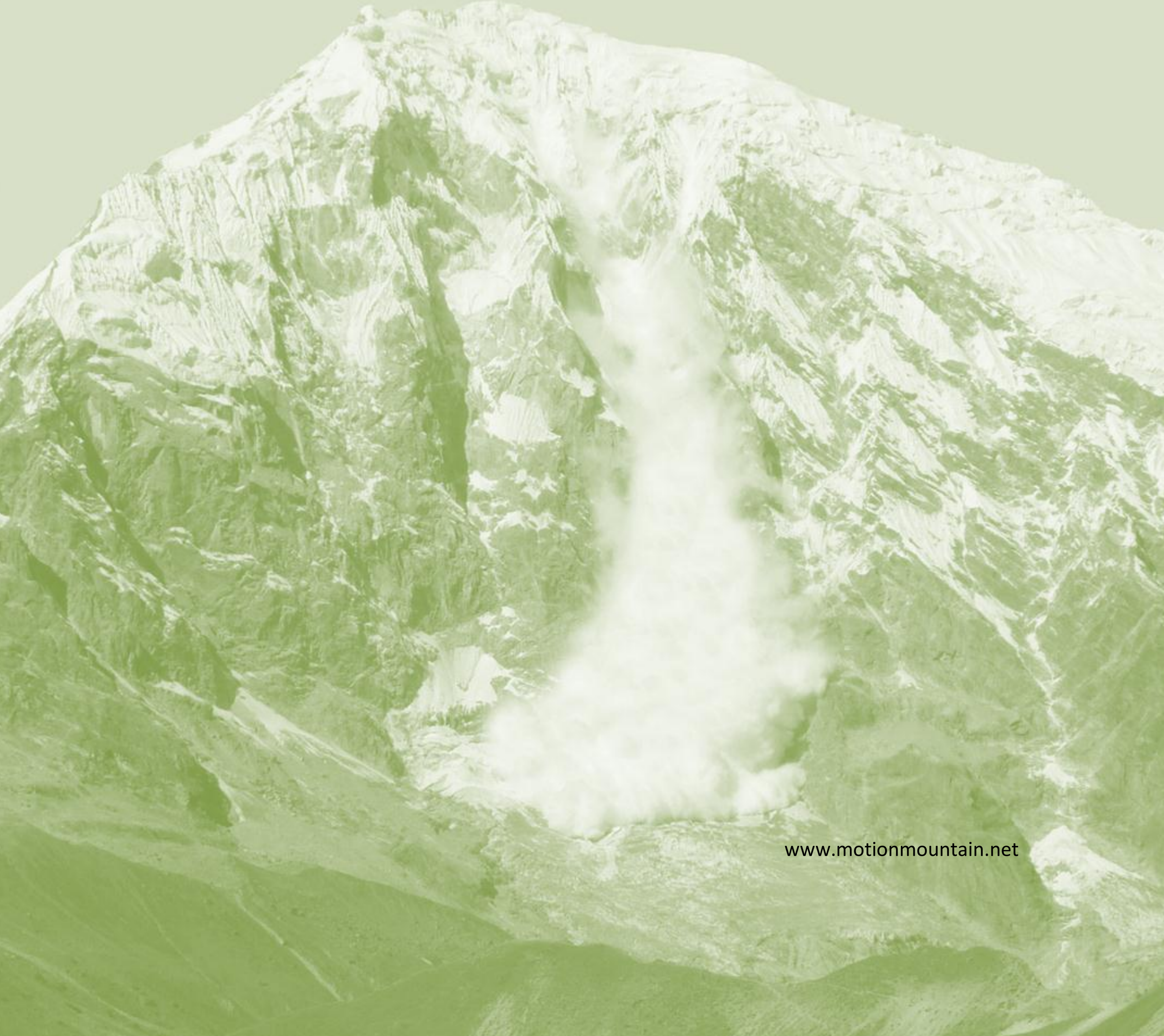
کریستف شیلر

کوه حرکت

ماجراجویی در فیزیک– جلد دوم

نسبیت و کیهان‌شناسی

مترجم: محمد بادسار



www.motionmountain.net

مقدمه مترجم

ضمن درود به همه طبیعت‌دوستان و معنادوستان فارسی‌زبان، این ترجمه همچنان در حال تکمیل است و لاجرم مصون از هیچ خطایی نیست، لذا از تمام خوانندگان ملتمسانه می‌خواهم هر گونه نقد یا ایرادی می‌بینند از طریق ایمیل badsar2000@yahoo.com یا شماره موبایل ۰۹۱۷۱۶۹۸۰۳۲ از طریق واتساپ بنده را از تعدیلات لازم آگاه سازند.

تقدیم به بریتا، استر و جوستوس آرون

پیش‌گفتار

«اول حرکت بعد آموزش»

باستان

این سری کتاب‌ها مختص هر کسی است که در مورد حرکت در طبیعت کنجکاو است. اشیا، مردم، حیوانات، تصاویر و فضای خالی چگونه حرکت می‌کنند؟ برای پاسخ، به ماجراجویی‌های زیادی نیاز داریم. این مجلد بهترین ماجراجویی‌ها را در خصوص حرکت‌های بسیار سریع، قدرتمند و دور عرضه می‌کند. همانگونه که در شکل ۱. نشان داده شده در کنکاش حرکت، نسبیت خاص و عام دو مرحله مهم را تشکیل می‌دهند.

نسبیت خاص عبارت است از کنکاش سرعت حدی نزدیک به سرعت نور c در طبیعت. نسبیت عام نیروی حدی $c^4/4G$ را کنکاش می‌کند. در این متن نشان داده خواهد شد که در هر دو دامنه، تمام نتایج از این دو مقدار حدی تبعیت می‌کنند. بطور ویژه، کیهان‌شناسی سرعت در فاصله حدی طبیعت یعنی 1/۷۸ را کنکاش می‌کند. این شیوه ساده، حسی و غیرعادی برای فراگیری نسبیت، کنجکاوی هر خواننده‌ای را بر می‌انگیزد چه دانشجو باشد چه متخصص.

کتاب حاضر دومین جلد از شش جلد کلیات فیزیک است که از سال ۱۹۹۰ تدوین آن را شروع کرده‌ام. هدف این کتاب‌ها ارائه حرکت به روشی ساده، به‌روز و جذاب می‌باشد.

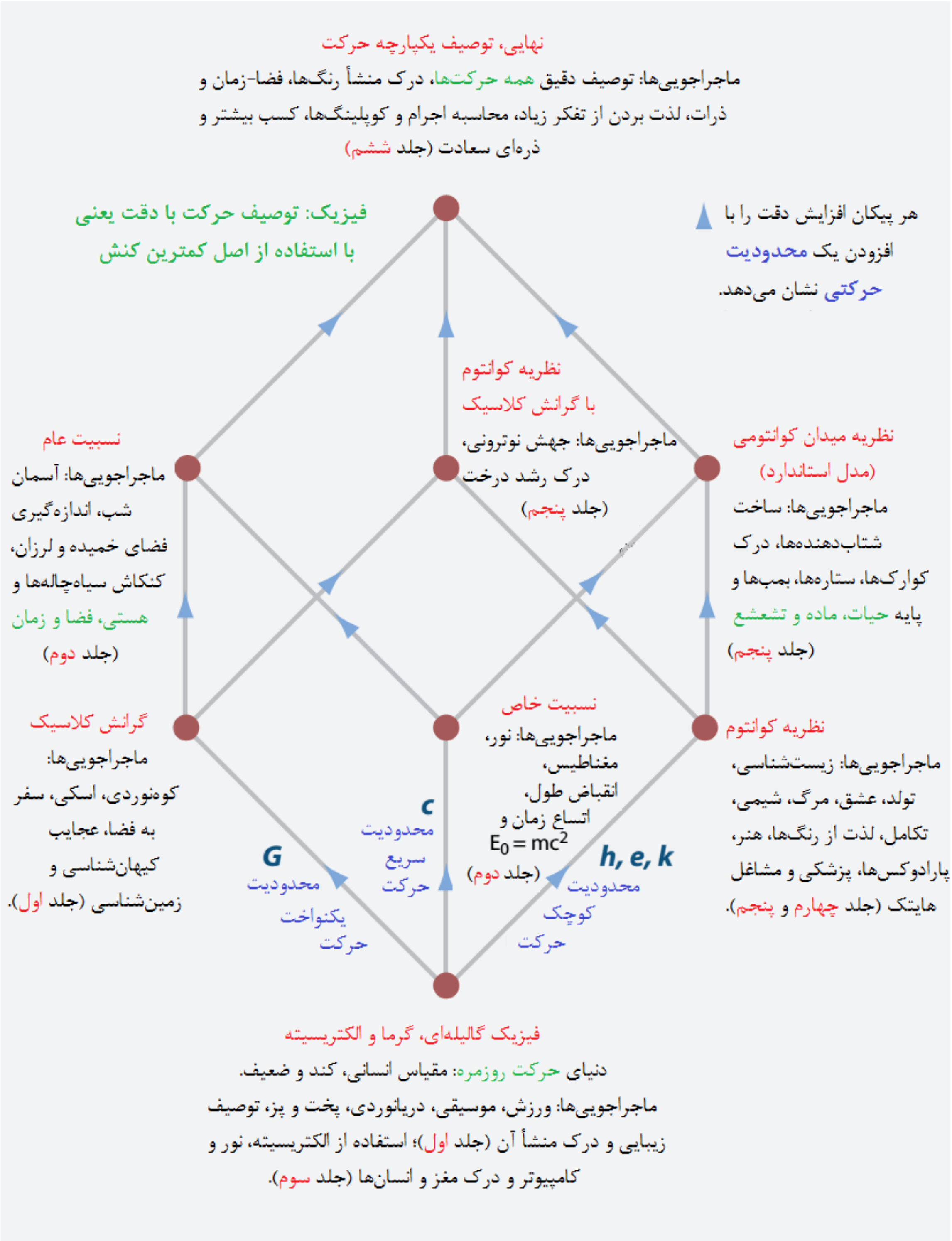
برای ساده بودن، متن بیشتر بر مفاهیم متمرکز است و ریاضیات را در حد امکان به صورت حداقل و فقط در حد ضرورت ارائه می‌دهد. به درک مفاهیم فیزیک نسبت به استفاده از فرمول‌ها در محاسبات اولویت داده شده است. کل متن در حد دانش یک لیسانسه است.

برای اینکه به‌روز باشد، گوهرهای نظری و تجربی که در نوشتارهای علمی در حال انتشار است به متن غنای لازم را بخشیده‌اند.

برای اینکه جذاب باشد متن تلاش می‌کند که خواننده را در حد امکان حیرت‌زده کند. خواندن کتابی در مورد فیزیک عمومی مثل رفتن به یک مراسم شعبده‌بازی است. در چنین مراسمی ما نگاه می‌کنیم، حیرت‌زده می‌شویم، به چشمانمان اعتماد نمی‌کنیم، فکر می‌کنیم و در نهایت حقه را می‌فهمیم. وقتی به طبیعت می‌نگریم غالباً شرایط مشابهی را تجربه می‌کنیم. در واقع، هر صفحه حداقل یک اعجاب یا تحریک را در خواننده القا می‌کند تا به آن فکر کند.

شعار این متن die Menschen stärken, die Sachen klären، جمله معروفی در آموزش و پرورش است که معنای آن عبارت است از: «شفاف کردن موضوعات، افراد را توانمند می‌کند.» شفاف کردن موضوعات و نزدیک شدن به حقیقت نیازمند انگیزه است زیرا تغییر عادات فکری تولید ترسی می‌کند که اغلب در ورای خشم پنهان می‌شود. با پیروزی بر ترس، قوت‌مان بیشتر می‌شود و احساسات شدید و زیبایی را تجربه می‌کنیم. همه ماجراجویی‌های بزرگ در زندگی به همین نتیجه منجر می‌شود و کنکاش حرکت یکی از آن‌هاست. از آن لذت ببرید.

کریستف شیلر



شکل ۱. یک نقشه کامل از فیزیک یا علم حرکت که برای اولین بار توسط ماتوی برونشتاین (Matvei Bronshtein متولد ۱۹۰۷ در وینیتسا اوکراین و مرگ در ۱۹۳۸ در لنینگارد روسیه) ارائه شد. مکعب برونشتاین در کف با حرکت روزمره شروع می‌شود و ارتباطات با زمینه‌های فیزیک مدرن را نشان می‌دهد. هر ارتباط دقت توصیف را افزایش می‌دهد زیرا محدودیت حرکتی اعمال می‌شود. محدودیت‌ها برای حرکت یکنواخت با ثابت گرانش G، برای حرکت سریع با سرعت نور c و برای حرکت کوچک با ثابت پلانک h، بار الکترون e و ثابت بولتزمن k ارائه شده‌اند.

استفاده از این کتاب

نکات قیدشده در حاشیه برای ارجاع به مراجع یا برای به چالش کشیدن راه حل‌هاست. در ویراست رنگی، نکات حاشیه‌ای، نشانگرهای زیرنویس و لینک‌ها به وبسایت‌ها به رنگ سبز هستند. با گذشت زمان ممکن است لینک‌های اینترنتی از کار بیفتد. بیشتر لینک‌ها می‌تواند از طریق www.archive.org بازیابی شود زیرا کپی صفحات قدیمی را نگه می‌دارد. در نسخه pdf این کتاب که در وبسایت www.motionmountain.net در دسترس است همه نشانگرهای سبز و لینک‌ها قابل کلیک کردن است. نسخه pdf حاوی همه فیلم‌هاست و می‌تواند مستقیماً در Adobe Reader مشاهده شود.

راه حل‌ها و نکات برای چالش در ضمیمه عرضه شده‌اند. چالش‌ها به صورت آسان (آ)، سطح استاندارد دانشجویی (د)، سخت (س) و سطح پژوهشی (پ) طبقه‌بندی شده‌اند. چالش‌هایی که تا به حال راه حلی برایشان ارائه نشده با (بر) مشخص شده‌اند.

توصیه به فراگیران

آموزش به ما می‌گوید که چگونه انسانی هستیم. آموزش دانسته‌ها را وسعت می‌دهد، هوش را بهبود می‌بخشد و احساس موفقیت را القا می‌کند. بنابراین یاد گرفتن از کتابی آن هم در مورد طبیعت می‌بایست کارآمد و لذت‌بخش باشد. پس از عادت‌های بد یادگیری، مانند بیماری مسری اجتناب کنید! از ماژیک و مداد برای هایلایت کردن یا زیر جملات خط کشیدن استفاده نکنید. این کار اتلاف وقت است چون راحتی کاذب ایجاد می‌کند و متن را ناخوانا می‌گرداند. از صفحه نمایش آموزش دریافت نکنید. به هیچ وجه در اینترنت، ویدیوها، بازی‌ها یا تلفن هوشمند به دنبال آموزش نباشید. بیشتر اطلاعات اینترنتی و تقریبا تمام ویدیوها و بازی‌ها برای ذهن همانند سم و افیون هستند. تلفن‌های هوشمند، سرنگ‌های تزریق مخدرات هستند که افراد را به اعتیاد دچار می‌کند و از آموزش جلوگیری می‌کند. هیچ کس از علامت گذاری روی صفحات یا نگاه کردن به صفحه نمایش نه بطور موثر یاد می‌گیرد و نه لذت می‌برد.

در تجربیاتم بعنوان دانشجو و مدرس به این نتیجه رسیده‌ام که یک روش آموزش هرگز در تبدیل کردن دانشجوی ناموفق به دانشجوی موفق شکست نمی‌خورد: اگر شما یک متن را برای مطالعه بخوانید و *با کلمات و تصورات مختص خودتان* تمام بخش‌های آن را *با صدای بلند خلاصه‌وار* بیان کنید. اگر نمی‌توانید این کار را بکنید، آن بخش را دوباره بخوانید. این کار را آنقدر تکرار کنید تا بتوانید به وضوح آنچه خوانده‌اید را با کلمات و تصورات خودتان با صدای بلند خلاصه‌وار بیان کنید. و از بلند گفتن *لذت ببرید*! این کار را می‌توانید به تنهایی یا با دوستان‌تان و در یک اتاق یا در حال پیاده‌روی انجام دهید. اگر برای تمام مطالبی که می‌خوانید این کار را بکنید، زمان یادگیری و زمان خواندن بطور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ از یادگیری از متون خوب بسیار بیشتر لذت خواهید برد و از یادگیری از متون بد کمتر تنفر خواهید داشت. اساتید این روش حتی می‌توانند در حین گوش دادن به یک تدریس با صدای کم این کار را بکنند و از نوت برداری دست بکشند.

توصیه به مدرسین

یک مدرس دانشجویان را دوست دارد و دوست دارد آن‌ها را به سوی تحقیق در زمینه‌ای که انتخاب کرده است، هدایت کند. اشتیاق یک مدرس کلید رضایت شغلی اوست. اگر یک مدرس هستید قبل از شروع درس نحوه لذت بردن از موضوع درس را تصور و احساس کنید و به خودتان گوشزد کنید؛ سپس تصور و احساس کنید و به خودتان یادآوری کنید که چگونه می‌توانید کاری کنیدکه دانشجویان شما هم مثل شما از آن موضوع لذت ببرند. این تمرین را آگاهانه و هر روز انجام دهید. با این کار مشکلات شما در کلاس حداقل و موفقیت شما در تدریس حداکثر خواهد شد.

این کتاب برای امتحان نوشته نشده است بلکه کتابی است تا به وسیله آن مدرسین و دانشجویان از فیزیک به عنوان علم حرکت لذت ببرند.

بازخورد

آخرین نسخه pdf این کتاب برای دانلود رایگان است و رایگان خواهد ماند. موجب مسرت اینجانب خواهد بود اگر ایمیل‌هایی از سمت شما به آدرس بنده در fb@motionmountain.net مخصوصاً درباره موضوعات زیر دریافت کنم:

- چه بخشی مبهم است و نیاز به بهبود دارد؟ چالش ۱د
- جای چه داستان، موضوع، سوال، تصویر یا فیلم را خالی می‌بینید؟

همچنین پذیرای کمک‌های شما در خصوص نکات لیست شده در آدرس www.motionmountain.net/help.html هستیم. همه بازخوردها برای بهبود نسخه بعدی استفاده خواهد شد. اگر فایلی pdf با مشخص کردن نکات به همراه علایم یا تصاویر را ارسال کنید یا در تکمیل مجموعه خطاها در وبسایت همکاری نمایید بسیار متشکر خواهم بود. اگر مایلید فصلی از کتاب را ترجمه نمایید لطفا به بنده اطلاع دهید. مشارکت‌های ویژه شما از نظر دور نخواهد بود و در صورت تمایل در بخش قدردانی نام شما قید خواهد شد یا هدیه به شما تعلق خواهد گرفت و یا هر دو مورد انجام خواهد شد.

حمایت

از کمک‌های شما به یک نهاد غیرانتفاعی و معاف از مالیات که این سری از کتاب‌ها را تولید، ترجمه و منتشر می‌کند استقبال می‌شود. برای جزئیات بیشتر وبسایت را ببینید www.motionmountain.net/donation.html. اداره مالیات آلمان مسیر درست کمک‌های مالی شما را بررسی می‌کند. اگر مایل هستید نام شما به لیست حامیان اضافه خواهد شد. پیشاپیش از طرف تمام خوانندگان در سراسر دنیا از کمک شما تشکر می‌شود.

نسخه کاغذی این کتاب در دسترس است و هم به صورت رنگی و هم به صورت سیاه و سفید از www.amazon.com یا www.createspace.com قابل تهیه است. اکنون از خواندن لذت ببرید.

فهرست

۱ حداکثر سرعت، شاهد در حالت ایستا و سرعت نور ۱۵

انحراف و سرعت باران ۱۷. سرعت نور ۱۹. آیا کسی می‌تواند با استفاده از پالس لیزر تنیس بازی کند و از آینه بعنوان راکت استفاده کند؟ ۲۲ . آلبرت انیشتین ۲۵. یک حد ثابت سرعت و عواقب آن ۲۶. نسبیت خاص در چند سطر ۲۸. شتاب نور و اثر دوپلر ۳۱. فرق بین نور و صوت ۳۶. آیا کسی می‌تواند سریع‌تر از سایه‌اش شلیک کند؟ ۳۷. اجزای سرعت ۳۹. شاهد و اصل نسبیت خاص ۴۰. فضا-زمان چیست؟ ۴۵. آیا می‌توان به گذشته سفر کرد؟- زمان و علیت ۴۶. کنجکاوی‌ها راجع به نسبیت خاص ۴۸. سریع‌تر از نور: تا چقدر دور می‌توان سفر کرد؟ ۴۸. همزمانی و سفر زمان- آیا یک مادر می‌تواند جوان‌تر از دخترش بماند؟ ۴۹. انقباض طول ۵۲. فیلم‌های نسبیتی – انحراف و اثر دوپلر ۵۴. بهترین صندلی در اتوبوس کدام است؟ ۵۵. چقدر سریع می‌توانیم پیاده‌روی کنیم؟ ۵۸. آیا سرعت سایه از سرعت نور بیشتر است؟ ۵۸. دو خط موازی، موازی نیستند – حرکت تقدیمی توماس ۶۲. داستان تمام نشدنی – دما و نسبیت ۶۲. یک کنجاوی: سرعت یک طرفه نور چیست؟ ۶۳. خلاصه ۶۳

۲ مکانیک نسسبیتی ۶۵

جرم در نسبیت ۶۵. چرا اسنوکر نسبیتی سخت‌تر است ۶۷. جرم و انرژی یکسان هستند ۶۸. وزن کردن نور ۷۱. برخورد، اشیای مجازی و تاکیون‌ها ۷۲. سیستم ذرات – بدون مرکز جرم ۷۴. چرا بیشتر حرکات اینقدر کند هستند؟ ۷۵. تاریخ فرمول برابری ماده و انرژی ۷۶. چهار بردار ۷۶. چهار سرعت ۷۸. شتاب و شتاب مناسب ۷۹. چهار تکانه یا تکانه-انرژی ۸۱. چهار نیرو و ماهیت مکانیک ۸۳. چرخش در نسبیت ۸۴. حرکت موج ۸۶. فعالیت ذره آزاد- چگونه اشیا حرکت می‌کنند؟ ۸۷. انتقالات همدیس ۸۹. شاهدان شتاب‌گیرنده ۹۱. دستگاه مرجع شتاب‌گیرنده ۹۳. شتاب ثابت ۹۴. افق‌های اتفاق ۹۶. اهمیت افق‌ها ۹۸. شتاب رنگ‌ها را تغییر می‌دهد ۹۹. آیا نور می‌تواند سریع‌تر از C حرکت کند؟ ۱۰۰. اجزای شتاب ۱۰۰. حدود طول اجسام جامد ۱۰۱

۳ نسبیت خاص در چهار جمله

آیا سرعت نور می‌تواند تغییر کند؟ ۱۰۴. در چه مواردی نسبیت خاص پاسخگو نیست؟ ۱۰۵

۴ نسبیت عام ساده: گرانش، حداکثر سرعت و حداکثر نیرو،

حداکثر نیرو- نسبیت عام در یک جمله ۱۰۸. معنای حدود نیرو و توان ۱۱۰. شاهد آزمایشگاهی ۱۱۲. نتیجه نسبیت عام ۱۱۳. گرانش، انحنای فضا-زمان، افق‌ها و حداکثر نیرو ۱۱۷. شرایط صحت حدود نیرو و توان ۱۱۹. آزمایش‌های گدانکن و تناقضات حد نیرو ۱۲۵. چرا حداکثر نیرو این همه مدت کشف نشد ۱۲۸. یک درک حسی از نسبیت عام ۱۲۹. یک درک حسی از کیهان‌شناسی ۱۳۲. چالش‌های آزمایشگاهی هزاره سوم ۱۳۳. خلاصه‌ای از نسبیت عام و حداقل نیرو ۱۳۴

۵ حداکثر سرعت چگونه فضا، زمان و گرانش را تغییر می‌دهد

ایستایی و سقوط آزاد ۱۳۶. آنچه ساعت در مورد گرانش به ما می‌گوید ۱۳۷. آنچه جزر و مد در مورد گرانش می‌گوید ۱۴۱. فضا و تشک را خم کن ۱۴۳. فضا-زمان خمیده ۱۴۵. سرعت نور و ثابت گرانش ۱۴۷. چرا سنگی که به هوا پرتاب می‌شود دوباره روی زمین می‌افتد؟ - ژئودزیک ۱۴۹. آیا نور می‌تواند سقوط کند؟ ۱۵۱. کنجکاوی‌ها و چالش‌های جالب در مورد گرانش ۱۵۲. وزن چیست؟ ۱۵۷. چرا سیب‌ها سقوط می‌کنند؟ ۱۵۸. یک خلاصه: برداشت‌ها از سرعت ثابت نور روی بر گرانش ۱۵۹

۶ مدارهای باز، نور خمیده و خلاء لرزان

میدان‌های ضعیف ۱۶۰. خمیده شدن نور و امواج رادیویی ۱۶۱. تأخیر زمانی ۱۶۳. تأثیرات نسبیتی روی مدارها ۱۶۴. اثر ژئودزیک ۱۶۶. اثرات تیرینگ ۱۶۹. مغناطیس گرانشی ۱۷۰. امواج گرانشی ۱۷۴. تولید و آشکارسازی امواج گرانشی ۱۷۹. کنجکاوی‌ها و چالش‌های جالب در مورد میدان‌های ضعیف ۱۸۳. خلاصه‌ای از مدارها و امواج

۷ از انحنا تا حرکت ۱۸۵

نحوه اندازه‌گیری انحنا در دو بعد ۱۸۵. سه‌بعد: انحنای فضا ۱۸۸. انحنای فضا-زمان ۱۹۰. متوسط انحنا و حرکت در نسبیت عام ۱۹۲. گرانش جهانی ۱۹۳. متریک شوارتس‌شیلد ۱۹۳. کنجکاوی‌ها و چالش‌های جالب در مورد انحنا ۱۹۴. انحنای سه بعدی: تنسور ریچی ۱۹۴. انحنای متوسط: نرده‌ای ریچی ۱۹۵. تنسور انیشتین ۱۹۵. توصیف تکانه، جرم و انرژی ۱۹۶. معادلات میدان انیشتین ۱۹۸. گرانش جهانی- دوباره ۱۹۹. درک معادلات میدان ۲۰۰. کنش هیلبرت – فضا چگونه خم می‌شود؟ ۲۰۱. تقارن نسبیت عام ۲۰۲. جرم در نسبیت عام ۲۰۳. حد نیرو و ثابت کیهانی ۲۰۳. آیا گرانش یک برهم‌کنش است؟ ۲۰۴. نحوه محاسبه شکل ژئودزیک ۲۰۵. ژیمناستیک ریمان ۲۰۶. کنجکاوی‌ها و چالش‌های جالب در مورد نسبیت عام ۲۰۸. یک خلاصه ساده از معادلات میدان ۲۱۰

۸ چرا می‌توانیم ستارگان را ببینیم؟- حرکت در فضا

چه ستارگانی را می‌بینیم؟ ۲۱۱. چگونه ستارگان را تماشا می‌کنیم؟ ۲۱۴. در شب چه می‌بینیم؟ ۲۱۶. آیا ستارگان هر شب می‌درخشند؟ ۲۲۸. تاریخ کوتاهی از هستی ۲۳۰. تاریخ فضا-زمان ۲۳۴. چرا آسمان در شب سیاه است؟ ۲۳۹. ارتعاشات رنگ آسمان شب ۲۴۲. آیا هستی باز، بسته یا مرزی است؟ ۲۴۳. چرا هستی شفاف است؟ ۲۴۵. انفجار بزرگ و عواقب آن ۲۴۶. آیا انفجار بزرگ یک انفجار بزرگ بوده است؟ ۲۴۷. آیا انفجار بزرگ یک اتفاق بود؟ ۲۴۷. آیا انفجار بزرگ یک شروع بود؟ ۲۴۷. آیا انفجار بزرگ به خلقت اشاره دارد؟ ۲۴۸. چرا می‌توانیم خورشید را ببینیم؟ ۲۴۹. چرا رنگ ستارگان متفاوت است؟ ۲۵۰. آیا ستاره سیاه وجود دارد؟ ۲۵۲. آیا همه ستارگان متفاوتند؟- عدسی‌های گرانشی ۲۵۲. هستی چه شکلی دارد؟ ۲۵۴. پشت افق چیست؟ ۲۵۵. چرا در تمام فضا ستارگان حضور دارند؟- تورم ۲۵۵. چرا اینقدر ستارگان کم هستند؟- محتوای انرژی و انتروپی جهان ۲۵۶. چرا ماده متمرکز است؟ ۲۵۷. چرا ستارگان نسبت به هستی اینقدر کوچک هستند؟ ۲۵۷. آیا ستارگان و کهکشان‌ها در حال دور شدن هستند یا هستی در حال انبساط است؟ ۲۵۸. آیا بیش از یک هستی وجود دارد؟ چرا ستارگان در محل ثابت هستند؟ - بازوها، ستارگان و اصل ماخ ۲۵۸. ایستایی در هستی ۲۵۹. آیا نور، نور را جذب می‌کند؟ ۲۶۰. آیا نور از بین می‌رود؟ ۲۶۰. خلاصه کیهان‌شناسی ۲۶۱

۹ سیاه‌چاله‌ها – سقوط تا ابد

چرا سیاه‌چاله‌ها را کنکاش می‌کنیم؟ ۲۶۲. تراکم جرم و افق‌ها ۲۶۲. افق سیاه‌چاله و سطوح حدی ۲۶۶. مدارها حول سیاه‌چاله ۲۶۷. سیاه‌چاله‌ها هیچ مویی ندارند ۲۶۹. سیاه‌چاله‌ها بعنوان منابع انرژی ۲۷۱. تشکیل و جستجوی سیاه‌چاله‌ها ۲۷۳. تکینگی‌ها ۲۷۴. کنجکاوی‌ها و چالش‌های جالب در مورد سیاه‌چاله‌ها ۲۷۵. خلاصه سیاه‌چاله‌ها ۲۷۸. یک امتحان- آیا جهان یک سیاه‌چاله است؟ ۲۷۹

۱۰ آیا فضا با زمان فرق دارد؟ ۲۸۰

آیا فضا و زمان قابل اندازه‌گیری است؟ ۲۸۲. آیا فضا و زمان ضروری است؟ ۲۸۳. آیا زمان بسته- همانند منحنی‌ها وجود دارد؟ ۲۸۳. آیا نسبیت عام محلی است؟- کل بحث ۲۸۴. آیا زمین توخالی است؟ ۲۸۵. یک خلاصه: آیا فضا، زمان و جرم مستقل هستند؟ ۲۸۶

۱۱ نسبیت عام در یک کلام – یک خلاصه برای عموم

دقت توصیف ۲۸۹. تحقیقات در زمینه نسبیت و کیهان‌شناسی ۲۹۰. آیا نسبیت عام می‌توانست متفاوت باشد؟ ۲۹۲ محدودیت‌های نسبیت عام ۲۹۳

الف واحدها، اندازه‌گیری‌ها و ثابت‌ها ۲۹۵

واحدهای SI ۲۹۵. معنای اندازه‌گیری ۲۹۸. کنجکاوی‌ها و چالش‌های جالب در مورد واحدها ۲۹۸. دقت اندازه‌گیری ۳۰۰. حدود دقت ۳۰۱. ثابت‌های فیزیکی ۳۰۲. اعداد مفید ۳۰۹.

نکات چالشی و راه‌حل‌ها ۳۱۰

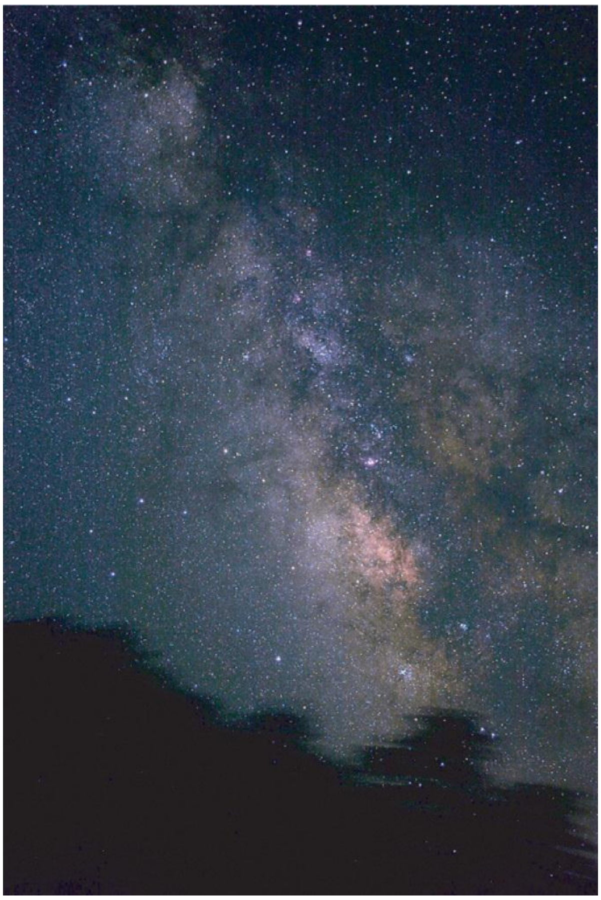
مراجع ۳۲۱

حق امتیازها ۳۵۰

قدردانی‌ها ۳۵۰. حق امتیاز فیلم ۳۵۱. حق امتیاز تصور ۳۵۱

فهرست اسامی ۳۵۳

فهرست موضوعی ۳۶۱



نسبیت

در تلاشمان برای فرا گرفتن چگونگی حرکت اشیا،

تجربه پیاده‌روی و دیدن، ما را سوق می‌دهد تا کشف کنیم

که یک حداکثر سرعت انرژی در طبیعت وجود دارد،

که دو اتفاق که همزمان برای یک شاهد رخ می‌دهد برای شاهد دیگر ممکن است اینگونه نباشد، و

اینکه شتاب توسط یک افق، فاصله مشاهده را محدود می‌کند.

ما در می‌یابیم که فضای خالی می‌تواند خم شود، بلرزد و حرکت کند،

ما اعجاب سیاه‌چاله‌ها را تجربه می‌کنیم،

ما در می‌یابیم که حداکثر نیرو در هستی وجود دارد،

می‌فهمیم که چرا ستارگان را می‌بینیم

و درک می‌کنیم که چرا آسمان در شب سیاه است.

حداکثر سرعت، شاهدان در حالت ایستا و حرکت نور

«هیچ چیز سریعتر از شایعه حرکت نمی‌کند»[1]

باستان

نور برای توصیف دقیق حرکت ضروری است. برای اینکه ببینیم یک خط یا یک مسیر راست است باید به راستای آن بنگریم. به عبارت دیگر برای تعریف راستی از نور استفاده می‌کنیم. چطور مطمئن می‌شویم که یک صفحه صاف است؟ به آن نگاه می‌کنیم[2]، دوباره از نور استفاده می‌کنیم. چگونه حرکت را مشاهده می‌کنیم؟ با نور. طول را چگونه با دقت بالا اندازه می‌گیریم؟ با نور: زمانی نوری که استفاده می‌شد از خورشید بود؛ امروزه نور را از اتم سزیم می‌گیریم. صفحه ۲۹۵

به طور خلاصه نور مهم است زیرا

- نور برای حرکت ایده‌آل و توزیع‌نشده استاندارد است.

اگر زمان زودتری، انتشار نور به عنوان نمونه ایده‌آلی برای حرکت محسوب شده بود، فیزیک با سرعت بسیار بیشتری تکامل پیدا می‌کرد.

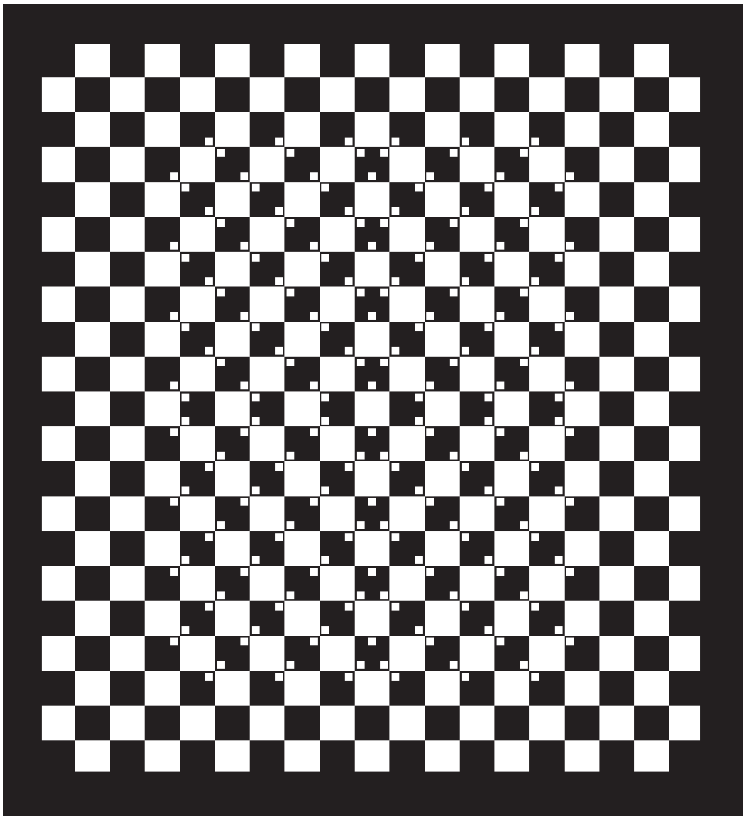
اما آیا نور واقعاً پدیده‌ای از جنس حرکت است؟ بله. مدت‌ها قبل در یونان باستان از پدیده ساده *سایه* این موضوع را دریافته بودند. سایه‌ها ثابت می‌کنند که نور یک ماهیت متحرک است که از منبع نور ساطع می‌شود و به صورت مستقیم حرکت می‌کند.[3] امپدوکلس متفکر یونانی (۴۹۰ تا ۴۳۰ قبل از میلاد) یک نتیجه منطقی گرفت که برای نور میزان معینی از زمان سپری می‌شود تا از منبع به صفحه تشکیل‌دهنده سایه برسد. مرجع ۱. امپدوکلس بیان کرد که

---

۱. جمله ساده شده از ویرژیل، شاعر روم باستان که اصل آن چنین است: «شایعه، سریع‌ترین شر است.»

۲. توجه داشته باشید که نگاه کردن به یک صفحه از تمام اطراف کافی نیست: صفحه‌ای که اشعه نور در راستای طولی و در تمام جهات آن را لمس می‌کند نیازی به صاف بودن ندارد. می‌توانید یک مثال بزنید؟ برای بررسی صاف بودن توسط نور روش دیگری نیاز داریم. می‌توانید یک روش تعیین کنید؟ چالش ۲د

۳. هر کجا که یک منبع، تولید سایه می‌کند، ماهیت منتشر شده اشعه یا تابش نامیده می‌شود. جدای از نور، مثال‌های دیگری از تابش‌هایی که از طریق سایه کشف شدند عبارتند از تابش مادون‌قرمز و تابش ماورای‌بنفش که مشخص گردید حاوی حرکت ذره جدیدی به نام *الکترون* هستند. سایه‌ها همچنین منجر به کشف اشعه ایکس شدند که مشخص شد شکل جدیدی از نور با فرکانس بالاست. اشعه‌های کانالی هم از طریق سایه کشف شد که از حرکت اتم‌های یونیزه تشکیل شده‌اند. سه نوع تابش رادیواکتیو با عناوین اشعه آلفا (هسته هلیوم)، اشعه بتا (دوباره الکترون‌ها) و اشعه گاما (اشعه ایکس پرانرژی) نیز سایه تولید می‌کنند. همه این اکتشافات در سال‌های ۱۸۹۰ تا ۱۹۱۰ انجام شده‌اند که «ایام اشعه» علم فیزیک را تشکیل می‌دادند.



شکل ۲. چگونه بررسی می‌کنید که آیا خطوط راست هستند یا منحنی؟

- سرعت نور محدود است

ما می‌توانیم این نتیجه‌گیری را با بحثی ظریف، ساده و متفاوت تأیید کنیم. سرعت قابل اندازه‌گیری است. و اندازه‌گیری یعنی مقایسه با یک مقدار استاندارد. بنابراین سرعت *کامل* یا ایده‌آل که برای استاندارد اندازه‌گیری ضمنی استفاده می‌شود باید مقداری محدود داشته باشد. یک استاندارد سرعت نامحدود اصلاً قابل اندازه‌گیری نیست. (چرا؟) چالش ۳د. در طبیعت، اجسام سبک‌تر با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند. نور که در واقع بی‌نهایت سبک است گزینه واضحی است برای حرکتی که کامل اما سرعتش محدود باشد. در یک دقیقه این را ثابت می‌کنیم.

سرعت محدود نور یعنی اینکه هر چه که می‌بینیم در واقع پیامی است از *گذشته*. وقتی ستاره‌ها[1]، خورشید یا فرد مورد علاقه خود را می‌بینیم، همواره داریم تصویری از گذشته را نگاه می‌کنیم. به عبارتی طبیعت، ما را از لذت بردن از زمان حال منع می‌کند اما به ما می‌آموزد که چگونه از گذشته لذت ببریم.

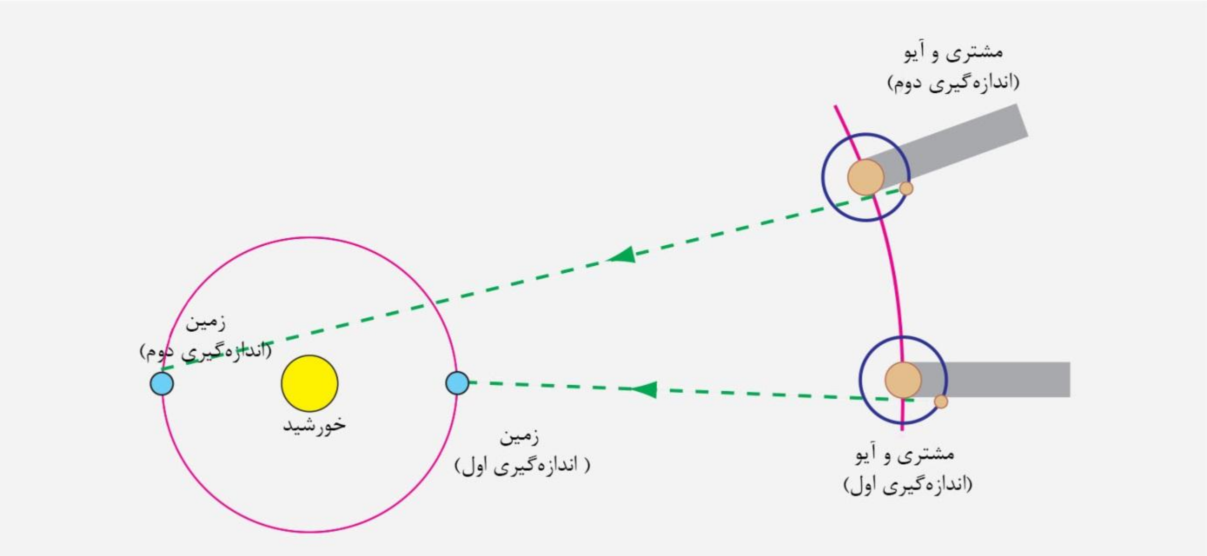
سرعت نور بالاست برای همین تا سال‌های ۱۶۶۸ تا ۱۶۷۶ اندازه‌گیری نشده بود اگر چه بسیاری من جمله آیزاک بکمان در ۱۶۲۹ و گالیله در سال ۱۶۳۸ قبل از این تلاششان را کرده بودند[۳]. [2] اولین روش اندازه‌گیری توسط کیهان‌شناس دانمارکی به نام اوله رومر[1]

---

۱. تصویر آسمان شب و کهکشان راه شیری در صفحه ۱۴ تحت قانون کپی رایت و متعلق به آنتونی آیومامیتیس است و در وبسایت عالی وی به آدرس www.perseus.gr قابل مشاهده است.

۲. رنه دکارت در تمام زندگی خود تا سال ۱۶۳۸ بر اساس دلایل اصولی به صورت عمومی سرعت نور را نامحدود اعلام کرده بود. اما در سال ۱۶۳۷، در توضیح قانون اسنل (شکست نور)، مقداری محدود را برای سرعت نور فرض کرده بود. این نشان می‌دهد که فیلسوفان چقدر ممکن است گیج باشند. [۲]. دکارت در سال ۱۶۳۴ نامه‌ای به بکمان نوشت که اگر بکمان بتواند ثابت کند که سرعت نور محدود است، وی حاضر است صراحتاً بپذیرد که از «از فلسفه هیچ نمی‌داند». ما باید دکارت را با همین جمله به حال خود رها کنیم.

منتشر گردید. محاسبات او در حین مطالعه مدارهای آیو و دیگر قمرهای گالیله‌ای سیاره مشتری انجام گرفت[جلد اول.صفحه ۲۰۹]. او نتوانست اندازه مشخصی برای سرعت نور بدست آورد زیرا برای فاصله این قمر تا زمین مقدار دقیقی وجود نداشت و ابزار اندازه‌گیری زمان هم دقیق نبودند. کمبود نتایج عددی به سرعت توسط هم‌طیفانش مخصوصاً کریستیان هویگنس و ادموند هالی تصحیح شد [۴]. (برای تلاش برای فهم روش رومر به شکل ۳ نگاه کنید. چالش ۴ د) در زمان رومر دریافته شده بود که نور در زمانی کمی بیش از ۸ دقیقه از خورشید به زمین می‌رسد. ۵۰ سال بعد در دهه ۱۷۲۰ این نتیجه به صورت جداگانه توسط کیهان‌شناسان اوستاچیو منفردی (متولد ۱۶۷۴ بولونیا و متوفی ۱۷۳۹ بولونیا ایتالیا) و جیمز برادلی (متولد ۱۶۹۳ شربورن بریتانیا و متوفی ۱۷۶۲ چلفورد بریتانیا) تأیید شد [جلد اول صفحه ۱۵۲]. اندازه‌گیری این دانشمندان موجب شد «روش باران» برای اندازه‌گیری سرعت نور به کار گرفته شود [۵].



شکل ۳. روش رومر برای اندازه‌گیری سرعت نور

کج‌نمایی و سرعت باران

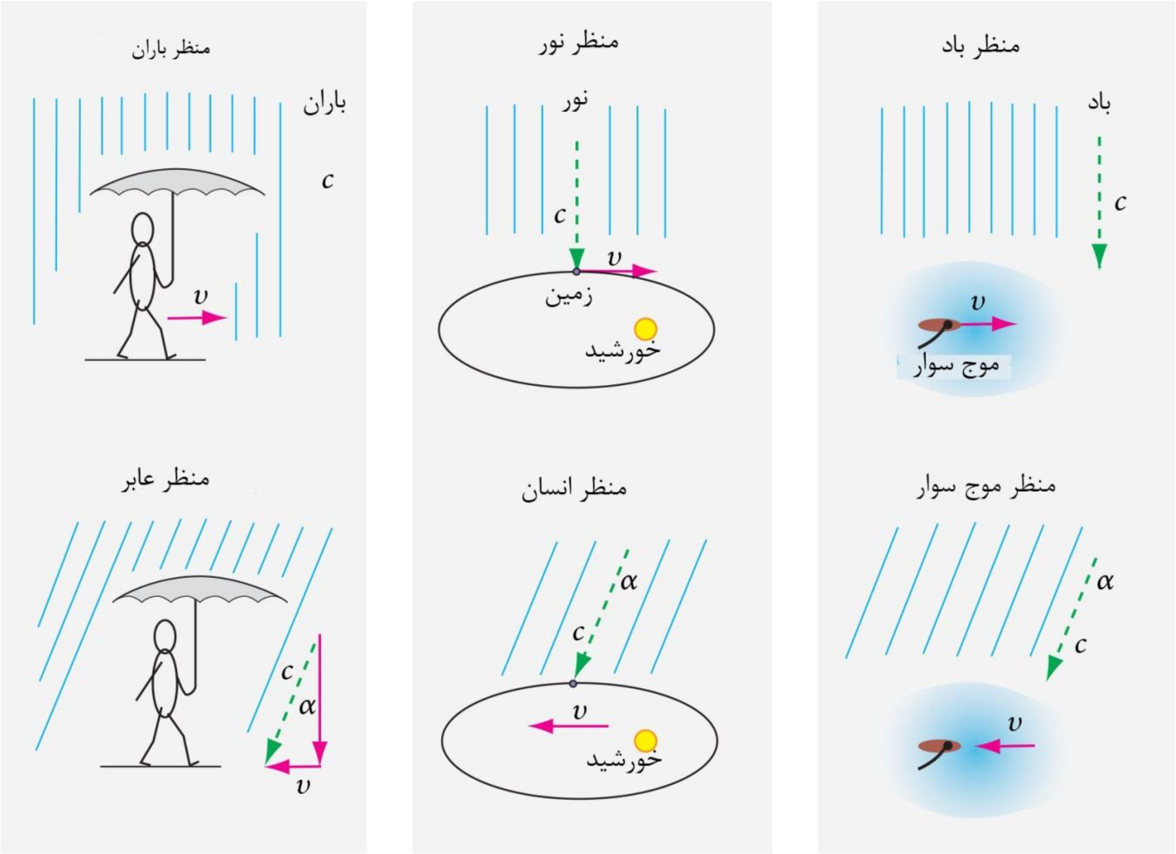
چطور می‌توانیم سرعت افتادن باران را اندازه بگیریم؟ به سرعت با چتر زیر باران پیاده‌روی می‌کنیم، زاویه ظاهری افتادن باران α را اندازه می‌گیریم و سپس سرعت خودمان v را اندازه می‌گیریم. (به سادگی می‌توانیم این زاویه را ببینیم در صورتی که به چپ یا راست و در صورت امکان با پس زمینه سیاه به باران نگاه کنیم.) همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده، سرعت c باران با تقریب زیر قابل محاسبه است:

$$c = v/\tan \alpha \qquad (۱)$$

به همین روش می‌توان هنگامی که سوار بر تخته اسکی روی آب یا کشتی هستیم، سرعت باد را اندازه بگیریم. همین روش برای سرعت نور هم قابل استفاده است. مطابق شکل ۴ فقط نیاز داریم زاویه بین حرکت زمین و نوری که از ستاره‌ای بالای مدار زمین می‌آید اندازه بگیریم. چون زمین نسبت به خورشید یا همان ستاره حرکت می‌کند، زاویه ۹۰ درجه نیست. این انحراف توسط اوستاچیو منفردی

۱. اوله (اولاف) رومر (متولد ۱۶۴۴ آرهوس و متوفی ۱۷۱۰ کپنهاگ)، کیهان‌شناس مهم. او در زمان لویی چهاردهم استاد دانشگاه دوفین پاریس بود. ایده اندازه‌گیری سرعت نور به این روش متعلق به جووانی کاسینی بود که رومر بعنوان دستیارش مشغول خدمت بود. رومر اندازه‌گیری‌هایش را تا سال ۱۶۸۱ ادامه داد. در آن سال مثل همه پروتستان‌ها (از قبیل کریستیان هویگنس) مجبور شد فرانسه را ترک کند و کارش نیمه‌تمام ماند. هنگام بازگشت به دانمارک، یک آتش تمام یادداشت‌های وی مربوط به اندازه‌گیری سرعت نور را از میان برد. در نتیجه نتوانست به افزایش دقت محاسباتش ادامه دهد. بعدها در دانمارک، وی به یک رهبر انقلابی مهم تبدیل شد.

کجنمایی نامیده شد [۷]. کجنمایی با مقایسه اندازه‌گیری در بازه زمانی یک ساله خصوصاً با فاصله شش ماه تعیین می‌شود. توضیح کجنمایی توسط جیمز برادلی که بصورت جداگانه اندازه‌گیری مشابهی را انجام می‌داد محاسبه شد.[۱]



شکل ۴. روش عابر زیر باران یا موج‌سوار برای اندازه‌گیری سرعت نور.

مقدار اندازه‌گیری شده برای زاویه کجنمایی در مورد ستاره‌ای دقیقا بالای دایرهٔ‌البروج عبارت است از ۲۰٫۴۹۵۵۲″ ≈ ۰٫۱ میلی‌رادیان - زاویه‌ای واقعا کوچک. به این عدد ثابت کجنمایی می‌گویند. وجود این زاویه به وضوح بیان می‌دارد که از منظر یک شاهد دور، زمین دارد به دور خورشید می‌چرخد. بله، زمین حرکت می‌کند.

با استفاده از زاویه کجنمایی و با دانستن سرعت حرکت زمین به دور خورشید می‌توانیم سرعت نور را محاسبه کنیم. برای محاسبه سرعت حرکت زمین ابتدا باید فاصله آن تا خورشید را تعیین کنیم. ساده‌ترین روش، روش متفکر یونانی به نام آریستارخوس ساموسی (متولد ۳۱۰ قبل از میلاد و متوفی ۲۳۰ قبل از میلاد) است. زاویه بین ماه و خورشید را در زمانی که هلال ماه دقیقاً نصف است اندازه می‌گیریم.

---

۱. چتر در سال ۱۷۱۹ یا ۱۷۲۶ در اروپا رایج نبود؛ بعدها به صورت مد در آمد. بخش چتر داستان ساختگی است. گفته می‌شود که برادلی کجنمایی را هنگامی فهمید که داشت در رودخانه تیمز دریانوردی می‌کرد. او متوجه شد که پرچم روی یک کشتی بر اثر جهت حرکت کشتی، جهتی متفاوت با باد موجود در خشکی دارد. سال‌ها، منفردی و برادلی ستاره‌های بیشماری من جمله گاماآژدها را مشاهده کرده بودند و علامت کجنمایی برایشان معما بود. این علامت به خاطر *اختلاف منظر* ستاره، مثبت بود. هم اختلاف منظر و هم کجنمایی ستاره بالای دایرهٔ‌البروج آن‌ها را بر آن داشت تا بیضی کوچکی در طول یک سال زمینی توصیف کنند، اگر چه بیضی‌ها با علامت جهتگیری و دوران آن‌ها متفاوت بود. می‌توانید بگویید چرا؟ چالش ۵ د امروز می‌دانیم که بزرگترین اختلاف منظر شناخته شده یک ستاره ″۰٫۷۷ است در حالی که محور اصلی بیضی کجنمایی برای تمام ستارگان ″۲۰٫۵ است. کشف برادلی و منفردی حتی مقامات کلیسا را قانع کرد که زمین به دور خورشید می‌چرخد و سرانجام کتاب‌های گالیله از لیست کتاب‌های ممنوعه خارج شد. از آنجا که کلیسا انتشار کشف منفردی را به تأخیر انداخت معمولاً از برادلی بعنوان تنها مکتشف کجنمایی یاد می‌شود. اما عنوان تأثیر کجنمایی به کارهای منفردی نصبت داده می‌شود که عضو فرهنگستان علوم و انجمن سلطنتی بود. اما نسخه صحیح فرمول (۱) برای این مورد خاص $c = v/\sin\alpha$ است. چرا؟ چالش ۶ د

کسینوس این زاویه برابر است با نسبت فاصله ما تا ماه (قبلاً توضیح داده شد) [جلد اول صفحه ۱۷۹] و فاصله ما تا خورشید. توضیح این موضوع بعنوان تمرین برای خواننده لحاظ می‌گردد. چالش ۷ د.

زاویه آریستارخوس[1] تقریباً قائمه است (که یک فاصله نامحدود را نتیجه می‌دهد) و ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری دقیق لازم است، برای همین هیپارخوس [۶] بحث مفصلی را در مورد این مسئله در حدود ۱۳۰ قبل از میلاد انجام داده است. اندازه‌گیری دقیق در اواخر قرن هفدهم میسر گردید و عدد ۸۹,۸۶ درجه بدست آمد و نسبت فاصله خورشید- ماه حدود ۴۰۰ بدست آمد. امروزه به لطف اندازه‌گیری‌های راداری فواصل سیارات، فاصله متوسط تا خورشید با دقت فوق‌العاده ۳۰ متر[2] بدست آمده است؛ مقدار آن (۳۰) ۱۴۹,۵۹۷,۸۷۰/۶۹۱ کیلومتر یا حدود ۱۵۰ میلیون کیلومتر است.

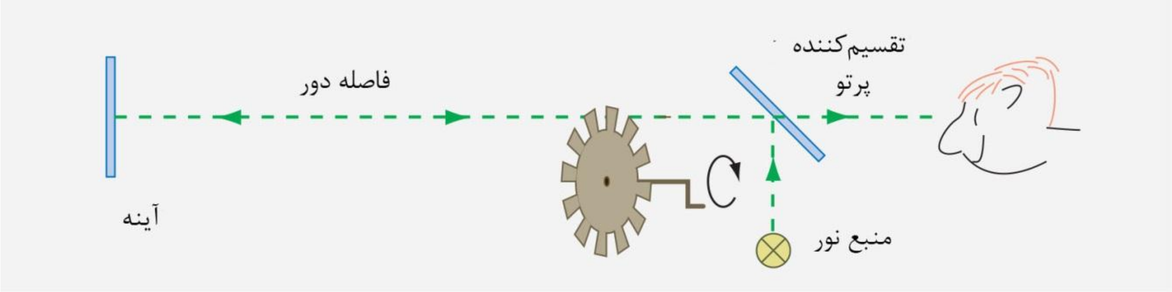
سرعت نور

با استفاده از فاصله بین زمین و خورشید، سرعت چرخش زمین به دور خورشید برابر است با $v=2\pi R/T$=29.7km/s. بنابراین زاویه کج‌نمایی نتیجه زیر را در بر دارد:

- سرعت نور (در خلا) برابر است با c = 0.300 Gm/s یا 0.3 m/ns یا 0.3 mm/ps یا 1080 million km/h.

این مقداری بس بزرگ است، مخصوصاً وقتی آن را با بالاترین سرعت ساخته بشر مقایسه کنیم. ماهواره هلیوس دو با سرعت 253 Mm/h = 70.2 km/s به دور خورشید می‌چرخد، سرعت رشد کودکان 3 nm/s است، سرعت رشد قندیل‌ها در غارها حدود 0.3 pm/s است. با این مقایسه‌ها تازه می‌فهمیم که اندازه‌گیری سرعت نور حق علم را ادا کرده است.

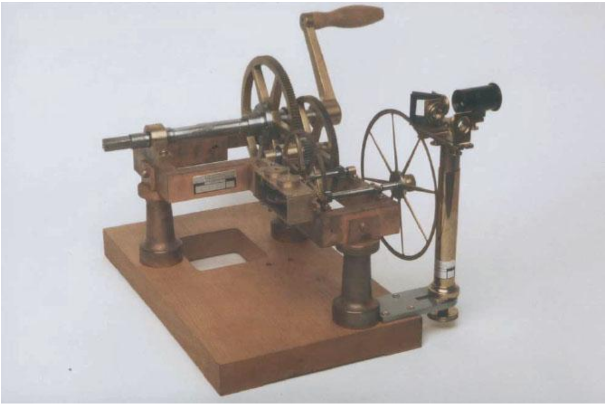
اولین اندازه‌گیری *دقیق* سرعت نور در سال ۱۸۴۹ توسط ایپیلویت فیزو (متولد ۱۸۱۹ پاریس و متوفی ۱۸۹۶ ونتویل فرانسه) انجام شد. عدد وی فقط ۵ درصد از مقدار کنونی بیشتر بود. او یک اشعه نور را به سمت یک آینه دور فرستاد و زمان بازگشت نور را اندازه گرفت. فیزو چگونه بدون هیچ وسیله الکترونیکی زمان را اندازه گرفته است؟ در واقع او از ایده مشابه اندازه‌گیری سرعت گلوله بهره برده است؛ [جلد اول صفحه ۶۱]. بخشی از پاسخ در شکل ۵ آمده است. (آینه باید چقدر دور باشد؟) چالش ۹ د یک بازسازی مدرن از آزمایش وی توسط جان فرکس دقت ۲ درصد را نتیجه داده است [۹]. امروزه اندازه‌گیری بسیار ساده‌تر است؛ در فصل‌های الکترودینامیک توضیح خواهیم داد که چگونه می‌توان با استفاده از کامپیوترهای یونیکس یا لینوکس استاندارد که با کابل به یکدیگر متصل هستند و با استفاده از دستور ping، سرعت نور را اندازه گرفت [جلد سوم صفحه ۳۲].



---

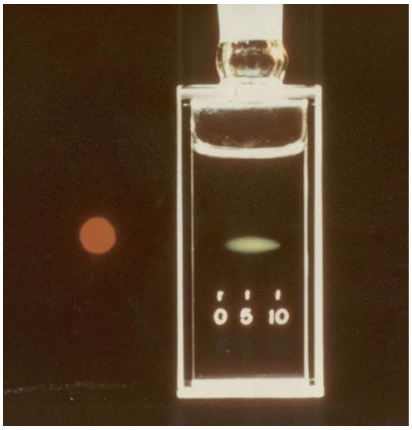
۱. آریستارخوس [۸] شعاع خورشید و ماه را هم بعنوان ضرایبی از شعاع زمین تعیین کرد. آریستارخوس متفکری برجسته بود: او اولین کسی بود که منظومه چرخنده بدور خورشید را ارائه داد و احتمالاً اولین کسی بود که ستارگان را خورشیدهای دوردست توصیف کرد. برای همین ایده‌ها برخی از هم‌عصرانش او را به خاطر بی‌دینی به مرگ محکوم کردند. هنگامی که راهب و کیهان‌شناس نیکلاس کوپرنیک (متولد ۱۴۷۳ تورنی لهستان و متوفی ۱۵۴۳ فرانبورگ لهستان) منظومه چرخنده به دور خورشید را دوهزار سال بعد دوباره ارائه داد، گر چه این ایده را از آریستارخوس گرفته بود، اسمی از وی نبرد.

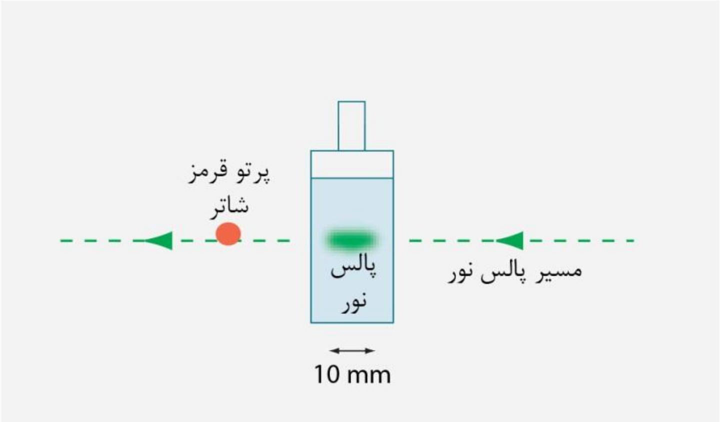
۲. تقریب فاصله ماه با دقت در حد سانتیمتر هم قابل اندازه‌گیری است؛ می‌توانید حدس بزنید چرا به این شکل بیان می‌شود؟ چالش ۸ د



شکل ۵. روش فیزو برای اندازه‌گیری سرعت نور (photo © AG Didaktik und Geschichte der Physik, Universität Oldenburg)

سرعت نور اینقدر بالاست که در زندگی روزانه نمی‌توان ثابت کرد که مقداری محدود است. شاید بهترین روش برای اثبات، عکس گرفتن از پالس نوری است که از مقابل میدان دید شخص عبور می‌کند مشابه عکس‌برداری از ماشین در حال عبور یا گلوله در حال عبور در هوا. شکل ۶ چنین عکسی را نشان می‌دهد. این عکس در سال ۱۹۷۱ توسط یک دوربین تجاری استاندارد تولید شد. مهم اینکه این دوربین تنها یک قطعه الکترونیکی ساده نبود. (دیافراگم همچنین دوربینی چقدر باید سریع باشد؟ و چگونه می‌توانید مطمئن باشید که در لحظه‌ی درست باز شده است؟ چالش ۱۰ د)





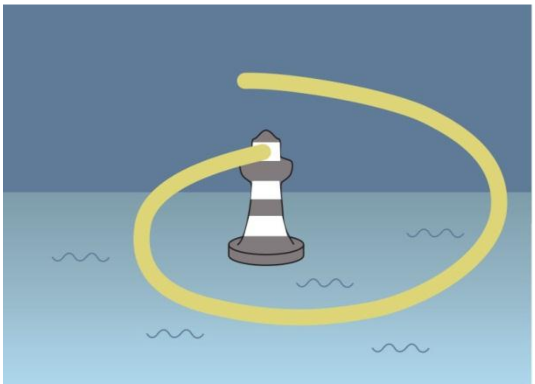
شکل ۶. اولین عکس از حرکت پالس نور سبز از راست به چپ از درون بطری آب شیری‌رنگ که با دقت میلیمتر علامت شده است (photograph © Tom Mattick)

سرعت محدود نور همچنین به این معناست که پرتو نوری که به سرعت می‌چرخد، باید خم شود، همانند شکل ۷. در زندگی روزمره، با سرعت بالای نور و چرخش کند فانوس دریایی این اثر قابل تشخیص نیست. اما شاید روزی …

در نهایت در قرن بیست و یکم فیلم‌های حرکت پالس‌های نوری تولید شد. یک نمونه جالب در شکل ۸ نمایش داده شده است. این فیلم‌ها تایید می‌کنند که سرعت نور محدود است.

بطور خلاصه نور با سرعت سرسام‌آور اما محدودی حرکت می‌کند. برای مثال، سرعت نور بسیار بیشتر از آذرخش است، ممکن است بخواهید امتحان کنید چالش ۱۱ د. یک قرن افزایش فزاینده دقت اندازه‌گیری سرعت نور به مقدار امروزی آن منجر گردید

$$c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}.$$



شکل ۷. نتیجه محدود بودن سرعت نور. مواظب جزئیات فریبنده باشید – نور از منبع به صورت مستقیم خارج می‌شود، در طول یک خط خمیده حرکت نمی‌کند؛ مشابه اتفاقی که هنگام خروج از آب‌پاش گردان برای آب رخ می‌دهد.

Ultrafast-camera.mov

شکل ۸. فیلمی که با یک دوربین خاص و فوق سریع گرفته شده و پالس کوتاهی از نور را در برخورد با آینه نشان می‌دهد
QuickTime film © Wang Lihong and Washington University at St.Louis

این مقدار به لحاظ تعریف کاملاً دقیق است و از سال ۱۹۸۳ متر را بر اساس سرعت نور c تعریف می‌کنند. تقریب خوبی مثل 0.3 Gm/s یا 0.3 µm/fs برای به خاطر سپردن آسان‌تر است. خلاصه‌ای از آنچه از سرعت نور می‌دانیم در جدول ۱ آمده است. دو مورد از شگفت‌انگیزترین خواص حرکت نور در اواخر قرن نوزدهم کشف گردید. این موارد اساس *نظریه نسبیت خاص* را تشکیل می‌دهند [مرجع ۱۱].

جدول ۱. خواص حرکت نور

مشاهدات نور
نور در خلا می‌تواند حرکت کند.
نور حامل انرژی است.
نور دارای تکانه است: می‌تواند به اجسام ضربه وارد کند.
نور دارای تکانه دورانی است: می‌تواند موجب چرخش اجسام شود.
نور از لابلای نور دیگر بدون تداخل عبور می‌کند.
سرعت نور در خلا عبارت است از $c = 299\ 792\ 458$ m/s یا تقریبا 30 cm/ns- همواره و همه‌جا.
سرعت نور در خلا بیش از هر محیط مادی دیگری است.
سرعت مناسب نور نامحدود است. صفحه ۴۸
سرعت پالس‌های نور، همان سیگنال صحیح سرعت، سرعت اصلی است نه سرعت گروهی.
سرعت نور در خلا، همواره و هر جا، سرعت اصلی c است. جلد سوم، صفحه ۱۳۶
با نادیده گرفتن طول موج، اشعه نور تقریبی است.
پرتوهای نور هنگامی که از ماده دور باشند، در مسیر مستقیم حرکت می‌کنند.
سایه‌ها محدودیت سرعت ندارند.
نور معمولی و پرشدت یک موج است. نور با شدت بسیار کم، جریانی است از ذرات.
درون ماده، هم سرعت اصلی و هم سرعت انرژی نور حداکثر c است.
درون ماده، سرعت گروهی پالس‌های نور می‌تواند منفی، صفر، مثبت یا نامحدود باشد.

آیا کسی می‌تواند با یک پالس لیزر بعنوان توپ و آینه به عنوان راکت، تنیس بازی کند؟

«هیچ چیز سریعتر از گذر عمر نیست»

دگردیسی‌های اووید، کتاب دهم، آیه ۵۲۰

تمام آزمایش‌هایی که تاکنون انجام شده نشان داده است: سرعت تابش‌های الکترومغناطیس در خلا ارتباطی با فرکانس تابش، پلاریزاسیون آن و تابش آن ندارد.

برای مثال، نشان داده شده که تمام پالس‌های الکترومغناطیس منتشر شده از پالسار سحابی عقرب از تمام امواج رادیویی گرفته تا اشعه‌های گاما طی ۱۳ دهه، سرعت یکسانی داشته‌اند [۱۲]. مقدار سرعت با دقت ۱۴ رقم، مقدار یکسانی دارد. مشاهدات با استفاده از تشعشعات گاما این دقت را تا ۲۰ رقم بهبود داده است. پس از شروع حرکت با یکدیگر و طی مسیر در کنار هم با طی میلیاردها سال نوری در خلال کیهان، پالس‌های نور با فرکانس و قطبش متفاوت همچنان بطور همزمان با یکدیگر به ما می‌رسند [۱۳].

مقایسه بین سرعت اشعه گاما و سرعت نور مرئی در شتاب‌دهنده‌ها هم انجام شده است. همچنین سرعت امواج رادیویی با فرکانس متفاوت که حول زمین طی مسیر می‌کنند را می‌توان مقایسه کرد [۱۴]. همه چنین آزمایش‌هایی هیچ تغییری در سرعت نور در فرکانس‌های متفاوت را نشان نداده است. آزمایش‌های بیشتر نشان می‌دهد که سرعت نور در تمام جهات فضا، حداقل تا دقت ۲۱ رقم یکسان است [۱۵].

نور قوی‌ترین لیزرها، نور ضعیف‌ترین لامپ‌های جیبی و نور ستاره‌های دوردست، سرعت یکسانی دارد. به همین طریق نور قطبیده خطی، قطبیده دایره‌ای، قطبیده بیضوی و همچنین نور غیرقطبیده یا گرمایی سرعت یکسانی دارند.

به طور خلاصه

- در طبیعت هیچ راهی برای افزایش یا کاهش سرعت نور در خلأ وجود ندارد.

مشاهده ستارگان تپنده در آسمان این را ثابت می‌کند. سرعت نور در خلأ همیشه یکسان است: *نامتغیر* است. اما این نامتغیر بودن سوال‌برانگیز است.

همه می‌دانیم اگر بخواهیم سنگی را تا حد ممکن سریع‌تر و به مکان دورتر پرتاب کنیم باید در حین دویدن پرتاب کنیم. ذاتاً می‌دانیم که با دویدن نسبت به حالتی که نمی‌دویم سرعت سنگ نسبت به زمین بالاتر خواهد بود. همچنین می‌دانیم که سریع‌تر زدن به توپ تنیس موجب سرعت بیشتر توپ می‌شود. به هر حال علی رغم تعجب همگان آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نور ساطع شده از لامپ متحرک با نور ساطع شده از لامپ ثابت، سرعت یکسانی دارد. نمونه‌های زیادی از *جفت ستاره* در آسمان موجود است: این‌ها ستارگانی هستند که در امتدادهای بیضوی حول یکدیگر می‌چرخند. تقریبا لبه مسیر بیضوی روبروی ماست به نحوی که به صورت نوسانی هر ستاره یا به سمت ما حرکت می‌کند و یا از ما دور می‌شود. اگر سرعت نور با تغییر سرعت منبع آن تغییر می‌کرد، تصاویر عجیبی را مشاهده می‌کردیم چون که نور ساطع شده از یکی از موقعیت‌ها بر موقعیت دیگر سبقت می‌گرفت. مخصوصاً نمی‌توانستیم مسیر بیضوی مدارها را مشاهده کنیم. به هر حال همچین تصاویر عجیبی مشاهده نمی‌شود و مسیر بیضوی به طور کامل قابل مشاهده است. ویلم دو سیتر این مباحثه زیبا را در سال ۱۹۱۳ مطرح نمود [۱۶] و صحت این موضوع را با تعداد زیادی از نمونه‌های جفت ستاره اثبات کرد.

به عبارت دیگر، نور در خلأ هرگز سریع‌تر از نور نیست:

- همه پرتوهای نور در خلأ سرعت یکسان دارند.

آزمایش‌های طراحی شده زیادی این نتایج را با دقت بالا اثبات کرده‌اند [۱۳][۱۷]. سرعت نور را با دقت بهتر از 1 m/s می‌توان اندازه گرفت؛ اما حتی برای سرعت لامپ بیش از 290 000 000 m/s سرعت نور ساطع شده تغییر نمی‌کند. (می توانید حدس بزنید چه نوع لامپی استفاده شده است؟ چالش ۱۲ د)

در زندگی روزمره می‌دانیم که اگر به سمت سنگ یا توپ تنیس بدویم زودتر به آن می‌رسیم نسبت به زمانی که بایستیم یا از آن دور شویم. اما بطرز عجیبی برای نور در خلأ همچین موضوعی وجود ندارد! همه آزمایش‌ها بوضوح نشان می‌دهد که چه به سمت لامپ برانیم

چه بایستیم چه از آن دور شویم، سرعت یکسانی برای نور اندازه خواهیم گرفت. همه این آزمایش‌ها با حداکثر دقت ممکن انجام شده است [۱۸]. حتی برای شاهدی با بیشترین سرعت ، سرعت رسیدن نور ثابت باقی می‌ماند.

هر دو دسته آزمایش چه آنهایی که لامپ در آن حرکت می‌کند چه آن‌هایی که شاهد در آن حرکت می‌کند نشان می‌دهند که سرعت نور دقیقاً مقدار یکسانی دارد همیشه و برای هر کس که باشد، هر کجا باشد. حتی اگر شاهدها نسبت به یکدیگر یا نسبت به منبع نور حرکت کنند.

- سرعت نور در خلأ نامتغیر است.

شکل ۹. همه دستگاه‌های دارای موتور الکتریکی ثابت می‌کنند که سرعت نور نامتغیر است (© Miele,EasyGlide)

در واقع سرعت نور در خلأ، ملاکی کامل و ایده‌آل برای سرعت است. باید یادآوری کنیم که معادل‌های جایگزین برای «سرعت نور» عبارتند از «سرعت راداری» یا «سرعت رادیویی»؛ در بخش الکترودینامیک خواهیم دید که چرا این موضوع مهم است [جلد سوم صفحه ۱۰۹].

سرعت نور با سرعت نوترینوها هم فاصله زیادی ندارد. این موضوع هنگام رصد یک ابرنواختر در سال ۱۹۸۷ نشان داده شد زیرا تشعشع نور و پالس نوترینو فقط با اختلاف ۱۲ ثانیه به زمین می‌رسیدند. (این اختلاف احتمالاً به خاطر تفاوت سرعت یا تفاوت نقطه شروع دو تشعشع است.) اختلاف این دو سرعت در رقم چندم خواهد بود با احتساب اینکه این ابرنواختر $1.7 \cdot 10^5$ سال نوری از ما فاصله دارد و نقطه شروع برای هر دو یکسان باشد چالش ۱۳ د؟

دسته‌های بیشتری از شواهد آزمایشگاهی برای نامتغیر بودن سرعت نور وجود دارد [۱۹]. هر دستگاه الکترومغناطیس مثل یک جاروبرقی نشان می‌دهد که سرعت نور نامتغیر است [جلد سوم صفحه ۵۳]. پی خواهیم برد که اگر سرعت نور نامتغیر نباشد اتفاقی که در زندگی روزانه در موتورهای الکتریکی و در هر بلندگو رخ می‌دهد و در آن میدان‌های مغناطیسی از جریان‌های الکتریکی نتیجه می‌شود، اتفاق نمی‌افتاد. برخی محققین از همین مورد برای اولین بار، نامتغبر بودن سرعت نور را نتیجه گرفتند. تازه *پس از* این نتایج بود که آلبرت انیشتین نشان داد که نامتغیر بودن سرعت نور با مشاهدات ما از حرکت اجسام سازگار است [۲۰]. این سازگاری را در این فصل بررسی خواهیم کرد. ارتباط بین نسبیت و جاروبرقی و دیگر ماشین‌ها در فصل‌های بعدی در مبحث الکترودینامیک کاوش خواهد شد [جلد سوم صفحه ۵۳].

حرکت نور و حرکت اجسام عمیقاً با هم ارتباط دارند. اگر سرعت نور نامتغیر نبود شاهدها می‌توانستند با سرعت نور حرکت کنند. چرا؟ از آنجا که نور موج است، شاهدی که تقریبا به سرعت موج نور حرکت می‌کند می‌توانست مشاهده کند که موج نور دارد به آهستگی حرکت می‌کند. به هر حال آزمایش و خواص الکترومغناطیس همچین مشاهداتی را نامکن می‌نماید؛ شاهدها و اجسام *نمی‌توانند* به سرعت نور برسند [جلد سوم صفحه ۵۳].

➢ سرعت نور در خلأ یک سرعت حدی است.

شاهدین و اجسام همواره آهسته‌تر از نور حرکت می‌کنند.

شکل ۱۰. آلبرت انیشتین (۱۸۷۹ – ۱۹۵۵)

بطور خلاصه سرعت نور در خلأ سرعت حدی نامتغیر است. بنابراین هیچ راهی برای شتاب دادن به پالس نور وجود ندارد. و در مقایسه با توپ تنیس هیچ راهی برای دیدن پالس نور قبل از رسیدنش وجود ندارد. بنابراین حداقل در خلأ بازی تنیس با نور نه ممکن است و نه سرگرم‌کننده. اما در دیگر موقعیت‌ها چطور؟ چالش ۱۴ س

آلبرت انیشتین

آلبرت انیشتین (متولد ۱۸۷۹ در اولم آلمان و متوفی ۱۹۵۵ در پرینستون آمریکا) برای همیشه یکی از بزرگترین فیزیکدانان است. او در سال ۱۹۰۵ سه مقاله مهم منتشر کرد: مقاله اول نشان داد که بطور قطعی مواد از مولکول و اتم ساخته شده‌اند؛ مقاله دوم نامتغیر بودن سرعت نور را نشان داد؛ و مقاله سوم یکی از نقاط شروع نظریه کوانتوم است. هر یک از مقالات شایسته یک جایزه نوبل است ولی وی فقط بابت مقاله سوم جایزه نوبل گرفت. در سال ۱۹۰۶ اثبات فرمول معروف $E = c^2 m$ را منتشر کرد [صفحه ۷۶]، سپس در چند مورد دیگر این موضوع را به تصویر کشید. اگرچه انیشتین یکی از پایه‌گذاران نظریه کوانتوم بود ولی بعدها به یکی از مخالفان آن تبدیل شد. به هر حال مباحثه‌های مشهور انیشتین با دوستش نیلز بور کمک کرد که غیر شهودی‌ترین جنبه‌های کوانتوم واضح شود. بعدها وی اثر انیشتین-دهاس را توضیح داد که ثابت می‌کند مغناطیس به خاطر حرکات درون مواد است. پس از اکتشافات بسیار بعدی در سال‌های ۱۹۱۵ و ۱۹۱۶، انیشتین مهمترین دستاوردش را منتشر کرد: نظریه نسبیت عام بعنوان یکی از زیباترین و مهمترین کارهای انجام شده در علم [صفحه ۱۳۶]. در باقی ۴۰ سال عمرش تمام تحقیقاتش را صرف اتحاد نظریه‌های حرکت نمود ولی هیچ موفقیتی حاصل نکرد.

انیشتین به خاطر اینکه هم معروف و هم یهودی بود، از سوی جنبش ملی سوسیالیسم بسیار مورد هجمه و تبعیض قرار می‌گرفت؛ به همین علت در سال ۱۹۳۳ از آلمان به ایالت متحده آمریکا مهاجرت نمود. از آن زمان به بعد ارتباطش را با آلمانی‌ها قطع کرد به استثنای دوستان بسیار نزدیکش مثل ماکس پلانک. یکی دیگر از دشمنانش فیلسوف هنری برگسون بود. شخصیت موثری در زمان خودش که تلاش کرد از اعطای جازه نوبل به انیشتین جلوگیری کند. انیشتین تا زمان مرگ، گذرنامه سوئیس خود را در اتاق خوابش نگاه داشت. انیشتین نه تنها یک فیزیکدان بزرگ بلکه متفکر بزرگی نیز بود. مجموعه تفکرات وی در حوزه‌های جدای از فیزیک کاملا ارزش مطالعه را دارد [۲۱]. با همه این احوال، زندگی خانوادگی وی مصیبت‌بار بود و تمام اعضای خانواده را عمیقا غمگین نموده بود.

کسی که مشتاق دنباله‌روی از انیشتین است باید ابتدا بداند که وی مقالات زیادی چاپ کرده است[1]. او هم باانگیزه و هم سخت‌کوش بود. بعلاوه بسیاری از مقالاتش اشتباه از آب در می‌آمد [۲۲]؛ و دائما مجبور بود در مقالات بعدی اشتباهات را تصحیح کند. این موضوع اینقدر رخ می‌داد که خودش نیز خودش را مسخره می‌کرد. او دریافته بود که تعریف درست یک نابغه عبارت است از شخصی که بیشترین اشتباهات ممکن را در کوتاه‌ترین زمان ممکن مرتکب می‌شود.

جدول ۲. چگونه خود و دیگران را قانع کنیم که یک سرعت با حداکثر انرژی در طبیعت وجود دارد. این جدول را با جدول حداکثر نیرو در صفحه ۱۰۹ و جدول حداقل فعالیت در صفحه ۱۹ جلد چهارم مقایسه کنید.

عبارت	آزمایش
حداکثر سرعت انرژی c به شاهد وابسته نیست	تمام مشاهدات را بررسی کنید.
سرعت انرژی محلی بیش از c وجود ندارد.	تمام مشاهدات را بررسی کنید.
سرعت انرژی محلی بیش از c قابل تولید نیست.	تمام تلاش‌ها را بررسی کنید.
سرعت انرژی محلی بیش از c حتی قابل تصور نیست.	تمام تناقض‌ها را حل کنید.
حداکثر سرعت انرژی محلی c است و این یک اصل در طبیعت است.	نسبیت خاص را از آن نتیجه بگیرید. تمام پس‌آیندها را بررسی کنید، گرچه عجیب است ولی با مشاهدات تأیید می‌شود.

یک سرعت حدی لایتغیر و عواقب آن

آزمایش‌ها و نظریه نشان می‌دهد که شاهدان نمی‌توانند به سرعت نور برسند. به همین ترتیب، هیچ شیئی نمی‌تواند به سرعت نور برسد. همچنین، c سریع‌ترین سرعت موجود در طبیعت است. بطور دقیق‌تر سرعت v از هر سیستم فیزیکی در طبیعت با جرم و انرژی محلی در شرط زیر واقع است:

$$v \leqslant c.$$

این رابطه اساس نسبیت خاص است؛ در واقع، تمام نسبیت خاص در آن قرار دارد.

وجود سرعت حدی غیرمتغیر c آنقدر هم که فکر می‌کنیم عجیب نیست: ما به همچنین مقدار غیرمتغیری برای توانایی *اندازه‌گیری* سرعت نیاز داریم [صفحه ۱۰۴]. به هر حال، یک حداکثر سرعت غیرمتغیر نتایج جالب بسیاری دارد: خواهیم دید که در نتیجه آن بازه‌های طول و زمان برای یک شاهد تغییر می‌کند، ماده و انرژی ارتباط نزدیکی دارند، افق‌های رویداد وجود دارند (سیاه‌چاله‌ها)، ضدماده وجود دارد.

پیشتر در سال ۱۸۹۵ آنری پوانکاره[2] مباحثه نامتغیر بودن و *نظریه نسبیت* را مطرح کرده بود و این اصطلاح در سال ۱۹۰۵ رایج بود. انیشتین از اینگونه نامیدن نظریه رضایت نداشت؛ او عنوان «Invarianztheorie» به معنی «نظریه عدم تغییر» را ترجیح می‌داد اما دیگر قادر نبود عنوان را عوض کند [۲۳]. به این ترتیب انیشتین توصیف حرکت *بدون حضور* گرانش را نسبیت *خاص* و توصیف حرکت

۱. تمام مقالات و نامه‌ها به صورت رایگان و آنلاین موجود است: einsteinpapers.press.princeton.edu.

۲. آنری پوانکاره (متولد ۱۸۵۴ نانسی و متوفی ۱۹۱۲ پاریس)، فیزیکدان و ریاضیدان موثری بود. وی یکی از مولدترین دانشمندان عصر خود بود و در پیشرفت نسبیت، نظریه کوانتوم و بسیاری از مباحث ریاضی نقش بسزایی ایفا کرد.

در *حضور* گرانش را نسبیت *عام* نامید [۱۹]. هر دو زمینه پر است از نتایج غیرقابل باور که بدان خواهیم پرداخت[۱]. آیا واقعا یک سرعت حدی غیرمتغیر می‌تواند در طبیعت وجود داشته باشد؟ جدول ۲ نشان می‌دهد که برای پذیرش این ایده باید سه چیز را بررسی کنیم. باید نشان دهیم که اولاً هیچ سرعتی بالاتر از نور *مشاهده* نشده است، دوماً هیچ سرعت انرژی بالاتر از نور *قابل* مشاهده نیست و سوماً *تمام* عواقب نامتغیر بودن سرعت نور گرچه عجیب در طبیعت صدق کند. در واقع این موضوع تعریف نسبیت خاص است و این فصل و فصل بعد تماماً به همین موضوع اختصاص دارد.

عدم تغییر سرعت نور با مکانیک گالیله‌ای کاملا در تضاد است. مکانیک گالیله‌ای رفتار سنگ‌ها را توصیف می‌کند ولی در سرعت‌های بالا این مکانیک اشتباه است. در سرعت‌های کم توصیف گالیله جوابگوست زیرا درصد خطا پایین است. ولی اگر بخواهیم توصیفی برای تمام سرعت‌ها داشته باشیم باید مکانیک گالیله‌ای را کنار بگذاریم. بعنوان مثال وقتی تنیس بازی می‌کنیم با درست ضربه زدن به توپ می‌توانیم سرعتش را زیاد یا کم کنیم. اما این کار را نمی‌توان با نور انجام داد. حتی اگر آینه‌ای را به یک هواپیما وصل کنیم و یک پرتو نور را توسط آن بازتاب دهیم، همچنان هم از هواپیما و هم از شاهد روی زمین نور با سرعتی یکسان دور خواهد شد. همه آزمایش‌ها این رفتار عجیب نور را تأیید می‌کنند.

اگر ما با حرکت شتابدار با یک اتوبوس برانیم، ماشین‌های سمت مخالف جاده با سرعت‌های بالا و بالاتر از کنارمان عبور خواهند کرد. آزمایش‌ها این موضوع را برای نور تأیید نمی‌کنند: نور همیشه با سرعت *یکسان* از کنارمان عبور می‌کند. حتی با آزمایشات با دقت $2 \cdot 10^{-13}$ در سرعت‌های متفاوت شاهد در سرعت نور هیچ تغییری قابل تشخیص نیست [۱۵]. نور همانند ماشین‌ها یا هر جسم مادی دیگری رفتار نمی‌کند.

با وجود اینکه آزمایشات بوضوح نشان می‌دهند، دقیقاً چرا عدم تغییر سرعت نور تقریباً باورنکردنی است؟ دو شاهد O و Ω را در نظر بگیرید که با سرعت نسبی v حرکت می‌کنند، مثل دو ماشین که در دو سمت خیابان در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند [جلد اول صفحه ۴۳۹]. تصور کنید لحظه‌ای که از کنار یکدیگر عبور می‌کنند نوری از یک لامپ در ماشین O ساطع شود. نور از موقعیت $x(t)$ برای شاهد O به سمت موقعیت $\xi(\tau)$ برای شاهد Ω حرکت می‌کند. از آنجا که سرعت نور برای هر دو شاهد یکسان است خواهیم داشت.

$$\frac{x}{t} = c = \frac{\xi}{\tau} \qquad (۴)$$

به هر حال با توجه به وضعیت توصیف شده واضح است که $x \neq \xi$. نا متغیر بودن سرعت نور بیان می‌دارد که $t \neq \tau$ یعنی:

- زمان برای شاهدانی که نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند *متفاوت* است.

پس زمان یکتا نیست [چالش ۱۵ ش]. این نتیجه شگفت‌انگیز که توسط بسیاری از آزمایش‌ها تأیید شده برای اولین بار در سال ۱۹۰۵ بوضوح توسط آلبرت انیشتین بیان گردید [۲۷]. هر شاهد زمان خودش را دارد. زمان‌های دو شاهد فقط در صورتی که دو شاهد نسبت به هم حرکت ندارند، همسان است. گرچه بسیاری دیگر هم می‌دانستند که سرعت نور نامتغیر است اما تنها انیشتین جوان بود که این جرأت را داشت که بگوید زمان به شاهد وابسته است تا با عواقب این ادعا روبرو شود. بگذارید ما هم همین کار را بکنیم.

یک تبصره وجود دارد. سرعت نور c یک سرعت حدی است. معنی این جمله این است که

- سرعت نور در *خلأ* یک سرعت حدی است.

در حقیقت، ذرات می‌توانند سریعتر از نور در ماده حرکت کنند البته تا زمانی که کندتر از سرعت نور در خلأ حرکت کنند. این موقعیت مرتبا مشاهده می‌شود.

در ماده جامد یا مایع، سرعت نور معمولا دو یا سه برابر از سرعت نور در خلأ کمتر است. برای برخی مواد خاص، سرعت نور از این هم می‌تواند کمتر باشد: در مرکز خورشید سرعت نور حدود 30 km/year = 1 mm/s تخمین زده می‌شود [۲۸]. حتی در آزمایشگاه برای برخی مواد، سرعت نور به اندکی 0.3 m/s اندازه‌گیری شده است [۲۹].

---

[۱]. بهترین مقدمات در مورد نسبیت همچنان مربوط به آلبرت انیشتین است. یک قرن زمان برد تا کتاب‌هایی در حد آن پدید آید از قبیل کتاب‌هایی توسط شوینگر، تیلور و ویلر [۲۵][۲۶].

هنگامی که یک هواپیما سریعتر از سرعت صوت در هوا حرکت کند، امواج شوک مخروطی‌شکل پشت سر آن تشکیل می‌شود [جلد اول صفحه ۳۲۶]. هنگامی که ذره باردار سریعتر از سرعت نور در ماده حرکت کند، تشعشعاتی مخروطی شکل به نام تابش واویلوف- چرنکوف نشر می‌دهد. تابش واویلوف- چرنکوف مکرراً مشاهده می‌شود. بعنوان نمونه همین پدیده موجب تابش آبی‌رنگ آب در رآکتورهای هسته‌ای شده و در یک پلاستیک شفاف که در مقابل ذرات پرسرعت قرار دارد ظاهر می‌شود. این اتصال در دتکتورهای مربوط به آزمایش‌های شتاب دهنده کاربرد دارد.

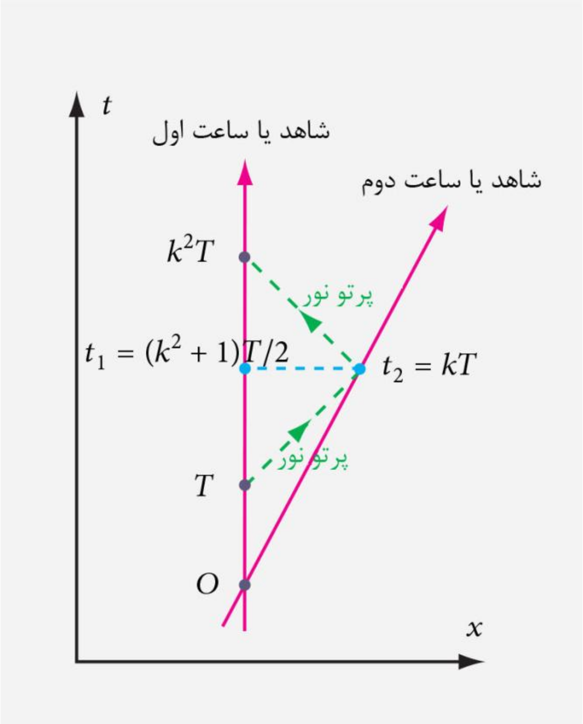
در این فصل و فصل بعد منظورمان از «سرعت نور»، سرعت نور در خلأ است. سرعت نور در هوا فقط با اختلاف یک درصد از سرعت در خلأ کمتر است، به همین علت در اکثر موارد اختلاف سرعت نور در هوا و خلأ نادیده گرفته می‌شود.

نسبیت خاص در چند سطر

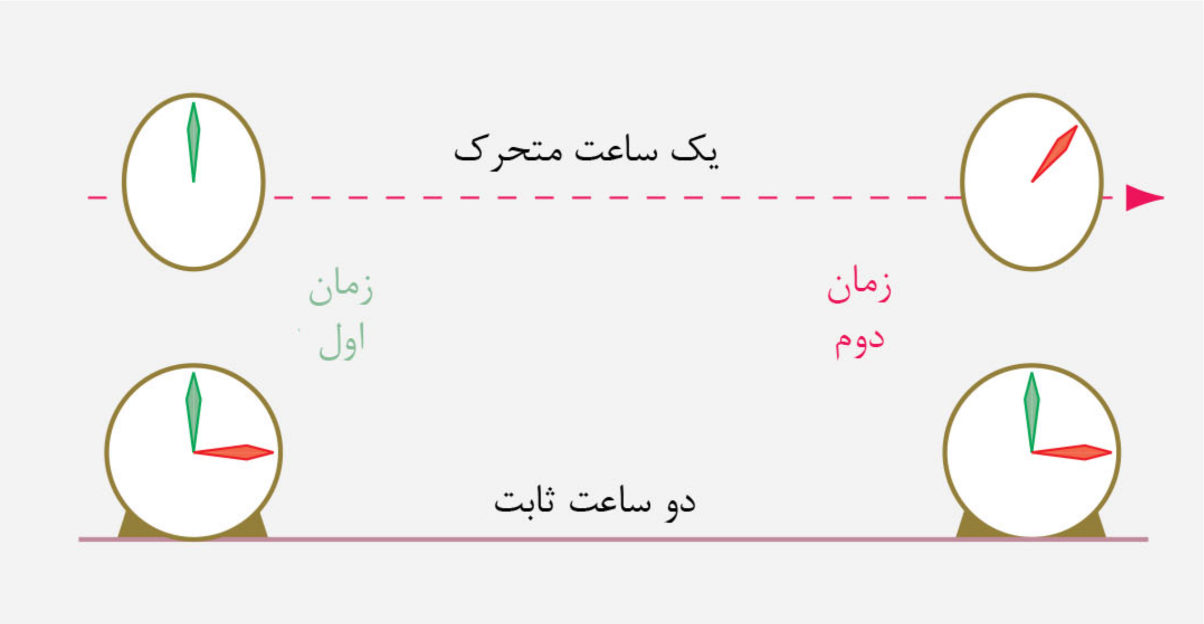
سرعت نور برای تمام شاهدها، ثابت و نامتغیر است. می‌توانیم با کمک شکل ۱۱ تمام تناسب‌هایی که بین دو شاهد برقرار است را استخراج کنیم [۳۰]. این شکل دو شاهد را نشان می‌دهد که با سرعت ثابت نسبت به یکدیگر در فضا-زمان حرکت می‌کنند. شاهد اول نوری را به سمت شاهد دوم ارسال می‌کند که از ناحیه شاهد دوم آن نور دوباره به سمت شاهد اول بازتاب داده می‌شود. از آنجا که سرعت نور نامتغیر است، نور تنها راه مقایسه مختصات زمان و فضا برای دو شاهد دور است. همچنین دو ساعت دور (مثل دو مترسنج دور) تنها با استفاده از نور یا انتشارات رادیویی می‌تواند مقایسه یا همگام‌سازی شود. چون سرعت نور نامتغیر است، در چنین نموداری تمام مسیرهای نور در جهت مشابه با هم موازی هستند.

یک سرعت نسبی ثابت بین دو شاهد بیانگر وجود یک ضریب ثابت k است که مختصات زمان اتفاق‌ها را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. (چرا این ارتباط خطی است؟ چالش ۱۶ د) اگر نور در زمان T برای شاهد اول حرکت کند، در زمان kT به شاهد دوم رسیده و سپس در زمان k^2T به شاهد اول باز می‌گردد چالش ۱۷ د. شکل نشان می‌دهد که

$$k=\sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \qquad \text{یا} \qquad \frac{v}{c}=\frac{k^2-1}{k^2+1} \qquad (۵)$$



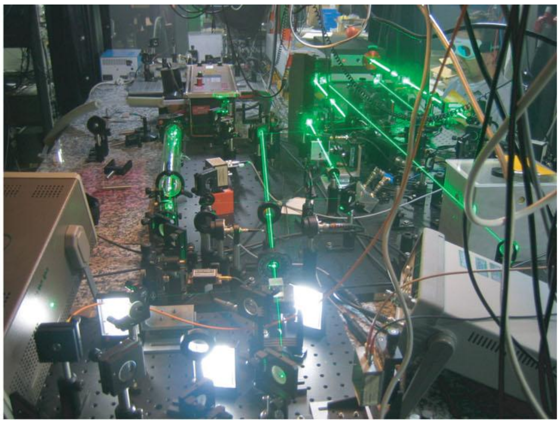
شکل ۱۱. این شکل بیشتر مباحث نسبیت خاص من جمله انقباض زمان و تبدیل لورنتس را توضیح می‌دهد.



شکل ۱۲. زمان برای ساعت متحرک کند می‌گذرد: ساعت‌های متحرک گذر زمان را کندتر از ساعت‌های ثابت نشان می‌دهند.

این ضریب در اثر دوپلر دوباره ظاهر خواهد شد[1] [صفحه ۳۱].

شکل ۱۱ هم نشان می‌دهد که شاهد اول برای هنگامی که پرتو نور بازتاب داده می‌شود زمان t_1 را اندازه می‌گیرد. اما شاهد دوم برای همان اتفاق زمان t_2 را محاسبه می‌کند. در واقع در صورت وجود حرکت نسبی، زمان برای دو شاهد *متفاوت* است. به این پدیده اتساع زمان می‌گویند. به عبارت دیگر زمان نسبی است. شکل ۱۲ روشی برای به تصویر کشیدن این نتیجه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. ساعت‌های متحرک کند می‌شوند: اتم‌های لیتیوم متحرک در یک حلقه ذخیره (چپ) با خوانش توسط لیزر (راست) این پدیده را در بالاترین دقت تأیید می‌کند (© TSR relativity team at the Max Planck Gesellschaft)

ضریب اتساع زمان بین دو شاهد از شکل ۱۱ با مقایسه t_1 و t_2 قابل محاسبه است؛ برابر است با:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(v) \qquad (۶)$$

---

۱. توضیح نسبیت با استفاده از ضریب k گاهی محاسبات k نامیده می‌شود.

بازه‌های زمانی برای شاهدان متحرک با نسبت ضریب γ کوتاه‌تر هستند؛ ضریب اتساع زمان همواره بزرگتر از ۱ است. به عبارت دیگر،

- ساعت‌های متحرک کندتر هستند.

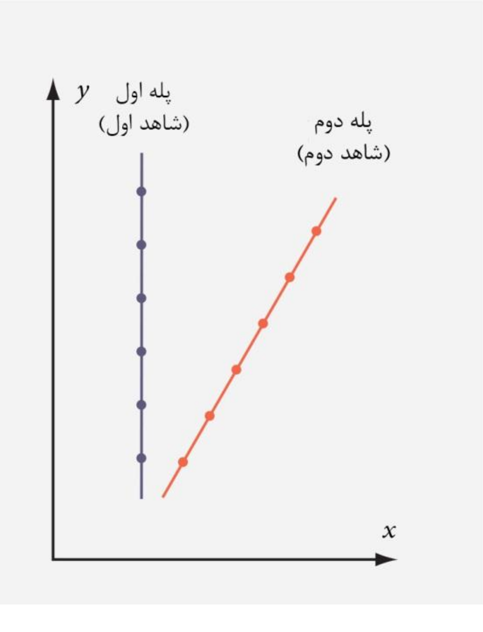
برای سرعت‌های روزمره این ضریب بسیار کوچک است [چالش ۱۸ آ]. برای همین است که در زندگی عادی این اختلاف زمان را حس نمی‌کنیم. به هر حال فیزیک گالیله‌ای برای سرعت‌های نزدیک به نور صحیح نیست؛ صحت عبارت (۶) با دقتی بیش از یک در ۱۰ میلیون توسط آزمایش شکل ۱۳ نشان داده شده است. ضریبی مشابه γ در رابطه $E = c^2\gamma m$ برای معادل جرم و انرژی لحاظ می‌شود که آن را استخراج خواهیم کرد. عبارت‌های (۵) و (۶) تنها اجزای ریاضی مورد نیاز در نسبیت خاص هستند: همه نتایج از اینها استخراج می‌شوند.

اگر پرتو نور از ناحیه شاهد دوم ارسال شود و دوباره بازتاب داده شود، عبارتی مشابه برای شاهد دوم رخ خواهد داد: برای شاهد دوم، ساعت اول در حال حرکت است و برای او هم ساعت متحرک زمان را کندتر نشان می‌دهد.

- هر یک از شاهدها ساعت شاهد دیگر را کندتر محاسبه می‌کند.

موقعیت مشابه دو نفر است که فواصل گام‌های دو نردبان کاملا مشابه ولی ناموازی را مقایسه می‌کنند همانند شکل ۱۴. شخصی که در هر یک از این نردبان‌هاست، فواصل گام‌های نردبان دیگر را کوتاه‌تر می‌بینند. برای اتساع زمان و انقباض طول، هیچ مثالی عمیق‌تر از این مشاهده نیست [۵۲].

طبیعتاً افراد زیادی تلاش کرده‌اند که برای نتیجه عجیب تفاوت زمان میان دو شاهد روشی پیدا کنند تا آن را به چالش بکشند. اما هیچکدام موفق نشدند و این نتیجه تأیید شد: زمان نسبی است. بگذارید نگاهی به این آزمایش‌ها بیاندازیم.



شکل ۱۴. شاهدین در هر دو نردبان ادعا می‌کنند که نردبان دیگر کوتاه‌تر است.

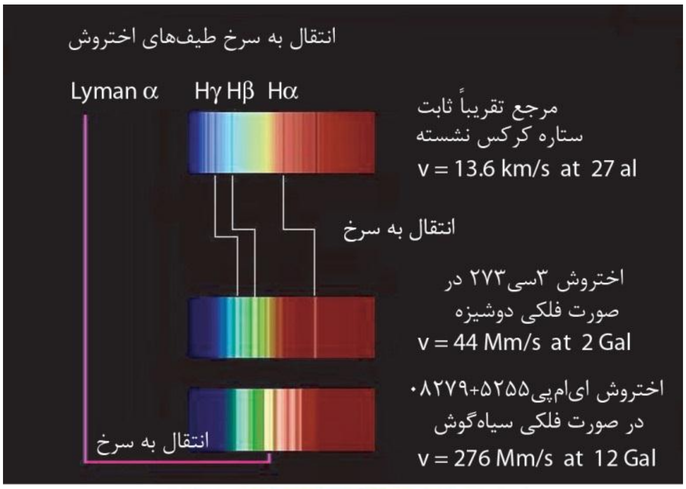
شتاب نور و اثر دوپلر

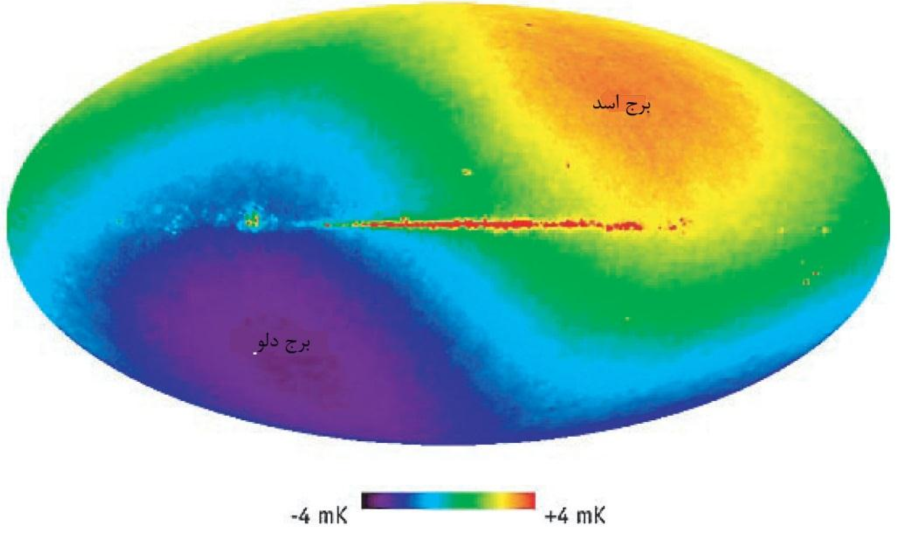
آیا نور در خلآ می‌تواند شتاب بگیرد؟ بستگی دارد منظورتان چه باشد. بیشتر فیزیکدانان مغرور هستند و می‌گویند هر آینه‌ای به نور شتاب می‌دهد چون جهت آن را تغییر می‌دهد. در فصل الکترومغناطیس خواهیم دید که ماده هم می‌تواند نور را خم کند پس دارد به آن شتاب

می‌دهد [جلد سوم صفحه ۱۵۸]. به هر حال همه این روش‌ها فقط جهت انتشار را عوض می‌کنند؛ هیچ کدام قدرت تغییر سرعت نور در خلأ را ندارند. نور نمونه‌ای از حرکت است که قابل توقف نیست. چند مثال دیگر هم هست. می‌توانید نام ببرید؟ [چالش ۱۹ د]

اگر می‌توانستیم سرعت نور را افزایش دهیم چه اتفاقی می‌افتاد؟ اگر همچین اتفاقی بخواهد رخ دهد نور می‌بایست از ذرات دارای جرم تشکیل شده باشد. اگر نور جرم داشت، باید «سرعت انرژی بدون جرم» c را از سرعت نور c_L تفکیک می‌کردیم که در این صورت مقدار آن کمتر و به انرژی جنبشی ذرات نور وابسته می‌بود. سرعت نور نامتغیر نمی‌بود ولی سرعت بدون جرم آن همچنان نامتغیر باقی می‌ماند. این ذرات نور دارای جرم قابل نگه داشتن و ذخیره در یک جعبه می‌بود. همچین جعبه‌هایی تابش الکتریکی را غیرضروری می‌نمود؛ کافی بود مقداری نور روز را در جعبه نگه می‌داشتیم و آن را در طول شب به آرامی آزاد می‌کردیم، البته احتمالا باید نیرو وارد می‌کردیم تا سرعت بگیرد.[1]

فیزیکدانان در برخی جزئیات، نور جرم‌دار را آزمایش کرده‌اند. از لحاظ آزمایش‌های زمینی، مشاهدات دانشمندان، برای جرم فوتون‌های نور کمتر از $1.3 \cdot 10^{-52}$ kg و از لحاظ آزمایش‌های کیهانی کمتر از $4 \cdot 10^{-62}$ kg محتمل می‌نماید. البته مورد اول کمی قانع‌کننده تر است. به عبارت دیگر، نور سنگین نیست، *نور سبک* است.

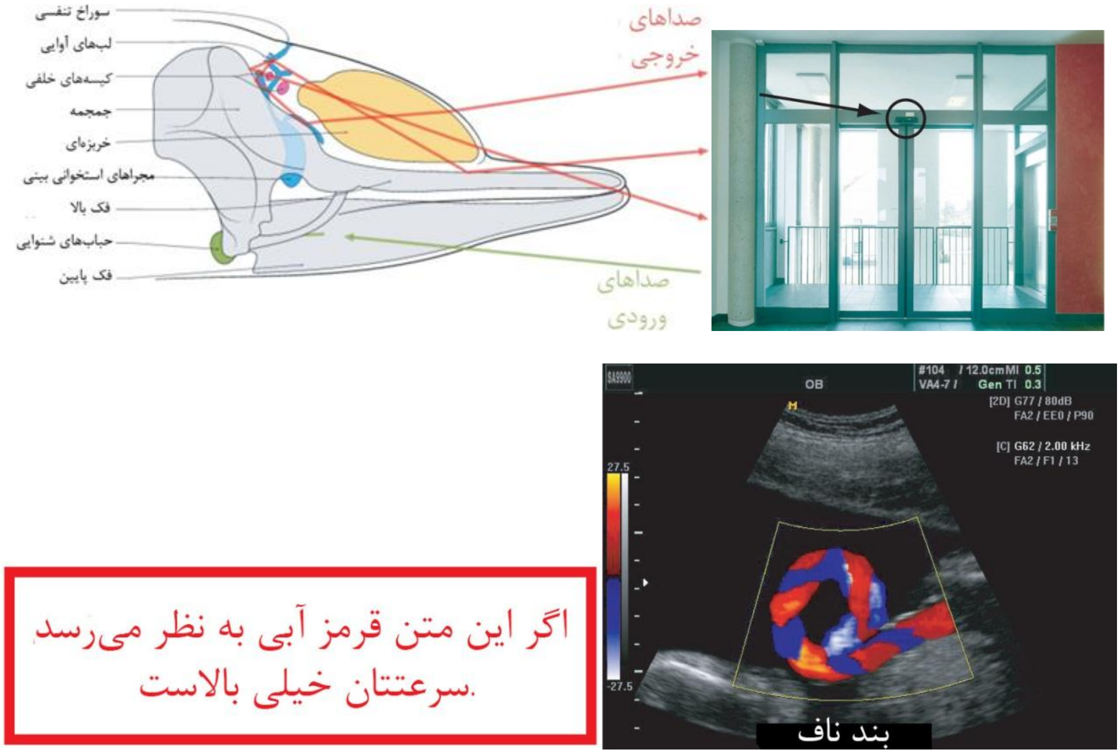




۱. ضمناً نور جرم‌دار می‌بایست از حالت‌های قطبش *طولی* برخوردار می‌بود. این موضوع با مشاهداتی که حاکی از *عرضی* بودن موج نور در جهت انتشار است، در تقابل است.

شکل ۱۵. بالا: اثر دوپلر برای نور در مورد دو اختروش. پایین: رنگ کاذب بزرگنمایی شده اثر دوپلر در مورد آسمان شب تقریبا سیاه – پس‌زمینه تشعشع کیهانی – به خاطر حرکت زمین در فضا. در مورد دوم اثر دوپلر بیانگر تغییری ناچیز در دمای موثر آسمان شب است.
(© Maurice Gavin, NASA)

اما اگر نور به یک آینه متحرک برخورد کند چه اتفاقی می‌افتد؟ وضعیت به شکلی است که منبع نور نسبت به دریافت‌کننده نور در حال حرکت است: دریافت کننده نسبت به فرستنده *رنگ متفاوتی* را مشاهده خواهد کرد. این تغییر فرکانش *اثر دوپلر* نامیده می‌شود. کریستیان دوپلر[1] اولین کسی بود که تغییر فرکانس را در مورد امواج صوتی مطالعه کرد.



شکل ۱۶. سیستم صوتی دوپلر در دولفین‌ها، سیستم اثر دوپلر در یک دربازکن کشویی، اثر دوپلر به عنوان هشداردهنده سرعت و سونوگرافی دوپلر برای تشخیص جریان خون (رنگی) در بند ناف یک جنین.

(© Wikimedia, Hörmann AG, Medison)

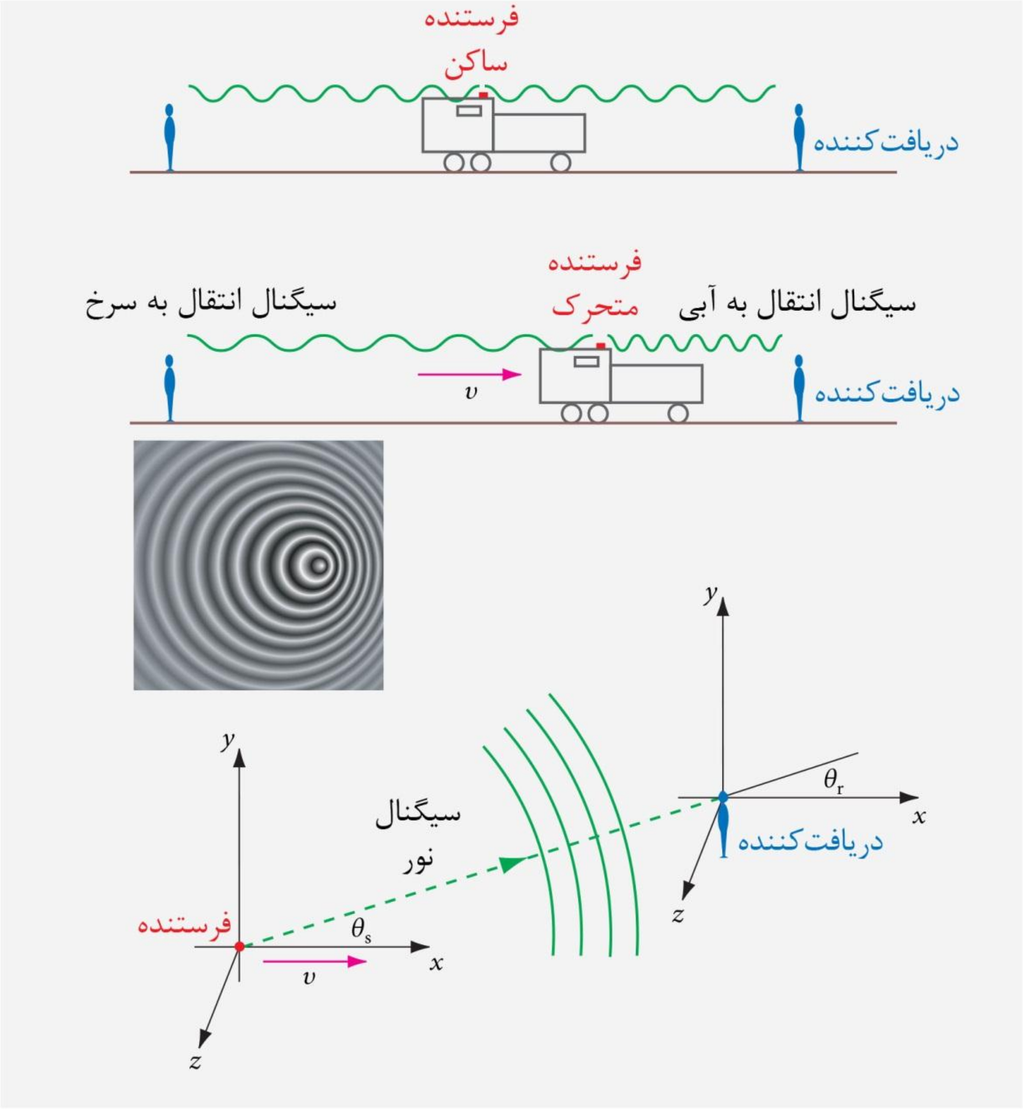
همه ما با تغییر تن صدای سوت قطار هنگامی که به ما نزدیک می‌شود نسبت به زمانی که از ما دور می‌شود آشنا هستیم: که بیانگر اثر دوپلر برای صوت است. به همین طریق می‌توانیم سرعت قطار را تعیین کنیم. خفاش‌ها، دولفین‌ها و وال‌ها با استفاده از اثر دوپلر در صوت، سرعت شکار را محاسبه می‌کنند، همچنین از این اثر برای اندازه‌گیری جریان خون و ضربان قلب کودک قبل از تولد با سیستم‌های مافوق صوت استفاده می‌شود (علی رغم اینکه برای کودک به شدت صدای بلندی است). همانگونه که در شکل ۱۶ می‌بینید [جلد اول صفحه ۳۱۲].

۱. کریستیان آندریاس دوپلر (متولد ۱۸۰۳ در زالتسبورگ اتریش و متوفی ۱۸۵۳ در ونیز ایتالیا)، فیزیکدان مشهور. دوپلر اثری را مطالعه کرد که در مورد صوت و نور به نام خود وی نام‌گذاری شد. او در سال ۱۸۴۲ بدرستی پیش‌بینی کرد که روزی با استفاده از این اثر می‌توانیم با مشاهده رنگ ستارگان دوردست، سرعت آن‌ها را محاسبه کنیم – علی رغم تأییدات آزمایشگاهی در سال‌های ۱۸۴۵ و ۱۸۴۶ – دوپلر در سال ۱۸۵۲ از آکادمی علوم پادشاهی اخراج شد. سلامتی وی رو به افول نهاد و کمی پس از آن درگذشت.

دوپلر همچنین اولین کسی بود که مبحث تغییر فرکانس را در مورد امواج نور به کار برد [جلد سوم صفحه ۱۰۷]. چنانکه خواهیم دید نور هم یک موج است و رنگ آن توسط فرکانس یا طول موج آن λ تعیین می‌شود. همانند تغییر تن صدای قطار متحرک، دوپلر دریافت که یک منبع نور متحرک برای دریافت کننده آن رنگ متفاوتی خواهد داشت. با هندسه مشابه و حفظ ماکزیمم و مینیمم به نتیجه زیر خواهیم رسید [چالش ۲۰ ه]

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

متغیرهای v و θ_r در شکل ۱۷ تعریف شده‌اند. بنابراین نور یک منبع نزدیک‌شونده، انتقال به آبی و نور یک منبع دورشونده، انتقال به سرخ است.



شکل ۱۷. مشاهده یک بعدی و سه بعدی اثر دوپلر: امواج منتشر شده توسط یک منبع نزدیک‌شونده بر خلاف یک منبع دورشونده با فرکانس بالاتر و طول موج کوتاه‌تر دریافت می‌شوند. (wave graph © Pbroks13)

اولین مشاهده اثر دوپلر برای نور یا جابه‌جایی رنگ توسط یوهانس اشتارک[1] در سال ۱۹۰۵ انجام شد. اشتارک نور ساطع شده از اتم‌های در حال حرکت را مطالعه می‌کرد. تمام آزمایش‌های بعدی میزان تغییر رنگ محاسبه شده در خطاهای محاسباتی را تأیید نمود [۳۴]. آخرین بررسی‌ها مطابقت را با دقت ۲ در یک میلیون تأیید نمود.

بر خلاف امواج صوت، تغییر رنگ در زمانی که جهت حرکت عمود بر جهت سیگنال نور باشد نیز قابل مشاهده است. بنابراین یک میله زرد با حرکت سریع در میدان دید، در نزدیک‌ترین حالت به ناظر، نوک آبی و انتهای قرمز خواهد داشت. رنگ‌ها نتیجه ترکیب تغییر دوپلر طولی (درجه اول) و تغییر دوپلر عمودی (درجه دوم) خواهد بود. (تغییر در طول موج در مورد عمودی خالص چگونه خواهد بود؟ عبارت $\theta_{\text{unshifted}}$ بر اساس سرعت v چه خواهد شد؟) چالش ۲۱ س

تغییر رنگ یا فرکانس دوپلر کاربردهای زیادی دارد. تقریباً تمام اجسام جامد برای امواج رادیویی آیینه هستند. یک حسگر کوچک بالای درب، فرد نزدیک شونده را تشخیص می‌دهد. با اندازه‌گیری تغییرات اثر دوپلر امواج رادیویی ساطع شده از حسگر و بازتاب شده توسط فرد این کار فراهم می‌شود. (خواهیم دید که امواج رادیویی و نور نمودهایی از یک پدیده مشابه هستند [جلد سوم صفحه ۱۰۹].) بنابراین وقتی چیزی به یک درب اتوماتیک نزدیک شود، در باز می‌شود. دوربین کنترل سرعت پلیس هم برای اندازه‌گیری سرعت خودروها از اثر دوپلر کمک می‌گیرد.[2]

همانگونه که توسط خود دوپلر پیش‌بینی شده بود، اثر دوپلر معمولا برای اندازه‌گیری سرعت ستارگان دوردست به کار می‌رود چنانکه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این موارد تغییر دوپلر با عدد تغییر قرمز z تعیین می‌شود که به کمک طول موج λ یا فرکانس f تعریف می‌شود:

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

آیا می‌دانید چگونه می‌توان مقدار z را تعیین نمود؟ [چالش ۲۳ د]. معمولا برای منابع نوری آسمان مقدار z بین -0.1 تا 3.5 است اما مقادیر بالاتر از ۱۰ هم یافت شده است. آیا می‌توانید سرعت‌های مربوطه را محاسبه کنید؟ چگونه می‌توانند چنین مقادیر بالایی داشته باشند؟ [چالش ۲۴ د]

بدلیل چرخش خورشید و اثر دوپلر یک لبه خورشید دارای انتقال به آبی و لبه دیگر دارای انتقال به سرخ است [۳۵]. از این طریق می‌توان سرعت چرخش خورشید به دور خود را محاسبه نمود. بسته به طول جغرافیایی چرخش خورشید بین ۲۷ تا ۳۳ روز طول می‌کشد. اثر دوپلر نشان می‌دهد که سطح خورشید با دوره تناوب ۵ دقیقه نوسان می‌کند.

حتی سرعت چرخش کهکشان ما هم با محاسبه اثر دوپلر ستارگان آن محاسبه شده است. کیهان‌شناسان کشف کرده‌اند که ۲۲۰ میلیون سال طول می‌کشد تا خورشید حول مرکز کهکشان یک دور بچرخد.

واقعا چه اتفاقی می‌افتد اگر کسی تلاش کند که با نور و با استفاده از راکت‌هایی که با سرعت واقعا بالا حرکت می‌کنند تنیس بازی کند؟ سرعت نسبیتی خواهد بود. چنین تنیس باز مشتاقی در واقع موجود است؛ سریع‌ترین راکت تنیسی که تا به حال ساخته شده است

---

۱. یوهانس اشتارک (متولد ۱۸۷۴در فرایهونگ فعلی آلمان و متوفی ۱۹۵۷ در تروان‌اشتاین آلمان)، در سال ۱۹۰۵ اثر دوپلر نوری را در اشعه‌های کانالی کشف کرد و در سال ۱۹۱۳ شکافت خطوط طیفی در میدان‌های الکتریکی را کشف نمود که امروزه به اثر اشتارک معروف است. به خاطر این دو اکتشاف در سال ۱۹۱۹ جایزه نوبل در فیزیک را دریافت نمود. وی در سال ۱۹۲۲ کرسی استادی را رها نمود و به یک نازیست تمام عیار تبدیل شد. از سال ۱۹۳۰ به بعد عضو NSDAP (حزب نازیسم) گردید و مشهور بود که تنها به دلایل ایدئولوژیک به جملات دیگران می‌تازد. پس از آن به درستی از سوی جامعه دانشگاهی تمام جهان در زمان حیاتش مورد نفرت قرار گرفت.

۲. در چه سرعتی چراغ راهنمای قرمز، سبز به نظر خواهد آمد؟ چالش س د

سرعتی بیش از ۸۰ درصد سرعت نور را دارا بوده است. این دسته‌های تنیس در سال ۲۰۱۳ با تاباندن پالس‌های فوق‌العاده قدرتمند و کوتاه لیزر با توان 0.6ZW و زمان 50fs به یک تراشه ۱۰ نانومتری کربن الماسی تولید شد. چنین پالس‌هایی، ابر الکترونی مسطح و سریعی را در خلا ساطع می‌کند؛ در یک زمان کوتاه این ابر الکترونی همچون یک *آینه نسبیتی* عمل می‌کند. هنگامی که اشعه لیزر دوم از این راکت نسبیتی ساطع شود، سرعت نور بدون تغییر می‌ماند اما فرکانسش تا حدود ۱۴ برابر افزایش می‌یابد و رنگ لیزر را از نزدیک مادون قرمز به ماورای بنفش شدید تغییر می‌دهد. این آینه الکترونی نسبیتی، بازتابشی بسیار کمتر از یک درصد را داراست به همین دلیل طول عمر آن فقط چند پیکو ثانیه و اندازه آن حدود ۲ میکرون است؛ بنابراین راکت نامیدن آن کمی اغراق‌آمیز است.

به طور خلاصه، هر موقع بخواهیم سرعت نور در خلأ را تغییر دهیم فقط می‌توانیم رنگ آن را عوض کنیم. و همانگونه که نشان دادیم تغییر رنگ به هیچ وجه سرعت نور را تغییر نمی‌دهد [صفحه ۲۲].

اندازه‌گیری‌های دوپلر مدرن بسیار دقیق هستند. به علت سیاره‌هایی که به دور خورشید می‌چرخند، سرعت خورشید نسبت به زمین بیش از 9 cm/s است. امروزه انتقال دوپلر ناشی از میزان سرعت را معمولاً با استفاده از لیزر خاصی به نام *شانه فرکانسی* اندازه می‌گیرند. این وسیله امکان اندازه‌گیری فرکانس‌های نوری حدود یک هرتز را فراهم می‌کند. شانه‌های فرکانسی، سرعت‌های کمتر از این هم با استفاده از اثر دوپلر القا شده اندازه می‌گیرند [۳۷]. این روش معمولا برای یافتن سیاراتی که به دور ستارگان دور دست می‌چرخند استفاده می‌شود.

ارتباط بین تغییر رنگ و تلاش برای شتاب دادن به نور معمایی را شکل داده است [جلد اول صفحه ۲۰۱]: از فیزیک کلاسیک می‌دانیم هنگامی که نور از اجرام بزرگی همچون یک ستاره عبور می‌کند، بازتابیده می‌شود. آیا این بازتابیدن موجب انتقال دوپلر می‌شود؟

تفاوت بین نور و صوت

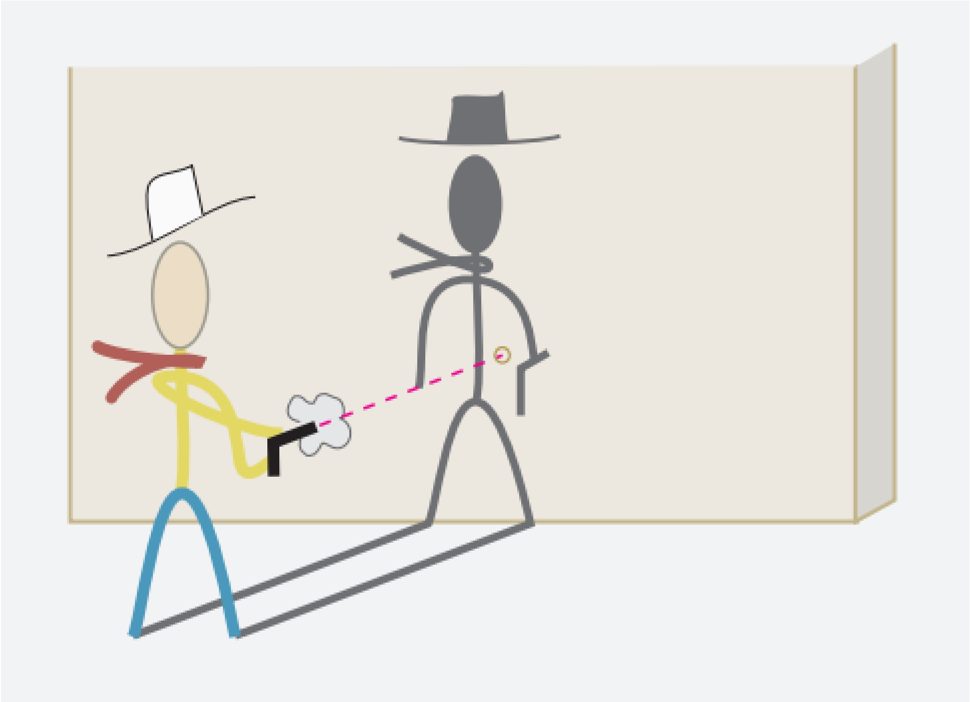
اثر دوپلر برای نور بسیار اساسی‌تر از اثر دوپلر برای صوت است. حتی اگر نمی‌دانستیم که سرعت نور نامتغیر است، اثر دوپلر به تنهایی ثابت می‌کرد که زمان برای ناظرهای مختلف که نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، متفاوت است. چرا؟

زمان چیزی است که از روی ساعت می‌خوانیم. برای اینکه بدانیم که ساعت دیگری با ساعت ما هماهنگ است به هر دو ساعت نگاه می‌کنیم. به طور خلاصه برای تنظیم ساعت‌ها نیاز داریم از سیگنال نور استفاده کنیم [۳۸]. با این احتساب هر تغییری در رنگ نور برای ناظری نسبت به ناظر دیگر به این معناست که ساعت هر یک متفاوت عمل کرده و زمان برای هر یک *متفاوت* است. در نظر داشته باشیم که خود منبع نور نیز یک ساعت است که به سرعت زیادی تیک‌تاک می‌کند. بنابراین اگر دو ناظر یک منبع نور را با رنگ متفاوت می‌بینند در واقع تعداد نوسان متفاوتی از همان ساعت را در پیش خود اندازه می‌گیرند. به عبارت دیگر زمان برای ناظرینی که نسبت به هم متحرک هستند متفاوت است [صفحه ۲۹]. در واقع معادله ۵ برای اثر دوپلر بیانگر کل نسبیت خاص شامل نامتغیر بودن سرعت نور است. (آیا می‌توانید ارتباط بین وابستگی فرکانس به ناظر و وابستگی زمان به ناظر در مورد اثر دوپلر برای صوت تأیید کنید؟ چالش ۲۶ د)

چرا رفتار نور، نسبیت خاص را نتیجه می‌دهد ولی برای صوت در هوا همچین نتیجه‌ای حاصل نمی‌شود؟ هواپیماهای مافوق صوت وجود دارند اما موشک‌های مافوق نور خیر. به عبارت دیگر حد $v \leqslant c$ تنها اگر c سرعت نور باشد صحیح است نه اگر سرعت صوت در هوا باشد.

به هر حال، حداقل یک سیستم در طبیعت وجود دارد که بر اساس آن سرعت صوت حد سرعت انتقال انرژی است: حد جابه‌جاشدگی در کریستال‌های جامد، سرعت صوت است. (در آینده در مورد این حرکت با جزئیات صحبت خواهیم کرد جلد ۵ صفحه ۲۹۸.) در نتیجه نظریه نسبیت خاص برای تمام جابه‌جاشدگی‌ها صحیح است منوط به اینکه سرعت نور با سرعت صوت جایگزین شود! در حقیقت جابه‌جاشدگی‌ها تابع تبدیلات لورنتز هستند [۳۹]، دارای انقباض طول هستند و از فرمول معروف $E = c^2\gamma m$ پیروی می‌کنند. در تمام این اثرات، سرعت صوت c نقشی مشابه جابه‌جاشدگی‌ها در مورد سرعت نور در سیستم‌های نسبیت عام بازی می‌کند.

با توجه به این بیان که هیچ چیز نمی‌تواند سریعتر از نور حرکت کند، نیاز داریم که این گفته را به دقت بررسی کنیم.



شکل ۱۸. لوک خوش‌شانس

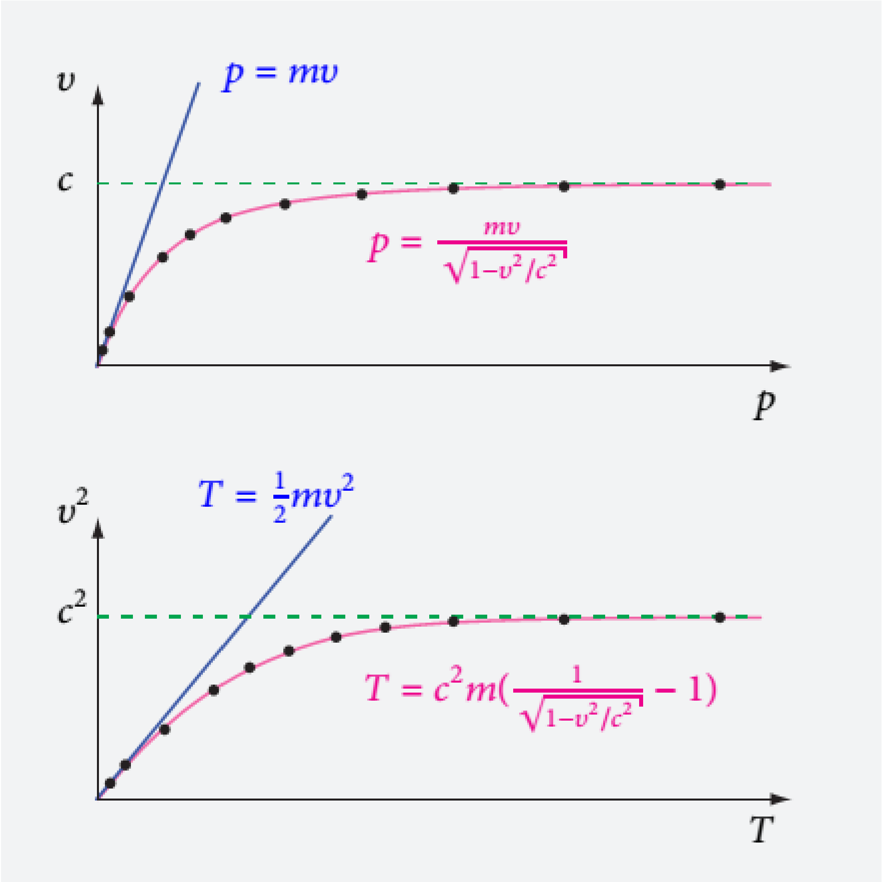
آیا کسی می‌تواند سریعتر از سایه‌اش شلیک کند؟

برای اینکه لوک خوش‌شانس به این پیروزی نشان داده شده در شکل ۱۸ دست یابد، باید گلوله‌اش سریع‌تر از نور حرکت کند. چالش ۲۷ آ. (دستانش چطور؟) برای رقابت با لوک خوش‌شانس می‌توانیم بزرگترین انواع انرژی‌های عملی را به کار ببریم و این انرژی را مستقیماً از یک نیروگاه برق تأمین کنیم و سبک‌ترین گلوله در دسترس یعنی الکترون را شتاب دهیم. این آزمایش هر روز در شتاب‌دهنده‌های ذرات انجام می‌شود؛ بعنوان نمونه حلقه بزرگ الکترون پوزیترون LEP که دارای محیطی برابر ۲۷ کیلومتر است و بخشی از آن در فرانسه و بخشی دیگر در سوئیس نزدیک ژنو واقع است. در آنجا 40 MW انرژی الکتریکی (به اندازه مصرف یک شهر کوچک) برای شتاب دادن به الکترون‌ها و پوزیترون‌ها به کار رفت تا انرژی‌هایی بیش از 16 nJ (104.5 GeV) به هر ذره داده شد و سرعت‌شان اندازه‌گیری شد. نتیجه در شکل ۱۹ نشان داده شده است: حتی با این تجهیزات خیره‌کننده غیرممکن است که الکترون سریعتر از نور حرکت کند. (آیا می‌توانید روشی را تصور کنید که بتوان سرعت و انرژی جنبشی را بطور جداگانه اندازه‌گیری کرد؟ چالش ۲۸ آ)

رابطه سرعت–انرژی که در شکل ۱۹ نشان داده شده و نتایج حداکثر سرعت و جزئیات دقیق آن در ذیل آمده است صفحه ۶۹. بنابراین این‌ها و مشاهدات مشابه بیانگر این است برای سرعت اجسام و تابش حدی وجود دارد. اجسام و تشعشعات نمی‌توانند با سرعت بیش از نور حرکت کنند. [۱] دقت مکانیک گالیله‌ای برای دو قرن مورد پذیرش بود و هیچکس در مورد آن فکر نمی‌کرد. تا اینکه مطابق شکل ۱۹ مشخص شد که اشتباه است.

---

۱. همچنان افرادی هستند که از پذیرش این نتایج و پس‌آیندهای نظریه نسبیت سرباز می‌زنند. هر خواننده حداقل برای یکبار در زندگی می‌بایست از گفتگو با این مردان لذت ببرد. (به طرز عجیبی تا به حال هیچ زنی گزارش نشده که جزء این گروه باشد. علی رغم این تاثیر واضح، مطالعه تاثیر جنسیت بر علم فیزیک تقریبا اتلاف وقت است.) [۴۱]
این دیوانه‌ها را می‌توانید از طریق اینترنت در گروه خبری دانش–فیزیک–نسبیت بیابید. [۴۲] وبسایت www.crank.net هم مشاهده کنید. دیوانه‌هاگاهی جذاب هستند عمدتاً چون اهمیت دقت در زبان و استدلال را به رخ می‌کشند؛ چیزی که همه آن‌ها بدون استثنا نادیده می‌گیرند.



شکل ۱۹. مقادیر آزمایشگاهی (نقطه‌های سیاه) برای سرعت الکترون v به صورت تابعی از اندازه حرکت p و به صورت تابعی از انرژی جنبشی T. پیش‌بینی‌های فیزیک گالیله‌ای (آبی) و پیش‌بینی‌های نسبیت خاص (قرمز) نشان داده شده‌اند.

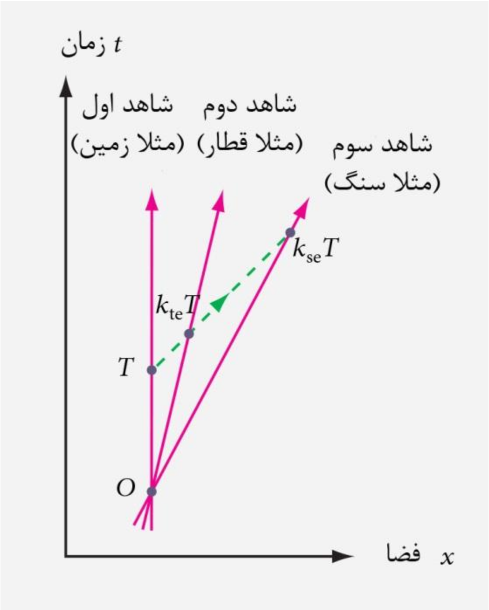
هنگامی که اندازه حرکت را به جای انرژی در نظر بگیریم، نتیجه مشابهی بدست می‌آید. شتابدهنده‌های ذرات نشان می‌دهند که اندازه حرکت با سرعت رابطه خطی ندارد: در سرعت‌های بالا دو برابر کردن اندازه حرکت، منجر به دو برابر شدن سرعت نمی‌شود. به طور خلاصه، آزمایش‌ها نشان می‌دهند که نه با افزایش انرژی و نه با افزایش اندازه حرکت حتی برای سبک‌ترین ذرات نمی‌توان به سرعت نور دست یافت. ناراحت‌ترین افراد به خاطر این محدودیت در سرعت مهندسان کامپیوتر هستند: اگر حد سرعت بالاتر بود می‌شد ریزپردازنده‌های سریعتر و بنابراین کامپیوترهای پرسرعت‌تر تولید نمود. برای مثال سریعتر می‌شد کامپیوتری ساخت که بتواند زبان انسان را بفهمد و آن را به کار گیرد.

وجود یک حد سرعت با مکانیک گالیله‌ای مقابله می‌کند. در واقع به این معناست که برای سرعت‌های نزدیک سرعت نور مثلا حدود 15000 km/s یا بیشتر، عبارت $mv^2/2$ با انرژی جنبشی T ذره برابر نیست. در حقیقت چنین سرعت‌هایی تقریبا رواج دارند: بسیاری از خانواده‌ها چنین نمونه‌ای در خانه دارند. فقط سرعت الکترون درون یک لامپ پرتو کاتدی درون یک تلویزیون رنگی قدیمی را محاسبه کنید با این احتساب که ترانسفورماتور درون آن 30 kV تولید می‌کند. چالش ۲۹ د

سرعت نور حدی است برای سرعت اجسام. این خاصیت را باید بعنوان نتیجه *نامتغیر* بودن سرعت نور تلقی کرد. اجسامی که از یک نظرگاه می‌توانند ساکن باشند در آن مرجع بوضوح آهسته‌تر از سرعت نور حرکت می‌کنند. حال اگر چیزی آهسته‌تر از چیز دیگر برای یک ناظر حرکت می‌کند، برای دیگر ناظران نیز چنین خواهد بود. (تصور جهانی که چنین چیزی در آن برقرار نباشد جالب خواهد بود چالش ۳۰ د: پدیده‌های عجیبی رخ می‌داد، مثل اینکه اجسام در حال فرورفتن در یکدیگر دیده شوند.) چون سرعت نور برای تمام ناظران یکسان است، هیچ جسمی نمی‌تواند سریعتر از نور باشد، برای همه ناظران.

نتیجه می‌گیریم که

- حداکثر سرعت، سرعت پدیده‌های بدون جرم است.



شکل ۲۰. نحوه استخراج اجزای سرعت.

امواج الکترومغناطیس، شامل نور و امواج گرانش تنها پدیده‌هایی هستند که با حداکثر سرعت حرکت می‌کنند. گرچه سرعت نوترینوها به لحاظ آزمایشگاهی از حداکثر سرعت قابل تفکیک نیست ولی آزمایش‌های اخیر نشان می‌دهد که جرم اندکی دارند.

بطور معکوس اگر پدیده‌ای وجود دارد که سرعت آن برای یک ناظر سرعت حدی است پس این سرعت حدی باید برای تمام ناظران یکسان باشد چالش ۳۱ آ. آیا ارتباط بین مشخصه حدی و نامتغیر بودن ناظر در طبیعت بطور کلی صحیح است؟ چالش ۳۲ پ.

اجزای سرعت‌ها

اگر سرعت نور یک حد است پس تلاش برای سرعت بیشتر نتیجه‌ای نخواهد داشت. این موضوع بیانگر این است که هنگامی که سرعت‌ها ترکیب شوند مثلا هنگامی که در حین حرکت یا سواره سنگی را پرتاب کنید، سرعت‌ها به سادگی به هم افزوده نمی‌شوند. قطاری را تصور کنید که با سرعت v_{te} نسبت به زمین در حال حرکت است. یک مسافر سنگی را درون قطار با سرعت v_{st} در همان جهت نسبت به قطار پرتاب می‌کند. معمولا فرض می‌شود که سرعت سنگ نسبت به زمین با رابطه $v_{se} = v_{st} + v_{te}$ حاصل می‌شود. در واقع هم استدلال و هم اندازه‌گیری نتیجه متفاوتی نشان می‌دهد.

وجود یک سرعت حداکثر به همراه شکل ۲۰ بیانگر این است که ضرایب k باید شرط $k_{se} = k_{st}k_{te}$ را ارضا کند.[1] [صفحه ۲۶] سپس تنها نیاز داریم که رابطه ۵ را بین هر ضریب k و سرعت مربوطه وارد کنیم تا رابطه زیر حاصل شود: چالش ۳۳ آ

۱. با گرفتن لگاریتم طبیعی از این معادله می‌توان مقدار و اندازه سرعت را تعریف نمود که شامل سرعت و میزان افزوده شده است.

$$v_{se} = \frac{v_{st} + v_{te}}{1 + v_{st}v_{te}/c^2} \qquad (9)$$

به این رابطه فرمول اجزای سرعت گفته می‌شود. چالش ۳۴ آ نتیجه هیچوقت از c بزرگتر نخواهد بود و همیشه از جمع ساده سرعت‌ها کوچکتر است.[1] صحت رابطه ۹ در هر یک از میلیون‌ها آزمایش انجام گرفته تأیید شده است [صفحه ۶۸]. جمع ساده سرعت‌ها برای موارد روزمره تقریب خوبی از همین رابطه است [۱۸].

ناظرها و اصل نسبیت خاص

نسبیت خاص بر اصل ساده‌ای بنا شده است:

- حداکثر سرعت انتقال محلی انرژی برای تمام ناظرها یکسان است.

یا معادل آن چیزی که هندریک لورنتز[2] بیان داشته است [۴۶]:

- سرعت v یک سیستم فیزیکی با رابطه زیر محدود می‌شود

$$v \leqslant c \qquad (10)$$

برای تمام ناظرها و c سرعت نور است.

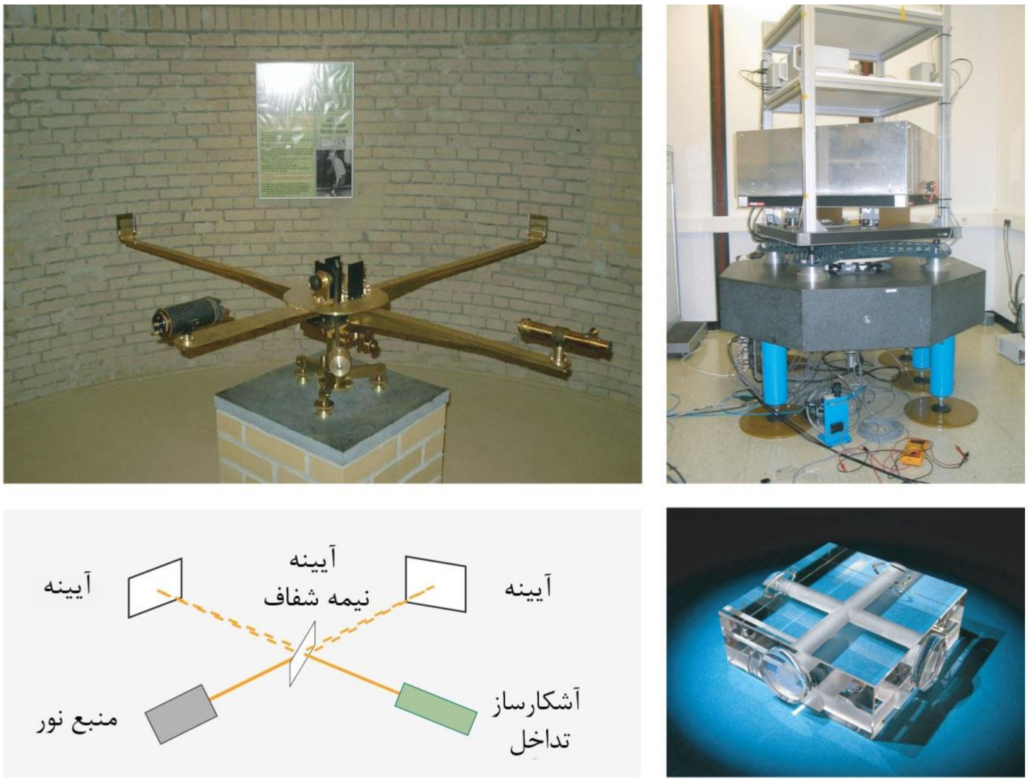
نامتغیر بودن سرعت نور از دهه ۱۸۵۰ معلوم بود زیرا عبارت $c = 1/\sqrt{\varepsilon 0 \mu 0}$ شناخته شده برای متخصصین حوزه الکتریسیته به سرعت ناظر یا منبع نور و نه جهت یا موقعیت وابسته نیست [جلد سوم صفحه ۱۰۷]. نامتغیر بودن c شامل عدم وابستگی به سرعت توسط آزمایش‌های مختلف نوری تعیین شده بود آزمایش‌هایی از قبیل منشور متحرک، آب متحرک، اجسام با ضریب شکست متفاوت، تداخل اشعه‌های نور متحرک در جهات مختلف، تداخل اشعه‌های نوری در گردش یا نور ناشی از ستارگان متحرک. نامتغیر بودن توسط آزمایش‌های الکترومغناطیسی که از عایق متحرک در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بهره می‌بردند هم ثابت شد.[3] همه آزمایش‌ها چه آزمایش‌های قبل و چه آزمایش‌های بعد از ارائه نسبیت خاص بدون استثنا نشان دادند که سرعت نور در خلا نامتغیر است. آزمایشی که توسط آلبرت مایکلسون انجام شد و نسخه بادقت بالا و امروزی آن که توسط استفان شیلر و تیمش انجام شد در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همه همچنین آزمایش‌هایی هیچ تغییری را در سرعت نور با حرکت زمین و در دقت اندازه‌گیری حدود دو قسمت در 10^{-17} یافت نکردند [۴۹]. عدم تغییر سرعت نور را خودتان نیز می‌توانید در منزل تأیید کنید؛ روش انجام در بخش الکترودینامیک شرح داده شده است [جلد سوم صفحه ۵۳].

---

۱. انتقال لورنتز را بطور مستقیم می‌توان از این رابطه استخراج نمود.

۲. هندریک آنتون لورنتز (متولد ۱۸۵۳ ارنهم و متوفی ۱۹۲۸ هارلم هلند) به همراه بولتزمن و کلوین یکی از مهمترین فیزیکدانان زمان خودش بود. او رابطه موسوم به تبدیلات لورنتز و انقباض لورنتز را از معادلات میدان الکترومغناطیس ماکسول استخراج کرد. او اولین کسی بود که مدت ها پیش از نظریه کوانتوم دریافت که معادلات ماکسول در خلأ، ماده و خواص آن را تا مادامی که ذرات متحرک باردار هستند نیز توصیف می‌کند (الکترون نیز شامل می‌شود). او این موضوع را برای پاشندگی نور، اثر زیمان، اثر هال و اثر فاراده نشان داد. وی همچنین توصیف صحیح نیروی لورنتز را ارائه کرد. لورنتز در سال ۱۹۰۲ به همراه پیتر زیمان جایزه نوبل گرفت. غیر از فیزیک در زمینه جهانی شدن همکاری‌های علمی فعالیت داشت. او همچنین در خلق بزرگترین سازه دست انسان بر زمین یعنی خلیج زایدرزی مشارکت داشت.

۳. همه این آزمایش‌ها که انیشتین در مقاله ۱۹۰۵ خود به آن‌ها ارجاع داده بود [۴۷] شامل فهرست کاملی است از فیزیکدانان قرن نوزدهم [۴۸] مثل ویلهلم رونتگن، الکساندر ایچنوالد، فرانسوا آراگو، اُگوستَن-ژان فِرنل، ایپولیت فیزو، مارتین هوئک، هارولد ویلسون، آلبرت مایکلسون (اولین آمریکایی برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۷)، ادوارد مورلی، الیور لوج، جان استرات ریلی، ویت براس، ژرژ ساینا‌ک، ویلم دو سیتر و ...



شکل ۲۱ آزمایش نامتغیر بودن سرعت نور با حرکت ناظر: نسخه بازسازی شده اولین آزمایش توسط آلبرت مایکلسون در پوتسدام که در سال ۱۸۸۱ انجام شد و یک نسخه مدرن با دقت بالا با اساس کار لیزر که فاصله‌های آیینه را با ثابت کمتر از شعاع الکترون نگه می‌دارد و کل آزمایش بطور ثابت حول یک محور عمودی بطور ثابت می‌چرخد.

(© Astrophysikalisches Institut Potsdam, Stephan Schiller)

وجود یک سرعت حدی نامتغیر چند نتیجه مهم در بر دارد. برای کنکاش این نتایج اجازه دهید فیزیک گالیله‌ای را دست‌نخورده باقی بگذاریم[1]. خاصیت حدی و نامتغیر بودن سرعت نور بطور ضمنی بیان می‌دارد:

- در یک اتاق بسته آزاد و شناور (لخت)، هیچ راهی برای بیان سرعت وجود ندارد. یا همانگونه که گالیله در کتاب Dialogo می نویسد: il moto [...] niente opera ed è come s’ e’ non fusse . حرکت [...] هیچ اثری ندارد و بگونه‌ای رفتار می‌کند که انگار وجود ندارد. گاهی این جمله با این عبارت کوتاه می‌شود: *حرکت مثل هیچ چیز است*.
- هیچ مفهومی برای سکون کامل وجود ندارد: سکون وابسته به ناظر است و یک مفهوم *نسبی* است.[2]
- طول و فضا به ناظر وابسته هستند؛ طول و فضا مطلق نیستند بلکه نسبی هستند.
- زمان به ناظر وابسته است؛ زمان مطلق نیست بلکه نسبی است.

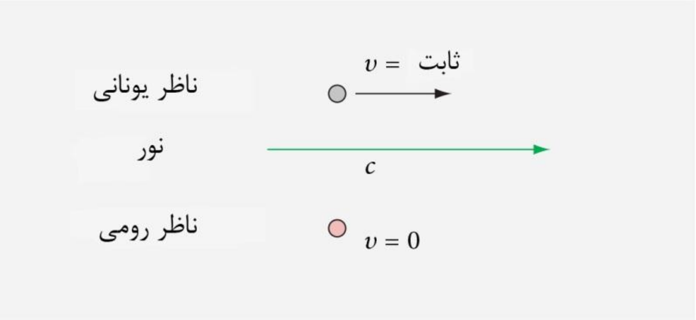
---

۱. این نکته اساسی است. برای مثال فیزیک گالیله‌ای بیان می‌دارد که تنها حرکت نسبی قابل مشاهده است [جلد اول صفحه ۱۵۶]. فیزیک گالیله‌ای همچنین روش‌های مختلف ریاضیاتی ممکن برای فهم یک سرعت نور ثابت که مشاهدات زندگی روزمره را نقض می‌کند را در بر نمی‌گرد.

مقاله اصلی سال ۱۹۰۵ انیشتین با دو اصل شروع می‌شود: نامتغیر بودن سرعت نور و هم‌ارزی یا نسبیت برای همه ناظران مرجع لخت. اصل دوم از قبل در سال ۱۶۳۲ توسط گالیله بیان شده بود؛ فقط نامتغیر بودن سرعت نور جدید بود. علی رغم این واقعیت، نظریه جدید به جای «نظریه نامتغیر بودن» که انیشتین ترجیح می‌داد توسط پوانکاره همانند اصل قدیم، نسبیت نامگذاری شد [۲۳].

۲. آیا می‌توانید بحث دقیقی برای این استنباط ارائه دهید؟ چالش ۳۵ د

➢ جرم و انرژی معادل هستند.



شکل ۲۲. دو ناظر لَخت و یک اشعه نور. هر دو سرعت یکسانی را برای سرعت نور c اندازه می‌گیرند.

با افزودن دو شرط اضافه می‌توانیم نتایج خاص بیشتری را درک کنیم. ابتدا موقعیت‌هایی که گرانش ناچیز است را بررسی می‌کنیم. (اگر این شرایط حاکم نباشد برای توصیف سیستم به نسبیت *عام* نیاز خواهیم داشت). ثانیا فرض می‌کنیم داده‌های اجسام مورد مطالعه مثل سرعت، مکان و غیره بدون تداخل قابل استحصال است. (اگر این شرایط حاکم نباشد برای توصیف سیستم به *نظریه کوانتوم* نیاز خواهیم داشت).

بازه‌های زمان و طولی که توسط دو ناظر اندازه‌گیری می‌شوند دقیقا چقدر اختلاف دارند؟ برای پاسخ فقط به یک مداد و یک خط‌کش احتیاج داریم. برای شروع وضعیتی را بررسی می‌کنیم که هیچ برهم‌کنشی نقش بازی نمی‌کند. به عبارت دیگر با *سینماتیک نسبیتی* شروع می‌کنیم: همه اجسام بدون اختلال حرکت می‌کنند.

اگر مشاهده شود یک جسم بدون تداخل و با سرعت ثابت (یا در حال سکون) در امتداد یک خط راست حرکت می‌کند، به آن ناظر لَخت گفته می‌شود و مختصات مورد استفاده ناظر دستگاه مرجع لَخت نامیده می‌شود. هر ناظر لَخت خود در یک حرکت بدون تداخل قرار دارد. مثال‌هایی از ناظرهای لَخت یا مرجع‌ها (در دو بعد) عبارتند از حرکت‌های بر روی کف یا سطح یخی بدون اصطکاک یا حرکت نرم قطار یا کشتی. برای یک نمونه کامل (حرکت در سه بعد فضایی) می‌توانیم یک فضانورد درون یک سفینه فضایی مادامی که موتور خاموش است یا سقوط یک فرد در خلآ را در نظر بگیریم. ناظرهای لَخت در سه بعد را نیز می‌توان ناظر *شناور آزاد* نامید که «آزاد» معادل «بدون تداخل» است. بنابراین ناظرهای لَخت بسیار نادرتر از ناظرهای غیرلخت هستند. آیا می‌توانید این را ثابت کنید؟ چالش ۳۶ آ. به هر حال ناظرهای لَخت ساده‌ترین ناظران هستند و دسته مشخصی تشکیل می‌دهند:

➢ هر دو ناظر لَخت نسبت به یکدیگر دارای *سرعت ثابت* نسبی هستند (ما دامی که گرانش و برهمکنش‌ها هیچ نقشی بازی نمی‌کنند همانگونه که در بالا فرض شده است).

➢ همه ناظرهای لَخت *معادل* هستند: ناظرهای لَخت جهان را با معادلات یکسان توصیف می‌کنند. این بیان به افتخار گالیله توسط آنری پوانکاره *اصل نسبیت* نامیده شد.

برای اینکه ببینیم بین دو ناظر لَخت بازه‌های فضا و زمان دقیقاً چقدر تغییر می‌کنند، یک ناظر رومی که از مختصات مکانی و زمانی x, y, z و t استفاده می‌کند و یک ناظر یونانی که از مختصات مکانی و زمانی ξ, υ, ζ و τ[1] بهره می‌برد در نظر می‌گیریم که همانند شکل ۲۲ با سرعت ثابت v نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند. نامتغیر بودن سرعت نور در همه جهات برای هر دو ناظر به این معناست که اختلاف مختصاتی دو ناظر از رابطه زیر حاصل می‌شود چالش ۳۷ آ:

۱. نحوه تلفظ این حروف عبارتند از «خی»، «اپسیلون»، «زتا» و «تاو». اسامی، مطابقات و تلفظ همه حروف یونانی در ضمیمه الف جلد اول شرح داده شده است.

$$(cdt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2 = (cd\tau)^2 - (d\xi)^2 - (dv)^2 - (d\zeta)^2 \qquad (11)$$

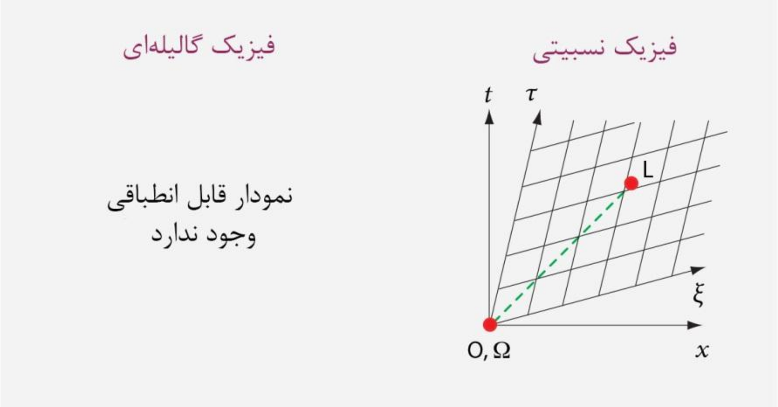
حال محورها را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که نقاط سرعت در جهت x و ξ باشد و خواهیم داشت:

$$(cdt)^2 - (dx)^2 = (cd\tau)^2 - (d\xi)^2 \qquad (12)$$

فرض کنید یک چراغ چشمک‌زن در مبدأ ناظر یونانی در حال سکون واقع است، بنابراین $\xi = 0$ و فاصله زمانی برای هر چشمک با بازه زمانی $d\tau$ برابر است. برای ناظر رومی،چراغ چشمک‌زن با سرعت v حرکت می‌کند بنابراین $dx = vdt$. اگر این عبارت را در معادله پیشین جایگزین کنیم خواهیم داشت چالش ۳۸ آ:

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma d\tau. \qquad (13)$$

بنابراین این عبارت بازه‌های زمانی اندازه‌گیری شده یک ناظر را به بازه‌های زمانی اندازه‌گیری ناظر دیگر ارتباط می‌دهد. در سرعت‌های نسبی v که نسبت به سرعت نور c کوچک هستند همانگونه که در زندگی روزمره چنین است، *ضریب کشش*، *تصحیح نسبیتی*، *ضریب لورنتز* یا *انقباض نسبیتی* γ برای تمام اهداف عملیاتی برابر واحد است. در این موارد، بازه‌های زمانی برای هر دو ناظر اساساً یکسان است: پس زمان برای همه یکی است. به هر حال، برای سرعت‌های نزدیک سرعت نور مقدار γ افزایش می‌یابد. بزرگترین مقداری که بشر به آن دست یافته است حدود $2 \cdot 10^5$ است؛ بزرگترین مقدار مشاهده در طبیعت حدود 10^{12} است. می‌توانید تصور کنید که کجا رخ می‌دهد؟ چالش ۳۹ د



شکل ۲۳. نمودار فضا-زمان برای نور دیده شده از سوی دو ناظر لَخت با مختصات (t, x) و (τ, ξ).

برای تصحیح نسبیتی γ بزرگتر از واحد (اساساً همه سرعت‌های نسبی غیر از صفر) اندازه‌گیری زمان برای دو ناظر نتایج متفاوتی در بر خواهد داشت. چون زمان برای یک ناظر با ناظر دیگر متفاوت می‌باشد، ناظرهای متحرک *اتساع زمان* را تجربه می‌کنند.

اما این همه ماجرا نیست. وقتی رفتار زمان‌سنج‌ها را بدانیم، به سادگی نحوه تغییر *مختصات* را استنباط خواهیم کرد. شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان می‌دهد که مختصات x متعلق به اتفاق L مجموع دو بازه است: مختصات ξ به اضافه فاصله بین دو مبدا مختصات. به عبارت دیگر داریم:

$$\xi = \gamma(x - vt) \qquad (14)$$

با احتساب نامتغیر بودن بازه فضا-زمان خواهیم داشت:

$$\tau = \gamma(t - xv/c^2) \qquad (15)$$

آنری پوانکاره این دو رابطه را به یاد مکتشف آن، فیزیکدان هلندی، هندریک آنتون لورنتز[1] *تبدیلات لورنتز فضا-زمان* نام نهاد. در یکی از زیباترین اکتشافات فیزیک در ۱۸۹۲ و ۱۹۰۴، لورنتز [۵۰] این روابط را از معادلات الکترودینامیک که از سال ۱۸۶۵ منتظر کشف شدن بودند استخراج نمود [جلد سوم، صفحه ۷۷].[2] در همان سال جیمز کلرک ماکسول معادلاتی که همه چیز را بصورت الکتریکی، مغناطیسی و نوری توصیف می‌کرد را منتشر کرده بود. به هر حال این انیشتین بود که برای اولین بار دریافت که t و τ به همراه x و ξ به همان طریق توصیفات صحیحی از فضا-زمان هستند.

تبدیل لورنتز نحوه تغییر نقطه دید از یک چهارچوب لَخت را به یک چهارچوب متحرک دوم توصیف می‌کند. این تغییر نقطه دید خیز (لورنتز) نامیده می‌شود. فرمول‌های (۱۴) و (۱۵) برای خیز، اساس تئوری‌های نسبیت هستند، هم نسبیت خاص و هم نسبیت عام. در واقع، ریاضی نسبیت خاص مشکل‌تر از این نیست: اگر می‌دانید جذر چیست، می‌توانید نسبیت خاص را با تمام زیبایی آن مطالعه کنید.

تبدیلات لورنتز (۱۴) و (۱۵) نتایج کنجکاوکننده‌ای را شامل می‌شوند. آن‌ها دوباره نشان دادند که زمان وابسته به ناظر است. چالش ۴۰ آ. همچنین نشان می‌دهند که طول به ناظر وابسته است: در واقع ناظرین متحرک *انقباض طول* را مشاهده می‌کنند [صفحه ۵۲]. پس فضا و زمان در حقیقت به یکدیگر وابسته هستند.

تبدیلات لورنتز (۱۴) و (۱۵) از یک جهت دیگر بسیار قوی هستند. وقتی دو ناظر به یکدیگر نگاه می‌کنند، هر کدام ادعا می‌کند که بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به دیگری اندازه گرفته است. چالش ۴۱ س. به عبارت دیگر، نسبیت خاص نشان می‌دهد که علف‌های آن طرف پرچین همیشه *کوتاه‌تر* است — در صورتی که با دوچرخه در طول پرچین برانیم و اگر علف مورب باشد. [صفحه ۵۲]. کمی بعد این نتیجه عجیب را با جزئیات بیشتر بررسی می‌کنیم.

فرمول‌های جایگزین برای خیز لورنتز استخراج شده‌اند، از قبیل عباراتی که شتاب نسبی دو ناظر به همراه سرعت نسبی را لحاظ کرده‌اند. [۵۱]. به هر حال، همه روابط جایگزین باید پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کنار گذاشته شوند. قبل از اینکه به چنین آزمایش‌هایی بپردازیم، کمی استنباطات منطقی از روابط خیز را بیشتر بررسی می‌کنیم.

فضا-زمان چیست؟

«از این به بعد فضا به خودی خود و زمان به خودی خود در سایه‌ها محو خواهند شد و تنها اتحاد این دو است که یک وجود مستقل را معنا می‌دهد.»[3]

هرمان مینکوفسکی.

تبدیلات لورنتز چیز مهمی به ما می‌گویند: فضا و زمان دو جنبه یک وجود پایه‌ای واحد هستند. برای ناظران مختلف به اشکال مختلف با هم *ترکیب* می‌شوند. این ترکیب معمولاً با عنوان اینکه زمان بعد *چهارم* است بیان می‌شود. به نظر درست می‌آید زیرا وجود پایه به نام فضا- زمان می‌تواند به شکل دسته‌ای از رویدادها توصیف شود، رویدادهایی که توسط چهار محور مختصات در زمان و فضا توصیف می‌شوند و به این دلیل که همه رویدادها خواص یک خمینه[4] را دارا هستند. (آیا این را تأیید می‌کنید؟) چالش ۴۲ د. فضا-زمان به شکل

---

۱. برای اطلاعات در مورد هندریک آنتون لورنتز صفحه ۴۰ را ببینید.

۲. کشف مشابهی ابتدا توسط ولدمار فویگت (متولد ۱۸۵۰ لایپزیگ و درگذشت ۱۹۱۹ گوتینگن) در سال ۱۸۸۷ منتشر شده بود. فویگت کاشف اثر فویگت و تانسور فویگت نیز بود. پس از وی در سال ۱۸۸۹ جرج فیتزجرالد (متولد ۱۸۵۱ دوبلین و درگذشت ۱۹۰۱ دوبلین) به همین نتیجه دست یافت.

۳. این جمله شروع سخنرانی مینکوفسکی در سال ۱۹۰۸ در نشست طبیعت‌گرایان و پزشکان بود.

۴. عنوان «خمینه» در تمام جزئیات ریاضیاتی جلوتر تعریف خواهد شد.

کامل مطلق و نامتغیر نسبت به ناظر است؛ فضا-زمان با خیزها بدون تغییر باقی می‌ماند. فقط بسته به نقطه دید به شکل زمان و فضا تفکیک می‌شود.

به عبارت دیگر، وجود حداکثر سرعت در طبیعت ما را مجبور می‌کند که خمینه فضا-زمان نامتغیر را تعریف کنیم که برای توصیف طبیعت از تمام رویدادهای ممکن تشکیل شده است. در غیاب گرانش یعنی نسبیت خاص خمینه فضا-زمان با خصلت ساده‌ای مشخص می‌شود: بازه فضا-زمان $\mathrm{d}i$ بین دو رویداد مطابق ذیل تعریف می‌شود:

$$di^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2dt^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \qquad (16)$$

$\mathrm{d}i$ از ناظر (لخت) مستقل است: نامتغیر است. فضا-زمان به افتخار هرمان مینکوفسکی[۱] *فضا-زمان مینکوفسکی* هم نامیده می‌شود. او استاد انیشتین بود و برای اولین بار در سال ۱۹۰۴ مفهوم فضا-زمان را تعریف کرده و فایده و اهمیت آن را دریافت. بعداً خواهیم فهمید که در صورت وجود گرانش، کل فضا-زمان انحنا می‌یابد؛ به چنین خمیدگی فضا-زمان *فضا-زمان ریمانی* گفته می‌شود و از اساسیات نسبیت عام است.

بازه فضا-زمان $\mathrm{d}i$ ذکر شده در معادله (۱۶) معنای فیزیکی ساده‌ای دارد. زمانی است که توسط یک ناظر که از رویداد (t, x) به رویداد $(t + \mathrm{d}t, x + \mathrm{d}x)$ حرکت می‌کند اندازه‌گیری می‌شود و در اصطلاح به آن زمان ویژه گفته می‌شود ضربدر c. اگر از ضریب c صرف نظر کنیم می‌توانیم این بازه را *زمان ساعت‌مچی* بنامیم.

بطور خلاصه، می‌توانیم بگوییم ما *درون* فضا-زمان *زندگی* می‌کنیم. فضا-زمان بطور مستقل از همه چیز وجود دارد؛ یک ظرف است، پس‌زمینه‌ای برای هر رویدادی که اتفاق می‌افتد. و حتی اگر دستگاه مختصات برای ناظرین متفاوت باشد، این وجود اساسی یعنی فضا-زمان یکسان و *یکتا* است گرچه فضا و زمان برای هر ناظر یکسان نیست. (در نسبیت عام، همه این شرایط در حضور گرانش هم کاربرد دارند.)

چه تفاوتی بین فضا-زمان مینکوفسکی و فضا-زمان گالیله‌ای بعنوان ترکیب فضا و زمان روزمره وجود دارد؟ هر دو فضا-زمان خمینه هستند یعنی مجموعه پیوسته‌ای از نقاط، هر دو ابعاد دارای بعد زمان و سه بعد فضایی هستند و هر دو خمینه دارای توپولوژی کره سوراخ‌شده هستند. (آیا تأیید می‌کنید؟ چالش ۴۳ د) هر دو خمینه مسطح هستند یعنی بدون انحنا هستند. در هر دو مورد، فضا توسط خط‌کش یا اشعه نور و زمان توسط ساعت اندازه‌گیری می‌شود. در هر دو مورد، فضا-زمان اساس، یکتا و مطلق است؛ بعنوان پس‌زمینه و ظرف اشیا و رویدادها هست و باقی می‌ماند.

اختلاف اصلی و در واقع تنها اختلاف این است که فضا-زمان مینکوفسکی بر خلاف گالیله فضا و زمان را با هم ترکیب می‌کند. همانگونه که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، این ترکیب برای ناظرین با سرعت متفاوت، متفاوت است. این ترکیب عامل بوجود آمدن مباحث مستقل یا مربوط بودن فضا و زمان به ناظر است.

از لحاظ ریاضی، زمان بعد چهارم است؛ فضا به فضا-زمان توسعه می‌یابد. قلمداد کردن زمان بعنوان بعد چهارم تنها عبارتی است برای محاسبات نسبیت – این محاسبات را در ذیل انجام می‌دهیم – و هیچ معنای عمیق‌تری ندارد.

---

۱. هرمان مینکوفسکی (متولد ۱۸۶۴ آلکسوتاس امپراطوری روسیه و مرگ ۱۹۰۹ گوتینگن امپراطوری آلمان) بیشتر یک ریاضی‌دان بود. او ایده‌هایی شبیه انیشتین را توسعه داده بود ولی انیشتین سریع‌تر عمل کرد. سپس مفهوم فضا-زمان را توسعه داد. متاسفانه مینکوفسکی بطور ناگهانی در ۴۴ سالگی درگذشت.

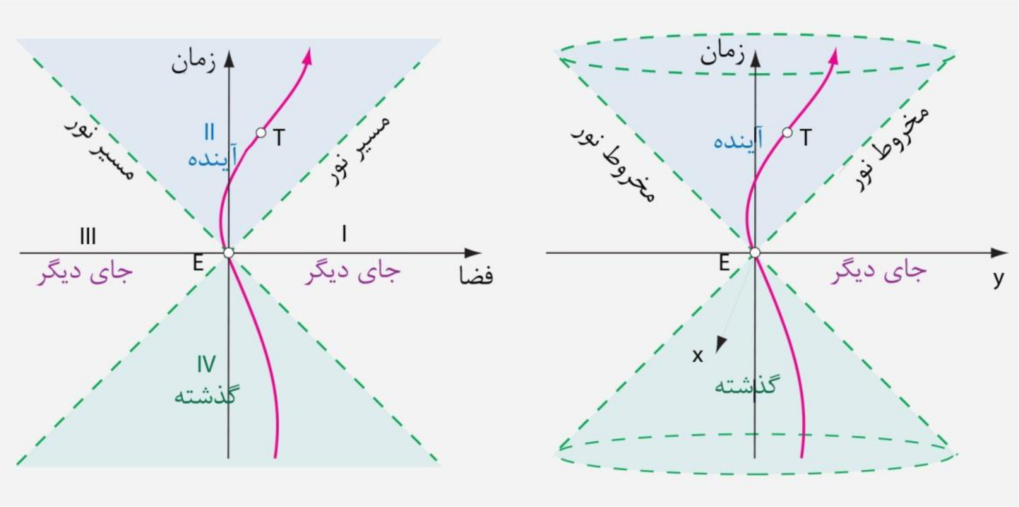
وجود حداکثر سرعت در طبیعت ما را مجبور می‌کند تا حرکت را با فضا-زمان توصیف کنیم. جالب است، زیرا بطور خلاصه در فضا-زمان، *حرکت وجود ندارد*. حرکت فقط در فضا وجود دارد. در فضا-زمان هیچ چیز حرکت نمی‌کند. برای هر ذره نقطه‌ای، فضا-زمان حاوی یک *جهان‌خط* است. (شکل ۲۴ را ببینید) به عبارت دیگر به جای اینکه بپرسیم *چرا* حرکت وجود دارد، می‌توانیم بطور معادل بپرسیم چرا فضا-زمان به جهان‌خط‌ها تقسیم شده است. اما در این لحظه از چالش‌مان از توانایی پاسخ به این سوال فاصله زیادی داریم. کاری که می‌توانیم فعلا انجام دهیم بررسی *نحوه* رخ دادن حرکت است.

آیا می‌توان به گذشته سفر کرد؟ – زمان و علیت

می‌دانیم که زمان برای ناظرهای مختلف، متفاوت است. آیا به هرحال زمان تسلسل رویدادها را بیان می‌کند؟ پاسخ نسبیت به این سوال روشن است «هم بله هم خیر». دسته مشخصی از رویدادها بطور طبیعی از لحاظ زمانی مرتب نیستند؛ برخی دسته‌ها مرتب هستند. این موضوع در نمودار فضا-زمان به خوبی نشان داده شده است، همانند شکل ۲۴.

بوضوح، دو رویداد تنها در صورتی می‌توانند در ترتیب زمانی باشند که یک رویداد *علت* رویداد دیگر باشد. اما این ارتباط فقط در صورتی قابل برقراری است که رویداد اول بتواند انرژی را مثلا با یک سیگنال به رویداد دوم بفرستد. به عبارت دیگر، سلسله زمانی بین دو رویداد بیان می‌دارد که سرعت سیگنال اتصال دهنده دو رویداد نباید بیش از سرعت نور باشد. شکل ۲۴ نشان می‌دهد که رویداد E در مبدأ مختصات تنها تحت تأثیر رویدادهای ربع چهارم است (*مخروط نور گذشته*، جایی که همه ابعاد فضایی شامل هستند)، و فقط می‌تواند روی رویدادهای واقع در ربع دوم اثر بگذارد، *مخروط نور آینده*. رویدادهای واقع در ربع اول و سوم نه روی رویداد E اثر می‌گذارند و نه از آن اثر می‌پذیرند: مگر اینکه سرعت سیگنال بیش از سرعت نور باشد. به این ترتیب مخروط کامل نور، مرز بین رویدادهایی که *می‌توانند* در ترتیب زمانی با رویداد E باشند – رویدادهای درون مخروط – و آنهایی که *نمی‌توانند* در ترتیب زمانی باشند – خارج از مخروط – را تعریف می‌کند. رویدادهای خارج از مخروط برای تمام ناظرین *جای دیگری* رخ می‌دهد. (برخی نویسندگان به غلط رویدادهای *جای دیگر* را *زمان حال* می‌نامند.)

مخروط نور گذشته حاوی تمام اتفاقاتی است که روی رویدادهای E در مبدأ مختصات می‌توانند اثر بگذارند. می‌توان گفت که E به رویدادهای مخروط نور گذشته به شکل *علت و معلولی مرتبط* است. باید در نظر داشت که ارتباط علت و معلولی مفهومی نامتغیر است: همه ناظرین موافقند که این رابطه بین دو رویداد برقرار است یا خیر. آیا تأیید می‌کنید؟ چالش ۴۴ د



شکل ۲۴. نمودار فضا-زمان برای شیء متحرک T از نگاه ناظر لَخت O در دو مورد یک و دو بعد فضایی؛ شیب جهان-خط در یک نقطه بیانگر سرعت در آن نقطه است بنابراین نمی‌تواند شیب تندتری از سرعت نور داشته باشد.

بطور خلاصه، زمان رویدادها را فقط بصورت *جزئی* مرتب می‌کند. به ویژه برای دو رویدادی که بصورت علت و معلولی مرتبط نیستند، ترتیب زمانی آن‌ها (یا همزمانی آن‌ها) به ناظر وابسته است! چالش ۴۵ آ

یک بردار درون مخروط نور *زمان-مانند* نامیده می‌شود؛ یک بردار روی مخروط نور *نور-مانند* یا *تهی* نامیده می‌شود؛ و یک بردار خارج از مخروط نور *فضا-مانند* نامیده می‌شود. بعنوان مثال *جهان خط* یک ناظر یعنی تمام اتفاقاتی که تاریخ گذشته و آینده را شکل می‌دهند فقط از رویدادهای زمان-مانند تشکیل شده است.

به این ترتیب نسبیت خاص به ما می‌آموزد که علیت و زمان *تنها* به خاطر وجود مخروط نور قابل تعریف هستند. اگر انتقال انرژی با سرعتی بیش از نور وجود می‌داشت، زمان قابل تعریف نبود. علیت احتمالاً به معنی (به صورت جزئی) مرتب کردن زمان برای تمام ناظرین، به خاطر وجود یک حداکثر سرعت موجودیت دارد.

اگر می‌شد از سرعت نور عبور کنیم، همیشه می‌توانستیم در بخت‌آزمایی برنده شویم. می‌توانید بگویید چرا؟ چالش ۴۶ آ. به عبارت دیگر، اگر می‌شد به طریقی از سرعت نور عبور کنیم، آینده می‌توانست بر گذشته اثر بگذارد. آیا تأیید می‌کنید؟ چالش ۴۷ د. در چنین وضعیتی، می‌شد آثار *غیرعلی* را مشاهده کرد. به هر حال، یک پدیده روزمره وجود دارد گه می‌گوید سرعت نور واقعاً حداکثر است: حافظه ما. اگر آینده می‌توانست بر گذشته اثر بگذارد، می‌توانستیم آینده را *به خاطر آوریم*. به عبارت دیگر اگر آینده می‌توانست بر گذشته اثر بگذارد، قانون دوم ترمودینامیک دیگر درست نبود.[۱] هیچ داده‌ای از زندگی روزمره یا آزمایش‌ها مبنی بر تأثیر آینده بر گذشته مشاهده نشده است. به عبارت دیگر،

- سفر در زمان به گذشته غیرممکن است.

نحوه تغییر وضعیت در نظریه کوانتوم بعداً بیان می‌شود. جالب اینکه، سفر به آینده ممکن *است* و به زودی خواهیم دید.

کنجکاوی‌هایی در مورد نسبیت خاص

نسبیت خاص پر است از آثار کنجکاوکننده. بگذارید با یک معما شروع کنیم تا به تفکرمان کمک کند. یک ناظر مشاهده می‌کند که در یک جزیره بطور همزمان دو صاعقه زده می‌شود: یکی به جزیره برخورد می‌کند و دیگری کیلومترها دورتر به دریای آزاد برخورد می‌کند. یک ناظر دوم خلبانی است در یک هواپیمای نسبیتی که در لحظه برخورد صاعقه به جزیره درست بالای جزیره است. در مورد خلبان ابتدا کدام صاعقه زده می‌شود؟ چالش ۴۸ آ

برای خلبان، صاعقه دور که در دریا زده می‌شود زودتر زده می‌شود. اما این یک سوال فریبنده است: با وجود اینکه صاعقه دور زودتر زده می‌شود اما خلبان آن را *پس از* صاعقه جزیره می‌بینند زیرا نور دور برای رسیدن به وی نیاز به زمان دارد. به هر حال، خلبان می‌تواند زمان رسیدن را محاسبه کند و نتیجه بگیرد که صاعقه دور زودتر زده است. چالش ۴۹ آ

هنگامی که جلوی یک آینه دست تکان می‌دهید، تصویر شما با فرکانس یکسان دست تکان می‌دهد. اگر آینه با سرعت نسبیتی حرکت کند چه اتفاقی می‌افتد؟ چالش ۵۰ آ

ما در بخش کوانتوم در خواهیم یافت که رنگ زرد طلا یک اثر نسبیتی است؛ [جلد چهارم صفحه ۱۹۵] همچنین حالت مایع جیوه در دمای اتاق نتیجه نسبیت است. هر دو اثر بخاطر سرعت بالای الکترون‌های بیرونی این اتم‌ها هستند.

---

۱. نتیجه مرتبط دیگری دارد به آرامی به دانش تبدیل می‌شود. حتی اگر فضا-زمان دارای یک شکل غیرجزئی می‌بود از قبیل توپولوژی استوانه‌ای با منحنی‌های بسته زمان-مانند، باز هم کسی نمی‌توانست به گذشته سفر کند، بر خلاف چیزی که بسیاری از داستان‌های علمی تخیلی عرضه می‌کنند. ناممکن بودن این نوع از سفر در زمان توسط استیون بلاو در یک مقاله آموزشی بیان شده است. [۵۳]

بگذارید چند نتیجه دیگر از نسبیت خاص را بررسی کنیم.

سریع‌تر از نور: چقدر دورتر می‌توانیم سفر کنیم؟

چقدر دورتر از زمین می‌توانیم سفر کنیم با احتساب اینکه بیش از طول عمر خود مثلا ۸۰ سال زمان نداشته باشیم و با احتساب اینکه می‌توانیم از موشکی استفاده کنیم که می‌تواند تا حد مطلوب به سرعت نور نزدیک شود؟ با فرض زمانی که در موشک سپری می‌کنیم t ، سرعت موشک v و با فرض اینکه بطور خوشبینانه موشک می‌تواند در مدت اندک و قابل چشمپوشی شتاب بگیرد یا از سرعتش بکاهد، فاصله d که می‌توانیم دور شویم با رابطه زیر محاسبه می‌شود. چالش ۵۱ آ

$$d = \frac{vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (17)$$

فاصله d برای $v > 0.72c$ از ct بزرگتر است، اگر v به اندازه کافی بزرگ باشد از تمام مرزها می‌توان عبور کرد! به عبارت دیگر سرعت نور، فاصله‌ای که در طول عمر یا در هر بازه زمانی دیگر می‌توانیم طی کنیم را محدود نمی‌کند. اساساً می‌توانیم در کمتر از یک ثانیه کل هستی را طی کنیم. (مبحث سوخت را در ذیل مطرح می‌کنیم.) [صفحه ۵۱]

برای سفر موشک خوب است که یک مفهوم *سرعت مناسب* w را مطابق ذیل تعریف کنیم

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

همانگونه که مشاهده کردیم، سرعت مناسب به سرعت نور محدود *نیست*؛ در واقع سرعت مناسب خود نور نامحدود است.[1]

همگام‌سازی و سفر زمان – آیا یک مادر می‌تواند جوانتر از دخترش بماند؟

وجود حداکثر سرعت در طبیعت بیان می‌دارد که زمان برای ناظرهای متفاوت که نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، متفاوت است. پس در مورد همگام‌سازی ساعت‌هایی که دور از هم هستند باید دقت کنیم، حتی اگر نسبت به یکدیگر در یک مرجع لَخت ساکن باشند. برای مثال، اگر دو ساعت مچی داریم که یک زمان را نشان می‌دهند و یکی از آن‌ها را برای یک پیاده‌روی به کار گیریم، پس از این پیاده روی، زمان این دو متفاوت خواهد بود. این آزمایش در واقع چندین بار انجام شده است و بطور کامل پیش‌بینی نسبیت خاص را تأیید کرده است [۵۵ و ۵۶]. اختلاف زمان برای یک شخص یا برای یک ساعت مچی در هواپیمایی که با سرعت 900 km/h یک بار به دور زمین بچرخد در حد 100 ns خواهد بود که در زندگی روزمره قابل توجه نیست. به این *پارادوکس ساعت* می‌گویند. در واقع، این تأخیر از عبارت زیر به سادگی محاسبه می‌شود:

$$\frac{t}{t'} = \gamma. \qquad (20)$$

بدن انسان هم ساعت است؛ زمان سپری شده را نشان می‌دهد که معمولاً به آن عمر می‌گویند و با تغییر شکل، وزن، رنگ مو و غیره همراه است. اگر شخصی به سفری طولانی و پرسرعت برود، در زمان بازگشت عمر کمتری سپری کرده است و نسبت به شخص دومی که در خانه (لخت) خود مانده است جوانتر مانده است. بطور خلاصه، نامتغیر بودن c بیان می‌کند که: *سفرکنندگان جوانتر می‌مانند.*

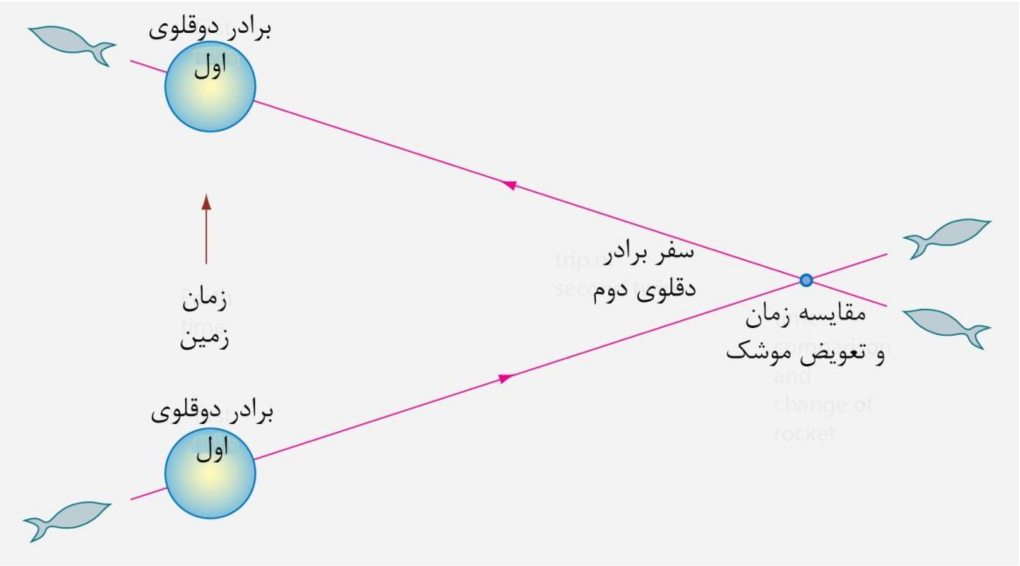
---

۱. با استفاده از سرعت مناسب، رابطه (۹) برای اجزای دو سرعت $\mathbf{w}_a = \gamma_a \mathbf{v}_a$ و $\mathbf{w}_b = \gamma_b \mathbf{v}_b$ به شکل زیر ساده می‌شود

$$w_{s\parallel} = \gamma_a \gamma_b (v_a + v_{b\parallel}) \text{ و } w_{s\perp} = w_{b\perp} \qquad (۱۹)$$

که علامت‌های $\parallel$ و $\perp$ به ترتیب جزء هم جهت و جزء عمود بر $\mathbf{v}_a$ را نشان می‌دهند. در واقع می‌توان تمام نسبیت خاص را با کمیت‌های «مناسب» شرح داد.

افراطی‌ترین مثال این حالت قضیه معروف پارادوکس دوقلو است. یکی از دوقلوها بر یک موشک نسبیتی سوار می‌شود و برای سال‌های زیادی زمین را ترک می‌کند. پس از دوری از زمین بر موشک نسبیتی دیگری سوار شده و از مسیر دیگر به زمین باز می‌گردد. این سفر در شکل ۲۵ نشان داده شده است. هنگام رسیدن متوجه می‌شود که برادر دوقلویش بسیار پیرتر از اوست. این نتیجه در آزمایش‌های زیادی تأیید شده است [۵۷]- البته تاکنون با دوقلوهای واقعی انجام نشده است. آیا می‌توانید نتیجه را شرح دهید خصوصاً عدم تقارن بین دوقلوها؟ چالش ۵۳ د



شکل ۲۵. پارادوکس دوقلو

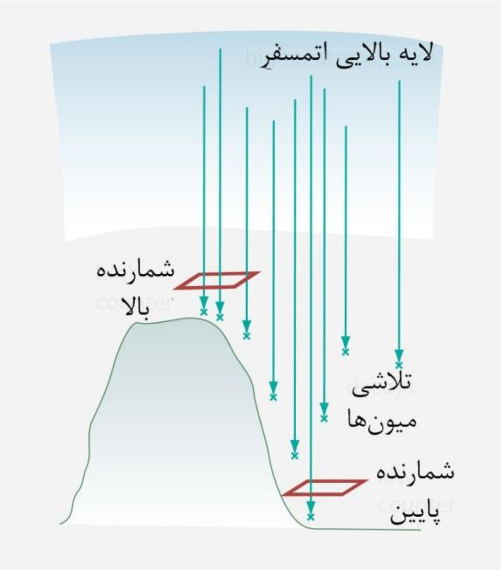
نسبیت خاص بطور شگفت‌آوری تأیید می‌کند که کسانی که زیاد مسافرت می‌کنند جوان‌تر می‌مانند. از طرف دیگر انسانی که بیشترین اثر جوان ماندن را ثبت کرده است فضانورد سرگئی کریکالف است که ۸۰۳ روز را در مدار سپری کرد ولی تنها چند میلی‌ثانیه از انسان‌های روی زمین کمتر عمر سپری کرد.

پارادوکس دوقلو همچنین موید احتمال سفر به آینده است. با کمک موشک سریعی که به نقطه اولش بر می‌گردد، می‌توانیم به زمان‌هایی دست یابیم که با ماندن در خانه در تمام طول عمر هرگز قابل حصول نیست. افسوس که هرگز نمی‌توانیم به گذشته بر گردیم تا در مورد آن صحبت کنیم.[1]

یکی از ساده‌ترین آزمایش‌هایی که طولانی شدن جوانی را برای مسافران *بسیار بسیار* سریع تأیید می‌کند شمارش میون‌ها را شامل می‌شود. میون‌ها ذراتی هستند که در لایه بالایی اتمسفر توسط اشعه‌ها بطور مداوم تشکیل می‌شوند و سپس به سمت زمین پرواز می‌کنند. میون‌ها در حال سکون (بر مبنای یک زمان‌سنج) نیم عمر محدود $2.2\ \mu s$ را دارند (یا در سرعت نور $660\ m$). پس از گذشت این مدت زمان نصف میون‌ها از بین می‌روند. این نیم عمر به سادگی با استفاده از شمارنده میون‌ها قابل اندازه‌گیری است. بعلاوه، شمارنده‌های خاصی هستند که فقط میون‌های با محدوده سرعت خاصی را اندازه‌گیری می‌کنند مثلاً از $0.9950c$ تا $0.9954c$. می‌توان یکی از این شمارنده‌های خاص را روی قله کوه و یکی دیگر را در دامنه پایین کوه قرار داد همانگونه که در شکل ۲۶ نشان داده شده است. اولین باری که این آزمایش انجام شد اختلاف ارتفاع ۱٫۹ کیلومتر بود [۵۹]. پرواز ۱٫۹ کیلومتر از میان اتمسفر با سرعت قیدشده حدود $6.4\ \mu s$ زمان می‌برد. با توجه به نیم عمر ذکرشده یک محاسبه ساده نشان می‌دهد که فقط ۱۳٪ میون‌های مشاهده شده

۱. حتی کتاب‌های خاصی در مورد سفر در زمان نگاشته شده است همچون کتاب خوب تحقیق‌شده توسط ناهین. توجه کنید که مفهوم سفر در زمان باید بطور شفاف تعریف شود؛ در غیر این صورت حتی برای کارمندی که صندلی کارش را ماشین زمانی می‌داند که با آن به آینده سفر می‌کند هم پاسخی نخواهیم داشت.

در قله باید به پایین کوه برسند. چالش ۵۴ د. اما مشاهده شد که ۸۲٪ میون‌ها به پایین کوه می‌رسند. علت این نتیجه، انبساط نسبیتی زمان است. در واقع در سرعت ذکرشده میون‌ها فقط $0.62\ \mu s$ را از قله تا دامنه کوه تجربه می‌کنند. این زمان بسیار کوتاه‌تر از زمان مشاهده شده توسط ناظرهای انسانی است. زمان کمتر سپری شده، موجب می‌شود که تعداد بسیار کمتری از میون‌ها از بین بروند نسبت به حالتی که انبساط زمان لحاظ نشود. بعلاوه، درصد خطای اندازه‌گیری شده با ضریب پیش‌بینی شده انبساط زمان γ هماهنگ است که می‌توانید بررسی کنید. چالش ۵۵ د. اگر درون یک حلقه ذخیره میون‌های نسبیتی با سرعت بالا در مسیر دایره‌ای دور بزنند اثر مشابهی مشاهده خواهد شد. هر چه میون‌ها سریعتر دور بزنند، بیشتر زنده می‌مانند [۶۰].



اتساع زمان نیم عمر برای بسیاری دیگر از سیستم‌های از بین رونده از جمله پیون‌ها، اتم‌های هیدروژن، اتم‌های نئون و هسته‌های مختلف مشاهده شده است که همواره موید پیش‌بینی‌های نسبیت خاص بوده است. این اثر اینقدر شایع است که غالباً *عمر ظاهری* τ_{app} از طریق رابطه $\tau_{app} = \gamma\tau$ بیان می‌شود. از آنجا که تمام اجسام موجود در طبیعت از ذرات ساخته شده‌اند، «اثر جوان ماندن» در سرعت‌های بالا که معمولا اتساع زمان نامیده می‌شود در اجسام با هر اندازه‌ای به کار گرفته می‌شود؛ در واقع این اثر نه تنها برای ذرات بلکه برای لیزرها و فرستنده‌ها و ساعت‌های رادیویی نیز مشاهده شده است [۱۸].

اگر حرکت به اتساع زمان منجر می‌شود، یک ساعت در استوا که بصورت ثابت به همراه زمین می‌چرخد باید از ساعتی که در قطبین واقع است کندتر باشد. اگر چه این پیش‌بینی توسط خود انیشتین انجام شده است ولی اشتباه است. شتاب گریز از مرکز به کاهش شتاب جاذبه منجر می‌شود که این کاهش جاذبه، اتساع زمان حاصل از سرعت چرخش را خنثی می‌کند. این قضیه یادآور می‌شود که به کار بردن نسبیت خاص در جاهایی که جاذبه نقش دارد نیازمند احتیاط است: نسبیت خاص خالص تنها زمانی قابل استفاده است که فضا-زمان مسطح است یعنی جاذبه حضور *ندارد*.

بطور خلاصه، یک مادر *می‌تواند* جوانتر از دخترش بماند. اما آرزوی مادر برای جوانتر ماندن از دخترش به سادگی قابل حصول نیست. تصور کنید مادری در یک سفینه فضایی به مدت ده سال با شتاب $10\ m/s^2$ از زمین دور شود، سپس به مدت ده سال دیگر با شتاب منفی $10\ m/s^2$ زمان بگذراند، سپس به مدت ده سال به زمین شتاب بگیرد و در نهایت به مدت ده سال دیگر برای فرود ایمن بر روی زمین شتابش را کاهش دهد. این سفر برای مادر ۴۰ سال زمان برده است. او به اندازه ۲۲۰۰۰ سال نوری از زمین دور شده است. در هنگام بازگشت به زمین ۴۴۰۰۰ سال گذشته است. همه چیز خوب به نظر می‌رسد، اما می‌دانید چه مقدار سوخت نیاز خواهد بود؟ حتی برای پربازده‌ترین موتور قابل تصور این مقدار اینقدر زیاد است که بازگشت جرم از این سفر

تنها یک در $2 \cdot 10^{19}$ نسبت به جرم آغاز است. چالش ۵۶ آ. این مقدار سوخت روی کره زمین وجود ندارد. برای سفرهای کوتاه‌تر هم مشکل مشابهی وجود دارد [۶۲].

همچنین دریافته‌ایم که (به این سادگی) نمی‌توان ساعت‌های ساکن را تنها با در دست داشتن و سپس جابه‌جا شدن با هم هماهنگ کرد. تنها روش درست مبادله سیگنال نوری است. می‌توانید نحوه کار را توصیف کنید؟ چالش ۵۷ د. تعریف دقیق همگام‌سازی ضروری است زیرا برای اینکه دو اتفاق دور را *همزمان* توصیف کنیم مثلا زمانی است که مختصات را از قبل تعریف کرده باشیم. واضح است که وجود حداکثر سرعت بیان می‌دارد که همزمانی به ناظر وابسته است. در واقع این وابستگی توسط تمام آزمایش‌ها تأیید شده است.

انقباض طول

طول یک شی که توسط یک ناظر متصل به آن شی اندازه‌گیری می‌شود *طول مناسب* آن نامیده می‌شود. طول اندازه‌گیری شده توسط یک ناظر لَخت که از کنار آن عبور می‌کند همواره از طول مناسب *کوچکتر* است. چالش ۵۸ آ. این نتیجه مستقیماً از تبدیلات لورنتز استخراج می‌شود.

برای یک فِراری که با سرعت 300 km/h یا 83 m/s در حال حرکت می‌باشد، طول به اندازه 0.15 pm منقبض می‌شود: کمتر از قطر یک پروتون. با نگاه از خورشید به زمین، زمین با سرعت 30 km/s حرکت می‌کند؛ انقباض طول در این حالت 6 cm است. هیچ یک از این آثار تا به حال اندازه‌گیری نشده است.[1] اما آثار بزرگتر را می‌توان اندازه گرفت. بگذارید احتمالات را کنکاش کنیم.

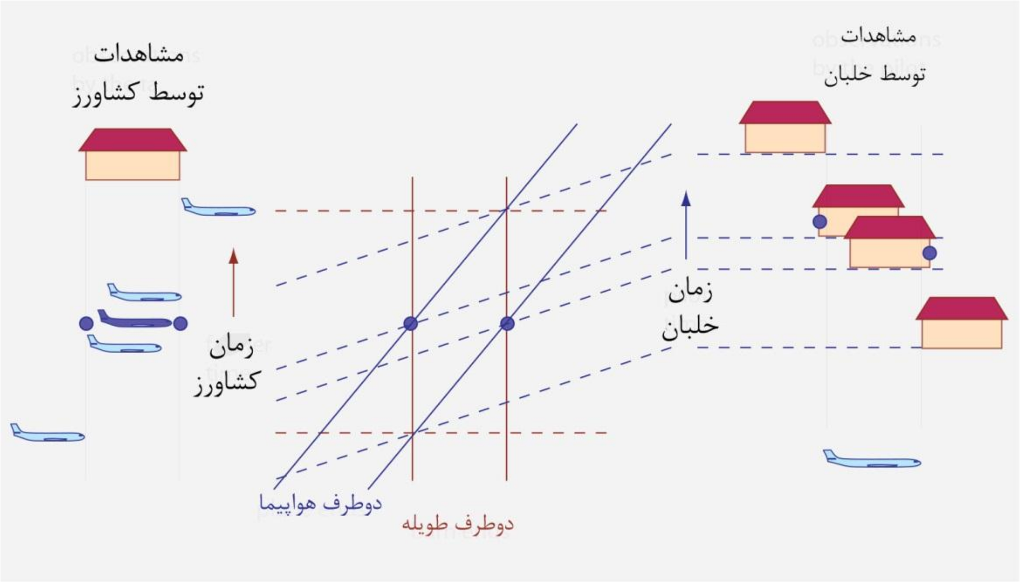
تصور کنید یک خلبان با هواپیمایش از یک طویله با دو در عبور می‌کند، درها در ورود و خروج هستند. هواپیما کمی از طویله طویلتر است، اما اینقدر سریع حرکت می‌کند که طول منقبض شده نسبیتی از طول طویله کوتاه‌تر است. آیا کشاورز می‌تواند طویله را (حداقل برای مدتی کوتاه) ببندد در حالتی که کل هواپیما داخل طویله باشد؟پاسخ مثبت است. اما چرا خلبان نمی‌تواند این جمله را بگوید: به نسبت وی، طویله منقبض شده است؛ بنابراین هواپیما در طویله جا نمی‌گیرد؟ پاسخ در شکل ۲۷ نشان داده شده است. برای کشاورز، درها همزمان بسته و دوباره باز می‌شوند. برای خلبان اینگونه نیست. برای کشاورز، خلبان برای لحظه‌ای در تاریکی واقع می‌شود؛ برای خلبان طویله هرگز تاریک نمی‌شود. (این موضوع کاملاً درست نیست: می‌توانید جزئیات را شرح دهید؟ چالش ۶۰ د) بخاطر دلایلی واضح، این آزمایش هرگز درک نشده است.

بگذارید چند آزمایش دیگر انقباض طول را کنکاش کنیم. آیا یک ورزشکار اسنوبورد ممکن است در در چاله‌ای بیفتد که دهانه‌ی آن کمی کوتاه‌تر از اسنوبورد باشد؟ تصور کنید که او با سرعت (غیرنسبیتی) اینقدر سریع حرکت می‌کند که ضریب انقباض طول γ در آن برابر ۴ است. برای ناظر روی زمین در زمان عبور از چاله، اسنوربورد چهاربرابر کوتاه‌تر است، پس به درون چاله سقوط می‌کند؛ اما برای خود ورزشکار این دهانه چاله است که چهار برابر کوتاه‌تر است و به نظر می‌رسد که اسنوبورد نمی‌تواند به درون چاله بیفتد.

اولین تحلیل محتاطانه [۶۳] نشان می‌دهد که بر خلاف مشاهده حفرکننده چاله، ورزشکار اسنوبورد، شکل ثابت تخته اسنوبورد را تجربه نمی‌کند: در حالی که با عبور از چاله، ورزشکار مشاهده می‌کند که تخته اسنوبورد به شکل منحنی در آمده و به درون چاله سقوط می‌کند، همانگونه که در شکل ۲۸ نشان داده شده است. آیا تأیید می‌کنید؟ چالش ۶۱ آ. به عبارت دیگر، شکل یک مفهوم نامتغیر با ناظر نیست. (به هر حال، اگر درست تعریف کنیم؛ سفتی نامتغیر با ناظر *است*، آیا تأیید می‌کنید؟ چالش ۶۲ د)

---

۱. آیا اصلاً میزان انقباض زمین قابل اندازه‌گیری است؟ چالش ۵۹ د



شکل ۲۷. مشاهدات خلبان و صاحب طویله

شکل ۲۸. مشاهدات حفرکننده چاله (چپ) و مشاهدات ورزشکار اسنوبورد (راست)، که اغلب (بصورت گمراه‌کننده) در مقالات منتشر می‌شود.

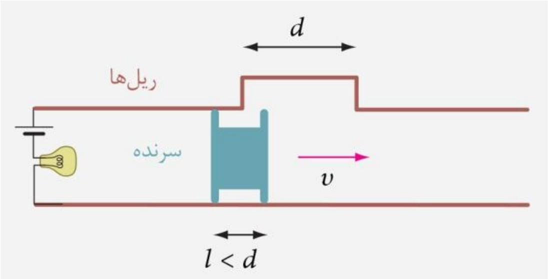
توضیح اسنوبورد و شکل مربوطه، اگر چه منتشر شده‌اند، صحیح *نمی‌باشند*، همانگونه که هارالد ون لینتل و کریستیان گروبر اشاره کرده‌اند [۶۴]. نباید فراموش کنیم اندازه این اثر را تخمین بزنیم. در سرعت نسبیتی، زمان مورد نیاز برای چاله که کل ضخامت تخته را مورد اثر قرار دهد قابل چشمپوشی نیست. ورزشکار فقط می‌بینند که تخته‌اش اگر به شدت نازک و انعطاف‌پذیر باشد یک شکل منحنی به خود می‌گیرد. برای تخته‌های معمولی که بت سرعت نسبیتی حرکت می‌کنند، تخته اسنوبورد هیچ زمانی برای برای افتادن در هر ارتفاع محسوس h یا برای خم شدن درون چاله قبل از عبور از آن در اختیار ندارد چالش ۶۳ آ. شکل ۲۸ اینقدر اغراق‌آمیز است که ناصحیح می‌باشد. ورزشکار به سادگی از روی چاله عبور می‌کند.

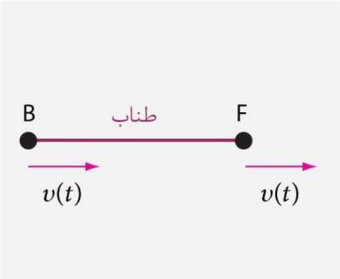
در واقع می‌توانیم مباحث مربوط به همچین مثال‌هایی از انقباض طول را از طریق کنکاش این مثال ساده‌سازی کنیم: هنگامی که یک میله درون یک مسیر مورب به سمت یک سوراخ بدون هیچگونه گرانشی حرکت می‌کند چه اتفاقی می‌افتد؟ یک کنکاش محتاطانه [۶۶] نشان می‌دهد که اگر سوراخ و میله برای ناظر میله موازی باشند، برای ناظر سوراخ موازی *نیستند* و بالعکس. مفهوم *موازی بودن* نسبی است!

تناقض‌های حول انقباض طول در مورد یک سرنده رسانا که ارتباط الکتریکی بین دو ریل را برقرار می‌کند جالبتر هم می‌شود (شکل ۲۹). ریل‌ها موازی هستند اما یک ریل یک تورفتگی دارد که از سرنده طویل‌تر است. می‌توانید بحث کنید که آیا لامپ متصل به مدار روشن می‌ماند در صورتی که سرنده در طول ریل‌ها با سرعت نسبیتی حرکت کند؟ چالش ۶۴ د. (ساده‌سازی کنید و فرض کاملاً واقع‌گرایانه لحاظ نکنید یعنی جریان الکتریکی به محضی که ریل‌ها را لمس کند، جریان الکتریکی برقرار می‌شود.) آیا برای تمام ناظرین نتیجه یکسانی حاصل می‌شود؟ و اگر سرنده از تورفتگی طویل‌تر باشد چه اتفاقی می‌افتد؟ یا هنگامی که سرنده

به لامپ از سمت دیگر به تورفتگی نزدیک می‌شود؟ مواظب باشید: ین مسئله بحث *داغی* به همراه دارد! چه چیز در این آزمایش غیرواقعی است؟

مثال دیگر از انقباض طول زمانی ظاهر می‌شود که مطابق شکل ۳۰ دو شیء مثلا دو ماشین با فاصله d توسط یک طناب راست به یکدیگر متصل هستند. تصور کنید که در لحظه $t = 0$ ساکن هستند و دقیقاً به یک شیوه با هم شتاب می‌گیرند. ناظر ساکن فاصله دو ماشین را همواره ثابت می‌پندارد. از طرف دیگر طناب باید به اندازه $d' = d/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ طویل‌تر شود و بنابراین با شتاب گرفتن ماشین‌ها باید طول طناب گسترش یابد. چه کسی راست می‌گوید؟ خودتان می‌توانید بررسی که این پیش‌بینی توسط تمام ناظرین در ماشین‌ها و روی زمین تأیید می‌شود. چالش ۶۵ د



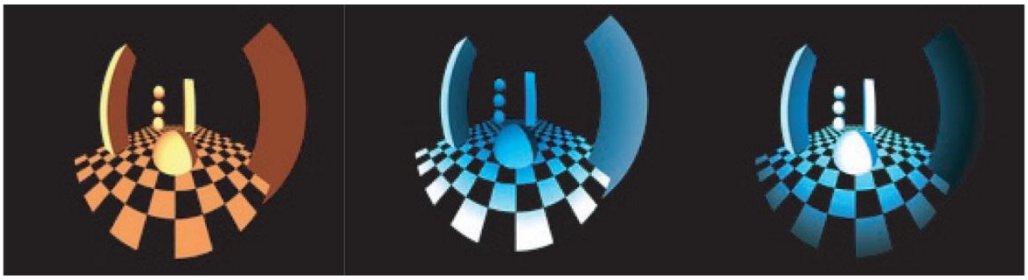


یک مثال جالب اما غیرواقعی از انقباض طول یک زیردریایی است که بصورت افقی حرکت می‌کند[۶۸]. تصور کنید که قبل از حرکت، زیردریایی ساکن وزنش را بگونه‌ای تنظیم کرده است که در آب شناور مانده و نه پایین و نه بالا برود. حال زیردریایی در جهت افقی حرکت می‌کند. کاپیتان مشاهده می‌کند که آب بیرون با رابطه لورنتز منقبض شده است؛ بنابراین آب چگال‌تر است و نتیجه می‌گیرد که زیردریایی بالا خواهد آمد. یک ماهی نزدیک زیردریایی می‌بیند که زیردریایی منقبض شده است پس از آب چگال‌تر است و نتیجه می‌گیرد که زیردریایی پایین می‌رود. چه کسی اشتباه می‌کند و نیروی صحیح بویانسی کدام است؟ چالش ۶۶ د. به طور مشابه به این سوال پاسخ دهید: چرا غیر ممکن است که یک زیردریایی با سرعت نسبیتی حرکت کند؟ چالش ۶۷ د

بطور خلاصه، برای اجسام ماکروسکوپی، انقباض طول جالب است اما احتمالاً هرگز مشاهده نخواهد شد. به هر حال انقباض طول برای *تصاویر* نقش مهمی بازی می‌کند.

فیلم‌های نسبیتی – انحراف و اثر دوپلر

در ماجراجویی خود تا کنون با چند روش مواجه شده‌ایم که در آن هنگامی که با سرعت نسبیتی می‌رانیم محیط اطراف تغییر می‌کند. حال همه اینها را یکجا می‌کنیم. اولاً، انقباض و انحراف لورنتز به تصاویر *واپیچیده* منجر می‌شود. ثانیاً انحراف، دیدن زوایای تقریباً بیش از ۱۸۰ درجه که به آن در زندگی روزانه عادت داریم را افزایش می‌دهد. در سرعت نسبیتی هنگامی که در جهت حرکت نگاه می‌کنیم نوری می‌بینیم برای یک ناظر ساکن قابل دیدن نیست، زیرا برای ناظر دوم نور از پشت می‌آید. سوماً اثر دوپلر تصاویر تغییر رنگ داده را تولید می‌کند. چهارماً حرکت سریع *درخشش* و *کنتراست* تصویر را تغییر می‌دهد: اثری با عنوان اثر چراغ جستجو. هر یک از این تغییرات به جهت نگاه ربط دارد؛ اینها در شکل ۳۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳۱. پرواز کردن از میان سه ستون راست و عمودی با سرعت ۰٫۹ سرعت نور. تصویرسازی توسط دنیل ویسکاپف: سمت چپ با نور اصلی؛ وسط با لحاظ کردن اثر دوپلر؛ و سمت راست شامل اثر درخشش. این تصاویر چیزی که ناظر می‌بیند را نشان می‌دهند (© Daniel Weiskopf)

رایانه‌های پیشرفته ما را قادر نموده است که مشاهدات توسط ناظرین سریع را با کیفیت عکاسی یا در قالب فیلم یا بازی رایانه‌ای تولید کنیم[۱]. تصاویر شکل ۳۲ بصورت ویژه در کمک به درک انحراف تصویر به ما کمک می‌کنند. ویژگی‌های این تصاویر گنجاندن مواردی است همچون زاویه دید، دایره‌ای که اجسام جلو ناظر و پشت ناظر را تمییز می‌دهد، مختصات قدم ناظر و نقطه روی افق که ناظر به سمت آن دارد حرکت می‌کند.

با افزودن این نشانه‌ها در ذهن‌تان هنگامی که دیگر تصاویر یا فیلم‌ها را می‌بینید به درک شفاف‌تر چیزی که نشان می‌دهند کمک خواهد شد.

توجه داریم که تصویری که توسط ناظر متحرک دیده می‌شود در واقع نسخه تحریف شده چیزی است که دیگران در حالت سکون و در همان نقطه می‌بینند. شکل ۳۳ بوضوح این را نشان می‌دهد. اما ناظر متحرک هرگز چیز متفاوتی از ناظرین ساکن در همان نقطه *نمی‌بیند*. در واقع مخروط‌های نور مستقل از حرکت ناظر هستند.

مطالعه دقیق تصاویر اثر دیگری را نشان می‌دهد. اگر چه انقباض لورنتز قابل اندازه‌گیری است اما قابل تصویربرداری *نیست*. این نتیجه اعجاب‌انگیز ابتدا در سال ۱۹۵۹ کشف شد [۶۹]. اندازه‌گیری، بطور همزمان بیانگر موقعیت جسم است؛ در مقابل عکاسی بطور همزمان بیانگر موقعیت ناظر است. در یک عکس یا در یک فیلم، انقباض لورنتز توسط اثرهای ناشی از زمان‌های متفاوت سفر نور از بخش‌های مختلف جسم تصحیح می‌شود؛ نتیجه تغییری است در شکل که یادآور چرخش است نه دقیقاً شبیه یک چرخش. این قضیه در شکل ۳۴ نشان داده شده است. تغییر شکل کامل در نتیجه انحراف وابسته به زاویه است. در مورد انحراف موقعیت‌های ستارگان در آغاز این فصل بحث کردیم [صفحه ۱۷]. در تصاویر کامل، انحراف دایره‌ها را به دایره‌ها تبدیل می‌کند: به چنین انتقالاتی همساز گفته می‌شود. در نتیجه یک کره حتی در سرعت‌های نسبیتی، نمای کلی دایره‌ای دارد – اگر چه ضخامت آن تغییر می‌کند.

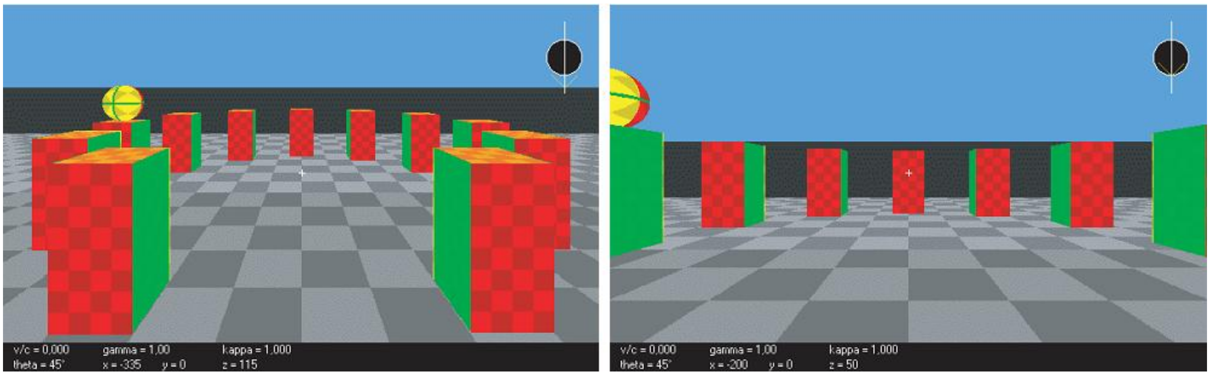
انحراف به *تناقض گردنبد مروارید* منجر می‌شود. اگر حرکت نسبیتی شکل دایره‌ای کره‌ها را تغییر نمی‌دهد اما میله‌ها را به میله‌های کوتاه‌تر تبدیل می‌کند، برای یک گردنبند مروارید که در طول محور خود حرکت می‌کند چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا کوتاه‌تر می‌شود یا خیر؟ چالش ۶۸ د

یک معمای دیگر: تصور کنید که یک کره با سرعت بالا حرکت می‌کند و می‌چرخد. آیا تمام اثرهای مذکور به یک احساس چرخش ظاهری مستقل از ناظر منجر می‌شود؟ چالش ۶۹ پ

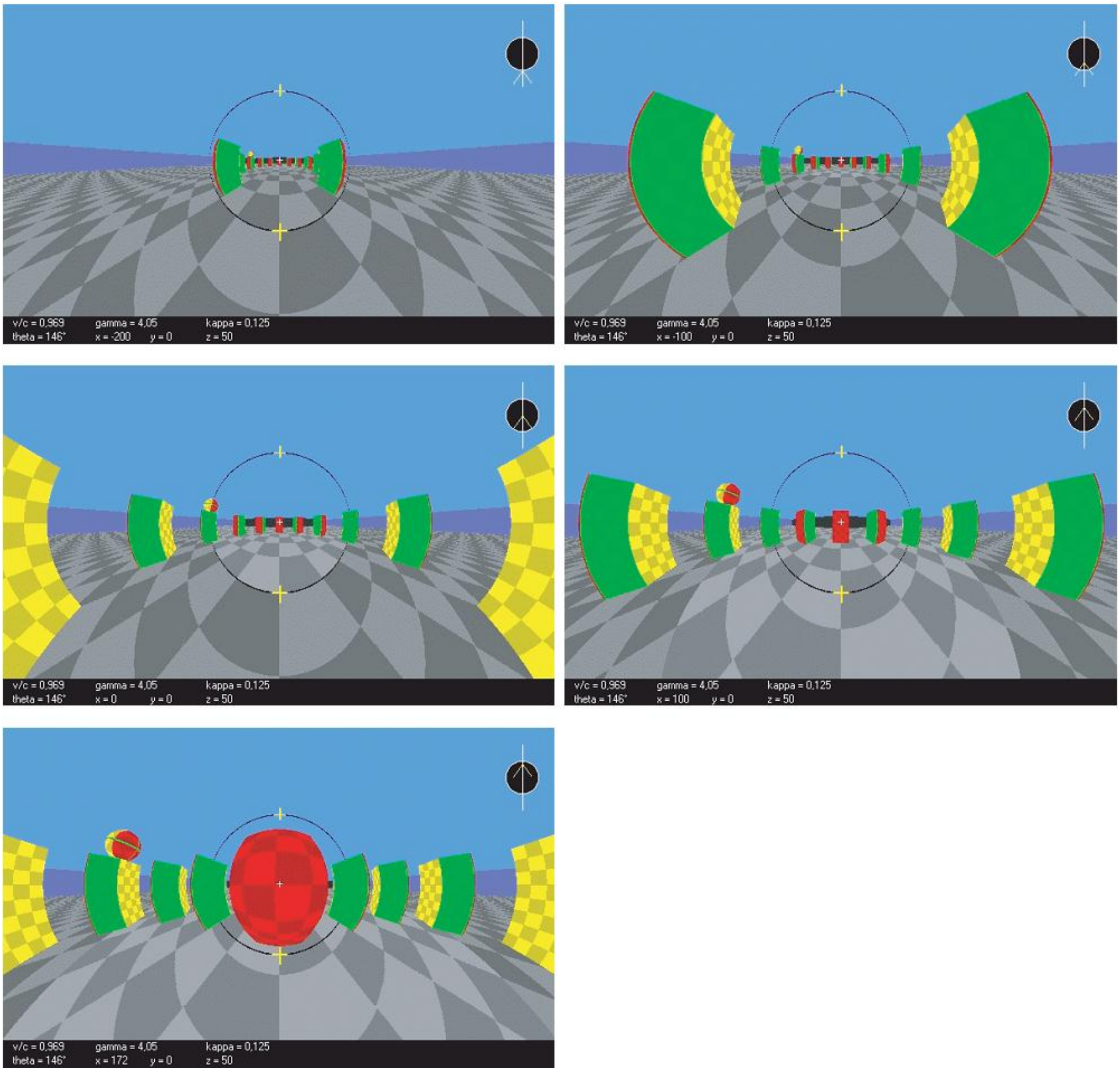
---

۱. برای مثال تصاویر و فیلم‌های عالی بسیار زیادی در www.anu.edu.au/Physics/Searle توسط آنتونی سیرل و www.anu.edu.au/Physics/vrproject توسط کرایگ ساویج و تیمش را ببینید؛ حتی می‌توانید حرکت فعل و انفعالی قابل کنترل را در برنامه قابل دانلود realtimerelativity.org انجام دهید. همچنین مطالب زیبایی وجود دارد در www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~weiskopf/gallery/index.html توسط دنیل ویسکاپف، در www.itp.uni-hannover.de/~dragon/stonehenge/stone1.htm توسط نوربرت دراگون و نیکلای موکروس و در www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de توسط یوت کراوس که زمانی در گروه هانس رودر بود.

منظرهای یک ناظر ساکن



منظرهای یک ناظر با سرعت نسبیتی



شکل ۳۲. پرواز از میان دوازده ستون عمودی (نشان داده شده در دو تصویر بالاتر) با سرعت ۰٫۹ سرعت نور تصویرسازی شده توسط نیکلای موکروس و نوربرت دراگون، که اثر سرعت و موقعیت در انحراف‌ها را نشان می‌دهد (© Nicolai Mokros).

شکل ۳۳. مشاهدات یک محقق ایستاده و یک محقق که سریع در راهرو می‌دود (از آثار رنگ و دخشش چشمپوشی شده است (Daniel Weiskopf ©)

wuerfelketten-xd-640x480.mp4

شکل ۳۴. یک ردیف ثابت از تاس (پایین)،و همان ردیف بالای آن با سرعت نسبیتی به سمت ناظر حرکت می‌کند، البته اثر دوپلر و آثار درخشش لحاظ نشده است.

بهترین صندلی اتوبوس کدام است؟

بگذارید موضوع شگفت‌انگیز دیگری از نسبیت خاص را بررسی کنیم [۶۷]. تصور کنید دو نفر دوقلو درون دو ماشین با شتاب یکسان هستند، یکی در جلوی دیگری است، از حالت سکون در زمان $t = 0$ آغاز به حرکت می‌کنند، البته بر اساس توصیف ناظری که هر دوی آن‌ها را مشاهده می‌کند. (این بار هیچ طناب اتصالی وجود ندارد.) هر دو ماشین به یک اندازه سوخت دارند. به سادگی استنباط می‌کنیم که شتاب هر دو نفر با پایان یافتن سوخت، متوقف می‌شود، در زمان یکسان برای ناظر بیرونی چالش ۷۰ آ. بعلاوه، فاصله بین دو ماشین برای ناظر بیرونی در تمام طول مسیر یکسان باقی می‌ماند، و دو ماشین تا زمانی که اصطکاک ناچیز باشد با یک سرعت ثابت یکسان v به حرکت ادامه می‌دهند. اگر رویدادهایی که در آن موتور ماشین جلو و موتور ماشین عقب خاموش می‌شود را f و b بنامیم، مختصات زمانی آن‌ها از نگاه ناظر بیرونی ساکن با رابطه $t_f = t_b$ به سادگی قابل بیان است. با استفاده از تبدیلات لورنتز می‌توانیم استنباط کنیم که از نگاه دوقلوهایی که با سرعت آزاد حرکت می‌کنند رابطه زیر برقرار است: چالش ۷۱ آ.

$$t'_b = \gamma \Delta x v / c^2 + t'_f \qquad (21)$$

که به این معناست که دوقلوی جلویی بیش از دوقلوی عقبی عمر گذرانده است! به این ترتیب، در سیستم‌های شتابدار، گذر عمر به موقعیت وابسته است.

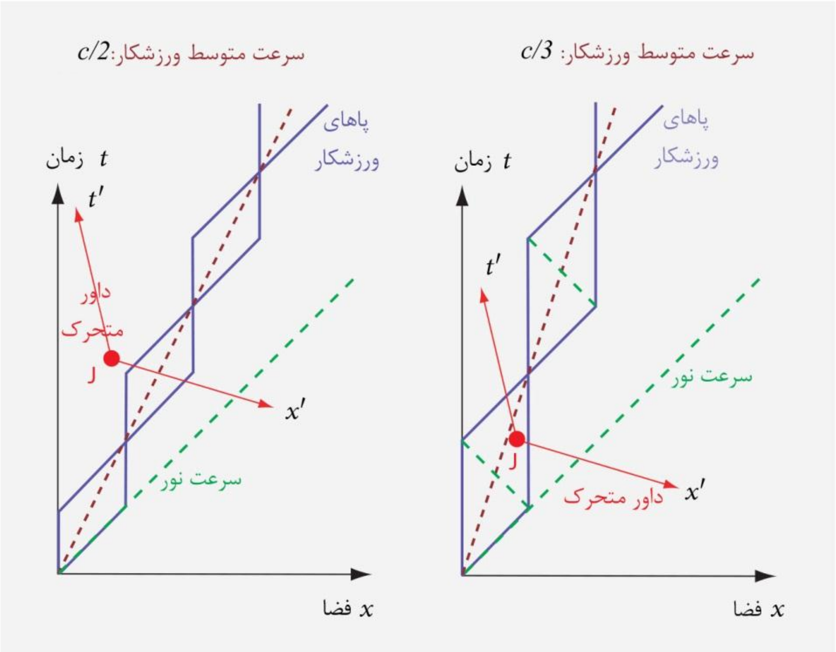
اما برای انتخاب یک صندلی در یک اتوبوس، این نتیجه کمکی نمی‌کند. درست است که صندلی عقب برای یک اتوبوس شتابدار بهترین است، اما برای یک اتوبوس در حال کاهش شتاب، صندلی جلو بهتر است. در پایان سفر انتخاب صندلی نقشی ندارد.

آیا صحیح است از مباحث بالا نتیجه بگیریم که مردمی که در کوهستان‌های بلند هستند سریعتر از مردمی که در دامنه‌ها هستند عمر می‌کنند پس زندگی در دامنه کمک می‌کند که موها دیرتر سفید شود؟ چالش ۷۲ د

یک نفر چقدر سریع می‌تواند راه برود؟

بر خلاف دویدن، راه رفتن به این معناست که بگونه‌ای حرکت کنیم که در هر لحظه حداقل یکی از پاها روی زمین باشد. این یکی از قوانینی است که ورزشکاران باید در رقابت‌های پیاده‌روی المپیک رعایت کنند؛ اگر این قانون را بشکنند محروم خواهند شد. یک دانشجوی ورزشکار داشت فکر می‌کرد در مورد اینکه حداکثر سرعت تئوریک که وی می‌تواند در بازی‌های المپیک حاصل کند چقدر است. حالت ایده‌آل این است که هر یک از پاها سریعاً تا تقریباً رسیدن به سرعت نور شتاب گیرد. سریع‌ترین سرعت پیاده‌روی زمانی حاصل می‌شود که پای دوم از زمین بلند شود دقیقاً در همان لحظه که پای اول بر زمین قرار می‌گیرد. منظور دانشجو از «همان لحظه»، «از نگاه داور مسابقات که نسبت به زمین ساکن است» می‌باشد. حرکت پاها در سمت چپ نمودار شکل ۳۵ نشان داده شده است؛ حد سرعت پیاده‌روی *نصف* سرعت نور است.

اما سپس این دانشجو متوجه می‌شود که داور متحرک بتدریج هر دو پا را بالای زمین می‌بینند و او را از ادامه حرکت محروم می‌کند. برای جلوگیری از محرومیت توسط هر داوری، پایی که بلند می‌شود باید تا رسیدن سیگنال نور از پای پایینی صبر کند. پس حد سرعت پیاده‌روی المپیک فقط می‌تواند یک سوم سرعت نور باشد.



شکل ۳۵. برای ورزشکار سمت چپ، داور مسابقه متحرک در خلاف جهت، در زمان‌های مشخصی مشاهده می‌کند که هر دو پا بالای زمین است اما برای ورزشکار سمت راست اینگونه نیست.

آیا سرعت سایه بیش از سرعت نور است؟

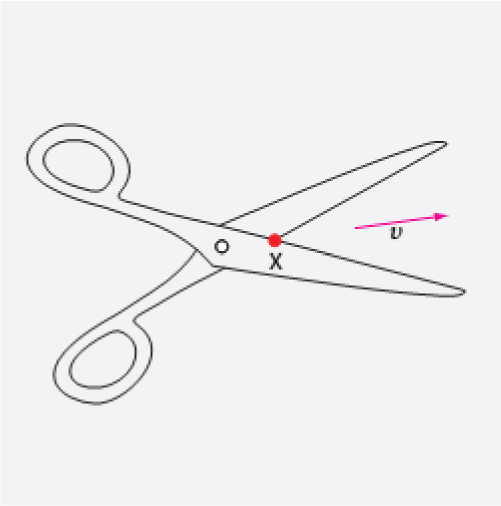
«چه چیز سریعتر از سایه است؟[۱]»

باستان

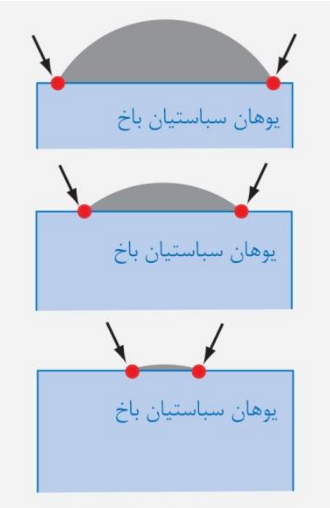
در واقع، سرعت بیش از نور وجود دارد و اتفاقاً رایج است. طبیعت فقط سرعت جرم و انرژی را محدود می‌کند. به هر حال، نقاط غیرمادی یا ماهیت‌های متحرک غیرانرژی و تصاویر می‌توانند سریع‌تر از نور حرکت کنند. چند مثال ساده وجود دارد [صفحه ۴۸]. بوضوح ما از سرعت *مناسب* سخن نمی‌گوییم، که در این موارد به هیچ وجه قابل تعریف نیستند. (چرا؟ چالش ۷۳ د) مثال‌های پیش رو نمونه‌هایی معرفی می‌کنند که اساساً از سرعت نور در خلا بیشتر هستند.

بعنوان مثال اول به نقطه‌ای که یک قیچی، یک کاغذ را برش می‌دهد توجه کنید که در شکل ۳۶ با X مشخص شده‌اند. اگر بازوهای قیچی با سرعت کافی به یکدیگر نزدیک شوند این نقطه سریعتر از نور حرکت خواهد کرد. مثال‌های مشابهی در هر پنجره قابل مشاهده است و در واقع در هر وسیله‌ای که قطعات دوران‌کننده دارند این مثال صدق می‌کند.

مثال دیگری از حرکت فرانور یک ضبط موسیقی از نوع صفحه گرامافون است. که دارد داخل غلاف خود محو می‌شود همانند شکل ۳۷. نقطه‌ای که مرز صفحه گرامافون با مرز غلاف تلاقی می‌کند می‌تواند سریعتر از نور حرکت کند.



شکل ۳۶. مثالی از حرکتی سریعتر از نور



شکل ۳۷. مثال دیگری از حرکت سریعتر از نور

مثالی دیگر زمانی است که به یاد بیاوریم داریم در سیاره‌ای کروی زندگی می‌کنیم. تصور کنید در کف خوابیده‌اید و بلند می‌شوید. آیا می‌توانید نشان دهید که سرعت دور شدن افق از شما می‌تواند سریعتر از نور باشد؟ چالش ۷۴ د

یک مثال استانداردتر حرکت نقطه نور تولید شده توسط اشعه لیزر روی سطح ماه است [۷۱]. اگر اشعه لیزر بتواند بازتاب یابد به سادگی می‌تواند سریعتر از نور حرکت کند. مثال مشابهی مربوط به نقطه نور روی صفحه نمایش یک اسیلوسکوپ است هنگامی که یک سیگنال با

۱. شعاری که اغلب بر ساعت‌های آفتابی نوشته می‌شود.

فرکانس بالا به آن وارد شود. در واقع هنگامی که یک اشعه یک سطح مورب را جاروب می‌کند، نقطه نور می‌تواند به عقب بازگردد، شکافته شود و دوباره یکجا شود. محققان هم در آزمایشگاه و هم در طبیعت به دنبال همچین رویدادهایی هستند.

در نهایت ساده‌ترین مثال از این قرار است. تصور کنید یک چراغ را در مقابل دیوار روشن می‌کنید [۷۱]. در طی فرآیند روشن شدن، مرز بین سطح روشن شده و سطحی که هنوز تاریک است می‌تواند سریعتر از نور حرکت کند. *چراغ نور می‌تواند سرعت فرانور تولید کند.*

همه این مثال‌ها از *سرعت سایه‌ها*، همچنین گاهی سرعت تاریکی‌ها نامیده می‌شود. در واقع هم سایه‌ها و هم تاریکی می‌توانند سریعتر از نور باشند. در واقع هیچ مرزی برای سرعت‌شان وجود ندارد. آیا می‌توانید مثال دیگری بیابید؟ چالش ۷۵ د

بعلاوه، آزمایش‌های فزاینده‌ای در حال تدوین است که بیانگر این است که سرعت فاز یا حتی سرعت گروه برای نور بیش از c است. معمولا تیترهایی در روزنامه‌ها بیان می‌شود که «نور از نور سریعتر حرکت می‌کند». این پدیده شگفت‌انگیز را در آینده بیشتر بررسی خواهیم کرد [جلد سوم صفحه ۱۳۴]. در حقیقت، این موارد را با کمی ساده‌انگاری می‌توان موارد خاصی از پدیده «سرعت سایه‌ها» دانست.

بعنوان مثالی دیگر، تصور کنید در خروجی یک تونل مستقیم به طول l ایستاده‌ایم. ماشینی را می‌بینیم که با سرعت مشخص برای ما یعنی v از طرف دیگر وارد تونل شده و به سمت ما می‌آید. می‌دانیم که ماشین وارد تونل شده زیرا ماشین دیگر زیر نور آفتاب نیست یا اینکه در همان لحظه چراغ‌ها را روشن می‌کند. در چه زمان t پس از اینکه وارد تونل شد از کنار ما عبور می‌کند؟ با استدلالی ساده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t = l/v - l/c \qquad (22)$$

به عبارت دیگر، سرعت نزدیک شدن ماشین v_{appr} برابر است با

$$v_{appr} = \frac{l}{t} = \frac{vc}{c - v} \qquad (23)$$

که برای هر سرعت ماشین بیش از $c/2$ از c بزرگتر خواهد بود. برای ماشین‌ها اغلب چنین رویدادی حادث نمی‌شود اما کیهان‌شناسان نوعی شیء نورانی در آسمان می‌شناسند که *اختروش* یا *کویزار* (خلاصه عبارتی به معنی شیء شبه ستاره) نامیده می‌شود. اختروش گاهی جت‌هایی گازی با سرعت بالا منتشر می‌کند. اگر انتشار در جهت زمین یا در نزدیکی آن باشد، سرعت ظاهری آن- حتی در جزء عرضی خالص- بیش از c است. چنین وضعیت‌هایی اکنون مرتباً با تلسکوپ‌ها مشاهده می‌شود [۷۲].

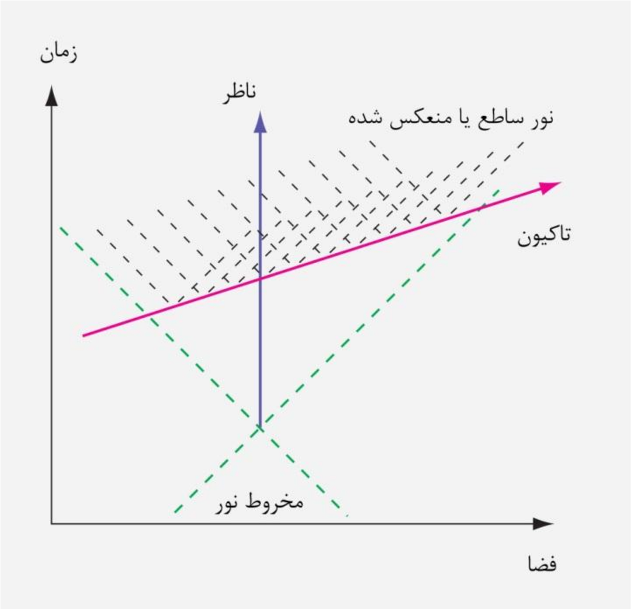
توجه داشته باشید که برای ناظر دوم در *ورودی* تونل، سرعت ظاهری ماشین در *حال دور شدن* برابر است با:

$$v_{leav} = \frac{vc}{c + v} \qquad (24)$$

که *هرگز* بیش از $c/2$ نخواهد شد. بعبارت دیگر، اشیا هرگز با بیش از نصف سرعت نور نمی‌توانند دور شوند.

این داستان یک پیچیدگی نهایی دارد. ما مشاهده کردیم که سرعت بیش از نور به چند طریق قابل دیدن است. اما آیا اصلاً می‌توان *شیئی* را با سرعت بیش از نور مشاهده کرد؟ شگفتا که چنین چیزی به یک طریق نسبتاً غیرعادی قابل مشاهده است. اول از همه، چنین شیء فرضی که معمولا *تاکیون* نامیده می‌شود اگر سریعتر از نور حرکت کند، هرگز در حال نزدیک شدن نمی‌توانیم آن را ببینیم [۷۳]. اگر هم دیده شود یک تاکیون فقط در حال دور شدن است. دیدن یک تاکیون شبیه شنیدن صدای یک جت فراصوت است. تنها پس از اینکه یک تاکیون از نزدیکی عبور کرد، با فرض اینکه در نور آفتاب قابل مشاهده باشد، می‌توانیم متوجه‌اش شویم. ابتدا بارقه‌ای از نور را می‌بینیم که مشابه صدای انفجاری هواپیمای با سرعت فراصوت است. سپس *دو* تصویر از تاکیون را می‌بینیم که جایی در فضا ظاهر می‌شود و در جهت

معکوس دور می‌شود چنانچه از شکل ۳۸ قابل استنباط است. یک تصویر انتقال به سرخ و دیگری انتقال به آبی است. اگر چه یکی از تصاویر دارد به ما نزدیک می‌شود اما کمرنگ‌تر و کوچکتر می‌شود. این یکی را می‌توان رفتاری تقریبا غیرمعمول دانست. بعلاوه اگر بخواهید به تاکیون در شب نگاه کنید و از یک مشعل برای روشنایی کمک بگیرید باید سرتان را در خلاف جهت دستی که مشعل را با آن گرفته‌اید قرار دهید! این نتیجه با نمودار فضا-زمان هم قابل حصول است: می‌توانید بگویید چرا؟ چالش ۷۶ آ آیا تا بحال کسی چنین چیزی دیده است؟

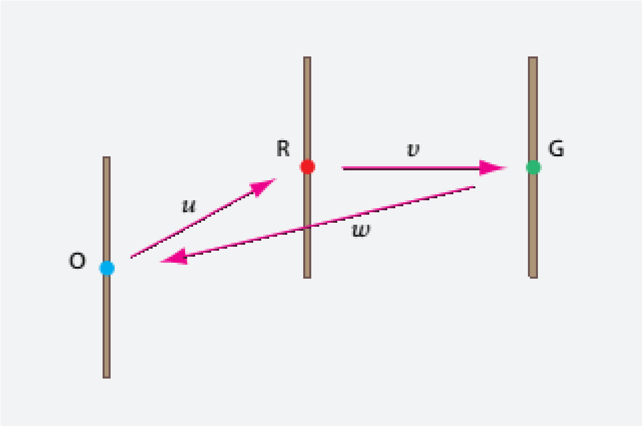


شکل ۳۸. نمودار فرضی فضا-زمان برای مشاهده تاکیون.

تاکیون‌ها اگر وجود می‌داشتند، چیزهای عجیبی بودند [۷۴]: وقتی انرژی از دست می‌دادند، شتاب می‌گرفتند و یک تاکیون با انرژی صفر، سریعترین و با سرعت بینهایت می‌بود و جهت حرکت یک تاکیون به جهت حرکت ناظر بستگی می‌داشت [۷۳]. هیچ چیزی با چنین مشخصاتی تا به حال مشاهده نشده است. بدتر اینکه، همانگونه که دیدیم، تاکیون‌ها انگار از هیچ پدید می‌آیند و با قوانین بقا مقابله می‌کنند؛ و توجه داشته باشید همانگونه که تاکیون‌ها با حواس عادی قابل دیدن نیستند، قابل لمس کردن هم نیستند زیرا هر دو فرآیند از برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی ناشی می‌شوند که در ادامه ماجراجویی‌هایمان خواهیم دید. بنابراین تاکیون‌ها را بر اساس حواس عادی نمی‌توان شیء نامید. در بخش کوانتوم از ماجراجویی خود، نشان خواهیم داد که نظریه کوانتوم در واقع وجود تاکیون‌های (واقعی) را مردود *می‌داند*. به هر حال در خواهیم یافت که نظریه کوانتوم هم به تاکیون‌های «مجازی» *نیاز دارد*.

موازی با موازی، موازی نیست – انحراف تامسون

سرعت حدی نتایج عجیبی در بر دارد. هر دو ناظر می‌توانند یک چوب را با چوب ناظر دیگر موازی نگه دارد حتی اگر نسبت به یکدیگر در حال حرکت باشند. اما بطرز عجیبی، اگر زنجیره‌ای از سه یا بیشتر از چوب‌ها وجود داشته باشند اگر هر دو چوب همسایه با یکدیگر موازی باشند، چوب‌های اول و آخر بطور کلی با یکدیگر موازی *نخواهند بود*. بخصوص اگر حرکت‌های ناظرین در جهات مختلف باشد مثلا اگر بردارهای سرعت یک حلقه را تشکیل دهند، هرگز موازی نخواهند بود. ساده‌ترین وضعیت در شکل ۳۹ نشان داده شده است. در نسبیت خاص، یک تسلسل کلی از انتقالات خالص، یک انتقال خالص را نتیجه نمی‌دهد بلکه یک انتقال بعلاوه یک دوران را در بر دارد [۷۵]. در نتیجه، اولین و آخرین چوب در یک زنجیره موازی معمولاً موازی نیستند.



شکل ۳۹. اگر چوب O با چوب R و چوب R با چوب G موازی باشد، چوب O با چوب G موازی نیستند.

نمونه‌ای از این اثر در حرکت دورانی ظاهر می‌شود. تصور کنید داریم در یک دایره با سرعت نسبیتی حرکت می‌کنیم و یک چوب به دست داریم. همواره چوب را با همان جهت قبلی آن موازی نگه می‌داریم. در انتهای دور، چوبمان نسبت به زمان شروع حرکت، زاویه خواهد داشت. به همان صورت، محور یک جسم چرخان که به دور یک جسم دوم می‌چرخد پس از یک دور جهت آن با جهت اولیه یکسان *نخواهد بود*. به افتخار لوین توماس که این اثر را در سال ۱۹۲۵، ۲۰ سال کامل پس از تولد نسبیت خاص کشف نمود، به این اثر انحراف توماس گفته می‌شود. این اثر از چشم دهها فیزیکدان معروف به دور مانده بود. انحراف توماس در مورد مدار الکترون‌های درون اتم اهمیت دارد زیرا چوب همان اسپین یعنی محور گردش سریع الکترون‌هاست. همه این پدیده‌های اعجاب‌آور کاملا نسبیتی هستند و بنابراین *فقط* در مورد سرعت‌های قابل قیاس با سرعت نور قابل اندازه‌گیری هستند.

یک داستان پایان‌ناپذیر- دما و نسبیت

ناظری که نسبت به یک حمام گرم حرکت می‌کند، چه دمایی را اندازه‌گیری می‌کند؟ مقالات در این زمینه گیج‌کننده است. ماکس پلانک، آلبرت انیشتین و ولفانگ پاولی با این نتیجه موافق هستند: دمای T که توسط یک ناظر با سرعت v اندازه‌گیری می‌شود نسبت به دمای T_0 که توسط ناظر ساکن نسبت به حمام گرم اندازه‌گیری شده از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$T = T_0\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad (25)$$

به این ترتیب یک ناظر متحرک همواره مقدار دمای کمتری از یک ناظر ساکن اندازه‌گیری می‌کند.

در سال ۱۹۰۸ ماکس پلانک از این عبارت استفاده کرد و به همراه ارتباط آن با تبدیل انرژی گرمایی نتیجه گرفت که آنتروپی تحت تبدیلات لورنتز بدون تغییر باقی می‌ماند. پلانک بعنوان کاشف ثابت بولتزمن k، نشان داد که ثابت بولتزمن یک نامتغیر نسبیتی است [۷۶].

به هر حال همه محققان با عبارت تبدیل انرژی موافق نیستند. (البته با نامتغیر بودن k موافق هستند.) برخی تصریح می‌کنند که T و T_0 باید در این فرمول جابه‌جا شوند. همچنین توان‌های متفاوت از جذر ساده هم پیشنهاد شده است [۷۷]. منشأ این اختلافات ساده است: دما فقط برای شرایط تعادل تعریف می‌شود، یعنی برای حمام‌ها. اما حمام یک ناظر با حمام ناظر دیگر یکسان نیست. برای سرعت‌های پایین، یک ناظر متحرک موقعیتی می‌بینند که *تقریباً* یک حمام گرم است؛ اما در سرعت‌های بیشتر این موضوع غلط‌انداز می‌شود. دما از سرعت ذرات مادی مثل اتمها و مولکول‌ها ناشی می‌شود. برای ناظرین سریع، هیچ روش مناسبی برای اندازه‌گیری دما وجود ندارد، زیرا توزیع در تعادل قرار ندارد. هر مقدار دمای تقریبی اندازه‌گیری‌شده برای ناظرین متحرک به محدوده انرژی ذرات ماده مورد استفاده بستگی دارد! خلاصه، تعادل گرمایی یک مفهوم نامتغیر نسبت به ناظر نیست. به این ترتیب هیچ فرمول تبدیل دما برای سرعت‌های بالا

صحیح نیست. (تنها با فرضیات اضافی معینی که عبارت پلانک لحاظ می‌نماید. موارد مشابه برای تبدیل نسبیتی آنتروپی هم وجود دارد.) در واقع، حتی هیچ مشاهده آزمایشگاهی برای بررسی چنین فرمولی هم وجود ندارد. فهم چنین نوعی از اندازه‌گیری چالشی است برای آزمایش‌های آینده- اما نه برای خود نسبیت.

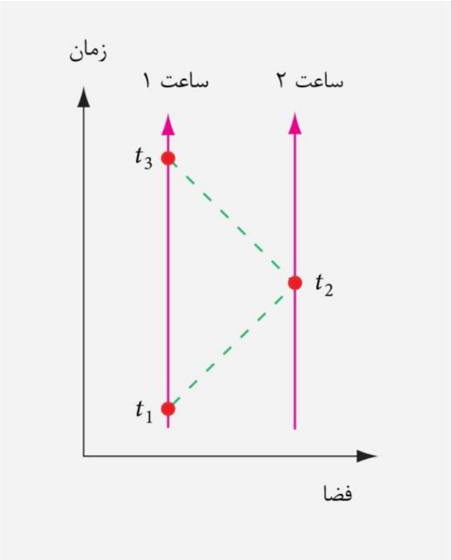
یک کنجکاوی: سرعت یک طرفه نور چیست؟

مشاهده کرده‌ایم که سرعت نور، همانگونه که معمولا تعریف می‌شود و با c نشان داده می‌شود، فقط در صورتی است که ناظر لَخت باشد یا ناظر سرعت نوری که از کنارش رد می‌شود اندازه‌گیری کند (تا اینکه نور از یک فاصله‌ای عبور کند.) به اختصار، سرعت نور باید به صورت محلی اندازه‌گیری شود. اما این شرایط یک ظرافت نهایی را از بین نمی‌برد.

معمولا، طول با زمانی که نور باید طی کند اندازه‌گیری می‌شود. در این مورد سرعت نور بوضوح نامتغیر خواهد بود. خوب چطور می‌توانیم نامتغیر بودن را بررسی کنیم؟ باید اندازه‌گیری‌های طول را حذف کنیم. ساده‌ترین راه برای انجام این کار، بازتاب دادن نور از یک آیینه است همانند شکل ۴۰. نامتغیر بودن سرعت نور بیان می‌دارد که اگر نور در یک خط راست کوتاه، بالا و پایین برود در این صورت ساعت‌ها در دو انتها زمان را با رابطه زیر اندازه می‌گیرند:

$$t_3 - t_1 = 2(t_2 - t_1) \qquad (26)$$

اینجا فرض شده است که ساعت‌ها طبق توضیحات صفحه ۵۱ با یکدیگر هماهنگ شده‌اند. اگر ضریب دقیقاً دو نبود، سرعت نور نامتغیر نمی‌بود. در واقع، همه آزمایش‌ها با لحاظ کردن خطاهای آزمایشگاهی، تا کنون به ضریب دو رسیده‌اند. اما این آزمایش‌ها ما را با یک شک مواجه می‌کنند [۷۸ و ۷۹]: به نظر می‌رسد سرعت یکطرفه نور قابل اندازه‌گیری نیست. آیا موافقید؟ آیا این موضوع مهم است؟ چالش ۷۷ د.



شکل ۴۰. ساعت‌ها و اندازه‌گیری سرعت نور بعنوان یک سرعت دوطرفه.

خلاصه

برای همه سیستم‌های فیزیکی، سرعت انرژی اندازه‌گیری شده بصورت محلی، سرعت پیشرو و سرعت سیگنال اندازه‌گیری شده به $c =$ 299 782 458 m/s یعنی سرعت نور در خلأ محدود می‌شود. در نتیجه، زمان، سن، فاصله، طول، رنگ، جهت‌گیری فضایی، زوایا و دما – تا جایی که قابل تعریف باشد– به ناظر وابسته است. در مقابل، سرعت نور در خلأ c نامتغیر است.

مکانیک نسبیتی

سرعت نور یک کمیت نامتغیر و مقداری محدود است. بنابراین، باید تمام مشهوداتی که بواسطه سرعت تعریف شده‌اند را باید بازبینی کنیم – همه آنها! پایه‌ایترین مشهودات عبارتند از جرم، تکانه و انرژی. بنابراین مکانیک را باید براساس سرعت محدود نامتغیر بازسازی کنیم: به عبارت دیگر، باید *مکانیک نسبیتی* را بنا نهیم.

کنکاش مکانیک نسبیتی ابتدا ما را به سمت *هم‌ارزی جرم و انرژی* رهنمون می‌کند، رابطه‌ای عمیق که اساس فهم ما از حرکت است. مکانیک نسبیتی همچنین ما را به سمت مفهوم *افق* رهنمون می‌کند، مفهومی که در آینده برای فهم سیاهچاله‌ها، آسمان شب و کل جهان به آن نیاز داریم.

جرم در نسبیت

در فیزیک گالیله‌ای، نسبت جرم بین دو جسم با استفاده از برخوردها تعریف می‌شد [جلد اول، صفحه ۱۰۰]. بطور دقیق‌تر، جرم برابر است با قرینه معکوس نسبت تغییر سرعت

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} \qquad (27)$$

به هر حال آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این عبارت برای سرعت‌های نزدیک به نور اشتباه است؛ باید تغییر کند. در واقع، آزمایش نیاز نیست: فقط فکر کردن می‌تواند نشان دهد که این رابطه اشتباه است. می‌توانید این کار را بکنید؟ چالش ۷۸ د

برای حل مسئله تعریف جرم فقط یک راه حل وجود دارد. در واقع، آزمایش‌ها تأیید می‌کنند که دو قضیه گالیله‌ای بقای تکانه و جرم باید بصورت زیر تغییر یابند [۸۰]:

$$\sum_i \gamma_i m_i v_i = const \qquad (28)$$

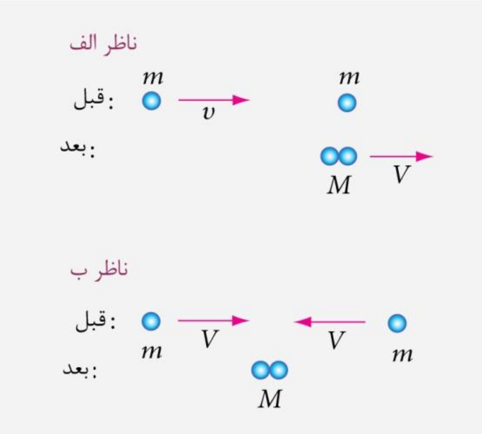
و

$$\sum_i \gamma_i m_i = const \qquad (29)$$

این عبارات بقای تکانه (*نسبیتی*) و بقای جرم-انرژی (*نسبیتی*) هستند. این عبارات در طول مابقی چالش‌هایمان معتبر خواهند ماند.

بقای تکانه و انرژی در خلال چیزهای دیگر بیان می‌دارد که بر خلاف داستان‌های علمی-تخیلی دورنوردی در طبیعت ممکن *نیست*. آیا تأیید می‌کنید؟ چالش ۷۹ د.

بوضوح برای بازیابی فیزیک گالیله‌ای ضرایب تصحیح نسبیتی γ_i باید برای سرعت‌های روزمره برابر واحد باشند یعنی برای سرعت‌هایی که به سرعت نور نزدیک نیستند. بنابراین موضوع همین است. در حقیقت، حتی اگر عبارت ضریب تصحیح نسبیتی را نمی‌شناختیم، می‌توانستیم این نتیجه را از برخورد نشان داده شده در شکل ۴۱ استنباط کنیم.



شکل ۴۱. یک برخورد غیرکشسان از دو ذره یکسان که از دو دیدگاه مرجع لخت دیده می‌شود.

در دیدگاه مرجع اول (الف) داریم $\gamma_v mv = \gamma_V MV$ و $\gamma_v m + m = \gamma_V M$. از مشاهدات دیدگاه مرجع دوم (ب) می‌توانیم استنباط کنیم که V با V ترکیب شده و v را نتیجه می‌دهد، به عبارت دیگر: چالش ۸۰ آ

$$v = \frac{2V}{1 + V^2/c^2} \qquad (30)$$

از ترکیب این روابط، تصحیح نسبیتی γ از طریق رابطه زیر به بزرگی سرعت v وابسته خواهد بود:

$$\gamma_v = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (31)$$

با این عبارت نسبت جرم بین دو ذره برخوردکننده با نسبت زیر تعریف می‌شود:

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

این تعمیم تعریف نسبت جرم فیزیک گالیله‌ای است. ضرایب تصحیح γ_i اطمینان می‌دهد که جرمی که توسط این معادله تعریف می‌شود مشابه تعریف مکانیک گالیله‌ای است، و برای انواع برخوردهای یک جسم یکسان خواهد بود.[1] از این طریق، جرم مقداری است که از راه سختی شتاب دادن به یک جسم مشخص می‌شود و همچنان برای *سیستم‌هایی* از اجسام هم قابل استفاده خواهد بود. (در فصل مربوط به مکانیک گالیله‌ای از یک تعمیم دیگر نیز استفاده کردیم که بر اساس نسبت‌های شتابدهی تعیین می‌شد. تعمیم نسبیتی آن را کنکاش نمی‌کنیم زیرا ظرافت‌هایی را شامل می‌شود که بزودی با آن مواجه خواهیم شد.)

با پیگیری مثال فیزیک گالیله‌ای می‌رسیم به

$$\boldsymbol{P} = \gamma m \boldsymbol{v} \qquad (33)$$

که آن را تکانه (*خطی*) نسبیتی (*سه گانه*) یک ذره می‌نامیم. مجموع تکانه کمیتی باقی است برای هر سیستمی که تحت نفوذ بیرونی نیست و این بقا نتیجه مستقیم روش تعریف جرم است.

---

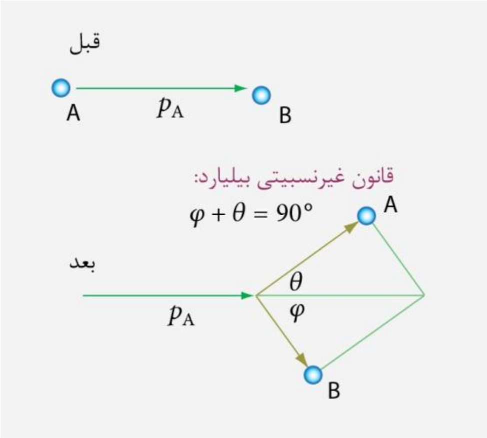
۱. نتایج زیر همچنان نشان می‌دهد که $\gamma = 1 + T/c^2m$ که T انرژی جنبشی یک ذره است.

برای سرعت‌های کم، یا $\gamma \approx 1$، تکانه نسبیتی مشابه تکانه گالیله‌ای است و متناسب است با سرعت. اما برای سرعت‌های بالا، تکانه سریعتر از سرعت افزایش می‌یابد، و با نزدیک شدن به سرعت نور به بی‌نهایت میل می‌کند. این نتیجه توسط داده‌های آزمایشگاهی تأیید شده است چنانکه در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

حال که تعاریف درست از جرم و تکانه را در اختیار داریم، برخوردها را با جزئیات بیشتر می‌توانیم کنکاش کنیم.

چرا بازی اسنوکر نسبیتی سخت‌تر است

یک خصلت معروف برخوردها بین یک ذره یا کره‌ی متحرک و یک ذره ساکن با جرم *یکسان* هنگام بازی اسنوکر یا بیلیارد اهمیت دارد. پس از چنین برخوردی، دو کره با *زاویه قائمه* از یکدیگر دور می‌شوند چالش ۸۲ آ. همانگونه که در شکل ۴۲ نشان داده شده است دو زاویه φ و θ با هم جمع شده و یک زاویه قائمه تشکیل می‌دهند. (تنها استثنا برای این قانون در صورتی است که برخورد کاملاً مستقیم باشد؛ در این حالت کره اول ساکن می‌ماند.)

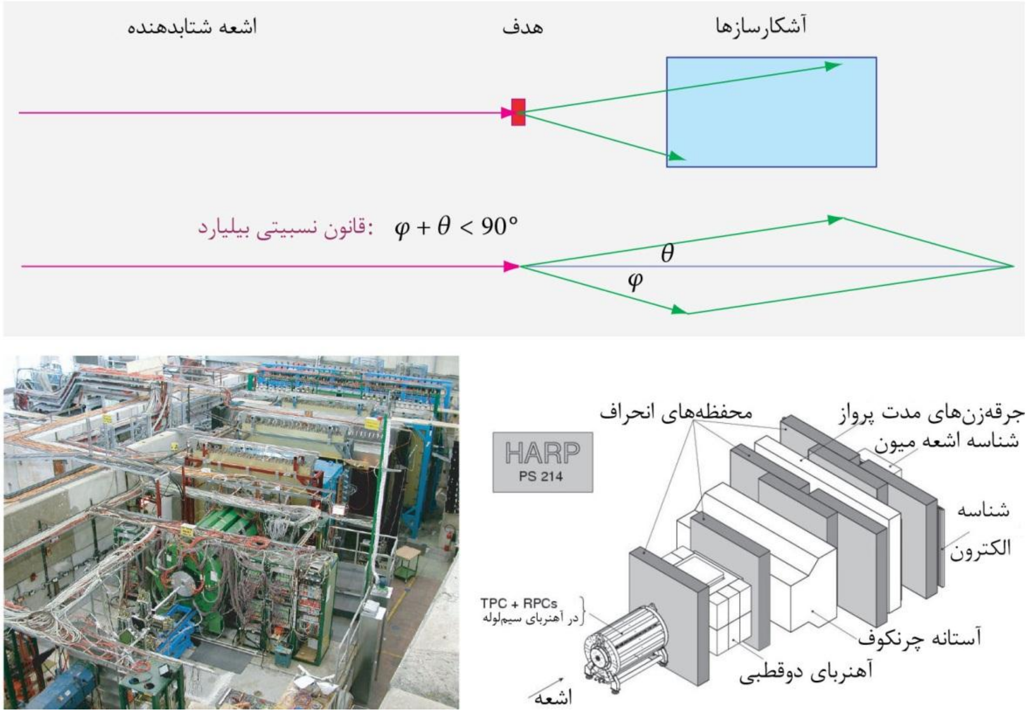


شکل ۴۲. قانون مفید برای بازی غیرنسبیتی اسنوکر – و برای پیش‌بینی برخوردهای غیرنسبیتی *کشسان*.

به هر حال، آزمایش‌ها نشان می‌دهد که قانون زاویه قائمه برای برخوردهای نسبیتی به کار نمی‌آید. در واقع با استفاده از بقای تکانه و کمی تلاش می‌توانید محاسبه کنید که: چالش ۸۳ آ

$$\tan\theta \tan\varphi = \frac{2}{\gamma + 1} \qquad (34)$$

که زوایا در شکل ۴۳ تعریف شده‌اند. طبق این رابطه در حالت نسبیتی مجموع $\theta + \varphi$ *کوچکتر* از زاویه قائمه است. بنابراین سرعت‌های نسبیتی بازی اسنوکر را به کلی تغییر می‌دهند. در واقع هر فیزیکدان شتابدهنده این را می‌داند: برای الکترون‌ها یا پروتون‌ها، این زوایا می‌تواند به سادگی از تصاویر گرفته شده در اتاقک حباب یا اتاقک ابر محاسبه شود، این اتاقک‌ها مسیر باقیمانده از حرکت ذرات را نشان می‌دهند همانند شکل ۴۴ [۱۸]. همه چنین عکس‌هایی عبارت نسبیتی را تأیید می‌کنند. در واقع، اشکال آشکارسازها طبق این عبارت انتخاب می‌شوند (۳۴)، همانگونه که در شکل ۴۳ تصویر شده است. اگر این فرمول – نسبیت-اشتباه می‌بود، بیشتر این آشکارسازها عمل نمی‌کردند، چون بیشتر ذرات را پس از برخورد از دست می‌دادند. اگر نسبیت اشتباه می‌بود، چنین آشکارسازهایی می‌بایست بسیار بزرگتر می‌بودند. در واقع، این آزمایش‌های ذرات همچنین فرمول اجزای سرعت را تایید می‌کنند. می‌توانید نشان دهید؟ چالش ۸۴ آ



شکل ۴۳. ابعاد آشکارسازهای شتابدهنده‌های ذره با یک اشعه بر اساس قانون زاویه بیلیارد نسبیتی – بعنوان مثال آزمایش HARP در CERN (© CERN)

جرم و انرژی هم‌ارز هستند

بگذارید دوباره برگردیم به برخورد خطی و غیرکشسان شکل ۴۱ [صفحه ۶۶]. جرم M سیستم نهایی چقدر است؟ محاسبه نشان می‌دهد که: چالش ۸۵ د

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

به عبارت دیگر، جرم سیستم نهایی بزرگتر از مجموع $2m$ دو جرم اولیه است. بر خلاف مکانیک گالیله‌ای، مجموع همه اجرام در یک سیستم یک کمیت باقی *نیست*. تنها مجموع $\sum_i \gamma_i m_i$ از اجرام اصلاح‌شده، باقی است.