كريستوف شيلر Christoph Schiller

جبل الحركة

مغامرة الفيزياء

المجلد الرابع

كم التغير

السقوط ، التدفق و الحرارة

الطبعة 29 ، متوفرة مجانا بشكل pdf

مع الأفلام من www.motionmountain.net/arabic.html

ترجم إلى العربية من النسخة الإنجليزية من قبل :

أحمد باسل رضوان

Translated from English into Arabic

by: Ahmad Bassel Radwan

الطبعة الثلاثين

حقوق الملكية © 2018 – 1990 لكريستوف شيلر

من السنة الثالثة للأولمبياد الرابع و العشرين

إلى السنة الثانية للأولمبياد الحادي و الثلاثين

إن pdf هذا مرخص بموجب النسبة غير التجارية المشتركة / العامة الإبداعية للأعمال غير المستمدة من غيرها للرخصة الألمانية 3.0 التي نصها الكامل موجود على موقع الإنترنت creativecommons.org/license/by-nc-nd/3.0/de

مع قيد إضافي بأن النسخ ، التوزيع و الاستخدام كليا أو جزئيا ، لأي مادة أو خدمة ، سواء كانت تجارية أو لا ، غير مسموحة بدون موافقة خطية من مالك حق الملكية . و ملف pdf كان و سيبقى مجانا لكل شخص ليقرأه ، يخزنه و يطبعه للاستخدام الشخصي و يوزع إلكترونيا ، ولكن فقط بدون تعديل و بدون مقابل .

إلى بريتا ، إستر و جوستوس آرون

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen strärken , die Sachen klären

في اختلاف الناس تتضح الأشياء

مقدمة

" تحرك أولا ، ثم تعلم " *

عبارة / مقولة قديمة

هذا الكتاب السلسلة لأي شخص لديه فضول حول الحركة في الطبيعة . لكن السؤال كيف تتحرك الأشياء ، الناس ، الحيوانات ، الصور ، و الفضاء الخالي ؟

يفضي الجواب على هذا السؤال إلى العديد من المغامرات ، هذا المجلد يقدم أفضل المغامرات عن الحركة اليومية .

إن الملاحظة الدقيقة للحركة اليومية تمكّننا من استخلاص ست عبارات أساسية " الحركة اليومية مستمرة ، منحفظة / مصونة ، نسبية ، قابلة للانعكاس ، متطابقة و كسولة . نعم الطبيعة فعلا كسولة : في كل حركة هي تقلل للحد الأدنى من التغير .

هذا الكتاب يستعرض كيف تم استنتاج هذه النتائج الست وكيف أنها تتطابق مع كل الملاحظات التي يبدو أنها تتناقض معها.

في بنية الفيزياء الحديثة ، المبينة في الشكل 1 ، فإن النتائج حول الحركة اليومية تشكّل الجزء الرئيس من نقطة البداية في الأسفل . إن المجلد الحالي هو الأول من ست مجلدات تعرض لعلم الفيزياء . و هو ناتج عن هدف ثلاثي وضعته لنفسي منذ عام 1990 : تقديم الحركة بشكل بسيط ، حديث و آسر .

من أجل أن يكون بسيطا فإن النص يركز على المفاهيم ، بينما يبقي العلاقات الرياضية في حدها الأدنى اللازم و فهم المفاهيم الفيزيائية يعطى أولوية على استخدام العلاقات في الحسابات . إن كل النص هو ضمن متناول الطالب في مرحلة الدراسة الجامعية الأولى . و من أجل أن يكون حديثا ، النص غني بالعديد من الإضافات النظرية و التجريبية المنتشرة في جميع المراجع العلمية .

من أجل أن يكون آسرا فإن النص يحاول أن يبهر القارئ قدر المستطاع . إن قراءة كتاب في الفيزياء العامة يجب أن يكون مثل الذهاب لعرض سحري . حيث نشاهد ، و ندهش و لا نصدق أعيننا ، ثم نفكر و أخيرا نفهم الحيلة .

إن مقولة النص " يقوى الناس بفهم الأشياء " وهي عبارة شهيرة حول التعليم تترجم كما سبق و قلنا ، الالتزام فقط بالحقيقة يتطلب شجاعة حيث أن تغيير عادات الفكر ينتج خوفا الذي غالبا يتخفى بالغضب . و لكن بالتغلب على مخاوفنا

فإننا نكبر ونقوى . و عندها نعاني من شعور قوي / شديد و جميل . و كل المغامرات العظيمة في الحياة تسمح بهذا و استكشاف الحركة هو أحدها . فلتستمتعوا بها .

كريستوف شيلر

---

*أولا تحرك ثم تعلم . في اللغة الحديثة ، النوع المذكور من الحركة (القلب) يدعى الخفق / الحفز و كلا المصطلحين يعودان لنفس الجذر اللاتيني .

الوصف النهائي الموحد للحركة

المغامرات : الوصف الدقيق لكل الحركة ، فهم أصل الألوان ، الفراغ – الزمن و الجزيئات ، الاستمتاع بالتفكير المتطرف ، حساب الكتل و الارتباطات / الاقترانات ، الحصول على لمحة أخرى صغيرة من النعيم (المجلد 6)

السهم يشير إلى زيادة في الدقة بإضافة حد للحركة

الفيزياء : وصف الحركة بدقة ، أي استخدام مبدأ الفعل الأقل / أقل جهد .

النسبية العامة : المغامرات : في سماء الليل ، قياس الفضاء المنحني و المرتعش / المتذبذب و استكشاف الثقوب السوداء و الكون ، الفضاء و الزمن (المجلد 2) .

نظرية الكم مع الجاذبية / الثقالة الكلاسيكية : النيترونات المرتدة ، فهم النمو الحر (المجلد 5)

مغامرات نظرية الحقل / المجال الكمي (النموذج المعياري): بناء مسرعات ، فهم الكواركات ، النجوم ، القنابل و أساس مادة الحياة ، المادة و الإشعاع (المجلد 5)

مغامرات الجاذبية / الثقالة الكلاسيكية : التسلق ، التزلج ، السفر في الفضاء ، عجائب علم الفلك و الجيولوجيا (المجلد 1) . حدود G ، الحركة المنتظمة

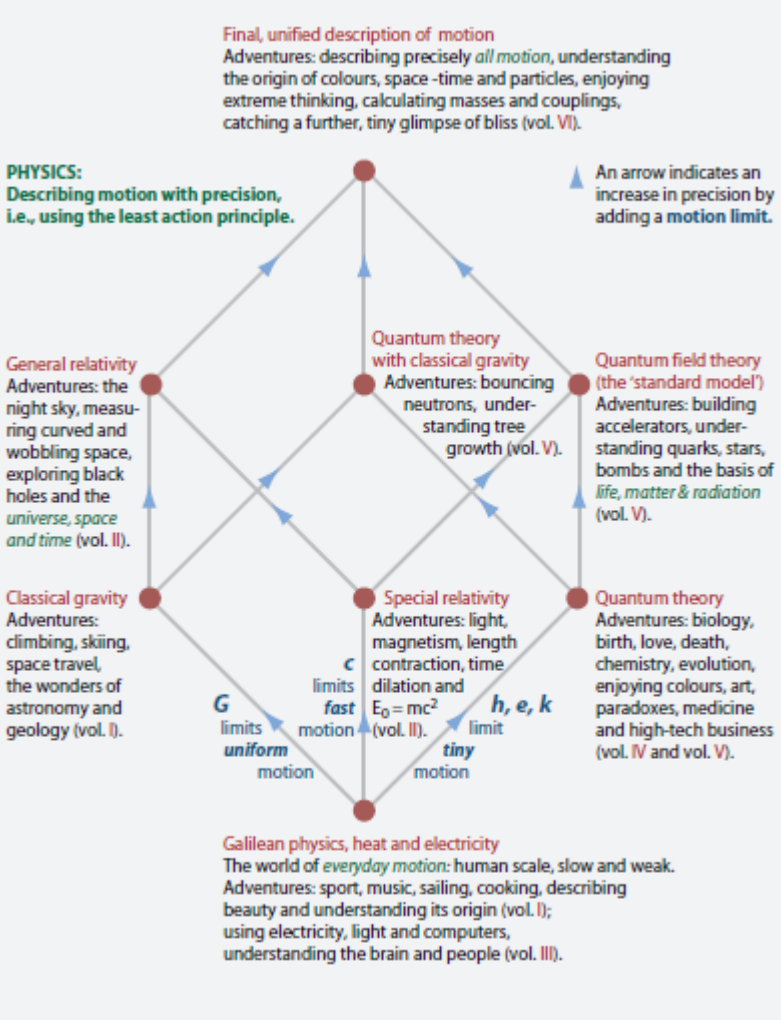
مغامرات النسبية الخاصة : الضوء ، المغناطيسية ، تقلص الطول ، تمدد الزمن و $E_0 = mc^2$ (المجلد 2) . حدود

h,e,k ، الحركة الصغيرة

مغامرات نظرية الكم : علم الحياة ، الولادة ، الحب ، الموت ، التطور ، الاستمتاع بالألوان ، الفن ، التناقضات ، الطب و الأعمال عالية التقانة (المجلد 5 & 4) .

فيزياء غاليليو ، الحرارة و الكهرباء : عالم الحركة اليومية : المقياس البشري ، البطيء و الضعيف .

مغامرات : الرياضة ، الموسيقى ، الإبحار ، الطبخ ، وصف الجمال وفهم أصله (المجلد 1). استخدام الكهرباء ، الضوء و الحاسبات ، فهم الدماغ و الناس (المجلد 3) .



الشكل 1 - خارطة كاملة للفيزياء ، علم الحركة كما اقترحت لأول مرة من قبل Matvei Bronshtein . مكعب Bronshtein يبدأ في الأسفل بالحركة اليومية و يبين الارتباطات بين حقول الفيزياء الحديثة . و كل ارتباط يزيد دقة الوصف و هو بسبب محدودية الحركة التي تؤخذ بالحسبان . إن الحدود معطاة من أجل الحركة المنتظمة بواسطة ثابت الجاذبية G و من أجل الحركة السريعة بواسطة سرعة الضوء c ومن أجل الحركة الصغيرة / الدقيقة بواسطة ثابت بلانك $\hbar$ و الشحنة الأولية e ، و ثابت بولتزمان k .

استخدام هذا الكتاب

إن الملاحظات في الهوامش هي للمراجع العلمية المعتمدة ، و لصفحات أخرى أو لتحديات إيجاد الحلول . وفي النسخة الملونة ، فإن الملاحظات الهامشية ، مؤشرات للملاحظات السفلية و روابط لمواقع إنترنت مطبوعة باللون الأخضر .

وعبر الزمن الروابط على الإنترنت تختفي و أكثر الروابط يمكن استعادتها من خلال www.archive.org الذي يبقي على نسخة من صفحات الإنترنت القديمة . و في نسخة pdf المجانية ، المتوفرة على www.motionmountain.net فإن كل المؤشرات الخضراء و الروابط قابلة للنقر . و نسخة pdf أيضا تحتوي على كل الأفلام ، و يمكن مشاهدتها مباشرة في برنامج Adobe Reader .

إن الحلول و الإرشادات للتحديات معطاة في الملحق . التحديات مصنفة بأنها (e) سهلة ، ذات مستوى مناسب للطالب المعياري (s) و صعبة (d) و ذات مستوى خاص بالبحوث (r) . التحديات التي لا يوجد من أجلها حلول و التي لم يتم تضمينها بعد في الكتاب قد وضعت عليها علامة (ny) .

نصيحة للمتعلمين

التعلم يسمح لنا باكتشاف ما هو نوع الشخص الذي يمكن نحن أن نكون عليه و يوسع التعلم معرفتنا ، يحسّن من الذكاء و يعطي إحساسا بالإنجاز .بالتالي التعلم من كتاب ، خلاصة كتاب يبحث في الطبيعة ، يجب أن يكون فعالا و ممتعا . تجنب طرق التعلم السيئة مثل الطاعون . و لا تستخدم قلم تأشير أو قلم رصاص للإشارة أو وضع خط على النص الورقي . إنه مضيعة للوقت ، حيث يعطي راحة زائفة ويجعل النص غير قابل للقراءة . و لا تتعلم من شاشة ، و بشكل خاص لا تتعلم أبدا من الإنترنت ، من الفيديو ، من الألعاب أو من الهاتف الذكي . أكثر الإنترنت و تقريبا كل الفيديوهات و كل الألعاب سموم و مخدرات للدماغ . و إن الهواتف الذكية هي أوعية مخدرات التي تجعل الناس مدمنين و تمنعهم من التعلم و لا يوجد أي شخص يضع علامات على الورق أو ينظر لشاشة يتعلم بشكل فعال أو يستمتع بالقيام بذلك .

في رأيي كتلميذ و كمعلم ، إحدى طرق التعلم التي لا تخطئ أبدا هي تحويل التلاميذ غير الناجحين إلى ناجحين : إذا كنت تقرأ نصل لدراسته ، لخص كل فقرة تقرؤها ، بكلماتك الخاصة و صورك ، بصوت عال . إذا كنت غير قادر على القيام بذلك اقرأ الفقرة ثانية . كرر هذا حتى تلخص بوضوح ما قرأته بكلماتك الخاصة و صورك بصوت عال . واستمتع بأن تخبر و تقول بصوت عال أنه يمكنك القيام بذلك لوحدك أو مع الأصدقاء ـ في غرفة بينما تمشي . إذا قمت بذلك في كل شيء تقرؤه فإنك ستخفض زمن التعلم و القراءة بشكل كبير وسوف تستمتع بالتعلم من نصوص جيدة أكثر بكثير و تكره النصوص السيئة أقل بكثير . و إن أرباب هذه الطريقة يمكنهم أن يستخدموها حتى بينما يستمعون لمحاضرة ، بصوت منخفض و بالتالي يتجنبون تسجيل الملاحظات .

نصائح للمعلمين

إن المعلم يحب تلاميذه و يحب أن يقودهم لاستكشاف الحقل الذي يختاره و إن حماسته هي الأساس للرضا عن العمل و إذا كنت معلما قبل بدء الدرس ، صور ، اشعر و أخبر نفسك كم تستمتع بموضوع الدرس و بعدها صور واشعر و أخبر نفسك كيف ستقود كلا من تلاميذك ليستمتعوا بالموضوع كما استمتعت أنت ، و قم بهذا التمرين لشكل واع ، كل يوم و سوف تقلل من المشاكل في صفك و تزيد من نجاحك في التعليم .

هذا الكتاب لم يكتب بهدف عمل امتحانات ولكنه مكتوب لجعل المعلمين و الطلاب يفهمون و يستمتعون بالفيزياء ، علم الحركة .

الآراء

إن آخر إصدار pdf للكتاب هو وسيبقى مجانا للتحميل من الإنترنت . و يسعدني أن أتلقى منكم رسائل إلكترونية على عنواني fb@motionmountain.net ، خاصة حول القضايا التالية :

التحدي الأول

- ما هي الأمور غير الواضحة و التي يجب تحسينها ؟

- ما هي القصة ، الموضوع ، الأحجية ، الصورة أو الفيلم الذي لم تفهمه ؟

أيضا ساعد في نقاط خاصة واردة في صفحة الويب www.motionmountain.net/helplhtml والتي هي موضع ترحيب . و كل الآراء سيتم استخدامها لتحسين الإصدار التالي . و إنه مرحب بكم لإرسال الآراء بالبريد الإلكتروني على العنوان التالي fb@motionmountain.net خاصة حول القضايا التالية :

التحدي الأول

- ما هي الأمور غير الواضحة الواجب تحسينها ؟

- ما هي القصة ، الأحجية ، الصورة أو الفيلم الذي لم تفهمه ؟

أيضا المساعدة حول النقاط الخاصة الواردة في صفحة الويب www.motionmountain.net/help.html هي موضع ترحيب و كل الآراء ستستخدم لتحسين الإصدار التالي . و أنتم مرحب بكم لإرسال الآراء بالبريد الإلكتروني أو بإرسالها كملف pdf مع إضافة ملاحظات باللون الأصفر لإعطاء توضيحات أو صور أو المساهمة في التصويب للأخطاء على موقع الويب و إذا كنتم ترغبون بترجمة فصل من الكتاب إلى لغتكم أخبروني من فضلكم . و باسم كل القراء ، أتقدم بالشكر لكم مقدما من أجل مجهودكم في ذلك ، و من أجل أي مساهمة مفيدة خاصة ستذكرون – إذا أردتم - في الثناءات / التقديرات و تتلقوا مكافأة أو كلاهما .

الدعم

إن تبرعكم للمنظمة الخيرية ، غير الربحية المعفاة من الضريبة التي تنتج ، تترجم و تنشر هذه السلسلة من الكتب هو موضع ترحيب . من أجل التفاصيل ، أنظروا من فضلكم في صفحة الويب www.motionmountain.net/donation.html إن مكتب الضرائب الألماني يتأكد الاستخدام الصحيح مسبقا من أجل مساعدتكم باسم كل القراء عبر العالم . إن الإصدار الورقي للكتاب متوفر ، إما بشكل ملون أو بالأبيض و الأسود من www.amayon.com أو www.createspace.com . و الآن استمتعوا بالقراءة .

المحتويات

15 1 **الفعل الأصغر – نظرية الكم للشعراء**

آثار الكم للفعل على السكون 18 . نتائج كم الفعل للأجسام 20 لماذا الكم ؟ 22 . أثر كم الفعل على الحركة 24 . مفاجآت كم الفعل 26 . التحويل ، الحياة و ديموقريطس 28 . العشوائية – نتيجة كم الفعل 31 . الأمواج – نتيجة كم الفعل 33 . الجسيمات – نتيجة كم الفعل 34 . معلومات الكم 35 . فضول و تحديات مرحة حول كم الفعل 36 . أخطار شراء علبة من الفاصولياء 37 . ملخص : فيزياء الكم ، القانون و الترسيخ / العقيدة

40 2 **الضوء – النتائج الغريبة لكم الفعل**

كيف تتصرف المصابيح الضعيفة الضوء 40 . الفوتونات 44 . ما هو الضوء ؟ 46 . حجم الفوتونات 47 . هل الفوتونات قابلة للعد ؟ - الضوء المضغوط 47 . مواضع الفوتونات 51 . هل الفوتونات ضرورية ؟ 54 . التداخل : كيف يمكن لموجة أن تكون مكونة من جسيمات ؟ 56 . تداخل الفوتون الوحيد 59 . الانعكاس و الحيود المستنتج من أسهم الفوتون 60 . الانكسار و الانعكاس الجزئي من أسهم الفوتونات 62 . من الفوتونات إلى الأمواج 63 . هل يمكن للضوء أن يتحرك أسرع من الضوء ؟ - الفوتونات الحقيقية و الافتراضية 64 . عدم تحديد الحقول الكهربائية 65 . هل يمكن لفوتونين أن يتداخلا ؟ 65 . فضول و تحديات مرحة حول الفوتونات 67 . ملخص عن الضوء : الجسيمي و الموجي 69

71 3 **حركة المادة – بعد الفيزياء الكلاسيكية**

كؤوس النبيذ ، الأقلام و الذرات – لا سكون 71 . لا دقة قياس لانهائية 72 . الغاز البارد 72 . التدفقات و تكميم المادة 73 . تدفقات السائل و الكوانتونات 73 . طرق الطاولات و الناقلية المكممة 73 كوانتونات المادة و حركتها – أمواج المادة 75 . الكتلة و تسارع الكوانتونات 78 . لماذا الذرات ليست مسطحة ؟ لماذا توجد الأشكال ؟ 78 . الدوران ، تكميم كمية الحركة الزاوية و عدم وجود الأقطاب الشمالية 80 . دوران الكوانتونات 81 . الفضة ، شتيرن و جيرلاخ – استقطاب الكوانتونات 82 . فضول و تحديات مرحة حول المادة الكمية 84 . أول ملخص عن حركة الجسيمات الكمية 85

86 4 **الوصف الكمي للمادة و حركتها**

الحالات و القياسات – تابع الموجة 86 .عرض تابع الموجة : الأسهم الدوارة و غيوم الاحتمال 88 . تطور الحالة – معادلة شرودنجر 90 . التداخل الذاتي للكوانتونات 92 . سرعة الكوانتونات 93. تشتت الكوانتونات 93 . النفقية و الحدود على الذاكرة – تخامد الكوانتونات 94 . طور الكم 96. هل يمكن لحزمتين إلكترونيتين أن تتداخلا ؟ هل هناك حزم إلكترونية متماسكة ؟ 100 . مبدأ أقل الفعل في فيزياء الكم 101 . حركة الكوانتونات مع البرم 103 . معادلات الموجة النسبية 104 .حركة الارتداد أو الكوانتونات المركبة مقابل الابتدائية / الأولية 106 . فضول و تحديات مرحة حول الحركة الكمية للمادة 108 . ملخص عن الحركة كوانتونات المادة 110 .

111 5 **تباديل الجسيمات – هل الجسيمات مثل القفازات ؟**

تمييز الأجسام الماكروسكوبية 111 . تمييز الذرات 112 . لماذا تظهر عدم قابلية التمييز في الطبيعة 114 . هل يمكن عد جسيمات الكم ؟ 114 . ما هو تناظر التباديل ؟ 115 . عدم قابلية التمييز و تناظر تابع الموجة 116 . سلوك الفوتونات 117 . التحزم / التعنقد و التحزم المضاد 119 . تبعية الطاقة لتناظر التباديل 119 . عدم قابلية التمييز في نظرية حقل الكم 120 . كم هي دقة التحقق من تناظر التباديل ؟ 121 . النسخ ، النسائل / الاستنساخات و القفازات 121 . ملخص 123 .

124 6 **الدورانات و الإحصاءات – عرض / بيان البرم**

جسيمات الكم و التناظر 124 . أنواع جسيمات الكم 126 . البرم 1/2 و الأجسام المربوطة 129 . تعميم خدعة السير 132 . الزوايا ، مبدأ الاستبعاد لباولي و صلابة المادة 134 . هل البرم هو دوران حول محور ؟ الدوران يتطلب الجسيمات المضادة 137 . لماذا التسوير بواسطة حزم الليزر مستحيل ؟ 138 . البرم ، الإحصاء و التركيب 139 . حجم و كثافة المادة 140 . ملخص حول البرم و عدم قابلية التمييز 140 . حدود و مسائل مفتوحة حول الإحصاء الكمي 141 .

142 7 **التنضدات و الاحتمالات – نظرية الكم بدون إيديولوجيا**

لماذا الناس إما أموات أو أحياء ؟ 143 . التنضدات الماكروسكوبية ، التماسك و عدم التماسك / التخلل 143 . إزالة التماسك / الخلخلة بسبب الحمّامات 145 . كيف تؤدي الحمّامات إلى التخلخل – الاسترخاء 147 . ملخص عن التخلخل ، الحياة و الموت 149 . ما هي الجملة ؟ ما هو الجسم ؟ 150 . الخديعة 150 . هل نظرية الكم غير محلية ؟ قليلا عن تناقض أينشتاين – بودولسكي - روزن 154 . فضول و تحديات مرحة حول التنضدات 154 . لماذا تقوض الاحتمالات و تابع الموجة تظهر في القياسات ؟ 156 . لماذا $\hbar$ ضرورية للاحتمالات ؟ 161 . المتحولات المخفية 162 . ملخص عن الاحتمالات و التحديد 164 . ما هو الفرق بين الفراغ و الزمن ؟ 166 . هل نحن مراقبون جيدون ؟ 167 .ما الذي يربط نظرية المعلومات ، علم التشفير / التعمية و نظرية الكم ؟ 167 . هل الكون حاسوب ؟ 168 .هل الكون له تابع موجة ؟ و شروط ابتدائية ؟ 168

170 8 **الألوان و التاثيرات المتبادلة الأخرى بين الضوء و المادة**

أسباب اللون 170 . استخدام قوس قزح لتحديد مم تتكون النجوم 179 . ما الذي يحدد ألوان الذرات ؟180 شكل الذرات 184 . حجم الذرات 185 . الهيدروجين النسبي 187 . معادلات الموجة النسبية – ثانية 188 . الحصول على أول شعور لمعادلة ديراك 190 . المادة المضادة 191 . الجسيمات الافتراضية 192 . فضول و تحديات مرحة حول اللون و الذرات 193 . خواص المادة 195 . تحدي صعب : مقاومة / قوة الكهرطيسية 195 . ملخص عن الألوان و المواد 196

197 9 **فيزياء الكم في عجالة**

نتائج فيزيائية لنظرية الكن 197 . نتائج عن حركة جسيمات الكم 198 . الإنجازات في الدقة و الإحكام 200 . هل نظرية الكم سحر ؟ 202 . نظرية الكم هي تامة و لكن يمكنها فعل المزيد 202

204 A **واحدات ، قياسات و ثوابت**

واحدات SI 204 . معنى القياس 207 . واحدا تبلانك الطبيعية 207 . جمل واحدات أخرى 209.فضول و تحديات مرحة حول الواحدات201 . الإحكام و دقة القياسات 211 . حدود حول الإحكام 213 . الثوابت الفيزيائية 213 .أعداد مفيدة 221 .

222 B **الأعداد و الفضاءات الشعاعية**

الأعداد كبنى رياضية 222 . الأعداد العقدية 224 . الكواتيرونات 226 . الأوكتيونات 232 . أنواع أخرى من الأعداد 233 . من الفضاءات الشعاعية إلى فضاءات هيلبرت 234 . فضول رياضي و تحديات مرحة 237

238 ملاحظات حول التحديات و حلول

246 مراجع

262 تصديقات

امتنان 262 . تصديق عن الأقلام 263 تصديق عن الصور 263

266 دليل الأسماء

273 دليل المواضيع

كم التغير

في بحثنا لفهم كيفية تحرك الأشياء

نكتشف أن هناك أصغر قيمة تغير في الطبيعة

مما يقتضي أن الحركة ضبابية

أن الصناديق لا تكون متينة أبدا

المادة مكونة من وحدات أولية

و أن الضوء و التأثيرات المتبادلة هي تدفقات للجسيمات

قيمة أصغر تغير تشرح لماذا توجد المادة

لماذا الجسيمات هي قفازات غير متشابهة

لماذا آلات النسخ غير موجودة

لماذا الاحتمالات هي مقبولة

و كيف تتشكل كل الألوان في الطبيعة

الفصل الأول

الفعل الأصغري – نظرية الكم للشعراء

" الطبيعة (في أعمالها) لا تعمل أي قفزات "

القرن الخامس عشر

بتسلق جبل الحركة إلى هذه النقطة فإننا قد أكملنا ثلاثة أرجل . و قد مررنا بميكانيك غاليليو (وصف الحركة للأطفال) و بعدها استمرينا في نسبية أينشتاين (وصف الحركة لمتحمسي الخيال العلمي) و أخيرا درسنا الديناميك الكهربائي لماكسويل (وصف الحركة لرجال الأعمال) . هذه الأوصاف الكلاسيكية للحركة كانت معبرة ، جميلة و مفيدة.لكنها لها مشكلة صغيرة : هي خاطئة . السبب بسيط : و لا واحد منها يصف الحياة .

متى راقبنا زهرة أو فراشة مثل تلك التي في الشكل 2 ، فإننا نستمتع بالألوان الزاهية ، الحركة و الرائحة البرية و الشكل الرقيق أو التفاصيل الدقيقة لتناظراتها . لكننا نعلم :

- الفيزياء الكلاسيكية لا يمكنها أن تشرح أي طول مميز أو مقياس زمني ملحوظ في الطبيعة

الآن ، الأزهار و الحيوانات – لكن أيضا العديد من الجمل الحية – لها حجوم مميزة ، مجالات حجم و تناسبات و هي تملك إيقاعات مميزة . في الحقيقة الفيزياء الكلاسيكية لا يمكنها شرح أصلها لأن

- الثوابت الفيزيائية للطبيعة – ثابت الجاذبية G ، ثابت الغاز المثالي R ، سرعة الضوء c ، سرعة الضوء c ، سماحية الخلاء ε_0 ، نفوذية الخلاء μ_0 ، لا تسمح بتعريف مقاييس الطول أو الزمن .

في الحقيقة الثوابت الفيزيائية لا تسمح لنا حتى بقياس قيم السرعة أو القوة ، حتى بالرغم من أن هذه القياسات هي نسب / أجزاء من c & c^4 /G لأنه من أجل قياس الأجزاء ، نحتاج أن نعرّفها أولا ، لكن تعريف الأجزاء أيضا يتطلب مقاييس الطول أو الزمن التي لا تسمح بها الفيزياء الكلاسيكية .

بدون قياسات ليس هناك أيضا مشاعر ! في الحقيقة مشاعرنا تقده بواسطة إحساساتنا / حواسنا . وكل الانطباعات و كل المعلومات التي تعطينا إياها حواسنا – من بين الأشياء الأخرى – هي قياسات .

نظرا لأن الفيزياء الكلاسيكية لا تعطي مقاييس قياس فإننا نعلم :

**الطبيعة (في أعمالها) لا تعمل أي قفزات (مرجع 1)

الشكل 2 – أمثلة على الآلات الكمية

- الفيزياء الكلاسكية لا تسمح بفهم حواسنا أو مشاعرنا

السبب لكل هذه القيود هو الارتباط التالي :

- الفيزياء الكلاسكية لوحدها لا يمكن أن تستخدم لبناء أي جهاز قياس .

كل حاسة تحتوي أجهزة قياس . و كل جهاز قياس مثل أي نموذج أو إيقاع يحتاج إلى مقياس داخلي أو بشكل أعم وحدة قياس داخلية . لأن الفيزياء الكلاسكية لا تعطي أي مقياس ، فإنها لا تشرح كيف تعمل أجهزة القياس ، ولا كيف تعمل الحواس ، و لا كيف تظهر المشاعر .

لفهم المشاعر و الحياة فإننا بحاجة للمضي ابعد من الفيزياء الكلاسكية

خذ أي مثال عن وضعية سارة ، * مثل السماء المسائية الجميلة ، شلال ماء ، طفل سعيد أو الملاطفة (تحدي 2 s) . الفيزياء الكلاسكية غير قادرة على شرح أي جانب من الوضعية : أولا ، الألوان و أصلها يبقى غامضا . ثانيا كل الأشكال ، القياسات ، و التناسبات تبقى غامضة . ثالثا ، التوقيت و فترة كل العمليات القائمة لا يمكن فهمها . رابعا ، كل الأحاسيس و المشاعر المنتجة بهذه الوضعية تبقى غامضة . لفهم وشرح هذه النواحي فإننا بحاجة لنظرية الكم .

---

*الصورة على الشكل 14 تبين أنثى دودة متوهجة ، Lampzris noctiluca ، كما توجد بشكل شائع في المملكة المتحدة ، جون تايلر www.jogntyler.co.uk/gwfacts.htm .

في الحقيقة سوف نجد أن كلا من الحياة و كل نوع من السعادة / المتعة هي أمثلة عن حركة كمية . المشاعر هي عمليات كمية .

في الأيام الأولى للفيزياء ، إن استحالة وصف الحياة و السعادة لم يرى كقصور لأنه لا يمكن للحواس أو خواص المواد أو المقاييس أن يفكر بأنها مرتبطة بالحركة . و السعادة لم تكن تعتبر موضوع مهم للبحث بالنسبة للباحث المحترم بأي شكل . اليوم ، الوضع مختلف . في مغامرتنا (مجلد I ، صفحة 409) فقد تعلمنا أن حواسنا بالزمن ، السمع ، اللمس ، الشم و الرؤية هي أساسا كواشف للحركة .بدون حركة لن يكون هناك حواس . أيضا كل الكواشف مصنوعة من المادة و خلال دراسة الكهرطيسية فقد بدأنا في فهم أن كل خواص المادة هي ناتجة حركات المكونات المشحونة . الكثافة ، الصلابة ، اللون و كل خواص المادة تنتج من السلوك الكهرطيسي لقطع الليجو من المادة (مجلد III ، صفحة 227) :هي الجزيئات ، الذرات و الإلكترونات . بالتالي خواص المادة أيضا هي نتائج للحركة . أيضا لقد رأينا أن هذه المكونات الصغيرة ليست موصوفة بشكل صحيح بواسطة الديناميك الكهربائي الكلاسيكي (مجلد III ، صفحة 243) . و لقد وجدنا حتى أن الضوء نفسه لا يتصرف بشكل كلاسيكي (مجلد III ، صفحة 147) . بالتالي عدم مقدرة الفيزياء الكلاسيكية على وصف المادة ، الضوء و الحواس هي في الواقع ناتجة عن حدودها الذاتية .

في الحقيقة كل فشل للفيزياء الكلاسيكية يمكن أن يعود لاكتشاف وحيد أساسي تم في عام 1899 من قبل ماكس بلانك:* (مرجع 2)

- في الطبيعة قيم الفعل الأصغر من $\hbar = 1.06 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}$ هي غير ملحوظة

كل المحاولات لقياس قيم الفعل الفيزيائي الأصغر من هذا تفشل . ** بمعنى آخر ، في الطبيعة – كما في الفيلم السينمائي – هناك دائما فعل ما (تسمى في السينما إثارة / أكشن). وجود قيمة أصغر فعل – هي ما يسمى مبدأ الكم – هو تباين كامل مع الفيزياء الكلاسيكية (لماذا ؟) (تحدي 3 s) . بالرغم من هذا التباين فإن مبدأ الكم سيصادف في هذا الجزء من صعودنا الجبل . فوق كل شيء ، مبدأ الكم لم يفشل أبدا حتى في اختبار وحيد .

---

*ماكس بلانك (1858-1947) أستاذ الفيزياء في برلين ، حيث كان شخصية محورية في الستاتيك الحراري و الفيزياء الحديثة . لقد اكتشف و سمى ثابت بولتزمان k و كم الفعل $\hbar$ ، وغالبا يسمى ثابت بلانك . و إن مقدمته عن الفرضية الكمية أوجد نظرية الكم : ولقد جعل أيضا أعمال أينشتاين معروفة في المجمع الفيزيائي و لاحقا أمّن عملا له في برلين . وقد تلقى جائزة نوبل في الفيزياء عام 1918 . و قد كان شخصية مهمة في المؤسسة العلمية الألمانية وقد كان أحد القلائل الذين كان لديهم الشجاعة ليخبر أدولف هتلر وجها لوجه أنه كانت فكرة سيئة طرد الأساتذة اليهود . (وقد حصل على ثورة غضب كإجابة) . و قد كان مشهورا ببساطته ، وحصلت له العديد من المآسي الشخصية في حياته ، وقد كان محترما من قبل كل شخص عرفه .

**في الحقيقة هذه القصة هي تبسيط طفيف : الثابت أصلا الذي طرح من قبل بلانك (غير المختصر) هو الثابت $h = 2\pi\hbar$. العامل 2π يؤدي إلى مبدأ الكم النهائي أضيف لاحقا بعض الشيء من قبل باحثين آخرين .

هذا بعض الشيء غير تقليدي و لكنها طريقة مفيدة تعليميا لنظرية الكم و هي من إيجاد نيلز بور .

في هذه الأيام من الصعب مصادفة هذا في المراجع بالرغم من بساطته (مرجع 4 & 3) .

نيلز بور(ولد عام 1885 في كوبنهاجن و توفي عام 1962 فيها) كان من الأشخاص العظام في الفيزياء الحديثة . و هو مفكر جريء و رجل محترم وقد جعل جامعة كوبنهاجن مركزا جديدا لتطوير نظرية الكم مما أزال الأضواء عن غوتنجن . وقد طور وصف الذرة بدلالة نظرية الكم و عن ذلك تلقى جائزة نوبل عام 1922 في الفيزياء . وقد اضطر للهرب من الدانمارك في عام 1943 بعد الغزو النازي بسبب خلفيته اليهودية ، ولكنه عاد بعد الحرب و استمر في جذب أفضل الفيزيائيين في العالم .

الشكل 3 – ماكس بلانك (1858- 1947)

الشكل 4 – نيلز بور (1885-1962)

إن الثابت الأساسي $\hbar$ الذي يلفظ " إيتش بار " يسمى كم الفعل ، أو بشكل مغاير ثابت بلانك . اكتشف بلانك مبدأ الكم عندما كان يدرس خواص الضوء المتوهج أي الضوء الصادر عن الأجسام الساخنة (مجلد III ، صفحة 147) . لكن مبدأ الكم أيضا يطبق على حركة المادة ، و حتى ، كما سنرى لاحقا على حركة الفراغ الحر ، مثل أمواج الجاذبية .

إن مبدأ الكم ينص على أن التجربة يمكن أن تقيس فعل أصغر من $\hbar$. لفترة طويلة ، حاول أينشتاين أن يوجد تجارب تتغلب على هذا الحد . لكنه فشل في كل مساعيه : الطبيعة لا تسمح بذلك كما بين بور مرات و مرات . إن نفس الشيء حدث مع العديد من الباحثين الآخرين .

نسمي هذا في الفيزياء – كما في المسرح – الفعل و هو مقياس للتغير الذي يحدث في جملة . مبدأ الكم بالتالي يمكن إعادة صياغته بالشكل (مجلد I ، صفحة 247)

- في الطبيعة التغير الأصغر من $\hbar = 1.06 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}$ لا يمكن ملاحظته / قياسه

بالتالي أصغر فعل يقتضي أن هناك قمة تغير أصغر ما يكون في الطبيعة . إذا قارنا قياسين فسيكون دائما هناك تغير بينهما . بالتالي كم الفعل ربما الأفضل أن يسمى كم التغير .

هل يمكن لتغير أصغري فعلا أن يوجد في الطبيعة ؟ لقبول الفكرة ، فإننا بحاجة لدراسة ثلاث نقاط مفصلة في الجدول 1 .

نحن بحاجة لبيان أن التغير الصغر لا يلاحظ / لا يقاس أبدا في الطبيعة و نبيت أن قيم التغير لا يمكن ملاحظتها / لا يمكن قياسها أبدا و أخيرا نبين أن كل نتائج هذا التغير الأصغر ما يكون ، بالرغم من كونها غريبة ، يمكن أن تطبق على الطبيعة . في الحقيقة هذه الدراسة تشكل مكونات كل فيزياء الكم . بالتالي هذه الدراسات كلها نقوم بها في بقية هذا الجزء من مغامرتنا . و لكن قبل أن ندرس بعض التجارب التي تؤكد وجود أصغر تغير ممكن ، فإننا نطرح مباشرة بعض نتائجها الأكثر إدهاشا .

تأثيرات كم الفعل على السكون

نظرا لأن الفعل هو مقياس للتغير ، فإن الفعل الأصغري الممكن قياسه يعني أن قياسين متلاحقين لنفس الجملة دائما يختلفان على الأقل بمقدار $\hbar$. في كل جملة ، هناك دائما شيء ما يحدث . بالنتيجة نجد :

الجدول 1 – كيفية إقناع نفسك و الآخرين أن هناك أصغر فعل ممكن أو أصغر تغير ممكن $\hbar$ في الطبيعة . قارن هذا الجدول مع الجدولين في المجلد II ، حول السرعة الأعظمية صفحة 26 و حول القوة الأعظمية صفحة 109 .

العبارة	الاختبار
أصغر قيمة فعل $\hbar$ الثابتة بالنسبة للمراقب	التأكد من كل القياسات
قيم التغير المحلي أو قيم الفعل $\hbar$ >ليست ملحوظة	التأكد من كل القياسات

قيم التغير المحلي أو قيم الفعل $\hbar$ > لا يمكن إنتاجه قيم التغير المحلي أو قيم الفعل $\hbar$ > لا يمكن تخيله	تأكد من كل المحاولات حل كل التناقضات
قيمة أصغر تغير محلي أو فعل $\hbar$ هو مبدأ في الطبيعة	استنتاج نظرية الكم منه بيان أن كل النتائج بالرغم من أنها غريبة مؤكدة بالملاحظة / القياس

- في الطبيعة ليس هناك سكون

كل شيء يتحرك ، في كل الأوقات ، على الأقل قليلا . (صفحة 15) . " الطبيعة تقوم بقفزات " من الصحيح بأن هذه القفزات صغيرة ، حيث أن $\hbar$ صغيرة جدا بحيث يتعذر قياسها بأي من حواسنا . على أن السكون يمكن أن يقاس فقط ماكروسكوبيا وفقط عبر أخذ متوسط لزمن طويل أو العديد من الجسيمات . مثلا ، كم الفعل يقتضي أنه في جبل – و هو جملة متعلقة بالنموذج الأصلي – هو في سكون – كل الذرات و الإلكترونات تتحرك / تطن باستمرار . باختصار

- هناك حركة داخل المادة

نظرا لأن هناك فعل أصغري لكل المراقبين ، و نظرا لأنه ليس هناك سكون ، نستنتج :

- في الطبيعة ليس هناك حركة مستقيمة أو منتظمة مثالية .

انس كل ما تعلمته حتى الآن : الحركة العطالية هي تقريب . الجسم يمكن أن يتحرك بحركة مستقيمة ، منتظمة فقط تقريبا وفقط عندما تقاس حركته ، ويراقب عبر مسافات طويلة أو أزمنة طويلة . سوف نرى لاحقا أنه لكما كان الجسم أكبر كما من الأفضل تقريب حركته . (هل تستطيع تأكيد هذا ؟) (تحدي 4s) . هكذا المراقبين الماكروسكوبيين ما يزال بإمكانهم الحديث عن تناظرات الفراغ – الزمن و النسبية الخاصة يمكن بالتالي أن تتلاقى مع نظرية الكم .

أيضا ، السقط الحر أو الحركة على طول الجيوديزيا ، توجد فقط كمتوسط عبر زمن طويل . لذا النسبية العامة

التي تستند لوجود المراقبين في حال السقوط الحر لا يمكن أن تكون صحيحة عندما تكون هناك أفعال من المرتبة $\hbar$. في الحقيقة تصالح / توافق مبدأ الكم مع النسبية العامة – و بالتالي مع الفراغ المنحني – هو تحدي كبير . (الجل هو بسيط من أجل الحقول اليومية الضعيفة) . القضايا القائمة هي مشتتة جدا للذهن و هي تشكل الجزء النهائي المنفصل لهذه المغامرة . بالتالي سوف ندرس الحالات بدون جاذبية أولا .

نتائج كم الفعل للأجسام

هل تساءلت قط لماذا الأوراق خضراء ؟ ربما تعلم أن بأنها خضراء لأنها تمتص الأزرق (طول موجة قصير) و الأحمر (طول موجة طويل) بينما تسمح للضوء الأخضر (طول موجة متوسط) بأن ينعكس . كيف يمكن لجملة أن ترشح الأطوال الموجبة القصيرة والطويلة و تمرر المتوسطة ؟ للقيام بذلك الأوراق يجب أن تقيس بشكل ما التردد . ولكن لقد رأينا بأن الفيزياء الكلاسيكية لا تسمح بقياس مجالات الزمن (أو الطول) حيث أن أي قياس يتطلب واحدة قياس والفيزياء الكلاسيكية لا تسمح بتعريف مثل هذه الواحدات (مجلد I ، صفحة 436) . من ناحية أخرى يستغرق الأمر بضعة سطور لتأكيد أنه بمساعدة كم الفعل $\hbar$ (وثابت بولتزمان k ، كلاهما مكتشفان من قبل بلانك) فإنه يمكن تعريف كل الواحدات الأساسية للكميات القابلة للقياس التي تتضمن الزمن و بالتالي التردد . (هل يمكنك يجاد تشكيل من سرعة الضوء c ، ثابت الجاذبية G و كم الفعل $\hbar$ الذي يعطي الزمن ؟ (تحدي 5 s) هذا سيستغرق بضعة دقائق) .

باختصار القياسات فقط ممكنة فقط بسبب وجود كم الفعل .

- كل القياسات هي تأثيرات كمية

عندما رأى بلانك أن كم الفعل سمح بتعرف كل الواحدات في الطبيعة فقد كان سعيدا مثل طفل و قد علم مباشرة أنه قد قام باكتشاف كبير ، حتى بالرغم (أنه في 1899) لم تكن نظرية الكم موجودة بعد .

وحتى أنه قد أخبر ابنه البالغ سبع سنين من العمر إروين عن ذلك ، بينما كانا يمشيان في الغابة حول برلين (مرجع 5) . وقد شرح بلانك لابنه أنه قد قام باكتشاف مهم مثل الجاذبية العامة . وفي الحقيقة علم أنه قد أوجد الفهم الأساسي للعديد من التأثيرات التي كانت غير مفهومة .

- في الطبيعة كل الأوقات و كل الترددات ناتجة عن كم الفعل

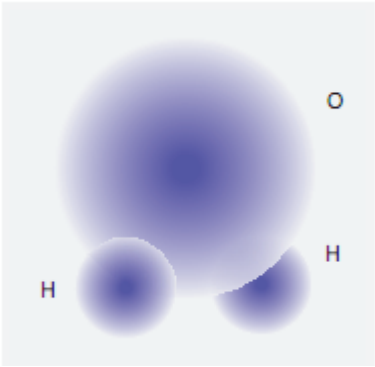
كل العمليات التي تستغرق زمنا هي عمليات كمية . إذا كنت تفضل ، الانتظار هو أثر كمي ! بشكل خاص بدون كم الفعل ، تذبذبات و أمواج لا يمكن الوجود :

- كل لون هو أثر كمي

لكن هذا ليس كل شيء .

بلانك أدرك أن كم الفعل يسمح لما بفهم حجم كل الأشياء .

- كل حجم هو أثر كمي .



الشكل 5 – تصور / رسم فني لجزيئة ماء مكونة من ذرتي هيدروجين (H) و ذرة أكسجين (O)

هل يمكنك إيجاد تشكيل من $\hbar$ & G , c التي تعطي الطول ؟ (تحدي 6e) بواسطة كم الفعل لقد أصبح أخيرا من الممكن تحديد الحجم الأعظمي للجبال ، الأشجار ، و البشر (مجلد I ، صفحة 336) . لقد علم بلانك أن كم الفعل أكد أن غاليليو قد استنتج قبله بفترة طويلة : أن الأحجام ناتجة عن مقاييس أساسية أصغر ما تكون في الطبيعة .

وقد فهم ماكس بلانك أيضا أن كم الفعل $\hbar$ كان آخر ثابت مفقود في الطبيعة . و بواسطة $\hbar$ أصبح من الممكن تعريف الواحدة الطبيعية لكل خاصة قابلة للقياس في الطبيعة . معا فإن $\hbar$ & G , c تسمح بتعريف الواحدات المستقلة عن الثقافة أو الحضارة – حتى الكائنات من خارج الأرض سيفهمونها . * باختصار إن $\hbar$ سمح بفهم كل القيم القابلة للقياس . و بالتالي من الممكن بـواسطة $\hbar$ رسم المخطط المبين في الشكل 1 الذي يتضمن كل الحركة في الطبيعة و بالتالي كل الفيزياء .

في بيئتنا حجم كل الأجسام مترابط و ناتج عن حجم الذرات . بدوره حجم الذرات هو نتيجة مباشرة لكم الفعل . هل يمكنك استنتاج تقريب لحجم الذرات ، بمعرفة أنها معطاة بواسطة حركة الإلكترونات ذات الكتلة m_e و الشحنة e المقيدة

بكم الفعل ؟ (تحدي 8s) . هذا الارتباط هو علاقة بسيطة مكتشفة في عام 1910 من قبل أرثر إيرك هاس قبل 15 عاما من صياغة نظرية الكم .

- حجم الذرات هي تأثيرات كمية

في ذلك الوقت تم السخرية من هاس . ** و الآن علاقته التي تعطي حجم الذرات توجد في كل الكتب (صفحة 185) التي تتضمن كتابتا هذا . في تحديد حجم الذرات فإن كم الفعل له نتيجة مهمة أخرى :

- رحلات غوليفر مستحيلة

ليس هناك أناس أقزام و ليس هناك عمالقة . بشكل كلاسيكي ، لا شيء يتحدث ضد الفكرة ، ولكن كم الفعل يمنعها (تحدي 9s) . هل يمكنك إعطاء فرضية مفصلة ؟

---

*في الحقيقة أيضا من الممكن تعريف كل واحدات القياس بدلالة سرعة الضوء c ، ثابت الجاذبية G و شحنة الإلكترون e . لماذا هذا غير مرضي بالكامل ؟ (تحدي 7s) .

**قبل اكتشاف $\hbar$ فإن مقياس الطول الوحيد للإلكترون كان التركيبة $e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2) \approx 3\ \mathrm{fm}$ وهذا هو أصغر بعشرة آلاف مرة من الذرة . و نشدد على أن أي مقياس طول يحتوي على أثر كمي و ليس مقياس طول كلاسيكي ، لأن e هو كم الشحنة كهربائية .

الشكل 6 – ماكس بورن (1882-1970)

لكن إذا كان السكون غير موجود ، كيف يمكن للأشكال أن توجد ؟ أي شكل في الحياة اليومية بما فيه أشكال الزهور هو نتيجة أجزاء الجسم الباقية في سكون بالنسبة لبعضها البعض . الآن كل الأشكال تنتج من تبادل التأثير بين مكونات المادة كما هو مبين بالشكل الأكثر وضوحا في أشكال الجزيئات . لكن كيف يمكن لجزيئة مثل جزئية الماء H_2O المبينة في الشكل 5 أن يكون لها شكل ؟ في الحقيقة الجزيئة ليس لها شكل ثابت و لكن يتذبذب شكلها كما يمكن توقعه من كم الفعل . بالرغم من التذبذبات فإن كل جزيئة لها شكل متوسط ، لأن الزوايا المختلفة و المسافات المختلفة تقابل الطاقات المختلفة . مرة ثانية هذه القيم المتوسطة للطول و الزاوية توجد لأن كم الفعل يعطي مقاييس الطول الأساسية في الطبيعة . بدون كم الفعل لن يكون هناك أشكال في الطبيعة .

- كل الأشكال هي تأثيرات كمية

كل الأشكال في الحياة اليومية ناتجة عن أشكال جزيئية ، أو تعميماتها . إن كتلة جسم هي أيضا نتيجة كم الفعل كما سنرى لاحقا .

نظرا لأن كل خواص المادة – مثل الكثافة ، اللون ، الصلابة أو قابلية الاستقطاب تعرف باشتراك واحدات الطول ، الزمن و الكتلة فإننا نجد :

- كل خواص المادة تظهر من كم الفعل

باختصار كم الفعل يحدد حجم ، شكل ، لون ، كتلة و كل الخواص الأخرى للأجسام من الأحجار إلى الكريما المخفوقة .

لماذا الكم ؟

تأثيرات الكم تحيط بنا من كل جانب . لكن نظرا لأن كم الفعل هو صغير جدا ، فإن تأثيراته تظهر في الأغلب على الحركة ، ولكن ليس حصريا ، في الأنظمة الميكروسكوبية . دراسة مثل هذه الأنظمة سميت بميكانيك الكم من قبل ماكس بورن ، وهو أحد كبار المساهمين في هذا المجال .* لاحقا مصطلح نظرية الكم أصبح أكثر شيوعا .

---

*ماكس بورن (ولد عام 1882 في بيرسلاو و توفي عام 1970 في غوتنجن) و قدر درس أولا الرياضيات وبعدها تحول للفيزياء . و كأستاذ في جامعة غوتنجن فقد جعل المدينة أحد المراكز العالمية للفيزياء . وقد طور ميكانيك الكم مع مساعديه فيرنر هايزنبيرغ و باسكال جوردان وبعدها طبقه على التشتت ، فيزياء الحالة الصلبة ، البصريات و السوائل .

الجدول2 – بعض الجمل الصغيرة في الحركة و قيم الفعل المقاسة من أجل تغيراتها

الجملة و التغير	الفعل	الحركة
الضوء		
أصغر قدر من الضوء الممتص من قبل سطح ملون	$1\hbar$	كمي
أصغر تأثير عندما ينعكس الضوء عن مرآة	$2\hbar$	كمي
أصغر قدر مرئي بشكل واعي من الضوء	تقريبا $5\hbar$	كمي
أصغر قدر ممتص من الضوء في بتلة / تويج الزهرة	$1\hbar$	كمي
اسوداد الفيلم الفوتوغرافي	تقريبا $3\hbar$	كمي
الفلاش / الومضة الفوتوغرافية	تقريبا $10^{17}\hbar$	كمي
الكهرباء		
الإلكترون الملفوظ من ذرة أو جزيئة	تقريبا $1\text{-}2\hbar$	كمي
الإلكترون المستخلص من ذرة	تقريبا $1\text{-}2\hbar$	كمي
حركة الإلكترون داخل معالج مصغر	تقريبا $2\text{-}6\hbar$	كمي
نقل الإشارة في الأعصاب من جزيئة لأخرى تالية / مجاورة	تقريبا $5\hbar$	كمي
تدفق التيار في ضربة البرق	تقريبا $10^{38}\hbar$	كلاسيكي
المواد		
تبعيد / تمزيق ذرتي حديد عن بعضهما	تقريبا $1\text{-}2\hbar$	كمي
كسر قضيب فولاذي	تقريبا $10^{35}\hbar$	كلاسيكي
عملية أساسية في الناقلية المفرطة / سوبرناقلية	$1\hbar$	كمي
عملية أساسية في الترانزستورات	$1\hbar$	كمي
عملية مغنطة أساسية	$1\hbar$	كمي

الكيمياء		
اصطدام ذرة في سائل عند درجة حرارة الغرفة	$1\hbar$	كمي
تذبذب الشكل لجزيئة الماء	تقريبا $1\text{-}5\hbar$	كمي
تغير الشكل لجزيئة مثل في تفاعل كيماوي	تقريبا $1\text{-}5\hbar$	كمي
تفاعل كيماوي وحيد لتجعيد شعرة	تقريبا $2\text{-}6\hbar$	كمي
تمزيق جزيئتي جبن موزاريلا	تقريبا $300\hbar$	كمي
شم جزيئة واحدة	تقريبا $10\hbar$	كمي
حرق وقود في سلندر في محرك انفجاري لسيارة عادية	تقريبا $10^{37}\hbar$	كلاسيكي
الحياة		
جزيئة هواء تضرب طبلة الأذن	تقريبا $2\hbar$	كمي
أصغر صوت إشارة قابل للكشف من قبل الأذن	تحدي 10 ny	
خطوة تضاعف DNA وحيدة خلال انقسام الخلية	تقريبا $100\hbar$	كمي
إخصاب البويضة	تقريبا $10^{14}\hbar$	كلاسيكي
أصغر خطوة في المحرك الجزيئي	تقريبا $5\hbar$	كمي
حركة النطفة بمقدار طول خلية واحدة	تقريبا $10^{15}\hbar$	كلاسيكي
انقسام الخلية	تقريبا $10^{19}\hbar$	كلاسيكي
ضربة جناح ذبابة الفاكهة	تقريبا $10^{24}\hbar$	كلاسيكي
شخص يمشي بطول جسم واحد	تقريبا $2.10^{36}\hbar$	كلاسيكي
النوى و النجوم		
تفاعل الاندماج النووي في النجم	تقريبا $1\text{-}5\hbar$	كمي
انفجار مفجر أشعة غاما	تقريبا $10^{80}\hbar$	كلاسيكي

إن نظرية الكم تنتج من وجود اصغر القيم الممكنة القابلة للقياس في الطبيعة ، التي تعمم الفكرة التي كانت لدى غاليليو في القرن السابع عشر . كما ناقشنا بالتفصيل سابقا (مجلد ا ، صفحة 333) ،فقد كان هناك إصرار من غاليليو على الكمات الأصغر ما يكون للمادة التي جعلته يقع في مشكلة . و سوف نكتشف سريعا أن فكرة التغير الأصغر ما يكون هي ضرورية من أجل الوصف الدقيق و المحكم للمادة و للطبيعة ككل . بالتالي اعتمد بورن مصطلح غاليليو من أجل الفرع الجديد من الفيزياء و سماه نظرية الكموم . و اللغة الإنجليزية اعتمدت المفرد اللاتيني "كم " بدلا من الجمع المستخدم في أكثر اللغات الأخرى .

لاحظ أن مصطلح كم لا يقتضي أن كل قيم القياس هي مضاعفات من أصغر قيمة : هي فقط كذلك في بضع حالات . نظرية الكم هي وصف الحركة الميكروسكوبية . نظرية الكم ضرورية متى أنتجت العملية قيمة فعل من مرتبة كم الفعل .

يبين الجدول 2 أن كل العمليات على المستويات الذرية و الجزيئية بما فيها العمليات البيولوجية و الكيماوية هي عمليات كمية . و كذلك عمليات إصدار الضوء و امتصاصه . هذه الظواهر يمكن فقط وصفها بواسطة نظرية الكم .

أيضا يبين الجدول 2 أن مصطلح ميكروسكوبي له معنى مختلف بالنسبة للفيزيائي و بالنسبة للبيولوجي . بالنسبة للبيولوجي الجملة هي ميكروسكوبية إذا كان فعلها المميز من مرتبة كم الفعل . بمعنى آخر بالنسبة لفيزيائي فإن الجملة تكون عادة ميكروسكوبية إذا حتى لم تكن مرئية في المجهر الضوئي . و لزيادة الإرباك بعض فيزيائي الكم في هذه الأيام يسمون النوع الخاص بهم من أنظمتهم الميكروسكوبية بالميزوسكوبي بينما يسميها آخرون بالجمل النانوسكوبية . كلا المصطلحين قد أدخلا فقط لجذب الاهتمام و التمويل : وهما عديمي الفائدة من الناحية المفهومية .

أثر كم الفعل على الحركة

هناك طريقة أخرى لتمييز الفرق بين الجملة الميكروسكوبية أو الكمية ، الجملة الماكروسكوبية أو الكلاسيكية . الفعل الأصغر ما يكون يقتضي أن الفرق بين قيم الفعل S لقياسين متتاليين لنفس الجملة متباعدين بمقدار زمن Δt لا يمكن أن يتلاشى . و لدينا :

$$|S(t+\Delta t)-S(t)| = |(E\pm\Delta E)(t+\Delta t)-Et| = |E\Delta t \pm t\Delta E \pm \Delta E\Delta t| \geqslant \frac{\hbar}{2}. \qquad (1)$$

العامل 1/2 يظهر لأن أصغر فعل $\hbar$ يقتضي آليا عدم تحديد الفعل لنصف قيمته . الآن قيم الطاقة E و الزمن t ولكن ليس (القيمة الإيجابية) ΔE أو Δt يمكن أن يوضع مساويا للصفر إذا اخترنا مراقب مناسب . بالتالي ، وجود كم الفعل يقتضي أنه في أي جملة التطور مقيد

لقد كان أول من فهم أن تابع الموجة أو تابع الحالة ، يصف مطال الاحتمال . (مرجع 6) لاحقا كتب بورن و إميل ولف ما يزال الكتاب الرئيسي عن البصريات . العديد من كتب بورن كانت كلاسيكية و تقرأ في كل العالم .

جذب بورن إلى غوتنجن أكثر المواهب اللامعة التي استقبلت كزوار مثل هوند ، باولي ، نوردهايم ، أوبنهايمر ، جوبيرت – ماير ،كوندون ، باولنج ، فوك ، فرينكل ، تام ، ديراك ، موت ، كلاين ، هايتلر ، لندن ، فون نيومان ، تيلر ، فينجر و عشرات آخرين . ولكونه يهوديا فقد بورن وظيفته في 1933 ، عندما سيطر المجرمون على الحكومة الألمانية . وقد هاجر ،وأصبح أستاذا في إدنبره حيث بقي لأكثر من عشرين عاما . الفيزياء في غوتنجن لم تعوض قط خسارته. من أجل توضيحه لمعنى تابع الموجة فقط تلقى جائزة نوبل عام 1954 في الفيزياء .

الشكل 7 – فيرنر هايزنبرغ

بالشكل

$$\Delta E\Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2}, \qquad (2)$$

حيث E طاقة الجملة و t عمرها بحيث أن ΔE هو تغير الطاقة و Δt هو الزمن بين قياسين متعاقبين .

بتفسير مشابه نجد أنه من أجل أي جملة فيزيائية فإن الموضع وكمية الحركة تكون مقيدة بالشكل (تحدي e 11)

$$\Delta x\Delta p \geqslant \frac{\hbar}{2}, \qquad (3)$$

حيث Δx هو عدم التحديد في الموضع و Δp عدم التحديد في كمية الحركة . و هاتين العلاقتين الشهيرتين تسميان بعلاقات عدم التحديد من قبل مكتشفها ، فيرنر هايزنبرغ . * باللغة الإنجليزية غالبا تسميان بعلاقات الارتياب / الشك ولكن هذا المصطلح غير صحيح . الكميات فيها ارتياب و لكن غير محددة . بسبب فعل الكم فإن القيم القابلة للقياس لجملة ليس لها قيمة محددة . و ليس هناك طريقة لوصف قيمة دقيقة لكمية الحركة ، الموضع أو أي قيمة قابلة للقياس لجملة كمية. سوف نستخدم مصطلح علاقة عدم التحديد دائما . و عادة تسمية العلاقة "مبدأ " هي حتى أكثر خطأ .

---

*غالبا يقال أن علاقة عدم التحديد للطاقة و الزمن لها وزن مختلف عن تلك التي لكمية الحركة و الموضع . هذه فكرة خاطئة و نشرت من قبل جيل أقدم من الفيزيائيين الذي بقي عبر العديد من الكتب لأكثر من سبعين عاما . انس فقط الأمر من الأساسي تذكر أن الكميات الأربعة كلها التي تظهر في المتراجحات تصف الخواص العطالية للجملة . بشكل خاص t هي متحول زمني يستنتج من التغيرات الملحوظة داخل الجملة ، و ليس الإحداثي الزمني المقاس بواسطة ساعة خارجية ، بشكل مشابه الموضع x ليس إحداثي فراغ خارجي ، ولكن الموضع الذي يميز الجملة (المرجع 7) .

فيرنر هايزنبرغ (1901-1976) كان فيزيائيا نظريا مهما و لاعب تنس طاولة و تنس ممتاز . في عام 1925 طور رجل شاب ، بمساعدة من ماكس بورن و باسكوال جوردان أول نظرية كم ، منها استنتجت علاقات عدم التحديد . و من أجل هذه الإنجازات فقد حاز على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1932 .وقد عمل أيضا في الفيزياء النووية و في الدوامية / اضطراب الهواء و السوائل . و خلال الحرب العالمية الثانية عمل في برنامج الانشطار النووي . بعد الحرب نشر العديد من الكتب الناجحة حول أسئلة فلسفية في الفيزياء ، وببطء تحول إلى هواية ، و حاول بشكل غير ناجح بمساعدة فاترة بعض الشيء من ولفجانج باولي أن يجد وصفا موحدا للطبيعة استنادا إلى نظرية الكم " علاقة العالم " .

أي جملة التي عدم تحديدها هو من مرتبة $\hbar$ هي جملة كمية و إذا كان جداء عدم التحديد هو أكبر بكثير فإن النظام كلاسيكي و بالتالي الفيزياء الكلاسيكية كافية لوصفه . هكذا حتى بالرغم من أن الفيزياء الكلاسيكية تفترض أنه ليس هناك عدم تحديد في القياس في الطبيعة ، فإن الجملة تكون كلاسيكية فقط إذا كان عدم تحديدها كبير بالمقارنة مع القيم الأصغرية الممكنة .

بعبارة أخرى ، نظرية الكم ضرورية عندما نحاول قياس بعض المقادير بالدقة الممكنة . في الحقيقة كل قياس بذاته هو عملية كمية . و علاقة عدم التحديد تقتضي أن دقة القياس محدودة . و كم الفعل يبين أن :

- الحركة لا يمكن أن تقاس بدقة لا نهائية

بمعنى آخر ، العالم الميكروسكوبي هو ضبابي . هذه الحقيقة لها العديد من النتائج الممكنة و العديد من الأمور الغريبة . مثلا ، إذا كانت الحركة لا يمكن أن تقاس بدقة لانهائية فإن المفهوم الدقيق للحركة يجب أن يتم التعامل معه بعناية عظمية ، كما لا يمكن أن تطبق في أوضاع معينة . من ناحية ، بقية بحثنا هو فقط دراسة لعواقب هذه النتيجة .

في الحقيقة طالما أن الفراغ – الزمن مسطح ينتج أنه يمكننا أن نحافظ على مفهوم الحركة لوصف القياسات شريطة أن نبقى مدركين بالحدود المفروضة من قبل مبدأ الكم .

مفاجآت كم الفعل

كم الفعل $\hbar$ يقتضي ضبابية كل الحركة . هذه الضبابية أيضا تقتضي وجود الانحرافات القصيرة الزمن من الطاقة ، كمية الحركة و مصونية كمية الحركة الزاوية في الجمل الميكروسكوبية . من أجل التأكيد العام ، يجب التأكيد على أنه من أجل أزمنة القياس الطويلة – بالتأكيد من أجل كل الأزمنة الأطول من الميكرو ثانية – فإن المصونية تبقى قائمة . و لكن في الجزء الأول من مغامرتنا (المجلد I ، صفحة 237) فقد عرفنا أن أي نوع من عدم المصونية يقتضي وجود المفاجآت في الطبيعة . حسنا هناك بعض منها .

نظرا لأن الحركة المنتظمة بشكل دقيق غير موجودة ، فإن الجملة التي تتحرك في بعد واحد فقط – مثل عقرب الساعة – دائما يملك إمكانية الحركة قليلا في اتجاه معاكس ، وبالتالي يؤدي إلى قراءات خاطئة . في الحقيقة نظرية الكم تتوقع أن الساعات لها حدود أساسية :

- الساعات المثالية غير موجودة

النتائج العميقة لهذه العبارة ستصبح واضحة خطوة بعد خطوة .

أيضا من المستحيل تجنب أن الجسم يقوم بانزياح صغير جانبيا . في الحقيقة نظرية الكم تقتضي أنه بدقة

- الحركة المنتظمة و وحيدة البعد غير موجودة

أيضا العبارة تتضمن العديد من المفاجآت الإضافية .

حدود الكم تطبق أيضا على مسطرة المتر . من المستحيل ضمان أن المسطرة هي تماما في سكون بالنسبة للجسم الجاري قياسه . بالتالي كم الفعل يقتضي ثانية من ناحية أخرى أن القياسات ممكنة و من ناحية أخرى :

- دقة القياس محدودة

أيضا ينتج من كم الفعل أن أي مراقب عطالي أو حر السقوط يجب أن يكون كبيرا ، حيث أن فقط الجمل الكبيرة تقرب الحركة العطالية .

- المراقب لا يمكن أن يكون ميكروسكوبيا

إذا لم يكن البشر ماكروسكوبيين فإنهم لا يمكنهم لا مراقبة و لا دراسة الحركة .

بسبب الدقة المنتهية التي يمكن بها مراقبة / قياس الحركة الميكروسكوبية فإننا نكتشف أن

- الحركة أسرع من الضوء ممكنة في المجال الميكروسكوبي

نظرية الكم بالتالي تتوقع التاكيونات ، على الأقل في مجالات زمنية قصيرة . لنفس السبب

- الحركة للخلف في الزمن ممكنة عبر أزمنة و مسافات ميكروسكوبية

باختصار ، كم الفعل يقتضي وجود المجال الزمني الميكروسكوبي . لكن هذا يبقى مستحيلا في المجال الماكروسكوبي مثل الحياة اليومية .

لكن هناك أكثر . تخيل سيارة متحرك فجأة تختفي للأبد . في مثل هذه الحالة لا يمكن لا لكمية الحركة و لا الطاقة أن تكون مصونة . تغير الفعل لمثل هذا الاختفاء هي كبيرة بالمقارنة مع h بحيث أن قياسه سيتعارض حتى مع الفيزياء الكلاسيكية – كما يمكن أن ترغب في التأكد . لكن كم الفعل بسمح لجسيم ميكروسكوبي مثل الإلكترون أن يختفي لفترة قصيرة شريطة أن يعاود الظهور بعد ذلك .

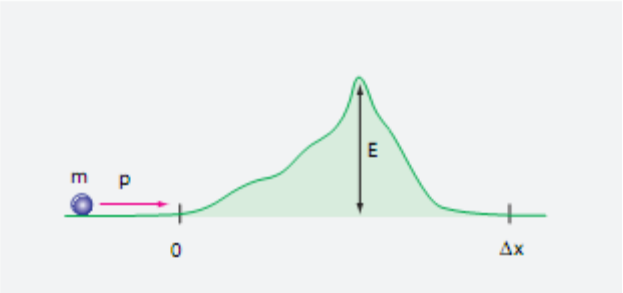
- كم الفعل يقتضي أنه ليس هناك دوام في الطبيعة

كم الفعل أيضا يقتضي :

- الخلاء ليس فارغ

إذا نظرنا للفضاء الفارغ مرتين فإن القياسية المفصولين عن بعضهما بفاصل زمني قصير فإن بعض الطاقة سيقاس في المرة / الزمن الثانية . إذا كان الفاصل الزمني قصير كفاية ، فإن كم الفعل سيؤدي إلى قياس إشعاع أو جسيمات المادة . في الواقع الجسيمات يمكن أن تظهر في أي مكان من لا مكان ، و تختفي بعد ذلك : حد الفعل يتطلب ذلك . باختصار تبدي الطبيعة الظهور قصير الأمد و اختفاء المادة و الإشعاع . بمعنى آخر الفكرة الكلاسيكية عن الخلاء الفارغ هي صحيحة فقط عندما يقاس الخلاء عبر زمن طويل .

كم الفعل يقتضي أن إبر البوصلة لا يمكن أن تعمل . إذا نظرنا مرتين في تتابع سريع لإبرة بوصلة أو حتى لمنزل ، فإننا نلاحظ عادة أنها تبقى متوضعة في نفس الاتجاه . و لكن نظرا لأن الفعل الفيزيائي يملك نفس أبعاد كمية الحركة الزاوية (تحدي 13 e) فإن القيمة الأصغرية للفعل تقتضي قيمة أصغرية لكمية الحركة الزاوية . حتى الجسم الماكروسكوبي يملك قيمة أصغرية من أجل دورانه . بمعنى آخر فيزياء الكم دائما تتوقع أن :



- كل شيء يدور

إن الجسم يمكن أن يكون غير دوار فقط بشكل تقريبي ، عندما القياسات تكون مفصولة بفواصل زمنية طويلة .

من أجل الجمل الميكروسكوبية فإن حدود الكم على الدوران تملك تأثيرات خاصة . إذا كانت زاوية الدوران يمكن قياسها – كما في الجزيئات – فإن الجملة تتصرف مثل الجسم الماكروسكوبي : إن موضعه و توجهه تكون ضبابية .

لكن من أجل جملة التي زاوية دورانها لا يمكن قياسها ، فإن كم الفعل يحد من كمية الحركة الزاوية إلى مضاعفات من $\hbar$ /2 . بشكل خاص ، كل جمل الارتداد الميكروسكوبية مثل الجزيئات ، الذرات أو النوى تحتوي حركة دورانية و مكونات دورانية .

التحويل ، الحياة و ديموقريطس

في بداية مغامرتنا ذكرنا أن الإغريق ميزوا ثلاثة أنواع من التغيرات : النقل ، النمو و التحويل (مجلد I ، صفحة20). أيضا ذكرنا أن ديموقريطس قد استنتج أن كل هذه الأنواع من التغيرات – التي تتضمن الحياة و الموت – كانت في الحقيقة نفسها ، و ناتجة عن حركة الذرات . كم الفعل يجلي تماما هذه النقطة .

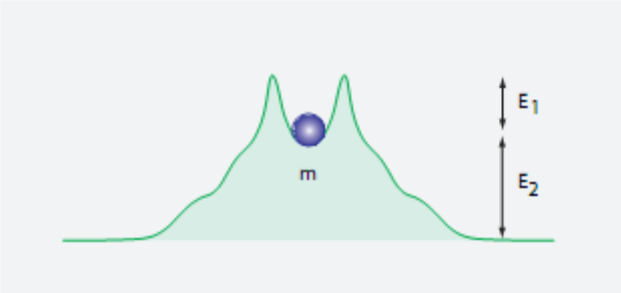
قبل كل شيء الفعل الأصغري يقتضي أن الأقفاص في حدائق الحيوانات هي خطرة و المصارف ليست آمنة . القفص هو ميزة التي تحتاج الكثير من الطاقة للتغلب عليها . فيزيائيا ، جدار القفص يكون تلة / مرتفع طاقة ، يشبع التلة الحقيقية في الشكل 8 .

تخيل أن جسيم ذو كمية حركة p يقترب من طرف تلة التي يفترض أن عرضها Δx .

في الحياة اليومية – وبالتالي في الفيزياء الكلاسيكية – الجسيم سوف لن يقاس أبدا من ناحية التل الأخرى إذا كانت طاقته الحركية $p^2/2m$ هو أقل من الارتفاع E للتلة . لكن تخيل أن كمية الحركة المفقودة للتغلب على التلة $\Delta p = \sqrt{2mE} - p$ تحقق $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$. الجسيم سوف يملك إمكانية التغلب على التلة بالرغم من طاقته غير الكافية . كم الفعل بالتالي يقتضي أن التلة ذات العرض

$$\Delta x \geq \frac{\hbar/2}{\sqrt{2mE} - p} \qquad (4)$$

ليست عقبة بالنسبة لجسيم ذو كتلة m . لكن ليس هذا كل شيء . نظرا لأن قيمة كمية حركة الجسيم p هي نفسها غير محددة ، الجسيم يمكن أن يتغلب على التل حتى لو كان التل أعرض من القيمة (4) – بالرغم من أنه كلما كان أعرض ، فإن الاحتمال سيكون أخفض .



الشكل 9 – مغادرة الأغلفة

هكذا الجسيم يمكن أن يتغلب على أي عقبة . وهذا يدعى بالأثر النفقي . وهذا يسمى بالأثر النفقي لأسباب واضحة . كلاسيكيا ، النفقية مستحيلة . في نظرية الكم هي ممكنة ، لأن تابع الموجة لا يتلاشى في موضع التلة (صفحة 88) ، و تقريبا تابع الموجة يكون غير صفري داخل التلة . و بالتالي سيكون أيضا غير صفري خلف التلة . و بالنتيجة الجمل الكمية تخترق أو تمضي نفقيا عبر التلال .

باختصار ، مبدأ الفعل الأصغري يقتضي أنه ليس هناك صناديق كتيمة في الطبيعة .

بفضل الأثر النفقي

- المادة ليست منيعة / يمكن اختراقها

إن قابلية الاختراق لكل المادة يتعارض مع الحياة اليومية ، القياس / الملاحظة الكلاسيكي . هل يمكنك شرح لماذا أقفاص الأسود تعمل بالرغم من كم الفعل ؟ (تحدي 14 s) .

بالمناسبة كم الفعل أيضا يقتضي أن الجسيم ذو الطاقة الحركية الأكبر من ارتفاع الطاقة لتلة يمكن أيضا أن ينعكس بواسطة التلة . أيضا هذا الأثر مستحيل في الفيزياء الكلاسيكية .

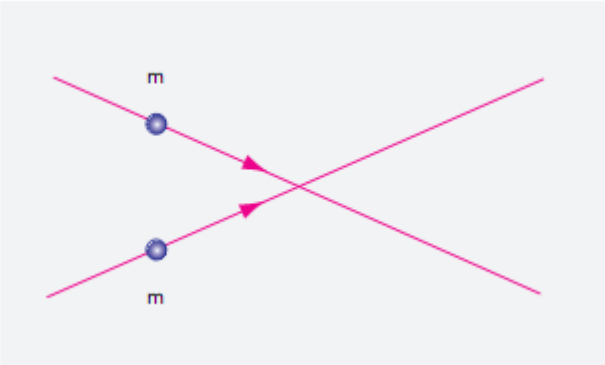
مبدأ الفعل الأصغري أيضا يقتضي أن رفوف الكتب هي خطرة . لماذا ؟ الرفوف هي عوائق للحركة . الكتاب على رف هو في نفس وضعية الكتلة في الشكل 9 : الكتلة محاطة بتلال الطاقة التي تعيق خروجها لعالم الطاقة الخارجي . لكن بفضل الأثر النفقي فإن الهروب دائما ممكن . نفس الصور تطبق على فرع الشجرة ، مسمار في حائط ، أو أي شيء مرتبط بأي شيء آخر . الأشياء لا تبقى متصلة ببعضها بشكل دائم . بشكل خاص ، سوف نكتشف أن كل مثال لإصدار الضوء – حتى النشاط الإشعاعي – ينتج من هذا الأثر .

في الملخص كم الفعل بالتالي يقتضي أن

- التفكك هو جزء من الطبيعة

لاحظ أن التفكك غالبا يظهر في الحياة اليومية ، تحت اسم مختلف : الكسر . في الحقيقة كل الكسور تتطلب كم الفعل لوصفها (مرجع 8) . من الواضح أن سبب الكسر غالبا يكون كلاسيكي ، ولكن آلية الكسر هي دائما كمية . فقط الأجسام التي تخضع لنظرية الكم يمكن أن تنكسر . باختصار ، ليس هناك جمل مثارة مستقرة في الطبيعة . لنفس السبب ، بالمناسبة ، لا يوجد ذاكرة يمكن أن تكون تامة / مثالية (هل يمكنك أن تؤكد هذا ؟) (تحدي 15 s)

بأخذ رؤية أعم ، التقدم في العمر و الموت هو أيضا نتيجة كم الفعل . الموت مثل التقدم في العمر ، هو تركيب لعمليات الكسر / التفكك . و عند الوفاة الآليات في الكائن الحي تتحطم . التحطم هو تفكك ، و هو ناتج عن النفقية . الموت بالتالي عملية كمية .



الشكل 10 - الأجسام المتطابقة ذات المسارات المتقاطعة

كلاسيكيا الموت غير موجود . هل ربما هذا سبب أن كثير من الناس يعتقدون بالخلود أو الشباب الأبدي ؟(تحدي 16s) سوف أيضا نكتشف أن كم الفعل هو سبب أهمية الفعل القابل للقياس في الفيزياء الكلاسيكية . في الحقيقة ، وجود أصغر فعل ممكن هو سبب مبدأ الفعل الأقل للفيزياء الكلاسيكية .

إن الفعل الأصغري أيضا يقتضي أن المادة لا يمكن أن تكون مستمرة , لكن يجب أن تكون مكونة من أشياء أصغر ما تكون . في الواقع ، أي تدفق لمادة مستمرة فعلا سيتعارض مع مبدأ الكم . هل يمكنك إعطاء الحجة الدقيقة ؟ (تحدي 17 s) . بالطبع عند هذه النقطة في مغامرتنا ، فإن عدم استمرارية المادة لم يعد مفاجأة . لكن كم الفعل يقتضي أنه حتى الإشعاع لا يمكن أن يكون مستمر . كان ألبرت أينشتاين أول من بيّن بوضوح أن الضوء مكون من جسيمات كمية .

حتى بشكل اعم فعل الكم يقتضي أنه في الطبيعة

- كل التدفقات و كل الأمواج مكونة من جسيمات ميكروسكوبية

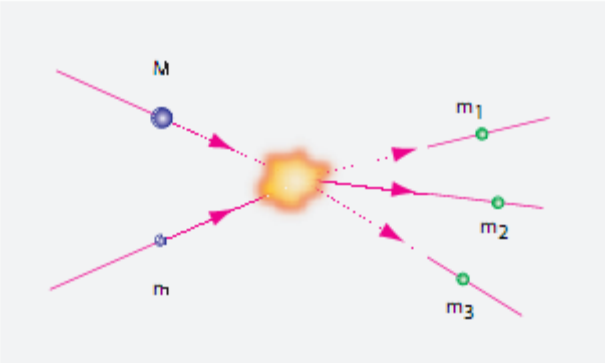
إن مصطلح ميكروسكوبي (أو كمي) هو أساسي حيث أن مثل هذه الجسيمات لا تتصرف مثل الأحجار الصغيرة.ولقد صادفنا العديد من الفروقات و سوف نصادف اختلافات أخرى قريبا . لهذه الأسباب سيكون هناك اسم خاص للجسيمات الميكروسكوربية و لكن حتى الآن كل المقترحات ، من بينها الكوانتون هو الأكثر شيوعا قد فشلت في الاتفاق على ذلك .

كم الفعل يملك العديد من النتائج الغريبة بالنسبة للجسيمات الميكروسكوبية . خذ اثنين من هذه الجسيمات بنفس الكتلة و التركيب . تخيل أن مسارهما يتقاطعان ، و أنه عند التقاطع فإنهما يقتربان من بعضهما البعض بشكل كبير جدا كما هو مبين في الشكل 10 . يقتضي كم الفعل أنه في مثل هذه الوضعية إذا أصبحت المسافة صغيرة كفاية ، فإن الجسيمين يمكن أن يتبادلا الأدوار ، بدون أن يكون أي أحد قادر على تجنب أو ملاحظة ذلك . بالتالي في حجم غاز من المستحيل بفضل كم الفعل أن نتابع الجسيمات التي تتحرك و القول أي جسيم يكون أو يفعل أي شيء . هل يمكنك تأكيد هذا الاستنتاج (تحدي 18 s) و تحديد الشروط باستخدام علاقات عدم التحديد ؟ في الملخص

- في الطبيعة من المستحيل التمييز بين الجسيمات المتطابقة

هل يمكنك تخمين ما الذي يحدث في حالة الضوء ؟ (تحدي 19s)

لكن المادة ما تزال تستحق المزيد من الاهتمام . تخيل ثانية جسيمين – حتى لو كانا مختلفين – يقتربان من بعضهما البعض بشكل قريب جدا . كما هو مبين في الشكل 11 . نحن نعلم أنه إذا



الشكل 11 - التحويل عبر التفاعل

فإن مسافة الاقتراب ستصبح صغيرة و الأشياء تصبح ضبابية . الآن مبدأ الفعل الأصغري يجعل من الممكن لشيء ما أن يحدث في ذلك المجال الصغير طالما أن المنتجات الصادرة الناتجة لها نفس كمية الحركة الخطية الكلية ، كمية الحركة الزاوية و الطاقة هي مثل الواردة . في الحقيقة تحديد مثل هذه العمليات سيقتضي أن الأعمال الصغيرة اختياريا يمكن أن تقاس و بالتالي تزيل ضبابية الطبيعة كما ربما ترغب أن تتأكد بنفسك (تحدي 20e) . باختصار

- كم الفعل يسمح بتحويل المادة

أيضا يقول المرء أن كم الفعل يسمح بتفاعلات الجسيم . في الحقيقة ، سوف نكتشف أن كل أنواع التفاعلات الكيماوية و النووية هي ناتجة فقط عن وجود كم الفعل . و أحد أنواع العمليات المهمة لنا خصيصا هي النمو . كم الفعل يقتضي أن كل النمو يحدث بخطوات صغيرة . في الحقيقة

- كل عمليات النمو في الطبيعة هي عمليات كمية

فوق كل شيء كما ذكرنا للتو ، فإن كم الفعل يشرح الحياة . فقط كم الفعل يجعل التكاثر و الوراثة ممكنة . الولادة ، الجنس و الموت هي نتاج لكم الفعل .

هكذا فإن ديموقريطس كان على صواب و خطأ . و قد كان محقا في استنتاج المكونات الأساسية للمادة و الإشعاع . ولقد كان محقا في توحيد كل التغير في الطبيعة من النقل إلى التحويل و النمو – بشكل حركة جسميات . لكنه كان مخطئا في افتراض أن الجسيمات الصغيرة تتصرف مثل الأحجار . كما سنبين فيما يلي ، أصغر الجسيمات تتصرف مثل الكوانتونات : هي تتصرف عشوائيا و تتصرف جزئيا كأمواج و جزئيا كجسيمات .

العشوائية - نتيجة كم الفعل

ماذا يحدث إذا حاولنا قياس التغير الأصغر من كم الفعل ؟ الطبيعة لديها جواب بسيط : نحصل على نتائج عشوائية.إذا صنعنا تجربة التي تحاول إنتاج تغير أو فعل بحجم ربع كم الفعل ، فإن التجربة ستنتج ، مثلا ، تغير بكم واحد من الفعل في ربع الحالات ، ولن يكون هناك نتائج في ثلاثة أرباع الحالات * و بالتالي تعطي متوسط ربع $\hbar$

الشكل 12 – أثر الكم الشهير : كيفية تدريب النوافذ على إظهار صورتين متركبتين ؟

- المحاولات لقياس الأفعال الأدنى من h تؤدي إلى نتائج عشوائية

إذا كنت تريد تكثيف فيزياء الكم في عبارة واحدة أساسية فهذه هي .

كم الفعل يؤدي إلى عشوائية على المستوى الميكروسكوبي . هذا الارتباط يمكن أن يرى أيضا بالشكل التالي . بسبب علاقات عدم التحديد ، من المستحيل الحصول على قيم محددة لكل من كمية الحركة و موضع الجسيم . من الواضح أن القيم المحددة هي أيضا مستحيلة من أجل العناصر الفردية لنظام تجربة أو مراقب . بالتالي الشروط الابتدائية – من أجل كل من الجملة و من أجل حالة تجربة – لا يمكن أن تكون مكررة تماما . كم الفعل بالتالي يقتضي أنه متى أجريت تجربة على جملة ميكروسكوبية مرتين ، فإن النتيجة (عادة) ستكون مختلفة . النتائج يمكن فقط أن تكون نفسها إذا كان كل من الجملة و المراقب كانوا تماما في نفس التشكيل كل مرة . لكن بسبب المبدأ الثاني في الثيرموديناميك ، و بسبب فعل الكم ، فإن تكرار التشكيل مستحيل و بالتالي

- الجمل الميكروسكوبية تتصرف بشك عشوائي

من الواضح أنه سيكون هناك نتيجة متوسطة ما ، ولكن في كل الحالات ، القياسات الميكروسكوبية هي احتمالية . العديد وجدوا هذه النتيجة لنظرية الكم هي الأكثر صعوبة في الفهم . و لكن الحقيقة هي : كم الفعل يقتضي أن سلوك جمل الكم مختلف بشكل كبير عن ذلك العائد للجمل الكلاسيكية . النتيجة غير ممكن تجنبها :

- الطبيعة تتصرف بعشوائية

هل يمكننا قياس العشوائية في الحياة اليومية ؟ نعم . كل نافذة تثبت أن الطبيعة تتصرف بشكل عشوائي على نطاق ميكروسكوبي . كل شخص يعلم أنه بإمكاننا استخدام نافذة قطار إما للنظر لمنظر خارجي أو بالتركيز على صورة منعكسة لمراقبة شخص مهما داخل عربة .

---

*في هذا السياق " لا تغير " يعني " لا تغير " في المتحول الفيزيائي الذي سيقاس ، وبشكل عام هناك دائما بعض التغير و لكن ليس بالضرورة في المتحول الجاري قياسه .

الشكل 13 - جسيم و دريئة ذات شقين متجاورين / قريبين

بمعنى آخر القياسات / المراقبات مثل التي في الشكل 12 تبين أن الزجاج يعكس بعض جسيمات الضوء و يدع بعضها الآخر يمر عبره . و بشكل أكثر دقة ، الزجاج يعكس اختيارا عشوائيا لجسيمات الضوء و مع ذلك النسبة المتوسطة هي ثابتة . و في هذه الخواص ، فإن الانعكاس الجزئي يكون مشابه للأثر النفقي . و في الحقيقة ، الانعكاس الجزئي للفوتونات في زجاج هو نتيجة لكم الفعل . و مرة ثانية الوضع يمكن وصفه بواسطة الفيزياء الكلاسيكية ، ولكن القدر الدقيق من الانعكاس لا يمكن شرحه بدون نظرية الكم . و نستمر بالقول :

- الكوانتيونات تتحرك بعشوائية

بدون كم الفعل ، رحلات القطار ستكون مملة أكثر بكثير .

الأمواج – نتيجة كم الفعل

إن كم الفعل يقتضي نتيجة مهمة حول مسارات الجسيمات . إذا انتقل جسيم من نقطة لأخرى ، فإنه ليس هناك طريقة للقول أي مسار سيؤخذ فيما بينهما . في الحقيقة للتمييز بين مسارين ممكنين و لكن مختلفين بشكل طفيف فإن الأفعال الأصغر من $\hbar$ يجب أن تقاس بشكل موثوق . بشكل خاص إذا أرسل الجسيم عبر دريئة ذات شقين قريبين بشكل كاف كما هو موضح في الشكل13 فإنه من المستحيل القول أي شق سيمر به الجسيم . وهذه الاستحالة أساسية .

لقد علمنا للتو ظاهرة الحركة التي من أجلها من غير الممكن القول بدقة كيف يتحرك شيء ما أو أي مسار يأخذه خلف شفين : الأمواج تتصرف بهذا الشكل . (مجلد I ، صفحة 313) . كل الأمواج تخضع لعلاقات عدم التحديد .

$$\Delta\omega\Delta t \geqslant \frac{1}{2} \quad \text{and} \quad \Delta k\Delta x \geqslant \frac{1}{2}. \qquad (5)$$

الموجة هي نوع من الحركة الموصوف بواسطة تغيرات طور عبر الفراغ و الزمن . و هذا بدوره يصح من أجل كل أنواع الحركة . و بشكل خاص يصح هذا بالنسبة للمادة .

لقد رأينا أعلاه أن جمل الكم تخضع إلى :

$$\Delta E\Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \quad \text{and} \quad \Delta p\Delta x \geqslant \frac{\hbar}{2}. \qquad (6)$$

و نحن بالتالي نقاد لنعطي تردد و طول موجة لنظام كمي :

$$E = \hbar\omega \quad \text{and} \quad p = \hbar k = \hbar\frac{2\pi}{\lambda} . \qquad (7)$$

علاقة الطاقة – التردد للضوء و علاقة كمية الحركة – التردد المكافئة تم استنتاجها من قبل ماكس بلانك في عام 1899.

وفي الأعوام من 1905 فصاعدا أكد ألبرت أينشتاين أن العلاقات صالحة من أجل كل أمثلة إصدار و امتصاص الضوء . في عام 1924 & 1923 توقع لويس دو برولي * أن العلاقة ستصح أيضا من أجل كل جسيمات المادة الكمية . التأكيد التجريبي أتى بعد بضع سنوات . (هذا بالتالي مثال آخر على الاكتشاف الذي تم منذ حوالي عشرين سنة خلت) . باختصار ، كم الفعل يقتضي :

- جسيمات المادة تتصرف مثل الأمواج

بشكل خاص ، كم الفعل يقتضي وجود تداخل لتدفقات المادة .

الجسيمات – نتيجة كم الفعل

كم الفعل ، أصغر تغير ممكن يقتضي أن التدفقات لا يمكن أن تكون ضعيفة بشكل اختياري . وهذا يطبق على كل التدفقات (مجلد I ، صفحة 352): بشكل خاص يطبق على الأنهار ، تدفقات المادة الصلبة ، تدفقات الغاز ، حزم الضوء ، تدفقات الطاقة ، تدفقات الإنتروبي ، تدفقات كمية الحركة ، تدفقات كمية الحركة الزاوية ، تدفقات الاحتمال ، إشارات من كل الأنواع ، تدفقات الشحنة الكهربائية ، تدفقات تغير اللون و تدفقات الشحنة الضعيفة .

تدفقات الماء في الأنهار ، مثل أي تدفق مادة آخر ، لا يمكن أن تكون صغيرة اختياريا : كم الفعل يقتضي أن هناك أصغر ما يكون من تدفق المادة في الطبيعة . تبعا لهذا الوضع ، فإن تدفق المادة الأصغر ما يكون هو الجزيئة ، الذرة أو الجسيم الأصغر . في الواقع ، كم الفعل هو أيضا أصل قياس أصغر تغير ممكن في التيار الكهربائي . نظرا لأن كل المادة مكن أن تتدفق ، فإن كم الفعل يقتضي :

- كل المادة لها نواحي جسيمية

بنفس الشكل ، كم الفعل ، أصغر تغير ممكن يقتضي أن الضوء لا يمكن أن يكون خافتا بشكل اختياري . هناك أصغر إنارة ممكنة في الطبيعة وهي تدعى الفوتون أو كم الضوء . الآن ، الضوء موجة ، و المقولة يمكن أن تطرح بالنسبة لأي موجة أخرى أيضا . باختصار كم الفعل يقتضي بالتالي :

- كل الأمواج لها نواحي جسيمية

---

*لويس دو برولي (ولد عام 1892 في ديبه و توفي عام 1987 في باريس) فيزيائي و أستاذ في السوربون . إن علاقة الطاقة – التردد للضوء جعلت ماكس بلانك و ألبرت أينشتاين يحوزا على جائزة نوبل في الفيزياء في عام 1918 & 1921 . عمم دو برولي العلاقة لتوقع طبيعة موجة الإلكترون (و كل الجسميات الكمية الأخرى للمادة) وهذا كان أساس أطروحته للدكتوراه . و التوقع أكد لأول مرة تجريبيا بعد بضع سنين في عام 1927 . من أجل توقع طبيعة المادة الموجية ، فقد تلقى دو برولي جائزة نوبل في الفيزياء في 1929 . و لكونه أرستقراطي ، فإنه لم يقم بمزيد من البحوث بعد ذلك . مثلا كان شرودنجر من كتب معادلة الموجة حتى بالرغم من أن دو برولي كان بإمكانه أيضا القيام بذلك .

هذا تم إثباته من أجل أمواج الضوء ، أمواج الماء ، الأشعة السينية ، أمواج الصوت ، أمواج البلازما ، دوامات السوائل و أي نوع موجة آخر الذي تم ملاحظته قط . هناك استثناء واحد : أمواج الجاذبية تم ملاحظتها أخيرا في عام 2016 ، بعد عقود عديدة من توقعها ، وقد توقع أن لها نواحي تشبه الجسيمات و هي الغرافيتونات ، أيضا موجودة بالرغم من أن هذا استغرق وقتا طويلا لإثباته بالتجربة .

في الملخص كم الفعل ينص على :

- إذا تحرك شيء ما فإنه مكون من جسيمات كمية أو كوانتونات

لاحقا سوف ندرس و نحدد الفروقات الدقيقة بين جسيم كمي و حجر صغير أو حبة رمل . سوف نكتشف أن كوانتونات المادة تتحرك بشكل مختلف ، و تتصرف بشكل مختلف تحت الدورات ، و تتصرف بشكل مختلف تحت التبادل .

معلومات الكم

في علم الحاسب أصغر واحدة للتغير تعرف بتغير البت . وجود أصغر تغير ممكن في الطبيعة يقتضي أن علم الحاسب – أو علم المعلومات – يمكن أن يستخدم لوصف الطبيعة و بشكل خاص نظرية الكم , هذا التشابه قد جذب الكثير من الأبحاث في العقود الماضية ، وفد درس العديد من الأسئلة المهمة : هل تخزين المعلومات اللامحدود ممكن ؟ هل يمكن للمعلومات أن تقرأ و تنسخ بشكل كامل . هل يمكن للمعلومات أن ترسل بينما تبقى سرية ؟ هل يمكن لإرسال المعلومات و تخزينها أن يتم بشكل مستقل عن الضجيج ؟ هل يمكن لفيزياء الكم أن تصنع أنواعا جديدة من الحاسبات ؟ حتى الآن الإجابة على هذه الأسئلة هو بالنفي و لكن الأمل بتغيير الوضع لم يتلاشى حتى الآن .

التشابه بين نظرية الكم و علم المعلومات محدود : علم المعلومات يمكن أن يصف فقط جانب البرمجيات من الأجهزة , بالنسبة للفيزيائي جانب المكونات الصلبة للطبيعة هو مركزي .المكونات الصلبة للطبيعة تدخل الوصف متى كانت القيمة الفعلية $\hbar$ لكم الفعل يجب أن تدخل .

كما درسنا التشابهات و الاختلافات بين الطبيعة و علم المعلومات سوف نكتشف أن كم الفعل يقتضي أن الجمل الفيزيائية الماكروسكوبية لا يمكن أن تنسخ أو تستنسخ مثلما نظريي الكم يحبون أن يقولوا . الطبيعة لا تسمح بنسخ من الأجسام الماكروسكوبية . بمعنى آخر :

- آلات النسخ التامة غير موجودة

كم الفعل يجعل من المستحيل جمع و استخدام كل المعلومات بالشكل الذي يسمح بإنتاج نسخة تامة .

دراسة آلات النسخ سيذكرنا ثانية بأن الترتيب الدقيق الذي تتم به القياسات في تجربة هو مهم . وعندما ترتيب القياسات يمكن أن يعكس بدون التأثير على النتيجة الصافية فإن الفيزيائيين يتحدثون عن الاتصال . و يقتضي كم الفعل :

- القيم القابلة للقياس فيزيائيا لا يمكن تبادلها

سوف نجد أيضا أن كم الفعل يقتضي أن الجمل ليست دائما مستقلة (صفحة 151) ولكن معقدة / مربكة . هذا المصطلح طرح من قبل إروين شرودنجر الذي وصف أحد النتائج الأكثر السخيفة لنظرية الكم . التعقيد / الإرباك يجعل كل شيء في الطبيعة متصل بكل شيء آخر . التعقيد / الإرباك ينتج تأثيرات التي يبدو (لكنها ليست) أسرع من الضوء .

- التعقيد / الإرباك ينتج شكل (مزيف) من عدم الموضعية

التعقيد يقتضي أن الاتصال السليم لا يمكن أن يوجد (مرجع 9)

سوف نكتشف أيضا أن زوال التماسك هو عملية عامة في الطبيعة التي تؤثر على جمل الكم . مثلا تسمح بالقياسات من ناحية و تجعل الحاسبات الكمية مستحيلة من ناحية أخرى (صفحة 156) .

فضول و تحديات مرحة حول كم الفعل

حتى إذا قبلنا أنه لم تتم أي تجربة حتى الآن متعارضة مع الفعل الأصغري فإننا ما يزال علينا التأكد بأن الفعل الأصغري لا يتعارض مع المنطق . بشكل خاص الفعل الأصغري يجب أيضا أن يكون متوافق مع كل التجارب المتخيلة . هذا ليس واضحا بذاته .

**

أين يكون مقياس الكم في ساعة نواس ؟ (تحدي 21 s)

**

عندما تؤدي الحقول الكهرطيسية دورها ، فإن قيمة الفعل (عادة) تعتمد على اختيار الكمون الشعاعي و بالتالي على اختيار المقياس . لقد رأينا في الجزء حول الديناميك الكهربائي (مجلد III ، صفحة 84) أن الاختيار المناسب للمقياس يمكن أن يغير قيمة الفعل بإضافة أو طرح أي مقدار مطلوب . على أن هناك فعل أصغر ما يكون في الطبيعة . هذا مستحيل ، لأنه في نظرية الكم ، تغيرات المقياس الفيزيائي لا يمكن أن تضيف أو تطرح أي مقدار و لكن تضرب بضعف القيمة الأصغرية . و بالتالي هي لا تسمح لنا بالذهاب أقل من الفعل الأصغري .

**

النباتات البالغة تتوقف عن النمو في الظلام . بدون ضوء ، التفاعلات اللازمة للنمو لتتوقف . هل يمكنك بيان أن هذا هو أثر كمي غير قابل للشرح بواسطة الفيزياء الكلاسيكية ؟ (تحدي 22 s) .

**

أكثر العمليات الكمية في الحياة اليومية هي كهرطيسية . هل يمكنك بيان أن كم الفعل يجب أيضا أن يصح من أجل العمليات النووية أي من أجل العمليات التي ليست كهرطيسية ؟ (تحدي 23 s)

**

هل كم الفعل مستقل عن المراقب ، حتى قرب سرعة الضوء ؟ (تحدي 24 s) هذا السؤال كان السبب الذي جعل بلانك يتصل بأينشتاين و يدعوه إلى برلين ، و بالتالي قدمه إلى المجمع الفيزيائي الدولي .

**

كم الفعل يقتضي أن الناس الصغار ، مثل توم ثمب ، لا يمكن أن يوجدوا . و كم الفعل يقتضي أن الفراكتالات لا يمكن أن توجد في الطبيعة . كم الفعل يقتضي أن قانون مور لإلكترونيات أنصاف النواقل الذي ينص على أن عدد الترانزستورات على شريحة يتضاعف كل سنتين لا يمكن أن يكون صحيحا أبدأ . لماذا لا ؟ (تحدي 25s)

**

خذ حدوة حصان . المسافة بين النهايتين ليست ثابتة ، نظرا لأن موضعها و سرعتها ستكون معلومة بنفس الوقت ، مما يتعارض مع علاقة عدم التحديد . بالطبع هذا التبرير أيضا صالح من أجل أي جسم صلب آخر . باختصار ، كل من ميكانيك الكم و النسبية الخاصة تبين أن الأجسام الصلبة غير موجودة بالرغم من وجود تبريرات مختلفة .

**

كمية الحركة الزاوية لها نفس أبعاد الفعل . الفعل الأصغر ما يكون يقتضي أن هناك كمية حركة زاوية أصغر ما يكون في الطبيعة . كيف يمكن أن يكون هذا بمعرفة أن الجسيمات لها برم صفري أي ليس لها كمية حركة زاوية ؟ (تحدي 26s).

**

هل يمكننا بدء كل مناقشة نظرية الكم بالقول أن هناك كمية حركة زاوية أصغرية بدلا من فعل أصغري ؟ (تحدي 27s).

**

نيلز بور بالإضافة إلى نشر فكرة الفعل الأصغري كان أيضا متحمسا لما يعرف بمبدأ التتام . وهذه هي فكرة أن زوجا معينا من الأشياء القابلة للقياس من جملة – مثل الموضع و كمية الحركة – لها دقة مرتبطة : إذا كان من المعلوم أن أحد الزوجين يملك دقة عالية فإن الآخر بالضرورة يجب أن يكون له دقة منخفضة . هل يمكنك استنتاج مبدأ من الفعل الأصغري ؟ (تحدي 28s).

أخطار شراء علبة فاصولياء

الطريقة الأخرى لبيان النتائج السخيفة لنظرية الكم معطاة من قبل تحذير منتج نهائي الذي وفق محامين معينين ذو إطلاع جيد ستطبع على كل علبة من الفاصولياء و على كل عبوة منتج (مرجع 10) . و تبين بالتفصيل كم تخدعنا الشروط البشرية العميقة

تحذير : يجب الانتباه عند النظر لهذا المنتج :

- إنه يصدر إشعاع حراري
- الضوء الساطع له تأثير يضغط على هذا المنتج

تحذير : يجب الانتباه عن لمس هذا المنتج :

- جزء منه سيسخن بينتما تبرد أجزاء أخرى مما يسبب حروق شديدة

تحذير : يجب الانتباه عند التعامل مع هذا المنتج :

- هذا المنتج يتألف على الأقل من % 999 999 999 99.999 فضاء فارغ
- هذه المادة تحتوي جسيمات تتحرك بسرعات أعلى من مليون كيلومتر بالساعة
- كل كيلو غرام من هذا المنتج يحتوي نفس مقدار الطاقة المتحرر من مائة قنبلة نووية *
- في حال لامس هذا المنتج مادة مضادة فإن انفجارا مدمرا سيحدث
- في حال دار هذا المنتج فإنه سيصدر إشعاع جاذبية

تحذير : يجب الانتباه عند نقل هذا المنتج :

- القوة اللازمة تعتمد على سرعه كما على وزنه
- هذه المادة ستصدر إشعاع إضافي عندما تسرع
- هذه المادة تجذب بقوة تزداد مع تناقص المسافة كل جسم آخر حولها بما فيها أولاد مشتريها

تحذير : يجب الانتباه عند تخزين هذه المادة :

- من المستحيل إبقاء هذه المادة في مكان محدد و في سكون بنفس الوقت
- ما عدا عندما تخزن تحت الأرض على عنق عدة كيلومترات ، فإنه مع الزمن ستجعل الأشعة الكونية هذه المادة نشطة إشعاعيا
- هذه المادة يمكن أن تتفكك في 10^{35} سنة القادمة
- يمكن أن تبرد و ترفع نفسها في الهواء
- هذه المادة تلف الفضاء و الزمن بجوارها بما فيها حاوية التخزين
- حتى إذا خزنت في حاوية ثانية ، فإن هذه المادة تتأثر و تؤثر في كل الأجسام الأخرى في الكون بما فيها زوج أبيك و أمك .
- المادة يمكن أن تختفي من موقعها الحالي و تعاود الاختفاء في أي مكان عشوائي في الكمون بما فيها مرآب جيرانك

تحذير : يجب الانتباه عند السفر بعيدا عن هذه المادة :

- سوف تصل إلى تاريخ انتهاء الصلاحية قبل أن يفعل المشتري ذلك

تحذير : يجب الانتباه عند استخدام هذه المادة :

- أي استخدام كان سيزيد من إنتروبي الكون
- مكونات هذه المادة هي تماما نفس تلك العائدة لأي جسم في الكون ، بما فيها السمك الفاسد

كل هذه العبارات صحيحة . انطباع جانب ارتيابي لفيزياء الكم هو فقط يكون بالمصادفة .

---

*الرأس الحربي النووي القياسي له قوة انفجار تبلغ 0.2 ميغا طن (ضمنيا المتفجرات القياسية هي ثالث النتروتولوين أو TNT) (مرجع 11) وهي حوالي ثلاثة عشر مرة قوة قنبلة هيروشيما ، التي كانت 15 كيلو طن . الميغا طن يعرف

بأنه 1 Pcal = 4.2 PJ ،حتى بالرغم من أن TNT يملك طاقة أقل بشكل طفيف من 5% من هذه القيمة . بمعنى آخر ، الميغا طن هو محتوى الطاقة البالغ حوالي 47 g من المادة . و هذا أقل من حفنة من أكثر المواد الصلبة أو السائلة .

ملخص : فيزياء الكم ، القانون و التلقين / غرس الأفكار

إن مجرد وجود كم الفعل ، التغير الكمي له العديد النتائج العميقة : العشوائية ، ثنائية الموجة – الجسيم ، تحويل المادة ، الموت ، و فوق كل شيء عادات التفكير الجديدة .

أليس كل الاستنتاجات من كم الفعل حتى الآن تبدو خاطئة أو على الأقل مجنونة ؟ في الحقيقة إذا كنت أو محاميك أطلقت بعض العبارات في فيزياء الكم في المحكمة ربما تحت القسم ، يمكن أن ينتهي بك الأمر في السجن . لكن كل العبارات السابقة صحيحة : هي كلها مؤكدة بالتجربة . و هناك العديد من المفاجآت الأخرى الآتية . يمكن أن تلاحظ أنه في الأمثلة السابقة ، لم نشر صراحة للكهرباء ، و إلى التفاعلات النووية أو الجاذبية . في هذه المجالات المفاجآت يمكن أن تكون حتى مدهشة أكثر . قياس المادة المضادة ، التيار الكهربائي بدون مقاومة ، الحركة داخل العضلات ، طاقة الخلاء ، التفاعلات النووية في النجوم – ربما يوما ما – الفضاء الفارغ الذي يغلي ، سيسحرك بالقدر الذي قد سحرت ، وما تزال تسحر آلاف الباحثين .

بشكل خاص ، نتائج كم الفعل للكون الأول هي مذهلة . فقط حاول أن تدرس بنفسك نتائجها من أجل الانفجار العظيم (تحدي 29 d) . كل هذه المواضيع معا ستؤدي بنا إلى هدف مغامرتنا . نتائج كم الفعل هي غريبة جدا ، لا تصدق جدا ، و كثيرة جدا ، بحيث أن فيزياء الكم يمكن أن تسمى فعلا وصف الحركة للعلماء المجانين .

في هذا المعنى هذا يعمم تعريفنا السابق لفيزياء الكم كوصف للحركة المرتبط بالمتعة .

لسوء الحظ ، في بعض الأحيان يقال أن لا احد يفهم نظرية الكم ، وهذا خطأ (صفحة 166) في الحقيقة هو أسوأ من خطأ : إن هذا بسبب التلقين و سوء تقديم معلوماته . إن التلقين و سوء عرض المعلومة هما طريقتان تمنعان الناس من تشكيل أفكارهم الخاصة و الاستمتاع بالحياة . في الواقع ، نتائج كم الفعل يمكن فهمها و الاستمتاع بها من قبل كل شخص.

من أجل القيام بذلك ، أول مهمة لدينا في طريقنا باتجاه إتمام مغامرتنا ستكون استخدام كم الفعل لدراسة المعيار الكلاسيكي للحركة : حركة الضوء .

" لا الآن و لا في أي وقت توجد المادة ، و لا يمكن أن توجد بدون حركة ".

---

*"لا الآن و لا في أي وقت توجد المادة ، و لا يمكن أن توجد بدون حركة " أولريش إنجلز (1820-1895) كان أحد المنظرين للماركسية . (مرجع 12) .

الفصل الثاني

الضوء – النتائج الغريبة لكم الفعل

" من الضوء تحيا كل الأشياء ، كل شيء مخلوق جميل

فريدريش شيلر ، فيلهم تل "

نظرا لأن كل ألوان المواد هي تأثيرات كمية ، يصبح من الملزم دراسة خواص الضوء نفسه . إذا كان التغير الأصغر ما يكون موجود فعلا ، عندها يجب أن يكون هناك أصغر إنارة في الطبيعة . هذه النتيجة قد تم التوصل إليها في اليونان القديمة (مرجع 13) مثلا من بل إبيكوروس (271 BCE- 341) الذي قال بأن الضوء هو تدفق من جسيمات الضوء . اليوم الجسيمات تسمى كمات الضوء أو الفوتونات . بشكل لا يصدق إبيكوروس نفسه تمكن من تأكيد توقعه بواسطة التجربة .

كيف يتصرف المصباح الخافت ؟

حوالي عام 1930 وجد برموبيرغ و فافيلوف طريقة جميلة للتأكد من وجود الفوتونات باستخدام العين المجردة و مصباح (مرجع 14) .

إن أعيننا لا تسمح لنا بأن نكشف بشكل واع الفوتونات الوحيدة و لكن برموبيرغ و فافيلوف وجدا طريقة للتغلب على هذا القصور . في الحقيقة ، التجربة هي بسيطة جدا بحيث أنه يمكن أن تجرى قبل قرون سابقة ، ولكن لا أحد كان لديه القدرة على تخيل تجريبها .

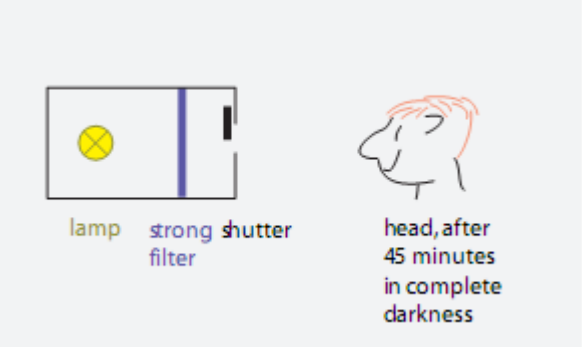
صنع برموبيرغ و فافيلوف مغلاقا ميكانيكيا الذي يمكن أن يفتح لفترات زمنية تبلغ 0.1 s . من الجانب الآخر ، في غرفة مظلمة كليا ، فقد أضاءا الفتحة بضوء أخضر ضعيف جدا : حوالي 200 aW عند 505nm كما هو مبين في الشكل 14 .

عند تلك الشدة ، متى فتح المغلاق ، فإن متوسط لحالي خمسين فوتونا يمكن أن يمر . وهذا مجرد عتبة حساسية العين . لتنفيذ التجربة ، فقد نظرا بشكل متكرر إلى فتحة المغلاق . و النتيجة كانت بسيطة و لكن مدهشة . بعض الأحيان لاحظا الضوء و أحيان أخرى لم يلاحظا . و سواء فعلا ذلك أو لم يفعلا فإن الأمر كان عشوائيا بشكل كامل . و قد أعطى برموبيرغ و فافيلوف التفسير البسيط أنه عند استطاعات المصباح المنخفضة و بسبب التذبذبات ، فإن عدد الفوتونات يكون أعلى من نصف زمن عتبة العين و أدنى من النصف الآخر . التذبذبات هي عشوائية ، وهكذا الكشف الواعي للضوء هو كذلك .

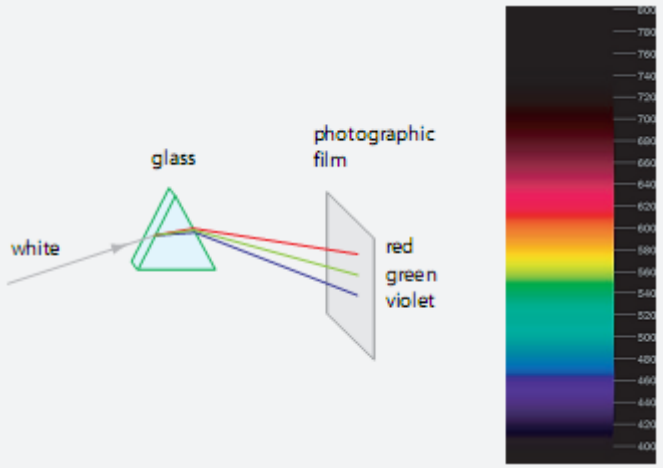
هذا لن يحدث إذا كان الضوء تدفقا مستمرا : في تلك الحالة العين ستكشف الضوء دائما و عند كل فتحة للمغلاق . (عند شدات ضوء أعلى ، فإن النسبة المئوية لعدم الملاحظات ستتناقص بسرعة وفق الشرح المعطى).

باختصار ، التجربة البسيطة تثبت :

**"من الضوء تحيا كل الأشياء ، كل شيء مخلوق جميل " فريدريش شيلر (ولد عام 1759 في مارباخ و توفي عام 1805 في فايمر) ، شاعر ، كاتب مسرحي و مؤرخ .



الشكل 14 – كيفية اختبار تأثير الفوتون الوحيد



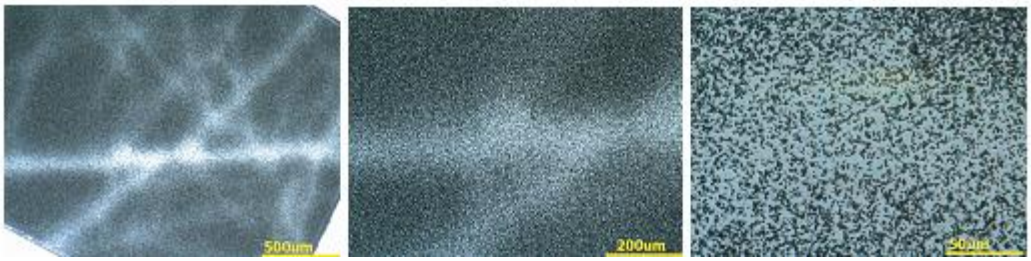
الشكل 15 – كيف يظهر طيف الضوء الأبيض عند مسافات دريئة طويلة جدا ؟ (مبين طيف المسافة القصيرة للدريئة و الذي تم أخذه في الحالة المثلى من أجل إظهار / شاشة CRT ، ليس من أجل الطباعة الملونة كما هو مشروح في (mintaka.sdsu/edu/GF/explain/optics/rendering.html

- الضوء مكون من فوتونات

لا أحد يعلم كيف أن نظرية الضوء كانت ستتطور لو أنه تم إجراء مثل هذه التجربة البسيطة قبل مائة أو حتى 2500 عام قبل ذلك .

إن حقيقة الفوتونات تصبح أكثر إقناعا إذا استخدمنا أجهزة تساعدنا . الطريقة البسيطة هي البدء بشاشة / دريئة خلف موشور المضاءة بضوء أبيض كما هو مبين في الشكل 15 . الضوء يقسم إلى ألوانه . عندما توضع الشاشة أبعد و أبعد فإن شدة الإضاءة لا يمكن أن تصبح صغيرة بشكل اختياري ، حيث أن هذا سيتعارض مع كم الفعل .

و للتأكد من هذا التوقع ، فإننا فقط بحاجة لفيلم فوتوغرافي أبيض و أسود . يصبح الفيلم أسود بواسطة ضوء النهار من أي لون ، و يصبح رماديا داكنا عند شدات متوسطة و رمادي فاتح عند شدات أخفض . و بالنظر للفيلم الرمادي الفاتح جدا تحت المجهر الضوئي نكتشف أنه حتى تحت الإضاءة المنتظمة الظل الرمادي مكون حقيقية من بقع سوداء ، مرتبة بشكل أكثر أو اقل كثافة و كل هذه البقع لها نفس الحجم ، كما هو مبين في الشكل 16 . هذا القياس المنتظم يبين أن الفيلم الفوتوغرافي يتفاعل مع فوتونات وحيدة . يؤكد البحث التفصيلي هذه المقولة ، في القرن العشرين منتجي الأفلام الفوتوغرافية توصلوا إلى الآلية الذرية القائمة بكل تفاصيلها .

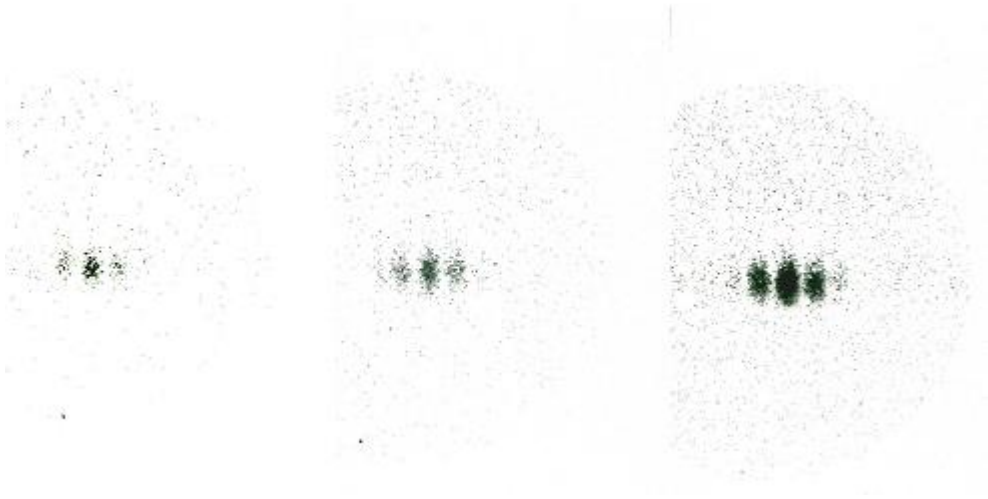


الشكل 16 – فيلم فوتوغرافي مظهر بتكبير متزايد

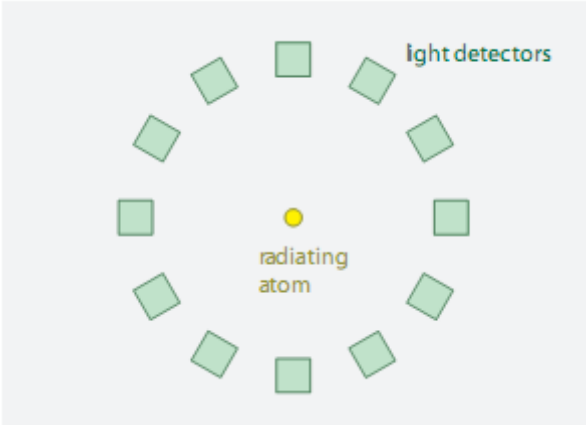
الشكل 17 – كواشف التي تسمح بعد الفوتونات : أنابيب مضاعفة ضوئية (يسار) ثنائي ضوئي انهياري (يمين أعلى تقريبا 1cm) ،صفيحة متعددة القنوات (يمين أسفل تقريبا 10cm)

الفوتونات الوحيدة يمكن كشفها بشكل أكثر دقة بواسطة الأجهزة الإلكترونية . مثل هذه الأجهزة يمكن أن تكون مضاعفات ضوئية ، ثنائيا ضوئية ، صفائح متعددة القنوات أو خلايا المخاريط في العين (مرجع 15) كما هو مبين في الشكل 17 .

أيضا هذه الكواشف تبين أن الضوء منخفض الشدة لا ينتج لون متجانس : على العكس ، الشدة المنخفضة تنتج نموذج عشوائي من بقع متساوية حتى عند ملاحظة ظواهر الموجة النوعية مثل نماذج التداخل كما هو مبين في الشكل 18 . اليوم تسجيل و عد الفوتونات الإفرادية هو إجراء تجريبي قياسي . عدادت الفوتونات هي جزء من أنظمة التصوير الطيفي مثل تلك المستخدمة في قياس التراكيز المنخفضة جدا من المواد . مثلا تستخدم لكشف الأدوية في الشعر البشري .



الشكل 18 – أمواج الضوء مكونة من جسيمات : قياس البقع سوداء للفوتونات في هذه التجربة ذات الشق المزدوج و منخفضة الشدة بأزمنة تعريض / تظهير تبلغ 5 s & 2, 1 باستخدام رافع لشدة الصورة



الشكل 19 - ذرة تصدر فوتون يقدح فقط كاشف واحد و يرتد في اتجاه واحد فقط

كل التجارب تبين نفس النتيجة : متى صنعت كواشف الضوء بهدف الرؤية بدقة قدر الإمكان وبالتالي في بيئات مثل

مظلمة قدر الإمكان – يجد المرء أن الضوء يتجلى بشكل تدفق من كمات الضوء . في هذه الأيام تسمى عادة الفوتونات ، وهو مصطلح ظهر في عام 1926 . الضوء ذو الشدة المنخفضة أو العالية يقابل تدفق ذو عدد صغير أو كبير من الفوتونات . إن المثال المهم بشكل خاص لمنبع ضوئي ذو شدة منخفضة هو ذرة وحيدة . الذرات هي كرات صغيرة . عندما تشع الذرات الضوء أو الأشعة السينية ، فإن الإشعاع يجب أن يصدر كموجة كروية . و لكن في كل التجارب ، أنظر الشكل 19 من أجل جملة نوعية فإن الضوء الصادر عن الذرة لا يكون أبدا موجة كروية ، على عكس ما يمكن أن نتوقعه من الفيزياء اليومية . متى كان إشعاع الذرة محاط بالكثير من الكواشف ، فإن كاشفا وحيدا يتم قدحه . فقط المتوسط خلال العديد من الإصدارات و الكشف يعطي شكل كروي .تبين التجارب بوضوح أن الفوتونات الجزئية لا يمكن أن تكشف .

كل التجارب في الضوء الخافت بالتالي تبين أن الوصف المستمر للضوء هو غير صحيح . كل من مثل هذه التجار يثبت مباشرة أن الضوء هو تدفق من الجسيمات كما اقترح إبيكوروس في اليونان القديمة . القياسات الأكثر دقة تؤكد دور كم الفعل : كل فوتون يؤدي إلى نفس القدر من التغير . كل الفوتونات ذات نفس التردد يسود فيلم أو تقدح دريئة / شاشة تألق بنفس الشكل . باختصار ، مقدار التغير المتحرض بواسطة فوتون وحيد هو في الحقيقة أصغر قدر من التغير الذي يمكن أن ينتجه الضوء .

إذا لم يكن هناك قيمة أصغر فعل ، فإن الضوء يمكن أن يغلف في مقادير صغيرة بشكل غير محدد / اعتباطي . و لكن الطبيعة مختلفة . بعبارة بسيطة : الوصف الكلاسيكي للضوء (مجلد III ، صفحة 85) بواسطة كمون شعاعي مستمر A(t,x) أو حقل كهرطيسي F(x,t) الذي تطوره موصوف بمبدأ أقل الفعل هو خطأ . التوابع المستمرة لا تصف تأثيرات الجسيم الملحوظة . الوصف المعدل مطلوب . التعديل يجب أن يكون مهما فقط عند شدات ضوئية منخفضة نظرا لأنه عند شدات يومية عالية يصف اللاغرانجيان كل القياسات التجريبية بدقة كافية .*

عند أي شدات يتوقف الضوء عن التصرف مثل موجة مستمرة ؟ الرؤية بالعين البشرية لا تسمح لنا بأن نميز بشكل واع الفوتونات الوحيدة ، بالرغم من أن التجارب تبين أن المكونات الصلبة للعين من حيث المبدأ قادر على فعل ذلك (المرجع 16) . و أكثر النجوم خفوتا الذي يمكن أن يرى في الليل ينتج شدة ضوء حوالي $0.5\ \mathrm{nW/m^2}$. نظرا لأن بؤبؤ العين صغير و نحن غير قادرين على رؤية الفوتونات الإفرادية فإن الفوتونات يجب أن يكون لها طاقات أصغر من 100aJ .أعطت تجارب برموبيرغ و فافيلوف حدا أعلى يبلغ حوالي 20 aJ . إن القيمة الدقيقة لكم الفعل التي وجدت في الضوء يجب أن تستنتج من تجربة مخبرية . بعض الأمثلة معطاة فيما يلي .

الفوتونات

بشكل عام كل التجارب تبين أن حزمة الضوء بتردد f أو تردد زاوي ω التي تحدد لونه ، توصف بدقة كتدفق من الفوتونات كل منها له طاقة E تعطى بالشكل :

$$E = \hbar 2\pi f = \hbar \omega \ . \qquad (8)$$

هذه العلاقة استنتجت لأول مرة من قبل ماكس بلانك عام 1899 . وقد وجد أنه من أجل الضوء فإن أصغر فعل قابل للقياس يعطى بكم الفعل $\hbar$. باختصار ، اللون هو خاصة للفوتونات . حزمة الضوء الملونة هي عاصفة من الفوتونات الموافقة .

إن قيمة ثابت بلانك (مجلد III ، صفحة 147) يمكن أن تحدد من قياسات الأجسام السوداء أو منابع ضوئية أخرى (صفحة 213) . كل من هذه القياسات تتطابق و تعطي

$$\hbar = 1.054\,571\,726(47) \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}\ , \qquad (9)$$

وهي قيمة صغيرة بحيث يمكننا فهم لماذا الفوتونات لا تلاحظ من قبل البشر . مثلا الفوتون الأخضر ذو طول الموجة 555 nm له طاقة تبلغ 0.37 aJ . في الحقيقة في شروط الضوء العادي ، فإن الفوتونات تكون كثيرة جدا بحيث أن التقريب المستمر للحقل الكهرطيسي يكون دقيقا بشكل كبير . في الظلام ، عدم حساسية معالجة الإشارة للعين البشرية – بشكل خاص بطء المستقبلات الضوئية – يجعل عد الفوتونات مستحيلا . (مرجع 16) . لكن العين ليست بعيدة عن الحساسية القصوى الممكنة (تحدي 31 ny) . من الأعداد المعطاة أعلاه حول النجوم الخافتة يمكننا تقدير أن البشر قادرين على الرؤية بوعي تحت شروط مثالية ، ومضات تبلغ حوالي نصف دزينة من الفوتونات ، في شروط عادية الأعداد هي أعلى بعشر مرات .

---

*الانتقال من الحالة الكلاسيكية إلى الحالة الكمية يمكن أن تسمى التكميم . هذا المفهوم و القضايا المثالية وراءه هي فقط ذات أهمية تاريخية اليوم .

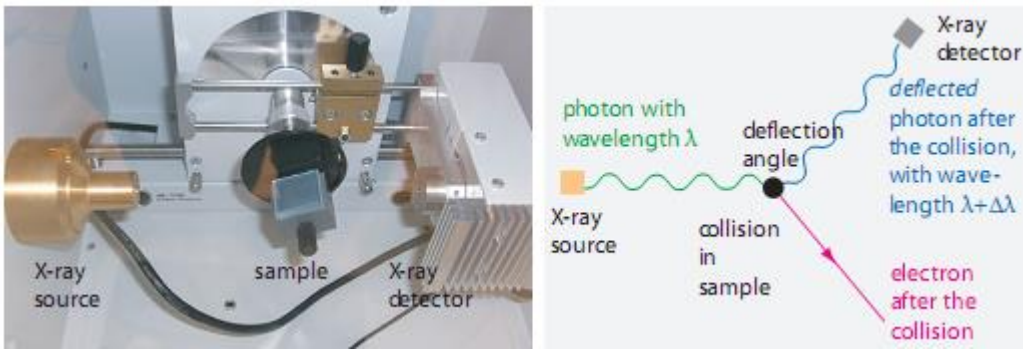
لندرس الخواص الأخرى للفوتونات . فوق كل شيء الفوتونات ليس لها كتلة (سكون) قابلة للقياس ، و ليس لها شحنة كهربائية قابلة للقياس .هل تستطيع تأكيد هذا ؟ (تحدي 32s) . في الحقيقة التجارب يمكن فقط أن تعطي حد أعلى لكلا المقدارين . الحد الأعلى التجريبي الحالي لكتلة (السكون) للفوتون هي 10^{-52} kg و من أجل الشحنة 5.10^{-30} مرة شحنة الإلكترون (مرجع 17) . و هذه الحدود هي صغيرة جدا بحيث يمكننا القول بأمان أن كلا من الكتلة و الشحنة للفوتون معدومتان . نحن نعلم أن الضوء يمكن أن يدفع الأجسام . نظرا لأن الطاقة ، عدم وجود كتلة و سرعة الفوتونات معلومة (تحدي 33e) يمكننا استنتاج أن كمية حركة الفوتون تعطى بالشكل :

$$p = \frac{E}{c} = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{or} \quad \boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k} \,. \qquad (10)$$

بمعنى آخر ، إذا كان الضوء مكون من جسيمات فإننا سنكون قادرين على لعب البلياردو بها . و هذا في الحقيقة ممكن كما بيّن آرثر كومبتون في تجربة شهيرة عام 1923 (مرجع 18) . وقد وجه أشعة سينية التي هي فوتونات عالية الطاقة على الغرافيت و هي مادة ذات إلكترونات حرة تقريبا . و قد وجد أنه متى الإلكترونات في المادة ضربت بواسطة فوتونات الأشعة السينية ، فإن الأشعة السينية المنعكسة تغير لونها . وتجربته مبينة في الشكل 20 . كما هو متوقع فإن قوة الضربة ترتبط بزاوية الانحراف للفوتون . من تغير اللون و من زاوية الانعكاس أكد كومبتون أن كمية حركة الفوتون في الحقيقة تحقق العلاقة $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$.

كل التجارب الأخرى تتفق بأن الفوتونات لها كمية حركة . مثلا عندما تصدر الذرة الضوء فإن الذرة تشعر بارتداد . و كمية الحركة ثانية ينتج أنها تعطة بالعلاقة $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$. باختصار كم الفعل يحدد كمية حركة الفوتون . إن قيمة كمية حركة الفوتون تحترم علاقة عدم التحديد , تماما كما لو أنه من المستحيل قياس بدقة كل من طول موجة الموجة و موضع عرفها ، كذلك من المستحيل قياس كل من كمية حركة الفوتون وموضعه . هل يمكنك تأكيد هذا ؟ (تحدي 34s) . بمعنى آخر ، قيمة كمية حركة الفوتون هي نتيجة مباشرة لكم الفعل .

من دراستنا للفيزياء الكلاسيكية نعلم أن الضوء له خاصة تتجاوز لونه : الضوء يمكن أن يستقطب . هذا فقط طريقة معقدة للقول أن الضوء يدور الأجسام التي يضيئها (مجلد III ، صفحة 122) . بمعنى آخر ، الضوء يملك كمية حركة زاوية موجهة (بشكل اساسي) على طول محور الانتشار . ماذا عن الفوتونات ؟ القياسات تجد بشكل متوافق أن كل كم ضوئي يحمل كمية حركة زاوية تعطى بالشكل $L = \hbar$. وهو يسمى باللولبية . و الكمية مشابهة للذي أوجد من أجل الجسيمات الضخمة : المرء بالتالي ايضا يتحدث عن برم الفوتون . باختصار الفوتونات تدور بعض الشيء في اتجاه إما موازي أو مخالف للموازي / عكسي التوازي لاتجاه حركتها . مرة ثانية قيمة الحلزونية / اللولبية أو البرم ، وهذا ليس مفاجأة وهو يؤكد العلاقة الكلاسيكية $L = E/\omega$ بين الطاق و كمية الحركة الزاوية التي وجدناها في الفقرة حول الديناميك الكهربائي الكلاسيكي (مجلد III ، صفحة 122) . لاحظ أن بشكل مخالف للحدس ، فإن كمية الحركة الزاوية لفوتون وحيد هي ثابتة و بالتالي مستقل عن طاقته . حتى الفوتونات ذات الطاقة الأكبر لها $L = \hbar$. بالطبع قيمة اللولبية ايضا تحترم الحد المعطى بواسطة كم الفعل . إن النتائج العديدة لقيمة اللولبية (البرم) $\hbar$ ستصبح واضحة فيما يلي .



الشكل 20 – الشكل الحديث لتجربة كومبتون المركب على طاولة . التجربة تبين أن الفوتونات لها كمية حركة : الأشعة السينية و بالتالي الفوتونات التي تتكون منها تغير التردد عندما تضرب الإلكترونات في المادة هو تماما نفس الطريقة كما هو متوقع من الجسيمات المتصادمة

ما هو الضوء ؟

" الضوء هو حركة الإضاءة للأجسام المضيئة

بليز باسكال "

في القرن السابع عشر

استخدم بليز باسكال العبارة السابقة حول الضوء ليضحك من بعض الفيزيائيين ، و يسخر من الاستخدام الصاخب للتعريف الدائري . بالطبع ، وقد كان على حق : في وقته كان التعريف في الحقيقة دائريا ، حيث أنه لا يمكن إعطاء أي معنى لأي من مصطلحاته . و لكن متى درس الفيزيائيون قياس بدقة ، فإن الفلاسفة خسروا . كل هذه المصطلحات غير المعرفة أصلا الآن لها معنى محدد و التعريف لدوار قد أزيل . و الضوء في الحقيقة هو نوع من الحركة و هذه الحركة يمكن أن تسمى بشكل واضح الضوئية ، لأنه على خلاف حركة الأجسام المادية ، هي تملك خاصة فريدة $v = c$ ، الأجسام المضيئة ، التي تسمى كمات الضوء أو الفوتونات يتم تمييزها و تفاضلها عن كل الجسيمات الأخرى ببواسطة علاقة التشتت لها E= cp ، و طاقتها $E = \hbar\omega$ و برمها $L = \hbar$ و الأعداد الكمية الأخرى كلها المتناقصة ، و خاصة كونها كمات للحقل الكهرطيسي .

باختصار الضوء هو تدفق الفوتونات . هو في الحقيقة حركة مضيئة للجسيمات المضيئة ، الفوتونات تعطي أول مثال لنا عن الخاصة العامة للعالم على مقاييس صغيرة : كل الأمواج و كل التدفقات في الطبيعة مكونة من جسيمات كمية . الأعداد الكبيرة من الجسيمات الكمية (المتماسكة) – أو الكوانتونات – تتصرف مثل أمواج . سوف نرى قريبا أن هذه هي الحال حتى بالنسبة للمادة . الكوانتونات هي مكونات أساسية من كل الأمواج و كل التدفقات بدون استثناء . و بالتالي الوصل المستمر اليومي للضوء هو مشابه في العديد من النواحي لوصف الماء كسائل مستمر : الفوتونات هي ذرات الضوء و الاستمرار هو تقريب صالح للأعداد الكبيرة من الجسيمات . الكوانتونات الوحيدة غالبا تتصرف مثل الجسيمات الكلاسيكية .

كتب الفيزياء اعتادت على مناقشة ما يعرف بالثنائية الموجية - الجسيمية . لنوضح الأمر من البداية : الكوانتونات أو الجسيمات الكمية هي ليست أمواج كلاسيكية و لا جسيمات كلاسيكية .

"الضوء هو الحركة الإضاءة للأجسام المضيئة " بليز باسكال (ولد عام 1623 في كليرمون و توفي عام 1662في باريس) هو رياضي و فيزيائي مهم حتى عمر 26 حيث أصبح عالم لاهوت وفيلسوف

في العالم الميكروسكوبي الكوانتونات هي الجسيمات الأساسية . لكن ما يزال هناك الكثير غير واضح . حيث داخل المادة من أين تأتي هذه الفوتونات وحيدة اللون ؟ حتى بشكل أكثر متعة ، إذا كان الضوء مكون من كوانتونات ، كل الحقول الكهرطيسية ، حتى الستاتيكية يجب أن تكون مكونة من فوتونات أيضا . لكن في الحقول الستاتيكية لا شيء يتحرك . كيف يمكن حل مثل هذا التناقض الظاهر ؟ ما هي النتائج المترتبة على الناجية الجسيمية لهذه الحقول الستاتيكية ؟ ما هو الفرق بين الكوانتونات و الجسيمات الكلاسيكية ؟ خواص الفوتونات تتطلب دراسة أكثر دقة .

حجم الفوتونات

أولا ، يمكننا أن نتساءل : كم تتكون هذه الفوتونات ؟ كل التجارب حتى الآن المجراة حتى الحدود الحالية

البالغة تقريبا 10^{-20} m تعطي نفس الإجابة : " لا يمكننا إيجاد أي شيء " . هذا متوافق مع كل من الكتلة المتناقصة و الحجم المتناقص للفوتونات . في الواقع ، يمكن أن نتوقع بشكل حدسي أن الجسم ذو الحجم المنتهي له كتلة منتهية . و بالتالي بالرغم من أن التجارب يمكن أن تعطي فقط حد أعلى ، فإن هذا متوافق مع القول أن للفوتون حجم صفري .

الجسيم ذو الحجم الصفري لا يمكن أن يكون له أي مكونات . بالتالي الفوتون يمكن أن يقسم إلى مكونات أصغر : الفوتونات ليست مركبة . لهذا السبب تسمى جسيمات أولية . سوف نعطي قريبا صياغات قوية أكثر من أجل هذه النتيجة.

(هل يمكنك إيجاد واحدة ؟) (تحدي 35s) . على أن النتيجة هي غريبة . كيف يمكن للفوتون أن يكون له حجم متلاشي و ألا يكون له مكونات , ما يزال هو شيء ما ؟ هذا سؤال صعب و الجواب سيظهر سريعا في المجلد الأخير من مغامرتنا . في الوقت الحالي سوف نقبل ببساطة الوضع كما هو . بالتالي سنتحول إلى سؤال أسهل .

هل الفوتونات قابلة للعد ؟ - الضوء المضغوط

" فعلا هي بالرغم من كل شيء موجود حقيقة

ماكس بلانك "

لقد رأينا أن أبسط طريقة لعد الفوتونات هي توزيعها عبر شاشة / دريئة كبيرة و بعدها امتصاصها . لكن هذه الطريقة ليست مرضية بشكل كلي ، حيث أنها تدمر الفوتونات . كيف يمكننا عد الفوتونات من دون تدميرها ؟

إحدى الطرق لعكس الفوتونات في مرآة و قياس الارتداد عن المرآة . و يبدو هذا تقريبا لا يصدق ، ولكن هذه الأيام هذا الأثر يصبح قابلا للقياس حتى من أجل أعداد صغيرة من الفوتونات . مثلا ، يجب أن يؤخذ بالحسبان بالنسبة لمرايا الليزر المستخدمة في كواشف موجة الجاذبية (مجلد II ، صفحة 180) التي موضعها يجب أن يقاس بدقة عالية .

الطريقة الأخرى لعد الفوتونات بدون تدميرها تتضمن استخدام تجاويف الليزر عالية الجودة . من الممكن عد الفوتونات بواسطة الأثر الذي تملكه على الذرات الموضوعة بشكل ذكي داخل مثل هذا التجويف .

بتعبير آخر شدة الضوء يمكن في الحقيقة قياسها بدون امتصاص . هذه القياسات تبدي قضية مهمة : حتى أفضل الحزم الضوئية من الليزرات الأكثر تعقيدا تتذبذب في شدتها .

---

*"بالتالي فهي لا اوجد أبدا " ماكس بلانك في سنواته اللاحقة قال بهذا بعد الوقوف بصمت ، لفترة طويلة أمام جهاز عد فوتونات وحيدة بإنتاج نقرة لكل فوتون كشفته . خلال جزء كبير من حياته ، بلانك كان متشككا بمفهوم الفوتون ، حتى بالرغم من أن تجاربه و نتائجه كانت بداية لطرح هذا المفهوم .

ليس هناك حزم ثابتة . هذا لا يعود مفاجأة : إذا لم تتذبذب حزمة ضوئية ، فإن مراقبتها / قياسها مرتين سيعطي قيمة متلاشية للفعل . و لكن هناك فعل أصغري في الطبيعة و هو $\hbar$. بالتالي أي حزمة و أي تدفق في الطبيعة يجب أن يتذبذب . لكن هناك المزيد .

توصف حزمة الضوء في مقطع عرضي ، بشدتها وطورها . التغير أو الفعل التي يحدث بينما تنتشر حزمة تعطى بجداء الشدة و الطور . و تؤكد التجارب النتيجة الواضحة : إن شدة و طور الحزمة تتصرف مثل كمية الحركة و موضع الجسيم في أنها تخضع لعلاقة عدم التحديد . يمكنك استنتاج ذلك بنفسك ، بنفس الطريقة التي استنتجنا بها علاقات هايزنبرغ . باستخدام الشدة المميزة $I = E/\omega$ فإن طاقة الحزمة مقسمة على التردد الزاوي و تسمية الطور φ نحصل على *

$$\Delta I \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} . \qquad (12)$$

بشكل مكافئ جداء عدم التحديد من أجل أعداد الفوتونات المتوسطة $n = I/\hbar = E/\hbar\omega$ و الطور φ يخضع لـ :

$$\Delta n \, \Delta\varphi \geqslant \frac{1}{2} . \qquad (13)$$

من أجل الضوء الصادر عن مصباح عادي ، ما يعرف بالضوء الحراري ، فإن جداء عدم التحديد في الطرف الأيسر من المتراجحة السابقة هو عدد كبير . بشكل مكافئ جداء عدم التحديد للعلاقة (12) هو مضاعف كبير لكم الفعل .

من أجل حزم الليزر أي حزم الضوء المتماسك ، ** فإن جداء عدم التحديد قريب من 1/2 . و توضيح الضوء المتماسك معطى في الشكل 22 .

اليوم من الممكن إنتاج ضوء الذي فيه جداء عدمي تحديد في المعادلة (13) هو قريب من 1/2 ولكن تلك التي قيمتيها تختلف (في واحدات ما يعرف بفضاء الشعاع الطوري موضح في الشكل 21) (مرجع 19) . مثل هذا الضوء يسمى غير كلاسيكي أو مضغوط . إن إحصائيات الفوتون هي إما بواصونية مفرطة أو دون / تحت بواصونية . مثل هذه الحزم الضوئية تتطلب أنظمة مخبرية معقدة من أجل إنتاجها و تستخدم في العديد من تطبيقات البحث الحديثة . الضوء غير الكلاسيكي يجب أن يعامل بدقة فائقة حيث أن أصغر الاضطرابات تحوله ثانية إلى ضوء عادي متماسك (أو حتى الضوء الحراري) الذي فيه إحصائيات بواصون (أو حتى بوس – أينشتاين) تصح ثانية . العرض العام للأنواع الأساسية لحزم الضوء يعطى بالشكل 21 ، مع شدتها و سلوك طورها . (العديد من الخواص المبينة في الشكل معرّفة من أجل خلية الفضاء الطوري الوحيد فقط) .

---

*العدد الكبير من الفوتونات مفترض في العلاقة . هذا واضح حيث أن $\Delta\varphi$ لا يمكن أن يكبر أبعد من كل الحدود . العلاقات الدقيقة هي

$$\Delta I\,\Delta\cos\varphi \geq \frac{\hbar}{2}|\langle\sin\varphi\rangle|$$
$$\Delta I\,\Delta\sin\varphi \geq \frac{\hbar}{2}|\langle\cos\varphi\rangle| \qquad (11)$$

حيث $< x >$ يشير على قمة التوقع للقيمة القابلة للقياس x .

**الضوء المتماسك هو ضوء من أجله عدد الفوتونات أو توزعها الاحتمالي هو بواصوني بشكل خاص التفاوت يساوي عدد الفوتونات المتوسط . الضوء المتماسك يوصف بأنه مكون من فوتونات في حالات الكم المتماسكة . مثل هذه الحالة المتماسكة (القانونية) أو حالة جلاوبر هي رسميا حالة حيث $\Delta n \to n$ & $\Delta\varphi \to 1/n$.

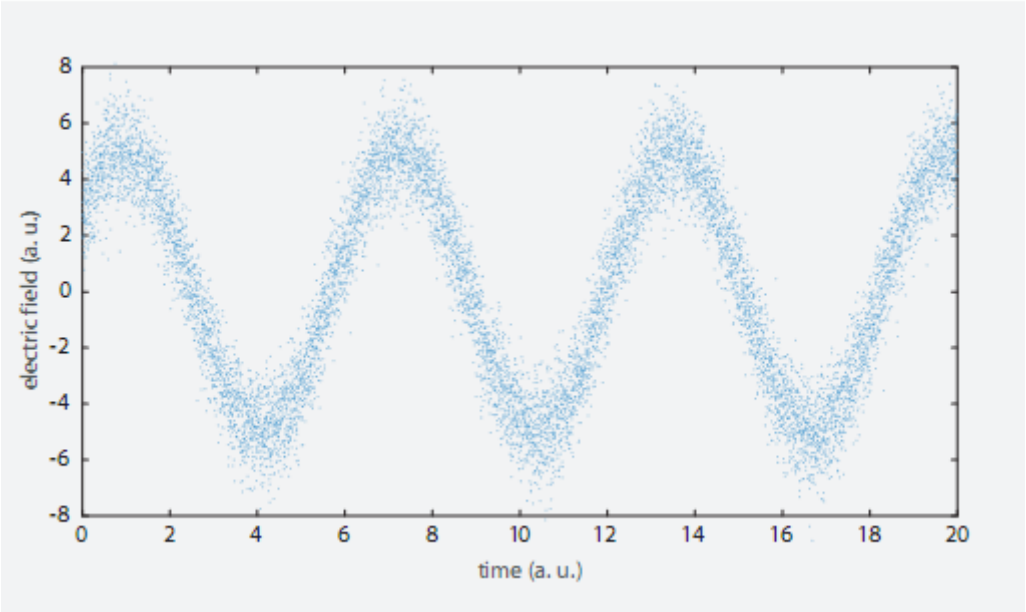
الشكل 21 – أربعة أنواع من الضوء و خواص فوتوناته ، الضوء الحراري ، ضوء الليزر و نوعين متطرفين من ضوء مضغوط غير كلاسيكي

إن أحد الأنواع المتطرفة من الضوء غير الكلاسيكي هو الضوء المضغوط الطور . نظرا لأن حزمن الضوء المضغوط الطور له (تقريبا) طول محدد ، فإن عدد الفوتونات في مثل هذه الحزمة يتذبذب من الصفر (تقريبا) إلى اللانهاية . بمعنى آخر ، من أجل إنتاج ضوء ليزري متماسك الذي يقترب من موجة جيبية نقية بالشكل المثالي قدر المستطاع علينا قبول أن عدد الفوتونات هو غير محدد قدر الإمكان . مثل هذه الحزمة لها تذبذبات طور صغيرة جدا التي تعطي دقة عالية في قياس التداخل ، و ضجيج الطور يكون منخفض قدر الإمكان .

الحالة المتطرفة الأخرى للضوء غير الكلاسيكي هي حزمة ذات عدد معطى ثابت من الفوتونات و بالتالي عدم تحديد طور عالي جدا . في مثل هذه الحزمة الضوئية مضغوطة المطال فإن الطور يتذبذب بشكل غريب .*

---

*الحالات الكمية الأكثر ملائمة لوصف مثل هذا الضوء تسمى حالات العدد و في بعض الأحيان حالات فوك . هذه الحالات ثابتة و بالتالي حالات خاصة للهاملتونية و تحتوي عدد ثابت من الفوتونات .

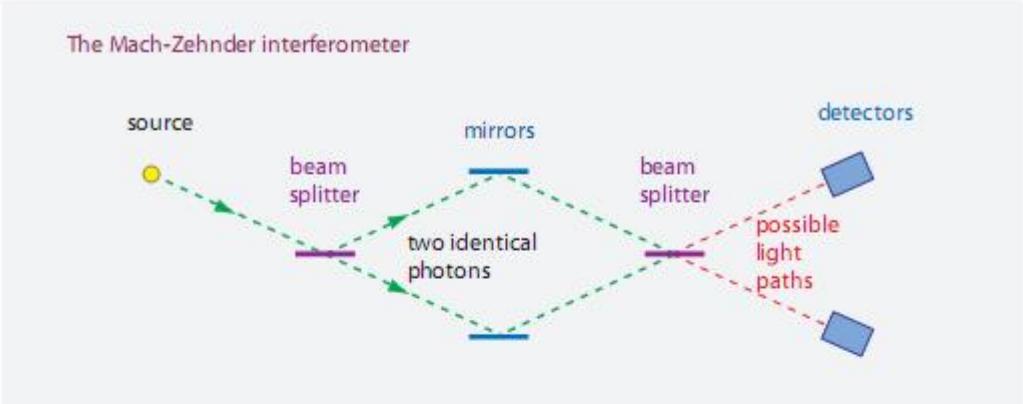


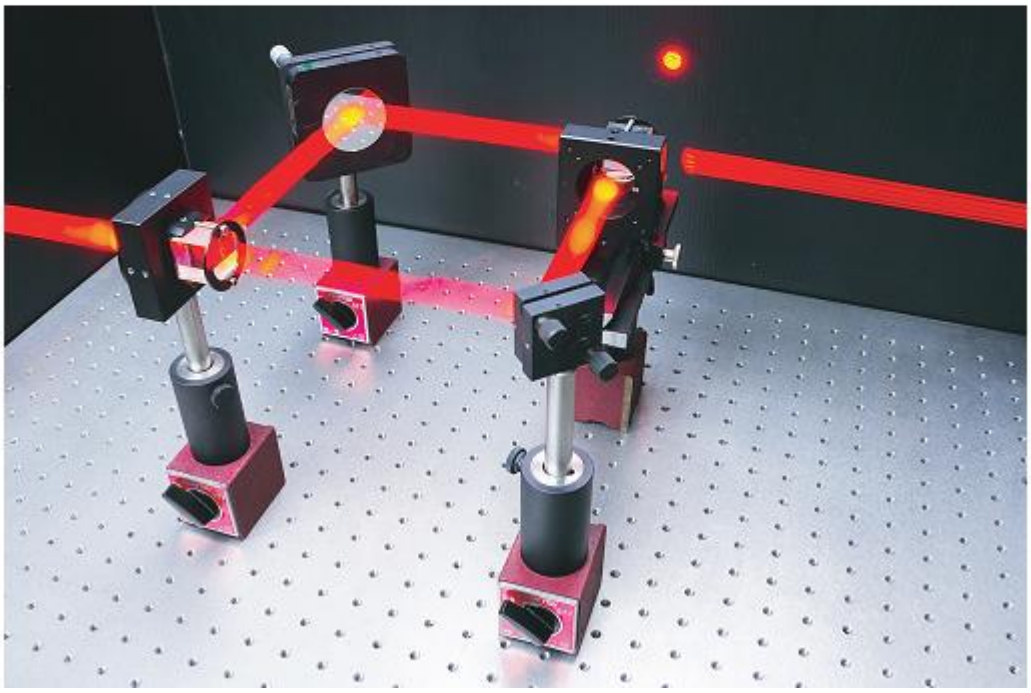
الشكل 22 – الطريقة البسيطة لتوضيح عدم التحديد لشدة حزمة الضوء و الطور : الحقل الكهربائي المقاس لموجة كهرطيسية متماسكة ذات شدة منخفضة مكونة من حوالي عشرة فوتونات . الموجة الجيبية الغيمية تقابل مخطط الطور الشعاعي في أسفل العامود الثاني في المراجعة السابقة . من أجل عدد كبير من الفوتونات ، فإن مطال الضجيج النسبي مهمل

هذا النوع من الضوء غير الكلاسيكي المضغوط للضوء هو مثالي من أجل قياسات الشدة كما يعطي الضجيج الشدة الأخفض ما يكون المتاح . هذا النوع من الضوء يبدي فوتونات مضادة للانضمام . للحصول على مزيد من البصيرة فإن رسم المخططات المقابل للشكل 22 من أجل الطور المضغوط و من أجل الضوء ذو المطال المضغوط (تحدي 36 s).

على العكس فإن الضوء المتماسك هو الذي يصدر عن مؤشرات الليزر و الليزرات الأخرى يكمن بين النوعين المتطرفين من الضوء المضغوط : عدم تحديد الطور و عدد الفوتونات هي ذات قيمة مشابهة .

إن القياسات حول الضوء الحراري ، فإن ضوء الليزر المتماسك و الضوء غير الكلاسيكي العالي هي خاصة مهمة للطبيعة : عدد الفوتونات في حزمة ضوئية ليس مقدار محدد جيدا . بشكل عام ، إنه غير محدد ومتذبذب . الفوتونات على خلاف الأحجار ، لا يمكن عدها بشكل دقيق – طالما أنها تنتشر و لا تمتص . في الطيران ، فقط من الممكن تحديد عدد الفوتونات المتوسط التقريبي ضمن الحدود الموضوعة بواسطة عدم التحديد . هل من الصحيح القول أن عدد الفوتونات في بداية الحزمة ليس بالضرورة هو نفس العدد في نهاية الحزمة ؟ (تحدي 37 ny) . التذبذبات في عدد الفوتونات هي أكثر أهمية في الترددات البصرية . عند الترددات الراديوية فإن عدد الفوتونات يكون عادة مهمل ، بسبب طاقات الفوتون المنخفضة و أعداد الفوتونات العالية القائمة . بشكل معاكس ، عند طاقات أشعة غاما ، فإن تأثيرات الموجة تلعب دورا قليلا . مثلا رأينا أنه في الفضاء العميق المظلم بين المجرات البعيدة عن أي نجم ، يوجد هناك تقريبا 400 فوتون لكل سنتمتر مكعب ،وهي تشكل إشعاع الخلفية الكونية . هذا العدد لشدة الفوتونات ، مثل عدد الفوتونات في حزمة ضوئية أيضا له عدم تحديد في القياس . هل يمكنك تقديره ؟ (تحدي 38s)





الشكل 23 – مقياس تداخل ماك تسندر و تحقيق عملي ، بحجم حوالي 0.5 m

باختصار على خلاف الحصى فإن الفوتونات هي قابلة للعد ، ولكن عددها غير ثابت . و هذا ليس الفرق الوحيد بين الفوتونات و الحصى .

مواضع الفوتونات

حيث الفوتون عندما تتحرك في حزمة ضوئية ؟ نظرية الكم تعطي إجابة بسيطة : إلى مكان غير معروف بشكل خاص

و هذا يثبت في شكل أكثر روعة بواسطة التجارب على مقاييس التداخل مثل مقياس التداخل الأساسي المبين في الشكل 23 . مقاييس التداخل تبدي أنه حتى الحزمة المكونة من فوتون وحيد يمكن تقسيمها ، و تقاد على طول مسارين مختلفين ، و بعدها تجمع . التداخل الناتج يبين أن الفوتون الوحيد لا يمكن أن يقال أنه أخذ أي من المسارين . إذا كان أحد المسارين مسدودا فإن النموذج على الشاشة يتغير . بمعنى آخر يجب أن يأخذ الفوتون بشكل ما كلا المسارين بنفس الوقت . الفوتونات لا يمكن أن تكون متوضعة : إنها لا تملك موضع . *

لقد وصلنا إلى نتيجة أن نبضات الضوء الماكروسكوبي تملك مسارات ولكن الفوتونات الفردية فيها لا تملك ذلك . الفوتونات ليس لها مواضع و لا مسارات . فقط الأعداد الكبيرة للفوتونات يمكن أن يكون لها مواضع و مسارات و بالتالي فقط بشكل تقريبي .

إن استحالة تموضع الفوتونات يمكن أن يتم تحديد كميتها . يبدي التداخل أنه من المستحيل تحديد موضع الفوتونات في اتجاه مستعرض للحركة . و ربما يبدو أنه من الأقل صعوبة تحديد موضع الفوتونات على طول اتجاه الحركة ، عندما تكون جزءا من نبضة الضوء و لكن هذا خطأ . إن كم الفعل يقتضي أن عدم التحديد في الموضع الطولاني يعطى على الأقل بطول موجة الضوء . هل يمكنك تأكيد هذا ؟ (تحدي e 39) . ينتج أن الفوتونات يمكن فقط أن يحدد موضعها ضمن طول التماسك . في الحقيقة طول التماسك العرضاني و الطولاني يختلفان في الحالة العامة . و إن طول التماسك الطولاني (مقسما على c) أيضا يعرف بالتماسك الزمني ، أو ببساطة زمن التماسك .أيضا مبين في الشكل 21 استحالة تموضع الفوتونات (صفحة 49) نتيجة لكم الفعل . مثلا طول التماسك العرضاني هو ناتج عن عدم تحديد كمية الحركة العرضانية ، قيم الفعل لمسارات تؤدي إلى نقاط مفصولة بأقل من طول التماسك تختلف بأقل من كم الفعل h .متى كشف الفوتون في مكان ما مثلا بالامتصاص فإن العبارة الدقيقة حول اتجاهه أو أصله لا يمكن أن تعطى . في بعض الأحيان ، في حالات خاصة ، ربما يكون هناك احتمال لاتجاه معين أو منبع بالرغم من ذلك .

إن عدم وجود تموضع يعني أن الفوتونات لا يمكن ببساطة تحديد موضعها كقطارات موجية قصيرة . مثلا يمكننا زيادة طول التماسك بإرسال الضوء عبر مرشح ضيق . الفوتونات هي عناصر غير متموضعة فعلا ، خاصة بالعالم الكمي . الفوتونات هي ليست أحجار صغيرة و لا رزم موجية صغيرة . بالعكس المسار الضوئي ، موضع نبضة الضوء و التماسك هي خواص لمجموعة الفوتونات ، و لا تطبق على الفوتون الوحيد.

متى كان يمكن تحديد موضع الفوتونات على طول اتجاه حركتها كما في الضوء المتماسك يمكننا سؤال كيف تتراصف الفوتونات ، واحدا بعد الآخر في حزمة ضوئية . بالطبع لقد رأينا للتو أنه من غير المنطقي الحديث عن موضعها الدقيق.

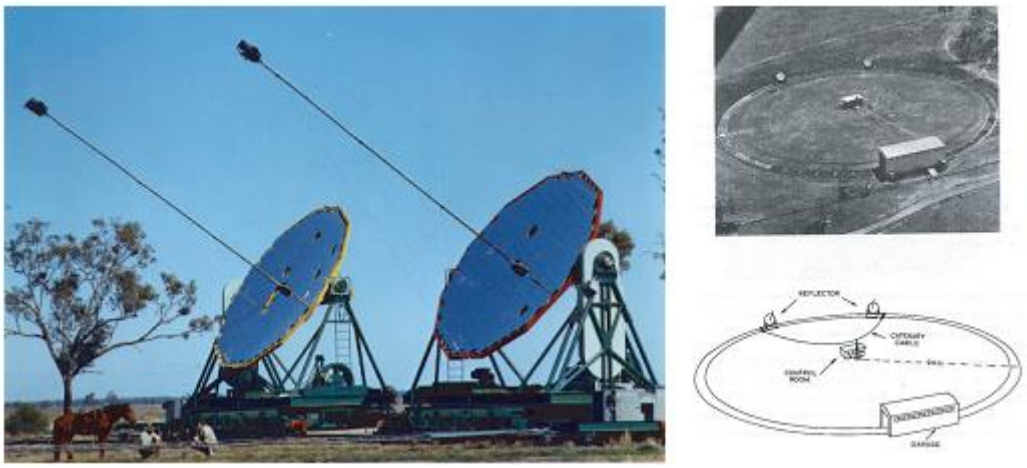
لكن الفوتونات في الحزمة المثالية تصل تقريبا في فواصل منتظمة ؟

لعار الفيزيائيين فإن دراسة ارتباطات الفوتون كانت قد بدأت من قبل فلكيين اثنين ، روبرت هانبري براون و ريتشارد تويس في 1956 ، و واجها سنوات عديدة من الإنكار (مرجع 20) . وقد اختلفوا في المسافة العرضانية للكاشفين المبينين في الشكل 24 - من بضع أمتار إلى 188 m وقاسا ارتباطات الشدة بينهما . و قد وجد هانبري براون و تويس أن شدة التذبذبات ضمن حجم التماسك مترابطة . بالتالي الفوتونات نفسها مترابطة بواسطة هذه التجربة فقد كانوا قادرين على قياس قطر الكثير من النجوم البعيدة .

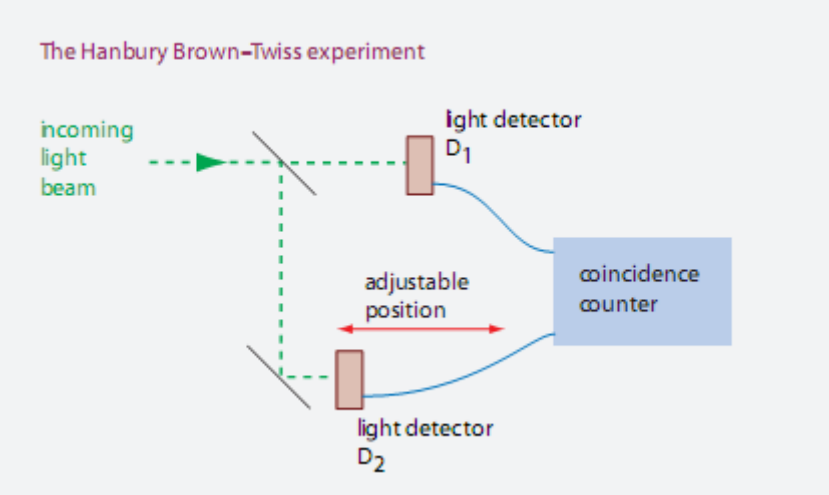
والباحثون الذين ألهمهم نجاح هانبري و تويس طوروا طريقة بسيطة لقياس احتمال أن فوتونا ثانيا في حزمة الضوء يصل في زمن معين بعد الأول . وقد قسموا ببساطة الحزمة ووضعوا كاشفا في أول فرع و غيروا موضع الكاشف الثاني في الفرع الآخر . و الجملة مرسومة في الشكل 25 . مثل هذه التجربة تعرف اليوم بتجربة هانبري براون تويس .

---

*لا يمكننا تجنب هذه النتيجة بالقول أن الفوتونات تقسم عند مقسم الحزمة : إذا وضعنا كاشف في كل ذراع ، نجد أنه لا يكشف أبدا الفوتون بنفس الوقت . الفوتونات لا يمكن تقسيمها .



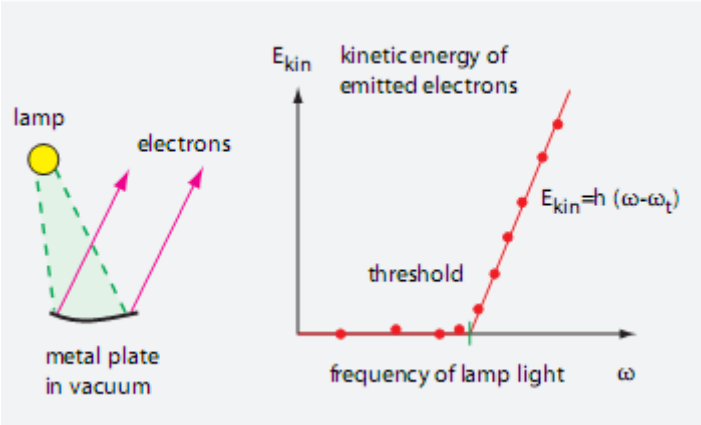
الشكل 24 – تنظيم التجربة الأصلية التي قاس بواسطتها هانبري براون و تويس أقطار النجوم في نارابري في استراليا و المسافة بين لاقطين ضوئيين يمكن تغييرها بتحريكهما على سكك . الكواشف الضوئية هي في نهاية الأقطاب و كل منهما ، كما كتبا ، يلتقطان الضوء كما يجمع المطر في دلو



الشكل 25 – كيفية قياس إحصائيات الفوتونات بواسطة رابط شدة إلكتروني أو عداد تطابق ، التغير يقاس بتغيير موضع الكاشف

يجد المرء أنه من أجل الضوء المتماسك ضمن حجم التماسك ، فإن النقرات في العدادين – وبالتالي الفوتونات نفسها – مترابطة . كي تكون أكثر دقة ، مثل هذه التجارب تبيّن أنه متى ضرب الفوتون الأول فإنه من الأكثر احتمالا أن الفوتون الثاني سيضرب بعده . بالتالي الفوتونات في الحزم الضوئية هي متجمعة . التجميع هو أحد النتائج العديدة التي تبين أن الفوتونات هي كوانتونات ، و الذي هو في الحقيقة ضروري لوصف الضوء و أنها أشياء غير ممكن تحديد موضعها . كما سنرى أدناه النتيجة أيضا تقتضي أن الفوتونات هي بوزونات (صفحة 63) .

كل حزمة ضوء تملك حد زمني علوي للتجميع : زمن التماسك . من أجل الأزمنة الأطول من زمن التماسك ، فإن احتمال التجميع منخفض و استقلال المجال الزمني كما هو مبين في الشكل 25 . زمن التماسك يميز كل حزمة ضوئية .



الشكل 26 - الطاقة الحركية للإلكترونات الصادرة في الأثر الكهرضوئي

في الحقيقة غالبا من الأسهل التفكير بدلالة طول التماسك لحزمة ضوئية . من أجل الضوء الحراري ، طول التماسك هو فقط بضعة ميكرومترات : مضاعف صغير من طول الموجة . و أكبر أطوال تماسك التي تزيد على و أكبر أطوال تماسك التي تزيد على 300 000 km يتم الحصول عليها بواسطة الليزرات البحثية التي لها عرض حزمة ضيق جدا يبلغ فقط 1 Hz . من الممتع ، أن الضوء المتماسك يوجد حتى في الطبيعة : النجوم العديدة الخاصة وجد أنها تصدره (مرجع 21).

بالرغم من أن شدة حزمة الليزر الجيدة هي تقريبا ثابتة ، فإن الفوتونات لا تصل عند فواصل زمنية منتظمة . حتى أفضل الليزرات تبدي تجميع ، بالرغم من أنه ذو إحصائيات مختلفة و بدرجة أقل من ضوء المصباح (صفحة 49) كما هو موضح في الشكل 21 . الضوء الذي فوتوناته تصل بانتظام بالتالي تبدي ما يعرف بالفوتون المضاد للتجميع ، و هو غير كلاسيكي واضح بالنسبة للمعنى المعرف أعلاه ، مثل هذا الضوء يمكن أن ينتج فقط بواسطة ترتيبات تجريبية خاصة . إن الأمثلة القصوى لهذه الظاهرة يتم دراستها في الوقت الحالي من قبل العديد من المجموعات البحثية التي تهدف لصنع منابع ضوئية التي تصدر فوتون واحد في كل مرة ، عند فواصل زمنية منتظمة بالشكل الموثوق قدر الإمكان . باختصار ، يمكننا أن نقول أن إحصائيات الفوتونات الدقيقة في حزمة ضوئية تعتمد على آلية المنبع الضوئي .

باختصار تجبرنا التجارب على أن نخلص إلى أن الضوء مكون من فوتونات و لكن أيضا أن الفوتونات لا يمكن أن تتوضع في حزم ضوئية . و من غير المنطقي الحديث عن موضع الفوتون بشكل عام و الفكرة تصبح منطقية فقط في بعض الحالات الخاصة ، و بعدها تقريبا فقط و كمتوسط إحصائي .

هل الفوتونات ضرورية ؟

في ضوء النتائج المبينة حتى الآن فإن الجواب على السؤال السابق واضح . لكن القضية مخادعة ، في الكتب ، الأثر الكهرضوئي عادة يستشهد به كأول برهان تجريبي و الأكثر وضوحا لوجود الفوتونات . و في عام 1887 لاحظ هاينريش هرتز أنه بالنسبة لمعادن معينة مثل الليثيوم أو السيزيوم ، فإن الضوء فوق البنفجسي الوارد يؤدي إلى شحن المعدن . و الدراسات اللاحقة للأثر بينت أن الضوء يسبب إصدار الإلكترونات و أن الطاقة للإلكترونات الملفوظة لا تعتمد على شدة الضوء و لكن فقط على الفرق بين $\hbar$ مضروبا بتردده و طاقة العتبة التابعة للمادة . الشكل 26 يلخص التجربة و القياسات .

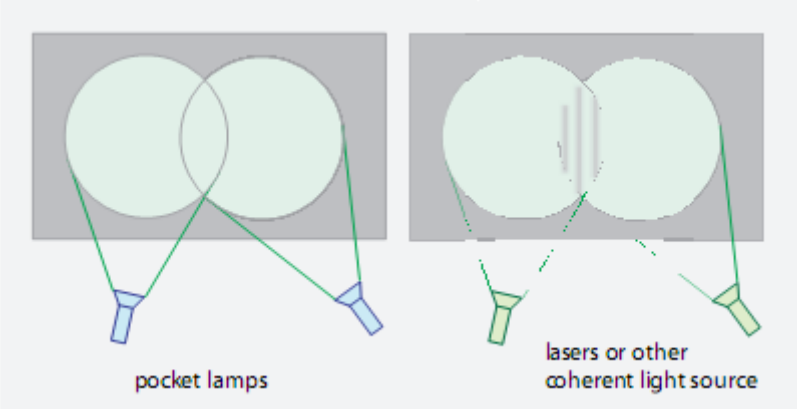
في الفيزياء الكلاسيكية فإن الأثر الكهرضوئي من الصعب شرحه . و لكن في عام 1905 استنتج ألبرت أينتشتاين القياسات من افتراض أن الضوء مكون من فوتونات ذات طاقة E= $\hbar\omega$. و قد تخيل أن هذه الطاقة تستخدم جزئيا لجعل الإلكترون يقفز فوق العتبة ، و جزئيا لتعطيه طاقة حركية . و المزيد من الفوتونات ستؤدي فقط إلى مزيد من الإلكترونات و لكن ليست أسرع . في عام 1921 تلقى أينشتاين جائزة نوبل عن شرح الأثر الكهرضوئي . و لكن أينشتاين كان عبقريا : حيث استنتج النتيجة الصحيحة بواسطة تبرير غير صحيح بعض الشيء . الخطأ (الصغير) كان افتراض أن حزمة الضوء المستمرة الكلاسيكية ستنتج أثرا مختلفا . في الحقيقة من السهل رؤية أن الحقل الكهرطيسي الكلاسيكي المستمر الذي يتبادل التأثير مع المادة المتقطعة ، المكونة من ذرات متفرقة ، الحاوية على إلكترونات متفرقة ، ستؤدي تماما إلى نفس النتيجة ، طالما أن حركة الإلكترونات موصوفة بواسطة نظرية الكم . أكد العديد من الباحثين هذا في بداية القرن العشرين (مرجع 23) . و الأثر الكهرضوئي بنفسه لا يقتضي وجود الفوتونات .

في الواقع الكثير من الباحثين في الماضي كانوا غير مقتنعين بأن الأثر الكهرضوئي يبيّن وجود الفوتونات و تاريخيا الحجة الأكثر أهمية من أجل ضرورة وجود كمات الضوء أعطيت من قبل هنري بوانكريه . في عام 1912 & 1911 في عمر 57 عاما وفقط قبل بضعة أشهر من وفاته ، فقد نشر أبحاث عظيمة أثبتت أن قانون إشعاع الجسم الأسود – الذي فيه كم الفعل الذي تم اكتشافه من قبل ماكس بلانك يتطلب وجود الفوتونات (مرجع 24) . و قد بيّن أيضا أن مقدار الأشعة الصادر عن جسم ساخن هو منتهي فقط بسبب الطبيعة الكمية للعمليات المؤدية إلى إصدار الضوء . و وصف هذه العمليات بدلالة الديناميك الكهربائي الكلاسيكي سيؤدي (تقريبا) إلى مقادير لا نهائية من الطاقة المشعة . و إن بحثي بوانكريه المهمين أقنعا معظم الفيزيائيين أنه من الجدير دراسة ظواهر الكم بمزيد من التفصيل . ولم يعلم بوانكريه عن حد الفعل $S \geqslant \hbar$ بالرغم من أن فرضيته تستند إلى ملاحظة أن الضوء ذو التردد المعين يملك شدة أصغرية و هو الفوتون الوحيد . مثل هذه الحزمة ذات الفوتون الوحيد يمكن تقسيمها إلى حزمتين ، مثلا باستخدام مرآة نصف مفضضة و لكن بأخذهما معا فإن هاتين الحزمتين لا تحتويان ابدأ أكثر من فوتون واحد .

التجربة الأخرى المهمة التي تتطلب فوتونات هي ملاحظة جزيئات الفوتونات (مرجع 25) . و في 1995 توقع جاكوبسون و آخرون أن طول موجة دو برولي لرزمة من الفوتونات يمكن قياسها . و وفقا لنظرية الكم ، فإن طول موجة الرزمة يعطى بطول موجة فوتون وحيد مقسمة على عدد الفوتونات في الرزمة .قال الفريق بأن طول موجة الرزمة يمكن قياسه إذا كان يمكن تقسيم مثل هذه الرزمة و يعاد جمعها بدون تخريب التماسك فيها . في 1999 هذا الأثر لوحظ في الحقيقة من قبل بادوا و مجموعته البحثية في البرازيل . وقد استخدموا نظام دقيق ذو بلورة غير خطية لتشكيل ما سموه الفوتون الثنائي و لاحظوا خواصه التداخلية ووجدوا انخفاض في طول الموجة الفعالة بعامل متوقع يساوي اثنين . ومنذ ذلك الحين ، الرزم ذات الثلاث وحتى أربعة فوتونات تم تشكيلها و قياسها (مرجع 26) .

مع ذلك فإن المقولة الأخرى لضرورة الفوتونات هي الارتداد المذكور أعلاه الذي يتم الإحساس به من قبل الذرات المصدرة للضوء (صفحة 43) . إن الارتداد المقاس في هذه الحالات يشرح بشكل أفضل بواسطة إصدار فوتون في اتجاه معين . على العكس ، يتوقع الديناميك الكهربائي الكلاسيكي إصدار موجة كروية بدون اتجاه تفضيلي .

من الواضح أن ملاحظة الضوء غير الكلاسيكي أيضا يسمى الضوء المضغوط (صفحة 49) أيضا يدل على وجود الفوتونات حيث أن الضوء المضغوط يثبت أن الفوتونات هي حقيقة ناحية ذاتية من الضوء و ضرورية حتى عندما التأثيرات المتبادلة مع المادة لا تلعب أي دور (مرجع 27) . نفس الشيء صحيح بالنسبة لأثر هانبري براون تويس .



الشكل 27 – أوضاع يتقاطع بها الضوء : منابع ضوئية مختلفة تؤدي لنتائج مختلفة

أخيرا ، التحلل / الاضمحلال للحالات الذرية المثارة أيضا تتطلب وجود الفوتونات . هذا لا يمكن شرحه بوصف الضوء المستمر .

في الملخص مفهوم الفوتون في الحقيقة ضروري من أجل الوصف الدقيق للضوء ، ولكن التفاصيل غالبا تكون دقيقة ، حيث أن خواص الفوتونات هي غير عادية و تتطلب تغيير في عادات تفكيرنا . و لتجنب هذه القضايا أكثر الكتب تتوقف عن مناقشة الفوتونات بعد الوصول إلى الفعل الكهرضوئي . و هذا مؤسف حيث أنه فقط بعد هذا تصبح الأشياء ممتعة .تأمل ما يلي . من الواضح أن كل الحقول الكهرطيسية مكونة من فوتونات . في الوقت الحالي يمكن اعتبار أن الفوتونات موجودة في أشعة غاما ، الأشعة السينية ، الضوء فوق البنفسجي و الضوء تحت الأحمر . لكن من أجل الترددات المنخفضة مثل أمواج الراديو فإن الفوتونات لم يتم كشفها بعد . هل يمكنك تخيل ما هو لازم لعد الفوتونات الصادرة عن محطة راديو ؟ (تحدي 40s) . هذه القضية تؤدي مباشرة إلى السؤال الأكثر أهمية على الإطلاق :

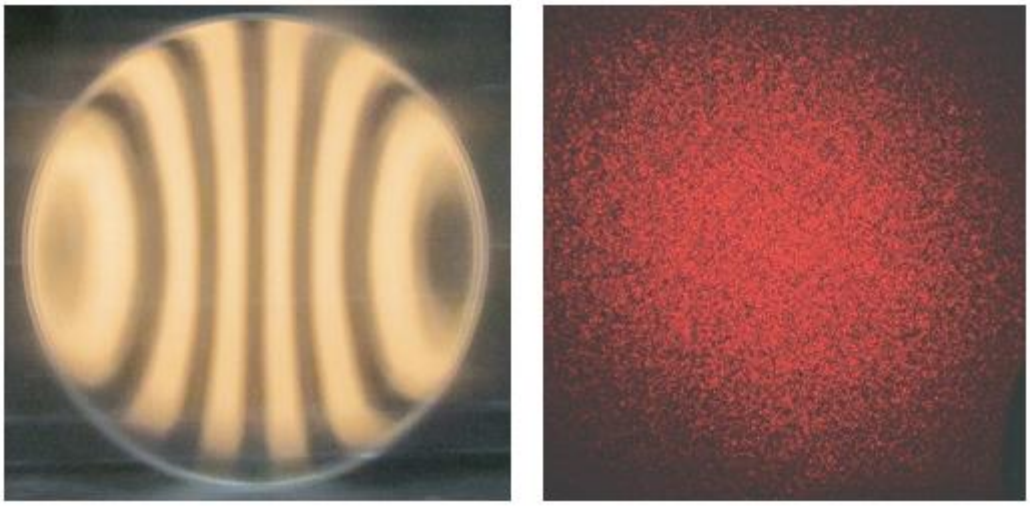
التداخل : كيف يمكن لموجة أن تتكون من جسيمات ؟

" خمسين عاما من الحضانة الواعية لم تأت بي أقرب إلى الإجابة على هذا السؤال : ما هي كمات الضوء ؟ " اليوم كل شخص متحاذق يعتقد أنه يعرف ذلك ، ولكنه مخطئ

ألبرت أينشتاين ، 1951 "

إذا كانت الموجة الضوئية مكونة من جسيمات يجب أن نكون قادرين على شرح كل و جميع خواص الموجة بدلالة الفوتونات . التجارب المذكورة أعلاه تبين أن هذا ممكن فقط لأن الفوتونات هي جسيمات كمية . لنأخذ نظرة أكثر تفصيلا على هذا الارتباط . الضوء يمكن أن يعبر ضوء آخر بدون أي يتأثر مثلا عندما حزم الضوء من مصباحين رزميين يشعان على بعضهما البعض . هذه الملاحظة ليس من الصعب شرحها .

" إن خمسين عاما من الحضانة الواعية لم تأت بي أقرب إلى الإجابة على هذا السؤال : " ما هي كمات الضوء ؟ " اليوم كل شخص متحاذق يعتقد أنه يعرف ذلك ، ولكنه مخطئ " كتب أينشتاين هذا قبل بضع سنوات من وفاته في رسالة إلى مايكل بيسو . (مرجع 28)



الشكل 28 – أمثلة على نماذج التداخل التي تظهر عندما تتقاطع حزم الضوء المتماسك : التداخل المنتج بواسطة مرآة تلسكوب بشكل قطع مكافئ مصنوعة ذاتيا بقطر 27 cm و نموذج ليزر نقطي على سطح خشن

الفوتونات ، نظرا لأن الفوتونات لا تتبادل التأثير مع بعضها البعض ، و هي مثل النقاط لا تضرب أبدا بعضها البعض .في الحقيقة هناك احتمال إيجابي صغير جدا من أجل تبادل تأثيرها و سوف نجد ذلك لاحقا و لكن هذا الأثر لا يلاحظ في الحياة اليومية .(مجلد V ، صفحة 130) .

لكن إذا تقاطعت حزمتان ضوئيتان متماسكتان أي حزمتين ضوئيتين بتردد متطابق و علاقة طور ثابتة ، نلاحظ مناطق ساطعة و مناطق عاتمة : هذا ما يعرف بأهداب التداخل . النظام التخطيطي مبين في الشكل 27 . و الأمثلة على تأثيرات التداخل معطاة في الشكل 29 & 28 . كيف يمكن لأهداب التداخل هذه أن تظهر ؟

كيف يمكن ألا تكشف هذه الفوتونات في المناطق العاتمة ؟ نحن نعلم للتو أن هناك فقط إجابة واحدة ممكنة : السطوع في مكان معين يقابل احتمال أن الفوتون قد وصل هناك . الأهداب تقتضي :

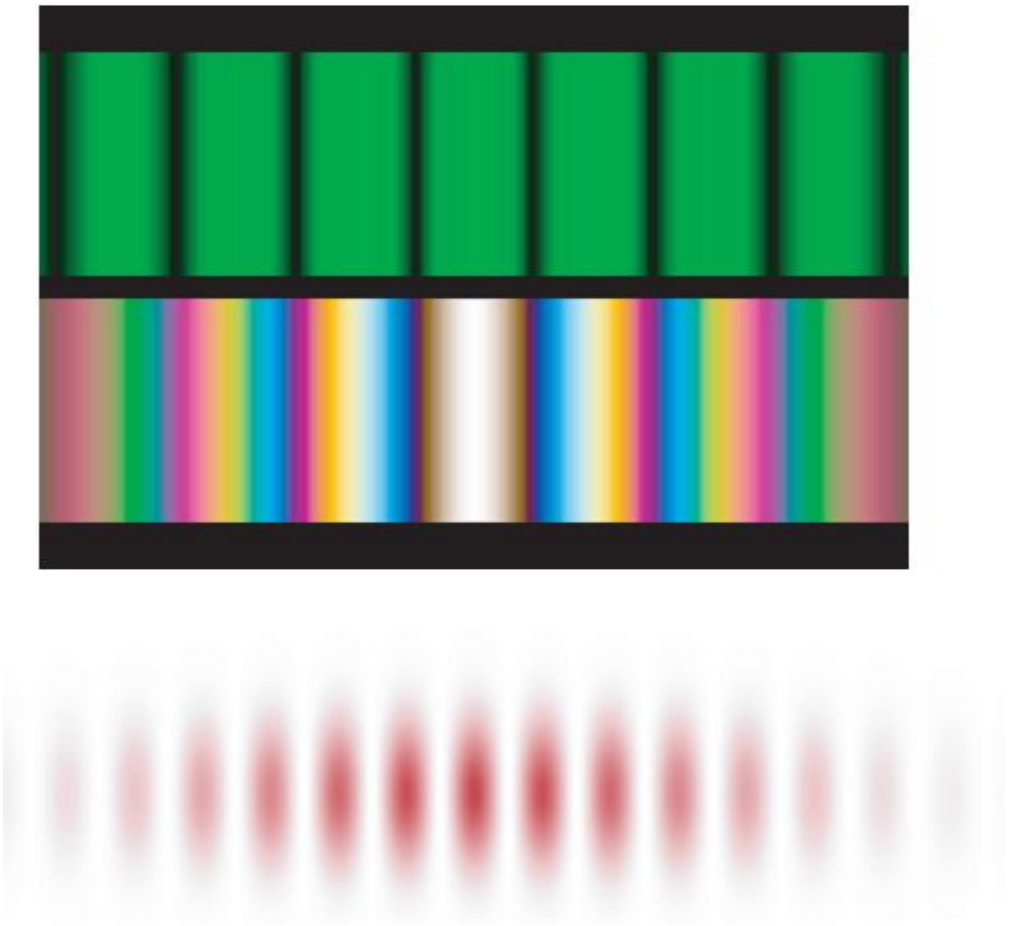
- الفوتونات تتصرف مثل الأسهم الصغيرة

بعض الأفكار الأخرى تؤدي إلى الوصف التالي :

- السهم دائما متعامد مع اتجاه الحركة
- اتجاه السهم يبقى ثابتا عندما تتحرك الفوتونات
- طول السهم يتقلص مع مربع المسافة المقطوعة
- احتمال وصول الفوتون لمكان ما يعطى بمربع السهم
- السهم النهائي هو مجموع كل الأسهم الواصلة هناك بواسطة كل المسارات الممكنة
- الفوتونات الصادرة عن المنابع وحيدة اللون تصدر بأسهم ذات طول ثابت تشير إلى الاتجاه ωt ، بمعنى آخر مثل هذه المنابع ترشق / تبصق الفوتونات بفم دوار
- الفوتونات الصادرة عن منابع غير متماسكة مثل المصادر الحرارية مثل مصابيح الجيب تصدر بأسهم بطول ثابت تشير إلى اتجاهات عشوائية

---

*إذا استخدمت الليزرات فإن الأهداب فقط تلاحظ إذا كانت الحزمتين مشتقتين من حزمة وحيدة بالتقسيم أو إذا استخدم ليزرين غاليين عاليي الدقة (لماذا ؟) (تحدي 41 s)



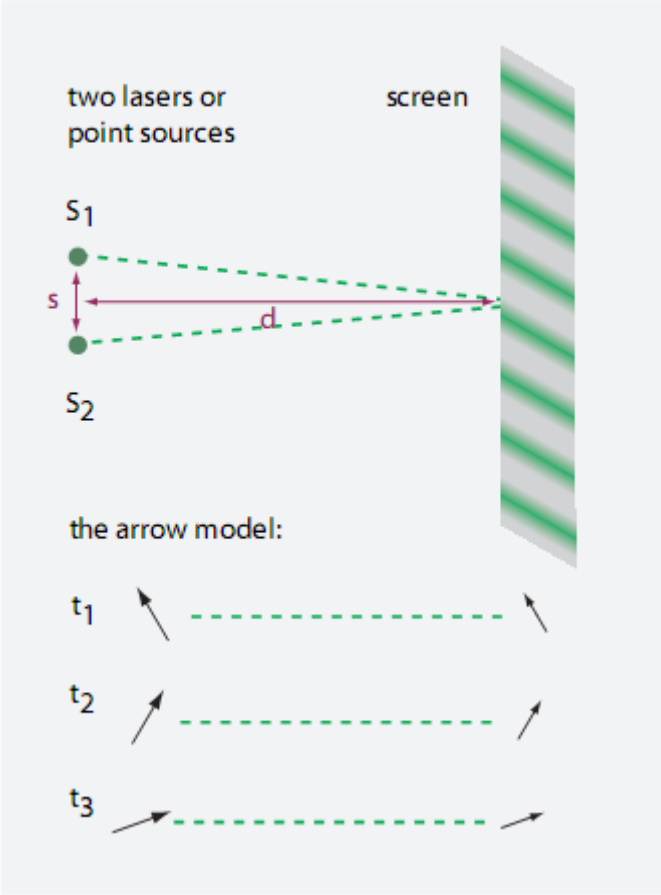
الشكل 29 - أعلى : نماذج التداخل المحسوبة – و الشكل غير القابل للتمييز عن الأشكال الملحوظة / المقاسة تحت شروط كتب مثالية منتجة بواسطة شقين ضيقين متوازيين مضاءين بضوء أخضر و بضوء أبيض . أسفل : حزمتين غوصيتين تتداخلان بزاوية

بواسطة هذا النموذج البسيط * يمكننا شرح السلوك الموجي للضوء . بشكل خاص ، يمكننا وصف شرائط التداخل التي ترى في تجارب الليزر كما هو مبين تخطيطيا في الشكل 30 . يمكنك التأكد أنه في بعض المناطق أن السهمين اللذين يتحركان عبر الشقين يجمعان حتى القيمة الأعظمية . هذه المناطق هي دائما نيرة . المناطق فيما بينها لها ظلال متوسطة. من الواضح أنه في حال مصابيح الجيب العادية المبينة في المخطط الأيسر من الشكل 27 فإن السطوع في المنطقة المشتركة أيضا يتصرف كما هو متوقع : المتوسطات ببساطة تجمع مع بعضها .

من الواضح أن نموذج الفوتون يقتضي أنه نموذج التداخل مكون من مجموع عدد كبير من ضربات الفوتونات الوحيدة . باستخدام الحزم منخفضة الشدة يمكننا بالتالي أن نرى هذه البقع الصغيرة المبنية ببطء حتى نموذج التداخل بواسطة التراكم في المناطق النيرة و لا تضرب أبدا المناطق العاتمة . و هذه في الواقع الحال كما التي رأينا سابقا (صفحة 43) . كل التجارب تؤكد هذا الوصف .

---

*النموذج يعطي الوصف الصحيح للضوء عدا أنه يهمل الاستقطاب . لإضافة الاستقطاب من الضروري جمع الأسهم التي تدور في كلا الاتجاهين حول اتجاه الحركة .



الشكل 30 – التداخل و وصف الضوء بواسطة أسهم (في ثلاث لحظات زمنية)

بمعنى آخر التداخل هو تنضد حقول الضوء المتماسك أو بشكل أعم ، الحقول الكهرطيسية المتماسكة . إن حقول الضوء المتماسك لها سلوك فوتوني أكثر انتظاما من حقول الضوء غير المتماسك . سوف ندرس تفاصيل إحصائيات الفوتون بمزيد من التفصيل قريبا .

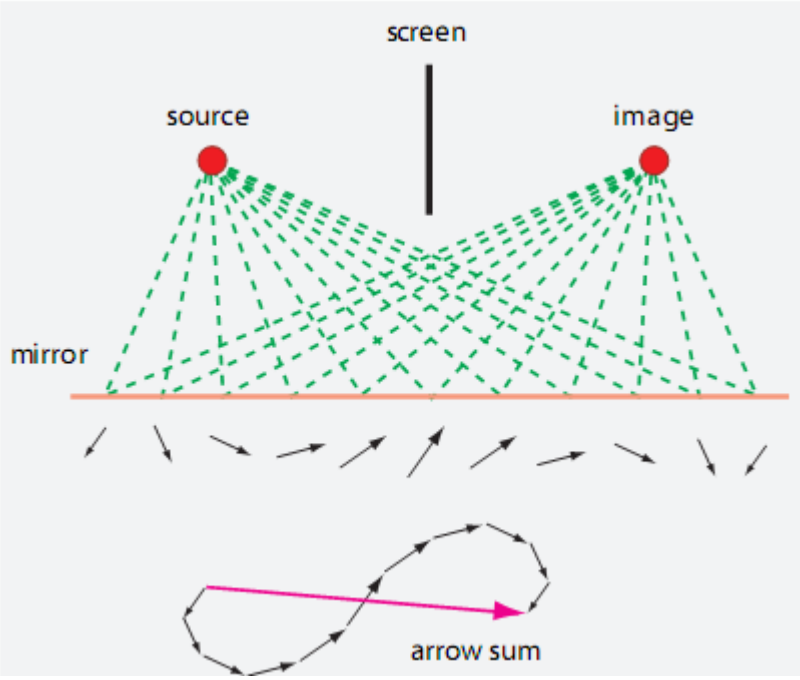
في الملخص ، الفوتونات هي جسيمات كمية . الجسيمات الكمية يمكن أن تنتج نماذج تداخل – وكل تأثيرات الأمواج الأخرى - عندما نظهر بأعداد كبيرة لأنها توصف بسهم الذي مربع طوله يعطي احتمال كشفه .

التداخل لفوتون وحيد

من المهم الإشارة إلى أن التداخل بين حزمتين ضوئيتين ليس نتيجة فوتونات مختلفة تفني بعضها البعض أو تجمع لبعضها البعض . مثل هذا الإفناء سيتعارض مع مصونية الطاقة و كمية الحركة . التداخل هو أثر قابل للتطبيق على كل فوتون بشكل منفصل – كما هو مبين في فقرة سابقة – لأن كل فوتون ينتشر عبر كامل المنظومة : كل فوتون يأخذ كل المسارات الممكنة . كما شدد باول ديراك (مرجع 29) :

- كل فوتون يتداخل فقط مع نفسه

التداخل لفوتون مع نفسه يحدث فقط لأن الفوتونات هي كوانتونات و ليست جسيمات كلاسيكية



الشكل 31 – الضوء المنعكس بواسطة مرآة و الأسهم المقابلة (في لحظة من الزمن)

إن عبارة ديراك التي غالبا يستشهد بها تؤدي إلى تناقض شهير : إذا كان الفوتون يمكن فقط أن يتداخل مع نفسه ، كيف يمكن لحزمتي ليزر من ليزرين مختلفين أن يتداخلا مع بعضهما البعض ؟

الجواب المعطي من قبل فيزياء الكم هو بسيط لكن غريب : في المنطقة حيث تتداخل الحزمة – كما ذكرنا أعلاه – (صفحة 51) من المستحيل القول من أي منبع أتت الفوتونات . الفوتونات في منطقة التقاطع لا يمكن القول أنها أتت من منبه معين . الفوتونات في منطقة التداخل هي كوانتونات و هي في الحقيقة تتداخل فقط مع نفسها .

الوصف الآخر للوضع هو التالي :

- الفوتون يتداخل ضمن حجم تماسكه . و في ذلك الحجم من المستحيل تمييز الفوتونات

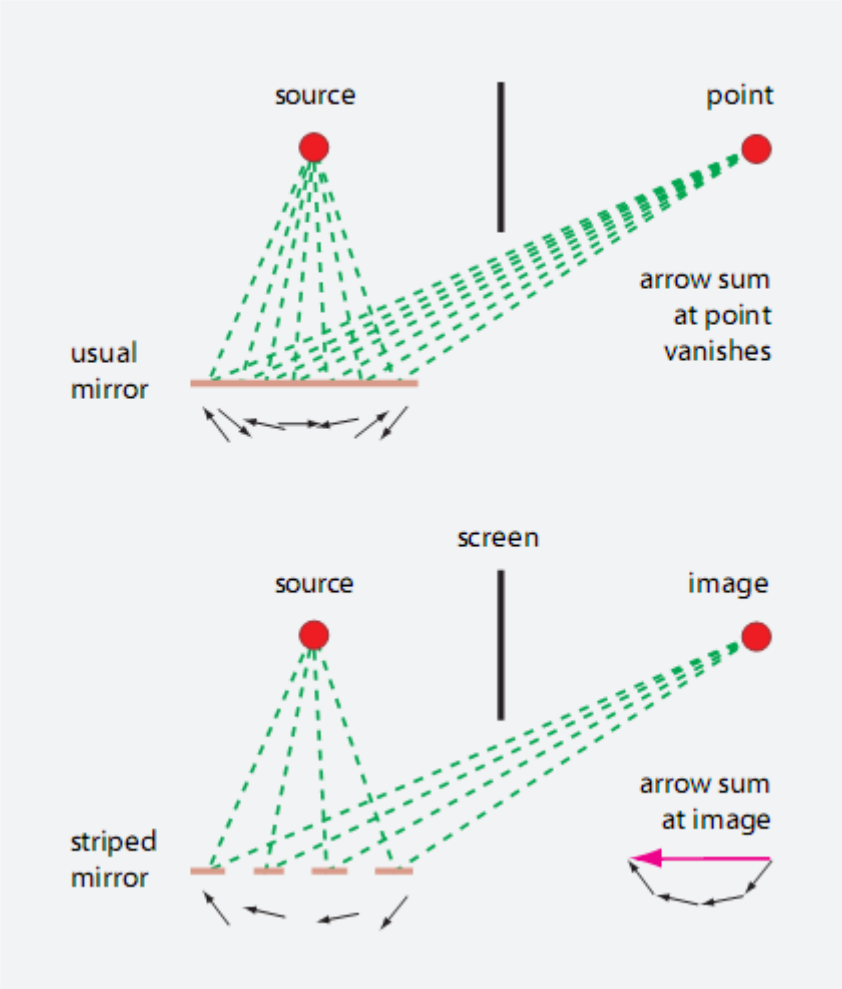
في الحجم المتماسك المشكل بواسطة طول التماسك العرضاني و الطولاني – في بعض الأحيان يسمى خلية الفراغ – لا يمكننا القول بشكل كامل أن الضوء هو تدفق للفوتونات لأن التدفق لا يمكن تعريفه . بالرغم من المقولات المعتادة بالعكس فإن عبارة ديراك غير صحيحة كما سنرى أدناه (صفحة 65) . و هي نتيجة غريبة لكم الفعل .

الانعكاس و الانكسار المستنتجان من أسهم الفوتون

الأمواج أيضا تبدي زيغ / حيود . الحيود هو تغير في اتجاه الانتشار للضوء أو أي حواف قريبة للموجة . لفهم هذه الظاهرة بالنسبة للفوتونات لنبدأ بمرآة بسيطة و ندرس الانعكاس أولا . الفوتونات (مثل كل جسيمات الكم) تتحرك من منبع إلى الكاشف بواسطة كل المسارات الممكنة . كما يحب أن يؤكد ريتشارد فينمان*الذي اكتشف هذا التفسير ، فإن مصطلح "الكل " يجب أن يؤخذ حرفيا . هذا ليس قدرا كبيرا في شرح التداخل لكن من أجل فهم المرآة عليا أن نضيف كل الإمكانيات مهما بدت مجنونة كما هو مبين في الشكل31 .

---

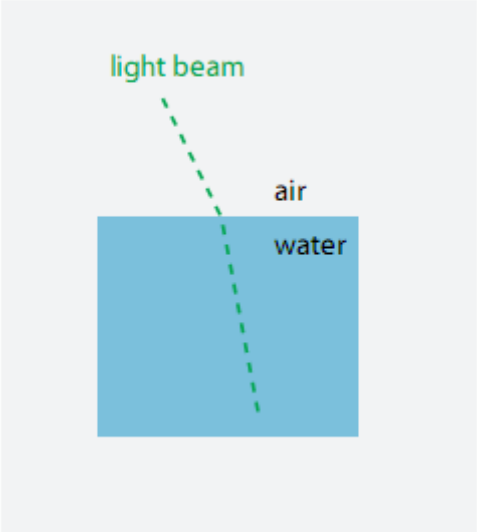
*ريتشارد "ديك" فيليبس فينمان (ولد عام 1918 في مدينة نيويورك و توفي عام 1988 في لوس أنجلس) فيزيائي و قد كان أحد مؤسسي الديناميك الكهربائي الكمي . وقد اكتشف أيضا إعادة صياغة " لمجاميع التاريخ " لنظرية الكم و قام بإسهامات مهمة في نظرية تبادل الأثر الضعيف و في الجاذبية الكمية ، و قد أسهم في كتابة الكتاب الشهير ، محاضرات فينمان في الفيزياء الموجود على الإنترنت الآن www.feynmanlectures.info .



الشكل 32 – الضوء المنعكس من مرآة موضوعة بشكل سيء و بواسطة شبكة اصبعية

كما قلنا أعلاه المنبع الضوئي يصدر أسهم دوارة , و لتحديد احتمال أن الضوء يصل لموضع معين ضمن الصورة علينا أن نضيف كل الأسهم التي تصب بنفس الوقت إلى ذلك الموضع . من أجل كل مسار ، فإن توجيه السهم على الصورة مبين – من أجل الملائمة فقط – أسفل المقطع الموافق للمرآة . إن زاوية وطول السهم الواصل يعتمد على المسار . لاحظ أن مجموع كل الأسهم لا يتلاشى : الضوء في الحقيقة يصل للصورة . أيضا أكبر مساهمة تأتي من مسارات قرب الوسط . إذا أجرينا نفس الحساب من أجل موقع صورة آخر (تقريبا) لا يصل أي ضوء إلى هناك .

إنه أحد الفيزيائيين النظريين الذين صنعوا اسمهم المهني من خلال إجراء حسابات معقدة – لكنه تم مراجعتها مع الوقت ، وقد كان أكثر نجاحا في تدريسه و كتبه الفيزيائية التي كلها جديرة بالقراءة . وقد كان مولعا بعمق بالفيزياء و في توسيع المعرفة و كان جامع لشروحات فيزيائية مدهشة . و قد ساعد في بناء القنبلة النووية ، و كتب أبحاث في البارات الأعلى مستوى ، و تجنب تحمل أي مسؤولية مهنية و كان مغرورا بشكل شهير و لا يحترم السلطة . وقد كتب العديد من الكتب الشهيرة حول أحداث حياته . و بالرغم من أنه حاول تجاوز عبقرية وولفجانج باولي في كل حياته ، فقد فشل في مسعاه. تشارك جائزة نوبل في الفيزياء عام 1965 لعمله في الديناميك الكهربائي الكمي .



الشكل 33 – إذا كان الضوء مكون من أحجار صغيرة فإنها ستتحرك أسرع في الماء

الحساب بواسطة مزيد من الأسهم يبين أن التقريب هو دقيق تماما : الأخطاء هي أصغر بكثير من طول موجة الضوء .

البرهان على أن الضوء لا يأخذ كل هذه المسارات الغريبة المعطاة بواسطة مرآة أكثر تخصصا . كما هو مبين في الشكل 32 يمكننا تكرار التجربة بواسطة مرآة التي تعكس فقط على طول قطاعات معينة . في هذه الحالة القطاعات قد تم اختيارها بعناية بحيث أن أطوال المسار المقابل يؤدي إلى أسهم ذات انحياز في اتجاه واحد ، و هو لليسار . و جمع السهم الآن يبين أن مثل هذه المرآة المتخصصة عادة تسمى الشبكة الإصبعية تسمح للضوء بأن ينعكس في اتجاهات غير عادية . في الحقيقة ، هذا السلوك هو قياسي للأمواج : و يسمى الحيود و باختصار ، نموذج السهم للفوتونات يسمح لنا بوصف هذه الخاصة للضوء ، شريطة أن الفوتونات تتبع نظام الاحتمال الجنوني . لا تنزعج ! كما قلنا أعلاه ، فإن نظرية الكم هي النظرية من أجل الناس المجانين .

يمكن أن ترغب بالتأكد أن نموذج السهم مع التقريبات التي يولدها بجمع كل المسارات الممكنة ، يضمن آليا أن كم الفعل في الحقيقة هو أصغر فعل ممكن الذي يمكن قياسه . (تحدي 42s) .

الانكسار و الانعكاس الجزئي من أسهم الفوتونات

كل الأمواج لها سرعة إشارة . سرعة الإشارة أيضا تعتمد على الوسط الذي تنتشر به . كنتيجة ، الأمواج تبدي انكسارا عندما تتحرك من وسط لآخر بسرعة إشارة مختلفة . من المدهش أن الصورة الساذجة الجسيمية للفوتونات كأحجار صغيرة ستقتضي أن الضوء هو أسرع في المواد ذات قرائن الانكسار العالية : وهذا ما يعرف بالمواد الكثيفة. (أنظر الشكل 33) هل يمكنك تأكيد هذا ؟ (تحدي 43e) . لكن التجارب تبين أن الضوء في المواد الكثيفة يتحرك ببطء . و الصورة الموجية ليس فيها صعوبة في شرح هذه الملاحظة (هل يمكنك تأكيد هذا ؟) (تحدي 44 e) . تاريخيا هذه كانت إحدى المقولات ضد النظرية الجسيمية للضوء . على العكس فإن نموذج الضوء المقدم أعلاه قادر أيضا على شرح الانكسار بشكل ملائم . وهو غير صعب : جرب ذلك (تحدي 45e) .

الأمواج أيضا تعكس جزيئا من المواد مثل الزجاج . هذا هو أحد خواص الأمواج الأكثر صعوبة في شرحها بواسطة الفوتونات . و لكنه واحد من التأثيرات التي لا يمكن شرحها بواسطة النظرية الموجية الكلاسكية للضوء . لكنه يشرح بواسطة نموذج السهم ، كما سنجد . و الانعكاس الجزئي يؤكد أول قاعدتين من نموذج السهم . الانعكاس الجزئي يبين أن الفوتونات حقيقة تتصرف بشكل عشوائي (صفحة 57) : و بعضها ينعكس و الآخر لا يفعل، بدون أي معيار اختيار . إن التمييز هو إحصائي صرف . المزيد عن هذه القضية سيعطى قريبا .

من الفوتونات إلى الأمواج

في الأمواج ، الحقول تتذبذب في الزمن و الفراغ . و إحدى الطرق لبيان كيف يمكن جعل تكوين الأمواج من جسيمات هو بيان كيفية بناء موجة جيبية باستخدام عدد كبيرة من الفوتونات . إن الموجة الجيبية هي حالة متماسكة للضوء (مرجع30) وطريقة بناءها شرحت بالتفصيل من قبل روي غلاوبر . في الحقيقة لبناء موجة جيبية صرفة ، فإننا بحاجة لتنضد حزمة بواسطة فوتون واحد، و حزمة بواسطة فوتونين و حزمة بواسطة ثلاثة فوتونات و هكذا . و هي معا تعطي موجة جيبية مثالية . كما هو متوقع إن أعداد فوتوناتها يتذبذب إلى أعلى درجة ممكنة .

إذا كررنا الحساب من أجل الحزم غير المثالية نجد أن علاقة عدم التحديد للطاقة و الزمن يتم احترامها : كل حزمة صادرة ستملك عرض طيفي معين . إن الضوء وحيد اللون الصرف لا يوجد . بشكل مشابه ، لا يوجد نظام الذي يصدر موجة عشوائيا يمكن أن ينتج موجة وحيدة اللون . كل التجارب تؤكد هذه النتائج . بالإضافة لذلك الأمواج يمكن أن تكون مستقطبة . حتى الآن لقد تغاضينا عن هذه الخاصة . في الصورة الفوتونية ، الاستقطاب هو نتيجة الحزم المتراكبة بعناية للفوتونات التي تبرم باتجاه عقارب الساعة و بعكس اتجاه عقارب الساعة . في الحقيقة نحن نعلم أن الاستقطاب الخطي يمكن أن يرى نتيجة للضوء المستقطب دائريا المتراكب لكلا الإشارتين باستخدام طور مناسب . إن ما يبدو فضول في البصريات الكلاسيكية ينتج أنه تبرير أساسي لنظرية الكم .

أخيرا ، الفوتونات غير قابلة للتمييز . عندما فوتونين من نفس اللون يتقاطعان ، لا يكون هناك طريقة للقول بعد ذلك أي من الاثنين هو الفوتون المعين . كم الفعل يجعل هذا مستحيلا . إن عدم قابلية تمييز الفوتونات تملك نتيجة مدهشة . من المستحيل القول أي فوتون صادر يقابل أي فوتون واصل . بمعنى آخر ، ليس هناك طريقة لمتابعة مسار الفوتون ، كما اعتدنا أن نتابع مسار كرة بليارد (صفحة 52). الفوتونات حقيقة لا يمكن تمييزها . بالإضافة لذلك التجربة المجراة من قبل هانبري براون و تويس تقتضي أن القوتونات هي بوزونات (مرجع 31) . و سوف نكتشف المزيد من التفاصيل عن عدم قابلية التمييز الخاصة للبوزونات لاحقا (صفحة 111) .

في الملخص نجد أن أمواج الضوء يمكن في الحقيقة أن توصف بأنها مكونة من جسيمات . لكن هذا فقط صحيح بشرط ن الفوتونات هي :

- ليست قابلة للعد بشكل دقيق – و لا يمكن حدوث ذلك أبدا بدقة أفضل من $\sqrt{N}$ ،
- غير قابلة لتحديد الموضع و لا يمكن أبدأ أن يحدث ذلك بدقة أفضل من طول التماسك
- ليس لها حجم ، ليس لها شحنة و لا كتلة سكونية
- تبدي طور الذي يتزايد مع ωt أي مع جداء التردد و الزمن
- تحمل برم يساوي 1
- بنفس التردد تكون بوزونات لا يمكن تمييزها – ضمن حجم التماسك
- ليس لها أصل قابل للتمييز
- لها احتمال كشف يعطى بمربع مجموع المطالات * من أجل كل المسارات المسموحة المؤدية لنقطة الكشف

---

* لكن مطال حقل الفوتون لا يمكن و لا يجب أن يعرّف بتابع الموجة لأي جسيم ضخم ذو برم 1

بكلمات أخرى ، الضوء يمكن وصف أنه مكون من جسيمات فقط إذا كانت هذه الجسيمات لها خواص كمية خاصة . هذه الخواص الكمية تختلف عن الجسيمات اليومية و تسمح للفوتونات أن تتصرف مثل الأمواج متى وجدت بأعداد كبيرة .

هل يمكن للضوء أن يتحرك بأسرع من الضوء ؟ - الفوتونات الحقيقية و الافتراضية

في الخلاء ، الضوء يمكن أن يتحرك بأسرع من c و أيضا أخفض من c . يعطي مبدأ الكم التفاصيل . طالما أن هذا المبدأ متبع ، فإن سرعة ومضة الضوء القصيرة يمكن أن يختلف – بالرغم من أن هذا بمقدار قليل – عن القيمة الرسمية .

هل يمكنك تقدير الفرق المسموح في زمن الوصول لومضة ضوئية تأتي من فجر الزمن ؟ (تحدي ny 46) .

الوصف السهمي للفوتونات يعطي نفس النتيجة . إذا أخذنا بالحسبان الإمكانية المجنونة بأن الفوتونات يمكن أن تتحرك بأي سرعة نجد أن كل السرعات التي تكون مختلفة جدا عن c تتلاشى / تلغي بعضها بعضا . التغير الوحيد الذي يبقى يترجم إلى مسافات ، هو عدم التحديد لطول موجة في الاتجاه الطولاني ، الذي ذكرناه أعلاه (تحدي ny 47).

باختصار ، الضوء أو الفوتونات الحقيقية يمكن في الحقيقة أن تتحرك بأسرع من الضوء ، بالرغم من أن هذا المقدار مسموح فقط بواسطة كم الفعل . من أجل الأوضاع اليومية أي من أجل القيم العالية للفعل فإن كل تأثيرات الكم تكون متوسطة بما فيها سرعات الضوء و الفوتونات المختلفة عن c .

ليس فقط الموضع و لكن أيضا طاقة الفوتون الوحيد يمكن ألا تكون معرفة (مرجع 32) . مثلا مواد معينة تقسم فوتون واحد ذو طاقة $\hbar\omega$ إلى فوتونين اللذين مجموع طاقتيهما تساوي إلى طاقة الفوتون الأصلي . ميكانيك الكم يقتضي أن تجزئة الطاقة معلومة فقط عندما تقاس طاقة أحد الفوتونين . فقط عند تلك اللحظة الدقيقة تكون طاقة الفوتون الثاني معلومة . قبل القياس ، كلا الفوتونين لهما طاقة غير محددة .عملية تثبيت الطاقة تتم لحظيا ، حتى إذا كان الفوتون الثاني بعيدا (صفحة 152) . سوف نشرح فيما يلي خلفية هذا و تأثيرات غريبة مشابهة ، التي يبدو أنها أسرع من الضوء . في الحقيقة بالرغم من الشكل فإن هذه القياسات لا تتضمن إرسال أسرع من الضوء للطاقة أو المعلومات (تحدي 48s).

مزيد من النتائج الغريبة لكم الفعل تظهر عندما ندرس الحقول الكهربائية الساكنة ، مثل الحقل حول كرة معدنية مشحونة. من الواضح أن مثل هذا الحقل يجب أيضا أن يكون مكون من فوتونات . كيف تتحرك ؟ ينتج أن الحقول الكهربائية الساكن مكونة من فوتونات افتراضية . الفوتونات الافتراضية هي فوتونات التي لا تظهر كجسيمات حرة : هي تظهر فقط لفترة زمنية قصيرة جدا قبل أن تختفي ثانية . في حال الحقل الكهربائي الساكن ، فإنها تكون مستقطبة طوليا و لا تحمل طاقة بعيدا . الفوتونات الافتراضية مثل الجسيمات الافتراضية الأخرى هي ظلال لجسيمات تخضع لها .

$$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2 \,. \qquad (14)$$

بدلا من الخضوع لعلاقة عدم التحديد فإنها تخضع لعلاقة معاكسة ، التي تعبر عن شكلها المختصر جدا . بالرغم من عمرها القصيرة ذاتيا و بالرغم من استحالة كشفها بشكل مباشر ، فإن الجسيمات الافتراضية لها تأثيرات هامة .

سوف ندرسها بالتفصيل قريبا . (صفحة 192) .

في الحقيقة الكمون الشعاعي A يسمح بأربعة استقطابات تقابل لأربعة إحداثيات (t , x , y, z) . و ينتج أنه بالنسبة للفوتونات يتحدث المرء عادة عن الفوتونات الحرة أو الحقيقية و الاستقطاب في الاتجاهين t & z يلغيان بعضهما البعض وهكذا المرء يلاحظ فقط الاستقطاب في x & y في التجارب الحقيقية .

من أجل الفوتونات المرتدة أو الافتراضية الوضع مختلف . كل الاستقطابات الأربعة ممكنة . في الواقع الاستقطابين t &z للفوتونات الافتراضية

التي لا تظهر من أجل الفوتونات الحقيقية أي من أجل الفوتونات الحرة و هي التي يمكن القول أنها أحجار البناء للحقول الكهربائية و المغناطيسية الساكنة .

بكلمات أخرى الحقول الكهربائية و المغناطيسية الساكنة هي تدفقات مستمرة من الفوتونات الافتراضية . على عكس الفوتونات الحقيقية فإن الفوتونات الافتراضية يمكن أن يكون لها كتلة ، يمكن أن يكون لها اتجاهات برم لا تشير على طول مسار الحركة ، و يمكن أن يكون لها كمية حركة معاكسة لاتجاه حركتها . تبادل الفوتونات الافتراضية يؤدي إلى جذب الجسام ذات الشحنات المختلفة. في الحقيقة الفوتونات الافتراضية لا تظهر بالضرورة في أي وصف للتأثيرات المتبادلة الكهرطيسية (مجلد V ، صفحة 122) . لاحقا سوف نناقش تأثيراتها أكثر التي تتضمن الجذب الشهير للأجسام الحيادية .

لقد رأينا (مجلد II ، صفحة 72) باكرا أن الفوتونات الافتراضية مثلا تلك التي تلزم وصف اصطدامات الشحنات يجب أن تتحرك بسرعات أكبر من الضوء . هذا الوصف مطلوب من أجل ضمان أن سرعة الضوء تبقى حدا في كل التجارب .

في الملخص ربما يكون من المثير للاهتمام ملاحظة أن الفوتونات الافتراضية على عكس الحقيقية هي غير مرتبطة بسرعة الضوء و لكن من الصحيح القول أن الفوتونات الافتراضية تتحرك بشكل أسرع من الضوء فقط في المعنى الرسمي .

عدم التحديد للحقول الكهربائية

لقد رأينا أن كم الفعل يقتضي عدم تحديد من أجل شدة الضوء : نظرا لأن الضوء هو موجة كهرطيسية فإن عدم التحديد هذا يقتضي حدود مشابهة منفصلة من أجل الحقول الكهربائية و المغناطيسية عند نقطة معطاة في الفراغ . إن هذه النتيجة استنتجت لأول مرة في 1933 من قبل بور و روزنفيلد (مرجع 33) .

وقد بدأ من تأثيرات الحقول على جسيم اختباري ذو كتلة m و شحنة q يوصف بالشكل :

$$m\boldsymbol{a} = q\,(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{b})\,. \qquad (15)$$

نزرا لأنه من المستحيل قياس كل من كمية الحركة وموضع الجسيم فإنهما استنتجا عدم تحديد من أجل الحقل الكهربائي معطى بالشكل (تحدي ny 49)

$$\Delta E = \frac{\hbar}{q\,\Delta x\,t}\,, \qquad (16)$$

حيث t قياس الزمن و Δx هو عدم تحديد الموضع . و بالتالي كل قيمة للحقل الكهربائي ، و بشكل مشابه للحقل المغناطيسي ، فإن العمليات هي عدم تحديد . عن حالة الحقل الكهرطيسي تتصرف مثل حالة المادة في هذا الصدد : كلاهما تتبع علاقة عدم تحديد .

هل يمكن لفوتونين أن يتداخلا ؟

في عام 1930 وضع باول ديراك عبارته الشهيرة التي ذكرناها سابقا (صفحة 59) :

- كل فوتون يمكن فقط أن يتداخل مع نفسه . التداخل بين فوتونين مختلفين لا يحدث أبدا (مرجع 29)

غالبا هذه العبارة يساء تفسيرها على أنها تقتضي أن الضوء من منبعي فوتونات مختلفين لا يمكن أن يتداخلا . لسوء الحظ فإن هذا التفسير الخاطئ قد انتشر بواسطة جزء من المراجع (مرجع 34) . وكل شخص يمكن أن يتأكد بأن هذه العبارة غير صحيحة في الراديو : الإشارات من محطتي راديو بعيدتين ترسلان على نفس التردد يؤدي لضربات في المطال أي تداخل الموجة (هذا يجب ألا يختلط مع التداخل الراديوي الأكثر شيوعا الذي ببساطة هو تنضد الشدات) . المرسلات الراديوية هي منابع متماسكة للفوتونات ، و أي مستقبل راديو يبدي ن الإشارات من مصدرين مختلفين يمكن في الحقيقة ان يتداخلا .

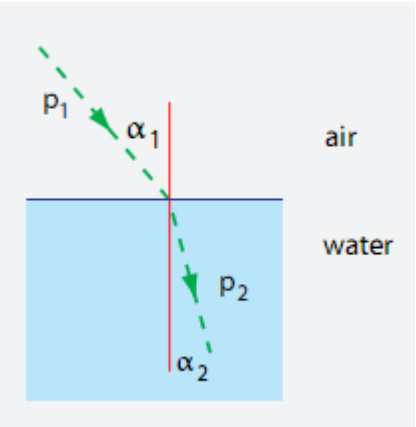
في عام 1949 فإن تداخل الحقول الصادرة عن مصدري فوتونات مختلفين تم إظهارها أيضا بواسطة حزم الميكروويف . من القرن التاسع عشر فصاعدا فإن تجارب كثيرة على ليزرين و حتى على منبعي ضوء حراريين بينت أن تداخل الضوء (مرجع 35) . مثلا في عام 1963 استخدم ماغيار وماندل ليزري ياقوت يصدران نبضات ضوئي و كاميرا ذات مغلاق سريع لإنتاج أهداب تداخل فراغي .

لكن كل هذه التجارب تنتج من مصدري تداخل لا تتعارض مع عبارة ديراك . في الحقيقة الفوتونات لا يمكن أن تتداخل لعدة أسباب .

- التداخل هو نتيجة انتشار الفراغ – الزمن للأمواج و الفوتونات تظهر فقط عندما تستخدم صورة الطاقة – كمية الحركة ، بشكل أساسي عندما يتم تبادل التأثير مع المادة . إن وصف انتشار الفراغ – الزمن و صورة الجسيم هما حصريتين بشكل متبادل و هذا هو أحد نواحي المبدأ المتمم . لماذا يبدو أن ديراك يمزج الاثنين في عبارته؟ استخدم ديراك مصطلح فوتون في معناها العام جدا ، كحالة مكممة للحقل الكهرطيسي . عندما يتم تراكب حزمتين متماسكتين ، فإن الأشياء المكممة ، الفوتونات ، لا يمكن نسبتها لأي من المنابع . ينتج التداخل من تنضد حالتين متماسكتين ، وليس جسيمين .
- التداخل ممكن فقط إذا كان المرء لا يمكن أن يعلم من أين تأتي الفوتونات المكشوفة . إن وصف ميكانيك الكم للحقل في وضعية التداخل لا يسمح أبدا بنسبة الفوتونات للحقل المتراكب لأحد المنبعين . بكلمات أخرى ، إذا كان من الممكن القول من أي منبع أتى الفوتون المكشوف ، فإن التداخل لا يمكن قياسه / ملاحظته .
- التداخل بين حزمتين متماسكتين يتطلب طور مترابط أو ثابت بينهما أي عدد جسيمات غير محدد ، بمعنى آخر التداخل ممكن إذا وفقط إذا كان عدد الفوتونات للحزمتين مجهول . و الحزمة لها عدد مجهول من الفوتونات عندما عدم تحديد العدد هو بحجم مشابه للعدد المتوسط

إن عبارة ديراك بالتالي تعتمد على تعريف مصطلح فوتون . إن الاختيار الأفضل للكلمات هو القول أن التداخل هو دائما بين تاريخين (غير قابلين للتمييز)ولكن ليس أبدا بين جسيمين كميين أو كما عبرنا أعلاه :

- الفوتون يتداخل فقط ضمن حجم تماسكه أي ضمن خليته الخاصة للفراغ الطوري . في الخارج ليس هناك تداخل ، و في داخل ذلك الحجم أو الخلية من المستحيل تمييز الفوتونات ، الحالات أو التواريخ .



الشكل 34 – انكسار الفوتونات

إن مفهوم الفوتون يبقى عميقا حتى اليوم . إن موديل جسيم الكم للتماسك و الضوء يبقى رائعا حتى اليوم . و للتلخيص يمكننا القول :إن حزمتين كهرطيسيتين يمكن أن تتداخلا و لكن الفوتونين المختلفين لا يمكنهما ذلك .

فضول و تحديات مرحة حول الفوتونات

هل يمكن للمرء أن يشرح الانكسار بواسطة الفوتونات ؟ نيوتن لم يكن قادرا على فعل ذلك ولكننا اليوم نستطيع. في الانكسار بواسطة سطح أفقي ، كما هو مبين في الشكل 34 فإن الوضع يكون ثابت اتتقاليا على طول الاتجاه الأفقي . بالتالي مركبة كمية الحركة على طول هذا الاتجاه مصونة : $p_1 \sin \alpha_1 = p_2 \sin \alpha_2$. و طاقة الفوتون $E= E_1 =E_2$ مصونة بشكل واضح . إن قرينة الانكسار n تعرف بدلالة كمية الحركة و الطاقة بالشكل :

$$n = \frac{cp}{E} . \qquad (17)$$

قانون الانكسار بالتالي (تحدي 50 e)

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n . \qquad (18)$$

العلاقة معروفة منذ العصور الوسطى .

هناك قضية هامة هنا . في مادة سرعة الفوتون $\upsilon = \delta E/\delta p$ في شعاع ضوئي تختلف عن سرعة الطور u= E/p التي تدخل في الحساب . في الملخص ، داخل المادة ، مفهوم الفوتون يجب أن يستخدم بحذر شديد .

* *

إذا كان لموجة كهرطيسية المطال A فإن كثافة الفوتونات d هي :

$$d = \frac{A^2}{\hbar\omega} . \qquad (19)$$

هل يمكنك بيان هذا ؟ (تحدي 51 ny)

* *

بيّن أنه من أجل نبضة الليزر في خلاء ، فإن حجم التماسك يزداد خلال الانتشار

الشكل 35 – ظلال الأزرق للسماء و ألوان الغيوم ناتجة عن درجات متعددة لتشتت رايله ، مي و تندال

بينما الحجم المشغول في فراغ الطور يبقى ثابت . إن الإنتروبي له ثابت حيث أن مساره قابل للانعكاس .(تحدي 52e)

* *

إن الأثر النوعي لقوانين الكم هي اللون الأصفر للمصابيح المستخدمة لإنارة الشوارع في أكثر المدن . هي تصدر ضوءا أصفر نقيا (تقريبا) ذو تردد وحيد وهذا يبين لماذا لا يمكن تمييز ألوان أخرى في ضوئها . وفقا للديناميك الكهربائي الكلاسيكي ، فإن التوافقيات لذلك التردد الضوئي يجب أن يصدر أيضا . تين التجارب أن هذه ليست الحال و بالتالي الديناميك الكهربائي الكلاسيكي خطأ هل هذه الحجة صحيحة ؟ (تحدي 53s) .

* *

هل يمكنك أن تتأكد فيما إذا كانت القنبلة المقدوحة بفوتون وحيد هي فاعلة بدون تفجيرها ؟ هذه الأحجية الشهيرة التي طرحت من قبل أفشالوم إليتزور و ليف فيدمان تتطلب تداخل لحلها . هل يمكنك إيجاد طريقة ؟ (تحدي 54 ny)

* *

ما الذي يحدث للفوتونات التي تضرب جسم ولكن لا تمتص أو ترسل ؟ بشكل عام ، هي مشتتة . التشتت هو الاسم لأي عملية التي تغير حركة الضوء (أو أي موجة أخرى) . إن تفاصيل عملية التشتت تعتمد على الجسم ، بعض عمليات التشتت فقط تغير اتجاه الحركة ، العمليات الأخرى أيضا تغير التردد . الجدول 3 يعطي عرضا للعمليات التي تشتت الضوء .

كل خواص التشتت تعتمد على المادة التي تنتج انحراف الضوء . من بين الأشياء الأخرى ، دراسة عمليات التشتت تشرح العديد من ألوان المواد الشفافة كما سنرى أدناه (صفحة 170) .

الجدول 3 - أنواع تشتت الضوء

نوع التشتت	المشتت	التفاصيل	أمثلة
تشتت رايله	الذرات ، الجزيئات	مرن تتغير الشدة بتناسب $1/\lambda^4$ ، المشتتات أصغر من $\lambda/10$	السماء الزرقاء ، السماء المسائية الحمراء ، دخان السيجارة الأزرق
تشتت مي	الأجسام الشفافة ، القطيرات	مرن تتغير الشدة بتناسب $1/\lambda^{0.5}$ إلى $1/\lambda^2$ ، المشتتات حوالي λ	السماء الزرقاء ، السماء المسائية الحمراء ، الجبال الزرقاء البعيدة
التشتت الهندسي	الحواف	مرن ، حجم المشتت أكبر من λ	أفضل أن يسمى الحيود ، يستخدم في التداخل
تشتت تيندال	الأجسام غير الشفافة	مرن ، تابع ضعيف للزاوية أو غير تابع لطول الموجة	الضباب ، الغيوم البيضاء ، الضباب ، دخان السجائر الأبيض
تشتت سميكال – رامان	الذرات المثارة ، الجزيئات	غير مرن ، الضوء يكتسب طاقة	يستخدم في دراسات الليدار للغلاف الجوي
تشتت رامان العكسي	الذرات ، الجزيئات	غير مرن ، الضوء يفقد طاقة	يستخدم في أبحاث المواد
تشتت تومبسون	الإلكترونات	مرن	يستخدم من أجل كثافة الإلكترون
تشتت كومبتون	الإلكترونات	غير مرن ، الأشعة السينية تفقد الطاقة	يثبت الطبيعة الجسيمية للضوء (أنظر صفحة 46)
تشتت برلوين	فونونات صوتية ، تغيرات الكثافة في الأجسام الصلبة/ السوائل	غير مرن ، انزياح ترددي بمقدار بضعة جيغا هرتز	يستخدم لدراسة الفونونات و تشخيص الألياف البصرية
تشتت فون لاو أو تشتت الأشعة السينية	الأجسام الصلبة المتبلورة	مرن ، ناتج عن التداخل عند مستويات البلورة	يستخدم لتحديد بنى البلورة ، ايضا يسمى حيود براغ

نلاحظ أن انحناء الضوء بسبب الجاذبية لا يسمى تشتت . لماذا لا ؟ (تحدي e 55)

ملخص حول الضوء : الجسيم و الموجة

في الملخص الضوء هو تدفق من كمات الضوء أو الفوتونات . الفوتون الوحيد هو اصغر شدة ضوئية ممكنة للون معين . الفوتونات مثل كل الكوانتونات هي مختلفة تماما عن الجسيمات اليومية . في الحقيقة يمكننا القول أن فقط النواحي الجسيمية (الكلاسيكية) للفوتونات هي طاقتها الكمية ، كمية حركتها و برمها . في كل النواحي الأخرى ، الفوتونات لا تشبه الأحجار الصغيرة . الفوتونات تتحرك بسرعة الضوء . الفوتونات لا يمكن تحديد موضعها / تتموضع في حزم ضوئية . الفوتونات غير قابلة للتمييز . الفوتونات هي بوزونات ، الفوتونات لا تملك أي كتلة ، لا شحنة و لا حجم . و من الأكثر دقة القول أن الفوتونات هي أجهزة حساب من أجل أن تصف بدقة الملاحظات / القياسات حول الضوء (مرجع 36) .

إن الخواص الغريبة للفوتونات هي سبب أن المحاولات الأولى لوصف الضوء كجريان من الجسيمات (الكلاسيكية) مثل محاولة نيوتن ، فشلت بشكل مزري ، و كان من الحق السخرية منها من قبل علماء آخرين . في الواقع نيوتن دعم نظريته ضد كل الأدلة التجريبية خاصة بالنسبة للخواص الموجية للضوء خاصة بالنسبة لخواص الضوء الموجية التي هي شيء لا يجب لأي فيزيائي ألا يفعله . فقط بعد أن قبل الناس أن الضوء موجة ، و بعدها اكتشف و فهم أن الجسيمات الكمية هي مختلفة بشكل أساسي عن الجسيمات الكلاسيكية ، كان الوصف الكوانتوني ناجحا .

إن كم الفعل يقتضي أن كل الأمواج هي تدفقات من الكوانتونات ، في الحقيقة كل الأمواج هي تدفقات مترابطة من الكوانتونات . و هذا صحيح بالنسبة للضوء ، من أجل أي شكل آخر للإشعاع ، و من أجل كل أشكال الأمواج المادية .

إن علاقات عدم التحديد تبين أن حتى الكوانتون الوحيد يمكن اعتباره أنه موجة و لكن متى تفاعل مع بقية العالم فإنه يتصرف كجسيم . و في الحقيقة من الأساسي أن كل الأمواج مكونة من كوانتونات : إذا لم يكن كذلك فإن التأثيرات المتبادلة ستكون غير موضعية و الأجسام لن تكون متوضعة على الإطلاق ، بشكل معاكس للخبرة .

لاتخاذ القرار فيما إذا كان الوصف الموجي أو الجسيمي هو أكثر ملائمة يمكننا استخدام المعيار التالي . متى تبادل المادة و الضوء التأثير فإنه يكون من الملائم أكثر وصف الإشعاع الكهرطيسي كموجة إذا كان طول الموجة λ يحقق :

$$\lambda \gg \frac{\hbar c}{kT} , \qquad (20)$$

حيث $k = 1.4 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$ هو ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة للجسيم . إذا كان طول الموجة أصغر بكثير من المقدار في الطرف الأيمن فإن الوصف الجسيمي هو الأكثر ملائمة . إذا كان الطرفين من نفس المرتبة ، فإن كلا الوصفين يلعب دورا . هل يمكنك شرح المعيار ؟ (تحدي 56e) .

الفصل الثالث

حركة المادة – أبعد / بتجاوز / خلاف الفيزياء الكلاسيكية

" كل الأشياء العظيمة تبدأ كتخاريف

جورج برنارد شو "

إن وجود الفعل الأصغر ما يكون له نتائج عديدة من أجل حركة المادة . سنبدأ ببضع نتائج تجريبية لبيان أن كمات الفعل في الحقيقة هي أصغر قيمة فعل قابلة للقياس ، و أيضا في حال المادة . بالتالي نبين أن كم الفعل يقتضي وجود الطور و بالتالي الخواص الموجية للمادة . أخيرا من كم الفعل نستنتج لحركة المادة نفس الوصف الذي وجدناه للضوء : جسيمات المادة تتصرف مثل الأسهم الدوارة .

زجاجات النبيذ ، أقلام الرصاص و الذرات – لا سكون

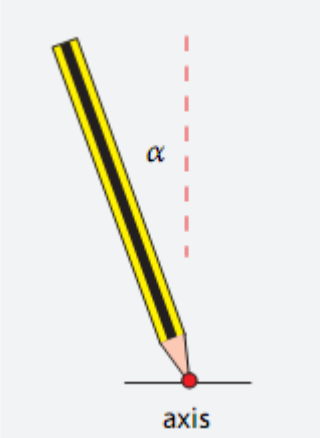
" السكون بشرف

تشيشرو ، دي أواتوره "

إذا كان كم الفعل هو أصغر ما يكون من التغير الممكن ملاحظته في جملة فيزيائية ، بالتالي فإن قياسين لنفس الجملة يجب دائما أن يختلفا . بالتالي لا يمكن أن يكون هناك سكون تام في الطبيعة . هل هذا صحيح ؟ التجارب تبين أن هذه في الواقع هي الحال . النتيجة البسيطة لعدم وجود سكون مثالي هو استحالة ملء كأس بشكل كامل من النبيذ . إذا سمينا الكأس في سعتها العظمى (بما فيها تأثيرات التوتر السطحي ، لجعل الفرضية دقيقة) كاملة ، فإننا فورا نرى أن الوضع يتطلب أن يكون سطح السائل في سكون . هذا لا يلاحظ أبدا . و في الحقيقة السطح الساكن تماما سيقبل قياسين متتابعين مختلفان بأقل من h . سنحاول تخفيض كل الحركات بتخفيض درجة حرارة الجملة . لتحقيق السكون المطلق فإننا بحاجة للوصول إلى درجة حرارة الصفر المطلق .

تبين التجارب أن هذا مستحيل (في الواقع هذه الاستحالة ، إن ما يعرف بالقانون الثالث في الثيرموديناميك مكافئ لوجود الفعل الأصغري) . كل التجارب تؤكد : ليس هناك سكون في الطبيعة . بمعنى آخر ، كم الفعل يثبت أن الحقيقة القديمة أن كأس النبيذ هي دائما فارغة جزئيا و ممتلئة جزئيا . غياب السكون الميكروسكوبي المتوقع من قبل كم الفعل مؤكد في العديد من التجارب . مثلا قلم الرصاص الذي يقف على رأسه لا يمكن أن يبقى شاقوليا كما هو مبين في الشكل 36 ، حتى إذا كان معزولا عن كل الاضطرابات ، مثل الاهتزازات ، جزيئات الهواء و الحركة الحرارية . هذه النتيجة – حقيقة أكاديمية جدا – تنتج من علاقة عدم التحديد .

**" السكون مع الشرف "



الشكل 36 - قلم رصاص ساقط

في الحقيقة ، إنه من الممكن حتى حساب الزمن الذي يبعده يجب أن يسقط القلم حتما . لكن عمليا الأقلام تسقط بشكل أبكر (تحدي 57 d) لأنه في الظروف المعتادة ، الاضطرابات الخارجية هي أكبر بكثير من تأثيرات كم الفعل .

لكن أكثر نتيجة أهمية لغياب السكون هي نقطة أخرى . غياب السكون للإلكترونات داخل الذرات يمنعها من السقوط في النوى ، بالرغم من جذبها المتبادل . بكلمات أخرى ، وجود و حجم الذرات و بالتالي كل المادة هو نتيجة مباشرة لغياب السكون الميكروسكوبي . سوف ندرس هذه النتيجة بمزيد من التفصيل أدناه (صفحة 78). نظرا لأننا مكونين من الذرات يمكننا القول : نحن نوجد فقط و نعيش بسبب كم الفعل .

لا يوجد دقة قياس لا نهائية

ليس فقط كم الفعل يمنع وجود السكون ، حيث أن كم الفعل يمنع أيضا مراقبة أو قياس السكون . من أجل التأكد فيما إذا كان الجسم في سكون ، فإننا بحاجة لمراقبة موضعه بدقة عالية . بسبب خواص موجة الضوء ، فإننا بحاجة لفوتون ذو طاقة عالية : فقط الفوتون عالي الطاقة يملك طول موجة صغير و بالتالي يسمح بقياس الموضع بدقة . لكن نتيجة هذه الطاقة العالية يكون الجسم مضطرب . الأسوأ ، فإن الاضطراب نفسه لا يكون قابل للقياس بشكل دقيق ، بحيث لا يكون هناك طريقة لتحديد الموضع الأصلي حتى بأخذ الاضطراب بالحسبان . باختصار ، السكون التام لا يمكن ملاحظته بدقة حتى لو كان موجودا . في الحقيقة كل التجارب التي فيها تم ملاحظة الجمل بأعلى دقة ممكنة تؤكد أن السكون التام غير موجود. غياب السكون تم تأكيده من أجل الإلكترونات ، النيوترونات ، البروتونات ، الشوارد ، الذرات ، الجزيئات ، التكاثف الذري و البلورات . إن غياب السكون قد تم تأكيده بالنسبة للأجسام ذات الكتلة التي تبلغ طن تقريبا كالتي تستخدم في كواشف الجاذبية المعينة . لا يوجد أي جسم قط في سكون .

نفس المقولة حول حدود القياس أيضا تبين أنه لا قياس لأي قيمة يمكن أن يتم بدقة لا نهائية . هذه من النتائج البعيدة الأخرى لكم الفعل .

الغاز البارد

إن كم الفعل يقتضي أن السكون مستحيل في الطبيعة . في الحقيقة حتى عند درجات حرارة منخفضة كل الجسيمات داخل المادة هي في حركة . هذا الغياب الأساسي للسكون يقال بأنه ناتج عن ما يعرف بالتذبذبات النقطة الصفرية . المثال الجيد أعطي بقياسات حديثة لتكاثفات بوز- أينشتاين . و هي غازات محصورة ذات عدد صغير من الذرات (بين عشرة و بضع مليون) مبردة إلى درجات حرارة منخفضة جدا (حوالي 1 nK) . المصائد تسمح بإبقاء الذرات معلقة في وسط الخلاء .

هذه الغازات المبردة و المحصورة يمكن ملاحظتها بدقة عالية . باستخدام تقنيات تجريبية معقدة ، يمكن وضع تكاثفات بوز- أينشتاين في حالات من أجل تكون $\Delta p \Delta x$ تقريبا مساوية تماما إلى $\hbar/2$ بالرغم من أنها لا تكون أبدا أخفض من هذه القيمة . هذه التجارب تؤكد مباشرة أنه ليس هناك سكون قابل للقياس ولكن ضبابية أساسية في الطبيعة . و الضبابية توصف بكم الفعل .

هذا يؤدي إلى أحجية ممتعة . في جسم عادي المسافة بين الذرات هي أكبر بكثير من طول موجة دو برولي (هل يمكنك تأكيد هذا ؟) (تحدي 58 s) . لكن اليوم من الممكن تبريد الأجسام إلى درجات حرارة منخفضة جدا . عند درجات حرارة منخفضة بشكل كاف أقل من 1 nK (مرجع 37) فإن طول موجة الذرات يمكن أن يكون أكبر من تباعدها . هل يمكنك تخيل ما يحدث في مثل هذه الحالات ؟ (تحدي 59s) .

التدفقات و تكميم المادة

" الحركة هي طريق المادة في الوجود

فريدريش إنجلز ، ضد دوهرنج "

ليس فقط كم الفعل من يجعل السكون مستحيلا ، إنه مستحيل أيضا بالعديد من الأوضاع التي لا تتغير مع الزمن . إن الأمثلة الأكثر أهمية

(ظاهريا) لأوضاع ثابتة هي التدفقات . كم الفعل يقتضي أنه لا تدفق يمكن أن يكون ثابت . بشكل أكثر دقة الفعل الأصغر ما يكون يقتضي أنه لا يمكن لأي تدفق أن يكون مستمر . كل التدفقات تتذبذب . في الطبيعة كل التدفقات مكونة من كيانات أصغر ما يكون : كل التدفقات مكونة من جسيمات كمية . رأينا أعلاه أن هذا صالح للضوء ،و يطبق أيضا على تدفقات المادة . إن نوعين بسيطين من التدفق من خبرتنا اليومية مباشرة تؤكد هذه النتيجة من كم الفعل : تدفقات الموائع و تدفقات الكهرباء .

تدفقات المائع و الكوانتونات

إن تدفق المادة أيضا يبدي وحدات أصغر ما يكون . و ذد ذكرنا سابقا في مغامرتنا أن نتيجة البنية الجسيمية للسوائل هي أن الزيت أو أي سائل منساب آخر ينتج ضجيج عندما يتدفق عبر حتى أكثر الأنابيب نعومة (المجلد ا ، صفحة 389)

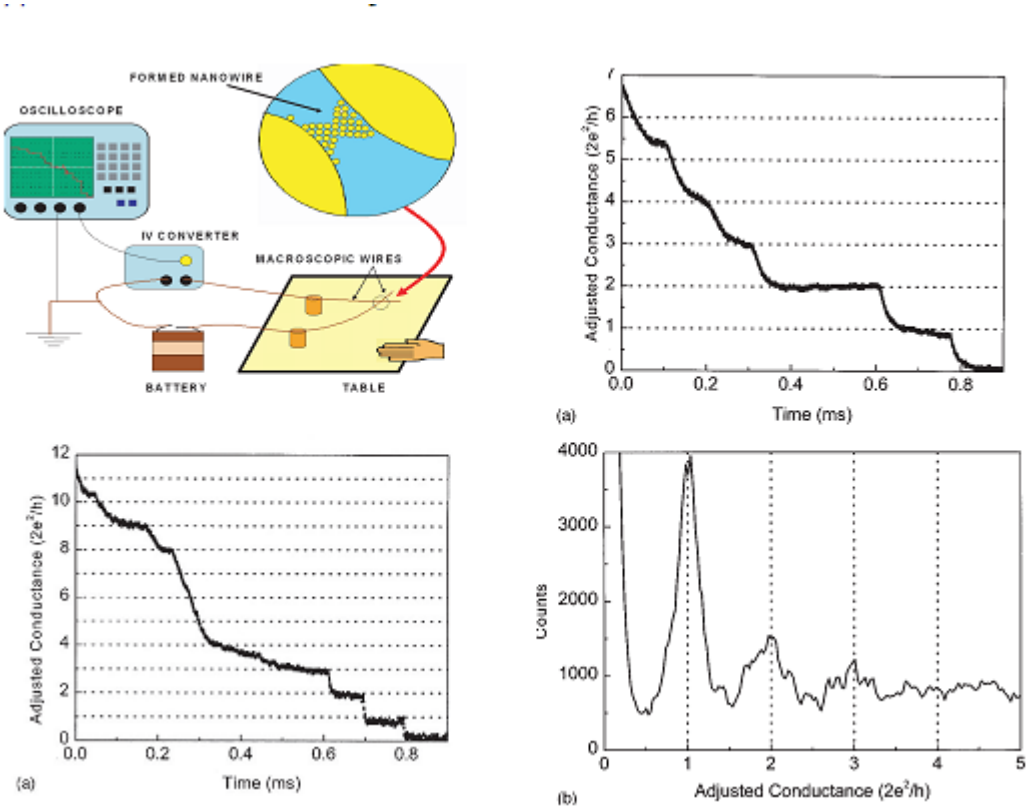
لقد ذكرنا أن الضجيج الذي نسمعه بآذاننا في أوضاع الصمت المطلق – مثلا في مكان طبيعي ثلجي و عديم الريح في الجبال أو في حجرة عديمة الصدى – هو جزئيا ناتج عن تحبب تدفق الدم في الأوردة . كل التجارب تؤكد أن كل التدفقات للمادة تنتج اهتزازات . و هذه نتيجة لكم الفعل و الحبيبية الناتجة للمادة . و في الحقيقة كم الفعل يمكن تحديده من قياسات الضجيج في الموائع .

طرق الطاولات و الناقلية المكممة

إذا كان التيار الكهربائي تدفقا مستمرا ، فإنه سيكون من الممكن قياس قيم الفعل الصغيرة قدر الإمكان . أبسط مثال معاكس اكتشف عام 1996 من قبل خوسيه كوستا – كريمر و زملائه (مرجع 39 & 38) .

---

*"الحركة هي طريق المادة في الوجود " (مرجع 12)



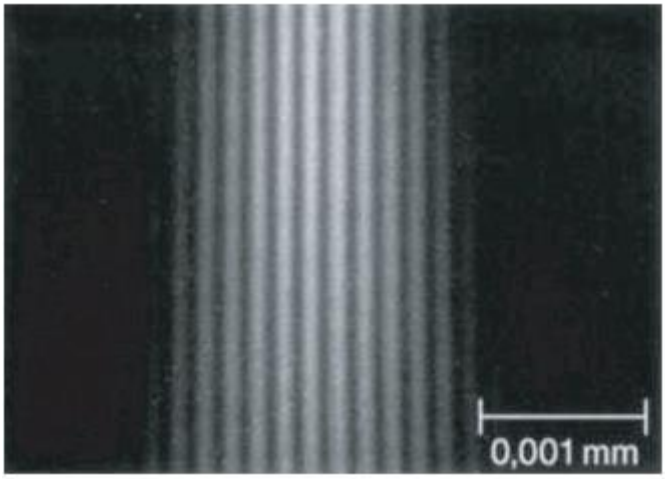
الشكل 37 - خطوات في تدفق الكهرباء في تقاطعات سلك معدني : النظام ، الأسلاك النانوية في أساس الأثر ، و ثلاثة نتائج قياس

لقد وضعوا أسلاكا معدنية فوق بعضها البعض على طاولة مطبخ ووصلوا بطارية ، محولة تيار – جهد أو ببساطة مقاومة و راسم إشارة تخزيني إليها . و بعدها قاسوا التيار الكهربائي أثناء الطرق على الطاولة . هذا كل شيء .

إن الطرق على الطاولة يقطع الوصل بين السلكين . في آخر ميلي ثانية قبل انفصال الأسلاك ، فإن الناقلية و بالتالي التيار الكهربائي يتناقص بخطوات منتظمة تبلغ حوالي سبعة ميكروأمبيرات ، كما يمكن كما يمكن أن يرى على راسم الإشارة. يبين الشكل 37 مثل هذا القياس . هذه التجربة البسيطة يمكن أن يتم التغلب عليها إذا أجريت ، منذ بضع سنين قبل ذلك ، وعدد من التجارب الأخرى المكلفة جدا التي اكتشفت نفس التكميم هذا بكلف تبلغ بضع ملايين يورو لكل منها باستخدام أنظمة معقدة عند درجات حرارة منخفضة جدا .

في الحقيقة تكميم الناقلية يظهر في أي تماس كهربائي ذو مقطع عرضي صغير . في مثل هذه الأوضاع ، فإن كم الفعل يقتضي أن الناقلية يمكن أن تكون فقط مضاعف لـ $2e^2/\hbar \approx (12\,906\Omega)^{-1}$. هل يمكنك تأكيد هذه النتيجة ؟ (تحدي 60 e) . لاحظ أن الناقلية الكهربائية يمكن أن تكون صغيرة قدر المطلوب ، فقط الناقلية الكهربائية المكممة لها القيمة $2e^2/\hbar$.

العديد من التجارب الكبيرة تؤكد قياس خطوات الناقلية . وهي تجبرنا على الاستنتاج أن هناك شحنة كهربائية اصغر ما تكون في الطبيعة . هذه الشحنة الأصغر ما تكون يجب أن يكون لها نفس قيمة شحنة الإلكترون . في الحقيقة الإلكترونات ينتج أنها جزء من كل ذرة ، في بنية سيتم شرحها قريبا . في المعادن فإن عددا كبيرا من الإلكترونات يمكن أن يتحرك بحرية : وهذا يبين لماذا المعادن تنقل الكهرباء بشكل جيد جدا و تعمل مرايا .



الشكل 38 - حزم الإلكترونات تحيد و تتداخل عند شقوق متعددة

باختصار ، تدفق المادة و الكهرباء في أصغر واحدات ممكنة . تبعا لتدفق المادة ، فإن واحدات أصغر تدفق ممكن للمادة يمكن أن تكون جزيئات ، ذرات ، شوارد أو إلكترونات . كلها هي جسيمات كمية ، أو كوانتونات . باختصار ، كم الفعل يقتضي أن المادة مكونة من كوانتونات . كوانتونات المادة تتشارك بعض الخواص مع الأحجار العادية ، ولكن أيضا تختلف عنها بالعديد من الطرق و الحجر يملك موضع و كمية حركة ، كتلة و تسارع ، حجم ، شكل ، بنية ، توجه و كمية حركة زاوية و لون . ندرس الآن كل من هذه الخواص من أجل الكوانتونات و نرى كيف ترتبط بكم الفعل .

كوانتونات المادة و حركتها – أمواج المادة

في عام 1924 & 1923 تأمل فيزيائي مؤثر هو لويس دو برولي نتائج كم الفعل على جسيمات المادة . (مرجع 40) و قد علم أنه في حال الضوء فإن كم الفعل يربط سلوك الموجة بسلوك الجسيم وقد فهم أن نفس الشيء يطبق على المادة,وقد اتضح له أن تدفقات جسيمات المادة ذات نفس كمية الحركة تتصرف مثل الأمواج مثل تدفقات كمات الضوء . و بالتالي توقع أنه مثل الضوء فإن تدفقات المادة المتماسكة سيكون لها طول موجة λ و تردد زاوية ω معطى بالشكل

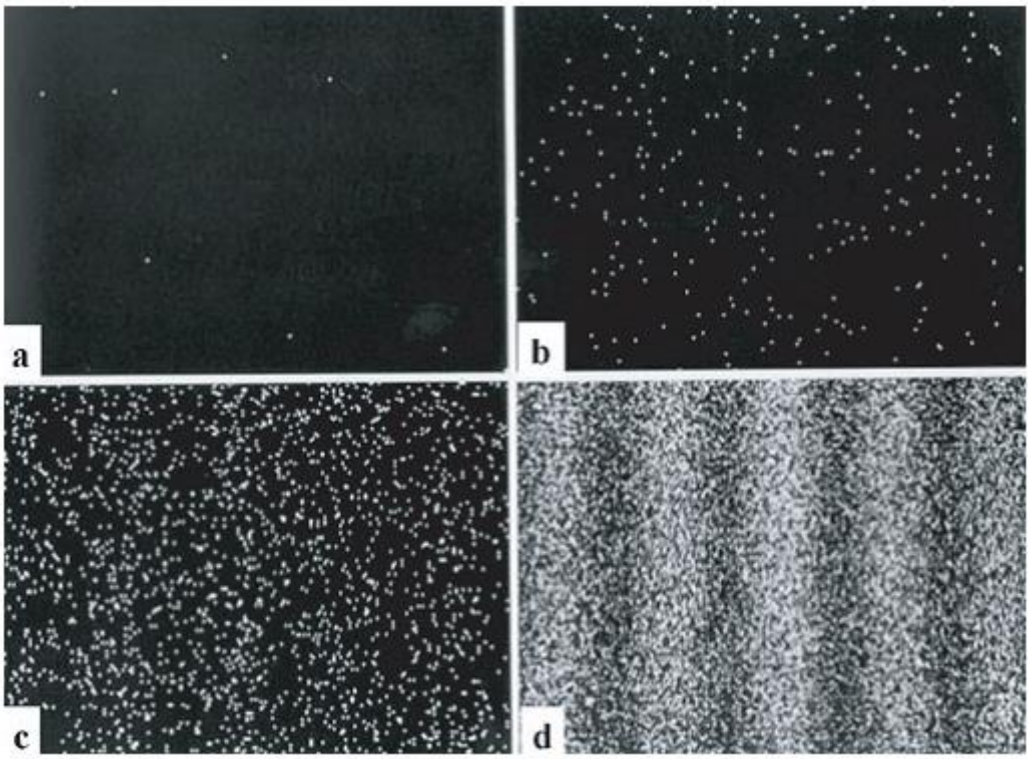
$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad \text{and} \quad \omega = \frac{E}{\hbar}, \qquad (21)$$

حيث p & E هما كمية الحركة و الطاقة على التوالي لجسيمات وحيدة .

بشكل مكافئ يمكننا كتابة العلاقات بالشكل :

$$p = \hbar k \quad \text{and} \quad E = \hbar\omega . \qquad (22)$$

كل هذه العلاقات تنص على أن كوانتونات المادة أيضا تتصرف مثل الأمواج . من أجل الأجسام اليومية ، فإن طول الموجة المتوقع هو صغير بشكل غير معقول بالرغم من أنها ليست من أجل الجسيمات الميكروسكوبية . سريعا بعد توقع دو برولي ، بدأت التجارب في تأكيده .



الشكل 39 – تشكيل مع الزمن لنموذج الإلكترونات هنا في تجربة الشق المضاعف منخفض الشدة : (أ) ثمانية إلكترونات (ب) 270 إلكترون (ت) 2000 الكترون (ث) 6000 الكترون بعد عشرين دقيقة من التعريض . الصورة الأخيرة تقابل الوضع المبين في الشكل السابق .

تدفقات المادة التي لوحظ أنها تحيد ، تنكسر و تتداخل وكل الملاحظات طابقت القيم المتوقعة من قبل دو برولي . بسبب صغر طول موجة الكوانتونات ، فإن التجارب الدقيقة لازمة لكشف هذه التأثيرات .لكن واحدا بعد الآخر كل التأكيدات التجريبية للخواص الموجية للضوء كررت من أجل حزم المادة . مثلا كما أن الضوء يحيد عندما يمر حلو حافة أو عبر شق ، فإن المادة أيضا تحيد في هذه الأوضاع . هذا صحيح حتى بالنسبة للإلكترونات و هي ابسط الجسيمات للمادة اليومية (مرجع 41) مبين في الشكل 38) . في الحقيقة التجربة على الإلكترونات صعبة تماما . و قد أجريت لأول مرة من

قبل كلاوس جونسون في توبنجن عام 1961 وقد اعتبرت عام 2002 على أنها أجمل تجربة في كل الفيزياء . بعد سنوات عديدة من جونسون كررت التجربة بواسطة مجهر إلكتروني معدل كما هو مبين في الشكل 39 .

ملهمين بمقاييس التداخل بدأ الباحثون في بناء مقاييس التداخل للمادة . مقاييس تداخل المادة تم استخدامها في العديد من التجارب الجميلة كما سنرى . (مجلد V ، صفحة 142) . اليوم مقاييس التداخل تعمل مع حزم الإلكترونات ، النكليونات ، النوى ، الذرات أو حتى الجزيئات الكبيرة (مرجع 42) . تماما كما الملاحظات للتداخل الضوئي أثبتت الطبيعة الموجية للضوء (مجلد III ، صفحة 100) فإن نماذج التداخل الملاحظة بواسطة حزم المادة أثبتت الطبيعة الموجية للمادة . و هي تؤكد أيضا قيمة $\hbar$.

مثل الضوء المادة مكونة من جسيمات و مثل الضوء المادة تتصرف كموجة عندما أعداد كبيرة من الجسيمات ذات نفس كمية الحركة تكون موجودة . ولكن بالرغم من أن حزم الجزيئات تتصرف مثل الأمواج و الأجسام اليومية مثل السيارات على طريق لا تفعل ذلك . هناك العديد من الأسباب لهذا . أولا بالنسبة للسيارات على طريق طول الموجة العائد لها صغير جدا . ثانيا ، سرعات السيارات تتغير بشكل كبير . ثالثا السيارات يمكن عدها . في الملخص تدفقات السيارات ذات نفس السرعة لا يمكن اعتبارها متماسك . إذا تصرفت المادة مثل الموجة ، يمكننا التوصل لاستنتاج غريب . من أجل أي موجة فإن الموضع و طول الموجة لا يمكن أن يكون محدد بدقة بنفس الوقت : عدم التحديد للعدد الموجب $k = 2\pi/\lambda$ و الموضع X تخضع للعلاقة

$$\Delta k \Delta X \geq \frac{1}{2} . \qquad (23)$$

بشكل مشابه من أجل كل موجة ذات تردد زاوي $\omega = 2\Pi f$ و اللحظة T لمطال ذروتها لا يمكن أن تعرّف بشكل حاد . إن عدم تحديدها يرتبط بالشكل :

$$\Delta\omega\Delta T \geq \frac{1}{2} . \qquad (24)$$

باستخدام خواص موجة دو برولي للمادة (22) نحصل على :

$$\Delta p \Delta X \geqslant \frac{\hbar}{2} \quad \text{and} \quad \Delta E \Delta T \geqslant \frac{\hbar}{2} . \qquad (25)$$

هذه العلاقات الشهيرة تسمى علاقات عدم التحديد لهايزنبرغ . وهي مكتشفة من قبل فيرنر هايزنبرغ في 1925 . و هي صالحة من أجل كل جزيئات الكم سواء كانت مادة أو إشعاع . و إن علاقات عدم التحديد تنص على أنه ليس هناك طريقة لتحديد بنفس الوقت بدقة كمية الحركة و موضع جملة كمية ، و لا تحديد بنفس الوقت الطاقة و العمر بدقة . كلما كانت أي كمية معلومة بدقة أكبر كلما كانت دقة الكمية الأخرى أقل .* بالنتيجة ، كوانتونات المادة – التي ليست مثل الأحجار – يمكن دائما تحديد موضعها ولكن دائما بشكل تقريبي . من ناحية أخرى رأينا أن الفوتونات غالبا لا يمكن تحديد موضعها.

إن كلا علاقتي عدم التحديد تم التأكد منهما بتفصيل كبير . كل التجارب تؤكدها . في الحقيقة ، كل تجربة تثبت أن المادة تتصرف مثل الموجة هي تأكيد لعلاقة عدم التحديد و العكس بالعكس .

عندما يرتبط متحولان بعلاقات عدم تحديد فإن المرء يقول أنهما متتامين لبعضهما البعض . درس نيلز بور بشكل نظامي مثل هذه الأزواج الممكنة . هل يمكنك فعل ذلك بنفسك (تحدي 61s) . و قد دهش نيلز بور بوجود مبدأ التتام وقد عممه لاحقا في اتجاهات فلسفية , و في مشهد معروف جيدا سأله شخص ما عن المقدار المتتم للدقة فأجابه : " الوضوح"

نلاحظ أن الكوانتونات العادية ، الحقيقية ، كوانتونات المادة دائما تتحرك أبطأ من الضوء . و بسبب الضبابية المتأصلة في حركة الكم يجب ألا يكون من المدهش و جود الاستثناءات . في الحقيقة ، في بعض الحالات الخاصة جدا ، كم الفعل يسمح بوجود جسيمات التي تتحرك أسرع من الضوء و هي ما تعرف بالجسيمات الافتراضية التي سوف نصادفها لاحقا (صفحة 192).

---

*الشرطي أوقف السيارة التي تقاد من قبل فيرنر هايزنبرغ . " هل تعلم كم السرعة التي كنت تقود بها ؟" لا و لكني أعلم بالضبط أين كنت !"

في الملخص ، كم الفعل يعني أن كوانتونات المادة لا تتصرف مثل الأحجار النقطية و لكن كأمواج . و بشكل خاص ، مثل الأمواج قيم الموضع و كمية الحركة لا يمكن أن تكون تماما معرّفة من أجل الكوانتونات . القيم ضبابية – الموضع و كمية الحركة غير محددان. و كلما كان أحدهما معروفا بشكل أكثر دقة كلما كان دقة الآخر أقل .

الكتلة و تسارع الكوانتونات

كوانتونات المادة مثل الأحجار لها كتلة . في الحقيقة الضربات بواسطة إلكترونات وحيدة ، الذرات أو الجزيئات يمكن أن تكشف ، إذا استخدمت جمل القياسات الحساسة فإن الكوانتونات أيضا يمكن أن تبطأ أو تسرع . و لقد درسنا بعض هذه التجارب في الفقرة حول الديناميك الكهربائي (مجلد III ، صفحة 30) . لكن الكوانتونات تختلف عن الحصى . باستخدام علاقة عدم تحديد الزمن – الطاقة يمكننا استنتاج أن (تحدي 62s)

$$a \leqslant \frac{2mc^3}{\hbar} . \qquad (26)$$

بالتالي هناك تسارع أعظمي للكوانتونات .* في الحقيقة لا يوجد جسيم قط تم ملاحظته بتسارع أعلى من هذه القيمة (مرجع 43) . في الحقيقة لا يوجد جسيم تم قياسه قط بتسارع قريب من هذه القيمة . إن كم الفعل بالتالي يمنع السكون و لكن أيضا يحد من التسارع .

لماذا الذرات ليست مسطحة ؟ لماذا توجد الأشكال ؟

إن كم الفعل يحدد كل الأحجام في الطبيعة و بشكل خاص يحدد كل الأشكال و لندرس هذا الموضوع .

تبين التجارب أن كل الكوانتونات المركبة مثل الذرات أو الجزيئات لها بنى ذات حجم منتهي و غالبا ذات شكل معقد . إن حجم و شكل كل كوانتون مركب هو ناتج عن حركة مكوناته . حركة المكونات ناتجة عن كم الفعل ، ولكن كيف تتحرك .

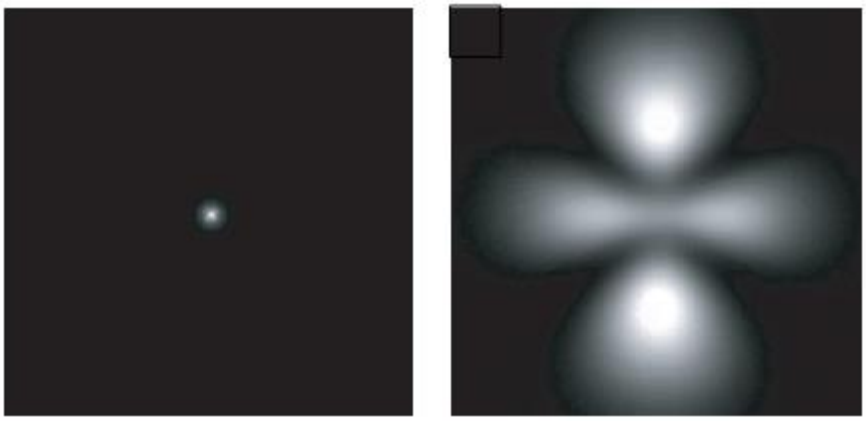
في عام 1901 اقترح جان بيران و بشكل مستقل في 1904 ناجوكا هانتارو أن الذرات هي مجموعات شمسية صغيرة (مرجع 44) . في عام 1913 استخدم نيلز بور هذه الفكرة و جمعها مع كم الفعل و وجد أنه يمكن أن يتوقع حجم و لون ذرات الهيدروجين (مرجع 45) و هما خاصتين لم يتم بعد فهمهما . و سوف نقوم بالحسابات فيما يلي (صفحة 180) . حتى بور علم أن الحسابات لم تكن مفهومة بشكل كامل لأنهم يبدو قد افترضوا أن ذرات الهيدروجين كانت مسطحة ، مثل المجموعة الشمسية . و لكن أولا ، الذرات يلاحظ أنها كروية . ثانيا الشكل المسطح سيتعارض مع كم الفعل (تحدي 64 e) . في الحقيقة كم الفعل يقتضي أن حركة مكونات الكم هي ضبابية . وبالتالي كل الكوانتونات المركبة مثل الذرات أو الجزيئات يجب أن تكون مشكلة من أعداد كبيرة من المكونات .

---

*نلاحظ أن حد التسارع هذا مختلف عن حد التسارع الناتج عن النسبية العامة :

$$a \leqslant \frac{c^4}{4Gm} . \qquad (27)$$

بشكل خاص ، حد الكم (26) يطبق على الجسيمات الميكروسكوبية بينما الحد النسبي العام يطبق على الجمل الماكروسكوبية . هل يمكنك تأكيد أنه في كل مجال الحد ذو الصلة هو أصغر الاثنين ؟ (تحدي 63e) .



الشكل 40 – غيوم الاحتمال : ذرة هيدروجين في حالتها الأرضية الكروية (يسار) و في حالة مثارة غير كروية (يمين) كما ترى من قبل مراقب بتحرك حولها .

باختصار كم الفعل يتوقع :

- الذرات هي غيوم كروية

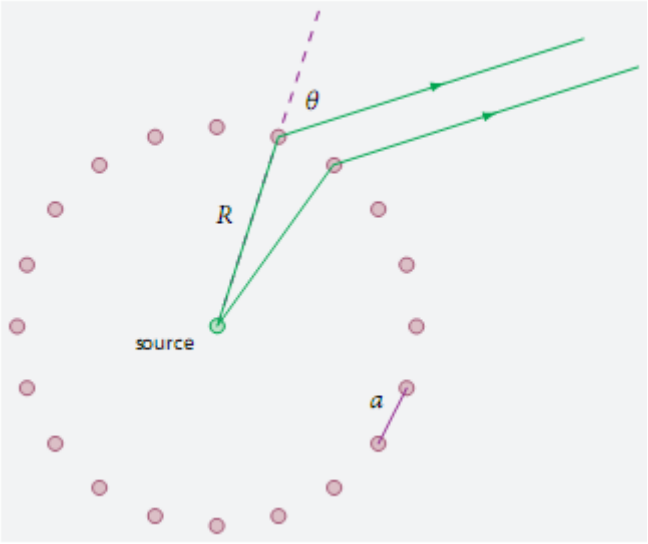
التجربة و النظرية تؤكد أن شكل أي ذرة ناتج عن الغيمة ، أو التوزع الاحتمالي ، لأخف مكوناتها . إن كم الفعل بالتالي ينص على أن الذرات أو الجزئيات ليست كرات صلبة كما اعتقد ديمقريطس أو دالتون ، ولكنها غيوم . المادة مكونة من غيوم .

الغيوم الإلكترونية الذرية ليست صلبة بشكل لانهائي و لكن يمكن بدرجة معينة أن يتم اختراقها / تخترق بعضها البعض و تتشوه . المنطقة حيث يحدث هذا التشوه تسمى الرابطة الكيماوية . الروابط تؤدي إلى الجزيئات . الجزيئات تؤدي إلى سوائل ، أجسام صلبة ، أزهار و ناس . إن الدراسة التفصيلية تؤكد أن كل الأشكال من أبسط الجزيئات إلى شكل الناس هي ناتجة عن التأثيرات المتبادلة بين الإلكترونات و النوى للذرات المكونة .

في أيامنا هذه ، الأشكال الجزيئية يمكن حسابها بدقة عالية . الجزيئات الصغيرة ، مثل الماء لها أشكال صلبة تماما بالرغم من تمتعها بدرجة معينة من المرونة . الجزيئات الكبيرة مثل البوليميرات أو الببتيدات لها أشكال مرنة . تغيرات الأشكال هذه هي أساسية من أجل تأثيراتها داخل الخلايا و بالتالي لحياتنا / بقائنا . و الكم الكبير من الأبحاث الفيزيائية الحيوية و الكيميائية الحيوية يدرس تأثيرات الأشكال الجزيئية .

في الملخص ، كم الفعل يقتضي أن الأشكال موجودة و أنها تتذبذب . مثلا إذا أبقيت جزيئة طويلة ثابتة من نهايتيها ، فإنها لا يمكن أن تبقى في سكون فيما بينهما . مثل هذه التجارب سهلة التنفيذ اليوم مثلا بواسطة DNA . في الحقيقة كل التجارب تؤكد أن كم الفعل يمنع السكون , ينتج أحجام و أشكال ، و يمكّن الكيمياء و الحياة .

في الطبيعة ، كل الأحجام و الأشكال ناتجة عن كم الفعل . الآن كل جسم ماكروسكوبي و كل جسم كمي ذو شكل غير كروي قادر على الدوران . و بالتالي سنستكشف ما يمكن لكم الفعل أن يقوله عن الدوران .



الشكل 41 – تكميم كمية الحركة الزاوية

الدوران ، تكميم كمية الحركة الزاوية و عدم وجود الأقطاب الشمالية

" حزين ذلك الطالب الذي لا يفوق معلمه

ليوناردو دافنشي "

في الحياة اليومية الدوران هو نوع كثير المصادفة من الحركة . الدواليب كلها حولنا ، و ينتج أن كم الفعل يملك نتائج مهمة على الحركة الدورانية . أولا ، نلاحظ أن الفعل و كمية الحركة الزاوية لهما نفس الأبعاد كلاهما يقاسان بالجول ثانية أو نيوتن متر ثانية . فقط يستغرق الأمر تفكيرا قليلا لبيان أنه إذا كان للمادة أو الإشعاع كمية حركة وطول موجة مرتبطان بكم الفعل عندها فإن سيكونان مقادير ثابتة لمضاعفات كم الفعل . و هذا القول الجميل صدر عن ديك و ويتكه (مرجع 46) .

تخيل سورا دائريا مكونا من N قضيب فولاذي شاقولي متباعدة بمسافة $a = 2\pi R/N$ كما هو مبين في الشكل 41 . في مركز السور تخيل منبع للمادة أو الإشعاع الذي يمكن أن يصدر جسيمات تجاه السور في أي اتجاه مختار . كمية الحركة الخطية لمثل هذا الجسيم هي $p = \hbar k = 2\pi\hbar/\lambda$. عند فراغات / شقوق السور ، الموجة ستتداخل . و خارج السور ، اتجاه الحركة للجسيم يحدد بواسطة شرط التداخل الموجب . بكلمات أخرى ، الزاوية θ التي تصف اتجاه الحركة خارج التداخل الإيجابي تعطى بالشكل : $a \sin\theta = M\lambda$ حيث M عدد صحيح . عن طريق الانحراف الناتج عن عملية التداخل فإن السور يتلقى كمية حركة خطية $p \sin\theta$ ، أو كمية حركة زاوية $L = pR\sin\theta$ (تحدي 65e). بجمع كل هذه العبارات نجد أن كمية الحركة الزاوية المنقولة للسور / المعطاة له هي :

$$L = NM\hbar \,. \qquad (28)$$

---

*"حزين ذلك الطالب الذي لا يفوق معلمه "

بمعنى آخر كمية الحركة الزاوية للسور هي مضاعف صحيح من $\hbar$. السور يمكن فقط أن يكون لها كميات حركة ذاتية صحيحة (بواحدات $\hbar$) و تعميم المقولة على كل الأجسام أيضا صحيح . (بالطبع العبارة الأخيرة هي فقط تلميح وليس برهان) .

- كمية الحركة الزاوية الذاتية المقاسة للأجسام هي دائما مضاعف لـ $\hbar$

نظرية الكم تنص على أن كل كمية الحركة الزاوية لكل حسم تزداد بخطوات . و كمية الحركة الزاوية مكممة . و هذه النتيجة مؤكدة من قبل كل التجارب .

لكن الدوران له نواح أكثر أهمية . بفضل كم الفعل تماما مثل كمية الحركة الخطية هي ضبابية ، كذلك كمية الحركة الزاوية . وهناك علاقة عدم تحديد من أجل كمية الحركة الزاوية L . (مرجع 47) و المتحول المتمم هو زاوية الطور φ لدوران (مرجع 48) . و علاقة عدم التحديد يمكن التعبير عنها بعدة طرق . أبسط تقريب – بالتالي ليس علاقة تامة- هو (صفحة 48)

$$\Delta L\,\Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2}\,. \qquad (29)$$

من الواضح أن هذا تقريبي : العلاقة فقط صالحة من أجل كميات الحركة الزاوية الكبيرة . في أي حال ، العلاقة تخبرنا على أن الدوران يتصرف بشكل مشابه للانتقال الخطي . و العلاقة لا يمكن أن تكون صالحة لقيم كميات الحركة الزاوية حيث أن $\Delta\varphi$ بالتعريف لا يمكن أن يزيد عن 2π . بشكل خاص ، الحالات الخاصة لكمية الحركة الزاوية تملك ΔL =0 *

إن عدم تحديد كمية الحركة الزاوية يظهر من أجل كل الأجسام الماكروسكوبية . و يمكننا القول أن عدم التحديد يظهر من أجل كل الحالات عندما الطور الزاوي للجملة يمكن أن يقاس .

إن التكميم و عدم التحديد لكمية الحركة الزاوية له نتائج مهمة . بالحديث كلاسيكيا قطبي الأرض هي أماكن التي لا تتحرك عندما تراقب من قبل مراقب لا يدور . بالتالي عند هذه الأماكن المادة سيكون لها موضع محدد و كمية حركة محددة و لكن كم الفعل يمنع هذا . لذا لا يمكن أن يكون هناك قطب شمالي للأرض . و بشكل أكثر دقة فكرة محور الدورات الثابت هي تقريب ، ليست صالحة بشكل عام . هذا يطبق بشكل خاص على الجسيمات الكمية .

دوران الكوانتونات

تأثيرات كم الفعل على دوران الجسيمات الميكروسكوبية مثل الذرات ، الجزيئات أو النوى ، هي مهمة بشكل خاص . نلاحظ ثانية أن الفعل و كمية الحركة الزاوية لها نفس الواحدات . إن الدقة التي يمكن بها قياس كمية الحركة الزاوية تعتمد على دقة زاوية الدوران .

---

*الصيغة الدقيقة لعلاقة عدم التحديد لكمية الحركة الزاوية هي

$$\Delta L\,\Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2}|1 - 2\pi P(\pi)|\,, \qquad (30)$$

حيث P(π) هي الاحتمال المضبوط أن الموضع الزاوي له القيمة π . من أجل الحالة الخاصة / المميزة لكمية الحركة الزاوية يحصل المرء على $\Delta\varphi = \pi/\sqrt{3}$ و $P(\pi) = 1/2\pi$. العلاقة الدقيقة تم اختبارها و تأكيدها بالتجارب (مرجع 49) .

لكن إذا دار الجسيم الميكروسكوبي فإن هذا الدوران يمكن أن يكون غير قابل للملاحظة / القياس ، و هي حالة على تباين أساسي مع حالة الأجسام الماكروسكوبية . التجارب حقيقة تؤكد أن العديد من الجسيمات الميكروسكوبية له زوايا دوران غير قابلة للقياس . مثلا في العديد (وليس كل) الحالات ، النواة الذرية تدور بمقدار نصف دورة لا يمكن تمييزها عن النواة غير الدوارة .

إذا كان الجسيم الميكروسكوبي له زاوية دوران أصغر ما يكون غير قابلة للقياس فإن كم الفعل يقتضي أن كمية الحركة الزاوية لذلك الجسيم لا يمكن أن يكون صفرا . و يجب دائما أن يكون دوارا . و بالتالي فإننا بحاجة للتأكد بالنسبة بكل جسيم ما هي الزاوية الدوران الأصغر غير القابلة للقياس. الفيزيائيون فحصوا كل الجسيمات في الطبيعة في التجارب و وجدوا أن أصغر الزوايا التي لا يمكن لحظها / قياسها (تبعا لنوع الجسيم) هي $0, 4\pi , 2\pi , 4\pi/3 , \pi , 4\pi/5 , 2\pi/3$ ... الخ . لنأخذ مثالا . إن بعض النوى لها أصغر زاوية دوران غير قابلة للقياس تبلغ نصف دورة . هذه حال النواة المسترخية (هي نواة تبدو مثل كرة الرغبي) تدور حول محورها القصير مثل نواة ^{23}Na . في هذه الحالة كل من زاوية الدوران الأكثر ما يكون القابلة للقياس و عدم التحديد بالتالي هما ربع دورة . نظرا لأن التغير ، أو الفعل الناتج عن دوران عدد من الدورات مضروبا بكمية الحركة الزاوية ، فإننا نجد أن كمية الحركة الزاوية لهذه النواة هي $2 \cdot \hbar$

و كنتيجة عامة ، نستنتج من قيم الزاوية الأصغرية أن كمية الحركة الزاوية لجسيم ميكروسكوبي يمكن أن تكون $0, \hbar/2, \hbar, 3\hbar/2, 2\hbar, 5\hbar/2, 3\hbar$ .. الخ . بمعنى آخر ، كمية الحركة الزاوية الذاتية لجسيم عادة تسمى ببرمه هي مضاعف صحيح من $\hbar/2$. يصف البرم كيف يتصرف الجسيم تحت الدوران .

كيف يمكن لجسيم أن يدور ؟ عند هذه النقطة ، لم نعلم بعد كيفية تصوير الدوران . لكننا نشعر به ، تماما كما بينا لأن الضوء مكون من أشياء دوارة : كل المادة بما فيها الإلكترونات يمكن أن تكون مستقطبة . هذا مبين بوضوح من قبل تجربة شتيرن – غيرلاخ الشهيرة .

الفضة ، شتيرن و غيرلاخ – استقطاب الكوانتونات

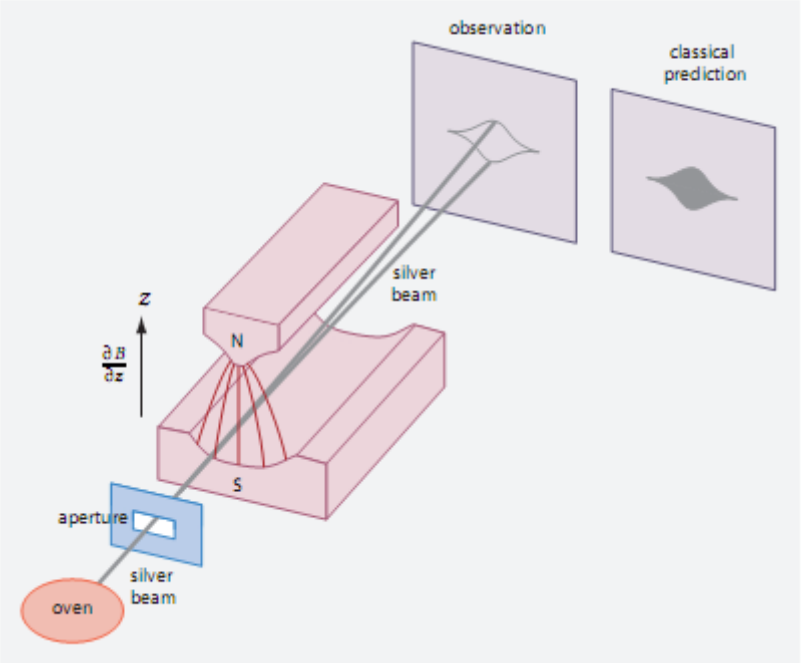
بعد سنة من العمل الشاق في عام 1922 أكمل أوتو شتيرن و فالتر غيرلاخ* تجربة جميلة لدراسة استقطاب كوانتونات المادة . و قد علما أنه في الحقول المغناطيسية المتجانسة تعمل كمقطبات من أجل الشحنات الدوارة . إن الشحنات الدوارة توجد في كل ذرة . بالتالي هي تجعل حزمة من ذرات الفضة ، مستخلصة من فرن بالتبخير ، تمر عبر حقل مغناطيسي غير متجانس . وقد وجدوا أن الحزمة تقسم إلى حزمتين منفصلتين :ما هو مبين في الشكل 42 (مرجع 50) . لا يوجد ذرات تترك منطقة الحقل المغناطيسي في اتجاهات متوسطة . وهذا على تباين كامل مع ما يتوقع من الفيزياء الكلاسيكية.

إن التقسيم إلى حزمتين هو خاصة ذاتية بذرات الفضة و اليوم نحن نعلم أن هذا ناتج عن برمها . ذرات الفضة لها برم $\hbar/2$

وتبعا لتوجهها في الفراغ ، فإنها تنحرف إما في اتجاه الحقل بشكل غير متجانس أو ضده . و تقسيم الحزمة هو أثر كمي صرف : ليس هناك خيارات وسيطة . في الحقيقة أعطت تجربة شتيرن – غيرلاخ أحد العروض الأوضح بأن الفيزياء الكلاسيكية لا تعمل جيدا في المجال الميكروسكوبي .

---

*أوتو شتيرن (1888-1969) و فالتر غيرلاخ (1889-1979) عملا معل في جامعة فرانكفورت . من أجل قياسه اللاحق للعزم المغناطيسي الشاذ ، فقد حاز شتيرن على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1943 بعد أن نجا / هرب من الاشتراكية القومية .



الشكل 42 – تجربة شتيرن – غيرلاخ

في عام 1922 فإن بدت النتيجة غير غريبة بحيث درست بتفصيل كبير في كل العالم .

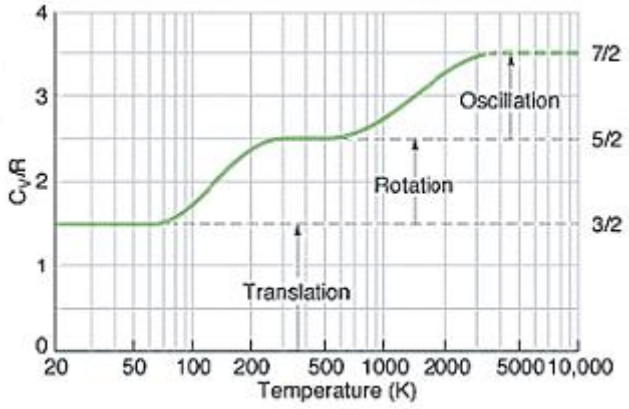
عندما أحد الحزمتين – مثلا الحزمة العلوية - تمر عبر مجموعة ثانية فإن كل الذرات تنتهي في الحزمة العلوية . و المخرج الثاني الممكن ، الحزمة السفلية تبقى غير مستخدمة في هذه الحالة . بمعنى آخر ، الحزمتين العلوية و السفلية على خلاف الحزمة الأصلية لا يمكن تقسيمهما أكثر . و هذا غير مدهش .

لكن إذا دارت المجموعة الثانية بمقدار $\pi/2$ بالنسبة للأولى مرة ثانية فإن الحزمتين اليمنى و اليسرى تتشكلان و لا يهم فيما إذا كانت الحزمة الواردة هي مباشرة من الفرن أو من الجزء العلوي من الحزمة . إن المجموعة الدوارة جزئيا تعطي تقسيم جزئي غير متساوي . و نسب الحزمتين النهائيتين تعتمد على زاوية الدوران للمجموعة الثانية .

نلاحظ مباشرة أنه إذا قسمنا القسمة من الفرن أولا بشكل شاقولي و بعدها أفقيا ، نحصل على نتيجة مختلفة عن التقسيم للحزمة بالترتيب المعاكس . (يمكنك التأكد من ذلك بنفسك) (تحدي 966e . عمليات التقسيم لا تتبادل . و عندما ترتيب العمليتين يشكل فرقا في النتيجة النهائية فإن الفيزيائيين يسمون هذا عدم التبادل . نظرا لأن كل القياسات أيضا هي عمليا فيزيائية نستنتج أنه بشكل عام القياسات و العمليات في أنظمة الكم غير تبادلية .

إن تقسيم الحزمة هو تابع للاتجاه . و حزم المادة تقريبا تتصرف بنفس الشكل الذي للحزم الضوئية المستقطبة . و في الحقيقة الحقل المغناطيسي غير المتجانس يؤثر على المادة مثل تأثير المقطب على الضوء . إن الحزمة العلوية و السفلية عندما تأخذا معا تعرفان اتجاه الاستقطاب . في الحقيقة اتجاه الاستقطاب يمكن تدويره ، بمساعدة حقل مغناطيسي متجانس . و الحزمة المدورة في المغناطيس غير الدوار تتصرف مثل حزمة غير دوارة في مغناطيس دوار .

في الملخص ، كوانتونات المادة يمكن أن تستقطب . و نصور الاستقطاب كتوجه لمحور الدوران الداخلي لكوانتون ضخم



الشكل 43 – مخطط مثالي للسعة الحرارية للهيدروجين كتابع لدرجة الحرارة

و كي يكون متوافقا فإن محور الدوران يجب أن يتخيل أنه يتقدم حول اتجاه الاستقطاب . بالتالي الجسيمات الكمية الضخمة تشبه الفوتونات أيضا في قابليتها للاستقطاب

فضول و تحديات مرحة حول المادة الكمية

" من الممكن السير أثناء القراءة و لكن ليس القراءة أثناء المشي

سيرج باو "

إن كم الفعل يقتضي أنه ليس هناك فراكتالات في الطبيعة . كل شيء مكون من جسيمات . و الجسيمات هي غيوم . نظرية الكم تتطلب أن كل الأشكال في الطبيعة هي غيوم ضبابية .

* *

هل يمكن للذرات أن تدور ؟ هل يمكن لذرة أن تسقط على الأرض متدحرجة تحت الطاولة ؟ هل يمكن للذرات أن تضع في حالة دوران عالي السرعة ؟ الجواب هو " لا " لكل هذه الأسئلة ، لأن كمية الحركة الزاوية مكممة (مرجع 51)،أيضا الذرات ليست أجسام صلبة و لكن غيوم . الحالة الماكروسكوبية لجسم يدور بشكل أبطأ و أبطأ حتى يتوقف لا توجد في العالم الميكروسكوبي . كم الفعل لا يسمح بذلك .

* *

الضوء ينكسر عندما يدخل مادة كثيفة . هل أمواج المادة تتصرف بشكل مشابه ؟ نعم ، هي تفعل . في عام 1995 أظهر ديفيد بيتشارد هذا من أجل أمواج الصوديوم التي تدخل غاز الهليوم و الإكسينون (مرجع 52) .

* *

العديد من تأثيرات الكم تعطي منحنيات تبدي خطوات . المثال المهم هو الحرارة المولية لغاز الهيدروجين H_2 المبينة في الشكل 43 . إن زيادة درجة الحرارة من 20 إلى 8 000 K ، فإن الحرارة المولية تبدي خطوتين ، أول من ، فإن الحرارة المولية تبدي خطوتين ، أولا من 3R/2 إلى 5R/2 و بعدها إلى 7R/2 . هل يمكنك شرح السبب ؟

* *

أكثر الأمثلة عن الحركة الكمية المعطاة حتى الآن هي ناتجة عن التأثيرات الكهرطيسية . هل يمكنك القول بأن كم الفعل يجب أيضا أن يطبق على الحركة النووية ، و بشكل خاص التأثيرات المتبادلة النووية ؟ (تحدي 67s)

* *

هناك العديد من الصيغ الأخرى لمبدأ عدم التحديد . إن الصيغة الممتعة هي التي وضعها سباطا و سيفارام اللذين شرحا في عام 1992 أن العلاقة المثيرة للجدل التالية بين درجة الحرارة و الزمن تصح :

$$\Delta T \Delta t \geqslant \hbar / k. \qquad (31)$$

هنا k هي ثابت بولتزمان (مرجع 53) . و كل الاختبارات التجريبية حتى الآن أكدت هذه النتيجة .

أول ملخص عن حركة الجسيمات الكمية

في الملخص ، إن التقسيم الرقمي للحزمة الذي يشاهد في تجربة شتيرن – غيرلاخ و خوصا الموجة للمادة تجبرنا على إعادة التفكير في وصفنا للحركة . هي تبين أن حركة المادة الميكروسكوبية تنتج من كم الفعل ، وهي قيمة الفعل الأصغر ما يكون القابلة للقياس . و في النسبية الخاصة فإن وجود السرعة الأعظمية أجبرنا على إدخال مفهوم الفراغ – الزمن ، و بالتالي تدقيق وصفنا للحركة . و في النسبية العامة ، فإن القوة الأعظمية أجبرتنا على إدخال مفاهيم الأفق و الانحناء و بعدها ثانية دققنا وصفنا للحركة . في النقطة الحالية ، وجود كم الفعل و سلوك الموجة للمادة يجبرنا على اتخاذ خطوتين مشابهتين : أولا سنطرح مفهوم تابع الموجة و بعدها سندقق وصفنا لحركة المادة .

الفصل الرابع

الوصف الكمي للمادة و حركتها

" إن الكمات هي فوضى قذرة لا أمل منها ** ماكس بورن " (مرجع 54)

في الحياة اليومية و في الفيزياء الكلاسيكية نقول عن نظام أن له موضع ، أنه ذو توجيه في اتجاه معين , أن له محور دوران و أنه في حالة ذات كمية حركة خاصة . في الفيزياء الكلاسيكية يمكننا الحديث بهذا الشكل لأن الحالة – الوضع الذي توجد به الجملة قد اتفق مع نتائج القياس . و هي تتفق لأن القياسات يمكن دائما تخيل أن لها تأثير مهمل على الجملة .

لكن بسبب وجود الفعل الأصغر ما يكون فإن التأثير المتبادل الضروري للقيام بالقياس على جملة لا يمكن أن يجعل صغير اختياريا . و بالتالي كم الفعل يجعل من المستحيل لنا أن نستمر بالقول أن الجملة لها كمية حركة ، ولها موضع أو لها محور دوران . كم الفعل يجبرنا على استخدام فكرة سهم الدوران و إدخال مفهوم تابع الموجة أو تابع الحالة . لنرى لماذا و كيف .

الحالات و القياسات – تابع الموجة

تبيّن تجربة شتيرن – غيرلاخ أن القيم المقاسة لتوجه البرم غير ذاتية لكنها تنتج من عملية القياس (في هذه الحالة من تبادل التأثير مع الحقل غير المتجانس المطبق) . هذا على عكس قيمة البرم التي هي ذاتية و مستقلة عن الحالة و القياس. باختصار كم الفعل يجبرنا على التمييز بدقة بين ثلاثة مفاهيم :

- حالة الجملة
- عملية القياس
- نتيجة أو مآل القياس

على عكس الحالة التقليدية الاعتيادية فإن حالة الجملة الكمية – الخواص التي تملكه الجملة - لا توصف بنتائج القياس . و أبسط توضيح لهذا الفرق هو الجملة المكونة من جسيم وحيد في تجربة شتيرن – غيرلاخ . تبين التجربة أن قياس البرم في حالة جسيم عام (الفرن) تعطي بعض الأحيان (ليكن 1+) و بعض الأحيان تعطي (ليكن 1 -) لذا فإن الذرة العامة في حالة الفرن ليس لها توجه ذاتي . فقط بعد القياس الذرة تكون إما في حالة أعلى أو في حالة أسفل .

**" الكمات هي فوضى قذرة لا أمل منها !"

أيضا وجد أن حالات التلقيم العلوية إلى جهاز قياس ثان يعطي فقط الحالات العلوية : بالتالي إن حالات خاصة معينة تسمى الحالات الخاصة ، تبقى غير متأثرة بالقياس .

أخيرا ، تجربة شتيرن – غيرلاخ و أشكالها تبين أن الحالات يمكن تدويرها بواسطة حقول مطبقة : حالات الذرات لها اتجاه أو توجه في الفراغ . إن التجارب أيضا تبين أن الحالات تدور لدى حركة الذرات في الفراغ .

الملاحظات / القياسات التجريبية يمكن وصفها في شكل مباشر . نظرا أن القياسات هي عمليات التي تأخذ حالة كدخل و تنتج حالة خرج و نتيجة القياس يمكن القول :

- الحالات توصف بأسهم دوارة أو أشعة دوارة
- القياسات للقيم القابلة للقياس هي عمليات على أشعة الحالة
- نتائج القياس هي أعداد حقيقية و كما في الفيزياء الكلاسيكية تعتمد عادة على المراقب

بشكل خاص لقد ميزنا كميتين اللتين لا تميزان في الفيزياء الكلاسيكية : الحالات و نتائج القياس . بمعرفة هذا التمييز فإن نظرية الكم تنتج بشكل بسيط تماما كما سنرى .

بمعرفة أن كم الفعل هو أي قياس صغير غير معدوم لكمية قابلة للقياس و هو تبادل تأثير مع جملة و بالتالي تحويل لحالتها. بالتالي فيزياء الكم تصف الكميات القابلة للقياس فيزيائيا كعوامل ، أو بشكل مكافئ تحويلات . إن تجربة شتيرن – غيرلاخ تبين هذا بوضوح : تبادل التأثير مع الحقل يؤثر على الذرات : بعضها بشكل ما و بعضها بشكل آخر . في الحقيقة ، كل التجارب تبين .

- رياضيا الحالات هي أشعة معقدة أو أسهم دوارة ، في فراغ كجرد (صفحة 236) .وهذا الفراغ لكل الحالات الممكنة أو الأسهم هو فراغ هيلبرت .
- رياضيا القياسات هي تحويلات خطية ، بشكل أكثر دقة توصف بواسطة معاملات مرافق ذاتي أو هرميتي (أو مصفوفات)
- رياضيا تغيرات وجهة النظر توصف بواسطة معاملات واحدية (أو مصفوفات) التي تؤثر على الحالات أو أسهم و على معاملات القياس

إن تجارب ميكانيك الكم أيضا يبين أن القياس لقيمة قابلة للقياس يمكن فقط أن تعطي نتيجة التي هي قيمة خاصة للتحويل الموافق . و الحالات الناتجة بعد القياس ، هي تلك الحالات الاستثنائية التي لا تتأثر عندما يتم قياس المتحول المقابل ،هي الأشعة الخاصة . باختصار كل خبير حول الحركة يجب أن يعلم ما هي القيمة الخاصة و الشعاع الخاص .

من أجل أي تحويل خطي T فإن تلك الأشعة الخاصة ψ التي تحول إلى مضاعفات لنفسها

$$T\psi = \lambda\psi \qquad (32)$$

تسمى أشعة خاصة (أو حالات خاصة) و عامل الضرب λ يسمى القيمة الخاصة المرتبطة . تبين التجارب :

- حالة الجملة بعد قياس تعطى بشعاع خاص يقابل القيمة الخاصة المقاسة

في تجربة شتيرن – غيرلاخ فإن الحالات الخاصة هي حالات أعلى و أسفل . بشكل عام ، الحالات الخاصة هي تلك الحالات التي لا تتغير عندما يقاس المتحول المقابل . و القيم الخاصة للمعاملات الهرميتية هي دائما حقيقية بحيث أن التوافق يكون مضمونا : كل نتائج القياس هي أعداد حقيقية .

في الملخص فعل الكم يجبرنا على التمييز بين المفاهيم التي تمزج معا في الفيزياء الكلاسيكية : حالة جملة ، قياس لجملة ، و نتيجة القياس . كم الفعل يجبرنا على تغيير المفردات التي نصف بها الطبيعة و تجبرنا على استخدام مفاهيم أكثر اختلافا . الآن باتباع الخطوة الأساسية : وصف الحركة بواسطة هذه المفاهيم . هذا ما يعرف بنظرية الكم

عرض تابع الموجة : الأسهم الدوارة و غيوم الاحتمال

لقد وصفنا حالة الكوانتون بواسطة سهم . في الحقيقة هذا تقريب من أجل الكوانتونات الموضعية . بشكل أكثر دقة

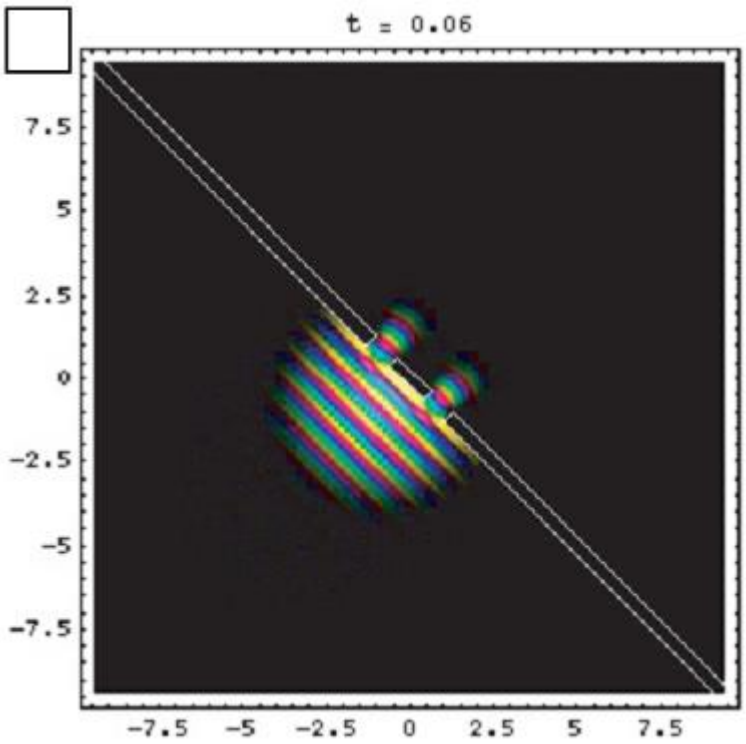
- حالة الجسيم الكمي توصف بواسطة توزيع فراغي للأسهم ،هذا ما يعرف بتابع الموجة

لتطوير صورة مرئية لتابع الموجة أولا نتصور جسيم كمي الذي يتموضع بأكبر قدر ممكن . في هذه الحالة تابع الكوانتون الحر يمكن أن يوصف ببساطة بسهم دوار وحيد .

التجارب تبين أنه عندما ينتقل الكوانتون المتموضع عبر الفراغ ، فإن السهو المرتبط به يدور . إذا كان الجسيم غير نسبي و إذا كان يمكن إهمال البرم فإن الدوران يحدث في مستوي متعامد مع اتجاه الحركة . و نهاية السهم بالتالي ترسم حلزونا حول اتجاه الحركة . و في هذه الوضعية فإن الحالة التي عند زمن معين توصف بزاوية السهم . و هذه الزاوية هي الطور الكمي . و الطور الكمي مسؤول عن خواص الموجة في المادة كما سنرى . إن طول موجة و تردد الحلزون يحدد بكمية حركة و الطاقة الحركية للجسيم .

إذا لم يكن الجسيم متموضعا ولكن ما يزال غير نسبي وذو تأثيرات برم مهملة فإن الحالة أو تابع الموجة يحدد سهما دورا عند كل نقطة في الفراغ . الدوران ما يزال يتم في مستوي متعامد مع اتجاه الحركة . و لكن الآن لدينا توزيع للأسهم الذي سيرسم حلزونات موازية لاتجاه الحركة . عند كل نقطة من الفراغ و الزمن فإن الحالة لها طور كمي و طول سهم . إن أطوال السهم تتناقص باتجاه اللانهاية الفراغية .

يبين الشكل 44 مثالا عن تطور تابع موجة من اجل جسيمات غير نسبية ذات تأثيرات برم مهملة . و اتجاه السهم في كل نقطة مبينة بلون عند النقطة المحددة . طول السهم مبين بواسطة سطوع اللون . من أجل الجسيمات غير النسبية ذات تأثيرات البرم المهملة فإن تابع الموجة $\psi(t,x)$ بالتالي يوصف بطول و صفحة / طور : وهو عدد عقدي في كل نقطة في الفراغ . (صفحة 224) . إن الطور هو أساسي من أجل التداخل و من أجل العديد من التأثيرات الموجية الأخرى . ما هي خاصة القياس التي يصفها المطال ، طول السهم المحلي ؟ الجواب أعطي من قبل الفيزيائي الشهير ماكس بورن :



الشكل 44 – حركة تابع موجة ، الحالة الكمية ، عبر شق مضاعف ، يبين كلا من الخواص الجسيمية و الموجية للمادة . إن كثافة الحالة المرتبطة بطول السهم ، تظهر بواسطة سطوع ، و الطور / الصفحة المحلي يرمز باللون

- مطال تابع الموجة هو مطال احتمالي . إن مربع المطال أي المقدار $|\psi(t,x)|^2$ يعطي احتمال إيجاد جسيم في المكان x في الزمن t

بعبارة أخرى ، تابع الموجة هو مجموع فكرتين : من ناحية تابع الموجة هو غيمة ، و من ناحية أخرى في كل نقطة من الغيمة يجب على المرء أن يتخيل سهما . و مع الزمن الأسهم تدور و الغيمة تغير شكلها .

إن وصف حالة الجسيم المادي بواسطة غيمة من أسهم تدور هو خطوة أساسية لتصوير الخواص الموجية للمادة .

يمكننا توضيح الوضع أكثر

- في كل عملية التي فيها طور تابع الموجة غير مهم فإن صورة الغيمة لتابع الموجة تكون كافية و صحيحة

مثلا حركة ذرات الجزيئات في غازات أو سوائل يمكن تخيلها كحركة أجسام غيمية يجب التأكيد على أن الغيوم قيد البحث هي صلبة تماما : نحتاج إلى الكثير من الطاقة لتشويه الغيوم الذرية . صلابة بلورة معينة ترتبط مباشرة بصلابة الغيوم الذرية التي توجد داخلها . الذرات غيوم جاسئة جدا أو صلبة .

من ناحية أخرى

- في كل عملية التي فيها طول تابع الموجة يلعب دورا فإن صورة الغيمة لتابع الموجة يجب أن توسع / تعمم بواسطة أسهم دوارة في كل نقطة .

هذه هي حالة عمليات التداخل للكوانتونات ، ولكن أيضا من أجل الوصف الدقيق للروابط الكيماوية .
المعلمون غالبا يناقشون أفضل طريقة لشرح توابع الموجة . بعض المعلمين يفضلون استخدام موديل الغيمة فقط و آخرون يفضلون استخدام أي طريقة بيان مهما كانت . و كلا الطريقتين ممكنتين ، لكن الطريقة الأكثر فائدة و مساعدة هي تخيل حالة تابع الموجة لجسيم كمي غير نسبي كسهم عند كل نقطة في الفراغ . إن تردد الدوران لمجموعة من الأسهم هو الطاقة الحركية لجسيم و طول موجة حركة السهم هي الدور للمنحني الحلزوني الذي ترسمه رؤوس الأسهم أو السهم المتوسط خلال الحركة و هو كمية حركة الجسيم الكمي .
إن السهم عند كل نقطة في الفراغ هو حقل (رياضي) . و الحقل مركز في منطقة حيث يتوضع الجسيم ، و مطال الحقل مرتبط باحتمال إيجاد الجسيم . بالتالي حقل الحالة ، تابع الموجة أو تابع الحالة هو غيمة أسهم .
لاحظ أنه حتى بالرغم من أن تابع الموجة يمكن أن يرى كتعرف سهم في كل نقطة في الفراغ ، فإن تابع الموجة ككل يمكن أيضا وصفه بأنه شعاع واحد وحيد ، هذه المرة في فضاء هيلبرت (صفحة 236) . من أجل الجسيمات الحرة أي الجسيمات التي لا تخضع لقوى خارجية ، فإن فضاء هيلبرت هو ذو أبعاد لا نهائية .
على أنه ليس من الصعب حساب مثل هذه الفضاءات . الجداء السلمي لتابعي موجة هو التكامل الفضائي لجداء المرافق العقدي لأول تابع و التابع الثاني (غير المترافق) . بواسطة هذا التعريف فإن كل المفاهيم الشعاعية (أشعة الواحدة ، الأشعة الصفرية ، أشعة الأساس ... الخ) (تحدي 68e) يمكن تطبيقها بشكل ذو معنى على توابع الموجة .
في الملخص ، الجسيمات غير النسبية بدون تأثيرات برم ، تابع الحالة أو الموجة لجسيم كمي هو غيمة أو موجة موزعة لأسهم دوارة . هذه الناحية من الغيمة الكمية غير اعتيادية . نظرا لأن الغيمة الكمية مكونة من أسهم صغيرة فإن كل نقطة من الغيمة توصف بكثافة محلية و توجه محلي / منحى . و الخاصة الأخيرة لا توجد في أي غيمة في الحياة اليومية .
لعدة عقود لقد افترض ضمنيا أن تابع الموجة لا يمكن أن يظهر بشكل أكثر بساطة من غيمة من أسهم دوارة . فقط السنوات الأخيرة أظهرت أن هناك طريقة عرض أخرى لمثل هذه الغيوم الكمية ، و إحدى هذه الطرق مبينة في المجلد الأخير من هذه السلسلة . (مجلد VI ، صفحة 172) .
تطور الحالة – معدلة شرودنجر
إن وصف الحالة لكوانتون غير نسبي ذو تأثيرات برم مهمل على أنه غيمة دوارة يحدد كليا كيفية تطور تابع الموجة مع الزمن . في الحقيقة بالنسبة لمثل هذه الجسيمات الكمية فإن التطور ينتج من الطاقة الكلية ، مجموع الطاقة الحركية و الكامنة T + V و خواص أمواج المادة :

- التغير الموضعي لسهم الحالة ψ ينتج بواسطة الطاقة الإجمالية (الكلية) المحلية / الموضعية أو الهاملتوني . H= T+V

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi \ . \qquad (33)$$

هذه المعادلة الشهيرة هي معادة شرودنجر للحركة .* معادلة التطور هذه تطبق على كل الجمل الكمية و هي واحدة من أعلى النقاط في الفيزياء الحديثة .

في الحقيقة ، وجد إروين شرودنجر معادلته بطريقتين مختلفتين (مرجع 55) . في بحثه الأول استنتجها من مبدأ التغير (مرجع 56) و في بحثه الثاني استنتج معادلة التطور مباشرة بطرح السؤال البسيط : كيف تتطور الحالة ؟ ولقد علم أن حالة الكوانتون تتصرف مثل كل من ، موجة و مثل جسيم . و الموجة الموصوفة بواسطة حقل ، التي سماها $\psi(t,x)$.إذا

تصرفت الحالة ψ مثل موجة عندها تابع الموجة المقابل يجب أن يكون مطالا W مضروبا بعامل الطور $e^{ikx-\omega t}$. التالي يمكن كتابة الحالة بالشكل :

$$\psi(t,x) = W(t,x)\, e^{ikx-\omega t} \ . \qquad (34)$$

المطال W هو طول السهم المحلي و الطور هو منحى السهم المحلي . و بشكل مكافئ ، المطال هو الكثافة المحلية للغيمة ، و الطور هو المنحى المحلي للغيمة .

نحن نعلم أن الموجة الكمية يجب أن تتصرف مثل جسيم ذو كتلة m . و بشكل خاص ، العلاقة غير النسبية بين الطاقة و كمية الحركة $E = p^2/2m + V(x)$ حيث V(x) هو الكمون عند الموضع x الذي يجب أن يحقق من اجل هذه الأمواج .

إن علاقتي دو برولي (22) (صفحة 75) من أجل طول موجة المادة و ترددها بالتالي يقتضي

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi = \frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(\boldsymbol{x})\psi \ . \qquad (35)$$

هذا هو الشكل الكامل لمعادلة الموجة لشرودنجر . حيث ∇^2 هو عامل لابلاس و هو أساسا المشتق الثاني عبر الفراغ . و هو ينص كيف أن موجة السهم ، تابع الموجة ψ المرتبط بجسيم يتطور مع الزمن . في عام 1926 فإن معادلة الموجة للحقل العقدي أصبحت فورا شهيرة عندما استخدمها شرودنجر بإدخال الكمون الذي يشعر به الإلكترون قرب بروتون لحساب مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين . في ذرة هيدروجين فإن الضوء يصدر عن إلكترون وحيد داخل الذرة ، بالتالي الوصف الدقيق لإلكترون في ذرة هيدروجين يسمح لنا بوصف ترددات الضوء التي يصدرها . (سوف نجري الحساب والمقارنة مع التجربة فيما يلي) (صفحة 180) . أولا معادلة شرودنجر تشرح أن فقط الألوان المتقطعة تصدر عن الهيدروجين . بالإضافة لذلك ، الترددات للضوء الصادر وجد أنها متفقة مع توقع المعادلة بخمسة مواضع عشرية .

---

*إروين شرودنجر (ولد عام 1887 في فينا ، و توفي عام 1961 فيها) وكان شهيرا بكونه فيزيائيا بوهيميا ودائما يعيش في بيت مع امرأتين . في عام 1925 اكتشف المعادلة التي حققت له الشهرة الدولية و جائزة نوبل في الفيزياء عام 1933. وقد كان أيضا أول من بيّن أن الإشعاع المكتشف من قبل فيكتور هس كان في الحقيقة آتيا من الكون . وقد ترك ألمانيا و بعدها ثانية النمسا ، بسبب كرهه للاشتراكية القومية ، وكان أستاذ في دبلن لسنوات عديدة وهناك نشر كتابه الشهير و المؤثر ما هي الحياة ؟ في هذا الكتاب اقترب من توقع وجود الحمض النووي المجهول DNA من البصيرة النظيرة فقط .

الشكل 45 – إروين شرودنجر (1887 -1961)

أخيرا حجم الذرات تم توقعه بشكل صحيح . هذه كانت النتائج المهمة خاصة إذا تذكرنا أن الفيزياء الكلاسيكية لا يمكن أن تشرح وجود الذرات ، فكيف بإصدارها للضوء . على العكس فإن فيزياء الكم تشرح كل خواص الذرات و ألوانها بدقة عالية . بمعنى آخر اكتشاف كم الفعل يؤدي إلى وصف حركة المادة إلى نقطة جديدة .

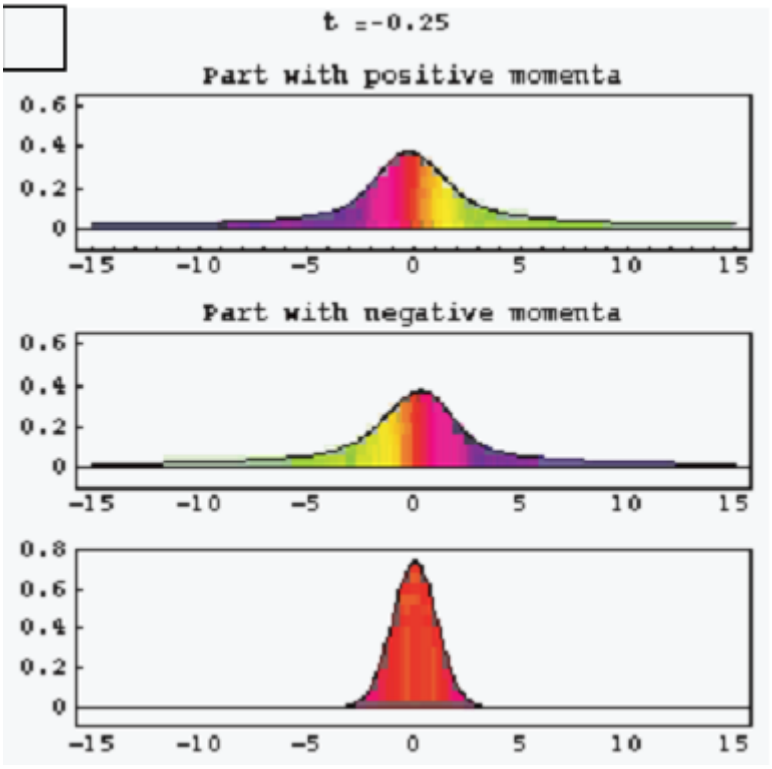
في الحقيقة الوصف الدقيق لكوانتونات المادة يوجد فقط عندما كل من تأثيرات البرم و علاقة الطاقة – كمية الحركة النسبية تؤخذ بالحسبان . نقوم بهاذ فيما يلي (صفحة 187) . لا يوجد انحرافات بين الحسابات النسبية الكاملة و التجارب قد وجدت قط . و حتى اليوم التوقعات و القياسات للطيوف الذرية تبقى الأكثر دقة و أمانة في كل دراسة الطبيعة : في حالات التي تسمح بها الدقة التجريبية فإن القيم المحسوبة تتفق مع التجارب بثلاثة عشر خانة عشرية

التداخل الذاتي للكوانتونات

تتداخل الأمواج (صفحة 75) . و كل التجارب التي تتضمن الأمثلة المبينة في الشكلين 39 & 38 تؤكد أن كل جسيمات الكم و بشكل خاص كوانتونات المادة تبدي تداخل . التداخل هو نتيجة مباشرة لمعادلة شرودنجر كما يبين الفيلم في الشكل 44 (صفحة 89) . يوضح الفيلم حل معادلة شرودنجر من أجل جسيم كمي يتحرك عبر شق مضاعف . الفيلم يظهر كيف أن شقا مضاعفا حرض الحيود و التداخل من أجل جسيم مادة .

ينتج أن معادلة شرودنجر تعكس كليا و تشرح قياسات تداخل المادة : أيضا تداخل كوانتونات المادة ناتج عن تطور الغيوم للأسهم الدوارة . و مثل هذا في كل ظواهر التداخل ، الشدة الموضعية لنموذج التداخل ينتج أنه متناسب مع المربع $|W|^2$ لمطال الموجة المحلي . ومطال الموجة المحلي ينتج من طور قطارات الموجة المتداخلة . إن التشابه مع التداخل الضوئي كامل حتى العلاقات هي نفسها .

نلاحظ أنه حتى بالرغم من أن تابع الموجة انتشر في كل شاشة الكشف تماما قبل أن يضرب الشاشة ، فإنه مع ذلك يعطي فقط بقعة متموضعة على الشاشة . (صفحة 152) . هذا الأثر يسمى تقوض تابع الموجة و سيدرس بالتفصيل فيما يلي .



الشكل 46 – تطور تابع الموجة (المنحني الأخفض) مع كمية حركة صفرية و حركة أجزائه مع كميات حركة موجبة و سالبة . الطور المحلي مركز في اللون

سرعة الكوانتونات

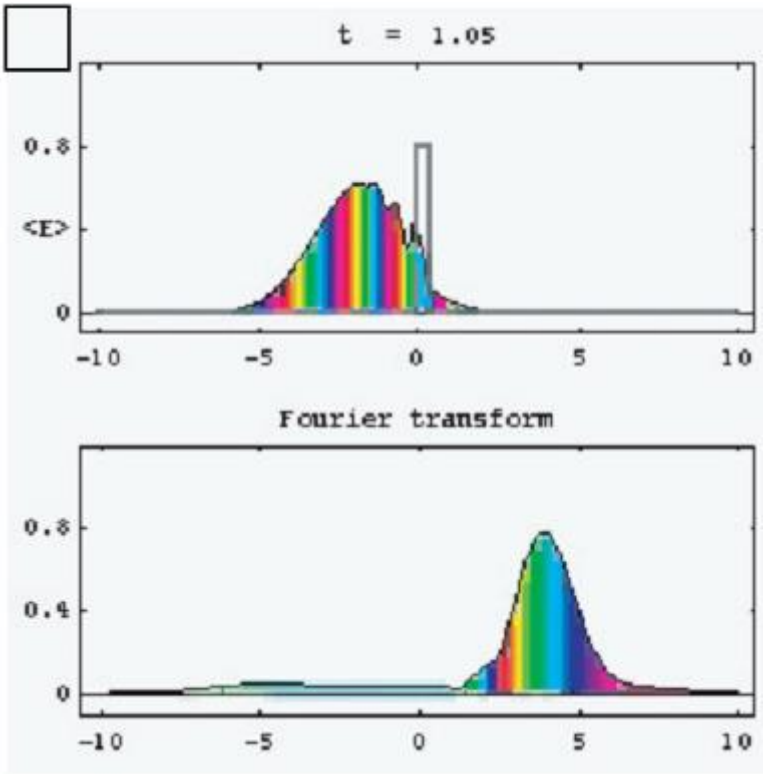
لندلف قليلا إلى تفاصيل الوصف المعطى بواسطة معادلة شرودنجر (35) . تعبّر المعادلة عن ارتباط بسيط : السرعة الكلاسيكية للجسيم المادي هي سرعة المجموعة لتابع الموجة ψ . و عند مشاهدته عن بعد فإن تابع الموجة بالتالي يتحرك مثلما يتحرك جسيم كلاسيكي .

لكننا نعلم من الفيزياء الكلاسيكية أن سرعة المجموعة ليست دائما معرّفة جيدا : في حالات حيث المجموعة تتحلل إلى ذرى عديدة فإن مفهوم سرعة المجموعة لا يكون ذو فائدة كبيرة . و هناك أيضا حالات التي تكون فيها حركة الكم مختلفة جدا عن الحركة الكلاسيكية كما سنكتشف سريعا (صفحة 152) . و لكن من أجل الحالات ذات التصرف الجيد مثل الجسيمات الحرة أو الحرة تقريبا فإننا نجد أن تابع الموجة يتحرك في نفس الطريقة التي يتحرك بها الجسيم الكلاسيكي .

تبين معادلة شرودونجر نقطة أخرى : السرعة و الموضع للمادة ليستا متحولين مستقلين ، و لا يمكن اختيارهما طوعا . الشرط الابتدائي لجملة يعطى بالقيمة الابتدائية لتابع الموجة فقط . و لا يوجد مشتقات يجب أن تحدد (أو يمكن) . في الحقيقة التجارب تؤكد أن الجمل الكمية توصف بمعادلة تطور من المرتبة الأولى ، وهذا متباين بشدة مع الجمل الكلاسيكية . سبب هذا التباين هو كم الفعل و الحد الذي يفرضه على متحولات الحالة الممكنة لجسيم .

تشتت الكوانتونات

من أجل الجسميات الكمية الحرة ، فإن معادلة شرودنجر للتطور تقتضي التشتت كما هو موضح في الشكل 46 . تخيل تابع موجة متوضع حول موضع بداية معين . مثل هذا التابع يصف جملة كمية عند السكون . و عندما يمر الزمن



الشكل 47 – نفقية تابع الموجة عبر تلة كمون (العامود المستطيل) : أكثر تابع الموجة ينعكس و جزء منه يمر للطرف الآخر . الطور الموضعي مرمز باللون

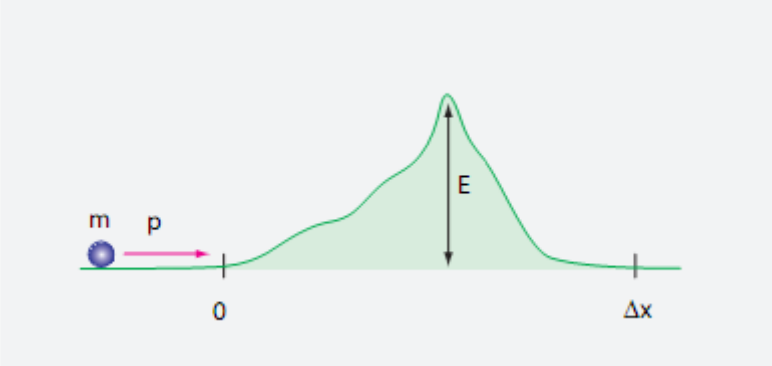
تابع الموجة هذا سينتشر في الفراغ . في الحقيقة معادلة التطور لشرودنجر مشابهة ، رياضيا ، لمعادلة الانتشار . بنفس الشكل الذي تنتشر به نقطة حبر في الماء أيضا حالة الجسيم الكمي المتموضع ستنتشر في الفراغ . صحيح أن أكثر موضع محتمل يبقى بلا تغيير ولكن احتمال إيجاد الجسيم على مسافات كبيرة عن موضع البدء يزداد مع الزمن . من أجل الجسيمات الكمية أثر الانتشار هذا هو في الحقيقة يلاحظ في كل التجارب . إن الانتشار هو نتيجة الناحية الموجية للمادة ، و بالتالي كم الفعل $\hbar$. و يحدب للكوانتونات عند السكون و بالتالي أيضا للكوانتونات المتحركة (التحدي 69 e) . لكن من أجل الأجسام الماكروسكوبية ، فإن أثر الانتشار لا يلاحظ : السيارات نادرا ما تتحرك بعيدا عن أماكن الركن . في الحقيقة نظرة الكم تتوقع بالنسبة للأجسام الماكروسكوبية أن أثر الانتشار صغير بشكل مهمل . هل يمكنك بيان لماذا ؟ (تحدي 70 ny) .

في الملخص الناحية الموجية للمادة تؤدي إلى انتشار توابع الموجة . توابع الموجة تبين تشتت .

النفقية و حدود الذاكرة – تخامد الكوانتونات

يقول المنطق العام أن كرة صغيرة لا يمكنها أن تتحرج صعودا لتلة . بشكل أكثر دقة الفيزياء الكلاسيكية تقول أنه إذا كانت الطاقة الحركية T أصغر من الطاقة الكامنة V لتلك الكرة عند أعلى التلة فإن الكرة لا يمكن أن تصل لأعلى التلة . على العكس وفقا لنظرية الكم ليس هناك احتمال موجب لتجاوز التلة لأي طاقة للكرة .

في نظرية الكم ، التلال و العوائق توصف بواسطة حواجز كمونية و أجسام بواسطة توابع الموجة . أي تابع موجة ابتدائي سينتشر متجاوزا أي حاجز كموني ذو ارتفاع و عرض منتهي. تابع الموجة أيضا سيكون غير متلاشي في موضع الحاجز . باختصار ، أي جسم يمكنه التغلب على أي تلة أو حاجز كما هو مبين في الشكل 48 .



الشكل 48 – تسلق تل

هذا الأثر يسمى أثر النفقية . و هو مختلف كليا عن الخبرة اليومية و الميكانيك الكلاسيكي .

أثرر النفقية ينتج من ناحية جديدة محتواة في الوصف الكمي للتلال : في الطبيعة أي عائق يمكن التغلب عليه بواسطة جهد منتهي . لا يوجد عائق صعب تجاوزه بشكل لا نهائي . في الحقيقة فقط بالنسبة لكمون الارتفاع اللانهائي سيكون تابع الموجة متلاشيا و يفشل في الانتشار للطرف الآخر . ولكن مثل هذه الكمونات توجد فقط كتقريبات ، في الطبيعة الكمونات دائما ذات قيمة منتهية .

كم مقدار أثر النفقية ؟ (تحدي 71 ny) ؟ تبيّن لحسابات أن احتمال النقل / الإرسال P يعطى تقريبا بالشكل:

$$P \approx \frac{16T(V-T)}{V^2}\ e^{-\frac{2w}{\hbar}\sqrt{2m(V-T)}} \qquad (36)$$

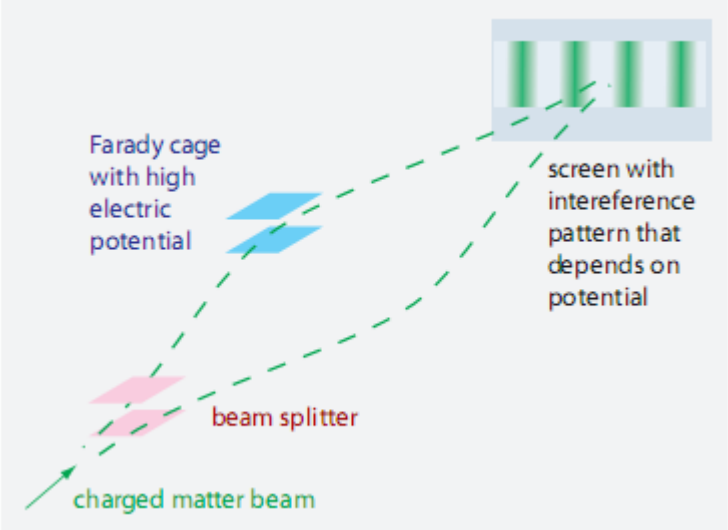
حيث ω عرض التل و v ارتفاعه ، و m & T هما كتلة و الطاقة الحركية للجسيم . من أجل جملة ذات عدد كبير من الجسيمات فإن الاحتمال (في الأكثر) هو جداء الاحتمالات للجسيمات المختلفة .

لنأخذ حالة سيارة في مرآب و نفترض أن السيارة مكونة من 10^{28} ذرة عند درجة حرارة الغرفة . المرآب النوعي يمكن أن يكون سماكة جداره 0.1 m و ارتفاع كمونه V = 1 KeV = 160 aJ من أجل مرور الذرة . نحصل على احتمال إيجاد السيارة خارج المرآب بالشكل :

$$P \approx \left(10^{-(10^{12})}\right)^{(10^{28})} \approx 10^{-(10^{40})} . \qquad (37)$$

إن صغير هذه القيمة (فقط حاول كتابتها ، كي تكون مقتنعا) (تحدي 72 e) هو سبب أنها لا تؤخذ أبدا بالحسبان من قبل الشرطة عندما يبلغ عن فقدان سيارة . (في الحقيقية الاحتمال حتى أصغر بكثير . هل يمكنك على الأقل تسمية أثر واحد تم نسيانه في هذا الحساب البسيط ؟) (تحدي 73 s) .

من الواضح أن النفقية يمكن أن تكون مهمة بالنسبة للجمل الصغيرة المكونة من بضع جسيمات ، و من أجل الحواجز الرقيقة ذات سماكة من المرتبة $\hbar/\sqrt{2m(V-T)}$.



الشكل 49 – كمون كهربائي متموضع في مقياس تداخل يؤدي إلى انزياح نموذج التداخل

مثلا النفقية لذرات وحيدة تلاحظ في الأجسام الصلبة عند درجات حرارة عالية ولكنها ليست مهمة في الحياة اليومية . بالنسبة للإلكترونات فإن الأثر هو أكثر شدة : عرض الحاجز ω لأثر نفقي مهم هو :

$$w \approx \frac{0.5\ \text{nm}\ \sqrt{\text{aJ}}}{\sqrt{V-T}} . \qquad (38)$$

عند درجة حرارة الغرفة فإن الطاقة الحركية T هي من مرتبة 6zJ و زيادة درجة الحرارة بوضوح يزيد النفقية . بالنتيجة تعبر الإلكترونات نفقيا بسهولة تماما عبر حواجز يبلغ عرضها بضع ذرات . في الحقيقة كل صمام تلفزيون يستخدم النفقية عند درجة حرارة عالية لتوليد حزمة إلكترونية تنتج الصورة . و التسخين الضروري هو سبب أن صمامات التلفزيون في الماضي كانت تستغرق بعض الوقت لتعمل .

إن العبور النفقي للإلكترونات أيضا يحد من الحجم الفيزيائي لذواكر الحاسب . شرائح الذاكرة لا يمكن صنعها صغيرة بشكل اعتباطي . الدارات المتكاملة السيلكيونية ذات سعة تيرا بايت من ذاكرة الوصول العشوائي RAM ربما لن توجد أبدا . هل يمكنك تخيل لماذا ؟ (تحدي 74 s) .

في الحقيقة النفقية تحد من عمل أي نوع ذاكرة التي تتضمن دماغنا ، في الحقيقة إذا كنا أعلى حرارة من 37 ^{o}C فإننا لن نتذكر أي شيء !

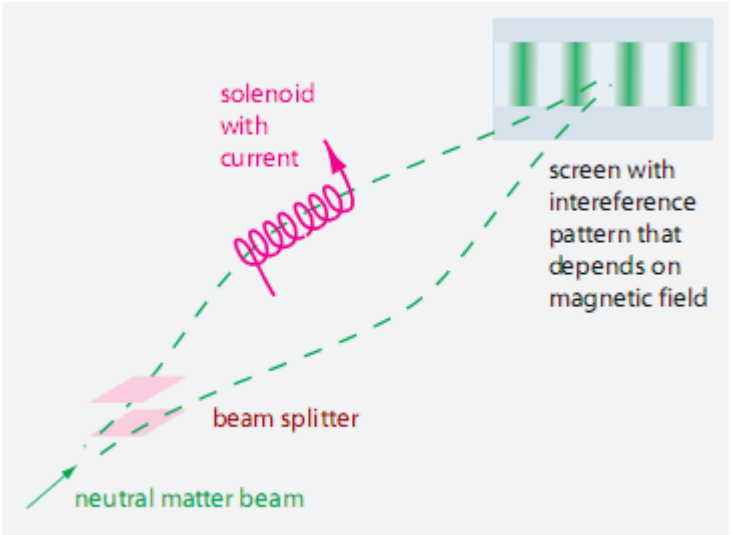
نظرا لأن الضوء مكون من جسيمات ، يمكن أيضا أن يعبر نفقيا عبر حواجز الكمن . أفضل – أو أعلى – حواجز كمون للضوء هي المرايا ، المرايا لها ارتفاعات حاجز من مرتبة أتوجول . النفقية تقتضي أن الضوء يمكن أن يكشف خلف أي مرآة . هذا ما يعرف بالأمواج سريعة الزوال و التي تم كشفها و هي تستخدم في تجارب عديدة عالية الدقة و أجهزة .

طور الكم

لقد رأينا أن مطال تابع الموجة ، مطال الاحتمال ، يبين نفس آثار أي موجة : التشتت و التخامد . و نعود الآن لطور تابع الموجة و ندرسه بمزيد من التفصيل .

بينما مطال تابع موجة سهل التصور ، تماما فكر بكثافة غيمة حقيقية (الجذر التربيعي) و الطور يحتاج لجهد أكبر .

كما ذكرنا ، توابع الحالات أو الموجة هي غيوم ذات طور محلي : هي غيوم لأسهم دوارة أي غيوم لأجسام تقوم بالتدوير و يمكن أن تجعل تدور . في حال غيمة الماء اليومية فإن الدوران الموضعي للقطيرات ليس له أثر على الغيمة . على العكس ، في نظرية الكم فإن الدوران المحلي للغيمة بالتالي يغير موضعيا طورها ، و له أثر قابل للقياس . لندرس هذه النقطة .



الشكل 50 – الحقول المغناطيسية تغير طول الجسيم البرام

إن طور أمواج مادية حرة يتصرف مثل طور الفوتونات : هو يتطور مع الزمن و بالتالي يتزايد على طول مسار الجسيم المتحرك . (صفحة 56) . الطور يمكن تصويره بسهم دورا صغير . السرعة الزاوية التي يدور بها الطور تعطى بالعلاقة الشهيرة $\omega = E/\hbar$ باختصار ،

- يمكننا تصوير تابع الموجة لجسيم كمي حر كغيمة متحركة من الأسهم ، السهم تدور بتردد ثابت بينما الغيمة تنتشر بنفس الوقت .

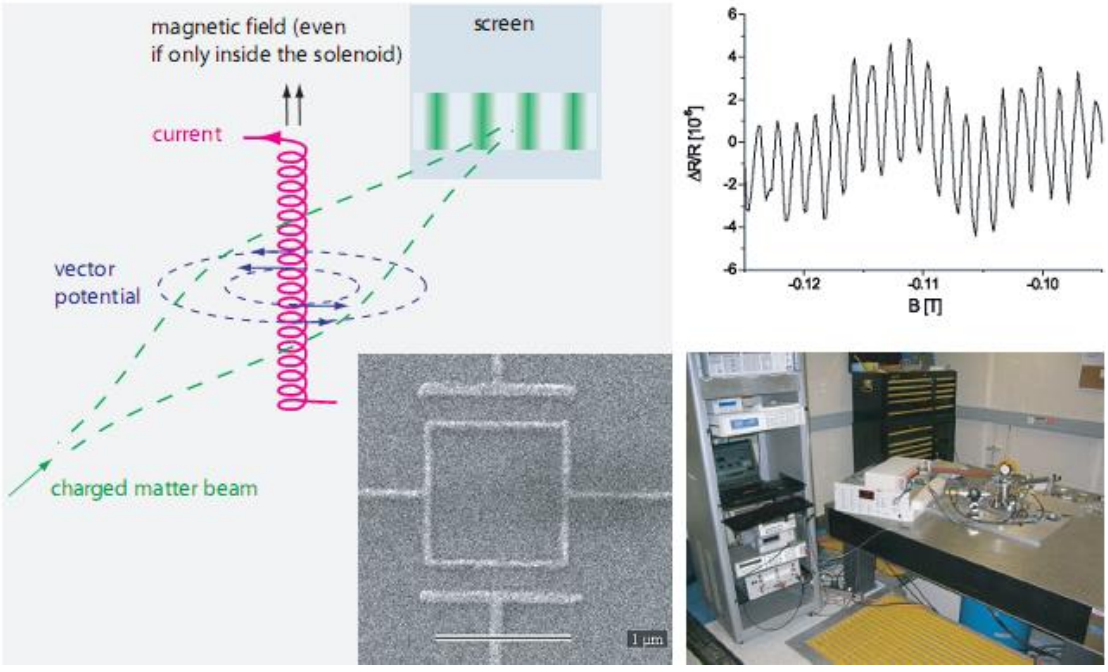
فوق كل شيء ، الطور هو ناحية لتابع الموجة الذي يؤدي إلى تأثيرات تداخل. عندما يفصل تابعي موجة جزئيين و يجمعان بعد تغير طوري نسبي ، فإن تغير الطور سيحدد نموذج التداخل . وهذا هو أصل قياسات تداخل الحزمة الإلكترونية المبين في الشكل 38 . بدون طور الكم ، لن يكون هناك أي انطفاء / زوال / انقراض و لن يكون هناك تداخل.

طور تابع الموجة يمكن أن يتأثر بعدة طرق . أبسط طريقة هي استخدام الحقول الكهربائية . إذا كان تم تقسيم تابع الموجة لجسيم مشحون وتم قيادة جزء منه في منطقة ذات حقل كهربائي ، فإن تغير الطور سيحدث . و الترتيب مبين في الشكل 49 .

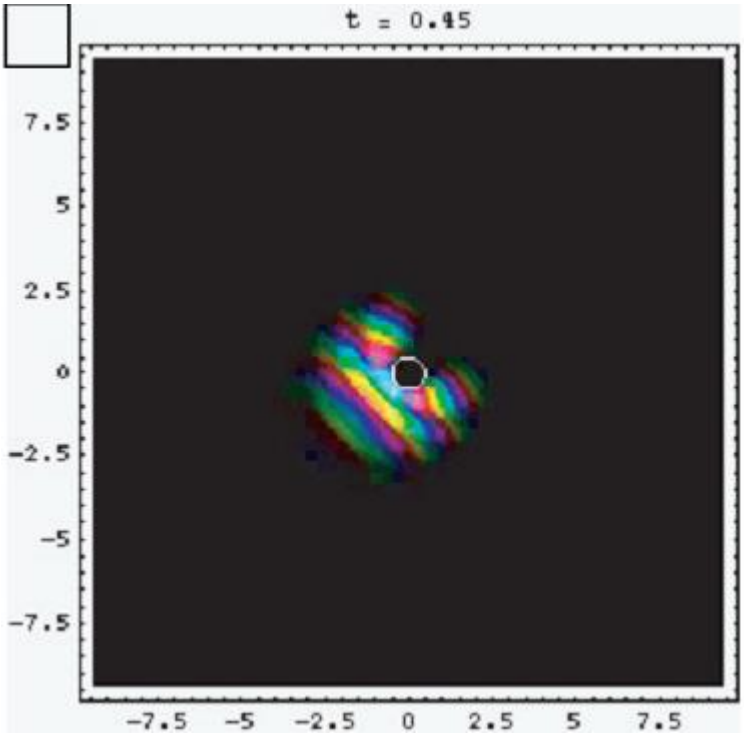
إن التغير الدوري للكمون الكهربائي سيعطي انزياحا دوريا لنموذج التداخل . و هذا يلاحظ حقيقة .

الحالة البسيطة الأخرى للتعامل مع الطور مبينة في الشكل 50 : أيضا تغيرات الحقل المغناطيسي تغير طور الجسيم المشحون البرام و بالتالي تؤثر على سلوك التداخل .

تبين تجربة شهيرة أهمية الطور حتى في طريقة أكثر إدهاشا (مرجع 57) : أثر أهارونوف – بوم . والثر شهير لسببين: الأول أنه مخالف للحدس وقد تم توقعه قبل ملاحظته . أنظر للجملة في الشكل 51 . الموجة المادية لجسيمات مشحونة تنقسم إلى اثنتين بواسطة أسطوانة – متوضعة بشكل قائم مع مسار المادة و موجة المادة تعاود الاتحاد خلفها . و داخل الأسطوانة هناك حقل مغناطيسي و في الخارج لا يوجد . (الطريقة البسيطة لتحقيق مثل هذه الأسطوانة هو وشيعة طويلة) . فيزياء الكم تتوقع أن نموذج التداخل سيتم ملاحظته و أن موضع القطاعات سيعتمد على قيمة الحقل المغناطيسي

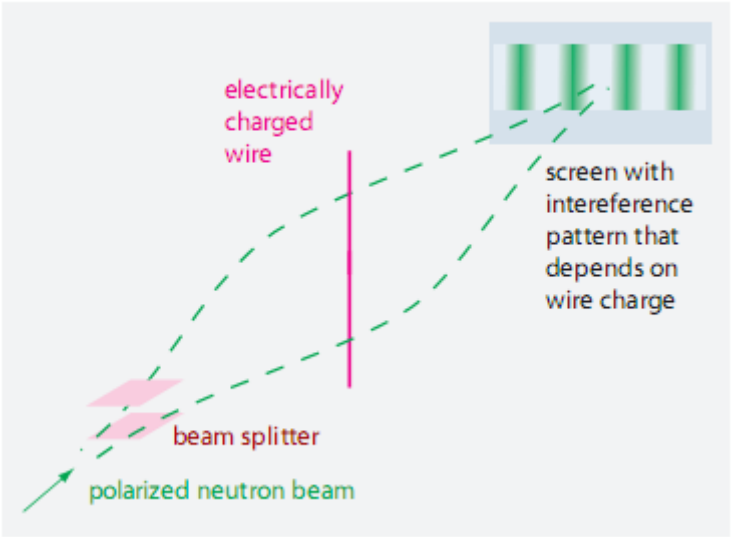


الشكل 51 – أثر أهارونوف – بوم : تأثير شعاع الكمون المغناطيسي على التداخل (يسار) و تأكيد القياس (يمين) باستخدام عينة ميكروسكوبية التي تنقل الإلكترونات في أسلاك معدنية رفيعة



الشكل 52 – حركة تابع الموجة حول وشيعة يظهر اثر أهارونوف- بوم . كثافة الحالة تظهر بواسطة سطوه و الطور المحلي مرمز لونيا

هذا يحدث حتى بالرغم من أن الموجة لا تدخل أبدا المنطقة ذات الحقل ! الأثر المدهش الذي لوحظ في تجارب لا حصر لها .



الشكل 53 – أثر أهارونوف – بوم : تأثير شحنة على الطور يؤدي إلى تداخل حتى من أجل النيوترونات المتداخلة

سبب أن أثر اهارونوف – بوم بسيط : بالنسبة لجسيم مشحون فان طور تابع الموجة تحدد بالكمون الشعاعي A و ليس بالحقل المغناطيسي B . الكمون الشعاعي حول وشيعة لا يتلاشى – كما نعلم من الفقرة حول الديناميك الكهربائي (مجلد III ، صفحة 82) ولكنه يدور حول الوشيعة . هذا الدوران يميز طرفي الوشيعة و يؤدي إلى انزياح طوري و الذي يعتمد فعلا على قيمة الحقل المغناطيسي و بالتالي ينتج تداخل ، حتى بالرغم من أن الجسيم لا يتبادل التأثير أبدا مع الحقل المغناطيسي نفسه .

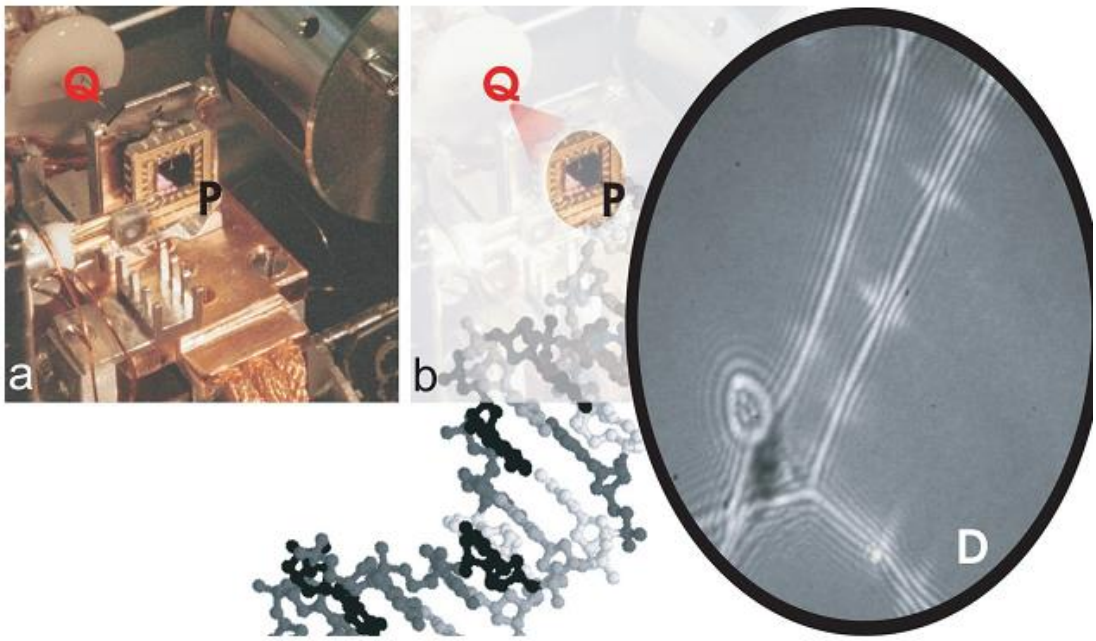
إن المثال الآخر على التعامل مع الطور هو ما يعرف بأثر أهارونوف – كاشر ، الذي حتى يحدث في الجسيمات الحيادية طالما أن لها عزم مغناطيسي ، مثل النيوترونات . إن طور نيوترون مستقطب سيتأثر بالحل الكهربائي بحيث أن الترتيب المبين في الشكل 53 سيبين نموذج تداخل الذي يعتمد على الكمون الكهربائي المطبق .

الحالة الأخرى لتعامل الطور ستعرض لاحقا :أيضا حقول الجاذبية يمكن أن تستخدم لتدوير توابع الموجة . حتى التسارع الناتج عن الحركة الدورانية يمكن أن يقوم بذلك . وفي الحقيقة ، كان من الممكن قياس دوران الأرض بمراقبة تغير نماذج تداخل حزم النيوترونات (مرجع 58) .

النوع المهم الآخر من التجارب التي تتعامل مع طور توابع الموجة هي ممكنة بواسطة الظواهر الكمية الماكروسكوبية . في الناقلية الفائقة و في السيولة الفائقة ، فإن طور تابع الموجة يتم التعامل معه بانتظام / التأثير عليه بواسطة الحقول الكهربائية و المغناطيسية . هذه الإمكانية لها العديد من التطبيقات الفنية المهمة . مثلا ، ما يعرف بأثر جوزيفسون يستخدم لقياس فروقات الكمون الكهربائية بقياس تردد الأمواج الراديوية الصادرة و ما يعرف بأجهزة التداخل الكمية للناقلية الفائقة أو SQIDs تستخدم لقياس الحقول المغناطيسية الصغيرة .

نلاحظ أن هذه التجارب تؤكد أن الطور المطلق لتابع الموجة لا يمكن قياسه . لكن الأطوار النسبية و فروقات الطور أو تغييرات الطور يمكن قياسها . هل يمكنك تاكيد هذا ؟ (تحدي 75e) .

كل تأثيرات انزياح الطور المعروضة تم قياسها في العديد من التجارب . و إن الطور هو ناحية أساسية من تابع الموجة : إن الطور يؤدي إلى تداخل و هو السبب الرئيسي من أجل تسميته بتابع الموجة في المقام الأول . كما في أي موجة فإن الطور يتطور عبر الزمن و يمكن أن يتأثر بالعديد من التأثيرات الخارجية . فوق كل شيء التجارب تبين أن الجسيم الكمي المتموضع بالتالي عند انتشار تابع الموجة يمكن إهماله و هو يتخيل بشكل أفضل كسهم دوار



الشكل 54 - هولوغرام إلكتروني لجزيئات DNA

على العكس فإنه متى كان الانتشار لا يمكن إهماله فإن تابع الموجة يتخيل بشكل أفضل كموجة من الأسهم التي تدور في كل نقطة من الفراغ .

هل يمكن لحزمتين إلكترونيتين أن تتداخلا ؟ هل هناك حزم إلكترونية متماسكة ؟

هل توجد منابع الضوء المتماسك ؟ (مرجع 59) . إن السؤال مخادع . النتائج في المراجع مثل المبين في الشكل 54 تنص على أنه من الممكن صنع هولوغرامات بواسطة حزم إلكترونية .* لكن عندما يسأل المرء هؤلاء الباحثين حول معنى التماسك فإنهم يجيبون بأن تماسك الإلكترونات يكون فقط عرضاني و ليس طولاني . التماسك العرضاني يحدد بالحجم الممكن لجبهات الموجة ذات طور معين . الحد العلوي لهذا الحجم يعطى بالتأثيرات المتبادلة مثل الحالة التي تملكها مع بيئته . و كل هذا السلوك كما هو متوقع من أجل التماسك الفعلي .

لكن مفهوم التماسك العرضاني هو مفهوم خاطئ . المقدرة على التداخل مع الذات كما يقتضيه مصطلح التماسك العرضاني ، ليس التعريف الصحيح للتماسك . التماسك العرضاني سواء كان من أجل الفوتونات أو من أجل الجسيمات المادية ، فقط يعبر عن صغر منبع الجسيمات . إن كلا من المصابيح الصغيرة (و الليزرات) يمكن أن يبدي تداخل عندما تقسم الحزمة و يعاد جمعها بواسطة طول المسار المطابق و هذا ليس إثباتا على تماسك الحقل الضوئي . التبرير المشابه يبين أن الأحادية اللونية ليست إثباتا للتماسك كذلك.

يقال أن الحالة متماسكة إذا كانت تملك طور معرف جيدا في كل مجال معطى من الفراغ أو الزمن . إن حجم المنطقة الفراغية أو المجال الزمني يعرف درجة التماسك . هذا التعريف يعطي أطوال تماسك من مرتبة حجم المنبع من أجل منابع غير متماسكة . حتى من أجل طول تماسك صغير فإن حجم نموذج التداخل أو المسافة d بين القيم العظمى يمكن ن يكون أكبر بكثير من طول التماسك l أو حجم المنبع s .

---

*في 2002 ، أول هولوغرامات تم نتاجها استخدمت حزم النيوترونات . (مرجع 60)

باختصار ، الحجم الكبير (أو الفترة المستمرة في الزمن) لنموذج تداخل لوحده ليس إثبات للتماسك . لنتذكر الوضع بالنسبة للضوء . إن المنبع الضوئي متماسك إذا كان ينتج موجة جيبية تقريبية عبر طول معين من الزمن . بسبب علاقة عدم التحديد في أي حزمة متماسكة للضوء (صفحة 47) يكون عدد الفوتونات غير محدد . إن نفس الشرط يطبق على الحزم الإلكترونية المتماسكة : العدد غير المحدد من الإلكترونات اللازم من أجل التماسك . ها مستحيل حيث أن الإلكترونات تحمل شحنة مصونة . الحزم الإلكترونية غير موجودة .

في الملخص حتى بالرغم من أن الإلكترون يمكن أن يتداخل مع نفسه، و حتى بالرغم من أنه من الممكن إنتاج تداخل بين منبعين ضوئيين فإن التداخل بين منبعين إلكترونيين مستحيل . في الحقيقة لا أحد قط قام بإنتاج تداخل بين منبعين إلكترونيين ليس هناك مفهوم تقليدي للتماسك من أجل الحزم الإلكترونية

مبدأ الفعل الأقل في فيزياء الكم

في الطبيعة تحدث الحركة بشكل يقلل التغير . في الحقيقة في الفيزياء الكلاسيكية فإن مبدأ أقل الفعل (مجلد I ، صفحة 252) أو مبدأ الكسل الكوني وحالاته : في الطبيعة حركة الجسيم تحدث على طول ذلك المسار الخاص ، من كل المسارات الممكنة ذو نفس النقاط النهائية التي من أجلها يكون الفعل أصغري . هذا المبدأ للكسل الكوني أو الفعالية الكونية تم التعبير عنه رياضيا بالقول أنه في الطبيعة التغير δS للفعل هي صفر . الفعل أو التغير الأصغري يشرح كل معادلات التطور الكلاسيكي . نحن الآن نقلنا هذه الفكرة إلى المجال الكمي .

من أجل الجمل الكمية ، فإننا بحاجة لإعادة تعريف مفهوم الفعل و مفهوم التغير : أولا ، علينا أن نجد وصف الفعل الذي يستند إلى العوامل ، ثانيا نحن بحاجة لتعريف تغير الفعل بدون مسارات حيث أن مفهوم المسار لا يوجد في الجمل الكمية

، ثالثا نظرا لأن هناك أصغر فعل ممكن في الطبيعة فإن التغير المتلاشي ليس مفهوم معرف بوضوح و علينا التغلب على هذه العقبة .

هناك طريقتين أساسيتين لتحقيق هذا الهدف : وصف حركة الجمل الكمية كتنضد لكل المسارات الممكنة ، أو وصف الفعل بمساعدة توابع الموجة . وكلا الطريقين متكافئين .

في الطريقة الأولى ، صيغة تكامل المسار ، حركة الجسيم الكمي توصف بشكل تنضد ديموقراطي للحركات على طول كل المسارات الممكنة (نسمي هذا نموذج السهم أعلاه) (صفحة 56) . من أجل كل مسار تطور السهم يحدد و في النقطة النهائية الأسهم من كل المسارات تجمع . الفعل من أجل كل مسار هو عدد الدورات التي يقوم بها السهم على طول المسار . النتيجة من هذا التمرين هو أن المسار الذي من أجله يقوم السهم بأصغر عدد من الدورات يكون عادة (لكن ليس دائما) المسار الأكثر احتمالا . و إن الدراسة الأكثر دقة تبين أن الجمل الماكروسكوبية الكلاسيكية دائما تتبع فقط مسار أصغر فعل ، بينما الجمل الكمية تتبع كل المسارات .

في الطريق الثانية للفيزياء الكمية ، يعرف الفعل بمساعدة توابع الموجة ، و في الفيزياء الكلاسيكية نعرف الفعل (أو التغير) بأنه تكامل اللاغرانجيان بين النقاط الابتدائية و النهائية في الزمن ، و اللاغرانجيان نفسه كفرق بين الطاقة الحركية و الكامنة (مجلد I ، صفحة 247) . في الفيزياء الكمية ، فإن أبسط تعريف هو فعل الكم المعرف من قبل جوليان شفينجر . لنسمي الحالات الابتدائية و النهائية للجملة بـ ψ_i & ψ_f . إن الفعل S بين هاتين الحالتين يعرف بالشكل

$$S = \langle \psi_i | \int L\,dt\,| \psi_f \rangle \ , \qquad (39)$$

حيث L اللاغرانجيان (عامل) . الزاوية بين قوسين تمثل ضرب الحالات و المعاملات كما هو محدد في نظرية الكم .* و بكلمات بسيطة أيضا في نظرية الكم ، الفعل أي التغير الحاصل في الجملة – هو تكامل اللاغرانجيان . إن معامل اللاغرانجيان L يعرف بنفس الطريقة التي في الفيزياء الكلاسيكية : اللاغرانجيان L = T- V هو الفرق بين معاملي الطاقة الحركية T والطاقة الكامنة V . الفرق الوحيد هو أنه في نظرية الكم متحولات كمية الحركة و الموضع للفيزياء الكلاسكية تستبدل بالمعاملات المقابلة لفيزياء الكم .**

لتحويل مفهوم تغير الفعل δS إلى المجال الكمي فقط أدخل جوليان شفينجر العلاقة المباشرة

$$\delta S = \langle \psi_i \,|\, \delta \int L\,dt |\, \psi_f \rangle \ . \qquad (40)$$

إن مفهوم المسار غير لازم في هذه العلاقة ،حيث أن تغير الفعل يستند لتوابع موجة متغيرة بدلا من مسارات جسيم متغيرة . و الشرط الكلاسيكي الأخير كي ينقل إلى المجال الكمي هو أنه بسبب أن الطبيعة كسولة فإن تغير الفعل يجب أن يتلاشى . ولكن في المجال الكمي فإن تغير الفعل لا يمكن أن يكون صفر ، حيث أن الفعل الأصغر ما يكون هو كم الفعل . كما اكتشف جوليان شيفنجر ، هناك فقط طريقة واحدة ممكنة للتعبير عن الأصغرية المطلوبة للفعل :

$$\delta S = \langle \psi_i \,|\, \delta \int L\,dt |\, \psi_f \rangle = -i\hbar\, \delta \langle \psi_i | \psi_f \rangle \ . \qquad (41)$$

هذا ما يعرف بمبدأ كم الفعل و يصف كل الحركة في مجال الكم . تقليديا ، الطرف الأيمن هو صفر – نظرا لأن $\hbar$ يؤخذ مساويا للصفر – و بعدها نستعيد مبدأ الفعل الأصغري $\delta S = 0$ للفيزياء الكلاسيكية . لكن في نظرية الكم متى حاولنا تحقيق تغيرات صغيرة نصادف كم الفعل و تغيرات الطور (النسبية) . هذا يعبر عنه بالطرف الأيمن من العلاقة . الطرف الأيمن هو سبب أن معادلات التطور من أجل تابع الموجة – معادلة شرودنجر من أجل الحالة غير النسبية عديمة البرم أو معادلة ديراك من أجل الحالة النسبية ذات البرم 1/2 تكون صالحة في الطبيعة .

بكلمات أخرى كل الحركة الكمية أي التطور الكمي للحالة ψ أو $|\psi>$ يحدث بحيث أن تغير الفعل يكون نفسه بشكل يكون i مرة من كم الفعل $\hbar$ مضروبا بتغير الجداء السلمي بين الحالة الابتدائية و النهائية .

---

*سوف نتجاوز تفاصيل المصطلحات و الرياضيات هنا ، في أبسط وصف ممكن الحالات هي توابع موجة ، المعاملات تؤثر على هذه التوابع ، و جداء الأقواس المختلفة هو تكامل جداء التابع عبر الفراغ .

**بشكل أكثر دقة ، هناك أيضا الشرط الحاكم لترتيب المعاملات في جداء مختلط ، بحيث أن عدم تبادلية المعاملات يؤخذ بالحسبان . و نحن لن ندرس هذه القضية هنا

في عبارة بسيطة ، في الحركة الحقيقية ، الحالات الوسيطة تكون ثابتة بواسطة شرط أنها يجب أن تقود من الحالة الابتدائية إلى الحالة النهائية بواسطة العدد الأصغر ما يكون للدورات الفعالة لحالة الطور . العامل i يعبر عن تبعية الفعل للدوران لتابع الموجة .

في الملخص ، مبدأ الفعل الأصغر هو أيضا صالح في فيزياء الكم شريطة أن يأخذ المرء بالحسبان أن قيم الفعل الأدنى من $\hbar$ لا يمكن أن توجد في التجارب . إن مبدأ الفعل الأقل يحكم تطور تابع الموجة . مبدأ الفعل الأقل بالتالي يشرح لون كل الأشياء ، كل جوانب علم المواد الأخرى ، كل الكيمياء و كل البيولوجيا و أيضا كما سنرى فيما يلي .

حركة الكوانتونات ذات البرم

" كل شيء يدور

شخص مجهول "

ما هو أصل طور الكم ؟ الفيزياء الكلاسيكية تساعد في الإجابة على السؤال . مثل الأجسام اليومية أيضا الكوانتونات يمكن أن تدور حول محور : نحن نتحدث عن برم الجسيم . لكن إذا كانت جسيمات الكم تستطيع البرم (صفحة 81) فإنها يجب أن تملك كمية حركة زاوية و في الحقيق التجارب تؤكد هذا الاستنتاج .

بشكل خاص ، الإلكترونات لها برم . التفاصيل الكاملة لبرم الإلكترون ستستنتج من التجارب التي أجريت من قبل طالبين هولنديين (مرجع 61) جورج أولنبك و صامويل جودسميت في عام 1925 . وقد كان لديهما إحساس بنشر ما شك به أيضا رالف كورنج : أن الإلكترونات تدور حول محور ذو مسقط مركبة لكمية الحركة الزاوية معطاة بالشكل $\hbar/2$

في الحقيقة هذه القيمة غالبا تسمى البرم 1/2 للاختصار ، وهي صالحة من أجل كل جسيمات المادة الأولية . (على العكس كل جسيمات الإشعاع الأولية لها قي برم تساوي $\hbar$ أو برم 1 للاختصار) .

إذا كان الجسيم البرام له كمية حركة زاوية فإنه يجب أن يكون بالإمكان إعادة ترتيب المحور بتطبيق عزم و مراقبة التقدم ، تحويل البرم في اصطدامات .. الخ وكل هذه التأثيرات في الحقيقة ملاحظة مثلا بتجربة شتيرن –غيرلاخ التي سمحت بكل هذه القياسات . (صفحة 82) . الفرق الوحيد بين برم الجسيم و كمية الحركة الزاوية الكلاسيكية (صفحة 81) هي أن برم الجسيم مكمم كما استنتجنا أعلاه .

بمعنى آخر البرم L لجسيم كمي له كل الخواص للدوران حول محور . بالنتيجة ، الجسيمات الكمية المشحونة التي تبرم تعمل كمغانط ثنائية قطب صغيرة حيث المغناطيس موجهة على طول محور الدوران . إن القوة المقاسة للمغناطيس ثنائي القطب ، عزم مغناطيسي ، متناسب مع البرم و عامل التحويل $e/2m_e$ – كما هو متوقع من الفيزياء الكلاسيكية . بالتالي الوحدة الطبيعية للعزم المغناطيسي للإلكترون هو الكمية $\mu_B = e\hbar/2m_e$ و تسمى ماغنتون بور . وينتج أن العزم المغناطيسي μ للكوانتونات يتصرف بشكل مختلف عن ذلك العائد للجسيمات الكلاسيكية . إن تأثيرات الكم للبرم توصف بما يعرف بالعمل g الذي هو عدد صرف :

$$\boldsymbol{\mu} = g\frac{-e}{2m_e}\boldsymbol{L} = -g\mu_{\mathrm{B}}\frac{\boldsymbol{L}}{\hbar}\,, \quad \text{with} \quad \mu_{\mathrm{B}} = \frac{e\hbar}{2m_e}\,. \tag{42}$$

من الطيوف الضوئية المقاسة ، فقط استنتج أولنبك و جودسميت استنتج عامل g يبلغ 2 للإلكترون (صفحة 106)

كلاسيكيا يتوقع المرء قيمة g=1 و القيمة التجريبية g=2 تم شرحها من قبل ليولينا وماس كأثر نسبي بعد بضع أشهر من اكتشافه التجريبي . (مرجع62) .

بحلول عام 2004 فقد أصبحت التقنيات التجريبية حساسة جدا بحيث أن الأثر المغناطيسي لبرم إلكترون وحيد مرتبط بشائبة (في مادة غير مغناطيسية) يمكن أن يكشف . الآن يأمل الباحثون أن يحسنوا مما يعرف بمجاهر قوة الرنين المغناطيسي حتى تصل للميز الذري .

في عام 1927 اكتشف ولفجانج باولي كيفية تضمين البرم 1/2 في وصف كمي – ميكانيكي : بدلا من تابع حالة موصوف بعدد عقدي وحيد ، فإن تابع الحالة ذو المركبتين العقديتين يكون لازما . إن سبب هذا التعميم هو بسيط . بشكل عام السهم الدوار الصغير الذي يصف حالة الكم لا يدور حول محور ثابت ، كما افترض من قبل معادلة شرودنجر ، محور الدوران أيضا يجب أن يحدد في كل موضع في الفراغ . هذا يقتضي أن البارامترين الإضافيين لازمين عند كل نقطة في الفراغ ، و الذي يجعل عدد البارامترات أربعة أعداد حقيقية أو بشكل مكافئ عددين عقديين . في هذه الأيام معادلة باولي لميكانيك الكم مع البرم هي أساسا ذات أهمية مفهومية لأنها مثل معادلة شرودنجر لا تحقق النسبية الخاصة .

في الملخص ، الوصف غير النسبي للكوانتون ذو البرم يقتضي استخدام توابع الموجة التي تحدد عددين عقديين في كل نقطة في الفراغ و الزمن . إن العدد العقدي الإضافي يصف مستوي الدوران المحلي للبرم . إن فكرة تضمين مستوي الدوران المحلي أيضا استخدم من قبل ديراك عندما أدخل الوصف النسبي لإلكترون و الفكرة أيضا مستخدمة في كل معادلات الموجة من أجل الجسيمات ذات البرم .

معادلات الموجة النسبية

في عام 1899 اكتشف ماكس بلانك كم الفعل . و في عام 1905 نشر ألبرت اينشتاين نظرية النسبية الخاصة ، التي تستند لفكرة أن سرعة الضوء c مستقلة عن المراقب . أول سؤال سأله بلانك لنفسه كان فيما إذا كانت قيمة كم الفعل ستكون مستقلة عن سرعة المراقب . ولقد كان اهتمامه بهذا السؤال الذي أدى به إلى دعوة أينشتاين إلى برلين . بواسطة هذه الدعوة فقد جعل موظف مكتب براءات الاختراع شهيرا في عالم الفيزياء .

التجارب تبين أن كم الفعل في الحقيقة مستقلة عن سرعة المراقب . كل المراقبين تجد نفس القيمة . لتضمين النسبية الخاصة في نظرية الكم فإننا بالتالي بحاجة لإيجاد هاملتوني الكم الصحيح H أي عامل الطاقة الصحيح .

---

*ولفجانج إرنست باولي (ولد عام 1900 في فينا و توفي عام 1958 في زيوريخ) بعمر 21 ، كتب واحد من أفضل النصوص حول النسبية الخاصة و النسبية العامة . وقد كان أول من حسب مستويات الطاقة للهيدروجين باستخدام نظرية الكم ، و اكتشف مبدأ الاستبعاد ،أدخل البرم في نظرية الكم ، واظهر العلاقة بين البرم و الإحصائيات واثبت نظرية CPT ، و توقع بوجود النيوترينو . وقد أعجب بذكائه و خشي من النقد المسلط ، الذي أدى لاسمه الحركي " وجدان الفيزياء " . بالرغم من هذه الصفة فقد ساعد العديد من الناس في أبحاثهم مثل هايزنبرغ في نظرية الكم بدون الإدعاء بأي فضل لنفسه (مرجع 63) . وقد اعتبر من قبل الكثيرين بمن فيهم أينشتاين بأنه أعظم و أكثر الناس حدة في العقل في مجال فيزياء القرن العشرين . و قد كان أيضا شهيرا بأثر باولي أي المقدرة على قدح الكوارث في المخابر ، الآلات و محيطه بمجرد وجوده . كما سنرى قريبا ، يمكن للمرء القول أن باولي فعلا تلقى جائزة نوبل في الفيزياء في 1945 رسميا لاكتشافه مبدأ الاستبعاد والذي قام في النهاية بالإجابة على سؤال كم عدد الملائكة التي يمكن أن ترقص على رأس دبوس .

من أجل الجسيم النسبي الحر ، فإن التابع الهاملتوني الهندسي أي طاقة الجسيم يعطى بالشكل :

$$H = \pm\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \quad \text{with} \quad \boldsymbol{p} = \gamma m \boldsymbol{v} \,. \tag{43}$$

بالتالي يمكننا سؤال ما هو المعامل الهاملتوني المقابل للعالم الكمي ؟ إن أبسط إجابة أعطيت في 1949 من قبل T.D.Newton & E.P.Winger و في عام 1950 من قبل L.L.Foldy & S.A.Wouthuysen . المعامل تقريبا هو نفسه :

$$H = \beta\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \quad \text{with} \quad \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \tag{44}$$

إن الإشارات التي تظهر في المعامل المصفوفي β تميز ، كما سنرى بين الجسيمات و الجسيمات المضادة . الأعداد +1 & -1 تظهر مرتين من أجل الاهتمام باتجاهي البرم الممكنين في كل حالة .

بواسطة هذا المعامل الهاملتوين النسبي من أجل جسيمات البرم 1/2 و مع كل الجسيمات الأخرى يوصف تابع الموجة بأربعة أعداد عقدية ، اثنين من أجل الجسيمات و اثنين من أجل الجسيمات المضادة . لماذا ؟

لقد رأينا أعلاه أن الجسيم الكمي ذو البرم يحتاج لمركبتين عقديتين من أجل حالته (صفحة 104) و هذا ينتج من شرط تحديد ، في كل نقطة في الفراغ ، طول السهم ، طوره و مستوي دورانه (مجلد II ، صفحة 72) . سابقا أيضا وجدنا أن النسبية تطرح آليا الجسيمات المضادة . (سوف ندرس القضية بمزيد من التفصيل فيما يلي) (صفحة 191) . إن كلا من المادة و المادة المضادة بالتالي جزء من أي وصف نسبي للتأثيرات الكمية . و تابع الموجة من أجل جسيم له مركبات متلاشية للجسيم المضاد و العكس بالعكس . إجمالا ، تابع الموجة من أحل الجسيم النسبي ذو البرم 1/2 بالتالي تملك أربعة مركبات عقدية .

إن معامل هاملتون يعطي معامل السرعة v عبر نفس العلاقة التي هي صالحة في الفيزياء الكلاسيكية :

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x} = \beta\frac{\boldsymbol{p}}{\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2}} \,. \tag{45}$$

إن معامل السرعة يبدي استمرار للقيم الخاصة ، من ناقص إلى زائد سرعة الضوء . و السرعة v هي ثابت الحركة كما هي كمية الحركة p و الطاقة

$$E = \sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \,. \tag{46}$$

أيضا كمية الحركة الزاوية المدارية L تعرف كما في الفيزياء الكلاسيكية عن طريق

$$\boldsymbol{L = x \times p} \ . \qquad (47)$$

كمية الحركة الزاوية المدارية L و البرم σ هما ثوابت منفصلة للحركة (مرجع 65) . إن الجسيم (أو الجسيم المضاد) ذو المركبة الموجبة (أو السالبة) لكمية الحركة الزاوية يملك تابع موجة ذو مركبة واحدة فقط غير متلاشية و المركبات الثلاث الأخرى تتلاشى .

لكن للأسف تمثيل الحركة النسبية سميت نسبة إلى فولدي و وثيوسن ليست الأبسط عندما يتعلق الأمر بأخذ التأثيرات البينية الكهرطيسية بالحسبان . إن المطابقة البسيطة بين الأوصاف الكلاسيكية و الكمية – الميكانيكية تضيع عندما يتم إدخال الكهرطيسية . و سوف نحل هذه المشكلة فيما يلي عندما ندرس معادلة تطوير ديراك لتوابع الموجة النسبية (صفحة 188) .

الحركة المقيدة أو المركبة مقابل الكوانتونات الابتدائية

متى يكون جسم مركب و ليس أولي ؟ متى كان يحتوي حركة داخلية أو مقيدة . متى تكون هذه الحالة ؟ نظرية الكم تعطي العديد من الإجابات البراغماتية . أول معيار للتركيبية هو غريب بعض الشيء (مرجع 66) : الجسم يكون مركب عندما تكون نسبته الدورانية المغناطيسية (الجيرومغناطيسية) مختلفة عن تلك المتوقعة بوساطة الديناميك الكهربائي الكمي (صفحة 188) . إن النسبة الدورانية المغناطيسية (الجيرومغناطيسية) γ – يجب ألا تختلط مع عامل التوسع / التمدد النسبي تعرف بأنها النسبة بين العزم المغناطيسي M و كمية الحركة الزاوية L :

$$\boldsymbol{M = \gamma L} \ . \qquad (48)$$

إن النسبة الدورانية المغناطيسية (الجيرومغناطيسية) γ تقاس بواحدات C/kg أي $s^{-1}\,T^{-1}$، (تحدي 76 e) و تحدد مستويات الطاقة لمبادئ البرم المغناطيسي في الحقول المغناطيسية وسوف تظهر لاحقا في سياق التصوير بالرنين المغناطيسي (مجلد V، صفحة 162) . كل المرشحين من أجل الجسيمات الابتدائية لها برم 1/2 و النسبة الدورانية المغناطيسية (الجيرومغناطيسية)من أجل جسيمات ذات البرم 1/2- للعزم المغناطيسي M و الكتلة m يمكن كتابتها بالشكل

$$\gamma = \frac{M}{\hbar/2} = g\frac{e}{2m} \ . \qquad (49)$$

إن معيار الأولية يمكن بالتالي أن ترجع للشرط على قيمة العدد عديم الأبعاد g الذي يسمى بالعامل g . (العلاقة $e\hbar/2m$ غالبا تسمى بماغنتون الجسيم) . إذا اختلف العامل g عن القيمة المتوقعة من قبل الديناميك الكهربائي الكمي للجسيمات النقطية – حوالي 2.0 - فإن الجسم يكون مركب (صفحة 188) . مثلا شاردة الهليوم $^4He^+$ لها برم 1/2 و قيمة g تبلغ $14.7.10^3$. في الواقع نصف قطر شاردة الهليوم هو في الواقع نصف قطر شاردة الهليوم هو 3.10^{-11} متر و من الواضح أنها قيمة منتهية و الشاردة هي شيء مركب . من اجل البروتون عامل g له حوالي 5.6 . في الواقع تعطي التجارب نصف قطر بروتون منته يبلغ حوالي 0.9 fm و يبين أنه يحتوي العديد من المكونات .

النيوترون الذي له عزم مغناطيسي بالرغم من كونه حيادي كهربائيا يجب بالتالي أن يكون مركب . في الحقيقة نصف قطره هو تقريبا نفس قطر البروتون . بشكل مشابه الجزيئات ،الجبال ، النجوم و الناس يجب أن يكونوا مركبين . وفقا لأول معيار الجسيمات الأولية فقط هي اللبتونات (أي الإلكترونات ، الميونات ، التاونات و النيوترنوات) ، الكواركات و البوزونات الوسيطة (مثل الفوتونات ، بوزونات W ، بوزونات Z و الغلوونات) (مجلد V ، صفحة 162)مزيد من التفاصيل حول هذه الجسيمات ستظهر في الفصول حول النواة .

المعيار البسيط الآخر للتركيب تم ذكرها للتو : أي جسم ذو حجم قابل للقياس مركب . هذا المعيار يعطي نفس القائمة للجسيمات الأولية على أنها الأولى . في الحقيقة المعيارين مترابطين و ابسط موديل للبنى المركبة يتوقع أن العامل g يخضع إلى (مرجع 67)

$$g - 2 = \frac{R}{\lambda_C} \qquad (50)$$

حيث R نصف القطر و $\lambda_C = h/mc$ هو طول موجة الجملة . هذه العلاقة هي دقيقة بشكل مدهش من أجل شوارد الهليوم 4 ، الهليوم 3 و البروتونات (تحدي 77e) ، كما يمكن أن تتأكد من ذلك بنفسك ؟ الجداول في الملحق B في المجلد التالي (مجلد V ، صفحة 342) تجلي نفس النقطة . باختصار ، المعيار الثاني من أجل التركيبية مكافئ للأول .

المعيار الثالث من أجل التركيبية هو أعم : أي جسم أكبر من طول كمبتون العائد له هو مركب . المقولة بسيطة . الجسم مركب إذا كان يمكن للمرء أن يكشف الحركة الداخلية أي حركة بعض المكونات . الآن فعل أي جزء ذو كتلة m_{part} تتحرك داخل الجملة المركبة ذات الحجم r تخضع إلى

$$S_{part} < 2\pi r m_{part} c < \pi r m c \qquad (51)$$

حيث m كتلة الجسم المركب ، من ناحية أخرى باتباع مبدأ نظرية الكم ، هذا الفعل يمكن ليكون قابل للقياس يجب أن يكون أكبر من $\hbar/2$. بإدخال هذا الشرط نجد أنه من أجل أي جسم مركب *

$$r > \frac{\hbar}{2\pi m c} . \qquad (52)$$

الطرف الأيمن يختلف فقط بعامل يساوي $4\pi^2$ عما يعرف بطول كومبتون (الطول الموجي) لجسم .

$$\lambda = \frac{h}{mc} \qquad (53)$$

بالتالي أي جسم أكبر من طول موجة كومبتون الخاصة به هو مركب و أي جسم أصغر من الطرف الأيمن للعلاقة (52) هو أولي . مرة ثانية فقط اللبتونات ، الكواركات و البوزونات الوسيطة تجتاز هذا الاختبار (من أجل بوزون هيجس المكتشف في عام 2012 فإن الاختبار لم يتم بعد ، ولكن يتوقع أن يحقق ذلك أيضا) . كل الأجسام الأخرى هي مركبة . باختصار هذا المعيار الثالث ينتج نفس القائمة التي للمعايير السابقة. هل يمكن شرح لماذا ؟ (تحدي 79 e).

المعيار الرابع للتركيبية يستشهد به بانتظام من قبل ستيفن واينبرغ : الجسيم هو ابتدائي إذا ظهر في اللاغرانجيان للموديل القياسي لفيزياء الجسيمات ، أي في وصف الأحجار الأساسية لبناء الطبيعة . (مجلد V ، صفحة 261).هل يمكنك بيان أن هذا المعيار ينتج من المعايير السابقة ؟ (تحدي 80 s) .

من المدهش أننا لم ننه بعد هذا الموضوع . حتى العبارات الأغرب حول التركيبية ستظهر عندما يتم أخذ الجاذبية بالحسبان . مثل المريض : إنه جدير بها . (مجلد VI ، صفحة 313)

---

*هل يمكنك إيجاد العامل المفقود المساوي إلى 2 ؟ (تحدي 78 ny) . و افتراض أن المركبات / المكونات يجب دائما أن تكون أخف من المركب هي صالحة ؟

فضول و تحديات مرحة حول الحركة الكمية للمادة

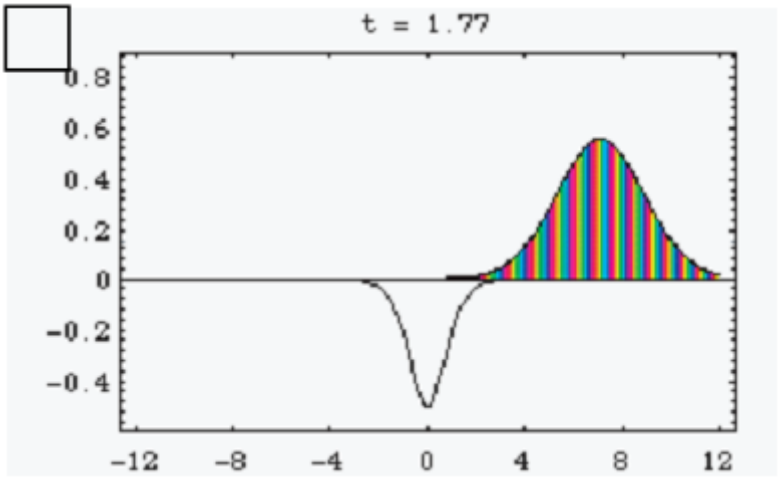
" إن الفيزيائيين الأفضل هم البسطاء / السذج جدا ، و هم يعتقدون دائما بالأمواج الحقيقية أو الجسيمات .*

أنطون تسايلنجر "

خذ حافة أكثر سكين حدة أو رأس إبرة يمكنك التفكير بها : كم الفعل يقتضي أن حدودها ليست حادة و لكن ضبابية ، مثل حدود الغيوم . خذ أكثر جسم صلب صلابة يمكن التفكير به ، مثل الألماس أو كتلة من التنغستين : كم الفعل يقتضي أن سطحها هو طري بعض الشيء . كل التجارب تؤكد هذه العبارات . لا شيء في الطبيعة هو حقيقية حاد أو حقيقة صلب . فيزياء الكم بالتالي يخالف العديد من أفكار علماء الذرة الإغريق القدماء .

* *

هل توجد ذرات الهيدروجين ؟ أكثر أنواع الذرات تم تصويرها بواسطة المجاهر ،و صورت فوتوغرافيا تحت الإضاءة ، و رفعت واحدة تلو الأخرى وحتى حركت بواسطة الإبر ، واحدة تلو الأخرى كما تبين الصورة صفحة 342 في المجلد I ؟ الباحثون حتى حركوا ذرات وحيدة باستخدام حزم الليزر لدفعها (مرجع 68) . و لكن ليس أي من هذه التجارب قاس أو صور ذرات الهيدروجين . هل هذا سبب الشك بوجود ذرات الهيدروجين ؟ (تحدي s 81) إن أخذ هذه المناقشة غير الجادة جدا يشكل جدي يمكن أن يكون ممتعا جدا .



الشكل 55 – بئر الكمون الخاص التي لا يؤثر على تابع الموجة

هناك كمونات خاصة التي ليس لها تأثير على تابع الموجة . يبين الشكل 55 مثالا على ذلك . هذا الكمون له معامل انعكاس صفري من أجل كل الطاقات ، الموجة المشتتة ليس لها جزء منعكس . السبب الرياضي هو رائع . بئر الكمون له شكل سوليتون معادلة Korteweg-de Vries وهذه المعادلة مرتبطة بمعادلة شرودنجر .

* *

أي جملة مقيدة في حالة غير نسبية بدون كمية حركة زاوية تخضع للعلاقة (مرجع 69)

$$\langle r^2 \rangle \langle T \rangle \geq \frac{9\hbar^2}{8m}, \qquad (54)$$

حيث m الكتلة المنخفضة / المرجعة و T الطاقة الحركية للمركبات و r حجم الجملة . هل يمكنك استنتاج هذه النتيجة ، و التأكد منها من أجل الحالة الأرضية للهيدروجين .(تحدي s 85) .

* *

في المدرسة الثانوية ، من المنطقي غالبا عرض توابع موجة الإلكترون كنوع خاص من المادة التي تشبه السائل ، تسمى الإلكترونيوم ، التي لها كثافة شحنة سلبية . في هذا العرض فإن الذرة لها نواة موجبة محاطة بغيمة إلكترونيوم . و تشويه غيمة الإلكترونيوم حول النواة يتطلب طاقة و هذا يحدث عندما فوتون ذو تردد صحيح يتم امتصاصه مثلا . عندما الذرات من النوع الصحيح تقترب من بعضها البعض ، فإن غيوم الإلكترونيوم غالبا تشكل جسور مستقرة – الروابط الكيماوية

* *

نظرية الكم تسمح للعديد من الحالات المقيدة غير العادية . عادة نفكر بالحالات المقيدة كحالات ذات طاقة منخفضة . لكن هناك أوضاع التي فيها تظهر الحالات المقيدة بسبب الإجبار في كمونات اهتزازية (مجلد I، صفحة ، صفحة 317) لقد صادفنا مثل هذه الحالة في الفيزياء الكلاسيكية : النواس المقاد شاقوليا المقلوب الذي يبقى شاقوليا بالرغم من كونه غير مستقر .الأوضاع المشابهة توجد أيضا في فيزياء الكم . الأمثلة هي مصائد باول ، ذرة الهليوم و الشوارد السالبة ، إلكترونات التروجان ، و المسرعات الجسيمية (مرجع 70) .

* *

غالبا يقرأ المرء أن الكون يمكن أن يكون قد ولد من تنبذب كمي . هل يمكنك شرح لماذا هذه العبارة غير منطقية ؟ (تحدي s 86)

* *

ملخص عن حركة كوانتونات المادة

في الملخص ، حركة الكوانتونات ذات الكتلة أي جسيمات المادة الكمية يمكن أن توصف بطريقتين :

- عند تكبير عال ، فإن جسيمات المادة الكمية توصف بواسطة توابع الموجة التي تتحرك مثل غيوم متقدمة ، دوارة و مبادرة من الأسهم . و منحى الغيمة المحلية ، أو الطور المحلي يتبع حركة تذبذبية . إن مربع تابع الموجة أي كثافة الغيمة هو احتمال إيجاد الجسيم في بقعة معينة
- عند النظر إليه من بعيد عند تكبير منخفض فإن الجسيم الكمي ذو الكتلة المتحرك يتصرف مثل سهم وحيد متقدم ، دوار و مبادر . و تفاصيل الدوران و التقدم للسهم تعتمد على الطاقة و كمية حركة الجسيم و الكمون الذي يخضع له . و السهم هو مطال احتمالي : مربع الطول للسهم هو احتمال ملاحظة الجسيم . إذا كان الجسيم يمكن أن يصل من نقطة بدء إلى نقطة نهاية بعدة طرق فإن مطالات الاحتمال من أجل كل منها يتم جمعها .

إن السهم الوحيد الدوار ينتج من متوسط الغيمة . إن السهم الوحيد يجمع خواص الجسيم و خواص الموجة . إن الدوران الكامل للسهم يقابل كم الفعل $\hbar$. هذه الميزة الأساسية تقتضي أن الجسيم غير النسبي الذي برمه يمكن أن يهمل ينتج من معادلة شرودنجر و أن الإلكترون النسبي ينتج من معادلة ديراك . إن معادلة ديراك تتفق مع كل التجارب المعروفة . بشكل خاص ، معادلة ديراك تصف كل علم المواد ، الكيمياء و البيولوجيا كما سنشاهد .

للاستمرار بأكبر فعالية في مسارنا عبر فيزياء الكم فإننا ندرس ثلاثة مواضيع مهمة : عدم قابلية تمييز الجسيمات من نفس النوع ، و برم الجسيمات الكمية و معنى الاحتمالات .

الفصل الخامس

تباديل الجسيمات – هل الجسيمات مثل القفازات ؟

لماذا نحن قادرين على التمييز بين التوائم ؟ لماذا نميز ما يبدو متشابها ، مثل النسخة عن الأصل ؟ أكثرنا مقتنع أنه متى قارنا الأصل مع النسخة يمكن أن نجد فرقا . هذا القول ينتج أنه صحيح أيضا في مجال الكم ولكن النتيجة ليست بسيطة

فكر بأي طريقة التي تسمح لك بتمييز الأجسام : يمكنك إيجاد أنك ستصير في مشكلة بالنسبة للجسيمات النقطية (تحدي 87s) . بالتالي في مجال الكم شيء ما يجب أن يتغير حول مقدرنا على تمييز الجسيمات و الأجسام . يمكننا القول أن الفروقات بين الجسم الأصلي و النسخة عنه يمكن دائما أن تختفي : سيكون من الكافي استخدام نفس العدد و النوع من الذرات . في الحقيقة كم الفعل يبين أن هذا غير كاف حتى بالرغم من أن كل الذرات من نفس النوع هي في الحقيقة نسخ غير قابلة للتمييز عن بعضها البعض . فيما يلي سندرس النتائج الأكثر أهمية على الحركة لعدم قابلية التمييز للذرات و عدم قابلية التمييز للأجسام الماكروسكوبية .

تمييز الأجسام ماكروسكوبية

إن عددا من الخواص المهمة للأجسام سيتم الإشارة إليها بدراسة الأحجيات التشكيلية : مسألة القفاز . و هي تسأل :

كم عدد قفازات الجراح (لليد اليمنى) ضرورية إذا كان هناك m طبيب سيجري جراحة لـ w مريض بشكل معقم ، بحيث أنه لا يمس أي أحد سوائل جسم أي أحد آخر ؟

نفس المسألة أيضا تظهر في حالات أخرى . مثلا أيضا تطبق على الحاسبات ، الواجهات و فيروسات الحاسب أو العوازل ، الرجال و النساء – و بالتالي تسمى مسألة العازل (مرجع 71). كي تكون واضحة ، العدد الأمثلي للقفازات ليس جداء mw . في الحقيقة المسألة لها ثلاث حالات فرعية .

- الحالة البسيطة عندما m = w =2 و التي تعطي الفكرة الأكثر أهمية اللازمة (تحدي 88 s) . هل تستطيع إيجاد الحل الأمثل و الطريقة ؟
- في حال w=1 ، و m فردي الحل هو (m+1)/2 قفاز (تحدي 89 e) . العلاقة المقابلة (w+1)/2 تصح من أجل حالة m=1 و w فردي . هذا هو الحل الأمثل كما يمكن أن تتأكد من نفسك بسهولة .
- الحل ذو الطريقة البسيطة من أجل كل الحالات الأخرى (مرجع 72) معطى بالشكل [2w/3+m/2] قفاز حيث [x] تعني أصغر عدد صحيح أكبر أو يساوي x . مثلا من أجلطبيبين و ثلاثة مرضى هذا يعطي فقط ثلاثة قفازات . (لكن هذه العلاقة لا تعطي دائما الحل الأمثل ، القيم الأفضل موجودة من أجل الحالات الفرعية) (تحدي 90 e) .

استمتع بالعمل في الأحجية . وسوف تجد أن الخواص الثلاث الأساسية للقفازات تحدد الحل . أولا القفازات ليس لها وجهين ، الداخل والخارج واحد ، الذي يمكن تمييزه عن بعضه البعض . ثانيا القفازات تقلب و تبدل لليد الأخرى و يمكن بالتالي تمييزها عن القفازات التي لا تقلب . ثالثا القفازات يمكن تمييزها عن بعضها البعض .

الآن لنعد للهدف الأصلي : هل الخواص الأساسية الثلاث للقفازات أيضا تطبق على جسيمات الكم ؟ سوف ندرس قضية الطرف المضاعف للجسيمات الكمية في الجزء الأخير من صعودنا الجبل (مجلد VI ، صفحة 112) . السؤال حول فيما إذا كانت الجسيمات يمكن أن تقلب من الداخل للخارج سيكون مهم من أجل وصفها و حركتها . وسوف أيضا ندرس الفرق بين الجسيمات اليمنى و اليسرى ، بالرغم من أن هذا سيكون في الجزء التالي من مغامرتنا (مجلد V ، صفحة 245).

في الفصل الحالي سنركز على القضية الثالثة وهي فيما إذا كانت الأجسام و الجسيمات يمكن دائما تمييزها عن النسخ . وسوف نجد أن الجسيمات الأولية لا تتصرف مثل القفازات –ولكن بشكل مدهش أكثر بكثير .

في الحياة اليومية التمييز للأجسام الماكروسكوبية يمكن أن يتم بطريقتين .من ناحية ، نحن قادرين على تمييز الأجسام – أو الناس عن بعضهم البعض لأنهم مختلفين في خواصهم الذاتية مثل الكتلة ، اللون ، الحجم أو الشكل . من ناحية أخرى نحن قادرين على تمييز الأشياء حتى إذا كان لها نفس الخواص الذاتية . أي لعبة بليارد تبين لنا أنه باتباع مسار كل كرة يمكننا تمييزها عن الكرات الأخرى . باختصار يمكن تمييز الأجسام ذات الخواص المتطابقة باستخدام حالتها .

إن حالة كرة البليارد تعطى بموضعها ، و كمية حركتها الخطية و الزاوية . و نحن قادرين على تمييز كرتي بليارد متطابقتين بسبب أن خطأ القياس لموضع كل كرة هو أصغر بكثير من حجم الكرة نفسها . إن الحالات المختلفة لكرتي بليارد تسمح لنا لمتابعة كل كرة . لكن في المجال الميكروسكوبي ، هذا غير ممكن ! لنأخذ ذرتين من نفس النوع . إن مثل هاتين الذرتين سيكون لهما نفس الخواص الذاتية تماما . ولتمييزهما في الاصطدام نحتاج إلى متابعة حركتهما . ولكن بسبب كم الفعل و ضمان علاقة عدم التحديد ليس لدينا فرصة لتحقيق هذا . في الحقيقة إن تجربة بسيطة من القرن التاسع عشر بينت أنه حتى الطبيعة نفسها غير قادرة على القيام بذلك ! هذه النتيجة الجوهرية تم اكتشافها بدراسة الجمل التي تتضمن عددا كبيرا من الذرات المتصادمة من نفس النوع : الغازات .

تمييز الذرات

ما هو إنتروبي الغاز ؟ (مجلد I ، صفحة 400) حساب الإنتروبي S لغاز بسيط مكون من N جسيم بسيط * ذو كتلة m في حجم V يعطي

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{\Lambda^3}\right] + \frac{3}{2} + \frac{\ln \alpha}{N} . \qquad (55)$$

هنا k ثابت بولتزمان ، ln هو اللوغاريتم الطبيعي ، T درجة الحرارة و $\Lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mkT}$

هو طول الموجة الحراري (تقريبا طول موجة دو برولي للجسيمات المكونة للغاز)

---

*الجسيمات هي بسيطة إذا وصفت بشكل كامل بكمية حركتها و موضعها ، والذرات هي جسيمات بسيطة . الجزيئات ليست بسيطة لأنها توصف أيضا بمنحاها .

الشكل 56 – ويلارد جيبس (1839-1903)

في هذه النتيجة ، العدد الصافي α يساوي الواحد إذا كانت الجسيمات قابلة للتمييز مثل كرات البليارد ، و تساوي إلى 1/N! إذا كانت غير قابلة للتمييز على الإطلاق (تحدي e 91) . إن قياس إنتروبي الغاز البسيط بالتالي يسمح لنا بتحديد α و بالتالي الاختبار التجريبي فيما إذا كانت الجسيمات قابلة للتمييز .

ينتج أن فقط الحالة الثانية ، $\alpha \approx 1/N!$ تصف الطبيعة . يمكننا بسهولة التأكد من هذا بدون حتى إجراء القياس : فقط في الحالة الثانية يكون الإنتروبي لحجمي غاز متطابقين مضافان لبعضهما البعض *

النتيجة غالبا تعرف بتناقض جيبس ** بالتالي تثبت أن المكونات الميكروسكوبية للمادة هي غير قابلة للتمييز (مرجع 73) : في جملة من جسيمات كمية – سواء كانت إلكترونات ، بروتونات ، ذرات أو جزيئات صغيرة لا يكون هناك طريقة لتبين الجسيمات .

عدم قابلية التمييز للجسيمات بالتالي هي خاصة تجريبية للطبيعة . و هي تصح بدون استثناء . مثلا ، عندما اكتشف النشاط الإشعاعي فإن الناس اعتقدوا أنه يتعارض مع عدم قابلية التمييز للذرات ، لأن التفكك يبدو أنه يميز ذرات معينة بالمقارنة مع الأخرى . لكن نظرية الكم بعدها بينت أن هذا ليس هو الحال و أن حتى الذرات و الجزيئات هي غير قابلة للتمييز .

نظرا لأن $\hbar$ يظهر في العلاقة من أجل الإنتروبي ، فإن عدم قابلية التمييز هي أثر كمي . في الحقيقة عدم قابلية التمييز لا تلعب دورا إذا كانت التأثيرات الكمية مهملة ، كما في حال كرات االبليارد . على أن عدم قابلية التمييز مهمة في الحياة اليومية . و سوف نجد أن خواص المادة اليومية - البلازما ، الغازات ، السوائل و الأجسام الصلبة ستكون مختلفة كليا بدون عدم قابلية التمييز . مثلا سوف نكتشف أنه بدونها فإن السكاكين و السيوف لا تقطع .بالإضافة لذلك ، التربة لن تحملنا و سوف نسقط تماما فيها / تخسف بنا الأرض . لتوضيح القضية بمزيد من التفصيل ندرس السؤال التالي .

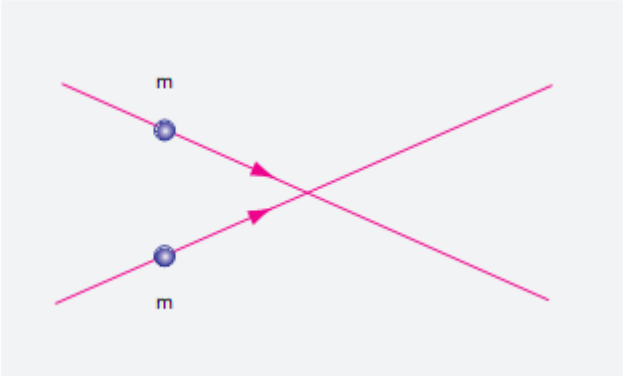
---

*في الحقيقة قيم الإنتروبي المقاسة بالتجربة ، من أجل غاز أحادي الذرة ، يعطى بما يعرف بعلاقة ساكور – تيترود (تحدي 93d)

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{N\Lambda^3}\right] + \frac{5}{2} \qquad (56)$$

التي تنتج عندما تضاف $\alpha \approx 1/N!$ أعلاه . و قد استنتج بشكل مستقل من قبل الفيزيائي الألماني أوتو ساكور (1880-1914) و الفيزيائي الهولندي هيوغو تيترود (1895-1931) . لاحظ أن البارامتر الأساسي هو النسبة بين V/N ، الحجم الكلاسيكي لكل جسيم و Λ^3 ، حجم دو برولي لجسيم كمي .

**جوسيا ويلارد جيبس (1839-1903) فيزيائي أمريكي الذي كان مع ماكسويل و بلانك و أحد المؤسسين الثلاثة للميكانيك الإحصائي و الثيرموديناميك و قد أدخل مفهوم المجموعة ومصطلح الطور الثيرموديناميكي



الشكل 57 – الأجسام المتطابقة ذات المسارات المتقاطعة

لماذا تظهر عدم قابلية التمييز في الطبيعة ؟

خذ جسيمين كميين بنفس الكتلة ، و نفس التركيب و نفس الشكل مثل ذرتين من نفس النوع . تخيل أن مساريهما يتقاطعان و أنهما يقتربان من بعضهما البعض بمسافات صغيرة عند التقاطع كما هو مبين في الشكل 57 . في غاز كل من اصطدام الذرات أو عدم إصابتهما لبعضهما البعض هي أمثلة .

الآن كل التجارب التي أجريت قط تبين أنه عند مسافات صغيرة من المستحيل القول فيما إذا كان أي الكوانتونين قد تبادل الأدوار أو لا .

- من المستحيل لغاز أن يتبع جسيمات كمية متحركة و تحديد أي منها . متابعة الكوانتونات المتصادمة مستحيل

إن استحالة التمييز بين الجسيمات القريبة من بعضها هي نتيجة مباشرة لفعل الكم $\hbar$. من أجل مسار الذي يأتي بجسيمين متقاربين قريبا جدا من بعضها البعض ، فإن تبديل الدور فقط يحتاج لقدر صغير من التغير أي فقط فعل صغير (فيزيائي)

لكن نحن نعلم أن هناك فعل أصغر ما يكون قابل للقياس في الطبيعة . إن الاستمرار بمتابعة كل جسيم كمي على مسافات صغيرة سيتطلب قيم فعل أصغر من كم الفعل . و وجود كم الفعل بالتالي يجعل من المستحيل الاستمرار بمتابعة جسيمات الكم عندما تقترب جدا من بعضها البعض . إن أي وصف للجمل ذات العديد من الكوانتونات بالتالي تأخذ بالحسبان أنه بعد المواجهة القريبة من المستحيل تحديد أي كوانتون / تمييزه عن آخر .

إذا تذكرنا أن نظرية الكم تصف الكوانتونات كغيوم ، فإن عدم قابلية التمييز تظهر حتى بشكل أكثر طبيعية . متى التقت غيمتان و افترقتا ثانية ، من المستحيل تمييز إحداهما عن الأخرى . من ناحية أخرى إذا أبقيت الجسيمات بعيدة كفاية يملك المرء قابلية تمييز فعالة ، حيث أن عدم قابلية التمييز بالتالي تظهر فقط عندما تأتي الجسيمات قرب بعضها البعض .

باختصار ، عدم قابلية التمييز هي نتيجة طبيعية لا مفر منها لوجود قيمة الفعل الأصغر في الطبيعة . هذه النتيجة تؤدي بنا مباشرة إلى السؤال التالي :

هل يمكن للجسيمات الكمية أن تعد ؟

في الحياة اليومية يمكننا عد الأجسام لأنه يمكننا تمييزها . نظرا لأن جسيمات الكم لا يمكنها دائما أن تميز ، فإننا بحاجة لعناية خاصة في تحديد كيفية عدها . الخطوة الأولى في عد الجسيمات هي تعريف ما يقصد بالوضع بدون أي جسيم على الإطلاق . هذا يعمي شيئا سهلا لفعله ، ولكن لاحقا سنصادف أوضاع حيث يشكل مثل هذا الوضع صعوبات .في أي حال الخطوة الأولى للعد هي بالتالي تحديد / توصيف الخلاء .أي طريقة عد تتطلب أن الوضع بدون جسيمات مفصولة بوضوح عن الأوضاع ذات الجسيمات .

الخطوة الثانية الضرورية للعد هي توصيف القيمة القابلة للقياس المفيدة من أجل تحديد عدد الجسيمات الكمية . أسهل طريقة هي اختيار أحد هذه الأعداد الكمية المصونة التي تجمع تحت التركيب مثل الشحنة الكهربائية .

إن العد نفسه بالتالي يتم بقياس الشحنة الكلية و تقسيمها على واحدة الشحنة .

في الحياة اليومية ، الوزن أو الكتلة يستخدم عادة كقيمة قابلة للقياس . لكن لا يمكن استخدامه عموما في المجال الكمي ما عدا من أجل حالات بسيطة . من أجل عدد كبير من الجسيمات ، طاقة التأثير المتبادل ستدخل أخطاء . من أجل أعداد كبيرة من الجسيمات فإن طاقة الارتباط الثقالية /الجاذبية ستقوم بذلك أيضا . لكن قبل كل شيء من أجل الظواهر الانتقالية ، الجسيمات غير المستقرة أو أزمنة القياس القصيرة ، فإن قياسات الكتلة تصل لحدودها . باختصار حتى بالرغم من أن عد الذرات المستقرة عن طريق قياسات الكتلة يعمل في الحياة اليومية فإن الطريقة غير قابلة للتطبيق بشكل عام خاصة عند طاقات جسيمات عالية لا يمكن تطبيقها .

إن العد بمساعدة أعداد الكم المصونة له عدة مزايا . أولا ، يعمل أيضا من أجل الظواهر الانتقالية ، الجسيمات غير المستقرة أو أزمنة القياس القصيرة . ثانيا ليس من المهم فيما إذا كانت الجسيمات قابلة للتمييز أو لا فإن العد يعمل دائما . (مجلد II ، صفحة 72) . ثالثا ـ الجسيمات الافتراضية لا تعد . هذه حالة ترحيب للقاء (مجلد V ، صفحة 127)كما سنرى من أجل الجسيمات الافتراضية أي الجسيمات التي من أجلها $E^2 \neq p^2c^2 + m^2c^4$ (مجلد II ، صفحة

72) و ليس هناك طريقة لتعريف عدد الجسيمات بأي حال . باستخدام الكمية المصونة في الحقيقة هو أفضل طريقة عد جسيمات ممكنة .

إن الأثر الجانبي للعد بمساعدة أعداد الكم هو الذي يتوقع العد سلبيا . أيضا هذه النتيجة هي نتيجة كم الفعل . لقد رأينا أعلاه أن كم الفعل يقتضي أنه حتى في الخلاء أزواج الجسيمات – الجسيمات المضادة مصونة عند طاقات عالية بشكل كاف . بالنتيجة الجسيم المضاد يحب أن يعد كجسيم ناقص واحد . بمعنى آخر ، أي طريقة لعد جسيمات الكم يمكن أن تنتج خطأ ناتج عن هذا الأثر . في الحياة اليومية هذا التحديد لا يلعب أي دور حيث أنه ليس هناك مادة مضادة حولنا . لكن القضية تلعب دورا عند طاقات أعلى . و ينتج أنه ليس هناك طريقة عامة يمكن تحديدها . باختصار ، نظرية الكم تبين أن عد الجسيمات لا يكون تاما / مثاليا أبدا .

في الملخص ، الطبيعة لا تعطي طريقة لعد الجسيمات الكمية حتى إذا كان لا يمكن تمييزها بالرغم من أنه فقط بالنسبة للحياة اليومية ، شروط الطاقة المنخفضة ، بسبب كم الفعل ، الجسيمات المضادة تعد سلبيا . الجسيمات المضادة بالتالي تعطي حد لعد الجسيمات عند طاقات عالية ، عندما يصبح تكافؤ الكتلة – الطاقة مهما .

ما هو تناظر التباديل ؟

نظرا لأن الجسيمات الكمية قابلة للعد و لكن غير قابلة للتمييز ، يوجد تناظر للطبيعة بالنسبة للجمل المكونة من عدة كوانتونات متطابقة . تناظر التباديل أيضا يسمى تناظر التبادل ، و هو خاصة الطبيعة بأن القياسات لا تتبدل تحت تبادل الجسيمات المتطابقة . تناظر التباديل يشكل أحد أربعة ركائز لنظرية الكم ، مع تناظر الفراغ – الزمن ، تناظر القياس و أيضا تناظر إعادة التنظيم / إعادة التقنين . تناظر التباديل هو خاصة للجمل المركبة أي جمل مكونة من العديد من الجمل الجزئية (المتطابقة) . فقط مثل هذه الجمل تلعب فيها عدم قابلية التمييز دورا .

بمعنى آخر " غير قابل للتمييز " ليس مثل " متطابق " . إن جسيمين كميين من نفس النوع ليسا نفس الشيء إنهما أشبه بنسختين تامتين من بعضهما البعض . من ناحية أخرى خبرة الحياة اليومية تبين لنا أن نسختين بمكن دائما تمييزهما تحت الفحص الدقيق بحيث أن مصطلح نسخة لا يكون مناسبا تماما أيضا .

- الكوانتونات ، الجسيمات الكمية هي قابلة للعد و غير قابلة للتمييز تماما * و الجسيمات الكمية هي نسخ تامة من بعضها البعض

إن كونها نسخا تامة فإنه لا يمكن حتى للطبيعة أن تميز الجسيمات ، بالنتيجة يظهر تناظر التباديل .

في الفصل التالي سوف نكتشف أن التبادل هي دوران جزئي. تناظر التباديل بالتالي هو تناظر تحت علاقات جزئية .هل يمكنك أن تعرف لماذا (تحدي 94 e) .

عدم قابلية التمييز و تناظر تابع الموجة

إن عدم قابلية تمييز الجسيمات الكمية يؤدي إلى نتائج مهمة حول وصف حالة حركتها . هذا يحدث لأنه من المستحيل صياغة وصف للحركة الذي يشمل عدم قابلية التمييز تماما من البداية . (هل أنت قادر على تأكيد هذا ؟) (تحدي 95s).

نحن بحاجة لوصف حالة n جسيم بحالة $\Psi_{1\dots i\dots j\dots n}$ التي تفترض أن التمييز ممكن ، كما هو متوقع من قبل القرائن المرتبة / الأدلة في الرمز ، و سوف نطرح عدم قابلية التمييز فيما بعد .

عدم قابلية التمييز أو تناظر التباديل يعني أن تبادل أي جسمين كميين يؤدي لنفس القياسات الفيزيائية .** الآن الحالتين الكميتين لهما نفس الخواص الفيزيائية إذا كانتا تختلفان في الأكثر بمقدار عامل الطور ، وعدم قابلية التمييز بالتالي تتطلب

$$\Psi_{1\dots i\dots j\dots n} = e^{i\alpha}\,\Psi_{1\dots j\dots i\dots n} \qquad (57)$$

من أجل زاوية مجهولة ما α . بتطبيق هذه العلاقة مرتين بتبديل نفس الزوج من الأدلة ثانية ، تسمح لنا باستنتاج أن $e^{2i\alpha} = 1$. هذا يقتضي أن :

$$\Psi_{1\ldots i\ldots j\ldots n} = \pm \Psi_{1\ldots j\ldots i\ldots n} , \qquad (58)$$

بمعنى آخر ، تابع الموجة هو إما متناظر أو مضاد التناظر تحت تبادل الأدلة . (يمكننا القول أن القيمة الخاصة من أجل عامل التبادل هو إما 1+ أو 1-) .

- نظرية الكم بالتالي تتوقع أن الجسيمات الكمية يمكن أن تكون غير قابلة للتمييز بأحد طريقين *

---

*إن كلمة عدم قابلية التمييز طويلة جدا بالنسبة للعديد من الفيزيائيين الذين يتحدثون بميوعة عن جسيمات متطابقة رغم ذلك .لذا انتبه

** نحن بالتالي لدينا نفس الوضعية التي صادفناها عدة مرات : زيادة تحديد للوصف الرياضي ، هنا حالتنا هي تناظر تحت تبادل الأدلة أي تحت تبادل الجسيمات

- الجسيمات التي توافق توابع الموجة المتناظرة – هي تلك التي تحول تحت تبادل الجسيم بواسطة + في المعادلة (58) تسمى ** البوزونات
- الجسيمات التي توافق توابع الموجة مضادة التناظر – هي تلك التي تحول تحت تبادل الجسيم بواسطة " – " في المعادلة (58) تسمى *** الفرميونات

التجارب تبين أن سلوك التبادل يعتمد على نوع الجسيم . الفوتونات وجد أنها بوزونات . من ناحية أخرى الإلكترونات ، البروتونات و النيوترونات وجد أنها فرميونات . أيضا حوالي نصف الذرات وجد أنها تتصوف مثل البوزونات (عند طاقات متوسطة) و النصف الآخر هي فرميونات . و لتحديد نوع الذرة نحتاج لأخذ بالحسبان البرم للإلكترون وذلك الذي للنواة .

في الحقيقة المركب لعدد زوجي من الفرميونات (عند طاقات معتدلة) أو لأي عدد من البوزونات (عند أي طاقة) ينتج أنه بوزون - و مركب العدد الفردي من الفرميونات هو (دائما) فرميون . مثلا ^4He بوزون ، بينما ^3He فرميون . أيضا النظائر الطبيعية $^{23}Na,\ ^{41}K,\ ^{85}Rb,\ ^{87}Rb$; و ^{133}Cs هي بوزونات لأن لها أعداد فردية من الإلكترونات و بالعكس النكليونات ^{40}K and ^{134}Cs هي فرميونات (وفي هذه الحالة هي أيضا نشطة إشعاعيا) .

سلوك الفوتونات

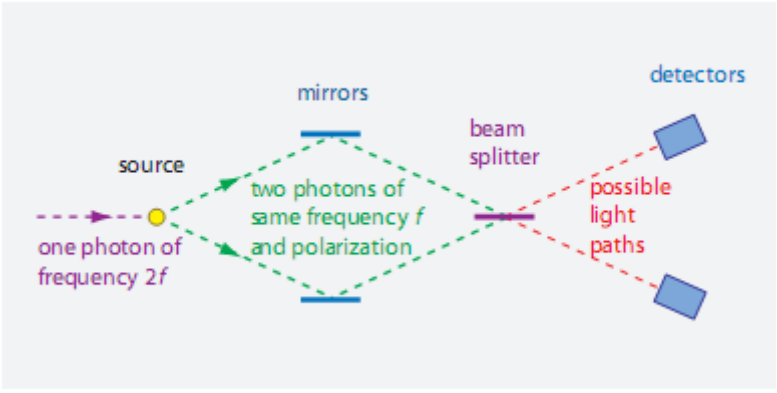
التجربة البسيطة المبينة في الشكل 58 تسمح بقياس ناحية مهمة من سلوك الفوتون . خذ منبعا الذي يصدر فوتونين غير قابلين للتمييز أي فوتونين بتردد و استقطاب متطابق بنفس الوقت . زوج الفوتونات بالتالي هو في حالة وقوع في شرك . في المخبر مثل هذا المنبع يمكن تحقيقه بواسطة محول مخفض ، وهي مادة التي تحول فوتون ذو تردد 2f إلى فوتونين بتردد f . و الفوتونين في الشرك بعد أن ينتقلا تماما بنفس المسافة يجعلان يدخلان في جانبي مقسم حزمة مثالي (مثلا مرآة نصف مفضضة) و الكاشفين يوضعان في مخرجي مقسم الحزمة . تبين التجارب أن كلا الفوتونين دائما يكشفان معا في نفس الجانب و لا يكونان أبدا منفصلين في الطرفين المختلفين . (مرجع 75) .

---

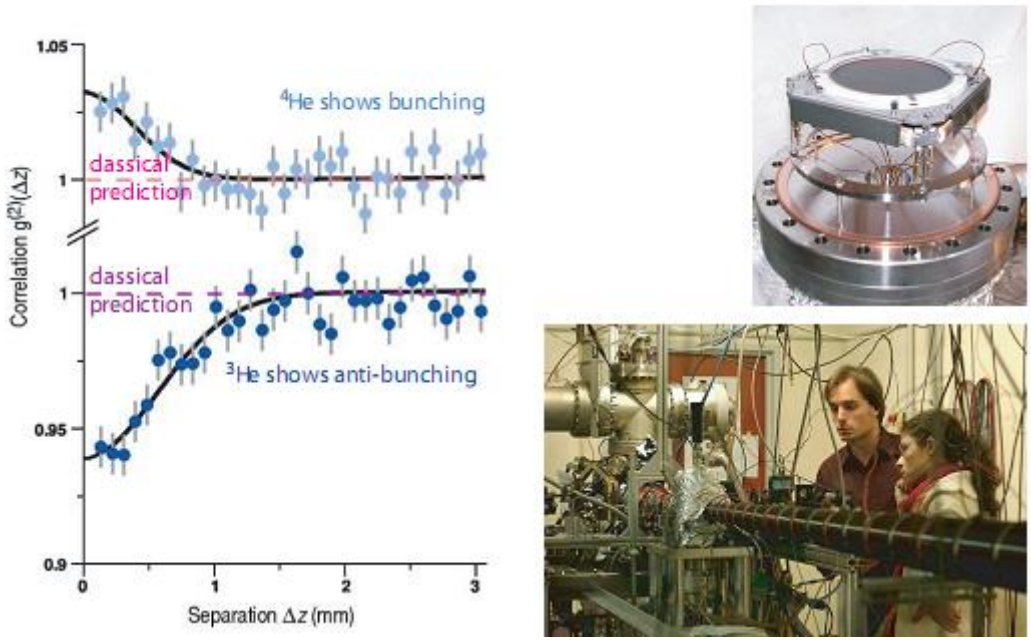
*هذه النتيجة تطبق على الفراغ ثلاثي الأبعاد . في الفراغ ذو البعدين هناك احتمالات أكثر . مثل هذه الاحتمالات كانت و ما تزال جزئيا موضوع بحث

** البوزونات سميت باسم الفيزيائي ساتينيرا ناث بوز (ولد عام 1894 في كالكوتا و توفي عام 1974 فيها) الذي وصف لأول مرة الخواص الإحصائية للفوتونات . (مرجع 74). و العمل تم تعميمه من قبل ألبرت أينشتاين بحيث يتحدث المرء عن إحصائيات بوز- أينشتاين .

***إن مصطلح فرميون مشتق من اسم الفيزيائي و الفائز بجائزة نوبل إنريكو فيرمي (ولد عام 1901 في روما و توفي عام 1954 في شيكاغو) و هو مشهور بعبقريته الشاملة في الفيزياء النظرية و التجريبية .وقد عمل بشكل أساسي في فيزياء الجسيمات النووية و الأولية ، حول البرم و حول الإحصائيات . من أجل عمله التجريبي سمي بمهندس الكم .وهو مشهور بمحاضراته التي ما تزال تنشر بخط يده و بطريقته الذكية في حل مسائل الفيزياء . على أن استحقاقه العالي لجائزة نوبل كانت إحدى الحالات القليلة التي أعطيت فيها الجائزة لاكتشاف تبين أنه غير صحيح . وقد غادر إيطاليا بسبب المعاملة السيئة التي تلقتها زوجته اليهودية و هاجر للولايات المتحدة . وقد عمل فيرمي في مشروع مانهاتن الذي صنع أول القنابل الذرية . وبعد الحرب العالمية الثانية نظم إحدى أولى أقسام الفيزياء في العالم في جامعة شيكاغو حيث أعجب به كل من عمل معه .



الشكل 58 – إصدار فوتونين و تداخلهما : فوتونين غير قابلين للتمييز دائما يوجد بأنهما يصلان معا إلى نفس الكاشف



الشكل 59 - التجمع و التفرق لذرات هليوم مثلا ^4He و ^3He متجمعة : نتيجة القياس ، الكاشف و التجربة

هذا يحدث لأن الخيارين كانا أحد الفوتونين يرسل و الآخر ينعكس فيتداخل بشكل هدام . (المناقشة المذكورة أعلاه تطبق هنا أيضا : بالرغم من أن الفوتونين مشاركين أيضا في هذه الحالة ، عند دراسة التفاصيل ، فقط فوتون واحد يتداخل مع نفسه) (صفحة 59) .

تبين التجربة أن الفوتونات هي بوزونات . في الحقيقة في نفس التجربة ، تتصرف الفرميونات تماما بطريقة معاكسة ، إن فرميونين دائما يكشفان بشكل منفصل في طرفين متعاكسين و لا يخرجان أبدا معا من نفس الطرف . (مرجع 76) .

الشكل 60 - جسيمات تصوير كتهييجات متوضعة (يسار) أو غيوم (يمين)

التجمع و التفرق

الطريقة الأخرى لطبيعة التبادل لجسيم هي تجربة هاندبري براون – تويس الموصوفة سابقا (صفحة 53) . أولا ، تبين التجربة الجميلة أن جسيمات الكم تتصرف بشكل مختلف عن الجسيمات الكلاسيكية . بالإضافة لذلك مقارنة مع الجسيمات الكلاسيكية فإن الفرميونات تبدي افتراق بسبب مبدأ الاستبعاد لباولي و البوزونات تبدي تجمع . أجرى هاندبري براون و تويس التجربة على الفوتونات التي هي بوزونات .

في عام 2005 اجري بحث تعاوني فرنسي – هولندي التجربة (مرجع 77) بواسطة الذرات . و باستخدام غاز الهليوم البارد جدا عند 500 nK و مبدأ كاشف ذكي ، فقد كانوا قادرين على قياس منحنيات الترابط النوعية لهذا الأثر . النتائج المبينة في الشكل 59 تؤكد أن ^3He هو فرميون و أن ^4He هو بوزون كما هو متوقع من قاعدة التركيب للجسيمات الكمية .

تبعية الطاقة لتناظر التباديل

إذا أجبرتنا التجارب على استنتاج أن لا أحد و حتى الطبيعة يمكن أن تميز بين جسيمين من نفس النوع ، يمكننا استنتاج أن التجارب لا تشكل شيئين منفصلين و لكن نوع من الوحدة . إن إحساسنا الساذج الكلاسيكي بالجسيم كشيء منفصل من السكون للعالم هو بالتالي وصف غير صحيح لظاهرة الجسيم . في الحقيقة لا يوجد تجربة يمكن أن تتابع الجسيمات ذات الخواص الذاتية المتطابقة بشكل أنه يمكن تمييزها بشكل مؤكد . وهذه الاستحالة تم فحصها تجريبيا بواسطة كل الجسيمات الأولية ، على النوى و على الذرات و على الكثير من الجزيئات .

كيف يناسب هذا الحياة اليومية أي مع الفيزياء الكلاسيكية ؟ الفوتونات لا تقلقنا كثيرا . لنركز على مناقشة الجسيمات المادية . نحن نعلم أننا قادرين على تمييز الإلكترونات بتوجيه سلك الذي تتدفق فيه ويمكننا تمييز مبردنا من مبرد الجيران.بينما كم الفعل يجعل التمييز مستحيل فإن الحياة اليومية تسمح به .

إن أبسط شرح لكلا القياسين هو تخيل جسيم ميكروسكوبي خاصة الابتدائي مثل النتوء ، أي التهيج المتموضع للخلاء أو كغيمة صغيرة .

يبين الشكل 60 اثنين من مثل هذه النتوءات و غيمتين تمثلان جسيمين . من الواضح أنه إذا كانت الجسيمات قريبة جدا من بعضها البعض فإنه من غير المنطقي تمييزها ، و لا يمكننا التعرف عليها .

صورة النتوء تبين أنه إما من أجل المسافات الكبيرة أو جدران الكمون العالية التي تفصلها ، تمييز الجسيمات المتطابقة يصبح ممكن . في مثل هذه الحالات ، القياسات التي تسمح لما بمتابعة الجسيمات بشكل مستقل هي موجودة كما نعلم من الحياة اليومية . بمعنى آخر يمكننا تحديد طاقة الحد التي عندها تناظر التباديل للأجسام أو الجسيمات المفصولة بمسافة d يصبح مهما . و يعطى بالشكل :

$$E = \frac{c\,\hbar}{d} \,. \qquad (59)$$

هل تستطيع تأكيد العلاقة ؟ (تحدي 96 e) مثلا ، في درجات الحرارة العادية يمكننا تمييز الذرات داخل الجسم الصلب عن بعضها البعض نظرا لأن الطاقة المحسوبة بهذا الشكل هي أعلى بكثير من الطاقة الحرارية للذرات .

كي نمرح يمكن أن تريد تحديد عند أي طاقة يصبح توأمين بشريين حقيقيين غير قابلين للتمييز (تحدي 97 e).

إن تقدير عند أي طاقة الطبيعة الإحصائية للأشجار أو البرادات ستصبح ظاهرة هو أمر سهل .

للإحاطة ، في الحياة اليومية نحن قادرين على تمييز الأجسام وبالتالي الناس لسببين : لأنهم مكونين من أجزاء عديدة و لأننا نعيش في بيئة منخفضة الطاقة . إن صورة النتوء للجسيمات تعطي فكرة أن قابلية التمييز توجد من أجل الأجسام في الحياة اليومية لكن ليس من أجل الجسيمات في المجال الماكروسكوبي .

إن قضية الطاقة فورا تضيف ناحية جديدة للمناقشة . كيف يمكننا وصف الفرميونات و البوزونات بوجود الجسيمات الافتراضية و الجسيمات المضادة ؟

عدم قابلية التمييز في نظرية الحقل الكمي

نظرية الحقل الكمي كما سنرى في المجلد التالي تضع ببساطة فكرة النتوء الغيمي في الشكل 60 بلغة رياضية . إن الوضع بدون نتوء يعرف بحالة الخلاء . نظرية حقل الكم تصف كل الجسيمات لنوع معين مثل التهييجات لحقل أساسي وحيد . الجسيمات غير قابلة للتمييز لأن كل جسيم هو تهيج لنفس الركيزة الأساسية و كل تهييج له نفس الخواص .

إن الوضع بالنسبة لجسيم واحد بالتالي يوصف بواسطة حالة خلاء يتم التأثير عليها بواسطة عامل تشكيل . إضافة جسيم ثاني موصوف بإضافة عامل تشكيل ثاني ، و طرح جسيم يتم بجمع عامل إلغاء / إفناء و الأخير ينتج أنه منقول الأول .

نظرية حقل الكم تدرس كيف أن معاملات التشكيل و الإفناء يجب أن تتصرف لوصف القياسات .* يتم الوصول للنتائج التالية :

- معاملات الحقل للجسيمات ذات نصف برم هي فرميونات و تقتضي الاستبدال المضاد (موضعيا)
- الحقول ذات البرم الصحيح هي بوزونات و تقتضي استبدال (موضعي)
- من أجل كل معاملات الحقل عند مواضع فصل تشبه الفراغ / الفضاء ، المبادل ، على التوالي مضاد المبادل يتلاشى
- الجسيمات المضادة للفرميونات هي فرميونات و الجسيمات المضادة للبوزونات هي بوزونات

متى هذه العلاقة

$$[b, b^{\dagger}] = bb^{\dagger} - b^{\dagger}b = 1 \qquad (60)$$

تصح بين معامل التشكيل $b^{\dagger}$ و معامل المضاد للإفناء b ، فإن المعاملات تصف بوزون . و الطاعن يمكن بالتالي أن يرى بأنه يصف عملية النقل / المنقولية ، و الطاعن المضاعف مكافئ لعدم وجود طاعن .

إذا كانت المعاملات من أجل تشكيل جسيم و إفنائه مضادة التبديل

$$\{d, d^{\dagger}\} = dd^{\dagger} + d^{\dagger}d = 1 \qquad (61)$$

فإنها تصف فرميون . إن ما يعرف بالقوس يسمى قوس مضاد المبدل .

- الجسيمات الافتراضية تتصرف تحت تبادل مثل نظيراتها الحقيقية

هذه الارتباطات هي أساس نظرية حقل الكم . وهي تصف كيف أن الكوانتونات تتصرف تحت التبديل .
لكن لماذا جسيمات الكم متطابقة ؟ لماذا كل الإلكترونات متطابقة ؟ مقادة بالتجربة ، فإن نظرية حقل الكم تصف الإلكترونات كتهييجات مطابقة للخلاء ، و كما هي متطابقة بالبنية . بالطبع هذا الجواب ليس مرضي حقيقة وسوف نجد إجابة أفضل في الجزء النهائي من صعودنا الجبل .
كم دقة التحقق من تناظر التباديل ؟
هل الإلكترونات فرميونات مثالية ؟ في عام 1990 ، تم إجراء تجربة اختبار فعالة لسلوك فرميوناتها من قبل رامبيرج و سنو . لقد أرسلا تيار كهربائي لا تيار كهربائي 30A عبر سلك نحاسي لمدة شهر و بحثوا عن إصدار الأشعة السينية . ولم يجدوا أي أشعة . وقد خلصوا إلى أن الإلكترونات دائما في حالة مضادة للتناظر بمركبة متناظرة أقل من

$$2 \cdot 10^{-26} \qquad (62)$$

للحالة الكلية . باختصار ، الإلكترونات دائما في حالة مضادة للتناظر : هي فرميونات .

إن السبب وراء هذه التجربة الجميلة هي ما يلي . إذا لم تكن الإلكترونات دوما فرميونات فإن كل إلكترون سيقع في مستوى طاقة أخفض ما يكون لذرة النحاس مما يؤدي لإصدار أشعة سينية . إن عدم وجود مثل هذه الأشعة السينية يقتضي أن الإلكترونات هي فرميونات بدقة عالية جدا . يمكن إصدار الأشعة السينية فقط إذا كانت بوزونات ، على الأقل لجزء من الزمن . و في الحقيقة إن إلكترونين لكونهما فرميونات لا يمكنهما أن يكونا في نفس الحالة الكوانتية : هذا الشرط يسمى مبدأ الاستبعاد لباولي . و يطبق على كل الفرميونات و هو موضوع الفصل التالي .

النسخ ، النسائل و القفازات

هل يمكن للجمل الكلاسيكية أن تكون غير قابلة للتمييز ؟ نعم يمكن : الجزيئات الكبيرة هي أمثلة عن ذلك شريطة أنها مكونة تماما من نفس النظائر . هل يمكن للجمل الكلاسيكية الكبيرة المكونة من مول أو أكثر من الجسيمات أن تكون غير قابلة للتمييز ؟ هذا السؤال البسيط يسأل ببساطة فيما إذا كانت النسخة التامة أو النسيلة (الفيزيائية)، لجملة فيزيائية هي ممكنة .

يقال بأن أي مصنع لإنتاج البضائع بكميات كبيرة مثل الذي ينتج قمصان أو ملاقط ورق ، أن يبين أن النسخ ممكنة ولكن الشكل مخادع . في المجهر ، هناك عادة بعض الفرق. هل هذه دائما هي الحال ؟ في عام 1982 نشر الفيزيائي الهولندي دنيس ديكس و بشكل مستقل الفيزيائيين الأمريكيين ووترز و زوريك أدلة بسيطة على أن الجمل الكمية لا يمكن أن تنسخ .وهذا مشهور بنظرية عدم الاستنساخ (مرجع 79).

إن آلة النسخ هي آلة التي تأخذ أصلا وتقرأ خواصه و تنتج نسخة عنه ، وتترك الأصل بلا تغيير . هذا التعريف يبدو بسيطا . و لكننا نعلم أنه إذا استخلصنا معلومات من الأصل ، فإن علينا أن نتبادل التأثير معه . بالنتيجة الجملة ستتغير على الأقل بواسطة كم الفعل . و بالتالي نتوقع أنه وفق نظرية الكم النسخ و الأصول لا يمكن أن تكون متطابقة أبدا .

---

*هذا يبدو أنه يعطي حل لتزوير أوراق العملة . في الحقيقة اقترح ستيفن ويسنر استخدام

نظرية الكم في الحقيقة تبين أن آلات النسخ مستحيلة . آلة النسخ موصوفة بعامل الذي يطابق حالة الجملة الأصلية مع حالة النسخة . بمعنى آخر ، آلة النسخ هي خطية . هذه الخطية أدت إلى مشكلة . بصياغتها ببساطة ، إذا كانت آلة النسخ قادرة على نسخ الأصول إما في الحالة |A> أو في الحالة | B> فإنها يمكن أن تعمل إذا كانت حالة الأصل هي تنضد |A> +|B> . لنرى لماذا .

إن آلة النسخ هي جهاز موصوف بعامل U الذي يغير حالة البدء $|s\rangle_c$ للنسخة في الشكل التالي :

- إذا كان الأصل في الحالة |A> فإن الناسخة تؤثر على النسخة $|s\rangle_c$ بالشكل :

$$U|A\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c \,. \qquad (63)$$

- إذ كان الأصل في الحالة |B> فإن الناسخة تؤثر على النسخة $|s\rangle_c$ بالشكل :

$$U|B\rangle|s\rangle_c = |B\rangle|B\rangle_c \,. \qquad (64)$$

بالنتيجة الشرطين أن الأصل في الحالة <A+B| تعالج من قبل الناسخة بالشكل :

$$U|A+B\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c + |B\rangle|B\rangle_c \,. \qquad (65)$$

هذا على خلاف ما نريده الذي هو

$$U_{\text{wanted}}|A+B\rangle|s\rangle_c = (|A\rangle + |B\rangle)(|A\rangle_c + |B\rangle_c) \,. \qquad (66)$$

بمعنى آخر آلة النسخ لا يمكنها نسخ الحالة بشكل كامل . * هذا ما يعرف بنظرية عدم الاستنساخ .

إن استحالة النسخ متأصلة في نظرية الكم . إذا كنا قادرين على استنساخ الجمل ، فإننا يمكن أن نقيس متحول جملة و متحول ثاني لنسختها . و بالتالي سنكون قادرين على ضرب علاقة عدم التحديد في كلا النسختين . هذا مستحيل . باختصار ، النسخ دائما غير تامة .

إن عدم وجود آلات نسخ كمية هو مخيب للأمل . مثل هذه الآلات الخيالية علميا سيتم تلقيمها من مدخلين مختلفين مثل الأسد و الماعز و تنتج تنضد : وهم .

نظرية الكم تبين أن كل هذه الكائنات الخيالية أو الحالات لا يمكن تحقيقها .

الباحثون الآخرون درسوا كم قرب كمال النسخة ، خاصة في حالة الجمل الكلاسيكية (مرجع 81) و لسرد قصة قصيرة بشكل طويل هؤلاء الباحثين بينوا أيضا أن النسخ أو الاستنساخ للجمل الماكروسكوبية مستحيل بشكل بسيط آلات النسخ لا توجد . النسخ يمكن دائما تمييزها عن الأصول إذا كانت القياسات قد تمت بدقة .

نظرية الكم في 1970 (مرجع 80) وقد تخيل استخدام الاستقطابات للفوتونات الوحيدة المخزنة كبتات أو أرقام تسلسلية. هل يمكنك شرح لماذا لا يصح هذا ؟ (تحدي 98 s)

*إن نظرية عدم الاستنساخ تضع العديد من القيود على الحواسب الكمية ، حيث أن الحسابات غالبا تحتاج إلى نسخ من نتائج وسيطة . النظرية أيضا تبين أن الاتصال الأسرع من الضوء مستحيل في تجارب ESR . في تعويض فإن التشفير الكمي يصبح ممكنا – على الأقل في المخبر . في الواقع ، تبين نظرية عدم الاستنساخ أن لا أحد يمكن أن ينسخ رسالة كمية بدون أن يكشف . إن الطرق الخاصة لاستخدام نتائج التشفير هي بروتوكول بينيت – براسارد 1984 و بروتوكول إكيرت 1991 .

بشكل خاص هذه حال الاستنساخات البيولوجية ، حيث أنها توائم متطابقة تولد بعد حمل منفصل . وهي تختلف في بصمات أصابعها , ومسح حدقة مختلف و ذواكر مادية و شعورية مختلفة ، بنى دماغ مختلفة و في العديد من النواحي الأخرى . (هل يمكنك تسمية البعض منها ؟) (تحدي 99 s) . باختصار الاستنساخات الحيوية مثل التوائك المتطابقة ليست نسخا من بعضها البعض .

في الملخص ، الأجسام اليومية مثل آلات النسخ ، كرات البليارد أو التوائم هي دائما قابلة للتمييز . و هذا لسببين : الأول التأثيرات الكمية لا تلعب دورا في الحياة اليومية بحيث أنه ليس هناك خطر في التبادل غير الممكن قياسه ، ثانيا الاستنساخات التامة للجمل الكلاسيكية لا توجد بأي حال ، بحيث أن هناك دائما فروقات طفيفة بين أي جسمين ، حتى إذا بدت متطابقة من النظرة الأولى . القفازات هي جمل كلاسيكية و يمكنها بالتالي أن تكون قابلة للتمييز دوما .

ملخص

نتيجة لكم الفعل h فإن الجسيمات الكمية هي غير قابلة للتمييز . هذا يحدث في أحد شكلين : هي إما بوزونات أو فيرميونات و حتى الطبيعة غير قادرة على التمييز بين جسميات كمية متطابقة .

بالرغم من عدم قابلية تمييز الكوانتونات فإن حالة الجملة الفيزيائية لا يمكن أن تنسخ إلى جملة ثانية ذات نفس المحتوى من الجسيمات . بالتالي الاستنساخات التامة لا توجد في الطبيعة .

الفصل السادس

الدورانات و الإحصائيات – إظهار / عرض البرم

البرم هو قياس أن حزم المادة يمكن أن تستقطب : الأشعة يمكن أن تدور . البرم بالتالي يصف كيف تتصرف الجسيمات تحت الدوران . الجسيمات بالتالي ليست ببساطة نقاط : الجسيمات الكمية يمكن أن تدور حول محور . هذا الدوران الخاص يسمى البرم (صفحة 103) مثل الدوران الماكروسكوبي البرم يوصف بواسطة كمية حركة زاوية .

فيما يلي نتذكر أن برم الكوانتونات يكمم بواحدات $\hbar$ 2/ . و بالتالي نبين نتيجة عميقة : قيمة البرم تحدد فيما إذا كان الجسيم الكمي و أي جملة كمية عامة هي بوزون او فرميون و سوف نبين أن البرم هو دوران الكوانتونات .

جسيمات الكم و التناظر

إن الخلفية العامة لشكل / ظهور البرم (مرجع 82) أوضحت من قبل يوجين فينجنر في 1939 .** وقد بدأت بتلخيص أن أي جسيم كمي ، يجب أن يكون له ما يشبه التمثيل غير القابل للاختزال لمجموعة كل تغيرات النظر له . و هذه المجموعة من تغيرات وجهات النظر تشكل مجموعة تناظر للفراغ – الزمن المسطح وهو ما يعرف بمجموعة لورنتز غير المتجانسة . لماذا ؟

لقد رأينا في الفصل عن التناظر في المجلد الأول (مجلد ا ، صفحة 265)من هذه المغامرة أن تناظر أي جملة مركبة يؤدي إلى شروط خاصة من أجل عناصر النظام . إذا كانت العناصر لا تتبع هذه الشروط فإنها لا يمكن أن تبني مركب متناظر .

نحن نعلم من الحياة اليومية و تجارب الدقة أن كل الجمل الفيزيائية هي متناظرة تحت الانتقال في الزمن و الفراغ ، تحت الدورات في الفراغ ، تحت الأحذية ، و في العديد من الحالات تحت انعكاس المرآة ، تبادل المادة – المادة المضادة و انعكاس الحركة . نحن نعلم أن هذه التناظرات من الحياة اليومية مثلا ، فائدة ما نسميه الخبرة في الحياة اليومية هي ببساطة نتيجة تناظر انتقال الزمن . إن مجموعة كل هذه التناظرات ، بشكل أكثر دقة ، كل هذه التحويلات المتناظرة تسمى مجموعة لورنتز غير المتجانسة .

هذه التناظرات أي هذه التغيرات لوجهات النظر ، تؤدي لشروط معينة من أجل مركبات الجمل الفيزيائية أي من أجل الجسيمات الكمية الأولية .في اللغة الرياضية (مجلد ا ، صفحة 265) فإن الشرط يعبر عنه بالقول أن الجسيمات الأولية يجب أن تكون تمثيلات غير قابلة للاختزال لمجموعة التناظر .

**يوجين فيجنر(ولد عام 1902 في بودابست و توفي عام 1995 في برنستون) فيزيائي نظري ، تلقى جائزة نوبل في الفيزياء عام 1963 وقد كتب أكثر من 500 بحث حول نواحي متعددة من التناظر في الطبيعة .وقد اشتهر أيضا بكونه أكثر فيزيائي أدبا في العالم .

إن كل كتاب حول نظرية الكم يقوم بهذا التفسير في تفصيل منهجي . بدءا من مجموعة لورنتز يحصل المرء على قائمة بكل التمثيلات غير القابلة للاختزال الممكنة . بعبارة أخرى ، يحصل المرء على قائمة بكل الطرق الممكنة التي يمكن أن تتصرف بها الجسيمات الأولية . * بتصنيف الاحتمالات يجد المرء كليا أن كل جسيم أولي يوصف بكميات : كمية حركة رباعية – لا جديد حتى الآن – بواسطة كمية حركة زاوية داخلية ، البرم و بمجموعة من قيم التكافؤ .

- إن كمية الحركة الرباعية تنتج من تناظر الانتقال للطبيعة . قيمة كمية الحركة تصف كيف يتصرف الجسيم تحت الانتقال أي تحت انزياح الموضع والزمن لنقاط المراقبة . مقدار كمية الحركة الرباعية هي خاصة ثابت تعطى بالكتلة بينما منحاها في الفراغ – الزمن هو حر
- البرم ينتج تناظر الدوران للطبيعة . قيمة البرم تصف كيف يتصرف الجسم تحت دورانات في ثلاثة أبعاد ، أي تحت منحى تغير نقاط النظر . ** مقدار البرم هو خاصة ثابتة ، و منحاه له إمكانيات متعددة بالنسبة لاتجاه الحركة . بشكل خاص برم الجسيمات الكمية الضخمة التي تتصرف بشكل مختلف عن ذلك العائد للجسيمات عديمة الكتلة.

من أجل الجسيمات الكمية ذات الكتلة فإن مجموعة لورنتز غير المتجانسة تقتضي أن القيمة الثابتة للبرم هي $\sqrt{J(J+1)}\hbar$ غالبا تكتب بزيادة تبسيط بالشكل J . و من المعتاد بالتالي القول و كتابة البرم J بدلا من القيمة الطويلة $\sqrt{J(J+1)}\hbar$. نظرا لأن قيمة العدد الكمي J تحدد قيمة كمية الحركة الزاوية ، فإنها تعطي تمثيل تحت الدورانات لجسيم معين . تبين الدراسة أن العدد الكمي للبرم J يمكن أن يكون أي مضاعف من 1/2 أي يمكن أن يأخذ القيم : 5/2 , 3/2 , 1/2 , 0 .. الخ كما هو ملخص في الجدول 4 ، تبين التجارب أن الإلكترونات ، البروتونات و النيوترونات لها برم 1/2 و برم الجسيمات W & Z هو 1 و ذرات الهليوم برمها صفر . بالإضافة لذلك تمثيل البرم J هو 2J+1 من حيث الأبعاد مما يعني أن المنحى الفراغي للبرم له 2J+1 قيمة ممكنة . من اجل الإلكترونات حيث J =1/2 هناك بالتالي إمكانيتين و هما عادة أعلى و أسفل . البرم بالتالي يأخذ قيم متقطعة . وهذا على عكس كمية الحركة الخطية التي تمثيلاتها هي لانهائية من حيث الأبعاد و التي قيمها الممكنة تشكل مجال مستمر .

أيضا الجسيمات الكمية عديمة الكتلة تتميز بقيمة لبرمها . يمكن أن تأخذ نفس القيم التي للحالة ذات الكتلة . مثلا الفوتونات و الغلوونات لها برم 1 . من اجل الجسيمات عديمة الكتلة ، فإن التمثيلات أحادية البعد بحيث أن الجسيمات عديمة الكتلة توصف كليا بحلزونيتها / لولبية المعرفة بأنها مسقط البرم على اتجاه الحركة . الجسيمات عديمة الكتلة يمكن أن يكون لها لولبية موجبة أو سالبة و غالبا تسمى بالاستقطاب الأيمن و الاستقطاب الأيسر . و ليس هناك حرية أخرى لمنحى البر في الحالة عديمة الكتلة .

- لإكمال قائمة خواص الجسيم ، فإن التناظرات المتقطعة الباقية لمجموعة لورنتز غير المتجانسة يجب أن تشمل . و نظرا انقلاب الحركة ، التكافؤية الفراغية و انقلاب التغير هي تكافؤات ، كل جسيم أولي يجب أن يوصف بثلاثة أعداد إضافية تسمى T , P & C وكل منها يمكن أن يأخذ فقط القيم 1+ أو 1 – .

---

*كي تكون ذات ارتباط فيزيائي بنظرية الكم فإن التمثيلات يجب أن تكون واحدية / موحدة . القائمة الكاملة للتمثيلات غير القابلة للاختزال و الواحدية لتغيرات وجهة النظر بالتالي تعطي مجال من الإمكانيات من أجل أي جسيم يريد أن يكون أوليا

**مجموعة المصطلحات الفيزيائية أيضا تسمى SO(3) نظرا لأنها رياضيا موصوفة بمجموعة من مصفوفات خاصة متعامدة 3 x 3

الجدول 4- برم الجسيم كتمثيل لمجموعة دوران

البرم $[\hbar]$	الجملة غير متغيرة بعد الدوران بواسطة	أمثلة جسيم ذو كتلة		أمثلة جسيم بدون كتلة
		أولي	مركب	أولي
0	أي زاوية	بوزون هيجس	ميزونات ، نوى ، ذرات	لا يوجد [a]
1/2	دورتين	$e,\ \mu,\ \tau,\ q,$ ν_e, ν_μ, ν_τ	نوى ، ذرات ، جزيئات ، جذور	لا يوجد ، حيث أن للنيوترينوات كتلة صغيرة
1	دورة واحدة	W , Z	ميزونات ، نوة ، ذرات ، جزيئات ، محمصات	الفوتون γ ، الغلوون g
3/2	2/3 دورة	لا يوجد [a]	الباريونات ، النوى ، الذرات	لا يوجد [a]
2	1/2 دورة	لا يوجد	النوى	الغرافيتون[b]
5/2	2/5 دورة	لا يوجد	النوى	لا يوجد

3	1/3 دورة	لا يوجد	النوى [c]	لا يوجد
..الخ [c]	..الخ [c]	..الخ [c]	..الخ [c]	غير ممكن

a . التناظر الفائق ، تناظر ابتدع في القرن العشرين ، يتوقع أن الجسيمات الأولية في هذه الصناديق و صناديق أخرى

b . الغرافيتون لم يتم ملاحظته / قياسه بعد

c . النوى موجودة بقيم برم تصل على الأقل إلى 101/2 و 51 (بواحدات $\hbar$) (مرجع 83)

لكونها مكافئات فإن هذه الأعداد يجب أن تضرب لتعطي قيمة للجملة المركبة .

باختصار التناظرات في الطبيعة تؤدي إلى تصنيف كل الجسيمات الكمية الأولية حسب كتلتها ، كمية حركتها و، برمها و تكافؤاتها P , C & T .

أنوع الجسيمات الكمية

قيم البرم المقاسة لكل الجسيمات الكمية في الطبيعة معطاة في الجدول 4 . إن التكافؤات و كل الخواص الذاتية المعروفة للجسيمات الأولية معطاة في الجدول 5 . البرم و التكافؤات معا تسمى الأعداد الكمية . كل الخواص الذاتية للكوانتونات ترتبط بالتأثيرات المتبادلة مثل الكتلة ، الشحنة الكهربائية أو الإيزو سبين و سوف ندرسها في المجلد التالي (مجلد V ، صفحة 162) .

الجدول 5 – خواص الجسيمات الأولية

الجسيم	الكتلة m^a	العمر τ أو عرض الطاقة [b] ، أنماط التفكك الرئيسية	الإيزوسبين I ، البرم J ، التكافؤ P ، [c] ، الشحنة C	الشحنة ، الإيزوسبين ، الغرابة ، [c] ، الجذب / السحر ، الجمال ،[d] العلو : QISCBT	اللبتون و الباريون ، [e] الأعداد LB
الإشعاع الأولي (البوزونات)					
الفوتون γ	0 ($< 10^{-53}$ kg)	مستقر	$I(J^{PC}) = 0,1(1^{--})$	000000	0,0
$W^{\pm}$	$80.398(25)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$2.124(41)$ GeV $67.60(27)$ % hadrons $32.12(36)$ % $l^+\nu$	$J = 1$	±100000	0,0
Z	$91.1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$2.65(2)\cdot 10^{-25}$ s or $2.4952(23)$ GeV/c^2 $69.91(6)$ % hadrons, $10.0974(69)$ % l^+l^-	$J = 1$	000000	0,0
الغلوون	0	مستقر	$I(J^P) = 0(1^-)$	000000	0,0
المادة الأولية (فرميونات) : لبتونات					
الإلكترون e	$9.109\,382\,15(45)\cdot 10^{-31}$ kg = 81.871 0438(41) pJ/c^2 = 0.510 998 910(13) MeV/c^2 = 0.000 548 579 909 43(23) u gyromagnetic ratio μ_e/μ_B = −1.001 159 652 1811(7)	$> 13\cdot 10^{30}$ s	$J = \frac{1}{2}$	−100 000	1,0
الميوون μ	0.188 353 130(11) yg 2.197 03(4) µs 99 % $e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$		$J = \frac{1}{2}$	−100 000	1,0

				= 105.658 3668(38) MeV/c^2 = 0.113 428 9256(29) u gyromagnetic ratio $\mu_\mu/(eh/2m_\mu)$ = -1.001 165 9208(6)	
1,0	−100 000	$J = \frac{1}{2}$	290.6(1.0) fs	1.776 84(17) GeV/c^2	تاو τ
1,0		$J = \frac{1}{2}$		< 2 eV/c^2	النتوترينو ν_e
1,0		$J = \frac{1}{2}$		< 2 eV/c^2	الميون نيوترينو ν_μ
المادة الأولية (فرميونات) : الكواركات					
$0, \frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}+\frac{1}{2}0000$	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	أنظر البروتون	1.5 to 3.3 MeV/c^2	أعلى u
$0, \frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}0000$	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	أنظر البروتون	3.5 to 6 MeV/c^2	أسفل d
$0, \frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}0-1000$	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$		70 to 130 MeV/c^2	غريب s
$0, \frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}00+100$	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$		1.27(11) GeV/c^2	السحر c

الجدول 5 – خواص الجسيمات الأولية (تابع)

الجسيم	الكتلة m^a	العمر τ أو عرض الطاقة Γ ، [b] أنماط التفكك الرئيسية	الإيزوسبين I ، البرم J ، التكافؤ P ، [c] تكافؤ الشحنة C	الشحنة ، الإيزوسبين ، الغرابة ، [c] ، الجذب / السحر ، الجمال ،[d] العلو : QISCBT	اللبتون و الباريون ، [e] الأعداد LB
أسفل d	4.20(17) GeV/c^2	$\tau = 1.33(11)$ ps	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}000-10$	$0, \frac{1}{3}$
أعلى t	171.2(2.1) GeV/c^2		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}0000+1$	$0, \frac{1}{3}$
البوزون الأولي المقاس					
بوزون هيجس	126 GeV/c^2		$J = 0$		

ملاحظات :

a . أنظر أيضا جدول سوابق SI في الصفحة 205 . حول واحدة الكتلة eV/c^2 أنظر صفحة 209

b . عرض الطاقة Γ لجسيم يرتبط بعمره τ بواسطة علاقة عدم التحديد $\Gamma\tau = \hbar$

هناك فرق بين نصف العمر $t_{1/2}$ و نصف العمر τ لجسيم حيث يرتبطان بالعلاقة $t_{1/2} = \tau \ln 2$ حيث $\ln 2 \approx 0.693\ 147$ و نصف العمر بالتالي هو أقصر من العمر . وحدة الكتلة الذرية الموحدة u تعرف بأنها 1/12 من كتلة ذرة الكربون 12 عند السكون و في حالتها الأرضية . و لدينا $1\ u = 1/12\ m(^{12}C) = 1.660\ 5402(10)yg$.

c . لإبقاء الجدول قصيرا فإن السطر الأول فيه لا يذكر صراحة اللون و الاسم المسمى بشكل يدعو للخلط شحنة التأثيرات المتبادلة القوية . وقد أضيفت لقائمة الخواص الأساسية للجسم . الأعداد الكمية التي تحوي كلمة مكافئ هي مضاريب ، كل الأعداد الأخرى مجاميع . التكافؤ P و تكافؤ الشحنة C يكتبان بالشكل + أو - . التكافؤ الزمني T (يجب ألا يخلط بينه و بين العلو T) ، الأفضل أن يسمى تكافؤ عكس الحركة ويساوي إلى CP في كل الجسيمات المعلومة . إن

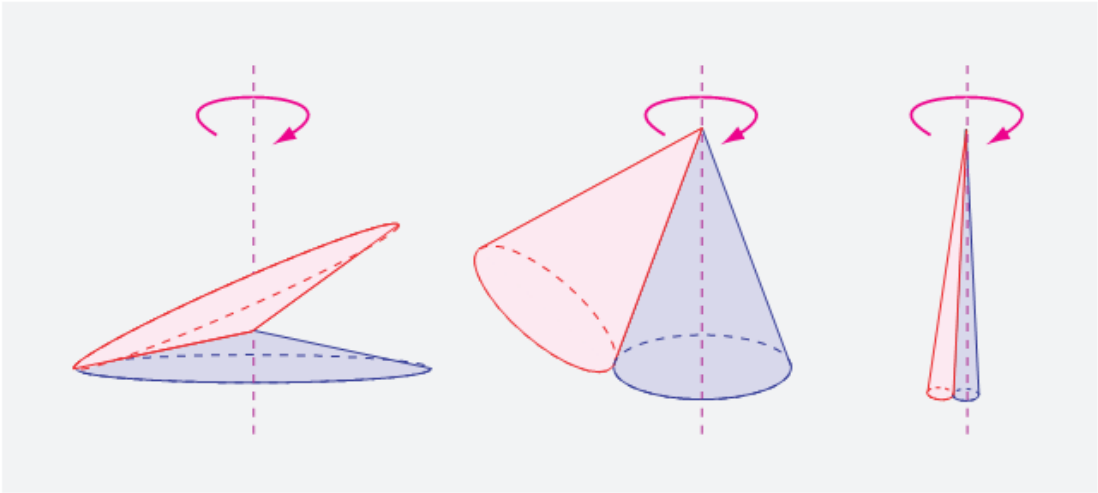
الإيزوسبين I (أو I_z) يظهر مرتين في الجدول ، وهو يعرف فقط الكواركات العليا و السفلى و مركباتها مثل البروتون و النيوترون . في المراجع يجب المرء أيضا الإشارات إلى ما يعرف بالتكافؤ G المعرف بأنه $G = (-1)^{IC}$.

قمة الجدول أيضا لا تذكر الشحنة الضعيفة للجسيمات .إن التفاصيل حول الشحنة الضعيفة g أو بشكل أكثر دقة حول الإيزوسبين الضعيف هو عدد كمي مخصص بكل الفرميونات اليسارية (و مضادات الفرميونات اليمنى) ، ولكن ليس للفرميونات اليمينية (و مضادات الفرميونات اليسرى) معطاة في الفقرة حول التأثيرات المتبادلة الضعيفة (مجلد V ، صفحة 245) .

d . الجمال ، الآن يسمى بشكل أغلب بالسفلية ، بشكل مشابه الحقيقة الآن تسمى العلو . إن إشارات الأعداد الكمية S , I, C ,B ,T يمكن تعريفها بطرق مختلفة . في التخصيص المعياري المبين هنا ، إشارة كل عدد كمي غير متلاشي يعطى بإشارة شحنة الكوارك المقابل .

e . إذا وجد التناظر المفرط ، فإن التكافؤ R يجب أن يضاف لهذا العامود . إن التكافؤ R هو عدد كمي ضارب مرتبط بعدد اللبتون L و عدد الباريون B و البرم J عن طريق التعريف $R = (-1)^{3B+L+2J}$. كل الجسيمات من الموديل القياسي هي زوجية بالنسبة لـ R بينما جسيماتها الشريكة ذات التناظر الفائق المبتدعة ستكون فردية بالنسبة لـ R . لكن التناظر الآن معلوم أنه متباين مع التجربة .

f. من أجل التعريف الدقيق و بقية كتل الكوارك أنظر الصفحة 233 في المجلد V .



الشكل 61 – توضيح المقولة التي تبين لماذا الدورانات بمقدار 4π مكافئة لعدم دوران على الإطلاق (أنظر النص)

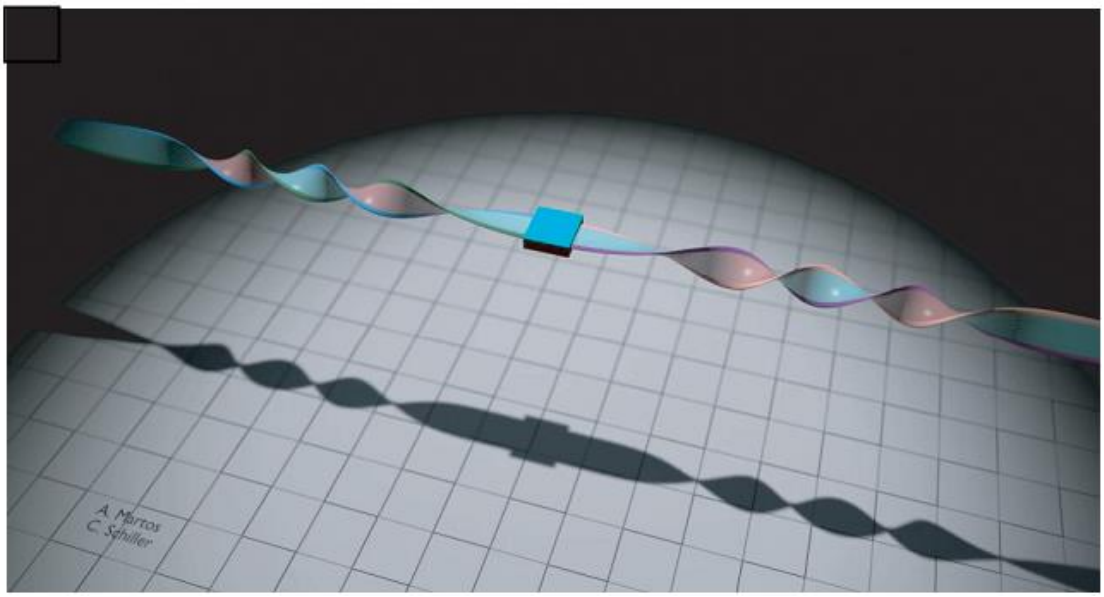
البرم 1/2 و الأجسام المقيدة

إن النتيجة المركزية لنظرية الكم هي أن البرم 1/2 هو امكانية في الطبيعة حتى بالرغم من أن هذه القيمة لا تظهر في الحياة اليومية . من أجل جملة لها برم 1/2 هذا يعني أنه من أجل مثل هذه الجملة فقط دوران بمقدار دورتين مكافئ لعدم الدوران على الإطلاق ، بينما الدوران بمقدار دورة بعد دورة هو ليس كذلك . لا يوجد جمل بسيطة بهذه الخاصة في الحياة اليومية ، ولكن مثل هذه الجمل توجد في الجمل الميكروسكوبية : الإلكترونات ، النيوترينوات ، ذرات الفضة و الجذور الجزيئية كلها لها برم 1/2 . يعطي الجدول 4 قائمة أكثر شمولا .

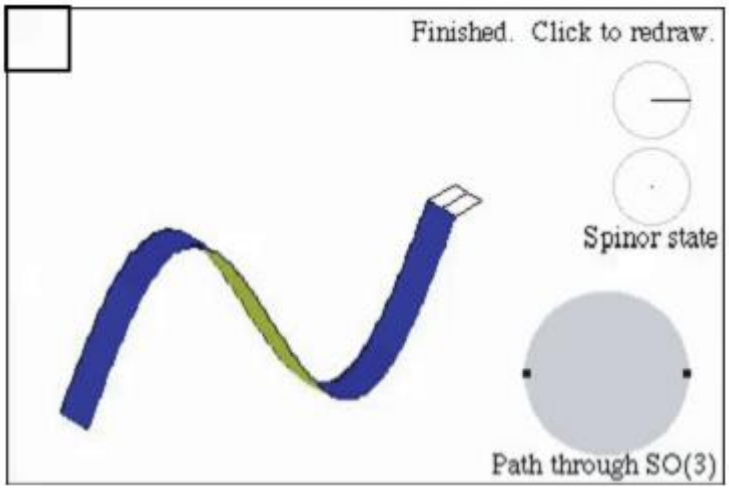
استخدم الرياضي هيرمان ويل (مجلد I ، صفحة 49) صورة بسيطة لشرح أن الدوران بمقدار دورتين مكافئ لصفر من الدورات بينما بالنسبة لدورة واحدة يختلف الأمر . خذ مخروطين يلامسان بعضهما البعض عند القمة / الرأس و أيضا على طول خط كما هو مبين في الشكل 61 . ثبت مخروطا واحدا و دحرج الآخر حوله . عندما المخروط المتحرج بعد دورة كاملة حول المخروط الآخر ، أي حول المحور الشاقولي ، يعود إلى الموضع الأصلي ، فإنه يكون قد دار بزاوية ما . إذا كان المخروطين عريضين كما هو مبين إلى اليسار ، فإن زاوية الدوران النهائية تكون صغيرة (تحدي 100e) . إن حد المخاريط العريضة جدا لا يعطي دوران على الإطلاق . إذا كانت المخاريط رفيعة جدا ، مثل الإبر فإن المخروط المتحرك يكون قد دار (تقريبا) بمقدار 720 درجة ، وهذا الوضع مثل قطعة نقدية تتحرج حول قطعة نقدية ثانية بنفس الحجم ، وكلاهما تقعان على طاولة . إن القطع النقدية المتدحرجة تدور بمقدار دورتين و بالتالي بمقدار 720 درجة

أيضا في هذه الحالة ، زاوية الدوران النهائية صغيرة . و نتيجة صفر درجة و 720 درجة هي نفسها . إذا تخيلنا أن زاوية المخروط تتغير بشكل مستمر فإن هذا العرض يبين أن دوران بمقدار صفر درجة يمكن أن يتغير بشكل مستمر إلى دوران 720 درجة (تحدي 101e)، وبالعكس لا يمكن أن يزال الدوران بمقدار 360 درجة بهذا الشكل .

هناك جمل في الحياة اليومية التي تتصرف مثل البرم 1/2 و لكنها ليست بسيطة : كل من هذه الجمل هي مقيدة . الجملة المعروفة بشكل أكبر هي السير / الحزام . يبين الشكل 63 & 62 أن الدوران بمقدار 4π لإبزيم الحزام يكافئ عدم الدوران على الإطلاق : هذا يحقق بسهولة بتحريك الحزام حول نفسه . يمكن أن ترغب بتكرار العلمية بنفسك (تحدي 102e) باستخدام سير حقيقي أو قطعة من ورق من أجل الشعور بها . إن عملية الفك غالبا تسمى خدعة السير ولكن ايضا خدعة المقص ، خدعة الخيط ، رقصة النبيذ الفلبيني أو رقصة شمعة الباليرينز . أيضا في بعض الأحيان تنسب خطأ لديراك لأنه مستخدم بشكل واسع في محاضراته .



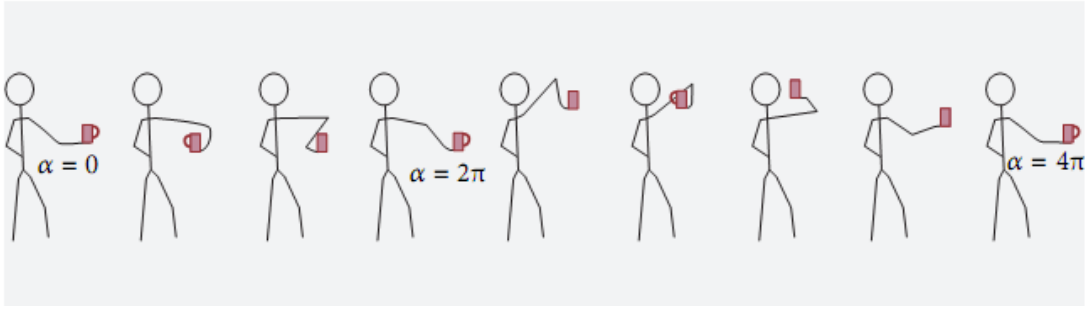
الشكل 62 – افترض أن السير لا يمكن أن يلاحظ ولكن الجسم المربع يمكن ، وأنه يمثل جسيم . العرض المتحرك بالتالي يبين أن مثل هذا الجسيم (الجسيم المربع) يمكن أن يعود إلى موضع البدء بعد دوران بمقدار 4π (وليس بعد 2π) مثل هذا الجسيم بشكل الحزام بالتالي يحقق خاصة تعريف البرم لجسيم 1/2 ، الذي يدور بمقدار 4π و المكافئ لعدم دوران على الإطلاق . الحزام بالتالي يمثل تابع موجة السبينور (البرام) ، مثلا الدورات بمقدار 2π يؤدي إلى فتل ، وهذا يعني تغير لإشارة تابع الموجة . إن الدوران بمقدار 4π لا يملك أثر على تابع الموجة . يمكنك تكرار الخدعة في المنزل بواسطة قطعة ورق . التكافؤ المبين هنا بواسطة حزامين مرتبطين ولكن الخدعة تعمل بواسطة أي عدد موجب من الأحزمة



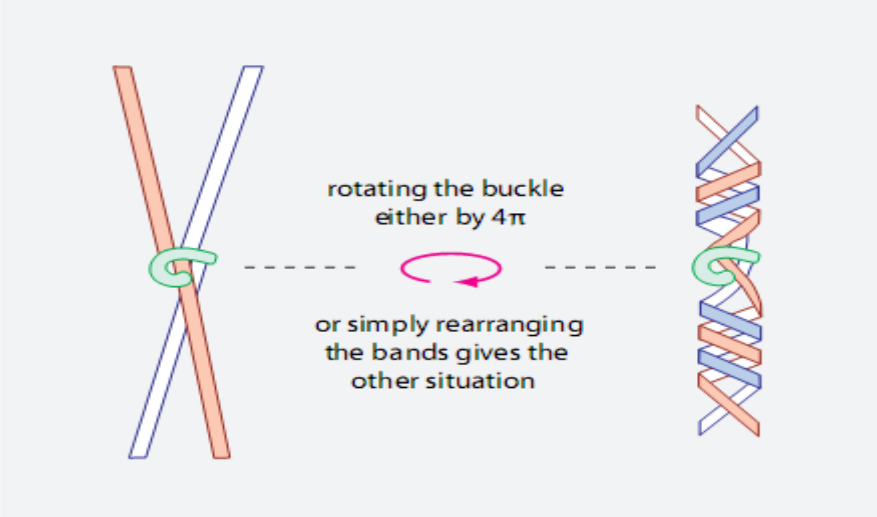
الشكل 63 – خدعة السير بواسطة سير بسيط : الدوران المضاعف لإبزيم السير مكافئ لعدم الدوران

إن الجسم البشري له مثل هذا الحزام بداخله : الذراع . فقط خذ يدك وضع فيها جسيما للتوضيح مثل فنجان ، ودور اليد بمقدار 2π بفتل الذراع . بعد دوران ثان كل الجملة سيتم الانفكاك ثانية ، كما هو مبين في الشكل 64 .

الخدعة حتى أكثر روعة عندما تستخدم العديد من الأذرع . يمكنك وضع يديك (إذا اخترت وضعية البداية الصحيحة) (تحدي e 103) تحت كأس أو يمكنك أخذ صديق أو اثنين



الشكل 64 - الذراع البشرية كنموذج برم 1/2



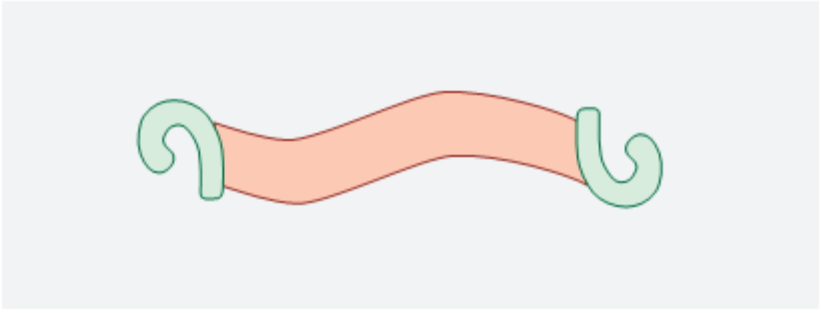
الشكل 65 - خدعة الحزام العامة ، نمذجة سلوك الحركة لجسيم برم 1/2 : بشكل مستقل عن عدد السيور أو الأنابيب أو الخيوط المتصلة فإن الحالتين يمكن تحويلهما لبعضهما البعض ، إما بتدوير الجسم المركزي بمقدار 4π أو بإبقاء الجسم المركزي و تحريك السيور حوله

اللذين كليهما يبقيان يدا متصلة مع الكأس معك . إن خدعة السير ما يزال بإمكانك تنفيذها ، و كل الجملة تنفك بعد دورتين كاملتين (تحدي e 104)

هذا يفضي بنا إلى الطريقة الأعم لبيان الرابط بين التقييد و البرم 1/2 . فقط الصق أي عدد من الخيوط ، السيور أو الأنابيب لنقل بطول نصف متر ، بجسم ما ، كما هو مبين في الشكل 65 . (بواسطة العديد من مثل هذه الذيول من غير المناسب بعد ذلك أن نسمي هذا إبزيم السير) . كل نطاق يفترض أنه يذهب إلى اللانهاية الفراغية و يرتبط هناك . بدلا من كونه متصل باللانهاية الفراغية يمكننا أيضا تخيل أن السيور متصلة على جسم بعيد ثابت مثل اتصال الأذرع بالجسم البشري . إذا كان الجسم الذي يمثل الجسيم ، معزول بمقدار 2π ، فإن الفتلات تظهر في ذيوله .إذا دور الجسم بدورة إضافية ، إلى زاوية كلية تبلغ 4π فإن كل الفتلات و الانفكاكات يمكن أن نجعلها تختفي ، بدون تحريك أو تدوير الجسم .

يجب عليك فعلا أن تختبر هذا من أجل أن تؤمن به . و العملية فعلا تعمل بأي عدد من الأحزمة تلصق بالجسم . إن الموقع www.evl.uic.edu/hypercomplex/html/dirac.html يعطي فيلم تحريكي يبين هذه العملية بأربعة سيور متصلة .

باختصار كل هذه الأفلام المتحركة تبين أن أبازيم السير و في الحقيقة كل (بشكل كافي) الجمل المقيدة ، تعود إلى حالتها الأصلية فقط بعد الدورانات بمقدار 4π و ليس بعد دورانات بمقدار 2π فقط . الأجسام المقيدة تتصرف مثل جسيمات البرم 1/2 .



الشكل 66 – إبزيمي سير متصلين بسير ، إحدى الطرق لعرض جسيمي برم 1/2

في الحقيقة الأجسام المقيدة مثل السيور ذات الإبزيم هي فقط الجمل التي تعيد إنتاج خواص البرم 1/2 (تحدي 105e) . في الجزء الأخير من مغامرتنا سوف نكتشف السبب العميق الكامن من أجل التكافؤ بين وجود البرم لكل الجسيمات الكمية . إن دراسة تابع الموجة تبين أن توابع الموجة للجسيمات الابتدائية تتصرف تحت الدوران مثل الأجسام المقيدة . مثلا تابع الموجة الذي مكافئه المقيد متشابك يكتسب إشارة سالبة .

في الملخص ، نظرية الكم تقتضي وجود قيمة البرم 1/2 المنافية للحدس بشكل طفيف .بشكل خاص فإنه يظهر من أجل جسيمات المادة الأولية .

تعميم خدعة السير / الحزام

لكن لماذا تبين التجارب أن كل الفرميونات لها برم نصف صحيح و أن كل البوزونات لها برم صحيح ؟ (صفحة 134)

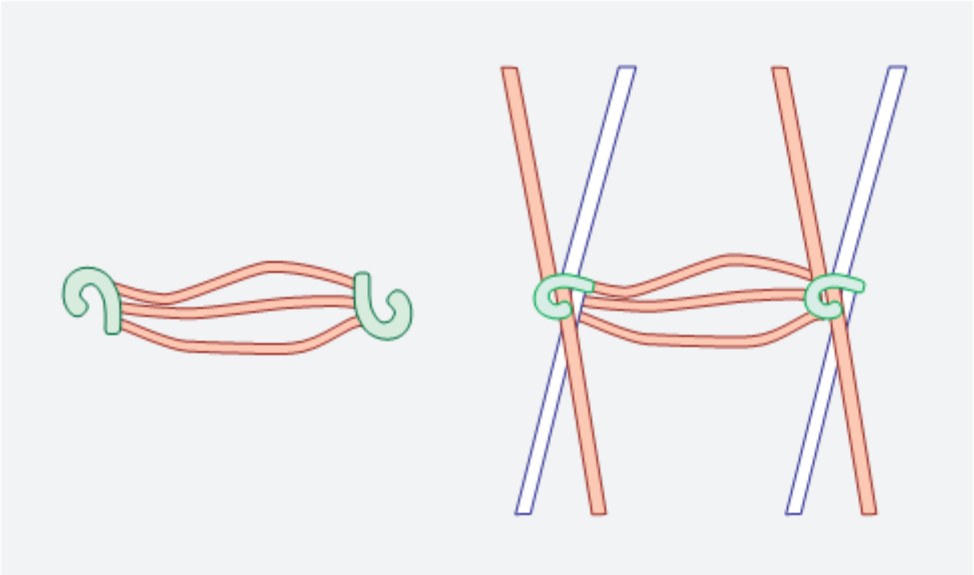
بشكل خاص ، لماذا الإلكترونات تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي ؟ من أول نظرة ، من غير الواضح ما هي علاقة قيمة البرم مع الخواص الإحصائية لجسيم . في الحقيقة ، هناك العديد من الطرق لبيان أن الدورانات و الإحصائيات مرتبطة.

إن أول برهان (مرجع 86) أعطي من قبل ولفجانج باولي استخدم تفاصيل حقل الكم و كان معقدا بحيث أن مكوناته الأساسية كانت مخفية . و استغرق الأمر عدة عقود لإقناع الجميع أن مزيدا من الملاحظة حول الأحزمة كانت جزءا مركزيا من البرهان (مرجع 87) .

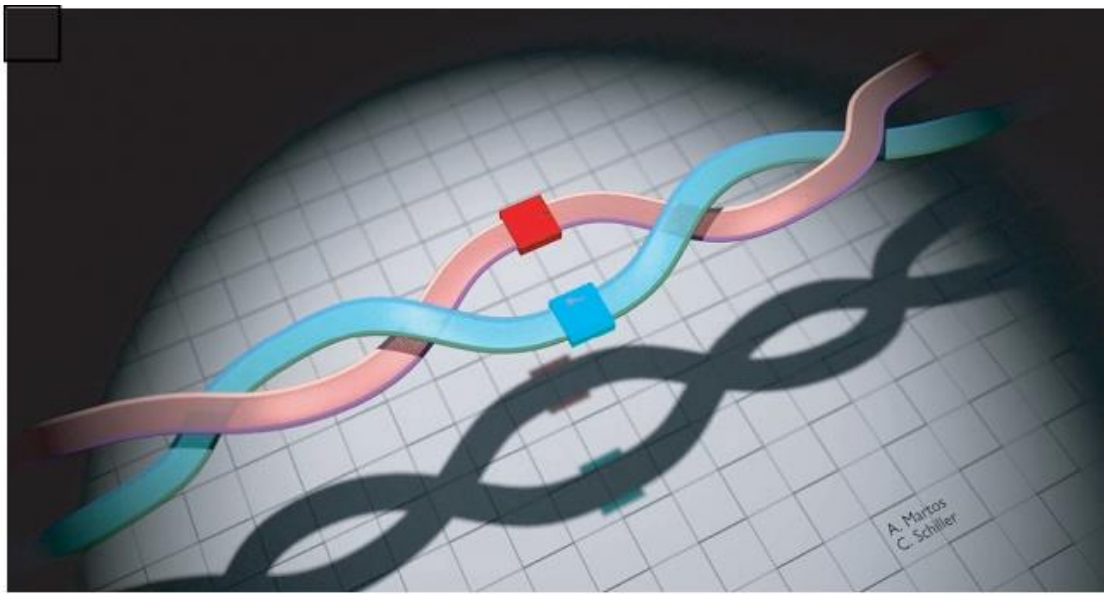
بدءا من نموذج الإبزيم لجسيمات الكم (صفحة 119) المبين في الشكل 60 ، يمكننا تخيل أنبوب يوصل جسيمين ، بشكل مشابه للسير الموصل لإبزيمي سير / حزام كما هو مبين في الشكل 66 . إن الأبازيم تمثل الجسيمات ، و الأنبوب يتابع منحاهما النسبي . إذا تم تدوير جسيم/ إبزيم بمقدار 2π على طول أي محور ، مما يحقق كليا 4π ، و الفتل المضاعف الناشئ يمكن بسهولة أن يزال بتحريك أو تدوير الأبازيم .

الآن لننظر ثانية للشكل 66 . إذا أخذنا إبزيمين و ببساطة بدلنا موضعيهما و أدخل فتل في الحزام . إذا بدلناهما ثانية فإن الفتل سيختفي . باختصار إبزيمي الحزام المتصلين يعودان لحالتهما الأصلية فقط بعد تبادل مضاعف و ليس بعد تبادل وحيد .

بمعنى آخر ، إذا أخذنا كل إبزيم أنه يمثل جسيم و فتل ليعني عامل يساوي 1- فإن الحزام يصف تماما سلوك الطور لتوابع الموجة للبرم 1/2 تحت كل من الدوران و تحت التبادل . بشكل خاص ، نرى أن سلوك الدوران و التبادل مرتبطان .



الشكل 67 – نماذج الحزام المعممة من أجل جسيمي برم 1/2



الشكل 68 – افترض أن الحزامين لا يمكن ملاحظتهما ولكن الأجسام المربعة يمكن و أنها تمثل جسيمات . نحن نعلم من السابق أن الأبازيم ذات السير تتصرف مثل جسيمات برم 1/2 . الفيلم المتحرك يبين أن اثنين من مثل هذه الأجسام يعودان إلى الوضع الأصلي إذا تم تبديلهما في الوضع مرتين (ولكن ليس مرة) . مثل هذه الجسيمات بالتالي تحقق خاصة التعريف للفرميونات (من أجل الحالة المعاكسة ، تلك العائدة للبوزونات ، فإن التبادل البسيط سيؤدي إلى وضعية مطابقة) . يمكنك تكرار الخدعة في البيت باستخدام قطع ورقية . المكافئ مبين هنا بواسطة حزامين لكل جسيم ، ولكن الخدعة تعمل من أجل أي عدد موجب من الأحزمة متصلة بكل إبزيم . و هذا الفيلم المتحرك جزء أساسي من إثبات أن جسيمات البرم 1/2 هي فرميونات . هذا يسمى نظرية البرم – الإحصاء .

بشكل مشابه خدعة الحزام نفسها يمكن أن تعمم على التبادل .خذ إبزيمين اللذين

بشكل مشابه خدعة الحزام نفسها يمكن أن تعمم على التبادل .خذ إبزيمين اللذين يتصلان بالعديد من الحزامات أو الخيوط مثل في الشكل 67 أو في الشكل 68 . و الحزام يمكن أن يربط الجسيمات أو يذهب للفراغ اللانهائي أو كلاهما . التبادل للإبزيمين ينتج تشابك معقد تماما . لكن تقريبا بشكل لا يصدق في كل الحالات التبادل الثاني يؤدي إلى الوضعية الأصلية ، إذا تم إعادة ترتيب الحزامين بشكل صحيح (تحدي 106e) . يمكن أن تربد اختبار بنفسك أن ذلك السلوك أيضا صالح إذا كانت جسيمات إضافية موجودة طالما أنك دائما تبادل نفس الجسيمين مرتين .

نخلص إلى أن الأجسام المقيدة تتصرف مثل الفرميونات تحت التبادل . هذه القياسات معا تشكل نظرية البرم – الإحصاء من أجل جسيمات البرم 1/2 : سلوك البرم و التبادل مرتبطان . في الحقيقة هذه المقولات التي هي تقريبا تجريبية يمكن أن توضع في لغة رياضية تامة (مرجع 88) بدراسة سلوك فراغ التشكيل للجسيمات . و هذه الدراسات تؤدي للعبارات التالية :

- أجسام البرم 1/2 هي فرميونات *
- تبادل و دوران جسيمات البرم 1/2 هي عمليات متشابهة

باختصار الأجسام التي تتصرف مثل جسيمات البرم 1/2 تحت الدورانات أيضا تتصرف مثل الفرميونات تحت التبادل و العكس بالعكس ، سلوك التبادل للجسيمات يحدد خواصها الإحصائية ، وسلوك الدورات يحدد برمها . بتعميم خدعة الحزام لعدة أبازيم كل منها ذو أحزمة متعددة فإننا بالتالي نعرض نظرية البرم – الإحصاء للفرميونات .

لاحظ أن كل هذه المقولات تتطلب ثلاثة أبعاد للفراغ ، لأنه ليس هناك تشابكات (أو عقد) بأبعاد أقل أو أكثر . ** و في الحقيقة يوجد البرم فقط في ثلاثة أبعاد فراغية .

إن خدعة الحزام تؤدي لأحاجي ممتعة . لقد رأينا أن الجسم ذو البرم 1/2 يمكن نمذجته بتخيل أن حزام يؤدي إلى اللانهاية الفراغية متصل به . إذا أردنا أن ننمذج سلوك البرم بواسطة خيوط / أوتار أحادية البعد بدلا من العصابات ما هو العدد الأصغري من الخيوط التي نحتاجها ؟ (تحدي 108 s) . الأكثر صعوبة هو الأحجية التالية : هل يمكن لخدعة الحزام أن تنفذ إذا كان الإبزيم ملصقا إلى فراش بالتالي الفراش يعمل مثل الأحزمة العديدة اللانهائية ؟ (تحدي 109 d).

الزوايا ، مبدأ الاستبعاد لباولي و صلابة المادة

لماذا نستطيع قرع باب ؟ لماذا يمكن للأحجار ألا تطير عبر جذوع الشجر ؟ كيف تحملنا الجبال التي نسير عليها ؟ لماذا لا يمكننا السير عبر الجدران ؟ في الفيزياء الكلاسيكية ، لقد تجنبنا هذه القضية ن بأخذ الصلابة كتعريف لخاصة المادة . لكننا لا يمكننا فعل ذلك بعد الآن : لقد رأينا أن المادة تتكون أساسا من غيوم إلكترونية منخفضة الكثافة . كم الفعل بالتالي يجبرنا على شرح كم المادة .

إن شرح قابلية اختراق المادة داخليا للأجسام جعل مستحيلا من قبل مبدأ الاستبعاد لباولي من بين الإلكترونات داخل الذرات . ينص مبدأ الاستبعاد لباولي :

- إن فرميونين لا يمكنهما أن يشغلا نفس الحالة .

---

*القيمة القابلة للقياس رياضيا التي تتصرف مثل جسيم ذو برم 1/2 هي ليست شعاع و لا تنسور ، كما يمكن أن تريد التأكد . المفهوم الإضافي ضروري ، مثل هذه القيمة القابلة للقياس تسمى سبينور (برام) (تحدي 107 e). سوف نطرح ذلك بالتفصيل لاحقا . (صفحة 188)

**بالطبع العقد و التشابكات توجد في أبعاد أعلى . بدلا من اعتبار الخطوط أحادية البعد المعقودة ، يمكننا اعتبار المستويات المعقودة أو المستويات العالية المعقودة ذات المراتب الأعلى . مثلا ، المستويات القابلة للتشوه يمكن عقدها في أربعة أبعاد و فراغات ثلاثية قابلة للتشوه في خمسة أبعاد .لكن الأبعاد الفعالة التي تنتج العقدة تكون دائما ثلاثة .

كل التجارب معروف أنها تؤكد العبارة .

لماذا الإلكترونات و الفرميونات الأخرى تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي ؟ الجواب يمكن أن يعطى بمقولة بسيطة بشكل جميل .(مرجع 89) . نحن نعلم أن تبادل فرميونين ينتج إشارة سالب في تابع الموجة الكلي . تخيل كون هذين الفرميونين كما ستقول الفيزياء الكلاسيكية ، متوضعين في نفس البقعة ، أو كما يمكن أن يقول فيزيائي كمي ، في نفس الحالة . إذا كان هاذ ممكنا فإن التبادل لن يغير شيء في الجملة . لكن التبادل في الفرميونات يجب أن ينتج إشارة سالب للحالة الكلية . كلا الإمكانيتين – عدم التغير على الإطلاق و أيضا إشارة السالب – لا يمكن تحقيقهما بنفس الوقت . هناك فقط طريقة واحدة للخروج من هذا : الفرميونين يجب أن يتجنبا أن يكونا قط في نفس الحالة . هذا هو مبدأ الاستبعاد لباولي.

مبدأ الاستبعاد هو سبب أن قطعتين من المادة في الحياة اليومية لا يمكن أن يخترقا بعضهما البعض ، لكن يجب أن يتنافرا مع بعضهما البعض . مثلا ، خذ جرسا . الجرس سوف لن يعمل إذا كانت القطع المتصادمة التي تنتج الصوت ستخترق بعضها البعض . لكن في أي مثال لقطعتين تخترقان بعضهما البعض ، فإن الإلكترونات من ذرات مختلفة يجب أن تكون عند نفس البقعة : يجب أن تكون في نفس الحالات . هذا مستحيل . و مبدأ الاستبعاد لباولي يمنع الاختراق البيني للمادة . الأجراس فقط تعمل بسبب مبدأ الاستبعاد .

لماذا لا نسقط عبر الأرض ، حتى بالرغم من أن الجاذبية تسحبنا للأسفل لكننا نبقى واقفين على سطحها ؟ مرة ثانية السبب هو مبدأ الاستبعاد لباولي . لماذا الأرض نفسها لا تسقط ؟ إنها لا تسقط لأن مادة الأرض لا يمكن أن تخترق نفسها و أن الذرات لا يمكن أن تتكون لتقترب من بعضها البعض أكثر من مسافة أصغرية معينة.

بتعبير آخر مبدأ الاستبعاد لباولي يقتضي أن المادة الذرية لا يمكن ضغطها بشكل لا نهائي . و عند مرحلة معينة فإن ضغط باولي الفعال يظهر ، بحيث أنه ينشأ حد الانضغاط . لهذا السبب مثلا ، الكواكب مكونة من مادة ذرية – أو النجوم النيوترونية مكونة من نيوترونات التي لها برم 1/2 و بالتالي أيضا تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي و لا تتقوض تحت ثقالتها / جاذبيتها الخاصة .

إن مبدأ الاستبعاد هو سبب أن الذرات هي غيوم إلكترونية ممتدة و أن الذرات المختلفة لها أحجام مختلفة . في الحقيقة ، مبدأ الاستبعاد يجبر الإلكترونات في الذرات على تشكيل طبقات . عندما تضاف الإلكترونات حول النواة و عندما تملأ طبقة تبدأ طبقة جديدة في التشكل . و هذا هو أصل الجمل الدورية للعناصر .

إن حجم أي ذرة هو حجم آخر طبقة فيها . بدون مبدأ الاستبعاد فإن الذرات ستكون صغيرة مثل ذرة الهيدروجين . و في الحقيقة أكثر الذرات هي أكبر بشكل معتبر . و نفس المقولة تطبق على النوى : إن حجمها يعطى بآخر طبقة نكليون . و بدون مبدأ الاستبعاد فإن النوى ستكون صغيرة مثل البروتون الوحيد . في الحقيقة هي عادة أكبر بحوالي 000 100 مرة .

إن مبدأ الاستبعاد أيضا يجيب على سؤال قديم : كم عدد الملائكة التي يمكن أن ترقص على رأس دبوس ؟(لاحظ أن الملائكة ، إن وجدت يجب أن تكون مكونة من فرميونات كما يمكن أن تستنتج من المعلومات المعروفة حولها و أن رأس الدبوس هو نقطة وحيدة في الفراغ) (تحدي s 110). إن كلا من النظرية و التجربة تؤكد الجواب الذي أعطي للتو من قبل توماس الأكويني في العصور الوسطى (مرجع 90) : فقط ملك واحد ! . إن مبدأ الاستبعاد للفرميون يمكن أن يسمى " مبدأ الاستبعاد للملائكة " . للبقاء في الموضوع ، المبدأ أيضا يبين أن الأشباح لا يمكن أن تكون أجساما ، حيث أن الأشباح يفترض أن تكون قادرة على اختراق الجدران .

لنجمع المعلومات ، و بالتبسيط بعض الشيء فإن مبدأ الاستبعاد يبقي الأشياء حولنا في شكلها . بدون مبدأ الاستبعاد لن يكون هناك أجسام ثلاثية الأبعاد . فقط مبدأ الاستبعاد يثبت قطر الغيوم الذرية , يمنع هذه الغيوم من الاندماج و يبقيها بعيدة عن بعضها البعض . هذا التنافر هو أصل حجم الصابون ، الكواكب ، و النجوم النيوترونية . كل الأشكال للأجسام الصلبة و السوائل هي نتيجة مباشرة لمبدأ الاستبعاد . بعبارة أخرى عندما نطرق على طاولة أو على باب فإننا نثبت تجريبيا أن ثلاثة أجسام و يدينا مكونة من فرميونات .

حتى الآن لقد اعتبرنا الفرميونات بأن ذات برم 1/2 . وسوف لن نتحدث كثيرا عن الجسيمات ذات قيمة البرم الزوجية الأعلى مثل 3/2 أو 5/2 . مثل هذه الجسيمات يمكن كلها رؤيتها بأنها مكونة من عناصر ذات برم 1/2 . هل يمكنك تأكيد هذا ؟ (تحدي e 111) .

إننا لم نتحدث حول البرم الأخفض من 1/2 أيضا . إن النظرية الشهيرة تنص على أن قيمة البرم بين 0 و 1/2 هي مستحيلة في الأبعاد الثلاثية . البرم الأصغر مستحيل بسبب زاوية الدوران الكبر التي يمكن تمييزها و قياسها في الأبعاد الثلاثية هي 4π . ليس هناك طريقة لقياس زاوية اكبر حيث أن كم الفعل يجعل هذا مستحيلا . بالتالي لا يمكن أن يكون هناك أي قيمة برم بين 0 و 1/2 في الطبيعة .

هل البرم هو دوران حول محور ؟

إن برم جسيم يتصرف تجريبيا مثل كمي حركة زاوية و يجمع مثل كمية الحركة الزاوية و هو مصون كجزء من كمية الحركة الزاوية و يوصف مثل كمية الحركة الزاوية و له نفس المرادفات لكمية الحركة الزاوية . بالرغم من كل هذا لعقود عديدة فإن أسطورة غريبة و خاطئة انتشرت في العديد من مناهج الفيزياء و الكتب في العالم : "البرم 1/2 بالرغم من اسمه فإنه ليس دوران حول محور " . لقد حان الوقت للإنهاء بهذا المثال للتفكير غير الصحيح .

الإلكترونات التي لها برم 1/2 تكون مشحونة . الإلكترونات و كل الجسيمات المشحونة ذات البرم 1/2 تملك عزم مغناطيسي * . إن العزم المغناطيسي يتوقع من أجل أي شحنة دوارة . بتعبير آخر البرم 1/2 يتصرف مثل دوران ز لكن بافتراض أن الجسيم مكون من توزع مستمر للشحنة في حركة دورانية يعطي قيمة خاطئة للعزم المغناطيسي . في الأيام الأولى من القرن العشرين عندما كان الفيزيائيون ما يزالون يفكرون بشكل كلاسيكي ، خلصوا إلى أن برم الجسيمات المشحونة 1/2 لا يمكن بالتالي أن تكون دوراة . وهذه الأسطورة بقيت في العديد من الكتب .لكن الاستنتاج الصحيح هو أن افتراض توزع الشحنة المستمر هو خطأ . في الحقيقة الشحنة مكممة و لا أحد يتوقع أن الشحنة الأولية هي منتشرة بشكل مستمر عبر الفراغ ، حيث أن هذا سيتعارض مع التكميم .

السبب الآخر للأسطورة الخاطئة هي الدوران نفسه . الأسطورة تستند إلى التفكير الكلاسيكي و تقول أن أي جسم دوار له برم صحيح . نظرا لأن البرم ذو قيمة نصف الصحيحة غير ممكن في الفيزياء الكلاسيكية ، يقال بأن مثل هذا البرم غير ناتج عن الدوران .

لكن لنتذكر ما هو الدوران . إن كلا من خدعة الحزام للبرم 1/2 و كذلك حالة البرم الصحيح تذكرنا : الدوران لجسم حول آخر هو نسبة أو مضاعف من تبادل و إن ما نسميه جسم دوار في الحياة اليومية هو جسم يتبادل باستمرار مواضع أجزائه و العكس بالعكس .

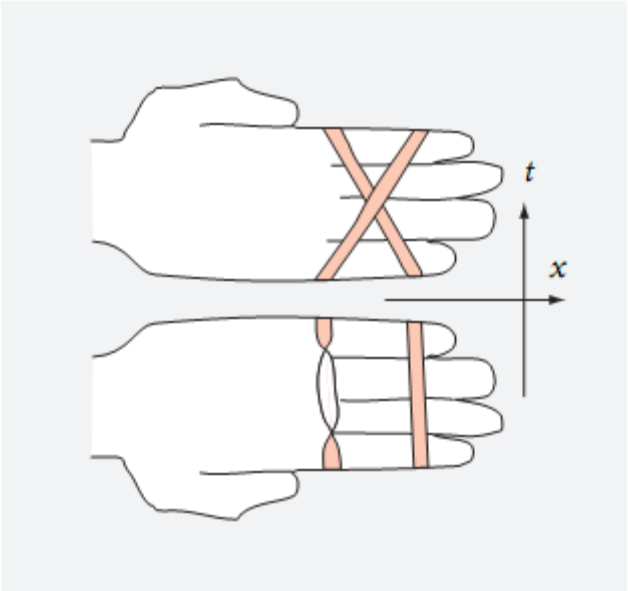
- الدوران و التبادل هما نفس العملية

الآن لقد وجدنا أن البرم هو سلوك تبادل . نظرا لأن الدوران هو تبادل و البرم هو تبادل ينتج أن

- البرم هو دوران

---

*هذا العزم المغناطيسي يمكن بسهولة قياسه في تجربة لكن ليست من نوع تجربة شتيرن – غيرلاخ . لماذا لا ؟ (تحدي ny 112)



الشكل 69 – تكافؤ التبادل و الدوران في الفراغ – الزمن

نظرا لأننا استنتجنا البرم مثل فينجر ، من ثبات الدوران فإن هذه النيتجة ليست مدهشة . بالإضافة لذلك نموذج الحزام للجسيم ذو البرم 1/2 يخبرنا أن مثل هذا الجسيم يمكن أن يدور بشكل مستمر بدون أي إعاقة (صفحة 130) . أيضا العزم المغناطيسي بالتالي يحصل على قيمته الصحيحة. باختصار ، يسمح لنا أن نقول بأن البرم هو دوران حول محور بدون أي تعارض مع القياسات حتى من أجل البرم 1/2 .

في الملخص ، نموذج الحزام يبين أيضا أن البرم 1/2 هو دوران ، طالما أننا افترضنا أن فقط الإبزيم يمكن أن يلاحظ وليس الحزام (الأحزمة) (مرجع 91) و أن الجسيم الأولي غير موزع باستمرار في الفراغ .*

نظرا لأن خواص التباديل و خواص البرم للفرميونات هي موصوفة جيدا بواسطة نموذج الحزام ، فإنه سيؤدي لنتيجة أن هذه الخواص يمكن حقيقة أن تكون نتيجة لمثل هذه الارتباطات مثل الحزام بين الجسيمات و العامل الخارجي .

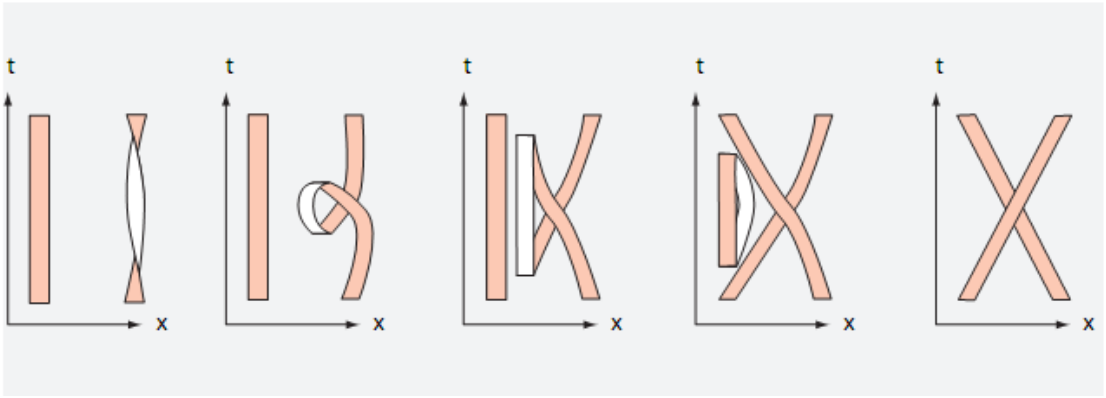
ربما لسبب ما ، فإننا فقط نلاحظ أبازيم الحزام و ليس الأحزمة نفسها . في الجزء الأخير من مسيرتنا سوف نكتشف فيما إذا كانت هذه الفكرة صحيحة .

الدوران يتطلب جسيمات مضادة

الارتباط بين الدوران و الجسيمات المضادة يمكن أن يكون النتيجة الأكثر إدهاشا من التجارب التي تبين البرم . حتى الآن لقد رأينا أن الدوران يتطلب وجود البرم ، وأن البرم يظهر عندما تدخل النسبية في نظرية الكم ، (مجلد II ،صفحة 72) و أن النسبية تتطلب المادة المضادة . إن أخذ هذه العبارات معا ، فإن نتيجة العنوان لا تكون مدهشة بعد الآن : يتطلب الدوران جسيمات مضادة . من المدهش أن هناك مقولة بسيطة تبين نفس النقطة بواسطة نموذج الحزام ، إذا عمت من الفراغ لوحده إلى الفراغ – الزمن الكامل .

---

*من الواضح أن البنية الدقيقة للإلكترون ما تزال غير واضحة عند هذه النقطة . أي كمية حركة زاوية S معطاة كلاسيكيا بالشكل $S = \Theta\omega$ ، لكن لا عزم العطالة Θ المرتبط بنصف قطر الدوران و كتلة الإلكترون و لا السرعة الزاوية ω هي معلومة عند هذه النقطة . علينا الانتظار فترة طويلة حتى الجزء الأخير من مغامرتنا لنجد المزيد



الشكل 70 - الأحزمة في الفراغ – الزمن : الدوران و الجسيمات المضادة

لنتعلم كيفية التفكير في الفراغ – الزمن لنأخذ جسيم و نرجعه إلى ذيلين ، بحيث أن الجسيم هو مقطع خط قصير . عند الحركة في 2+1 بعد في الفراغ الزمن (تحدي ny 113) ، الجسيم موصوف بشريط . إن اللعب بالشرائط في الفراغ – الزمن بدلا من الأحزمة في الفراغ يعطي العديد من النتائج المهمة . مثلا الشكل 69 يبين أن لف شريط مطاطي حول الأصابع يمكن أن يبين ، ثانية ، أن الدوران لجسم بمقدار 2π بوجود جسم ثان هو نفس تبادل المواضع للجسمين . * إن كلا الطرفين لليد يحول نفس الشرط الابتدائي ، في حافة لليد إلى نفس الشرط النهائي عند الحافة الأخرى . بالتالي لقد عممنا بنجاح نتيجة معروفة من الفراغ إلى الفراغ – الزمن : الدوران و التبادل هما متكافئين .

إذ كنت تعتقد أن الشكل 69 شرح غير مرضي فأنت على حق . إن الشرح الأكثر إرضاءا يجب أن يشمل تتابع انسيابي للخطوات التي تحقق التكافؤ بين الدوران و التبادل . هذا مبين في الشكل 70 . نفترض أن كل جسيم موصوف بمقطع في الشكل ، المقطعين يقعان أفقيا . المخطط الأيسر يبين جسيمين : الأول في سكون و الثاني مدور بمقدار 2π . تشوه الأشرطة

يبين أن هذه العملية مكافئة للتبادل في الموضع للجسيمين ، المبينة في المخطط أقصى اليمين .

لكن النقطة الأساسية يمكن أن تكون المخطط في الوسط . نلاحظ أن التتابع الذي يبين التكافؤ بين الدوران و التبادل يتطلب استخدام حلقة . لكن مثل هذه الحلقة في الفراغ – الزمن تصف ظهور زوج الجسيم – الجسيم المضاد . بمعنى آخر ، بدون الجسيمات المضادة تكافؤ الدوران و التبادل لن يصح . باختصار الدوران في الفراغ – الزمن يتطلب وجود الجسيمات المضادة.

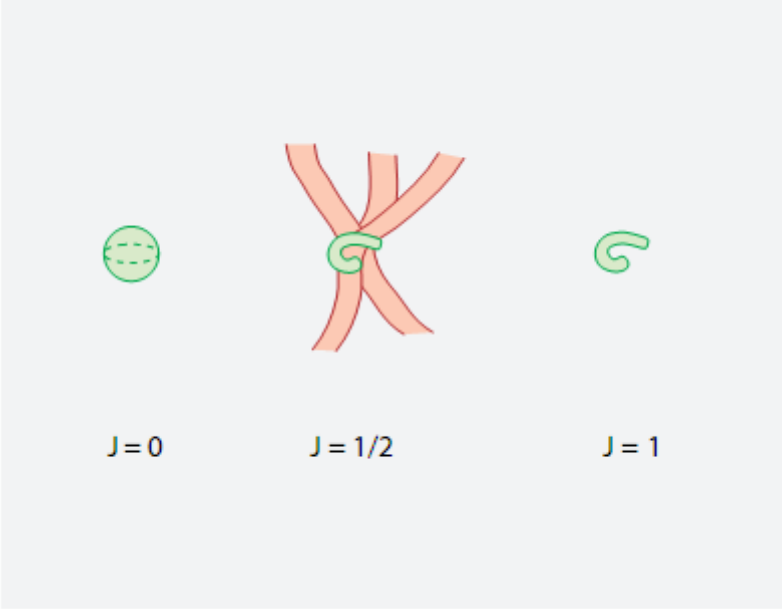
لماذا المبارزة بواسطة حزم الليزر مستحيل ؟

عندما يقترب سيف بشكل خطير ، يمكننا إيقافه بسيف ثان . العديد من الأفلام القديمة تستخدم مثل هذه المشاهد. عندما تقترب حزمة ليزر من المستحيل مبارزتها بحزمة أخرى ، بالرغم من أن أفلام الخيال العلمي تظهر ذلك . إن ارتطام حزمتي ليزر ببعضهما البعض مستحيل . الشرح السابق لنظرية البرم – الإحصاء تبين لماذا .

إن الإلكترونات في السيوف هي فرميونات و هي تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي . إن الفرميزنات تجعل المادة غير قابلة للاختراق . من ناحية اخرى ، الفوتونات في حزم الليزر هي بوزونات .

---

*من الواضح أن المقولة الكاملة ستحتاج لفحص نموذج البرم 1/2 الكامل في الشكل 65 في الفراغ – الزمن رباعي الأبعاد . لكن فعل هذا ليس عملا سهلا و لا يوجد عرض جيد بعد (تحدي 114 ny)



الشكل 71 – بعض عروض لتمثيلات البرم

البوزونات يمكن أن تكون في نفس الحالة ، البوزونات تسمح بالاختراق . المادة غير قابلة للاختراق لأنها على المستوى الأساسي حيث هي مكونة من فرميزنات . الإشعاع مكون من بوزونات ، حزم الضوء يمكن أن تتقاطع مع بعضها البعض. التمييز بين الفرميونات و البوزونات بالتالي يشرح لماذا الجسام يمكن أن تتلامس بينما الصور لا يمكنها . في الجزء الأول من صعودنا للجبل بدأنا بملاحظة هذا الفرق و الآن تحن نعلم أصله (مجلد ا ، صفحة 98).

البرم ، الإحصاء و التركيب

تحت الدورانات ، فإن جسيمات البرم الصحيحة تتصرف بشكل مختلف عن الجسيمات ذات العدد نصف الصحيح .جسيمات البرم الصحيح لا تبدي تغيرات إشارة غريبة تحت الدورانات بمقدار 2π . في تصوير الحزام ، جسيمات البرم الصحيح لا تحتاج لخيوط اتصال . بشكل خاص ، جسيمات البرم الصفري من الواضح أنها تقابل كرة . النماذج من أجل حالات البرم المهمة الأخرى مبينة في الشكل 71 . بدراسة خواصها بنفس الشكل أعلاه نصل على نظرية البرم – الإحصاء الكاملة :

- تبادل و دوران الأجسام هي عمليات متشابهة
- الجسام ذات البرم نصف الصحيح هي فرميونات . و هي تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي
- الأجسام ذات البرم الصحيح هي بوزونات

يمكنك أن تثبيت أن هذا يكفي ببيان القاعدة التالية (تحدي e 115):

- مركبات البوزونات و أيضا مركبات عدد زوجي من الفرميونات (عند طاقة منخفضة) هي بوزونات و مركبات عدد غير زوجي من الفرميونات هي فرميونات .*

---

*هذه القاعدة تقتضي أن البرم 1 و أعلى يمكن أيضا تحقيقه بواسطة الذيول ، هل يمكنك إيجاد مثل هذه التمثيلات؟(تحدي s 116) . لاحظ أن مركب الفرميونات يمكن أن تكون بوزونات حتى تلك الطاقة التي عندها يتحطم التركيب . أو بجمع الفرميونات في بوزونات يمكن أن يكون لدينا فرميونات بنفس الحالة .

هذه الارتباطات تعبر عن المميزات الأساسية للعالم ثلاثي الأبعاد الذي نغيش فيه . لأي صنف من الجسيمات تنتمي كرات التنس ، الناس ، الأشجار و كل الأجسام الماكروسكوبية الأخرى ؟ (تحدي s 117)

الحجم و كثافة المادة

إن الأبعاد الفراغية الثلاثية لها العديد من النتائج للجمل الفيزيائية . نحن نعلم أن كل المادة مكونة من فرميونات مثل الإلكترونات ، البروتونات و النيوترونات . إن مبدأ الاستبعاد له نتيجة مهمة للجمل المكونة من N فرميون متطابقة ، مثل هذه الجمل تخضع للعلاقة التالية من أجل كمية الحركة p و الحجم l

$$\Delta p\ \Delta l \gtrsim N^{1/3}\hbar\ . \qquad (67)$$

هل يمكنك استنتاجها ؟ (تحدي e 118) هذه العلاقة المعممة لعدم التحديد هي طريقة بسيطة لتقدير الحجم الفراغي للجمل المادية (مرجع 92) . بشكل خاص علاقة عدم التحديد المعممة تقتضي أن متوسط الطاقة لكل كوانتون تزداد مع كثافة الكوانتونات . هل يمكنك بيان هذا ؟ (تحدي e 119) .

إن علاقة عدم التحديد المعممة تقتضي أن الجمل المادية التي امتداداها ناتج عن الإلكترونات – بالتالي الجمل المادية المكثفة – أساسا لها كثافات مادة و طاقة متشابهة . إن علاقة عدم التحديد المعممة أيضا تقتضي أن النوى التي هي مكونة من بروتونات و نيوترونات كلها أساسا لها نفس كثافة المادة .

بالنسبة للبوزونات ، عناصر الإشعاع ، ليس هناك علاقة عدم تحديد معممة ، حيث أن عدد العناصر N في حالة كمية معينة لا تملك أي تأثير أو حدود . إن علاقة عدم التحديد بالتالي لا تحد من كثافة الاستطاعة لضوء الليزر ، و في الحقيقة كثافة الاستطاعة لحزم الليزر تتغير بشكل أكثر من كثافة المادة للأجسام الصلبة .

عن علاقة عدم التحديد تشير لفرق آخر بين المادة و الإشعاع (صفحة 48) . كما رأينا أعلاه فإن جملة من N بوزون متطابقة مثل حزمة الليزر تخضع لعدم تحديد بين العدد و الطور الذي يستنتج بسهولة من علاقة عدم التحديد للطاقة – الزمن . إن علاقة العدد – الطور يمكن كتابتها تقريبا بالشكل :

$$\Delta N \, \Delta\varphi \gtrsim 1 \, . \qquad (68)$$

العلاقة مهمة في استخدام الليزرات في تجارب دقيقة . تحد العلاقة مقدار قرب الجملة من موجة جيبية صرفة حقيقة من أجل موجة جيبية صرفة جداء عدم التحديد سيكون صفر .

من أجل الفرميونات حيث العدد الأعظمي الذي في نفس الحالة هو 1 ، فإن علاقة الارتياب للعدد – الطور ترد إلى ارتياب كلي على الطور . بعبارة أخرى ، نجد – ثانية – أنه لا يمكننا أن يكون لدينا حزم فرميونات تتصرف مثل الأمواج . ليس هناك أمواج فرميونات كلاسيكية و لا يوجد حزم فرميونات متماسكة في الطبيعة (صفحة 100).

ملخص عن البرم و عدم قابلية التمييز

إن كم الفعل $\hbar$ يقتضي أن الجمل الفيزيائية مكونة من نوعين من الجسيمات الكمية غير القابلة للتمييز : البوزونات و الفرميونات . سلوكي التبادل الممكنين مرتبطان بقيمة برم الجسيم ، لأن التبادل مرتبط بالدوران .

إن الارتباط بين البرم و الدوران يقتضي أن الجسيمات المضادة موجودة . أيضا يقتضي أن البرم هو ضمنيا ظاهرة ثلاثية الأبعاد .

تبين التجارب أن الإشعاع مكون من جسيمات أولية التي تتصرف مثل البوزونات . البوزونات لها عدد برم صحيح . إن بوزونين أو أكثر مثل فوتونين يمكن أن يتشاركا بنفس الحالة . و هذا التشارك يجعل ضوء الليزر ممكنا .

تبين التجارب أن المادة مكونة من جسيمات أولية التي تتصرف مثل الفرميونات و الفرميونات لها أعداد برم نصف صحيحة . وهي تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي : إن فرميونين لا يمكن أن يكون لهما نفس الحالة . مبدأ الاستبعاد بين الإلكترونات يشرح بنية و (جزئيا) حجم الذرات و أيضا السلوك الكيماوي للذرات كما سنجد لاحقا . مع التنافر الكهربائي الساكن للإلكترونات فإن مبدأ الاستبعاد يشرح عدم قابلية انضغاط المادة و عدم إمكانية اختراقها .

الفرميونات تجعل المادة صلبة و البوزونات تسمح للحزم بالتقاطع / العبور .

حدود و أسئلة مفتوحة لإحصاء الكم

إن موضوع إحصاء الكم يبقى حقل بحث في الفيزياء النظرية و التجريبية . بشكل خاص ، الباحثون ما يزالون يبحثون في تعميمات سلوكات التبادل الممكنة للجسيمات .

في الأبعاد الفراغية الثنائية فإن اثر تبادل الجسيم على تابع الموجة هو طور مستمر (صفحة 136) على عكس الأبعاد الثلاثية حيث النتيجة هي إشارة . إن الأجسام الكمية ثنائية الأبعاد هي بالتالي تسمى أنيونات لأنه يمكن أن يكون لها أي برم . الأنيونات تظهر كشبه جسيمات في تجارب متعددة في فيزياء الحالة الصلبة ، لأن الجملة غالبا يكون لها بعدين فعالين . و أثر هول الكمي الجزئي ربما الاكتشاف الأكثر أهمية للفيزياء التجريبية الحديثة وقد دفع الأنيونات إلى مجال البحث الحديث (مجلد V ، صفحة 107) .

النظريين الآخرين عمموا مفهوم الفرميونات بطرق أخرى ، وأدخلوا البارافيرميونات ، بارابوزونات ، بليكتونات و مفاهيم دون نظرية أخرى . (مرجع 93) . قضى أوسكار جرينبيرج أكثر حياته المهنية حول هذه القضية . و نتيجته هي :

- في أبعاد الفراغ – الزمن د الفراغ – الزمن 1+3 فقط الفرميونات و البوزونات موجودة

هل يمكنك بيان أن هذه النتيجة تقتضي أن الأشباح التي تظهر في القصص الأسكتلندية غير موجودة ؟ (تحدي 120s)

من وجهة نظر مختلفة فإن نموذج الحزام للبرم 1/2 يدعو لدراسة سلوك الجدائل ، الوصلات المفتوحة و العقد . (في الرياضيات ، الجدائل و الوصلات المفتوحة مصنوعة من سرائد / مجموعات ممتدة للانهاية) . هذا الجزء الرائع من الفيزياء الرياضية أصبح مهما في النظريات الحديثة الموحدة ، التي تنص على أن الجسيمات ، خاصة عند طاقات عالية ليست نقطية ، ولكن أشياء ممتدة . إن السعي لفهم ما يحدث لتناظر التباديل في نظرية موحدة للطبيعة . إن نظرة على المصاعب ظهرت أعلاه : كيف يمكن للشكل 70 & 65 , 60 أن تتوافق و تجمع ؟ سوف نسوي هذه القضية في الجزء النهائي من صعودنا الجبل (مجلد VI ، صفحة 172) .

الفصل السابع

تنضدات و احتمالات – نظرية الكم بدون إيديولوجيا

" حقيقة أن العرض الفلسفي المناسب كان قد تأخر طويلا هو ناتج عن حقيقة أن نيلز بور قد غسل دماغ جيل كامل من النظريين الذين يفكرون أن العمل قد تم منذ خمسين سنة مضت

موراي جيل – مان " (مرجع 94)

لماذا القضية الفيزيائية الشهيرة تثير مثل هذه المشاعر القوية ؟ بشكل خاص ، من هو مغسول الدماغ ، جيل – مان ن مكتشف الكواركات أو أكثر فيزيائيي العالم الذين يعملون على النظرية الكمية الذين تبعوا رأي نيلز بور ؟

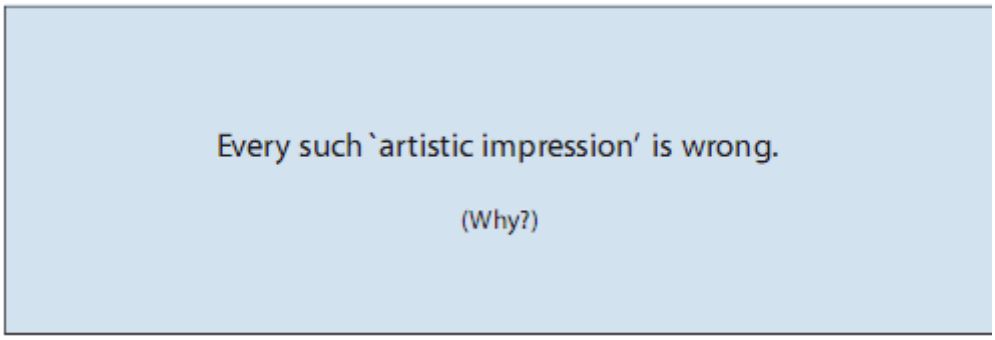
في القرن العشرين ميكانيك الكم قد جعل الكثير في حالة ضياع . لدينا هدف أساسي : نريد أن نفهم نظرية الكم . ميكانيك الكم هو غير مألوف لسببين : إنه يسمح بتنضدات و يؤدي إلى احتمالات . في هذا الفصل سوف ندرس و نوضح هذين الموضوعين – حتى نفهم نظرية الكم .

الاحتمالات تظهر عندما تقاس ناحية من الجملة الميكروسكوبية . كم الفعل ، قيمة أصغر تغير التي توجد في الطبيعة تؤدي لظهور الاحتمالات في القياسات .

التنضدات تظهر بسبب أن كم الفعل يغير جذريا المفهومين الأكثر أساسية للفيزياء الكلاسيكية : الحالة و الجملة . الحالة لم تعد تعرف و لم تعد تصف القيم الخاصة المأخوذة من قبل الموضع وكمية الحركة ولكن بتابع الموجة الخاص المأخوذ بواسطة معاملات الموضع و كمية الحركة **. بالإضافة لذلك في الفيزياء الكلاسيكية الجمل وصفت و عرفت كمجموعة من النواحي الدائمة للطبيعة و الدوام عرف بأنه تبادل تأثير مهمل مع البيئة .

إن توضيح أصل التنضدات و الاحتمالات و أيضا مفاهيم الجملة و الحالة سيساعدنا في تجنب الضياع في طريقنا لأعلى جبل الحركة . في الحقيقة إن عددا كبيرا من الباحثين أضاعوا طريقهم منذ أن ظهرت نظرية الكم التي تتضمن فيزيائيين مثل جيل – مان و ستيفن فاينبيرج .

**من المكافئ وغالبا الأوضح من حيث المبدأ القول أن الحالة موصوفة بمجموعة كاملة من العوامل المتبادلة . في الحقيقة مناقشة الحالات هي بعض الشيء مبسطة في صورة هايزنبرج . ولكن هنا ندرس قضية في صورة شرودنجر فقط أي استخدام توابع الموجة .



(تحدي 121 s)

الشكل 72 – انطباع الفنان لتنضد ماكروسكوبي مستحيل – لأن مثل هذه التنضدات لا توجد في بيئتنا

لماذا الناس إما أموات أو أحياء ؟

إن معادلة التطور لميكانيك الكم هي خطية في تابع الموجة و الخطية تعكس وجود التنضدات . التنضدات تقتضي أنه يمكننا تخيل و محاولة إنشاء جمل حيث الحالة ψ هي تنضد لحالتين متميزتين جذريا ، مثل تلك العائدة للقطة الميتة والحية.

هذا الحيوان الخيالي الشهير يسمى قطة شرودنجر نسبة لمن أوجد المثال . هل من الممكن إنتاجها ؟ وكيف ستتطور مع الزمن ؟ يمكننا طرح السؤالين في حالات أخرى . مثلا هل يمكننا إنتاج تنضد للحالة حيث السيارة في داخل مرآب مغلق مع حالة حيث السيارة في الخارج ؟ ماذا يحدث بالتالي ؟

التنضدات الماكروسكوبية هي غريبة . مثل هذه الحالات لا تلاحظ في الحياة اليومية و فقط نادرا جدا في المخبر . إن سبب هذه الندرة هي ناحية مهمة مما يسمى غالبا تفسير ميكانيك الكم . في الحقيقة ، مثل هذه الحالات الغريبة ممكنة ، و تنضد الحالات المتميزة ماكروسكوبيا لوحظ فعلا في بضع حالات ، بالرغم من أنه لا يكون في القطط ، الناس أو السيارات . للحصول على فكرة عن القيود لنحدد الوضع بمزيد من التفصيل .*

التنضدات الماكروسكوبية ، التماسك و عدم التماسك

إن هدف المناقشة هي التنضدات الخطية من النوع $\psi = a\,\psi_a + b\,\psi_b$ حيث ψ_a و ψ_b هي حالات متميزة ماكروسكوبيا للجملة قيد المناقشة و حيث a & b هي معاملات عقدية معينة . الحالات تسمى متميزة ماكروسكوبيا عندما كل حالة توافق وضع ماكروسكوبي مختلف أي عندما الحالتين يمكن تمييزهما باستخدام مفاهيم أو طرق قياس للفيزياء الكلاسيكية . بشكل خاص هذا يعني أن الفعل الفيزيائي الضروري للتحويل من حالة لأخرى يجب أن يكون أكبر بكثير من $\hbar$. مثلا الموضعين المختلفين لجسم مكون من عدد كبير من الذرات هما متميزين ماكروسكوبيا . حالة قطة التي تعيش و نفس القطة ميتة أيضا تختلف بالعديد من كمات الفعل .

إن الوضع الغريب هو بالتالي تنضد لحالات متميزة ماكرسكوبيا . لنوجد أصل مثل هذه التنضدات الماكروسكوبية بشكل أوضح . بمعرفة حالتين متميزتين ماكروسكوبيا ψ_a و ψ_b فإن أي تنضد من النوع $\psi = a\,\psi_a + b\,\psi_b$ يسمى بحالة صرفة . نظرا لأن الحالتين ψ_a و ψ_b يمكن أن تتداخلا و يتحدث المرء عن تنضد متماسك (طوريا) . في حال التنضد لحالات متميزة ماكروسكوبيا

---

*أكثر ما يمكن قوله حول هذا الموضوع قيل من قبل ثلاثة باحثين مهمين : نيلز بور ، أحد آباء فيزياء الكم ، جون فون نيومان الذي في القرن التسع عشر شدد على الفروقات بين التطور و إزالة التماسك (مرجع 95) و من قبل هانز ديتر تسه الذين شددوا على أهمية الحمّامات و البيئة في عملية إزالة التماسك (مرجع 96) .

الجداء السلمي $\psi_a^\dagger \psi_b$ من الواضح أنه متلاشي . في حال التنضد المتماسك ، فإن الجداء المعامل a*b هو مختلف عن الصفر . هذه الحقيقة يمكن أيضا التعبير عنها بمساعدة مصفوفة الكثافة ρ للجملة ، المعرفة بالشكل $\rho = \psi \otimes \psi^\dagger$ وفي الحالة الحالية يعطى بالشكل

$$\rho_{\text{pure}} = \psi \otimes \psi^\dagger = |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger + a\, b^* \psi_a \otimes \psi_b^\dagger + a^*\, b \psi_b \otimes \psi_a^\dagger$$
$$= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & a\, b^* \\ a^*\, b & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} . \qquad (69)$$

يمكننا بالتالي القول أنه متى كانت الجملة هي في حالة نقية أو حالة متماسكة ، بالتالي مصفوفة كثافته أو الكثافة التابعية تحتوي حدود خارج القطر من نف مرتبة القيمة التي للحدود القطرية .* مثل هذه المصفوفة للكثافة تقابل الأوضاع الغريبة المذكورة أعلاه التي لا نلاحظها أبدا في الحياة اليومية . و سوف نفهم قريبا لماذا .

الآن سننظر للوضعية المعاكسة ، مصفوفة الكثافة لحالات متميزة ماكروسكوبيا ذات عناصر خارج القطر متلاشية . من أجل الحالتين مثلا

$$\rho_{\text{mixed}} = |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger$$
$$= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} \qquad (71)$$

تصف جملة التي لا تملك أي تماسك أبدا . (هنا $\otimes$ تشير إلى جداء زوجي / ثنائي تبديلي أو جداء تنسور الذي ينتج شكل بدء تنسوري أو مصفوفي من شعاعين) . مثل هذه المصفوفة للكثافة القطرية لا يمكن أن تكون تلك العائدة لحالة صرفة لمصفوفة كثافة تصف جملة التي فيها الحالة ψ_a باحتمال $|a|^2$ التي فيها الحالة ψ_b ذات الاحتمال $|b|^2$. مثل هذه الجملة يقال بأنها في حالة مختلطة لأن حالتها غير معلومة أو بشكل مكافئ هي في تنضد غير متماسك (طوري) : تأثيرات التداخل لا يمكن ملاحظتها في مثل هذه الوضعية . الجملة الموصوفة بحالة مختلطة هي دائما إما في الحالة ψ_a أو في الحالة ψ_b . بمعنى آخر مصفوفة الكثافة القطرية من أجل الحالات الماكروسكوبية ليست في تباين و لكن في اتفاق مع الخبرة اليومية .

في صورة مصفوفات الكثافة فإن العناصر غير القطرية تحتوي فرق بين القيم العادية أي غير المتماسكة و غير العادية أو الغريبة أي المتماسكة ، التنضدات . إن الوضع التجريبي واضح : من أجل الحالات المتميزة ماكروسكوبيا فإن فقط مصفوفات الكثافة القطرية تلاحظ في الحياة اليومية . تقريبا كل الجمل في تنضد ماكروسكوبي متماسك تفقد بعض الشيء عناصر المصفوفة خارج القطر . كيف تتم عملية إزالة التماسك – أيضا تعرف بعملية فك الارتباط في حالات معينة ؟ مصفوفة الكثافة بنفسها تبين الطريقة .

---

*باستخدام مصفوفة الكثافة يمكننا كتابة معادلة التطور لجملة كمية :

$$\dot{\psi} = -iH\psi \quad \text{becomes} \quad \frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] \ . \qquad (70)$$

إن كلاهما متكافئتان كليا . (العلاقة الجديدة تسمى في بعض الأحيان معادلة فون نيومان) و لا يمكننا في الحقيقة عمل أي حسابات هنا . العلاقتين معطاة بحيث أنك تعرفهما عندما تصادفهما في أي مكان .

إزالة التماسك هو ناتج عن الحمّامات

في الثيرموديناميك (مرجع 97) مصفوفة الكثافة ρ لجملة كبيرة تستخدم لتعريف الإنتروبي لها S (تحدي 122 ny)وكل الكميات الثيرموديناميكة الأخرى . هذه الدراسات تبين أن

$$S = -k \ \mathrm{tr}\,(\rho \ln \rho) \qquad (72)$$

حيث tr تدل على الأثر ، أي مجموع كل العناصر القطرية ، و k ثابت بولتزمان . العلاقة بالتالي هي تعريف الميكانيك الكمي للإنتروبي .

الآن نذكر أنفسنا أن الجملة الفيزيائية ذات الإنتروبي الثابت و الكبير تسمى حمّام . في عبارات فيزيائية بسيطة الحمّام هي جملة التي يمكننا بها نسبة درجة الحرارة . بشكل أكثر دقة

- الحمّام (الفيزيائي) – أيضا يسمى حوض (ثيرموديناميكي) – هي جملة كبيرة التي يمكن فيها تطبيق مفهوم التوازن

تبين التجارب أنه عمليا ، هذا مكافئ لحالة التي يتألف بها الحمّام من العديد من الجمل الفرعية / الجزئية المتبادلة التأثير و لهذا السبب كل المقادير الماكروسكوبية التي تصف حالة الحمّام تبدي تذبذبات صغيرة غير منتظمة ، وهي خاصة التي ستكون ذات أهمية قريبا .

إن الحمّام المتعارف عليه هو أيضا حمّام فيزيائي : في الحقيقة الحمّام الثيرموديناميكي مشابه لحمّام ماء ساخن كبير جدا ، و هو الذي لا تتغير درجة حرارته حتى لو أضفنا إليه بعض الماء البارد أو الدافئ . إن المفهوم الفيزيائي للحمّام أو الحوض هو بالتالي تجريد و تعميم للمفهوم المتعارف عليه للحمّام . الأمثلة الأخرى على الحمّامات الفيزيائية هي : الحقل المغناطيسي القوي ، كمية كبيرة من الغاز ، أو جسم صلب كبير . (إن معاني " قوي " و " كبير" بالطبع تعتمد على الجملة قيد الدرس) .

إن التعريف (72) للإنتروبي يخبرنا أن ضياع العناصر خارج القطر يوافق زيادة في الإنتروبي . بالإضافة لذلك ، أي زيادة في الإنتروبي (تحدي 123s) بالإضافة لذلك أي زيادة في الإنتروبي لجملة قابلة للانعكاس مثل جملة ميكانيكية كمية المعنية هو ناتج عن تبادل التأثير مع الحمّام .

باختصار ، إزالة التماسك هو ناتج عن تبادل التأثير مع الحمّام . و بالإضافة لذلك إزالة التماسك هو علية التي تزيد الإنتروبي : إزالة التماسك عملية غير عكوسة . سوف نبين الآن أن الحمّامات موجودة في كل مكان و أن إزالة التماسك بالتالي يحدث في كل مكان و في كل الأوقات و أنه بالتالي التنضدات الماكروسكوبية لا تلاحظ أبدا (تقريبا) .

كيف تؤدي الحمّامات إلى إزالة التماسك – التبعثر

أين يتبادل الحمّام التأثير مع جملة نوعية ؟ الحمّام يجب أن يكون خارج الجملة التي نتحدث عنها أي في بيئتها . في الحقيقة نحن نعلم تجريبيا أن البيئة النوعية كبيرة و تتميز بدرجة حرارة . بعض الأمثلة واردة في الجدول 6 . باختصار

- أي بيئة هي حمّام

يمكننا حتى المضي أبعد : من أجل كل حالة تجريبية ، هناك حمّام يتبادل التأثير مع الجملة قيد الدراسة . في الحقيقة كل جملة التي يمكننا ملاحظتها هي غير معزولة حيث أنها تتبادل التاثير بشكل واضح على الأقل مع المراقب و كل مراقب بالتعريف يحوي حمّام كما سنبين بمزيد من التفصيل قريبا .

الجدول 6 – الحمّامات الشائعة و الأقل شيوعا مع خواصها الرئيسية

نوع الحمّام	درجة الحرارة T	طول الموجة λ_{eff}	فيض الجسيم φ	المقطع العرضي (ذرة) σ	زمن الضرب $1/\sigma\varphi$ من أجل	
					ذرة[a]	كرة [b]
حمّامات المادة ، صلبة وسائلة	300K	10 pm	10^{31} $m^2.s$	10^{-19} m^2	10^{-12} s	10^{-25} s
الهواء	300K	10 pm	10^{28} $m^2.s$	10^{-19} m^2	10^{-9} s	10^{-22} s
الخلاء المخبري	50K	10 μm	10^{18} $m^2.s$	10^{-19} m^2	10 s	10^{-12} s
حمّامات الفوتون						
ضوء الشمس	5800K	900 nm	10^{23} $m^2.s$		10^{-4} s	10^{-17} s
الظلام	300K	20 μm	10^{21} $m^2.s$		10^{-2} s	10^{-15} s
الأمواج الميكروية الكونية	2.7K	2 mm	10^{17} $m^2.s$		10^{2} s	10^{-11} s
أمواج الراديو الأرضية					كبير جدا	
إشعاع الأونرو للأرض	40zK				كبير جدا	
حمّامات الإشعاع النووية						
النشاط الإشعاعي		10 fm	1 $m^2.s$	10^{-25} m^2	10^{25} s	10^{12} s
الإشعاع الكوني	> 1000 K	10 fm	10^{-2} $m^2.s$	10^{-25} m^2	10^{27} s	10^{14} s
النيوترينوات الشمسية	≈ 10 MK	10 fm	10^{11} $m^2.s$	10^{-47} m^2	10^{36} s	10^{15} s
النيوترينوات الكونية	2.0 K	3 mm	10^{17} $m^2.s$	10^{-62} m^2	10^{45} s	10^{24} s
حمّامات الجاذبية	5. 10^{31} K	10^{-35} m			كبير جدا	

a. القيم تقديرات تقريبية . الكرة الماكروسكوبية يفترض أن حجمها 1 mm

لكن عادة الحمّامات الأكثر أهمية التي علينا أن نأخذها بالحسبان هي الغلاف الجوي حول جملة ، الإشعاع أو الحقول الكهرطيسية التي تتبادل التأثير مع الجملة ، أو إذا كانت الجملة نفسها كبيرة كفاية ليكون لها درجة حرارة ، تلك الدرجات من الحرية للجملة التي غير موجودة في التنضد قيد البحث .

نظرا لأن كل جملة فيزيائية هي في تماس مع الحمّام ، فإن كل مصفوفة كثافة للتنضد الماكروسكوبي سيفقد عناصره القطرية في النهاية . من أول نظرة ، هذا الاتجاه للفكر غير مقنع . و التأثيرات المتبادلة لجملة مع بيئتها يمكن أن تجعل صغيرة جدا باستخدام النظم التجريبية الذكية ، التي ستقتضي أن الزمن لإزالة التماسك يمكن أن يجعل كبيرا جدا . و بالتالي فإننا بحاجة أن نتأكد من مقدار الزمن لتنضد الحالات اللازم كي يزيل تماسكه . و ينتج أن هناك طريقتين معياريتين لتقدير زمن إزالة التماسك : إما بنمذجة الحمّام كعدد كبير من الجسيمات المتصادمة أو بنمذجته كحقل مستمر .

إذا كان الحمّام موصوفا كمجموعة من الجسيمات التي تضرب عشوائيا الجملة الميكروسكوبية ، وهي تميز بشكل أفضل بطول الموجة الفعال λ_{eff} للجسيمات وبواسطة المجال المتوسط t_{hit} بين ضربتين . (تحدي 124 ny) .إن الحساب المباشر يبين أن زمن إزالة التماسك t_d في أي حال هو أصغر من زمن الفاصل هذا بحيث أن :

$$t_d \leqslant t_{\text{hit}} = \frac{1}{\varphi\sigma}\,, \qquad (73)$$

حيث φ هو فيض الجسيمات و σ المقطع العرضي للضربة .* القيم النوعية هي المعطاة في الجدول 6 . نلاحظ بسهولة من أجل الأجسام الماكروسكوبية أن أزمنة إزالة التماسك هي قصيرة جدا . (نلاحظ أيضا أن التأثيرات النووية و الجاذبية تؤدي إلى أزمنة إزالة تماسك كبيرة و بالتالي يمكن إهمالها) . إن التبعثر يؤدي إلى زوال تماسك سريع للجمل الماكروسكوبية . و لكن بالنسبة للذرات أو الجمل الأصغر ، فإن الوضع مختلف ، كما هو متوقع .

الجمل الميكروسكوبية يمكن أن تبدي أزمنة إزالة تماسك طويلة .

نلاحظ أن كم الفعل $\hbar$ يظهر في العلاقة من أجل زمن إزالة التماسك ، كما يظهر في المساحة σ . و إزالة التماسك هو عملية كمية .

كيف تؤدي الحمّمات إلى إزالة تماسك – الاسترخاء

الطريقة الثانية لتقدير زمن إزالة التماسك هي أيضا شائعة . أي تأثير متبادل لجملة مع الحمّام توصف بواسطة زمن الاسترخاء t_r . المصطلح استرخاء يدل على أي عملية تؤدي إلى عودة حالة الاتزان . المصلطحات تخامد و احتكاك تستخدم أيضا . في الحالة الحالية ، زمن الاسترخاء يصف العودة للاتزان لمجموع الحمّام و الجملة . و الاسترخاء هو مثال عن تطور غير عكوس . العملية تسمى غير عكوسة إذا كانت العملية العكسية التي فيها كل مكون يتحرك في اتجاه معاكس تكون ذات احتمال منخفض جدا **.

مثلا ، من المعتاد أن زجاجة نبيذ تصب في وعاء ماء تلون كل الماء ، و هذا نادرا ما يلاحظ أن النبيذ و الماء ينفصلان ثانية نظرا لأن احتمال أن كل جزيئات الماء و النبيذ تغير اتجاهاتها معا بنفس الوقت هو منخفض و حالة التزاوج التي تصنع السعادة لدى منتجي النبيذ و يأس مستهلكي النبيذ .

الآن لنبسط وصف الحمّام . سنقرب هذا بحقل وحيد غير مخصص ، سلمي الذي يتبادل التأثير مع الجملة الكمية . بسبب استمرارية الفراغ فإن مثل هذا الحقل يملك درجات لا نهائية من الحرية . وهي تؤخذ لنمذجة العديد من درجات الحرية للحمّام . إن الحقل يفترض أنه في حالة ابتدائية حيث درجات حريته تثار بطريقة موصوفة بدرجة الحرارة T . وإن تبادل تأثير الجملة مع الحمّام الذي هو أصل عملية الاسترخاء يمكن وصفها بانتقال متكرر لكميات صغيرة من الطاقة E_{hit} حتى اكتمال عملية الاسترخاء .

---

*زمن إزالة التماسك يشتق بدراسة تطور مصفوفة الكثافة ρ(x,x') للأجسام المتموضعة في النقطتين x , x' .ويجد المرء أن العناصر خارج القطر $\rho(x,x',t)=\rho(x,x',0)e^{-\Lambda t(x-x')^2}$ ، حيث معدل التموضع Λ يعطى بالشكل :

$$\Lambda = k^2 \varphi \sigma_{\text{eff}} \qquad (74)$$

حيث k هو العدد الموجي ، φ هو الفيض و σ_{eff} سطح المقطع للتصادمات أي عادة حجم الجسم الماكروسكوبي (مرجع 98) .

يجد المرء أيضا نتيجة مدهشة أن الجملة التي تضرب بجسيم ذو طاقة E_{hit} يقوض مصفوفة الكثافة تقريبا إلى طول موجة دو برولي (مرجع 99)(أو دو برولي الحرارية) للجسيم الضارب . إن كلا النتيجتين معا تعطيان العلاقة أعلاه .

**انتبه للتعاريف التي تحاول جعل شيء ما أعمق من مفهوم قابلية الانعكاس ، مثل الذي يقول بأن العكوسية تعني أن العملية المعكوسة ليست ممكنة أبدا . العديد مما يسمى بالتناقضات بين قابلية الانعكاس للعمليات و قابلية الانعكاس لمعادلات التطور هي ناتجة عن التفسير الخاطئ لمصطلح غير قابل للانعكاس .

إن الأجسام المهمة في هذه المناقشة مثل القطة المذكورة ، الشخص أو السيارة تصوف بواسطة كتلة m . إن مميزتها الأساسية هي الطاقة الأعظمية E_r التي يمكن تحويلها من جملة للبيئة . و هذه الطاقة تصف التأثيرات المتبادلة بين الجملة و البيئة . إن تنضدات الحالات الماكروسكوبية التي نهتم بها في حلول التطور الهاملتوني لهذه الجمل .

إن التماسك الأولي للتنضد ، الذي يكون مضطربا بهذا الشكل على تباين مع خبرتنا اليومية ، يختفي أسيا خلال زمن إزالة التماسك t_d المعطى بالشكل * (مرجع 100) .

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{hit}}}{E_r} \frac{e^{E_{\text{hit}}/kT}-1}{e^{E_{\text{hit}}/kT}+1} \qquad (77)$$

حيث k مرة ثانية ثابت بولتزمان و مثل السابق E_r هي الطاقة الأعظمية التي يمكن نقلها من الجملة للبيئة . لاحظ أن المرء دائما لديه $t_d \leqslant t_r$. بعد انقضاء زمن إزالة التماسك t_d فإن الجملة تكون قد تطورت من التماسك تنضد عدم التماسط للحالات أو بعبارة أخرى ، مصفوفة الكثافة فقدت عناصرها خارج القطرية . و أيضا يقول المرء أن تماسك الطور لهذه الجملة قد تم تدميره . بالتالي بعد زمن t_d فإن الجملة توجد إما في الحالة ψ_a أو في الحالة ψ_b على التوالي باحتمال $|a^2|$ أو $|b^2|$ و لا تعود في تنضدات تماسك التي هي في قدر كبير من التناقض مع خبرتنا اليومية . إن أي حالة نهائية يتم اختيارها يعتمد على الحالة الدقيقة للحمّام و التي تفاصيلها أزيلت من الحساب بأخذ القيمة المتوسطة عبر حالات مكوناتها الميكروسكوبية . إن النتيجة المهمة هي أنه من أجل كل الأجسام الماكروسكوبية فإن زمن إزالة التماسك t_d يكون صغيرا جدا . من أجل أن نرى هذا بشكل أكثر وضوحا ، يمكننا دراسة حالة مبسطة خاصة . إن الجسم الماكروسكوبي ذو الكتلة m مثل القطة المذكورة أو السيارة يفترض أنه في نفس الوقت في موضعين منفصلين بمسافة l ، أي في تنضد لحالتين مقابلتين . و أيضا نفترض أن التنضد ناتج عن الجسم المتحرك كمذبذب / هزاز ميكانيكي كمي ذو تردد ω بين الموضعين و هذه الجملة البسيطة التي تبين تنضدات جسم واقع في موضعين مختلفين . طاقة الجسم بالتالي تعطى بالشكل $E_r = m\omega^2 l^2$ و أصغر انتقال ممكن للطاقة $E_{hit} = \hbar\omega$ هو الفرق بين مستويات الهزاز . في الوضعية الماكروسكوبية ، هذه الطاقة الأخيرة هي أصغر من kT بحيث من العلاقة السابقة نحصل على (مرجع 102)

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{hit}}^2}{2E_r kT} = t_r \frac{\hbar^2}{2mkTl^2} = t_r \frac{\lambda_T^2}{l^2} \qquad (78)$$

---

*هذه النتيجة مستنتجة كما في الحالة السابقة . الجملة التي تتبادل التأثير مع الحمّام دوما لها تطور معطى بالشكل العام (مرجع 101)

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H,\rho] - \frac{1}{2t_o}\sum_j [V_j\rho, V_j^\dagger] + [V_j, \rho V_j^\dagger] \ , \qquad (75)$$

حيث ρ هي مصفوفة الكثافة ، H الهاملتوني ، V التأثير المتبادل ، و t_o الزمن المميز للتأثير المتبادل . هل تستطيع أن ترى لماذا ؟ (تحدي 125 ny) بحل هذه المعادلة يجد المرء بالنسبة للعناصر البعيدة عن القطر $\rho(t) = \rho_0 e^{-t/t_0}$.

بمعنى آخر هي تختفي بزمن مميز t_o . في أكثر الوضعيات يكون لدى المرء علاقة من الشكل

$$t_0 = t_r \frac{E_{\text{hit}}}{E_r} = t_{\text{hit}} \qquad (76)$$

أو تغيرات ما لها ، كما في المثال أعلاه .

التي فيها يختفي التردد ω . إن الكمية $\lambda_T = \hbar/\sqrt{2mkT}$ تسمى طول موجة دو برولي الحرارية لجسيم .

نلاحظ ثانية أن كم الفعل $\hbar$ يظهر في العلاقة من أجل زمن إزالة التماسك . إزالة التماسك عملية كمية .

من السهل رؤية أنه من أجل كل الأجسام الماكروسكوبية عمليا يكون زمن إزالة التماسك t_d قصير جدا . مثلا بوضع m= 1g, l = 1mm & T= 300K نحصل على $t_d/t_r = 1.3\cdot 10^{-39}$. حتى إذا كان التأثير المتبادل بين الجملة و البيئة هو ضعيف جدا بحيث أن الجملة سيكون لها زمن استرخاء بعمر الكون الذي هو حوالي 4.10^{17} s ، الزمن t_d ما يزال أقصر من 5.10^{-22} s الذي هو أسرع بمليون مرة من زمن تذبذب حزمة ضوء (حوالي 2 fs من أجل الضوء الأخضر) . من أجل قطة شرودنجر ، فإن زمن إزالة التماسك سيكون حتى أقصر . هذه الأزمنة هي قصيرة جدا بحيث لا يمكننا أن نأمل تحضير التنضد المتماسك الابتدائي ، فما بالنا بمراقبة تفككه أو قياس عمره الزمني .

لكن من جل الجمل الميكروسكوبية ، فإن الوضع مختلف . مثلا ، من أجل الإلكترون في الجسم الصلب المبرد إلى درجة حرارة الهليوم السائل لدينا m=9.1. 10^{-31} kg ، و نوعيا l=1 nm & T = 4K بالتالي نحصل على $t_d \approx t_r$ و بالتالي الجملة يمكن أن تبقى ي تنضد متماسك حتى تسترخي ، و الذي يؤكد هذا من أجل حالة التأثيرات المتماسكة يمكن في الحقيقة أن يلاحظ في المواد السوبر ناقلة . (مرجع 103) . و سوف نذكر بعض المزيد من هذا فيما يلي .

في عام 1996 أول قياس فعلي لأزمنة إزالة التماسك نشرت من قبل فريق باريسي من قبل سيرج هاروش (مرجع 104)

وقد أكد العلاقة بين زمن إزالة التماسك و زمن الاسترخاء ، و بالتالي يبين أن العمليتين يجب أن تميزا على المقياس الميكروسكوبي . في الوقت الحالي ، العديد من التجارب الأخرى أكدت عملية إزالة التماسك و معادلة تطورها (مرجع

105) من أجل كل من القيم الصغيرة و الكبيرة لـ t_d/t_r . إن التجربة الجميلة بشكل خاص أجريت عام 2004 (مرجع 106) حيث اختفاء تداخل بشقين من أجل جزيئات C_{70} لوحظت عندما تفاعل حمّام معها .

ملخص عن إزالة التماسك ، الحياة و الموت

إن شرحنا بيّن أن إزالة التماسك ينتج من الاقتران لحمّام في البيئة . إزالة التماسك هي أثر إحصائي كمي ، أي أثر ثيرموديناميكي .ينتج إزالة التماسك من نظرية الكم ، وهي عملية غير عكوسة و بالتالي تحدث آليا . فوق كل شيء إزالة التماسك عي عملية لوحظت في التجارب .

إن تقديرات أزمنة إزالة التماسك في الحياة اليومية تخبرنا أن كلا من تحضير و بقاء التنضدات للحالات الماكروسكوبية المختلفة يكون مستحيلا بتبادل التأثير مع أي حمّام في البيئة . هذه هي الحال حتى إذا كان القياس المعتاد لهذا التأثير المتبادل ، المعطى باحتكاك حركة الجملة ، هو صغير جدا . حتى إذا كانت الجملة الماكروسكوبية خاضعة لاحتكاك صغير جدا ، و المؤدي إلى زمن استرخاء طويل جدا ، فإن زمن إزالة تماسكها ما يزال قصير بشكل متلاشي . فقط الجمل الميكروسكوبية المصممة بدقة الغالية في الإعداد مخبريا يمكن أن تصل إلى أزمنة إزالة تماسك أساسية .

إن بيئتنا اليومية مليئة بالحمّامات . بالتالي

- تنضدات إزالة التماسك هي حالات متميزة ماكروسكوبيا التي لا تظهر أبدأ في الحياة اليومية بسبب أزمنة إزالة التماسك السريعة المتحرضة بواسطة الحمّامات في البيئة .

السيارات لا يمكن أن تدخل و تخرج من المرآب بنفس الوقت . لا يمكننا أن نكون أموات و أحياء بنفس الوقت . إن توضيح التنضد الماكروسكوبي – أنظر الشكل 121 – هو مستحيل . في اتفاق مع الشرح فإن التنضدات المتماسكة للحالات الماكروسكوبية تظهر في بعض الحالات المخبرية . (صفحة 154)

ما هي الجملة ؟ ما هو الجسم ؟

في الفيزياء الكلاسيكية الجملة هي جزء من الطبيعة الذي يمكن عزله عن بيئته . لكن ميكانيك الكم يخبرنا أن الجمل المعزولة غير موجودة ، نظرا لأن التأثيرات المتبادلة لا يمكن أن تجعل صغيرة بشكل متلاشي . التناقض يمكن حله بالنتائج السابقة : هي تسمح لنا بتعريف مفهوم الجملة بشكل أكثر دقة .

- الجملة هي أي جزء من الطبيعة الذي يتبادل التأثير بشكل غير متماسك مع بيئته

هذا يقتضي

- الجسم هو جزء من الطبيعة الذي يتبادل التأثير مع بيئته فقط عبر الحمّامات

بشكل خاص نحصل على :

- الجملة تسمى ميكروسكوبية أو ميكانيكية كمية و يمكن وصفها بواسطة تابع الموجة ψ متى
  - كانت تقريبا معزولة حيث $t_{\text{evol}} = \hbar/\Delta E < t_{\text{r}}$ و
  - كانت في تبادل تأثير غير متماسك مع بيئتها (مرجع 107)

باختصار الجملة الميكروسكوبية أو الميكانيكية الكمية يمكن وصفها بتابع موجة فقط إذا كانت تتبادل التأثير بشكل غير متماسك وضعيف مع بيئتها . (من أجل مثل هذه الجملة ، فإن عدم تحديد الطاقة ΔE هو أكبر من طاقة الاسترخاء) . على العكس فإن الحمّام لا يكون أبدا معزولا في المعنى الذي أعطي للتو لأن زمن التطور للحمّام ، المقياس الزمني الذي خلاله تتغير خواصه يكون دائما أكبر بكثير من زمن استرخائه .

نظرا لأن كل الأجسام الماكروسكوبية هي في تماس مع الحمّامات – أو حتى تحتوي واحد – فإنه لا يمكنها أن توصف بتابع موجة . بشكل خاص من المستحيل وصف أي جهاز قياس بمساعدة تابع موجة .

بالتالي نستنتج

- الجملة الماكروسكوبية هي جملة ذات زمن إزالة تماسك أقصر بكثير من أي زمن تطور لمكوناتها

من الواضح أن الجمل الماكروسكوبية أيضا تتبادل التأثير بشكل غير متماسك مع بيئتها . بالتالي القطط ، السيارات و متحدثي أخبار التلفاز كلهم جمل ماكروسكوبية .

التشابك

أحد الإمكانيات المتروكة من قبل تعريفين للجملة : ماذا يحدث في الحالة التي التأثيرات المتبادلة مع البيئة تكن متماسكة ؟ سوف نصادف بعض الأمثلة قريبا . وفق التعاريف فإنها ليس جمل لا ميكروسكوبية و لا ماكروسكوبية .

- الجملة التي فيها تبادلات التأثير مع بيئتها متماسة تسمى متشابكة

مثل هذه الجمل لا توصف بتابع الموجة و بشكل دقيق ، هي ليست جمل . في هذه الحالات ، عندما يكون تبادل التأثير متماسكا يتحدث المرء عن التشابك . مثلا يقول المرء أن الجسيم أو مجموعة الجسيمات يقال بأنها متشابكة مع بيئتها

متشابكة أي جمل متبادلة التأثير بشكل متماسك يمكن تقسيمها و لكن يجب أن يفك تشابكها عند القيام بذلك .

إن عملية التقسيم تؤدي إلى كيانات منفصلة ، و الكيانات المنفصلة تتبادل التأثير بشكل غير متماسك . نظرية الكم تبين أن الطبيعة غير مكونة من كيانات منفصلة و لكنها من كيانات قابلة للفصل . في نظرية الكم معيار الانفصال هو عدم التماسك في التأثير المتبادل . التنضدات المتماسكة تقتضي أن النتيجة المدهشة أن هناك جمل التي حتى أنها تبدو مكونة من أجزاء منفصلة فهي ليست كذلك . التشابك يفرض حد على الفصل . كل الخواص المدهشة لميكانيك الكم مثل قطة شرودنجر هي نتائج للمقدمات الكلاسيكية بأن الجملة مكونة من جزئين أو أكثر يمكن أن تنفصل بشكل واضح إلى جمل جزئية بدون اضطراب . و لكن التنضدات المتماسكة أو الجمل المتشابكة لا تسمح بالانفصال بدون اضطراب . متى افترضنا أننا قادرين على فص الجمل المتشابكة فإننا نحصل على نتائج غريبة أو غير صحيحة مثل الانتشار الظاهري الأسرع من الضوءأو كما يقول المرء أحيانا السلوك غير الموضعي . لننظر إلى بعض الأمثلة النوعية .

الحالات المتشابكة تلاحظ في العديد من التجارب . مثلا عندما الإلكترون و البوزيترون يفنيان متحولان إلى فوتونين فإن استقطابات هذين الفوتونين تكون متشابكة ، كما قيس في عام 1949 . أيضا عندما تتفكك ذرة مثارة في خطوات ، فإنها تصدر فوتونين و استقطابات الفوتونات تكون متشابكة كما أظهر لأول مرة في 1966 بمساعدة ذرات الكالسيوم .

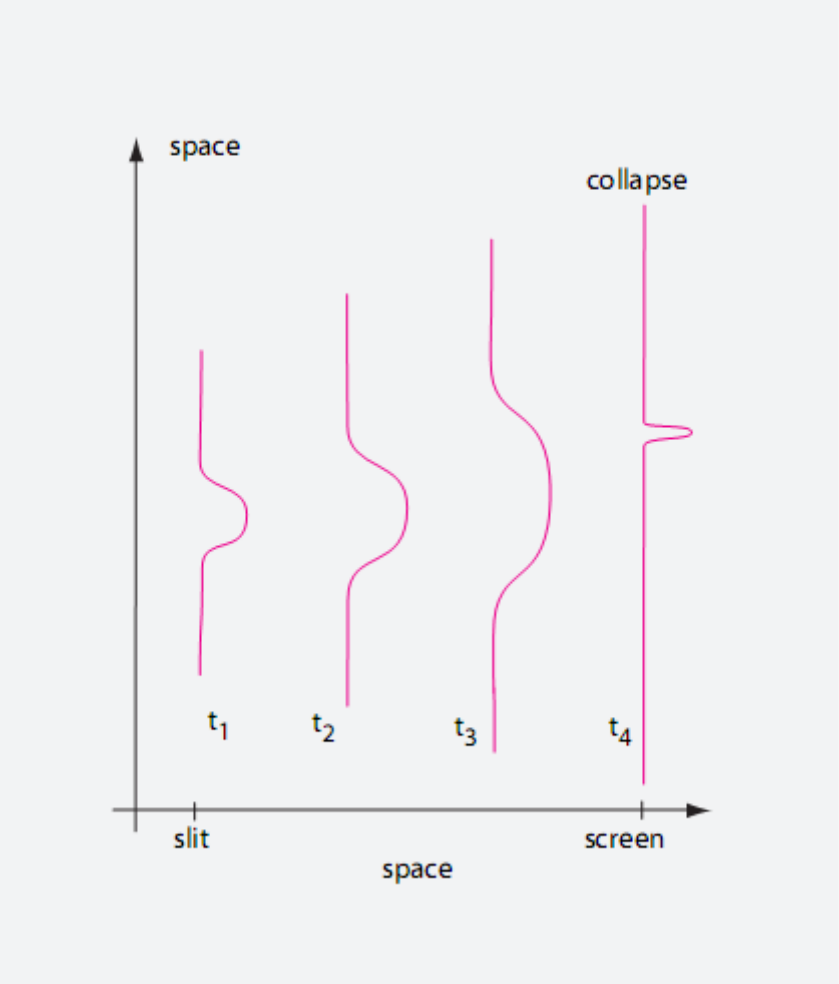
بشكل مشابه عندما جزيئة غير مستقرة في حالة وحيدة ، أي ذات حالة برم صفري ، تتفكك أو تنقسم إلى حطام ، فإن البرم للحطام يكون متشابك كما لوحظ في 1970s . أيضا التحويل البارامتري التلقائي للفوتونات ينتج تشابك

في مادة ضوئية غير خطية ، فإن الفوتون الوارد يحول إلى فوتونين صادرين اللذين طاقتهما المضافة تقابل طاقة الفوتون الوارد . في هذه الحالة الفوتونين الصادرين متشابكين في كل من استقطابهما و اتجاههما . في عام 2001 ، فإن برم عينتين من غاز السيزيوم البارد جدا المحتويتان على ملايين الذرات و الواقعتين على بعد بضع مليمترات عن بعضهما البعض تبين أنهما متشابكين . أيضا موضع التشابك لوحظ بانتظام مثلا من أجل الشوارد المتقاربة داخل فخاخ الشوارد.

هل نظرية الكم غير موضعية القليل حول تناقص أينشتاين – بودولسكي – روزن

" (السيد دوفي) عاش على مسافة قريبة من جسمه ...

جيمس جويس ، حالة مؤلمة "



الشكل 73 – الحركة الميكانيكية الكمية : تابع موجة الإلكترون (حقيقة مربعه الواحدي) من لحظة مروره في شق حتى ضربه للدريئة

غالبا يقترح ، بشكل غير صحيح أن تابع الموجة يتقوض أو أن نظرية الكم غير موضعية.* القضية بحاجة لتوضيح .

نبدأ بتخيل إلكترون يضرب دريئة بعد المرور من شق . وفق الوصف المستنتج للتو ، فإن عملية التقوض تتم تخطيطا كما هو مبين في الشكل 73 . إن الفيلم المتحرك الذي يشمل مثالا آخر عن عملية تقوض – الذي أوحت به تجربة بوم (صفحة 114) يمكن أن ترى في الزوايا اليسرى السفلية على هذه الصفحات بدءا من الصفحة 114 .

عملية التقوض لها جانب مدهش : بسبب قصر زمن إزالة التماسك ، خلال هذا (و أي عملية أخرى) فإن تقوض تابع الموجة القيمة فإن القيمة الأعظمية لتابع الموجة عادة تغير الموضع أسرع من الضوء . هل هذا معقول ؟.

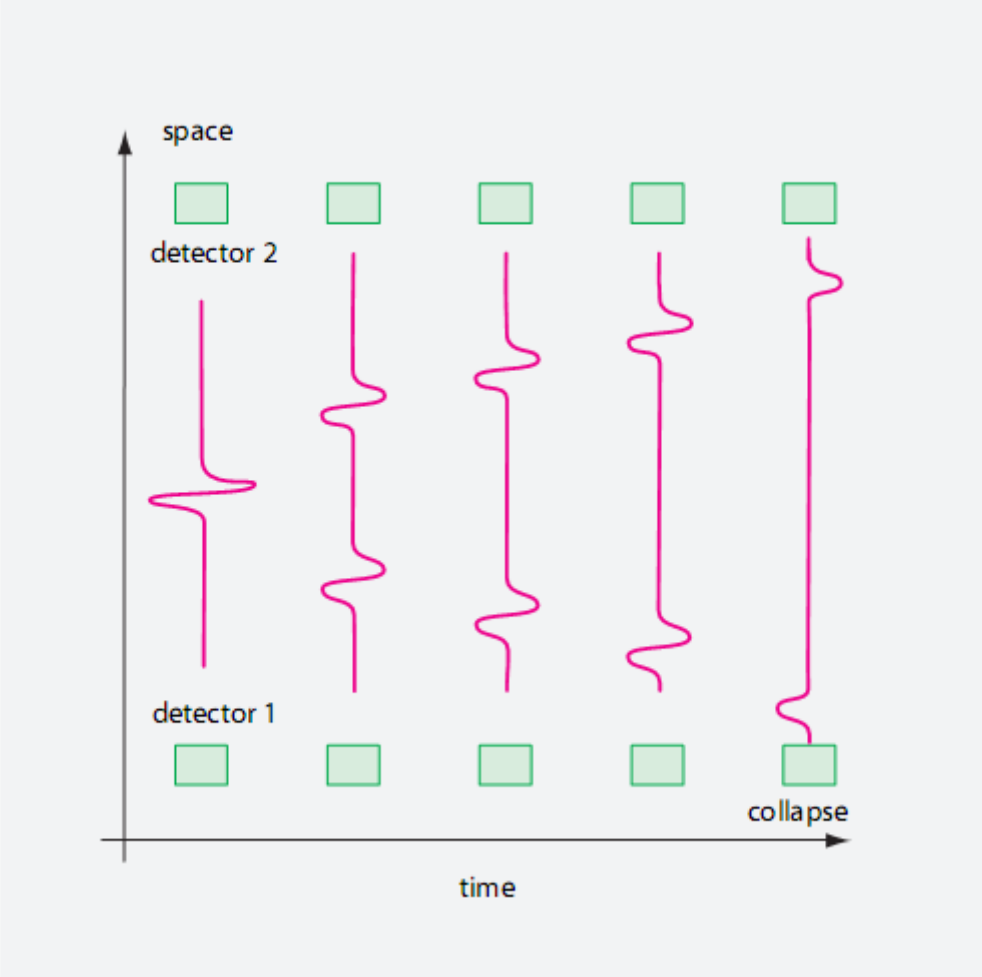
إن الوضع المسمى الوضع السببي أو غير الموضعي إذا كانت الطاقة المنقولة أسرع من الضوء .

باستخدام الشكل 73 يمكنك تحديد سرعة الطاقة القائمة (تحدي 126s)، باستخدام النتائج حول انتشار الإشارة (مجلد III ، صفحة 132) . إن النتيجة هي قيمة أصغر من c . إن تابع الموجة الذي قيمته الأعظمية تتحرك بأسرع من الضوء لا يتقتضي آليا أن الطاقة تتحرك بأسرع من الضوء .

بتعبير آخر ، نظرية الكم تحتوي سرعات أكبر من الضوء و لكن ليس سرعات طاقة أكبر من الضوء (مرجع 108) . في الديناميك الكهربائي الكلاسيكي نفس الشيء يحدث في الكمون الشعاعية و السلمية إذا استخدم مقياس كولون . ولقد صادفنا سرعات أكبر من الضوء في حركة الظلال ، المقصات و في العديد من القياسات الأخرى . (مجلد I ، صفحة 58) . أي فيزيائي الآن لديه خيارين : يمكنه أن يكون مباشرا و يقول أنه ليس هناك عدم محلية في الطبيعة ، أو يمكنه أن يكون أقل مباشرة و يدعي أن هناك عدم محلية . في الحالة الأخيرة

---

*هذا يستمر كموضوع الذي نعلمه : لقد درسنا نوعا مختلفا من عدم الموضعية ، في النسبية العامة سابقا (مجلد II ، صفحة 284)



الشكل 74 – تجربة فكر بوم

فإنه قد ادعى حتى بأن الفيزياء الكلاسيكية ليست موضعية . لكن لا أحد يجرؤ على الإدعاء بهذا . في الحقيقة هناك خطر في أن التحريض بشكل أكبر باستخدام مصطلح عدم الموضعية : فإن نسبة مئوية صغيرة من أولئك الذين يدعون بأن العالم غير موضعي بينما يبدؤون في الاعتقاد بأن هناك فعلا نقل طاقة أسرع من الضوء في الطبيعة . هؤلاء الناس يصبحون سجناء لتفكيرهم المشوش . من نواحي أخرى ، يساعد التفكير المشوش في الوصول بسهولة للصحف . باختصار ، حتى بالرغم من أن تعريف عدم الموضعية غير مجمع عليه ، فإننا هنا نلتزم بالتعريف الأكثر صرامة و نعرف عدم الموضعية بأنه نقل الطاقة بأسرع من الضوء .

إن التجربة الفكرية التي يستشهد بها غالبا التي تبين هنات عدم الموضعية كانت قد اقترحت من قبل بوم * في مناقش حول ما يعرف بتناقض إينشتاين – بودولسكي – روزن (مرجع 110 & 109) .

في بحث EPR شهير فإن الباحثين الثلاث حاولوا إيجاد تناقص بين ميكانيك الكم و المنطق الشائع . وقد ترجم بوم بحثهم الذي كان فيه خلط إلى تجربة فكرية واضحة المبينة تخطيطيا في الشكل 74 . عندما الجسيمين بحالة برم صفري يتحركان بعيدا عن بعضهما ، فإن قياس توجه جسيم واحد يقتضي تقوض فوري أيضا لبرم الجسيم الثاني و هو تماما عكس الاتجاه . و هذا يحدث تلقائيا عبر كل مسافة الفصل ، ولا يخضع الأمر لأي حد سرعة . بتعبير آخر ، التشابك يبدو أنه يؤدي إلى اتصال أسرع من الضوء .

لكن في تجربة بوم ، لا تنقل طاقة بأسرع من الضوء . لا توجد أي عدم موضعية ، بالرغم من الإدعاءات العديدة بالعكس من قبل باحثين معينين .

---

*ديفيد جوزيف بوم (1992-1917) كان فيزيائيا بارزا . وقد اكتشف بالتشارك أثر أهارونوف – بوم و قضى جزءا كبيرا من أواخر حياته في دراسة الارتباطات بين فيزياء الكم و الفلسفة .

إن الإلكترونين المتشابكين ينتميان لجملة واحدة : بافتراض أنهما منفصلان فقط بسبب أن تابع الموجة له قيمتين أعظميتين بعيدتين عن بعضهما البعض هو خطأ مبدئي . في الحقيقة لا يمكن إرسال أي إشارة بواسطة هذه الطريقة ، إزالة التماسك هي حالة توقع التي تبدو مثل إشارة بدون أن تكون إشارة . و إن تجربة بوم مثل أي تجربة مماثلة لـ EPR ، لا تسمح بالاتصال أسرع من الضوء . لقد ناقشنا مثل هذه الحالات في الفقرة حول الديناميك الكهربائي (مجلد III ، صفحة 135).

تجربة بوم قد نفذت فعلا . و أول و أكثر تحقيق شهير لها كان في عام 1982 من قبل ألان أسبكت (مرجع 111) الذي استخدم فوتونات بدلا من الإلكترونات . ومثل كل الاختبارات اللاحقة فقد أكدت بشكل كامل ميكانيك الكم .

في الحقيقة ، التجارب مثل التي أجراها أسبكت أكدت أنه من المستحيل معاملة سواء الجسيمين كجملة بذاتهما و من المستحيل نسبة أي خاصة فيزيائية ، مثل توجه البرم لأي منهما لوحدهما . (صورة هايزنبرغ ستعبر عن هذا الشرط حتى بشكل أكثر وضوحا) . فقط الإلكترونين معا يشكلان جملة فيزيائية ، لأنهما فقط زوج يتبادل التأثير بشكل غير متماسك مع البيئة .

إن المثالين المذكورين لعدم الموضعية الظاهرية يمكن تجاوزهما بملاحظة أنه نظرا أن من الواضح لا يكون هناك فيض طاقة أسرع من الضوء فإنه لا يوجد مشاكل في ظهور السببية . بالتالي المثال التالي هو أكثر أهمية . خذ ذرتين متطابقتين واحدة في الحالة المثارة و الأخرى في الحالة الأرضية ، وسمي l المسافة التي تفصلهما . المنطق العام يخبرنا أن الذرة الأولى تعود لحالتها الأرضية مصدرة فوتون ، و الثانية يمكن أن تثار بعد انقضاء زمن t = l/c أي بعد أن ينتقل الفوتون للذرة الثانية .

بشكل مدهش هذه النتيجة خاطئة . الذرة في حالتها الأرضية تملك احتمال غير صفري لأن تثار بنفس اللحظة التي تزول بها إثارة الأولى . و هذا تبين بالشكل الأكثر بساطة من قبل جيرهارد هيجرفيلت .(مرجع 112) و النتيجة أيضا أكدت بشكل تجريبيا .

الدراسات الأكثر دقة بينت أن النتيجة تعتمد على نوع التنضد للذرتين في البداية : متماسك أو غير متماسك . من أجل التنضدات غير المتماسكة فإن النتيجة المنطقية هي صحيحة و النتيجة المنافية للحدس تظهر فقط من أجل التنضدات المتماسكة . مرة ثانية ، المناقشة الدقيقة تبين أنه لا يوحد عدم موضعية حقيقية للطاقة .

في الملخص ، السرعات الأعلى من الضوء في تقوض تابع الموجة لا تتعارض مع الحد على سرعة الطاقة في النسبية الخاصة .

سرعات التقوض هي سرعات طورية . في الطبيعة السرعات الطورية غير محدودة و السرعات الطورية غير المحدودة لا تقتضي أبدا نقل الطاقة بأسرع من الضوء . بالإضافة لذلك لقد استعدنا نتيجة أن الجمل الفيزيائية هي فقط معرفة بوضوح بشكل غير متماسك مع بيئتها .

فضول و تحديات مرحة حول التنضدات

بعض الناس يقول خطأ أن الذرات في تنضد حالتين متمركزة عند مواضع مختلفة يمكن تصويرها (هذا حتى مستخدم من قبل بعض الفرق الدينية لجذب الأتباع) . لماذا هذا غير صحيح ؟ (تحدي 127 s)

* *

في بضع حالات فإن التنضد لحالات ماكروسكوبية مختلفة يمكن فعلا أن يلاحظ بخفض درجة الحرارة إلى قيم صغيرة كفاية و بالاختيار الدقيق بشكل مناسب لكتل صغيرة أو مسافات . إن مثالين معروفين جيدا للتنضدات المتماسكة هي تلك التي تلاحظ في كواشف موجة الجاذبية و في متصلات جوزفسون . في الحالة الأولى (مرجع 102) يلاحظ المرء كتلة بوزن حتى 1000 kg في تنضد لحالات متوضعة في نقاط مختلفة في الفراغ : المسافة بينها من مرتبة 10^{-17} m . في الحالة الثانية ، في حلقات السوبر ناقلية ، تنضدات الحالة التي فيها تيار ماكروسكوبي من مرتبة 1 pA يتدفق في اتجاه عقارب الساعة مع الذي يتدفق في اتجاه عكس عقارب الساعة قد تم إنتاجها (مرجع 113) .

* *

التنضدات الفائقة للمغنطة في الاتجاه العلوي و السفلي في نفس الوقت تم ملاحظتها في عدة مواد (مرجع 114)

* *

منذ 1990s فإن رياضة إيجاد و اللعب مع جمل جديدة في التنضدات الماكروسكوبية المتماسكة (مرجع 115) انطلقت في كل العالم . التحدي يكمن في التجارب النظيفة اللازمة . التجارب على ذرات وحيدة في تنضدات حالات هي من بين التجارب الأكثر شيوعا . (مرجع 116) .

* *

في 1997 تم استخلاص أمواج الذرة المتماسكة من غيمة ذرات صوديوم (مرجع 117) .

* *

الأجسام الماكروسكوبية عادة تكون في حالات غير متماسكة . هذا هو نفس الوضع الذي للضوء . العالم مليء بالضوء الماكروسكوبي أي غير المتماسك : ضوء النهار و كل الضوء من المصابيح ، من النار و من الديدان المتوهجة هو غير متماسك . فقط المنابع الخاصة و المصنوعة بدقة مثل الليزرات أو منابع الضوء الصغيرة النقطية تصدر ضوء متماسك .

فقط هذه المنابع تسمح بدراسة تأثيرات التداخل . في الحقيقة مصطلح متماسك و غير متماسك نشأ في البصريات ، نظرا لأنه من أجل الضوء الفرق بين الاثنين هو المقدرة على التداخل ، قد لوحظ منذ قرون قبل حالة المادة .

التماسك وعدم التماسك للضوء و المادة يظهر نفسه بشكل مختلف ، لأن المادة يمكن أن تبقى في سكون أما الضوء فلا يمكن و لأن المادة مكونة من فرميونات و لكن الضوء مكون من بوزونات . (صفحة 138) . التماسك يمكن أن يلاحظ بسهولة في الجمل المكونة من بوزونات مثل الضوء و الصوت في الأجسام الصلبة أو أزواج الإلكترونات في السوبر نواقل . التماسك يلاحظ بشكل أقل سهولة في جمل الفرميونات مثل جمل الذرات ذات الغيوم الإلكترونية .

لكن في كلا الحالتين زمن عدم التماسك يمكن أن يحدد . و في كلا الحالتين التماسك في العديد من جمل الجسيمات يلاحظ بشكل أفضل إذا كانت كل الجسيمات في نفس الحالة (السوبر ناقلية ، ضوء الليزر) و في كلا الحالتين الانتقال من التماسك إلى عدم التماسك هو ناتج عن تبادل التأثير مع الحمّام . الحزمة بالتالي غير متماسكة إذا وصلت جسيماتها بشكل عشوائي في الزمن و في التردد . و في الحياة اليومية ، ندرة الملاحظة لتنضدات المادة المتماسكة لها نفس الأصل الذي لندرة ملاحظة الضوء المتماسك .

* *

سوف نناقش العلاقة بين البيئة و التفكك للجمل غير المستقرة لاحقا (مجلد V ، صفحة 47) . الظاهرة موصوفة كليا بعدم التماسك .

* *

هل يمكنك إيجاد طريقة لقياس درجة التشابك ؟ هل يمكنك القيام بذلك لجملة مكونة من العديد من الجسيمات؟ (تحدي 128 ny)

* *

دراسة التشابك تؤدي إلى نتيجة بسيطة : السفر عبر الزمن يتعارض مع الارتباط . هل يمكنك تأكيد العبارة ؟ (تحدي 129 ny) .

* *

هل صور الأشباح في أجهزة التلفاز غالبا الناتجة عن الانعكاسات الكثيرة هي أمثلة عن التداخل ؟ (تحدي 130 s) .

* *

ماذا يحدث عندما يتراكب إلكترونين وحيدي اللون ؟ (تحدي 131 d) .

* *

بعض الناس يقولون أن نظرية الكم يمكن استخدامها في الحوسبة الكمية ، باستخدام تنضدات متماسكة لتوابع الموجة (مرجع 118) هل يمكنك إعطاء سبب عام الذي يجعل هذا الهدف صعبا جدا – حتى بالرغم من أنه غير مستحيل – حتى بدون معرفة كيفية عمل مثل هذا الحاسب الكمي أو ما يمكن أن يكون ما يعرف بالكيوبتات ؟ (تحدي 132 s) .

* *

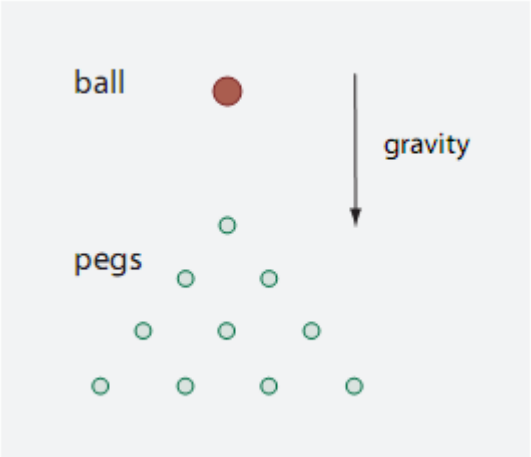
لماذا الاحتمالات و تقوض تابع الموجة تظهر في القياسات ؟

القياسات في ميكانيك الكم هي محيرة أيضا لأنها تؤدي إلى عبارات التي تظهر فيها الاحتمالات . مثلا ، نتحدث عن احتمال إيجاد إلكترون في مسافة معينة من نواة ذرة . العبارات مثل هذه تنتمي لنوع عام " عندما تقاس القيمة القابلة للقياس A فإن احتمال أن نجد النتيجة a هو p . فيما يلي سنبين أن الاحتمالات في مثل هذه العبارات لا مفر منها لأي قياس كما سنبين (1) أي قياس و أي ملاحظة هي حالة خاصة من عملية إزالة التماسك أو فك الارتباط و (2) كل عمليات إزالة التماسك تقتضي كم الفعل . (تاريخيا ، عملية القياس درست قبل العملية الأكثر عمومية لإزالة التماسك) .ذلك يشرح جزئيا لماذا الموضوع مختلط جدا في العديد من عقول الناس) .

ما هو القياس ؟ كما ذكرنا سابقا (مجلد III ، صفحة 263) القياس هو أي تبادل تأثير الذي ينتج قيمة أو ذاكرة . (أي أثر في الحياة اليومية هو قيمة / سجل ، لكن هذا غير صحيح بشكل عام . هل يمكنك إعطاء بعض الأمثلة عن تأثيرات هي سجلات و بعض التأثيرات التي ليست كذلك ؟) (تحدي 133 s) . القياسات يمكن أن تتم بواسطة الآلات ، عندما تنفذ من قبل الناس ، فإنها تسمى ملاحظات . في نظرية الكم عملية القياس ليست مباشرة كما في الفيزياء الكلاسيكية . هذا يرى بشكل أكثر وضوحا عندما جملة كمية مثل إلكترون وحيد تجعل أولا تمر عبر شق حيود ،أو بشكل أفضل من أجل جعل شكل موجتها أوضح – تمر عبر شق مضاعف و بعدها تضرب صفيحة من أجل أيضا جعل شكلها الجسيمي يظهر.

تبين التجربة أن النقطة المسودة ، البقعة التي يضرب الإلكترون الدريئة لا يمكن أن تحدد مسبقا . (نفس الشيء صحيح من أجل الفوتونات أو أي جسيم آخر) . لكن من أجل الأعداد الكبيرة من الإلكترونات ، فإن التوزع الفراغي للنقط السوداء الذي يعرف بنموذج الحيود يمكن حسابه مسبقا بدقة عالية .

إن نتيجة التجارب في الجمل الميكروسكوبية بالتالي تجبرنا على استخدام الاحتمالات من أجل وصف الجمل الدقيقة . و نجد أن التوزع الاحتمالي p(x) للبقع على الصفيحة الفوتوغرافية يمكن حسابه من تابع الموجة ψ للإلكترون على سطح الدريئة و يعطى بالشكل $p(\boldsymbol{x}) = |\psi^{\dagger}(\boldsymbol{x})\psi(\boldsymbol{x})|^2$.



الشكل 75 – جملة تبين السلوك الاحتمالي : كرة تسقط عبر مجموعة من الأوتاد

وهذا في الحقيقة حالة خاصة لأول خاصة عامة للقياسات الكمية :

- قياس قيمة قابلة للقياس A لجملة في حالة ψ يعطى كنتيجة واحدة من القيم الخاصة a_n و الاحتمال P_n للحصول على النتيجة a_n يعطى بالشكل :

$$P_n = |\varphi_n^\dagger \psi|^2 \ , \qquad (79)$$

حيث φ_n هو التابع الخاص للعامل A المقابل للقيمة الخاصة a_n .*

أيضا تبين التجارب خاصة ثانية للقياسات الكمية :

- بعد القياس ، الجملة الكمية المقاسة هي في الحالة φ_n التي تقابل القيمة المقاسة a_n . أيضا يقول المرء أنه خلال القياس ، تابع الموجة قد تقوض من ψ إلى φ_n . (مرجع 119)

هاتين الخاصتين التجريبيتين يمكن أيضا تعميمهما إلى الحالات الأعم بواسطة القيم الخاصة المتحللة و المستمرة .

من الواضح أن النتائج التجريبية حول عملية القياس تتطلب شرح . من النظرة الأولى فإن نوع الاحتمالات المصادفة في نظرية الكم هي مختلفة عن الاحتمالات التي نصادفها في الحياة اليومية .

لنأخذ الروليت ، النرد ، الجملة المبينة في الشكل 75 ، آلات باكينكو أو الاتجاه الذي فيه قم الرصاص يسقط على رأسه : كل ما تم قياسه تجريبيا سيكون عشوائي (بافتراض عدم الغش من قبل المصمم أو المشغلين) بدرجة عالية من الدقة . هذه الجمل اليومية لا تحيرنا . نحن نفترض بشكل غير واعي أن النتيجة العشوائية ناتجة عن التغيرات الصغيرة غير القابلة للتحكم بها لشروط البدء أو البيئة في كل مرة تكرر بها التجربة.**

---

*كل التحويلات الخطية تحول أشعة خاصة ما تسمى الأشعة الخاصة (من الألمانية eigen تعني ذاتي / خاص) إلى مضاعفات من نفسها . بتعبير آخر إذا كان T تحويل ، e شعاع و

$$T(e) = \lambda e \qquad (80)$$

حيث λ مقدار سلمي ، عندها الشعاع e يسمى شعاعا خاصا لـ T و λ مرتبط بالقيمة الخاصة . إن مجموعة كل القيم الخاصة لتحويل T يسمى طيف T .

**للحصول على شعور بحدود هذه الافتراضات غير الواعية يمكن أن تريد أن تقرأ

لكن الجمل الميكروسكوبية يبدو أنها مختلفة . إن خاصتي القياسات الكمية المذكورة للتو تعبر عما يلاحظه الفيزيائيون في كل تجربة ، حتى إذا كانت الشروط الابتدائية اعتبرت نفسها في كل مرة . لكن لماذا بالتالي هي موضع لإلكترون وحيد أو في أكثر القيم الأخرى القابلة للقياس للجمل الكمية ليست قابلة للتوقع ؟ بتعبير آخر ، ماذا يحدث خلال تقوض تابع الموجة؟ كم يستغرق التقوض ؟ في بداية نظرية الكم ، كان هناك تصور أن عدم قابلية التوقع الملحوظة هي ناتجة عن نقص المعلومات حول حالة الجسيم . هذا يؤدي بالكثيرين ليبحثوا فيما يسمى بالمتحولات المخفية . لكن كل هذه المحاولات فشلت . إذا أخذنا بعض الوقت من أجل أن يدرك المجمع العلمي أن عدم قابلية التوقع ليست ناتجة عن نقص المعلومات حول حالة الجسيم ، التي في الحقيقة موصوفة بشكل كامل بشعاع الحالة ψ .

- أي ملاحظة هي إنتاج سجل

السجل يمكن أن يكون مرئيا أو ذاكرية سمعية في دماغنا أو سجل مكتوب على ورق أو شريط تسجيل أو أي نوع من مثل هذه الأجسام . كما شرح في المجلد السابق (مجلد III ، صفحة 261) فإن الشيء يكون سجل إذا لم يكن قد ظهر أو اختفى بالصدفة . لتجنب تأثير الصدفة فإن كل السجلات يجب أن تكون محمية قدر المستطاع من العالم الخارجي ، مثل وضع الأرشيفات في أبنية مقاومة للزلازل مع حماية من الحريق إبقاء الوثائق في خزنة و تجنب أذى الدماغ قدر المستطاع ... الخ

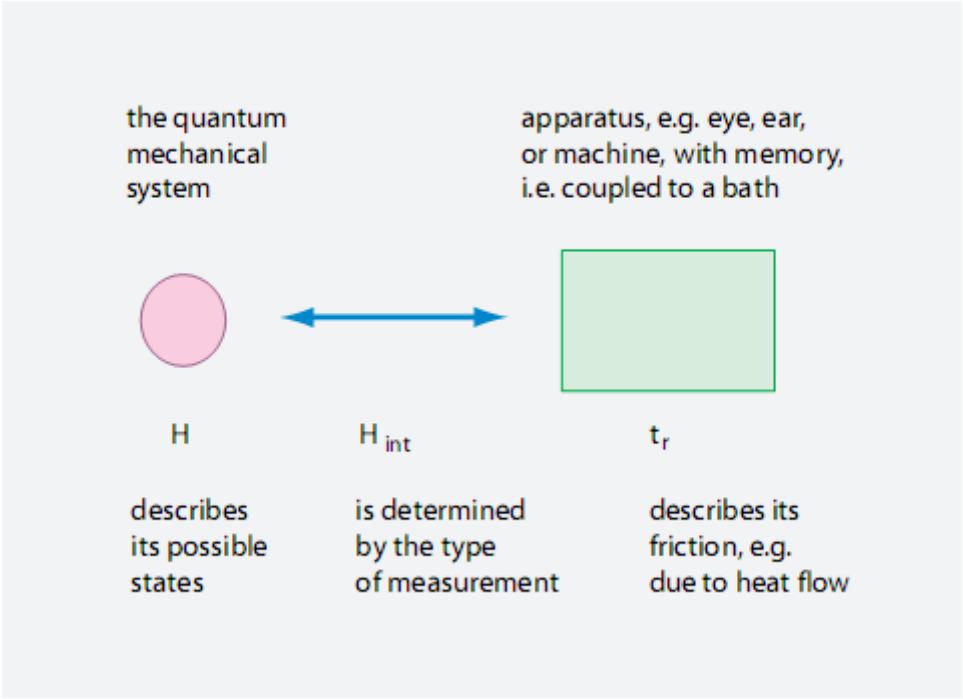
فوق كل هذا السجلات يجب أن تكون محمية من التذبذبات الداخلية . هذه التذبذبات الداخلية ناتجة عن العديد من المكونات مكون منها أي جهاز تسجيل . إذا كانت التذبذبات كبيرة جدا فإنه سيكون من المستحيل التمييز بين المحتويات الممكنة لذاكرة . الآن التذبذبات تتناقص مع حجم الجملة ، نوعيا مع الجذر التربيعي للحجم . مثلا إذا كانت كتابة اليد صغيرة جدا فإنه من الصعب قراءتها إذا كان الورق ضعيفا ، إذا كانت المسارات المغناطيسية على الأشرطة صغيرة جدا و هي تزال مغنطتها و تفقد المعلومات المخزنة . بتعبير آخر ، السجل بالتالي يعتبر مستقر ضد التذبذبات الداخلية بجعلها ذات حجم كافي . وكل سجل بالتالي مكون من العديد من العناصر و يبين تذبذبات صغيرة .

أهمية الحجم يمكن التعبير عنها بطريقة أخرى : كل جملة ذات ذاكرة أي كل جملة قادرة على إنتاج سجل تحتوي حمّام . في الملخص ، العبارة أن أي قياس هو إنتاج سجل يمكن التعبير عنها بشكل أكثر دقة بالشكل :

- أي قياس لجملة هو نتيجة تبادل تأثير بين تلك الجملة و حمّام في جهاز التسجيل .

بالمناسبة ،نظرا لأن الحمّامات تقتضي الاحتكاك ، يمكننا أيضا القول : الذاكرة تحتاج إلى احتكاك . بالإضافة لذلك أي قياس يقيس كمية فيزيائية يستخدم تبادل تأثير الذي يعتمد على نفس الكمية . بواسطة هذه الملاحظة التي تبدو بسيطة يمكننا وصف بمزيد من التفصيل

القصة المذكورة لهؤلاء الفيزيائيين الذين بنوا آلة التي يمكن أن تتوقع نتيجة كرة الروليت من السرعة الابتدائية المعطاة من قبل مدير اللعبة (مجلد I ، صفحة 127)



الشكل 76 – مفاهيم مستخدمة في وصف القياسات

عملية القياس ، أو كما يسمى عادة في نظرية الكم ، عملية القياس . أي جهاز قياس ، أو كاشف يتميز بناحيتين رئيسيتين مبينتين في الشكل 76 : تبادل التأثير الذي يملكه مع الجملة الميكروسكوبية و الحمّام الذي يحتويه لإنتاج السجل (مرجع 120) . و أي وصف لعملية القياس بالتالي هو وصف لتطور الجملة الميكروسكوبية و الكاشف ، بالتالي يحتاج المرء للهاملتوني من أجل الجسيم ، تبادل التأثير الهاملتوني و خواص الحمّام (مثل زمن الاسترخاء t_r) . إن تبادل التأثير يحدد ما هو مقاس و الحمّام يحقق الذاكرة .

نحن نعلم أن فقط الجمل الثيرموديناميكة الكلاسيكية يمكن أن تكون غير عكوسة ، الجمل الكمية ليست كذلك . و بالتالي نستنتج : جملة القياس يجب وصفها كلاسيكيا : وإلا لن يكون هناك ذاكرة و لن يكون هناك جملة قياس : أي سوف لن تنتج سجل . الذاكرة هي أثر كلاسيكي . (بشكل أكثر دقة الذاكرة هي أثر الذي يظهر فقط في الحد الكلاسيكي) . على أنه لنرى ما يحدث إذا وصفنا جملة القياس بشكل ميكانيكي كمي .

لنسمي A القيمة القابلة للقياس التي تقاس في التجربة و توابعها الخاصة φ_n . نصف جملة ميكانيك كمي قيد الملاحظة – غالبا جسيم – بحالة ψ . والحالة الكاملة للجملة يمكن دائما كتابتها بالشكل :

$$\psi = \psi_p \, \psi_{\text{other}} = \sum_n c_n \varphi_n \, \psi_{\text{other}} \, . \qquad (81)$$

هنا ψ_p هي الناحية (الجسيم أو الجملة) من الحالة التي نريد قياسها و ψ_{other} تمثل كل الدرجات الأخرى من الحرية أي تلك غير الموصوفة – الممتدة ، بلغة رياضية – من قبل العامل A المقابل للقيمة المقاسة التي نريد قياسها . و إن الأعداد $c_n = |\varphi_n^\dagger \psi_p|$ تعطي النشر / التعميم / الامتداد للحالة ψ_p التي تؤخذ بأنها منسوبة / مطبعة بدلالة الأساس φ_n . مثلا في قياس موضع نموذجي فإن التوابع φ_n ستكون التوابع الخاصة للموضع و ψ_{other} ستحتوي المعلومات حول كمية الحركة ، البرم و كل الخواص الأخرى للجسيم .

كيف يبدو تبادل تأثير الجملة – الكاشف ؟ لنسمي حالة الجهاز قبل القياس χ_{start} . جهاز القياس نفسه بالتعريف هو جهاز الذي عندما يضرب بجسيم في الحالة φ_n ψ_{other} يتغير من الحالة χ_{start} إلى الحالة χ_n . و بالتالي يقول المرء أن الجهاز قاس القيمة الخاصة a_n المقابلة للتابع الخاص φ_n للعامل A. الدليل n بالتالي هوي سجل القياس و يسمى دليل المؤشر أو المتحول . هذا الدليل يخبرنا في أي حالة كانت الجملة الميكروسكوبية قبل تبادل التأثير . إن النقطة المهمة ، المأخودة من مناقشتنا السابقة هي أن الحالات χ_n هي سجلات و هي متميزة ماكروسكوبيا ، بدقة من حيث الفقرة السابقة . وإلا فهي ليست سجلات و تبادل التأثير مع الكاشف لن يكون قياس .

بالطبع خلال القياس الجهاز الحساس لـ φ_n يغير الجزء ψ_{other} من حالة الجسيم إلى وضعية أخرى ما $\psi_{other,n}$ التي تعتمد على القياس و على الجهاز و لا نحتاج لتحديدها في المناقشة التالية . * لكن لنقم بفحص وسيط لفهمنا . هل الأجهزة كما هي موصوفة موجودة ؟ نعم ، هي موجودة . مثلا أي صفيحة فوتوغرافية هي كاشف لموضع جسيمات متشردة .الصفيحة و بشكل عام أي جهاز يقيس الموضع يقوم بهذا بواسطة تغيير كمية حركته بشكل يعتمد على الموضع المقاس : الإلكترون على صفيحة فوتوغرافية يتم إيقافه . في هذه الحالة χ_{start} هي صفيحة بيضاء و φ_n ستكون جسيم متوضع عند البقعة n و χ_n هو تابع يصف الصفيحة المسودة عند البقعة n و $\psi_{other,n}$ يصف كمية الحركة و البرم للجسيم بعد أن يضرب الصفيحة الفوتوغرافية في النقطة n .

الآن نحن جاهزون للنظر لعملية القياس نفسها . من أجل الآن ، لنترك الحمّام في الكاشف ، و لنصف فقط الحالة أيضا ، التي نسميها χ_{start} . في الوقت قبل تبادل التأثير بين الجسيم و الكاشف و الجملة مجتمعة (التي تتضمن الكاشف) كانت في حالة ابتدائية ψ_i تعطى ببساطة بالشكل :

$$\psi_i = \psi_p \chi_{start} = \sum_n c_n \varphi_n \psi_{other} \chi_{start} \,, \qquad (84)$$

حيث ψ_p هو حالة (الجسيم أو الجملة). بعد تبادل التأثير باستخدام ما ذكر للتو فإن المميزات المعروفة تجريبيا للجهاز ، الحالة الجمعية ψ_a هي

$$\psi_a = \sum_n c_n \varphi_n \psi_{other,n} \chi_n \,. \qquad (85)$$

هذا الشكل التطوري من ψ_i إلى ψ_a ينتج من معادلة التطور المطبقة على مجموع الجسم – الكاشف . الآن الحالة الكلية ψ_a هي تنضد للحالات المختلفة ماكرسكوبيا : هذا تنضد لحالات ماكروسكوبية مختلفة للكاشف .

---

*كيف يبدو تبادل التأثير رياضيا ؟ من الوصف الذي أعطياه للتو نحدد الحالة النهائية من أجل كل حالة ابتدائية . نظرا لأن مصفوفتي الكثافة مرتبطتان بالشكل

$$\rho_f = T \rho_i T^{\dagger} \qquad (82)$$

يمكننا استنتاج المصفوفة الهاملتونية من المصفوفة T . هل تستطيع أن ترى لماذا ؟ (تحدي 134 ny) .

بالمناسبة يمكننا القول بشكل عام أن جهاز القياس الذي يقيس القيمة القابلة للقياس A له مصفوفة تبادل تأثير جملة هاملتونية يعتمد على متحول المؤشر A و الذي له القيمة

$$[H + H_{\text{int}}, A] = 0 \,. \qquad (83)$$

في مثالنا ψ_a يمكن أن تقابل تنضد لحالة واحدة حيث البقعة في الزاوية العليا اليسارية تكون مسودة على صفيحة بيضاء مع حالة أخرى حيث بقعة في الزاوية السفلى اليمينية على صفيحة بيضاء مسودة. مثل هذه الحالة لا تلاحظ أبدا . دعونا نرى لماذا .

مصفوفة الكثافة ρ_a للحالة الكلية ψ_a بعد القياس معطاة بالشكل :

$$\rho_a = \psi_a \otimes \psi_a^{\dagger} = \sum_{n,m} c_n c_m^{*} (\varphi_n \psi_{\text{other},n} \chi_n) \otimes (\varphi_m \psi_{\text{other},m} \chi_m)^{\dagger} \,, \qquad (86)$$

تحتوي حدود كبيرة غير قطرية مثل الحدود من أجل $n \neq m$ التي معاملاتها العددية مختلفة عن الصفر. الآن لنأخذ إدخال الحمّام . من الفقرة السابقة علمنا أن أثر الحمّام على مثل هذا التنضد الماكروسكوبي . لقد وجدنا أن مصفوفة الكثافة مثل ρ_a يزال تماسكها بشكل سريع . نفترض هنا أن زمن إزالة التماسك هو صغير بشكل مهمل . * بعد إزالة التماسك ، فإن الحدود خارج القطر تتلاشى و فقط مصفوفة الكثافة القطرية النهائية ρ_f تعطى بالشكل :

$$\rho_f = \sum_n |c_n|^2 (\varphi_n \psi_{\text{other},n} \chi_n) \otimes (\varphi_n \psi_{\text{other},n} \chi_n)^{\dagger} \qquad (87)$$

تبقى و لها صلة تجريبية . كما شرحنا أعلاه ، مثل هذه المصفوفة للكثافة تصف حالة مختلطة ، و الأعداد $P_n = |c_n|^2 = |\varphi_n^{\dagger} \psi_p|^2$ تعطي احتمال قياس القيمة a_n و إيجاد الجسيم في الحالة $\varphi_n \psi_{\text{other},n}$ و أيضا الكاشف في الحالة χ_n . لكن هذا هو بدقة يبين ما هي خاصتي حالة القياسات الكمية .

بالتالي فإننا نجد أن وصف القياس كتطور لجملة كمية تتبادل التأثير مع كاشف ماكروسكوبي بذاتها تحتوي حمّام و يمكننا أن نستنتج خاصتي القياسات الكمية ، النتائج الاحتمالية و تقوض تابع الموجة من معادلة التطور الميكانيكي الكمي .

إن زمن إزالة التماسك t_d للفقرة السابقة يصبح زمن التقوض لحالة القياس بالإضافة لذلك نجد

$$t_{\text{collapse}} = t_{\text{d}} < t_{\text{r}} \,. \qquad (88)$$

بمعنى آخر ، زمن التقوض هو دائما أصغر من زمن الاسترخاء للحمّام . و بالتالي لدينا علاقة من أجل الزمن الذي يستغرقه تابع الموجة ليتقوض . و كل القياسات التجريبية لزمن التقوض أكدت هذه النتيجة . (مرجع 104) .

لماذا $\hbar$ ضروري للاحتمالات ؟

من النظرة الأولى يمكن القول أن خاصتي القياسات الكمية لا تحتويان $\hbar$ و بالتالي ليست نتائج لنظرية الكم . لكن هذه المقولة غير صحيحة .

---

*لكن لاحظ أن زمن إزالة التماسك المتقوض تماما الذي سيعني عدد لانهائي بشكل صارم من درجات الحرية للحمّام أو البيئة هو في تناقض مع معادلة التطور ، و بشكل خاص مع التوحيد ، الموضعية و السببية . و من الأساسي في كل المقولة ألا نخلط النتائج المنطقية لإزالة التماسك الصغير جدا مع ذلك العائد لإزالة التماسك المتلاشي تماما

إن إزالة التماسك هو عملية كمية لأن $\hbar$ يظهر في علاقة زمن إزالة التماسك . نظرا لأن تقوض تابع الموجة يستند إلى إزالة التماسك ، فإنه عملية كمية أيضا . أيضا الاحتمالات هي ناتجة عن كم الفعل .

بالإضافة لذلك لقد رأينا أن مفهوم تابع الموجة يظهر فقط بسبب أن كم الفعل $\hbar$ هو غير صفري (صفحة 86) . توابع الموجة ، تقوضها و احتمالاتها ناتجة عن كم الفعل $\hbar$.

هذه النتائج تسترجع العبارة المذكورة سابقا (صفحة31) : الاحتمالات تظهر متى حاولت التجربة كشف تغييرات أي قيم الفعل الأصغر من $\hbar$. أكثر الأحاجي حول القياس هي ناتجة عن مثل هذه المحاولات . (تحدي e 135) و لكن الطبيعة لا تسمح بمثل هذه القياسات في كل من مثل هذه المحاولة تظهر الاحتمالات .

المتحولات المخفية

إن عددا كبيرا من الناس غير راضين عن شرح الاحتمالات في عالم الكم . و هي لفترة طويلة أكثر غرابة في نظرية الكم . و هم لا يرغبون بفكرة أن الاحتمالات ناتجة عن الحمّامات و عن كم الفعل . و إن الضرر الذي زرعه أولئك الناس هي فكرة أن الاحتمالات ناتجة عن بعض النواحي المخفية في الطبيعة التي ما تزال مجهولة للبشر . مثل هذه النواحي المتصورة المجهولة تسمى المتحولات المخفية .

إن الشيء الجميل حول ميكانيك الكم هو أنه يسمح بكل من الاختبارات المبدئية و التجريبية حول فيما إذا كانت مثل هذه المتحولات الخفية موجودة – بدون الحاجة لمعرفتها . من الواضح أن المتحولات الخفية التي تتحكم بتطور الجملة الميكروسكوبية ستتعارض مع عبارة أن قيم الفعل الأدنى من $\hbar$ لا يمكن أن تكشف . إن أصغر قيمة فعل قابلة للقياس هي سبب من أجل السلوك العشوائي للجمل الميكروسكوبية .

أصغر فعل بالتالي يستبعد المتحولات الخفية . لكن دعونا نضيف بعض المقولات التفصيلية . تاريخيا ، فإن أول مقولة مجردة بعض الشيء ضد المتحولات أعطيت من قبل جون فون نيومان * و نظرية عدم الذهاب الإضافية للمتحولات المخفية نشرت من قبل كوخن و سبيكر في عام 1967 (مرجع 121) و بشكل مستقل من قبل بيل في 1969 . تنص النظرية على :

- المتحولات الخفية غير السياقية هي مستحيلة إذا كان فراغ هيلبرت له بعد يساوي أو أكبر من ثلاثة

النظرية هي عن المتحولات غير السياقية أي حول المتحولات المخفية داخل الجملة الميكانيكية الكمية . إن نظرية كوخن – سبيكر بالتالي تنص أنه ليس هناك نموذج متحول مخفي غير سياقي ، لأن الرياضيات تمنع ذلك . هذه النتيجة تلغي أساسا كل الاحتمالات للمتحولات الخفية لكن الجمل الميكانيكية الكمية لها أبعاد فراغ هيلبرت أكثر من ثلاثة .

---

*يانوس نيومان (ولد عام 1903 في بودابست ، توفي عام 1957 في واشنطن) هو رياضي بارز . هو أحد العقول العلمية و الأكثر وضوحا للقرن العشرين وقد قام بتسوية العديد من القضايا خاصة في الرياضيات التطبيقية و نظرية الكم و التي ما يزال الآخرون يكافحون بها اليوم . وقد عمل بعد ذلك على القنبلة الذرية و الهيدروجينية ، على الصواريخ البالستية ، و في مسائل الدفاع العامة , من أجل أبحاث القنابل ، فقد أثر بشكل كبير على بناء أول الحاسبات الإلكترونية ، و التي عممت أفكار كونراد زوس . في نهاية حياته ، فقد أراد تغيير الطقس بواسطة القنابل النووية . وقد مات بالسرطان الذي كان ناتج عن التعرض للإشعاع النووي عند مشاهدة اختبارات القنابل .

لا يمكننا تجنب ملاحظة أنه ليس هناك متحولات خفية سياقية أي متحولات في البيئة و بشكل خاص في حمّامات محتواة فيها . في الحقيقة إن ضرورتها تم بيانها أعلاه.

أيضا المنطق العام يزيل المتحولات الخفية ، بدون أي لجوء للرياضيات بواسطة فرض بسيط . إذا كانت جملة الميكانيك الكمي لها متحولات خفية ، فإن جهاز القياس سيملك زليونات منها . * و هذا سيعني أنها لن تعمل كجملة قياس .

بالرغم من كل المقولات فإن الباحثين دائما كانوا يبحثون عن الاختبارات التجريبية للمتحولات الخفية . أكثر الاختبارات تستند لمتراجحة بيل الشهيرة ، وهذه علاقة بسيطة نشرت من قبل جون بيل ** في 1960s .

هل يمكننا تمييز نظرية الكم و النظريات الواقعية موضعيا التي تستخدم المتحولات الخفية ؟ إن فكرة بيل البدائية هي القيام بذلك بقياس استقطابات فوتونين مرتبطين . نظرية الكم تقول أن استقطاب الفوتونات ثابت فقط عند قياس الزمن ، بينما النماذج الحقيقية الموضعية – النوع الأكثر وضوحا من نماذج المتحولات الخفية – تقول بأن الاستقطاب ثابت مسبقا بواسطة متحول خفي . كما وجد بيل فإن التجارب يمكن أن تستخدم لاتخاذ قرار التي بديلها صحيح .

إن تخيل أن الاستقطاب يقاس عند نقاط بعيدة A & B . كل مراقب يمكن أن يقيس 1 أو 1- في كل من اتجاهه المفضل . لنجعل كل مراقب يختار اتجاهين 2 & 1 و نسمي نتائجها b_1 & b_2 , a_1 , a_2 . نظرا لأن نتائج القياس $(a_1 + a_2)b_1 + (a_2 - a_1)b_2$ كان دائما لهل القيمة ± 2 .

تخيل أنك كررت التجربة عدة مرات ، بافتراض أن المتحولات الخفية تظهر إحصائيا (مرجع 122) . يمكنك بعدها استنتاج (حالة خاصة) من متراجحة بيل من أجل متحولين خفيين ، يتوقع أن (تحدي e 136)

$$|(a_1 b_1) + (a_2 b_1) + (a_2 b_2) - (a_1 b_2)| \leqslant 2 . \qquad (89)$$

هنا ، العلاقات بين قوسين هي متوسطات نواتج / جداءات القياس عبر عدد كبير من العينات . هذا المتحول المخفي يصح بشكل مستقل عن اتجاهات المقطبات الموجودة .

من ناحية أخرى من اجل الحالة التي فيها المقطبين 1 و 2 في الموضع A و المقابلة في الموضع B تختار بزوايا $\pi/4$ ، تتوقع نظرية الكم أن

$$|(a_1 b_1) + (a_2 b_1) + (a_2 b_2) - (a_1 b_2)| = 2\sqrt{2} > 2 . \qquad (90)$$

هذا التوقع هو متناقص كليا مع توقع المتحول المخفي .

الآن ، كل التدقيقات التجريبية لمتراجحة بيل أكدت ميكانيك الكم القياسي و زيفت المتحولات المخفية . ليس هناك استثناءات .

التناقص الآخر القابل للقياس بين نظرية الكم و النظريات الحقيقية الموضعية تم توقعه من قبل جرينبيرغر ، هورن و تساليغر في الجمل ذات الثلاث جسيمات المتشابكة .(مرجع 123) . مرة ثانية نظرية الكم أكدت في كل التجارب .

---

*الذي يؤدي إلى التعريف : زليون واحد هو 10^{23}

**جون ستيوارت بيل (1928-1990) فيزيائي نظري الذي عمل بشكل أساسي على أسس نظرية الكم

في الملخص ، المتحولات المخفية غير موجودة . بالطبع هذا ليس فعلا مدهش . البحث عن متحولات مخفية يستند إلى سوء فهم ميكانيك الكم أو بناء على الرغبات الشخصية حول كيف يجب أن يكون العالم ، بدلا من أخذه كما هو : هناك أصغر قيمة فعل قابلة للقياس $\hbar$ في الطبيعة .

ملخص عن الاحتمالات و التحديد

" نحن قادرين على إظهار المواد لأننا نعلمها ، إذا استطعنا إثبات المواد فإننا سنكون قادرين على صنعها

جيامبتيستا فيكو "

نتوصل لعدد من الاستنتاجات التي نحتاجها لبقية صعودنا الجبل . لاحظ أن هذه النتائج حتى بالرغم من أنها متفقة مع كل التجارب غير متشاركة بعد من قبل كل الفيزيائيين . الموضوع كله هو مشكلة للناس الذين يفضلون الإيديولوجيا على الحقائق .

في الحياة اليومية ، الاحتمالات غالبا لا تظهر أو لا تلاحظ . تبين نظرية الكم :

- الاحتمالات تظهر عندما تحاول عملية أن تميز بين الأوضاع التي تختلف بحوالي كم فعل واحد $\hbar$
- الآلية الدقيقة لظهور الاحتمالات هي ناتجة عن الحمّامات القائمة

باختصار تظهر الاحتمالات متى تحاول التجربة التمييز بين أوضاع مغلقة أو قريبة

بمزيد من التفصيل

- الاحتمالات لا تظهر في القياسات بسبب حالة الجمل الكمية مجهولة او ضبابية ولكن بسبب الحالة التفصيلية لحمام تبادل التأثير في البيئة هو مجهول .الاحتمالات الميكانيكية الكمية هي ذات أصل إحصائي و هي ناتجة عن الحمامات في البيئة أو في أجهزة القياس بالاشتراك مع كم الفعل $\hbar$.

إن الاحتمالات ناتجة عن عدد كبير من درجات الحرية المحتواة في الحمّام . هذه الأعداد الكبيرة تجعل نتيجة التجارب – خاصة تلك ذات النتائج الممكنة تختلف بحوالي $\hbar$ - غير قابلة للتوقع . إذا كانت الحالة للحمّام القائم مجهولة ، فإن نتيجة التجربة يمكن توقعها . إن احتمالات نظرية الكم هي ناتجة عن كم الفعل و هي ثيرموديناميكة في الأصل . بكلمات أخرى ، ليس هناك احتمالات أساسية في الطبيعة . كل الاحتمالات في الطبيعة هي ناتجة عن إزالة التماسك و بشكل خاص الاحتمالات ناتجة عن الإحصائيات للعديد من الجسيمات – وبعضها حتى افتراضي – و هي جزء من الحمّامات في البيئة . إن تعديل الكلمات المعروفة جيدا من قبل ألبرت أينشتاين يمكننا الاتفاق على ما يلي : " الطبيعة لا تلعب النرد " بالتالي نسمي تابع الموجة ψ بدلا من مطال الاحتمال كما يتم غالبا . و المصطلح الأفضل حتى سيكون تابع الحالة .

---

*"نحن قادرين على إظهار المواد لأننا نعلمها ، إذا استطعنا إثبات المواد فإننا سنكون قادرين على صنعها " جيوفاني باتيستا فيكو (ولد عام 1668 في نابولي و توفي عام 1744 فيها) فيلسوف مهم و مفكر . في هذه العبارة الشهيرة يشير إلى تمييز أساسي بين الرياضيات و الفيزياء .

- كل قياس في الحياة اليومية هو حالة خاصة من إزالة التماسك . إن ما نسميه عادة تقوض تابع الموجة هو عملية إزالة تماسك ناتجة عن تبادل التأثير مع الحمّامات الموجودة في البيئة أو في جهاز القياس . لأن البشر ذوي دم حار ، و لديهم ذاكرة فإن البشر أنفسهم أجهزة قياس . إن حقيقة أن درجات حرارة جسمنا هي 37 ^{o}C هي بالتالي سبب أننا نرى فقط عالما وحيدا ، و لا يوجد تنضدات . (في الحقيقة ، هناك العديد من الأسباب الإضافية ، هل يمكنك تسمية بعضها ؟) (تحدي 137s)
- كل القياسات كاملة عندما الجملة الميكروسكوبية تكون قد تبادلت التأثير مع الحمّام في جهاز القياس . نظرية الكم كوصف للطبيعة لا تتطلب كواشف ، معادلة التطور تصف كل أمثلة الحركة . لكن القياسات تحتاج لوجود

الكواشف .. الكاشف أو جهاز القياس هو آلة التي تسجل القياسات . بالتالي يجب أن تتضمن حمّام ، أي يجب أن تكون جسما ماكروسكوبيا . في هذا السياق يتحدث المرء أيضا عن جهاز كلاسيكي . هذه الضرورة لجهاز القياس يجب أن تكون كلاسيكية و التي تم التشديد عليها للتو في المراحل المبكرة جدا من نظرية الكم .

- كل القياسات لكونها عمليات إزالة تماسك ، التي تتضمن تبادلات تأثير مع الحمّامات هي غير عكوسة و تزيد الإنتروبي
- كل قياس مثل كل مثال لإزالة التماسك هو حالة خاصة من تطور ميكانيكي كمي أي تطور مجموع جملة كمية ، كاشف ماكروسكوبي و حمّام . نظرا لأن معادلة التطور هي ثابتة نسبيا فإنه لا تظهر أي مشكلة سببية في القياسات و لا مشاكل موضعية أو منطقية تظهر .
- نظرا لأن كلا من معادلة التطور و عملية القياس لا تتضمن كميات غير الفراغ – الزمن ، الهاملتونيات ، الحمّامات و توابع الموجة فإنه لا يوجد أي كمية أخرى تلعب دورا في القياس . بشكل خاص لا يكون ضروريا مشاركة أي مراقب بشري و لا أي وعي . (مجلد III ، صفحة 335) .كل قياس كامل عندما الجملة الميكروسكوبية تكون قد تبادلت التأثير مع الحمّام في الجهاز . إن إزالة التماسك المتأصلة في كل قياس تتم حتى إذا كان لا أحد ينظر إليها . هذا التتابع التجريبي هو في اتفاق مع ملاحظات الحياة اليومية ، مثلا بحقيقة أن القمر يدور حول الأرض ولو لم ينظر إليه أحد . * بشكل مشابه السقوط الحر في منتصف غابة يتم حتى و لم يكن أحد ينصت له . إزالة التماسك هي مستقلة عن الملاحظة البشرية ، عن العقل البشري و الوجود البشري .
- في كل قياس الجملة الكمية تتبادل التأثير مع الكاشف . نظرا لأن هناك قيمة دنيا لمقدار الفعل ، فإن كل ملاحظة تؤثر على الشيء الملاحظ . بالتالي كل قياس يحدث اضطراب في الجملة الكمية . وأي وصف دقيق للملاحظات يجب أيضا أن يشمل وصف هذا الاضطراب . في الفقرة الحالية فإن الاضطراب تم نمذجته بتغير حالة الجملة من ψ_{other} إلى $\psi_{other,\,n}$. بدون مثل هذا التغير للحالة و بدون اضطراب للجملة الكمية القياس مستحيل .
- نظرا لأن عملية القياس الكاملة توصف بواسطة ميكانيك الكم ، فإن الواحدية تبقى الخاصة الأساسية للتطور . و ليس هناك عمليات غير واحدية في ميكانيك الكم .

---

*الرأي المعاكس في بعض الأحيان ينسب لنيلز بور . القمر بشكل واضح في تماس مع العديد من حمّامات الإشعاع . هل يمكنك أن تورد بعضا منها ؟ (تحدي s 138) .

- وصف تقوض تابع الموجة كعملية إزالة تماسك هي الشرح تماما من ناحية أن مصطلح " شرح " تم تعريفه سابقا ، ويصف العلاقة بين الملاحظة و كل النواحي الأخرى من الحقيقة (مجلد III ، صفحة 330) ، وفي هذه الحالة الحمّام في الكاشف أو البيئة . إن تقوض تابع الموجة تم قياسه ، و حسابه و شرحه . التقوض ليس مسألة تفسير أي رأي كما كان غالبا يقترح بشكل غير صحيح . *
- من غير المفيد تصور فيما إذا كان التطور من أجل قياس كمي وحيد يمكن أن يحدد إذا كانت حالة البيئة حول الجملة معلومة . القياسات تحتاج حمّامات ، ولكن الحمّام هو تقريب ممتاز ، غير عكوس و بالتالي لا يمكن وصفه بتابع موجة الذي يتصرف بشكل معكوس .**

باختصار :

- ميكانيك الكم تحديدي
- الحمّامات احتمالية
- الحمّامات احتمالية بسبب كم الفعل

في الملخص ، ليس هناك عدم منطقية في نظرية الكم . إن من يستخدم نظرية الكم كحجة للتنضدات ، السلوك غير المنطقي ، عصر جديد من المعتقدات أو الإيديولوجيات هو مدان بتقديم معلومات خاطئة . العبارة من قبل جيل – مان في بداية هذا الفصل هي مثال عن ذلك (صفحة 142) . المثال التالي هو العبارة المعروفة جيدا لكن غير الصحيحة من قبل ريتشارد فينمان :

... لا أحد يفهم ميكانيك الكم . (مرجع 125)

إن جوائز نوبل من الواضح أنها لا تمنع الآراء المشوهة بواسطة هذه الإيديولوجيا . العبارة الصحيحة هي :

- كم الفعل و إزالة التماسك هما المفتاح لفهم نظرية الكم .

في الحقيقة $\hbar$ و إزالة التماسك تسمح بتوضيح العديد من القضايا الأخرى . و سندرس بعضا من المهم منها

ما هو الفرق بين الفراغ و الزمن ؟

الفراغ و الزمن مختلفان . الأجسام تتوضع في الفراغ و لكن ليس في الزمن . لماذا هذا هو الحال ؟ في الطبيعة أكثر تبادلات التأثير بين الجملة – الحمّام تتواسط بواسطة كمون . و كل الكمونات هي بالتعريف تابعة للموضع . بالتالي كل كمون كونه تابع للموضع x يشكل موضع قابل للملاحظة (و بالتالي مع تبادل تأثير هاملتوني) . إن إزالة التماسك المحرضة بواسطة الحمّامات – عدا إذا تم اتخاذ عناية خاصة – بالتالي قبل كل شيء يدمر العناصر غير القطرية من كل تنضد لحالات مركزة عند مواقع مختلفة . باختصار ، الأجسام متوضعة لأنها تتبادل التأثير مع الحمّامات عن طريق الكمونات .

---

*هذا يقتضي أن ما يعرف بتفسير "العوالم العديدة " هو فكر تمني . و النتيجة مؤكدة عند دراسة تفاصيل هذه الطريقة الدينية (مرجع 124) . وهي نظام اعتقاد ، و لا تستند للحقائق .

**هذا نوع قوي جدا من التحديد الذي سيتم تحديه بشكل كبير في الجزء الأخير من هذا النص ، الذي فيه سنبين أن الزمن ليس مفهوما أساسيا و بالتالي أن الجدل حول التحديد يفقد جل أهميته

لنفس الغرض ، الأجسام أيضا لها منحى فراغي واحد في كل مرة . و إذا كان تبادل تأثير الجملة – الحمّام تابع للبرم فإن الحمّام يؤدي لتموضع في متحول البرم . وهذا يحدث من أجل كل الجمل الميكروسكوبية التي تتبادل التأثير مع المغانط.

بالنتيجة التنضدات الماكروسكوبية للمغنطة هي تقريبا لا تلاحظ أبدا . نظرا لأن الإلكترونات ، البروتونات ، و النيوترونات لها عزم مغناطيسي و لها برم فإن هذه النتيجة يمكن حتى أن تعمم : كل جسم لا يرى أبدا في تنضدات لحالات دوران مختلفة لأن تأثيراتها المتبادلة مع الحمّامات هي تابعة للبرم .

كمثال معاكس ، تقريبا أكثر الجمل غير متوضعة في الزمن و لكن على العكس توجد لفترة قصيرة جدا من الزمن لأن عمليا كل تبادلات تأثير الجمل – الحمّامات لا تتبادل مع الزمن . في الحقيقة ، هذا هو الطريق الذي يعّرف به الحمّام للبدء بها

باختصار الأجسام دائمة لأنها تتبادل التأثير مع الحمّامات .

هل تستطيع إيجاد تبادل تأثير الذي هو تابع لكمية الحركة بدلا من التبعية للموضع ؟ (تحدي 139s) . ما هي نتائج ذلك على الجمل الماكروسكوبية ؟

بكلمات أخرى ، على عكس النسبية العامة ، نظرية الكم تنتج تمييز بين الفراغ و الزمن . في الحقيقة يمكننا تعريف الموضع بأنه قيمة قابلة للقياس التي تتبادل مع هاملتونيات تبادل التأثير . هذا التمييز بين الفراغ و الزمن ناتج عن خواص المادة و تبادلات تأثيرها . و لا يمكننا استنتاج هذا التمييز في النسبية العامة .

هل نحن مراقبون جيدون ؟

هل البشر أجهزة كلاسيكية ؟ نعم ، هم كذلك . حتى بالرغم من أن العديد من الفيزيائيين البارزين يدعون بأن الإرادة الحرة و الاحتمالات مترابطين و الدراسة التفصيلية تبين أن هذه ليست هي الحال . (مرجع 126) . إن حواسنا هي آلات كلاسيكية لأنها تخضع لتعريفها : الحواس البشرية تسجل الملاحظات بواسطة التأثير المتبادل مع حمّام . إن دماغنا هو أيضا جهاز كلاسيكي : العصبونات متضمنة في حمّامات . الاحتمالات الكمية لا تلعب دور محدد في الدماغ .

أي كيان ملاحظة يمكن أن يكون آلة أو كائن بشري ، و يحتاج إلى حمّام و ذاكرة لتسجيل ملاحظاته . هذا يعني أن المراقبين يجب أن يكونوا مكونين من المادة ، و المراقب لا يمكن أن يكون مكون من إشعاع . إن وصفنا للطبيعة بالتالي منحاز بشدة : نحن نصفه من وجهة نظرة المادة . أي أن هذا يشبه قليلا وصف النجوم بوضع الأرض في مركز الكون : (تحدي e 140) نحن دائما نضع المادة في مركز وصفنا . هل يمكننا إزالة هذا الشكل الإنساني ؟ سنجد هذا أثناء استمرارنا في مغامرتنا . (مجلد VI ، صفحة 82) .

ما الذي يربط نظرية المعلومات ، علم التشفير و نظرية الكم ؟

تعني الفيزياء الحديث عن ملاحظات الطبيعة . مثل أي ملاحظة ، أيضا القياسات تنتج معلومات . بالتالي من الممكن ترجمة الكثير (ولكن ليس كل) من نظرية الكم إلى لغة نظرية المعلومات . بشكل خاص ، وجود أصفر قيمة تغير في الطبيعة يقتضي أن المعلومات حول جملة فيزيائية يمكن ألا تكون كاملة قط ، و أن نقل المعلومات له حدوده و أن المعلومات يمكن ألا تكون موثوقة قط بشكل كامل . تفاصيل هذه الدراسات تشكل طريقة رائعة للنظر إلى العالم الميكروسكوبي .

إن التشابه بين نظرية الكم و نظرية المعلومات يصبح أكثر متعة عندما تترجم العبارات إلى لفة التشفير .(مرجع 127) التشفير هو علم إرسال رسائل مخفية التي يراد فقط للمستقبل أن يفك شيفرتها . في أزمنتنا الحديثة للفحص المستمر ، فإن التشفير هو أداة مهمة لحماية الحرية الشخصية . *

إن كم الفعل يقتضي أن الرسائل يمكن أن ترسل في (تقريبا) طريقة آمنة . و الاستماع للرسالة هو عملية قياس . نظرا لأن هناك أصغر فعل ممكن h يمكننا كشف فيما إذا أحد ما قد حاول الاستماع للرسالة التي أرسلناها . و لتجنب الهجوم من قبل رجل في الوسط فإن شخصا ما الذي يتظاهر بأنه المستقبل و بعدها يرسل نسخة من الرسالة إلى المستقبل المراد الحقيقي – يمكن أن يستخدم أنظمة متشابكة كإشارات أو رسائل لإرسال المعلومات . إذا تم تخريب التشابك فإن شخصا ما يكون قد استمع للرسالة . عادة أخصائي التشفير الكميين يستخدمون أنظمة الاتصال استنادا للفوتونات المتشابكة .

القضية الرئيسية لعلم التشفير الكمي و هو حقل بحث حديث كبير ، هو مشكلة التوزيع الرئيسية . كل الاتصال الآمن يستند إلى مفتاح سري الذي يستخدم لفك تشفير الرسالة . حتى إذا كانت قناة الاتصال من أعلى سرية - مثل الفوتونات المتشابكة – ما يزال على المرء أن يجد طريقة لإرسال إلى شريك الاتصال المفتاح السري اللازم من أجل فك تشفير الرسائل . إن إيجاد مثل هذه الطرق هو الناحية الرئيسية لفك التشفير الكمي . لكن الدراسة الوثيقة تبين أن كل طرق تبادل المفتاح محدودة في سريتها .

باختصار ، بسبب كم الفعل ، فإن الطبيعة تعطي حدود لإمكانية إرسال رسائل مشفرة . إن عبارة هذه الحدود (تقريبا) هي مكافئة لعبارة أن التغير في الطبيعة محدود بكم الفعل .

هل الكون حاسوب ؟

إن كم الفعل يعطي حد لضمان تبادل المعلومات . هذا الارتباط يسمح لنا بأن نستخرج جانبا العديد من العبارات الخاطئة التي توجد غالبا في وسائل الإعلام . إن القول أن الكون هو معلومات أو أن الكون هو حاسوب ، هو معقول مثل القول أن الكون هو ملاحظة أو آلة بيع علكة (مجلد VI ، صفحة 107) . إن أي خبير في الحركة سيكون مدركا لهذه العبارات المشابهة المشكوك بها ، الناس الذين يستخدمونها إما يخدعون أنفسهم أو يحاولون خداع الآخرين .

هل الكون يملك تابع موجة ؟ و شروط ابتدائية ؟

إن تابع الموجة للكون غالبا يثار في المناقشات حول نظرية الكم . إن النتائج العديدة تستنتج من هذه الفكرة ، مثلا حول عدم انعكاس الزمن ، حول أهمية الشروط الابتدائية و حول التغيرات المطلوبة لنظرية الكم و الكثير أكثر . هل هذه المقولات صحيحة ؟

إن أول شيء يجب توضيحه هو معنى الكون (مجلد II ، صفحة 223) . كما شرحنا فإن المصطلح يمكن أن يكون له معنيين : إما مجموعة كل المادة و الإشعاع أو هذه المجموعة إضافة إلى الفراغ – الزمن . لنسترجع معنى تابع الموجة : إنه يصف حالة جملة .

---

*علم التشفير يتألف من حقل علم التشفير ، و هو فن تشفير الرسائل ، و حقل تحليل الشيفرة ، و هو فن فك تشفير الرسائل المشفرة . من أجل مقدمة جيدة عن التشفير أنظر كتاب ALBRECHT BEUTELSPACHER , JÖRG SHWENK & KLAUS-DIETER WOLFENSTÄTTER ، طرق حديثة لعلم التشفير ، مطبعة فيبج 1995 .

إن الحالة التي تميز جملتين متطابقتين ، مثلا الموضع و السرعة تميز كرتي عاج متطابقتين على طاولة بليارد . بشكل مغاير ومكافئ الحالة تصف التغير في الزمن .

هل الكون يملك حالة ؟ إذا أخذنا المعنى الأوسع للكون ، فإنه لا يملك . الحديث عن حالة الكون يكون تناقض (مجلد ا ، صفحة 27) : بالتعريف مفهوم الحالة المعرف بأنه نواحي غير دائمة لجسم ، قابل للتطبيق فقط على أجزاء من الكون .

بالتالي يمكننا أخذ المعنى الأضيق للكون – مجموع المادة و الإشعاع فقط – و نسأل السؤال ثانية. لتحديد حالة كل المادة و الإشعاع فإننا نحتاج لإمكانية قياسها : نحن بحاجة لبيئة . و لكن بيئة المادة و الإشعاع في الفراغ – الزمن فقط و الشروط الابتدائية لا يمكن تحديدها نظر لأننا بحاجة لقياسات للقيم بذلك و بالتالي لجهاز . الجهاز هو جملة مادية مع حمّام متصل بها ، لكن ليس هناك مثل هذه الجملة خارج الكون .

باختصار ،

نظرية الكم لا تسمح بقياسات للكون .

- الكون ليس له حالة

انتبه لأي شخص يدعي أنه يعرف شيئا ما عن تابع موجة الكون . فقط اسأله سؤال ويلر : إذا كنت تعلم تابع الموجة للكون لماذا لست غنيا ؟

بالرغم من هذه النتيجة فإن العديد من الفيزيائيين المشاهير اقترحوا معادلة تطور لتابع الموجة للكون . (أكثرها معرفة ، بشكل يدعو للسخرية ، معادلة ويلر – دو فيت) (مرجع 128). و يبدو أنها نقطة سخيفة و لكن ليست توقعا لهذه المعادلات التي قورنت مع التجربة : المقولات التي أعطيت للتو حتى تجعل هذا مستحيلا من حيث المبدأ . إن دراسة مثل هذه المعادلات ربما يبدو من النظرة الأولى ممتع جدا ، يجب بالتالي أن يتم تجنبه إذا أردنا أن نكل مغامرتنا و تجنب الضياع في معتقدات زائفة .

هناك العديد من الالتواءات الإضافية في هذه القصة . أحدها هو أن الفراغ – الزمن نفسه حتى بدون مادة يمكن أن يكون حمّام . هذا التصور سيظهر بأنه صحيح في آخر مجلد من هذه المغامرة . و النتيجة يبدو أنها تسمح بالحديث عن تابع موجة الكون . لكن مرة ثانية ، ينتج أن الزمن غير محدد في مقاييس حيث الفراغ – الزمن هو حمّام فعال .، وهذا ثانية يقتضي أن مفهوم الحالة غير قابل للتطبيق هنا . إن عدم وجود حالة من أجل الكون هو عبارة قوية . و أيضا يقتضي عدم وجود الشروط الابتدائية . إن المقولات هي بدقة نفسها . و هذا هو نتيجة قوية . ونحن أيضا معتادون جدا على التفكير أن الكون له شروط ابتدائية التي لا تستعلم أبدا عن المصطلح . (حتى في هذا النص ، فإن الخطأ يمكن أن يظهر في كل مرة) و لكن ليس هناك شروط ابتدائية من أجل الكون .

يمكننا القول كملخص صالح حتى في ضوء آخر الأبحاث : الكون ليس جملة ، و ليس تابع موجة و ليس له شروط ابتدائية و المستقلة عن ما يقصد بالكون .

الفصل الثامن

الألوان و تبادلات التأثير الأخرى بين الضوء و المادة

" اعرف الموضوع و الكلمات التي تليه

كاتو " **

الأحجار و كل الأجسام الأخرى لها ألوان . لماذا ؟ بكلمات أخرى ما هي الطريقة الخاصة التي توجد بها الجسيمات الكمية المشحونة داخل الأحجار و داخل الأجسام الأخرى التي تتبادل التأثير مع الحقول الكهرطيسية ؟

في هذا الفصل سوف نعطي أولا عرض الطرق المختلفة التي تنتج بها الألوان في الطبيعة من كم الفعل أي من تبادل التأثير بين كوانتونات المادة و الفوتونات . بعدها سندرس أبسط مثل هذه الجمل : سنبين كيف أن كم الفعل يؤدي إلى ألوان مختلفة المنتجة بواسطة ذرات الهيدروجين . بعد هذا سنكتشف أن تبادل التأثير بين المادة و الإشعاع تؤدي إلى تأثيرات مدهشة أخرى خاصة عندما النسبية الخاصة تؤخذ بالحسبان .

أسباب اللون

نظرية الكم تشرح كل الألوان في الطبية . في الحقيقة كل الألوان التي نلاحظها هي ناتجة عن جسيمات مشحونة كهربائيا. بشكل أكثر دقة الألوان ناتجة عن تبادلات تأثير الجسيمات المشحونة . كل الألوان بالتالي هي تأثيرات كمية .

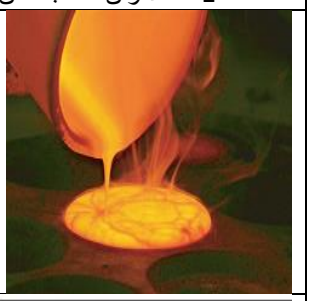
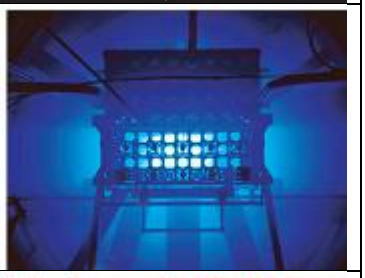
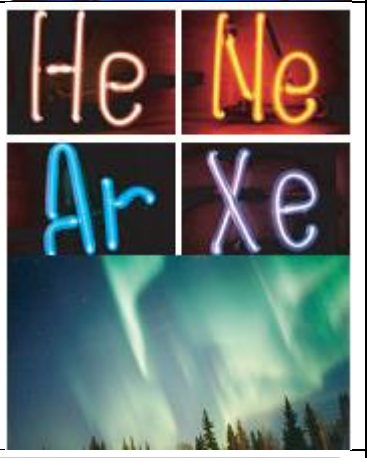
حتى الآن لقد درسنا حركة الكوانتونات التي توصف بواسطة الكتلة فقط . الآن نحن ندرس حركة الجسيمات المشحونة كهربائيا .

الجسيمات المشحونة في أساس أكثر الألوان هي إلكترونات و نوى التي تتضمن تركيباتها ، من الشوارد ، الذرات و الجزيئات إلى الموائع و الأجسام الصلبة . قضايا العديد من الألوان ما تزال موضوع بحث . مثلا حتى وقت قريب كان من غير الواضح لماذا الأسفلت هو أسود تماما . البنية الدقيقة للمركبات الكيماوية الأسفالتينات التي تنتج اللون الأسود البني الشديد كانت غير معلومة (مرجع 130) . فقط الأبحاث الحديثة أجابت على هذا السؤال . في الحقيقة تطوير ملونات جديدة و تأثيرات لونية هي جزء مهم من الصناعة الحديثة .

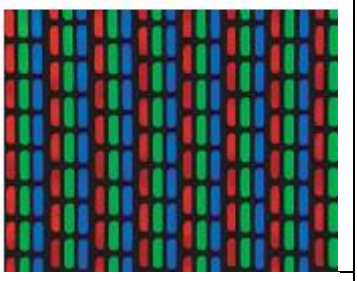
إن عرض الآليات الخاصة التي تولد اللون تعطى بالجدول التالي (مرجع 129). يشمل الجدول كل الألوان التي تظهر في الحياة اليومية .(هل يمكنك أن تجد لونا غير موجود ؟) (تحدي s 141) .

**"اعرف الموضوع و الكلمات التي تليه " ماركوس بروسيوس كاتو (234- 149 BCE) أو كاتول الأكبر ، سياسي روماني شهير بخطاباته و نزاهته .

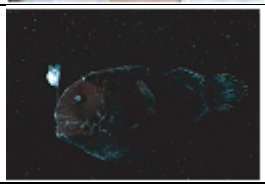
الجدول 7 – أسباب اللون

نوع اللون	المثال	التفاصيل
الصنف 1 – الألوان الناتجة عن تهييجات / إثارات بسيطة		
	التألق و إشعاع الشحنات الحرة . مصباح قوس الكربون ، الفولاذ الساخن ، أسلاك المصباح الكهربائي ، أكثر النجوم ، المغاغما ، الحمم البركانية / المقذوفات ، الصهارة الساخنة	الألوان ناتجة عن الطيف المستمر الصادر عن كل المادة الساخنة ، تتابع اللون يعطى بقاعدة فين هو : الأسود ، الأحمر ، البرتقالي ، الأصفر ، الأبيض ، الأزرق – الأبيض (الرصاص المصهور و الفضة)
	حريق / نار الخشب / الشمعة المشتعلة الألعاب النارية البيضاء ، مصباح اليد ، مولدات الشرارات	لهب الخشب و الشمع هي صفراء بسبب التألق إذا كانت غنية بالكربون و فقيرة بالأكسجين . بسبب المعادن التي تحترق لتتأكسد عن درجة حرارة عالية مثل المغنيويوم ، الزنك ، الحديد ، الألمنيوم أو الزرنكونيوم
	المفاعلات النووية ، المنابع السنكروترونية ، ليزرات الإلكترونات الحرة	ناتجة عن الشحنات السريعة الحرة : إشعاع فافيلوف – تشيرنكوف هو ناتج عن سرعة الجسيم الأكبر من سرعة الضوء في المادة ، الإشعاع الناتج عن تباطؤ الجسيمات المشحونة (قلب المفاعل النووي تحت الماء)
	2- إثارات الغاز الذري مصباح النيون الأحمر ، مصباح الأرغون الأزرق ، مصباح الزئبق للأشعة فوق البنفسجية، مصابيح الشوارع للصوديوم الأصفر ، اكثر الليزرات الغازية ، ليزرات الأبخرة المعدنية ، بعض التألق الأورورا / الهالات ، الإنارة الاحتكاكية في شريط السكوتش اللاصق ، الإنارة البلورية في برومات السترونتيوم	الألوان ناتجة عن انتقالات بين مستويات الطاقة الذرية (انفراغات الغاز) في الهواء الألوان الزرقاء و الحمراء ناتجة عن مستويات الطاقة الذرية و الجزيئية للنتروجين ، بينما الأخضر ، الأصفر ، البرتقالي ناتجة عن الأكسجين .
	الإنراة ، الأقواس ، الشرار ، الألعاب النارية الملونة ، أكثر اللهب الملون ، بعض التألق الكهربائي	خطوط الألوان ناتجة عن مستويات الطاقة لذرات مثارة بشكل عالي (لهب K , Cu ,Cs, B , Ca)

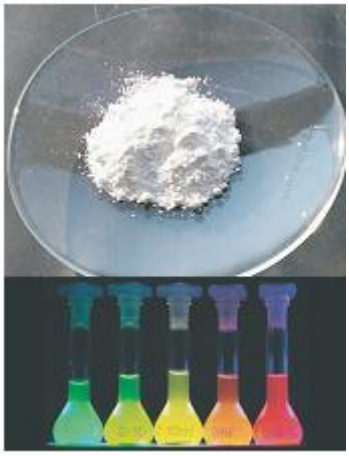
الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

نوع اللون	المثال	التفاصيل
	الألوان ناتجة عن مستويات مكممة من الدوران و الاهتززات في الجزيئات	3- الاهتزازات و دورانات الجزيئات الماء المزرق ، الجليد الأزرق عندما يكون شفافا ، اليود البنفسجي ، البروميد الأحمر – البني ، الكلور الأصفر – الأخضر ، اللهب من CN ، أو اللهب الأزرق – الأخضر من CH ،بعض الليزرات الغازية ، الأوزون الأزرق المؤدي إلى السماء الزرقاء و الرمادية في المساء
النوع 2: الألوان الناتجة عن تأثيرات حقل الرابط		
  	4- المركبات المعدنية الانتقالية الماشيت الأخضر $Cu_2CO_3(OH)_2$ ، أكسيد الكوبالت الأزرق ، الأزوريت الأزرق $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ ، الهيماتيت الأحمر إلى البني Fe_2O_3 ، MnO الأخضر ، $Mn(OH)_2$ الأبيض ، الماغنيت البني ، الكروم الأخض Cr_2O_3 ، براسيدوميوم الأخضر ، اليوربيوم الوردي و مركبات السماريوم الصفراء ، البيروكرومي و الثيرموكرومي للأشعة فوق Cr_2O_3- Al_2O_3 البنفسجية و فوسفورات الإلكترون ، الوميض ، بعض التألف ، بعض الليزرات	الألوان ناتجة ع الأألوان الناتجة عن الحالات الإلكترونية للشوارد ، الفوسفورات تستخدم في الأنابيب المهبطية من أجل شاشات التلفاز / الحاسوب و في أنابيب مصابيح التألق (المالشيت الأخضر في الكاسوليت الأصفر ، اليورانيوم المعدني / الفلز ، الصورة بعرض 5mm ، التي توجد في كولويزي ، زائير / الكونجو
	5- شوائب المعادن الانقالية الياقوت ، الزمرد ، الأليكساندريت ، بيرفوسكيت ، الليزرات الموافقة	الحالات الإلكترونية للشوارد المعدنية الانتقالية تثار بواسطة الضوء وبالتالي تمتض أطول موجبة معينة (الياقوت علىالكالسيت من الماغوك ، ميانمار ، عرض الصورة 3cm)

الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

نوع اللون	المثال	التفاصيل
النوع 3- الألوان الناتجة عن المدارات الجزيئية		
	6- المركبات العضوية و الهيموغلوبين الأحمر في الدم ، هيموسيانين الأزرق في الدم ، الكلوروفيل الأخضر في النباتات ، الكاروتينات الصفراء أو البرتقالية في الجزر ، الأزهار و أوراق الخريف الصفراء ، الأنثوسيانينات الحمراء أو القرمزية في التوت البري ، صيغة النيلة الزرقاء ، اللكيوبين الأحمر في الطماطم ، اللحم الأحمر من الميوغلوبين الحاوي على الحديد ، الغلكوزأمين البني في قشرة الغذاء المطبوخ ، التانينات البنية ، اليوميلانين الأسود في الجلد البشري ، أشكال الفيوميلانين الغنية بالأحمر في الشعر و العين في الأشخاص الصهب ،الميلانين الأسود في التفاح المقطوع و الموز و أيضا في الأكياس المتحركة في الكامليونات ، الأسفلت البني – الأسود ، بعض التألق ، السطوع الكيماوي ، التألق الفوسفوري ، التلون الكهربائي ، التلون بالهالات و التلون الحراري ، ليزرات الصبغة	اللوان ناتجة عن روابط π المقترنة أي الروابط المتناوبة الأحادية و المضاعفة في الجزيئات ، الأصبغة النباتية هي تقريبا كلها أنثوسيانينات ، البيتالانينات أو الكاروتينات المستخدمة في الملونات للأغذية و مواد التجميل ، في أصبغة النسيج ، في الشاشات الملونة الكهربائية ، في أحبار الطابعات الملونة ، في المحسسات الضوئية
	الديدان المتوهجة ، بعض البكتريا و الفطور ، أكثر أسماك البحر العميق ، الأخطبوط و السمك الهلامي و حيوانات البحر العميق الأخرى	السطوع الحيوي ناتج عن جزيئات مثارة عموما تسمى اللودفرينات

الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

نوع اللون	المثال	التفاصيل
	7- نقل الشحنات اللاعضوية الزافير الأزرق ، اللازورد الأزرق ، الأمازونيت الأخضر ، الماغنيت البني – الأسود Fe_2O_3 و أكثر الخامات الحديدية (البازلت الأسود الملون ، بني زجاجات البيرة ، أصفر رمل الكوارتز ، و العديد من الصخور الأخرى ذات اللون البني أو الأحمر) ، الغرانيت الأسود ، البيرمنغنات الأسود ، البوتاسيوم البرتقالي ثنائي الكرومات ، الموليبدات الأصفر ، الهيماتيت الأصفر Fe_2O_3 ، بعض التألق	الضوء المتحرض لتغير الموضع لإلكترون من ذرة لأخرى ، مثلا في ازافير الأزرق الانتقال هو بين شوائب Ti و Fe . العديد من اصبغة الدهان تستخدم ألوان نقل الشحنة ، الكواشف التحليلية المتألقة تستخدم في الطب الجزيئي والبيولوجيا
النوع 4 – الألوان الناتجة عن تأثيرات حزم الطاقة		
	8- الحزم المعدنية في الذهب (الأخضر في النقل) ، البيريت ، الحديد ، الشبه ، الخلائط ، الفضة ، النحلس ، زجاج الياقوت	الألوان في الانعكاس و في النقل ناتجة عن انتقالات الإلكترونات بين الحزم المتراكبة
	9- حزم أنصاف النواقل النقية السيليكون ، GaAs ، الغالينا السوداء ، PbS، السينابار الأحمر HgS ، أصفر الكادميوم CdS ، CdSe الأسود ، CdS_xSe_{1-x} الأحمر ، ZnO الأبيض ، الفرميلون البرتقالي HgS ، الألماس عديم اللون ، SmS البيزوكرومي الأسود إلى الذهبي 10- حزم أنصاف النواقل المشابة الألماس الأزرق ، الأصفر ، الأخضر و الأسود ، LEDs ، ليزرات أنصاف النواقل ، الخلايا الشمسية ، أنصاف النواقل المستندة إلى $ZnCd_{1-x}S$ & ZnS و الفوسفورات الأخرى	الألوان ناتجة عن الانتقالات الإلكرتونية بين حزم منفصلة ، سلاسل اللون هي الأسود، الأحمر ، البرتقالي ، الأصفر ، الأبيض / الملونات ، بعضها مستخدمة كأصبغة الألوان ناتجة عن انتقالات بين المشيبات و حزم أنصاف النواقل (مثل الألماس الأزرق ، مستقبلات / آخذات البورون ، الألماس السود ، واهبات النتروجين)

الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

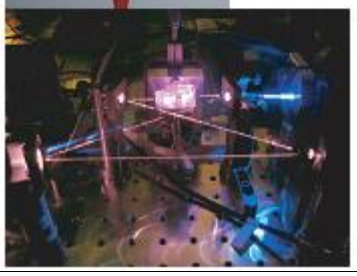
نوع اللون	المثال	التفاصيل
	11- مراكز اللون الأميثيست ، الكوارتز الدخاني ، الفلوريت ، الألماس الأخضر ، التوباز الأزرق ، الأصفر ، و البني ، اللون القرمزي لزجاج مشعع حاوي على Mn^{2+} ، السطوع الكيماوي ، بعض التألق ، ليزرات مركز F بعض النظارات الشمسية التابعة للضوء	الألوان ناتجة عن مراكز اللون أي الإلكترونات أو الثقوب المتحدة في فراغات بلورية ، مراكز اللون تتشكل عادة بواسطة الإشعاع . التلوين اللوني الضوئي ناتج عن مراكز اللون المشكلة بواسطة الضوء فوق البنفسجي للشمس

النوع 5 – الألوان ناتجة عن البصريات الفيزيائية و الهندسية

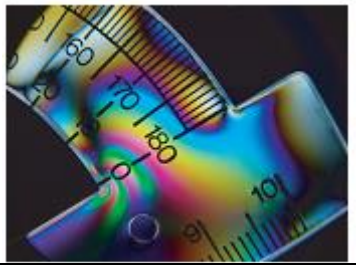
12- الانكسار التشتتي و الاستقطاب

	الألماس المقصوص ، الزركونيا المقصوص ، الهالات و كلاب الشمس المشكلة بواسطة بلورات الجليد في الهواء قوس قزح الوميض الأخضر	التفكك الطيفي (الشرارة أو النار للجواهر) ، ناتج عن التشتت في البلورات الألوان للقوس الأولي و الثانوي ناتجة عن التشتت في قطيرات الماء ، التشتت في الغلاف الجوي الذي يزيح ألوان الشمس
   	13- التبعثر السماء الزرقاء ، اللون الأزرق للجبال البعيدة ، غروب الشمس الأحمر ، شدة اللون بواسطة التلوث ، الكوارتز الأزرق	الضوء الأزرق يتبعثر بشكل أكثر من الضوء الأحمر بواسطة تبعثر رايله ، عندما المبعثرات (الجزيئات ، الغبار) هي أصغر من طول موجة الضوء

الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

نوع اللون	المثال	التفاصيل
	اللون الأبيض للشعر ، الحليب ، رغوة البيرة ، الغيوم، الضباب ، دخان السجائر ، الثلج ، الكريما المخفوقة ، الشامبو ، النجوم في المجوهرات .	اللون الأبيض ناتج عن تبعثر مي المستقل عن طول الموجة أي التبعثر عند جسيمات أكبر من طول موجة الضوء .
	لون الجلد البشري الأزرق في الطقس البارد ، العيون الزرقاء و الخضراء في البشر ، جلد القرد الأزرق ، عنق الديك الرومي الأزرق ، أكثر الأسماك الزرقاء ، الزواحف الزرقاء ، دخان السجائر الأزرق	ألوان أزرق تيندال ناتجة عن التبعثر على الجسيمات الصغيرة أمام خلفية مظلمة / داكنة
	الياقوت	اللون الأحمر لزجاج مورانو ناتج عن التبعثر بواسطة جسيمات الذهب الغروية المتضمنة في الزجاج بالاشتراك مع بنية الحزم المعدنية للذهب .
	حالات عدم الخطية ، أثر رامان ، فوسفات ثاني هيدروجين البوتاسيوم (KDP)	تبعثر انزياح التردد ، التوليد التوافقي الثاني و حالات عدم الخطية الأخرى لمواد معينة تغير لون الضوء المرتطم بشدات عالية (400- 800 NM لليزر الحلقي ذو تضاعف التردد)

14- التداخل (بدون حيود)

	عرق اللؤلؤ ، أفلام الزيت ، الطلاءات على عدسات الكاميرات ، أعين القطط في الظلام ، أجنحة الذباب و اليعاسيب ، حراشف السمك ، بعض الثعابين ، اللؤلؤ ، الوان التقسية للفولاذ .	تداخل الطبقة الرقيقة ينتج تتابع لون قياسي الذي يسمح بتحديد السماكة الدقيق .
	ألوان الاستقطاب للطبقات الرقيقة للبلورات ثنائية التهدب أو الطبقات الأثخن للبوليمرات المجهدة	الألوان ناتجة عن التداخل ، كما هو مبين بالتبعية لسماكة الطبقة .

الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

نوع اللون	المثال	التفاصيل
	الأعداد الكبيرة لأقواس قزح (أنظر الصفحة 101 في المجلد II)	بسبب التداخل كما هو مين في التبعية لحجم القطرة

النوع 6- الألوان ناتجة عن محدودية العين

ألوان فيكنر كما في lite.bu.edu/vision/applets/Color/ Benham/Benham.html	دولاب بنهام أو السطح	الألوان ناتجة عن استجابة السرعة المختلفة لمستقبلات ضوئية مختلفة

الجدول 7 – أسباب اللون (تابع)

نوع اللون	المثال	التفاصيل
إنتاج اللون الداخلي عندما تنبه / تحث العينين	الفوسفينات	يحدث عن طريق الضغط (الفرك ، العطاس) أو بواسطة حقول كهربائية أو مغناطيسية .
ألوان الاستقطاب	فرشاة هادينجر	أنظر الصفحة 111 في المجلد III
أوهام اللون كما في www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/ color9e.html	ظهور و اختفاء الألوان	التأثيرات ناتجة عن مجموع المعالجة الدماغية و محدودية العين
خرج اللون الخاطئ للعين كما هو موصوف في الصفحة 196 في المجلد III	الضوء الأحمر الذي يمكن أن يرى كأخضر	القيم القابلة للقياس بواسطة البصريات التلاؤمية ، إذا ركز الضوء الأحمر على قمع حساس للون الأخضر
عمى الألوان أو الشخص الدالتوني أنظر الصفحة 206 في المجلد III ، مع طيف اللون المنخفض	البروتان ، الديوتان أو الترايتان	كل نوع حد رؤية الضوء بطريقة مختلفة

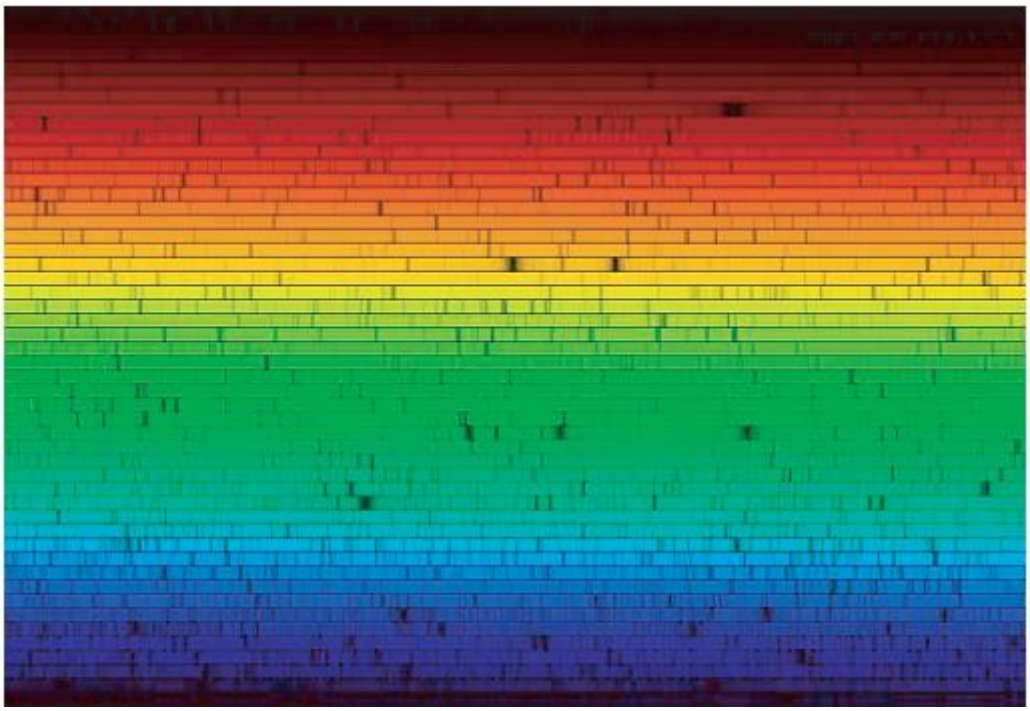
الألوان رائعة و تبهر . الإبهار دائما يعني العمل ، في الواقع إن جزء كبير من الصناعة الكيماوية مخصصة لتركيب الملونات للدهان ، الأحبار ، الأقمشة ، الغذاء و مواد التجميل . ايضا التطور يستخدم الإبهار للألوان من أجل عملهن وهو نشر الحياة . الأخصائيين في هذا المجال هي النباتات الزهرية . إن كيمياء إنتاج الألوان في النباتات هي معقدة جدا و على الأقل ممتعة مثل إنتاجها في المصانع . عمليا كل ملونات الأزهار من الأبيض ، الأصفر ، البرتقالي ، الأحمر إلى الأزرق هي من ثلاثة أنواع كيماوية : الكاروتينويدات ، الأنثوسيانينات (الفلافونويدات) و البيتا ألانينات . هذه الملونات تخزن في البتلات داخل حاويات مخصصة هي التجاويف (مرجع 131) . هناك العديد من العروض الجيدة تعطي تفاصيل .

حتى بالرغم من أن الألوان شائعة في النباتات و الحيوانات فإن أكثر الحيوانات العليا لا تنتج العديد من الملونات بنفسها . مثلا البشر ينتجون لون واحد فقط هو الميلانين . (الهيموغلوبين ، الذي يلون الدم بالأحمر ليس لونا مخصصا و لكنه ينقل الأكسجين من الرئتين عبر الجسم . أيضا الميوغلوبين الوردي في العضلات ليس ملونا مخصصا) .

العديد من الحيوانات العليا مثل الطيور تحتاج لتناول الملونات وهكذا يكون هذا مميز لشكلها . اللون الأصفر في سيقان الحمام هو مثال على ذلك . و قد تبين أن الارتباط بين اللون و التغذية يستخدم بانتظام من قبل الأزواج المحتملين ليحكموا من لون الجسم فيما إذا كان الشريك المتقدم للزواج صحيح الجسم بشكل كافي و بالتالي جذاب كفاية (مرجع 132) .

فوق كل شيء الجدول السابق يميز ستة أصناف أساسية بين اسباب اللون . و دراسة النوع الأول ، ألوان التالق ، أدى بماكس بلانك على اكتشاف أن الألوان ناتجة عن كم الفعل h . العلاقة بين كم الفعل و خواص المادة للذرات ، الجزيئات السوائل و الاجسام الصلبة معروفة جيدا بحيث ان الملونات الان تصمم على الحاسوب .

في الملخص ،دراسة اسباب اللون التي توجد في الطبيعة تؤكد ان كل الألوان ناتجة عن تاثيرات كمية . نبين هذا بدراسة أبسط مثال : ألوان إثارات الغاز الذرية .



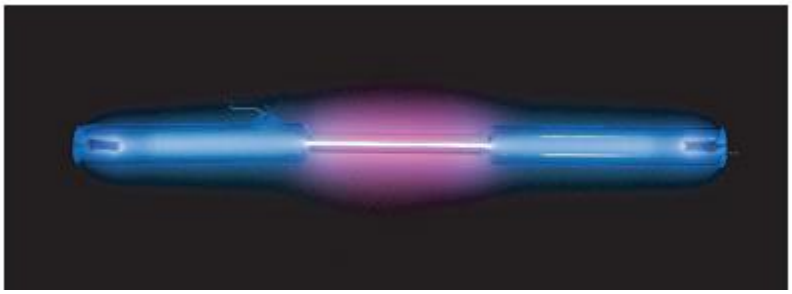
الشكل 77 – طيف ضوء النهار : صورة مكدسة لقوس قزح ممتد تبين خطوط فراونهوفر له

استخدام قوس قزح لتحديد مم تتكون النجوم

قرب بداية القرن الثامن عشر ، قام صانع أجهزة القياس البافاري جوزيف فراونهوفر * و الفيزيائي الإنجليزي ويليام ولاستون بملاحظة أن اقواس قزح ينقصها ألوان معينة . و هذه الألوان تظهر كخطوط سوداء عندما ينشر قوس قزح بعرض كاف . يبين الشكل 77 الخطوط بالتفصيل ، وهي تسمى خطوط فراونهوفر اليوم . في عام 1860 قام غوستاف كيرشوف و روبرت بونسن ببيان ان الألوان المفقودة في قوس قزح كانت تماما تلك الألوان التي تصدرها عناصر معينة عندما تسخن . في هذه الطريقة عملا على بيان أن الصوديوم ، الكالسيوم ، الباريوم ، النيكل ، المغنيزيوم ، الزنك النحاس و الحديد موجودة في الشمس و بالنظر لقوس قزح يخبرنا مم تتكون الشمس .

---

*جوزيف فراونهوفر (ولد عام 1787 في شتراوبنج ، و توفي عام 1826 في ميونيخ) وقد كان يتيما و بعمر 11 عاما عندما تعلم صقل العدسات . وقد علم نفسه البصريات من الكتب . وقد دخل شركة بصريات في عمر 19 مما ضمن لها النجاح في إنتاج أفضل العدسات المتوفرة ، المناظير ، الميكرومترات و الشبكات الضوئية و الأنظمة البصرية في هذا الوقت . و قد اخترع مطياف و هليومتر . وقد اكتشف و عد 476 خطا من طيف للشمس (مجلد II ، صفحة 312)، و هذه الخطوط الان مسماة باسمه . (اليوم خطوط فراونهوفر ما تزال تستخدم كمعايير قياس : الثانية و المتر معرفة بدلالتها) الفيزيائيين من كل العالم يشترون أجهزتم منه ، و يطلبون نسخ من منشوراته . و حتى بعد وفاته فإن أجهزة القياس من صنعه بقيت لا يفوقها شيء لأجيال . و بواسطة مناظيره كان بيسل قادرا في 1837 على إجراء أول قياس لتوازي نجم ، و في عام 1846 اكتشف يوهان غوتفريد جال نبتون . أصبح فراونهوفر استاذا في 1819 . و قد توفي شابا نتيجة سنين قضاها يعمل في الرصاص و مسحوق الزجاج .



الشكل 78 – تفريغ هيدروجين منخفض الضغط في أنبوب زجاجي بطول 20 cm

من 476 خط لفراونهوفر التي لاحظها كيرشوف و بونسن لم توافق 13 منها أي عنصر معروف . و في عام 1868 ، جولز يانسن و جوزيف لوكر توقعا بشكل مستقل أن هذه الخطوط المجهولة كانت من عنصر مجهول . وجد هذا العنصر أخيرا على الأرض ، في خام يورانيوم يسمى كليفايت في عام 1895 . و العنصر الجديد سمي الهليوم من الكلمة الإغريقية هيلوس – الشمس .

في 1925 باستخدام معادلة مطورة من قبل ساها و لانجومير ، فإن الفيزيائية الشابة سيسيليا باين (ولدت عام 1900 في فندوفر و توفيت عام 1979 في كامبريدج ، ماساشوستس) علمت العالم كيفية استنتاج النسبة المئوية للكتلة من كل عنصر من الطيف الضوئي لنجم . و قد قامت بذلك في رسالتها الرائعة للدكتوراه . فوق كل شيء لقد وجدت أن الهيدروجين و الهليوم العنصرين الأكثر وفرة في الشمس ، في النجوم و بالتالي في كل الكون . وهذا جاء كليا مخالفا لكل الأفكار في ذلك الزمن لكنها الآن معروفة بشكل شائع . إن باين أكملت دراسة الفيزياء في كامبريدج ، المملكة المتحدة ولكنها لم تتلق درجة هناك بسبب أنها امرأة . و هكذا غادرت للولايات المتحدة حيث الوضع كان أفضل بعض الشيء ، و هناك عملت على أطروحة الدكتوراه و في النهاية أصبحت استاذ في جامعة هارفارد ، و لاحقا رئيس قسم الفلك فيها .

فوق كل شيء أصبحت باين أسوة للكثير من العلماء الإناث .

بالرغم من أن العنصر الثاني الأكثر شيوعا في الكون ، فإن الهليوم نادر على الأرض لأنه غاز نادر خفيف الذي لا يشكل مركبات كيماوية . و ذرات الهليوم على الأرض ترتفع بالتالي في الجو و أخيرا تهرب للفضاء .

إن فهم الخطوط اللونية المنتجة من قبل كل عنصر بدأ يصبح مهما قبل اكتشاف الهيلوم ، ولكن بعد ذلك زاد الاهتمام أكثر بفضل العدد المتزايد من التطبيقات لمعرفة اللون في الكيمياء ، الفيزياء ، التكنولوجيا ، علم البلورات ، علم الأحياء والليزرات . الألوان هي عمل ضخم ، كما تبين صناعة الأزياء ، وسائل الإعلام و شركات الإعلان .

في الملخص الألوان هي أمزجة خاصة من الترددات الضوئية (مجلد III ، صفحة 123) . الضوء هو موجة كهرطيسية و يصدر عن الشحنات المتحركة .بالنسبة للفيزيائي ، الألوان بالتالي تنتج من تبادل التأثير للمادة المشحونة مع الحقل الكهرطيسي . الآن الخطوط اللونية الحادة لا يمكن شرحها بواسطة الديناميك الكهربائي الكلاسيكي . نحن بحاجة لنظري الكم لشرحها .

ما الذي يحدد ألوان الذرات ؟

إن أبسط الألوان لدراستها هي الخطوط اللونية الحادة الصادرة او الممتصة من قبل ذرات وحيدة . الذرات الوحيدة توجد في الغازات .أبسط ذرة هي الهيدروجين . كما هو مبين في الشكل 78 ، غاز الهيدروجين الساخن يصدر ضوء . الضوء يتألف من عدد من

الخطوط الطيفية الحادة المبينة إلى يسار الشكل 79 . في عام 1885 قام المعلم السويسري يوهان بالمر (1828-1898) باكتشاف أطوال موجة خطوط الهيدروجين المرئية التي تخضع للعلاقة :

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right) \quad \text{for} \quad m = 3, 4, 5, \ldots . \qquad (91)$$

القياسات الدقيقة التي شملت الخطوط الطيفية للهيدروجين في المجال تحت الأحمر و فوق البنفسجي سمحت ليوهانس ريدبيرغ (1854-1919) بتعميم هذه العلاقة إلى :

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) , \qquad (92)$$

حيث m>n & n هما عددين صحيحين موجبين و ما يعرفان بثابت ريدبيرغ R قيمته $10.97\ \mu m^{-1}$ هو سهل التذكر والقيمة المعكوسة له 1/R = 91.16 nm . كل الخطوط اللونية الصادرة عن الهيدروجين تحقق هذه العلاقة البسيطة . الفيزياء الكلاسكية لا يمكن أن تشرح هذه النتيجة أبدا . و بالتالي نظرية الكم حددت بشكل واضح التحدي هنا : شرح العلاقة و قيمة R .

بالمصادفة ، الانتقال λ_{21} للهيدروجين يسمى خط ليمان – ألفا . إن طول موجته هو 121.6 nm و يقع في المنطقة فوق البنفسجية . و من السهل ملاحظته بالمناظير ، نظرا لأن أكثر النجوم المرئية تتألف من هيدروجين مثار . و إن خط ليمان – ألفا يستخدم بشكل روتيني لتحديد سرعة النجوم البعيدة أو المجرات نظرا لأن أثر دوبلر يغير طول الموجة عندما تكون السرعة كبيرة . (مرجع 133). و السجل في عام 2004 كان مجرة ذات خط ليمان – ألفا مزاح إلى 1337 nm.

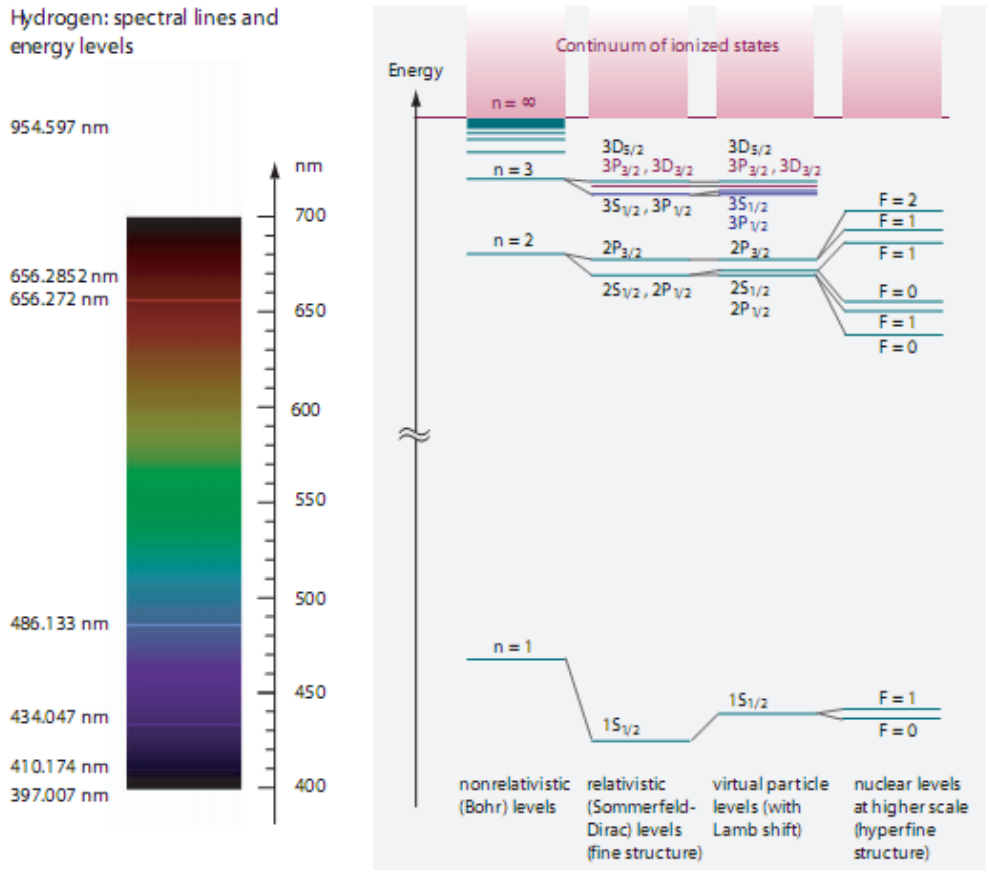
هل يمكنك حساب السرعة التي تتحرك بها المجرة عن الأرض ؟ (تحدي 142 s) .

من البداية كان واضحا ان ألوان الهيدروجين ناتجة عن حركة إلكترونه . (لماذا ؟) (تحدي 143 e) . إن الو طريقة لاستنتاج علاقة بالمر من كم الفعل أوجدت من قبل نيلز بور في عام 1903 . و قد فهم بور أنه على عكس الكواكب التي تدور حول الشمس ، فإن الإلكترون الذي يدور حول البروتون يملك فقط عددا متقطعا من حالات الحركة الممكنة (صفحة 80) : كمية الحركة الزاوية للإلكترون هي مكممة . بافتراض أن كمية الحركة الزاوية للإلكترون هي مضاعف صحيح من $\hbar$ يعطي مباشرة علاقة بالمر و يشرح القيمة العددية لثابت ريدبيرغ R . (تحدي 144 e) . هذا الحساب شهير جدا بحيث يوجد في العديد من كتب المدارس الثانوية . النتيجة ايضا عززت قرار بور بتخصيص حياته لدراسة بنية الذرة.

بعد عشرين سنة لاحقا في عام 1926 ، حل إروين شرودنجر معادلته للحركة من أجل الإلكترون المتحرك في الكمون الكهربائي الساكن $V(r) = e^2/4\pi\varepsilon_0 r$ لبروتون نقطي .

وبالقيام بذلك كرر شرودنجر نتيجة بور و استنتج علاقة بالمر و أصبح شهيرا في عالم الفيزياء . لكن هذا الحساب المهم طويل و معقد . و يمكن تبسيطه .

من أجل فهم ألوان الهيدروجين ، ليس من الضروري حل معادلة الحركة للإلكترون حيث يكفي مقارن الطاقات للحالات الابتدائية و النهائية للإلكترون . و هذا يمكن أن يتم بشكل أكثر سهولة بملاحظة الشكل الخاص للفعل الذي يجب أن يكون من مضاعفات $\hbar/2$. وهذه الطريقة ، تعميم دراسة بور طورت من قبل أينشتاين ، بريولين و كيلر و هي الآن تسمى تعميم EBK .



الشكل 79 – الهيدروجين الذري : الطيف المرئي للهيدروجين (ناسا) و مستويات طاقته المحسوبة في أربعة تقريبات بدقة متزايدة . هل يمكنك ربط الخطوط المرئية بالمستوى الصحيح من الانتقالات ؟

وهي تستند إلى حقيقة أن الفعل S لأي جملة كمية يخضع إلى (مرجع 134)

$$S = \frac{1}{2\pi}\oint dq_i p_i = \left(n_i + \frac{\mu_i}{4}\right)\hbar \qquad (93)$$

من أجل الإحداثي q_i و كمية حركته المقترنة p_i . العلاقة تعكس التشابه بين كمية الحركة الزاوية و الفعل . و هنا n_i يمكن أن تكون صفر أو أي عدد موجب صحيح ، و μ_i هي ما يعرف بدليل / قرينة ما سلوف ، وهي عدد صحيح ، الذي في حال الذرات له القيمة 2 من أجل الإحداثيات القطرية و السمتية θ & r من اجل زاوية الدوران φ .

العدد الصحيح يؤخذ على طول مدار كامل . بعبارات بسيطة الفعل S هو مضاعف نصف صحيح لكم الفعل . هذه النتيجة يمكن استخدامها لحساب مستويات الطاقة للجمل الكمية الدورية . لنفعل ذلك بالنسبة لذرات الهيدروجين .

أي حركة دورانية في كمون كروي V(r) تتميز بطاقة ثابتة E و كمية حركة زاوية L_z & L . بالتالي كميات الحركة المقترنة من أجل الإحداثيات φ & θ , r هي (تحدي 145 ny)

$$p_r = \sqrt{2m(E - V(r)) - \frac{L^2}{r^2}}$$

$$p_\theta = \sqrt{L^2 - \frac{L_z^2}{\sin^2\theta}}$$

$$p_\varphi = L_z \,. \qquad (94)$$

باستخدام العلاقات في المعادلة (93) و وضع $n = n_r + n_\theta + n_\varphi + 1$ نحصل على * النتيجة

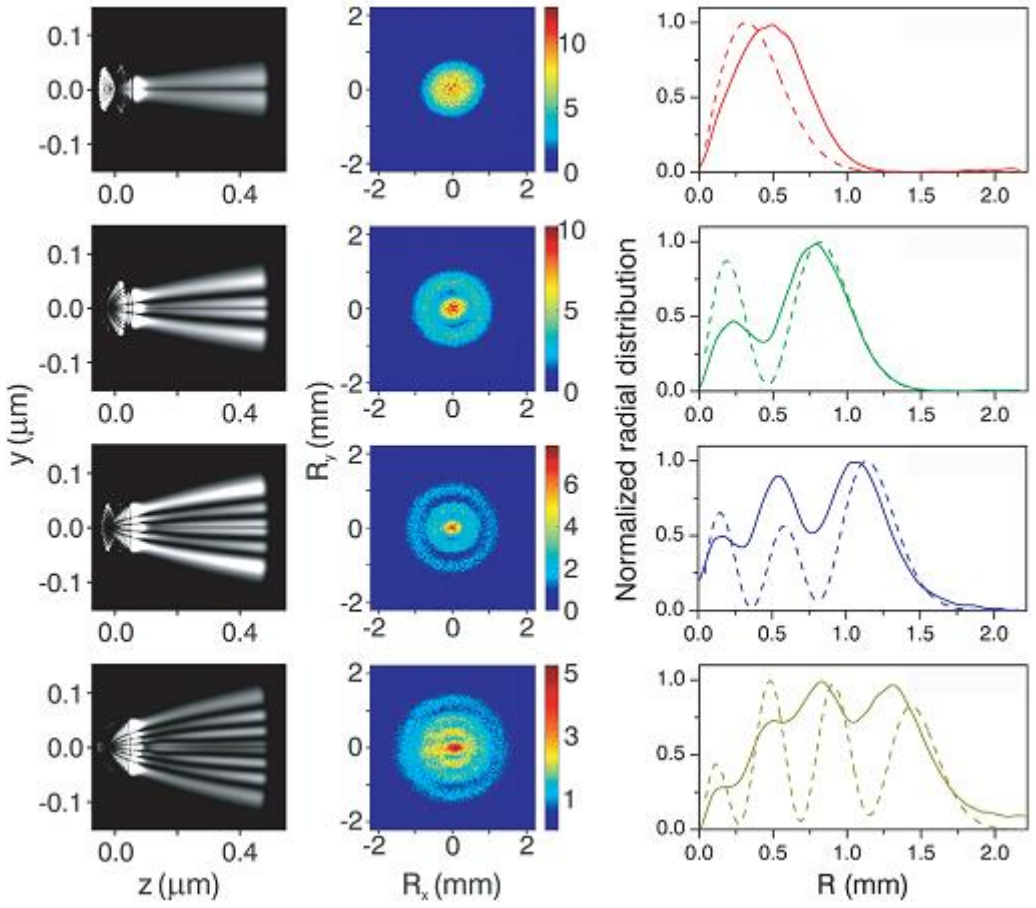
$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^2} = -\frac{Rhc}{n^2} = -\frac{c^2m\alpha^2}{2n^2} \approx -\frac{2.19\,\text{aJ}}{n^2} \approx -\frac{13.6\,\text{eV}}{n^2}\,. \qquad (97)$$

مستويات الطاقة هذه E_n ، مستويات بور غير النسبية ، مبينة في الشكل 79 . و باستخدام فكرة أن ذرة الهيدرجين تصدر قوتون وحيد عندما يتغير إلكترونها من الحالة E_n إلى E_m نحصل تماما على العلاقات المستنتجة من قبل بالمر و ريدبيرغ من القياسات .

إن التطابق بين القياس و الحساب هو تقريبا بمقدار أربع خانات (تحدي e 147). و (تقريبا) لأول مرة ، فإن خاصة المادة ، لون ذرات الهيدرجين قد شرح من مبدأ أساسي في الطبيعة , الشيء الأساسي لهذا الشرح كان كم الفعل $\hbar$. (هذه المناقشة كلها تفترض أن الإلكترونات في ذرات الهيدروجين التي تصدر الضوء هي حالات خاصة .هل يمكنك التفسير لماذا يكون هذا ؟ (تحدي s 148) .

باختصار كم الفعل يقتضي أن فقط قيم طاقة خاصة معينة من أجل الإلكترون هي مسموحة داخل الذرة . و أخفض مستوى طاقة من أجل n=1 يسمى الحالة الأرضية . إن قيمة طاقته البالغة 2.91 aJ هي طاقة التشرد للهيدروجين ، إذا أضيفت هذه الطاقة للحالة الأرضية فإن الإلكترون لا يعود مرتبطا بالنواة . طاقة التشرد بالتالي تلعب نفس دور الإلكترونات حول الذرات كما تفعل سرعة الانفلات أو بشكل أفضل ، طاقة الانفلات من أجل الأقمار الصناعية و الصواريخ المطلقة من الكواكب .

بنفس الطريقة التي يحدد بها كم الفعل ألوان ذرة الهيدروجين فإنه يحدد ألوان الذرات الأخرى (صفحة 179) . كل خطوط فراونهوفر سواء قيست في المجال تحت الأحمر ، المرئي أو فوق البنفسجي هي ناتجة عن كم الفعل . و في الحقيقة كل لون في الطبيعة ناتج عن مزيج من خطوط الألوان ، بحيث أن كل الألوان ، أيضا تلك العائدة للأجسام الصلبة و السوائل تحدد بواسطة كم الفعل .



الشكل 80 – يبين الشكل البنية العقدية المحسوبة و المقاسة لذرة الهيدروجين في حقل كهربائي خارجي ضعيف مضخم بواسطة عدسة إلكتروستاتيكية . إن النماذج هي ظلال التداخل لتوابع الموجة . العامود الأيسر : كيف يسقط تابع الموجة من الذرات إلى الدريئة الماكروسكوبية : البنية العقدية المقاسة ، العامود الأيمن : مقارنة الكثافات الإلكترونية المقاسة (الخطوط المستمرة) و المحسوبة (الخطوط المقطعة)

شكل الذرات

الذرات الحرة هي كروية . الذرات في حقول خارجية تكون مشوهة . مهما كان الوضع فإن شكل الذرات هو ناتج عن شكل تابع الموجة . أبسط حالة هي ذرة الهيدروجين .

---

*الحساب مباشر . بعد إدخال $V(r) = e/4\pi\varepsilon_0 r$ في المعادلة (94) يحتاج المرء لأن يقوم بتكامل (مخادع) (تحدي ny 146) باستخدام النتيجة العامة

$$\frac{1}{2\pi}\oint \frac{dz}{z}\sqrt{Az^2+2Bz-C} = -\sqrt{C}+\frac{B}{\sqrt{-A}} \qquad (95)$$

يحصل المرء على

$$\left(n_r + \frac{1}{2}\right)\hbar + L = n\hbar = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{m}{-2E}}\ . \qquad (96)$$

هذا يؤدي إلى العلاقة العامة (97) .

إن توابع موجتها – بشكل أكثر تحديدا ، التوابع الخاصة لأول بضع مستويات طاقة موضحة في الطرف الأيمن من الشكل 81 . هذه التوابع تم حسابها من قبل إروين شرودنجر في عام 1926 و موجودة في كل الكتب . و نحن لن نقوم بالحساب هنا و فقط نعرض النتائج . إن مربع تابع الموجة هو الكثافة الاحتمالية للإلكترون . و هذه الكثافة تتناقص بسرعة مع تزايد المسافة عن النواة . و مثل الغيمة الحقيقية فإن الكثافة لا تكون صفر أبدا ، حتى عن مسافات كبيرة . و يمكننا بالتالي القول أن كل الذرات لها حجم لانهائي ، لكن عمليا الروابط الكيماوية أو ترتيبات الذرات في الأجسام الصلبة تبين أنه من الملائم أكثر بكثير تخيل الذات كغيوم ذات حجم منته .

بشكل مدهش فغن أول قياس لتابع الموجة لذرة يعود فقط إلى عام 2013 وقد أجري بواسطة تقنية تشريد فوتونية ذكية من قبل أنيتا ستودولنا و فريقها . (مرجع 138) . إن نتيجة التجربة الجميلة مبينة في الشكل 80 . و الأرقام تؤكد أن توابع الموجة على عكس الكثافات الاحتمالية لها عقد أي خطوط أوبشكل افضل أسطح – الذي قيمتها تساوي الصفر .

في الملخص ، كل التجارب تؤكد أن الإلكترون في ذرة الهيدروجين يشكل توابع موجية بنفس الشكل تماما المتوقع من قبل نظرية الكم . بشكل خاص ، شكل الذرات وجد أنه يتفق مع الحساب من ميكانيك الكم .

حجم الذرات

إن حساب مستويات طاقة الهيدروجين أيضا تعطي نصف القطر الفعال لمدارات الإلكترون و هي تعطى بالشكل :

$$r_n = n^2\frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{m_e c\alpha} = n^2 a_0 \approx n^2\, 52.918\,937\,\text{pm}\ ,\ \text{with}\ n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (98)$$

نرى ثانية أنه على عكس الفيزياء الكلاسيكية فإن نظرية الكم تسمح فقط بمدارات خاصة معينة حول النواة . (لمزيد من التفاصيل حول ثابت البنية الدقيقة α ، أنظر أدناه) (صفحة 195 , 187) . كي نكون أكثر دقة أنصاف الأقطار هذه هي الأحجام المتوسطة للغيوم الإلكترونية التي تحيط بالنواة . و إن قيمة نصف قطر أصغر مدار 53 pm من أجل n=1 تسمى نصف قطر بور ، و يرمز له بـ a_0 .

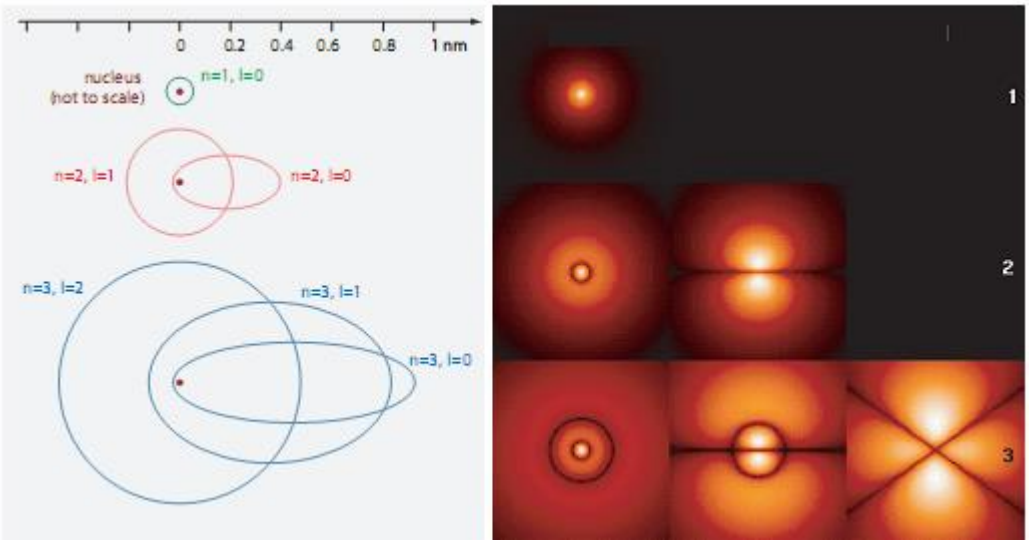
في ذرات غاز الهيدروجين ، أكثر الذرات هي في الحالة الأرضية توصف بالشكل $r_1 = a_0$ & E_1 . من ناحية أخرى نظرية الكم تقتضي أن ذرة الهيدروجين المثارة للمستوى n = 500 هي بحجم تقريبا 12 µm (مرجع 135) : أكبر من العديد من الباكتريا . و مثل هذه الذرات المنفتحة تسمى عادة ذرات ريدبيرغ و قد تم قياسها فعلا في المخبر بالرغم من أنها حساسة جدا للاضطرابات .

باختصار كم الفعل يحدد حجم الذرات . النتيجة بالتالي تؤكد التوقع من قبل آرثر إلريش هاس من 1910 (صفحة 21)

بعبارة أخرى :

- كم الفعل يحدد حجم الأشياء

في عام 1915 فهم ارنولد سومرفيلد بأن تشابه حركة الإلكترون مع حركة الجاذبية يمكن أن تستمر بطريقتين . أولا ، الإلكترونات تتحرك في المتوسط على مدارات إهليلجية بدلا من الدوائر . إن تكميم كمية الحركة الزاوية بالتالي يقتضي أن فقط تباعد المراكز المختارة فقط هي ممكنة . كلما كانت كمية الحركة الزاوية أعلى كلما كان أكبر عدد الاحتمالات : أول بضع احتمالات مبينة في الشكل 81 .



الشكل 81 – المدارات المتخيلة ، لكن غير الموجودة و بالتالي الزائفة لنموذج بور – سومرفيلد لذرة الهيدروجين (يسار) و الوصف الصحيح ، باستخدام الكثافة الاحتمالية للإلكترون في حالات متعددة

يقابل أعلى تخالف مركزي للقيمة الدنيا l = 0 لما يعرف بالعدد الكمي السمتي ، بينما حالة l = n-1 تقابل المدارات الدائرية (مرجع 137) . أيضا المدارات الإهليلجية يمكن أن يكون لها توجهات في الفراغ .

النقطة الثانية التي لاحظها سومرفيلد كانت أن سرعات الإلكترون في الهيدروجين هي بعض الشيء نسبية : قيم السرعة غير مهملة بالمقارنة مع سرعة الضوء . في الحقيقة التردد المداري للإلكترونات في الهيدروجين هو :

$$f_n = \frac{1}{n^3}\frac{e^4 m_e}{4\varepsilon_0^2 h^3} = \frac{1}{n^3}\frac{m_e c^2 \alpha^2}{h} \approx \frac{6.7\ \mathrm{PHz}}{n^3} \qquad (99)$$

وسرعة الإلكترون v

$$v_n = \frac{1}{n}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} = \frac{\alpha c}{n} \approx \frac{2.2\ \mathrm{Mm/s}}{n} \approx \frac{0.007\ c}{n}\ . \qquad (100)$$

كما هو متوقع فإنه كلما كان مدار الإلكترون ابعد عن النواة فإنه كلما كان ابطا في حركته . هذه النتيجة يمكن ايضا التاكد منها بالتجربة : تبادل الالكترون بالموون يسمح لنا بقياس التمدد الزمني لعمره . القياسات هي في اتفاق ممتاز مع الحسابات (مرجع 136)

باختصار لاحظ سومرفيلد ان حسابات بور لم تاخذ بالحسبان التاثيرات النسبية و في الحقيقة القياسات عالية الدقة تبدي اختلافات طفيفة بين مستويات طاقة بور غير النسبية و المقاسة و الحساب يجب تحسينه

الهيدروجين النسبي

ان قياس مستويات الطاقة الذرية ممكن بدقة اعلى بكثير من قياس توابع الموجة .بشكل خاص قياسات مستوى الطاقة يسمح بقياس التاثيرات النسبية .

ايضا في الحالة النسبية فان EBK الفعل يجب ان يكون مضاعف من 2/ $\hbar$. من العلاقة النسبية من أجل الطاقة الحركية للالكترون في ذرة الهيدروجين (مرجع 134)

$$E + c^2 m = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad (101)$$

ونحصل على العلاقة (تحدي e 149)

$$p_r^2 = 2mE\left(1 + \frac{E}{2c^2 m}\right) + \frac{2me^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 + \frac{E}{c^2 m}\right) . \qquad (102)$$

الآن نقدم للملائمة ما يعرف بثابت البنية الدقيقة بالشكل α = $e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c) = \sqrt{4\pi\hbar R/mc} \approx 1/137.036$ (α هي ثابت عديم الأبعاد R= 10.97 μm^{-1} وهو ثابت ريدبيرغ (تحدي e 150) . فعل EBK القطري بالتالي يقتضي أن :

$$E_{nl} + c^2 m = \frac{c^2 m}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\left(n - l - \frac{1}{2} + \sqrt{(l+\frac{1}{2})^2 - \alpha^2}\right)^2}}} . \qquad (103)$$

هذه النتيجة أولا وجدت من قبل ارنولد سومرفيلد في 1915 و هي صحيحة من أجل اللإلكترونات النقطية أي غير الدوارة . في الحقيقة الالكترون يملك برم 1/2 و مستويات الطاقة النسبية الحقيقية تظهر بالتالي عندما نضع $l = j \pm 1/2$ في العلاقة أعلاه . النتيجة يمكن تقريبها بالشكل :

$$E_{nj} = -\frac{R}{n^2}\left(1 + \frac{\alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{j+\frac{1}{2}} - \frac{3}{4}\right) + \ldots\right) . \qquad (104)$$

هي تكرر طيف الهيدروجين بدقة عالية جدا . إذا قارنا النتيجة مع النتيجة غير النسبية نلاحظ أن كل مستوى غير نسبي n هو تقسيم إلىn مستوى مختلف (صفحة 182) . هذا التقسيم واضح في الشكل 79 . في التجارب الدقيقة فإن انقسام الخطوط لطيف الهيدروجين يكون مرئي بحيث يشكل ما يسمى بالبنية الدقيقة . منذ أن اكتشف أرنولد سومرفيلد أهمية هذا الثابت الأساسي في هذا السياق ، فإن الاسم الذي اختاره ، ثابت البنية الدقيقة قد انتشر في العالم أجمع .

ان ثابت البنية الدقيقة يصف قوة تبادل التأثير الكهرطيسي (صفحة 195) و ثابت البنية الدقيقة هو ثابت الاقتران الكهرطيسي .ان التجارب الحديثة عالية الدقة تبين تأثيرات إضافية التي تعدل ألوان الهيدروجين الذري (صفحة 182). و هي موضحة في الشكل 79 و التأثيرات الافتراضية للجسيم و اقتران برم البروتون تعطي تصحيحات إضافية . لكن ما يزال هناك تأثيرات النظائر و انزياحات دوبلر و انزياحات المستوى الناتجة عن الحقول الكهربائية أو المغناطيسية البيئية .

الشكل 82 – باول ديراك (1984- 1902)

أيضا تؤثر على طيف الهيدروجين .الأثر النهائي على طيف الهيدروجين ، انزياح لامب الشهير ، سيكون موضوعنا لاحقا (مجلد V ، صفحة 125)

توابع الموجة النسبية – ثانية

" المعادلة كانت اكثر ذكاء مما كنت . باول ديراك حول معادلته ، يكرر العبارة التي قالها هاينريش هيرتز"

ما هي معادلة التطور من أجل تابع الموجة في حال الأخذ بالحسبان النسبية ، البرم و التأثيرات المتبادلة مع الحقل الكهرطيسي؟ . يمكننا أن نحاول تعميم تمثيل الحركة النسبية المعطاة من قبل فولدي و وفوتيوسن (صفحة 105)لحالة الجسيمات ذات تبادلات التأثير الكهرطيسية . لسوء الحظ هذا ليس أمرا سهلا . الشيء البسيط بين الأوصاف الكلاسيكية و الميكانيكية الكمية تضيع إذا تم إدخال الكهرطيسية .

إن الجسيمات الكمية المشحونة توصف بشكل أفضل من قبل تمثيل مكافئ آخر للهاملتوني الذي اكتشف بشكل مبكر أكثر بكثير في 1926 من قبل الفيزيائي البريطاني باول ديراك .* وجد ديراك خدعة جميلة ليأخذ الجذر التربيعي في معامل الطاقة النسبي . في تمثيل ديراك عامل هاملون يعطى بالشكل :

$$H_{\text{Dirac}} = \beta m + \boldsymbol{\alpha} \cdot p \,. \qquad (105)$$

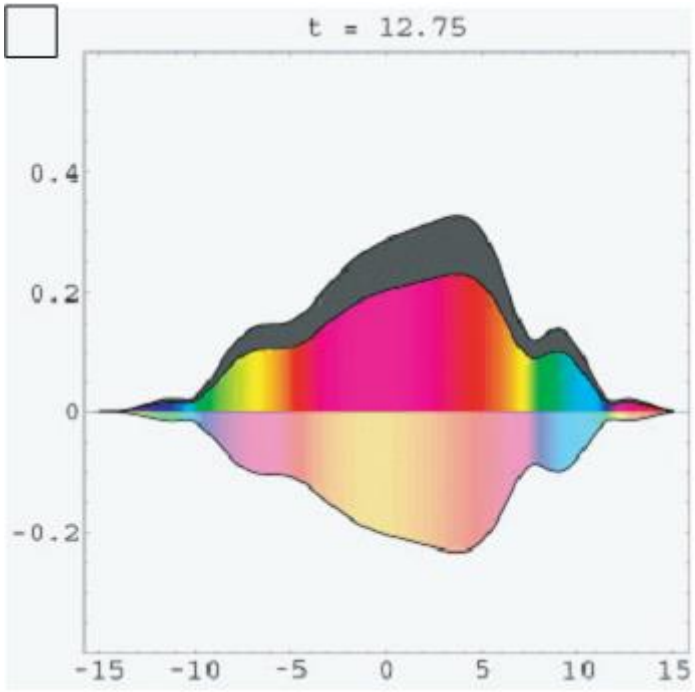
الكميات β و المركبات الثلاث $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ ينتج أنها مصفوفات عقدية 4 x 4 .

في تمثيل ديراك ، عامل الموضع x ليس موضع الجسيم و لكن له حدود إضافية ، إن عامل سرعته له فقط القيم الخاصة زائد أو ناقص سرعة الضوء ، و عامل السرعة لا يرتبط ببساطة بعامل كمية الحركة

---

*باول أدريان موريس ديراك (ولد عام 1902 في برستول و توفي عام 1984 في تالاهاسي) فيزيائي ثنائي اللغة درس التكنيك الكهربائي في بريستول وبعدها ذهب إلى كامبريدج حيث لاحقا أصبح أستاذا كرسي الذي كان لنيوتن . و في السنوات من 1933-1925 نشر عددا من الأبحاث التي العديد منها جديرة بجائزة نوبل ، التي تلقاها عام 1933 و قد وحد ديراك النسبية الخاصة و نظرية الكم و توقع وجود المادة المضادة و عمل على البرم و الإحصاء ، و توقع بأحاديات القطب و تخيل قانون الأعداد الكبيرة و المزيد إلى جانب ذلك . و إن انطواءه ، وديته و خجله و بصيرته العميقة في الطبيعة المشتركة مع حبه للجمال في الفيزياء النظرية جعلت منه اسطورة في كل العالم خلال حياته . و في النصف

الأخير من حياته جرب ، بلا نجاح ، ايجاد طريقة بديلة للديناميك الكهربائي الكمي و التي كان مؤسسها حيث واجهته مسائل اللانهايات . وقد توفي في فلوريدا حيث عاش و عمل بعد تقاعده من كامبريدج .



الشكل 83 – حركة الجسيمات الأولية السريعة الشهيرة لتنضد حالات موجبة و سالبة للطاقة تؤدي إلى تذبذب حول القيمة المتوسطة . يشير اللون إلى الطور و اللونين في المنحني مبينان حيث أن معادلة ديراك أحادية البعد لها فقط مركبتين (ليس أربعة) و المنحني الرمادي هو الكثافة الاحتمالية .

معادلة الحركة تحتوي مصطلح Zitterbewegung الشهير حيث كمية الحركة الزاوية و البرم ليسا ثابتين منفصلين عن الحركة .

لذا لماذا نستخدم هذا الهاملوني المربع ؟ لأن فقط هاملوني ديراك يمكن بسهولة أن يستخدم من أجل الجسيمات المشحونة . في الحقيقة يحول إلى الهملوني المقترن مع الحقل الكهرطيسي بواسطة ما يعرف بالاقتران الأصغري (مجلد III ، صفحة 84) أي بتعويض

$$p \rightarrow p - qA \ , \qquad (106)$$

التي تعامل كمية الحركة الكهرطيسية مثل كمية حركة جسيم . بواسطة هذا الوصف ، يصف هاملوتونيان ديراك حركة الجسيمات المشحونة التي تتبادل التأثير مع الحقل الكهرطيسي A . إن التبديل للاقتران الأصغري غير ممكن في فولدي – وشوسين الهاملتوني . في تمثيل ديراك الجسيمات هي شحنات كهربائية صرفة ، نقطية ، عديمة البنية ، وفي تمثيل فولدي – وشوسين فهي تحتاج إلى نصف قطر شحنة و تبادل تأثير عزم مغناطيسي (مرجع 139) (سوف نبين الأسباب لاحقا ، في الفقرة حول QED).

بمزيد من التفصيل فإن أبسط وصف للإلكترون (أو أي شحنة كهربائية أولية ، مستقرة اخرى ذات برم 1/2) يعطى بالفعل S و اللاغرانجيان

$$S = \int \mathcal{L}_{\mathrm{QED}} d^4x \quad \text{where} \tag{107}$$

$$\mathcal{L}_{\mathrm{QED}} = \overline{\psi}\left(i\hbar c \not{D} - c^2 m\right)\psi - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad \text{and}$$

$$\not{D}_\mu = \gamma^\mu\left(\partial_\mu - ieA_\mu\right)$$

الأول ، حد المادة في اللاغرانجيان يؤدي إلى معادلة ديراك : و هي تصف كيف أن الجسيمات الأولية المشحونة و ذات البرم 1/2 تتحرك بواسطة الحقول الكهرطيسية . الحد الثاني للإشعاع يؤدي لمعادلات ماكسويل و يصف كيف تحرك الحقول الكهرطيسية بواسطة تابع موجة الجسيم المشحون . و معا بعد بضع حسابات خداعية ، هذه المعادلات تصف ما يعرف عادة بالديناميك الكهربائي الكمي أو QED باختصار .

كما هو معلوم اليوم فإن الوصف النسبي لحركة المادة المشحونة و الحقول الكهرطيسية باعتبار اللاغرانجيان QED (107) هو تام : لم توجد قط فروقات بين النظرية و التجربة بالرغم من الأبحاث الواسعة و بالرغم من المكافأة التي يمكن أن يحصل عليها المرء .

كل التوقعات المعلومة تتفق بشكل كامل مع كل القياسات و في الحالات الأكثر وضوحا ، فإن التوافق بين النظرية و القياس تمتد لأكثر من ثلاثة عشر خانة . لكن حتى الأكثر أهمية من الدقة لـ QED تكون مؤكدة لمزاياها التي تكون مفقودة في الديناميك الكهربائي الكلاسيكي . لنأخذ جولة سريعة .

الحصول على شكل أولي لمعادلة ديراك

إن لاغرانجيان QED يقتضي أن تابع الموجة لجسيم مشحون في كمون يتبع معادلة ديراك :

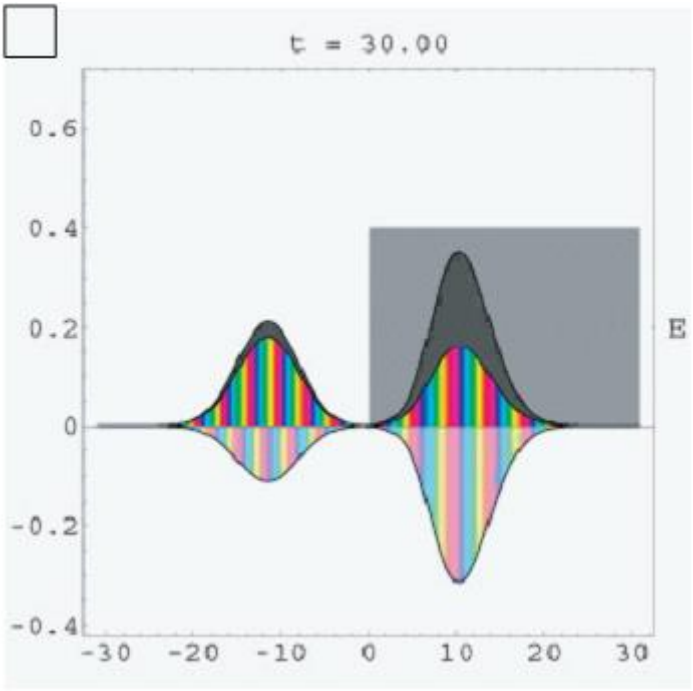
$$i\hbar\gamma^\mu\left(\partial_\mu - ieA_\mu\right)\psi = mc\psi\,. \tag{108}$$

القرائن العديدة لا تجعلنا ننسى ان هذه المعادلة تنص ببساطة على ان القيمة الخاصة لعامل الطاقة – كمية الحركة هو كتلة السكون (مضروبة بسرعة الضوء c) . بعبارة أخرى ، حالات المعادلة التي تتحرك بها الموجة ψ بسرعة الطور c .

تابع الموجة ψ يملك أربعة مركبات عقدية . كل نوع الجسيمات يحتاج لمركبتين عقديتين ، لأن المعادلة تصف البرم و كثافة الجسيمات . البرم هو دوران ، و الدوران يتطلب ثلاثة بارامترات حقيقية . البرم و الكثافة بالتالي تتطلب أربع بارامترات حقيقية ، و يمكنها أن تجمع في عددين عقديين ، كلاهما من أجل الجسيمات و من اجل الجسيمات المضادة .

كل من المركبات الأربعة لتابع الموجة لجسيم برم نسبي يتبع معادلة شرودنجر – كلاين – غوردون النسبية (تحدي 151 e) و هذا يعني ان علاقة الطاقة – كمية الحركة النسبية تتبعها كل من المركبات بشكل منفصل .

إن تابع الموجة النسبي ψ له خاصة هامة هي أن البرم بمقدار 2π يغير إشارته (تحدي 152 e) وفقط الدوران بمقدار 4π يترك تابع الموجة بدون تغيير . و هذا هو السلوك النوعي لجسيمات البرم 1/2 . لهذا السبب فإن تابع الموجة ذو الاربع مركبات لجسيم البرم 1/2 يسمى برام / سبينور .



الشكل 84 تناقض كلاين : حركة تابع الموجة النسبي هو الذي يصادف كمون متدرج بشكل سهل جدا . و جزء من تابع الموجة يمرر و هذا الجزء هو المادة المضادة كما تبين المركبة السفلية الاكبر

المادة المضادة

المادة المضادة الآن هي مصطلح بيتي . بشكل مدهش فإن المفهوم ظهر قبل ان يكون هناك أي دليل تجريبي عليها و العلاقة النسبية للطاقة E لالكترون ذو شحنة e في حقل شحنة Q هي

$$E + \frac{Qe}{4\pi\varepsilon_0 r} = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}\ . \qquad (109)$$

هذه العلاقة ايضا تسمح بحلول ذات طاقة سالبة و شحنة موجبة e– اذا استخدم الجذر السالب . نظرية الكم تبين ان هذه خاصة عامة و هذه الحلول تقابل لما يدعى المادة المضادة

في الحقيقة مرافق المادة المضادة للالكترون تم توقعه في 1920s من قبل باول ديراك من المعادلة (108) و التي تستند لعلاقة الطاقة النسبية اعلاه (109) . بدون إدراك لهذا التوقع اكتشف كارل أندرسون الالكترون المضاد في 1932 و سماه البوزيترون . (الاسم الصحيح يجب أن يكون بوزيتون بدون r . و هذا الشكل الصحيح مستخدم في الفرنسية) كان أندرسون يدرس الأشعة الكونية و لاحظ بعض الإلكترونات تدور بطريقة خاطئة في الحقل المغناطيسي الذي طبقه على جهازه وقد تأكد من جهازه بشكل كامل و أخيرا استنتج أنه قد وجد جسيم ذو نفس كتلة الإلكترون و لكن شحنته موجبة.

وجود البوزيترونات له العديد من النتائج الغريبة .في عام 1928 قبل اكتشفه أشار الفيزيائي النظري السويدي أوسكار كلاين بان معادلة ديراك للإلكترونات تعطي توقعا غريبا : عندما الإلكترون يضرب جدار كموني قليل الانحدار فإن

معامل الانعكاس يكون أكبر من الواحد . مثل هذا الجدار سيعكس أكثر مما يرمى إليه . بالإضافة لذلك جزء كبير من تابع الموجة يمر عبر الجدار . و في 1935 بعد اكتشاف البوزيترون فإن فيرنر هايزنبرغ و هانس أويلر شرحا التناقض (مرجع 140) و قد وجدا ان معادلة ديراك تتوقع أنه متى تجاوز الحقل الكهربائي القيمة الحرجة البالغة

$$E_c = \frac{m_e c^2}{e\lambda_e} = \frac{m_e^2 c^3}{e\hbar} = 1.3\,\mathrm{EV/m}\,, \qquad (110)$$

الخلاء سيولد تلقائيا أزواج إلكترون – بوزيترون التي بالتالي ستنفصل بواسطة الحقل . بالنتيجة ، الحقل الأصلي ينخفض. إن ما يعرف باستقطاب الخلاء هو سبب معامل الانعكاس الأكبر من الواحد الذي وجد من قبل كلاين . وفي الحقيقة الكمونات ذات التدرج العالي تقابل حقول كهربائية عالية .

يبين استقطاب الخلاء ، على عكس الحياة اليومية أن عدد الجسيمات غير ثابت في المجال الميكروسكوبي . فقط الفرق بين عدد الجسيمات و عدد الجسيمات المضادة ينتج أنه مصون . و استقطاب الخلاء بالتالي يحد إمكانيتنا من عد الجسيمات في الطبيعة .

استقطاب الخلاء هو أثر ضعيف . و هو يلاحظ فقط في اصطدامات الجسيمات ذات الطاقة العالية . و في هذه الحالات فإن الأثر حتى يزيد ثابت البنية الدقيقة . و لاحقا سوف نصف الأمثلة الضخمة حقيقة لاستقطاب الخلاء (مجلد V ، صفحة 153) المفروضة حول الثقوب السوداء المشحونة .

بالطبع توليد أزواج الإلكترون – بوزيترون ليس خلقا من لاشيء و لكنه تحويل للطاقة إلى مادة . مثل هذه العمليات هي جزء من كل وصف نسبي للطبيعة . لسوء الحظ الفيزيائيين لديهم عادة تسمية هذا التحويل بتشكيل الأزواج و بالتالي يحدث خلط حول القضية بعض الشيء . إن التحويل يوصف بنظرية حقل الكم الذي سيدرس في المجلد التالي .

الجسيمات الافتراضية

بالرغم مما قيل حتى الان ، فإن قيم الفعل الأصغر من قيمة أصغر فعل ممكن لها دور تلعبه . و لقد صادفنا مثالا : في اصطدام بين إلكترونين ، يكون هناك تبادل للفوتونات الافتراضية (صفحة 64). و لقد تعلمنا أن تبادل الفوتون الافتراضي لا يمكن أن يلاحظ . و في الحقيقة الفعل S لهذا التبادل يخضع إلى

$$S \leqslant \hbar\,. \qquad (111)$$

باختصار الجسيمات الافتراضية تظهر فقط كوسطاء في التأثيرات المتبادلة . و هي لا يمكنها أن تقاس . و الجسيمات الافتراضية على عكس الجسيمات العادية، الجسيمات الحقيقية لا تخضع للعلاقة $E^2 - p^2c^2 = m^2 c^4$.

مثلا الطاقة الحركية يمكن أن تكون سالبة . في الحقيقة ، الجسيمات الافتراضية هي عكس الجسيمات الحرة او الحقيقية

هي يمكن ان تلاحظ في خلاء إذا كان زمن القياس قصير جدا . و هي قصيرة العمر ضمنيا .

الفوتونات الافتراضية هي سبب الكمونات الإلكتروستاتيكية ، من اجل الحقول المغناطيسية ، من أجل أثر كاسيمير ، من أجل الانبعاث التلقائي ، و من أجل قوى فان دير فالس ، و من أجل انزياح لامب في الذرات . عن المعالجة الأكثر تفصيلا تبين أن كل وضعية للفوتونات الافتراضية هناك ايضا احتمال أخفض للإلكترونات الافتراضية والبوزيترونات الافتراضية .

عن الجسيمات الافتراضية ذات الكتلة / الكبيرة هي أساسية من أجل استقطاب الخلاء ، من اجل الحد في عدد العناصر ، من أجل إشعاع الثقب الأسود و من أجل إشعاع أونره . الجسيمات الافتراضية الكبيرة أيضا تلعب دورا في التأثيرات المتبادلة القوية حيث تثبت النكلوينات معا في النوى ، و في تبادل التاثير الضعيف حيث تشرح لماذا تفكك بيتا يحدث و لماذا تسطع الشمس .

بشكل خاص أزواج الجسم – الجسيم المضاد الافتراضية للمادة و جسيمات الإشعاع الافتراضي معا تشكل ما نسميه الخلاء . بالإضافة لذلك ، جسيمات الإشعاع الافتراضي تشكل ما يسمى عادة الحقول الستاتيكية . الجسيمات الافتراضية لازمة من اجل الوصف الكامل للتأثيرات المتبادلة . بشكل خاص الجسيمات الافتراضية مسؤولة عن كل عملية تفكك .

فضول و تحديات مرحة عن اللون و الذرات

أين يكون البحر اكثر زرقة ؟ ماء البحر ، مثل الماء العذب هو ازرق لأنه يمتص الضوء الأحمر و الأخضر . الامتصاص ناتج عن الحزمة الاهتزازية لجزيئة الماء التي هي ناتجة عن اشتراك كل من الشد الجزيئي المتناظر وغير المتناظر (مرجع 141) . الامتصاص ضعيف ولكن ملحوظ . عند 700 nm (الأحمر) فإن طول الامتصاص البالغ 1/e للماء هو متر واحد .

ماء البحر يمكن أيضا أن يكون ذو لون ناصع إذا كان قعر البحر يعكس الضوء . بالإضافة لذلك ماء البحر يمكن أن يكون أخضر إذا كان يحتوي جسيمات صغيرة التي تبعثر أو تمتص الضوء الأزرق . في الأغلب هذه الجسيمات هي تربة أو عوالق .(الأقمار الصناعية يمكن ان تحدد محتوى العوالق من اخضرار البحر) . بالتالي البحر هو خاصة أزرق إذا كان عميقا ، هادئا و باردا ، في تلك الحالة تكون الأرض بعيدة و التربة غير ممزوجة مع الماء و محتوى البلانكتون منخفض. إن بحر سارغاسو بعمق 5km ، هادئ و بارد أكثر العام . و غالبا يسمى أكثر مياه الأرض زرقة .

البحيرات يمكن أيضا أن تكون زرقاء إذا احتوت جسيمات معدنية صغيرة . الجسيمات تبعثر الضوء و تؤدي إلى لون أزرق لأسباب مشابهة للون الأزرق للسماء . مثل هذه البحيرات الزرقاء توجد في العديد من الأماكن على الأرض.

* *

في القياسات الحديثة عالية الدقة لطيوف الهيدروجين ، استمع لسيد هذا الحقل بلا منازع : استمتع بحديث 2012 من قبل تيودور هينش الذي خصص جزءا كبيرا من حياته لهذا الموضوع في www.mediatheque.lindau-nobel.org .

* *

ذرة الهيدروجين تحمل العديد من الطيوف الرائعة . في عام 2015 بيّن فريدمان و هاجن أن العلاقة المعروفة جيدا لـ π =3.14159265… (مرجع 142) يمكن استخراجها من الطيف اللوني . ميكانيك الكم و الألوان هي حقيقة مواضيع جميلة .

* *

إذا احتوت الذرات إلكترونات مدارية ، فإن دورات الأرض عن طريق تسارع كوريوليس سيكون له اثر على حركتها و بالتالي على لون الذرات (مرجع 136). هذا التوقع الجميل اعطاه مارك سيلفرمان ، الأثر صغير لكنه لم يتم قياسه بعد.

* *

الضوء يحيد بواسطة الشبكات أو الحواجز (المقضبات المتقاطعة) المادية . هل يمكن للمادة أن تحيد بواسطة الشبكات أو الحواجز (المقضبات المتقاطعة) الضوئية ؟ بشكل مدهش يمكن ذلك ، كما توقع ديراك و كابيتزا في 1937 . وهذا تحقق لأول مرة في 1986 (مرجع 143) باستخدام ذرات . بالنسبة للإلكترونات الحرة الأمر أكثر صعوبة و التأكيد الاكثر وضوحا أتى في 2001 ، عندما استخدمت تكنولوجيا ليزر جديدة للقيام بقياس جميل للنهايات العظمى النوعية للحيود للإلكترونات الحائدة بواسطة جائز مقضب ضوئي .

* *

الضوء ينعكس كليا عندما يوجه لمادة كثيفة عند زاوية كبيرة كفاية بحيث أنه لا يمكنه دخول المادة . إن مجموعة من الفيزيائيين الروس بينوا أنه إذا تم إثارة المادة الكثيفة (مرجع 136) فإن شدة الحزمة المنعكسة كليا يمكن تضخيمها .ومن غير الواضح فيما إذا كان هذا سيؤدي لتطبيقات .

* *

الطرق التي يتعامل بها الناس مع ذرات وحيدة بواسطة الحقول الكهرطيسية تعطي العديد من الأمثلة الجميلة لتكنولوجيات مطبقة حديثة . في هذه الأيام من الممكن رفع ، صيد ، و اثارة ، تصوير و ازالة اثارة ذرات وحيدة فقط بسطوع الضوء عليها (مجلد I ، صفحة 342) . في عام 1997 منحت جائزة نوبل في الفيزياء (مرجع 144) لمن أسس هذا المجال ستيفة تشو ، كلاود كوهين – تانودجي و ويليام فيليبس .

* *

بوجود مرآتين و بضع فوتونات من الممكن إمساك ذرة (مرجع 145)و إبقائها عائمة بين المرآتين هذا الأمر هو واحد من طرق عديدة لعزل ذرات وحيدة و هو الآن ممارسة قياسية في المخابر . هل يمكنك تخيل كيف يتم ؟ (تحدي 153 s)

* *

المثال على البحث الحديث هو دراسة الذرات المجوفة أي الذرات التي خسرت عددا من إلكتروناتها الداخلية . و قد تم اكتشافها عام 1990 من قبل جي بي برياند و مجموعته . وهي تظهر عندما ذرة متشردة بشكل كامل أي ذرة بدون أي إلكترونات تلامس معدن . الإلكترونات المكتسبة بالتالي تدور في الخارج و ترك الطبقات الداخلية فارغة و هذا على عكس تماما الذرات العادية . مثل هذه الذرات المجوفة يمكن أيضا أن تتشكل بواسطة التشعيع الليزري الشديد (مرجع 146).

* *

التأثيرات الكمية النسبية يمكن أن ترى بالعين المجردة . التأثيرين الأكثر اهمية تتعلقان بالذهب و الزئبق . اللون الأصفر للذهب – الذي عدده الذري 79 – ناتج عن طاقة انتقال بين إلكترونات الطبقتين 5d & 6s و التي تمتص الضوء الأزرق . بدون تأثيرات نسبية فإن هذا الانتقال سيكون في المنطقة فوق البنفسجية ، بشكل مشابه للانتقال بين الإلكترونات 4d & 5s للفضة و الذهب سيكون عديم اللون . اللون الأصفر للذهب بالتالي هو أثر نسبي .

الزئبق - الذي له عدد ذري 80 – فيه طبقة 6s مليئة . و بسبب نفس التاثيرات النسبية التي تظهر في الذهب فإن هذه الطبقات تتقلص و لا تحب تشكيل روابط . لهذا السبب ما يزال الزئبق سائلا عند درجة حرارة الغرفة و أن مقاييس الحرارة تعمل .

* *

هل الفوسفور مفسفر / مومض ؟ (تحدي 154 s)

* *

هل من الممكن كشف مرور فوتون وحيد بواسطة جهاز بدون أن يمتصه . كيف يمكنك فعل ذلك ؟ (تحدي 155ny)

* *

خواص المادة

مثل حجم ذرات الهيدروجين فإن ايضا حجم كل الذرات ثابت بفعل الكم . في الواقع ، كم الفعل يحدد بدرجة كبيرة التأثيرات المتبادلة بين الإلكترونات . بالقيام بذلك فإن كم التغير يحدد كل التأثيرات المتبادلة بين الذرات في المادة المعروفة و بالتالي تحدد كل خواص المادة الأخرى . إن المرونة ، اللدونة ، القصافة، الخواص المغناطيسية و الكهربائية للمواد هي تثبت ايضا بكم الفعل . فقط $\hbar$ يجعل الإلكترونيات ممكنة . سندرس بعض الأمثلة عن خواص المادة في المجلد التالي . التفاصيل العديدة للربط العام بين $\hbar$ و خواص المادة ما يزال موضوع بحث ،بالرغم من أنه لا يوجد أي صفة تعاكس كم الفعل . ابحاث المواد هي من بين أكثر الحقول أهمية في العلم الحديث و أكثر التطورات في مستوى حياتنا تنتج عنها . سوف ندرس بعض خالنواحي في المجلد التالي .

في الملخص علم المواد أكد أن فيزياء الكم هي ايضا وصف صحيح لكل المواد و فيزياء الكن اكدت ان كل خواص المواد في الحياة اليومية هي من أصل كهرطيسي و فيزياء الكم أكدت أن كل خواص المادة في الحياة اليومية ناتجة عن تبادلات التاثير التي تتضمن الالكترونات .

تحدي صعب : قوة الكهرطيسية

الفيزيائي العظيم ولفجانج باولي اعتاد ان يقول انه بعد وفاته اول شيء سيسأله عنه الرب هو شرح ثابت البنية الدقيق لسومرفيلد .(الآخرون اعتادوا على التعليق أن هذا سيتم بعد أن يشرح له الرب ذلك ، فإنه سيفكر قليلا و بعدها سيقول :خطا)

ثابت البنية الدقيقة الذي طرحه سومرفيلد هو ثابت بلا واحدات الذي قيمته تقاس بالشكل (مرجع 147)

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137.035\,999\,679(94)} \approx 0.007\,297\,352\,5376(50)\ . \qquad (112)$$

هذا العد ظهر لأول مرة في شروحات البنية الدقيقة للطيوف اللونية الذرية وبالتالي اخذ اسمه منها (مرجع 148)

سومرفيلد كان أول من فهم أهميته العامة . و هو أساسي في الديناميك الكهربائي الكمي لعدة أسباب .

قبل كل شيء ، ثابت البنية الدقيقة يصف قوة الكهرطيسية . العدد α ينتج من تبادل تأثير شحنتين كهربائيتين e .بكتابة علاقة كولون للقوة F بين الكترونين بالشكل

$$F = \alpha\frac{\hbar c}{r^2} \qquad (113)$$

يصبح من الواضح أن ثابت البنية الدقيقة يصف قوة الكهرطيسية .

القيمة الأعلى لثابت البنية الدقيقة α سيعني الجذب الأقوى أو التنافر الأقوى بين الجسمين المشحونين . بالتالي قيمة α تحدد أحجام كل الذرات ، و في الحقيقة كل الأشياء و أيضا كل الألوان في الطبيعة .

ثانيا ، فقط لأن ثابت البنية الدقيقة α ه صغير جدا فإننا قادرين على الحديث عن الجسيمات على الإطلاق . و في الحقيقة فقط لأن ثابت البنية القديقة هو أصغر بكثير من 1 من الممكن تمييز الجسيمات عن بعضها البعض .

إذا كان العدد α قريب أو أكبر من 1 فإن الجسيمات ستتبادل التاثير بقوة جدا بحيث لا يكون من الممكن ملاحظتها بشكل منفصل أو الحديث عن الجسيمات مطلقا .

هذا يؤدي إلى سبب ثالث لأهمية ثابت البنية الدقيقة . نظرا لأنه عدد بدون واحدات فإنه يقتضي ان هناك آلية غير معروفة بعد التي تثبت قيمته . ان اكتشاف هذه الالية هو احد التحديات الباقية في مغامرتنا و طالما ان الالية بقيت مجهولة

كما كانت الحال عام 2016 فاننا لا نستطيع فهم اللون ، حجم شيء وحيد حولنا .

التغيرات الصغيرة في قوة الجذب الكهرطيسي بين الالكترونات و البروتونات سيكون لها نتائج مهمة عديدة . هل يمكنك وصف ماذا سيحدث لحجم الناس ، للون الأجسام ، و لون الشمس أو لأعمال الحواسب إذا ضوعفت القوة ؟ و ماذا سيهبط تدريجيا لنصف قيمته المعتادة ؟ (تحدي 156 s).

منذ 1920s فإن شرح قيمة α قد نظر اليه على أنه أصعب التحديات التي تواجه الفيزياء الحديثة . هذا هو سبب خيال باولي . في 1946 خلال محاضرته لجائزة نوبل كرر القول أن النظرية التي لا تحدد هذا العدد ليست كاملة (مرجع 149) و منذ ذلك الحين فإن الفيزيائيين بدا أنهم انقسموا صنفين : أولئك الذين لا يجرؤون على خوض التحدي و اولئك الذين ليس لديهم دليل و هذه القصة الرائعة ما تزال تنتظرنا

مسألة ثابت البنية الدقيقة هو عميقة جدا بحيث تفضي إلى متاهات كثيرة. مثلا إذا قال أحد ما انه من المستحيل تغيير واحدات الفيزياء بشكل ان $\hbar$ ، c& e ستساوي كلها للواحد بنفس الوقت لأن القيام بذلك سيغير العدد و يجعله α = 1/137.036...(1) . هل يمكنك شرح لماذا هذه الفرضية خطا ؟ (تحدي 157 s).

ملخص حول الألوان و المواد

في الملخص كم الفعل $\hbar$ مع تبادل التاثير بين الحقول الكهرطيسية و الالكترونات داخل الذرة ، الجزيئات ، السوائل و الأجسام الصلبة يحدد حجم ، شكل ، لون و خواص المادة لكل الأشياء حولنا . كم الفعل يحدد الخواص الميكانيكية مثل الصلابة أو المرونة ،الخواص المغناطيسية ، الخواص الحرارية مثل السعة الحرارية أو حرارة التكاثف ، الخواص الضوئية مثل الشفافية ، و الخواص الكهربائية مثل السطوع المعدني . بالاضافة لذلك كم الفعل يحدد كل النواحي الكيماوية و الحيوية للمادة .هذا الارتباط هو موضوع المجلد التالي .

إن قوة التأثير المتبادل الكهرطيسي توصف بثابت البنية الدقيقة α = 1/137.036 و مع ذلك قيمته لم تشرح بعد .

الفصل التاسع

فيزياء الكم باختصار

مقارنة مع الفيزياء الكلاسيكية فان فيزياء الكم فإن نظرية الكم بالتأكيد أكثر تعقيدا . و لكن الفكرة الأساسية هي بسيطة : في الطبيعة هناك تغير أصغر ما يكون أو كم فعل أصغر ما يكون بقيمة $\hbar = 1.054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js}$

وبشكل أكثر دقة كل نظرية الكم يمكن تلخيصها بجملة واحدة :

- في الطبيعة الأفعال أو التغيرات الأصغر من $\hbar = 1.054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js}$ لا تلاحظ

قيمة أصغر فعل هذه ، كم الفعل ، تؤدي إلى أن كل الملاحظات الغريبة التي تتم في المجال الميكروسكوبي ، مثل السلوك الموجي للمادة ، علاقات عدم التحديد ،إزالة التماسك ، العشوائية في القياسات ، عدم قابلية التمييز ، تكميم كمية الحركة الزاوية ، النفقية ، تشكيل الأزواج ، التفكك و تفاعلات الجسيمات .

إن أصل نظرية الكم بالتالي هي عدم وجد تغير صغير بكل لانهائي . إن رياضيات نظرية الكم مجردة و معقدة و لكن هل كان هذا الجزء من مشوارنا كاملا . سنعطي أولا عرضا لهذه النتائج و بعدها نتحول لأسئلة ما تزال مفتوحة .

النتائج الفيزيائية لنظرية الكم

إن وجود قيمة فعل أصغر ما يكون في الطبيعة يؤدي مباشرة إلى درس رئيسي تعلمناه حول الحركة في جزء الكم من مغامرتنا

- إذا كانت الشيء يتحرك فإنه مكون من كوانتونات أو جسيمات كمية

هذه العبارة تطبق على كل جملة فيزيائية وبالتالي على كل الأجسام و لك الصور أي على كل المادة و الإشعاع. إن الاشياء المتحركة مكونة من كوانتونات . الأحجار ، أمواج الماء ، الضوء ، أمواج الصوت ، الزلازل ، الجيلاتين و كل شيء آخر يمكننا تبادل التاثير معه مكون من جسيمات كمية .

في دراستنا للنسبية اكتشفنا أن الآفاق أيضا و الخلاء يمكن أن تتحرك . إذا كانت كل الأشياء المتحركة مكونة من جسيمات كمية لماذا يقتضي هذا وجود الآفاق و الفضاء الفارغ ظ يمكننا القول انه لا يوجد مشاكل اساسية متوقعة بالنسبة للافاق لأن احد الطرق لوصف الآفاق هي بانها حالة متطرفة من المادة . و لكن التفاصيل من أجل النواحي الكمية للخلاء ليست بسيطة ، سوف تكون موضوع الجزء الأخير من هذه المغامرة .

سابقا في مغامرتنا سالنا : ما هي المادة ، الإشعاع و تبادلات التأثير ؟ (مجلد II ، صفحة 293)

الآن نحن نعلم : هي كلها مركبات من الجسيمات الكمية الأولية (مجلد II ، صفحة 318) . بشكل خاص تبادلات التأثير هي تبادلات لجسيمات كمية أولية .

الجسيم الكمي الأولي هو شيء قابل للعد الذي هو اصغر من طول موجة كومبتون العائدة له و كل الجسيمات الأولية توصف بالطاقة – كمية الحركة ، الكتلة ، البرم ، القيم P ، C و T . و لكن سوف نرى في المجلد التالي انها ليست بعد قائمة كاملة لخواص الجسيمات . حول الخواص الذاتية للجسيمات الكمية أي تلك التي لا تعتمد على المراقب ، فإن نظرية الكم تعطي عبارة بسيطة :

- في الطبيعة كل الخواص الذاتية للكوانتونات او الجسيمات الكمية – باستثناء الكتلة مثل البرم ، الشحنة الكهربائية ، الشحنة القوية ، القيم التأكيدية ... الخ تظهر كمضاعفات صحيحة من واحدة اساسية . (صفحة 127) و نظرا لأن كل الجمل الفيزيائية مكونة من كوانتونات في جمل مركبة فإن كل الخواص الذاتية – باستثناء الكتلة * - إما تجمع او تضرب / تتضاعف .

في الملخص كل الأشياء المتحركة مكونة من جسيمات كمية موصوفة بواسطة خواص متقطعة . لرؤية مقدار عمق هذه النتيجة ، يمكنك تطبيقها على كل هذه الأشياء المتحركة التي من أجلها تكون عادة منسية ، مثل الاشباح ، الأوراح ، الملائكة ، الحوريات ، الحراس ، الشياطين ، الآلهة ، الإلاهات ، و النفوس . يمكنك التأكد بنفسك ما يحدث عندما طبيعتها الجسيمية تؤخذ بالحسبان . (تحدي e 158) .

" عقاب الآلهة هي عناية منها

تيبيريوس كما نقل من قبل تاسيتوس "

نتائج حركة الجسيمات الكمية

الكوانتونات أو الجسيمات الكمية ، تختلف عن الجسيمات اليومية : الجسيمات الكمية تتداخل : وهي تتصرف مثل مزيج من الجسيمات و الأمواج . و هذه الخاصة تنتج مباشرة من وجود $\hbar$, أصغر فعل ممكن في الطبيعة . من وجود $\hbar$ فإن نظرية الكم تستنتج كل عباراتها حول حركة الجسيم الكمي . و نلخص النقاط الأساسية .

ليس هناك سكون في الطبيعة . كل الأجسام تخضع لعلاقة عدم التحديد ، التي تنص على أن عدم التحديد في الموضع x و كمية الحركة p تعطي

$$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2 \quad \text{with} \quad \hbar = 1.1 \cdot 10^{-34}\,\text{Js} \qquad (114)$$

و تحقيق السكون هو استحالة . و حالة الجسيمات الكمية تعرف بنفس القيم المقاسة في الفيزياء الكلاسكية مع فرق أن القيم القابلة للقياس لا تتبادل . تظهر الفيزياء الكلاسيكية في حد الذي يمكن فيه لثابت بلانك $\hbar$ أن يوضع بشكل فعال مساويا للصفر .

نظرية الكم تطرح عنصر احتمالي في الحركة . تنتج الاحتمالات من كم الفعل عبر تبادلات تأثير مع الحمّامات التي هي جزء من بيئة كل جملة فيزيائية .

---

* بشكل اكثر دقة مع الكتلة ، أيضا الزوايا الممزوجة ليست مكممة . هذه الخواص تعرف في المجلد التالي

**عقاب الآلهة هي عناية منها "

بشكل مكافئ الاحتمالات تؤدي إلى كل خبرة التي تحاول تحريض تغيير الذي هو أصغر من كم الفعل .

الجسيمات الكمية تتصرف مثل الأمواج . طول موجة دو بروي المرتبطة بها λ تعطى بكمية الحركة p بالشكل

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p} \qquad (115)$$

في كل من حالة المادة و الإشعاع . هذه العلاقة هي منشأ السلوك الموجي للضوء و المادة . إن الجسيمات الضوئية تسمى الفوتونات و قياسها الآن هو ممارسة قياسية . نظرية الكم تنص على أن الأمواج الجسيمية مثل كل الأمواج تتداخل ، تنكسر ، تتشتت ، تتخامد و يمكن تخميدها و يمكن تقطيبها . هذا يطبق على الفوتونات ، الإلكترونات ، الذرات و الجزيئات . كل الأمواج مكونة من جسيمات كمية ، كل الأمواج يمكن أن ترى ، تلمس و تحرك . الضوء مثلا يمكن أن يرى في تبعثر الفوتون – الفوتون في الخلاء عند طاقات عالية ، و يمكن أن يلمس باستخدام أثر كومبتون ، و يمكن أن

يحرك بواسطة الانحناء بالجاذبية . جسيمات المادة ، مثل الجزيئات أو الذرات يمكن أن ترى بالمجاهر الإلكترونية و يمكن أن تلمس بواسطة مجاهر القوة الذرية . و التدخل و الانكسار للجسيمات الموجية يلاحظ يوميا في المجهر الإلكتروني .

أمواج المادة يمكن تخيلها كغيوم التي تدور موضعيا . في حد حجم الغيمة المهمل ، الجسيمات الكمية يمكن تخيل أنها أسهم صغيرة دوارة . بشكل مكافئ ، الكوانتونات تملك طور .

الجسيمات لا يمكن أن تحاط للأبد . حتى بالرغم من ان المادة غير قابلة للاختراق ، فإن نظرية الكم تبين أن الصناديق المحكمة أو العوائق التي لا يمكن تجاوزها غير موجودة . الإحاطة لا تكون أبدا دائمة . الانتظار طويلا بشكل كاف دائما يسمح لنا بالتغلب على أي عائق نظرا لأن هناك احتمال منتهي للتغلب على أي عائق . هذه العملية تسمى النفقية عندما ترى من وجهة النظر الفراغية و يسمى التفكك عندما ترى من وجهة النظر الزمانية . تشرح النفقية عمل أنابيب التلفاز وأيضا التفكك الإشعاعي .

كل الجسيمات و كل الحزم الجسيمية يمكن أن تدور . تملك الجسيمات كمية حركة زاوية ذاتية تسمى البرم التي تحدد سلوكها تحت الدورانات . البوزونات لها برم صحيح ، و الفرميونات لها برم نصف صحيح . إن العدد الزوجي من الفرميونات المرتبطة أو أي عدد من البوزونات المرتبطة تعطي بوزون مركب ، و العدد الفردي من الفرميونات المرتبطة تعطي فرميون منخفض الطاقة . الأجسام الصلبة هي غير قابلة للاختراق بسبب طبيعة الفرميون للإلكتروناته في الذرات .

الجسيمات المتطابقة هي غير قابلة للتمييز . الإشعاع مكون من جسيمات غير قابلة للتمييز تسمى البوزونات ، مادة الفرميونات . تحت تبادل فرميونين عند انفصالات تشبه الفراغ ، فإن تابع الموجة يغير إشارته ، بينما من أجل بوزونين فإن تابع الموجة يبقى بلا تغيير . كل الخواص الأخرى للجسيمات الكمية هي نفسها بالنسبة للجسيمات الكلاسيكية ، و هي قابلية العد ، التأثير المتبادل ، الكتلة ، الشحنة ، كمية الحركة الزاوية ، الطاقة ، كمية الحركة ، الموضع و أيضا عدم قابلية الاختراق للمادة و قابلية الاختراق للإشعاع . آلات النسخ المثالية غير موجودة .

في الاصطدامات ، الجسيمات تتبادل التأثير موضعيا ، عن طريق تبادل الجسيمات الأخرى . عندما تصطدم جسيمات المادة فإنها تتبادل التأثير عبر تبادل البوزونات الافتراضية أي بوزونات خارج الطبقة . تغير الحركة بالتالي هو ناتج عن تبادل الجسيمات .

تبادل البوزونات ذات البرم الزوجي يتواسط فقط تبادلات التأثير الجاذبة . و بوزنات التبادل ذات البرم الفردي تتواسط تبادلات التأثير التنافرية أيضا .

خواص التصادمات تقتضي عدم مصونية عدد الجسيمات ز في التصادمات ـ الجسيمات يمكن أن تظهر أي يمكن أن تتشكل أو تختفي أي يمكن أن تباد . وهذا صالح من أجل كل من البوزونات و الفرميونات .

خواص التصادمات تقتضي وجود الجسيمات المضادة التي تلاحظ بانتظام في التجارب . الفرميونات الأولية على عكس العديد من البوزونات الأولية ، تختلف عن جسيماتها المضادة ، حيث يمكنها أن تخلق و تفنى فقط بشكل أزواج . الفرميونات الأولية تملك كتلة غير متلاشية و تتحرك أبطأ من الضوء .

الجسيمات يمكن أن تتفكك و تتحول . الدراسات التفصيلية تبين أن التصادمات تقتضي عدم موضعية نوع الجسم . في التصادمات الجسيمات المختارة يمكن أن تغير خواصها الذاتية . و هذه الملاحظة سيتم تفصيلها في المجلد التالي . بشكل مكافئ كم الفعل يقتضي أن الأشياء تتكسر و الأحياء تموت .

الصور ، المكونة من إشعاع ، توصف بنفس القيم القابلة للقياس مثل المادة : الموضع ، الطور ، السرعة ، الكتلة ، كمية الحركة .. الخ بالرغم من أن قيمها و علاقاتها نختلف . الصور يمكن فقط أن تتوضع بدقة طول الموجة λ للإشعاع الذي أنتجها .

إن ظهور ثابت بلانك h يقتضي أن مقاييس الطول و الزمن توجد في الطبيعة . نظرية الكم تطرح عدم استقرار أساسي في كل مثال للحركة .

بالتالي القيمة الصغيرة بشكل لا متناهي تزال . بهذا تظهر الشكل الحدود الأخفض / الدنيا للأبعاد الإنشائية و للعديد من المقادير الأخرى القابلة للقياس . بشكل خاص نظرية الكم تبين أنه من المستحيل أنه على الإلكترونات في ذرة تعيش كائنات صغيرة بنفس الطريقة التي يعيش بها البشر على الأرض التي تدور حول الشمس . نظرية الكم تبين استحالة التقزم.

الساعات و قضبان المتر لها دقة منتهية بسبب وجود الفعل الأصغر و بسبب تأثيراتها المتبادلة مع الحمّامات . من ناحية أخرى ، كل أجهزة القياس يجب أن تحوي حمّامات نظرا لأنه في حال عدم وجودها لن تكون قادرة على تسجيل النتائج.

تأثيرات الكم لاتترك أي مجال للاندماج البارد (مرجع 150) ، علم التنجيم ، الانتقال البعيد ، الحركة البعيدة ، الظواهر الخارقة و الخلق من لاشيء ، الأكوان المتعددة أو الظواهر الأسرع من الضوء و تناقض ERP ليس استثناء لذلك .

الإنجازات في الدقة و الإحكام

بعيدا عن التغيرات المفهومية ، حسنت نظرية الكم دقة التوقعات من بضع – إن وجدت – خانات في الميكانيك الكلاسيكي إلى العدد الكامل من الخانات – في بعض الأحيان ثلاثة عشر – التي يمكن قياسها اليوم . إن الدقة المحدودة عادة لا تعطى بعدم دقة النظرية ، و هي تعطى بدقة القياس . بتعبير آخر ، الاتفاق فقط بمقدار المال الذي يريد المجرب إنفاقه . يبين الجدول 8 هذا بمزيد من التفصيل .

الشكل 8 – المقارنات المختارة بين الفيزياء الكلاسيكية ، نظرية الكم و التجربة

القيمة القابلة للقياس	التوقع الكلاسيكي	توقع نظرية الكم [a]	القياس	تقدير الكلفة
عدم تحديد الحركة البسيطة للأجسام	0	$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar/2$	10 k€

القيمة القابلة للقياس	التوقع الكلاسيكي	توقع نظرية الكم [a]	القياس	تقدير الكلفة
طول موجة المادة	لا يوجد	$\lambda p = 2\pi\hbar$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar$	10 k€
طول موجة كومبتون	لا يوجد	$\lambda_c = h/m_e c$	$(1 \pm 10^{-3})\,\lambda$	20 k€
معدل تشكيل الأزواج	0	σE	يتفق	100 k€
زمن التفكك الإشعاعي في الهيدروجين	لا يوجد	$\tau \sim 1/n^3$	(1 ± 10^{-2})	5 k€
أصغر كمية حركة زاوية	0	$\hbar/2$	$(1 \pm 10^{-6})\,\hbar/2$	10 k€
أثر كاسيمير / ضغط	0	$p = (\pi^2 \hbar c)/(240 r^4)$	(1 ± 10^{-3})	30 k€
ألوان الأجسام				
طيف الأجسام الساخنة	يتباعد	$\lambda_{max} = hc/(4.956\,kT)$	$(1 \pm 10^{-4})\ \Delta\lambda$	10 k€
انزياح لامب	لا يوجد	$\Delta\lambda = 1057.86(1)\,\text{MHz}$	$(1 \pm 10^{-6})\,\Delta\lambda$	50 k€
ثابت ريدبيرغ	لا يوجد	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$(1 \pm 10^{-9})\,R_\infty$	50 k€
ثابت ستيفان – بولتزمان	لا يوجد	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	$(1 \pm 3 \cdot 10^{-8})\,\sigma$	20 k€

ثابت إزاحة فين	لا يوجد	$b = \lambda_{max} T$	$(1 \pm 10^{-5})\, b$	20 k€
قرينة انكسار الماء	لا يوجد	1.34	ضمن بضع %	1 k€
تبعثر الفوتون – الفوتون	0	من QED : منتهي	يتوافق	50 M€
النسبة الجيرومغناطيسية للإلكترون	1 أو 2	2.002 319 304 365(7)	2.002 319 304 361 53(53)	30 M€
العزم المغناطيسي لمشابه المون	0	$11\,659\,1827(63) \cdot 10^{-11}$	$11\,659\,2080(60) \cdot 10^{-11}$	100 M€
خواص المواد المركبة				
زمن عمر الذرة	تقريبا ميكرو ثانية	∞	$>10^{20}$ a	1 €
تقسيم دقيق جدا للأمونيوم	لا يوجد	4 463 302 542(620) Hz	4 463 302 765(53) Hz	1 M€
الحجم الجزيئي و الشكل	لا يوجد	**من QED**	ضمن 10^{-3}	20 k€

a.كل هذه التوقعات تحسب من الثوابت الفيزيائية الأساسية الملحق (أ) (صفحة 213)

نلاحظ أن القيم المتوقعة لا تختلف عن المقاسة . و إذا تذكرنا أن الفيزياء الكلاسيكية لا تسمح لنا بحساب أي من القيم المقاسة ، نحصل على فكرة عن التقدم الذي حققه فيزياء الكم . و هذا التقدم في الفهم هو ناتج عن طرح كم الفعل $\hbar$.

بشكل مكافئ يمكننا القول أنه لا يوجد وصف للطبيعة كامل بدون كم الفعل .

في الملخص ، نظرية الكم دقيقة و محكمة . في المجال الميكروسكوبي نظرية الكم هي توافق تام مع الطبيعة بالرغم من تصورات الشهرة و الغنى و بالرغم من العدد الأكبر من الباحثين ، فلا تعارض بين الملاحظة و النظرية وجد قط .

من ناحية أخرى شرح القيمة المقاسة لثابت البنية الدقيقة $\alpha = 1/137.035\,999\,074(44)$ يبقى مسألة مفتوحة لتبادل التاثير الكهرطيسي .

هل نظرية الكم سحر ؟

دراسة الطبيعة هو مثل اختبار السحر . الطبيعة غالبا تبدو مختلف عما هي عليه . خلال السحر يتم خداعنا و السخرية منا و لكن فقط إذا نسينا حدودنا الخاصة و حالما نبدأ برؤية أنفسنا كجزء من اللعبة نبدا في فهم الخدع وهذا هو متعة السحر . نفس الشيء يحدث في الحركة الكمية .

* *

الطبيعة تبدو غير عكوسة حتى بالرغم من أنها ليست كذلك . نحن لا نتذكر أبدا المستقبل . و نحن نخذع لأننا ماكروسكوبيون.

* *

الطبيعة تبدوغير متماسكة ، حتى بالرغم من أنها ليست كذلك . و نحن نخذع لأننا ماكروسكوبيون

* *

ليس هناك ساعات في الطبيعة . نحن نخذع بتلك التي في الحياة اليومية لأننا محاطين بعدد كبير من الجسيمات .

* *

الحركة غالبا يبدو أنها تختفي حتى بالرغم من أنها أبدية . نحن نخدع ثانية لأن حواسنا لا تعايش المجال الميكروسكوبي

* *

الأجسام تبدو غير قابلة للتمييز حتى بالرغم من أن الخواص الإحصائية لمكوناتها تبين أنها ليست كذلك . و نحن نخدع لأننا نعيش عند طاقات منخفضة .

* *

المادة تبدو مستمرة بالرغم من أنها ليست كذلك ، و نحن نخدع بسبب محدودية حواسنا

* *

المادة تبدو محددة في المعنى الكلاسيكي بالرغم من أنها عشوائية . و نحن نخدع لثانية لأننا ماكرسكوبيون

* *

باختصار إن حالتنا البشرية دائما تخدعنا . الجواب على سؤال العنوان: الفيزياء الكلاسكية مثل السحر و الخدع لا تكشف بنظري الكم . وهذا هو جاذبيتها الأساسية .

نظرية الكم هي تامة و لكن يمكن أن تفعل المزيد

يمكننا تلخيص مغامرتنا بعبارة بسيطة :

- فيزياء الكم هي وصف للمادة و الإشعاع بدون مفهوم الصغير بشكل لا نهائي

كل التغير في الطبيعة في الحقيقة و كل شيء يوصف بمقادير منتهية و فوق كل شيء بواسطة التغير الأصغر ما يكون الممكن في الطبيعة ، كم الفعل $\hbar = 1.054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js. .

كل التجارب بدون استثناء ، تبين أن كم الفعل $\hbar$ هو أصغر تغير قابل للقياس . و وصف الطبيعة بواسطة كم الفعل بالتالي تام و نهائي . أصغر فعل قابل للقياس $\hbar$ مثل سرعة الطاقة الأعظمية c ،هي خاصة أساسية للطبيعة و يمكن للمرء أيضا أن

أن يدعوها الحقائق الاساسية .

نظرا لأن نظرية الكم تنتج منطقيا و بشكل كامل من أصغر فعل قابل للقياس $\hbar$ بأبسط طريقة – و الطريقة الوحيدة فقط – فإنه لنقض نظرية الكم يجب إيجاد قياس الذي يتعارض مع قيمة أصغر فعل $\hbar$. جرب ذلك ! (تحدي 159 e) .

حتى بالرغم من اننا استنتجنا خاصة أساسية للطبيعة إذا عدنا إلى بداية دراستنا لنظرية الكم (صفحة 15) لا يمكننا أن نخفي بعض خيبة الأمل . و نحن نعلم ان الفيزياء الكلاسيكية لا يمكنها شرح الحياة و في البحث عن تفاصيل الحركة الميكروسكوبية نصادف العديد من النواحي المدهشة التي لم نحققها بعد في شرح الحياة. مثلا نحن نعلم ما يحد سرعة الإلكترونات في الذرات ولكننا لا نعلم ما الذي يحدد سرعة جري رياضي . في الحقيقة ، لم نناقش حتى خواص أي جسم صلب او سائل ، بغض النظر عن تلك التي لها بنى معقدة مثل الكائنات الحية .

بعبارة اخرى بعد طرح نرظية الكم ما يزال علينا أن نربط العمليات الكمية بالعالم اليومي . بالتالي موضوع المجلد التالي سيكون دراسة الحركة و داخل الأحياء و الحركة داخل كل انواع المادة من الأجسام الصلبة للنجوم باستخدام كم الفعل كاساس . و بعد ذلك سندرس حركة الفضاء الفارغ .

الملحق(أ)

الواحدات ، القياسات و الثوابت

القياسات هي مقارنات مع المعايير . المعايير تستند للواحدات و العديد من جمل الواحدات يتم استخدامها في كل العالم .

كثر هذه المعايير تعطي القوة للمنظمة المسؤولة عنها . مثل هذه القوة يمكن أن يساء استخدامها وهذه هي الحالة اليوم مثلا في صناعة الحاسب و لم يكن الأمر كذلك في الماضي البعيد , الحل هو نفسه في كلا الحالتين : نظم معيار مستقل و شامل . من أجل واحدات القياس ، هذا حدث في القرن الثامن عشر: من أجل تجنب سوء الاستخدام من قبل المؤسسات المسؤولة / السلطوية ، لإزالة المشاكل المتعلقة بالمعايير المختلفة ، المتغيرة و غير المتكررة و هذه ليس مزحة – لتبسيط جمع الضرائب و جعلها أكثر عدلا ، فإن مجموعة من العلماء ، السياسيين و الاقتصاديين اتفقوا على مجموعة من الواحدات . و هي تعرف بالنظام الدولي للواحدات و يختصر SI و يعرف من قبل معاهدة دولية ، اتفاقية المتر .

الواحدات يحتفظ بها من قبل منظمة دولية / المؤتمر العام للأوزان و المقاييس ، و منظماته التابعة له ، اللجنة الدولية للوزان و المقاييس و المكتب الدولي للأوزان و المقاييس (BIPM) وكلها نشأت في أزمة تماما قبل الثورة الفرنسية (مرجع 151)

<u>وحدات SI</u>

كل وحدات SI مكونة من وحدات أساسية ، التي تعاريفها الرسمية مترجمة من الفرنسية إلى الإنجليزية ومعطاة فيما يلي مع تواريخ صياغتها :

- الثانية هي الفترة من 770 631 9192 فترة لإشعاع موافق للانتقال لمستويين فائقة الدقة للحالة الأرضية لذرة السيزيوم 133 (1967) *
- المتر هو طول مسار يقطعه الضوء في الخلاء خلال زمن يبلغ 458 792 1/299 من الثانية (1983) *
- الكيلوغرام هو وحدة الكتلة و تساوي إلى كتلة الكيلوغرام النموذجي الأولي (1901)*
- الأمبير هو تيار ثابت الذي إذا سرى في ناقلين مستقيمين متوازيين بطول منتهي ، بمقطع عرضي مهمل ووضعا على مسافة متر واحد فيما بينهما في الخلاء ، سينتج بين هذين الناقلين قوة تساوي 2.10^{-7} نيوتن لكل متر طول (1948)*
- الكلفين ، واحدة درجة الحرارة الثيرموديناميكية ، و نسبتها 1/273.16 من درجة الحرارة الثيرموديناميكية لنقطة الماء الثلاثية (1967) *
- المول هو مقدار المادة لجملة الذي يحتوي عدد من المكونات بقدر عدد الذرات الموجودة في 0.012 كيلوغرام من الكربون 12 (1971)*
- الشمعة هي الشدة الضوئية في اتجاه معين لمنبع الذي يصدر إشعاع وحيد اللون بتردد 540.10^{12} هرتز و له شدة إشعاع في ذلك الاتجاه تساوي (1/683) وات لكل ستيراديان (1979) *

نلاحظ أن كلا من واحدات الزمن و الطول معرفة بخواص معينة لمثال قياسي للحركة ، وهي الضوء . بمعنى آخر ، المؤتمر العام للأوزان و المقاييس يبين أن قياس الحركة هو مطلب مسبق لتعريف و إنشاء الزمن و الفراغ

الحركة هي أساسية في كل ملاحظة و كل قياس . و بالمناسبة استخدام الضوء في التعاريف مقترح منذ 1827 من قبل جاك بابينيه . **

من هذه الواحدات الأساسية كل الواحدات الأخرى تعرف بالضرب و التقسيم . بالتالي واحدات SI تملك الخواص التالية :

- واحدات SI تشكل جملة بدقة أحدث ما يكون : كل الواحدات معرفة بإحكام أعلى من إحكام القياسات المستخدمة عادة . أيضا إحكام التعاريف يتم تحسينه بشكل منتظم . و الارتياب النسبي الحالي لتعريف الثانية هو حوالي 10^{-14} و للمتر حوالي 10^{-10} و الكيلو غرام حوالي 10^{-9} و للأمبير 10^{-7} و للمول أقل من 10^{-6} و للكلفين 10^{-6} و للشمعة 10^{-3} .

- واحدات SI تشكل جملة بدقة أحدث ما يكون : كل الواحدات معرفة بإحكام أعلى من إحكام القياسات المستخدمة عادة . أيضا إحكام التعاريف يتم تحسينه بشكل منتظم . و الارتياب النسبي الحالي لتعريف الثانية هو حوالي 10^{-14} و للمتر حوالي 10^{-10} و الكيلو غرام حوالي 10^{-9} و للأمبير 10^{-7} و للمول أقل من 10^{-6} و للكلفين 10^{-6} و للشمعة 10^{-3} .

- واحدات SI تشكل جملة مطلقة : كل الواحدات معرفة بحيث أنه يمكن تكرارها في كل تجهيزات مخبرية مناسبة بشكل مستقل و بإحكام عالي . و هذا يجنب الكثير من إمكانية سوء الاستخدام من قبل المنظمة الواضعة للمعيار (الكيلوغرام ، ما يزال معرف بمساعدة مصطنعة جميلة ،هي آخر استثناء لهذا الشرط ، البحث الواسع جاري لإزالة هذه الحقائق المصطنعة من التعريف – سيأخذ هذا السابق الدولي بضع سنين أخرى . و هناك طريقتين : عد الجسيمات ، أو تثبيت h . الأول يمكن أن يتحقق في البلورات مثل البلورات المصنوعة من السيليكون النقي و الأخيرة باستخدام أي علاقة تظهر فيها h مثل علاقة طول موجة دو برولي أو تـأثير جوزيفسون) .

- إن واحدات SI تشكل نظاما عمليا : الواحدات الأساسية هي مقادير لكميات يومية . و الواحدات المستخدمة بشكل متكرر لها اسماء قياسية و اختصارات . القائمة الكاملة تشمل سبعة واحدات أساسية التي أعطيت للتو و الواحدات الإضافية ، هي واحدات مشتقة وواحدات مقبولة

إن الواحدات SI الإضافية هما اثنتين : واحدة الزاوية (المستوية) و تعرف بأنها نسبة القوس لنصف القطر وهي الراديان (rad) ، ومن أجل الزوايا المجسمة تعرف بانها نسبة المساحة المحتواة بالزاوية إلى مربع نصف لقطر و الوحدة هي ستيراديان (sr) .

الواحدات المشتقة ذات السماء الخاصة في كتابتها بالإنجليزية الرسمية أي بدون أحرف كبيرة و تشديد هي :

---

*الرموز الموافقة هي s , m , kg ,A ,K , mol & cd . النموذج الأولي الدولي للكيلوغرام هو أسطوانة من البلاتين – الإيريديوم محفوظة في BIPM في سيفر في فرنسا (مجلد I ، صفحة 100)، مزيد من التفاصيل حول مستويات ذرة السيزيوم (مرجع 152) عد إلى كتاب حول الفيزياء الذرية . إن مقياس السيلزيوس لدرجة الحرارة θ يعرف بأنه θ/°C = T /K – 273.15 ، لاحظ الفرق الصغير في الرقم الذي يظهر في تعريف الكلفين . إن SI أيضا ينص على : " عندما يستخدم المول ، فإن الكيانات الابتدائية / الأولية يجب أن تحدد و يمكن أن تكون ذرات ، جزيئات ، شوارد ، إلكترونات ، جسيمات أخرى أو مجموعات محددة من مثل هذه الجسيمات . في تعريف المول ، يفهم أن ذرات الكربون 12 غير متحدة ، عند الراحة و في حالتها الأرضية . و في تعريف الشمعة فإن تردد الضوء يقابل 555.5 nm أي اللون الأخضر حوالي طول الموجة الذي تكون فيه العين أكثر حساسية .

**جاك بابينيه (ولد في لوسينيان 1794 و توفي في باريس 1874) فيزيائي ، نشر أعمال مهمة في البصريات .

الاسم	المختصر	الاسم	المختصر
هرتز	$Hz = 1/s$	نيوتن	$N = kg\,m/s^2$
باسكال	$Pa = N/m^2 = kg/m\,s^2$	جول	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
وات	$W = kg\,m^2/s^3$	كولومب	$C = As$
فولت	$V = kg\,m^2/As^3$	فاراد	$F = As/V = A^2s^4/kg\,m^2$
أوم	$\Omega = V/A = kg\,m^2/A^2s^3$	سيمنس	$S = 1/\Omega$
ويبر	$Wb = Vs = kg\,m^2/As^2$	تيسلا	$T = Wb/m^2 = kg/As^2 = kg/Cs$
هنري	$H = Vs/A = kg\,m^2/A^2s^2$	درجة مئوية	°C (see definition of kelvin)
لومن	$lm = cd\,sr$	لوكس	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
بيكريل	$Bq = 1/s$	غراي	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
سيفرت	$Sv = J/kg = m^2/s^2$	كاتال	$kat = mol/s$

نلاحظ أن كل التعاريف للواحدات ، فإن الكيلوغرام فقط يظهر فقط في قوة 1 ، 0 و 1- . هل يمكنك تحديد السبب ؟ (تحدي 728s) . إن واحدات SI غير المقبولة هي الدقيقة ، الساعة ، اليوم (للزمن) ، الدرجة 800 rad /10 π = 1° ، الثانية 1" = π /648 000 rad (للزوايا) ، اللتر و الطن . كل الواحدات الأخرى يجب تجنبها .

كل واحدات SI تجعل أكثر عملية بإدخال السماء المعيارية و المختصرات لقوى من عشرة و هذا ما يعرف بالسوابق : *

الاسم	القوة	الاسم	القوة	الاسم	القوة	الاسم	القوة
أتو – a	10^{-18}	إكسا – E	10^{18}	ديسي – d	10^{-1}	ديكا – de	10^{1}
زبتو – z	10^{-21}	زيتا – Z	10^{21}	سنتي – c	10^{-2}	هكتو – h	10^{2}
يوكتو – y	10^{-24}	يوتا – Y	10^{24}	ميللي – m	10^{-3}	كيلو – k	10^{3}
مرجع 370			غير رسمية	ميكرو – μ	10^{-6}	ميغا – M	10^{6}
كسننو – x	10^{-27}	إكسنتا – X	10^{27}	نانو – n	10^{-9}	جيغا – G	10^{9}
ويكو – w	10^{-30}	ويكتا – W	10^{30}	بيكو – p	10^{-12}	تيرا – T	10^{12}
فينديكو – v	10^{-33}	فينديكتا – V	10^{33}	فيمتو – f	10^{-15}	بيتا – P	10^{15}
أوديكو - u	10^{-36}	يوديكتا – U	10^{36}				

- واحدات SI تشكل جملة كاملة : هي تغطي بشكل منهجي المجموعة الكاملة من القيم القابلة للقياس في الفيزياء .أيضا هي تثبت الواحدات من أجل كل العلوم أيضا

---

*بعض هذه الأسماء هي مخترعة (اليوكتو تبدو مشابهة للكلمة اللاتينية octo " ثمانية " ، الزيبتو تشبه الكلمة اللاتينية septum ، yotta و zetta تشبهها و exa & peta تسيه الكلمات الإغريقية ἑξάκις ، πεντάκις تعني ستة أضعاف و خمسة أضعاف / أمثال ، و المختصرات غير الرسمية مشابهة للكلمات اللاتينية المعبرة عن تسعة ، عشرة ، أحد عشر ، و اثنا عشر) وبعضها هي من الدانماركية / النرويجية (atto من atten " ثماني عشر " و femto من femten " خمسة عشر) و بعضها من اللاتينية (من mille " ألف " ، من centum " مائة " ، من decem "عشرة " ، من nanus " قزم". وبعضها من الإيطالية (من piccolo تعني صغير) ، بعضها من اليونانية (ميكرو من μικρός تعني صغير ، deca-deka ، δέκα تعني عشرة ، hecto من ἑκατόν تعني مائة ، kilo من χίλιοι تعني ألف ، ميغا من μέγας تعني كبير ، جيغا من γίγας تعني عملاق ، تيرا من τέρας تعني فائق الضخامة)

ترجم : لقد علقت في زحمة السير بحيث احتجت إلى ميكرو قرن لمدة بيكو بار ثانية و استهلاك وقود سيارتي المتوسط كان ضخما : لقد كان عشري ميللي متر مربع . (تحدي e 161)

- واحدات SI تشكل جملة عالمية / شاملة : يمكن أن تستخدم في المهن ، في الصناعة ، في التبادل التجاري ، في البيت ، في التعليم و في البحث . و هي يمكن حتى أن تستخدم من قبل حضارات خارج الأرض إذا وجدت
- واحدات SI تشكل جملة متوافقة مع ذاتها : الجداء أو باقي القسمة لواحدتين من واحدات SI هو أيضا واحدة من واحدات SI وهذا يعني من حيث المبدأ نفس المختصر أي SI يمكن أن يستخدم لكل واحدة

واحدات SI ليست فقط المجموعة الممكنة التي تحقق كل هذه الشروط و لكن هي الجملة الوحيدة القائمة التي تحققها * في المستقبل القريب ، تخطط BIPM لإعادة تدقيق واحدات SI باستخدام مخطط مكعب الفيزياء المبين في الشكل 1 (صفحة 8) وهذا سيتحقق بالتثبيت بالإضافة إلى قيم K_{cd} & c و أيضا قيم N_A & $\hbar$, k , e .

إن القيم المقترحة هي : $h = 6.626\,069\,57 \cdot 10^{-34}$ Js, $e = 1.602\,176\,565 \cdot 10^{-19}$ C, $k =$

$1.380\,648\,8 \cdot 10^{-23}$ J/K and $N_A = 6.022\,141\,29 \cdot 10^{23}$ 1/mol .

تعريف الثانية سيتم الاحتفاظ به ، من أجل تجنب الإحكام المنخفض لكل القياسات المعروفة لـ G . و تفاصيل هذا المستقبل لـ SI الجديدة واردة في www.bipm.org/en/measurement-units/new-si و www.bipm.org/utils/pdf/si-brochure-draft-2016.pdf

معنى القياس

كل قياس هو مقارنة مع معيار . بالتالي أي قياس يتطلب مادة لتحقيق المعيار (حتى معيار السرعة) و الإشعاع لتحقيق المقارنة (تحدي لتحقيق المقارنة (تحدي e 162) . مبدأ القياس بالتالي يفترض أن المادة و الإشعاع موجودة و يمكن فصلهما بوضوح عن بعضهما البعض .

كل قياس ينتج نتيجة قياس . بالتالي كل قياس يقتضي تخزين النتيجة . عملية القياس بالتالي تقتضي أن الوضع قبل و بعد القياس يمكن تمييزه . و بمعنى آخر ، كل قياس هو عملية غير عكوسة .

كل قياس هو عملية . و بالتالي كل قياس يأخذ قدرا معينا من الوقت و قدرا معينا من الفراغ .

كل هذه الخواص للقياسات بسيطة و لكنها مهمة . انتبه عندما يحاول أحد إنكارها .

واحدات ثابت بلانك

نظرا لأن الشكل الدقيق للعديد من المعادلات يعتمد على جملة الواحدات فإن الفيزيائيين النظريين غالبا يستخدمون جمل واحدات أفضلية لإنتاج المعادلات البسيطة . الواحدات المختارة و القيم لثوابت الطبيعة مترابطة . في الفيزياء الميكروسكوبية فإن جملة واحدا تبلانك الطبيعية تستخدم غالبا و هي تعرف بوضع

$$c = 1, \hbar = 1, G = 1, k = 1, \varepsilon_0 = 1/4\pi \text{ and } \mu_0 = 4\pi;$$

---

*بعيدا عن الواحدات الدولية هناك واحدات إقليمية . أكثر الواحدات الإقليمية المستخدمة هي في المنطقة الرومانية

الميل يأتي من milia passum الذي يستخدم ليكون ألف (ضعف) خطوة كل منها حوالي 1480 mm و اليوم الميل البحري الذي عرف سابقا بأنه دقيقة من قوس سطح الأرض ، و الذي يعرف تماما بانه 1852m . و الانش أتى من unica/onzia (جزء من اثني عشر من القدم) . الرطل (من pondere يزن) و يستخدم لترجمة libra – ميزان – التي هي أصل الاختصار lb . حتى عادة عد الدزينات بدلا من العشرات هي من أصل روماني . و هذه وكل التشابهات المرحة الأخرى مثل الجملة التي فيها كل الواحدلات تبدأ بت f و تستخدم furlong/fortnight (الفرس/ اسبوعين) كواحدة للسرعة و هي الآن رسميا تعرف بأنها مضاعفات واحدات SI .

واحدات بلانك هي بالتالي تعرف من تشكيلات الثوابت الأساسية و تلك التي تقابل واحدات SI الأساسية معطاة في الجدول 10 * و الجدول أيضا مفيد من أجل تحويل المعادلات في الواحدات الطبيعية إلى واحدات SI (تحدي 163 e) تماما بتبديل كل كمية X بالمقدار X/X_{Pl} .

الجدول 10 – واحدات بلانك الطبيعية (غير المصححة)

الاسم	التعريف	القيمة
الواحدات الأساسية		
طول بلانك	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1.616\,0(12) \cdot 10^{-35}$ m
زمن بلانك	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$= 5.390\,6(40) \cdot 10^{-44}$ s
كتلة بلانك	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	$= 21.767(16)$ µg
تيار بلانك	$I_{Pl} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	$= 3.479\,3(22) \cdot 10^{25}$ A
درجة حرارة بلانك	$T_{Pl} = \sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	$= 1.417\,1(91) \cdot 10^{32}$ K
واحدات تجريبية		
سرعة بلانك	$v_{Pl} = c$	$= 0.3$ Gm/s
كمية الحركة الزاوية لبلانك	$L_{Pl} = \hbar$	$= 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js
فعل بلانك	$S_{aPl} = \hbar$	$= 1.1 \cdot 10^{-34}$ Js
إنتروبي بلانك	$S_{ePl} = k$	$= 13.8$ yJ/K
واحدات مركبة		

كثافة الكتلة لبلانك	ρ_{Pl}	=	$c^5/G^2\hbar$	= $5.2 \cdot 10^{96}\ \mathrm{kg/m^3}$
طاقة بلانك	E_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^5/G}$	= $2.0\ \mathrm{GJ} = 1.2 \cdot 10^{28}\ \mathrm{eV}$
كمية حركة بلانك	p_{Pl}	=	$\sqrt{\hbar c^3/G}$	= $6.5\ \mathrm{Ns}$
استطاعة بلانك	P_{Pl}	=	c^5/G	= $3.6 \cdot 10^{52}\ \mathrm{W}$
قوة بلانك	F_{Pl}	=	c^4/G	= $1.2 \cdot 10^{44}\ \mathrm{N}$
ضغط بلانك	p_{Pl}	=	$c^7/G\hbar$	= $4.6 \cdot 10^{113}\ \mathrm{Pa}$
تسارع بلانك	a_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/\hbar G}$	= $5.6 \cdot 10^{51}\ \mathrm{m/s^2}$
تردد بلانك	f_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/\hbar G}$	= $1.9 \cdot 10^{43}\ \mathrm{Hz}$
الشحنة الكهربائية لبلانك	q_{Pl}	=	$\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	= $1.9\ \mathrm{aC} = 11.7\ \mathrm{e}$
جهد بلانك	U_{Pl}	=	$\sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	= $1.0 \cdot 10^{27}\ \mathrm{V}$
مقاومة بلانك	R_{Pl}	=	$1/4\pi\varepsilon_0 c$	= $30.0\ \Omega$
سعة بلانك	C_{Pl}	=	$4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	= $1.8 \cdot 10^{-45}\ \mathrm{F}$
محارضة بلانك	L_{Pl}	=	$(1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	= $1.6 \cdot 10^{-42}\ \mathrm{H}$
الحقل الكهربائي لبلانك	E_{Pl}	=	$\sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	= $6.5 \cdot 10^{61}\ \mathrm{V/m}$

---

*الواحدات الطبيعية x_{Pl} المعطاة هنا هي تلك المستخدمة عادة اليوم أي تلك المعرفة باستخدام الثابت $\hbar$ و ليس كما فعل بلانك اصلا ، باستخدام الثابت $h = 2\pi\hbar$. الواحدات الكهرطيسية يمكن أيضا تعريفها بعوامل أخرى غير $4\pi\varepsilon_0$ في العلاقات : مثلا باستخدام $4\pi\varepsilon_0\alpha$ مع ثابت البنية الدقيقة α يعطي $q_{Pl} = e$. (صفحة 195) من اجل شرح الاعداد بين قوسين أنظر أدناه

الجدول 10 – واحدات بلانك الطبيعية (غير المصححة) تابع

الاسم	التعريف			القيمة
كثافة الفيض المغناطيسي لبلانك	B_{Pl}	=	$\sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	= $2.2 \cdot 10^{53}\ \mathrm{T}$

إن الواحدات الطبيعية مهمة لسبب آخر : متى سميت كمية بشكل غير محدد بأنها صغيرة بشكل لانهائي (أو كبيرة) فإن العبارة الصحيحة هي صغير مثل (أو كبير مثل) واحدة بلانك المصححة المقابلة و كما شرحنا في كل النص و خاصة في الجزء الأخير (مجلد VI ، صفحة 36) فإن هذا التعويض ممكن لأن اكثر واحدا تبلانك تعطي ضمن عامل تصحيح من مرتبة 1 ، والقيمة القصوى للقيمة المقاسة المقابلة هي ذات حد أعلى ما و ذات حد أدنى ما . لسوء الحظ عوامل التصحيح هذه

ليست معروفة بعد بشكل واسع . القيمة القصوى الصحيحة لكل قيمة قابلة للقياس في الطبيعة يتم الحصول عليها عندما G يعوض بـ 4G و $4\pi\varepsilon_0$ بـ $4\pi\varepsilon_0\alpha$ في كل مقادير بلانك . و هذه القيم القصوى او واحدا تبلانك المصححة هي واحدات طبيعية حقيقية . و تجاوز القيم القصوى من الممكن فقط في بعض الكميات الكبيرة (هل يمكنك ان تجد ايها ؟) (تحدي 164 s)

جمل واحدات أخرى

إن الهدف الأساسي للبحث في فيزياء الطاقة العالية هو حساب قوى كل التاثيرات المتبادلة و بالتالي ليس من العملي

وضع ثابت الجاذبية G مساويا للواحد كما في جملة بلانك للواحدات . لهذا السبب فإن فيزيائيي الطاقة العالية غالبا يضعون $c = \hbar = k = 1$ and $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$ * و يتركون فقط ثابت الجاذبية G في المعادلات

في هذه الجملة فقط توجد واحدة اساسية واحدة و لكن اختيارها حر وغالبا الطول المعياري يختار كواحدة اساسية و هو طول نموذج اصلي لكمية مقاسة . القيم القابلة للقياس الفيزيائية الاكثر اهمية ترتبط بالتالي بالشكل

$$
\begin{aligned}
1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{electric}}]\,, \\
1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T]\,, \\
1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropy}}] = \hbar = c = k = [\alpha]\,, \quad (116) \\
[l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{and} \\
[l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P]
\end{aligned}
$$

حيث نكتب $[x]$ من اجل واحدة المقدار x و باستخدام نفس الواحدة للزمن ، السعة و المحارضة ليس وفق ذوق الحياة اليومية و لكن و لذلك الكهربائيين لا يستخدمون هذه الجملة . **

---

*التعاريف الاخرى لثوابت التناسب في الديناميك الكهربائي تؤدي على جملة واحدة غوصية التي تستخدم غالبا في الحسابات النظرية و إن جملة واحدات هيفزايد – لورنتز و جملة الواحدات الالكتروستاتيكية و جملة الواحدات الكهرطيسية هي من بين الجمل الاخرى (مرجع 154)

**في القائمة ، l الطول ، E الطاقة ، F القوة و $E_{electric}$ الحقل الكهربائي و B الحقل المغناطيسي ، m الكتلة ، ρ كمية الحركة ، a التسارع ، f التردد ، I التيار الكهربائي ، U الجهد ، T درجة الحرارة ، v السرعة ، q الشحنة ، R المقاومة ، P الاستطاعة ، G ثابت الجاذبية .

إن صفحة الإنترنت www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html تعطي أداة لتحويل واحدات مختلفة لبعضها البعض

الباحثون في النسبية العامة غالبا يستخدمون جملة اخرى التي فيها نصف قطر شفارتزشيلد $r_S = 2Gm/c^2$ و $\hbar$ لها واحدة المساحة .

غالبا ، من أجل الحصول على انطباع عن الطاقات اللازمة لملاحظة اثر قيد الدرس فإن الطاقة القياسية تختار كواحدة اساسية و في فيزياء الجسيمات فان واحدة الطاقة الأكثر شيوعا هي الإلكترون فولت eV و تعرف بأنها الطاقة الحركية المكتسبة من قبل إلكترون عندما يتسارع بواسطة فرق كمون كهربائي يبلغ فولت واحد (بروتون فولت سيكون الاسم الأفضل) وبالتالي يملك قيمة $1\,\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$ او تقريبا :

$$1\,\text{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\text{aJ} \qquad (117)$$

الذي يمكن تذكره بسهولة اكبر. إن التبسيط $c = \hbar = 1$ يعطي $G = 6.9 \cdot 10^{-57}\ \mathrm{eV}^{-2}$ و يسمح للمرء باستخدام واحدة eV ايضا من أجل الكتلة ، درجة الحرارة ، التردد ، الزمن و الطول (تحدي e 165) مع التوافقات المقابلة $1\,\mathrm{eV} \equiv 1.8 \cdot 10^{-36}\,\mathrm{kg} \equiv 5.4 \cdot 10^{-28}\,\mathrm{Ns} \equiv 242\,\mathrm{THz} \equiv 11.6\,\mathrm{kK}$ and $1\,\mathrm{eV}^{-1} \equiv 4.1\,\mathrm{fs} \equiv 1.2\,\mu\mathrm{m}$

للحصول على بعض الفهم لواحدة eV فإن العلاقات التالية مفيدة . درجة حرارة الغرفة تؤخذ عادة مساوية إلى 20 °C أو 293 K و تقابل إلى طاقة حركية لجسيم تساوي 0.025 eV أو 4.0 zJ . أعلى طاقة جسيم قيست حتى الآن تنتمي للأشعة الكونية بطاقة 3.10^{20} eV أو 48 J . و هنا على الأرض تم صنع المسرع قادر على إنتاج طاقة تبلغ حوالي 105 GeV أو 17 nJ للإلكترونات و الإلكترونات المضادة و قادر على إنتاج طاقة تبلغ 14 TeV أو 2.2 µJ للبروتونات و سينتهي قريبا .

كلاهما مملوكان من شركة CERT في جنيف و لها محيط يبلغ 27km .

إن أخفض درجة حرارة تم قياسها حتى الان هي 280 pK في جملة نوى الروديوم داخل نظام تبريد خاص (مرجع 156) و داخل ذلك الكريوستات يمكن ألا تكون هناك حتى ابرد نقطة في كل الكون . الطاقة الحركية للجسيم تقابل درجة الحرارة تلك هي أيضا اصغر قيمة مقاسة قط و هي تقابل 24 feV أو $3.8\ \mathrm{vJ}=3.8\ .10^{-33}$ J . من أجل جسيمات معزولة فإن السجل يبدو أنه للنيوترونات : الطاقات الحركية التي تصل إلى 10^{-7} eV تم تحقيقها و التي تقابل أطوال موجة دوبروي المساوية إلى 60 nm .

فضول و تحديات مرحة حول الواحدات

طول بلانك هو تقريبا طول موجة دو برولي $\lambda_B = h/mv$ لرجل يمشي بشكل مريح $(m = 80\,\mathrm{kg},\ v = 0.5\,\mathrm{m/s})$ (مرجع 157) و الحركة بالتالي تسمى بشكل مقبول مشي بلانك

* *

كتلة بلانك تساوي كتلة حوالي 10^{19} بروتون . وهذا تقريبا كتلة جنين بشري بعمر حوالي عشرة ايام

* *

المقادير الأكثر دقة المقاسة في الطبيعة هي ترددات نجوم نابضة بالميلي ثانية معينة (مرجع 158) و تردد انتقالات ذرية ضيقة معينة ، و ثابت ريدبيرغ للهيدروجين الذري و الذي يمكن قياسه بدقة تعريف الثانية . و انتقال السيزيوم الذي يحدد الثانية له عرض خط نهائي الذي يحد من الدقة القابلة للتحقيق : الحد هو حوالي 14 خانة .

* *

الساعة الأكثر إحكاما التي بنيت قط باستخدام الأمواج الميكروية لها استقرار يبلغ 10^{-16} خلال وقت التشغيل مدة 500s (مرجع 159) و لفترات أطول من الزمن ، فإن القيمة القياسية في عام 1997 كانت حوالي 10^{-15} وكلن القيم حوالي 10^{-17} يبدو ضمن مطال التكنولوجيا (مرجع 160) . إن إحكام الساعات محدود بأزمنة القياس القصيرة ، و من أجل أزمنة قياس طويلة بواسطة الانزياحات ، أي بواسطة تأثيرات الأنظمة .إن منطقة أعلى استقرار تعتمد على نوع الساعة ،و عادة تقع بين 1ms و من أجل الساعات الضوئية و 5000 s للميزرات . النجوم النابضة هي النوع الوحيد من الساعات الذي من أجله هذه المنطقة غير معروفة بعد و بالتأكيد يقع عند أكثر من عشرين سنة ، و هو الزمن المنقضي وقت الكتابة منذ اكتشافها .

* *

أقصر زمن مقاس هي أعمار جسيمات اولية معينة . بشكل خاص عمر ميزونات D معينة (مرجع 161) التي قيست بأقل من 10^{-23} s . مثل هذه الأزمنة تقاس باستخدام حجرة الفقاعات حيث يتم تصوير المسار . هل يمكنك تقدير كم طول المسار ؟(تحدي 166 s) (هذا سؤال مخادع – إذا كان لا يمكن قياس الطول بواسطة مجهر ضوئي ، فأنت قمت بخطأ في حسابك .

* *

أطول أزمنة مصادفة في الطبيعة هي عمر نظائر مشعة معينة التي تصل إلى أكثر من 10^{15} سنة و الحد الأخفض هو لتفككات بروتونات معينة الأطول من 10^{32} سنة . وهذه الأزمنة بالتالي أطول بكثير من عمر الكون و المقدر بأنه أربعة عشر ألف مليون سنة (مرجع 162)

تغيرات الكميات غالبا من الأسهل بكثير أن تقاس أكثر من قيمها . مثلا في كواشف موجة الجاذبية ، الحساسية التي حققتها في 1992 كانت $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ من أجل أطول من مرتبة 1 m (مرجع 163) . بتعبير آخر من أجل كتلة حوالي متر مكعب من المعدن من الممكن قياس تغيرات الطول حوالي 3000 مرة أصغر من نصف قطر البروتون . هذه الحالات هي الان تفوقها مقاييس التداخل الحلقية . مقاييس التداخل الحلقية التي تقيس فروقات تردد تبلغ 10^{-21} قد تم صنعها و ما تزال تحسن (مرجع 164) .

الإحكام و دقة القياسات

القياسات هي أساس الفيزياء و كل قياس فيه خطأ . الأخطاء ناتجة عن نقص الإحكام ، أو نقص الدقة . و الإحكام يعني

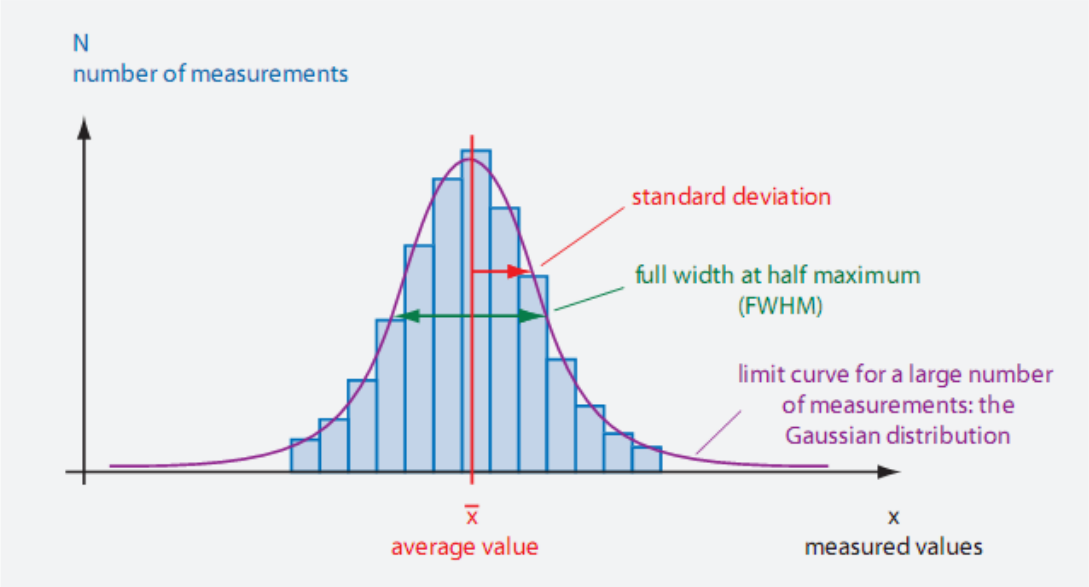
مقدار تكرار النتيجة عند تكرار القياس ، الدقة هي الدرجة التي تقابل بها النتيجة القيمة الفعلية .

نقص الإحكام ناتج عن الأخطاء العرضية / غير المقصودة أو العشوائية ، و هي تقاس بشكل أفضل بالانحراف المعياري ، عادة يرمز له بـ σ و يعرف بالشكل :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \,, \qquad (118)$$

حيث $\bar{x}$ متوسط القياسات x_i (هل يمكن أن تتخيل لماذا يستخدم n-1 في العلاقة بدلا من n ؟) (تحدي 167 s)

من أجل أكثر التجارب فإن توزع القياسات يميل لأن يكون توزع طبيعي ، أيضا يعرف بالتوزع الغوصي متى كان عدد القياسات يزداد . التوزيع المبين في الشكل 85 يوصف بالعلاقة :



$$N(x) \approx e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad . \qquad (119)$$

إن المربع σ^2 للانحراف المعياري أيضا يعرف بالتفاوت / التباين . من أجل التوزيع الغوصي لقيم القياس ، يكون $2.35\ \sigma$ هو العرض الكامل عند نصف القيمة الأعظمية (تحدي 168 e) .

إن نقص الدقة هو ناتج عن الأخطاء النظامية / المنهجية عادة هذه يمكن تقديرها فقط . و هذا التقدير غالبا يضاف للأخطاء العشوائية لإنتاج الخطأ التجريبي الكلي ، في بعض الأحيان يعرف بالارتياب الكلي (المرجع 165). والخطأ النسبي أو الارتياب هو النسبة بين الخطأ و القيمة المقاسة .

مثلا قياس احترافي سيعطي نتيجة مثل 0.312 (6) m . العدد بين قوسين هو الانحراف المعياري σ بواحدات الأرقام الأخيرة . كما بينا أعلاه ، يفترض التوزيع الغوصي لنتائج القياس . بالتالي قيمة 0.312 (6) m تقتضي أن القيمة الفعلية يتوقع أن تقع بين :

- ضمن 1σ باحتمال 68.3% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.006 m
- ضمن 2σ باحتمال 95.4% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.012 m
- ضمن 3σ باحتمال 99.73% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.018 m
- ضمن 4σ باحتمال 99.9937% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.024 m
- ضمن 5σ باحتمال 99.99943% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.030 m
- ضمن 6σ باحتمال 99.999 999% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.036 m
- ضمن 7σ باحتمال 99.999 999 999 74% وبالتالي في هذا المثال هي ضمن 0.312±0.041 m

(تحدي 170s) هل الأرقام السابقة صحيحة ؟

لاحظ أن الانحرافات المعيارية لها رقم واحد ، عليك أن تكون خبيرا عالميا لتستخدم اثنين ، و أبله لتستخدم أكثر . و إذا لم يعطى أي انحراف معياري يفترض أنه يساوي (1) . و بالنتيجة بين المحترفين 1 km & 1000 m ليسا نفس الطول .

ما الذي يحدث للأخطاء عندما قياس قيمتين A & B يجمعان أو يطرحان ؟ إذا كانت كل القياسات مستقلة - أو غير مترابطة – فإن الانحراف المعياري للمجموع و الفرق يعطى بالشكل $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$ و من أجل الجداء أو النسبة للقيمتين المقاستين غير المترابطتين C & D النتيجة هي $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$; حيث ρ حدود تمثل الانحرافات المعيارية النسبية .

افترض أنك تقيس جسما يتحرك لمتر واحد في 0.3 s : ما هي قيمة السرعة المقاسة ؟ (تحدي 171 s)

حدود الإحكام

ما حدود الدقة و الإحكام ؟ ليس هناك طريقة من حيث المبدأ لقياس مسافة x بإحكام أعلى من 61 رقم ، لأنه في الطبية النسبة بين أكبر و أصغر طول مقاس هو $\Delta x/x > l_{\mathrm{pl}}/d_{\mathrm{hortzon}} = 10^{-61}$. (هل هذه النسبة أيضا صالحة للقوة أو الحجم ؟) (تحدي (تحدي 172e) . في المجلد النهائي لكتابنا دراسات الساعات و قضبان المتر تقوي هذا النظري ؟ (مجلد VI ، صفحة 93) .

لكن ليس من الصعب استنتاج مزيد من الحدود العملية الصارمة . لا يوجد آلة يمكن تخيلها تستطيع قياس كميات بإحكام أعلى من قياس قطر الأرض ضمن أصغر طول مقاس ، حوالي 10^{-19} m أي هذا حوالي 26 رقم للإحكام . و باستخدام حد أكثر واقعية البالغ لآلة بقياس 1000 m يقتضي حد من 22 رقم / خانة . ذا كما هو متوقع أعلاه ، قياسات الزمن فعلا تحقق 17 خانة من الإحكام فإنها قرب الحد العملي ، لأنه بعيدا عن القياس ، ليس هناك قيد عملي إضافي : الكلفة . في الحقيقة الخانة الإضافية في إحكام القياس غالبا تعني خانة إضافية في كلفة التجهيزات .

الثوابت الفيزيائية

في الفيزياء الملاحظة العامة تستنتج من الملاحظة الأساسية . بالنتيجة العديد من القياسات يمكن استنتاجها من القياسات الأكثر أساسية . القياسات الأكثر أساسية هي تلك العائدة للثوابت الفيزيائية .

الجداول التالية تعطي أفضل القيم العالمية لأكثر الثوابت الفيزيائية أهمية و خواصها الجسيمات – في واحدات SI و في بعض الواحدات الشائعة أيضا – كما نشرت في المراجع القياسية (المرجع 166) . القيم هي متوسطات عالمية لأفضل القياسات التي تمت حتى الآن . و كما هو ومعتاد فإن الأخطاء التجريبية التي تتضمن العشوائية و الأخطاء النظامية المقدرة ، معبر عنها بإعطاء الانحراف المعياري في آخر الأرقام . و في الحقيقة وزراء كل من الأعداد في الجداول التالية هناك قصة طويلة تستحق أن تروى ولكن ليس هناك مجال كاف لذلك (مرجع 167)

من حيث المبدأ كل الخواص الكمية للمادة يمكن حسابها بواسطة نظرية الكم و قيم الثوابت الفيزيائية المعينة (مرجع مرجع 166) . مثلا اللون ، الكثافة ، و خواص المرونة يمكن توقعها باستخدام المعادلات لنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات و قيم الثوابت الأساسية التالية .

الجدول 11 الثوابت الفيزيائية الأساسية

الكمية	الرمز	القيمة بواحدات SI	الارتياب [a]
الثوابت التي تعرف واحدات القياس SI			
سرعة الضوء في الخلاء[c]	c	299 792 458 m/s	0
النفوذية في الخلاء [c]	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	0
السماحية في الخلاء [c]	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	= 1.256 637 061 435 ... μH/m	0
ثابت بلانك الأصلي	h	8.854 187 817 620 ... pF/m	0
ثابت بلانك	$\hbar$	$6.626\,069\,57(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$4.4 \cdot 10^{-8}$
كم الفعل		$1.054\,571\,726(47) \cdot 10^{-34}$ Js	$4.4 \cdot 10^{-8}$
شحنة البوزيترون	e	0.160 217 656 5(35) aC	$2.2 \cdot 10^{-8}$
ثابت بولتزمان	k	$1.380\,6488(13) \cdot 10^{-23}$ J/K	$9.1 \cdot 10^{-7}$
ثابت الجاذبية	G	$6.673\,84(80) \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$1.2 \cdot 10^{-4}$
ثابت اقتران الجاذبية	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2.076\,50(25) \cdot 10^{-43}$ $s^2/kg\,m$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
الثوابت الأساسية (المجهولة الأصل)			
عدد أبعاد الفراغ –الزمن		3 + 1	0 [b]
ثابت البنية الدقيقة [d] أو	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c}$	1/137.035 999 074(44)	$3.2 \cdot 10^{-10}$
ثابت اقتران e.m.	$= g_{em}(m_e^2 c^2)$	= 0.007 297 352 5698(24	$3.2 \cdot 10^{-10}$
ثابت اقتران فيرمي [d]أو	$G_F/(\hbar c)^3$	$1.166\,364(5) \cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$4.3 \cdot 10^{-6}$
ثابت الاقتران الضعيف	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	1/30.1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
زاوية المزج الضعيف	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	0.231 24(24)	$1.0 \cdot 10^{-3}$
	$\sin^2\theta_W$ (on shell) $= 1 - (m_W/m_Z)^2$	0.2224(19)	$8.7 \cdot 10^{-3}$
ثابت الاقتران القوي [d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	0.118(3)	$25 \cdot 10^{-3}$

الجدول 11 (تابع) الثوابت الفيزيائية الأساسية

الكمية	الرمز	القيمة بواحدات SI	الارتياب [a]
مصفوفة مزج الكوارك CKM	$\|V\|$	$\begin{pmatrix} 0.97428(15) & 0.2253(7) & 0.00347(16) \\ 0.2252(7) & 0.97345(16) & 0.0410(11) \\ 0.00862(26) & 0.0403(11) & 0.999152(45) \end{pmatrix}$	
ثابت Jarlskog	J	$2.96(20) \cdot 10^{-5}$	
PMNS لمزج النيوترينو m	P	$\begin{pmatrix} 0.82 & 0.55 & -0.15 + 0.038i \\ -0.36 + 0.020i & 0.70 + 0.013i & 0.61 \\ 0.44 + 0.026i & -0.45 + 0.017i & 0.77 \end{pmatrix}$	
كتل الجسيمات الأولية (المجهولة الأصل)			
كتلة الإلكترون	m_e	$9.109\,382\,91(40) \cdot 10^{-31}$ kg	$4.4 \cdot 10^{-8}$
		$5.485\,799\,0946(22) \cdot 10^{-4}$ u	$4.0 \cdot 10^{-10}$
		0.510 998 928(11) MeV	$2.2 \cdot 10^{-8}$
كتلة الميوون	m_μ	$1.883\,531\,475(96) \cdot 10^{-28}$ kg	$5.1 \cdot 10^{-8}$
		0.113 428 9267(29) u	$2.5 \cdot 10^{-8}$
كتلة تاو		105.658 3715(35) MeV	$3.4 \cdot 10^{-8}$
كتلة النيوترينو .EI	m_τ	1.776 82(16) GeV/c^2	
كتلة نيوترينو الميوون	m_{ν_e}	< 2 eV/c^2	
كتلة نيوترينو تاو	m_{ν_e}	< 2 eV/c^2	
كتلة الكوارك الصاعد	m_{ν_e}	< 2 eV/c^2	
كتلة الكوارك النازل	u	1.8 to 3.0 MeV/c^2	
كتلة الكوارك الغريبة	d	4.5 to 5.5 MeV/c^2	
كتلة الكوارك الساحرة	s	95(5) MeV/c^2	
كتلة الكوارك السفلي	c	1.275(25) GeV/c^2	
كتلة الكوارك العلوي	b	4.18(17) GeV/c^2	
كتلة الفوتون	t	173.5(1.4) GeV/c^2	
كتلة البوزون W	γ	< $2 \cdot 10^{-54}$ kg	
كتلة البوزون Z	$W^\pm$	80.385(15) GeV/c^2	
كتلة هيغز	Z^0	91.1876(21) GeV/c^2	
كتلة الغلوون	H	126(1) GeV/c^2	
	$g_{1...8}$	c. 0 MeV/c^2	
كتل الجسيمات المركبة			
كتلة البروتون	m_p	$1.672\,621\,777(74) \cdot 10^{-27}$ kg	$4.4 \cdot 10^{-8}$
		1.007 276 466 812(90) u	$8.9 \cdot 10^{-11}$
		938.272 046(21) MeV	$2.2 \cdot 10^{-8}$
كتلة النيوترون	m_n	$1.674\,927\,351(74) \cdot 10^{-27}$ kg	$4.4 \cdot 10^{-8}$
		1.008 664 916 00(43) u	$4.2 \cdot 10^{-10}$
		939.565 379(21) MeV	$2.2 \cdot 10^{-8}$
وحدة الكتلة الذرية	$m_{..} = m_{12C}/12 = 1$ u	1.660 538 921(73) yg	$4.4 \cdot 10^{-8}$

[a] الارتياب : الانحراف المعياري لأخطاء القياس

[b] : فقط يقاس من 10^{-19} m – 10^{26} m

[c] ثابت تعريف

[d] كل ثوابت الاقتران تعتمد على انتقال كمية الحركة 4 ، كما مشروح في الفقرة حول إعادة التطبيع / التسوية . (صفحة 131) . ثابت البنية الدقيقة هو الاسم التقليدي لثابت الاقتران الكهرطيسي g_{em} في حال نقل كمية الحركة 4 البالغ $Q^2 = c^2 m_e^2$ الذي هو اصغر كمية ممكنة . و عند انتقالات عالية لكمية الحركة فإنه يملك قيم أكبر مثل $g_{em}(Q^2 = c^2 M_W^2) \approx 1/128$

على العكس فإن ثابت الاقتران القوي يملك قيم أخفض عند انتقال كمية حركة أعلى مثل $\alpha_s(34\,\mathrm{GeV}) = 0.14(2)$

لماذا كل هذه الثوابت الفيزيائية الأساسي لها القيم التي لها ؟ بالنسبة لأي ثابت أساسي ذو بعد مثل كم الفعل $\hbar$ فإن القيمة العددية لها فقط معنى تاريخي . و هي $1.054 \cdot 10^{-34}$ Js بسبب تعريف SI للجول و الثانية .

السؤال هو لماذا قيمة ثابت البعد ليست أكبر أو أصغر بالتالي دائما تحتاج للمرء أن يفهم أصل بعض الأعداد عديمة الأبعاد التي تعطي النسبة بين ثابت و الواحدة الطبيعية المقابلة المعرف بالشكل $\hbar$, G , c و α .

(صفحة 207) : مزيد من التفاصيل وقيم الواحدات الطبيعية معطاة لاحقا . إن فهم أحجام الذرات ، الناس ، الأشجار ، و النجوم و فترة العمليات الجزيئية و الذرية أو كتلة النوى و الجبال يقتضي فهم النسب بين هذه القيم و الواحدات الطبيعية المقابلة . و الشيء الأساسي لفهم الطبيعة هو بالتالي فهم كل النسب ، و بالتالي كل الثوابت عديمة الأبعاد . و إن السعي لفهم كل النسب بما فيها ثوابت البنى الدقيقة α نفسها يكتمل في المجلد الأخير من مغامرتنا .

الثوابت الأساسية تعطي القياسات عالية الإحكام التالية .

الجدول 11 (تابع) الثوابت الفيزيائية المشتقة

الكمية	الرمز	القيمة بواحدات SI	الارتياب
كم الدوران	$h/2m_e$	$3.636\,947\,5520(24)\cdot10^{-4}$ m^2/s	$6.5\cdot10^{-10}$
شحنة البوزيترون النوعية	e/m_e	$1.758\,820\,088(39)\cdot10^{11}$ C/kg	$2.2\cdot10^{-8}$
تردد السيكلوترون للإلكترون	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27.992 491 10(62) GHz/T	$2.2\cdot10^{-8}$
العزم المغناطيسي للإلكترون	μ_e	$-9.284\,764\,30(21)\cdot10^{-24}$ J/T	$2.2\cdot10^{-8}$
	μ_e/μ_B	$-1.001\,159\,652\,180\,76(27)$	$2.6\cdot10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1.838\,281\,970\,90(75)\cdot10^{3}$	$4.1\cdot10^{-10}$
العامل g للإلكترون	g_e	$-2.002\,319\,304\,361\,53(53)$	$2.6\cdot10^{-13}$
نسبة كتلة المون – الإلكترون	m_μ/m_e	206.768 2843(52)	$2.5\cdot10^{-8}$
العزم المغناطيسي للمون	μ_μ	$-4.490\,448\,07(15)\cdot10^{-26}$ J/T	$3.4\cdot10^{-8}$
العامل g للمون	g_μ	$-2.002\,331\,8418(13)$	$6.3\cdot10^{-10}$
نسبة كتلة البروتون – الإلكترون	m_p/m_e	1 836.152 672 45(75)	$4.1\cdot10^{-10}$
شحنة البروتون النوعية	e/m_p	$9.578\,833\,58(21)\cdot10^{7}$ C/kg	$2.2\cdot10^{-8}$
طول موجة كومبتون للبروتون	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1.321 409 856 23(94) fm	$7.1\cdot10^{-10}$
الماغنترون النووي	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5.050\,783\,53(11)\cdot10^{-27}$ J/T	$2.2\cdot10^{-8}$
العزم المغناطيسي للبروتون	μ_p	$1.410\,606\,743(33)\cdot10^{-26}$ J/T	$2.4\cdot10^{-8}$
	μ_p/μ_B	$1.521\,032\,210(12)\cdot10^{-3}$	$8.1\cdot10^{-9}$
	μ_p/μ_N	2.792 847 356(23)	$8.2\cdot10^{-9}$
	$\gamma_p = 2\mu_p/\hbar$	$2.675\,222\,005(63)\cdot10^{8}$ Hz/T	$2.4\cdot10^{-8}$
	g_p	5.585 694 713(46)	$8.2\cdot10^{-9}$
	m_n/m_e	1 838.683 6605(11)	$5.8\cdot10^{-10}$
	m_n/m_p	1.001 378 419 17(45)	$4.5\cdot10^{-10}$
	$\lambda_{C,n} = h/m_n c$	1.319 590 9068(11) fm	$8.2\cdot10^{-10}$
	μ_n	$-0.966\,236\,47(23)\cdot10^{-26}$ J/T	$2.4\cdot10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1.041\,875\,63(25)\cdot10^{-3}$	$2.4\cdot10^{-7}$
	μ_n/μ_N	$-1.913\,042\,72(45)$	$2.4\cdot10^{-7}$
ثابت ستيفان – بولتزمان	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56.703 73(21) nW/m^{2}K^4	$3.6\cdot10^{-6}$
ثابت إزاحة فين	$b = \lambda_{max} T$	2.897 7721(26) mmK	$9.1\cdot10^{-7}$
الإلكترون فولت		58.789 254(53) GHz/K	$9.1\cdot10^{-7}$
ثابت أجزاء تحويل الإنتروبي	eV	$1.602\,176\,565(35)\cdot10^{-19}$ J	$2.2\cdot10^{-8}$
محتوى الطاقة في TNT	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0.956 994 5(9) J/K	$9.1\cdot10^{-7}$
		3.7 to 4.0 MJ/kg	$4\cdot10^{-2}$

[a] من أجل الكتلة اللانهائية للنواة

بعض الخواص المفيدة لبيئتنا المحلية معطاة في الجدول التالي :

الجدول 12 الثوابت الفيزيائية المشتقة

الكمية	الرمز	القيمة بواحدات SI	الارتياب
مقاومة الموجة في الخلاء	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376.730 313 461 77... Ω	0
عدد أفوغادرو	N_A	$6.022\,141\,29(27) \cdot 10^{23}$	$4.4 \cdot 10^{-8}$
عدد لوشميدت عند 273.15K &101325Pa	N_L	$2.686\,7805(24) \cdot 10^{23}$	$9.1 \cdot 10^{-7}$
ثابت فاراداي	$F = N_A e$	96 485.3365(21) C/mol	$2.2 \cdot 10^{-8}$
ثابت الغاز العام	$R = N_A k$	8.314 4621(75) J/mol K	$9.1 \cdot 10^{-7}$
الحجم المولي لغاز مثالي عند 273.15K &101325Pa	$V = RT/p$	22.413 968(20) l/mol	$9.1 \cdot 10^{-7}$
ثابت ريدبيرغ [a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$10\,973\,731.568\,539(55)\ m^{-1}$	$5 \cdot 10^{-12}$
كم الناقلية	$G_0 = 2e^2/h$	77.480 917 346(25) μS	$3.2 \cdot 10^{-10}$
كم الفيض المغناطيسي	$\varphi_0 = h/2e$	2.067 833 758(46) pWb	$2.2 \cdot 10^{-8}$
نسبة تردد جوزيفسون	$2e/h$	483.597 870(11) THz/V	$2.2 \cdot 10^{-8}$
ثابت فون كليتسينغ	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812.807 4434(84) Ω	$3.2 \cdot 10^{-10}$
ماغنترون بور	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9.274 009 68(20) yJ/T	$2.2 \cdot 10^{-8}$
نصف قطر الإلكترون الكلاسيكي	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 c^2 m_e$	2.817 940 3267(27) fm	$9.7 \cdot 10^{-10}$
طول موجة كومبتون للإلكترون	$\lambda_C = h/m_e c$	2.426 310 2389(16) pm	$6.5 \cdot 10^{-10}$
	$\lambda\!\!\!^{-}_C = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0.386 159 268 00(25) pm	$6.5 \cdot 10^{-10}$
نصف قطر بور [a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52.917 721 092(17) pm	$3.2 \cdot 10^{-10}$

الجدول 12 (تابع) الثوابت الفيزيائية المشتقة

الكمية	الرمز	القيمة بواحدات SI	الارتياب
كم الدوران	$h/2m_e$	$3.636\,947\,5520(24)\cdot10^{-4}$ m²/s	$6.5\cdot10^{-10}$
شحنة البوزيترون النوعية	e/m_e	$1.758\,820\,088(39)\cdot10^{11}$ C/kg	$2.2\cdot10^{-8}$
تردد السيكلوترون للإلكترون	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27.992 491 10(62) GHz/T	$2.2\cdot10^{-8}$
العزم المغناطيسي للإلكترون	μ_e	$-9.284\,764\,30(21)\cdot10^{-24}$ J/T	$2.2\cdot10^{-8}$
	μ_e/μ_B	$-1.001\,159\,652\,180\,76(27)$	$2.6\cdot10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1.838\,281\,970\,90(75)\cdot10^{3}$	$4.1\cdot10^{-10}$
العامل g للإلكترون	g_e	$-2.002\,319\,304\,361\,53(53)$	$2.6\cdot10^{-13}$
نسبة كتلة المون – الإلكترون	m_μ/m_e	206.768 2843(52)	$2.5\cdot10^{-8}$
العزم المغناطيسي للمون	μ_μ	$-4.490\,448\,07(15)\cdot10^{-26}$ J/T	$3.4\cdot10^{-8}$
العامل g للمون	g_μ	$-2.002\,331\,8418(13)$	$6.3\cdot10^{-10}$
نسبة كتلة البروتون – الإلكترون	m_p/m_e	1 836.152 672 45(75)	$4.1\cdot10^{-10}$
شحنة البروتون النوعية	e/m_p	$9.578\,833\,58(21)\cdot10^{7}$ C/kg	$2.2\cdot10^{-8}$
طول موجة كومبتون للبروتون	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1.321 409 856 23(94) fm	$7.1\cdot10^{-10}$
الماغنترون النووي	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5.050\,783\,53(11)\cdot10^{-27}$ J/T	$2.2\cdot10^{-8}$
العزم المغناطيسي للبروتون	μ_p	$1.410\,606\,743(33)\cdot10^{-26}$ J/T	$2.4\cdot10^{-8}$
	μ_p/μ_B	$1.521\,032\,210(12)\cdot10^{-3}$	$8.1\cdot10^{-9}$
	μ_p/μ_N	2.792 847 356(23)	$8.2\cdot10^{-9}$
	$\gamma_p = 2\mu_p/\hbar$	$2.675\,222\,005(63)\cdot10^{8}$ Hz/T	$2.4\cdot10^{-8}$
	g_p	5.585 694 713(46)	$8.2\cdot10^{-9}$
	m_n/m_e	1 838.683 6605(11)	$5.8\cdot10^{-10}$
	m_n/m_p	1.001 378 419 17(45)	$4.5\cdot10^{-10}$
	$\lambda_{C,n} = h/m_n c$	1.319 590 9068(11) fm	$8.2\cdot10^{-10}$
	μ_n	$-0.966\,236\,47(23)\cdot10^{-26}$ J/T	$2.4\cdot10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1.041\,875\,63(25)\cdot10^{-3}$	$2.4\cdot10^{-7}$
	μ_n/μ_N	−1.913 042 72(45)	$2.4\cdot10^{-7}$
ثابت ستيفان – بولتزمان	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56.703 73(21) nW/m²K⁴	$3.6\cdot10^{-6}$
ثابت إزاحة فين	$b = \lambda_{max} T$	2.897 7721(26) mmK	$9.1\cdot10^{-7}$
الإلكترون فولت		58.789 254(53) GHz/K	$9.1\cdot10^{-7}$
ثابت أجزاء تحويل الإنتروبي	eV	$1.602\,176\,565(35)\cdot10^{-19}$ J	$2.2\cdot10^{-8}$
محتوى الطاقة في TNT	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0.956 994 5(9) J/K	$9.1\cdot10^{-7}$
		3.7 to 4.0 MJ/kg	$4\cdot10^{-2}$

[a] من أجل الكتلة اللانهائية للنواة

بعض الخواص المفيدة لبيئتنا المحلية معطاة في الجدول التالي :

الجدول 13 الثوابت الفلكية

الكمية	الرمز	القيمة
السنة المدارية 1990 [a]	a	31 556 925.974 7 s
السنة المدارية 1994	a	31 556 925.2 s
اليوم الفلكي المتوسط	d	$23^h56'4.090\,53''$
المسافة المتوسطة للأرض –الشمس [b]		149 597 870.691(30) km
الوحدة الفلكية [b]	AU	149 597 870 691 m
السنة الضوئية ،استنادا إلى سنة جوليان [b]	al	9.460 730 472 5808 Pm
بارسيك / فرسخ نجمي Parsec	pc	30.856 775 806 Pm = 3.261 634 al
كتلة الأرض	$M_{♁}$	$5.973(1) \cdot 10^{24}$ kg
ثابت الجاذبية المركزي الأرضي	GM	$3.986\,004\,418(8) \cdot 10^{14}\ m^3/s^2$
طول الأرض الجاذبي	$l_{♁} = 2GM/c^2$	8.870 056 078(16) mm
نصف قطر الأرض الاستوائي [c]	$R_{♁eq}$	6378.1366(1) km
نصف قطر الأرض القطبي [c]	$R_{♁p}$	6356.752(1) km
تسطح الأرض [c]	$e_{♁}$	10 001.966 km (average) 1/298.25642(1)
كثافة الأرض المتوسطة	$\rho_{♁}$	5.5 Mg/m³
عمر الأرض	$T_{♁}$	4.50(4) Ga = 142(2) Ps
جاذبية الأرض العادية	g	9.806 65 m/s²
الضغط الجوي القياسي للأرض	re p_0	101 325 Pa
نصف قطر القمر	$R_{☾\,v}$	1738 km in direction of Earth
نصف قطر القمر	$R_{☾\,h}$	1737.4 km in other two directions
كتلة القمر	$M_{☾}$	$7.35 \cdot 10^{22}$ kg
مسافة القمر المتوسطة [d]	$d_{☾}$	384 401 km
مسافة القمر المتوسطة عند الحضيض [d]		typically 363 Mm, historical minimum 359 861 km
مسافة القمر المتوسطة عند الأوج [d]		typically 404 Mm, historical maximum 406 720 km
حجم القمر النظامي [e]		average 0.5181° = 31.08′, minimum 0.49°, maximum 0.55°
الكثافة المتوسطة للقمر	$\rho_{☾}$	3.3 Mg/m³
جاذبية سطح القمر	$g_{☾}$	1.62 m/s²
	$p_{☾}$	from 10^{-10} Pa (night) to 10^{-7} Pa (day)
كتلة المشتري	$M_{♃}$	$1.90 \cdot 10^{27}$ kg
نصف قطر المشتري ، الإستوائي	$R_{♃}$	71.398 Mm
نصف قطر المشتري ، القطبي	$R_{♃}$	67.1(1) Mm
مسافة المشتري المتوسطة عن الشمس	$D_{♃}$	778 412 020 km
جاذبية سطح المشتري	$g_{♃}$	24.9 m/s²
الضغط الجوي للمشتري	$p_{♃}$	from 20 kPa to 200 kPa
كتلة الشمس	$M_{☉}$	$1.988\,43(3) \cdot 10^{30}$ kg
طول الشمس الجاذبي	$2GM_{☉}/c^2$	2.953 250 08(5) km
ثابت الجاذبية في مركز الشمس	$GM_{☉}$	$132.712\,440\,018(8) \cdot 10^{18}\ m^3/s^2$

الجدول 13 (تابع) الثوابت الفلكية

الكمية	الرمز	القيمة
سطوع الشمس	$L_\odot$	384.6 YW
نصف قطر الشمس الإستوائي	$R_\odot$	695.98(7) Mm
		0.53° average; minimum on fourth of July (aphelion) 1888 ″, maximum on fourth of January (perihelion) 1952 ″
حجم الشمس الزاوي	$\rho_\odot$	1.4 Mg/m^3
الكثافة المتوسطة للشمس	AU	149 597 870.691(30) km
المسافة المتوسطة للشمس	$T_\odot$	4.6 Ga
عمر الشمس	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
سرعة الشمس حول مركز المجرة		
السرعة الشمسية مقابل الخلفية الكونية	$v_{\odot b}$	370.6(5) km/s
جاذبية سطح الشمس	$g_\odot$	274 m/s^2
الضغط الجوي للشمس	$p_\odot$	15 kPa
المسافة إلى مركز درب التبانة		8.0(5) kpc = 26.1(1.6) kal
عمر درب التبانة		13.6 Ga
حجم درب التبانة		*c.* 10^{21} m or 100 kal
كتلة درب التبانة		10^{12} solar masses, *c.* $2 \cdot 10^{42}$ kg
أكثر العناقيد المجرية بعدا المعروفة	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9.6 \cdot 10^9$ al

[a] ثابت تعريف ، من الاعتدال الربيعي للاعتدال التالي ، وقد استخدم لتعرف الثانية . (تذكر : π ثانية هو حوالي نانوقرن) والقيمة في عام 1990 هي أقل بحوالي 0.7s تقابل تباطؤ تقريبا 0.2 ms/a . (انتبه : لماذا؟) (تحدي 173 s) هناك حتى علاقة تجريبية لتغير طول السنة مع الزمن (المرجع) هناك حتى علاقة تجريبية لتغير طول السنة مع الزمن (المرجع 168) .

[b] الإحكام المذهل فعلا في المسافة المتوسطة للأرض – الشمس هو فقط الإحكام المذهل فعلا في المسافة المتوسطة للأرض – الشمس هو فقط 30 m ينتج من المتوسطات الزمنية للإشارات المرسلة من الأقمار الدوارة فايكنغ و المركبات التي حطت على المريخ المأخوذة خلال فترة عشرين عاما . لاحظ أن الاتحاد الدولي للفلك يميز المسافة المتوسطة للأرض – الشمس من الوحدة الفكية نفسها ، والأخيرة تعرف بأنها طول ثابت و دقيق . أيضا السنة الضوئية هي وحدة تعرف بعدد دقيق من قبل IAU . و لمزيد من التفاصيل أنظر www.iau.org/public/measuring

[c] شكل الأرض يوصف بشكل أكثر إحكاما بواسطة نظام الجيوديزيا العالمي . آخر إصدار يعود لعام 1984 و من أجل عرض شامل لخلفيته و تفاصيله ، أنظر موقع www.wgs84.com . اتحاد الجيوديزيا الدولي دقق البيانات في عام 2000 و إن أنصاف أقطار و التسطح المعطاة هنا ، هي من أجل نظام المد و الجزر الوسطي . وهي تختلف عن تلك العائدة لنظام المد و الجزر الصفري و الأنظمة الأخرى بمقدار 0.7 m تقريبا . و التفاصيل تشكل علما بذاته .

[d] مقاسة من المركز إلى المركز . لإيجاد الموضع الدقيق للقمر في السماء عند تاريخ معين أنظر صفحة www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html . من أجل الكواكب أنظر الصفحة

www.fourmilab.ch/solar/solar.html و الصفحات الأخرى في نفس الموقع .

[e] الزوايا معرفة كالتالي : درجة واحدة = 1° = π/180 rad ، دقيقة واحدة = 1' = 1°/60 ، ثانية واحدة = 1" = 1'/60

. إن الواحدات القديمة الدقيقة الثالثة و الدقيقة الرابعة كل منها تساوي جزء من ستين من السابق ، و لم تعد تستعمل الآن . (الدقيقة أصلا تعني صغر جدا كما تزال في الإنجليزية الحديثة) .

بعض خواص الطبيعة بشكل كبير ورادة في الجدول التالي (إذا أردت تحديا يمكنك تحديد فيما إذا كانت أي خاصة من الكون نفسها واردة ؟) (تحدي 174 s) .

الجدول 14 الثوابت الكونية

الكمية	الرمز	القيمة
الثابت الكوني	Λ	$c.\,1 \cdot 10^{-52}\ \mathrm{m}^{-2}$
عمر الكون [a](محددا من الفراغ – الزمن ، عن طريق التمدد باستخدام النسبية العامة)	t_0	$4.333(53) \cdot 10^{17}\ \mathrm{s} = 13.8(0.1) \cdot 10^{9}\ \mathrm{a}$
عمر الكون [a](محددا من المادة ، عن طريق المجرات و النجوم باستخدام نظرية الكم)	H_0 $= h_0 \cdot 100\ \mathrm{km/s}$	over $3.5(4) \cdot 10^{17}\ \mathrm{s} = 11.5(1.5) \cdot 10^{9}\ \mathrm{a}$
بارامتر هابل [a]	h_0	$2.3(2) \cdot 10^{-18}\ \mathrm{s}^{-1} = 0.73(4) \cdot 10^{-10}\ \mathrm{a}^{-1}$
بارامتر هابل المخفض [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	$:= h_0 \cdot 1.0227 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{a}^{-1}$
بارامتر التباطؤ [a]	$d_0 = 3ct_0$	0.71(4)
المسافة الأفقية للكون [a]		–0.66(10)
طبولوجيا الكون		$40.0(6) \cdot 10^{26}\ \mathrm{m} = 13.0(2)\ \mathrm{Gpc}$
عدد أبعاد الفضاء		trivial up to 10^{26} m
	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	3, for distances up to 10^{26} m
الكثافة الحرجة للكون		$h_0^2 \cdot 1.878\,82(24) \cdot 10^{-26}\ \mathrm{kg/m^3}$
	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	$= 0.95(12) \cdot 10^{-26}\ \mathrm{kg/m^3}$
بارامتر الكثافة (الكلية) [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	1.02(2)
بارامتر كثافة بايرون [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/$	0.044(4)
بارامتر كثافة الطاقة الداكنة / المظلمة [a]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0.23(4)
بارامتر حالة الطاقة الداكنة / المظلمة	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0.001 to 0.05
	$w = p_X/\rho_X$	0.73(4)
	m_b	–1.0(2)
كتلة بايرون		$1.67 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
كثافة عدد بايرون	n_s	$0.25(1)\ /\mathrm{m}^3$
كثافة المادة الساطعة	n_b	$3.8(2) \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg/m^3}$
النجوم في الكون البايرونات في الكون	T_0	$10^{22\pm1}$
درجة حرارة خلفية الأمواج الميكروية	n_γ	$10^{81\pm1}$
الفوتونات في الكون	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	2.725(1) K
كثافة طاقة الفوتون		10^{89}
كثافة عدد الفوتون		$4.6 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg/m^3}$
	$\sqrt{S}$	$410.89\ /\mathrm{cm}^3$ or $400\ /\mathrm{cm}^3 (T_0/2.7\ \mathrm{K})^3$
مطال اضطراب الكثافة	$\sqrt{T}$	$5.6(1.5) \cdot 10^{-6}$
مطال موجة الجاذبية	σ_8	$< 0.71\sqrt{S}$
تذبذبات الكتلة عند 8Mpc	n	0.84(4)
الدليل السلمي	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	0.93(3)
دوران الدليل السلمي		–0.03(2)
طول بلانك	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$ t_0	$1.62 \cdot 10^{-35}\ \mathrm{m}$

الجدول 60 (تابع) الثوابت الكونية

الكمية	الرمز	القيمة
زمن بلانك	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5.39 \cdot 10^{-44}\ \mathrm{s}$
كتلة بلانك	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21.8 µg
اللحظات في التاريخ [a]	t_0/t_{Pl}	$8.7(2.8) \cdot 10^{60}$
نقاط الفراغ – الزمن	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3$	$10^{244\pm1}$
داخل الأفق [a]	(t_0/t_{Pl})	
الكتلة داخل الأفق	M	$10^{54\pm1}\ \mathrm{kg}$

[a] الدليل 0 يشير إلى القيم الحالية

[b] الإشعاع الناشئ عندما كان عمر الكون 380 000 سنة و له درجة حرارة حوالي 3000K ، التذبذبات ΔT_0 التي أدت إلى تشكل المجرة هي اليوم حوالي T_0 .10^{-6} (2)6= 4Mk ± 16 . (المجلد II ، صفحة 231) .

أرقام مفيدة

المرجع 169

e	$2.71828\ 18284\ 59045\ 23536\ 02874\ 71352\ 66249\ 77572\ 47093\ 69995_9$
π	$3.14159\ 26535\ 89793\ 23846\ 26433\ 83279\ 50288\ 41971\ 69399\ 37510_5$
π^2	$9.86960\ 44010\ 89358\ 61883\ 44909\ 99876\ 15113\ 53136\ 99407\ 24079_0$
γ	$0.57721\ 56649\ 01532\ 86060\ 65120\ 90082\ 40243\ 10421\ 59335\ 93992_3$
ln 2	$0.69314\ 71805\ 59945\ 30941\ 72321\ 21458\ 17656\ 80755\ 00134\ 36025_5$
ln 10	$2.30258\ 50929\ 94045\ 68401\ 79914\ 54684\ 36420\ 76011\ 01488\ 62877_2$
$\sqrt{10}$	$3.16227\ 76601\ 68379\ 33199\ 88935\ 44432\ 71853\ 37195\ 55139\ 32521_6$

إذا كان العدد π طبيعيا ، أي إذا كانت كل الخانات و تشكيلات الخانات في نشرها العشري تظهر بنفس التردد المحدد عندها كل نص كتب قط أو سيكتب و أيضا كل كلمة حكيت أو ستحكى يمكن أن توجد مشفرة في متتاليته . خاصة الطبيعية لم تثبت بعد بالرغم من أنه يشك بـأنها صحيحة .

هل هذا يعني ان كل الحكمة مشفرة في دائرة بسيطة ؟ لا . الخاصة ليست شيئا خاصا : إنها تطبق أيضا على العدد $0.12345678910111213141516171819202 1\ldots$ و العديد من الأعداد الأخرى . هل يمكنك تحديد بضع أمثلة ؟ (تحدي 157 s) .

بالمناسبة الخط البياني للتابع الأسي e^x في النقطة (0,1) هي فقط النقطة ذات الإحداثيين الكسريين . إذا تخليت رسم بالأزرق كل النقاط على المستوي بواسطة إحداثيين كسريين ، فإن المستوي سيبدو مزرقا تماما . على أن المخطط لا يمر عبر واحدة من هذه النقاط و يعمل على تجنب كل النقاط الأخرى .

الملحق " ب"

الأعداد و فراغ الأشعة

" الرياضي هو آلة التي تحول القهوة إلى نظريات

بال إردوس (ولد عام 1913 في بودابست و توفي عام 1996 في وارسو "

إن المفاهيم الرياضية يمكن كلها التعبير عنها بدلالة مجموعات و علاقات . العديد من المفاهيم الأساسية قدمت في الفصل الاخير . لماذا تعطي الرياضيات هذا الأساس البسيط الذي ينمو في شغف بالنسبة لأناس معينين ؟ كيف يمكن للمجموعات و العلاقات أن تصبح مركز حياة شخص ؟ (مجلد III - صفحة 281) إن الملاحق الرياضية تقدم بعض المزيد من المفاهيم المتقدمة بشكل بسيط و حيوي قدر الإمكان (مرجع 170) لكل اولئك الذين يريدون فهم و لمس الشغف في الرياضيات .

لسوء الحظ فإن الشغف بالرياضيات ليس سهل بيانه لأن مثل العديد من المهن الاخرى ايضا الرياضيين يخفون شغفهم. في الرياضيات هذا يتم عن طريق الصياغة و الفصل الظاهري عن الحدس . لكن تعليم الرياضيات الجيد بضع الحدس في البداية . في هذا الملحق سوف نطرح ابسط البنى الجبرية . و الملحق في المجلد التالي سيقدم مزيدا من البنى الجبرية المعقدة و بالتالي أكثر البنى الطبولوجية اهمية ، و النوع الأساسي الثالث من البنى الرياضية : بنى الترتيب ليست مهمة في الفيزياء باستثناء تعريف العداد الحقيقة التي تحتوي بنية ترتيب . الرياضيون معنين فقط ليس بدراسة المفاهيم و لكن ايضا بتصنيفها . متى طرح مفهوم رياضي جديد ، فإن الرياضيين يحالون تصنيف الحالات الممكنة و الأنواع . هذا يتحقق بشكل أكثر روعة من أجل أنواع مختلفة للأعداد من اجل المجموعات البسيطة / الزمر و العديد من أنواع الفضاءات و الوصلات .

الأعداد كبنى رياضية

" الشخص الذي يمكن أن يحل $x^2 - 92\,y^2 = 1$ هو أقل بسنة من كونه رياضي (تحدي ny 176)

براهما غوبتا (ولد عام 598 في السند و توفي عام 668) (المعنى : الحل للحصول على أعداد صحيحة)

يعلم الأطفال : الأعداد هي اشياء يمكن جمعها وضربها . الرياضين أكثر دقة . أي جملة رياضية ذات نفس الخواص الأساسية التي للأعداد الطبيعية تسمى حلقة . (المصطلحات وضعها ديفيد هيلبرت . كلا البنيتين يمكن أيضا أن تكون منتهية و ليس لانهائية) بشكل أكثر دقة الحلقة $(R, +, \cdot)$ هي مجموعة R من العناصر ذات عمليات ثنائية ، تسمى الجمع ، و الضرب و عادة تكتب بالشكل . & + (الأخير يمكن أن يفهم بسهولة و بالتالي بدون مفهوم صريح) من أجلها تصح الخواص التالية لكل العناصر $a, b, c \in R$:

- R هي زمرة تبديلية بالنسبة للجمع أي

$$a+(b+c) = (a+b)+c; \quad \text{و} \quad a+b \in R, a+b = b+a, a+0 = a, a+(-a) = a-a = 0$$

- R هي مغلقة تحت الضرب أي $ab \in R;$
- الضرب تجميعي أي $a(bc) = (ab)c;$

قابلية التوزيع صحيحة أي $a(b+c) = ab + ac$ و $(b+c)a = ba + ca.$

العديد من الباحثين يضيفون البديهة التالية

- توجد وحدة ضرب أي 1a =a1=a

إن تعريف الخواص مثل هذه يسمى بالبديهيات . و نشدد على أن البديهيات ليست معتقدات أساسية كما يقال غالبا أو يفرض ، البديهيات هي خواص أساسية مستخدمة في تعريف مفهوم : في هذه الحالة الحلقة . بواسطة آخر بديهية أيضا يتحدث المرء عن حلقة واحدية.

شبه الحلقة هي مجموعة تحقق كل البديهيات لحلقة ، ما عدا وجود عناصر حيادية و سالبة من أجل الجمع التي تستبدل بشرط أضعف بانه إذا a+c = b+c عندها a=b . بشكل ملتوي شبه الحلقة هي حلقة بدون عناصر سالبة .

لتضمين التقسيم وتعريف اعداد كسرية نحن بحاجة لمفهوم آخر . حقل الأعداد أو الحقل K وهو حلقة ذات

- مطابقة ضرب 1 ، بحيث أن كل العناصر تخضع إلى 1a =a
- على الاقل يوجد عنصر واحد مختلف عن الصفر و الأكثر اهمية
- المقلوب (الضارب) a^{-1} لأي عنصر $a \neq 0$

الحلقة أو الحقل يقال بانه تبديلي إذا كان الضرب تبديلي . الحقل غير التبديلي أيضا يسمى حقل ملتوي . الحقول يمكن ان تكون منتهية او لانهائية .(الحقل أو الحلقة تتميز بقيمتها المميزة p) و هذا هو أصغر عدد من المرات يضيف فيه المرء الواحد لنفس العدد ليعطي صفرا . إذا لم يكن هناك مثل هذا العدد فإن المميز يوضع مساويا للصفر. و يكون p دائما عدد أولي أو صفر) . كل الحقول المنتهية هي تبديلية . في حقل كل المعادلات من النوع cx =b و ($c \neq 0$) xc =b لها حلول من أجل x وهناك حل وحيد إذا كان $b \neq 0$. لنجمل تقريبا بالتركيز على الخاصة الأكثر أهمية ، الحقل هو مجموعة من العناصر التي مع الجمع ، الطرح و الضرب ،أيضا القسمة (على عناصر غير صفرية) أيضا معرفة . الأعداد الكسرية هي ابسط حقل الذي يتضمن الأعداد الصحيحة .

جملة الأعداد الحقيقية هي التعميم الأصغري للأعداد الكسرية التي هي كاملة و مرتبة كليا *هل يمكنك بيان أن $\sqrt{2}$ حقيقي وليس عدد كسري ؟ (تحدي e 177)

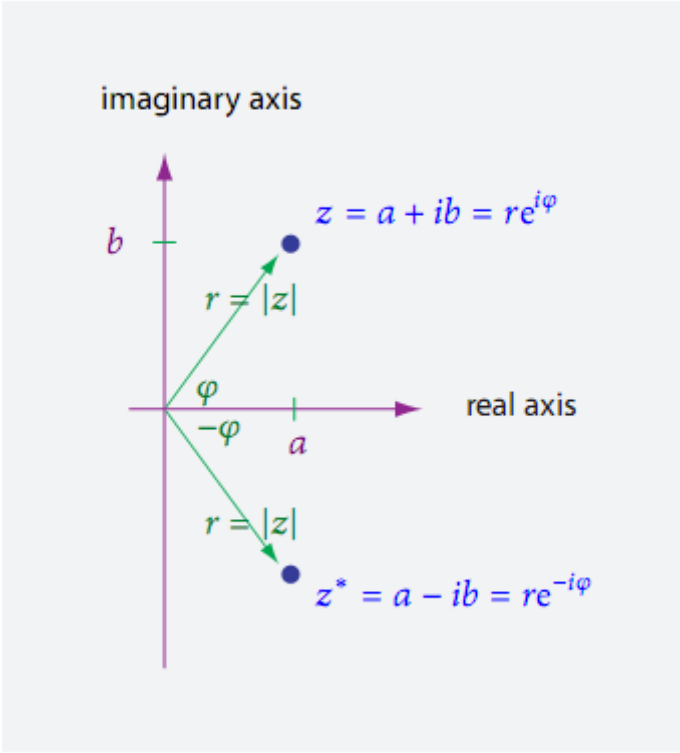
---

*المجموعة تكون كاملة رياضيا إذا سماها الفيزيائيون مستمرة . بشكل اكثر دقة مجموعة الأعداد هي كاملة إذا كانت كل مجموعة جزئية غير خالية محدودة علويا و لها حد أعلى اصغر

المجموعة تكون مرتبة كليا إذا كان هناك علاقة ثنائية $\leq$ بين أزواج العناصر بحيث أنه من اجل كل العناصر a& b

- إذا كان $a \leq b$ & $b \leq c$ عندها $a \leq c$
- إذا كان $a \leq b$ & $b \leq a$ عندها a=b
- $a \leq b$ عندها يصح $b \leq a$

في الملخص المجموعة تكون مرتبة كليا إذا كان هناك علاقة ثنائية التي تسمح بالقول حول أي عنصرين أي واحد منهما هو سابق للآخر بشكل منسجم . وهذه هي بنية مرتبة اساسي و أيضا وحيدة المستخدمة في الفيزياء .



الشكل 86 – الأعداد العقدية هي نقاط في مستوي ثنائي البعد حيث العدد العقدي z و مرافقه *z يمكن وصفهما بشكل كارتيزي أو قطبي

في الفيزياء الكلاسيكية و نظرية الكم يشدد دائما على أن نتائج القياسات هي و يجب أن تكون أعداد حقيقية . لكن هل كل الأعداد الحقيقية هي نتائج قياس ممكنة ؟ بعبارة أخرى هل كل نتائج القياس هي مجرد مجموعة جزئية من الأعداد الحقيقية ؟ (تحدي s 178) .

لكن مفهوم العدد غير محدود بهذه الأمثلة . يمكن تعميمه بعدة طرق .(مرجع 171) . أبسط تعميم يتحقق بتعميم الأعداد الحقيقة إلى وصلات لأكثر من بعد واحد .

الأعداد العقدية

في الطبيعة الأعداد العقدية هي طريقة مفيدة لوصف الجمل بطريقة مضغوطة و حالات التي تحتوي طور . الأعداد العقدية بالتالي مفيدة في لوصف الأمواج من أي نوع .

الأعداد العقدية تشكل وصلة ذات بعدين . العدد العقدي يعرف في شكله الديكارتي بالشكل z = a+ i b حيث a & b عددان حقيقيان ، و i هو الرمز الجديد الذي يسمى بالوحدة التخيلية . تحت الضرب مولدات الأعداد العقدية هي 1 & i تحقق

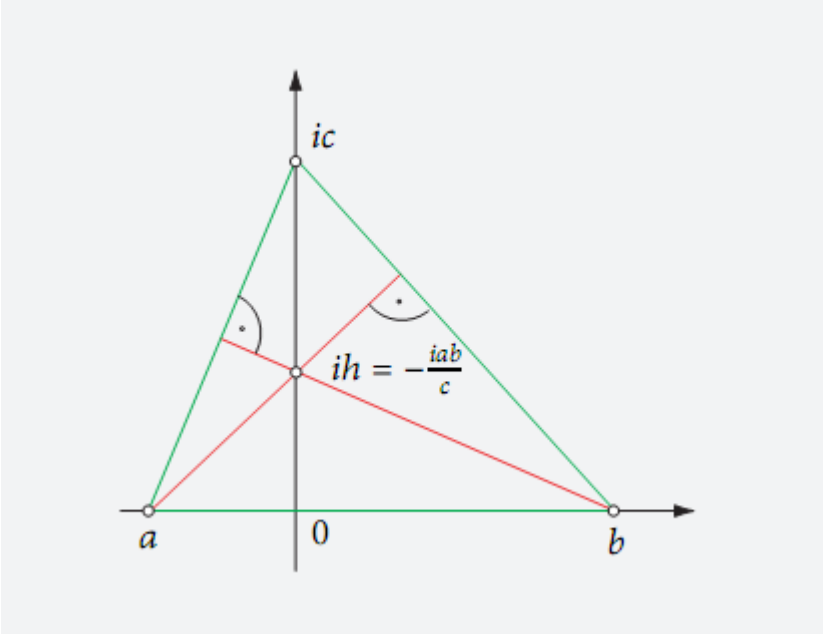
·	1	i
1	1	i
i	i	-1

(120)

غالبا تلخص بالشكل $i = +\sqrt{-1}$ و في العدد العقدي z = a+ i b يسمى a بالجزء الحقيقي و b بالجزء المركب و هي موضحة في الشكل 86 . المرافق العقدي *z و أيضا يكتب بالشكل $\bar{z}$ لعقد عقدي z = a+ i b يعرف بالشكل z* = 1

a – i b و القيمة المطلقة |z| لعقد عقدي تعرف بالشكل $\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{z*z} = \sqrt{zz*} = |z|$ ويعرف كناظم على الفضاء الشعاعي للأعداد اعقدية . من |z| |w| =|wz| ينتج نظرية المربعين

$$(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) = (a_1 b_1 - a_2 b_2)^2 + (a_1 b_2 + a_2 b_1)^2 \qquad (121)$$



الشكل 87 – خاصة المثلثات قابلة للبرهنة بسهولة بواسطة الأعداد العقدية

وهي صالحة من أجل كل الأعداد الحقيقة a_i, b_i و من المعروف أنه في شكلها الصحيح تعود إلى ديوفانتوس الإسكندري في القرن الثالث الميلادي .

الأعداد العقدية يمكن أيضا كتابتها بشكل أزواج مرتبة (a , A) لأعداد حقيقية حيث جمعها يعرف بالشكل (a ,A) +(b, B) = (a+b, A+B) و ضربها يعرف بالشكل (b, B) = (ab-AB , aB+bA) .(a ,A) , تسمح هذه المصطلحات لنا بتحديد الأعداد العقدية بنقاط على المستوي أو إذا فضلنا ، بأسهم في المستوي . إن ترجمة تعريف الضرب إلى لغة هندسية يسمح لنا بالإثبات السريع لنظريات هندسية معينة مثل المبينة في الشكل 87 (تحدي 179 e) .

الأعداد العقدية a+ib يمكن أيضا تمثيلها بمصفوفة 2 x 2 .

$$\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \quad \text{with} \quad a, b \in \mathbb{R} . \qquad (122)$$

إن جمع المصفوفات و ضربها بالتالي يقابل جمع و ضرب عقدي . بهذا الشكل الأعداد العقدية يمكن أن تمثل بنوع خاص من المصفوفات الحقيقية .

ماذا يكون |z| في لغة المصفوفات ؟ (تحدي 180 s) .

إن المجموعة $\mathbb{C}$ للأعداد العقدية مع الجمع و الضرب كما تعرف بالأشكال السابقة هي حقل تبديلي ثنائي الأبعاد (صفحة 234) و فضاء شعاعي على $\mathbb{R}$.

في حقل الأعداد العقدية ، المعادلات التربيعية $az^2 + bz+c=0$ من أجل المجهول z دائما لها حلين (من أجل $a\neq0$ و احتساب الضرب) (تحدي 181 e) .

الأعداد العقدية يمكن استخدامها من أجل وصف نقاط المستوي . الدوران حول المبدا يمكن وصفه بضرب عدد عقدي ذو طويلة واحدية . و المقادير الأخرى ذات البعدين يمكن أيضا ان توصف بواسطة الأعداد العقدية . المهندسين الكهربائيين يستخدمون الأعداد العقدية لوصف المقادير ذات الأطوار / الصفحات مثل التيارات المتناوبة أو الحقول الكهربائية في الفراغ .

كتابة الأعداد العقدية ذات الطول الواحدي بالشكل $\cos\theta + i\sin\theta$ هو طريقة مفيدة من أجل تذكر علاقات الجمع الزاوية (تحدي 182 e) . نظرا لأن لدينا $\cos n\theta + i\sin n\theta = (\cos\theta + i\sin\theta)^n$ يمكن للمرء بسهولة أن يستنتج علاقات مثل $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$ و $\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$

بالمناسبة ، الأعداد العقدية الواحدية تشكل زمرة لاي $SO(2)=U(1)$. (تحدي 183 e) .

كل عدد عقدي بمكن كتابته بالشكل :

$$z = re^{i\varphi} . \qquad (123)$$

هذا الشكل القطبي لكتابة الأعداد العقدية هو سبب إدخالها في المقام الأول الزاوية φ تسمى الطور ، العدد الحقيقي r = |z| يسمى القيمة المطاقة أوالمعامل / المركبة الفضائية او الطويلة . عند استخدامها لوصف الاهتزازات أو الأمواج فإنه من المنطقي تسمية r بالمطال . التابع الأسي العقدي هو دوري في 2πi ، بمعنى آخر لدينا

$$e^1 = e^{1+2\pi i} , \qquad (124)$$

الذي يبين الخاصة التي نتوقعها من زاوية الطور . إذا استخدم المرء المعادلة الأخيرة مرتين يمكنه كتابة

$$e^1 = e^{1+2\pi i} = (e^{1+2\pi i})^{1+2\pi i} = e^{(1+2\pi i)(1+2\pi i)} = e^{1-4\pi^2+4\pi i} = e^{1-4\pi^2} . \qquad (125)$$

و لكن أوبس ، هذا سيقتضي أن $\pi =0$! ما الشيء الخاطئ هنا ؟ (تحدي 184 e) .

الأعداد العقدية ايضا يمكن استخدامها لوصف الهندسية المستوية الإقليدية . الدورانات ، الانسحابات و الإيزومتريات الاخرى لكن ايضا الانعكاسات ، انعكاسات الانزلاق و تغيير المقياس توصف بسهولة بواسطة عمليات بسيطة على الأعداد العقدية التي تصف إحداثيات النقاط .

بالمناسبة هناك تماما عدد من الاعداد العقدية نفس الاعداد الحقيقية . هل يمكنك بيان هذا؟ (تحدي 185 s) .

"الحب عقدي و هو يملك اجزاء حقيقية و خيالية

شخص مجهول "

الرباعيات

إن مواضع النقاط على مستقيم يمكن وصفها باعداد حقيقية و الاعداد العقدية يمكن استخدامها لوصف مواضع النقاط في المستوي . و من الطبيعي محاولة تعميم فكرة العدد لفضاءات ذات ابعاد اعلى . و لكن ينتج انه لا يوجد جملة اعداد مفيدة يمكن تعريفها في الفراغ الثلاثي الابعاد . جملة الاعداد الجديدة الرباعيات يمكن انشاؤها و التي تقابل نقاط في الفضاء الرباعي الابعاد لكن فقط اذا تم التضحية بالتبديلية و الضرب . و لا يوجد جملة عددية مفيدة يمكن تعريفها من اجل الابعاد الاكبر من 4, 2 , 1

الرباعيات اكتشفت من قبل العديد من الرياضيين في القرن التاسع عشر من بينهم هاملتون * و الذي درسها اكثر حياته .

و في الحقيقة نظرية ماكسويل في الديناميك الكهربائي صيغت بدلالة الرباعيات قبل ان يتم استخدام الاشعة ثلاثية الابعاد (مرجع 173) .

تحت الضرب فان الرباعيات $\mathbb{H}$ تشكل جبر رباعي الابعاد فوق الاعداد الحقيقة (مجلد V ، **صفحة** 358)

---

*ويليام روان هاملتون (ولد عام 1805 في دبلن و توفي عام 1865 في دونسينك) وهو طفل معجزة و رياضي شهير سمى الرباعيات نسبة لتعبير من فولجات .

باساس 1, i, j ,k تحقق

·	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	$-j$
j	j	$-k$	-1	i
k	k	j	$-i$	-1

(126)

هذه العلاقات ايضا تكتب غالبا بالشكل $i^2 = j^2 = k^2 = -1, ij = -ji = k, jk = -kj = i, \quad ki = -ik = j$

الرباعيات 1, i, j ,k ايضا تسمى الواحدات الاساسية او المولدات . و ان عدم وجود تناظر عبر قطر الجدول يبين عدن التبديلية للضرب الرباعي . و بواسطة الرباعيات فان فكرة الجداء غير التبديلي ظهرت لاول مرة في الرياضيات. و لكن ضرب الرباعيات هو تجميعي . و نتيجة عدم التبديلية فان معادلات كثيرات الحدود في الرباعيات لها العديد من الحلول اكثر من الاعداد العقدية فقط ابحث عن كل الحلول للمعادلة $X^2 + 1 = 0$ لاقناع نفسك بذلك .(تحدي 186 s)

كل رباعية X بمكن كتابتها بالشكل

$$X = x_0 + x_1 i + x_2 j + x_3 k = x_0 + \boldsymbol{v} = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (x_0, \boldsymbol{v}) \,, \qquad (127)$$

حيث x_0 يسمى الجزء السلمي و v يسمى الجزء الشعاعي . و الضرب بالتالي يغرف بالشكل $(x, \boldsymbol{v})(y, \boldsymbol{w}) = (xy - \boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{w}, x\boldsymbol{w} + y\boldsymbol{v} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{w})$. ضرب رباعيين عامين يمكن كتابته بالشكل

$$(a_1,b_1,c_1,d_1)(a_2,b_2,c_2,d_2) = (a_1a_2 - b_1b_2 - c_1c_2 - d_1d_2\ ,\ a_1b_2 + b_1a_2 + c_1d_2 - d_1c_2,$$
$$a_1c_2 - b_1d_2 + c_1a_2 + d_1b_2, a_1d_2 + b_1c_2 - c_1b_2 + d_1a_2)\ . \quad (128)$$

الرباعي المرافق $\overline{X}$ يعرف بالشكل $\overline{X} = x_0 - v$ بحيث ان $\overline{XY} = \overline{Y}\ \overline{X}$ و الناظم $|X|$ لرباعي X يعرف بالشكل

$|X|^2 = X\overline{X} = \overline{X}X = x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = x_0^2 + v^2$ و الناظم قابل للضرب (معرف عليه) أي $|XY| = |X|\ |Y|$.

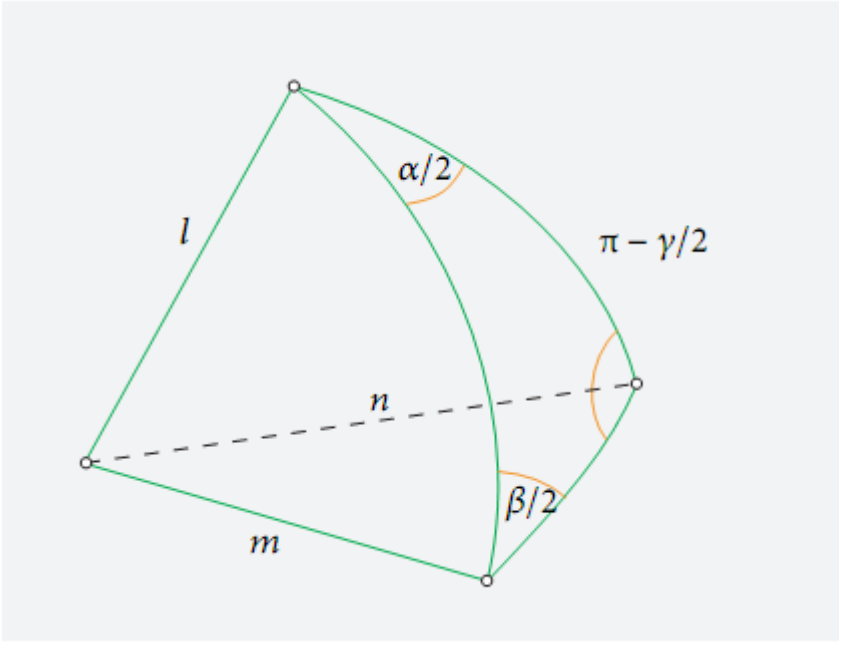
على خلاف الاعداد العقدية كل رباعية مرتبطة بمرافقها العقدي بالشكل

$$\overline{X} = -\tfrac{1}{2}(X + iXi + jXj + kXk)\ . \quad (129)$$

لا يوجد علاقة من اجل الاعداد العقدية . في لغة الفيزياء العدد العقدي ومرافقه متحولين مستقلين من اجل الرباعيات ليست هذه هي الحال . و بالنتيجة توابع الرباعيات اقل فائدة في الفيزياء من توابع المتحولات العقدية.

العلاقة $|XY| = |X|\ |Y|$ تقتضي نظرية المربعات الاربعة .

$$(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2)$$
$$= (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4)^2 + (a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3)^2$$
$$+ (a_1b_3 + a_3b_1 + a_4b_2 - a_2b_4)^2 + (a_1b_4 + a_4b_1 + a_2b_3 - a_3b_2)^2 \quad (130)$$



الشكل 88 – تشكيلات الدورانات

وهي صالحة من اجل كل الاعداد الحقيقية a_i & b_i و بالتالي ايضا من اجل أي مجموعة من ثمانية اعداد صحيحة .وقد اكتشفت في عام 1748 من قبل ليونارد اويلر (1783 – 1707) عند محاولة إثبات ان كل عدد صحيح هو مجموع اربعة مربعات . (الحقيقة الأخيرة اثبتت في 1770 من قبل جوزيف لاغرانج)

فكر هاملتون ان الرباعية ذات الجزء السلمي الصفري التي سميت ببساطة شعاعا (مصطلح تم اختراعه) سيحدد بشعاع انسحابي ثلاثي الأبعاد عادي ولكن هذا خطا. مثل هذه الرباعية الان تسمى رباعية صرفة او متجانسة او خيالية

جداء رباعييتين صرفتين $V = (0, \boldsymbol{v})$ و $W = (0, \boldsymbol{w})$ يعطى بالشكل $VW = (-\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$ حيث $\cdot$ يرمز الى جداء سلمي و $\times$ يشير للجداء الشعاعي . لاحظ ان أي رباعية يمكن ان تكتب كنسبة رباعيتين صرفتين .

في الواقع الرباعية الصرفة $(0, \boldsymbol{v})$ لا تتصرف مثل شعاع انسحابي تحت تحويلات الاحداثيات وفي الحقيقة الرباعية الصرفة تمثل دوران بزاوية π او 180^o حول المحور المحدد بالاتجاه $\boldsymbol{v} = (v_x, v_y, v_z)$ (تحدي ny 187) .

ينتج انه في فراغ الأبعاد الثلاثية فان الدوران العام حول المبدا يمكن وصفه برباعية واحدية Q التي تسمى ايضا الرباعية النظامية من اجلها $|Q| = 1$

مثل هذه الرباعية يمكن كتابتها بالشكل $(\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$ حيث $\boldsymbol{n} = (n_x, n_y, n_z)$ هو شعاع نظامي يصف اتجاه محور الدوران و θ هي زاوية الدوران

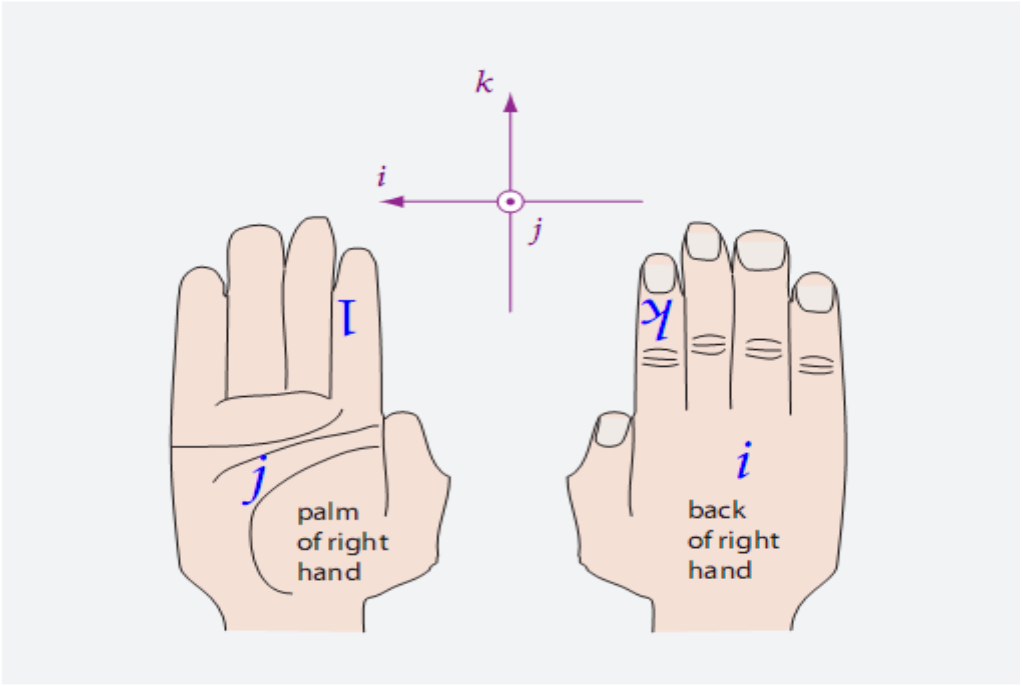
مثل هذه الرباعية الواحدية $Q = (\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$ تدور رباعية صرفة $V = (0, \boldsymbol{v})$ الى رباعية صرفة اخرى $W = (0, \boldsymbol{w})$ معطاة بالشكل

$$W = QVQ^* \ . \qquad (131)$$

بالتالي إذا كنا نستخدم رباعيات مثل V او W لوصف المواضع يمكننا استخدام رباعيات واحدية لوصف الدورانات و حساب تغيرات الاحداثيات

ان تسلسل دورانين يعطى بالتالي بجداء رباعيات الواحدة الموافقة و في الحقيقة الدوران بواسطة زاوية α حول المحور l يليه دوران بزاوية β حول المحور m يعطي دوران بزاوية γ حول المحور n بقيمة محددة بالشكل

$$(\cos\gamma/2, \sin\gamma/2\boldsymbol{n}) = (\cos\beta/2, \sin\beta/2\boldsymbol{m})(\cos\alpha/2, \sin\alpha/2\boldsymbol{l}) \ . \qquad (132)$$



الشكل 89 – سطح و خلف اليد اليمنى و الرباعيات

إحدى الطرق لبيان النتيجة تخطيطيا معطاة في الشكل 88 . برسم مثلث على كرة واحدية و الانتباه لتذكر العامل 1/2 في الزوايا فإن جمع دورانين يمكن أن يحدد ببساطة .

إن تفسير الرباعيات كدورانات ايضا موضح في شكل مختلف بعض الشيء (مرجع 174) في حركة أي يد . لرؤية هذا خذ قلم تحديد اخضر و اكتب الاحرف k, j , i , 1 كما هو مبين في الشكل 89 . بتعريف محاور الدورانات الثلاث الممكنة بزاوية 180 درجة كما هو مبين في الشكل و هذه التسلسلات كمضاريب ، و حركة اليد اليمنى(تحدي 188s) تتبع نفس القوانين التي للرباعيات الواحدية الصرفة . (يحتاج المرء لتمييز i & -i + و نفس الشيء بالنسبة للواحدات ، من ناحية فتل الذراع . ونتيجة الضرب هي ذلك الحرف الذي يمكن قراءته من قبل الشخص الذي يواجهك) .

يمكنك بيان أن $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ و تؤكد علاقات كل الرباعيات الاخرى .النموذج أيضا يبين أن زاوية الدوران للذراع هي نصف زاوية الدوران للرباعية المقابلة . بعبارة أخرى الرباعيات يمكن ان تستخدم لوصف خدعة الحزام ، إذا كان ضرب VW للرباعيتين اخذ ليعني أن الدوران V يتم بعد الدوران W (صفحة 129) و الرباعيات مثل الأيدي البشرية بالتالي تتصرف مثل البرم لجسيم 1/2 . الرباعيات و السبينورات هي متساوية الشكل .

سبب سلوك نصف الزاوية للدورانات يمكن تحديده بشكل اكثر دقة باستخدام اللغة الرياضية . الدورانات في الابعاد الثلاثة حول نقطة تشكل زمرة متعامدة خاصة في الابعاد الثلاثية التي تسمى SO(3) . لكن الحركات لليد المرتبطة بالكتف عن طريق الذراع تشكل زمرة مختلفة و هي متساوية الشكل بالنسبة لزمرة لي SU(2) . (مجلد V ، صفحة 369) و الفرق ناتج عن شكل الزوايا النصفية في تحديد بارامترات الدورانات و في الحقيقة يقتضي تحديد البارامترات السابق ان الدوران بمقدار 2π يقابل الضرب بـ 1- . و فقط في القرن العشرين ادر كان هناك قيم أساسية قابلة للقياس فيزيائيا التي تتصرف مثل الأيدي المرتبطة بالاذرعة وهي تسمى السبينورات .(صفحة 129)

المزيد عن السبينورات يمكن أن يوجد في الفقرة حول تناظر التباديل حيث الأحزمة تستخدم كمشابه ايضا للأذرعة

باختصار الزمرة SU(2) المشكلة بواسطة الرباعيات الواحدية هي الغطاء المزدوج لزمرة الدوران SO(3) (مرجع 175)

إن أبسط تمثيل للدورانات و المواضع بواسطة الرباعيات يستخدم في برامج الحاسوب في الروبوتيات و في علم الفلك و في محاكاة الطيران و في البرمجيات يستخدم لتشكيل صور ثلاثية الابعاد و رسوم متحركة و برمجيات العرض وتستخدم الرباعيات غالبا لحساب المسار المتخذ من قبل الاشعة الضوئية المنعكسة بشكل متكرر و بالتالي تعطي أسطح ذات شكل حقيقي

إن جبر الرباعيات هو فقط التجميعي و غير التبديلي و الجبر المنتهي من حيث الابعاد النظامي ذو المطابق فوق حقل الاعداد الحقيقية و تشكل الرباعيات حقل غير تبديلي أي حقل مفلطح الذي فيه مقلوب الرباعية X هو $\overline{X}/|X|$ و يمكننا بالتالي تعريف القسمة للرباعيات (بينما نكون منتبهين للتمييز بين XY^{-1} و $Y^{-1}X$) و بالتالي الرباعيات يقال بأنها جبر تقسيم . في الحقيقة الرباعيات $\mathbb{H}$ و الأعداد العقدية $\mathbb{C}$ و الأعداد الحقيقية $\mathbb{R}$ هي أنواع جبر القسمة الثلاث التجميعية الأبعاد . وبعبارة اخرى الحقل المفلطح للرباعيات هو الجبر نهائي الابعاد الحقيقي التجميعي غير التبديلي بدون قواسم للصفر و مركز الرباعيات أي مجموعة الرباعيات التي تتبادل مع كل الرباعيات الاخرى هي فقط مجموعة من الاعداد الحقيقية

الرباعيات يمكن تمثيلها كمصفوفات من الشكل

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{pmatrix} \quad \text{with} \quad A, B \in \mathbb{C} \quad \text{thus} \quad A = a + ib, B = c + id\,, \qquad (133)$$

أو بشكل مغاير :

$$\begin{pmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & -d & c \\ -c & d & a & -b \\ -d & -c & b & a \end{pmatrix} \quad \text{with} \quad a, b, c, d \in \mathbb{R}\,, \qquad (134)$$

حيث الرباعية X بالتالي تعطى بالشكل $X = A + Bj = a + ib + jc + kd$ و جمع المصفوفات و ضربها بالتالي يوافق لجمع وضرب الرباعيات

المولدات للرباعيات يمكن تحقيقها بالشكل

$$1 : \sigma_0 \quad , \quad i : -i\sigma_1 \quad , \quad j : -i\sigma_2 \quad , \quad k : -i\sigma_3 \qquad (135)$$

حيث σ_n و هي مصفوفات برم باولي .*

---

*مصفوفات برم باولي هي المصفوفات الهرميتين العقدية

$$\sigma_0 = \mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad (136)$$

كلها ذات قيم خاصة ± 1 و هي تحقق العلاقات $[\sigma_i, \sigma_k]_+ = 2\,\delta_{ik}$ و $[\sigma_i, \sigma_k] = 2i\,\varepsilon_{ikl}\,\sigma_l$ و التشكيلات الخطية $\sigma_\pm = \frac{1}{2}(\sigma_1 \pm \sigma_2)$ ايضا غالبا تستخدم و بالمناسبة التمثيل الاخر الممكن للرباعيات هو $i : i\sigma_3, j : i\sigma_2, k : i\sigma_1$.

التمثيلات الحقيقية 4 x 4 ليست وحيدة كما يبين التمثيل البديل

$$\begin{pmatrix} a & b & -d & -c \\ -b & a & -c & d \\ d & c & a & b \\ c & -d & -b & a \end{pmatrix} \qquad (137)$$

لا يوجد تمثيل للرباعيات بواسطة مصفوفات 3 x 3 ممكن (تحدي 190 ny)

هذه المصفوفات تحتوي العناصر الحقيقية و العقدية التي لا تشكل أي مشاكل . على العكس عندما تشكل المصفوفات ذات العناصر الرباعية فانه يجب الانتباه لأن ضرب الرباعيات ليس تبديليا بحيث ان العلاقات البسيطة مثل trAB =trBA لا تكون مقبولة عموما .

ماذا يمكننا تعلمه من الرباعيات حول وصف الطبيعة ؟ اولا يمكن أن نرى ان العلاقات الثنائية مشابهة للمواضع و بالتالي الانتقالات : كلها ممثلة بواسطة ثلاثة اشعة

هل الدورانات العمليات الاساسية في الطبيعة ؟ الارتباط بين الانتقالات و الدورانات مدروس في اخر مجلد من صعودنا الجبل (مجلد VI ، صفحة 172)

عندما كتب ماكسويل معادلاته للديناميك الكهربائي فقد استخدم مفهوم الرباعيات (مجلد III ، صفحة 75) . (الان مفهوم الشعاع الثلاثي ادخل لاحقا من قبل هيرتز و هيفزايد).

المعادلات يمكن كتابتها بطرق مختلفة باستخدام الرباعيات و أبسطها يتحقق عندما نستمر بالتمييز بين $\sqrt{-1}$ و الرباعية الواحداية i,j,k للرباعيات (مرجع 173) و يمكن بالتالي كتابة كل الديناميك الكهربائي في معالدة واحدة (تحدي 191s).

$$\mathrm{d}F = -\frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad (138)$$

حيث F الحقل الكهرطيسي المعمم و Q الشحنة المعممة . وهذه تعرف بالشكل :

$$
\begin{aligned}
F &= E + \sqrt{-1}cB \\
E &= iE_x + jE_y + kE_z \\
B &= iB_x + jB_y + kB_z \\
\mathrm{d} &= \delta + \sqrt{-1}\partial_t/c \\
\delta &= i\partial_x + j\partial_y + k\partial_z \\
Q &= \rho + \sqrt{-1}J/c
\end{aligned}
\qquad (139)
$$

حيث الحقلين E & B و توزعات الشحنة ρ و J لها المعاني المعتادة وان محتوى المعادلة (138) من أجل الحقل الكهرطيسي

هو تماما نفس الصيغة المعتادة .

بالرغم من جمالها و ابعادها الرباعية فان الرباعيات لا تبدو انها مفيدة من اجل اعادة صياغة النسبية و السبب الرئيسي هو الاشارة في علاقة نظامها و بالتالي النسبية و الفراغ – الزمن توصف عادة باستخدام الاعداد الحقيقية وحتى اذا كانت الرباعيات مفيدة فانها لن تعطي التبصرات الاضافية في الفيزياء او الطبيعة

الثمانيات

بنفس الطريقة التي تشكل بها الرباعيات من الاعداد العقدية فان الثمانيات يمكن ان تشكل من الرباعيات و قد درست لاول مرة من قبل ارثر كايلي (1821-1895) وتحت الضرب فان الثمانيات او الاوكتافات هي عناصر لجبر ثماني الابعاد فوق الاعداد الحقيقية ذات مولدات i_n , 1 حيث n=1.....7 و تحقق

·	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
1	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1	i_1	-1	i_3	$-i_2$	i_5	$-i_4$	i_7	$-i_6$
i_2	i_2	$-i_3$	-1	i_1	$-i_6$	i_7	i_4	$-i_5$
i_3	i_3	i_2	$-i_1$	-1	i_7	i_6	$-i_5$	$-i_4$
i_4	i_4	$-i_5$	i_6	$-i_7$	-1	i_1	$-i_2$	i_3
i_5	i_5	i_4	$-i_7$	$-i_6$	$-i_1$	-1	i_3	i_2
i_6	i_6	$-i_7$	$-i_4$	i_5	i_2	$-i_3$	-1	i_1
i_7	i_7	i_6	i_5	i_4	$-i_3$	$-i_2$	$-i_1$	-1

(140)

في الحقيقة هناك 479 جدول اخر مكافئ ممكنة ايضا وهذا الجبر يسمى جبر كايلي و له مطابقته و قسمته الفريدة

و هذا الجبر غير تبديلي و ايضا غير تجميعي و لكنه تناوبي مما يعني انه بالنسبة لكل العناصر x & y يوجد هناك $x(xy) = x^2y$ و $(xy)y = xy^2$:وهي خاصة بعض الشيء أضعف من قابلية التجميع وهو فقط الجبر التناوبي الحقيقي ثماني الابعاد بدون قواسم صفرية

لانه غير تجميعي فان المجموعة $\mathbb{O}$ من كل الثمانيات لا تشكل حقل و لا حتى حلقة بحيث ان التسمية القديمة اعداد كايلي تم تركها و الثمانيات هي الاعداد العالية التعقيد الاكثر عمومية التي ناظمها قابل للضرب

إن مولداتها تخضع إلى $(i_n i_m) i_l = \pm i_n (i_m i_l)$ حيث اشارة الناقص التي تبين عدم التجميع صالحة من اجل التشكيلات غير الرباعية مثل 4-2-1

الثمانيات تمثل كمصفوفات من الشكل

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -\bar{B} & \bar{A} \end{pmatrix} \text{where } A, B \in \mathbb{H}, \quad \text{or as real } 8 \times 8 \text{ matrices.} \tag{141}$$

ضرب المصفوفات بالتالي يعطي نفس نتيجة ضرب الثمانيات

العلاقة $|wz| = |w|\,|z|$ تسمح باستنتاج نظرية المربعات الثمانية الرائعة

$$\begin{aligned}
&(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 + a_7^2 + a_8^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2 + b_7^2 + b_8^2) \\
&\quad = (a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 - a_5 b_5 - a_6 b_6 - a_7 b_7 - a_8 b_8)^2 \\
&\quad + (a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 + a_5 b_6 - a_6 b_5 + a_7 b_8 - a_8 b_7)^2 \\
&\quad + (a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 - a_5 b_7 + a_6 b_8 + a_7 b_5 - a_8 b_6)^2 \\
&\quad + (a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 + a_4 b_1 + a_5 b_8 + a_6 b_7 - a_7 b_6 - a_8 b_5)^2 \\
&\quad + (a_1 b_5 - a_2 b_6 + a_3 b_7 - a_4 b_8 + a_5 b_1 + a_6 b_2 - a_7 b_3 + a_8 b_4)^2 \\
&\quad + (a_1 b_6 + a_2 b_5 - a_3 b_8 - a_4 b_7 - a_5 b_2 + a_6 b_1 + a_7 b_4 + a_8 b_3)^2 \\
&\quad + (a_1 b_7 - a_2 b_8 - a_3 b_5 + a_4 b_6 + a_5 b_3 - a_6 b_4 + a_7 b_1 + a_8 b_2)^2 \\
&\quad + (a_1 b_8 + a_2 b_7 + a_3 b_6 + a_4 b_5 - a_5 b_4 - a_6 b_3 - a_7 b_2 + a_8 b_1)^2
\end{aligned} \tag{142}$$

الصالحة من اجل كل الاعداد الحقيقية a_i و b_i و بالتالي بشكل خاص لكل الاعداد الصحيحة .

(هناك العديد من الاشكال لهذه العلاقة ذات تشكيلات مختلفة للاشارة) و النظرية اكتشفت في 1818 من قبل كارل فيرديناند ديجن (1766-1825) و بعدها تم اعادة اكتشافها في 1844 من قبل جون جرافز و في 1845 من قبل ارثر كايلي و ليس هناك تعميم للأعداد الاعلى من المربعات و هي حقيقة اثبتت من قبل ادولف هورفيتس (1859-1919) في 1898 .

ان الثمانيات يمكن استخدامها لبيان أن الجداء الشعاعي يمكن تعريفه باكثر من ثلاثة أبعاد و الجداء الشعاعي او الجداء الهجين هو عملية × تحقق

$$\begin{aligned}
u \times v &= -v \times u \quad \textit{anticommutativity} \\
(u \times v)\, w &= u\, (v \times w) \quad \textit{exchange rule.}
\end{aligned} \tag{143}$$

باستخدام التعريف

$$X \times Y = \frac{1}{2}(XY - YX)\,, \qquad (144)$$

فان الجداءات الشعاعية للرباعيات التخيلية أي رباعيات من النوع (0,u) هي مرة تخيلية و توافق الجداء الشعاعي ثلاثي الأبعاد العادي و بالتالي تحقق (143) (مرجع 171) . و من المدهش أنه من الممكن استخدام التعريف (144) من أجل الثمانيات أيضا . و في تلك الحالة فإن جداء الثمانيات ايضا تخيلي (تحدي e 192) و (143) مرة ثانية تتحقق و في الحقيقة هذا هو المثال الوحيد غير التجريبي للجداء الشعاعي .

في الملخص : يوجد الجداء الشعاعي فقط في الابعاد الثلاثية و السباعية و العديد من الدارسين يعتبرون هذه العلاقة مرتبطة بالأبعاد العشرة الممكنة للطبيعة و لكن هذه التصورات لم تلق أي نجاح .

التناظرات للقوى في الطبيعة تؤدي إلى سؤال معروف جيدا . الاعداد العقدية الواحدية من زمرة لي U(1) و الرباعيات الواحدية لزمرة لي SU(2) . هل الثمانيات الواحدية من زمرة لي SU(3) ؟ (تحدي s 193).

انواع أخرى من الأعداد

إن عملية إنشاء مجموعات جديدة من الأعداد عالية التعقيد و جبر أعداد أو جبر حقيقي بواسطة مضاعفة نوع معين يمكن للمرء الاستمرار بهذا للانهاية . و لكن الثمانيات ، السدنيونات و كل انواع المضاعفات التالية ليست حلقات و لا حقول ولكنها فقط جبر غير تجميعي ذو واحدية . و الجبر الاخر منتهي الابعاد يمكن ايضا تعريفه : وهي تشمل ما يعرف بالأعداد الثنائية و الأعداد المزدوجة و أعداد كليفورد – ليفشيدز .. الخ و هي لا تلعب دورا في الفيزياء

الرياضيون ايضا عرفوا حقول الأعداد التي لها أبعاد واحد و جزء من واحد مثل جبر حقول الاعداد و هناك ايضا تعميم لمفهوم الأعداد الصحيحة إلى المجال العقدي (مرجع 176) : الأعداد الصحيحة الغوصية ، المعرفة بأنها n+im حيث n & m هي أعداد صحيحة عادية و حتى غوص عرّف ما يعرف الآن بالأعداد الأولية الغوصية (هل يمكنك أن تجد كيف ؟) (تحدي s 194).وهي لا تستخدم في وصف الطبيعة و لكنها مهمة في نظرية الاعداد و دراسة خواص الأعداد الصحيحة .

الفيزيائيين اعتادوا على تسمية المعاملات الميكانيكية الكمية " الأعداد q " و لكن هذا المصطلح لم يعد مستخدما

الطريقة الأخرى التي يمكن بها تعميم الأعداد الطبيعية هي تضمين الأعداد الأكبر من اللانهاية (مرجع 177) و الأنواع الأكثر أهمية من الاعداد الاكبر من اللانهاية هي الترتيبية و الرئيسية و فوق الحقيقية (مجلد III ، صفحة 289) و الأعداد الترتيبية هي اساسا تعميم للأعداد الصحيحة بعد اللانهاية بينما فوق الحقيقية هي تعميم مستمر للأعداد الحقيقية ايضا بعد اللانهاية و بشكل تقريبي من بين الأعداد الأكبر من اللانهاية فإن الأعداد الترتيبية لها دور مشابه الذي للأعداد الصحيحة بين الحقيقية و الأعداد فوق الحقيقية تملا كل الفجوات بين الاعداد الترتيبية مثلما تفعل الحقيقية بالنسبة للاعداد الصحيحة . و من المدهش أن العديد من السلاسل الاتي تتباعد في $\mathbb{R}$ تتقارب في الأعداد فوق الحقيقية هل يمكنك ايجاد مثال ؟ (تحدي 195ny).

ان الأعداد فوق الحقيقية تشمل الأعداد الصغيرة بشكل لانهائي كما تفعل أعداد التحليل غير القياسي (مرجع 171) ايضا تسمى فوق الحقيقية و في كلا نظامي الأعداد على عكس الأعداد الحقيقية فإن الأعداد ... 0.999 999 & 1 (حيث سلسلة اللانهاية لكن ليس بعد اللانهاية من ارقام التسعة تكون مفروضة) و لا تتلاقى مع ولكن تنفصل بواسطة أعداد أخرى بشكل لا نهائي . لقد درسنا الأعداد فوق الحقيقية سابقا (مجلد III ، صفحة 291) و الأعداد غير القياسية يمكن استخدامها لتعريف القيم المتناهية بالصغر المستخدمة في التكامل و التفاضل (مرجع 172) حتى على مستوى المدرسة الثانوية .

من الفضاءات الشعاعية إلى فضاءات هيلبرت

الفضاءات الشعاعية أيضا تسمى الفضاءات الخطية هي تعميمات رياضية لنواحي معينة من الفضاء ثلاثي الأبعاد و المجموعة من عناصر أي اثنين منها يمكن أن تجمع معا و أي واحد منها يمكن أن يضرب بعدد يمسى فضاء شعاعي و إذا كانت النتيجة ثانية هي في المجموعة و القواعد المعتادة للحساب صحيحة .

بشكل اكثر دقة الفضاء الشعاعي فوق حقل عددي K هو مجموعة من العناصر تسمى أشعة من أجلها تعريف جمع الأشعة و الضرب السلمي يتم تعريفه بحيث أن كل الاشعة a, b,c ومن أجل كل الأعداد s & r من الحقل يكون لدينا

$$\begin{aligned}
(a+b)+c = a+(b+c) = a+b+c \quad & \textit{associativity of vector addition} \\
n+a = a \quad & \textit{existence of null vector} \\
(-a)+a = n \quad & \textit{existence of negative vector} \\
1a = a \quad & \textit{regularity of scalar multiplication} \\
(s+r)(a+b) = sa+sb+ra+rb \quad & \textit{complete distributivity of scalar multiplication}
\end{aligned} \tag{145}$$

إذا كان الحقل K الذي عناصره تسمى القيم السلمية في هذا السياق تؤخذ بأنها أعداد حقيقية (أو عقدية أو رباعية) فإننا نتحدث عن فضاء شعاعي حقيقي (أو عقدي أو رباعي) و الفضاءات الشعاعية تسمى أيضا فضاءات شعاعية خطية أو ببساطة فضاءات خطية

إن الأعداد العقدية و هي مجموعة كل التوابع الحقيقية المعرفة في المستقيم الحقيقي و مجموعة كثيرات الحدود و مجموعة المصفوفات ذات العدد المعين من الأسطر و الأعمدة كلها تشكل فضاءات شعاعية . في الرياضيات الشعاع بالتالي هو مفهوم أكثر عمومية عما هو عليه في الفيزياء (ما هو أبسط فضاء شعاعي رياضي ممكن ؟) (تحدي s 196)

في الفيزياء المصطلح شعاع يترك للعناصر ذات النوع الاكثر تخصصا للفضاء الشعاعي و هي الفضاءات الشعاعية الداخلية النظامية و لتعريفها نحتاج اولا لمفهوم الفضاء المتري

ان الفضاء المتري هو مجموعة ذات نظام متري أي طريقة لتعريف المسافات بين العناصر و التابع الحقيقي d(a,b) بين العناصر يمسى متري إذا

$$\begin{aligned}
d(a,b) \geqslant 0 \quad & \textit{positivity of metric} \\
d(a,b)+d(b,c) \geqslant d(a,c) \quad & \textit{triangle inequality} \\
d(a,b) = 0 \quad \text{if and only if} \quad a = b \quad & \textit{regularity of metric}
\end{aligned} \tag{146}$$

المثال غير التجريبي هو التالي . نعرّف مسافة خاصة d بين مدينتين وإذا كانت المدينتين تقعان على خط يمر من باريس فاننا نستخدم المسافة العادية و في كل الحالات الأخرى نعّرف المسافة d باقصر مسافة من نقطة لاخرى عبر باريس (تحدي s 197)

هذه الطريقة الغريبة تعرّف فضاء خطي ذو ناظم أو طول مرتبط بكل شعاع و الناظم هو عدد غير سالب ||a|| يعرف من اجل كل شعاع a بالخواص

$$\begin{aligned} \|ra\| &= |r|\,\|a\| && \textit{linearity of norm} \\ \|a+b\| &\leqslant \|a\| + \|b\| && \textit{triangle inequality} \\ \|a\| = 0 \quad &\text{only if} \quad a = 0 && \textit{regularity} \end{aligned} \tag{147}$$

عادة يكون هناك العديد من الطرق لتعريف فضاء شعاعي معين (تحدي 198 ny) لاحظ أن الناظم يمكن دائما استخدامه لتعريف نظام متري بوضع

$$d(a,b) = \|a-b\| \tag{148}$$

بحيث ان كل الفضاءات النظامية هي أيضا فضاءات مترية . هذا هو تعريف المسافة الطبيعية (على عكس غير الطبيعية التي نريدها بين المدن الفرنسية المعطاة اعلاه)

إن الناظم غالبا يعرّف بفضاءات الجداء الداخلي و هذه الفضاءات الشعاعية ذات الجداء الداخلي ايضا تسمى الجداء السلمي (يجب الا يخلط بينها و بين الضرب السلمي)

الذي يربط عدد بكل زوج من الاشعة و أي فضا جداء داخلي فوق $\mathbb{R}$ يحقق

$$\begin{aligned} a\cdot b &= b\cdot a && \textit{commutativity of scalar product} \\ (ra)\cdot(sb) &= rs(a\cdot b) && \textit{bilinearity of scalar product} \\ (a+b)\cdot c &= a\cdot c + b\cdot c && \textit{left distributivity of scalar product} \\ a\cdot(b+c) &= a\cdot b + a\cdot c && \textit{right distributivity of scalar product} \\ a\cdot a &\geqslant 0 && \textit{positivity of scalar product} \\ a\cdot a = 0 \quad &\text{if and only if} \quad a = 0 && \textit{regularity of scalar product} \end{aligned} \tag{149}$$

من اجل كل الاشعة a, b,c ومن أجل كل الأعداد s & r و فضاء الجداء الداخلي ذو البعد المنتهي ايضا يسمى الفضاء الشعاعي الاقليدي و مجموعة كل السرعات و مجموعة كل المواضع و مجموعة كل كميات الحركة الممكنة هي امثلة على مثل هذه الفضاءات

فضاء الجداء الداخلي فوق $\mathbb{C}$ يحقق *

$$\begin{aligned} a\cdot b &= \overline{b\cdot a} = \overline{b}\cdot\overline{a} && \textit{Hermitean property} \\ (ra)\cdot(sb) &= r\overline{s}(a\cdot b) && \textit{sesquilinearity of scalar product} \\ (a+b)\cdot c &= a\cdot c + b\cdot c && \textit{left distributivity of scalar product} \\ a\cdot(b+c) &= a\cdot b + a\cdot c && \textit{right distributivity of scalar product} \\ a\cdot a &\geqslant 0 && \textit{positivity of scalar product} \\ a\cdot a = 0 \quad &\text{if and only if} \quad a = 0 && \textit{regularity of scalar product} \end{aligned} \tag{150}$$

من اجل كل الاشعة a, b,c ومن أجل كل الأعداد s & r . الجداء الداخلي العقدي (ذو البعد المنتهي) ايضا يسمى الفضا الشعاع الواحدي او الهرميتي . اذا كان فضاء الجداء الداخلي كاملا يسمى خاصة في الحالة العقدية ذات الابعاد اللانهائية (صفحة 223) بفضاء هيلبرت .

فضاء كل الحالات المكننة لجملة كمية يشكل فضاء هيلبرت .

كل فضاءات الجداء الداخلي هي ايضا فضاءات مترية و بالتالي فضاءات نظامية إذا تم تعريف المتري بالشكل

$$d(a,b) = \sqrt{(a-b)\cdot(a-b)}\,. \qquad (151)$$

فقط في سياق الفضاءات الجداء الداخلية يمكننا الحديث عن الزوايا (او فروقات الطور) وبين الاشعة ، اعتدنا على استخدامها في الفيزياء . بالطبع مثل الفضاءات النظامية فضاءات الجداء الداخلي ايضا تسمح لما بالحديث عن طول الاشعة و تعريف اساس و المفهوم الرياضي الضروري لتعريف جملة الاحداثيات . أي الفضاءات الشعاعية أو فضاءات الجداء الداخلي هي مهمة في الفيزياء ؟ (تحدي 199 s).

بعد الفضاء الشعاع هو عدد اشعة الاساس المستقلة خطيا . هل يمكنك تعريف هذه المصطلحات بدقة ؟ (تحدي 200s).

فضاء هيلبرت هو فضاء جداء داخلي حقيقي او عقدي الذي ايضا هو فضاء كامل متري . بعبارة اخرى فضاءات هيلبرت عادة لكمن ليس دائما لها عدد لا نهائي من الابعاد .

---

*الشكلين غير التكافئين لبديهية التتابع الخطي موجودة . الاخر هو $(ra).(sb)=\overline{r}\,s(a.b)$. المصطلح تتابعي خطي مشتق من اللاتينية و يعني خطي واحد و نصف .

تعريف فضاءات هيلبرت و الفضاءات الشعاعية يفترض مجموعات مستمرة للبدء بها . إذا لم تكن الطبيعة مستمرة ها ما يزال بامكان المرء استخدام المفاهيم ؟ (تحدي 201 s).

فضول رياضية و تحديات مرحة

تعطي الرياضيات

نتائج منافية للحدس . قراءة كتاب جيد حول الموضوع مثل BERNARD R. GELBAUM & JOHN M.H.OLMSTED النظريات و الأمثلة المعاكسة في الرياضيات ، سبرينجر 1993 يمكن أن يساعدك في شحذ دماغك لجعلك عارفا بجمال الرياضيات حتى أكثر

* *

من الممكن رسم منحني يلتقي بكل النقاط في مربع أو كل النقاط في مكعب . وهذا مبين مثلا في HANS SAGAN منحنيات ملء الفراغ ، مطبعة سبرينجر 1994 . بالنتيجة التمييز بين بعد ، اثنين و ثلاثة أبعاد غير واضح في الرياضيات الصرفة . و لكن في الفيزياء الابعاد معرفة بوضوح و بشكل جيد و كل جسم في الطبيعة له ثلاثة ابعاد (تحديث 202 e).

* *

بيّن أن العاملين A & B يخضعان إلى (تحديث 203 ny).

* *

$$
\begin{aligned}
e^{A}e^{B} = \exp(A + B + \frac{1}{2}[A, B] \\
+ \frac{1}{12}[[A, B], B] - \frac{1}{12}[[A, B], A] \\
- \frac{1}{48}[B, [A, [A, B]]] - \frac{1}{48}[A, [B, [A, B]]] \\
+ \ldots)
\end{aligned}
\qquad (152)
$$

من أجل العاملين A & B . هذه النتيجة غالبا تسمى علاقة باكر – كامبل – هاوسدروف أو علاقة BCH .

ملاحظات حول التحديات و حلولها

" لا تقم بالحسب أبدا قبل ان تعرف افجابة

شعار جون ويلر "

تحدي 1 ، صفحة 10 : لا تتردد في الطلب و الاصرار . الاصدار التالي من الكتاب سيفيد من ذلك

تحدي 2 ، صفحة 16 : الفيزياء الكلاسيكية تفشل في شرح أي خاصة للمادة مثل اللون او الطراوة . خواص المادة تنتج من تبادلات تاثير الطبيعة و هي كمية دون شك و شروحات خواص المادة تتطلب بدون استثناء استخدام الجسيمات و خواصها الكمية

تحدي 3 ، صفحة 17 : الفيزياء الكلاسيكية تسمح لأي قيمة قابلة للقياس بان تتغير بانسيابية مع الزمن و في الفيزياء الكلاسيكية ليس هناك قيمة دنيا لأي كمية فيزيائية قابلة للقياس .

تحدي 4 ، صفحة 19 : كلما كانت الكتلة أعلى كلما كانت الضبابية أصغر المحرضة عن كم الفعل لأن الفعل هو الكتلة مضروبا بالمسافة مضروبا بالسرعة و من أجل كتلة كبيرة تغيرات السرعة و المسافة هي صغيرة .

تحدي 5 ، صفحة 20 : أبسط زمن هو $\sqrt{Gh/c^5}$. العامل العددي من الواضح انه غير ثابت و سيتغير لاحقا . باستخدام 4G بدلا من G يصبح الزمن أقصر زمن قابل للقياس في الطبيعة

تحدي 7 ، صفحة 21 : شحنة الالكترون خاصة بالتأثيرات المتبادلة الكهرطيسية و هي لا تأخذ بالحسبان تبادلات التاثير النووية او الجاذبية . و من غير الواضح لماذا الطول المعرف بواسطة الشحنة الأولية e يجب أن يكون مهما للجمل الحيادية أو من أجل الخلاء . من ناحية اخرى كم الفعل $\hbar$ صالح من اجل كل التأثيرات المتبادلة و كل القياسات .

بالاضافة لذلك يمكننا القول ان الخيارين لتعريف الطول الاساسي – بواسطة كم الفعل و بواسطة كم الشحنة – ليسا مختلفين كثيرا : شحنة الالكترون ترتبط بكم الفعل بالشكل $e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 \alpha c\hbar}$ و مقياسي الطول معرفين بواسطة الخيارين يختلفان فقط بعام قريب من 11.7 و في الحقيقة كلا المقياسين هما مياسين كميين .

تحدي 8 ، صفحة 21 : على أساس الأبعاد الصرفة نصف قطر الذرة يجب أن يكون

$$r \approx \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} , \qquad (153)$$

الذي هو حوالي 53 nm (صفحة 185) و في الحقيقة هذا التقدير ممتاز : هو فقط نصف قطر بور

تحدي 9 ، صفحة 21 : بسبب كم الفعل فان الذرات في كل الناس سواء كانوا عمالقة أو اقزام لها نفس الحجم و هذا يقتضي أن العمالقة غير موجودين كما هو مبين من قبل غاليليو .

المقولة تستند إلى المقاومة المعطاة للمواد و التي هي نفسها في كل مكان (مجلد I ، صفحة 336) و هذا مكافئ لنفس خواص الذرات في كل مكان . و الأقزام لا يمكن ان يوجدوا لسبب مشابه حيث الطبيعة لا تصنع اناسا أصغر من المعتاد (حتى في الرحم هم يختلفون بشكل ملحوظ عن البالغين) حيث هذا يتطلب ذرات أصغر .

تحدي 12 ، صفحة 27 : اختفاء الكتلة m في زمن Δt هو تغير الكم $c^2 m\Delta t$ و هذا هو أكبر بكثير من $\hbar$ من اجل كل الأجسام في الحياة اليومية .

تحدي 14 ، صفحة 29 : النفقية لأسد ستقتضي أن قيم الفعل S من المرتبة $\hbar$ << $S = 100\ kgm^2/s$ وهذا لا يمكن أن يحدث تلقائيا .

تحدي 15 ، صفحة 29 : كل ذاكرة سواء كانت ذاكرة بشرية او ذاكرة حاسب الكترونية يجب ان تتجنب التلاشي و التلاشي يمكن فقط ان يتم تجنبه عن طريق الجدران العالية و معدلات النفقية المنخفضة

تحدي 16 ، صفحة 30 : نعم ! العديد من المعتقدات و الاساطير – من اليانصيب للأشباح – هي ناتجة عن اهمال تأثيرات الكم .

تحدي 17 ، صفحة 30 : التدفق المستمر بشكل تام هو على عمس ضبابية الحركة المحرضة بكم الفعل

تحدي 18 ، صفحة 30 : استحالة ملاحقة جسيمين على طول مسارهما يظهر عندما مسافتهما المشتركة d هي أصغر من عدم تحديد موضعهما بسبب كمية حركتهما النسبية p و بالتالي عندما $d < \hbar/p$. تأكد من الاعداد على الالكترونات ، الذرات ، الجزيئات ، الباكتريا ، الناس و المجرات

تحدي 19 ، صفحة 30 : ايضا الفوتونات غير قابلة للتمييز انظر الصفحة 63

تحدي 21 ، صفحة 36 : في المادة التي تشكل آلية هروب

تحدي 22 ، صفحة 36 : النمو غير متناسب مع شدة الضوء او تردد الضوء و لكن يبين عتبات من اجل كل من الشدة و التردد . هذه هي تاثيرات كمية

تحدي 23 ، صفحة 36 : كل التأثيرات المذكورة اعلاه مثل التداخل النفقي ، الاضمحلال ، التحويل ، عدم فراغ الخلاء و عدم التحديد و الغعشوائية هي ايضا ملاحظة في المجال النووي

تحدي 24 ، صفحة 36 : هذا غير واضح مما قبل حتى الان ،ولكنه ينتج أنه صحيح وفي الحقيقة ليس هناك خيار آخر كما سنرى عندما نحاول ايجاد واحد

تحدي 25 ، صفحة 37 : توم ثمب يفترض أنه بذكاء الانسان العادي و لكن الدماغ لا يمكن ان يخفض مقياسه و الفراكتالات تتعارض مع وجود طول بلانك و قانون مور يتعارض مع وجود الذرات

تحدي 26 ، صفحة 37 : تحتسب كمية الحركة الزاوية الكلية التي تتضمن كمية الحركة الزاوية المدارية . ان كمية الحركة الزاوية المدارية L معطاة باستخدام مصف قطر كمية الحركة الخطية $L = r \times p$ و كمية الحركة الزاوية الكلية هي مضاعف لـ $\hbar$.

تحدي 27 ، صفحة 37 : نعم يمكننا ذلك !

تحدي 28 ، صفحة 37 : هذا فقط علاقة عدم التحديد و لقد عمم بور هذه الفكرة على كل نوع من ازواج المفاهيم الاخرى بشكل أكثر في المجال الفلسفي مثل الوضوح و دقة الشروحات و كلاهما لا يمكن أن يكونا عاليين بنفس الوقت

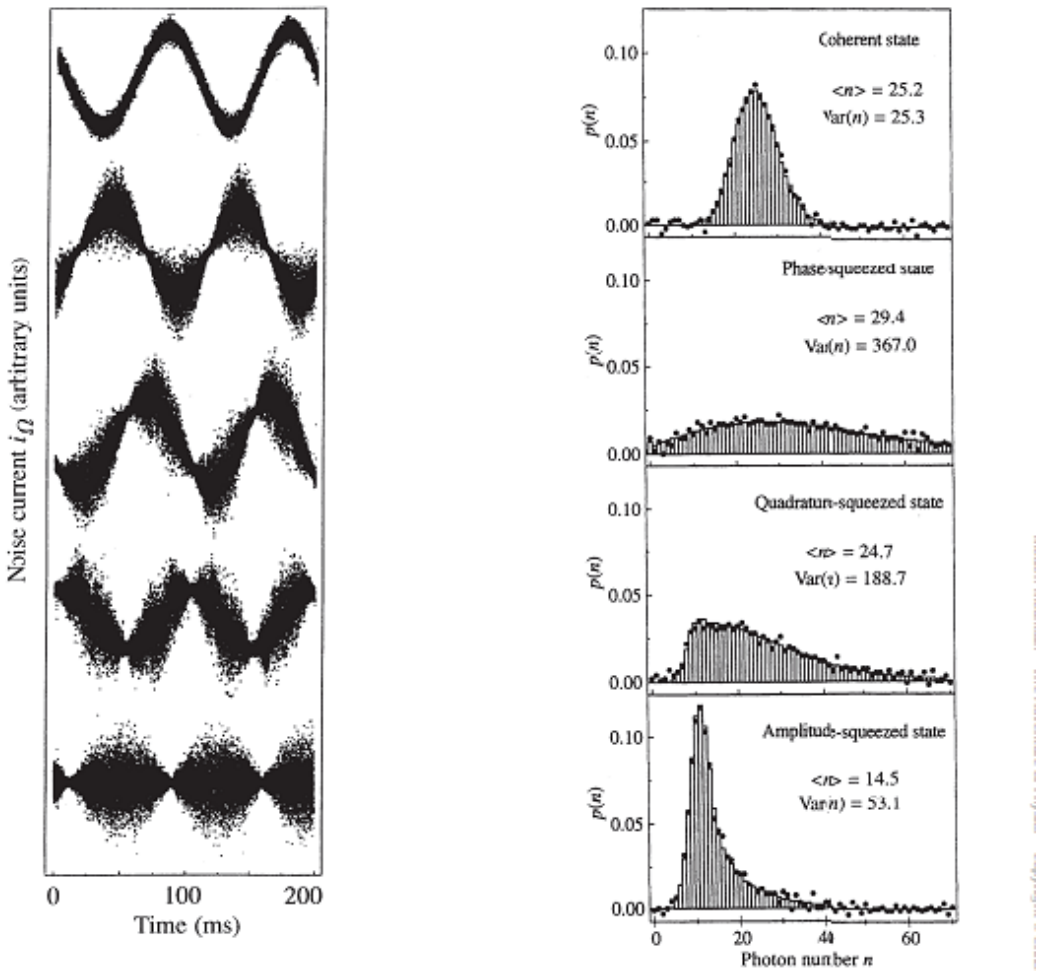
تحدي 29 ، صفحة 39 : الانفجار العظيم كان حدثا مثلا

تحدي 32 ، صفحة 45 : الفوتونات المشحونة يمكن أن تنعكس بواسطة حقول كهربائية أو مغناطيسية بشكل خاص هي لا يمكن أن تعبر بدون اضطراب و هذا لا يلاحظ و الفوتونات الكبيرة يمكن أن تنعكس بواسطة الكتل مثل الشمس و بشكل أكثر بكثير مما يلاحظ

تحدي 34 ، صفحة 45 : لقياس كمية الحركة نحن بحاجة لجهاز قياس ممتد فراغيا لقياس الموضع و نحن بحاجة لجهاز قياس موضعي

تحدي 35 ، صفحة 47 : الفوتونات هي أولية لانها تحقق الفعل الاصغري و لانها لا تضمحل و لانها لا تتشوه او تنقسم وليس لها كتلة و لا شحنة كهربائية و لا عدد كمي آخر و لأنها تظهر في لاغرانجيان الديناميك الكهربائي الكمي

تحدي 36 ، صفحة 50 : الحقول الكهربائية المقاسة و توزع الفوتونات مبينة في المخططات الشهيرة المبينة في الشكل



الشكل 90 – يسار ، من الأعلى للأسفل : الحقل الكهربائي و ضبابيته مقاسا من أجل حالة متماسكة ، من أجل حالة الخلاء المهصور ، من أجل حالة الطور المهصور ، من أجل حالة مهصورة ربعيا و من أجل حالة مهصورة المطال ، و كلها ذات عدد صغير من الفوتونات . يمين : توزعات العدد الفوتوني المقابل للحالات العلوية الأربعة .

تحدي 38 ، صفحة 50 : هذه مشكل مصاغة بشكل غير واضح حيث الإشعاع حراري ولكن أعداد الفوتونات تعتمد على الحجم قيد النقاش

تحدي 40 ، صفحة 56 : فوتونات الراديو يمكن عدها باستخدام تجارب ضخ ضوئية التي فيها الحالات الذرية تقسم بواسطة مقادير صغيرة بطول موجة الراديو بمساعدة حقول مغناطيسية . أيضا ساعات السيزيوم تكشف فوتونات الراديو بوسائل ضوئية . إن أثر جوزيفسون و التصوير بالرنين المغناطيسي هي طرق كشف إضافية لفوتونات الراديو

تحدي 41 ، صفحة 57 : كي تكون قابلة للملاحظة من قبل العين فإن اهداب التداخل تحتاج لأن تكون مرئية لمدة 0.1 s تقريبا و هذا يقتضي أن فرق التردد الأعظمي بين حزمتين بحوالي 10 Hz و هذا متوفر فقط إذا كان أي من الحزمتين الوحيدتين قد قسمت إلى حزمتين أو إذا اتت الحزمتان من ليرزين بدقة عالية مستقرين

تحدي 42 ، صفحة 62 : هذا ضمني في النموذج الضيق و هي فكرة أن جسيم كمي واحد يوصف بواسطة سهم

تحدي 48 ، صفحة 64 : بالرغم من العدد الضخم من المحاولات و الوعد بالشهرة الدائمة هذه نتيجة هادئة

تحدي 53 ، صفحة 68 : نعم المقولة صحيحة و في الحقيقة مزيد من المناقشات التفصيلية تبين أن الديناميك الكهربائي الكلاسيكي هو في تعارض مع كل الألوان الملحوظة في الطبيعة

تحدي 57 ، صفحة 72 : الحساب غير سهل و لكنه ليس صعبا جدا أيضا (مرجع 178)، من اجل توجه اولي قريب من الشاقولي فإن زمن السقوط T ينتج أنه

$$T = \frac{1}{2\pi} T_0 \ln \frac{8}{\alpha} \qquad (154)$$

حيث α زاوية مستقيمة و يفترض ان زاوية السقوط هي π . هنا T_0 هي زمن التذبذب لقلم الرصاص من اجل زوايا صغيرة (هل يمكنك تحديدها ؟) ان علاقة عدم التحديد لراس قلم الرصاص تعطي زاوية بدء اصغرية لأن عدم تحديد كمية الحركة لا يمكن ان يجعل كبيرا بشكل اعتباطي و عليك ان تكون قادرا على اعطاء حد اعلى و حالما هذه الزاوية تكون معروفة يمكنك حساب الزمن الاعظمي

تحدي 58 ، صفحة 73 : استخدم درجة الحرارة لسحاب الطاقة الحركية المتوسطة و بالتالي السرعة المتوسطة للذرات

تحدي 59 ، صفحة 73 : عند مثل درجات الحرارة المنخفضة هذه فان الذرات لا يمكن تمييزها بشكل كامل و هي تشكل حالة من المادة ذات خواص غريبة تسمى التكاثف والتكاثف ليس في سكون ايضا و لكن بسبب الكتلة الكبيرة تكون تذبذباتها منخفضة بشكل كبير مقارنة مع تلك العائدة لذرة وحيدة

تحدي 61 ، صفحة 77 : فقط المتحولات التي جداؤها له نفس الواحدات التي للفعل الفيزياء - Js – يمكن ان تكون متممة لبعضها البعض

تحدي 62 ، صفحة 78 : استخدم $\Delta E < E \ \& \ a \ \Delta t < c$

تحدي 67 ، صفحة 85 : كم الفعل لا يطبق فقط على القياسات حيث يطبق على الجسيمات و الجسيمات الاشعاعية النووية و كل الحركة . ايضا تاثيرات القوى النووية للجسيمات النووية و جسيمات الاشعاع النووي يجب أن تحقق هذا الحد و تبين التجارب انها بحاجة لأن تكون كذلك . في الحقيقة إذا لم تكن كذلك فان كم الفعل للديناميك الكهربائي سيتم التحايل عليه كما يمكنك التاكد من ذلك

تحدي 73 ، صفحة 95 : خارج المرآب كل الذرات تحتاج لان تشكل تفس البنية الصلبة ثانية

تحدي 74 ، صفحة 96 : الشرائح ذات التيرابت تحتاج لان يكون لها خلايا ذاكرة صغيرة و الخلايا الصغيرة تقتضي حواجز رقيقة و الحواجز الرقيقية تقتضي تبادل تاثير للنفقية و النفقية تقتضي عدم وجود ذاكرة

تحدي 80 ، صفحة 107 : إذا لم يكن الجسيم اوليا فان مكوناته سترتبط بتاثير متبادل و لكن إذا ليس هناك تاثير متبادل خارج هذا النموذج المعياري

تحدي 81 ، صفحة 108 : المصاعب هي رؤية ذرات الهيدروجين بسبب حجمها الصغير وعددها الصغير من الالكترونات بالنتيجة ذرات الهيدروجين تنتج فقط تباينات ضعيفة في صور الاشعة السينية ولهذا السبب من الصعب تصويرها باستخدام الالكترونات لكن نصف قطر بور للهيدروجين هو اكبر بشكل طفيف من طول موجة كومبتون للالكترون

لاول مرة في 2008 قال فريق بحثي أنه صور ذرات هيدورجين ممتصة على الغرافين بمساعدة مجهر الكتروني ناقل

للتفاصيل انظر J.C, MEYER , C.O.GRIT , M.F. CROMMLE & A. ZETTI تصوير و ديناميك ذرات الضوء و الجزيئات على الغرافين ، الطبيعة 454 صفحة 319-322, 2008 لكنن يبدو أن التقرير لم يؤكد من قبل مجموعة اخرى بعد

مزيد من صور الهيدروجين ظهرت في السنن الأخيرة . يمكنك البحث عن الأوليمبيسين في الإنترنت(صفحة 184) مثلا ومن أجل نتيجة أحدث عن تصوير الهيدروجين انظر أعلاه

تحدي 83 ، صفحة 108 : هذا ليس سهلا ! يمكنك استخدام مفهوم الفعل لبيان ان هناك فعلا فرق اساسي بين المعاملات المتشابهة والمختلفة جدا

تحدي 85 ، صفحة 109 : r = 86 pm بالتالي T = 12eV وهذا يقارن مع القيمة الفعلية البالغة 13.6 eV و الخدعة من أجل انحراف العلاقة هي استخدام $\langle\psi|r_x^2|\psi\rangle = \frac{1}{3}\langle\psi|\boldsymbol{rr}|\psi\rangle$ وهي علاقة صالحة من أجل الحالات بدون كمية حركة زاوية مدارية . و هي صالحة من أجل كل الاحداثيات و ايضا من أجل القيم القابل للقياس لكمية الحركة الثلاثية طالما أن الجملة غير نسبية

تحدي 86 ، صفحة 110 : التنبذب الكمي سيتطلب أن يكون الكون موجودا و مثل هذه العبارات توجد بانتظام في الصفحة و هي هراء مطلق

تحدي 87 ، صفحة 111 : الجسيمات النقطية لا يمكن تعليمها و الجسيمات النقطية القريبة لا يمكن تمييزها بسبب كم الفعل

تحدي 88 ، صفحة 111 : الحل هو قفازين . في الحالة الاصلية إذا كان الرجلين و المرأتين قاما بممارسة الحب بلا خطر في النظرية فما بحاجة لعازلين

تحدي 93 ، صفحة 113 : ان علاقة ساكور – تيترود تستنتج بشكل افضل في الشكل التالي حيث نبدا بغاز مثالي وحيد الذرة بحجم V ذو N جسيم و طاقة كلية U . في فضاء الطور مجموعة الحالة Z تعطى بالشكل

$$Z = \frac{V^N}{N!}\frac{1}{\Lambda^{3N}}\,. \qquad (155)$$

نستخدم تقريب ستيرليغ $N! \approx N^N/e^N$ و تعريف الانتروبي $S = \partial(kT\ln Z)/\partial T$ و بادخال تعريف Λ يعطي هذا معادلة ساكور – تيترود

تحدي 95 ، صفحة 116 : لكتابة أي شيء عن جسمين على ورق نحتاج لتمييزهما حتى لو كان التمييز اعتباطيا

تحدي 98 ، صفحة 122 : الفكرة ايضا تسمى المال الكمي و هي غير متوافقة مع شروط الحجم و العمر لأوراق النقد الفعلية

تحدي 99 ، صفحة 123 : التوائم تختلف بالشكل الذي تكون فيه أمعاؤها مطوية و في خطوط اليدين و طيات الجلد و في بعض الاحيان و ليس دائما التفاصيل مثل النقاط السوداء على الجلد تكون مقلوبة مرآتيا في التؤأمين

تحدي 108 ، صفحة 134 : ثلاثة

تحدي 109 ، صفحة 134 : لا من أجل المادة و هذا غير سهل تصويره

تحدي 110 ، صفحة 135 : الملائكة يمكن تمييزها بالاسم حيث يمكن ان تتكلم و يمكن ان تغني و بالتالي مكونة من اعداد كبيرة من الفرميونات و في الحقيقة العديد من الملائكة ذات حجم بشري بحيث أنها لا يمكن ان تناسب رأس دبوس

تحدي 116 ، صفحة 139 : البوزون يمكن تمثيله بجسم ملصق على خيط رفيع بشكل لا متناهي في الصغر الذي طرفيه يصلان للانهاية الفراغية

تحدي 117 ، صفحة 140 : الأشجار مثل كل الأجسام الماكروسكوبية لها قيمة برم تعتمد على كمية حركتها الزاوية و كونها أجسام كلاسيكية التي يمكن قياس طورها فإن قيمة البرم غير مؤكدة و من غير المنطقي سؤال فيما إذا كانت الاشجار أو الأجسام الماكروسكوبية الأخرى هي بوزونات او فرميونات حيث أنها ليست كوانتونات

تحدي 120 ، صفحة 141 : الاشباح مثل الملائكة يمكن تمييزها بالاسم و يمكن ان تتحدث و أن ترى وبالتالي تحتوي فرميونات ولكن يمكنها ان تمر عبر الجدران و هي شفافة و بالتالي لا يمكن ان تكون مكونة من فرميونات و لكن يجب أن تكون صور مكونة من بوزونات وهذا تناقض

تحدي 121 ، صفحة 143 : التنضدات الماكروسكوبية لا يمكن ان ترسم لانها ملاحظة تقتضي تبادل تاثير مع حمّام و الذي يخرب التنضد الماكروسكوبي

تحدي 123 ، صفحة 145 : فقد العناصر غير القطرية يؤدي الى زيادة في العناصر القطرية و بالتالي انتروبي

تحدي 126 ، صفحة 152 : سرعة الطاقة تعطى بتقدم الطرفين الخارجيين و تلك السرعة لا تكون ابدا اكبر من سرعة الضوء

تحدي 127 ، صفحة 154 : لا ، حيث ان أخذ صورة يقتضي تبادل تاثير مع حمّام و الذي سيخرب التنضد . و بمزيد من التفصيل تتطلب الصورة اضاءة و الاضاءة هي حقل كهرطيسي ماكروسكوبي و الحقل الماكروسكوبي هو حمّام و الحمام يقتضي زوال التماسك و الذي يخرب التنضدات

تحدي 130 ، صفحة 156 : هذا يعتمد على الحالة . هي يمكن ان تكون ناتجة عن التداخل او مجموعات الشدة و في حال الراديو الاثر أوضح و إذا عند تردد معين تغيرات الاشارات دوريا من محطة لأخرى يوجد لدينا أثر تداخل

تحدي 131 ، صفحة 156 : هي تتداخل و لكن هذا سؤال مخادع ، ما هو الالكترون وحيد اللون ؟ هل يوجد في المخبر؟

تحدي 132 ، صفحة 156 : مثل هذا الحاسب سيتطلب علاقات طور واضحة بين المكونات مثل علاقات الطور هذه هي حساسة جدا للاضطرابات الخارجية و في الوقت الحالي هي لا تصح لاطول من ميكرو ثانية بينما برامج الحاسوب الطويلة تتطلب دقائق لساعات لتشغيلها

تحدي 133 ، صفحة 156 : السجل هو أثر عملية يجب أن يكون من الصعب عكسه أو إلغاؤه و الآثار للبيض المكسور من السهل تنظيفها على لوج زجاج كبير و لكن من الصعب على صوف شاة

الأسنان المكسورة ، الأقمشة الممزقة أو الخدوش على أسطح كبيرة هي سجلات جيدة وعلماء الأدلة الجنائية يعلمون العديد من الأمثلة الإضافية .

تحدي 137 ، صفحة 165 : أي حمّام آخر أيضا يقوم بالخدعة مثل الغلاف الجوي ، اهتزازات الصوت ، الحقول الكهرطيسية .. الخ

تحدي 138 ، صفحة 165 : القمر هو في تماس مع حمّامات مثل الريح الشمسية ، المذنبات الساقطة ، إشعاع الخلفية الكهرطيسي للكون العميق و فيض النيتوترينو من الشمس ، الاشعاع الكوني ..الخ

تحدي 139 ، صفحة 167 : الكمونات الدورية فراغيا لها هذه الخاصة . ازالة التماسك بالتالي تؤدي الى قطربة كمية الحركة

تحدي 141 ، صفحة 170 : إذا كان كذلك أعلموا المؤلف بذلك

تحدي 142 ، صفحة 181 : قيمة الانزياح الاحمر هي z =9.9995 . من علاقة انزياح دوبلر الطولي نحصل على $v/c=((z+1)^2-1/(z+1)^2+1)$ وهذا يعطي 0.984 في الحالة الحالية. المجرة بالتالي تتحرك بعيدا عن الرض بنسبة 98.4% من سرعة الضوء .

تحدي 148 ، صفحة 183 : ذرات الهيدروجين هي في حالات خاصة لأسباب مشروحة في الفصل حول التنضدات و الاحتمالات :في غاز الذرات هي جزء من حمّام و بالتالي تقريبا دائما في حالات خاصة للطاقة

تحدي 153 ، صفحة 194 : إذا ركزت عدة حزم ضوئية في الفراغ بين مرآتين و إذا كان تردد حزمة الضوء قد ضبط بشكل ملائم بالنسبة لترددات الامتصاص للذرات فإن الذرات ستعاني من قوة استعادة متى تحركت بعيدا عن منطقة التركيز . و بواسطة الحزم الضوئية الساطعة على منطقة التركيز من ستة اتجاهات تحجز الذرات . و تقنية تبريد الليزر تستخدم بشكل واسع الآن في مخابر البحث

تحدي 154 ، صفحة 195 : لا ، بالرغم من اسمه فإن الفوسفور غير مصدر للفسفرة و لكن متألق كيماويا

تحدي 156 ، صفحة 196 : هذا سؤال مخادع . التغير في α يتطلب تغير في c , $\hbar$, e أو ε_0 . و لا واحد من هذه التغيرات ممكن أو يمكن قياسه كما كل أجهزة القياس التي تستند لهذه الواحدات . التصورات حول تغير α بالرغم من ترددها في الصحافة و في المجلات العلمية فهي مجرد حديث

تحدي 157 ، صفحة 196 : التغير في الواحدات الفيزيائية مثل $\hbar = c = e = 1$ سيغير قيمة ε_0 بحيث أن $4\pi\ \varepsilon_0 = 1/\alpha \approx 137.036$

تحدي 160 ، صفحة 206 : الكتلة هي قياس لكمية الطاقة . مربع الكتلة لا يشكل أي معنى

تحدي 164 ، صفحة 209 : حدود بلانك يمكن تجاوزها من أجل القيم القابلة للقياس الشاملة التي من اجلها العديد من جمل الجسيمات يمكن أن تتجاوز حدود الجسيم الوحيد مثل الكتلة ، كمية الحركة ، الطاقة أو المقاومة الكهربائية

تحدي 166 ، صفحة 211 : لا تنسى تمدد الزمن النسبي

تحدي 167 ، صفحة 211 : العلاقة ذات n-1 ذات تطابق أفضل . لماذا ؟

تحدي 170 ، صفحة 212 : لا ! هي أكثر دقة بكثير لتعطي معنى . و هي فقط معطاة كتوضيح لسلوك التوزع الغوصي . توزعات القياس الأحمر ليست غوصية بالدقة المفترضة في هذه الأعداد

تحدي 171 ، صفحة 213 : تقريبا 0.3 m/s . هي ليست 0.33 m/s و ليست 0.333 m/s وهي ليست سلاسل أطول للثلاثة

تحدي 173 ، صفحة 219 : الإبطاء يذهب بشكل رباعي مع الزمن لان كل تباطؤ جديد يضاف للقديم

تحدي 174 ، صفحة 219 : لا ، فقط خواص أجزاء من الكون واردة . الكون نفسه لا يملك خواص كما هو مبين في المجلد الأخير (مجلد VI ، صفحة 110)

تحدي 175 ، صفحة 221 : ضعف ذلك العدد ، العدد مكون من متتالية كل الأعداد الزوجية .. الخ

تحدي 178 ، صفحة 224 : سوف نجد في المجلد الأخير أن كل قيم القياس لها حدود علوية و سفلية . وسوف نجد أيضا ان نتائج القياسين الفيزيائيين لا يمكن أن يختلفا فقط عن ، لنقل ، الموقع الثلاثمائة العشري و هذا في الواقع كل نتائج القياس هي اعداد حقيقية و لكن العكس بالعكس . نحتاج للتأكيد انه من اجل نظرية الكم و من اجل النسبية و أيضا من أجل فيزياء غاليليو هذا الشرط ليس له عواقب مهما كانت

تحدي 180 ، صفحة 225 : $|z|^2$ هو معين المصفوفة $z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$

$$z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}.$$

تحدي 185 ، صفحة 226 : استخدم فرضية كانتور القطرية كما في التحدي 271 .

تحدي 186 ، صفحة 227 : أي رباعية $X = ai+bj+ck$ حيث $a^2 +b^2 +c^2 =1$ تحل المعادلة $X^2 +1 =0$ و الحلول التخيلية الصرفة i & $- i$ هي بالتالي مفترضة من قبل كرة مستمرة من الحلول في فضاء الرباعيات

تحدي 189 ، صفحة 229 : أي دوران بزاوية 2π يوصف بـ 1- . فقط الدوران بمقدار 4π يوصف بـ 1+ و الرباعيات في الحقيقة تصف السبينورات

تحدي 191 ، صفحة 231 : فقط تأكد من النتيجة مركبة بعد أخرى . أنظر ايضا المرجع المذكور

تحدي 193 ، صفحة 233 : لا . لأن الثمانيات الواحدية غير تجميعية و هي لا تشكل زمرة أبدا . و بالرغم من شكلها السطحي هذا النسق من التبرير لا يؤدي إلى أي معرفة لطبيعة التأثيرات المتبادلة الأساسية

تحدي 194 ، صفحة 234 : من أجل عدد صحيح غوصي $m+n$ ليكون أولي فإن العدد الصحيح $n^2 + m^2$ يجب أن يكون اولي و بالاضافة لذلك الشرط على $n \bmod 3$ يجب أن يتحقق ، أي واحد و لماذا ؟

تحدي 196 ، صفحة 235 : المجموعة تحتوي فقط شعاع صفري

تحدي 197 ، صفحة 235 : المتري هو منتظم و محدد إيجابيا و يخضع للمتراجحة المثلثية

تحدي 199 ، صفحة 236 : اساسا فقط الفضاءات الشعاعية الواردة في الملحق (او في الكتاب)

تحدي 200 ، صفحة 236 : اذا كنت لا تستطيع لوم معلم الرياضيات خاصتك في المدرسة الثانوية و بعدها ابحث عن التعاريف . هذا ليس موضوعا صعبا

تحدي 201 ، صفحة 237 : الفضاءات يمكن أن توجد بشكل تقريبي كمتوسطات لبنى غير مستمرة و هذه الفكرة درست في الأبحاث الحديثة و مثال عليها معطى في آخر مجلد من هذه السلسلة .

BIBLIOGRAPHY

> No man but a blockhead ever wrote except for money.
>
> Samuel Johnson

> As soon as you write, no time to read remains.
>
> Anonymous

1 GIUSEPPE FUMAGALLI, *Chi l'ha detto?*, Hoepli, Milano, 1983. Cited on page 15.

2 The quantum of action was introduced in MAX PLANCK, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin pp. 440–480, 1899. In the paper, Planck used the letter *b* for what nowadays is called *h*. Cited on page 17.

3 Bohr explained the indivisibilty of the quantum of action in his famous Como lecture. See N. BOHR, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Springer, 1931. On page 16 he writes: 'No more is it likely that the fundamental concepts of the classical theories will ever become superfluous for the description of physical experience. The recognition of the indivisibility of the quantum of action, and the determination of its magnitude, not only depend on an analysis of measurements based on classical concepts, but it continues to be the application of these concepts alone that makes it possible to relate the symbolism of the quantum theory to the data of experience.' He also writes: '...the fundamental postulate of the indivisibility of the quantum of action is itself, from the classical point of view, an irrational element which inevitably requires us to forgo a causal mode of description and which, because of the coupling between phenomena and their observation, forces us to adopt a new mode of description designated as complementary in the sense that any given application of classical concepts precludes the simultaneous use of other classical concepts which in a different connection are equally necessary for the elucidation of the phenomena ...' and '...the finite magnitude of the quantum of action prevents altogether a sharp distinction being made between a phenomenon and the agency by which it is observed, a distinction which underlies the customary concept of observation and, therefore, forms the basis of the classical ideas of motion.' Other statements about the indivisibility of the quantum of action can be found in N. BOHR, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, 1961. See also MAX JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, first edition, 1974, pp. 90–91. Cited on page 17.

4 For some of the rare modern publications emphasizing the quantum of action see M. B. MENSKY, *The action uncertainty principle and quantum gravity*, Physics Letters A 162, p. 219, 1992, and M. B. MENSKY, *The action uncertainty principle in continuous quantum measurements*, Physics Letters A 155, pp. 229–235, 1991. Schwinger's quantum-action principle is also used in RICHARD F. W. BADER, *Atoms in Molecules – A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2010 free pdf file available at www.motionmountain.net

There is a large number of general textbooks on quantum theory. There is one for every taste.

A well-known *conceptual* introduction is JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND & FRANÇOISE BALIBAR, *Quantique – Rudiments*, Masson, 1997, translated into English as *Quantics*, North-Holland, 1990.

One of the most beautiful books is JULIAN SCHWINGER, *Quantum Mechanics – Symbolism of Atomic Measurements*, edited by Berthold-Georg Englert, Springer Verlag, 2001.

A modern approach with a beautiful introduction is MAX SCHUBERT & GERHARD WEBER, *Quantentheorie – Grundlagen und Anwendungen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1993.

A standard beginner's text is C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU & F. LALOË, *Mécanique quantique I et II*, Hermann, Paris, 1977. It is also available in several translations.

A good text is ASHER PERES, *Quantum Theory – Concepts and Methods*, Kluwer, 1995.

For a lively approach, see VINCENT ICKE, *The Force of Symmetry*, Cambridge University Press, 1994.

New textbooks are published regularly around the world. Cited on pages 17 and 254.

5 The best source for the story about the walk in the forest with Planck's son Erwin is HANS ROOS & ARMIN HERMANN, editors, *Max Planck – Vorträge, Reden, Erinnerungen*, Springer, 2001, page 125. As the text explains, the story was told by Erwin Planck to at least two different people. Erwin Planck himself was part of the failed 1944 plot against Hitler and was hanged in January 1945. Cited on page 20.

6 MAX BORN, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (vorläufige Mitteilung)*, Zeitschrift für Physik **37**, pp. 863–867, 1926, MAX BORN, *Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeitschrift für Physik **38**, pp. 803–827, 1926. Cited on page 24.

7 See for example the papers by JAN HILGEVOORD, *The uncertainty principle for energy and time*, American Journal of Physics **64**, pp. 1451–1456, 1996, and by PAUL BUSCH, *On the time-energy uncertainty reaction, parts 1 & 2*, Foundations of Physics **20**, pp. 1–43, 1990. A classic is the paper by EUGENE P. WIGNER, *On the time-energy uncertainty relation*, in ABDUS SALAM & EUGENE P. WIGNER, editors, *Aspects of Quantum Theory*, Cambridge University Press, 1972. Cited on page 25.

8 See also the booklet by CLAUS MATTHECK, *Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik*, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003. Cited on page 29.

9 R. CLIFTON, J. BUB & H. HALVORSON, *Characterizing quantum theory in terms of information-theoretic constraints*, arxiv.org/abs/quant-ph/0211089. Cited on page 36.

10 This way to look at cans of beans goes back to the text by SUSAN HEWITT & EDWARD SUBITZKY, *A call for more scientific truth in product warning labels*, Journal of Irreproducible Results **36**, nr. 1, 1991. Cited on page 37.

11 J. MALIK, *The yields of the Hiroshima and Nagasaki nuclear explosions*, Technical Report LA-8819, Los Alamos National Laboratory, September 1985. Cited on page 38.

12 The quotes on motion are found in chapter VI of F. ENGELS, *Herrn Eugen Dührings Umwälzung der Wissenschaft*, Verlag für fremdsprachliche Literatur, 1946. The book is commonly called *Anti-Dühring*. Cited on pages 39 and 73.

13 RODNEY LOUDON, *The Quantum Theory of Light*, Oxford University Press, 2000. Cited on page 40.

14 E. M. BRUMBERG & S. I. VAVILOV, Izvest. Akad. Nauk. Omen Ser. 7, p. 919, 1933. Cited on page 40.

15 On photon detection in the human eye, see the influential review by F. RIEKE &

Motion Mountain – The Adventure of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2018 – free pdf file available at www.motionmountain.net

D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics 70, pp. 1027–1036, 1998. It can be found on the internet as a pdf file. Cited on page 42.

16 F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics 70, pp. 1027–1036, 1998. They also mention that the eye usually works at photon fluxes between 10^8 / $\mu m^2 s$ (sunlight) and 10^{-2} / $\mu m^2 s$ (starlight). The cones, in the retina detect, in colour, light intensities in the uppermost seven or eight decades, whereas the rods detect, in black and white, the lower light intensities. Cited on page 44.

17 E. Fischbach, H. Kloor, R. A. Langel, A. T. Y. Lui & M. Peredo, *New geomagnetic limit on the photon mass and on long-range forces coexisting with electromagnetism*, Physical Review Letters 73, pp. 514–517, 1994. Cited on page 45.

18 A. H. Compton, *The scattering of X-rays as particles*, American Journal of Physics 29, pp. 817–820, 1961. This is a pedagogical presentation of the discoveries he made in 1923. Cited on page 45.

19 The reference paper on this topic is G. Breitenbach, S. Schiller & J. Mlynek, *Measurement of the quantum states of squeezed light*, 387, pp. 471–475, 1997. It is available freely at gerdbreitenbach.de/publications/nature1997.pdf. Cited on pages 48 and 240.

20 The famous paper is R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature 178, p. 1046, 1956. They got the idea to measure light in this way from their earlier work, which used the same method with radio waves: R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature 177, p. 27, 1956. The complete discussion is given in their papers R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation*, Proceedings of the Royal Society A 242, pp. 300–324, 1957, and R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. II. An experimental test of the theory for partially coherent light*, Proceedings of the Royal Society A 243, pp. 291–319, 1958. Both are dowloadable for free on the internet and are well worth reading. Cited on page 52.

21 J. Glanz, *First light from a space laser*, Science 269, p. 1336, 1995. Cited on page 54.

22 A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*, Annalen der Physik 17, pp. 132–184, 1905. Cited on page 55.

23 See the summary by P. W. Milonni, *Answer to question 45: What (if anything) does the photoelectric effect teach us?*, American Journal of Physics 65, pp. 11–12, 1997. Cited on page 55.

24 For a detailed account, See J. J. Prentis, *Poincaré's proof of the quantum discontinuity of nature*, American Journal of Physics 63, pp. 339–350, 1995. The original papers are Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris) 153, pp. 1103–1108, 1911, and Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Journal de Physique (Paris) 2, pp. 5–34, 1912. Cited on page 55.

25 J. Jacobson, G. Björk, I. Chang & Y. Yamamoto, *Photonic de Broglie waves*, Physical Review Letters 74, pp. 4835–4838, 1995. The first measurement was published by E. J. S. Fonseca, C. H. Monken & S. de Pádua, *Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet*, Physical Review Letters 82, pp. 2868–2671, 1995. Cited on page 55.

26 For the three-photon state, see M. W. Mitchell, J. S. Lundeen & A. M. Steinberg, *Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state*, Nature 429, pp. 161–164, 2004, and for the four-photon state see, in the same edition, P. Walther, J.-W. Pan,

Modern Mountain – The Adventure of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net

M. Aspelmeyer, R. Ursin, S. Gasparoni & A. Zeilinger, *De Broglie wavelength of a non-local four-photon state*, Nature 429, pp. 158–161, 2004. Cited on page 55.

27 For an introduction to squeezed light, see L. Mandel, *Non-classical states of the electromagnetic field*, Physica Scripta T 12, pp. 34–42, 1986. Cited on page 55.

28 Friedrich Herneck, *Einstein und sein Weltbild: Aufsätze und Vorträge*, Buchverlag Der Morgen, 1976, page 97. Cited on page 56.

29 The famous quote on single-photon interference is found on page 9 of famous, beautiful but difficult textbook P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, 1930. It is also discussed, in a somewhat confused way, in the otherwise informative article by H. Paul, *Interference between independent photons*, Reviews of Modern Physics 58, pp. 209–231, 1986. Cited on pages 59 and 66.

30 The original papers on coherent states are three: R. J. Glauber, *The quantum theory of optical coherence*, Physical Review 130, pp. 2529–2539, 1963, J. R. Klauder, *Continuous-representation theory*, I and II, Journal of Mathematical Physics 4, pp. 1055–1058, 1963, and E. C. G. Sudarshan, *Equivalence of semiclassical and quantum mechanical descriptions of statistical light beams*, Physical Review Letters 10, p. 227, 1963. Cited on page 63.

31 See, for example the wonderful text Richard P. Feynman, *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, pp. 73–75, Princeton University Press, 1988, or Richard P. Feynman & Steven Weinberg, *Elementary Particles and the Laws of Physics*, p. 23, Cambridge University Press 1987. Cited on page 63.

32 Wolfgang Tittel, J. Brendel, H. Zbinden & N. Gisin, *Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart*, Physical Review Letters 81, pp. 3563–3566, 26 October 1998. Cited on page 64.

33 N. Bohr & L. Rosenfeld, *Zur Frage der Meßbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen*, Mat.-fys. Medd. Danske Vid. Selsk. 12, p. 8, 1933. The results were later published in English as N. Bohr & L. Rosenfeld, *Field and charge measurements in quantum electrodynamics*, Physical Review 78, pp. 794–798, 1950. Cited on page 65.

34 Misleading statements are given in the introduction and in the conclusion of the review by H. Paul, *Interference between independent photons*, Review of Modern Physics 58, pp. 209–231, 1986. However, in the bulk of the article the author in practice retracts the statement, e.g. on page 221. Cited on page 66.

35 G. Magyar & L. Mandel, *Interference fringes produced by superposition of two independent maser light beams*, Nature 198, pp. 255–256, 1963. Cited on page 66.

36 R. Kidd, J. Aedini & A. Anton, *Evolution of the modern photon*, American Journal of Physics 57, pp. 27–35, 1989. Cited on page 70.

37 The whole bunch of atoms behaves as one single molecule; one speaks of a Bose–Einstein condensate. The first observations, worthy of a Nobel prize, were by M. H. Anderson & al., *Observation of Bose–Einstein condensation in a dilute atomic vapour*, Science 269, pp. 198–201, 1995, C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett & R. G. Hulet, *Evidence of Bose–Einstein condensation in an atomic gas with attractive interactions*, Physical Review Letters 75, pp. 1687–1690, 1995, K. B. Davis, M.-O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn & W. Ketterle, *Bose–Einstein condensation in a gas of sodium atoms*, Physical Review Letters 75, pp. 3969–3973, 1995. For a simple introduction, see W. Ketterle, *Experimental studies of Bose–Einstein condensation*, Physics Today pp. 30–35, December 1999. Cited on page 73.

38 J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. García-Mochales & P. A. Serena, *Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: a universal property of metals*, Surface

Modern Mountain – The Adventures of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net

Science Letters 342, pp. L1144–L1152, 1995. See also J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. A. Serena, P. García-Mochales, M. Marqués & A. Correia, *Conductance quantization in nanowires formed in macroscopic contacts*, Physical Review B p. 4416, 1997. Cited on page 73.

39 The beautiful undergraduate experiments made possible by this discovery are desribed in E. L. Foley, D. Candela, K. M. Martini & M. T. Tuominen, *An undergraduate laboratory experiment on quantized conductance in nanocontacts*, American Journal of Physics 67, pp. 389–393, 1999. Cited on pages 73 and 74.

40 L. de Broglie, *Ondes et quanta*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences 177, pp. 507–510, 1923. Cited on page 75.

41 C. Jönsson, *Interferenz von Elektronen am Doppelspalt*, Zeitschrift für Physik 161, pp. 454–474, 1961, C. Jönsson, *Hectron diffraction at multiple slits*, American Journal of Physics 42, pp. 4–11, 1974. Because of the charge of electons, this experiment is not easy to perform: any parts of the set-up that are insulating get charged and distort the picture. That is why the experient was performed much later with electrons than with atoms, neutrons and molecules. Cited on page 76.

42 M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw & A. Zeilinger, *Wave-particle duality of C60 molecules*, Nature 401, pp. 680–682, 14 October 1999. See also the observation for tetraphenyleprophyrin and $C_{60}F_{48}$ by the same team, published as L. Hackermüller & al., *Wave nature of biomolecules and fluorofullerenes*, Physical Review Letters 91, p. 090408, 2003.

No phenomoenon of quantum theory has been experimentally studied as much as quantum interference. The transition from interference to non-interference has also been explored, as in P. Facchi, A. Mariano & S. Pascazio, *Mesoscopic interference*, Recent Developments in Physics 3, pp. 1–29, 2002. Cited on page 76.

43 G. Papini, *Shadows of a maximal acceleration*, arxiv.org/abs/gr-qc/0211011. Cited on page 78.

44 J. Perrin, *Nobel Prize speech*, found at www.nobel.se, and H. Nagaoka, *Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity*, Philosophical Magazine S6, 7, pp. 445–455, March 1904. Cited on page 78.

45 N. Bohr, *On the constitution of atoms and molecules: Introduction and Part I – binding of electrons by positive nuclei*, Philosophical Magazine 26, pp. 1–25, 1913, *On the constitution of atoms and molecules: Part II – systems containing only a single nucleus*, ibid., pp. 476–502, *On the constitution of atoms and molecules: Part III*, ibid., pp. 857–875. Cited on page 78.

46 Robert H. Dicke & James P. Wittke, *Introduction to Quantum Theory*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1960. See also Stephen Gasiorowicz, *Quantum Physics*, John Wiley & Sons, 1974. Cited on page 80.

47 P. Carruthers & M. M. Nieto, *Phase and angle variables in quantum mechanics*, Review of Modern Physics 40, pp. 411–440, 1968. Cited on page 81.

48 The indeterminacy relation for rotational motion is well explained by W. H. Louisell, *Amplitude and phase uncertainty relations*, Physics Letters 7, p. 60, 1963. Cited on page 81.

49 S. Franke-Arnold, S. M. Barnett, E. Yao, J. Leach, J. Courtial & M. Padgett, *Uncertainty principle for angular position and angular momentum*, New Journal of Physics 6, p. 103, 2004. This is a freely accessible online journal. Cited on page 81.

50 W. Gerlach & O. Stern, *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*, Zeitschrift für Physik 8, p. 110, 1921. See also the pedagogical explanation by

Modern Mountain – The Adventure of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2011 – free pdf file available at www.motionmountain.net

M. Hannout, S. Hoyt, A. Kryowonos & A. Widom, *Quantum measurement and the Stern–Gerlach experiment*, American Journal of Physics 66, pp. 377–379, 1995. Cited on page 82.

51 J.P. Woerdman, G. Nienhuis, I. Kuščer, *Is it possible to rotate an atom?*, Optics Communications 93, pp. 135–144, 1992. We are talking about atoms rotating around their centre of mass; atoms can of course rotate around other bodies, as discussed by M.P. Silverman, *Circular birefringence of an atom in uniform rotation: the classical perspective*, American Journal of Physics 58, pp. 310–317, 1990. Cited on page 84.

52 J. Schmiedmayer, M.S. Chapman, C.R. Ekstrom, T.D. Hammond, S. Wehinger & D.E. Pritchard, *Index of refraction of various gases for sodium matter waves*, Physical Review Letters 74, p. 1043-1046, 1995. Cited on page 84.

53 The original result is due to V. de Sabbata & C. Sivaram, *A minimal time and time-temperature uncertainty principle*, Foundations of Physics Letters 5, pp. 183–189, 1992. Experimental details are found, for example, in G.T. Gillies & S.W. Allison, *Experimental test of a time-temperature formulation of the uncertainty principle via nanoparticle fluorescence*, Foundations of Physics Letters 18, pp. 65–74, 2005. Cited on page 85.

54 Albert Einstein & Max Born, *Briefwechsel 1916 bis 1955*, Rowohlt, 1969, as cited on page 34. Cited on page 86.

55 E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem I*, Annalen der Physik 79, pp. 361–376, 1926, and *Quantisierung als Eigenwertproblem II*, Annalen der Physik 79, pp. 489–527, 1926. Cited on page 91.

56 C.G. Gray, G. Karl & V.A. Novikov, *From Maupertius to Schrödinger. Quantization of classical variational principles*, American Journal of Physics 67, pp. 959–961, 1999. Cited on page 91.

57 Y. Aharonov & D. Bohm, *Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory*, Physical Review 115, pp. 485–491, 1959. Cited on page 97.

58 R. Colella, A.W. Overhauser & S.A. Werner, *Observation of gravitationally induced quantum interference*, Physical review Letters 34, pp. 1472–1474, 1975. Cited on page 99.

59 The trend-setting result that started this exploration was Hans-Werner Fink & al., *Atomic resolution in lens-less low-energy electron holography*, Physical Review Letters 67, pp. 1543–1546, 1991. Cited on page 100.

60 L. Cser, Gy. Török, G. Krexner, I. Sharkov & B. Faragó, *Holographic imaging of atoms using thermal neutrons*, Physical Review Letters 89, p. 175504, 2002. Cited on page 100.

61 G.E. Uhlenbeck & S. Goudsmit, *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, Naturwissenschaften 13, pp. 953–954, 1925. Cited on page 103.

62 L. Thomas, *The motion of the spinning electron*, Nature 117, p. 514, 1926. Cited on page 104.

63 K. von Meyenn & E. Schucking, *Wolfgang Pauli*, Physics Today pp. 43–48, February 2001. Cited on page 104.

64 T.D. Newton & E.P. Wigner, *Localized states for elementary systems*, Review of Modern Physics 21, pp. 400–406, 1949. L.L. Foldy & S.A. Wouthuysen, *On the Dirac theory of spin 1/2 particles and its nonrelativistic limit*, Physical Review 78, pp. 29–36, 1950. Both are classic papers. Cited on page 105.

Modern Mountain – The Adventures of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 – free pdf file available at www.modernmountain.net

65 J.P. Costella & B.H.J. McKellar, *The Foldy–Wouthuysen transformation*, American Journal of Physics **63**, pp. 1119–1121, 1995. Cited on page 105.

66 For an account of the first measuremnt of the g-factor of the electron, see H.R. Crane, *How we happended to measure g-2: a tale of serendipity*, Physics in Perspective **2**, pp. 135–140, 2000. The most interesting part is how the experimentalists had to overcome the conviction of almost all theorists that the measurement was impossible in principle. Cited on page 106.

67 The *g*-factors for composite nuclei are explained briefly on en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_moment and measured values are found at www-nds.iaea.org. See also H. Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Cited on pages 107 and 253.

68 The nearest anyone has come to an image of a hydrogen atom is found in A. Yazdani, *Watching an atom tunnel*, Nature **409**, pp. 471–472, 2001. The experiments on Bose–Einstein condensates are also candidates for images of hydrogen atoms. The company Hitachi made a fool of itself in 1992 by claiming in a press release that its newest electron microscope could image hydrogen atoms. Cited on page 108.

69 A.M. Wolsky, *Kinetic energy, size, and the uncertainty principle*, American Journal of Physics **42**, pp. 760–763, 1974. Cited on page 109.

70 For a fascinating summary, see M.A. Cirone, G. Metikas & W.P. Schleich, *Unusual bound or localized states*, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/0102065. Cited on page 109.

71 See the paper by Martin Gardner, *Science fiction puzzle tales*, Clarkson Potter, **67**, pp. 104–105, 1981, or his book *Aha! Insight*, Scientific American & W.H. Freeman, 1978. Several versions are given A. Hajnal & P. Lovász, *An algorithm to prevent the propagation of certain diseases at minimum cost*, in *Interfaces Between Computer Science and Operations Research*, edited by J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan & P. Van Emde Boas, Mathematisch Centrum, Amsterdam 1978, whereas the computer euphemism is used by A. Orlitzky & L. Shepp, *On curbing virus propagation*, Technical memorandum, Bell Labs 1989. Cited on page 111.

72 A complete discussion of the problem can be found in chapter 10 of Ilan Vardi, *Computational Recreations in Mathematica*, Addison Wesley, 1991. Cited on page 111.

73 On Gibbs' paradox, see your favourite text on thermodynamics or statistical mechanics. See also W.H. Zurek, *Algorithmic randomness and physical entropy*, Physical Review A **40**, pp. 4731–4751, 1989. Zurek shows that the Sackur–Tetrode formula can be derived from algorithmic entropy considerations. Cited on page 113.

74 S.N. Bose, *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese*, Zeitschrift für Physik **26**, pp. 178–181, 1924. The theory was then expanded in A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **22**, pp. 261–267, 1924, A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 3–14, 1925, A. Einstein, *Zur Quantentheorie des idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 18–25, 1925. Cited on page 117.

75 C.K. Hong, Z.Y. Ou & L. Mandel, *Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference*, Physical Review Letters **59**, pp. 2044–2046, 1987. See also T.B. Pittman, D.V. Strekalov, A. Migdall, M.H. Rubin, A.V. Sergienko & Y.H. Shih, *Can two-photon interference be considered the interference of two photons?*, Physical Review Letters **77**, pp. 1917–1920, 1996. Cited on page 117.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2010 free pdf file available at www.motionmountain.net

76 An example of such an experiment performed with electrons instead of photons is described in E. Bocquillon, V. Freulon, J.-M. Berroir, P. Degiovanni, B. Plaçais, A. Cavanna, Y. Jin & G. Fève, *Coherence and indistinguishability of single electrons emitted by independent sources*, Science **339**, pp. 1054–1057, 2013. See also the comment C. Schönenberger, *Two indistinguishable electrons interfere in an electronic device*, Science **339**, pp. 1041–1042, 2013. Cited on page 118.

77 M. Schellekens, R. Hoppeler, A. Perrin, J. Viana Gomes, D. Boiron, C.I. Westbrook & A. Aspect, *Hanbury Brown Twiss effect for ultracold quantum gases*, Science **310**, p. 648, 2005, preprint at arxiv.org/abs/cond-mat/0508466. J. Viana Gomes, A. Perrin, M. Schellekens, D. Boiron, C.I. Westbrook & M. Belsley, *Theory for a Hanbury Brown Twiss experiment with a ballistically expanding cloud of cold atoms*, Physical Review A **74**, p. 053607, 2006, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/0606147. T. Jeltes, J.M. McNamara, W. Hogervorst, W. Vassen, V. Krachmalnicoff, M. Schellekens, A. Perrin, H. Chang, D. Boiron, A. Aspect & C.I. Westbrook, *Comparison of the Hanbury Brown-Twiss effect for bosons and fermions*, Nature **445**, p. 402, 2007, preprint at arxiv.org/abs/cond-mat/0612278. Cited on page 119.

78 The experiment is described in E. Ramberg & G.A. Snow, *Experimental limit on a small violation of the Pauli principle*, Physics Letters B **238**, pp. 438–441, 1990. Other experimental tests are reviewed in O.W. Greenberg, *Particles with small violations of Fermi or Bose statistics*, Physical Review D **43**, pp. 4111–4120, 1991. Cited on page 121.

79 The original no-cloning theorem is by D. Dieks, *Communication by EPR devices*, Physics Letters A **92**, pp. 271–272, 1982, and by W.K. Wootters & W.H. Zurek, *A single quantum cannot be cloned*, Nature **299**, pp. 802–803, 1982. For a discussion of photon and multiparticle cloning, see N. Gisin & S. Massar, *Optimal quantum cloning machines*, Physics Review Letters **79**, pp. 2153–2156, 1997. The whole topic has been presented in detail by V. Buzek & M. Hillery, *Quantum cloning*, Physics World **14**, pp. 25–29, November 2001. Cited on page 121.

80 S.J. Wiesner, *Conjugate Coding*, SIGACT News, **15**, pp. 78–88, 1983. This widely cited paper was one of starting points of quantum information theory. Cited on page 122.

81 The most recent experimental and theoretical results on physical cloning are described in A. Lamas-Linares, C. Simon, J.C. Howell & D. Bouwmeester, *Experimental quantum cloning of single photons*, Science **296**, pp. 712 – 714, 2002, D. Collins & S. Popescu, *A classical analogue of entanglement*, preprint arxiv.org/abs/quant-ph/0107082, 2001, and A. Daffertshofer, A.R. Plastino & A. Plastino, *Classical no-cloning theorem*, Physical Review Letters **88**, p. 210601, 2002. Cited on page 122.

82 E. Wigner, *On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group*, Annals of Mathematics **40**, pp. 149–204, 1939. This famous paper summarises the work which later brought him the Nobel Prize in Physics. Cited on pages 124 and 136.

83 For a full list of isotopes, see R.B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition, 1999 Update*, with CDROM, John Wiley & Sons, 1999. Cited on page 126.

84 This is deduced from the $g - 2$ measurements, as explained in his Nobel-prize talk by Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990. On this topic, see also his paper Ref. 67. No citations.
and in Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993.

85 G. Gabrielse, H. Dehmelt & W. Kells, *Observation of a relativistic, bistable hysteresis in the cyclotron motion of a single electron*, Physical Review Letters **54**, pp. 537–540,

Modern Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net

1985. No citations.

86 W. Pauli, *The connection between spin and statistics*, Physical Review **58**, pp. 716– 722, 1940. Cited on page 132.

87 The belt trick has been popularized by Dirac, Feynman and many others. An example is R. P. Feynman, *The reason for antiparticles*, in *Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures*, Cambridge University Press, 1987. The belt trick is also explained, for example, on page 1148 in C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973. It is called the *scissor trick* on page 43 of volume 1 of R. Penrose & W. Rindler, *Spinors and Spacetime*, 1984. It is also cited and discussed by R. Gould, *Answer to question #7*, American Journal of Physics **63**, p. 109, 1995. Still, some physicists do not like the belt-trick image for spin 1/2 particles; for an example, see I. Duck & E. C. G. Sudarshan, *Toward an understanding of the spin-statistics theorem*, American Journal of Physics **66**, pp. 284–303, 1998. Cited on page 132.

88 M. V. Berry & J. M. Robbins, *Indistinguishability for quantum particles: spin, statistics and the geometric phase*, Proceedings of the Royal Society in London A **453**, pp. 1771–1790, 1997. See also the comments to this result by J. Twamley, *Statistics given a spin*, Nature **389**, pp. 127–128, 11 September 1997. Their newer results are M. V. Berry & J. M. Robbins, *Quantum indistinguishability: alternative constructions of the transported basis*, Journal of Physics A (Letters) **33**, pp. L207–L214, 2000, and M. V. Berry & J. M. Robbins, in *Spin-Statistics*, eds. R. Hilborn & G. Tino, American Institute of Physics, 2000, pp. 3–15. See also Michael Berry's home page at www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv. Cited on page 134.

89 R. W. Hartung, *Pauli principle in Euclidean geometry*, American Journal of Physics **47**, pp. 900–910, 1979. Cited on page 135.

90 The issue is treated in his *Summa Theologica*, in question 52 of the first part. The complete text, several thousand pages, can be found on the www.newadvent.org website. Also present-day angelologists, of which there are only a few across the world, agree with Aquinas. Cited on page 135.

91 The point that spin can be seen as a rotation was already made by F. J. Belinfante, *On the spin angular momentum of mesons*, Physica **6**, p. 887, 1939, and taken up again by Hans C. Ohanian, *What is spin?*, American Journal of Physics **54**, pp. 500–505, 1986. See also E. Duran & A. Erschow, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **12**, p. 466, 1937. Cited on page 137.

92 See the book by Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar in Ref. 4. Cited on page 140.

93 Generalizations of bosons and fermions are reviewed in the (serious!) paper by O. W. Greenberg, D. M. Greenberger & T. V. Greenbergest, *(Para)bosons, (para)fermions, quons and other beasts in the menagerie of particle statistics*, at arxiv.org/abs/hep-th/9306225. A newer summary is O. W. Greenberg, *Theories of violation of statistics*, electronic preprint available at arxiv.org/abs/hep-th/0007054. Cited on page 141.

94 Gell-Mann wrote this for the 1976 Nobel Conference (not for the Nobel speech; he is the only winner who never published it.) M. Gell-Mann, *What are the building blocks of matter?*, in D. Huff & O. Prewitt, editors, *The Nature of the Physical Universe*, New York, Wiley, 1979, p. 29. Cited on page 142.

95 See e.g. the reprints of his papers in the standard collection by John A. Wheeler & Wojciech H. Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983. Cited on page 143.

Motion Mountain – The Adventure of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2018 – free pdf file available at www.motionmountain.net

96 H. D. Zeh, *On the interpretation of measurement in quantum theory*, Foundations of Physics 1, pp. 69–76, 1970. Cited on page 143.

97 Linda Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. An excellent introduction into thermodynamics. Cited on page 145.

98 E. Joos & H. D. Zeh, *The emergence of classical properties through interactions with the environment*, Zeitschrift für Physik B 59, pp. 223–243, 1985. See also Erich Joos, *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*, Springer Verlag, 2003. Cited on page 147.

99 M. Tegmark, *Apparent wave function collapse caused by scattering*, Foundation of Physics Letters 6, pp. 571–590, 1993, preprint at arxiv.org/abs/gr-qc/9310032. See also his paper that shows that the brain is not a quantum computer, M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review E 61, pp. 4194–4206, 2000, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cited on page 147.

100 The decoherence time is bound from above by the relaxation time. See A. O. Caldeira & A. J. Leggett, *Influence of damping on quantum interference: an exactly soluble model*, Physical Review A 31, 1985, pp. 1059–1066. This is the main reference about effects of decoherence for a harmonic oscillator. The general approach to relate decoherence to the influence of the environment is due to Niels Bohr, and has been pursued in detail by Hans Dieter Zeh. Cited on page 148.

101 G. Lindblad, *On the generators of quantum dynamical subgroups*, Communications in Mathematical Physics 48, pp. 119–130, 1976. Cited on page 148.

102 Wojciech H. Zurek, *Decoherence and the transition from quantum to classical*, Physics Today pp. 36–44, October 1991. An easy but somewhat confusing article. His reply to the numerous letters of response in Physics Today, April 1993, pp. 13–15, and pp. 81–90, exposes his ideas in a clearer way and gives a taste of the heated discussions on this topic. Cited on pages 148 and 155.

103 John Bardeen, explained this regularly in the review talks he gave at the end of his life, such as the one the author heard in Tokyo in the year 1990. Cited on page 149.

104 Collapse times have been measured for the first time by the group of Serge Haroche in Paris. See M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maitre, A. Maali, C. Wunderlich, J. M. Raimond & S. Haroche, *Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement*, Physical Review Letters 77, pp. 4887–4890, 1996. See also C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune, J.-M. Raimond & S. Haroche, *Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting*, Nature 448, pp. 889–893, 2007. Cited on pages 149 and 161.

105 Later experiments confirming the numerical predictions from decoherence were published by C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A "Schrödinger cat" superposition state of an atom*, Science 272, pp. 1131–1136, 1996, W. P. Schleich, *Quantum physics: engineering decoherence*, Nature 403, pp. 256–257, 2000, C. J. Myatt, B. E. King, Q. A. Turchette, C. A. Sackett, D. Kielpinski, W. M. Itano, C. Monroe & D. J. Wineland, *Decoherence of quantum superpositions through coupling to engineered reservoirs*, Nature 403, pp. 269–273, 2000. See also the summary by W. T. Strunz, G. Alber & F. Haake, *Dekohärenz in offenen Quantensystemen*, Physik Journal 1, pp. 47–52, November 2002. Cited on page 149.

106 L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger & M. Arndt, *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation*, Nature 427, pp. 711–714, 2004. Cited on page 149.

Modern Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2010 free pdf file available at www.motionmountain.net

107 K. Baumann, *Quantenmechanik und Objektivierbarkeit*, Zeitschrift für Naturforschung 25a, pp. 1954–1956, 1970. Cited on page 150.

108 See for example D. Styer, Physics Today p. 11, September 2000. Cited on page 152.

109 David Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, 1951, pp. 614–622. Cited on page 153.

110 A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Physical Review 48, pp. 696–702, 1935. Cited on page 153.

111 A. Aspect, J. Dalibard & G. Roger, *Experimental tests of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, Physical Review Letters 49, pp. 1804–1807, 1982, Cited on page 154.

112 G.C. Hergerfeldt, *Causality problems for Fermi's two-atom system*, Physical Review Letters 72, pp. 596–599, 1994. Cited on page 154.

113 An experimental measurement of superpositions of left and right flowing currents with 10^{10} electrons was J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. H. van der Wal & S. Lloyd, *Josephson persistent-current qubit*, Science 285, pp. 1036–1039, 1999. In the year 2000, superpositions of 1 μA clockwise and anticlockwise have been detected; for more details, see J.R. Friedman & al., *Quantum superposition of distinct macroscopic states*, Nature 406, p. 43, 2000. Cited on page 155.

114 On the superposition of magnetization in up and down directions there are numerous papers. Recent experiments on the subject of quantum tunnelling in magnetic systems are described in D.D. Awschalom, J.F. Smith, G. Grinstein, D.P. DiVicenzo & D. Loss, *Macroscopic quantum tunnelling in magnetic proteins*, Physical Review Letters 88, pp. 3092–3095, 1992, and in C. Paulsen & al., *Macroscopic quantum tunneling effects of Bloch walls in small ferromagnetic particles*, Europhysics Letters 19, pp. 643–648, 1992. Cited on page 155.

115 For example, superpositions were observed in Josephson junctions by R.F. Voss & R.A. Webb, *Macroscopic quantum tunnelling in 1 mm Nb Josephson junctions*, Physical Review Letters 47, pp. 265–268, 1981, Cited on page 155.

116 S. Haroche, *Entanglement, decoherence and the quantum-classical transition*, Physics Today 51, pp. 36–42, July 1998. An experiment putting atom at two places at once, distant about 80 nm, was published by C. Monroe, C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A 'Schroedinger Cat' Superposition of an Atom*, Science 272, pp. 1131–1136, 1996. Cited on page 155.

117 M.R. Andrews, C.G. Townsend, H.-J. Miesner, D.S. Durfee, D.M. Kurn & W. Ketterle, *Observations of interference between two Bose condensates*, Science 275, pp. 637–641, 31 January 1997. See also the www.aip.org/physnews/special.htm website. Cited on page 155.

118 A clear discussion can be found in S. Haroche & J.-M. Raimond, *Quantum computing: dream or nightmare?*, Physics Today 49, pp. 51–52, 1996, as well as the comments in Physics Today 49, pp. 107–108, 1996. Cited on page 156.

119 The most famous reference on the wave function collapse is chapter IV of the book by Kurt Gottfried, *Quantum Mechanics*, Benjamin, New York, 1966. It was the favourite reference by Victor Weisskopf, and cited by him on every occasion he talked about the topic. Cited on page 157.

120 The prediction that quantum tunnelling could be observable when the dissipative interaction with the rest of the world is small enough was made by Leggett; the topic is reviewed in A.J. Leggett, S. Chahravarty, A.T. Dorsey, M.P.A. Fisher, A. Garg & W. Zwerger, *Dynamics of dissipative 2-state systems*, Review of Modern Physics 59, pp. 1–85, 1987. Cited on page 159.

Modern Mountain – The Adventures of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net

121 S. Kochen & E.P. Specker, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, Journal of Mathematics and Mechanics 17, pp. 59–87, 1967. Cited on page 162.

122 J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony & R.A. Holt, *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Physical Review Letters 23, pp. 880–884, 1969. The more general and original result is found in J.S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics 1, p. 195, 1964. Cited on page 163.

123 D.M. Greenberger, M.A. Horne & A. Zeilinger, *Going beyond Bell's theorem*, postprint of the 1989 paper at arxiv.org/abs/0712.0912. The first observation was D. Bouwmeester, J.-W. Pan, M. Daniell, H. Weinfurter & A. Zeilinger, *Observation of three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement*, preprint at arxiv.org/abs/quant-ph/9810035. Cited on page 163.

124 Bryce de Witt & Neill Graham, eds., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973. This interpretation talks about entities which cannot be observed, namely the many worlds, and often assumes that the wave function of the universe exists. Both habits are beliefs and in contrast with facts. Cited on page 166.

125 'On the other had I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.' From Richard P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, 1965, p. 129. He repeatedly made this statement, e.g. in the introduction of his otherwise excellent *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin Books, 1990. Cited on page 166.

126 M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review D 61, pp. 4194–4206, 2000, or also arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cited on page 167.

127 Connections between quantum theory and information theory can be followed in the International Journal of Quantum Information. Cited on page 168.

128 J.A. Wheeler, pp. 242–307, in *Batelle Recontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, C. DeWitt & J.A. Wheeler, editors, W.A. Benjamin, 1968. For a pedagogical explanation, see John W. Norbury, *From Newton's laws to the Wheeler-DeWitt equation*, arxiv.org/abs/physics/980604 or European Journal of Physics 19, pp. 143–150, 1998. Cited on page 169.

129 The most fascinating book on the topic is by Kurt Nassau, *The Physics and Chemistry of Color – the Fifteen Causes of Color*, 1983, and the excellent webexhibits.org/causesofcolour website. Cited on page 170.

130 Y. Ruiz-Morales & O.C. Mullins, *Measured and Simulated Electronic Absorption and Emission Spectra of Asphaltenes*, Energy & Fuels 23, pp. 1169–1177, 2009. U. Bergmann, H. Groenzin, O.C. Mullins, P. Glatzel, J. Fetzer & S.P. Cramer, *Carbon K-edge X-ray Raman spectroscopy supports simple, yet powerful description of aromatic hydrocarbons and asphaltenes*, Chemical Physics Letters 369, pp. 184–191, 2003. Cited on page 170.

131 Two excellent reviews with numerous photographs are E. Grotewohl, *The genetics and biochemistry of floral pigments*, Annual Reviews of Plant Biology 57, pp. 761–780, 2006, and Y. Tanaka, N. Sasaki & A. Ohmiya, *Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids*, The Plant Journal 54, pp. 733–749, 2008. Cited on page 178.

132 L. Pérez-Rodriguez & J. Viñuda, *Carotenoid-based bill and eye coloration as honest signals of condition: an experimental test in the red-legged partridge (Alectoris rufa)*, Naturwissenschaften 95, pp. 821–830, 2008, Cited on page 178.

133 R. Pello, D. Schaerer, J. Richard, J.-F. Le Borgne & J.-P. Kneib, *ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at z=10.0*, Astronomy and Astrophysics 416, p. L35, 2004.

Modern Mountain – The Adventure of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2010 – free pdf file available at www.motionmountain.net

Cited on page 181.

134 A pedagogical introduction is given by L. J. Curtis & D. G. Ellis, *Use of the Einstein–Brillouin–Keller action quantization*, American Journal of Physics **72**, pp. 1521–1523, 2004. See also the introduction of A. Klein, *WKB approximation for bound states by Heisenberg matrix mechanics*, Journal of Mathematical Physics **19**, pp. 292–297, 1978. Cited on pages 182 and 187.

135 J. Neukammer & al., *Spectroscopy of Rydberg atoms at n ≈ 500*, Physical Review Letters **59**, pp. 2947–2950, 1987. Cited on page 185.

136 Mark P. Silverman, *And Yet It Moves: Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press 1993. A beautiful book by an expert on motion. Cited on pages 186, 193, and 194.

137 This is explained by J. D. Hey, *Mystery error in Gamow's Tompkins reappears*, Physics Today pp. 88–89, May 2001. Cited on page 186.

138 The beautiful experiment was first published in A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robicheaux, A. Gijsbertsen, J. H. Jungmann, C. Bordas & M. J. J. Vrakking, *Hydrogen atoms under magnification: direct observation of the nodal structure of Stark states*, Physical Review Letters **110**, p. 213001, 2013. Cited on pages 184 and 185.

139 L. L. Foldy, *The electromagnetic properties of Dirac particles*, Physical Review **83**, pp. 688–693, 1951. L. L. Foldy, *The electron–neutron interaction*, Physical Review **83**, pp. 693–696, 1951. L. L. Foldy, *Hectron–neutron interaction*, Review of Modern Physics **30**, pp. 471–481, 1952. Cited on page 189.

140 H. Euler & B. Kockel, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Naturwissenschaften **23**, pp. 246–247, 1935, H. Euler, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Annalen der Physik **26**, p. 398, 1936, W. Heisenberg & H. Euler, *Folgerung aus der Diracschen Theorie des Electrons*, Zeitschrift für Physik **98**, pp. 714–722, 1936. Cited on page 192.

141 See the simple explanation by L. J. F. Hermans, *Blue skies, blue seas*, Europhysics News **37**, p. 16, 2006, and the detailed explanation by C. L. Braun & S. N. Smirnov, *Why is water blue?*, Journal of Chemical Education **70**, pp. 612–614, 1993. Cited on page 193.

142 The discovery is published in T. Friedmann & C. R. Hagen, *Quantum Mechanical Derivation of the Wallis Formula for π*, Journal of Mathematical Physics **56**, p. 112101, 2015, preprint at arxiv.org/1510.07813. See also I Chashchina & Z. K. Silagadze, *On the quantum mechanical derivation of the Wallis formula for π*, preprint at arxiv.org/1704.06153. Cited on page 193.

143 For the atomic case, see P. L. Gould, G. A. Ruff & D. E. Pritchard, *Diffraction of atoms by light: the near resonant Kapitza–Dirac effect*, Physical Review Letters **56**, pp. 827–830, 1986. Many early experimental attempts to observe the diffraction of electrons by light, in particular those performed in the 1980s, were controversial; most showed only the deflection of electrons, as explained by H. Batelaan, Contemporary Physics **41**, p. 369, 2000. Later on, he and his group performed the newest and most spectacular experiment, demonstrating real diffraction, including interference effects; it is described in D. L. Freimund, K. Aflatooni & H. Batelaan, *Observation of the Kapitza–Dirac effect*, Nature **413**, pp. 142–143, 2001. Cited on page 194.

144 A single-atom laser was built in 1994 by K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari & M. S. Feld, *Microlaser: a laser with one atom in an optical resonator*, Physical Review Letters **73**, p. 3375, 1994. Cited on page 194.

Modern Mountain – The Adventures of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 – free pdf file available at www.motionmountain.net

145 An introduction is given by P. Pinkse & G. Rempe, *Wie fängt man ein Atom mit einem Photon?*, Physikalische Blätter **56**, pp. 49–51, 2000. Cited on page 194.

146 J.P. Briand & al., *Production of hollow atoms by the excitation of highly charged ions in interaction with a metallic surface*, Physical Review Letters **65**, pp. 159–162, 1990. See also G. Marowsky & C. Rhodes, *Hohle Atome und die Kompression von Licht in Plasmakanälen*, Physikalische Blätter **52**, pp. 991–994, Oktober 1996. Cited on page 194.

147 G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio & B. Odom, *New determination of the fine structure constant from the electron g value and QED*, Physical Review Letters **97**, p. 030802, 2006. Cited on page 195.

148 A. Sommerfeld, *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, Annalen der Physik **51**, pp. 1–94, 1916, and its continuation with the same title on pp. 125–167 in the same volume. The fine structure constant is introduced in the first paper, but Sommerfeld explains that the paper is a transcript of talks that he gave in 1915. Cited on page 195.

149 Wolfgang Pauli, *Exclusion principle and quantum mechanics*, Nobel lecture, 13 December 1946, in *Nobel Lectures, Physics*, Volume 3, 1942–1962, Elsevier, 1964. Cited on page 196.

150 An informative account of the world of psychokinesis and the paranormal is given by the famous professional magician James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo 1987, as well as in several of his other books. See also the www.randi.org website. Cited on page 200.

151 *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. All new developments concerning SI units are published in the journal *Metrologia*, edited by the same body. Showing the slow pace of an old institution, the BIPM launched a website only in 1998; it is now reachable at www.bipm.fr. See also the www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html website; this includes the biographies of people who gave their names to various units. The site of its British equivalent, www.npl.co.uk/npl/reference, is much better; it provides many details as well as the English-language version of the SI unit definitions. Cited on page 204.

152 The bible in the field of time measurement is the two-volume work by J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. A popular account is Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

The site opdaft.obspm.fr/www/lexique.html gives a glossary of terms used in the field. For precision *length* measurements, the tools of choice are special lasers, such as modelocked lasers and frequency combs. There is a huge literature on these topics. Equally large is the literature on precision *electric current* measurements; there is a race going on for the best way to do this: counting charges or measuring magnetic forces. The issue is still open. On *mass* and atomic mass measurements, see Volume II, on page 71. On high-precision *temperature* measurements, see Volume I, on page 543. Cited on page 205.

153 The unofficial SI prefixes were first proposed in the 1990s by Jeff K. Aronson of the University of Oxford, and might come into general usage in the future. See New Scientist 144, p. 81, 3 December 1994. Other, less serious proposals also exist. Cited on page 206.

154 For more details on electromagnetic unit systems, see the standard text by John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Cited on page 209.

155 D.J. Bird & al., *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Physical Review Letters **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cited on page 210.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2010 free pdf file available at www.motionmountain.net

156 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, *Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures*, Physical Review Letters 70, pp. 2818–2821, 1993. See also his article in Scientific American, January 1994. Cited on page 210.

157 A. Zeilinger, *The Planck stroll*, American Journal of Physics 58, p. 103, 1990. Can you find another similar example? Cited on page 210.

Challenge 204 e

158 An overview of this fascinating work is given by J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic gravity*, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A 341, pp. 117–134, 1992. Cited on page 210.

159 The most precise clock built in 2004, a caesium fountain clock, had a precision of one part in 10^{15}. Higher precision has been predicted to be possible soon, among others by M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, *An optical lattice clock*, Nature 435, pp. 321–324, 2005. Cited on page 211.

160 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cited on page 211.

161 See the information on D_s^* mesons from the particle data group at pdg.web.cern.ch/pdg. Cited on page 211.

162 About the long life of tantalum 180, see D. Belic & al., *Photoactivation of* $^{180}Ta^m$ *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters 83, pp. 5242–5245, 20 December 1999. Cited on page 211.

163 See the review by L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, *The detection of gravitational waves*, Reports on Progress in Physics 63, pp. 1317–1427, 2000. Cited on page 211.

164 See the clear and extensive paper by G. E. Stedman, *Ring laser tests of fundamental physics and geophysics*, Reports on Progress in Physics 60, pp. 615–688, 1997. Cited on page 211.

165 The various concepts are even the topic of a separate international standard, ISO 5725, with the title *Accuracy and precision of measurement methods and results*. A good introduction is John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cited on page 212.

166 P. J. Mohr, B. N. Taylor & D. B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, preprint at arxiv.org/abs/1203.5425. This is the set of constants resulting from an international adjustment and recommended for international use by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA), a body in the International Council of Scientific Unions, which brings together the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) and other organizations. The website of IUPAC is www.iupac.org. Cited on page 213.

167 Some of the stories can be found in the text by N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. The field of high-precision measurements, from which the results on these pages stem, is a world on its own. A beautiful introduction to it is J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Cited on page 213.

168 For details see the well-known astronomical reference, P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cited on page 219.

169 See the corresponding reference in the first volume. Cited on page 221.

170 A good reference is the *Encyclopedia of Mathematics*, in 10 volumes, Kluwer Academic Publishers, 1988–1993. It explains most concepts used in mathematics. Spending an hour with it looking up related keywords is an efficient way to get an introduction into any part of

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2011 free pdf file available at www.motionmountain.net

mathematics, especially into the vocabulary and the main connections.

The opposite approach, to make things as complicated as possible, is taken in the delightful text by Carl E. Linderholm, *Mathematics Made Difficult*, 1971. Cited on page 222.

171 An excellent introduction into number systems in mathematics, including hyperreal (or nonstandard) numbers, quaternions, octonions, p-adic and surreal numbers, is the book by Heinz-Dieter Ebbinghaus, Hans Hermes, Friedrich Hirzebruch, Max Koecher, Klaus Mainzer, Jürgen Neukirch, Alexander Prestel & Reinhold Remmert, *Zahlen*, 3rd edition, Springer Verlag, 1993. It is also available in English, under the title *Numbers*, Springer Verlag, 1990. Cited on pages 224, 233, and 234.

172 For a book on how to use hyperreals in secondary school, see Helmut Wunderling, *Analysis als Infinitesimalrechnung*, Duden Paetec Schulbuchverlag, 2007. Cited on page 234.

173 A. Waser, *Quaternions in Electrodynamics*, 2001. The text can be downloaded from various websites. Cited on pages 226 and 231.

174 S. L. Altman, *Rotations, Quaternions and Double Groups*, Clarendon Press, 1986, and also S. L. Altman, *Hamilton, Rodriguez and the quaternion scandal*, Mathematical Magazine **62**, pp. 291–308, 1988. See also J. C. Hart, G. K. Francis & L. H. Kauffman, *Visualizing quaternion rotation*, ACM Transactions on Graphics **13**, pp. 256–276, 1994. The latter can be downloaded in several places via the internet. Cited on page 229.

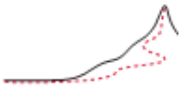
175 See the fine book by Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, 2nd edition, 1994, which gives a clear and visual introduction to the mathematics of knots and their main applications to physics. Cited on page 230.

176 Gaussian integers are explored by G. H. Hardy & E. M. Wright, *An Introduction to the Theory of Numbers*, 5th edition, Clarendon Press, Oxford, 1979, in the sections 12.2 'The Rational Integers, the Gaussian Integers, and the Integers', pp. 178–180, and 12.6 'Properties of the Gaussian Integers' pp. 182–183. For challenges relating to Gaussian integers, look at www.mathpuzzle.com/Gaussians.html. Cited on page 234.

177 About transfinite numbers, see the delightful paperback by Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, 1983. Cited on page 234.

178 E. I. Butikov, *The rigid pendulum – an antique but evergreen physical model*, European Journal of Physics **20**, pp. 429–441, 1999. D. Easton, *The quantum mechanical tipping pencil – a caution for physics teachers*, European Journal of Physics **28**, pp. 1097–1104, 2007, Cited on page 241.

Modern Mountain – The Adventures of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net



CREDITS

Acknowledgements

Many people who have kept their gift of curiosity alive have helped to make this project come true. Most of all, Peter Rudolph and Saverio Pascazio have been – present or not – a constant reference for this project. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, my parents Peter and Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara and Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger and, most of all, my wife Britta have all provided valuable advice and encouragement.

Many people have helped with the project and the collection of material. Most useful was the help of Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, the numerous improvements by Bert Sierra, the detailed suggestions by Claudio Farinati, the many improvements by Eric Sheldon, the detailed suggestions by Andrew Young, the continuous help and advice of Jonatan Kelu, the corrections of Elmar Bartel, and in particular the extensive, passionate and conscientious help of Adrian Kubala.

Important material was provided by Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Damoon Saghian, Wladimir Egorov, Markus Zecherle, Miles Mutka, plus a number of people who wanted to remain unnamed.

The software tools were refined with extensive help on fonts and typesetting by Michael Zedler and Achim Blumensath and with the repeated and valuable support of Donald Arseneau; help came also from Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke, Craig Up-

Modern Mechanics – The Adventures of Physics – copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 – free pdf file available at www.motionmountain.net

right, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk and Alexander Grahn.

The typesetting and book design is due to the professional consulting of Ulrich Dirr. The typography was much improved with the help of Johannes Küster and his Minion Math font. The design of the book and its website also owe much to the suggestions and support of my wife Britta.

I also thank the lawmakers and the taxpayers in Germany, who, in contrast to most other countries in the world, allow residents to use the local university libraries.

From 2007 to 2011, the electronic edition and distribution of the Motion Mountain text was generously supported by the Klaus Tschira Foundation.

Film credits

The hydrogen orbital image and animation of page 79 were produced with a sponsored copy of Dean Dauger's software package *Atom in a Box*, available at daugerresearch.com. The coloured animations of wave functions on page 89, page 93, page 94, page 98, page 109, page 189 and page 191 are copyright and courtesy by Bernd Thaller; they can be found on his splendid website vqm.uni-graz.at and in the CDs that come with his two beautiful books, Bernd Thaller, *Visual Quantum Mechanics* Springer, 2000, and Bernd Thaller, *Advanced Visual Quantum Mechanics* Springer, 2004. These books are the best one can read to get an intuitive understanding for wave functions and their evolution. The animation of the belt trick on page 130 is copyright and courtesy by Greg Egan; it can be found on his website www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html. The beautiful animation of the belt trick on page 130 and the wonderful and so far unique animation of the fermion exchange on page 133 are copyright and courtesy of Antonio Martos. They can be found at vimeo.com/62228139 and vimeo.com/62143283.

Image credits

The photograph of the east side of the Langtang Lirung peak in the Nepalese Himalayas, shown on the front cover, is courtesy and copyright by Kevin Hite and found on his blog thegettingthere.com. The photograph of a glow worm on page 14 is copyright and courtesy of John Tyler, and found on his beautiful website at www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm. The photograph of a glass butterfly on page 16 is copyright and courtesy of Linda de Volder and found on her site at www.flickr.com/photos/lindadevolder. The photograph of a train window on page 32 is copyright and courtesy of Greta Mansour and found at her website www.flickr.com/photos/wireful/. The graphics of the colour spectrum on page 41 is copyright and courtesy of Andrew Young and explained on his website mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html. The images of photographic film on page 42 are copyright and courtesy of Rich Evans. The images of photomultipliers on page 42 are copyright and courtesy of Hamamatsu Photonics. The pictures of the low-intensity photon interference experiment of page 43 are copyright of the Delft University of Technology, courtesy of Silvania Pereira, and found on the website www.optica.tn.tudelft.nl/education/photons.asp. The photograph of the Compton effect apparatus on page 46 was taken by Helene Hoffmann and is courtesy of Arne Gerdes from the University of Göttingen; it is found at the physics teaching website lp.uni-goettingen.de. The graph on page 50 is courtesy and copyright of Rüdiger Paschotta and found in his free and wonderful laser encyclopedia at www.rp-photonics.com. The photograph of the Mach–Zehnder interferometer on page 51 is copyright and courtesy of Félix Dieu and Gaël Osowiecki and found on their websites www.flickr.com/photos/felixdieu/sets/72157622768433934/ and www.flickr.com/photos/gaeloso/sets/

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2011 free pdf file available at www.motionmountain.net

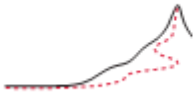
72157623165826538/. The photograph on page page 53 is copyright of John Davis and courtesy of . The telescope mirror interference image on page page 57 is copyright and courtesy of Mel Bartels and found on his site www.bbastrodesigns.com. The speckle pattern image is copyright and courtesy of Epzcaw and found on Wikimedia Commons. On page page 58, the double slit interference patterns are copyright and courtesy of Dietrich Zawischa and found on his website on beauty and science at www.itp.uni-hannover.de/~zawischa. The interference figure of Gaussian beams is copyright and courtesy of Rüdiger Paschotta and found on his free laser encyclopedia at www.rp-photonics.com. The blue sky photograph on page 68 is courtesy and copyright of Giorgio di Iorio, and found on his website www.flickr.com/photos/gioischia/. The images about the wire contact experiment on page 68 is courtesy and copyright of José Costa-Krämer and AAPT. The famous photograph of electron diffraction on page 75 is copyright and courtesy of Claus Jönsson. The almost equally famous image that shows the build-up of electron diffraction on page 76 is courtesy and copyright of Tonomura Akira/Hitachi: it is found on the www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm website. The hydrogen graph on page 84 is courtesy and copyright of Peter Eyland. The photographs of the Aharonov–Bohm effect on page 98 are copyright and courtesy of Doru Cuturela. The images of DNA molecules on page 100 are copyright and courtesy by Hans-Werner Fink and used with permission of Wiley VCH. The experiment pictures of the bunching and antibunching of ^{3}He and ^{4}He on page 118 are from the website atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html and courtesy and copyright of Denis Boiron and Jerome Chatin. The molten metal photograph on page 171 is courtesy and copyright of Graela and found at flickr.com/photos/alaig. The sparkler photograph on page 171 is courtesy and copyright of Sarah Domingos and found at her flickr.com website. The reactor core photograph on page 171 is courtesy NASA and found on the grin.hq.nasa.gov website. The discharge lamp photographs on page 171 are courtesy and copyright of Pslawinski and found at www.wikimedia.org. The aurora photograph on page 171 is courtesy and copyright of Jan Curtis and found at his climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html website. The coloured flames photograph on page 171 is courtesy and copyright of Philip Evans and found at his community.webshots.com/user/hydrogen01 website. The iceberg photograph on page 172 is courtesy and copyright of Marc Shandro and found at his flickr.com/photos/mshandro website. The malachite photograph on page 172 is copyright and courtesy of Stephan Wolfsried and found on the www.mindat.org website. The shadow mask photograph on page 172 is courtesy and copyright of Planemad and found at the www.wikimedia.org website. The mineral photographs on page 172 and later are copyright and courtesy of Rob Lavinsky at irocks.com, and taken from his large and beautiful collection there and at www.mindat.org/photo-49529.html. The narcissus photograph on page 173 is courtesy and copyright of Thomas Lüthi and found at his website www.tiptom.ch/album/blumen/. The photograph with a finger with blood on page 173 is courtesy and copyright of Ian Humes and found at his website www.flickr.com/photos/ianhumes. The berries photograph on page 173 is courtesy and copyright of Nathan Wall and found at his website www.flickr.com/photos/ozboi-z. The photograph of a red-haired woman on page 173 is by dusdin and courtesy of Wikimedia. The rare photograph of a living angler fish on page 173 is courtesy and copyright of Steve Haddock and found at his website www.lifesci.ucsb.edu/~biolum/. The magnetite photograph on page 174 is copyright and courtesy of Stephan Wolfsried and found on the www.mindat.org website. The desert photograph on page 174 is copyright of Evelien Willemsen, courtesy Raf Verbeelen and found at www.flickr.com/photos/verbeelen. The tenor saxophone photograph on page 174 is courtesy and copyright of Selmer at www.selmer.fr. The photograph of zinc oxide on page 174 is by Walkerma and courtesy of Wikimedia. The fluorescing quantum dot photograph on page 174 is courtesy and copyright of Andrey Rogach, Center for Nanoscience, München. The zirconia photograph on page 175 is courtesy and copyright of Gregory Phillips and found at the commons.wikimedia.org website. The Tokyo sunset on page 175 is courtesy and copyright of Altus Plunkett and found

Modern Mountain - The Adventures of Physics copyright © Christoph Schiller June 1999–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net

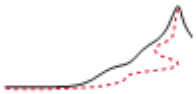
at his www.flickr.com/photos/altus website. The blue quartz photograph on page 175 is courtesy and copyright 2008 of David K. Lynch and found at his www.thulescientific.com website. The snowman photograph on page 176 is courtesy and copyright of Andreas Kostner and found at his www.flickr.com/photos/bytesinmotion website. The endangered blue poison frog photograph on page 176 is courtesy and copyright of Lee Hancock and found at the www.treewalkers.org website. The ruby glass photograph on page 176 is courtesy and copyright of the Murano Glass Shop and is found at their murano-glass-shop.it website. The photograph of a ring laser with second harmonic generation on page 176 is courtesy and copyright of Jeff Sherman and found at his flickr.com/photos/fatllama website. The abalone photograph on page 176 is courtesy and copyright of Anne Elliot and found at her flickr.com/photos/annkelliot website. The photograph of polarization colours on page 176 is copyright of Nevit Dilmen and courtesy of Wikimedia. The mallard duck photograph on page 177 is courtesy and copyright of Simon Griffith and found at his www.pbase.com/simon2005 website. The opal photograph on page 177 is courtesy and copyright of Opalsnopals and found at his www.flickr.com website. The aeroplane condensation photograph on page 177 is courtesy and copyright of Franz Kerschbaum and found at the epod.usra.edu website. The CD photograph on page 177 is courtesy and copyright of Alfons Reichert and found at his www.chemiephysikskripte.de/artikel/cd.htm website. The liquid crystal pattern on page 177 is courtesy and copyright of Ingo Dierking and Wiley/VCH; it is found in his wonderful book INGO DIERKING, *Textures of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, 2003. See also his website reynolds.ph.man.ac.uk/people/staff/dierking/gallery. The measured colour spectrum on page 179 is copyright and courtesy of Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA and NSF. The photograph of a hydrogen discharge on page 180 is copyright and courtesy of Jürgen Bauer and found at the beautiful website www.smart-elements.com. The illustrations of hydrogen orbitals on page 186 are courtesy of Wikimedia. The images of the nodal atomic structures on page 184 are courtesy of Aneta Stodolna and copyright and courtesy of the American Physical Society; they are found at journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.213001. The graphs of the squeezed light states on page 240 are courtesy of G. Breitenbach and S. Schiller and copyright of Macmillan.

The historical portraits of physicists in the text are in the public domain, except where mentioned. The photograph on the back cover, of a basilisk running over water, is courtesy and copyright by the Belgian group TERRA vzw and found on their website www.terravzw.org. All drawings are copyright by Christoph Schiller. If you suspect that your copyright is not correctly given or obtained, this has not been done on purpose; please contact me in this case.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–March 2018 free pdf file available at www.motionmountain.net



NAME INDEX



SUBJECT INDEX