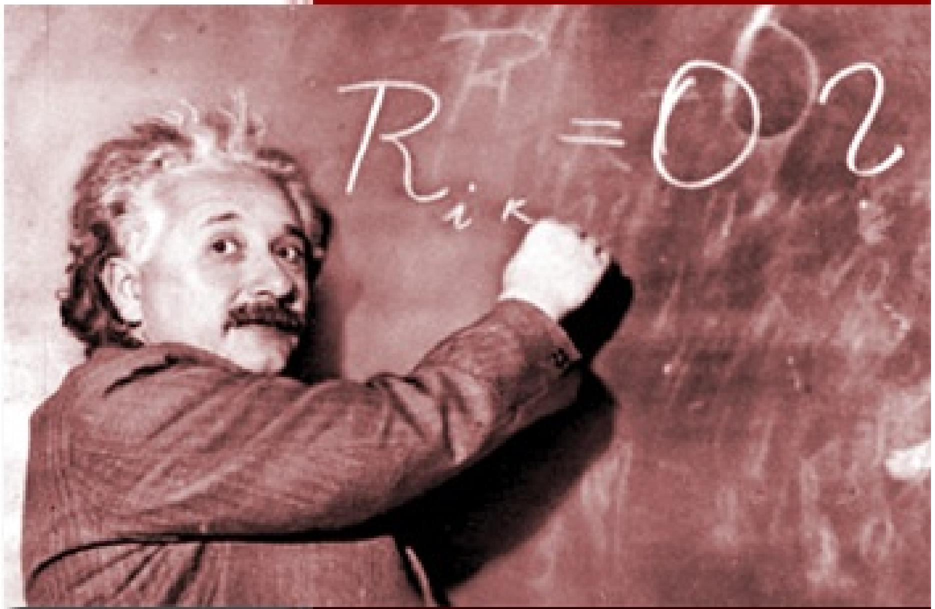
من إصدارات
المركز العلمي للترجمة

النسبية Relativity

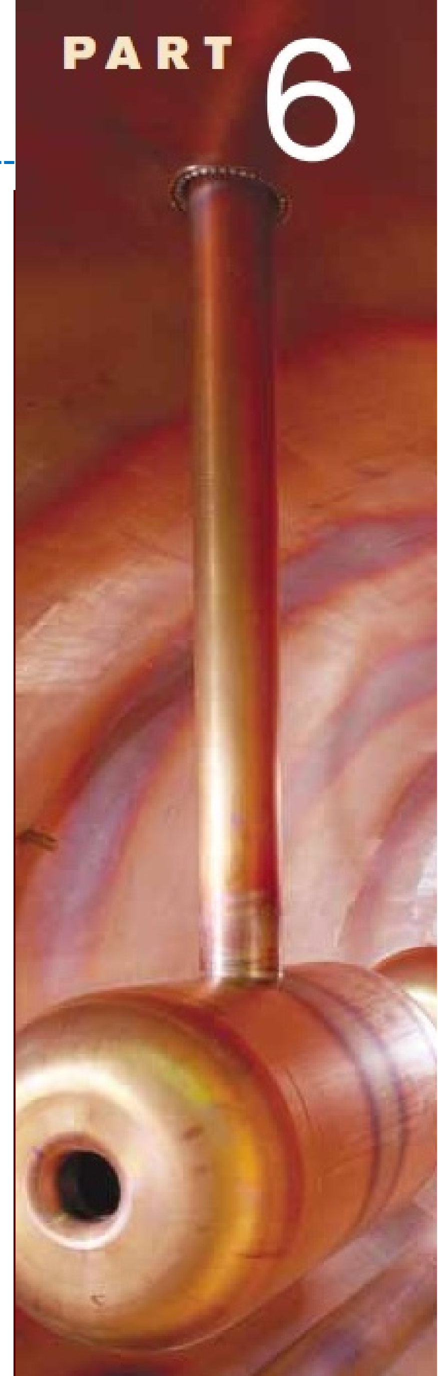


ترجمة
مروة إبراهيم

www.trgma.com

توثيـق

م	البند	البيان
1	المصدر	Physics for Scientists and Engineers By Raymond A. Serway & John W. Jewett 6th Edition
2	الموضوع	الوحدةالسادسة: الفيزياء الحديثة الجزء التاسع والثلاثون: النسبية
3	المترجم	مروة إبراهيم
4	المراجعة العلمية	د. حازم سكيك
5	المراجعة اللغوية	
6	التصنيف	فيزياء
7	الفئة	كتاب
11	التاريخ	2009-8-26



آمن أكثر العلماءفي نهاية القرن التاسع عشربأنهم قد تعلموا معظم ما كان يمكن معرفته عن الفيزياء. قوانين الحركة لنيوتن، ونظريته عن الجذب العام، و العمل النظري لماكسويل في توحيد الكهربية والمغناطيسية، وقوانين الديناميكا الحرارية، والنظرية الحركية، ومبادئ البصريات كانت ناجحة جدا في تفسير مختلف الظواهر. و عندما انقلب القرن التاسع عشر إلي العشرين، كيفما كان، صدمت ثورة كبري عالم الفيزياء.في عام 1900أتاح بلانك الأفكار الأساسية التي أدت إلي هيكلة نظرية الكمية، وفي 1905 صاغ اينشتاين نظريته اللامعة النسبية الخاصة.الإثارة في تلك الأوقات لوحظت في كلمات أينشتاين نفسه:"لقد كان وقتا رائعا لأكون حيا".كلتا الفكرتين كان لهما تأثيراً علي فهمنا للطبيعة.خلال عقود قليلة، ألهمتهاتان النظريتان تطورات جديدة ونظريات في مجال الفيزياء الذرية والفيزياء النووية وفيزياء المادة المكثفة.

في الجزء 39 نقدم النظرية النسبية الخاصة.النظرية تمدنا برؤية جديدة أكثر عمقا للقوانين الفيزيائية.وعلي الرغم من أن المفاهيم الضمنية لهذه النظرية غالبا ما تنتهك حسنا المشترك، إلا أنها تتنبأ علي نحو صحيح بنتائج التجارب المتعلقة بالسرعات القريبة من سرعة الضوء.

جزء من نفق المعجل في فيرمي لاب قرب شيكاغو، إلينوس.النفق دائري وقطره 1.9 كم.باستخدام مجالات كهربية ومغناطيسية، تعجل البروتونات والبروتونات المضادة إلي سرعات قريبة من سرعة الضوء ثم تترك لتصطدم من أجل استقصاء الناتج من الجسيمات الجديدة.(صورة فيرمي لاب).

في النسخة الموسعة من هذا الكتاب الدراسي *الفيزياء للعلماء والمهندسين مع الفيزياء الحديثة*، نغطي المفاهيم الأساسية لميكانيكا الكم وتطبيقاتها علي الفيزياء الذرية والجزيئية ونقدم فيزياء الحالة الجامدة، والفيزياء النووية، والفيزياء الجسيمية، وعلم الكونيات.

يجب أن تتذكر أنه علي الرغم من أن الفيزياء التي طورت خلال القرن العشرين قادت إلى وفرة من الإنجازات التكنولوجية المهمة، إلا أن القصة لا تزال غير مكتملة. فالاكتشافاتسوف تواصل التطور خلال حياتنا و الكثير من هذه الاكتشافات سوف تعمق وتهذب فهمناللطبيعة و العالم من حولنا.انه لا يزال "وقتا رائعا لأكون حيا".

واقفين علي أكتاف عملاق. دافيد سيروي، ابن واحد من المؤلفين، يراقب أطفاله، ناثان و كيتلين بينما هما يمرحان في ذراعي ألبرت أينشتاين عند النصب التذكاري له في واشنطن.من المعروف جيدا أن أينشتاين، المهندس الرئيسي للنسبية كان مولع جدا بالأطفال. (ايميلي سيروى)

الوحدة السادسة: الفيزياء الحديثة

الجزء التاسع و الثلاثون: النسبية

The Principle of Galilean Relativity	مبدأ النسبية الجاليلية
The Michelson-Morley Experiment	تجربة مايكلسون-مورلي
Einstein's Principle of Relativity	مبدأ نسبية أينشتاين
Consequences of The Special Theory of Relativity	نتائج النظرية النسبية الخاصة
The Lorentz Transformation Equations	معادلات تحويل لورنتز
The Lorentz Velocity Transformation Equations	معادلات تحويل لورنتز للسرعة
Relativistic Linear Momentum and the Relativistic Form of Newton's Laws	كمية الحركة الخطية النسبية و الصورة النسبية لقوانين نيوتن
Relativistic Energy	الطاقة النسبية
Mass and Energy	الكتلة و الطاقة
The General Theory of Relativity	النظرية النسبية العامة

مــروة إبراهيـم
www.trgma.com

مقدمة

خبراتنا اليومية ومشاهداتنا تتعامل مع الأجسام التي تتحرك بسرعات أقل بكثير من سرعة الضوء.فالميكانيكا النيوتونية صيغت برصد ووصف حركة هذه الأجسام و هذه الصيغة ناجحة جدا في وصف مدي بعيد من الظواهر التي تحدث في السرعات المنخفضة.

تجريبيا، يمكن اختبار توقعات النظرية النيوتونية عند سرعات عالية بتعجيل الالكترونات أو جسيمات أخري لها شحنة بواسطة فرق جهد كهربي كبير.علي سبيل المثال، من الممكن تعجيل إلكترون إلي سرعة 0.99c (حيث c هي سرعة الضوء) باستخدام فرق جهد حوالي عدة ملايين من الفولتات.

وفقا للميكانيكا النيوتونية، إذا زيد فرق الجهد بأربع أضعاف، فإن طاقة حركة الإلكترون ستكون أربع مرات أكبر وسرعته تتضاعف إلي 1.98c.

علي أية حال، التجارب تظهر أن سرعة الإلكترون_مثلها كمثل سرعة أي جسم آخر في الكون_تظل دائما أقل من سرعة الضوء،بغض النظر عن كبر الجهد المعجل.و لأنها لا تضع حدا أقصي للسرعة، فإن الميكانيكا النيوتونية تناقض نتائج التجارب الحديثة وهي بوضوح نظرية محدودة.في عام 1905، وفي سن 26 فقط،نشر اينشتاين نظريته النسبية الخاصة.فيما يتعلق بالنظرية، كتب اينشتاين:

نظرية النسبية نشأت من ضرورة،من تناقضات جدية وعميقة في النظرية القديمة و التي بدا انه لا مخرج منها.قوة النظرية الجديدة تكمن في تماسكها و بساطتها ويمكن بواسطتها حل تلك الصعوبات.

علي الرغم من أن اينشتاين قدم العديد من الإسهامات الأخرى للعلم إلا أن نظرية النسبية الخاصة وحدها تمثل واحدة من أعظم الإنجازات الفكرية علي مر الزمان.

مع هذه النظرية، المشاهدات العملية يمكن التنبؤ بها علي نحو صحيح علي مدي من السرعات من $v=0$ إلي سرعات تقترب من سرعة الضوء.عند السرعات المنخفضة تؤول نظرية اينشتاين الميكانيكا النيوتونية كحالة خاصة.

من المهم إدراك أن اينشتاين كان يعمل علي الكهرومغناطيسية عندما طور النظرية النسبية الخاصة.لقد كان مقتنعا أن معادلات ماكسويل كانت صحيحة، ولكي يوفق بينها وبين واحد من فروضه، كان مضطرا إلي الفكر ة الثورية التي تفرض أن الزمان و المكان ليسا مطلقين.

هذا الفصل يعطي مقدمة عن النظرية النسبية الخاصة مع التركيز علي بعض نتائجها.النسبية الخاصة تغطي ظواهر مثل تأخر الساعات المتحركة و انكماش الأطوال المتحركة ونناقش أيضا الصور النسبية لكمية الحركة و الطاقة.

بالإضافة إلي دورها المعروف و الضروري في الفيزياء النظرية،فإن نظرية النسبية الخاصة لها تطبيقات عملية،تتضمن تصميم محطات القوة النووية ووحدات النظام العالمي الحديث لتحديد المواقع (GPS).هذه الأجهزة لا تعمل إذا كنت مصممة وفقا للمبادئ غير النسبية.

1.39 مبدأ النسبية الجاليلية The Principle of Galilean Relativity

لوصف حدث فيزيائي، يجب علينا أن ننشأ إطار مرجعي frame of reference. ويجب أن تتذكر من الجزء الخامس أن الإطار المرجعي القصوري هو ما يشاهد فيه الجسم غير متسارع عندما لا تؤثر عليه قوة.علاوة علي ذلك، أي نظام متحرك بسرعة منتظمة بالنسبة إلي إطار قصوري يجب أن يكون أيضا في إطار قصوري فلا يوجد مرجع إسناد قصوري مطلق، هذا يعني أن نتائج تجربة أجريت في مركبة متحركة بسرعة منتظمة ستكون مطابقة لنتائج نفس التجربة التي أجريت في مركبة غير متحركة. التعبير الاصطلاحي لهذه النتيجة يسمي **مبدأ النسبية الجاليلية**. والذي ينص على أن

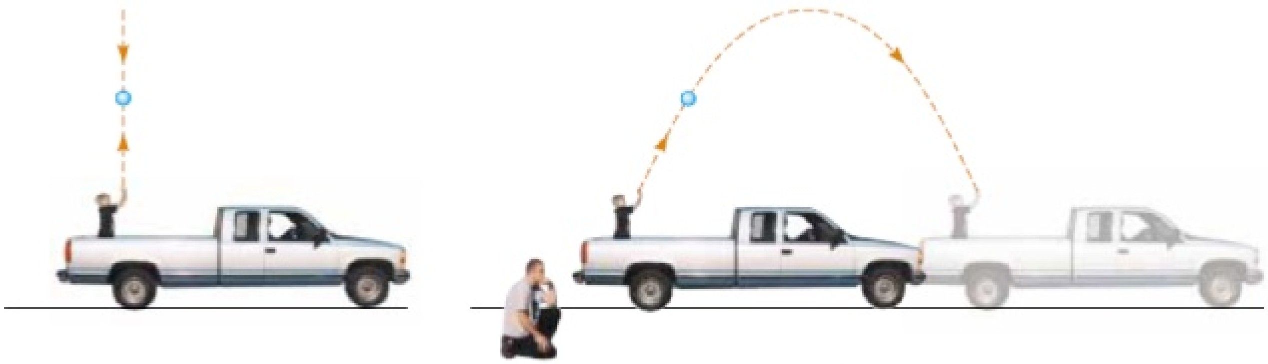
قوانين الميكانيكا لابد أن تكون واحدة في كل أطر الإسناد المرجعية.

دعنا ندرس مشاهدة توضح تكافؤ قوانين الميكانيكا في أطر قصورية مختلفة. شاحنة نصف نقل تتحرك بسرعة ثابتة، كما يظهر في الشكل 1.39 a. لو رمي راكب في الشاحنة كرة إلي الأعلى، وإذا أهمل تأثير الهواء، يلاحظ الراكب أن الكرة تتحرك في مسار رأسي.حركة الكرة تبدو تماما كما لو أنها رميت بواسطة شخص في حالة سكون علي سطح الأرض. ويطبق قانون الجذب العام و معادلات الحركة بعجلة منتظمة سواء كانت الشاحنة ساكنة أو متحركة حركة منتظمة.

كلا المراقبين يتفقان علي قوانين الفيزياء. كلا منهما يرمي كرة إلي الأعلى فترتفع ثم تسقط في يديهما.ماذا عن مسار الكرة

مــروة إبراهيــم
www.trgma.com

التي رماها المراقب في الشاحنة؟ هل يتفق المراقبان علي المسار؟ المراقب علي الأرض يري مسار الكرة كقطع مكافئ كما يظهر في الشكل b1.39. بينما - كما ذكر سابقا - يري المراقب في الشاحنة الكرة تتحرك في مسار رأسي.علاوة علي ذلك، وفقا للمراقب علي الأرض، الكرة لها مركبة سرعة أفقية تساوي سرعة الشاحنة. علي الرغم من أن المراقبين الاثنين يختلفان علي جوانب محددة للحالة، فإنهما يتفقان علي صلاحية قوانين نيوتن و علي صلاحية المبادئ الكلاسيكية مثل بقاء الطاقة وبقاء كمية الحركة الخطية.ذلك الاتفاق يتضمن أنه لا توجد تجربة ميكانيكية تستطيع كشف أي فرق بين مرجعين قصوريين.الشئ الوحيد الذي يمكن كشفه هو الحركة النسبية لإطار بالنسبة لآخر.



الشكل 1.39 (a) المراقب في الشاحنة رأى الكرة تتحرك في مسار رأسي عندما رميت لأعلي. (b) مراقب الأرض يري مسار الكرة كقطع مكافئ.

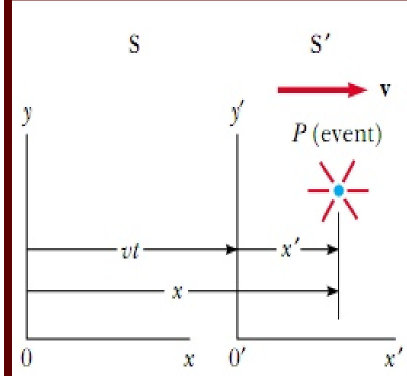
سؤال للتفكير 1.39

أي مراقب في الشكل 1.39 يرى مسار الكرة الصحيح؟ (a) المراقب في الشاحنة (b) المراقب علي الأرض (c) كلا المراقبين.

افترض أن بعض الظواهر الفيزيائية، و التي ندعوها حدث، تحدث ويراقبها مراقب في حالة سكون في إطار إسناد قصوري وموقع الحدث و وقت حدوثه يمكن تعيينهما بواسطة الإحداثيات الأربعة (x, y, z, t).

نود أن نكون قادرين علي تحويل هذه الإحداثيات من تلك الخاصة بمراقب في إطار قصوري إلى مراقب آخر في إطار يتحرك بحركة نسبية منتظمة مقارنة بإطار الإسناد الأول. لاحظ أنه عندما نقول أن مراقب يوجد "في إطار" نعني أن المراقب ساكن بالنسبة لنقطة الأصل للإطار.

افترض أن هناك إطارين قصوريين S وS' (الشكل 2.39). الإطارS' يتحرك بسرعة ثابتة **v** على طول المحورين المشتركينx وx'، حيث **v** مقاسة بالنسبة لـ S.



الشكل 2.39 حدث يقع عند نقطة P.الحدث يرى بواسطة مراقبين في الإطارين القصوريين S و S'، حيث S'يتحركبسرعةvنسبة لـ S.

نفرض أن نقطة الأصل لـ S و′S تطابقا عندما $t = 0$ وأن حدثا وقع عند النقطة P في المكان في بعض لحظات من الزمن.

المراقب في S يصف الحدث بإحداثيات زمان- مكان (x, y, z, t)، في حين أن المراقب في ′S يستخدم الإحداثيات (x', y', z', t') ليصف نفس الحدث.

الشكل 2.39 حدث يقع عند نقطة P. الحدث يرى بواسطة مراقبين في الإطارين القصوريين S و′S، حيث ′S يتحرك بسرعة**v** نسبة لـS.

كما نرى من هندسة الشكل 2.39، العلاقات بين هذه الإحداثيات المختلفة يمكن كتابتها

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t \quad (1.39)$$

هذه المعادلات هي **معادلات تحويلات الزمان-مكان الجاليلية.**

لاحظ أنهفُرض أ ذ الوقت ذاته في كلا الإطارين القصوريين.هذا - ئفي إطار الميكانيكا الكلاسيكية- يعني أن كل الساعات تسير بنفس المعدل، بغض النظر عن سرعتها،لذلك فإن الوقت الذي وقع فيه الحدث للمراقب في S هو ذاته الوقت لنفس الحدث في ′S.

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

بناء على ذلك، فإن الفترة الزمنية بين حدثين متعاقبين يجب أن تكون واحدة لكلا الراصدين. و علي الرغم من أن هذا الفرض ربما يبدو واضحا، إلا أنه يصبح غير صحيح في حالات تكون فيها السرعة v يمكن مقارنتها بسرعة الضوء.

افترض الآن أن جسيما يتحرك عبر إزاحة مقدارها dx علي طول المحور x في فترة زمنية dt يقيسها المراقب في S. من المعادلات 1.39، الإزاحة المناظرة dx' التي يقيسها الراصد في S' هي $dx' = dx - vdt$، حيث الإطار S' يتحرك بسرعة v في اتجاه x بالنسبة للإطار S.

و لأن $dt=dt'$، نجد أن

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} - v$$

أو

$$u'_{\mathrm{x}} = u_x - v(2.39)$$

حيث u_x و u'_x هما مركبتي السرعة للجسيم مقاستان بواسطة المراقبين في S و S'علي الترتيب. (نستخدم الرمز u لسرعة الجسيم فضلا عن vو الذي يستخدم للسرعة النسبية لإطارين مرجعيين).

مــروة إبراهيــم
www.trgma.com

هذه هي **المعادلات الجاليلية لتحويل السرعة**. إنها متسقة مع تفكيرنا الحدسي عن الزمان و المكان وأيضا مع مناقشتنا في القسم 6.4. وكما سنرى قريبا، فإنها تقود إلى تناقضات خطيرة عندما تطبق على الموجات الكهرومغناطيسية.

سؤال للتفكير 2.39

لاعب بيسبول يرمي كرة بسرعة 90mi/h يرميها بينما هو واقف علي عربة مكشوفة تتحرك علي سكة حديدية بسرعة 110mi/h. رميت الكرة في نفس اتجاه حركة القطار. بتطبيق معادلة جاليليو لتحويل السرعة، فإن سرعة الكرة بالنسبة للأرض هي (a) 90 mi/h (d) 200 mi/h(b) 20 mi/h (c) 110 mi/h (e) يستحيل تعيينها.

سرعة الضوء The Speed of Light

إنه لمن الطبيعي إلى حد ما السؤال عما إذا كان مبدأ النسبية الجاليلية يطبق على الكهربية و المغناطيسية و البصريات. التجارب توضح أن الجواب هو لا. تذكر من الجزء 34 أن ماكسويل أوضح أن سرعة الضوء في الفراغ الحر هي $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. اعتقد فيزيائيو أواخر عام 1800 أن موجات الضوء تتحرك خلال وسط يدعي الأثير و أن سرعة الضوء تكون c فقط في إطار مطلق خاص، ساكن بالنسبة للأثير. كان متوقعا لمعادلة تحويل جاليليو للسر عة أن تصمد أمام المشاهدات الخاصة بالضوء المعدة بواسطة مراقب في أي إطار يتحرك بسرعة v بالنسبة لإطار الأثير

المطلق. هذا يعني أنه إذا تحرك الضوء على طول المحور x وتحرك مراقب بسرعة v على طول المحور x، فإن المراقب سيقيس سرعة الضوء $c \pm v$، اعتماداً على اتجاه حركة المراقب و الضوء.

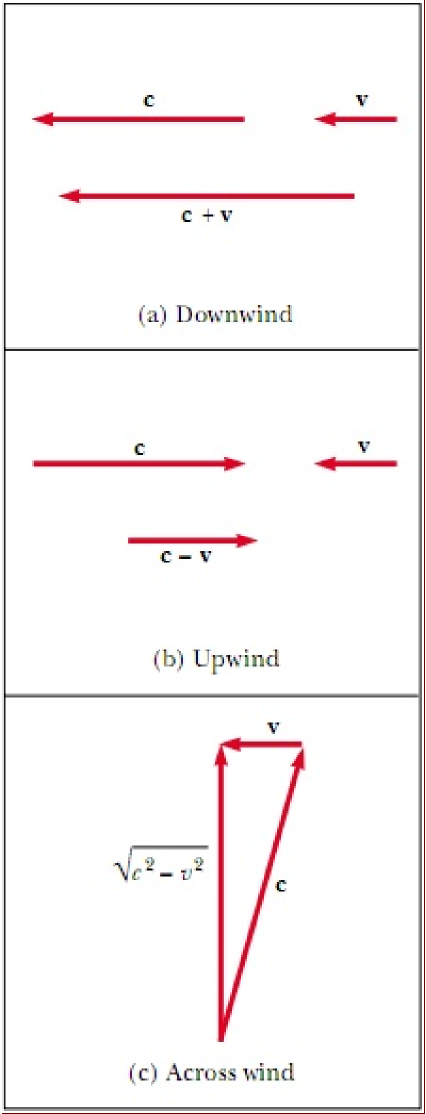
و لأن وجود إطار أثير مطلق، سيبين أن الضوء مماثل للموجات الكلاسيكية الأخرى و أ ن أفكار نيوتن عن إطار مطلق كانت صحيحة، لهذا ألحقت أهمية جديرة بالاعتبار لترسيخ وجود إطار الأثير.

قبيل أواخر القرن التاسع عشر،لم تكنالتجارب التي تتعلق بانتقال الضوء في الأوساط متحركاً بأعلى السرعات المعملية الممكن تحقيقها في ذلك الوقت قادرة على ضبط الفروق الصغيرة كمثل الفرق بين c و $c \pm v$ وبدءاً من العام 1880، قرر العلماء استخدام كوكب الأرض كإطار متحرك في محاولة لتعزيز فرصهم في ضبط تلك التغييرات الصغيرة في سرعة الضوء.

بما أن المراقبين موجودين على كوكب الأرض،نستطيع أن نعتبر أنفسنا ساكنين و أن الإطار الأثيري المطلق الذي يحتوي الوسط من أجل انتشار الضوء هو المتحرك ماراً بنا بسرعة v.

تعيين سرعة الضوء تحت هذه الظروف هو كمجرد قياس سرعة طائرة تنتقل في تيار هواء متحرك أو رياح؛ بناء على ذلك، نحن نتكلم عن "رياح أثيرية" تهب عبر أجهزتنا الموجودة على الأرض.

في طريقة مباشرة لكشف الأثير سوف يستخدم جهاز موجود على الأرض ليقيس تأثير الرياح الأثيرية على سرعة الضوء. إذا كان الرمز v هو سرعة الأثير بالنسبة للأرض، حينئذ لابد أن تبلغ سرعة الضوء القيمة القصوىو هي$c + v$ عند انتشاره في اتجاه الرياح الأثيرية، كما في الشكل a3.39. بطريقة مماثلة، سرعة الضوء لابد أن تكون القيمة الأدنى $c - v$ عند انتشار الضوء في عكس اتجاه حركة الرياح الأثيرية، كما في الشكل b3.39. وقيمة متوسطة $(c^2 - v^2)^{1/2}$ في الاتجاه العمودي علي الرياح الأثيرية، كما في الشكل 3.39 c. إذا فرض أن الشمس في حالة سكون في الأثير، حينئذ ستكون سرعة الرياح الأثيرية مساوية للسرعة المدارية للأرض حول الشمس، ومقدارها يساوي $3 \times 10^4\ m/s$ تقريبا و لأن $c = 3 \times 10^8$ m/s، فإنه من الضروري ضبط تغير في السرعة حوالي جزء واحد من 10^4 في القياسات في عكس وفي اتجاه الرياح الأثيرية.على أية حال، رغم أن هذه التغيرات يمكن قياسها تجر يبيا، فإن كل المحاولات لكشفها و ترسيخ وجود الرياح الأثيرية (وبالتالي الإطار المطلق) باءت بالفشل! وسنستكشف البحث التجريبي الكلاسيكي في القسم 2.39.



الشكل 3.39 إذا كانت سرعة الرياح الأثيرية بالنسبة للأرض هي vوسرعة الضوء بالنسبة للأثير هي c، حينئذ تكون سرعة الضوء بالنسبة للأرض هي (a) c + v في اتجاه حركة الرياح الأثيرية، (b) c − v في عكس اتجاه الرياح الأثيرية،(c) $(c^2 - v^2)^{1/2}$ في الاتجاه العمودي علي الرياح.

مبدأ النسبية الجاليلية ينطبق علىقوانين الميكانيكا فقط، فإذا فرض أن قوانين الكهربية و المغناطيسية ثابتة في كل الأطر القصورية، فإن مفارقة تتعلق بسرعة الضوء تظهر في الحال. يمكننا فهم هذا بإدراك أن معادلات ماكسويل يبدو أنها تنطوي بداهة علي كون سرعة الضوء لها قيمة ثابتة $3 \times 10^8\ m/s$ في كل أطر الإسناد، وهي نتيجة مناقضة مباشرة لما هو متوقع بناء على معادلة جاليليو لتحويل السرعة. وفقا للنسبية الجاليلية، سرعة الضوء يجب ألا تكون ثابتة في جميع الأطر القصورية.

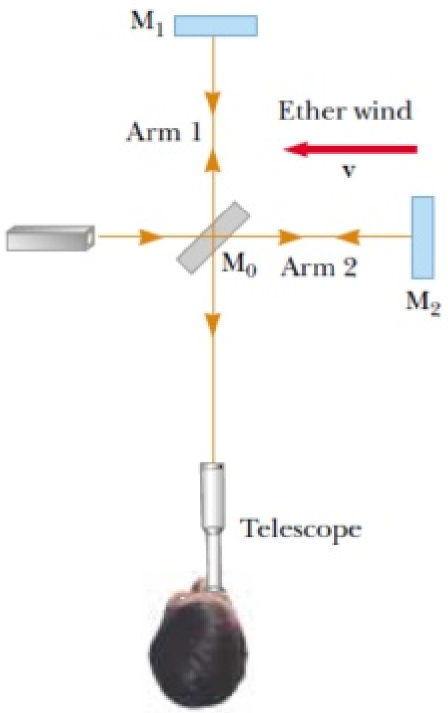
لحل هذا التناقض في المعادلات، يجب أن نقرر أنه إما أ ن(1)قوانين الكهربية و المغناطيسية ليست ثابتة في كل الأطر القصورية أو (2) المعادلة الجاليلية لتحويل السرعة غير صحيحة.

إذا اخترنا الخيار الأول، حينئذ لابد من وجود إطار إسناد مفضل وفيه سرعة الضوء لها القيمة c والسرعة المقاسة لابد أن تكون أكبر أو أقل من قيمتها في أي إطار إسناد آخر، طبقا للمعادلة الجاليلية لتحويل السرعة.وإذا اخترنا الخيار الثاني، فنحن مضطرين حينها إلى ترك الأفكار عن الزمان المطلق والطول المطلق والذي يشكل أساس معادلات تحويل الزمان-المكان الجاليلية.

2.39 تجربة مايكلسون.مورلي The Michelson-Morley Experiment

هي التجربة الأكثر شهرة و التي صممت للكشف عن تغيرات صغيرة في سرعة الضوء وقام بها لأول مرة سنة 1881 ألبرت أبراهام مايكلسون (انظر القسم 7.37) و أعيدت فيما بعد تحت ظروف مختلفة بواسطة مايكلسون و إدوارد ويليامز مورلي (1838-1923). ونقول في البداية أن حصيلة التجربة تناقض فرضية الأثير.

صممت التجربة لتعيين سرعة الأرض بالنسبة للأثير الافتراضي, كانت الأداة المستخدمة في التجربة هي مقياس تداخل ميلكلسون، و الذ ي بحث بالتفصيل في القسم 7.37 ويعرض مرة أخري في الشكل 4.39. الذراع 2 مصفوف علي طول اتجاه حركة الأرض في الفضاء. سرعة تحرك الأرض خلال الأثير v مساوية لسرعةتدفق الأثير ماراً بالأرض في الاتجاه المعاكس بسرعة v. هذه الرياح الأثيرية التي تهب في اتجاه معاكس لاتجاه حركة الأرض لا بد من أن تجعل سرعة الضوء المقاسة في إطار الأرض $c - v$ عندما يقترب الضوء من المرآة M_2 و $c + v$ بعد الانعكاس، حيث c هي سرعة الضوء في إطار الأثير.



الشكل 4.39 وفقا لنظرية الرياح الأثيرية من المفترض أن تكون سرعة الضوء $c - v$ عندما يقترب الشعاع من المرآة M_2 و $c + v$ بعد الانعكاس.

شعاعي الضوء ينعكسان من M_1 و M_2 ويعاد ضمهما معا، وتتكون هد بـ التداخل، كما بحث في القسم 7.37. ثم ترصد هدب التداخل بينما يتم إدارة مقياس التداخل بزاوية 90º. هذا الدورا ن يبادل سرعة الرياح الأثيرية بين ذراعي مقياس التداخل. لا بد أن يسبب الدوران إزاحة خفيفة لمجموعة الهد بـ ولكن قابلة للقياس.

فشلت القياسات مع ذلك في إظهار أي تغير في مجموعة التداخل! وأعيدت تجربة مايكلسون-مورلي في أوقات مختلفة من السنة حين كان من المتوقع أن تغير الرياح الأثيرية اتجاهها ومقدارها، ولكن النتائج كانت دائما كما هي: **لم ترصد إزاحة لهدب التداخل بالمقدار المطلوب أبداً.**

النتائج السلبية لتجربة مايكلسون-مورلي لم تناقض فقط فرضية الأثير ولكنها أيضا أظهرت أنه من المستحيل قياس السرعة المطلقة للأرض بالنسبة لإطار الأثير. على أية حال, عرض أينشتاين فرض لنظريته النسبية الخاصة والتي وضعت تفسير مختلف إلي حد بعيد لهذه النتائج السلبية. في السنوات اللاحقة، عندما عرف أكثر عن طبيعة الضوء، نبذت فكرة الأثير الذي يتخلل كل مكان. **الضوء الآن مفهوم أنه موجة كهرومغناطيسية، لا تطلب وجود وسط لانتشارها.** وكنتيجة لذلك، أصبحت فكرة الأثير الذي تنتقل فيه تلك الموجات فكرة غيرة ضرورية.

تفاصيل تجربة مايكلسون-مورلي

لفهم حصيلة تجربة مايكلسون-مورلي، دعنا نفرض أن طول ذراعي مقياس التداخل في الشكل 4.39 يساوي L. سنحلل الحالة كما لو كانت هناك رياح أثيرية، لأن هذا ما توقع مايكلسون ومورلي أن يجدوه. كما ذكر أعلاه، سرعة شعاع الضوء على طول الذراع2 يجب أن تكون $c - v$ عندما يقترب من M_2 و $c + v$ بعد انعكاسه.وبالتالي فإن الفترة الزمنية اللازمة للانتقال إلى اليمين تساوي $L/(\mathrm{c} - \mathrm{v})$ و الفترة الزمنية للانتقال إلي اليسار تساوي $L/(\mathrm{c} + \mathrm{v})$.

الزمن الكلي ليقوم برحلة على طول الذراع2 هو

$$\Delta t_{arm\ 2} = \frac{L}{c + v} + \frac{L}{c - v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

وبالتالي، الفارق الزمني Δt بين الرحلة الأفقية (الذراع2) والرأسية (الذراع1) يساوي

$$\Delta t = \Delta t_{\mathrm{arm}\ 2} - \Delta \mathrm{t}_{\mathrm{arm}\ 1} = \frac{2\mathrm{L}}{\mathrm{c}}\left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}\right]$$

ولأن $v^2/c^2 \ll 1$، نستطيع تبسيط هذا التعبير باستخدام مفكوك ذات الحدين التالي بعد إسقاط كل الحدود الأعلى من

مــروة إبراهيــم
www.trgma.com

الدرجة الثانية.

$$(1-x)^n \approx 1-nx \qquad (x \ll 1 \text{ لـ})$$

في حالتنا، $x = v^2/c^2$، نجد أن

$$\Delta t = \Delta t_{arm\ 2} - \Delta t_{arm\ 1} \approx \frac{Lv^2}{c^3} (3.39)$$

هذا الفارق الزمني بين اللحظتين اللتين يصل فيهما الشعاع المنعكس إلى التليسكوب الفاحص تسبب زيادة في اختلاف الطور بين الشعاعين، منتجاً هدب تداخل عندما يجتمعا عند التلسكوب. يجب أن ترصد إزاحة في هدب التداخل عندما يدار مقياس التداخل بزاوية 90^o في المستوى الأفقي، حيث يتبادل الشعاعين الأدوار. هذا الدوران يؤدي إلى فارق زمني يساوي ضعف الفارق الزمني المعطي بالمعادلة 3.39. هكذا يكون الفرق في المسار المقابل لهذا الفارق الزمني هو

$$\Delta d = c\,(2\,\Delta t) = \frac{2Lv^2}{c^2}$$

ولأن التغير في طول المسار لطول موجي واحد يقابله إزاحة في واحدة من هدب التداخل، فإن إزاحة هدب التداخل في تساوي فرق المسار مقسوما على الطول الموجي للضوء.

$$\text{Shift} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2} (4.39)$$

في التجارب التي أجراها مايكلسون ومورلي، كل شعاع ضوئي عكس بواسطة المرايا مرات عديدة لإعطاء طول مسار فعال L يساوي تقريبا 11 م. باستخدام هذه القيمة واستخدام v تساوي $3.0 \times 10^4\ m/s$، سرعة دوران الأرض حول الشمس، نحصل على فرق في المسار

$$\Delta d = \frac{2\,(11\,m)(3.0 \times 10^4\ m/s)^2}{(3.0 \times 10^8)^2} = 2.2 \times 10^{-7}\ m$$

مسافة السفر الإضافية هذه لابد أن تنتج إزاحة ملحوظة في هدب التداخل. على وجه التخصيص، إذا استخدمنا ضوء طوله الموجي 500-nm، فنحن نتوقع إزاحة في هدب التداخل من أجل الدوران 90^{o} قيمتها

$$\text{Shift} = \frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{2.2 \times 10^{-7}\ m}{5.0 \times 10^{-7}\ m} \approx 0.44$$

الجهاز الذي استخدمه مايكلسون ومورلي يستطيع رصد إزاحات يبلغ صغرها 0.01 هدبة. ومع ذلك، **لم يرصد البتة أي انحراف أو إزاحة في مجموعة الهدب.**

ومنذ ذلك الوقت أعيدت لتجربة مرات عديدة أجراها علماء مختلفين تحت ظروف متنوعة إلى مدى بعيد، ولم يرصد أبدا أي انحراف في هدب التداخل.

بذلت الكثير من الجهود لتفسير النتائج السلبية لتجربة مايكلسون-مورلي وللحفاظ على مفهوم إطار الأثير ومعادلة تحويل جاليليو للسرعة بالنسبة للضوء. كل الاقتراحات الناتجة عن هذه الجهود تمت البرهنة علي خطأها. لا توجد تجربة في تاريخ الفيزياء لاقت جهود شجاعة مماثلة لتفسير غياب نتيجة متوقعة كما لاقتها تجربة مايكلسون-مورلي. أفسح المجال لأينشتاين، الذي حل المشكلة سنة 1905 بنظريته النسبية الخاصة.

3.39 مبدأ نسبية أينشتاين Einstein's Principle of Relativity

في القسم السابق لاحظنا استحالة قياس سرعة الأثير بالنسبة للأرض وإخفاق معادلة تحويل جاليليو للسرعة في حالة الضوء. اقترح أينشتاين نظرية أزالت تلك الصعوبات بجرأة وبدلت فهمنا للمكان والزمان. بنى نظريته النسبية الخاصة على مسلمتين/فرضين:

1. **مبدأ النسبية:** قوانين الفيزياء يجب أن تكون واحدة في كل أطر الإسناد القصورية.
2. **ثبات سرعة الضوء:** سرعة الضوء في الفراغ لها القيمة نفسها، $c = 3.00 \times 10^{8}\, m/s$، في كل الأطر القصورية، بغض النظر عن سرعة المراقب أو سرعة مصدر انبعاث الضوء.

المسلمة الأولتجزم بأن كل قوانين الفيزياء- تلك التي تتعامل مع الميكانيكا، والكهربية، والمغناطيسية، والبصريات، والديناميكا الحرارية، و هكذا- كلها واحدة في كل أطر الإسناد المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لإطار آخر. هذه المسلمة هي تعميم شامل لمبدأ النسبية الجاليلية، والذي يتصل فقط بالميكانيكا. من وجهة نظر تجريبية، مبدأ نسبية أينشتاين يعني أن أي نوع من التجارب (قياس سرعة الضوء، علي سبيل المثال) تجرى في مختبر في حالة سكون لابد أن تعطي نتيجة واحدة عندما تجرى في مختبر يتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة للأول. من هنا، لا يوجد إطار إسناد قصوري مفضل، ولا يمكن رصد حركة مطلقة.

لاحظ أن المسلمة 2 تتطلبها المسلمة 1: لو لم تكن سرعة الضوء واحدة في كل أطر الإسناد، لجعلت قياسات السرعات المختلفة من الممكن التفريق بين الأطر القصورية؛ وكنتيجة، فإن إطار مطلق مفضل قد يمكن إيجاده، مما يناقض المسلمة 1.

على الرغم من أن تجربة مايكلسون-مورلي أجريت قبل نشر أينشتاين لعمله عن النسبية، وليس من الواضح إذا ما كان أينشتاين على علم بتفاصيل التجربة. مع ذلك، فإن النتيجة السلبية للتجربة يمكن فهمها بسهولة في إطار نظرية أينشتاين.طبقا لمبدئه للنسبية، مقدمة تجربة مايكلسون-مورلي غير صحيحة. في معالجة لمحاولة تفسير النتائج المتوقعة، صرحنا بأنه عندما انتقل الضوء بعكس اتجاه الرياح الأثيرية كانت سرعته $c-v$، وفقا لمعادلة تحويل جاليليو للسرعة.

على أية حال إذا كانت حالة حركة المراقب أو المصدر ليس لها تأثير على قيمة سرعة الضوء، سيقيس المرءقيمة سرعة الضوء c. بطريقة مماثلة، يقوم الضوء برحلة عائدا بعد الانعكاس من المرآة بسرعة c، ليس $c + v$. لا وبالتالي، حركة الأرض لا تؤثر في مجموعة الهدب المشاهدة في تجربة مايكلسون-مورلي، و يجب توقع نتيجة سلبية.

إذا قبلنا نظرية نسبية أينشتاين، يجب أن نصل إلى أن الحركة النسبية غير مهمة عند قياس سرعة الضوء. في نفس الوقت، سنرى أننا يجب أن نبدل فكرنا البديهي عن المكان والزمان و نكون مستعدين لنتائج مفاجئة. ربما يساعد أن تقرأ الصفحة قدما لتضع في حسابك أن أفكارنا البديهية مبنية على أساس خبرة العمر وليست على مشاهدة أجسام تتحرك بمئات الآلاف من الكيلومترات في الثانية. وبالتالي ستكون النتائج غريبة، لكن هذا فقط لأننا ليس لنا خبرة معها.

4.39 نتائج النظرية النسبية الخاصة

قبل أن نناقش نتائج نظرية أينشتاين النسبية الخاصة، لابد أولاً أن نفهم كيف يمكن لمراقب في إطار إسناد قصوري أن يصف حدثاً كما ذكر سابقا، حدث يعني حادثة قابلة للوصف بثلاث إحداثيات مكانية، وا ٍحداثي واحد للزمن. المراقبين في الأطر القصورية المختلفة سوف يصفون الحدث ذاته بإحداثيات لها قيم مختلفة.

بينما ندرس بعض نتائج النسبية في الجزء الباقي من هذا القسم، سنقصر دراستنا على مفاهيم الآنية، والفترات الزمنية،

والأطوال، كل من الثلاثة يختلف إلى حد بعيد في الميكانيكا النسبية عما هو عليه في الميكانيكا النيوتونية.على سبيل المثال، في الميكانيكا النسبية المسافة بين نقطتين والفترة الزمنية بين حدثين يعتمدان علي إطار الإسناد الذي قيسا فيه.

في الميكانيكا النسبية لا يوجد شيء كهذا كطول مطلق أو فترة زمنية مطلقة. علاوة على هذا، **الأحداث في الأماكن المختلفة والتي ترصد أنها آنية في إطار، ليست بالضرورة آنية في إطار آخر يتحرك حركة منتظمة بالنسبة للأول.**

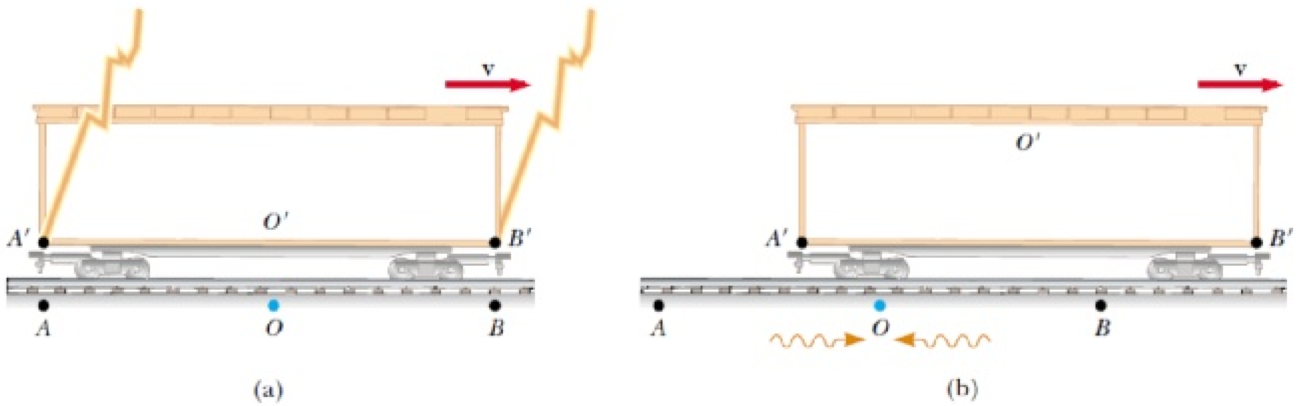
الآنية و نسبية الزمن Simultaneity and The Relativity of Time

المقدمة المنطقية الأساسية للميكانيكا النيوتونية هي أنه يوجد مقياس زمن كوني وهو واحد لكل المراقبين. في الواقع، كتب نيوتن التالي "المطلق، حقيقي، والزمن الرياضي، بنفسه ومن طبيعته، يتدفق باطراد بدون ارتباط بأي شيء خارجي." وبالتالي، فإن نيوتن و أتباعه ببساطة يأخذون الآنية كشيء مسلم به. في نظريته النسبية الخاصة، تحرر أينشتاين من هذا الفرض.

ابتكر أينشتاين التجربة الفكرية التالية ليوضح هذه النقطة. تتحرك شاحنة صندوقية بسرعة منتظمة، وضربها صاعقتي برق من نهايتيها، كما هو موضح في الشكل 5.39 a، تاركتين علامتينعلى الشاحنةو على الأرض العلامتين على الشاحنة

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

الصندوقية هما A' وB'، والعلامتين على الأرض A وB، يتحرك المراقب O' مع الشاحنة الصندوقية وهو في منتصف المسافة بين A' وB'، والمراقب الأرضي O في منتصف المسافة بين A وB. الأحداث المسجلة بواسطة المراقبين هي إصابة الشاحنة الصندوقية بصاعقتي البرق.



الشكل 5.39 (a) صاعقتي برق تضربان نهايتي شاحنة صندوقية متحركة. (b) الحدثان يظهران آنيان للمراقب 0، الواقف في منتصف المسافة بين A وB. الحدثان لا يبدوان آنيان للمراقب '0 والذي يدعي أن الصاعقة أصابت مقدمة الشاحنة قبل المؤخرة. لاحظ أنه في (b) الإشارة الضوئية المتحركة نحو اليسار قد عبرت بالفعل المراقب '0 لكن الإشارة الضوئية المتجهة ناحية اليمين لم تصله بعد.

الإشارتين الضوئيتين المنبعثتين من A و B في اللحظة التي ضربت فيها الصاعقتين، تصلان إلى المراقب 0 في نفس الوقت كما هو موضح في الشكل 5.39 b. يدرك هذا المراقب أن الإشارتين انتقلا بالسرعة ذاتها على مسافات متساوية، وهكذا يستنتج بطريقة صحيحة أن الحدثان عند A وB وقعا بصورة آنياً .

والآن خذ بعين الاعتبار الحدثين ذاتهما كما يشاهدهما المراقب $0'$. في الوقت الذي تصل فيه الإشارتين للمراقب 0 يكون المراقب $0'$ قد تحرك كما هو موضح في الشكل 5.39 b. هكذا تكون الإشارة من B' قد مرت بالفعل على $0'$، لكن الإشارة من A' لم تصل بعد. بكلمات أخرى، $0'$ يرى الإشارة من B' قبل أن يرى الإشارة من A'. وفقا لأينشتاين، يجب أن يرى المراقبين أن الضوء ينتقل بنفس السرعة. بناء على ذلك، المراقب $0'$ يستنتج أن البرق ضرب مقدمة الشاحنة

الحدثان الآنيان في إطار مرجعي ليسا آنيين عامة في الإطار المتحرك بالنسبة للأول. هذه هي الآنية ليست مفهوما مطلقا ولكنها تعتمد على حالة حركة المراقب.

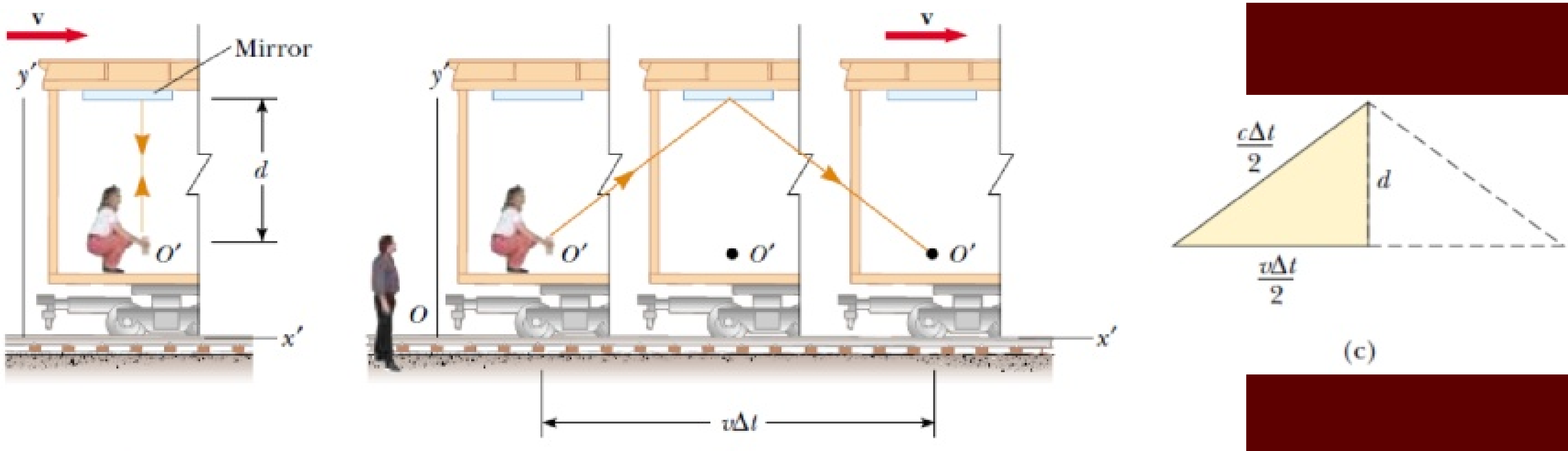
الصندوقية قبل أن يضرب مؤخرتها.هذه التجربة الفكرية تبرهن بوضوح على أن الحدثين اللذين كانا آنيين للمراقب 0 لم

يظهرا آنيين للمراقب O'. بكلمات أخرى،تجربة أينشتاين الفكرية تبرهن أن المراقبين يستطيعوا أن يختلفوا على آنية الأحداث. **هذا الاختلاف،كيفما كان، يعتمد على وقت عبور الضوء لكل من المراقبين ولذلك، لا يشرح المعنى الأعمق للنسبية**. في التحليلات النسبية لحالات السرعات العالية، تظهر النسبية أن الآنية نسبية حتى إذا طرح وقت العبور.

في الواقع، كل التأثيرات النسبية التي سنناقشها من الآن فصاعداً ستفرض أننا أهملنا الفروق الناتجة عن وقت مرور الضوء بالمراقبين.

تمدد الزمن Time Dilation

يمكننا أن نوضح أن حقيقة أن المراقبين في أطر قصورية مختلفة يمكنهم قياس فترات زمنية مختلفة بين حدثين بتأمل شاحنة تتحرك لليمين بسرعة v كما في الشاحنة الصندوقية في الشكل 6.39 a.



(a) (b)

الشكل 6.39 (a) مرآة مثبتة في شاحنة متحركة، وأرسلت نبضة ضوء بواسطة المراقبة '0 الساكنة في الشاحنة.(b) بالنسبة لمراقب ساكن يقف بجانب الشاحنة، تتحرك المرآة والراصد '0 بسرعة v. لاحظ أن القيمة التي يرصدها المراقب 0 للمسافة التي تقطعها نبضة الضوء أكبر من 2d. (c) المثلث الأيمن لحساب العلاقة بين Δt وΔt_p.

ثبتت مرآة في سقف الشاحنة و المراقبة'0 ساكنة في الإطار المرافق للشاحنة وتمسك مصباح بطارية على مسافة d أسفل المرآة. في لحظة معينة يطلق مصباح البطارية نبضة من الضوء موجهة إلى المرآة (الحدث 1)، و في وقت لاحق بعد انعكاسه عن المرآة تعود النبضة مجدداً إلى مصباح البطارية (الحدث 2). تحمل المراقبة '0 ساعة يستخدمها في حساب

الفترة الزمنية Δt_p بين هذين الحدثين. (الدليل السفلي p يرمز إلى أصلي proper، كما سنرى في لحظة). ولأن نبضة الضوء سرعتها c فإن الفترة الزمنية اللازمة للنبضة لتنتقل من 'O إلى المرآة ثم تعود مرة أخرى هي

$$\Delta t_{\mathrm{p}} = \frac{\text{distance traveled}}{\text{speed}} = \frac{2d}{c} (5.39)$$

الآن تأمل الحدثين كما يراهما المراقب O في الإطار الثاني، كما هو موضح في الشكل b6.39. وفقا لهذا المراقب، المرآة ومصباح البطارية يتحركان إلى اليمين بسرعة v، وكنتيجة فإن تسلسل الأحداث يظهر مختلفا تماما. في الوقت الذي يصل فيه الضوء من المصباح إلى المرآة، تكون المرآة قد تحركت إلى اليمين مسافة $v\ \Delta t/2$، حيث Δt الفترة الزمنية اللازمة لانتقال الضوء من 'O إلى المرآة و عودته إلى 'O كما قاسها O. بكلمات أخرى، O يستنتج أنه بسبب حركة الشاحنة لو أن الضوء صدم المرآة فإنه لابد أن يترك المصباح بزاوية بالنسبة للاتجاه الرأسي. بمقارنة الشكل 6.39 a و b نجد أن الضوء يجب أن ينتقل مسافة أكبر في (b) عنها في (a). (لاحظ أنه لا أحد من المراقبين "يعرف" إذا كان متحركاً. كل منهما ساكن في إطاره القصوري الخاص.)

وفقا للمسلمة الثانية لنظرية النسبية الخاصة, كلا المراقبين، يجب أن يقيس c لسرعة الضوء. لأن الضوء ينتقل مسافة أكبر بالنسبة للمراقب O، ينتج أن الفترة الزمنية Δt التي يقيسها المراقب O أطول من الفترة الزمنية Δt_pالتي يقيسها المراقبة'O.

وللحصول على علاقة بين الفترتين الزمنيتين، من الملائم استخدام المثلث على اليمين الموضح في الشكل c6.39. نظرية فيثاغورث تعطي

$$\left(\frac{c\,\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\,\Delta t}{2}\right)^2 + d^2$$

الحل لـΔt يعطي

$$\Delta t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (6.39)$$

ولأن $\Delta t_p = 2d/c$ ، يمكننا التعبير عن النتيجة هكذا

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_p \quad (7.39)$$

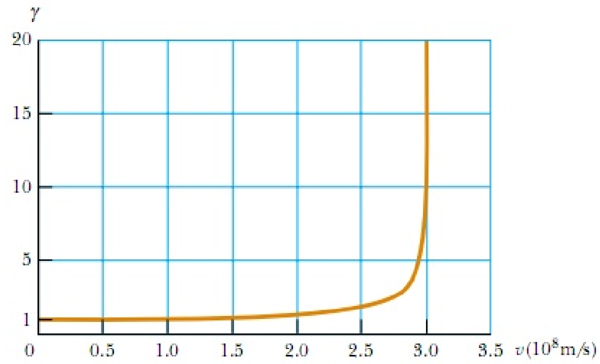
حيث

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (8.39)$$

لأن γ دائماً أكبر من الو احد، هذه النتيجة تقول أن **الفترة الزمنية Δt مقاسة بواسطة مراقب يتحرك بالنسبة لساعة أطول من الفترة الزمنية Δt_p مقاسة بواسطة مراقب ساكن بالنسبة لهذه الساعة.** هذا التأثير يعرف **باسم تمدد الزمن.**

Approximate Values for γ at Various Speeds

v/c	γ
0.001 0	1.000 000 5
0.010	1.000 05
0.10	1.005
0.20	1.021
0.30	1.048
0.40	1.091
0.50	1.155
0.60	1.250
0.70	1.400
0.80	1.667
0.90	2.294
0.92	2.552
0.94	2.931
0.96	3.571
0.98	5.025
0.99	7.089
0.995	10.01
0.999	22.37



الشكل 7.39 رسم بياني يمثل γ مقابل v. بينما تقترب السرعة من سرعة الضوء، تزداد γ بسرعة.

يمكننا أن نرى أن تمدد الزمن ليس مرصودا في حياتنا اليومية بالنظر إلى العامل γ. هذا العامل ينحرف عن الواحد بدرجة كبيرة فقط عند السرعات العالية جدا، كما هو موضح في الشكل 7.39 والجدول 1.39. على سبيل المثال، بالنسبة لسرعة $0.1c$، تكون قيمة γ1.005. وبالتالي، يوجد تمدد في الزمن فقط 0.5%عند واحد من عشرة من سرعة الضوء.

السرعات التي نلاقيها يوميا أبطأ إلى حد بعيد من هذه، لذلك لا نرى تمدد الزمن في الحالات العادية.

الفترة الزمنية Δt_p في المعادلة 5.39 و7.39 **تدعى الفترة الزمنية الأصلية**. (بالألمانية، استخدم أينشتاين المصطلح *Eigenzeit*، والتي تعني "الزمن الخاص".)

بوجه عام، الفترة الزمنية الأصلية هي الفترة الزمنية بين حدثين مقاسة بواسطة راصد يرى الحدثين يحدثان في نقطة واحدة في الفضاء.

إذا كانت هناك ساعة تتحرك بالنسبة لك، فإن الفترة الزمنية بين دقات الساعة المتحركة تبدو أطول من الفترة الزمنية بين دقات ساعة مطابقة لها في إطارك المرجعي. وبالتالي، يقال في الغالب أن الساعة المتحركة تعمل أبطأ من ساعة في إطارك المرجعيبالعاملγ.و هذا صحيح للساعات الميكانيكية وكذلك الساعة الضوئية الموصوفة للتو.

يمكننا تعميم هذه النتيجة بتقرير أن كل العمليات الفيزيائية بما فيها العمليات الكيميائية والحيوية تبطئ عندما تحدث هذه العمليات في إطار متحرك بالنسبة لمراقب.

وكمثال، نبضات قلب رائد فضاء يتحرك عبر الفضاء ستظل بنفس معدل ساعة في سفينة الفضاء. كلا من ساعة رائد الفضاء ونبضه سيبطئان وفقا لمراقب على الأرض يقارن الفترات الزمنية بساعته (على الرغم من أن رائد الفضاء سوف لن يشعر بتباطؤ الحياة في سفينته الفضائية).

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

سؤال للتفكير 3.39

افترض أن المراقبة '0 في القطار في الشكل 6.39 توجه مصباح البطارية إلى الحائط البعيد للشاحنة الصندوقية وتشغله وتطفئه، فترسل نبضة من الضوء نحوه. كلا من '0 و0 يقيسان الفترة الزمنية بين مغادرة النبضة لمصباح البطارية واصطدامه بالحائط. أي من المراقبين يقيس الفترة الزمنية الأصلية بين هذين الحدثين؟ (a) '0 ، (b) 0 ، (c) كلا من المراقبين (d) لا هذا ولا ذاك.

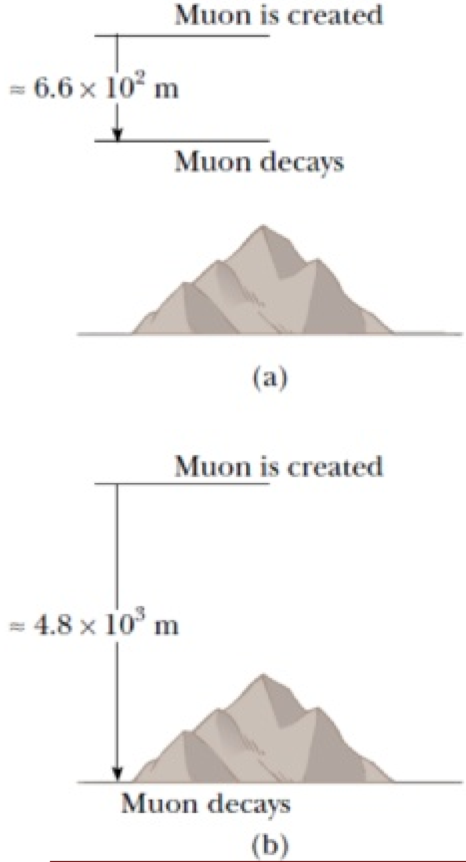
سؤال للتفكير 4.39

طاقم يشاهد فيلم طوله ساعتين في سفينة فضاء تتحرك بسرعة كبيرة في الفضاء. هل سيقيس مراقب أرضي، يشاهد الفيلم عبر تلسكوب قوي، مدة الفيلم (a) أطول من (b) أقصر من (c) مساوية لساعتين؟

وتمدد الزمن، على الرغم من أنه قد يبدو غريبا، ظاهرة ممكن إثباتها. وفي تجربة لهافل وكيتنج زودتنا ببرهان مباشر لتمدد الزمن. قورنت فترات زمنية مقاسة بواسطة أربع ساعات سيزيوم ذرية في رحلة بطائرة نفاثة بفترات زمنية مقاسة بواسطة ساعات ذرية أرضية. ومن أجل مقارنة هذه النتائج بالنظرية، يجب أن تؤخذ العديد من العوامل بعين الاعتبار، هذه العوامل تتضمن فترات الإسراع والإبطاء بالنسبة للأرض، الاختلاف في اتجاه الحركة، وحقيقة أن مجال الجاذبية الذي تعانيه الساعات الطائرة كان أضعف من الذي تعانيه الساعة الأرضية. النتائج كانت في توافق مع توقعات نظرية النسبية الخاصة ويمكن تفسيرها في حدود الحركة النسبية بين الأرض والطائرة النفاثة. أعلن هافل وكيتنج في بحثهما أن

"بالنسبة للمقياس الذري للزمن والخاص بمرصد بحرية الولايات المتحدة، فإن الساعات الطائرة فقد ت 10 ± 95 نانو ثانية أثناء سفرها باتجاه الشرق واكتسبت 7 ± 273 نانو ثانية أثناء سفرها باتجاه الغرب. . . .هذه النتائج تمد بحل تجريبي غير ملتبس لمفارقة الساعات بساعات ماكروسكوبية."

مثال آخر مشوق لتمدد الزمن يتعلق برصد الميونات، جسيمات أولية غير مستقرة لها شحنة تساوي شحنة الإلكترون وكتلة تساوي 207 قدر كتلة الإلكترون. (سندرس الميونات وجسيمات أخرى في الجزء 46.) الميونات يمكن إنتاجها بتصادم الإشعاعات الكونية بذرات عاليا في الغلاف الجوي. الميونات بطيئة الحركة في المعمل لها عمر والذي هو الفترة الزمنيةالأصلية يساوي $\Delta t_p = 2.2\ \mu s$. إذا فرضنا أن سرعة الميونات في الغلاف الجوي قريبة من سرعة الضوء، نجد أن هذه الجسيمات يمكنها السفر مسافة $(3 \times 10^8\ m/s)\,(2.2\ \times 10^{-6}\ s) \approx 6.6\ \times 10^2\ m$ قبل أن تتحل أو تضمحل (الشكل a8.39).

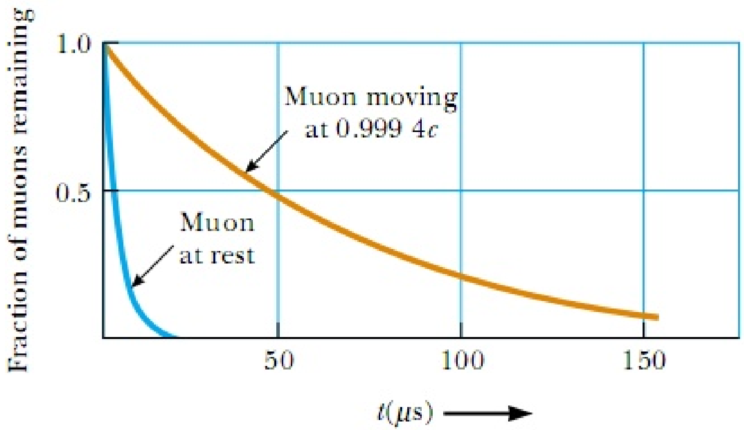


الشكل 8.39 (a) بدون اعتبارات نسبية، تخلق الميونات في الغلاف الجوي وتنتقل للأسفل بسرعة 0.99c تنتقل فقط حوالي $6.6 \times 10^2 m$ قبل انحلالها بعمر متوسط يساوي $2.2\mu s$. وبالتالي تصل ميونات قليلة جدا لسطح الأرض. (b) مع اعتبارات نسبية، عمر الميون يتمدد بالنسبة لمراقب علي الأرض. وكنتيجة، يمكن للميون قطع مسافة $4.8 \times 10^3 m$ قبل أن ينحل. وهذا يتسبب في وصول العديد منها إلى سطح الأرض.

لهذا فإنه من غير المحتمل أن تصل إلى سطح الأرض من أعلى الغلاف الجوي حيث تم إنتاجها. مع ذلك أظهر عدد كبير من التجارب أن الميونات تصل إلى السطح بالفعل. ظاهرة تمدد الزمن تفسر هذا الواقع. كما قيس بواسطة مراقب على الأرض، فإن الميونات لها عمر متمدد يساوي $\gamma \Delta t_p$ على سبيل المثال، عند $v = 0.99\,c$، $\gamma \approx 1.7$ و $\gamma \Delta t_p \approx 16\,\mu s$.

إذن المسافة المتوسطة التي تقطعها الميونات مقاسة بواسطة مراقب علي الأرض هي تقريبا $(0.99)(3 \times 10^8\,m/s)(16 \times 10^{-6} s) \approx 4.8 \times 10^3 m$، كما هو موضح في الشكل b8.39.

في عام 1976، في معمل المجلس الأوروبي للبحث النووي (سيرن) في جنيف، أدخلت الميونات في حلقة مخزن ضخم وصلت سرعاتها حوالي 0.9994c. الالكترونات الناتجة عن انحلال الميونات كشف عنها بواسطة عدادات حول الحلقة تمكن العلماء من قياس معدل الانحلال وبالتالي عمر الميونات.وعمر الميون المتحرك قيس ليكون تقريبا 30 مرة قدر عمر الميون الساكن (الشكل 9.39)، في اتفاق مع تنبؤ النسبية إلي جزأين من ألف.



الشكل 9.39 منحنيات الانحلال لميونات ساكنة ولميونات متحركة بسرعة $0.9994c$.

مثال 1.39 ما هو الزمن الدوري للبندول؟

الزمن الدوري للبندول قيس فكان 0.3 s في إطار إسناد البندول. ما الزمن الدوري عندما يقاس بواسطة مراقب يتحرك بسرعة 0.950c بالنسبة للبندول؟

الحل: لكي نبني فكرة عامة حول هذه المسألة، دعنا نغير أطر الإسناد. بدلا من أن المراقب يتحرك بسرعة 0.950c، يمكننا أن نأخذ وجهة النظر المكافئة أن المراقبساكن وأن البندول يتحرك أمام المراقب الساكن بسرعة 0.950c. وبالتالي فإن البندول مثال لساعة تتحرك بسرعة عالية بالنسبة لمراقب ويمكننا أن نصنف هذه المسألة كواحدة تتعلق بتمدد الزمن.

لتحليل المسألة، لاحظ أن الفترة الزمنية الحقيقة، المقاسة في الإطار الساكن للبندول، هي $\Delta t_p = 3.00\ s$ ولأن ساعة متحركة بالنسبة لمراقب تقاس أنها تتحرك أبطأ بالنسبة لساعة ساكنة بالعامل γ، فإن المعادلة 7.39 تعطي

$$\mathbf{\Delta t = \gamma \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{(0.950c)^2}{c^2}}}\Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1-0.902}}\Delta t_p}$$

$$\mathbf{= (3.20)(3.00\ s) = 9.60\ s}$$

ولوضع الصيغة النهائية لهذه المسألة، نرى أنه بالفعل يأخذ البندول المتحرك وقتا ليكمل دورة أطول من البندول الساكن تزداد الفترة بالعامل $\gamma = 3.20$.

نرى أن هذا متسق مع الجدول 1.39، حيث هذه القيمة تقع بين قيم γ لـ $v/c = 0.94$ و $v/c = 0.96$.

ماذا لو؟ ماذا لو زدنا سرعة المراقب بمقدار 5.00%؟ هل تزداد فترة الزمن الممددة بـ 5.00%؟

الحل: اعتماداً على الأسلوب الغير خطي لـ γ كدالة في v في الشكل 7.39، يمكننا التخمين أن الزيادة في Δt ستكون مختلفة عن 5.00%.

زيادة v بـ 5.00% تعطينا

$$v_{new} = (1.0500)(0.950c) = 0.9975c$$

(لأن γ تتغير بسرعة كبيرة مع v عندما تكون v بهذه الضخامة، سوف نحافظ على شكل هام إضافي حتى الإجابة النهائية)

إذا أجرينا حساب تمدد الزمن مرة أخرى، سنجد أن

$$\Delta t_p = \gamma \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{(0.9975\,c)^2}{c^2}}}\Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1-0.9950\,c}}\Delta t_p$$

$$= (14.15)(3.00\text{ s}) = 42.5\text{ s}$$

وبالتالي، فإن زيادة 5.00% في السرعة سببت زيادة 300%.

مثال 2.39 كم كان طول رحلتك؟

افترض أنك تقود سيارتك في رحلة عمل وتتحرك بسرعة 30 m/s. رئيس عملك والذي ينتظرك في وجهتك، يتوقع أن تستغرق الرحلة 5.0 h. عندما تصل متأخراً، عذرك هو أن ساعة سيارتك سجلت الطريق 5.0 h ولكنك كنت تقود بسرعة وهكذا دارت ساعتك أبطأ من ساعة رئيسك، إذا كانت سيارتك قد سجلت بالفعل رحلة طولها 5.0 h، كم من الوقت مر على ساعة رئيسك الذي كان ساكناً على الأرض؟

الحل: نبدأ بحساب γمن المعادلة 8.39:

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{(3\times10^1 m/s)^2}{(3\times10^8 m/s)^2}}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-10^{-14}}}$$

إذا حاولت تعيين هذه القيمة بآلتك الحاسبةمن المحتمل أنك ستجد $\gamma = 1$، كيفما كان إذا أجرينا حساب مفكوك ذات الحدين، نستطيع بدقة أكبر تعيين قيمتها

$$\gamma = (1 - 10^{-14})^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}(10^{-14}) = 1 + 5.0 \times 10^{-15}$$

هذه النتيجة تبين أنه في السرعات النموذجية للسيارات، γ لا تختلف كثيرا عن 1.

بتطبيق المعادلة 7.39 نجد أن Δt، الفترة الزمنية التي يقيسها رئيسك هي

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p = (1 + 5.0 \times 10^{-15})(5.0\, h)$$

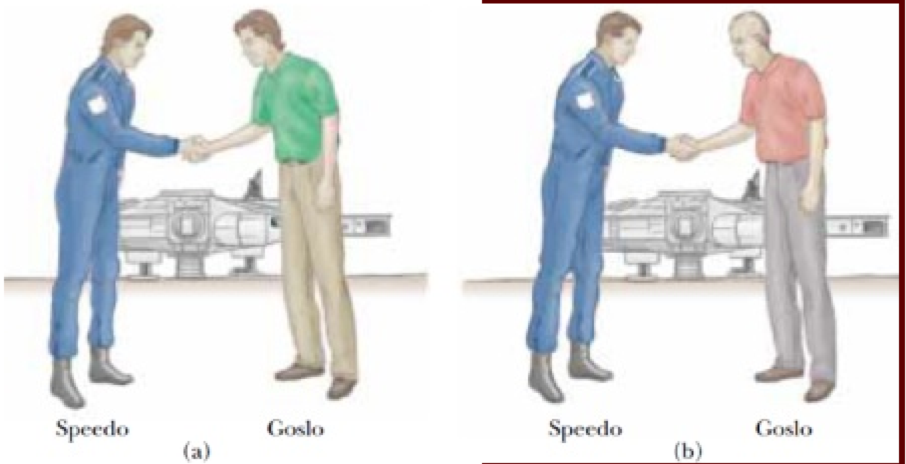
$$= 5.0\, h + 2.5 \times 10^{-14}\, h = 0.5\, h + 0.09\, ns$$

ساعة رئيسك ستكون زائدة عن ساعة سيارتك بمقدار 0.09 ns. ربما تود التفكير في عذر آخر!

مفارقة التوأمين The Twin Paradox

نتيجة مخادعة لتمدد الزمن تدعى مفارقة التوأمين (شكل 10.39). خذ بعين الاعتبار تجربة تتعلق بمجموعة من توأمين اسمهما سبيدو وجوسلو. عندما كانا في سن 20 سنة، سبيدو، أكثر الاثنين حبا للمغامرة، انطلق في رحلة ملحمية إلى الكوكب X، الواقع على بعد 20 سنة ضوئية من الأرض. (لاحظ أن 1 سنة ضوئية (ly) هي المسافة التي يقطعها الضوء في فضاء حر في 1 سنة) علاوة على هذا، سفينة سبيدو الفضائية قادرة على الوصول لسرعة 0.95c بالنسبة لإطار توأمه القصوري في الوطـن. بعد الوصول إلى الكوكب X، يصبح سبيدو مشتاق للوطن ويرجع على الفور إلى الأرض بنفس السرعة 0.95c. حين عودته، صدم سبيدو لاكتشافه أن جوسلو زاد 42 سنة وعمره الآن 62 سنة. ومن ناحية أخرى زاد سبيدو 13 سنة فقط.

عند هذه النقطة، من العدل أن نطرح السؤال التالي أي توأم هو المسافر وأيهم أصغر في الحقيقة كنتيجة لهذه التجربة؟ من الإطار القصوري لجوسلو، كان هو ساكن بينما سافر أخوه بسرعة كبيرة بعيدا عنه ثم عاد. وفقا لسبيدو، كيفما كان، هو نفسه ظل ساكنا بينما جوسلو والأرض أسرعا بعيدا عنه ثم عادا.



الشكل 10.39 (a) عندما يغادر واحد من التوأمين أخاه على الأرض، كلاهما بنفس العمر. (b) عندما يعود سبيدو من رحلته إلى الكوكب X، يكون أصغر من توأمه جوسلو.

هذا يقود إلى تناقض ظاهري نتيجة التماثل الظاهري للمشاهدات. أي التوأمين أظهر علامات التقدم في السن؟

الحال في مشكلتنا الحالية ليس متماثل في الحقيقة. لحل هذه المفارقة الظاهرية. تذكر أن النظرية النسبية الخاصة تصف المشاهدات في أطر الإسناد المتحركة بالنسبة لبعضها. سبيدو مسافر الفضاء، لابد أن يعاني سلسلة من العجلات خلال رحلته لأنه لابد أن يطلق محركات صاروخه ليبطئ ويتحرك عائدا تجاه الأرض. وكنتيجة، فإن سرعته ليست دائما منتظمة، وبالتالي فهو ليس في إطار قصوري. بناء على ذلك، لا توجد مفارقة. جوسلو فقط، والذي يوجد دائما في إطار إسنادي مفرد، يستطيع القيام بتنبؤات صحيحة مبنيةعلى النسبية الخاصة، أثناء كل سنة تمر يدونها جوسلو، أقل من أربع شهور تمر بالنسبة لسبيدو.

جوسلو فقط، والذي يوجد في إطار إسنادي مفرد، يستطيع تطبيق معادلة تمدد الزمن البسيط لرحلة سبيدو.وا ٍذن يجد جوسلو أنه بدلا من الزيادة 42 عام، سيزيد جوسلو فقط $(1-v^2/c^2)^{1/2}(42\,yr) = 13$ سنة. وبالتالي، بالنسبة لجوسلو، يمضي سبيدو 6.5سنة مسافراً إلى الكوكب X و6.5 سنة عائداً، لزمن سفر كل 13 سنة، موافقا لبياننا السابق.

سؤال للتفكير 5.39

افترض أن رواد الفضاء يدفع لهم وفقا لطول الوقت الذي يقضونه مسافرين في الفضاء. بعد رحلة طويلة بسرعة تقارب c، هل سيفضل الطاقم أن يدفع لهم وفقا لـ (a) ساعة أرضية (b) ساعة سفينتهم الفضائية (c) أياً منهما؟

مـروة إبراهيـم

www.trgma.com

انكماش الطول Length Contraction

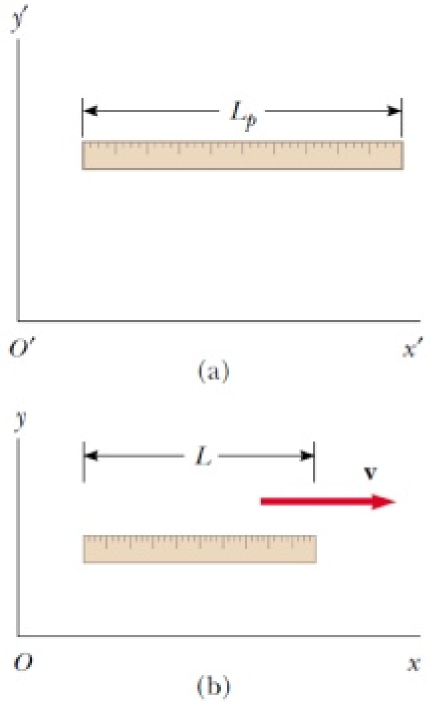
المسافة بين نقطتين تعتمد أيضاً على إطار الإسناد. **ويعرف الطول الأصليلجسم L_p على انه الطول المقاس بواسطة الشخص الساكن بالنسبة للجسم.** وطول الجسم المقاس بواسطة شخص في إطار إسناد متحرك بالنسبة للجسم يكون دائماً أقل من الطول الأصلي. هذا التأثير يسمى **انكماش الطولLength Contraction**.

اعتبر سفينة فضاء تنتقل بسرعة v من نجم إلى آخر. وكان هناك مراقبان: احدهما على الأرض والآخر في سفينة الفضاء. المراقب الساكن بالنسبة للأرض (وسنفترض أيضا انه ساكن بالنسبة للنجمين) يقيس المسافة بين النجمين لتكو ن الطول الأصلي L_p. وفقا لهذا المراقب، تكون الفترة الزمنية اللازمة لتكمل سفينة الفضاء رحلتها هي $\Delta t_p = L_p/v$.

وحيث أن مرور مركبة الفضاء على النجمين تحدث عند نفس الموضع بالنسبة للمسافر الفضائي،لذلك يقيس مسافر الفضاء الفترة الزمنية الأصلية Δt_p. وبسبب تمدد الزمن، فإن الفترة الزمنية الأصلية مرتبطة بالفترة الزمنية المقاسة من الأرض من خلال العلاقة $\Delta t_p = \Delta t/\gamma$. لأن مسافر الفضاء يصل إلى النجم الثاني في زمن Δt_p، لذلك فانه يستنتج أن المسافة L بين النجمين هي

$$L = v\Delta t_p = v\,\frac{\Delta t}{\gamma}$$

ولأن الطول الأصلي $L_p = v\Delta t$، نرى أن



الشكل 11.39 (a) عصا قياس، يقيس مراقب في إطار ملحق بالعصا (كلا منهما له نفس السرعة) الطول الأصلي.(b) العصا مقاسة في إطار تتحرك فيه بسرعة v بالنسبة للإطار، تقاس أقصر من الطول الأصلي بـالعامل $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (9.39)$$

حيث $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ هو معامل أقل من الواحد.

إذا كان لجسم طول حقيقي L_p عندما تقاس بواسطة مراقب ساكن بالنسبة للجسم، فإنه عندما يتحرك بسرعة v في اتجاه موازٍ لطوله يكون طوله أقصر وفقا للمعادلة $L = L_p/\gamma = L_p\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

وعلى سبيل المثال، أفترض أن عصا قياس تتحرك مارة بمراقب ساكن على الأرض بسرعة v كما في الشكل 11.39. الطول الذي يقيسه مراقب في الإطار الملحق بالعصا هو الطول الأصلي L_p كما في الشكل a11.39. طول العصا الذي يقيسه المراقب الأرضي أقصر من L_p بالعامل $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. لاحظ أن **انكماش الطول يحدث فقط علي طول اتجاه الحركة.**

الطول الأصلي والفترة الزمنية الأصلية يعرفان بطريقة مختلفة. الطول الأصلي هو المقاس بواسطة مراقب تبقي بالنسبة له نقطتي نهاية الطول ثابتة في الفضاء. الفترة الزمنية الأصلية هي المقاسة بواسطة شخص بالنسبة له يحصل الحدثان في نفس الموضع من الفضاء. كمثال على هذه النقطة، لنرجع إلى الميونات التي تضمحل وهي متحركة بسرعات مقاربة لسرعة الضوء. المراقب في الإطار المرجعي للميون سيقيس العمر الأصلي، بينما يقيس المراقب الأرضي الطول الأصلي (المسافة من الخلق إلى الاضمحلال في الشكل 8.39). في الإطار المرجعي للميون لا يوجد تمدد زمني ولكن

المسافة المقطوعة تبدو أقصر في هذا الإطار. بالمثل، في الإطار المرجعي للمراقب الأرضي، يوجد تمدد زمني، لكن المسافة المقطوعة تقاس لتكون الطول الأصلي. ولذا عندما تجرى الحسابات علي الميون في كلا الإطارين، ناتج التجربة في إطار هو نفسه في الإطار الآخر. وتصل ميونات إلى سطح الأرض أكثر مما كان متوقعا بدون التأثيرات النسبية.

سؤال للتفكير 6.39

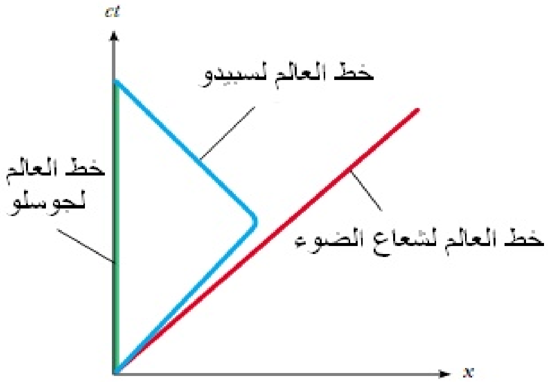
أنت تحزم أمتعتك لرحلة إلى نجم آخر. خلال الرحلة ستكون مسافرا بسرعة 0.99c. تحاول أن تقرر ما إذا كنت ستشتري قياساً أصغر لملابسك، لأنك ستصبح أنحف في رحلتك، نتيجة انكماش الطول. وأيضاً أنت تضع في عين الاعتبار توفير المال بحجز قمره أصغر لتنام فيها لأنك ستصبح أقصر عندما تضطجع. هل يتوجب عليك(a) شراء قياسات أصغر للملابس،(b) حجز قمره أصغر،(c) لا تفعل أياً من هما، أو (d) تقوم بكليهما؟

سؤال للتفكير 7.39

أنت ترصد سفينة فضاء تتحرك بعيداً عنك. تقيسها أصغر مما كانت عليه عندما كانت على الأرض بجوارك. وترى أيضا ساعة عبر نافذة السفينة، وتراقب أن مر الزمن على الساعة أبطأ منه في الساعة التي علي معصمك. مقارنة بحال السفينة عندما كانت على الأرض، ماذا تقيس إذا التفت السفينة وجاءت تجاهك بنفس السرعة؟(a) تقاس السفينة أطول والساعة تسير أسرع. (b) تقاس السفينة أقصر والساعة تسير أبطأ. (c) تقاس السفينة أقصر والساعة تسير أسرع. (d) تقاس السفينة أقصر والساعة تسير أبطأ.

الرسوم البيانية للمكان-الزمان Space-Time Graphs

من المفيد أحياناً عمل رسم بياني للزمان-المكان، حيث ct الإحداثي الصادي و x الإحداثي السيني. نرى مفارقة التوأمين معروضة في مثل هذا المخطط البياني في الشكل 12.39 من وجهة نظر جوسلو.



الشكل 12.39 (a)مفارقة التوأمين على رسم بياني للمكان-الزمان. التوأم الذي يظل على الأرض له خط-عالم على طول المحور ct. طريق التوأم المسافر خلال الزمكان يعبر عنه بخط-عالم يغير اتجاهه.

المسار خلال الزمان-المكان يسمى **خط-العالم world-line**. في نقطة الأصل ينطبق خطا-العالم لسبيدو وجوسلو لأن التوأمان في نفس المكان في نفس الوقت. وبعد أن يغادر جوسلو في رحلته، ينحرف خط-العالم له عن خط-العالم لأخيه. خط-عالم جوسلو رأسي لأنه يبقى ثابتاً في مكانه. عند إعادة لقاءهم يعود خطا-العالم معاً. لاحظ أن سيكون من

المستحيل لسبيدو أن يكون له خط-عالم يقطع خط شعاع الضوء الذي غادر الأرض عندما غادر سبيدو. ليفعل هذا سيكون من المطلوب له أن تكون له سرعة أكبر من c (وهو غير ممكن كما أوضح في القسم 6.39 و 7.39).

خطوط-العالم لأشعة الضوء في رسم بياني للمكان-الزمان، ترسم نموذجيا عند 45^o لليمين أو اليسار من الرأسي (بفرض أن المحورين x و ct لهما نفس المقاييس)، اعتماداً على ما إذا كان شعاع الضوء ينتقل في اتجاه x المتزايد أو المتناقص. خطي العالم الاثنين هذين يعنيان أن كل الأحداث المستقبلية الممكنة لجوسلو وسبيدو تقع داخل خطين ميلهما 45^o يمتدان من نقطة الأصل. وجود أي من التوأمين عند أي حدث خارج "مخروط الضوء" سيتطلب أن يتحرك التوأم بسرعة أكبر من c، والذي قلنا أنهه غير ممكن. كذلك الأحداث الماضية الوحيدة التي من الممكن لجوسلو وسبيدو أن يكونا قد اختبراها وقعت داخل خطي-عالم مشابهين يقتربان من نقطة الأصل من عند أسفل المحور x.

مثال 3.39 انكماش سفينة فضاء

سفينة فضاء طولها 120.0 متر، وقطرها 20.0 متر بينما هي ساكنة بالنسبة لمراقب. إذا طارت سفينة الفضاء مارة بالمراقب بسرعة 0.99c، ما الطول والقطر اللذان يقيسهما المراقب؟

الحل: من المعادلة 9.39، الطول الذي يقيسه المراقب

$$L = L_p\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = (120.0\, m)\sqrt{1-\frac{(0.99c)^2}{c^2}} = 17\, m$$

القطر الذي يقيسه المراقب يظل 20.0 متر لأن القطر بعد عمودي على الحركة وانكماش الطول يحدث على طول اتجاه الحركة.

مثال 4.39 مفارقة سارية في الحظيرة

مفارقة التوأمين، التي نوقشت سابقاً، هي "مفارقة" كلاسيكية في النسبية. "مفارقة" كلاسيكية أخرى هي كالآتي: افترض أن عداء يتحرك بسرعة 0.75c يحمل سارية أفقية طولها 15 متر باتجاه حظيرة طولها 10 متر. الحظيرة لها باب أمامي وخلفي. وهناك مراقب على الأرض يمكنه فتح وغلق البابين لحظيا وفي وقت واحد بجهاز تحكم عن بعد. عندما يصبح العداء والسارية داخل الحظيرة، يغلق المراقب على الأرض كلا البابين ثم يفتحهملذلك فإن العداء والسارية يحتجزان لحظياً داخل الحظير ة ثم يبدءان بالخروج من الحظيرة من الباب الخلفي. هل يتفق كل من العداء والمراقب الأرضي على أن العداء يمضي بأمان عبر الحظيرة؟

الحل: من خبرتنا اليومية سنكون مندهشين لرؤية سارية بطول 15 متر تدخل في حظيرة طولها 10 متر. لكن السارية في حالة حركة بالنسبة للمراقب الأرضي، الذي سيقيس السارية وقد انكمشت إلى طول L_{pole} حيث

$$L_{pole} = L_p\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = (15\,m)\sqrt{1-(0.75)^2} = 9.9\,m$$

وبالتالي، يقيس المراقب الأرضي السارية أقصر قليلا من الحظيرة فلا توجد مشكلة في الاحتجاز اللحظي للسارية داخلها. تظهر "المفارقة" عندما نعتبر وجهة نظر العداء.

يرى العداء الحظيرة وقد تقلصت إلى

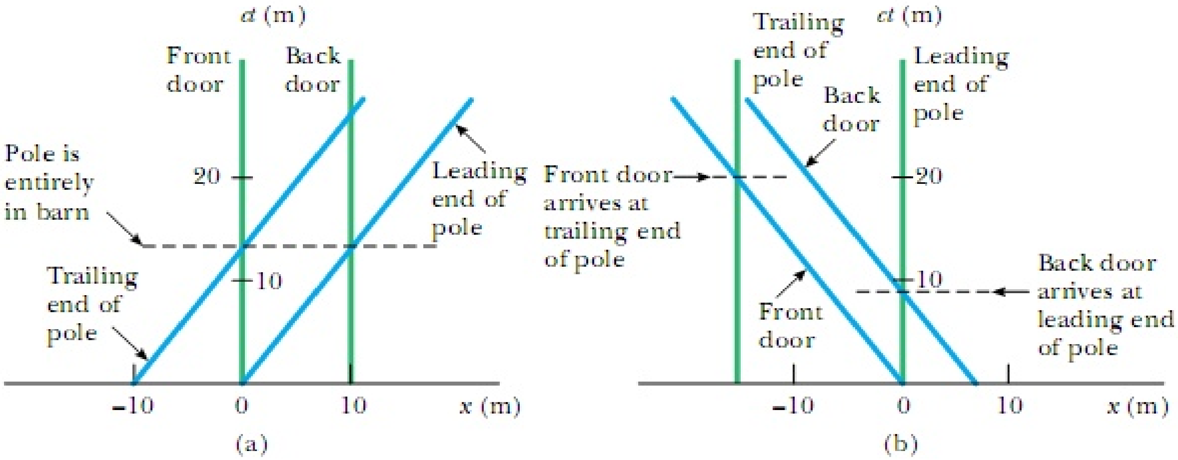
$$L_{barn} = L_p\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = (10\,m)\sqrt{1-(0.75)^2} = 6.6\,m$$

ولأن السارية في الإطار السكوني للعداء، يقيس طولها 15 متر. كيف يمكن لسارية طولها 15 متر أن تدخل في حظيرة طولها 6.6 متر؟ في حين أن هذا هو السؤال الكلاسيكي الذي يسأل، فهو ليس السؤال الذي سألناه لأنه ليس هو السؤال المهم. نحن سألنا *ما إذا كان العداء يستطيع أن يمضي بأمان عبر الحظيرة*.

حل "المفارقة" يكمن في نسبية الآنية. غلق البابين يبدو آنيا بالنسبة للمراقب الأرضي. ولأن البابين في موضعين مختلفين، كيفما كان، لا يغلقان آنيا عندما يقيسهما العداء. الباب الخلفي يغلق ثم يفتح أولا متيحاً للحافة الأمامية الخروج. والباب الأمامي للحظيرة لا يغلق حتى تمر الحافة الخلفية للسارية. يمكننا تحليل هذا باستخدام مخطط بياني للمكان-الزمان. الشكل a13.39 هو رسم بياني للمكان الزمان من وجهة نظر المراقب الأرضي. نختار $x=0$ لتكون موضع الباب الأمامي للحظيرة و $t=0$ للحظة التي فيها النهاية الأمامية للسارية عند الباب الأمامي للحظيرة.

خطي العالم لنهايتي الحظيرة مفصولان بـ10 أمتار وهما رأسيان لأن الحظيرة لا تتحرك بالنسبة لهذا المراقب. بالنسبة للسارية نتبع خطي-عالم مائلين لكي من نهايتي السارية. خطي-العالم هذين مفصولان بـ9.9 متر أفقيا وهو الطول المنكمش الذي يراه المراقب الأرضي. كما يرى في الشكل a 13.39، لحظة واحدة تكون السارية داخل الحظيرة كلياً.

الشكل b13.39 يوضح الرسم البياني للمكان-الزمان وفقا للعداء. هنا خطي-العالم للسارية مفصولان بمسافة 15 متر وهما رأسيان لأن السارية ساكنة في الإطار المرجعي للعداء. الحظيرة تندفع بعنف تجاه العداء، ولذلك فإن خطي-العالم للبابين الأمامي والخلفي للحظيرة مائلين في الاتجاه المعاكس بالمقارنة بالشكل a13.39. خطي العالم للحظيرة تفصلهما مسافة 6.6 متر، الطول المنكمش كما يراه العداء. لاحظ أن مقدمة السارية تغادر الباب الخلفي للحظيرة طويلاً قبل أن تدخل مؤخرة السارية إلى الحظيرة، وهكذا فإن فتح الباب الخلفي يحدث قبل غلق الباب الأمامي.



الشكل 13.39 (مثال 4.39) رسوم بيانية للمكان-الزمان لمفارقة السارية في الحظيرة.

(a) من وجهة نظر المراقب الأرضي، خطي-العالم للبابين الأمامي والخلفي للحظيرة خطان رأسيان.نهايتي خطي-العالم للسارية مائلان ويبعدان 9.9 متر عن الأفقي. الباب الأمامي للحظيرة عند النقطة x=0 ، ومقدمة طرف السارية تدخل الباب الأمامي عند t=0. السارية تكون داخل الحظيرة كلياً في الوقت الموضح بالخط المتقطع.(b) من وجهة نظر العداء، خطي-العالم لنهايتي السارية رأسيان، الحظيرة تتحرك في الاتجاه السالب، ولذلك فإن خطي-العالم للبابين الأمامي والخلفي مائلان لليسار. وتخرج الحافة الأمامية للسارية من الباب الخلفي قبل أن تصل مؤخرة حافة السارية إلى الباب الأمامي.

من وجهة نظر المراقب الأرضي، الوقت الذي تدخل فيه مؤخرة نهاية السارية إلى الحظيرة توجد من

$$\Delta t = t - 0 = t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{9.9\ m}{0.75c} = \frac{13.2\ m}{c}$$

وبالتالي، يجب أن تكون السارية بداخل الحظيرة تماما في زمن مناظر لـ $ct=13.2\ m$. وذلك متسق مع النقطة على المحور ct في الشكل a13.39 حيث السارية داخل الحظيرة.

من وجهة نظر العداء، الزمن الذي تغادر النهاية الأمامية للسارية فيه الحظيرة توجد من

$$\Delta t = t - 0 = t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{6.6\ m}{0.75c} = \frac{8.8\ m}{c}$$

مؤدياً إلى $ct=8.8\ m$. وذلك متسق مع النقطة على المحور ct في الشكل b13.39 حيث الباب الخلفي للحظيرة يصل إلى النهاية الأمامية للسارية.

أخيرا، الوقت الذي تدخل فيه النهاية الخلفية للسارية الباب الأمامي للحظيرة توجد من

$$\Delta t = t - 0 = t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{15\ m}{0.75c} = \frac{20\ m}{c}$$

هذا يعطي $ct=20\ m$، والذي يوافق اللحظة الموضحة في الشكل b13.39.

مثال 5.39 رحلة إلى الشعرى

رائدةفضاء تقوم برحلة إلى نجم الشعرى، والذي يقع على بعد 8 سنوات ضوئية من الأرض. تقيس رائدة الفضاء زمن الرحلة في اتجاه واحد لتكون 6-yr. إذا كانت سفينة الفضاء تتحرك بسرعة 0.8c. كيف يمكن توفيق المسافة 8-ly مع زمن الرحلة 6-yr الذي قاسته رائدة الفضاء؟

الحل:المسافة 8 lyتمثل الطول الأصليمن الأرض إلى نجم الشعرى مقاسا بواسطة مراقب يري كلا الجسمين ساكنين تقريباً . ترى رائدة الفضاء نجم الشعرى يقترب منها بسرعة 0.8c لكن أيضاً ترى المسافة تتكمش لـ

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

$$\frac{8\,ly}{y} = (8\,ly)\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = (8\,ly)\sqrt{1-\frac{(0.8c)^2}{c^2}} = 5\text{ly}$$

إذن، وقت السفر مقاساً على ساعتها هو

$$\Delta t = \frac{\text{d}}{v} = \frac{5\,ly}{0.8c} = 6\text{ yr}$$

لاحظ أننا استخدمنا قيمة سرعة الضوء $c = 1\text{ ly/yr}$.

ماذا لو؟ ماذا لو تمت مراقبة الرحلة بتلسكوب قوي جداً بواسطة فني متخصص في محطة تحكم المهمات على الأرض؟ في أي وقت سيرى الفني رائدة الفضاء تصل إلى الشعرى؟

الحل: الفترة الزمنية التي سيقيسها الفني المتخصص لوصول رائدة الفضاء هي

$$\Delta t = \frac{\text{d}}{v} = \frac{8\,ly}{0.8c} = 10\text{ yr}$$

ولكي يرى الفني الوصول يجب أن ينتقل الضوء من مسرح حدث الوصول عائداً إلى الأرض ويدخل التلسكوب. هذا سيتطلب فترة زمنية تساوي

$$\Delta t = \frac{\text{d}}{v} = \frac{8\,ly}{c} = 8\text{ yr}$$

وبالتالي، يرى الفني الوصول بعد $10\,yr + 8\,yr = 18\,yr$. لاحظ أنه إذا دارت رائدة الفضاء على الفور وعادت إلى الأرض، فهي تصل، كما يقيس المراقب، بعد 20 سنة من مغادرتها، وبعد سنتين فقط من رؤيتها تصل إلى هناك! بالإضافة إلى ذلك سيكون عمرها قد زاد فقط 12 سنة.

تأثير دوبلر النسبي The Relativistic Doppler Effect

نتيجة أخرى مهمة من نتائج تمدد الزمن هي الإزاحة في التردد التي وجدت في الضوء المنبعث من ذرات في حالة حركة إذا قورنت بالضوء المنبعث من ذرات ساكنة، هذه الظاهرة تعرف باسم تأثير دوبلر، قدمت في الجزء 17 فيما يختص بموجات الصوت. في حالة الصوت، حركة المصدر بالنسبة لوسط الانتشار يمكن تمييزها من حركة المراقب بالنسبة للوسط. موجات الضوء يجب أن تحلل بطريقة مختلفة، بأية طريقة، لأنها لا تتطلب وسط للانتشار، ولا توجد طريقة لتمييز حركة الضوء من حركة المراقب.

إذا اقترب مصدر ضوء ومراقب من بعضهما البعض بسرعة نسبية v، فإن التردد f_{obs} مقاساً بواسطة المراقب هو

$$f_{obs} = \frac{\sqrt{1+v/c}}{\sqrt{1-v/c}} f_{source} \quad (10.39)$$

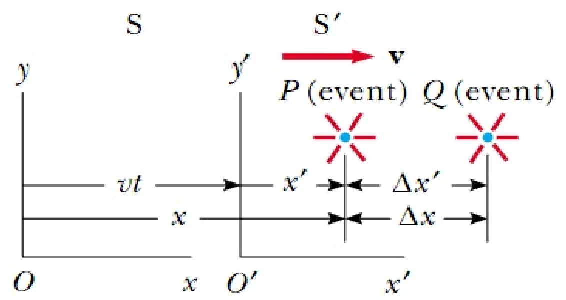
حيث f_{source} هو تردد المصدر مقاساً في إطار السكون. لاحظ أن معادلة إزاحة دوبلر النسبية هذه بخلاف معادلة إزاحة دوبلر للصوت تعتمد فقط على السرعة النسبية v للمصدر والمراقب وتصمد عند السرعات النسبية العالية مثل c. وكما يمكن أن تتوقع، تتنبأ المعادلة أن $f_{source} < f_{obs}$ عندما يقترب المصدر والمراقب من بعضهما البعض.

ونستطيع الحصول على العلاقة الجبرية في حالة تراجع المصدر والمراقب عن بعضهما البعض بالتعويض عن v في المعادلة 10.39.

والاستخدام الأكثر إثارة ودراماتيكية لظاهرة دوبلر النسبية هو حساب الإزاحة في تردد الضوء المنبعث من أجسام فلكية متحركة كمجرة مثلاً. فالضوء المنبعث من الذرات والذي يوجد بشكل طبيعي في أقصى المنطقة البنفسجية من الطيف يزاح تجاه النهاية الحمراء للطيف للذرات في للمجرات الأخرى مبيناً أن هذه المجرات تبتعد عنا. في هذا الإطار أجرى الفلكي الأمريكي إدوين هابل (1889-1953) قياسات شاملة لهذه الإزاحة الحمراء لإثبات أن معظم المجرات تتحرك مبتعدة عنا، مبينة أن الكون يتمدد.

4.39 معادلات تحويل لورنتز The Lorentz Transformation Equations

افترض أن حدثاً يقع عند نقطة ما P وصفه مراقبين أحدهما ساكن في إطار S وآخر في إطار S' يتحرك إلى اليمين بسرعة v كما في الشكل 14.39. ويصف المراقب في S الحدث بإحداثيات مكان-زمان (x, y, z, t)، بينما المراقب في S' يصف نفس الحدث باستخدام إحداثيات (x', y', z', t').



الشكل 14.39 الأحداث تقع عند النقطتين P و Q وتتم مراقبتها بواسطة مراقب ساكن في الإطار S وآخر في الإطار S' الذي يتحرك إلى اليمين بسرعة v.

إذا وقع الحدثان عند P و Q، فإن المعادلة 1.39 تتنبأ بأن $\Delta x = \Delta x'$، هذه هي المسافة بين النقطتين في الفضاء الذي يقع فيه الحدثان ولا تعتمد على حركة المراقب. ولأن هذا مناقض لفكرة انكماش الطول، فإن التحويل الجاليلي لا يكون مفعوله سارياً عندما تقترب v من سرعة الضوء. ولهذا سنقوم في هذا القسم بتقرير معادلات التحويل الصحيحة التي تصلح لكل السرعات في المدى $0 \le v < c$.

المعادلات الصالحة للتطبيق لكل السرعات والتي تمكننا من إجراء تحويل الإحداثيات من S إلى S' هي **معادلات تحويل لورنتز**:

$$x' = \gamma(x - vt) \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \qquad (11.39)$$

معادلات تحويل لورنتز من $S \to S'$

معادلات التحويل هذه طورت بواسطة هيندريك أ.لورنتز (1853-1928) في عام 1890 في ارتباط مع الكهرومغناطيسية. ومع ذلك، كان أينشتاين هو من أدرك دلالتها الفيزيائية وأخذ الخطوة الجريئة لتفسيرها في إطار النظرية النسبية الخاصة.

لاحظ الفرق بين معادلتي تحويل جاليليو ولورنتز للزمن. في الحالة الجاليلية، $t=t'$، لكن في حالة لورنتز قيمة t' المخصصة لحدث بواسطة مراقب O' في الإطار S' في الشكل 14.39 تعتمد على كل من الزمن t والإحداثي x كما قاسها المراقب O في الإطار S. وهذا متسق مع فكرة أن الحدث يوصف بإحداثيات مكان-زمان أربعة (x, y, z, t).

بمعنى آخر، المكان والزمان في النسبية ليسا مفهومين منفصلين لكن على العكس هما مترابطان إلى حد بعيد مع بعضهما البعض.

وإذا أردنا تحويل إحداثيات في S' إلى إحداثيات في الإطار S، ببساطة نستبدل v بـ $-v$ ونبادل الإحداثيات ذات الشرطة بإحداثيات بدون شرطة في المعادلة 11.39:

$$(12.39)\qquad x = \gamma(x' + vt') \qquad y = y' \qquad z = z' \qquad t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right)$$

معادلات تحويل لورنتز من $S' \leftarrow S$

عندما $v \ll c$، يجب أن تؤول معادلات تحويل لورنتز إلى المعادلة الجاليلية. للتحقق من هذا، لاحظ أنه كلما اقتربت v من الصفر، $v/c \ll 1$؛ وبالتالي $\gamma \to 1$، وتؤول المعادلات 11.39 إلى معادلات تحويل المكان-زمان الجاليلية:

$$x' = x - vt \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = t$$

في كثير من الحالات، نريد أن نعرف الفرق في الإحداثيات بين حدثين أو فترة زمنية بين حدثين كما ترى بواسطة المراقبين O وO'. يمكننا انجاز ذلك بكتابة معادلات لورنتز في قالب مناسب لوصف الحدثين.

من المعادلات 11.39 و12.39، يمكننا التعبير عن الفروق بين المتغيرات الأربعة x، x'، t وt' بالشكل

$$(13.39)\qquad \left.\begin{aligned} \Delta x' &= \gamma(\Delta x - v\Delta t) \\ \Delta t' &= \gamma\left(\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x\right) \end{aligned}\right\} S \to S'$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta x &= \gamma(\Delta x' + v\Delta t')\\ \Delta t &= \gamma\left(\Delta t' + \frac{v}{c^2}\Delta x'\right)\end{aligned}\right\} S' \rightarrow S \qquad (14.39)$$

حيث $\Delta x' = x_2' - x_1'$ و $\Delta t' = \Delta t_2' - \Delta t_1'$ هما الفرق مقاساً بواسطة المراقب O' و $\Delta x = x_2 - x_1$ و $\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1$ هما الفرق مقاساً بواسطة المراقب O. (لم نذكر الصيغة الجبرية المرتبطة بالإحداثيين y و z لأنهما لا يتأثران بالحركة على طول اتجاه x).

مثال 6.39 زيارة ثانية للآنية وتمدد الزمن

استخدم معادلات تحويل لورنتز في صيغة الفرق مبرهنا أن

(أ) الآنية ليست مفهوماً مطلقاً. وأن

(ب) الساعة المتحركة تقاس أبطأ من ساعة ساكنة بالنسبة لمراقب.

الحل:

(أ) افترض أن هناك حدثان آنيان مفصولان في الفضاء $\Delta t' = 0$ و $\Delta x' \neq 0$ وفقا للمراقب O' الذي يتحرك بسرعة v بالنسبة لـ O. نرى من التعبير Δt في المعادلة 14.39 أنه في هذه الحالة تكون الفترة الزمنية Δt المقاسة بواسطة المراقب O هي $\Delta t = \gamma v\, \Delta x'/c^2$. هذه هي الفترة الزمنية لكلا الحدثين كما يقيسها المراقب O لا تساوي الصفر، ولهذا لا يظهر الحدثان آنيان بالنسبة للمراقب O.

(ب) افترض أن المراقب O' يحمل ساعة يستخدمها لقياس الفترة الزمنية $\Delta t'$. يجد أن الحدثان يقعان في نفس المكان في إطاره المرجعي $\Delta x \neq 0$ لكن في وقتين مختلفين $\Delta t' \neq 0$. يتحرك المراقب O' بسرعة v بالنسبة لـO، الذي يقيس الفترة الزمنية بين الحدثين لتكونΔt. في هذه الحالة يصبح التعبير عن Δt في المعادلة 14.39 $\Delta t = \gamma \Delta t'$ هذه هي معادلة تمدد الزمن الموجودة مسبقاً (معادلة. 7.39) حيث $\Delta t' = \Delta t_p$ هي الفترة الزمنية الأصلية التي تقيسها الساعة التي يحملها المراقب O'. وبالتالي يقيس O أن الساعة تسير أبطأ.

6.39معادلات تحويل لورنتز للسرعة

افترض أن مراقبين في حالة حركة نسبية بالنسبة لبعضهما البعض كلاهما يراقب حركة جسم. ولقد عرفنا الحدث سابقاً على أنه يحدث عند لحظة زمنية. والآن نود أن نفسر "الحدث" على أنه حركة الجسم. ونحن نعلم أن معادلة جاليليو للسرعة (معادلة. 2.39) صحيحة للسرعات المنخفضة. إذ كيف ترتبط قياسات المراقبين للسرعة بعضها ببعض إذا كانت سرعة الجسم قريبة من سرعة الضوء؟ مرة أخرى، S' هو إطارنا المتحرك بسرعة v بالنسبة لـ S. الآن افترض أن جسم له مركبة سرعة u'_x مقاساً في الإطار S'، حيث

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} \qquad (15.39)$$

باستخدام المعادلة 11.39، نحصل على

$$dx' = \gamma(dx - vdt)$$

$$dt' = \gamma\left(dt - \frac{v}{c^2}\,dx\right)$$

بالتعويض عن هذه القيم في المعادلة 15.39 نجد أن

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - v\,dt}{dt - \frac{v}{c^2}\,dx} = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{1 - \frac{v}{c^2}\frac{dx}{dt}}$$

لكن dx/dt ليس إلا مركبة السرعة u_x للجسم مقاسة بواسطة مراقب في الإطار S وهكذا تصبح المعادلة كالآتي

$$(16.39)\quad u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

معادلات تحويل لورنتز للسرعة من $S \rightarrow S'$

وإذا كان الجسم له مركبتي سرعة على طول المحورين y و z فإن المركبتين كما يقيسها المراقب في الإطار S'

$$u'_z = \frac{u_z}{\gamma\left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)} \quad \text{و} \quad u'_y = \frac{u_y}{\gamma\left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)} \qquad (17.39)$$

لاحظ أن u'_y و u'_z لا يحتويان على البارامتر v في البسط لأن السرعة النسبية إنما هي على طول المحور x.

عندما تكون v أقل بكثير من c (في الحالة الغير نسبية)، يقترب المقام في المعادلة 16.39 من الواحد وتصبح $u'_x = u_x - v$ وهي معادلة تحويل جاليليو. ومن ناحية أخرى، عندما تكون $u_x = c$ تصبح المعادلة 16.39 كالآتي

$$u'_x = \frac{\mathrm{c} - \mathrm{v}}{1 - \frac{cv}{c^2}} = \frac{c\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{1 - \frac{v}{c}} = c$$

من هذه النتيجة نرى أن سرعة c المقاسة بواسطة مراقب في S يقيسها المراقب في 'S لتكون c أيضاً - مستقلاً عن السرعة النسبية للإطار S أو 'S .

لاحظ أن هذه النتيجة متسقة مع الفرض الثاني لأينشتاين- أن سرعة الضوء لابد أن تكون c بالنسبة لكل أطر الإسناد القصورية. وعلاوة على ذلك، نجد أن سرعة أي جسم لا يمكن أبداً أن تكون أكبر من c. ولهذا فإن سرعة الضوء هي السرعة القصوى وسنعود إلى هذه النقطة لاحقاً.

وللحصول على قيمة u_x بمعلومية u'_x ، نستبدل v بـ $-v$ في المعادلة 16.39 وتبديل u_x مع u'_x:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \qquad (18.39)$$

سؤال للتفكير 8.39

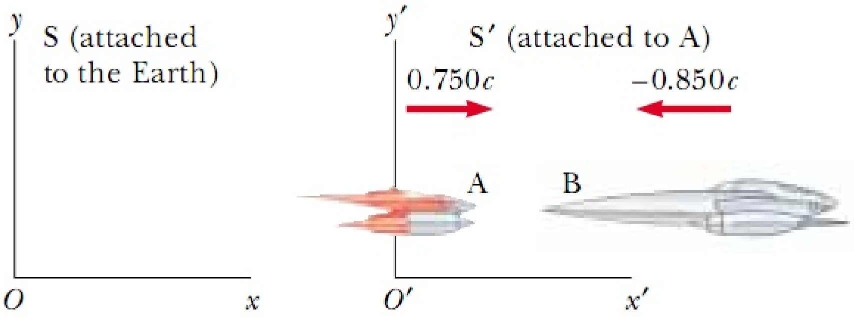
افترض أنك تقود على الطريق السريع بسرعة نسبية. ويقف أمامك مباشرة على الأرض فني، يشغل مصباحه ويتحرك شعاع من الضوء رأسياً تماماً إلى أعلى كما يراه الفني. وبينما أنت ترصد شعاع الضوء تقيس قيمة المركبة العمودية للسرعة لتكون (a) مساوية لـ c (b) أكبر من c (c) أقل من *c*.

سؤال للتفكير 9.39

اعتبر نفس الحالة في سؤال للتفكير 9.39 مرة أخرى. إذا صوب الفني ضوء مصباحه تجاهك مباشرة بدلاً من أن يصوبه إلى أعلى، وتقيس قيمة المركبة الأفقية للسرعة لتكون (a) مساوية لـ c (b) أكبر من c (c) أقل من *c*.

مثال 7.39 السرعة النسبية لسفينتي فضاء

سفينتي فضاء A وB تتحركان في اتجاهين مختلفين، كما هو موضح في الشكل 15.39. وافترض أن هناك مراقب على الأرض يقيس سرعة سفينة الفضاء A لتكون $0.750c$ وسرعة السفينة B لتكون $0.850c$. أوجد سرعة سفينة الفضاء B بالنسبة لطاقم سفينة الفضاء A.



الشكل15.39 (المثال 7.39) سفينتي فضاء A وB تتحركان في اتجاهين متعاكسين. وسرعة B بالنسبة لـA أقل من c ويحصل عليها من معادلة تحويل السرعة النسبية.

الحل:

لكي نبني فكرة عامة عن هذه المسألة، علينا أن نعين المراقبين والحدث بعناية. نجد أن المراقبين الاثنين على الأرض وفي سفينة الفضاءA. وأما الحدث فهو حركة سفينة الفضاء B. ولأن المسألة تتطلب إيجاد سرعة مراقب نصنف هذه المسألة كواحدة من المسائل التي تتطلب تحويل لورنتز للسرعة. عند تحليل المسألة نلاحظ أن المراقب الأرضي يجري قياسين، واحد لكل سفينة فضاء وأن هذا المراقب ساكن في الإطار S. ولأننا نريد قياس سرعة سفينة الفضاء B نعين السرعة u_x وهي $-0.850c$. وسرعة سفينة الفضاء A هي كذلك سرعة المراقب الساكن في الإطار′S الملحق بسفينة الفضاء

بالنسبة للمراقب الساكن في S. وبالتالي فإن v=0.750c، الآن يمكننا معرفة السرعة u'_x لسفينة الفضاء Bبالنسبة لسفينة الفضاء A باستخدام16.39:

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} = \frac{-0.850c - 0.750c}{1 - \frac{(-0.850c)(0.750c)}{c^2}}$$

$$= -0.977c$$

ولنصوغ هذه المسألة نهائياً، لاحظ أن الإشارة السالبة تبين أن سفينة الفضاء B تتحرك في اتجاه x السالب كما يشاهده طاقم السفينة A. هل هذا متفق مع توقعاتك من الشكل 15.39؟ لاحظ أن السرعة أقل من c. هذا يعني أنه إذا كان لجسم سرعة أقل من c في أحد أطر الإسناد فإنه لابد أن تكون سرعته أقل من c في أي إطار آخر(فإذا استخدمت معادلات تحويل جاليليو للسرعة في هذا المثال، لوجدنا أن $u'_x = u_x - v = -0.850c - 0.750c = 1.60c$ وهذا مستحيل. ولهذا لا تصلح معادلة تحويل جاليليو في الحالات النسبية)

ماذا لو؟ جاوزت سفينتي الفضاء بعضهما البعض؟ ماذا ستكون السرعة النسبية لهما؟

الحل:الحسابات المستخدمة في المعادلة 16.39 تستخدم فقط سرعة سفينتي الفضاء ولا تعتمد على موقعهما. فبعد أن تمرا ببعضهما البعض، ستظل سرعتهما كما هي، ولذلك فإن سرعة السفينة B كما يراها الطاقم على السفينة A كما هي والفارق الوحيد بعد أن يجاوزا بعضهما أن Bستتراجع بعيداً عن A حيث كانت تقترب من A قبل مرورهما.

مثال 8.39 الدراجة البخارية المسرعة

تخيل دراجة بخارية تتحرك بسرعة 0.80c مارة على مراقب ساكن، كما هو موضح في الشكل 16.39. إذا قذف الراكب كرة في اتجاه الأمام بسرعة 0.70c بالنسبة له هو، ماذا ستكون سرعة الكرة بالنسبة للمراقب الساكن؟

الشكل 16.39 (المثال 8.39)سائق دراجة بخارية يتحرك ماراً بمراقب ساكن بسرعة 0.80c ويلقي بكرة في اتجاه حركته بسرعة 0.70c بالنسبة له.

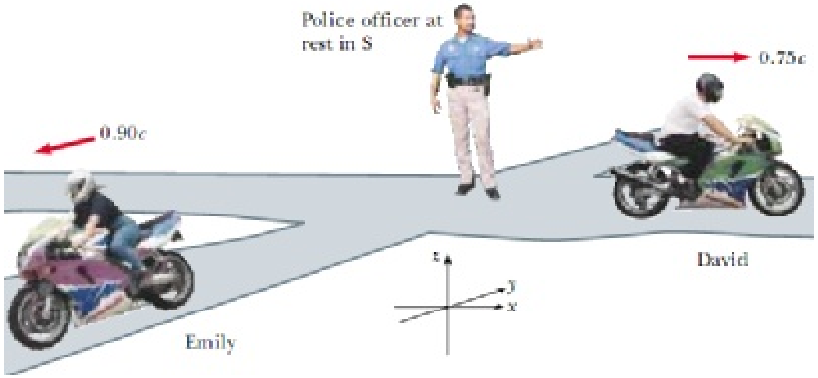
الحل:سرعة الدراجة البخارية بالنسبة للمراقب الساكن هي 0.80c. وسرعة الكرة في إطار الإسناد لسائق الدراجة البخارية $u'_x = 0.70c$. ولذلك فإن سرعة الكرة u_x بالنسبة للمراقب الساكن هي

$$u_x = \frac{u'x+v}{1+\frac{u'_x v}{c^2}} = \frac{0.70c+0.80c}{1+\frac{(0.70c)(0.80c)}{c^2}} = 0.96c$$

مثال 9.39 قائدي المجموعة النسبيين

قائدي مجموعة من سائقي الدراجات البخاريةيدعيان دافيد وإيميلي يتسابقان بسرعات نسبية على طول مسارين متعامدين، كما هم موضح في الشكل 17.39 ما السرعة التي تتراجع بها ايميلي كما يراها دافيد من فوق كتفه الأيمن ؟

الحل: الشكل 17.39 يوضح الموقف كما يراه ضابط شرطة ساكن في الإطار S، والذي يرصد الآتي:



الشكل 17.39 (المثال 9.39) يتحرك دافيد ناحية الشرق بسرعة $0.75c$ بالنسبة لضابط الشرطة، وإيميلي تتحرك ناحية الجنوب بسرعة $0.90c$ بالنسبة للشرطي.

دافيد: $u_x = 0.75c u_y = 0$

ايميلي: $u_x = 0 u_y = -0.90c$

لحساب سرعة تراجعي ايميلي كما يراها دافيد، نعتبر 'Sيتحرك مع دافيد ثم نحسب u'_x وu'_y لايميلي باستخدام المعادلتين 16.39 و 17.39:

$$u'_x = \frac{u'_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} = \frac{0 + 0.75c}{1 - \frac{(0)(0.75c)}{c^2}} = -0.75c$$

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma\left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{(0.75c)^2}{c^2}}\, -0.90c}{\left(1 - \frac{(0)(0.75c)}{c^2}\right)}$$

وبالتالي، فإن سرعة ايميلي كما يراها دافيد هي

$$u' = \sqrt{(u'_x)^2 + \left(u'_y\right)^2} = \sqrt{(-0.75c)^2 + (-0.60c)^2}$$
$$= 0.96c$$

لاحظ أن هذه السرعة أقل من c كما تفرض النظرية النسبية الخاصة.

7.39 كمية الحركة الخطية النسبية والصورة النسبية لقوانين نيوتن

لقد رأينا أنه يجب لوصف حركة الجسيمات بصورة صحيحة في إطار النظرية النسبية الخاصة أن نستبدل معادلات التحويل الجاليلية بمعادلات تحويل لورنتز. ولأن قوانين الفيزياء يجب أن تظل كما هي تحت تحويلات لورنتز يجب أن نعمم قوانين نيوتن وتعريف كمية الحركة الخطية والطاقة بما يوافق معادلات تحويل لورنتز ومبدأ النسبية. وبالطبع هذه التعريفات المعممة يجب أن تؤول للتعريفات الكلاسيكية (الغير نسبية) عندما $v \ll c$.

أولاً، تذكر أن قانون بقاء كمية الحركة الخطية يوضح أنه عندما يصطدم جسيمين (أو جسمين يمكن عرضهما كجسيمين) فإن كمية الحركة الكلية في النظام المعزول للجسيمين تبقي ثابتة.

افترض أننا نراقب هذا الاصطدام في إطار إسنادي S ونؤكد أن كمية حركة النظام محفوظة. الآن تخيل أن كمية حركة الجسيمات يقيسها مراقب في إطار إسنادي ثان 'S يتحرك بسرعة v بالنسبة للإطار الأول. وباستخدام معادلة تحويل لورنتز للسرعة والتعريف الكلاسيكي لكمية الحركة الخطية P = mu (حيث u هي سرعة الجسيم) نجد أن كمية الحركة الخطية ليست محفوظة بالنسبة للمراقب في الإطار 'S. على أية حال، بما أن قوانين الفيزياء هي نفسها في كل الأطر القصورية، فإن كمية الحركة الخطية لنظام يجب أن تكون منحفظة في كل الأطر. الآن أصبحت عندنا متناقضة. وبالنظر

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

إلى هذه المتناقضة وفرض أن معادلات تحويل لورنتز للسرعة صحيحة، نجد أنه لابد من تعديل تعريف كمية الحركة الخطية لتوافق الشروط الآتية:

- كمية الحركة الخطية لنظام معزول لابد أن تكون منحفظة في كل التصادمات.
- القيمة النسبية المحسوبة لكمية الحركة الخطية **p** لجسيم يجب أن تقترب من القيمة الكلاسيكية $m\mathbf{u}$ عندما تقترب **u** من الصفر.

فبالنسبة لأي جسيم، تكون المعادلة النسبية الصحيحة لكمية الحركة الخطية والتي توافق الشروط السابقة هي

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{u}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\mathbf{u} \qquad (19.39)$$

حيث **u** هي سر عة الجسيم و m هي كتلة الجسيم. وعندما تكون **u** أقل بكثير من c تقترب $\gamma = (1-u^2/c^2)^{-1/2}$ من الواحد وتقترب **p** من $m\mathbf{u}$ ولذلك فإن المعادلة النسبية بالفعل تؤول للمعادلة الكلاسيكية عندما تكون **u** أقل بكثير من c.

ويمكن تعريف القوة المؤثرة على الجسيم الذي له كمية حركة خطية **p** هكذا

سرعة الضوء هي حد السرعة في الكون. هي أقصى سرعة ممكنة لنقل الطاقة وأيضا لنقل المعلومات. وأي جسم له كتلة لابد أن يتحرك بسرعة أقل منها.

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \qquad (20.39)$$

حيث **p** هي المحددة بالمعادلة 19.39. هذا التعبير الجبري والذي هو الصورة النسبية للقانون الثاني لنيوتن منطقي لأنه يحفظ الميكانيكا الكلاسيكية في حد السرعات المنخفضة وهو أيضاً متسق مع بقاء كمية الحركة الخطية لنظام معزول (**F** $\notin 0$ نسبياً وكلاسيكياً على حد سواء.

وتركت المسألة (مسألة 69) في آخر الفصل لتوضيح أنه تحت الظروف النسبية تتناقص العجلة **a** لجسيم تحت تأثير قوة ثابتة في هذه الحالة $a \propto (1 - u^2/c^2)^{3/2}$.

نرى من هذا التناسب أنه إذا اقتربت سرعة الجسيم من c فإن العجلة التي تسببها أي قوة متناهية تقترب من الصفر. لهذا السبب من المستحيل تعجيل جسيم من السكون لسرعة $u \geq c$. خلاصة هذا هوتوضيح أن سرعة الضوء هي السرعة القصوى كما ذكر في نهاية القسم السابق.

مثال 10.39 كمية الحركة الخطية لإلكترون

إلكترون كتلته $9.11 \times 10^{-31} Kg$، يتحرك بسرعة0.750c. أوجد كمية الحركة النسبية له، وقارن بينها وبين قيمة كمية الحركة المحسوبة من المعادلة الكلاسيكية.

الحل: باستخدام المعادلة 19.39 وبالتعويض عن u=0.750c

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

$$p = \frac{m_e u}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m u$$

$$p = \frac{(9.11\times10^{-31}\text{kg})(0.750)(3.00\times10^{8}m/s)}{\sqrt{1-\frac{(0750c)^2}{c^2}}} = \gamma m u$$

$$p = 3.10 \times 10^{-22}\text{kg. m/s}$$

أما الصورة الكلاسيكية (واستخدامها هنا خطأ) تعطي $p_{classical} = m_e u = 2.05 \times 10^{-22}\text{kg. m/s}$

إذن الناتج النسبي الصحيح أكبر ب 50% من الناتج الكلاسيكي!

8.39 الطاقة النسبية Relativistic Energy

لقد رأينا أن تعريف كمية الحركة الخطية يتطلب تعميماً لجعله متوافقاً مع فرضي أينشتاين. وهذا ينطوي بداهة على أن طاقة الحركة لابد أن تعدل أيضاً.

ولكي نستنتج الصورة النسبية للشغل-الطاقة الحركية، دعنا نتخيل جسيم يتحرك في بعد واحد على طول المحور x. وهناك

قوة في اتجاه x تسبب تغيراً في كمية حركة الجسيم طبقاً للمعادلة 20.39. والشغل الذي تبذله القوة F على الجسيم هي

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F\, dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dp}{dt} dx \qquad (21.39)$$

ومن أجل إجراء هذا التكامل وا يجاد الشغل المبذول على الجسيم وطاقة الحركة النسبية كدالة ففي u، علينا أولاً أن نحسب dp/dt:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}\frac{mu}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m(du/dt)}{\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)^{3/2}}$$

بالتعويض عن dp/dt و $dx = u\,dt$ في المعادلة 21.39 نجد أن

$$W = \int_0^t \frac{m(du/dt)u\,dt}{\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)^{3/2}} = m\int_0^u \frac{u}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}\,du$$

حيث استخدمنا الحدين 0 و u في التكامل لأن متغير التكامل تغير من t إلى u. وقد فرضنا أن الجسيم تم تعجيله من السكون إلى سرعة نهائية ما تساوي u. بحساب التكامل نجد أن

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 \qquad (22.39)$$

أعد إلى ذهنك من الجزء السابع أن الشغل الذي تبذله قوة تؤثر على نظام يتكون من جسيم مفرد يساوي التغير في طاقة حركة الجسيم. ولأننا فرضنا أن السرعة الأولية للجسيم تساوي صفر، فإننا نعرف أن الطاقة الحركية الأولية له تساوي صفر. وبناء على ذلك، نستنتج أن الشغل W في المعادلة 22.39 مساو للطاقة الحركية النسبية K:

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 \qquad (23.39)$$

هذه المعادلة يتم إثباتها بطريقة روتينية عن طريق تجارب تستخدم معجلات جسيمات ذات طاقة عالية.وفي السرعات المنخفضة حيث $u/c \ll 1$، يجب أن تؤول هذه المعادلة للمعادلة الكلاسيكية $K = \frac{1}{2}mv^2$ وبإمكاننا اختبار ذلك عن طريق استخدام مفكوك ذات الحدين $(1-\beta^2)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2 + \ldots$ عند $\beta \ll 1$، حيث تهمل الحدود ذات القوى العليا في المفكوك (في معالجات النسبية، β هو الرمز الشائع المستخدم لتمثيل u/c أو v/c). في حالتنا هذه،

ولذلك $\beta = u/c$

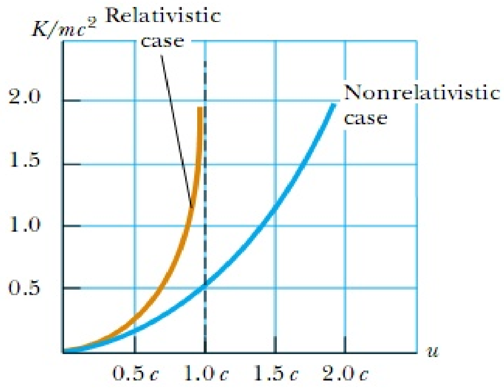
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)^{-1/2} \approx 1+\frac{1}{2}\frac{u^2}{c^2}$$

بالتعويض عن هذا في المعادلة 23.39

$$K \approx \left[\left(1+\frac{1}{2}\frac{u^2}{c^2}\right)-1\right]mc^2 = \frac{1}{2}mu^2$$

(حيث $u/c \ll 1$)

وهو التعبير الكلاسيكي لطاقة الحركة. وهناك رسم بياني يقارن بين التعبير الكلاسيكي وغير الكلاسيكي في الشكل 18.39 حيث يظهر أنه في الحالة النسبية لا تتعدى السرعة قيمة c أبداً مهما كانت الطاقة الحركية وأن المنحنيان يتفقان على نحو جيد عندما $u \ll c$.



الشكل 18.39 رسم بياني يقارن بين الطاقة الحركية النسبية والغير نسبية لجسيم متحرك. مثلت الطاقات بيانياً كدالة في سرعة الجسيم u. في الحالة النسبية ، u دائماً تكون أقل من c.

المصطلح الثابت mc^2، في المعادلة 23.39 والذي لا يعتمد على سرعة الجسيم يدعى طاقة السكون E_R للجسيم:

$$E_R = mc^2 \qquad (24.39)$$

والمصطلح γmc^2، والذي يعتمد على سرعة الجسيم، هو بالتالي مجموع طاقتي الحركة والسكون. ويمكننا تعريف γmc^2 على أنه الطاقة الكلية E total energy:

الطاقة الكلية = طاقة الحركة + طاقة السكون

$$E = K + mc^2 \qquad (25.39)$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \gamma mc^2 \qquad (26.39)$$

العلاقة $E = K + mc^2$ توضح أن **الكتلة صورة من صور الطاقة**، حيث c^2 في طاقة السكون ليس إلا عامل تحويل ثابت. هذا التعبير يوضح أيضاً أن الكتل الصغيرة تقابلها كمية ضخمة من الطاقة وهو مبدأ جوهري في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات الأولية.

في العديد من الحالات، تقاس كمية الحركة الخطية أو طاقة الجسيم فضلاً عن سرعته. ولذلك فإنه من المفيد أن تكون هناك علاقة تربط بين الطاقة الكلية E وكمية الحركة الخطية النسبية p وهذا يتم باستخدام المعادلتين $E = \gamma mc^2$ و $p = \gamma mu$. بتربيع هاتين المعادلتين والطرح(المسألة 43)، يكون الناتج بعد استخدام بعض الجبر

$$E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2 \qquad (27.39)$$

عندما يكون الجسيم في حالة سكون $p = 0$ وبالتالي $E = E_R = mc^2$.

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

في القسم 1.35 قدمنا مفهوم جسيم الضوء الذي يدعى **فوتون**. بالنسبة للجسيمات التي لها كتلة صفر، مثل الفوتونات نضع $m = 0$ في المعادلة 27.39 ونجد أن

$$E = pc \qquad (28.39)$$

هذه المعادلة هي تعبير دقيق يربط الطاقة الكلية وكمية الحركة الخطية للفوتونات، والتي تنتقل دائماً بسرعة الضوء (في الفراغ).

وأخيراً، لاحظ أنه لأن الكتلة m لجسيم لا تعتمد على حركته، فلابد أن تكون قيمة m واحدة في كل أطر الإسناد. ولهذا السبب يطلق عليها غالباً **الكتلة الثابتة**. ومن ناحية أخرى، لأن الطاقة الكلية وكمية الحركة الخطية للجسيم كلاهما يعتمد على السرعة فإن هاتين الكميتين تعتمدان على إطار الإسناد الذي تقاس فيه.

عندما نتعامل مع الجسيمات دون الذرية، من الملائم التعبير عن طاقتها بوحدات الإلكترون فولت (القسم 1.25) لأن هذه الجسيمات عادة ما تكتسب هذه الطاقة بواسطة تعجيلها عبر فرق جهد. ويصبح عامل التحويل كما تتذكر من المعادلة 5.25 هو

$$1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

على سبيل المثال، كتلة الإلكترون هي $9.11 \times 10^{-31}\ Kg$، من هنا تكون كتلة السكون للإلكترون هي

$$m_e c^2 = (9.11 \times 10^{-31}\ Kg)(3.00 \times 10^8\ m/s)^2 = 8.20 \times 10^{-14}\mathrm{J}$$

$$= (8.20 \times 10^{-14})(1\mathrm{eV}/1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}) = 0.511\ \mathrm{MeV}$$

سؤال للتفكير 10.39

أزواج قيم الطاقة التالية توضح طاقة السكون والطاقة الكلية لثلاث جسيمات مختلفة الجسيم1: E، 2E. الجسيم2: E، 3E. الجسيم 3: 2E، 4E. رتب هذه الجسيمات من الأكبر للأصغر طبقاً لـ (a) كتلتها (b) طاقة حركتها (c) سرعتها.

مثال 11.39 طاقة إلكترون سريع

إلكترون في شاشة التلفيزيون يتحرك بسرعة u=0.250c. احسب طاقته الكلية وطاقته حركته بالإلكترون فولت.

الحل:

باستخدام حقيقة أن طاقة السكون للإلكترون هي 0.511 MeV كما في المعادلة 26.39 نجد أن

$$E = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{0.511\ \mathrm{MeV}}{\sqrt{1-\frac{(0.250c)^2}{c^2}}}$$
$$= 1.03\ (0.511\ \mathrm{MeV}) = 0.528\ \mathrm{MeV}$$

وهذه أكبر من طاقة السكون بـ 3%.

ويمكننا الحصول على طاقة الحركة بطرح طاقة السكون من الطاقة الكلية.

$$K = E - \mathrm{m_e c^2} = 0.528\ \mathrm{MeV} - 0.511\ \mathrm{MeV}$$
$$= 0.017\ \mathrm{MeV}$$

مثال 12.39 طاقة بروتون سريع

(A) أوجد طاقة السكون للبروتون بوحدات الإلكترون فولت.

الحل: باستخدام المعادلة 24.39،

$$E_R = m_p c^2 = (1.67 \times 10^{-27}\ Kg)(3.00 \times 10^{8}\ m/s^2)^2$$
$$= (1.50 \times 10^{-10}\mathrm{J})\left(\frac{1.00\ \mathrm{eV}}{1.60 \times 10^{-19}\mathrm{J}}\right)$$
$$= 938\ \mathrm{MeV}$$

(B) إذا كانت الطاقة الكلية للبروتون تساوي ثلاثة أضعاف طاقة سكونه، فماذا تكون سرعة البروتون؟

الحل: المعادلة 26.39 تعطي،

$$E = 3m_pc^2 = \frac{m_pc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

$$3 = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

بالحل لـ u نجد أن

$$\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) = \frac{1}{9}$$

$$\frac{u^2}{c^2} = \frac{8}{9}$$

$$u = \frac{\sqrt{8}}{3}c = 0.943c = 2.83 \times 10^8\ m/s$$

(C) احسب طاقة حركة الفوتون بوحدة الإلكترون فولت.

الحل: من المعادلة 25.39،

$$K = E - m_pc^2 = 3m_pc^2 - m_pc^2 = 2m_pc^2$$

ولأن $m_pc^2 = 938\ \text{MeV}$، نرى أن $K = 1880\ \text{MeV}$

(D) احسب كمية حركة البروتون.

الحل: يمكننا استخدام المعادلة 27.39 لحساب كمية الحركة مع $E = 3m_pc^2$:

$$E^2 = p^2c^2 + \left(m_pc^2\right)^2 = \left(3m_pc^2\right)^2$$

$$p^2c^2 = 9(m_pc^2)^2 - (m_pc^2)^2 = 8(m_pc^2)^2$$

$$p = \sqrt{8}\frac{m_pc^2}{c} = \sqrt{8}\frac{(938\ \mathrm{MeV})}{c} = 2650\ \mathrm{MeV}/c$$

وحدة كمية الحركة هذه تكتب MeV/c وهي وحدة شائعة في فيزياء الجسيمات.

ماذا لو؟ في الفيزياء الكلاسيكية، إذا تضاعفت كمية حركة جسيم ما، فإن طاقة حركته تزداد أربعة أضعاف. ما الذي يحدث للطاقة الحركية للبروتون السريع في هذا المثال إذا تضاعفت كمية حركته؟

الحل: بناء على ما سبق أن رأيناه حتى الآن في النسبية، من المرجح أنك ستتنبأ أن طاقته الحركية لن تزداد بالعامل 4. إذا تضاعفت كمية الحركة فإن كمية الحركة الجديدة ستكون

$$p_{new} = 2\left(\sqrt{8}\frac{m_pc^2}{c}\right) = 4\sqrt{2}\frac{m_pc^2}{c}$$

باستخدام المعادلة 27.39، يمكننا إيجاد مربع الطاقة الكلية الجديدة:

$$E_{new}^2 = p_{new}^2c^2 + (m_pc^2)^2$$

$$E_{new}^2 = \left(4\sqrt{2}\frac{m_pc^2}{c}\right)^2 c^2 + (m_pc^2)^2 = 33(m_pc^2)^2$$

$$E_{new} = \sqrt{33}(m_pc^2) = 5.7m_pc^2$$

والآن باستخدام المعادلة 25.39، نجد أن الطاقة الحركية الكلية:

$$K_{new} = E_{new} - m_pc^2 = 5.7m_pc^2 - m_pc^2 = 4.7m_pc^2$$

لاحظ أن هذا الناتج أكبر 2.35 مرة من الطاقة الحركية وليس أكبر 4 مرات. عامة، يمكننا القول أن العامل الذي تزداد به طاقة الحركة عندما تتضاعف كمية الحركة سيعتمد على كمية الحركة الأولية لكنها ستقترب من 4 عندما تقترب كمية الحركة من الصفر. حيث في هذه الحالة الأخيرة تصف الفيزياء الكلاسيكية الموقف بصورة صحيحة.

9.39 الكتلة والطاقة

المعادلة 26.39، $E = \gamma mc^2$ التي تمثل الطاقة الكلية لجسيم، توحي بأنه حتى ولو كان الجسيم ساكناً $(\gamma = 1)$ فإنه لا يزال يمتلك طاقة هائلة نتيجة لكتلته. وأوضح إثبات تجريبي على تكافؤ الكتلة والطاقة يظهر في التفاعلات النووية وتفاعلات الجسيمات الأولية والتي يحدث فيها تحول جزء من الكتلة إلى طاقة حركية. وبسبب ذلك لا نستطيع في الحالات النسبية استخدام مبدأ بقاء الطاقة كما حددنا في الأجزاء 7 و 8. فمن الضروري أن نضمن طاقة السكون كشكل آخر لمخزون الطاقة.

هذا المفهوم مهم في العمليات الذرية والنووية، والتي يكون التغير في الكتلة فيها جزء ضخم من الكتلة الأولية. على سبيل المثال، في مفاعل نووي تقليدي، تخضع أنوية اليورانيوم للانشطار، وهو تفاعل يتسبب في العديد من الشظايا الخفيفة

التي لها طاقة حركية كبيرة جديرة بالاعتبار. في حالة ^{235}Uوالذي يستخدم كوقود في مصانع الطاقة النووية، وتكونالشظايا نواتين خفيفتين وبعض النيوترونات والكتلة الكلية للشظايا أقل من كتلة ^{235}U بما يعادل Δm، والطاقة Δmc^2 المقابلة لهذا الفارق في الكتلة مساوية تماماً للطاقة الحركية الكلية للشظايا. هذه الطاقة الحركية تمتص أثناء حركة الشظايا عبر الماء متسببة في رفع الطاقة الداخلية للماء. هذه الطاقة الداخلية تستخدم للحصول على بخار لتوليد الطاقة الكهربية.

بعد ذلك، اعتبر تفاعل اندماج أساسي حيث تندمج ذرتي ديوتيريوم لتكوين ذرة هليوم. ينتج عن ذلك نقص في الكتلة من تكوين ذرة هليوم واحدة من ذرتي ديوتيريوم يساوي $\Delta m = 4.25 \times 10^{-29}\text{kg}$. من هنا، نجد أن الطاقة المناظرة التي تنتج من تفاعل إندماج واحد هي $\Delta mc^2 = 3.83 \times 10^{-12}\ \text{J} = 23.9\ \text{MeV}$.

لكي ندرك كبر هذه النتيجة، إذا تم تحويل 1 جم فقط من الديوتريوم إلى هليوم، فإن الطاقة المتحررة تكون من الرتبة 10^{12} جول! ووفق تكلفة الطاقة الكهربية لعام 2003، هذه الطاقة قيمتها حوالي 30000 دولار. وسوف نقدم تفاصيل أكثر عن هذه العمليات النووية في الجزء 45 من النسخة الموسعة لهذا الكتاب.

مثال 13.39 تغير الكتلة في تحلل نشط إشعاعياً

نواة ^{216}Po غير مستقرة وتظهر نشاطات إشعاعية (الجزء 44). تتحلل إلى ^{212}Pb عن طريق إصدار جسيمات ألفا، والتي هي عبارة عن نواة هليوم

احسب

(A) تغير الكتلة في هذا التحلل.

(B) الطاقة التي تمثل ذلك.

الحل: باستخدام القيم في الجدول A.3 نرى أن الكتل الأولية والنهائية هي

$$m_i = m\,(^{216}\mathrm{Po}) = 216.001905\ \mathrm{u}$$

$$m_f = m\,(^{212}\mathrm{Pb}) + m\,(^{4}\mathrm{He}) = 211.991888\ \mathrm{u} + 4.002603\ \mathrm{u}$$
$$= 215.994491\ \mathrm{u}$$

وبالتالي فإن التغير في الطاقة هو

$$\Delta m = 216.001905\,u - 215.994491\,u = 0.007414\,u$$
$$= 1.23 \times 10^{-29}\mathrm{kg}$$

(B) الطاقة المرتبطة بالتغير في الكتلة هي

$$E = \Delta mc^2 = (1.23 \times 10^{-29}\text{kg})(3.00 \times 10^8 m/s)^2$$
$$1.11 \times 10^{-12}\text{J} = 6.92\ \text{MeV}$$

هذه الطاقة تظهر على صورة الطاقة الحركية لجسيم ألفا و نواة ^{212}Pb بعد التحلل.

9.39 النظرية النسبية العامة

حتى هذه النقطة قد تجنبنا لغزاً محيراً، أن الكتلة لها على ما يبدو خاصيتين مختلفتين: تجاذب جذبي للكتل الأخرى وخاصية قصورية التي تمثل مقاومة التسارع. لتعيين هاتين الخاصيتين نستخدم الدليلين السفليين g و i ونكتب

الخاصية الجذبية $F_g = m_g g$

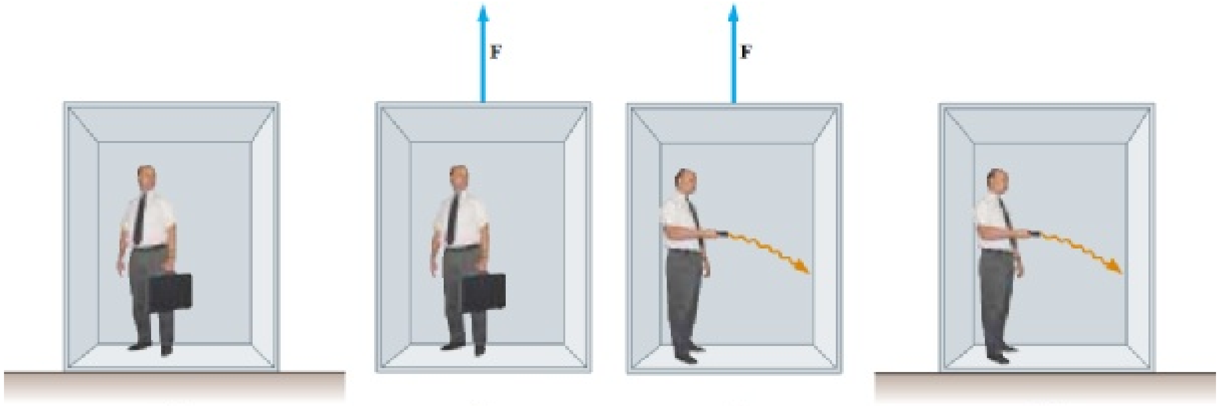
الخاصية القصورية $\sum F = m_i a$

قيمة ثابت الجذب G اختيرت لتجعل قيمة m_g و m_i متساويتين عددياً. بغض النظر عن كيفية اختيار G، كيفما كان، فإن التناسب الصارم بين m_g و m_i قد تم إثباته لدرجة عالية للغاية: بضع أجزاء في 10^{12}. وهكذا يظهر أن الكتلة الجذبية والكتلة القصورية ربما يكونان متناسبين بالفعل.

لكن لماذا؟ يبدو أنهما يشملان مفهومين مختلفين بالكلية: قوة تجاذب بين كتلتين، ومقاومة الكتلة للتسارع. هذا السؤال والذي حير نيوتن والكثير من الفيزيائيين الآخرين على مر السنين، تمت الإجابة عنه بواسطة أينشتاين عام 1916 عندما نشر نظريته عن الجذب، المعروفة باسم *النظرية النسبية العامة*. ولأنها نظرية معقدة رياضياً، سنعرض لمحة فحسب من أناقتها

حسب رؤية أينشتاين، كان السلوك المزدوج دليلاً على صلة وثيقة وأساسية بين السلوكين الاثنين. وقد أشار إلى أنه لا توجد تجربة ميكانيكية (مثل إسقاط جسم) يمكنها التفريق بين الحالتين الموضحتين في الشكل a19.39 و b19.39.

في الشكل a19.39، هناك شخص يقف في مصعد على سطح كوكب، ويشعر بأنه يضغط نحو الأرضية، بسبب قوة الجاذبية. وفي الشكل b19.39 يقف هذا الشخص في مصعد في فضاء خاوٍ يتسارع فيه المصعد إلى أعلى بعجلة $a = g$. يشعر هذا الشخص بأنه يضغط نحو الأرضية بنفس القوة في الشكل a19.39. في كلا الحالتين، يطلق جسم بواسطة المراقب فيخضع لعجلة إلى أسفل مقدارها g بالنسبة للأرضية.



الشكل 19.39 (a) المراقب ساكن في مجال جذبي منتظم g، اتجاهه إلى أسفل. (b) المراقب في منطقة حيث الجاذبية مهملة، لكن الإطار يتسارع بقوة خارجية F والتي ينتج عنها عجلة g اتجاهها إلى أعلى. وفقاً لأينشتاين، إطاري الإسناد في الأجزاء (a) و(b) متكافئة في كل شيء. فلا توجد تجربة محلية يمكنها إيجاد أي فرق بين الإطارين. (c) في الإطار المتسارع، سيظهر شعاع الضوء منحنياً إلى أسفل نتيجة عجلة المصعد. (d) إذا كانت الأجزاء (a) و(b) متكافئة حقيقة، كما اقترح أينشتاين، فإن الجزء (c) يوحي بأنه ينبغي على شعاع الضوء أن ينحني إلى أسفل في مجال جذبي.

في الشكل a19.39، هذا الشخص يوجد في إطار قصوري في حقل جذبي. وفي الشكل b19.39، يوجد الشخص في إطار غير قصوري يتسارع في فضاء خالٍ من الجاذبية. أينشتاين يقول بأن هاتين الحالتين متكافئتين تماماً.ساق أينشتاين هذه الفكرة إلى حد أبعد واقترح أنه لا توجد تجربة، ميكانيكية أو غيرها، يمكنها التفريق بين هاتين الحالتين. هذا الامتداد

والذي شمل كل الظواهر (ليس الميكانيكية فقط) له نتائج شيقة.

على سبيل المثال، افترض أن هناك نبضة ضوئية ترسل أفقياً عبر مصعد يتسارع إلى الأعلى في فضاء خاوٍ كما في الشكل c19.39. من وجهة نظر مراقب في إطار قصوري خارج المصعد، ينتقل الضوء في خط مستقيم بينما تتسارع أرضية المصعد إلى أعلى. وطبقاً للمراقب الموجود في المصعد، ينحني مسار نبضة الضوء إلى أسفل بينما أرضية المصعد (والمراقب) يتسارعان إلى أعلى. ولذلك وبناء على تساوي الجزأين (a) و(b) من الشكل لكل الحوادث، اقترح أينشتاين أن **شعاع الضوء يجب أيضاً أن ينحني لأسفل بواسطة مجال جذبي،** كما في الشكل d19.39. وقد أكد ت التجارب هذا التأثير على الرغم من أن الانحناء صغير فالليزر المصوب أفقيا يهبط مسافة 1 سم بعد انتقاله مسافة 6000 كم. (لا يوجد انحناء مماثل تتنبأ به نظرية نيوتن للجذب.)

فرضي نظرية أينشتاين **النسبية العامة** هما

- كل قوانين الطبيعة لها نفس الشكل في أطر الإسناد، سواء أكانت تتسارع أم لا.
- في جوار أية نقطة، يكون المجال الجذبي مكافئ لإطار الإسناد المتسارع في غياب تأثيرات الجاذبية (وهذا هو **مبدأ التكافؤ**.)

وهناك تأثير شيق استنتجته النظرية النسبية العامة هو أن الزمن يتأثر بالجاذبية. فالساعة في وجود الجاذبية تسير

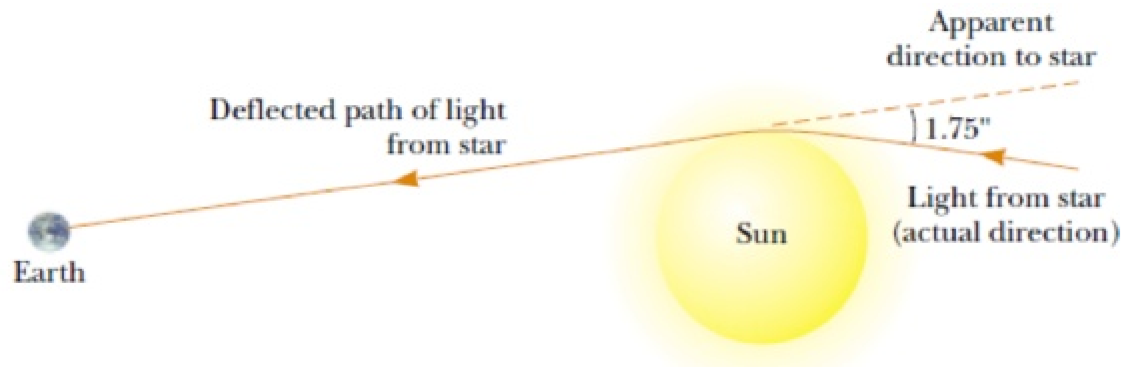
أبطأ من أخرى متواجدة حيث الجاذبية مهملة. بناء على ذلك، تكون ترددات الإشعاع الذي تبعثه الذرات في وجود مجال جذبي قوي مزاحة إلى الأحمر إلى ترددات المنخفضة إذا ما قورنت بنفس الإشعاعات في وجود مجال ضعيف. كشفت هذه الإزاحة الحمراء الجذبية في الخطوط الطيفية للإشعاع الذي تبعثه الذرات في النجوم الضخمة. وأثبت ذلك أيضاً على الأرض عن طريق مقارنة ترددات أشعة جاما المنبعثة من أنوية منفصلة بـ20م أفقياً .

الفرض الثاني يقترح أن مجال الجاذبية ربما "يختفي" عند أي نقطة إذا اخترنا إطار إسناد متسارع مناسب__ واحداً يسقط سقوطاً حراً . وقد قام أينشتاين بتطوير طريقة بارعة لوصف العجلة اللازمة لجعل مجال الجاذبية "يختفي". أدخل مفهوم انحناء الزمان-المكان، الذي يصف التأثير الجذبي عند كل نقطة. في الواقع، انحناء الزمان-المكان يحل تماماً محل نظرية نيوتن للجذب. وفقاً لأينشتاين لا يوجد ما يسمى بقوة الجاذبية. بالأحرى، وجود الكتلة يسبب انحناء في الزمان-المكان في جوار الكتلة، وهذا الانحناء يملي المسار في الزمان-المكان الذي يجب أن تتبعه كل الأجسام التي تسقط سقوطاً حراً .

في عام 1979، لخص جون ويلر النظرية النسبية العامة لأينشتاين في جملة واحدة "الفضاء يخبر المادة كيف تتحرك والمادة تخبر الفضاء كيف ينحني."

وكمثال على تأثير انحناء الزمان-المكان، تخيل مسافرين اثنين يتحركان على مسارين متوازيين تفصلهما بعض

الأمتار عن سطح الأرض ويحافظان على اتجاه مضبوط ناحية الشمال على طول خطي طول. عندما يراقب أحدهما الآخر قريباً من خط الاستواء سيزعم كل منهما أن المساران متوازيين تماماً. وبينما هما يقتربان من القطب الشمالي يلاحظان أنهما يقتربان من بعضهما وأنهما في الواقع سيلتقيان عند القطب الشمالي. وبالتالي سيقول كل منهما أنهما يتحركان على طول مسارين متوازيين، ولكن يتحركان باتجاه بعضهما البعض، *كما لو كانت هناك قوة جذب بينهما*. سيقومان بهذا الاستنتاج بناء على خبرتهما اليومية في الحركة على سطوح مستوية. على أية حال، من عرضنا العقلي ندرك أنهما يتحركان على سطح منحن وأنها هندسة السطوح المنحنية هي التي تجعلهما يتقاربان فضلا عن قوة جاذبة. بطريقة مماثلة، تستبدل النسبية العامة فكرة القوى بحركة الأجسام عبر زمكان منحني.ومن إحدى تنبؤات النسبية العامة أن شعاعاً من الضوء يمر قريباً من الشمس يجب أن ينحرف في الزمكان المنحني الذي تحدثه كتلة الشمس. وقد أثبتت صحة هذا التنبؤ عندما ضبط الفلكيين انحرافاً في ضوء نجم قريباً من الشمس أثناء كسوف كلي للشمس والذي حدث بعد الحرب العالمية الأولى بقليل (الشكل 20.39).



الشكل 20.39 انحراف ضوء نجم يمر قريباً من الشمس. نتيجة لهذا التأثير يمكن للشمس والأجسام البعيدة الأخرى أن تتصرف كعدسة جذبية. وقد حسب أينشتاين في نظريته النسبية العامة أن إذا كان هناك شعاع من الضوء يرعى في سطح الشمس فإنه سيعاني انحرافاً بزاوية 1.75 ثانية قوسية.

عندما أعلن هذا الاكتشاف، أصبح أينشتاين من مشاهير العالم.

وا ٍذأصبح تركيز الكتلة كبيراً جداً، كما هو معتقد أنه يحدث عندما يستهلك نجماً ضخماً وقوده النووي وينهار متقلصاً إلى حجم صغير جداً، ربما يتشكل **ثقباً أسود.** هنا يكون انحناء الزمكان شديد جداً لدرجة أنه ضمن مسافة معينة من مركز الثقب الأسود تصبح المادة وأشعة الضوء محتجزة كما نوقش في القسم 7.13.

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

الخلاصــة

- الفرضيتين الأساسيتين للنظرية النسبية الخاصة هما:
  - قوانين الفيزياء يجب أن تكون واحدة في كل أطر الإسناد القصورية.
  - سرعة الضوء في الفراغ لها القيمة نفسها، $c = 3.00 \times 10^8\ m/s$، في كل الأطر القصورية، بغض النظر عن سرعة المراقب أو سرعة مصدر انبعاث الضوء.
- النتائج الثلاثة للنظرية النسبية الخاصة هي:
  - الأحداث التي تبدو آنية لمراقب ليست بالضرورة آنية بالنسبة لمراقب آخر يتحرك بالنسبة للأول
  - الساعات التي تتحرك بالنسبة لمراقب تسير أبطأ بالعامل $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. هذه الظاهرة تعرف باسم **تمدد الزمن**.
  - طول الأجسام التي تتحرك يتقلص في اتجاه الحركة بالعامل $1/\gamma = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$. هذه الظاهرة تعرف باسم **انكماش الطول**.
- لننفذ فرضي النسبية الخاصة، لابد أن تستبدل معادلات التحويل الجاليلية بـ **معادلات تحويل لورنتز**:

$$x' = \gamma(x - vt) \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)$$

حيث $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ والإطار S' يتحرك في اتجاه x بالنسبة للإطار x.

- الصورة النسبية لمعادلة تحويل السرعة هي:

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

حيث u_x سرعة الجسم في الإطار S و u'_x سرعته في الإطار S'.

- الصورة النسبية لكمية حركة جسيم يتحرك بسرعة u هي:

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{u}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\mathbf{u}$$

- الصورة النسبية لطاقة حركة جسيم هي:

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

- الثابت mc^2 في المعادلة 23.39 يدعى طاقة السكون E_R للجسيم: $E_R = mc^2$

- الطاقة الكلية للجسيم تعطى بالعلاقة:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \gamma mc^2$$

- كمية الحركة الخطية للجسيم ترتبط مع طاقته الكلية بالمعادلة بالعلاقة:

$$E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2$$

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

أسئلة للتفكير

(1) ما هي قياسات السرعة التي يتقوم بها مراقبين في حركة نسبية ويكونا متفقين عليها؟

(2) مركبة فضائية كروية الشكل تتجاوز مراقب على الارض بسرعة 0.5c. ما هو شكل المركبة الفضائية الذي سوف يقيسه المراقب عندما تمر عنه.

(3) سرعة الضوء في الماء هي 230 Mm.s. افترض ان الكترون يتحرك خلال الماء بسرعة 250 Mm/s. هل هذا ينتهك مبدأ النسبية؟

(4) ساعتين متماثلتين ومتزامنتين تماما. وضعت واحدة في مدار حول الارض في حين ان الثانية بقيت على الارض. أي الساعتين سوف تكون أبطىء؟ عندما تعود الساعة المتحركة إلى الأرض، هل ستكون الساعتين متزامنتين؟

(5) اشرح لماذا من الضروري، عندما نعرف طول ساق، ان نحدد موضع نهايتي الساق في نفس اللحظة.

(6) كيف يمكن ان نشير إلى التسارع على منحنى المكان-الزمان؟

(7) جسم يتحرك بسرعة اقل من c/2. اذا تضاعفت سرعة الجسم، ماذا يحدث لكمية الحركة؟

(8) اذا كان حد السرعة القصوى للإلكترون هو سرعة الضوء c، فهل هذا يعني ان كمية الحركة للإلكترون لها حد اقصى؟

(9) لأن الكتلة هي مقياس للطاقة، نستنتج من ذلك ان كتلة زنبرك مضغوط اكبر من كتلة زنبرك غير مضغوط؟

(10)يقال ان اينشتين سأل نفسه سؤال وهو في عمر الشباب، وقال ماذا سوف اشاهد في المرأة اذا حملتها بيدي وتحركت بسرعة الضوء؟ كيف يمكنك ان تجيب على هذا السؤال؟

(11)فوتونات الضوء لها كتلة صفر. كيف يكون لهذه الفوتونات كمية حركة.

(12)بالاستعانة بمحاور الاسناد، كيف تختلف النظرية النسبية العامة عن النظرية النسبية الخاصة؟

(13)ساعتين متماثلتين في نفس البيت، الأولى في الطابق العلوي في غرفة النوم، والثانية في الطابق الارضي في المطبخ. أي من الساعتين سوف تكون أبطىء، اشرح إجابتك؟

مسائل وتمارين

1.39 نسبية جاليلو

(1) سيارة كتلتها 2000 kg تتحرك بسرعة 20.0 m/s تصطدم بسيارة ساكنة كتلتها 1500 kg. اثبت ان كمية الحركة محفوظة في محور اسناد متحرك بسرعة 10.0 m/s في اتجاه السيارة المتحركة.

(2) قذفت كرة بسرعة 20.0 m/s داخل سيارة شحن متحركة بسرعة 40.0 m/s. ما هي سرعة الكرة بالنسبة الى الارض اذا كانت الكرة قذفت (a) للامام، (b) للخلف، (c) خارج الباب؟

2.39 تجربة ميكلسون-مورلي، 3.39 فروض النظرية النسبية، 4.39 نتائج النظرية النسبية

(3) ما هي السرعة التي يجب ان تتحرك بها مسطرة طولها 1 m ليكون طولها منكمش الى 0.500 m؟

(4) عند أي سرعة تتحرك بها ساعة اذا وجدت انها تقيس الزمن بمعدل يساوي نصف معدل ساعة ثابتة بالنسبة للمراقب.

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

(5) يسافر رجل فضاء في مركبة فضائية بسرعة 0.500c بالنسبة إلى الارض. يقيس الرجل نبضه فيجده 75 نبضة في الدقيقة. تتولد اشارات بواسطة الرجل الفضائي عند كل نبضة وعندما تكون المركبة عمودية على المراقب على الارض. (a) ما هوعدل النبضات التي يقيسها المراقب على الارض؟ (b) ماذا لو. ماذا يكون معدل النبضات اذا كانت سرعة المركبة الفضائية زادت إلى 0.990c؟

(6) ميون يتشكل في طبقات الغلاف الجوي العليا للارض ويسافر بسرعة 0.990c لمسافة 4.60 km قبل ان يضمحل ويتحول إلى إلكترون ونيوترينو، ومضاد النيوترينو. (a) كم هي فترة بقاء الميون كما يقيسها مراقب في محور اسناد الميون؟ (b) كم هي المسافة التي تتحركها الارض كما يقيسها مراقب في محور اسناد الميون؟

(7) مر عليك صديق في مركبة فضائية تسافر بسرعة كبير ة. اخبرك ان طول مركبته 20.0 m وان طول مركبتك المشابهة تماما لمركبته هو 19.0 m. طبقا لملاحظاتك، (a) كم هي طول مركبتك، (b) طم طول مركبة صديقك، (c) ما هي سرعة مركبة صديقك؟

(8) يقود فيزيائي سيارة ويعبر اشارة مرور. وعندما اجبره شرطي المرور بالوقوف اخبر الشرطي ان انزياح دوبلر جعل ضوء اشارة المرور الاحمر (طوله الموجي 650 nm) يظهر اخضر بالنسبة له (طوله الموجي 520 nm). فحرر له الشرطي مخالفة. ما هي سرعة الفيزيائي بالاستناد إلى شهادته؟

5.39 معادلات تحويلات لورنتز

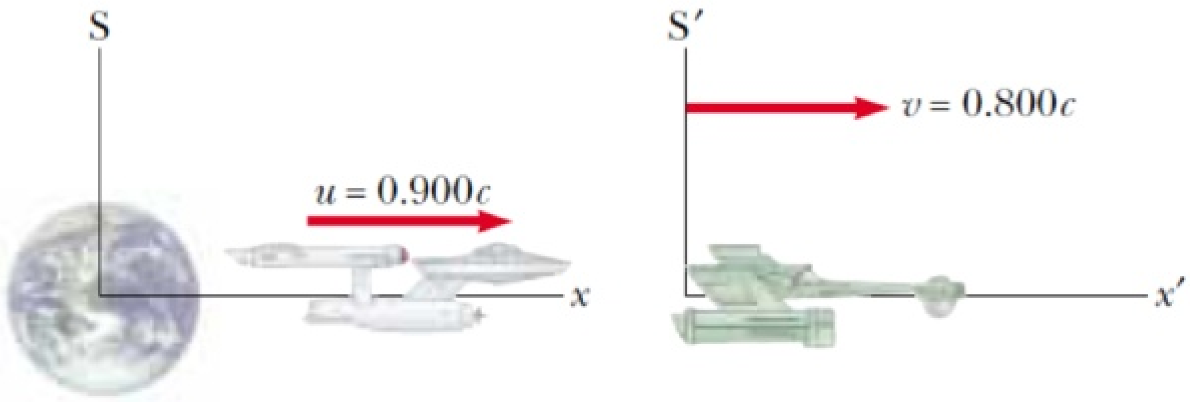
(9) لاحظت سوزان نبضتي ضوء تصدر من نفس المكان، ولكن بفارق زمني 3.00 μs. ويرى مارك نفس النبضتين ولكن بفارق زمني 9.00 μs. (a) كم هي سرعة مارك بالنسبة لسوزان؟ (b) بالنسبة لمارك، ما هي المسافة الفاصلة بين النبضتين؟

(10) يصدر مصباح كهربي فلاشات ضوئية حمراء عند $x_R = 3.00$ m وعند زمن $t_R = 1.00\text{x}10^{-9}$ s، وتصدر فلاشات ضوئية زرقاء عند $x_B = 5.00$ m و $t_B = 9.00\text{x}10^{-9}$ s، كما يقيسها محور الاسناد S. فاذا كان مركز محور الاسناد S' له نفس النقطة مثل S عند $t = t' = 0$، S' يتحرك بسرعة منتظمة الى اليمين. شوهدت كل الفلاشات الضوئية عند نفس الموضع بالنسبة لـ S'. (a) اوجد السرعة النسبية بين S و S'. (b) اوجد موضع الفلاشين في محور اسناد S'. (c) عند أي زمن يصدر الضوء الاحمر في محور اسناد S'.

6.39 معادلات تحويلات سرعة لورنتز

(11) Klingon مركبة فضائية تتحرك بعيدا عن الأرض بسرعة 0.800c كما في الشكل ادناه. وسفينة فضائية تدعى Enterprise تتحرك بسرعة 0.900c بالنسبة للارض. مراقبون على الارض يروا ان سفينة

الفضاء Enterprise تتجاوز مركبة الفضاء Klingon بسرعة نسبية 0.100c. ما هي سرعة سفينة الفضاء Enterprise عندما تجاوزت مركبة الفضاء Klingon كما يراها احد ركاب السفينة Enterprise ؟



(12) انطلقت مركبة فضائية من سطح الأرض بسرعة 0600c بزاوية 50.0^{o} بالنسبة لمحور x الموجب. مركبة فضائية اخرى تجاوزت بسرعة 0.700c في اتجاه محور x السالب. حدد مقدار واتجاه السرعة للمركبة الاولى كما يقيسها قائد المركبة الثانية.

7.39 نسبية كمية الحركة الخطية

(13) احسب كمية الحركة لألكترون يتحرك بسرعة (a) 0.010c، (b) 0.500c، (c) 0.900c.

(14) التعبير الغير نسبي لكمية الحركة لجسم هي P = m µ وهذا يتفق مع التجربة اذا كانت µ<<c. ما هي السرعة التي عندها تعطي اجابة خاطئة لكمية التحرك بمقدار (a) 1.00% و (b) 10.0%.

(15) اثبت ان سرعة جسم له كمية حركة مقدارها P وكتلة m هي

$$u = \frac{c}{\sqrt{1 + (mc/p)^2}}$$

8.39 الطاقة النسبية

(16) حدد مقدار الطاقة اللازمة لتعجيل الكترون من (a) 0.500c إلى 0.900c و (b) 0.900c إلى 0.990c.

(17) بروتون في معجل طاقة عالي يتحرك بسرعة c/2. استخدم نظرية الطاقة والشغل لايجاد الشغل اللازم لزيادة السرعة الى (a) 0.750c و (b) 0.995c.

مـروة إبراهيـم
www.trgma.com

(18) اوجد كمية الحركة للبروتون بوحدة MeV/c بافتراض ان طاقتها الكلية اكبر بمرتين طاقة السكون.

(19) اوجد طاقة حركة مركبة فضائية كتلتها 78.0 kg انطلقت بسرعة 106 km/s باستخدام (a) القانون الكلاسيكي $K = ½ mu^2$. (b) ماذا لو. احسب طاقة الحركة باستخدام معادلة النسبية.

(20) جسم كتلته 900 kg يسافر بسرعة 0.850c يصطدم بجسم مستقر كتلته 1400 kg. يلتصق الجسمين مع بعضهما البعض. اوجد (a) السرعة و (b) كلتة الجسمين المتحدين.

(21) اثبت ان علاقة الطاقة وكمية الحركة $E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2$ تتبع نفس التعبير $E = \mu\, \gamma mc^2$ و $p = \gamma mu$.

(22) في انبوبة جهاز تلفزيون ملون، الالكترونات تعجل في فرق جهد 25000 V. (a) ما هي سرعة الالكترونات عندما تصطدم بالشاشة؟ (b) ما هي طاقتها بالجول؟

(23) افترض ان الكترونات عجلت إلى طاقة مقدارها 20 GeV في معجل خطي طوله 3.00 km. (a) ما هو معامل γ لهذه الالكترونات؟ (b) ما هي سرعتها؟ ما هو طول المعجل بالنسبة للالكترونات؟

9.39 الكتلة والطاقة

(24) عندما يتحد 1.00 g من الهيدروجين مع 8.00 g من الأكسجين، فان 9.00 g من الماء تتكون. خلال هذا التفاعل الكيميائي $2.86x10^{5}$ J من الطاقة تحررت. كم هي مقدار الكتلة المفقودة من مكونات هذا التفاعل؟ هل تعتقد ان الكتلة المفقودة يمكن رصدها؟

(25) في محطة مفاعل نووي فان قضبان الوقود تبقى لمدة 3 سنوات قبل ان يتم استبدالها. اذا كانت المحطة ذات قدرة حرارية 1.00 GW وتعمل عند 80.0% من قدرتها لمدة 3 سنوات، ما هو مقدار الفقد في كتلة قضبان الوقود؟

(26) اذا كان مقدار الطاقة الصادرة عن الشمس هو $3.77x10^{26}$ W. ما هو مقدار كتلة الشمس المتحولة إلى طاقة في كل ثانية؟