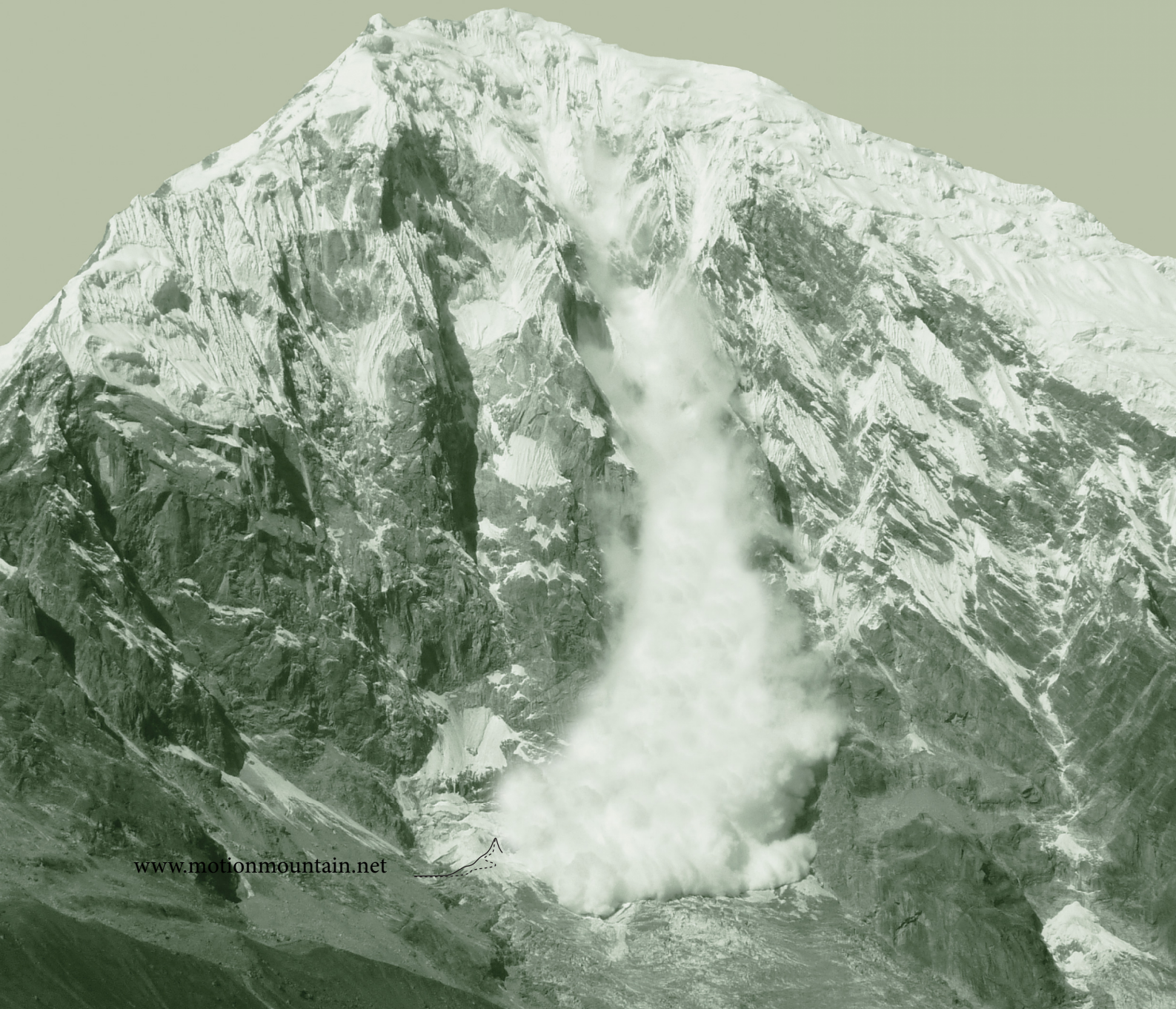
Christoph Schiller Dịch giả: Cao Sĩ Sơn

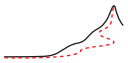
HÀNH SƠN

CUỘC PHIÊU LƯU CỦA VẬT LÝ – QUYỂN II

THUYẾT TƯƠNG ĐỐI VÀ VŨ TRỤ HỌC



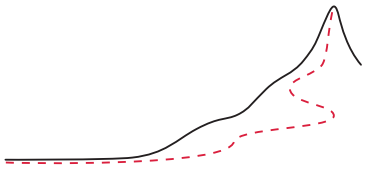
www.motionmountain.net



Christoph Schiller

Dịch giả: Cao Sĩ Sơn

Hành sơn



Cuộc phiêu lưu của Vật lý
Quyển II

Thuyết tương đối và Vũ trụ học

Ấn bản 31, có bản miễn phí dạng pdf kèm với film tại trang web www.motionmountain.net

Editio vicesima nona.

Proprietas scriptoris © Chrestophori Schiller
secundo anno Olympiadis trigesimae primae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliqua, quae
partem horum verborum continet; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Ấn bản thứ 32.

Bản quyền © 1990–2023 của Christoph Schiller,
từ năm thứ 3 của Olympiad 24
đến năm thứ 4 của Olympiad 32.

File pdf này đã được đăng ký giấy phép the Creative Commons
Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 3.0 Germany
mà toàn văn của nó có thể xem trên website
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de,
với ràng buộc bổ sung là việc sao chép, phân phối và sử dụng,
toàn bộ hay từng phần tác phẩm, trong một sản phẩm hay dịch vụ
bất kỳ, có tính chất thương mại hay không, đều không được
phép nếu không có sự đồng ý bằng văn bản của người giữ bản quyền.
File pdf vẫn còn miễn phí để mọi người có thể đọc, lưu trữ và in
để sử dụng riêng, phân phối bằng phương tiện điện tử nhưng chỉ
dưới dạng không thể chỉnh sửa và không thu phí.

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.

Lời mở đầu

> Primum movere, deinde docere.*
>
> Cổ nhân

Bộ sách này dành cho những người muốn tìm hiểu về chuyển động trong thiên nhiên. Sự vật, con người, động vật, hình ảnh và không gian chuyển động như thế nào? Câu trả lời dẫn tới nhiều cuộc phiêu lưu. Quyển sách này trình bày những điều lý thú nhất về chuyển động cực nhanh, mãnh liệt và xa xăm. Trong cuộc thám hiểm về Chuyển động – Vật lý – Thuyết tương đối đặc biệt và Thuyết tương đối tổng quát tạo thành hai chặng đường quan trọng, như ta thấy trong Hình **??**.

Thuyết tương đối *đặc biệt* là cuộc thám hiểm về giới hạn tốc độ của thiên nhiên c. Thuyết tương đối *tổng quát* là cuộc thám hiểm về giới hạn lực $c^4/4G$. Quyển sách sẽ cho ta thấy rằng, trong cả hai lĩnh vực, mọi kết quả đều dẫn xuất từ hai giới hạn này. Đặc biệt, *Vũ trụ học* là cuộc thám hiểm về chuyển động gần với giới hạn khoảng cách của thiên nhiên $1/\sqrt{\Lambda}$. Phương thức tìm hiểu Thuyết tương đối theo hướng đơn giản, trực giác và khác thường này sẽ mang lại nhiều phần thưởng cho sự ham hiểu biết của mọi độc giả – không phân biệt học sinh hay các nhà nghiên cứu.

Đây là quyển thứ hai trong bộ tổng quan về vật lý gồm 6 quyển, nảy sinh từ ba mục đích mà tôi đã theo đuổi từ năm 1990: trình bày chuyển động một cách đơn giản, hiện đại và hấp dẫn.

Với mục đích *đơn giản*, quyển sách sẽ tập trung vào các khái niệm và giới hạn phần toán học ở mức tối thiểu. Việc tìm hiểu các khái niệm vật lý được ưu tiên hơn việc sử dụng các công thức tính toán. Kiến thức của quyển sách chỉ ở trình độ của sinh viên đại học.

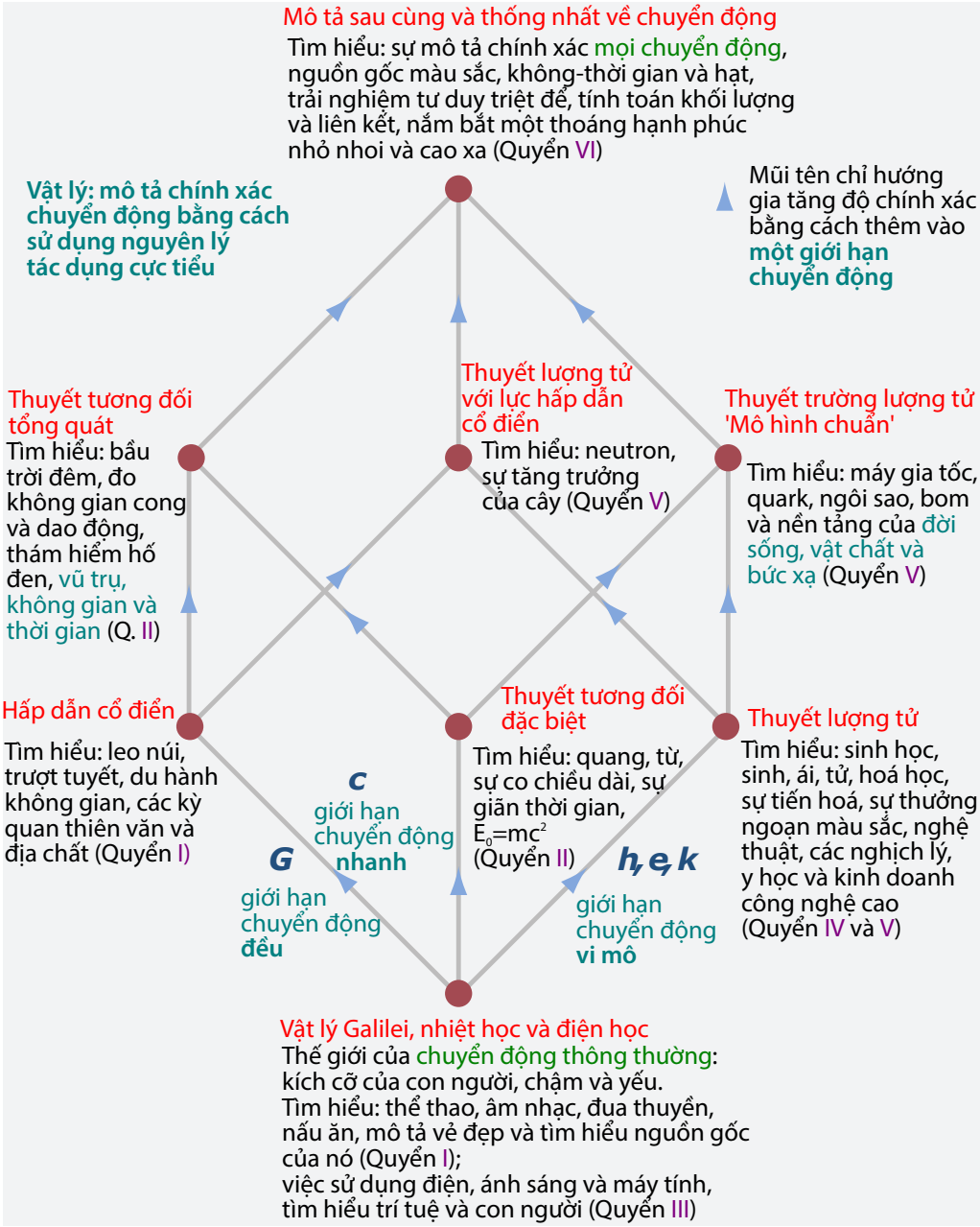
Với mục đích *hiện đại*, quyển sách sở hữu rất nhiều các tư liệu quý – cả lý thuyết lẫn thực nghiệm – rải rác trong nhiều tài liệu khoa học.

Với mục đích *hấp dẫn*, quyển sách sẽ cố gắng làm cho độc giả ngạc nhiên thật nhiều. Việc đọc một quyển sách vật lý đại cương sẽ giống như đi xem ảo thuật. Chúng ta xem, ngạc nhiên, không tin vào mắt mình, suy nghĩ và sau cùng ta hiểu được mánh lới của trò ảo thuật. Khi quan sát thiên nhiên, ta cũng có cùng một kinh nghiệm như thế. Thật vậy, mỗi trang sách đều chứa ít nhất một điều bất ngờ hay một sự khích động khiến độc giả phải ưu tư.

Câu châm ngôn của quyển sách, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, một phát biểu nổi tiếng về giáo dục, có thể dịch ra là: 'Làm cho con người trở nên mạnh mẽ, làm sáng tỏ mọi điều.' Việc làm sáng tỏ mọi điều – chỉ trung thành với sự thật – đòi hỏi sự

* 'Chuyển động trước, giáo huấn sau.' Trong ngôn ngữ hiện đại, *lay động* (trái tim) được gọi là *khuyến khích*; cả hai từ đều có cùng ngữ căn Latin.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 1 Một bản đồ đầy đủ của vật lý, khoa học về chuyển động, được Matvei Bronshtein (b. 1907 Vinnytsia, d. 1938 Leningrad) giới thiệu lần đầu tiên. Hình lập phương Bronshtein bắt đầu từ dưới cùng với chuyển động thông thường và cho thấy các mối liên hệ của nó với các lĩnh vực vật lý hiện đại. Hướng của các kết nối biểu diễn sự gia tăng độ chính xác của việc mô tả nhờ các giới hạn được thêm vào. Giới hạn của chuyển động đều là hằng số hấp dẫn G, của chuyển động nhanh là tốc độ ánh sáng c, và của chuyển động của các hạt vi mô là hằng số Planck h, điện tích sơ cấp e và hằng số Boltzmann k.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

can đảm, vì thay đổi tập quán suy nghĩ sẽ làm phát sinh sự sợ hãi, thường được che giấu bằng sự giận dữ.

Nhưng bằng cách vượt qua nỗi sợ hãi chúng ta sẽ trở nên mạnh mẽ đồng thời sẽ cảm nhận được những xúc cảm mãnh liệt và đẹp đẽ. Mọi cuộc phiêu lưu vĩ đại trong đời đều cho phép điều này xảy ra và việc tìm hiểu về chuyển động là một trong những cuộc phiêu lưu đó. Hãy tận hưởng điều này.

Munich và Sài Gòn, 06-2023

Cách sử dụng sách

Những ghi chú bên lề sẽ chỉ đến các tham chiếu thư tịch, các trang khác hay lời giải của các câu đố. Trong ấn bản màu, ghi chú bên lề, chỉ dấu tới cước chú và liên kết đến các website được tô màu xanh lục. Theo thời gian, các liên kết internet có thể biến mất. Đa số các liên kết đều có thể phục hồi thông qua trang www.archive.org, nơi lưu giữ các bản sao của các trang web cũ. Trong ấn bản miễn phí của sách này dưới dạng pdf, sẵn có tại trang www.motionmountain.net, mọi chỉ dấu và liên kết xanh lục đều có thể truy cập được. Ấn bản pdf cũng chứa tất cả các film có thể xem trực tiếp bằng Adobe Reader.

Lời giải và gợi ý của các *câu đố* được cho trong phụ lục. Các câu đố được phân loại thành các mức độ dễ (e), học sinh bình thường (s), khó (d) và mức độ nghiên cứu (r). Các câu đố chưa có lời giải trong sách được đánh dấu (ny).

Lời khuyên dành cho học viên

Học tập cho phép ta thấy được mình trong tương lai, giúp ta mở mang kiến thức, phát triển trí thông minh và cảm thấy tự hào. Do đó, học tập từ sách vở, đặc biệt là sách về tự nhiên, sẽ hiệu quả và thích thú. Hãy tránh xa các phương pháp học tập tệ hại như tránh bệnh dịch! Đừng dùng bút đánh dấu hay viết chì để làm nổi bật hay gạch dưới văn bản trên trang sách. Điều đó làm ta mất thì giờ, không thoải mái và làm cho văn bản trở nên khó đọc. Đừng học từ một màn hình. Đặc biệt, không bao giờ, học từ internet, video, game hay smartphone. Phần lớn internet, video và game là độc dược và ma tuý đối với não bộ. Smartphone là các nhà bào chế ma tuý làm người ta nghiện ngập và không học hành gì được. Không có ai đánh dấu lên trang giấy hay nhìn vào màn hình mà học hành có hiệu quả hay thích thú làm những việc như vậy.

Theo kinh nghiệm học và dạy học của tôi, có một phương pháp học tập để biến đổi một học sinh không đạt thành một học sinh thành công: nếu bạn đọc sách để học tập, hãy tóm tắt các phần đã đọc, *bằng cách đọc thật to bằng ngôn ngữ và hình ảnh riêng của bạn*. Nếu bạn không làm được như vậy, hãy đọc lại phần đó. Lặp lại quá trình này cho đến khi bạn có thể tóm tắt được những gì bạn đã đọc bằng cách trên. *Hãy thưởng thức* niềm vui của việc lớn tiếng kể chuyện! Bạn có thể làm việc này một mình hay với bạn bè, trong một căn phòng hay trong khi đi bộ. Nếu thành công, bạn sẽ giảm được một cách đáng kể thời gian học hành và đọc sách. Bạn sẽ thích thú hơn trong việc học từ những cuốn sách hay và bớt ghét những cuốn sách dở. Người làm chủ được phương pháp này có thể dùng nó ngay trong lúc nghe giảng bài, nhưng hạ thấp giọng, và sẽ tránh được việc ghi bài triền miên.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Lời khuyên dành cho giáo viên

Giáo viên thường thích có học trò và thích hướng dẫn học trò thám hiểm lĩnh vực mà họ đã chọn. Nhiệt tình với công việc là nguyên tắc cơ bản cho sự thoả mãn trong nghề nghiệp. Nếu bạn là một giáo viên, trước khi bắt đầu bài học, hãy tự hình dung, tự cảm nhận và tự nhủ về sự yêu thích chủ đề của bài học; tiếp theo bạn hãy tự hình dung, tự cảm nhận và tự nhủ về cách thức mà bạn sẽ dùng để hướng dẫn học trò của bạn có được sự yêu thích chủ đề đó giống như bạn. Hãy làm việc này một cách có ý thức, mỗi ngày. Bạn sẽ đỡ phải gặp các điều phiền toái trong lớp và thành công nhiều hơn trong việc giảng dạy của mình. Cuốn sách này không viết cho mục đích thi cử mà mục đích của nó là làm cho giáo viên và học sinh *hiểu* và *yêu thích* môn vật lý, khoa học của chuyển động.

Phản hồi

Ấn bản pdf mới nhất của bộ sách này đang và sẽ còn cho bạn đọc download miễn phí từ internet. Tôi rất mong nhận được email từ các bạn tại địa chỉ fb@motionmountain.net, đặc biệt về các vấn đề sau đây:

Câu đố 1 s
— Những điều chưa rõ ràng và nên cải tiến?
— Bạn chưa hiểu câu chuyện, chủ đề, câu đố, hình ảnh hay đoạn film nào?

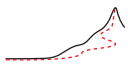
Tôi cũng hân hạnh đón nhận sự góp ý của các bạn về các điểm đặc biệt liệt kê trong trang web www.motionmountain.net/help.html. Mọi phản hồi sẽ được sử dụng để cải tiến ấn bản kế tiếp. Bạn có thể gởi phản hồi bằng mail hay file pdf có thêm các ghi chú màu vàng, hay cung cấp các hình minh hoạ, hình chụp, hay đóng góp vào trang errata wiki trên website. Nếu bạn muốn dịch một chương của cuốn sách sang ngôn ngữ của bạn, vui lòng cho tôi biết.

Thay mặt cho tất cả độc giả, xin cám ơn các bạn trước về những đóng góp này. Đối với những đóng góp đặc biệt hữu ích – nếu bạn muốn – bạn sẽ được ghi nhận trong phần cảm tạ, nhận quà thưởng, hay cả hai.

Trợ giúp

Chúng tôi rất hoan nghênh khi nhận được sự tài trợ từ các bạn cho tổ chức từ thiện, phi lợi nhuận (được miễn thuế) để soạn thảo, dịch thuật và phát hành bộ sách này. Để có thêm chi tiết hãy vào trang web www.motionmountain.net/donation.html. Sở thuế vụ của Đức sẽ kiểm tra việc sử dụng hợp thức nguồn tài trợ của bạn. Nếu bạn muốn, tên của bạn sẽ được ghi trong danh sách các nhà tài trợ. Thay mặt các độc giả trên toàn thế giới, chúng tôi xin cám ơn bạn trước.

Bản in trên giấy của bộ sách này, bản màu hay bản đen trắng, có bán trên www.amazon.com hay www.createspace.com. Và bây giờ, mời bạn thưởng thức cuốn sách.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Mục lục

7 Lời mở đầu

Cách sử dụng sách 9 • Lời khuyên dành cho học viên 9 • Lời khuyên dành cho giáo viên 10 • Phản hồi 10 • Trợ giúp 10

16 1 Tốc độ cực đại, quan sát viên đứng yên và chuyển động của ánh sáng

Tinh sai và tốc độ của giọt mưa 18 • Tốc độ của ánh sáng 20 • Người ta có thể chơi tennis bằng cách dùng xung laser làm banh và gương làm vợt không? 23 • Albert Einstein 26 • Tốc độ giới hạn bất biến và hệ quả của nó 27 • Thuyết tương đối đặc biệt trình bày một cách cô đọng 29 • Gia tốc của ánh sáng và hiệu ứng Doppler 32 • Sự khác nhau giữa ánh sáng và âm thanh 37 • Người ta có thể bắn nhanh hơn bóng của mình không? 38 • Tổng hợp vận tốc 41 • Quan sát viên và nguyên lý của Thuyết tương đối đặc biệt 41 • Không-thời gian là gì? 46 • Chúng ta có thể du hành vào quá khứ không? – Thời gian và tính nhân quả 48 • Những điều kỳ lạ từ Thuyết tương đối đặc biệt 49 • Nhanh hơn ánh sáng: chúng ta có thể du hành bao xa? 50 • Sự đồng bộ hoá và du hành trong thời gian – một người mẹ có thể trẻ hơn con gái của mình không? 51 • Sự co chiều dài 53 • Film tương đối tính – quang sai và hiệu ứng Doppler 56 • Chỗ ngồi tốt nhất trên xe bus là chỗ nào? 59 • Người ta có thể đi bộ nhanh cỡ nào? 60 • Tốc độ của cái bóng có lớn hơn tốc độ ánh sáng không? 61 • Song song với song song thì không song song – sự tiến động Thomas 63 • Một truyện không có đoạn kết – nhiệt độ và Thuyết tương đối 64 • Một điều kỳ dị: tốc độ một chiều của ánh sáng là gì? 65 • Tóm tắt 66

67 2 Cơ học tương đối tính

Khối lượng trong Thuyết tương đối 67 • Tại sao khó chơi snooker tương đối tính 69 • Sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng 70 • Cân ánh sáng 73 • Sự va chạm, vật thể ảo và tachyon 74 • Hệ hạt – không khối tâm 76 • Tại sao đa số các chuyển động lại chậm như vậy? 77 • Lịch sử của công thức tương đương năng-khối lượng 78 • Vector 4 chiều 79 • Vận tốc 4 chiều 80 • Gia tốc 4 chiều và gia tốc riêng 82 • Động lượng 4 chiều hay năng–động lượng 83 • Lực 4 chiều – và bản chất của cơ học 85 • Chuyển động quay trong Thuyết tương đối 86 • Chuyển động sóng 88 • Tác dụng của một hạt tự do – các vật chuyển động như thế nào? 89 • Các phép biến đổi bảo giác 91 • Quan sát viên có gia tốc 93 • Hệ quy chiếu có gia tốc 95 • Gia tốc không đổi 96 • Chân trời biến cố 98 • Tầm quan trọng của chân trời 100 • Gia tốc làm thay đổi màu sắc 101 • Ánh sáng có thể chuyển động nhanh hơn *c* không? 102 • Sự tổng hợp gia tốc 102 • Các giới hạn về chiều dài của vật rắn 103

106 3 Phần tóm lược của Thuyết tương đối đặc biệt

Tốc độ ánh sáng có thể thay đổi hay không? 106 • Đâu là giới hạn của Thuyết tương đối đặc biệt? 107

109 4 Thuyết tương đối tổng quát đơn giản: lực hấp dẫn, tốc độ cực đại và lực cực đại

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Lực cực đại – nguyên lý của Thuyết tương đối tổng quát 110 • Ý nghĩa của các giới hạn lực và công suất 111 • Bằng chứng thực nghiệm 114 • Thiết lập Thuyết tương đối tổng quát 115 • Lực hấp dẫn, độ cong không-thời gian, chân trời và lực cực đại 120 • Các điều kiện hiệu lực đối với giới hạn của lực và công suất 122 • Các thí nghiệm tưởng tượng và các nghịch lý về giới hạn lực 122 • Các thí nghiệm tưởng tượng với giới hạn của công suất và dòng khối lượng 128 • Tại sao lực cực đại đã không được khám phá trong một thời gian lâu đến như vậy? 131 • Một cách hiểu trực giác về Thuyết tương đối tổng quát 132 • Một cách hiểu trực giác về vũ trụ học 135 • Những thách thức thực nghiệm trong thiên niên kỷ thứ ba 136 • Tóm tắt về Thuyết tương đối tổng quát – và lực cực tiểu 137

139 5 Cách thức mà tốc độ cực đại đã làm thay đổi không gian, thời gian và lực hấp dẫn

Đứng yên và rơi tự do 139 • Đồng hồ và lực hấp dẫn 140 • Thuỷ triều và lực hấp dẫn 144 • Không gian cong và các tấm nệm 146 • Không-thời gian cong 149 • Tốc độ ánh sáng và hằng số hấp dẫn 151 • Tại sao một hòn đá ném vào không khí lại rơi trở lại mặt đất? – Các đường trắc địa 152 • Ánh sáng có rơi được không? 155 • Các câu đố vui và lạ về lực hấp dẫn 156 • Trọng lượng là gì? 161 • Tại sao quả táo rơi? 162 • Tóm tắt: mối quan hệ mật thiết giữa tốc độ ánh sáng bất biến và lực hấp dẫn 163

164 6 Quỹ đạo mở, ánh sáng bị uốn cong và chân không lắc lư

Các trường yếu 164 • Sự uốn cong ánh sáng và sóng vô tuyến 165 • Sự trễ của thời gian 167 • Hiệu ứng tương đối tính trên các quỹ đạo 168 • Hiệu ứng trắc địa 171 • Các hiệu ứng Thirring 173 • Hấp dẫn từ luận 175 • Sóng hấp dẫn 178 • Sự sinh tạo và phát hiện sóng hấp dẫn 183 • Các câu đố vui và lạ về các trường yếu 188 • Tóm tắt về quỹ đạo và sóng 189

190 7 Từ độ cong đến chuyển động

Cách đo độ cong trong không gian 2 chiều 190 • Độ cong của không gian ba chiều 193 • Độ cong trong không-thời gian 195 • Độ cong trung bình và chuyển động trong Thuyết tương đối tổng quát 197 • Lực hấp dẫn vạn vật 198 • Metric Schwarzschild 198 • Các câu đố vui và lạ về độ cong 199 • Độ cong 3 chiều: tensor Ricci 199 • Độ cong trung bình: vô hướng Ricci 200 • Tensor Einstein 200 • Mô tả động lượng, khối lượng và năng lượng 201 • Các phương trình trường của Einstein 203 • Trở lại với Lực hấp dẫn vạn vật 204 • Tìm hiểu các phương trình trường 205 • Tác dụng Hilbert – không gian uốn cong như thế nào? 206 • Tính đối xứng của Thuyết tương đối tổng quát 207 • Khối lượng trong Thuyết tương đối tổng quát 208 • Giới hạn lực và hằng số vũ trụ 208 • Lực hấp dẫn có phải là sự tương tác hay không? 209 • Cách tìm hình dạng các đường trắc địa 210 • Thể dục Riemann 211 • Các câu đố vui và lạ về Thuyết tương đối tổng quát 214 • Tóm lược về các phương trình trường 215

216 8 Tại sao ta có thể nhìn thấy các ngôi sao? – Chuyển động trong vũ trụ

Chúng ta thấy những ngôi sao nào? 216 • Chúng ta ngắm sao như thế nào? 219 • Vào ban đêm ta nhìn thấy gì? 224 • Vũ trụ là gì? 228 • Màu sắc và sự chuyển động của các ngôi sao 231 • Hằng đêm các vì sao có chiếu sáng hay không? 234 • Lược sử vũ trụ 236 • Lịch sử của không-thời gian 239 • Tại sao bầu trời lại tối đen vào

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

ban đêm? 244 • Sự thay đổi màu sắc của bầu trời đêm 248 • Vũ trụ mở, đóng hay cận biên? 248 • Tại sao vũ trụ trong suốt? 251 • Big bang và các hệ quả của nó 251 • Big bang có phải là một vụ nổ lớn không? 252 • Big bang có phải là một biến cố không? 253 • Big bang có phải là một sự khởi đầu không? 253 • Big bang có bao hàm ý sáng tạo không? 254 • Tại sao ta có thể nhìn thấy Mặt trời? 254 • Tại sao các ngôi sao có màu sắc khác nhau? 255 • Có các ngôi sao tối không? 257 • Có phải mọi ngôi sao đều khác nhau không? – Thấu kính hấp dẫn 258 • Vũ trụ có hình gì? 260 • Phía sau chân trời là cái gì? 261 • Tại sao lại có ngôi sao ở khắp mọi nơi? – Sự lạm phát 261 • Tại sao lại có ít ngôi sao như vậy? – Năng lượng và entropy của vũ trụ 262 • Tại sao vật chất kết tụ lại? 263 • Tại sao ngôi sao lại quá nhỏ so với vũ trụ? 263 • Ngôi sao và thiên hà đang chuyển động ra xa nhau hay vũ trụ đang giãn nở? 264 • Có nhiều hơn 1 vũ trụ không? 264 • Tại sao các ngôi sao lại cố định? – Những cánh tay, ngôi sao và nguyên lý Mach 264 • Đứng yên trong vũ trụ 265 • Ánh sáng có hút ánh sáng không? 266 • Ánh sáng có phân rã không? 266 • Tóm tắt về vũ trụ học 267

268 9 Hố đen – rơi mãi

Tại sao phải tìm hiểu về hố đen? 268 • Mật độ khối lượng và chân trời 268 • Chân trời hố đen là các mặt giới hạn 271 • Quỹ đạo quanh các hố đen 273 • Hố đen không có tóc 275 • Hố đen là nguồn năng lượng 277 • Sự hình thành và tìm kiếm hố đen 279 • Các kỳ dị 280 • Các câu đố vui và lạ về hố đen 282 • Tóm tắt về hố đen 285 • Một câu đố – Vũ trụ có phải là một hố đen không? 285

286 10 Không gian có khác thời gian không?

Ta có thể đo được không gian và thời gian không? 288 • Không gian và thời gian có cần thiết hay không? 289 • Có đường cong đóng loại thời gian hay không? 289 • Thuyết tương đối tổng quát có tính địa phương không? – Luận điểm hố 290 • Trái đất có rỗng không? 291 • Tóm tắt: không gian, thời gian và khối lượng có độc lập hay không? 292

294 11 Thuyết tương đối tổng quát giản lược – Tóm tắt dành cho người không chuyên

Độ chính xác của sự mô tả 296 • Việc nghiên cứu về Thuyết tương đối tổng quát và Vũ trụ học 298 • Thuyết tương đối tổng quát có thể khác đi hay không? 299 • Những hạn chế của Thuyết tương đối tổng quát 301

303 12 Đơn vị, sự đo lường và các hằng số

Đơn vị SI 303 • Ý nghĩa của phép đo 306 • Các câu đố vui và lạ về đơn vị 306 • Độ chính xác và độ đúng của các phép đo 308 • Giới hạn của độ chính xác 309 • Các hằng số vật lý 310 • Các số hữu ích 317

318 Gợi ý và lời giải các câu đố

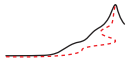
330 Tài liệu tham khảo

359 Công trạng

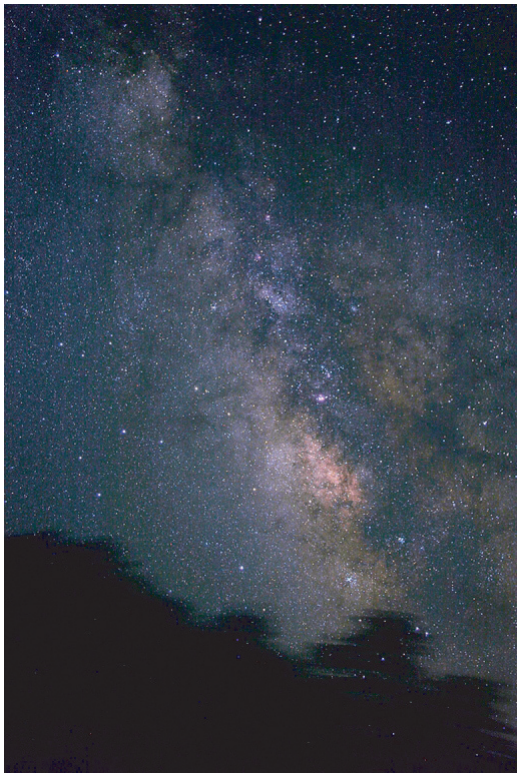
Lời cám ơn 359 • Công trạng phần Film 360 • Công trạng phần hình ảnh 360

362 Bảng tra cứu nhân danh

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Thuyết tương đối

Trong cuộc hành trình tìm hiểu quy luật vận động của sự vật,
kinh nghiệm của việc đi và quan sát sẽ giúp ta khám phá được nhiều điều:
có một tốc độ năng lượng cực đại trong thiên nhiên,
hai biến cố xảy ra đồng thời đối với quan sát viên này
có thể không đồng thời đối với quan sát viên khác và
gia tốc sẽ giới hạn tầm quan sát bằng một chân trời.
Chúng ta sẽ:
khám phá ra là không gian có thể uốn cong,dao động và chuyển động;
cảm nhận được vẻ quyến rũ của các hố đen;
nhận ra là có một lực cực đại trong thiên nhiên;
hiểu tại sao có thể nhìn thấy được những ngôi sao
và hiểu được nguyên do bầu trời tối đen vào ban đêm.

Chương 1

Tốc độ cực đại, quan sát viên đứng yên và chuyển động của ánh sáng

> “Fama nihil est celerius.**”
>
> Cổ nhân

Ánh sáng rất cần cho việc mô tả chính xác một chuyển động. Để kiểm tra một đường, một quỹ đạo chuyển động có thẳng hay không, chúng ta phải nhìn dọc theo đường đó. Nói cách khác, ta dùng ánh sáng để xác định tính chất thẳng. Làm cách nào để xác định là một mặt có phẳng hay không? Chúng ta nhìn ngang qua nó. Lại cần đến ánh sáng*** Chúng ta quan sát chuyển động bằng cách nào? Bằng ánh sáng. Làm sao để có thể đo chiều dài thật chính xác? Bằng ánh sáng. Làm sao để có thể đo thời gian thật chính xác? Bằng ánh sáng: ngày xưa người ta dùng ánh sáng mặt trời; ngày nay là ánh sáng từ các nguyên tử caesium.

Câu đố 2 s

Trang 303

Tóm lại, ánh sáng quan trọng vì

▷ Ánh sáng là tiêu chuẩn của một chuyển động *lý tưởng, không bị nhiễu loạn*.

Vật lý sẽ tiến hoá nhanh hơn nhiều nếu trước kia sự lan truyền ánh sáng được xem là một thí dụ lý tưởng về sự chuyển động.

Nhưng ánh sáng có thực sự là một hiện tượng của sự chuyển động không? Có đấy. Người Hy Lạp cổ đã biết điều này, từ những hiện tượng đơn giản thông thường, *cái bóng*. Bóng chứng tỏ rằng ánh sáng là một thực thể chuyển động, phát ra từ nguồn sáng và chuyển động theo đường thẳng.**** Tư tưởng gia Hy Lạp Empedocles (*c.* 490

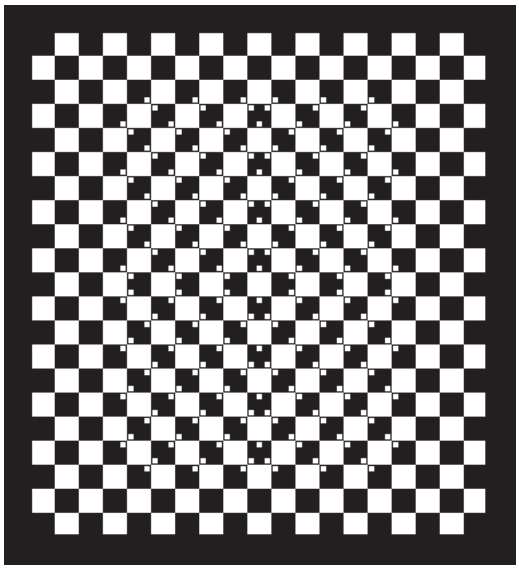
Xem 1

** ‘Không có gì nhanh hơn tin đồn.’ Câu này là phiên bản giản lược câu nói của Virgil: *fama, malum qua non aliud velocius ullum*. ‘Tin đồn, một con quỷ nhanh hơn tất cả.’ From *Aeneid*, book IV, verses 173 and 174.

*** Nên nhớ rằng nhìn dọc theo một mặt từ nhiều hướng khác nhau vẫn chưa đủ: một chùm tia sáng tiếp xúc với một mặt dọc theo tia sáng và theo khắp *mọi* hướng, thì mặt đó chưa chắc đã phẳng. Bạn có thể cho một thí dụ không? Người ta cần các phương pháp khác để kiểm tra tính phẳng bằng ánh sáng. Bạn có thể chỉ ra một phương pháp không?

**** Khi có một nguồn phát sinh bóng, người ta gọi thực thể được phát ra đó là *tia* hay *bức xạ*. Trừ ánh sáng, các thí dụ về bức xạ được khám phá nhờ cái bóng là *tia hồng ngoại*, *tia tử ngoại*, phát ra từ nhiều nguồn sáng cùng với ánh sáng khả kiến, và *tia cathode*, là chuyển động của một hạt mới, *electron*. Bóng cũng dẫn tới việc khám phá *tia X*, là ánh sáng nhưng có tần số cao. *Tia anode* cũng được khám phá nhờ bóng của chúng; hoá ra đó là các nguyên tử bị ion hoá, di chuyển. Ba loại phóng xạ là *tia α* (hạt nhân helium), *tia β* (lại là điện tử) và *tia γ* (tia X có tần số cao) cũng tạo ra bóng. Tất cả các khám phá này đều diễn ra trong khoảng từ 1890 đến 1910: đó là ‘những tháng ngày bức xạ’ của vật lý.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 2 Làm cách nào để kiểm tra các đường là cong hay thẳng?

tới *c.* 430 BCE) rút ra một kết luận hợp lý là ánh sáng cần thời gian để đi từ nguồn đến bề mặt chứa cái bóng. Empedocles cho rằng

▷ Tốc độ ánh sáng là *hữu hạn*.

Chúng ta có thể khẳng định điều này qua nhiều cuộc tranh luận, đơn giản nhưng gay go. Tốc độ có thể đo được. Và đo có nghĩa là so sánh với một mẫu chuẩn. Do đó một tốc độ *hoàn hảo* hay lý tưởng, được dùng làm chuẩn đo lường tuyệt đối, phải có giá trị *hữu hạn*. Một chuẩn vận tốc vô hạn sẽ không thể dùng để đo được. (Tại sao?) Trong thiên nhiên, vật nhẹ hơn sẽ có khuynh hướng chuyển động nhanh hơn. Ánh sáng, cực kỳ nhẹ, hiển nhiên là một ứng cử viên vì chuyển động hoàn hảo mà tốc độ lại hữu hạn. Chúng ta sẽ chứng minh điều này ngay sau đây.

Câu đố 3 s

Tốc độ ánh sáng hữu hạn có nghĩa là bất kỳ cái gì chúng ta thấy được đều là thông điệp từ *quá khứ*. Khi ta thấy các ngôi sao,* Mặt trời hay người ta yêu, ta luôn luôn thấy hình ảnh từ quá khứ. Theo một nghĩa nào đó, thiên nhiên không cho ta thưởng ngoạn hiện tại – mà hướng dẫn cho ta học cách thưởng ngoạn quá khứ.

Tốc độ ánh sáng rất *lớn*; do đó mãi đến những năm từ 1668 đến 1676 người ta mới đo được, cho dù có nhiều người, gồm Isaac Beeckman năm 1629 và Galileo năm 1638, đã cố gắng đo nó. ** Phương pháp đo đầu tiên do thiên văn gia Đan Mạch Ole Rømer

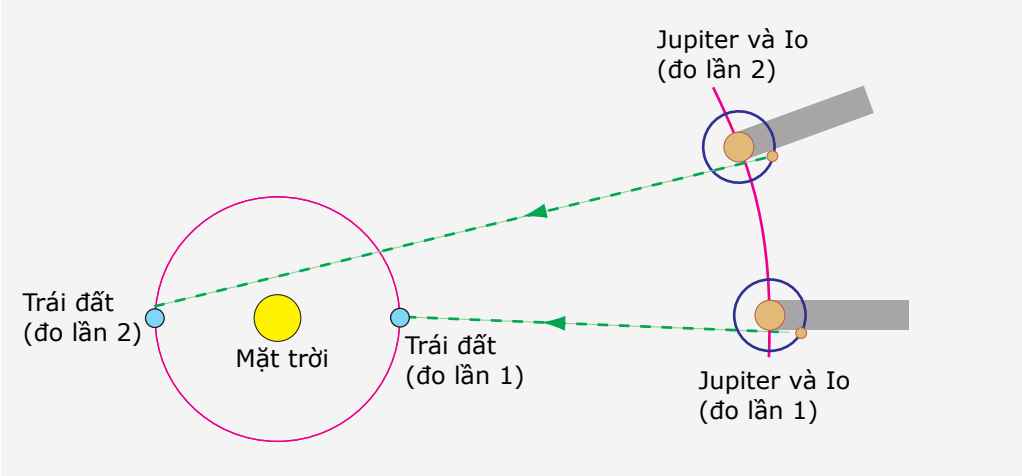
Xem 3

* Hình của bầu trời đêm và Ngân hà, trên Trang 15 bản quyền của Anthony Ayiomamitis và có thể tìm thấy trên website tuyệt vời www.perseus.gr của ông.

** Trong suốt cuộc đời, và cho đến năm 1638, René Descartes vẫn tuyên bố tốc độ ánh sáng là vô hạn vì những lý do mang tính nguyên tắc. Nhưng trong năm 1637, để giải thích định luật Snell, ông phải giả sử tốc độ ánh sáng là hữu hạn. Điều này cho thấy các triết gia đã rối trí đến cỡ nào. Thật vậy, Descartes viết cho Beeckman năm 1634 rằng, nếu người ta có thể chứng minh tốc độ ánh sáng là hữu hạn, ông sẽ thẳng thắn thừa nhận là mình 'không biết gì về triết học cả.' Chúng ta nên tin lời ông.

Xem 2

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 3 Phương pháp đo tốc độ ánh sáng của Rømer.

công bố và thực hiện* khi ông đang nghiên cứu quỹ đạo của Io và các vệ tinh Galilei của Mộc tinh. Ông không kiếm được một giá trị đặc biệt nào của tốc độ ánh sáng vì ông không có số đo đủ tin cậy của khoảng cách từ Trái đất đến các vệ tinh và phép đo thời gian của ông cũng không chính xác. Thiếu sót này đã được các đồng nghiệp của ông, chủ yếu là Christiaan Huygens và Edmund Halley sửa chữa. (Bạn hãy thử tìm hiểu phương pháp của Rømer từ Hình 3.) Từ thời Rømer người ta đã biết ánh sáng cần khoảng 8 phút để đi từ Mặt trời đến Trái đất. Kết quả này đã được kiểm chứng một cách ngoạn mục sau đó 50 năm, vào thập niên 1720, một cách độc lập, bởi các nhà thiên văn Eustachio Manfredi (b. 1674 Bologna , d. 1739 Bologna) và James Bradley (b. 1693 Sherborne , d. 1762 Chalford). Phép đo của họ dựa vào 'phương pháp giọt mưa' để xác định tốc độ ánh sáng.

Quyển I, trang 210
Xem 4
Câu đố 4 s
Quyển I, trang 153
Xem 5

TINH SAI VÀ TỐC ĐỘ CỦA GIỌT MƯA

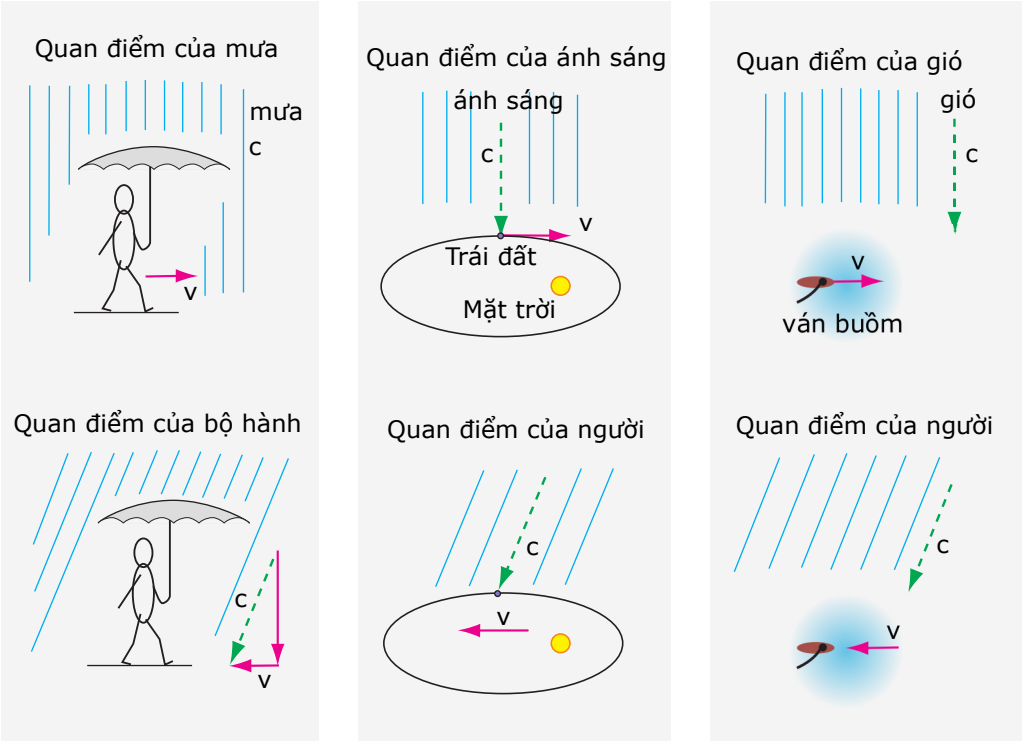
Làm thế nào để đo tốc độ của giọt mưa rơi? Khi chúng ta cầm dù rảo bước, hãy đo góc rơi α của giọt mưa, rồi đo vận tốc riêng của chúng ta v. (Chúng ta có thể thấy rõ góc này, nếu trong khi đi, chúng ta nhìn sang hai bên mình, mưa sẽ nổi rõ trên màn trời đen.) Như đã thấy trong Hình 4, tốc độ c của giọt mưa có thể tính (gần đúng) bằng công thức

$$c = v/\tan\alpha \,. \tag{1}$$

Tương tự, ta có thể đo tốc độ gió khi ở trên ván buồm hay trên một con tàu. Phương pháp này cũng có thể áp dụng cho tốc độ ánh sáng. Hình 4 chứng tỏ rằng ta chỉ cần

* Ole (Olaf) Rømer (b. 1644 Aarhus, d. 1710 Copenhagen), thiên văn gia lỗi lạc. Ông là giáo sư của trường Dauphin ở Paris, thời vua Louis XIV. Ý tưởng đo tốc độ ánh sáng bằng phương pháp này là của thiên văn gia Ý Giovanni Cassini, mà Rømer là phụ tá. Rømer tiếp tục công việc cho đến năm 1681, khi ông phải rời France, như những người Tin Lành khác (giống Christiaan Huygens), vì vậy công việc của ông bị gián đoạn. Trở về Đan Mạch, một cơn hoả hoạn thiêu huỷ tất cả ghi chép về việc đo đạc của ông. Hậu quả là ông không thể tiếp tục cải thiện độ chính xác của các phép đo. Sau đó ông trở thành một viên chức và nhà cải cách quan trọng của Đan Mạch.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 4 Phương pháp Bộ hành dưới mưa hay Người lướt ván buồm dùng để đo tốc độ ánh sáng.

đo góc giữa vận tốc của Trái đất trên quỹ đạo và tia sáng đến từ ngôi sao. Vì Trái đất chuyển động đối với Mặt trời và ngôi sao nên góc này không bằng 90°. Độ lệch này được Xem 7 Eustachio Manfredi gọi là *tinh sai*. Tinh sai được xác định bằng cách so sánh các số đo trong thời gian 1 năm, đặc biệt, cách nhau 6 tháng. James Bradley là người giải thích hiện tượng tinh sai và cũng là người thực hiện các phép đo tương tự, độc lập với Manfredi.* Giá trị đo được của tinh sai đối với một ngôi sao ở ngay trên mặt phẳng hoàng đạo là $20.49552(1)''\approx 0.1$ mrad – một góc rất nhỏ. Nó được gọi là *hằng số tinh sai*. Sự hiện hữu

* Ở châu Âu, vào năm 1719 hay 1726 dù không được dùng nhiều; sau này chúng mới trở thành thời trang. Chuyện dù cũng là một giai thoại. Người ta kể rằng Bradley hiểu được khái niệm tinh sai trong khi đi thuyền trên sông Thames, khi đó ông nhận thấy rằng trên con tàu chuyển động, gió thể hiện qua lá cờ trên tàu, có hướng tuỳ thuộc vào hướng tàu chạy và do đó khác với hướng lúc trên đất liền. Trong nhiều năm, độc lập với nhau, Manfredi và Bradley đã quan sát nhiều ngôi sao, đặc biệt là sao Gamma Draconis, và trong thời gian đó họ đã bối rối khi thấy *dấu* của tinh sai, *ngược* với dấu của *thị sai*. Cả thị sai lẫn tinh sai của một ngôi sao trên mặt phẳng hoàng đạo đều làm cho chúng vẽ thành một ellipse nhỏ trong thời gian Câu đố 5 s 1 năm của trái đất, mặc dù các ellipse khác nhau về hướng và chiều quay. Bạn có biết tại sao không? Ngày nay chúng ta biết rằng thị sai lớn nhất của một ngôi sao là $0.77''$, trong khi trục chính của ellipse tinh sai là $20.5''$ đối với mọi ngôi sao. Khám phá của Bradley và Manfredi thuyết phục ngay cả Giáo hội tin rằng Trái đất chuyển động quanh Mặt trời và sách của Galilei dần dần được rút khỏi danh sách cấm. Vì Giáo hội trì hoãn việc công bố khám phá của Manfredi, Bradley được xem như người duy nhất khám phá hiện tượng tinh sai. Nhưng tên của hiệu ứng nhắc lại công trình của Manfredi, người đã trở thành thành viên của Viện hàn lâm khoa học và Hội khoa học hoàng gia. Ngoài ra, dạng đúng của công thức (1) đối với trường hợp Câu đố 6 s đặc biệt của ánh sáng là $c = v/\sin\alpha$. Tại sao?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

của hằng số này chứng tỏ rằng Trái đất chuyển động quanh Mặt trời, khi được quan sát bởi một người ở xa. Đúng vậy, Trái đất đang chuyển động.

Dùng góc tinh sai ta có thể tìm được tốc độ ánh sáng nếu ta biết tốc độ của Trái đất di chuyển quanh Mặt trời. Để làm được điều này, đầu tiên ta phải xác định khoảng cách Trái đất - Mặt trời. Phương pháp đơn giản nhất là phương pháp của tư tưởng gia Hy Lạp Aristarchus of Samos (*c.* 310 tới *c.* 230 BCE). Chúng ta đo góc giữa Mặt trăng và Mặt trời lúc Mặt trăng ở pha bán nguyệt. Cosine của góc chính là tỷ số giữa khoảng cách Trái đất đến Mặt trăng (xác định như đã giải thích trước kia) và khoảng cách Trái đất đến Mặt trời. Phần giải thích xem như câu đố dành cho độc giả.

Quyển I, trang 180
Câu đố 7 s

Góc của Aristarchus * gần bằng góc vuông (dẫn tới khoảng cách lớn vô hạn), và người ta cần những dụng cụ chính xác để đo đạc, như Hipparchus đã nhận xét trong một cuộc thảo luận rộng rãi về vấn đề này vào khoảng năm 130 BCE. Phép đo góc chính xác chỉ có thể thực hiện được vào cuối thế kỷ 17, cho giá trị 89.86° và cho tỷ số khoảng cách Mặt trời–Mặt trăng vào khoảng 400. Ngày nay, nhờ đo khoảng cách bằng radar, khoảng cách trung bình từ Trái đất đến Mặt trời được biết với độ chính xác khó tin lên đến 30m;** giá trị của nó là 149 597 870.691(30) km hay gần đúng là 150 triệu km.

Xem 6
Trang 316

Tốc độ của ánh sáng

Dùng khoảng cách giữa Trái đất và Mặt trời, tốc độ của Trái đất trên quỹ đạo là $v = 2\pi R/T = 29.7\,\mathrm{km/s}$. Góc tinh sai cho chúng ta kết quả sau

▷ Tốc độ ánh sáng (trong chân không) là $c = 0.300\,\mathrm{Gm/s}$, hay $0.3\,\mathrm{m/ns}$, hay $0.3\,\mathrm{mm/ps}$, hay 1080 triệu km/h.

Đây là một con số đáng ngạc nhiên, đặc biệt khi ta so sánh với tốc độ lớn nhất mà một vật nhân tạo đã đạt tới, đó là vệ tinh Helios II, chuyển động quanh mặt trời với vận tốc $253\,\mathrm{Mm/h} = 70.2\,\mathrm{km/s}$, hay với tốc độ tăng trưởng của trẻ em, khoảng $3\,\mathrm{nm/s}$, hay với độ tăng trưởng của măng đá trong hang động, khoảng $0.3\,\mathrm{pm/s}$. Chúng ta bắt đầu thấy lý do tại sao việc đo đạc tốc độ ánh sáng tự nó đã là một khoa học.

Việc đo *chính xác* tốc độ ánh sáng được thực hiện năm 1849 bởi Hippolyte Fizeau (b. 1819 Paris, d. 1896 Venteuil). Giá trị đo được chỉ lớn hơn giá trị hiện nay 5 %. Ông chiếu một chùm tia sáng đến một gương ở xa và đo thời gian ánh sáng quay trở lại. Fizeau đã làm cách nào để đo thời gian mà không có một thiết bị điện nào trong tay? Thật ra, ông dùng phương pháp giống phương pháp đã được dùng để đo tốc độ viên đạn; câu trả lời có trong Hình 5. (Gương phải đặt xa khoảng bao nhiêu?). Jan Frercks đã làm lại thí nghiệm này với thiết bị hiện đại và đạt tới độ chính xác là 2 %. Ngày nay, việc đo đạc đơn giản hơn nhiều; trong chương Điện động lực học chúng ta sẽ tìm hiểu cách đo tốc

Quyển I, trang 62
Câu đố 9 s
Xem 9

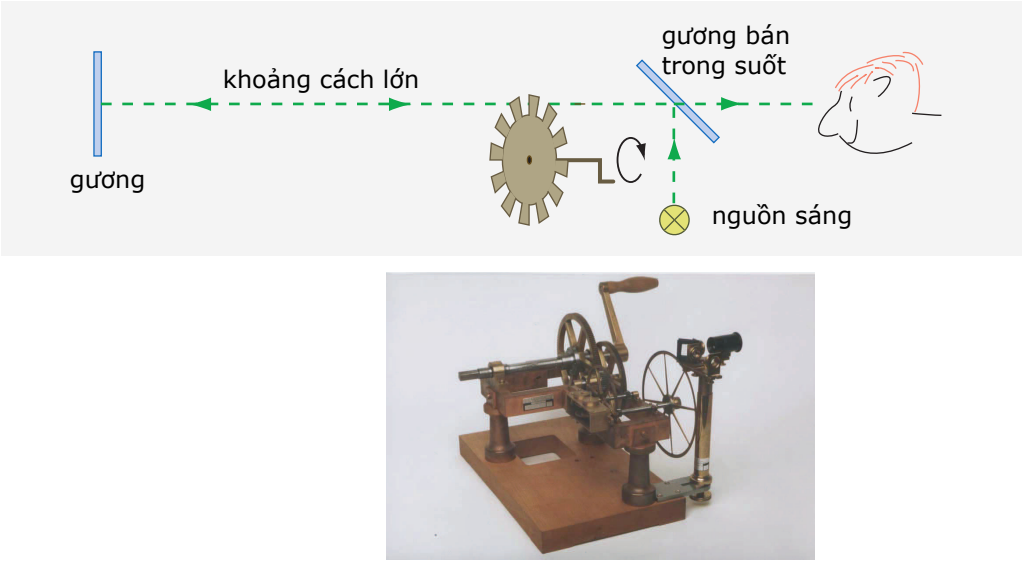
Xem 8

* Aristarchus cũng là người xác định bán kính Mặt trời và Mặt trăng theo bán kính Trái đất. Aristarchus là một tư tưởng gia phi thường: ông là người đầu tiên đề xướng ý tưởng về Hệ nhật tâm và có lẽ là người đầu tiên cho rằng ngôi sao là những Mặt trời ở rất xa. Vì những tư tưởng này, nhiều người đương thời đề nghị xử tử ông vì tội nghịch đạo. Khi tu sĩ, thiên văn gia Nicolaus Copernicus (b. 1473 Thorn, d. 1543 Frauenburg) tái đề xuất hệ nhật tâm sau đó 2000 năm, ông không đề cập đến Aristarchus, mặc dù đã lấy ý tưởng của Aristarchus.

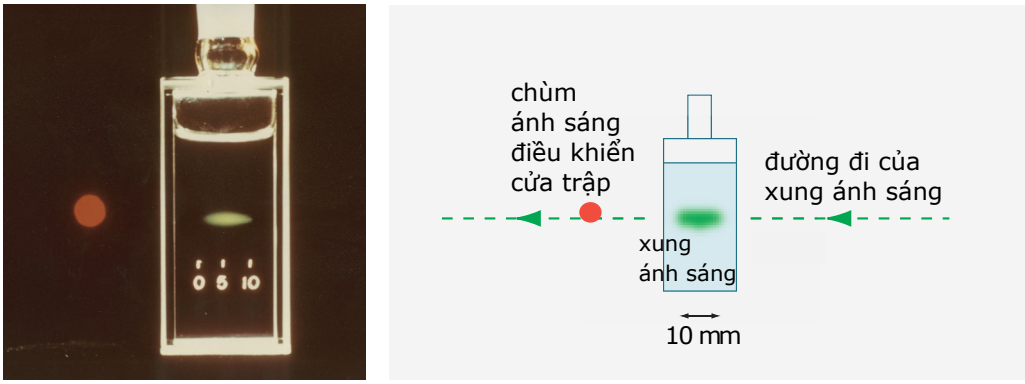
** Sai số của phép đo khoảng cách đến Mặt trăng vào cỡ cm; bạn có thể đoán ra người ta đã làm được việc này bằng cách nào không?

Câu đố 8 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 5 dụng cụ của Fizeau dùng để đo tốc độ ánh sáng (photo © AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg).



HÌNH 6 Hình đầu tiên của một xung ánh sáng màu lục chuyển động từ phải qua trái xuyên qua chai nước trắng đục, có vạch các dấu mm(photograph © Tom Mattick).

độ ánh sáng bằng cách dùng hai máy tính tiêu chuẩn Unix hay Linux nối với nhau bằng một sợi cáp, cộng thêm lệnh 'ping'.

Quyển III, trang 32

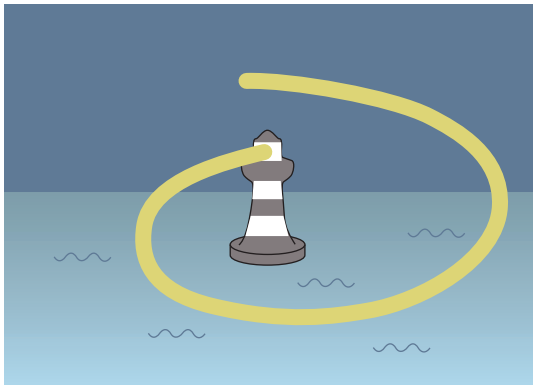
Tốc độ ánh sáng lớn đến nỗi trong đời sống hằng ngày rất khó chứng minh là nó *hữu hạn*. Có lẽ cách hay nhất để chứng minh điều này là chụp hình một xung sáng bay ngang tầm mắt của một người, giống như người ta có thể chụp hình một chiếc xe đang chạy hay viên đạn đang bay xuyên qua không khí. Hình 6 là hình đầu tiên, chụp năm 1971 bằng một máy ảnh thông dụng, không có kính nhắm, có màn trập tốc độ cao, do những người thợ chụp ảnh phát minh, và đáng nể nhất là không có một trang thiết bị điện tử nào. (Màn trập phải nhanh cỡ nào? Bạn có thể tạo ra một màn trập nhanh như vậy không? Và làm sao bạn chắc rằng nó mở đúng thời điểm đòi hỏi?)

Xem 10

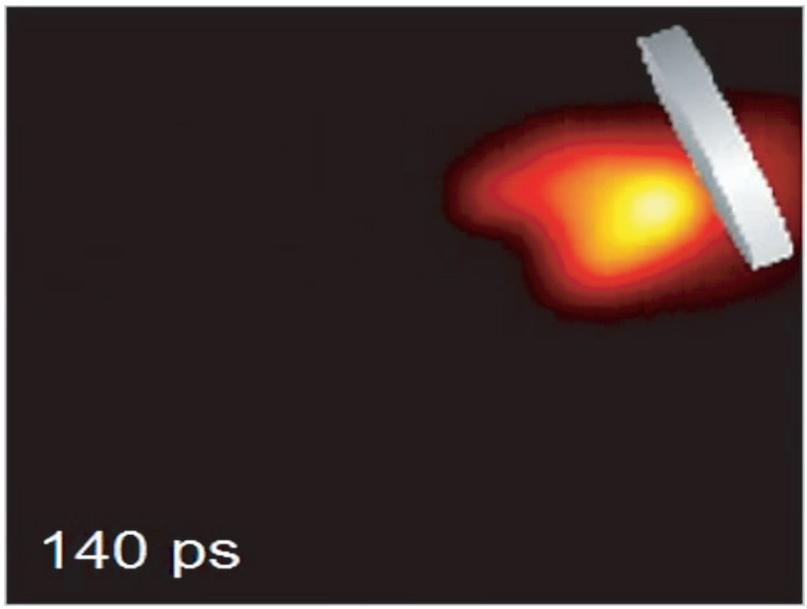
Câu đố 10 s

Tốc độ hữu hạn của ánh sáng cũng dẫn tới việc chùm ánh sáng quay nhanh bị uốn

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 7 Một hệ quả suy ra từ tính hữu hạn của tốc độ ánh sáng. Coi chừng những chi tiết đánh lừa – ánh sáng đã chuyển động thẳng từ nguồn sáng, chứ không đi theo đường cong đã vẽ; điều tương tự đã xảy ra khi nước bắn ra từ các vòi nước phun quay tròn.



HÌNH 8 Một đoạn film do máy quay siêu tốc ghi được cho thấy xung ánh sáng ngắn nảy ra từ một tấm gương (QuickTime film © Wang Lihong và Washington University at St. Louis).

cong, như đã thấy trong Hình 7. Trong đời sống hằng ngày, ta không thể nhận ra hiệu ứng này vì ánh sáng có tốc độ lớn còn hải đăng thì lại quay chậm. Nhưng có thể, một ngày nào đó, ...

Sau cùng, trong thế kỷ 21, *film* về các xung sáng chuyển động bắt đầu xuất hiện. Một thí dụ ngoạn mục có thể thấy trong Hình 8. Những đoạn film như vậy khẳng định tính hữu hạn của tốc độ ánh sáng.

Tóm lại, ánh sáng chuyển động cực nhanh nhưng có *tốc độ hữu hạn*. Thí dụ, ánh sáng nhanh hơn tia chớp, và bạn có thể tự kiểm tra điều này. Trải qua một thế kỷ đo tốc độ ánh sáng bằng nhiều phương pháp, với độ chính xác tăng dần, hiện nay ta có kết quả là

Câu đố 11 s

$$c = 299\,792\,458\ \mathrm{m/s}. \tag{2}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 1 Những tính chất của chuyển động của ánh sáng.

Kết quả những quan sát về ánh sáng
Ánh sáng có thể chuyển động trong chân không.
Ánh sáng mang theo năng lượng.
Ánh sáng có động lượng: nó có thể va chạm với vật thể khác.
Ánh sáng có moment động lượng: nó có thể làm quay một vật.
Ánh sáng có thể xuyên qua ánh sáng khác mà không gây ra ảnh hưởng gì cả.
Trong chân không, tốc độ ánh sáng là c = 299 792 458 m/s, hay gần đúng là 30 cm/ns – vào mọi lúc và ở mọi nơi.
Trong chân không ánh sáng luôn chuyển động nhanh hơn mọi vật thể khác.
Tốc độ riêng của ánh sáng là vô hạn. Trang 50
Tốc độ của xung ánh sáng, hay tốc độ tín hiệu, là tốc độ tiên hành, không phải là vận tốc nhóm. Trong chân không, tốc độ tín hiệu không đổi và bằng c. Quyển III, trang 136
Chùm tia sáng là khái niệm gần đúng khi bước sóng không đáng kể.
Chùm tia sáng chuyển động theo đường thẳng khi ở xa vật chất.
Bóng có thể di chuyển với vận tốc không giới hạn.
Ánh sáng thông thường và có cường độ lớn là sóng. Ánh sáng có cường độ rất nhỏ là dòng hạt.
Trong vật chất, cả tốc độ tiên hành lẫn tốc độ năng lượng của ánh sáng đều lớn nhất và bằng c.
Trong vật chất, vận tốc nhóm của xung sáng có thể âm, zero, dương hay lớn vô hạn.

Giá trị này được xem là *chính xác* hoàn toàn và metre đã được định nghĩa theo tốc độ ánh sáng c từ năm 1983. Giá trị gần đúng tốt nhất 0.3 Gm/s hay 0.3 µm/fs hiển nhiên là dễ nhớ hơn. Bảng tóm tắt những điều đã biết ngày nay về chuyển động của ánh sáng được cho trong Bảng 1. Hai trong các đặc tính kỳ lạ nhất của chuyển động của ánh sáng đã được khám phá vào cuối thế kỷ 19. Chúng tạo thành nền tảng của *Thuyết tương đối đặc biệt*.

Xem 11

Người ta có thể chơi tennis bằng cách dùng xung laser làm banh và gương làm vợt không?

> “Et nihil est celerius annis.*”
>
> Ovid, *Metamorphoses*.

Tất cả những thí nghiệm đã thực hiện đều chứng tỏ rằng: tốc độ của bức xạ điện từ trong chân không *không* phụ thuộc tần số bức xạ, sự phân cực của bức xạ và cường độ bức xạ.

Xem 12

Thí dụ, các xung điện từ phát ra từ pulsar trong tinh vân Con Cua đều có cùng tốc độ trên mọi tần số, từ sóng radio đến tia γ. Tốc độ của các xung giống nhau với độ chính xác lên đến 14 chữ số. Những quan sát dùng tia γ đã đẩy độ chính xác lên 20 chữ số. Sau khi xuất phát và đồng hành trong hàng ngàn triệu năm, băng ngang qua vũ trụ, các xung ánh sáng có tần số và độ phân cực khác nhau vẫn đến đích cùng lúc.

Xem 13

Việc so sánh giữa tốc độ của tia γ và ánh sáng khả kiến cũng được thực hiện trong các

* ‘Không có gì nhanh hơn những tháng năm.’ Book X, verse 520.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

máy gia tốc. Cũng có thể so sánh tốc độ của sóng radio có tần số khác nhau khi chuyển
Xem 14 động quanh Trái đất. Tất cả các thí nghiệm như vậy đều không cho thấy tốc độ ánh sáng phụ thuộc vào tần số. Các thí nghiệm bổ sung cho thấy tốc độ ánh sáng giống nhau theo
Xem 15 mọi hướng trong không gian, với độ chính xác ít nhất là 20 chữ số.

Ánh sáng từ các laser mạnh nhất, hay từ các đèn bỏ túi yếu ớt nhất và ánh sáng từ các ngôi sao xa nhất đều có cùng tốc độ. Tương tự, ánh sáng phân cực thẳng, tròn, ellipse và không phân cực cũng có cùng tốc độ.

Tóm lại,

▷ Thiên nhiên *không cung cấp* phương tiện để tăng tốc hay giảm tốc chuyển động của ánh sáng trong chân không.

Việc quan sát pulsar trên bầu trời chứng minh cho điều này. Tốc độ của ánh sáng trong chân không đều giống nhau: nó *bất biến*. Tính bất biến này làm ta rối trí.

Tất cả chúng ta đều biết rằng để ném một hòn đá bay nhanh và ra thật xa, chúng ta phải vừa chạy vừa ném; theo bản năng, chúng ta biết rằng tốc độ của hòn đá đối với mặt đất sẽ lớn hơn so với khi ta không chạy. Chúng ta cũng biết rằng khi đánh thật nhanh một quả banh tennis thì nó sẽ bay nhanh hơn.

Tuy vậy, điều làm người ta ngạc nhiên là thí nghiệm chứng tỏ rằng ánh sáng phát ra từ ngọn đèn di chuyển có *cùng tốc độ* với ánh sáng phát ra từ ngọn đèn đứng yên. Cách đơn giản nhất để chứng minh cho điều này là nhìn lên bầu trời. Bầu trời cho nhiều thí dụ về *sao đôi*: hai sao này quay quanh nhau theo quỹ đạo ellipse. Trong các hệ thống sao này, chúng ta thấy ellipse (gần như) từ phía cạnh, nên mỗi ngôi sao sẽ di chuyển đến gần rồi ra xa chúng ta một cách tuần hoàn. Nếu tốc độ ánh sáng thay đổi theo tốc độ nguồn, ta sẽ thấy những hiệu ứng kỳ dị, vì ánh sáng phát ra từ một số vị trí sẽ bắt kịp ánh sáng phát ra từ vị trí khác. Đặc biệt, ta sẽ không thể thấy hình dạng ellipse của các quỹ đạo. Tuy nhiên, các hiệu ứng kỳ dị đó không xảy ra và ta thấy các ellipse hoàn hảo. Willem de
Xem 16 Sitter đã đưa ra luận điểm đẹp đẽ này vào năm 1913 dựa trên nhiều ngôi sao đôi.

Nói cách khác:

▷ Mọi chùm ánh sáng trong chân không đều có cùng tốc độ.

Nhiều thí nghiệm được thiết kế một cách đặc biệt đã khẳng định điều này với độ chính
Xem 13, Xem 17 xác cao. Có thể đo tốc độ ánh sáng với độ chính xác hơn 1 m/s; nhưng dù tốc độ của đèn có hơn 290 000 000 m/s, tốc độ của ánh sáng phát ra cũng không thay đổi. (Bạn có
Câu đố 12 s thể đoán ra loại đèn được dùng không?)

Trong đời sống hằng ngày, ta đã biết là một viên đá hay một trái banh tennis bay đến nhanh hơn nếu ta chạy về phía nó và chậm hơn khi ta đứng yên hay chạy ra xa nó. Nhưng ngạc nhiên thay, đối với ánh sáng trong chân không, điều đó không xảy ra! Mọi thí nghiệm chính xác đều chứng tỏ rằng khi ta chạy về phía ngọn đèn ta vẫn đo được tốc độ ánh sáng y như trường hợp ta đứng yên hay chạy ra xa ngọn đèn. Ngay trường hợp quan sát viên có tốc độ cao nhất, tốc độ của ánh sáng tới vẫn y như cũ.

Cả hai loạt thí nghiệm, đèn di chuyển hay quan sát viên di chuyển, đều chứng tỏ rằng vận tốc ánh sáng đều có *độ lớn như nhau* đối với mọi người, ở mọi nơi và mọi thời điểm – cho dù quan sát viên di chuyển đối với nhau hay đối với nguồn sáng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 9 Mọi thiết bị hoạt động dựa trên động cơ điện đều chứng tỏ rằng tốc độ của ánh sáng là bất biến (© Miele, EasyGlide).

▷ Tốc độ của ánh sáng trong chân không thì *bất biến*.

Tốc độ ánh sáng trong chân không đúng là một chuẩn lý tưởng và hoàn hảo dùng để đo tốc độ. Nhân tiện, có một thuật ngữ tương đương với 'tốc độ ánh sáng' là 'tốc độ radar' hay 'tốc độ sóng radio'; trong phần Điện động lực học chúng ta sẽ hiểu tại sao lại như vậy.

Quyển III, trang 108

Tốc độ của ánh sáng cũng không khác nhiều với tốc độ của neutrino. Điều này được chứng minh một cách ngoạn mục khi người ta quan sát một siêu tân tinh năm 1987, chớp sáng và xung neutrino đến Trái đất cách nhau chỉ 12 giây. (Sự khác biệt có lẽ là do sự khác nhau về tốc độ và điểm khởi hành.) Giá trị của hai vận tốc khác nhau ở chữ số thứ mấy, biết rằng siêu tân tinh cách ta $1.7 \cdot 10^5$ năm ánh sáng và giả sử điểm khởi hành giống nhau?

Câu đố 13 s

Cũng có nhiều bằng chứng thực nghiệm khác chứng minh cho sự bất biến của tốc độ ánh sáng. Mọi thiết bị điện từ, như máy hút bụi, đều chứng tỏ tốc độ ánh sáng là bất biến. Chúng ta sẽ thấy rằng dòng điện sẽ không tạo ra từ trường, như ta vẫn thường thấy trong động cơ điện và trong loa điện, nếu tốc độ ánh sáng không bất biến. Đây đúng là cách mà nhiều nhà nghiên cứu đã luận ra tính bất biến lần đầu tiên. Chỉ *sau* những kết quả này Albert Einstein mới chứng tỏ rằng tính bất biến của tốc độ ánh sáng cũng phù hợp với chuyển động quan sát được của các vật thể. Chúng ta sẽ kiểm chứng tính chất đó trong chương này. Mối liên hệ giữa Thuyết tương đối và máy hút bụi, cũng như các máy móc khác, sẽ được tìm hiểu trong các chương về Điện động lực học.

Xem 19

Quyển III, trang 53

Xem 20

Chuyển động của ánh sáng và chuyển động của vật thể liên hệ với nhau một cách chặt chẽ. Nếu tốc độ ánh sáng không bất biến, quan sát viên có thể di chuyển với tốc độ ánh sáng. Tại sao? Vì ánh sáng là sóng, một quan sát viên chuyển động nhanh *gần bằng* sóng ánh sáng sẽ thấy ánh sáng chuyển động *chậm lại*. Và một quan sát viên chuyển động với tốc độ của sóng sẽ thấy sóng *đông cứng lại*. Tuy vậy, thí nghiệm và các tính chất của hiện tượng điện từ đều *không cho thấy* hai hiện tượng trên; quan sát viên lẫn các vật thể đều *không thể* chuyển động với tốc độ ánh sáng.

Quyển III, trang 53

Quyển III, trang 53

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 10 Albert Einstein (1879–1955).

▷ Tốc độ ánh sáng trong chân không là *tốc độ giới hạn*.

Quan sát viên và các vật thể luôn luôn chuyển động *chậm hơn* ánh sáng.

Tóm lại, tốc độ ánh sáng trong chân không là tốc độ giới hạn bất biến. Do đó, không có cách làm tăng tốc độ một xung ánh sáng. Và tương phản với banh tennis, không có cách gì để thấy ánh sáng trước khi nó thật sự đến nơi. Như vậy, không thể chơi tennis bằng ánh sáng và cũng chẳng có gì vui thú khi chơi – ít nhất là trong chân không. Nhưng còn các trường hợp khác thì sao?

Câu đố 14 d

Albert Einstein

Albert Einstein (b. 1879 Ulm, d. 1955 Princeton) là một trong các nhà vật lý vĩ đại nhất. Cũng nói thêm là chữ 's' trong tên của ông được phát âm là 'sh' và hai chữ 'ei' được phát âm giống như 'eye'. Năm 1905, ông công bố 3 bài báo khoa học quan trọng: một về chuyển động Brown, một về Thuyết tương đối đặc biệt và một về Lượng tử ánh sáng. Bài đầu tiên chứng minh vật chất được cấu thành từ các phân tử và nguyên tử; bài thứ hai trình bày về tính bất biến của tốc độ ánh sáng; và bài thứ ba là một trong những khởi điểm của Thuyết lượng tử. Mỗi bài xứng đáng với một giải Nobel nhưng ông được tặng giải nhờ bài cuối cùng. Cũng trong năm 1905, ông chứng minh được công thức nổi tiếng $E_0 = c^2 m$ (công bố năm 1906), sau khi một số người khác cũng đã đề xuất nó. Mặc dù Einstein là một trong những người đặt nền tảng cho Thuyết lượng tử nhưng sau này ông lại chống lại nó. Tuy vậy, cuộc tranh luận nổi tiếng giữa ông và bạn ông là Niels Bohr đã làm sáng tỏ những khía cạnh phản trực giác nhất của Thuyết lượng tử. Sau này, ông đã giải thích hiệu ứng Einstein–de Haas, là hiệu ứng cho thấy từ tính có được do chuyển động bên trong vật chất. Sau nhiều khám phá, vào năm 1915 và 1916 Einstein công bố thành tựu lớn nhất của mình: Thuyết tương đối tổng quát, một trong những công trình khoa học đẹp đẽ và phi thường nhất. Trong 40 năm cuối đời, ông miệt mài tìm kiếm một lý thuyết thống nhất về chuyển động nhưng không thành công.

Trang 78

Trang 139

Là người Do Thái và nổi tiếng, Einstein thường là mục tiêu tấn công và phân biệt đối xử của phong trào Quốc xã; do đó, vào năm 1933 ông di cư từ Đức sang Mỹ; từ đó, ông ngưng tiếp xúc với người Đức, trừ một vài người bạn, trong số đó có Max Planck. Một kẻ thù khác của ông là triết gia Henri Bergson. Là một nhân vật có vai vế vào thời đó, chẳng hiểu sao ông ta đã thành công, với đầu óc lẩm cẩm của mình, ngăn không cho Einstein nhận giải Nobel vật lý. Cho đến khi qua đời, Einstein vẫn giữ passport Thuỵ Sĩ trong phòng ngủ của mình. Ông không chỉ là một vật lý gia vĩ đại mà còn là một nhà tư

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 2 Cách thuyết phục chính bạn và những người khác là có một tốc độ năng lượng cực đại c trong thiên nhiên. So sánh bảng này với bảng về lực cực đại ở trang 112 dưới đây và với bảng về tác dụng cực tiểu ở trang 19 trong quyển IV.

Mệnh đề	Kiểm chứng
Giá trị cực đại của tốc độ năng lượng c thì bất biến đối với quan sát viên.	Kiểm tra mọi quan sát.
Người ta chưa thấy tốc độ năng lượng địa phương $> c$.	Kiểm tra mọi quan sát.
Không thể tạo ra tốc độ năng lượng địa phương $> c$.	Kiểm tra mọi nỗ lực.
Không thể hình dung ra tốc độ năng lượng địa phương $> c$.	Giải quyết mọi nghịch lý.
Giá trị cực đại của tốc độ năng lượng địa phương c là một nguyên lý của thiên nhiên.	Thuyết tương đối đặc biệt dẫn xuất từ nguyên lý này.
	Kiểm tra mọi hệ quả, tuy kỳ dị, nhưng được các quan sát khẳng định.

Xem 21 tưởng lớn; tuyển tập các tư tưởng của ông về các chủ đề ngoài Vật lý cũng rất đáng để chúng ta học tập. Tuy vậy, cuộc sống gia đình của ông thì lại bi thảm, vì ông đã đem lại sự bất hạnh sâu sắc cho các thành viên của gia đình mình.

Ai quan tâm đến việc tiếp bước Einstein thì đầu tiên cũng nên biết rằng ông công bố rất *nhiều* bài báo khoa học.* Ông vừa tham vọng vừa cần mẫn. Thêm một điều nữa,
Xem 22 nhiều bài báo của ông có chứa lỗi; ông đính chính lỗi trong những bài báo kế tiếp, rồi lại sửa lỗi tiếp. Việc này xảy ra thường xuyên đến nỗi ông cũng phải tự nhạo báng mình về chuyện đó. Einstein đã đưa ra định nghĩa nổi tiếng về thiên tài là: một người phạm nhiều sai lầm nhất trong thời gian ngắn nhất.

Tốc độ giới hạn bất biến và hệ quả của nó

Thí nghiệm và lý thuyết đều chứng tỏ rằng quan sát viên không thể di chuyển với tốc độ ánh sáng. Điều này tương đương với việc không có vật thể nào đạt đến tốc độ ánh sáng. Nói cách khác, tốc độ ánh sáng không chỉ là *chuẩn* để đo tốc độ mà nó còn là tốc độ *lớn nhất* trong thiên nhiên. Nói chính xác hơn, vận tốc v của một hệ vật lý bất kỳ trong thiên nhiên – nghĩa là, của khối lượng hay năng lượng định xứ bất kỳ – bị giới hạn bởi điều kiện

$$v \leqslant c \,. \tag{3}$$

Hệ thức này là nền tảng của Thuyết tương đối đặc biệt; thật vậy, toàn bộ Thuyết tương đối đặc biệt chứa trong hệ thức này.

* Tất cả các bài báo và thư từ của ông đều có sẵn trên mạng, tại địa chỉ einsteinpapers.press.princeton.edu.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Sự hiện hữu của một tốc độ giới hạn bất biến c không bất ngờ như ta nghĩ: chúng ta cần một giá trị bất biến như vậy để có thể *đo được* tốc độ. Tuy vậy, một tốc độ cực đại bất biến kéo theo nhiều hệ quả hấp dẫn: thời gian và chiều dài thay đổi theo quan sát viên, mối quan hệ mật thiết giữa khối lượng và năng lượng, sự hiện hữu của chân trời biến cố, của phản vật chất như ta sẽ thấy sau đây.

Trang 106

Năm 1895, Henri Poincaré * đã gọi các luận bàn về tính bất biến đối với vị trí quan sát là *Thuyết tương đối* và tên gọi này trở nên phổ biến từ năm 1905. Einstein lấy làm tiếc là lý thuyết đã được gọi như vậy; có lẽ ông thích tên gọi 'Invarianztheorie' nghĩa là 'Thuyết bất biến' hơn nhưng đã không thể đổi tên được nữa. Vì vậy Einstein gọi sự mô tả chuyển động khi *không có* lực hấp dẫn là Thuyết *tương đối đặc biệt* và sự mô tả chuyển động khi *có* lực hấp dẫn là Thuyết *tương đối tổng quát*. Cả hai lĩnh vực đều đầy ắp các hệ quả quyến rũ và phản trực giác, như chúng ta sẽ thấy sau này.**

Xem 23
Xem 19

Trong thiên nhiên có thể hiện hữu một tốc độ giới hạn bất biến hay không? Bảng 2 chứng tỏ rằng chúng ta cần tìm hiểu 3 điểm trước khi chấp nhận ý tưởng này. Đầu tiên chúng ta cần chứng tỏ, không *quan sát* được tốc độ nào lớn hơn, thứ hai, *không thể* quan sát thấy tốc độ năng lượng nào lớn hơn, và sau cùng, *mọi* hệ quả của tính bất biến của tốc độ ánh sáng, tuy kỳ dị nhưng có thể áp dụng được trong thiên nhiên. Thật vậy, đây là những công việc mà chúng ta phải thực hiện trong chương này và chương kế tiếp để khẳng định Thuyết tương đối đặc biệt.

Tính bất biến của tốc độ ánh sáng hoàn toàn tương phản với cơ học Galilei, là cơ học mô tả hành trạng của các viên đá và chứng tỏ rằng cơ học Galilei sẽ *sai* khi vận tốc lớn. Khi vận tốc nhỏ thì cơ học Galilei còn đúng, vì sai số nhỏ. Nhưng nếu ta muốn có sự mô tả đúng đối với *mọi* vận tốc, chúng ta cần bỏ cơ học Galilei. Thí dụ, khi ta chơi tennis, chúng ta có thể tăng hay giảm tốc độ banh bằng việc đánh banh đúng cách. Nhưng với ánh sáng thì điều này không thể. Cho dù ta dựng một cái gương trên máy bay để phản xạ chùm tia sáng, tốc độ ánh sáng vẫn không đổi, đối với phi công và cả người trên mặt đất. Nhiều thí nghiệm đã khẳng định điều này.

Nếu chúng ta tăng tốc xe bus đang lái, những chiếc xe đi ngược lại, ngang qua chúng ta với tốc độ ngày càng cao. Đối với ánh sáng, thí nghiệm chứng tỏ rằng điều này *không thể* xảy ra: ánh sáng luôn đi ngang qua chúng ta với *cùng* một tốc độ. Ngay cả với những phép đo hiện tại có độ chính xác đến $2 \cdot 10^{-13}$, chúng ta cũng vẫn không thể phân biệt được sự thay đổi tốc độ ánh sáng đối với những quan sát viên có tốc độ khác nhau. Ánh sáng không cư xử như xe hơi hay bất cứ vật thể nào khác.

Xem 15

Tại sao sự bất biến của tốc độ ánh sáng hầu như rất khó tin, mặc dù các phép đo đều chứng tỏ điều đó một cách rõ ràng? Giả sử có hai quan sát viên O và Ω (đọc là 'omega') chuyển động đối với nhau với vận tốc v, như hai xe chạy ngược chiều nhau trên một con đường. Hãy tưởng tượng khi hai xe đi ngang qua nhau, một chớp sáng loé lên ở O. Ánh sáng đi ngang vị trí $x(t)$ đối với quan sát viên O và vị trí $\xi(\tau)$ (đọc là 'xi tau') đối với quan

Quyển I, trang 440

* Henri Poincaré (1854 Nancy–1912 Paris), nhà toán học và vật lý học kiệt xuất. Poincaré là một trong những khoa học gia có nhiều đóng góp nhất trong khoa học, thúc đẩy sự phát triển của Thuyết tương đối, Thuyết lượng tử và nhiều lĩnh vực toán học.

** Giữa những lời giới thiệu Thuyết tương đối đẹp đẽ nhất có lời giới thiệu của chính Albert Einstein. Nhưng phải trải qua hàng thế kỷ mới có những cuốn sách hay xuất hiện, như những cuốn sách giáo khoa của Schwinger hay của Taylor và Wheeler.

Xem 24
Xem 25, Xem 26

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

sát viên Ω. Vì tốc độ ánh sáng như nhau đối với cả hai người, chúng ta có

$$\frac{x}{t} = c = \frac{\xi}{\tau} \,. \tag{4}$$

Tuy vậy, theo điều kiện đã cho, hiển nhiên ta có $x \neq \xi$. Nói cách khác, tính bất biến của tốc độ ánh sáng sẽ cho ta $t \neq \tau$, điều đó có nghĩa là,

▷ Thời gian đối với các quan sát viên chuyển động đối với nhau thì *khác nhau*.

Câu đố 15 e
Xem 27

Như vậy thời gian không phải là duy nhất. Kết quả đáng kinh ngạc này, đã được nhiều thí nghiệm khẳng định và Albert Einstein đã nói đến lần đầu năm 1905. Mỗi quan sát viên có thời gian riêng của mình. Thời gian của hai quan sát viên chỉ giống nhau nếu họ đứng yên đối với nhau. Mặc dù có nhiều người biết đến tính bất biến của c nhưng chỉ có chàng trai Einstein mới có can đảm để nói rằng thời gian phụ thuộc quan sát viên, để khám phá và đối diện với các hệ quả. Chúng ta cũng nên làm như vậy.

Ở đây cần chú ý một điều. Tốc độ ánh sáng c là tốc độ giới hạn. Phát biểu sau đây muốn nói lên điều gì?

▷ Tốc độ ánh sáng *trong chân không* là tốc độ giới hạn.

Thực vậy, các hạt có thể chuyển động với tốc độ lớn hơn tốc độ của ánh sáng *trong vật chất*, miễn là tốc độ này nhỏ hơn tốc độ ánh sáng *trong chân không*. Người ta vẫn thường quan sát thấy điều này.

Trong chất rắn hay lỏng, tốc độ ánh sáng thường nhỏ hơn tốc độ ánh sáng trong chân không hai hoặc ba lần. Trong những chất đặc biệt, tốc độ ánh sáng có thể nhỏ hơn: trong tâm mặt trời, tốc độ ánh sáng vào khoảng 30 km/year = 1 mm/s, và ngay trong phòng thí nghiệm, đối với một số chất, tốc độ ánh sáng đã đo được là 0.3 m/s.

Xem 28
Xem 29
Quyển I, trang 326

Khi một phi cơ bay nhanh hơn tốc độ âm thanh trong không khí, nó tạo ra một sóng kích động hình nón phía sau nó. Khi một hạt mang điện chuyển động nhanh hơn tốc độ ánh sáng trong vật chất, nó phát ra một hình nón bức xạ, được gọi là *bức xạ Vavilov–Čerenkov*. Người ta vẫn thường thấy bức xạ Vavilov–Čerenkov; thí dụ, nó là nguyên nhân xuất hiện vầng sáng màu xanh của nước trong lò phản ứng hạt nhân và trong plastic trong suốt khi có các hạt chuyển động với vận tốc lớn xuyên qua, một hiện tượng được ứng dụng trong các máy dò của các thí nghiệm trong máy gia tốc.

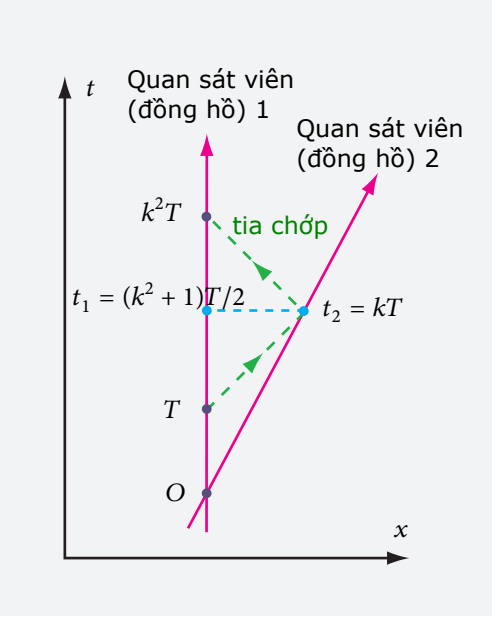
Trong chương này và các chương tiếp theo, khi chúng ta dùng thuật ngữ 'tốc độ ánh sáng', thì đó là tốc độ ánh sáng trong chân không. Trong không khí, tốc độ của ánh sáng chỉ nhỏ hơn tốc độ ánh sáng trong chân không ít hơn một phần trăm, nên trong nhiều trường hợp, ta có thể bỏ qua sai biệt này.

Thuyết tương đối đặc biệt trình bày một cách cô đọng

Tốc độ ánh sáng thì bất biến và không đổi đối với mọi quan sát viên. Như vậy ta có thể tìm ra các hệ thức giữa các giá trị mà hai quan sát viên khác nhau đo được nhờ Hình 11. Hình biểu diễn hai quan sát viên chuyển động với tốc độ không đổi đối với nhau vẽ trong hệ trục toạ độ không-thời gian. Người thứ nhất gởi một chớp sáng tới người thứ

Xem 30

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 11 Một hình vẽ chứa nhiều tính chất của Thuyết tương đối đặc biệt, bao gồm các biểu thức của sự giãn dài thời gian và của phép biến đổi Lorentz.

hai, là nơi mà ánh sáng phản xạ ngược lại vị trí của người thứ nhất. Vì tốc độ ánh sáng bất biến, nên ánh sáng là cách duy nhất để so sánh toạ độ không-thời gian đối với hai quan sát viên ở xa nhau. Hai đồng hồ đặt xa nhau (cũng như hai cây thước đặt xa nhau) chỉ có thể so sánh hay đồng bộ hoá bằng cách dùng ánh chớp của ánh sáng hay của sóng vô tuyến. Vì tốc độ ánh sáng bất biến, mọi quang lộ cùng hướng thì *song song với nhau* trong những sơ đồ như vậy.

Câu đố 16 s

Tốc độ tương đối giữa hai quan sát viên không đổi sẽ dẫn tới việc có một hằng số tỷ lệ k giữa các toạ độ thời gian của các biến cố. (Tại sao liên hệ lại là tuyến tính?) Nếu một ánh chớp loé lên vào thời điểm T lúc đo đối với quan sát viên 1, nó sẽ đến vị trí quan sát viên 2 vào lúc kT, và trở lại nơi quan sát viên 1 lúc k^2T. Theo hình vẽ ta có

Câu đố 17 s

$$k = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \quad \text{or} \quad \frac{v}{c} = \frac{k^2-1}{k^2+1} \,. \tag{5}$$

Trang 32

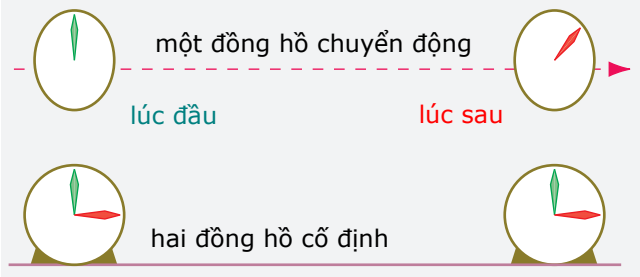
Hằng số này sẽ tái xuất trong hiệu ứng Doppler.*

Hình 11 cũng cho thấy quan sát viên 1 đo được giá trị t_1 đối với biến cố lúc ánh sáng phản xạ; tuy vậy, quan sát viên 2 lại đo được giá trị t_2 khác, đối với *cùng* một biến cố. Thời gian quả thật *khác nhau* đối với hai quan sát viên chuyển động tương đối đối với nhau. Hiệu ứng này được gọi là *sự giãn dài thời gian*. Nói cách khác, *thời gian có tính tương đối.* Hình 12 trình bày một cách để minh hoạ kết quả này.

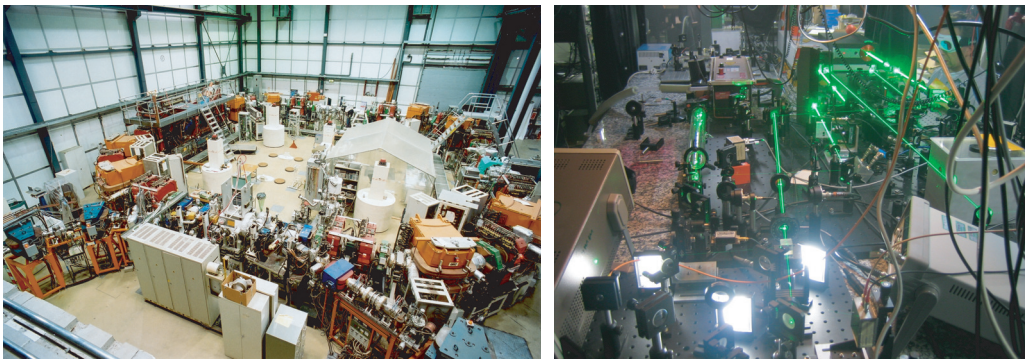
Hệ số giãn thời gian giữa hai quan sát viên được tìm thấy từ Hình 11 bằng cách so sánh

* Việc giải thích tính tương đối dựa trên hằng số k đôi khi được gọi là *phép tính k*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 12 Đồng hồ chuyển động chạy chậm lại: nó đếm thời gian chậm hơn đồng hồ đứng yên.



HÌNH 13 Đồng hồ chuyển động chạy chậm hơn: nguyên tử lithium chuyển động trong máy gia tốc vòng lưu trữ (hình bên trái) được đếm bằng lasers (hình bên phải) khẳng định sự tiên đoán với độ chính xác rất cao. (© TSR relativity team at the Max Planck Gesellschaft).

hai giá trị t_1 và t_2; và người ta tính được

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(v) \,. \tag{6}$$

Thời gian của quan sát viên chuyển động thì *ngắn hơn* γ lần; hệ số giãn thời gian luôn lớn hơn 1. Nói cách khác,

▷ Đồng hồ chuyển động chạy chậm hơn.

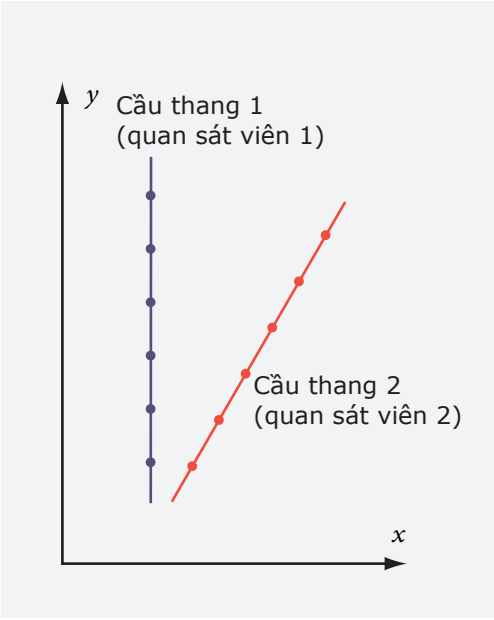
Câu đố 18 e

Đối với tốc độ thông thường thì hiệu ứng không đáng kể. Đó là lý do ta không dò ra được sự khác biệt này. Tuy vậy, vật lý Galilei không còn đúng đối với tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng; biểu thức đúng (6) đã được kiểm nghiệm với độ chính xác hơn một phần 10 triệu, trong thí nghiệm thấy trong Hình 13. Hệ số γ cũng xuất hiện trong công thức $E = c^2\gamma m$ liên quan đến sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng, mà chúng ta sẽ suy ra dưới đây. Biểu thức (5) hay (6) là những công thức quan trọng trong Thuyết tương đối đặc biệt: tất cả các công thức khác đều dẫn xuất từ hai công thức đó.

Xem 31

Nếu một chớp sáng được gởi đi từ quan sát viên 2 đến quan sát viên 1 rồi phản xạ lại, quan sát viên 2 cũng sẽ phát biểu tương tự: đối với anh ta, đồng hồ 1 đang chuyển động, và cũng đối với anh ta, đồng hồ chuyển động đếm thời gian chậm hơn.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 14 Quan sát viên trên cả hai thang đều cho rằng thang kia ngắn hơn.

▷ Mỗi quan sát viên đều thấy đồng hồ của người kia chạy chậm hơn.

Tình trạng cũng tương tự như trường hợp hai người so sánh số bậc giữa hai thang giống nhau mà không song song, như đã trình bày trong Hình 14. Người ở trên thang này sẽ luôn thấy các bậc của thang *kia* ngắn hơn. Không có gì sâu sắc hơn sự quan sát dựa trên nền tảng của sự giãn thời gian và sự co chiều dài này.

Trang 53

Tất nhiên là có nhiều người đã cố gắng tìm ra những lập luận để né tránh việc khác nhau một cách kỳ lạ về thời gian giữa các quan sát viên khác nhau. Nhưng không ai thành công và mọi kết quả thực nghiệm đều khẳng định một điều: thời gian có tính tương đối. Chúng ta hãy xem qua một số thí nghiệm.

Gia tốc của ánh sáng và hiệu ứng Doppler

Trong chân không có thể tăng tốc ánh sáng không? Điều này tuỳ thuộc điều bạn muốn nói. Các vật lý gia kiểu cọ thường nói rằng mọi tấm gương đều gia tốc ánh sáng vì gương làm hướng tia sáng thay đổi. Chúng ta sẽ thấy trong chương về Điện từ học là vật chất cũng có khả năng *uốn cong* tia sáng và như vậy là đã gia tốc nó. Tuy vậy, các phương pháp này thật ra chỉ thay đổi *hướng* truyền; không có cái gì có khả năng thay đổi *tốc độ* ánh sáng trong chân không. Đặc biệt, ánh sáng là một thí dụ về sự chuyển động không thể ngừng lại. Chỉ có một vài thí dụ khác tương tự. Bạn có thể gọi tên một thí dụ không?

Quyển III, trang 157
Câu đố 19 s

Điều gì sẽ xảy ra nếu ta có thể tăng tốc ánh sáng? Để làm được điều này, ánh sáng phải được cấu tạo từ các hạt có khối lượng. Nếu ánh sáng có khối lượng, người ta cần phân biệt 'tốc độ năng lượng không có khối lượng' c với tốc độ ánh sáng c_L, sẽ nhỏ hơn và phụ thuộc vào động năng của các hạt ánh sáng có khối lượng. Tốc độ ánh sáng có thể không còn bất biến nhưng tốc độ năng lượng không có khối lượng thì vẫn bất biến. Những hạt ánh sáng có khối lượng như vậy có thể bị tóm lấy, ngừng lại và có thể chứa

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

trong một cái hộp. Những cái hộp như vậy sẽ làm cho đèn điện trở nên không cần thiết; chỉ cần nhốt ánh sáng ban ngày vào hộp rồi thả ra, từ từ, trong những đêm sau, sau khi đã cho nó một cái đẩy để tăng tốc.*

Các nhà vật lý đã kiểm tra khả năng ánh sáng có khối lượng khá chi tiết. Hiện nay các quan sát cho thấy khối lượng của các hạt ánh sáng, hay photon nếu có, sẽ nhỏ hơn $1.3 \cdot 10^{-52}$ kg với các thí nghiệm trên Trái đất và nhỏ hơn $4 \cdot 10^{-62}$ kg dựa trên các suy luận Vật lý thiên văn (tuy ít có sức thuyết phục hơn một chút). Nói cách khác, ánh sáng không nặng, *'LIGHT is light'*.

Xem 32, Xem 18

Nhưng điều gì sẽ xảy ra khi ánh sáng chạm vào một cái gương *đang chuyển động*? Trường hợp này cũng giống như khi nguồn sáng chuyển động đối với máy thu: màu nhận được sẽ có *màu khác* với màu phát ra từ nguồn. Sự dịch chuyển tần số này được gọi là *Hiệu ứng Doppler*. Christian Doppler** là người đầu tiên nghiên cứu sự dịch chuyển tần số trong sóng âm. Tất cả chúng ta đều biết sự thay đổi cao độ của tiếng còi tàu lúc nó đến và đi: đó là hiệu ứng Doppler đối với âm thanh. Ta có thể xác định tốc độ đoàn tàu nhờ hiệu ứng này. Dơi, cá heo và cá voi dùng hiệu ứng Doppler âm học để đo tốc độ con mồi; hiệu ứng cũng được người ta dùng để đo tốc độ dòng máu và nhịp tim của thai nhi trong hệ thống siêu âm (mặc dù cực kỳ ồn đối với thai nhi), như đã thấy trong Hình 16.

Quyển I, trang 312

Doppler cũng là người đầu tiên mở rộng khái niệm dịch chuyển tần số cho sóng ánh sáng. Như ta sẽ thấy, ánh sáng (cũng) là sóng và màu sắc của nó do tần số, hay một cách tương đương, bước sóng λ của nó quyết định. Giống như sự thay đổi cao độ âm đối với các đoàn tàu chuyển động, Doppler nhận thấy rằng một nguồn sáng chuyển động sẽ làm cho màu sắc nhận được sẽ *khác* với màu của nguồn sáng. Dùng phép tính hình học đơn giản, cùng với sự bảo toàn số lượng cực đại và cực tiểu, ta được kết quả sau

Quyển III, trang 107

Câu đố 20 e

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_s} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}(1 - \frac{v}{c}\cos\theta_r) = \gamma\,(1 - \frac{v}{c}\cos\theta_r)\,. \tag{7}$$

Các biến v và θ_r trong biểu thức này được xác định trong Hình 17. Ánh sáng phát từ các nguồn tiến đến gần ta sẽ dịch chuyển về phía xanh, trong khi ánh sáng phát từ nguồn ra xa ta sẽ dịch chuyển về phía đỏ.

Việc quan sát hiệu ứng Doppler đối với ánh sáng, còn gọi là *dịch chuyển màu*, do Johannes Stark *** người đã nghiên cứu ánh sáng từ các nguyên tử chuyển động phát

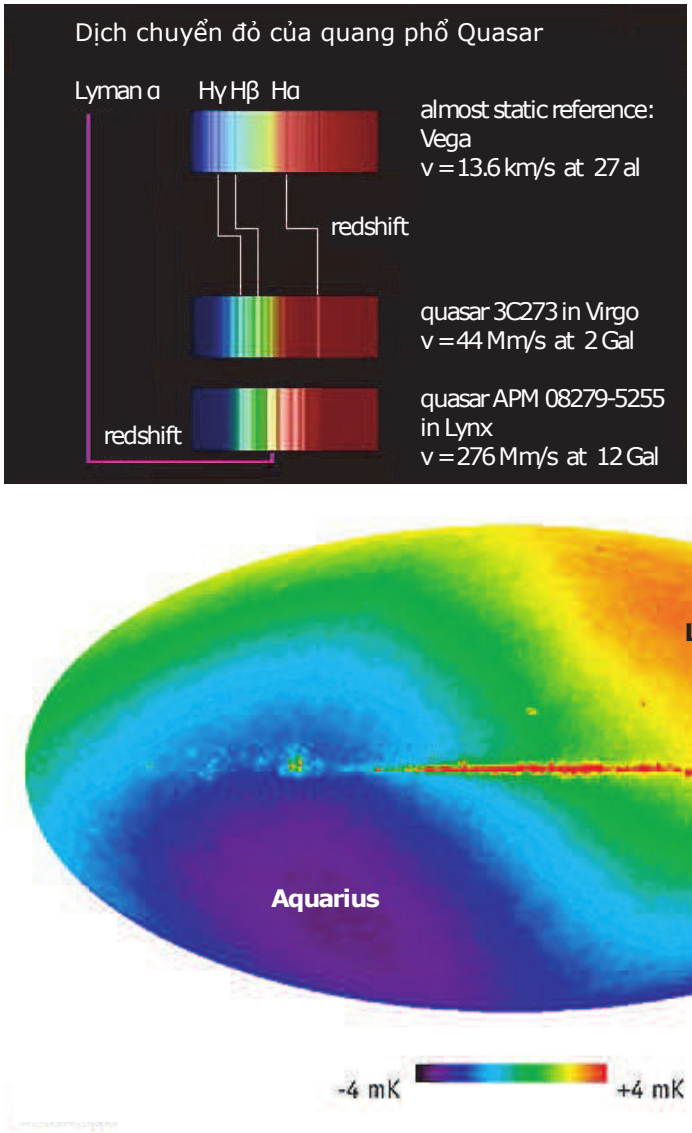
* Cũng cần nói thêm, ánh sáng có khối lượng cũng sẽ có tính *phân cực dọc*. Điều này trái với những điều ta quan sát được, cho thấy ánh sáng chỉ có phân cực *ngang* đối với phương truyền.

** Christian Andreas Doppler (b. 1803 Salzburg, d. 1853 Venezia), nhà vật lý kiệt xuất. Doppler nghiên cứu hiệu ứng mang tên ông đối với âm thanh và ánh sáng. Trong năm 1842 ông đã tiên đoán (chính xác) rằng một ngày nào đó chúng ta có thể đo chuyển động của các vì sao xa xôi qua màu sắc của chúng. Do việc khám phá hiệu ứng này – mặc dù nó được kiểm chứng qua thực nghiệm trong năm 1845 và 1846 – Doppler bị khai trừ khỏi Viện hàn lâm khoa học hoàng gia năm 1852. Sức khoẻ của ông suy sụp và ông mất sau đó ít lâu.

Xem 33

*** Johannes Stark (b. 1874 Schickenhof, d. 1957 Eppenstatt), đã khám phá hiệu ứng Doppler quang học vào năm 1905 trong tia anode, và sự tách vạch phổ trong điện trường vào năm 1913, bây giờ được gọi là *hiệu ứng Stark*. Nhờ hai khám phá này ông được tặng giải Nobel vật lý năm 1919. Ông từ chức giáo sư năm 1922 và sau đó trở thành một đảng viên Quốc xã nhiệt thành. Là thành viên của NSDAP từ năm 1930, ông trở nên nổi tiếng vì sự công kích người khác chỉ vì những lý do ý thức hệ; ông bị cộng đồng khoa học trên khắp thế giới khinh bỉ đến cuối đời.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



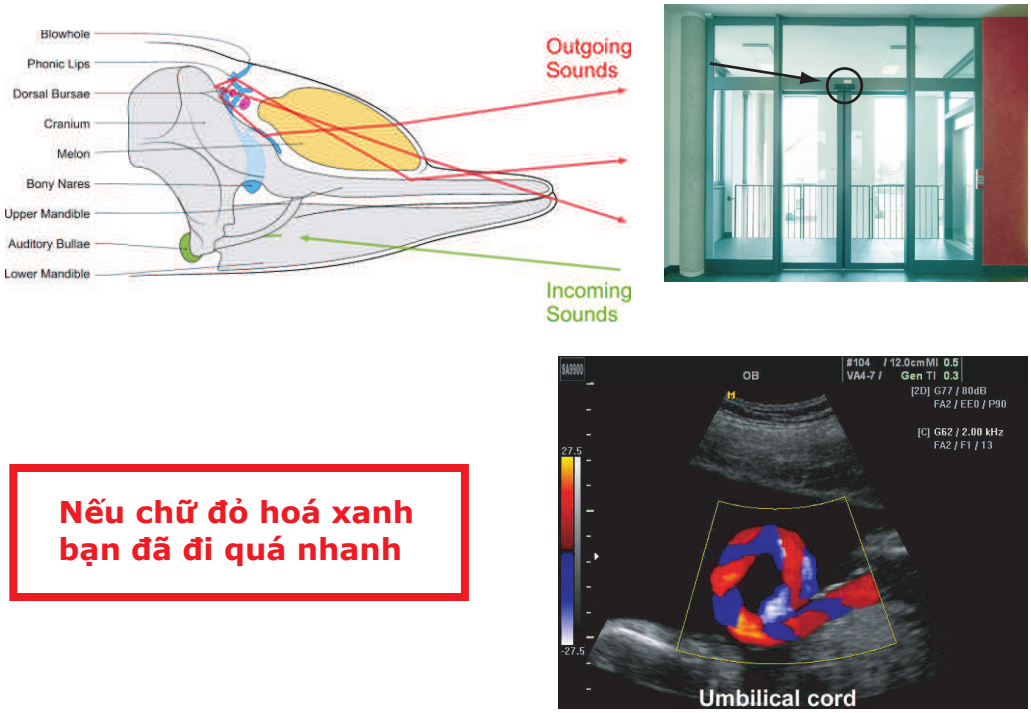
HÌNH 15 Hình trên: hiệu ứng Doppler đối với ánh sáng của hai quasar. Hình dưới: – đã phóng đại, màu không đúng – hiệu ứng Doppler đối với màu gần như đen của bầu trời đêm – bức xạ nền vũ trụ – do chuyển động của Trái đất trong không gian. Trong trường hợp sau, độ dịch chuyển Doppler sẽ đưa tới kết quả là có một sự thay đổi nhỏ của nhiệt độ hiệu dụng của bầu trời đêm (© Maurice Gavin, NASA).

ra, thực hiện năm 1905. Tất cả các thí nghiệm tiếp theo đều khẳng định độ dịch chuyển màu theo tính toán trong phạm vi sai số của phép đo; thí nghiệm cuối cùng cho thấy sự phù hợp lên đến 2 phần triệu.

Xem 34

Khác với sóng âm, sự thay đổi màu cũng xảy ra khi chuyển động *có phương ngang* đối với tín hiệu ánh sáng. Như vậy, một cái gậy màu vàng chuyển động nhanh ngang qua vùng quan sát (thị trường) sẽ có cạnh trước màu xanh và cạnh sau màu đỏ trước khi tiến

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 16 Hệ thống sonar Doppler của cá heo, hệ thống cửa mở tự động ứng dụng hiệu ứng Doppler, cảnh báo tốc độ ứng dụng hiệu ứng Doppler và siêu âm Doppler theo dõi tuần hoàn máu (phần có màu) trong cuống nhau của thai nhi (© Wikimedia, Hörmann AG, Medison).

đến điểm gần quan sát viên nhất. Màu sắc có được là tổ hợp của độ dịch chuyển Doppler dọc (bậc 1) và độ dịch chuyển Doppler ngang (bậc 2). Ở một góc đặc biệt $\theta_{\text{unshifted}}$, màu sẽ không thay đổi. (Bước sóng sẽ thay đổi như thế nào nếu chỉ có chuyển động ngang? Biểu thức của $\theta_{\text{unshifted}}$ theo tốc độ v là gì?)

Câu đố 21 s

Sự dịch chuyển màu (tần số) do Doppler khám phá có nhiều ứng dụng thực tế. Hầu như mọi vật rắn đều có thể là gương đối với sóng vô tuyến. Nhiều toà nhà có cửa tự động mở khi có người đến gần. Một cảm biến nhỏ trên cánh cửa sẽ nhận ra có người đang đến gần. Hệ thống hoạt động bằng cách đo hiệu ứng Doppler của sóng vô tuyến do cảm biến phát ra và sóng phản xạ từ người đang đi đến gần. (Sau này chúng ta sẽ thấy sóng vô tuyến và ánh sáng là những biểu hiện của cùng một hiện tượng.) Do đó cửa sẽ mở khi có vật đến gần chúng. Radar của cảnh sát cũng dùng hiệu ứng Doppler, ở đây dùng để đo tốc độ xe.*

Quyển III, trang 108

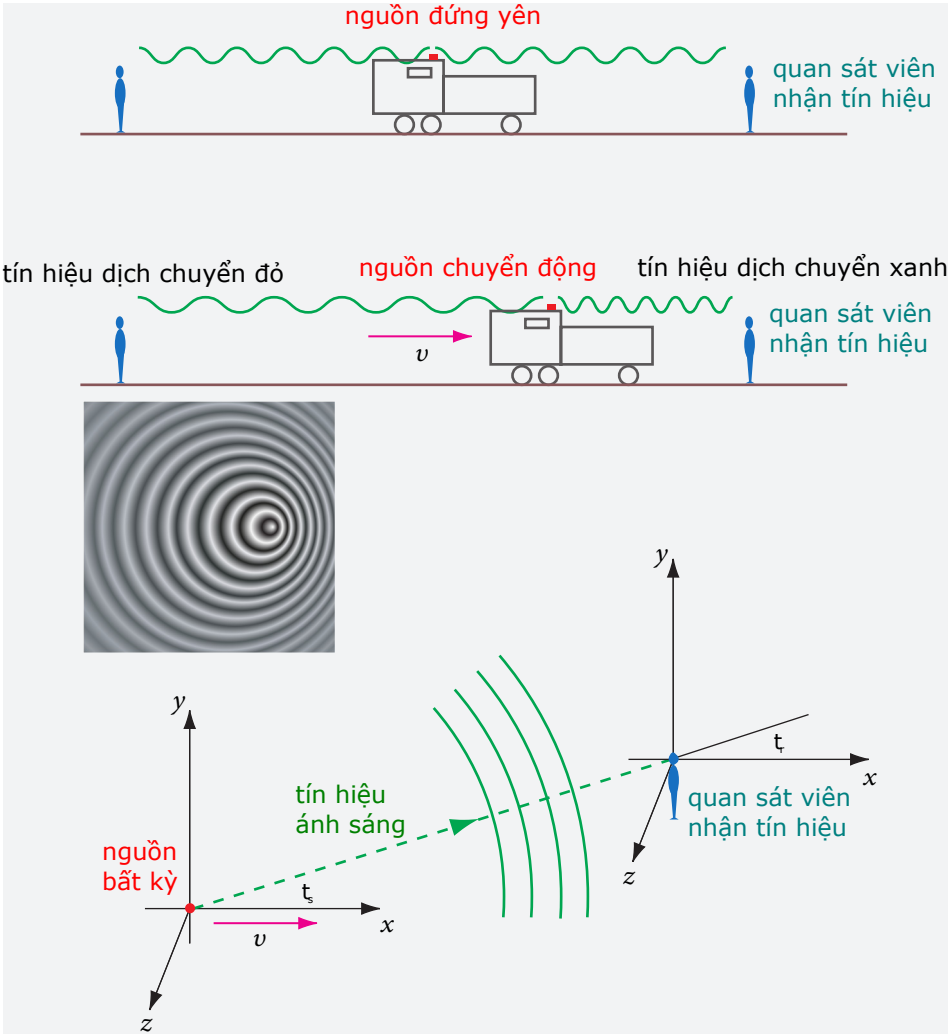
Như Doppler đã tiên đoán, hiệu ứng Doppler thường được dùng để đo tốc độ của các ngôi sao ở xa, như đã thấy trong Hình 15. Trong trường hợp này, độ dịch chuyển Doppler thường được đặc trưng bởi *số dịch chuyển đỏ* z, được định nghĩa theo bước sóng λ hay tần số f:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_R} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1\,. \tag{8}$$

Câu đố 22 s

* Với tốc độ bao nhiêu thì ta sẽ thấy đèn đỏ là đèn xanh?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 17 Cách bố trí để quan sát hiệu ứng Doppler trong không gian một và ba chiều: sóng phát ra từ nguồn tiến đến gần quan sát viên sẽ có tần số tăng lên và bước sóng giảm đi, tương phản với sóng phát ra từ nguồn ra xa quan sát viên (wave graph © Pbroks13).

Câu đố 23 s Bạn có thể hình dung ra cách xác định số z không? Giá trị điển hình của z đối với các nguồn sáng trên bầu trời nằm trong khoảng −0.1 đến 3.5, nhưng người ta cũng đã tìm thấy những giá trị cao, có thể lớn hơn 10. Bạn có thể xác định tốc độ tương ứng không?

Câu đố 24 s Tại sao chúng lại lớn như vậy?

Xem 35 Do Mặt trời quay tròn và hiệu ứng Doppler, một cạnh của Mặt trời dịch chuyển về phía xanh, còn cạnh kia thì dịch chuyển về phía đỏ. Có thể đo tốc độ quay của Mặt trời nhờ hiện tượng này. Thời gian quay nằm trong khoảng 27 đến 33 ngày, tuỳ theo vĩ độ. Hiệu ứng Doppler cũng cho thấy bề mặt Mặt trời dao động với chu kỳ khoảng 5 phút.

Ngay cả hiện tượng quay của Ngân hà cũng được khám phá bằng cách dùng hiệu ứng Doppler cho các sao của nó. Các nhà thiên văn đã khám phá ra rằng Mặt trời mất khoảng 220 triệu năm để đi quanh tâm của Ngân hà.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Điều gì sẽ xảy ra nếu người ta thật sự thử chơi tennis bằng ánh sáng và dùng vợt chuyển động với tốc độ tương đối tính? Nhiều người có niềm đam mê như vậy; những cây vợt nhanh nhất được tạo ra cho đến nay có vận tốc trên 80 % tốc độ ánh sáng. Chúng được sản xuất năm 2013 bằng cách bắn những xung laser ngắn và cực mạnh, công suất 0.6 ZW trong thời gian 50 fs, lên một lá carbon dày 10 nm. Những xung như vậy làm bắn ra một đám mây electron phẳng và nhanh vào chân không; trong một thời gian ngắn, đám mây này có tác dụng như một *cái gương tương đối tính*. Khi chùm laser thứ nhì phản xạ từ cây vợt tương đối tính này, tốc độ ánh sáng vẫn không đổi, nhưng tần số của chúng thì gia tăng với hệ số khoảng 14, làm thay đổi màu chùm tia từ cận hồng ngoại đến viễn tử ngoại. Dù vậy, gương điện tử tương đối tính này có độ phản xạ nhỏ hơn 1 %, đời sống của nó chỉ vào khoảng vài ps và kích thước của nó chỉ vào khoảng 2 µm; do đó nếu gọi nó là một cái vợt thì có hơi phóng đại một chút.

Xem 36

Tóm lại, để thay đổi *tốc độ* ánh sáng trong chân không, ta chỉ cần kiểm soát việc thay đổi *màu*. Đó là hiệu ứng Doppler. Nói cách khác, nỗ lực nhằm tăng tốc hay giảm tốc ánh sáng chỉ làm cho màu thay đổi. Và sự thay đổi màu không làm thay đổi tốc độ ánh sáng như ta đã trình bày ở trên.

Trang 23

Các phép đo Doppler hiện đại cực kỳ chính xác. Mặt trời của chúng ta chuyển động với tốc độ khoảng 9 cm/s đối với Trái đất, do các hành tinh chuyển động quanh nó. Hiện nay, độ dịch chuyển Doppler tương ứng với giá trị tốc độ này được đo thường xuyên, bằng cách dùng một loại laser đặc biệt gọi là *lược tần số*. Dụng cụ này cho phép đo tần số ánh sáng xê xích trong phạm vi một phần nhỏ của 1 Hz. Nhờ độ dịch chuyển Doppler cảm ứng, lược tần số cho phép ta dò ra những tốc độ còn nhỏ hơn nữa. Phương pháp này thường được dùng để phát hiện các ngoại hành tinh chuyển động quanh các ngôi sao ở xa.

Xem 37

Mối liên hệ giữa sự thay đổi màu và nỗ lực gia tốc ánh sáng dẫn tới một vấn đề khó xử: ta đã biết từ vật lý cổ điển là khi ánh sáng đi ngang qua một vật có khối lượng lớn, như một ngôi sao, nó sẽ bị lệch hướng. Sự lệch hướng này có dẫn tới sự dịch chuyển Doppler hay không?

Quyển I, trang 201

Câu đố 25 s

Sự khác nhau giữa ánh sáng và âm thanh

Hiệu ứng Doppler quang học cơ bản hơn hiệu ứng Doppler âm học rất nhiều. Cho dù ta chưa biết đến tính bất biến của tốc độ ánh sáng, chỉ hiệu ứng Doppler cũng đủ để *chứng tỏ* rằng thời gian của các quan sát viên chuyển động đối với nhau thì khác nhau. Tại sao?

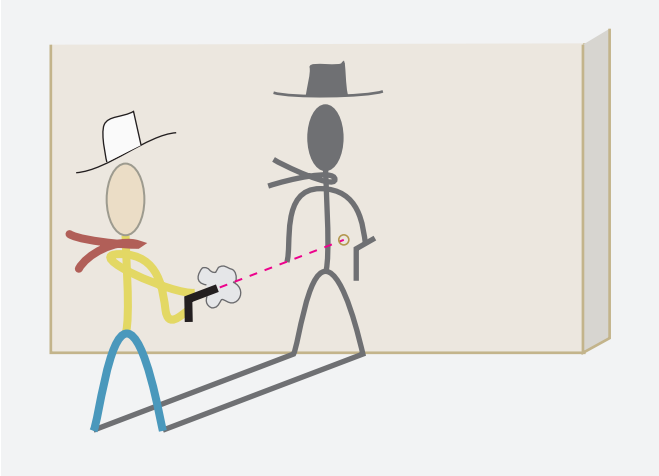
Chúng ta xem thời gian từ đồng hồ. Để biết là đồng hồ khác có đồng bộ với đồng hồ của chúng ta hay không, ta phải *nhìn* cả hai đồng hồ. Tóm lại, ta cần dùng tín hiệu ánh sáng để đồng bộ đồng hồ. Bây giờ bất kỳ sự thay đổi màu sắc nào của ánh sáng khi chuyển động từ quan sát viên này đến quan sát viên khác thì đó là do đồng hồ của cả hai chạy khác nhau và như vậy thời gian của cả hai *khác nhau*. Để hiểu điều này, ta nên nhớ rằng nguồn sáng cũng là đồng hồ – nhưng 'tích tắc' rất nhanh. Vì vậy nếu hai quan sát viên thấy hai màu khác nhau phát ra từ cùng một nguồn, họ đã đo được số dao động khác nhau từ nguồn đó. Nói cách khác, thời gian của hai quan sát viên chuyển động đối với nhau thì khác nhau. Thực vậy, phương trình (5) của hiệu ứng Doppler bao hàm cả Thuyết tương đối đặc biệt, bao gồm tính bất biến của tốc độ ánh sáng. (Bạn có thể khẳng định là mối liên hệ giữa 'tần số phụ thuộc quan sát viên' và 'thời gian phụ thuộc quan sát viên' trong trường hợp hiệu ứng Doppler *âm học* đã bị phá vỡ hay không?)

Xem 38

Trang 30

Câu đố 26 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 18 Lucky Luke.

Tại sao hành trạng của ánh sáng lại dẫn đến Thuyết tương đối đặc biệt, trong khi âm trong không khí thì không? Câu trả lời: ánh sáng là giới hạn cho chuyển động của năng lượng. Kinh nghiệm cho thấy có phi cơ siêu thanh, nhưng không có hoả tiễn siêu quang. Nói cách khác, giới hạn $v \leqslant c$ chỉ đúng khi c là tốc độ ánh sáng, chứ không đúng khi c là tốc độ âm trong không khí.

Tuy vậy, có ít nhất một hệ thống trong thiên nhiên mà tốc độ âm thực sự là tốc độ giới hạn đối với năng lượng: đó là trường hợp chuyển động của *vị trí lệch mạng* trong chất rắn tinh thể. (Chúng ta sẽ bàn chi tiết đến chuyển động này sau.) Kết quả là, Thuyết tương đối đặc biệt cũng đúng với các chỗ lệch mạng, miễn là tốc độ ánh sáng được thay thế bằng tốc độ âm! Thực vậy, chỗ lệch mạng tuân theo phép biến đổi Lorentz, cho thấy có sự co chiều dài và tuân theo công thức năng lượng nổi tiếng $E = c^2\gamma m$. Trong tất cả các hiệu ứng này, tốc độ âm c đối với chỗ lệch mạng đóng cùng vai trò như tốc độ ánh sáng đối với các hệ vật lý tổng quát.

Quyển V, trang 298

Xem 39

Nếu Thuyết tương đối đặc biệt dựa trên mệnh đề không có vật gì chuyển động nhanh hơn ánh sáng, chúng ta cần kiểm tra mệnh đề này thật cẩn thận.

NGƯỜI TA CÓ THỂ BẮN NHANH HƠN BÓNG CỦA MÌNH KHÔNG?

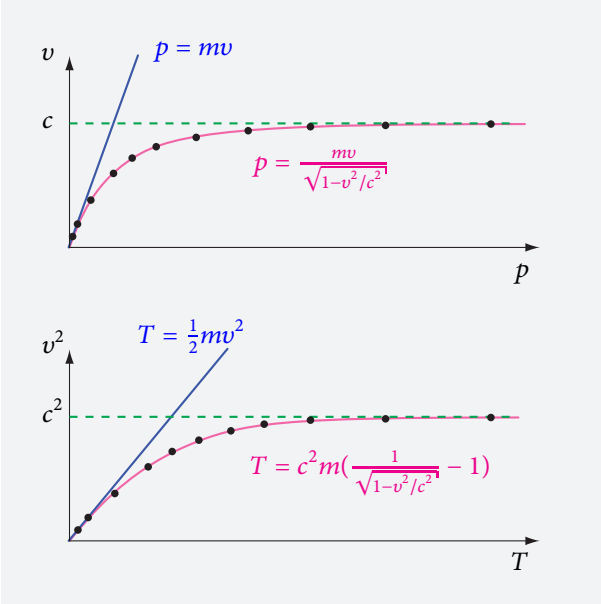
> “Quid celerius umbra?*”
>
> Cổ nhân

Vì Lucky Luke đã lập nên kỳ công như đã thấy trong Hình 18, viên đạn phải chuyển động nhanh hơn tốc độ ánh sáng. (Còn tay anh ta thì sao?) Để thi với Lucky Luke, chúng ta cần lấy sẵn một lượng năng lượng lớn nhất, ngay từ một trạm phát điện và gia tốc cho những ‘viên đạn’ nhẹ nhất tên là electron. Thí nghiệm này được thực hiện hằng ngày trong các máy gia tốc hạt; thí dụ như máy Electron Positron lớn (LEP) có chu vi 27 km, nằm trên biên giới Pháp và Thuỵ Sĩ, gần Geneva. Tại đó, một công suất điện 40 MW (một lượng đủ cho một thành phố nhỏ) được dùng để gia tốc electron và positron đạt được

Câu đố 27 e

* ‘Cái gì nhanh hơn cái bóng?’ Một tiêu ngữ thường thấy trên đồng hồ mặt trời.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 19 Các số đo thực nghiệm (chấm đen) của vận tốc electron v là hàm số của động lượng p và động năng T. Tiên đoán của vật lý Galilei (xanh) và tiên đoán của Thuyết tương đối đặc biệt (đỏ) cũng được hiển thị.

Xem 40 năng lượng trên16 nJ (104.5 GeV) mỗi hạt và tốc độ của chúng đã được đo lại. Kết quả được trình bày trong Hình 19: ngay cả khi dùng những phương tiện kinh khủng như vậy cũng không thể làm cho electron chuyển động nhanh hơn ánh sáng. (Bạn có thể hình Câu đố 28 e dung ra cách đo động năng và tốc độ tách riêng ra không?)

Mối liên hệ tốc độ–năng lượng trong Hình 19 là một hệ quả của tốc độ cực đại và công Trang 71 thức chính xác của nó được chứng minh dưới đây. Nhiều quan sát đã chứng tỏ rằng có một *giới hạn* đối với vận tốc của vật thể và bức xạ. Vật thể và bức xạ không thể chuyển động với vận tốc lớn hơn tốc độ ánh sáng.* Sự chính xác của cơ học Galilei được công nhận trong hơn hai thế kỷ mà không ai nghĩ đến việc kiểm chứng; nhưng khi việc kiểm Xem 43 chứng được thực hiện như trong Hình 19, thì người ta nhận ra là nó sai.

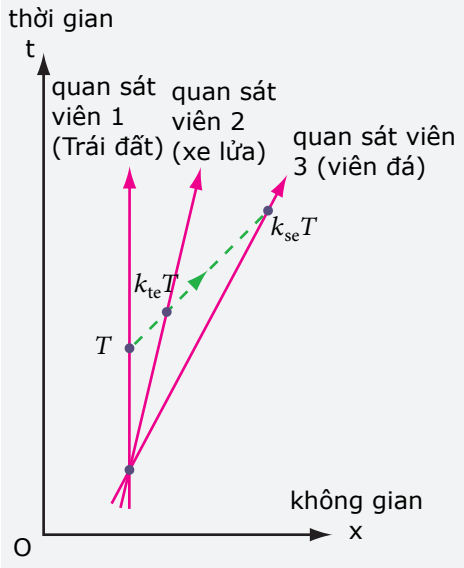
Ta cũng có kết quả tương tự khi xét đến động lượng thay vì năng lượng. Máy gia tốc hạt cho thấy động lượng *không* tỷ lệ với tốc độ: ở tốc độ cao, việc gấp đôi động lượng *không* dẫn tới việc gấp đôi tốc độ. Nói vắn tắt, thí nghiệm chứng tỏ rằng việc tăng năng lượng hay động lượng của một hạt dù nhẹ ký nhất cũng không thể đạt tới tốc độ ánh sáng.

Người bực bội nhiều nhất với giới hạn tốc độ này là các kỹ sư máy tính: nếu giới hạn tốc độ cao hơn, người ta đã có thể chế tạo các bộ vi xử lý nhanh hơn và như vậy sẽ có máy tính nhanh hơn; điều này sẽ đem lại những tiến bộ vượt bậc trong việc tạo ra các

* Vẫn có người không chấp nhận kết quả này cũng như Thuyết tương đối. Mỗi độc giả nên tự trải nghiệm ít nhất một lần trong đời, chuyện trò với một trong những người này. (Kỳ lạ là không có phụ nữ trong nhóm người này. Mặc dù điều này cũng đáng chú ý, nhưng nghiên cứu ảnh hưởng của *giới tính* trong vật lý thì Xem 41 chắc chắn là phí thời gian.)

Xem 42 Có thể tìm thấy những người lập dị qua internet hay trong sci.physics.relativity newsgroup. Cũng có thể ghé trang www.crank.net. Những người lập dị là những người tầm thường, đặc biệt vì họ thường rao giảng về tầm quan trọng của *sự chính xác* trong ngôn ngữ và lý luận, điều mà tất cả bọn họ không trừ một ai, đều lờ đi.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 20 Cách chứng minh công thức tổng hợp vận tốc.

máy tính có thể hiểu và sử dụng ngôn ngữ.

Sự hiện hữu của tốc độ giới hạn chống lại cơ học Galilei. Thật vậy, khi vận tốc gần bằng vận tốc ánh sáng, khoảng 15 000 km/s hay lớn hơn, biểu thức $mv^2/2$ *không còn* bằng động năng T của hạt. Thực ra tốc độ cao như vậy bây giờ là chuyện bình thường, nhà nào cũng có. Chỉ cần tính tốc độ electron trong ống tia cathode của chiếc TV màu cũ kỹ, nếu ta biết rằng biến thế trong máy có thể tạo ra điện áp 30 kV.

Câu đố 29 s

Tốc độ ánh sáng là tốc độ *giới hạn* đối với vật thể. Dễ dàng thấy tính chất này là hệ quả của *tính bất biến* của tốc độ ánh sáng. Vật thể có thể đứng yên trong một hệ quy chiếu hiển nhiên sẽ chuyển động chậm hơn ánh sáng trong hệ quy chiếu đó. Bây giờ, nếu một vật chuyển động chậm hơn một vật khác đối với *một* quan sát viên, thì điều đó cũng xảy ra đối với các quan sát viên khác. (Thử tưởng tượng một thế giới mà điều này sai thì thú vị lắm: những hiện tượng kỳ dị sẽ xảy ra, như các vật có thể đi xuyên qua nhau.) Vì tốc độ ánh sáng giống nhau đối với mọi quan sát viên nên không có một vật nào có thể đi nhanh hơn ánh sáng.

Câu đố 30 d

Chúng ta kết luận

▷ Tốc độ cực đại là tốc độ của những thực thể *không khối lượng* .

Sóng điện từ, bao gồm ánh sáng và sóng hấp dẫn là các thực thể đã biết có thể du hành với tốc độ cực đại. Mặc dù tốc độ của neutrino chưa thể phân biệt bằng thực nghiệm với tốc độ cực đại nhưng các thí nghiệm gần đây chứng tỏ rằng chúng có khối lượng rất nhỏ.

Xem 44

Ngược lại, nếu một hiện tượng có tốc độ giới hạn đối với một quan sát viên thì các quan sát viên khác cũng phải thấy giống như thế. Mối liên hệ giữa tính giới hạn và tính bất biến đối với quan sát viên có tính phổ quát không?

Câu đố 31 e
Câu đố 32 r

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tổng hợp vận tốc

Nếu tốc độ ánh sáng là giới hạn thì không có cách nào để vượt qua nó. Điều này hàm ý khi tổng hợp 2 vận tốc, thí dụ như ta ném viên đá khi đang chạy, không thể cộng hai giá trị một cách đơn giản. Hãy tưởng tượng có một toa tàu đang chuyển động với vận tốc v_{te} đối với mặt đất và một hành khách trong toa ném một viên đá cùng hướng chuyển động của toa tàu, với vận tốc v_{st} đối với toa tàu. Thường người ta vẫn cho rằng vận tốc của đá đối với mặt đất được tính theo công thức $v_{se} = v_{st} + v_{te}$. Thực ra, cả lý luận lẫn phép đo đều cho một kết quả khác.

Trang 27 Từ sự hiện hữu của tốc độ cực đại , cùng với Hình 20, ta thấy các hệ số k phải thoả mãn hệ thức $k_{se} = k_{st}k_{te}$.* Như vậy ta chỉ cần dùng hệ thức (5) giữa hệ số k và tốc độ Câu đố 33 e tương ứng để kiếm được công thức

$$v_{se} = \frac{v_{st} + v_{te}}{1 + v_{st}v_{te}/c^2} \,. \tag{9}$$

Đây là *công thức tổng hợp vận tốc*. Kết quả không bao giờ lớn hơn c và luôn luôn nhỏ hơn Trang 70 phép cộng đơn giản hai vận tốc.** Công thức (9) đã được khẳng định qua hằng triệu lần kiểm tra. Bạn có thể kiểm lại là nó có thể trở thành công thức cộng đơn giản đối với các Xem 18 tốc độ gặp trong đời sống hằng ngày.

Quan sát viên và nguyên lý của Thuyết tương đối đặc biệt

Thuyết tương đối đặc biệt được xây dựng dựa trên một nguyên lý đơn giản:

▷ Tốc độ truyền tải năng lượng *cực đại* địa phương thì giống nhau đối với mọi quan sát viên.

Xem 46 Hay như Hendrik Lorentz*** thích phát biểu, mệnh đề tương đương là:

▷ Tốc độ v của một hệ vật lý bị giới hạn bởi hệ thức

$$v \leqslant c \tag{10}$$

đối với *tất cả* các quan sát viên, trong đó c là tốc độ ánh sáng.

* Bằng cách lấy logarithm (tự nhiên) của phương trình này, người ta có thể xác định *độ nhanh*, đại lượng dùng định lượng tốc độ và có cộng tính.

Xem 45 ** Người ta có thể chứng minh phép biến đổi Lorentz trực tiếp từ công thức này.

*** Hendrik Antoon Lorentz (b. 1853 Arnhem, d. 1928 Haarlem) cùng với Boltzmann và Kelvin, là một trong những vật lý gia vĩ đại trong thời đó. Ông chứng minh Phép biến đổi Lorentz và sự co Lorentz từ các phương trình Maxwell trong lĩnh vực điện từ. Ông là người đầu tiên hiểu được rằng, trước khi lý thuyết lượng tử khẳng định ý tưởng này rất lâu, các phương trình Maxwell đối với chân không cũng mô tả vật chất và các tính chất của chúng, bao gồm các điện tích chuyển động – electron. Ông chứng minh điều này cho các trường hợp đặc biệt như sự tán sắc ánh sáng, hiệu ứng Zeeman, hiệu ứng Hall và hiệu ứng Faraday. Ông cũng mô tả chính xác lực Lorentz. Năm 1902, ông nhận giải Nobel vật lý cùng với Pieter Zeeman. Ngoài vật lý, ông cũng rất tích cực trong phong trào quốc tế hoá sự hợp tác trong khoa học. Ông còn tham gia vào việc tạo dựng công trình nhân tạo lớn nhất trên trái đất: công trình lấn biển ở vùng Zuiderzee.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Người ta đã biết đến Tính bất biến của tốc độ ánh sáng từ những năm 1850, vì biểu thức $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, đã được các nhà khoa học trong lĩnh vực điện biết đến, không phụ thuộc
Quyển III, trang 107 tốc độ quan sát viên, nguồn sáng, lẫn hướng và vị trí của họ. Tính bất biến của c, bao gồm tính độc lập của tốc độ, được phát hiện nhờ các thí nghiệm quang học dùng các lăng kính chuyển động, nước chuyển động, các vật lưỡng chiết chuyển động, sự giao thoa giữa các chùm ánh sáng chuyển động theo các hướng khác nhau hay giữa các chùm ánh sáng chuyển động tròn hay ánh sáng từ các ngôi sao chuyển động. Tính bất biến cũng được tìm thấy trong thí nghiệm điện từ dùng điện môi chuyển động trong điện từ trường.* Tất cả các thí nghiệm đều chứng tỏ rõ ràng rằng tốc độ ánh sáng trong chân không là bất biến, bất kể chúng được thực hiện *trước* hay *sau* khi Thuyết tương đối đặc biệt ra đời. Thí nghiệm của Albert Michelson và phiên bản có độ chính xác cao của Stephan Schiller và cộng sự, được minh hoạ trong Hình 21. Tất cả các thí nghiệm như vậy đều không tìm thấy sự thay đổi tốc độ ánh sáng đối với chuyển động của Trái đất
Xem 49 trong giới hạn sai số của phép đo, khoảng 2.10^{-17} . Bạn cũng có thể khẳng định tính bất biến của tốc độ ánh sáng ngay tại nhà mình; cách làm sẽ được giải thích trong chương về Điện động lực học.

Quyển III, trang 53 Sự hiện hữu của tốc độ giới hạn bất biến có nhiều hệ quả quan trọng. Để tìm hiểu chúng, ta hãy giữ nguyên phần còn lại của vật lý Galilei.** Tính giới hạn và tính bất biến của tốc độ ánh sáng bao hàm các ý sau:

- Trong một phòng kín trôi nổi tự do ('theo quán tính'), không có cách xác định tốc độ của phòng. Hay, như Galilei viết trong *Dialogo*: il moto [...] niente opera ed è come s' e' non fusse. 'Chuyển động [...] không gây ra tác dụng và hành xử như thể nó không hiện hữu'. Đôi khi phát biểu này được rút gọn thành: *chuyển động giống như không có gì xảy ra.*
- Không có khái niệm đứng yên tuyệt đối: đứng yên là khái niệm phụ thuộc quan sát viên hay *tương đối.****
- Chiều dài và không gian phụ thuộc quan sát viên; chiều dài và không gian có tính tương đối.
- Thời gian phụ thuộc quan sát viên; thời gian có tính tương đối.
- Khối lượng và năng lượng tương đương với nhau.

Chúng ta có thể rút ra nhiều kết luận đặc biệt hơn khi bổ sung thêm hai điều kiện. Đầu tiên, chúng ta nghiên cứu tình trạng nơi mà lực hấp dẫn có thể bỏ qua. (Nếu không có điều kiện này, chúng ta cần thuyết tương đối *tổng quát* để mô tả hệ thống.) Thứ hai,

---

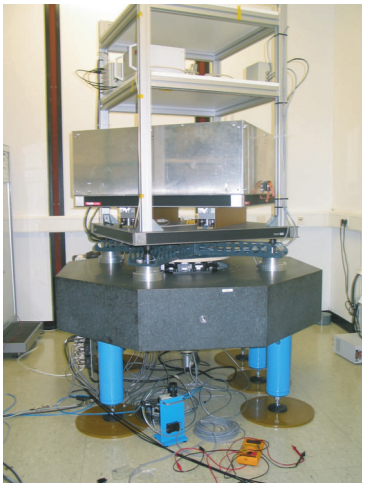
* Tất cả các thí nghiệm này, mà Einstein không buồn trích dẫn trong công trình năm 1905 của mình, đều
Xem 47
Xem 48 do những nhà vật lý nổi tiếng trong thế kỷ 19 thực hiện, như Wilhelm Röntgen, Alexander Eichenwald, François Arago, Augustin Fresnel, Hippolyte Fizeau, Martin Hoek, Harold Wilson, Albert Michelson, (Người Mỹ đầu tiên nhận giải Nobel vật lý 1907), Edward Morley, Oliver Lodge, John Strutt Rayleigh, Dewitt Brace, Georges Sagnac và Willem de Sitter.

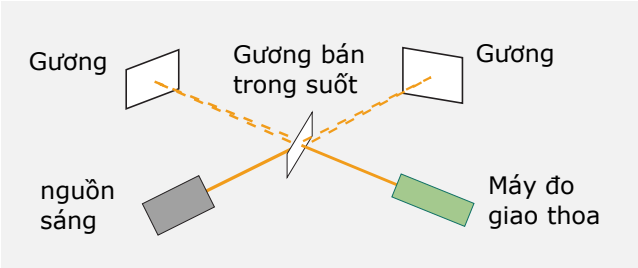
Quyển I, trang 157 ** Đây là điều cốt yếu. Thí dụ, vật lý Galilei cho rằng chỉ có thể quan sát được chuyển động *tương đối*. Vật lý Galilei cũng loại trừ những phương pháp toán học khác nhau dùng để nhận biết một tốc độ ánh sáng bất biến mâu thuẫn với đời sống hằng ngày.

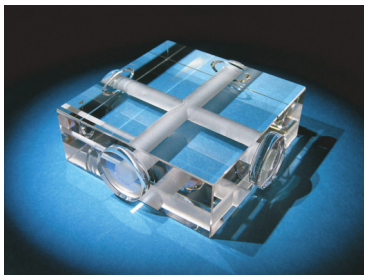
Bài báo gốc của Einstein năm 1905 khởi đầu từ hai nguyên lý: sự *bất biến* của tốc độ ánh sáng và sự tương đương hay *tính tương đối* của tất cả các hệ quy chiếu quán tính. Nguyên lý sau đã được Galilei phát biểu năm 1632; chỉ có tính bất biến của tốc độ ánh sáng là mới. Dù vậy, lý thuyết mới lại được đặt tên – do
Xem 23 Poincaré – theo nguyên lý cũ, thay vì gọi nó là 'lý thuyết bất biến', là tên mà Einstein thích hơn.

Câu đố 34 s *** Bạn có thể cho một luận cứ chính xác để suy ra điều này không ?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net







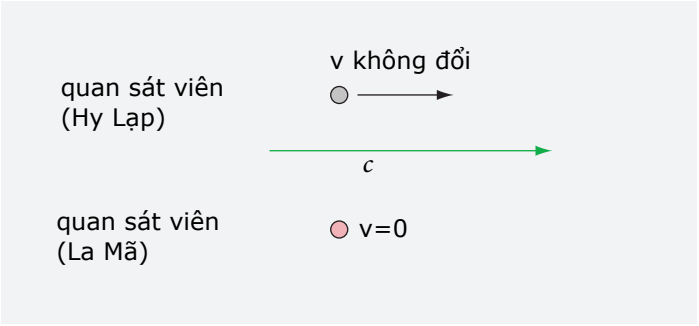
HÌNH 21 Kiểm tra tính bất biến của tốc độ ánh sáng đối với chuyển động của quan sát viên: Bộ dụng cụ thí nghiệm đầu tiên của Albert Michelson, năm 1881, được dựng lại ở Potsdam và bộ dụng cụ laser hiện đại có độ chính xác cao, có thể giữ cho khoảng cách các gương thay đổi không quá đường kính một proton và cả hệ quay đều quanh một trục thẳng đứng (© Astrophysikalisches Institut Potsdam, Stephan Schiller).

chúng ta cũng giả sử rằng dữ liệu về vật thể mà ta đang nghiên cứu – tốc độ, vị trí của vật, v.v. – có thể được thu thập mà không làm chúng bị nhiễu loạn. (Nếu không có điều kiện này, chúng ta cần *lý thuyết lượng tử* để mô tả hệ thống.)

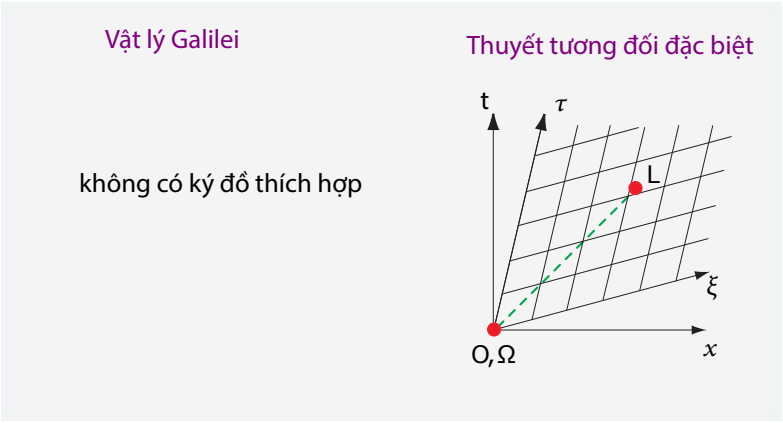
Thời khoảng và chiều dài do hai quan sát viên khác nhau đo được *thật sự* khác nhau như thế nào? Để trả lời, chúng ta chỉ cần một cây viết chì và một cái thước. Để bắt đầu, chúng ta tìm hiểu tình trạng khi không có tương tác. Nói cách khác, chúng ta bắt đầu từ *Động học tương đối tính*: tất cả các vật thể chuyển động mà không ảnh hưởng đến nhau.

Nếu một vật tự do được quan sát khi đang chuyển động thẳng đều (hay đứng yên), thì quan sát viên được gọi là quan sát viên *quán tính* và hệ quy chiếu do quan sát viên đó sử dụng được gọi là *hệ quy chiếu quán tính*. Mọi quan sát viên quán tính đều ở trong trạng thái chuyển động tự do. Như vậy những thí dụ về quan sát viên quán tính (hay hệ quy chiếu quán tính) – trong không gian *hai* chiều – bao gồm các vật di chuyển trên mặt băng không ma sát hay trên sàn nhẵn của tàu thuyền đang chuyển động. Nếu thí dụ đầy đủ – trong không gian *ba* chiều – chúng ta có thể lấy trường hợp phi hành gia di chuyển trong phi thuyền tắt máy hay một người rơi trong chân không. Quan sát viên quán tính 3 chiều còn được gọi là quan sát viên *trôi nổi tự do*, 'tự do' thay cho 'không bị tác động'. Quan sát viên quán tính ít gặp hơn quan sát viên không quán tính. Bạn có thể chứng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 22 Hai quan sát viên quán tính và một chùm tia sáng. Cả hai đo được tốc độ ánh sáng c như nhau.



HÌNH 23 Giản đồ không-thời gian của ánh sáng được nhìn từ hai quan sát viên quán tính, sử dụng hệ toạ độ (t, x) và (τ, ξ).

Câu đố 35 e

minh điều này không? Tuy vậy, quan sát viên quán tính là trường hợp đơn giản nhất và họ tạo thành một tập hợp đặc biệt:

- ▷ Hai quan sát viên *quán tính* bất kỳ sẽ chuyển động với *vận tốc không đổi* đối với nhau (miễn là không có lực hấp dẫn và sự tương tác, như đã giả sử ở trên).
- ▷ Tất cả các quan sát viên quán tính đều *tương đương*: họ mô tả thế giới bằng những phương trình như nhau. Phát biểu này, của Galilei, được Henri Poincaré gọi là *nguyên lý tương đối*.

Để thấy rõ chiều dài đo được và khoảng trong không gian, thay đổi như thế nào khi chuyển từ quan sát viên quán tính này sang quan sát viên quán tính khác, ta giả sử một người La Mã, dùng toạ độ không-thời gian x, y, z và t và một người Hy Lạp, dùng toạ độ ξ, υ, ζ và τ,* chuyển động với vận tốc $\boldsymbol{v}$ không đổi đối với nhau, như ta thấy trong Hình 22. Tính bất biến của tốc độ ánh sáng theo mọi hướng đối với hai quan sát viên bất kỳ có nghĩa là độ biến thiên toạ độ mà hai quan sát viên tìm được sẽ liên hệ với nhau

Câu đố 36 e

theo phương trình

$$(c\mathrm{d}t)^2 - (\mathrm{d}x)^2 - (\mathrm{d}y)^2 - (\mathrm{d}z)^2 = (c\mathrm{d}\tau)^2 - (\mathrm{d}\xi)^2 - (\mathrm{d}\upsilon)^2 - (\mathrm{d}\zeta)^2 \,. \tag{11}$$

* Chúng được đọc là 'xi', 'upsilon', 'zeta' và 'tau'. Tên, chữ tương ứng và cách phát âm của tất cả các ký tự Hy Lạp được giải thích trong Phụ lục 16 của tập 1.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Bây giờ ta chọn các trục toạ độ sao cho vận tốc chỉ có thành phần theo hướng x và ξ. Như vậy ta có

$$(c\mathrm{d}t)^2 - (\mathrm{d}x)^2 = (c\mathrm{d}\tau)^2 - (\mathrm{d}\xi)^2 \,. \tag{12}$$

Giả sử có một đèn flash đứng yên ở gốc toạ độ của quan sát viên Hy Lạp, như vậy $\xi = 0$, và tạo ra hai chớp sáng cách nhau một khoảng thời gian $\mathrm{d}\tau$. Đối với quan sát viên La Mã, đèn flash chuyển động với tốc độ v, nên $\mathrm{d}x = v\mathrm{d}t$. Thay vào công thức trước, ta được

Câu đố 37 e

$$\mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \mathrm{d}\tau \,. \tag{13}$$

Đây là công thức liên hệ giữa thời gian đồng hồ do một quan sát viên đo được với thời gian đồng hồ do quan sát viên kia đo được. Nếu vận tốc tương đối v *nhỏ* so với vận tốc ánh sáng c, như trong đời sống hằng ngày, *hệ số giãn*, *hiệu chỉnh tương đối tính*, *hệ số Lorentz* hay *độ co tương đối tính* γ trong thực tế bằng 1. Trong trường hợp này, hai quan sát viên sẽ nhận thấy hai thời khoảng bằng nhau: thời gian giống nhau đối với cả hai. Tuy vậy, đối với vận tốc *gần bằng* vận tốc ánh sáng, γ tăng lên. Giá trị lớn nhất mà con người đã đạt tới được khoảng $2 \cdot 10^5$; giá trị lớn nhất quan sát được trong thiên nhiên khoảng 10^{12}. Bạn có thể tưởng tượng được nơi chúng xảy ra không?

Câu đố 38 s

Đối với trường hợp γ lớn hơn 1 – thì theo nguyên tắc khi vận tốc tương đối bất kỳ khác 0 – số đo thời gian của hai quan sát viên sẽ khác nhau. Vì thời gian của hai quan sát viên khác nhau, quan sát viên chuyển động sẽ thấy *hiện tượng giãn thời gian*.

Nhưng đó không phải là tất cả. Một khi ta biết đồng hồ chạy ra sao, ta có thể dễ dàng suy ra quy luật biến đổi của *toạ độ*. Hình 22 và 23 cho thấy toạ độ x của một biến cố L là tổng của hai khoảng: toạ độ ξ cộng khoảng cách giữa hai gốc toạ độ. Nói khác đi, ta có

$$\xi = \gamma(x - vt) \,. \tag{14}$$

Dùng tính bất biến của khoảng không-thời gian, ta được

$$\tau = \gamma(t - xv/c^2) \,. \tag{15}$$

Henri Poincaré gọi hai hệ thức này là *phép biến đổi Lorentz của không-thời gian* theo tên người khám phá là vật lý gia Hoà Lan Hendrik Antoon Lorentz.* Là một trong những khám phá vật lý đẹp đẽ nhất, đã được Lorentz chứng minh vào năm 1892 và 1904, từ những phương trình của Điện động lực học, nơi chúng đã nằm chờ khám phá từ năm 1865.** Trong năm đó James Clerk Maxwell đã công bố những phương trình mô tả mọi hiện tượng điện, từ và quang học. Tuy vậy, Einstein mới là người đầu tiên hiểu rằng t và τ, cũng như x và ξ, là những mô tả không-thời gian *có giá trị ngang nhau*.

Xem 50

Quyển III, trang 77

Phép biến đổi Lorentz mô tả sự thay đổi quan điểm từ hệ quy chiếu quán tính này sang hệ quy chiếu quán tính khác, chuyển động đối với hệ quy chiếu trước. Sự thay đổi

* Để có thông tin về Hendrik Antoon Lorentz, hãy xem Trang 41.

** Khám phá tương tự đã được Woldemar Voigt (b. 1850 Leipzig, d. 1919 Göttingen) công bố lần đầu tiên năm 1887; Voigt – phát âm là 'Fohgt' – cũng là người khám phá hiệu ứng Voigt và tensor Voigt. Sau này, năm 1889, George Fitzgerald (b. 1851 Dublin, d. 1901 Dublin) cũng tìm thấy kết quả như vậy.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

quan điểm này được gọi là *phép đẩy (phép biến đổi) Lorentz*. Những công thức (14) và (15) của phép đẩy là trọng tâm của Thuyết tương đối, cả đặc biệt lẫn tổng quát. Thật ra phần toán của Thuyết tương đối đặc biệt cũng không khó hơn các công thức đó: nếu bạn biết căn bậc 2 là gì, bạn đã có thể tìm hiểu Thuyết tương đối đặc biệt với đầy đủ các vẻ đẹp của nó rồi.

Phép biến đổi Lorentz (14) và (15) còn chứa nhiều kết quả kỳ lạ. Chúng chứng tỏ rằng thời gian và chiều dài phụ thuộc quan sát viên: quan sát viên chuyển động sẽ thấy *hiện tượng co chiều dài*. Như vậy không-thời gian thực sự có tính tương đối.

Câu đố 39 e
Trang 53

Phép biến đổi Lorentz (14) và (15) còn kỳ lạ trên phương diện khác. Khi hai quan sát viên nhìn nhau, người nào cũng cho rằng mình đo được những khoảng ngắn hơn khoảng của người kia. Nói cách khác, Thuyết tương đối đặc biệt cho thấy cỏ trên cạnh kia của hàng rào luôn luôn *ngắn hơn* – nếu ta đi xe đạp dọc theo hàng rào và nếu cỏ bị nghiêng đi. Sau này chúng ta sẽ tìm hiểu chi tiết kết quả kỳ dị này.

Câu đố 40 s
Trang 53

Còn nhiều dạng công thức khác của phép biến đổi Lorentz đã được khám phá, như biểu thức trong đó bao gồm cả gia tốc tương đối lẫn vận tốc tương đối của hai quan sát viên. Tuy vậy, tất cả các công thức đó đều được bỏ đi sau khi so sánh những tiên đoán của chúng với kết quả thực nghiệm. Trước khi ta xem xét các thí nghiệm như vậy, ta hãy tiếp tục tìm hiểu thêm vài hệ quả suy diễn từ các hệ thức của phép biến đổi Lorentz.

Xem 51

Không-thời gian là gì?

> Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbstständigkeit bewahren.*
>
> Hermann Minkowski.

Phép biến đổi Lorentz cho ta biết một điều quan trọng: không gian và thời gian là hai mặt của cùng một thực thể cơ bản. Chúng *hoà trộn* theo những cách khác nhau đối với các quan sát viên khác nhau. Sự hoà trộn này thường được diễn tả bằng cách nói: thời gian là *chiều thứ tư*. Điều này rất có lý vì thực thể cơ bản thông thường – được gọi là *không-thời gian* – có thể định nghĩa là tập hợp các biến cố, được mô tả bằng 4 toạ độ trong thời gian và không gian và vì tập hợp của tất cả các biến cố có các tính chất của một đa tạp.** (Bạn có thể khẳng định điều này không?) Không-thời gian đầy đủ thì bất biến đối với quan sát viên và có tính tuyệt đối; chúng không bị thay đổi bởi các phép biến đổi Lorentz. Chỉ khi tách riêng thành không gian và thời gian thì chúng mới phụ thuộc quan sát viên.

Câu đố 41 s

Nói cách khác, sự hiện hữu của tốc độ cực đại trong thiên nhiên buộc ta phải đưa ra khái niệm đa tạp không-thời gian bất biến, được tạo thành từ mọi biến cố khả dĩ, để mô tả thiên nhiên. Trong trường hợp không có lực hấp dẫn, nghĩa là trong Thuyết tương đối đặc biệt, đa tạp không-thời gian được đặc trưng bởi một tính chất đơn giản: *khoảng*

* 'Từ nay trở đi bản thân không gian và thời gian sẽ nhoè đi thành những cái bóng và chỉ có sự hợp nhất cả hai mới bảo toàn được tính độc lập của chúng.' Câu phát biểu nổi tiếng này là câu nói mở đầu buổi nói chuyện của Minkowski năm 1908 tại cuộc họp của Hiệp hội các nhà tự nhiên học và bác sĩ.

** Thuật ngữ 'đa tạp' sẽ được định nghĩa với đầy đủ các chi tiết toán học trong cuộc hành trình của chúng ta sau này.

Quyển V, trang 366

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 52 *không-thời gian* d*i* giữa hai biến cố, được định nghĩa theo công thức

$$\mathrm{d}i^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - \mathrm{d}x^2 - \mathrm{d}y^2 - \mathrm{d}z^2 = c^2\mathrm{d}t^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right), \tag{16}$$

độc lập với quan sát viên (quán tính): nó là một bất biến. Không-thời gian còn được gọi là *không-thời gian Minkowski*, theo tên của Hermann Minkowski,* là thầy của Albert Einstein; ông là người đầu tiên, năm 1904, định nghĩa khái niệm không-thời gian đồng thời tìm hiểu sự hữu ích và tính quan trọng của nó. Sau này ta sẽ khám phá ra một điều là khi có lực hấp dẫn, cả không-thời gian đều bị *uốn cong*; không-thời gian cong như vậy, được gọi là *không-thời gian Riemann*, đóng vai trò trọng yếu trong Thuyết tương đối tổng quát.

Khoảng không-thời gian d*i* của phương trình (16) có một ý nghĩa vật lý đơn giản. Nó bằng thời gian đo được bởi một quan sát viên khi chuyển từ biến cố (t, x) tới biến cố $(t + \mathrm{d}t, x + \mathrm{d}x)$, được gọi là *thời gian riêng*, nhân với c. nếu ta bỏ qua hệ số c, ta cũng có thể gọi khoảng thời gian đó là *thời gian đồng hồ đeo tay*.

Tóm lại, ta có thể nói rằng mình *đang sống* trong không-thời gian. Không-thời gian hiện hữu độc lập với mọi vật; nó là bình chứa, là phông nền cho mọi sự kiện xảy ra. Và cho dù hệ toạ độ có thay đổi từ quan sát viên này đến quan sát viên khác, thực thể nền tảng, không-thời gian, vẫn không đổi và *duy nhất*, cho dù không gian và thời gian xét riêng thì không. (Tất cả các điều này cũng áp dụng được khi có mặt lực hấp dẫn, trong Thuyết tương đối tổng quát.)

Không-thời gian Minkowski khác với không-thời gian Galilei, tổ hợp của không-thời gian thông thường như thế nào? Cả hai không-thời gian này đều là những đa tạp, nghĩa là các tập điểm continuum. Cả hai đều có một chiều thời gian, ba chiều không gian và
Câu đố 42 s đều có topo là hình cầu có lỗ thủng. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Cả hai đa tạp đều phẳng, nghĩa là không có độ cong. Trong cả hai trường hợp, không gian được đo bằng một cây thước hay một tia sáng, còn thời gian được đọc từ một đồng hồ. Trong cả hai trường hợp, không-thời gian là cơ bản, duy nhất và tuyệt đối; nó là và vẫn còn là *phông nền* và *vật chứa* các sự vật và biến cố.

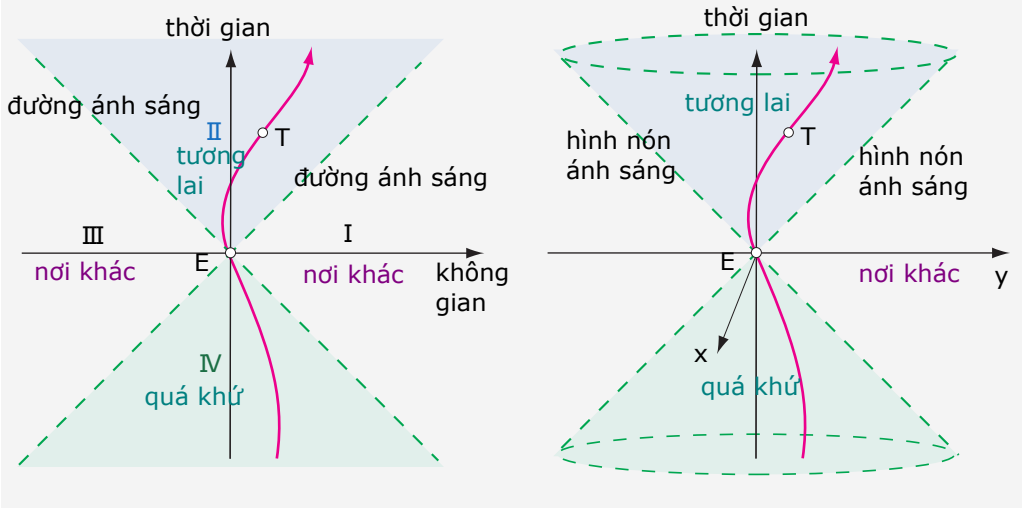
Sự khác nhau chính, thật ra chỉ có một, đó là không-thời gian Minkowski, tương phản với không-thời gian Galilei, *là sự hoà trộn* không gian và thời gian. Sự hoà trộn sẽ khác nhau đối với những quan sát viên có tốc độ khác nhau, như ta thấy trong Hình 23. Sự hoà trộn là lý do tại sao thời gian và không gian là khái niệm phụ thuộc quan sát viên, hay tương đối.

Về mặt toán học, thời gian là chiều thứ 4; nó mở rộng không gian thành không-thời gian. Việc gọi thời gian là *chiều thứ 4* chỉ là một lối nói về cách tính toán trong Thuyết tương đối – chúng ta sẽ làm như vậy dưới đây – chứ *không* có một ý nghĩa gì sâu sắc hơn.

Tốc độ cực đại trong thiên nhiên sẽ buộc chúng ta mô tả chuyển động bằng không-thời gian. Điều này thật thú vị, vì trong không-thời gian, nói một cách vắn tắt, *không*

* Hermann Minkowski (b. 1864 Aleksotas, d. 1909 Göttingen) chủ yếu là một nhà toán học. Ông đã phát triển, một cách độc lập, những ý tưởng tương tự những ý tưởng của Einstein, nhưng Einstein nhanh chân hơn. Minkowski lúc đó đã phát triển khái niệm không-thời gian. Không may, Minkowski đột ngột qua đời ở tuổi 44.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 24 Sơ đồ không-thời gian đối với vật chuyển động T được nhìn từ quan sát viên quán tính O trong không gian 1 hay 2 chiều; độ dốc của đường thế giới ở một điểm sẽ là tốc độ ở điểm đó, và như vậy không có trường hợp nào dốc hơn độ dốc của ánh sáng.

có chuyển động. Chuyển động chỉ hiện hữu trong không gian. Trong không-thời gian, không có gì chuyển động. Đối với mỗi hạt, không-thời gian chứa một *đường thế giới*. (Xem Hình 24.) Nói cách khác, thay vì hỏi *tại sao* có chuyển động, chúng ta có thể hỏi, một cách tương đương, tại sao không-thời gian lại chằng chịt các đường thế giới. Nhưng lúc này ta chưa thể trả lời cả hai câu hỏi trên. Điều chúng ta có thể làm bây giờ là tìm hiểu chuyển động xảy ra *như thế nào* .

Chúng ta có thể du hành vào quá khứ không? – Thời gian và tính nhân quả

Ta đã biết rằng thời gian khác nhau đối với các quan sát viên khác nhau. Tuy vậy các biến cố có xếp theo trình tự thời gian không? Thuyết tương đối cho câu trả lời rõ ràng là 'có và không'. Một số tập hợp các biến cố không sắp xếp theo thứ tự thời gian; các tập hợp biến cố khác thì lại có. Ta có thể thấy rõ điều này trong sơ đồ không-thời gian, như trong Hình 24.

Rõ ràng là hai biến cố nằm trong một chuỗi thời gian chỉ trong trường hợp một biến cố là (hay có thể là) *nguyên nhân* của biến cố kia. Nhưng mối liên hệ này chỉ có thể có khi biến cố đầu tiên có thể gởi năng lượng, thí dụ như thông qua một tín hiệu, đến biến cố thứ hai. Nói cách khác, chuỗi thời gian giữa hai biến cố có liên hệ hàm ý rằng tốc độ tín hiệu kết nối hai biến cố phải không lớn hơn tốc độ ánh sáng. Hình 24 cho thấy biến cố E ở gốc toạ độ chỉ có thể bị ảnh hưởng bởi các biến cố trong phần tư IV (*hình nón ánh sáng quá khứ*, bao gồm tất cả các chiều không gian) và nó chỉ có thể ảnh hưởng đến các biến cố trong phần tư II, *hình nón ánh sáng tương lai*. Những biến cố trong phần tư I và III không ảnh hưởng cũng không chịu ảnh hưởng của biến cố E: cần tín hiệu có tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng để đạt được điều đó. Như vậy toàn bộ hình nón ánh sáng xác định ranh giới giữa những biến cố *có thể* sắp thứ tự đối với biến cố E – nghĩa là bên trong hình nón – và những biến cố *không thể sắp thứ tự* – những biến cố ngoài hình

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

nón, xảy ra *ở một nơi khác* đối với mọi quan sát viên. (Có một số tác giả gọi bừa tất cả các biến cố xảy ra ở nơi khác là *hiện tại*.)

Hình nón ánh sáng quá khứ là tập hợp đầy đủ các biến cố có thể ảnh hưởng đến những gì xảy ra ở E, gốc toạ độ. Người ta nói rằng E *có liên hệ nhân quả* với những biến cố trong hình nón ánh sáng quá khứ. Cũng nên lưu ý mối liên hệ nhân quả là một khái niệm bất biến: tất cả các quan sát viên đều đồng ý với nhau rằng hai biến cố đã cho có liên hệ nhân quả với nhau hay không. Bạn có thể khẳng định điều này không?

Câu đố 43 s

Nói vắn tắt, thứ tự theo thời gian của các biến cố chỉ có tính *cục bộ*. Đặc biệt, đối với hai biến cố không có liên hệ nhân quả, thứ tự theo thời gian của chúng (hay tính đồng thời của chúng) phụ thuộc vào quan sát viên!

Câu đố 44 e

Một vector trong hình nón ánh sáng được gọi là vector *loại thời gian*; vector nằm trên hình nón ánh sáng được gọi là vector *loại ánh sáng* hay vector *null*; và vector nằm ngoài hình nón ánh sáng được gọi là vector *loại không gian*. Thí dụ, *đường thế giới* của một quan sát viên, nghĩa là tập hợp các biến cố tạo thành lịch sử quá khứ và tương lai của họ, chỉ gồm các biến cố loại thời gian.

Thuyết tương đối đặc biệt cho chúng ta thấy có thể xác định được tính nhân quả và thời gian *chỉ* vì có hình nón ánh sáng. Nếu việc truyền tải năng lượng có tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng, ta không thể xác định được thời gian. Tính nhân quả là khả năng sắp thứ tự (cục bộ) các biến cố đối với mọi quan sát viên nhờ sự hiện hữu của tốc độ cực đại.

Nếu có thể vượt qua tốc độ ánh sáng, chúng ta luôn luôn trúng số. Bạn có thể hiểu tại sao không? Nói cách khác, nếu có cách nào đó vượt qua tốc độ ánh sáng, tương lai có thể ảnh hưởng đến quá khứ. Bạn chứng minh được điều này không? Trong tình huống như vậy, người ta sẽ thấy các hiệu ứng *phi nhân quả*. Tuy vậy, có một hiện tượng xảy ra hằng ngày cho thấy tốc độ ánh sáng đúng là lớn nhất: ký ức của chúng ta. Nếu tương lai có thể ảnh hưởng đến quá khứ, chúng ta có thể *nhớ* tương lai. Diễn tả theo cách khác, nếu tương lai có thể ảnh hưởng đến quá khứ, nguyên lý II của nhiệt động lực học sẽ không có giá trị.* Không có dữ kiện nào trong cuộc sống hằng ngày hay từ các thí nghiệm cho ta bằng chứng là tương lai có thể ảnh hưởng đến quá khứ. Nói cách khác,

Câu đố 45 e

Câu đố 46 s

▷ Không thể du hành theo thời gian ngược về quá khứ.

Trong thuyết lượng tử tình trạng này sẽ thay đổi. Điều thú vị là việc du hành theo thời gian tới tương lai *có thể xảy ra* như ta sẽ thấy sau này.

Những điều kỳ lạ từ Thuyết tương đối đặc biệt

Thuyết tương đối đặc biệt chứa đầy những hiệu ứng kỳ lạ. Chúng ta hãy bắt đầu với một bài tập rèn luyện tư duy. Một quan sát viên trên một hòn đảo, thấy đồng thời hai tia sét: một tia đánh xuống đảo, một tia cách đó nhiều km, ở ngoài biển. Quan sát viên thứ hai là một phi công trong một phi cơ tương đối tính ở ngay trên hòn đảo khi tia sét đánh

* Kết quả có liên quan khác đang dần trở thành kiến thức thông thường. Cho dù không-thời gian có hình dạng khác thường, với một topo hình trụ với các đường cong loại thời gian đóng như vậy, người ta vẫn không thể du hành vào quá khứ, tương phản với những điều trong tiểu thuyết khoa học giả tưởng mô tả. Tính bất khả thi của kiểu du hành trong thời gian này đã được Steven Blau nói rõ trong bài báo giáo dục gần đây.

Xem 53

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 47 e xuống đảo. Đối với phi công thì tia sét nào xảy ra trước?

Đối với phi công, tia sét xa đánh xuống biển xảy ra trước. Nhưng đây là một câu hỏi mẹo: mặc dù xảy ra trước, phi công thấy tia sét xa xảy ra *sau* tia trên đảo, vì ánh sáng của tia sét xa cần thời gian để đến với anh ta. Tuy vậy, phi công có thể bổ chính thời gian
Câu đố 48 e truyền và suy ra tia sét xa xảy ra trước.

Khi bạn vẫy tay trước gương, ảnh của bạn cũng vẫy tay với cùng tần số. Điều gì sẽ xảy
Câu đố 49 e ra nếu gương chạy ra xa với tốc độ tương đối tính?

Trong phần Thuyết lượng tử ta sẽ khám phá ra là màu vàng của kim loại vàng là một hiệu ứng tương đối tính; trạng thái lỏng của thuỷ ngân ở nhiệt độ phòng cũng là một
Quyển IV, trang 197 hệ quả của Thuyết tương đối. Cả hai hiệu ứng đều do tốc độ cao của các electron ở tầng ngoài cùng của nguyên tử.

Chúng ta hãy tìm hiểu thêm vài hệ quả của Thuyết tương đối đặc biệt.

Nhanh hơn ánh sáng: chúng ta có thể du hành bao xa?

Chúng ta có thể du hành ra khỏi Trái đất bao xa, biết rằng cuộc du hành không thể dài hơn một đời người, cho là 80 năm và ta được phép dùng hoả tiễn có tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng? Gọi t là thời gian ta sống trong hoả tiễn, tốc độ hoả tiễn là v, giả sử một cách tối ưu là thời gian tăng và giảm tốc có thể bỏ qua, khoảng cách d mà chúng ta đi
Câu đố 50 e được tính theo công thức

$$d = \frac{vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,. \tag{17}$$

Khoảng cách d lớn hơn ct vì $v > 0.72c$, và, nếu v được chọn đủ lớn, nó tăng vô hạn! Nói cách khác, tốc độ ánh sáng *không còn* giới hạn khoảng cách ta đi được trong một đời hay trong một khoảng thời gian bất kỳ. Về nguyên tắc chúng ta có thể lang thang trong cả vũ
Trang 53 trụ với thời gian ít hơn một giây. (Vấn đề nhiên liệu sẽ được bàn dưới đây.)

Đối với những cuộc du hành bằng hoả tiễn, sẽ là điều hợp lý nếu ta đưa ra thêm khái niệm *vận tốc riêng* w, được định nghĩa như sau

$$w = \frac{d}{t} = \frac{v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma\, v \,. \tag{18}$$

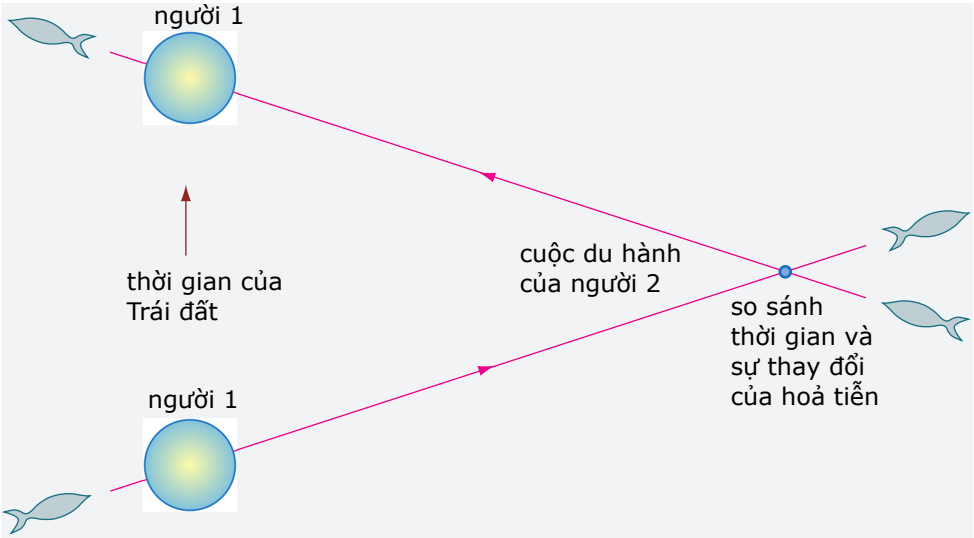
Như ta đã thấy, vận tốc riêng *không bị* giới hạn bởi tốc độ ánh sáng; thật ra vận tốc riêng của ánh sáng là vô hạn.*

* Dùng vận tốc riêng và mối liên hệ trong phương trình (9) để tổng hợp hai vận tốc $\mathbf{w}_a = \gamma_a \mathbf{v}_a$ and $\mathbf{w}_b = \gamma_b \mathbf{v}_b$
Câu đố 51 e thành

$$w_{s\parallel} = \gamma_a \gamma_b (v_a + v_{b\parallel}) \quad \text{and} \quad w_{s\perp} = w_{b\perp} \,, \tag{19}$$

Nơi dấu $\parallel$ và $\perp$ tương ứng là ký hiệu cho thành phần song song và thành phần vuông góc của $\mathbf{v}_a$. Thật ra
Xem 54 người ta có thể biểu diễn toàn bộ Thuyết tương đối theo các đại lượng 'riêng'.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 25 Nghịch lý hai người sinh đôi.

Sự đồng bộ hoá và du hành trong thời gian – một người mẹ có thể trẻ hơn con gái của mình không?

Tốc độ cực đại trong thiên nhiên hàm ý rằng thời gian sẽ khác nhau đối với các quan sát viên chuyển động tương đối đối với nhau. Vì vậy chúng ta phải cẩn thận về việc đồng bộ hoá các đồng hồ ở xa nhau, cho dù chúng đứng yên đối với nhau trong một hệ quy chiếu quán tính. Thí dụ, nếu ta có hai đồng hồ giống nhau chỉ cùng giờ, và nếu ta mang một đồng hồ đi dạo một vòng rồi quay lại, chúng sẽ chỉ giờ khác nhau. Thí nghiệm này thực ra đã được thực hiện nhiều lần và đã khẳng định hoàn toàn các tiên đoán của Thuyết tương đối đặc biệt. Độ chênh lệch thời gian đối với một người hay một đồng hồ ở trong một phi cơ bay một vòng quanh Trái đất, với tốc độ 900 km/h, vào khoảng 100 ns – không thể nhận ra trong đời sống hằng ngày. Việc này đôi khi được gọi là *nghịch lý đồng hồ*. Thật ra có thể dễ dàng tính được độ trễ nhờ biểu thức

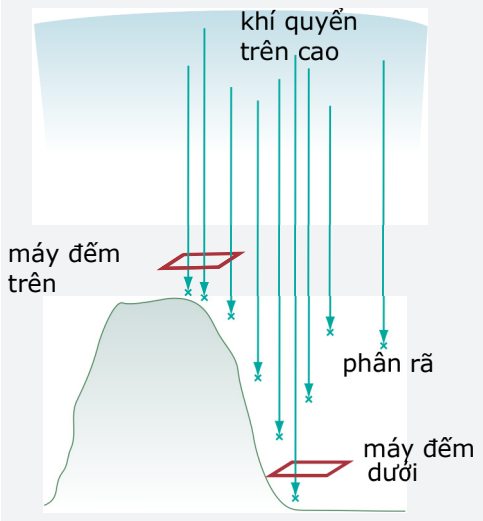
Xem 55, Xem 56

$$\frac{t}{t'} = \gamma \,. \tag{20}$$

Cơ thể con người cũng là một đồng hồ; chúng chỉ thời gian đã trôi qua, thường được gọi là *tuổi*, thể hiện qua các thay đổi khác nhau về hình dáng, trọng lượng, màu tóc, v.v.. Nếu một người tham gia một chuyến du hành dài và nhanh, khi trở về sẽ *ít tuổi hơn* và như vậy sẽ trẻ hơn một người ở nhà (hệ quy chiếu quán tính). Tóm lại, tính bất biến của c sẽ kéo theo việc: *Người đi du lịch sẽ trẻ hơn.*

Minh hoạ cực đoan nhất của điều này là *nghịch lý hai người sinh đôi* nổi tiếng. Một người ưa mạo hiểm nhảy lên một hoả tiễn tương đối tính rời Trái đất và du hành trong nhiều năm. Từ xa xôi, anh ta lại nhảy lên một hoả tiễn tương đối tính khác để trở về Trái đất. Chuyến du hành được minh hoạ trong Hình 25. Khi về đến nơi, anh ta nhận thấy rằng anh em song sinh của mình trên Trái đất già hơn anh ta rất nhiều. Kết quả này cũng đã được kiểm chứng từ nhiều thí nghiệm – mặc dù không phải với hai người sinh

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 26 Có nhiều muon hơn ta mong đợi đến được mặt đất vì việc du hành nhanh giữ cho chúng trẻ ra.

Xem 57
Câu đố 52 s

đôi thật. Bạn có thể giải thích kết quả, đặc biệt là tính bất đối xứng giữa hai người sinh đôi không?

Thuyết tương đối đặc biệt khẳng định, một cách khác thường, sự kiện nổi tiếng là người du hành sẽ còn rất trẻ. Mặt khác, người du hành trải qua hiệu ứng trẻ lâu nhất cho tới nay là phi hành gia Sergei Krikalyov, người đã trải qua 803 ngày trên quỹ đạo, nhưng tuổi chỉ nhỏ hơn tuổi của người ở trên Trái đất vài ms.

Nghịch lý sinh đôi cũng là sự khẳng định cho khả năng du hành vào tương lai. Với sự trợ giúp của hoả tiễn nhanh để có thể trở lại điểm xuất phát, chúng ta có thể tới một thời điểm mà chúng ta không bao giờ tới được trong cuộc đời của mình nếu chúng ta ở nhà. Nhưng than ôi, chúng ta *không bao giờ* có thể trở lại quá khứ để có dịp kể về nó.*

Một trong những thí nghiệm đơn giản nhất khẳng định việc kéo dài tuổi trẻ của du khách *bay thật nhanh* liên quan đến việc đếm số muon. Muon là các hạt được liên tục hình thành trên thượng tầng khí quyển do bức xạ vũ trụ rồi bay đến mặt đất. Muon *đứng yên* (đối với đồng hồ đo) có chu kỳ bán rã hữu hạn là 2.2 µs (hay, ở tốc độ ánh sáng, 660 m). Sau thời gian này, phân nửa số muon phân rã. Chu kỳ bán rã có thể đo được bằng cách dùng máy đếm muon đơn giản. Thêm nữa, có một số máy đếm đặc biệt chỉ đếm muon chuyển động với tốc độ nằm trong giới hạn nào đó, thí dụ từ $0.9950c$ đến $0.9954c$. Người ta có thể đặt một trong những máy đếm này trên đỉnh núi và một máy khác dưới thung lũng, như trong Hình 26. Trong lần đầu tiên thực hiện thí nghiệm này, hiệu hai độ cao là 1.9 km. Muon bay 1.9 km xuyên qua khí quyển ở tốc độ đã đề cập mất khoảng 6.4 µs. Với chu kỳ bán rã đã biết, bằng một phép tính đơn giản người ta tìm thấy chỉ có khoảng 13 % muon có mặt ở đỉnh núi xuống đến thung lũng. Tuy vậy, người ta lại thấy có khoảng 82 % muon tới nơi. Nguyên do đưa tới kết quả này là sự giãn dài thời gian tương đối tính. Thật vậy, ở vận tốc đã đề cập, thời gian riêng của muon chỉ

Quyển V, trang 162
Xem 59
Câu đố 53 s

Xem 58

* Có nhiều sách đặc biệt nói về du hành trong thời gian, như sách nghiên cứu nghiêm túc của Nahin. Cũng nên nhớ rằng khái niệm du hành trong thời gian phải được xác định rõ ràng; nếu không người ta sẽ không có câu trả lời với nhân viên người gọi cái ghế trong văn phòng của anh ta là một cỗ máy thời gian, vì khi ngồi lên ghế anh ta có thể đi tới tương lai.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

có 0.62 μs trong khi đi từ đỉnh núi xuống thung lũng. Thời gian này ngắn hơn thời gian quan sát của người quan sát rất nhiều. Việc thời gian của muon bị rút ngắn sẽ làm cho số muon bị mất giảm đi rất nhiều so với trường hợp thời gian không giãn; hơn nữa, tỷ lệ phần trăm đo được đã khẳng định giá trị của hệ số giãn dài thời gian theo tiên đoán γ nằm trong phạm vi sai số của thí nghiệm, và bạn có thể kiểm tra lại. Người ta cũng quan sát được hiệu ứng tương tự khi muon tương đối tính chuyển động trong máy gia tốc vòng lưu trữ với vận tốc lớn. Muon chạy càng nhanh thì sống càng lâu.

Câu đố 54 s
Xem 60

Sự giãn dài chu kỳ bán rã cũng được tìm thấy trong nhiều hệ thống hạt phân rã khác, như pion, nguyên tử hydrogen, nguyên tử neon và các hạt nhân khác, luôn khẳng định những tiên đoán của Thuyết tương đối đặc biệt. Hiệu ứng này thường xảy ra đến nỗi đối với các chuyển động nhanh người ta nói về *thời gian sống biểu kiến* τ_{app} cho bởi hệ thức $\tau_{app} = \gamma\tau$. Vì tất cả vật thể trong thiên nhiên đều được cấu tạo từ các hạt, 'hiệu ứng trễ' do tốc độ lớn – thường được gọi là *sự giãn thời gian* – áp dụng cho vật thể ở mọi kích thước; thật vậy, người ta đã thấy hiệu ứng xảy ra không những cho các hạt mà còn cho lasers, máy phát vô tuyến và đồng hồ.

Xem 18

Nếu chuyển động dẫn tới sự giãn thời gian, một đồng hồ ở xích đạo, đi đều quanh Trái đất, sẽ chạy chậm hơn đồng hồ ở hai địa cực. Tuy vậy, tiên đoán này, của chính Einstein, không đúng. gia tốc ly tâm làm giảm gia tốc trọng lực, tạo ra sự bù trừ cho phần giãn thời gian do vận tốc quay. Câu chuyện này nhắc ta cẩn thận khi áp dụng Thuyết tương đối đặc biệt vào các trường hợp có liên quan đến trọng lực: Thuyết tương đối đặc biệt chỉ có thể áp dụng khi không-thời gian phẳng, nghĩa là, khi lực hấp dẫn *vắng mặt*.

Xem 61

Tóm lại, một người mẹ *có thể* trẻ hơn con gái của mình. Tuy nhiên, việc thực hiện ước muốn trẻ hơn con là điều không dễ dàng. Chúng ta hãy tưởng tượng rằng người mẹ được tăng tốc khi ở trong phi thuyền bay khỏi Trái đất với gia tốc10 $\mathrm{m/s^2}$ trong 10 năm, rồi giảm tốc với gia tốc 10 $\mathrm{m/s^2}$ trong 10 năm khác, sau đó lại tăng tốc về Trái đất và giảm tốc để an toàn đáp xuống Trái đất. Người mẹ đã trải qua cuộc hành trình 40 năm. Bà đã đi xa cách Trái đất 22 000 năm ánh sáng. Khi trở về Trái đất, 44 000 năm đã trôi qua. Mọi việc có vẻ tốt đẹp, cho đến khi chúng ta nhận ra là lượng nhiên liệu cần thiết, ngay cả đối với một động cơ có hiệu suất cao nhất, lớn đến nỗi phi thuyền lúc trở về chỉ còn là một phần của $2 \cdot 10^{19}$ khối lượng lúc ra đi. Lượng nhiên liệu cần thiết không kiếm đâu ra. Vấn đề tương tự cũng xuất hiện trong những cuộc hành trình ngắn hơn.

Câu đố 55 e
Xem 62

Chúng ta cũng thấy rằng không thể đồng bộ hoá các đồng hồ đứng yên đối với nhau, chỉ đơn giản bằng cách đi bộ với đồng hồ trong tay từ nơi này sang nơi khác. Phương pháp đúng là trao đổi tín hiệu ánh sáng. Bạn có thể mô tả cách làm không? Cần có một định nghĩa Sự đồng bộ hoá một cách chính xác, vì thường thường, ta cần tham chiếu hai biến cố ở xa nhau *một cách đồng thời*, thí dụ như khi ta cần xác định toạ độ. Hiển nhiên là, tốc độ cực đại hàm ý rằng sự đồng thời phụ thuộc quan sát viên. Thật vậy, mọi thí nghiệm đều khẳng định điều này.

Câu đố 56 s

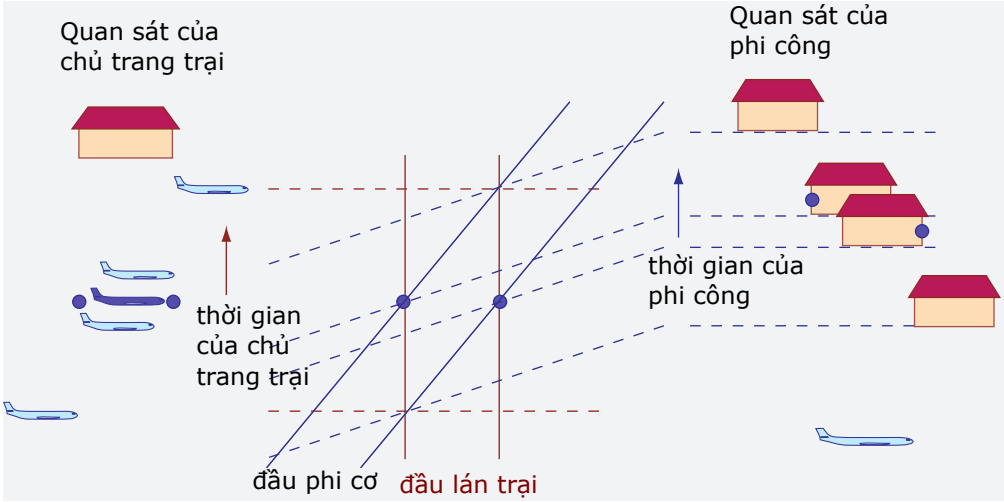
Sự co chiều dài

Chiều dài của một vật được đo bởi một quan sát viên gắn liền với vật đó được gọi là *chiều dài riêng*. Chiều dài do một quan sát viên quán tính, đi ngang qua vật, đo được luôn luôn *nhỏ hơn* chiều dài riêng. Kết quả này được suy ra trực tiếp từ phép biến đổi Lorentz.

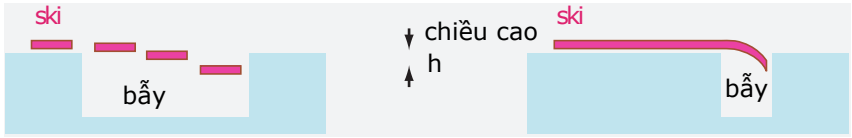
Câu đố 57 e

Đối với một chiếc Ferrari chạy với tốc độ 300 km/h hay 83 m/s, chiều dài co lại

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 27 Các quan sát của phi công và chủ trang trại.



HÌNH 28 Quan sát của người đào bẫy (bên trái) và người trượt tuyết (bên phải), in trong sách vở (dễ gây hiểu lầm).

khoảng 0.15 pm: nhỏ hơn đường kính proton. Trái đất nhìn từ Mặt trời, di chuyển với tốc độ 30 km/s; sẽ co lại khoảng 6 cm. Người ta chưa đo được các hiệu ứng này.* Nhưng hiệu ứng lớn hơn thì có thể đo được. Chúng ta hãy xét qua các khả năng.

Hãy tưởng tượng một phi công cho phi cơ bay xuyên qua một chuồng ngựa có hai cửa, ở hai đầu. Phi cơ dài hơn chuồng một chút, nhưng di chuyển nhanh đến nỗi chiều dài bị co tương đối tính nên ngắn hơn chiều dài của chuồng. Người nông dân có thể đóng cửa chuồng (trong một thời gian rất ngắn) để phi cơ nằm hoàn toàn trong chuồng không? Câu trả lời là có. Nhưng tại sao phi công không thể nói rằng: đối với anh ta, chuồng co lại do đó phi cơ không vừa trong chuồng? Câu trả lời được trình bày trong Hình 27. Đối với người nông dân, cửa đóng (và mở lại) đồng thời. Đối với phi công thì không. Đối với người nông dân, phi công ở trong bóng tối một thời gian ngắn; đối với phi công, chuồng không bao giờ tối. (Điều đó không đúng lắm: bạn có thể nói rõ hơn không?) Vì nhiều lý do hiển nhiên, thí nghiệm này không bao giờ trở thành hiện thực.

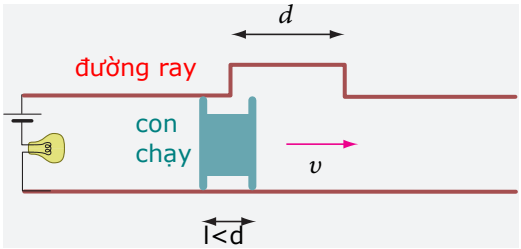
Câu đố 59 s

Chúng ta hãy xem một số thí nghiệm về sự co chiều dài khác. Một người trượt tuyết nhanh có thể rơi vào một lỗ hơi ngắn hơn ván trượt của anh ta không? Hãy tưởng tượng anh ta trượt nhanh (không thực tế) đến nỗi hệ số co chiều dài γ là 4. Đối với một quan sát viên trên mặt đất, ván trượt ngắn đi 4 lần, và khi nó đi ngang qua lỗ, nó sẽ rơi xuống. Tuy vậy, đối với người trượt tuyết, lỗ hẹp lại 4 lần; hình như ván trượt không thể rơi xuống được.

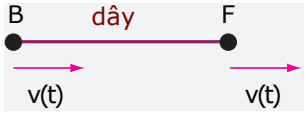
Câu đố 58 s

* Độ co của Trái đất có thể đo được không?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 29 Con chạy dẫn điện có giữ cho đèn sáng khi chuyển động với tốc độ lớn hay không?



HÌNH 30 Điều gì sẽ xảy ra đối với sợi dây?

Xem 63 Phân tích cẩn thận ta thấy, trái với sự quan sát của người đào lỗ, người trượt tuyết sẽ không nhận thấy sự thay đổi hình dáng của ván trượt như đã nói: khi đi ngang qua lỗ, người đó sẽ thấy ván trượt đi theo một đường parabol và rơi xuống lỗ như trong Câu đố 60 e Hình 28. Bạn chứng minh điều này được không? Nói cách khác, hình dáng không phải là một khái niệm bất biến đối với quan sát viên. (Tuy thế, độ cứng *thì* bất biến đối với Câu đố 61 s quan sát viên, nếu được định nghĩa đúng; Bạn chứng minh được chứ?)

Xem 64 Tuy vậy hình vẽ và lời giải thích của trò chơi trượt ván, mặc dù đã được công bố, thì *không* đúng, như Harald van Lintel và Christian Gruber đã chỉ ra. Chúng ta không nên quên ước lượng độ lớn của hiệu ứng. Ở tốc độ tương đối tính thời gian cần thiết để cho lỗ có ảnh hưởng đến cả chiều dầy của ván trượt không thể bỏ qua. Người trượt tuyết chỉ có thể thấy ván trượt đi theo đường parabol nếu nó rất mỏng và đàn hồi. Đối với các tấm ván thông thường di chuyển với tốc độ tương đối tính, không có thời gian để ván Câu đố 62 e rơi xuống h hay hướng vào trong lỗ trước khi vượt qua nó. Hình 28 được phóng đại nên không chính xác. Người trượt tuyết sẽ dễ dàng bay qua lỗ.

Xem 65 Thực vậy, ta có thể đơn giản hoá sự bàn luận về những thí dụ co chiều dài như vậy bằng cách tìm hiểu điều gì sẽ xảy ra khi một cây gậy chuyển động trên một đường dốc hướng về một đường rãnh, trong trường hợp không có trọng lực. Tìm hiểu cẩn thận ta sẽ thấy rằng nếu rãnh và gậy song song đối với quan sát viên gắn với gậy, chúng sẽ *không còn* song song đối với quan sát viên gắn với rãnh, và ngược lại. Khái niệm *song song* có tính tương đối!

Xem 66 Nghịch lý quanh việc co chiều dài sẽ trở nên thú vị hơn trong trường hợp con chạy dẫn điện tạo ra sự tiếp xúc điện giữa hai đường ray, như trong Hình 29. Hai đường ray song song, nhưng một ray có một khoảng hở dài hơn con chạy. Bạn có thể cho biết đèn có còn sáng không khi con chạy chuyển động dọc theo hai đường ray với tốc độ tương Câu đố 63 s đối tính? (Để đơn giản hoá hãy giả sử là dòng điện vẫn còn miễn là con chạy còn chạm đường ray.) Bạn có kiếm được cùng kết quả với mọi quan sát viên hay không? Và điều gì xảy ra nếu con chạy dài hơn khoảng trống? Hay khi con chạy đến gần đèn? Cảnh báo: vấn đề này sẽ gây ra những cuộc tranh luận *nóng bỏng*! Điều phi thực tế trong vấn đề này là gì?

Xem 67 Một thí dụ khác về sự co chiều dài là hai xe nối với nhau bằng một sợi dây thẳng cách nhau một khoảng d, như trong Hình 30. Hãy tưởng tượng hai bên ban đầu đứng yên lúc $t = 0$ và cùng được tăng tốc theo cùng một cách. Quan sát viên đứng yên cho rằng hai xe luôn cách nhau một khoảng không đổi. Mặt khác, vì dây nối một khoảng $d' = d/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, và như vậy phải giãn ra khi hai xe tăng tốc. Nói cách khác, dây sẽ đứt. Ai đúng? Bạn có thể tự kiểm tra rằng quan sát viên trong xe và trên mặt đất đều

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 31 Bay xuyên qua ba cây cột thẳng đứng với tốc độ 0.9 lần tốc độ ánh sáng theo sự hình dung của Daniel Weiskopf: hình bên trái là màu nguyên thuỷ ; hình giữa bao gồm hiệu ứng Doppler và hình bên phải bao gồm hiệu ứng độ sáng, hiển thị những gì mà một quan sát viên thực sự nhìn thấy (© Daniel Weiskopf).

Câu đố 64 s

khẳng định điều tiên đoán này.

Một thí dụ về sự co chiều dài vui – nhưng lại phi thực tế – về tàu ngầm chuyển động ngang. Hãy tưởng tượng trước khi chuyển động, tàu ngầm đứng yên và được điều chỉnh trọng lượng để cân bằng trên mặt nước. Bây giờ tàu ngầm chuyển động theo phương ngang. Thuyền trưởng thấy nước bên ngoài bị co Lorentz; như vậy mật độ nước tăng và ông ta cho rằng tàu ngầm nổi lên. Một con cá gần đó thấy tàu ngầm co lại, nên mật độ tàu tăng lên, và kết luận tàu chìm xuống. Ai sai, và lực đẩy của nước đúng là bao nhiêu?

Xem 68

Câu đố 65 s

Thay vào đó, hãy trả lời câu hỏi sau: tại sao tàu ngầm không thể chuyển động với tốc độ tương đối tính?

Câu đố 66 s

Tóm lại, đối với các vật vĩ mô, sự co chiều dài tuy thú vị nhưng không bao giờ ta thấy được. Tuy nhiên, sự co chiều dài lại đóng một vai trò quan trọng đối với *hình ảnh*.

Film tương đối tính – quang sai và hiệu ứng Doppler

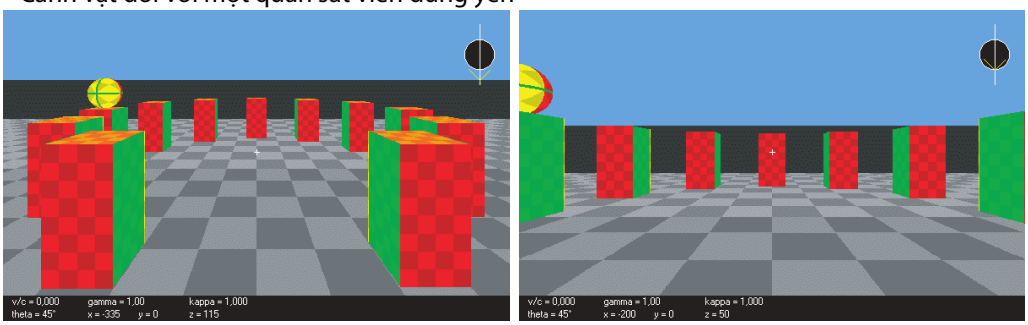
Cho tới lúc này, ta đã gặp nhiều kiểu thay đổi cảnh quan khi chuyển động với tốc độ tương đối tính. Bây giờ ta hãy sắp xếp lại các sự kiện đã có. Trước hết, phép co Lorentz và quang sai dẫn tới việc hình ảnh *bị biến dạng*. Thứ hai, quang sai làm tăng góc nhìn hơn 180 độ mà ta đã quen trong đời sống hằng ngày. Ở tốc độ tương đối tính, khi nhìn theo hướng chuyển động, ta thấy quan sát viên đứng yên không nhìn thấy ánh sáng, vì đối với người đó, ánh sáng đến từ phía sau. Thứ ba, hiệu ứng Doppler làm *sai màu* của hình ảnh. Thứ tư, chuyển động nhanh của chúng ta làm thay đổi *độ sáng* và *độ tương phản* của hình ảnh: đó là *hiệu ứng đèn pha rọi*. Các thay đổi này phụ thuộc hướng nhìn, được trình bày trong Hình 31.

Máy tính hiện đại giúp chúng ta: mô phỏng hình ảnh với chất lượng cao, mà những quan sát viên chuyển động nhanh nhìn thấy, sản xuất những phim mô phỏng và những trò chơi điện tử.* Những hình ảnh trong Hình 32 đặc biệt hữu ích vì cho phép ta hiểu

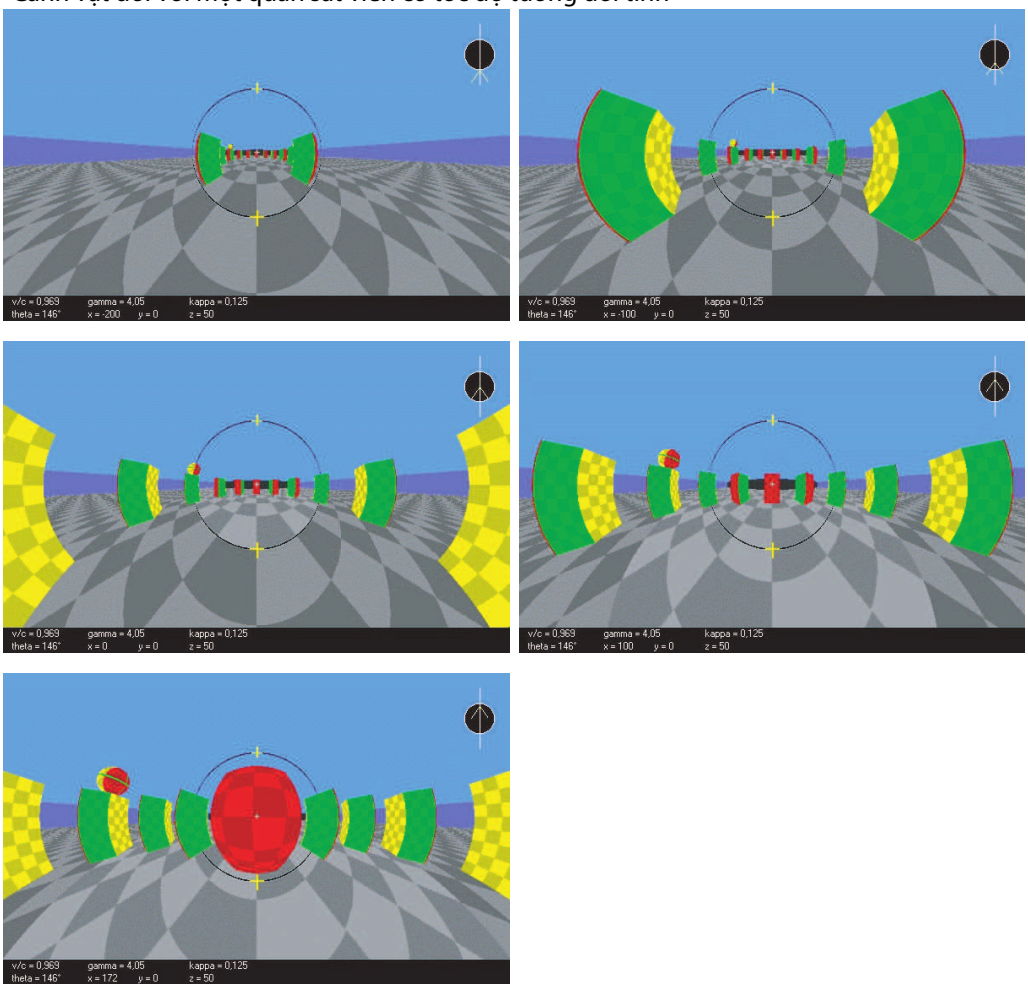
* Hãy xem những hình ảnh và phim tuyệt vời tại trang www.anu.edu.au/Physics/Searle của Anthony Searle và www.anu.edu.au/Physics/vrproject của Craig Savage và cộng sự; bạn cũng có thể xem các mô phỏng chuyển động tương tác do các phần mềm miễn phí tạo ra, tải từ trang realtimerelativity.org. Cũng có nhiều tư liệu đẹp đẽ tại trang www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~weiskopf/gallery/index.html của Daniel Weiskopf, tại trang www.itp.uni-hannover.de/~dragon/stonehenge/stone1.htm của Norbert Dragon và Nicolai Mokros, hay tại trang www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de của Ute Kraus, trước kia thuộc nhóm Hanns Ruder.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Cảnh vật đối với một quan sát viên đứng yên



Cảnh vật đối với một quan sát viên có tốc độ tương đối tính



HÌNH 32 Bay xuyên qua 12 cột thẳng đứng (như đã thấy trong hai hình trên cùng) với tốc độ 0.9 lần tốc độ ánh sáng theo sự hình dung của Nicolai Mokros và Norbert Dragon, cho thấy tác dụng của tốc độ và vị trí lên sự biến dạng (© Nicolai Mokros).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

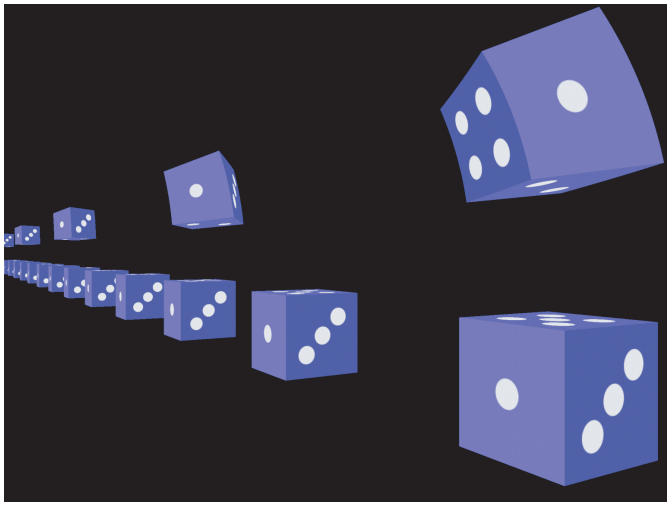
HÌNH 33 Cảnh vật mà một nhà nghiên cứu đứng yên và một người khác đang chạy nhanh xuyên qua hành lang nhìn thấy (bỏ qua hiệu ứng màu và độ sáng) (© Daniel Weiskopf).

sự biến dạng của hình ảnh. Chúng hiển thị góc nhìn, vòng tròn phân biệt các vật phía trước và phía sau của quan sát viên, toạ độ của chân quan sát viên và điểm mà quan sát viên đang hướng tới trên đường chân trời. Nếu nhớ được những ghi chú này thì khi xem những hình hay phim khác bạn có thể hiểu rõ chúng hơn.

Lưu ý là hình ảnh mà quan sát viên chuyển động nhìn thấy là một phiên bản *biến dạng* của hình ảnh mà quan sát viên đứng yên nhìn thấy ở cùng một điểm. Hình 33 hiển thị rõ ràng điều này. Nhưng một quan sát viên chuyển động *không bao giờ* thấy những vật khác những vật của quan sát viên đứng yên tại cùng một điểm. Thực vậy, hình nón ánh sáng độc lập với chuyển động của quan sát viên.

Nghiên cứu cẩn thận các hình ảnh sẽ cho ta thấy các hiệu ứng khác nhau. Mặc dù độ co Lorentz có thể đo được, nhưng chụp ảnh thì *không thể*. Điều làm cho ta ngạc nhiên
Xem 69 này chỉ được khám phá vào năm 1959. Việc đo đạc bao hàm tính đồng thời ở vị trí của vật; trái lại, việc chụp ảnh bao hàm tính đồng thời tại vị trí của quan sát viên. Trên ảnh hay trên film, độ co Lorentz bị thay đổi bởi các hiệu ứng do sự khác nhau về thời gian di chuyển của ánh sáng phát ra từ những phần khác nhau của vật; kết quả là sự thay đổi về hình dáng hơi giống, nhưng không giống hệt, một sự quay tròn. Điều này được thể hiện trong Hình 34. Sự biến dạng toàn phần là kết quả của quang sai phụ thuộc góc. Chúng
Trang 19 ta đã bàn về quang sai của vị trí sao ở đầu chương này. Nhìn chung, quang sai biến đổi hình tròn thành hình tròn: những phép biến đổi như vậy được gọi là *phép biến đổi bảo giác*. Kết quả là, một hình cầu sẽ có ngoại vi là hình tròn cho dù nó chuyển động với tốc

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 34 Một hàng xúc xắc đứng yên (bên dưới), và hàng trên, có tốc độ tương đối tính hướng về phía quan sát viên, có bỏ qua hiệu ứng Doppler và độ sáng. (Mpg film © Ute Kraus at www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de).

độ tương đối tính – mặc dù độ dầy của nó có thay đổi.

Quang sai dẫn đến *nghịch lý chuỗi hạt trai*. Nếu chuyển động tương đối tính giữ nguyên dạng hình cầu, nhưng biến đổi đoạn thẳng thành đoạn thẳng ngắn hơn, điều gì sẽ xảy ra cho một chuỗi hạt trai chuyển động dọc theo trục lớn của nó? Nó có ngắn đi hay không?

Câu đố 67 s

Một câu đố khó hơn: hãy tưởng tượng một hình cầu chuyển động và quay với tốc độ cao. Tất cả các hiệu ứng đã đề cập ở trên có dẫn tới một cảm giác về chuyển động quay biểu kiến, phụ thuộc người quan sát hay không?

Câu đố 68 r

CHỖ NGỒI TỐT NHẤT TRÊN XE BUS LÀ CHỖ NÀO?

Xem 67

Chúng ta hãy khám phá một điều kỳ lạ khác của Thuyết tương đối đặc biệt. Hãy tưởng tượng hai người sinh đôi ở trong hai chiếc xe có gia tốc như nhau, chiếc này ở trước chiếc kia, khởi hành từ trạng thái đứng yên lúc $t = 0$, được mô tả bởi một quan sát viên đứng yên đối với cả hai người. (Ở đây không có sợi dây nối hai xe.) Hai xe chứa cùng lượng nhiên liệu. Ta dễ dàng suy ra là việc gia tốc hai xe sẽ ngừng khi nhiên liệu cạn, cùng lúc đối với quan sát viên bên ngoài. Hơn nữa, khoảng cách giữa hai xe luôn không đổi đối với quan sát viên bên ngoài, và hai xe tiếp tục lăn bánh với vận tốc không đổi v, miễn là ma sát không đáng kể. Nếu ta gọi biến cố lúc máy hai xe tắt là f và b, toạ độ thời gian của hai xe trong hệ quy chiếu đứng yên thoả hệ thức đơn giản $t_f = t_b$. Bằng cách dùng phép biến đổi Lorentz bạn có thể suy ra hệ thức đối với hệ quy chiếu chuyển động tự do của hai người song sinh

Câu đố 69 e

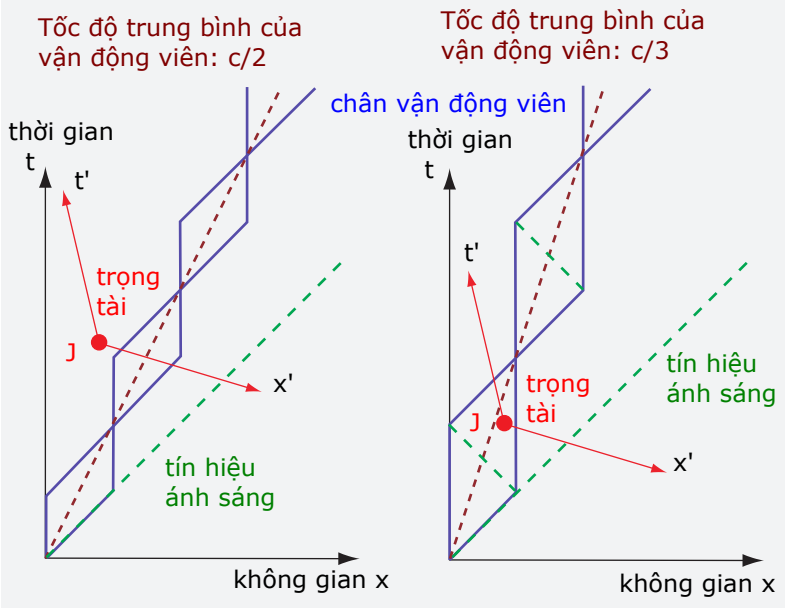
Câu đố 70 e

$$t'_b = \gamma \Delta x \, v/c^2 + t'_f \,, \tag{21}$$

Điều này có nghĩa là người ở xe trước *già hơn* người phía sau! Như vậy, trong hệ có gia tốc, tuổi tác phụ thuộc vị trí.

Tuy vậy kết quả này chẳng giúp ích gì cho việc chọn chỗ ngồi trên xe bus. Đúng là

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 35 Đối với vận động viên bên trái, trọng tài di chuyển theo hướng ngược lại sẽ thấy cả hai chân của người đó không chạm đất vào thời điểm nào đó, nhưng đối với vận động viên bên phải thì không thấy như vậy.

chỗ ngồi tốt nhất trên xe bus đang tăng tốc ở phía sau, nhưng trong xe bus giảm tốc thì lại là chỗ ngồi phía trước. Khi kết thúc cuộc hành trình, việc chọn chỗ không thành vấn đề.

Câu đố 71 s

Có đúng là do kết quả trên nên người ở trên núi cao thì già nhanh hơn người ở trong thung lũng và sống trong thung lũng giúp ta chậm bạc tóc hơn không?

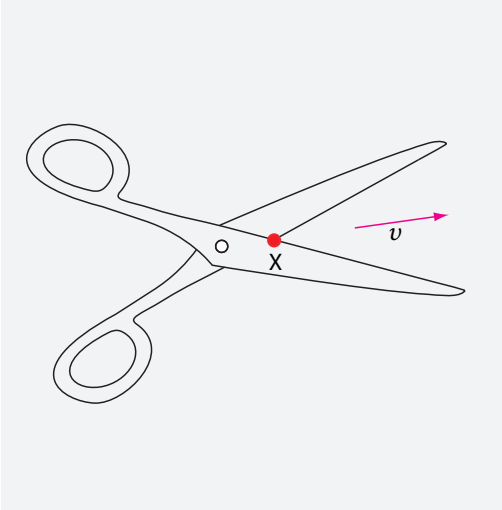
Người ta có thể đi bộ nhanh cỡ nào?

Trái với chạy, đi bộ có nghĩa là di chuyển chân sao cho lúc nào cũng có ít nhất một chân đặt trên mặt đất. Đây là một trong những luật thi đấu mà các vận động viên đi bộ phải tuân thủ trong các cuộc tranh tài ở Thế vận hội; nếu phạm luật họ sẽ bị loại. Một vận động viên học sinh đang suy nghĩ về tốc độ cực đại theo lý thuyết mà anh ta có thể đạt tới trong Thế vận hội. Lý tưởng nhất là mỗi chân được gia tốc ngay đến tốc độ (gần bằng) tốc độ ánh sáng. Anh ta sẽ đạt được tốc độ đi bộ cao nhất bằng cách nhấc chân thứ 2 khỏi mặt đất cùng lúc chân thứ 1 đặt xuống đất. Khi nói 'cùng lúc', ý học sinh muốn nói rằng 'như một trọng tài đứng yên đối với mặt đất nhìn thấy'. Chuyển động của chân được biểu diễn trong sơ đồ bên trái của Hình 35; cho tốc độ giới hạn của việc đi bộ là *phân nửa* tốc độ ánh sáng.

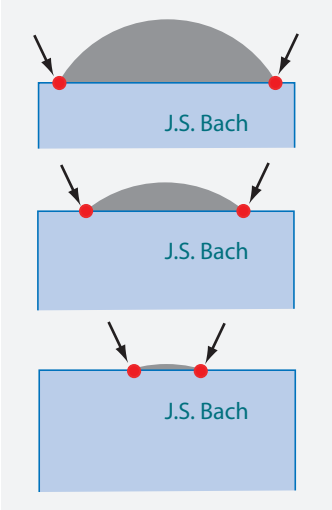
Xem 70

Nhưng rồi người học sinh nhận thấy rằng một trọng tài *chuyển động* sẽ đều đặn nhìn thấy cả hai chân của học sinh không chạm đất và loại anh ta vì đã chạy. Để tránh việc bị loại bởi *bất kỳ* trọng tài nào, chân sắp nhấc lên phải chờ tín hiệu ánh sáng từ chân hạ xuống. Tốc độ giới hạn cho môn đi bộ ở Thế vận hội hoá ra là chỉ bằng *1/3* tốc độ ánh sáng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 36 Một thí dụ đơn giản về chuyển động nhanh hơn ánh sáng.



HÌNH 37 Một thí dụ khác về chuyển động nhanh hơn ánh sáng.

TỐC ĐỘ CỦA CÁI BÓNG CÓ LỚN HƠN TỐC ĐỘ ÁNH SÁNG KHÔNG?

Thật ra, có chuyển động nhanh hơn tốc độ ánh sáng và ta rất thường gặp nó. Thiên nhiên chỉ ràng buộc chuyển động của khối lượng và năng lượng. Tuy vậy, những điểm phi vật chất, những quá trình không có sự truyền năng lượng và các hình ảnh *có thể* chuyển động nhanh hơn ánh sáng. Có nhiều thí dụ đơn giản. Để cho dễ hiểu, chúng ta không nói về vận tốc *riêng*, mà trong trường hợp này không cách nào xác định được nó. (Tại sao?) Những thí dụ sau đây cho thấy những tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng trong chân không.

Trang 50
Câu đố 72 s

Thí dụ đầu tiên, hãy xem điểm cắt giấy của cái kéo, được đánh dấu X trong Hình 36. Nếu kéo khép lại đủ nhanh, điểm cắt sẽ chuyển động nhanh hơn ánh sáng. Thí dụ tương tự có thể tìm thấy trong trong mỗi khung cửa sổ và thực ra là trong bất kỳ thiết bị nào có các phần xoắn vào nhau.

Một thí dụ khác về chuyển động siêu quang là một đĩa nhạc – một đĩa LP cổ – chui vào bao, như trong Hình 37. Giao điểm của đường viền của đĩa và đường viền của bao có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng.

Một thí dụ khác là chúng ta sống trên một hành tinh hình cầu. Hãy tưởng tượng bạn nằm trên sàn và đứng dậy. Bạn có thể chứng minh rằng tốc độ ban đầu của đường chân trời khi đi ra xa bạn có thể lớn hơn tốc độ ánh sáng không?

Câu đố 73 s

Một thí dụ tiêu chuẩn khác là chuyển động của một điểm sáng của chùm tia laser khi chiếu lên Mặt trăng. Nếu laser di chuyển, điểm sáng có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng. Tương tự là điểm sáng trên màn hình của dao động nghiệm khi tín hiệu vào có tần số đủ lớn. Đúng ra khi một chùm ánh sáng quét ngang một mặt phẳng nghiêng, điểm sáng có thể đi ngược lại, tách ra hay hợp lại. Các nhà nghiên cứu vẫn đang tìm những hiện tượng như vậy trong vũ trụ cũng như trong phòng thí nghiệm.

Sau cùng là thí dụ đơn giản nhất. Hãy tưởng tượng là chúng ta bật một đèn tròn trước một bức tường. Trong khi bật đèn, ranh giới giữa vùng được chiếu sáng và vùng tối di

Xem 71

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

chuyển với tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng. *Đèn tròn tạo ra tốc độ siêu quang.*

Tất cả các thí dụ điển hình này về *tốc độ của cái bóng*, có khi còn được gọi là *tốc độ của bóng tối*. Thực ra cả bóng lẫn bóng tối đều có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng. Thật vậy, không có giới hạn dành cho chúng. Bạn có thể tìm ra thí dụ khác không?

Câu đố 74 s

Ngoài ra, ngày càng có nhiều cách thiết lập các thí nghiệm trong đó vận tốc phase hay ngay cả vận tốc nhóm của ánh sáng lớn hơn c. Chúng thường xuất hiện trên báo chí, dưới các tiêu đề 'ánh sáng nhanh hơn ánh sáng'. Sau này ta sẽ bàn chi tiết hơn về các hiện tượng kỳ lạ này. Thật ra, những trường hợp này cũng có thể xem – với một chút tưởng tượng – như trường hợp đặc biệt của hiện tượng 'tốc độ của cái bóng'.

Quyển III, trang 131

Trong một thí dụ khác, hãy tưởng tượng rằng chúng ta đang đứng ở lối ra của một đường hầm thẳng chiều dài l. Ta thấy một cái xe, có tốc độ là v, vào đầu kia của hầm và tiến về phía chúng ta. Ta biết xe vào hầm vì nó không còn ở dưới ánh Mặt trời hay vì đèn xe bật sáng vào lúc đó. Xe đi ngang qua chúng ta sau khi ta thấy nó vào hầm vào thời điểm t bằng bao nhiêu? Lý luận đơn giản cho thấy t có thể tính theo phương trình

$$t = l/v - l/c \,. \tag{22}$$

Nói cách khác, hình như xe đang đến gần với vận tốc v_{appr} với

$$v_{\text{appr}} = \frac{l}{t} = \frac{vc}{c - v} \,, \tag{23}$$

lớn hơn c nếu vận tốc v lớn hơn $c/2$. Đối với xe thì điều này ít xảy ra, nhưng các nhà thiên văn biết một loại thiên thể sáng trên bầu trời gọi là *quasar* (cách viết gọn của 'quasi-stellar object'), có lúc phát ra những luồng khí tốc độ cao. Nếu luồng khí hướng về phía Trái đất, tốc độ biểu kiến của nó – dù chỉ có thành phần ngang – vẫn lớn hơn c. Người ta thường quan sát được điều này bằng kính thiên văn.

Xem 72

Cũng cần ghi chú thêm là đối với quan sát viên thứ 2 ở *lối vào* đường hầm, tốc độ biểu kiến của xe *chuyển động ra xa* được cho bởi phương trình

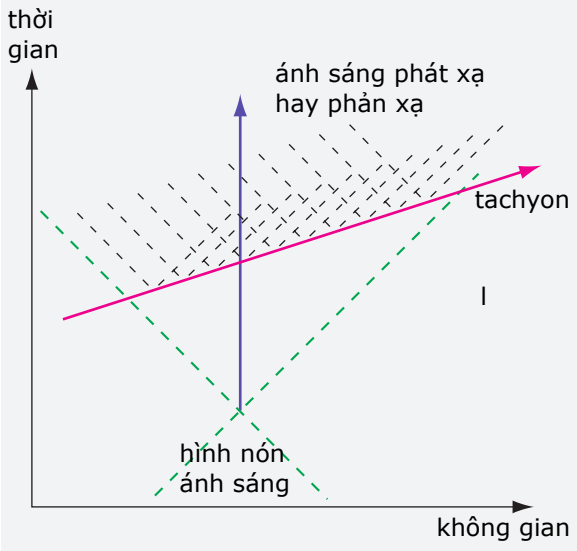
$$v_{\text{leav}} = \frac{vc}{c + v} \,, \tag{24}$$

không bao giờ lớn hơn $c/2$. Nói cách khác, vật không bao giờ rời xa với tốc độ lớn hơn nửa tốc độ ánh sáng.

Câu chuyện đến đoạn cuối. Ta đã thấy chuyển động nhanh hơn ánh sáng có thể quan sát được bằng nhiều cách. Nhưng có thể quan sát được *một vật* chuyển động nhanh hơn ánh sáng không? Đáng ngạc nhiên là, người ta có thể quan sát được bằng những cách hơi khác thường. Trước hết, vì những vật tưởng tượng như vậy, thường được gọi là *tachyon*, chuyển động nhanh hơn ánh sáng, ta không bao giờ có thể thấy nó đến gần. Nếu được, chỉ có thể thấy một tachyon đang chạy ra xa. Thấy một tachyon giống như nghe thấy một phi cơ siêu thanh. Chỉ *sau khi* tachyon đã đi ngang qua, giả sử trong ánh sáng ban ngày, ta mới nhận ra nó. Đầu tiên ta thấy một chớp sáng, tương ứng với tiếng nổ của phi cơ bay ngang qua với tốc độ siêu thanh. Rồi ta thấy *hai* hình ảnh của tachyon, một xuất hiện đâu đó trong không gian và một đi ra xa theo hướng ngược lại, như có thể suy ra từ Hình 38. Một ảnh dịch chuyển đỏ, một ảnh dịch chuyển xanh. Mặc dù một trong hai

Xem 73

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 38 Sơ đồ không-thời gian giả định của việc quan sát hạt tachyon.

ảnh đến gần ta, nó vẫn mờ và nhỏ hơn. Điều này, không nói quá lời, khá khác thường. Hơn nữa, nếu bạn muốn thấy tachyon vào ban đêm, khi chiếu sáng nó bằng một cây đuốc, bạn phải quay đầu về phía ngược với tay cầm đuốc! Yêu cầu này bắt nguồn từ sơ đồ không-thời gian: bạn có hiểu lý do không? Không có ai từng thấy hiện tượng như vậy.

Câu đố 75 e

Tachyon, nếu có thật, sẽ là những vật kỳ lạ: chúng sẽ tăng tốc khi mất năng lượng, tachyon sẽ có tốc độ vô hạn khi không có năng lượng và hướng chuyển động của tachyon phụ thuộc vào chuyển động của quan sát viên. Chưa ai quan sát được những vật có đặc điểm như vậy. Tệ hơn, như ta vừa thấy, tachyon hình như xuất hiện từ hư vô, thách thức các định luật bảo toàn; và hãy nhớ rằng, chỉ có tachyon là không thể nhìn thấy theo nghĩa thông thường, cũng như không thể chạm vào chúng, vì cả hai quá trình đều do các tương tác điện từ. Do đó Tachyon không thể là vật thể theo nghĩa thông thường. Trong phần lượng tử ta sẽ chứng tỏ rằng lý thuyết lượng tử sẽ *loại trừ* sự hiện hữu (thật) của tachyon. Tuy vậy, thuyết lượng tử cũng *đòi hỏi* sự hiện hữu của tachyon 'ảo', như ta sẽ tìm hiểu sau này.

Xem 74
Trang 75

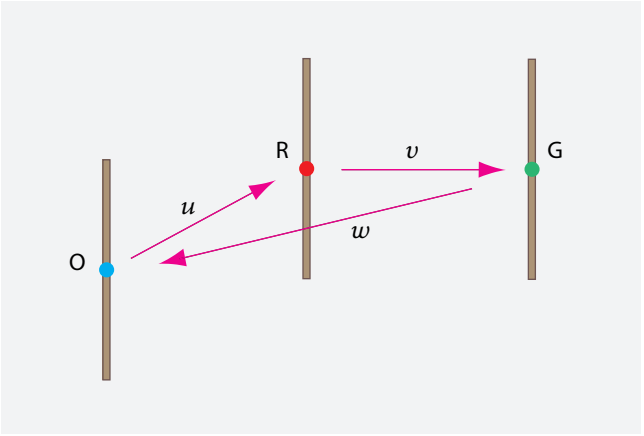
Song song với song song thì không song song – sự tiến động Thomas

Tốc độ giới hạn có nhiều hệ quả kỳ dị. Hai quan sát viên bất kỳ có thể giữ hai gậy song song với nhau, cho dù họ đang chuyển động đối với nhau. Nhưng kỳ lạ thay, nếu có một chuỗi ba hay nhiều gậy trong đó hai gậy liền kề song song với nhau, thì cái đầu tiên và cuối cùng thường *không* song song với nhau. Đặc biệt, chúng *sẽ không bao giờ* song song nếu hướng chuyển động của các quan sát viên khác nhau, như trong trường hợp các vector vận tốc tạo thành một cái vòng.

Cách sắp xếp đơn giản nhất được trình bày trong Hình 39. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, một phép cộng các phép biến đổi Lorentz thuần tuý sẽ cho kết quả là một phép biến đổi Lorentz và một phép quay. Kết quả, hai gậy đầu tiên và cuối cùng trong chuỗi

Xem 75

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 39 Nếu gậy O song song với gậy R và gậy R song song với gậy G, thì gậy O và gậy G không song song với nhau.

các gậy song song thường không song song với nhau.

Một thí dụ của hiệu ứng này xuất hiện trong chuyển động quay. Hãy tưởng tượng rằng ta đang đi bộ trên một vòng tròn với tốc độ tương đối tính và tay cầm một cây gậy. Ta luôn giữ cho gậy song song với hướng ban đầu. Cuối một vòng, gậy sẽ tạo thành một góc so với hướng ban đầu. Tương tự, *trục* quay của một vật đi vòng quanh một vật thứ hai sẽ *không* chỉ theo hướng cũ sau một vòng chuyển động. Hiệu ứng này được gọi là *Sự tiến động Thomas*, theo tên của Llewellyn Thomas, người khám phá ra hiệu ứng này năm 1925, tròn 20 năm sau khi Thuyết tương đối ra đời. Hiệu ứng không được nhiều nhà vật lý nổi tiếng khác chú ý tới. Sự tiến động Thomas quan trọng đối với quỹ đạo của electron trong nguyên tử, nơi gậy là trục spin trong chuyển động rất nhanh của electron. Tất cả các hiện tượng kỳ lạ này đều là hiện tượng tương đối tính và như vậy *chỉ* có thể đo được trong trường hợp tốc độ có thể so sánh được với tốc độ ánh sáng.

Một truyện không có đoạn kết – nhiệt độ và Thuyết tương đối

Nhiệt độ của nguồn nhiệt, do một quan sát viên chuyển động đối với nó đo được, là bao nhiêu? Sách vở về chủ đề này đều khó hiểu. Max Planck, Albert Einstein và Wolfgang Pauli đồng ý với kết quả sau: nhiệt độ T do một quan sát viên chuyển động với tốc độ v đo được, liên hệ với nhiệt độ T_0 do một quan sát viên đứng yên đối với nguồn nhiệt đo được, qua phương trình

$$T = T_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \,. \tag{25}$$

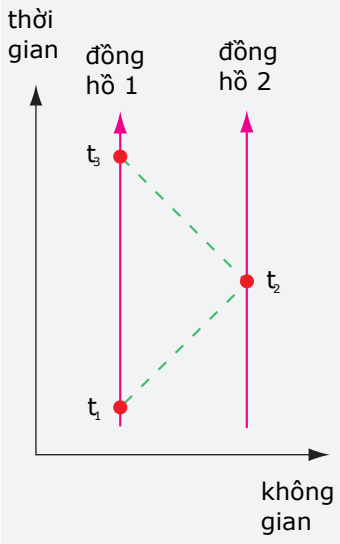
Quan sát viên chuyển động luôn đo được nhiệt độ thấp hơn giá trị do người đứng yên đo.

Năm 1908, Max Planck dùng biểu thức này, cùng với phép biến đổi tương ứng đối với nhiệt năng, để suy ra entropy bất biến đối với phép biến đổi Lorentz. Là người khám phá ra hằng số Boltzmann k, Planck đã chứng tỏ hằng số Boltzmann là một bất biến tương đối tính.

Xem 76

Tuy vậy, không phải tất cả các nhà nghiên cứu đều đồng ý với biểu thức của sự biến đổi năng lượng. (Mặc dù họ đồng ý về tính bất biến của k.) Những người khác giữ ý kiến cho rằng T và T_0 nên đổi chỗ cho nhau trong công thức. Cũng có người đề nghị

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 40 Đồng hồ và phép đo tốc độ ánh sáng được xem là vận tốc hai chiều.

Xem 77 nên thay căn bậc hai đơn giản bằng luỹ thừa. Nguyên do của sự không nhất quán này thì đơn giản: nhiệt độ chỉ được xác định đối với tình trạng cân bằng, nghĩa là, đối với các nguồn cân bằng. Nhưng nguồn cân bằng đối với người này *thì không* cân bằng đối với người khác. Khi tốc độ nhỏ, một quan sát viên thấy đó *gần như là* một nguồn nhiệt; nhưng ở tốc độ lớn hơn vấn đề trở nên rắc rối. Nhiệt độ được suy ra từ tốc độ của các hạt vật chất, như nguyên tử hay phân tử. Đối với quan sát viên chuyển động nhanh, không có cách thích hợp để đo nhiệt độ, vì sự phân bố không cân bằng. Số đo nhiệt độ của một quan sát viên phụ thuộc khoảng năng lượng của các hạt vật chất được dùng! Nói vắn tắt, cân bằng nhiệt không phải là một khái niệm bất biến đối với người quan sát. Do đó, *không có* công thức của phép biến đổi nhiệt độ nào đúng đối với trường hợp tốc độ cao. (Chỉ với các giả định bổ sung nào đó, công thức của Planck mới đúng. Và phép biến đổi tương đối tính của entropy cũng gặp vấn đề tương tự.) Đúng ra không có quan sát thực nghiệm nào cho phép kiểm chứng một công thức như vậy. Việc hiện thực hoá một phép đo như thế là một thách thức cho các nhà thực nghiệm trong tương lai – chứ không phải cho Thuyết tương đối.

MỘT ĐIỀU KỲ DỊ: TỐC ĐỘ MỘT CHIỀU CỦA ÁNH SÁNG LÀ GÌ?

Chúng ta đã thấy rằng tốc độ ánh sáng, như người ta thường xác định, ký hiệu là c chỉ trong trường hợp quan sát viên quán tính hay quan sát viên đo tốc độ của ánh sáng đi ngang qua gần mình (chứ không phải ở khoảng cách xa). Nói vắn tắt, tốc độ ánh sáng phải được đo *theo địa phương*. Nhưng điều kiện này không loại trừ được một vấn đề khá tinh tế.

Thường chiều dài được đo theo thời gian ánh sáng vượt qua khoảng cách đó. Trong trường hợp này tốc độ ánh sáng *hiển nhiên* là bất biến. Như vậy làm sao ta kiểm tra được tính bất biến? Chúng ta cần loại trừ phép đo chiều dài. Cách đơn giản nhất là cho ánh sáng phản xạ từ một cái gương, như trong Hình 40. Tính bất biến của tốc độ ánh sáng hàm ý rằng nếu ánh sáng đi xuôi và ngược trên một đoạn thẳng ngắn, thì đồng hồ ở hai

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

đầu sẽ đo được thời gian nghiệm đúng phương trình

$$t_3 - t_1 = 2\,(t_2 - t_1)\,. \tag{26}$$

Ở đây ta đã giả sử rằng các đồng hồ đã được đồng bộ hoá theo quy định ở Trang 53. Nếu hệ số khác 2, tốc độ ánh sáng không bất biến. Thật vậy, mọi thí nghiệm cho đến nay đều cho kết quả là 2, trong phạm vi sai số của phép đo.

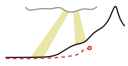
Xem 78, Xem 79

Câu đố 76 s

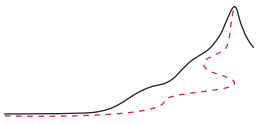
Nhưng những thí nghiệm này gây cho chúng ta một sự ngờ vực: hình như không thể đo được vận tốc ánh sáng *một chiều*. Bạn có đồng ý không? Vấn đề này có quan trọng không?

Tóm tắt

Đối với mọi hệ vật lý, tốc độ năng lượng địa phương, tốc độ tiên hành và tốc độ tín hiệu bị giới hạn bởi $c = 299\,782\,458\,\mathrm{m/s}$, tốc độ ánh sáng trong chân không. Kết quả là, thời gian, tuổi tác, khoảng cách, chiều dài, màu sắc, sự định hướng trong không gian, góc và nhiệt độ – hay các đại lượng có thể xác định được – đều phụ thuộc quan sát viên. Ngược lại, tốc độ ánh sáng trong chân không c thì bất biến.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chương 2

Cơ học tương đối tính

Tốc độ ánh sáng là một đại lượng bất biến và có giá trị giới hạn. Do đó, chúng ta cần xem lại tất cả các biến động lực mà ta đã định nghĩa nhờ vận tốc – tức là tất cả các biến! Những biến động lực cơ bản nhất là khối lượng, động lượng và năng lượng. Nói cách khác, ta cần tái tạo môn Cơ học dựa trên tốc độ giới hạn bất biến: *cơ học tương đối tính*.

Đầu tiên, việc tìm hiểu cơ học tương đối tính sẽ dẫn ta tới *sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng*, mối quan hệ sâu sắc làm nền tảng cho sự tìm hiểu về chuyển động. Cơ học tương đối tính cũng đưa ta tới khái niệm *chân trời*, một khái niệm cần thiết để sau này ta có thể hiểu rõ về hố đen, bầu trời đêm và toàn thể vũ trụ.

Khối lượng trong Thuyết tương đối

Trong vật lý Galilei, người ta dùng *sự va chạm* để xác định tỷ số khối lượng của hai vật.
Quyển I, trang 101
Chính xác hơn, *khối lượng* được tính theo hệ thức

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} \,. \tag{27}$$

Tuy vậy, thực nghiệm chứng tỏ rằng hệ thức này sai khi tốc độ gần với tốc độ ánh sáng; phải thay đổi định nghĩa này. Thật ra ta không cần thí nghiệm mà chỉ cần suy nghĩ một
Câu đố 77 s
chút cũng đã thấy nó sai. Bạn đã nghĩ ra chưa?

Chỉ có một giải pháp cho vấn đề định nghĩa khối lượng. Thực ra, thí nghiệm chứng tỏ rằng hai định luật bảo toàn động lượng và bảo toàn khối lượng của Galilei phải được
Xem 80
đổi thành

$$\sum_i \gamma_i m_i \boldsymbol{v}_i = \text{const} \tag{28}$$

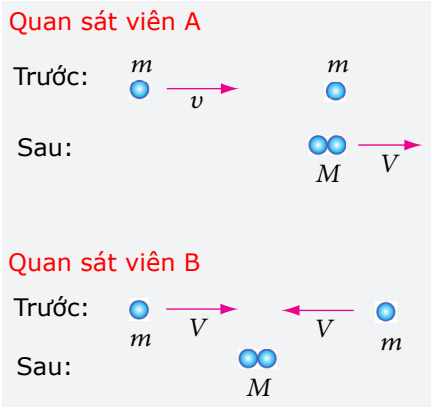
và

$$\sum_i \gamma_i m_i = \text{const} \,. \tag{29}$$

Đây là các biểu thức của định luật *bảo toàn động lượng tương đối tính* và định luật *bảo toàn năng-khối lượng tương đối tính*. Chúng sẽ đúng trong suốt phần còn lại của giáo trình.

Định luật bảo toàn động lượng và năng lượng bao hàm việc viễn tải *không thể* xảy ra trong thiên nhiên, tương phản với truyện khoa học giả tưởng. Bạn chứng minh điều này

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 41 Một va chạm không đàn hồi của hai hạt giống nhau quan sát từ hai hệ quy chiếu quán tính khác nhau.

Câu đố 78 s

được không?

Điều hiển nhiên là, để trở lại vật lý Galilei, hệ số hiệu chỉnh tương đối tính γ_i phải gần bằng 1 đối với các vận tốc thông thường, nghĩa là, vận tốc không gần với tốc độ ánh sáng. Vấn đề nằm ở chỗ đó. Đúng ra dù ta không biết biểu thức của hệ số hiệu chỉnh tương đối tính, ta vẫn có thể suy ra nó từ sự va chạm được trình bày trong Hình 41.

Câu đố 79 e

Trong hệ quy chiếu (A) ta có $\gamma_v mv = \gamma_V MV$ và $\gamma_v m + m = \gamma_V M$. Từ những quan sát trong hệ quy chiếu (B) ta suy ra V tổng hợp với V bằng v, nói cách khác,

$$v = \frac{2V}{1 + V^2/c^2} \,. \tag{30}$$

Kết hợp các phương trình, ta thấy hiệu chỉnh tương đối tính γ phụ thuộc vào độ lớn của vận tốc v theo công thức

$$\gamma_v = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,. \tag{31}$$

Với biểu thức này tỷ số *khối lượng* giữa hai hạt va chạm sẽ là

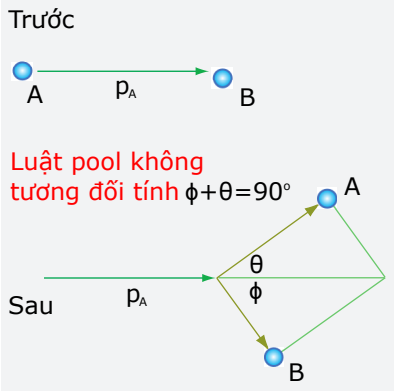
$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{\Delta(\gamma_2 v_2)}{\Delta(\gamma_1 v_1)} \,. \tag{32}$$

Đây là định nghĩa tổng quát của tỷ số hai khối lượng theo vật lý Galilei. Hệ số hiệu chỉnh γ_i bảo đảm rằng khối lượng định nghĩa theo phương trình này sẽ giống như khối lượng định nghĩa trong cơ học Galilei và cũng giống nhau đối với mọi va chạm của vật thể.* Như vậy khối lượng vẫn còn là đại lượng đặc trưng cho mức độ khó khăn khi gia tốc một vật và nó vẫn còn được dùng trong *hệ* các vật thể. (Trong chương về cơ học Galilei chúng ta cũng dùng một định nghĩa khối lượng tổng quát hoá khác dựa trên tỷ số các gia tốc. Chúng ta không đi sâu tìm hiểu việc tổng quát hoá tương đối tính của khối lượng vì sẽ gặp ngay một số điều rắc rối.)

Quyển I, trang 105

* Những kết quả dưới đây cũng chứng tỏ rằng $\gamma = 1 + T/c^2 m$, trong đó T là động năng của một hạt.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 42 Một quy luật hữu ích để chơi snooker không tương đối tính – và để tiên đoán các va chạm đàn hồi không tương đối tính.

Tiếp theo thí dụ trong vật lý Galilei, ta gọi đại lượng

$$\boldsymbol{p} = \gamma m \boldsymbol{v} \tag{33}$$

là *động lượng* (*tuyến tính*) *tương đối tính* (*3 chiều*) của một hạt. Động lượng toàn phần là một đại lượng *được bảo toàn* đối với các hệ không chịu tác dụng của tác động bên ngoài và sự bảo toàn này là hệ quả trực tiếp của cách định nghĩa khối lượng.

Khi tốc độ nhỏ, hay $\gamma \approx 1$, động lượng tương đối tính giống như động lượng Galilei và tỷ lệ với vận tốc. Nhưng khi tốc độ lớn, động lượng tăng nhanh hơn vận tốc, và dần tới vô hạn khi vận tốc gần với tốc độ ánh sáng. Kết quả này được dữ liệu thực nghiệm khẳng định, như đã thấy trong Hình 19.

Trang 39

Đến đây khi đã có định nghĩa đúng của khối lượng và động lượng, ta có thể tìm hiểu sự va chạm chi tiết hơn.

TẠI SAO KHÓ CHƠI SNOOKER TƯƠNG ĐỐI TÍNH

Tính chất nổi tiếng của các va chạm giữa một hình cầu (hay một hạt) đang chuyển động với một hình cầu đứng yên có *cùng khối lượng* có vai trò quan trọng khi ta chơi snooker, pool hay billiard. Sau một va chạm như vậy, hai hình cầu sẽ tách ra theo hai hướng *vuông góc* với nhau. Như đã thấy trong Hình 42, hai góc φ và θ có tổng là một góc vuông. (Ngoại lệ duy nhất là trường hợp va chạm trực diện, quả cầu đầu tiên sẽ ngừng lại.)

Câu đố 80 e

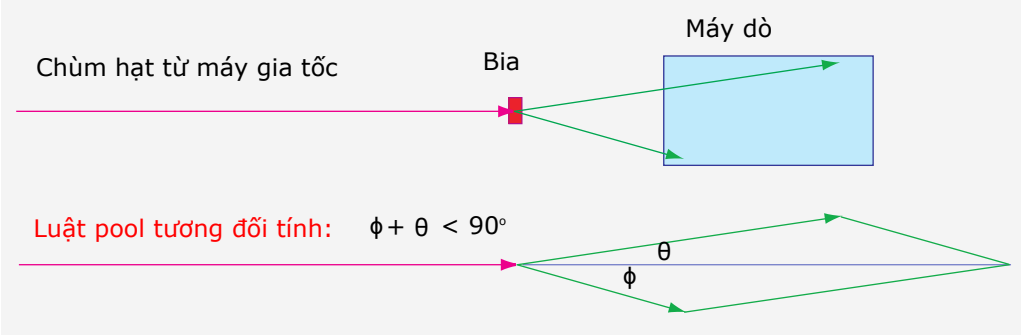
Tuy vậy, thí nghiệm chứng tỏ rằng quy luật góc vuông sẽ *không thể* áp dụng cho sự va chạm tương đối tính. Thật vậy, dùng định luật bảo toàn động lượng và một chút kỹ năng tính toán, bạn sẽ tìm được công thức

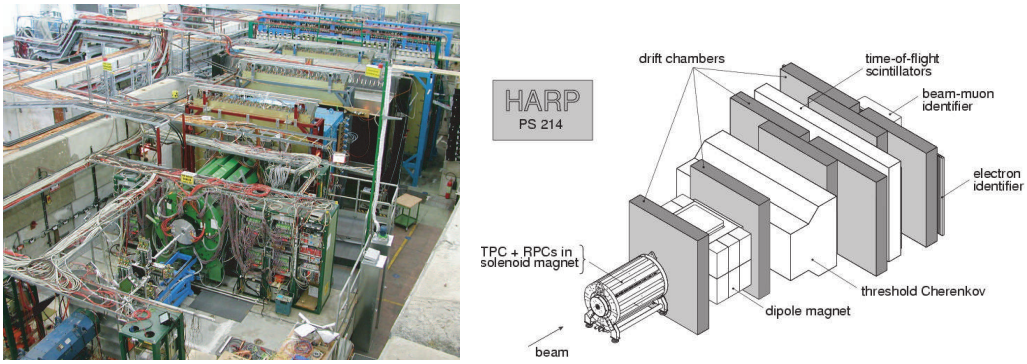
Câu đố 81 e

$$\tan\theta \tan\varphi = \frac{2}{\gamma + 1}\,, \tag{34}$$

với các góc được xác định như trong Hình 43. Kết quả là trong trường hợp va chạm tương đối tính, tổng $\varphi + \theta$ *nhỏ hơn* góc vuông. Tốc độ tương đối tính thay đổi hoàn toàn trò chơi snooker. Thực vậy, mọi vật lý gia làm việc với máy gia tốc đều biết điều này: đối với electron hay proton, những góc này có thể tìm ra dễ dàng từ những hình chụp

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net





HÌNH 43 Kích thước của các máy dò trong máy gia tốc một chùm hạt dựa trên quy luật góc snooker tương đối tính – thí dụ như, thí nghiệm HARP ở CERN (© CERN).

trong buồng sương hay buồng bọt, hiển thị các vệt do các hạt để lại khi chuyển động ngang qua buồng, như ta thấy trong Hình 44. Tất cả các hình chụp đều khẳng định biểu thức tương đối tính. Thật vậy, *hình dạng* của các máy dò được chọn lựa theo biểu thức (34), như minh hoạ trong Hình 43. Nếu công thức – và Thuyết tương đối – sai, đa số các máy dò sẽ không hoạt động, vì chúng sẽ bắt hụt phần lớn các hạt sau va chạm. Nếu Thuyết tương đối sai, những máy dò giống như vậy phải lớn hơn nhiều. Thật ra, những thí nghiệm về hạt này cũng chứng minh cho công thức tổng hợp vận tốc. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Xem 18
Câu đố 82 e

Sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng

Chúng ta hãy trở lại hiện tượng va chạm cộng tuyến và không đàn hồi của Hình 41. Khối lượng sau cùng M của hệ là bao nhiêu? Việc tính toán cho kết quả

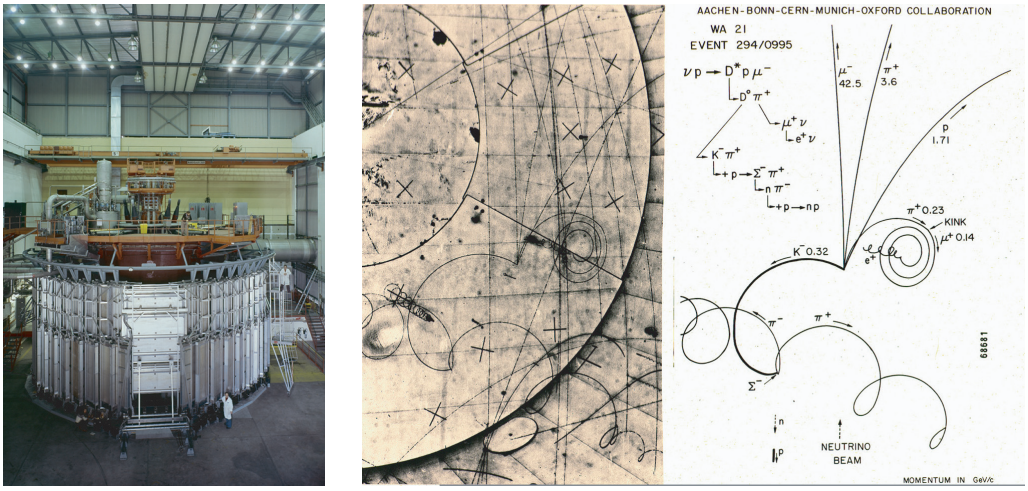
Trang 68
Câu đố 83 s

$$M/m = \sqrt{2(1+\gamma_v)} > 2\,. \tag{35}$$

Nói cách khác, khối lượng sau cùng của hệ *lớn hơn* tổng $2m$ của hai khối lượng ban đầu. Khác với cơ học Galilei, tổng khối lượng các vật trong hệ *không* phải là một đại lượng bảo toàn. Chỉ có tổng $\sum_i \gamma_i m_i$ của khối lượng *được hiệu chỉnh* mới bảo toàn.

Thuyết tương đối cung cấp lời giải cho bài toán này. Mọi điều sẽ trở nên mạch lạc

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 44 'Buồng bọt châu Âu lớn' và một thí dụ về các vết của các hạt tương đối tính, với các giá trị động lượng suy ra từ hình chụp (© CERN).

nếu, đối với *năng lượng* E của một vật khối lượng m và vận tốc v, ta sử dụng biểu thức

$$E = c^2\gamma m = \frac{c^2 m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,, \tag{36}$$

áp dụng cho cả hệ hay từng thành phần của hệ. Bảo toàn khối lượng được hiệu chỉnh có thể xem như bảo toàn năng lượng, chỉ đơn giản là không có hệ số c^2. Trong thí dụ của hai vật giống nhau và dính vào nhau, được mô tả bằng khối lượng và năng lượng, năng lượng sau cùng của hệ E bằng tổng năng lượng của hai phần. (Cũng cần nhắc lại là khối lượng chưa hiệu chỉnh *không thể* cộng với nhau.) Đặc biệt, năng lượng E_0 của một vật *đứng yên* và khối lượng m của nó liên hệ với nhau qua công thức

$$E_0 = c^2 m \,. \tag{37}$$

Tại sao ta lại viết c^2m thay vì mc^2? Vì trong công thức, hằng số luôn *đứng trước*. Hệ số c^2 không phải là phần chính yếu; bản chất của biểu thức là mối liên hệ giữa năng lượng E và khối lượng m. c^2 đơn giản chỉ là hệ số chuyển đổi giữa hai đại lượng.

Hệ thức năng-khối lượng $E = c^2\gamma m$ là một trong những khám phá ngoạn mục và nổi tiếng nhất của vật lý hiện đại. Nói một cách đơn giản, sự hiện hữu của tốc độ cực đại hàm ý mọi khối lượng đều có chứa năng lượng và năng lượng có khối lượng. Khối lượng và năng lượng là hai tên gọi của cùng một khái niệm cơ bản:

▷ Khối lượng và năng lượng tương đương với nhau.

Vì khối lượng và năng lượng tương đương nên *năng lượng có tất cả các tính chất của khối lượng*. Đặc biệt, năng lượng có *quán tính* và *trọng lượng*. Thí dụ, một cục pin nạp đầy thì nặng hơn một cục pin cạn và ly nước nóng nặng hơn ly nước lạnh. Sóng vô tuyến và ánh

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

sáng có trọng lượng. Chúng có thể rơi xuống.

Ngược lại, *khối lượng có tất cả các tính chất của năng lượng.* Thí dụ, chúng ta có thể dùng khối lượng để chạy một động cơ. Nhưng điều này không có gì mới vì quá trình này đã được thực hiện trong mọi động cơ mà ta đã biết! Bắp thịt, động cơ ô tô và tàu thuyền hạt nhân hoạt động bằng cách biến đổi một ít khối lượng thành năng lượng tương đương để thắng ma sát và làm cho người, xe hay tàu thuyền chuyển động.

Hệ số biến đổi c^2 rất lớn: 1 kg đá, nếu biến đổi thành điện năng, sẽ có giá trị khoảng 8 tỷ Euro. Trong thí dụ này, cho dù số tiền rất lớn nhưng chỉ tương ứng với một lượng đá khiêm tốn. Vì c^2 quá lớn nên ta cũng có thể nói:

▷ Khối lượng là năng lượng được cô đọng lại.

Việc gia tăng năng lượng của hệ thống làm gia tăng khối lượng của hệ lên một chút và việc giảm năng lượng làm khối lượng của hệ giảm xuống một chút. Nếu một quả bom nổ bên trong một hộp kín, khối lượng, trọng lượng và động lượng của hộp không đổi, trước và sau khi nổ, nhưng tổng khối lượng của các mảnh vỡ trong hộp sẽ *nhỏ hơn* trước một chút. Mọi loại bom – không riêng gì bom hạt nhân – đều lấy năng lượng phá huỷ của chúng từ việc giảm khối lượng. Thật vậy, mọi hoạt động của một hệ – như một cử chỉ âu yếm, một nụ cười hay một ánh mắt – đều lấy năng lượng từ việc giảm khối lượng.

Động năng T là hiệu của năng lượng toàn phần và năng lượng nghỉ. Ta có

$$T = c^2\gamma m - c^2 m = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1\cdot 3}{2\cdot 4}m\frac{v^4}{c^2} + \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6}m\frac{v^6}{c^4} + \dots \tag{38}$$

Câu đố 84 e (sử dụng định lý nhị thức). Biểu thức chỉ trở thành công thức nổi tiếng của Galilei $T_{\text{Galilei}} = \frac{1}{2}mv^2$ khi tốc độ nhỏ, như tốc độ ta gặp hằng ngày.

Sự tương đương năng-khối lượng $E = c^2\gamma m$ dẫn tới việc: khi lấy *năng lượng* từ một hệ vật chất sẽ làm cho khối lượng của hệ giảm đi. Khi một người đàn piano, suy nghĩ hay chạy, khối lượng của họ sẽ giảm đi. Khi một tách trà nguội đi hay khi một ngôi sao sáng lên, khối lượng của chúng giảm đi. Khi dùng điện năng của người khác, ta đã lấy đi một ít khối lượng của họ: ăn cắp điện là ăn cắp khối lượng! Sự tương đương năng-khối lượng có mặt khắp nơi trong thiên nhiên.

Chỉ có một cách để biến đổi *toàn bộ* khối lượng của một vật thành động năng là trường hợp năng lượng điện từ: ta huỷ một vật bằng *phản vật chất* có cùng khối lượng. May mắn thay, hầu như không có phản vật chất trong vũ trụ, vì vậy quá trình này không xảy ra trong đời sống hằng ngày. Thật vậy, năng lượng của một hạt bụi lớn đến nỗi sự

Câu đố 85 e huỷ biến với cùng một lượng phản vật chất sẽ là một biến cố vô cùng nguy hiểm.

Sự tương đương năng-khối lượng cho ta khả năng 'tạo ra' các hạt có khối lượng bằng cách thao tác trên ánh sáng hay lấy bớt động năng trong các va chạm. Điều này thực tế đã xảy ra; sự chuyển đổi các dạng năng lượng thành các hạt vật chất đang diễn ra, như ta đã nói, ở tâm các thiên hà, trong các máy gia tốc hạt hay khi tia vũ trụ xuyên qua bầu khí quyển của Trái đất. Chi tiết của các quá trình này sẽ trở nên rõ ràng khi ta tìm hiểu Vật lý lượng tử.

Sự tương đương năng-khối lượng $E = c^2\gamma m$ đồng nghĩa với việc khai tử các điều kỳ ảo trong tiểu thuyết khoa học giả tưởng. Nó bao hàm việc *không có* các nguồn năng lượng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

chưa khám phá trên hay gần Trái đất. Nếu có các nguồn như vậy, ta đã có thể phát hiện được nhờ khối lượng của chúng. Người ta thực hiện nhiều thí nghiệm để tìm và hãy còn tìm, những hiệu ứng như vậy. Tất cả đều không có kết quả. *Không có năng lượng có sẵn trong thiên nhiên.*

Tóm lại, sự tương đương năng-khối lượng là một chân lý. Nhưng nhiều nhà khoa học không thể lưu danh nếu không khám phá ra những điều bí mật. Người ta đã phát hiện hai dạng năng lượng khác, rất loãng, được gọi là *vật chất tối* và *năng lượng tối (tên gọi hơi sai)* vào thập niên 1990, có mặt trong toàn vũ trụ, với mật độ khoảng 1 nJ/m^3. Sự hiện hữu của hai đối tượng này được suy ra từ các phép đo khá tỉ mỉ trong bầu trời để dò ra khối lượng của chúng. Cả năng lượng tối và vật chất tối phải có khối lượng và các tính chất hạt. Nhưng cho đến nay, bản chất và nguồn gốc của chúng vẫn chưa sáng tỏ.

Trang 224

Cân ánh sáng

Sự tương đương năng-khối lượng $E = c^2\gamma m$ cũng hàm ý rằng người ta cần khoảng 90 ngàn triệu kJ (hay 21 ngàn triệu kcal) để tăng khối lượng lên 1 gam. Dĩ nhiên, những người ăn kiêng sẽ có ý kiến hơi khác về vấn đề này! Như đã đề cập, con người nạp năng lượng hằng ngày từ vật chất mà họ ăn, uống và hô hấp, bằng cách làm giảm khối lượng liên kết của chúng rồi sau đó thải chúng ra ngoài; tuy vậy, *độ hụt khối hoá học* này không thể đo được bằng cách cân vật chất trước và sau phản ứng: độ sai biệt quá nhỏ, vì hệ số biến đổi c^2 quá lớn. Thật vậy, đối với một phản ứng hoá học bất kỳ, năng lượng liên kết khoảng 1 aJ (6 eV) mỗi liên kết nên độ biến thiên khối lượng chỉ vào cỡ một phần của 10^{10}, quá nhỏ nên không thể đo được bằng cách cân cơ thể hay xác định độ chênh lệch khối lượng giữa thức ăn và chất bài tiết. Do đó, đối với các phản ứng hoá học thông thường, khối lượng có thể xem như không đổi, giống như trong vật lý Galilei.

Câu đố 86 e

Cho đến nay, công thức $E = c^2\gamma m$ đã được nhiều thí nghiệm khẳng định. Đối với độ hụt khối hạt nhân thì việc đo đạc đơn giản nhất. Thí nghiệm chính xác nhất, thực hiện năm 2005, là so sánh độ biến thiên khối lượng của hạt nhân trước và sau khi bắt neutron, với năng lượng của tia gamma phát ra. Hệ thức được khẳng định với độ chính xác hơn 6 chữ số.

Xem 81

Các phương pháp hiện đại dùng để đo khối lượng của các đơn phân tử đã giúp người ta đo được độ hụt khối *hoá học*: hiện nay người ta đã có thể so sánh khối lượng một phân tử với khối lượng của các nguyên tử thành phần. Nhóm nghiên cứu của David Pritchard đã phát triển được phương pháp *bẫy Penning*, cho phép người ta xác định khối lượng từ việc đo tần số; độ chính xác của các thí nghiệm cộng hưởng cyclotron này đủ để khẳng định công thức $\Delta E_0 = c^2\Delta m$ đối với các liên kết hoá học. Trong tương lai, năng lượng liên kết sẽ được xác định theo cách này với độ chính xác cao. Vì năng lượng liên kết thường phát ra dưới dạng ánh sáng nên ta cũng có thể nói rằng kỹ thuật hiện đại đã giúp con người *cân được* ánh sáng.

Xem 82

Thật vậy, việc suy nghĩ về ánh sáng và khối lượng của nó là nền tảng cho việc suy diễn ra hệ thức năng-khối lượng của Einstein. Khi một vật khối lượng m phát ra hai chùm ánh sáng có năng lượng như nhau E theo hai hướng ngược nhau, năng lượng riêng của vật đã giảm đi một lượng bằng lượng phát ra. Chúng ta hãy xem điều gì xảy ra cho khối lượng của vật. Vì hai chùm ánh sáng giống nhau về năng lượng và động lượng, vật không chuyển động, nên ta không thể suy ra được điều gì về sự thay đổi khối lượng của vật. Nhưng tình thế sẽ khác nếu ta mô tả hiện tượng khi chuyển động dọc theo chùm tia

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

sáng với vận tốc không tương đối tính v. Chúng ta đã biết, do hiệu ứng Doppler một chùm sẽ dịch chuyển đỏ và chùm kia dịch chuyển xanh, theo các hệ số $1 + v/c$ và $1 - v/c$.
Câu đố 87 e Chùm dịch chuyển xanh sẽ có thêm động lượng $vE/2c^2$ còn chùm dịch chuyển đỏ sẽ mất đi một động lượng tương đương. Mà động lượng bảo toàn. Nên sau khi các chùm sáng phát ra, ta thấy vật có động lượng $p = mv - vE/c^2 = v(m - E/c^2)$. Như vậy ta kết luận rằng *một vật mất đi năng lượng E thì khối lượng của nó giảm đi* E/c^2. Đây là sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng.

Tóm lại, ta thấy rằng *năng lượng nghỉ* E_0 của một vật, hay năng lượng tối đa mà ta có thể lấy ra từ khối lượng m, bằng

$$E_0 = c^2 m \,. \tag{39}$$

Chúng ta đã thấy ở trên, hiệu ứng Doppler là hệ quả của tính bất biến của tốc độ ánh sáng. Ta có thể kết luận: khi liên kết tính bất biến của tốc độ ánh sáng với định luật bảo toàn năng lượng và động lượng thì ta có thể tìm được sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng.

Động lượng và năng lượng liên hệ với nhau như thế nào? Định nghĩa của động lượng (33) và năng lượng (36) dẫn tới hai hệ thức cơ bản. Đầu tiên, *độ lớn* của chúng liên hệ
Câu đố 88 e theo phương trình

$$c^4 m^2 = E^2 - c^2 p^2 \tag{40}$$

đối với tất cả các hệ tương đối tính, có thể là các vật thể hay, như ta sẽ thấy sau đây, là bức xạ. Đối với *vector* động lượng ta có một hệ thức quan trọng khác

$$\boldsymbol{p} = \frac{E}{c^2}\boldsymbol{v} \,, \tag{41}$$

đúng với mọi dạng năng lượng chuyển động *bất kỳ*, có thể là một vật thể, một chùm tia
Câu đố 89 e sáng hay một xung bức xạ.* Ta thường dùng cả hai hệ thức trong phần còn lại của giáo trình, bao gồm phần bàn luận dưới đây.

Sự va chạm, vật thể ảo và tachyon

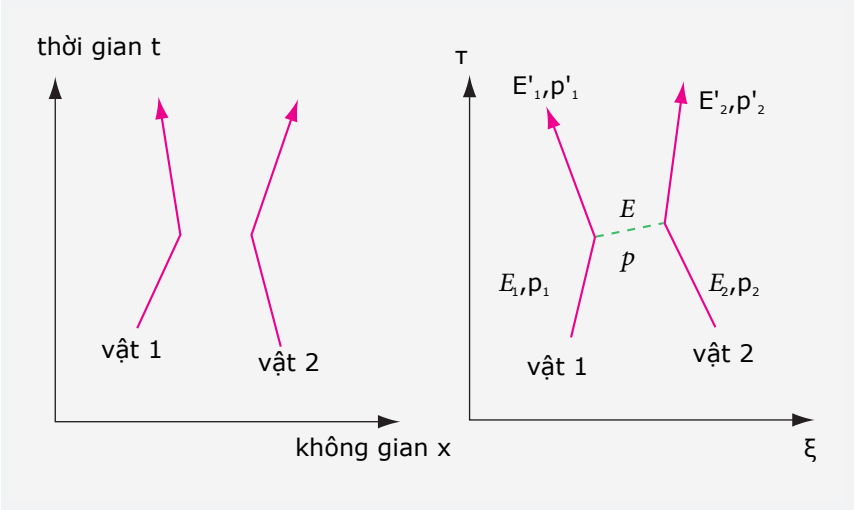
Ta vừa thấy rằng trong trong sự va chạm tương đối tính, sự bảo toàn năng lượng và động lượng toàn phần là hệ quả riêng của định nghĩa khối lượng. Bây giờ ta hãy xem xét sự va chạm một cách chi tiết hơn. *Va chạm* là một quá trình, nghĩa là, một chuỗi biến cố, trong đó

— động lượng toàn phần trước và sau khi tương tác không đổi;
— động lượng được trao đổi trong một miền không-thời gian nhỏ;
— khi vận tốc nhỏ, mô tả của Galilei vẫn đúng.

Trong đời sống hằng ngày, *va chạm* là một biến cố có hai vật thay đổi động lượng. Nhưng hai vật va chạm ở hai vị trí *khác nhau* khi biến cố xảy ra. Do đó va chạm sẽ được mô tả
Xem 83 bằng một sơ đồ không-thời gian như hình bên trái của Hình 45; đó là hình ảnh trong quá khứ của chòm sao Orion. Có thể dễ dàng kiểm tra là quá trình được mô tả bằng sơ
Câu đố 90 e đồ đó, theo định nghĩa trên, là một va chạm.

* Dùng ký hiệu vector 4 chiều, ta có thể viết $\boldsymbol{v}/c = \boldsymbol{p}/P_0$, với $P_0 = E/c$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 45 Sơ đồ không thời gian của một va chạm đối với hai quan sát viên khác nhau.

Hình bên phải trong Hình 45 cho thấy quá trình đó trong hệ quy chiếu của người Hy Lạp. Quan sát viên Hy Lạp cho rằng vật 1 đã thay đổi động lượng *trước* vật 2. Điều đó có nghĩa là có một khoảng thời gian ngắn động lượng và năng lượng *không* bảo toàn!

Cách duy nhất dùng để giải thích điều này là giả sử rằng có một sự trao đổi một vật thứ 3, được vẽ bằng đường chấm chấm. Chúng ta hãy tìm ra các đặc điểm của vật này. Ta gán các chỉ số cho khối lượng, năng lượng và động lượng của hai vật, và gán dấu phẩy cho lúc sau va chạm. Như vậy khối lượng của vật m sẽ nghiệm đúng phương trình

Câu đố 91 e

$$m^2c^4 = (E_1 - E_1')^2 - (p_1 - p_1')^2c^2 = 2m_1^2c^4 - 2E_1E_1'\left(\frac{1 - v_1v_1'}{c^2}\right) < 0\,. \qquad (42)$$

Đây là một kết quả kỳ dị, vì như vậy khối lượng chưa biết là một *số ảo*![*] Hơn nữa, ta có thể thấy trực tiếp từ sơ đồ 2 là vật được trao đổi chuyển động *nhanh hơn ánh sáng*. Nó là một *tachyon*, do tiếng Hy Lạp ταχύς có nghĩa là 'nhanh'. Nói cách khác,

▷ Va chạm liên quan tới chuyển động nhanh hơn ánh sáng.

Sau này ta sẽ thấy rằng va chạm thực sự là các quá trình *duy nhất* trong thiên nhiên có mặt tachyon. Vì các hạt được trao đổi chỉ xuất hiện trong va chạm chứ không xuất hiện riêng lẻ nên chúng được gọi là các hạt *ảo*, để phân biệt với các hạt *thực*, mà ta thường gặp.[**] Sau này, ta sẽ nghiên cứu tính chất của các hạt ảo, khi bàn đến lý thuyết lượng tử.

Quyển IV, trang 66

* Việc đổi hệ thức năng-khối lượng và động-khối lượng của tachyon thành $E = \pm c^2 m/\sqrt{v^2/c^2 - 1}$ và $p = \pm mv/\sqrt{v^2/c^2 - 1}$ là điều bình thường; điều này chẳng khác gì việc tái định nghĩa khối lượng m. Sau khi tái định nghĩa, tachyon có khối lượng *thực*. Các hệ thức năng lượng và động lượng chứng tỏ rằng tachyon mất năng lượng và động lượng khi đi nhanh hơn. (Kỳ lạ hơn, một tachyon nằm trong hộp có thể cung cấp tất cả năng lượng mà loài người cần đến.) Ta phải dùng cả hai dấu trong các hệ thức năng lượng và động lượng để bảo đảm tính chất tương đương của mọi quan sát viên quán tính. Như vậy tachyon không có năng lượng và động lượng cực tiểu.

** Chính xác hơn, một hạt ảo không tuân theo hệ thức $m^2c^4 = E^2 - p^2c^2$, là hệ thức chỉ đúng cho các hạt

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Trong thiên nhiên, tachyon luôn luôn là hạt ảo. Hạt thực luôn luôn là *bradyon* – từ tiếng Hy Lạp có nghĩa là βραδύς 'chậm' – hay là những vật chuyển động chậm hơn ánh sáng. Cũng nên nhớ rằng tachyon, mặc dù có vận tốc lớn, không cho phép chuyển tải năng lượng nhanh hơn ánh sáng; chúng cũng không vi phạm tính nhân quả khi và chỉ khi chúng được phát xạ hay hấp thu với xác suất như nhau. (Bạn chứng minh điều này được không?)

Câu đố 92 e

Khi chúng ta nghiên cứu Thuyết lượng tử, chúng ta cũng sẽ khám phá ra rằng một tương tác tiếp xúc tổng quát giữa các vật không chỉ được mô tả bằng sự trao đổi các hạt ảo *đơn lẻ*, mà còn bằng sự trao đổi các *dòng* hạt ảo liên tục. Đối với các va chạm cơ bản của những vật thông thường, tương tác hoá ra có bản chất điện từ. Trong trường hợp này, các hạt được trao đổi là các *photon ảo*. Nói cách khác, khi tay này chạm tay kia, khi tay đẩy một tảng đá, hay khi núi mang vác cây cối, các dòng photon ảo được trao đổi liên tục.

Điều kỳ lạ là khái niệm *vận tốc tương đối* cũng có trong Thuyết tương đối. Giả sử có 2 hạt 1 và 2, độ lớn của vận tốc tương đối được cho bởi công thức

Quyển IV, trang 65
Xem 84

$$v_{\text{rel}} = \frac{\sqrt{(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)^2 - (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)^2/c^2}}{1 - \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2/c^2} \,. \tag{43}$$

Giá trị này không bao giờ lớn hơn c, cho dù hai hạt tách xa nhau với tốc độ siêu tương đối tính. Biểu thức này cũng có ích khi ta tính tiết diện ngang tương đối tính của va chạm. Nếu ta dùng vận tốc 4-chiều, ta sẽ kiếm được kết quả thú vị dưới dạng tổng quát, $\mathbf{v}_{12} \neq -\mathbf{v}_{21}$, nghĩa là, hai vận tốc tương đối không chỉ theo 2 hướng ngược nhau – trừ trường hợp hai vận tốc cộng tuyến. Tuy vậy, hệ thức $v_{12} = v_{21} = v_{\text{rel}}$ đúng trong mọi trường hợp.

Câu đố 93 e

Có thêm một bí mật ẩn giấu trong sự va chạm. Trong hình bên phải của Hình 45, tachyon được vật 1 phát ra và được vật 2 hấp thu. Tuy vậy, cũng dễ tưởng tượng ra một quan sát viên mà tình trạng ngược lại sẽ diễn ra. Tóm lại, hướng du hành của một tachyon tuỳ thuộc quan sát viên! Thật vậy, điều này ám chỉ đến *phản vật chất*. Trong sơ đồ không-thời gian, vật chất và phản vật chất đi ngược chiều nhau. Mối liên kết giữa Thuyết tương đối và phản vật chất sẽ trở nên rõ ràng hơn trong Thuyết lượng tử.

Câu đố 94 s

Quyển IV, trang 193

Hệ hạt – không khối tâm

Thuyết tương đối cũng buộc ta bỏ khái niệm *khối tâm* yêu dấu. Chúng ta có thể đã thấy điều này trong thí dụ đơn giản nhất: trường hợp va chạm của hai hạt giống nhau.

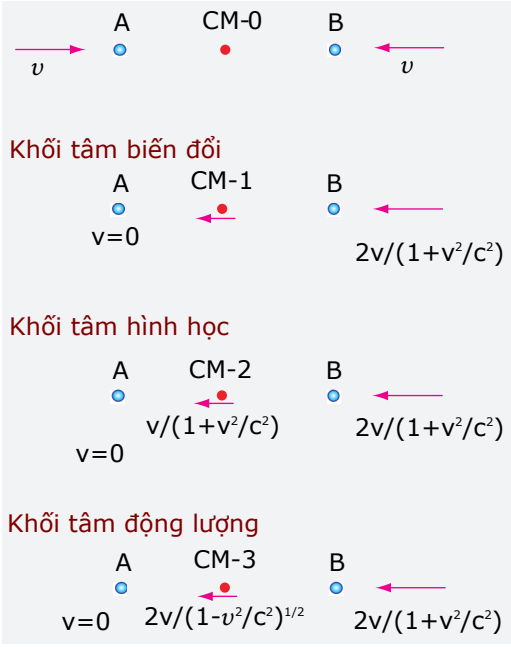
Hình 46 chứng tỏ rằng từ quan điểm trong đó một trong hai hạt va chạm đứng yên, có ít nhất 3 cách xác định khối tâm khác nhau. Nói cách khác, khối tâm *không phải là* khái niệm bất biến đối với quan sát viên. Từ hình vẽ ta có thể suy ra được rằng khái niệm khối tâm chỉ có ý nghĩa đối với các hệ gồm các thành phần chuyển động với vận tốc *nhỏ* đối với nhau. Nguyên tử là một thí dụ. Đối với các hệ tổng quát hơn, khối tâm không thể định nghĩa một cách duy nhất.

Xem 85

Vậy vấn đề khối tâm sẽ cản trở cuộc thám hiểm của chúng ta chăng? Không. Chúng ta sẽ tập trung vào chuyển động của các hạt đơn lẻ hơn là hệ gồm nhiều hạt.

thực.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 46 Không có phương thức nhất quán để xác định khối tâm tương đối tính.

TẠI SAO ĐA SỐ CÁC CHUYỂN ĐỘNG LẠI CHẬM NHƯ VẬY?

Đối với phần lớn các hệ thông thường, hệ số giãn γ gần bằng 1; trường hợp hệ số giãn khác 1 nhiều, tức tốc độ cỡ vài phần trăm tốc độ ánh sáng, đã là khác thường. Đa số các trường hợp như vậy thuộc thế giới *vi mô*. Chúng ta đã đề cập tới electron trong máy gia tốc hạt hay trong ống tia cathode của các TV màu cổ xưa. Các hạt tạo nên tia vũ trụ là một thí dụ nữa; tia vũ trụ khá quan trọng vì năng lượng lớn của chúng đã tạo ra nhiều đột biến sinh học, là nền tảng cơ bản cho sự tiến hoá của động vật và thực vật trên hành tinh này. Sau này ta sẽ khám phá ra là các hạt có liên quan đến phóng xạ cũng có tính tương đối.

Nhưng tại sao ta không thấy *các vật vĩ mô* tương đối tính? Vì vũ trụ đã có từ lâu! Các vật thể va chạm với vận tốc tương đối tính trải qua các quá trình không xảy ra trong cuộc sống hằng ngày: khi chúng va chạm, động năng của chúng biến thành vật chất mới theo công thức $E = c^2\gamma m$. Trong lịch sử vũ trụ điều này xảy ra nhiều đến nỗi thực tế là mọi vật vĩ mô đều chuyển động với tốc độ nhỏ đối với môi trường và mọi vật vi mô đều chuyển động tương đối tính.

Lý do thứ nhì của việc biến mất các chuyển động tương đối nhanh là sự tắt dần của bức xạ. Bạn có thể tưởng tượng điều gì sẽ xảy ra cho các *điện tích tương đối tính* trong các va chạm, hay trong một luồng ánh sáng không? Sự tắt dần của bức xạ cũng làm chậm các hạt vi mô.

Câu đố 95 s

Tóm lại, hầu như mọi vật chất trong vũ trụ đều chuyển động với vận tốc nhỏ đối với vật khác. Có một vài phản thí dụ nổi tiếng thì, hoặc là rất cũ như luồng vật chất của quasar đã đề cập ở trên, hoặc là mất đi rất nhanh. Thí dụ, nguồn năng lượng khổng lồ cần cho các chuyển động tương đối tính vĩ mô thì có sẵn trong các vụ nổ của các siêu tân tinh, nhưng các chuyển động tương đối tính sẽ mất đi sau vài tuần. Tóm lại, vũ trụ

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

đẩy các chuyển động chậm chạp vì nó đã *già*. Thật vậy, ta sẽ xác định tuổi vũ trụ ngay
Trang 236 sau đây.

Lịch sử của công thức tương đương năng-khối lượng

Sau bài báo đầu tiên về Thuyết tương đối đặc biệt Albert Einstein đã mất nhiều tháng để chứng minh công thức

$$E = c^2 \gamma m \tag{44}$$

thường được cho là công thức vật lý nổi tiếng nhất. Ta viết công thức này dưới dạng hơi khác thường một chút, nhưng lại là cách viết rõ ràng để nhấn mạnh rằng c^2 là một hệ số phụ thuộc đơn vị và *không quan trọng*. Những hệ số như vậy luôn đặt đằng trước một
Xem 19 công thức vật lý.* Einstein công bố công thức này trong một bài báo riêng cuối năm 1905. Tuy vậy người ta cho rằng công thức này có thể đã được khám phá trước đó 30 năm, từ lý thuyết điện từ.

Đúng ra thì nhiều người đã chứng minh được kết quả tương tự trước Einstein. Năm 1903 và 1904, *trước* bài báo đầu tiên về Thuyết tương đối của Einstein, Olinto De Pretto,
Xem 86 một kỹ sư Ý ít tiếng tăm, đã tính toán, bàn luận và công bố công thức $E = c^2 m$. Có nhiều khả năng là Einstein đã lấy ý tưởng về công thức đó từ De Pretto,** thông qua bạn bè như Michele Besso hay những người bạn nói tiếng Ý mà ông đã gặp khi ông đến thăm cha mẹ lúc đó đang sống ở Italy. Dĩ nhiên điều này không làm giảm bớt giá trị những nỗ lực của Einstein.

Thật vậy, một công thức tương tự đã được Friedrich Hasenöhrl chứng minh năm 1904
Xem 86 và công bố trong Annalen der Physik năm 1905, trước Einstein, mặc dù chứa một hệ số không đúng do lỗi tính toán. Công thức $E = c^2 m$ cũng có mặt trong nhiều biểu thức trong hai bài báo năm 1900 của Henri Poincaré. Paul Langevin cũng biết công thức này, và Einstein khi nói về Langevin cũng cho rằng chắc chắn Paul sẽ khám phá ra Thuyết tương đối đặc biệt nếu chưa có ai làm điều đó. Tolver Preston cũng đã bàn luận về sự tương đương giữa khối lượng và năng lượng, năm 1875, trong cuốn sách *Vật lý Ether của ông*. Người hùng thực sự của câu chuyện này có lẽ là hoá học gia Thuỵ Sĩ Jean Charles Gallisard de Marignac; ngay từ năm 1861 đã công bố ý tưởng, mà hiện nay được công nhận, về sự hình thành các nguyên tố: khi proton hợp thành các nguyên tố, sự ngưng tụ làm khối lượng toàn phần giảm đi và độ chênh lệch phát ra dưới dạng năng lượng. Ý tưởng tương đương năng–khối lượng đã thực sự lơ lửng trong không khí, chờ con người tìm hiểu và đặt vào ngữ cảnh thích hợp.

Vào những năm 1970, một câu chuyện tương tự đã xảy ra: một hệ thức đơn giản giữa gia tốc và nhiệt độ của chân không đã được khám phá. Kết quả này đã chờ con người
Quyển V, trang 146 khám phá trong hơn 50 năm. Thực ra nhiều kết quả tương tự trước đó đã được người ta tìm thấy trong thư viện. Còn nhiều hệ thức đơn giản khác ẩn giấu trong vật lý hiện đại
Câu đố 96 s đang chờ được khám phá hay không?

* Những thí dụ khác là $A = 4\pi r^2$, $a = Gm/r^2$, $U = RI$, $F = (1/4\pi\varepsilon_0)Q^2/r^2$, $pV = RT$ hay $S = k \ln W$.

** Umberto Bartocci, giáo sư toán Đại học Perugia ở Italy, đã kể chi tiết về câu chuyện đáng ngạc nhiên này
Xem 87 trong nhiều bài báo và trong một cuốn sách.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Vector 4 chiều

Làm thế nào để chúng ta có thể mô tả chuyển động một cách nhất quán đối với *mọi* quan sát viên, ngay cả trong trường hợp chuyển động với tốc độ gần tốc độ ánh sáng? Chúng ta phải đề xuất một ý tưởng đơn giản: vector 4 chiều. Ta đã biết rằng chuyển động của một hạt có thể xem như một chuỗi các *biến cố*. Biến cố là các điểm trong không-thời gian. Để mô tả các biến cố một cách chính xác, ta dùng toạ độ biến cố, còn gọi là *toạ độ 4 chiều*. Toạ độ này được viết dưới dạng

$$\boldsymbol{X} = (ct, \boldsymbol{x}) = (ct, x, y, z) = X^i \,. \tag{45}$$

Bằng cách này, một biến cố là một điểm trong không-thời gian 4 chiều, và được mô tả bằng 4 toạ độ. Bốn toạ độ được gọi là toạ độ thứ *zero*, đó là thời gian $X^0 = ct$, thứ *nhất*, thường gọi là $X^1 = x$, thứ *nhì*, $X^2 = y$, và thứ *ba*, $X^3 = z$. Thực ra, $\boldsymbol{X}$ là thí dụ đơn giản nhất của *vector 4 chiều*. Vector thông thường $\boldsymbol{x}$ của vật lý Galilei còn được gọi là *vector 3 chiều*. Ta thấy rằng thời gian được xem như toạ độ thứ zero trong 4 chiều.

Bây giờ ta đã có thể định nghĩa *khoảng cách không-thời gian* hay *khoảng không-thời gian* giữa 2 biến cố là chiều dài của vector hiệu $\boldsymbol{X}$. Đúng ra ta thường dùng bình phương của chiều dài, *độ lớn của vector*, để tránh trường hợp khó sử dụng căn bậc 2. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, *độ lớn* $\boldsymbol{X}^2$ của vector 4 chiều bất kỳ $\boldsymbol{X}$ được định nghĩa như sau

$$\boldsymbol{X}^2 = {X_0}^2 - {X_1}^2 - {X_2}^2 - {X_3}^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = X_a X^a = \eta_{ab} X^a X^b = \eta^{ab} X_a X_b \,. \tag{46}$$

Khoảng không-thời gian bình phương bằng khoảng thời gian bình phương *trừ* khoảng không gian bình phương. Theo trên ta đã biết dấu trừ này là hệ quả của tính bất biến của tốc độ ánh sáng. Trái với khoảng không gian bình phương, khoảng không-thời gian có thể dương, âm hay bằng không.

Trang 44

Làm cách nào để tưởng tượng ra khoảng không-thời gian? Độ lớn của *khoảng không-thời gian* là bình phương của c nhân cho thời gian riêng. *Thời gian riêng* là thời gian của đồng hồ chuyển động thẳng đều giữa hai biến cố trong không-thời gian. Thí dụ, nếu biến cố bắt đầu và kết thúc trong không-thời gian đòi hỏi chuyển động với tốc độ ánh sáng, thời gian riêng và khoảng không-thời gian sẽ biến mất. Đây là trường hợp biểu diễn bằng *vector null* hay khoảng *loại ánh sáng*. Ta gọi tập hợp các điểm ngọn của mọi vector null là hình nón ánh sáng; nó được biểu diễn trong Hình 47. Nếu chuyển động giữa hai biến cố *chậm hơn* tốc độ ánh sáng, thời gian riêng bình phương dương và khoảng không-thời gian được gọi là khoảng loại thời gian. Đối với khoảng không-thời gian âm khoảng được gọi là khoảng loại không gian. Trong trường hợp này, độ lớn đổi dấu, thành số dương, được gọi là *khoảng cách riêng* bình phương. Khoảng cách riêng là chiều dài đo bằng một hành trình kế khi vật chuyển động.

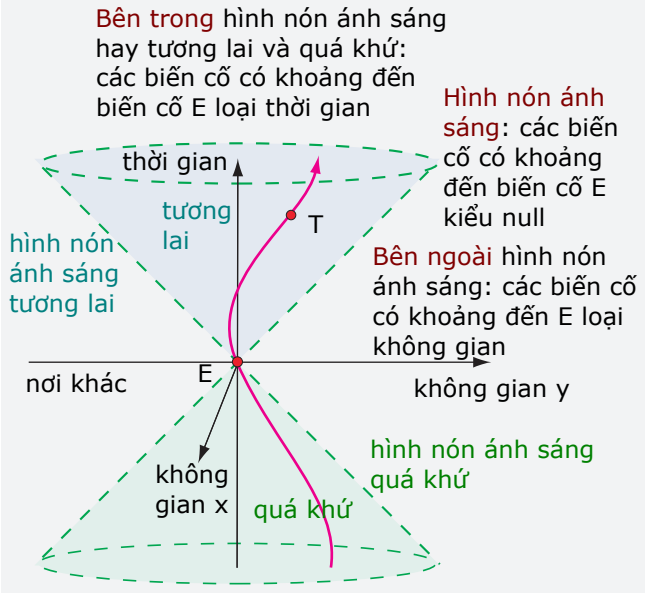
Trang 49

Ta cũng cần chú ý rằng định nghĩa của hình nón ánh sáng, miền trong và ngoài của hình nón, thì *bất biến đối với quan sát viên*. Do đó ta sẽ thường xuyên sử dụng khái niệm này.

Câu đố 97 e

Trong định nghĩa của khoảng không-thời gian, lần đầu tiên ta đã đưa ra 2 ký hiệu tiện dụng trong Thuyết tương đối. Đầu tiên, ta tự động tính tổng trên các chỉ số lặp lại. Như vậy, $X_a X^a$ có nghĩa là tổng của mọi tích $X_a X^a$ khi a chạy trên mọi chỉ số. Thứ đến,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 47 Sơ đồ không-thời gian của một vật chuyển động T, bỏ bớt một chiều không gian.

đối với mọi vector 4 chiều $\boldsymbol{X}$ ta phân biệt hai cách viết toạ độ, đó là toạ độ với *chỉ số trên* và toạ độ với *chỉ số dưới*. (Đối với vector 3 chiều, ta chỉ dùng chỉ số dưới.) Chúng liên hệ với nhau theo hệ thức tổng quát sau đây

$$\begin{aligned} X^b &= (ct, x, y, z) \\ X_a &= (ct, -x, -y, -z) = \eta_{ab} X^b \,, \end{aligned} \tag{47}$$

trong đó ta giới thiệu thêm khái niệm *metric* η^{ab}, viết tắt của matrix*

$$\eta^{ab} = \eta_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \tag{48}$$

Đừng lo sợ: đây là tất cả, sẽ không còn điều gì khó hơn! (Dạng tổng quát hoá của matrix này sẽ được dùng trong Thuyết tương đối tổng quát.) Bây giờ ta trở lại với vật lý; đặc biệt, ta đã sẵn sàng mô tả chuyển động trong không-thời gian.

VẬN TỐC 4 CHIỀU

Bây giờ ta định nghĩa vận tốc của một vật theo cách có thể hữu dụng cho mọi quan sát viên. Ta không thể định nghĩa bằng cách lấy đạo hàm toạ độ vật theo thời gian, vì thời gian và dãy thời gian phụ thuộc vào quan sát viên. Giải pháp cho vấn đề này là định

Xem 88

* Đây là *quy ước loại thời gian*, được dùng trong khoảng 70 % sách giáo khoa vật lý trên thế giới. Còn 30 % sách giáo khoa vật lý dùng $-\eta$, theo *quy ước loại không gian* và như vậy có dấu ngược với định nghĩa này.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

nghĩa mọi biến động lực theo *thời gian riêng* τ như mới vừa đề cập, là thời gian của đồng hồ gắn liền với vật. Trong Thuyết tương đối, chuyển động và sự thay đổi luôn được đo đối với đồng hồ gắn liền với hệ chuyển động.

Do đó *vận tốc tương đối tính* hay *vận tốc 4 chiều* $\boldsymbol{U}$ của một vật được định nghĩa như tốc độ biến thiên của toạ độ 4 chiều $\boldsymbol{X} = (ct, \boldsymbol{x})$ đối với thời gian riêng, nghĩa là, bằng

$$\boldsymbol{U} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{X}}{\mathrm{d}\tau} \,. \tag{49}$$

Toạ độ $\boldsymbol{X}$ được đo trong hệ toạ độ được xác định bởi quan sát viên quán tính đã chọn. Giá trị của vận tốc 4 chiều $\boldsymbol{U}$ phụ thuộc vào quan sát viên hay hệ toạ độ được dùng, giống như vận tốc thông thường trong đời sống hằng ngày. Sử dụng $\mathrm{d}t = \gamma \, \mathrm{d}\tau$ ta được

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \gamma \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \,, \quad \text{trong đó như thường lệ} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \,, \tag{50}$$

Ta kiếm được hệ thức giữa vận tốc 4 chiều với vận tốc 3 chiều $\boldsymbol{v} = \mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}t$:

$$U^0 = \gamma c \,, \, U^i = \gamma v_i \quad \text{hay} \quad \boldsymbol{U} = (\gamma c, \gamma \boldsymbol{v}) \,. \tag{51}$$

Khi vận tốc nhỏ ta có $\gamma \approx 1$, và như vậy 3 thành phần cuối của vận tốc 4 chiều là vận tốc 3 chiều Galilei thông thường. Về phần độ lớn của vận tốc 4 chiều $\boldsymbol{U}$ ta tìm được $\boldsymbol{U}\boldsymbol{U} = U_a U^a = \eta_{ab} U^a U^b = c^2$, độc lập với độ lớn của vận tốc 3 chiều $\boldsymbol{v}$ và khiến nó thành vector loại thời gian, nghĩa là một vector *nằm trong* hình nón ánh sáng.

Một cách tổng quát, một *vector 4 chiều* được định nghĩa là đại lượng (H^0, H^1, H^2, H^3) qua phép biến đổi Lorentz sẽ trở thành

$$\begin{aligned} H^0_V &= \gamma_V (H^0 - H^1 V/c) \\ H^1_V &= \gamma_V (H^1 - H^0 V/c) \\ H^2_V &= H^2 \\ H^3_V &= H^3 \end{aligned} \tag{52}$$

khi đổi từ quan sát viên quán tính này sang quan sát viên quán tính khác chuyển động với vận tốc tương đối V theo hướng x; sự tổng quát hoá tương ứng đối với các toạ độ khác cũng dễ hiểu. Hệ thức này cho phép ta suy diễn các định luật biến đổi tương đối tính cho một vector 3 chiều bất kỳ. Bạn có thể chứng minh công thức tổng hợp vận tốc 3 chiều (9) từ định nghĩa này không?

Câu đố 98 s

Ta đã biết độ lớn của vector 4 chiều có thể bằng 0 mặc dù mọi thành phần của vector thì khác 0. Một vector như thế được gọi là vector *null*. Chuyển động nào có vận tốc là vector null ?

Câu đố 99 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Gia tốc 4 chiều và gia tốc riêng

Tương tự vận tốc 4 chiều, *gia tốc 4 chiều* $\boldsymbol{B}$ của một vật được định nghĩa như sau

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{U}}{\mathrm{d}\tau} = \frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{X}}{\mathrm{d}\tau^2} \,. \tag{53}$$

Thay $\mathrm{d}\gamma/\mathrm{d}\tau = \gamma \mathrm{d}\gamma/\mathrm{d}t = \gamma^4 \boldsymbol{va}/c^2$, ta kiếm được hệ thức giữa 4 thành phần của $\boldsymbol{B}$ và gia
Xem 89 tốc 3 chiều $\boldsymbol{a} = \mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t$:

$$B^0 = \gamma^4 \frac{\boldsymbol{va}}{c} \quad , \quad B^i = \gamma^2 a_i + \gamma^4 \frac{(\boldsymbol{va})v_i}{c^2} \,. \tag{54}$$

Câu đố 100 e Dễ dàng tìm được độ lớn B của gia tốc 4 chiều nhờ công thức $\boldsymbol{BB} = \eta_{cd} B^c B^d = -\gamma^4(a^2 + \gamma^2(\boldsymbol{va})^2/c^2) = -\gamma^6(a^2 - (\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{a})^2/c^2)$. Cần lưu ý độ lớn phụ thuộc vào giá trị của gia tốc 3 chiều $\boldsymbol{a}$. Ta thấy rằng một vật có gia tốc đối với một quan sát viên quán tính thì cũng có gia tốc đối với mọi quan sát viên quán tính khác. Ta cũng thấy ngay rằng gia tốc 3 chiều *không* phải là bất biến Lorentz, trừ trường hợp vận tốc nhỏ so với tốc độ ánh sáng.

▷ Các quan sát viên quán tính khác nhau sẽ đo được các gia tốc 3 chiều khác nhau.

Điều này khác với kinh nghiệm thông thường của chúng ta cũng như khác với vật lý Galilei, khi gia tốc *độc lập* với tốc độ quan sát viên.

Ta cũng nên nhớ rằng gia tốc 4 chiều nằm *ngoài* hình nón ánh sáng hay nó là vector loại không gian. Ta cũng chú ý thêm vì $\boldsymbol{BU} = \eta_{cd} B^c U^d = 0$ nên gia tốc 4 chiều luôn luôn *vuông góc* với vận tốc 4 chiều.*

Khi gia tốc 3 chiều $\boldsymbol{a}$ song song với vận tốc 3 chiều $\boldsymbol{v}$, ta có $B = \gamma^3 a$; khi $\boldsymbol{a}$ vuông góc với $\boldsymbol{v}$, như trong chuyển động tròn, ta có $B = \gamma^2 a$. Ta sẽ còn dùng đến kết quả này.

Gia tốc 3 chiều thay đổi như thế nào khi chuyển từ quan sát viên quán tính này sang quan sát viên quán tính khác? Để đơn giản lý luận, ta đưa thêm khái niệm *quan sát viên đồng hành*, là quan sát viên mà đối với người đó hạt xem như đứng yên. Ta gọi độ lớn của gia tốc 3 chiều đối với quan sát viên đồng hành là *gia tốc riêng* hay gia tốc đồng hành; trong trường hợp này $\boldsymbol{B} = (0, \boldsymbol{a})$ và $\boldsymbol{B}^2 = -a^2$. Gia tốc riêng mô tả điều mà quan sát viên đồng hành *cảm nhận*: gia tốc riêng mô tả kinh nghiệm bị đẩy vào lưng ghế đang tăng tốc. Gia tốc riêng là khái niệm quan trọng và hữu dụng nhất khi ta nghiên cứu chuyển động có gia tốc trong Thuyết tương đối.

---

* Tương tự, *độ biến thiên gia tốc 4 chiều* $\boldsymbol{J}$ của một vật là

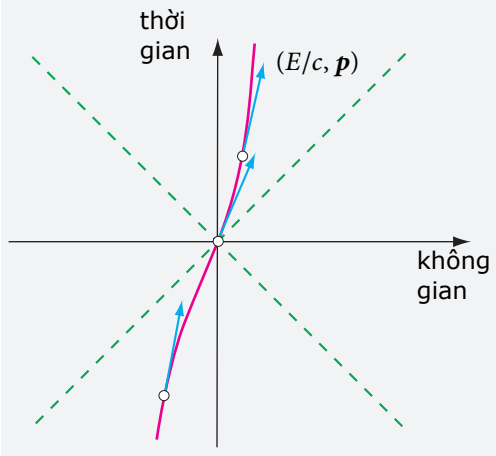
$$\boldsymbol{J} = \mathrm{d}\boldsymbol{B}/\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}^2\boldsymbol{U}/\mathrm{d}\tau^2 \,. \tag{55}$$

Câu đố 101 e với công thức của độ biến thiên gia tốc 3 chiều là $\boldsymbol{j} = \mathrm{d}\boldsymbol{a}/\mathrm{d}t$ ta kiếm được hệ thức

$$\boldsymbol{J} = (J^0, J^i) = \left(\frac{\gamma^5}{c}(\boldsymbol{jv} + a^2 + 4\gamma^2 \frac{(\boldsymbol{va})^2}{c^2}) \,,\, \gamma^3 j_i + \frac{\gamma^5}{c^2}((\boldsymbol{jv})v_i + a^2 v_i + 4\gamma^2 \frac{(\boldsymbol{va})^2 v_i}{c^2} + 3(\boldsymbol{va})a_i) \right) \tag{56}$$

Trang 96 mà sau này ta sẽ dùng đến. Điều ngạc nhiên là, $\boldsymbol{J}$ không triệt tiêu khi độ biến thiên gia tốc 3 chiều $\boldsymbol{j}$ triệt
Câu đố 102 e tiêu. Tại sao lại không nhỉ?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 48 Năng–động lượng tiếp xúc với đường thế giới.

Gia tốc riêng là một đại lượng quan trọng, vì không có quan sát viên nào, bất kể tốc độ của anh ta đối với vật chuyển động, đo được gia tốc 3 chiều lớn hơn gia tốc riêng, như ta sẽ thấy ngay sau đây.

Ta có thể tìm được hệ thức giữa gia tốc 3 chiều $\boldsymbol{a}$ do một quan sát viên *quán tính* tổng quát đo được với gia tốc riêng $\boldsymbol{a}_c$ do một quan sát viên đồng hành đo được bằng cách dùng các biểu thức (54) và (52). Trong trường hợp này $\boldsymbol{v}$ vừa là tốc độ tương đối giữa hai quan sát viên vừa là tốc độ của hạt được gia tốc. Ta có

Xem 90

$$a^2 = \frac{1}{\gamma_v^4}\left(a_c^2 - \frac{(\boldsymbol{a}_c \boldsymbol{v})^2}{c^2}\right) , \tag{57}$$

mà ta đã biết dưới dạng hơi khác một chút. Một lần nữa ta (lại) thấy:

Trang 82

▷ Gia tốc 3 chiều riêng (đồng hành) luôn luôn *lớn hơn* gia tốc 3 chiều do mọi quan sát viên quán tính khác đo được.

Quan sát viên quán tính càng chuyển động nhanh đối với hệ được gia tốc, thì sẽ thấy gia tốc 3 chiều càng nhỏ. Biểu thức trên cũng chứng tỏ rằng khi vận tốc vuông góc với gia tốc, phép biến đổi Lorentz sẽ có hệ số biến đổi là $1/\gamma_v^2$, còn trường hợp vận tốc song song với gia tốc thì hệ số biến đổi là $1/\gamma_v^3$.

Câu đố 103 e

Tính chất cực đại của gia tốc riêng dẫn tới một điều là, khác với vận tốc, *không thể* xem gia tốc có tính tương đối. Nói cách khác, chỉ xem gia tốc có tính tương đối khi vận tốc lớn. Nếu vận tốc nhỏ, vẫn có thể dùng vật lý Galilei để tính toán gia tốc (dù rất lớn).

ĐỘNG LƯỢNG 4 CHIỀU HAY NĂNG–ĐỘNG LƯỢNG

Để mô tả chuyển động, ta cần khái niệm động lượng. *Động lượng 4 chiều* được định nghĩa như sau

$$\boldsymbol{P} = m\boldsymbol{U} \tag{58}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

và liên hệ với động lượng 3 chiều $\boldsymbol{p}$ theo công thức

$$\boldsymbol{P} = (\gamma mc, \gamma m\boldsymbol{v}) = (E/c, \boldsymbol{p}) \,. \tag{59}$$

Vì lý do này động lượng 4 chiều còn được gọi là *v*ector năng–động lượng 4 chiều. Tóm lại,

▷ Động lượng 4 chiều hay năng–động lượng của một vật thì bằng khối lượng vật nhân với độ dời 4 chiều trong một đơn vị thời gian riêng.

Đây là định nghĩa đơn giản nhất của động lượng và năng lượng. Khái niệm này do Max Planck đưa ra năm 1906.

Vector năng–động lượng 4 chiều, đôi khi được gọi là *động năng lượng*, giống vận tốc 4 chiều, *tiếp xúc* với đường thế giới của hạt. Điều này được biểu diễn trong Hình 48, là hệ quả trực tiếp của định nghĩa, vì

$$(E/c, \boldsymbol{p}) = (\gamma mc, \gamma m\boldsymbol{v}) = m(\gamma c, \gamma \boldsymbol{v}) = m(c\mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau, \mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}\tau) \,. \tag{60}$$

(Bình phương) chiều dài của năng động lượng, chính là $\boldsymbol{PP} = \eta_{ab}P^aP^b$, tương tự bình phương chiều dài của một vector 4 chiều bất kỳ, đều giống nhau đối với mọi quan sát viên quán tính; người ta tìm được là

$$E^2/c^2 - p^2 = c^2m^2 \,, \tag{61}$$

đủ để khẳng định kết quả trên. Như ta đã nói từ trước, năng lượng được xem là có *tính tương đối* nếu động năng $T = E - E_0$ không thể bỏ qua khi so với năng lượng nghỉ $E_0 = c^2m$. Hạt có động năng lớn hơn năng lượng nghỉ của nó *nhiều lần* được gọi là hạt *siêu tương đối tính*. Các hạt trong máy gia tốc hay trong tia vũ trụ thuộc loại hạt này. Mối liên hệ năng-động lượng của chúng là gì?

Câu đố 104 s

Định luật bảo toàn năng lượng, động lượng và khối lượng của cơ học Galilei trong Thuyết tương đối được hợp nhất thành định luật bảo toàn năng động lượng:

▷ Trong thiên nhiên, năng-động lượng, được bảo toàn.

Đặc biệt, khối lượng không phải là đại lượng được bảo toàn.

Khác với cơ học Galilei, Thuyết tương đối bao hàm năng lượng *zero tuyệt đối*. Ta không thể thu được năng lượng lớn hơn c^2m từ hệ có khối lượng nghỉ m. Đặc biệt, giá trị zero tuyệt đối của thế năng được ấn định theo quy tắc này. Tóm lại, Thuyết tương đối chứng tỏ rằng năng lượng bị chặn dưới. Trong thiên nhiên không có nguồn năng lượng vô hạn.

Không phải tất cả năng lượng Galilei đều góp phần vào khối lượng: thí dụ thế năng của trường bên ngoài. Thuyết tương đối buộc chúng ta tính toán năng lượng thật chính xác. Sau này ta cần nhớ rằng 'thế năng' trong Thuyết tương đối là viết tắt của 'năng lượng thu gọn của ngoại trường'.

Bạn có thể chứng minh rằng đối với hai hạt có động lượng 4 chiều P_1 và P_2, ta có

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

$P_1P_2 = m_1E_2 = m_2E_1 = c^2\gamma_{12}m_1m_2$, với γ_{12} là hệ số Lorentz do vận tốc tương đối v_{12} giữa hai hạt không?

Câu đố 105 s

Hãy nhớ rằng với từ 'khối lượng' m ta muốn nói đến cái đôi khi được gọi là *khối lượng nghỉ*. Danh từ này dẫn xuất từ thói quen cũ của nhiều tiểu thuyết khoa học giả tưởng và sách giáo khoa trung học hay gọi tích γm là *khối lượng tương đối tính*. Các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực này thường (nhưng không nhất trí) bỏ khái niệm này, như chính Einstein đã làm, và họ cũng bỏ luôn phát biểu mà bạn thường hay nghe là 'khối lượng (tương đối tính) tăng theo vận tốc'. Khối lượng và năng lượng tương đối tính chỉ cùng một khái niệm: đây là cách nói của các tờ báo lá cải.

Xem 91

Lực 4 chiều – và bản chất của cơ học

Lực 4 chiều $\boldsymbol{K}$ được định nghĩa theo động lượng 4 chiều $\boldsymbol{P}$ như sau

$$\boldsymbol{K} = \mathrm{d}\boldsymbol{P}/\mathrm{d}\tau = m\boldsymbol{B}\,, \tag{62}$$

với $\boldsymbol{B}$ là gia tốc 4 chiều. Do đó, trong Thuyết tương đối, lực vẫn còn bằng khối lượng nhân với gia tốc. Từ định nghĩa của $\boldsymbol{K}$ ta suy ra mối liên hệ với lực 3 chiều $\boldsymbol{F} = \mathrm{d}\boldsymbol{p}/\mathrm{d}t = m\mathrm{d}(\gamma\boldsymbol{v})/\mathrm{d}t$, đó là*

Xem 89, Xem 92

$$\boldsymbol{K} = (K^0, K^i) = \left(\gamma^4\frac{m\boldsymbol{v}\boldsymbol{a}}{c}, \gamma^2 m a_i + \gamma^4 v_i\frac{m\boldsymbol{v}\boldsymbol{a}}{c^2}\right) = \left(\frac{\gamma}{c}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}, \gamma\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}\right) = \left(\gamma\frac{\boldsymbol{F}\boldsymbol{v}}{c}, \gamma\boldsymbol{F}\right)\,. \tag{63}$$

Lực 4 chiều, giống gia tốc 4 chiều, vuông góc với vận tốc 4 chiều. Ý nghĩa của thành phần zero của lực 4 chiều có thể thấy rõ: đó là *công suất* cần thiết để gia tốc vật. Thật vậy, ta có $\boldsymbol{K}\boldsymbol{U} = c^2\mathrm{d}m/\mathrm{d}\tau = \gamma^2(\mathrm{d}E/\mathrm{d}t - \boldsymbol{F}\boldsymbol{v})$: đây là tốc độ gia tăng nội năng riêng của hệ. Tích $\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}$ chỉ triệt tiêu đối với các lực bảo toàn khối lượng nghỉ. Sự va chạm nhiều hạt dẫn đến các phản ứng và do đó không thuộc lớp lực này; những va chạm và lực như vậy không bảo toàn khối lượng nghỉ. Tuy vậy trong đời sống hằng ngày, khối lượng nghỉ bảo toàn và lúc đó ta kiếm được biểu thức Galilei của công suất $\boldsymbol{F}\boldsymbol{v} = \mathrm{d}E/\mathrm{d}t$.

Câu đố 106 e

Đối với các lực bảo toàn khối lượng nghỉ ta có $\boldsymbol{F} = \gamma m\boldsymbol{a} + (\boldsymbol{F}\boldsymbol{v})\boldsymbol{v}/c^2$. Nói cách khác, trong trường hợp tổng quát, lực 3 chiều và gia tốc 3 chiều không song song và cũng không tỷ lệ với nhau. Ngược lại, như ta đã thấy ở trên động lượng 3 chiều thì song song, nhưng không tỷ lệ với vận tốc 3 chiều.

Câu đố 107 s

Ta cũng cần nhớ rằng lực 3 chiều hay *lực riêng*, có giá trị khả hữu lớn nhất trong hệ quy chiếu đồng hành. Một phép biến đổi Lorentz giữ cho thành phần của lực theo hướng biến đổi không đổi và làm giảm thành phần vuông góc với hướng biến đổi. Đặc biệt, không thể dùng phép biến đổi Lorentz để làm tăng vô hạn cường độ lực 3 chiều. (Mặc dù đối với cường độ lực 4 chiều thì chúng có thể.) Tình trạng hơi giống trường hợp gia tốc 3 chiều, mặc dù có khác trong tác dụng của phép biến đổi.

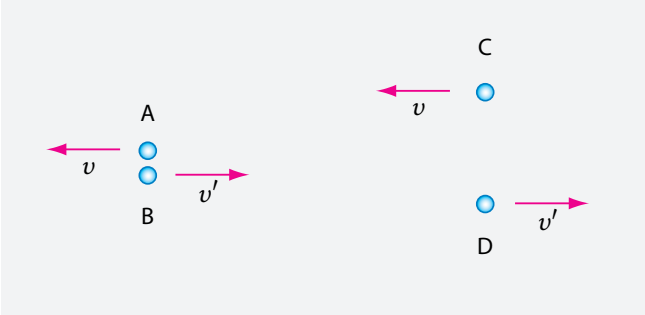
Câu đố 108 e

Trang 83

Như vậy cũng có thể gọi lực 4 chiều là vector *lực–công suất* 4 chiều. Trong cơ học Galilei, khi ta định nghĩa lực, ta cũng khảo sát cả thế. Tuy vậy, trong Thuyết tương đối đặc biệt thì làm điều này không dễ. Khác với cơ học Galilei, nơi mà tương tác và thế có thể có tác động mong muốn bất kỳ, Thuyết tương đối đặc biệt có những yêu cầu nghiêm

* Có tác giả định nghĩa lực 3 chiều là $\mathrm{d}\boldsymbol{p}/\mathrm{d}\tau$; lúc đó $\boldsymbol{K}$ sẽ hơi khác một chút.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 49 Về định nghĩa của vận tốc tương đối (xem bài học).

Xem 93 ngặt. Không thể định nghĩa thế và tương tác sao cho có ý nghĩa với mọi quan sát viên – trừ trường hợp thế có liên quan tới các trường có thể mang năng lượng và động lượng. Nói cách khác,

▷ Thuyết tương đối chỉ cho phép những thế có liên quan tới bức xạ.

Thật vậy, theo Thuyết tương đối chỉ có hai loại thế được phép trong đời sống thông thường: thế do trường điện từ và thế do trường hấp dẫn. (Trong lĩnh vực vi mô, cũng chỉ có thể có hai loại tương tác hạt nhân.) Đặc biệt, kết quả này còn hàm ý: khi hai vật thông thường va chạm, thì va chạm hoặc là do trường hấp dẫn hoặc là do điện trường. Nói rõ hơn: Thuyết tương đối cấm các tương tác 'cơ học thuần tuý'. Cơ học không phải là một phần cơ bản của thiên nhiên. Thật vậy, trong quyển về Thuyết lượng tử, ta sẽ khẳng định một điều là mọi hiện tượng *cơ* trong đời sống hằng ngày, không có ngoại lệ, đều là hiện tượng *điện từ*. Mọi âu yếm và mọi nụ hôn đều là các quá trình điện từ. Diễn tả cách khác, và xem ánh sáng là một quá trình điện từ, ta có thể nói: nếu ta đập mạnh hai vật bất kỳ vào nhau, chắc chắn ta sẽ tạo ra ánh sáng.

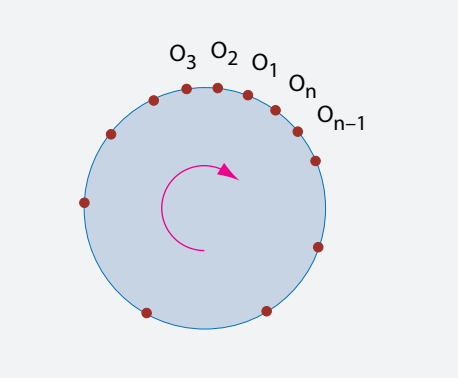
Việc bao gồm lực hấp dẫn vào Thuyết tương đối sẽ hình thành Thuyết tương đối tổng quát. Trong Thuyết tương đối tổng quát, Vector công suất–lực vừa định nghĩa có vai trò rất quan trọng. Hoá ra là trong thiên nhiên, lực 3 chiều $\boldsymbol{F}$ và công suất 3 chiều $\boldsymbol{Fv}$ có độ Câu đố 109 d lớn giới hạn. Bạn có thể đoán ra là chúng bị giới hạn như thế nào không?

Chuyển động quay trong Thuyết tương đối

Nếu vào ban đêm ta quay quanh trục riêng của mình trong khi nhìn lên bầu trời, các ngôi sao sẽ chuyển động với vận tốc lớn hơn tốc độ ánh sáng rất nhiều. Phần lớn ngôi sao là các vật thể, không phải hình ảnh. Tốc độ của chúng bị giới hạn bởi tốc độ ánh sáng. Làm cách nào để điều này phù hợp với Thuyết tương đối đặc biệt?

Thí dụ này giúp ta làm sáng tỏ ý nghĩa thực sự của vận tốc giới hạn. Nói theo ngôn ngữ vật lý, một bầu trời quay tròn *không* cho phép chuyển tải năng lượng siêu quang và như vậy không mâu thuẫn với khái niệm tốc độ giới hạn. Nói bằng ngôn ngữ toán học, tốc độ ánh sáng chỉ giới hạn vận tốc tương đối giữa các vật *gần* nhau, như đã thấy bên trái Hình 49. Để có thể so sánh vận tốc của các vật *cách xa nhau*, như giữa chúng ta và các vì sao, thì tất cả các vận tốc liên quan đều phải không đổi theo thời gian; đây không phải là trường hợp quay của chúng ta. Phép biến đổi Lorentz dạng vi phân sẽ làm rõ điều

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 50 Các quan sát viên trên một vật quay tròn.

này. Thật vậy, vận tốc tương đối của các vật *ở xa* thường lớn hơn tốc độ ánh sáng. Trước kia ta đã gặp một thí dụ, khi bàn về chiếc xe trong đường hầm và ta sẽ gặp nhiều thí dụ nữa.

Trang 62
Trang 102

Với sự phân định rõ ràng này, ta có thể bàn luận vắn tắt về *chuyển động quay* trong Thuyết tương đối. Câu hỏi đầu tiên là chiều dài và thời gian sẽ thay đổi như thế nào trong một hệ quy chiếu quay tròn. Có thể bạn muốn kiểm tra xem một quan sát viên trong một hệ quy chiếu quay tròn có đồng ý với quan sát viên khác (không quay) về bán kính của vật đang quay hay không; tuy vậy, cả hai đều nhận thấy rằng vật đang quay, cho dù là vật rắn, vẫn có chu vi *khác* với chu vi của nó trước khi bắt đầu quay. Nói một cách tuỳ tiện, giá trị của π *thay đổi* đối với các quan sát viên quay tròn! Đối với quan sát viên quay tròn, tỷ số giữa chu vi c và bán kính r hoá ra là $c/r = 2\pi\gamma$: tỷ số này tăng theo tốc độ quay. Kết quả phản trực giác này thường được gọi là *nghịch lý Ehrenfest*. Nó chứng tỏ rằng không-thời gian đối với quan sát viên quay tròn *không phải* là không-thời gian Minkowski phẳng của Thuyết tương đối đặc biệt. Nghịch lý cũng cho thấy rằng vật rắn không hiện hữu.

Câu đố 110 e
Câu đố 111 e
Xem 94

Vật quay tròn hành xử khá kỳ lạ theo nhiều cách. Thí dụ, ta sẽ gặp khó khăn khi cố gắng đồng bộ hoá các đồng hồ gắn trên các đĩa quay tròn, như trong Hình 50. Nếu ta bắt đầu đồng bộ hoá đồng hồ ở vị trí O_2 với đồng hồ ở vị trí O_1, v.v..., liên tiếp đến đồng hồ sau cùng ở vị trí O_n, ta sẽ thấy rằng đồng hồ cuối *không* đồng bộ với đồng hồ đầu tiên. Hệ quả này phản ánh sự thay đổi chu vi như ta vừa đề cập. Thật vậy, khi xem xét cẩn thận ta sẽ thấy rằng số đo của chiều dài và thời khoảng sẽ dẫn tới việc mọi quan sát viên O_k đều kết luận rằng họ sống trong một không-thời gian quay, là không-thời gian không phẳng. Như vậy các đĩa quay tròn được dùng như phần giới thiệu Thuyết tương đối tổng quát, nơi mà độ cong của không gian và tác dụng của nó tạo thành chủ đề chính. Ta sẽ nói nhiều hơn về đề tài này trong chương kế tiếp.

Trong Thuyết tương đối, chuyển động quay và tĩnh tiến kết hợp theo những cách kỳ lạ. Hãy tưởng tượng một hình trụ quay đều quanh trục chính của nó, được quan sát bởi một người đứng yên. Như Max von Laue đã đề cập, một quan sát viên đi dọc theo trục quay sẽ thấy hình trụ bị *xoắn lại*. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Xem 26
Câu đố 112 e

Đối với người yêu xe lửa, đây là một câu đố nổi tiếng. Một xe lửa chuyển động trên một đường ray hình tròn. Xe dài bằng đường ray, và tạo thành hình tròn. Điều gì sẽ xảy ra nếu xe lửa đó chạy với vận tốc tương đối tính: rơi ra ngoài, vẫn trên đường ray hay rơi

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 113 s

vào bên trong đường ray?

Vận tốc góc có bị giới hạn hay không? Có: tốc độ tiếp tuyến trong hệ quy chiếu quán tính sẽ không thể đạt đến tốc độ ánh sáng. Giới hạn của vận tốc góc sẽ tuỳ thuộc vào *kích thước* của vật. Điều này dẫn đến một câu đố khó hơn: ta có thể *nhìn thấy* một vật

Câu đố 114 s

quay rất nhanh không?

Chúng ta cũng nói thêm, *moment động lượng 4 chiều* được định nghĩa một cách tự nhiên như sau

$$l^{ab} = x^a p^b - x^b p^a \,. \tag{64}$$

Hai chỉ số chỉ ra rằng moment động lượng 4 chiều là một *tensor* chứ không phải là một vector. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, moment động lượng cũng được bảo toàn.

Câu đố 115 e

Moment quán tính được định nghĩa là hệ số tỷ lệ giữa vận tốc góc và moment động lượng. Tiện thể, làm thế nào bạn xác định được là một hạt vi mô, không thể nhìn thấy

Câu đố 116 s

vì quá nhỏ, đang quay?

Đối với hạt đang quay, năng lượng quay là một phần của khối lượng nghỉ. Bạn có thể

Câu đố 117 e

tính toán tỷ lệ này đối với Trái đất và Mặt trời. Nó không lớn.

Đây là một số câu đố về chuyển động quay tương đối tính. Ta đã biết vận tốc có tính tương đối: số đo của nó phụ thuộc vào quan sát viên. Vận tốc góc có giống vậy không?

Câu đố 118 s

Biểu thức của năng lượng quay tương đối tính là gì? và hệ thức giữa nó và moment động

Câu đố 119 s

lượng 4 chiều là gì?

Chuyển động quay cũng gây ra *Hiệu ứng Doppler quay*. Quan sát hiệu ứng này khá rắc rối nhưng ngày nay trong những phòng thí nghiệm laser chính xác thì chỉ cần một chút khéo léo quen tay. Để thấy hiệu ứng này, người ta cần một chùm ánh sáng phân cực tròn; những chùm ánh sáng như vậy có sẵn trong nhiều phòng thí nghiệm. Khi chùm ánh sáng như vậy bị phản xạ trên một mặt quay có khả năng phân cực, tần số của chùm tia phản xạ bị dịch đi một ít. Độ dịch chuyển Doppler quay này tuỳ thuộc vào tần số quay của bề mặt phản xạ. Hiệu ứng này quan trọng trong lý thuyết về hiệu ứng Faraday; nó đã được dùng để đo vận tốc quay của các phần tử quang học khác nhau và ngay cả vận tốc quay của các phân tử. Một ngày nào đó, hiệu ứng có thể hữu dụng trong kỹ nghệ, hay trong Thiên văn học, để đo vận tốc quay của các vật quay ở xa hay các vật quay bé nhỏ.

Chuyển động sóng

Quyển I, trang 292

Sóng cũng chuyển động. Ta đã thấy sóng *điều hoà* hay sóng *hình sin* được mô tả trong vật lý Galilei, bằng tần số góc $\omega = 2\pi\nu$ và vector sóng $\boldsymbol{k}$, với $k = 2\pi/\lambda$. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, hai đại lượng này liên kết với nhau trong *vector sóng 4 chiều* $\boldsymbol{L}$ được cho bởi biểu thức

$$L^a = \left(\frac{\omega}{c}, \boldsymbol{k}\right) \,. \tag{65}$$

Như thường lệ, vận tốc pha của sóng điều hoà là $\omega/k = \lambda\nu$. Vector sóng 4 chiều *đối với ánh sáng* có độ lớn bằng 0, nó là vector null. Đối với sóng chậm, như sóng âm, vector

Câu đố 120 e

sóng 4 chiều thuộc loại thời gian.

Pha φ của sóng có thể được định nghĩa như sau

$$\varphi = L_a x^a = L^a x_a \,. \tag{66}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Pha của sóng bất kỳ, dù là ánh sáng, âm hay loại nào khác, như ta thấy, là một đại lượng vô hướng, không đổi đối với mọi quan sát viên: *pha là một bất biến tương đối tính.**

Câu đố 121 e

Giả sử một quan sát viên có vận tốc 4 chiều $\boldsymbol{U}$ thấy một sóng có vận tốc sóng 4 chiều $\boldsymbol{L}$ và tần số ν. Hãy chứng minh

$$\nu = \boldsymbol{LU} \tag{67}$$

Câu đố 122 s

Điều thú vị là, vận tốc pha 4 chiều ω/k biến đổi theo một cách khác với vận tốc hạt, trừ trường hợp $\omega/k = c$. Công thức quang sai đối với chuyển động sóng cũng khác công thức đối với chuyển động của hạt, trừ trường hợp $\omega/k = c$. Bạn có thể tìm ra hai hệ thức đó không?

Xem 25
Câu đố 123 ny

TÁC DỤNG CỦA MỘT HẠT TỰ DO – CÁC VẬT CHUYỂN ĐỘNG NHƯ THẾ NÀO?

Nếu ta muốn mô tả chuyển động tương đối tính của một hạt tự do theo nguyên lý tác dụng cực tiểu, ta cần định nghĩa *tác dụng*. Ta đã biết tác dụng vật lý là số đo của *sự thay đổi* xảy ra trong một hệ. Đối với một chuyển động quán tính hay một hạt tự do, thay đổi duy nhất là việc đếm nhịp của đồng hồ riêng của hệ. Kết quả là tác dụng của một hạt *tự do* sẽ tỷ lệ với thời gian riêng đã trôi qua. Để đơn vị chuẩn của tác dụng là đơn vị của năng lượng nhân với đơn vị thời gian, hay Js, công thức của tác dụng của một hạt tự do sẽ là

Quyển I, trang 248

$$S = -c^2 m \int_{\tau_1}^{\tau_2} \mathrm{d}\tau \,, \tag{68}$$

với τ là thời gian riêng lấy dọc theo lộ trình. Đây là một biểu thức đúng thực sự.

Nói vắn tắt, trong thiên nhiên,

▷ *Mọi* hạt đều chuyển động sao cho thời gian riêng – hay thời gian đồng hồ đeo tay – cực đại.

Nói cách khác, ta lại thấy rằng trong thiên nhiên vật thể thay đổi *ít đến mức tối thiểu*. Thiên nhiên giống như một ông già thông thái: chuyển động càng chậm càng tốt – làm càng ít càng tốt. Nếu bạn thích thì có thể nói, mọi thay đổi trong thiên nhiên có hiệu quả cực đại. Như đã đề cập ở trên, Bertrand Russell gọi điều này là *'định luật' lười vũ trụ*.

Quyển I, trang 253

Sử dụng tính bất biến của tốc độ ánh sáng, nguyên lý tác dụng cực tiểu có thể phát biểu như sau:

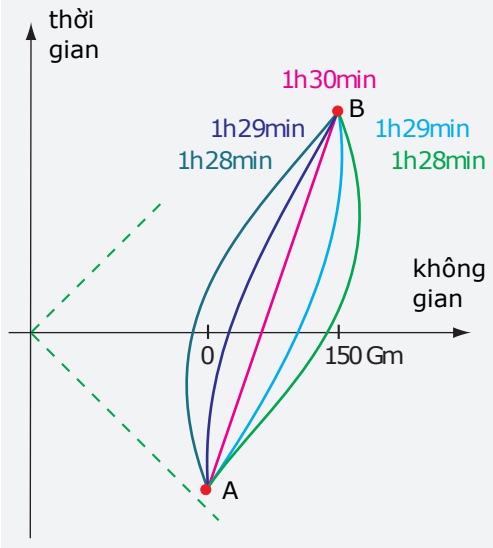
▷ Vật thể lười biếng hết mức.

Hình 51 cho thấy một số thí dụ về thời gian riêng đối với một vật chuyển động từ điểm này đến điểm kia trong không gian tự do. Chuyển động thẳng, chuyển động mà thiên nhiên đã chọn, là chuyển động có thời gian riêng *dài nhất*. (Cũng cần nhắc lại kết quả đã cho ở trên: du hành giúp bạn trẻ hơn.) Tuy vậy, sự khác biệt về thời gian riêng chỉ đáng kể đối với các tốc độ tương đối tính và các khoảng cách lớn – như đã thấy trong hình –

Trang 51

* Viết dưới dạng thành phần, các hệ thức quan trọng nhất là $(\omega/c, \mathbf{k})(ct, \mathbf{x}) = \varphi$, rồi $(\omega/c, \mathbf{k})(c, \mathbf{v}_{\text{phase}}) = 0$ và sau cùng $(\mathrm{d}\omega/c, \mathrm{d}\mathbf{k})(c, \mathbf{v}_{\text{group}}) = 0$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 51 Chuyển động thẳng giữa hai điểm A và B là chuyển động đòi hỏi thời gian riêng dài nhất.

và do đó ta sẽ không cảm thấy những tác dụng tương tự trong đời sống phi tương đối tính thông thường.

Ta cũng nên nhớ rằng thời gian riêng cực đại tương đương với tác dụng cực tiểu. Hai phát biểu có cùng ý nghĩa. Cả hai đều diễn tả nguyên lý tác dụng cực tiểu. Đối với vật tự do, thời gian riêng thay đổi nhiều nhất và tác dụng thì ít nhất đối với chuyển động thẳng *đều*. Như vậy nguyên lý tác dụng cực tiểu bao hàm định luật bảo toàn năng động lượng (tương đối tính). Bạn chứng minh điều này được không?

Câu đố 124 e

Biểu thức của tác dụng (68) do Max Planck đưa ra. Năm 1906, sau khi nghiên cứu chi tiết, ông thấy rằng lượng tử tác dụng $\hbar$, mà ông đã khám phá cùng lúc với hằng số Boltzmann k, là bất biến tương đối tính (giống hằng số Boltzmann). Bạn có thể tưởng tượng ra cách ông đã làm điều này không?

Câu đố 125 s

Tác dụng còn có thể viết dưới dạng phức tạp, khiếp đảm hơn một chút. Cách viết này thì đặc biệt thích hợp để chuẩn bị cho chúng ta tìm hiểu Thuyết tương đối tổng quát :

$$S = \int L\,\mathrm{d}t = -c^2 m \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\gamma}\,\mathrm{d}t = -mc \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sqrt{u_a u^a}\,\mathrm{d}\tau = -mc \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{\eta^{ab} \frac{\mathrm{d}x_a}{\mathrm{d}s} \frac{\mathrm{d}x_b}{\mathrm{d}s}}\,\mathrm{d}s\,, \quad (69)$$

với s là một hàm tuỳ ý, nhưng tăng đơn điệu theo τ giống như chính τ. Như thường lệ, *metric* $\eta^{\alpha\beta}$ của Thuyết tương đối đặc biệt là

$$\eta^{ab} = \eta_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (70)$$

Bạn có thể chứng minh một cách dễ dàng các công thức (69) bằng cách suy diễn phương trình của chuyển động theo cách thông thường.

Câu đố 126 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tóm lại, thiên nhiên không vội vã: mọi vật đều chuyển động sao cho đồng hồ riêng của chúng hiển thị độ trì hoãn *nhiều nhất*, so với mọi chuyển động lân cận khác. Nguyên lý tổng quát này cũng đúng đối với các hạt chịu tác dụng của lực hấp dẫn, như ta sẽ thấy trong phần về Thuyết tương đối tổng quát và đối với các hạt chịu tác dụng của các tương tác điện từ. Thật vậy, nguyên lý thời gian riêng cực đại, nghĩa là nguyên lý tác dụng cực tiểu, đúng cho *mọi* trường hợp chuyển động trong thiên nhiên như ta sẽ lần lượt khám phá sau đây. Lúc đó, ta chỉ cần nhớ rằng thời gian riêng dài nhất sẽ trở thành hiện thực khi hiệu trung bình của động năng và thế năng cực tiểu. (Bạn có thể chứng minh điều này không?) Như vậy ta sẽ phục hồi nguyên lý tác dụng cực tiểu dưới dạng thông thường của nó.

Câu đố 127 e

Quyển I, trang 248

Trước kia, ta đã thấy rằng tác dụng đo sự thay đổi xảy ra trong hệ. Thuyết tương đối đặc biệt cho thấy rằng thiên nhiên đã cực tiểu hoá sự thay đổi bằng cách cực đại hoá thời gian riêng. Trong thiên nhiên, *thời gian riêng luôn luôn cực đại*. Nói cách khác, vật sẽ di chuyển theo những đường xác định bởi *nguyên lý tuổi đời cực đại*. Bạn có thể giải thích tại sao 'tuổi đời cực đại' và 'lười biếng vũ trụ' lại tương đương với nhau không?

Câu đố 128 e

Khi bạn ném một hòn đá, ít nhiều gì đó, nó sẽ đi theo một đường parabol. Nếu nó bay cao hơn, nó sẽ phải đi nhanh hơn, để nó chậm già đi. Nếu nó bay thấp hơn, nó cũng sẽ chậm già đi, vì ở độ cao nhỏ hơn bạn sẽ trẻ hơn, như ta sẽ thấy. Như vậy đường đi thực sự phải là đường đi của tuổi đời cực đại.

Trang 152

Như vậy ta lại thấy rằng thiên nhiên trái ngược với film Hollywood: thiên nhiên thay đổi theo cách tiết kiệm nhất – mọi chuyển động đều có lượng 'hành động' nhỏ nhất. Tìm hiểu kỹ hơn về ý nghĩa sâu sắc của kết quả này là việc của bạn: hãy tận hưởng điều đó!

Các phép biến đổi bảo giác

Sự phân biệt giữa không gian và thời gian trong Thuyết tương đối đặc biệt phụ thuộc vào quan sát viên quán tính. Mặt khác, mọi quan sát viên quán tính đều đồng ý về vị trí, hình dạng và sự định hướng của hình nón ánh sáng tại một điểm. Như vậy, trong Thuyết tương đối, hình nón ánh sáng là các 'đối tượng' vật lý cơ bản. Đối với mọi chuyên gia về Thuyết tương đối, không-thời gian là một tập hợp lớn các hình nón ánh sáng. Vì tính quan trọng của các hình nón ánh sáng, ta có thể thắc mắc rằng có phải các quan sát viên quán tính mới là những người thấy các hình nón ánh sáng như nhau hay không. Điều thú vị là có *thêm* những quan sát viên khác cũng thấy như vậy.

Nhóm quan sát viên thứ nhất cũng thấy hình nón ánh sáng bất biến là những người dùng các đơn vị đo trong đó mọi khoảng thời gian và không gian đều có nhân thêm một *hệ số tỷ lệ* λ. Phép biến đổi giữa các quan sát viên này được cho bởi hệ thức

$$x_a \mapsto \lambda x_a \tag{71}$$

và được gọi là *phép giãn* hay *phép biến đổi tỷ lệ*.

Nhóm quan sát viên thứ hai được tìm ra bằng cách áp dụng *các phép biến đổi bảo giác đặc biệt*. Phép biến đổi này là hợp của một *phép nghịch đảo*

$$x_a \mapsto \frac{x_a}{x^2} \tag{72}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

cùng với một *phép tĩnh tiến* bởi vector 4 chiều b_a, cụ thể là

$$x_a \mapsto x_a + b_a \,, \tag{73}$$

Câu đố 129 e và một phép nghịch đảo. Do đó phép biến đổi bảo giác đặc biệt là

$$x_a \mapsto \frac{x_a + b_a x^2}{1 + 2b_a x^a + b^2 x^2} \,. \tag{74}$$

Phép biến đổi này được gọi là *bảo giác* vì chúng không thay đổi góc của các hình (vô
Câu đố 130 e cùng nhỏ) và bạn có thể kiểm tra lại điều này. Do đó phép biến đổi này sẽ giữ cho *dạng* (của các vật vô cùng nhỏ) không thay đổi. Thí dụ, chúng biến đổi các vòng tròn vô cùng nhỏ thành các vòng tròn vô cùng nhỏ và các (siêu-)cầu vô cùng nhỏ thành các (siêu-)cầu vô cùng nhỏ. Phép biến đổi này được gọi là *đặc biệt* vì nhóm phép biến đổi bảo giác *đầy đủ* cũng bao gồm các phép giãn và các phép biến đổi Lorentz không thuần nhất.*

Câu đố 132 e Cũng nên nhớ rằng cách mà phép biến đổi bảo giác đặc biệt giữ nguyên hình nón ánh sáng cũng khá rắc rối. Bạn hãy tìm hiểu vấn đề này!

Vì phép giãn không khả hoán với phép tĩnh tiến thời gian, nên không có đại lượng bảo toàn nào liên kết với tính đối xứng này. (Điều tương tự cũng đúng đối với phép biến đổi Lorentz.) Trái lại, phép quay và phép tĩnh tiến trong không gian lại khả hoán với phép tĩnh tiến thời gian nên sẽ có các đại lượng bảo toàn.

Tóm lại, chân không thì bất biến bảo giác – theo nghĩa đặc biệt vừa nói – và như vậy cũng bất biến với phép giãn. Đây cũng là một cách diễn tả khác về việc một mình chân không không đủ để xác định chiều dài, vì nó không ấn định một hệ số tỷ lệ. Phải có vật chất để thực hiện điều đó như ta đã mong đợi. Thật vậy, phép biến đổi bảo giác (đặc biệt) không phải là các phép đối xứng của các trạng thái có vật chất. Chân không thì bất biến bảo giác; toàn bộ thiên nhiên thì không.**

Câu đố 131 e * Tập hợp tất cả các phép biến đổi bảo giác *đặc biệt* tạo thành một nhóm có 4 tham số; thêm các phép giãn và các phép biến đổi Lorentz không thuần nhất người ta có 15 tham số cho nhóm phép biến đổi bảo giác *đầy đủ*. Nói theo ngôn ngữ toán học, nhóm phép biến đổi bảo giác đẳng cấu địa phương với SU(2,2) và với nhóm đơn SO(4,2). Những khái niệm này sẽ được giải thích sau. Nên nhớ rằng tất cả các điều này chỉ đúng
Quyển V, trang 359 đối với không-thời gian *4* chiều. Trường hợp *2* chiều – một trường hợp quan trọng khác – nhóm phép biến đổi bảo giác đẳng cấu với nhóm các phép biến đổi toạ độ giải tích tuỳ ý và như vậy có vô hạn chiều.

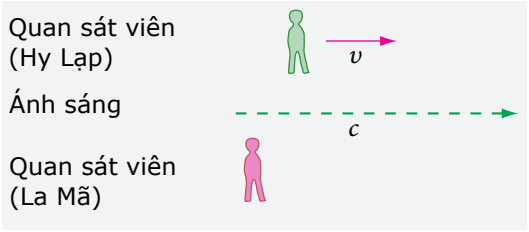
** Một trường có khối lượng thì không thể bất biến bảo giác; do đó tính bất biến bảo giác không phải là một phép đối xứng của mọi vật trong thiên nhiên. Bạn có thể chứng minh rằng số hạng khối lượng $m\varphi^2$
Câu đố 133 e trong mật độ Lagrange không bất biến bảo giác không?

Ta cũng cần ghi chú thêm là nhóm các phép biến đổi bảo giác chỉ không xuất hiện trong động học của Thuyết tương đối đặc biệt và do đó chỉ không phải là một phép đối xứng của chân không: nhóm các phép biến đổi bảo giác cũng là nhóm các phép đối xứng của các tương tác vật lý, như tương tác điện từ, miễn là các boson bức xạ liên quan có khối lượng bằng 0, như trường hợp photon. Nói một cách đơn giản, cả chân không và các trường bức xạ tạo bởi các hạt không khối lượng đều bất biến bảo giác. Các trường tạo bởi các hạt có khối lượng thì không.

Ta có thể đi xa hơn nữa. Mọi hạt sơ cấp đã quan sát được cho đến nay đều có khối lượng nhỏ hơn khối lượng Planck $\sqrt{\hbar c/G}$ gấp nhiều lần. Như vậy người ta có thể nói rằng chúng có khối lượng *gần như* triệt tiêu; như vậy phép đối xứng bảo giác có thể được xem như phép đối xứng *gần đúng* của thiên nhiên. Theo quan điểm này, mọi hạt có khối lượng có thể được xem như các hiệu chỉnh nhỏ, hay các nhiễu loạn, của các hạt không khối lượng, nghĩa là các trường bất biến bảo giác. Do đó, để xây dựng một lý thuyết cơ bản, Lagrangian bất biến bảo giác thường cung cấp một tiếp cận gần đúng khởi đầu khá tốt.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 52 Hoạt hình hiển thị cảnh nhìn thấy của một quan sát viên chuyển động có gia tốc theo một con đường trong sa mạc, cho đến khi anh ta đạt được tốc độ tương đối tính. Bản đồ nhỏ cho biết vị trí của người trên con đường. Để ý là cảnh vật hình như lùi lại, mặc dù chuyển động tiến về phía trước. (QuickTime film © Anthony Searle and Australian National University, from www.anu.edu.au/Physics/Savage/TEE.)



HÌNH 53 Trường hợp đơn giản nhất đối với một quan sát viên quán tính và một quan sát viên có gia tốc.

Tuy vậy, tính bất biến bảo giác, hay tính bất biến của hình nón ánh sáng, là điều kiện đủ cho việc đo đạc vận tốc. Bạn cũng có thể kiểm tra lại là tính bất biến bảo giác cũng *cần* cho việc đo đạc vận tốc.

Câu đố 134 e

Ta đã thấy tính bất biến bảo giác bao hàm tính đối xứng nghịch đảo nghĩa là có liên hệ đến tỷ lệ lớn nhỏ của chân không. Điều này khiến cho tính bất biến của tốc độ ánh sáng có liên hệ với sự hiện hữu của tính đối xứng nghịch đảo. Mối liên hệ bí mật này cho ta một cái nhìn đại cương về các cuộc phiêu lưu mà ta sẽ gặp trong phần cuối của cuộc hành trình.

Quan sát viên có gia tốc

Cho tới bây giờ, ta chỉ nghiên cứu các quan sát viên quán tính hay chuyển động tự do, là các quan sát viên cùng quan sát, cùng nói về một sự việc. Thí dụ, ta thấy các đồng hồ chuyển động luôn chạy chậm. Câu chuyện trở nên thú vị hơn khi một hay cả hai quan sát viên có gia tốc.

Đôi khi người ta nghe nói rằng Thuyết tương đối đặc biệt không thể dùng để mô tả quan sát viên có gia tốc. Điều này sai, giống như nói rằng vật lý Galilei không thể áp dụng cho quan sát viên có gia tốc. Giới hạn duy nhất của Thuyết tương đối đặc biệt là không thể dùng trong không-thời gian không phẳng (cong). Các vật có gia tốc hiện hữu trong không-thời gian phẳng, do đó có thể bàn luận đến chúng trong Thuyết tương đối đặc biệt.

Để khai vị, ta hãy xem phát biểu của một quan sát viên Hy Lạp có gia tốc nói về đồng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 95 hồ của một quan sát viên quán tính La Mã và ngược lại. Ta hãy giả sử rằng quan sát viên Hy Lạp, biểu diễn trong Hình 53, chuyển động dọc theo đường $\boldsymbol{x}(t)$, khi được quan sát bởi quan sát viên quán tính La Mã. Một cách tổng quát, tỷ số tốc độ hai đồng hồ Hy Lạp–La Mã được cho bởi $\Delta\tau/\Delta t = (\tau_2 - \tau_1)/(t_2 - t_1)$. Ở đây toạ độ của người Hy Lạp được tạo dựng bằng một phương thức đơn giản: lấy hai tập hợp các biến cố xác định bởi $t = t_1$ và $t = t_2$, và gọi τ_1 và τ_2 là những điểm nơi các tập hợp này cắt trục thời gian của quan sát viên Hy Lạp.*

Trước tiên ta hãy giả sử rằng quan sát viên Hy Lạp cũng là quan sát viên quán tính và chuyển động với vận tốc v khi được quan sát bởi quan sát viên La Mã. Tỷ số đồng hồ của quan sát viên Hy Lạp được cho bởi

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}t} = \sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{1}{\gamma_v} \,, \tag{75}$$

Câu đố 135 e một công thức quen thuộc. Ta lại thấy rằng đồng hồ chuyển động quán tính chạy chậm.

Đối với chuyển động có gia tốc của quan sát viên Hy Lạp, ta cần dạng vi phân của lý
Xem 95 luận trên. Tỷ số tốc độ hai đồng hồ Hy Lạp/La Mã là $\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t$, τ và $\tau + \mathrm{d}\tau$ được tính tương tự từ thời gian t và $t + \mathrm{d}t$. Để làm điều này, ta lại giả sử rằng quan sát viên Hy Lạp chuyển động dọc theo đường $\boldsymbol{x}(t)$, khi quan sát viên La Mã đo đạc. Ta thấy ngay rằng

$$\frac{\tau}{\gamma_v} = t - \boldsymbol{x}(t)\boldsymbol{v}(t)/c^2 \tag{76}$$

và như vậy

$$\frac{\tau + \mathrm{d}\tau}{\gamma_v} = (t + \mathrm{d}t) - [\boldsymbol{x}(t) + \mathrm{d}t\boldsymbol{v}(t)][\boldsymbol{v}(t) + \mathrm{d}t\boldsymbol{a}(t)]/c^2 \,. \tag{77}$$

Biến đổi các phương trình này ta được

$$\text{`}\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t\text{'} = \gamma_v(1 - \boldsymbol{v}\boldsymbol{v}/c^2 - \boldsymbol{x}\boldsymbol{a}/c^2) \,. \tag{78}$$

Kết quả này chứng tỏ rằng đồng hồ có gia tốc có thể chạy *nhanh hoặc chậm*, tuỳ thuộc vào vị trí $\boldsymbol{x}$ của chúng và dấu của gia tốc $\boldsymbol{a}$. Có dấu nháy trong phương trình trên vì ta có thể thấy ngay rằng quan sát viên Hy Lạp ghi là

$$\text{`}\mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau\text{'} = \gamma_v \,, \tag{79}$$

và nó *không phải là* nghịch đảo của phương trình (78). Sự khác biệt này trở nên rõ ràng nhất trong trường hợp đơn giản khi hai đồng hồ có cùng vận tốc, một có gia tốc không đổi g hướng về gốc toạ độ, trong khi đồng hồ kia chuyển động theo quán tính. Lúc đó
Xem 95 ta có

$$\text{`}\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t\text{'} = 1 + gx/c^2 \tag{80}$$

* Toán gia gọi những tập hợp này là các *siêu diện*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 54 Một quan sát viên có gia tốc đi trên một con đường trong thành phố. Film cho phép nhìn toàn cảnh 360° quanh quan sát viên; các đường viền cho thấy tình trạng sau lưng quan sát viên, nơi mà nhà cửa, đứng gần chân trời biến cố, vẫn có kích thước và khoảng cách không đổi. (Mpg film © Anthony Searle and Australian National University.)

và

$$\text{`}\mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau\text{'} = 1\,. \tag{81}$$

Trang 101 Ta sẽ bàn luận về tình huống này chi tiết hơn. Nhưng trước hết ta phải làm rõ khái niệm gia tốc.

Hệ quy chiếu có gia tốc

Có cách nào để ta kiểm tra xem là mình có đang sống trong một hệ quy chiếu quán tính không? Đầu tiên ta hãy định nghĩa thuật ngữ này. Một *hệ (quy chiếu) quán tính* có hai tính chất xác định. Một, chiều dài và khoảng cách được đo bằng một cây thước được mô tả bằng hình học Euclide. Nói cách khác, các cây thước phải có tác dụng như vẫn thường thấy. Đặc biệt, khoảng cách tìm được bằng cách đếm số thước (gậy) phải đặt liên tiếp từ điểm này tới điểm kia – mà ta gọi là *khoảng cách đo bằng thước* – phải tuân theo hình học Euclide. Thí dụ, khoảng cách đo bằng thước tuân theo định lý Pythagoras trong trường hợp tam giác vuông. Hai, trong hệ quy chiếu quán tính, tốc độ ánh sáng thì bất biến. Nói cách khác, hai quan sát viên bất kỳ trong hệ quy chiếu đó, độc lập về thời gian và vị trí, đều có thể quan sát thấy: tỷ số c giữa hai lần khoảng cách đo bằng thước giữa hai điểm và thời gian ánh sáng đi từ điểm này đến điểm kia rồi quay lại chỗ cũ luôn luôn giống nhau.

Nói khác đi, hệ quy chiếu quán tính là hệ quy chiếu trong đó mọi đồng hồ luôn luôn đồng bộ và hình học của hệ là hình học Euclide. Đặc biệt, trong hệ quy chiếu quán tính mọi quan sát viên có toạ độ cố định luôn *đứng yên* đối với nhau. Tuy vậy điều kiện cuối cùng này là điều kiện tổng quát hơn. Có những hệ quy chiếu khác, không quán tính, điều kiện này vẫn đúng.

Hệ quy chiếu không quán tính, hay *hệ quy chiếu có gia tốc*, là khái niệm có ích trong Thuyết tương đối đặc biệt. Thật ra, chúng ta đang sống trong một hệ quy chiếu như vậy. Và ta có thể dùng Thuyết tương đối đặc biệt để mô tả chuyển động trong hệ quy chiếu này, giống như ta đã dùng Vật lý Galilei để mô tả chuyển động ở đầu cuộc hành trình

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

của chúng ta.

Một *hệ quy chiếu tổng quát* là một tập hợp liên tục các quan sát viên đứng yên đối với nhau. Ở đây, 'đứng yên đối với nhau' có nghĩa là thời gian, để một tín hiệu sáng đi từ quan sát viên này đến quan sát viên kia và trở lại, không đổi theo thời gian, hay nói cách khác, khoảng cách đo bằng thước giữa hai quan sát viên không đổi. Hệ quy chiếu như vậy cũng có thể được gọi là một tập hợp *rắn* của các quan sát viên. Do đó ta cũng nên chú ý là một hệ quy chiếu tổng quát *không* giống như một tập hợp toạ độ tổng quát; tập hợp toạ độ thường *không* rắn. Nhưng nếu tất cả các quan sát viên kết nối chặt chẽ với nhau, có toạ độ không thay đổi, thì chúng ta đã nói về một *hệ toạ độ rắn*. Hiển nhiên những điều này sẽ hữu ích nhất khi được sử dụng để mô tả những hệ quy chiếu có gia tốc.*

Xem 96

Cũng cần chú ý là nếu hai quan sát viên đều chuyển động với vận tốc $\boldsymbol{v}$, khi được đo trong hệ quy chiếu *quán tính*, họ sẽ thấy rằng họ đang đứng yên đối với nhau *chỉ* khi vận tốc này *không đổi*. Ta lại tìm thấy, như bên trên, là khi hai người được cột với nhau bằng một sợi dây, và cách nhau một khoảng sao cho dây căng, thì họ sẽ thấy dây đứt (hay lỏng ra) nếu họ tăng tốc đến (hay giảm tốc từ) những tốc độ tương đối tính giống hệt nhau. Gia tốc trong Thuyết tương đối đòi hỏi người ta suy nghĩ cẩn thận.

Xem 96
Câu đố 136 e
Trang 55

Bạn có thể cho biết tỷ số gia tốc đi vào định nghĩa khối lượng trong Thuyết tương đối đặc biệt như thế nào không?

Trang 68
Câu đố 137 ny

Gia tốc không đổi

Gia tốc là một chủ đề rắc rối. Một quan sát viên luôn *cảm thấy* một lực *giống nhau* trên cơ thể mình thì được gọi là đang gia tốc *đều*. Gia tốc riêng của anh ta không đổi. Chính xác hơn, quan sát viên đang gia tốc đều là một quan sát viên luôn luôn có gia tốc $\boldsymbol{B}$ ở mọi thời điểm, được đo trong một hệ quy chiếu quán tính mà đối với nó quan sát viên *lúc đó* đứng yên. Điều quan trọng phải nhớ là gia tốc đều *không phải* là gia tốc một cách đều đặn khi luôn được quan sát từ *cùng một* hệ quy chiếu quán tính. Đây là sự khác biệt quan trọng với vật lý Galilei.

Đối với chuyển động biến đổi đều, với ý nghĩa vừa đề cập thì độ biến thiên gia tốc 4 chiều bằng 0, và ta cần

$$\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{B} = -g^2 \,, \tag{82}$$

trong đó g là một hằng số độc lập đối với t. Trường hợp đơn giản nhất là chuyển động biến đổi đều, cũng là chuyển động *thẳng*, nghĩa là, gia tốc $\boldsymbol{a}$ song song với $\boldsymbol{v}$ tại một thời điểm và (do đó) cũng tại mọi thời điểm khác. Trong trường hợp này ta có thể viết, bằng cách dùng vector 3 chiều,

Xem 98
Câu đố 138 e

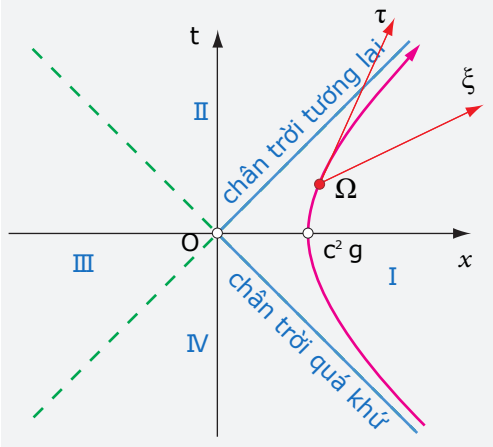
$$\gamma^3 \boldsymbol{a} = \boldsymbol{g} \quad \text{or} \quad \frac{\mathrm{d}\gamma \boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{g} \,. \tag{83}$$

Xem 97

* Về cơ bản chỉ có 2 loại hệ toạ độ rắn khác, tách biệt với các hệ quy chiếu quán tính:

— Hệ toạ độ $\mathrm{d}s^2 = \mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 - c^2\mathrm{d}t^2(1 + g_k x_k/c^2)^2$ có gốc toạ độ có gia tốc bất kỳ nhưng không đổi. Gia tốc sẽ là $\boldsymbol{a} = -\boldsymbol{g}(1 + \boldsymbol{g}\boldsymbol{x}/c^2)$.
— Hệ toạ độ quay đều $\mathrm{d}s^2 = \mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 + 2\omega(-y\,\mathrm{d}x + x\,\mathrm{d}y)\mathrm{d}t - (1 - r^2\omega^2/c^2)\mathrm{d}t$. Ở đây trục z là trục quay và $r^2 = x^2 + y^2$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 55 Chuyển động hyperbol của một quan sát viên Ω tăng tốc thẳng và biến đổi đều với gia tốc g.

Câu đố 139 e

Lấy hướng mà ta đang đề cập là trục x, tìm $v(t)$, ta sẽ có

$$v = \frac{gt}{\sqrt{1 + \frac{g^2t^2}{c^2}}}\,, \tag{84}$$

với giả sử rằng $v(0) = 0$. Ta lưu ý là khi thời gian nhỏ ta có $v = gt$ và khi thời gian lớn $v = c$, đúng như ta mong đợi. Động lượng của quan sát viên có gia tốc tăng tuyến tính theo thời gian, cũng đúng như ta mong đợi. Lấy tích phân, ta thấy rằng quan sát viên có gia tốc chuyển động dọc theo con đường

Câu đố 140 e

$$x(t) = \frac{c^2}{g}\sqrt{1 + \frac{g^2t^2}{c^2}}\,, \tag{85}$$

trong đó ta đã giả sử $x(0) = c^2/g$, để giữ cho biểu thức được đơn giản. Vì kết quả này, như được hiển thị trong Hình 55, một quan sát viên chuyển động thẳng biến đổi đều, được gọi là đã trải qua một chuyển động *hyperbol*. Đối với trường hợp thời gian nhỏ, đường thế giới có phương trình $x = gt^2/2 + x_0$, trong khi nếu thời gian lớn phương trình sẽ là $x = ct$, như mong đợi. Chuyển động biến đổi đều như vậy chỉ đối với bản thân vật chuyển động nhưng *không phải* là đối với quan sát viên bên ngoài.

Thời gian riêng τ của quan sát viên có gia tốc liên hệ với thời gian t của hệ quy chiếu quán tính theo như bình thường là $\mathrm{d}t = \gamma \mathrm{d}\tau$. Sử dụng biểu thức của vận tốc $v(t)$ của phương trình (84) ta kiếm được*

Xem 98, Xem 99

$$t = \frac{c}{g}\sinh\frac{g\tau}{c} \quad \text{và} \quad x = \frac{c^2}{g}\cosh\frac{g\tau}{c} \tag{86}$$

Xem 100

* Hãy sử dụng bộ công thức toán học yêu thích của bạn – mỗi người nên có một bộ – để suy ra điều này. *sine hyperbolic* và *cosine hyperbolic* được định nghĩa bởi $\sinh\ y = (\mathrm{e}^y - \mathrm{e}^{-y})/2$ và $\cosh\ y = (\mathrm{e}^y + \mathrm{e}^{-y})/2$. Chúng bao hàm $\int \mathrm{d}y/\sqrt{y^2 + a^2} = \operatorname{arsinh}\ y/a = \operatorname{Arsh}\ y/a = \ln(y + \sqrt{y^2 + a^2})$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

dành cho mối liên hệ giữa thời gian riêng τ, thời gian t và vị trí x được đo bởi quan sát viên bên ngoài, quan sát viên quán tính La Mã. Ta sẽ gặp lại hệ thức này khi nghiên cứu về hố đen.

Nhìn công thức cuối có vẻ chán? Vậy chỉ cần tưởng tượng bạn ngồi trên xe gắn máy có gia tốc $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ trong thời gian riêng τ 25 năm. Xe sẽ mang bạn bay ra ngoài vũ trụ mà ta đã biết! Điều đó không đáng thử sao? Không may, không có xe hay hoả tiễn nào có gia tốc như vậy, vì bình nhiên liệu của chúng sẽ lớn vô cùng. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Câu đố 141 s

Đối với chuyển động thẳng biến đổi đều, phép biến đổi toạ độ là

$$\begin{aligned} t &= \left(\frac{c}{g} + \frac{\xi}{c}\right) \sinh \frac{g\tau}{c} \\ x &= \left(\frac{c^2}{g} + \xi\right) \cosh \frac{g\tau}{c} \\ y &= \upsilon \\ z &= \zeta \,, \end{aligned} \tag{87}$$

τ bây giờ là toạ độ thời gian của người Hy Lạp, hệ quy chiếu có gia tốc. Ta cũng cần nhớ rằng khoảng không-thời gian $\mathrm{d}\sigma$ thoả phương trình

$$\mathrm{d}\sigma^2 = (1 + g\xi/c^2)^2 c^2 \mathrm{d}\tau^2 - \mathrm{d}\xi^2 - \mathrm{d}\upsilon^2 - \mathrm{d}\zeta^2 = c^2 \mathrm{d}t^2 - \mathrm{d}x^2 - \mathrm{d}y^2 - \mathrm{d}z^2 \,, \tag{88}$$

và vì khi $\mathrm{d}\tau = 0$ khoảng được tính theo định lý Pythagore, hệ quy chiếu có gia tốc của người Hy Lạp rắn thực sự.

Xem 101

Sau đám rừng công thức này, ta hãy giải quyết một vấn đề đơn giản, biểu diễn trong Hình 55. Quan sát viên quán tính La Mã O thấy quan sát viên Hy Lạp Ω xuất phát với sự gia tốc liên tục, đi càng ngày càng xa, theo phương trình (85). Quan sát viên Hy Lạp nói gì về anh bạn La Mã? Với tất cả kiến thức ta đã biết, trả lời điều đó không khó. Tại mỗi điểm trên quỹ đạo Ω sẽ thấy O có toạ độ $\tau = 0$ (bạn có thể chứng minh điều này không?), nghĩa là khoảng cách đến quan sát viên La Mã, mà người Hy Lạp nhìn thấy, thì giống như khoảng không-thời gian OΩ. Dùng biểu thức (85), ta thấy rằng

Câu đố 142 e

Xem 102

$$d_{\mathrm{O}\Omega} = \sqrt{\xi^2} = \sqrt{x^2 - c^2 t^2} = c^2/g \,, \tag{89}$$

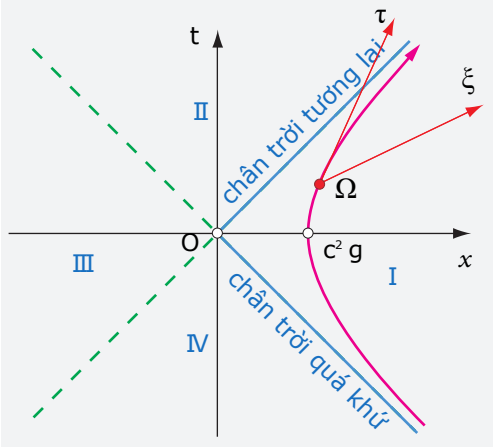
và kỳ lạ thay nó không đổi theo thời gian! Nói cách khác, quan sát viên Hy Lạp sẽ thấy anh ta luôn cách quan sát viên La Mã một khoảng không đổi, hoàn toàn trái ngược với điều quan sát viên La Mã nói. Hãy bỏ thời gian để kiểm tra kết quả kỳ lạ này theo lối khác. Ta sẽ cần đến nó sau này, để giải thích lý do tại sao Trái đất không nổ tung. (Bạn có thể đoán ra mối liên hệ giữa hai kết quả này không?)

Câu đố 143 s

Chân trời biến cố

Bây giờ ta sẽ tìm hiểu một trong những hệ quả kỳ lạ nhất của chuyển động có gia tốc, có liên hệ mật thiết với kết quả vừa chứng minh. Ta sẽ nghiên cứu quỹ đạo, trong hệ toạ độ ξ và τ của hệ quy chiếu rắn có gia tốc, của một vật có điểm xuất phát $x = x_0 = c^2/g$ tại

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 56 Chuyển động Hyperbol và chân trời biến cố.

Câu đố 144 ny

mọi thời điểm t. Ta kiếm được hai hệ thức*

$$\xi = -\frac{c^2}{g}\left(1 - \operatorname{sech}\frac{g\tau}{c}\right)$$
$$\mathrm{d}\xi/\mathrm{d}\tau = -c \operatorname{sech}\frac{g\tau}{c}\tanh\frac{g\tau}{c}\,. \tag{91}$$

Những phương trình này khá kỳ lạ. Khi thời gian τ lớn, toạ độ ξ dần tới giá trị giới hạn $-c^2/g$ và $\mathrm{d}\xi/\mathrm{d}\tau$ dần tới 0. Tình trạng này giống như khi lái xe có gia tốc rời xa một phụ nữ đứng trên một con đường dài. Đối với tài xế, người phụ nữ chuyển động ra xa; tuy vậy, sau một thời gian, điều duy nhất mà anh ta nhận thấy là người đó tiến chầm chậm đến chân trời. Trong đời sống hằng ngày, cả hai người đều thấy người kia tiến đến chân trời của họ; trong Thuyết tương đối đặc biệt, chỉ có quan sát viên có gia tốc mới thấy điều này.

Một sơ đồ của tình huống này sẽ giúp ta thấy rõ vấn đề. Trong Hình 56 ta có thể thấy rằng ánh sáng phát ra từ biến cố bất kỳ trong vùng II và III không thể đến quan sát viên Hy Lạp. Những biến cố đó ẩn đi và anh ta không thể thấy chúng. Ranh giới giữa phần không-thời gian thấy được và không thấy được được gọi là *chân trời biến cố*. Tuy vậy, điều kỳ lạ là, ánh sáng từ quan sát viên Hy Lạp *có thể* đến miền II. Chân trời biến cố có tác dụng như *cánh cổng một chiều* đối với ánh sáng và những tín hiệu khác. Nói cho đầy đủ, sơ đồ cũng cho thấy chân trời biến cố của quá khứ. Ta cũng nên nhớ rằng chân trời biến cố là một *mặt*. Như vậy nó sẽ khác chân trời thông thường, là một *đường*. Bạn có thể chứng minh rằng chân trời biến cố có *màu đen*, như minh hoạ trong Hình 57 không?

Câu đố 145 e

Vì vậy không phải mọi biến cố quan sát trong một hệ quy chiếu quán tính đều có

* Những hàm *secant hyperbolic* và *tang hyperbolic*, được định nghĩa theo công thức ở phần ghi chú trên Trang 97:

$$\operatorname{sech}\ y = \frac{1}{\cosh\ y} \quad \text{và} \quad \tanh\ y = \frac{\sinh\ y}{\cosh\ y}\,. \tag{90}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 57 Chân trời biến cố theo Thuyết tương đối đặc biệt và (tổng quát).

thể thấy được trong hệ quy chiếu chuyển động biến đổi đều. Quan sát viên có gia tốc bị hạn chế. Đặc biệt, hệ quy chiếu chuyển động biến đổi đều sinh ra các chân trời biến cố ở khoảng cách $-c^2/g$. Thí dụ, một người đang đứng không bao giờ thấy xa hơn khoảng cách này bên dưới chân anh ta.

Nhân tiện, có đúng là chùm ánh sáng không thể bắt kịp một quan sát viên có khối
Câu đố 146 s lượng trong chuyển động hyperbol, nếu quan sát viên đó khởi hành trước không?

Đây là một câu đố khó hơn để ta chuẩn bị trước khi tìm hiểu Thuyết tương đối tổng quát. *Hình dạng* 2 chiều của chân trời mà một quan sát viên chuyển động biến đổi đều
Câu đố 147 s nhìn thấy là gì?

Một câu đố khác: Một quan sát viên ngồi trong vòng quay ngựa gỗ nhìn thấy chân
Câu đố 148 s trời nào?

Tầm quan trọng của chân trời

Trong Thuyết tương đối đặc biệt, chân trời hình như có vai trò không quan trọng. Nhưng ấn tượng này sai. Chân trời rất phổ biến và quan trọng. Trên nguyên tắc, nếu bạn muốn quan sát chân trời ở đâu đó thì chỉ cần gia tốc và nhìn theo hướng ngược lại.

Đúng ra *sự vắng mặt* của chân trời rất hiếm: nó bao hàm việc không có gia tốc. Mà ta đã biết rằng trong thiên nhiên ít có chuyển động đều (quán tính) do có lực hấp dẫn và các tương tác khác. Vì trong đời sống hằng ngày ta không chuyển động theo quán tính nên chân trời hiện diện khắp mọi nơi. Nói cách khác, *không gian thực trong đời sống hằng ngày có giới hạn.*

Mỗi khi bạn gia tốc đều có chân trời phía sau bạn. Như vậy lực hấp dẫn và gia tốc tương đương với nhau vì chúng chỉ khác nhau do sự thay đổi hệ quy chiếu mang tính địa phương. Do đó, lực hấp dẫn gắn bó chặt chẽ với chân trời.

Chân trời ở khắp mọi nơi – vì mọi nơi đều có lực hấp dẫn. Sự mô tả tương đối tính của lực hấp dẫn được gọi là Thuyết tương đối tổng quát. Chúng ta sẽ nhận thấy rằng trong Thuyết tương đối tổng quát chân trời trở nên phổ biến và quan trọng hơn: *bầu trời đêm* là một thí dụ về chân trời. Đúng, bầu trời đêm tối đen vì vũ trụ không có kích thước vô hạn. Bề mặt của *hố đen* cũng là một chân trời và đúng ra có hàng tỷ hố đen trong vũ

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

trụ.

Nhưng chân trời thú vị vì một lý do khác nữa.

Cách nay 2500 năm, Leucippus ở Elea (*c.* 490 tới *c.* 430 BCE) và Democritus ở Abdera (*c.* 460 tới *c.* 356 hay 370 BCE) đã đặt nền tảng cho thuyết nguyên tử. Đặc biệt, họ đã phát biểu rằng mọi vật trong thiên nhiên – theo ngôn ngữ hiện đại – đều là *hạt* và *không gian trống rỗng*. Qua nhiều thế kỷ, vật lý hiện đại có nhiều bằng chứng ủng hộ cho phát biểu này. Thí dụ, mọi vật đều do các hạt tạo nên. Ánh sáng và mọi loại bức xạ khác cũng vậy. Rồi Thuyết tương đối xuất hiện kèm theo sự khám phá ra chân trời.

Chân trời cho thấy *thuyết nguyên tử sai*. Người ta có thể đo và quan sát chân trời. Một mặt, chân trời là các hệ linh hoạt, không định xứ và có hai chiều không gian. Mặt khác, chúng ta sẽ thấy rằng chân trời không hoàn toàn đen mà có chút ít màu sắc, có thể có khối lượng, spin và điện tích. Tóm lại, chân trời không phải là không gian cũng không phải là hạt. Chân trời là một cái gì đó mới mẻ hơn.

Sau này, khi ta kết hợp Thuyết tương đối tổng quát và Thuyết lượng tử, thì ta mới biết rằng chân trời là *trung gian* giữa không gian và hạt. Chân trời cũng được xem là một *sự hoà trộn* giữa không gian và hạt. Nhưng ta sẽ cần nhiều thời gian để khám phá ý nghĩa chính xác của điều này. Cho tới bây giờ, Thuyết tương đối đặc biệt chỉ cho ta biết rằng chân trời là một hiện tượng trong thiên nhiên, một bổ sung không mong đợi cho hạt và chân không.

Gia tốc làm thay đổi màu sắc

Trang 32

Ta đã thấy ở trên rằng một máy thu chuyển động sẽ thấy màu khác với màu của máy phát. Cho tới bây giờ, ta đã bàn luận về sự dịch chuyển màu này, hiệu ứng Doppler, chỉ trong trường hợp chuyển động quán tính. Đối với hệ quy chiếu có gia tốc tình trạng sẽ kỳ lạ hơn: máy phát và máy thu không đồng ý về màu sắc cho dù chúng *đứng yên* đối với nhau. Thật vậy, nếu ánh sáng được phát ra theo hướng gia tốc, công thức khoảng không-thời gian cho ta

Xem 98, Xem 103

$$\mathrm{d}\sigma^2 = \left(1 + \frac{g_0 x}{c^2}\right)^2 c^2 \mathrm{d}t^2 \tag{92}$$

Câu đố 149 e

trong đó g_0 là gia tốc riêng của quan sát viên ở vị trí $x = 0$. Ta có thể trực tiếp suy ra

$$\frac{f_\mathrm{r}}{f_\mathrm{s}} = 1 - \frac{g_\mathrm{r} h}{c^2} = \frac{1}{1 + \frac{g_\mathrm{s} h}{c^2}} \tag{93}$$

với h là khoảng cách đo bằng thước giữa nguồn phát và máy thu, trong đó $g_\mathrm{s} = g_0/(1 + g_0 x_\mathrm{s}/c^2)$ và $g_\mathrm{r} = g_0/(1 + g_\mathrm{o} x_\mathrm{r}/c^2)$ là gia tốc riêng đo được tại nguồn phát và máy thu. Tóm lại, tần số ánh sáng giảm đi khi ánh sáng di chuyển theo hướng gia tốc. Nhân tiện, điều này có tác dụng gì đến màu sắc của cây cối dọc theo phương thẳng đứng của chúng hay không?

Câu đố 150 s

Công thức đã cho, cụ thể là

$$\frac{f_\mathrm{r}}{f_\mathrm{s}} = 1 - \frac{gh}{c^2}\,, \tag{94}$$

chỉ đúng tới sự gần đúng bậc nhất. Trong hệ quy chiếu có gia tốc, ta phải thận trọng với

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

ý nghĩa của mỗi đại lượng. Tuy vậy, đối với gia tốc thông thường, sự khác biệt có thể bỏ qua. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Câu đố 151 e

Ánh sáng có thể chuyển động nhanh hơn *c* không?

Quan sát viên có gia tốc đo được tốc độ ánh sáng nào? Dùng biểu thức (94) trên, một quan sát viên có gia tốc suy ra được

$$v_{\text{light}} = c\left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \tag{95}$$

sẽ lớn hơn c khi ánh sáng đi trước hay 'trên' anh ta, và nhỏ hơn c khi ánh sáng đi sau hay 'dưới' anh ta. Kết quả kỳ lạ này suy ra từ tính chất cơ bản của hệ quy chiếu có gia tốc bất kỳ: trong một hệ quy chiếu như vậy, mặc dù mọi quan sát viên đứng yên đối với nhau, các đồng hồ *không còn* đồng bộ. Sự thay đổi tốc độ ánh sáng (đã được tiên đoán) này đã được các thí nghiệm khẳng định: sự lan truyền bị trễ, được bàn luận trong Thuyết tương đối tổng quát, có thể xem là sự khẳng định của hiệu ứng này.

Trang 167

Tóm lại, tốc độ ánh sáng chỉ bất biến khi nó được định nghĩa là $c = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$, *và* nếu $\mathrm{d}x$ được đo bằng một cây thước đặt tại một điểm *trong* khoảng $\mathrm{d}x$, *và* nếu $\mathrm{d}t$ được đo bằng một đồng hồ đọc *trong* khoảng $\mathrm{d}t$. Nói cách khác, tốc độ ánh sáng chỉ bất biến trong phép đo *địa phương*.

Tuy vậy, nếu tốc độ ánh sáng được định nghĩa là $\Delta x/\Delta t$, hay nếu thước đo khoảng cách hay đồng hồ đo thời gian được đặt *xa* tia sáng đang truyền đi, tốc độ ánh sáng sẽ khác với c đối với quan sát viên có gia tốc! Tác dụng này giống như điều bạn cảm nhận khi quay quanh một trục thẳng đứng vào ban đêm: vận tốc của các ngôi sao mà bạn thấy sẽ lớn hơn tốc độ ánh sáng rất nhiều. Tóm lại,

▷ c chỉ là tốc độ ánh sáng đối với các vật *kề bên*.

Trong các trường hợp khác, ánh sáng có thể chuyển động *nhanh hơn* c. Hãy nhớ rằng kết quả này không bao hàm việc các tín hiệu hay năng lượng có thể chuyển động nhanh hơn c. Bạn có thể tự kiểm tra lại điều này.

Câu đố 152 s

Trong thực tế, các tác dụng phi-địa phương trên tốc độ ánh sáng có thể bỏ qua đối với các khoảng cách l rất nhỏ so với c^2/a. Nếu gia tốc cỡ $9.5\,\mathrm{m/s^2}$ (gia tốc rơi tự do), thì khoảng cách phải cỡ một năm ánh sáng, hay $9.5 \cdot 10^{12}$ km, để ta có thể thấy các hiệu ứng đáng kể.

Nhân tiện ta cũng nói thêm, lực hấp dẫn thông thường tương đương với một gia tốc không đổi. Như vậy, tại sao các vật ở xa như các ngôi sao không chuyển động nhanh hơn ánh sáng theo biểu thức (95)?

Câu đố 153 s

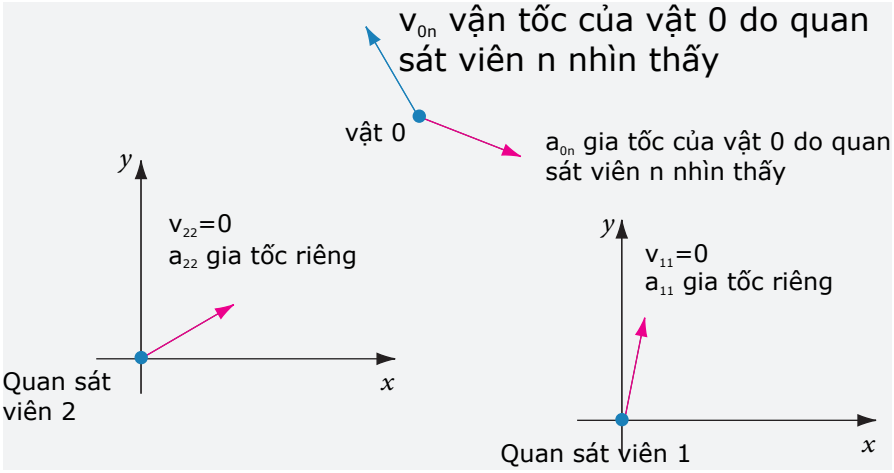
Sự tổng hợp gia tốc

Để cảm nhận tốt hơn về gia tốc, ta sẽ tìm hiểu một chủ đề khác: định lý tổng hợp gia tốc. Vấn đề này phức tạp hơn vận tốc và người ta thường tránh né. Tuy vậy, Mishra đã công bố một cách giải thích khá rõ ràng về vấn đề này.

Xem 104

Nếu ta gọi a_{nm} là gia tốc của hệ thống n theo quan sát viên m, ta đang tìm cách diễn tả gia tốc của vật a_{01} như là một hàm của giá trị a_{02} do quan sát viên khác đo được, gia

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 58 Các định nghĩa cần thiết để diễn giải hành trạng của gia tốc tổng hợp.

tốc tương đối a_{12} và gia tốc riêng a_{22} của một quan sát viên khác: hãy xem Hình 58. Ở đây ta chỉ nghiên cứu trường hợp một chiều, tức là các quan sát viên và các vật chuyển động trên cùng một trục. (Để cho rõ ràng, ta cũng viết $v_{12} = v$ và $v_{02} = u$.)

Câu đố 154 e Trong vật lý Galilei ta có hệ thức tổng quát

$$a_{01} = a_{02} - a_{12} + a_{22} \tag{96}$$

vì các gia tốc hành xử khá đơn giản. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, ta có

$$a_{01} = a_{02}\frac{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}{(1 - uv/c^2)^3} - a_{12}\frac{(1 - u^2/c^2)(1 - v^2/c^2)^{-1/2}}{(1 - uv/c^2)^2} + a_{22}\frac{(1 - u^2/c^2)(1 - v^2/c^2)^{3/2}}{(1 - uv/c^2)^3} \tag{97}$$

Câu đố 155 e và bạn có thể giải trí bằng việc kiểm tra lại biểu thức này.

Các giới hạn về chiều dài của vật rắn

Một vật rắn thông thường bị gãy/vỡ khi một số phần của nó chuyển động đối với các phần lân cận với tốc độ lớn hơn tốc độ âm c trong vật chất.* Thí dụ, khi một vật chạm sàn và phần phía trước của nó ngừng lại sau khi di chuyển một khoảng d, cuối cùng vật sẽ vỡ ra khi

$$\frac{v^2}{c^2} \geqslant \frac{2d}{l} \,. \tag{98}$$

Trong trường hợp này, ta thấy rằng có thể tránh làm vỡ một vật mong manh bằng cách gói nó vào cao su xốp – để làm gia tăng khoảng cách dừng. Điều này có thể dùng giải thích lý do tại sao các hộp chứa quà thường lớn hơn vật mà nó chứa.

Giới hạn gãy nứt cũng có thể viết theo cách khác. Để khỏi bị gãy/vỡ, gia tốc a của

* Tốc độ (dọc) của âm khoảng 5.9 km/s đối với thuỷ tinh, sắt hay thép; khoảng 4.5 km/s đối với vàng; và khoảng 2 km/s đối với chì. Nhiều tốc độ âm đã được cho trước kia. Quyển I, trang 294

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

một vật rắn chiều dài l phải thoả điều kiện

$$la < c^2 \,, \tag{99}$$

với c là tốc độ âm - giới hạn tốc độ cho các phần vật chất của vật rắn. Bây giờ chúng ta hãy viết lại các đối số trong Thuyết tương đối nhưng dùng tốc độ ánh sáng thay vì tốc độ âm. Hãy tưởng tượng ta đang gia tốc cho phần trước của một vật *rắn* có gia tốc *riêng* a. Phần sau của vật không thể chuyển động với gia tốc α bằng hay lớn hơn vô hạn, hay chính xác hơn, nó không thể chuyển động với tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng. Kiểm tra nhanh ta sẽ thấy chiều dài l của một vật rắn phải thoả điều kiện

Xem 105
Câu đố 156 s

$$la < c^2 \,, \tag{100}$$

với c bây giờ là tốc độ ánh sáng.

▷ Như vậy tốc độ ánh sáng sẽ giới hạn kích thước của các vật rắn được gia tốc.

Thí dụ, với $9.8\,\mathrm{m/s^2}$, gia tốc của một xe mô tô mạnh, biểu thức này cho một giới hạn chiều dài là 9.2 Pm, khoảng một năm ánh sáng. Không phải là một ràng buộc lớn: phần lớn các xe mô tô ngắn hơn. Tuy vậy, có những tình huống khác thú vị hơn. Ngày nay, gia tốc lớn được tạo ra trong các máy gia tốc hạt. Hạt nhân nguyên tử có kích thước vài fm. Bạn có thể tính xem với năng lượng cỡ nào thì chúng sẽ vỡ khi chạm nhau trong một máy gia tốc? Thật ra, trong hạt nhân, các nucleon chuyển động với gia tốc vào cỡ $v^2/r \approx \hbar^2/m^2r^3 \approx 10^{31}\,\mathrm{m/s^2}$; đây là giá trị lớn nhất tìm thấy trong thiên nhiên. Hạt nhân có tuân theo giới hạn chiều dài không?

Câu đố 157 ny
Câu đố 158 s

Ta thấy rằng vật lý Galilei và Thuyết tương đối đều cho các kết luận tương tự: có một tốc độ giới hạn, của âm hay của ánh sáng, làm cho vật rắn không thể *cứng rắn*. Khi ta đẩy vào một đầu của vật thì đầu kia của vật luôn luôn chuyển động sau một chút.

Một câu đố: giới hạn tốc độ có bao hàm một 'hệ thức bất định' tương đối tính

$$\Delta l \, \Delta a \geqslant c^2 \tag{101}$$

giữa độ bất định chiều dài và độ bất định gia tốc hay không?

Câu đố 159 s

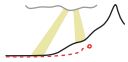
Tất cả các điều này có ý nghĩa gì đối với kích thước của các hạt sơ cấp? Lấy 2 electron cách nhau một khoảng d và gọi kích thước của chúng là l. Gia tốc do lực đẩy tĩnh điện sẽ dẫn đến một giới hạn trên cho kích thước của các electron theo hệ thức

Câu đố 160 ny

$$l < \frac{4\pi\varepsilon_0 c^2 d^2 m}{e^2} \,. \tag{102}$$

Electron càng muốn đến gần nhau thì chúng phải càng nhỏ. Giới hạn đo được bằng thí nghiệm hiện nay nhỏ hơn 10^{-19} m. Electron có thể xem như là một điểm không? Ta sẽ trở lại vấn đề này nhiều lần nữa trong phần còn lại của cuộc thám hiểm của chúng ta.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 3

Phần tóm lược của Thuyết tương đối đặc biệt

Đến đây ta có thể tóm tắt những kết quả của Thuyết tương đối đặc biệt trong 4 mệnh đề:

— Mọi quan sát viên ở gần nhau đều nhận thấy có một tốc độ năng lượng duy nhất, cực đại và bất biến trong thiên nhiên, một tốc độ 'hoàn hảo' $v_{max} = c = 299\,792\,458\,\mathrm{m/s} \approx 0.3\,\mathrm{Gm/s}$. Chỉ có các bức xạ không khối lượng như ánh sáng hay tín hiệu vô tuyến mới đạt đến tốc độ cực đại này, còn các hệ vật chất thì không thể. Nhận xét này minh định cho *Thuyết tương đối đặc biệt*.

— Do đó, cho dù không-thời gian của mọi quan sát viên có *giống nhau*, thì thời gian và chiều dài mà các quan sát viên đo được – bao gồm góc và màu sắc – *cũng khác nhau*, như các phép biến đổi Lorentz (14) và (15) đã mô tả và điều này đã được thực nghiệm khẳng định.

Trang 45

— Các thí nghiệm về va chạm cũng cho ta thấy rằng tốc độ năng lượng cực đại dẫn tới việc *khối lượng tương đương với năng lượng*, năng lượng toàn phần của một vật có khối lượng chuyển động được cho bởi công thức $E = c^2\gamma m$ và khối lượng không bảo toàn.

— Khi áp dụng cho các vật có gia tốc, các kết quả này kéo theo nhiều hệ quả phản trực giác, như *Nghịch lý sinh đôi*, sự xuất hiện của *Chân trời biến cố* và sự xuất hiện của các hạt có đời sống ngắn, tức là các *Tachyon* ảo trong va chạm.

Không riêng gì các chuyển động của bức xạ và vật chất, mọi tốc độ được xác định và đo bằng cách dùng sự lan truyền ánh sáng cũng bị giới hạn. Các tính chất khác của chuyển động thông thường *thì vẫn còn*. Đặc biệt, 6 tính chất cơ bản của chuyển động thông thường bắt nguồn từ tính tiên đoán được của chuyển động vẫn còn giá trị: chuyển động tương đối tính có tính liên tục, bảo toàn năng–động lượng và moment động lượng, có tính tương đối, có tính thuận nghịch, bất biến gương (ngoại trừ tương tác yếu, cần có một phương thức tổng quát để kiểm tra tính chất này). Sau cùng, chuyển động tương đối tính có tính lười: nó luôn cực tiểu hoá tác dụng.

Quyển I, trang 29

Quyển V, trang 245

Tốc độ ánh sáng có thể thay đổi hay không?

Tốc độ của ánh sáng và bức xạ không khối lượng là tốc độ năng lượng giới hạn trong thiên nhiên. Tốc độ giới hạn này có thể thay đổi theo vị trí hoặc theo thời gian hay không? Câu hỏi rắc rối này vẫn còn làm điên đầu nhiều vật lý gia. Câu trả lời đầu tiên thường là khẳng định: 'Có, dĩ nhiên! Chỉ cần nhìn điều gì sẽ xảy ra khi c trong công thức

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 106 thay đổi.' Nhiều giả định 'tốc độ ánh sáng có thể thay đổi' đã được các nhà nghiên cứu đưa ra. Tuy vậy, câu trả lời mà ta thường nghe thấy thì *sai*.

Vì tốc độ ánh sáng nằm trong định nghĩa thời gian và không gian của chúng ta, nên nó cũng nằm trong, mặc dù ta không nhận ra, việc tạo ra các thước đo, các tiêu chuẩn đo lường và mọi dụng cụ đo lường. Do đó *không có cách nào* dò ra sự thay đổi của tốc độ ánh sáng.

▷ Không thể đo được sự thay đổi của tốc độ ánh sáng.

Câu đố 161 s Không thể nghĩ ra một thí nghiệm có khả năng dò ra sự thay đổi của tốc độ giới hạn, vì tốc độ giới hạn là nền tảng của mọi phép đo. 'Đó quả là một sự thách đố trí tuệ!', bạn có thể nói như vậy. 'Mọi thí nghiệm đều chứng tỏ rằng tốc độ ánh sáng bất biến; ta phải nuốt trôi hết kết quả phản trực giác này đến kết quả phản trực giác khác để chấp nhận tính bất biến của tốc độ ánh sáng và bây giờ đành phải dung nạp điều đó vì không còn lựa chọn nào khác?' Vâng, đúng vậy. Đó là điều trớ trêu của sự tiến bộ trong vật lý. Không có cách dò ra sự thay đổi – trong thời gian cũng như trong không gian – của một Câu đố 162 e chuẩn đo lường. Chỉ cần thử thì bạn sẽ rõ!

Tính bất biến của tốc độ ánh sáng đối với quan sát viên thì phản trực giác và kỳ cục khi đem so sánh với tính phụ thuộc quan sát viên của tốc độ Galilei thông thường. Nhưng ta cũng phải tính đến việc mỗi khi đo tốc độ – dù ta có thích hay không – tức là so sánh nó với tốc độ ánh sáng, ta đã không hề ngạc nhiên về tính bất biến của tốc độ ánh sáng một chút nào; hơn nữa, ta cũng không hề ngạc nhiên về tính giới hạn của tốc độ – cũng như các tính chất kỳ lạ của những tốc độ *nhỏ*.

Tóm lại, về nguyên tắc, *không* có cách nào để làm sai lệch tính bất biến của một chuẩn đo lường. Nói cách khác, điều đáng ngạc nhiên thật sự do Thuyết tương đối gây ra không phải là tính bất biến của c mà là sự biến mất của tốc độ giới hạn c trong công thức của các chuyển động thông thường.

Đâu là giới hạn của Thuyết tương đối đặc biệt?

Tốc độ năng lượng địa phương cực đại được nhiều thí nghiệm khẳng định. Giới hạn của tốc độ năng lượng địa phương là một *chân lý cơ bản* trong thiên nhiên. Thật vậy, điều này cũng đúng trong phần còn lại của cuộc phiêu lưu này.

Khi chúng ta tiến gần đến tốc độ ánh sáng, hệ số Lorentz và các đại lượng trong phép biến đổi Lorentz dần tới vô hạn. Tuy vậy, trong thiên nhiên, *không có* biến động lực nào có giá trị lớn tuỳ ý. Thí dụ, người ta chưa thấy hạt sơ cấp nào có năng lượng hay động lượng lớn hơn – hay gần bằng – các giới hạn Planck (có hiệu chính)

$$E_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{4G}} = 9.8 \cdot 10^8 \,\text{J} = 0.60 \cdot 10^{19} \,\text{GeV}$$
$$p_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{4G}} = 3.2 \,\text{kg m/s} = 0.60 \cdot 10^{19} \,\text{GeV/c} \qquad (103)$$

Thật vậy, giá trị kỷ lục được quan sát thấy cho đến nay nhỏ hơn giới hạn Planck một triệu lần. Lý do rất đơn giản: khi tốc độ gần với tốc độ ánh sáng, Thuyết tương đối đặc

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

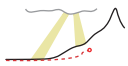
biệt *không còn khả năng* mô tả thiên nhiên.

Như vậy, tại sao khi giới hạn tốc độ cực đại vẫn còn đúng thì Thuyết tương đối đặc biệt lại sụp đổ? Lúc năng lượng rất lớn thì Thuyết tương đối đặc biệt mô tả thiên nhiên *không còn hiệu quả*. Có hai lý do.

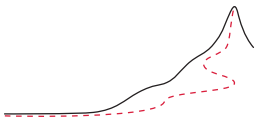
Trong trường hợp phép co Lorentz đạt cực trị, ta phải tính đến độ cong của không-thời gian do năng lượng chuyển động tạo ra: phải kể đến *lực hấp dẫn*. Tương tự, cũng cần nhắc lại là cho đến nay ta đã giả sử rằng trong thiên nhiên có chất điểm. Tuy vậy, chất điểm có mật độ lớn vô hạn, nên không thể hiện hữu: lực hấp dẫn, đặc trưng bởi hằng số hấp dẫn G, không cho mật độ lớn vô hạn thông qua độ cong của không gian như ta sẽ thấy sau này.

Hơn nữa, trong trường hợp phép co Lorentz đạt cực trị, ta phải tính đến độ thăng giáng của tốc độ và vị trí của các hạt chuyển động: ta cần đến *Thuyết lượng tử*. Cũng cần nhắc thêm, cho đến nay, ta đã giả sử các phép đo trong thiên nhiên có độ chính xác vô hạn. Tuy vậy, điều này không đúng: Thuyết lượng tử, đặc trưng bởi giá trị tác dụng nhỏ nhất $\hbar$, không cho độ chính xác của phép đo lớn vô hạn như ta sẽ thấy sau này.

Tóm lại, hai hằng số cơ bản G, hằng số hấp dẫn và $\hbar$, lượng tử tác dụng, giới hạn phạm vi áp dụng của Thuyết tương đối đặc biệt. Cả hai hằng số đều xuất hiện trong giới hạn Planck. Hằng số hấp dẫn G điều chỉnh sự mô tả các chuyển động của các vật có kích thước lớn, năng lượng cao. Lượng tử tác dụng $\hbar$ điều chỉnh sự mô tả các chuyển động của các vật có kích thước nhỏ. Tìm hiểu hai loại chuyển động này là hai giai đoạn kế tiếp trong cuộc thám hiểm của chúng ta. Hãy bắt đầu với sự hấp dẫn.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chương 4

Thuyết tương đối tổng quát đơn giản: lực hấp dẫn, tốc độ cực đại và lực cực đại

Thuyết tương đối tổng quát cũng *dễ hiểu*. Ngày nay, người ta có thể xây dựng nó bằng trực giác giống như trường hợp lực hấp dẫn vạn vật và định luật bình phương nghịch đảo của nó, sao cho học sinh trung học cũng có thể hiểu được những ý tưởng quan trọng của Thuyết tương đối tổng quát cũng như Thuyết tương đối đặc biệt. Đặc biệt, hố đen, sóng hấp dẫn, độ cong không-thời gian và các giới hạn của vũ trụ cũng sẽ dễ hiểu như Nghịch lý sinh đôi.

Trong những trang kế tiếp chúng ta sẽ khám phá ra rằng, giống như Thuyết tương đối đặc biệt đặt cơ sở và dẫn xuất từ *tốc độ cực đại c*,

▷ Thuyết tương đối tổng quát đặt cơ sở và dẫn xuất từ *độ biến thiên động lượng cực đại* hay *lực cực đại* $c^4/4G$ – cũng như từ *công suất cực đại* $c^5/4G$.

Trước hết ta sẽ chứng tỏ rằng mọi dữ liệu thực nghiệm đã biết đều nhất quán với các giới hạn này. Lúc đó ta sẽ thấy rằng lực cực đại và công suất cực đại chỉ có thể đạt được trên các mặt giới hạn không thể vượt qua.

▷ Các mặt thể hiện lực cực đại hay dòng động lượng cực đại – và công suất cực đại hay dòng năng lượng cực đại này – được gọi là ***chân trời***.

Chân trời ở đây là sự tổng quát hoá đơn giản của các chân trời mà ta đã gặp trong Thuyết tương đối đặc biệt. Ta sẽ thấy ngay lý do chúng liên quan đến các giá trị cực đại. Chân trời trong Thuyết tương đối tổng quát cũng đóng vai trò như chùm tia sáng trong Thuyết tương đối đặc biệt: chúng là hệ thống *thể hiện* giới hạn. Chân trời là nguyên do của việc bầu trời tối đen vào ban đêm và vũ trụ có kích thước hữu hạn. Chân trời cũng cho ta biết một cách tổng quát rằng không-thời gian bị uốn cong. Và chân trời cho phép chúng ta xây dựng các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát.

Trang 98

Ta cũng sẽ bàn luận về các phản biện và nghịch lý chính nảy sinh từ giới hạn của công suất và lực. Việc giải quyết các nghịch lý sẽ làm rõ lý do tại sao các giới hạn vẫn tiềm tàng rất lâu trong thực nghiệm cũng như trong việc giảng dạy.

Sau phần giới thiệu này ta sẽ nghiên cứu chi tiết các tác dụng của lực hấp dẫn tương đối tính. Ta cũng sẽ tìm hiểu các hệ quả của độ cong không-thời gian đối với các chuyển động của vật thể và ánh sáng trong đời sống hằng ngày của chúng ta. Thí dụ, định luật bình phương nghịch đảo sẽ được sửa đổi. (Bạn có thể giải thích lý do tại sao điều này là cần thiết theo quan điểm mà chúng ta đã theo cho đến lúc này không?) Điều hấp dẫn nhất là ta sẽ khám phá cách làm chuyển động và uốn cong chân không. Rồi ta sẽ nghiên

Câu đố 163 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 59 Các tác dụng của lực hấp dẫn: stalactite đang nhỏ giọt (© Richard Cindric) và các vòng của Thổ tinh, được chụp hình khi Mặt trời đang ở phía sau hành tinh này (courtesy CICLOPS, JPL, ESA, NASA).

cứu vũ trụ ở tầm cỡ vĩ mô. Sau cùng, ta sẽ tìm hiểu một dạng lực hấp dẫn mãnh liệt nhất: hố đen.

Lực cực đại – nguyên lý của Thuyết tương đối tổng quát

> Một trong những đối tượng chính của việc nghiên cứu lý thuyết trong bất kỳ lĩnh vực kiến thức nào là tìm ra quan điểm để nhìn thấy chủ thể dưới hình thức đơn giản nhất.
>
> Willard Gibbs

Xem 107

Ta chỉ thấy Thuyết tương đối *đặc biệt* xuất hiện khi ta nhận ra giới hạn tốc độ c trong thiên nhiên và lấy giới hạn này làm nguyên lý cơ bản. Qua thế kỷ 21 người ta đã chứng minh rằng cũng có thể tiếp cận Thuyết tương đối *tổng quát* bằng cách dùng một nguyên lý cơ bản tương tự:

Xem 108

▷ Trong thiên nhiên có một *lực cực đại*, hay *tốc độ biến thiên động lượng cực đại:*

$$F \leqslant \frac{c^4}{4G} = 3.0258(4) \cdot 10^{43}\,\mathrm{N}\,. \tag{104}$$

Trong thiên nhiên, không có lực nào dù là do bắp thịt, máy móc hay hệ thống nào đó tạo ra, có thể vượt qua giới hạn này. Thông tin thêm cho người thích tìm hiểu, giá trị của giới hạn lực là năng lượng của một hố đen (Schwarzschild) chia cho hai lần bán kính của nó. Giới hạn lực có thể hiểu một cách trực giác nếu ta chú ý rằng hố đen (Schwarzschild) là những vật thể có mật độ cao nhất với khối lượng đã cho. Vì khả năng nén một vật có giới hạn, nên lực – dù là lực hấp dẫn, điện lực, lực hướng tâm hay một loại lực bất kỳ nào khác – cũng không thể có cường độ tuỳ ý.

Người ta có thể dùng một mệnh đề tương đương để diễn tả nguyên lý cơ bản:

▷ Trong thiên nhiên có một *công suất cực đại*, hay tốc độ biến thiên năng lượng cực đại:

$$P \leqslant \frac{c^5}{4G} = 9.071(1) \cdot 10^{51}\,\mathrm{W}\,. \tag{105}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Không có công suất nào dù là của bóng đèn, máy móc hay một vụ nổ lại có thể vượt qua giá trị này. Nó tương đương với $1.2 \cdot 10^{49}$ mã lực. Có một cách khác dùng để hình dung ra giá trị này như sau: công suất cực đại tương ứng với việc biến đổi 50 lần khối lượng của mặt trời thành bức xạ không khối lượng trong một ms. Khi một hố đen (Schwarzschild) chuyển thành bức xạ, trong thời gian mà ánh sáng cần để vượt qua một khoảng cách bằng đường kính của hố đen, thì nó phát ra một công suất cực đại. Dưới đây ta sẽ hiểu một cách chính xác, hố đen là gì và tại sao nó lại liên quan đến các giới hạn này.

Hơn nữa, khi lấy công suất cực đại chia cho c^2 ta lại có thêm một giới hạn tương đương

▷ Trong thiên nhiên có một *tốc độ biến thiên khối lượng cực đại*:

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \leqslant \frac{c^3}{4G} = 1.000\,93(1) \cdot 10^{35}\,\mathrm{kg/s}\,. \tag{106}$$

Ràng buộc trên dòng khối lượng này sẽ áp đặt một giới hạn đối với máy bơm, động cơ phản lực và những người ăn uống nhanh. Thật vậy, tốc độ dòng nước hay luồng vật chất bất kỳ chảy trong các ống dẫn đều bị hạn chế. Giới hạn dòng khối lượng hiển nhiên là sẽ tương đương với giới hạn lực hay giới hạn công suất.

Sự hiện hữu của lực, công suất hay dòng khối lượng cực đại bao hàm toàn bộ Thuyết tương đối tổng quát. Để chứng minh sự đúng đắn và sự hữu ích của cách tiếp cận này, ta cần một chuỗi luận cứ. Chuỗi luận cứ này được liệt kê trong Bảng 3, giống như chuỗi luận cứ mà ta đã dùng khi thiết lập tốc độ giới hạn trong Thuyết tương đối đặc biệt. Điều cơ bản là ta phải nhận ra *tính bất biến* của lực cực đại. Điều này được suy ra từ tính bất biến của c và G. Đầu tiên ta cần thu thập mọi *bằng chứng dựa trên sự quan sát* cho các giới hạn đã đưa ra và phải chứng tỏ rằng nó đúng trong mọi trường hợp. Kế đến, ta phải chứng tỏ rằng giới hạn phải áp dụng được trong *mọi trường hợp khả hữu mà ta có thể nghĩ ra được*; mọi nghịch lý nếu có đều phải được giải quyết. Sau cùng, để thiết lập một nguyên lý của thiên nhiên từ các giới hạn, ta phải chứng tỏ rằng các giới hạn đó sẽ dẫn đến *Thuyết tương đối tổng quát*.

Trang 27

Ba bước này tạo nên phần giới thiệu Thuyết tương đối tổng quát. Chúng ta hãy bắt đầu bằng việc giải thích nguồn gốc của tư tưởng về giá trị giới hạn.

Ý NGHĨA CỦA CÁC GIỚI HẠN LỰC VÀ CÔNG SUẤT

Vào thế kỷ 19 và 20 nhiều vật lý gia đã khổ công né tránh khái niệm lực. Heinrich Hertz lấy điều này làm nguyên lý chỉ đạo trong công trình của mình và đã viết một cuốn sách đầy sức thuyết phục về Cơ học cổ điển mà không dùng đến khái niệm lực. Các nhà khoa học sáng tạo ra Thuyết lượng tử đều biết đến cuốn sách này, nên đã loại bỏ hẳn thuật ngữ 'lực' ra khỏi bảng ngữ vựng của Vật lý vi mô. Trong lúc đó, khái niệm 'lực hấp dẫn' bị loại khỏi Thuyết tương đối tổng quát bằng cách quy nó thành 'giả lực'. Lực xem như 'hết thời'.

Tuy vậy, nguyên lý lực cực đại cũng khá dễ hiểu, miễn là ta dùng các định nghĩa của lực để hình dung ra nó:

▷ *Lực* là dòng động lượng trong một đơn vị thời gian.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 3 Cách thuyết phục chính bạn và những người khác rằng có một lực cực đại $c^4/4G$ hay công suất cực đại $c^5/4G$ trong thiên nhiên. So sánh bảng này với bảng nói về tốc độ năng lượng cực đại ở trang 27 và với bảng nói về tác dụng cực tiểu ở trang 19 trong tập IV.

Phát biểu	Kiểm chứng
Không quan sát thấy lực $> c^4/4G$.	Kiểm tra mọi quan sát.
Không thể tạo ra lực $> c^4/4G$.	Kiểm tra mọi nỗ lực.
Không thể tưởng tượng ra lực có giá trị $> c^4/4G$.	Giải quyết mọi nghịch lý.
Giá trị lực cực đại $c^4/4G$ là một nguyên lý của thiên nhiên.	Từ nguyên lý đó suy diễn ra Thuyết tương đối tổng quát. Chứng tỏ rằng mọi hệ quả, tuy khó hiểu, nhưng được các quan sát khẳng định.

Trong thiên nhiên, động lượng không sinh ra hay mất đi. Ta dùng thuật ngữ 'dòng' để nhớ rằng động lượng là một đại lượng bảo toàn, chỉ có thể thay đổi do thông lượng vào hay thông lượng ra. Nói cách khác,

Xem 109

▷ Độ biến thiên động lượng, hay lực, luôn luôn xảy ra qua một *mặt ranh giới* nào đó.

Mối liên hệ này rất quan trọng. Khi ta nghĩ về lực tại một điểm, *thực ra* ta muốn nói đến dòng động lượng 'chảy' qua một mặt tại điểm đó. Và đại lượng đó có giới hạn.

▷ Lực là một khái niệm *tương đối*.

Số đo của một lực bất kỳ đối với một mặt có tính tương đối. Số đo của dòng động lượng cũng có tính tương đối. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, tốc độ có tính tương đối và có giới hạn. Trong Thuyết tương đối tổng quát, lực cũng có tính tương đối và có giới hạn. Đó là nét quyến rũ của giới hạn lực.

Thuyết tương đối tổng quát thường giải thích khái niệm lực như sau: lực giữ cho các vật thể đi theo các đường trắc địa. (*Đường trắc địa* là đường đi của một hạt rơi tự do.) Cơ chế cơ bản của lực không quan trọng; để có một thí dụ cụ thể nhằm định hướng bàn luận hãy hình dung lực có nguồn gốc điện từ. Tuy vậy, lực hay dòng động lượng đều bị giới hạn đối với một mặt bất kỳ. Mặt, tức là quan sát viên hay vật thể, có đi theo các đường trắc địa hay không, không quan trọng.

Nguyên lý lực cực đại có thể cô đọng lại thành mệnh đề sau: nếu ta tưởng tượng ra một mặt vật lý bất kỳ (và bao bọc nó bằng các quan sát viên), tích phân của dòng động lượng xuyên qua mặt đó (được đo bởi mọi quan sát viên) không bao giờ vượt quá giá trị $c^4/4G$. Việc chọn các mặt như thế nào không quan trọng mà chỉ cần chúng là các mặt vật lý:

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Một mặt là mặt *vật lý* khi ta có thể gắn các quan sát viên lên trên đó.

Cần nhấn mạnh rằng quan sát viên trong Thuyết tương đối tổng quát cũng như đặc biệt, là các hệ vật lý có khối lượng đủ nhỏ sao cho ảnh hưởng của nó lên các hệ cần quan sát không đáng kể.

Nguyên lý lực cực đại áp đặt một giới hạn lên bắp thịt, tác dụng của búa, luồng vật chất, gia tốc của các vật có khối lượng, ... Không một hệ thống nào có thể tạo ra một lực, có thể đo hay cảm nhận được, vượt qua giới hạn đó. Không có hạt, thiên hà hay máy ủi đất nào có thể vượt qua giới hạn đó.

Sự hiện hữu của một giới hạn lực có một hệ quả hấp dẫn. Trong thiên nhiên, lực có thể đo được. Đo có nghĩa là là so sánh với một mẫu chuẩn.

▷ Giới hạn lực cho ta *một đơn vị tự nhiên* để đo lực: lực *Planck*.

Đơn vị lực phù hợp với hệ đơn vị tự nhiên mà Max Planck đã dẫn xuất từ c, G và h (hiện nay người ta chuộng $\hbar$ hơn).* Như vậy lực cực đại đã cung cấp cho ta *một chuẩn đo lường* cho lực, có giá trị ở mọi nơi và mọi lúc.

Giá trị lực cực đại $c^4/4G$ khác với đơn vị do Planck đề nghị lúc đầu ở hai điểm. Đầu tiên là hệ số khác nhau (Planck có khuynh hướng dùng giá trị c^4/G). Thứ hai, đơn vị lực phải là một giá trị *giới hạn*. Về mặt này, lực cực đại đóng vai trò như tốc độ cực đại. Như ta sẽ thấy sau này, tính chất giới hạn cũng đúng đối với mọi đơn vị Planck khác, một khi các hệ số đã được hiệu chính. Hệ số 1/4 không có ý nghĩa sâu xa gì hơn: nó chỉ là các giá trị để ta có dạng đúng của phương trình trường trong Thuyết tương đối tổng quát. Hệ số 1/4 trong phần giới hạn cũng cần có để phục hồi, trong điều kiện thông thường, định luật bình phương nghịch đảo của lực hấp dẫn vạn vật. Khi hệ số đã được tính đúng, lực cực đại (hay công suất cực đại) chỉ đơn giản bằng năng lượng Planck (đã hiệu chính) chia cho chiều dài Planck hay thời gian Planck (đã hiệu chính).

Xem 110
Quyển VI, trang 27
Trang 132

Biểu thức $c^4/4G$ của lực cực đại liên quan đến tốc độ ánh sáng c và hằng số hấp dẫn G; như vậy nó có đủ tiêu chuẩn để là một tiên đề về *lực hấp dẫn tương đối tính*. Nguyên lý cơ bản của Thuyết tương đối đặc biệt là: tốc độ v phải thoả hệ thức $v \leqslant c$ đối với mọi quan sát viên. Tương tự như vậy, nguyên lý cơ bản của Thuyết tương đối tổng quát là: trong mọi trường hợp lực F và công suất P phải thoả các hệ thức $F \leqslant c^4/4G$ và $P \leqslant c^5/4G$. Việc quan sát viên đo lực hay công suất trong khi chuyển động với vận tốc lớn đối với hệ đang quan sát, trong khi rơi tự do, hay trong khi chuyển động với gia tốc lớn, không quan trọng. Tuy vậy, việc quan sát viên đo đạc *tại vị trí riêng của họ* và *tính hiện thực của quan sát viên*, tức là quan sát viên có cấu tạo vật chất, không bị tách rời với hệ thống bằng một chân trời, lại là điều quan trọng. Các điều kiện này giống như các điều kiện ràng buộc quan sát viên khi đo vận tốc trong Thuyết tương đối đặc biệt.

Giới hạn lực liên quan tới lực 3 chiều, hay khái niệm 'lực' trong đời sống hằng ngày và giới hạn công suất liên quan tới khái niệm 'công suất' trong đời sống hằng ngày. Nói cách khác, trong thiên nhiên, cả vận tốc và lực 3 chiều đều bị giới hạn.

Vì công suất vật lý = lực x tốc độ và vì tốc độ bị giới hạn nên việc lực và công suất bị

* Khi Planck khám phá ra lượng tử tác dụng, ông nhận thấy ngay khả năng định nghĩa các đơn vị tự nhiên. Vào một buổi đi dạo trong rừng Berlin với người con trai Erwin 7 tuổi, ông nhận thấy là mình đã có một khám phá quan trọng không kém việc khám phá ra lực hấp dẫn.

Quyển IV, trang 20

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

giới hạn là điều tương đương. Ta cũng đã biết lực và công suất đi với nhau trong định
Trang 85 nghĩa của lực 4 chiều. Mệnh đề về lực 3 chiều cực đại cũng có giá trị đối với mọi thành phần của lực 3 chiều cũng như với cường độ của nó. (Như ta sẽ thấy dưới đây, không
Trang 125 thể sử dụng một phép biến đổi có giá trị γ lớn trên một quan sát viên để vượt qua các giới hạn của lực hay công suất.) Ràng buộc này khiến cho công suất của máy xe hơi, máy xe mô tô, đèn, laser, ngôi sao, nguồn bức xạ hấp dẫn và thiên hà bị giới hạn. Nguyên lý công suất cực đại phát biểu rằng không có phương thức chuyển động hay giải phóng năng lượng nào nhanh hơn giới hạn đó.

Ta có thể hiểu Giới hạn công suất một cách trực giác bằng cách nhớ rằng mọi động cơ đều tạo ra *chất thải*, tức là vật chất hay năng lượng còn thừa. Đối với một ngọn đèn, một ngôi sao hay một hố đen đang bay hơi, chất thải là bức xạ phát ra; đối với một cái xe hay động cơ phản lực nó là hơi nóng; đối với turbine nước, chất thải là dòng nước chậm chạp rời khỏi turbine; đối với một hoả tiễn nó là vật chất phun ra từ sau đuôi của nó; đối với một hoả tiễn photon hay động cơ điện nó là năng lượng điện từ. Khi công suất của một động cơ đến gần giá trị giới hạn, chất thải cũng tăng vọt theo quan hệ năng-khối lượng. Khi khối lượng chất thải rất lớn, lực hấp dẫn giữa chúng – cho dù chỉ là bức xạ – cũng ngăn không cho gia tốc của động cơ tăng thêm.

▷ Như vậy Nguyên lý công suất cực đại cho rằng trong thiên nhiên có sẵn một cơ chế *hãm đà*; cơ chế này là lực hấp dẫn.

Yêu cầu về lực cực đại, công suất cực đại hay dòng khối lượng cực đại trong thiên nhiên huyền hoặc đến nỗi khó có thể là sự thật. Do đó công việc ưu tiên của chúng ta là kiểm chứng thật kỹ lưỡng điều này bằng thực nghiệm.

Bằng chứng thực nghiệm

Giống như nguyên lý tốc độ cực đại, trước tiên nguyên lý lực cực đại cũng phải được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Cũng cần nhắc lại rằng Michelson đã dùng phần lớn thời gian nghiên cứu của đời mình để cố tìm ra độ sai lệch khả hữu trong giá trị của tốc độ ánh sáng. Nhưng chưa có ai chịu bỏ ra nhiều công sức để kiểm chứng lực hay công suất cực đại. Tuy vậy, thành thật mà nói thì chưa có thí nghiệm nào, dù ở cấp độ vi mô, vĩ mô hay vũ trụ, đã đo được các giá trị lực lớn hơn giá trị đã nói. Trong quá khứ, nhiều người tự cho là đã tạo ra được tốc độ năng lượng lớn hơn tốc độ ánh sáng. Nhưng cho đến bây giờ chưa ai dám nói là đã tạo ra hay quan sát thấy một lực lớn hơn giá trị giới
Câu đố 164 s hạn.

Những gia tốc lớn mà các hạt đã đạt tới trong các va chạm xảy ra trong mặt trời, trong các máy gia tốc mạnh nhất hay trong các phản ứng do các tia vũ trụ tạo ra tương ứng với các lực có giá trị nhỏ hơn giới hạn lực rất nhiều. Điều này cũng đúng đối với các neutron trong các sao neutron, các hạt quark trong proton và cả vật chất mà ta thấy đang rơi vào hố đen. Thêm nữa, các cuộc tìm kiếm các kỳ dị trong không-thời gian, nơi mà các lực có thể đạt tới hay vượt qua giới hạn lực, đều không có kết quả.

Trong lĩnh vực thiên văn, tất cả các lực giữa các ngôi sao hay thiên hà đều nhỏ hơn giá trị giới hạn và các lực bên trong các hệ đó cũng vậy. Ngay cả lực tương tác giữa hai nửa vũ trụ cũng không vượt qua giới hạn, bất kể cách chia hai có hợp lý về mặt vật lý
Trang 129 hay không. (Ý nghĩa của 'phân chia hợp lý về mặt vật lý' sẽ được xác định dưới đây; đối

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

với cách chia *không* hợp lý, *có thể* có các ngoại lệ về lực cực đại. Bạn có thể tìm kiếm các ngoại lệ đó cho vui.)

Câu đố 165 s

Các thiên văn gia cũng không tìm thấy một miền không-thời gian nào có độ cong (khái niệm sẽ được giới thiệu dưới đây) đủ lớn để lực có thể vượt qua giới hạn. Thật vậy, không có quan sát nào trong các quan sát gần đây về hố đen cho thấy các lực lớn hơn giá trị giới hạn hay các vật nhỏ hơn bán kính của hố đen tương ứng.

Giới hạn công suất cũng có thể kiểm tra bằng thực nghiệm. Hoá ra công suất – hay cường độ sáng – của ngôi sao, quasar, sao đôi, sự bùng nổ tia gamma, thiên hà hay đám thiên hà thực ra có giá trị đáng kể so với giới hạn công suất. Tuy vậy, người ta chưa quan sát thấy sự vi phạm giới hạn. Thực ra là toàn bộ ánh sáng phát ra từ các ngôi sao trong vũ trụ cũng không vượt quá giới hạn. Tương tự, ngay cả các nguồn mạnh nhất của sóng hấp dẫn, sự hợp nhất các hố đen, cũng không vượt quá giới hạn công suất. Thí dụ, sự kiện hợp nhất hố đen được công bố năm 2016, có lẽ là sự kiện dữ dội nhất mà người ta đã quan sát được cho đến nay, đã biến đổi khối lượng khoảng 3 lần mặt trời thành bức xạ trong 0.2 s. Công suất đó nhỏ hơn giới hạn công suất $c^5/4G$ khoảng 3000 lần; công suất lớn nhất có lẽ nhỏ hơn giới hạn khoảng 300 lần. Có thể chỉ có độ sáng của hố đen đang bay hơi trong giai đoạn cuối cùng đạt đến giới hạn công suất. Tuy vậy, người ta chưa quan sát thấy sự kiện nào như vậy. (Trong điều kiện có nhiều nguồn ở gần nhau, mỗi nguồn có thể đạt tới giới hạn công suất, điều được gọi là *nghịch lý công suất*, sẽ được bàn luận sau đây.)

Xem 112

Xem 111

Trang 130

Tương tự như vậy, độ lớn của tốc độ dòng khối lượng quan sát được đều nhỏ hơn giới hạn tương ứng. Ngay đến các hệ vật lý là mô hình toán học của các hố đen – thí dụ như hố đen âm học im lặng hay hố đen quang học – cũng không vi phạm các giới hạn lực và công suất trong các hệ đó.

Xem 113

Tóm lại, về mặt thực nghiệm thì không có gì đáng phấn khởi. Các thí nghiệm không mâu thuẫn với các giá trị giới hạn. Nhưng cũng không có nhiều dữ liệu khẳng định cho các giới hạn này. Lý do là không có các chân trời trong đời sống hằng ngày và trong các hệ thống thực nghiệm. Tốc độ cực đại, nền tảng cho Thuyết tương đối đặc biệt là điều có thể nhận thấy ở mọi nơi; trong khi đó lực cực đại và công suất cực đại lại không thấy ở đâu cả. Dưới đây ta sẽ đề nghị một số thí nghiệm kiểm chứng giới hạn chuyên dụng có thể thực hiện được trong tương lai không xa.

Trang 136

Thiết lập Thuyết tương đối tổng quát

*

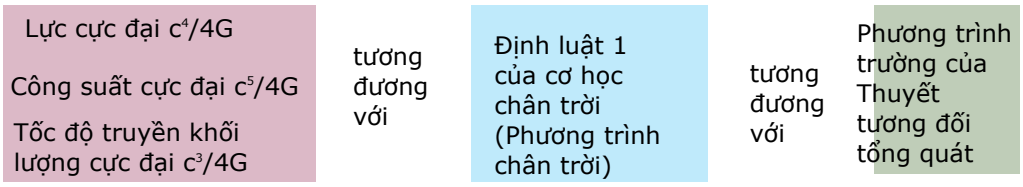
Để đưa giới hạn lực và công suất cực đại trở thành nguyên lý cơ bản của vật lý thì việc chứng minh chúng nhất quán với những gì ta quan sát được trong thiên nhiên thì không đủ. Ta cần chứng minh rằng chúng sẽ dẫn tới một Thuyết tương đối tổng quát hoàn chỉnh. (Phần này chỉ dành cho những độc giả đã biết về phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát. Các độc giả khác có thể đọc ngay đến phần kế tiếp.)

Trang 120

Để dẫn xuất Thuyết tương đối ta cần nghiên cứu các hệ *thể hiện* các giới hạn đang xem xét. Trong trường hợp Thuyết tương đối đặc biệt, hệ thống chính thể hiện tốc độ giới hạn là ánh sáng. Vì lý do này, ánh sáng là trọng tâm nghiên cứu của Thuyết tương đối đặc biệt. Trong trường hợp Thuyết tương đối tổng quát, các hệ thể hiện các giới hạn

* Phần này có thể bỏ qua trong lần đọc đầu tiên. Phần chứng minh trong phần này có từ tháng 12-2003.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 60 Minh hoạ sự tương đương của lực cực đại hay công suất cực đại với các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát.

không rõ ràng cho lắm. Đầu tiên ta nên nhớ rằng lực (hay công suất) cực đại không thể thể hiện thông qua một *khối* trong không gian. Nếu điều này xảy ra, một phép biến đổi đơn giản* có thể biến đổi lực (hay công suất) sang một giá trị lớn hơn. Do đó, thiên nhiên chỉ có thể thể hiện lực và công suất cực đại trên các mặt chứ không thể trong các khối. Thêm nữa, những mặt này phải không thể đạt tới. Những mặt không thể đạt tới này đối với Thuyết tương đối tổng quát là cơ bản; chúng được gọi là *chân trời*.

Xem 108, Xem 110

▷ Lực và công suất cực đại chỉ xuất hiện trên các chân trời.

Trang 99

Ta đã gặp chân trời trong Thuyết tương đối đặc biệt, nơi chúng được định nghĩa là các mặt áp đặt các giới hạn lên việc quan sát. (Chú ý là khác với đời sống hằng ngày, chân trời chỉ là các đường chứ không phải là các mặt.) Định nghĩa hiện tại của chân trời là mặt của lực (hay công suất) cực đại thì tương đương với định nghĩa: mặt mà bên ngoài nó ta không thể nhận được tín hiệu. Trong cả hai trường hợp, chân trời là một mặt mà không có tương tác nào có thể xảy ra bên ngoài nó.

Mối liên hệ giữa chân trời và lực cực đại là tâm điểm của lực hấp dẫn tương đối tính. Nó cũng quan trọng như mối liên hệ giữa ánh sáng và tốc độ cực đại trong Thuyết tương đối đặc biệt. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, ta dùng tính chất giới hạn của tốc độ ánh sáng để suy ra phép biến đổi Lorentz. Trong Thuyết tương đối tổng quát, ta sẽ chứng tỏ rằng lực cực đại trong thiên nhiên, mà ta còn có thể gọi là *lực chân trời*, bao hàm các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát. Để đạt được mục tiêu này, ta bắt đầu bằng cách nhận xét rằng mọi chân trời đều có một dòng năng lượng chảy qua chúng. Dòng năng lượng này phụ thuộc vào độ cong của chân trời, như ta sẽ thấy sau này. Mối liên hệ này bao hàm việc chân trời không thể là mặt phẳng, vì mặt phẳng rộng vô hạn sẽ kéo theo dòng năng lượng cũng vô hạn.

Việc thiết lập các phương trình của Thuyết tương đối tổng quát chỉ có hai bước, như đã trình bày trong Hình 60. Trong bước đầu tiên, ta chứng minh rằng nguyên lý lực hay công suất cực đại bao hàm 'định luật' đầu tiên của Cơ học chân trời. Trong bước thứ hai, ta chứng minh rằng 'định luật' đầu tiên bao hàm các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát.

Chân trời hữu hạn đơn giản nhất là một hình cầu tĩnh, tương ứng với hố đen Schwarzschild. Một chân trời hình cầu được đặc trưng bởi bán kính cong R hay gia tốc hấp dẫn ở bề mặt của nó a; hai đại lượng này có mối liên hệ $2aR = c^2$. Năng lượng chảy xuyên qua một chân trời bất kỳ thì luôn luôn hữu hạn khi đo dọc theo phương truyền.

* *Phép biến đổi* được định nghĩa trong Thuyết tương đối đặc biệt là sự thay đổi điểm quan sát sang quan sát viên thứ hai *đang chuyển động* đối với quan sát viên thứ nhất.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ta có thể nói về các xung năng lượng một cách cụ thể hơn: một xung năng lượng bất kỳ xuyên qua một chân trời được đặc trưng bởi năng lượng E và chiều dài riêng L. Khi xung năng lượng chảy vuông góc xuyên qua chân trời, tốc độ biến thiên động lượng, hay lực, đối với một quan sát viên ở chân trời là

$$F = \frac{E}{L} \,. \tag{107}$$

Mục đích của chúng ta là chứng minh rằng sự hiện hữu của lực cực đại bao hàm Thuyết tương đối tổng quát. Bây giờ, lực cực đại thể hiện trên chân trời. Như vậy ta cần đưa giá trị cực đại vào cả hai vế của phương trình (107) và chứng tỏ rằng điều này kéo theo Thuyết tương đối tổng quát.

Dùng giá trị lực cực đại và diện tích $4\pi R^2$ đối với chân trời hình cầu ta kiếm được

$$\frac{c^4}{4G} = \frac{E}{LA} 4\pi R^2 \,. \tag{108}$$

Tỷ số E/A là mật độ năng lượng mặt, chảy qua diện tích A, là một phần của chân trời. Việc đưa giá trị cực đại vào phương trình sẽ hoàn tất khi ta chú ý thêm rằng chiều dài L của xung năng lượng bị giới hạn bởi bán kính R. Giới hạn $L \leqslant R$ là kết quả có được khi ta xem xét các tính chất hình học: khi nhìn từ phía lõm của chân trời, xung phải ngắn hơn bán kính cong. Đại lượng sau là một đối số độc lập. Chiều dài L của một vật có gia
Xem 114 tốc a bị giới hạn, theo Thuyết tương đối đặc biệt, bởi điều kiện $L \leqslant c^2/2a$. Thuyết tương đối đặc biệt đã chứng minh rằng giới hạn này có liên hệ với sự xuất hiện của chân trời. Cùng với hệ thức (108), mệnh đề: chân trời là các mặt của lực cực đại, sẽ dẫn đến hệ thức quan trọng về chân trời hình cầu tĩnh sau đây:

$$E = \frac{c^2}{8\pi G} a\, A \,. \tag{109}$$

Phương trình chân trời này là mối liên hệ giữa dòng năng lượng E xuyên qua diện tích A của một chân trời hình cầu với gia tốc hấp dẫn ở bề mặt a. Hệ thức cho thấy năng lượng chảy qua chân trời bị giới hạn, nó tỷ lệ với diện tích chân trời và dòng năng lượng tỷ lệ với gia tốc hấp dẫn ở bề mặt. Phương trình chân trời còn được gọi là *định luật thứ nhất*
Xem 115 *của Cơ học hố đen* hay *định luật thứ nhất của Cơ học chân trời*.

Dẫn xuất trên còn cho một kết quả trung gian

$$E \leqslant \frac{c^4}{16\pi G} \frac{A}{L} \,. \tag{110}$$

Dạng phương trình chân trời này cho thấy rõ một điều nữa là không có mặt nào khác hơn chân trời lại đạt đến dòng năng lượng cực đại, với diện tích và chiều dài xung (hay gia tốc hấp dẫn ở bề mặt) đã cho. *Lực hấp dẫn giới hạn dòng năng lượng.* Không có một lĩnh vực vật lý nào khác tạo ra được một nguyên lý như vậy: chỉ riêng lý thuyết hấp dẫn mới có.

Một dẫn xuất khác của phương trình chân trời lại bắt đầu từ việc nhấn mạnh đến

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

công suất thay vì lực, bằng cách dùng phương trình $P = E/T$ làm khởi điểm.

Cũng cần nhấn mạnh rằng phương trình chân trời dưới hai dạng (109) và (110) chỉ là hệ quả của hai giả thuyết: đầu tiên, có một tốc độ cực đại trong thiên nhiên, và thứ hai, có một lực cực đại (hay công suất cực đại) trong thiên nhiên. Không cần giả định một lý thuyết về sự hấp dẫn đặc biệt nào. Phương trình chân trời có thể được kiểm chứng bằng thực nghiệm, như ta sẽ bàn dưới đây.

Kế đến, ta phải tổng quát hoá phương trình chân trời, từ chân trời tĩnh và hình cầu sang chân trời tổng quát. Vì ta đã giả sử lực cực đại đúng với *mọi* quan sát viên, bất kể quán tính hay có gia tốc, nên việc tổng quát hoá cũng đơn giản. Đối với chân trời có độ cong bất kỳ hay thay đổi theo thời gian, phương trình chân trời có dạng

$$\delta E = \frac{c^2}{8\pi G}\, a\, \delta A \,. \tag{111}$$

Hệ thức vi phân này – có thể gọi là *phương trình chân trời tổng quát* – đúng với mọi loại chân trời. Ta có thể áp dụng phương trình này cho một phần δA của một chân trời động hay biến đổi trong không gian.

Người ta đã biết sự tương đương giữa Phương trình chân trời tổng quát (111) và Thuyết tương đối tổng quát ít nhất từ năm 1995, khi sự tương đương này đã được Jacobson chứng minh (một cách không tường minh). Ta sẽ chứng minh rằng vai trò của phương trình chân trời dạng vi phân này đối với Thuyết tương đối tổng quát cũng giống như vai trò của phương trình $\mathrm{d}x = c\ \mathrm{d}t$ đối với Thuyết tương đối đặc biệt. Từ đây trở đi, khi ta nói về phương trình chân trời, là ta muốn nói đến phương trình dạng vi phân tổng quát (111).

Xem 116

Cũng có ích để nhắc lại rằng hành trạng của xung năng lượng có chiều dài L thì giống nhau đối với mọi mặt, ngay cả khi mặt không phải là chân trời. Lặp lại lý luận trên, ta kiếm được giới hạn năng lượng

$$\frac{\delta E}{\delta A} \leqslant \frac{c^4}{16\pi G}\,\frac{1}{L} \,. \tag{112}$$

Dấu bằng xảy ra khi mặt A là một chân trời. Nói cách khác, khi giá trị $\delta E/\delta A$ trong hệ vật lý dẫn đến giá trị của vế bên phải thì chân trời xuất hiện. Mối liên hệ này là cốt lõi trong việc bàn luận của chúng ta khi phát sinh các phản thí dụ về nguyên lý giới hạn.

Nếu ta nhớ rằng ở chân trời chiều dài xung L tuân theo hệ thức $L \leqslant c^2/2a$, thì rõ ràng phương trình chân trời tổng quát là một hệ quả của lực cực đại $c^4/4G$ hay công suất cực đại $c^5/4G$. Thêm nữa, phương trình chân trời cũng liên quan đến tốc độ cực đại và là nguồn gốc của hệ thức $L \leqslant c^2/2a$. Như vậy phương trình chân trời chỉ là hệ quả của hai giới hạn trong thiên nhiên này. Ta cũng ghi chú thêm rằng phương trình chân trời – hay, một cách tương đương, giới hạn lực hay công suất – bao hàm việc tốc độ biến thiên khối lượng cực đại trong thiên nhiên sẽ là $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t \leqslant c^3/4G$.

Công việc thứ hai còn lại là suy ra Thuyết tương đối tổng quát từ phương trình chân trời tổng quát. Điều này được Jacobson chứng minh và các điểm chủ yếu nằm trong những đoạn văn sau đây. Để thấy mối liên hệ giữa phương trình chân trời tổng quát (111) và phương trình trường, ta chỉ cần tổng quát hoá phương trình chân trời tổng quát sang hệ toạ độ tổng quát và dòng năng-động lượng có hướng tổng quát. Ta đạt được điều này

Xem 116

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

bằng cách đưa ra khái niệm tensor áp dụng vào không-thời gian cong.

Để tổng quát hoá phương trình chân trời tổng quát, ta đưa thêm khái niệm nguyên tố mặt tổng quát $\mathrm{d}\Sigma$ và trường vector Killing k của phép biến đổi địa phương, đã tạo ra chân trời (với chuẩn thích hợp). Jacobson sử dụng hai đại lượng này để viết lại vế trái của phương trình chân trời tổng quát (111) thành

$$\delta E = \int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \,, \tag{113}$$

trong đó T_{ab} là tensor năng-động lượng. Rõ ràng là biểu thức này sẽ cho năng lượng ở chân trời đối với hệ toạ độ bất kỳ và dòng năng lượng có hướng bất kỳ.

Kết quả chính của Jacobson là hệ số $a\,\delta A$ trong vế phải của phương trình chân trời tổng quát (111) có thể được viết lại, bằng cách dùng phương trình (thuần tuý hình học) Raychaudhuri, là

$$a\ \delta A = c^2 \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \,, \tag{114}$$

trong đó R_{ab} là tensor Ricci mô tả độ cong không-thời gian. Hệ thức này mô tả sự phụ thuộc của các tính chất địa phương của chân trời vào độ cong địa phương.

Kết hợp hai bước, phương trình chân trời tổng quát (111) trở thành

$$\int T_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b = \frac{c^4}{8\pi G} \int R_{ab} k^a \mathrm{d}\Sigma^b \,. \tag{115}$$

Jacobson chứng tỏ rằng phương trình này, cùng với sự bảo toàn năng lượng địa phương (nghĩa là tensor năng-động lượng không còn phân kỳ) chỉ có thể được nghiệm đúng khi

$$T_{ab} = \frac{c^4}{8\pi G} \left(R_{ab} - (\frac{R}{2} + \Lambda) g_{ab} \right) \,, \tag{116}$$

trong đó R là vô hướng Ricci và Λ là hằng số tích phân không xác định trong bài toán này. Các phương trình trên là toàn bộ các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát, bao gồm hằng số vũ trụ Λ. Như vậy phương trình trường là hệ quả của phương trình chân trời. Do đó chúng cũng đúng ở vị trí chân trời.

Vì ta có thể định vị chân trời tại một điểm không-thời gian bất kỳ, bằng cách chọn phép biến đổi toạ độ thích hợp, phương trình trường phải đúng trong toàn bộ không-thời gian. Đến đây thì lý luận của Jacobson kết thúc. Vì phương trình trường, thông qua phương trình chân trời, là hệ quả của nguyên lý lực cực đại, ta cũng đã chứng minh được: tại mọi điểm trong không-thời gian giá trị của lực cực đại là một bất biến và là một hằng số của thiên nhiên.

Nói cách khác, phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát là hệ quả trực tiếp của sự giới hạn dòng năng lượng ở chân trời và do đó cũng là hệ quả của sự hiện hữu của lực (hay công suất) cực đại. Thật ra thì Jacobson đã chứng tỏ rằng các lập luận đều đúng trong cả hai phần. *Tóm lại, lực (hay công suất) cực đại, phương trình chân trời, và Thuyết tương đối tổng quát tương đương với nhau.*

Ta cũng nên nhớ rằng việc thiết lập các phương trình trường của Thuyết tương đối

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

tổng quát từ lực hay công suất cực đại chỉ đúng khi ta giả định rằng lực hấp dẫn có tính hình học thuần tuý. Thật vậy, đây là nguyên lý cơ bản của Thuyết tương đối tổng quát. Nếu cơ chế của lực hấp dẫn dựa trên các nền tảng khác, như các hạt cho đến nay chưa biết, thì sự tương đương lực hấp dẫn-lực cực đại sẽ không còn.

Vì ta hoàn thành việc thiết lập Thuyết tương đối tổng quát từ nguyên lý lực (hay công suất) cực đại, nên ta có thể gọi các giới hạn này là *lực chân trời* và *công suất chân trời*. Mọi khẳng định bằng thực nghiệm hay lý thuyết các phương trình trường cũng là sự khẳng định gián tiếp sự hiện hữu của các giới hạn chân trời này.

Lực hấp dẫn, độ cong không-thời gian, chân trời và lực cực đại

Chúng ta hãy nhắc lại các kết quả của phần trước bằng các thuật ngữ đơn giản. Hãy tưởng tượng có hai quan sát viên bắt đầu chuyển động tự do và song song đối với nhau. Cả hai liên tục chuyển động thẳng về phía trước. Nếu sau một thời gian họ nhận ra là họ không còn chuyển động song song với nhau nữa, thì họ sẽ suy ra là họ đang chuyển động trên một mặt cong (bạn hãy thử xem!) hay trong một không gian cong. Người ta đã quan sát thấy sự chệch khỏi chuyển động song song như vậy khi ở gần các vật có khối lượng và nguồn năng lượng định xứ. Ta kết luận rằng không-thời gian gần các vật có khối lượng bị cong. Hay, đơn giản hơn: lực hấp dẫn làm cong không gian.

Câu đố 166 s

Lực hấp dẫn làm phát sinh gia tốc. Và gia tốc dẫn đến một chân trời ở khoảng cách c^2/a. Không có hiện tượng chân trời xảy ra trong đời sống hằng ngày, vì khoảng cách này không thể nhận ra được; nhưng chân trời sẽ sinh ra quanh các vật thể có khối lượng tập trung trong một hình cầu bán kính $r = 2Gm/c^2$. Những vật như vậy được gọi là *hố đen* (Schwarzschild). Độ cong không gian quanh một hố đen khối lượng m là độ cong khả hữu cực đại bao quanh một vật có khối lượng như vậy.

Hố đen có thể xem như là vật chất đang rơi tự do. Sau này ta sẽ nghiên cứu chi tiết về hố đen. Trong trường hợp hố đen, giống như đối với chân trời, ta không thể dò ra những gì ẩn 'sau' ranh giới đó.*

Trang 268

Hố đen được đặc trưng bằng gia tốc hấp dẫn ở bề mặt a và dòng năng lượng E.

▷ Nguyên lý lực cực đại là một cách phát biểu đơn giản của mệnh đề: tại chân trời, dòng năng lượng tỷ lệ với diện tích và gia tốc hấp dẫn ở bề mặt.

Mối liên hệ này giúp ta có thể thiết lập một Thuyết tương đối tổng quát đầy đủ. Đặc biệt, chỉ cần giá trị lực cực đại cũng đủ để biết độ cong của không-thời gian. Ta sẽ tìm hiểu chi tiết của mối liên hệ này ngay sau đây.

Nếu trong thiên nhiên không có giới hạn lực, ta có thể 'bơm' một lượng năng lượng bất kỳ xuyên qua một mặt đã cho, bất kể loại chân trời. Trong trường hợp này, dòng năng lượng sẽ không tỷ lệ với diện tích, chân trời sẽ không có tính chất vốn có và Thuyết tương đối tổng quát không còn đứng vững nữa. Như vậy ta sẽ hiểu được mối liên hệ giữa chân trời với dòng năng lượng cực đại, với dòng động lượng cực đại và với dòng khối lượng cực đại. Mối liên hệ này trong trường hợp hố đen thì rõ ràng nhất, nơi mà năng lượng, động lượng hay khối lượng rơi vào bên trong nó.

Trang 271

* Tương tự như vậy, trong Thuyết tương đối đặc biệt ta không thể dò ra những vật chuyển động nhanh hơn rào cản ánh sáng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Còn nhiều điểm tương đồng giữa Thuyết tương đối đặc biệt và Thuyết tương đối tổng quát. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, tốc độ cực đại dẫn đến hệ thức $\mathrm{d}x = c\,\mathrm{d}t$ và thời gian phụ thuộc vào quan sát viên. Trong Thuyết tương đối tổng quát, lực (hay công suất) cực đại dẫn tới phương trình chân trời $\delta E = \frac{c^2}{8\pi G}\, a\, \delta A$ và các hiện tượng về không-thời gian cong. Phương trình chân trời dẫn tới phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát. Tóm lại:

▷ Sự hiện hữu của lực cực đại bao hàm việc không-thời gian bị uốn cong khi gần các vật có khối lượng và *phương thức* không-thời gian bị uốn cong.

Như vậy lực (hay công suất) cực đại cùng có vai trò kép trong Thuyết tương đối tổng quát giống như tốc độ cực đại trong Thuyết tương đối đặc biệt. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, tốc độ ánh sáng là tốc độ cực đại; nó cũng là hằng số tỷ lệ kết nối không gian và thời gian, như ta đã thấy trong phương trình $\mathrm{d}x = c\,\mathrm{d}t$. Trong Thuyết tương đối tổng quát, lực ở chân trời là lực cực đại xuất hiện (với hệ số 2π) trong các phương trình trường và cũng là hằng số tỷ lệ kết nối năng lượng và độ cong. Như vậy lực cực đại mô tả cả độ đàn hồi của không-thời gian lẫn – nếu ta đơn giản xem không-thời gian như một môi trường – lực căng cực đại của không-thời gian. Vai trò kép của một hằng số vừa là hệ số tỷ lệ vừa là giá trị giới hạn đã được biết nhiều trong khoa học vật liệu.

Xem 108

Tại sao lực cực đại cũng là hệ số tỷ lệ giữa độ cong và năng lượng? Hãy tưởng tượng không gian là một môi trường đàn hồi.* Độ đàn hồi của một chất được mô tả bằng một hằng số vật liệu. Định nghĩa đơn giản nhất của hằng số này là tỷ số giữa ứng suất (lực trên một đơn vị diện tích) và độ biến dạng (độ biến thiên tương đối của chiều dài). Một định nghĩa chính xác phải tính đến các yếu tố hình học. Thí dụ, *suất trượt* G (hay μ) mô tả mức độ khó khăn để di chuyển hai mặt song song của vật đối với nhau. Nếu lực F cần có để di chuyển hai mặt song song của vật có diện tích A và chiều dài l một khoảng Δl, ta có *suất trượt* G là

$$\frac{F}{A} = G\frac{\Delta l}{l}\,. \tag{117}$$

Giá trị của suất trượt G đối với kim loại và hợp kim nằm trong khoảng 25 đến 80 GPa. Lý thuyết continuum của chất rắn chứng tỏ rằng đối với chất rắn tinh thể bất kỳ không có chỗ hỏng (chất rắn 'hoàn hảo') sẽ có một ứng suất trượt lý thuyết: khi ứng suất có giá trị lớn hơn giá trị này, vật sẽ bị gãy. *Ứng suất trượt lý thuyết*, hay nói cách khác, ứng suất cực đại của một chất, được cho bởi công thức

$$G_{\text{tss}} = \frac{G}{2\pi}\,. \tag{118}$$

Như vậy ứng suất cực đại chủ yếu là suất trượt. Mối liên hệ này tương tự mối liên hệ ta đã thấy trong chân không. Thật vậy, việc tưởng tượng chân không là một chất có thể uốn cong được là một cách hữu ích để hiểu Thuyết tương đối tổng quát. Ta sẽ thường xuyên làm như vậy trong phần tiếp theo sau đây.

Xem 117

* Sự tương tự này chắc làm bạn nghĩ tới aether? Đừng lo: vật lý không cần khái niệm aether vì ta không thể phân biệt nó với chân không. Thuyết tương đối tổng quát không mô tả chân không như một loại vật chất có thể biến dạng hay chuyển động – nên nó không cần đưa ra khái niệm aether.

Quyển III, trang 137

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Điều gì sẽ xảy ra khi chân không bị nén tối đa? Nó có bị vỡ ra như chất rắn không? Gần như vậy: vì thật ra, khi chân không bị vỡ ra, các hạt sẽ xuất hiện. Sau này ta sẽ tìm hiểu thêm về mối liên hệ đó: vì các hạt là các thực thể lượng tử nên ta cần nghiên cứu lý thuyết lượng tử trước khi mô tả các hiệu ứng đó trong phần cuối của cuộc phiêu lưu này.

Quyển VI, trang 303

Các điều kiện hiệu lực đối với giới hạn của lực và công suất

Giá trị lực cực đại chỉ có được với ba điều kiện. Để làm rõ điểm này, ta có thể so sánh với trường hợp tốc độ cực đại. Có 3 điều kiện hiệu lực đối với tốc độ cực đại.

Đầu tiên, tốc độ ánh sáng (trong chân không) là giới hạn trên đối với chuyển động của hệ chỉ có *động lượng* hay *năng lượng*. Tuy vậy, giới hạn này có thể bị vượt qua đối với các chuyển động của các điểm phi vật chất. Thật vậy, điểm cắt của hai lưỡi kéo, điểm sáng laser in trên Mặt trăng, cái bóng, hay vận tốc nhóm, vận tốc phase của nhóm sóng có thể lớn hơn tốc độ ánh sáng. Tốc độ giới hạn chỉ có giá trị đối với *chuyển động của năng lượng*.

Trang 61

Thứ hai, tốc độ ánh sáng chỉ là một giới hạn nếu được đo *gần* khối lượng hay năng lượng đang chuyển động: Mặt trăng chuyển động nhanh hơn ánh sáng nếu ta quay quanh trục của mình trong một giây; các điểm ở xa trong vũ trụ Friedmann chuyển động ra xa nhau với tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng. Tốc độ giới hạn chỉ có tính chất *địa phương*.

Thứ ba, quan sát viên đo tốc độ phải có bản chất *vật lý*: quan sát viên phải được cấu tạo từ vật chất và năng lượng, do đó phải chuyển động chậm hơn ánh sáng và phải có khả năng quan sát được hệ thống. Một hệ chuyển động với tốc độ bằng hay lớn hơn tốc độ ánh sáng không thể làm quan sát viên. Tốc độ giới hạn chỉ chấp nhận các quan sát viên *vật lý*.

Xem 118

Ba điều kiện tương tự cũng áp dụng cho tính hiệu lực của lực và công suất cực đại. Điểm thứ ba đặc biệt quan trọng. Đó là, lực hấp dẫn tương đối tính cấm các quan sát viên *nhỏ như một điểm* và khối lượng thử là một *chất điểm*: chúng không có tính chất vật lý. Các mặt chuyển động nhanh hơn ánh sáng cũng vậy. Trong các trường hợp đó, ta có thể tìm thấy các phản thí dụ về lực cực đại. Thử tìm ra một thí dụ như vậy – hoặc là nhiều thí dụ nếu có thể và tất cả đều hấp dẫn. Bây giờ ta hãy xem xét một số trường hợp quan trọng nhất.

Câu đố 167 s

Các thí nghiệm tưởng tượng và các nghịch lý về giới hạn lực

> Wenn eine Idee am Horizonte eben aufgeht, ist gewöhnlich die Temperatur der Seele dabei sehr kalt. Erst allmählich entwickelt die Idee ihre Wärme, und am heissesten ist diese (das heisst sie tut ihre grössten Wirkungen), wenn der Glaube an die Idee schon wieder im Sinken ist.
>
> Friedrich Nietzsche*

* 'Khi một ý tưởng vừa ló dạng trên đường chân trời, nhiệt độ của tâm hồn đối với nó thường rất thấp. Lần hồi ý tưởng ấm dần lên và nó nóng nhất (nghĩa là có ảnh hưởng lớn nhất) khi niềm tin vào ý tưởng đó, một lần nữa, đã suy tàn.' Friedrich Nietzsche (1844–1900), triết gia và học giả. Đây là câu cách ngôn 207 – *Sonnenbahn der Idee* – trong tác phẩm *Menschliches Allzumenschliches – Der Wanderer und sein Schatten*. của ông

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Bước sau cùng, nhưng quan trọng trong lập luận của chúng ta về giới hạn lực giống như trường hợp giới hạn tốc độ. Ta đã thấy rằng không có một thí nghiệm thực tế nào dẫn tới một lực lớn hơn giới hạn lực. Nhưng ta cũng cần chứng tỏ rằng không có một thí nghiệm *tưởng tượng* nào cho kết quả vượt qua giới hạn lực. Theo truyền thống có từ thế kỷ 20, những thí nghiệm tưởng tượng như vậy được gọi là *Gedanken experiment*, xuất phát từ tiếng Đức Gedankenexperiment, có nghĩa là 'thí nghiệm trong ý nghĩ'.

Lúc đầu việc đặt cho tốc độ một giới hạn kể cũng đáng ngạc nhiên, vì tốc độ có tính tương đối, do đó ta nên để cho nó có giá trị tuỳ theo trí tưởng tượng. Đối với lực cũng vậy: vì lực cũng có tính tương đối, ta nên để cho nó có giá trị tuỳ ý.

Để loại bỏ mọi nỗ lực tưởng tượng nhằm vượt qua tốc độ cực đại, chỉ cần nghiên cứu các tính chất của phép cộng vận tốc và sự phân kỳ của động năng ở tốc độ gần tốc độ ánh sáng là đủ. Trong trường hợp lực cực đại, công việc phức tạp hơn. Thật vậy, việc công bố về lực cực đại, công suất cực đại và độ biến thiên khối lượng cực đại dễ kích động nhiều làn sóng phản đối.

* *

Cách tiếp cận kiểu thử mọi khả năng. Cách đơn giản nhất để vượt qua giới hạn lực là thử gia tốc một vật bằng một lực lớn hơn giá trị cực đại. Đến đây, gia tốc dẫn tới việc truyền năng lượng. Việc truyền này bị giới hạn bởi phương trình chân trời (111) hay giới hạn năng lượng (112). Khi cố gắng vượt qua giới hạn lực, dòng năng lượng sẽ làm một chân trời xuất hiện. Chân trời này giữ cho lực không vượt quá giới hạn, vì nó đặt ra một giới hạn cho sự tương tác.

Chúng ta hãy tìm hiểu giới hạn tương tác này. Trong Thuyết tương đối đặc biệt ta
Trang 103
thấy rằng gia tốc của một vật bị chiều dài của vật giới hạn. Thật vậy, ở một khoảng cách $c^2/2a$ theo hướng ngược với gia tốc a, có một *chân trời* xuất hiện. Nói cách khác, một vật được gia tốc sau cùng sẽ vỡ ra tại thời điểm và vị trí đó. Lực F tác dụng lên vật khối lượng M và bán kính R bị giới hạn theo hệ thức

$$F \leqslant \frac{M}{2R}\, c^2 \,. \tag{119}$$

Bổ sung thêm tác dụng của lực hấp dẫn (thường là nhỏ) là một điều đơn giản. Để có thể quan sát được, vật được gia tốc phải *lớn hơn* một hố đen; thay bán kính $R = 2GM/c^2$ ta kiếm được giới hạn lực (104). Phép thử theo kiểu *động lực* để vượt qua giới hạn lực thất bại.

* *

Phép thử bằng dây. Ta cũng có thể thử tạo ra một lực lớn hơn trong trạng thái *tĩnh*, thí dụ bằng cách kéo hai đầu một sợi dây theo hai hướng ngược nhau. Để đơn giản ta giả sử rằng ta dùng dây không đứt. Mọi dây đều dùng được vì thế năng giữa các nguyên tử có thể tạo ra các lực lớn giữa chúng. Để tạo ra một lực căng dây vượt qua giá trị giới hạn, ta cần tích năng lượng (đàn hồi) vào sợi dây. Năng lượng này phải đưa vào từ hai đầu dây. Khi ta tăng lực căng dây, ngày càng lớn, năng lượng (đàn hồi) được tích luỹ ngày càng nhiều trong phạm vi ngày càng nhỏ. Để vượt quá giới hạn lực, ta cần thêm ngày càng nhiều năng lượng cho mỗi đơn vị khoảng cách và diện tích hơn giới hạn quy định bởi phương trình chân trời. Một chân trời không mời lại đến. Nhưng *không có* cách nào kéo

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

căng sợi dây ngang qua một chân trời, cho dù nó không thể đứt gãy được! Một chân trời dẫn tới việc hoặc là dây đứt hoặc là dây tách rời khỏi hệ thống kéo.

▷ Như vậy chân trời ngăn cản việc tạo ra lực lớn hơn giới hạn lực.

Đúng ra thì việc giả sử độ bền của dây lớn vô hạn là điều không cần thiết: không thể vượt qua giới hạn lực cho dù độ bền của dây chỉ có giới hạn.

Ta cũng nên nhớ rằng việc lực tác dụng là *lực kéo* – trường hợp dây thừng hay dây thép – hay *lực đẩy* cũng không quan trọng. Trong trường hợp đẩy hai vật tựa vào nhau, nỗ lực không ngừng gia tăng cường độ lực sẽ dẫn tới việc thành lập một chân trời, do giới hạn quy định bởi phương trình chân trời. Theo định nghĩa, điều này xảy ra ngay tại giới hạn lực. Vì không có cách dùng chân trời để đẩy hay kéo một vật, nỗ lực để tạo ra một lực lớn hơn sẽ kết thúc một khi chân trời được thành lập. Tóm lại, các *tĩnh* lực không thể lớn hơn lực cực đại.

* *

Phép thử bằng sự hãm đà. Giới hạn lực sẽ tạo ra một tốc độ biến thiên động lượng cực đại. Như vậy ta có thể tìm cách *dừng* đột ngột một hệ vật lý đang chuyển động để vượt qua giới hạn lực cực đại. Việc không có vật rắn trong thiên nhiên, đã gặp trong Thuyết tương đối đặc biệt, làm cho ta không thể dừng đột ngột một vật; nhưng Thuyết tương đối đặc biệt thì lại không ấn định thời gian dừng tối thiểu. Tuy vậy, việc bao gồm cả lực hấp dẫn thì lại có. Việc dừng một hệ đang chuyển động bao hàm việc truyền năng lượng. Dòng năng lượng xuyên qua một đơn vị diện tích không thể lớn hơn giá trị mà phương trình chân trời đã cho. Như vậy ta không thể vượt qua giới hạn lực bằng cách làm cho một vật dừng lại.

Trang 103

Tương tự như vậy, nếu một hệ chuyển động nhanh *bị phản xạ* thay vì dừng lại, cần phải có một lượng năng lượng để truyền và tích chứa trong một thời gian ngắn. Thí dụ, khi một quả banh tennis bị phản xạ tại một bức tường lớn, động lượng của banh thay đổi và nó chịu tác dụng của một lực. Nếu nhiều banh như vậy phản xạ cùng một lúc, có chắc là sẽ có một lực lớn hơn giới hạn xuất hiện không? Hoá ra là không thể. Nếu ta cố làm như vậy thì dòng động lượng tại bức tường sẽ đạt tới giới hạn cho bởi phương trình chân trời và sẽ tạo ra một chân trời. Trong trường hợp đó, không còn sự phản xạ nữa. Như vậy không thể vượt qua giới hạn nhờ sự phản xạ.

* *

Phép thử dùng bức xạ cổ điển. Thay cho các hệ thống kéo, đẩy, chặn đứng hay phản xạ *vật chất*, ta có thể nghiên cứu các hệ thống liên quan tới *bức xạ*. Tuy vậy, lý lẽ thì vẫn như cũ, cho dù đó là photon, graviton hay các hạt khác thì cũng vậy. Đặc biệt, gương thì cũng giống như tường, khả năng của nó cũng bị giới hạn: không thể dùng ánh sáng và gương để tạo ra độ biến thiên động lượng lớn hơn $c^4/4G$.

Ta cũng không thể tạo ra một lực lớn hơn lực cực đại bằng cách tập trung một lượng lớn ánh sáng trên một mặt. Lại xảy ra tình trạng tương tự banh tennis: khi đạt tới giá trị giới hạn E/A cho bởi phương trình chân trời (112), một chân trời xuất hiện ngăn không cho giới hạn bị phá vỡ.

* *

Phép thử dùng gạch. Ta có thể thử giới hạn lực và công suất bằng các thí nghiệm tưởng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

tượng cụ thể hơn. Ta có thể thử vượt qua giới hạn lực bằng cách xếp chồng các vật nặng. Nhưng dù ta có xây một tháp gạch cao vô hạn thì cũng không tạo ra được một lực đủ mạnh lên trên nền nhà: việc tích luỹ trọng lượng, có tính đến việc giảm chiều cao, cũng chỉ tạo ra một giá trị hữu hạn chứ *không thể* đụng tới giới hạn lực. Nếu ta tiếp tục gia tăng mật độ các viên gạch, ta cần tính đến việc tháp và Trái đất biến thành hố đen. Và hố đen thì không cho phép vượt qua giới hạn lực.

* *

Phép thử dùng phép biến đổi. Một phép biến đổi tưởng chừng như có thể được chọn sao cho giá trị của lực 3 chiều F trong một hệ quy chiếu này được biến đổi thành giá trị F' bất kỳ trong một hệ quy chiếu khác. Điều này hoá ra là sai. Trong Thuyết tương đối, lực 3 chiều không thể tăng vô hạn bằng cách dùng phép biến đổi. Trong mọi hệ quy chiếu, lực 3 chiều đo được không bao giờ vượt qua lực riêng, là lực 3 chiều đo trong hệ quy chiếu đồng hành. (Có thể so sánh trường hợp này với trường hợp vận tốc 3 chiều, khi ta không thể dùng phép biến đổi tuỳ ý để tốc độ lớn hơn c. Tuy vậy, không có sự tương đương một cách chặt chẽ vì hành trạng của phép biến đổi đối với lực 3 chiều và vận tốc 3 chiều khác nhau rõ rệt.)

Xem 119
Trang 85

* *

Phép thử phân kỳ. Lực tác dụng lên khối lượng thử m ở khoảng cách xuyên tâm d đối với hố đen Schwarzschild (khi $\Lambda = 0$) được tính theo công thức

Xem 112

$$F = \frac{GMm}{d^2\sqrt{1 - \frac{2GM}{dc^2}}} \,. \tag{120}$$

Tương tự như vậy, biểu thức bình phương nghịch đảo của lực hấp dẫn vạn vật giữa hai vật khối lượng m và M là

$$F = \frac{GMm}{d^2} \,. \tag{121}$$

Cả hai biểu thức này có thể có giá trị bất kỳ; điều này cho thấy không có giới hạn lực cực đại.

Tuy vậy, lực hấp dẫn chỉ có thể phân kỳ đối với *chất điểm* phi vật lý. Tuy vậy, có một khoảng cách tiếp cận nhỏ nhất đối với khối lượng m được tính theo công thức

$$d_{\text{min}} = \frac{2Gm}{c^2} \,. \tag{122}$$

Khoảng cách tiếp cận nhỏ nhất chính là bán kính hố đen tương ứng. Việc tạo thành hố đen làm cho việc đạt đến khoảng cách zero giữa hai khối lượng không thể thực hiện được. Việc tạo thành hố đen cũng ngăn cản việc hiện thực hoá chất điểm. Chất điểm không có tính chất vật lý. Kết quả, trong thiên nhiên có khoảng cách tiếp cận (thực) nhỏ nhất tỷ lệ với khối lượng. Nếu khoảng cách này được đưa vào phương trình (120) và

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

(121), ta kiếm được

$$F = \frac{c^4}{4G}\,\frac{Mm}{(M+m)^2}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{M}{M+m}}} \leqslant \frac{c^4}{4G}\,. \tag{123}$$

Tính gần đúng lực hấp dẫn vạn vật cho ta kết quả

$$F = \frac{c^4}{4G}\,\frac{Mm}{(M+m)^2} \leqslant \frac{c^4}{4G}. \tag{124}$$

Trong cả hai trường hợp, giá trị lực cực đại không bao giờ bị vượt qua, miễn là ta có tính đến kích thước vật lý của vật hay của quan sát viên.

* *

Vấn đề về tính nhất quán. Nếu quan sát viên không phải là chất điểm, thì ta có thể thắc mắc về tính đúng đắn của việc áp dụng định nghĩa ban đầu cho độ biến thiên động lượng hay năng lượng, là tích phân của các giá trị do quan sát viên gắn với mặt đã cho đo được. Trong Thuyết tương đối tổng quát, quan sát viên không thể là chất điểm, nhưng họ có thể nhỏ tuỳ ý. Như vậy định nghĩa ban đầu vẫn còn khả dụng nếu ta xem việc giảm liên tục kích thước của quan sát viên là một quá trình có giới hạn. Hiển nhiên là khi ta tính đến Thuyết lượng tử thì quá trình này sẽ kết thúc khi đạt đến chiều dài Planck. Đây không phải là vấn đề trong Thuyết tương đối tổng quát, miễn là kích thước đặc trưng trong trường hợp này lớn hơn trị số Planck khá nhiều.

* *

Vấn đề lượng tử. Nếu bỏ qua các hiệu ứng lượng tử, ta có thể dựng các mặt có góc nhọn hay ngay cả các hình fractal để có thể vượt qua giới hạn lực. Tuy nhiên các mặt như vậy không phải là mặt vật lý, nếu không ta sẽ đo được các chiều dài nhỏ hơn chiều dài Planck. Điều kiện buộc các mặt phải là mặt vật lý kéo theo việc chúng phải có một độ bất định riêng cho bởi chiều dài Planck. Việc tìm hiểu chi tiết chứng tỏ rằng các hiệu ứng lượng tử không cho phép vượt qua giới hạn lực.

Câu đố 168 e

Xem 108, Xem 110

* *

Phép thử bằng quan sát viên cực hạn tương đối tính. Bất kỳ quan sát viên nào, dù chuyển động nhanh theo quán tính hay có gia tốc, đều không có cơ hội thắng được giới hạn lực. Trong vật lý cổ điển ta thường nghĩ rằng sự tương tác cần cho việc đo đạc có thể nhỏ như ý ta muốn. Tuy nhiên nhận định này không đúng cho mọi quan sát viên; đặc biệt, quan sát viên cực hạn không thoả điều kiện này. Đối với các quan sát viên đó, tương tác khi đo đạc phải lớn. Kết quả là chân trời sẽ xuất hiện ngăn không cho giới hạn bị vượt qua.

* *

Phép thử vi mô. Ta có thể cố gắng vượt qua giới hạn lực bằng cách ra sức gia tốc một hạt nhỏ hay bằng cách cho nó va chạm với các hạt khác. Thực ra các lực mạnh sẽ xuất hiện khi hai hạt có năng lượng lớn va chạm với nhau. Tuy vậy, nếu năng lượng liên kết của hai hạt trở nên lớn đủ để thách thức giới hạn lực, một chân trời sẽ xuất hiện trước

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

khi hai hạt tới gần nhau.

Thực tế thì Thuyết lượng tử cho kết quả đúng như vậy. Bản thân Thuyết lượng tử đã
Xem 120 định một giới hạn cho gia tốc. Đối với một hạt có khối lượng m giới hạn này là

$$a \leqslant \frac{2mc^3}{\hbar} \,. \tag{125}$$

Ở đây, $\hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js là *lượng tử tác dụng*, một hằng số cơ bản của thiên nhiên. Đặc biệt, giới hạn gia tốc này được đáp ứng trong các máy gia tốc hạt, trong va chạm giữa các hạt và trong hiện tượng sinh cặp. Thí dụ, sự phát sinh tự phát các cặp electron–positron trong điện từ trường mạnh hay ở gần các chân trời hố đen, có liên quan tới giới hạn (125). Gán khối lượng lớn hết cỡ cho một hạt sơ cấp, cụ thể là khối lượng Planck (có hiệu chính), ta thấy từ phương trình (125) lực giới hạn là cận trên của các hạt sơ cấp.

Quyển VI, trang 40

* *

Phép thử dùng cách nén. Các hố đen có thật sự là dạng vật chất hay năng lượng có mật độ lớn nhất hay không? Nghiên cứu nhiệt động lực học hố đen cho thấy sự tập trung khối lượng với mật độ cao hơn mật độ hố đen sẽ mâu thuẫn với các nguyên lý của Nhiệt
Xem 112 động lực học. Trong nhiệt động lực học hố đen, mặt và entropy có liên hệ với nhau: ta có thể tạo ra những quá trình thuận nghịch làm giảm entropy nếu các hệ vật lý có thể bị nén tới giá trị nhỏ hơn bán kính của hố đen. Kết quả: kích thước của hố đen là kích thước giới hạn của khối lượng trong thiên nhiên. Tương tự, ta cũng không thể vượt qua giới hạn lực trong thiên nhiên.

* *

Phép thử bằng cách cộng lực. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, ta không thể tổng hợp vận tốc bằng phép cộng vector đơn giản. Tương tự, trong trường hợp các lực, một phép cộng ngây thơ như vậy không đúng; mọi nỗ lực cộng các lực như vậy sẽ tạo ra chân trời. Nếu sách giáo khoa về Thuyết tương đối đã tìm hiểu hành trạng của vector lực khi cộng, với sự cẩn trọng như khi tìm hiểu vector vận tốc, thì giới hạn lực có lẽ đã xuất hiện trong sách vở sớm hơn nhiều. (Hiển nhiên là Thuyết tương đối tổng quát đòi hỏi cách xử lý riêng.) Trong thiên nhiên, không thể cộng các lực lớn.

* *

Trong Thuyết tương đối đặc biệt, một vật chuyển động chậm hơn ánh sáng trong một hệ quy chiếu thì nó cũng sẽ chậm hơn giống như vậy trong mọi hệ quy chiếu khác. Bạn có thể chứng tỏ rằng một lực nhỏ hơn giới hạn bất biến $c^4/4G$ trong một hệ quy chiếu
Câu đố 169 s này thì cũng nhỏ hơn trong các hệ quy chiếu khác không?

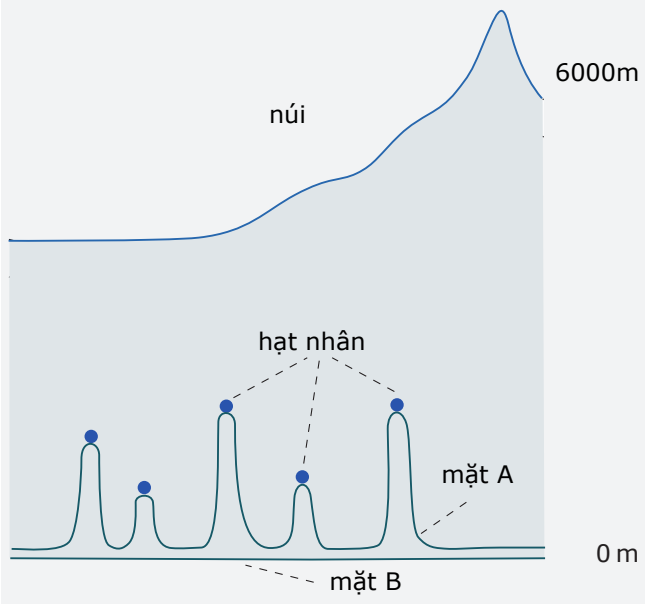
* *

Ta cũng có thể thử dùng hằng số vũ trụ để tạo ra lực vượt qua lực cực đại. Nhưng cách
Xem 121 này cũng không thành công, như đã được John Barrow và Gary Gibbons bàn đến.

* *

Bạn có thể đề nghị và quyết định đưa ra một phép thử bổ sung để vượt qua giới hạn lực

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 61 Phép thử ngọn núi để vượt qua giá trị dòng khối lượng cực đại.

Câu đố 170 r hay không?

CÁC THÍ NGHIỆM TƯỞNG TƯỢNG VỚI GIỚI HẠN CỦA CÔNG SUẤT VÀ DÒNG KHỐI LƯỢNG

Giống như giới hạn lực, giới hạn công suất cũng phải đúng đối với mọi hệ mà ta có thể *tưởng tượng* ra được. Sau đây là một số phép thử nhằm bác bỏ nó.

* *

Phép thử xe cáp treo. Hãy tưởng tượng một bộ máy có thể gia tốc một vật bằng một dây thép không đứt và không khối lượng (giả sử là có một sợi dây như vậy). Ngay khi máy đạt tới giới hạn công suất, động cơ hoặc khí thải sẽ đạt tới phương trình chân trời. Khi chân trời xuất hiện, động cơ không thể tiếp tục kéo sợi dây, vì sợi dây, cho dù rất bền bỉ cũng không thể vượt qua chân trời. Giới hạn công suất sẽ vẫn có ở đầu sợi dây kéo, cho dù động cơ được lắp bên trong hay bên ngoài vật được gia tốc.

* *

Phép thử ngọn núi. Người ta có thể xác định một mặt được uốn cong kỳ lạ đến nỗi nó chỉ đi qua *ngay bên dưới* mỗi hạt nhân nguyên tử của một ngọn núi, như mặt A trong Hình 61. Mọi nguyên tử của núi đều nằm *ngay trên* mực nước biển, gần như chạm vào nó. Hãy tưởng tượng thêm rằng mặt này đang chuyển động *lên trên* với tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng. Dễ dàng chứng tỏ rằng dòng khối lượng xuyên qua mặt này lớn hơn giới hạn dòng khối lượng. Thật vậy, giới hạn dòng khối lượng $c^3/4G$ có giá trị khoảng 10^{35} kg/s. Trong thời gian 10^{-22} s, bằng đường kính một hạt nhân chia cho tốc độ ánh sáng, chỉ cần 10^{13} kg xuyên qua mặt: đó là khối lượng của một ngọn núi.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Mặt uốn cong quanh các nguyên tử có thể cung cấp một phản thí dụ cho giới hạn. Tuy nhiên, tìm hiểu kỹ hơn một chút thì không đúng như vậy. Vấn đề nằm ở phát biểu 'ngay bên dưới'. Hạt nhân là các hạt lượng tử và có một độ bất định về vị trí; độ bất định này chủ yếu là khoảng cách giữa hai hạt nhân. Kết quả, để chắc rằng tất cả các nguyên tử *nằm trên* mặt đang xét, hình dạng của nó không thể giống mặt A trong Hình 61. Nó phải là một mặt phẳng nằm dưới nguyên ngọn núi, như mặt B trong hình. Tuy vậy, một mặt phẳng bên dưới ngọn núi không cho phép vượt qua giới hạn của độ biến thiên khối lượng.

* *

Phép thử đa nguyên tử. Ta có thể tưởng tượng một số lớn các nguyên tử bằng với số nguyên tử của một ngọn núi nằm phân tán (đại khái) trên một mặt phẳng. Một lần nữa, mặt phẳng này chuyển động lên trên với tốc độ ánh sáng. Và cũng trong trường hợp này độ bất định về vị trí của các nguyên tử khiến cho ta không thể quan sát thấy hay cho rằng giới hạn dòng khối lượng đã bị vượt qua.

* *

Phép thử nhiều hố đen. Các hố đen thường là lớn và như vậy độ bất định về vị trí có thể bỏ qua. Giới hạn khối lượng $c^3/4G$, hay giới hạn công suất $c^5/4G$, tương ứng với dòng của một hố đen chuyển động xuyên qua một mặt phẳng với tốc độ ánh sáng. Nhiều hố đen cùng xuyên qua một mặt phẳng với tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng hình như có thể vượt qua giới hạn. Tuy vậy, mặt phải là mặt vật lý: một quan sát viên phải có thể ở trên một điểm của nó. Nhưng không một quan sát viên nào có thể xuyên qua một hố đen. Như vậy hố đen phải xuyên thủng mặt phẳng. Người ta không thể nói rằng một hố đen có thể xuyên qua một mặt phẳng; ngay cả khi số hố đen ít hơn cũng không được. Giới hạn không thể bị vượt qua.

* *

Phép thử nhiều sao neutron. Hình như ta có thể đạt tới giới hạn khối lượng khi có nhiều sao neutron (mà mật độ hơi nhỏ hơn mật độ hố đen có cùng khối lượng) đi với tốc độ cao ngang qua một mặt phẳng cùng một lúc. Tuy vậy, khi tốc độ gần với tốc độ ánh sáng, thời gian xuyên qua đối với các điểm ở xa sao neutron và các điểm đang đi ngang qua sao khác nhau rất nhiều. Không thể xuyên qua Sao neutron (gần giống với hố đen) trong một thời gian ngắn tính theo một đồng hồ đặt xa ngôi sao. Một lần nữa, giới hạn không thể bị vượt qua.

* *

Phép thử cường độ sáng. Các nhà vật lý thiên văn đã bàn đến sự hiện hữu của giới hạn cường độ sáng cực đại. Một cách tổng quát, giới hạn cực đại của công suất, tức là của năng lượng trên một đơn vị thời gian, thì đúng đối với dòng năng lượng bất kỳ *xuyên qua một mặt vật lý bất kỳ*. Mặt vật lý có thể bao trùm toàn thể vũ trụ. Tuy vậy, cho dù gom tất cả các ngọn đèn, ngôi sao và thiên hà trong vũ trụ cũng không tạo ra được một mặt có công suất phát ra lớn hơn giới hạn đã đề cập.

Xem 112

Mặt phải là mặt *vật lý*.* Một mặt là mặt *vật lý* nếu một quan sát viên có thể được đặt

* Hay còn được gọi là *nhận biết được về mặt vật lý*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

trên một điểm bất kỳ của nó. Đặc biệt, mặt vật lý không thể cắt ngang chân trời, hay có một chi tiết nhỏ hơn một độ dài tối thiểu nào đó. Độ dài tối thiểu này sẽ được giới thiệu sau; nó được xác định bởi chiều dài Planck có hiệu chỉnh. Nếu một mặt không phải là vật lý thì nó có thể cho ta một phản thí dụ về giới hạn công suất hay lực. Tuy vậy, những phản thí dụ phi vật lý này không tạo ra các định luật về thiên nhiên. (*Ex falso quodlibet.**)

Quyển VI, trang 67

Câu đố 171 s

* *

Phép thử nhiều ngọn đèn, hay *nghịch lý về công suất*. Một giới hạn công suất tuyệt đối sẽ đặt ra một ràng buộc về tốc độ chuyển tải năng lượng xuyên qua một mặt vật lý tưởng tượng bất kỳ. Thoạt tiên, hình như việc kết hợp hai nguồn bức xạ, mỗi nguồn phát ra 3/4 công suất cực đại, sẽ phát ra công suất bằng 3/2 lần công suất cực đại, và như vậy cho phép ta vượt qua giới hạn công suất. Tuy nhiên, hai đèn như vậy sẽ đổ sộ đến nỗi tạo ra một chân trời chung quanh chúng – một hố đen được hình thành. Thêm nữa, vì có giới hạn chân trời (112), chân trời này sẽ nuốt phần lớn bức xạ và giữ cho giới hạn lực và công suất không bị vượt qua. Việc tìm hiểu mô phỏng bằng số của sự kiện này sẽ là một điều hữu ích. Bạn có thể cung cấp một mô phỏng như vậy không? Tóm lại, ta có thể nói, *không thể cộng* các công suất lớn trong thiên nhiên.

Câu đố 172 e

Câu đố 173 r

* *

Phép thử tập trung ánh sáng. Một cách tiếp cận khác là chiếu một xung ánh sáng hình cầu, ngắn và mạnh vào một khối cầu. Mới đầu có vẻ như ta có thể vượt qua giới hạn công suất và lực, vì quang năng có thể được tập trung vào một thể tích rất nhỏ. Tuy vậy, việc tập trung cao độ quang năng sẽ tạo thành một hố đen hoặc sẽ làm cho khối lượng tạo thành một hố đen. Không thể bơm năng lượng vào một vật với tốc độ nhanh hơn tốc độ do giới hạn công suất hạn chế. Thực tế là người ta không thể gom nhiều nguồn sáng sao cho tổng công suất phát ra của chúng lớn hơn giới hạn công suất. Mỗi khi giới hạn lực bị tiếp cận thì một chân trời sẽ xuất hiện giữ cho giới hạn không bị vượt qua.

* *

Phép thử hố đen. Một hệ thống trong thiên nhiên có thể *đạt tới* giới hạn công suất là công suất của hố đen khi bay hơi ở giai đoạn cuối cùng. Tuy vậy, ngay cả trong trường hợp này, chỉ có thể bằng chứ không thể vượt qua giới hạn công suất.

* *

Phép thử bão hoà. Nếu vũ trụ đạt tới giới hạn công suất, một nguồn công suất mới xuất hiện sẽ phá vỡ giới hạn này, nếu không ít nhất sẽ có một nguồn ở chỗ khác tắt đi. Bạn có thể tìm ra sự nguỵ biện trong lập luận này không?

Câu đố 174 s

* *

Phép thử dòng nước. Ta có thể thử bơm nước thật nhanh qua các ống lớn có thiết diện A. Tuy vậy, khi ống có chiều dài L đầy nước chảy với tốc độ v gần với giới hạn dòng khối lượng, lực hấp dẫn của nước *chờ* được bơm qua A sẽ làm chậm dòng nước được bơm qua thiết diện đó. Giới hạn lại xuất hiện khi thiết diện A hoá thành chân trời.

* 'Người ta có thể suy ra bất kỳ điều gì từ một sự sai lầm.'

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

Việc kiểm tra là không có hệ nào – từ vi mô tới vũ trụ – vượt qua công suất cực đại hay dòng khối lượng cực đại là công việc kiểm nghiệm thêm về Thuyết tương đối tổng quát. Mới đầu ta thấy có vẻ dễ tìm ra các phản thí dụ, vì một mặt có thể bao trùm cả vũ trụ hay một số bất kỳ các phản ứng của hạt sơ cấp. Tuy vậy, không có nỗ lực nào thành công.

* *

Tóm lại, trong tất cả các trường hợp mà giới hạn của lực, công suất hay dòng khối lượng bị thử thách, khi dòng năng lượng đạt tới mật độ năng–khối lượng của hố đen trong không gian hay dòng động lượng tương ứng theo thời gian, một chân trời biến cố sẽ xuất hiện; chân trời này sẽ ngăn việc vượt qua các giới hạn. Cả ba loại giới hạn này đều được khẳng định trong thực nghiệm cũng như trong lý thuyết. Người ta không thể tạo ra hay đo được các giá trị lớn hơn giới hạn. Các thí nghiệm tưởng tượng cũng chứng tỏ rằng ba giới hạn này là các giới hạn tuyệt đối. Hiển nhiên là cả ba đều mở đối với các phép kiểm nghiệm trong tương lai cũng như các thí nghiệm tưởng tượng xa hơn. (Nếu bạn có nghĩ ra thí nghiệm nào tốt hơn, hãy cho tác giả được biết.)

Câu đố 175 r

Tại sao lực cực đại đã không được khám phá trong một thời gian lâu đến như vậy?

Lý do *đầu tiên* vì sao nguyên lý lực cực đại được khám phá chậm đến như vậy vì ta không gặp chân trời trong đời sống hằng ngày. Do điều này, các thí nghiệm thông thường không phát hiện được giới hạn lực hay công suất. Phải mất nhiều thập kỷ để các nhà vật lý nhận ra rằng bầu trời đêm tối đen không phải là trường hợp duy nhất mà chỉ là một điều thường thấy trong thiên nhiên: thiên nhiên đầy các chân trời. Nhưng trong đời sống hằng ngày, chân trời không có vai trò quan trọng – thật may – vì chân trời gần nhất có lẽ nằm ở tâm của dải Ngân hà.

Lý do *thứ hai* là niềm tin sai lầm vào sự hiện hữu của chất điểm. Đây là một thành kiến về mặt lý thuyết do việc lý tưởng hoá thường gặp trong vật lý Galilei. Để hiểu thấu đáo Thuyết tương đối tổng quát ta cần tâm niệm rằng không có hạt, vật thể hay quan sát viên nào có kích thước nhỏ như một điểm trong hình học. Chúng là các khái niệm gần đúng chỉ có thể áp dụng trong vật lý Galilei, Thuyết tương đối đặc biệt hay Thuyết lượng tử. Trong Thuyết tương đối tổng quát, chân trời phủ nhận sự hiện hữu của chất điểm. Thói quen sai lầm khi tin rằng có thể thu nhỏ tuỳ ý kích thước của một vật trong khi khối lượng của vật đó vẫn không đổi sẽ làm cho ta không nhận ra giới hạn lực và công suất.

Lý do *thứ ba* là các thành kiến về khái niệm lực. Trong Thuyết tương đối tổng quát, rất khó xác định lực hấp dẫn. Ngay trong vật lý Galilei ta cũng hiếm khi nhấn mạnh rằng lực là dòng động lượng xuyên qua một mặt. Việc giảng dạy về khái niệm lực không được đầy đủ trong nhiều thế kỷ – một ngoại lệ khác thường – do đó người ta thường lảng tránh khái niệm này.

Xem 122

Tóm lại, nguyên lý lực cực đại – hay công suất cực đại – đã ẩn kín rất lâu vì một 'âm mưu' của thiên nhiên và tập quán tư duy đã che giấu nguyên lý này với các nhà vật lý thực nghiệm và lý thuyết.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Một cách hiểu trực giác về Thuyết tương đối tổng quát

> Wir leben zwar alle unter dem gleichen Himmel, aber wir haben nicht alle den gleichen Horizont.*
>
> Konrad Adenauer

Các khái niệm về lực chân trời và công suất chân trời có thể dùng làm nền tảng cho cách tiếp cận trực giác với Thuyết tương đối tổng quát.

* *

Lực hấp dẫn là gì? Trong nhiều câu trả lời mà ta sẽ gặp, bây giờ ta có câu trả lời đầu tiên: lực hấp dẫn là 'cái bóng' của lực cực đại. Khi ta cảm thấy lực hấp dẫn yếu, ta cần nhớ rằng một quan sát viên khác ở cùng nơi và tại cùng thời điểm với ta sẽ cảm thấy lực cực đại. Việc tìm kiếm cảm giác chính xác của quan sát viên đó là một bài tập hay. Một cách hiểu khác: nếu không có lực cực đại thì cũng không có lực hấp dẫn.

* *

Lực cực đại bao hàm lực hấp dẫn vạn vật. Để hiểu điều này, ta hãy nghiên cứu một hệ hành tinh đơn giản, tức là, một hành tinh có vận tốc nhỏ và lực yếu. Một hệ hành tinh đơn giản có kích thước L bao gồm một vệ tinh (nhỏ) chuyển động quanh một khối lượng M ở trung tâm, cách nhau một khoảng $R = L/2$. Gọi a là gia tốc của vật. Vận tốc nhỏ bao hàm điều kiện $aL \ll c^2$, suy ra từ Thuyết tương đối đặc biệt; lực nhỏ bao hàm điều kiện $\sqrt{4GMa} \ll c^2$, suy ra từ giới hạn của lực. Những điều kiện này đúng đối với toàn hệ thống kể cả các thành phần của nó. Cả hai biểu thức đều có thứ nguyên bình phương của tốc độ. Vì hệ thống chỉ có một tốc độ đặc trưng, hai biểu thức $aL = 2aR$ và $\sqrt{4GMa}$ phải tỷ lệ với nhau, có nghĩa là

$$a = f\frac{GM}{R^2}\,, \tag{126}$$

ở đây ta phải xác định hệ số f. Để xác định nó, ta tìm vận tốc thoát cần thiết để rời khỏi vật ở trung tâm. Vận tốc thoát phải nhỏ hơn tốc độ ánh sáng đối với vật bất kỳ lớn hơn hố đen. Vận tốc thoát, dẫn xuất từ biểu thức (126), rời khỏi một vật có khối lượng M và bán kính R được cho bởi công thức $v_{\text{esc}}^2 = 2fGM/R$. Bán kính nhỏ nhất R của vật, được cho bởi công thức $R = 2GM/c^2$, suy ra $f = 1$. Do đó, đối với các tốc độ và lực nhỏ, định luật bình phương nghịch đảo mô tả quỹ đạo của một vệ tinh quanh một vật ở trung tâm.

* *

Nếu không-thời gian rỗng đàn hồi, như một miếng kim loại, nó phải dao động. Một hệ vật lý bất kỳ có thể dao động khi sự biến dạng phát sinh một lực hồi phục. Ta đã thấy ở trên là có một lực như thế trong chân không: đó là lực hấp dẫn. Nói cách khác, chân không có thể dao động và vì nó có tính linh hoạt nên nó cũng phải có khả năng duy trì sóng. Thật vậy, sóng hấp dẫn đã được tiên đoán từ Thuyết tương đối tổng quát, như ta sẽ thấy dưới đây.

Trang 178

* 'Tất cả chúng ta đều sống chung dưới một bầu trời, nhưng không có cùng một chân trời.' Konrad Adenauer (1876–1967), Thủ tướng Tây Đức.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

Nếu độ cong và năng lượng được liên kết với nhau thì tốc độ cực đại cũng phải áp dụng được cho năng lượng hấp dẫn. Thật vậy, ta sẽ thấy rằng lực hấp dẫn có tốc độ truyền hữu hạn. Định luật bình phương nghịch đảo thông thường không thể đúng vì nó mâu thuẫn với mọi giới hạn tốc độ. Rõ ràng là ta cần thêm sự hiệu chỉnh do tốc độ cực đại. Ngoài ra, vì sóng hấp dẫn là sóng năng lượng không có khối lượng, ta cũng chờ đợi là tốc độ truyền của chúng sẽ là tốc độ cực đại. Điều này quả đúng như vậy, như ta sẽ thấy.

Trang 178

* *

Một vật không thể có mật độ lớn hơn mật độ hố đen (không quay) có cùng khối lượng. Giới hạn lực và công suất cực đại áp dụng cho chân trời không thể tạo ra khả năng nén vật chất vào trong những chân trời nhỏ hơn. Do đó có thể viết lại giới hạn lực cực đại thành giới hạn cho kích thước L của hệ vật lý có khối lượng m:

$$L \geqslant \frac{4Gm}{c^2} \,. \tag{127}$$

Nếu ta xem hai lần bán kính của hố đen là 'kích thước' của nó, ta có thể nói rằng không có hệ vật lý có khối lượng m nào có kích thước nhỏ hơn giá trị này.* Giới hạn kích thước đóng vai trò quan trọng trong Thuyết tương đối tổng quát. Bất đẳng thức $m \geqslant \sqrt{A/16\pi}\, c^2/G$, mô tả 'kích thước' cực đại của hố đen, được gọi là *bất đẳng thức Penrose* đã được chứng minh cho nhiều trường hợp thực tế. Có thể thấy Bất đẳng thức Penrose bao hàm giới hạn lực cực đại và ngược lại. Nguyên lý lực cực đại, hay kích thước cực tiểu tương đương của hệ vật chất–năng lượng, không cho phép hình thành các kỳ dị trần trụi (điểm kỳ dị có thể quan sát được). (Các vật lý gia gọi việc không có các kỳ dị trần trụi này là giả định *kiểm duyệt vũ trụ*.)

Xem 123, Xem 124

* *

Mọi nguồn năng lượng đều có một giới hạn công suất. Đặc biệt, giá trị $c^5/4G$ giới hạn cường độ sáng của mọi nguồn hấp dẫn. Thật vậy, mọi công thức của sự phát xạ sóng hấp dẫn đều có một giới hạn trên là giá trị này. Thêm nữa, các mô phỏng bằng số của Thuyết tương đối không bao giờ vượt qua giá trị đó: thí dụ, công suất phát ra khi mô phỏng việc hợp nhất hai hố đen cho kết quả nhỏ hơn giới hạn này.

Xem 112

* *

Trong thiên nhiên không có sóng phẳng hoàn hảo. Sóng phẳng kéo dài vô tận. Nhưng cả sóng điện từ lẫn sóng hấp dẫn đều hữu hạn, vì những sóng đó sẽ mang nhiều động lượng trong một đơn vị thời gian xuyên qua một mặt phẳng hơn mức cho phép do giới hạn lực. Việc không có sóng hấp dẫn phẳng cũng loại trừ việc phát sinh các kỳ dị khi hai sóng như vậy đụng nhau.

* *

Trong thiên nhiên, không có lực vô hạn. Cũng không có các kỳ dị (trần trụi hay có y

* Giá trị cực đại đối với khối lượng có kích thước giới hạn thì tương đương với độ biến thiên khối lượng cực đại đã cho ở trên.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

phục) trong thiên nhiên. Chân trời ngăn cấm các kỳ dị xuất hiện. Đặc biệt, big bang *không phải là* một kỳ dị. Các định lý toán học của Penrose và Hawking hình như có bao hàm sự hiện hữu của các kỳ dị và ngầm giả sử sự hiện hữu của chất điểm – thường dưới dạng 'bụi' – tương phản với những gì Thuyết tương đối tổng quát đưa ra. Việc tái đánh giá một cách cẩn thận mỗi chứng cứ như vậy là điều cần thiết.

* *

Giới hạn lực đồng nghĩa với việc không-thời gian có một độ ổn định hữu hạn. Giới hạn đó cho thấy rằng không-thời gian có thể bị xé thành nhiều mảnh. Theo một nghĩa nào đó thì đúng là như vậy, mặc dù chân trời ngăn điều đó xảy ra. Tuy vậy, Thuyết tương đối tổng quát không mô tả cách thức mà điều này xảy ra. Ta sẽ tìm hiểu điều đó trong phần cuối của quyển sách này.

* *

Lực cực đại là chuẩn của lực. Điều này bao hàm việc hằng số hấp dẫn G không đổi trong không gian và thời gian – hay ít nhất, người ta không thể dò ra sự thay đổi của nó trong không-thời gian. Dữ liệu mà ta đang có, ủng hộ cho điều này với một độ chính xác cao.

Xem 125

* *

Nguyên lý lực cực đại cũng dẫn tới việc năng lượng hấp dẫn – miễn là người ta xác định được nó – *suy giảm đi* khi ở trong trường hấp dẫn giống như các dạng năng lượng khác. Kết quả, nguyên lý lực cực đại tiên đoán rằng hiệu ứng Nordtvedt sẽ biến mất. Hiệu ứng Nordtvedt là sự thay đổi tuần hoàn theo giả định của quỹ đạo Mặt trăng, xuất hiện khi năng lượng hấp dẫn của hệ Trái đất–Mặt trăng không suy giảm, giống như hệ khối lượng–năng lượng khác trong trường hấp dẫn của Mặt trời. Việc đo khoảng cách mặt trăng đã khẳng định sự vắng mặt của hiệu ứng này.

Xem 112

* *

Nếu chân trời là các mặt, ta có thể thắc mắc màu của chúng là gì. Đây là vấn đề mà ta sẽ tìm hiểu sau.

Trang 268

* *

Ta sẽ thấy rằng các hiệu ứng lượng tử không thể dùng để vượt qua giới hạn lực và công suất. (Bạn có thể đoán ra lý do không?) Thuyết lượng tử cũng định ra một giới hạn cho chuyển động, cụ thể là một giới hạn dưới cho tác dụng; tuy vậy, giới hạn này độc lập với giới hạn lực và công suất. (Việc phân tích thứ nguyên đã chứng tỏ điều này: không có cách xác định một tác dụng bằng cách tổ hợp c và G.) Do đó, ngay cả việc kết hợp Thuyết lượng tử và Thuyết tương đối tổng quát cũng không giúp cho ta vượt qua các giới hạn lực và công suất.

Quyển VI, trang 37

* *

Nếu tốc độ c và giá trị lực $c^4/4G$ là các giá trị giới hạn, ta có thể nói gì về G? Hằng số hấp dẫn G mô tả cường độ của tương tác hấp dẫn. Đúng ra thì G đặc trưng cho cường độ của tương tác *khả hữu yếu nhất*. Nói cách khác, với vật trung tâm có khối lượng M, gia tốc a của vật thử cách vật trung tâm một khoảng r do tương tác giữa hai vật, thì tỷ số ar^2/M *ít nhất là bằng* G. (Bạn có thể chứng minh rằng vệ tinh địa tĩnh hay các nguyên

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 176 e

tử trong tinh thể không phải là phản thí dụ không?) Tóm lại, hằng số hấp dẫn G cũng là giá trị giới hạn trong thiên nhiên.

Một cách hiểu trực giác về vũ trụ học

Trang 245

Công suất cực đại có lẽ là cách giải thích nghịch lý Olbers đơn giản nhất. Công suất và cường độ sáng là hai cái tên chỉ cùng một biến động lực. Tổng giá trị của cường độ sáng trong vũ trụ thì hữu hạn; ánh sáng và các dạng năng lượng khác do mọi ngôi sao phát ra, gom lại thì hữu hạn. Nếu ta giả sử rằng vũ trụ thuần nhất và đẳng hướng, giới hạn công suất $P \leqslant c^5/4G$ phải đúng với mọi mặt phẳng phân đôi vũ trụ. Phần quang năng của vũ trụ đến Trái đất lúc đó nhỏ đến nỗi bầu trời đêm tối đen. Đúng ra thì cường độ sáng thực sự đo được hãy còn nhỏ hơn giá trị tính toán này, vì phần lớn năng lượng thì không thấy được – và phần lớn công suất phát ra là vật chất. Nói cách khác, *đêm tối đen vì giới hạn công suất của thiên nhiên*. Cách giải thích này *không* mâu thuẫn với cách giải thích thông thường, đã dùng thời gian sống, mật độ, kích thước hữu hạn của sao, sự hữu hạn của tuổi vũ trụ cùng với sự giãn nở của vũ trụ. Thật vậy, tất cả các luận chứng thông thường này đơn giản chỉ là sự diễn dịch và lặp lại, bằng những lời lẽ phức tạp hơn, ý tưởng 'giới hạn công suất không thể bị vượt qua'. Tuy vậy, sự giải thích rất đơn giản bằng giới hạn công suất hình như không thấy trong sách giáo khoa vật lý.

Sự hiện hữu của lực cực đại trong thiên nhiên, cùng với tính thuần nhất và đẳng hướng, đã bao hàm ý vũ trụ khả kiến có *kích thước hữu hạn*. Trường hợp đối nghịch sẽ là một vũ trụ thuần nhất, đẳng hướng, lớn vô hạn, có mật độ ρ_0. Nhưng trong trường hợp này, hai nửa vũ trụ bất kỳ sẽ hút nhau bằng một lực lớn hơn giới hạn (miễn là vũ trụ đủ già). Để định lượng kết quả này ta hãy tưởng tượng một hình cầu bán kính R_0 có tâm ở Trái đất, bao gồm cả vũ trụ, và bán kính này thay đổi theo thời gian nhanh (gần bằng) tốc độ ánh sáng. Người ta tiên đoán là dòng khối lượng $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t = \rho_0 A_0 c$ xuyên qua hình cầu đó sẽ đạt tới giới hạn $c^3/4G$; như vậy ta sẽ có

$$\rho_0 4\pi R_0^2 c \leqslant \frac{c^3}{4G} \,. \tag{128}$$

Ta có thể so sánh hệ thức này với mô hình Friedmann, người đã tiên đoán, trong một giới hạn thích hợp, rằng *1/3* của vế trái đã đạt tới giới hạn dòng khối lượng. Việc đo chính xác bức xạ nền của vũ trụ bởi vệ tinh WMAP khẳng định rằng mật độ năng lượng toàn phần ngày nay ρ_0 – bao gồm vật chất tối và năng lượng tối – và bán kính chân trời R_0 chỉ đạt tới giá trị Friedmann. Các bàn luận trên tuy dùng lực cực đại hay dòng khối lượng cực đại nhưng vẫn cần một hiệu chỉnh nhỏ.

Xem 126

Tóm lại, giới hạn lực cực đại tiên đoán rằng, trong phạm vi một hệ số bằng 6, sẽ có một mối quan hệ thấy được, giữa kích thước và mật độ của vũ trụ. Đặc biệt, nguyên lý lực cực đại tiên đoán rằng vũ trụ có kích thước hữu hạn. Nhân tiện, từ giới hạn hữu hạn của công suất có thể suy ra tuổi của vũ trụ có giới hạn. Bạn có thể tìm cho tôi một luận chứng không?

Câu đố 177 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Những thách thức thực nghiệm trong thiên niên kỷ thứ ba

Việc thiếu các kiểm nghiệm trực tiếp các giới hạn lực, công suất và dòng khối lượng rõ ràng là do trong vùng lân cận của các nhà nghiên cứu không gặp các chân trời. Tuy vậy, các giá trị giới hạn này vẫn có thể quan sát và xác minh được.

Ta có thể kiểm chứng giới hạn lực, bằng các phép đo có độ chính xác cao, các pulsar đôi hay hố đen đôi. Các hệ như vậy cho phép ta xác định một cách chính xác vị trí của hai ngôi sao. Nguyên lý lực cực đại cho ta mối liên hệ giữa sai số vị trí Δx và sai số năng lượng ΔE. Đối với mọi hệ thống ta có

Xem 108, Xem 110

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} \leqslant \frac{c^4}{4G} \,. \tag{129}$$

Thí dụ, một sai số vị trí cỡ 1 mm sẽ cho một sai số khối lượng nhỏ hơn $3 \cdot 10^{23}$ kg. Trong đời sống hằng ngày, mọi phép đo đều theo đúng hệ thức trên. Thật vậy, vế trái nhỏ hơn vế phải quá nhiều nên ta ít để cập đến hệ thức này. Để kiểm tra trực tiếp, chỉ có những hệ có khả năng đạt tới đẳng thức mới đáng quan tâm: hố đen đôi hay pulsar đôi là những hệ như vậy. Do đó những thí nghiệm về Pulsar và các máy phát hiện sóng hấp dẫn có thể kiểm chứng giới hạn công suất trong những năm tới.

Giới hạn công suất dẫn tới việc cường độ sáng sẽ mạnh nhất chỉ khi hệ phát ra năng lượng với tốc độ ánh sáng. Thật vậy, công suất phát ra chỉ cực đại khi vật chất được phát xạ cực nhanh: công suất phát ra $P = c^2 M/(R/v)$ không thể cực đại nếu bán kính của vật R lớn hơn bán kính hố đen (vật có mật độ lớn nhất với khối lượng đã cho) hay tốc độ phát xạ v nhỏ hơn tốc độ ánh sáng. Do đó nguồn có cường độ sáng mạnh nhất phải có mật độ lớn nhất và phát ra các thực thể không có khối lượng, như sóng hấp dẫn, sóng điện từ hay (có lẽ) các gluon. Các ứng viên mà ta có thể dùng để dò ra giới hạn này là các hố đen khi hình thành, khi bay hơi hay khi đang hợp nhất. Do đó các máy phát hiện sóng hấp dẫn có thể kiểm chứng giới hạn công suất trong các năm tới.

Mặt có thể đạt tới giới hạn công suất là bầu trời đêm. Bầu trời đêm là một chân trời. Nếu các dòng ánh sáng, neutrino, hạt và sóng hấp dẫn hợp lại, ta có thể đạt tới giới hạn $c^5/4G$. Nếu công suất đo được nhỏ hơn giới hạn (như thời điểm hiện tại), có thể là do một số hạt mới chưa được khám phá. Nếu ta có thể vượt qua hay không đạt tới giới hạn, Thuyết tương đối tổng quát xem như không đúng. Điều này có thể là một kiểm chứng thực nghiệm đầy thú vị trong tương lai.

Giới hạn công suất cũng bao hàm việc một sóng có cường độ tích hợp tiếp cận giới hạn lực thì không thể là sóng phẳng. Như vậy giới hạn công suất sẽ dẫn tới một chặn trên của tích cường độ I (năng lượng tính trên một đơn vị thời gian và diện tích) và kích thước (bán kính cong) R của mặt đầu sóng chuyển động với tốc độ ánh sáng c tức là:

$$4\pi R^2 I \leqslant \frac{c^5}{4G} \,. \tag{130}$$

Hiển nhiên là ta khó kiểm chứng điều này bằng thực nghiệm, bất kể tần số sóng và loại sóng, vì giá trị bên vế phải cực kỳ lớn. Có lẽ các thí nghiệm trong tương lai, với các máy phát hiện sóng hấp dẫn, tia X, tia gamma, máy thu sóng vô tuyến hay máy phát hiện hạt mới có thể cho ta kiểm chứng hệ thức (130) một cách chính xác.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Một ngày nào đó có lẽ ta sẽ đo được lượng vật chất rơi vào hố đen, chẳng hạn như hố đen ở tâm Ngân hà. Lúc đó ta có thể kiểm chứng trực tiếp giới hạn $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t \leqslant c^3/4G$.

Tóm lại, việc kiểm chứng trực tiếp các giới hạn là điều khả thi nhưng không phải là việc dễ dàng. Thật ra thì chắc bạn cũng muốn tiên đoán thí nghiệm đầu tiên khẳng định các giới hạn sẽ là thí nghiệm nào trong số các thí nghiệm đã đề cập. Việc khan hiếm các thí nghiệm kiểm chứng trực tiếp các giới hạn lực, công suất và dòng khối lượng cho ta thấy rằng *các thí nghiệm kiểm chứng gián tiếp* trở nên quan trọng một cách đặc biệt. Mọi thí nghiệm như vậy sẽ nghiên cứu chuyển động của vật chất hay năng lượng và so sánh nó với các hệ quả nổi tiếng của giới hạn là các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát. Đây sẽ là chủ đề kế tiếp của chúng ta.

Câu đố 178 e

Tóm tắt về Thuyết tương đối tổng quát – và lực cực tiểu

> “Non statim pusillum est si quid maximo minus est.*”
>
> Seneca

Thuyết tương đối tổng quát có một tiên đề đơn giản: lực chân trời $c^4/4G$ và công suất chân trời $c^5/4G$ là những giá trị khả hữu lớn nhất của lực và công suất. Ta chưa thấy một quan sát nào mâu thuẫn với điều đó. Ta cũng chưa tưởng tượng ra được một phản thí dụ nào. Thuyết tương đối tổng quát dẫn xuất từ những giới hạn này. Ngoài ra, các giới hạn đó phù hợp với sự tối đen của màn đêm và sự hữu hạn của vũ trụ.

Nguyên lý lực cực đại phải có mặt trong phần giảng dạy về Thuyết tương đối tổng quát. Có thể dạy nguyên lý này cho sinh viên đại học năm thứ nhất hay học sinh giỏi của bậc trung học phổ thông: chỉ có các khái niệm về lực cực đại và chân trời là cần thiết. Độ cong của không-thời gian là một hệ quả của độ cong chân trời.

Khái niệm lực cực đại xem như phần bổ sung của lực hấp dẫn. Nguyên lý lực cực đại không chỉnh sửa Hằng số vũ trụ Λ (nhưng có chỉnh dấu của hằng số thành dấu dương). Các phép đo hiện tại cho kết quả $\Lambda \approx 10^{-52}\,/\mathrm{m}^2$. Hằng số vũ trụ dương khiến cho mật độ khối của năng lượng có giá trị âm là $-\Lambda c^4/G$. Giá trị này tương ứng với một áp suất âm, vì áp suất và mật độ năng lượng có cùng thứ nguyên. Nhân với diện tích Planck (đã hiệu chính) $4G\hbar/c^3$, là diện tích nhỏ nhất trong thiên nhiên, ta được giá trị của lực là

Trang 249

Quyển VI, trang 37

$$F = 4\Lambda\hbar c = 1.20 \cdot 10^{-77}\,\mathrm{N}\,. \tag{131}$$

Đây cũng là lực hấp dẫn giữa hai khối lượng Planck (đã hiệu chính) $\sqrt{\hbar c/4G}$ cách nhau một khoảng cách vũ trụ $1/4\sqrt{\Lambda}$.

Ta đã giả định rằng biểu thức (131) là *lực cực tiểu* trong thiên nhiên. Chứng minh giả định này thì rắc rối hơn trường hợp lực cực đại. Cho đến nay, người ta chỉ có một số gợi ý. Giống như lực cực đại, lực cực tiểu cũng phải tương thích với lực hấp dẫn, không mâu thuẫn với các thí nghiệm và phải đứng vững trước các thí nghiệm tưởng tượng bất kỳ. Một phép kiểm tra nhanh chứng tỏ rằng lực cực tiểu cho phép chúng ta suy ra được hằng số hấp dẫn. Lực cực tiểu là một bất biến và không mâu thuẫn với một thí nghiệm nào cả. Cũng có những gợi ý cho rằng có lẽ sẽ không có cách tạo ra hay đo được giá trị

* ‘Không có gì có thể bỏ qua chỉ vì nó nhỏ hơn cái lớn nhất.’ Lucius Annaeus Seneca (*c.* 4 BCE–65), *Epistolae* 16, 100.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

nào nhỏ hơn. Thí dụ như lực hấp dẫn giữa hai hạt trung hoà bất kỳ ở khoảng cách vũ trụ, giữa hai nguyên tử hay hai neutrino, nhỏ hơn lực cực tiểu rất nhiều; tuy vậy, hình như không thể nào dò ra bằng thực nghiệm xem hai hạt như vậy có tương tác với nhau hay không: gia tốc quá nhỏ nên không thể đo được. Một thí dụ khác, lực cực tiểu tương ứng với năng lượng trên một đơn vị chiều dài chứa trong một photon có kích thước bước sóng bằng kích thước vũ trụ. Khó – nhưng có lẽ là có thể – tưởng tượng ra phép đo của một lực nhỏ hơn thế. (Bạn có làm được không?)

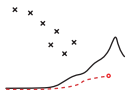
Câu đố 179 e

Câu đố 180 d

Nếu ta nhảy đến kết luận – chưa được chứng minh hoàn toàn – rằng biểu thức (131) là lực khả hữu *nhỏ nhất* trong thiên nhiên (các hệ số cũng chưa được xác minh), ta sẽ kiếm được một giả định hấp dẫn là toàn bộ lý thuyết của Thuyết tương đối tổng quát, bao gồm hằng số vũ trụ, có thể được xác định bằng cách kết hợp lực *cực đại* với lực *cực tiểu* trong thiên nhiên.

Ta đã thấy rằng cả nguyên lý lực cực đại và Thuyết tương đối tổng quát đều chưa hiệu chỉnh được giá trị của hằng số vũ trụ. Chỉ có một lý thuyết thống nhất mới có thể làm được điều đó. Như vậy ta có hai yêu cầu cho một lý thuyết như thế. Đầu tiên, bất kỳ một thuyết thống nhất nào cũng đều phải tiên đoán được một giới hạn trên của lực giống như Thuyết tương đối tổng quát. Thứ hai, thuyết thống nhất phải hiệu chỉnh được hằng số vũ trụ. Sự xuất hiện của $\hbar$ trong biểu thức giả định của lực cực tiểu cho ta thấy rằng có thể xác định được lực cực tiểu bằng cách kết hợp Thuyết tương đối tổng quát và Thuyết lượng tử. Chứng minh điều này và khẳng định lực cực tiểu là hai thách thức quan trọng của chúng ta để có thể vươn lên trên tầm của Thuyết tương đối tổng quát. Ta sẽ trở lại để tài này trong phần cuối của cuộc phiêu lưu.

Bây giờ ta đã sẵn sàng để tìm hiểu các hệ quả của Thuyết tương đối tổng quát và các phương trình trường của nó một cách chi tiết hơn. Ta sẽ bắt đầu bằng cách tập trung vào khái niệm độ cong của không-thời gian trong đời sống hằng ngày, và đặc biệt, vào các hệ quả của nó đối với việc quan sát chuyển động.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 5

Cách thức mà tốc độ cực đại đã làm thay đổi không gian, thời gian và lực hấp dẫn

"Sapere aude."**

Horace *Epistulae*, 1, 2, 40.

Qua quan sát người ta thấy rằng các tác động hấp dẫn đều chuyển tải năng lượng.*** Do đó sự mô tả của chúng ta về lực hấp dẫn phải bao gồm tốc độ ánh sáng. Chỉ có sự mô tả có tính đến tốc độ giới hạn của sự chuyển tải năng lượng mới có thể là sự mô tả chính xác lực hấp dẫn. Henri Poincaré đã đề cập rất sớm đến yêu cầu này vào năm 1905. Nhưng lực hấp dẫn vạn vật, cùng với mối quan hệ $a = GM/r^2$, cho phép tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng. Thí dụ, tốc độ của một vật trên quỹ đạo không bị giới hạn. Đối với lực hấp dẫn vạn vật, người ta vẫn chưa rõ giá trị của a và r phụ thuộc vào quan sát viên như thế nào. Tóm lại, Thuyết hấp dẫn vạn vật *không thể* đúng. Để đạt được sự mô tả chính xác, đó là *Thuyết tương đối tổng quát* của Albert Einstein, ta phải ném đi một số thành kiến.

Xem 127, Xem 128

Kết quả của việc kết hợp tốc độ cực đại với lực hấp dẫn thật là quyến rũ: ta sẽ thấy rằng không gian rỗng cũng có thể uốn cong và chuyển động, vũ trụ có tuổi hữu hạn và các vật thể có thể thường xuyên rơi tự do. Ta sẽ khám phá ra rằng mặc dù không gian rỗng có thể bị uốn cong nhưng nó vẫn cứng hơn thép rất nhiều. Mặc dù điều này và các hệ quả khác có vẻ kỳ dị, tất cả chúng đều đã được khẳng định bởi nhiều thí nghiệm đã được thực hiện từ trước đến nay.

Đứng yên và rơi tự do

Đối lập với chuyển động thông thường là một vật đứng yên, như một em bé đang ngủ hay một tảng đá đang thách thức các đợt sóng. Một vật đứng yên khi nó không bị vật khác tác động. Trong các mô tả về thế giới thường ngày, đứng yên là *không có vận tốc*. Đối với Galilei và Thuyết tương đối đặc biệt, đứng yên trở thành *chuyển động theo quán tính*, vì không có một quan sát viên quán tính nào có thể phân biệt chuyển động riêng của họ với sự đứng yên: không có gì tác động lên họ. Cả tảng đá trong các làn sóng và các proton xẹt ngang qua thiên hà trong các tia vũ trụ đều đứng yên. Nếu gộp luôn lực hấp dẫn, ta sẽ đi tới định nghĩa về sự đứng yên một cách tổng quát hơn.

▷ Mọi quan sát viên và mọi vật đang rơi tự do được xem là đứng yên.

** 'Mạo hiểm là thông minh.' Horace là Quintus Horatius Flaccus, (65–8 BCE), Nhà thơ La Mã nổi tiếng.

*** Chi tiết của mệnh đề này không đơn giản. Chúng sẽ được bàn đến trong Trang 178 và Trang 209.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 181 e

Nếu một vật bất kỳ đang chuyển động theo quán tính được xem như đứng yên, thì một vật bất kỳ đang rơi tự do cũng phải được xem là đứng yên. Không ai hiểu rõ điều này hơn Joseph Kittinger, người mà vào tháng 8 năm 1960 bước ra khỏi khinh khí cầu ở độ cao 31.3 km. Ở độ cao đó, không khí loãng đến nỗi trong phút rơi tự do đầu tiên, anh ta cảm thấy hoàn toàn giống như đứng yên, hay đang trôi nổi trong không khí. Mặc dù là một người nhảy dù có kinh nghiệm, anh ta vẫn ngạc nhiên đến nỗi phải nhìn lên để chắc là mình đang rời khỏi khinh khí cầu! Mặc dù thiếu cảm giác về chuyển động, anh ta vẫn đang rơi với tốc độ lên tới 274 m/s hay 988 km/h đối với mặt đất. Anh ta chỉ bắt đầu có cảm giác khi gặp lớp không khí đặc hơn. Đó là lúc sự rơi tự do của anh ta bắt đầu bị tác động. Sau khi rơi được 4.5 phút, chiếc dù đặc biệt của anh mở ra và 9 phút sau anh đáp xuống New Mexico.

Xem 129

Kittinger và tất cả các quan sát viên rơi tự do khác, như các phi hành gia bay quanh Trái đất hay các hành khách trong các phi cơ bay theo đường parabol,* đều có cùng cảm giác: không thể nhận ra sự khác nhau giữa rơi tự do và đứng yên. Điều này được gọi là *nguyên lý tương đương*; nó là một trong những điểm khởi đầu của Thuyết tương đối tổng quát. Nó dẫn đến định nghĩa chính xác nhất – và sau cùng – của sự đứng yên mà ta sẽ gặp trong cuộc phiêu lưu của mình:

▷ *Đứng yên* là rơi tự do.

Đứng yên, giống như rơi tự do, đều không có sự tác động từ bên ngoài.

Tập hợp mọi quan sát viên rơi tự do khả hữu tại một điểm trong không-thời gian là sự tổng quát hoá khái niệm tương đối tính-đặc biệt của tập hợp các quan sát viên quán tính tại một điểm. Điều này có nghĩa là ta phải mô tả chuyển động sao cho các quan sát viên quán tính lẫn các quan sát viên rơi tự do đều có thể nói chuyện với nhau. Thêm nữa, một mô tả chuyển động đầy đủ phải có thể mô tả lực hấp dẫn và chuyển động do nó gây ra đồng thời cũng phải mô tả được chuyển động của một quan sát viên tưởng tượng bất kỳ. Thuyết tương đối tổng quát nhắm đến mục đích này.

Đầu tiên, ta mô tả sự đứng yên theo cách khác:

▷ *Chuyển động* thật sự thì đối nghịch với sự rơi tự do.

Câu đố 182 s

Phát biểu này lập tức gây ra nhiều thắc mắc: Phần lớn cây cối và núi non không rơi tự do, như vậy chúng không đứng yên. Chúng đang chuyển động ra sao? Và nếu rơi tự do là đứng yên, thì trọng lượng là gì? Và như vậy trọng lực là gì? Chúng ta hãy bắt đầu với câu hỏi sau cùng.

ĐỒNG HỒ VÀ LỰC HẤP DẪN

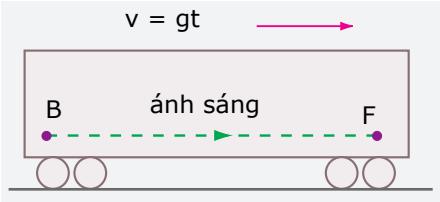
Trang 132

Ở phần trên, ta đã mô tả lực hấp dẫn là cái bóng của lực cực đại. Nhưng còn một cách mô tả thứ hai, liên hệ mật thiết với đời sống hằng ngày. Như William Unruh thích dài dòng, sự bất biến của tốc độ ánh sáng đối với mọi quan sát viên bao hàm một kết luận đơn giản:

Xem 130

* Ngày nay ta có thể mua vé trên các chuyến bay như vậy tại các đại lý du lịch đặc biệt.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 62 Bên trong một xe lửa hay xe bus đang gia tốc .

▷ Lực hấp dẫn là sự vận hành khác thường của các đồng hồ tại các địa điểm khác nhau.*

Câu đố 184 e Dĩ nhiên, định nghĩa hình như ngớ ngẩn này cần được kiểm tra. Định nghĩa không nói về một tình trạng đơn lẻ mà các quan sát viên khác nhau nhìn thấy, như ta thường gặp trong Thuyết tương đối đặc biệt. Định nghĩa này phụ thuộc vào sự kiện là các đồng hồ giống nhau, đặt cố định gần nhau, chạy khác nhau khi có mặt trường hấp dẫn, được *cùng* một quan sát viên quan sát; hơn nữa, sự khác biệt này có liên hệ trực tiếp tới cái mà ta thường gọi là lực hấp dẫn. Có hai cách kiểm tra mối liên hệ này: bằng thí nghiệm và bằng lý luận. Chúng ta bắt đầu với phương pháp sau, vì nó ít tốn kém hơn, nhanh hơn và vui hơn.

Một quan sát viên sẽ không cảm thấy sự khác nhau giữa lực hấp dẫn và gia tốc không đổi. Như vậy ta có thể tìm hiểu gia tốc không đổi và sử dụng cách lý luận mà ta đã dùng trong chương Thuyết tương đối đặc biệt. Ta giả sử ánh sáng phát ra từ đầu phía sau của xe lửa hay xe bus có chiều dài Δh đang tăng tốc về phía trước với gia tốc g, như trong Hình 62. Ánh sáng tới đầu phía trước của xe lửa hay xe bus sau thời gian $t = \Delta h/c$. Trong thời gian này vận tốc xe lửa hay xe bus đã tăng thêm, một lượng là $\Delta v = gt = g\Delta h/c$. Kết quả, do hiệu ứng Doppler mà ta đã gặp trong phần bàn luận về Thuyết tương đối
Trang 59 đặc biệt, tần số f của ánh sáng tới đầu phía trước đã thay đổi. Dùng biểu thức của hiệu
Câu đố 185 e ứng Doppler, ta kiếm được**

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{g\Delta h}{c^2} \,. \tag{132}$$

Dấu của độ biến thiên tần số phụ thuộc vào chuyển động của ánh sáng và gia tốc của xe lửa là cùng chiều hay ngược chiều. Đối với xe lửa hay xe bus thật, độ biến thiên tần số
Câu đố 187 s khá nhỏ; tuy vậy, vẫn có thể đo được.

▷ Gia tốc làm tần số của ánh sáng thay đổi.

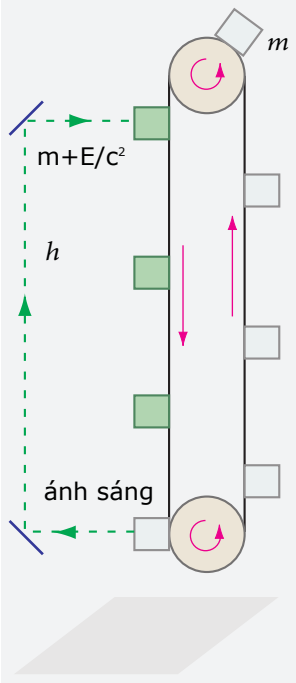
Chúng ta hãy so sánh hiệu ứng của gia tốc với hiệu ứng của lực hấp dẫn.

Để đo thời gian và không gian ta dùng ánh sáng. Điều gì sẽ xảy ra cho ánh sáng khi
Xem 131 có mặt của lực hấp dẫn? Thí nghiệm đơn giản nhất là cho ánh sáng rơi xuống hay chiếu

* Lực hấp dẫn cũng là chiều dài khác thường của thước đo chiều dài tại các địa điểm khác nhau, như ta sẽ thấy dưới đây. Để mô tả đầy đủ ta cần cả hai hiệu ứng; nhưng trong đời sống hằng ngày trên Trái đất, hiệu ứng đồng hồ thì không đủ, vì nó lớn hơn hiệu ứng chiều dài, là hiệu ứng thường bị bỏ qua, khá nhiều. Bạn
Câu đố 183 s có thể hiểu được lý do không?

** Biểu thức $v = gt$ chỉ đúng đối với vận tốc phi tương đối tính; tuy vậy, kết luận của phần này không bị
Câu đố 186 e ảnh hưởng bởi việc tính gần đúng này.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 63 Sự cần thiết của sự dịch chuyển về phía xanh và dịch chuyển về phía đỏ của ánh sáng: lý do gốc cây thường xanh hơn.

lên. Để suy diễn những điều sẽ xảy ra, ta thêm một vài chi tiết. Hãy tưởng tượng một băng chuyền mang các vật nặng chuyển động quanh hai bánh xe, một ở dưới thấp một ở trên cao, như trong Hình 63. Các khối xám đi xuống lớn hơn một chút. Khi các khối xám đi xuống gần đến đáy, một số cơ cấu – không thấy trong hình – biến đổi khối lượng dư thành ánh sáng, theo phương trình $E = c^2 m$, và gởi ánh sáng lên phía trên.* Ở trên đỉnh băng chuyền, một trong những khối trắng nhẹ hơn, đi ngang qua, hấp thu ánh sáng này, và vì trọng lượng của nó tăng thêm, sẽ làm quay băng chuyền cho đến khi khối đi đến cuối băng chuyền. Cứ như thế quá trình được lặp lại.**

Vì các khối xám bên phía đi xuống luôn nặng hơn, băng chuyền sẽ quay mãi và hệ thống này có thể liên tục *tạo ra* năng lượng. Tuy vậy, vì định luật bảo toàn năng lượng là nền tảng cho việc định nghĩa thời gian của chúng ta, như đã thấy lúc bắt đầu cuộc hành trình, nên quá trình này không thể diễn ra. Chúng ta phải kết luận rằng năng lượng của ánh sáng đã thay đổi khi đi lên. Chỉ còn một khả năng là ánh sáng đến đỉnh băng chuyền có tần số *khác* với tần số lúc nó được phát ra ở dưới thấp.***

Quyển I, trang 280

Tóm lại,

▷ Ánh sáng đi lên thì dịch chuyển về phía đỏ do lực hấp dẫn.

* Như trong Thuyết tương đối đặc biệt, ở đây và trong phần còn lại của cuộc phiêu lưu của chúng ta, thuật ngữ 'khối lượng' luôn luôn dùng để chỉ khối lượng nghỉ.

Câu đố 188 s

** Quá trình này có thể được thực hiện với hiệu suất 100 % không?

*** Hệ thức chính xác giữa năng lượng và tần số ánh sáng được mô tả và giải thích trong phần bàn luận về Lý thuyết lượng tử. Nhưng ta đã biết từ Điện động lực học cổ điển là năng lượng của ánh sáng phụ thuộc vào cường độ và tần số của nó.

Quyển IV, trang 45

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tương tự như vậy, ánh sáng đi xuống từ ngọn cây đến quan sát viên thì *dịch chuyển về phía xanh*; điều này khiến cho màu ở ngọn cây tối hơn so với màu ở gốc cây. Kết hợp tính bất biến của tốc độ ánh sáng và lực hấp dẫn sẽ dẫn đến việc màu xanh của cây sẽ có sắc thái thay đổi dọc theo chiều cao của cây.* Hiệu ứng này mạnh cỡ nào? Kết quả suy ra từ hình vẽ lại là một trong những công thức (132). Đó là điều ta mong đợi, vì ánh sáng chuyển động trong một toa tàu có gia tốc và ánh sáng chuyển động trong trọng trường là hai trường hợp tương đương và bạn có thể tự kiểm chứng điều này. Sử dụng công thức đó ta sẽ được độ biến thiên tương đối của tần số chỉ có $1.1 \cdot 10^{-16}$ /m ở vị trí gần mặt đất. Đối với cây cối, độ biến thiên này, thường được gọi là *dịch chuyển đỏ do lực hấp dẫn* hay *hiệu ứng Doppler do lực hấp dẫn*, rất nhỏ nên rất khó quan sát, nhất là khi ta dùng ánh sáng thông thường.

Câu đố 190 e

Câu đố 191 s

Xem 132

Vào năm 1911, Einstein đã đề nghị một thí nghiệm để kiểm tra sự biến đổi tần số theo độ cao bằng cách đo độ dịch chuyển đỏ của ánh sáng do Mặt trời phát ra và dùng các vạch Fraunhofer nổi tiếng để làm các vạch đánh dấu màu sắc. Kết quả những thí nghiệm đầu tiên của Schwarzschild và cộng sự, thì không rõ ràng, thậm chí cho kết quả âm do nhiều hiệu ứng khác làm cho màu sắc thay đổi ở nhiệt độ cao. Nhưng vào năm 1920 và 1921, Leonhard Grebe và Albert Bachem, và một cách độc lập là Alfred Perot, khẳng định sự dịch chuyển đỏ do lực hấp dẫn nhờ các thí nghiệm được đo đạc cẩn thận. Trong những năm kế tiếp, sự tiến bộ về mặt kỹ thuật khiến cho việc đo đạc dễ dàng hơn rất nhiều, cho đến khi người ta có thể đo được hiệu ứng này ngay trên Trái đất. Vào năm 1960, trong một thí nghiệm cổ điển dùng hiệu ứng Mössbauer, Pound và Rebka khẳng định dịch chuyển đỏ do lực hấp dẫn trong toà tháp của đại học bằng cách dùng tia γ.

Quyển IV, trang 182

Trang 320

Xem 133

Xem 134

Nhưng hai thí nghiệm tưởng tượng cho ta biết nhiều điều hơn. Ta hãy dùng cùng một lý luận như trong Thuyết tương đối đặc biệt: một sự thay đổi về màu sắc sẽ dẫn tới việc đồng hồ ở các độ cao khác nhau chạy khác nhau, giống như chúng sẽ chạy khác nhau khi chúng ở đầu và cuối một con tàu. Người ta tiên đoán là độ biến thiên thời gian $\Delta\tau$ phụ thuộc vào hiệu hai độ cao Δh và gia tốc trọng trường g theo công thức

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{g\Delta h}{c^2} \,. \tag{133}$$

Nói một cách đơn giản,

▷ Trong trọng trường, thời gian phụ thuộc vào độ cao.

Câu đố 192 e

Nói cách khác, *độ cao làm cho ta già đi.* Bạn có thể khẳng định kết luận này không?

Năm 1972, với 4 đồng hồ chính xác đặt trên phi cơ và một đồng hồ giống hệt đặt trên mặt đất, Hafele và Keating nhận thấy rằng các đồng hồ ở các độ cao khác nhau chạy khác nhau phù hợp với biểu thức (133). Sau đó, vào năm 1976, nhóm Vessot đặt một đồng hồ nguyên tử maser – máy phát vi ba chính xác – trên một hoả tiễn rồi phóng lên cao. Nhóm so maser trong hoả tiễn với maser giống hệt đặt trên mặt đất và tái khẳng định biểu thức trên. Năm 1977, Briatore và Leschiutta chứng tỏ rằng đồng hồ ở Torino thực sự chạy chậm hơn đồng hồ đặt trên đỉnh Monte Rosa. Nhóm cũng khẳng định điều tiên đoán là trên Trái đất, cứ mỗi khi lên cao thêm 100 m, thì người ta già nhanh hơn

Xem 55

Xem 135

Xem 136

Câu đố 189 ny

* Luận điểm này sẽ thay đổi ra sao nếu ta tính luôn độ rọi của Mặt trời?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 193 e khoảng 1 ns mỗi ngày. Hiệu ứng này đã được khẳng định trên mọi hệ thống mà các thí nghiệm đã được thực hiện, như hành tinh, Mặt trời và nhiều ngôi sao khác.

Các thí nghiệm này chứng tỏ rằng thời gian thay đổi hay đơn giản là do các đồng hồ
Câu đố 194 e chạy sai? Hãy bỏ chút thời giờ giải quyết câu hỏi này. Ta chỉ đưa ra một luận điểm: lực hấp dẫn làm màu sắc của ánh sáng thay đổi, vậy nó đã thực sự làm thời gian thay đổi. Độ chính xác của đồng hồ không phải là vấn đề ở đây.

Tóm lại, lực hấp dẫn đúng là sự vận hành khác thường của các đồng hồ ở độ cao khác nhau. Cũng cần nhớ rằng một quan sát viên ở vị trí thấp và một quan sát viên ở vị trí cao hơn đều *đồng ý* một điều: cả hai cùng nhận thấy rằng đồng hồ ở cao hơn thì chạy nhanh hơn. Nói cách khác, khi lực hấp dẫn hiện diện, không-thời gian *không được* mô tả bằng hình học Minkowski của Thuyết tương đối đặc biệt, mà bằng một loại hình học tổng quát hơn. Khi diễn tả điều này bằng toán học, lúc có lực hấp dẫn, khoảng cách 4 chiều ds^2 giữa hai biến cố sẽ khác với biểu thức khi không có lực hấp dẫn:

$$ds^2 \neq c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \,. \tag{134}$$

Ta sẽ cho biểu thức đúng ngay sau đây.

Quan niệm xem lực hấp dẫn là thời gian phụ thuộc vào độ cao có thực sự là hợp lý không? Không. Hoá ra là điều đó chưa đủ kỳ dị! Vì tốc độ ánh sáng giống nhau đối với mọi quan sát viên nên ta có thể nói nhiều điều hơn. Nếu thời gian thay đổi theo độ cao thì chiều dài cũng phải thay đổi như vậy! Chính xác hơn, nếu các đồng hồ ở các độ cao khác nhau chạy khác nhau, chiều dài của cây thước cũng phải thay đổi theo độ cao. Bạn có thể khẳng định điều này cho trường hợp cây thước nằm ngang ở những độ cao khác
Câu đố 195 s nhau không?

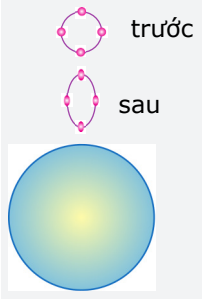
Nếu chiều dài thay đổi theo độ cao, chu vi của một vòng tròn bao quanh Trái đất *không thể* tính theo công thức $2\pi r$. Một sự không nhất quán tương tự cũng được một con kiến nhận thấy khi đo bán kính và chu vi của một vòng tròn vẽ trên mặt một quả bóng rổ. Thật vậy, lực hấp dẫn gây ra cho người một tình trạng tương tự tình trạng của các con kiến trên một quả bóng rổ, chỉ có một điều khác biệt là hoàn cảnh được chuyển từ hai chiều sang ba chiều. Ta có thể kết luận là bất cứ khi nào có lực hấp dẫn xuất hiện thì *không gian sẽ cong đi*.

Thuỷ triều và lực hấp dẫn

Trong khi rơi tự do, Kittinger đã có thể xem mình như một hệ quy chiếu quán tính. Thật vậy, anh ta hoàn toàn cảm thấy mình đứng yên. Như vậy điều này có đồng nghĩa với việc ta không thể phân biệt được gia tốc và lực hấp dẫn không? Không: *có thể* phân biệt được. Ta chỉ cần so sánh *hai* (hay nhiều) quan sát viên đang rơi, hoặc hai phần của một quan sát viên.

Kittinger không thể tìm thấy một hệ quy chiếu quán tính cho một đồng nghiệp đang
Câu đố 196 e rơi ở phía bên kia của Trái đất. Không có một hệ quy chiếu chung như vậy. Nói một cách tổng quát, ta không thể tìm thấy một hệ quy chiếu quán tính *đơn lẻ* để mô tả những quan sát viên khác nhau đang rơi tự do gần một vật có khối lượng. Thật ra thì ta không thể tìm được một hệ quy chiếu quán tính chung, cho dù các quan sát viên ở *gần nhau* trong trường hấp dẫn. Hai quan sát viên ở gần nhau đều thấy rằng trong khi rơi, khoảng cách
Câu đố 197 s tương đối giữa hai người thay đổi. (Tại sao?) Tình trạng tương tự cũng xảy ra cho các

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 64 Hiệu ứng thuỷ triều: hiệu ứng duy nhất mà vật thể chịu ảnh hưởng khi đang rơi.

quan sát viên đang bay trên quỹ đạo.

Trong một căn phòng kín bay quanh Trái đất, một người hay một vật ở giữa phòng sẽ không cảm thấy một lực nào và đặc biệt là không có trọng lực. Nhưng nếu trong phòng có nhiều hạt, chúng sẽ hành xử khác nhau tuỳ theo vị trí chính xác của chúng ở trong phòng. Nếu chỉ có hai hạt ở trên cùng một quỹ đạo thì chúng sẽ giữ nguyên vị trí tương đối đó. Nếu một trong hai hạt ở trên một quỹ đạo thấp hơn hay cao hơn hạt kia, chúng sẽ rời xa nhau theo thời gian. Thú vị hơn, nếu một hạt trên quỹ đạo lệch qua một bên, nó sẽ dao động quanh vị trí trung tâm. (Bạn có thể khẳng định điều này không?)

Câu đố 198 e

Lực hấp dẫn làm thay đổi khoảng cách tương đối. Những thay đổi này làm lộ ra hiệu ứng khác, như trong Hình 64: trong khi rơi tự do vật bị kéo dài giống như bị *ép* nhẹ. Hiệu ứng này cũng cho ta biết rằng đó là một tính chất chủ yếu của lực hấp dẫn làm cho sự rơi tự do *khác nhau* từ điểm này sang điểm kia. Điều này nghe cũng khá quen thuộc. Việc ép một vật cũng giống như tác dụng đã gây ra thuỷ triều. Thật vậy, đại dương phồng lên có thể xem như Trái đất bị ép lại trong khi đang rơi về phía Mặt trăng. Sử dụng kết quả của lực hấp dẫn vạn vật, bây giờ ta có thể khẳng định: điều cốt yếu của lực hấp dẫn là việc quan sát hiệu ứng thuỷ triều.

Quyển I, trang 197
Xem 137

Nói cách khác, lực hấp dẫn chỉ có tính *địa phương*. Tính địa phương làm cho lực hấp dẫn trông giống gia tốc. Tính địa phương cũng khiến cho các quan sát viên đang rơi như Kittinger cảm thấy như đứng yên. Thật ra thì chỉ có quan sát viên giống như chất điểm mới cảm thấy như vậy! Ngay khi ta tính đến sự giãn dài không gian, ta tìm thấy hiệu ứng thuỷ triều.

▷ Lực hấp dẫn là sự hiện diện của hiệu ứng thuỷ triều.

Sự vắng mặt của hiệu ứng thuỷ triều bao hàm việc vắng mặt của lực hấp dẫn. Hiệu ứng thuỷ triều là hệ quả quen thuộc của việc thời gian phụ thuộc vào độ cao. Điều này không phải là một kết luận đẹp đẽ suy ra từ tính bất biến của tốc độ ánh sáng hay sao?

Về nguyên tắc, Kittinger có thể đã *cảm thấy* lực hấp dẫn trong khi rơi tự do, cho dù anh ta có nhắm mắt lại, anh ta vẫn tập trung chú ý đến chính mình. Nếu anh ta đã đo độ biến thiên khoảng cách giữa hai bàn tay, anh ta có thể đã nhận thấy một độ giảm rất nhỏ và có thể cho anh ta biết là mình đang rơi. Độ giảm bé tí này có thể đã buộc Kittinger có một kết luận kỳ lạ. Hai bàn tay chuyển động theo quán tính sẽ di chuyển dọc theo hai đường thẳng song song, luôn cách nhau một khoảng không đổi. Vì khoảng cách thay đổi, anh ta phải kết luận rằng trong không gian quanh anh ta các đường thẳng lúc đầu

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

song song thì sau đó không còn song song. Kittinger đã kết luận rằng không gian quanh anh ta tương tự với bề mặt Trái đất, nơi hai đường thẳng ban đầu song song với nhau đi về phía bắc cũng thay đổi khoảng cách cho đến khi chúng gặp nhau ở Bắc cực. Nói cách khác, Kittinger phải kết luận rằng anh ta đã ở trong một không gian *cong*.

Bằng cách nghiên cứu sự thay đổi khoảng cách giữa hai bàn tay, Kittinger đã có thể kết luận rằng độ cong không gian thay đổi theo độ cao. Không gian vật lý khác với một hình cầu, có độ cong không đổi. Không gian vật lý phức tạp hơn. Hiệu ứng cực kỳ nhỏ và các giác quan của con người không thể nào cảm nhận được. Kittinger không có cơ hội để dò ra bất cứ điều gì. Tuy vậy, kết luận này vẫn còn giá trị. Không-thời gian *không thể* được diễn tả bằng hình học Minkowski khi lực hấp dẫn có mặt. Hiệu ứng thuỷ triều bao hàm cả độ cong không-thời gian.

▷ Lực hấp dẫn là độ cong của không-thời gian.

Đây là bài học chính và sau cùng rút ra từ tính bất biến của tốc độ ánh sáng.

Không gian cong và các tấm nệm

> “Wenn ein Käfer über die Oberfläche einer Kugel krabbelt, merkt er wahrscheinlich nicht, dass der Weg, den er zurücklegt, gekrümmt ist. Ich dagegen hatte das Glück, es zu merken.*”
>
> Câu mà Albert Einstein trả lời con trai Eduard về lý do nổi tiếng của mình

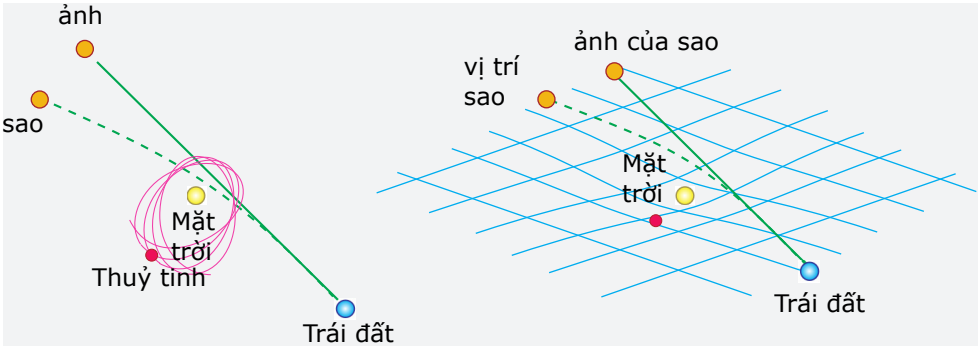
Vào ngày 7/11/1919, Albert Einstein trở nên nổi tiếng khắp thế giới. Vào ngày đó, một bài trên báo *Times* ở London đã thông báo kết quả của một cuộc thám hiểm kép đến Nam Mỹ dưới tiêu đề ‘Cuộc cách mạng trong khoa học / lý thuyết mới về vũ trụ / tư tưởng của Newton bị lật đổ’. Cuộc cách mạng đã chứng tỏ một cách rõ ràng – mặc dù không phải là lần đầu tiên – rằng lý thuyết lực hấp dẫn vạn vật, chủ yếu dựa trên công thức $a = GM/r^2$ là sai và thay vào đó không gian bị *uốn cong*. Một luồng hưng cảm lan toả khắp thế giới. Einstein xuất hiện như một nhân vật vĩ đại nhất trong tất cả các thiên tài. ‘Không gian cong’ trở thành tiêu đề phổ biến nhất. Các bài báo của Einstein về Thuyết tương đối tổng quát được in lại toàn bộ trên các tạp chí phổ thông. Người ta có thể đọc về phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát, dưới dạng tensor với các chỉ số Hy Lạp, trong tạp chí *Time*. Điều này chưa từng xảy ra cho các nhà vật lý khác trước đó hay sau này. Lý do của sự kích động này là gì?

Cuộc thám hiểm ở nam bán cầu đã thực hiện một thí nghiệm do chính Einstein đề nghị. Ngoài việc tìm kiếm bằng chứng cho sự thay đổi của thời gian theo độ cao, Einstein cũng đã nghĩ đến nhiều thí nghiệm để dò ra sự cong của không gian. Trong một thí nghiệm thực sự làm ông nổi tiếng, Einstein đã đề nghị chụp hình của ngôi sao gần Mặt trời trong thời gian nhật thực và so sánh hình đó với hình của cùng một ngôi sao vào ban đêm, khi Mặt trời không có ở đó. Từ các phương trình của Thuyết tương đối tổng quát, Einstein tiên đoán vị trí sao sẽ thay đổi một góc $1.75''$ (1.75 giây cung) đối với các sao có ảnh ở biên Mặt trời, giá trị này *gấp đôi* giá trị do thuyết hấp dẫn vạn vật tiên đoán.

Xem 138

* ‘Khi một con côn trùng đi trên một mặt cầu, có lẽ nó không nhận ra là đường mà nó đang đi bị cong. Trái lại, Ba đã có may mắn để nhận ra điều đó.’

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 65 Mô hình tấm nệm của không gian: đường đi của chùm tia sáng và của vệ tinh gần một vật hình cầu.

Quyển I, trang 209

Sự tiên đoán được khẳng định lần đầu tiên vào năm 1919 và như vậy thuyết hấp dẫn vạn vật bị bác bỏ.

Kết quả này có *bao hàm* việc không gian bị uốn cong không? Trực tiếp thì không. Thật vậy, có thể giải thích kết quả của thí nghiệm nhật thực bằng cách khác, thí dụ như hàm thế không có dạng bình phương nghịch đảo. Tuy vậy, kết quả thí nghiệm nhật thực không phải là những dữ liệu duy nhất. Ta đã biết về sự thay đổi của thời gian theo độ cao. Thí nghiệm đã chứng tỏ rằng hai quan sát viên ở các độ cao khác nhau đo được cùng một giá trị của tốc độ ánh sáng c ở gần họ. Nhưng những thí nghiệm này cũng chứng tỏ rằng nếu một quan sát viên đo tốc độ ánh sáng tại vị trí của quan sát viên *kia*, anh ta sẽ kiếm được một giá trị khác với c, vì đồng hồ của anh ta chạy khác đi. Chỉ có một giải pháp cho song đề này: thước đo chiều dài, giống như đồng hồ, cũng thay đổi theo độ cao, sao cho tốc độ ánh sáng đều giống nhau ở khắp mọi nơi.

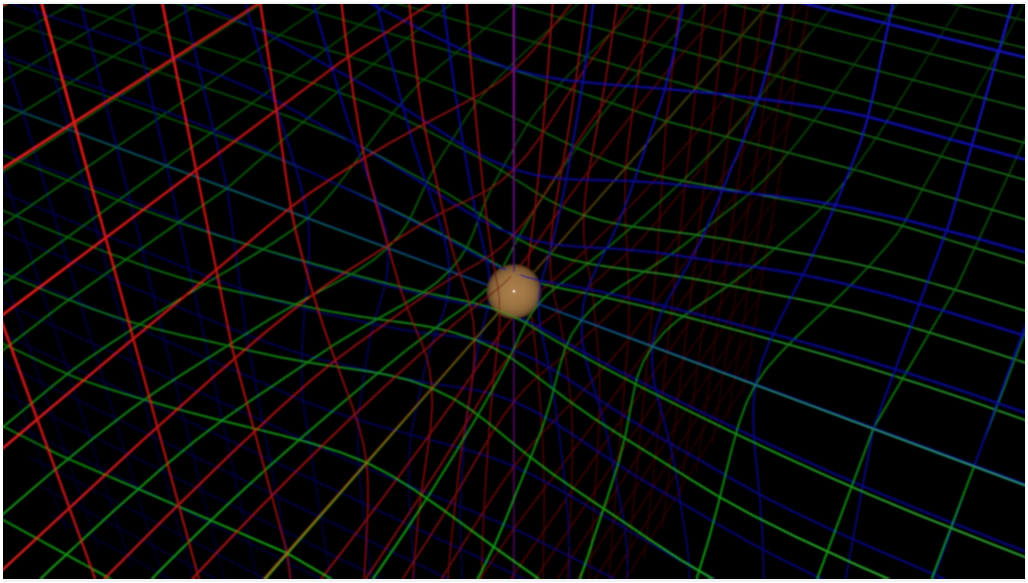
Câu đố 199 e

Nếu tốc độ ánh sáng không đổi nhưng đồng hồ và thước thay đổi theo độ cao, ta phải kết luận là *không gian gần các vật bị uốn cong*. Nhiều vật lý gia trong thế kỷ 20 đã kiểm tra xem thước đo có thật sự thay đổi ở những nơi có lực hấp dẫn hay không. Và thực vậy, không gian cong đã được dò ra quanh nhiều hành tinh, quanh hàng trăm ngôi sao - nơi có thể đo được và quanh hàng chục thiên hà. Người ta đã quan sát thấy nhiều hiệu ứng gián tiếp của sự uốn cong quanh các vật, được mô tả chi tiết dưới đây. Mọi kết quả đều khẳng định sự uốn cong của không gian, của không-thời gian quanh các vật, đồng thời cũng khẳng định giá trị của độ cong được Thuyết tương đối tổng quát tiên đoán. Nói cách khác, thước đo ở gần các vật đã thực sự thay đổi kích thước từ nơi này qua nơi khác và ngay cả từ hướng này qua hướng khác. Hình 65 cho một ấn tượng về điều này.

Xem 140
Câu đố 200 s

Nhưng hãy cẩn thận: hình bên phải, mặc dù xuất hiện trong nhiều sách giáo khoa, có thể gây hiểu lầm. Người ta dễ nhầm nó với bản sao của một *hàm thế* quanh một vật. Thật vậy, không thể vẽ một giản đồ biểu diễn riêng rẽ độ cong và hàm thế. (Tại sao?) Ta sẽ thấy rằng đối với các độ cong nhỏ, ta có thể giải thích sự thay đổi chiều dài thước đo mà chỉ dùng hàm thế. Như vậy hình vẽ không thực sự đánh lừa, ít nhất là trong trường hợp lực hấp dẫn yếu. Nhưng đối với các giá trị lực hấp dẫn lớn và thay đổi, ta không thể xác định hàm thế và như vậy chỉ còn cách mô tả lực hấp dẫn bằng không gian cong. Tóm lại, nếu ta tưởng tượng không gian là một loại nệm tổng quát hoá trong đó khối lượng tạo ra các biến dạng, thì ta đã có một mô hình không-thời gian hợp lý. Khi các vật chuyển động, biến dạng sẽ chạy theo chúng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 66 Một minh hoạ 3 chiều độ cong của không gian bao quanh một khối lượng (© Farooq Ahmad Bhat).

Gia tốc của hạt thử chỉ phụ thuộc vào độ cong của tấm nệm. Nó không phụ thuộc vào khối lượng hạt thử. Như vậy mô hình tấm nệm giải thích được lý do mọi vật đều rơi giống nhau. (Xưa kia, điều này còn được gọi là sự bằng nhau của khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn.)

Như vậy không gian giống như một tấm nệm không ma sát thâm nhập mọi nơi. Ta sống bên trong tấm nệm, nhưng ta không hề cảm thấy nó trong đời sống hằng ngày. Các vật nặng kéo lớp nệm về phía chúng, do đó làm thay đổi hình dạng tấm nệm. Lực càng mạnh, năng lượng và khối lượng càng nhiều thì độ biến dạng càng lớn. (Tấm nệm làm bạn nhớ tới aether phải không? Đừng lo: vật lý loại trừ khái niệm aether vì ta không thể phân biệt nó với chân không.)

Quyển III, trang 137

Nếu lực hấp dẫn là không gian cong, thì lúc đó một quan sát viên bất kỳ được gia tốc, thí dụ như một người trong một xe đang khởi hành, phải quan sát thấy không gian bị uốn cong. Tuy vậy, trong đời sống hằng ngày ta không thể nhận ra một hiệu ứng như vậy, vì đối với gia tốc và kích thước thông thường thì độ cong này quá nhỏ nên ta không thể nhận ra. Bạn có thể nghĩ ra một thí nghiệm thật nhạy để kiểm tra sự tiên đoán này hay không?

Câu đố 201 s

Bạn cũng có thể thắc mắc: nếu không gian phẳng chứa một vật vĩ mô bị trường hấp dẫn uốn cong, điều gì sẽ xảy ra cho vật chứa trong nó? (Để cho đơn giản, ta có thể tưởng tượng rằng vật được treo lên và giữ yên bằng một sợi dây không khối lượng.) Trường hấp dẫn cũng sẽ ảnh hưởng tới vật, nhưng độ cong của nó *không* có mối liên hệ đơn giản với độ cong của không gian. Thí dụ như vật có quán tính lớn hơn không gian trống rỗng. Và trong trạng thái tĩnh, độ cong của vật phụ thuộc vào tính chất đàn hồi riêng của nó, khác hẳn với độ cong của không gian rỗng, thường cứng hơn nhiều.

Câu đố 202 ny

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

KHÔNG-THỜI GIAN CONG

Hình 65 và Hình 66 chỉ cho thấy sự uốn cong của không gian, nhưng thật ra cả không-thời gian đều bị uốn cong. Ta sẽ mau chóng tìm ra cách mô tả cả hình dạng của không gian lẫn hình dạng của không-thời gian và cách đo độ cong của chúng.

Đầu tiên chúng ta hãy cố gắng mô tả thiên nhiên theo ý tưởng không-thời gian bị uốn cong. Trong Hình 65, cách mô tả các biến cố tốt nhất là dùng thời gian t do một đồng hồ đặt ở rất xa đo được; điều đó tránh cho ta gặp phải vấn đề vận hành khác thường của các đồng hồ đặt cách khối lượng ở trung tâm các khoảng khác nhau. Đối với toạ độ cực r, cách lựa chọn thực tế nhất để tránh các vấn đề do độ cong của không gian là dùng chu vi của một vòng tròn bao quanh vật ở trung tâm, chia cho 2π. Hình dạng cong của không-thời gian được mô tả tốt nhất bằng hành trạng của khoảng không-thời gian $\mathrm{d}s$, hay bằng thời gian của đồng hồ đeo tay $\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}s/c$, giữa hai điểm lân cận có toạ độ (t, r) và $(t + \mathrm{d}t, r + \mathrm{d}r)$. Như ta đã thấy ở trên, lực hấp dẫn đồng nghĩa với một điều là trong toạ độ cầu ta sẽ có

Trang 47
Trang 144

$$\mathrm{d}\tau^2 = \frac{\mathrm{d}s^2}{c^2} \neq \mathrm{d}t^2 - \mathrm{d}r^2/c^2 - r^2\mathrm{d}\varphi^2/c^2 \,. \tag{135}$$

Bất đẳng thức này biểu diễn sự kiện không-thời gian bị *uốn cong*. Thật vậy, những thí nghiệm về sự thay đổi của thời gian theo độ cao chứng tỏ rằng khoảng không-thời gian quanh một vật hình cầu được tính theo công thức

$$\mathrm{d}\tau^2 = \frac{\mathrm{d}s^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)\mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{c^2 - \frac{2GM}{r}} - \frac{r^2}{c^2}\mathrm{d}\varphi^2 \,. \tag{136}$$

Biểu thức này được gọi là *metric Schwarzschild* theo tên người khám phá ra nó.* Metric (136) mô tả hình dạng của không-thời gian bị uốn cong quanh một vật hình cầu không quay. Nó khá giống với Trái đất và Mặt trời. (Tại sao ta lại bỏ qua chuyển động quay của chúng?) Biểu thức (136) cũng chứng tỏ rằng cường độ của lực hấp dẫn quanh một vật khối lượng M bán kính R có số đo bằng một số vô hướng h được xác định như sau

Câu đố 203 s

$$h = \frac{2G}{c^2}\frac{M}{R} \,. \tag{137}$$

Tỷ số này biểu diễn, độ biến dạng của chiều dài và chân không do lực hấp dẫn, so với tình trạng phẳng trong Thuyết tương đối đặc biệt và nó cũng xác định độ chậm của các đồng hồ khi có mặt của lực hấp dẫn. (Tỷ số này cũng cho thấy độ xa của vật đối với chân trời khả hữu bất kỳ.) Trên mặt đất, tỷ số h có giá trị nhỏ cỡ $1.4 \cdot 10^{-9}$; trên mặt của Mặt trời, nó có giá trị lớn hơn cỡ $4.2 \cdot 10^{-6}$. Độ chính xác của các đồng hồ hiện đại cho phép ta dò ra những hiệu ứng nhỏ bé như vậy khá dễ dàng. Các hệ quả và ứng dụng khác nhau của sự biến dạng không-thời gian sẽ được ta bàn luận ngay sau đây.

* Karl Schwarzschild (1873–1916), một thiên văn gia có uy tín, là một trong những người đầu tiên tìm hiểu Thuyết tương đối tổng quát. Ông đã công bố công thức này vào tháng 12/1915, chỉ vài tháng sau khi Einstein đã công bố các phương trình trường. Ông mất sớm, ở tuổi 42, để lại cho Einstein một nỗi buồn to lớn. Sau này ta sẽ suy diễn ra dạng của metric, trực tiếp từ các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát. Một nhà khoa học khác khám phá ra metric, mà Einstein không biết, là Johannes Droste, một học trò của Lorentz.

Xem 141

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ta nên chú ý rằng nếu một vật có mật độ cao, đặc biệt khi bán kính của nó *bằng* với *bán kính Schwarzschild*

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}\,, \tag{138}$$

thì metric Schwarzschild sẽ hành xử một cách kỳ lạ: ở vị trí đó, *thời gian biến mất* (nên nhớ t là thời gian ở vô cực). Ở bán kính Schwarzschild, giờ của đồng hồ đeo tay (giống như đồng hồ ở vô cực thể hiện) ngừng lại – và *chân trời* xuất hiện. Dưới đây, ta
Trang 272 sẽ tìm hiểu chính xác xem điều gì xảy ra. Trường hợp này không phổ biến: bán kính Schwarzschild đối với một vật như Trái đất là 8.8 mm và đối với Mặt trời là 3.0 km; bạn có thể kiểm tra lại là kích thước của vật đối với các hệ thống thông thường lớn hơn bán
Xem 142 kính Schwarzschild của nó. Các hệ vật lý có bán kính Schwarzschild được gọi là *hố đen*
Trang 268 và sau này ta sẽ nghiên cứu kỹ về nó. Thuyết tương đối tổng quát cho rằng *không có* hệ thống nào trong thiên nhiên nhỏ hơn kích thước Schwarzschild của nó, nói cách khác, tỷ số h xác định bởi biểu thức (137) không bao giờ lớn hơn 1.

Tóm lại, qua những kết quả đã đề cập từ trước cho đến giờ thì rõ ràng là *khối lượng tạo ra độ cong*. Sự tương đương năng–khối lượng mà ta đã biết từ Thuyết tương đối đặc biệt sẽ dẫn tới một hệ quả là không gian cũng sẽ bị uốn cong khi có mặt của bất kỳ một loại năng–động lượng nào. Mọi loại năng lượng đều làm cong không-thời gian. Thí dụ như ánh sáng cũng sẽ làm cong không-thời gian. Tuy vậy, ngay cả những chùm tia sáng có năng lượng cao nhất mà ta có thể tạo ra cũng tương đương với một khối lượng cực kỳ nhỏ và như vậy các độ cong rất nhỏ nên ta không thể đo được. Nhiệt cũng làm cong không-thời gian nhưng trong phần lớn các hệ thống, nhiệt chỉ chiếm một phần của 10^{-12} của khối lượng tổng cộng nên tác dụng uốn cong của nó không thể đo được và có thể bỏ qua. Tuy vậy, ta vẫn còn có thể chứng minh bằng thực nghiệm rằng năng lượng làm cong không gian. Trong hầu hết các nguyên tử thì phần lớn khối lượng là do năng lượng tĩnh điện của các proton tích điện dương. Vào năm 1968 Kreuzer đã chứng minh năng lượng làm cong không gian nhờ một thí nghiệm thông minh sử dụng một khối lượng
Xem 143 thay đổi.

Ta có thể trực tiếp suy ra sự tương đương giữa độ cong thời gian và độ cong không
Câu đố 204 e gian qua sự vận hành khác thường của các đồng hồ. Gom cả hai hiệu ứng, ta kết luận rằng khi có mặt lực hấp dẫn, *không-thời gian* bị uốn cong.

Chúng ta hãy tổng hợp các nhận định. Năng lượng tương đương với khối lượng; khối lượng sinh ra lực hấp dẫn; lực hấp dẫn tương đương với gia tốc; gia tốc là thời gian phụ thuộc vào vị trí. Vì tốc độ ánh sáng không đổi, ta suy ra được *năng–động lượng làm cong không-thời gian*. Mệnh đề này là nửa đầu của Thuyết tương đối tổng quát.

Ta sẽ sớm tìm ra cách đo độ cong, cách tính độ cong từ năng–động lượng và điều được tìm thấy khi số đo và kết quả tính toán được so sánh với nhau. Ta cũng sẽ khám phá ra rằng các quan sát viên khác nhau sẽ đo được các độ cong khác nhau. Tập hợp các phép biến đổi liên hệ điểm quan sát này với điểm quan sát khác, *phép đối xứng vi đồng phôi*, sẽ cho ta biết mối liên hệ giữa các số đo của các quan sát viên khác nhau.

Vì vật chất chuyển động nên ta có thể nói nhiều hơn. Không chỉ không-thời gian gần các khối lượng mới bị uốn cong mà nó còn cong ngược lại khi các vật đã đi ngang qua. Nói cách khác, Thuyết tương đối tổng quát cho rằng không gian, cũng như không-thời
Xem 144 gian, thì *đàn hồi*. Tuy vậy, chúng khá cứng và cứng hơn thép khá nhiều. Để làm cong một mảnh không gian 1 % ta cần một mật độ năng lượng khổng lồ lớn hơn mật độ năng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 205 ny

lượng dùng để uốn cong một thanh ray xe lửa đi 1 %. Sắp tới đây ta sẽ gặp những hệ quả thú vị về sự đàn hồi của không-thời gian.

Tốc độ ánh sáng và hằng số hấp dẫn

> Si morior, moror.*
>
> Cổ nhân

Chúng ta tiếp tục lên đường hướng đến mục đích tìm hiểu kỹ càng về lực hấp dẫn. Mọi kiến thức lý thuyết và thực nghiệm của chúng ta về lực hấp dẫn có thể tổng kết trong hai nguyên lý. Nguyên lý đầu tiên:

▷ Tốc độ v của một hệ vật lý bị chặn trên:

$$v \leqslant c \tag{139}$$

đối với mọi quan sát viên, trong đó c là tốc độ ánh sáng.

Lý thuyết dẫn xuất từ nguyên lý này, Thuyết tương đối *đặc biệt*, được mở rộng thành Thuyết tương đối *tổng quát* bằng cách thêm vào nguyên lý thứ hai, đặc trưng cho lực hấp dẫn. Có nhiều cách tương đương để phát biểu nguyên lý này. Đây là một cách.

▷ Đối với mọi quan sát viên, lực F tác dụng lên một hệ thống bị giới hạn theo bất đẳng thức

$$F \leqslant \frac{c^4}{4G}\,, \tag{140}$$

trong đó G là hằng số hấp dẫn vạn vật.

Tóm lại, có một lực cực đại trong thiên nhiên. Lực hấp dẫn làm cho các vật hút nhau.
Câu đố 206 e

Tuy vậy, lực hút này bị giới hạn. Một mệnh đề tương đương:

▷ Đối với mọi quan sát viên, kích thước L của một hệ có khối lượng M bị giới hạn theo bất đẳng thức

$$\frac{L}{M} \geqslant \frac{4G}{c^2}\,. \tag{141}$$

Nói cách khác, một vật có khối lượng không thể có mật độ lớn hơn mật độ của một hố đen không quay có cùng khối lượng. Sau đây là một cách phát biểu nguyên lý hấp dẫn khác:

▷ Đối với mọi hệ thống, công suất phát xạ P bị giới hạn theo bất đẳng thức

$$P \leqslant \frac{c^5}{4G}\,. \tag{142}$$

* 'Nếu tôi nghỉ ngơi, thì tôi qua đời.' Đây là câu châm ngôn của một con chim trên thiên đàng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tóm lại, có một công suất cực đại trong thiên nhiên.

Ba giới hạn đã cho trên đây đều tương đương với nhau; không có và không thể có ngoại lệ. Các giới hạn bao gồm lực hấp dẫn vạn vật trong trường hợp phi tương đối tính. Chúng cho ta biết *bản chất* của lực hấp dẫn, chính là sự uốn cong và lực hấp dẫn tác dụng *như thế nào*. Các giới hạn cho phép ta xác định độ cong trong mọi trường hợp, mọi biến cố không-thời gian. Như ta đã thấy ở trên, giới hạn tốc độ cùng với bất kỳ một trong ba nguyên lý trên bao hàm toàn bộ Thuyết tương đối tổng quát.*

Trang 115

Thí dụ, bạn có thể chứng tỏ rằng công thức mô tả sự dịch chuyển đỏ do hấp dẫn tuân theo giới hạn tổng quát (141) về tỷ số chiều dài/khối lượng không?

Câu đố 207 ny

Ta cũng nên nhớ rằng bất kỳ một công thức nào có chứa tốc độ ánh sáng c đều dựa trên Thuyết tương đối đặc biệt và nếu nó chứa hằng số hấp dẫn G thì nó có liên hệ với lực hấp dẫn vạn vật. Nếu một công thức chứa *cả* c và G, nó là một mệnh đề của Thuyết tương đối tổng quát. Chương này thường xuyên nhấn mạnh mối liên hệ này.

Cuộc hành trình lên đỉnh kiến thức cho đến bây giờ đã cho ta biết rằng một sự mô tả chính xác về chuyển động đòi hỏi sự hiểu rõ về mọi quan điểm được thừa nhận, các đặc trưng của chúng, các điểm khác biệt của chúng và sự biến đổi giữa chúng. Từ đây trở đi, *mọi* quan điểm đều được thừa nhận, không có ngoại lệ: mọi người phải được có ý kiến với người khác. Không có sự phân biệt quan sát viên chịu tác dụng của lực hấp dẫn, rơi tự do, có gia tốc hay đang chuyển động theo quán tính. Thêm nữa, những người coi bên trái là bên phải, coi trên là dưới hay cho rằng Mặt trời quay quanh Trái đất cũng được có ý kiến với mọi người kể cả chúng ta. Điều này tạo ra một tập hợp các phép biến đổi quan điểm lớn hơn trường hợp của Thuyết tương đối đặc biệt rất nhiều; nó khiến cho Thuyết tương đối tổng quát vừa khó vừa hấp dẫn. Và vì mọi quan điểm đều được phép, mô tả về chuyển động sau cùng mới trở nên *đầy đủ*.**

Tại sao một hòn đá ném vào không khí lại rơi trở lại mặt đất? – Các đường trắc địa

> “Thiên tài là người có thể phạm mọi sai lầm khả hữu trong thời gian ngắn nhất.”
>
> Vô danh

Trong cuộc bàn luận của chúng ta về Thuyết tương đối đặc biệt, ta đã thấy rằng chuyển động theo quán tính hay chuyển động tự do là chuyển động nối liền hai biến cố đòi hỏi thời gian riêng *dài nhất*. Trường hợp không có lực hấp dẫn, chuyển động thoả mãn điều kiện này là chuyển động *thẳng*. Mặt khác, ta cũng thường nghĩ về các tia sáng là các đường thẳng. Thật vậy, tất cả chúng ta đều quen với việc kiểm tra độ thẳng của một cạnh bằng cách nhìn dọc theo nó. Khi ta vẽ các trục của hệ toạ độ vật lý, ta đều tưởng tượng đến việc vẽ các đường đi của các tia sáng hay vẽ chuyển động của các vật chuyển động tự do.

Trang 89

Quyển I, trang 60

Trong trường hợp không có lực hấp dẫn, quỹ đạo của vật và đường đi của tia sáng trùng nhau. Tuy vậy, khi có lực hấp dẫn, vật không còn chuyển động dọc theo đường đi của tia sáng, như mọi hòn đá được ném lên đã chứng tỏ. Ánh sáng không còn xác định

* Cách tiếp cận mô phạm này khá độc đáo. Nó có thể đã được các tác giả hiện đại sử dụng trước tiên, mặc dù trước kia đã có nhiều nhà nghiên cứu đã độc lập phát triển các sáng kiến tương tự, như Venzo de Sabbata và C. Sivaram.

Xem 108

** Hay lẽ ra nó đã đầy đủ nếu không vì một sai lệch nhỏ được gọi là Thuyết lượng tử.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

sự ngay thẳng trong không gian nữa. Khi có lực hấp dẫn, cả đường đi của ánh sáng và vật chất đều bị uốn cong, mặc dù mức độ có *khác nhau*. Nhưng mệnh đề ban đầu vẫn còn giá trị: ngay cả khi có lực hấp dẫn, các vật đi theo các con đường có thời gian riêng khả hữu dài nhất. Đối với vật chất, những đường như vậy được gọi là *các đường trắc địa loại thời gian*. Đối với ánh sáng, những đường như vậy được gọi là *đường trắc địa loại ánh sáng* hay *đường trắc địa null*.

Ta cũng nên nhớ rằng trong không-thời gian, các đường trắc địa là các đường cong có chiều dài *lớn nhất*. Điều này tương phản với trường hợp không gian thuần tuý, như mặt cầu, nơi các đường trắc địa là các đường cong có chiều dài *nhỏ nhất*.

Nói một cách đơn giản, *các hòn đá rơi xuống vì chúng đi theo các đường trắc địa*. Chúng ta hãy kiểm tra mệnh đề này. Vì các hòn đá chuyển động với thời gian riêng lớn nhất đối với các quan sát viên quán tính, nên chúng cũng phải chuyển động như vậy đối với các quan sát viên rơi tự do, như Kittinger. Thật vậy, chúng phải chuyển động như vậy đối với mọi quan sát viên. Sự tương đương của quỹ đạo rơi và các đường trắc địa ít ra cũng khá nhất quán.

Nếu rơi được xem như là hệ quả của việc đến gần mặt đất – như ta sẽ bàn luận dưới
Trang 162 đây – ta có thể suy ra trực tiếp rằng rơi sẽ dẫn tới việc thời gian riêng dài nhất. Rơi tự do thực sự là chuyển động dọc theo các đường trắc địa.

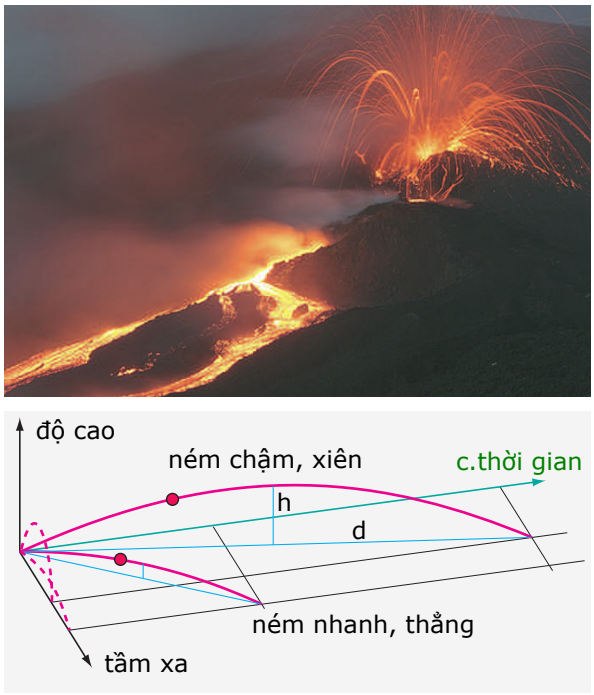
Ta đã thấy ở trên là lực hấp dẫn dẫn xuất từ sự hiện hữu của một lực cực đại. Kết quả này có thể được hình dung theo một cách khác. Nếu lực hấp dẫn giữa một vật ở trung tâm và một vệ tinh *mạnh* hơn, kích thước hố đen có thể nhỏ hơn; trong trường hợp đó giới hạn lực cực đại và tốc độ cực đại có thể bị vượt qua bằng cách tiến đến gần một hố đen như vậy. Mặt khác, nếu lực hấp dẫn *yếu* hơn, sẽ có quan sát viên nhìn thấy hai vật không tương tác và như vậy chúng không thể tạo thành một hệ vật lý. Tóm lại, một lực cực đại $c^4/4G$ sẽ bao hàm lực hấp dẫn vạn vật. Không có sự khác biệt giữa hai phát biểu: mọi vật hút nhau thông qua lực hấp dẫn và có một lực cực đại với giá trị $c^4/4G$. Nhưng đồng thời nguyên lý lực cực đại kéo theo sự kiện là các vật chuyển động trên các đường
Câu đố 208 ny trắc địa. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Chúng ta hãy xét một thí nghiệm kiểm chứng. Nếu rơi là hệ quả của độ cong, thì quỹ đạo của *mọi* hòn đá được ném hay rơi gần mặt đất phải có *cùng* độ cong trong không-thời gian. Xét một hòn đá được ném ngang, một hòn đá được ném dọc, một hòn đá được ném nhanh, hay một hòn đá được ném chậm: chỉ cần hai hàng lý luận để chứng tỏ rằng *trong không-thời gian* mọi quỹ đạo đều gần đúng là các cung tròn với một độ chính xác
Câu đố 209 ny cao, như đã thấy trong Hình 67. Mọi quỹ đạo đều có *cùng* bán kính cong r, được cho theo công thức

$$r = \frac{c^2}{g} \approx 9.2 \cdot 10^{15}\,\mathrm{m}\,. \tag{143}$$

Bán kính lớn, thì độ cong nhỏ, nên ta không nhận thấy nó trong đời sống hằng ngày. Hình dạng parabol của quỹ đạo hòn đá trong đời sống hằng ngày chỉ là hình chiếu của một quỹ đạo cơ bản hơn trong không-thời gian 4 chiều vào không gian 3 chiều. Điểm quan trọng là giá trị của độ cong *không* phụ thuộc vào cách ném. Đúng ra kết quả đơn giản này có thể đã gợi ra những ý tưởng của Thuyết tương đối tổng quát cho nhiều người đi trước Einstein hàng thế kỷ; nhưng điều đã bị bỏ lỡ là không ai nhận ra tầm quan trọng của việc xem tốc độ ánh sáng là tốc độ giới hạn. Trong mọi trường hợp, phép tính đơn

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 67 Mọi quỹ đạo của các hòn đá bay, độc lập với tốc độ và hướng chuyển động của chúng, đều có cùng độ cong trong không-thời gian (photograph © Marco Fulle).

giản này khẳng định rằng sự rơi và độ cong có liên hệ với nhau. Như ta đã mong đợi và đã đề cập ở trên, độ cong ở độ cao lớn nhất thì nhỏ nhất và nó biến mất khi ở rất xa Trái đất. Bây giờ nếu cho rằng độ cong của mọi quỹ đạo của vật rơi tự do là giống nhau, và các quỹ đạo đó là những đường có tác dụng cực tiểu, ta có thể suy ra ngay rằng chúng cũng là các đường trắc địa.

Nếu ta mô tả sự rơi là hệ quả của độ cong của không-thời gian, ta phải chứng tỏ rằng việc mô tả sự rơi bằng các đường trắc địa sẽ cho trở lại mọi tính chất của nó. Đặc biệt, ta phải giải thích được sự kiện hòn đá được ném với tốc độ nhỏ sẽ rơi trở lại, còn hòn đá được ném với tốc độ lớn sẽ thoát đi luôn. Bạn có thể suy ra điều này từ độ cong của không gian không?

Câu đố 210 ny

Tóm lại, chuyển động của một hạt bất kỳ rơi tự do 'trong một trường hấp dẫn' cũng được mô tả bằng một nguyên lý biến phân giống như nguyên lý mô tả chuyển động của một hạt tự do trong Thuyết tương đối đặc biệt: quỹ đạo cực đại hoá thời gian riêng $\int \mathrm{d}\tau$. Ta có thể phát biểu lại điều này bằng cách nói rằng một hạt bất kỳ khi rơi tự do từ điểm A tới điểm B trong không-thời gian sẽ cực tiểu hoá tác dụng S theo công thức

$$S = -c^2 m \int_A^B \mathrm{d}\tau \,. \tag{144}$$

Đó là tất cả những điều ta cần biết về sự rơi tự do của các vật. Kết quả là, bất kỳ *một sự sai lệch khỏi sự rơi tự do nào cũng đều giữ cho bạn trẻ hơn*. Sai lệch càng lớn, bạn càng trẻ lâu.

Trang 296

Như ta sẽ thấy dưới đây, mô tả sự rơi tự do theo tác dụng cực tiểu đã được kiểm chứng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 145 cực kỳ chính xác và người ta chưa thấy một sự khác biệt nào từ thực nghiệm. Ta cũng sẽ khám phá ra rằng đối với sự rơi tự do, các tiên đoán của Thuyết tương đối tổng quát và của Thuyết hấp dẫn vạn vật khác nhau rất nhiều, kể cả trường hợp các hạt có tốc độ gần tốc độ ánh sáng lẫn trường hợp các vật trung tâm có mật độ cao. Cho đến bây giờ, mọi thí nghiệm đều đã chứng tỏ rằng khi hai tiên đoán khác nhau, thì Thuyết tương đối tổng quát sẽ đúng và Thuyết hấp dẫn vạn vật cùng các mô tả khác đều sai.

Mọi vật đều rơi theo các đường trắc địa. Việc này cho ta thấy một điều quan trọng. Sự rơi của các vật không phụ thuộc vào khối lượng của chúng. Các đường trắc địa giống như các 'đường ray' trong không-thời gian hướng dẫn cho các vật cách thức rơi. Nói cách khác, không-thời gian có thể được tưởng tượng như là một thực thể đơn, khổng lồ, bị biến dạng. Không-thời gian không phải là 'không có gì'; nó là một thực thể trong tư tưởng của chúng ta. Hình dạng của thực thể này hướng dẫn các vật cách chuyển động. Như vậy không-thời gian thực sự giống như một tấm nệm vô hình; tấm nệm bị biến dạng này hướng dẫn các vật rơi đi theo mạng lưới các đường trắc địa.

Hơn nữa, năng lượng *liên kết* cũng rơi giống như khối lượng, như đã được chứng minh bằng cách so sánh sự rơi của các vật làm bằng các vật liệu khác nhau. Chúng có tỷ
Câu đố 211 s lệ năng lượng liên kết khác nhau. (Tại sao?) Thí dụ trên Mặt trăng, nơi không có không khí, David Scott từ Apollo 15 thả một cái búa và một sợi lông thì nhận thấy rằng chúng rơi như nhau, cùng đi với nhau. Sự độc lập về cấu tạo vật chất đã được kiểm tra và khẳng
Xem 146 định mãi mãi.

Ánh sáng có rơi được không?

Bức xạ rơi như thế nào? Ánh sáng, giống như bức xạ, là năng lượng không có khối lượng nghỉ. Nó chuyển động giống như một dòng các vật sáng và cực kỳ nhanh. Do đó sự lệch hướng của ánh sáng do lực hấp dẫn dễ nhận thấy nhất. Ánh sáng rơi như thế nào? Ánh sáng không thể thay đổi tốc độ. Khi ánh sáng rơi thẳng đứng, nó chỉ đổi màu, như ta đã
Trang 140 thấy ở trên. Nhưng ánh sáng cũng có thể đổi hướng. Trước khi các tư tưởng của Thuyết tương đối trở nên quen thuộc rất lâu, vào năm 1801, thiên văn gia người Phổ Johann
Xem 147 Soldner đã hiểu rằng lực hấp dẫn sẽ dẫn tới việc ánh sáng *bị lệch hướng* khi đi ngang qua gần một vật. Ông cũng đã tìm được mối liên hệ giữa góc lệch với khối lượng của vật và
Quyển I, trang 201 chiều dài đường đi. Tuy vậy, không có ai trong thế kỷ 19 kiểm tra kết quả này bằng thực nghiệm.

Một điều hiển nhiên, ánh sáng là năng lượng và năng lượng có khối lượng; như vậy độ lệch của tia sáng *không phải là* bằng chứng cho sự uốn cong của không gian. Thuyết tương đối tổng quát cũng tiên đoán một góc lệch khi tia sáng đi ngang một vật, nhưng có độ lớn *gấp đôi* giá trị cổ điển của Soldner, vì độ cong của không gian quanh một vật khối lượng lớn cộng thêm vào tác dụng của lực hấp dẫn vạn vật. Như vậy độ lệch của ánh sáng chỉ khẳng định sự uốn cong của không gian nếu *giá trị* phù hợp với độ lệch được tiên đoán bởi Thuyết tương đối tổng quát. Quả nhiên điều này đúng như vậy: các
Trang 165 quan sát đều trùng với các tiên đoán.

Nói một cách đơn giản, ta không cần phải có khối lượng để cảm thấy lực hấp dẫn; chỉ năng lượng cũng đủ. Kết quả của sự tương đương năng-khối lượng này phải trở thành bản chất thứ hai khi tìm hiểu về Thuyết tương đối tổng quát. Đặc biệt, ánh sáng không phải nhẹ mà là nặng. Bạn có thể chứng tỏ rằng độ cong của tia sáng gần mặt đất phải
Câu đố 212 ny giống như độ cong của quỹ đạo hòn đá theo công thức (143) không?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tóm lại, mọi thí nghiệm đều chứng tỏ rằng không những chỉ khối lượng mà năng lượng cũng rơi theo các đường trắc địa, bất kể loại năng lượng (liên kết hay tự do) và loại tương tác (điện từ hay hạt nhân). Hơn nữa, chuyển động của bức xạ cũng khẳng định rằng không-thời gian bị uốn cong.

Vì thí nghiệm chứng tỏ rằng mọi hạt đều rơi như nhau, không phụ thuộc khối lượng, điện tích hay tính chất nào khác của chúng, nên ta có thể kết luận rằng mọi hệ thống quỹ đạo khả hữu đều tạo thành một cấu trúc độc lập. Đây là cấu trúc mà ta gọi là *không-thời gian*.

Như vậy ta có thể thấy rằng *không-thời gian hướng dẫn cách thức rơi cho vật chất, năng lượng và bức xạ*. Mệnh đề này là nửa thứ hai của Thuyết tương đối tổng quát. Nó bổ sung cho nửa đầu, là mệnh đề đã phát biểu rằng năng lượng hướng dẫn cách uốn cong cho không-thời gian. Để hoàn tất việc mô tả chuyển động vĩ mô, chỉ cần thêm các con số vào những mệnh đề này, là ta có thể kiểm chứng được chúng. Thông thường, ta có thể tiến hành theo hai cách: trực tiếp suy ra các phương trình chuyển động, hay thiết lập các hàm Lagrange trước rồi từ đó suy ra các phương trình chuyển động. Nhưng trước khi làm như vậy, ta hãy giải trí một chút.

Các câu đố vui và lạ về lực hấp dẫn

> Wenn Sie die Antwort nicht gar zu ernst nehmen und sie nur als eine Art Spaß ansehen, so kann ich Ihnen das so erklären: Früher hat man geglaubt, wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig. Nach der Relativitätstheorie verschwinden aber auch Zeit und Raum mit den Dingen.*
>
> Albert Einstein năm 1921 ở New York

Câu đố 213 s

Lấy một chai nhựa và tạo ra một số lỗ thủng ở gần đáy chai. Đổ nước đầy chai, bịt các lỗ bằng các ngón tay. Nếu bạn buông chai, trong khi chai rơi không có nước chảy ra. Bạn có thể giải thích lý do tại sao thí nghiệm này đã khẳng định sự tương đương giữa đứng yên và rơi tự do không?

* *

Câu đố 214 s

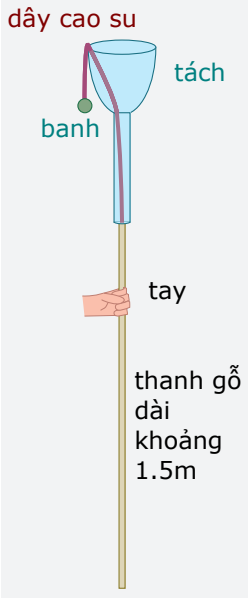
Vào dịp sinh nhật thứ 76, Einstein đã nhận được một món quà sinh nhật đặc biệt được làm để dành tặng ông, như trong Hình 68. Một cái tách khá sâu được gắn trên đầu một cán chổi. Tách có chứa một dây cao su mềm cột vào đáy tách, đầu dây còn lại có cột một quả banh. Ở vị trí ban đầu, banh treo bên ngoài tách. Dây cao su quá mềm nên không thể kéo banh vào trong tách. Cách nhẹ nhàng nhất để đem banh vào trong tách là gì?

* *

Lực hấp dẫn có các tính chất như nhau trong cả vũ trụ – ngoại trừ trong văn phòng cấp bằng sáng chế của Mỹ. Năm 2005, bằng sáng chế Nr. 6 960 975, đã được cấp cho một thiết

* 'Nếu bạn không cần câu trả lời quá nghiêm túc và nghe nó chỉ để giải trí, thì tôi có thể giải thích điều đó cho bạn như sau: trong quá khứ người ta đã nghĩ rằng nếu mọi vật biến mất khỏi thế giới này, không gian và thời gian vẫn còn. Nhưng theo Thuyết tương đối thì không gian và thời gian sẽ biến mất cùng với mọi vật.'

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 68 Một câu đố: cách nào là cách đơn giản nhất để đem trái banh cột ở đầu sợi dây cao su vào trong cái tách?

bị phản hấp dẫn hoạt động bằng cách làm biến dạng không-thời gian theo kiểu lực hấp dẫn 'được bổ chính' (xem patft.uspto.gov). Bạn có biết thiết bị nào đơn giản hơn không?

Câu đố 215 s

* *

Bán kính cong của không-thời gian ở mặt đất là $9.2 \cdot 10^{15}$ m. Bạn có thể khẳng định giá trị này không?

Câu đố 216 e

* *

Câu đố 217 s Một miếng gỗ nổi trên mặt nước. Nó sẽ nhô ra nhiều hơn hay ít hơn trong một thang máy tăng tốc đi lên?

* *

Trang 59 Ta đã thấy trong Thuyết tương đối đặc biệt là nếu hai người sinh đôi được gia tốc như nhau theo cùng một hướng, một người đi trước một khoảng xa, thì người đi trước già hơn người đi sau. Điều này có xảy ra trong trường hấp dẫn không? Và điều gì sẽ xảy ra khi trường thay đổi theo độ cao, như trên Trái đất?

Câu đố 218 s

* *

Lực cực đại và công suất cực đại cũng bao hàm dòng khối lượng cực đại. Bạn có thể chứng minh rằng không có dòng khối lượng nào có thể vượt qua $1.1 \cdot 10^{35}$ kg/s không?

Câu đố 219 s

* *

Các thí nghiệm trong Hình 62 và 63 khác nhau ở một điểm: một xảy ra trong không gian phẳng, cái kia trong không gian cong. Một hình như có liên quan tới định luật bảo toàn năng lượng, cái kia thì không. Các điểm khác biệt này có làm mất hiệu lực của sự tương

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 220 s đương giữa hai thí nghiệm không?

* *

Các phi hành gia đã tự cân để kiểm tra xem họ có ăn uống đầy đủ hay không bằng cách
Câu đố 221 s nào?

* *

Một phi hành gia trên quỹ đạo có thật sự lơ lửng tự do không? Không. Hoá ra là các trạm không gian và vệ tinh được gia tốc bằng nhiều hiệu ứng nhỏ. Một tác dụng quan trọng là áp suất của ánh sáng Mặt trời, ma sát của không khí mỏng và tác dụng của gió mặt trời. (Các vi thiên thạch thường được bỏ qua.) Ba tác dụng này đều dẫn tới các gia tốc vào cỡ từ $10^{-6}\,\mathrm{m/s^2}$ tới $10^{-8}\,\mathrm{m/s^2}$, phụ thuộc vào độ cao của quỹ đạo. Bạn có thể ước lượng thời gian để một trái táo lơ lửng trong trạm không gian chạm vào tường của trạm, khi
Câu đố 222 s bắt đầu đi từ giữa trạm không? Ngoài ra độ lớn của gia tốc thuỷ triều trong tình trạng này là bao nhiêu?

* *

Trong thiên nhiên không có khối lượng âm, như ta đã bàn luận từ đầu cuộc hành trình
Quyển I, trang 106 (ngay cả phản vật chất cũng có khối lượng *dương*). Điều này có nghĩa là không thể ngăn chặn lực hấp dẫn, khác với các tương tác điện từ. Vì không thể che chắn được lực hấp dẫn, ta không thể tạo ra một hệ hoàn toàn cô lập. Nhưng những hệ như vậy tạo thành nền tảng của Nhiệt động lực học! Ta sẽ nghiên cứu các hàm ý đầy quyến rũ đó sau: thí
Quyển V, trang 140 dụ như ta sẽ khám phá ra *giới hạn trên* của entropy của các hệ vật lý.

* *

Có thể dùng không gian cong để du hành nhanh hơn ánh sáng không? Hãy tưởng tượng một không-thời gian trong đó có hai điểm được nối với nhau hoặc bằng một con đường đi xuyên qua một phần phẳng, hoặc bằng một con đường khác đi xuyên qua một phần cong. Ta có thể dùng phần cong để du hành giữa các điểm nhanh hơn là đi xuyên qua phần phẳng hay không? Về mặt toán học, điều này là có thể; tuy vậy, một không gian cong như vậy sẽ cần có mật độ năng lượng *âm*. Điều đó không tương thích với định
Xem 148 nghĩa của năng lượng và với việc không có khối lượng âm. Mệnh đề cho rằng điều này không thể xảy ra trong thiên nhiên còn được gọi là *điều kiện năng lượng yếu*. Có thể suy
Câu đố 223 ny ra điều này từ giới hạn của tỷ số chiều dài/khối lượng không?

* *

Mệnh đề về giới hạn chiều dài/khối lượng $L/M \geqslant 4G/c^2$ mời gọi các thí nghiệm để thử vượt qua giới hạn này. Bạn có thể giải thích điều sẽ xảy ra khi một quan sát viên chuyển
Câu đố 224 ny động rất nhanh ngang qua một vật mà sự co chiều dài của nó đạt tới giới hạn không?

* *

Có một tính chất toán học quan trọng của không gian 3 chiều $\mathbb{R}^3$ đã phân biệt nó với tất cả các không gian có số chiều khác. Một đường cong đóng (một chiều) *chỉ* có thể tạo thành các gút trong $\mathbb{R}^3$: trong trường hợp số chiều cao hơn không thể tạo ra gút. (Sự hiện hữu của các gút cũng giải thích lý do tại sao 3 là số chiều nhỏ nhất cho phép các hạt chuyển động hỗn loạn.) Tuy vậy, Thuyết tương đối tổng quát không nói *lý do* tại sao

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

không-thời gian có 3 cộng 1 chiều. Nó chỉ đơn giản căn cứ trên thực tế. Câu hỏi khó và sâu sắc này sẽ được tìm hiểu trong phần cuối của cuộc thám hiểm của chúng ta.

* *

Henri Poincaré, mất năm 1912, không lâu trước khi Thuyết tương đối tổng quát được hoàn thiện, đã có lúc nghĩ rằng không gian cong là điều không cần thiết, mà chỉ là một khả năng. Ông đã tưởng tượng rằng người ta có thể tiếp tục dùng không gian Euclide miễn là ánh sáng được phép đi theo đường cong. Bạn có thể giải thích lý do tại sao không thể có một lý thuyết như vậy không?

Câu đố 225 s

* *

Hai nguyên tử hydrogen có thể quay tròn quanh nhau, trong trường hấp dẫn chung của cả hai không? Kích thước của 'phân tử' này là bao nhiêu?

Câu đố 226 s

* *

Hai xung ánh sáng có thể quay tròn quanh nhau, trong trường hấp dẫn chung của cả hai không?

Câu đố 227 s

* *

Các chuyển động khác nhau của Trái đất đã được đề cập trong phần vật lý Galilei, như chuyển động quay quanh trục của nó hay chuyển động quanh Mặt trời, dẫn đến các loại thời gian khác nhau trong vật lý và trong thiên văn. Thời gian được xác định bằng các đồng hồ nguyên tử tốt nhất được gọi là *thời gian động lực của trái đất*. Bằng cách thêm các giây nhuận theo định kỳ để bổ chính cho định nghĩa không chính xác của giây (một vòng quay của Trái đất không phải là 86 400, mà là 86 400.002 s) và ít quan trọng hơn, bổ chính cho sự quay chậm dần của Trái đất, ta có *toạ độ thời gian phổ quát* hay UTC. Rồi lại có thời gian dẫn xuất từ hiện tượng này bằng cách tính đến tất cả các giây nhuận. Lúc đó ta sẽ có một loại thời gian – khác – được hiển thị bằng một đồng hồ không quay đặt ở tâm Trái đất. Sau cùng, có *thời gian động lực khối tâm*, là thời gian được hiển thị bằng một đồng hồ đặt ở khối tâm của Thái dương hệ. Dùng thời gian này thì các vệ tinh mới có thể được lái một cách chính xác xuyên qua Thái dương hệ. Tóm lại, Thuyết tương đối đã từ giã giờ GMT, như luật của Anh đã quy định, một trường hợp hiếm hoi luật pháp thuận theo khoa học. (Chỉ có BBC là tiếp tục dùng giờ này.)

Quyển I, trang 157

Quyển I, trang 455

Xem 149

* *

Như vậy các cơ quan không gian *phải* dùng Thuyết tương đối tổng quát nếu họ muốn đưa các vệ tinh nhân tạo đến Hoả tinh, Kim tinh, hay các sao chổi. Nếu không dùng, người ta không thể tính đúng các quỹ đạo, các vệ tinh sẽ bay trượt các mục tiêu kể cả các hành tinh. Trong thực tế các cơ quan không gian đã chọn giải pháp an toàn: họ dùng kiến thức tổng quát hoá của Thuyết tương đối tổng quát, cụ thể là *hình thức luận hậu-Newton tham số hoá*, lý thuyết bao gồm sự kiểm tra liên tục tính đúng đắn của Thuyết tương đối tổng quát. Trong phạm vi sai số của phép đo, cho đến nay chưa thấy sự sai lệch nào.*

* Để có thể hiểu ý nghĩa của điều này, ta nên biết trong hình thức luận hậu-Newton *phi tham số hoá*, dựa trên Thuyết tương đối tổng quát, đã viết phương trình chuyển động của một vật có khối lượng m ở gần một

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

Các cơ quan không gian trên khắp thế giới cũng dùng Thuyết tương đối tổng quát để tính vị trí chính xác của các vệ tinh và để điều hưởng các sóng vô tuyến theo tần số của các máy phát vô tuyến đặt trên vệ tinh. Thêm vào đó, Thuyết tương đối tổng quát cũng là lý thuyết thiết yếu của *hệ thống định vị toàn cầu*, hay GPS. Công cụ đạo hàng hiện đại này* gồm có 24 vệ tinh trang bị các đồng hồ bay quanh Trái đất. Tại sao hoạt động của hệ thống này cần Thuyết tương đối tổng quát? Vì mọi vệ tinh, cũng như bất kỳ người nào trên mặt đất, đều du hành theo quỹ đạo tròn, thì có $\mathrm{d}r = 0$, và ta có thể viết lại metric Schwarzschild (136) như sau

Xem 150

$$\left(\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}t}\right)^2 = 1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{r^2}{c^2}\left(\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}\right)^2 = 1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{v^2}{c^2}\,. \tag{146}$$

Câu đố 228 e Ta kiếm được hệ thức giữa thời gian vệ tinh và thời gian Trái đất là

$$\left(\frac{\mathrm{d}t_{\mathrm{sat}}}{\mathrm{d}t_{\mathrm{Earth}}}\right)^2 = \frac{1 - \frac{2GM}{r_{\mathrm{sat}}c^2} - \frac{v_{\mathrm{sat}}^2}{c^2}}{1 - \frac{2GM}{r_{\mathrm{Earth}}c^2} - \frac{v_{\mathrm{Earth}}^2}{c^2}}\,. \tag{147}$$

Câu đố 229 s Bạn có thể tính ra số microsecond mà một đồng hồ trên vệ tinh chạy nhanh mỗi ngày không, nếu biết vệ tinh GPS đi quanh Trái đất một vòng mất 12h? Vì chỉ cần 3 microsecond là vị trí sai lệch 1 km sau một ngày nên đồng hồ trong các vệ tinh phải được điều chỉnh để chạy chậm lại một thời gian như đã tính toán. Những điều chỉnh cần thiết đều được giám sát, và cho đến nay, Thuyết tương đối đã được khẳng định từng ngày, trong phạm vi sai số của phép đo, kể từ khi hệ thống bắt đầu hoạt động.

Xem 151

* *

Thuyết tương đối tổng quát là nền tảng của môn thể thao *geocaching*, môn săn kho tàng trên khắp thế giới với sự giúp đỡ của máy thu tín hiệu GPS. Hãy thăm các websites www.terracaching.com và www.geocaching.com để biết thêm chi tiết.

* *

vật có khối lượng lớn M với một độ lệch so với biểu thức nghịch đảo bình phương đối với gia tốc a như sau:

$$a = \frac{GM}{r^2} + f_2\frac{GM}{r^2}\frac{v^2}{c^2} + f_4\frac{GM}{r^2}\frac{v^4}{c^4} + f_5\frac{Gm}{r^2}\frac{v^5}{c^5} + \cdots \tag{145}$$

Ở đây các hệ số bậc nhất f_n được tính từ Thuyết tương đối tổng quát. Không có hai số hạng lẻ đầu tiên vì tính thuận nghịch (gần đúng) của chuyển động tương đối tính tổng quát: sự phát xạ sóng hấp dẫn, thì bất thuận nghịch, giải thích cho sự có mặt của số hạng nhỏ f_5; lưu ý là nó chứa khối lượng nhỏ m thay vì khối lượng lớn M. Tất cả các hệ số f_{n} lên tới f_7 hiện nay đã được tính toán. Tuy vậy, trong Thái dương hệ, chỉ có số hạng f_2 là đã được phát hiện. Tình trạng này có thể thay đổi với các thí nghiệm trên vệ tinh có độ chính xác cao trong tương lai. Các hiệu ứng bậc cao hơn, tới f_5, đã được đo đạc trong các pulsar đôi, như sẽ bàn luận dưới đây.

Trang 185

Trong hình thức luận hậu-Newton *tham số hoá*, mọi hệ số f_n, bao gồm các hệ số lẻ, đều khớp với các dữ liệu ghi được; cho đến nay tất cả các hệ số này đều phù hợp với các giá trị do Thuyết tương đối tổng quát tiên đoán.

* Để có thêm thông tin, hãy ghé website www.gpsworld.com.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 152 Hằng số hấp dẫn G hình như không thay đổi theo thời gian. Các thí nghiệm sau cùng cho thấy tốc độ thay đổi ít hơn $1/10^{12}$ mỗi năm. Bạn có thể tưởng tượng ra cách kiểm tra
Câu đố 230 d điều này không?

* *

Có phải sự cảm nhận là chúng ta đang sống trong không gian 3 chiều là do sự hạn chế
Câu đố 231 s của các giác quan không? Ta đã cảm nhận như thế nào?

* *

Bạn có thể ước lượng tác dụng của thuỷ triều lên màu sắc của ánh sáng do một nguyên
Câu đố 232 s tử phát ra không?

* *

Trường hấp dẫn khả hữu mạnh nhất là trường của một hố đen nhỏ. Tuy vậy trường mạnh nhất mà người ta từng quan sát thấy có phần nhỏ hơn. Năm 1998, Zhang và Lamb
Xem 153 đã dùng dữ liệu về tia X phát ra từ một hệ sao đôi để xác định là không-thời gian gần sao neutron kích thước 10 km bị uốn cong tới 30 % của giá trị cực đại khả hữu. Gia tốc hấp
Câu đố 233 ny dẫn tương ứng là bao nhiêu khi giả sử sao neutron có cùng khối lượng như Mặt trời?

* *

Xem 154 Độ lệch của tia sáng làm thay đổi kích thước góc δ của một vật khối lượng M bán kính
Câu đố 234 e r được quan sát từ khoảng cách d. Hiệu ứng này dẫn tới một công thức đẹp đẽ như sau

$$\delta = \arcsin\left(\frac{r\sqrt{1-R_S/d}}{d\sqrt{1-R_S/r}}\right) \quad \text{trong đó} \quad R_S = \frac{2GM}{c^2}\,. \tag{148}$$

Câu đố 235 e Một quan sát viên ở vô cực nhìn thấy bao nhiêu phần trăm của bề mặt Mặt trời? Sau này
Trang 282 ta sẽ xem xét vấn đề này chi tiết hơn.

Trọng lượng là gì?

Không có cách nào để một quan sát viên *đơn lẻ* (và giống như chất điểm) phân biệt tác dụng của lực hấp dẫn với tác dụng của gia tốc. Tính chất này của thiên nhiên làm phát sinh một điều kỳ lạ: các vật thể *rơi* vì mặt đất tăng tốc tiến về phía các vật đó. Do đó, *trọng lượng* của một vật là kết quả của việc mặt đất tăng tốc tiến lên trên và ép vào vật. Đó là nguyên lý tương đương áp dụng vào đời sống hằng ngày. Các vật khi rơi tự do không có trọng lượng với cùng một lý do như vậy.

Chúng ta hãy kiểm tra các con số. Hiển nhiên là mặt đất gia tốc tạo ra trọng lượng cho các vật đặt trên đó. Trọng lượng này tỷ lệ với khối lượng quán tính. Nói cách khác, khối lượng quán tính của một vật giống hệt khối lượng hấp dẫn. Điều này đã thực sự
Xem 155 được quan sát trong các thí nghiệm với độ chính xác rất cao. Roland von Eötvös* đã thực hiện nhiều thí nghiệm có độ chính xác cao như vậy suốt đời mình mà không tìm thấy

* Roland von Eötvös (b. 1848 Budapest, d. 1919 Budapest), vật lý gia Hungary. Ông đã thực hiện nhiều thí nghiệm về lực hấp dẫn với độ chính xác cao; trong các khám phá có việc khám phá ra hiệu ứng mang tên ông. Đại học Budapest cũng mang tên ông.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

điều gì mâu thuẫn. Trong những thí nghiệm này, ông đã dùng đến mối liên hệ giữa khối lượng quán tính là đại lượng xác định lực ly tâm và khối lượng hấp dẫn là đại lượng xác định sự rơi tự do. (Bạn có thể tưởng tượng ra cách mà ông đã dùng để kiểm chứng sự giống nhau của hai loại khối lượng không?) Các thí nghiệm gần đây chứng tỏ rằng hai loại khối lượng chỉ sai biệt không quá 1 phần của 10^{-12}.

Câu đố 236 ny
Xem 155

Tuy vậy, sự bình đẳng của hai loại khối lượng không có gì lạ. Hãy nhớ lại định nghĩa của tỷ số khối lượng là âm của nghịch đảo tỷ số của hai gia tốc, độc lập với nguyên nhân gây ra gia tốc, sẽ nhắc ta một điều là không thể dùng số đo của khối lượng để phân biệt khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn. Như ta đã thấy, hai loại khối lượng bằng nhau theo định nghĩa trong vật lý Galilei và không có gì để bàn luận về vấn đề này. Trọng lượng là một tác dụng riêng của khối lượng.

Quyển I, trang 102
Quyển I, trang 202

Sự bình đẳng của gia tốc và lực hấp dẫn cho phép ta tưởng tượng ra điều sau đây. Hãy tưởng tượng ta bước vào một thang máy để đi xuống tầng dưới. Bạn bấm nút. Lực nâng lên của mặt đất vào thang máy ít hơn vào toà nhà; toà nhà vượt qua thang máy, thang máy lọt ra phía sau. Hơn nữa, vì được nâng lên ít hơn, lúc đầu mọi người trong thang máy cảm thấy nhẹ hơn một chút. Khi tiếp xúc với toà nhà được phục hồi, thang máy tăng tốc để đuổi kịp mặt đất. Do đó chúng ta cảm thấy như đang ở trong một chiếc xe tăng tốc mạnh và chịu một lực đẩy ngược hướng với gia tốc: trong một thời gian ngắn, ta cảm thấy mình nặng hơn, cho đến khi thang máy đến đích.

Tại sao quả táo rơi?

> “Vires acquirit eundo.”
>
> Vergilius*

Một chiếc xe đang tăng tốc thì chẳng bao lâu sau sẽ bắt kịp một vật được ném từ trong xe về phía trước. Với lý do tương tự, mặt đất sẽ bắt kịp một hòn đá được ném lên, vì nó không ngừng tăng tốc hướng lên trên. Nếu bạn thích cách nhìn nhận này, hãy tưởng tượng một trái táo từ trên cây rơi xuống. Khi nó rời cành, nó không còn được cành cây gia tốc lên trên. Trái táo bây giờ có thể tận hưởng cái tĩnh lặng của sự nghỉ ngơi thật sự. Vì sự nhận thức có giới hạn của con người nên ta gọi tình trạng yên nghỉ này là rơi tự do. Không may, mặt đất lạnh lùng tăng tốc đến gần và phụ thuộc vào thời gian trái táo yên nghỉ, Trái đất sẽ đụng vào nó với vận tốc lớn hay nhỏ và dẫn tới việc vật bị biến dạng nhiều hay ít.

Trái táo rơi cũng bảo với ta rằng đừng bối rối với câu phát biểu rằng trọng lực là sự vận hành khác thường của các đồng hồ theo độ cao. Thật vậy, phát biểu này *tương đương* với việc nói rằng mặt đất đang tăng tốc đi lên, như đã bàn luận trên kia.

Lý luận này có thể kéo dài mãi không? Nó vẫn có thể tiếp tục trong một thời gian dài. Việc chứng tỏ rằng bán kính của Trái đất vẫn không đổi, mặc dù bề mặt của nó tăng tốc ra phía bên ngoài ở khắp mọi nơi, cũng là điều lý thú. Ta đã có thể vui đùa với sự tương đương của gia tốc và trọng lực. Tuy vậy, sự tương đương này chỉ hữu ích trong trường hợp chỉ liên quan đến một vật đang tăng tốc. Sự tương đương giữa gia tốc và trọng lực kết thúc ngay khi ta nghiên cứu *hai* vật rơi. Việc nghiên cứu nhiều vật rơi không tránh

Câu đố 237 ny

* ‘Khi đi người ta kiếm được sức mạnh.’ Publius Vergilius Maro (b. 70 BCE Andes, d. 19 BCE Brundisium), từ *Aeneid* 4, 175.

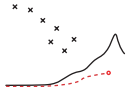
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

khỏi dẫn tới kết luận rằng trọng lực không phải là gia tốc mà là *không-thời gian bị uốn cong*.

Nhiều phương diện của lực hấp dẫn và sự uốn cong có thể hiểu được mà không cần hoặc cần rất ít toán học. Phần kế tiếp sẽ làm nổi bật một số điểm khác nhau giữa Thuyết hấp dẫn vạn vật và Thuyết tương đối tổng quát, để chứng tỏ rằng chỉ có các mô tả của Thuyết tương đối phù hợp với thực nghiệm. Sau đó là việc giới thiệu một vài khái niệm liên quan tới việc đo độ cong, áp dụng vào chuyển động của các vật và không-thời gian. Nếu bạn thấy các lý luận trở nên quá rắc rối khi đọc lần đầu thì hãy bỏ qua để đọc tiếp phần sau. Trong các phần nói về sao, vũ trụ học và hố đen đều có rất ít toán học.

Tóm tắt: mối quan hệ mật thiết giữa tốc độ ánh sáng bất biến và lực hấp dẫn

Khi có mặt của lực hấp dẫn, thời gian phụ thuộc vào độ cao. Tính bất biến của tốc độ ánh sáng sẽ dẫn tới việc không gian và không-thời gian *bị uốn cong* trong mọi miền có lực hấp dẫn tác dụng. Sự uốn cong của không gian có thể hình dung bằng hình ảnh không gian được đan bằng những đường cách đều nhau hay bằng hình ảnh của một tấm nệm. Khi có mặt của lực hấp dẫn, những đường này bị uốn cong. Như vậy khối lượng làm cong không gian, đặc biệt là các vật nặng. Không gian cong gây ảnh hưởng và quyết định đến chuyển động của khối lượng thử và của ánh sáng.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 6

Quỹ đạo mở, ánh sáng bị uốn cong và chân không lắc lư

> Einstein giải thích cho tôi về lý thuyết của ông mỗi ngày, và khi tôi đến, tôi hoàn toàn tin rằng ông đã hiểu lý thuyết đó.
>
> Chaim Weizmann, tổng thống đầu tiên của Israel.

Xem 156

Trước khi giải quyết các chi tiết của Thuyết tương đối tổng quát, ta hãy tìm hiểu sự khác nhau giữa chuyển động của các vật theo Thuyết tương đối tổng quát và theo Thuyết hấp dẫn vạn vật, vì hai cách mô tả này dẫn tới sự khác biệt đáng kể. Vì tính bất biến của tốc độ ánh sáng dẫn tới việc không gian gần các vật bị uốn cong, nên trước tiên ta hãy kiểm tra xem độ cong nhỏ sẽ ảnh hưởng như thế nào tới chuyển động.

Lực hấp dẫn chỉ mạnh khi ở gần chân trời và khi đó khối lượng M và khoảng cách R tuân theo biểu thức

$$\frac{2GM}{Rc^2} \approx 1 \,. \tag{149}$$

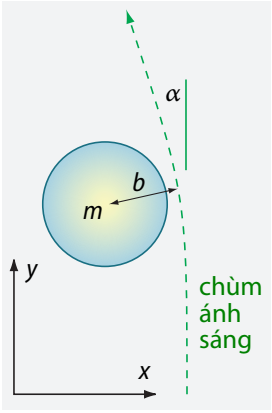
Do đó, lực hấp dẫn chỉ mạnh trong 3 trường hợp: gần hố đen, gần chân trời vũ trụ và lúc hạt có năng lượng cực lớn. Hai trường hợp đầu được tìm hiểu dưới đây, trường hợp cuối sẽ được tìm hiểu vào lúc ta gần kết thúc cuộc thám hiểm. Ngược lại, trong phần lớn các miền của vũ trụ, bao gồm Trái đất và Thái dương hệ, *không* ở gần chân trời; trong các trường hợp này lực hấp dẫn là một tương tác *yếu*. Đây là chủ đề của chương này.

Các trường yếu

Trong đời sống hằng ngày, dù có sự khốc liệt của các dòng thác tiểu hành tinh đang rơi, lực hấp dẫn vẫn yếu hơn lực cực đại rất nhiều. Trên Trái đất, tỷ số $2GM/Rc^2$ chỉ vào khoảng 10^{-9}. Do đó, trong mọi trường hợp thông thường, lực hấp dẫn tương đối tính vẫn có thể xem gần đúng là một trường, nghĩa là, một thế thêm vào không-thời gian phẳng, mặc dù các điều đề cập trên đây là nói về độ cong của không gian.

Trường hợp trường yếu khá thú vị vì tìm hiểu và mô tả chúng rất đơn giản; chỉ cần giải thích sự vận hành khác nhau của các đồng hồ ở độ cao khác nhau. Trường yếu cho phép ta tiếp tục suy nghĩ về lực hấp dẫn như là nguồn của gia tốc và tiện thể để cập đến độ cong của không-thời gian. Tuy vậy, sự thay đổi của thời gian theo độ cao đã tạo ra nhiều hiệu ứng mới chưa từng xảy ra trong Thuyết hấp dẫn vạn vật. Để tìm hiểu các hiệu ứng thú vị này, ta chỉ cần một sự xử lý tương đối tính nhất quán.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 69 Tính toán độ uốn cong của tia sáng do hấp dẫn.

Sự uốn cong ánh sáng và sóng vô tuyến

Lực hấp dẫn ảnh hưởng đến chuyển động của ánh sáng. Đặc biệt, *lực hấp dẫn uốn cong các chùm tia sáng*. Thật vậy, việc phát hiện sự uốn cong của tia sáng Mặt trời đã làm cho
Trang 146 Einstein nổi tiếng. Điều này xảy ra vì góc lệch đo được khác với góc do Thuyết hấp dẫn vạn vật tiên đoán và khẳng định việc Thuyết tương đối tổng quát có tính đến độ cong của không gian.

Việc tính độ uốn cong tia sáng do khối lượng gây ra cũng dễ dàng. Người ta thấy tia sáng bị uốn cong vì quan sát viên *ở xa* nào cũng đo được độ biến thiên của tốc độ ánh sáng *hiệu dụng* v ở gần một vật có khối lượng. (Nếu đo ở vị trí *lân cận* thì dĩ nhiên tốc độ ánh sáng luôn luôn là c.) Hoá ra một quan sát viên ở xa đo được một tốc độ *nhỏ hơn*, vì vậy đối với anh ta, lực hấp dẫn có tác dụng như một môi trường chiết quang. Chỉ cần một ít tưởng tượng cũng thấy rằng hiệu ứng này sẽ *làm tăng* độ cong của tia sáng đi gần một vật có khối lượng đã được Soldner tính được năm 1801 từ Thuyết hấp dẫn vạn vật. Tóm lại, sự uốn cong ánh sáng tương đối tính khác với trường hợp phi tương đối tính.*

Ta hãy tính toán góc lệch. Như thường lệ, ta dùng hệ toạ độ không-thời gian phẳng có không gian vô hạn, như trong Hình 69. Ý tưởng chính là chỉ tính toán đến bậc nhất,
Xem 157 vì giá trị của độ cong rất nhỏ. Góc lệch α, tính đến bậc nhất, chỉ đơn giản là

$$\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial v}{\partial x} \mathrm{d}y \,, \tag{150}$$

ở đây v là tốc độ ánh sáng do quan sát viên ở xa đo được. (Bạn có thể chứng minh điều
Câu đố 238 e này không?) Bước kế tiếp ta dùng metric Schwarzschild bao quanh khối cầu

$$\mathrm{d}\tau^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)\mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{c^2 - \frac{2GM}{r}} - \frac{r^2}{c^2}\mathrm{d}\varphi^2 \tag{151}$$

Trang 175 * Trong ngữ vựng được định nghĩa dưới đây, hiện tượng uốn cong ánh sáng chỉ là hiệu ứng hấp dẫn-điện thuần tuý.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 239 ny

và biến đổi nó sang toạ độ (x, y) bậc nhất. Ta được

$$d\tau^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \left(1 + \frac{2GM}{rc^2}\right) \frac{1}{c^2}(dx^2 + dy^2) \tag{152}$$

mà một lần nữa tính đến bậc nhất, kết quả là

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c \,. \tag{153}$$

Biểu thức này khẳng định điều ta đã biết, cụ thể là người quan sát ở xa thấy ánh sáng *đi chậm lại* khi đến gần một vật. Như vậy ta cũng có thể nói là chiết suất phụ thuộc vào độ cao. Nói cách khác, tốc độ ánh sáng *địa phương* không đổi sẽ dẫn tới sự giảm tốc *tổng thể*.

Câu đố 240 ny

Thay kết quả cuối cùng vào biểu thức (150) và dùng một phép thế khéo léo, ta kiếm được góc lệch α

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2}\frac{1}{b} \tag{154}$$

ở đây khoảng cách b được gọi là *tham số đụng* của chùm ánh sáng tới.

▷ Góc lệch α của tia sáng do Thuyết tương đối tổng quát tiên đoán bằng *2 lần* kết quả của Thuyết hấp dẫn vạn vật.

Quyển I, trang 201

Đối với chùm tia sát trên Mặt trời, góc lệch có giá trị nổi tiếng là $1.75'' = 8.5\,\mu\text{rad}$. Giá trị nhỏ này được đoàn thám hiểm năm 1919 khẳng định một cách ngoạn mục. (Các thiên văn gia đã đo góc lệch này như thế nào?) Kết quả này chứng tỏ rằng *Thuyết hấp dẫn vạn vật sai*. Từ đó đến nay, thí nghiệm này đã được lặp lại hàng trăm lần, trong đó có cả các lần của các thiên văn gia tài tử.

Câu đố 241 s

Thật ra Einstein rất may mắn. Hai đoàn thám hiểm được tổ chức để đo giá trị này trước đó đã thất bại. Năm 1912, người ta không thể thu thập dữ liệu vì trời mưa và năm 1914 ở Crimea, các khoa học gia bị bắt giam (do bị nhầm) là gián điệp, khi Thế chiến thứ nhất bắt đầu. Năm 1911, Einstein đã công bố một tính toán *sai*, cho kết quả giống Soldner tức bằng nửa giá trị đúng; chỉ đến năm 1915, khi ông hoàn thành Thuyết tương đối tổng quát, ông mới tìm ra kết quả đúng. Do đó Einstein trở nên nổi tiếng chỉ vì sự thất bại của hai đoàn thám hiểm đầu tiên xảy ra trước khi ông công bố kết quả đúng!

Xem 158

Quyển I, trang 201

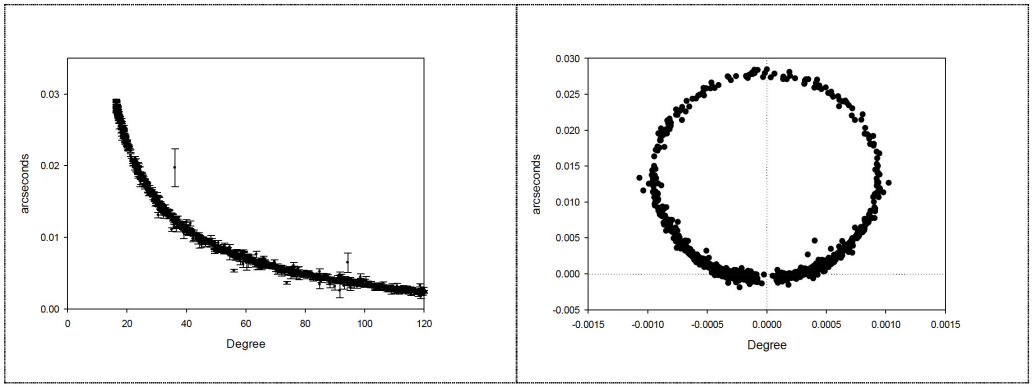
Đối với các thí nghiệm chính xác cao quanh Mặt trời, nếu đo độ cong của *sóng vô tuyến* thì hiệu quả hơn, vì chúng ít gặp vấn đề khi đi xuyên qua nhật hoa. Từ đó đến nay, hàng tá các thí nghiệm độc lập đã được thực hiện, sử dụng nguồn sóng vô tuyến trên bầu trời nằm trên đường đi của Mặt trời. Chúng đã khẳng định tiên đoán của Thuyết tương đối tổng quát với sai số cỡ vài phần trăm.

Xem 150, Xem 127 Xem 128

?

Một thí dụ điển hình cho một phép đo như vậy được trình bày trong hình Hình 70. Đường cong bên trái cho thấy những giá trị đo được của công thức (**??**); ký đồ bên phải cho thấy cách di chuyển của hình ảnh của nguồn vô tuyến trên bầu trời. Cũng cần nói thêm là ngày nay người ta có thể đo được các góc nhỏ nhờ phương pháp đo giao thoa với đường cơ sở rất dài.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



? HÌNH 70 Sự thay đổi vị trí hình ảnh của nguồn sóng vô tuyến 0552+398 trong thời gian 10 năm. Hình trái: Độ lệch thay đổi theo khoảng cách góc (tham số đụng) đến Mặt trời; hình phải: sự thay đổi vị trí hình ảnh quasar trên bầu trời từ điểm (0,0), là vị trí khi quasar ở xa Mặt trời (tham số đụng lớn), đến vị trí khi quasar gần Mặt trời (tham số đụng nhỏ).

Người ta cũng quan sát được sự uốn cong các chùm tia sóng điện từ gần Mộc tinh, gần các ngôi sao, gần nhiều thiên hà và các đám thiên hà. Đối với Trái đất, góc lệch lớn nhất là 3 nrad, quá nhỏ nên chưa thể đo được, mặc dù điều này có thể khả thi trong tương lai gần. Có một cơ hội để dò ra giá trị này như Andrew Gould đề nghị là nếu dữ liệu của vệ tinh Hipparcos, ghi lại những hình ảnh chính xác của bầu trời đêm trong nhiều năm, được phân tích cẩn thận trong tương lai.

Trang 258

Sự uốn cong của ánh sáng cũng khẳng định rằng trong không gian cong thì tổng các góc trong của một tam giác không bằng π (2 góc vuông) như người ta đã tiên đoán. Độ cong mang dấu gì?

Trang 194

Câu đố 242 e

Sự trễ của thời gian

Việc tính toán độ lệch của ánh sáng cho thấy đối với các quan sát viên ở xa, khi đến gần các vật thì ánh sáng đi chậm lại. Tốc độ ánh sáng *địa phương* không đổi dẫn đến việc tốc độ ánh sáng *tổng thể* phải giảm đi. Nếu không thì nó sẽ lớn hơn c đối với các quan sát viên ở gần các vật có khối lượng![*]

▷ Khối lượng là nguyên nhân gây ra *sự trễ thời gian* của các sóng điện từ đi ngang qua nó.

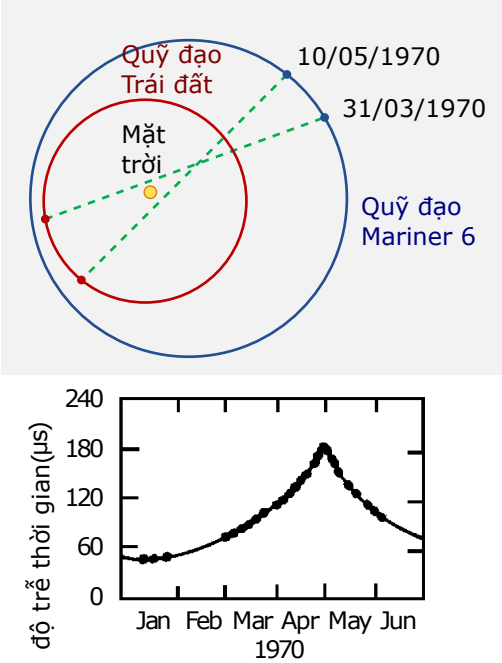
Năm 1964, Irwin Shapiro đã có ý muốn đo hiệu ứng này. Ông đã đề nghị hai phương pháp. Cách thứ nhất là gởi các xung radar đến Kim tinh và đo thời gian cần thiết để tia phản xạ trở lại Trái đất. Nếu tín hiệu đi gần Mặt trời nó sẽ bị trễ. Cách thứ hai là sử dụng một máy thăm dò không gian liên lạc với Trái đất.

Xem 159

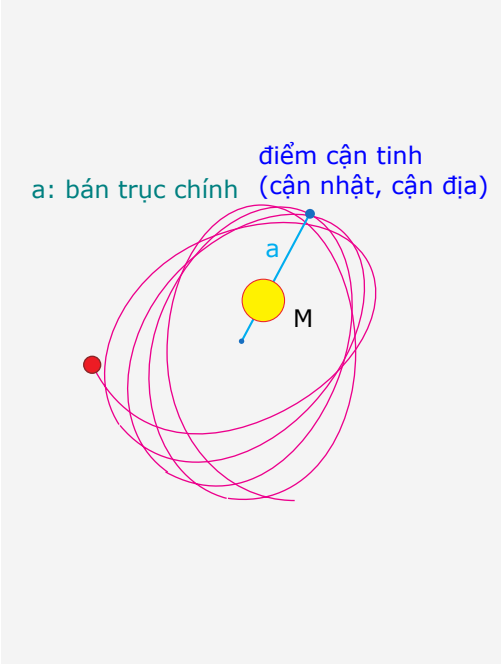
* Một bài tập thú vị là chứng tỏ rằng việc làm lệch hướng các hạt *chậm* sẽ cho kết quả của Soldner nhưng khi tốc độ tăng giá trị của độ lệch tăng lên hai lần giá trị đó. Trong mọi trường hợp, chuyển động quay của vật được bỏ qua. Giống như tác dụng kéo theo của hệ quy chiếu, chuyển động quay cũng làm thay đổi góc lệch; tuy vậy, trong mọi trường hợp nghiên cứu cho đến nay, ảnh hưởng của nó nằm dưới ngưỡng bị phát hiện.

Câu đố 243 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 71 Sự trễ của thời gian trong các tín hiệu vô tuyến – một trong những thí nghiệm của Irwin Shapiro.



HÌNH 72 Quỹ đạo đi vòng quanh một vật trung tâm trong Thuyết tương đối tổng quát.

Xem 160

Kết quả của thí nghiệm 1 được công bố năm 1968 đã trực tiếp khẳng định các tiên đoán của Thuyết tương đối tổng quát trong phạm vi sai số thí nghiệm. Mọi thí nghiệm kiểm chứng cùng loại sau này, giống như thí nghiệm trong Hình 71, cũng đã khẳng định điều tiên đoán trong phạm vi sai số thí nghiệm cỡ một phần ngàn. Người ta cũng đã đo

Xem 161

được độ trễ trong các pulsar đôi, vì có một vài hệ thống như vậy trên bầu trời có đường ngắm gần như nằm đúng trong mặt phẳng quỹ đạo.

Tóm lại, sự hấp dẫn tương đối tính cũng đã được khẳng định nhờ các thí nghiệm đo thời gian trễ; trái lại, Thuyết hấp dẫn vạn vật không tiên đoán được các hiệu ứng như vậy. Các tính toán đơn giản trình bày ở đây dẫn đến một thách đố: có thể mô tả *đầy đủ* Thuyết tương đối tổng quát – lực hấp dẫn trong các trường *mạnh* – là sự thay đổi tốc độ

Câu đố 244 ny

ánh sáng theo vị trí và thời gian do khối lượng và năng lượng gây ra hay không?

Hiệu ứng tương đối tính trên các quỹ đạo

Thiên văn học cho phép tiến hành các phép đo rất chính xác các chuyển động đã biết. Đặc biệt là chuyển động của các hành tinh. Vì vậy, đầu tiên Einstein đã thử áp dụng các kết quả nghiên cứu về hấp dẫn tương đối tính vào chuyển động của các hành tinh. Ông đã tìm ra sự sai lệch giữa các tiên đoán của Thuyết hấp dẫn vạn vật và chuyển động của các hành tinh. Trong số đó có *sự tiến động của điểm cận nhật của Thuỷ tinh*. Hiệu ứng được trình bày trong Hình 72. Sau này Einstein đã nói rằng khi ông khám phá ra tính toán của mình về sự tiến động của Thuỷ tinh phù hợp với sự quan trắc là khoảnh khắc hạnh phúc nhất đời ông.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Việc tính toán không khó. Trong Thuyết hấp dẫn vạn vật, các quỹ đạo được xác định bằng cách đặt $a_{\text{grav}} = a_{\text{centri}}$, nói cách khác, bằng cách cho $GM/r^2 = \omega^2 r$ rồi tính năng lượng và moment động lượng. Khối lượng của vệ tinh không xuất hiện một cách tường minh. Trong Thuyết tương đối tổng quát, khối lượng của vệ tinh được làm cho biến mất bằng cách điều chỉnh tỷ lệ của năng lượng và moment động lượng thành $e = E/c^2 m$ và $j = J/m$. Kế tiếp, ta thêm độ cong không gian. Ta dùng metric Schwarzschild (151) đã đề cập ở trên để suy ra điều kiện ban đầu của năng lượng e, cùng với sự bảo toàn của nó, để đưa tới hệ thức giữa thời gian riêng τ và thời gian t ở vô cực:

Xem 127, Xem 128
Trang 149
Câu đố 245 e

$$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\tau} = \frac{e}{1 - 2GM/rc^2} \,, \tag{155}$$

trong khi điều kiện ban đầu của moment động lượng j và sự bảo toàn của nó bao hàm hệ thức

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}\tau} = \frac{j}{r^2} \,. \tag{156}$$

Những mối liên hệ này đúng cho mọi hạt bất kỳ, bất kể khối lượng m. Đưa tất cả vào metric Schwarzschild, ta thấy rằng chuyển động của một hạt tuân theo hệ thức

$$\left(\frac{\mathrm{d}r}{c\mathrm{d}\tau}\right)^2 + V^2(j, r) = e^2 \tag{157}$$

trong đó thế hiệu dụng V được cho bởi

$$V^2(J, r) = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)\left(1 + \frac{j^2}{r^2c^2}\right) \,. \tag{158}$$

Biểu thức hơi khác với biểu thức trong Thuyết hấp dẫn vạn vật và bạn có thể kiểm tra lại điều đó. Bây giờ ta cần tìm $r(\varphi)$. Đối với quỹ đạo *tròn* ta có *hai* khả năng

Câu đố 246 e

$$r_\pm = \frac{6GM/c^2}{1 \pm \sqrt{1 - 12(\frac{GM}{cj})^2}} \tag{159}$$

Trong đó dấu trừ ứng với một quỹ đạo ổn định còn dấu cộng cho quỹ đạo không ổn định. Nếu $cj/GM < 2\sqrt{3}$, không có quỹ đạo ổn định; vật sẽ đụng vào mặt hành tinh hay bị hố đen nuốt chửng. Quỹ đạo tròn *chỉ* ổn định khi moment động lượng j lớn hơn $2\sqrt{3}GM/c$. Như vậy, ta thấy trong Thuyết tương đối tổng quát, tương phản với Thuyết hấp dẫn vạn vật, có một quỹ đạo tròn ổn định *nhỏ nhất*. Bán kính của quỹ đạo tròn ổn định nhỏ nhất là $6GM/c^2 = 3R_S$.

Còn với trường hợp quỹ đạo *ellipse* thì sao? Thay $u = 1/r$ vào (157) và lấy vi phân, phương trình $u(\varphi)$ trở thành

$$u' + u = \frac{GM}{j^2} + \frac{3GM}{c^2}u^2 \,. \tag{160}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nếu không có phần hiệu chỉnh phi tuyến bên vế phải do Thuyết tương đối tổng quát,
Câu đố 247 e các lời giải là *các thiết diện conic* nổi tiếng

$$u_0(\varphi) = \frac{GM}{j^2}(1 + \varepsilon \cos\varphi) \,, \tag{161}$$

tức là ellipse, parabol hay hyperbol. Loại thiết diện conic phụ thuộc vào giá trị của tham số ε, thường được gọi là *tâm sai*. Ta đã biết các dạng đường cong này từ Thuyết hấp dẫn
Quyển I, trang 194 vạn vật. Bây giờ, Thuyết tương đối tổng quát đưa thêm số hạng phi tuyến vào vế phải của phương trình (160). Như vậy, lời giải không còn là các thiết diện conic nữa; tuy vậy,
Câu đố 248 e vì sự hiệu chỉnh nhỏ, công thức

$$u_1(\varphi) = \frac{GM}{j^2}\left(1 + \varepsilon \cos(\varphi - \frac{3G^2M^2}{j^2c^2}\varphi)\right) \,. \tag{162}$$

là một lời giải gần đúng khá tốt.

Như vậy các hyperbol và parabol của Thuyết hấp dẫn vạn vật hơi bị biến dạng.

▷ Thay vì các quỹ đạo ellipse, Thuyết tương đối tổng quát dẫn tới kết quả là các đường rosetta nổi tiếng như ta thấy trong Hình 72.

Quỹ đạo này có một đặc điểm chủ yếu là sự dịch chuyển của điểm cận tinh. *Điểm cận tinh*, hay *điểm cận nhật* trong trường hợp Mặt trời, là điểm mà vật trên quỹ đạo đến *gần*
Câu đố 249 e *với vật trung tâm nhất*. Điểm cận tinh quay quanh vật trung tâm một góc

$$\alpha \approx 6\pi \frac{GM}{a(1-\varepsilon^2)c^2} \tag{163}$$

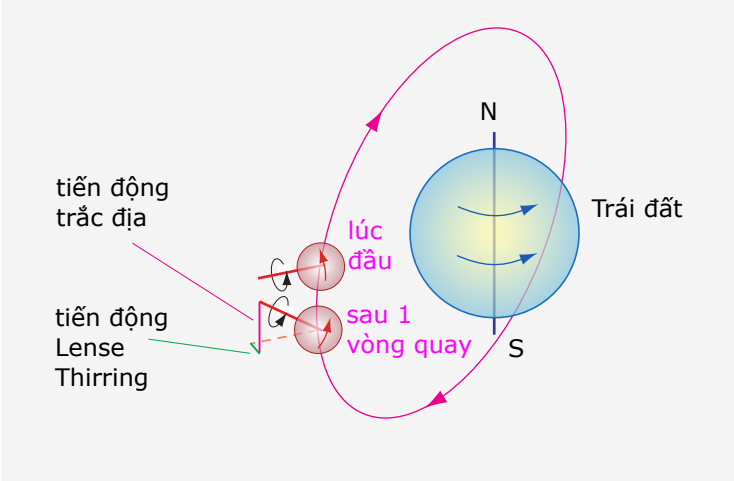
sau mỗi vòng quay, trong đó a là *bán trục chính*. Đối với Thuỷ tinh, giá trị này là $43''$= 0.21 mrad cho mỗi thế kỷ. Vào khoảng năm 1900, đây là hiệu ứng duy nhất đã biết nhưng chưa giải thích được bằng Thuyết hấp dẫn vạn vật; khi các tính toán của Einstein cho đúng giá trị này, trái tim ông đã tràn ngập niềm vui trong nhiều ngày.

Để bảo đảm thực nghiệm và tính toán đồng nhất với nhau, ta phải loại trừ các hiệu ứng khác dẫn tới đường rosetta. Có một thời, người ta nghĩ rằng moment tứ cực của Mặt trời là nguyên nhân gây ra hiệu ứng này; các phép đo sau đó đã loại bỏ khả năng này.

Trong thế kỷ qua, người ta cũng đã đo sự dịch chuyển điểm cận nhật của quỹ đạo quanh Mặt trời của Icarus, Kim tinh và Hoả tinh, cũng như của nhiều hệ sao đôi. Trong
Xem 161 pulsar đôi, độ dịch chuyển của điểm cận tinh có thể lớn cỡ nhiều độ mỗi năm. Trong mọi trường hợp, biểu thức (163) mô tả chuyển động đều nằm trong phạm vi sai số thí nghiệm.

Ta cần lưu ý rằng ngay cả quỹ đạo rosetta cũng không thực sự ổn định, do sự phát xạ của sóng hấp dẫn. Nhưng trong Thái dương hệ, công suất mất đi do hiện tượng này hoàn toàn có thể bỏ qua cho dù trải qua thời gian hàng ngàn triệu năm, vì như ta đã thấy
Trang 184 ở trên, đường rosetta vẫn còn mô tả hoàn hảo những gì ta đã biết.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 73 Hiệu ứng trắc địa.

Hiệu ứng trắc địa

Lực hấp dẫn tương đối tính còn có thêm một hiệu ứng trên các vật chuyển động trên quỹ đạo đã được Willem de Sitter tiên đoán năm 1916.* Khi một vật *nhọn* chuyển động quanh một khối lượng trung tâm m cách vật một khoảng r, *hướng* của đầu nhọn *sẽ thay đổi* sau khi nó đi đủ một vòng. Hiệu ứng này, được trình bày trong Hình 73, chỉ có trong Thuyết tương đối tổng quát. Góc α mô tả sự đổi hướng sau một vòng được cho bởi công thức

$$\alpha = 2\pi\left(1 - \sqrt{1 - \frac{3Gm}{rc^2}}\right) \approx \frac{3\pi Gm}{rc^2} \,. \tag{164}$$

Câu đố 250 e

Sự thay đổi góc này được gọi là *hiệu ứng trắc địa*. Nó là hệ quả của việc tách thành hai trường hấp dẫn điện và hấp dẫn từ. Điều hiển nhiên là nó không có trong Thuyết hấp dẫn vạn vật.

Trong trường hợp vật có thêm chuyển động quay riêng, thí dụ như một vệ tinh tự quay quanh mình, hiệu ứng trắc địa sẽ tạo ra *sự tiến động trắc địa* của trục quay riêng này. Hiệu ứng này có thể so sánh với liên kết spin–quỹ đạo trong lý thuyết nguyên tử. (Hiệu ứng Thirring–Lense được đề cập dưới đây thì tương tự như liên kết spin–spin.)

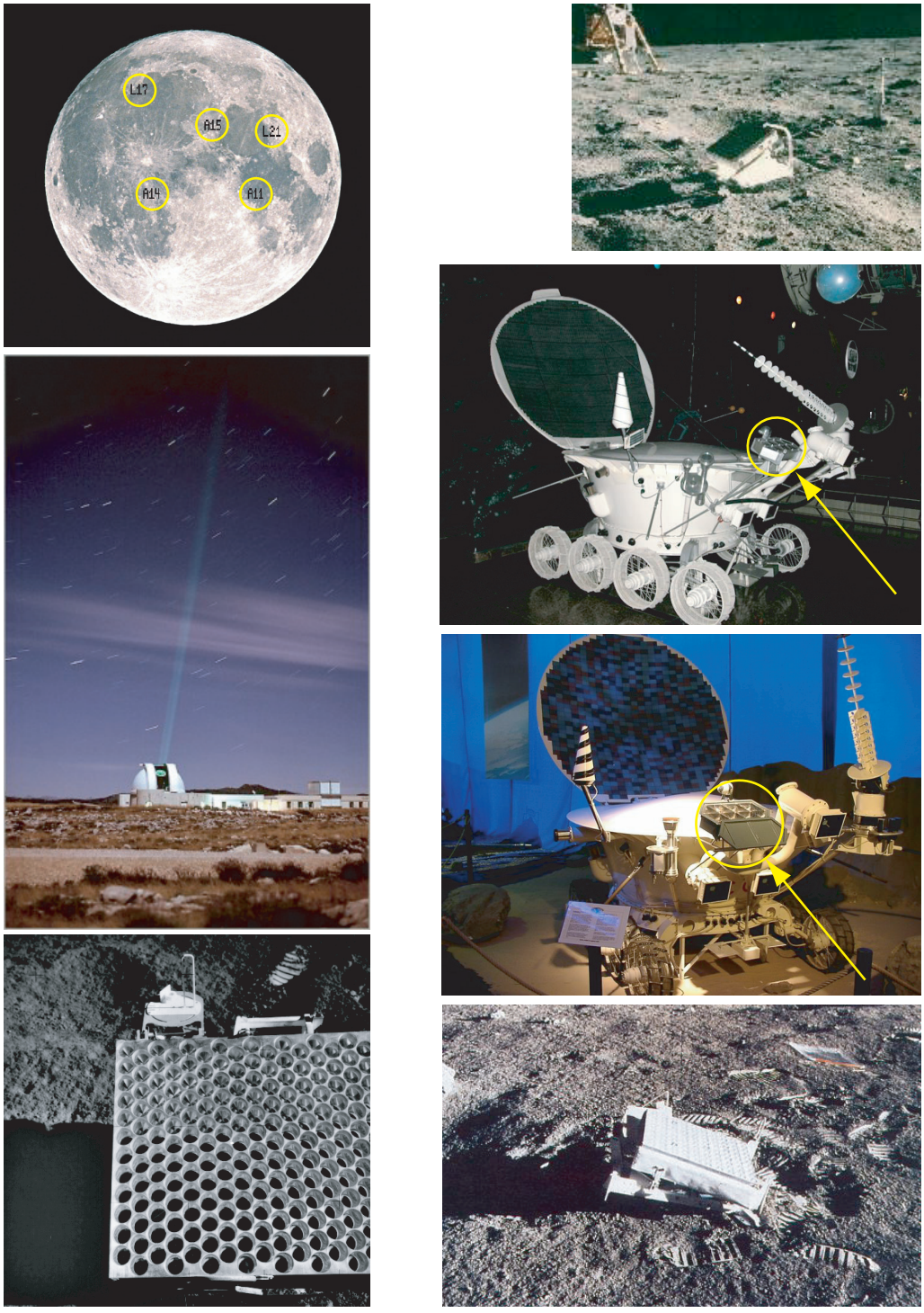
Khi Willem de Sitter tiên đoán hiệu ứng trắc địa, hay sự tiến động trắc địa, ông đã đề nghị cách để phát hiện sự đổi hướng của trục quay riêng của hệ Trái đất–Mặt trăng khi chúng chuyển động quanh Mặt trời. Hiệu ứng này rất nhỏ; đối với trục quay của Mặt trăng góc tiến động vào khoảng 0.019 arcsec mỗi năm. Hiệu ứng này trên hệ Trái đất–Mặt trăng đã được một nhóm khoa học gia Ý đo lần đầu tiên vào năm 1987, bằng một tổ hợp Phép đo giao thoa-vô tuyến và Phép định tầm Mặt trăng, sử dụng hệ thống Cat's-eyes (mắt mèo), như trong Hình 74, đã được các phi thuyền Lunokhod và Apollo lắp đặt trên Mặt trăng. Năm 2005, hiệu ứng trắc địa đã được khẳng định với độ chính xác cao nhờ sự trợ giúp của một vệ tinh nhân tạo bay quanh Trái đất mang theo nhiều con quay hồi chuyển chính xác.

Xem 162

Xem 167

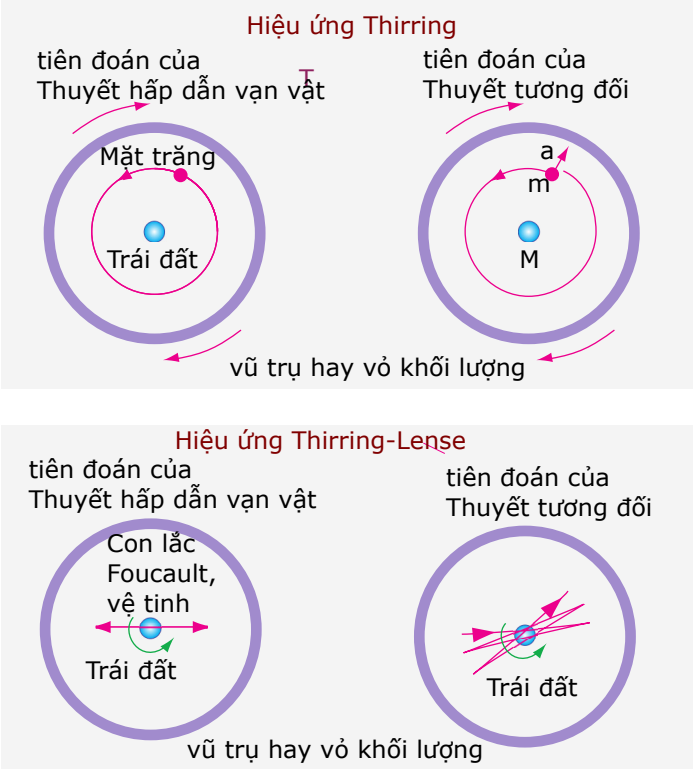
* Willem de Sitter (b. 1872 Sneek, d. 1934 Leiden) là toán gia, vật lý gia và thiên văn gia.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 74 Các gương phản xạ Mặt trăng do phi thuyền Apollo 11 lắp đặt (hình trên bên phải), trên hai chiếc Lunokhods (hình bên phải),của phi thuyền Apollo 14 (hình dưới bên phải) và của phi thuyền Apollo 15 (hình dưới bên trái), vị trí của các gương trên Mặt trăng (hình trên bên trái) và kính thiên văn thực hiện việc đo khoảng cách bằng laser (© NASA, Wikimedia, Observatoire de la Côte d'Azur).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 75 Hiệu ứng Thirring và hiệu ứng Thirring–Lense.

Thoạt nhìn, sự tiến động trắc địa giống như sự tiến động Thomas trong Thuyết tương
Trang 63 đối đặc biệt. Trong cả hai trường hợp, sự vận chuyển theo một đường cong đóng đều đưa tới kết quả là sự thay đổi hướng ban đầu. Tuy vậy, khi xem xét cẩn thận ta thấy rằng tiến động Thomas có thể *cộng thêm* vào tiến động trắc địa bằng cách áp dụng một số tương tác phụ, phi hấp dẫn và vì vậy sự tương tự rất mờ nhạt.

Các hiệu ứng Thirring

Năm 1918, vật lý gia Áo Hans Thirring đã công bố hai điều tiên đoán mới, đơn giản và đẹp đẽ về chuyển động, trong đó có một công bố chung với cộng sự của ông là Josef Lense. Không có chuyển động nào xuất hiện trong Thuyết hấp dẫn vạn vật, nhưng cả
Xem 163, Xem 164 hai đều có mặt trong Thuyết tương đối tổng quát. Hình 75 minh hoạ các tiên đoán này.

Thí dụ đầu tiên, ngày nay được gọi là *hiệu ứng Thirring*, tiên đoán về các gia tốc ly tâm và gia tốc Coriolis của các vật nằm trong một vỏ khối lượng đang quay. Thirring đã chứng tỏ rằng nếu một vỏ khối lượng đóng quay, các vật bên trong nó sẽ bị hút về phía lớp vỏ. Hiệu ứng này rất nhỏ; tuy vậy, tiên đoán này tương phản rõ ràng với tiên đoán của Thuyết hấp dẫn vạn vật, là vỏ khối lượng cầu – dù quay hay không – cũng không tác dụng gì lên các vật bên trong nó. Bạn có thể giải thích hiệu ứng này bằng cách dùng
Câu đố 251 e hình vẽ và sự tương tự với tấm nệm không?

Hiệu ứng thứ nhì, *Thirring–Lense*,* nổi tiếng hơn. Thuyết tương đối tổng quát tiên

* Mặc dù thứ tự các tác giả là Lense và Thirring, nhưng theo thông lệ (nhưng không phổ biến) để nhấn

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 76 Các vệ tinh LAGEOS: các quả cầu kim loại có đường kính 60 cm, khối lượng 407 kg, được bao bọc bằng 426 gương phản xạ (courtesy NASA).

đoán rằng một con lắc Foucault dao động, hay một vệ tinh bay quanh Trái đất trên một quỹ đạo địa cực, không ở yên trong một mặt phẳng cố định đối với phần còn lại của vũ trụ, mà sẽ bị Trái đất kéo dịch đi một chút. *Sự kéo theo hệ quy chiếu*, cũng là tên hiệu ứng, xuất hiện vì Trái đất trong chân không hành xử giống như một trái banh lăn trong một tấm nệm đầy bọt. Khi trái banh hay một vỏ cầu lăn trong một đám bọt xốp, nó sẽ kéo một phần bọt đi theo nó. Tương tự như vậy, Trái đất kéo chân không đi cùng với nó, do đó sẽ làm quay mặt phẳng dao động của con lắc. Với cùng một lý do, chuyển động quay của Trái đất sẽ làm quay mặt phẳng quỹ đạo của vệ tinh.

Hiệu ứng Thirring–Lense, hay hiệu ứng kéo theo hệ quy chiếu, rất nhỏ. Một nhóm khoa học gia Ý, đứng đầu là Ignazio Ciufolini đã đo hiệu ứng này lần đầu tiên vào năm 1998 và những năm sau đó cho tới 2004. Nhóm theo dõi chuyển động của hai vệ tinh nhân tạo đặc biệt – như trong Hình 76 – chỉ gồm một thân bằng thép và một số 'Mắt mèo'. Nhóm đã đo chuyển động của vệ tinh bay quanh Trái đất với độ chính xác rất cao, bằng cách dùng các xung laser được phản xạ. Phương pháp này giúp cho thí nghiệm tương đối ít tốn kém và nhanh. Không may, kích cỡ của các hiệu ứng hệ thống và nhiều lý do khác làm cho người ta không thể tin vào các kết quả đã được công bố.

Xem 165
Xem 166

Cho tới nay, chỉ còn một nhóm cố gắng làm các thí nghiệm chung quanh Trái đất. Vệ tinh dùng cho thí nghiệm có tên là Gravity Probe B đã được đưa vào quỹ đạo năm 2005, sau hơn 30 năm hoạch định. Các vệ tinh này cực kỳ phức tạp và mang theo các quả cầu siêu dẫn quay rất nhanh. Mặc dù có nhiều hệ thống bị phá vỡ, năm 2009 thí nghiệm đã khẳng định là có sự kéo theo hệ quy chiếu chung quanh Trái đất. Các thí nghiệm khẳng định những tiên đoán của Thuyết tương đối tổng quát chiếm khoảng 25 %.

Xem 167

Trong thời gian đó, người ta cũng đã đo được hiệu ứng kéo theo hệ quy chiếu trong các hệ thiên văn khác nhau. Sự khẳng định rõ nhất đã đến từ các pulsar. Pulsar phát ra các xung vô tuyến đều đặn sau mỗi ms, với độ chính xác cực cao. Bằng cách đo chính xác thời điểm khi các xung đến Trái đất, người ta có thể suy ra các thông tin về sự chuyển động của các ngôi sao này và khẳng định rằng các hiệu ứng tinh vi như vậy đã thực sự xảy ra.

Xem 168

mạnh ý tưởng là của Hans Thirring người ta đặt tên ông trước.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Hấp dẫn từ luận

*

Sự kéo theo hệ quy chiếu, hiệu ứng trắc địa và hiệu ứng Thirring có thể xem như các trường hợp đặc biệt của *Hấp dẫn từ luận*. (Ta sẽ chứng minh sự liên hệ đó dưới đây.) Cách tiếp cận với lực hấp dẫn này đã được Holzmüller và Tisserand tiến hành trong thế kỷ 19 trước khi Thuyết tương đối tổng quát được khám phá rất lâu. Cách tiếp cận này lại trở nên phổ biến trong các năm gần đây vì nó dễ hiểu. Như đã đề cập ở trên, việc bàn về *trường* hấp dẫn luôn luôn có tính chất gần đúng. Trong trường hợp lực hấp dẫn yếu, sự gần đúng rất tốt. Nhiều hiệu ứng tương đối tính có thể được mô tả theo trường hấp dẫn, không cần dùng khái niệm độ cong không gian hay tensor metric. Thay vì mô tả tấm nệm không-thời gian đầy đủ, mô hình trường hấp dẫn chỉ mô tả sự sai lệch của tấm nệm khỏi trạng thái phẳng, bằng cách xem độ sai lệch là một thực thể riêng rẽ, được gọi là trường hấp dẫn. Nhưng đâu là cách chính xác, theo kiểu tương đối, dùng để mô tả trường hấp dẫn này?

Xem 169

Ta có thể so sánh với môn Điện từ học. Trong việc mô tả của Điện động lực học tương đối tính, điện từ trường có một thành phần điện và một thành phần từ. Điện trường chịu trách nhiệm cho lực Coulomb bình phương nghịch đảo. Tương tự, trong mô tả tương đối tính của lực hấp dẫn (yếu),** trường hấp dẫn có một thành phần hấp dẫn điện, một thành phần hấp dẫn từ. Trường hấp dẫn điện chịu trách nhiệm cho gia tốc của lực hấp dẫn bình phương nghịch đảo; cái mà ta gọi là trường hấp dẫn thông thường chỉ là phần hấp dẫn điện của trường hấp dẫn (yếu) tương đối tính toàn phần.

Quyển III, trang 53

Xem 170, Xem 171

Còn trường hấp dẫn từ là gì? Trong Điện động lực học, điện tích sinh ra điện trường, và một điện tích *chuyển động*, tức là *dòng điện*, sinh ra từ trường. Tương tự, trong trường hấp dẫn yếu tương đối tính, năng-khối lượng sinh ra trường hấp dẫn điện, và năng-khối lượng *chuyển động* sinh ra trường hấp dẫn từ. Nói cách khác, sự kéo theo hệ quy chiếu là do hiệu ứng hấp dẫn từ và do *các dòng* khối lượng.

Trong trường hợp Điện từ học, sự phân biệt giữa từ trường và điện trường phụ thuộc vào quan sát viên; mỗi trường đều có thể biến đổi (một phần) thành trường kia. Điều tương tự cũng xảy ra cho lực hấp dẫn. Điện từ học đã cung cấp một chỉ dẫn tốt về cách hành xử của hai loại trường hấp dẫn; cách hiểu trực giác này có thể áp dụng cho lực hấp dẫn. Trong Điện động lực học, chuyển động $\boldsymbol{x}(t)$ của hạt mang điện được mô tả bởi phương trình Lorentz

Xem 170

Quyển III, trang 47

$$m\ddot{\boldsymbol{x}} = q\boldsymbol{E} + q\dot{\boldsymbol{x}} \times \boldsymbol{B} \,, \tag{165}$$

trong đó dấu chấm ký hiệu cho đạo hàm theo thời gian. Nói cách khác, độ biến thiên của *tốc độ* $\ddot{\boldsymbol{x}}$ là do điện trường $\boldsymbol{E}$, trong khi từ trường $\boldsymbol{B}$ gây ra sự đổi *hướng* của vận tốc, nhưng không thay đổi độ lớn của tốc độ. Cả hai sự thay đổi đều phụ thuộc vào giá trị của điện tích q. Trong trường hợp lực hấp dẫn biểu thức này trở thành

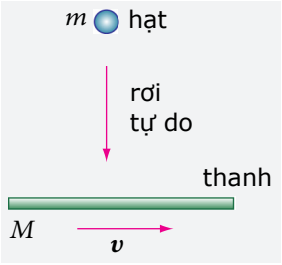
$$m\ddot{\boldsymbol{x}} = m\boldsymbol{G} + m\dot{\boldsymbol{x}} \times \boldsymbol{H} \,. \tag{166}$$

Khối lượng thay thế vai trò của điện tích. Trường hấp dẫn điện $\boldsymbol{G}$ – mà ta đơn giản gọi là *trường hấp dẫn* thông thường, thay thế vai trò của điện trường – và trường hấp dẫn từ

* Độc giả có thể bỏ qua phần này trong lần đọc đầu tiên.

** Sự gần đúng đòi hỏi vận tốc nhỏ, trường yếu, phân bố của năng–khối lượng phải dừng và định xứ.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 77 Tính xác thực của Hấp dẫn từ luận.

H thay thế vai trò của từ trường. Trong biểu thức dành cho chuyển động này, ta đã biết trường hấp dẫn điện ***G***; được cho bởi

$$\boldsymbol{G} = \nabla\varphi = \nabla\frac{GM}{r} = -\frac{GM\boldsymbol{x}}{r^3} \,. \tag{167}$$

Như thường lệ, đại lượng φ là thế (vô hướng). Trường ***G*** là trường hấp dẫn thông thường trong Thuyết hấp dẫn vạn vật, do khối lượng sinh ra và có thứ nguyên của gia tốc. Khối lượng là nguồn của trường hấp dẫn điện. Trường hấp dẫn điện tuân theo công thức $\nabla\boldsymbol{G} = -4\pi G\rho$, trong đó ρ là mật độ khối. *Tĩnh* trường ***G*** không có xoáy; nó tuân theo công thức $\nabla \times \boldsymbol{G} = 0$.

Người ta dễ dàng chứng minh được là nếu trường hấp dẫn *điện* hiện hữu, Thuyết tương đối cần các trường hấp dẫn *từ* cũng phải hiện hữu. Trường hấp dẫn từ xuất hiện khi ta đổi từ quan sát viên đứng yên sang quan sát viên chuyển động. (Ta sẽ dùng lý luận giống như trong Điện động lực học.) Một hạt rơi vuông góc và hướng về phía một cây gậy dài vô hạn như được minh hoạ trong Hình 77. Một quan sát viên đứng yên đối với cây gậy mô tả toàn bộ hiện tượng chỉ bằng một mình lực hấp dẫn điện. Một quan sát viên thứ hai, chuyển động dọc theo cây gậy với tốc độ không đổi, quan sát thấy động lượng của hạt *dọc theo gậy* cũng tăng lên. Như vậy quan sát viên này không chỉ đo trường hấp dẫn điện, mà còn đo trường hấp dẫn từ. Thật vậy, một vật chuyển động với vận tốc ***v*** sinh ra một gia tốc 3 chiều hấp dẫn từ, trên khối lượng thử m được cho bởi công thức

Xem 172

Quyển III, trang 53

$$m\boldsymbol{a} = m\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{H} \tag{168}$$

trong đó, *giống như* trong Điện động lực học, tĩnh *trường hấp dẫn từ* ***H*** tuân theo công thức

Câu đố 252 ny

$$\boldsymbol{H} = 16\pi N\rho\boldsymbol{v} \tag{169}$$

ở đây ρ là mật độ khối của trường nguồn và N là một hằng số tỷ lệ. Trong thiên nhiên, không có nguồn của trường hấp dẫn từ; nó tuân theo công thức $\nabla\boldsymbol{H} = 0$. Trường hấp dẫn từ có thứ nguyên là [1/s], giống như vận tốc góc.

Câu đố 253 ny

Dùng Hình 77 để tính toán, ta tìm được hằng số tỷ lệ N theo công thức

$$N = \frac{G}{c^2} = 7.4 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{m/kg}\,, \tag{170}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

một giá trị cực nhỏ. Như vậy ta thấy rằng giống như trường hợp của điện động lực, trường hấp dẫn từ yếu hơn trường hấp dẫn điện c^2 lần. Khó mà quan sát được nó. Thêm một điều nữa làm cho việc quan sát trường hấp dẫn từ càng khó hơn. Trái với điện từ trường, trong trường hợp lực hấp dẫn không có cách để quan sát trường hấp dẫn từ *thuần tuý* (Tại sao?); nó luôn luôn hoà trộn với trường hấp dẫn điện thông thường. Vì những lý do này, tác dụng hấp dẫn từ chỉ được đo lần đầu tiên vào những năm 1990s. Nói cách khác, lực hấp dẫn vạn vật là trường yếu gần đúng của Thuyết tương đối tổng quát, nảy sinh khi mọi tác dụng hấp dẫn từ không đáng kể.

Câu đố 254 s

Tóm lại, *nếu một vật di chuyển, nó cũng sinh ra một trường hấp dẫn từ*. Làm cách nào để ta có thể hình dung được trường hấp dẫn từ? Chúng ta hãy quan sát các tác dụng của nó. Thí nghiệm trong Hình 77 chứng tỏ rằng một cây gậy chuyển động sẽ làm cho một khối lượng thử tăng tốc một chút theo hướng chuyển động của nó. Khi ta dùng phép ẩn dụ xem chân không như tấm nệm, thì điều đó sẽ dẫn tới việc cây gậy khi chuyển động sẽ kéo theo chân không, cũng như khối lượng thử nằm trong vùng đó. Trường hấp dẫn từ hành xử giống như *sự kéo theo chân không*. Vì nhiều người miễn cưỡng khi xem chân không là tấm nệm nên ta dùng từ *sự kéo theo hệ quy chiếu* để thay thế.

Trong phần mô tả này, *mọi hiệu ứng kéo theo hệ quy chiếu đều là các hiệu ứng hấp dẫn từ*. Đặc biệt, trường hấp dẫn từ cũng xuất hiện khi một vật nặng *quay*, giống như trong hiệu ứng Thirring–Lense ở Hình 75. Đối với moment động lượng $\boldsymbol{J}$ trường hấp dẫn từ $\boldsymbol{H}$ là một trường lưỡng cực; nó được cho bởi công thức

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{\nabla} \times \left(-2 \frac{\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{x}}{r^3} \right) \tag{171}$$

giống y trường hợp điện động lực. Trường hấp dẫn từ bao quanh một vật đang quay có 3 hiệu ứng chính.

Đầu tiên, giống như trong Điện từ học, một hạt thử đang quay với moment động lượng $\boldsymbol{S}$ sẽ chịu tác dụng của một *moment lực* nếu nó ở gần một vật lớn đang quay với moment động lượng $\boldsymbol{J}$. $\boldsymbol{T}$ được tính theo công thức

$$\boldsymbol{T} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{S}}{\mathrm{d}t} = \tfrac{1}{2}\, \boldsymbol{S} \times \boldsymbol{H} \,. \tag{172}$$

Moment lực sẽ gây ra *sự tiến động hồi chuyển* hay *sự tiến động trắc địa* đã đề cập ở trên. Đối với Trái đất, hiệu ứng này rất nhỏ: ở Bắc cực, góc hình nón của tiến động là 0.6 ms cung và tốc độ quay cỡ 10^{-10} lần tốc độ quay của Trái đất.

Hiệu ứng thứ hai thì như sau. Vì đối với moment lực ta có $\boldsymbol{T} = \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \boldsymbol{S}$, trường lưỡng cực của vật nặng đang quay với moment động lượng $\boldsymbol{J}$ sẽ tác động lên vật quay quanh nó. Mặt phẳng quỹ đạo của vật quay quanh đó sẽ *tiến động*. Nhìn từ vô cực, đối với một quỹ đạo có bán trục chính a, tâm sai e thì

Câu đố 255 ny

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}} = -\frac{\boldsymbol{H}}{2} = -\frac{G}{c^2}\frac{\boldsymbol{J}}{|\boldsymbol{x}|^3} + \frac{G}{c^2}\frac{3(\boldsymbol{J}\boldsymbol{x})\boldsymbol{x}}{|\boldsymbol{x}|^5} = \frac{G}{c^2}\frac{2\boldsymbol{J}}{a^3(1-e^2)^{3/2}} \tag{173}$$

điều mà Lense và Thirring đã tiên đoán.* Hiệu ứng này – tương tự liên kết spin–spin

* Một hình cầu thuần nhất quay tròn có moment động lượng là $J = \frac{2}{5} M\omega R^2$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

trong nguyên tử – cực nhỏ, chỉ gây ra một độ biến thiên góc chỉ có 8″ cho mỗi vòng quỹ đạo của vệ tinh gần mặt đất. Điều này giải thích cho những khó khăn và các cuộc tranh luận chung quanh những thí nghiệm liên quan tới Trái đất. Như đã đề cập ở trên, hiệu ứng này sẽ lớn hơn nhiều trong các hệ pulsar.

Còn hiệu ứng thứ ba mà ta chưa đề cập tới, *sự tiến động phụ của điểm cận tinh* của một vật quay. Hiệu ứng này tương tự hiệu ứng do sự cong của không gian gây ra cho vật chuyển động quanh vật khác, dù vật ở trung tâm không quay. Chuyển động quay chỉ làm giảm sự tiến động bắt nguồn từ sự cong của không-thời gian. Hiệu ứng này đã được khẳng định hoàn toàn với pulsar đôi nổi tiếng PSR 1913+16, được khám phá năm 1974, cũng như với pulsar đôi 'thực' PSR J0737-3039, được khám phá năm 2003. Hệ sao thứ hai cho thấy sự tiến động của điểm cận tinh là 16.9°/a, giá trị lớn nhất mà người ta đã quan sát được cho tới nay.

Xem 173

Việc tách thành hai hiệu ứng hấp dẫn điện và hấp dẫn từ như vậy là một tiếp cận gần đúng hữu dụng cho việc mô tả sự hấp dẫn. Điều này cũng giúp cho việc trả lời các câu hỏi như: lực hấp dẫn giữ cho Trái đất chuyển động quanh Mặt trời như thế nào nếu như lực hấp dẫn cần 8 phút để đi từ Mặt trời đến chúng ta? Sau cùng, việc tách trường hấp dẫn thành hai thành phần hấp dẫn điện và hấp dẫn từ cho phép ta mô tả sóng hấp dẫn đơn giản hơn.

Câu đố 256 s

Sóng hấp dẫn

Một trong những tiên đoán dị thường nhất của Vật lý là sự hiện hữu của sóng hấp dẫn. * Sóng trọng lực chứng tỏ rằng không gian rỗng tự nó cũng có khả năng chuyển động và dao động. Ý tưởng cơ bản cũng đơn giản. Vì không gian có tính đàn hồi, giống như một tấm nệm lớn mà ta sống trong đó, không gian sẽ có thể dao động dưới dạng sóng lan truyền, giống như một tấm nệm hay bất cứ một môi trường đàn hồi nào khác.

Poincaré năm 1905 đã tiên đoán về sóng hấp dẫn.** Sóng được suy ra từ một tính toán gần đúng trong Thuyết tương đối tổng quát của Einstein năm 1916 . Có một khoảng thời gian, Einstein – và nhiều người khác – đều tin rằng tính toán của ông bị sai. Ông chỉ tin vào sự hiện hữu của sóng hấp dẫn vào năm 1937, khi nhiều người chỉ ra những chỗ sai trong bản thảo cùng viết với Nathan Rosen về cách thức suy ra sóng hấp dẫn từ Thuyết tương đối tổng quát mà không cần phép tính gần đúng. Ông đã sửa lại bản thảo. Do đó, chỉ có bài báo công bố năm 1937 lần đầu tiên chứng minh rõ ràng rằng sóng hấp dẫn hiện hữu trong Thuyết tương đối tổng quát. Ngay sau bài báo này đã có nhiều vấn đề phát sinh cần phải làm sáng tỏ; trong thập niên 1950 các vấn đề đã được giải quyết hoàn toàn.

Xem 174

Xem 175

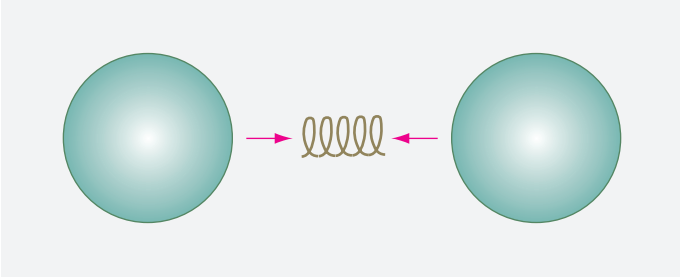
Khởi đầu từ sự hiện hữu của tốc độ năng lượng cực đại, Jørgen Kalckar và Ole Ulfbeck đã đưa ra một luận cứ đơn giản cho thấy sự cần thiết của sóng hấp dẫn. Họ nghiên cứu hai khối lượng bằng nhau rơi vào nhau dưới tác dụng của lực hấp dẫn và tưởng tượng giữa hai vật có một lò xo. Thí nghiệm tưởng tượng được minh hoạ trong Hình 78. Lò xo sẽ làm hai vật bật ra và tích chứa động năng của hai vật đang rơi. Phần năng lượng này

Xem 176

* Nói một cách chặt chẽ, thuật ngữ 'sóng trọng lực' có một ý nghĩa đặc biệt: *sóng trọng lực* là sóng mặt của biển, mà trọng lực là lực hồi phục. Tuy vậy, trong Thuyết tương đối tổng quát, thuật ngữ có thể được dùng thay cho 'sóng hấp dẫn'.

** Thực ra thì câu hỏi về tốc độ của lực hấp dẫn đã được Laplace bàn luận trước Poincaré khá lâu. Tuy vậy các điều bàn luận này không dự đoán về sự hiện hữu của sóng hấp dẫn.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 78 Một thí nghiệm tưởng tượng cho thấy sự cần thiết của sóng hấp dẫn.

BẢNG 4 Phổ của sóng hấp dẫn theo tiên đoán.

Tần số	Bước sóng	Tên	Nơi xuất hiện
$< 10^{-4}$ Hz	> 3 Tm	tần số cực thấp	hệ sao đôi chậm, hố đen siêu trọng
10^{-4} Hz–10^{-1} Hz	3 Tm–3 Gm	tần số rất thấp	hệ sao đôi nhanh, hố đen nặng, các dao động của sao lùn trắng
10^{-1} Hz–10^{2} Hz	3 Gm–3 Mm	tần số thấp	pulsar đôi, hố đen trung bình và nhẹ
10^{2} Hz–10^{5} Hz	3 Mm–3 km	tần số trung bình	siêu tân tinh, các dao động của pulsar
10^{5} Hz–10^{8} Hz	3 km–3 m	tần số cao	chưa biết; có thể là các nguồn nhân tạo trong tương lai
$> 10^{8}$ Hz	< 3 m		có thể là các nguồn vũ trụ chưa biết

có thể đo được dựa vào độ biến dạng của lò xo. Khi lò xo giãn ra nó sẽ ném hai vật ra xa, lực hấp dẫn sẽ làm hai vật đi chậm lại, rồi hai vật lại rơi vào nhau, bắt đầu chu kỳ kế tiếp.

Tuy vậy, sau mỗi chu kỳ năng lượng chứa trong lò xo sẽ *nhỏ đi*. Khi một quả cầu rời khỏi lò xo, vận tốc của nó sẽ bị giảm đi do lực hấp dẫn của quả cầu kia. Độ lớn của gia tốc phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai quả cầu; nhưng vì vận tốc lan truyền có một giá trị cực đại, sự giảm tốc của quả cầu một chỉ *xuất hiện* khi tác dụng của lực hấp dẫn bắt đầu xuất phát từ quả cầu kia. Khi hai vật rời xa nhau, khoảng cách hiệu dụng sẽ nhỏ hơn khoảng cách thực. Tóm lại, khi rời xa nhau, độ giảm tốc thực sẽ *lớn hơn* giá trị do tính toán không tính đến thời gian trễ.

Tương tự như vậy, khi hai vật rơi vào nhau, vật sẽ được gia tốc khi tác dụng của lực hấp dẫn bắt đầu di chuyển về phía nó. Khi đến gần nhau, gia tốc sẽ *nhỏ hơn* giá trị do tính toán không tính đến thời gian trễ.

Do đó, các vật đến gần nhau với năng lượng *nhỏ hơn* khi chúng rời xa nhau. Mỗi lần va chạm, lò xo bị nén ít hơn một chút. Phần năng lượng chênh lệch này là phần năng lượng của hai vật bị mất đi: chúng bị không-thời gian lấy đi. Nói cách khác, phần năng lượng này được phát xạ dưới dạng sóng hấp dẫn. Điều tương tự cũng xảy ra với các tấm

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

nệm. Nên nhớ rằng khối lượng làm biến dạng không gian quanh nó như một trái banh thép trên mặt tấm nệm làm biến dạng bề mặt chung quanh nó. (Tuy vậy, khác với nệm thật, không có ma sát giữa banh và nệm.) Nếu hai banh thép đụng nhau rồi bật ra một cách tuần hoàn, chúng sẽ làm phát sinh sóng trên mặt của tấm nệm. Theo thời gian, tác dụng này sẽ làm giảm khoảng cách giữa hai quả banh. Như ta sẽ thấy sau đây, người ta cũng đã đo được hiệu ứng tương tự; hai vật, thay vì bị đẩy bởi một lò xo, thì quay quanh lẫn nhau.

Việc tách thành hai hiệu ứng hấp dẫn từ và hấp dẫn điện sẽ cho ta một cách mô tả
Xem 177 sóng hấp dẫn bằng toán học khá đơn giản. Dễ dàng mở rộng Hấp dẫn từ tĩnh học và Hấp dẫn điện tĩnh học thành *Hấp dẫn động lực học*. Giống như Điện động lực học có thể suy ra từ lực Coulomb bằng phép biến đổi sang các quan sát viên quán tính khả hữu, Hấp dẫn động lực học có thể suy ra từ lực hấp dẫn vạn vật bằng phép biến đổi sang các
Câu đố 257 ny quan sát viên khác. Ta kiếm được 4 phương trình

$$\begin{aligned} \nabla\cdot\boldsymbol{G} &= -4\pi G\rho \quad , \quad \nabla\times\boldsymbol{G} = -\frac{1}{4}\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} \\ \nabla\cdot\boldsymbol{H} &= 0 \quad , \quad \nabla\times\boldsymbol{H} = -16\pi N\rho\boldsymbol{v} + 4\frac{N}{G}\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial t} \,. \end{aligned} \tag{174}$$

Ta đã gặp hai trong bốn phương trình này. Hai phương trình khác là phiên bản mở rộng của các phương trình ta đã gặp, có tính đến sự phụ thuộc thời gian. Trừ hệ số 4, các phương trình của Hấp dẫn động lực học giống như các phương trình Maxwell của Điện động lực học. Các hệ số 4 xuất hiện là do tỷ số giữa moment động lượng L và năng lượng E của sóng hấp dẫn khác với trường hợp sóng điện từ. Tỷ số này xác định *spin* của sóng. Đối với sóng hấp dẫn

$$L = \frac{2}{\omega}E \,, \tag{175}$$

trong đó đối với sóng điện từ hệ số là $1/\omega$. Cũng cần nhắc lại rằng spin của bức xạ là một tính chất *cổ điển*. *Spin của một sóng* được định nghĩa là tỷ số $E/L\omega$, E là năng lượng, L là moment động lượng và ω là tần số góc. Đối với sóng điện từ, spin là 1; đối với sóng hấp dẫn, spin là 2.

Dĩ nhiên spin cũng là một tính chất – cho đến bây giờ vẫn chưa dò ra – của hạt lượng tử tạo nên sóng hấp dẫn. Điều thú vị là, vì lực hấp dẫn có tính phổ quát, nên chỉ có *một* loại hạt bức xạ có spin là 2 trong thiên nhiên. Điều này tương phản rõ rệt với trường hợp spin bằng 1 mà ta đã gặp *nhiều* trong thiên nhiên: photon, boson yếu và gluon.

Các phương trình của Hấp dẫn động lực học phải được bổ sung bằng định nghĩa của các trường thông qua gia tốc mà chúng tạo ra:

$$m\ddot{\boldsymbol{x}} = m\boldsymbol{G} + m\dot{\boldsymbol{x}}\times\boldsymbol{H} \,. \tag{176}$$

Các định nghĩa có các hệ số khác nhau cũng là chuyện bình thường và như vậy dẫn tới các hệ số khác nhau trong các phương trình của Hấp dẫn động lực học.

Các phương trình của Hấp dẫn động lực học có một tính chất đơn giản: trong chân không, ta có thể từ chúng suy ra một *phương trình sóng* cho các trường hấp dẫn điện và trường hấp dẫn từ $\boldsymbol{G}$ và $\boldsymbol{H}$. (Điều này không khó: bạn hãy thử chứng minh xem!)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 258 e

Nói cách khác, *lực hấp dẫn có thể hành xử như một sóng: nó có thể phát xạ*. Tất cả các điều này có thể suy ra từ biểu thức của lực hấp dẫn vạn vật khi áp dụng cho các quan sát viên chuyển động, với điều kiện quan sát viên cũng như năng lượng, không chuyển động nhanh hơn c. Cả luận cứ liên quan tới lò xo ở trên và luận cứ toán học ở đây đều dùng chung giả thiết và đi đến cùng một kết luận.

Câu đố 259 e

Sau một vài tính toán ta có thể chứng minh tốc độ của sóng hấp dẫn được tính theo công thức

$$c = \sqrt{\frac{G}{N}} \,. \tag{177}$$

Kết quả này tương ứng với biểu thức điện từ

Quyển III, trang 107

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \,. \tag{178}$$

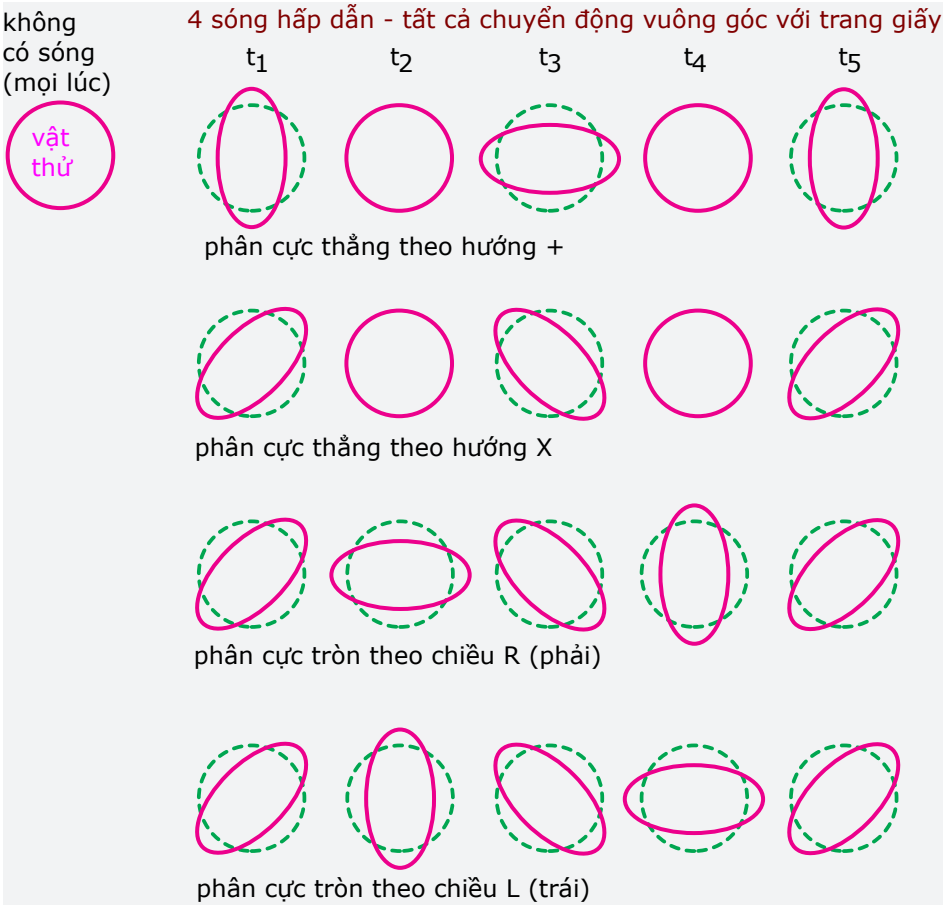
Hai tốc độ dùng chung ký hiệu, vì chúng giống nhau. Cả hai đều giống nhau đối với mọi dạng năng lượng, không phụ thuộc vào khối lượng nghỉ. Ta cũng ghi chú thêm, nói một cách chặt chẽ, đây chỉ là tiên đoán: giá trị của tốc độ sóng hấp dẫn được khẳng định trực tiếp vào năm 2016, mặc dù có nhiều phản biện.

Xem 178

Xem 179

Làm thế nào để ta có thể hình dung được sóng hấp dẫn? Ở trên ta đã phát biểu một cách tuỳ tiện rằng sóng hấp dẫn tương ứng với một sóng trên mặt của một tấm nệm; bây giờ ta phải thận trọng hơn và hãy tưởng tượng rằng ta đang sống *bên trong* tấm nệm. Như vậy sóng hấp dẫn là các biến dạng của tấm nệm, nghĩa là của không gian, chuyển động và dao động. Giống như sóng trên tấm nệm, hoá ra sóng hấp dẫn cũng là sóng *ngang*. Như vậy chúng có thể bị phân cực. Thật ra sóng hấp dẫn có thể bị phân cực theo hai cách. Tác dụng của sóng hấp dẫn được biểu diễn trong Hình 79, cho cả hai trường

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 79 Tác dụng của một sóng hấp dẫn phẳng chuyển động vuông góc với trang giấy lên một vật hình tròn hay hình cầu.

hợp phân cực thẳng và tròn.* Ta cũng lưu ý rằng sóng bất biến với phép quay một góc π và hai phân cực thẳng khác nhau một góc π/4; điều này chứng tỏ rằng các hạt tương ứng

* Một sóng hấp dẫn phẳng (có biên độ nhỏ) chuyển động theo hướng z được mô tả bằng metric g có công thức

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 + h_{xx} & h_{xy} & 0 \\ 0 & h_{xy} & -1 + h_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{179}$$

mà tỷ số biên độ của hai thành phần của nó xác định độ phân cực, theo phương trình

$$h_{ab} = B_{ab} \sin(kz - \omega t + \varphi_{ab}) \tag{180}$$

giống như trong mọi sóng phẳng điều hoà. Biên độ B_{ab}, tần số ω và phase φ phụ thuộc vào hệ vật lý cụ thể. Hệ thức tán sắc tổng quát đối với số sóng k suy ra từ phương trình sóng là

$$\frac{\omega}{k} = c \tag{181}$$

chứng tỏ rằng sóng chuyển động với tốc độ của ánh sáng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

với sóng, graviton, có spin là 2. (Một cách tổng quát, trường bức xạ cổ điển đối với một hạt có spin S thì bất biến đối với phép quay một góc $2\pi/S$. Ngoài ra, hai hướng phân cực thẳng trực giao của một hạt có spin S tạo thành một góc $\pi/2S$. Đối với photon có spin là 1 thì nó bất biến đối với phép quay một góc 2π và góc tạo bởi hai hướng phân cực là $\pi/2$.)

Nếu ta tưởng tượng không gian trống rỗng giống như một tấm nệm *lấp đầy* không gian thì sóng hấp dẫn là các biến dạng của tấm nệm dao động. Nói chính xác hơn, Hình 79 cho thấy một sóng phân cực tròn có cùng tính chất với một cái mở nút chai đi xuyên qua tấm nệm. Sau này ta sẽ khám phá ra tại sao sự tương tự mở nút chai-sóng hấp dẫn phân cực tròn lại phù hợp tốt như vậy. Thật vậy, trong phần cuối của cuộc thám hiểm, ta sẽ tìm thấy một mô hình đặc biệt của tấm nệm không-thời gian tự động hợp nhất với sóng của cái mở nút chai (thay vì sóng có spin bằng 1 xuất hiện trong những tấm nệm latex thông thường).

Quyển VI, trang 298

Sự sinh tạo và phát hiện sóng hấp dẫn

Người ta tạo ra sóng hấp dẫn như thế nào? Hiển nhiên, các vật phải được gia tốc. Nhưng chính xác như thế nào? Định luật bảo toàn năng lượng ngăn cấm các đơn cực khối lượng thay đổi cường độ. Ta cũng biết từ Thuyết hấp dẫn vạn vật là một khối cầu có bán kính dao động không thể phát ra sóng hấp dẫn. Thêm nữa, định luật bảo toàn động lượng ngăn cấm lưỡng cực khối lượng thay đổi.

Câu đố 260 ny

Kết quả chỉ có *tứ cực biến đổi* mới có thể phát ra sóng hấp dẫn. * Thí dụ, hai vật quay quanh nhau sẽ phát ra sóng hấp dẫn. Tương tự, một vật bất kỳ, không có đối xứng trụ quanh trục quay của nó, thì khi quay cũng sẽ phát ra sóng hấp dẫn. Kết quả là khi ta quay một cánh tay cũng làm phát xạ sóng hấp dẫn. Phần lớn các phát biểu này cũng áp dụng cho các vật trong tấm nệm. Bạn có thể chỉ ra sự khác nhau không?

Câu đố 261 ny

Einstein nhận thấy rằng biên độ h của sóng, cách nguồn đã cho một khoảng r, ở mức gần đúng tốt nhất, là đạo hàm bậc hai của moment tứ cực trễ Q:

Xem 180

$$h_{ab} = \frac{2G}{c^4}\frac{1}{r}\mathrm{d}_{tt}Q^{\mathrm{ret}}_{ab} = \frac{2G}{c^4}\frac{1}{r}\mathrm{d}_{tt}Q_{ab}(t - r/c)\,. \tag{183}$$

Biểu thức này chứng tỏ rằng biên độ sóng hấp dẫn *chỉ giảm theo* $1/r$, khác với suy nghĩ thông thường. Tính chất này giống như sóng điện từ. Thêm nữa, giá trị nhỏ của tiền nhân tử, $1.6 \cdot 10^{-44}$ Wm/s, chứng tỏ rằng cần có một hệ thật vĩ đại để tạo ra sự thay đổi moment tứ cực thì mới có thể gây ra sự biến thiên chiều dài của vật để ta có thể dò ra

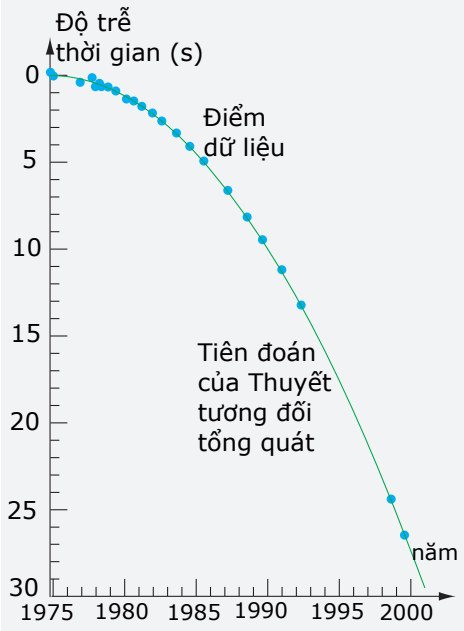
Trong một chuẩn khác, một sóng phẳng có thể được viết lại như sau

$$g = \begin{pmatrix} c^2(1+2\varphi) & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & -1+2\varphi & h_{xy} & 0 \\ A_2 & h_{xy} & -1+h_{xx} & 0 \\ A_3 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{182}$$

trong đó φ và $\boldsymbol{A}$ là các hàm thế sao cho $\boldsymbol{G} = \nabla\varphi - \frac{\partial \boldsymbol{A}}{c\partial t}$ và $\boldsymbol{H} = \nabla \times \boldsymbol{A}$.

* Tứ cực *l*à một sắp xếp đối xứng, trên *bốn* cạnh của một hình vuông, có 4 cực đan xen nhau. Trong sự hấp dẫn, đơn cực là một chất điểm hay một vật hình cầu, và vì khối lượng không thể âm nên một tứ cực được tạo thành từ *hai* đơn cực. Một hình cầu như Trái đất, có thể được xem gần đúng là tổng của một đơn cực và một tứ cực. Điều tương tự cũng đúng đối với một hình cầu giãn dài.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 80 So sánh giữa độ trễ thời gian đo được đối với điểm cận tinh của pulsar đôi PSR 1913+16 và số liệu tiên đoán do sự hao hụt năng lượng vì bức xạ hấp dẫn.

được. Để có tính thuyết phục, ta chỉ cần đưa ra vài con số và nhớ rằng các máy dò tốt nhất hiện nay có thể đo được độ biến thiên chiều dài nhỏ tới $h = \delta l/l = 10^{-21}$. Việc con người tạo ra các sóng hấp dẫn để có thể dò ra được là điều không thể.

Sóng hấp dẫn, giống như các loại sóng khác, có chuyển tải năng lượng.* Nếu ta áp dụng công thức tổng quát của công suất phát xạ P cho trường hợp hai vật m_1 và m_2 khi chúng quay quanh nhau và cách nhau một khoảng l ta sẽ kiếm được

Quyển III, trang 90
Xem 128

$$P = -\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \frac{G}{45c^5}\,\ddot{Q}^{\mathrm{ret}}_{ab}\,\ddot{Q}^{\mathrm{ret}}_{ab} = \frac{32}{5}\frac{G}{c^5}\left(\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}\right)^2 l^4\omega^6 \tag{184}$$

sử dụng hệ thức Kepler $4\pi^2 r^3/T^2 = G(m_1 + m_2)$, ta được

$$P = \frac{32}{5}\frac{G^4}{c^5}\frac{(m_1 m_2)^2(m_1+m_2)}{l^5}\,. \tag{185}$$

Đối với các quỹ đạo ellipse, tốc độ tăng theo tính elliptic, như đã giải thích trong sách của Goenner. Dùng các số liệu của Trái đất và Mặt trời, ta kiếm được công suất vào khoảng 200 W và 400 W cho trường hợp Mộc tinh-Mặt trời. Các giá trị này quá nhỏ nên không thể phát hiện được.

Xem 128

Đối với mọi hệ quay quanh nhau, tần số sóng bằng hai lần tần số quay và bạn có thể kiểm tra lại điều này. Các tần số thấp này làm cho việc phát hiện ra chúng càng khó hơn.

Câu đố 262 ny

Do công suất phát xạ của sóng hấp dẫn thường là nhỏ nên lần đầu tiên người ta quan

* Hấp dẫn điện từ luận cho phép định nghĩa vector Poynting hấp dẫn. Việc định nghĩa và sử dụng nó cũng giống như trong Điện động lực học.

Xem 172

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

sát được tác dụng của chúng là trong hệ pulsar đôi. Pulsar là các sao tuy nhỏ nhưng có mật độ cực lớn; ngay cả với sao có cùng khối lượng với Mặt trời thì đường kính của chúng cũng chỉ vào khoảng 10 km. Do đó chúng sẽ chuyển động trên quỹ đạo có bán kính nhỏ với tốc độ cao. Thật vậy, trong hệ pulsar đôi nổi tiếng nhất, PSR 1913+16, hai sao quay quanh nhau trong thời gian đáng nể là 7.8 h, mặc dù bán trục chính khoảng 700 Mm, chỉ nhỏ hơn khoảng cách Trái đất–Mặt trăng hai lần. Vì tốc độ trên quỹ đạo của chúng lên tới 400 km/s, hệ sao này đúng là hệ tương đối tính.

Pulsar có một tính chất hữu ích: do chuyển động quay, chúng phát ra các xung vô tuyến cực kỳ đều đặn (do đó chúng mới có tên như vậy), thường với chu kỳ cỡ ms. Do đó người ta dễ dàng theo dõi chuyển động quay của chúng bằng cách đo độ biến thiên thời gian đến của xung. Trong một thí nghiệm nổi tiếng, một nhóm thiên văn vật lý gia do Joseph Taylor dẫn đầu* đã đo được độ giảm tốc của hệ pulsar đôi vừa đề cập. Sau khi loại bỏ các hiệu ứng khác và thu thập dữ liệu trong 20 năm, họ đã tìm thấy sự giảm tần số quay, được biểu diễn trong Hình 80. Sự chậm dần này là do sự phát xạ sóng hấp dẫn. Các kết quả rất phù hợp với tiên đoán của Thuyết tương đối tổng quát, *mà không có một tham số bất kỳ nào khác*. (Bạn có thể kiểm tra lại rằng hiệu ứng phải có bậc 2 theo thời gian.) Đây là trường hợp đầu tiên mà Thuyết tương đối đã được kiểm chứng với độ chính xác lên tới $(v/c)^5$. Để hình dung được độ chính xác này, bạn nên biết thí nghiệm đó có thể phát hiện độ giảm bớt đường kính quỹ đạo là 3.1 mm mỗi vòng quay, hay 3.5 m mỗi năm! Người ta có thể thực hiện được việc đo đạc này là nhờ: hai ngôi sao trong hệ là các sao neutron có kích thước nhỏ, vận tốc lớn và tương tác thì thuần tuý là lực hấp dẫn. Chu kỳ quay của Pulsar quanh trục của nó, vào khoảng 59 ms, chính xác tới 11 chữ số, thời gian quay là 7.8 h chính xác tới 10 chữ số và tâm sai của quỹ đạo chính xác tới 6 chữ số. Thiên văn vô tuyến thật là ngoạn mục.

Xem 181
Xem 182
Câu đố 263 ny
Trang 159
Xem 181
Xem 128

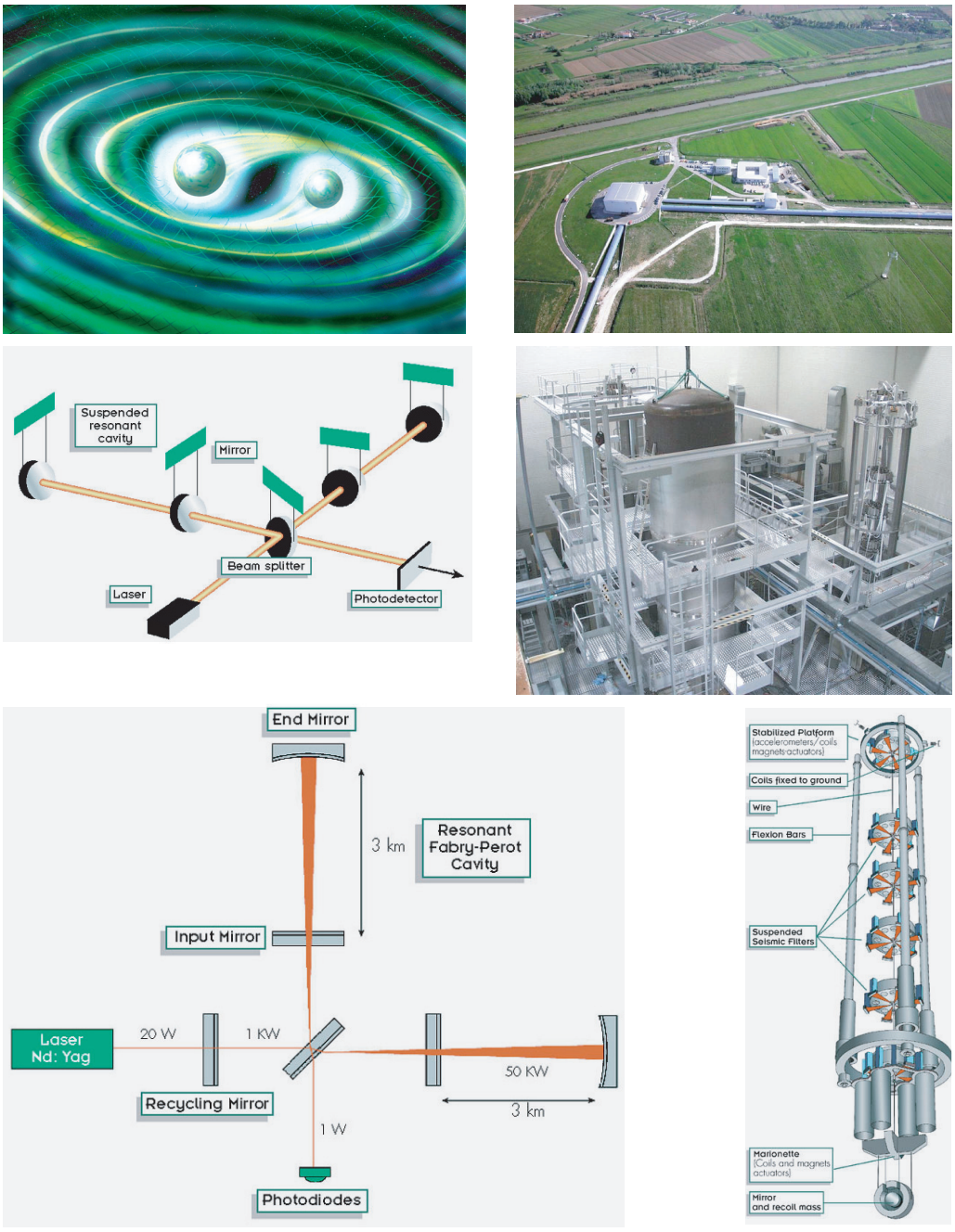
Việc *trực tiếp* dò ra sóng hấp dẫn là một trong những mục tiêu dài hạn của Thuyết tương đối trong tương lai. Cuộc đua đã bắt đầu từ những năm 1990. Tư tưởng cơ bản này khá đơn giản như ta đã thấy trong Hình 81: lấy 4 vật, thường là 4 cái gương, hai đường thẳng nối mỗi cặp gương vuông góc với nhau. Rồi đo độ biến thiên khoảng cách của mỗi cặp gương. Nếu có sóng hấp dẫn đi qua, khoảng cách một cặp sẽ tăng và khoảng còn lại sẽ giảm trong *cùng một* thời gian.

Vì con người không thể tạo ra sóng hấp dẫn, nên điều kiện đầu tiên để có thể dò ra sóng hấp dẫn là sự kiên nhẫn chờ đợi sóng tới. Hoá ra là ngay cả đối với các vật ở quanh hố đen, chỉ có khoảng 6 % khối lượng nghỉ có thể phát xạ dưới dạng sóng hấp dẫn; hơn nữa, phần lớn năng lượng được phát xạ vào giai đoạn cuối cùng khi vật rơi vào hố đen, nên chỉ có các quá trình mãnh liệt, như sự va chạm của các sao neutron hay các vụ hợp nhất các hố đen, mới là các ứng viên thích hợp để làm các nguồn sóng hấp dẫn. Sóng hấp dẫn do sự hợp nhất hai hố đen sinh ra được biểu diễn trong Hình 81.

Ngoài ra, người ta cần một hệ thống đo có khả năng phát hiện sự thay đổi chiều dài cỡ 10^{-22} hay nhạy hơn – nói cách khác, cần có nhiều tiền. Đối với các gương đặt cách nhau 4 km, độ biến thiên có thể dò ra được phải nhỏ hơn 1/1000 đường kính proton. Cốt lõi của việc phát hiện thành công là kỹ thuật *khử nhiễu* trong tín hiệu dò. Trong nhiều thập niên qua, tất cả các chuyên gia trong lãnh vực làm giảm tín hiệu nhiễu giỏi nhất thế giới đang cải tiến các máy phát hiện sóng hấp dẫn. Việc tìm hiểu cơ chế của nhiễu (tiếng ồn) đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu riêng.

* Năm 1993 ông nhận một phần giải Nobel vật lý nhờ công trình tâm huyết này.

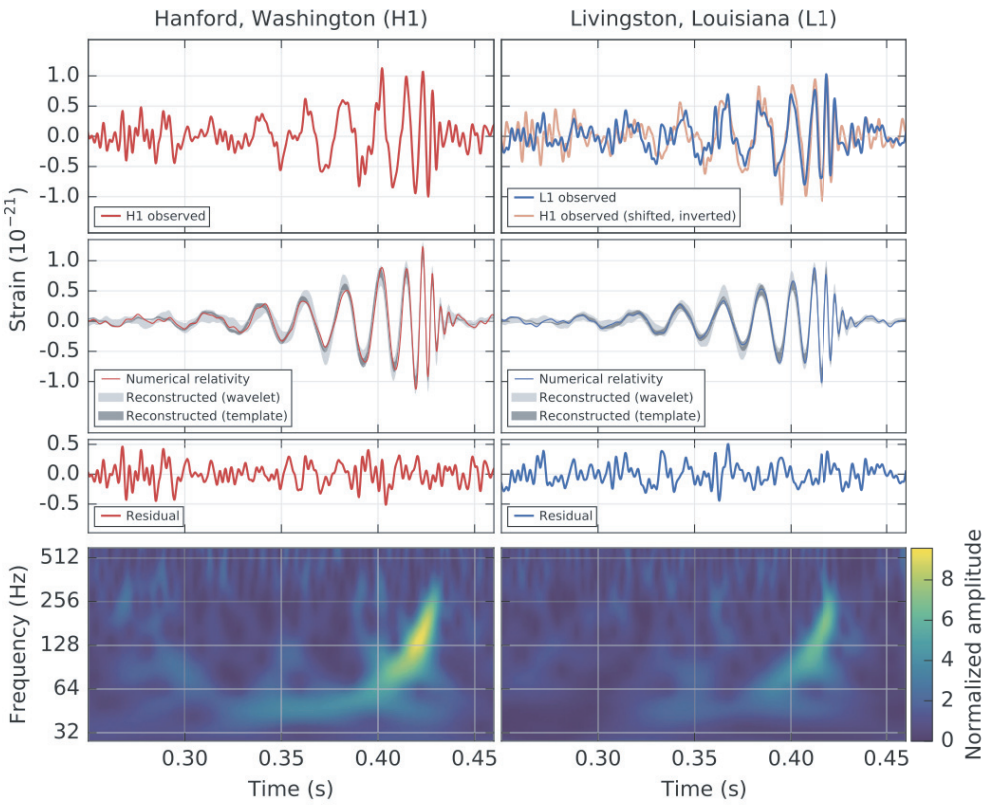
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 81 Việc phát hiện sóng hấp dẫn: hình minh hoạ sự hợp nhất hai hố đen phát xạ sóng hấp dẫn (hình trên bên trái). Những hình khác cho thấy máy phát hiện VIRGO ở Cascina - Ý, với một trong các khung treo gương khổng lồ, chi tiết một khung treo gương và hai hình vẽ của giao thoa kế laser (© INFN).

Cho tới năm 2015, người ta vẫn chưa phát hiện ra sóng hấp dẫn. Độ nhạy của máy phát hiện chưa đủ. Thực tế là cuộc chạy đua để làm tăng độ nhạy vẫn đang diễn ra trên

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 82 Sự phát hiện sóng hấp dẫn, trực tiếp, lần đầu tiên thông qua sự biến dạng của không gian, với độ biến dạng cỡ 10^{-21}, bằng hai máy dò đặt cách nhau 3000 km (© LIGO/Physical Review Letters).

Xem 111

khắp thế giới. Sau hơn 20 năm phát triển đều đặn, sau cùng, vào năm 2016, một tín hiệu kéo dài 0.2 s – như trong Hình 82 – đã được công bố: nó tương hợp với tín hiệu mà ta chờ đợi từ sự hợp nhất 2 hố đen có khối lượng bằng 29 và 36 lần Mặt trời. Kết quả của sự hợp nhất là một hố đen có khối lượng 62 lần khối lượng Mặt trời và một khối lượng bằng 3 lần Mặt trời được phát xạ ra ngoài, phần lớn là sóng hấp dẫn. Sự kiện này xảy ra cách chúng ta từ 600 đến 1800 triệu năm ánh sáng. Sự rõ ràng của tín hiệu, được đo ở hai nơi khác nhau, thuyết phục được mọi người về tính đúng đắn của lời giải thích. Độ biến thiên tương đối của chiều dài cực đại $\Delta l/l$, nhỏ một cách lạ thường, cỡ 10^{-21}, khiến cho việc đo đạc được xem là một kỳ công về mặt thực nghiệm, ngay cả khi ta có chú ý đến việc ngân sách khá tốn kém. Người ta cũng đã phát hiện nhiều sự kiện hợp nhất khác sau sự kiện đầu tiên này.

Câu đố 264 r

Sóng hấp dẫn là một chủ đề quyến rũ. Bạn có thể tìm ra một phương pháp đo tốc độ sóng ít tốn kém hơn không? Trước kia, một vài thí nghiệm vật lý thiên văn đã tìm ra những điều kiện giới hạn trên khối lượng của graviton và đã gián tiếp xác nhận tốc độ truyền tương tác hấp dẫn. Việc đo trực tiếp lần đầu tiên là một khám phá của năm 2016

Xem 111

và kết quả thu được là tốc độ ánh sáng, trong phạm vi sai số của phép đo. Việc quan sát một chớp sáng đi liền với một vụ hợp nhất hai hố đen, nếu được xác nhận vào lúc này

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

hay trong tương lai, sẽ chứng tỏ rằng sóng hấp dẫn chuyển động với tốc độ giống như tốc độ sóng ánh sáng với sai số không quá $1/10^{16}$.

Vẫn còn một câu hỏi mở về sóng hấp dẫn: nếu mọi thay đổi trong thiên nhiên đều bắt nguồn từ chuyển động của các hạt, như người Hy Lạp vẫn tin, thì làm cách nào để sóng hấp dẫn phù hợp với điều đó? Lý thuyết lượng tử đòi hỏi sóng hấp dẫn phải được cấu tạo từ các hạt. (Các hạt theo giả thuyết này được gọi là *graviton*). Đến đây không còn sự khác biệt thực sự giữa không gian rỗng đứng yên và không gian rỗng dao động. Nếu các hạt tạo nên sóng hấp dẫn, không-thời gian cũng phải có cấu tạo như vậy! Điều này có thể xảy ra như thế nào? Ta phải chờ cho tới cuối cuộc thám hiểm mới có thể nói nhiều hơn.

Các câu đố vui và lạ về các trường yếu

Câu đố 265 s Có một trường hấp dẫn tĩnh dao động trong không gian không ?

* *

Nếu ta tìm hiểu sâu hơn về các khả năng của tốc độ sóng hấp dẫn, một mối liên hệ thú vị sẽ xuất hiện. Nếu tốc độ sóng hấp dẫn *nhỏ* hơn tốc độ ánh sáng, các vật chuyển động di chuyển nhanh như tốc độ ánh sáng, giống như các hạt trong tia vũ trụ, sẽ đi chậm lại do phát ra bức xạ *Vavilov–Čerenkov*, cho đến khi tốc độ của chúng nhỏ đi. Người ta chưa quan sát thấy điều này.

Trang 29

Nếu tốc độ sóng hấp dẫn *lớn* hơn tốc độ ánh sáng, sóng sẽ không tuân theo tính nhân quả hay định luật 2 của Nhiệt động lực học. Tóm lại, sóng hấp dẫn, nếu hiện hữu, phải truyền với tốc độ ánh sáng. (Một tốc độ gần với tốc độ khả hữu của ánh sáng.)

* *

Một hiệu ứng làm nhiễu các máy phát hiện sóng hấp dẫn là thuỷ triều. Thuỷ triều tác động lên máy GEO600 ở Hannover đã làm thay đổi khoảng cách của các gương, vốn là 600 m, sai đi 2 µm.

* *

Các chùm tia hẹp của sóng hấp dẫn có tương tự với các chùm tia sáng không? Hai chùm tia sóng hấp dẫn song song có hút nhau không?

Câu đố 266 ny

* *

Như đã tiên đoán trong các ấn bản trước kia của bộ sách này, sự khám phá ra sóng hấp dẫn đã được loan báo trên TV và Radio. Khám phá này có giúp cho việc cải thiện đời sống trên khắp hành tinh này hay không? Trừ một số khoa học gia, phần nhân loại còn lại chắc chắn không được hưởng lợi chút nào. Tình trạng này tương phản gay gắt với các khám phá khoa học đã được thực hiện trong thế kỷ 20. Lý do của sự trái ngược này là gì?

Câu đố 267 e

* *

Xem 183 Sóng hấp dẫn có thể dùng làm nguồn năng lượng cho hoả tiễn không? Có Bonnor và Piper ủng hộ. Bạn có thể tự suy đoán về triển vọng của điều này.

Câu đố 268 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

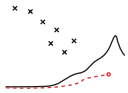
* *

Hiện tượng điện từ và hấp dẫn khác nhau ở một điểm: hai điện tích giống nhau thì đẩy nhau, hai khối lượng bằng nhau thì lại hút nhau. Nói rõ hơn hơn một chút: đối với sự trao đổi các hạt có spin là 2 – graviton – tác dụng của khối lượng có thể được mô tả bằng mô hình tấm nệm. Ta có thể làm như vậy vì dấu của tác dụng trong tấm nệm độc lập với các khối lượng. Trái lại, đối với các hiện tượng điện từ, dấu của hàm thế phụ thuộc vào các điện tích.

Tóm tắt về quỹ đạo và sóng

Tóm lại, sự uốn cong của không gian và không-thời gian sẽ dẫn tới các điều sau đây:
— trái với Thuyết hấp dẫn vạn vật, khối lượng làm lệch ánh sáng mạnh hơn;
— trái với Thuyết hấp dẫn vạn vật, ánh sáng khi đi gần các khối lượng thì đi chậm lại nhiều hơn;
— trái với Thuyết hấp dẫn vạn vật, các quỹ đạo ellipse không khép kín;
— trái với Thuyết hấp dẫn vạn vật, các vật chuyển động trên quỹ đạo đổi hướng trong không gian;
— trái với Thuyết hấp dẫn vạn vật, sóng hấp dẫn có thể truyền trong chân không trống rỗng với tốc độ ánh sáng.

Mọi thí nghiệm đã thực hiện khẳng định các kết luận trên đây và xác minh các tiên đoán định lượng trong phạm vi sai số của phép đo. Cả các thí nghiệm thực hiện nhiều lần trong trường hấp dẫn yếu lẫn các thí nghiệm ít ỏi trong các trường mạnh đều hoàn toàn khẳng định Thuyết tương đối tổng quát. Mọi thí nghiệm đều khẳng định các giới hạn lực và công suất.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 7

Từ độ cong đến chuyển động

Trong sự mô tả chính xác về lực hấp dẫn, chuyển động phụ thuộc vào độ cong của không-thời gian. Để định lượng sự mô tả này, đầu tiên ta cần mô tả độ cong thật chính xác. Để dễ hiểu, ta sẽ bắt đầu bàn luận trong không gian 2 chiều rồi chuyển sang không gian 3 và 4 chiều. Khi đã hiểu được độ cong, ta sẽ hiểu được mối liên hệ chính xác giữa độ cong và chuyển động.

Cách đo độ cong trong không gian 2 chiều

Một điều hiển nhiên là tờ giấy phẳng không có độ cong. Nếu ta cuộn nó thành một hình nón hay hình trụ, nó sẽ có một *độ cong ngoại lai*; tuy vậy, đối với sinh vật 2 chiều sống trên tờ giấy thì vẫn thấy nó phẳng – một thí dụ gần đúng là con kiến đi trên tờ giấy đó. Nói khác đi, *độ cong nội tại* của tờ giấy là zero cho dù nhìn một cách tổng thể nó có vẻ cong.

Như vậy độ cong riêng (hay nội tại) là một khái niệm mạnh hơn, dùng để đo một độ cong mà ngay con kiến cũng nhìn thấy. Ta nên nhớ rằng một mặt cong thực sự thì cũng có độ cong ngoại lai. Mặt đất, mặt một hòn đảo, hay sườn dốc của một ngọn núi** là các mặt cong thực sự. Khi ta nói về độ cong trong Thuyết tương đối tổng quát, là ta muốn nói đến độ cong *nội tại*, vì một quan sát viên trong thiên nhiên, theo bản chất, cũng ở trong tình trạng như con kiến sống trên một mặt: kinh nghiệm, hành động và kế hoạch luôn luôn liên quan tới vùng lân cận gần nhất trong không-thời gian.

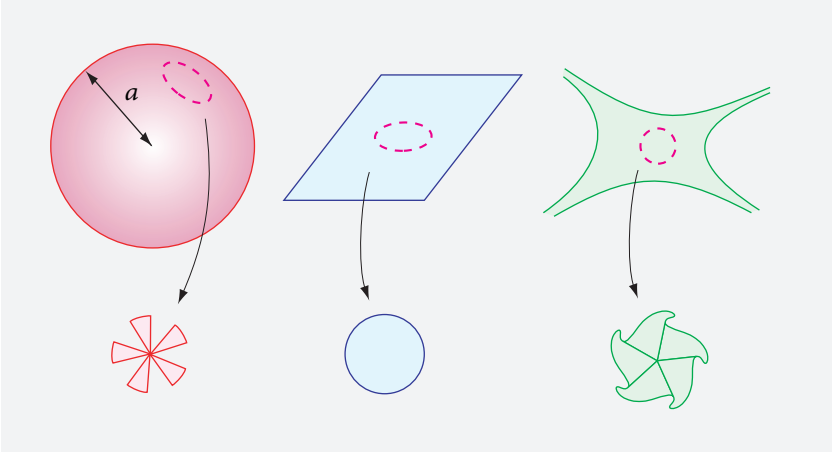
Nhưng làm thế nào con kiến xác định được là nó có sống trên một mặt có độ cong nội tại hay không?*** Cách đầu tiên được trình bày trong Hình 83. Con kiến có thể kiểm tra xem mối liên hệ giữa chu vi của một hình tròn và bán kính của nó có theo đúng công thức trong hình học Euclide hay không. Con kiến cũng có thể dùng hiệu số giữa giá trị đo được và giá trị tính từ công thức để làm số đo của độ cong thực địa phương, nếu nó lấy giới hạn khi vòng tròn rất nhỏ và chuẩn hoá các giá trị thật đúng. Nói cách khác, con kiến có thể cắt (tưởng tượng) một đĩa nhỏ bao quanh điểm nó đang đứng, ủi phẳng và kiểm tra xem đĩa có rách hay bị gấp hay không. Một mặt 2 chiều có độ cong riêng thì khi ủi xong ta không thể tạo ra một bản đồ đường phố phẳng phiu. 'Mật độ' các nếp gấp hay các vết rách có liên quan tới độ cong. Nếu có nếp gấp thì độ cong riêng âm, vết rách thì độ cong riêng dương.

Câu đố 269 e

** trừ trường hợp núi có hình dáng là một hình nón hoàn hảo. Bạn có thể khẳng định điều này không?

*** Cũng nên nhớ rằng câu trả lời cho câu hỏi này cũng cho ta biết cách phân biệt độ cong nội tại với hệ toạ độ cong trên một không gian phẳng. Thường những người tiếp cận với Thuyết tương đối tổng quát lần đầu tiên hay hỏi câu này.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 83 Độ cong dương, bằng 0 và âm trong không gian 2 chiều.

Kiểm tra kiến thức: Không gian một chiều có độ cong riêng không? Vòng xuyến có độ cong riêng không?

Câu đố 270 s

Mặt khác, ta cũng có thể nhận ra độ cong riêng bằng cách kiểm tra hai đường thẳng song song có còn song song, đến gần nhau hay tách xa nhau một cách cục bộ hay không. Trên mặt trụ giấy, các đường song song vẫn còn song song; trong trường hợp này, người ta nói rằng nó có độ cong riêng *bằng không*. Mặt có các đường song song *hội tụ*, như mặt đất, thì có độ cong riêng *dương*, và mặt có các đường song song *phân kỳ*, như mặt yên ngựa, thì có độ cong riêng *âm*. Nói một cách đơn giản, độ cong dương có nghĩa là ta bị ràng buộc vào chuyển động của mình nhiều hơn, âm thì ta ít bị ràng buộc hơn. Độ cong *không đổi* bao hàm việc bị khoá trong một không gian hữu hạn. Bạn có thể kiểm tra điều này bằng Hình 83 và Hình 85. Ta còn có thể đo độ cong riêng bằng cách xác định tốc độ hội tụ hay phân kỳ của các đường song song.

Trang 193

Cách đo độ cong riêng thứ ba là dùng các hình tam giác. Trên mặt cong tổng các góc trong của tam giác lớn hơn π, nghĩa là lớn hơn 2 góc vuông, nếu độ cong dương và nhỏ hơn π nếu độ cong âm.

Xem 184

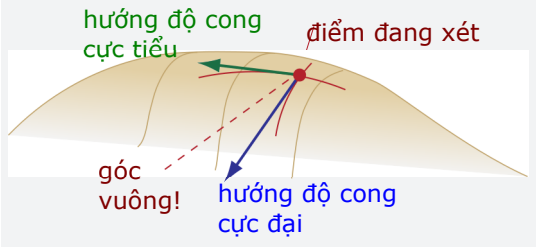
Chúng ta hãy đi vào chi tiết cách *định lượng* và đo độ cong của các mặt. Đầu tiên là vấn đề ngữ vựng: một hình cầu bán kính a theo định nghĩa có độ cong riêng là $K = 1/a^2$. Do đó mặt phẳng có độ cong bằng 0. Bạn có thể kiểm tra điều này đối với một vòng tròn trên mặt cầu, có bán kính r, chu vi C, và diện tích A liên hệ với nhau theo công thức

$$C = 2\pi r\left(1 - \frac{K}{6}r^2 + \ldots\right) \quad \text{và} \quad A = \pi r^2\left(1 - \frac{K}{12}r^2 + \ldots\right) \tag{186}$$

chỗ chấm chấm là các số hạng bậc cao. Công thức này cho phép ta xác định độ cong riêng K, còn gọi là độ cong *Gauss*, đối với một điểm tổng quát trên một mặt hai chiều bằng một trong hai công thức sau đây:

$$K = 6\lim_{r\to 0}\left(1 - \frac{C}{2\pi r}\right)\frac{1}{r^2} \quad \text{hay} \quad K = 12\lim_{r\to 0}\left(1 - \frac{A}{\pi r^2}\right)\frac{1}{r^2}\,. \tag{187}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 84 Hướng của độ cong cực đại và hướng của độ cong cực tiểu của một mặt luôn luôn trực giao với nhau.

Các biểu thức này cho phép một con kiến đo được độ cong riêng tại mọi điểm trên một mặt mịn màng bất kỳ.* Từ giờ trở đi, *độ cong* luôn có nghĩa là độ cong *riêng* nghĩa là độ cong Gauss và các độ cong có số chiều lớn hơn. Giống như một con kiến trên mặt 2 chiều, một quan sát viên trong không gian cũng chỉ có thể phát hiện ra độ cong riêng. Do đó, trong việc mô tả thiên nhiên ta chỉ cần quan tâm đến độ cong riêng.

Ta cũng nên nhớ rằng độ cong của một mặt có thể thay đổi theo vị trí, có thể dương, như trên quả trứng, hay âm, như chỗ gần lỗ thủng của vòng xuyến. Yên ngựa cũng là một thí dụ về độ cong âm, nhưng khác với vòng xuyến, độ cong của nó thay đổi theo mọi hướng. Đúng ra thì ta không thể đặt vừa một mặt hai chiều có độ cong âm *không đổi* vào trong không gian 3 chiều; để làm được như vậy ta cần ít nhất 4 chiều và nếu bạn
Câu đố 272 e cố gắng tưởng tượng, bạn có thể nhận ra điều đó.

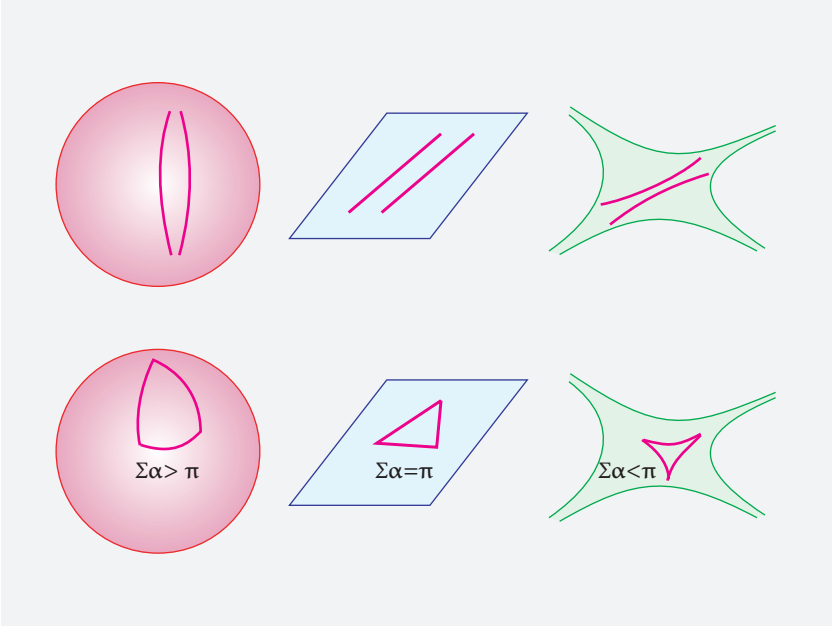
Đối với một mặt bất kỳ, tại *mọi* điểm, hướng của độ cong cực đại và hướng của độ cong cực tiểu *trực giao* với nhau. Mối quan hệ này, như ta thấy trong Hình 84, được Leonhard Euler khám phá vào thế kỷ 18. Bạn có thể kiểm tra điều này bằng một tách trà, một công trình kiến trúc của Henry Moore, hay bất kỳ một vật cong nào khác chung quanh bạn, như một chiếc Volkswagen Beetle chẳng hạn. Độ cong Gauss K xác định theo công thức (187) thực ra là tích của hai nghịch đảo của hai bán kính cong tương ứng. Như vậy, mặc dù độ cong của *một đường không phải là* một tính chất riêng, nhưng độ cong Gauss là một tính chất *riêng* tại mỗi điểm trên một mặt. Điều này như đã giải thích, có nghĩa là bẻ cong một mặt sẽ không làm thay đổi độ cong tại mỗi điểm. Thí dụ một tờ giấy phẳng, một tờ giấy cuộn thành một hình trụ hay một tờ giấy gấp lại, đều có độ cong riêng bằng 0. Vì độ cong riêng/Gauss của một tờ giấy phẳng là 0, đối với mọi tờ giấy bị uốn cong, tại mỗi điểm, luôn luôn có một đường thẳng có độ cong bằng 0. Các tờ giấy bị uốn cong tạo thành những đường thẳng. Tính chất này suy ra từ tính độc lập với hình dạng của độ cong Gauss. Tính chất này làm cho những tờ giấy *bị uốn cong* – không phải các tờ giấy phẳng – trở nên cứng và kháng cự lại các nỗ lực nhằm bẻ cong các đường thẳng đó. Tính chất này giải thích cho việc các tờ giấy có hình trụ thẳng, hình nón hay được gấp lại là những cấu trúc nhẹ và cứng đặc biệt. Cùng lý do như vậy, cách tốt nhất để cầm một miếng pizza là gấp nó theo đường bán kính. Trong trường hợp này, độ cứng riêng sẽ giúp cho đầu miếng bánh không cong xuống.

* Nếu thể tích n chiều của một hình cầu được viết dưới dạng $V_n = C_n r^n$ và 'bề mặt' $(n-1)$ chiều là $O_n = nC_n r^{n-1}$, ta có thể tổng quát hoá các biểu thức của độ cong thành
Xem 185

$$K = 3(n+2)\lim_{r\to 0}\left(1-\frac{V_n}{C_n r^n}\right)\frac{1}{r^2} \quad \text{hay} \quad K = 3n\lim_{r\to 0}\left(1-\frac{O_n}{nC_n r^{n-1}}\right)\frac{1}{r^2}\,, \tag{188}$$

Câu đố 271 ny như Vermeil đã chứng minh. Một bài toán đố nổi tiếng là xác định số C_n.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 85 Độ cong dương, 0, và âm (trong không gian 2 chiều) được minh hoạ bằng các đường trắc địa tương ứng và tổng các góc trong một tam giác.

Các mái nhà có hình dạng là các mặt hyperboloid tròn xoay hay các mặt paraboloid hyperbolic thì rất cứng và có hai đường thẳng đi qua mỗi điểm trên mặt đó. Các mặt này chẳng phải được làm từ các mặt phẳng được uốn cong đó sao?

Câu đố 273 s

Tóm lại, độ cong Gauss là số đo độ cong riêng của một mặt 2 chiều. Người ta cần một số đo riêng của độ cong như vậy nếu phải sống hay di chuyển trong một mặt hay không gian mà ta đang thám hiểm. Vì điều này áp dụng cho mọi người, nên các nhà vật lý đặc biệt quan tâm tới độ cong riêng, kể cả trường hợp nhiều hơn 2 chiều.

Độ cong của không gian ba chiều

Đối với không gian *3 chiều*, việc mô tả độ cong riêng hơi phức tạp một chút. Đầu tiên ta khó mà hình dung ra độ cong này, vì ta thường liên kết độ cong với độ cong riêng. Thật vậy, cách duy nhất để tìm hiểu độ cong 3 chiều của không gian là nghĩ giống như con kiến trên mặt phẳng và tập trung vào độ cong riêng. Do đó ta sẽ mô tả độ cong 3 chiều bằng cách dùng độ cong 2 chiều.

Trong không gian cong 3 chiều, độ cong Gauss của một đĩa nhỏ 2 chiều, quanh một điểm bất kỳ sẽ tuỳ thuộc vào sự định hướng của đĩa. Đầu tiên chúng ta hãy xem trường hợp đơn giản nhất. Nếu độ cong Gauss tại một điểm giống nhau đối với mọi hướng, điểm đó được gọi là *đẳng hướng*. Ta có thể tưởng tượng một hình cầu nhỏ bao quanh điểm đó. Trong trường hợp 3 chiều đặc biệt này, mối liên hệ giữa bán kính r, diện tích bề mặt A đo được và thể tích V của hình cầu là

Câu đố 274 ny

$$A = 4\pi r^2 \left(1 - \frac{K}{3}r^2 + \dots\right) \quad \text{và} \quad V = \frac{4\pi}{3}r^3 \left(1 - \frac{K}{5}r^2 + \dots\right), \tag{189}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

ở đây K là độ cong đối với một điểm đẳng hướng. Điều này kéo theo

$$K = 3 \lim_{r\to 0} \left(1 - \frac{A}{4\pi r^2}\right) \frac{1}{r^2} = 6 \lim_{r\to 0} \frac{r - \sqrt{A/4\pi}}{r^3} = 6 \lim_{r\to 0} \frac{r_{\text{excess}}}{r^3} \,, \tag{190}$$

ở đây ta định nghĩa *dư số bán kính* là $r_{\text{excess}} = r - \sqrt{A/4\pi}$. Như vậy

▷ Đối với không gian 3 chiều, *độ cong trung bình bằng 6 lần dư số bán kính của một hình cầu nhỏ chia cho bán kính lập phương.*

Mỗi độ cong dương thì tương đương với một dư số bán kính dương và tương tự cho trường hợp bằng 0 và âm. Độ cong *trung bình* tại một điểm là độ cong được tính bằng cách áp dụng định nghĩa cho một hình cầu nhỏ với một điểm không đẳng hướng bất kỳ.

Đối với một điểm không đẳng hướng trong không gian 3 chiều, giá trị độ cong Gauss được xác định bằng một đĩa 2 chiều sẽ tuỳ thuộc vào *sự định hướng* của đĩa. Đúng ra thì có một mối liên hệ giữa mọi độ cong khả hữu của đĩa tại điểm đã cho; hợp lại, chúng phải tạo thành một tensor. (Tại sao?) Nói cách khác, giá trị độ cong Gauss xác định một ellipsoid tại mỗi điểm. Để mô tả độ cong một cách đầy đủ bằng một tensor bất kỳ trong không gian 3 chiều, ta phải định rõ giá trị độ cong Gauss theo 3 hướng trực giao, tương ứng với ba trục chính của ellipsoid.*

Câu đố 275 ny

Giá trị độ cong đối với không gian 3 chiều quanh chúng ta là gì? Năm 1827, người ta nói rằng nhà toán học và vật lý học Carl-Friedrich Gauß** đã kiểm tra xem 3 góc do 3 ngọn núi gần nơi ông ở có tổng bằng π hay không. Ngày nay ta biết rằng độ sai lệch δ so với góc π trên mặt một vật có khối lượng M bán kính r được cho bởi công thức

$$\delta = \pi - (\alpha + \beta + \gamma) \approx -A_{\text{triangle}} K = A_{\text{triangle}} \frac{GM}{r^3 c^2} \,. \tag{191}$$

Đây là biểu thức điển hình trong hình học hyperbolic. Đối với trường hợp độ cong toán học K âm, đẳng thức đầu tiên do Johann Lambert chứng minh.*** Phương trình cuối cùng được tìm ra sau đó 1.5 thế kỷ, do Einstein là người đã cắt nghĩa rằng độ cong âm

* Tuy nhiên 3 giá trị này không độc lập, vì chúng phải cùng với nhau tạo ra độ cong khối trung bình K. Tóm lại, có *3* số vô hướng độc lập mô tả độ cong tại mỗi điểm trong không gian 3 chiều. Dùng tensor metric g_{ab} và tensor Ricci R_{ab} được giới thiệu dưới đây, có một cách là xem 3 số đó như 3 số độc lập có giá trị $R = -2K$, $R_{ab}R^{ab}$ và $\det R/\det g$.

** Carl-Friedrich Gauß (b. 1777 Braunschweig, d. 1855 Göttingen), cùng với Leonhard Euler, là toán gia vĩ đại nhất trong lịch sử toán học. (Tên ông được viết là 'Gauss' trong sách tiếng Anh.) Nổi tiếng là thần đồng, năm 19 tuổi ông đã dựng được hình 17 cạnh đều bằng compa và thước (xem www.mathworld.wolfram.com/Heptadecagon.html). Ông tự hào về điều này đến nỗi cho vẽ hình này lên mộ bia của mình. Gauss đã để lại nhiều công trình về Lý thuyết số, Topo, Thống kê học, Đại số, Số phức và Hình học vi phân là một phần của toán học hiện đại mang tên ông. Trong các thành tựu của ông có Lý thuyết độ cong và Hình học phi-Euclide. Ông cũng nghiên cứu về Điện từ học và Thiên văn học.

Gauss là một người khó tính, làm việc độc lập và không tạo ra một trường phái nào cả. Ông công bố ít, vì phương châm của ông là: pauca sed matura (ít nhưng chín chắn). Vì thế khi một toán gia khác công bố một kết quả mới, ông thường đưa ra một cuốn sổ tay trong đó có ghi kết quả tương tự mà ông đã tìm ra nhiều năm trước đó. Cuốn sổ tay nổi tiếng này bây giờ vẫn còn ở trên trang www.sub.uni-goettingen.de.

*** Johann Lambert (1728–1777), toán gia, vật lý gia, triết gia Thuỵ Sĩ. Trong các thành tựu có việc ông chứng minh tính vô tỷ của π và nhiều định luật quang học mang tên ông.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

K của không gian quanh ta có liên hệ với khối lượng và lực hấp dẫn của một vật. Đối với trường hợp của Trái đất và các khoảng cách núi non điển hình, góc δ có độ lớn cỡ 10^{-14} rad. Gauss không có cơ hội để phát hiện ra độ sai lệch nào và thực tế là ông không phát hiện được điều gì. Cho đến bây giờ, các thí nghiệm với laser và các dụng cụ đo có độ chính xác cao vẫn chưa phát hiện ra độ sai lệch nào trên Trái đất. Hệ số tỷ lệ xác định độ cong của không-thời gian trên mặt đất đơn giản là quá nhỏ. Nhưng Gauss không biết, như chúng ta ngày nay, rằng lực hấp dẫn và độ cong luôn cặp kè với nhau.

Độ cong trong không-thời gian

> Notre tête est ronde pour permettre à la pensée de changer de direction.*
>
> Francis Picabia

Trong thiên nhiên, với *4* chiều không-thời gian, việc xác định độ cong cần một cách tiếp cận phức tạp hơn. Đầu tiên, việc sử dụng toạ độ không-thời gian tự động kéo theo việc tốc độ ánh sáng c là tốc độ giới hạn. Thêm nữa, vì số chiều là 4, nên ta trông chờ có nhiều loại độ cong: độ cong trung bình tại một điểm, được xác định bằng cách so sánh thể tích 4 chiều của một hình cầu 4 chiều trong không-thời gian với giá trị suy ra từ bán kính đã đo; rồi một tập hợp các độ cong 'gần trung bình' được xác định bằng thể tích 3 chiều của một hình cầu 3 chiều theo những hướng khác nhau, cộng với một tập hợp các độ cong 'bậc thấp' được xác định bằng diện tích 2 chiều của một đĩa 2 chiều thông thường theo nhiều hướng. Hiển nhiên là ta cần sắp xếp lại tập hợp này.

May mắn thay, Vật lý có thể làm cho Toán học dễ dàng hơn. Ta bắt đầu bằng việc xác định độ cong trong không-thời gian. Để làm được điều này, ta dùng định nghĩa độ cong của Hình 85. Như ta đã thấy trong hình, độ cong K cũng mô tả cách mà đường trắc địa *phân kỳ* hay *hội tụ*.

Các đường trắc địa là con đường thẳng nhất trên một mặt, nghĩa là các đường mà một chiếc xe hơi nhỏ hay một xe đạp 3 bánh sẽ chạy theo nếu nó chạy trên mặt đó bằng cách giữ cho tay lái thẳng. Các đường trắc địa lân cận thì song song với nhau. Nếu hai đường trắc địa lân cận ở trong một không gian cong, khoảng cách s giữa chúng sẽ thay đổi dọc theo các đường trắc địa. Điều này xảy ra khi

Câu đố 276 e

$$\frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}l^2} = -Ks + \text{các bậc cao hơn} \tag{192}$$

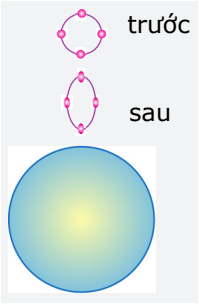
trong đó l là số đo chiều dài dọc theo đường trắc địa. Ở đây, K là độ cong địa phương, nói cách khác, là nghịch đảo của bán kính cong bình phương. Trong trường hợp không-thời gian, hệ thức này được mở rộng bằng cách thay thế thời gian riêng τ (nhân tốc độ ánh sáng) cho chiều dài riêng. Như vậy khoảng cách và độ cong liên hệ với nhau theo công thức

$$\frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}\tau^2} = -Kc^2 s + \text{các bậc cao hơn} \tag{193}$$

Nhưng đây là định nghĩa của gia tốc! Trong không-thời gian, các đường trắc địa là quỹ

* 'Đầu của chúng ta tròn để cho phép tư tưởng của chúng ta chuyển hướng.' Francis Picabia (b. 1879 Paris, d. 1953 Paris) hoạ sĩ dada và siêu thực Pháp.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 86 Hiệu ứng thuỷ triều đo độ cong của không-thời gian.

đạo của các hạt rơi tự do. Nói cách khác, những gì trong không gian thuần tuý được mô tả bằng *độ cong*, thì trong không-thời gian sẽ trở thành *gia tốc tương đối* của hai hạt lân cận đang rơi tự do. Thật vậy, ta đã gặp những gia tốc này: chúng mô tả hiệu ứng thuỷ triều. Tóm lại, độ cong không-thời gian và hiệu ứng thuỷ triều giống y như nhau.

Quyển I, trang 197

Hiển nhiên là, độ lớn của hiệu ứng thuỷ triều, và cũng là độ cong, sẽ phụ thuộc vào hướng – chính xác hơn là hướng của mặt phẳng không-thời gian tạo bởi vận tốc của hai hạt. Hình 86 chứng tỏ rằng dấu của hiệu ứng thuỷ triều, cũng là dấu của độ cong, phụ thuộc vào sự định hướng: hạt theo hướng trên-dưới thì phân kỳ, những hạt cạnh nhau thì hội tụ.

Định nghĩa của độ cong cũng bao hàm K là một tensor, nghĩa là từ đây trở đi ta phải thêm các chỉ số. (Bao nhiêu?) Điều thú vị là ta có thể tạm thời tránh các chỉ số bằng cách quan sát một tổ hợp đặc biệt của các độ cong không gian. Nếu ta lấy 3 mặt phẳng trong không gian, cả 3 trực giao với nhau và giao nhau tại một điểm đã cho, *tổng* của 3 độ cong *thiết diện* này *không* phụ thuộc vào quan sát viên. (Điều này tương ứng với vết của tensor.) Bạn có thể khẳng định điều này bằng cách dùng định nghĩa của độ cong vừa mới cho không?

Câu đố 277 ny
Xem 186
Câu đố 278 ny

Tổng của 3 độ cong thiết diện xác định các mặt phẳng trực giao hỗ tương$K_{(12)}$, $K_{(23)}$ và $K_{(31)}$, có liên hệ với dư số bán kính đã định nghĩa ở trên. Bạn có thể tìm ra mối liên hệ này không?

Câu đố 279 ny

Nếu một mặt có độ cong *không đổi*, nghĩa là độ cong giống nhau tại mọi điểm, các vật thể hình học có thể chuyển động trên mặt đó mà không làm nó biến dạng. Bạn có thể hình dung ra điều này không?

Câu đố 280 e

Tóm lại, độ cong của không-thời gian là một khái niệm trực giác mô tả cách biến dạng của không-thời gian. Độ cong địa phương của không-thời gian được xác định bằng cách lần theo chuyển động của các hạt rơi tự do ở gần nhau. Nếu ta tưởng tượng không (-thời gian) như một tấm nệm, hay một viên cao su lớn mà ta đang sống ở trong đó, độ cong tại một điểm mô tả cách thức mà tấm nệm bị nén tại điểm đó. Vì ta sống *trong* tấm nệm, ta cần dùng các phương pháp 'người trong cuộc', như dư số bán kính và độ cong thiết diện, để mô tả sự biến dạng.

Xem 187

Thuyết tương đối tổng quát hình như hơi khó học vì gần như người ta không thích nghĩ chân không là một tấm nệm và cũng ít giải thích nó theo lối này. Chúng ta cũng cần nhắc lại rằng, trong hàng trăm năm, nó là một điều khoản trong luật trung thành nên mọi vật lý gia phải nói rằng chân không thì trống rỗng. Điều này vẫn còn đúng. Tuy vậy, việc hình dung chân không là một tấm nệm, hay là một chất, là một trong nhiều cách để

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

giúp ta hiểu Thuyết tương đối tổng quát.

Độ cong trung bình và chuyển động trong Thuyết tương đối tổng quát

Một nửa của Thuyết tương đối tổng quát là phát biểu: một vật bất kỳ chuyển động dọc theo các đường trắc địa, nghĩa là dọc theo các đường có thời gian riêng *cực đại*. Nửa còn lại nằm trong một biểu thức: đối với *mỗi* quan sát viên, tổng của 3 độ cong thiết diện *riêng* tại một điểm *trong không gian*, độ cong trung bình, được cho bởi công thức

$$K_{(12)} + K_{(23)} + K_{(31)} = \frac{8\pi G}{c^4} W^{(0)} \tag{194}$$

ở đây $W^{(0)}$ là mật độ năng lượng *riêng* tại điểm đó. Chỉ số dưới cho biết độ cong riêng hỗn hợp được xác định bằng 3 hướng trực giao 1, 2 và 3. Đây là toàn bộ Thuyết tương đối tổng quát viết gọn trong một đoạn văn.

Ta đã biết không-thời gian quanh các khối lượng và năng lượng bị uốn cong. Biểu thức (194) xác định *giá trị* khối lượng và năng lượng làm cong không gian. Ta cũng nên nhớ rằng hệ số bên vế phải là 2π chia cho lực cực đại.

Không khó để tìm thấy một cách mô tả tương đương khi sử dụng dư số bán kính đã định nghĩa ở trên, bằng cách đưa ra công thức khối lượng $M = VW^{(0)}/c^2$. Gọi A là diện tích bề mặt của thể tích hình cầu V chứa khối lượng, ta được

$$r_{\text{excess}} = r - \sqrt{A/4\pi} = \frac{G}{3c^2} M \,. \tag{195}$$

Tóm lại, Thuyết tương đối tổng quát khẳng định rằng đối với mỗi quan sát viên, *dư số bán kính của một hình cầu nhỏ phụ thuộc khối lượng chứa trong hình cầu đó.**

Cần lưu ý rằng cả hai cách mô tả đều dẫn tới kết luận độ cong trung bình tại một điểm trong một không gian rỗng thì *bằng 0*. Như ta sẽ thấy sau đây, điều này có nghĩa là gần một khối cầu, -(độ cong) *hướng về phía* khối cầu bằng 2 lần độ cong *quanh* khối cầu; do đó tổng sẽ bằng 0.

Độ cong thay đổi theo vị trí. Đặc biệt, hai cách mô tả đều bao hàm một điều là nếu năng lượng *chuyển động*, độ cong sẽ chuyển động theo. Tóm lại, như ta sẽ thấy ngay sau đây, cả hai độ cong không gian và độ cong không-thời gian đều *thay đổi* theo không gian và thời gian.

Ta cần lưu ý là khi chuyển sang độ cong có một hiệu ứng khó chịu: vận tốc tương đối của các quan sát viên *ở xa* không xác định. Bạn có thể cung cấp luận cứ cho phần này không? Trong không gian bị uốn cong, vận tốc tương đối chỉ xác định đối với các vật *ở gần* – đúng ra là các vật sát bên. Vận tốc tương đối của các vật ở xa chỉ được xác định đúng khi không gian phẳng.

Câu đố 281 ny

Xem 188 * Một công thức khác tương đương, khi bán kính nhỏ, là diện tích A được tính theo công thức

$$A = 4\pi r^2 \left(1 + \frac{1}{9} r^2 R\right) \tag{196}$$

ở đây R là vô hướng Ricci, sẽ được nói tới sau.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Các đại lượng xuất hiện trong biểu thức (194) *độc lập* với quan sát viên. Nhưng thông thường người ta lại muốn dùng các đại lượng phụ thuộc quan sát viên. Hệ thức trở nên phức tạp; phương trình (194) phải mở rộng thành 10 phương trình, được gọi là *các phương trình trường của Einstein*. Chúng sẽ được giới thiệu dưới đây. Nhưng trước khi làm như vậy, ta sẽ kiểm tra tính hợp lý của Thuyết tương đối tổng quát. Ta sẽ bỏ qua việc kiểm tra này nếu nó chứa Thuyết tương đối đặc biệt như một trường hợp giới hạn và tiến thẳng tới việc kiểm tra chính.

Lực hấp dẫn vạn vật

> Lý do duy nhất giữ chân tôi ở đây là trọng lực.
> Vô danh

Đối với các vận tốc và độ cong nhỏ, các độ cong *tức thời* $K_{(0j)}$ có một tính chất đặc biệt. Trong trường hợp này, có thể định nghĩa chúng như đạo hàm bậc 2 của một hàm vô hướng φ. Nói cách khác, trong trường hợp thông thường ta có thể viết

Câu đố 282 e

$$K_{(0j)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial (x^j)^2} \tag{197}$$

Thường thì sự gần đúng này rất tốt và hàm φ trở thành thế hấp dẫn. Thật vậy, vì vận tốc và độ cong nhỏ nên ta có thể đặt $W^{(0)} = \rho c^2$ và $c \to \infty$, để kiếm được

$$K_{(ij)} = 0 \quad \text{và} \quad K_{(01)} + K_{(02)} + K_{(03)} = \Delta\varphi = 4\pi G\rho \,. \tag{198}$$

Nói cách khác, khi tốc độ nhỏ, không gian sẽ phẳng và hàm thế φ tuân theo phương trình Poisson. Như vậy Thuyết hấp dẫn vạn vật thực ra là giới hạn của Thuyết tương đối tổng quát khi tốc độ và độ cong nhỏ.

Câu đố 283 ny

Bạn có thể chứng minh rằng hệ thức (194) giữa độ cong và mật độ năng lượng, khi tính chính xác hơn, thực ra có bao hàm ý tưởng thời gian gần một vật phụ thuộc vào độ cao, như đã đề cập trước kia hay không?

Trang 140

Metric Schwarzschild

Xem 186

Độ cong chính xác của không-thời gian gần một khối cầu là bao nhiêu? Câu trả lời được đưa ra năm 1915 là của Karl Schwarzschild, người đã tính ra kết quả này trong thời gian ở trong quân đội lúc Đệ nhất thế chiến. Như vậy lời giải của Einstein có sau.

Trang 149

Trong toạ độ cầu, cung vi phân là

$$\mathrm{d}s^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 \mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2 \mathrm{d}\varphi^2 \,. \tag{199}$$

Câu đố 284 ny

Độ cong của metric Schwarzschild sẽ là

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

$$K_{r\varphi} = K_{r\theta} = -\frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \quad \text{và} \quad K_{\theta\varphi} = 2\frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3}$$
$$K_{t\varphi} = K_{t\theta} = \frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \quad \text{và} \quad K_{tr} = -2\frac{G}{c^2}\frac{M}{r^3} \tag{200}$$

Xem 186
Quyển I, trang 197

ở mọi nơi. Sự phụ thuộc vào $1/r^3$ xuất phát từ sự phụ thuộc tổng quát của mọi hiệu ứng thuỷ triều mà ta đã tính được trong chương lực hấp dẫn vạn vật. Các hệ số G/c^2 là do lực hấp dẫn cực đại. Chỉ có các tiền nhân tử cần phải tính từ Thuyết tương đối tổng quát.

Câu đố 285 ny

Độ cong trung bình hiển nhiên bằng 0 vì nó bằng 0 tại mọi điểm trong chân không. Giá trị của các độ cong gần mặt đất rất nhỏ như ta mong đợi.

Các câu đố vui và lạ về độ cong

> Il faut suivre sa pente, surtout si elle monte.*
>
> André Gide

* *

Một con ruồi đậu bên ngoài một cái ly hình trụ, dưới miệng ly 1 cm. Một giọt mật nằm bên ngoài, phía bên kia ly, cách miệng ly 2 cm. Khoảng cách ngắn nhất từ con ruồi tới giọt mật là bao nhiêu? Nếu giọt mật nằm trong ly thì khoảng cách ngắn nhất là bao nhiêu?

Câu đố 286 e

* *

Câu đố 287 e

Điểm có độ cong Gauss lớn nhất và nhỏ nhất trên quả trứng nằm ở đâu?

**

Độ cong 3 chiều: tensor Ricci

> Jeder Straßenjunge in unserem mathematischen Göttingen versteht mehr von vierdimensionaler Geometrie als Einstein. Aber trotzdem hat Einstein die Sache gemacht, und nicht die großen Mathematiker.
>
> David Hilbert***

Bây giờ khi ta đã có cảm giác về độ cong, chúng ta hãy mô tả nó theo cách thức cho phép một quan sát viên *bất kỳ* đều có thể nói chuyện với một quan sát viên bất kỳ *khác*. Rủi thay, việc này phải sử dụng các công thức có *tensor*. Trước tiên, những công thức này trông phát nản. Thách thức ở đây là thấy điểm cốt yếu trong mỗi biểu thức (nghĩa là tạm thời quên đi mọi chỉ số) và đừng bị các chữ nhỏ rải rác đó làm rối trí.

* 'Người ta phải theo thiên hướng của mình, đặc biệt trong trường hợp nó hướng lên.'
** Phần còn lại của Chương này có thể bỏ qua trong lần đọc đầu tiên.
*** 'Mọi đứa trẻ đường phố trong thành phố Göttingen toán học của chúng ta đều biết nhiều hơn Einstein về hình học 4 chiều. Tuy vậy, chính Einstein là người tạo nên hình học đó chứ không phải các nhà toán học vĩ đại nào khác.'

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ta đã đề cập ở trên là không-thời gian 4 chiều được mô tả bằng độ cong 2, 3, 4 chiều. Nhiều tài liệu nhập môn bắt đầu bằng độ cong 3 chiều. Độ cong 3 chiều mô tả sự khác biệt giữa thể tích 3 chiều tính từ một bán kính và thể tích 3 chiều thực. Các chi tiết được mô tả bằng *tensor Ricci*.* Khi tìm hiểu về độ lệch trắc địa hoá ra tensor Ricci mô tả sự biến dạng đám mây hình cầu của các hạt rơi tự do – đám mây cà phê – dọc theo quỹ đạo của chúng. Chính xác hơn, tensor Ricci R_{ab} là (công thức chính xác của) đạo hàm bậc 2 theo thời gian (riêng) của thể tích đám mây chia cho thể tích đám mây. Trong chân không, thể tích của đám mây cà phê đang rơi như vậy luôn luôn không đổi, mặc dù có sự biến dạng do các lực thuỷ triều. Hình 86 minh hoạ việc lực hấp dẫn không làm thay đổi thể tích đám mây cà phê. Tóm lại, tensor Ricci là phiên bản tương đối tính tổng quát của Laplacian của hàm thế $\Delta\varphi$, hay đúng hơn, của mô hình 4 chiều $\Box\varphi$.

Xem 189
Trang 196

Độ cong trung bình: vô hướng Ricci

Định nghĩa tổng quát nhất nhưng ít chi tiết nhất của độ cong là định nghĩa mô tả sự khác biệt giữa thể tích 4 chiều tính từ bán kính đo được và thể tích 4 chiều thực. Đây là *độ cong trung bình* tại một điểm trong không-thời gian và được biểu diễn bằng *vô hướng Ricci* R

$$R = -2K = \frac{-2}{r^2_{\text{curvature}}} \,. \tag{201}$$

Hoá ra vô hướng Ricci có thể dẫn xuất từ tensor Ricci nhờ một *phép co*, một phép lấy trung bình chính xác. Vì các tensor có hạng là 2, phép co giống như phép tìm vết:

$$R = R^{\lambda}{}_{\lambda} = g^{\lambda\mu} R_{\lambda\mu} \,. \tag{202}$$

Vô hướng Ricci mô tả độ cong được lấy trung bình trên không gian *và* thời gian. Trong hình ảnh của đám mây hình cầu đang rơi, vô hướng Ricci mô tả sự thay đổi thể tích của đám mây. Vô hướng Ricci luôn luôn = 0 trong chân không. Kết quả này cho phép ta lập mối liên hệ giữa độ cong không gian với sự thay đổi của thời gian theo độ cao trên mặt đất.

Câu đố 288 ny

Tensor Einstein

Sau hai năm miệt mài làm việc, Einstein khám phá ra là đại lượng mô tả độ cong trong thiên nhiên tốt nhất không phải là tensor Ricci R_{ab}, mà là một tensor xây dựng từ tensor Ricci. Đại lượng này được gọi là *tensor Einstein* G_{ab} được định nghĩa bằng công thức toán (dạng không có hằng số vũ trụ) như sau

$$G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R \,. \tag{203}$$

Hiểu ý nghĩa của công thức không khó. Giá trị G_{00} là tổng của độ cong thiết diện trong mặt phẳng *trực giao* với hướng 0 và như vậy tổng của tất cả các độ cong thiết diện không

* Gregorio Ricci-Cubastro (b. 1853 Lugo, d. 1925 Bologna), toán gia Ý. Ông là cha đẻ của phép tính vi phân tuyệt đối, còn gọi là 'phép tính Ricci'. Tullio Levi-Civita là học trò của ông.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

gian là:

$$G_{00} = K_{(12)} + K_{(23)} + K_{(31)} \,. \tag{204}$$

Tương tự, đối với mỗi chiều i, phần tử chéo G_{ii} là tổng (có để ý đến dấu trừ của metric) các độ cong thiết diện trong mặt phẳng *trực giao* với hướng i. Thí dụ ta có

$$G_{11} = K_{(02)} + K_{(03)} - K_{(23)} \,. \tag{205}$$

Sự khác biệt giữa tensor Ricci và tensor Einstein nằm trong cách thức mà các độ cong thiết diện tổ hợp với nhau: các đĩa *chứa* toạ độ của tensor Ricci và các đĩa *trực giao* với toạ độ của tensor Einstein. Cả hai đều mô tả độ cong không-thời gian tốt như nhau và hiệu chỉnh cái này cũng có nghĩa là hiệu chỉnh cái kia. (Vết và định thức của tensor Einstein là gì?)

Câu đố 289 d

Tensor Einstein có tính đối xứng, nghĩa là nó có *10* thành phần độc lập. Quan trọng nhất, tính phân kỳ của nó biến mất; do đó nó mô tả một đại lượng bảo toàn. Đây là tính chất cốt yếu đã cho phép Einstein liên kết nó với khối lượng và năng lượng bằng ngôn ngữ toán học.

Mô tả động lượng, khối lượng và năng lượng

Hiển nhiên là để mô tả lực hấp dẫn cho đầy đủ, chuyển động của động lượng và năng lượng cần được định lượng sao cho một quan sát viên bất kỳ có thể nói chuyện với một quan sát viên khác. Ta đã thấy động lượng và năng lượng luôn luôn xuất hiện cùng nhau trong các mô tả tương đối tính; bước kế tiếp là tìm ra cách định lượng chuyển động của chúng đối với các quan sát viên tổng quát.

Trước hết là đại lượng mô tả năng lượng, ta hãy gọi nó là T, phải được định nghĩa bằng cách dùng vector năng-động lượng $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{u} = (\gamma mc, \gamma m\boldsymbol{v})$ của Thuyết tương đối đặc biệt. Thêm nữa, T không mô tả một hạt đơn lẻ, mà theo cách phân bố của năng-động lượng trong không-thời gian. Vì vậy thực tế nhất là dùng T để mô tả *mật độ* của năng động lượng. Như vậy T sẽ là một *trường*, phụ thuộc vào thời gian và không gian, thường được biểu diễn bằng ký hiệu $T = T(t, x)$.

Vì mật độ năng-động lượng T mô tả mật độ trong không gian và thời gian nên nó xác định, tại mọi điểm không-thời gian đối với mọi diện tích vô cùng nhỏ $\mathrm{d}\boldsymbol{A}$ bao quanh điểm đó, dòng năng-động lượng $\mathrm{d}\boldsymbol{p}$ xuyên qua diện tích đó. Nói cách khác, T được định nghĩa bởi hệ thức

$$\mathrm{d}\boldsymbol{p} = T \, \mathrm{d}\boldsymbol{A} \,. \tag{206}$$

Bề mặt được đặc trưng bằng vector pháp tuyến $\mathrm{d}\boldsymbol{A}$. Vì mật độ năng-động lượng là hệ số tỷ lệ giữa hai vector nên T là một *tensor*. Dĩ nhiên, ta đang nói về dòng 4 chiều và mặt 4 chiều. Do đó tensor mật độ năng-động lượng có thể được tách ra như sau:

$$T = \left(\begin{array}{c|ccc} w & S_1 & S_2 & S_3 \\ \hline S_1 & t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ S_2 & t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ S_3 & t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} \text{mật độ} & \text{dòng năng lượng hay} \\ \text{năng lượng} & \text{mật độ động lượng} \\ \hline \text{dòng năng lượng hay} & \text{mật độ dòng} \\ \text{mật độ động lượng} & \text{động lượng} \end{array}\right) \tag{207}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

ở đây $w = T_{00}$ là số vô hướng 3 chiều, $\boldsymbol{S}$ là vector 3 chiều và t là tensor 3 chiều. Đại lượng T được gọi là *tensor* (*mật độ*) *năng-động lượng*. Nó có 2 tính chất chủ yếu: đối xứng và không phân kỳ.

Tính đối xứng của tensor T là kết quả của định luật bảo toàn moment động lượng. Tính không phân kỳ của T, thường được viết là

$$\partial_a T^{ab} = 0 \quad \text{hay viết tắt} \quad T^{ab}{}_{,a} = 0 \,, \tag{208}$$

hàm ý rằng tensor mô tả một đại lượng *được bảo toàn*. Trong mỗi thể tích, năng lượng chỉ có thể thay đổi thông qua dòng xuyên qua mặt ranh giới của nó. Bạn có thể chứng minh rằng sự mô tả năng-động lượng bằng tensor này thoả yêu cầu hai quan sát viên bất kỳ, có vị trí, hướng, tốc độ *và* gia tốc khác nhau, có thể trao đổi kết quả cho nhau không?

Câu đố 290 ny

Tensor mật độ năng-động lượng mô tả đầy đủ sự phân bố năng lượng, động lượng và khối lượng trong không gian và thời gian. Thí dụ, chúng ta hãy xác định mật độ năng–động lượng cho chất lỏng chuyển động. Vì chất lỏng có mật độ ρ, áp suất p và vận tốc 4 chiều $\boldsymbol{u}$, ta có

$$T^{ab} = (\rho_0 + p)u^a u^b - p g^{ab} \tag{209}$$

ở đây ρ_0 là mật độ đo được trong hệ quy chiếu đồng hành, còn gọi là mật độ *riêng*.* Hiển nhiên là ρ, ρ_0 và p phụ thuộc vào không gian và thời gian.

Dĩ nhiên, đối với một chất lỏng đặc biệt, ta cần biết mối liên hệ giữa áp suất p và mật độ ρ. Như vậy để mô tả đầy đủ một chất, ta cần biết mối liên hệ

$$p = p(\rho) \,. \tag{211}$$

Mối liên hệ này là tính chất riêng của chất và vì vậy *không thể* xác định từ Thuyết tương đối. Nó phải được dẫn xuất từ các thành phần của chất đó hay bức xạ và sự tương tác của chúng. Trường hợp đơn giản nhất là *bụi*, nghĩa là chất được tạo thành từ các chất điểm không tương tác. **

Tensor năng–động lượng được cho bởi công thức

$$T^{ab} = \rho_0 u^a u^b \,. \tag{212}$$

Câu đố 291 ny Bạn có thể giải thích sự khác biệt với trường hợp chất lỏng hay không?

Tính không phân kỳ của tensor năng–động lượng có ở mọi lúc, mọi nơi và bạn có thể kiểm tra điều này. Tính chất này giống như tensor Einstein đã được trình bày ở trên.

Câu đố 292 ny

* Trong hệ quy chiếu *đồng hành* ta có

$$T^{ab} = \begin{pmatrix} \rho_0 c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix} \,. \tag{210}$$

** Mặc dù Thuyết tương đối tổng quát cấm nói về sự hiện hữu của chất điểm, nhưng tính gần đúng tỏ ra hữu dụng trong các trường hợp khoảng cách các hạt rất lớn so với kích thước của chúng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nhưng trước khi ta tập trung cho đề tài này, có một ghi chú ngắn. Ta không tính tới *năng lượng hấp dẫn*. Hoá ra năng lượng hấp dẫn không thể xác định một cách tổng quát. Nhìn chung, lực hấp dẫn *không có* năng lượng liên kết với nó. Trong điều kiện đặc biệt nào đó, như trường yếu, chuyển động chậm, hay không-thời gian gần như phẳng, ta *có thể* xác định tích phân của thành phần G^{00} của tensor Einstein như năng lượng hấp dẫn âm. Như vậy năng lượng hấp dẫn chỉ được xác định *gần đúng* và chỉ trong môi trường sống thông thường của chúng ta.*

Các phương trình trường của Einstein

> [Thuyết tương đối tổng quát của Einstein] đội lốt chủ nghĩa vô thần.
>
> Một tay săn phù thuỷ ở Boston, vào khoảng 1935

> Bạn có tin vào Chúa không? Đã trả tiền cho câu trả lời dài 50 từ.
>
> Điện tín tiếp theo của một tay săn phù thuỷ khác dành cho người hùng (của anh ta là) Albert Einstein

> Tôi tin vào Chúa của Spinoza, người tự biểu lộ trong sự hài hoà có trật tự của sự vật đang hiện hữu, chứ không tin vào chúa là người can thiệp vào số phận và hành động của loài người.
>
> Câu trả lời của Albert Einstein

Các phương trình trường nổi tiếng của Einstein là nền tảng của nhiều nỗi lo tôn giáo. Chúng chứa đựng sự mô tả đầy đủ của Thuyết tương đối tổng quát. Những phương trình này có thể suy diễn theo nhiều cách. Cách đơn giản nhất là bắt đầu từ nguyên lý lực cực đại. Cách thứ hai là suy diễn các phương trình từ tác dụng Hilbert, như được giải thích dưới đây. Cách thứ ba là cách ta đang làm, cụ thể là tổng quát hoá mối liên hệ giữa độ cong và năng lượng đối với mọi quan sát viên.

Trang 115
Trang 206

Phương trình trường của Einstein được cho bởi công thức

$$G_{ab} = -\kappa\, T_{ab}$$

hay chi tiết hơn

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R - \Lambda g_{ab} = -\kappa\, T^{ab} \quad . \tag{213}$$

Hằng số κ, được gọi là *hằng số tương tác hấp dẫn*, có số đo là

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4} = 2.1 \cdot 10^{-43}\,/\mathrm{N} \tag{214}$$

và giá trị rất nhỏ của nó – 2π chia cho lực cực đại $c^4/4G$ – phản ánh mức độ yếu của lực hấp dẫn trong đời sống hằng ngày, hay nói khác đi, mức độ khó khăn của việc uốn cong

* Việc tính gần đúng này dẫn tới sự suy đoán nổi tiếng là năng lượng toàn phần của vũ trụ bằng 0. Bạn có đồng ý không?

Câu đố 293 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

không-thời gian. Hằng số Λ, còn gọi là *hằng số vũ trụ*, tương ứng với mật độ năng lượng khối của chân không, hay áp suất Λ/κ. Giá trị của nó nhỏ nên đo rất khó. Giá trị được
Trang 249 chấp nhận hiện nay là

$$\Lambda \approx 10^{-52}\,/\mathrm{m}^2 \quad \text{hay} \quad \Lambda/\kappa \approx 0.5\,\mathrm{nJ/m}^3 = 0.5\,\mathrm{nPa}\,. \tag{215}$$

Xem 190 Các phép đo và mô phỏng hiện tại cho thấy rằng tham số này, mặc dù có giá trị gần với nghịch đảo bình phương của bán kính vũ trụ hiện nay, là một hằng số không thay đổi theo thời gian.

Tóm lại, các phương trình trường nói rõ rằng độ cong tại một điểm thì bằng với dòng năng–động lượng xuyên qua điểm đó, có tính tới mật độ năng lượng trong chân không. Nói cách khác: *Năng–động lượng xác định cách uốn cong của không-thời gian, với lực cực đại là hệ số tỷ lệ.**

Trở lại với Lực hấp dẫn vạn vật

Phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát có thể đơn giản hoá trong trường hợp tốc độ nhỏ. Lúc đó $T_{00} = c^2\rho$ và mọi thành phần khác của T đều bằng 0. Sử dụng
Câu đố 294 ny định nghĩa của hằng số κ và đặt $\varphi = (c^2/2)h_{00}$ trong $g_{ab} = \eta_{ab} + h_{ab}$, ta tìm được

$$\nabla^2\varphi = 4\pi\rho \quad \text{và} \quad \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = -\nabla\varphi \tag{216}$$

* Einstein tìm được các phương trình trường nhờ dựa trên nhiều nguyên tắc chỉ đạo mà trong các tài liệu được gọi là *các nguyên lý*. Ngày nay nhiều nguyên lý trong số đó không được xem là quan trọng nữa. Tuy vậy, ta vẫn đưa ra đây một tổng quan ngắn.

- *Nguyên lý của Thuyết tương đối tổng quát*: mọi quan sát viên đều tương đương; nguyên lý này, mặc dù hay được phát biểu, nhưng hầu như không có nội dung vật lý.

- *Nguyên lý hiệp biến tổng quát*: các phương trình vật lý phải được phát biểu dưới dạng tensor; mặc dù ngày nay người ta biết rằng mọi phương trình đều có thể viết dưới dạng tensor, ngay cả lực hấp dẫn vạn
Xem 191 vật, trong nhiều trường hợp chúng đòi hỏi các yếu tố 'tuyệt đối' phi vật lý, nghĩa là các đại lượng ảnh hưởng đến các đại lượng khác nhưng không ảnh hưởng đến chính chúng. Ý tưởng phi vật lý này tương phản với ý tưởng *tương* tác, như ta sẽ giải thích sau đây.

Quyển III, trang 321 - *Nguyên lý tương tác cực tiểu*: các phương trình trường của lực hấp dẫn được tìm thấy từ các phương trình của Thuyết tương đối đặc biệt bằng cách lấy dạng tổng quát hoá đơn giản nhất. Dĩ nhiên hiện nay, khi người ta đã biết và kiểm chứng bằng thực nghiệm các phương trình trường, nguyên lý này chỉ còn ý nghĩa lịch sử.

- *Nguyên lý tương đương*: người ta không thể phân biệt gia tốc địa phương với lực hấp dẫn; ta dùng nguyên lý này để chứng tỏ không-thời gian là bán-Riemann và lực hấp dẫn là độ cong của nó.

- *Nguyên lý Mach*: quán tính bắt nguồn từ sự tương tác với phần còn lại của vũ trụ; nguyên lý này đúng, mặc dù có người vẫn cho rằng nó chưa đầy đủ trong Thuyết tương đối tổng quát. Dù sao nó cũng không
Trang 264 phải là bản chất của Thuyết tương đối tổng quát.

- *Sự đồng nhất của khối lượng hấp dẫn và khối lượng quán tính*: nguyên lý này được bao gồm trong định nghĩa khối lượng ngay từ đầu, nhưng được lặp lại đến phát chán trong các sách nói về Thuyết tương đối tổng quát; nó ngầm chứa trong định nghĩa tensor Riemann.

- *Nguyên lý tương ứng*: một lý thuyết mới, tổng quát hơn như Thuyết tương đối tổng quát, phải quy về các lý thuyết trước đó, ở đây là thuyết hấp dẫn vạn vật hay thuyết tương đối đặc biệt, khi nó bị giới hạn trong miền mà các lý thuyết kia có hiệu lực.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

mà ta đã biết rõ, vì ta có thể phát biểu lại như sau: một vật có khối lượng m ở gần một vật có khối lượng M có gia tốc là

$$a = G\frac{M}{r^2}, \tag{217}$$

một giá trị độc lập với khối lượng m của vật rơi. Và thực vậy, như Galileo đã nhận xét, mọi vật rơi với cùng một gia tốc, độc lập với kích thước, khối lượng, màu sắc, ... của chúng. Tương tự, trong Thuyết tương đối tổng quát, lực hấp dẫn hoàn toàn dân chủ.* Sự độc lập với khối lượng của vật rơi tự do bắt nguồn từ sự mô tả không-thời gian giống như một tấm nệm bị uốn cong. Các vật chuyển động trên tấm nệm đều di chuyển giống nhau, độc lập với khối lượng của chúng.

Tìm hiểu các phương trình trường

Để làm quen với các phương trình trường một cách đầy đủ, ta sẽ lướt qua các tính chất chính của chúng. Trước hết, mọi chuyển động bắt nguồn từ độ cong của không-thời gian có *tính thuận nghịch*, *khả vi* và do đó có *tính tất định*. Nên nhớ rằng chỉ có chuyển động đầy đủ của không-thời gian, vật chất *và* năng lượng mới có những tính chất này. Đối với các hạt, chuyển động có *tính bất thuận nghịch* vì thường có một số bức xạ hấp dẫn phát ra.

Câu đố 295 e

Bằng cách rút gọn các phương trình trường, khi hằng số vũ trụ bằng 0, ta tìm thấy biểu thức của vô hướng Ricci như sau:

$$R = -\kappa T\ . \tag{222}$$

Kết quả này cũng bao hàm hệ thức giữa dư số bán kính và khối lượng chứa trong một hình cầu.

Câu đố 296 ny

Các phương trình trường thì *phi tuyến* trong metric g, nghĩa là tổng các lời giải thường *không phải là* lời giải. Điều này khiến cho việc tìm kiếm các lời giải trở nên khó khăn hơn. Để có lời giải đầy đủ của các phương trình trường, ta phải xác định các điều kiện ban đầu và điều kiện biên. Cách thực hiện điều này tạo thành một phần chuyên biệt hoá của toán lý; ta không tìm hiểu chúng ở đây.

Xem 192

Albert Einstein thường nói rằng Thuyết tương đối tổng quát chỉ cung cấp sự hiểu biết

---

* Đây là một cách khác để chứng tỏ rằng Thuyết tương đối tổng quát phù hợp với Thuyết hấp dẫn vạn vật. Từ định nghĩa của tensor Riemann ta đã biết gia tốc tương đối b_a và tốc độ của các hạt lân cận có mối liên hệ

$$\nabla_e b_a = R_{ceda} v^c v^d\ . \tag{218}$$

Từ tính đối xứng của R ta biết rằng có một hàm φ sao cho $b_a = -\nabla_a \varphi$. Điều này có nghĩa là

$$\nabla_e b^a = \nabla_e \nabla^a \varphi = R^a_{ced} v^c v^d \tag{219}$$

suy ra

$$\Delta\varphi = \nabla_a \nabla^a \varphi = R^a_{cad} v^c v^d = R_{cd} v^c v^d = \kappa(T_{cd} v^c v^d - T/2) \tag{220}$$

Thay $T_{ab} = \rho v_a v_b$ ta được

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \tag{221}$$

là điều ta muốn chứng minh.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

về một phương diện của các phương trình trường (213), chứ không phải toàn thể. Bạn có biết ông muốn nói đến phương diện nào không?

Câu đố 297 ny

Ta có thể thu được điều gì từ các phương trình trường? Thật tình mà nói, ta chưa hoàn tất công việc. Rất ít quá trình cần sử dụng hết các phương trình trường. Nhiều sách giáo khoa về Thuyết tương đối chỉ viết ra các phương trình rồi thôi! Tuy vậy, nghiên cứu chúng cũng là việc đáng làm. Thí dụ như người ta có thể chứng tỏ rằng lời giải Schwarzschild *chỉ là* lời giải đối xứng cầu. Tương tự như vậy, năm 1923, Birkhoff chứng tỏ rằng mọi lời giải trong chân không đối xứng tròn xoay là lời giải tĩnh. Điều này xảy ra ngay cả khi khối lượng chuyển động, thí dụ như trong hiện tượng suy sụp của một ngôi sao.

Có lẽ áp dụng đẹp nhất của các phương trình trường là việc thực hiện các *film* về các quá trình tương đối tính. Nhiều film đã được đưa lên web; chúng cho ta thấy những hiện tượng xảy ra khi hai hố đen chạm nhau, khi một quan sát viên rơi vào hố đen, ... Để tạo ra các film này, ta cần giải trực tiếp (chứ không phải giải gần đúng) các phương trình trường.*

Các ứng dụng khác liên quan tới *sóng hấp dẫn*. Các phương trình trường đầy đủ chứng tỏ rằng sóng hấp dẫn không điều hoà cũng không tuyến tính. Sóng hình sin chỉ hiện hữu một cách gần đúng đối với biên độ nhỏ. Thú vị hơn, nếu hai sóng gặp nhau, trong nhiều trường hợp người ta tiên đoán là *các kỳ dị* của độ cong sẽ xuất hiện. Toàn bộ đề tài này vẫn còn là một chủ đề nghiên cứu và có thể cung cấp nhiều hiểu biết mới, sâu sắc giúp cho việc lượng tử hoá Thuyết tương đối tổng quát trong tương lai.

Chúng ta kết thúc phần này với một ghi chú bên lề. Thường các phương trình trường được đọc theo một chiều, khi phát biểu rằng năng–động lượng sinh ra độ cong. Người ta cũng có thể đọc theo cách khác, việc tính toán năng–động lượng cần thiết để tạo ra độ cong đã cho. Khi làm như vậy, người ta khám phá ra rằng không phải tất cả các không-thời gian cong là khả hữu, vì một số trường hợp sẽ dẫn tới mật độ năng lượng (hay mật độ khối lượng) *âm*. Những lời giải như vậy sẽ mâu thuẫn với giới hạn của tỷ số chiều dài/khối lượng của các hệ vật lý đã được đề cập.

Tác dụng Hilbert – không gian uốn cong như thế nào?

Khi Einstein bàn về các nghiên cứu của ông với David Hilbert, Hilbert đã tìm thấy một cách để làm trong một vài tuần, công việc mà Einstein mất nhiều năm để làm. Hilbert đã chứng tỏ rằng Thuyết tương đối tổng quát *trong không gian rỗng* có thể được mô tả bằng *nguyên lý tác dụng cực tiểu*.

Hilbert đã biết rằng mọi chuyển động đều cực tiểu hoá tác dụng nghĩa là cực tiểu hoá sự biến đổi. Đầu tiên Hilbert tìm Lagrangian, nghĩa là số đo của độ biến đổi đối với *chuyển động của không-thời gian*, hay nói chính xác hơn là đối với *sự uốn cong của không-thời gian*. Hiển nhiên là một số đo như vậy phải bất biến đối với quan sát viên; đặc biệt, nó phải bất biến đối với *mọi* sự thay đổi điểm quan sát.

Chuyển động do lực hấp dẫn được xác định bởi độ cong. Số đo của độ cong, độc lập với quan sát viên, phải là một tổ hợp của vô hướng Ricci R và hằng số vũ trụ Λ. Nhìn theo cách này thì nguyên lý tương đương và tính hiệp biến tổng quát đều quan trọng như nhau. Như vậy sẽ là điều hợp lý nếu ta xem sự biến đổi của không-thời gian được

* Xem thí dụ tại website www.photon.at/~werner/black-earth.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

mô tả bằng một tác dụng S tính theo công thức

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int (R - 2\Lambda)\, \mathrm{d}V \,. \tag{223}$$

Thể tích nguyên tố $\mathrm{d}V$ phải được xác định để sử dụng biểu thức này trong tính toán. Hằng số vũ trụ Λ (được thêm vào sau công trình của Hilbert vài năm), xuất hiện như một giải pháp toán học dùng để mô tả tác dụng tổng quát nhất, thì bất biến đồng phôi. Ta sẽ thấy dưới đây là giá trị của nó trong thiên nhiên, mặc dù nhỏ, nhưng hình như vẫn khác 0.

Ta có thể nói thêm về tác dụng Hilbert; một tính toán dài dòng đã khẳng định rằng tác dụng Hilbert cho phép ta suy ra các phương trình trường của Einstein – và ngược lại. Cả hai cách trình bày đều *tương đương với nhau*. Tác dụng Hilbert của một mảnh không-thời gian là tích phân lấy trên mảnh đó, của vô hướng Ricci cộng với hai lần hằng số vũ trụ. Nguyên lý tác dụng cực tiểu phát biểu rằng không-thời gian sẽ chuyển động hay uốn cong sao cho tích phân này thay đổi ít nhất.

Ta cũng có nhận xét là lực cực đại, với giá trị khổng lồ của nó, là một tiền nhân tử trong tác dụng (223). Một độ biến thiên nhỏ của độ cong sẽ kéo theo một tác dụng hay một biến đổi khổng lồ. Điều này phản ánh độ cứng cực lớn của không-thời gian. Bạn có thể chứng minh rằng tác dụng Hilbert dẫn xuất từ lực cực đại không?

Câu đố 298 ny

Cùng với tác dụng Hilbert, để mô tả chuyển động một cách đầy đủ, ta cần các điều kiện ban đầu. Những cách khác nhau để làm điều này đã tạo thành một lĩnh vực nghiên cứu đặc biệt. Tuy vậy chủ đề này đã lệch ra khỏi con đường mà ta đang đi. Điều tương tự cũng đúng đối với các biểu thức khác, nhưng tương đương, của tác dụng của Thuyết tương đối tổng quát.

Xem 127

Tóm lại, câu hỏi 'không gian chuyển động như thế nào?' được trả lời bằng nguyên lý tác dụng cực tiểu theo cách sau đây: *không gian tiến hoá bằng cách cực tiểu hoá độ cong vô hướng*. Câu hỏi 'vật thể chuyển động như thế nào?' được trả lời bằng Thuyết tương đối tổng quát giống như trong Thuyết tương đối đặc biệt: *vật thể chuyển động theo con đường có tuổi đời cực đại*.

Tính đối xứng của Thuyết tương đối tổng quát

Tính đối xứng chính của Lagrangian trong Thuyết tương đối tổng quát được gọi là *tính bất biến vi đồng phôi* hay *tính hiệp biến tổng quát*. Nói theo kiểu vật lý, tính đối xứng xác định rằng chuyển động thì độc lập với hệ toạ độ. Nói chính xác hơn, chuyển động của vật chất, bức xạ và không-thời gian không thay đổi qua các phép biến đổi toạ độ khả vi hay *vi đồng phôi* bất kỳ. Tính bất biến vi đồng phôi là tính đối xứng chủ yếu của tác dụng Hilbert: chuyển động độc lập với hệ toạ độ.

Các phương trình trường đối với không-thời gian rỗng cũng có *tính đối xứng tỷ lệ*. Đây là tính bất biến của các phương trình sau khi nhân tất cả toạ độ với một thừa số chung. Năm 1993, Torre và Anderson đã chứng tỏ rằng phép đối xứng vi đồng phôi và phép đối xứng tỷ lệ tầm thường là các phép đối xứng *duy nhất* của phương trình trường trong chân không.

Xem 193

Không kể tính bất biến vi đồng phôi, toàn bộ Thuyết tương đối tổng quát, bao gồm năng-khối lượng, có một tính đối xứng phụ chưa được làm sáng tỏ hoàn toàn. Tính đối

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

xứng này liên kết các điều kiện ban đầu khả hữu khác nhau của các phương trình trường; nó cực kỳ phức tạp và hãy còn là đề tài nghiên cứu. Những cuộc nghiên cứu hấp dẫn này có thể cho ta nhiều hiểu biết sâu sắc, mới lạ trong việc mô tả cổ điển hiện tượng big bang.

Xem 194

Tóm lại, các tính đối xứng của Thuyết tương đối tổng quát cũng hàm ý rằng các chuyển động nhanh nhất, xa nhất và mãnh liệt nhất trong thiên nhiên thì *tương đối*, *liên tục*, *thuận nghịch* và *bất biến gương*. Các tính đối xứng cũng khẳng định rằng chuyển động dữ dội nhất *bảo toàn năng–động lượng và moment động lượng*. Sau cùng, tác dụng Hilbert khẳng định rằng ngay cả chuyển động điên cuồng nhất trong thiên nhiên cũng *lười biếng*, nghĩa là được mô tả bằng nguyên lý tác dụng cực tiểu.

Nói tóm lại, mặc dù có thêm chuyển động của chân không và chân trời, Thuyết tương đối tổng quát không làm thay đổi khái niệm chuyển động thường ngày của chúng ta. Thuyết tương đối là một cách mô tả chuyển động *cổ điển*.

Khối lượng trong Thuyết tương đối tổng quát

Tính bất biến vi đồng phôi của Thuyết tương đối tổng quát làm cho cuộc đời trở nên thú vị. Nó cho phép ta nói rằng mình đang sống *bên trong* một hình cầu rỗng. Ta đã thấy Thuyết tương đối tổng quát không cho phép ta xác định vị trí thực sự của năng lượng. Nếu ta không thể định vị năng lượng thì khối lượng có định vị được không? Việc tìm hiểu vấn đề cho thấy khối lượng, giống như năng lượng, *chỉ* có thể định xứ nếu không–thời gian ở xa được xác định là phẳng. Lúc đó ta có thể xác định giá trị khối lượng định xứ bằng cách chính xác hoá khái niệm trực giác sau đây: khối lượng của một vật có số đo bằng thời gian một vệ tinh bay quanh vật đó.*

Trang 291

Định nghĩa khối lượng theo lối trực giác *đòi hỏi* không–thời gian phẳng ở vô cực; không thể mở rộng cho các trường hợp khác. Tóm lại, khối lượng chỉ có thể định xứ nếu ta có thể xác định khối lượng toàn phần. Và *khối lượng toàn phần* chỉ được xác định đối với không–thời gian gần phẳng. Một khái niệm khối lượng chính xác khác trong Thuyết tương đối tổng quát là *mật độ khối lượng địa phương* tại một điểm. Ngược lại, người ta chưa hiểu rõ cách xác định khối lượng chứa trong một miền lớn hơn một điểm nhưng nhỏ hơn toàn bộ không-thời gian (trong trường hợp không (gần) phẳng).

Câu đố 299 ny

Giới hạn lực và hằng số vũ trụ

Khi tính đến hằng số vũ trụ, nguyên lý lực cực đại đòi hỏi một cái nhìn khác. Trong trường hợp hằng số vũ trụ khác 0, giới hạn lực chỉ có ý nghĩa nếu hằng số Λ dương;

Xem 195

* Định nghĩa này được Arnowitt, Deser và Misner hình thức hoá và từ đó thường được gọi là *khối lượng ADM* . Ý tưởng ở đây là dùng metric g_{ij} và lấy tích phân

$$m = \frac{c^2}{32\pi G}\int_{S_R}(g_{ij,i}\nu_j - g_{ii,j}\nu_j)\mathrm{d}A \tag{224}$$

trong đó S_R là hình cầu toạ độ bán kính R, ν là vector pháp tuyến đơn vị đối với hình cầu và $\mathrm{d}A$ là diện tích nguyên tố trên mặt cầu. Giới hạn sẽ hiện hữu khi R lớn nếu không-thời gian gần phẳng và nếu khối lượng phân bố đủ đậm đặc. Các nhà vật lý toán cũng đã chứng tỏ rằng đối với một đa tạp bất kỳ có metric thay đổi ở vô cực theo công thức

Xem 196

$$g_{ij} = (1 + f/r + O(1/r^2))\delta_{ij} \tag{225}$$

thì khối lượng toàn phần được cho bởi công thức $M = fc^2/G$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 197
Xem 127, Xem 128

đây là trường hợp giá trị đo được hiện nay, với $\Lambda \approx 10^{-52}/\mathrm{m}^2$. Thật vậy, hệ thức khối lượng–bán kính của hố đen là

$$2GM = Rc^2\left(1 - \frac{\Lambda}{3}R^2\right) \tag{226}$$

cho thấy là việc lực cực đại *độc lập* với bán kính chỉ đúng khi hằng số vũ trụ dương hay bằng 0. Khi hằng số vũ trụ âm giới hạn lực chỉ đúng đối với các hố đen vô cùng nhỏ. Sau đây, ta chọn một cách tiếp cận thực dụng và cũng chú ý là giới hạn lực cực đại được xem xét khi đã ngầm định hằng số vũ trụ lớn hơn hay bằng 0. Hiển nhiên là giới hạn lực không xác định *giá trị* của hằng số; để làm được điều này, cần thêm vào một nguyên lý nữa. Việc thiết lập công thức bằng cách dùng thêm nguyên lý lực cực tiểu trong thiên nhiên cũng khá đơn giản và đã được đưa ra ở trên.

Trang 137

Người ta cũng có thể hỏi là các hố đen quay hay tích điện có làm thay đổi các lập luận để đi từ lực cực đại suy ra Thuyết tương đối tổng quát hay không. Tuy vậy, việc dẫn xuất bằng cách sử dụng phương trình Raychaudhuri thì không thay đổi. Đúng ra sự thay đổi duy nhất chỉ xuất hiện trong lập luận khi ta bao gồm *hiện tượng xoắn*, khiến phương trình Raychaudhuri thay đổi. Khi không có hiện tượng xoắn thì lý luận vẫn còn đúng. Việc bao gồm hiện tượng xoắn vẫn còn là một đề tài nghiên cứu mở.

Lực hấp dẫn có phải là sự tương tác hay không?

Ta có khuynh hướng trả lời khẳng định câu hỏi này, vì trong vật lý Galilei lực hấp dẫn được xem như là một tác động lên chuyển động của các vật. Trong vật lý Galilei, ta mô tả lực hấp dẫn bằng một hàm thế, vì lực hấp dẫn làm thay đổi chuyển động. Thật vậy, một lực hay một tương tác là nguyên nhân làm thay đổi chuyển động của một vật. Tuy vậy, ta đã thấy rằng khi hai vật hút lẫn nhau bằng lực hấp dẫn, cả hai luôn luôn rơi tự do. Thí dụ, Mặt trăng quay quanh Trái đất vì Mặt trăng liên tục rơi quanh Trái đất. Vì bất kỳ một quan sát viên rơi tự do nào cũng đều luôn luôn đứng yên, nên mệnh đề lực hấp dẫn làm thay đổi chuyển động của các vật đều không đúng đối với mọi quan sát viên. Thật ra nếu ta cho rằng các đường trắc địa là đường có độ thẳng lớn nhất, thì chúng ta phải công nhận Mặt trăng và Trái đất đang đi theo những đường 'thẳng' đối với mọi quan sát viên. Nhưng các vật đi theo đường thẳng thì không chịu ảnh hưởng của một sự tương tác nào, đúng không các bạn?

Quyển III, trang 321

Chúng ta hãy tìm hiểu vấn đề này theo lối khác. Định nghĩa cơ bản nhất của 'tương tác' giống như sự khác nhau giữa toàn thể và tổng của các thành phần. Trong trường hợp trọng lực, một quan sát viên rơi tự do có thể cho rằng không có gì đặc biệt xảy ra, độc lập với việc có mặt một vật khác hay không và có thể cho rằng trọng lực không phải là một sự tương tác.

Trang 202
Câu đố 300 s

Tuy vậy, tương tác cũng vận chuyển năng lượng giữa các hệ thống. Bây giờ ta đã thấy rằng khi nói lực hấp dẫn vận chuyển năng lượng thì chỉ là gần đúng. Các tính chất của năng lượng hấp dẫn khẳng định luận điểm này. Xét về mặt năng lượng thì lực hấp dẫn cũng chỉ là tương tác một cách gần đúng.

Sau đây là một cách nhìn vấn đề theo kiểu toán học. Một vệ tinh chuyển động quanh Mộc tinh với năng–động lượng $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{u}$. Nếu ta tính độ biến thiên năng–động lượng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 301 ny

theo đường s, ta có

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}s} = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}s} = m\left(\boldsymbol{e}_a\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}^a}{\mathrm{d}s} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}_a}{\mathrm{d}s}\boldsymbol{u}^a\right) = m\boldsymbol{e}_a\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}^a}{\mathrm{d}s} + \Gamma^a{}_{bd}\boldsymbol{u}^b\boldsymbol{u}^d\right) = 0 \qquad (227)$$

ở đây $\boldsymbol{e}$ mô tả vector đơn vị theo hướng trục toạ độ. Bạn có thể kiểm tra là dọc theo
Câu đố 302 ny một đường trắc địa độ biến thiên năng–động lượng bằng 0. Do đó năng–động lượng của chuyển động được bảo toàn. Nói cách khác, *không có* lực tác dụng lên vệ tinh. Ta
Xem 198 có thể cho rằng trong phương trình (227) số hạng thứ nhì là lực hấp dẫn thực. Nhưng
Câu đố 303 ny số hạng này có thể làm cho biến mất dọc theo toàn bộ đường thế giới đã cho. Tóm lại, toán học cũng khẳng định rằng không có gì thay đổi giữa hai vật rơi tự do chung quanh nhau: không thể nói lực hấp dẫn là một tương tác.

Chúng ta hãy nhìn hành trạng của ánh sáng. Trong chân không, ánh sáng luôn luôn chuyển động tự do. Theo một nghĩa nào đó, ta có thể nói rằng bức xạ luôn luôn rơi tự do. Kỳ lạ thay, vì ta gọi rơi tự do là đứng yên, ta có thể kết luận rằng bức xạ luôn luôn đứng yên. Điều này không sai! Ta đã thấy rằng không thể gia tốc ánh sáng.* Ta cũng đã thấy sự uốn cong do hấp dẫn không phải là một sự gia tốc, vì trong trường hợp này, ánh sáng vẫn đi theo đường thẳng trong không-thời gian. Mặc dù ánh sáng khi đi gần các vật hình như đi chậm lại đối với quan sát viên ở xa, nhưng tại địa phương nó vẫn chuyển động với tốc độ ánh sáng. Tóm lại, ngay cả lực hấp dẫn cũng không điều khiển sự chuyển động của ánh sáng.

Tóm lại, nếu ta thích những trò chơi trí tuệ như vậy, ta có thể chứng tỏ rằng lực hấp dẫn không phải là một tương tác, mặc dù nó đặt các vật vào quỹ đạo và làm lệch ánh sáng. Trong thực tế, lực hấp dẫn vẫn có thể xem là sự tương tác.

Cách tìm hình dạng các đường trắc địa

Một nửa Thuyết tương đối tổng quát phát biểu rằng các vật thể rơi theo các đường trắc địa. Mọi quỹ đạo đều là các đường trắc địa, là các đường cong với thời gian riêng dài nhất. Như vậy nếu tìm được các quỹ đạo này thì rất hữu ích.** Để bắt đầu, ta cần biết về *hình dạng không-thời gian*. Khái niệm 'hình dạng' được tổng quát hoá từ nghĩa 2 chiều quen thuộc của chúng. Đối với sinh vật 2 chiều, hình dạng thường được mô tả bằng metric g_{ab}, xác định khoảng cách giữa các điểm lân cận qua công thức

$$\mathrm{d}s^2 = \mathrm{d}x_a\,\mathrm{d}x^a = g_{ab}(x)\,\mathrm{d}x^a\,\mathrm{d}x^b\,. \qquad (228)$$

Có một bài tập nổi tiếng là từ biểu thức trên chứng minh rằng một đường cong $x^a(s)$ phụ thuộc vào một tham số affine s hoàn hảo là một *đường trắc địa* (metric) loại thời gian hay loại không gian, có nghĩa là đường khả hữu dài nhất giữa hai biến cố,*** chỉ

* Hiện tượng khúc xạ, việc ánh sáng đi chậm lại trong vật chất, không phải là một phản thí dụ. Nói một cách chặt chẽ, ánh sáng trong vật chất được hấp thu và phát xạ một cách đều đặn. Giữa hai quá trình này, ánh sáng vẫn truyền với tốc độ ánh sáng trong chân không. *Nhìn* toàn bộ quá trình dưới cấp độ vĩ mô thì ánh sáng giống như đi chậm lại. Điều tương tự cũng áp dụng cho hiện tượng nhiễu xạ và phản xạ. Danh sách đầy đủ các cách uốn cong tia sáng có thể tìm thấy ở nơi khác.

Quyển III, trang 157 ** Phần ngắn này dành cho những người tò mò; bạn có thể bỏ qua trong lần đọc đầu tiên.

*** Ta nên nhớ rằng trong không gian thông thường, các đường trắc địa là các đường khả hữu ngắn nhất; tuy vậy, trong không-thời gian của Thuyết tương đối tổng quát, các đường trắc địa là các đường khả hữu

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 304 ny

khi

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left(g_{ad}\frac{\mathrm{d}x^d}{\mathrm{d}s}\right) = \frac{1}{2}\frac{\partial g_{bc}}{\partial x^a}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}x^c}{\mathrm{d}s}\,, \tag{229}$$

miễn là ds khác 0 trên đường đó.* Mọi vật rơi tự do đều đi theo các đường trắc địa như vậy. Ta đã chứng minh rằng tính chất trắc địa bao hàm việc một hòn đá ném vào không khí sẽ rơi trở lại, trừ trường hợp vận tốc ném lớn hơn vận tốc thoát. Như vậy biểu thức (229) thay thế cả hai biểu thức $\mathrm{d}^2x/\mathrm{d}t^2 = -\nabla\varphi$ đúng trong trường hợp các vật đang rơi và $\mathrm{d}^2x/\mathrm{d}t^2 = 0$ đúng trong trường hợp các vật rơi tự do trong Thuyết tương đối đặc biệt.

Trang 153

Quỹ đạo không phụ thuộc vào khối lượng hay chất liệu của vật. Do đó *phản vật chất* cũng rơi theo các đường trắc địa. Nói cách khác, phản vật chất và vật chất không 'cự tuyệt' nhau; chúng hút lẫn nhau. Điều thú vị là, ngay cả các thí nghiệm thực hiện với vật chất thông thường cũng có thể chứng tỏ điều này, nếu chúng được đánh giá cẩn thận. Bạn có thể tìm ra cách thực hiện không?

Xem 199

Câu đố 305 ny

Để cho đầy đủ, ta cũng nhắc thêm rằng ánh sáng đi theo các đường trắc địa *loại ánh sáng* hay *đường trắc địa null*. Nói cách khác, có một tham số affine u sao cho các đường trắc địa thoả phương trình

$$\frac{\mathrm{d}^2x^a}{\mathrm{d}u^2} + \Gamma^a{}_{bc}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}u}\frac{\mathrm{d}x^c}{\mathrm{d}u} = 0 \tag{233}$$

cùng với điều kiện

$$g_{ab}\frac{\mathrm{d}x^a}{\mathrm{d}u}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}u} = 0\,. \tag{234}$$

Câu đố 306 ny

Trong các định nghĩa của các loại đường trắc địa đã cho, đường nào đã được vẽ trong Hình 65 ở Trang 147?

Thể dục Riemann

Phần lớn các quyển sách giới thiệu độ cong theo phong cách nặng nề, cụ thể là theo dòng lịch sử, bằng cách sử dụng tensor độ cong Riemann. Đây là một phần tóm tắt ngắn, sao cho bạn có thể hiểu câu chuyện cổ xưa này khi đọc đến nó.

dài nhất. Trong cả hai trường hợp, chúng đều là các đường khả hữu 'thẳng nhất'.

* Điều này thường được viết như sau

$$\frac{\mathrm{d}^2x^a}{\mathrm{d}s^2} + \Gamma^a_{bc}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}x^c}{\mathrm{d}s} = 0 \tag{230}$$

trong đó điều kiện

$$g_{ab}\frac{\mathrm{d}x^a}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}x^b}{\mathrm{d}s} = 1 \tag{231}$$

phải được thoả. Như vậy đơn giản chỉ cần các vector tiếp tuyến là vector *đơn vị* và $\mathrm{d}s \neq 0$ trên cả con đường. Các ký hiệu Γ xuất hiện ở trên được cho bởi công thức

$$\Gamma^a{}_{bc} = \left\{\begin{matrix} a \\ bc \end{matrix}\right\} = \frac{1}{2}g^{ad}(\partial_b g_{dc} + \partial_c g_{db} - \partial_d g_{bc})\,, \tag{232}$$

và được gọi là *ký hiệu Christoffel loại 2* hay đơn giản là *liên kết metric*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Như ta đã thấy ở trên, độ cong được mô tả tốt nhất bằng một tensor. Trong không gian 4 chiều, tensor độ cong này, thường được gọi là R, phải là một đại lượng cho phép ta tính toán, cùng với các đại lượng khác, diện tích của một đĩa 2 chiều định hướng bất kỳ trong không-thời gian. Trong không gian 4 chiều, việc định hướng của một đĩa được
Câu đố 307 e xác định bằng *2* vector 4 chiều; ta gọi chúng là $\boldsymbol{p}$ và $\boldsymbol{q}$. Và thay vì một đĩa, ta lấy *hình bình hành* tạo bởi $\boldsymbol{p}$ và $\boldsymbol{q}$.

Tensor độ cong Riemann-Christoffel R lúc đó được định nghĩa là một đại lượng cho phép ta tính độ cong $K(\boldsymbol{p},\boldsymbol{q})$ đối với bề mặt tạo bởi $\boldsymbol{p}$ và $\boldsymbol{q}$, có diện tích A, qua công thức

$$K(\boldsymbol{p},\boldsymbol{q}) = \frac{R\,\boldsymbol{pqpq}}{A^2(\boldsymbol{p},\boldsymbol{q})} = \frac{R_{abcd}\,p^a q^b p^c q^d}{(g_{\alpha\delta}g_{\beta\gamma} - g_{\alpha\gamma}g_{\beta\delta})\,p^\alpha q^\beta p^\gamma q^\delta} \tag{235}$$

Ở đây, như thường lệ, các chỉ số Latin a, b, c, d, ... chạy từ 0 tới 3, giống như các chỉ số Hy Lạp, và có một *phép lấy tổng* khi chỉ số xuất hiện 2 lần. Hiển nhiên R là một tensor hạng 4. Như vậy tensor này chỉ mô tả độ cong *riêng* của không-thời gian. Trái lại, metric g mô tả *hình dạng* đầy đủ của một mặt chứ không chỉ mô tả độ cong. Như vậy độ cong là đại lượng vật lý mang tính địa phương và do đó các mô tả vật lý chỉ sử dụng * *tensor Riemann* R hay các đại lượng dẫn xuất từ nó.**

Nhưng ta có thể quên định nghĩa độ cong vừa mới đề cập. Có một cách thứ 2, mang tính chất vật lý nhiều hơn, để nhìn nhận tensor Riemann. Ta đã biết rằng độ cong đồng nghĩa với lực hấp dẫn. Như đã nói ở trên, lực hấp dẫn có nghĩa là khi hai hạt gần nhau, chuyển động tự do với cùng vận tốc và cùng hướng, khoảng cách giữa chúng sẽ thay đổi.
Câu đố 308 e Nói cách khác, hiệu ứng địa phương của lực hấp dẫn là *gia tốc tương đối* của các hạt gần nhau.

Hoá ra tensor R mô tả chính xác gia tốc tương đối này, nghĩa là, điều mà ta gọi là *hiệu ứng thuỷ triều* trước kia. Hiển nhiên là gia tốc tương đối $\boldsymbol{b}$ tăng theo khoảng cách $\boldsymbol{d}$ và
Câu đố 309 ny bình phương (tại sao?) của tốc độ $\boldsymbol{u}$ của hai hạt. Do đó ta có thể định nghĩa R là một hệ số tỷ lệ (tổng quát hoá) giữa những đại lượng này:

$$\boldsymbol{b} = R\,\boldsymbol{u}\,\boldsymbol{u}\,\boldsymbol{d} \quad \text{hay, rõ hơn,} \quad b^a = R^a{}_{bcd}\,u^b\,u^c\,d^d\,. \tag{238}$$

* Bernhard Riemann (b. 1826 Breselenz, d. 1866 Selasca), nhà toán học vĩ đại. Một trong nhiều thành tựu quan trọng của ông là đặt nền tảng cho hình học phi-Euclide.

** Ta đã chứng minh ở trên là không-thời gian bị uốn cong bằng cách ghi nhận sự thay đổi tốc độ đồng hồ, chiều dài cây thước và sự truyền ánh sáng. Những thí nghiệm như vậy là cách dễ nhất để xác định metric g. Ta biết rằng không-thời gian được mô tả bằng đa tạp 4 chiều M cùng với metric địa phương g_{ab}, tại mỗi điểm trong không-thời gian, là một metric Minkowski. Một đa tạp như vậy được gọi là *đa tạp Riemann*. Chỉ có metric như vậy mới cho phép ta định nghĩa một hệ quy chiếu quán tính địa phương nghĩa là một không-thời gian Minkowski địa phương tại mỗi điểm không-thời gian. Đặc biệt, ta có

$$g_{ab} = 1/g^{ab} \quad \text{và} \quad g_a{}^b = g^a{}_b = \delta^a_b\,. \tag{236}$$

Độ cong và metric liên hệ với nhau ra sao? Lời giải cho câu hỏi này thường chiếm nhiều trang sách về Thuyết tương đối; ở đây chỉ để thông tin thêm, liên hệ đó là

$$R^a{}_{bcd} = \frac{\partial\Gamma^a{}_{bd}}{\partial x^c} - \frac{\partial\Gamma^a{}_{bc}}{\partial x^d} + \Gamma^a{}_{ec}\Gamma^e{}_{bd} - \Gamma^a{}_{fd}\Gamma^f{}_{bc}\,. \tag{237}$$

Tensor độ cong được xây dựng từ đạo hàm bậc 2 của metric. Mặt khác, ta cũng có thể xác định metric nếu biết độ cong. Hệ thức gần đúng được cho dưới đây.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Các thành phần của tensor độ cong Riemann có thứ nguyên là nghịch đảo của chiều dài bình phương. Vì nó chứa mọi thông tin về độ cong riêng, ta kết luận rằng nếu $R = 0$ trong một miền nào đó, không-thời gian trong miền đó sẽ phẳng. Mối liên kết này được suy ra một cách dễ dàng từ định nghĩa thứ hai.*

Câu đố 310 ny

Cách sau cùng để định nghĩa tensor R là cách sau đây. Đối với một quan sát viên *rơi tự do*, metric g_{ab} được cho bởi metric η_{ab} từ Thuyết tương đối đặc biệt. Trong vùng lân cận của nó, ta có

$$\begin{aligned} g_{ab} &= \eta_{ab} + \frac{1}{3} R_{acbd} x^c x^d + O(x^3) \\ &= \frac{1}{2} (\partial_c \partial_d g_{ab}) x^c x^d + O(x^3) \,, \end{aligned} \tag{240}$$

ở đây O biểu thị các số hạng bậc cao. Số hạng độ cong mô tả chỗ bắt đầu của metric không-thời gian là nơi không-thời gian phẳng. Tensor độ cong R rất rườm rà; nó có $4^4 = 256$ thành phần tại mỗi điểm của không-thời gian; tuy vậy, các tính chất đối xứng của nó làm giảm số thành phần còn 20 số độc lập.** Con số thực sự quan trọng trong các bài toán vật lý còn nhỏ hơn, cụ thể chỉ là 10. Đây là những thành phần của tensor Ricci, có thể được định nghĩa với sự giúp đỡ của tensor Riemann bằng cách rút gọn, nghĩa là bằng cách đặt

$$R_{bc} = R^a{}_{bac} \,. \tag{243}$$

Các thành phần của nó, giống các thành phần của tensor Riemann, là nghịch đảo của chiều dài bình phương. Các giá trị của tensor R_{bc}, hay của R^a_{bcd}, thì độc lập với quy ước dấu được sử dụng trong metric Minkowski, khác với R_{abcd}.

Câu đố 313 e

Bạn có thể chứng minh hệ thức $R_{abcd}R^{abcd} = 48m^2/r^6$ cho nghiệm Schwarzschild hay

---

* Định nghĩa thứ 2 này còn được gọi là định nghĩa thông qua *độ lệch trắc địa*. Dĩ nhiên là nó không trùng với định nghĩa đầu tiên một cách rõ ràng. Hãy xem sách giáo khoa để biết lời giải tường minh. Cũng có cách thứ 3 để hình dung ra tensor R, có tính chất toán học hơn, cụ thể là cách do Riemann giới thiệu. Nếu ta vận chuyển song song một vector $\boldsymbol{w}$ quanh một hình bình hành được tạo thành từ 2 vector $\boldsymbol{u}$ và $\boldsymbol{v}$, mỗi vector có chiều dài ε, vector $\boldsymbol{w}$ được đổi thành $\boldsymbol{w} + \delta\boldsymbol{w}$. Lúc đó ta có

Xem 200

$$\delta \boldsymbol{w} = -\varepsilon^2 R \; \boldsymbol{u} \; \boldsymbol{v} \; \boldsymbol{w} + \quad \text{các số hạng bậc cao hơn} \tag{239}$$

Ta có thể học được nhiều điều về độ lệch trắc địa bằng cách nghiên cứu hoạt động của kim chỉ nam nổi tiếng mà ta đã gặp trước kia. Dụng cụ này, được người Trung Hoa sử dụng trước khi phát minh la bàn, chỉ hoạt động nếu thế giới phẳng. Thật vậy, trên một mặt cong, sau khi đi theo một đường cong đóng lớn, nó sẽ chỉ một hướng khác hướng lúc bắt đầu cuộc hành trình. Bạn có thể giải thích lý do hay không?

Quyển I, trang 244

Câu đố 311 s

** Định nghĩa sự rơi tự do chứng tỏ rằng tensor Riemann có tính đối xứng theo các chỉ số nào đó và phản đối xứng theo các chỉ số khác:

Câu đố 312 ny

$$R_{abcd} = R_{cdab} \quad , \quad R_{abcd} = -R_{bacd} = -R_{abdc} \,. \tag{241}$$

Những hệ thức này cũng kéo theo việc nhiều thành phần triệt tiêu. Hệ thức sau cũng khá quan trọng

$$R_{abcd} + R_{adbc} + R_{acdb} = 0 \,. \tag{242}$$

Nên nhớ rằng thứ tự của các chỉ số không được chuẩn hoá trong sách giáo khoa. Danh sách của các bất biến suy ra từ R thì khá dài. Ta đã nói đến $\frac{1}{2}\varepsilon^{abcd}R_{cd}{}^{ef}R_{abef}$, cụ thể là tích ${}^*R\,R$ của tensor Riemann với đối ngẫu của nó, là bất biến đặc trưng cho hiệu ứng Thirring–Lense.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 314 ny

không?

Các câu đố vui và lạ về Thuyết tương đối tổng quát

Trong nhiều năm qua, người ta đã suy đoán lý do các vệ tinh nhân tạo Pioneer 10 và 11, bây giờ đã cách xa Mặt trời trên 70 đơn vị thiên văn, đã chịu một sự giảm tốc không đổi $8 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{m/s^2}$, kể từ lúc chúng đi ngang qua quỹ đạo của Thổ Tinh. Sự giảm tốc này được gọi là *sự dị thường Pioneer*. Điều này đã là một đề tài nghiên cứu sôi nổi. Nhiều công trình nghiên cứu đã chứng tỏ rằng lý do giảm tốc *không phải là* sự sai lệch với định luật bình phương nghịch đảo như nhiều người đã giải thích. Hiệu ứng có tính chất điện từ.

Xem 201

Có nhiều ý kiến quy cho sự bất đối xứng trong sự phát xạ nhiệt của các vệ tinh. Các máy phát điện gắn trên vệ tinh sinh ra công suất nhiệt là 2.5 kW. Sự bất đối xứng trước-sau chỉ cần 80 W là đủ để giải thích sự bất thường đã đo được. Các nghiên cứu gần đây đã chứng tỏ rằng thực sự có sự bất đối xứng như vậy, vì vậy xem như vấn đề đã được giải quyết.

Xem 202

* *

Công suất hay lực cực đại xuất hiện ở chân trời là nền tảng của Thuyết tương đối tổng quát. Có hệ vật lý nào khác hơn không-thời gian mà cũng có thể được mô tả bằng cách này không?

Đối với Thuyết tương đối đặc biệt, ta thấy rằng mọi hiệu ứng chính của nó như tốc độ giới hạn, sự co Lorentz hay sự tương đương năng–khối lượng, ... cũng được tìm thấy trong các chỗ lệch mạng của chất rắn. Có hệ nào tương tự trong Thuyết tương đối tổng quát hay không? Cho đến bây giờ, các nỗ lực tìm ra những hệ như vậy chỉ thành công một phần.

Trang 38

Nhiều phương trình và ý tưởng của Thuyết tương đối tổng quát có thể áp dụng cho sự biến dạng của chất rắn, vì Thuyết tương đối tổng quát mô tả sự biến dạng của tấm nệm không-thời gian. Kröner đã nghiên cứu rất kỹ sự tương tự này.

Xem 117

Các hệ vật lý có 'chân trời', và như vậy có các biến động lực tương tự với độ cong, đã được tìm thấy trong một số chất lỏng – ở đây xoáy đóng vai trò hố đen – và trong các chất lỏng lượng tử đối với sự truyền ánh sáng. Việc tìm hiểu các hệ như vậy đã trở thành các đề tài nghiên cứu riêng biệt.

Xem 203

Chỉ cách nay vài năm, người ta đã khám phá ra một sự tương tự hoàn toàn với Thuyết tương đối tổng quát trong một hệ vĩ mô. Sự tương tự này sẽ được trình bày trong phần sau cùng của cuộc thám hiểm.

Quyển VI, trang 281

* *

Người ta có thể dùng Nguyên lý lực cực đại để loại bỏ các lý thuyết khác về lực hấp dẫn hay không? Đối thủ của Thuyết tương đối tổng quát thường được bàn đến nhiều nhất là Thuyết hấp dẫn vô hướng-tensor và sự tổng quát hoá của nó, do Brans và Dicke đưa ra.

Nếu Thuyết vô hướng-tensor đặc biệt tuân theo phương trình chân trời tổng quát (111) thì nó cũng phải bao hàm một lực cực đại. Phương trình chân trời tổng quát phải được tuân thủ đối với chân trời *tĩnh* cũng như *động*. Nếu đúng như vậy, Thuyết vô hướng-tensor đặc biệt sẽ tương đương với Thuyết tương đối tổng quát, vì nó cho phép ta, sử dụng lý luận của Jacobson, để suy ra các phương trình trường thông thường. Trường hợp

Trang 118

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

này có thể xảy ra nếu trường vô hướng hành xử như vật chất nghĩa là nếu nó có năng–khối lượng như vật chất và uốn cong không-thời gian như vật chất. Nói cách khác, nếu trong Thuyết vô hướng-tensor đặc biệt, phương trình chân trời tổng quát không được tuân thủ đối với *mọi chân trời chuyển động* – vì trong trường hợp tổng quát Thuyết vô hướng–tensor có nhiều hằng số cần xác định hơn Thuyết tương đối tổng quát – thì lực cực đại sẽ không xuất hiện và lý thuyết này không tương đương với Thuyết tương đối tổng quát. Mối liên hệ này cũng chứng tỏ rằng chỉ một kiểm chứng thực nghiệm của phương trình chân trời đối với chân trời *tĩnh* thì không đủ để khẳng định Thuyết tương đối tổng quát; một kiểm chứng như vậy chỉ xoá bỏ một số, chứ không phải tất cả, các Thuyết vô hướng–tensor.

* *

Có một cách kiểm chứng Thuyết tương đối tổng quát là gởi ba phi thuyền không gian xuyên qua Thái dương hệ và đo thật chính xác vị trí tương đối của chúng theo thời gian. Ở đây tốt nhất là sử dụng laser ổn định tần số để gởi ánh sáng từ vệ tinh này đến vệ tinh kia. Bạn có thể tóm tắt những rủi ro kỹ thuật chính liên quan đến một dự án như vậy không? Bạn có thể tìm ra cách giảm thiểu chúng hay không?

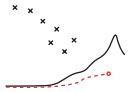
Câu đố 315 s

Tóm lược về các phương trình trường

Các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát mô tả chuyển động của không gian, vật chất và năng lượng. Chúng phát biểu rằng:

— Độ cong địa phương của không gian thì bằng mật độ năng lượng địa phương chia cho lực cực đại.
— Vật thể chuyển động theo các đường trắc địa được xác định bởi độ cong địa phương này.

Mô tả này được khẳng định với độ chính xác cao bởi mọi thí nghiệm đã được thực hiện từ trước cho đến nay.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 8

Tại sao ta có thể nhìn thấy các ngôi sao? – Chuyển động trong vũ trụ

> Zwei Dinge erfüllen das Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt: der bestirnte Himmel über mir und das moralische Gesetz in mir.**
>
> Immanuel Kant

Vào những đêm trời quang đãng, ta có thể thấy bằng mắt trần từ hai tới năm ngàn ngôi sao. Trong số đó, có hàng trăm ngôi sao đã có tên. Tại sao? Vì trong tất cả các thế giới mà các ngôi sao và các chòm sao tạo thành đều gắn liền với các truyện thần thoại. Trong mọi nền văn minh, thần thoại là các truyện được kể để làm tăng thêm phần khó hiểu hơn là làm cho dễ hiểu. Nhưng sự kiện đơn giản nhất mà ta có thể *thấy* ở các ngôi sao là nền tảng cho một câu chuyện dị thường hơn tất cả các truyện thần thoại. Gần như nó chạm vào mọi lĩnh vực của vật lý hiện đại và bao trùm toàn bộ lịch sử của vũ trụ.

Xem 205

Chúng ta thấy những ngôi sao nào?

> Democritus nói [về Ngân hà] rằng nó là một miền phát xạ ánh sáng từ nhiều ngôi sao nhỏ và gần nhau, hợp lại tạo ra độ sáng của toàn thể.
>
> Aetius, *Opinions*.

Xem 206

Những ngôi sao mà ta thấy trên bầu trời đêm quang đãng chính là những ngôi sao sáng nhất trong những vùng lân cận quanh ta thuộc Ngân Hà. Chúng ở cách ta từ 4 đến vài ngàn năm ánh sáng. Đại khái cứ 400 năm ánh sáng khối thì có 1 ngôi sao. Mặt trời của chúng ta chỉ là 1 trong 100 tỷ ngôi sao của Ngân Hà.

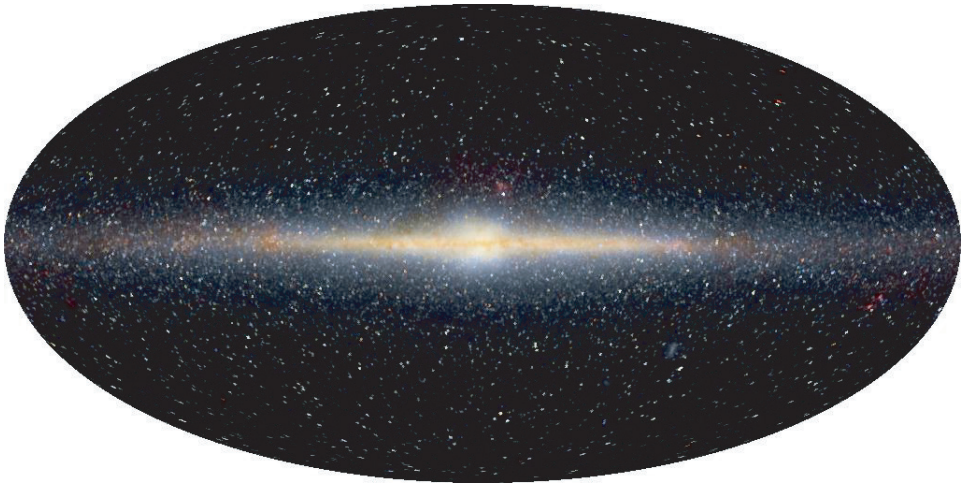
Vào ban đêm, hầu hết các ngôi sao trong Ngân hà đều có thể nhìn thấy bằng mắt trần. Vật thể ngoài thiên hà mà ta *thường xuyên* nhìn thấy được bằng mắt trần ở bắc bán cầu là tinh vân Andromeda (Tiên Nữ), được phóng đại trong Hình 91. Nó là một thiên hà như thiên hà của chúng ta, như Immanuel Kant đã phỏng đoán vào năm 1755. Có nhiều vật thể ngoài thiên hà có thể nhìn thấy bằng mắt trần ở nam bán cầu: tinh vân Tarantula,

** 'Hai điều mà tôi thường xuyên chiêm nghiệm với sự ngưỡng mộ và sùng kính luôn tươi mới không ngừng gia tăng là: bầu trời đầy sao trên cao và quy luật đạo đức trong tim mình.' Immanuel Kant (1724–1804) triết gia quan trọng nhất của *Thời kỳ khai sáng* - là phong trào hướng tới nền khoa học hiện đại và các tiêu chuẩn phương tây của sự thịnh vượng và đời sống bằng cách gạt bỏ các tư tưởng sai lầm do các nhà nước thần quyền truyền bá.

Xem 204

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 87 Một tấm ảnh hiện đại của bầu trời đêm khả kiến, cho thấy vài ngàn ngôi sao và Ngân hà. Hình này là một ảnh ghép bằng kỹ thuật số của nhiều ảnh các bầu trời đêm không mây chụp từ nhiều nơi trên Trái đất. Ngân hà nằm ngang trên hình. (© Axel Mellinger, from Xem 207).



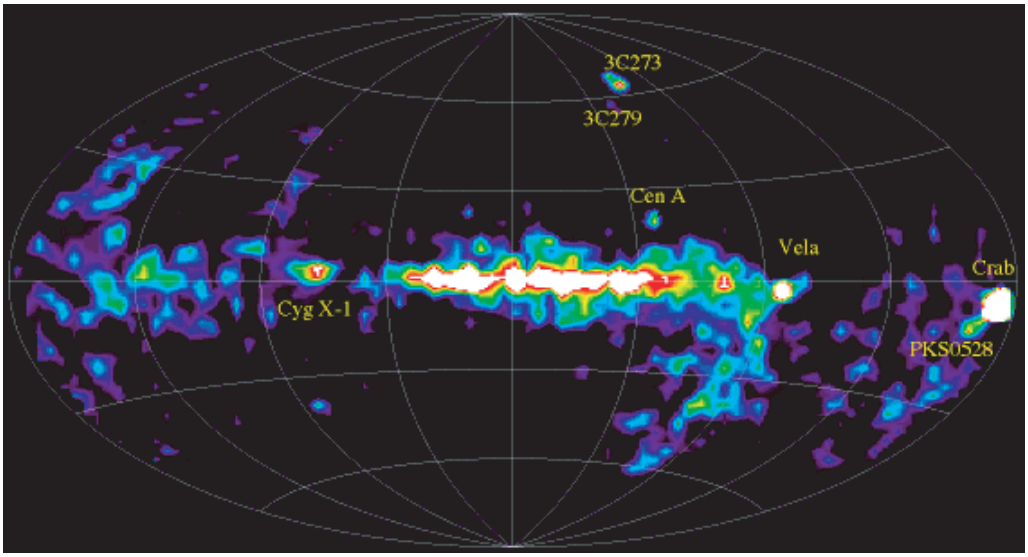
HÌNH 88 Một ảnh không đúng màu của bầu trời đêm, và đặc biệt thiên hà của chúng ta, chụp bằng ánh sáng hồng ngoại gần (courtesy NASA).

cũng như các đám mây Magellan lớn và nhỏ. Các đám mây Magellan là các thiên hà hàng xóm của chúng ta. Các vật thể ngoài thiên hà mà ta *đang* nhìn thấy là các *tân tinh* hiếm hoi, các ngôi sao đang bùng nổ ở các thiên hà lân cận, hay các *siêu tân tinh* hiếm hoi hơn, thường gặp trong các thiên hà xa xôi.

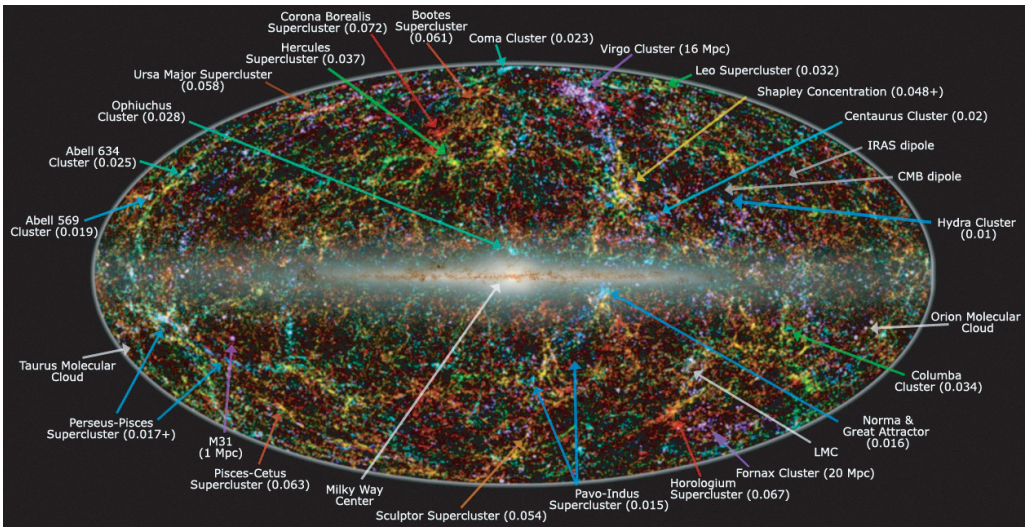
Thật ra các ngôi sao khả kiến còn đặc biệt ở các mặt khác. Kính thiên văn đã cho ta thấy khoảng phân nửa của chúng thật ra là các sao đôi, tức là 2 ngôi sao quay quanh nhau, như trong trường hợp của Sirius (Sao Thiên Lang). Việc đo các quỹ đạo sẽ cho phép ta xác định được khối lượng của chúng. Bạn giải thích được điều này không?

Câu đố 316 ny

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 89 Một ảnh không đúng màu của các nguồn tia X được quan sát trong bầu trời đêm, có năng lượng từ 1 đến 30 MeV (courtesy NASA).



HÌNH 90 Một ảnh không đúng màu, tổng hợp từ các dữ liệu hồng ngoại, cho thấy cấu trúc có tầm cỡ lớn của vũ trụ quanh ta; màu của mỗi thiên hà biểu diễn khoảng cách của nó và số trong ngoặc ghi rõ độ dịch chuyển đỏ; một ảnh hồng ngoại của Ngân hà cũng được in chồng lên (courtesy Thomas Jarret/IPAC/Caltech).

Với kính thiên văn ta có thể thấy nhiều vật thể ngoài thiên hà hơn. Hiện nay đây là lý do chính để xây dựng các đài thiên văn thật lớn trong điều kiện kỹ thuật cho phép.

Quyển III, trang 164

Vũ trụ có khác với Ngân Hà của chúng ta không? Có đấy. Có nhiều luận cứ để chứng minh cho điều này. Trước hết, thiên hà của chúng ta – từ *thiên hà* có gốc Hy Lạp có nghĩa là 'Ngân Hà' – thì *dẹt* do nó quay tròn. Nếu một thiên hà quay thì phải có các vật thể khác để làm vật quy chiếu cho các chuyển động quay này. Đúng ra thì có một số lượng khổng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 91 Tinh vân Andromeda M31, một trong những thiên hà láng giềng của chúng ta (và là thành viên thứ 31 của danh mục Messier) (NASA).

lồ các thiên hà khác – khoảng 10^{11} – trong vũ trụ, một khám phá chỉ mới bắt đầu từ thế kỷ 20. Một số thí dụ ta đã thấy trong Hình 91, Hình 92 và Hình 93. Hình cuối cùng cho ta thấy cách 'qua đời' thông thường của các thiên hà: đụng vào các thiên hà khác.

Tại sao sự nhận thức về vị trí của Ngân Hà trong vũ trụ lại xảy ra trễ quá như vậy? Thật ra con người cũng gặp khó khăn tương tự khi cố gắng xác định hình dạng của Trái đất. Người ta phải hiểu rằng Ngân hà không chỉ là một dải lụa bạc vắt ngang bầu trời trong veo mà còn là một hệ vật lý thực sự, bao gồm khoảng 10^{11} ngôi sao hút nhau.* Giống như Trái đất, người ta thấy Ngân Hà có một *hình dạng* 3 chiều: như trong Hình 88 chụp bằng hồng ngoại, Ngân Hà có cấu trúc phẳng và tròn, với một khối cầu ở trung tâm. Đường kính của nó là 100 000 năm ánh sáng. Nó quay một vòng mất từ 200 tới 250 triệu năm. (Bạn có thể đoán ra cách người ta đo được con số này không?) Chuyển động này rất chậm: từ khi Mặt trời được tạo lập, nó chỉ quay được từ 20 tới 25 vòng.

Câu đố 317 ny

Người ta có thể đo được *khối lượng* của Ngân Hà. Bí quyết ở đây là dùng một pulsar đôi ở ngoại vi Ngân Hà. Quan sát trong nhiều năm, người ta có thể suy ra gia tốc của nó khi quay quanh tâm Ngân Hà, vì pulsar có độ dịch chuyển tần số có thể đo được từ Trái đất. Người ta cần nhiều thập kỷ để quan sát và loại bỏ các hiệu ứng giả tạo. Tuy vậy, sự đo đạc vẫn được tiến hành. Khối lượng của Ngân Hà hiện nay cỡ 10^{42} kg hay $5 \cdot 10^{11}$ khối lượng Mặt trời.

Xem 208

Chúng ta ngắm sao như thế nào?

Các kính thiên văn nhạy nhất đã tạo ra các hình ảnh tốt nhất của bầu trời đêm. Trên mặt đất, các kính thiên văn nhạy nhất là những kính lớn nhất, như những kính ta đã thấy trong Hình 96, đặt ở Paranal, Chile. Lịch sử và khả năng của các kính thiên văn này rất hấp dẫn. Vì nhiều bước sóng bị khí quyển hấp thu, kính thiên văn nhạy nhất được đặt trên vệ tinh, như đã thấy trong Hình 97. Đối với mỗi khoảng bước sóng, những hệ thống hiện đại như vậy sẽ tạo ra những hình ảnh quyến rũ của bầu trời đêm. Từ Hình 87 đến Hình 90 là một số thí dụ. Một website đầy màu sắc được dành riêng để trình bày hình ảnh của bầu trời đêm ở những bước sóng khác nhau là trang www.chromoscope.

Xem 209

* Ngân Hà, hay *thiên hà* trong tiếng Hy Lạp, bắt nguồn từ truyền thuyết Zeus, vị thần Hy Lạp tối cao, cho con trai là Heracles bú sữa của Hera để trở thành bất tử; Heracles, đã có dấu hiệu của một sức lực siêu phàm trong tương lai, bú mạnh đến nỗi sữa bắn ra khắp bầu trời tạo thành Ngân Hà.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

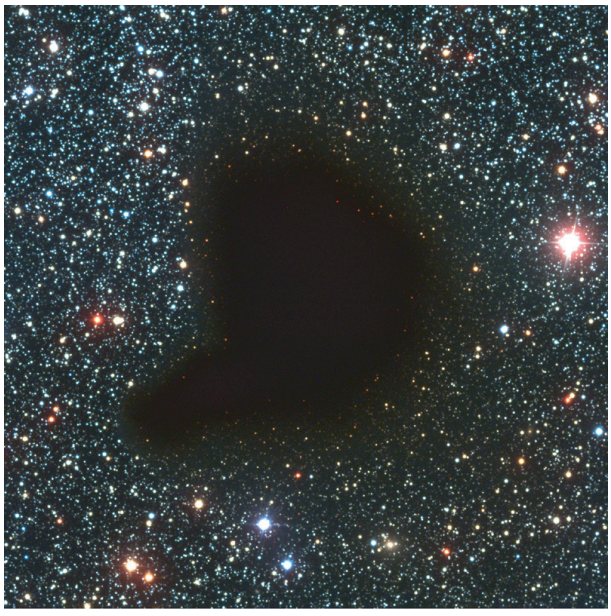
HÌNH 92 Thiên hà ellipse NGC 205 (thành viên thứ 205 của Danh mục Tân thiên hà) (NASA).

HÌNH 93 Hai thiên hà M51 và M51B đang va chạm, có quy mô 65 000 al, cách xa ta 31 Mal, cho thấy cách một thiên hà 'qua đời' (NASA).

net. Website cho phép ta chuyển từ bước sóng này sang bước sóng thật dễ dàng bằng cách di chuyển một con chạy; quan sát và khám phá vẻ đẹp của vũ trụ kể cũng bõ công.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 94 Vũ trụ tràn ngập các thiên hà – hình này cho thấy đám sao Perseus (Anh Tiên) (NASA).

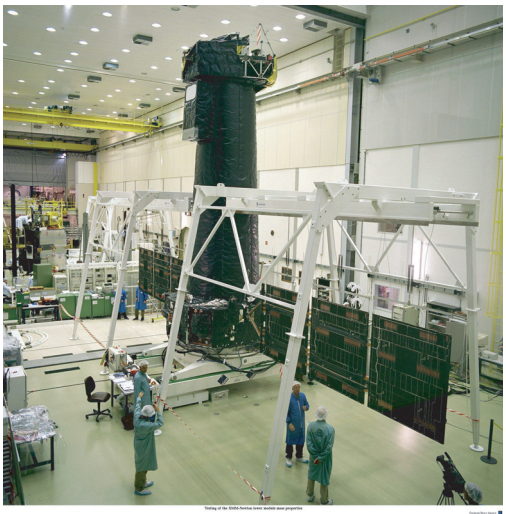


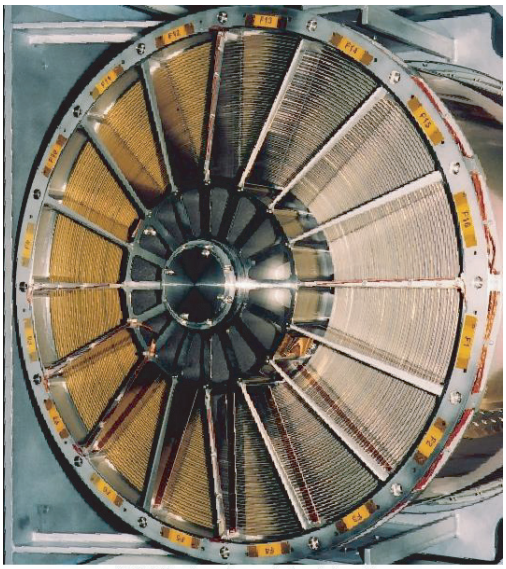
HÌNH 95 Vũ trụ chứa nhiều đám mây; một thí dụ là đám mây phân tử trong chòm sao Ophiuchus (Xà Phu) (© ESO).

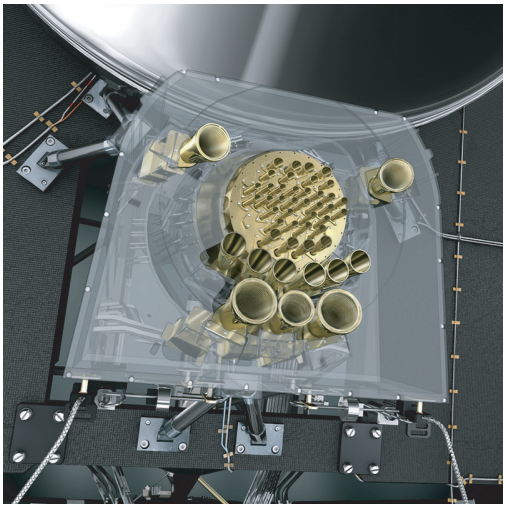
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 96 Một trong 4 Kính thiên văn cực lớn (VLT Very Large Telescopes) của Đài thiên văn Nam Âu (ESO) ở Paranal Chile, là những kính thiên văn mạnh nhất thế giới, mỗi kính có đường kính 8 m (© ESO).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net







HÌNH 97 Hình trên: vệ tinh XMM-Newton và các gương giống củ hành, có độ chính xác cao đã tạo ra một bản đồ tia X của bầu trời đêm. Hình dưới: vệ tinh Planck và các antenne vi ba mạ vàng đã tạo ra bản đồ có độ phân giải cao của bức xạ nền vũ trụ (© ESA).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

VÀO BAN ĐÊM TA NHÌN THẤY GÌ?

Vật lý thiên văn đã đưa ra một kết luận kỳ lạ về vật chất, khác với điều ta thường nghĩ trong vật lý cổ điển: *vật chất ta thấy trên bầu trời được tìm thấy trong những đám mây*. *Mây* là các hệ thống trong đó mật độ vật chất giảm dần theo khoảng cách từ tâm ra ngoài, không có đường biên rõ ràng và không có kích thước xác định. Vật thể ta thấy trong Hình 95 là một đám mây phân tử. Nhưng đây không phải là trường hợp duy nhất. Phần lớn các vật thể vật lý thiên văn, bao gồm các hành tinh và ngôi sao, là các đám mây.

Trang 221

Trái đất cũng là một đám mây, nếu ta xem khí quyển, từ quyển và vòng bụi chung quanh là một phần của nó. Mặt trời là một đám mây. Khởi đầu nó là một quả cầu khí, nhưng nó giống một đám mây nếu ta tính đến các tai lửa, nhật quyển, gió mặt trời và từ quyển của nó. Thái dương hệ là một đám mây nếu ta tính đến các đám mây sao chổi, vành đai tiểu hành tinh và các đám mây khí liên hành tinh. Thiên hà là một đám mây nếu ta nhớ đến sự phân bố vật chất và các đám mây bức xạ vũ trụ quanh nó. Thật ra ngay cả chúng ta cũng có thể được xem là các đám mây, vì mỗi người được bao quanh bởi các loại khí, các hạt bụi nhỏ trên da, hơi nước, v.v...

Xem 210

Trong vũ trụ, hầu hết các đám mây là các đám mây plasma. *Plasma* là khí bị ion hoá, giống như lửa, sét, bên trong đèn ống hay Mặt trời. Ít nhất 99.9 % *vật chất trong vũ trụ là các đám mây plasma*. Chỉ có một ít hiện hữu ở thể rắn hay lỏng, như lò nướng bánh mì, tăm xỉa răng hay những người dùng chúng.

Mọi đám mây trong vũ trụ đều có chung nhiều tính chất. Đầu tiên, chúng – nếu không bị nhiễu loạn vì va chạm hay tương tác với các vật thể lân cận – đều *đang quay*. Do đó phần lớn các đám mây đều *dẹt*: chúng có hình dạng các chiếc đĩa. Thứ hai, trong nhiều đám mây đang quay, vật chất đang rơi về phía trung tâm: phần lớn các đám mây là *các đĩa bồi tụ*. Sau cùng, các đĩa bồi tụ không bị nhiễu loạn thường phát ra vật chất dọc theo trục quay: chúng phun ra *những luồng vật chất*. Cấu trúc cơ bản này đã được người ta quan sát thấy trong các sao trẻ, pulsar, thiên hà, quasar và nhiều hệ thống khác. Hình 98 cho một số thí dụ. Sau cùng vào năm 2010, các luồng vật chất đã được thấy trong thiên hà của chúng ta (Ngân hà). (Mặt trời có phun ra các luồng vật chất hay không? Cho đến nay, người ta vẫn chưa phát hiện được.)

Câu đố 318 r

Tóm lại, vào ban đêm ta thấy phần lớn các đám mây plasma dẹt, quay tròn phát ra các luồng vật chất dọc theo trục quay. Nhưng bầu trời đêm còn có nhiều hiện tượng khác. Một phần lớn Thiên văn học và Vật lý thiên văn là các thông tin về các hiện tượng đó. Một tổng quan về các điều quan sát được có trong Bảng 5.

Xem 211

BẢNG 5 Các hiện tượng quan sát được trong vũ trụ.

Phương diện	Tính chất chính	Giá trị
Hiện tượng		
Sự hình thành thiên hà	do Hubble quan sát được	nhiều lần
	biến cố kích khởi	chưa biết
Va chạm thiên hà	động lượng	10^{45} tới 10^{47} kg m/s
Sự hình thành ngôi sao	sự suy sụp của đám mây	tạo thành các ngôi sao từ 0.04 đến 130 khối lượng Mặt trời

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 5 (Tiếp theo) Các hiện tượng quan sát được trong vũ trụ.

Phương diện	Tính chất chính	Giá trị
	tần số hình thành	từ 0 tới 1000 khối lượng Mặt trời/năm/thiên hà; khoảng 1 khối lượng Mặt trời/năm trong Ngân Hà
	do hợp nhất sao	lên tới 250 khối lượng Mặt trời
Tân tinh	các sao sáng mới,	$L < 10^{31}$ W
	sự phun các bọt khí	$R \approx t \cdot c/100$
Siêu tân tinh	các sao cực sáng mới,	$L < 10^{36}$ W
	tốc độ hình thành	1 tới 5/thiên hà/1000 a
Sao suy sụp	bùng nổ quang học	$L > 10^{37}$ W
Bùng nổ Gamma	độ trưng	L lên tới 10^{45} W, khoảng 1 % độ trưng của toàn thể vũ trụ khả kiến
	năng lượng	*c.* 10^{46} J
	thời gian	*c.* 0.015 tới 1000 s
	số lần quan sát được	*c.* 2 /ngày
Các nguồn vô tuyến	phát xạ sóng vô tuyến	10^{33} tới 10^{38} W
Các nguồn tia X	phát xạ tia X	10^{23} tới 10^{34} W
Các tia vũ trụ	năng lượng	từ 1 eV tới 10^{22} eV
Thấu kính hấp dẫn	độ cong của tia sáng	góc xuống tới 10^{-4} ″
Sao chổi	chu kỳ, sự hoá hơi	50 a, thời gian xuất hiện 2 ka, thời gian sống 100 ka
Vẫn thạch	tuổi	lên tới $4.57 \cdot 10^9$ a
Thành phần		
Không gian liên thiên hà	mật độ khối lượng	*c.* 10^{-26} kg/m^3
Quasar	dịch chuyển đỏ	lên tới $z = 6$
	độ trưng	$L = 10^{40}$ W, gần giống một thiên hà
Siêu đám thiên hà	số thiên hà	*c.* 10^8 trong chân trời của chúng ta
Siêu đám Ngân hà	số thiên hà	khoảng 4000
Nhóm thiên hà	kích thước	100 Zm
	số thiên hà	từ 12 đến 1000
Nhóm Ngân hà	số thiên hà	30
Thiên hà	kích thước	0.5 tới 2 Zm
	số lượng	*c.* 10^{11} trong chân trời
	chứa	10 tới 400 đám sao hình cầu
	chứa	10^{11} sao/thiên hà
	chứa	một hố đen siêu trọng và nhiều hố đen khối lượng trung bình
Ngân Hà	đường kính	1.0(0.1) Zm
	khối lượng	10^{42} kg hay $5 \cdot 10^{11}$ khối lượng Mặt trời Xem 208

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 5 (Tiếp theo) Các hiện tượng quan sát được trong vũ trụ.

Phương diện	Tính chất chính	Giá trị
	tốc độ	600 km/s về phía Hydra-Centaurus
	chứa	khoảng 30 000 pulsar Xem 212
	chứa	100 đám sao hình cầu có 1 triệu ngôi sao/đám
Đám sao hình cầu (thí dụ M15)	chứa	hàng ngàn ngôi sao, 1 hố đen khối lượng trung bình
	tuổi	lên tới 12 Ga (vật thể già nhất cho tới nay)
Tinh vân, các đám mây	cấu tạo	bụi, oxygen, hydrogen
Đám mây liên Ngân hà	kích thước	20 năm ánh sáng
	cấu tạo	nguyên tử hydrogen ở 7500 K
Hệ sao	kiểu	sao đôi, hơn 70 sao có các sao lùn nâu và nhiều hệ hành tinh quay quanh
Thái dương hệ	kích thước	2 năm ánh sáng (đám mây Oort)
	tốc độ	368 km/s từ Aquarius hướng về Leo
Sao	khối lượng	lên tới 130 khối lượng Mặt trời (trừ lúc hợp nhất) Xem 213
sao kềnh và siêu kềnh	kích thước lớn	lên tới 1 Tm
sao trong dãy chính		
sao lùn nâu	khối lượng nhỏ	dưới 0.072 khối lượng Mặt trời
	nhiệt độ thấp	dưới 2800 K Xem 214
sao lùn L	nhiệt độ thấp	1200 tới 2800 K
sao lùn T	nhiệt độ thấp	900 tới 1100 K
sao lùn trắng	bán kính nhỏ	$r \approx 5000$ km
	nhiệt độ cao	từ 100 000 giảm tới 5000 K
sao neutron	mật độ hạt nhân	$\rho \approx 10^{17}$ kg/m^3
	kích thước nhỏ	$r \approx 10$ km
nguồn phát xạ các bùng nổ tia X	phát xạ tia X	
pulsar	phát xạ sóng vô tuyến tuần hoàn	
	khối lượng	lên tới 25 khối lượng Mặt trời
sao từ	từ trường lớn	lên tới 10^{11} T và cao hơn Xem 215
	một số là các vật thể khuếch đại tia gamma, một số là các pulsar tia X dị thường	
	khối lượng	hơn 25 khối lượng Mặt trời Xem 216

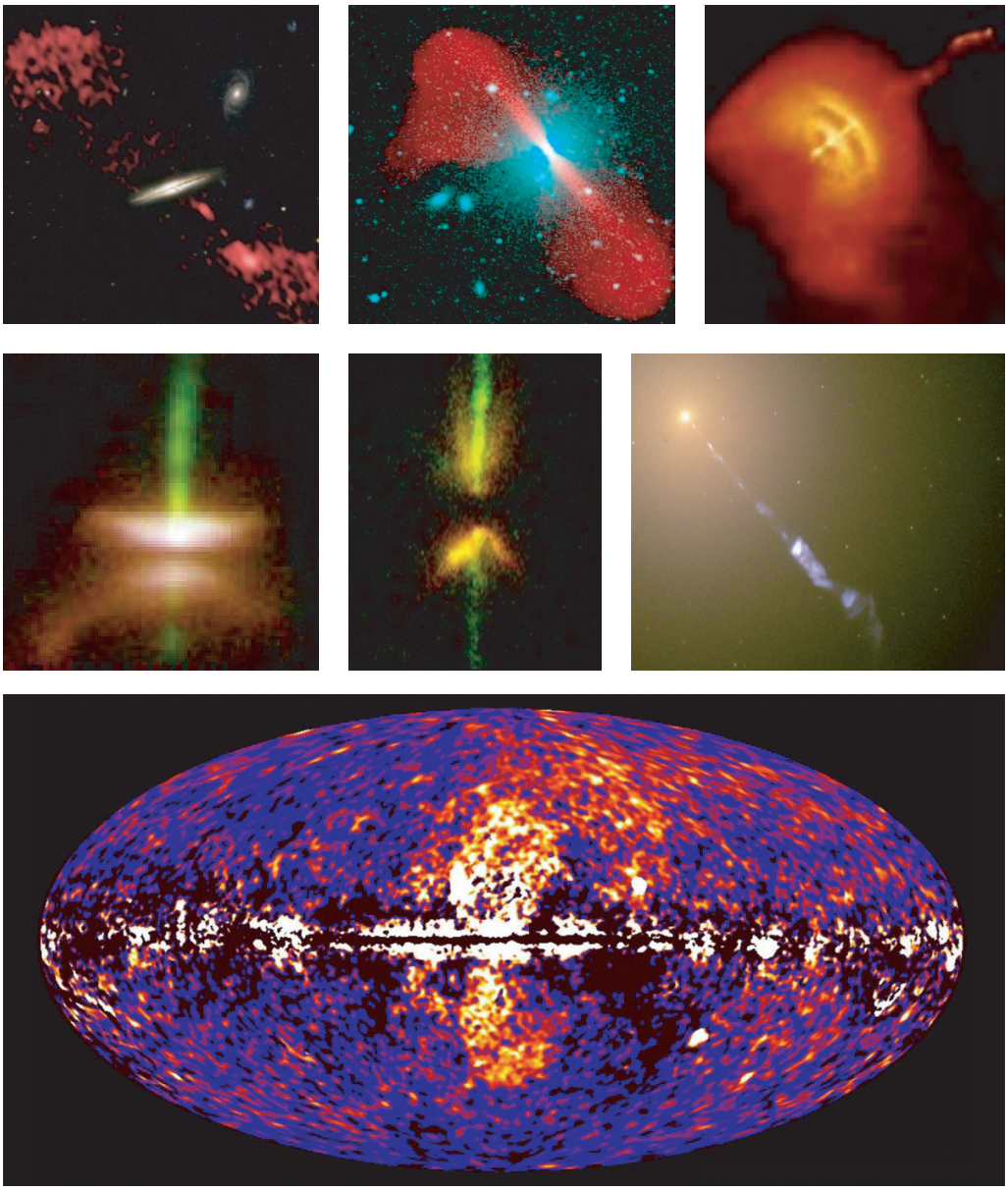
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 5 (Tiếp theo) Các hiện tượng quan sát được trong vũ trụ.

Phương diện	Tính chất chính	Giá trị
Hố đen	bán kính chân trời	$r = 2GM/c^2$, khối lượng quan sát được từ 3 tới 10^{11} khối lượng Mặt trời
Các tính chất tổng quát		
Chân trời vũ trụ	khoảng cách	c. 10^{26} m = 100 Ym
Sự giãn nở	Hằng số Hubble	71(4) km s^{-1} Mpc^{-1} hay $2.3(2) \cdot 10^{-18}$ s^{-1}
'Tuổi' vũ trụ		13.8(1) Ga
Chân không	mật độ năng lượng	0.5 nJ/m^3 hay $\Omega_\Lambda = 0.73$ khi $k = 0$
		không có dấu hiệu phụ thuộc thời gian
Hình dạng cỡ lớn	độ cong không gian	$k \approx \Omega_K = 0$ Trang 241
	topo	đơn giản ở mọi thang đo
Chiều	số lượng	3 cho không gian, 1 cho thời gian, ở mọi kích cỡ và năng lượng đo được
Vật chất	mật độ	2 tới $11 \cdot 10^{-27}$ kg/m^3 hay 1 tới 6 nguyên tử hydrogen/m^3
		$\Omega_M = 0.25$
Baryon	mật độ	$\Omega_b = 0.04$, 1/6 ở trên (bao gồm trong Ω_M)
Vật chất tối	mật độ	$\Omega_{DM} = 0.21$ (bao gồm trong Ω_M), chưa biết
Năng lượng tối	mật độ	$\Omega_{DM} = 0.75$, chưa biết
Photon	mật độ	4 tới $5 \cdot 10^8$ /m^3
		= 1.7 tới $2.1 \cdot 10^{-31}$ kg/m^3
	mật độ năng lượng	$\Omega_R = 4.6 \cdot 10^{-5}$
Neutrino	mật độ năng lượng	Ω_ν chưa biết
Nhiệt độ trung bình	photon	2.725(2) K
	neutrino	không đo được, giá trị dự đoán là 2 K
Nhiễu loạn bức xạ	độ dị hướng photon	$\Delta T/T = 1 \cdot 10^{-5}$
	biên độ mật độ	$A = 0.8(1)$
	chỉ số phổ	$n = 0.97(3)$
	tỷ số tensor/vô hướng	$r < 0.53$ với độ tin cậy 95 %
Độ dày quang học ion hoá		$\tau = 0.15(7)$
Thời kỳ tái hợp		$z = 1100$

Nhưng khi nói về những gì ta thấy trên bầu trời thì ta cần làm sáng tỏ một vấn đề chính.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 98 Các đám mây quay tròn phun ra các luồng vật chất dọc theo trục quay; hàng trên: hình ảnh tổng hợp (ánh sáng khả kiến và hồng ngoại) của thiên hà 0313-192, 3C296 và pulsar Vela; hàng giữa: sao đang hình thành HH30, DG Tauri B và một luồng vật chất phun ra từ hố đen thuộc thiên hà M87; hàng dưới: các luồng vật chất trong thiên hà của chúng ta (NASA).

Vũ trụ là gì?

> Tôi kinh ngạc khi có những người muốn 'biết rõ' về vũ trụ này trong khi tìm được đường đi trong Chinatown cũng đã là khó rồi.
>
> Woody Allen

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 99 Vẻ đẹp thiên văn học: Bọt Cygnus, được khám phá năm 2008, một tinh vân bị một ngôi sao ở trung tâm đẩy ra ngoài (ảnh không đúng màu của T.A. Rector, H. Schweiker).

Thuật ngữ 'vũ trụ' bao hàm sự quay tròn. Vũ trụ là những gì quay quanh ta mỗi đêm. Đối với một nhà vật lý, ít nhất có 3 định nghĩa khả hữu cho 'vũ trụ':

— *Vũ trụ* (*quan sát được* hay *khả kiến*) *l*à toàn thể khối lượng và năng lượng có thể quan sát được. Định nghĩa này bao gồm mọi vật trong chân trời vũ trụ. Vì chân trời đang chạy ra xa chúng ta, số lượng khối lượng và năng lượng gia tăng một cách đều đặn. Như vậy nội dung của thuật ngữ 'vũ trụ quan sát được' thay đổi theo thời gian. (Nguồn gốc của sự gia tăng này là gì? Ta sẽ trở lại vấn đề này trong phần cuối của cuộc thám hiểm.)

Quyển VI, trang 307

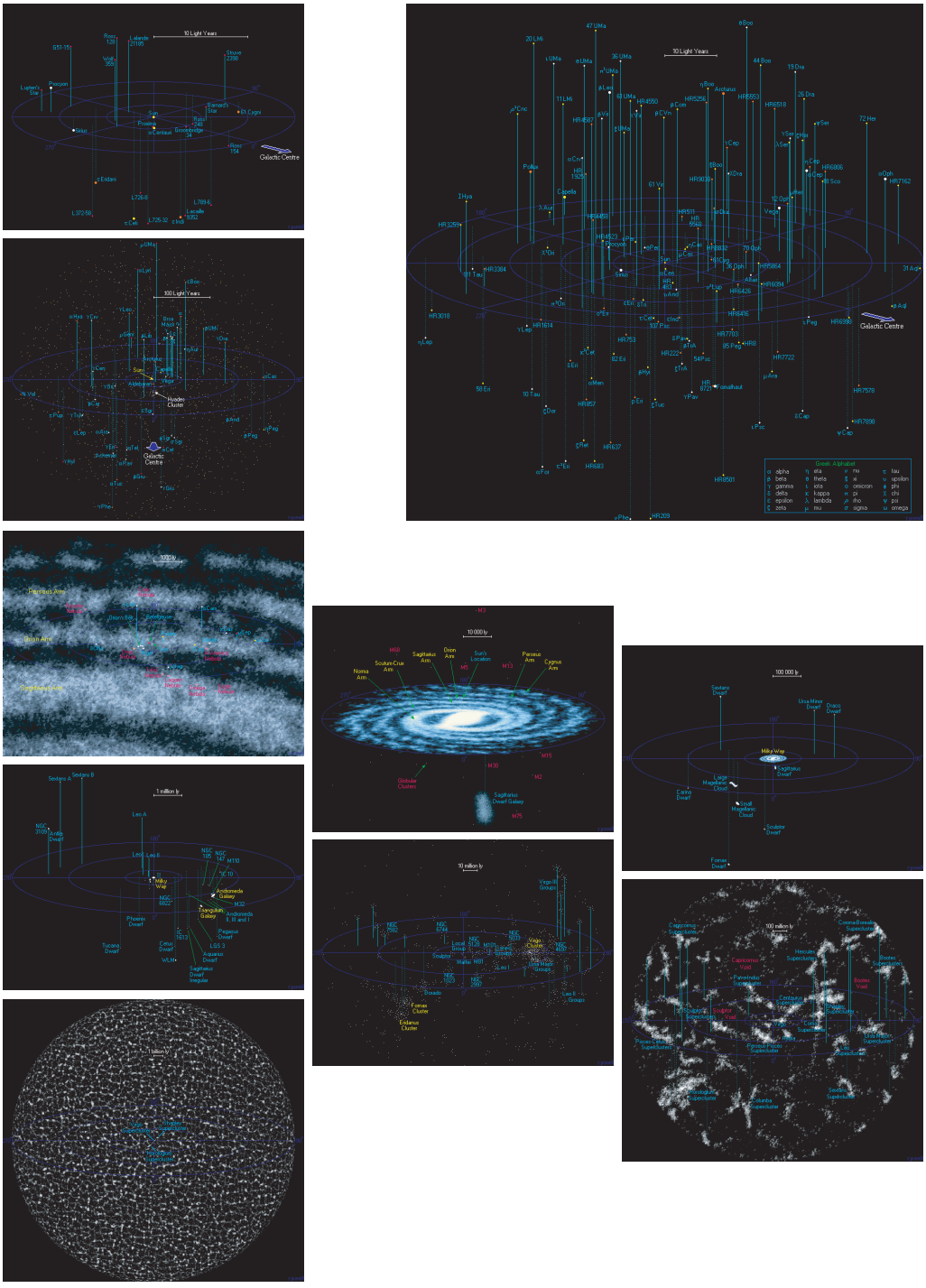
— *Vũ trụ* (*được tin là có*) *l*à toàn bộ khối lượng và năng lượng, *bao gồm* cả những gì không quan sát được. Nhiều sách về Thuyết tương đối tổng quát cho rằng có một số vật chất và năng lượng xác định ngoài tầm quan sát. Ta sẽ giải thích điều này dưới đây. (Bạn có đồng ý với điều đó không?)

Câu đố 319 e

— *Vũ trụ* (*đầy đủ*) *l*à tổng vật chất và năng lượng *cũng như* không-thời gian.

Những định nghĩa này thường pha trộn các lý luận vật lý và triết học. *Không có* sự nhất

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 100 Một tập bản đồ môi trường vũ trụ của chúng ta: các ảnh minh hoạ có kích cỡ 12.5, 50, 250, 5 000, 50 000, 500 000, 5 triệu, 100 triệu, 1 tỷ và 14 tỷ năm ánh sáng (© Richard Powell, www.atlasoftheuniverse.com).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

trí về thuật ngữ, vì vậy ta phải thận trọng. Trong quyển sách này, khi sử dụng thuật ngữ 'vũ trụ' ta chỉ muốn nói đến định nghĩa *sau cùng*. Ta sẽ tiếp tục khám phá mà không phân biệt rõ ràng giữa các định nghĩa nếu không ta sẽ không hoàn tất được cuộc thám hiểm này. (Thí dụ: lượng vật chất và năng lượng trong vũ trụ đầy đủ có giống như trong vũ trụ khả kiến hay không?)

Câu đố 320 s

Hãy nhớ rằng 'kích thước' của vũ trụ khả kiến, hay đúng hơn, khoảng cách tới chân trời, là một đại lượng *có thể* hình dung được. Giá trị 10^{26} m, hay 10 triệu năm ánh sáng, không ngoài sức tưởng tượng. Nếu ta lấy tất cả sắt từ lõi Trái đất làm thành một sợi dây căng dài tới cạnh của vũ trụ khả kiến, nó sẽ dày bao nhiêu? Câu trả lời có thể làm bạn ngạc nhiên. Vũ trụ rõ ràng là hữu hạn. Số *thiên hà* khả kiến trong vũ trụ thì cũng cỡ số hạt cát trong 1 mét khối cát. Để mở rộng sự so sánh, bạn có thể tính xem cần một khoảng không gian rộng bao nhiêu để chứa tất cả các hạt bột, mỗi hạt có kích thước cỡ 150 μm và đại diện cho một ngôi sao, được không?

Câu đố 321 s

Câu đố 322 s

Màu sắc và sự chuyển động của các ngôi sao

> Ἦ τοι μὲν πρώτιστα Χάος γένετ' ... *
>
> Hesiod, *Thần phả*.

Một điều hiển nhiên, vũ trụ toàn là chuyển động. Để hiểu đôi chút về vũ trụ, ta cần đo vận tốc và vị trí của thật nhiều vật thể bên trong nó. Trong thế kỷ 20, người ta đã thực hiện rất nhiều quan trắc về các ngôi sao và thiên hà. (Bạn có thể hình dung ra cách xác định khoảng cách và vận tốc không?) Kho tàng dữ liệu này có thể tổng kết thành hai điểm.

Câu đố 323 s

Đầu tiên, ở quy mô lớn, nghĩa là trung bình trên 5 tỷ năm ánh sáng, mật độ vật chất trong vũ trụ *thuần nhất* và *đẳng hướng*. Hiển nhiên là ở quy mô nhỏ hơn sự không thuần nhất xuất hiện, như các thiên hà hay bánh phô mai. Ngân Hà thì không đẳng hướng cũng không thuần nhất. Nhưng ở quy mô lớn không còn sự khác biệt. Sự thuần nhất của phân bố vật chất ở quy mô lớn thường được gọi là *nguyên lý vũ trụ học*.

Xem 217

Điểm thứ hai về vũ trụ còn quan trọng hơn. Vào thập niên 1920, Carl Wirtz, Knut Lundmark và Gustaf Stromberg, độc lập với nhau, chứng tỏ rằng, về tổng thể mọi thiên hà *đều chuyển động ra xa Trái đất* và càng ngày càng xa. Có rất ít ngoại lệ đối với các thiên hà láng giềng, như tinh vân Andromeda; nhưng một cách tổng quát, tốc độ bay v của một vật tăng theo khoảng cách d. Năm 1929, thiên văn gia Mỹ Edwin Hubble** đã công bố lần đầu tiên hệ thức giữa tốc độ và khoảng cách. Mặc dù sử dụng các thang đo chiều dài không chính xác ông vẫn tìm thấy hệ thức

Xem 218

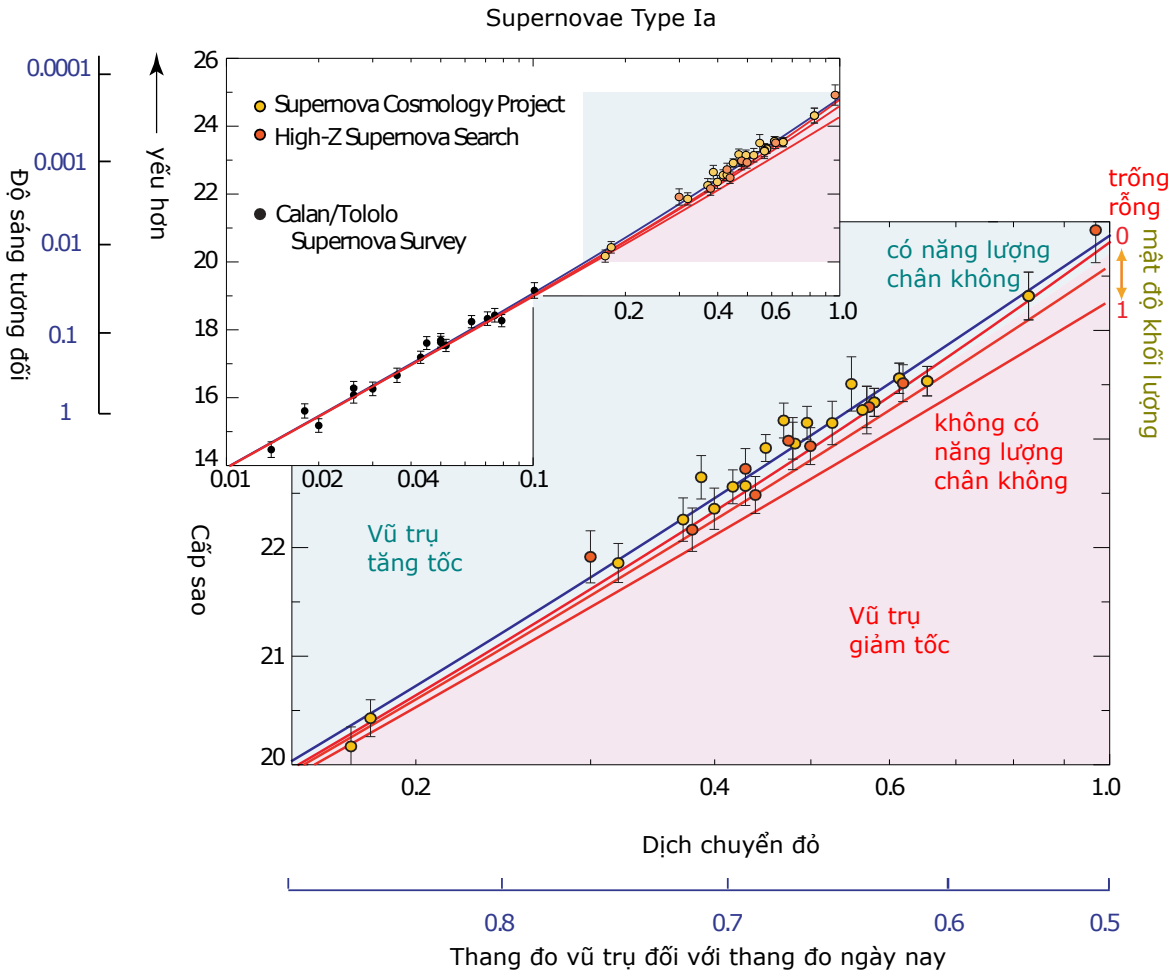
$$v = H\,d\,, \tag{244}$$

trong đó hằng số tỷ lệ H ngày nay được gọi là *hằng số Hubble*. Đồ thị hiện nay của

* 'Quả thật đầu tiên là sự hỗn độn ...' Thần phả, thường được cho là của nhà thơ thần thoại Hesiodos, được hoàn thành vào khoảng năm 700 BCE. Có bản tiếng Anh và Hy Lạp trên website www.perseus.tufts.edu. Câu trích dẫn nổi tiếng này thuộc đoạn 117.

** Edwin Powell Hubble (1889–1953), thiên văn gia nổi tiếng của Mỹ. Sau khi là một vận động viên và tốt nghiệp trường luật, ông quay trở lại với niềm đam mê các vì sao thuở thiếu thời; sau cùng ông chứng minh được giả định của Immanuel Kant năm 1755 là tinh vân Andromeda là một thiên hà giống như Ngân Hà. Như vậy ông đã chứng tỏ rằng Ngân Hà chỉ là một phần rất nhỏ của vũ trụ.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 101 Mối liên hệ giữa khoảng cách ngôi sao và vận tốc của nó (courtesy Saul Perlmutter and the Supernova Cosmology Project).

hệ thức trên được cho trong Hình 101. Hằng số Hubble ngày nay có giá trị khoảng 71 km s^{-1}Mpc^{-1}. (Giá trị của Hubble tìm ra khác xa với giá trị bây giờ nên nó không còn được sử dụng nữa.) Thí dụ, một ngôi sao cách ta 2 Mpc* đang rời xa Trái đất với tốc độ khoảng 142 km/s và sẽ lớn hơn đối với các sao ở xa hơn.

Câu đố 324 s

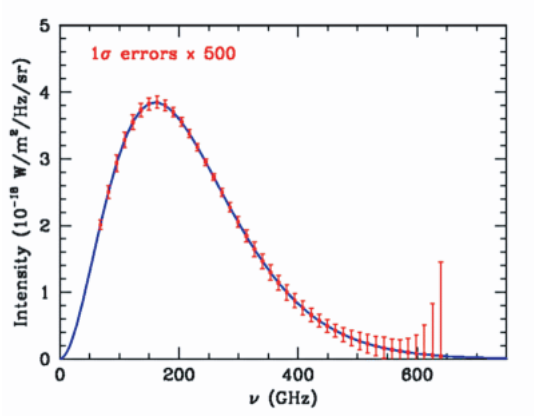
Đúng ra sự khám phá của Wirtz, Lundmark và Stromberg đã bao hàm ý *mọi* thiên hà đều chuyển động ra xa *tất cả* các thiên hà khác. (Tại sao?) Nói cách khác, vật chất trong vũ trụ *đang giãn nở*. Quy mô của sự giãn nở này và các kích thước khổng lồ liên quan làm cho ta phải kinh ngạc. Chuyển động của hàng tỷ nhóm thiên hà trên bầu trời chỉ được mô tả bằng một phương trình vô cùng đơn giản (244)! Người ta quan sát thấy có một số sai lệch đối với các thiên hà lân cận, như đã đề cập ở trên và đối với các thiên hà ở xa, như ta sẽ thấy.

Nguyên lý vũ trụ học và sự giãn nở sẽ dẫn tới một điều là vũ trụ không thể hiện hữu

Trang 316

* Một *megaparsec* hay Mpc là khoảng cách bằng 30.8 Zm.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 102 Quang phổ đo được của bức xạ nền vũ trụ, với các sai số nhân cho 500, so với quang phổ theo tính toán của Planck ở nhiệt độ 2.728 K (NASA).

trước thời điểm kích thước của nó bằng 0; như vậy tuổi của vũ trụ thì *hữu hạn*. Cùng với các phương trình tiến hoá, sẽ được giải thích chi tiết dưới đây, hằng số Hubble chỉ tới một thời điểm khoảng 13.8 tỷ năm. Sự giãn nở cũng mang ý nghĩa là vũ trụ có một *chân trời*, nghĩa là một khoảng cách cực đại hữu hạn của các nguồn phát ra những tín hiệu có thể đến được Trái đất. Tín hiệu của các nguồn ngoài chân trời không thể đến được với chúng ta.

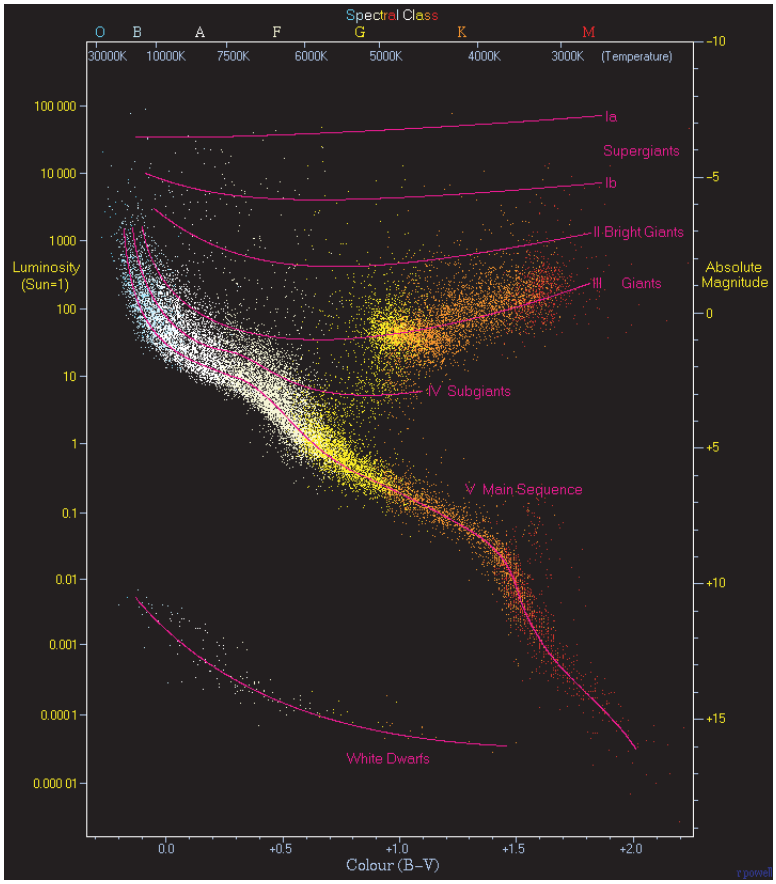
Chuyển động của các thiên hà nói lên nhiều điều quan trọng: trong quá khứ, bầu trời đêm, và như vậy là vũ trụ, đã *nhỏ hơn* bây giờ và vật chất đã *đậm đặc hơn* bây giờ nhiều. Hoá ra vật chất cũng *nóng hơn* bây giờ rất nhiều. George Gamow* đã tiên đoán vào năm 1948: vì các vật thể nóng sẽ phát xạ ánh sáng nên bầu trời đêm không tối đen hoàn toàn, mà phải tràn ngập bức xạ của thể đen do vũ trụ phát ra khi 'còn nóng'. Bức xạ đó được gọi là *bức xạ nền*, phải lạnh dần đi do sự giãn nở của vũ trụ. (Bạn có thể khẳng định điều này không?) Mặc dù có nhiều tiên đoán tương tự của nhiều nhà khoa học khác, kể cả Yakov Zel'dovich, một trong những trường hợp thông tin khoa học bị bỏ lỡ nổi tiếng nhất, phải mất một thời gian rất dài bức xạ nền mới được hai nhà nghiên cứu hoàn toàn không biết gì về các công trình đó tìm thấy. Một bài báo nổi tiếng năm 1964 của Doroshkevich và Novikov cũng đã cho rằng antenne do các nhà khoa học 'vô tư' này sử dụng là thiết bị tốt nhất trong việc tìm kiếm bức xạ! Dù sao thì đến năm 1965 Arno Penzias và Robert Wilson mới khám phá ra bức xạ này. Đó là một trong những phát minh khoa học đẹp đẽ, mà nhờ nó sau này cả hai nhận được giải Nobel vật lý. Bức xạ này được mô tả bằng bức xạ thể đen của một vật có nhiệt độ 2.728(1) K, như minh hoạ trong Hình 102. Thật ra thì quang phổ của thể đen có độ chính xác nhỏ hơn $1/10^4$.

Xem 219
Câu đố 325 ny
Xem 220
Xem 221

Tóm lại, số liệu cho thấy rằng vũ trụ bắt đầu bằng một vụ *big bang* nóng. Nhưng không kể sự giãn nở và sự nguội đi, 14 tỷ năm của quá khứ cũng đã sinh ra một vài biến cố đáng nhớ khác.

* George Gamow (b. 1904 Odessa, d. 1968 St. Boulder), vật lý gia. Ông đã giải thích được sự phân rã alpha nhờ hiệu ứng xuyên hầm và đã tiên đoán về nền vi ba của vũ trụ. Ông đã viết các sách giáo khoa vật lý phổ thông đầu tiên khá thành công, như *1, 2, 3, vô cực* và *bộ sách Mr.Thompkins*, mà sau này đã được nhiều tác giả phỏng theo.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 103 Giản đồ Hertzsprung–Russell (© Richard Powell).

HẰNG ĐÊM CÁC VÌ SAO CÓ CHIẾU SÁNG HAY KHÔNG?

> Ngôi sao không toả sáng lung linh đó sao? Tôi là người duy nhất trên thế gian này biết được điều đó.
>
> Friedrich (Fritz) Houtermans (1903–1966)

Hình như sao trên trời chẳng bao giờ dời đổi. Nhưng thật ra thì vào lúc này hay lúc khác đều có một sao mới xuất hiện trên bầu trời: một *tân tinh*. Tên sao theo tiếng Latin có nghĩa là 'mới'. Các tân tinh sáng đặc biệt được gọi là *siêu tân tinh*. Tân tinh và các hiện tượng tương tự nhắc chúng ta rằng sao thường sống lâu hơn người rất nhiều, nhưng cũng giống như người, sao cũng sinh ra, sáng lên rồi tắt lịm.

Thành ra người ta có thể biểu diễn tất cả các sao trên một giản đồ được gọi là *giản đồ Hertzsprung–Russell*. Giản đồ này, nền tảng cho mọi quyển sách thiên văn học, được biểu diễn trong Hình 103. Nó là một thí dụ đẹp đẽ về một phương pháp tiêu chuẩn được các nhà vật lý thiên văn sử dụng: bằng cách thu thập số liệu thống kê trên nhiều mẫu vật của một loại vật thể, người ta có thể suy ra vòng đời của vật đó, ngay cả khi cuộc đời của nó dài hơn cuộc đời của một người rất nhiều. Thí dụ như người ta có thể sử dụng giản đồ một cách khéo léo để ước tính tuổi của một đám sao, như đám sao M15 trong

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 104 Đám sao hình cầu Messier 15 (M15), có tuổi là 13 tỷ năm (© ESA, NASA).

Hình 104 và như vậy suy ra được tuổi tối thiểu của vũ trụ. Kết quả là vào khoảng 13 tỷ năm.

Cuộc đời hữu hạn của một vì sao dẫn tới sự hạn chế khả năng được nhìn thấy của chúng đặc biệt trong trường hợp độ dịch chuyển đỏ cao. Thật vậy, kính thiên văn hiện đại có thể nhìn tới những nơi (và những thời điểm) rất xa trong quá khứ đến mức chỗ đó chưa có ngôi sao nào. Ở khoảng cách đó người ta chỉ có thể thấy các *quasar*; những nguồn sáng này không phải là ngôi sao nhưng nặng và sáng hơn nhiều. Các nhà vật lý thiên văn vẫn còn nghiên cứu về cấu trúc chính xác của chúng.

Vì các ngôi sao chiếu sáng nên chúng cũng đã được *hình thành* bằng một cách nào đó. Trải qua hàng triệu năm, các đám mây bụi khổng lồ trong không gian có thể co lại do ảnh hưởng của lực hấp dẫn và tạo thành một cấu trúc quay tròn, nóng và đậm đặc: một ngôi sao mới ra đời. Chi tiết hấp dẫn về sự ra đời của sao từ các đám mây bụi là phần trọng tâm của Vật lý thiên văn, nhưng ta sẽ không tìm hiểu chúng ở đây. Các sao

Xem 222

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

khác nhau về cuộc sống và tuổi đời. Điều chủ yếu là cuộc đời của chúng phụ thuộc vào khối lượng của chúng lúc ra đời. Các sao có khối lượng cỡ Mặt trời sống từ 10 tới 20 Ga và chết khi trở thành sao kềnh đỏ. Các sao có khối lượng 20 lần Mặt trời chỉ sống vài triệu năm và chết lúc là siêu tân tinh. Các sao có khối lượng nặng nhất có khối lượng khoảng 130 lần Mặt trời. Ngoại lệ có những sao hình thành từ việc hợp nhất nhiều ngôi sao; chúng có thể nặng cỡ 250 lần Mặt trời.

Xem 223

Tuy vậy ta vẫn chưa có câu trả lời đầy đủ cho câu hỏi này. Tại sao sao sáng? Rõ ràng là chúng chiếu sáng vì chúng nóng. Chúng nóng do bên trong chúng có các phản ứng nhiệt hạch. Ta sẽ bàn chi tiết hơn về các quá trình này trong quyển sau.

Quyển V, trang 211

Lược sử vũ trụ

> “Anima scintilla stellaris essentiae.*”
> Heraclitus of Ephesus (*c.* 540 tới *c.* 480 BCE)

Xem 224

Không phải chỉ có các vì sao sinh ra, sáng lên rồi tắt đi. Các thiên hà cũng vậy. Còn toàn thể vũ trụ thì sao? Những cuộc phiêu lưu quan trọng nhất mà vật chất và bức xạ quanh ta đã trải qua được tóm tắt trong Bảng 6. Những giai đoạn chưa được bàn tới sẽ được nghiên cứu trong phần còn lại của cuộc phiêu lưu của chúng ta. Bảng niên đại này thật phi thường. Chuỗi sự kiện đẹp đẽ và đầy ấn tượng đến nỗi ngày nay chúng thường được sử dụng trong việc tâm lý trị liệu để chỉ ra cho con người thấy câu chuyện ẩn sau sự hiện hữu của họ và cũng để nhắc nhở con người về giá trị riêng của mình. Hãy tận hưởng điều này.

Xem 225

BẢNG 6 Lược sử vũ trụ.

Thời gian trước hiện tại[a]	Thời gian kể từ Big Bang[b]	Biến cố	Nhiệt độ
c. $13.8 \cdot 10^9$ a	$\approx t_{\text{Pl}}$ [b]	Thời gian, không gian, vật chất và các điều kiện ban đầu không xác định	10^{32} K $\approx T_{\text{Pl}}$
$13 \cdot 10^9$ a	*c.* 1000 t_{Pl} $\approx 10^{-42}$ s	Phân biệt không-thời gian với vật chất và bức xạ, các điều kiện ban đầu xác định	10^{30} K
	10^{-35} s tới 10^{-32} s	**Kỷ nguyên lạm phát & GUT** bắt đầu; các tương tác mạnh và điện nhược tách ra	$5 \cdot 10^{26}$ K
	10^{-12} s	Các phản quark huỷ biến; tương tác điện từ và tương tác yếu tách ra	10^{15} K
	$2 \cdot 10^{-6}$ s	Quark bị giam vào hadron; vũ trụ là plasma Positron huỷ biến	10^{13} K
	0.3 s	Vũ trụ trở nên trong suốt đối với neutrino	10^{10} K
	một vài giây	**dung hợp hạt nhân**: *hạt nhân* D, ^{4}He, ^{3}He và ^{7}Li hình thành; bức xạ hãy còn chiếm ưu thế	10^9 K
	2500 a	**Vật chất bắt đầu chiếm ưu thế**; các nhiễu loạn mật độ tăng dần	75 000 K

* ‘Linh hồn là một tia lửa vật chất của các vì sao.’

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 6 (Tiếp theo) Lược sử vũ trụ.

Thời gian trước hiện tại[a]	Thời gian kể từ Big Bang[b]	Biến cố	Nhiệt độ
dịch chuyển đỏ $z = 1100$	380 000 a	**Sự tái hợp**: trong những giai đoạn sau này của big bang, các *nguyên tử* H, He và Li hình thành và vũ trụ trở nên 'trong suốt' đối với ánh sáng, vì vật chất và bức xạ tách rời, nghĩa là chúng có nhiệt độ khác nhau; bầu trời 'đêm' càng lúc càng tối đen	3000 K
		Bầu trời gần như đen trừ bức xạ của thể đen	$T_\gamma = T_{o\gamma}(1+z)$
$z = 10$ tới 30		**Sự hình thành của thiên hà**	
$z = 9.6$		Vật thể già nhất mà đến nay ta còn thấy được	
$z = 5$		Các đám thiên hà hình thành	
$z = 3$	10^6 a	Thế hệ sao đầu tiên (quần thể sao II) hình thành, bắt đầu dung hợp hydrogen; dung hợp helium sinh ra carbon, silic và oxygen	
	$2 \cdot 10^9$ a	Những ngôi sao đầu tiên bùng nổ thành siêu tân tinh[c]; sắt được tạo ra	
$z = 1$	$3 \cdot 10^9$ a	Thế hệ sao thứ 2 (quần thể sao I) xuất hiện, các bùng nổ thành siêu tân tinh tiếp theo của các sao lão hoá hình thành các nguyên tố vi lượng (Fe, Se, v.v...) tạo nên chúng ta và thổi chúng vào thiên hà	
$4.7 \cdot 10^9$ a		Đám mây nguyên thuỷ, được tạo thành từ tàn dư của các bùng nổ như vậy, suy sụp; **Mặt trời hình thành**	
$4.5 \cdot 10^9$ a		**Trái đất** và hành tinh khác **hình thành**: Liên đại vô sinh bắt đầu [d]	
$4.5 \cdot 10^9$ a		Mặt trăng hình thành từ vật chất bắn ra trong sự va chạm của một tiểu hành tinh lớn với Trái đất hãy còn lỏng	
$4.3 \cdot 10^9$ a		Crater hình thành trên các hành tinh	
$4.0 \cdot 10^9$ a		**Liên đại thái cổ** (Archaeozoicum) bắt đầu: sự bắn phá từ không gian ngừng lại; vỏ Trái đất hoá rắn; khoáng chất xưa nhất hình thành	
$3.8 \cdot 10^9$ a		kết thúc sự ngưng tụ và tích luỹ nước	
$3.5 \cdot 10^9$ a		Vi sinh vật đơn bào xuất hiện ; stromatolites hình thành	
$2.5 \cdot 10^9$ a		**Liên đại nguyên sinh** ('thời kỳ của sự sống đầu tiên') bắt đầu: khí quyển trở nên giàu oxygen nhờ hoạt động của vi sinh vật Xem 226	
$1.3 \cdot 10^9$ a		Sinh vật đa bào vĩ mô xuất hiện, nấm xâm chiếm mặt đất	
$800 \cdot 10^6$ a		Băng hoàn toàn che phủ mặt đất lần đầu tiên (lý do vẫn chưa biết) Xem 227	

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 6 (Tiếp theo) Lược sử vũ trụ.

Thời gian trước hiện tại[a]	Thời gian kể từ Big Bang[b]	Biến cố	Nhiệt độ
600 tới $540 \cdot 10^6$ a		Băng hoàn toàn che phủ mặt đất lần sau cùng	
$540(5) \cdot 10^6$ a		**Đại cổ sinh** (Palaeozoicum, 'lão niên') bắt đầu, sau khi thời kỳ băng giá kết thúc: động vật xuất hiện, vật hoá thạch xưa nhất (540(5) bắt đầu của kỷ Cambria, 495(5) kỷ Ordovic, 440(5) kỷ Silur, 417(5) kỷ Devon, 354(5) kỷ than đá và 292(5) kỷ Permia)	
$480 - 450 \cdot 10^6$ a		Thực vật trên cạn xuất hiện	
$400 - 370 \cdot 10^6$ a		Cây thân mộc xuất hiện, côn trùng bay xuất hiện	
$250(5) \cdot 10^6$ a		**Đại trung sinh** (Mesozoicum, 'trung niên', trước kia gọi là đệ nhị) bắt đầu: phần lớn côn trùng và các dạng sinh vật khác đều tuyệt chủng; động vật hữu nhũ xuất hiện (250(5) bắt đầu của kỷ Tam điệp, 205(4) kỷ Jura và 142(3) kỷ phấn trắng)	
$150 \cdot 10^6$ a		Lục địa Pangaea tách thành Laurasia và Gondwana	
		Đám sao Thất nữ hình thành	
$150 \cdot 10^6$ a		Chim chóc xuất hiện	
$142(3) \cdot 10^6$ a		Thời hoàng kim của khủng long (phấn trắng) bắt đầu	
$100 \cdot 10^6$ a		Bắt đầu hình thành các dãy núi Alps, Andes và Rocky	
$65.5 \cdot 10^6$ a		**Đại tân sinh** (Caenozoicum, 'tân sinh') bắt đầu: sau khi một tiểu hành tinh đụng vào Trái đất ở Yucatan, khủng long tuyệt chủng, cỏ và động vật linh trưởng xuất hiện. 65.5 bắt đầu của kỷ Đệ tam (gồm kỷ Paleogen với thế Paleocen, 55.0 thế Eocen và 33.7 thế Oligocen và kỷ Neogen với 23.8 thế Miocen và 5.32 thế Pliocen). Rồi đến 1.81 kỷ Đệ tứ (gồm thế Pleistocen hay Diluvium và 0.01 thế Holocen hay Alluvium).	
$50 \cdot 10^6$ a		Động vật hữu nhũ lớn xuất hiện	
$7(1) \cdot 10^6$ a		Họ Vượn người xuất hiện	
$3 \cdot 10^6$ a		Siêu tân tinh bùng nổ, gây ra các hậu quả: nhiều bức xạ vũ trụ cường độ lớn, tốc độ hình thành các đám mây tăng lên, Trái đất lạnh đi nhiều hơn, áp lực tiến hoá lên họ Vượn người mạnh hơn và kết quả là chi Người xuất hiện Xem 228	
500 000 a		Các ngôi sao trẻ nhất trong thiên hà hình thành	
500 000 a		Chi Người thông tuệ xuất hiện	
100 000 a		Bắt đầu Kỳ băng giá sau cùng	
90 000 a		Chi Người hiện đại xuất hiện	

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 6 (Tiếp theo) Lược sử vũ trụ.

Thời gian trước hiện tại[a]	Thời gian kể từ Big Bang[b]	Biến cố	Nhiệt độ
11 800 a		Kết thúc Kỳ băng giá sau cùng, bắt đầu của thế Holocen	
6 000 a		Chữ viết đầu tiên	
2 500 a		Vật lý bắt đầu	
500 a		Sử dụng cà phê, viết chì và Vật lý hiện đại bắt đầu	
200 a		Bắt đầu sử dụng điện	
100 a		Các bài báo của Einstein	
10 tới 120 a		Bạn là một sinh vật đơn bào	
Hiện tại	*c.* $14 \cdot 10^9$ a	Bạn đang đọc quyển sách này	$T_{o\gamma} = 2.73\,\mathrm{K}$ $T_{o\nu} \approx 1.6\,\mathrm{K}$ $T_{ob} \approx 0\,\mathrm{K}$
Tương lai		Bạn hưởng thụ cuộc sống; để có thêm chi tiết và phần biện giải, hãy xem các quyển sau.	

a. Toạ độ thời gian sử dụng ở đây được xác định bằng bức xạ nền vi ba, như đã giải thích ở Trang 243. Một năm được viết tắt là 'a' (tiếng Latin 'annus'). Sai số ở chữ số cuối được đặt trong ngoặc đơn.
b. Đại lượng này không được xác định một cách chính xác vì big bang không phải là một biến cố không-thời gian. Vấn đề này sẽ được tìm hiểu sau.
Quyển VI, trang 92 *c*. Lịch sử của các nguyên tử trên Trái đất chứng tỏ rằng chúng ta được tạo nên từ những tàn dư của một siêu tân tinh. Cấu tạo thực sự của chúng ta là *bụi sao*.
Quyển V, trang 182 *d*. Không kể thuật ngữ Azoicum, tất cả các tên và ngày tháng đều xuất phát từ Địa niên biểu của Uỷ ban quốc tế về Địa tầng học; niên đại được xác định nhờ Phương pháp định thời bằng phóng xạ.

Mặc dù khá dài và khá quan trọng, bảng niên đại này cũng có phần hạn chế của nó: điều gì xảy ra ở nơi khác trong vài tỷ năm cuối cùng? Vẫn còn một truyện dài phải viết tiếp về những điều chưa biết. Vì những lý do hiển nhiên, việc nghiên cứu chỉ tập trung ở Trái đất.

Việc khám phá và tìm hiểu mọi hiện tượng quan sát được trên bầu trời là mục tiêu nghiên cứu của vật lý thiên văn. Trong cuộc phiêu lưu của mình, chúng ta phải bỏ qua nhiều chủ đề hấp dẫn để tập trung vào sự chuyển động. Điều thú vị là Thuyết tương đối tổng quát cho phép ta giải thích nhiều hiện tượng tổng quát về chuyển động trong vũ trụ bằng một phương thức vô cùng đơn giản.

Lịch sử của không-thời gian

> Một số thỏ chạy túa ra từ một điểm trung tâm theo các hướng khác nhau với cùng một tốc độ. Trong khi chạy, một con thỏ quay đầu lại và nhìn thấy một cảnh tượng đáng kinh ngạc. Con thỏ nhìn thấy điều gì?

Câu đố 326 s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Trang 230 Số liệu thu thập được chứng tỏ rằng các ngôi sao rải rác khắp nơi đưa tới một kết luận đơn giản: *vũ trụ không thể ở trạng thái tĩnh.* Lực hấp dẫn luôn luôn làm thay đổi khoảng cách giữa chúng; chỉ có ngoại lệ là các quỹ đạo tròn. Lực hấp dẫn cũng làm thay đổi khoảng cách *trung bình* giữa các vật thể: lực hấp dẫn luôn cố làm suy sụp các đám mây. Đám mây lớn nhất, được tạo thành từ tất cả vật chất trong vũ trụ, phải thay đổi: hoặc suy sụp, hoặc đang giãn nở.

Xem 229 Người đầu tiên dám đưa ra kết luận này là Aleksander Friedmann.* Năm 1922 ông đã suy ra các con đường tiến hoá khả hữu của vũ trụ trong trường hợp khối lượng phân bố thuần nhất và đẳng hướng. Tính toán của ông là một thí dụ cổ điển về sự lý luận đơn giản nhưng hiệu quả. Đối với một vũ trụ thuần nhất và đẳng hướng tại mọi điểm, cung Câu đố 327 ny vi phân của không-thời gian được cho bởi công thức

$$\mathrm{d}s^2 = c^2\mathrm{d}t^2 - a^2(t)(\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2) \,. \tag{245}$$

Đại lượng $a(t)$ là *hệ số tỷ lệ*. Hệ số này thường được gọi một cách tuỳ tiện là 'bán kính' hay 'kích thước' của vũ trụ. Vật chất được mô tả bằng mật độ ρ_{M} và áp suất p_{M}. Thay các đại lượng này vào phương trình trường, ta được 2 phương trình mà bất kỳ một học sinh trung học nào cũng có thể hiểu được; đó là

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho_{\mathrm{M}} + \frac{\Lambda c^2}{3} \tag{246}$$

và

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2}p + \Lambda c^2 \,. \tag{247}$$

Từ đây ta suy ra được 2 phương trình

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_{\mathrm{M}} + 3p_{\mathrm{M}}/c^2)\, a + \frac{\Lambda c^2}{3}\, a \tag{248}$$

và

$$\dot{\rho}_{\mathrm{M}} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho_{\mathrm{M}} + p_{\mathrm{M}}/c^2) \,, \tag{249}$$

trong đó dấu chấm chỉ đạo hàm theo thời gian. Các phương trình (248) và (249) chỉ phụ thuộc vào 3 hằng số của thiên nhiên: hằng số hấp dẫn G, liên hệ với lực cực đại hay công

* Aleksander Aleksandrowitsch Friedmann (1888–1925) là vật lý gia đầu tiên đã tiên đoán về sự giãn nở của vũ trụ. Do mất sớm vì bệnh sốt phát ban, công trình của ông không ai biết đến cho đến khi Georges A. Lemaître (b. 1894 Charleroi, d. 1966 Leuven), tu sĩ và nhà vũ trụ học, đem ra phổ biến vào năm 1927, đặc biệt tập trung vào lời giải có một điểm kỳ dị ban đầu. Lemaître là một trong những người truyền bá ý tưởng (sai lầm!) rằng big bang là một 'biến cố sáng thế' và đã thuyết phục cả tổ chức tôn giáo của ông tin vào nó. Page 253, page 254 Lời giải Friedmann–Lemaître thường được gọi sai lầm theo tên hai nhà vật lý khác, mãi sau này mới nghiên cứu lại bài toán này, vào năm 1935 và 1936, cụ thể là H.P. Robertson và A.G. Walker.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

suất cực đại trong thiên nhiên, tốc độ ánh sáng c và hằng số vũ trụ Λ mô tả mật độ năng
Trang 137 lượng của chân không, hay nếu bạn thích thì thay bằng lực cực tiểu trong thiên nhiên. Phương trình (248) biểu diễn dưới dạng thông thường, định luật bảo toàn năng lượng,
Câu đố 328 e nghĩa là nguyên lý I của Nhiệt động lực học. Định luật bảo toàn năng lượng cũng được bao hàm trong định nghĩa của metric mà Friedmann đã sử dụng. Phương trình (249) cho thấy hằng số vũ trụ Λ *làm tăng tốc độ* giãn nở $\dot{a}$ và vật chất, thông qua lực hấp dẫn, *làm giảm tốc độ* giãn nở $\dot{a}$ của vũ trụ.

Trước khi ta bàn luận về các phương trình, còn vài điều cần để ý về ngữ vựng. Sau đây, chỉ số 0 chỉ thời điểm hiện tại. Ở thời điểm hiện tại t_0, áp suất của vật chất có thể bỏ
Câu đố 329 e qua. Trong trường hợp này, biểu thức $\rho_M a^3$ không đổi theo thời gian. Tham số Hubble của thời điểm hiện tại được xác định bởi $H_0 = \dot{a}_0/a_0$. Nó mô tả tốc độ giãn nở của vũ trụ hay nếu bạn thích, nó chính là tốc độ thỏ trong câu đố trên. Người ta thường liên kết tất cả các mật độ khối lượng vào một đại lượng gọi là *mật độ khối lượng tới hạn* ρ_c được
Câu đố 330 ny cho bởi công thức

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx (8 \pm 2) \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg/m^3} \tag{250}$$

tương ứng với khoảng 8, thêm hay bớt 2, nguyên tử hydrogen mỗi mét khối. Mật độ thực sự của vũ trụ cũng không khác mấy với giá trị này. Trên Trái đất, ta gọi nó là một *chân không* tuyệt hảo. Đó là sự khác nhau giữa đời sống trên Trái đất và nguyên cả vũ trụ. Trong mọi trường hợp, mật độ tới hạn đặc trưng cho một phân bố vật chất dẫn tới sự tiến hoá của vũ trụ theo hướng giãn không ngừng hay suy sụp. Đúng ra thì mật độ tới hạn này sẽ dẫn đến sự tiến hoá *cận biên*, chỉ trong trường hợp hằng số vũ trụ *bằng 0*. Mặc dù có sự ràng buộc này, thuật ngữ 'mật độ khối lượng tới hạn' vẫn được dùng trong các trường hợp khác. Như vậy ta có thể nói về một mật độ khối lượng không thứ nguyên Ω_M được xác định theo công thức

$$\Omega_M = \rho_0/\rho_c\,. \tag{251}$$

Hằng số vũ trụ cũng có thể liên kết với mật độ tới hạn bằng cách đặt

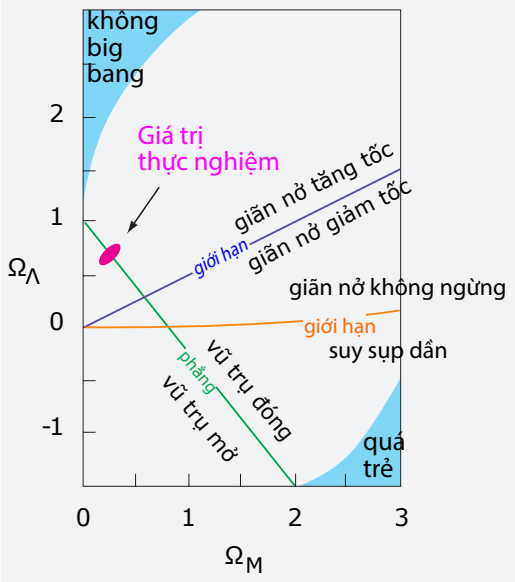
$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G \rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}\,. \tag{252}$$

Tham số không thứ nguyên thứ 3 Ω_K mô tả độ cong của không gian. Nó được xác định theo bán kính của vũ trụ hiện nay R_0 và hằng số độ cong $k = \{1, -1, 0\}$ theo công thức

$$\Omega_K = \frac{-k}{R_0^2\, H_0^2} \tag{253}$$

và dấu của nó ngược với dấu của độ cong k; Ω_K bằng 0 khi độ cong biến mất. Cũng nên nhớ rằng vũ trụ có độ cong *dương* trong trường hợp nó thuần nhất và đẳng hướng, thì nhất thiết phải đóng và có thể tích hữu hạn. Một vũ trụ *phẳng* hay có độ cong *âm* với sự phân bố vật chất tương tự, có thể mở, nghĩa là có thể tích vô hạn, nhưng không nhất thiết phải như vậy. Vũ trụ cũng có thể là đơn hay đa liên thông. Trong những trường

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 105 Miền giá trị của các tham số Ω và hệ quả của chúng.

hợp này, topo không hoàn toàn bị quy định bởi độ cong.

Như đã đề cập, tham số Hubble hiện nay được xác định bởi $H_0 = \dot{a}_0/a_0$. Từ phương trình (246) ta kiếm được hệ thức quan trọng

Câu đố 331 ny

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1 \,. \tag{254}$$

Trong quá khứ, khi dữ liệu thiếu thốn, các nhà vũ trụ học chia thành hai phe: *những người sợ không gian kín* tin rằng $\Omega_K > 0$ và *những người sợ không gian rộng* thì tin rằng $\Omega_K < 0$. Chi tiết về các giá trị đo được của các tham số này sẽ được cho ngay sau đây. Giản đồ trong Hình 105 cho thấy các miền giá trị thú vị của các tham số cùng với các hành trạng tương ứng của vũ trụ. Các phép đo hiện đại phù hợp với một vũ trụ phẳng, tức là với $\Omega_K = 0$.

Đối với tham số Hubble, các phép đo mới nhất thu được trị số

$$H_0 = 71 \pm 4\,\mathrm{km/sMpc} = 2.3 \pm 2 \cdot 10^{-18}\,/\mathrm{s} \tag{255}$$

tương ứng với *tuổi của vũ trụ* là 13.8 ± 1 tỷ năm. Nói cách khác, tuổi suy ra từ lịch sử của không-thời gian phù hợp với tuổi suy ra từ lịch sử của các ngôi sao.

Để có thể cảm nhận về sự tiến hoá của vũ trụ, người ta quen sử dụng *tham số giảm tốc* q_0. Nó được định nghĩa như sau

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0}{a_0 H_0^2} = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda \,. \tag{256}$$

Tham số q_0 >0 nếu sự giãn nở chậm lại và âm nếu sự giãn nở tăng tốc. Các khả năng này cũng được biểu diễn trong giản đồ của Hình 105.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Có một cách rõ ràng hơn để hình dung sự giãn nở của vũ trụ khi áp suất triệt tiêu là viết lại phương trình (246) bằng cách sử dụng $\tau = t\,H_0$ và $x(\tau) = a(t)/a(t_0)$, kết quả là

$$\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau}\right)^2 + U(x) = \Omega_\mathrm{K}$$
$$\text{ở đây} \quad U(x) = -\Omega_\Lambda x - \Omega_\Lambda x^2 \,. \tag{257}$$

Phương trình này giống phương trình tiến hoá đối với chuyển động của một hạt có khối lượng = 1, với năng lượng toàn phần Ω_K trong thế $U(x)$. Phương trình tiến hoá được suy ra một cách dễ dàng.

Khi Ω_Λ *triệt tiêu*, vũ trụ sẽ giãn nở mãi mãi, hoặc suy sụp mãi mãi, tuỳ theo giá trị mật độ năng-khối lượng. Khi *không triệt tiêu*, Ω_Λ dương, hàm thế có đúng một cực đại; nếu hạt có đủ năng lượng để vượt qua cực đại đó, nó sẽ liên tục tăng tốc. Số liệu cũng chứng tỏ rằng đây chính là tình trạng của vũ trụ chúng ta ngày nay. Cả hai trường hợp đều nói lên một điều:

▷ Thuyết tương đối tổng quát và trời đêm tối đen đều hàm ý rằng vũ trụ đang giãn nở.

Nói cách khác, vũ trụ *không* ở trạng thái tĩnh. Đây là kết luận đầy can đảm của Friedmann. Sự giãn nở theo thời gian được biểu diễn trong Hình 106. Ta cũng nên nhớ vì sự giãn nở có tính đẳng hướng nên vũ trụ có một hệ quy chiếu ưu tiên: hệ quy chiếu này được xác định bởi một mật độ vật chất vừa phải. Thời gian đo được trong hệ quy chiếu đó là thời gian được liệt kê trong Bảng 6 và trong Hình 106, đó là thời gian ta mà đã giả định khi nói về *tuổi* của vũ trụ.

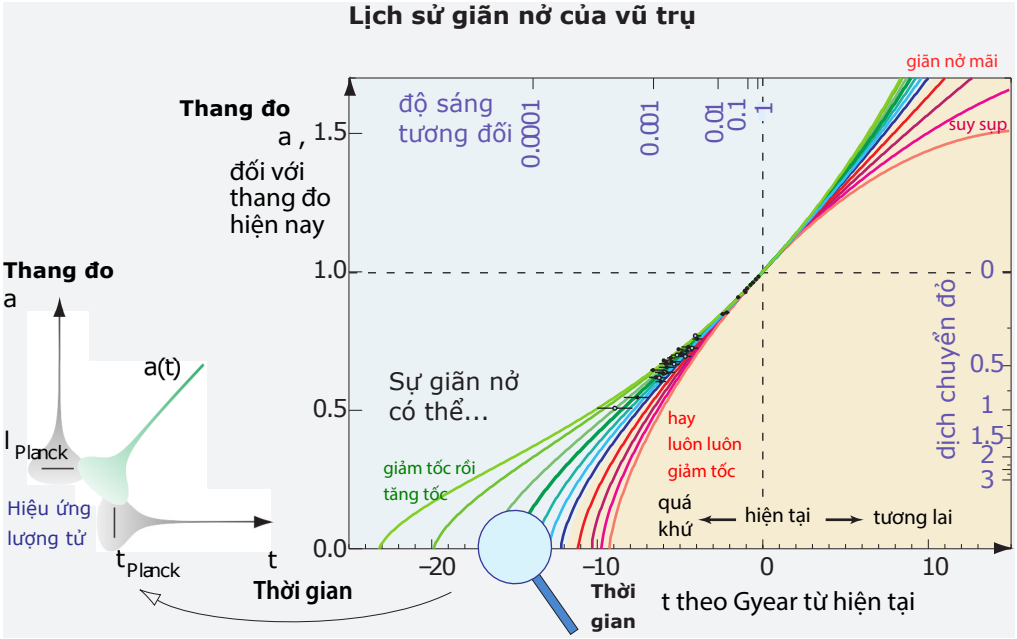
▷ Thuyết tương đối tổng quát và trời đêm tối đen đều hàm ý rằng đã có lúc vũ trụ cực kỳ nhỏ rồi sau đó giãn nở rất nhanh. Sự tiến hoá ngay từ thuở sơ khai đó được gọi là *big bang*.

Có hai điểm ta cần lưu ý: đầu tiên là tập hợp các đường cong tiến hoá khả hữu được mô tả bằng *hai* tham số chứ không phải là một. Thêm nữa, ta *không thể* vẽ kích thước các đường này bằng *0*, mà chỉ có thể vẽ với kích thước rất nhỏ. Lý do là ta chưa hiểu rõ hành trạng của vật chất và không-thời gian lúc năng lượng lớn. Ta sẽ trở lại vấn đề quan trọng này sau.

Tóm lại, kết luận chính từ công trình của Friedmann là một vũ trụ thuần nhất và đẳng hướng thì *động*: nó có thể giãn nở hoặc co lại. Trong cả hai trường hợp, vũ trụ đều có *tuổi đời hữu hạn*. Những ý tưởng sâu sắc này đã mất nhiều năm để lan toả trong cộng đồng vũ trụ học; ngay cả Einstein cũng phải mất một thời gian dài để quen với ý tưởng đó.

Một tổng quan về các khả năng của *sự tiến hoá trong một thời gian dài* được cho trong Hình 107. Sự tiến hoá có thể có những kết quả khác nhau. Vào đầu thế kỷ 20, người ta chọn lựa kết quả theo sở thích. Thoạt tiên Albert Einstein thích lời giải $k = 1$ và $\Lambda = a^{-2} = 4\pi G\rho_\mathrm{M}$. Đó là lời giải không ổn định tìm được khi $x(\tau)$ còn ở đỉnh của hàm thế $U(x)$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 106 Sự tiến hoá của hệ số tỷ lệ *a* của vũ trụ đối với các giá trị khác nhau của mật độ khối lượng, cũng như số liệu đo được (Đồ thị bên phải là của Saul Perlmutter và Dự án Vũ trụ Siêu tân tinh).

Willem de Sitter vào năm 1917, đã tìm thấy điều làm Einstein hết hồn, là có thể có một vũ trụ *trống rỗng* với $\rho_M = p_M = 0$ và $k = 1$. Loại vũ trụ này giãn nở trong thời gian rất lâu. Vũ trụ De Sitter cho ta thấy, trong trường hợp đặc biệt, không-thời gian có thể hiện hữu mà không cần vật chất!

Câu đố 332 ny

Lemaître đã tìm thấy vũ trụ đang giãn nở đối với khối lượng dương và kết quả của ông lúc đầu cũng được Einstein đưa ra tranh cãi. Sau đó, khi các phép đo đầu tiên khẳng định các tính toán, ý tưởng về một vũ trụ có khối lượng và đang giãn nở mới trở nên phổ biến. Nó trở thành mô hình chuẩn trong sách giáo khoa.

Trong sự mù quáng tập thể kéo dài từ 1950 tới 1990, hầu hết các nhà vũ trụ học đều tin rằng $\Lambda = 0$.* Chỉ vào cuối thế kỷ 20 thì các tiến bộ về thực nghiệm mới cho phép các nhà vũ trụ học trao đổi ý kiến dựa trên chứng cứ hơn là niềm tin hay sở thích, như ta sẽ thấy sau đây. Nhưng trước hết ta phải giải quyết một vấn đề đã cũ.

TẠI SAO BẦU TRỜI LẠI TỐI ĐEN VÀO BAN ĐÊM?

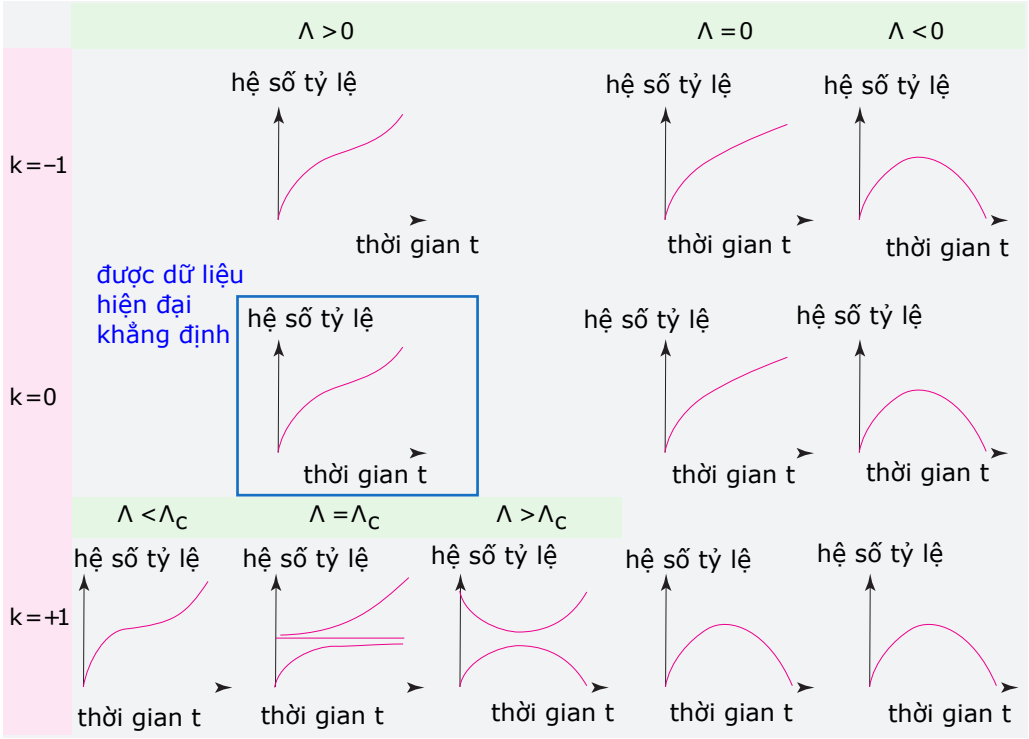
> In der Nacht hat ein Mensch nur ein Nachthemd an, und darunter kommt gleich der Charakter.**
>
> Rober Musil

Câu đố 333 ny

* Trong trường hợp này, vì $\Omega_M \geqslant 1$, tuổi của vũ trụ sẽ tuân theo bất đẳng thức $t_0 \leqslant 2/(3H_0)$. Khi mật độ khối lượng bằng 0 ta có $t_0 = 1/H_0$.

** 'Vào ban đêm, một người chỉ mặc áo ngủ và ngay bên dưới nó là một người lập dị.' Robert Musil (b. 1880 Klagenfurt, d. 1942 Geneva), văn sĩ.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 107 Sự tiến hoá liên tục của hệ số tỷ lệ *a* của vũ trụ theo các tham số khác nhau.

Trước hết, vào ban đêm bầu trời không đen – mà là xanh đen. Nhìn từ mặt đất, nó có màu xanh giống lúc ban ngày, giống một ảnh phơi sáng lâu như Hình 108 cho thấy. Màu xanh của bầu trời đêm, giống như màu của bầu trời lúc ban ngày, là do ánh sáng đi từ ngôi sao bị khí quyển khuếch tán. Nếu ta muốn biết màu thực của bầu trời, ta cần đi *phía trên* lớp khí quyển. Ở đó, đối với mắt, bầu trời có mầu đen của hắc ín. Nhưng các phép đo chính xác chứng tỏ rằng cho dù bầu trời trống rỗng cũng không đen hoàn toàn vào ban đêm; nó được các bức xạ khoảng 200 GHz lấp đầy; chính xác hơn, bức xạ lấp đầy bầu trời tương ứng với bức xạ nhiệt của một vật ở 2.73 K. *Bức xạ nền vũ trụ* này là bức xạ nhiệt còn lại từ big bang.

Xem 230

Như vậy vũ trụ thực sự lạnh hơn ngôi sao. Nhưng tại sao lại như vậy? Nếu vũ trụ thuần nhất ở mức độ lớn vô hạn, nó sẽ có vô số ngôi sao. Nhìn theo một hướng bất kỳ, ta sẽ thấy mặt của một ngôi sao. Bầu trời đêm sẽ sáng như Mặt trời! Bạn có thể thuyết

Câu đố 334 s

phục bà của bạn tin vào điều này không?

Trong một khu rừng sâu, mỗi hướng ta sẽ thấy một cây, như đã thấy trong Hình 109. Tương tự trong một vũ trụ 'sâu', mỗi hướng ta sẽ thấy một sao. Bây giờ, một sao trung bình có nhiệt độ bề mặt khoảng 6000 K. Nếu ta sống trong một vũ trụ sâu và già, ta sẽ sống với một ấn tượng sâu sắc như trong một cái lò có nhiệt độ khoảng 6000 K! Một khí hậu như vậy thì khó mà thưởng thức kem cho được.

Như vậy tại sao bầu trời *tối đen* vào lúc ban đêm, mặc dù ngập tràn bức xạ từ các ngôi sao ở 6000 K, nghĩa là với ánh sáng *trắng*? Nghịch lý này đã được thiên văn gia Wilhelm

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 108 Mọi màu sắc như màu xanh của bầu trời, cũng có mặt lúc ban đêm, như trong bức ảnh phơi sáng lâu này cho thấy. Ở trên bên trái, vật thể sáng là Hoả tinh; nửa dưới của ảnh là một cầu vồng trong sương mù đầy màu sắc hiếm hoi do ánh trăng tạo ra (© Wally Pacholka).

Olbers trình bày rất rõ ràng năm 1823. * Vì ông bàn luận nhiều về vấn đề này nên nó được gọi là *nghịch lý Olbers*.

Ngày nay ta biết rằng có hai hiệu ứng chính giải thích cho sự tối đen của ban đêm. Thứ nhất, vì vũ trụ có tuổi hữu hạn, các ngôi sao ở xa chiếu sáng trong thời gian ít hơn. Ta thấy chúng lúc trẻ hay trong lúc đang hình thành, khi chúng tối hơn. Kết quả là phần ánh sáng đóng góp của các sao ở xa ít hơn các sao ở gần nên nhiệt độ trung bình của bầu trời giảm đi.** Ngày nay ta biết rằng cho dù mọi vật chất trong vũ trụ được biến thành bức xạ, vũ trụ cũng sẽ không sáng như ta vừa tính toán. Nói cách khác, công suất và cuộc đời của các sao quá nhỏ nên không thể sinh ra độ sáng của lò nướng như vừa đề cập. Thứ hai, ta có thể lý luận rằng bức xạ của các sao ở xa bị dịch chuyển đỏ và thể tích chứa bức xạ gia tăng liên tục nên nhiệt độ trung bình hiệu dụng của bầu trời cũng giảm đi.

Xem 231

* Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (b. 1758 Arbergen, d. 1840 Bremen) là một thiên văn gia lớn. Ông đã khám phá ra hai tiểu hành tinh, Pallas và Vesta, và 5 sao chổi; ông đã phát triển phương pháp tính quỹ đạo parabol của các sao chổi mà ngày nay vẫn còn sử dụng. Olbers cũng tích cực trợ giúp nhà toán học và thiên văn học Friedrich Wilhelm Bessel trong việc lựa chọn nghề nghiệp. Nghịch lý mang tên Olbers, mặc dù có những người khác đã giải thích trước đó, như thiên văn gia Thuỵ Sĩ Jean Philippe Loÿs de Cheseaux năm 1744 và Johannes Kepler năm 1610.

Quyển I, trang 151

** Bạn có thể giải thích bầu trời không đen chỉ vì nó được sơn đen hay làm bằng chocolate đen không? Hay tổng quát hơn, rằng bầu trời không làm bằng hay không chứa bất kỳ chất màu đen và lạnh nào, như chính Olbers đã đề nghị và như John Herschel đã bác bỏ năm 1848 không?

Câu đố 335 ny

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 109 Hình trên: trong một khu rừng sâu hay ngay cả vô hạn, ta chỉ thấy cây và không thấy gì đằng sau chúng. Hình dưới: vào ban đêm, ta có thể thấy sao nhưng cũng thấy những gì đằng sau nó, cụ thể là bầu trời đen. Như vậy vũ trụ có kích thước hữu hạn. (© Aleks G, NASA/ESA)

Cần có tính toán để quyết định lý do nào là quan trọng nhất đối với sự tối đen của ban đêm. Vấn đề này đã được Paul Wesson nghiên cứu tường tận; ông đã giải thích rằng tác dụng đầu tiên, sự tối đen do cuộc đời của sao hữu hạn và cực đại, lớn hơn tác dụng thứ hai, sự tối đen do dịch chuyển đỏ, với một hệ số vào khoảng 3. Tuy vậy, cả hai hiệu ứng đều do vũ trụ có tuổi đời hữu hạn. Như vậy ta có thể phát biểu một cách đúng đắn rằng *bầu trời tối đen vào ban đêm vì vũ trụ có tuổi đời hữu hạn.*

Xem 232

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 230
Câu đố 336 e

Ta cũng nên lưu ý rằng sự tối đen của bầu trời đêm nảy sinh chỉ vì tốc độ ánh sáng hữu hạn. Bạn có thể khẳng định điều này không?

Sự tối đen của bầu trời cũng cho ta biết rằng vũ trụ có tuổi rất *lớn*. Thật vậy, bức xạ nền 2.7 K là lạnh, mặc dù đã được phát ra lúc 3000 K, vì nó đã bị dịch chuyển đỏ, do hiệu ứng Doppler. Dưới các giả định có lý, nhiệt độ T của bức xạ này thay đổi theo hệ số tỷ lệ $a(t)$ của vũ trụ như sau

Xem 233

$$T \sim \frac{1}{a(t)} \,. \tag{258}$$

Như vậy trong một vũ trụ trẻ trung, ta không thể thấy các ngôi sao, mặc dù chúng hiện hữu.

Từ độ sáng của bầu trời đêm, đo được vào khoảng $3 \cdot 10^{-13}$ lần độ sáng của một ngôi sao trung bình như Mặt trời, ta có thể suy ra một số điều thú vị: mật độ ngôi sao trong vũ trụ phải nhỏ hơn mật độ ngôi sao trong Ngân hà rất nhiều. Người ta có thể suy ra mật độ ngôi sao trong thiên hà bằng cách đếm các ngôi sao mà ta thấy vào lúc ban đêm. Nhưng mật độ sao trung bình trong thiên hà đối với độ sáng lúc ban đêm sẽ có giá trị cao hơn nhiều nếu nó không đổi trong toàn vũ trụ. Như vậy ta có thể suy ra rằng thiên hà *nhỏ hơn* vũ trụ rất nhiều, đơn giản chỉ bằng cách đo độ sáng của bầu trời đêm và bằng cách đếm sao trên bầu trời. Bạn có thể tính toán một cách cụ thể không?

Xem 231
Câu đố 337 e

Tóm lại, bầu trời đen, hay đúng hơn, rất đen vào lúc ban đêm vì không-thời gian và vật chất thì *hữu hạn, nhưng già*. Đây là một câu đố phụ: có nghịch lý Olbers dành cho lực hấp dẫn không?

Câu đố 338 ny

Sự thay đổi màu sắc của bầu trời đêm

Không phải chỉ bầu trời đêm không đen; sự tăm tối của bầu trời đêm còn phụ thuộc vào hướng quan sát.

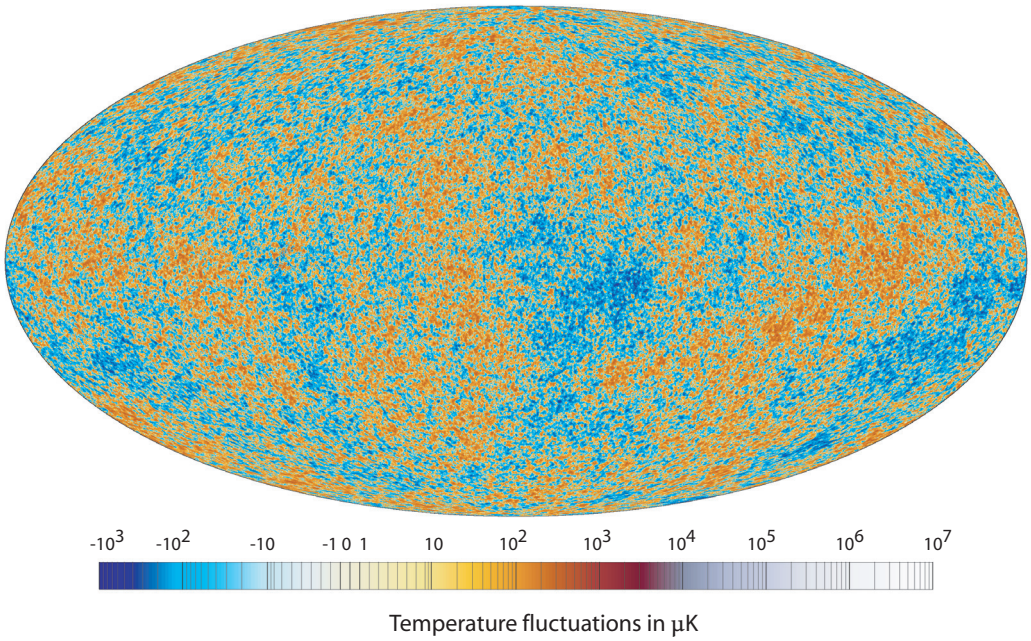
Vì Trái đất đang chuyển động khi so với các ngôi sao trung bình, màu đen của bầu trời cho thấy có dịch chuyển Doppler. Nhưng dù hiệu ứng này được bổ chính thì vẫn còn một số thay đổi về màu sắc. Các thay đổi này nhỏ nhưng có thể đo được nhờ các vệ tinh đặc biệt. Kết quả chính xác nhất do vệ tinh Planck của châu Âu đo được năm 2013; chúng được trình bày trong Hình 110. Những biến đổi nhiệt độ này dao động trong khoảng microkelvin; chúng chứng tỏ rằng vũ trụ đã có một số chỗ không thuần nhất khi có một số ánh sáng được phát ra. Hình 110 cho ta một ấn tượng về vũ trụ khi nó còn 'trẻ' khoảng 380 000 năm.

Dữ liệu của Hình 110 vẫn còn được nghiên cứu thật kỹ lưỡng. Nó cho phép các nhà nghiên cứu suy ra tuổi chính xác của vũ trụ – 13.8 Ga – cấu tạo của nó và nhiều phương diện khác nữa. Những nghiên cứu này vẫn đang tiến hành.

Vũ trụ mở, đóng hay cận biên?

> – Không phải cái bao la của vũ trụ làm bạn cảm thấy mình nhỏ bé hay sao?
> – Tôi có thể cảm thấy nhỏ bé mà không cần sự giúp đỡ của vũ trụ.
>
> Vô danh

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 110 Một ảnh (màu không đúng) của sự thăng giáng của bức xạ nền vũ trụ, sau khi độ dịch chuyển Doppler do chuyển động địa phương của chúng ta và các tín hiệu từ Ngân hà đã được khử đi (© Planck/ESA).

Đôi khi lịch sử của vũ trụ được tóm tắt trong 2 từ: *bang!...co lại*. Nhưng vũ trụ sẽ thực sự co trở lại hay sẽ giãn nở mãi mãi? Hay nó sẽ ở trong trạng thái cận biên trung gian? Các tham số quyết định vận mệnh của nó là mật độ khối lượng và hằng số vũ trụ.

Những thông tin chính của vật lý thiên văn trong thập niên sau cùng của Thế kỷ 20 là những kết quả thực nghiệm cho phép ta xác định những tham số này. Người ta đã sử dụng nhiều phương pháp. Phương pháp đầu tiên thì hiển nhiên: xác định tốc độ và khoảng cách của các ngôi sao ở xa. Đối với các khoảng cách lớn thì có khó khăn vì các ngôi sao rất mờ. Nhưng hiện nay người ta có khả năng kiếm ra các siêu tân tinh, những ngôi sao bùng nổ sáng rực và xác định được khoảng cách nhờ độ sáng của chúng. Điều này được thực hiện nhờ sử dụng các kính thiên văn lớn nhất sẵn có cùng với việc tìm kiếm trên bầu trời được điện toán hoá.

Xem 234

Phương pháp thứ 2 là đo độ bất đẳng hướng của bức xạ nền vi ba vũ trụ. Từ phổ công suất quan sát được là một hàm số theo góc, ta có thể suy ra độ cong của không-thời gian.

Phương pháp thứ 3 là xác định mật độ khối lượng bằng cách sử dụng hiệu ứng thấu kính hấp dẫn đối với ánh sáng của các quasar ở xa bị uốn cong quanh các thiên hà hay đám thiên hà.

Trang 258

Phương pháp thứ 4 là xác định mật độ khối lượng bằng cách sử dụng các đám thiên hà. Tất cả các phương pháp đo này đều được mong chờ là sẽ phát triển nhiều trong

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

những năm sắp đến.

Xem 235 Hiện nay, bốn bộ phương pháp đo hoàn toàn độc lập này cho ta các trị số

$$\Omega_M \approx 0.3 \quad , \quad \Omega_\Lambda \approx 0.7 \quad , \quad \Omega_K \approx 0.0 \tag{259}$$

với sai số cỡ 0.1 hay nhỏ hơn. Các giá trị này hàm ý

- ▷ Vũ trụ phẳng trong không gian, sự giãn nở của nó đang tăng tốc và sẽ không có vụ co lớn.

Tuy vậy, không có phát biểu xác định khả hữu về topo. Ta sẽ trở lại vấn đề sau cùng này Trang 260 sau đây.

Đặc biệt, số liệu chứng tỏ rằng mật độ vật chất, bao gồm vật chất tối, chỉ bằng 1/3 giá trị tới hạn.* Trên 2/3 được cho bởi số hạng vũ trụ. Đối với hằng số vũ trụ Λ số đo hiện tại là

$$\Lambda = \Omega_\Lambda \frac{3H_0^2}{c^2} \approx 10^{-52}\,/\mathrm{m}^2 \,. \tag{260}$$

Giá trị này có quan hệ mật thiết với Thuyết lượng tử, vì nó tương ứng với mật độ năng lượng của chân không

$$\rho_\Lambda c^2 = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G} \approx 0.5\,\mathrm{nJ/m}^3 \approx \frac{10^{-46}\,(\mathrm{GeV})^4}{(\hbar c)^3} \,. \tag{261}$$

Nhưng số hạng vũ trụ này cũng bao hàm một áp suất chân không âm $p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2$. Thay kết quả này vào hệ thức của hàm thế của lực hấp dẫn vạn vật suy ra từ Thuyết tương đối Trang 204

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho + 3p/c^2) \tag{262}$$

Xem 236 ta được

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho_M - 2\rho_\Lambda) \,. \tag{263}$$

Câu đố 339 ny Như vậy gia tốc hấp dẫn chung quanh một vật khối lượng M là

$$a = \frac{GM}{r^2} - \frac{\Lambda}{3}c^2 r = \frac{GM}{r^2} - \Omega_\Lambda H_0^2\, r \,, \tag{264}$$

chứng tỏ rằng một năng lượng chân không *dương* sẽ dẫn tới một tác dụng hấp dẫn *đẩy*. Thay giá trị đã đề cập (260) vào hằng số vũ trụ Λ ta nhận thấy rằng hiệu ứng đẩy rất nhỏ ngay cả đối với khoảng cách Trái đất-Mặt trời. Đúng ra thì bậc độ lớn của tác dụng đẩy nhỏ hơn tác dụng hút nhiều đến nỗi người ta không có hy vọng kiểm chứng được bằng

* Sự khác nhau giữa mật độ vật chất toàn phần và mật độ vật chất baryon - có thể đo được riêng rẽ, chỉ vào khoảng 1/6 của giá trị cũ và cũng chưa giải thích được. Có thể vũ trụ còn chứa loại vật chất mà cho đến bây giờ ta vẫn chưa biết. Ta có thể nói rằng vũ trụ không WYSIWYG; có vật chất *không thấy được*, hay vật chất *tối*. Vấn đề này, *vấn đề vật chất tối*, là một trong những câu hỏi quan trọng về vũ trụ mà ta chưa giải đáp được.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 340 ny

thực nghiệm, độ sai lệch giữa tác dụng đẩy và lực hấp dẫn vạn vật. Sự xác định bằng vật lý thiên văn có lẽ là khả năng duy nhất. Đặc biệt, hằng số hấp dẫn dương sẽ tự thể hiện thông qua một thành phần dương trong tốc độ giãn nở.

Nhưng tình trạng này đang lộn xộn. Nguồn gốc của hằng số vũ trụ *không thể* giải thích bằng Thuyết tương đối tổng quát. Bí mật này chỉ có thể giải quyết được nhờ sự giúp đỡ của Thuyết lượng tử. Đúng ra thì hằng số vũ trụ là một khía cạnh lượng tử và địa phương của thiên nhiên, đầu tiên và duy nhất cho đến nay, được phát hiện nhờ các phương tiện vật lý thiên văn.

Tại sao vũ trụ trong suốt?

Vũ trụ có thể ngập đầy nước trong suốt, như một số sách phổ thông đã bám vào đó để

Xem 237

giải thích hiện tượng mưa hay không? Không. Dù vũ trụ có đầy không khí thì khối lượng toàn phần của nó cũng không cho phép vũ trụ có kích thước như hiện nay; nó sẽ tái suy

Câu đố 341 ny

sụp sớm hơn và chúng ta không thể hiện hữu.

Như vậy vũ trụ trong suốt vì nó gần như trống rỗng. Nhưng *tại sao* nó lại trống nhiều đến thế? Trước tiên, lúc kích thước vũ trụ còn nhỏ, tất cả phản vật chất đều huỷ biến với lượng vật chất tương ứng. Chỉ có một phần rất nhỏ vật chất, do hơi nhiều hơn phản vật chất là còn sót lại. Phần 10^{-9} này là vật chất mà ta thấy hiện nay. Kết quả là có 10^{9}

Quyển V, trang 255

photon nhiều hơn electron hay quark trong vũ trụ.

Thêm nữa, 380 000 năm sau sự huỷ biến của phản vật chất, mọi hạt nhân và electron sẵn có tái hợp tạo thành nguyên tử và các dạng kết tập của chúng như ngôi sao và loài người. Không còn sự tương tác giữa điện tích tự do với các photon bị che giấu nữa. Từ đó trở đi ánh sáng có thể đi xuyên qua vũ trụ như ngày nay và chỉ bị ảnh hưởng khi nó đụng vào một ngôi sao, một hạt bụi hay các nguyên tử khác. Việc quan sát bức xạ nền vũ trụ chứng tỏ rằng ánh sáng có thể du hành trên 13 tỷ năm mà không gặp một vấn đề hay một sự nhiễu loạn nào. Thật vậy, nếu ta nhớ lại rằng mật độ trung bình của vũ trụ là $10^{-26}\,\mathrm{kg/m^3}$ và phần lớn vật chất do lực hấp dẫn kết tụ lại thành các thiên hà thì ta có thể tưởng tượng được cái chân không giữa các thiên hà. Kết quả là ánh sáng có thể du hành trên một quãng đường dài mà không gặp một trở ngại nào đáng kể.

Nhưng tại sao chân không lại trong suốt? Đó là một câu hỏi sâu sắc. Chân không trong suốt vì nó không chứa điện tích và các chân trời: điện tích hay chân trời có thể hấp thu ánh sáng. Đúng ra Thuyết lượng tử đã chứng tỏ rằng chân không có chứa các điện tích *ảo*. Tuy vậy, những điện tích ảo này không tác động lên tính trong suốt của chân

Quyển V, trang 122

không.

Big bang và các hệ quả của nó

> Μελέτη θανάτου. Hãy học cách chết.
> Plato, *Phaedo*, 81a.

Điều chủ yếu là mô hình big bang nóng, được suy ra từ màu sắc của các ngôi sao và thiên

Trang 233

hà, cho rằng cách nay khoảng 14 tỷ năm cả vũ trụ cực kỳ nhỏ. Điều này khiến big bang có tên như vậy. Thuật ngữ do Fred Hoyle tạo ra vào năm 1950 (với một ẩn ý mỉa mai),

Xem 238

vì ông không tin rằng khái niệm này có thể áp dụng cho thiên nhiên. Tuy vậy thuật ngữ đã được chấp nhận. Vì ta không thể trực tiếp kiểm tra sự nhỏ bé của vũ trụ, ta cần tìm các hệ quả có thể kiểm chứng được. Các hệ quả chính là:

Quyển III, trang 336

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

— Mọi vật chất đang rời xa lẫn nhau. Người ta đã quan sát được điều này trước khi mô hình được đưa ra.
— Tuổi cực đại của một hệ bất kỳ trong vũ trụ đều hữu hạn. Gần đây người ta đã tìm được tuổi cực đại là 13.8(1) Ga, gần 14 tỷ năm.
— Có nền bức xạ nhiệt. Nhiệt độ quan sát được T_γ khoảng 2.7 K được tìm thấy độc lập với mô hình big bang; nó phù hợp với kết quả suy ra từ tuổi cực đại.
— Khối lượng của vũ trụ gồm khoảng 75 % hydrogen và 23 % helium. Các giá trị này phù hợp với dự đoán.
— Đối với trường hợp hằng số vũ trụ Λ khác 0, sự giãn nở của vũ trụ tăng tốc. Người ta đã nhận thấy có gia tốc nhưng không thể tiên đoán giá trị của nó.
— Đối với trường hợp hằng số vũ trụ khác 0, lực hấp dẫn vạn vật giảm nhẹ. Điều này chưa được khẳng định.
— Có các neutrino nền với nhiệt độ khoảng 2 K; tiên đoán chính xác là $T_\nu/T_\gamma \approx (4/11)^{1/3}$ và các neutrino này xuất hiện sau big bang khoảng 0.3 s. Điều này chưa được khẳng định.

Cần nhấn mạnh rằng những hệ quả này *khẳng định* mô hình big bang nóng, nhưng về mặt lịch sử, chỉ có giá trị của nhiệt độ nền là được *tiên đoán* từ mô hình. Hai điểm sau cùng, về nhiệt độ của neutrino và sự sai lệch của lực hấp dẫn, cũng đúng nhưng chưa được khẳng định. Công nghệ chưa cho phép ta kiểm chứng hai tiên đoán này trong một tương lai gần. Nhưng cũng không có bằng chứng nào chống lại chúng.

Các mô tả vũ trụ khác tuy tránh được phase nóng ban đầu nhưng chưa thật khớp với
Xem 238 số liệu quan sát. Tuy vậy điều này luôn có thể thay đổi trong tương lai.

Hơn nữa, các lý luận toán học cho thấy với sự phân bố vật chất như người ta đã quan sát thấy trong vũ trụ, cùng với một số giả định tổng quát yếu hơn thì phải có một giai
Xem 239 đoạn trong quá khứ *hữu hạn* mà vũ trụ phải rất nhỏ và nóng. Do đó cũng bõ công để nghiên cứu kỹ trường hợp này.

Big bang có phải là một vụ nổ lớn không?

Trước tiên, big bang có phải là một vụ nổ không? Sự diễn tả này hàm ý một số vật chất biến đổi nội năng thành chuyển động của các phần của chúng. Tuy vậy, không có một quá trình nào như vậy trong tiền sử của vũ trụ. Đúng ra cách mô tả tốt hơn là: vũ trụ đang giãn nở chứ không phải vật chất đang tách xa nhau. Vào lúc này của cuộc thám hiểm, ta *vẫn chưa biết* cơ chế và nguồn gốc của sự giãn nở. Vì tính chất quan trọng của sự giãn nở không gian, ta *không thể* gọi toàn bộ hiện tượng là một vụ nổ. Và điều hiển nhiên là không có tiếng động hay môi trường mang âm thanh nào trong không gian giữa các vì sao nên ta không thể nói về tiếng 'bang' theo nghĩa thông thường của nó.

Vậy big bang có 'lớn' không? Cách nay khoảng 14 tỷ năm, vũ trụ khả kiến nhỏ hơn nhiều; nhỏ hơn cả một nguyên tử. Tóm lại, big bang không 'big' cũng không 'bang'; nhưng phần còn lại thì đúng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Big bang có phải là một biến cố không?

> Quid faciebat deus, antequam faceret caelum et terram? ...Non faciebat aliquid.*
>
> Augustine of Hippo, *Confessiones*, XI, 12.

Lý thuyết big bang là sự mô tả những điều xảy ra trong *toàn bộ* không-thời gian. Mặc dù có nhiều điều thường được viết trong các bài báo bất cẩn, không có thời điểm nào không gian có kích thước bằng 0: không gian *không bao giờ* là một điểm. Những người ủng hộ ý tưởng đó nghe có vẻ có lý nhưng thật ra sai lầm. Lý thuyết big bang là sự mô tả *sự giãn nở* của không-thời gian chứ không phải là sự khởi đầu của nó. Lần theo chuyển động của vật chất để đi ngược thời gian – ngay cả khi bỏ qua vấn đề sai số của phép đo – Thuyết tương đối tổng quát có thể suy ra sự hiện hữu của một kỳ dị lúc ban đầu chỉ khi ta giả sử là có chất điểm. Tuy vậy giả sử này sai. Thêm nữa, hiệu ứng của tính phi tuyến trong Thuyết tương đối tổng quát trong trường hợp mật độ năng lượng cao vẫn chưa được làm rõ hoàn toàn. Sau cùng, big bang xảy ra trong toàn vũ trụ. (Đây là lý do mà các nhà nghiên cứu suy ngẫm nhiều về 'sự lạm phát' để giải thích các mặt khác nhau của vũ trụ.) Tóm lại, *big bang không phải là một biến cố.*

Điều quan trọng nhất, Thuyết lượng tử cho thấy big bang *không phải là* một kỳ dị thực, vì không có một biến động lực vật lý nào, kể cả mật độ và nhiệt độ, đạt tới giá trị lớn vô hạn (hay nhỏ vô hạn). Những giá trị như thế không thể hiện hữu trong thiên nhiên. ** Mọi trường hợp đều có chung nhau một điểm là các lập luận chỉ dựa trên
Quyển VI, trang 102 Thuyết tương đối tổng quát *thuần tuý* không thể đưa ra các phát biểu đúng về big bang. Tuy vậy, đa số phát biểu trong các bài báo lại thuộc loại này.

Big bang có phải là một sự khởi đầu không?

Việc hỏi trước big bang có cái gì cũng giống như hỏi phía bắc của Bắc Cực là gì. Giống như không có cái gì ở phía bắc của Bắc cực cũng không có cái gì 'trước' big bang. Sự tương tự này có thể diễn giải sai lầm để kết luận là big bang khởi đầu tại một thời điểm trong thời gian, dĩ nhiên là sai như ta vừa giải thích. Nhưng sự tương tự tốt hơn ta tưởng: đúng ra là *không có* Bắc cực chính xác, vì Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng có một sự bất định cơ bản về vị trí. Do đó cũng có một sự bất định tương ứng về big bang.

Thật ra chỉ cần 3 hàng để chứng tỏ bằng Thuyết lượng tử rằng thời gian và không gian *không* xác định ngay khi hay gần lúc big bang. Ta sẽ trình bày phần lập luận đơn giản này trong chương 1 của phần cuối cuộc thám hiểm. Do đó không thể gọi big bang
Quyển VI, trang 65 là 'sự khởi đầu' của vũ trụ. Không bao giờ có thời điểm mà hệ số tỷ lệ $a(t)$ của vũ trụ bằng 0.

Sai lầm thuộc về nhận thức khi cho rằng thời gian và không gian hiện hữu từ một 'khởi đầu' trở đi rất thường gặp. Đúng ra thì Thuyết lượng tử đã chứng tỏ rằng gần big bang, các biến cố *không thể* có thứ tự *cũng như không* được xác định. Nói thẳng ra là *không có* sự khởi đầu; không bao giờ có một biến cố hay kỳ dị ban đầu.

Điều hiển nhiên là khái niệm thời gian không xác định 'bên ngoài' hay 'trước' sự hiện

* 'Thượng đế làm gì sau khi tạo ra Trời và Đất? ... Ông ta không làm gì cả.' Augustine of Hippo (b. 354 Tagaste, d. 430 Hippo Regius), một nhà thần học phản động và có nhiều thế lực.

** Nhiều vật lý gia vẫn còn thận trọng khi phát biểu về điểm này. Phần cuối của cuộc thám hiểm sẽ cho ta
Quyển VI, trang 57 các lập luận chính xác dẫn tới kết luận.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Xem 240 hữu của vũ trụ; điều này đã rõ ràng đối với các nhà tư tưởng cách nay hơn 1000 năm. Việc kết luận rằng thời gian phải có *bắt đầu* kể cũng hấp dẫn. Nhưng như ta sẽ thấy, đó là một lý luận sai lầm: trước tiên, không có biến cố khởi đầu, thứ hai, thời gian không Quyển I, trang 49 chảy, như ta đã làm rõ lúc bắt đầu cuộc hành trình.

Một sai lầm tương tự ẩn sau ý tưởng vũ trụ có một số 'điều kiện ban đầu nào đó.' Quyển I, trang 237 Những điều kiện ban đầu *theo định nghĩa* chỉ có ý nghĩa đối với các vật thể hay trường, nghĩa là đối với các thực thể mà ta có thể quan sát chúng từ bên ngoài tức là các thực thể có một môi trường. Vũ trụ không tuân theo đòi hỏi này nên nó không thể có điều kiện ban đầu. Tuy vậy, nhiều người vẫn cố bám vào các ý nghĩ như vậy. Điều thú vị là Stephen Xem 241 Hawking đã bán được hàng triệu quyển sách trong đó giải thích rằng việc mô tả vũ trụ không có điều kiện ban đầu là hấp dẫn nhất mà không hề đề cập đến việc không thể có khả năng nào khác.*

Tóm lại, big bang không phải là một sự khởi đầu, cũng không hàm ý như vậy. Ta sẽ tiết lộ cách suy nghĩ đúng đắn về điều này trong phần cuối của cuộc thám hiểm.

Quyển VI, trang 306

Big bang có bao hàm ý sáng tạo không?

> "[Thuyết tương đối tổng quát sinh ra] sự nghi ngờ phổ quát về chúa và sự sáng tạo của người."
>
> Một tay săn phù thuỷ

Sáng tạo, nghĩa là sự xuất hiện của cái gì đó từ không có gì, đòi hỏi một khái niệm về sự hiện hữu của không gian và thời gian thì nó mới có ý nghĩa. Khác đi thì khái niệm 'xuất Quyển III, trang 329 hiện' vô nghĩa. Nhưng dù mô tả big bang theo kiểu cổ điển như trong chương này, hay theo Cơ học lượng tử trong phần sau, thì điều kiện này không bao giờ được thoả mãn. Ngay trong hiện tại, cách mô tả cổ điển của big bang, nguyên nhân phát sinh tên của nó, cũng *không có* sự xuất hiện của vật chất, của năng lượng, hay bất cứ cái gì khác. Và sau này sự mô tả mà ta đã phát triển cũng sẽ không thay đổi, vì thời gian hay không gian không bao giờ được xác định *trước khi* vật chất xuất hiện.

Đúng ra thì mọi tính chất của sự sáng tạo đều thiếu: không có 'lúc' sáng tạo, không có sự xuất hiện từ không có gì, không thể lựa chọn điều kiện 'ban đầu' từ một tập hợp các điều kiện khả hữu và như ta sẽ thấy chi tiết trong phần cuối của cuộc phiêu lưu, không Quyển VI, trang 148 có bất kỳ một sự lựa chọn các 'định luật' vật lý đặc biệt nào từ một tập hợp các định luật khả hữu.

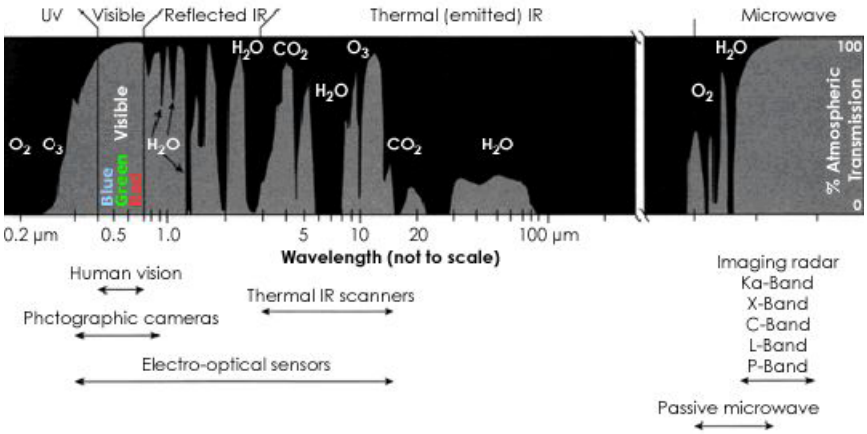
Tóm lại, big bang không bao hàm cũng không che giấu một quá trình sáng tạo nào. Big bang *không phải là* một biến cố, *không phải là* một sự khởi đầu và *cũng không phải là* một trường hợp sáng tạo. Chúng ta không thể tiếp tục cuộc thám hiểm nếu không chấp Câu đố 342 ny nhận ba kết luận này. Chối bỏ chúng có nghĩa là tiếp tục sống cùng niềm tin và định kiến, tức là từ bỏ hành trình lên đỉnh núi.

Tại sao ta có thể nhìn thấy Mặt trời?

Trước hết, Mặt trời có thể thấy được vì không khí trong suốt. Không khí trong suốt không phải là điều hiển nhiên; đúng ra nó chỉ trong suốt đối với ánh sáng *khả kiến* và một số tần số chọn lọc khác. Tia hồng ngoại và tử ngoại bị hấp thu phần lớn. Nguyên

* Phát biểu này vẫn còn gây ra các phản ứng mạnh mẽ trong các nhà vật lý; ta sẽ bàn luận kỹ hơn trong phần Thuyết lượng tử.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 111 Hệ số truyền qua của khí quyển (NASA).

do xuất phát từ hành trạng của các phân tử khí tạo nên không khí, cụ thể là nitrogen, oxygen và một số khí trong suốt khác. Nhiều vệ tinh và hành tinh trong Thái dương hệ có khí quyển không trong suốt: chúng ta thực sự may mắn khi có thể nhìn ngắm trăng sao.

Đúng ra không khí không trong suốt hoàn toàn; các phân tử không khí *khuếch tán* một phần nhỏ ánh sáng. Đó là lý do bầu trời và các rặng núi ở xa có màu xanh và bầu trời hoàng hôn có màu đỏ. Tuy vậy, mắt chúng ta không thể cảm thấy điều này và ta không thể nhìn thấy ngôi sao trong ánh sáng ban ngày. Ở nhiều bước sóng ngoài vùng quang phổ khả kiến thì ngay cả khí quyển cũng không trong suốt, như Hình 111 cho thấy. (Nó cũng không trong suốt đối với mọi bước sóng ngắn hơn 200 nm, cho tới tia gamma. Trong phạm vi sóng dài, không khí còn trong suốt cho tới bước sóng từ 10 tới 20 m, tuỳ thuộc vào hoạt động của Mặt trời, khi có sự dập tắt ánh sáng do ion quyển.)

Thứ hai, ta có thể nhìn thấy Mặt trời vì Mặt trời, như tất cả các vật thể nóng khác, *đều phát ra* ánh sáng. Sau này ta sẽ mô tả chi tiết của *hiện tượng nóng sáng*.

Quyển III, trang 238

Thứ ba, ta có thể nhìn thấy Mặt trời vì chúng ta, môi trường quanh ta và Mặt trời, *lạnh hơn* Mặt trời. Đúng ra thì ta có thể phân biệt các vật nóng sáng và phông nền chỉ khi phông nền lạnh hơn. Đây là một hệ quả của các tính chất của sự phát xạ ánh sáng do nhiệt độ cao, thường được gọi là *sự bức xạ của thể đen*. Bức xạ độc lập với chất liệu, vì vậy đối với một môi trường có cùng nhiệt độ với vật, ta không thể thấy gì cả. Một cái lò bất kỳ như trong Hình 112 cho ta bằng chứng về điều này.

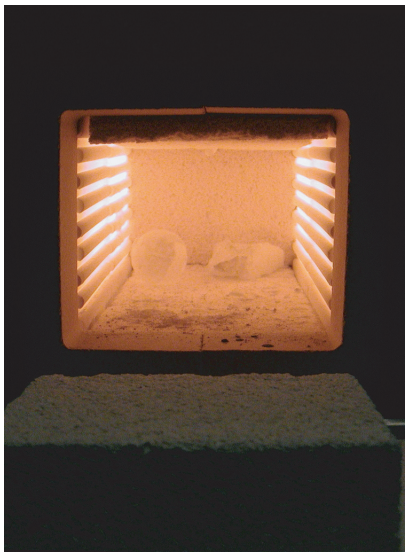
Sau cùng, ta có thể nhìn thấy Mặt trời vì nó không phải là một hố đen. Nếu là hố đen thì nó (gần như) không phát ra ánh sáng.

Điều hiển nhiên là các điều kiện này cũng áp dụng cho các ngôi sao. Thí dụ ta chỉ có thể thấy sao vì bầu trời đêm màu đen. Nhưng như vậy làm sao ta giải thích được bầu trời đa sắc?

Tại sao các ngôi sao có màu sắc khác nhau?

Ta có thể thấy các ngôi sao vì chúng phát ra ánh sáng khả kiến. Ta đã gặp nhiều hiệu ứng quan trọng xác định màu sắc: nhiệt độ đa dạng của các ngôi sao, dịch chuyển Doppler

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 112 Một lò nướng nóng đỏ cho thấy ở nhiệt độ cao, ta không thể phân biệt các vật thể và môi trường chung quanh (© Wikimedia).

do vận tốc tương đối đối với quan sát viên và dịch chuyển đỏ do hấp dẫn.

Không phải tất cả các ngôi sao đều gần giống như thể đen nên ta không thể luôn luôn dùng các định luật bức xạ của thể đen để mô tả chính xác màu sắc của sao. Tuy vậy, phần lớn các sao có thể xem gần đúng như các thể đen. Nhiệt độ của một ngôi sao chủ yếu tuỳ thuộc vào kích thước, khối lượng, thành phần cấu tạo và tuổi của nó, như các nhà vật lý thiên văn vui tính đã giải thích. Chòm sao Lạp Hộ là một thí dụ thích hợp về một chòm sao có màu sắc: mỗi sao có một màu. Những hình phơi sáng đủ lâu cho ta thấy vẻ đẹp của chòm sao này.

Quyển III, trang 149

Xem 242

Quyển I, trang 88

Màu sắc cơ bản được xác định bằng nhiệt độ bị thay đổi do hai hiệu ứng. Thứ nhất, *dịch chuyển đỏ Doppler* z, phụ thuộc vào tốc độ v giữa nguồn và quan sát viên theo công thức

Câu đố 343 ny

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_O} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1 \,. \tag{265}$$

Những dịch chuyển như vậy chỉ đóng một vai trò quan trọng đối với các ngôi sao ở xa, mờ, thấy được qua kính thiên văn. Mắt trần không thể nhận ra dịch chuyển Doppler. Nhưng dịch chuyển Doppler làm cho các sao ở xa sáng lên trong bước sóng hồng ngoại thay vì ánh sáng khả kiến. Thật vậy, dịch chuyển Doppler lớn nhất mà người ta quan sát được đối với các vật sáng là > 5.0, tương ứng với tốc độ chạy ra xa cỡ 94 % tốc độ ánh sáng. Trong vũ trụ, dịch chuyển đỏ liên hệ với hệ số giãn nở vũ trụ $R(t)$ theo công thức

Câu đố 344 ny

$$z = \frac{R(t_0)}{R(t_{\text{phát xạ}})} - 1 \,. \tag{266}$$

Như vậy ánh sáng có độ dịch chuyển đỏ là 5.0 được phát ra khi vũ trụ có tuổi là 1/6 tuổi hiện nay.

Thứ hai, hiệu ứng *dịch chuyển đỏ do hấp dẫn* z_g, phụ thuộc vào mật độ vật chất của

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 7 Màu sắc của các ngôi sao.

Lớp sao	Nhiệt độ	Thí dụ	Vị trí	Màu sắc
O	30 kK	Mintaka	δ Orionis	xanh-tím
O	31(10) kK	Alnitak	ζ Orionis	xanh-tím
B	22(6) kK	Bellatrix	γ Orionis	xanh
B	26 kK	Saiph	κ Orionis	trắng-xanh
B	12 kK	Rigel	β Orionis	trắng-xanh
B	25 kK	Alnilam	ε Orionis	trắng-xanh
B	17(5) kK	Regulus	α Leonis	trắng-xanh
A	9.9 kK	Sirius	α Canis Majoris	trắng-xanh
A	8.6 kK	Megrez	δ Ursae Majoris	trắng
A	7.6(2) kK	Altair	α Aquilae	vàng-trắng
F	7.4(7) kK	Canopus	α Carinae	vàng-trắng
F	6.6 kK	Procyon	α Canis Minoris	vàng-trắng
G	5.8 kK	Sun	ecliptic	vàng
K	3.5(4) kK	Aldebaran	α Tauri	cam
M	2.8(5) kK	Betelgeuse	α Orionis	đỏ
D	<80 kK	–	–	bất kỳ

Ghi chú. Sao lùn trắng, hay sao lớp-D, là tàn dư của ngôi sao nổ nén, có kích thước chỉ vài chục km. Không phải tất cả đều màu trắng; chúng có thể vàng hay đỏ. Chúng chiếm 5 % tổng số sao. Không sao nào có thể thấy bằng mắt thường. Trong giá trị nhiệt độ, chữ số không chính xác nằm trong ngoặc đơn.
Kích thước sao là một biến độc lập và đôi khi được thêm vào dưới dạng chữ số La Mã ở cuối loại quang phổ. (Sao Thiên Lang là một sao A1V, Arcturus là sao K2III.) Sao kềnh và siêu kềnh có mặt trong mọi lớp từ O tới M.
Để thích ứng với sao lùn nâu, người ta đề nghị thêm hai lớp sao mới là L và T.

nguồn và bán kính phát xạ ánh sáng R; nó được cho bởi công thức

$$z_g = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{f_S}{f_0} - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}} - 1 \,. \tag{267}$$

Thường nó nhỏ hơn dịch chuyển Doppler một chút. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Câu đố 345 e

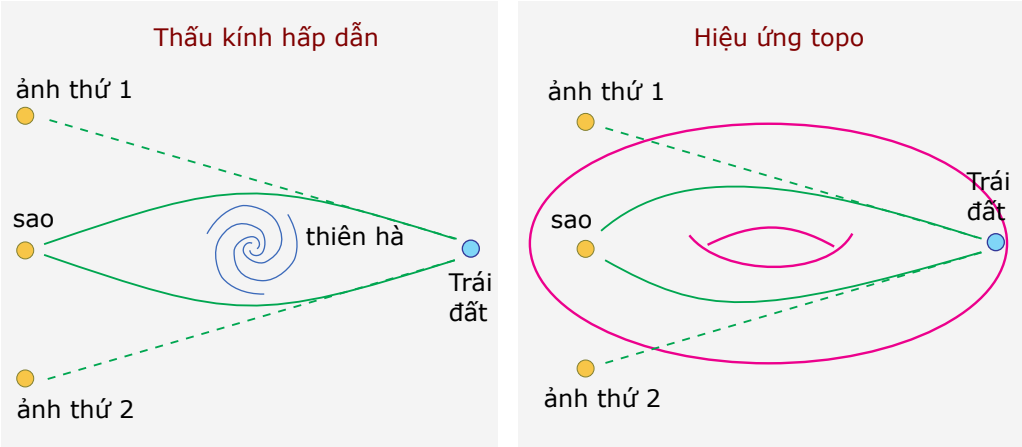
Người ta chưa biết các quá trình dịch chuyển đỏ khác; hơn nữa, những quá trình như vậy sẽ mâu thuẫn với tất cả các tính chất đã biết của thiên nhiên. Nhưng vấn đề màu sắc dẫn tới câu hỏi kế tiếp.

Trang 267

CÓ CÁC NGÔI SAO TỐI KHÔNG?

Người ta có thể không nhìn thấy một số ngôi sao vì chúng tối đen. Điều này có thể dùng để giải thích cho một lượng lớn vật chất tối có trong số đo gần đây của bức xạ nền vũ trụ.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 113 Hai cách mà một ngôi sao có thể cho nhiều ảnh.

Vấn đề này hiện nay thu hút nhiều sự quan tâm và được tranh luận rất sôi nổi. Người ta đã biết rằng các vật thể nặng hơn Mộc Tinh nhưng nhẹ hơn Mặt trời có thể hiện hữu dưới trạng thái hầu như không phát ra chút ánh sáng nào. Một ngôi sao có khối lượng nhỏ hơn 7.2 % khối lượng Mặt trời không thể khởi động phản ứng nhiệt hạch và được gọi là *sao lùn nâu*. Hiện nay chưa rõ có bao nhiêu vật thể như vậy. Nhiều vật thể được gọi là 'hành tinh ngoài Thái dương hệ' có thể là các sao lùn nâu. Vấn đề vẫn chưa được giải quyết.

Trang 268 Các hố đen có khả năng là sao tối. Điều này sẽ được bàn luận kỹ dưới đây.

CÓ PHẢI MỌI NGÔI SAO ĐỀU KHÁC NHAU KHÔNG? – THẤU KÍNH HẤP DẪN

"Per aspera ad astra."*

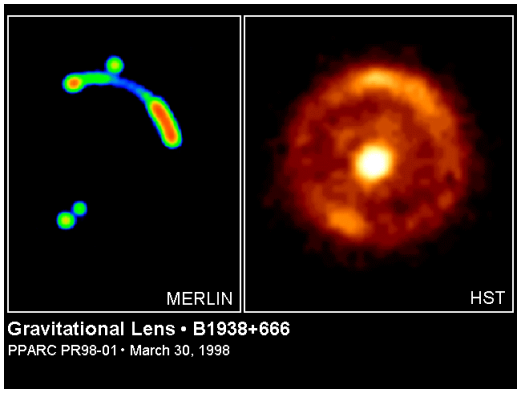
Chúng ta có chắc rằng vào ban đêm hai ngôi sao thực sự khác nhau không? Câu trả lời là không. Sau đây ta sẽ chứng tỏ rằng 2 'ngôi sao' thực ra là 2 ảnh của cùng một vật. Điều nầy được nhận ra nhờ so sánh sự nhấp nháy của 2 ảnh. Người ta nhận thấy rằng ánh sáng của một ảnh nhấp nháy giống y như ảnh kia, chỉ dịch đi 423 ngày. Kết quả này do nhà vật lý thiên văn Estonia Jaan Pelt và cộng sự tìm ra trong khi quan sát 2 ảnh của Xem 243 quasar trong hệ sao Q0957+561.

Hai ảnh là kết quả của hiện tượng *thấu kính hấp dẫn*, hiệu ứng được minh hoạ trong Hình 113. Thật vậy, Pelt đã thấy một thiên hà lớn nằm giữa 2 ảnh và nó ở gần Trái đất hơn ngôi sao. Hiệu ứng này đã được Einstein nghiên cứu; tuy vậy ông không tin là có Xem 244 thể quan sát được nó. Người cha thực sự của hiệu ứng này là Fritz Zwicky, đã tiên đoán năm 1937 rằng hiện tượng này rất bình thường và dễ quan sát, nếu ta ngắm thẳng vào các thiên hà thay vì các ngôi sao, và thực tế đã xảy ra như thế.

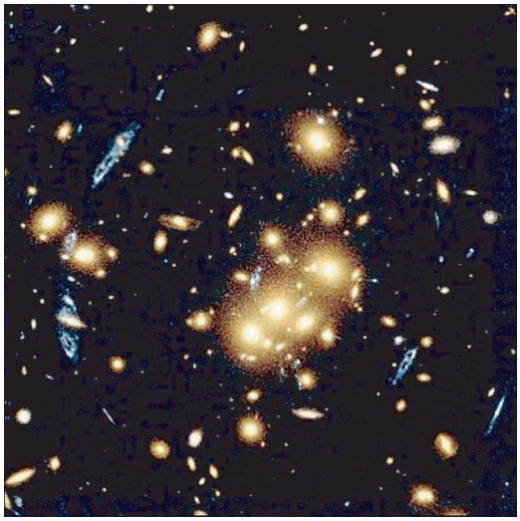
Điều thú vị là khi biết độ trễ của thời gian, các thiên văn gia có thể xác định kích Câu đố 346 ny thước của vũ trụ từ sự quan sát này. Bạn có thể hình dung ra cách làm không?

* 'Trải qua gian khổ để đi tới vinh quang.' Một câu châm ngôn Latin nổi tiếng. thường bị nói sai là 'per ardua ad astra'.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 114 Vành Zwicky–Einstein B1938+666, được quan sát trong quang phổ vô tuyến (hình bên trái) và trong vùng quang học (hình bên phải) (NASA).



HÌNH 115 Những hình ảnh màu xanh của một thiên hà do đám thiên hà màu vàng CL0024+1654 tạo ra (NASA).

Nếu 2 vật nặng được quan sát lúc chúng nằm thẳng hàng, vật này sau vật kia, thì ta sẽ thấy vật ở xa hơn là một *vành* bao quanh vật gần hơn. Người ta đã quan sát được những vành như vậy và ảnh một thiên hà bao quanh một thiên hà tiền cảnh trung tâm B1938+666, như ta thấy trong Hình 114, là một trong những thí dụ đẹp đẽ nhất. Năm 2005, người ta đã khám phá ra nhiều thấu kính hấp dẫn của ngôi sao. Thú vị hơn, có 3 sự kiện trong đó người ta quan sát thấy một trong hai ngôi sao có hành tinh mà khối lượng cỡ Trái đất. Trong những năm sắp tới chắc chắn sẽ có thêm nhiều hiện tượng, được các chương trình quan sát bầu trời trợ giúp, ở nam bán cầu để kiểm tra độ sáng của khoảng 100 triệu ngôi sao mỗi đêm.

Tóm lại, ảnh của các ngôi sao lân cận đúng là duy nhất nhưng đối với các ngôi sao ở xa thì vấn đề phức tạp hơn. Đối với các sao đơn, xét tổng thể thì vấn đề không quan trọng. Điều chắc chắn là đến nay chỉ có khoảng 80 sao có nhiều ảnh. Nhưng khi thấy cả thiên hà có nhiều ảnh cùng lúc (đến nay có hàng chục trường hợp như vậy) có lẽ chúng ta bắt đầu cảm thấy lo lắng. Trong trường hợp đám thiên hà CL0024+1654, như trong Hình 115, ta thấy 7 ảnh mảnh, kéo dài, màu xanh của cùng một thiên hà ở xa bao quanh

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

các thiên hà ellipse màu vàng, ở gần hơn.

Nhưng không phải chỉ có thấu kính hấp dẫn mới có thể tạo ra nhiều ảnh; *hình dạng* của vũ trụ cũng có thể tạo ra nhiều trò tinh nghịch.

Vũ trụ có hình gì?

Ta thường so sánh sự giãn nở vũ trụ với hình ảnh một quả bóng cao su to lên khi có hơi thổi vào trong. Bề mặt quả bóng được xem là tương ứng với thể tích của vũ trụ. Các dấu chấm trên quả bóng tương ứng với các thiên hà; khoảng cách giữa chúng gia tăng liên tục. Mặt quả bóng thì hữu hạn và không có ranh giới. Tương tự như vậy, thể tích vũ trụ có giới hạn, nhưng không có ranh giới. Sự tương tự này đã giả định trước là vũ trụ có cùng topo, cùng 'hình dạng' như một quả cầu với một chiều bổ sung.

Xem 245 Nhưng bằng chứng thực nghiệm cho sự tương tự này là gì? Không có nhiều. Ta chưa biết rõ về hình dạng của vũ trụ. Xác định điều đó cực khó, đơn giản chỉ là vì kích thước của chúng. Thực nghiệm chứng tỏ rằng trong vùng gần chúng ta, tức là trong phạm vi vài triệu năm ánh sáng, topo là đơn liên thông. Nhưng đối với các khoảng cách lớn, hầu như không có gì là chắc chắn. Có lẽ việc nghiên cứu các bùng nổ gamma sẽ cho ta biết nhiều điều về topo, vì các vụ bùng nổ này thường bắt nguồn từ thuở ban đầu.* Có lẽ ngay cả việc nghiên cứu sự thăng giáng của bức xạ nền vũ trụ cũng có thể tiết lộ cho ta một số điều. Tất cả các cuộc nghiên cứu này vẫn còn sơ khai.

Vì không biết rõ nên ta có thể thắc mắc về phạm vi của các câu trả lời khả hữu. Như vừa đề cập, theo mô hình vũ trụ luận, có 3 tuỳ chọn. Khi $k = 0$, tương thích với thực nghiệm, topo đơn giản nhất của không gian là không gian Euclide 3 chiều $\mathbb{R}^3$. Khi $k = 1$, không-thời gian thường được giả định là tích của thời gian tuyến tính, với topo R của đường thẳng thực và hình cầu S^3 cho không gian. Đó là hình dạng khả hữu đơn giản nhất, tương ứng với một vũ trụ *đơn liên thông*. Khi $k = -1$, tuỳ chọn đơn giản cho không gian là một đa tạp hyperbolic $\boldsymbol{H}^3$.

Trang 242 Thêm vào đó, Hình 105 cho ta thấy rằng vì phụ thuộc vào giá trị của hằng số vũ trụ, không gian có thể hữu hạn và giới nội, hay vô hạn và không giới nội. Trong nhiều tính toán của Friedmann–Lemaître, sự đơn liên thông thường được giả định ngầm, cho dù nó không cần thiết chút nào.

Có thể không-thời gian thì *đa* liên thông, giống như một phiên bản nhiều chiều của một hình xuyến, như đã minh hoạ trên hình bên phải của Hình 113. Một hình xuyến có $k = 0$ ở mọi nơi, nhưng là một topo toàn cục không tầm thường. Khi $k \neq 0$, không-thời gian cũng có thể có các topo phức tạp hơn.** Nếu topo không tầm thường thì có thể số thiên hà thực sự ít hơn số quan sát được rất nhiều. Tình trạng này tương ứng với một kính vạn hoa, nơi mà một số ít hạt sinh ra một số lớn hình ảnh.

Đúng ra thì phạm vi các khả năng không bị giới hạn vào các trường hợp đơn và đa liên thông như vật lý cổ điển đã đề ra. Nếu bao gồm các hiệu ứng lượng tử, nhiều tuỳ chọn phụ và phức tạp hơn xuất hiện; chúng sẽ được bàn tới trong phần cuối của cuộc hành trình.

Quyển VI, trang 101

* Chuyện này được Bob Osserman, kể lại theo quan điểm toán học, *Poetry of the Universe*, 1996.

** Metric Friedmann–Lemaître cũng đúng đối với một tỷ số bất kỳ của những topo đơn giản vừa đề cập với một nhóm các phép đẳng cự, dẫn tới các không gian nhị diện và không gian thấu kính trong trường hợp $k = 1$, hay tới các hình xuyến trong trường hợp $k = 0$ và tới một đa tạp hyperbolic *bất kỳ* trong trường hợp $k = -1$.

Xem 246

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Phía sau chân trời là cái gì?

> Nếu tôi đến cạnh ngoài cùng của bầu trời, tôi có thể đưa tay hay gậy vào những gì ở bên ngoài đó hay không? Nếu không làm được thì đó sẽ là một điều nghịch lý.
> Archytas of Tarentum (428–347 BCE)

> Vũ trụ là một nơi to lớn; có lẽ là lớn nhất.
> Kilgore Trout, *Venus on the Half Shell*.

Chân trời ban đêm là một thực thể phức tạp. Đúng ra mọi mô hình vũ trụ đều cho ta thấy rằng nó đang rời xa chúng ta rất nhanh. Một cuộc nghiên cứu chi tiết chứng tỏ rằng đối với một vũ trụ đa số là vật chất, chân trời chạy ra xa ta với vận tốc

Xem 247
Câu đố 347 ny

$$v_{\text{horizon}} = 3c \tag{268}$$

Một kết quả đẹp đẽ đấy chứ? Điều hiển nhiên là vì chân trời không vận chuyển bất kỳ tín hiệu nào nên nó không mâu thuẫn với Thuyết tương đối. Hiện nay, số đo Ω_K cho thấy không gian về bản chất là phẳng. Vì vậy ta có thể thắc mắc: sau chân trời là cái gì?

Trang 249

Nếu vũ trụ *mở* hay *cận biên*, vật chất mà ta thấy vào ban đêm được tiên đoán bằng cách áp dụng một cách ngây thơ Thuyết tương đối tổng quát – thì đó đúng là – một phần vô cùng nhỏ của tất cả vật chất hiện có. Thật vậy, việc áp dụng các phương trình trường vào một vũ trụ mở hay cận biên bao hàm ý có một lượng vật chất vô hạn phía sau chân trời. Có thể kiểm tra nhận định này hay không?

Câu đố 348 s

Trong một vũ trụ *đóng*, người ta tiên đoán là có vật chất ở phía sau chân trời; tuy vậy, trong trường hợp này chỉ có một lượng hữu hạn. Có thể kiểm tra nhận định này hay không?

Câu đố 349 s

Tóm lại, mô hình vũ trụ chuẩn cho rằng có nhiều vật chất phía sau chân trời. Giống như phần lớn các nhà vũ trụ học, ta giấu vấn đề này đi và sau này sẽ xem lại. Giả thuyết lạm phát sẽ cung cấp sự mô tả chính xác cho chủ đề này.

Tại sao lại có ngôi sao ở khắp mọi nơi? – Sự lạm phát

Các điều kiện ban đầu của vật chất là gì? Vật chất được phân bố với một mật độ không đổi trên một không gian đang giãn nở với tốc độ cao. Điều này xảy ra như thế nào? Nhà nghiên cứu đi sâu tìm hiểu câu hỏi này nhiều nhất là Alan Guth. Cho tới bây giờ, các nghiên cứu của chúng ta về bầu trời đêm, vũ trụ, đều dựa trên 2 nguyên lý quan sát: tính đẳng hướng và tính thuần nhất của vũ trụ. Ngoài ra, vũ trụ (gần như) phẳng. Giả định về *sự lạm phát* là một nỗ lực tìm hiểu nguồn gốc của những hiện tượng này.

Tính phẳng ở thời điểm hiện tại là một điều kỳ lạ: trạng thái phẳng là một lời giải không ổn định của các phương trình Friedmann. Vì vũ trụ vẫn còn phẳng sau 14 tỷ năm, lúc gần big bang nó còn phẳng hơn.

Xem 248

Guth cho rằng tính phẳng, tính thuần nhất và tính đẳng hướng của vũ trụ có thể hiểu được nếu trong giây đầu tiên vũ trụ đã trải qua một giai đoạn gia tăng kích thước theo hàm mũ, mà ta gọi là *sự lạm phát*. Sự lạm phát với hệ số tỷ lệ khoảng 10^{26} này, sẽ thuần nhất hoá vũ trụ. Sự tiến hoá cực ngắn đó được *trường lạm phát* - mà ta chưa biết - điều khiển. Lạm phát hình như cũng có thể dùng để mô tả đúng sự tăng trưởng của tính

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

không thuần nhất trong bức xạ nền vũ trụ.

Tuy vậy cho đến nay, sự lạm phát đặt ra nhiều câu hỏi cần giải đáp. Sau để nghị ban đầu khoảng 20 năm, Guth lại tỏ ra hoài nghi không biết đây có phải là một bước tiến về mặt nhận thức hay không. Vấn đề này chưa có đoạn kết.

Tại sao lại có ít ngôi sao như vậy? – Năng lượng và entropy của vũ trụ

> Die Energie der Welt ist constant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.*
>
> Rudolph Clausius

Mật độ năng-khối lượng của vũ trụ gần với giá trị tới hạn. Sự lạm phát, được mô tả ở phần trước, là sự giải thích hợp lý cho mối liên hệ này. Điều này dẫn tới việc số ngôi sao thực sự tuỳ thuộc vào trạng thái của vật chất khi nhiệt độ cực cao và mật độ năng lượng còn lại khi nhiệt độ giảm xuống. Mối liên hệ chính xác vẫn còn là chủ đề nghiên cứu rất sôi động. Nhưng vấn đề này cũng nảy sinh một câu hỏi về câu trích dẫn ở trên. Người tạo ra thuật ngữ 'entropy', Rudolph Clausius, có đúng khi đưa ra phát biểu nổi tiếng đó không? Chúng ta hãy xem qua những điều mà Thuyết tương đối tổng quát đã nói về vấn đề này.

Trong Thuyết tương đối tổng quát, thực ra năng lượng *toàn phần* có thể xác định được, khác với năng lượng *định xứ* thì không thể. Năng lượng toàn phần của toàn thể vật chất và bức xạ thì thực sự không đổi trong chuyển động. Nó bằng tổng các hạt baryon, ánh sáng và neutrino:

$$E = E_{\mathrm{b}} + E_\gamma + E_\nu \approx \frac{c^2 M_0}{T_0} + \dots \approx \frac{c^2}{G} + \dots \,. \tag{269}$$

Giá trị này chỉ không đổi khi tính tổng trên toàn thể vũ trụ, chứ không phải chỉ bên trong các chân trời.**

Nhiều người cũng thêm số hạng năng lượng hấp dẫn. Nếu cố làm như vậy, người ta buộc lòng phải định nghĩa nó có giá trị âm đối với các số hạng đứng trước. Giá trị năng lượng hấp dẫn này có thể dẫn tới một kết quả thường gặp là năng lượng *toàn phần* của vũ trụ có thể là 0. Nói cách khác, số ngôi sao cũng có thể bị giới hạn bởi hệ thức này.

Tuy vậy, sự bàn luận về *entropy* đặt ra một dấu hỏi lớn sau tất cả các mệnh đề có vẻ hiển nhiên này. Nhiều người thử tính giá trị của entropy của vũ trụ. Một số người đã kiểm tra xem hệ thức

Xem 249

$$S = \frac{kc^3}{G\hbar}\frac{A}{4} = \frac{kG}{\hbar c} 4\pi M^2 \tag{270}$$

Câu đố 350 ny

áp dụng cho vũ trụ có đúng với hố đen không. Ở đây ta đã giả định rằng mọi vật chất và bức xạ trong vũ trụ đều có thể được mô tả bằng một nhiệt độ trung bình. Người ta đã bàn cãi về việc entropy của vũ trụ thấp một cách kỳ lạ nên có thể có một định luật chi phối điều này. Một số người còn xem xét việc entropy của vũ trụ đến từ đâu và chân trời có phải là nguồn của entropy hay không.

* 'Năng lượng của vũ trụ thì không đổi. Entropy của nó lại có khuynh hướng dẫn tới một cực đại.'

** Trừ trường hợp có thể bỏ qua áp suất.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nhưng chúng ta hãy cẩn thận. Clausius đã giả sử mà không một chút nghi ngờ rằng vũ trụ là một *hệ đóng* và rút ra kết luận đã trích dẫn ở trên. Ta hãy kiểm tra giả định này. Entropy mô tả năng lượng cực đại có thể lấy ra từ một vật nóng. Sau khi khám phá ra cấu trúc hạt của vật chất thì rõ ràng là entropy phụ thuộc vào số trạng thái vi mô hợp thành một trạng thái vĩ mô đặc thù. Nhưng không có định nghĩa hợp lý nào có thể áp dụng cho toàn thể vũ trụ. Không có cách để lấy năng lượng của vũ trụ và cũng không thể biết số trạng thái vi mô để tạo thành một trạng thái vĩ mô của vũ trụ.

Lý do cơ bản là ta không thể áp dụng khái niệm *trạng thái* cho vũ trụ. Trước tiên ta đã
Quyển I, trang 27 định nghĩa trạng thái là tất cả các tính chất của một hệ giúp ta phân biệt nó với một hệ khác có cùng những tính chất nội tại, hay trông khác nhau đối với các quan sát viên khác nhau. Bạn có thể tự kiểm tra để thấy, đối với vũ trụ, không có những tính chất trạng thái
Câu đố 351 s như vậy.

Ta có thể nói về trạng thái của không-thời gian hay trạng thái của vật chất và năng lượng nhưng ta không thể nói về trạng thái của vũ trụ vì khái niệm này vô nghĩa.Nếu không có trạng thái của vũ trụ thì cũng không có entropy của vũ trụ. Và cũng không có một giá trị năng lượng nào. Đúng ra đây là kết luận hợp lý duy nhất mà ta có thể rút ra từ vấn đề này.

Tại sao vật chất kết tụ lại?

Ta có thể nhìn thấy các ngôi sao vì vũ trụ đa phần là các khoảng trống, nói cách khác, vì các ngôi sao nhỏ và tách xa nhau. Nhưng tại sao lại như vậy? Sự giãn nở của vũ trụ được tính toán và suy ra từ việc sử dụng tính phân bố thuần nhất của khối lượng. Như vậy tại sao vật chất lại kết tụ lại?

Hoá ra sự phân bố thuần nhất của khối lượng thì *không bền*. Nếu vì một lý do nào đó làm cho mật độ thăng giáng, các vùng có mật độ cao sẽ thu hút nhiều vật chất hơn các vùng có mật độ thấp. Lực hấp dẫn sẽ làm mật độ các vùng có mật độ cao tăng lên và mật độ các vùng có mật độ thấp giảm đi. Bạn có thể chứng minh tính không bền vững chỉ
Câu đố 352 ny bằng cách giả sử không gian đầy bụi và $a = GM/r^2$ không? Tóm lại, chỉ cần một thăng giáng lượng tử nhỏ bé trong mật độ khối lượng thì sau một thời gian nào đó vật chất sẽ kết tụ lại.

Nhưng sự không thuần nhất đầu tiên đã được hình thành như thế nào? Đó là một trong những vấn đề lớn của vật lý hiện đại, vật lý thiên văn nhưng chưa có câu trả lời thoả đáng. Nhiều thí nghiệm mới đang được tiến hành để đo sự biến thiên của phổ bức xạ nền vũ trụ theo vị trí góc và sự phân cực; những kết quả này, mà ta sẽ có vào các năm
Xem 250 tới đây, có thể cung cấp một số thông tin để giải quyết vấn đề này.

Tại sao ngôi sao lại quá nhỏ so với vũ trụ?

Nếu cho rằng mật độ vật chất gần bằng giá trị tới hạn thì kích thước các ngôi sao, nơi chứa phần lớn vật chất, là kết quả của sự tương tác của các hạt sơ cấp tạo nên chúng. Sau
Trang 288 đây ta sẽ chứng tỏ rằng (chỉ một mình) Thuyết tương đối tổng quát không thể giải thích được sự xuất hiện của các vật có kích thước bất kỳ trong thiên nhiên. Việc bàn luận về đề tài này là một chủ đề của Thuyết lượng tử.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ngôi sao và thiên hà đang chuyển động ra xa nhau hay vũ trụ đang giãn nở?

Ta có thể phân biệt giữa việc giãn nở không gian và các thiên hà đang chuyển động ra xa nhau không? Có, ta có thể. Bạn có thể tìm được một luận chứng hay đề nghị một thí nghiệm để thực hiện điều đó không?

Câu đố 353 ny

Sự giãn nở của vũ trụ không áp dụng được cho không gian trên Trái đất. Sự giãn nở được tính toán cho trường hợp khối lượng phân bố thuần nhất và đẳng hướng. Vật chất trong thiên hà không thuần nhất cũng không đẳng hướng; sự gần đúng của nguyên lý vũ trụ học không có giá trị ở đây. Người ta đã kiểm chứng bằng thực nghiệm bằng cách nghiên cứu phổ nguyên tử ở những nơi khác nhau trong Thái dương hệ, là nơi *không có* sự giãn nở Hubble đang xảy ra chung quanh ta.

Xem 251

Có nhiều hơn 1 vũ trụ không?

Sự hiện hữu của 'nhiều' vũ trụ có thể là một tuỳ chọn khi ta xem xét câu hỏi là ta có thấy mọi ngôi sao hay không. Nhưng bạn có thể kiểm tra lại rằng không có định nghĩa 'vũ trụ' nào đã cho ở trên, dù là 'tất cả vật chất-năng lượng' hay 'tất cả vật chất-năng lượng và tất cả không-thời gian', cho phép ta nói về nhiều vũ trụ.

Câu đố 354 e

Không có cách định nghĩa nhiều vũ trụ: hoặc vũ trụ là mọi vật và là duy nhất hay không phải là mọi vật và như vậy không phải là vũ trụ. Ta sẽ phát hiện ra là Thuyết lượng tử cũng không thay đổi kết luận này mặc dù thường xuyên có những báo cáo về những điều ngược lại.

Quyển IV, trang 167

Những người nói về việc có nhiều vũ trụ là đang nói những điều vô nghĩa.

Tại sao các ngôi sao lại cố định? – Những cánh tay, ngôi sao và nguyên lý Mach

> "Si les astres étaient immobiles, le temps et l'espace n'existeraient plus.*"
>
> Maurice Maeterlink.

Hai cánh tay của con người đã đóng một vai trò quan trọng trong việc bàn luận về chuyển động và đặc biệt trong việc phát triển của Thuyết tương đối. Ban đêm khi ngắm sao, ta có thể thấy một hiện tượng đơn giản, nếu ta giữ cho cánh tay ta thoải mái. Đứng yên và buông thõng tay. Rồi ta quay nhanh. Cánh tay sẽ nhấc lên. Đúng ra khi làm như vậy ta sẽ thấy các ngôi sao quay. Nhiều người đã bỏ cả đời để nghiên cứu hiện tượng này. Tại sao?

Xem 252

Sao và cánh tay chứng tỏ rằng chuyển động có tính tương đối, chứ không tuyệt đối.** Quan sát này dẫn tới việc thiết lập hai điều mà Einstein đã gọi là *nguyên lý Mach*.

— *Các hệ quy chiếu quán tính được xác định nhờ phần vật chất còn lại trong vũ trụ.*

Ý tưởng này đã được hiện thực hoá thành Thuyết tương đối tổng quát. Không có gì vướng mắc ở đây.

---

* 'Nếu các ngôi sao bất động thì thời gian và không gian cũng không còn hiện hữu nữa.' Maurice Maeterlink (1862–1949) là một nhà soạn kịch nổi tiếng người Bỉ.

** Trong lý luận ban đầu của Newton và nhiều người khác đã sử dụng một cái xô và mặt nước trong xô; nhưng lý luận thì tương tự.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

— *Quán tính bắt nguồn từ* sự tương tác *với phần còn lại của vũ trụ.*

Phát biểu này có thể gây ra tranh cãi. Nhiều người diễn giải rằng *khối lượng* của một vật phụ thuộc vào sự phân bố của vật chất trong phần còn lại của vũ trụ. Điều đó có nghĩa là người ta cần nghiên cứu xem khối lượng có tính bất đẳng hướng hay không khi ở gần một vật lớn. Dĩ nhiên là câu hỏi này đã được được nghiên cứu qua thực nghiệm; người ta chỉ cần đo gia tốc của cùng một hạt theo những hướng khác nhau. Và cũng bình thường khi ta không thấy một sự bất đẳng hướng nào với một độ chính xác rất cao. Do đó nhiều người kết luận rằng nguyên lý Mach sai. Nhiều người nén lòng kết luận rằng toàn bộ vấn đề chưa được giải quyết.

Xem 253
Xem 254

Nhưng thật ra cũng dễ dàng thấy là Mach *không có ý* nói về một sự biến thiên khối lượng nào cả: vì lúc đó ta sẽ phải kết luận rằng khối lượng phụ thuộc vào khoảng cách, giống như trong vật lý Galilei. Nhưng điều này sai; không ai có đầu óc tỉnh táo lại nghi ngờ về điều này.

Câu đố 355 e

Toàn bộ việc tranh cãi là do hiểu sai ý nghĩa của 'quán tính': người ta có thể diễn giải nó là *khối lượng* quán tính hay *chuyển động* quán tính (như cánh tay chuyển động dưới ngôi sao). Không có điều gì chứng tỏ rằng Mach tin vào khối lượng bất đẳng hướng hay khối lượng phụ thuộc vào khoảng cách; toàn bộ sự việc này là một thí dụ về những người lấy làm tự hào là không phạm phải sai lầm, thường đẩy sai lầm cho người khác được xem là ngốc nghếch hơn.*

Điều hiển nhiên là các tác dụng quán tính chỉ phụ thuộc vào sự phân bố khối lượng trong phần còn lại của vũ trụ. Nguyên lý Mach đúng. Mach đã phạm một số sai lầm trong đời mình (ông nổi tiếng vì chống lại quan niệm nguyên tử cho tới lúc qua đời mặc dù có bằng chứng thực nghiệm) nhưng nguyên lý của ông *không* nằm trong các sai lầm đó. Điều không may là các điều hoang đường về sự sai lầm của nguyên lý Mach vẫn tồn tại dai dẳng giống như việc chế nhạo Columbus.

Xem 254

Thực ra nguyên lý Mach rất có giá trị. Lấy thí dụ như Ngân Hà. Các thí nghiệm đều chứng tỏ rằng nó phẳng và đang quay. Mặt trời quay quanh tâm của Ngân Hà trong khoảng 250 triệu năm. Thật vậy, nếu Mặt trời không quay quanh tâm Ngân Hà, chúng ta sẽ rơi vào trong đó trong khoảng 20 triệu năm. Như đã đề cập ở trên, từ hình dạng của Ngân Hà ta có thể rút ra một kết luận chắc chắn là phải có nhiều vật chất khác, nghĩa là có nhiều ngôi sao và thiên hà khác trong vũ trụ.

Trang 216

Đứng yên trong vũ trụ

Không có hệ quy chiếu ưu tiên trong Thuyết tương đối đặc biệt, không có không gian tuyệt đối. Điều đó có đúng trong vũ trụ thực không? Không; *có* một hệ quy chiếu ưu tiên. Thật vậy, trong vũ trụ học big-bang tiêu chuẩn, thiên hà trung bình đứng yên. Mặc dù ta nói về big bang, một thiên hà trung bình bất kỳ có thể vẫn còn đứng yên. Mỗi thiên hà đều đang rơi tự do. Bức xạ nền vũ trụ cung cấp cho ta một bằng chứng rõ hơn về một hệ quy chiếu ưu tiên.

Nói cách khác, bầu trời đêm tối đen vì ta hầu như không di chuyển xuyên qua nền bức xạ. Nếu Trái đất có một tốc độ lớn so với nền bức xạ thì bầu trời sẽ sáng cho dù đang

* Một thí dụ nổi tiếng thường được dạy ở trường học. Người ta luôn cho rằng Columbus bị chế nhạo vì ông nghĩ rằng Trái đất hình cầu. Nhưng thật ra ông không bị chế nhạo vì lý do này mà chỉ do sự bất đồng ý kiến về *kích thước* của Trái đất, và hoá ra người chỉ trích ông thì đúng, là ông có sai nhưng rất ít, trong việc ước tính bán kính của Trái đất.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

là ban đêm nhờ hiệu ứng Doppler đối với bức xạ nền. Nói cách khác, bầu trời đêm tối đen theo mọi hướng vì chúng ta chuyển động chậm chạp so với bức xạ nền vũ trụ.

Chuyển động 'chậm' này có tốc độ khoảng 368 km/s. (Đây là tốc độ của chuyển động của Mặt trời; có độ sai lệch do cộng thêm chuyển động của Trái đất.) Giá trị tốc độ thì lớn so với điều kiện thông thường nhưng so với tốc độ ánh sáng thì nhỏ. Việc nghiên cứu kỹ hơn không làm thay đổi kết luận này. Ngay cả chuyển động của Ngân Hà và của nhóm sao địa phương đối với bức xạ nền vũ trụ cũng chỉ cỡ 600 km/s, vẫn còn chậm hơn tốc độ ánh sáng. Lý do tại sao thiên hà và Thái dương hệ chuyển động ngang vũ trụ với tốc độ 'thấp' này đã được tìm hiểu trong cuộc hành trình của chúng ta. Bạn có thể tóm tắt lại không?

Câu đố 356 e

Cũng cần hỏi thêm, thuật ngữ 'vũ trụ' có đúng không? Vũ trụ có quay như tên của nó đã cho thấy không? Nếu ta muốn nói đến vũ trụ trong kinh nghiệm của chúng ta thì câu hỏi này vô nghĩa, vì chuyển động quay chỉ được xác định đối với các vật thể, nghĩa là đối với các phần của vũ trụ. Tuy vậy, nếu ta chỉ muốn nói đến vũ trụ là 'tất cả vật chất', câu trả lời *có thể* được xác định bằng thực nghiệm. Hoá ra chuyển động quay rất ít, nếu có quay thì các số liệu về bức xạ nền vũ trụ cho thấy rằng, trong cả cuộc đời của vũ trụ, vật chất của nó quay không hơn 1 phần trăm triệu của một vòng tròn! Tóm lại, ta có thể nói vui rằng 'vũ trụ' là một thuật ngữ sai lầm.

Xem 255

Ánh sáng có hút ánh sáng không?

Một lý do khác khiến ta thấy các ngôi sao là ánh sáng của chúng đến được với chúng ta. Nhưng tại sao các tia sáng du hành không bị sự hấp dẫn của các tia sáng khác quấy nhiễu? Ta đã biết rằng ánh sáng là năng lượng nên sẽ hút các năng lượng khác do sự hấp dẫn. Đặc biệt, ánh sáng là năng lượng điện từ và các thí nghiệm đã chứng tỏ rằng năng lượng điện từ chịu tác dụng của lực hấp dẫn. Hai chùm ánh sáng tạo thành một góc nhỏ có thể hội tụ do lực hấp dẫn giữa chúng hay không? Điều đó có thể gây ra các hiệu ứng thú vị, mà ta có thể đo được, trên ánh sáng của các ngôi sao ở xa.

Cách đơn giản nhất để tìm hiểu vấn đề này là nghiên cứu câu hỏi sau đây: các chùm tia sáng song song có giữ được sự song song không? Điều thú vị là một tính toán chính xác đã chứng tỏ rằng lực hấp dẫn hỗ tương *không* làm thay đổi đường đi của hai chùm tia sáng song song, mặc dù nó *làm* thay đổi đường đi của hai chùm tia đối song, nghĩa là hai chùm tia sáng song song nhưng chuyển động ngược chiều nhau. Lý do là vì các chùm tia song song chuyển động với tốc độ ánh sáng thì thành phần hấp dẫn từ *bù trừ* với thành phần hấp dẫn điện.

Xem 256

Câu đố 357 ny

Vì ánh sáng không hút ánh sáng đi cùng nên ánh sáng không bị nhiễu loạn bởi lực hấp dẫn riêng của nó trong hàng triệu năm mà nó đã trải qua để đến với chúng ta từ các ngôi sao xa xôi. Ánh sáng không hút hay làm nhiễu loạn ánh sáng đang chuyển động bên cạnh. Cho tới nay mọi hiệu ứng cơ-lượng tử đã biết cũng đã khẳng định kết luận này.

Ánh sáng có phân rã không?

Trong phần Thuyết lượng tử ta sẽ gặp các thí nghiệm chứng minh rằng ánh sáng được cấu tạo từ các hạt. Ta cũng thường nghe nói rằng các photon này có thể *phân rã* thành một số các hạt khác chưa biết, hoặc thành các photon có tần số thấp. Nếu điều này thực sự xảy ra thì ta không thể thấy các ngôi sao ở xa.

Nhưng dù phân rã theo kiểu nào thì ánh sáng cũng sẽ thay đổi hướng của chúng (Tại

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 358 e

sao?) và như vậy làm cho ảnh của các vật ở xa bị nhoè đi. Tuy vậy, người ta không thấy sự mờ nhoè nào. Hơn nữa, vật lý gia Nga Matvey Bronstein đã chứng minh trong các năm 1930 rằng bất kỳ một quá trình phân rã ánh sáng nào cũng sẽ có một tốc độ lớn hơn đối

Xem 257

với các tần số nhỏ hơn. Khi người ta kiểm tra độ dịch chuyển của sóng vô tuyến, đặc biệt là vạch 21 cm nổi tiếng, rồi so sánh nó với độ dịch chuyển của ánh sáng cùng một nguồn thì không có sự khác biệt nào được tìm thấy đối với các thiên hà được kiểm nghiệm.

Người ta cũng đã kiểm tra được rằng hằng số cấu trúc tinh tế của Sommerfeld, thường

Xem 258

được sử dụng để xác định màu sắc của các vật thể, không thay đổi theo thời gian. Dù có các xác nhận không đúng trong những năm gần đây, người ta vẫn không thể phát hiện được sự thay đổi nào trong hàng tỷ năm qua.

Dĩ nhiên thay vì phân rã, ánh sáng cũng có thể *va chạm* với các thực thể mà cho tới nay ta vẫn chưa biết. Nhưng khả năng này bị loại với cùng một lập luận. Nhiều nghiên cứu cũng chứng tỏ rằng không có thêm cơ chế dịch chuyển đỏ nào trong thiên nhiên

Trang 257

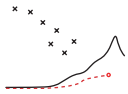
khác với hiệu ứng Doppler và sự dịch chuyển đỏ do hấp dẫn.

Độ thị kiến của các sao lúc ban đêm đã thực sự tước bỏ ánh sáng khỏi nhiều tính chất của thiên nhiên. Bây giờ ta lại tiếp tục cuộc hành trình với một vấn đề tổng quát hơn và gần gũi với yêu cầu của chúng ta hơn về các nguyên tắc cơ bản của chuyển động.

Tóm tắt về vũ trụ học

Câu hỏi về việc ta chính xác nhìn thấy cái gì vào lúc ban đêm dẫn tới nhiều nhận thức kỳ quặc. Đầu tiên, vũ trụ thì khổng lồ – nhưng kích thước thì hữu hạn. Thứ hai, vũ trụ cực kỳ già – nhưng tuổi thì hữu hạn. Thứ ba vũ trụ đang giãn nở.

Nếu bạn đã có dịp nhìn vào kính viễn vọng thì hãy thực hiện đi! Điều đó kỳ diệu lắm đấy.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 9

Hố đen – rơi mãi

> Qui iacet in terra non habet unde cadat.**
>
> Alanus de Insulis

Tại sao phải tìm hiểu về hố đen?

Hiện tượng hấp dẫn cực hạn nhất trong thiên nhiên là các hố đen. Chúng thể hiện giới hạn của tỷ số chiều dài/khối lượng trong thiên nhiên. Nói cách khác, chúng sinh ra lực khả hữu lớn nhất trong thiên nhiên ở bề mặt của chúng, tức là *chân trời*. Các hố đen cũng sinh ra độ cong không-thời gian lớn nhất đối với một khối lượng đã cho. Nói cách khác, hố đen là hệ tương đối tính tổng quát nhất mà ta gặp trong thiên nhiên. Do các tính chất cực hạn, việc nghiên cứu các hố đen cũng là bậc đá chính để bước tới sự thống nhất và sự mô tả sau cùng của chuyển động.

Xem 142

Hố đen là dạng viết gọn của 'vật thể suy sụp hoàn toàn do hấp dẫn'. Dù được tiên đoán cách nay trên 2 thế kỷ, trong một thời gian dài người ta cũng không chắc là có nó hay không. Vào khoảng năm 2000, dữ liệu thực nghiệm sẵn có đã giúp cho đa số các chuyên gia kết luận rằng hầu hết ở tâm các thiên hà đều có một hố đen, kể cả Ngân Hà (xem

Xem 259

Hình 116). Người ta cũng đoán rằng hố đen cũng có ở tâm của các quasar, *các nhân thiên hà hoạt động* và *các vụ bùng nổ gamma*. Tóm lại, hình như sự tiến hoá của các thiên hà liên hệ mật thiết với sự tiến hoá của hố đen. Hơn nữa, hàng tá các hố đen đã được nhận dạng trong Ngân Hà. Vì các lý do này, hố đen, các hệ ấn tượng nhất, mạnh mẽ nhất và có

Xem 260

tính tương đối nhiều nhất trong thiên nhiên, là một chủ đề nghiên cứu quyến rũ nhất.

Mật độ khối lượng và chân trời

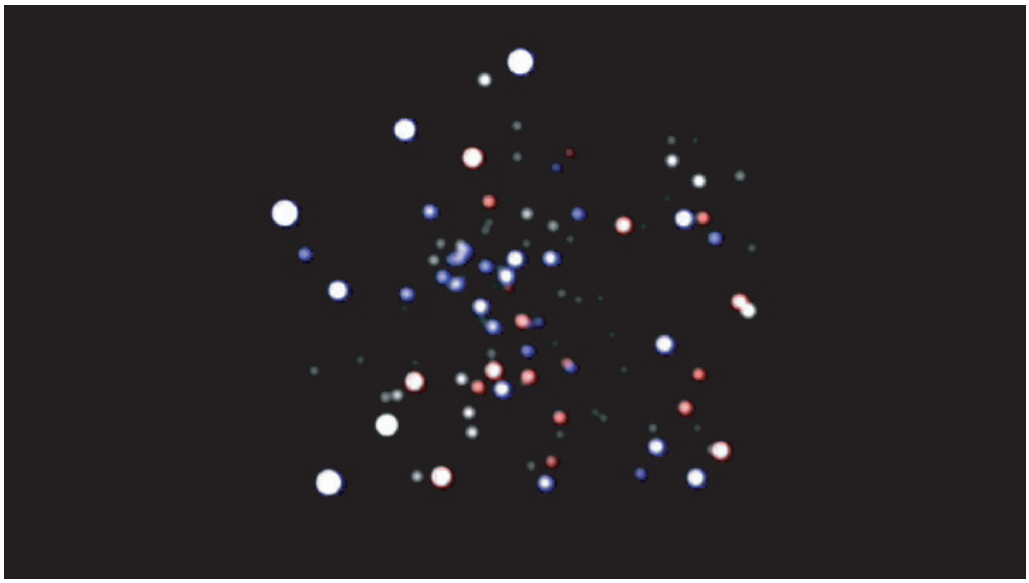
Vận tốc thoát là tốc độ cần thiết để phóng một đạn tử sao cho nó không rơi trở lại. Vận tốc thoát phụ thuộc vào khối lượng và kích thước của hành tinh nơi việc phóng đạn tử xảy ra: mật độ hành tinh càng lớn thì vận tốc thoát càng cao. Điều gì sẽ xảy ra khi một hành tinh hay một ngôi sao có vận tốc thoát lớn hơn tốc độ ánh sáng c? Những vật như vậy đã được nhà địa chất người Anh John Michell tưởng tượng ra lần đầu tiên năm 1784,

Xem 261

độc lập với toán gia Pháp Pierre Laplace năm 1795, rất lâu trước khi Thuyết tương đối tổng quát ra đời. Michell và Laplace đã nhận ra điều cơ bản: cho dù vật có vận tốc thoát lớn như vậy là một ngôi sao nóng sáng thì đối với một quan sát viên ở xa nó vẫn hoàn toàn đen, như được minh hoạ trong Hình 117. Vật không cho tí ánh sáng nào thoát ra;

** 'Người nằm trên mặt đất thì không thể từ đó rơi xuống.' Tên gốc của tác giả là Alain de Lille (*c.* 1128 –1203).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 116 Một đoạn film time-lapse (kỹ thuật tua nhanh theo thời gian), ghi hình quỹ đạo của các sao gần tâm Ngân Hà trong thời gian 16 năm. Vật thể không thấy được ở trung tâm rất nặng và nhỏ mà người ta có thể chắc chắn rằng nó là một hố đen (QuickTime film © ESO).

hơn nữa, nó chặn luôn ánh sáng đến từ phía sau nó. Năm 1967, John Wheeler* đã làm cho thuật ngữ *hố đen*, bây giờ là tiêu chuẩn nhờ Anne Ewing, trở nên phổ biến trong vật lý.

Xem 142

Chỉ cần vài dòng để chứng minh rằng ánh sáng không thể thoát khỏi vật có khối lượng M khi bán kính của nó nhỏ hơn giá trị tới hạn

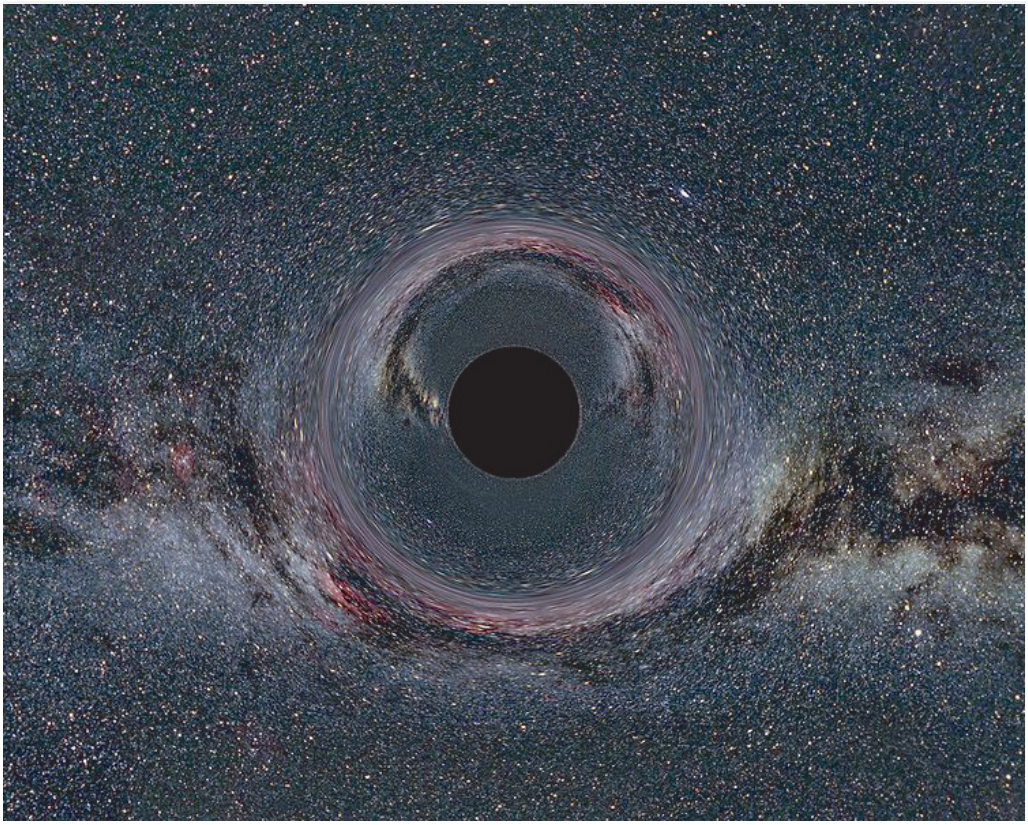
$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \tag{271}$$

được gọi là *bán kính Schwarzschild*. Công thức này đúng trong Thuyết hấp dẫn vạn vật lẫn Thuyết tương đối tổng quát, miễn là trong Thuyết tương đối tổng quát ta lấy bán kính bằng chu vi chia cho 2π. Một vật như vậy thể hiện giá trị giới hạn của tỷ số chiều dài/khối lượng trong thiên nhiên. Vì lý do này hay lý do khác, sau này ta cũng sẽ gọi R_S là *kích thước* của hố đen khối lượng M. (Nhưng hãy nhớ rằng nó chỉ là 1/2 của đường kính.) Về nguyên tắc, ta có thể tưởng tượng một vật có tỷ số chiều dài/khối lượng nhỏ hơn; tuy vậy, ta sẽ khám phá ra rằng không thể thấy một vật nhỏ hơn bán kính Schwarzschild, giống như ta không thể thấy một vật chuyển động nhanh hơn tốc độ ánh sáng. Tuy vậy, ta có thể quan sát một hố đen – trường hợp giới hạn – giống như ta có thể quan sát các thực thể chuyển động với tốc độ ánh sáng.

Khi một khối lượng thử được làm cho co lại và dần tới bán kính tới hạn R_S, có 2 điều

* John Archibald Wheeler (1911–2008), vật lý gia Mỹ, chuyên gia nổi tiếng về Thuyết tương đối tổng quát và là tác giả của nhiều sách giáo khoa tuyệt hảo, như John A. Wheeler, *Tìm hiểu lực hấp dẫn và không-thời gian*, Scientific American Library & Freeman, 1990, trong đó ông đã diễn giải về Thuyết tương đối tổng quát thật chi tiết và đầy cảm xúc mà không dùng một chút toán học nào.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 117 Một ảnh mô phỏng đơn giản hoá về cách mà một hố đen khối lượng 10 lần mặt trời, bán kính Schwarzschild 30 km, được nhìn từ khoảng cách không đổi 600 km, làm biến dạng hình ảnh của Ngân Hà ở phía sau. Cũng nên chú ý là vành Zwicky–Einstein hình thành ở khoảng cách hai lần bán kính hố đen và viền sáng mảnh (ảnh © Ute Kraus ở www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de).

sẽ xảy ra. Thứ nhất, gia tốc riêng địa phương của chất điểm (ảo) tăng vô hạn. Thứ hai, đối với các vật thực có kích thước hữu hạn, hố đen thể hiện lực khả hữu cực đại trong thiên nhiên. Người ta không thể kéo một vật rơi vào hố đen ra ngoài. Như vậy một hố đen nuốt mọi vật chất rơi vào bên trong nó. Nó giống như một máy hút bụi vũ trụ.

Ở bề mặt của một hố đen, hệ số dịch chuyển đỏ đối với một quan sát viên ở xa cũng tăng vô hạn. Tỷ số giữa hai đại lượng được gọi là *gia tốc hấp dẫn bề mặt* của một hố đen. Nó được cho bởi công thức

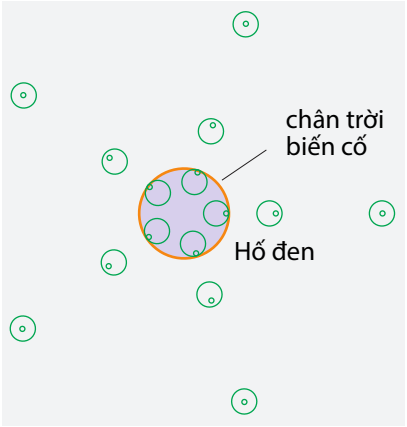
Câu đố 359 ny

$$g_{\text{surf}} = \frac{GM}{R_S^2} = \frac{c^4}{4GM} = \frac{c^2}{2R_S} \,. \tag{272}$$

Như vậy hố đen không cho ánh sáng thoát ra.

Một mặt thể hiện giới hạn lực và một độ dịch chuyển đỏ vô hạn sẽ làm cho nó không thể gởi ánh sáng, vật chất, năng lượng hay bất kỳ tín hiệu nào ra thế giới bên ngoài. Như vậy một hố đen có một chân trời bao quanh. Ta đã biết rằng chân trời là một mặt giới

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 118 Các hình nón ánh sáng trong mặt phẳng xích đạo quanh một hố đen không quay, nhìn từ bên trên.

hạn. Đúng ra thì chân trời là một giới hạn theo 2 nghĩa. Thứ nhất, chân trời là một giới hạn truyền thông: không thể liên lạc xuyên qua nó. Thứ hai, chân trời là một mặt của lực và công suất cực đại. Những tính chất này đủ để trả lời cho mọi câu hỏi về tác dụng của chân trời. Thí dụ: điều gì sẽ xảy ra khi một chùm ánh sáng được gởi ra từ chân trời? và từ ngay trên chân trời? Hình 118 cho ta một số gợi ý.

Câu đố 360 s

Các hố đen được xem như các vật thể thiên văn, như vậy sẽ khác với các hành tinh. Trong việc hình thành các hành tinh, vật chất kết tụ với nhau; ngay khi không thể nén thêm được nữa, một sự cân bằng được tạo lập sẽ xác định bán kính của hành tinh. Điều đó giống như cơ chế mà một tảng đá được ném về phía Trái đất: nó ngừng rơi khi *chạm* mặt đất. Một 'mặt đất' được hình thành khi vật chất va chạm với vật chất khác. Trong trường hợp hố đen, không có mặt đất; mọi vật *tiếp tục* rơi. Đó là lý do trong tiếng Nga hố đen thường được gọi là *sao suy sụp*.

Sự rơi liên tục này xảy ra khi mật độ vật chất lớn đến nỗi nó vượt qua mọi tương tác đã làm cho vật chất trở nên *bất khả xuyên thấu* trong đời sống thông thường. Năm 1939, Robert Oppenheimer* và Hartland Snyder đã chứng minh bằng lý thuyết rằng một hố đen sẽ hình thành khi một ngôi sao có đủ khối lượng để làm ngừng sự cháy. Khi đó, các tương tác tạo nên 'sàn' sẽ biến mất và mọi vật tiếp tục rơi không ngừng.

Xem 262

Hố đen là vật chất rơi liên tục. Tuy vậy, đối với một quan sát viên bên ngoài thì bán kính của nó không đổi! Nhưng chưa hết. Vì sự rơi tự do liên tục này, hố đen là trạng thái vật chất duy nhất đang cân bằng nhiệt động lực! Theo một nghĩa nào đó thì sàn và mọi trạng thái vật chất thông thường khác là nửa bền: các trạng thái này không bền bằng hố đen.

Chân trời hố đen là các mặt giới hạn

Như vậy tính chất đặc trưng của hố đen là *chân trời* của nó. Lần đầu tiên ta gặp chân trời là trong Thuyết tương đối đặc biệt, phần quan sát viên có gia tốc. Các chân trời

Trang 98

* Robert Oppenheimer (1904–1967), vật lý gia nổi tiếng của Mỹ. Ông có thể được gọi là cha của Vật lý lý thuyết ở Hoa Kỳ. Ông nghiên cứu về Thuyết lượng tử và Vật lý nguyên tử. Ông đứng đầu một nhóm phát triển bom hạt nhân trong Đệ nhị thế chiến. Ông cũng là nạn nhân (ngây thơ) nổi bật nhất trong các cuộc săn phù thuỷ vĩ đại đã được tổ chức ở quê nhà của ông. Có thể xem thêm website www.nap.edu/readingroom/books/biomems/joppenheimer.html.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

bắt nguồn từ lực hấp dẫn đều có tính chất giống nhau; phần gây ấn tượng nhất là lực và công suất cực đại. Sự khác biệt duy nhất mà ta đã thấy là sự bỏ qua lực hấp dẫn trong Thuyết tương đối đặc biệt. Kết quả là chân trời trong thiên nhiên không thể phẳng, trái với những điều mà các quan sát viên chất điểm tưởng tượng đã giả sử trong Thuyết tương đối đặc biệt.

Cả nguyên lý lực cực đại lẫn các phương trình trường đều bao hàm ý không-thời gian quanh một khối lượng trung hoà về điện và có đối xứng tròn xoay (như vậy nó không
Trang 149 quay) được mô tả bởi công thức

$$\mathrm{d}i^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)\mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}r^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - r^2\mathrm{d}\varphi^2/c^2 \,. \tag{273}$$

Công thức này được gọi là *metric Schwarzschild*. Như đã nói, r là chu vi chia cho 2π; t là thời gian đo ở vô cực.

Bây giờ ta hãy giả sử rằng khối lượng được định xứ rõ ràng. Lúc đó ta sẽ thấy rằng quan sát viên *bên ngoài* không thể nhận được tín hiệu nào phát ra trong vòng bán kính $r = 2GM/c^2$ hay nhỏ hơn. Ta có một chân trời ở xa và đang mô tả một hố đen. Thật vậy, vì thời gian riêng i của một quan sát viên ở vị trí bán kính r liên hệ với thời gian t của một quan sát viên ở vô cực thông qua công thức

$$\mathrm{d}i = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}\,\mathrm{d}t \,, \tag{274}$$

nên ta thấy rằng một quan sát viên ở chân trời sẽ có thời gian riêng = 0. Nói cách khác, ở chân trời độ dịch chuyển đỏ lớn vô hạn. (Hay chính xác hơn, mặt của dịch chuyển đỏ lớn vô hạn và chân trời chỉ trùng nhau đối với những hố đen không quay. Đối với hố đen quay, hai mặt này không trùng nhau.) Mọi việc xảy ra ở chân trời sẽ vô cùng chậm, như quan sát viên ở xa sẽ thấy. Nói cách khác, đối với quan sát viên ở xa đang quan sát những điều đang xảy ra ở chân trời, thì không có gì xảy ra.

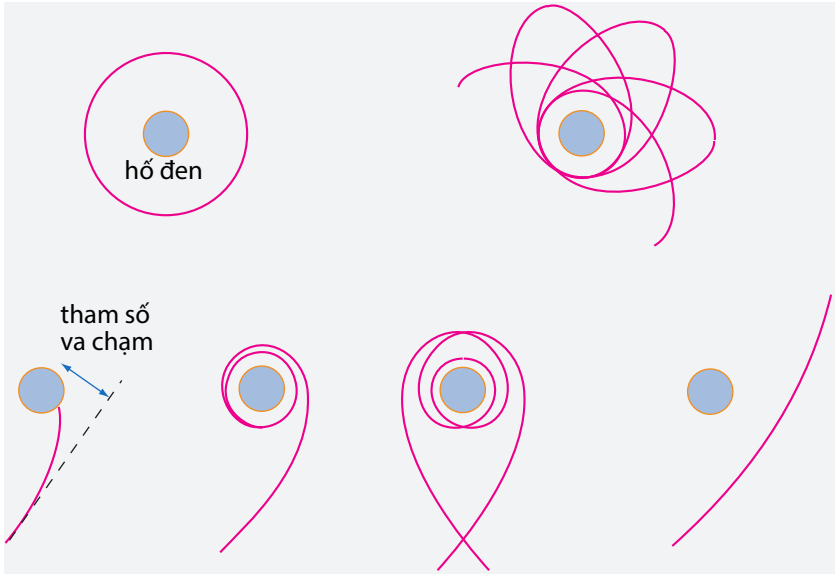
Tương tự như vậy những quan sát viên không có tốc độ ánh sáng thì không thể đến gần chân trời. Đối với một quan sát viên thứ hai thì chỉ thấy quan sát viên thứ nhất chuyển động nhanh như ánh sáng và tiến gần đến chân trời. Ngoài ra, người du hành không thể cảm thấy là anh ta đang chuyển động gần với tốc độ ánh sáng đến cỡ nào so với người khác và cảm thấy là không thể đạt tới tốc độ ánh sáng; tương tự, người du hành (vào trong một hố đen lớn) không thể cảm thấy anh ta ở gần chân trời đến cỡ nào và cảm thấy là không thể tới gần nó được.

Ta không thể nói điều gì xảy ra bên trong chân trời.* Ta có thể theo quan điểm về cực hạn này để rút ra kết luận metric hố đen là một loại metric của chân không. Theo quan điểm này, khối lượng là một đại lượng được 'tạo dựng' từ chân không.

Trong Thuyết tương đối tổng quát, người ta tiên đoán là mọi chân trời đều *màu đen*.

* Dĩ nhiên là các toán gia không cần biết đến các điều bàn luận của các vật lý gia. Do đó, Martin Kruskal và George Szekeres đã định nghĩa các toạ độ cho vùng bên trong hố đen. Tuy vậy, những hệ toạ độ này (và các hệ tương tự) đều kỳ quái, không hiện thực vì chúng mâu thuẫn với Thuyết lượng tử. Các hệ toạ độ dành cho vùng bên trong chân trời hố đen cũng giống như các hệ toạ độ dành cho phía sau chân trời vũ trụ: chúng là các hệ của niềm tin chứ không phải là các hệ có thể kiểm chứng bằng thực nghiệm.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 119 Chuyển động của các vật có khối lượng quanh một hố đen không quay – đối với các tham số va chạm và vận tốc ban đầu khác nhau.

Vì ánh sáng không thể thoát ra khỏi chúng, chân trời cổ điển là các mặt đen hoàn toàn. Đúng ra thì chân trời là thực thể đen nhất mà ta có thể tưởng tượng được: không có gì
Trang 278 trong thiên nhiên đen hơn nó. Tuy nhiên, dưới đây ta sẽ thấy rằng chân trời vật lý không hoàn toàn đen.

Quỹ đạo quanh các hố đen

Xem 257 Vì hố đen uốn cong không-thời gian rất mạnh, một vật chuyển động gần hố đen hành xử theo những cách phức tạp hơn những gì mà Thuyết hấp dẫn vạn vật tiên đoán. Trong thuyết này, quỹ đạo là các ellipse, parabol, hay hyperbol; đây là các đường cong phẳng. Hoá ra là các quỹ đạo chỉ nằm trong một mặt phẳng khi vật ở gần các hố đen *không quay*.*

Quanh những hố đen không quay, còn gọi là *hố đen Schwarzschild*, không thể có quỹ đạo tròn khi khoảng cách nhỏ hơn $3R_S/2$ (bạn có thể chứng minh điều này không?)
Câu đố 362 ny và quỹ đạo cũng không ổn định đối với các nhiễu loạn từ đó tới khoảng cách $3R_S$. Khi khoảng cách lớn hơn thì các quỹ đạo tròn mới ổn định. Quanh hố đen, không có quỹ đạo elliptic; quỹ đạo là đường rosetta tương ứng như trong Hình 119. Những đường như vậy cho ta thấy sự dịch chuyển tuyệt mỹ của điểm cận tinh.

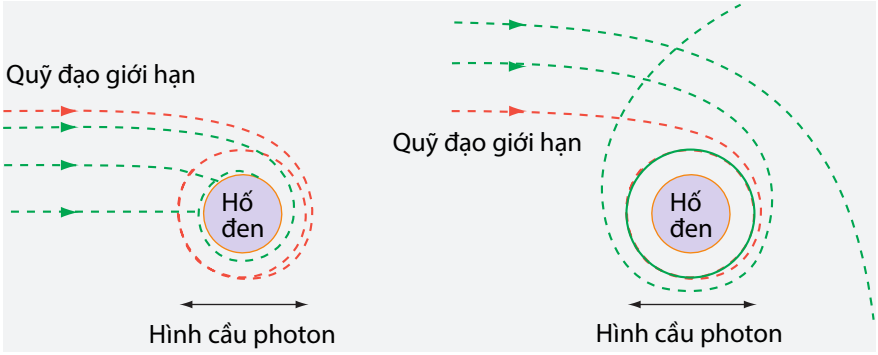
Chú ý là hàm thế quanh hố đen không khác nhiều với $1/r$ đối với khoảng cách lớn
Câu đố 363 e hơn 15 lần bán kính Schwarzschild. Đối với hố đen có khối lượng cỡ Mặt trời, khoảng

* Đối với những quỹ đạo như vậy, định luật Kepler liên kết khoảng cách trung bình và chu kỳ quay

$$\frac{GMt^3}{(2\pi)^2} = r^3 \tag{275}$$

Câu đố 361 ny vẫn còn đúng, miễn là ta sử dụng thời gian riêng và bán kính do một quan sát viên ở xa đo được.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 120 Chuyển động của ánh sáng đi gần một hố đen không quay.

cách đó là 42 km kể từ tâm của nó; do đó ta không thể thấy sự khác biệt gì trong quỹ đạo của Trái đất quanh Mặt trời.

Ta đã nói nhiều lần trong cuộc thám hiểm rằng lực hấp dẫn được đặc trưng bằng hiệu ứng thuỷ triều của nó. Về mặt này hố đen cho thấy các tính chất cực hạn. Nếu một đám mây bụi rơi vào trong hố đen, kích thước của đám mây tăng lên khi nó rơi cho đến khi đám mây bao trùm cả chân trời. Đúng ra thì kết quả này chỉ giá trị đối với các vật linh hoạt. Tính chất đó sẽ trở nên quan trọng khi sau này ta bàn về kích thước của các hạt sơ cấp.

Đối với các vật rơi từ vô cực, tình trạng của chúng lúc gần hố đen thú vị hơn nhiều. Dĩ nhiên không có quỹ đạo hyperbolic, mà chỉ có các quỹ đạo tương tự hyperbol đối với các vật đi ngang qua đủ xa. Nhưng đối với các tham số va chạm nhỏ nhưng không quá nhỏ, một vật sẽ chuyển động nhiều vòng quanh hố đen trước khi bay đi tiếp. Số vòng sẽ tăng lên vượt qua mọi giới hạn cùng với sự giảm tham số va chạm cho tới khi đạt tới một giá trị mà vật sẽ bị bắt vào một quỹ đạo bán kính $2R$, như ta thấy trong Hình 119. Nói cách khác, quỹ đạo này sẽ *bắt* các vật đang đi đến nếu chúng đi gần dưới một góc tới hạn nào đó. Để so sánh, hãy nhớ rằng trong Thuyết hấp dẫn vạn vật không bao giờ có sự bắt giữ này. Với các tham số va chạm nhỏ hơn, hố đen nuốt các vật đi tới. Trong cả hai trường hợp, bắt giữ hay đi lệch, một vật có thể chuyển động nhiều vòng quanh hố đen, trong khi trong Thuyết hấp dẫn vạn vật thì vật không đi hơn *nửa* vòng.

Câu đố 364 ny

Tuy vậy những quỹ đạo trông buồn cười nhất là những quỹ đạo tương ứng với trường hợp parabolic của Thuyết vạn vật hấp dẫn. (Đây là điều quan tâm không thực tế vì chúng có xác suất xảy ra là 0.) Tóm lại, Thuyết tương đối thay đổi một cách mạnh mẽ các chuyển động do lực hấp dẫn.

Quanh các hố đen *quay*, quỹ đạo của chất điểm còn phức tạp hơn các quỹ đạo vẽ trong Hình 119; đối với các chuyển động bị giới hạn thí dụ như ellipse thì không còn ở trong một mặt phẳng – do hiệu ứng Thirring–Lense – nên các quỹ đạo trở nên cực kỳ rắc rối trong không gian 3 chiều quanh hố đen.

Đối với *ánh sáng* đi ngang qua một hố đen, quỹ đạo là những đường thú vị như ta thấy trong Hình 120. Không có sự khác biệt định tính trong trường hợp các hạt nhanh. Đối với hố đen không quay, quỹ đạo hiển nhiên nằm trong một mặt phẳng. Dĩ nhiên là nếu ánh sáng đi đủ gần, nó có thể bị uốn cong nhiều, cũng như bị tóm lấy. Ánh sáng cũng có thể đi một hay nhiều vòng quanh hố đen trước khi đi luôn hay bị tóm lại. Giới

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

hạn giữa 2 trường hợp là quỹ đạo trong đó ánh sáng chuyển động tròn quanh một hố đen, ở khoảng cách $3R/2$. Nếu ta được đặt vào quỹ đạo đó, ta sẽ thấy phía sau đầu của mình khi nhìn về phía trước! Tuy vậy, quỹ đạo này không bền. Mặt chứa tất cả các quỹ đạo nằm trong một quỹ đạo tròn được gọi là *hình cầu photon*. Như vậy hình cầu photon chia các quỹ đạo làm hai, phần bị tóm lại và phần hướng tới vô cực. Nên nhớ rằng không có quỹ đạo *bền* đối với ánh sáng quanh hố đen. Có một đường rosetta nào để ánh sáng đi quanh hố đen không?

Câu đố 365 ny

Câu đố 366 ny

Đối với ánh sáng đi quanh một hố đen *quay*, quỹ đạo phức tạp hơn nhiều. Trong mặt phẳng xích đạo có 2 quỹ đạo ánh sáng tròn khả hữu: một nhỏ hơn theo hướng quay và một lớn hơn theo hướng ngược lại.

Câu đố 367 ny

Đối với hố đen *tích điện*, quỹ đạo rơi của các hạt mang điện phức tạp hơn rất nhiều. Cần tính đến các điện trường tuyến. Nhiều hiệu ứng hấp dẫn xuất hiện mà không tương ứng với Điện từ học thông thường, giống như các hiệu ứng tương tự với phiên bản điện của hiệu ứng Meissner. Hành trạng của các quỹ đạo như vậy vẫn còn là một lĩnh vực nghiên cứu sôi động trong Thuyết tương đối tổng quát.

Hố đen không có tóc

Hố đen được đặc trưng như thế nào? Hoá ra là mọi tính chất của hố đen đều kèm theo các đại lượng cơ bản đặc trưng cho chúng, cụ thể là khối lượng M, moment động lượng J và điện tích Q.* Mọi tính chất khác – như kích thước, hình dạng, màu sắc, từ trường – được xác định một cách duy nhất nhờ các đặc trưng này. ** Dường như khi dùng sự tương tự đầy màu sắc của Wheeler người ta có thể suy ra mọi đặc điểm của một người phụ nữ từ kích thước, vòng eo và chiều cao của cô ta. Các vật lý gia cũng nói rằng hố đen 'không có tóc', với ý nghĩa là hố đen (cổ điển) không có một bậc tự do nào khác. Phát biểu này cũng xuất phát từ Wheeler.*** Điều này đã được Israel, Carter, Robinson và Mazur chứng minh; họ đã chứng tỏ rằng đối với một khối lượng, moment động lượng và điện tích đã cho, chỉ có *một* hố đen khả hữu. (Tuy vậy, định lý duy nhất sẽ sai nếu hố đen có số lượng tử hạt nhân, như các loại nhược tích hay cường tích.)

Xem 265
Xem 266

Nói cách khác, một hố đen độc lập với cách hình thành và chất liệu tạo nên nó. Tất cả các hố đen đều có cùng cấu tạo hay đúng hơn chúng không có cấu tạo gì cả.

Khối lượng M của một hố đen không bị Thuyết tương đối tổng quát ràng buộc điều gì. Nó có thể nhỏ như khối lượng của một hạt vi mô hay có khối lượng lớn bằng hàng triệu lần khối lượng Mặt trời. Nhưng đối với moment động lượng J và điện tích Q của chúng thì lại khác. Một hố đen quay có moment động lượng khả hữu và điện/từ tích khả

* Sự hiện hữu của 3 đặc trưng cơ bản làm ta nhớ về các hạt. Ta sẽ khám phá nhiều hơn về mối liên hệ giữa hố đen và các hạt trong phần sau cùng của cuộc thám hiểm.

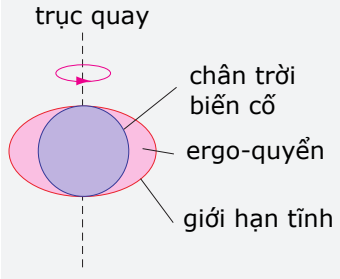
** Chủ yếu vì lý do tiếp thị, hố đen trung hoà về điện và không quay thường được gọi là *hố* đen Schwarzschild; hố đen quay và không mang điện thường được gọi là *hố* đen Kerr, theo tên Roy Kerr, người khám phá ra lời giải tương ứng của phương trình trường của Einstein năm 1963. Hố đen tích điện nhưng không quay thường được gọi là *hố đen Reissner–Nordström*, theo tên vật lý gia Đức Hans Reissner và vật lý gia Phần Lan Gunnar Nordström. Trường hợp tổng quát, hố đen tích điện và quay, đôi khi được đặt tên là hố đen Kerr và Newman.

Quyển VI, trang 148
Xem 263
Xem 264

*** Wheeler cũng tự nhận rằng ông đã lấy cảm hứng từ việc khó phân biệt giữa những người đàn ông hói đầu; tuy vậy, có một điều rõ ràng là Feynman, Ruffini và cộng sự đã có một hình ảnh cơ thể học trọn vẹn trong tâm trí khi họ phát biểu rằng 'hố đen, khác với những người chung quanh, không có tóc.'

Xem 142

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 121 Ergo-quyển của một hố đen quay.

hữu cực đại.* Moment động lượng bị giới hạn vì chu vi của hố đen không thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng. Điện tích cũng bị giới hạn. Hai giới hạn này không độc lập mà liên hệ với nhau theo hệ thức

Câu đố 368 ny

$$\left(\frac{J}{cM}\right)^2 + \frac{GQ^2}{4\pi\varepsilon_0 c^4} \leqslant \left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 \tag{276}$$

Điều này suy ra từ giới hạn của tỷ số chiều dài/khối lượng làm nền tảng cho Thuyết tương đối tổng quát. Hố đen quay thể hiện giới hạn (276) được gọi là hố đen *cực hạn*. Giới hạn (276) dẫn tới việc bán kính chân trời của hố đen tổng quát được cho bởi công thức

Câu đố 369 ny

$$r_\mathrm{h} = \frac{GM}{c^2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{J^2c^2}{M^4G^2} - \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 GM^2}}\right) \tag{277}$$

Thí dụ như đối với hố đen khối lượng bằng khối lượng Mặt trời và moment động lượng thì bằng phân nửa của Mặt trời, cụ thể là $2 \cdot 10^{30}$ kg và $0.45 \cdot 10^{42}$ kg m^2/s, giới hạn của điện tích sẽ vào khoảng $1.4 \cdot 10^{20}$ C.

Làm thế nào người ta phân biệt được hai loại hố đen quay và không quay? Trước hết ta dùng *hình dạng*. Hố đen không quay phải là hình cầu (bất cứ cái gì không phải hình cầu đều phát xạ dưới dạng sóng hấp dẫn) và hố đen quay có hình dạng hơi dẹt, được xác định duy nhất nhờ moment động lượng. Vì quay nên mặt có lực hấp dẫn vô hạn hay độ dịch chuyển đỏ vô hạn của chúng, được gọi là *giới hạn tĩnh*, khác với chân trời (bên ngoài) của chúng, như được minh hoạ trong Hình 121. Vùng ở giữa được gọi là *ergo-quyển*; đây là một định danh sai vì nó *không có* hình cầu. (Nó được gọi như vậy vì, như ta sẽ thấy sau đây, người ta có thể dùng nó để rút năng lượng ra khỏi hố đen.) Chuyển động của các vật thể bên trong ergo-quyển khá phức tạp. Chỉ cần nói rằng các hố đen quay sẽ kéo những vật đang rơi đi vào một quỹ đạo bao quanh chúng; điều này ngược với các hố đen không quay, sẽ nuốt các vật rơi vào. Nói cách khác, các hố đen quay không thực sự là 'hố' mà đúng hơn là các xoáy.

Xem 267

Sự phân biệt giữa hai loại hố đen cũng có trong diện tích mặt chân trời. Diện tích mặt (chân trời) A của một hố đen không quay và không mang điện thì hiển nhiên là sẽ liên

* Sau này ta sẽ nói thêm về từ tích giả định. Trong các hố đen, nó được đưa vào các biểu thức giống như một loại tích bổ sung cho những nơi có điện tích xuất hiện.

Quyển III, trang 54

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 370 e hệ với khối lượng M theo công thức

$$A = \frac{16\pi G^2}{c^4} M^2 \tag{278}$$

Hệ thức giữa diện tích mặt và khối lượng của một hố đen quay và tích điện thì phức tạp hơn: công thức sẽ là

$$A = \frac{8\pi G^2}{c^4} M^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{J^2 c^2}{M^4 G^2} - \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 G M^2}} \right) \tag{279}$$

Trong đó J là moment động lượng và Q là điện tích. Đúng ra thì hệ thức

$$A = \frac{8\pi G}{c^2} M r_\mathrm{h} \tag{280}$$

đúng đối với *mọi* hố đen. Điều hiển nhiên là trong trường hợp hố đen tích điện, chuyển động quay sẽ sinh ra một từ trường bao quanh nó. Điều này khác với hố đen không quay nên không thể có từ trường.

Hố đen là nguồn năng lượng

Người ta có thể trích xuất năng lượng từ hố đen không? Roger Penrose đã khám phá ra
Xem 268 là điều này có thể được nếu là hố đen *quay*. Một hoả tiễn bay quanh một hố đen quay trong ergo-quyển của nó có thể mở máy và sẽ lao vào không gian với một vận tốc khủng khiếp, lớn hơn vận tốc do máy đã tạo ra rất nhiều. Đúng ra thì người ta đã sử dụng một hiệu ứng tương tự cho các hoả tiễn trên Trái đất và đó là lý do quỹ đạo của các vệ tinh trên Trái đất có cùng hướng; người ta sẽ cần nhiều nhiên liệu hơn để làm cho chúng chuyển sang hướng khác.*

Năng lượng do hoả tiễn lấy đi của hố đen sẽ làm cho hố đen quay chậm lại và mất một phần khối lượng; mặt khác, có một phần khối lượng gia tăng do khí được hút vào trong hố đen. Lượng gia tăng này luôn lớn hơn hay bằng lượng mất đi do chuyển động quay chậm lại. Điều tốt nhất mà người ta có thể làm là mở máy đúng vào lúc ở chân trời; lúc đó diện tích chân trời của hố đen vẫn không đổi và chỉ có chuyển động quay của nó là chậm lại.**

Kết quả là đối với một hố đen trung hoà *quay* với moment động lượng khả hữu cực đại thì ta có thể rút ra $1 - 1/\sqrt{2} = 29.3\,\%$ năng lượng toàn phần của nó thông qua quá
Câu đố 371 ny trình Penrose. Đối với các hố đen quay chậm hơn, năng lượng thu được hiển nhiên nhỏ hơn.

Đối với hố đen *tích điện*, quá trình trích xuất năng lượng không thuận nghịch như

* Và điều đó sẽ nguy hiểm vô cùng vì bất kỳ một vật nhỏ nào cũng có thể chạm vào dòng vệ tinh đi ngược lại với vận tốc khoảng 15.8 km/s và sẽ biến các vật đó thành các đạn tử nguy hiểm. Đúng ra thì bất kỳ một thế lực nào muốn phá huỷ các vệ tinh của kẻ thù thì chỉ đơn giản phải làm một việc là chất đầy các bu-lông và đai ốc lên một vệ tinh, cho nó bay vào không gian theo hướng khác, rồi tung các bu-lông thành một đám mây. Nó sẽ làm cho không còn vệ tinh nào trong các thập niên sắp tới.

** Người ta cũng có thể trích xuất năng lượng từ hố đen quay nhờ bức xạ hấp dẫn.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 372 ny

vậy cũng có thể xảy ra. Bạn đã nghĩ ra cách làm chưa? Sử dụng biểu thức (276), ta thấy rằng có tới 50 % khối lượng của một hố đen không quay có thể là do điện tích của nó.

Câu đố 373 ny

Đúng ra trong phần lượng tử của cuộc thám hiểm, ta sẽ gặp một quá trình trích xuất năng lượng mà hình như thiên nhiên sử dụng rất nhiều.

Quyển V, trang 153

Xem 269

Quá trình Penrose cho phép ta xác định cách mà moment động lượng và điện tích làm tăng khối lượng của hố đen. Kết quả là ta được hệ thức năng-khối lượng nổi tiếng sau đây

$$M^2 = \frac{E^2}{c^4} = \left(m_{\text{irr}} + \frac{Q^2}{16\pi\varepsilon_0 G m_{\text{irr}}} \right)^2 + \frac{J^2}{4m_{\text{irr}}^2}\frac{c^2}{G^2} = \left(m_{\text{irr}} + \frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_0 \rho_{\text{irr}}} \right)^2 + \frac{J^2}{\rho_{\text{irr}}^2}\frac{1}{c^2} \quad (281)$$

cho thấy cách mà năng lượng quay và năng lượng tĩnh điện chuyển thành khối lượng của hố đen. Trong biểu thức, m_{irr} là *khối lượng bất khả quy* được xác định như sau

$$m_{\text{irr}}^2 = \frac{A(M, Q=0, J=0)}{16\pi}\frac{c^4}{G^2} = \left(\rho_{\text{irr}}\frac{c^2}{2G} \right)^2 \quad (282)$$

và ρ_{irr} là *bán kính bất khả quy*.

Việc nghiên cứu kỹ càng cho ta thấy rằng không có quá trình nào làm *giảm* diện tích chân trời cũng như khối lượng hay bán kính bất khả quy của hố đen. Người ta đã kiểm chứng điều này bằng nhiều cách mà người ta có thể tưởng tượng ra được. Thí dụ như khi hai hố đen hợp nhất, thì diện tích toàn phần tăng lên. Người ta gọi những quá trình giữ cho diện tích và năng lượng của hố đen không đổi là quá trình *thuận nghịch*, còn các quá trình khác là quá trình *bất thuận nghịch*. Đúng ra diện tích của hố đen hành xử giống như *entropy* của một hệ đóng: nó không bao giờ giảm. Và việc diện tích được xem như *là* entropy đã được Jacob Bekenstein nói đến lần đầu tiên năm 1970. Ông cho rằng chỉ khi entropy được gán cho một hố đen, thì người ta mới có thể hiểu được nơi thu thập entropy của tất cả chất liệu rơi vào hố đen.

Xem 270

Entropy của hố đen là một hàm của khối lượng, moment động lượng và điện tích của hố đen. Bạn có thể kiểm chứng lý luận của Bekenstein khi cho rằng entropy S tỷ lệ với diện tích chân trời. Sau này người ta đã dùng Thuyết lượng tử để tìm được

Câu đố 374 ny

$$S = \frac{A}{4}\frac{kc^3}{\hbar G} = \frac{A\,k}{4\,l_{\text{Pl}}^2}\,. \quad (283)$$

Không thể tìm được hệ thức nổi tiếng này nếu ta không dùng Thuyết lượng tử, vì entropy, cũng giống như các biến động lực khác, nếu chỉ một mình vật lý cổ điển thì không thể nào xác định được giá trị tuyệt đối của nó. Trong cuộc thám hiểm, ta sẽ bàn về biểu thức này sau.

Quyển V, trang 154

Nếu hố đen có entropy, chúng cũng phải có nhiệt độ. Nếu chúng có nhiệt độ, chúng phải phát sáng. Nếu vậy hố đen không thể đen! Điều này đã được Stephen Hawking chứng minh năm 1974 với các tính toán cực kỳ phức tạp. Tuy vậy, người ta đã có thể suy ra điều này trong những năm 1930 bằng một thí nghiệm tưởng tượng đơn giản mà ta sẽ trình bày sau đây. Bạn có thể suy nghĩ về vấn đề này và tìm hiểu những hệ quả kỳ dị có thể xảy ra nếu hố đen không có entropy. Bức xạ của thể đen là một cơ chế trích

Quyển V, trang 147

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 8 Các loại hố đen.

Loại hố đen	Khối lượng	Điện tích	Moment động lượng	Bằng chứng thực nghiệm
Hố đen siêu trọng	10^5 tới $10^{11}\,m_\odot$	chưa biết	chưa biết	quỹ đạo của sao lân cận, phát xạ ánh sáng do sự bồi tụ
Hố đen trung bình	50 tới $10^5\,m_\odot$	chưa biết	chưa biết	sự phát xạ tia X của vật chất đang bồi tụ
Hố đen sao	1 tới $50\,m_\odot$	chưa biết	chưa biết	sự phát xạ tia X từ bạn đồng hành trong sao đôi
Hố đen nguyên thuỷ	dưới $1\,m_\odot$	chưa biết	chưa biết	đến nay chưa được phát hiện; việc nghiên cứu vẫn tiếp tục
Hố đen nhỏ	dưới 1 g			không có; chỉ xuất hiện trong tiểu thuyết khoa học giả tưởng và trong tâm trí của những người lập dị

xuất năng lượng tuy nhỏ bé (lượng tử) nhưng sâu sắc và có thể áp dụng cho các hố đen không quay, không mang điện. Việc nối kết thú vị giữa các hố đen, Nhiệt động lực học và Thuyết lượng tử sẽ được trình bày trong các phần sắp tới. Bạn có thể tưởng tượng ra các cơ chế khác làm cho các hố đen phát sáng không?

Quyển V, trang 147

Sự hình thành và tìm kiếm hố đen

Hố đen được hình thành như thế nào? Hiện nay, người ta phân biệt ít nhất 3 cơ chế hình thành; câu hỏi này vẫn còn là để tài nghiên cứu nóng bỏng. Trước hết, hố đen có thể đã hình thành trong những giai đoạn đầu của vũ trụ. Những *hố đen nguyên thuỷ* này có thể đã phát triển nhờ *sự bồi tụ*, nghĩa là, nhờ sự nuốt vật chất và bức xạ lân cận, hay biến mất nhờ một trong những cơ chế sẽ được nghiên cứu sau.

Xem 271

Trong những hố đen *đã được quan sát* cho đến nay, các hố đen *siêu trọng* đã được người ta tìm thấy ở tâm của mọi thiên hà. Chúng có khối lượng điển hình trong phạm vi từ 10^6 tới 10^9 khối lượng Mặt trời và chứa khoảng 0.5 % khối lượng một thiên hà. Thí dụ như hố đen ở tâm Ngân Hà có khoảng 2.6 triệu khối lượng Mặt trời, trong khi hố đen ở tâm thiên hà M87 có khối lượng là 6400 triệu khối lượng Mặt trời. Các hố đen siêu trọng hiện hữu ở tâm của hầu hết các thiên hà và hình như có liên hệ với sự hình thành của chính thiên hà. Các hố đen siêu trọng được giả sử là đã hình thành nhờ sự suy sụp của các đám mây bụi lớn và đã phát triển nhờ sự bồi tụ liên tục của vật chất. Ý tưởng sau cùng hàm ý rằng việc các hố đen này bồi tụ nhiều vật chất trong giai đoạn sơ khai của chúng; vật chất rơi vào hố đen làm phát xạ nhiều bức xạ mà ta có thể dùng để giải thích độ sáng của quasar. Sau đó, tốc độ của sự bồi tụ giảm dần và các thiên hà Seyfert ít hùng vĩ hơn hình thành. Có thể sự có mặt của hố đen siêu trọng ở tâm của thiên hà đã kích khởi sự hình thành các ngôi sao. Sau đó, những hố đen siêu trọng này hầu như

Quyển V, trang 150

Xem 259

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

ngủ đông hay im lìm giống như một hố đen ở tâm của Ngân hà.

Xem 272 Mặt khác, hố đen cũng có thể hình thành khi các sao nặng già *suy sụp*. Người ta đã ước lượng rằng khi một sao với khối lượng ít nhất là 3 lần khối lượng Mặt trời cháy hết nhiên liệu thì phần vật chất còn lại sẽ suy sụp thành một hố đen. Những hố đen *sao* như vậy có khối lượng từ 1 tới 100 lần khối lượng Mặt trời; chúng cũng có thể tiếp tục phát triển nhờ sự bồi tụ xảy ra sau đó. Trường hợp này đã cho ta một ứng viên hố đen đầu Xem 259 tiên, Cygnus X-1, được khám phá năm 1971. Người ta đã biết trên một tá hố đen sao có khối lượng từ 4 tới 20 lần khối lượng Mặt trời nằm rải rác quanh Ngân Hà; tất cả đều được khám phá sau năm 1971.

Các cuộc đo đạc gần đây cũng cho thấy sự hiện hữu của các hố đen *trung bình*, với khối lượng khoảng 1000 khối lượng Mặt trời; ta vẫn chưa biết cơ chế và điều kiện hình thành các hố đen này. Ứng viên đầu tiên được tìm thấy năm 2000. Các thiên văn gia cũng đang nghiên cứu về hành trạng của các hố đen trong các đám sao cũng như cách mà chúng thường va chạm với nhau. Với một số điều kiện nào đó hai hố đen sẽ hợp nhất với nhau. Bất kể kết quả là gì, sự va chạm của hố đen sẽ phát ra các sóng hấp dẫn mạnh. Đúng ra thì tín hiệu này được các máy dò sóng hấp dẫn đang vận hành trên khắp thế Trang 186 giới tìm kiếm.

Sự tìm kiếm các hố đen là một môn thể thao phổ biến giữa các nhà vật lý thiên văn. Về mặt nhận thức, cách đơn giản nhất để tìm ra chúng là tìm các trường hấp dẫn mạnh. Nhưng người ta chỉ có thể đo trực tiếp trường hấp dẫn của các sao đôi và tín hiệu mạnh Xem 273 nhất đã đo được là 30 % của giá trị cực đại theo lý thuyết. Một cách hiển nhiên nữa là tìm các thấu kính hấp dẫn mạnh và cố gắng kiếm một tỷ số khối lượng/kích thước chỉ tới một hố đen; tuy vậy, chưa có hố đen nào được tìm thấy bằng cách này. Còn một cách nữa là nhìn vào động lực học của các sao gần tâm các thiên hà. Đo chuyển động của chúng, người ta có thể suy ra khối lượng của vật thể mà chúng bay quanh nó. Phương pháp tìm hố đen được ưa chuộng nhất là tìm các nguồn điểm phát ra tia X cực mạnh bằng cách sử dụng các máy dò đặt trên khinh khí cầu hay trên vệ tinh bay trong không gian. Nếu biết khoảng cách tới các vật đó, ta có thể suy ra độ sáng tuyệt đối của nó; nếu độ sáng trên một giới hạn nào đó, nó phải là một hố đen, vì vật chất thông thường không thể sinh ra một lượng ánh sáng vô hạn. Phương pháp này được hoàn thiện nhờ sự quan sát trực tiếp năng lượng biến mất vào chân trời. Đúng ra thì gần đây người ta đã có thể Xem 274 quan sát thấy sự biến mất này.

Sau cùng, người ta nghi ngờ rằng các hố đen nhỏ có thể đã được tìm thấy trong các quầng của thiên hà và tạo nên một phần đáng kể của vật chất tối.

Tóm lại, người ta mong chờ một sự gia tăng đột ngột các khám phá về hố đen trong những năm sắp tới.

Các kỳ dị

Khi giải các phương trình của Thuyết tương đối tổng quát với các điều kiện ban đầu khác nhau, người ta thấy rằng một đám mây bụi thường suy sụp thành một *kỳ dị*, nghĩa là thành một điểm có mật độ vô hạn. Ta cũng có kết luận tương tự khi lần ngược theo thời gian tiến hoá của vũ trụ. Thật vậy, Roger Penrose và Stephen Hawking đã chứng minh nhiều định lý toán học về sự cần thiết của các kỳ dị đối với nhiều phân bố vật chất cổ điển. Các định lý này chỉ cần giả sử có sự liên tục của không-thời gian và vài điều Xem 275 kiện yếu hơn cho vật chất chứa trong nó. Các định lý này phát biểu rằng trong các hệ

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

giãn nở như vũ trụ hiện nay, hay trong các hệ suy sụp như hố đen khi hình thành, các biến cố với mật độ vật chất vô hạn sẽ hiện hữu đâu đó trong quá khứ hay trong tương lai một cách tương ứng. Kết quả này thường được tóm tắt lại bằng cách nói rằng việc vũ trụ bắt đầu từ một kỳ dị đã được chứng minh bằng toán học.

Đúng ra thì sự dẫn xuất từ những kỳ dị ban đầu đã tạo ra một giả định, ẩn nhưng mạnh mẽ, về vật chất: các hạt bụi không có kích thước riêng hay chúng là các chất điểm. Nói cách khác, người ta đã giả sử rằng các hạt bụi chính là các kỳ dị. Chỉ với giả định này người ta có thể suy ra sự hiện hữu của các kỳ dị ban đầu hoặc cuối cùng. Tuy vậy, ta đã thấy rằng nguyên lý lực cực đại có thể được phát biểu lại thành nguyên lý kích thước cực tiểu của vật chất. Như vậy lý luận cho rằng phải có một kỳ dị ban đầu của vũ trụ thành ra có chỗ khiếm khuyết! Tình hình thực nghiệm thì cho thấy rõ ràng là có bằng chứng không thể bác bỏ, về một trạng thái sơ khai của vũ trụ rất nóng và rất nặng; nhưng *không có* bằng chứng về nhiệt độ hay mật độ *vô hạn*.

Các nhà nghiên cứu thiên về toán học phân biệt hai loại kỳ dị: kỳ dị với một chân trời – còn gọi là kỳ dị *có y phục* – và kỳ dị không có chân trời, còn gọi là kỳ dị *trần trụi*. Kỳ dị trần trụi thì đặc biệt kỳ lạ: thí dụ như một bàn chải đánh răng có thể rơi vào nó và biến mất không để lại dấu vết gì. Vì các phương trình trường bất biến đối với thời gian, nên ta có thể mong chờ lúc này hay lúc khác kỳ dị trần trụi sẽ trả lại bàn chải đánh răng.

Câu đố 375 ny (Bạn có thể giải thích lý do tại sao kỳ dị có y phục lại ít nguy hiểm hơn không?)

Để tránh việc bàn chải xuất hiện một cách tự phát, trong nhiều năm qua đã có nhiều người cố gắng khám phá các nguyên lý lý thuyết cấm sự hiện hữu của kỳ dị trần trụi. Hoá ra là có hai nguyên lý như vậy. Nguyên lý đầu là nguyên lý lực hay công suất cực đại mà ta đã gặp ở trên. Lực cực đại sẽ hàm ý không có giá trị lực vô hạn trong thiên nhiên; nói cách khác, không có kỳ dị trần trụi trong thiên nhiên. Phát biểu này thường được gọi là *sự kiểm duyệt vũ trụ*. Điều hiển nhiên là nếu Thuyết tương đối tổng quát mô tả thiên nhiên không đúng, kỳ dị trần trụi vẫn *có thể* xuất hiện. Sự kiểm duyệt vũ trụ vẫn còn được bàn luận trong các đề tài nghiên cứu. Việc tìm kiếm bằng chứng thực nghiệm cho các kỳ dị trần trụi chưa thành công; đúng ra thì cũng không có quan sát nào dành cho những kỳ dị *có y phục*. Nhưng lý thuyết về các kỳ dị 'có y phục' cũng rất yếu. Vì không có cách tương tác với những gì sau chân trời, người ta không có gì để bàn về các điều xảy ra ở đó. Không có cách chứng minh là phía sau chân trời có một kỳ dị. Kỳ dị có y phục là đề tài của niềm tin chứ không phải của vật lý.

Xem 276

Thật ra có một nguyên lý khác ngăn sự kỳ dị, cụ thể là *Thuyết lượng tử*. Khi ta gặp một tiên đoán về một giá trị vô hạn là ta đã mở rộng sự mô tả thiên nhiên sang một lĩnh vực mà ta không nhận thức được. Khi nói về các kỳ dị, ta phải giả sử rằng Thuyết tương đối thuần tuý có khả năng áp dụng vào các khoảng cách rất nhỏ và năng lượng rất lớn. Như ta sẽ thấy rõ trong quyển cuối cùng, thiên nhiên không cho phép điều này: sự tổ hợp Thuyết tương đối tổng quát và Thuyết lượng tử chứng tỏ rằng sẽ là vô nghĩa khi ta nói về 'các kỳ dị', cũng như về những gì xảy ra 'bên trong' chân trời của một hố đen. Lý do là các giá trị không gian và thời gian vô cùng nhỏ đó không hiện hữu trong thiên nhiên.

Quyển VI, trang 102

Quyển VI, trang 65

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Các câu đố vui và lạ về hố đen

> Tiens, les trous noirs. C'est troublant.*
>
> Vô danh

Hố đen có nhiều tính chất phản trực giác. Đầu tiên ta sẽ tập trung vào các hiệu ứng cổ điển và tạm gác các hiệu ứng lượng tử.

Quyển V, trang 156

* *

Theo Thuyết hấp dẫn vạn vật, ánh sáng có thể leo lên mặt của một hố đen và rơi xuống trở lại. Trong Thuyết tương đối tổng quát, hố đen không cho phép ánh sáng leo lên một chút nào cả; nó chỉ có thể rơi xuống. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Câu đố 376 ny

* *

Điều gì xảy ra cho một người rơi vào hố đen? Một quan sát viên bên ngoài có câu trả lời rõ ràng: người rơi *không bao giờ* đến nơi vì người đó cần một thời gian vô hạn để tới chân trời. Bạn có thể khẳng định kết quả này không? Tuy vậy người rơi đến được chân trời trong thời gian riêng *hữu hạn* của mình. Bạn có thể tính nó không?

Câu đố 377 ny

Câu đố 378 ny

Kết quả này đáng ngạc nhiên vì điều đó có nghĩa là đối với một quan sát viên bên ngoài, trong một vũ trụ có tuổi *hữu hạn*, hố đen chưa thể hình thành! Trong điều kiện tốt nhất, ta chỉ có thể quan sát được các hệ là các hố đen đang nhộn nhịp hình thành. Theo một nghĩa nào đó, ta có thể đúng khi nói rằng hố đen không hiện hữu. Hố đen có thể đã hiện hữu ngay từ đầu trong cấu trúc không-thời gian. Mặt khác, sau này ta sẽ thấy lý do tại sao điều này không thể xảy ra. Tóm lại, điều quan trọng là ta phải nhớ rằng ý tưởng về hố đen là một khái niệm giới hạn, nhưng thông thường thì các khái niệm giới hạn (như nguồn nhiệt động lực hay nhiệt độ) lại là các mô tả thiên nhiên rất hữu ích. Độc lập với vấn đề sau cùng này, ta có thể khẳng định rằng trong thiên nhiên, tỷ số chiều dài/khối lượng luôn luôn thoả bất đẳng thức

$$\frac{L}{M} \geqslant \frac{4G}{c^2} \,. \tag{284}$$

* *

Điều thú vị là *kích thước* của một người rơi vào hố đen được người đang rơi và người bên ngoài cảm nhận khác nhau rất nhiều. Nếu hố đen lớn, quan sát viên rơi vào sẽ không cảm thấy gì, vì hiệu ứng thuỷ triều nhỏ. Quan sát viên bên ngoài thì sửng sốt vì thấy người đang rơi *bị kéo dài* trên cả chân trời của hố đen. Một vật thể *đang rơi, bị kéo dài, che phủ cả chân trời.* Bạn có thể giải thích sự kiện này, thí dụ như bằng cách dùng giới hạn của tỷ số chiều dài/khối lượng không?

Câu đố 379 ny

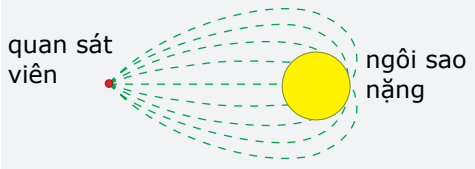
Kết quả lạ lùng này sẽ rất quan trọng trong cuộc thám hiểm của chúng ta sau này và dẫn tới các kết quả quan trọng về kích thước của chất điểm.

* *

Một quan sát viên ở gần một hố đen (không quay), hay đúng ra ở gần một vật bất kỳ nhỏ hơn 7/4 lần bán kính hấp dẫn của nó, có thể thấy trọn vẹn phía *sau* của vật đó, như trình

* Không thể dịch được.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 122 Chuyển động của một số tia sáng từ một vật nặng tới quan sát viên.

bày trong Hình 122. Bạn có thể tưởng tượng ra hình ảnh đó trông như thế nào không?

Câu đố 380 ny Nên nhớ rằng thêm vào những đường đã thấy trong Hình 122, ánh sáng cũng có thể đi vòng quanh hố đen nhiều lần trước khi đến quan sát viên! Do đó, một quan sát viên như vậy sẽ thấy vô số ảnh của hố đen. Công thức của kích thước góc của ảnh trong cùng đã

Trang 161 được cho ở trên.

Đúng ra, tác dụng của lực hấp dẫn làm cho ta có thể thấy hơn nửa bề mặt của một vật hình cầu *bất kỳ*. Tuy vậy trong đời sống hằng ngày tác dụng này nhỏ: thí dụ việc uốn cong tia sáng cho phép ta thấy khoảng 50.0002 % của bề mặt Mặt trời.

* *

Một chất điểm bên trong quỹ đạo tròn nhỏ nhất của ánh sáng bao quanh một hố đen, ở khoảng cách $3R/2$, không thể ở trong vòng tròn vì trong miền đó sẽ có vài điều kỳ lạ xảy ra. Trong đời sống hằng ngày, một vật đi vòng quanh một vật khác luôn cảm thấy bị đẩy ra ngoài; hiệu ứng ly tâm này bắt nguồn từ quán tính của vật. Nhưng ở khoảng cách nhỏ hơn $3R/2$, vật chuyển động tròn lại bị đẩy *vào trong* do quán tính của nó. Có nhiều cách

Xem 277 để giải thích hiệu ứng nghịch lý này. Cách đơn giản nhất là để ý , khi gần một hố đen, lực hấp dẫn tăng lên nhanh hơn lực ly tâm và bạn có thể tự kiểm tra điều này. Chỉ có một hoả tiễn mở máy và lực đẩy hướng lên trời mới có thể bay quanh hố đen ở khoảng cách $3R/2$.

* *

Cũng cần hỏi thêm, làm cách nào lực hấp dẫn hay một điện trường đi ra ngoài một hố

Câu đố 381 s đen nếu không có tín hiệu hay năng lượng nào có thể rời xa chúng?

* *

Có *hố trắng* tức là hố đen mà thời gian bị đảo ngược, trong đó mọi vật trôi ra ngoài thay

Câu đố 382 ny vì đi vào một số miền bị giới nội hay không?

* *

Câu đố 383 ny Hãy chứng tỏ rằng hằng số vũ trụ Λ dẫn tới metric sau đây đối với một hố đen:

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} - \frac{\Lambda}{3}r^2\right)dt^2 - \frac{dr^2}{c^2 - \frac{2GM}{r} - \frac{\Lambda c^2}{3}r^2} - \frac{r^2}{c^2}d\varphi^2 \,. \qquad (285)$$

Nên nhớ rằng metric này không trở thành metric Minkowski đối với r lớn. Tuy vậy trong trường hợp Λ nhỏ, metric gần như phẳng đối với các giá trị của r thoả mãn $1/\sqrt{\Lambda} \gg r \gg 2GM/c^2$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Kết quả là định luật bình phương nghịch đảo cũng bị thay đổi:

$$a = -\frac{GM}{r^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} r \,. \tag{286}$$

Với các giá trị đã biết của hằng số vũ trụ, số hạng thứ nhì có thể bỏ qua bên trong Thái dương hệ.

* *

Trong Thuyết lượng tử, *tỷ số hồi chuyển từ* là một đại lượng quan trọng đối với một hệ tích điện quay bất kỳ. Tỷ số hồi chuyển từ của hố đen quay là bao nhiêu?

Câu đố 384 ny

* *

Một hố đen lớn, giống như tên gọi, có màu đen. Nhưng người ta vẫn có thể thấy nó. Nếu ta du hành hướng về phía nó trong một phi thuyền không gian, ta có thể ghi nhận rằng hố đen được một vòng sáng bao quanh, giống như một quầng sáng như đã thấy trong Hình 117. Vòng này ở một khoảng cách bằng bán kính của hình cầu photon là do các photon đến từ các vật sáng khác rồi đi quanh hố đen và sau cùng sau một hay nhiều vòng quay, kết thúc trong mắt của chúng ta. Bạn có thể khẳng định kết quả này không?

Câu đố 385 s

* *

Hố đen có bị co Lorentz hay không? Hố đen sẽ sáng hơn một chút. Đúng ra thì những hình ảnh do chúng tạo ra khá phức tạp, vì ánh sáng có thể chạy vòng quanh chúng vài lần trước khi tới mắt quan sát viên. Hơn nữa quan sát viên phải ở khá xa sao cho ảnh hưởng của sự uốn cong nhỏ đi. Phải tính đến mọi ảnh hưởng này; tuy vậy vấn đề vẫn còn một chút rắc rối. Lý do là khái niệm co Lorentz không có ý nghĩa trong Thuyết tương đối tổng quát, vì khó phân định chính xác so với lúc chưa co.

Câu đố 386 ny

* *

Có phải hố đen được tạo thành từ không gian hay vật chất không? Cả hai câu trả lời là phải! Bạn có thể khẳng định điều này không?

Câu đố 387 s

* *

Công suất là độ biến thiên năng lượng/thời gian. Thuyết tương đối tổng quát đưa ra giới hạn giá trị công suất là $P \leqslant c^5/4G$. Nói cách khác, không có máy nào trong thiên nhiên có thể cung cấp nhiều hơn $0.92 \cdot 10^{52}$ W hay $1.2 \cdot 10^{49}$ mã lực. Bạn có thể chứng minh hố đen là nơi giúp ta xác nhận điều này không?

Câu đố 388 e

* *

Hố đen sinh ra một số vấn đề trong lĩnh vực vi mô là nơi Thuyết lượng tử trấn giữ như Jürgen Ehlers đã chỉ ra. Thuyết lượng tử được xây dựng dựa trên chất điểm và chất điểm chuyển động trên đường thế giới *loại thời gian*. Nhưng theo Thuyết tương đối tổng quát, chất điểm có một kỳ dị trong chân trời hố đen của chúng và các kỳ dị luôn chuyển động trên những đường thế giới *loại không gian*. Hố đen vi mô tương phản với hố đen vĩ mô như vậy sẽ mâu thuẫn với Thuyết lượng tử.

Xem 278

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tóm tắt về hố đen

Hố đen là vật chất rơi tự do không ngừng. Nói cách khác, hố đen là một kiểu không gian bị uốn cong rất nhiều. Vì hố đen được xác định thông qua chân trời của chúng nên ta có thể xem chúng như một trường hợp giới hạn của hệ vật chất hay như trường hợp giới hạn của không gian rỗng bị uốn cong.

Hố đen thể hiện lực cực đại. Đối với khối lượng đã cho hố đen cũng thể hiện mật độ, độ đen và entropy cực đại. Hố đen làm lệch hướng, bắt giữ và phát ra vật chất và ánh sáng theo những cách thức đặc biệt.

Một câu đố – Vũ trụ có phải là một hố đen không?

Có thể nào chúng ta đang sống trong một hố đen hay không? Cả vũ trụ lẫn hố đen đều có chân trời. Điều thú vị là khoảng cách chân trời r_0 của vũ trụ thì vào khoảng

$$r_0 \approx 3ct_0 \approx 4 \cdot 10^{26}\,\mathrm{m} \tag{287}$$

và vật chất chứa trong nó thì cỡ

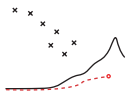
$$m_0 \approx \frac{4\pi}{3}\rho_o r_0^3 \quad \text{từ đó} \quad \frac{2Gm_0}{c^2} = 72\pi G\rho_0 c t_0^3 = 6 \cdot 10^{26}\,\mathrm{m} \tag{288}$$

với mật độ $3 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg/m^3}$. Như vậy ta có

$$r_0 \approx \frac{2Gm_0}{c^2}\,, \tag{289}$$

tương tự như hệ thức của hố đen $r_S = 2Gm/c^2$. Đây có phải là sự trùng hợp không? Không phải: mọi hệ thống có độ cong lớn thì ít nhiều gì cũng tuân theo hệ thức này. Nhưng như vậy chúng ta có đang rơi vào một hố đen khổng lồ không? Bạn có thể tự trả lời câu hỏi này.

Câu đố 389 s



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chương 10

Không gian có khác thời gian không?

> Tempori parce.**
>
> Seneca

Thời gian là chủ của chúng ta, đó là phát biểu ta thường nghe thấy. Không ai nói như vậy về không gian. Hiển nhiên là thời gian và không gian thông thường có khác nhau. Nhưng trong Thuyết tương đối tổng quát thì sự khác nhau giữa chúng là gì? Ta có cần chúng không? Những câu hỏi này thật đáng cho ta tìm hiểu.

Thuyết tương đối tổng quát cho rằng ta đang sống trong một không-thời gian (giả-Riemann) có độ cong thay đổi. Độ cong là một biến động lực và có liên hệ với sự phân bố và chuyển động của vật chất và năng lượng. Các phương trình trường mô tả chính xác mối quan hệ này. Tuy vậy, có một vấn đề cơ bản.

Các phương trình của Thuyết tương đối tổng quát thì bất biến với nhiều phép biến đổi *hoà trộn* các toạ độ x_0, x_1, x_2 và x_3. Thí dụ như phép biến đổi điểm quan sát

$$\begin{aligned} x'_0 &= x_0 + x_1 \\ x'_1 &= -x_0 + x_1 \\ x'_2 &= x_2 \\ x'_3 &= x_3 \end{aligned} \tag{290}$$

được sử dụng trong Thuyết tương đối tổng quát và không làm cho các phương trình trường thay đổi. Bạn có thể tìm các thí dụ khác về các phép biến đổi suy ra từ tính bất biến vi đồng phôi.

Câu đố 390 e

Phép biến đổi điểm quan sát hoà trộn không gian và thời gian dẫn tới hệ quả tương phản rõ ràng với đời sống hằng ngày: tính bất biến vi đồng phôi làm cho ta *không thể* phân biệt không gian và thời gian *trong* Thuyết tương đối tổng quát. Nói rõ hơn, toạ độ x_0 không thể được đồng nhất một cách đơn giản với thời gian vật lý t, như ta đã ngầm thực hiện từ trước tới nay. Sự đồng nhất này chỉ có thể thực hiện trong Thuyết tương đối *đặc biệt*. Trong Thuyết tương đối đặc biệt, tính bất biến đối với phép biến đổi Lorentz (hay Poincaré) của không gian và thời gian đã tách riêng năng lượng, động lượng và moment động lượng thành các biến động lực cơ bản. Trong Thuyết tương đối tổng quát, *không có* nhóm các phép đẳng cự metric (không tầm thường); kết quả là *không có* các biến động lực vật lý cơ bản được tách riêng do đặc tính được bảo toàn của chúng. Nhưng

** 'Hãy trân trọng thời gian.' Lucius Annaeus Seneca (*c.* 4 BCE–65), *Epistolae* 14, 94, 28.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

các đại lượng bất biến lại cần cho việc truyền thông! Thật ra ta có thể *nói* với người khác chỉ vì ta sống trong một không-thời gian *gần như phẳng*: nếu tổng các góc trong tam giác không bằng π (2 góc vuông), thì sẽ *không có* các đại lượng bất biến và ta không thể liên lạc được với nhau.

Ta đã sắp xếp như thế nào để che giấu vấn đề đó cho tới bây giờ? Ta đã làm như vậy bằng nhiều cách. Cách đơn giản nhất là luôn luôn đòi hỏi một số phần không-thời gian mà ta đang xét là không-thời gian Minkowski phẳng thông thường của chúng ta, trong đó x_0 được đồng nhất với t. Ta có thể thoả mãn yêu cầu này ở vô cực, như ta đã làm chung quanh các khối lượng hình cầu, hay tính toán gần đúng bậc 0, như ta đã làm đối với bức xạ hấp dẫn cũng như các phép tính nhiễu loạn khác. Bằng cách này, ta đã khử việc hoà trộn tự do các toạ độ và các đại lượng bất biến vắng mặt khác xuất hiện như mong đợi. Cách tiếp cận thực dụng này là cách thông thường để giải quyết vấn đề. Thực tế thì nó thường được sử dụng trong một số sách giáo khoa có giá trị, viết về Thuyết tương đối tổng quát nhằm ngăn ngừa các thắc mắc sâu xa hơn về vấn đề này.

Xem 233

Một biến thể thông thường của mánh lới này là để cho sự phân biệt giữa không gian và thời gian 'lặn' vào trong các tính toán bằng cách nói về vật chất và các tính chất của chúng, nói về bức xạ hay sự đo lường. Các tính chất của vật chất, thí dụ như các phương trình trạng thái Nhiệt động lực học của nó, luôn luôn phân biệt giữa không gian và thời gian. Ta cũng có thể làm điều tương tự với bức xạ bằng sự truyền dẫn của nó. Hiển nhiên là điều này cũng đúng đối với các tổ hợp đặc biệt của vật chất và bức xạ được gọi là đồng hồ và thước. Cả vật chất lẫn bức xạ phân biệt không gian và thời gian đơn giản chỉ bằng sự có mặt của chúng.

Đúng ra nếu ta xem xét kỹ thì phương pháp dùng vật chất để phân biệt không gian và thời gian cũng giống như phương pháp dùng không-thời gian Minkowski với một số giới hạn: mọi tính chất của vật chất đều được xác định bằng cách sử dụng các mô tả không-thời gian phẳng.*

Một biến thể khác của cách tiếp cận thực dụng là sử dụng toạ độ thời gian vũ trụ. Một vũ trụ đẳng hướng và thuần nhất phải có một hệ toạ độ ưu tiên, cụ thể là một toạ độ thời gian được sử dụng trong tất cả các bảng biểu về quá khứ và tương lai của vũ trụ. Thực ra phương pháp này là tổ hợp của hai phương pháp trên.

Trang 236

Nhưng ta còn một sứ mệnh đặc biệt ở đây. Ta muốn *tìm hiểu* chuyển động về mặt nguyên tắc chứ không phải chỉ tính toán nó trong thực hành. Ta muốn một câu trả lời *căn bản* chứ không phải là một câu trả lời thực dụng. Và với mục đích này ta cần biết cách kết nối vị trí x_i và thời gian t cùng với cách xác định các đại lượng bất biến. Câu hỏi này cũng chuẩn bị cho chúng ta đối mặt với công việc kết hợp lực hấp dẫn với Thuyết lượng tử - mục đích của phần cuối cuộc thám hiểm.

Quyển III, trang 347

Một lời giải cơ bản cho vấn đề này đòi hỏi một sự mô tả các đồng hồ cùng với hệ thống đang xét và sự diễn dịch về cách đọc t của một đồng hồ liên quan tới hành trạng của hệ trong không-thời gian. Nhưng ta biết rằng mô tả một hệ thống cần sự đo lường: thí dụ như để xác định những điều kiện ban đầu. Và các điều kiện ban đầu cần không gian và thời gian. Như vậy ta lọt vào trong một vòng lẩn quẩn: đó chính xác là điều ta muốn tránh.

* Ta ghi nhận một điều lạ lùng ở đây: việc bao gồm một số điều kiện ở các khoảng cách nhỏ (mô tả vật chất) cũng có tác dụng giống như việc bao gồm các điều kiện ở vô cực (không gian Minkowski tiệm cận). Đây có phải là sự trùng hợp không? Ta sẽ trở lại vấn đề này trong phần cuối cùng của cuộc thám hiểm.

Quyển VI, trang 113

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Một sự nghi ngờ nảy sinh. Có thực là có sự khác nhau cơ bản giữa không gian và thời gian không? Ta hãy điểm qua các hướng nghiên cứu câu hỏi này.

Ta có thể đo được không gian và thời gian không?

Để phân biệt giữa không gian và thời gian trong Thuyết tương đối tổng quát, ta phải đo được chúng. Nhưng như đã đề cập trong phần Hấp dẫn vạn vật ta không thể đo chiều dài, thời gian và khối lượng nếu chỉ dùng các hiệu ứng hấp dẫn. Tình trạng này có thay đổi trong Thuyết tương đối tổng quát không? Chiều dài và thời gian kết nối với nhau qua tốc độ ánh sáng, còn chiều dài và khối lượng thì kết nối với nhau qua hằng số hấp dẫn. Dù vậy ta cũng có thể thấy ngay là vẫn còn có vấn đề.

Quyển I, trang 438

Thật vậy, ta cần *Điện động lực học* và *tính chất hạt của vật chất* để thực hiện các phép đo. Nói cách khác, ta cần điện tích nguyên tố e để tạo ra thang đo chiều dài. Thang đo đơn giản nhất là

Xem 279

$$l_{\text{em scale}} = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0}} \frac{\sqrt{G}}{c^2} \approx 1.4 \cdot 10^{-36}\,\text{m} \,. \tag{291}$$

Ở đây, ε_0 là độ điện thẩm của không gian tự do. Ngoài ra, ta có thể tính đến việc *Vật lý lượng tử* cũng cung cấp một thang đo chiều dài, vì ta có thể sử dụng lượng tử tác dụng $\hbar$ để định nghĩa thang đo chiều dài

Quyển III, trang 26

$$l_{\text{qt scale}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.6 \cdot 10^{-35}\,\text{m} \,, \tag{292}$$

được gọi là *chiều dài Planck* hay *đơn vị chiều dài tự nhiên của Planck*. Tuy vậy, điều này không làm thay đổi phần lý luận vì ta vẫn cần Điện động lực học để đo giá trị của $\hbar$.

Sự tương đương của 2 lập luận trên được thể hiện bằng cách viết lại điện tích nguyên tố e như một tổ hợp của các hằng số cơ bản của thiên nhiên:

$$e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar\alpha} \,. \tag{293}$$

Ở đây, $\alpha \approx 1/137.06$ là hằng số cấu trúc tinh tế đặc trưng cho cường độ của điện từ trường. Tính theo α, biểu thức (291) trở thành

$$l_{\text{em scale}} = \sqrt{\frac{\alpha\hbar G}{c^3}} = \sqrt{\alpha}\, l_{\text{qt scale}} \,. \tag{294}$$

Tóm lại:

▷ Mọi phép đo chiều dài đều căn cứ trên hằng số liên kết điện từ α và chiều dài Planck.

Dĩ nhiên là điều này cũng đúng cho mọi phép đo thời gian và khối lượng. Như vậy không có cách nào để xác định hay đo chiều dài, thời gian và khối lượng bằng cách chỉ sử dụng

Câu đố 391 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

lực hấp dẫn hay Thuyết tương đối tổng quát.*

Với kết quả này, ta có thể thay đổi quan điểm. Ta có thể thắc mắc là trong Thuyết tương đối tổng quát

KHÔNG GIAN VÀ THỜI GIAN CÓ CẦN THIẾT HAY KHÔNG?

Xem 281 Robert Geroch trả lời cho câu hỏi này trong một bài báo dài 5 trang khá hay. Ông đã giải thích cách thiết lập Thuyết tương đối tổng quát mà *không sử dụng không gian và thời gian* bằng cách chỉ lấy các biến động lực vật lý như điểm khởi đầu.

Geroch bắt đầu với tập hợp tất cả các biến động lực. Giữa chúng có một biến gọi là v, được tách riêng ra. Nó là biến động lực duy nhất cho phép ta nói rằng đối với 2 biến động lực bất kỳ a_1, a_2 thì có một biến thứ 3 a_3, sao cho

$$(a_3 - v) = (a_1 - v) + (a_2 - v) \,. \tag{295}$$

Biến đó được gọi là *chân không*. Geroch cho thấy cách sử dụng một biến động lực để xây dựng dẫn xuất của các biến động lực khác. Rồi ông tạo dựng ra đại số Einstein, bao gồm cả Thuyết tương đối tổng quát.

Thường trong Thuyết tương đối tổng quát, ta mô tả chuyển động trong 3 bước: suy diễn ra không-thời gian từ các biến động lực vật chất, tính toán sự tiến hoá của không-thời gian và suy diễn ra sự chuyển động của vật chất theo sự tiến hoá của không-thời gian. Sự mô tả của Geroch chứng tỏ rằng bước thứ 2 không cần thiết và do đó việc sử dụng không gian và thời gian là không cần thiết.

Bằng một cách gián tiếp, nguyên lý lực cực đại cũng tạo ra một kết quả tương tự. Thuyết tương đối tổng quát có thể dẫn xuất từ sự hiện hữu của giá trị giới hạn của lực hay công suất. Không gian và thời gian chỉ là công cụ cần cho việc thông dịch nguyên lý này thành các hệ quả cho các quan sát viên trong đời sống thực.

Tóm lại, ta không thể thiết lập Thuyết tương đối tổng quát mà *không* sử dụng không gian và thời gian. Vì nếu lấy cả hai thì không cần thiết nên hình như có một sự khác biệt cơ bản giữa chúng. Tuy vậy đó là một sự khác biệt nổi tiếng.

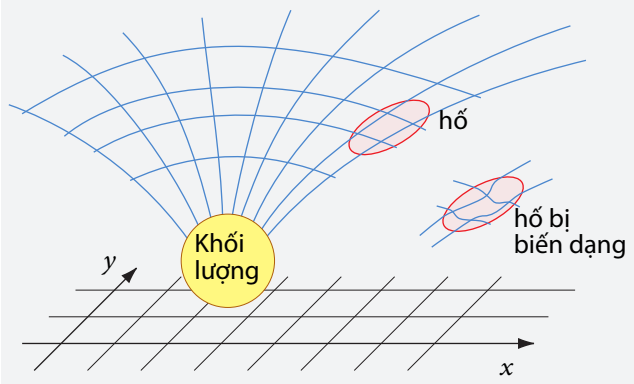
CÓ ĐƯỜNG CONG ĐÓNG LOẠI THỜI GIAN HAY KHÔNG?

Toạ độ thời gian có thể hành xử, ít nhất trong một số vùng nào đó, giống như một hình xuyến không? Khi đi bộ, ta có thể quay lại điểm khởi hành. Có thể *ngược dòng thời gian* tới nơi ta đã bắt đầu không? Câu hỏi này đã được nghiên cứu rất kỹ.

Sách tham khảo chuẩn mực về các đường cong loại thời gian đóng là quyển sách của Xem 239 Hawking và Ellis; họ đã liệt kê các tính chất cần thiết của không-thời gian, giải thích các đặc tính tương thích hay loại trừ nhau. Họ đã thấy rằng không-thời gian mịn, có tính hyperbolic toàn cục, định hướng và hướng thời gian thì không chứa bất kỳ một đường cong nào như vậy. Người ta thường giả sử rằng vũ trụ được quan sát có những tính chất này nên ta không thể quan sát được các đường cong loại thời gian đóng. Thật vậy, chưa có trường hợp nào được đưa ra – mặc dù nó sẽ là một tin giật gân trong khoa học. Sau

Xem 280 * Trong quá khứ, John Wheeler thường phát biểu rằng *đồng hồ hình động lực học* của ông, dụng cụ có thể đo được thời gian bằng cách cho ánh sáng nẩy qua lại giữa hai gương đặt song song, là một phản thí dụ. Câu đố 392 s Tuy vậy, điều này không đúng. Bạn có thể chứng minh điều này không?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 123 Một 'hố' trong không gian nhìn dưới dạng sơ đồ.

này ta sẽ thấy rằng việc tìm kiếm trong thiên nhiên những đường cong như vậy, ở mức độ vi mô, không đem lại một kết quả nào.

Quyển V, trang 159

Tóm lại, *không có* các đường cong loại thời gian đóng trong thiên nhiên. Việc không có khả năng tìm ra những đường cong như vậy hình như chỉ ra một sự khác biệt giữa không gian và thời gian. Nhưng đúng ra thì sự khác biệt này chỉ có tính biểu kiến. Những nghiên cứu này dựa trên hành trạng của vật chất. Thành ra ngay từ đầu, mọi luận điểm đều cho rằng có sự khác biệt rõ ràng giữa không gian và thời gian. Tóm lại, mạch truy vấn này không thể giúp ta quyết định được là không gian và thời gian có khác nhau hay không. Do đó ta sẽ nhìn vấn đề theo hướng khác.

Thuyết tương đối tổng quát có tính địa phương không? – Luận điểm hố

Khi Albert Einstein phát triển Thuyết tương đối tổng quát, ông đã gặp nhiều rắc rối với tính bất biến vi đồng phôi. Đáng chú ý nhất là *luận điểm hố* nổi tiếng của ông, đúng ra nên gọi là *nghịch lý hố*. Lấy trường hợp được trình bày trong Hình 123, trong đó khối lượng làm biến dạng không-thời gian bao quanh nó. Einstein đã tưởng tượng ra một vùng nhỏ của chân không, *hố*, được biểu diễn như một ellipse nhỏ. Điều gì sẽ xảy ra nếu bằng cách nào đó ta thay đổi độ cong bên trong hố trong khi vẫn để bên ngoài không đổi, như được biểu diễn trong hình vẽ?

Xem 282

Một mặt, hiển nhiên là trạng thái mới khác với trạng thái cũ về mặt vật lý, vì độ cong trong hố đã khác. Như vậy sự khác biệt này khiến cho độ cong bên ngoài một miền không xác định độ cong bên trong miền đó. Điều này thật không thoả đáng. Tệ hơn, nếu ta tổng quát hoá thao tác này cho miền thời gian, ta sẽ gặp một ác mộng lớn nhất trong vật lý: tất định luận sẽ tiêu vong.

Mặt khác, Thuyết tương đối tổng quát có tính bất biến vi đồng phôi. Sự biến dạng mà ta thấy trong hình là một vi đồng phôi; vì vậy trạng thái mới phải tương đương với trạng thái cũ về mặt vật lý.

Luận điểm nào đúng? Thoạt tiên Einstein thích quan điểm đầu và do đó bỏ nguyên ý tưởng về tính bất biến vi đồng phôi trong khoảng một năm. Sau này, chỉ khi ông hiểu rằng quan điểm sau đúng và luận điểm đầu gặp sai lầm cơ bản: nó đã giả sử có sự độc lập giữa hai trục toạ độ x và y, như ta đã thấy trong hình. Nhưng trong sự biến dạng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

của hố, toạ độ x và y cũng tự động thay đổi sao cho *không có* sự khác biệt vật lý giữa hai trạng thái.

Bài học của câu chuyện này là *không có sự khác biệt giữa không-thời gian và trường hấp dẫn*. Không-thời gian là tính chất của trường, như Einstein đã nói và không phải là một thực thể tách biệt như đã thấy trong đồ thị. Toạ độ không có ý nghĩa vật lý; chỉ có khoảng cách (khoảng) trong không-thời gian là có ý nghĩa. Đặc biệt, tính bất biến vi đồng phôi chứng tỏ rằng *không có dòng thời gian*. Thời gian giống như không gian, chỉ là một thực thể tương đối: thời gian và không gian thì tương đối chứ không phải là tuyệt đối.

Tính tương đối của không gian và thời gian có các hệ quả hữu ích. Thí dụ như có nhiều bài toán trong Thuyết tương đối tổng quát tương đương với bài toán Schwarzschild, mặc dù lúc ban đầu hình như chúng hoàn toàn khác. Kết quả là các nhà nghiên cứu đã 'khám phá ra' lời giải Schwarzschild (dĩ nhiên với các hệ toạ độ khác) trên 20 lần, mà họ thường nghĩ rằng họ đã tìm thấy một lời giải mới, chưa biết. Đến đây ta sẽ bàn tới một hệ quả lạ thường của tính bất biến vi đồng phôi.

Trái đất có rỗng không?

> Bất kỳ một đôi giầy nào cũng đều chứng tỏ rằng ta đang sống trong một hình cầu. Đế của chúng mòn đi ở các đầu, còn ở giữa hầu như không mòn.
>
> Vô danh

Giả thuyết Trái đất rỗng, nghĩa là giả định kỳ quái rằng ta đang sống *trong* một hình cầu, phổ biến trong những nhóm bí mật khoảng năm 1900 và ngày nay điều này vẫn còn giữa những người lập dị nào đó, đặc biệt là ở Anh, Đức và Mỹ. Họ duy trì, như được minh hoạ trong Hình 124, ý tưởng Trái đất rắn *bao quanh* bầu trời, cùng với Mặt trăng, Mặt trời và ngôi sao. Phần lớn chúng ta bị lừa gạt bởi sự giáo dục để tin vào sự mô tả khác và tin rằng ánh sáng du hành trên các đường thẳng. Họ nói, hãy vứt bỏ sự tin tưởng sai lầm này và 'Trái đất rỗng' trông cực kỳ lộng lẫy.

Quyển I, trang 61

Điều thú vị là lý luận cũng có phần đúng. *Không có* lý lẽ bác bỏ cách mô tả vũ trụ này. Đúng ra như vật lý gia vĩ đại Roman Sexl giải thích, tính bất biến vi đồng phôi của Thuyết tương đối tổng quát đã chỉ ra sự tương đương giữa 2 quan điểm. Điều khôi hài xuất hiện khi cả hai phe đều muốn nói là *chỉ có* sự mô tả riêng của phe mình mới đúng. Bạn có thể kiểm tra lại rằng lý luận như vậy là sai; thật là nực cười khi ta đi theo những người lập dị bảo vệ cho giả thuyết Trái đất rỗng, chống lại bạn của mình. Giải thích sự xuất hiện của ngày và đêm, của chân trời và hình ảnh của Trái đất chụp từ vệ tinh là một điều dễ dàng. Giải thích những điều xảy ra trong chuyến bay tới Mặt trăng cũng không khó. Bằng cách này bạn có thể làm các nhà vật lý rởm hoá điên! Sự mô tả thông thường và mô tả Trái đất rỗng tương đương một cách chính xác. Bạn có thể chứng minh rằng ngay cả Thuyết lượng tử, cùng với việc đưa thang chiều dài vào trong thiên nhiên, cũng không thay đổi được tình trạng này không?

Xem 283

Câu đố 393 e

Câu đố 394 s

Tóm lại, tính bất biến vi đồng phôi không phải là một phép đối xứng dễ nuốt. Nhưng tốt nhất là làm quen với nó ngay từ bây giờ, vì phần phiêu lưu còn lại sẽ tạo ra nhiều điều ngạc nhiên hơn. Thật vậy, trong phần cuối của cuộc bách bộ ta sẽ khám phá ra rằng có một phép đối xứng lớn hơn trong thiên nhiên, tương tự như sự thay đổi về quan điểm từ

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

HÌNH 124 Một mô hình của lý thuyết Trái đất rỗng (© Helmut Diehl).

quan điểm Trái đất rỗng đến quan điểm chuẩn mực. Phép đối xứng này, tính đối ngẫu không-thời gian, không những chỉ đúng đối với những khoảng cách được đo từ tâm Trái đất mà còn đúng đối với các khoảng cách được đo từ một điểm bất kỳ trong thiên nhiên.

Quyển VI, trang 113

Tóm tắt: không gian, thời gian và khối lượng có độc lập hay không?

Chúng ta có thể kết luận từ cuộc bàn luận ngắn ngủi này là không có sự phân biệt cơ bản giữa không gian và thời gian trong Thuyết tương đối tổng quát. Sự phân biệt khả hữu duy nhất là sự phân biệt thực dụng đã sử dụng vật chất, bức xạ hay không-thời gian ở vô cực.

Quyển I, trang 437

Lúc bắt đầu cuộc thám hiểm ta đã nhận thấy rằng cần có vật chất để định nghĩa không gian và thời gian. Giờ đây ta thấy đúng là cần có vật chất để phân biệt *giữa* không gian *và* thời gian. Tương tự như vậy, lúc bắt đầu cuộc thám hiểm, ta thấy cần có không gian và

Quyển I, trang 208

thời gian để định nghĩa vật chất; giờ đây thì ta thấy đúng là cần không-thời gian *phẳng* để định nghĩa vật chất. Trong những vấn đề cơ bản này, Thuyết tương đối tổng quát đã *không* mang lại một sự tiến bộ nào hơn những kết quả của vật lý Galilei.

Tóm lại, Thuyết tương đối tổng quát *không* cung cấp một lối thoát cho vòng lý luận lẩn quẩn mà ta đã gặp trong vật lý Galilei. Thật vậy, Thuyết tương đối tổng quát không làm cho vấn đề rõ ràng hơn trước. Chủ yếu vật chất và bức xạ vẫn còn được dùng để định nghĩa và phân biệt không gian và thời gian, cũng như không gian và thời gian vẫn có vai trò cốt yếu trong việc định nghĩa và phân biệt vật chất và bức xạ. Tiếp tục cuộc hành trình lên đỉnh là lối thoát duy nhất.

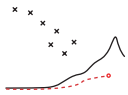
Trong những phần kế của cuộc thám hiểm, vật lý lượng tử sẽ khẳng định rằng ta cần

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

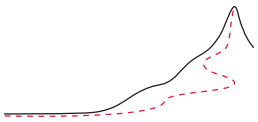
vật chất để phân biệt giữa không gian và thời gian. Về nguyên tắc ta không thể phân biệt không gian và thời gian mà *không dùng tới vật chất*. Lúc đó, trong phần cuối của cuộc thám hiểm, ta sẽ thấy khối lượng và không gian có vai trò như nhau trong thiên nhiên. Vì cả hai định nghĩa lẫn nhau nên ta suy ra là hạt và chân không đều được làm bằng cùng một chất liệu. Hoá ra chỉ có thể phân biệt giữa không gian và thời gian khi năng lượng thấp như trong điều kiện thông thường; còn về nguyên tắc thì không thể phân biệt như vậy.

Quyển IV, trang 168

Quyển VI, trang 80



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chương 11

Thuyết tương đối tổng quát giản lược – Tóm tắt dành cho người không chuyên

> Sapientia felicitas.**
>
> Cổ nhân

Thuyết tương đối tổng quát là sự mô tả đúng đắn sau cùng của *chuyển động vĩ mô*. huyết tương đối tổng quát mô tả, trước tiên, mọi chuyển động vĩ mô do lực hấp dẫn và đặc biệt, mô tả mối liên hệ giữa các quan sát về chuyển động của hai quan sát viên *bất kỳ*. Trước tiên, Thuyết tương đối tổng quát mô tả các chuyển động nhanh nhất, mạnh nhất, mãnh liệt nhất và xa nhất. Vì lý do này, Thuyết tương đối tổng quát mô tả chuyển động của vật chất và của không gian rỗng, bao gồm chuyển động của chân trời và sự tiến hoá của cái thường được gọi là biên giới của vũ trụ.

Sự mô tả các chuyển động vĩ mô bằng Thuyết tương đối tổng quát là *tối hậu* và *đúng đắn*. Các tính toán và tiên đoán của Thuyết tương đối tổng quát khớp với mọi quan sát khả hữu. Không có sự phù hợp trong trường hợp vật chất tối; vấn đề này chưa được giải quyết.

Thuyết tương đối tổng quát dựa trên hai nguyên lý được suy diễn từ các quan sát:

— Mọi quan sát viên đều đồng ý rằng có một tốc độ 'hoàn hảo' trong thiên nhiên, cụ thể là một tốc độ năng lượng chung *cực đại* đối với vật chất (ở gần nhau). Giá trị tốc độ bất biến $c = 299\,792\,458$ m/s được các bức xạ không khối lượng, như ánh sáng hay tín hiệu vô tuyến, thể hiện.
— Mọi quan sát viên đều đồng ý rằng có một lực 'hoàn hảo' trong thiên nhiên, một lực *cực đại* chung mà có thể được thể hiện đối với vật chất (ở gần nhau). Giá trị lực bất biến $F = c^4/4G = 3.0258(4) \cdot 10^{43}$ N được thể hiện tại chân trời biến cố.

Hai nhận định này chứa toàn bộ Thuyết tương đối. Đặc biệt, từ hai nhận định này ta suy ra:

— Không-thời gian bao gồm các biến cố trong 3 + 1 *chiều liên tục*, với độ cong thay đổi được. Độ cong có thể suy ra từ việc đo khoảng cách giữa các biến cố, thí dụ như từ các hiệu ứng thuỷ triều. Thời gian, chiều dài và độ cong đo được thay đổi từ quan sát viên này đến quan sát viên khác theo cách mà ta có thể tiên đoán được. Tóm lại, ta đang sống trong một *không-thời gian giả-Riemann*.
— Không-thời gian và không gian, *ở gần khối lượng và năng lượng, bị uốn cong*. Độ cong tại một điểm được xác định bằng mật độ năng–động lượng tại điểm đó và được mô tả bằng các phương trình trường. Khi vật chất và năng lượng chuyển động, độ cong

** 'Minh triết là hạnh phúc.' Câu nói cổ xưa này đã từng là câu châm ngôn của Đại học Oxford.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

không gian chuyển động theo chúng. Độ trễ có sẵn trong chuyển động này khiến cho ta không thể tạo ra việc chuyển tải năng lượng nhanh hơn ánh sáng. Hằng số tỷ lệ giữa năng lượng và độ cong nhỏ đến nỗi ta không thể thấy được độ cong trong đời sống hằng ngày; chỉ có thể quan sát được sự thể hiện gián tiếp của nó, tức là lực hấp dẫn vạn vật.

— Mọi chuyển động vĩ mô – của vật chất, bức xạ và chân không – được mô tả bằng các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát.
— Không gian *có tính đàn hồi*: nó thích ở trạng thái phẳng. Vì đàn hồi nên nó có thể dao động độc lập với vật chất; lúc đó ta có thể nói về bức xạ hấp dẫn hay sóng hấp dẫn.
— Vật chất rơi tự do theo *các đường trắc địa*, nghĩa là dọc theo các con đường có chiều dài cực đại trong không-thời gian cong. Trong không gian điều này có nghĩa là ánh sáng bị uốn cong khi đi gần các vật nặng với giá trị lớn gấp 2 lần giá trị do Thuyết hấp dẫn vạn vật tiên đoán.
— Để mô tả lực hấp dẫn ta cần không-thời gian *bị uốn cong*, nghĩa là Thuyết tương đối tổng quát, *ở mức tổng quát nhất* khi khoảng cách có bậc cỡ bán kính Schwarzschild $r_S = 2Gm/c^2$. Nếu khoảng cách lớn hơn giá trị này nhiều, mô tả tương đối tính với lực hấp dẫn và Hấp dẫn từ luận (sự kéo theo hệ quy chiếu) cũng đủ. Khi khoảng cách lớn hơn nữa và tốc độ nhỏ hơn tốc độ ánh sáng, sự mô tả bằng Thuyết hấp dẫn vạn vật, cụ thể là $a = Gm/r^2$, cùng với không-thời gian Minkowski phẳng, sẽ là một tiếp cận gần đúng tốt.
— Không gian và thời gian không thể phân biệt một cách tổng quát mà chỉ có tính địa phương. *Vật chất* và *bức xạ* cần cho sự phân biệt này.

Hơn nữa, tất cả vật chất và năng lượng mà ta quan sát thấy trong bầu trời đưa ta tới những kết luận sau đây:

Trang 204

— Vũ trụ có kích thước hữu hạn, gần đúng bằng $r_{max} \approx 1/\sqrt{\Lambda} \approx 10^{26}$ m. Hằng số vũ trụ Λ cũng có tác dụng của mật độ năng lượng. Người ta đã nói về *năng lượng tối*.
— Vũ trụ có *tuổi đời hữu hạn*; đó là lý lẽ giải thích cho sự tối đen của bầu trời đêm. Có một chân trời giới hạn khoảng không-thời gian đo được cỡ 14 tỷ năm.
— Ở tầm cỡ vũ trụ, mọi vật đều chuyển động ra xa các vật khác: vũ trụ *đang giãn nở*. Chi tiết về sự giãn nở của không gian cũng như chân trời của bầu trời đêm được mô tả bằng các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát.

Tóm lại, thí nghiệm chứng tỏ rằng mọi chuyển động của năng lượng, bao gồm vật chất và bức xạ bị giới hạn về tốc độ, dòng động lượng hay lực. Lực cực đại hàm ý rằng không gian bị uốn cong và độ cong có thể chuyển động được. Các tính chất cơ bản của chuyển động thông thường đã biết vẫn còn đúng: chuyển động tương đối tính bao gồm lực hấp dẫn cũng có tính liên tục, bảo toàn năng-động lượng, bảo toàn moment động lượng, tính tương đối, tính thuận nghịch, và bất biến gương (trừ tương tác yếu, nơi mà phương pháp tổng quát hoá để tiên đoán chuyển động nghịch đảo gương vẫn còn đúng). Sau cùng, giống như chuyển động thông thường, mọi trường hợp chuyển động tương đối tính bao gồm lực hấp dẫn đều lười biếng: mọi chuyển động đều cực tiểu hoá tác dụng. Tóm lại, các nguyên lý về lực cực đại và tốc độ cực đại đều đúng đối với mọi chuyển động trong thiên nhiên. Chúng là chân lý phổ quát. Thuyết tương đối tổng quát được suy ra từ hai nguyên lý mô tả mọi chuyển động *vĩ mô* quan sát được trong vũ trụ, bao gồm các

Quyển I, trang 29

Quyển V, trang 245

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

chuyển động nhanh nhất, mạnh nhất và xa nhất – là chuyển động của vật chất, bức xạ, chân không hay chân trời.

ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA SỰ MÔ TẢ

Thuyết Tương đối tổng quát có đáng để ta nỗ lực không? Để bàn luận về độ chính xác của nó, tiện nhất là phân thành hai tập hợp thí nghiệm. Tập hợp đầu tiên bao gồm các phép đo về cách mà *vật chất chuyển động*. Các vật thể có thực sự đi theo các đường trắc địa không? Như đã tóm tắt trong Bảng 9, mọi thí nghiệm đều phù hợp với lý thuyết trong phạm vi sai số của phép đo, nghĩa là, ít nhất là $1/10^{12}$. Tóm lại, Thuyết tương đối tổng quát mô tả rất tốt cách rơi của vật chất.

Xem 284
Xem 285

Tập hợp thứ hai liên quan tới động lực học của không-thời gian. *Không-thời gian có chuyển động* theo các phương trình trường của Thuyết tương đối tổng quát không? Nói cách khác, không-thời gian có thực sự bị vật chất uốn cong theo cách mà lý thuyết tiên đoán không? Người ta đã thực hiện nhiều thí nghiệm, gần cũng như xa Trái đất, trong cả hai trường hấp dẫn mạnh và yếu. Tất cả đều phù hợp với sự tiên đoán trong phạm vi sai số của phép đo. Tuy vậy, những phép đo tốt nhất cho đến nay chỉ có khoảng 3 chữ số có nghĩa. Nên nhớ rằng dù đã có nhiều thí nghiệm được thực hiện nhưng chỉ có vài *loại* thí nghiệm kiểm chứng liệt kê trong Bảng 9. Việc khám phá một loại thí nghiệm mới gần như bảo đảm sẽ đem tới danh vọng và tiền tài. Phần lớn những thí nghiệm tìm thấy sau này dĩ nhiên là các phát hiện trực tiếp về sóng hấp dẫn.

Xem 284, Xem 285
Câu đố 395 ny

Các chú thích trên Bảng 9 đã được xếp thứ tự. Sau nhiều thập niên mà các hiệu ứng đo được chỉ ở bậc v^2/c^2, nhiều *hiệu ứng trường mạnh* trong các pulsar cho phép ta đạt tới bậc v^4/c^4. Không bao lâu nữa một vài hiệu ứng có bậc này cũng sẽ được phát hiện ngay bên trong Thái dương hệ bằng cách sử dụng các thí nghiệm trên vệ tinh có độ chính xác cao. Đứng đầu trong các phép đo cho đến nay, độ trễ của sự phát xạ sóng hấp dẫn, là hiệu ứng duy nhất có bậc v^5/c^5.

Xem 284
Trang 185

Việc khó khăn để đạt tới độ chính xác cao khi đo độ cong không-thời gian là lý do tại sao người ta đo khối lượng bằng cân, luôn luôn sử dụng (một cách gián tiếp) nguyên mẫu kilogram ở Paris, thay vì định nghĩa một số độ cong mẫu và ấn định giá trị của G. Thật vậy, người ta chưa bao giờ tiến hành các thí nghiệm đo độ cong trên Trái đất. Một sự đột phá trong lĩnh vực này sẽ tạo ra nhiều điều mới mẻ. Những phương pháp đo độ cong trên Trái đất hiện có không cho phép người ta xác định một kilogram cam hay đào với một độ chính xác đủ để phân biệt nó với một lượng gấp đôi!

Có một cách kiểm chứng Thuyết tương đối tổng quát nữa là tìm các mô tả lực hấp dẫn khác. Người ta đã thiết lập và nghiên cứu khá nhiều lý thuyết hấp dẫn để thay thế nhưng cho đến nay chỉ có Thuyết tương đối tổng quát là phù hợp với tất cả các thí nghiệm.

Xem 285, Xem 286

Tóm lại, như Thibault Damour đã giải thích, Thuyết tương đối tổng quát đã đúng ít nhất 99.999 999 999 9 % trong các vấn đề liên quan tới chuyển động của vật chất và năng lượng và đúng ít nhất 99.9 % về phương thức mà vật chất và năng lượng uốn cong và làm chuyển động không-thời gian. Người ta chưa gặp ngoại lệ, lực phản hấp dẫn hay các dữ liệu thí nghiệm không rõ ràng nào. Mọi chuyển động trên Trái đất và trên bầu trời đều được mô tả bằng Thuyết tương đối tổng quát. Các chuyển động mãnh liệt nhất, nhanh nhất và xa nhất mà ta đã biết đều hành xử như người ta mong đợi. Sự thành công của Albert Einstein thật mỹ mãn.

Xem 284

Ta cần lưu ý rằng Thuyết tương đối tổng quát chưa được kiểm chứng với các chuyển

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 9 Các loại thí nghiệm kiểm chứng Thuyết tương đối tổng quát.

Hiệu ứng đã đo	Độ chính xác	Loại	Tham khảo
Nguyên lý tương đương	10^{-12}	chuyển động của vật chất	Xem 155, Xem 284, Xem 287
Sự phụ thuộc vào $1/r^2$ (số chiều của không-thời gian)	10^{-10}	chuyển động của vật chất	Xem 288
Sự độc lập đối với thời gian của G	10^{-19} /s	chuyển động của vật chất	Xem 284
Dịch chuyển đỏ (ánh sáng và vi ba trên Mặt trời, Trái đất, Sirius)	10^{-4}	độ cong không-thời gian	Xem 134, Xem 132, Xem 284
Dịch chuyển cận nhật (4 hành tinh, Icarus, pulsar)	10^{-3}	độ cong không-thời gian	Xem 284
Sự lệch của tia sáng (ánh sáng, sóng vô tuyến chung quanh Mặt trời, ngôi sao, thiên hà)	10^{-3}	độ cong không-thời gian	Xem 284
Độ trễ thời gian (tín hiệu vô tuyến gần Mặt trời, gần pulsar)	10^{-3}	độ cong không-thời gian	Xem 284, Xem 173
Hấp dẫn từ luận (Trái đất, pulsar)	10^{-1}	độ cong không-thời gian	Xem 165, Xem 166
Hiệu ứng trắc địa (Mặt trăng, pulsar)	10^{-1}	độ cong không-thời gian	Xem 162, Xem 284
Độ trễ của sự phát xạ sóng hấp dẫn (pulsar)	10^{-3}	độ cong không-thời gian	Xem 284

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

động vi mô. Theo ngữ cảnh này, *chuyển động vi mô* là một chuyển động bất kỳ mà đối với nó giá trị tác dụng thì gần bằng lượng tử tác dụng $\hbar$, cụ thể là 10^{-34} Js. Việc tìm hiểu chuyển động vi mô trong các trường hấp dẫn mạnh là chủ đề của phần cuối trong cuộc thám hiểm của chúng ta.

Việc nghiên cứu về Thuyết tương đối tổng quát và Vũ trụ học

Việc nghiên cứu về Thuyết tương đối tổng quát vẫn còn sôi nổi mặc dù đang sút giảm; sự suy thoái hiện nay mạnh nhất ở Thuỵ Sĩ và Đức là các quốc gia nơi Albert Einstein
Xem 289 phát triển lý thuyết này. Tuy vậy, việc nghiên cứu trong lĩnh vực Vũ trụ học và Vật lý thiên văn hiện nay vẫn rất nhiều. Sau đây là một tổng quan ngắn.

* *

Những nghiên cứu thực nghiệm thú vị nhất về Thuyết tương đối tổng quát là các thí nghiệm kiểm chứng sử dụng pulsar đôi, việc tìm kiếm sóng hấp dẫn và các phép đo chính xác sử dụng vệ tinh. Một vệ tinh đặc biệt sẽ ghi nhận tất cả các pulsar khả hữu của thiên hà. Tất cả các thí nghiệm này đã mở rộng các kiểm chứng thực nghiệm vào các vùng mà trước kia người ta chưa chạm tới. Cho tới nay mọi thí nghiệm đều hoàn toàn khẳng định Thuyết tương đối tổng quát – như người ta mong đợi.

* *

Việc nghiên cứu các va chạm trong vũ trụ và bài toán nhiều vật, đặc biệt liên quan đến các sao neutron và hố đen, giúp cho các nhà vật lý thiên văn hiểu biết thêm về thế giới
Xem 267 muôn màu mà họ đã thấy trong các kính thiên văn của mình.

* *

Việc nghiên cứu về các hỗn độn trong phương trình trường là mối quan tâm chính trong việc nghiên cứu vũ trụ sơ khai và có thể có liên quan tới bài toán hình thành thiên hà,
Xem 290 một trong những bài toán toán mở lớn nhất trong Vật lý.

* *

Thu thập dữ liệu về sự hình thành của thiên hà là mục tiêu chính của nhiều hệ vệ tinh và các kính thiên văn xây dựng cho mục đích đó. Trọng điểm là tìm kiếm các vùng bất
Xem 291 đẳng hướng của nền vi ba vũ trụ định xứ bắt nguồn từ các thiên hà nguyên thuỷ.

* *

Việc xác định chính xác các tham số vũ trụ như mật độ vật chất, độ cong và mật độ chân
Xem 235 không, là nỗ lực chính của Vật lý thiên văn hiện đại. Sự tìm hiểu mật độ chân không – còn gọi là *hằng số vũ trụ* hay *năng lượng tối* – và việc làm rõ bản chất của *vật chất tối* chiếm đa số công việc của các nhà vật lý thiên văn.

* *

Các nhà thiên văn và vật lý thiên văn đều đặn khám phá ra các hiện tượng mới trên bầu trời. Người ta vẫn chưa hiểu hết về các loại bùng nổ tia gamma, bùng nổ tia X và bùng
Xem 292 nổ quang học khác nhau. Thí dụ như bùng nổ tia Gamma, có thể sáng như 10^{17} ngôi sao cỡ Mặt trời gộp lại; tuy vậy, chúng chỉ kéo dài vài giây. Chi tiết bổ sung về chủ đề nghiên

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

cứu này sẽ được trình bày sau.

Quyển V, trang 153

* *

Một cơ sở dữ liệu của tất cả các lời giải chính xác đã biết của các phương trình trường đang được xây dựng. Trong số đó, các nhà nghiên cứu đang kiểm tra xem chúng có phải là các lời giải thực sự khác nhau hay không.

Xem 293

* *

Các lời giải của phương trình trường với topo không tầm thường, như các lỗ sâu và các lời giải kiểu hạt, tạo thành một lĩnh vực tìm kiếm hấp dẫn. Tuy vậy, những lời giải đó không thể được tìm ra từ các hiệu ứng lượng tử.

Xem 294

Quyển V, trang 159

* *

Các trình bày khác về Thuyết tương đối tổng quát như mô tả không-thời gian bằng các đại lượng khác hơn metric, được phát triển liên tục, với hy vọng làm rõ mối quan hệ giữa lực hấp dẫn và thế giới lượng tử. Biến Ashtekar là một cách mô tả hiện đại như vậy.

Xem 295

* *

Việc nghiên cứu vũ trụ sơ khai và mối quan hệ giữa tính chất của các hạt sơ cấp với các giả định như *sự lạm phát*, một khoảng thời gian giãn nở có gia tốc ngắn trong vài giây đầu tiên sau big bang, vẫn còn là một chủ đề nghiên cứu quan trọng.

Xem 296, Xem 297

* *

Sự hợp nhất Vật lý lượng tử, Vật lý hạt và Thuyết tương đối tổng quát là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng và sẽ còn chiếm lĩnh tâm trí các nhà nghiên cứu trong nhiều năm nữa. Mục tiêu là tìm ra một sự mô tả đầy đủ về chuyển động. Đây là chủ đề cuối cùng của cuộc phiêu lưu này.

Quyển VI, trang 17

* *

Sau cùng, việc giảng dạy Thuyết tương đối tổng quát, mà nhiều thập niên qua đã ẩn mình sau các chỉ số Hy Lạp, các dạng vi phân và các tiếp cận phản sư phạm khác, sẽ được hưởng lợi nhiều từ các tiến bộ trong tương lai tập trung vào Vật lý hơn là chủ nghĩa hình thức.

Xem 298

Thuyết tương đối tổng quát có thể khác đi hay không?

> Thật là tốt khi ta có trọng lực nếu không khi chim qua đời chúng sẽ yên vị và thợ săn sẽ bối rối vô cùng.
>
> Steven Wright

Hằng số hấp dẫn ấn định một giới hạn cho mật độ và gia tốc của vật thể cũng như công suất của máy móc. Tất cả những lý luận của chúng ta đều dựa trên tính bất biến này. Hằng số hấp dẫn G có thể thay đổi từ nơi này qua nơi khác hay thay đổi theo thời gian không? Câu hỏi này hơi rắc rối. Thoạt tiên, câu trả lời là khẳng định: 'Dĩ nhiên là có! Chỉ nhìn điều gì sẽ xảy ra khi G bị thay đổi trong công thức.' Tuy vậy câu trả lời này *sai*. Sai lầm này giống như sai lầm đối với tốc độ ánh sáng c.

Trang 106

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Vì hằng số hấp dẫn có mặt trong định nghĩa lực hấp dẫn và gia tốc nên nó đi vào, cho dù ta không nhận ra, trong việc làm ra thước đo, các chuẩn đo lường và tất cả các dụng cụ đo. Do đó *không có cách nào* phát hiện ra là nó có thực sự thay đổi hay không.

▷ Người ta không thể đo được độ thay đổi của lực cực đại hay hằng số hấp dẫn G.

Đúng vậy, tính bất biến của lực giới hạn và của G là phản trực giác. Thí nghiệm có thể phát hiện *sự hiện hữu* của một lực cực đại. Tuy nhiên, không có một thí nghiệm tưởng tượng nào phát hiện được *sự biến đổi* của giá trị lực cực đại, trong không gian cũng như
Câu đố 396 e trong thời gian. Bạn thử làm xem! Mỗi phép đo lực, dù muốn hay không, là một sự so sánh với lực giới hạn. Về nguyên tắc không có cách nào để nguỵ tạo sự bất biến của một chuẩn đo lường. Điều này còn đáng ngạc nhiên hơn vì các phép đo loại này được báo
Trang 297 cáo thường xuyên. Theo một nghĩa nào đó, Bảng 9 là một danh sách các thí nghiệm như vậy! Nhưng kết quả của một thí nghiệm như vậy cũng dễ tiên đoán: ta không tìm thấy một sự thay đổi hay một sự sai lệch nào đối với Thuyết tương đối tổng quát.

Có thể có những thay đổi khác hay không? Số chiều không gian có thể khác 3 không? Vấn đề này khá rắc rối. Thí dụ như 3 là số chiều nhỏ nhất sao cho khi tensor Ricci biến mất thì phù hợp với việc độ cong không biến mất. Mặt khác, việc có hơn 3 chiều sẽ gây ra sự sai lệch với 'định luật' bình phương nghịch đảo của lực hấp dẫn. Không có dữ liệu nào chỉ ra điều này. Mọi thí nghiệm đều khẳng định rằng không gian có đúng 3 chiều.

Các phương trình của Thuyết tương đối tổng quát có thể thay đổi hay không? Trong thế kỷ qua, các nhà lý thuyết đã tìm các phương trình thay thế khác. Nhưng cho tới nay hầu như không có một đề nghị thay thế nào phù hợp với dữ liệu thực nghiệm – và phù hợp với sự hiện hữu của lực cực đại. Chỉ có hai ứng viên vẫn còn được bàn đến thường xuyên.

Đầu tiên, sự bao gồm *lực xoắn* trong các phương trình trường là một cố gắng để bao
Xem 300 gồm spin của hạt vào Thuyết tương đối tổng quát. Sự bao gồm này không đòi hỏi các hằng số cơ bản mới; thật vậy, sự vắng mặt của lực xoắn đã được giả sử trong phương
Xem 299 trình Raychaudhuri. Việc sử dụng phương trình Raychaudhuri mở rộng, bao gồm lực xoắn, có thể cho phép ta suy ra toàn bộ lý thuyết Einstein–Cartan từ nguyên lý lực cực đại. Tuy vậy, mọi bàn luận cho đến nay đều cho thấy rằng lực xoắn là một sự phức tạp không cần thiết.

Thứ hai, còn một vấn đề mà ta chưa giải thích được: sự hiện hữu của vật chất tối. Tốc độ quay của vật chất khả kiến ở xa tâm của các thiên hà *có thể* bắt nguồn từ sự hiện hữu của vật chất tối hay do sự sai lệch với quy luật bình phương nghịch đảo của Thuyết hấp dẫn vạn vật. Lý do sau sẽ dẫn đến một sự sửa đổi trong các phương trình trường cho
Xem 301 những khoảng cách thiên văn lớn. Tuỳ chọn vật chất tối giả sử rằng ta đã gặp khó khăn trong việc quan sát, tuỳ chọn động lực học có điều chỉnh lại giả sử rằng ta thiếu một cái gì đó trong phương trình. Cũng có một số thí nghiệm về sự lệch của ánh sáng hình như cho ta thấy có một số loại vật chất bất khả kiến trải rộng quanh các thiên hà. Đây có phải là một dạng vật chất mới hay không? Hiện nay, phần lớn các nhà nghiên cứu nghiêng về giả định có vật chất tối và còn cho rằng đó là một loại vật chất chưa biết. Nhưng vì ta chưa hiểu được bản chất của vật chất tối và cũng vì người ta chưa bao giờ phát hiện nó trong phòng thí nghiệm nên vấn đề vẫn còn đó.

Tóm lại, với nguyên lý lực cực đại đã có, hầu như, nếu không nói là không thể không

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

diễn tả thiên nhiên bằng Thuyết tương đối tổng quát.

> Những điều mà bạn đã đọc thấy về sự lên án tôn giáo của tôi rõ ràng là một sự dối trá đã được lặp lại có hệ thống. Tôi không tin vào một Thượng đế nhân hoá và tôi đã không bao giờ chối bỏ điều này mà còn phát biểu nó một cách rõ ràng. Nếu có một điều gì đó trong tôi có thể được gọi là tôn giáo thì chính là sự ngưỡng mộ vô biên với cấu trúc của thế giới mà nền khoa học của chúng ta đã khám phá được cho đến nay.
>
> Albert Einstein, 24 March 1954.

Những hạn chế của Thuyết tương đối tổng quát

Mặc dù có sự thành công và vẻ quyến rũ, sự mô tả chuyển động đã được trình bày cho tới nay vẫn chưa được đầy đủ cho lắm; có lẽ bạn cũng đã có một số cảm nghĩ chân thật về các vấn đề chưa giải quyết được.

Câu đố 397 e

Trước hết, mặc dù tốc độ ánh sáng là điểm khởi đầu của toàn bộ lý thuyết, ta vẫn chưa biết ánh sáng thực sự *là* gì. Việc tìm hiểu bản chất ánh sáng là chủ đề kế tiếp của chúng ta.

Kế đến, ta đã thấy rằng mọi vật có khối lượng đều rơi theo các đường trắc địa. Nhưng một ngọn núi không rơi. Bằng cách nào đó vật chất bên dưới nó làm cho nó không rơi. Khối lượng đến từ đâu và đến như thế nào? Vật chất là gì? Thuyết tương đối tổng quát không cung cấp câu trả lời; đúng ra thì nó không mô tả vật chất *một chút nào cả*. Einstein thường nói rằng vế trái của phương trình trường mô tả độ cong của không-thời gian, là đá hoa cương, trong khi vế phải thì mô tả vật chất, là cát. Thật vậy, cho đến lúc này ta vẫn chưa biết vật chất và khối lượng *là gì*. (Về vật chất tối thì còn biết ít hơn nữa.) Như ta đã lưu ý, để biến đổi cát thành đá, đầu tiên ta cần Vật lý lượng tử, rồi trong bước kế tiếp, hợp nhất nó với Thuyết tương đối. Đây là chương trình của phần cuối của cuộc thám hiểm.

Ta cũng đã thấy rằng cần có vật chất để phân biệt rõ ràng giữa không gian và thời gian, và đặc biệt, để hiểu công dụng của đồng hồ, thước đo và cân. Nhưng còn một câu hỏi: tại sao lại *không có* đơn vị khối lượng, chiều dài và thời gian trong thiên nhiên? Việc tìm hiểu tính khả hữu của các phép đo sẽ là một chủ đề khác trong Vật lý lượng tử.

Chúng ta cũng biết quá ít về chân không. Ta cần tìm hiểu về độ lớn của hằng số vũ trụ, sự phụ thuộc của nó vào thời gian và số chiều của không-thời gian. Chỉ đến lúc đó ta mới có thể trả lời câu hỏi đơn giản này: tại sao bầu trời lại xa quá như vậy? Thuyết tương đối tổng quát không giúp được gì ở đây. Ta sẽ khám phá ra rằng giá trị nhỏ bé đã đo được của hằng số vũ trụ mâu thuẫn với phiên bản đơn giản nhất của Thuyết lượng tử; đây là một trong những lý do cho thấy ta vẫn còn một khoảng cách khá lớn phải vượt qua để đến được đỉnh Hành Sơn.

Quyển VI, trang 58

Sau cùng, ta đã phải giấu bớt một số vấn đề quan trọng khác. Thuyết tương đối tổng quát cấm sự hiện hữu của chất điểm và như vậy là cả các hạt không có kích thước. Nhưng ý tưởng về chất điểm là lý do để ta đưa ra khái niệm điểm trong không gian lúc trước. Số phận sau cùng của ý tưởng điểm trong không gian là gì? Việc này sẽ dẫn tới điều gì đối với các tính chất của chân trời, hố đen và bầu trời đêm? Cho tới bây giờ, các vấn đề

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

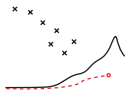
này vẫn còn được nghiên cứu.

Tóm lại, để mô tả chuyển động cho đúng, ta cần mô tả chính xác hơn về ánh sáng, vật chất và chân không. Nói cách khác, ta cần biết thêm về mọi vật! Nếu khác đi, ta không có hy vọng trả lời được câu hỏi về núi non, đồng hồ và ngôi sao. Đặc biệt, ta cần biết thêm về ánh sáng, vật chất và chân không ở những thang đo *nhỏ*, tức là tìm hiểu về các phương diện *vi mô* của thế giới.

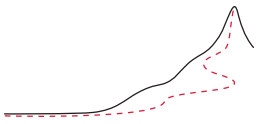
Quyển V, trang 67

Ở thang đo nhỏ thì độ cong của không gian có thể bỏ qua. Như vậy ta sẽ lùi lại một bước, trong trường hợp *không có* lực hấp dẫn và tìm hiểu chuyển động vi mô của ánh sáng, vật chất và chân không. Lĩnh vực này được gọi là *Vật lý lượng tử*. Hình **??** trong phần mở đầu, cho ta một ấn tượng mạnh mẽ về các chủ đề đang chờ đợi. Và mặc dù đã đơn giản hoá đến mức không-thời gian phẳng, cuộc phiêu lưu vẫn còn ngoạn mục và sôi nổi: ta sẽ tìm hiểu chuyển động ở mức độ nền tảng của cuộc sống.

Trang **??**



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chương 12

Đơn vị, sự đo lường và các hằng số

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Sự đo lường đồng nghĩa với việc so sánh các đại lượng cần đo với các chuẩn đo lường. Các chuẩn đo lường dựa trên các *đơn vị*. Nhiều hệ đơn vị khác nhau đã được sử dụng trên khắp thế giới. Phần lớn các chuẩn đo lường này được trao quyền cho một tổ chức phụ trách. Việc trao quyền này có khi bị lạm dụng và ngày nay việc này đã xảy ra, thí dụ như trong kỹ nghệ máy tính cũng như trong quá khứ xa xưa. Giải pháp cho cả hai trường hợp này thì giống nhau: tạo ra chuẩn đo lường có tính độc lập và toàn cầu. Đối với các đơn vị đo lường, việc này đã diễn ra vào thế kỷ 18: để tránh việc các tổ chức độc đoán lạm dụng, để loại bỏ các vấn đề các chuẩn đo lường khác nhau, thay đổi và không thể tái lập được, và – điều này không phải chuyện đùa – để đơn giản hoá việc thu thuế, tạo nên sự công bằng, một nhóm các khoa học gia, chính trị gia và kinh tế gia đồng ý tạo ra một bộ đơn vị. Nó được gọi là *Système International d'Unités*, Hệ đơn vị quốc tế, viết tắt là *SI*, và được xác định bởi một Hiệp ước quốc tế, 'Công ước về Mét'. Các đơn vị được bảo dưỡng bởi một tổ chức quốc tế, 'Đại hội đồng về cân đo', và các tổ chức con của nó, 'Uỷ ban quốc tế về cân đo' và 'Văn phòng quốc tế về cân đo' (BIPM). Tất cả đều được tổ chức trước Cách mạng Pháp.

Xem 368

Đơn vị SI

Tất cả các đơn vị SI đều được xây dựng từ 7 *đơn vị cơ bản*, có định nghĩa chính thức, được dịch từ tiếng Pháp sang tiếng Anh như dưới đây, cùng với ngày tháng định nghĩa:

- '*giây* là khoảng thời gian của 9 192 631 770 chu kỳ của bức xạ tương ứng với sự chuyển dời giữa hai mức siêu tinh tế của trạng thái cơ bản của nguyên tử caesium 133.' (1967) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*
- '*mét* là chiều dài của quãng đường trong chân không mà ánh sáng đi được trong khoảng thời gian 1/299 792 458 s.' (1983) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*
- '*kilogam*, ký hiệu kg, là đơn vị SI của khối lượng. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của hằng số Planck h bằng $6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ khi được biểu diễn theo đơn vị $J \cdot s$ hay $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$.' (2019)'*
- '*ampere*, ký hiệu A, là đơn vị SI của dòng điện. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của điện tích nguyên tố e bằng $1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ khi được biểu diễn theo đơn vị C hay $A \cdot s$.' (2019) * Định nghĩa này tương đương với: 1 ampere là $6.241\,509\,074... \cdot 10^{18}$ điện tích nguyên tố mỗi giây.
- '*kelvin*, ký hiệu K, là đơn vị SI của nhiệt độ nhiệt động lực. Nó được định nghĩa bằng cách lấy trị số của hằng số Boltzmann *k* bằng $1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ khi được biểu diễn theo

đơn vị J/K.' (2019)*

- '*mole*, ký hiệu mol, là đơn vị SI của lượng chất. Một mol chứa đúng $6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ thực thể sơ cấp.' (2019)*
- '*candela* là cường độ sáng, theo hướng đã cho, của một nguồn phát ra bức xạ đơn sắc có tần số $540 \cdot 10^{12}$ hertz và có cường độ bức xạ theo hướng đó bằng (1/683) w/sr.' (1979) Định nghĩa 2019 thì tương đương nhưng ít rõ ràng hơn.*

Ta nên chú ý là cả hai đơn vị thời gian và chiều dài đều được định nghĩa như các tính chất nào đó của một mẫu tiêu chuẩn của chuyển động, cụ thể là ánh sáng. Đại hội đồng về cân đo cũng nhấn mạnh rằng việc quan sát chuyển động là một *điều kiện tiên quyết* để định nghĩa và xây dựng không gian và thời gian. *Chuyển động là cơ sở cho mọi quan sát và mọi phép đo.* Cũng cần nói thêm, việc sử dụng ánh sáng trong các định nghĩa đã được Jacques Babinet đề nghị vào năm 1827.**

Từ những đơn vị cơ bản này, tất cả các đơn vị khác được định nghĩa bằng các phép nhân và chia. Như vậy tất cả các đơn vị SI đều có các tính chất sau đây:

- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị có *độ chính xác cao nhất*: tất cả các đơn vị được định nghĩa với độ chính xác cao hơn độ chính xác của các phép đo thường dùng. Hơn nữa, độ chính xác của các định nghĩa được cải tiến thường xuyên. Sai số tương đối hiện nay của định nghĩa của giây vào khoảng 10^{-14}, của met vào khoảng 10^{-10}, của kilogam vào khoảng 10^{-9}, của ampere là 10^{-7}, của mole ít hơn 10^{-6}, của kelvin là 10^{-6} và của candela là 10^{-3}.
- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *tuyệt đối*: mọi đơn vị đều được định nghĩa sao cho người ta có thể tái lập chúng trong những phòng thí nghiệm được trang bị thích hợp, một cách độc lập, với độ chính xác cao. Điều này nhằm loại trừ tối đa các sai sót hay lạm dụng của các tổ chức định chuẩn. Đúng ra đơn vị SI hiện nay rất gần với các đơn vị tự nhiên của Planck mà ta sẽ trình bày sau đây. Trong thực tế, SI hiện nay là một tiêu chuẩn quốc tế dùng để xác định trị số của 7 hằng số $\Delta\nu_{Cs}$, c, $\hbar$, e, k, N_A và K_{cd}. Sau hơn 200 năm bàn bạc, CGPM còn rất ít việc để làm.
- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *thực tế*: các đơn vị cơ bản là các đại lượng có kích thước thông thường. Các đơn vị thường dùng có tên và cách viết tắt tiêu chuẩn. Danh sách đầy đủ chỉ bao gồm 7 đơn vị cơ bản, các đơn vị phụ, các đơn vị dẫn xuất và các đơn vị được thêm vào.

Có hai đơn vị SI *phụ*: đơn vị đo góc (phẳng), được định nghĩa là tỷ số của chiều dài cung/bán kính, gọi là *radian* (rad). Góc khối được định nghĩa là tỷ số diện tích đối diện/bình phương bán kính, gọi là *steradian* (sr).

Các đơn vị *dẫn xuất* có tên riêng chính thức bằng tiếng Anh, không viết hoa và dấu nhấn, là:

* Ký hiệu của 7 đơn vị là s, m, kg, A, K, mol và cd. Định nghĩa chính thức có đầy đủ ở địa chỉ www.bipm.org. Để biết thêm chi tiết về các mức năng lượng của nguyên tử caesium, hãy tham khảo một quyển sách về vật lý nguyên tử. Thang đo nhiệt độ Celsius θ được định nghĩa như sau: $\theta/°C = T/K - 273.15$; hãy để ý có một sai biệt nhỏ với con số xuất hiện trong định nghĩa của kelvin. Trong định nghĩa của candela, tần số ánh sáng tương ứng với 555.5 nm, tức là màu lục, là bước sóng nhạy nhất đối với mắt.

Xem 303

** Jacques Babinet (1794–1874), vật lý gia Pháp, người đã công bố các công trình quang học quan trọng.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tên	Viết tắt
hertz	Hz = 1/s
pascal	Pa = N/m^2 = kg/(m s^2)
watt	W = kg m^2/s^3
volt	V = kg m^2/(As^3)
ohm	Ω = V/A = kg m^2/(A^{2}s^3)
weber	Wb = Vs = kg m^2/(As^2)
henry	H = Vs/A = kg m^2/(A^{2}s^2)
lumen	lm = cd sr
becquerel	Bq = 1/s
sievert	Sv = J/kg = m^2/s^2

Tên	Viết tắt
newton	N = kg m/s^2
joule	J = Nm = kg m^2/s^2
coulomb	C = As
farad	F = As/V = A^{2}s^4/(kg m^2)
siemens	S = 1/Ω
tesla	T = Wb/m^2 = kg/(As^2) = kg/(Cs)
độ Celsius	°C (xem định nghĩa của kelvin)
lux	lx = lm/m^2 = cd sr/m^2
gray	Gy = J/kg = m^2/s^2
katal	kat = mol/s

Ta cần chú ý là trong tất cả các định nghĩa đơn vị, kilogram chỉ xuất hiện với luỹ thừa 1, 0 và −1. Bạn có thể tìm ra lý do không?

Câu đố 398 s

Các đơn vị không thuộc SI *được thêm vào* là *phút*, *giờ*, *ngày* (đối với thời gian), *độ* 1° = π/180 rad, *phút* 1′ = π/10 800 rad, *giây* 1″ = π/648 000 rad (đối với góc), *lít*, và *tấn*. Các đơn vị khác đều bị tránh không sử dụng.

Người ta làm tăng thêm tính thực tế cho tất cả các đơn vị SI bằng cách đưa ra thêm các tên và cách viết tắt tiêu chuẩn của các luỹ thừa của 10, mà ta gọi là *các tiền tố*:*

Tên luỹ thừa			Tên luỹ thừa			Tên luỹ thừa			Tên luỹ thừa		
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d	10^{18}	Exa	E	10^{-18}	atto	a
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c	10^{21}	Zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m	10^{24}	Yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
10^6	Mega	M	10^{-6}	micro	μ	không chính thức:			Xem 304		
10^9	Giga	G	10^{-9}	nano	n	10^{27}	Xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{12}	Tera	T	10^{-12}	pico	p	10^{30}	Wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{15}	Peta	P	10^{-15}	femto	f	10^{33}	Vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
						10^{36}	Udekta	U	10^{-36}	udeko	u

▪ Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *đầy đủ*: chúng bao gồm một cách có hệ thống tất cả các biến động lực trong vật lý. Thêm nữa, chúng còn điều chỉnh luôn các đơn vị đo lường cho tất cả các khoa học khác.

* Người ta đã sáng chế ra một số tên (yocto nghe giống như từ Latin *octo* 'tám', zepto nghe giống như từ Latin *septem*, yotta và zetta thì tương tự, exa và peta nghe giống như từ Hy Lạp ἑξάκις và πεντάκις là '6 lần' và '5 lần', các tên không chính thức nghe giống như các từ Hy Lạp có nghĩa là 9, 10, 11 và 12); một số tên là từ tiếng Đan Mạch/Na Uy (atto do *atten* '18', femto do *femten* '15'); một số tên là từ tiếng Latin (*mille* là '1000', *centum* là '100', *decem* là '10', *nanus* là 'lùn'); một số tên là từ tiếng Ý (*piccolo* là 'nhỏ'); một số tên là từ tiếng Hy Lạp (micro do μικρός là 'nhỏ', deca/deka do δέκα là '10', hecto do ἑκατόν là '100', kilo do χίλιοι là '1000', mega do μέγας là 'lớn', giga do γίγας là 'khổng lồ', tera do τέρας là 'quái vật').

Hãy dịch câu: Tôi đã bị kẹt xe mất một micro-thế kỷ để đi một quãng đường một picoparsec và tốn hết 2/10 milimét vuông nhiên liệu.

Câu đố 399 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *phổ dụng*: chúng còn được sử dụng trong lĩnh vực thương mại, kỹ nghệ, giáo dục, nghiên cứu và trong gia đình. Chúng còn có thể được các nền văn minh ngoài Trái đất, nếu có, sử dụng.
- Các đơn vị SI tạo thành một hệ đơn vị *nhất quán*: tích hay thương của 2 đơn vị SI cũng là một đơn vị SI. Về nguyên tắc điều này có nghĩa là có thể dùng cùng một chữ viết tắt 'SI' cho mọi đơn vị.

Các đơn vị SI không phải là tập hợp khả hữu duy nhất có thể thoả mãn các yêu cầu trên nhưng chúng là hệ đơn vị đang có, duy nhất làm được điều đó.*

Ý nghĩa của phép đo

Mỗi phép đo là một sự so sánh với một chuẩn đo. Do đó, một phép đo bất kỳ đòi hỏi có *vật chất* để hiện thực hoá chuẩn đo (ngay cả chuẩn vận tốc) và *bức xạ* để hoàn thành việc so sánh. Như vậy khái niệm đo đã giả sử rằng phải có vật chất và bức xạ và chúng phải tách biệt nhau.

Câu đố 400 e

Mỗi phép đo là một sự so sánh. Như vậy đo bao hàm việc phải có không gian và thời gian và chúng phải khác nhau.

Mỗi phép đo sinh ra một kết quả đo. Do đó mỗi phép đo phải có *nơi lưu trữ* kết quả. Như vậy quá trình đo dẫn tới sự phân biệt trạng thái trước và sau khi đo. Nói cách khác, mỗi phép đo là một quá trình *bất thuận nghịch*.

Mỗi phép đo là một quá trình chiếm một lượng thời gian và không gian nào đó.

Các tính chất này tuy đơn giản nhưng quan trọng. Hãy coi chừng xem có ai phủ nhận chúng hay không.

Các câu đố vui và lạ về đơn vị

Giây không còn tương ứng với 1/86 400 của một ngày nữa mặc dù nó đã được định nghĩa như vậy năm 1900; Trái đất bây giờ quay một vòng mất khoảng 86 400.002 s, vì vậy *Cơ quan quốc tế theo dõi chuyển động quay của Trái đất* phải thường xuyên thêm vào 1 giây nhuận để bảo đảm rằng Mặt trời luôn ở điểm cao nhất trên bầu trời vào đúng 12 giờ trưa.** Thời gian được định nghĩa như vậy được gọi là *Toạ độ thời gian phổ quát*. Tốc độ quay của Trái đất cũng thay đổi bất thường từ ngày này qua ngày khác do thời tiết; tốc độ quay trung bình cũng thay đổi theo mùa vì sự thay đổi các chỏm băng ở địa cực; thêm vào đó tốc độ quay cũng giảm dần theo thời gian vì sự ma sát do thuỷ triều. Tốc độ thêm giây nhuận do đó cũng phải tăng lên sau 500 ngày chứ không phải là hằng số.

* Ngoài các đơn vị quốc tế, cũng có các đơn vị mang tính *địa phương*. Phần lớn các đơn vị địa phương, vẫn còn được sử dụng, có nguồn gốc La Mã. Dặm xuất phát từ *milia passum*, thường là 1000 bước (đôi) dài khoảng 1480 mm mỗi bước; ngày nay một hải lý, đã từng được định nghĩa là 1 phút cung trên Mặt đất, có chiều dài chính xác là 1852 m. Inch xuất phát từ *uncia*/*onzia* (1/12 của một foot). Pound (xuất phát từ *pondere* 'cân') được dịch từ *libra* – cái cân – cũng là nguồn gốc của chữ viết tắt lb. Ngay cả thói quen đếm từng tá thay vì chục cũng có nguồn gốc La Mã. Những đơn vị này và các đơn vị buồn cười khác – như hệ đơn vị mà tên các đơn vị đều bắt đầu bằng chữ 'f', và hệ dùng furlong/fortnight làm đơn vị vận tốc – bây giờ đã chính thức được định nghĩa là bội số của đơn vị SI.

** Website của cơ quan ở hpiers.obspm.fr có thông tin chi tiết về việc bổ sung này, cũng như ở trang maia.usno.navy.mil, một trong những websites có ích thuộc quân đội. Cũng nên thăm trang www.bipm.fr, của BIPM.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

Việc không sử dụng đơn vị SI có thể gây ra tốn kém. Năm 1999, cơ quan không gian NASA mất một vệ tinh trên Hoả tinh vì một số lập trình viên đã dùng đơn vị địa phương thay vì đơn vị SI trong chương trình. Kết quả của việc dùng feet thay vì mét, phi thuyền Mars Climate Orbiter đâm vào hành tinh thay vì bay quanh nó; thiệt hại khoảng 100 triệu euro.*

* *

Những đại lượng trong thiên nhiên được đo chính xác nhất là tần số của các pulsar ms,** tần số chuyển dời nguyên tử và hằng số Rydberg của *nguyên tử* hydrogen, có thể được đo một cách chính xác như việc định nghĩa đơn vị giây. Chuyển dời caesium dùng định nghĩa giây có bề rộng vạch hữu hạn đã giới hạn độ chính xác khoảng 14 chữ số.

* *

Hằng số được đo ít chính xác nhất trong các hằng số vật lý cơ bản là hằng số hấp dẫn G và hằng số liên kết mạnh α_s. Ít chính xác hơn là tuổi của vũ trụ và mật độ của nó (xem Trang 316 Bảng 14).

* *

Độ biến thiên của các đại lượng thường dễ đo hơn giá trị của chúng. Thí dụ như trong máy phát hiện sóng hấp dẫn, độ nhạy đạt được trong năm 1992 là $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ đối với Xem 305 chiều dài có bậc là 1 m. Nói cách khác, đối với một khối kim loại thể tích khoảng 1 mét khối thì ta có thể đo được độ biến thiên chiều dài khoảng 3000 lần nhỏ hơn bán kính proton. Các bộ dụng cụ này bây giờ đã được thay thế bằng giao thoa kế vòng. Giao thoa kế vòng đo được độ biến thiên khoảng 10^{-21} đã được xây dựng và người vẫn đang phát Xem 306 triển chúng.

* *

Bảng tiền tố SI bao gồm 72 bậc của độ lớn. Người ta cần bao nhiêu tiền tố phụ? Ngay cả một danh sách mở rộng cũng chỉ bao gồm một phần nhỏ của một số rất lớn các khả năng. Như vậy chẳng lẽ Đại hội đồng cân đo sẽ phải tiếp tục mãi việc định nghĩa một số Câu đố 401 s vô hạn các tiền tố SI hay sao?

* *

Triết gia Pháp Voltaire, sau khi gặp Newton, đã phổ biến câu chuyện nổi tiếng về mối liên hệ giữa sự rơi của một vật và chuyển động của Mặt trăng đã được Newton khám phá khi ông nhìn thấy một quả táo rơi từ trên cây xuống. Hơn một thế kỷ sau, chỉ trước Cách mạng Pháp, một uỷ ban các nhà khoa học quyết định lấy đơn vị lực chính xác bằng lực do trọng lực tác dụng lên một *trái táo chuẩn* và đặt tên cho nó theo tên khoa học gia người Anh. Sau khi nghiên cứu rộng rãi, người ta thấy rằng khối lượng của trái táo chuẩn là 101.9716 g; trọng lượng của nó được gọi là 1 newton. Từ đó, du khách tới

* Truyện này làm sống lại một huyền thoại cũ nhưng sai lầm cho rằng chỉ có 3 quốc gia trên thế giới không dùng đơn vị SI là: Liberia, Mỹ và Myanmar.

** Một tổng quan của công trình hấp dẫn này là của J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

viện bảo tàng ở Sèvres gần Paris đã có thể thích thú ngắm nghía mét chuẩn, kilogram chuẩn và trái táo chuẩn.*

ĐỘ CHÍNH XÁC VÀ ĐỘ ĐÚNG CỦA CÁC PHÉP ĐO

Đo lường là nền tảng của vật lý. Mỗi phép đo có một *sai số*. Sai số là do sự thiếu chính xác hay chưa đúng. *Độ chính xác* là mức độ tái lập kết quả khi phép đo được lặp lại; *độ đúng* là mức độ tương ứng của kết quả đo với giá trị thực.

Sự thiếu chính xác là do *các sai số ngẫu nhiên* hay tình cờ; sai số được đánh giá tốt nhất bằng *độ lệch tiêu chuẩn*, ký hiệu σ; được định nghĩa như sau

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \,, \tag{296}$$

trong đó $\bar{x}$ là giá trị trung bình của các kết quả đo x_i. (Bạn có biết tại sao người ta dùng $n-1$ trong công thức thay vì n không?)

Câu đố 402 s

Đối với phần lớn các thí nghiệm, sự phân bố của các giá trị đo được đều hướng tới phân bố chuẩn, còn gọi là *phân bố Gauss*, khi số lượng phép đo tăng lên. Phân bố biểu diễn trong Hình 125, được mô tả bởi biểu thức

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \,. \tag{297}$$

Bình phương của độ lệch tiêu chuẩn σ^2 được gọi là *phương sai*. Đối với phân bố Gauss của các giá trị đo được, 2.35σ là độ rộng tại nửa cực đại.

Câu đố 403 e

Độ đúng không cao là do *các sai số hệ thống*; thường người ta chỉ có thể ước lượng các sai số này. Phần ước lượng này được thêm vào sai số ngẫu nhiên để tạo ra *sai số toàn phần của thí nghiệm*, đôi khi còn được gọi là *độ bất định toàn phần*. Sai số *tương đối* hay độ bất định là tỷ số giữa sai số và giá trị đo được.

Xem 308

Thí dụ một phép đo chuyên nghiệp sẽ cho một kết quả như 0.312(6) m. Con số giữa hai dấu ngoặc đơn là độ lệch tiêu chuẩn σ, theo đơn vị của chữ số cuối cùng. Theo trên, ta đã giả sử kết quả đo tuân theo phân bố Gauss. Do đó, một giá trị 0.312(6) m hàm ý rằng giá trị thực theo mong đợi nằm

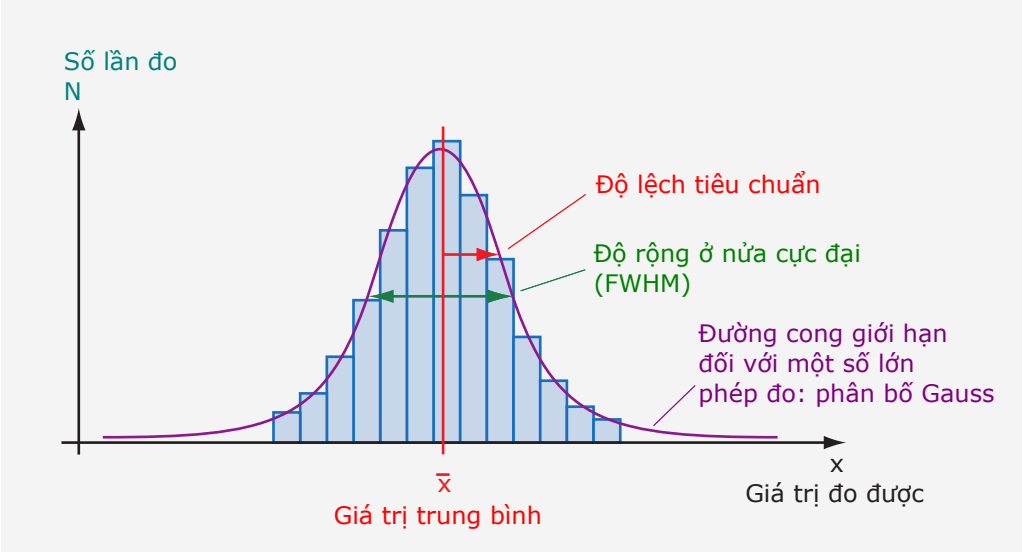
Câu đố 404 e

— trong khoảng 1σ với xác suất 68.3 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.006 m;
— trong khoảng 2σ với xác suất 95.4 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.012 m;
— trong khoảng 3σ với xác suất 99.73 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.018 m;
— trong khoảng 4σ với xác suất 99.9937 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.024 m;

* Rõ ràng đây là một trò đùa; không có trái táo chuẩn nào ở đây. Tuy vậy có một *câu chuyện thật* là các chủ nhân của nhiều cây táo ở Anh và Mỹ đã nhận là đã sở hữu các cây táo là dòng dõi của cây táo mà Newton đã từng ngồi để phát hiện ra định luật nổi tiếng của mình. Người ta đã thực hiện các xét nghiệm DNA để xem các cây này có bắt nguồn từ cùng một cây hay không. Kết quả không làm ai ngạc nhiên là cây ở MIT, khác với các cây ở Anh, là đồ giả.

Xem 307

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 125 Một thí nghiệm chính xác và phân bố của các giá trị đo được. Sự chính xác cao nếu bề rộng của phân bố hẹp; độ đúng cao nếu tâm của phân bố phù hợp với giá trị thực.

— trong khoảng 5σ với xác suất 99.999 943 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.030 m;
— trong khoảng 6σ với xác suất 99.999 999 80 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.036 m;
— trong khoảng 7σ với xác suất 99.999 999 999 74 %, như vậy trong thí dụ này nằm trong khoảng 0.312 ± 0.041 m.

Câu đố 405 s (Những con số sau có ý nghĩa không?)

Nên nhớ rằng độ lệch tiêu chuẩn có 1 chữ số; bạn phải là một chuyên gia tầm cỡ thế giới mới dùng 2 chữ số, và một anh hề mới dùng nhiều chữ số hơn. Nếu không cho độ lệch tiêu chuẩn, thì xem như bằng (1). Kết quả, đối với các tay chuyên nghiệp, thì 1 km và 1000 m *không* giống nhau!

Điều gì sẽ xảy ra cho các sai số khi hai giá trị đo được A và B được cộng hay trừ với nhau? Nếu tất cả các phép đo độc lập – hay không tương quan – độ lệch tiêu chuẩn của tổng *và* hiệu sẽ là $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$. Đối với tích hay thương của hai giá trị đo được không tương quan C và D, kết quả là $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$, ở đây ρ là độ lệch tiêu chuẩn *tương đối*.

Câu đố 406 s Giả sử bạn đo được một vật đi được 1.0 m trong 3.0 s: giá trị đo được của tốc độ là bao nhiêu?

Giới hạn của độ chính xác

Giới hạn của độ đúng và độ chính xác là gì? Không có cách nào, ngay cả theo nguyên tắc, để đo một chiều dài x với *độ chính xác* cao hơn 61 chữ số, vì trong thiên nhiên, tỷ số giữa chiều dài lớn nhất và nhỏ nhất có thể đo được là $\Delta x/x > l_{\text{Pl}}/d_{\text{horizon}} = 10^{-61}$. (Tỷ số
Câu đố 407 e này còn đúng với lực và thể tích không?) Trong quyển sách sau cùng của chúng ta, việc nghiên cứu đồng hồ và thước sẽ củng cố cho giới hạn lý thuyết này.

Quyển VI, trang 94 Cũng dễ suy ra các giới hạn thực tế chặt chẽ hơn. Không có máy móc tưởng tượng

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

nào có thể đo các đại lượng với độ chính xác cao hơn phép đo đường kính của Trái đất trong phạm vi chiều dài nhỏ nhất đã đo được, khoảng 10^{-19} m; giới hạn đó có khoảng 26 chữ số chính xác. Dùng một giới hạn hiện thực hơn của một máy có kích cỡ 1000 m sẽ dẫn tới một giới hạn 22 chữ số. Nếu, như đã tiên đoán ở trên, các phép đo thời gian thực sự đạt tới 17 chữ số chính xác, thì chúng đang tiến gần đến giới hạn thực tế, vì tách rời khỏi kích thước, có một ràng buộc thực tế phụ: chi phí. Thật vậy, thêm một chữ số chính xác trong phép đo thường có nghĩa là thêm một chữ số vào chi phí thiết bị.

Các hằng số vật lý

Trong vật lý, các quan trắc tổng quát được suy ra từ các quan trắc cơ bản hơn. Kết quả là nhiều phép đo có thể được suy ra từ những phép đo cơ bản hơn. Các phép đo cơ bản nhất là các phép đo các hằng số vật lý.

Các bảng sau đây cho các giá trị tốt nhất thế giới của các hằng số vật lý và các tính chất quan trọng nhất – theo đơn vị SI và vài đơn vị thông thường khác – như đã công bố trong phần tham khảo các tiêu chuẩn. Các giá trị là trung bình của các phép đo tốt nhất thế giới đã được thực hiện cho đến nay. Như thường lệ, sai số thực nghiệm, bao gồm cả sai số ngẫu nhiên và sai số hệ thống đã được ước lượng, biểu diễn theo dạng độ lệch tiêu chuẩn được cho vào chữ số cuối cùng. Đúng ra thì sau mỗi số trong các bảng sau đây là một câu chuyện dài đáng kể lại, nhưng ở đây không đủ chỗ để làm việc đó.

Xem 309

Xem 310

Về nguyên tắc, *mọi* tính chất định lượng của vật chất đều có thể tính toán bằng Thuyết lượng tử – nói chính xác hơn là các phương trình của mô hình chuẩn của hạt – và tập hợp các hằng số *cơ bản* được cho trong bảng sau đây. Thí dụ như màu sắc, mật độ và các tính chất đàn hồi đều có thể tiên đoán được bằng phương thức này.

Quyển V, trang 261

BẢNG 11 Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.[a]
Các hằng số dùng để định nghĩa các đơn vị đo lường SI			
Tốc độ của ánh sáng trong chân không [c]	c	299 792 458 m/s	0
Hằng số Planck [c]	h	$6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Js	0
Hằng số Planck rút gọn, lượng tử tác dụng	$\hbar$	$1.054\,571\,817\,... \cdot 10^{-34}$ Js	0
Điện tích Positron [c]	e	0.160 217 6634 aC	0
Hằng số Boltzmann [c]	k	$1.380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K	0
Số Avogadro	N_A	$6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol	0
Hằng số *sẽ* dùng để định nghĩa đơn vị đo lường SI			
Hằng số hấp dẫn	G	$6.674\,30(15) \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Các hằng số cơ bản khác			
Số chiều không-thời gian		3 + 1	0 [b]
Hằng số cấu trúc tinh tế [d] hay	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	1/137.035 999 084(21)	$1.5 \cdot 10^{-10}$
hằng số liên kết điện từ	$= g_{em}(m_e^2c^2)$	= 0.007 297 352 5693(11)	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Hằng số liên kết Fermi [d] hay	$G_F/(\hbar c)^3$	$1.166\,3787(6) \cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$5.1 \cdot 10^{-7}$
hằng số liên kết yếu	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/(4\pi)1/30.1(3)$		$1 \cdot 10^{-2}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 11 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý cơ bản.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ[a]
Hằng số liên kết mạnh [d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/(4\pi)$	0.1179(10)	$8.5 \cdot 10^{-3}$
Góc hoà trộn yếu	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	0.231 22(4)	$1.7 \cdot 10^{-4}$
	$\sin^2\theta_W$ (trên mặt) $= 1 - (m_W/m_Z)^2$	0.222 90(30)	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Matrix hoà trộn quark CMK	$\lvert V\rvert$	$\begin{pmatrix} 0.97383(24) & 0.2272(10) & 0.00396(9) \\ 0.2271(10) & 0.97296(24) & 0.04221(80) \\ 0.00814(64) & 0.04161(78) & 0.999100(34) \end{pmatrix}$	
Bất biến Jarlskog	J	$3.08(18) \cdot 10^{-5}$	
Matrix hoà trộn neutrino PMNS	$\lvert P\rvert$	$\begin{pmatrix} 0.82(2) & 0.55(4) & 0.150(7) \\ 0.37(13) & 0.57(11) & 0.71(7) \\ 0.41(13) & 0.59(10) & 0.69(7) \end{pmatrix}$	
Khối lượng Electron	m_e	$9.109\,383\,7015(28) \cdot 10^{-31}$ kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
		$5.485\,799\,090\,65(16) \cdot 10^{-4}$ u	$2.9 \cdot 10^{-11}$
		0.510 998 950 00(15) MeV	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng Muon	m_μ	$1.883\,531\,627(42) \cdot 10^{-28}$ kg	$2.2 \cdot 10^{-8}$
		105.658 3755(23) MeV	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Khối lượng Tau	m_τ	1.776 82(12) GeV/c^2	$6.8 \cdot 10^{-5}$
Khối lượng neutrino electron	m_{ν_e}	< 2 eV/c^2	
Khối lượng neutrino Muon	m_{ν_μ}	< 2 eV/c^2	
Khối lượng neutrino Tau	m_{ν_τ}	< 2 eV/c^2	
Khối lượng quark Up	u	21.6(+0.49/ − 0.26) MeV/c^2	
Khối lượng quark Down	d	4.67(+0.48/ − 0.17) MeV/c^2	
Khối lượng quark Strange	s	93(+11/ − 5) MeV/c^2	
Khối lượng quark Charm	c	1.27(2) GeV/c^2	
Khối lượng quark Bottom	b	4.18(3) GeV/c^2	
Khối lượng quark Top	t	172.9(0.4) GeV/c^2	
Khối lượng Photon	γ	$< 2 \cdot 10^{-54}$ kg	
Khối lượng boson W	$W^\pm$	80.379(12) GeV/c^2	
Khối lượng boson Z	Z^0	91.1876(21) GeV/c^2	
Khối lượng Higgs	H	125.10(14) GeV/c^2	
Khối lượng Gluon	$g_{1\ldots8}$	*c.* 0 MeV/c^2	

a. Độ bất định: độ lệch tiêu chuẩn của sai số của phép đo.
b. Chỉ đo được từ 10^{-19} m tới 10^{26} m.
c. Hằng số định nghĩa.
d. Tất cả các hằng số liên kết phụ thuộc vào sự chuyển động lượng 4 chiều, như đã giải thích trong phần tái chuẩn hoá. *Hằng số cấu trúc tinh tế* là tên truyền thống của hằng số liên kết điện từ g_{em} trong trường hợp chuyển động lượng 4 chiều có $Q^2 = m_e^2c^2$, là giá trị khả hữu nhỏ nhất. Ở mức chuyển động lượng cao hơn, nó có giá trị lớn hơn, tức là $g_{em}(Q^2 = M_W^2c^2) \approx 1/128$. Trái lại, hằng số liên kết mạnh ở mức chuyển động lượng cao hơn, có giá trị nhỏ hơn; tức là

Page 131

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

$\alpha_s(34\,\text{GeV}) = 0.14(2)$.

Tại sao các hằng số cơ bản này lại có giá trị như vậy? Đối với một hằng số bất kỳ *có thứ nguyên*, như lượng tử tác dụng $\hbar$, trị số chỉ có giá trị lịch sử. Nó là $1.054 \cdot 10^{-34}$ Js vì định nghĩa SI của joule và giây. Do đó câu hỏi tại sao giá trị của một hằng số *có thứ nguyên* không lớn hơn hay nhỏ hơn, luôn luôn đòi hỏi ta hiểu nguồn gốc của các số *không thứ nguyên* là tỷ số giữa hằng số đó và *đơn vị tự nhiên* tương ứng được định nghĩa bằng c, G, k, N_A và $\hbar$. Thông tin và giá trị của các đơn vị tự nhiên được cho trong một phần riêng.

Quyển IV, trang 210

Việc tìm hiểu kích thước nguyên tử, con người, cây cối và ngôi sao, thời gian xảy ra của các quá trình phân tử và nguyên tử, khối lượng của hạt nhân và núi non, bao hàm việc tìm hiểu về các tỷ số giữa các giá trị này và đơn vị tự nhiên tương ứng. Như vậy điểm chính yếu của việc tìm hiểu thiên nhiên là tìm hiểu tất cả các tỷ số của phép đo, tức là tất cả các hằng số không thứ nguyên. Nhiệm vụ tìm hiểu tất cả các tỷ số, bao gồm chính hằng số cấu trúc tinh tế α, chỉ được hoàn tất trong quyển cuối cùng của cuộc phiêu lưu.

Các hằng số cơ bản sinh ra các kết quả quan sát hữu ích, có độ chính xác cao, sau đây:

BẢNG 12 Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
Độ từ thẩm của chân không	μ_0	1.256 637 062 12(19) μH/m	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Độ điện thẩm của chân không	$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	8.854 187 8128(13) pF/m	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Ba trở trong chân không	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376.730 313 668(57) Ω	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Số Loschmidt ở 273.15 K và 101 325 Pa	N_L	$2.686\,780\,111\ldots \cdot 10^{25}$ 1/m^3	0
Hằng số Faraday	$F = N_A e$	96 485.332 12... C/mol	0
Hằng số khí phổ dụng	$R = N_A k$	8.314 462 618... J/(mol K)	0
Thể tích mol của khí lý tưởng ở 273.15 K và 101 325 Pa	$V = RT/p$	22.413 969 54... l/mol	0
Hằng số Rydberg [a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/(2h)$	10 973 731.568 160(21) m^{-1}	$1.9 \cdot 10^{-12}$
Lượng tử độ dẫn	$G_0 = 2e^2/h$	77.480 917 29... μS	0
Lượng tử từ thông	$\varphi_0 = h/(2e)$	2.067 833 848... fWb	0
Tỷ số tần số Josephson	$2e/h$	483.597 8484... THz/V	0
Hằng số Von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/(2\alpha)$	25 812.807 45... Ω	0
Magneton Bohr	$\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	9.274 010 0783(28) yJ/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Bán kính electron cổ điển	$r_e = e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2)$	2.817 940 3262(13) fm	$4.5 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton	$\lambda_C = h/(m_e c)$	2.426 310 238 67(73) pm	$3.0 \cdot 10^{-10}$
của electron	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/(m_e c) = r_e/\alpha$	0.386 159 267 96(12) pm	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Bán kính Bohr [a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52.917 721 0903(80) pm	$1.5 \cdot 10^{-10}$
Lượng tử của lưu số	$h/(2m_e)$	3.636 947 5516(11) cm^2/s	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Điện tích riêng của positron	e/m_e	175.882 001 076(55) GC/kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Tần số Cyclotron của electron	$f_c/B = e/(2\pi m_e)$	27.992 489 872(9) GHz/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của electron	μ_e	−9.284 764 7043(28) yJ/T	$3.0 \cdot 10^{-10}$
	μ_e/μ_B	−1.001 159 652 181 28(18)	$1.7 \cdot 10^{-13}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 12 (Tiếp theo) Các hằng số vật lý dẫn xuất.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị theo đơn vị SI	Độ bđ.
	μ_e/μ_N	$-1\,838.281\,971\,88(11) \cdot 10^3$	$6.0 \cdot 10^{-11}$
Thừa số g của electron	g_e	$-2.002\,319\,304\,362\,56(35)$	$1.7 \cdot 10^{-13}$
Tỷ khối muon–electron	m_μ/m_e	206.768 2830(46)	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Moment từ của muon	μ_μ	$-4.490\,448\,30(10) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2.2 \cdot 10^{-8}$
Thừa số g của muon	g_μ	$-2.002\,331\,8418(13)$	$6.3 \cdot 10^{-10}$
Đơn vị khối lượng nguyên tử	$1\,u = m_{^{12}C}/12$	$1.660\,539\,066\,60(50) \cdot 10^{-27}$ kg	$3.0 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng proton	m_p	$1.672\,621\,923\,69(51) \cdot 10^{-27}$ kg	$3.1 \cdot 10^{-10}$
		1.007 276 466 621(53) u	$5.3 \cdot 10^{-11}$
		938.272 088 16(29) MeV	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối proton–electron	m_p/m_e	1 836.152 673 43(11)	$6.0 \cdot 10^{-11}$
Điện tích riêng của proton	e/m_p	$9.578\,833\,1560(29) \cdot 10^7$ C/kg	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton của proton	$\lambda_{C,p} = h/(m_p c)$	1.321 409 855 39(40) fm	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Magneton hạt nhân	$\mu_N = e\hbar/(2m_p)$	$5.050\,783\,7461(15) \cdot 10^{-27}$ J/T	$3.1 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của proton	μ_p	$1.410\,606\,797\,36(60) \cdot 10^{-26}$ J/T	$4.2 \cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_B	$1.521\,032\,202\,30(46) \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_N	2.792 847 344 63(82)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Tỷ số hồi chuyển từ của proton	$\gamma_p = 2\mu_p/h$	42.577 478 518(18) MHz/T	$4.2 \cdot 10^{-10}$
Thừa số g của proton	g_p	5.585 694 6893(16)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Khối lượng neutron	m_n	$1.674\,927\,498\,04(95) \cdot 10^{-27}$ kg	$5.7 \cdot 10^{-10}$
		1.008 664 915 95(43) u	$4.8 \cdot 10^{-10}$
		939.565 420 52(54) MeV	$5.7 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối neutron–electron	m_n/m_e	1 838.683 661 73(89)	$4.8 \cdot 10^{-10}$
Tỷ khối neutron–proton	m_n/m_p	1.001 378 419 31(49)	$4.9 \cdot 10^{-10}$
Bước sóng Compton của neutron	$\lambda_{C,n} = h/(m_n c)$	1.319 590 905 81(75) fm	$5.7 \cdot 10^{-10}$
Moment từ của neutron	μ_n	$-0.966\,236\,51(23) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1.041\,875\,63(25) \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_N	$-1.913\,042\,73(45)$	$2.4 \cdot 10^{-7}$
Hằng số Stefan–Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/(60\hbar^3 c^2)$	56.703 744 19... nW/(m^{2}K^4)	0
Hằng số dịch chuyển Wien	$b = \lambda_{max} T$	2.897 771 955... mmK	0
		58.789 257 57... GHz/K	0
Electron volt	eV	0.160 217 6634... aJ	0
Hệ số chuyển đổi bit sang entropy	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0.956 994... J/K	0
Năng lượng của TNT		3.7 tới 4.0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Đối với khối lượng hạt nhân lớn vô hạn.

Một số tính chất hữu ích của môi trường địa phương của chúng ta được cho trong bảng sau đây.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 13 Các hằng số thiên văn.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Năm tropic 1900 [a]	a	31 556 925.974 7 s
Năm tropic 1994	a	31 556 925.2 s
Ngày sao trung bình	d	$23^h56'4.090\,53''$
Khoảng cách Trái đất–Mặt trời trung bình [b]		149 597 870.691(30) km
Đơn vị thiên văn [b]	AU	149 597 870 691 m
Năm ánh sáng, căn cứ trên năm Julian [b]	al	9.460 730 472 5808 Pm
Parsec	pc	30.856 775 806 Pm = 3.261 634 al
Khối lượng Trái đất	$M_{♁}$	$5.973(1) \cdot 10^{24}$ kg
Hằng số hấp dẫn địa tâm	GM	$3.986\,004\,418(8) \cdot 10^{14}$ m^3/s^2
Chiều dài hấp dẫn của Trái đất	$l_{♁} = 2GM/c^2$	8.870 056 078(16) mm
Bán kính xích đạo của Trái đất [c]	$R_{♁\mathrm{eq}}$	6378.1366(1) km
Bán kính cực của Trái đất [c]	$R_{♁\mathrm{p}}$	6356.752(1) km
Khoảng cách xích đạo–cực [c]		10 001.966 km (trung bình)
Độ phẳng của Trái đất [c]	$e_{♁}$	1/298.25642(1)
Mật độ trung bình của Trái đất	$\rho_{♁}$	5.5 Mg/m^3
Tuổi Trái đất	$T_{♁}$	4.50(4) Ga = 142(2) Ps
Gia tốc trọng lực	g	9.806 65 m/s^2
Áp suất khí quyển chuẩn của Trái đất	p_0	101 325 Pa
Bán kính Mặt trăng	$R_{☾\,\mathrm{v}}$	1738 km theo hướng của Trái đất
Bán kính Mặt trăng	$R_{☾\,\mathrm{h}}$	1737.4 km theo hai hướng khác
Khối lượng Mặt trăng	$M_{☾}$	$7.35 \cdot 10^{22}$ kg
Khoảng cách trung bình tới Mặt trăng [d]	$d_{☾}$	384 401 km
Khoảng cách tới Mặt trăng ở điểm cận địa [d]		tiêu biểu 363 Mm, cực tiểu trong lịch sử 359 861 km
Khoảng cách tới Mặt trăng ở điểm viễn địa [d]		tiêu biểu 404 Mm, cực đại trong lịch sử 406 720 km
Kích thước góc của Mặt trăng [e]		trung bình 0.5181° = 31.08′, cực tiểu 0.49°, cực đại 0.55°
Mật độ trung bình của Mặt trăng	$\rho_{☾}$	3.3 Mg/m^3
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mặt trăng	$g_{☾}$	1.62 m/s^2
Áp suất khí quyển Mặt trăng	$p_{☾}$	từ 10^{-10} Pa (đêm) tới 10^{-7} Pa (ngày)
Khối lượng Mộc tinh	$M_{♃}$	$1.90 \cdot 10^{27}$ kg
Bán kính Mộc tinh, xích đạo	$R_{♃}$	71.398 Mm
Bán kính Mộc tinh, cực	$R_{♃}$	67.1(1) Mm
Khoảng cách trung bình Mộc tinh-Mặt trời	$D_{♃}$	778 412 020 km
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mộc tinh	$g_{♃}$	24.9 m/s^2
Áp suất khí quyển Mộc tinh	$p_{♃}$	từ 20 kPa tới 200 kPa
Khối lượng Mặt trời	$M_{☉}$	$1.988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
Chiều dài hấp dẫn của Mặt trời	$2GM_{☉}/c^2$	2.953 250 08(5) km
Hằng số hấp dẫn nhật tâm	$GM_{☉}$	$132.712\,440\,018(8) \cdot 10^{18}$ m^3/s^2

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 13 (Tiếp theo) Các hằng số thiên văn.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Độ trưng của Mặt trời	$L_\odot$	384.6 YW
Bán kính xích đạo Mặt trời	$R_\odot$	695.98(7) Mm
Kích thước góc của Mặt trời		0.53° trung bình; cực tiểu vào ngày 4/7 (điểm viễn nhật) 1888″, cực đại vào ngày 4/1 (điểm cận nhật) 1952″
Mật độ trung bình của Mặt trời	$\rho_\odot$	1.4 Mg/m^3
Khoảng cách trung bình tới Mặt trời	AU	149 597 870.691(30) km
Tuổi Mặt trời	$T_\odot$	4.6 Ga
Vận tốc Mặt trời quanh tâm thiên hà	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
Vận tốc Mặt trời đối với nền vũ trụ	$v_{\odot b}$	370.6(5) km/s
Gia tốc hấp dẫn tại bề mặt Mặt trời	$g_\odot$	274 m/s^2
Áp suất hạ quang quyển của Mặt trời	$p_\odot$	15 kPa
Khoảng cách tới tâm Ngân hà		8.0(5) kpc = 26.1(1.6) kal
Tuổi Ngân hà		13.6 Ga
Kích thước Ngân hà		*c.* 10^{21} m hay 100 kal
Khối lượng Ngân hà		10^{12} khối lượng Mặt trời, *c.* $2 \cdot 10^{42}$ kg
Đám thiên hà xa nhất đã biết	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9.6 \cdot 10^9$ al

a. Định nghĩa một hằng lượng giữa 2 lần đi qua điểm xuân phân liên tiếp; đã có lần người ta dùng nó để định nghĩa giây. (Nên nhớ: π s thì bằng cỡ một nano-thế kỷ.) Giá trị 1990 thì ít hơn khoảng 0.7 s, tương ứng với việc đi chậm lại khoảng 0.2 ms/a. (Coi chừng: tại sao?) Có cả một công thức theo kinh nghiệm dành cho sự thay đổi chiều dài của năm theo thời gian.

Câu đố 408 s

Xem 311

b. Độ chính xác đáng kinh ngạc trong khoảng cách trung bình Trái đất–Mặt trời, vì chỉ có 30 m, là nhờ việc đo thời gian trung bình của các tín hiệu gởi từ phi thuyền Viking và phi thuyền thám hiểm Hoả tinh được thực hiện trong thời gian hơn 20 năm. Cũng nên nhớ rằng Hiệp hội thiên văn quốc tế phân biệt khoảng cách trung bình Trái đất–Mặt trời với *đơn vị thiên văn*; đại lượng sau được định nghĩa như một chiều dài cố định và chính xác. *Năm ánh sáng* cũng là một đơn vị được IAU định nghĩa là một con số chính xác. Để biết thêm chi tiết, hãy xem trang www.iau.org/public/measuring.

c. Hình dạng của Trái đất được Hệ thống trắc địa thế giới mô tả chính xác nhất. Ấn bản sau cùng đã có từ năm 1984. Để có một cái nhìn bao quát về nền tảng cũng như chi tiết, hãy xem website www.wgs84.com. Hiệp hội trắc địa quốc tế đã tinh lọc dữ liệu trong năm 2000. Bán kính và độ phẳng được ghi ra đây là dữ liệu dành cho 'hệ thuỷ triều trung bình'. Chúng khác với dữ liệu của 'hệ không thuỷ triều' và các hệ khác vào khoảng 0.7 m. Các thông tin cũng đã tự tạo thành một khoa học.

d. Được đo giữa 2 tâm. Để tìm vị trí chính xác của Mặt trăng vào ngày tháng đã cho, hãy xem trang www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Đối với các hành tinh hãy xem trang www.fourmilab.ch/solar/solar.html và các trang khác trên cùng site.

e. Góc được định nghĩa như sau: 1 độ = 1° = π/180 rad, 1 phút (đầu tiên) = 1′ = 1°/60, 1 giây

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

(phút) = $1'' = 1'/60$. Các đơn vị cổ 'phút thứ 3' và 'phút thứ tư', mỗi đơn vị là 1/60 của đơn vị đứng trước, không còn được sử dụng nữa. ('Minute' có nghĩa là 'rất nhỏ' và nó vẫn còn giữ nghĩa đó trong Anh văn hiện đại.)

Một số tính chất của thiên nhiên ở tầm cỡ lớn được liệt kê trong bảng dưới đây. (Thêm một câu đố, bạn có thể xác định xem một tính chất bất kỳ của vũ trụ đã được liệt kê hay chưa?)

Câu đố 409 s

BẢNG 14 Các hằng số vũ trụ.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Hằng số vũ trụ	Λ	$c.\ 1 \cdot 10^{-52}\ \mathrm{m}^{-2}$
Tuổi của vũ trụ [a]	t_0	$4.333(53) \cdot 10^{17}\ \mathrm{s} = 13.8(0.1) \cdot 10^{9}\ \mathrm{a}$
(được xác định từ không-thời gian, thông qua sự giãn nở, và sử dụng Thuyết tương đối tổng quát)		
Tuổi của vũ trụ [a]	t_0	trên $3.5(4) \cdot 10^{17}\ \mathrm{s} = 11.5(1.5) \cdot 10^{9}\ \mathrm{a}$
(được xác định từ vật chất, thông qua các thiên hà và ngôi sao, sử dụng Thuyết lượng tử)		
Tham số Hubble [a]	H_0	$2.3(2) \cdot 10^{-18}\ \mathrm{s}^{-1} = 0.73(4) \cdot 10^{-10}\ \mathrm{a}^{-1}$
	$= h_0 \cdot 100\ \mathrm{km/s\,Mpc} = h_0 \cdot 1.0227 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{a}^{-1}$	
Tham số Hubble rút gọn [a]	h_0	0.71(4)
Tham số giảm tốc [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	−0.66(10)
Khoảng cách chân trời vũ trụ [a]	$d_0 = 3ct_0$	$40.0(6) \cdot 10^{26}\ \mathrm{m} = 13.0(2)\ \mathrm{Gpc}$
Topo của vũ trụ		độ không rời rạc lên tới 10^{26} m
Số chiều của không gian		3, cho các khoảng cách lên tới 10^{26} m
Mật độ tới hạn	$\rho_c = 3H_0^2/(8\pi G)$	$h_0^2 \cdot 1.878\,82(24) \cdot 10^{-26}\ \mathrm{kg/m}^3$
của vũ trụ		$= 0.95(12) \cdot 10^{-26}\ \mathrm{kg/m}^3$
Tham số mật độ (toàn phần) [a]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1.02(2)
Tham số mật độ Baryon [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0.044(4)
Tham số mật độ vật chất tối lạnh [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0.23(4)
Tham số mật độ Neutrino [a]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0.001 to 0.05
Tham số mật độ năng lượng tối [a]	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0.73(4)
Tham số trạng thái năng lượng tối	$w = p_X/\rho_X$	−1.0(2)
Khối lượng Baryon	m_b	$1.67 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
Mật độ số Baryon		$0.25(1)\ /\mathrm{m}^3$
Mật độ vật chất sáng		$3.8(2) \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg/m}^3$
Số ngôi sao trong vũ trụ	n_s	$10^{22\pm1}$
Số Baryon trong vũ trụ	n_b	$10^{81\pm1}$
Nhiệt độ nền vi ba [b]	T_0	2.725(1) K
Số Photon trong vũ trụ	n_γ	10^{89}
Mật độ năng lượng Photon	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/(15T_0^4)$	$4.6 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg/m}^3$
Mật độ số Photon		$410.89\ /\mathrm{cm}^3$ hay $400\ /\mathrm{cm}^3 (T_0/2.7\ \mathrm{K})^3$
Biên độ nhiễu loạn mật độ	$\sqrt{S}$	$5.6(1.5) \cdot 10^{-6}$
Biên độ sóng hấp dẫn	$\sqrt{T}$	$< 0.71\sqrt{S}$
Thăng giáng khối lượng cho 8 Mpc	σ_8	0.84(4)
Chỉ số vô hướng	n	0.93(3)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

BẢNG 14 (Tiếp theo) Các hằng số vũ trụ.

Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Độ biến thiên của chỉ số vô hướng	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	−0.03(2)
Chiều dài Planck	$l_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1.62 \cdot 10^{-35}$ m
Thời gian Planck	$t_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5.39 \cdot 10^{-44}$ s
Khối lượng Planck	$m_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	21.8 µg
Số khoảnh khắc trong lịch sử [a]	t_0/t_{Pl}	$8.7(2.8) \cdot 10^{60}$
Số điểm không-thời gian trong chân trời [a]	$N_0 = (R_0/l_{\mathrm{Pl}})^3 \cdot (t_0/t_{\mathrm{Pl}})$	$10^{244\pm1}$
Khối lượng trong chân trời	M	$10^{54\pm1}$ kg

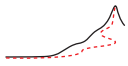
a. Chỉ số 0 chỉ giá trị hiện tại.
b. Bức xạ phát sinh khi vũ trụ được 380 000 tuổi và có nhiệt độ khoảng 3000 K; độ thăng giáng ΔT_0 dẫn tới việc hình thành thiên hà ngày nay khoảng $16 \pm 4\,\mu\mathrm{K} = 6(2) \cdot 10^{-6}\, T_0$.

Trang 236

Các số hữu ích

π	3.14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510$_5$
e	2.71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995$_9$
γ	0.57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992$_3$
ln 2	0.69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025$_5$
ln 10	2.30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877$_2$
$\sqrt{10}$	3.16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521$_6$

Xem 312



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Gợi ý và lời giải các câu đố

Câu đố ??, trang **??**: Đừng vội vã đòi hỏi khắt khe. Ấn bản kế tiếp của sách sẽ được lợi vì điều này.

Câu đố 2, trang 16: Một hình nón hay một mặt hyperbol tròn xoay cũng có thể nhìn thẳng từ 'mọi' hướng, miễn là vị trí đặt mắt được chọn một cách thích hợp. Do đó, để kiểm tra tính phẳng, không những ta chỉ quay vật mà còn phải đổi chỗ của nó nữa. Cách tốt nhất để kiểm tra tính phẳng là sử dụng sự giao thoa giữa hai chùm ánh sáng điều hợp đến và đi* có đường kính chùm bao trùm cả vật. Nếu các vân giao thoa trong *giao thoa đồ* thẳng, bề mặt đó phẳng.

Quyển III, trang 180

Câu đố 3, trang 17: Một phần hữu hạn của vô hạn vẫn là vô hạn. Không thể dùng vô hạn làm đơn vị.

Câu đố 4, trang 18: Thời gian mà vệ tinh Io đi vào bóng tối trong lần đo thứ 2 xảy ra khoảng 1000 s trễ hơn tiên đoán từ lần đo thứ 1. Vì Trái đất cách xa Jupiter và Io khoảng $3 \cdot 10^{11}$ m, ta sẽ kiếm được giá trị gần đúng của tốc độ ánh sáng.

Câu đố 5, trang 19: Để bù trừ cho tinh sai, kính thiên văn phải được đặt nghiêng *dọc theo* hướng chuyển động của Trái đất; để bù trừ cho thị sai, phải đặt kính *vuông góc* với chuyển động.

Câu đố 6, trang 19: Những sơ đồ bên trên trong Hình 4 cho thấy cách sử dụng *tang* trong phương trình (1). Đây là biểu thức Galilei; tuy vậy, nó sẽ dẫn tới việc vận tốc lớn hơn c. Các sơ đồ bên dưới cho thấy cách sử dụng *sin*. Đây là biểu thức tương đối tính đúng cho trường hợp đặc biệt của một ngôi sao ở ngay trên hoàng đạo. Các biểu thức tương đối tính tổng quát hơn, cho các ngôi sao có độ nghiêng bất kỳ, được tính toán một cách dễ dàng.

Câu đố 7, trang 20: Hình vẽ đã cho thấy lời giải. Quan sát viên, Mặt trăng và Mặt trời tạo thành một tam giác. Khi Mặt trăng ở pha bán nguyệt, góc ở vị trí Mặt trăng là một góc vuông. Như vậy ta có thể xác định tỷ số khoảng cách, dù không dễ, vì góc ở vị trí quan sát viên cũng gần bằng một góc vuông.

Câu đố 8, trang 20: Có nhiều gương phản xạ để lại trên Mặt trăng trong các phi vụ Apollo và Lunokhod. Chúng được sử dụng để phản xạ các xung laser 35 ps gởi lên xuyên qua các kính thiên văn. Thời gian đi một vòng sẽ cho ta tính khoảng cách tới Mặt trăng. Dĩ nhiên là ta không thể biết khoảng cách tuyệt đối với độ chính xác cao, nhưng độ biến thiên thì biết được. Bề dầy của khí quyển là nguyên nhân gây ra sai số lớn nhất. Hãy ghé thăm www.csr.utexas.edu/mlrs và ilrs.gsfc.nasa.gov.

Trang 172

Câu đố 9, trang 20: Fizeau sử dụng một gương đặt cách xa khoảng 8.6 km. Như hình cho thấy, ông chỉ phải đếm số răng của bánh xe răng cưa và đo tốc độ quay khi ánh sáng đi theo một hướng xuyên qua một kẽ răng và trở lại qua kẽ răng kế tiếp.

Câu đố 10, trang 21: Thời gian của cửa trập phải nhỏ hơn $T = l/c$, nói cách khác là ngắn hơn 30 ps; nó là một cửa trập *khí* chứ không phải rắn. Nó được kích khởi bằng một xung ánh sáng

* Nói chung, hai chùm ánh sáng – hay hai sóng bất kỳ – được gọi là *điều hợp* nếu chúng có độ lệch pha và tần số không đổi. Sự điều hợp là điều kiện cần và đủ cho sự giao thoa.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

đỏ (được thấy trong hình chụp), định thời bằng xung được ghi hình; đối với một chất nào đó, việc dùng khí như vậy, ánh sáng mạnh có thể dẫn tới việc mất màu và chúng trở nên trong suốt. Để có thêm chi tiết về cửa trập và kỹ thuật kích khởi tinh xảo của nó, hãy xem bài báo của tác giả. Đối với các cửa trập nhanh hơn, cũng nên xem các bàn luận trong quyển VI, trên Trang 120.

Câu đố 11, trang 22: Chỉ chụp hình tia sét khi máy chuyển động theo chiều ngang. Bạn sẽ thấy một tia sét sẽ gồm nhiều sự phóng điện nhỏ; Toàn bộ sự việc sẽ cho ta thấy rằng tia sét chậm hơn ánh sáng nhiều. Nếu tia sét chuyển động nhanh gần bằng ánh sáng, hiệu ứng Doppler sẽ làm thay đổi màu sắc của nó tuỳ theo góc quan sát so với hướng chuyển động của nó. Một tia sét gần sẽ đổi màu từ trên xuống dưới.

Câu đố 12, trang 24: Những ngọn đèn nhanh nhất là các hạt hạ nguyên tử, như muons, bằng cách phân rã và phát ra một photon, giống như một đèn flash tí hon. Tuy vậy, một số ngôi sao cũng phát ra các luồng vật chất nhanh, chuyển động với tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng.

Câu đố 13, trang 25: Tốc độ của neutrino thì giống tốc độ ánh sáng tới 9 số thập phân, vì người ta thấy neutrino và ánh sáng đến cùng với nhau, cách nhau 12 s, sau một cuộc hành trình 170 000 năm ánh sáng từ một vụ nổ của một siêu tân tinh.

Xem 44

Câu đố 14, trang 26: Ngay cả hướng của xung ánh sáng tới cũng khó xác định trước khi nó đến. Nhưng người ta có thể chơi trên mặt của một hố đen hay không? Hay ở dưới nước? Hay sử dụng một cái gương làm sân quần vợt? Hãy tận hưởng niềm vui tự thám hiểm.

Câu đố 16, trang 30: Người ta đã bàn luận kỹ về điều này bằng cách chứng tỏ rằng các khả năng khác đều vô nghĩa.

Câu đố 17, trang 30: Toạ độ không gian của biến cố mà ánh sáng bị phản chiếu là $c(k^2 - 1)T/2$; toạ độ thời gian là $(k^2 + 1)T/2$. Tỷ số của chúng phải là v. Giải ra theo k ta được kết quả.

Câu đố 19, trang 32: Chuyển động của sóng vô tuyến, hồng ngoại, tử ngoại và tia gamma cũng không thể dừng lại. Người ta đã nhận thấy Neutrino có khối lượng và do đó theo nguyên tắc thì có thể dừng lại được. Chuyển động của lực hấp dẫn cũng không thể dừng lại.

Câu đố 21, trang 35: $\lambda_R/\lambda_S = \gamma$.

Câu đố 22, trang 35: Để đổi từ màu đỏ sáng (650 nm) sang màu lục (550 nm), cần có $v = 0.166c$.

Câu đố 23, trang 36: Người ta đo độ dịch chuyển của các vạch phổ, như độ dịch chuyển của các vạch Lyman-α của hydrogen, được phát xạ (hay hấp thu) khi một electron tự do bị bắt giữ (hay được phóng thích) bởi một proton. Nó là một trong những vạch Fraunhofer nổi tiếng nhất.

Quyển IV, trang 182

Câu đố 24, trang 36: Tốc độ được tính theo công thức

$$v/c = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \tag{298}$$

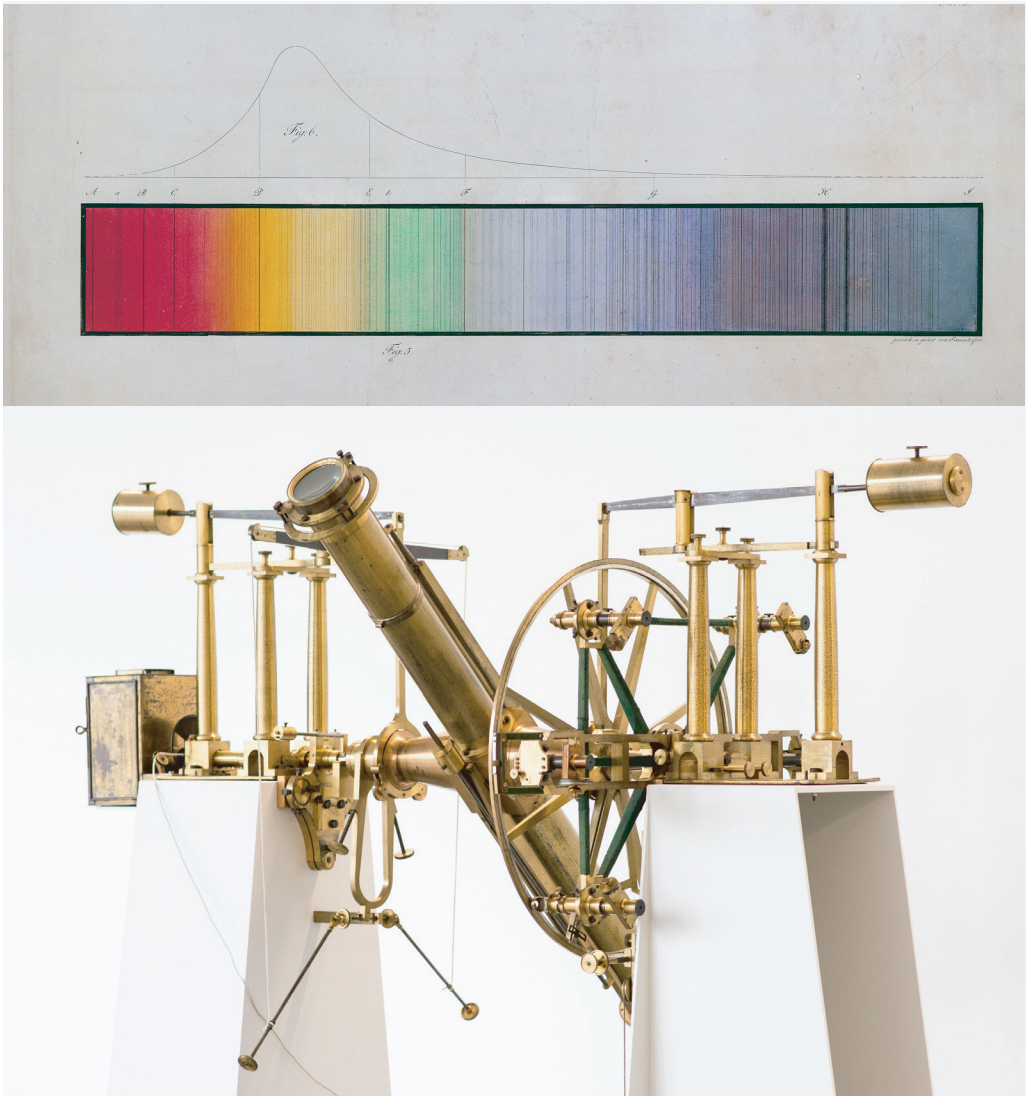
suy ra $v(z = -0.1) = 31\,\mathrm{Mm/s} = 0.1c$ *hướng về phía* quan sát viên và $v(z = 5) = 284\,\mathrm{Mm/s} = 0.95c$ *hướng ra xa* quan sát viên.

Một dịch chuyển đỏ bằng 6 dẫn tới một tốc độ $0.96c$; tốc độ như vậy xuất hiện vì, như ta sẽ thấy trong phần Thuyết tương đối tổng quát, những vật ở xa chạy ra xa chúng ta. Và độ dịch chuyển đỏ cao được quan sát thấy chỉ đối với những vật cực kỳ xa Trái đất và chúng càng lùi xa nhanh khi càng ở xa. Đối với độ dịch chuyển đỏ = 6 thì khoảng cách là nhiều tỷ năm ánh sáng.

Câu đố 25, trang 37: Một quan sát viên ở xa đứng yên đối với một khối lượng lớn sẽ không thấy hiệu ứng Doppler. Trong các trường hợp khác hiển nhiên là có hiệu ứng Doppler, nhưng không phải do sự chệch hướng.

Câu đố 26, trang 37: Tốc độ âm không phải là một bất biến đối với quan sát viên. Kết quả là hiệu ứng Doppler đối với sóng âm cũng khẳng định rằng – trong sai số của phép đo – thời gian *giống nhau* đối với các quan sát viên chuyển động đối với nhau.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 126 Các vạch phổ gốc do Fraunhofer công bố và kính ngắm qua kinh tuyến đã được ông sử dụng (© Fraunhofer Gesellschaft).

Câu đố 29, trang 40: Trong ống đèn hình của TV màu (sử dụng hiệu thế cao, thường là 30 kV, lớn hơn hiệu thế mà TV đen trắng đã sử dụng), electron được mô tả bằng tỷ số $v/c \approx \sqrt{2 \cdot 30/511}$ hay $v \approx 0.3c$.

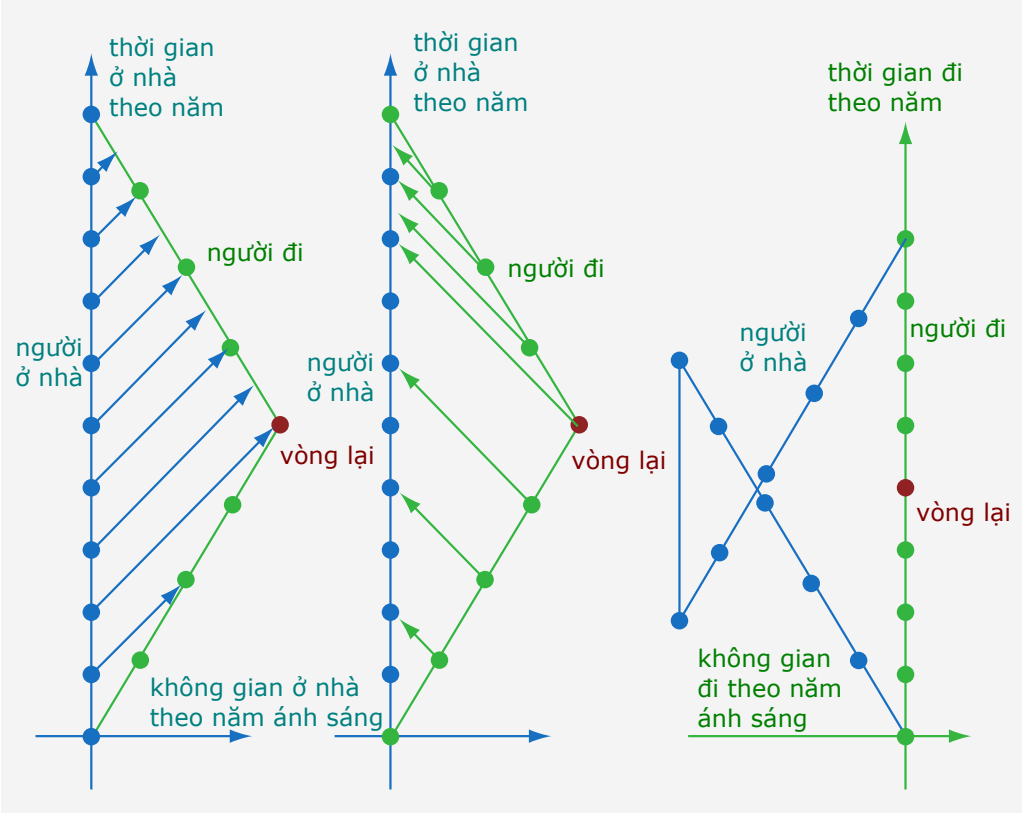
Câu đố 30, trang 40: Nếu bạn có thể hình dung ra điều này, hãy công bố nó. Độc giả sẽ rất vui khi nghe câu chuyện đó.

Câu đố 32, trang 40: Mối liên hệ giữa bất biến đối với quan sát viên và tính chất giới hạn thường là đúng trong thiên nhiên, như đã thấy trong chương 2. Tuy vậy, một sự bàn luận đầy đủ và chặt chẽ chưa xảy ra. Nếu bạn có thì hãy công bố nó!

Quyển VI, trang 27

Câu đố 34, trang 42: Nếu tốc độ ánh sáng giống nhau đối với mọi quan sát viên thì không ai được xem là đứng yên nhiều hơn người khác (miễn sao không-thời gian là phẳng), vì không có

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÌNH 127 Nghịch lý sinh đôi: (hình trái và giữa) sự định thời cho cả hai người sinh đôi với các tín hiệu gởi đi giữa 2 người trong hệ quy chiếu quán tính của người ở nhà và (hình bên phải) sự mô tả của người đi, trong một hệ quy chiếu không quán tính.

sự quan sát nào từ Điện động lực học, Cơ học hay các lĩnh vực khác của vật lý cho phép phát biểu như vậy.

Câu đố 38, trang 45: Các giá trị do con người thì đạt được trong các máy gia tốc hạt; các giá trị trong thiên nhiên thì được tìm thấy trong các tia vũ trụ có năng lượng cao nhất.

Câu đố 40, trang 46: Hãy vẽ lại Hình 11 trên Trang 30 đối với các quan sát viên khác nhau để thấy rõ vấn đề.

Câu đố 41, trang 46: Tập hợp các biến cố hành xử như một đa tạp vì nó hành xử như một không gian 4 chiều: có vô hạn điểm bao quanh một điểm khởi đầu đã cho và các khoảng cách, các giới hạn hành xử như ta thường gặp. Nó khác đi do một chiều được thêm vào và do dấu trong định nghĩa của khoảng cách; như vậy, nói một cách đúng đắn, nó là một đa tạp Riemann.

Câu đố 42, trang 47: Tính vô hạn là hiển nhiên giống như tính mở. Như vậy sự tương đương topo có thể được bộc lộ bằng cách hình dung đa tạp được làm bằng cao su và quấn quanh một hình cầu.

Câu đố 43, trang 49: Hình nón ánh sáng vẫn chưa thay đổi và mối liên hệ nhân quả cũng vậy.

Câu đố 46, trang 49: Trong trường hợp như vậy, sự phân chia không-thời gian quanh một quan sát viên quán tính thành tương lai, quá khứ và nơi khác sẽ không còn đúng nữa, và tương lai có thể ảnh hưởng tới quá khứ (như quan sát viên khác nhìn thấy).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 52, trang 52: Để hiểu nghịch lý sinh đôi, cách tốt nhất là vẽ sơ đồ không-thời gian biểu diễn cách mỗi người gởi tín hiệu thời gian sau những khoảng thời gian đều đặn, như được nhìn thấy trên đồng hồ riêng và đồng hồ của người anh em. Một số thí dụ đã cho trên hình Hình 127. Những tín hiệu thời gian này cho thấy tuổi của anh ta. Bạn sẽ nhìn thấy trực tiếp, trong chuyến du hành, một người sẽ gởi ít tín hiệu hơn người kia.

Câu đố 53, trang 52: Tỷ số được tiên đoán bằng lý luận ngây thơ là $(1/2)^{(6.4/2.2)} = 0.13$.

Câu đố 54, trang 53: Hệ số giãn dài thời gian cho $v = 0.9952c$ là 10.2, với thời gian riêng là 0.62 μs; như vậy tỷ số do Thuyết tương đối đặc biệt tiên đoán là $(1/2)^{(0.62/2.2)} = 0.82$.

Câu đố 56, trang 53: Gởi một tín hiệu ánh sáng từ đồng hồ 1 tới đồng hồ 2 rồi quay lại. Lấy thời điểm giữa của đi và đến, rồi so sánh nó với thời điểm lúc phản xạ. Lặp lại vài lần. Cũng nên xem Hình 11.

Câu đố 58, trang 54: Không, với các phương pháp thực nghiệm hiện nay.

Câu đố 59, trang 54: Gợi ý: hãy nghĩ về các hướng nhìn khác nhau.

Câu đố 61, trang 55: Gợi ý: hãy cẩn thận với định nghĩa của 'độ cứng'.

Câu đố 63, trang 55: Nếu con chạy khởi hành khi đi ngang qua khoảng hở, đèn không thể sáng bất kể tốc độ nếu con chạy ngắn hơn khoảng hở. Thoạt tiên điều này nghe có vẻ lạ lùng vì con chạy không thắp sáng bóng đèn dù nó có tốc độ cao, mặc dù trong hệ quy chiếu của con chạy có sự tiếp xúc ở cả hai đầu. Lý do là trong trường hợp này không có đủ thời gian để gởi tín hiệu đến pin là có tiếp xúc để dòng điện bắt đầu chảy.

Giả sử dòng điện chảy với tốc độ u, và có bậc của c. Lúc đó như Dirk Van de Moortel đã chứng minh, đèn sẽ tắt nếu chiều dài con chạy l và chiều dài khoảng hở d thoả điều kiện $l/d < \gamma(u+v)/u$. Hãy xem phần tham khảo được trích dẫn.

Đối với con chạy đang tiến đến gần khoảng hở và bóng đèn, tình trạng sẽ khác đi: dù ngắn hơn khoảng hở, nó vẫn *có thể* giữ cho đèn sáng liên tục, như Madhu Rao đã chỉ ra.

Tại sao các cuộc tranh luận được hâm nóng thường xuyên? Một số người sẽ làm bộ (một cách sai lầm) xem như đây là một vấn đề phi vật lý; một số khác sẽ nói rằng cần các phương trình Maxwell. Người khác thì nói vấn đề vô nghĩa, vì với con chạy có chiều dài lớn hơn, câu trả lời sáng/tối tuỳ thuộc vào giá trị chính xác của tốc độ. Tuy vậy, đây đúng là trường hợp của bài toán này.

Câu đố 64, trang 56: Có, dây bị đứt; trong các xe tăng tốc, khoảng cách thay đổi, như đã chứng minh sau đó trong sách.

Câu đố 65, trang 56: Tàu ngầm sẽ chìm. Tàu đi nhanh sẽ nặng hơn vì có động năng làm tăng thêm trọng lượng. Hiệu ứng co sẽ làm nó nhẹ đi, như thuyền trưởng nói, nhưng với một lượng nhỏ hơn. Trọng lượng toàn phần – với chiều dương hướng lên – là $F = -mg(\gamma - 1/\gamma)$.

Câu đố 66, trang 56: Tàu ngầm tương đối tính sẽ lập tức tan chảy do ma sát với nước. Nếu không nó sẽ bay ra khỏi hành tinh vì nó chuyển động nhanh hơn vận tốc thoát – và sẽ sinh ra nhiều thảm hoạ khác nữa.

Câu đố 67, trang 59: Một chuỗi hạt trai tương đối tính có tốc độ không đổi sẽ ngắn đi nhưng như thường lệ, sự ngắn đi chỉ có thể đo được nhưng không chụp hình được. Ở tốc độ tương đối tính, kích thước đo được của hạt trai là các ellipsoids dẹt lại. Hình cầu không bị biến đổi thành hình cầu. Chuỗi hạt quan sát được bao gồm sự chồng lấp của các ellipsoid.

Câu đố 68, trang 59: Không: bạn hãy suy nghĩ xem!

Câu đố 71, trang 60: Có, sự lão hoá trong thung lũng sẽ chậm hơn trên đỉnh núi. Tuy vậy, cảm giác riêng về thời gian thì không đổi. Người ta chưa biết lý do tóc bạc; nếu sự định thời có tính di truyền, thời gian riêng mà sự việc xảy ra sẽ giống nhau ở cả hai nơi.

Câu đố 72, trang 61: Không có cách để đặt quan sát viên ở những điểm đã quy định. Vận tốc

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

riêng chỉ có thể xác định đối với các quan sát viên, nghĩa là đối với các thực thể có thể mang một đồng hồ. Đó không phải là trường hợp của hình ảnh.

Câu đố 73, trang 61: Chỉ cần dùng hình học để chứng minh điều này.

Câu đố 74, trang 62: Điều thú vị nhất là chân trời có thể chuyển động nhanh hơn ánh sáng một cách dễ dàng, nếu bạn chuyển động đầu một cách thích hợp.

Câu đố 76, trang 66: Ta cần ánh sáng để xác định khoảng cách *và* để đồng bộ hoá đồng hồ; như vậy ta không có cách nào để đo tốc độ ánh sáng từ điểm này sang điểm khác. Cần bao gồm luôn chuyển động ngược lại. Tuy vậy, vẫn có người nói về tốc độ của ánh sáng một chiều (xem trang math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SR/experiments.html). Mọi thí nghiệm về tốc độ ánh sáng một chiều đã được thực hiện cho tới nay đều nhất quán với giá trị đẳng hướng bằng với tốc độ hai chiều. Tuy vậy, không có thí nghiệm nào có thể loại bỏ một nhóm các lý thuyết trong đó tốc độ ánh sáng một chiều thì bất đẳng hướng và như vậy khác với tốc độ hai chiều. Mọi lý thuyết từ nhóm này đều có tính chất là tốc độ ánh sáng *khứ hồi* thì đẳng hướng trong một hệ quy chiếu quán tính bất kỳ, nhưng tốc độ *một chiều* thì chỉ đẳng hướng trong một hệ quy chiếu 'ether' ưu tiên. Trong tất cả các lý thuyết này, trong mọi hệ quy chiếu quán tính, các hiệu ứng của đồng hồ chạy chậm bù trừ với các hiệu ứng của tốc độ ánh sáng một chiều bất đẳng hướng. Tất cả những lý thuyết này không thể phân biệt với Thuyết tương đối đặc biệt bằng thực nghiệm. Do đó trong thực hành, tốc độ ánh sáng một chiều đã được đo và nó là hằng số. Nhưng vẫn còn một tuỳ chọn nhỏ.

Sự khác nhau của tốc độ ánh sáng một chiều và hai chiều đã là một để tài thảo luận trong một thời gian dài. Người ta thường tranh luận về việc một hệ số khác 2, sẽ dẫn tới sự phân biệt giữa tốc độ ánh sáng một chiều và tốc độ ánh sáng hai chiều, không thể loại bỏ bằng thực nghiệm, miễn là tốc độ ánh sáng hai chiều vẫn là c đối với tất cả các quan sát viên.

Xem 18 Nhiều thí nghiệm về tốc độ ánh sáng một chiều đã được Zhang giải thích và bàn luận. Ông nói trong phần tóm tắt ở trang 171, rằng vận tốc ánh sáng một chiều thực sự độc lập với nguồn sáng; tuy vậy, không có thí nghiệm chứng thực rằng nó bằng với vận tốc 2 chiều. Hơn nữa, hầu Xem 78 như mọi thí nghiệm gọi là 'một chiều' đúng ra là vẫn còn che giấu các thí nghiệm 'hai chiều' (hãy xem trang 150 sách của ông).

Xem 79 Năm 2004, Hans Ohanian đã chứng tỏ rằng vấn đề có thể được giải quyết bằng cách bàn luận về việc tốc độ ánh sáng một chiều sẽ ảnh hưởng như thế nào lên Động lực học. Ông đã chứng tỏ rằng một tốc độ ánh sáng một chiều không chuẩn sẽ dẫn tới giả gia tốc và giả lực (tương tự với gia tốc và lực Coriolis); vì người ta chưa quan sát thấy hai đối tượng này, tốc độ ánh sáng một chiều giống như tốc độ ánh sáng hai chiều.

Tóm lại ta không cần lo về vấn đề tốc độ ánh sáng một chiều.

Câu đố 77, trang 67: Thí dụ như biểu thức không đúng đối với một photon chạm vào một cái gương.

Câu đố 78, trang 68: Trong một hệ quy chiếu quán tính viễn tải mâu thuẫn với sự bảo toàn của khối tâm. Viễn tải nhanh sẽ dẫn tới việc môi trường gởi và nhận bị gia tốc mạnh.

Câu đố 83, trang 70: Va chạm dưới trong Hình 41 cho thấy trực tiếp kết quả từ định luật bảo toàn năng lượng. Đối với va chạm trên kết quả cũng tương tự, nếu người ta bắt đầu từ định luật bảo toàn động lượng $\gamma mv = \Gamma MV$ và định luật bảo toàn năng lượng $(gamma + 1)m = \Gamma M$.

Câu đố 94, trang 76: Chỉ cần quay cạnh bên trái của Hình 45 một chút theo chiều ngược chiều kim đồng hồ.

Câu đố 95, trang 77: Trong sự va chạm giữa các điện tích tương đối tính, phần năng lượng phát xạ là ánh sáng, vì vậy các hạt thực sự mất năng lượng.

Câu đố 96, trang 78: Có lẽ không, như tất cả các hệ thức giữa các đại lượng vật lý đã biết cho tới nay. Tuy vậy, bạn có thể kiểm tra lại; có thể người ta không bao giờ biết được. Cũng nên nói

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

thêm rằng lực cực đại trong thiên nhiên đã được khám phá (trong sách này) sau khi ẩn mình suốt 80 năm.

Câu đố 98, trang 81: Hãy viết ra các vector 4 chiều U' và U rồi tính v' theo v và tốc độ tương đối V. Rồi đổi tên các biến.

Câu đố 99, trang 81: *Không có* thí dụ về chuyển động của một vật nặng nào! Chỉ có chuyển động của sóng ánh sáng có vận tốc pha 4 chiều bằng không và vận tốc nhóm 4 chiều bằng không, như đã giải thích trên Trang 88.

Câu đố 104, trang 84: Đối với các hạt siêu tương đối tính như các hạt không khối lượng, thì ta có $E = pc$.

Câu đố 105, trang 85: Gợi ý: tính P_1 và P_2 trong hệ quy chiếu đứng yên của một hạt.

Câu đố 107, trang 85: Sử dụng định nghĩa $\boldsymbol{F} = \mathrm{d}\boldsymbol{p}/\mathrm{d}t$ và hệ thức $\boldsymbol{KU} = 0 = \boldsymbol{Fv} - \mathrm{d}E/\mathrm{d}t$ đúng với các lực bảo toàn khối lượng nghỉ.

Câu đố 109, trang 86: Truyện được kể trên Trang 110.

Câu đố 113, trang 88: Bài này được gọi là *nghịch lý Ehrenfest*. Có nhiều tài liệu nói về vấn đề này. Hãy thưởng thức niềm vui khám phá!

Câu đố 114, trang 88: Có, người ta có thể thấy những vật như vậy: hiệu ứng đèn pha rọi và hiệu ứng Doppler không làm cho mất khả năng nhìn thấy. Tuy vậy, một phần của vật, cụ thể là phần quay ra xa quan sát viên có thể rất tối.

Câu đố 116, trang 88: Nếu hạt quay có moment từ, người ta có thể gởi nó qua một từ trường không đều và quan sát xem moment từ có đổi hướng hay không.

Câu đố 118, trang 88: Không.

Câu đố 119, trang 88: Đối với sự bàn luận về moment động lượng tương đối tính và một hiệu ứng đẹp, hãy xem K. Y. Bliokh & F. Nori, *Relativistic Hall Effect*, Physical Review Letters **108**, p. 120403, 2012, preprint at arxiv.org/abs/1112.5618.

Câu đố 122, trang 89: Hệ thức về tần số suy ra từ định nghĩa của phase.

Câu đố 125, trang 90: Planck đã mời Einstein tới Berlin và đã kiểm tra câu trả lời của ông. Biểu thức $E = \hbar\omega$ đối với năng lượng photon dẫn tới sự bất biến của $\hbar$.

Câu đố 141, trang 98: Năng lượng trong nhiên liệu phải được so với khối lượng nghỉ của xe gắn máy, nhân với c^2. Vì nhiên liệu chứa nhiều khối lượng hơn năng lượng, nó sẽ tạo ra một vấn đề nan giải.

Câu đố 143, trang 98: Gia tốc và lực hấp dẫn không đổi thì giống nhau về mặt tác dụng, như đã bàn trong phần Thuyết tương đối tổng quát.

Câu đố 146, trang 100: Vâng, đúng.

Câu đố 147, trang 100: Nó phẳng như một mặt phẳng.

Câu đố 148, trang 100: Mặc dù gia tốc hướng về tâm vòng ngựa gỗ vẫn không có chân trời nào xuất hiện cả.

Câu đố 150, trang 101: Có; tuy vậy tác dụng thì rất nhỏ và phụ thuộc vào vị trí của Mặt trời. Đúng ra thì vật gì trắng ở một độ cao nào đó thì không trắng ở một độ cao khác.

Câu đố 152, trang 102: Trong phạm vi địa phương thì ánh sáng luôn có tốc độ c.

Câu đố 153, trang 102: Ra xa Trái đất, g giảm; nó thực sự bằng không ở đa số các vị trí.

Câu đố 156, trang 104: Như đã thấy trong phần tham khảo đã trích dẫn, giới hạn suy ra từ điều kiện $l\gamma^3 a \leqslant c^2$.

Câu đố 158, trang 104: Có.

Câu đố 159, trang 104: Có. Lấy $\Delta f \ \Delta t \geqslant 1$ và thay $\Delta l = c/\Delta f$ và $\Delta a = c/\Delta t$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 161, trang 107: Mặc dù có nhiều bài báo giả vờ nghiên cứu vấn đề này, cũng có nhiều nhà vật lý cho rằng không thể được. Đo độ biến thiên của tốc độ ánh sáng cũng không khác gì đo tốc độ ánh sáng một chiều: điều đó không thể xảy ra. Tuy vậy, sự tranh cãi về đề tài này rất sôi nổi; sẽ mất nhiều thời gian để việc này lắng xuống.

Câu đố 163, trang 109: Định luật bình phương nghịch đảo của lực hấp dẫn không phù hợp với nguyên lý tốc độ cực đại; Người ta không biết rõ cách thay đổi của nó khi chuyển sang một quan sát viên chuyển động.

Câu đố 164, trang 114: Nếu bạn nghe thấy một công bố nào về sự vượt qua giới hạn lực hay công suất, hãy cho tôi biết.

Câu đố 165, trang 115: Lấy một mặt chuyển động với tốc độ ánh sáng hay một mặt được xác định với độ chính xác nhỏ hơn chiều dài Planck.

Câu đố 166, trang 120: Bóng tối cũng không còn song song trên các mặt cong. Nếu quên điều này ta sẽ gặp những sai lầm kỳ lạ: nhiều luận điểm cho rằng đã 'chứng tỏ được' rằng con người không bao giờ lên được Mặt trăng đã bỏ qua điều này khi họ bàn đến những bức ảnh đã chụp ở đó.

Câu đố 167, trang 122: Nếu bạn tìm được, hãy công bố và gởi nó cho tôi.

Câu đố 169, trang 127: Đây là một sự đánh lừa. Việc chỉ đơn giản áp dụng phép biến đổi tương đối tính cho các vector 4 chiều có thể cho ra các giá trị lực lớn hơn giới hạn. Nhưng trong các trường hợp đó, một chân trời đã xuất hiện ngăn ta thấy các giá trị lớn này.

Câu đố 170, trang 128: Nếu như vậy, hãy công bố và gởi nó cho tôi.

Câu đố 171, trang 130: Thí dụ như ta có thể tưởng tượng một mặt có hình dạng phức tạp đến nỗi nó sẽ đi qua mọi nguyên tử trong vũ trụ với tốc độ ánh sáng. Mặt như vậy không phải là mặt vật lý vì ta không thể hình dung ra cách các quan sát viên trên mọi điểm của nó chuyển động cùng một lúc.

Câu đố 173, trang 130: Hãy công bố và gởi nó cho tôi.

Câu đố 174, trang 130: Nguồn mới không thể xuất hiện từ hư vô. Một nguồn năng lượng 'mới' bất kỳ trước khi xuất hiện phải là kết quả của một sự biến đổi từ các bức xạ khác tìm thấy trong vũ trụ.

Câu đố 175, trang 131: Tuy vậy nhiều người không tin vào các giới hạn này; vì vậy nếu có một phản thí dụ bất kỳ hay có thêm một nghịch lý được đề nghị thì cũng đáng để công bố.

Câu đố 177, trang 135: Nếu như vậy, hãy công bố và gởi nó cho tôi.

Câu đố 180, trang 138: Nếu như vậy, hãy công bố và gởi nó cho tôi.

Câu đố 182, trang 140: Chúng được gia tốc hướng lên trên.

Câu đố 183, trang 141: Trong đời sống hằng ngày, (a) Mặt đất có thể xem như phẳng, (b) có thể bỏ qua hiệu ứng uốn cong dọc, và (c) có thể bỏ qua hiệu ứng chiều dài ngang.

Câu đố 187, trang 141: Đối với một xe bus mạnh, gia tốc là $2\,\mathrm{m/s^2}$; sau 100 m gia tốc, tần số tương đối sẽ thay đổi $2.2 \cdot 10^{-15}$.

Câu đố 188, trang 142: Có, sự hấp thu và phát xạ ánh sáng luôn luôn biến đổi đầy đủ năng lượng thành khối lượng.

Câu đố 191, trang 143: Đối với một chùm ánh sáng, trong cả 2 trường hợp, tình trạng được mô tả bằng một môi trường trong đó các khối lượng 'rơi' ngược với hướng chuyển động. Nếu ta không nhìn thấy Trái đất và tường toa tàu – thí dụ như chúng bị sương mù che phủ – sẽ không có cách nào để dùng thí nghiệm xác định rõ các tình trạng này. Thêm nữa, nếu một quan sát viên ở trong một cái hộp kín, anh ta không thể phân biệt được giữa gia tốc không đổi và lực hấp dẫn không đổi. (Quan trọng: sự mất khả năng này chỉ áp dụng được cho các quan sát viên có kích thước không đáng kể!)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 195, trang 144: Chiều dài = thời gian X tốc độ ánh sáng. Nếu thời gian thay đổi theo độ cao thì chiều dài cũng vậy.

Câu đố 197, trang 144: Cả hai đều rơi về phía tâm quả đất. Các hạt chuyển động quanh vật khác cũng đang rơi tự do; khoảng cách tương đối của chúng cũng thay đổi như đã giải thích trong bài.

Câu đố 200, trang 147: Một giản đồ như vậy cần 4 hay ngay cả 5 chiều.

Câu đố 201, trang 148: Các thí nghiệm về sự thay đổi thời gian theo độ cao cũng có thể sử dụng cho trường hợp này.

Câu đố 203, trang 149: Năng lượng do chuyển động quay có thể bỏ qua khi so với các dạng năng lượng khác trong bài toán.

Câu đố 211, trang 155: Các nucleon, hạt nhân, nguyên tử và các phân tử khác đều có tỷ lệ phần trăm của năng lượng liên kết khác nhau đối với khối lượng toàn phần.

Câu đố 213, trang 156: Trong sự rơi tự do, chai và nước vẫn còn đứng yên đối với nhau.

Câu đố 214, trang 156: Để cho dụng cụ rơi. Dây cao su đàn hồi lúc đó đủ mạnh để kéo trái banh vào trong phễu. Xem M. T. Westra, *Einsteins verjaardagscadeau*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **69**, p. 109, April 2003. Dụng cụ ban đầu cũng có một lò xo nối với dây cao su.

Câu đố 215, trang 157: Ngoài bàn ghế đã được đề cập, những thiết bị phản trọng lực quan trọng là dây đeo quần, thắt lưng và bao nhựa.

Câu đố 217, trang 157: Như nhau.

Câu đố 218, trang 157: Có, trong trọng trường người cao hơn sẽ già hơn. Độ chênh lệch tuổi tác thay đổi theo độ cao và bằng 0 đối với chiều cao vô hạn.

Câu đố 219, trang 157: Giới hạn của dòng khối lượng là $c^3/4G$.

Câu đố 220, trang 158: Không, có thể tạo dựng băng chuyền trong xe lửa.

Câu đố 221, trang 158: Người ta sử dụng một cân lò xo và đo thời gian dao động. Từ đó suy ra khối lượng. NASA gọi nó là BMMD, dụng cụ đo khối lượng cơ thể. Hình có trong quyển 1 .

Quyển I, trang 109

Câu đố 222, trang 158: Sau khoảng 1/2 giờ thì trái táo chạm tường.

Câu đố 225, trang 159: Cách tiếp cận bằng quỹ đạo ánh sáng cong hay thay đổi tốc độ ánh sáng không thể mô tả đúng các chân trời.

Câu đố 226, trang 159: Dùng $\hbar$ làm moment động lượng nhỏ nhất người ta kiếm được kích thước khoảng 100 Tm.

Câu đố 227, trang 159: Không. Sự nhiễu xạ của các chùm tia sáng không cho phép điều đó xảy ra. Với Thuyết lượng tử thì có thể; các trạng thái liên kết của các hạt không khối lượng như photon sẽ không bền.

Câu đố 229, trang 160: Bán kính quỹ đạo là 4.2 bán kính Trái đất; làm cho đồng hồ chạy nhanh khoảng 38μs mỗi ngày.

Câu đố 230, trang 161: Thành thật mà nói, các thí nghiệm không nhất quán. Chúng ta đã công nhận một số tính chất của thiên nhiên – như kích thước nguyên tử – trong khi đúng ra thì chúng có phụ thuộc G. Có thể tìm hiểu thêm về vấn đề này ở Trang 299.

Câu đố 231, trang 161: Dĩ nhiên các chiều không gian khác có thể hiện hữu và có thể phát hiện nếu có sự giúp đỡ của các dụng cụ đo lường. Thí dụ như các chiều bị che giấu có thể xuất hiện ở các mức năng lượng không thể đạt được trong đời sống hằng ngày.

Câu đố 232, trang 161: Về hiệu ứng nhỏ bé này, hãy đọc sách của Ohanian, Xem 112, trang 147.

Câu đố 254, trang 177: Vì không có khối lượng âm, các trường hấp dẫn điện không thể ở trạng thái trung hoà. Trái lại, điện trường có thể được trung hoà chung quanh một vật dẫn kim loại bằng một lồng Faraday.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 256, trang 178: Để tìm ra câu trả lời, hãy nghĩ về sự tương tự điện từ.

Câu đố 264, trang 187: Người ta cần đo thời gian của các xung đi ngang Trái đất nơi có các máy phát hiện sóng hấp dẫn khác nhau trên Trái đất.

Câu đố 241, trang 166: Người ta đo trong thời gian nhật thực.

Câu đố 265, trang 188: Không. Không thể có tĩnh điện trường như vậy (với cùng lý do).

Câu đố 270, trang 191: Không, một đường thẳng không có độ cong riêng. Một hình xuyến thực sự có độ cong riêng; ta không thể khai triển nó để tạo ra một mảnh giấy phẳng.

Câu đố 273, trang 193: Không, không thể tạo ra chúng bằng các mảnh giấy. Độ cong khác 0 ở khắp mọi nơi.

Câu đố 289, trang 201: Vết của tensor Einstein ngược dấu với vô hướng Ricci; như vậy nó ngược dấu với vết của tensor Ricci.

Câu đố 293, trang 203: Khái niệm năng lượng không có ý nghĩa đối với vũ trụ, vì khái niệm này chỉ được định nghĩa cho các hệ vật lý, và như vậy nó không dành cho vũ trụ. Cũng nên xem Trang 262.

Câu đố 300, trang 209: Thực ra, trong Thuyết tương đối tổng quát năng lượng hấp dẫn không thể *định xứ* trong không gian, trái với điều người ta mong chờ và yêu cầu từ một sự tương tác.

Câu đố 311, trang 213: Sai số trong xe chỉ nam bắt nguồn từ *phase hình học*, một hiệu ứng xuất hiện trong trường hợp có *vận chuyển song song* trong không gian 3 chiều. Nó cũng là hiệu ứng làm quay mặt phẳng dao động của con lắc Foucault. Vận chuyển song song có khi còn được gọi là *vận chuyển Fermi-Walker*. Pha hình học được giải thích chi tiết trong quyển về quang học.

Quyển III, trang 140

Câu đố 315, trang 215: Cơ quan không gian Châu Âu đang nghiên cứu vấn đề này. Hãy tham gia!

Câu đố 318, trang 224: Cũng có khả năng có các luồng vật chất yếu phun ra trên Mặt trời; nhưng phát hiện chúng không dễ. (Câu hỏi về sự hiện hữu của các luồng vật chất trong Ngân Hà đã có trong sách này từ năm 2006; chúng đã được khám phá vào năm 2010.)

Câu đố 320, trang 231: Nếu bạn tin rằng hai lượng đó khác nhau, bạn là tù nhân của niềm tin, cụ thể là tin rằng ý tưởng của bạn về vật lý cổ điển và Thuyết tương đối tổng quát cho phép bạn ngoại suy các ý tưởng này trong các lĩnh vực mà chúng không đúng, như là đằng sau một chân trời. Tại mỗi chân trời, các hiệu ứng lượng tử mạnh đến nỗi chúng *vô hiệu hoá* những phép ngoại suy cổ điển như thế.

Câu đố 321, trang 231: Vài mm.

Câu đố 322, trang 231: Nếu ta giả sử đường kính hạt bột là 150 μm và mật độ bột là 1000 kg/m^3 thì có khoảng 566 triệu hạt trong 1 kg bột. Một thiên hà điển hình chứa 10^{11} ngôi sao; điều đó tương ứng với 177 kg bột.

Câu đố 323, trang 231: Tốc độ được đo bằng hiệu ứng Doppler, thường bằng cách quan sát vạch Lyman-alpha. Khoảng cách thì khó giải thích hơn. Việc đo khoảng cách chính là một khoa học, tuỳ theo người ta đo khoảng cách giữa các ngôi sao trong thiên hà, khoảng cách tới thiên hà khác hay tới quasar. Bạn có thể tìm hiểu thêm trong một quyển sách thiên văn hay vật lý thiên văn bất kỳ.

Câu đố 324, trang 232: Xem câu đố ở Trang 240.

Câu đố 326, trang 239: Con thỏ thấy mọi con thỏ khác hình như chuyển động ra xa nó.

Câu đố 334, trang 245: Đứng trong một khu rừng mùa đông và thử nhìn chân trời. Nếu rừng rất sâu, bạn thấy thân cây theo mọi hướng. Nếu rừng hữu hạn bạn có cơ hội nhìn thấy chân trời.

Câu đố 348, trang 261: Không. Đây là một thí dụ về việc một mô tả hình như chính xác về thiên nhiên có thể dẫn tới một phát biểu không khoa học, một niềm tin không liên hệ một chút nào với thực tại.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 349, trang 261: Cũng không. Phát biểu chỉ thuần tuý là một niềm tin.

Câu đố 351, trang 263: Vũ trụ không cho phép ta quan sát từ bên ngoài. Như vậy không có tính chất đã đề cập.

Câu đố 360, trang 271: Ở chân trời, ánh sáng không thể leo lên.

Câu đố 381, trang 283: Điều này xảy ra tương tự như trường hợp tĩnh điện trường đi ra ngoài một điện tích. Trong cả hai trường hợp, trường ngang không ra ngoài, nhưng trường dọc thì có. Thuyết lượng tử cung cấp lý do sâu sắc hơn. Các hạt bức xạ thực, chịu trách nhiệm cho trường ngang tự do không thể rời hố đen vì tốc độ thoát. Tuy vậy, các hạt ảo thì có thể, vì tốc độ của chúng không bị giới hạn bởi tốc độ ánh sáng. Mọi trường tĩnh dọc đều do các hạt ảo sinh ra. Ngoài ra còn một lý do thứ 2 nữa. Trường cổ điển có thể đi ra ngoài hố đen vì đối với một quan sát viên bên ngoài mọi vật tạo thành hố đen đang liên tục rơi và không có vật nào thực sự đi ngang qua chân trời. Như vậy các nguồn của trường cũng chưa đi ra ngoài hố đen.

Câu đố 385, trang 284: Sự mô tả nói lên tất cả. Người ta có thể tìm thấy một ấn tượng về thị giác trong Phòng về hố đen trong 'Viện bảo tàng Đức' ở Munich.

Câu đố 387, trang 284: Một mặt, hố đen có thể sinh ra từ sự suy sụp của vật chất. Mặt khác, có thể xem hố đen như một chân trời bị uốn cong.

Câu đố 389, trang 285: Cho tới nay, hình như mọi hệ quả thực nghiệm từ sự tương tự đều khớp với sự quan sát; như vậy hình như ta có thể cho rằng bầu trời đêm là một chân trời hố đen. Tuy nhiên vấn đề vẫn chưa được giải quyết và một số vật lý gia xuất chúng không thích sự tương tự này. Vấn đề cũng liên hệ với câu hỏi là thiên nhiên có thể hiện sự đối xứng giữa các thang đo chiều dài cực lớn và cực nhỏ hay không. Chủ đề này sẽ được mở rộng trong phần cuối của cuộc thám hiểm của chúng ta.

Câu đố 392, trang 289: Một dụng cụ bất kỳ sử dụng gương đều cần đến Điện động lực học; không có Điện động lực học thì không có gương.

Câu đố 394, trang 291: Thuyết Trái đất rỗng chỉ đúng nếu các khoảng cách thông thường thay đổi một cách nhất quán theo công thức $r_{\text{he}} = R^2_{\text{Earth}}/r$. Điều này hàm ý một lượng tử tác dụng sẽ giảm theo chiều hướng về tâm hình cầu rỗng. Như vậy không có chuyện thích cách mô tả này hơn cách mô tả kia trừ lý do là tính đơn giản của nó.

Câu đố 398, trang 305: Khối lượng là số đo năng lượng. 'Bình phương khối lượng' không có ý nghĩa gì.

Câu đố 401, trang 307: Có lẽ đại lượng có độ biến thiên lớn nhất là khối lượng, nên một tiền tố cho $1\,\text{eV}/c^2$ sẽ hữu dụng, vì khối lượng toàn phần trong vũ trụ sẽ là 1, lớn hơn khoảng 10^{90} lần.

Câu đố 402, trang 308: Công thức với $n - 1$ là vừa vặn nhất. Tại sao?

Câu đố 405, trang 309: Không! Chính xác quá thành ra vô nghĩa. Chúng chỉ mang tính minh hoạ cho dáng điệu của phân bố Gauss. Các phân bố số đo thực không phải là phân bố Gauss theo độ chính xác hàm chứa trong các con số này.

Câu đố 406, trang 309: Khoảng 0.33 m/s. Nó *không phải là* 0.333 m/s và cũng *không có* chuỗi số 3 nào dài hơn nữa!

Câu đố 408, trang 315: Tốc độ chậm lại có *bậc hai* theo thời gian vì mỗi lần chậm mới cộng thêm vào lần cũ!

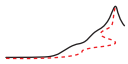
Câu đố 409, trang 316: Không, chỉ có các tính chất của một số phần trong vũ trụ được liệt kê. Tự vũ trụ không có tính chất, như ta sẽ trình bày chi tiết trong phần cuối của cuộc thám hiểm này.

Quyển VI, trang 112

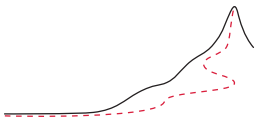
Câu đố 410, trang 358: Câu này có thể giải được nhờ một mánh lới đã dùng chứng minh tính vô tỷ của một trong hai số hạng của tổng nhưng chưa ai tìm ra lời giải.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Câu đố 411, trang 358: Vẫn còn nhiều khám phá trong toán học hiện đại đặc biệt trong topo, lý thuyết số và hình học đại số.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Tài liệu tham khảo

> Người ta sẽ lật nửa số sách trong thư viện để viết một cuốn sách.
>
> Samuel Johnson*

1 Aristotle, *On sense and the sensible*, section 1, part 1, 350 bce. Cited in Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 157, 1991. Cited on page 16.

2 The original Latin text of Descartes' letter, dated 22 August 1634, can be read online on gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k20740j/f419.image. Cited on page 17.

3 Anonyme, *Demonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Academie Royale des Sciences*, Journal des Scavans pp. 233–236, 1676. An English summary is found in O. C. Rømer, *A demonstration concerning the motion of light*, Philosophical Transactions of the Royal Society **136**, pp. 893–894, 1677. You can read the two papers at dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Roemer-1677/Roemer-1677.html. Cited on page 17.

4 F. Tuinstra, *Rømer and the finite speed of light*, Physics Today **57**, pp. 16–17, December 2004. Cited on page 18.

5 The history of the measurement of the speed of light can be found in chapter 19 of the text by Francis A. Jenkins & Harvey E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, New York, 1957. Cited on page 18.

6 On the way to perform such measurements, see Sydney G. Brewer, *Do-it-yourself Astronomy*, Edinburgh University Press, 1988. Kepler himself never measured the distances of planets to the Sun, but only *ratios* of planetary distances. The parallax of the Sun from two points of the Earth is at most $8.79''$; it was first measured in the eighteenth century. Cited on page 20.

7 For a detailed discussion, see note 32 of A. Gualandi & F. Bònoli, *The search for stellar parallaxes and the discovery of the aberration of light: the observational proofs of the Earth's revolution, Eustachio Manfredi, and the 'Bologna case'*, Journal for the History of Astronomy **20**, pp. 155–172, 2009. Indeed, the term 'aberration' does not appear in Bradley's publication on the issue. Cited on page 19.

8 Aristarchus of Samos, *On the sizes and the distances of the Sun and the Moon*, *c.* 280 bce, in Michael J. Crowe, *Theories of the World From Antiquity to the Copernican Revolution*, Dover, 1990. Cited on page 20.

9 J. Frercks, *Creativity and technology in experimentation: Fizeau's terrestrial determination of the speed of light*, Centaurus **42**, pp. 249–287, 2000. See also the beautiful website

* Samuel Johnson (1709–1784), nhà thơ và trí giả nổi tiếng người Anh.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

on reconstrutions of historical science experiments at www.uni-oldenburg.de/histodid/forschung/nachbauten. Cited on page 20.

10 The way to make pictures of light pulses with an ordinary photographic camera, without any electronics, is described by M. A. Duguay & A. T. Mattick, *Ultrahigh speed photography of picosecond light pulses and echoes*, Applied Optics **10**, pp. 2162–2170, 1971. The picture on Trang 21 is taken from it. Cited on page 21.

11 You can learn the basics of special relativity with the help of the web; the simplest and clearest introduction is part of the Karlsruhe physics course, downloadable at www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de. You can also use the physics.syr.edu/research/relativity/RELATIVITY.html web page as a starting point; the page mentions many of the English-language relativity resources available on the web. Links in other languages can be found with search engines. Cited on page 23.

12 See the classic paper G. J. Fishman, *Gamma ray observations of the Crab pulsar – past, present, future*, Annals of the New York Academy of Sciences **655**, pp. 309–318, 1992. Cited on page 23.

13 Observations of gamma-ray bursts show that the speed of light does not depend on the lamp speed to within one part in 10^{20}, as shown by the well-known paper by B. E. Schaefer, *Severe limits on variations of the speed of light with frequency*, Physical Review Letters **82**, pp. 4964–4966, 1999, preprint at arxiv.org/abs/astro-ph/9810479. The result was confirmed most impressively with a bright gamma-ray burst observed in 2009. In this gamma-ray burst, after travelling for ten thousand million years, photons of frequencies that differed by a factor $3 \cdot 10^{10}$ – gamma rays and visible light – still arrived within less than a second from each other. See A. A. Abdo & al., (Fermi GBM/LAT collaborations) *Testing Einstein's special relativity with Fermi's short hard gamma-ray burst GRB090510*, preprint at arxiv.org/abs/0908.1832. Cited on pages 23, 24, 331, and 333.

14 M. Füllekrug, *Probing the speed of light with radio waves at extremely low frequencies*, Physical Review Letters **93**, p. 043901, 2004. Cited on page 24.

15 See, e.g., C. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, revised edition, Cambridge University Press, 1993. See also Xem 27. Cited on pages 24 and 28.

16 The discussions using binary stars are W. de Sitter, *A proof of the constancy of the speed of light*, Proceedings of the Section of the Sciences – Koninklijke Academie der Wetenschappen **15**, pp. 1297–1298, 1913, W. de Sitter, *On the constancy of the speed of light*, Proceedings of the Section of the Sciences – Koninklijke Academie der Wetenschappen **16**, pp. 395–396, 1913, W. de Sitter, *Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*, Physikalische Zeitschrift **14**, p. 429, 1913, W. de Sitter, *Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann*, Physikalische Zeitschrift **14**, p. 1267, 1913, For a more recent version, see K. Brecher, *Is the speed of light independent of the velocity of the source?*, Physics Letters **39**, pp. 1051–1054, Errata 1236, 1977. Cited on page 24.

17 The strong limits from observations of gamma-ray bursts were explored in Xem 13.

Measuring the light speed from rapidly moving stars is another possible test; see the previous reference. Some of these experiments are not completely watertight; a speculation about electrodynamics, due to Ritz, maintains that the speed of light is c only when measured with respect to the source; the light from stars, however, passes through the atmosphere, and its speed might thus be reduced to c.

The famous experiment with light emitted from rapid pions at CERN is not subject to this criticism. It is described in T. Alväger, J. M. Bailey, F. J. M. Farley, J. Kjellman

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

& I. Wallin, *Test of the second postulate of relativity in the GeV region*, Physics Letters **12**, pp. 260–262, 1964. See also T. Alväger & al., *Velocity of high-energy gamma rays*, Arkiv för Fysik **31**, pp. 145–157, 1965.

Another precise experiment at extreme speeds is described by G. R. Kalbfleisch, N. Baggett, E. C. Fowler & J. Alspector, *Experimental comparison of neutrino, anti-neutrino, and muon velocities*, Physical Review Letters **43**, pp. 1361–1364, 1979. Cited on page 24.

18 An overview of experimental results is given in Yuan Zhong Zhang, *Special Relativity and its Experimental Foundations*, World Scientific, 1998. Cited on pages 33, 41, 53, 70, 323, and 335.

19 The beginning of the modern theory of relativity is the famous paper by Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik **17**, pp. 891–921, 1905. It still well worth reading, and every physicist should have done so. The same can be said of the famous paper, probably written after he heard of Olinto De Pretto's idea, found in Albert Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, Annalen der Physik **18**, pp. 639–641, 1905. See also the review Albert Einstein, *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4**, pp. 411–462, 1907. These papers are now available in many languages. A later, unpublished review is available in facsimile and with an English translation as Albert Einstein, Hanoch Gutfreund, ed., *Einstein's 1912 Manuscript on the Theory of Relativity*, George Braziller, 2004. Also interesting is the later paper Albert Einstein, *Elementary derivation of the equivalence of mass and energy*, American Mathematical Society Bulletin **41**, pp. 223–230, 1935. All papers and letters of Einstein are now available, both in their original language and in English translation, at einsteinpapers.press.princeton.edu. Cited on pages 25, 28, and 78.

20 Jean van Bladel, *Relativity and Engineering*, Springer, 1984. Cited on page 25.

21 Albert Einstein, *Mein Weltbild*, edited by Carl Selig, Ullstein Verlag, 1998. Cited on page 27.

22 There is even a book on the topic: Hans C. Ohanian, *Einstein's Mistakes: The Human Failings of Genius*, Norton, 2009. On 26 December 1915, Einstein wrote, in a letter to Paul Ehrenfest: "Es ist bequem mit dem Einstein, jedes Jahr widerruft er, was er das vorige Jahr geschrieben hat. " A few weeks later, on 17 January 1916, Einstein wrote to Hendrik Lorentz: "Die Serie meiner Gravitationsarbeiten ist eine Kette von Irrwegen, die aber doch allmählich dem Ziele näher führten." See for, example, the book by Henoch Gutfreund & Jürgen Renn, editors, *The Road to Relativity*, Princeton University Press, 2015. Cited on page 27.

23 Albrecht Fölsing, *Albert Einstein – eine Biographie*, Suhrkamp, p. 237, 1993. Cited on pages 28 and 42.

24 Einstein's beautiful introduction, almost without formulae, is Albert Einstein, *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Vieweg, 1917 and 1997. For a text with all required mathematics, see Albert Einstein, *The Meaning of Relativity*, Methuen, 1921 and 1956. The posthumous edition also contains Einstein's last printed words on the theory, in the appendix. See also the German text Albert Einstein, *Grundzüge der Relativitätstheorie*, Springer, 1921 expanded 1954, and republished 2002, which also contains the relevant mathematics. Cited on page 28.

25 Julian Schwinger, *Einstein's Legacy*, Scientific American, 1986. Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Freeman, 1992. See also Nick M. J. Woodhouse, *Special Relativity*, Springer, 2003. Cited on pages 28 and 89.

26 Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001. This is a beautiful book by one of the masters of the field. Cited on pages 28 and 87.

27 R. J. Kennedy & E. M. Thorndike, *Experimental establishment of the relativity of time*, Physical Review **42**, pp. 400–418, 1932. See also H. E. Ives & G. R. Stilwell, *An experimental study of the rate of a moving atomic clock*, Journal of the Optical Society of America **28**, pp. 215–226, 1938, and **31**, pp. 369–374, 1941. For a modern, high-precision versions, see C. Braxmeier, H. Müller, O. Pradl, J. Mlynek, A. Peters & S. Schiller, *New tests of relativity using a cryogenic optical resonator*, Physical Review Letters **88**, p. 010401, 2002. The newest result is in P. Antonini, M. Okhapkin, E. Göklü & S. Schiller, *Test of constancy of speed of light with rotating cryogenic optical resonators*, Physical Review A **71**, p. 050101, 2005, preprint at arxiv.org/abs/gr-qc/0504109, and the subsequent arxiv.org/abs/physics/0510169. See also P. Antonini, M. Okhapkin, E. Göklü & S. Schiller, *Reply to "Comment on 'Test of constancy of speed of light with rotating cryogenic optical resonators' "*, Physical Review A **72**, p. 066102, 2005, preprint at arxiv.org/abs/physics/0602115. Cited on pages 29 and 331.

28 The slowness of the speed of light inside the Sun is due to the frequent scattering of photons by solar matter. The most serious estimate is by R. Mitalas & K. R. Sills, *On the photon diffusion time scale for the Sun*, The Astrophysical Journal **401**, pp. 759–760, 1992, They give a photon escape time of 0.17 Ma, an average photon free mean path of 0.9 mm, an average speed of 0.97 cm/s and a speed at the centre that is ten times smaller. Cited on page 29.

29 L. Vestergaard Hau, S. E. Harris, Z. Dutton & C. H. Behroozi, *Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas*, Nature **397**, pp. 594–598, 1999. See also C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi & L. Vestergaard Hau, *Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses*, Nature **409**, pp. 490–493, 2001, and the comment E. A. Cornell, *Stopping light in its track*, **409**, pp. 461–462, 2001. However, despite the claim, the light pulses have *not* been halted. Cited on page 29.

30 The method of explaining special relativity by drawing a few lines on paper is due to Hermann Bondi, *Relativity and Common Sense: A New Approach to Einstein*, Dover, New York, 1980. See also Dierck-Ekkehard Liebscher, *Relativitätstheorie mit Zirkel und Lineal*, Akademie-Verlag Berlin, 1991. Cited on page 29.

31 S. Reinhardt & al., *Test of relativistic time dilation with fast optical clocks at different velocities*, Nature Physics **3**, pp. 861–864, 2007. Cited on page 31.

32 Rod S. Lakes, *Experimental limits on the photon mass and cosmic vector potential*, Physical Review Letters **80**, pp. 1826–1829, 1998. A maximum photon mass of 10^{-47} kg was also deduced from gamma-ray bursts in the paper Xem 13. Cited on page 33.

33 F. Tuinstra, *De lotgevallen van het dopplereffect*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **75**, p. 296, August 2009. Cited on page 33.

34 R. W. McGowan & D. M. Giltner, *New measurement of the relativistic Doppler shift in neon*, Physical Review Letters **70**, pp. 251–254, 1993. Cited on page 34.

35 R. Lambourne, *The Doppler effect in astronomy*, Physics Education **32**, pp. 34–40, 1997, Cited on page 36.

36 D. Kiefer & al., *Relativistic electron mirrors from nanoscale foils for coherent frequency upshift to the extreme ultraviolet*, Nature Communications **4**, p. 1763, 2013. The exploration

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

of relativistic charge systems promises interesting results and applications in the coming decade. Cited on page 37.

37 See, for example, the paper by T. Wilken & al., *A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level*, Nature **485**, pp. 611–614, 2012. Cited on page 37.

38 The present record for clock synchronization seems to be 1 ps for two clocks distant 3 km from each other. See A. Valencia, G. Scarcelli & Y. Shih, *Distant clock synchronization using entangled photon pairs*, Applied Physics Letters **85**, pp. 2655–2657, 2004, or arxiv.org/abs/quant-ph/0407204. Cited on page 37.

39 J. Frenkel & T. Kontorowa, *Über die Theorie der plastischen Verformung*, Physikalische Zeitschrift der Sowietunion **13**, p. 1, 1938. F. C. Frank, *On the equations of motion of crystal dislocations*, Proceedings of the Physical Society A **62**, pp. 131–134, 1949. J. Eshelby, *Uniformly moving dislocations*, Proceedings of the Physical Society A **62**, pp. 307–314, 1949. See also G. Leibfried & H. Dietze, Zeitschrift für Physik **126**, p. 790, 1949. A general introduction can be found in A. Seeger & P. Schiller, *Kinks in dislocation lines and their effects in internal friction in crystals*, Physical Acoustics **3A**, W. P. Mason, ed., Academic Press, 1966. See also the textbooks by Frank R. N. Nabarro, *Theory of Crystal Dislocations*, Oxford University Press, 1967, or J. P. Hirth & J. Lothe, *Theory of Dislocations*, McGraw Hill, 1968. Cited on page 38.

40 This beautiful graph is taken from Z. G. T. Guiragossian, G. B. Rothbart, M. R. Yearian, R. Gearhart & J. J. Murray, *Relative velocity measurements of electrons and gamma rays at 15 GeV*, Physical Review Letters **34**, pp. 335–338, 1975. Cited on page 39.

41 A provocative attempt to explain the lack of women in physics in general is made in Margaret Wertheim, *Pythagoras' Trousers – God, Physics and the Gender Wars*, Fourth Estate, 1997. Cited on page 39.

42 To find out more about the best-known crackpots, and their ideas, send an email to majordomo@zikzak.net with the one-line body 'subscribe psychoceramics'. Cited on page 39.

43 The accuracy of Galilean mechanics was discussed by Simon Newcomb already in 1882. For details, see Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972. Cited on page 39.

44 The speed of neutrinos is the same as that of light to 9 decimal digits. This is explained by Leo Stodolsky, *The speed of light and the speed of neutrinos*, Physics Letters B **201**, p. 353, 1988. An observation of a small mass for the neutrino has been published by the Japanese Super-Kamiokande collaboration, in Y. Fukuda & al., *Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos*, Physical Review Letters **81**, pp. 1562–1567, 1998. The newer results published by the Canadian Sudbury Neutrino Observatory, as Q.R. Ahmad & al., *Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory*, Physical Review Letters **89**, p. 011301, 2002, also confirm that neutrinos have a mass in the 1 eV region. Cited on pages 40 and 319.

45 B. Rothenstein & G. Eckstein, *Lorentz transformations directly from the speed of light*, American Journal of Physics **63**, p. 1150, 1995. See also the comment by E. Kapuścik, *Comment on "Lorentz transformations directly from the speed of light" by B. Rothenstein and G. Eckstein*, American Journal of Physics **65**, p. 1210, 1997. Cited on page 41.

46 See e.g. the 1922 lectures by Lorentz at Caltech, published as H. A. Lorentz, *Problems of Modern Physics*, edited by H. Bateman, Ginn and Company, page 99, 1927. Cited on page 41.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

47 Max Born, *Die Relativitätstheorie Einsteins*, Springer, 2003, a new, commented edition of the original text of 1920. Cited on page 42.

48 A. A. Michelson & E. W. Morley, *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, American Journal of Science (3rd series) **34**, pp. 333–345, 1887. Michelson published many other papers on the topic after this one. Cited on page 42.

49 The newest result is Ch. Eisele, A. Yu. Nevsky & S. Schiller, *Laboratory test of the isotropy of light propagation at the* 10^{-17} *level*, Physics Review Letters **103**, p. 090401, 2009. See also the older experiment at S. Schiller, P. Antonini & M. Okhapkin, *A precision test of the isotropy of the speed of light using rotating cryogenic cavities*, arxiv.org/abs/physics/0510169. See also the institute page at www.exphy.uni-duesseldorf.de/ResearchInst/WelcomeFP.html. Cited on page 42.

50 H. A. Lorentz, *De relative beweging van de aarde en dem aether*, Amst. Versl. **1**, p. 74, 1892, and also H. A. Lorentz, *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, Amst. Proc. **6**, p. 809, 1904, or Amst. Versl. **12**, p. 986, 1904. Cited on page 45.

51 A general refutation of such proposals is discussed by S. R. Mainwaring & G. E. Stedman, *Accelerated clock principles*, Physical Review A **47**, pp. 3611–3619, 1993. Experiments on *muons* at CERN in 1968 showed that accelerations of up to 10^{20} m/s^2 have no effect, as explained by D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Addison-Wesley, 1972, or by J. Bailey & al., Il Nuovo Cimento **9A**, p. 369, 1972. Cited on page 46.

52 W. Rindler, *General relativity before special relativity: an unconventional overview of relativity theory*, American Journal of Physics **62**, pp. 887–893, 1994. Cited on page 47.

53 Steven K. Blau, *Would a topology change allow Ms. Bright to travel backward in time?*, American Journal of Physics **66**, pp. 179–185, 1998. Cited on page 49.

54 On the 'proper' formulation of relativity, see for example D. Hestenes, *Proper particle mechanics*, Journal of Mathematical Physics **15**, pp. 1768–1777, 1974. See also his numerous other papers, his book David Hestenes, *Spacetime Algebra*, Gordon and Breach, 1966, and his webpage modelingnts.la.asu.edu. A related approach is W. E. Baylis, *Relativity in introductory physics*, preprint at arxiv.org/abs/physics/0406158. Cited on page 50.

55 The simple experiment to take a precise clock on a plane, fly it around the world and then compare it with an identical one left in place was first performed by J. C. Hafele & R. E. Keating, *Around-the-world atomic clocks: predicted relativistic time gains*, Science **177**, pp. 166–167, and *Around-the-world atomic clocks: observed relativistic time gains*, pp. 168–170, 14 July 1972. See also Xem 18. Cited on pages 51 and 143.

56 A readable introduction to the change of time with observers, and to relativity in general, is Roman U. Sexl & Herbert Kurt Schmidt, *Raum-Zeit-Relativität*, 2. Auflage, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1991. Cited on page 51.

57 Most famous is the result that moving muons stay younger, as shown for example by D. H. Frisch & J. B. Smith, *Measurement of the relativistic time dilation using μ-mesons*, American Journal of Physics **31**, pp. 342–355, 1963. For a full pedagogical treatment of the twin paradox, see E. Sheldon, *Relativistic twins or sextuplets?*, European Journal of Physics **24**, pp. 91–99, 2003. Cited on page 52.

58 Paul J. Nahin, *Time Machines – Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, Springer Verlag and AIP Press, second edition, 1999. Cited on page 52.

59 The first muon experiment was B. Rossi & D. B. Hall, *Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum*, Physical Review **59**, pp. 223–228, 1941. 'Mesotron' was the old

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

name for muon. Cited on page 52.

60 J. Bailey & al., *Final report on the CERN muon storage ring including the anomalous magnetic moment and the electric dipole moment of the muon, and a direct test of relativistic time dilation*, Nuclear Physics B **150**, pp. 1–75, 1979. Cited on page 53.

61 A. Harvey & E. Schucking, *A small puzzle from 1905*, Physics Today, pp. 34–36, March 2005. Cited on page 53.

62 Search for 'fuel' and 'relativistic rocket' on the internet. Cited on page 53.

63 W. Rindler, *Length contraction paradox*, American Journal of Physics **29**, pp. 365–366, 1961. For a variation without gravity, see R. Shaw, *Length contraction paradox*, American Journal of Physics **30**, p. 72, 1962. Cited on page 55.

64 H. van Lintel & C. Gruber, *The rod and hole paradox re-examined*, European Journal of Physics **26**, pp. 19–23, 2005. Cited on page 55.

65 See the clear discussion by C. Iyer & G. M. Prabhu, *Differing observations on the landing of the rod into the slot*, American Journal of Physics **74**, pp. 998–1001, 2006, preprint at arxiv.org/abs/0809.1740. Cited on page 55.

66 This situation is discussed by G. P. Sastry, *Is length contraction paradoxical?*, American Journal of Physics **55**, 1987, pp. 943–946. This paper also contains an extensive literature list covering variants of length contraction paradoxes. Cited on page 55.

67 S. P. Boughn, *The case of the identically accelerated twins*, American Journal of Physics **57**, pp. 791–793, 1989. Cited on pages 55 and 59.

68 J. M. Supplee, *Relativistic buoyancy*, American Journal of Physics 57 **1**, pp. 75–77, January 1989. See also G. E. A. Matsas, *Relativistic Arquimedes law for fast moving bodies and the general-relativistic resolution of the 'submarine paradox'*, Physical Review D **68**, p. 027701, 2003, or arxiv.org/abs/gr-qc/0305106. Cited on page 56.

69 The distinction was first published by J. Terrell, *Invisibility of Lorentz contraction*, Physical Review **116**, pp. 1041–1045, 1959, and R. Penrose, *The apparent shape of a relativistically moving sphere*, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **55**, pp. 137–139, 1959. Cited on page 58.

70 G. R. Rybicki, *Speed limit on walking*, American Journal of Physics **59**, pp. 368–369, 1991. Cited on page 60.

71 See, for example, R. J. Nemiroff, Q. Zhong & E. Lilleskov, *Lights illuminate surfaces superluminally*, preprint available at arXiv.org/abs/1506.02643; see also the related and beautiful paper R. J. Nemiroff, *Superluminal spot pair events in astronomical settings: sweeping beams*, preprint available at arXiv.org/abs/1412.7581. Cited on page 61.

72 The first examples of such astronomical observations were provided by A.R. Whitney & al., *Quasars revisited: rapid time variations observed via very-long-baseline interferometry*, Science **173**, pp. 225–230, 1971, and by M.H. Cohen & al., *The small-scale structure of radio galaxies and quasi-stellar sources at 3.8 centimetres*, Astrophysical Journal **170**, pp. 207–217, 1971. See also T. J. Pearson, S. C. Unwin, M. H. Cohen, R. P. Linfield, A. C. S. Readhead, G. A. Seielstad, R. S. Simon & R. C. Walker, *Superluminal expansion of quasar 3C 273*, Nature **290**, pp. 365–368, 1981. An overview is given in J. A. Zensus & T. J. Pearson, editors, *Superluminal radio sources*, Cambridge University Press, 1987. Another measurement, using very long baseline interferometry with radio waves on jets emitted from a binary star (thus not a quasar), was shown on the cover of Nature: I. F. Mirabel & L. F. Rodríguez, *A superluminal source in the galaxy*, Nature **371**, pp. 46–48, 1994. A more recent example was reported in Science News **152**, p. 357, 6 December 1997.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Pedagogical explanations are given by D. C. Gabuzda, *The use of quasars in teaching introductory special relativity*, American Journal of Physics **55**, pp. 214–215, 1987, and by Xem 118 on pages 89-92. Cited on page 62.

73 A somewhat old-fashioned review paper on tachyons mentioning the doubling issue, on pages 52 and 53, is E. Recami, *Classical tachyons and possible applications*, Rivista del Nuovo Cimento **9**, pp. 1–178, 1986. It also discusses a number of paradoxes. By the way, a simple animation claiming to show a flying tachyon can be found in Wikipedia. Cited on page 62.

74 O. M. Bilaniuk & E. C. Sudarshan, *Particles beyond the light barrier*, Physics Today **22**, pp. 43–51, 1969, and O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande & E. C. G. Sudarshan, *'Meta' relativity*, American Journal of Physics **30**, pp. 718–723, 1962. See also the book E. Recami, editor, *Tachyons, Monopoles and Related Topics*, North-Holland, 1978. Cited on page 63.

75 J. P. Costella, B. H. J. McKellar, A. A. Rawlinson & G. J. Stephenson, *The Thomas rotation*, American Journal of Physics **69**, pp. 837–847, 2001. Cited on page 63.

76 Planck wrote this in a letter in 1908. Cited on page 64.

77 See for example S. S. Costa & G. E. A. Matsas, *Temperature and relativity*, preprint available at arxiv.org/abs/gr-qc/9505045. Cited on page 65.

78 One of the latest of these debatable experiments is T. P. Krisher, L. Maleki, G. F. Lutes, L. E. Primas, R. T. Logan, J. D. Anderson & C. M. Will, *Test of the isotropy of the one-way speed of light using hydrogen-maser frequency standards*, Physical Review D **42**, pp. 731–734, 1990. Cited on pages 66 and 323.

79 H. C. Ohanian, *The role of dynamics in the synchronization problem*, American Journal of Physics **72**, pp. 141–148, 2004. Cited on pages 66 and 323.

80 R. C. Tolman & G. N. Lewis, *The principle of relativity and non-Newtonian mechanics*, Philosophical Magazine **18**, pp. 510–523, 1909, and R. C. Tolman, *Non-Newtonian mechanics: the mass of a moving body*, Philosophical Magazine **23**, pp. 375–380, 1912. Cited on page 67.

81 S. Rainville, J. K. Thompson, E. G. Myers, J. M. Brown, M. S. Dewey, E. G. Kessler, R. D. Deslattes, H. G. Börner, M. Jentschel, P. Mutti & D. E. Pritchard, *World year of physics: a direct test of $E = mc^2$*, Nature **438**, pp. 1096–1097, 2005. Cited on page 73.

82 This information is due to a private communication by Frank DiFilippo; part of the story is given in F. DiFilippo, V. Natarajan, K. R. Boyce & D. E. Pritchard, *Accurate atomic masses for fundamental metrology*, Physical Review Letters **73**, pp. 1481–1484, 1994. These measurements were performed with Penning traps; a review of the possibilities they offer is given by R. C. Thompson, *Precision measurement aspects of ion traps*, Measurement Science and Technology **1**, pp. 93–105, 1990. The most important experimenters in the field of single particle levitation were awarded the Nobel Prize in 1989. One of the Nobel Prize lectures can be found in W. Paul, *Electromagnetic traps for neutral and charged particles*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 531–540, 1990. Cited on page 73.

83 J. L. Synge, *Relativity: The Special Theory*, North-Holland, 1956, pp. 208–213. More about antiparticles in special relativity can be found in J. P. Costella, B. H. J. McKellar & A. A. Rawlinson, *Classical antiparticles*, American Journal of Physics **65**, pp. 835–841, 1997. See also Xem 102. Cited on page 74.

84 M. Cannoni, *Lorentz invariant relative velocity and relativistic binary collisions*, preprint at arxiv.org/abs/1605.00569. Cited on page 76.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

85 A. Papapetrou, *Drehimpuls- und Schwerpunktsatz in der relativistischen Mechanik*, Praktika Acad. Athenes **14**, p. 540, 1939, and A. Papapetrou, *Drehimpuls- und Schwerpunktsatz in der Diracschen Theorie*, Praktika Acad. Athenes **15**, p. 404, 1940. See also M. H. L. Pryce, *The mass-centre in the restricted theory of relativity and its connexion with the quantum theory of elementary particles*, Proceedings of the Royal Society in London, A **195**, pp. 62–81, 1948. Cited on page 76.

86 The references preceding Einstein's $E = c^2m$ are: S. Tolver Preston, *Physics of the Ether*, E. & F.N. Spon, 1875, J. H. Poincaré, *La théorie de Lorentz et le principe de réaction*, Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles **5**, pp. 252–278, 1900, O. De Pretto, *Ipotesi dell'etere nella vita dell'universo*, Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti **tomo LXIII**, parte 2, pp. 439–500, Febbraio 1904, F. Hasenöhrl, Berichte der Wiener Akademie **113**, p. 1039, 1904, F. Hasenöhrl, *Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern*, Annalen der Physik **15**, pp. 344–370, 1904, F. Hasenöhrl, *Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern – Berichtigung*, Annalen der Physik **16**, pp. 589–592, 1905. Hasenöhrl died in 1915, De Pretto in 1921. All these papers were published before the famous paper by Albert Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, Annalen der Physik **18**, pp. 639–641, 1905. Cited on page 78.

87 Umberto Bartocci, *Albert Einstein e Olinto De Pretto: la vera storia della formula più famosa del mondo*, Ultreja, 1998. Cited on page 78.

88 For a clear overview of the various sign conventions in general relativity, see the front cover of the text by Misner, Thorne and Wheeler, Xem 97. We use the gravitational sign conventions of the text by Ohanian and Ruffini, Xem 112. Cited on page 80.

89 A jewel among the texts on special relativity is the booklet by Ulrich E. Schröder, *Spezielle Relativitätstheorie*, Verlag Harri Deutsch, 1981. Cited on pages 82 and 85.

90 G. Stephenson & C. W. Kilmister, *Special Relativity for Physicists*, Longmans, London, 1965. See also W. N. Matthews, *Relativistic velocity and acceleration transformations from thought experiments*, American Journal of Physics **73**, pp. 45–51, 2005, and the subsequent J. M. Lévy, *A simple derivation of teh Lorentz transformation and of the accompanying velocity and acceleration changes*, American Journal of Physics **75**, pp. 615–618, 2007. Cited on page 83.

91 A readable article showing a photocopy of a letter by Einstein making this point is Lev B. Okun, *The concept of mass*, Physics Today, pp. 31–36, June 1989. The topic is not without controversy, as the letters by readers following that article show; they are found in Physics Today, pp. 13–14 and pp. 115–117, May 1990. The topic is still a source of debates. Cited on page 85.

92 Christian Møller, *The Theory of Relativity*, Clarendon Press, 1952, 1972. This standard textbook has been translated in several languages. Cited on page 85.

93 The famous *no-interaction theorem* states that there is no way to find a Lagrangian that only depends on particle variables, is Lorentz invariant *and* contains particle interactions. It was shown by D. G. Currie, T. F. Jordan & E. C. G. Sudarshan, *Relativistic invariance and Hamiltonian theories of interacting particles*, Review of Modern Physics **35**, pp. 350–375, 1963. Cited on page 86.

94 P. Ehrenfest, *Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie*, Physikalische Zeitschrift **10**, pp. 918–928, 1909. Ehrenfest (incorrectly) suggested that this meant that relativity cannot be correct. A good modern summary of the issue can be found in M. L. Ruggiero, *The relative space: space measurements on a rotating platform*, arxiv.org/abs/gr-qc/0309020. Cited on page 87.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

95 R. J. Low, *When moving clocks run fast*, European Journal of Physics **16**, pp. 228–229, 1995. Cited on page 94.

96 E. A. Desloge & R. J. Philpott, *Uniformly accelerated reference frames in special relativity*, American Journal of Physics **55**, pp. 252–261, 1987. Cited on page 96.

97 The impossibility of defining rigid coordinate frames for non-uniformly accelerating observers is discussed by Charles Misner, Kip Thorne & John A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, p. 168, 1973. Cited on pages 96 and 338.

98 R. H. Good, *Uniformly accelerated reference frame and twin paradox*, American Journal of Physics **50**, pp. 232–238, 1982. Cited on pages 96, 97, and 101.

99 J. D. Hamilton, *The uniformly accelerated reference frame*, American Journal of Physics **46**, pp. 83–89, 1978. Cited on page 97.

100 The best and cheapest mathematical formula collection remains the one by K. Rottmann, *Mathematische Formelsammlung*, BI Hochschultaschenbücher, 1960. Cited on page 97.

101 C. G. Adler & R. W. Brehme, *Relativistic solutions to a falling body in a uniform gravitation field*, American Journal of Physics **59**, pp. 209–213, 1991. Cited on page 98.

102 See for example the excellent lecture notes by D. J. Raymond, *A radically modern approach to freshman physics*, on the www.physics.nmt.edu/~raymond/teaching.html website. Cited on pages 98 and 337.

103 Edward A. Desloge, *The gravitational red-shift in a uniform field*, American Journal of Physics **58**, pp. 856–858, 1990. Cited on page 101.

104 L. Mishra, *The relativistic acceleration addition theorem*, Classical and Quantum Gravity **11**, pp. L97–L102, 1994. Cited on page 102.

105 Edwin F. Taylor & A. P. French, *Limitation on proper length in special relativity*, American Journal of Physics **51**, pp. 889–893, 1983. Cited on page 104.

106 Clear statements against a varying speed of light are made by Michael Duff in several of his publications, such as M. J. Duff, *Comment on time-variation of fundamental constants*, arxiv.org/abs/hep-th/0208093. The opposite point of view, though incorrect, has been proposed by John Moffat and by João Magueijo, but also by various other authors. Cited on page 107.

107 The quote is form a letter of Gibbs to the American Academy of Arts and Sciences, in which he thanks the Academy for their prize. The letter was read in a session of the Academy and thus became part of the proceedings: J. W. Gibbs, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, **16**, p. 420, 1881. Cited on page 110.

108 It seems that the first published statement of the maximum force as a *fundamental principle* was around the year 2000, in this text, in the chapter on gravitation and relativity. The author discovered the maximum force principle, not knowing the work of others, when searching for a way to derive the results of the last part of this adventure that would be so simple that it would convince even a secondary-school student. In the year 2000, the author told his friends in Berlin about his didactic approach.

The *concept* of a maximum force was first proposed, most probably, by Venzo de Sabbata and C. Sivaram in 1993. Also this physics discovery was thus made much too late. In 1995, Corrado Massa took up the idea. Independently, Ludwik Kostro in 1999, Christoph Schiller just before 2000 and Gary Gibbons in the years before 2002 arrived at the same concept. Gary Gibbons was inspired by a book by Oliver Lodge; he explains that the maximum force value follows from general relativity; he does not make a statement about the converse, nor do the other authors. The statement of maximum force as a fundamental principle seems

Quyển VI, trang 57

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

original to Christoph Schiller.

The temporal order of the first papers on maximum force seems to be V. de Sabbata & C. Sivaram, *On limiting field strengths in gravitation*, Foundations of Physics Letters **6**, pp. 561–570, 1993, followed by C. Massa, *Does the gravitational constant increase?*, Astrophysics and Space Science **232**, pp. 143–148, 1995, and by L. Kostro & B. Lange, *Is c^4/G the greatest possible force in nature?*, Physics Essays **12**, pp. 182–189, 1999. The next references are the paper by G. W. Gibbons, *The maximum tension principle in general relativity*, Foundations of Physics **32**, pp. 1891–1901, 2002, preprint at arxiv.org/abs/hep-th/0210109 – though he developed the ideas before that date – and the older versions of the present text Christoph Schiller, *Motion Mountain – The Adventure of Physics*, free pdf available at www.motionmountain.net. Then came C. Schiller, *Maximum force and minimum distance: physics in limit statements*, preprint at arxiv.org/abs/physics/0309118, and C. Schiller, *General relativity and cosmology derived from principle of maximum power or force*, International Journal of Theoretical Physics **44**, pp. 1629–1647, 2005, preprint at arxiv.org/abs/physics/0607090. See also R. Beig, G. W. Gibbons & R. M. Schoen, *Gravitating opposites attract*, Classical and Quantum Gravity **26**, p. 225013, 2009. preprint at arxiv.org/abs/09071103.

In 2016, Gary Gibbons is not yet convinced maximum force or power can be seen as a *fundamental* physical principle from which general relativity can be *deduced* – though he sees it as a promising conjecture. Cited on pages 110, 116, 121, 126, 136, and 152.

109 See the fundamental paper by A. DiSessa, *Momentum flow as an alternative perspective in elementary mechanics*, **48**, p. 365, 1980, and A. DiSessa, *Erratum: "Momentum flow as an alternative perspective in elementary mechanics" [Am. J. Phys. 48, 365 (1980)]*, **48**, p. 784, 1980. Also the excellent physics textbook by Friedrich Herrmann, *The Karlsruhe Physics Course*, makes this point extensively; it is free to download in English, Spanish, Russian, Italian and Chinese at www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/index_en.html. Cited on page 112.

110 C. Schiller, *Maximum force and minimum distance: physics in limit statements*, preprint at arxiv.org/abs/physics/0309118; the ideas are also part of the sixth volume of this text, which is freely downloadable at www.motionmountain.net. Cited on pages 113, 116, 126, and 136.

111 The analysis of the first detected gravitational wave event, called GW150914, is presented in B.P. Abbott & al., (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, Physical Review Letters **116**, p. 061102, 2016, also available for free download at journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102. Additional, more detailed papers on the event can be found at www.ligo.caltech.edu. Cited on pages 115 and 187.

112 H. C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., 1994. Another textbook that talks about the power limit is Ian R. Kenyon, *General Relativity*, Oxford University Press, 1990. The maximum power is also discussed in L. Kostro, *The quantity c^5/G interpreted as the greatest possible power in nature*, Physics Essays **13**, pp. 143–154, 2000. Cited on pages 115, 125, 127, 129, 133, 134, 326, 338, and 349.

113 An overview of the literature on analog model of general relativity can be found on Matt Visser's website www.physics.wustl.edu/~visser/Analog/bibliography.html. Cited on page 115.

114 See for example Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001, p. 70 ff, or Ray d'Inverno, *Introducing Einstein's Relativity*, Clarendon Press, 1992, p. 36 ff. Cited on page 117.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

115 See for example A. Ashtekar, S. Fairhust & B. Krishnan, *Isolated horizons: Hamiltonian evolution and the first law*, arxiv.org/abs/gr-qc/0005083. Cited on page 117.

116 T. Jacobson, *Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state*, Physical Review Letters **75**, pp. 1260–1263, 1995 or arxiv.org/abs/gr-qc/9504004. Cited on page 118.

117 See for example Ekkehart Kröner, *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958, volume 5 of the series 'Ergebnisse der angewandten Mathematik'. Kröner shows the similarity between the equations, methods and results of solid-state continuum physics and those of general relativity, including the Ricci formalism. Cited on pages 121 and 214.

118 See the excellent book Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Spacetime Physics – Introduction to Special Relativity*, second edition, Freeman, 1992. Cited on pages 122 and 337.

119 This counter-example was suggested by Steve Carlip. Cited on page 125.

120 E. R. Caianiello, Lettere al Nuovo Cimento **41**, p. 370, 1984. Cited on page 127.

121 J. D. Barrow & G. W. Gibbons, *Maximum tension: with and without a cosmological constant*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **446**, pp. 3874–3877, 2014, preprint at arxiv.org/abs/1408.1820. Cited on page 127.

122 A notable exception is the physics teching group in Karlsruhe, who has always taught force in the correct way. See F. Herrmann, *Mengenartige Größen im Physikunterricht*, Physikalische Blätter **54**, pp. 830–832, September 1998. See also the lecture notes on general introductory physics on the website www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/skripten. Cited on page 131.

123 R. Penrose, *Naked singularities*, Annals of the New York Academy of Sciences **224**, pp. 125–134, 1973. Cited on page 133.

124 G. Huisken & T. Ilmanen, *The Riemannian Penrose inequality*, International Mathematics Research Notices **59**, pp. 1045–1058, 1997. S. A. Hayward, *Inequalities relating area, energy, surface gravity and charge of black holes*, Physical Review Letters **81**, pp. 4557–4559, 1998. Cited on page 133.

125 C. Will, *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, Living Reviews in Relativity **17**, 2014, available freely at www.livingreviews.org/lrr-2014-4. An older and more extensive reference is Clifford M. Will, *Was Einstein Right? – Putting General Relativity to the Test*, Oxford University Press, 1993. See also his paper arxiv.org/abs/gr-qc/9811036. Cited on pages 134 and 345.

126 The measurement results by the WMAP satellite are summarized on the website map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html; the papers are available at lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_bibliography.cfm. Cited on page 135.

127 The simplest historical source is Albert Einstein, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften II pp. 844–846, 1915. It is the first explanation of the general theory of relativity, in only three pages. The theory is then explained in detail in the famous article Albert Einstein, *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Annalen der Physik **49**, pp. 769–822, 1916. The historic references can be found in German and English in John Stachel, ed., *The Collected Papers of Albert Einstein*, Volumes 1–9, Princeton University Press, 1987–2004.

Below is a selection of English-language textbooks for deeper study, in ascending order of depth and difficulty:

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

— An entertaining book without any formulae, but nevertheless accurate and detailed, is the paperback by Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990.
— Almost no formulae, but loads of insight, are found in the enthusiastic text by John A. Wheeler, *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman, 1990.
— An excellent presentation is Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity*, Addison Wesley Longman, 2000.
— Beauty, simplicity and shortness are the characteristics of Malcolm Ludvigsen, *General Relativity, a Geometric Approach*, Cambridge University Press, 1999.
— Good explanation is the strength of Bernard Schutz, *Gravity From the Ground Up*, Cambridge University Press, 2003.
— A good overview of experiments and theory is given in James Foster & J. D. Nightingale, *A Short Course in General Relativity*, Springer Verlag, 2nd edition, 1998.
— A pretty text is Sam Lilley, *Discovering Relativity for Yourself*, Cambridge University Press, 1981.
— A modern text is by Ray d'Inverno, *Introducing Einstein's Relativity*, Clarendon Press, 1992. It includes an extended description of black holes and gravitational radiation, and regularly refers to present research.
— A beautiful, informative and highly recommended text is H. C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, W.W. Norton & Co., 1994.
— A well written and modern book, with emphasis on the theory, by one of the great masters of the field is Wolfgang Rindler, *Relativity – Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, 2001.
— A classic is Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972.
— The passion of general relativity can be experienced also in John Klauder, ed., *Magic without Magic: John Archibald Wheeler – A Collection of Essays in Honour of His Sixtieth Birthday*, W.H. Freeman & Co., 1972.
— An extensive text is Kip S. Thorne, *Black Holes and Time Warps – Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton, 1994.
— The most mathematical – and toughest – text is Robert M. Wald, *General Relativity*, University of Chicago Press, 1984.
— Much information about general relativity is available on the internet. As a good starting point for US-American material, see the math.ucr.edu/home/baez/physics/ website.

There is still a need for a large and modern textbook on general relativity, with colour material, that combines experimental and theoretical aspects. For texts in other languages, see the next reference. Cited on pages 139, 166, 169, 207, and 209.

128 A beautiful German teaching text is the classic G. Falk & W. Ruppel, *Mechanik, Relativität, Gravitation – ein Lehrbuch*, Springer Verlag, third edition, 1983.

A practical and elegant booklet is Ulrich E. Schröder, *Gravitation – Einführung in die allgemeine Relativitätstheorie*, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2001.

A modern reference is Torsten Fliessbach, *Allgemeine Relativitätstheorie*, Akademischer Spektrum Verlag, 1998.

Excellent is Hubert Goenner, *Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Akademischer Spektrum Verlag, 1996.

In Italian, there is the beautiful, informative, but expensive H. C. Ohanian & Remo Ruffini, *Gravitazione e spazio-tempo*, Zanichelli, 1997. It is highly recommended. A modern update of that book would be without equals. Cited on pages 139, 166, 169, 184,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

185, 209, and 347.

129 P. Mohazzabi & J. H. Shea, *High altitude free fall*, American Journal of Physics **64**, pp. 1242–1246, 1996. As a note, due to a technical failure Kittinger had his hand in (near) vacuum during his ascent, without incurring any permanent damage. On the consequences of human exposure to vacuum, see the www.sff.net/people/geoffrey.landis/vacuum.html website. Cited on page 140.

130 This story is told by W. G. Unruh, *Time, gravity, and quantum mechanics*, preprint available at arxiv.org/abs/gr-qc/9312027. Cited on page 140.

131 H. Bondi, *Gravitation*, European Journal of Physics **14**, pp. 1–6, 1993. Cited on page 141.

132 J. W. Brault, Princeton University Ph.D. thesis, 1962. See also J. L. Snider, Physical Review Letters **28**, pp. 853–856, 1972, and for the star Sirius see J.L. Greenstein & al., Astrophysical Journal **169**, p. 563, 1971. Cited on pages 143 and 297.

133 See the detailed text by Jeffrey Crelinsten, *Einstein's Jury – The Race to Test Relativity*, Princeton University Press, 2006, which covers all researchers involved in the years from 1905 to 1930. Cited on page 143.

134 The famous paper is R. V. Pound & G. A. Rebka, *Apparent weight of photons*, Physical Review Letters **4**, pp. 337–341, 1960. A higher-precision version was published by R. V. Pound & J. L. Snider, Physical Review Letters **13**, p. 539, 1964, and R. V. Pound & J. L. Snider, Physical Review B **140**, p. 788, 1965. Cited on pages 143 and 297.

135 R.F.C. Vessot & al., *Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser*, Physical Review Letters **45**, pp. 2081–2084, 1980. The experiment was performed in 1976; there are more than a dozen co-authors involved in this work, which involved shooting a maser into space with a scout missile to a height of *c.* 10 000 km. Cited on page 143.

136 L. Briatore & S. Leschiutta, *Evidence for Earth gravitational shift by direct atomic-time-scale comparison*, Il Nuovo Cimento **37B**, pp. 219–231, 1977. Cited on page 143.

137 More information about tides can be found in E. P. Clancy, *The Tides*, Doubleday, New York, 1969. Cited on page 145.

138 The expeditions had gone to two small islands, namely to Sobral, north of Brazil, and to Principe, in the gulf of Guinea. The results of the expedition appeared in *The Times* before they appeared in a scientific journal. Today this would be called unprofessional. The results were published as F. W. Dyson, A. S. Eddington & C. Davidson, Philosophical Transactions of the Royal Society (London) **220A**, p. 291, 1920, and Memoirs of the Royal Astronomical Society **62**, p. 291, 1920. Cited on page 146.

139 D. Kennefick, *Testing relativity from the 1919 eclipse – a question of bias*, Physics Today pp. 37–42, March 2009. This excellent article discusses the measurement errors in great detail. The urban legend that the star shifts were so small on the negatives that they implied large measurement errors is wrong – it might be due to a lack of respect on the part of some physicists for the abilities of astronomers. The 1979 reanalysis of the measurement confirm that such small shifts, smaller than the star image diameter, are reliably measurable. In fact, the 1979 reanalysis of the data produced a smaller error bar than the 1919 analysis. Cited on page 147.

140 A good source for images of space-time is the text by G. F. R. Ellis & R. Williams, *Flat and Curved Space-times*, Clarendon Press, Oxford, 1988. Cited on page 147.

141 J. Droste, *Het veld van een enkel centrum in Einstein's theorie der zwaartekracht, en de beweging van een stoffelijk punt*, Verslag gew. Vergad. Wiss. Amsterdam **25**, pp. 163–180, 1916. Cited on page 149.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

142 The name *black hole* was introduced in 1967 at a pulsar conference, as described in his autobiography by John A. Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*, W.W. Norton, 1998, pp. 296–297: 'In my talk, I argued that we should consider the possibility that at the center of a pulsar is a gravitationally completely collapsed object. I remarked that one couldn't keep saying "gravitationally completely collapsed object" over and over. One needed a shorter descriptive phrase. "How about black hole?" asked someone in the audience. I had been searching for just the right term for months, mulling it over in bed, in the bathtub, in my car, whenever I had quiet moments. Suddenly, this name seemed exactly right. When I gave a more formal ... lecture ... a few weeks later on, on December 29, 1967, I used the term, and then included it into the written version of the lecture published in the spring of 1968 ... I decided to be casual about the term "black hole", dropping it into the lecture and the written version as if it were an old familiar friend. Would it catch on? Indeed it did. By now every schoolchild has heard the term.'

The widespread use of the term began with the article by R. Ruffini & J. A. Wheeler, *Introducing the black hole*, Physics Today **24**, pp. 30–41, January 1971.

In his autobiography, Wheeler also writes that the expression 'black hole has no hair' was criticized as 'obscene' by Feynman. This is a bizarre comment, given that Feynman used to write his papers in topless bars. Cited on pages 150, 268, 269, and 275.

143 L. B. Kreuzer, *Experimental measurement of the equivalence of active and passive gravitational mass*, Physical Review **169**, pp. 1007–1012, 1968. With a clever experiment, he showed that the gravitational masses of fluorine and of bromine are equal. Cited on page 150.

144 A good and accessible book on the topic is David Blair & Geoff McNamara, *Ripples on a cosmic sea*, Allen & Unwin, 1997. Cited on page 150.

145 That bodies fall along geodesics, independently of their mass, the so-called weak equivalence principle, has been checked by many experiments, down to the 10^{-13} level. The most precise experiments use so-called *torsion balances*. See, for example, the website of the Eőt-Wash group at www.npl.washington.edu/eotwash/experiments/experiments.html. Cited on page 155.

146 So far, the experiments confirm that electrostatic and (strong) nuclear energy fall like matter to within one part in 10^8, and weak (nuclear) energy to within a few per cent. This is summarized in Xem 150. Cited on page 155.

147 J. Soldner, *Berliner Astronomisches Jahrbuch auf das Jahr 1804*, 1801, p. 161. Cited on page 155.

148 See for example K. D. Olum, *Superluminal travel requires negative energies*, Physical Review Letters **81**, pp. 3567–3570, 1998, or M. Alcubierre, *The warp drive: hyper-fast travel within general relativity*, Classical and Quantum Gravity **11**, pp. L73–L77, 1994. See also Chris Van Den Broeck, *A warp drive with more reasonable total energy requirements*, Classical and Quantum Gravity **16**, pp. 3973–3979, 1999. Cited on page 158.

149 See the *Astronomical Almanac*, and its *Explanatory Supplement*, H.M. Printing Office, London and U.S. Government Printing Office, Washington, 1992. For the information about various time coordinates used in the world, such as barycentric coordinate time, the time at the barycentre of the solar system, see also the tycho.usno.navy.mil/systime.html web page. It also contains a good bibliography. Cited on page 159.

150 An overview is given in Clifford Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, chapter 14.3, revised edition, Cambridge University Press, 1993. Despite being a standard reference, Will's view of the role of tides and the role of gravitational energy within the

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

principle of equivalence has been criticised by other researchers. See also Xem 125. Cited on pages 160, 166, and 344.

151 The calculation omits several smaller effects, such as rotation of the Earth and red-shift. For the main effect, see Edwin F. Taylor, *'The boundaries of nature: special and general relativity and quantum mechanics, a second course in physics' – Edwin F. Taylor's acceptance speech for the 1998 Oersted Medal presented by the American Association of Physics Teachers, 6 January 1998*, American Journal of Physics **66**, pp. 369–376, 1998. Cited on page 160.

152 A. G. Lindh, *Did Popper solve Hume's problem?*, Nature **366**, pp. 105–106, 11 November 1993, Cited on page 161.

153 See the paper P. Kaaret, S. Piraino, P. F. Bloser, E. C. Ford, J. E. Grindlay, A. Santangelo, A. P. Smale & W. Zhang, *Strong Field Gravity and X-Ray Observations of 4U1820-30*, Astrophysical Journal **520**, pp. L37–L40, 1999, or at arxiv.org/abs/astro-ph/9905236. The beautiful graphics at the research.physics.uiuc.edu/CTA/movies/spm website illustrate this star system. Cited on page 161.

154 R. J. Nemiroff, *Visual distortions near a black hole and a neutron star*, American Journal of Physics **61**, pp. 619–632, 1993. Cited on page 161.

155 The equality was first tested with precision by R. von Eötvös, Annalen der Physik & Chemie **59**, p. 354, 1896, and by R. von Eötvös, V. Pekár, E. Fekete, *Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität*, Annalen der Physik 4, Leipzig **68**, pp. 11–66, 1922. Eötvös found agreement to 5 parts in 10^9. More experiments were performed by P. G. Roll, R. Krotkow & R. H. Dicke, *The equivalence of inertial and passive gravitational mass*, Annals of Physics (NY) **26**, pp. 442–517, 1964, one of the most interesting and entertaining research articles in experimental physics, and by V. B. Braginsky & V. I. Panov, Soviet Physics – JETP **34**, pp. 463–466, 1971. Modern results, with errors less than one part in 10^{12}, are by Y. Su & al., *New tests of the universality of free fall*, Physical Review **D50**, pp. 3614–3636, 1994. Several future experiments have been proposed to test the equality in space to less than one part in 10^{16}. Cited on pages 161, 162, and 297.

156 Nigel Calder, *Einstein's Universe*, Viking, 1979. Weizmann and Einstein once crossed the Atlantic on the same ship. Cited on page 164.

157 L. Lerner, *A simple calculation of the deflection of light in a Schwarzschild gravitational field*, American Journal of Physics **65**, pp. 1194–1196, 1997. Cited on page 165.

158 A. Einstein, *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*, Annalen der Physik **35**, p. 898, 1911. Cited on page 166.

159 I. I. Shapiro, & al., *Fourth test of general relativity*, Physical Review Letters **13**, pp. 789–792, 1964. Cited on page 167.

160 I. I. Shapiro, & al., *Fourth test of general relativity: preliminary results*, Physical Review Letters **20**, pp. 1265–1269, 1968. Cited on page 168.

161 J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Proceedings of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992. Cited on pages 168 and 170.

162 B. Bertotti, I. Ciufolini & P. L. Bender, *New test of general relativity: measurement of De Sitter geodetic precession rate for lunar perigee*, Physical Review Letters **58**, pp. 1062–1065, 1987. Later it was confirmed by I.I. Shapiro & al., *Measurement of the De Sitter precession of the moon: a relativistic three body effect*, Physical Review Letters **61**, pp. 2643–2646, 1988. Cited on pages 171 and 297.

163 The Thirring effect was predicted in H. Thirring, *Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie*, Physikalische Zeitschrift **19**, pp. 33–39,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

1918, and in H. Thirring, *Berichtigung zu meiner Arbeit: "Über die Wirkung rotierender Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie"*, Physikalische Zeitschrift **22**, p. 29, 1921. The Thirring–Lense effect was predicted in J. Lense & H. Thirring, *Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie*, Physikalische Zeitschrift **19**, pp. 156–163, 1918. Cited on page 173.

164 W. de Sitter, *On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences*, Monthly Notes of the Royal Astrononmical Society **77**, pp. 155–184, p. 418E, 1916. For a discussion of De Sitter precession and Thirring–Lense precession, see also B. R. Holstein, *Gyroscope precession in general relativity*, American Journal of Physics **69**, pp. 1248–1256, 2001. Cited on page 173.

165 The work is based on the LAGEOS and LAGEOS II satellites and is told in I. Ciufolini, *The 1995–99 measurements of the Thirring–Lense effect using laser-ranged satellites*, Classical and Quantum Gravity **17**, pp. 2369–2380, 2000. See also I. Ciufolini & E. C. Pavlis, *A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense–Thirring effect*, Nature **431**, pp. 958–960, 2004. See, however, the next reference. Cited on pages 174 and 297.

166 See the interesting, detailed and disturbing discussion by L. Iorio, *On some critical issues of the LAGEOS-based tests of the Lense–Thirring effect*, Journal of Modern Physics **2**, pp. 210–218, 2011, preprint available at arxiv.org/abs/1104.4464. Cited on pages 174 and 297.

167 On the Gravity Probe B satellite experiment, see the web page einstein.stanford.edu/highlights/status1.html and the papers cited there. Cited on pages 171 and 174.

168 The detection of the Thirring–Lense effect in binary pulsars is presented in R. D. Blandford, *Lense–Thirring precession of radio pulsars*, Journal of Astrophysics and Astronomy **16**, pp. 191–206, 1995. Cited on page 174.

169 G. Holzmüller, Zeitschrift für Mathematik und Physik **15**, p. 69, 1870, F. Tisserand, Comptes Rendus **75**, p. 760, 1872, and Comptes Rendus **110**, p. 313, 1890. Cited on page 175.

170 B. Mashhoon, *Gravitoelectromagnetism: a brief review*, arxiv.org/abs/gr-qc/0311030, and B. Mashhoon, *Gravitoelectromagnetism*, arxiv.org/abs/gr-qc/0011014. See also its extensive reference list on gravitomagnetism. Cited on page 175.

171 A. Tartaglia & M. L. Ruggiero, *Gravito-electromagnetism versus electromagnetism*, European Journal of Physics **25**, pp. 203–210, 2004. Cited on page 175.

172 D. Bedford & P. Krumm, *On relativistic gravitation*, American Journal of Physics **53**, pp. 889–890, 1985, and P. Krumm & D. Bedford, *The gravitational Poynting vector and energy transfer*, American Journal of Physics **55**, pp. 362–363, 1987. Cited on pages 176 and 184.

173 M. Kramer & al., *Tests of general relativity from timing the double pulsar*, preprint at arxiv.org/abs/astro-ph/0609417. Cited on pages 178 and 297.

174 The discussion of gravitational waves by Poincaré is found in H. Poincaré, *Sur la dynamique de l'électron*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences **140**, pp. 1504–1508, 1905, which can be read online at www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Poincare/Poincare_pdf/Poincare_CR1905.pdf. Einstein's prediction from an approximation of general relativity, eleven years later, is found in A. Einstein, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften pp. 688–696, 1916. The first fully correct prediction of gravitational waves is A. Einstein & N. Rosen, *On gravitational waves*, Journal of the Franklin Institute **223**, pp. 43–54, 1937. Despite heated discussions, until his death, Nathan Rosen continued not to believe in the existence of gravitational waves. On the story about the

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

errors of Einstein and Rosen about the reality of the waves, see also en.wikipedia.org/wiki/Sticky_bead_argument. Cited on page 178.

175 The history of how the existence gravitational was proven in all its conceptual details is told in the excellent paper C. D. Hill & P. Nurowski, *How the green light was given for gravitational wave search*, preprint at arxiv.org/abs/1608.08673. Cited on page 178.

176 This is told in John A. Wheeler, *A Journey into Gravity and Spacetime*, W.H. Freeman, 1990. Cited on page 178.

177 See, for example, K. T. McDonald, *Answer to question #49. Why c for gravitational waves?*, American Journal of Physics **65**, pp. 591–592, 1997, and section III of V. B. Braginsky, C. M. Caves & K. S. Thorne, *Laboratory experiments to test relativistic gravity*, Physical Review D **15**, pp. 2047–2068, 1992. Cited on page 180.

178 A proposal to measure the speed of gravity is by S. M. Kopeikin, *Testing the relativistic effect of the propagation of gravity by Very Long Baseline Interferometry*, Astrophysical Journal **556**, pp. L1–L5, 2001, and the experimental data is E. B. Formalont & S. M. Kopeikin, *The measurement of the light deflection from Jupiter: experimental results*, Astrophysical Journal **598**, pp. 704–711, 2003. See also S. M. Kopeikin, *The post-Newtonian treatment of the VLBI experiment on September 8, 2002*, Physics Letters A **312**, pp. 147–157, 2003, or arxiv.org/abs/gr-qc/0212121. Several arguments against the claim were published, such as C. M. Will, *Propagation speed of gravity and the relativistic time delay*, arxiv.org/abs/astro-ph/0301145, and S. Samuel, *On the speed of gravity and the v/c corrections to the Shapiro time delay*, arxiv.org/abs/astro-ph/0304006. The discussion went on, as shown in S. M. Kopeikin & E. B. Formalont, *Aberration and the fundamental speed of gravity in the Jovian deflection experiment*, Foundations of Physics **36**, pp. 1244–1285, 2006, preprint at arxiv.org/abs/astro-ph/0311063. Both sides claim to be right: the experiment claims to deduce the speed of gravity from the lack of a tangential component of the light deflection by the gravity of Jupiter, and the critical side claims that the speed of gravity does not enter in this measurement. If we compare the situation with analogous systems in transparent fluids or solids, which also show no tangential deflection component, we conclude that neither the measurement nor the proposal allow us to deduce information on the speed of gravity. A similar conclusion, but based on other arguments, is found on physics.wustl.edu/cmw/SpeedofGravity.html. Cited on page 181.

179 For an introduction to gravitational waves, see B. F. Schutz, *Gravitational waves on the back of an envelope*, American Journal of Physics **52**, pp. 412–419, 1984. Cited on page 181.

180 The quadrupole formula is explained clearly in the text by Goenner. See Xem 128. Cited on page 183.

181 The beautiful summary by Daniel Kleppner, *The gem of general relativity*, Physics Today **46**, pp. 9–11, April 1993, appeared half a year before the authors of the cited work, Joseph Taylor and Russel Hulse, received the Nobel Prize in Physics for the discovery of millisecond pulsars. A more detailed review article is J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992. The original paper is J. H. Taylor & J. M. Weisberg, *Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16*, Astrophysical Journal **345**, pp. 434–450, 1989. See also J. M. Weisberg, J. H. Taylor & L. A. Fowler, *Pulsar PSR 1913+16 sendet Gravitationswellen*, Spektrum der Wissenschaft, pp. 53–61, December 1981. Cited on page 185.

182 D. R. Lorimer, *Binary and millisecond pulsars*, in www.livingreviews.org/lrr-2005-7, and J. M. Weisberg & J. H. Taylor, *The relativistic binary pulsar B1913+16: thirty years of observations and analysis*, pp. 25–31, in F. A. Rasio & I. H. Stairs, editors, *Binary Radio*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Pulsars, Proceedings of a meeting held at the Aspen Center for Physics, USA, 12 Janaury – 16 January 2004, volume 328 of ASP Conference Series, Astronomical Society of the Pacific, 2005. Cited on page 185.

183 W. B. Bonnor & M. S. Piper, *The gravitational wave rocket*, Classical and Quantum Gravity **14**, pp. 2895–2904, 1997, or arxiv.org/abs/gr-qc/9702005. Cited on page 188.

184 Wolfgang Rindler, *Essential Relativity*, Springer, revised second edition, 1977. Cited on page 191.

185 This is told (without the riddle solution) on p. 67, in Wolfgang Pauli, *Relativitätstheorie*, Springer Verlag, Berlin, 2000, the edited reprint of a famous text originally published in 1921. The reference is H. Vermeil, *Notiz über das mittlere Krümmungsmaß einer n-fach ausgedehnten Riemannschen Mannigfaltigkeit*, Göttinger Nachrichten, mathematische–physikalische Klasse p. 334, 1917. Cited on page 192.

186 M. Santander, L. M. Nieto & N. A. Cordero, *A curvature based derivation of the Schwarzschild metric*, American Journal of Physics **65**, pp. 1200–1209, 1997. Cited on pages 196, 198, and 199.

187 Michael H. Soffel, *Relativity in Astronomy, Celestial Mechanics and Geodesy*, Springer Verlag, 1989. Cited on page 196.

188 Richard P. Feynman, Fernando B. Morinigo, William G. Wagner & Brian Hatfield, *Feynman Lectures on Gravitation*, Westview Press, 1995. Cited on page 197.

189 J. C. Baez & E. F. Bunn, *The meaning of Einstein's equation*, American Journal of Physics **73**, pp. 644–652, 2005. Cited on page 200.

190 Y. Wang & M. Tegmark, *New dark energy constraints from supernovae, microwave background and galaxy clustering*, Physical Review Letters **92**, p. 241302, 2004, or arxiv.org/astro-ph/0403292. Cited on page 204.

191 Arguments for the emptiness of general covariance are given by John D. Norton, *General covariance and the foundations of general relativity*, Reports on Progress in Physics **56**, pp. 791–858, 1993. The opposite point, including the discussion of 'absolute elements', is made in the book by J. L. Anderson, *Principles of Relativity Physics*, chapter 4, Academic Press, 1967. Cited on page 204.

192 For a good introduction to mathematical physics, see the famous three-women text in two volumes by Yvonne Choquet-Bruhat, Cecile DeWitt-Morette & Margaret Dillard-Bleick, *Analysis, Manifolds, and Physics*, North-Holland, 1996 and 2001. The first edition of this classic appeared in 1977. Cited on page 205.

193 C. G. Torre & I. M. Anderson, *Symmetries of the Einstein equations*, Physical Review Letters **70**, pp. 3525–3529, 1993, or arxiv.org/abs/gr-qc/9302033. Cited on page 207.

194 H. Nicolai, *Gravitational billiards, dualities and hidden symmetries*, arxiv.org//abs/gr-qc/0506031. Cited on page 208.

195 The original paper is R. Arnowitt, S. Deser & C. Misner, *Coordinate invariance and energy expressions in general relativity*, Physical Review **122**, pp. 997–1006, 1961. Cited on page 208.

196 See for example H. L. Bray, *Black holes, geometric flows, and the Penrose inequality in general relativity*, Notices of the AMS **49**, pp. 1372–1381, 2002. Cited on page 208.

197 See for example R.A. Knop & al., *New constraints on Ω_M, Ω_Λ, and w from an independent set of eleven high-redshift supernovae observed with HST*, Astrophysical Journal **598**, pp. 102–137, 2003. Cited on page 209.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

198 See for example the paper by K. Dalton, *Gravity, geometry and equivalence*, preprint to be found at arxiv.org/abs/gr-qc/9601004, and L. Landau & E. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields*, Pergamon, 4th edition, 1975, p. 241. Cited on page 210.

199 A recent overview on the experimental tests of the universality of free fall is that by R. J. Hughes, *The equivalence principle*, Contemporary Physics **4**, pp. 177–191, 1993. Cited on page 211.

200 The equivalence of the various definitions of the Riemann tensor is explained in most texts on general relativity; see Xem 112. Cited on page 213.

201 K. Tangen, *Can the Pioneer anomaly have a gravitational origin?*, arxiv.org/abs/gr-qc/0602089. Cited on page 214.

202 H. Dittus & C. Lämmerzahl, *Die Pioneer-Anomalie*, Physik Journal **5**, pp. 25–31, January 2006. Cited on page 214.

203 Black hole analogues appear in acoustics, fluids and several other fields. This is an ongoing research topic. See, for example, M. Novello, S. Perez Bergliaffa, J. Salim, V. De Lorenci & R. Klippert, *Analog black holes in flowing dielectrics*, preprint at arxiv.org/abs/gr-qc/0201061, T. G. Philbin, C. Kuklewicz, S. Robertson, S. Hill, F. Konig & U. Leonhardt, *Fiber-optical analog of the event horizon*, Science **319**, pp. 1367–1379, 2008, O. Lahav, A. Itah, A. Blumkin, C. Gordon & J. Steinhauer, *A sonic black hole in a density-inverted Bose–Einstein condensate*, arxiv.org/abs/0906.1337. Cited on page 214.

204 This famous quote is the first sentence of the final chapter, the 'Beschluß', of Immanuel Kant, *Kritik der praktischen Vernunft*, 1797. Cited on page 216.

205 About the myths around the stars and the constellations, see the text by G. Fasching, *Sternbilder und ihre Mythen*, Springer Verlag, 1993. On the internet there are also the beautiful www.astro.wisc.edu/~dolan/constellations/ and www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sow.html websites. Cited on page 216.

206 Aetius, Opinions, III, I, 6. See Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 445. Cited on page 216.

207 A. Mellinger, *A color all-sky panorama of the Milky Way*, preprint at arxiv.org/abs/0908.4360. Cited on page 217.

208 P. Jetzer, *Gravitational microlensing*, Naturwissenschaften **86**, pp. 201–211, 1999. Measurements using orbital speeds around the Galaxy gives agree with this value. Cited on pages 219 and 225.

209 Dirk Lorenzen, *Geheimnivolles Universum – Europas Astronomen entschleiern das Weltall*, Kosmos, 2002. See also the beautiful website of the European Southern Observatory at www.eso.org. Cited on page 219.

210 A beautiful introduction to modern astronomy was Paolo Maffei, *I mostri del cielo*, Mondadori Editore, 1976. Cited on page 224.

211 See for example A. N. Cox, ed., *Allen's Astrophysical Quantities*, AIP Press and Springer Verlag, 2000. An overview of optical observations is given by the Sloan Digital Sky Survey at skyserver.sdss.org. More details about the universe can be found in the beautiful text by W. J. Kaufmann & R. A. Fredman, *Universe*, fifth edition, W.H. Freeman & Co., 1999. The most recent discoveries are best followed on the sci.esa.int and hubble.nasa.gov websites. Cited on page 224.

212 D. R. Lorimer, A. J. Faulkner, A. G. Lyne, R. N. Manchester, M. Kramer, M. A. McLaughlin, G. Hobbs, A. Possenti, I. H. Stairs, F. Camilo,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

M. Burgay, N. D'Amico, A. Corongiu & F. Crawford, *The Parkes multibeam pulsar survey: VI. Discovery and timing of 142 pulsars and a Galactic population analysis*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society preprint at arxiv.org/abs/astro-ph/0607640. Cited on page 226.

213 D. Figer, *An upper limit to the masses of stars*, Nature **434**, pp. 192–194, 2005. Cited on page 226.

214 G. Basri, *The discovery of brown dwarfs*, Scientific American **282**, pp. 77–83, April 2001. Cited on page 226.

215 See the well-written paper by P. M. Woods & C. Thompson, *Soft gamma repeaters and anomalous X-ray pulsars: magnetar candidates*, preprint at arxiv.org/abs/astro-ph/0406133. Cited on page 226.

216 B. M. Gaensler, N. M. McClure-Griffiths, M. S. Oey, M. Haverkorn, J. M. Dickey & A. J. Green, *A stellar wind bubble coincident with the anomalous X-ray pulsar 1E 1048.1-5937: are magnetars formed from massive progenitors?*, The Astrophysical Journal (Letters) **620**, pp. L95–L98, 2005, or arxiv.org/abs/astro-ph/0501563. Cited on page 226.

217 Opposition to the cosmological principle is rare, as experimental data generally supports it. Local deviations are discussed by various cosmologists; the issue is still open. See, for example, D. Wiltshire, *Gravitational energy and cosmic acceleration*, preprint at arxiv.org/abs/0712.3982, and D. Wiltshire, *Dark energy without dark energy*, preprint at arxiv.org/abs/0712.3984. Cited on page 231.

218 C. Wirtz, Scientia **38**, p. 303, 1925, and K. Lundmark, *The motions and the distances of the spiral nebulae*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **85**, pp. 865–894, 1925. See also G. Stromberg, *Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae*, Astrophysical Journal **61**, pp. 353–362, 1925. Cited on page 231.

219 G. Gamow, *The origin of the elements and the separation of galaxies*, Physical Review **74**, p. 505, 1948. Cited on page 233.

220 A. G. Doroshkevich, & I. D. Novikov, Dokl. Akad. Nauk. SSSR **154**, p. 809, 1964. It appeared translated into English a few months later. The story of the prediction was told by Penzias in his Nobel lecture. Cited on page 233.

221 Arno A. Penzias & Robert W. Wilson, *A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mcs*, Astrophysical Journal **142**, pp. 419–421, 1965. Cited on page 233.

222 See for example, D. Prialnik, *An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution*, Cambridge University Press, 2000. Cited on page 235.

223 Star masses are explored in D. Figier, *An upper limit to the masses of stars*, Nature **434**, pp. 192–194, 2005. Cited on page 236.

224 Macrobius, *Somnium Scipionis*, XIV, 19. See Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 61. Cited on page 236.

225 On the remote history of the universe, see the excellent texts by G. Börner, *The Early Universe – Facts & Fiction*, Springer Verlag, 3rd edition, 1993, or Barry Parker, *Creation – The Story of the Origin and the Evolution of the Universe*, Plenum Press, 1988. For an excellent popular text, see M. Longair, *Our Evolving Universe*, Cambridge University Press, 1996. Cited on page 236.

226 The first oxygen seems to have appeared in the atmosphere, produced by microorganisms, 2.32 thousand million years ago. See A. Becker & al., *Dating the rise of atmospheric oxygen*, Nature **427**, pp. 117–120, 2003. Cited on page 237.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

227 Gabriele Walker, *Snowball Earth – The Story of the Great Global Catastrophe That Spawned Life as We Know It*, Crown Publishing, 2003. Cited on page 237.

228 K. Knie, *Spuren einer Sternexplosion*, Physik in unserer Zeit **36**, p. 8, 2005. The first step of this connection is found in K. Knie, G. Korschinek, T. Faestermann, E. A. Dorfi, G. Rugel & A. Wallner, ^{60}*Fe anomaly in a deep-sea manganese crust and implications for a nearby supernova source*, Physics Review Letters **93**, p. 171103, 2004, the second step in N. D. Marsh & H. Svensmark, *Low cloud properties influenced by cosmic rays*, Physics Review Letters **85**, pp. 5004–5007, 2000, and the third step in P. B. de Menocal, *Plio-Pleistocene African climate*, Science **270**, pp. 53–59, 1995. Cited on page 238.

229 A. Friedman, *Über die Krümmung des Raumes*, Zeitschrift für Physik **10**, pp. 377–386, 1922, and A. Friedmann, *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*, Zeitschrift für Physik **21**, pp. 326–332, 1924. (In the Latin transliteration, the author aquired a second 'n' in his second paper.) Cited on page 240.

230 H. Knutsen, *Darkness at night*, European Journal of Physics **18**, pp. 295–302, 1997. Cited on pages 245 and 248.

231 See for example P.D. Peşić, *Brightness at night*, American Journal of Physics **66**, pp. 1013–1015, 1998. Cited on pages 246 and 248.

232 Paul Wesson, *Olbers' paradox and the spectral intensity of extra-galactic background light*, Astrophysical Journal **367**, p. 399, 1991. Cited on page 247.

233 Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley, 1972. An excellent book written with a strong personal touch and stressing most of all the relation with experimental data. It does not develop a strong feeling for space-time curvature, and does not address the basic problems of space and time in general relativity. Excellent for learning how to actually calculate things, but less for the aims of our present adventure. Cited on pages 248 and 287.

234 Supernova searches are being performed by many research groups at the largest optical and X-ray telescopes. A famous example is the Supernova Cosmology project described at supernova.lbl.gov. Cited on page 249.

235 The experiments are discussed in detail in the excellent review by D. Giulini & N. Straumann, *Das Rätsel der kosmischen Vakuumenergiedichte und die beschleunigte Expansion des Universums*, Physikalische Blätter **556**, pp. 41–48, 2000. See also N. Straumann, *The mystery of the cosmic vacuum energy density and the accelerated expansion of the universe*, European Journal of Physics **20**, pp. 419–427, 1999. Cited on pages 250 and 298.

236 A. Harvey & E. Schucking, *Einstein's mistake and the cosmological contant*, American Journal of Physics **68**, pp. 723–727, 2000. Cited on page 250.

237 The author of the bible explains *rain* in this way, as can be deduced from its very first page, Genesis 1: 6-7. Cited on page 251.

238 Up to his death, Fred Hoyle defended his belief that the universe is not described by the big bang, but by a steady flow; see G. Burbidge, F. Hoyle & J. V. Narlikar, *A different approach to cosmology*, Physics Today **52**, pp. 38–44, 1999. The team has also written a book with the same title, published in 2000. The newest book on the topic is J. V. Narlikar & G. Burbidge, *Facts and speculations in Cosmology*, Cambridge University Press, 2008, well worth reading because it is one of the rare books that are thought-provoking. Cited on pages 251 and 252.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

239 Stephen W. Hawking & G. F. R. Ellis, *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, Cambridge, 1973. Among other things, this reference text discusses the singularities of space-time, and their necessity in the history of the universe. Cited on pages 252, 289, and 355.

240 Augustine, *Confessions*, 398, writes in Book XI: 'My answer to those who ask 'What was god doing before he made Heaven and Earth?' is not 'He was preparing Hell for people who pry into mysteries'. This frivolous retort has been made before now, so we are told, in order to evade the point of the question. But it is one thing to make fun of the questioner and another to find the answer. So I shall refrain from giving this reply. [...] Before God made heaven and earth, he did not make anything at all. [...] But if before Heaven and Earth there was no time, why is it demanded what you [god] did then? For there was no "then" when there was no time.' (Book XI, chapter 12 and 13). Cited on page 254.

241 Stephen Hawking, *A Brief History of Time – From the Big Bang to Black Holes*, 1988. Reading this bestseller is almost a must for any physicist, as it is a frequent topic at dinner parties. Cited on page 254.

242 Star details are explained in many texts on stellar structure and evolution. See for example Rudolf Kippenhahn & Alfred Weigert, *Stellar Structure and Evolution*, Springer, 1990. Cited on page 256.

243 J. Pelt, R. Kayser, S. Refsdal & T. Schramm, *The light curve and the time delay of QSO 0957+561*, Astronomy and Astrophysics **305**, p. 97, 1996. Cited on page 258.

244 F. Zwicky, *Nebulae as gravitational lenses*, Physical Review Letters **51**, p. 290, and F. Zwicky, *On the probability to detect nebulae which act as gravitational lenses*, p. 679, 1937. The negative view by Einstein is found in A. Einstein, *Lens-like action of a star by the deviatioin of light in the gravitational field*, Science **84**, pp. 506–507, 1936. A review on gravitational lensing can even be found online, in the paper by J. Wambsganss, *Gravitational lensing in astronomy*, Living Reviews in Relativity **1-12**, pp. 1–80, 1998, to be found on the www.livingreviews.org/Articles/Volume1/1998-12wamb website.

There is also the book by P. Schneider, J. Ehlers & E. E. Falco, *Gravitational Lenses*, Springer Verlag, Berlin, 1992. Cited on page 258.

245 M. Lachièze-Rey & J.-P. Luminet, *Cosmic topology*, Physics Reports **254**, pp. 135–214, 1995. See also B. F. Roukema, *The topology of the universe*, arxiv.org/abs/astro-ph/0010185 preprint. Cited on page 260.

246 Steve Carlip clarified this point. Cited on page 260.

247 G. F. R. Ellis & T. Rothman, *Lost horizons*, American Journal of Physics **61**, pp. 883–893, 1993. Cited on page 261.

248 A. Guth, *Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts – Die Theorie des inflationären Universums*, Droemer Knaur, 1999. Cited on page 261.

249 Entropy values for the universe have been discussed by Ilya Prigogine, *Is Future Given?*, World Scientific, 2003. This was his last book. For a different approach, see G. A. Mena Marugán & S. Carneiro, *Holography and the large number hypothesis*, arxiv.org/abs/gr-qc/0111034. This paper also repeats the often heard statement that the universe has an entropy that is much smaller than the theoretical maximum. The maximum is often estimated to be in the range of $10^{100}\,k$ to $10^{120}\,k$. Other authors give $10^{84}\,k$. In 1974, Roger Penrose also made statements about the entropy of the universe. However, it is more correct to state that the entropy of the universe is not a useful quantity, because the universe is not a physical system. Cited on page 262.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

250 C. L. Bennet, M. S. Turner & M. White, *The cosmic rosetta stone*, Physics Today **50**, pp. 32–38, November 1997. The cosmic background radiation differs from black hole radiation by less than 0.005 %. Cited on page 263.

251 The lack of expansion in the solar system is explained in detail in E. F. Bunn & D. W. Hogg, *The kinematic origin of the cosmological redshift*, American Journal of Physics **77**, pp. 688–694, 2009. Cited on page 264.

252 A pretty article explaining how one can make experiments to find out how the human body senses rotation even when blindfolded and earphoned is described by M.-L. Mittelstaedt & H. Mittelstaedt, *The effect of centrifugal force on the perception of rotation about a vertical axis*, Naturwissenschaften **84**, pp. 366–369, 1997. Cited on page 264.

253 No dependence of *inertial mass* on the distribution of surrounding mass has ever been found in experiments. See, for example, R. H. Dicke, *Experimental tests of Mach's principle*, **7**, pp. 359–360, 1961. Cited on page 265.

254 The present status is given in the conference proceedings by Julian Barbour & Herbert Pfister, eds., *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Birkhäuser, 1995. Various formulations of Mach's principle – in fact, 21 different ones – are compared on page 530.

In a related development, in 1953, Dennis Sciama published a paper in which he argues that inertia of a particle is due to the gravitational attraction of all other matter in the universe. The paper is widely quoted, but makes no new statements on the issue. See D. W. Sciama, *On the origin of inertia*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **113**, pp. 34–42, 1953. Cited on page 265.

255 Information on the rotation of the universe is given in A. Kogut, G. Hinshaw & A. J. Banday, *Limits to global rotation and shear from the COBE DMR four-year sky maps*, Physical Review D **55**, pp. 1901–1905, 1997. Earlier information is found in J. D. Barrow, R. Juszkiewicz & D. H. Sonoda, *Universal rotation: how large can it be?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **213**, pp. 917–943, 1985. See also J. D. Barrow, R. Juszkiewicz & D. H. Sonoda, *Structure of the cosmic microwave background*, Nature **309**, pp. 397–402, 1983, or E. F. Bunn, P. G. Fereira & J. Silk, *How anisotropic is the universe?*, Physical Review Letters **77**, pp. 2883–2886, 1996. Cited on page 266.

256 The issue has been discussed within linearized gravity by Richard Tolman, in his textbook *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*, Clarendon Press, 1934, on pp. 272–290. The exact problem has been solved by A. Peres, *Null electromagnetic fields in general relativity theory*, Physical Review **118**, pp. 1105–1110, 1960, and by W. B. Bonnor, *The gravitational field of light*, Commun. Math. Phys. **13**, pp. 163–174, 1969. See also N. V. Mitskievic & K. K. Kumaradtya, *The gravitational field of a spinning pencil of light*, Journal of Mathematical Physics **30**, pp. 1095–1099, 1989, and P. C. Aichelburg & R. U. Sexl, *On the gravitational field of a spinning particle*, General Relativity and Gravitation **2**, pp. 303–312, 1971. Cited on page 266.

257 See the delightful popular account by Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990. The consequences of light decay were studied by M. Bronstein, *Die Ausdehnung des Weltalls*, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **3**, pp. 73–82, 1933. Cited on pages 267 and 273.

258 C. L. Carilli, K. M. Menten, J. T. Stocke, E. Perlman, R. Vermeulen, F. Briggs, A. G. de Bruyn, J. Conway & C. P. Moore, *Astronomical constraints on the cosmic evolution of the fine structure constant and possible quantum dimensions*, Physical Review Letters **85**, pp. 5511–5514, 25 December 2000. Cited on page 267.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

259 The observations of black holes at the centre of galaxies and elsewhere are summarised by R. Blandford & N. Gehrels, *Revisiting the black hole*, Physics Today **52**, pp. 40–46, June 1999. Cited on pages 268, 279, and 280.

260 An excellent and entertaining book on black holes, without any formulae, but nevertheless accurate and detailed, is the paperback by Igor Novikov, *Black Holes and the Universe*, Cambridge University Press, 1990. See also Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity*, Addison Wesley Longman 2000.

For a historical introduction, see the paper by R. Ruffini, *The physics of gravitationally collapsed objects*, pp. 59–118, in *Neutron Stars, Black Holes and Binary X-Ray Sources*, Proceedings of the Annual Meeting, San Francisco, Calif., February 28, 1974, Reidel Publishing, 1975. Cited on page 268.

261 J. Michell, *On the means of discovering the distance, magnitude, etc of the fixed stars*, Philosophical Transactions of the Royal Society London **74**, p. 35, 1784, reprinted in S. Detweiler, *Black Holes – Selected Reprints*, American Association of Physics Teachers, 1982. Cited on page 268.

262 The beautiful paper is R. Oppenheimer & H. Snyder, *On continued gravitational contraction*, Physical Review **56**, pp. 455–459, 1939. Cited on page 271.

263 R. P. Kerr, *Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics*, Physical Review Letters **11**, pp. 237–238, 1963. Cited on page 275.

264 E. T. Newman, E. Couch, R. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash & R. Torrence, *Metric of a rotating, charged mass*, Journal of Mathematical Physics **6**, pp. 918–919, 1965. Cited on page 275.

265 For a summary, see P. O. Mazur, *Black hole uniqueness theorems*, pp. 130–157, in M. A. H. MacCallum, editor, *General Relativity and Gravitation*, Cambridge University Press, 1987, or the update at arxiv.org/abs/hep-th/0101012. See also D. C. Robinson, *Four decades of black hole uniqueness theorems*, available at www.mth.kcl.ac.uk/staff/dc_robinson/blackholes.pdf Cited on page 275.

266 H. P. Künzle & A. K. M. Masood-ul-Alam, *Spherically symmetric static SU(2) Einstein-Yang-Mills fields*, Journal of Mathematical Physics **31**, pp. 928–935, 1990. Cited on page 275.

267 An example of research that shows the tendency of gravitational radiation to produce spherical shapes when black holes collide is L. Rezzolla, R. P. Macedo & J. L. Jaramillo, *Understanding the "anti kick" in the merger of binary black holes*, Physical Review Letters **104**, p. 221101, 2010. Cited on pages 276 and 298.

268 R. Penrose & R. M. Floyd, *Extraction of rotational energy from a black hole*, Nature **229**, pp. 177–179, 1971. Cited on page 277.

269 The mass–energy relation for a rotating black hole is due to D. Christodoulou, *Reversible and irreversible transformations in black hole physics*, Physical Review Letters **25**, pp. 1596–1597, 1970. For a general, charged and rotating black hole it is due to D. Christodoulou & R. Ruffini, *Reversible transformations of a charged black hole*, Physical Review D **4**, pp. 3552–3555, 1971. Cited on page 278.

270 J. D. Bekenstein, *Black holes and entropy*, Physical Review **D7**, pp. 2333–2346, 1973. Cited on page 278.

271 On the topic of black holes in the early universe, there are only speculative research papers, as found, for example, on arxiv.org. The issue is not settled yet. Cited on page 279.

272 For information about black holes formation via star collapse, see the Wikipedia article at en.wikipedia.org/wikie/Stellar_black_hole. Cited on page 280.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

273 Frederick Lamb, APS meeting 1998 press conference: *Binary star 4U1820-30, 20 000 light years from Earth*, Physics News Update, April 27, 1998. Cited on page 280.

274 The first direct evidence for matter falling into a black hole was published in early 2001 by NASA astronomers led by Joseph Dolan. Cited on page 280.

275 For a readable summary of the Penrose–Hawking singularity theorems, see J. Natàrio, *Relativity and singularities – a short introduction for mathematicians*, preprint at arxiv.org/abs/math.DG/0603190. Details can be found in Xem 239. Cited on page 280.

276 For an overview of cosmic censorship, see T. P. Singh, *Gravitational collapse, black holes and naked singularities*, arxiv.org/abs/gr-qc/9805066, or R. M. Wald, *Gravitational collapse and cosmic censorship*, arxiv.org/abs/gr-qc/9710068. The original idea is due to R. Penrose, *Gravitational collapse: the role of general relativity*, Rivista del Nuovo Cimento **1**, pp. 252–276, 1969. Cited on page 281.

277 The paradox is discussed in M. A. Abramowicz, *Black holes and the centrifugal force paradox*, Scientific American **266**, pp. 74–81, March 1993, and in the comment by D. N. Page, *Relative alternatives*, Scientific American **266**, p. 5, August 1993. See also M. A. Abramowicz & E. Szuszkiewicz, *The wall of death*, American Journal of Physics **61**, pp. 982–991, 1993, and M. A. Abramowicz & J. P. Lasota, *On traveling round without feeling it and uncurving curves*, American Journal of Physics **54**, pp. 936–939, 1986. Cited on page 283.

278 J. Ehlers, *Introduction – Survey of Problems*, pp. 1–10, in J. Ehlers, editor, *Sistemi gravitazionali isolati in relatività generale*, Rendiconti della scuola internazionale di fisica "Enrico Fermi", LXVII° corso, Società Italiana di Fisica/North Holland, 1979. Cited on page 284.

279 G. J. Stoney, *On the physical units of nature*, Philosophical Magazine **11**, pp. 381–391, 1881. Cited on page 288.

280 The geometrodynamic clock is discussed in D. E. Brahm & R. P. Gruber, *Limitations of the geometrodynamic clock*, General Relativity and Gravitation **24**, pp. 297–303, 1992. The clock itself was introduced by R. F. Marzke, in his Ph.D. thesis *The theory of measurement in general relativity*, 1959, with John Wheeler as thesis adviser. Cited on page 289.

281 R. Geroch, *Einstein algebras*, Commun. Math. Phys. **26**, pp. 271–275, 1972. Cited on page 289.

282 A. Macdonald, *Einstein's hole argument*, American Journal of Physics **69**, pp. 223–225, 2001. Cited on page 290.

283 Roman U. Sexl, *Die Hohlwelttheorie*, Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht **368**, pp. 453–460, 1983. Roman U. Sexl, *Universal conventionalism and space-time.*, General Relativity and Gravitation **1**, pp. 159–180, 1970. See also Roman U. Sexl, *Die Hohlwelttheorie*, in Arthur Scharmann & Herbert Schramm, editors, *Physik, Theorie, Experiment, Geschichte, Didaktik – Festschrift für Wilfried Kuhn zum 60. Geburtstag am 6. Mai 1983*, Aulis Verlag Deubner, 1984, pp. 241–258. Cited on page 291.

284 T. Damour, *Experimental tests of relativistic gravity*, arxiv.org/abs/gr-qc/9904057. It is the latest in a series of his papers on the topic; the first was T. Damour, *Was Einstein 100 % right?*, arxiv.org/abs/gr-qc/9412064. Cited on pages 296 and 297.

285 H. Dittus, F. Everitt, C. Lämmerzahl & G. Schäfer, *Die Gravitation im Test*, Physikalische Blätter **55**, pp. 39–46, 1999. Cited on page 296.

286 For theories competing with general relativity, see for example the extensive and excellent review by C. M. Will, *The confrontation between general relativity and experiment*, Living Reviews of Relativity 2001-2014, electronic version at www.livingreviews.org/lrr-2001-4,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

update at www.livingreviews.org/lrr-2006-3 and preprint at arxiv.org/abs/1403.7377. For example, the absence of the Nordtvedt effect, a hypothetical 28-day oscillation in the Earth–Moon distance, which was looked for by laser ranging experiments without any result, eliminated several competing theories. This effect, predicted by Kenneth Nordtvedt, would only appear if the gravitational energy in the Earth–Moon system would fall in a different way than the Earth and the Moon themselves. For a summary of the measurements, see J. Müller, M. Schneider, M. Soffel & H. Ruder, *Testing Einstein's theory of gravity by analyzing lunar laser ranging data*, Astrophysical Journal Letters **382**, pp. L101–L103, 1991. Cited on page 296.

287 See S. Bässler & al., *Improved test of the equivalence principle for gravitational selfenergy*, Physical Review Letters **83**, pp. 3585–3588, 1999. See also C. M. Will, *Gravitational radiation and the validity of general relativity*, Physics Today **52**, p. 38, October 1999. Cited on page 297.

288 The inverse square dependence has been checked down to 60 µm, as reported by E. Adelberger, B. Heckel & C. D. Hoyle, *Testing the gravitational inverse-square law*, Physics World **18**, pp. 41–45, 2005. Cited on page 297.

289 Almost everything of importance in general relativity is published in the free and excellent internet-based research journal *Living Reviews in Relativity*, to be found at the www.livingreviews.org website. The other important journal in the field is *Classical and Quantum Gravity*. In astrophysics, the central publication is *Astronomy & Astrophysics*. Cited on page 298.

290 The study of chaos in Einstein's field equations is just beginning. See, e.g., L. Bombelli, F. Lombardo & M. Castagnino, *Chaos in Robertson-Walker cosmology*, arxiv.org/abs/gr-qc/9707051. Cited on page 298.

291 The ESA satellite called 'Planck' has measured the polarization of the cosmic microwave background. This will provide more details on galaxy formation. Cited on page 298.

292 A good introduction to the topic of gamma-ray bursts is S. Klose, J. Greiner & D. Hartmann, *Kosmische Gammastrahlenausbrüche – Beobachtungen und Modelle*, Teil I und II, Sterne und Weltraum March and April 2001. Cited on page 298.

293 The field solution database is built around the work of A. Karlhede, which allows one to distinguish between solutions with a limited amount of mathematical computation. Cited on page 299.

294 Beautiful simulated images of wormholes are available, for example on the wonderful website www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de. However, quantum effects forbid their existence, so that no such image is included here. A basic approach is the one by T. Diemer & M. Hadley, *Charge and the topology of spacetime*, Classical and Quantum Gravity **16**, pp. 3567–3577, 1999, or arxiv.org/abs/gr-qc/9905069 and M. Hadley, *Spin half in classical general relativity*, Classical and Quantum Gravity **17**, pp. 4187–4194, 2000, or arxiv.org/abs/gr-qc/0004029. Cited on page 299.

295 An important formulation of relativity is A. Ashtekar, *New variables for classical and quantum gravity*, Physical Review Letters **57**, pp. 2244–2247, 1986. Cited on page 299.

296 For a review on inflation and early universe, see D. Baumann, *TASI lectures on inflation*, preprint at arxiv.org/abs/0907.5424. Cited on page 299.

297 A well written text on the connections between the big bang and particle physics is by I. L. Rozental, *Big Bang – Big Bounce, How Particles and Fields Drive Cosmic Evolution*, Springer, 1988. For another connection, see M. Nagano & A. A. Watson, *Observations*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

and implications of the ultrahigh energy cosmic rays, Reviews of Modern Physics **72**, pp. 689–732, 2000. Cited on page 299.

298 Teaching will benefit in particular from new formulations, from concentration on principles and their consequences, as has happened in special relativity, from simpler descriptions at the weak field level, and from future research in the theory of general relativity. The newer textbooks cited above are all steps in these directions. Cited on page 299.

299 G. E. Prince & M. Jerie, *Generalising Raychaudhuri's equation*, in *Differential Geometry and Its Applications*, Proc. Conf., Opava (Czech Republic), August 27-31, 2001, Silesian University, Opava, 2001, pp. 235–242. Cited on page 300.

300 Torsion is presented in R. T. Hammond, *New fields in general relativity*, Contemporary Physics **36**, pp. 103–114, 1995. Cited on page 300.

301 A well-known approach is that by Bekenstein; he proposes a modification of general relativity that modifies univesal, $1/r^2$ gravity at galactic distances. This is done in order to explain the hundreds of measured galactic rotation curves that seem to require such a modification. (This approach is called *modified Newtonian dynamics* or *MOND*.) An introduction is given by Jacob D. Bekenstein, *The modified Newtonian dynamics – MOND – and its implications for new physics*, Contemporary Physics **47**, pp. 387–403, 2006, preprint at arxiv.org/abs/astro-ph/0701848v2. Cited on page 300.

302 *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. All new developments concerning SI units are published in the journal *Metrologia*, edited by the same body. Showing the slow pace of an old institution, the BIPM launched a website only in 1998; it is now reachable at www.bipm.fr. See also the www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html website; this includes the biographies of people who gave their names to various units. The site of its British equivalent, www.npl.co.uk/npl/reference, is much better; it provides many details as well as the English-language version of the SI unit definitions. No citations.

303 The bible in the field of time measurement is the two-volume work by J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. A popular account is Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

The site opdafl.obspm.fr/www/lexique.html gives a glossary of terms used in the field. For precision *length* measurements, the tools of choice are special lasers, such as mode-locked lasers and frequency combs. There is a huge literature on these topics. Equally large is the literature on precision *electric current* measurements; there is a race going on for the best way to do this: counting charges or measuring magnetic forces. The issue is still open. On *mass* and atomic mass measurements, see Trang 73. On high-precision *temperature* measurements, see Volume I, on Trang 545. Cited on page 304.

304 The unofficial SI prefixes were first proposed in the 1990s by Jeff K. Aronson of the University of Oxford, and might come into general usage in the future. See New Scientist **144**, p. 81, 3 December 1994. Other, less serious proposals also exist. Cited on page 305.

305 See the review by L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, *The detection of gravitational waves*, Reports on Progress in Physics **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cited on page 307.

306 See the clear and extensive paper by G. E. Stedman, *Ring laser tests of fundamental physics and geophysics*, Reports on Progress in Physics **60**, pp. 615–688, 1997. Cited on page 307.

307 J. Short, *Newton's apples fall from grace*, New Scientist **2098**, p. 5, 6 September 1997. More details can be found in R. G. Keesing, *The history of Newton's apple tree*, Contemporary Physics **39**, pp. 377–391, 1998. Cited on page 308.

308 The various concepts are even the topic of a separate international standard, ISO 5725, with

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

the title *Accuracy and precision of measurement methods and results*. A good introduction is John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cited on page 308.

309 P. J. Mohr & B. N. Taylor, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998*, Reviews of Modern Physics **59**, p. 351, 2000. This is the set of constants resulting from an international adjustment and recommended for international use by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA), a body in the International Council of Scientific Unions, which brings together the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) and other organizations. The website of IUPAC is www.iupac.org. Cited on page 310.

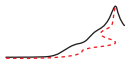
310 Some of the stories can be found in the text by N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. The field of high-precision measurements, from which the results on these pages stem, is a world on its own. A beautiful introduction to it is J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Cited on page 310.

311 For details see the well-known astronomical reference, P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cited on page 315.

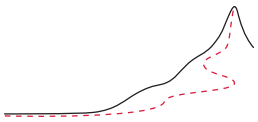
312 See the corresponding reference in the first volume.

Note that little is known about the basic properties of some numbers; for example, it is still not known whether $\pi + e$ is a rational number or not! (It is believed that it is not.) Do you want to become a mathematician? Cited on page 317.

Câu đố 410 r
Câu đố 411 s



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



Công trạng

Lời cám ơn

Many people who have kept their gift of curiosity alive have helped to make this project come true. Most of all, Peter Rudolph and Saverio Pascazio have been – present or not – a constant reference for this project. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, my parents Peter and Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara and Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger and, most of all, my wife Britta have all provided valuable advice and encouragement.

Many people have helped with the project and the collection of material. In particular, I thank Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Ludwik Kostro, Heinrich Neumaier, Peter Brown and David Thornton for interesting discussions on maximum force. Most useful was the help of Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, the numerous improvements by Bert Sierra, the detailed suggestions by Claudio Farinati, the many improvements by Eric Sheldon, the detailed suggestions by Andrew Young, the continuous help and advice of Jonatan Kelu, the corrections of Elmar Bartel, and in particular the extensive, passionate and conscientious help of Adrian Kubala.

Important material was provided by Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, JarosThlaw Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Sergei Kopeikin, Damoon Saghian, Zach Joseph Espiritu, David Thornton, Miles Mutka, Fabrizio Bònoli, plus a number of people who wanted to remain unnamed.

The software tools were refined with extensive help on fonts and typesetting by Michael

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Zedler and Achim Blumensath and with the repeated and valuable support of Donald Arseneau; help came also from Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Nieprashk and Alexander Grahn.

The typesetting and book design is due to the professional consulting of Ulrich Dirr. The typography was much improved with the help of Johannes Küster and his Minion Math font. The design of the book and its website also owe much to the suggestions and support of my wife Britta.

I also thank the lawmakers and the taxpayers in Germany, who, in contrast to most other countries in the world, allow residents to use the local university libraries.

From 2007 to 2011, the electronic edition and distribution of the Motion Mountain text was generously supported by the Klaus Tschira Foundation.

CÔNG TRẠNG PHẦN FILM

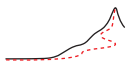
The impressive film of a light pulse bouncing of a mirror on Trang 22 is copyright and courtesy of Wang Lihong and Washington University at St. Louis. The beautiful animation of a dice flying at relativistic speed, on Trang 59, is copyright and courtesy by Ute Kraus. It can be found on her splendid website www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de, which provides many other films of relativistic motions and the related publications. The beautiful animation of an observer accelerating in a desert, on Trang 93, is copyright Anthony Searle and Australian National University, and courtesy of Craig Savage. It is from the wonderful website at www.anu.edu.au/Physics/Savage/TEE. Also the equally beautiful animation of an observer accelerating between houses, on Trang 95, is copyright Anthony Searle and Australian National University, and courtesy of Craig Savage. It is from the equally wonderful website at www.anu.edu.au/Physics/Searle. The spectacular animation on Trang 269 is courtesy and copyright of the European Southern Observatory ESO and found on its website www.eso.org/public/news/eso0846/.

CÔNG TRẠNG PHẦN HÌNH ẢNH

The photograph of the east side of the Langtang Lirung peak in the Nepalese Himalayas, shown on the front cover, is courtesy and copyright by Kevin Hite and found on his blog thegettingthere.com. The photograph of the night sky on Trang 15 is copyright and courtesy of Anthony Ayiomamitis; it is found on his wonderful website www.perseus.gr. The photograph of the reconstruction of Fizeau's experiment on Trang 21 is copyright by AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg, and courtesy of Jan Frercks, Peter von Heering and Daniel Osewold. The photograph of a light pulse on Trang 21 is courtesy and copyright of Tom Mattick. On Trang 25 the photographs of electrical devices are courtesy Miele and EasyGlide. On Trang 31, the lithium images are courtesy and copyright of the TSR relativity team at the Max Planck Gesellschaft. On Trang 34 the Doppler images are copyright and courtesy of Maurice Gavin and NASA. On Trang 35, the Doppler sonar system images are copyright and courtesy of Wikimedia, Hörmann AG and Medison. On Trang 36, the wave graphic is copyright Pbroks13 and courtesy Wikimedia. On Trang 43, the image of the historical Michelson experiment is courtesy and copyright of the Astrophysikalisches Institut Potsdam, and the images of the modern high-precision experiment are copyright and courtesy of Stephan Schiller. The relativistic views on Trang 56 and 58 are courtesy and copyright of Daniel Weiskopf. The relativistic images of the travel through the simplified Stonehenge on Trang 57 are copyright of Nicolai Mokros and courtesy of Norbert Dragon. On Trang 70, the photograph of the HARP experiment is

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

courtesy and copyright of CERN. On Trang 71, the photographs about the bubble chamber are courtesy and copyright of CERN. The stalactite photograph on Trang 110 is courtesy and copyright of Richard Cindric and found on the website www.kcgrotto.org; the photograph of Saturn is courtesy NASA. On Trang 154, the volcano photograph is copyright and courtesy of Marco Fulle and found on the wonderful website www.stromboli.net. On Trang 186, the VIRGO photographs are courtesy and copyright of INFN. On Trang 172, the photographs about lunar reflectors are copyright and courtesy NASA and Wikimedia; the photograph of the Nice observatory is courtesy and copyright of Observatoire de la Côte d'Azur. The figures of galaxies on pages 219, 217, 220, 220, 218, 228, 221, 249, 259 and 259 are courtesy of NASA. The photo of the night sky on Trang 217 is copyright and courtesy of Axel Mellinger; more details on the story of this incredible image is found on his website at home.arcor.de/axel.mellinger. The picture of the universe on Trang 218 is courtesy of Thomas Jarret, IPAC and Caltech, and is found on the spider.ipac.caltech.edu/staff/jarret/lss/index.html website. The photograph of the molecular cloud on Trang 221 is courtesy and copyright of the European Southern Observatory ESO; it was also featured on the antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap030202.html website. On Trang 222, the photopgraphs of the Very Large Telescopes are copyright and courtesy of ESO. On Trang 223, the photographs of the XMM-Newton satellite and of the Planck satellite are copyright and courtesy of ESA and found on the fascinting website www.esa.int. The Hubble diagram on Trang 232 is courtesy of Saul Perlmutter and the Supernova Cosmology Project. The maps of the universe on Trang 230 and the Hertzsprung–Russell diagram on Trang 234 are courtesy and copyright of Richard Powell, and taken from his websites www.anzwers.org/free/universe and www.atlasoftheuniverse.com. On Trang 235, the photograph of M15 is copyright and courtesy of ESA and NASA. The photograph on Trang 246 is courtesy and copyright of Wally Pacholka and found on the wonderful website www.twanlight.org that collects pictures of the world at night. On page Trang 247, the tree image is copyright of Aleks G and courtesy of Wikimedia, whereas the Hubble deep sky image is courtesy of NASA and ESA and found at apod.nasa.gov/apod/ap140605.html. On Trang 249, the Planck data map is courtesy and copyright of Planck/ESA. The simulated view of a black hole on Trang 270 is copyright and courtesy of Ute Kraus and can be found on her splendid website www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de. On Trang 292, the image of the hollow Earth theory is courtesy of Helmut Diel and was drawn by Isolde Diel. On Trang 320, the drawing of the Fraunhofer lines is copyright and courtesy of Fraunhofer Gesellschaft. The photograph on the back cover, of a basilisk running over water, is courtesy and copyright by the Belgian group TERRA vzw and found on their website www.terravzw.org. All drawings are copyright by Christoph Schiller. If you suspect that your copyright is not correctly given or obtained, this has not been done on purpose; please contact me in this case.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Bảng tra cứu nhân danh

A

Abramowicz

A
Abbott, B.P. 340
Abdo, A.A. 331
Abramowicz, M.A. 355
Adelberger, E. 356
Adenauer, Konrad 132
Adler, C.G. 339
Aetius 216, 349
Ahmad Bhat, Farooq 148
Ahmad, Q.R. 334
Aichelburg, P.C. 353
Alanus de Insulis 268
Alcubierre, M. 344
Aleks G 247, 361
Allen, Woody 228
Alspector, J. 332
Alväger, T. 331, 332
Anderson, I.M. 207, 348
Anderson, J.D. 337
Anderson, J.L. 348
Antonini, P. 333, 335
Arago, François 42
Archytas of Tarentum 261
Aristarchus of Samos 330
  life 20
Aristotle 330
Arnowitt, Richard 208, 348
Aronson, Jeff K. 357, 359
Arseneau, Donald 360
Ashtekar, A. 341, 356
Astrophysikalisches Institut Potsdam 43, 360
Ata Masafumi 359
Audoin, C. 357
Augel, Barbara 359
Augel, Edgar 359
Augustine 352
Augustine of Hippo 253
Australian National University 93, 95, 360
Ayiomamitis, Anthony 17, 360

B
Babinet, Jacques
  life 304
Bachem, Albert 143
Baez, John 348, 359
Baggett, N. 332
Bagnoli, Franco 359
Bailey, J. 335, 336
Bailey, J.M. 331
Banday, A.J. 353
Barberi Gnecco, Bruno 359
Barbour, Julian 353
Barrow, J.D. 341, 353
Bartel, Elmar 359
Bartocci, Umberto 78, 338
Basri, G. 350
Bateman, H. 334
Baumann, D. 356
Bautista, Ferdinand 359
Baylis, W.E. 335
Beaty, William 359
Becker, A. 350
Bedford, D. 346
Beeckman, Isaac 17
Beeksma, Herman 359
Behroozi, C.H. 333
Beig, R. 340
Bekenstein, Jacob 278, 354, 357
Belfort, François 359
Bender, P.L. 345
Bennet, C.L. 352
Bergliaffa, S. Perez 349
Bergson, Henri 26
Bertotti, B. 345
Bessel, Friedrich Wilhelm 246
Besso, Michele 78
Beyer, Lothar 359
Biggar, Mark 359
Bilaniuk, O.M. 337
Birkhoff 206
Bladel, Jean van 332
Blair, David 344, 357
Blandford, R. 354
Blandford, R.D. 346
Blau, Steven 49, 335
Bliokh, K.Y. 324
Bloser, P.F. 345
Blumensath, Achim 360
Blumkin, A. 349
Bohr, Niels 26
Bombelli, Luca 356, 359
Bondi, Hermann 333, 343
Bonnor, W.B. 188, 348, 353
Boone, Roggie 359
Born, Max 335
Boughn, S.P. 336
Boyce, K.R. 337
Brace, Dewitt 42
Bradley, James 18, 19
Braginsky, V.B. 345, 347
Brahm, D.E. 355
Brandes, John 359
Brault, J.W. 343
Braxmeier, C. 333
Bray, H.L. 348
Brebner, Douglas 359
Brecher, K. 331
Brehme, R.W. 339
Brewer, Sydney G. 330

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

B

BRIATORE

Briatore, L. 143, 343
Briggs, F. 353
Broeck, Chris Van Den 344
Bronshtein, Matvei 8
Bronstein, Matvey 267, 353
Brown, J.M. 337
Brown, Peter 359
Bruce, Tom 359
Bruyn, A.G. de 353
Buchmann, Alfons 359
Budney, Ryan 359
Bunn, E.F. 348, 353
Burbidge, G. 351
Burgay, M. 350
Bäßler, S. 356
Bònoli, F. 330
Bònoli, Fabrizio 359
Böhncke, Klaus 360
Börner, G. 350
Börner, H.G. 337

C
Caianiello, E.R. 341
Calder, Nigel 345
Caltech 218, 361
Camilo, F. 349
Cannoni, M. 337
Carilli, C.L. 353
Carlip, Steve 341, 352, 359
Carneiro, S. 352
Carr, Jim 359
Carter, Brandon 275
Cassini, Giovanni 18
Castagnino, M. 356
Caves, C.M. 347
CERN 70, 71, 361
Cheseaux, Jean Philippe Loÿs de 246
Chinnapared, R. 354
Choquet-Bruhat, Yvonne 348
Christodoulou, D. 354
Cindric, Richard 110, 361
Ciufolini, Ignazio 174, 345, 346
Clancy, E.P. 343
Clausius, Rudolph 262, 263
Cohen, M.H. 336
Colazingari, Elena 359
Columbus 265
Conti, Andrea 359
Conway, J. 353
Copernicus, Nicolaus 20
Cordero, N.A. 348
Cornell, E.A. 333
Corongiu, A. 350
Corovic, Dejan 359
Costa, S.S. 337
Costella, J.P. 337
Couch, E. 354
Cox, A.N. 349
Crawford, F. 350
Crelinsten, Jeffrey 343
Crespi, Roberto 359
Crowe, Michael J. 330
Currie, D.G. 338

D
D'Amico, N. 350
Dahlman, John 359
Dalton, K. 349
Damour, Thibault 296, 355
Danecek, Petr 359
Darley, Vincent 360
Darre, Daniel 359
Davidson, C. 343
Deaver, B.S. 358
Democritus Abdera 101
Descartes, René 17
Deser, Stanley 208, 348
Deshpande, V.K. 337
Deslattes, R.D. 337
Desloge, E.A. 339
Desloge, Edward A. 339
Detweiler, S. 354
Dewey, M.S. 337
DeWitt-Morette, Cecile 348
Dicke, R.H. 345, 353
Dickey, J.M. 350
Diehl, Helmut 292
Diel, Helmut 361
Diel, Isolde 361
Diemer, T. 356
Dietze, H. 334
Diez, Ulrich 360
DiFilippo, Frank 337, 359
Dillard-Bleick, Margaret 348
Dirr, Ulrich 360
DiSessa, A. 340
Dittus, H. 349, 355
Dobra, Ciprian 359
Dolan, Joseph 355
Doppler, Christian
  life 33
Dorfi, E.A. 351
Doroshkevich, A.G. 233, 350
Dragon, Norbert 56, 57, 359, 360
Droste, J. 343
Droste, Johannes 149
Duff, M.J. 339
Duguay, M.A. 331
Dumont, Jean-Paul 330, 349, 350
Dutton, Z. 333
Dyson, F.W. 343
Dyson, Freeman 359

E
EasyGlide 25, 360
Eckstein, G. 334
Eddington, A.S. 343
Ehlers, J. 352, 355
Ehlers, Jürgen 284
Ehrenfest, P. 338
Eichenwald, Alexander 42
Einstein, A. 346
Einstein, Albert 25, 26, 28, 29, 47, 64, 73, 78, 139, 143, 146, 156, 164, 178, 203, 205, 239, 290, 296, 298, 301, 332, 338, 341, 345, 352
  life 26–27
Einstein, Eduard 146
Eisele, Ch. 335
Ellis, George 289, 343, 352
Els, Danie 360
Elswijk, Herman B. 359
Emelin, Sergei 359
Empedocles 16
Eötvös, Roland von 161, 345
ESA 223, 235, 247, 361
Eshelby, J. 334
ESO 221, 222, 360, 361
Espiritu, Zach Joseph 359
Euler, Leonhard 192
European Southern Observatory 360, 361
Everitt, C.W. 358

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

E

Everitt

Everitt, F. 355
Ewing, Anne 269
Exton, A. 354

F
Faestermann, T. 351
Fairbanks, J.D. 358
Fairhust, S. 341
Falco, E.E. 352
Falk, G. 342
Farinati, Claudio 359
Farley, F.J.M. 331
Fasching, G. 349
Faulkner, A.J. 349
Fekete, E. 345
Fereira, P.G. 353
Fermani, Antonio 359
Feynman, Richard P. 348
Figer, D. 350
Figier, D. 350
Finkenzeller, Klaus 359
Fischer, Ulrike 360
Fishman, G.J. 331
Fitzgerald, George 45
Fizeau, Hippolyte 20, 42
Fließbach, Torsten 342
Floyd, R.M. 354
Ford, E.C. 345
Formalont, E.B. 347
Foster, James 342
Fowler, E.C. 332
Fowler, L.A. 347
Frank, F.C. 334
Fraunhofer Gesellschaft 320, 361
Fredman, R.A. 349
French, A.P. 339
Frenkel, J. 334
Frercks, Jan 20, 330, 360
Fresnel, Augustin 42
Friedmann, Aleksander 351
  life 240
Frisch, D.H. 335
Fukuda, Y. 334
Fulle, Marco 154, 361
Furrie, Pat 359
Fölsing, Albrecht 332
Füllekrug, M. 331

G
Gabuzda, D.C. 337
Gaensler, B.M. 350
Galilei, Galileo 17
Gallisard de Marignac, Jean Charles 78
Gamow, George 350
  life 233
Gauß, Carl-Friedrich
  life 194
Gavin, Maurice 34, 360
Gearhart, R. 334
Gehrels, N. 354
Georgi, Renate 359
Geroch, Robert 289, 355
Gibbons, G.W. 341
Gibbons, Gary 127, 339, 340, 359
Gibbs, J. Willard 110, 339
Gide, André 199
Giltner, D.M. 333
Giulini, D. 351
Glassey, Olivier 359
Goenner, Hubert 184, 342
González, Antonio 359
Good, R.H. 339
Gordon, C. 349
Gould, Andrew 167
Grahn, Alexander 360
Grebe, Leonhard 143
Green, A.J. 350
Greenstein, J.L. 343
Gregorio, Enrico 360
Greiner, Jochen 356, 359
Grindlay, J.E. 345
Gruber, Christian 55, 336
Gruber, R.P. 355
Gualandi, A. 330
Guiragossian, Z.G.T. 334
Gutfreund, Hanoch 332
Gutfreund, Henoch 332
Guth, Alan 261, 352
Gácsi, Zoltán 359
Göklü, E. 333

H
Haber, John 359
Hadley, M. 356
Hafele, J.C. 143, 335
Haley, Stephen 359
Hall, D.B. 335
Halley, Edmund 18
Hamilton, J.D. 339
Hammond, R.T. 357
Hardcastle, Martin 359
Harris, S.E. 333
Hartmann, D. 356
Harvey, A. 336, 351
Hasenöhrl, Friedrich 78, 338
Hatfield, Brian 348
Hausherr, Tilman 359
Haverkorn, M. 350
Hawking, Stephen 134, 254, 278, 280, 289, 352
Hawking, Stephen W. 351
Hayes, Allan 359
Hayward, S.A. 341
Heckel, B. 356
Heering, Peter von 360
Helmond, Tom 359
Henderson, Paula 359
Heracles 219
Heraclitus of Ephesus 236
Herrmann, F. 341
Herrmann, Friedrich 340
Herschel, John 246
Hertz, Heinrich 111
Hertzlinger, Joseph 360
Hesiod 231
Hestenes, David 335
Heumann, John 359
Hilbert, David 199, 206
Hill, C.D. 347
Hill, S. 349
Hillman, Chris 359
Hinshaw, G. 353
Hipparchus 20
Hirth, J.P. 334
Hite, Kevin 360
Hobbs, G. 349
Hoek, Martin 42
Hoffman, Richard 359
Hogg, D.W. 353
Holstein, B.R. 346
Holzmüller, G. 175, 346
Horace, in full Quintus Horatius Flaccus 139
Houtermans, Friedrich 234

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

H

HOYLE

Hoyle, C.D. 356
Hoyle, Fred 251, 351
Hubble, Edwin
life 231
Huber, Daniel 359
Hughes, R.J. 349
Huisken, G. 341
Hulse, Russel 347
Huygens, Christiaan 18
Hörmann AG 35, 360

I
Ilmanen, T. 341
INFN 186, 361
Inverno, Ray d' 340, 342
Iorio, L. 346
IPAC 218, 361
Israel, Werner 275
Itah, A. 349
Ivanov, Igor 359
Ives, H.E. 333
Iyer, C. 336

J
Jacobson, T. 341
Jalink, Kim 359
Jamil, M. 359
Janek, Jürgen 359
Jaramillo, J.L. 354
Jarret, Thomas 218, 361
Jenkins, Francis A. 330
Jentschel, M. 337
Jerie, M. 357
Jetzer, P. 349
Johansson, Mikael 359
Johnson, Samuel
life 330
Jones, Quentin David 359
Jones, Tony 357
Jong, Marc de 359
Jordan, T.F. 338
Ju, L. 357
Juszkiewicz, R. 353

K
Köppe, Thomas 359
Kaaret, P. 345
Kalbfleisch, G.R. 332
Kalckar, Jørgen 178
Kant, Immanuel 216, 231, 349
life 216
Kapuścik, E. 334
Karlhede, A. 356
Kaufmann, W.J. 349
Kayser, R. 352
Keating, Richard E. 335
Keating,Richard E. 143
Keesing, R.G. 357
Kelu, Jonatan 359
Kennedy, R.J. 333
Kennefick, D. 343
Kenyon, Ian R. 340
Kepler, Johannes 246
Kerr, Roy 275, 354
Kessler, E.G. 337
Kiefer, D. 333
Kilmister, C.W. 338
Kippenhahn, Rudolf 352
Kiss, Joseph 359
Kittinger 343
Kittinger, Joseph 140, 144
Kjellman, J. 331
Klauder, John 342
Klaus Tschira Foundation 360
Kleppner, Daniel 347
Klippert, R. 349
Klose, S. 356
Knie, K. 351
Knop, R.A. 348
Knutsen, H. 351
Kogut, A. 353
Konig, F. 349
Kontorowa, T. 334
Koolen, Anna 359
Kopeikin, Sergei 347, 359
Korschinek, G. 351
Kostro, L. 340
Kostro, Ludwik 339, 359
Kramer, M. 346, 349
Kraus, Ute 56, 59, 270, 360, 361
Kreuzer, L.B. 150, 344
Krijn, Marcel 359
Krikalyov, Sergei 52
Krisher, T.P. 337
Krishnan, B. 341
Krotkow, R. 345
Krumm, P. 346
Królikowski, Jarosław 359
Kröner, Ekkehart 214, 341
Kubala, Adrian 359
Kuklewicz, C. 349
Kumaradtya, K.K. 353
Kuzin, Pavel 359
Künzle, H.P. 354
Küster, Johannes 360

L
Lachièze-Rey, M. 352
Lahav, O. 349
Lakes, Rod S. 333
Lamb, Frederick 161, 355
Lambert, Johann
life 194
Lambourne, R. 333
Landau, L. 349
Lange, B. 340
Langevin, Paul 78
Laplace, Pierre 268
Lasota, J.P. 355
Laue, Max von 87
Leibfried, G. 334
Lemaître, Georges A.
life 240
Lense, Josef 173, 346
Leonhardt, U. 349
Lerner, L. 345
Leschiutta, S. 343
Leschiutta,S. 143
Leucippus Elea 101
Levi-Civita, Tullio 200
Lewis, G.N. 337
Liebscher, Dierck-Ekkehard 333
Lifshitz, E. 349
LIGO 187
Lille, Alain de 268
Lilleskov, E. 336
Lilley, Sam 342
Linde, Johan 360
Lindh, A.G. 345
Linfield, R.P. 336
Lintel, Harald van 55, 336, 359
Liu, C. 333
Lodge, Oliver 42
Logan, R.T. 337
Lombardi, Luciano 359

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

L

Lombardo

Lombardo, F. 356
Longair, M. 350
Lorenci, V. De 349
Lorentz, Hendrik Antoon 45, 334, 335
  life 41
Lorenzen, Dirk 349
Lorimer, D.R. 347, 349
Lothe, J. 334
Low, R.J. 339
Ludvigsen, Malcolm 342
Luke, Lucky 38
Luminet, J.-P. 352
Lundmark, Knut 231, 350
Lutes, G.F. 337
Lyne, A.G. 349
Lämmerzahl, C. 349, 355
Lévy, J.M. 338

M
MacCallum, M.A.H. 354
Macdonald, A. 355
Macedo, R.P. 354
Mach, Ernst 264
Macrobius 350
Madhu, Rao S.M. 359
Madhu, Rao S.R. 322
Maeterlink, Maurice
  life 264
Maffei, Paolo 349
Magueijo, João 339
Mahoney, Alan 359
Mainwaring, S.R. 335
Maleki, L. 337
Manchester, R.N. 349
Manfredi, Eustachio 18, 19
Mark, Martin van der 359
Marsh, N.D. 351
Martos, Antonio 359
Marzke, R.F. 355
Mashhoon, B. 346
Mason, W.P. 334
Masood-ul-Alam, A.K.M. 354
Massa, Corrado 339, 340, 359
Matsas, G.E.A. 336, 337
Matthews, W.N. 338
Mattick, Tom 21, 331, 360
Max Planck Gesellschaft 31, 360
Maxwell, James Clerk 45
Mayné, Fernand 359
Mayr, Peter 359
Mazur, P.O. 275, 354
McClure-Griffiths, N.M. 350
McDonald, K.T. 347
McGowan, R.W. 333
McKellar, B.H.J. 337
McLaughlin, M.A. 349
McNamara, Geoff 344
McQuarry, George 359
Medison 35, 360
Mellinger, Axel 217, 349, 361
Mena Marugán, G.A. 352
Menocal, P.B. de 351
Menten, K.M. 353
Merrit, John 359
Michaelson, P.F. 358
Michell, John 268, 354
Michelson, Albert Abraham 42, 114, 335
  life 42
Miele 25, 360
Minkowski, Hermann 46
  life 47
Mirabel, I.F. 336
Mishra, L. 102, 339
Misner, Charles 208, 339, 348
Mitalas, R. 333
Mitskievic, N.V. 353
Mittelstaedt, H. 353
Mittelstaedt, M.-L. 353
Mlynek, J. 333
Moffat, John 339
Mohazzabi, P. 343
Mohr, P.J. 358
Mokros, Nicolai 56, 57, 360
Moore, C.P. 353
Moore, Henry 192
Moortel, Dirk Van de 322, 359
Morinigo, Fernando B. 348
Morley, Edward 42, 335
Moser, Lukas Fabian 359
Murdock, Ron 359
Murillo, Nadia 359
Murray, J.J. 334
Musil, Rober 244
Mutka, Miles 359
Mutti, P. 337
Muynck, Wim de 359
Myers, E.G. 337
Møller, Christian 338
Müller, H. 333
Müller, J. 356

N
Nabarro, Frank R.N. 334
Nagano, M. 356
Nahin, Paul J. 335
Namouni, Fathi 359
Narlikar, J.V. 351
NASA 34, 172, 235, 247, 360, 361
Natarajan, V. 337
Natàrio, J. 355
Nemiroff, R.J. 336, 345
Neumaier, Heinrich 359
Nevsky, A.Yu. 335
Newcomb, Simon 334
Newman, E.T. 354
Newton 307
Nicolai, H. 348
Niepraschk, Rolf 360
Nieto, L.M. 348
Nietzsche, Friedrich 122
Nieuwpoort, Frans van 359
Nightingale, J.D. 342
Nordström, Gunnar 275
Nordtvedt, Kenneth 356
Nori, F. 324
Norton, John D. 348
Novello, M. 349
Novikov, Igor 233, 342, 350, 353, 354
Nurowski, P. 347

O
Oberdiek, Heiko 360
Oberquell, Brian 359
Observatoire de la Côte d'Azur 172, 361
Oey, M.S. 350
Offner, Carl 359
Ohanian, Hans 323, 337, 340, 342
Ohanian, Hans C. 332
Okhapkin, M. 333, 335
Okun, Lev B. 338

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

Olbers, Wilhelm
life 245
Olum, K.D. 344
Oostrum, Piet van 360
Oppenheimer, Robert 354
life 271
Osewold, Daniel 360
Osserman, Bob 260
Ovidius, in full Publius Ovidius Naro 23

P
Pacholka, Wally 246, 361
Page, Don 355, 359
Pahaut, Serge 359
Panov, V.I. 345
Papapetrou, A. 338
Parker, Barry 350
Parks, David 359
Pascazio, Saverio 359
Pasi, Enrico 359
Paul, W. 337
Pauli, Wolfgang 64, 348
Pavlis, E.C. 346
Pbroks13 36, 360
Pearson, T.J. 336
Peeters, Bert 359
Pekár, V. 345
Pelt, Jaan 258, 352
Penrose, Roger 134, 277, 280, 336, 341, 352, 354, 355
Penzias, Arno 233, 350
Peres, A. 353
Perini, Romano 359
Perkins, D.H. 335
Perlman, E. 353
Perlmutter, Saul 232, 244, 361
Perot, Alfred 143
Peşić, P.D. 351
Peters, A. 333
Pfister, Herbert 353
Philbin, T.G. 349
Philpott, R.J. 339
Physical Review Letters 187
Piper, M.S. 188, 348
Piraino, S. 345
Planck, Max 26, 64, 84, 90, 113
Planck/ESA 249, 361
Plato 251
Poincaré, H. 346
Poincaré, Henri 44, 45, 78, 139, 159, 178, 338
life 28
Possenti, A. 349
Pound, R.V. 143, 343
Powell, Richard 230, 234, 361
Prabhu, G.M. 336
Pradl, O. 333
Prakash, A. 354
Preston, S. Tolver 338
Preston, Tolver 78
Pretto, O. De 338
Pretto, Olinto De 78, 332
Prialnik, D. 350
Prigogine, Ilya 352
Primas, L.E. 337
Prince, G.E. 357
Pritchard, Carol 359
Pritchard, D.E. 337
Pritchard, David 73
Proença, Nuno 359
Pryce, M.H.L. 338
Purves, William 359
Pythagoras of Samos 334

R
Rahtz, Sebastian 360
Rainville, S. 337
Rankl, Wolfgang 359
Rasio, F.A. 347
Rawlinson, A.A. 337
Raymond, D.J. 339
Readhead, A.C.S. 336
Rebka, G.A. 143, 343
Recami, E. 337
Rector, T.A. 229
Redondi, Pietro 359
Refsdal, S. 352
Reinhardt, S. 333
Reissner, Hans 275
Renn, Jürgen 332
Renselle, Doug 359
Reppisch, Michael 359
Rezzolla, L. 354
Ricci-Cubastro, Gregorio
life 200
Riemann, Bernhard
life 212
Rindler, Wolfgang 333, 335, 336, 340, 342, 348
Ritz 331
Rivas, Martin 359
Robertson, H.P. 240
Robertson, S. 349
Robertson, Will 360
Robinson, D.C. 275, 354
Rodríguez, L.F. 336
Roll, P.G. 345
Rømer, Ole C. 330
life 17
Rosen, N. 346
Rosen, Nathan 178
Rossi, B. 335
Rothbart, G.B. 334
Rothenstein, B. 334
Rothman, T. 352
Rottmann, K. 339
Roukema, B.F. 352
Rozental, I.L. 356
Ruben, Gary 359
Ruder, Hanns 56, 356
Rudolph, Peter 359
Ruffini, Remo 275, 340, 342, 344, 354
Rugel, G. 351
Ruggiero, M.L. 338, 346
Ruppel, W. 342
Russell, Bertrand 89
Rybicki, G.R. 336
Röntgen, Wilhelm 42

S
Sabbata, V. de 340
Sabbata, Venzo de 152, 339
Saghian, Damoon 359
Sagnac, Georges 42
Salim, J. 349
Samuel, S. 347
Santander, M. 348
Santangelo, A. 345
Sastry, G.P. 336
Savage, Craig 56, 360
Scarcelli, G. 334
Schaefer, B.E. 331
Scharmann, Arthur 355
Schiller, Britta 359, 360
Schiller, Christoph 339, 340,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

S

SCHILLER

361
Schiller, Isabella 359
Schiller, Peter 334, 359
Schiller, Stephan 42, 43, 333, 335, 359, 360
Schmidt, Herbert Kurt 335
Schneider, M. 356
Schneider, P. 352
Schoen, R.M. 340
Schramm, Herbert 355
Schramm, T. 352
Schröder, Ulrich E. 338, 342
Schucking, E. 336, 351
Schutz, Bernard 342, 347
Schwarzschild, Karl 143, 198
  life 149
Schweiker, H. 229
Schwinger, Julian 332
Schäfer, G. 355
Sciama, Dennis 353
Scott, David 155
Scott, Jonathan 359
Searle, Anthony 56, 93, 95, 360
Seeger, A. 334
Seidelmann, P. Kenneth 358
Seielstad, G.A. 336
Selig, Carl 332
Seneca, Lucius Annaeus 137, 286
Sexl, Roman 291, 335, 353, 355
Shapiro, I.I. 345
Shapiro, Irwin 167, 345
Shaw, R. 336
Shea, J.H. 343
Sheldon, Eric 335, 359
Shih, Y. 334
Short, J. 357
Siart, Uwe 360
Sierra, Bert 359
Silk, J. 353
Sills, K.R. 333
Simon, Julia 359
Simon, R.S. 336
Singh, T.P. 355
Singleton, Douglas 359
Sitter, W. de 346
Sitter, Willem de 244, 331
Sitter, Willem de 24, 42
  life 171
Sivaram, C. 152, 339, 340
Slabber, André 359
Smale, A.P. 345
Smith, J.B. 335
Snider, J.L. 343
Snyder, Hartland 271, 354
Soffel, Michael H. 348, 356
Soldner, Johann 155, 165, 166, 344
Solomatin, Vitaliy 359
Sonoda, D.H. 353
Stachel, John 341
Stairs, I.H. 347, 349
Stark, Johannes
  life 33
Stedman, G.E. 335, 357
Steinhauer, J. 349
Stephenson, G. 338
Stephenson, G.J. 337
Stilwell, G.R. 333
Stocke, J.T. 353
Stodolsky, Leo 334
Stoney, G.J. 355
Story, Don 360
Straumann, N. 351
Stromberg, Gustaf 231, 350
Strutt Rayleigh, John 42
Su, Y. 345
Sudarshan, George 337, 338
Supplee, J.M. 336
Surdin, Vladimir 359
Svensmark, H. 351
Synge, J.L. 337
Szuszkiewicz, E. 355

T

Tangen, K. 349
Tarko, Vlad 359
Tartaglia, A. 346
Taylor, B.N. 358
Taylor, Edwin F. 332, 339, 341, 342, 345, 354
Taylor, John R. 358
Taylor, Joseph 185, 307, 345, 347
Tegelaar, Paul 359
Tegmark, M. 348
Terrell, J. 336
Thaler, Jon 359
Thies, Ingo 359
Thirring, Hans 173, 345, 346
Thomas, Llewellyn 64
Thompson, C. 350
Thompson, J.K. 337
Thompson, R.C. 337
Thorndike, E.M. 333
Thorne, Kip 339, 342, 347
Thornton, David 359
Tisserand, F. 346
Tisserand, Félix 175
Tolman, Richard 337, 353
Torre, C.G. 207, 348
Torrence, R. 354
Townsend, Paul 359
Trevorrow, Andrew 360
Trout, Kilgore 261
Tschira, Klaus 360
TSR relativity team 31, 360
Tuinstra, F. 330, 333
Tuppen, Lawrence 359
Turner, M.S. 353

U

Uguzzoni, Arnaldo 359
Ulfbeck, Ole 178
Unruh, William 140, 343
Unwin, S.C. 336
Upright, Craig 360

V

Valencia, A. 334
Vanier, J. 357
Vannoni, Paul 359
Vergilius, Publius 162
Vermeil, H. 192, 348
Vermeulen, R. 353
Vessot, R.F.C. 143, 343
Vestergaard Hau, L. 333
Voigt, Woldemar
  life 45
Volin, Leo 359
Voltaire 307
Voss, Herbert 360

W

Wagner, William G. 348
Wald, Robert M. 342, 355

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net

W

WALKER

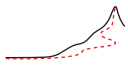
Walker, A.G. 240
Walker, Gabriele 351
Walker, R.C. 336
Wallin, I. 332
Wallner, A. 351
Wambsganss, J. 352
Wang Lihong 22, 360
Wang, Y. 348
Warkentin, John 360
Washington University at St. Louis 22, 360
Watson, A.A. 356
Weigert, Alfred 352
Weinberg, Steven 334, 342, 351
Weisberg, J.M. 347
Weiskopf, Daniel 56, 58, 360
Weiss, Martha 359
Weizmann, Chaim 164
Wertheim, Margaret 334
Wesson, Paul 247, 351
Westra, M.T. 326
Wheeler, John 269, 275, 289, 332, 339, 341, 342, 344, 347, 354, 355
  life 269
White, Harvey E. 330
White, M. 353
Whitney, A.R. 336
Wierda, Gerben 360
Wierzbicka, Anna 359
Wijk, Mike van 359
Wikimedia 35, 172, 256, 360, 361
Wilken, T. 334
Will, C.M. 331, 337, 341, 344, 347, 355, 356
Williams, R. 343
Wilson, Harold 42
Wilson, Robert 233, 350
Wiltshire, D. 350
Wirtz, Carl 231, 350
Wise, N.W. 358
Woodhouse, Nick M.J. 333
Woods, P.M. 350
Wright, Joseph 360
Wright, Steven 299

Y

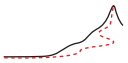
Yearian, M.R. 334
Young, Andrew 359

Z

Zaccone, Rick 360
Zalm, Peer 359
Zedler, Michael 359
Zeeman, Pieter 41
Zel'dovich, Yakov 233
Zensus, J.A. 336
Zeus 219
Zhang Yuan Zhong 332
Zhang, W. 161, 345
Zhao, C. 357
Zhong, Q. 336
Zwicky, Fritz 258, 352



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–07 2023 free pdf file available at www.motionmountain.net



HÀNH SƠN

Cuộc phiêu lưu của Vật lý – Quyển II

Thuyết tương đối và Vũ trụ học

Cuộc du hành tuyệt vời nhất là gì?
Bóng tối có nhanh hơn ánh sáng hay không?
Ta có thể gia tốc ánh sáng được không?
Không gian trống rỗng uốn cong như thế nào và làm cách nào để ta đo được độ cong đó?
Không gian trống rỗng cứng cỡ nào?
Hố đen là gì?
Nhờ các kính thiên văn tốt nhất, chúng ta có thể nhìn thấy và khám phá được điều gì?
Lịch sử của vũ trụ đã diễn ra như thế nào?
Lực và công suất cực đại trong thiên nhiên là bao nhiêu?

Qua việc trả lời các câu hỏi về chuyển động, bộ sách này giới thiệu cho các bạn một phần vật lý hiện đại thú vị và nhức đầu – vì bạn sẽ ngạc nhiên và bị thử thách trên từng trang sách. Khởi đi từ cuộc sống hằng ngày, cuộc thám hiểm này sẽ cung cấp cho các bạn một tổng quan về các thành quả mới nhất trong Cơ học, Nhiệt học, Điện từ học, Thuyết tương đối, Vật lý lượng tử và Lý thuyết thống nhất.

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles, là một nhà vật lý và là người viết sách phổ biến vật lý. Ông viết bộ sách này cho con mình đọc và cũng dành cho mọi học sinh, giáo viên và độc giả quan tâm đến vật lý - khoa học về sự chuyển động.

Ấn bản miễn phí dạng Pdf có tại
website www.motionmountain.net