تخيّل العالِمُ الفيزيائيّ "جورج جامو" في كتابٍ قديمٍ للخيال العلميّ (1940)، بعنوان "السّيد تومبكن في بلاد العجائب"، أنّ سرعة الضوء في عالم ما هي 10 m/s (20 mi/h). درس السيّدُ تومبكن النسبيّة، وعندما بدأ "يُسرِعُ" على دراجته "توقع أن تقصر قامته على الفور. وقد كان سعيدًا بذلك حيث كانت قامته الطويلة تسبّبُ له بعض المتاعب. ومع هذا، ولدهشته الكبيرة، لم يحدث أيّ شيء من توقعاته. وعلى الوجه الآخر، فقد تغيّرت الصورة حوله تمامًا. فظهرت الشوارع أقصر، وشبابيك المتاجر كشقوقٍ ضيّقةٍ، أمّا الشرطيّ عند الناصية، فظهر وكأنه أنحفُ رجلٍ رآه في حياته. فصاح بدهشةٍ قائلاً: الآن توضحت الصورة. من هنا تأتي كلمة النسبية". وبالفعل،تتنبأ النسبيّة بأنّ الأجسامَ التي تتحرّكُ بسرعاتٍ عاليةٍ بالنسبة لنا،قريبة من سرعةِ الضوءِ، تقلّ أطوالها. ولا نلاحظها كما لاحظها السيد تومبكن؛ لأنّ سرعة الضوء، $c = 3 \times 10^8$ m/s، هي سرعة عالية جدّا. وسوف ندرسُ تقلّص الطول، وتمدّد الزمن، والتزامن غير المتفق، وكيفية تكافؤ الطاقة والكتلة ($E = mc^2$).

الفصل 26

نظريّة النسبيّة الخاصّة

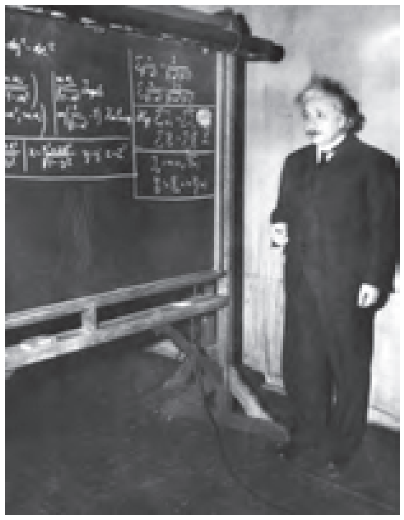
لو نظرت الفيزياءُ في نهايةِ القرن التاسع عشر إلى الخلفِ لرأت فترة من التطوّر الهائل. لقد نجحت النظريات التي طوّرت خلال القرون الثلاثة الماضية في تفسير كمّ هائلٍ من الظواهر الطبيعية. ففسّرت الميكانيكا التقليدية (ميكانيكا نيوتن) حركة الأجسام على الأرض وفي الفضاء بشكل جميل. إضافة إلى ذلك، فقد شكلت الأساس للمعالجات الناجحة للموائع، والحركة الموجية، والصوت. في حين فسّرت النظرية الحركية تصرف الغازات والمواد الأخرى.وكانت نظريّة ماكسويل قادرة على دمج ظاهرتي الكهرباء والمغناطيسية وتفسيرهما، وكذلك التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية التي تتصرف بطرق مشابهة لتصرف الضوء، ممّا عزّز من فكرة التعامل مع الضوء كموجة كهرومغناطيسية.

وقد ظهر العالمُ الحقيقيّ، في بادئ الأمر كما تمّ رؤيته بأعين الفيزيائيين على أنّه قابلٌ للتفسير بشكلٍ جيّدٍ. وبقيت بعضُ الأمور المحيّرة عالقة. ومع هذا، فقد كان الشعورُ السائدُ آنذاك أنها ستحلّ خلال وقتٍ قصير باستخدام المفاهيم المعروفة في حينه.

ولكن، اتضح فيما بعد أنّ هذه الأمور المحيرة هي أمور غير بسيطة. ولذلك، فلم يكن حلُّها ممكنًا دون إدخال نظريتين حديثتين ثوريتين في بداية القرن العشرين، واللتين غيّرتا إدراكنا الكلي للطبيعة. والنظريتان هما: النظريّة النسبيّة والنظريّة الكميّة.

الفيزياء التقليدية مقابل الحديثة

ويُشارُ إلى الفيزياءِ التي كانت معروفة حتى القرن التاسع عشر (والتي قمنا بشرحها في هذا الكتاب إلى الآن) بـ **الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية)**. في حين تدعى الفيزياءُ الجديدة التي نتجت من الثورة العلميّةِ الهائلةِ عند بدايةِ القرن العشرين **الفيزياء الحديثة**. وسوف نقدّمُ في هذا الفصل نظريّة النسبيّة الخاصّة التي تقدّمَ باقتراحها لأوّل مرّةٍ ألبرت آينشتاين (1879 – 1955، الشكل 26–1) في عام 1905. وسنقدّمُ في (الفصل 27) النظريّة الكميّة والمساوية في الأهميّة لسابقتها



الشكل **26-1** ألبرت آينشتاين (1879 - 1955) أحد ألمع العقول المفكرة في القرن العشرين وصاحب النظريتين النسبيّة العامّة والنسبيّة الخاصّة.

1-26 نسبيّة جاليليو ونيوتن

إطار مرجعي قصوري

تتعاملُ نظريّة النسبيّة الخاصّة لآينشتاين مع كيفية ملاحظتنا للأحداث، وتحديدًا كيف نلاحظ الأجسام والأحداث من خلال الأطر المرجعيّة المختلفة.* ولقد تمّ استكشافُ هذا الموضوع بالطبع من قبل كلّ من جاليليو ونيوتن. وتتعاملُ النظريّة النسبيّة الخاصّة مع أحداثٍ تمّت ملاحظتها وقياسها فيما يُسمّى **أطرا مرجعية قصورية** (نوقشت في الفصل الرابع) وهي أطر مرجعية ينطبق عليها قانون نيوتن الأول: إذا لم يتأثر الجسم بأي قوّة، فسيبقى على حالته من السكون أو يستمر في حركتهِ بسرعةٍ ثابتةٍ وفي خط مستقيم. وتعدّ أسهلُ طريقة لذلك هي تحليل الأحداث عند ملاحظتها وقياسها من أطر مرجعية قصورية. ومع أنّ الأرضَ لا تعدّ إطارًا قصوريًّا (بسبب دورانها) إلا أنّها قد تُعدّ تقريبًا كذلك لمعظم التطبيقات. وتعدّ الأطر المرجعيّة الدّورانيّة أو المتسارعة أطراغير قصوريّة** حيث لن نكترث لها في هذا الفصل، وسيتمّ التعامل معها في نظريّة آينشتاين النسبيّة العامّة في (البند 33–4).

* الإطارُ المرجعيّ عبارة عن مجموعة من المحاور الإحداثية المثبتة لجسم ما مثل الأرض، أو القطار، أو حتى القمر. (انظر البند 2–1).

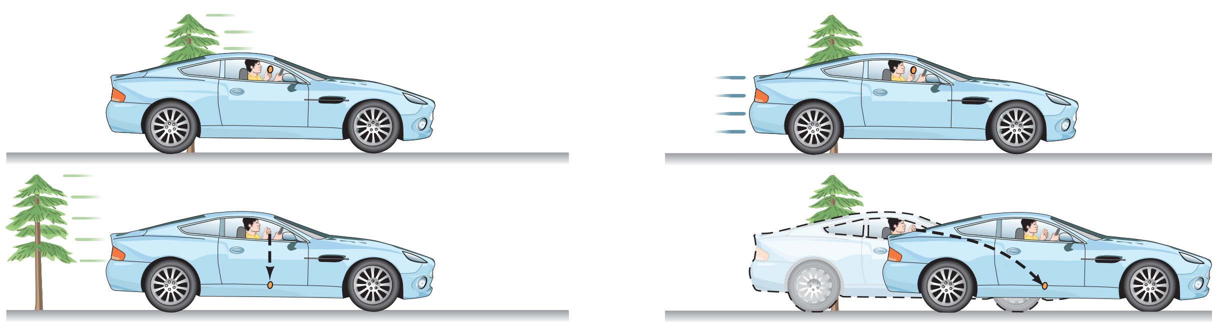
** على منصة دورانية (كدوامة الأحصنة في مدينة ترفيهية)، على سبيل المثال، حيث يبدأ الجسم الساكن بالحركة نحو الخارج بالرغم من عدم تأثره بأي قوة. ولذلك فلا يعدّ هذا إطاراً قصورياً. انظر الفهرس جـ الشكل جـ - 1.

يُعدّ الإطارُ المرجعيُّ الذي يتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لإطار قصوري، أيضًا إطارًا قصوريًّا نظرًا لصمود قوانين نيوتن من خلاله. وعندما نقول بأنّنا قمنا بالملاحظة أو أخذ قراءات من خلال إطار مرجعي معين، فهذا يعني أننا كنا ساكنين في ذلك الإطار المرجعي.

وكان كلّ من جاليليو ونيوتن مدركَيْن لما ندعوه الآن تطبيق **مبدأ النسبيّة** على الميكانيكا: أي أنّ قوانين الفيزياء الأساسية هي نفسها، ولا تتغيّر في الأطر المرجعية القصورية جميعها. وقد تكون قد لاحظت صحة ذلك في الحياة اليومية. فعلى سبيل المثال، تتحرّك الأجسام داخل قطار أو طائرة، يتحرك كلّ منهما بصورة سلسلة (بسرعة ثابتة)، بالطريقة نفسها التي تتحرّك بها على الأرض. (وهذا على افتراض عدم وجود أيّ اهتزاز أو تأرجح يعمل على جعل الإطار المرجعي غير قصوري). وعندما تمشي أو تتناول كوبًا من الحساء، أو تلعب البلياردو، أو تسقط قلمًا على الأرض وأنت تسافر في قطار أو طائرة أو سفينة يتحرك كلٌّ منهم بسرعة ثابتة، فإنّ الأجسام ستتحرك كما لو كانت ستتحرك لو كنت ساكنا على الأرض. ما طريقة سقوط القطعة النقدية الفلزية إذا تركتها تسقط من أعلى رأسك وأنت تجلس في سيارة تسير بسرعة عالية ثابتة؟ بالطبع ستسقط إلى الأسفل مباشرة داخل السيارة المتحركة بسرعة ثابتة وستصطدم بأرض السيارة أسفل النقطة التي سقطت منها. (الشكل 26–2 أ). (أمّا إذا سقطت القطعة النقدية الفلزية خارج نافذة السيارة، فإنّها لن تسقط إلى الأرض كما في الحالة السابقة، بل سيعمل الهواء على سحبها إلى الخلف بالنسبة إلى السيارة) . وهذه طريقة سقوط الأجسام على الأرض – مباشرة نحو الأسفل؛ لذا فإنّ تجربتنا داخل السيارة المتحركة تخضع لمبدأ النسبيّة.

مبدأ النسبيّة:
تبقى قوانين الفيزياء ولا تتغير في الأطر المرجعية القصورية جميعها.

الشكل 26-2 سقوط قطعة نقدية من شخص ما داخل سيارة متحركة. وتظهر الرسومات العلوية لحظة سقوط القطعة النقدية، في حين تظهر الرسومات السفلية ما يحدث بعد عدة لحظات. (أ) تسقط القطعة النقدية الفلزية مباشرة نحو الأسفل حسب الإطار المرجعي للسيارة. (ب) تسقط القطعة النقدية بشكل مسار منحن (قطع مكافىء) حسب إطار مرجعي مثبت على الأرض.



(أ) الإطار المرجعي = السيارة

(ب) الإطار المرجعي = الأرض

ولاحظ على أيّ حال، في هذا المثال، بأنّ القطعة النقدية لمراقب على الأرض ستتبع مسارًا منحنيًا كما في (الشكل 26–2ب). وأنّ المسار الفعلي للقطعة النقدية سيظهر مختلفا عند رؤيته من أطر مرجعية مختلفة. وهذا لا يتعارض مع مبدأ النسبيّة؛ لأنّ هذا المبدأ ينصّ على أنّ قوانين الفيزياء لن تتغير في الأطر القصورية جميعها. وستنطبق قوانين الحركة نفسها وقانون الجاذبية في الإطارين المرجعيين السابقين. وتسارع القطعة النقدية هو ذاته في هذين الإطارين المرجعيين. أمّا الاختلاف في (الشكلين 26–2 أ و ب) فينحصر في سرعة القطعة النقدية الابتدائية (والمساوية لسرعة السيارة) بالنسبة إلى إطار الأرض المرجعي. وبذلك، فإنّ قوانين الفيزياء ستتنبأ بتتبع القطعة النقدية مسار قطع ناقص كما في المقذوفات (الفصل الثالث). أمّا في إطار السيارة المرجعي، فلا توجد سرعة ابتدائية للقطعة النقدية، ولذلك ستتنبأ قوانين الفيزياء بأنّ القطعة النقدية ستسقط مباشرة نحو الأسفل. ولهذا، فإنّ قوانين الفيزياء هي نفسها، ولن تتغيّر في الإطارين المرجعيين بالرغم من اختلاف مساري القطعة النقدية.

تنويه !
تبقى القوانين نفسها، ولكن قد تتغير المسارات في الأطر المرجعية المختلفة.

تشتملُ نسبيّة جاليليو ونيوتن على بعض الفرضيّات غير المثبتة، والتي تُعدّ منطقية حسب الممارسات اليومية. فلقد افترض أنّ أطوال الأجسام ثابتةً لا تتغيّر بتغيّر الإطار المرجعي، وأنّ معدل مرور الزمن لا يتغير أيضًا بتغير هذا الإطار المرجعي. وبناءً على ذلك، فإنّ المكان والفترات الزمنية تُعدّ مطلقة؛ أي لا يتغير قياسها من إطار مرجعي إلى آخر. إضافة إلى ذلك، فقد تمّ اعتبار الكتلة والقوى جميعها على أنها لا تتغير مع تغير الإطار المرجعي القصوري.

تنويه !

الموضع والسرعة يختلفان باختلاف الأطر المرجعية، ولكن الطول يبقى كما هو (تقليديا)

ومع هذا، فإنّ موضع الجسم وسرعته سيختلفان عندما ينظر إليهما من عدة أطر مرجعية مختلفة . فعلى سبيل المثال، يمكن لشخص ما يتحرك داخل حافلة باتجاه مقدمتها بسرعة $2\ \mathrm{m/s}$، فإذا تحركت الحافلة بسرعة $10\ \mathrm{m/s}$ بالنسبة إلى الأرض، فستصبح سرعة الشخص $12\ \mathrm{m/s}$ بالنسبة إلى الأرض. ومع هذا، فإنّ تسارع الجسم هو نفسه في أيّ إطار مرجعي قصوري بحسب الفيزياء التقليدية. وهذا ناجم عن عدم تغير مقدار السرعة والفترة الزمنية عند قياسهما بالنسبة إلى عدّة أُطر مرجعية . وفيما يلي مثال على ذلك: عندما يتسارع شخص ما في حافلة من صفر إلى $2\ \mathrm{m/s}$ خلال ثانية واحدة، فإنّ تسارعه $a = 2\ \mathrm{m/s^2}$ بالنسبة إلى إطار الحافلة المرجعي، وكذلك بالنسبة إلى الأرض فإنّ تسارعه:

$$\frac{(12\ \mathrm{m/s} - 10\ \mathrm{m/s})}{1.0\ \mathrm{s}} = 2\ \mathrm{m/s^2}$$

وهو تمامًا كما نتج سابقًا.

وبما أنّ كلًّا من F، و m، و a لا يتغيّر من إطارٍ مرجعي إلى آخر، فإنّ قانون نيوتن الثاني $F = ma$ لن يتغيرهو أيضًا، وعليه، فإنّ قانون نيوتن الثاني يحقق مبدأ النسبيّة. ومن السهولة إثبات تحقيق قوانين الميكانيكا الأخرى لمبدأ النسبيّة.

الأطر المرجعية القصورية جميعها صحيحة بالتساوي.

وبما أنّ قوانين الميكانيكا تبقى ثابتة ولا تتغير في الأطر المرجعية القصورية جميعها، فإنّ هذا يوحي بعدم خصوصيّة أو تميز أيّ إطار مرجعي بالنسبة إلى الأطر الأخرى. ونعبّر عن هذا الاستنتاج المهمّ بأنّ **الأطر المرجعية القصورية جميعها متكافئة** في وصفها للظواهر الميكانيكية. وليس هناك أيّ إطار مرجعي قصوري أفضل من الآخر. فالإطار المرجعي المثبت في سيارة، أو طائرة، يتحرك كلّ منهما بسرعة ثابتة يكون بالجودة نفسها لإطار مثبت على الأرض. وعندما تتحرك بسرعة ثابتة بسلاسة في سيارة أو طائرة، فمن الصحة أيضا أن تقول بأنك ساكن، وبأنّ الأرض تتحرك. تماماً مثل صحة قولك عكس ذلك. ولا توجد هناك أيّ تجربة تستطيع أن تجريها لتستنتج منها أيّ إطار منهما هو الساكن في الحقيقة وأيّا منهما المتحرك. وعليه، فليس هناك أيّ وسيلة لاختيار إطار مرجعي محدّد ليكون عند السكون المطلق.

ومع هذا، فقد برزت بعض التعقيدات في النصف الأخير من القرن التاسع عشر. فقد تنبأت نظريّة ماكسويل الشاملة والناجحة في الكهرباء والمغناطيسية (الفصل 22) بأنّ الضوء ما هو إلاّ موجة كهرومغناطيسية. وأعطت معادلات ماكسويل سرعة الضوء c على أنّها $3.00 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$ وهذا ما تمّ قياسه تماما ضمن حدود الأخطاء العملية. ليبرز عندئذ السؤال الآتي: في أيّ إطار مرجعي يمتلكُ الضوءُ تماما القيمة التي تنبأت بها نظرية ماكسويل؟ وكان يفترض في السابق أنّ الضّوءَ يمتلك سرعاتٍ مختلفة في الأطر المرجعية المختلفة. وعلى سبيل المثال، إذا كان المراقبون يتحركون بسفينةٍ صاروخيةٍ بسرعةِ $1.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$ مبتعدين عن مصدر ضوءٍ، فمن المتوقع أنْ يقيسوا سرعة الضوء القادمة باتّجاههم لتكون:

$$(3.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}) - (1.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}) = 2.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$$

ولكن لا يوجد أيّ موضع للسرعة النسبيّة في معادلات ماكسويل. وتنبأت هذه المعادلات بأنّ سرعة الضوء: $c = 3.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$. وظهر هذا وكأنه يُوحي بوجود إطار مرجعيّ خاص يمنح c هذه القيمة.

"الأثير"

لقد ذكرنا في (الفصلين 11 و 12) الأمواج، وكيف يمكنها أن تنتقل على المياه وعلى امتداد الحبال، وكيف يمكن للأمواج الصوتية أن تنتقل في الهواء وخلال مواد أخرى. لقد رأى فيزيائيوالقرن التاسع عشر العالم الماديّ من خلال قوانين الميكانيكا، فأصبح من الطبيعي الافتراض بضرورة انتقال الضوء خلال وسط ما. وقد أطلقوا على هذا الوسط الشفاف **الأثير**، وافترضوا أنّه يملأ الفضاء كلّه.* وبناءً على ذلك، فقد افترض أنّ سرعة الضوء المبينة في معادلات ماكسويل هي بالنسبة للأثير.

لقد ظهر في البداية وكأنّ معادلات ماكسويل لا تحقق مبدأ النسبيّة. وكانت هذه المعادلات تظهرُ في أبسطِ صورها عندما تكون سرعة الضوء $c = 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$، أي عندما تكون سرعة الضوء في إطار مرجعيّ ساكن في الأثير. ويترتبُ على ذلك إضافة عدة حدودٍ أخرى لتعكس حركة الإطار المرجعي عندما يتحركُ بسرعةٍ نسبيّة. ونتيجة لذلك، وبالرغم من أنّ معظم قوانين الفيزياء تحققُ مبدأالنسبيّة، إلا أنّ قوانين الكهرباء المغناطيسية ظهرت وكأنّها لا تخضعُ لقوانين النسبيّة. (مُسلمّة آينشتاين الثانية —انظر البند التالي— قدمت حلاً لهذه المعضلة: إنّ معادلات ماكسويل تحقق النسبيّة بالفعل).

تجربة مايكلسون ومورلي

وعَمِدَ العُلماءُ عندئذٍ إلى تحديدِ سرعةِ الأرض بالنسبة إلى هذا الإطار المُطلق مهما كانت طبيعته. وتمّ تصميم عددٍ من التجارب الذكيّة. وكان أكثرُها توجّها لخدمة هذا الهدف التجربة التي قام بها كلّ من مايكلسون ومورلي في ثمانينيّات القرن التاسع عشر (1880). وقاما بقياس الفرق في سرعة الضوء في عدّة اتجاهاتٍ باستخدام جهاز مقياس التداخل لمايكلسون (البند 24–9). وتوقعا أن يجدا فرقًا اعتمادًا على اتجاه آلتهم بالنسبة إلى الأثير. وبما أنّ القارب سيظهر عدة سرعات مختلفة بالنسبة إلى الأرض عندما يتحرك مع التيار أو ضده أو عموديا عليه، فإنّ من المتوقع أيضا أن يُبديَ الضوءُ عدة سرعات اعتمادا على سرعة الأثير في ما بعد الأرض.

النتيجة الخاوية.

ومع غرابة الأمر، لم يستطيعا قياس أيّ اختلافٍ نهائيّا. وكان هذا لغزا كبيرا، وتمّ وضعُ عدة تفاسير خلال فترة زمنيّة امتدت لسنوات أدّت إلى خلق تناقضات، أو إلى عدم قبول بشكل عام. وكانت هذه **النتيجة الخاوية** واحدة من أكبر الألغاز في نهاية القرن التاسع عشر.

وبعد ذلك، في عام 1905، اقترح ألبرت آينشتاين نظريّة حديثة فريدة عالجت هذه المعضلات جميعها بطريقة بسيطة. ولكنها في الوقت نفسه، كما سنرى، غيرت بشكل كامل أفكارنا عن الزمان والمكان.

2-26 مُسلمّات نظريّة النسبيّة الخاصّة

لقد تمّ حلّ المعضلات التي كانت موجودة في بداية القرن العشرين، والمتعلّقة بالميكانيكا النيوتونية وبنظرية الكهرباء والمغناطيسية بطريقة حسنة بتقديم آينشتاين لنظريّة النسبيّة في عام 1905. ولم يكن آينشتاين على دراية بالنتيجة الخاوية لمايكلسون وموري، وكان الدافع وراء عمل آينشتاين الإجابة عن أسئلة محددة بالنسبة لنظرية الكهرباء والمغناطيسية، والأمواج الضوئية. وعلى سبيل المثال، فقد سأل آينشتاين نفسه: "ماذا سأرى إذا ما امتطيت شعاعا ضوئيا؟" وكانت الإجابة أنّه بدلاً من موجة كهرومغناطيسية متحركة، فإنّه سيرى مجالين (كهربائيّ ومغناطيسيّ) مترددين ساكنين تغيرت قيمتاهما في الفراغ، ولم تتغيرا مع الزمن. وأدرك أنّ هذين المجالين لم يُقاسا قبل ذلك مطلقا، وهما بالفعل لا ينطبقان على نظريّة ماكسويل في الكهرباء والمغناطيسية. ولذلك جادل آينشتاين أنّه من غير المنطقي أن يتمّ اعتبار سرعة الضوء بالنسبة إلى مراقب ما يمكن أن تقل إلى الصفر، أو أن تقل بأيّ شكل كان.

وأصبحت هذه الفكرة المُسلمة الثانية لنظريته النسبيّة.

* لا يمكن أن يكون الهواء الوسط الناقل للأمواج الضوئية؛ لأنّ الضوء ينتقل من الشمس إلى الأرض خلال الفضاء الفارغ إلى حد ما. ولذلك تمّ افتراض وسط آخر؛ إنّه الأثير. ولم يكن الأثيرُ شفافاً فقط، وبسبب صعوبة قياسه، فقد تمّ افتراض عدم وجود كثافة له.

المُسلّمة الأولى للنسبية الخاصة

وفي نشرته الشهيرة عام 1905، اقترح آينشتاين التخلي تمامًا عن فكرة الأثير والفرضيات المصاحبة للإطار المرجعي المطلق الساكن. وقد تضمن اقتراحه الجديد مُسلمتين: الأولى تعدّ امتدادا لمبدأ نسبيّة جاليليو – نيوتن. وهي تضمّ قوانين الفيزياء الأخرى ومن ضمنها الكهرباء والمغناطيسية وليس فقط قوانين الميكانيكا. **المُسلّمة الأولى*** ***(مبدأ النسبيّة):*** **تمتلك قوانين الفيزياء الشكل نفسه في الأطر المرجعية القصورية جميعها.**

المُسلّمة الثانية للنسبية الخاصة

في حين تتوافق المُسلمة الثانية مع الأولى:

المُسلّمة الثانية ***(ثبات سرعة الضوء):*** **ينتشر الضوء خلال الفضاء الفارغ بسرعة محددّة، c، لا تعتمد على سرعة المصدر أو المراقب.**

وهاتان المُسلّمتان تشكلان أساس نظريّة النسبيّة الخاصّة لآينشتاين. وسُمّيت خاصة لتمييزها عن عمله اللاحق "نظريّة النسبيّة العامّة"، التي تتعامل مع الأطر المرجعية (المتسارعة) اللاقصورية (الفصل 33). وتتعامل النظريّة الخاصّة، والتي نناقشها هنا، مع الأطر القصورية فقط (الفصل 33).

وتبدو المُسلمة الثانية صعبة القبول وكأنّها تُخلّ بالمنطق العام. وكبداية، يجب أن نفكّر بالضوء المنتقل خلال الفضاء الفارغ، فلا يُعدّ الاستغناء عن الأثير أمرًا صعبًا حيث إنّه لم يُقس مطلقًا. ولكن المُسلمة الثانية تخبرنا بأنّ سرعة الضوء في الفراغ هي دائما نفسها $3.00 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}$ بغض النظر عن سرعة المراقب أو المصدر. وعليه، فإنّ شخصًا ما يتحرك باتّجاه مصدر الضوء أو مبتعدًا عنه سيقيس سرعة الضوء نفسها تمامًا كشخص ساكن بالنسبة إلى المصدر. وهذا ما يتناقض مع تجاربنا اليومية؛ لأنّ من المتوقع أن نضيف سرعة المراقب. وعلى الوجه الآخر، ربّما لا يمكن لنا توقع أنّ التجارب اليومية مفيدة عندما نتعامل مع سرعة الضوء الكبيرة. إضافة إلى ذلك، فإنّ النتيجة الخاوية لتجربة مايكلسون ومورلي متطابقة تماما مع المسلمة الثانية.**

"تجربة ذهنية"

وهناك استحسان معين في اقتراح آينشتاين. فعند التخلي التام عن فكرة الإطار المرجعي المطلق، أصبح من الممكن التوفيق بين الميكانيكا التقليدية والنظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل. إنّ سرعة الضوء التي تنبأت بها معادلات ماكسويل هي سرعة الضوء في الفراغ في أيّ إطار مرجعي.

وتطلبت نظريّة آينشتاين منّا التخلّي عن المفاهيم البديهية للمكان والزمان. وسنختبر في البنود القادمة بعض النتائج الغريبة والمثيرة في الوقت نفسه للنسبيّة الخاصّة. ونقاشنا في معظم أجزائه سيكون بسيطا. وسنستخدم الأسلوب نفسه الذي استخدمه آينشتاين؛ سنتخيل حالات تجريبية بسيطة جدّا لا تحتاج إلى الرياضيات إلا قليلاً. وفي هذه الحالة نستطيع أن نتفحّص كثيرًا من نتائج نظريّة النسبيّة دون الخوض في حسابات تفصيلية، وهذا هو الذي أطلق عليه آينشتاين التجارب "الذهنية".

3-26 التّزامن

تعريف الحدث

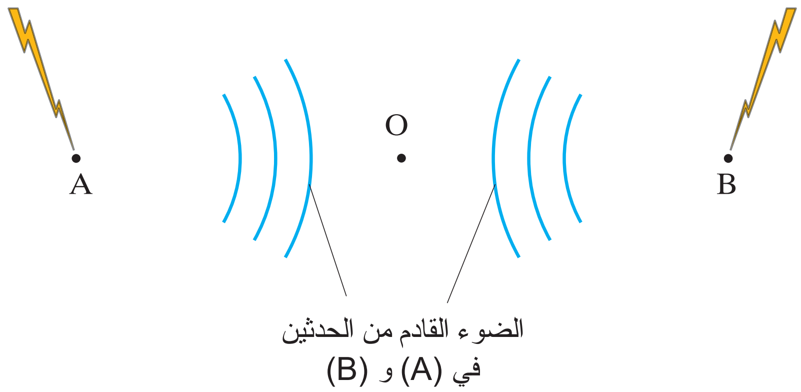
هناك نتيجة مهمّة لنظريّة النسبيّة وهي أننا لم نعد ننظر إلى الزمن على أنّه كمّية مطلقة. لا أحد يشكّ بأنّ الزمن يتقدّمُ إلى الأمام وليس إلى الخلف أبدًا. ولكن الفترة الزمنية بين حدثين- حتى ولو كانا متزامنين- تعتمد على إطار المراقب المرجعي. ونعني "بالحدث" الذي سنستخدمه بكثرة هنا، شيئا يحدث في مكان وزمن معينين.

* يمكن صياغة المُسلّمة الأولى كالتالي: ليست هناك أيّ تجربة تستطيع أن تجريها في إطار مرجعي قصوري لتتيقن ما إذا كنت ساكنا أم متحركا بانتظام وبسرعة ثابتة.

** يمكن اعتبار تجربة مايكلسون ومورلي أيضًا دليلًا على المُسلّمة الأولى بما أنه كان المقصود من إجرائها قياس حركة الأرض بالنسبة إلى إطار مرجعي مطلق. وفشلها في تحقيق ذلك يوحي بغياب أيّ إطارٍ مفضل.

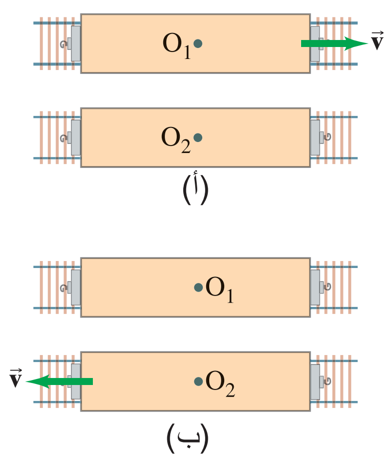
ويُقالُ عن حدثين أنّهما متزامنان إذا حصلا خلال الوقت نفسه تمامًا. ولكن كيف يمكننا أن نعرف ما إذا حصلا خلال الوقت نفسه تماما؟ وإذا حصلا عند الموضع نفسه في الفراغ – مثل وقوع تفاحتين على رأسك في الوقت نفسه– فهذا أمر بسيط. ولكن إذا حصلا في مكانين مختلفين تفصلهما مسافة كبيرة فهو أمر أكثر صعوبة لمعرفة ما إذا كان حدوثهما متزامنا لحاجتنا إلى الأخذ بالحسبان الزمن اللازم للضوء القادم منهما للوصول إلينا. وبما أنّ الضوء يتحرك بسرعة ثابتة، فيجب على الشخص الذي يرى حدثين أن يعيد الحساب لمعرفة وقت حدوثهما الفعلي. فعلى سبيل المثال، إذا تمّ ملاحظة حدثين في الوقت نفسه، وكان أحدهما قد حصل على بعدٍ أكبر من الثاني بالنسبة إلى المراقب، فهذا يعني أنّ الأبعد قد حصل أولاً، وأنّ الحدثين غير متزامنين.

ونتخيل الآن تجربة ذهنية بسيطة. لنفترض أنّ مراقبا يُسمّى O وُضِعَ في منتصف المسافة تماما بين نقطتين A و B حيث يقع هناك حدثان (الشكل 26–3). افترض أنّ الحدثين برقان ضربا النقطتين A و B كما هو مبين. وللأحداث السريعة مثل البرق، هناك نبضات قصيرة من الضوء ستتحرك من A و B لتصل إلى O. ويرى المراقب O الحدثين عندما تصلُ النبضتان إليه. وإذا وصلت النبضتان إليه في اللحظة نفسها، فهذا يعني أنّ الحدثين متزامنان؛ لأنّ النبضتين الضوئيتين تسيران بالسرعة نفسها(المُسلمة الثانية)، وبما أنّ المسافة OA تساوي OB، فإنّ الزمن اللازم للضوء ليسير من A إلى O هو نفسه من B إلى O. ويستطيع المراقب O عندئذٍ، بما لا يدع مجالا للشكّ، أن يقول بأنّ الحدثين قد حصلا متزامنين. وعلى الجانب الآخر، إذا رأى O الضوء القادم من الحدث الأول قبل ذلك القادم من الحدث الثاني، فهذا يعني أنّ الحدث الأول قد حصل أولاً.

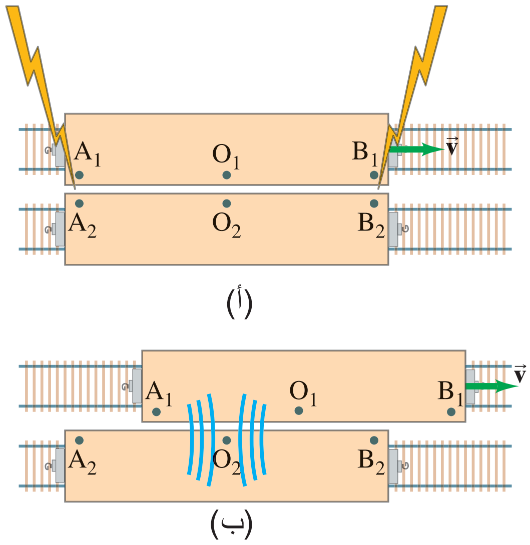


الشكل 26-3 لحظة بعد ضرب البرق النقطتين A و B، تبدأ النبضتان A و B بالتحرك باتجاه المراقب O الذي يرى البرق فقط عندما يصل الضوء إليه.

والسؤال الذي نريد الإجابة عنه هو: إذا كان الحدثان متزامنين بالنسبة إلى مراقب في إطار مرجعي واحد، فهل هما متزامنان لمراقب آخر يتحرك بالنسبة إلى الأول؟ دعنا نرمز إلى المراقبَين بـ O_1 و O_2. ونفترض أنهما ثابتان في الإطارين المرجعيين 1 و 2، اللذين يتحركان بسرعة v بالنسبة إلى بعضهما بعضا. ويمكن اعتبار هذين الإطارين المرجعيين كقطارين (الشكل 26–4). فيقول O_2 بأنّ O_1 يتحرك نحو اليمين بسرعة v كما في (الشكل 26–4 أ)، في حين يقول O_1 بأنّ O_2 يتحرك نحو اليسار بسرعة v كما في (الشكل 26–4ب). وبناءً على مبدأ النسبيّة، فإنّ وجهتي النظر صحيحتان. [لاتوجد وجهة نظرٍ ثالثة تخبرنا أيّ المراقبين هو الذي يتحرك بالفعل "حقيقة"].



الشكل 26-4 يتحرك مراقبان O_1 و O_2 على قطارين مختلفين (إطاران مرجعيان مختلفان) بسرعة نسبية v. ويدّعي O_2 أنّ O_1 يتحرك إلى اليمين (أ) في حين يدّعي O_1 أنّ O_2 يتحرك إلى اليسار (ب). وجهتا النظر صحيحتان ؛ يعتمد هذا كلّه على إطارك المرجعي.



الشكل 26-5 تجربة ذهنية عن التزامن. يتحرك إطار O_2 المرجعي بالنسبة إلى O_1 نحو اليمين. تضرب صاعقة "برق" في (أ) الإطارين المرجعين عند الموضعين A_1 و A_2، في حين تضرب صاعقة "برق" أخرى عند الموضعين B_1 و B_2. (ب) بعد لحظة، يصل الضوء من الحادثتين إلى O_2 في الوقت نفسه. وعليه، فإنّ الصاعقتين متزامنتان بالنسبة إلى المراقب O_2. ولكن في إطار O_1 المرجعي، فإنّ الضوء من B_1 قد وصل بالفعل إلى O_1، في حين لم يصل الضوء من A_1 إليه بعد. لذا، فإنّ الحدث عند B_1 في إطار O_1 المرجعي لابُدّ وأنّه وقع قبل الحدث عند A_1. التزامن في الوقت ليس مطلقا.

والآن، افترض أنّ المراقبين O_1 و O_2 لاحظا صاعقتي البرق وقاساهما. وأضافت كلٌّ من الضربتين الصاعقيتين علامةً على القطارين في مكان ضربهما: عند A_1 و B_1 على قطار O_1. وعند A_2 و B_2 على قطار O_2 (الشكل 26–5 أ). وللتبسيط، نفترض أنّ O_1 يقف عند منتصف المسافة بين A_1 و B_1 تمامًا. وكذلك يقف O_2 عند منتصف المسافة تماما بين A_2 و B_2.

ودعنا نضع أنفسنا بداية في إطار O_2 المرجعي لنلاحظ تحرك O_1 نحو اليمين بسرعة v. ونفترض أيضا أنّ الحدثين متزامنان ويحدثان في إطار O_2 لحظيّا عندما يصبح كلّ من O_1 و O_2 مقابل بعضهما بعضا (الشكل 26–5أ). ولاحقا وبعد فترة زمنية قصيرة (الشكل 26–5 ب) يصل الضوء من A_2 و B_2 إلى O_2 في الوقت نفسه (افترضنا هذا). وبما أنّ O_2 قد يعلم أنّ المسافتين O_2A_2 و O_2B_2 متساويتان، فإنه يعلم أيضا أنّ الحادثين متزامنان في إطاره المرجعي (إطار O_2). ولكن ماذا يلاحظ المراقب O_1 ويقيس؟ ونستطيع أن نتنبأ من إطارنا (O_2) المرجعي ماذا سيرى O_1. حيث نرى أنّ O_2 يتحرك تجاه اليمين خلال الفترة الزمنية التي يتحرك بها الضوء من A_1 و B_1 إلى O_1. وكما هو مبين في (الشكل 26–5ب). نستطيع أن نرى من إطار O_2 المرجعي أنّ الضوء B_1 قد مرّ عن O_1 فعليًا . في حين لم يصل الضوء القادم من A_1 بعد إلى O_1. أي أنّ O_1 يلاحظ الضوء القادم من B_1 قبل أن يلاحظ الضوء القادم من A_1. وأخذا بالحسبان (1) أنّ الضوء ينتقل بالسرعة c نفسها في أيّ اتجاه وفي أيّ إطار مرجعي. (2) أنّ المسافة O_1A_1 تساوي O_1B_1. ليستطيع عندها المراقب O_1 الاستنتاج بأنّ الحدث عند B_1 قد حصل قبل الحدث عند A_1. والحادثان ليسا متزامنين للمراقب O_1 بالرغم من أنهما كذلك للمراقب O_2. وهكذا نجدُ حدثين يجريان في موضعين مختلفين فيكونان متزامنين لمراقب ما وغير متزامنين لمراقب آخر يتحرك بالنسبة إلى الأول.

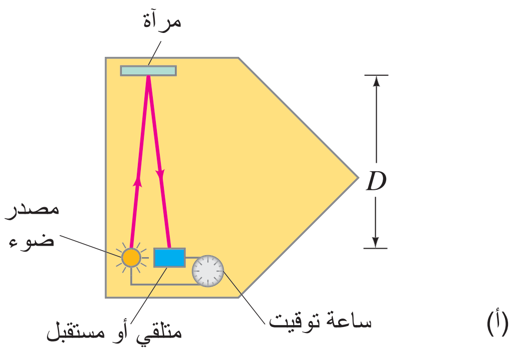
التزامن النسبي

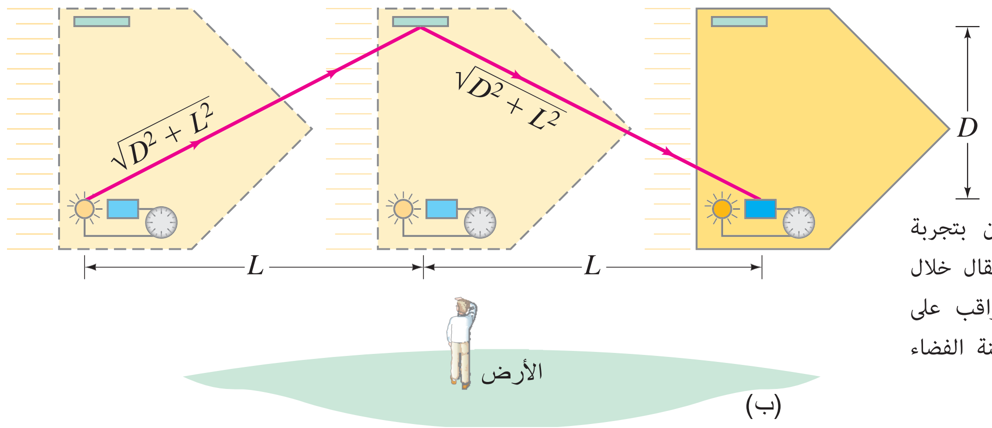
وقد يكون مدهشا التساؤل: "من المراقب المصيب، O_1 أم O_2"؟ والجواب هو أنّ كلاهما مصيب؛ استنادا إلى النسبيّة. ليس هناك "أفضل" إطار مرجعي نستطيع اختياره لتحديد أيّ مراقب مصيب. فالإطار ان خيار مناسب. ونستطيع الاستنتاج بأنّ التزامن مبدأ غير مطلق بل نسبيّ. ولا ندرك هذا في حياتنا اليومية لأنّ تأثيره لا يمكن ملاحظته إلا إذا كانت السرعة النسبيّة للإطارين المرجعيين كبيرة جدّا (قريبة من c) أو أنّ المسافات كبيرة جدّا.

تمرين أ، اختبر التجربة في (الشكل 26–5) من إطار O_1 المرجعي. في هذه الحالة، سيكون O_1 ساكنا، وسيرى B_1 الحدث يحصل قبل A_1. هل سيدرك O_1 أن O_2 الذي يتحرك إلى اليسار بسرعة v سيرى الحدثين متزامنين (مساعدة: ارسم مخطّطا مكافئا للشكل 26–5).

26-4 تمدّد الزمن والتوأم المتناقض

تقترح الحقيقة، أنّ حدثين متزامنين لمراقبٍ ما قد لا يكونان متزامنين لمراقبٍ آخر،أي أنّ الزمن غير مطلق . هل من الممكن أن يمُرّ الوقت بطريقة مختلفة في إطار مرجعي مقارنة بمروره في إطار آخر؟ وهذا بالتحديد ما تنبأت به نظرية آينشتاين "النسبيّة" كما تظهر التجربة الذهنية التالية.





الشكل 26-6 يمكن إظهار تمدّد الزمن بتجربة ذهنية: الزمن الذي يستغرقه الضوء بالانتقال خلال سفينة فضاء ومن ثمّ الرجوع أطول لمراقب على الأرض (ب) مقارنة مع مراقب على سفينة الفضاء (أ).

يظهر (الشكل 26–6) سفينة فضاء تسافر مرورًا بالأرض بسرعة عالية. وتبيّنُ وجهة نظر مراقب داخل سفينة الفضاء في البند (أ). ووجهة نظر مراقب على الأرض في البند (ب). ويمتلك المراقبان ساعات توقيت دقيقة. يومِضُ الشخص في سفينة الفضاء ضوءًا، ويقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء في الانتقال على امتداد طول السفينة والعودة بعد انعكاسه من مرآة. وفي الإطار المرجعي لسفينة الفضاء، ينتقل الضوء مسافة $2D$ بسرعة c، ونقيس الزمن اللازم لانتقال الضوء وعودته، والذي سندعوه Δt_0:

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{c}$$

فترة زمنية مقيسة بواسطة مراقب داخل سفينة فضاء.

ويلاحظ المراقب على الأرض (الشكل 26–6ب) العملية نفسها. ولكن بالنسبة إلى هذا المراقب، فإنّ سفينة الفضاء تتحرك. وعليه، فإنّ الضوء ينتقل خلال المسار القطري المبين المار خلال سفينة الفضاء لينعكس عن المرآة وليعود إلى المرسل. وبالرغم من أنّ الضوء ينتقل بالسرعة نفسها بالنسبة إلى هذا المراقب (المُسلّمة الثانية) إلاّ أنّه يسافر مسافة أطول. لذا، فإنّ الزمن الضروري كما تمّ قياسه بواسطة مراقب على الأرض سيكون أكبر من الذي قيس بواسطة المراقب الموجود في سفينة الفضاء.

والفترة الزمنية Δt الملاحظة من قبل المراقب على الأرض يمكن قياسها كما يلي: خلال الفترة الزمنية Δt، تسافر سفينة الفضاء مسافة $2L = v\,\Delta t$ حيث تمثل v سرعة سفينة الفضاء (الشكل 26–6ب). ولهذا، فإنّ الضوء يسافر مسافة كلّيّة خلال المسار القطري (نظرية فيثاغورس) تعادل $2\sqrt{D^2 + L^2}$.

حيث $L = v\,\Delta t/2$ وعليه :

$$c = \frac{2\sqrt{D^2 + L^2}}{\Delta t} = \frac{2\sqrt{D^2 + v^2(\Delta t)^2/4}}{\Delta t}$$

ونربع الطرفين

$$c^2 = \frac{4D^2}{(\Delta t)^2} + v^2$$

ونحلّ لإيجاد Δt:

$$(\Delta t)^2 = \frac{4D^2}{c^2 - v^2}$$

$$\Delta t = \frac{2D}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ونضمّ هذه المعادلة مع الصيغة على صفحة 734، $\Delta t_0 = 2D/c$:

صيغة تمدّد الزمن

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \qquad \textbf{(1–26 أ)}$$

وبما أنّ قيمة $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ دائما أقلّ من 1، فإننا نرى أن $\Delta t > \Delta t_0$. أي أنّ الفترة الزمنية بين الحدثين (إرسال الضوء واستقباله داخل سفينة الفضاء) تعدّ أكبر لمراقب على الأرض منها لمراقب داخل سفينة الفضاء. وهذه النتيجة العامّة لنظرية النسبيّة تعرف بـــ تمدّد الزمن. ويُعبّر عنها ببساطة كما يلي:

تمدد الزمن : الساعات المتنقلة تسير ببطء

وُجِدت السّاعات المتحرّكة بالنّسبة إلى مراقب،والتي قام بقياسها بنفسه، أنها تتقدّم ببطء (مقارنة مع السّاعات غير المتحرّكة).

وبالرغم من هذا، فيجب ألا نعتقد بأنّ الساعات بطريقة ما غير صالحة. وتمّ قياس الزمن فعليًا، فوجد أنّه يتقدم ببطء أكبر في أي إطار مرجعي متحرك مقارنة مع إطار المراقب. وهذه النتيجة المذهلة نتيجة حتمية لمُسلّمتي النسبيّة.

ويظهر المعامل $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ كثيرا في النسبيّة إلى الدرجة التي أصبحنا نعطيه الرمز المختصر γ .
ولنكتب المعادلة $26-1$أ كالتالي:

تمدّد الزمن

$$\Delta t = \gamma\,\Delta t_0 \qquad \textbf{(1–26ب)}$$

حيث

تعريف γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \textbf{(2–26)}$$

لاحظ أنّ γ لن تكون أقلّ من 1 أبدا. وعند السرعات الطبيعية $\gamma = 1$ لعدة خانات عشرية قليلة. وبشكل عام $\gamma \geq 1$.

لماذا لا نلاحظ تمدّد الزمن

وربّما يصعب تقبل مبدأ تمدّد الزمن لأنّه يتعارض مع تجربتنا. نستطيع أن نرى من (المعادلة $26-1$) أنّ ظاهرة تمدّد الزمن بالفعل مهملة إلا إذا كانت قيمة v قريبة من c بصورة معقولة. أمّا إذا كانت v أقلّ بكثير من c، فعندها سيصبح الحدّ v^2/c^2 أقلّ بكثير من 1 في مقام (المعادلة $26-1$أ). وعندئذ ستصبح $\Delta t \approx \Delta t_0$ (انظر المثال $26-2$). السرعات التي نتعايش معها في الحياة اليومية أقلّ بكثير من c. لذا، فمن غير المستغرب ألا نلاحظ تمدّد الزمن.

تأكيد التجارب

اختبرت التجارب ظاهرة تمدّد الزمن وأكدت تنبؤات آينشتاين. فعلى سبيل المثال، في عام 1971، نُقِلت ساعات ذرية دقيقة جوّا في طائرات نفاثة حول العالم. وكانت سرعة الطائرات $(10^3\ \mathrm{km/h})$، أي أقل بكثير من c. وكانت دقة الساعات تصل إلى نانو ثانية $(10^{-9}\ \mathrm{s})$ لكي تستطيع أن تكتشف وتسجل أيّ تمدّد زمني. وكانت الساعات بهذه الدقة، لتؤكد (المعادلة $26-1$) لأقرب خطأ عملي. ومع هذا، فقد تمّ تأكيد تمدّد الزمن قبل عدة قرون بملاحظة "الجسيمات الأولية" ذات الكتل الصغيرة (طبيعيّا 10^{-30} إلى $10^{-27}\ \mathrm{kg}$) والتي تتطلب كنتيجة لذلك مقدارا ضئيلا من الطاقة لتسريعها لسرعات قريبة من سرعة الضوء c. والكثير من هذه الجسيمات الأولية غير مستقرّ ويضمحلّ بعد مدة إلى جسيمات أخفّ . ومثال على ذلك، الميون $(muon)$، الذي متوسط عمره $2.2\ \mu s$ وهو في حالة السّكون. وأظهرت تجارب دقيقة أنه عند قياس عمر ميون يسير بسرعات عالية وُجِد أنّه أطول من عمره وهو ساكن كما تنبأت بذلك صيغة تمدّد الزمن.

المثال 26-1 عمر ميون متحرك

(أ) ما متوسط عمر ميون كما تمّ قياسه في المختبر إذا كان ينتقل بسرعة $v = 0.60c = 1.80 \times 10^8\,\text{m/s}$ بالنسبة إلى مراقب داخل المختبر؟ متوسط عمره في حالة السكون $2.20 \times 10^{-6}\,\text{s} = 2.20\,\mu\text{s}$؟ (ب) ما أقصى مسافة يقطعها الميون بالمتوسط في المختبر قبل أن يضمحل؟

النهج : إذا كان على المراقب أن يتحرك مع الميون (سيكون عندها الميون ساكنًا بالنسبة إلى المراقب). فإنّ متوسط عمر الميون عندئذٍ سيكون $2.2 \times 10^{-6}\,\text{s}$. ولمراقب داخل المختبر. فإنّ الميون سيعيش فترة أطول بسبب تمدّد الزمن. ونستخدم (المعادلة 26 – 1أ) لإيجاد متوسط العمر. أمّا متوسط المسافة فنجده من $d = v\,\Delta t$.

الحلّ : (أ) نعوّض $v = 0.60c$ في (المعادلة 26 – 1أ) فنحصل على:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{2.20 \times 10^{-6}\,\text{s}}{\sqrt{1 - \dfrac{0.36c^2}{c^2}}} = \frac{2.20 \times 10^{-6}\,\text{s}}{\sqrt{0.64}} = 2.8 \times 10^{-6}\,\text{s}$$

(ب) وتتنبأ النسبيّة أنّ الميون سينتقل متوسط مسافة

$$d = v\,\Delta t = (0.60)(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})(2.8 \times 10^{-6}\,\text{s}) = 500\,\text{m}$$

وهي المسافة التي تمّ قياسها في المختبر.

ملحوظة : عند سرعة $1.8 \times 10^8\,\text{m/s}$. ستخبرنا الفيزياء التقليدية بأنّ متوسط المسافة التي سيقطعها ميون ذومتوسط عمر $2.2\,\mu\text{s}$ هي $d = vt = (1.8 \times 10^8\,\text{m/s})(2.2 \times 10^{-6}\,\text{s}) = 400\,\text{m}$. وهي أقصر من المسافة المقيسة.

تمرين ب: ما متوسط عمر الميون في (المثال 26–1) إذا كانت v (أ) $0.10c$؟ (ب) $0.90c$؟

الزمن الصحيح Δt_0 هو في إطار مرجعي حيث يحصل الحدثان عند النقطة نفسها في الفضاء.

ونحتاج إلى توضيح كيفية استخدام (المعادلة 26–1) ومعنى Δt و Δt_0. إنّ المعادلة صحيحة فقط عندما تمثل Δt_0 الفترة الزمنية بين الحدثين في إطار مرجعي عندما يحصل الحدثان عند نقطة واحدة في الفضاء كما في (الشكل 26–6أ). حيث إنّ الحدثين هما الوميضان الضوئيان: المرسل والمستقبل. وتدعى الفترة الزمنية هذه ، Δt_0. الزّمن الصحيح. وعليه. فإنّ Δt في (المعادلة 26–1) تمثل الفترة الزمنية بين الحدثين كما تمّ قياسها في إطار مرجعي متحرك بسرعة v بالنسبة إلى الأول. وفي (المثال 26–1) بالأعلى. فإنّ Δt_0 (وليست Δt) وضعت مساوية لـ $2.2 \times 10^{-6}\,\text{s}$ لأنه فقط خلال إطار الميون الساكن يحدث الحدثان ("الولادة" و"الاضمحلال") عند النقطة نفسها في الفضاء. ويكون الزمن الصحيح Δt_0 هو أقصر زمن يمكن لأيّ مراقب أن يقيسه بين حدثين. ويعدّ الزمن Δt الأكبر في أيّ إطار مرجعي متحرك.

المثال 26-2 تمدّد الزمن عند 100 km/h

دعنا نفحص تمدّد الزمن للسرعات الاعتيادية اليومية. سيارة تسير بسرعة $100\,\text{km/h}$. تقطع مسافة معينة خلال $10.00\,\text{s}$ حسب ساعة يد السائق. ماذا يقيس مراقب ساكن على الأرض هذه الفترة الزمنية؟

النهج: سرعة السيارة بالنسبة إلى الأرض $100\,\text{km/h} = (1.00 \times 10^5\,\text{m})/(3600\,\text{s}) = 27.8\,\text{m/s}$. والسائق ساكن خلال الإطار المرجعي للسيارة. فنضع $\Delta t_0 = 10.00\,\text{s}$ في صيغة تمدّد الزمن.

الحلّ: نستخدم (المعادلة 26 – 1أ):

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{10.00\,\text{s}}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{27.8\,\text{m/s}}{3.00 \times 10^8\,\text{m/s}}\right)^2}} = \frac{10.00\,\text{s}}{\sqrt{1 - (8.59 \times 10^{-15})}}$$

وإذا أدخلت هذه الأرقام في آلتك الحاسبة. فإنك ستحصل على $\Delta t = 10.00\,\text{s}$. لأنّ المقام يختلف عن 1 بمقدار ضئيل جدًا. وبالفعل. فإنّ الزمن المقيس بواسطة مراقب على الأرض لن يُظهر أيّ اختلاف عن الزمن المقيس بواسطة السائق. حتى وإن استخدمت أفضل الآلات. وسيظهر الحاسوب القادر على القياس وحتى عدد كبير من الخانات العشرية أنّ Δt أكبر من Δt_0 بحوالي $4 \times 10^{-14}\,\text{s}$.

ملحوظة: نستطيع تقدير الفرق باستخدام المتمدّدة ذات الحدّين (فهرس أ).

$$(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx \qquad [\text{حيث } x \ll 1]$$

وفي صيغتنا لتمدّد الزمن، نعوض المعامل $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.
أي

$$\begin{aligned}\Delta t &= \gamma\, \Delta t_0 \\ &= \Delta t_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \\ &\approx \Delta t_0 \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) \\ &\approx 10.00\,\text{s}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{27.8\,\text{m/s}}{3.00 \times 10^8\,\text{m/s}}\right)^2\right] \\ &\approx 10.00\,\text{s} + 4 \times 10^{-14}\,\text{s}\end{aligned}$$

وعليه، فإنّ الفرق بين Δt و Δt_0 الذي تمّ التنبؤ به $4 \times 10^{-14}\,\text{s}$ وهو كمية صغيرة جدًا.

تمرين د: تحتفظ ساعة ذرية معينة بالوقت بدقة على الأرض. وإذا أخِذت هذه الساعة في سفينة فضاء تنتقل بسرعة $v = 0.60c$، فهل ستعمل هذه الساعة عندها أبطأ بالنسبة إلى الناس (أ) على سفينة الفضاء؟ أم (ب) على الأرض؟

تطبيق الفيزياء

استخدم مفكوك ذات الحدّين

السّفر في الفضاء

أثار تمدّد الزمن توقعات مثيرة حول السفر في الفضاء. وبحسب الفيزياء التقليدية (فيزياء نيوتن)، فإنّ الوصول إلى نجم يبعد 100 سنة ضوئية عن الأرض غير ممكن للمخلوقات البشرية العادية (السنة الضوئية هي المسافة التي يمكن أن يقطعها الضوء في سنة واحدة $= (3.0 \times 10^8\,\text{m/s} \times 3.16 \times 10^7\,\text{s} = 9.5 \times 10^{15}\,\text{m}$). وحتى لو استطاعت سفينة الفضاء أن تسير بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فإنها ستحتاج إلى أكثر من 100 عام لتصل إلى ذلك النجم. ولسفينة فضاء تنتقل بسرعة $v = 0.999c$، فإنّ زمن رحلة كتلك يبلغ تقريبا

$$\begin{aligned}\Delta t_0 &= \Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2} \\ &= (100\,\text{yr})\sqrt{1 - (0.999)^2} \\ &= 4.5\,\text{yr}\end{aligned}$$

وبذلك، فإنّ تمدّد الزمن يسمح برحلة كهذه. ولكن قد لا نكون قادرين على تجاوز المشاكل العملية الهائلة للوصول إلى هذه السرعات والتغلب عليها. وبكل تأكيد لن يكون هذا في المستقبل القريب.

وفي هذا المثال، فإنّ 100 عام ستنقضي على الأرض، وستنقضي فقط أربعة أعوام ونصف بالنسبة إلى رائد الفضاء خلال الرحلة. هل هي الساعات فقط التي ستتباطأ لرائد الفضاء هذا؟ الجواب كلاّ؛ فالعمليات جميعها، بما فيها الهرم وعمليات الحياة الأخرى، ستتحرك ببطء أكثر بالنسبة إلى رائد الفضاء حسب المراقب الأرضي. ولكن بالنسبة إلى رائد الفضاء، فإنّ الزمن سيتقدم بصورة طبيعية. وسيختبر رائد الفضاء أربع سنوات ونصف من النوم الطبيعي والأكل والقراءة، وهكذا دواليك. في حين سيختبر الناس على الأرض 100 عام من النشاط الطبيعي.

مفارقة التوأم

مفارقة التوأم

بعد فترة ليست بطويلة من اقتراح آينشتاين لنظرية النسبيّة الخاصة، تمّت الإشارة إلى مفارقة واضحة . وبحسب مفارقة التوأم هذه، افترض أنّ أحد توأمين عمرهما 20 عاما قد سافر في سفينة فضاء غادرت بسرعة عالية جدّا إلى نجم بعيد ثمّ عاد أدراجه بعد ذلك، في حين بقي التوأم الآخر على الأرض . وبحسب التوأم الموجود على الأرض، فإنّ توأمه رائد الفضاء سيهرم بمقدار أقلّ منه. وخلال مرور 20 عاما على توأم الأرض، فإنه قد ينقضي عام واحد فقط (اعتمادا على سرعة سفينة الفضاء) بالنسبة إلى التوأم الرّحّال. وعليه، فعندما يعود التوأم الرّحّال فإنه من المتوقع أن يكون الأخ التوأم الموجود على الأرض قد أصبح عمره 40 عامًا تقريبًا، مقابل 21 عامًا فقط للتوأم الرّحال.

وهذه وجهة نظر التوأم على الأرض. ولكن ماذا بشأن التوأم الرّحّال؟ إذا كانت الأطر المرجعية جميعها متساوية الاحتمالية، فهل من الممكن أن يدّعي التوأم الرّحّال ما ادّعاه التوأم الأرضي كلّه، ولكن هذه المرّة بالعكس؟ هل يمكن لرائد الفضاء أن يدّعي بناءً على تحرك الأرض مبتعدة بسرعة عالية أنّ الزمن يمر ببطء أكبر على الأرض. وعليه، فإنّ توأمه الأرضي سيهرم بنسبة أقل؟ وهذا عكس ما تنبّأ به التوأم الآخر. ولا يمكن أن يكون الاثنان على صواب بعد أن تعود سفينة الفضاء إلى الأرض لتقارن مباشرة الأعمار والساعات.

ومع هذا، فلا يوجد أي تناقض هنا. فنتائج نظرية النسبيّة الخاصة —في هذه الحالة، تمدّد الزمن— يمكن تطبيقها فقط بواسطة مراقبين في إطار مرجعي قصوري. وتعدّ الأرض إطارا قصوريا (تقريبا)، أمّا سفينة الفضاء فليست كذلك. وتتسارع سفينة الفضاء في بداية الرحلة ونهايتها، وعندما تعكس اتجاهها عند أبعد نقطة في رحلتها. لا يُعدّ التوأم في سفينة الفضاء خلال التسارع في إطار قصوري . وبين ذلك، من الممكن أن يكون التوأم رائد الفضاء في إطار قصوري (القول بأنّ ساعات التوأم الأرضي تتحرك ببطء مُبَرَّرٌ)، وهو ليس الإطارنفسه طوال الوقت. ويبقى التوأم الأرضي في إطار القصور نفسه. ولذلك نستطيع الوثوق في التوقعات بناءً على النسبيّة الخاصة. أي، ليس هناك أي تناقض. إن تنبؤ التوأم الأرضي بأنّ التوأم الرّحّال سيهرم بدرجة أقل هو الخيار الأصح.

مثال إضافي – باستخدام γ

* **المثال 26-3** γ لسرعات متعددة

حدّد قيمة γ لسرعة v مساوية لـ (أ) 0. (ب) $0.010c$. (جـ) $0.10c$. (د) $0.50c$ (هـ) $0.90c$ (و) $0.990c$.

النّهج : نعوّض ببساطة في (المعادلة 26–2).

الحلّ : (أ) عند $v = 0$ فإنّ $\gamma = 1/1 = 1$ تماما.

(ب) عند $v = 0.010c = 3.0 \times 10^6\,\mathrm{m/s}$ (سرعة عالية جدا):

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{0.010c}{c}\right)^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - (0.010)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.99990}} = 1.00005$$

إلا إذا أُعطيت v لأكثر من عدة أرقام مميزة، فإنّ $\gamma = 1.0$ هنا. ونرى أنّ "γ" لا يمكن أن تكون أقلّ من 1.0، وستزيد على 1.0 بوضوح فقط عند السرعات المرتفعة.

(جـ) لسرعة أعلى 10 أضعاف ، $v = 0.10c$، نحصل على

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (0.10)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.99}} = 1.005$$

(د) عند سرعة تعادل نصف سرعة الضوء

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(0.50)^2}} = 1.15$$

(هـ) عند $v = 0.90c$، نحصل على $\gamma = 2.3$.

(و) عند $v = 0.990c$، نحصل على $\gamma = 7.1$

يلخّص (الجدول 26–1) هذه النتائج.

الجدول 26–1 قيم γ	
v	γ
0	1.000
$0.01c$	1.000
$0.10c$	1.005
$0.50c$	1.15
$0.90c$	2.3
$0.99c$	7.1

*نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)

الطائرات، والسيارات، والقوارب، والمتنزهون جميعهم يستخدمون لواقط نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، ليخبرهم بدقة متناهية عن أماكن وجودهم في أيّ لحظة. ويُرسِلُ 24 قمرا صناعيّا لنظام تحديد المواقع إشارات زمنية دقيقة باستخدام ساعات ذرّية. ويقاربُ لاقطك الأوقات الملتقطة من أربعة أقمار صناعية على الأقلّ تمّت مزامنتها إلى جزء واحد لكل 10^{13}. وعند مقارنة الفروقات الزمنية مع كلّ من مواضع الأقمار الصناعية المعروفة وسرعة الضوء الثابتة، يستطيع اللاقط تحديد بعده عن كلّ قمر صناعيّ، ويُحدّدُ موقعه على الأرض بناءً على ذلك. ويستطيع أن يفعل هذا بدقة اعتيادية تصل إلى 15 m إذا كان قد تمّ تصميمه كالذي في الأسفل للقيام بالتصحيحات الناجمة عن النسبيّة الخاصّة.

تطبيق الفيزياء

نظام تحديد الموقع العالمي (GPS)

المثال المفاهيمي 26-4 تصحيح النسبيّة لـ GPS

يتحرّكُ قمرٌ صناعيّ (GPS) بمعدل $4\,\text{km/s} = 4000\,\text{m/s}$. أثبت أنّ لاقط GPS جيّدًا يحتاج إلى تصحيح تمدّد الزمن للحصول على نتائج تتوافق مع الساعات الذرية الدقيقة إلى جزء لكلّ 10^{13}.

الحلّ: دعنا نحسب قيمة ظاهرة تمدّد الزمن بإدخال $v = 4000\,\text{m/s}$ في (المعادلة 26–1أ):

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\Delta t_0$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{4\times 10^3\,\text{m/s}}{3\times 10^8\,\text{m/s}}\right)^2}}\Delta t_0$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1-1.8\times 10^{-10}}}\Delta t_0$$

ونستخدم المتمدّدة ذات الحدين:

$(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx$ لأجل $x \ll 1$ (انظر الفهرس أ) وهي هنا $(1-x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2}x$

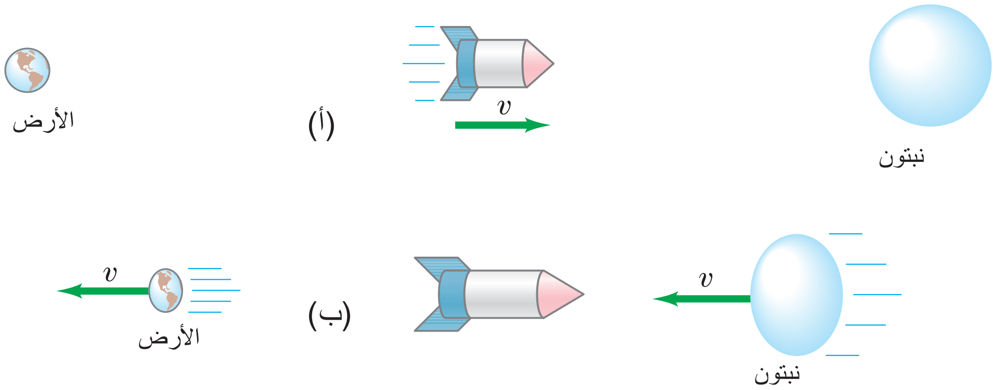
أي أنّ

$$\Delta t = \left(1 + \tfrac{1}{2}(1.8\times 10^{-10})\right)\Delta t_0 = (1 + 9\times 10^{-11})\,\Delta t_0$$

"الخطأ" الزمني مقسوم على الفترة الزمنية

$$\frac{(\Delta t - \Delta t_0)}{\Delta t_0} = 1 + 9\times 10^{-11} - 1 = 9\times 10^{-11} \approx 1\times 10^{-10}$$

وإن لم يؤخذ تمدّد الزمن بالحسبان، فإنّه سيضيف خطأ يقدّرُ بجزءٍ واحدٍ لكلّ 10^{10}. وهو 1000 مرّة ضعف الدقة في الساعات الذرّية. وعدم التصحيح لتمدّد الزمن يعني أنّ اللاقط قد يعطي تحديدا أقلّ دقة للموقع.



الشكل 7-26 (أ) سفينة فضاء تسافر بسرعة عالية جدّا من الأرض إلى كوكب نبتون كما يشاهد من إطار الأرض المرجعي. (ب) بالنسبة إلى مراقب على سفينة الفضاء، تتحرك الأرض ونبتون بسرعة عالية جدّا v: تغادر الأرض سفينة الفضاء وبعد زمن Δt_0 يصل نبتون إلى سفينة الفضاء.

5-26 تقلّص الطّول

لا تختلف الفترات الزمنية وحدها فقط في الأطر المرجعية المختلفة: فالفترات الفضائية –الأطوال والمسافات– تختلف هي أيضاً وفقا لنظرية النسبيّة الخاصة. وسنوضح هذا بتجربة ذهنية.

يرى مراقبون على الأرض سفينة فضاء تسافر بسرعة v من الأرض ولنقل إلى نبتون (الشكل 26–7أ). والمسافة بين الكوكبين كما قاسها مراقبون على الأرض هي L_0. والزمن اللازم لهذه الرحلة المقيس من الأرض هو:

$$\Delta t = \frac{L_0}{v}$$ [مراقب أرضي]

في (الشكل 26 – 7ب) نرى وجهة نظر مراقبين على سفينة الفضاء. وفي هذا الإطار المرجعي، فإنّ سفينة الفضاء ساكنة ويتحرك كلّ من الأرض ونبتون* بسرعة v. إنّ الزمن بين مغادرة الأرض والوصول إلى نبتون (كما لوحظ من سفينة الفضاء) هو "الزمن الصحيح". نتيجة لوقوع الحدثين عند النقطة نفسها في الفضاء (أي على سفينة الفضاء). ولذلك، فإنّ الفترة الزمنية أقلّ نسبة لمراقبي سفينة الفضاء مقارنة بالمراقبين على الأرض. أيّ أنه بسبب تمدّد الزمن (المعادلة 26–1) فإنّ زمن الرحلة كما تمّت رؤيته بواسطة سفينة الفضاء هو

$$\Delta t_0 = \Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2} = \Delta t/\gamma$$ [مراقب سفينةالفضاء]

وبما أنّ المراقبين على سفينة الفضاء يقيسون السرعة نفسها، ولكن بزمنٍ أقلّ بين هذين الحدثين، فإنهم يقيسون مسافة أقلّ أيضًا. وإذا جعلنا L لتكون المسافة بين الكوكبين كما يراها المراقبون على سفينة الفضاء، فإنّ $L = v\,\Delta t_0$، ونستطيع إعادة كتابتها كالتالي:

$$L = v\,\Delta t_0 = v\,\Delta t\,\sqrt{1 - v^2/c^2} = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

وأخيرا سنحصل على النتيجة المهمة الآتية:

$$L = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad \textbf{(3–26 أ)}$$

صيغة تقلص الطول

أو باستخدام γ (المعادلة 26–2)

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \qquad \textbf{(3–26 ب)}$$

وهذه نتيجة عامّة لنظريّة النسبيّة الخاصّة وتطبق على أطوال الأجسام بالإضافة إلى المسافات بينها. ويمكن صياغة النتيجة ببساطة كبيرة كالتالي:

عند قياس طول جسم ما، وُجد أنه يكون أقصر عندما يتحرّك بالنّسبة إلى المراقب، مقارنة معه وهو ساكن.

تقلص الطول: الأجسام المتحركة أقصر (باتجاه الحركة)

ويُسَمّى هذا **تقلصَ الطول**. ويُدعى الطول L_0 في (المعادلة 26–3) الطولَ الصّحيح. وهو طول الجسم (أو المسافة بين نقطتين تمّ قياس موضعيهما في الوقت نفسه) كما حدّده مراقبون ساكنون بالنسبة إليه. وتعطي (المعادلة 26–3) الطول L الذي سيقيسه المراقبون عندما يمرّ الجسم بمحاذاتهم بسرعة v.

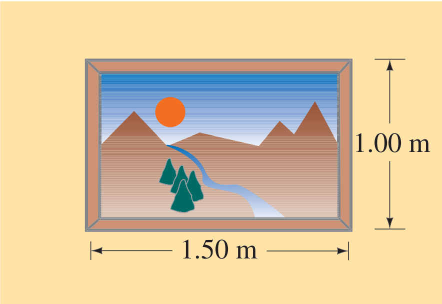
تنويه:
قيس الطول الصحيح في إطار مرجعي حيث الموضعان ساكنان.

* نفترض أنّ v أكبر بكثير من السرعة النسبية لنبتون والأرض، لدرجة يمكن عندها إهمال الأخيرة.

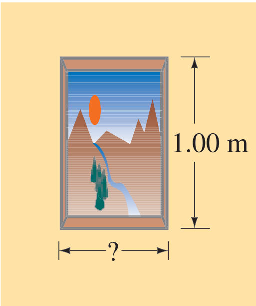
من المهمّ أن نلاحظ أنّ تقلص الطول يحدث على امتداد اتّجاه الحركة. فعلى سبيل المثال، سفينة الفضاء المتحركة في (الشكل 26–7أ) أصبحت أقصر طولاً، ولكن ارتفاعها بقي كما هو مقارنة مع ما كان عليه وهي ساكنة.

وتقلص الطول يشبه تمدّد الزمن في أنّه غير ملاحظ في الحياة اليومية لاختلاف المعامل $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ في (المعادلة 26–3) عن 1.00 بصورة واضحة خاصة عندما تكون v كبيرة جدّاً.

مثال 26-5 تقلص اللوحة الزيتية



(أ)



(ب)

الشكل **26-8** (المثال 26-5).

لوحة زيتية مستطيلة الشكل، طولها 1.00 m وعرضها 1.50 m، معلقة على جدار جانبي في سفينة فضاء تمرّ بمحاذاة الأرض بسرعة $0.90c$. انظر (الشكل 26 – 8أ). (أ) ما أبعاد اللوحة كما يراها قبطان سفينة الفضاء؟ (ب) ما أبعادها كما يراها مراقب أرضي؟

النّهج: نطبّق صيغة تقلص الطول (المعادلة 26 – 3) على البعد الموازي للحركة. وتمثل v سرعة اللوحة الزيتية بالنسبة إلى المراقب.

الحل: (أ) اللوحة ساكنة $(v = 0)$ على سفينة الفضاء. وعليه، ستبدو (بالإضافة لكلّ شيء آخر داخل سفينة الفضاء) طبيعية جدّاً بالنسبة إلى ركاب السفينة الفضائية جميعهم. ويرى القبطان لوحة أبعادها 1.00-m في 1.50-m.

(ب) البعد في اتّجاه الحركة هو الذي يتقلص فقط. لذا، فإنّ الارتفاع لا يتغير ويبقى 1.00 m (الشكل 26 – 8 ب). ومع هذا، فإنّ الطول يتقلص إلى

$$L = L_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$= (1.50\ \text{m})\sqrt{1 - (0.90)^2} = 0.65\ \text{m}$$

ولذلك، فإنّ أبعاد اللوحة هي $1.00\ \text{m} \times 0.65\ \text{m}$.

المثال 26-6 قطار أحلام خارق

يمرّ قطارٌ سريعٌ جدّاً، طوله الصحيح 500 m، خلال نفقٍ طوله 200-m. إنّ سرعة القطار مرتفعة جدًّا لدرجة أنه ظهر لمراقب ساكن بالنسبة إلى الأرض (يجلس ساكنا فوق التلة أعلى النفق) وكأنّه تقلّص تماما فأصبح بطول النفق. أي أنّ محرك القطار كاد يظهر من مقدمة النفق فقط عندما اختفت آخر عربة يجرها داخل الطرف الآخر للنفق. ما سرعة القطار؟

النّهج: بما أنّ القطار تقلّص تماما بحيث أصبح بطول النفق، فإنّ طوله وفق ما رآه المراقب الساكن على الأرض 200 m. ولذلك يمكن استخدام تقلص الطول (المعادلة 26–3) لإيجاد v.

الحل: إنّ تعويض $L = 200\ \text{m}$ و $L_0 = 500\ \text{m}$ في (المعادلة 26–3) يعطي

$$200\ \text{m} = 500\ \text{m}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

وبقسمة الجانبين على 500 m وتربيعهما نحصل على

$$(0.40)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

أو

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - (0.40)^2}$$

$$v = 0.92c$$

ملحوظة : لا يمكن لأيّ قطار حقيقي أن يسير بهذه السرعة. ومع هذا، فمن الطرافة التفكير في ذلك.

ملحوظة: لا يمكن لمراقب على القطار أن يرى نهايتي القطار داخل النفق في اللحظة نفسها؛ فالتزامن شيء نسبيّ.

تمرين د: كم يجب أن تكون سرعة سفينة الفضاء في (المثال 26–5)، حتى يستطيع المراقبون على الأرض من رؤيتها وقد تقلصت بمقدار 10 cm ليصبح الطول $(L = 1.40\ \text{m})$؟

* 6-26 الفضاء والزّمن رُباعيّ الأبعاد

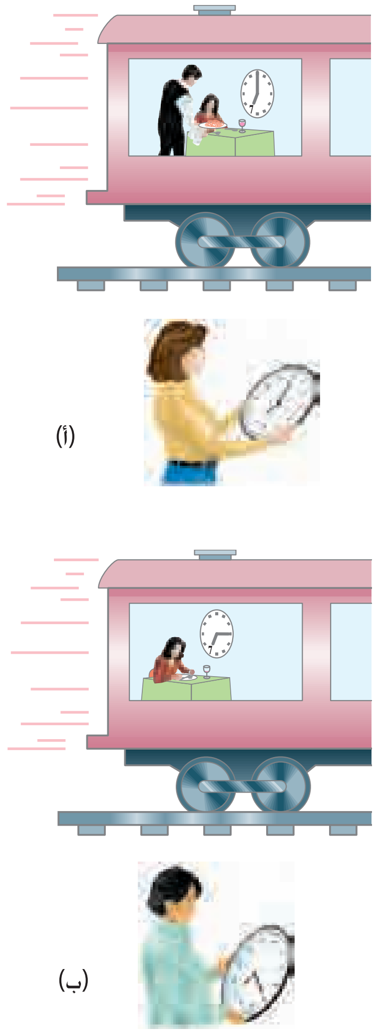
دعنا نتخيّلُ شخصا ما على قطار يتحركُ بسرعةٍ عاليةٍ جدّا، ولنقل $0.65c$ (الشكل 26–9). ويبدأ هذا الشخص بتناول وجبة طعام عند الساعة 7:00، وينتهي عند الساعة 7:15 حسب ساعة القطار. ويحصل الحدثان عند بدء تناول الوجبة والانتهاء منها، عند الموضع نفسه على القطار. لذا، فإنّ الزمن الصحيح بين هذين الحدثين يساوي 15 دقيقة. وبالنسبة إلى مراقبين على الأرض، فإنّ تناول الوجبة سيستغرق فترة أطول – 20 دقيقة – وفقا (للمعادلة 26–1) ودعنا نفترض أنه تمّ تقديم الوجبة على صحن قطره 20-cm. بالنسبة إلى مراقبين على الأرض، فإنّ عرض الصحن 15 cm فقط (تقلص الطول). بالنسبة إلى مراقبين على الأرض، فإنّ الوجبة تبدو أصغر، ولكنها تستمر لفترة أطول.

وإلى حدّ ما، فإنّ ظاهرتي تمدّد الزمن وتقلص الطول توازن إحداهما الأخرى. وعندما يُشاهَدُ من الأرض، فإنّ ما يبدو وكأنّ الجسم يفقده في الحجم يكتسبه في طول فترة بقائه؛ تمّت مقايضة الفضاء أو الطول بالزمن.

وأفضت أفكار مثل هذه إلى فكرة الفضاء والزمن رباعي الأبعاد؛ فالفضاءُ يأخذ ثلاثة أبعادٍ، في حين يأخذ الزمنُ البعدَ الرابع. ويرتبط الفضاء والزمن ببعضهما بشكل جوهري. وتماما مثلما يحدث عندما نحاول الضغط على بالون فيصبح أحد أبعاده أطول والبعد الآخر أقصر، فإننا عندما نختبر الأجسام والأحداث من خلال أطر مرجعية مختلفة، فإنّ مقدارا ما من الفضاء سيحلّ محله الزمن والعكس صحيح.

ومع أنّ فكرة أبعادٍ أربعة تبدو غريبة، إلا أنها تشير إلى فكرة أنّ أيّ جسم أو حدث قد يوصف بأربع كميات هي: ثلاث لوصف موقعه في الفضاء، وواحدة لوصف زمن حدوثه. وفي الحقيقة، فإنّ الوجه غير العاديّ في الفضاء والزمن رباعيّ الأبعاد هو إمكانية الخلط بين الفضاء والزمن: يمكن أن يحلّ جزءٌ صغيرٌ من أحدهما محلّ جزءٍ صغير من الآخر عندما يتغير الإطار المرجعي.

إنّ استيعاب فكرة الفضاء والزمن رباعيّ الأبعاد عسيرة على فهم الكثير منا، حيث نشعر- نوعا ما- كما شعر الفيزيائيون قبل التوصل إلى النسبيّة، في أنّ الفضاء والزمن شيئان منفصلان تماما. ومع هذا، فقد وجدنا في تجاربنا الذهنية أنهما غير منفصلين تماما عن بعضهما بعضا. ولنفكر بجاليليو ونيوتن. فقبل جاليليو كان الاتجاه الرأسي، وهو الذي تسقط الأجسام على امتداده يُعدّ مُختلفا تماما عن البعدين الأفقيين. وأثبت جاليليو أنّ الاتجاه الرأسي يختلف فقط في كونه اتجاه عمل الجاذبية. وفيما عدا ذلك، فإنّ الأبعاد الثلاثة متكافئة جميعها، وهي وجهة نظر نقبلها اليوم كلّنا. والمطلوب منا اليوم هو أن نقبل بُعدا آخر، ألا وهو الزّمن، الذي كنا نعتقد قديما بأنه مختلفٌ بطريقةٍ ما. وهذا لا يعني أننا نقصد عدم وجود أيّ اختلافٍ بين الفضاء والزمن. ولقد أظهرت النسبيّة أنّ تحديد كلٍّ من الفضاء والزمن غير منعزلٍ عن الآخر.



الشكل 26-9 حسب ساعة دقيقة على متن قطار يتحرك بسرعة: (أ) يبدأ الشخص بتناول الطعام عند 7:00 (ب) ينتهي عند فترة تناول الطعام ليجدوها 20 دقيقة.

7-26 الزّخم والكتلة النّسبيّان

لقد رأينا إلى الآن في هذا الفصل أنّ الكميتين الميكانيكيتين الأساسيتين، الطول والفترة الزمنية، بحاجة إلى تعديل بسبب ارتباطهما ببعض ، حيث تعتمد قيمتاهما على الإطار المرجعي اللتان تقاسان من خلاله. ومن الممكن التوقع بأنّ هناك كميات فيزيائية أخرى ربما تحتاج إلى تعديل حسب نظرية النسبيّة، كالزخم (كمية التحرك) والطاقة، والكتلة.

ويظهر تحليل التصادمات بين جسيمين أنه إذا أردنا إدماج قانون حفظ الزخم في النسبيّة؛ فعلينا إعادة تعريف الزخم كالتالي:

الزخم النسبي

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 v \qquad \textbf{(4–26)}$$

وتعدّ γ هنا اختصارا لـ $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ كما في السابق (المعادلة 26–2). ولسرعات

أقلّ بكثير من سرعة الضوء، فإنّ (المعادلة 26–4) تعطي الزخم التقليدي $p = m_0 v$.

ولقد كتبنا m_0 بدلاً من m؛ لأنّ (المعادلة 26–4) تتطلب من الفيزيائيين أن يفسّروا الكتلة اعتمادًا على نظرية النسبيّة. وبالتحديد، فإنّ الجسم الساكن يمتلك كتلة سكونيّة m_0. ومع هذا، فيمكن لكتلته أن تزداد مع السرعة حسب الصيغة

صيغة ازدياد الكتلة

$$m_{rel} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 \qquad \textbf{(5–26)}$$

m_0

وتُدعى m_{rel} **الكتلة النسبيّة**. وكن حذرًا بألاّ تظنّ أنّ الكتلة ستكتسب جسيمات أكثر أو جزيئات إضافية في حين تزداد سرعتها لتصبح كبيرة جدا؛ ليس هذا ما يحدث. وفي الحقيقة، يعتقد كثيرٌ من الفيزيائيين أنّ الجسم يمتلك كتلة وحيدة (كتلته السكونية)، وأنّ الزخم فقط هو الذي يزداد بازدياد السرعة، وهي ظاهرة نسبوية يتفق عليها الجميع. [نستخدم الرموز السفلية لـ m (m_0 و m_{rel}) لنتلافى أيّ سوء فهم. وإذا رأيت m دون أيّ رمز سفليّ، فباستطاعتك التأكّد بأنها تعني الكتلة السكونية].

ولقد تمّ اختبار الزخم النسبويّ مراتٍ عديدةٍ على الجسيمات الأولية الضئيلة (مثل الميونات) ووُجِدَ أنه يزداد حسب (المعادلة 26–4).

المثال 26-7 زخم إلكترون متحرك

قارن الزخم لإلكترون عندما تكون سرعته: (أ) $4.00 \times 10^7\ \mathrm{m/s}$ داخل CRT في جهاز تلفاز. (ب) $0.98c$ داخل مسارع يُستخدم في علاج السرطان.

النّهج: نستخدم (المعادلة 26–4) لإيجاد زخم إلكترونٍ متحركٍ.

الحلّ: (أ) عندما $v = 4.00 \times 10^7\ \mathrm{m/s}$، يكون زخم الإلكترون

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{(4.00 \times 10^7\ \mathrm{m/s})^2}{(3.00 \times 10^8\ \mathrm{m/s})^2}}} = 1.01 m_0 v$$

والمعامل $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1.01$، وبذلك فإنّ الزخم يزيد حوالي 1% فقط عن القيمة التقليدية .

(وإذا عوضنا بالكتلة السكونية للإلكترون $m_0 = 9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$، فإنّ الزخم سيكون $p = 1.01 m_0 v = 3.68 \times 10^{-23}\ \mathrm{kg \cdot m/s}$). (ب) مع $v = 0.98c$ فسيكون الزخم

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \dfrac{(0.98c)^2}{c^2}}} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (0.98)^2}} = 5.0 m_0 v$$

إلكترون يتحرك بمعدل 98% من سرعة الضوء يمتلك $\gamma = 5.0$، ويكون زخمه خمسة أضعاف قيمته التقليدية.

8-26 السّرعة القصوى

هناك نتيجة أساسية لنظرية النسبيّة الخاصّة، وهي أنّ سرعة الجسم لا يمكن لها أن تساوي سرعة الضوء أو تزيد عليها. أي أنّ سرعة الضوء هي الحدّ الطبيعي الأعلى للسرعة في الكون، كما يظهر من (المعادلات 26–1، أو 26–3، أو 26–4).

وربّما من الأسهل أن نرى ذلك من (المعادلة 26–4): كلما تسارع جسم ما لسرعات أعلى وأعلى، فإنّ زخمه يصبح أكبر وأكبر. وبالفعل، إذا كانت v تساوي c، فإنّ المقام في هذه المعادلة سيصبح صفرًا (وكذلك في المعادلتين الأخيرتين) وسيؤول الزخم إلى مالانهاية. وعليه، فإنّ تسريع جسم إلى $v = c$ سيتطلب مقدارا لانهائيّا من الطاقة، وهذا غير ممكن.

9-26 $E = mc^2$ الكتلة و الطّاقة

إذا احتاج الزخم إلى التعديل كي يتناسب مع النسبيّة كما رأينا في (المعادلة 26–4). فقد نتوقع أنّ الطاقة تحتاج إلى إعادة النظر بها. وبالفعل، لم يطوّر آينشتاين صيغة جديدة للطاقة الحركية فقط، ولكنه وجد أيضا علاقة جديدة بين الكتلة، والطاقة، والفكرة المُغيّبَة القائلة بأنّ الكتلةَ شكلٌ من أشكال الطاقة.*
ونستطيع أن نبدأ من مبدأ الشغل والطاقة (الفصل السادس). ونفترض أنه لا يزال صحيحا في النسبيّة، أي أنّ الشغل الصافي المبذول على جسم ما يساوي التغير في طاقته الحركية (KE). وباستخدام هذا المبدأ، أثبت آينشتاين أنه عند السرعات المرتفعة، تكون الصيغة $\mathrm{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ غير صحيحة. وبدلاً من ذلك، أثبت أنّ الطاقة الحركية لجسم ما، كتلته السكونية m_0، ويسافر بسرعة v، تعطى كالتالي:

طاقة الحركة النسبيّة

$$\mathrm{KE} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2 \qquad \textbf{(26–6أ)}$$

وبدلالة $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ نستطيع أن نعيد كتابة (المعادلة 16–6أ) كالتالي:

$$\mathrm{KE} = \gamma m_0c^2 - m_0c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2 \qquad \textbf{(26–6ب)}$$

وتحتاج (المعادلتان 26–6) إلى بعض التفسير. يزداد الحدّ الأوّل بازدياد سرعة الجسم v، أما الحدّ الثاني، m_0c^2، فهو ثابت، ويُدعى الطاقة السكونية E_0 للجسم، ويمثل شكلاً من أشكال الطاقة التي يمتلكها الجسم حتى وهو ساكن. لاحظ أنه إذا كان الجسم ساكنًا $(v = 0)$، فإنّ الحدّ الأوّل في (المعادلة 26–6أ) سيصبح m_0c^2، وستكون $\mathrm{KE} = 0$ كما يجب أن تكون.
ونستطيع إعادة ترتيب (المعادلة 26–6ب) للحصول على

$$\gamma m_0c^2 = m_0c^2 + \mathrm{KE}$$

وندعو γm_0c^2 الطاقة الكلية E للجسم (مفترضا عدم وجود طاقة وضع)، لأنّها تساوي الطاقة السكونية إضافة إلى الطاقة الحركية:

$$E = m_0c^2 + \mathrm{KE} \qquad \textbf{(26–7أ)}$$

الطاقة الكلية (مُعرّفة)

ويمكن كتابة الطاقة الكلية باستخدام (المعادلة 26–6) كما يلي:

$$E = \gamma m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \textbf{(26–7ب)}$$

ولجسم ساكن (في إطار مرجعي ما) تكون KE صفرا في (المعادلة 26–7). وبذلك، فإنّ الطاقة الكلية هي طاقته السكونية E_0:

علاقة الكتلة بالطاقة

$$\boxed{E_0 = m_0c^2} \qquad \textbf{(26–8)}$$

وعندنا هنا صيغة آينشتاين الشهيرة التي تكتب عادة ببساطة $E = mc^2$. وتربط هذه الصيغة رياضيًّا بين مبدأ كلّ من الطاقة والكتلة. ولكن إذا كانت ستعني هذه الفكرة أيّ شيء من وجهة النظر العملية، فإنّ على الكتلة أن تكون قادرة على التحوّل إلى أشكال أخرى من الطاقة، والعكس صحيح. لقد اقترح آينشتاين إمكانية حدوث هذا، وبالفعل، فإنّ تحوّل الكتلة إلى أشكال أخرى من الطاقة، وعكس ذلك،قد تمّ تأكيده عمليا مراتٍ لا تحصى. كما أنّ التحوّل بين الكتلة والطاقة غالبا ما يتمّ قياسه في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات الأولية، وعلى سبيل المثال، فإنّ البيون المتعادل (π^0) وكتلته السكونية 2.4×10^{-28} kg قد تمّ ملاحظته ليضمحل إلى إشعاعات (فوتونات) كهرومغناطيسية صرفة. ويختفي π^0 تماما في العملية. ووُجِدَ أنّ كمية الطاقة الكهرومغناطيسية المتولدة مساوية تماما لتلك التي تنبأت بها صيغة آينشتاين، $E = mc^2$. وبشكل عام، فقد تمّ ملاحظة العملية العكسية أيضا في المختبر: فمن الممكن للأشعة الكهرومغناطيسية تحت ظروف معينة أن تتحول إلى أجسام مادية مثل الإلكترونات (انظر البند 27–6 حول إنتاج الثنائي، *Pair production*).

تبادل الكتلة و الطاقة

* إنّ مبدأ كون الكتلة شكلاً من أشكال الطاقة يظهر للعيان بشكل جيد من مبدأ الكتلة النسبية (المعادلة 26–5). عندما يُبذلُ شغلٌ على جسمٍ ما، فستزداد طاقته الحركية. ولا تستطيع سرعة الجسم أن تزداد إلى ما لانهاية؛ لأنها لا تستطيع أن تكون أكبر من c. ومع هذا، فإنّ كتلة الجسم النسبية ستزداد. أي أنّ الشغل المبذول على الجسم لن يزيد من سرعة الجسم فقط، بل سيساهم أيضًا في زيادة كتلته.

وعلى نطاق واسع، فإنّ الطاقة المُولّدة في محطات الطاقة النووية هي نتيجة نقصان في الكتلة السكونية لوقود اليورانيوم خلال مروره بعملية تدعى الانشطار النووي (الفصل 31). وحتى الطاقة المُشّعة التي تصلنا من الشمس هي مثال على $E = mc^2$؛ تنقص كتلة الشمس باستمرار لتشع طاقة كهرومغناطيسية نحو الخارج.

ويعتقد حاليا أنّ العلاقة $E = mc^2$ تنطبق على العمليات جميعها، بالرغم من أنّ هذه التغييرات غالبا ما تكون صغيرة جدًا ويصعب قياسها. أي أنه عندما تتغير طاقة نظام ما بمقدار ΔE، فإنّ كتلته تتغير بمقدار Δm وتعطى كالتالي:

$$\Delta E = (\Delta m)(c^2) \qquad \textbf{(9–26)}$$

وفي التفاعل النووي، عندما تخرج طاقة ما E (أو تكون هناك حاجة إلى خروجها)، فإنّ الكتل المتفاعلة الناجمة ستختلف بمقدار $\Delta m = \Delta E/c^2$. وحتى عندما يُسخّنُ ماءٌ على موقدٍ، فمن المفترض ازدياد كتلته بمقدار ضئيل جدًّا.

المثال 8-26 طاقة البيون الحركية

➡ حل المسألة

الطاقة الحركية النسبية

يتحرك ميزون π^0 $(m_0 = 2.40 \times 10^{-28}\,\text{kg})$ بسرعة $v = 0.80c = 2.4 \times 10^8\,\text{m/s}$. ما طاقته الحركية؟ قارن مع الحسابات التقليدية.

النّهج: نسبويًا، تعطى الطاقة الحركية (بالمعادلتين 26–6). وتقليديًا حسب $\text{KE} = \frac{1}{2}m_0v^2$.

الحل: الطاقة الحركية للميزون π^0 عند سرعة $v = 0.80c$ هي (المعادلة 26–6أ):

$$\begin{aligned}\text{KE} &= m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right)\\ &= (2.40 \times 10^{-28}\,\text{kg})(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})^2\left(\frac{1}{(1 - 0.64)^{\frac{1}{2}}} - 1\right)\\ &= 1.4 \times 10^{-11}\,\text{J}\end{aligned}$$

ولاحظ أنّ وحدات m_0c^2 هي $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ وهي الجول. وتعطي الحسابات التقليدية

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}m_0v^2 = \tfrac{1}{2}(2.4 \times 10^{-28}\,\text{kg})(2.4 \times 10^8\,\text{m/s})^2 = 6.9 \times 10^{-12}\,\text{J}$$

وهي نصف القيمة، ولكن هذه النتيجة ليست صحيحة.

ملحوظة: لا تحاول أن تحسب طاقة الحركة النسبية باستخدام المعادلة التقليدية مع الكتلة النسبية بدلاً من الكتلة السكونية (وهنا $m_{\text{rel}} = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2} = 4.0 \times 10^{-28}\,\text{kg}$)

$$\text{KE} = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}(4.0 \times 10^{-28}\,\text{kg})(2.4 \times 10^8\,\text{m/s})^2 = 1.2 \times 10^{-11}\,\text{J}$$

المثال 9-26 الطاقة الناجمة عن الاضمحلال النووي

الطاقة الناجمة عن عملية نووية

تأتي الطاقة اللازمة أو الناجمة في التفاعلات النووية والاضمحلالات من التغيّر في الكتلة بين الجسيمات الابتدائية والنهائية. وفي نوعٍ واحدٍ من الاضمحلال الإشعاعي (الفصل 30)، تضمحلّ ذرة يورانيوم $(m = 232.03714\,\text{u})$ إلى ذرة ثوريوم $(m = 228.02873\,\text{u})$ إضافة إلى ذرة هيليوم $(m = 4.00260\,\text{u})$ حيث تعطى الكتل بدلالة وحدة الكتل الذرية $(1\,\text{u} = 1.6605 \times 10^{-27}\,\text{kg})$. احسب الطاقة الناجمة عن هذا الاضمحلال.

النّهج: الكتلة الابتدائية ناقص الكتلة الكلية النهائية يعطي الكتلة المفقودة بدلالة وحدة الكتل الذرية (u). ثمّ نحولها إلى kg ونضربها في c^2 للحصول على الطاقة الناجمة، $\Delta E = \Delta m\, c^2$.

الحل: الكتلة الابتدائية هي $232.03714\,\text{u}$، والكتلة بعد الاضمحلال هي $228.02873\,\text{u} + 4.00260\,\text{u} = 232.03133\,\text{u}$ وعليه، فإنّ هناك نقصا في الكتلة بمقدار $0.00581\,\text{u}$. وتتحول هذه الكتلة المساوية لـ $(0.00581\,\text{u})(1.66 \times 10^{-27}\,\text{kg}) = 9.64 \times 10^{-30}\,\text{kg}$ إلى طاقة. وذلك بواسطة $\Delta E = \Delta m\, c^2$:

$$\Delta E = (9.64 \times 10^{-30}\,\text{kg})(3.0 \times 10^8\,\text{m/s})^2 = 8.68 \times 10^{-13}\,\text{J}$$

وبما أنّ $1\,\text{MeV} = 1.60 \times 10^{-13}\,\text{J}$، فإنّ الطاقة الناجمة هي $5.4\,\text{MeV}$.

المثال 26-10 **تغير الكتلة في تفاعل كيميائي.**

عندما يتفاعل مولان من الهيدروجين مع مول واحد من الأكسجين لتكوين مولين من الماء، فإنّ الطاقة الناجمة هي $484\ \mathrm{kJ}$. ما مقدار نقصان الكتلة في هذا التفاعل؟

النّهج : نستخدم مبدأ آينشتاين الرائع لتبادل الكتلة والطاقة ($E = mc^2$).

الحلّ : باستخدام (المعادلة 26–9)، نحصل على التغير في الكتلة Δm:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{(-484 \times 10^3\ \mathrm{J})}{(3.00 \times 10^8\ \mathrm{m/s})^2} = -5.38 \times 10^{-12}\ \mathrm{kg}$$

والكتلة الابتدائية للنظام هي $0.002\ \mathrm{kg} + 0.016\ \mathrm{kg} = 0.018\ \mathrm{kg}$. ولذلك، فإنّ التغير في الكتلة نسبيّ وصغيرٌ جدّا ويمكن إهماله. [تحويل الكتل في العادة مبدأ معقول لتطبيقه على الأنظمة الكيميائية].

وحدات:
p للزخم eV/c
m للكتلة eV/c^2

وفي عالم الذرات والأنوية بالغة الصغر، من الشائع أن تصنف الطاقات بدلالة الإلكترون فولت (eV) أو بمضاعفاته مثل ($10^6\ \mathrm{eV}$). ويمكن وصف الزخم (انظر المعادلة 26–4) بالوحدات eV/c (أو MeV/c). في حين توصف الكتلة (من $E = mc^2$) بالوحدات eV/c^2 (أو MeV/c^2). ولاحظ استخدام c للإبقاء على صحة هذه الوحدات. لقد تمّ إثبات أنّ الكتلتين السكونيتين للإلكترون والبروتون هما $0.511\ \mathrm{MeV}/c^2$ و $938\ \mathrm{MeV}/c^2$ على الترتيب. انظر أيضًا إلى الجدول داخل الغلاف الأمامي.

المثال 26-11 **بروتون ذو 1-TeV**

يستطيع مُسارعُ تيفاترون في مختبر فيرمي في ولاية إلينوي تسريع البروتونات إلى طاقة حركية مقدراها $1.0\ \mathrm{TeV}$ ($10^{12}\ \mathrm{eV}$). ما سرعة بروتون كهذا؟

النّهج: نحلّ باستخدام صيغة الطاقة الحركية (المعادلة 26–6أ) لإيجاد v.

الحلّ: إنّ الطاقة الحركية للبروتون هي $E_0 = 938\ \mathrm{MeV}$ أو $9.38 \times 10^8\ \mathrm{eV}$. ويمكن إهمال الطاقة السكونية بالمقارنة مع $\mathrm{KE} = 10^{12}\ \mathrm{eV}$، وبذلك نبسط (المعادلة 26 – 6أ) إلى:

$$\mathrm{KE} \approx \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ونحلّ لإيجاد v حسب الخطوات التالية:~

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_0c^2}{\mathrm{KE}};$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{m_0c^2}{\mathrm{KE}}\right)^2;$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \left(\frac{m_0c^2}{\mathrm{KE}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{9.38 \times 10^8\ \mathrm{eV}}{1.0 \times 10^{12}\ \mathrm{eV}}\right)^2;$$

$$v = \sqrt{1 - (9.38 \times 10^{-4})^2}\, c = 0.99999956c$$

وعليه، فإنّ البروتون يتحرك بسرعة تكاد تساوي c.

وعند السرعات المنخفضة $v \ll c$، فإنّ الصيغة النسبية لـ KE تؤول إلى تلك التقليدية، كما أثبتنا باستخدام المتمدّدة ذات الحدّين $(1 \pm x)^n = 1 \pm nx + n(n-1)x^2/2! + \cdots$ ومع $n = -\frac{1}{2}$، تمدّد الجذر التربيعي في (المعادلة 26–6أ)

وبذلك يكون

$$\mathrm{KE} = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1\right)$$

وهكذا

$$\mathrm{KE} \approx m_0c^2\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \cdots - 1\right)$$
$$\approx \tfrac{1}{2}m_0v^2$$

وتمثل النقاط في العبارة الأولى حدودا صغيرة جدا في المتمدّدة والتي أهملناها لافتراضنا بأنّ $v \ll c$.

وعليه

فعند السرعات المنخفضة. يُختزلُ الشكلُ النسبويُّ للطاقة الحركية إلى الشكل التقليدي $\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$ وهذا يجعل النسبيّة نظرية قابلة للتطبيق من حيث قدرتها على التنبؤ بنتائج دقيقة عند كلّ من السرعات المنخفضة والمرتفعة. وبالفعل، فإنّ معادلات النسبيّة الخاصّة الأخرى تختزل أيضا إلى مكافئاتها التقليدية عند السرعات الاعتيادية. ويختفي كلّ من تقلص الطول، وتمدّد الزمن، وتعديلات الزخم والطاقة الحركية عند $v \ll c$ لأنّ $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1$ 1

ومن الممكن أيضًا اشتقاق علاقة مفيدة تجمع بين الطاقة الكلية E لجسمٍ ما وزخمه p. ويُعطى زخم جسم ما كتلته السكونية m_0 وسرعته v (بالمعادلة 26–4) كما يلي:

الزخم النسبوي

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 v$$

الطاقة الكلية هي (المعادلة 26 – 7ب)

$$E = \gamma m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ونربّع هذه المعادلة (ونضيف الحدّ "$v^2 - v^2$" وهو صفر، ولكنه سيساعدنا):

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^2 (v^2 - v^2 + c^2)}{1 - v^2/c^2}$$

$$= p^2c^2 + \frac{m_0^2 c^4 (1 - v^2/c^2)}{1 - v^2/c^2}$$

أو

الطاقة المرتبطة بالزخم

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2 c^4 \qquad \textbf{(10–26)}$$

ولذلك، فيمكن كتابة الطاقة الكلية بدلالة الزخم p، أو بدلالة الطاقة الحركية (المعادلة 26–7أ)، حيث افترضنا عدم وجود طاقة وضع.

*متى نستخدم الصيغ النسبية؟

من وجهة نظر عملية، فإننا لا نملك أيّ فرصة في حياتنا اليومية لاستخدام الرياضيات النسبية. وعلى سبيل المثال، فإنّ قيمة المعامل γ، الذي يظهر في كثير من الصيغ النسبية هي $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ 1.005 عندما تكون $v = 0.10c$. ولذلك، فعند السرعات العالية مثل $0.10c = 3.0 \times 10^7\,\text{m/s}$، فإنّ المعامل $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ في الصيغ النسبية يعطي تصحيحا عدديّا أقل من 1%. ولسرعات أقل من $0.10c$، إلا إذا كانت الكتلة والطاقة قادرتين على أن تحلّ إحداهما محل الأخرى، فإننا لا نحتاج عادة إلى استخدام الصيغ النسبية الأكثر تعقيدا، ولكننا نستطيع استخدام الصيغ التقليدية الأبسط.

وإذا أعطيتَ كتلة الجسم السكونية m_0 وطاقته الحركية KE، فبإمكانك أن تقومَ بحسابٍ سريع لتحَدّد ما إذا كنت تحتاج إلى استخدام صيغ نسبوية، أو أنّ الصيغ التقليدية تفي بالغرض. وببساطةٍ، تحسب النسبة KE/m_0c^2؛ لأنّ (المعادلة 26 – 6ب)

$$\frac{\text{KE}}{m_0c^2} = \gamma - 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1$$

وإذا كانت نتيجة النسبيّة أقلّ، ولنقل من 0.01، فعليه $\gamma \le 1.01$، وستصحّحُ المعادلات النسبية تلك التقليدية بحوالي 1%. أمّا إذا كانت دقتك المتوقعة ليست أفضل من 1%، فإنّ الصيغ التقليدية تكون جيدة بما فيها الكفاية. ولكن إذا كانت دقتك جزءا واحدا من 1000 (0.1%)، فعليك استخدام الصيغ النسبية. في حين إذا كانت دقتك المتوقعة هي 10% فقط، فإنك بحاجة إلى النسبيّة إذا كانت $(\text{KE}/m_0c^2) \gtrsim 0.1$.

تمرين هـ : لأجل دقّة 1%، هل يجب أن نتعامل مع إلكترون طاقته الحركية $\text{KE} = 100\,\text{eV}$ نسبويًّا؟ [مساعدة : كتلة الإلكترون السكونية = 0.511 MeV].

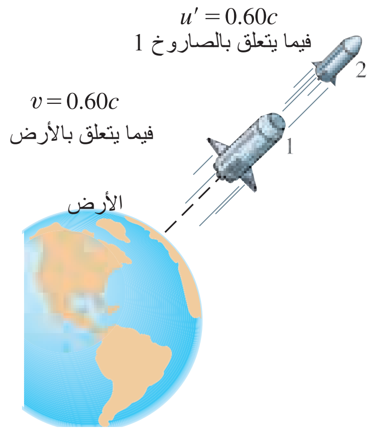
10-26 جمع السّرعات نسبويّا

افرض أنّ سفينة صاروخية تنتقل مبتعدة عن الأرض بسرعة v. وافرض كذلك أنّ هذا الصاروخ قد أطلق صاروخا ثانيا يتحرك بسرعة u' بالنسبة إلى الصاروخ الأول (الشكل 26–10). ويمكن أن نتوقع أن u سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض هي $u = v + u'$. وبالنسبة إلى الحالة المبينة في (الشكل 26–10) فهي $u = 0.60c + 0.60c = 1.20c$. ولكن، وحسب ما تمّ مناقشته في (البند 26–8)، فإنه لا يوجد أيّ جسم يستطيع أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء في أيّ إطار مرجعي. وبالفعل، وضح آينشتاين أنّه وبسبب تغيّر الطول والزمن باختلاف الأطر المرجعية، فإنّ الصيغة القديمة لجمع السرعات المتجهة أصبحت غير صالحة. وبدلاً من ذلك، فإنّ الصيغة الصحيحة هي:

$$u = \frac{v + u'}{1 + vu'/c^2} \qquad \text{[}\vec{u}\text{ و }\vec{v}\text{ على امتداد الاتجاه نفسه]} \qquad \textbf{(11–26)}$$

⚠ تنويه:
لا تجمع السرعات النسبيّة ببساطة كما تجمع في الميكانيكا التقليدية $(v \ll c)$
صيغة الجمع النسبيّ للسرعات ($\vec{u}$ و $\vec{v}$ على امتداد الخط نفسه)

لحركة على امتداد خط مستقيم. ولقد قمنا باشتقاق هذه الصيغة في الفهرس هـ. إذا كانت u' في الاتجاه المعاكس لـ v، عندها يجب أن تكون إشارتها سالبة في المعادلة أعلاه. وعليه، $u = (v - u')/(1 - vu'/c^2)$



الشكل 26-10 أطلق الصاروخ 2 من الصاروخ 1 بسرعة $u' = 0.60c$، ما سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض؟

المثال 26-12 السرعة النسبيّة، نسبويّا

احسب سرعة الصاروخ 2 في (الشكل 26–10) بالنسبة إلى الأرض.

النّهج: نضيف سرعة الصاروخ 2 نسبة إلى الصاروخ 1، إلى سرعة الصاروخ 1 نسبة إلى الأرض، باستخدام (المعادلة النسبية 26–11) بسبب ارتفاع قيم السرعات، وبسبب كونها على امتداد الخط نفسه أيضا.

الحلّ: يتحرك الصاروخ 2 بسرعة $u' = 0.60c$ نسبة إلى الصاروخ 1. وسرعة الصاروخ 1 $v = 0.60c$ نسبة إلى الأرض. إنّ سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض هي (المعادلة 26 – 11)

$$u = \frac{0.60c + 0.60c}{1 + \dfrac{(0.60c)(0.60c)}{c^2}} = \frac{1.20c}{1.36} = 0.88c$$

ملحوظة: وُجدت سرعة الصاروخ 2 بالنسبة إلى الأرض على أنّها أقلّ من c، كما يجب أن تكون.

ويمكننا أن نرى بأنّ (المعادلة 26–11) تختزل إلى الشكل التقليدي عند السرعات الصغيرة مقارنة بسرعة الضوء؛ لأنّ $1 + vu'/c^2 \approx 1$ لـ v و $u' \ll c$. ولذلك، فإنّ $u \approx v + u'$ كما في الفيزياء التقليدية (الفصل 3).

والآن، سنختبر هذه الصيغة في حالة أخرى، أي في حالة سرعة الضوء. لنفترض أنّ الصاروخ في (الشكل 26–11) يُصدرُ شعاعا ضوئيّا بحيث $u' = c$. وتخبرنا (المعادلة 26–11) أنّ سرعة الضوء الصادر هذا بالنسبة إلى الأرض هي

$$u = \frac{0.60c + c}{1 + \dfrac{(0.60c)(c)}{c^2}} = \frac{1.60c}{1.60} = c$$

وهي متوافقة تماما مع المُسلّمة الثانية للنسبيّة.

تمرين و: استخدم (المعادلة 26–11) لحساب سرعة الصاروخ 2 في (الشكل 26–10) بالنسبة إلى الأرض إذا أطلق من الصاروخ 1 بسرعة $u' = 3000\ \text{km/s} = 0.010c$. افرض أنّ سرعة الصاروخ 1 كانت $v = 6000\ \text{km/s} = 0.020c$.

11-26 تأثير النّسبيّة الخاصة

لقد تمّ إجراءُ عددٍ كبير من التجارب لاختبار تنبؤات نظرية النسبيّة الخاصّة، ولم تسجل أيّ تناقضات ضمن الأخطاء العملية المقبولة. ولذلك، فقد قبل العلماء النسبيّة على أنها وصف دقيق للطبيعة.

مبدأ التطابق

عند سرعات أقلّ بكثيرٍ من سرعة الضوء، تختزل الصيغ النسبية إلى نظيراتها التقليدية القديمة، كما ذكر سابقًا. ونأمل بالطبع، بل ونصرّعلى أنّ هذا صحيح؛ لأنّ الميكانيكا النيوتونية تعمل بشكل رائع للأجسام المتحركة بسرعات $v \ll c$. ويُدعى هذا الإصرار على أنّ نظريّة عامّة (مثل النسبيّة) تعطي النتائج نفسها كما تعطيها نظريّة أكثر خصوصيّة (مثل الميكانيكا التقليدية التي تعمل عند $v \ll c$) مبدأ التوافق. فتتوافق النظريتان في مناطق تقاطعهما. ولذلك، فإنّ النسبيّة لا تتعارض مع الميكانيكا الكلاسيكية(التقليدية). وبالأحرى فهي نظريّة أكثر عموميّة، بل تعدّ الميكانيكا التقليدية حالة خاصّة منها.

ولا تقتصر أهمية نظريّة النسبيّة في أنها تعطي نتائج أكثر دقة، خصوصًا عند السرعات العالية. ولكنها أكثر من ذلك بكثير؛ لقد غيّرت الطريقة التي ننظر بها إلى العالم. وأصبح ينظر الآن إلى مبدأي الفضاء والزمن على أنهما نسبويّان ومترابطان مع بعضهما بعضا، في حين كان ينظر إليهما في السابق على أنهما مطلقان ومنفصلان. وحتى مفاهيمنا عن المادة والطاقة تغيرت؛ فالجديد في الأمر أنه يمكن تحوّل أيّ منهما إلى الأخرى. وقد امتد تأثير النسبيّة إلى أبعد بكثير من الفيزياء، من خلال تأثيرها في العلوم الأخرى، وخاصة في عالمي الفن والأدب، وقد دخلت بالفعل في الثقافة العامة.

ومع هذا، فمن وجهة نظر عملية بحتة، فنحن لا نملك أيّ فرصة لاستخدام رياضيات النسبيّة في حياتنا اليومية . وعلى سبيل المثال، فإنّ قيمة المعامل γ، $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ الذي يظهر في الصيغ النسبية، هي 1.005 فقط. وحتى للسرعات المرتفعة التي قد تصل إلى $0.10c = 3.0 \times 10^7\,\mathrm{m/s}$ لاتعطي تصحيحا أقل من 1%. وعند سرعات أقل من $0.10c$، إلا إذا كانت الكتلة والطاقة قادرتين على أن تحلّ إحداهما محلَّ الأخرى، فإنّنا لا نحتاج عادة إلى استخدام الصيغ النسبية الأكثر تعقيدا، بل نستطيع استخدام الصيغ التقليدية الأبسط.

وتتعامل نظرية النسبيّة الخاصّة التي درسناها في هذا الفصل مع الأُطر المرجعية القصورية (غير المتسارعة). وسوف نناقش"نظرية النسبيّة العامة" الأكثر تعقيدا في (الفصل 33) باختصار، والتي تستطيع التعامل مع الأطر المرجعية غير القصورية.

ملخص

إنّ **الإطار المرجعي القصوري** هو إطار ينطبق فيه قانون نيوتن للقصور. ويمكن للأطر المرجعية القصورية أن تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة إلى بعضها بعضا، والأطر المرجعية المتسارعة **غير قصورية**.

تعتمد **نظرية النسبيّة الخاصة** على مبدأين هما: **مبدأ النسبيّة** الذي ينصّ على أنّ قوانين الفيزياء لا تتغير في الأطر المرجعية القصورية جميعها، ومبدأ **ثبات سرعة الضوء** الذي ينصّ على أنّ سرعة الضوء في الفضاء الخالي هي نفسها في الأطر المرجعية القصورية جميعها.

إحدى نتائج نظرية النسبيّة هي أنّ حدثين متزامنين في إطار مرجعي قد لا يكونان متزامنين في إطار آخر. وأثران آخران هما: **تمدّد الزمن**؛ قيست الساعات المتحركة فوجد أنها تتحرك ببطء، **وتقلص الطول**؛ قيس طول جسم متحرك (في اتجاه حركته نفسه) فوُجد أنه أقصر منه في حالة السكون. وكميّا،

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma\,\Delta t_0 \qquad (1\text{–}26)$$

$$L = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{L_0}{\gamma} \qquad (3\text{–}26)$$

حيث L و Δt هما الطول والفترة الزمنية للأجسام (أو الأحداث) المُلاحظة خلال حركتها بسرعة v.

L_0 و Δt_0 هما **الطول الصحيح والزمن الصحيح**؛ أي أنّهما الكميتان المقيستان في الإطار السكوني للأجسام أو الأحداث. والكمية γ هي اختصار لـ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (2\text{–}26)$$

غيرت نظرية النسبيّة أفكارنا العامّة عن كلّ من الفضاء، والزمن، والطاقة، والكتلة. ويُرى كلّ من الفضاء والزمن على أنهما مترابطان بشدة. ويُعدّ الزمن البعد الرابع إضافة إلى الأبعاد الثلاثة للفضاء. ويُعطى **الزخم** لجسم ما كالتالي:

$$p = \gamma m_0 v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (4\text{–}26)$$

هذه الصيغة على أنها **ازدياد كتلة**. أما الكتلة النسبية فهي

$$m_{\mathrm{rel}} = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (5\text{–}26)$$

و m_0 هي **الكتلة السكونية** للجسم $(v = 0)$.

إنّ الكتلة والطاقة كميتان متحولتان. وتخبرنا المعادلة

$$E_0 = m_0c^2 \tag{8–26}$$

عن مقدار الطاقة E الضرورية لتكوين m_0، أو العكس. وبطريقة أخرى، فإنّ $E_0 = m_0c^2$ هي مقدار الطاقة التي يمتلكها الجسم بسبب كتلته m_0. ويجب أن يضمّ قانون حفظ الطاقة الكتلة على أنّه شكلٌ من أشكال الطاقة. وتُعطى الطاقة الحركية KE لجسم يتحرك بسرعة v كالتالي:

$$\mathrm{KE} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2 \tag{6–26}$$

حيث m_0 هي الكتلة السكونية للجسم. والطاقة الكلية E، في حالة عدم وجود طاقة وضع، هي

$$E = \mathrm{KE} + m_0c^2 = \gamma m_0c^2 \tag{7–26}$$

ويرتبط الزخم p لجسم ما بطاقته الكلية E (مفترضًا عدم وجود طاقة وضع) بواسطة

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4 \tag{10–26}$$

ويجب إجراء الجمع الاتجاهي للسرعة بطريقة خاصة. وتظهر أهمية هذه الظواهر النسبية عند السرعات المرتفعة والقريبة فقط من سرعة الضوء والتي تشكل بحدّ ذاتها النهاية العليا للسرعة في الكون.

أسئلة

1. إذا كنت داخل عربة قطار لا تحتوي على أيّ شباك، وكان القطار يتحرك بسرعة ثابتة سلسة جدًا، فهل هناك أيّ تجربة عملية تستطيع إجراءها في عربة القطار لتحدد ما إذا كان القطار متحركاً؟ فسّر.

2. ربما تكون قد مررت بتجربة عندما كنت في سيارتك تقف أمام إشارة مرور ضوؤها أحمر، لترى بطرف عينك أنّ هناك سيارة خلفك تتحرك باتجاهك نحو الأمام ببطء شديد، فقمت بالضغط بشدة على كوابح السيارة ظنّا منك أنّك ترجع إلى الخلف. ما علاقة هذا بالحركتين؛ المطلقة والنسبيّة؟

3. يقف عامل على قمة عربة قطار متحرك، ويرمي كرة ثقيلة إلى الأعلى مباشرة (من وجهة نظره). مع إهمال مقاومة الهواء، هل ستسقط الكرة على العربة أم خلفها؟

4. هل تدور الأرض فعلاً حول الشمس؟ أو هل من الصحة أن نقول أيضًا بأنّ الشمس تدور حول الأرض؟ ناقش في ضوء المبدأ الأوّل للنسبيّة (لا يوجد إطار مرجعي مفضل). فسّر.

5. إذا كنت على سفينة فضاء تنتقل بمعدل $0.5c$ بعيدا عن نجم ما، فما سرعة مرور ضوء النجم بجانبك؟

6. يُعبَّرُ في بعض الأحيان عن ظاهرة تمدّد الزمن كما يلي: "تتقدّمُ الساعات المتحركة ببطء". ` وفي الحقيقة، ليس لهذه الظاهرة أيّ صلةٍ بالحركة المؤثرة في عمل الساعات. فما الذي تؤثر فيه إذن؟

7. هل يعني تمدّد الزمن أنّه يمرّ ببطء أكبر في الأطر المرجعية المتحركة؟ أم أنّه يبدو وكأنّه يمرّ ببطء أكبر فقط ؟

8. وصلت رائدة فضاء يافعة إلى موطنها بعد رحلة طويلة. وحال وصولها، أسرعت باتجاه رجلٍ مسنّ رمادي الشعر لتخاطبه مشيرة إليه خلال الحديث على أنه ابنها. كيف يمكن لهذا أن يكون؟

9. هل يمكن أن تلاحظ تغيرا في نبضات قلبك وأنت تسافر مبتعدا عن الأرض بسرعة $0.5c$؟ وهل سيتغير أيّ من كتلتك، أو طولك، أو عرض خصرك؟ وماذا سيقول عنك مراقبون على الأرض ينظرون إليك من خلال المنظار المكبر؟

10. هل يحدث تمدّد الزمن وتقلص الطول عند السرعات الاعتيادية، ولنقل عند $90\ \mathrm{km/h}$؟

11. افرض أنّ سرعة الضوء لانهائية. عندئذٍ، ماذا سيحدث للتنبؤات النسبية من تقلص الطول وتمدّد الزمن؟

12. ناقش ماذا سيحدث أو سيختلف في حياتنا اليومية لو أنّ سرعة الضوء كانت $25\ \mathrm{m/s}$؟

13. فسّر كيف يمكن استخدام صيغتي تقلص الطول وتمدّد الزمن للدلالة على أن c هي السرعة العليا في الكون.

14. يظهر الرسم في بداية هذا الفصل الشارع كما يراه السيد تومبكن، حيث سرعة الضوء $c = 20\ \mathrm{mi/h}$. كيف يبدو السيد تومبكن للناس الواقفة في الشارع (الشكل 26–11)؟ فسّر.

الشكل 26–11 (السؤال 14). السيّد تومبكن كما يراه الناس على جانب الطريق. انظر أيضا إلى الصورة في بداية الفصل.

15. يتحرك الإلكترون بسرعات محدودة أقلّ من c. فهل يضع هذا حدًّا أعلى لزخم الإلكترون؟ وإذا كان الأمر كذلك، فما هذا الحدّ الأعلى؟ وإن كان الجواب "لا"، ففسّر.

16. هل يمكن لجسم كتلته السكونية لا تساوي صفرًا أن يصل إلى سرعة الضوء؟

17. هل تتناقض المعادلة $E = mc^2$ مع مبدأ حفظ الطاقة؟ فسّر.

18. إذا كانت الكتلة شكلاً من أشكال الطاقة، فهل يعني هذا أنّ الزنبرك سيمتلك كتلة أكبر عندما يكون مضغوطا بالمقارنة معه عندما لايكون كذلك؟

19. ليس صحيحًا القول بأنّ: " لا تفنى المادة ولا تستحدث من عدم". ما الذي يجب قوله بدلاً من ذلك ؟

20. هل فكرتنا العامة عن جمع السرعات المتجهة هي ببساطة كما عملنا في (البند 3–8)، أم هي خطأ تماما؟

مسائل

26–4 و 26–5 تمدّد الزمن وتقلّص الطّول

.1 (I) تمرّ سفينة فضاء عنك بسرعة $0.750c$. فإذا قست طول السفينة ووجدته $28.2\ \text{m}$، فما طول السفينة وهي في حالة السكون؟

.2 (I) ينتقل جسيم أولي من نوع ما بسرعة $2.70 \times 10^8\ \text{m/s}$. وقيس عمره عند هذه السرعة فوجد أنه $4.76 \times 10^{-6}\ \text{s}$. ما عمر الجسيم الساكن؟

.3 (I) تعتمد الأطوال والفترات الزمنية على المعامل حسب نظرية النسبيّة (المعادلتان 26–1 و 26–3). قيّم هذا المعامل $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ عند السرعات: (أ) $v = 20{,}000\ \text{m/s}$ (سرعة اعتيادية لقمر صناعي). (ب) $v = 0.020c$ (جـ) $v = 0.200c$ (د) $v = 0.95c$ (هـ) $v = 0.98c$ (و) $v = 0.999c$.

.4 (II) إذا كنت ستسافر إلى نجم يبتعد مسافة 125 سنة ضوئية عن الأرض بسرعة $2.50 \times 10^8\ \text{m/s}$، فكم ستجد هذه المسافة؟

.5 (II) ما سرعة بيون إذا كان متوسط عمره المقيس هو $4.10 \times 10^{-8}\ \text{s}$؟ متوسط عمره في وضع السكون هو $2.60 \times 10^{-8}\ \text{s}$.

.6 (II) في إطار الأرض المرجعي، يبتعد نجم عن الأرض مسافة 82 سنة ضوئية. ما سرعة انتقالك الضرورية لكي تصبح المسافة بالنسبة إليك 35 سنة ضوئية فقط؟

.7 (II) لنفترض أنك قررت السفر إلى نجم يبتعد مسافة 85 سنة ضوئية بسرعة ما بحيث تبدو لك المسافة على أنها 25 سنة ضوئية فقط. كم سنة ستستغرق هذه الرحلة؟

.8 (II) ما السرعة v التي ستجعل عصا طولها 1.00-m تبدو أقصر بمقدار 10.0% ($90.0\ \text{cm}$)؟

.9 (II) سرعة الإفلات من الأرض $40{,}000\ \text{km/h}$. ما نسبة نقصان طول سفينة فضاء طولها 95.2-m تسافر بهذه السرعة؟

.10 (II) عند أيّ سرعة ستختلف الصيغ النسبية لكلّ من: (أ) الطول؟ (ب) الفترات الزمنية عن القيم التقليدية بمقدار 1.00%؟ (هذه طريقة معقولة للتقدير عند استخدام الحسابات النسبية بدلاً من التقليدية).

.11 (II) لنفترض أنّ تقريرا صحفيا قد أخبرنا أنّ سفينة النجوم "انتربرايز" قد عادت من رحلة مدتها 5 سنوات وهي تنتقل بسرعة $0.84c$. (أ) إذا كان التقرير يعني أنّ السنوات الخمس هي من زمن الأرض، فكم انقضى من الوقت على السفينة؟ (ب) إذا عنى التقرير أنّ السنوات هي من زمن السفينة، فكم انقضى من الوقت على الأرض؟

.12 (II) يبتعد نجم ما 10.6 سنة ضوئية. فكم من الزمن سيستغرق سفينة فضاء تنتقل بـ $0.960c$ للوصول إلى ذلك النجم من الأرض كما قاسه مراقبون: (أ) على الأرض؟ (ب) على سفينة الفضاء؟ (جـ) ما المسافة المقطوعة حسب مراقبين على سفينة الفضاء؟ (د) كيف سيحسب راكبو سفينة الفضاء سرعتهم من النتائج في (ب) (جـ)؟

.13 (II) تمرّ صديقتك عنك وهي تركب سفينتها الفضائية "الفراري" بسرعة $0.660c$. إذا قست أبعاد سفينتها من إطارك ووجدت أنّ طولها $4.80\ \text{m}$ وارتفاعها $1.25\ \text{m}$. (أ) ما طول السفينة وهي ساكنة وارتفاعها؟ (ب) كم ثانية انقضت حسب ساعة صديقتك إذا انقضى $20.0\ \text{s}$ حسب ساعتك؟ (جـ) ما سرعة انتقالك كما تبدو لصديقتك؟ (د) كم ثانية ستقول هي أنّها انقضت حسب ساعتك عندما تنقضي حسب ساعتها $20.0\ \text{s}$؟

.14 (II) كم تبلغ السرعة التي يجب أن ينتقل بها بيون متوسط ليقطع مسافة $15\ \text{m}$ قبل أن يضمحل؟ متوسط عمره في وضع السكون $2.6 \times 10^{-8}\ \text{s}$.

26 – 7 الزخم النسبويّ

.15 (I) ما زخم بروتون يتحرك بسرعة $v = 0.85c$؟

.16 (I) عند أيّ سرعة ستصبح كتلة الجسم النسبية ضعف كتلته السكونية؟

.17 (II) يسافر جسم كتلته السكونية m_0 بسرعة $v = 0.20c$. عند أيّ سرعة سيتضاعف زخمه؟

.18 (II) (أ) يسافر جسم بسرعة $v = 0.10c$. ما نسبة الخطأ في حسابات الزخم عند استخدام الصيغة التقليدية؟ أعد الحل مستخدما $v = 0.50c$.

.19 (II) ما نسبة التغير في الزخم لبروتون يتسارع: (أ) من $0.45c$ إلى $0.90c$؟ (ب) من $0.90c$ إلى $0.98c$؟

26–9 $E = mc^2$

.20 (I) يتطلب تفاعل كيميائي ما $4.82 \times 10^4\ \text{J}$ من الطاقة المدخلة لحدوثه. ما الزيادة في كتلة المنتجات مقارنةً بتلك التي للمتفاعلات؟

.21 (I) عندما تنقسم نواة اليورانيوم الساكنة في عملية تعرف بالانشطار في مفاعل نووي، تمتلك الشظايا الناجمة طاقة حركية تقترب من $200\ \text{MeV}$. ما مقدار الكتلة المفقودة خلال العملية؟

.22 (I) احسب الطاقة السكونية لإلكترون بدلالة الجول والإلكترون فولت ($1\ \text{MeV} = 1.60 \times 10^{-13}\ \text{J}$).

.23 (I) احسب طاقة البروتون السكونية بدلالة MeV/c^2.

.24 (I) الطاقة الكلية السنوية المستهلكة في الولايات المتحدة هي حوالي $8 \times 10^{19}\ \text{J}$. ما مقدار الكتلة اللازم تحويلها إلى طاقة لتلبية هذه الحاجة؟

.25 (II) ما مقدار الطاقة التي يمكن الحصول عليها من تحويل $1.0\ \text{gm}$ من الكتلة؟ ما مقدار الكتلة التي تستطيع هذه الطاقة رفعها إلى $0.25\ \text{km}$ فوق سطح الأرض؟

.26 (II) ما سرعة جسمٍ ما عندما تتساوى طاقتاه: الحركية و السكونية؟

.27 (II) ما السرعة التي ستكون عندها الطاقة الحركية لجسم ما تساوي 25% من طاقته السكونية؟

.28 (II) (أ) ما مقدار الشغل اللازم لتسريع بروتون من السكون إلى سرعة $0.997c$؟ (ب) كم سيصبح زخم هذا البروتون؟

.29 (II) احسب الطاقة الحركية والزخم لبروتون ينتقل بسرعة $2.60 \times 10^8\ \text{m/s}$.

.30 (II) ما زخم 750-MeV بروتون (أي أنّ طاقته الحركية تساوي 750-MeV)؟

.31 (II) ما سرعة بروتون يتسارع بواسطة فرق جهد مقداره $105\ \text{MV}$؟

.32 (II) ما سرعة إلكترون طاقته الحركية $1.00\ \text{MeV}$؟

.33 (II) ما سرعة الإلكترون مباشرة قبل أن يصطدم بشاشة تلفاز بعد تسريعه من السكون بواسطة $25{,}000\ \text{V}$ ناجمة عن أنبوب الصور؟

.34 (II) يقترب جسيمان متماثلان من بعضهما بعضًا. كتلة كلٍّ منهما السكونية m_0، بسرعتين متساويتين بالمقدار ومتعاكستين بالاتجاه. وإذا كان التصادم غير مرن كليًّا ونتج عنه جسم ساكن ووحيد، فما الكتلة السكونية للجسم الناتج؟ وما مقدار الطاقة المفقودة خلال التصادم؟ وما مقدار الطاقة الحركية المفقودة خلال هذا التصادم؟

.35 (II) احسب سرعة بروتون $(m_0 = 1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg})$ طاقته الحركية هي تماماً نصف: (أ) طاقته الكلية. (ب) طاقته السكونية.

.36 (II) ما سرعة إلكترون وزخمه $(m = 9.11 \times 10^{-31}\,\text{kg})$ إذا تساوت طاقتاه الحركية و السكونية؟

.37 (II) لنفترض أنّ سفينة كتلتها $27{,}000\,\text{kg}$ قد سُرّعت إلى $0.21c$. (أ) ما مقدار ما ستمتلكه من طاقة حركية؟ (ب) إذا استخدمت الصيغة التقليدية للطاقة الحركية، فما نسبة خطئك؟

.38 (II) احسب الطاقة الحركية والزخم لبروتون $(m_0 = 1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg})$ يتحرك بسرعة $7.35 \times 10^{7}\,\text{m/s}$. ما نسبة الخطأ في حساباتك الناجمة عن استخدامك الصيغ التقليدية؟

.39 (II) تضمحل نواة أماريكيوم، $^{142}_{95}\text{Am}$ إلى نواة نبتونيوم $^{732}_{39}\text{NP}$، بعد أن تبعث جسيم ألفا كتلته $4.00260\,\text{u}$ وطاقة حركته $5.5\ \text{MeV}$ قدّر كتلة نواة النبتونيوم إذا أهملت ارتدادها، وعلمت أنّ كتلة أماريكيوم $241.05682\,\text{u}$.

.40 (II) إذا سُرّع إلكترونٌ $(m_0 = 9.11 \times 10^{-31}\,\text{kg})$ من السكون إلى سرعة v بواسطة قوة محافظة، فستقلّ طاقته الحركية بمقدار $6.60 \times 10^{-14}\,\text{J}$. حدّد سرعة الإلكترون v.

.41 (II) ارسم مخططا للطاقة الحركية مقابل الزخم لـ جسم: (أ) كتلته السكونية لا تساوي صفرا. (ب) كتلته السكونية صفر.

.42 (II) ما شدة المجال المغناطيسي الضرورية لإبقاء بروتون طاقته 998-GeV بروتون يدور في دائرة نصف قطرها $1.0\,\text{km}$ (ولنقل في سنكروترون مختبر فيرمي)؟ استخدم الكتلة النسبية. كتلة البروتون السكونية هي:

$0.938\,\text{GeV}/c^2$. $(1\,\text{GeV} = 10^9\,\text{eV})$

مساعدة: في النسبة، ما زالت القيمة $mv^2/r = qvB$ صحيحة في المجال المغناطيسي.

26–10 جمع السرعات النسبويّ

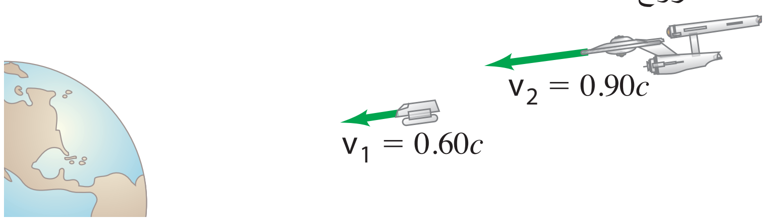
.43 (I) يلاحظ شخص في صاروخ ينتقل بسرعة $0.50c$ (بالنسبة إلى الأرض) شهابًا يأتي من خلفه ويمرّ عنه بسرعة، وعندما قاسها وجدها $0.50c$. كم تبلغ سرعة الشهاب بالنسبة إلى الأرض؟

.44 (II) تغادر سفينتا فضاء الأرض في اتجاهين متعاكسين، كلّ منهما بسرعة $0.50c$ بالنسبة إلى الأرض. (أ) ما سرعة سفينة الفضاء 1 بالنسبة إلى السفينة 2؟ (ب) ما سرعة سفينة الفضاء 2 بالنسبة إلى السفينة 1؟

.45 (II) تغادر سفينة فضاء الأرض بسرعة $0.71c$. وتغادر سفينة فضاء ثانية من السفينة الأولى بسرعة $0.87c$ بالنسبة إليها. احسب سرعة السفينة الثانية بالنسبة إلى الأرض إذا أطلقت: (أ) في اتجاه حركة السفينة الأولى نفسه. (ب) مباشرة إلى الخلف باتجاه الأرض.

.46 (II) يرى مراقبٌ على الأرض سفينةً مخلوقات فضائية تقترب بسرعة $0.60c$ وتأتي الإنتربرايز للنجدة (الشكل 26–12) لتفاجيء المخلوقات الفضائية وهي تسير مباشرة باتجاه الأرض بسرعة $0.90c$ بالنسبة إلى الأرض. ما السرعة النسبية لإحدى السفينتين كما تمت رؤيتها من قبل الثانية؟

مشروع



.47 (II) ترسل سفينة فضاء منكوبة حجرتي نجاة في اتجاهين متضادين. تتحرك الأولى بسرعة $v_1 = -0.60c$ في اتجاه ما، في حين تتحرك الأخرى بسرعة $v_2 = +0.70c$ في الاتجاه الآخر كما تمّت ملاحظتها من سفينة الفضاء. ما سرعة حجيرة النجاة الثانية كما تمّ قياسها من حجيرة النجاة الأولى؟

.48 (II) يمرّ صاروخ A عن الأرض بسرعة $0.75c$. وفي الوقت نفسه يمرّ صاروخ B عن الأرض وهو يتحرك في الاتجاه نفسه بسرعة $0.95c$. بالنسبة إلى الأرض. ما سرعة B بالنسبة إلى A عندما يتجاوزه؟

مسائل عامة

.49 إنّ أقرب نجم إلى الأرض هو بروكسيما سينتوري، وهو بعيد مسافة 4.3 سنة ضوئية. (أ) ما السرعة الثابتة التي يجب أن تسير بها سفينة فضاء من الأرض إذا أرادت أن تصل النجم في 4.0 سنوات كما يقيسها المسافرون على سفينة الفضاء؟ (ب) كم ستستغرق الرحلة كما سيراها المراقبون على الأرض؟

.50 كقاعدة، أيّ شيء يسافر أسرع من $0.1c$ تقريبًا يُسَمّى نسبويًّا، وتصحيحه باستخدام النسبيّة الخاصّة يؤثر فيه بشكل واضح. حدّد سرعة الإلكترون في ذرّة الهيدروجين (نصف قطرها $0.5 \times 10^{-10}\,\text{m}$) هل هي نسبويّة ؟ (تعامل مع الإلكترون كما لو أنه في فلك دائري حول البروتون).

.51 (أ) ما سرعة إلكترون v طاقته الحركية تساوي $14{,}000$ ضعف طاقته السكونية؟ تستطيع أن تعرف الفرق، $c - v$. ويمكن الوصول إلى هذه السرعات في مسارع ستانفورد الخطي (SLAC). (ب) إذا انتقلت الإلكترونات في المختبر خلال أنبوب طوله $3.0\,\text{km}$ (كما في SLAC)، فما طول الأنبوب نسبة إلى إطار الإلكترون المرجعي ؟ [مساعدة: استخدم المتمدّدة ذات الحدين].

.52 كم غرامًا من المادة يستهلك كليًّا لإضاءة مصباح ضوئيّ قدرته 100-W واط لمدة عام واحد؟

.53 ما كميّةُ الطاقة الكهرومغناطيسية الدنيا اللازمة لإنتاج إلكترون وبوزيترون معا؟ البوزيترون هو جسيم له كتلة الإلكترون السكونية نفسها، ولكنه يمتلك شحنة معاكسة. (لاحظ أنّ الشحنة الكهربائية محفوظة في هذه العملية. (انظر البند 27–6).

.54 يدخل إلكترون $(m = 9.11 \times 10^{-31}\,\text{kg})$ مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا $B = 1.8\,\text{T}$ ، ويتحرك عموديًّا على خطوط المجال بسرعة $v = 0.92c$. ما نصف قطر مساره الدائري؟ انظر تلميح (المسألة 42).

55. يصطدم ميون سالب يتحرك بسرعة تعادل 33% من سرعة الضوء مباشرة مع ميون موجب يتحرك بسرعة تعادل 50% من سرعة الضوء . ما مقدار الطاقة الكهرومغناطيسية الناجمة عن إلغاء الجسيمين كلّ منهما الآخر (كتلة كلّ منهما السكونية $105.7\,\mathrm{MeV}/c^2$)؟

56. يستطيع نيوترون حرّ أن يضمحل إلى بروتون، وإلكترون، ونيترينو. افرض أنّ كتلة النيوترينو السكونية صفر، وأنّ الكتل الأخرى يمكن أن نجدها في الجدول داخل غلاف الكتاب الأمامي. حدّد الطاقة الحركية الكلية المشتركة بين الجسيمات الثلاثة عندما يضمحل نيوترون ساكن.

57. تشعّ الشمس بمعدل $4 \times 10^{26}\,\mathrm{W}$. (أ) ما معدل تناقص كتلة الشمس؟ (ب) كم تستغرق الشمس لتخسر كتلة مساوية لكتلة الأرض؟ (جـ) قدّر زمن بقاء الشمس لو أنها أشعت باستمرار بهذا المعدّل.

58. قيس جسيم مجهول فوُجِدَ أنه يمتلك شحنة سالبة، وسرعة مقدارها $2.24 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$. وتمّ تحديد زخمه فوُجد أنه $3.07 \times 10^{-22}\,\mathrm{kg \cdot m/s}$. حدّد الجسيم بإيجاد كتلته السكونية؟

59. ما مقدار الطاقة اللازمة لتفكيك نواة هيليوم إلى مكوناتها؛ بروتونين ونيوترونين؟ الكتل السكونية للبروتون (ومعه الإلكترون) والنيوترون والهيليوم على الترتيب هي $1.00783\,\mathrm{u}$، و $1.00867\,\mathrm{u}$، و $4.00260\,\mathrm{u}$. (يُدعى فرق الطاقة هذا بطاقة الربط الكلية لنواة الهيليوم $^4_2\mathrm{He}$).

60. ما الزيادة المئوية في الكتلة (النسبية) لسيارة تسير بسرعة $110\,\mathrm{km/h}$ مقارنة بكتلتها وهي ساكنة؟ [مساعدة: استخدم المتمددّة ذات الحدّين].

61. بروتونان، سرعة كلّ منهما $0.935c$ داخل المختبر، ويتحركان باتجاه بعضهما بعضا. حدّد زخم: (أ) كلّ بروتون في المختبر. (ب) البروتونين في المختبر. (جـ) أحد البروتونين كما يشاهده البروتون الآخر.

62. أثبت بالتحليل أنّ سرعة جسم ما زخمه p، وطاقته E تعطى كالتالي:

$$v = \frac{pc^2}{E} = \frac{pc}{\sqrt{m_0^2c^2 + p^2}}$$

63. تتزود سفينة النجوم الصورية إنتربرايز بطاقتها عن طريق دمج المادة ومضادها لتحقق تحويل كامل للكتلة إلى طاقة. إذا كانت كتلة الإنتربرايز $5 \times 10^9\,\mathrm{kg}$ تقريبا . فما مقدار الكتلة اللازم تحويلها إلى طاقة حركية لتسريع السفينة من السكون إلى عُشْرِ سرعة الضوء؟

64. سُرّعَ إلكترونٌ لدرجة أنّ طاقته الحركية أصبحت أكبر من طاقته السكونية m_0c^2 بمقدار : (أ) 5.00 أضعاف. (ب) 999 ضعفا. ما سرعة الإلكترون في كلّ حالة؟

65. قروي يدرس الفيزياء ويعتقد أنّه يستطيع إدخال عمود طوله 15.0-m مترا في حظيرة طولها 12.0-m مترا إذا ركض بسرعةٍ كافية (وهو يحمل العمود). فهل يستطيع فعل ذلك؟ فسّر بالتفصيل. كيف يتوافق هذا مع فكرة أنّ الحظيرة ستبدو أقصر من $12.0\,\mathrm{m}$ بالنسبة إليه وهو ينظر إليها راكضًا؟

66. إنّ الطاقة الناجمة عن تفاعل مولين من الهيدروجين ومول واحد من الأكسجين لتكوين مولين من الماء هي $484\,\mathrm{kJ}$. ما مقدار النقص في كتلتي العنصرين في هذا التفاعل؟ ما النسبة المئوية من كتلة النظام الأصلية الكلية التي يمثّلها التغيّر الكتلي هذا؟

67. استحدث جسمان متماثلان في تفاعل نووي، فتحركا في اتجاهين متعاكسين. إذا كانت سرعة كلّ جسيم $0.75c$ بالنسبة إلى إطار المختبر المرجعي، فما سرعة أحد الجسمين بالنسبة إلى الجسيم الآخر؟

68. قاس رائد فضاء في سفينة فضاء تسير بسرعة $0.75c$ بالنسبة إلى الأرض طول سفينته فوجدها $25\,\mathrm{m}$. وتناول طعامه في 23 دقيقة . (أ) ما طول سفينة الفضاء بالنسبة إلى مراقب على الأرض. (ب) ما الفترة الزمنية التي يستغرقها رائد الفضاء في تناول طعامه بالنسبة إلى مراقبين على الأرض؟

69. إذا انتقلت في سفينة فضاء بسرعة $0.85c$ مبتعدا عن الأرض، وأرسلت شعاعًا ليزريًّا باتجاه الأرض يسير بسرعة c بالنسبة إليك. ما سرعة شعاع الليزر كما يقيسها المراقبون على الأرض؟

70. الكتلة الكلية لسفينة فضاء وركابها هي $150{,}000\,\mathrm{kg}$. ويرغب الرّكاب أن يسافروا إلى نجم يبتعد 25 سنة ضوئية بسرعة $0.60c$. يقوم محرّك سفينة الفضاء بتحويل كتلة مباشرة إلى طاقة لكي تتسارع السفينة. ما مقدار الكتلة التي ستتحول إلى طاقة لتسريع سفينة الفضاء إلى هذه السرعة؟ افرض أنّ التسارع يتمّ بسرعة بحيث تكون السرعة للرحلة كاملة $0.60c$، وأهمل النقص في الكتلة الكلية لأغراض الحساب. كم ستستغرق الرحلة بالنسبة إلى رواد الفضاء في السفينة؟

71. افرض أنّ سفينة فضاء كتلتها $12{,}500\text{-kg}$ قد غادرت الأرض بسرعة $0.99c$. ما الطاقة الحركية لسفينة الفضاء؟ قارن هذا مع استهلاك الولايات المتحدة (US) السنوي للطاقة (حوالي $10^{20}\,\mathrm{J}$).

72. تنوي سفينة فضاء كتلتها $42{,}000\text{-kg}$ السفر إلى جوار نجم يبتعد 6.0 سنوات ضوئية عن الأرض. ويرغب ركّاب السفينة ألا تستغرق الرحلة (باتجاه واحد) أكثر من سنة واحدة. ما مقدار الشغل اللازم بذله على سفينة الفضاء لإيصالها السرعة الضرورية لهذه الرحلة؟

73. تهتز كتلة مقدارها 1.68-kg مثبتة بنهاية زنبرك ثابت صلابته $k = 48.7\,\mathrm{N/m}$. إذا كان هذا النظام مثبتا في سفينة فضاء تتحرك مبتعدة عن الأرض بسرعة $0.900c$، فما زمن تذبذب الكتلة الدوري حسب: (أ) مراقبين على السفينة؟ (ب) مراقبين على الأرض؟

74. يضمحل pi ميزون كتلته السكونية m_μ وهو ساكن إلى ميون (كتلته السكونية m_μ) ونيوترينو كتلته السكونية مهملة أو صفر. أثبت أنّ طاقة الميون الحركية هي $\mathrm{KE}_\mu = (m_\pi - m_\mu)^2c^2/2m_\pi$.

إجابات التمارين

أ: نعم.

ب : (أ) $2.21\,\mu s$. (ب) $5.0\,\mu s$.

جـ: (أ) لا.(ب) نعم.

د : $0.36c$.

هـ: لا.

و: $0.030c$ ، تماما مثل التقليدية، لدقة أفضل من 0.1%.