

من إصدارات المركز العلمي للترجمة

النظرية النسبية

ترجمة الفصل التاسع والثلاثون من كتاب سيرويه

إعداد وترجمة

الدكتور حازم فلاح سكيك

النسبية والفيزياء الحديثة

Relativity and Modern Physics

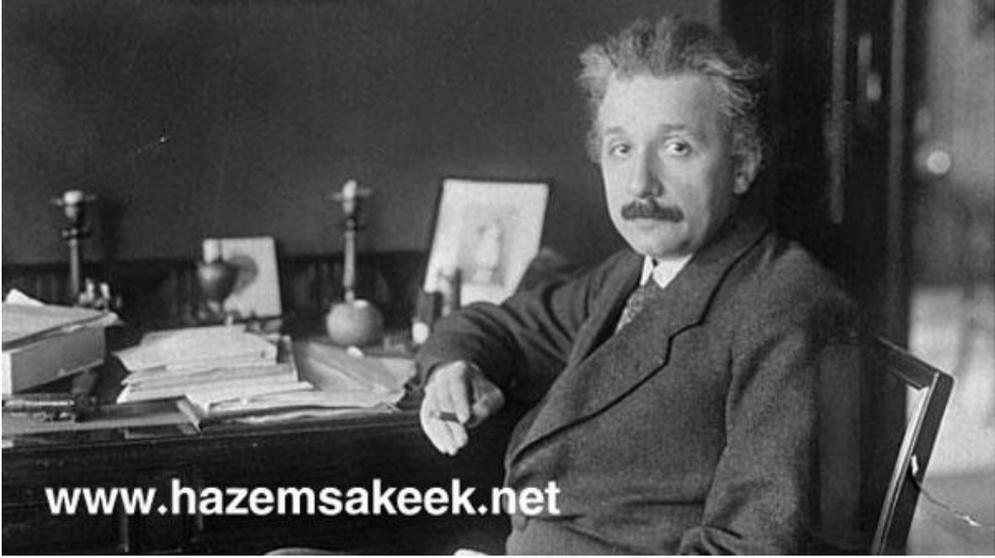
الفصل الأول: النظرية النسبية

Theory of Relativity



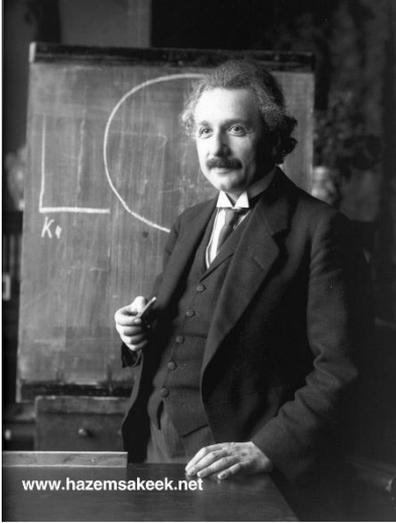
إعداد وترجمة
الدكتور حازم فلاح سكيك

مقدمة



البرت اينشتاين عالم فيزيائي قضى حياته في محاولة لفهم قوانين الكون. كان اينشتاين يسأل الكثير من الأسئلة المتعلقة بالكون ويقوم بعمل التجارب داخل عقله. فقد عاش اينشتاين عبقرية بإجماع كافة علماء عصره وبلغ اسمى درجات المجد العلمية بخلاف العديد من العلماء الذين ماتوا دون ان يحظوا بمتعة النجاح والتألق فمثلاً العالم مائدل الذي وضع قوانين الوراثة لم يعرف احد أنه هو الذي وضع هذه القوانين إلا بعد وفاته بخمسين عام، كذلك العالم والطبيب العربي ابن النفيس الذي اكتشف الدورة الدموية في جسم الانسان لا يزال مجهولاً حتى الآن وغيره من الأمثلة .. كانت عبقرية اينشتاين من نوع مختلف فلم يكن أحد يفهم شيء عن نظريته النسبية أو تطبيقاتها ولكن الجميع اقر بمنطقها. فقد جاءت النظرية النسبية الخاصة لتحير العلماء وتغير مفاهيم الفيزياء المعروفة. ويروي أن اينشتاين كان يقف في أحد شوارع هوليود مع شارلي تشابلن فتجمع حولهما المارة، فقال اينشتاين لتشابلن (لقد تجمع الناس لينظروا إلى عبقرية يفهمونه تمام الفهم وهو أنت، وعبقري لا يفهمون من أمره شيئاً وهو أنا) .. العديد من العلماء بلغوا مراتب علمية عالية نتيجة لمجهودهم الفكري أو الفني فمثلاً اديسون وبيكاسو وأبن سينا والمنتبي اجمع الناس على تفوقهم وعبقريتهم لأنهم لمسوا ورأوا قيمة ما يقدمون من اكتشافات واختراعات. وهذا لم يحدث مع اينشتاين حيث كانت عبقريته من نوع مختلف فما هو الذي قدمه اينشتاين؟ وعن ماذا كانت عبقريته؟ وما قيمة ما قدمه؟ وعن أي شيء يتحدث . كل ما هو معروف أنه وضع النظرية النسبية. فإذا ما حاول المرء قراءة النظرية النسبية إلا وجد نفسه غارقاً في بحر من الألغاز لدرجة انه شاع القول بأن هناك عشرة في العالم يفهمون النظرية النسبية.

حياة أينشتين



ولد ألبرت أينشتين في 14 مارس 1879 في ألمانيا في مدينة صغيرة تسمى أولم وبعد عام انتقلت أسرته إلى ميونخ. كان والده هرمان صاحب مصنع كهروكيميائي. وكانت والدته بولين كوخ من عشاق الموسيقى وكان له اخت تصغره بعام. تأخر أينشتين عن النطق وكان يحب الصمت والتفكير والتأمل ولم يهوى اللعب كأقرانه. لم يكن يعجبه نظام المدرسة وطريقة التعليم فيها التي تحصر الطالب في نطاق ضيق ولا تدع له مجالاً للأبداع واطهار امكانياته .

اهدى له والده بوصلة صغيرة في عيد ميلاده العاشر وكان لها الاثر البالغ في نفسه وبارتها المغناطيسية التي تشير دائماً إلى الشمال والجنوب واستخلص هذا الطفل بعد تأمل عميق أن الفضاء ليس خالياً ولا بد

وأن فيه ما يحرك الاجسام ويجعلها تدور في نسق معين. تعلق أينشتين في شبابه بعلم الطبيعة والرياضيات وبرع فيهما في البيت وليس في المدرسة ووجد متعة في علم الهندسة وحل مسائلها. تعلم الموسيقى وهو في السادسة من عمره وكان يعزف على آلة الكمان. كانت اكبر مشكلة له اضطراره لدراسة اللغات والعلوم الانسانية التي لا تطلق للفكر العنان وانما حفظها للحصول على الشهادة وكان كثيراً ما يخرج اساتذة الرياضيات لتفوقه عليهم وطرده احد الاساتذة من المدرسة قائلاً له)) أن وجودك في المدرسة يهدم احترام التلاميذ لي ((سافر بعدها ليلتحق بوالديه في ميلانو بعد ان تركوه لمشاكل مادية في ميونخ والتحق هناك في معهد بولوتكنيك ولكنه رسب في جميع امتحانات الالتحاق فيما عدا الرياضيات فارشده مدير المعهد ليدرس دبلوم في احدى مدن سويسرا ليتمكن بعد عام من الالتحاق في البوليتكنيك .

في عام 1901 بلغ اينشتين من العمر 21 عاماً وبعد عناء طويل للحصول على عمل يعيش منه حصل على وظيفة في مكتب تسجيل براءات الاختراع في برن. قرأ الكثير عن اعمال العلماء والفلاسفة ولم تعجبه كتاباتهم حيث وصفها بالسطحية والبعد عن العمق الفكري الذي يبحث عنه.

في العام 1905 وضع أينشتين خلال عمله في مكتب تسجيل الاختراعات العديد من النظريات التي جعلت من العام 1905 عاماً ثورياً في تاريخ العالم. واسترعت نتائج نظرياته اهتمام علماء الفيزياء في كافة جامعات سويسرا مما طالبوا بتغيير وظيفته من كاتب إلى استاذ في الجامعة وفي عام 1909 عين رئيساً للفيزياء النظرية في جامعة زوريخ ثم انتقل إلى جامعة براغ الألمانية في 1910 ليشغل نفس المنصب ولكنه اضطر لمغادرتها في العام 1912 بسبب رفض زوجته مغادرة زوريخ. ...

من أعمال أينشتين نذكر.....

في عام 1905 نشر اينشتين اربعة ابحاث علمية الأولى في تفسير الظاهرة الكهروضوئية والبحث الثاني للحركة الابروانية للجزيئات والثالثة لطبيعة المكان والزمان والرابعة لديناميكا حركة الأجسام الفردية. كان البعثين الأخيرين الاساس للنظرية النسبية الخاصة والتي نتج عنها معادلة الطاقة $E=mc^2$ وتحويل كتلة متناهية في الصغر أمكن الحصول على طاقة هائلة (الطاقة النووية).

في العام 1921 حصل أينشتين على جائزة نوبل لاكتشافه قانون الظاهرة الكهروضوئية التي حيرت هذه الظاهرة علماء عصره.

وضع اينشتين الاسس العلمية للعديد من المجالات الحديثة في الفيزياء هي:

النظرية النسبية الخاصة

النظرية النسبية العامة

ميكانيكا الكم

نظرية المجال الموحد



وحتى يومنا هذا يقف العلماء عاجزين عن تخيل كيف توصل اينشتين لهذا النظريات ولا سيما وأن التجارب التي تجرى حتى الآن تؤكد صحة نظريات اينشتين وينشر ما يقارب 1000 بحث سنوياً حول النظرية النسبية.

قال عنه زميله في برلين العالم الفيزيائي لندتبورغ (كان يوجد في برلين نوعان من الفيزيائيين : النوع الأول أينشتين، والنوع الآخر سائر الفيزيائيين).

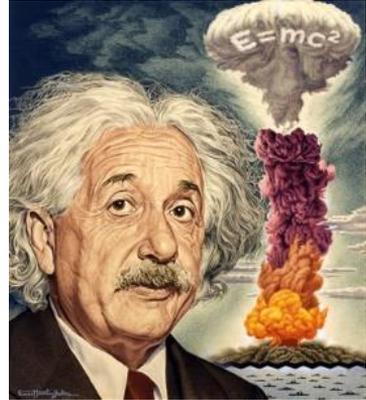
مع اندلاع الحرب العالمية ظل أينشتين يتابع اعماله العلمية في برلين وركز نشاطه على التوسع في نظرية الجاذبية التي نشرها في العام 1916 وهو في الثامنة والثلاثين من عمره .حاول الكثير من الاحزاب السياسية زجه في نشاطاتهم ولكنه كان دائماً يقول انني لم اخلق للسياسة وفضل الانعزال والوحدة قائلاً (ان الفرد المنعزل هو وحده الذي يستطيع أن يفكر وبالتالي أن يخلق قيمة جديدة تتكامل بها الجماعة) هذا ادى إلى دفع معارضيه للنيل منه . احيكت له المؤامرات والدسائس مما زاع صيته في مختلف انحاء العالم ووجهت له الدعوات من العديد من الجامعات للتعرف عليه وسافر إلى ليدن بهولندا وعين استاذاً في جامعتها . وأسف الكثيرون في ألمانيا رحيله لأن شهرته العظيمة في الخارج من شأنها ان تعيد إلى المانيا هيبته التي فقدتها في الحرب .وتلقى كتب ودعوات من وزير التربية ليعود إلى بلده فعاد وحصل على الجنسية الألمانية لأنه في ذلك الوقت كان لا يزال محتفظاً بجنسيته السويسرية.

كثرت الدعوات التي تلقاها أينشتاين بسبب شهرة نظريته النسبية وكان يقابل في كل مرة يلقي فيها محاضرة باحتفال هائل يحضره عامة الناس ليتعرفوا على هذا الرجل بالرغم من عدم المامهم بفحوى النظرية النسبية ولكن اهتمام الناس به لم يسبق لعالم ان حظي به من قبل فكان يستقبل استقبال المعجبين لفنان مشهور. لقد كان تقرير صادر عن البعثة الفلكية الانجليزية عام 1919 الذي تويد فيه صحة نبوءة أينشتاين عن انحراف الضوء عند مروره بالجو الجاذبي من اهم دواعي شهرته العالمية. ولكن لكونه الماني الجنسية كان صيته في انجلترا قليل وبدعوة من اللورد هالدين توجه أينشتاين إلى انجلترا وقدمه هالدين قائلاً (إن ما صنعه نيوتن بالنسبة إلى القرن الثامن عشر يصنعه أينشتاين بالنسبة إلى القرن العشرين).

يروى أنه تم الاعلان عن جائزة قدرها خمسة آلاف دولار لكاتب احسن ملخص للنظرية النسبية في حدود ثلاثة آلاف كلمة تقدم ثلاثمائة شخص وحصل على الجائزة رجل من محبي الفيزياء ايرلاندي الجنسية عمره 61 عاماً في 1921

ظل أينشتاين يسافر بين بلدان العالم من فرنسا إلى اسبانيا إلى فلسطين وإلى الصين واليابان وحصل على جائزة نوبل في 1923 وسلمه اياها ملك السويد وبعدها استقر في برلين وكان الزوار من مختلف انحاء العالم يأتون له ويستمتعون بحديثه ولقائه حتى عام 1929 والتي فيها بلغ من العمر الخمسين عاماً قرر الاختفاء عن الانظار ولم يكن احد يعلم اين يقيم.

كان أينشتاين محبا للسلام ويكره الحرب وفي نداء تلفزيوني إلى تورمان رئيس الولايات المتحدة الاسبق قال (لقد كان من المفروض أول الامر أن يكون سباق التسلح من قبيل التدابير الدفاعية. ولكنه اصبح اليوم ذا طابع جنوني. لأنه لو سارت الامور على هذا المنوال فسيأتي يوم يزول فيه كل أثر للحياة على وجه البسيطة).



في 18 ابريل من العام 1955 وفي مدينة برنستون مات ذلك العبقري وأخذ الناس يتحدثون عن أينشتاين من جديد وتنافست الجامعات للاستئثار بدماع ذلك الرجل عساها تقف من فحصه على اسرار عبقريته.. كان أينشتاين يعيش بخياله في عالم اخر له فيه الشطحات والسبحات وكانت الموسيقى سبيله الوحيد للتنفيس عن ثورته العارمة وكان الكون بالنسبة له مسرحاً ينتزع منه الحكمة فغاص في ابعاده السحيقة وبهذا نكون قد لخصنا قصة حياة اسطورة القرن العشرين لندخل في تفاصيل النظرية النسبية الخاصة ونتائجها... .

د. حازم فلاح سكيك

www.hazemsakeek.net

غزة: 25 - 8 - 2015

الفصل الأول: النظرية النسبية

Theory of Relativity

10	The Principle of Galilean Relativity	1.1 مبدأ جاليليو للنسبية
17	The Michelson–Morley Experiment	2.1 تجربة ميكلسون مورلي
20	Einstein’s Principle of Relativity	3.1 مبدأ اينشتين للنسبية
23	Consequences of the Special Theory of Relativity	4.1 نتائج النظرية النسبية الخاصة
47	The Lorentz Transformation Equations	5.1 معادلات تحويلات لورنز
50	The Lorentz Velocity Transformation Equations	6.1 معادلات تحويلات سرعة لورنز
56	Relativistic Linear Momentum	7.1 كمية الحركة النسبية
59	Relativistic Energy	8.1 الطاقة النسبية
66	Mass and Energy	9.1 الكتلة والطاقة
68	The General Theory of Relativity	10.1 النظرية النسبية العامة

من المعلوم ان سرعة الاجسام التي نتعامل معها في حياتنا اليومية هي سرعات أقل بكثير من سرعة الضوء، ولقد تم صياغة قوانين ميكانيكا نيوتن من خلال مراقبة ووصف حركة مثل هذه الاجسام، وتعتبر هذه القوانين ناجحة تماما في وصف العديد من الظواهر التي تحدث عند سرعات أقل بكثير من سرعة الضوء. الا انها تفشل عند وصف اجسام تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء.

بامكاننا فحص واختبار توقعات نظرية نيوتن عند سرعات مختلفة من خلال تعجيل الالكترونات أو أية جسيمات مشحونة باستخدام فرق جهد كهربى كبير جدا. على سبيل المثال، من الممكن ان نقوم بتعجيل الكترون لسرعة تصل إلى $0.99c$ (حيث ان c هي سرعة الضوء والتي تبلغ 3×10^8 m/s) باستخدام فرق جهد يصل إلى عدة ملايين فولت. طبقا لميكانيكا نيوتن فانه اذا قمنا بزيادة فرق الجهد بمقدار أربعة اضعاف، فان طاقة حركة الالكترون تصبح أكبر بأربع مرات وان سرعته سوف تتضاعف لتصبح $1.98c$. الا ان التجارب العلمية اثبتت ان سرعة الالكترون أو سرعة أي جسم اخر في الكون تبقى أقل من سرعة الضوء مهما كان فرق جهد التعجيل المستخدم كبيرا. لذلك فانه بسبب عدم وجود أي قيود على السرعة القصوى في قوانين نيوتن فان نظرية نيوتن تتناقض مع نتائج التجارب العملية الحديثة ولهذا فان نظرية نيوتن تعتبر نظرية محدودة.

في العام 1905 عندما كان اينشتين يبلغ من العمر 26 عاما نشر نظريته عن النسبية الخاصة. حيث كتب اينشتين "نشأت النظرية النسبية من الضرورة الملحة، ومن التناقضات الخطيرة في النظرية الكلاسيكية والتي لا يوجد مفر منها. ان قوة النظرية الجديدة تقع في توافقها وبساطتها في حل كل هذه الصعوبات".

مع ان اينشتين قد قدم العديد من المشاركات الهامة للعلم، الا ان النظرية النسبية الخاصة بمفردها تمثل واحدة من اعظم الإنجازات الرائعة على مر العصور. مع هذه النظرية يمكن توقع النتائج العملية بشكل صحيح على مدى السرعات من $v = 0$ إلى سرعات تقترب من سرعة الضوء. عند السرعات المنخفضة فان النظرية النسبية لاينشتين تحتزل إلى ميكانيكا نيوتن كحالة خاصة ومن هنا تعتبر النظرية النسبية اشمل واعم. من المهم ان نشير إلى ان اينشتين كان يعمل على النظرية الكهرومغناطيسية عندما طور النظرية

النسبية الخاصة. لقد كان مقتنعا تماما بان معادلات ماكسويل صحيحة، وتتوافق مع واحدة من فرضياته، وهذا أدى به لان يفترض ان المكان والزمان ليسا مطلقين.

يقدم هذا الفصل فكرة مبسطة عن النظرية النسبية الخاصة مع التركيز على بعض نتائجها. بالإضافة إلى ان النظرية النسبية لها دور هام ومعروف في الفيزياء النظرية، فان النظرية النسبية الخاصة لها تطبيقات عملية تشتمل على تصميم محطات الطاقة النووية وأنظمة تحديد المواقع العالمي والذي يعرف باختصار GPS (Global Positioning System). هذه الأجهزة تعتمد على مبدأ النسبية للحصول على تصميم مناسب وأداء دقيق.



تمثال ضخيم لآينشتاين في واشنطن.

1.1 مبدأ النسبية لجاليليو The Principle of Galilean Relativity

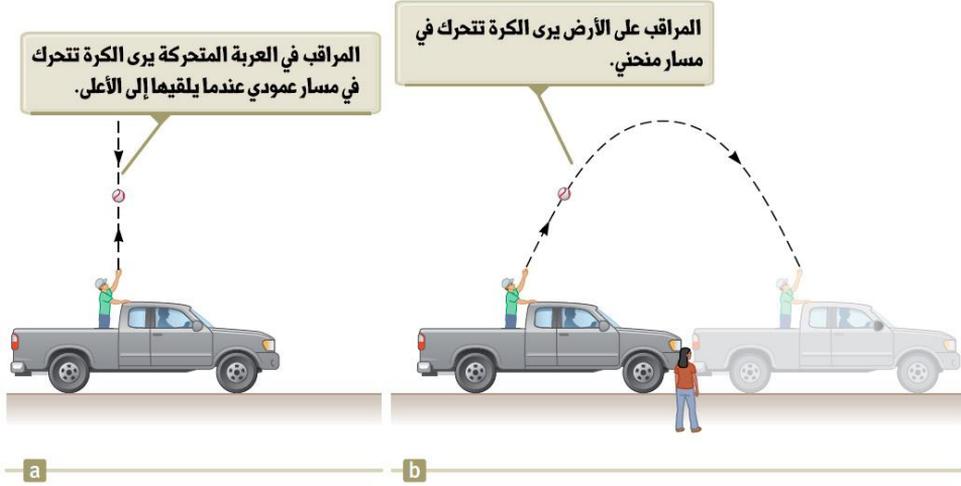
لوصف أي حدث فيزيائي علينا في البداية ان ننشئ محور اسناد مرجعي "محور الاسناد المرجعي القصوربي هو نظام احداثيات اما ان يكون في حالة سكون أو في حالة حركة بسرعة منتظمة أي لا يكون له تسارع وهو محور الاسناد الذي لا يكون للجسم تسارع عندما لا تؤثر عليه قوة. علاوة على ان أي محور اسناد مرجعي يتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة لمحور الاسناد المرجعي القصوربي يجب ان يكون أيضا محور اسناد مرجعي قصوربي.

لا يوجد محور اسناد قصوربي مطلق. لهذا فان نتائج تجربة أجريت في عربة متحركة بسرعة منتظمة يجب ان تكون مشابهة تماما لنتائج نفس التجربة أجريت في عربة ساكنة. الصيغة الرسمية لهذه النتيجة تعرف باسم مبدأ النسبية لجاليليو:

يجب ان تكون قوانين الميكانيكا هي نفسها في كل محاور الاسناد القصوربية.

دعنا نعتبر تجربة تشرح تكافؤ قوانين الميكانيكا في محاور اسناد قصورية مختلفة. العربة في الشكل 1.1 a تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة إلى الأرض. اذا قام مراقب داخل العربة بقذف كرة للأعلى، وبإهمال تأثير سرعة الرياح فان المراقب سوف يلاحظ ان الكرة تتحرك في مسار رأسي. ان نفس مسار حركة الكرة سوف يكون هو نفسه تماما لو ان الكرة قذفت بواسطة مراقب ساكن على الأرض. قانون الجذب العام ومعادلات الحركة تحت تأثير سرعة ثابتة متحققة سواء كانت العربة في حالة سكون او في حالة حركة بسرعة منتظمة. اعتبر أيضا مراقب على الأرض كما هو في الشكل 1.1 b. كلا المراقبين متفقين على قوانين الفيزياء: قذف المراقب في العربة كرة إلى الأعلى، فترتفع إلى الأعلى ومن ثم تهبط وتعود إلى يده.

هل يتفق المراقبان على مسار الكرة التي قذفها المراقب في العربة؟ المراقب الساكن على الأرض يرى مسار الكرة على شكل منحنى كما هو موضح في الشكل 1.1 b، بينما المراقب داخل العربة سوف يرى الكرة تتحرك في مسار رأسي. علاوة على ذلك وطبقا للمراقب على الأرض فان الكرة تمتلك مركبة أفقية للسرعة تساوي سرعة العربة. كما ان المراقبين



الشكل 1.1 مراقبان يرصدان مسار كرة قذفت إلى الأعلى، وقد حصلنا على نتائج مختلفة.

يختلفان في بعض الجوانب لهذه الحالة، انهما يتفقان على صحة قوانين نيوتن وعلى المبادئ الكلاسيكية للحفاظ على الطاقة وكمية الحركة الخطية. هذا الاتفاق بينهما يؤدي إلى انه لا يوجد تجربة ميكانيكية يمكن ان ترصد أي فرق بين محوري الاسناد القصوريين. الامر الوحيد الذي يمكن ان يتم رصده هو الحركة النسبية لمحور اسناد بالنسبة للأخر.

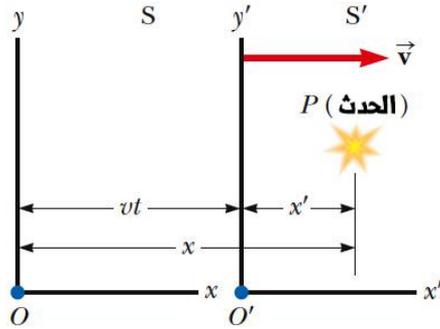
سؤال للتفكير 1.1

أي من المراقبين في الشكل 1.1 يرى المسار الصحيح للكرة؟ (a) المراقب في العربة (b) المراقب على الأرض (c) كلا المراقبين.

افتراض حدوث بعض الظواهر الفيزيائية، والتي سوف نطلق عليها مصطلح "حدث"، والتي يتم رصدها من قبل مراقب في حالة سكون في محور اسناد مرجعي قصوري. ان كلمة في محور اسناد مرجعي تعني ان المراقب يكون في حالة سكون بالنسبة لنقطة اصل هذا المحور. يمكن ان نحدد موضع الحدث وزمن حدوثه بواسطة أربعة احداثيات هي (x, y, z, t) . اننا نرغب في ان نكون قادرين على تحويل هذه الاحداثيات من مراقب في

محور اسناد قصوري إلى مراقب آخر في محور اسناد متحرك بسرعة منتظمة بالمقارنة مع محور الاسناد الأول.

اعتبر محوري اسناد قصورين S و S' كما هو موضح في الشكل 2.1. يتحرك محور الاسناد S' بسرعة ثابتة \vec{v} على امتداد المحور المشترك بين x و x', حيث ان \vec{v} تقاس بالنسبة إلى S. لنفترض ان نقطة الأصل لـ S و S' تتطابقان عند $t = 0$ ويحدث حدث عند النقطة P في الفراغ عند لحظة ما من الزمن. للتبسيط سوف نظهر المراقب O في محور اسناد S والمراقب O' في محور اسناد S' كنقطتين باللون الأزرق عند نقطة الأصل لحدثيات محاوريهما كما في الشكل 2.1، لكن هذا ليس ضروريا: أي من المراقبين يمكن ان يكون عند أي موضع ثابت في محور اسناده. يصف المراقب O الحدث باحداثيات المكان والزمان (x, y, z, t) ، بينما يصف المراقب O' في S' باستخدام الاحداثيات (x', y', z', t') لوصف نفس الحدث. كما سوف نرى من الشكل الهندسي في الشكل 2.1، فان العلاقة بين هذه الاحداثيات المختلفة تكتب على النحو التالي:



الشكل 2.1 يحدث حدث عند النقطة P. يرصد هذا الحدث بواسطة مراقبين في محوري اسناد S و S'، حيث ان S' يتحرك بسرعة \vec{v} بالنسبة إلى S.

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t \quad (2.1)$$

تعرف هذه المعادلات بمعادلات تحويلات المكان والزمان لجاليليو. لاحظ اننا افترضنا ان الزمن هو نفسه في كلا محوري الاسناد. هذا يعني ان كل الساعات في الميكانيكا الكلاسيكية تعمل كلها بنفس المعدل، بغض النظر عن سرعتها، لذا فان زمن حدوث

حدث بالنسبة لمراقب في S يكون هو نفس الزمن لنفس الحدث بالنسبة للمراقب في S'. نتيجة لذلك فان الفترة الزمنية بين حدثين متعاقبين يجب ان تكون متساوية لكلا المراقبين. بالرغم من ان هذا الافتراض يبدو واضحا، الا انه غير صحيح في حالات عندما تكون v قريبة من سرعة الضوء.

الان افترض ان جسيم يتحرك خلال إزاحة مقدارها dx على امتداد المحور x في فترة زمنية مقدارها dt كما قيست بواسطة المراقب في محور الاسناد S. من المعادلة 1.1 فان الازاحة المقابلة dx' المقاسة بواسطة المراقب في محور الاسناد S' تكون $dx' = dx - vdt$ ، حيث ان S' يتحرك بسرعة v في اتجاه محور x بالنسبة إلى محور اسناد S. حيث ان $dt = dt'$ نجد ان

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

أو

$$u'_x = u_x - v \quad (1.2)$$

حيث ان u'_x و u_x هما المركبتين على المحور x لسرعة الجسيم مقاسة بواسطة المراقب S والمراقب S' على التوالي. (لقد استخدمنا الرمز u كسرعة الجسيم بدلا عن الرمز v المستخدم للسرعة النسبية بين محوري الاسناد). تعتبر المعادلة 2.1 معادلة تحويل السرعة لجاليليو. انها تتفق مع ملاحظتنا اليومية للزمن والمكان. سوف نرى بعد قليل انها تؤدي إلى تناقض خطير عندما نطبقها على الأمواج الكهرومغناطيسية.

ملاحظة حول العلاقة بين S و S': التمثيلات الرياضية المستخدمة في هذا الفصل تكون حقيقية فقط لعلاقة محددة بين محوري اسناد S و S'. تتطابق المحورين x و x' مع بعضهما البعض ما عدا نقطة الأصل تكون مختلفة. المحورين y و y' (والمحورين z و z') يكونا متوازيين الا انهما يتطابقان عند لحظة محددة بسبب الازاحة المتغيرة مع الزمن لنقطة اصل S' بالنسبة إلى S. كما اننا نختار الزمن $t = 0$ هو الزمن الذي يحدث عنده تطابق لنقطتي اصل S مع S'. اذا كان محور الاسناد S' يتحرك في اتجاه محور x الموجب بالنسبة إلى محور الاسناد S فان السرعة v تكون موجبة، والعكس تكون سالبة.

سؤال للتفكير 2.1

يقذف لاعب بيسبول كرة بسرعة 90 km/h عندما كان واقفا على قطار متحرك بسرعة 110 km/h. علما بان الكرة قذفت في نفس اتجاه حركة القطار. اذا قمنا بتطبيق معادلة تحويل سرعة جاليليو، هل تكون سرعة الكرة بالنسبة للأرض هي (a) 90 km/h (b) 110 km/h (c) 20 km/h (d) 200 km/h أو (e) غير قابلة للتحديد؟

سرعة الضوء The Speed of Light

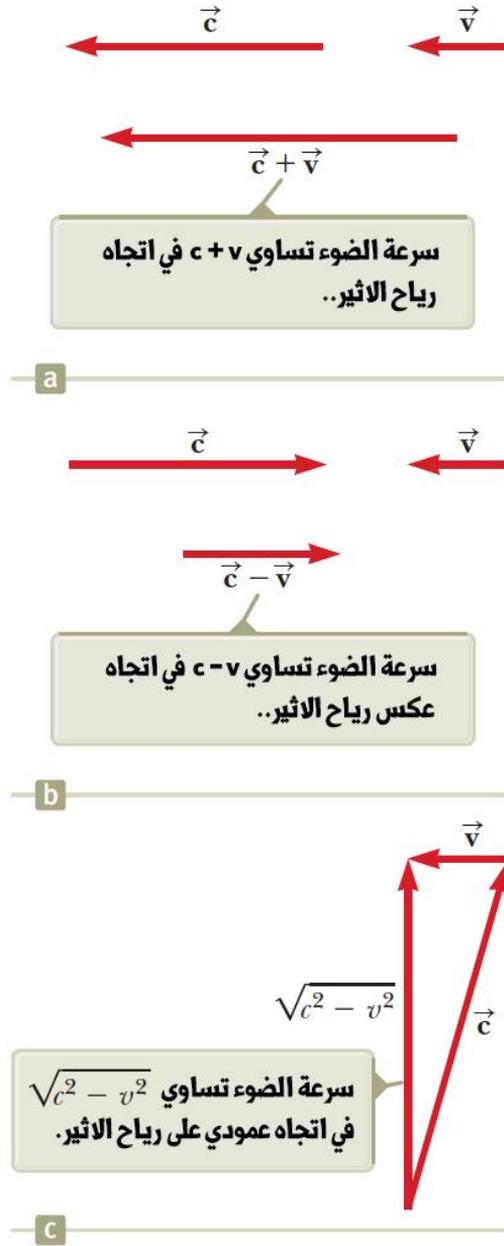
من الطبيعي جدا ان نسأل اذا ما كان مبدأ النسبية لجاليليو يطبق أيضا على الكهربائية والمغناطيسية والضوء. في الحقيقة تشير التجارب العملية إلى ان الإجابة لا. فلقد تبين من اعمال ماكسويل ان سرعة الضوء في الفراغ هي مقدار ثابت وتكون $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. اعتقد الفيزيائيون في أواخر القرن التاسع عشر ان أمواج الضوء تتحرك خلال وسط اطلقوا عليه اسم الاثير ether وسرعة الضوء هي c فقط في محور اسناد مطلق وخاص في حالة سكون بالنسبة إلى الاثير. وكان من المتوقع ان تتحقق معادلة تحويل سرعة جاليليو لرصد الضوء من خلال مراقب في أي محور اسناد يتحرك بسرعة v بالنسبة لمحور الاسناد المطلق الاثير. أي اذا كان الضوء يتحرك على امتداد محور x ويتحرك المراقب بسرعة v على امداد محور c ، فان المراقب سوف يقيس سرعة الضوء هي $c \pm v$ ، بالاعتماد على اتجاه حركة المراقب واتجاه الضوء.

حيث ان وجود محور اسناد مرجعي مفضل ومطلق فانه سوف يظهر ان الضوء مشابه لأية أمواج كلاسيكية وان أفكار نيوتن حول محور الاسناد المطلق سوف تكون صحيحة ويعتبر هام جدا في وجود محور اسناد الاثير. قبل نهاية القرن التاسع عشر، لم تتمكن التجارب العملية التي اشتملت على قياس سرعة الضوء في وسط متحرك بأقصى سرعة ممكنة في ذلك الوقت ان ترصد أي فروقات حتى لو صغيرة جدا بين c و $c \pm v$ ، لذا قرر العلماء في مطلع العام 1889 استخدام الكرة الأرضية كمحور اسناد متحرك في محاولة لتحسين فرصة رصد أي فروقات صغيرة في سرعة الضوء.

يمكن اعتبار مراقب على الأرض كاجسام ساكنة بالنسبة للأرض، وان الاثير هو محور

الاسناد المطلق والذي يشتمل على الوسط الذي ينتشر فيه الضوء ويتحرك بالنسبة للمراقب بسرعة v . ان فكرة قياس سرعة الضوء في ظل هذه الظروف يكون مشابه لقياس سرعة طائرة تتحرك في تيار هوائي أو رياح، ونتيجة لذلك نقول ان رياح الاثير تتحرك عبر أدوات الرصد الثابتة على الأرض.

يعتبر استخدام أجهزة ومعدات مثبتة على الأرض طريقة مباشرة لقياس تأثير رياح الاثير على سرعة الضوء. اذا كانت v هي سرعة الاثير بالنسبة إلى الأرض، فان اقصى سرعة للضوء يجب ان تكون $c+v$ عندما ينتشر الضوء في اتجاه رياح الاثير كما هو موضح في الشكل 3.1 a. بالمثل يكون للضوء اقل سرعة $c-v$ عندما ينتشر الضوء في اتجاه معاكس لرياح الاثير كما هو موضح في الشكل 3.1 b والقيمة المتوسطة هي $(c^2-v^2)^{1/2}$ عندما يكون اتجاه الضوء عموديا على اتجاه رياح الاثير كما هو موضح في الشكل 3.1 c. في الحالة الأخيرة فان المتجه \vec{c} يجب ان



الشكل 3.1 اذا كانت سرعة رياح الاثير بالنسبة للأرض هي \vec{v} وسرعة الضوء بالنسبة للاثير هي \vec{c} ، فان سرعة الضوء بالنسبة للأرض تعتمد على اتجاه سرعة الأرض.

يوجه ضد التيار حتى تكون السرعة المحصلة عمودية على رياح الاثير. اذا افترضنا ان الشمس في حالة سكون بالنسبة للاثير فان سرعة رياح الاثير سوف تساوي السرعة المدارية للأرض حول الشمس، والتي لها مقدار يساوي تقريبا 30km/s أو $3 \times 10^4 \text{ m/s}$. حيث ان سرعة الضوء هي $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ، لذا فانه من الضروري ان يتم رصد تغير في السرعة يعادل جزء في الـ 10^4 للفرق في قياسات سرعة الضوء عندما يكون انتشاره في نفس اتجاه رياح الاثير وعندما يكون في عكس الاتجاه. بالرغم من ان هذا المقدار الصغير يمكن قياسه الا ان كل المحاولات لرصد مثل هذه التغيرات التي تؤكد وجود تأثير لرياح الاثير على سرعة الضوء، وبالتالي وجود محور الاسناد المطلق اثبتت انها كلها خاطئة! سوف نناقش التجربة الكلاسيكية للاثير في الفصل 2.1.

مبدأ النسبية لجاليليو يشير فقط إلى قوانين الميكانيكا. اذا افترض ان قوانين الكهربية والمغناطيسية هي نفسها لكل محاور الاسناد القصورية، فان المعضلة المتعلقة بسرعة الضوء تظهر على الفور. يمكن ان نفهم هذا من خلال اعتبار معادلات ماكسويل التي تفترض ضمنا ان سرعة الضوء دائما لها قيمة ثابتة وتساوي $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ في كل محاور الاسناد القصورية، وهذا يعني تناقضا مباشرا مع ما كان متوقعا بالاعتماد على معادلة تحويل السرعة لجاليليو. طبقا لنسبية جاليليو فان سرعة الضوء يجب ان لا تكون ثابتة في كل محاور الاسناد القصورية.

لحل هذا التناقض في النظريتين، يجب ان نستنتج اما ان (1) قوانين الكهربية والمغناطيسية ليست واحدة في كل محاور الاسناد القصورية أو ان (2) معادلة تحويل السرعة لجاليليو غير صحيحة. اذا افترضنا البديل الأول، فان محور اسناد مرجعي مفضل تكون فيه سرعة الضوء لها القيمة c وان السرعة المقاسة للضوء يجب ان تكون أكبر أو أقل من هذه القيمة في أي محور اسناد مرجعي اخر، طبقا لمعادلة تحويل السرعة لجاليليو. اذا افترضنا البديل الثاني، يجب ان نتخلى عن مصطلح الزمن المطلق والطول المطلق والتي تعتبر الأساس لمعادلات تحويلات المكان والزمان لجاليليو.

2.1 تجربة ميكلسون – مورلي The Michelson-Morley Experiment

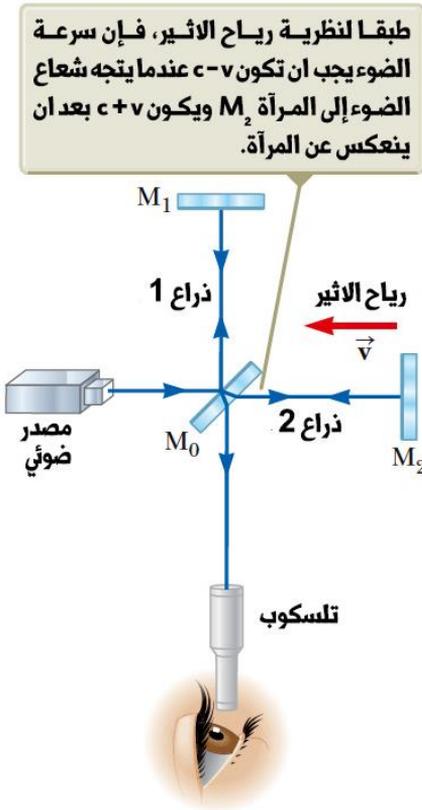
أجريت التجربة الأكثر شهرة والتي صممت خصيصا لرصد التغيرات الصغيرة في سرعة الضوء في العام 1981 بواسطة العالم ميكلسون Michelson واعيدت التجربة بعد ذلك تحت ظروف مختلفة بواسطة ميكلسون ومورلي. الا ان نتائج هذه التجربة تتناقض مع فرضية الاثير كما سوف نرى ذلك فيما يلي.

تم تصميم تجربة ميكلسون - مورلي لتحديد سرعة الأرض بالنسبة للاثير الافتراضي. استخدم لهذه التجربة مقياس تداخل ميكلسون والموضح في الشكل 4.1. وجه الذراع 2 على امتداد اتجاه حركة الأرض في الفضاء. تتحرك الأرض عبر الاثير بسرعة v وهي نفس السرعة التي يتحرك بها الاثير بالنسبة للأرض في اتجاه معاكس للسرعة v . تهب رياح الاثير في اتجاه يعاكس اتجاه حركة الأرض مما يجعل قياس سرعة الضوء في محور اسناد الأرض هو $c - v$ عندما يقترب الضوء من المرآة M_2 ويكون $c + v$ بعد الانعكاس عنها، حيث ان c هي سرعة الضوء في محور اسناد الاثير.

ينعكس شعاعي الضوء عن المرآتين M_1 و M_2 ويتحدان وينتج عنها اهداب تداخل. يتم رصد اهداب التداخل اثناء دوران الأرض بزاوية 90° . يعمل هذا الدوران على تغير سرعة رياح الاثير بين ذراعي مقياس التداخل. هذا الدوران يجب ان يتسبب في حدوث انزياح لاهداب التداخل! كان من المتوقع ان يحدث تغير في مقدار واتجاه رياح الاثير مع دوران الأرض، لكن النتائج كانت هي نفسها دون حدوث أي تغير: لم يحدث أي انزياح في اهداب التداخل كما كان متوقعا.

النتائج السلبية لتجربة ميكلسون - مورلي لم تتعارض مع فرضية الاثير فحسب بل انها اثبتت انه من المستحيل قياس السرعة المطلقة للأرض بالنسبة لمحور اسناد الاثير. هنا قدم العالم اينشتين فرضية النظرية النسبية الخاصة التي أعطت تفسير مختلفا للنتائج السلبية. في الأعوام الأخيرة تم اكتشاف المزيد من المعلومات حول طبيعة الضوء التي اكدت ان فكرة الاثير كانت مجرد فرضية خيالية ليس لها أي أساس علمي. يعرف الضوء الان على انه أمواج كهرومغناطيسية لا يحتاج إلى وسط لينتشر فيه. نتيجة لذلك أصبحت فرضية الاثير لا ضرورة لها.

تفاصيل حول تجربة ميكلسون - مورلي Details of the Michelson-Morley Experiment



الشكل 4.1 مقياس ميكلسون للتداخل الذي استخدم لرصد رياح الاثير.

لفهم نتائج تجربة ميكلسون - مورلي دعنا نفترض ان ذراعي التداخل في الشكل 4.1 لهما نفس الطول L . سوف نقوم بتحليل هذه الحالة كما لو انها في رياح الاثير لان هذا كان هو هدف تجربة ميكلسون - مورلي. كما ذكرنا أعلاه فان سرعة الضوء على امتداد الذراع 2 يجب ان يكون $c-v$ عندما يكون اتجاه الضوء نحو المرآة M_2 ويكون $c+v$ بعد ان ينعكس عنها. سوف نقوم بنمذجة نبضة الضوء كجسيم يتحرك بسرعة ثابتة. لهذا فان الفترة الزمنية اللازمة لانتقال النبضة الضوئية إلى اليمين هي $\Delta t = L/(c - v)$ والفترة الزمنية اللازمة لانتقال الضوء إلى اليسار $\Delta t = L/(c + v)$. فان الفترة الزمنية الكلية لرحلة كاملة للضوء على امتداد الذراع 2 يكون على النحو التالي:

$$\Delta t_{arm2} = \frac{L}{c + v} + \frac{L}{c - v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

اعتبر الان ان شعاع الضوء ينتقل على امتداد الذراع 1 عموديا على اتجاه رياح الاثير. حيث ان سرعة الشعاع بالنسبة للأرض تكون في هذه الحالة $(c^2 - v^2)^{1/2}$ كما هو موضح في الشكل 3.1، وعليه فان انتقال الضوء في كل نصف دورة يتطلب فترة زمنية قدرها $\Delta t = L/(c^2 - v^2)^{1/2}$ والفترة الزمنية الكلية للدورة الكاملة تكون على النحو التالي:

$$\Delta t_{arm1} = \frac{2L}{(c^2 - v^2)^{1/2}} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

الفارق الزمني بين الرحلة الافقية على الذراع 2 والرحلة الرأسية على الذراع 1 يكون

$$\Delta t = \Delta t_{arm2} - \Delta t_{arm1} = \frac{2L}{c} \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \right]$$

حيث ان $v^2/c^2 \ll 1$ يمكننا ان نبسط هذه الصيغة باستخدام العلاقة التالية

$$(1 - x)^n \approx 1 - nx$$

عندما تكون $x \ll 1$

$$\Delta t = \Delta t_{arm2} - \Delta t_{arm1} \approx \frac{Lv^2}{c^3} \quad (1.3)$$

هذا هو الفارق الزمني بين رحلتي الضوء على الذراعين والذي ينتج عنه اختلاف في الطور بين الشعاعين مما يتسبب في حدوث اهداب تداخل على تلسكوب الرصد. يجب ان يتم رصد انزياح في اهداب التداخل عندما يدور مقياس ميكلسون للتداخل مع الأرض بزاوية مقدارها 90° في مستوى افقي حيث يحدث تبادل لمواقع الشعاعين. ينتج عن هذا الدوران اختلاف في الزمن يعادل ضعفي الفارق الزمني المعطى بواسطة المعادلة 3.1. لهذا فان فرق المسار الناتج عن الفارق الزمني يساوي

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

حيث ان تغير طول المسار بمقدار طول موجي واحد يسبب انزياح في اهداب التداخل بمقدار هدبة واحدة فان عدد الاهداب المزاحة يقابل اختلاف طول المسار مقسوما على الطول الموجي للضوء أي ان

$$\text{الانزياح} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2} \quad (1.4)$$

في تجربة ميكلسون مورلي انعكس كل شعاع ضوئي عن المرايا عدة مرات ليعطي طول المسار مناسب وكانت قيمته تقدر بـ 11 متر. باستخدام هذه القيمة وبالتعويض عن السرعة v بـ 3.0×10^4 m/s (سرعة دوران الأرض حول الشمس) وباستخدام 500 nm للطول الموجي للضوء، فاننا نتوقع ان نحصل على انزياح في الاهداب مقداره

$$\text{الانزياح} = \frac{2(11m)(3.0 \times 10^4 m/s)^2}{(5.0 \times 10^{-7}m)(3.0 \times 10^8 m/s)^2} = 0.44$$

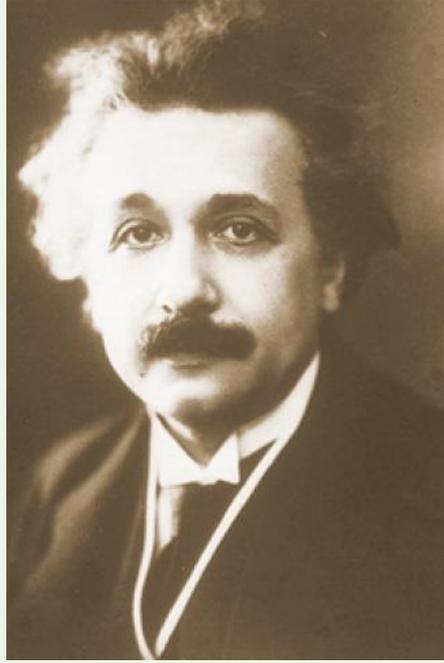
المعدات التي استخدمت بواسطة ميكلسون ومورلي لها القدرة على رصد انزياح صغير جدا يصل إلى 0.01 هدبة ولكن لم يتم رصد أي انزياح في اهداب التداخل! لقد اعيدت التجربة عدة مرات في ظروف مختلفة وأيضا لم يتم رصد أي انزياح في اهداب التداخل. لهذا استنتج ان حركة الأرض بالنسبة للاثير لا يمكن رصدها.

لقد بذلت الكثير من الجهد لشرح هذه النتائج السلبية لتجربة ميكلسون - مورلي مع الحفاظ على مبدأ الاثير ومعادلة تحويل السرعة لجاليليو. كل الفرضيات التي وضعت كانت خاطئة. تعد تجربة ميكلسون مورلي من اشهر التجارب التي جذبت اهتمام منقطع النظير في تاريخ الفيزياء حتى جاء العالم اينشتين وقدم الحل في العام 1905 من خلال النظرية النسبية الخاصة.

3.1 مبدأ النسبية لاينشتين Einstein's Principle of Relativity

لاحظنا في الفصل السابق استحالة قياس سرعة الاثير بالنسبة للأرض وفشل معادلة جاليليو لتحويل السرعة في حالة الضوء. قدم اينشتين نظريته كحلا جريئا أزال هذه الصعوبات وفي نفس الوقت غير مفاهيمنا للمكان والزمان. لقد أسست النظرية النسبية الخاصة على فرضيتين هما:

1. مبدأ النسبية: قوانين الفيزياء يجب ان تكون نفسها في كل محاور الاسناد المرجعية القصورية.
2. ثبات سرعة الضوء: ان سرعة الضوء في الفراغ لها نفس القيمة $c = 3.00 \times 10^8$ m/s في كل محاور الاسناد القصورية، بغض النظر عن سرعة المراقب او سرعة المصدر الباعث للضوء.



ألبرت أينشتاين Albert Einstein
فيزيائي ألماني أمريكي (1879 - 1955)

أينشتاين هو واحد من أعظم الفيزيائيين على مر العصور، ولد في ألمانيا. في العام 1905 عندما كان يبلغ من العمر 26 عاماً نشر أربعة أبحاث علمية طورت الفيزياء. اثنين من هذه البحوث تتعلق بأهم أعماله وهي النظرية النسبية الخاصة. في العام 1916 نشر أينشتاين بحثه حول النظرية النسبية العامة. أكثر التوقعات التي جاءت في النظرية النسبية العامة هي انحراف الضوء تحت تأثير مجال الجاذبية. وجدير بالذكر أن أينشتاين قضى آخر عقدين من عمره في محاولته وضع نظرية المجال الموحد لربط المجال الكهرومغناطيسي مع مجال الجاذبية الأرضية ولكن لم تكمل محاولاته بالنجاح.

تنص الفرضية الأولى على أن كل قوانين الفيزياء والتي تتعامل مع الميكانيكا والكهربية والمغناطيسية والضوء والديناميكا الحرارية وغيرها تكون نفسها في كل محاور الاسناد المرجعية التي تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض. هذه الفرضية هي تعميم لمبدأ جاليليو للنسبية والذي يشير فقط إلى قوانين الميكانيكا. من وجهة نظر عملية فإن مبدأ

اينشتين للنسبية يعني ان أي نوع من التجارب التي تجرى في المختبر في حالة سكون لقياس سرعة الضوء على سبيل المثال في حالة سكون يجب ان تعطي نفس النتيجة عندما تجرى في مختبر متحرك بسرعة ثابتة بالنسبة للحالة الأولى. وعليه فانه لا يوجد محور اسناد مرجعي قصوري مميز، وكذلك فانه من المستحيل ان يكون هناك حركة مطلقة.

لاحظ ان الفرضية 2 متعلقة بالفرضية 1: اذا لم تكون سرعة الضوء هي نفسها في كل محاور الاسناد القصورية فان قياس سرعات مختلفة للضوء سوف يجعل بالإمكان ان نميز بين محاور الاسناد القصورية. ونتيجة لذلك يمكن ان نحدد محور اسناد مطلق وهذا يتعارض مع الفرضية الأولى.

بالرغم من ان تجربة ميكلسون-مورلي قد أجريت قبل ان يقوم اينشتين بنشر ابحاثه حول النسبية الخاصة، الا انه ليس من الواضح ان اينشتين كان يعلم بتفاصيل التجربة. ومع هذا فان النتائج السلبية للتجربة يمكن ان تفهم بوضوح من خلال نظرية اينشتين. طبقاً لمبدأ النسبية فان أساس تجربة ميكلسون-مورلي لم يكن صحيحاً. في محاولة شرح النتائج المتوقعة فاننا نقول عندما يتحرك الضوء عكس رياح الاثير فان سرعته سوف تكون طبقاً لمعادلة تحويل السرعة لجاليليو هي $c - v$. اذ لم يكن لحالة حركة المراقب او المصدر تأثير على القيمة التي وجدت لسرعة الضوء حيث حصلنا على مقدار ثابت لقياس سرعة الضوء وهو c . بالمثل يقوم الضوء بعمل دورة كاملة بعد ان ينعكس عن المرآة بسرعة c وليس بسرعة $c + v$. لهذا فان حركة الأرض لا تؤثر على اهداب التداخل التي تظهر من تجربة ميكلسون-مورلي، ويتوقع في هذه الحالة الحصول على نتائج سلبية.

اذا قبلنا بنظرية اينشتين للنسبية فاننا نستنتج ان الحركة النسبية غير مهمة عندما نقوم بقياس سرعة الضوء. في نفس الوقت علينا ان نغير مفاهيمنا الأساسية حول المكان والزمان ونكون على استعداد لتقبل المزيد من النتائج المدهشة. في الصفحات القادمة تذكر ان الأفكار الأساسية هي عبارة عن مفاهيم تعتمد بالأساس على خبرتنا اليومية وليست مبنية على اجسام متحركة بسرعة مئات الالاف من الكيلومترات لكل ثانية. لهذا فان هذه النتائج سوف تبدو لنا غريبة لعدم خبرتنا بها.

4.1 نتائج النظرية النسبية الخاصة Consequences of the Special Theory of Relativity

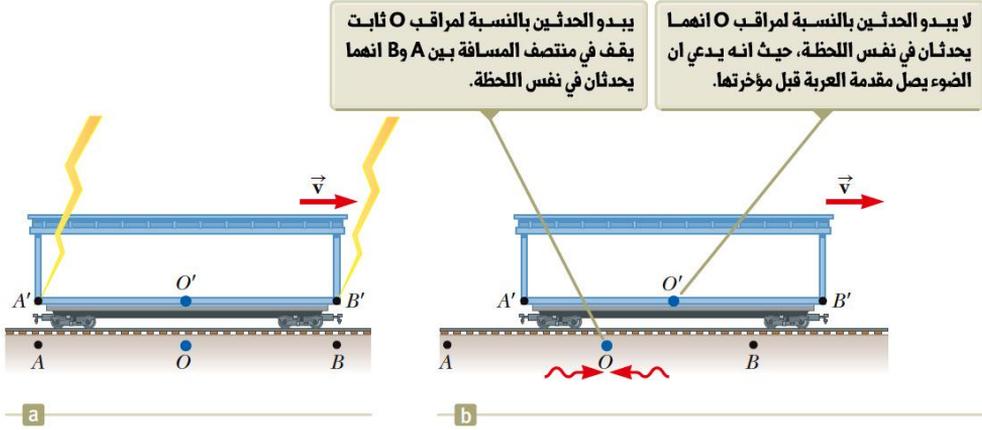
سوف نقوم بمناقشة بعض نتائج النظرية النسبية وسوف نركز مناقشتنا على مفاهيم الآنية أو اللحظية والفترات الزمنية والاطوال، كل هذه الكميات الفيزيائية الثلاثة مختلفة تماما في الميكانيكا النسبية عن ما نعرفه عنها من خلال ميكانيكا نيوتن. في الميكانيكا النسبية على سبيل المثال تكون المسافة بين نقطتين والفترة الزمنية بين حدثين تعتمد على محور الاسناد المرجعي الذي تمت بواسطته القياسات.

الآنية أو اللحظية ونسبية الزمن Simultaneity and the Relativity of Time

الفرضية الأساسية لميكانيكا نيوتن هي ان مقياس الزمن العالمي لا يتغير لكل المراقبين. لقد اعتبر نيوتن واتباعه من العلماء ان مفهوم الآنية امرا لا نقاش فيه. الا ان النظرية النسبية الخاصة خالفت هذه الفرضية.

ابدع اينشتين في التجربة التخيلية التالية لشرح هذه النقطة. لقد افترض عربة تتحركة بسرعة منتظمة، وصدمت مقدمة العربة ومؤخرتها نبضتين ضوئيتين كما هو موضح في الشكل 5.1 a، مما تركت علامة على العربة وعلى الأرض. اذا افترضنا ان العلامة على مقدمة العربة ومؤخرتها هي A' و B' وعلى الأرض هي A و B . اذا افترضنا مراقب O' يتحرك مع العربة وكان في وسط المسافة بين A' و B' ، ومراقب اخر O في وسط المسافة بين A و B . الحدثين الذان يسجلهما كلا من المراقبين هما اصطدام النبضتين الضوئيتين بالعربة.

تصدر إشارة ضوئية من عند العلامتين A و B عند اللحظة التي تصطدم فيها النبضتين الضوئيتين مقدمة ومؤخرة العربة ومن ثم تصل إلى المراقب O في نفس الوقت كما هو موضح في الشكل 5.1 b. يلاحظ المراقب O ان الاشارتين تتحركان بنفس السرعة مسافتين متساويتين وبالتالي فانها تصلان للمراقب في نفس اللحظة ونستنتج هنا ان الحدثين عند العلامتين A و B تحدثان في نفس اللحظة بالنسبة للمراقب O .



الشكل 5.1 (a) اشارتين ضوئيتين تصطدمان بمقدمة ومؤخرة عربة متحركة. (b) الإشارة الضوئية المتحركة ناحية اليسار تمر عبر المراقب O، بينما الإشارة الضوئية المتحركة ناحية اليمين لم تعبر المراقب O' بعد.

لنعتبر الان نفس الحدثين كما يرصدهما المراقب O'. في الفترة الزمنية التي استغرقتها الاشارتين للوصول إلى المراقب O، يكون المراقب O' قد تحرك مسافة كما هو موضح في الشكل 5.1 b. لهذا فان الإشارة من عند العلامة B' قد مرت عن المراقب O'، لكن الإشارة الصادرة عند العلامة A' لم تصل إلى المراقب O'.

بمعنى ان المراقب O' يرصد الإشارة عند العلامة B' قبل ان يرصدها عند العلامة A'. طبقا لاينشتين تكون سرعة الإشارة الضوئية بالنسبة للمراقبين لها نفس القيمة. لهذا يستنتج المراقب O' ان الإشارة الضوئية التي تصدم مقدمة العربة قبل الإشارة الضوئية الأخرى.

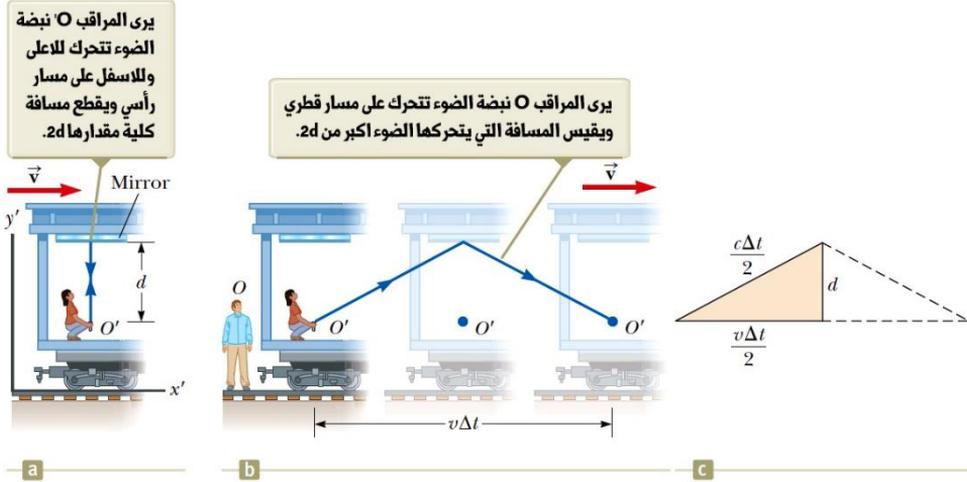
هذه التجربة الافتراضية تشرح بوضوح ان حدثين يحدثان في نفس اللحظة بالنسبة للمراقب O ولكن لا يحدثان في نفس اللحظة بالنسبة للمراقب O'. معنى ذلك ان الآنية ليست مطلقة ولكنها تعتمد على حالة الحركة للمراقب. تشرح تجربة اينشتين الافتراضية ان مراقبين يمكن ان يختلفان حول آنية أو لحظة حدثين.

ملاحظة أي من المراقبين صحيحا؟ ربما تتساءل أي من المراقبين في الشكل 5.1 يكون صحيحا في قياساته حول الاشارتين الضوئيتين. كلا المراقبين صحيحا لان مبدأ النسبية ينص على انه لا يوجد محور اسناد قصوري مفضل. بالرغم من ان المراقبين يتوصلان لاستنتاجين مختلفين، الا ان كلاهما صحيحا في محور اسناده لان مبدأ الآنية ليس مطلقا. هذا في الحقيقة يعتبر نقطة مركزية في النظرية النسبية: أي محور اسناد يتحرك بسرعة منتظمة يمكن ان يستخدم لوصف الاحداث وكذلك هي الفيزياء.

التأخير الزمني Time dilation

لشرح إمكانية ان يقوم مراقبين في محوري اسناد مرجعي مختلفين بقياس فترات زمنية مختلف لحدثين، اعتبر عربة تتحرك إلى اليمين بسرعة v كما هو موضح في الشكل 6.1 a. اعتبر ان هناك مرآة مثبتة في سقف العربة، والمراقب O' في حالة سكون في محور اسناد متصل مع العربة ويمسك مصباح ضوء فلاشي عند مسافة تبعد d اسفل المرآة. عند لحظة من الزمن يصدر المصباح نبضة ضوئية في اتجاه المرآة مباشرة (هذا هو الحدث رقم 1)، وبعد مرور فترة زمنية بعد انعكاس النبضة الضوئية عن المرآة، تصل النبضة إلى المصباح (وهذا هو الحدث رقم 2). يحمل المراقب O' ساعة ويستخدمها لقياس الفترة الزمنية Δt_p بين الحدثين. (الرمز السفلي p يشير إلى اول حرف من كلمة proper أي الاصيلي). سوف نقوم بنمذجة النبضة الضوئية كجسيم يتحرك بسرعة ثابتة. حيث ان النبضة الضوئية تتحرك بسرعة c ، فان الفترة الزمنية اللازمة للنبضة الضوئية لتتحرك من المراقب O' إلى المرآة والعودة مرة أخرى تكون على النحو التالي:

$$\Delta t_p = \frac{\text{المسافة}}{\text{السرعة}} = \frac{2d}{c} \quad (1.5)$$



الشكل 6.1 (a) مرآة مثبتة على سقف عربة متحركة، وتنتقل نبضة ضوئية بواسطة المراقب O' في حالة سكون في العربة. (b) بالنسبة إلى مراقب ثابت O يقف على الأرض خارج العربة، يلاحظ أن المرآة والمراقب O' يتحركان بسرعة v. (c) المثلث على اليمين لحساب العلاقة بين Δt_p و Δt .

الآن لنعتبر نفس الحدثين كما يرصدهما المراقب O في محور اسناد آخر في حالة سكون بالنسبة إلى الأرض كما هو موضح في الشكل 6.1 b. طبقاً لهذا المراقب فإن المرآة والمصباح الضوئي يتحركان إلى اليمين بسرعة v، والنتيجة أن تتابع الأحداث يظهر بشكل مختلف تماماً. في الفترة الزمنية التي يصل فيها الضوء إلى المرآة تكون قد تحركت إلى اليمين مسافة مقدارها $v\Delta t/2$ حيث أن Δt هي الفترة الزمنية اللازمة للضوء لينتقل من O' إلى المرآة ويعود إلى O' مرة أخرى كما يقيسه المراقب O. يستنتج المراقب O أن بسبب حركة العربة، فإن الضوء لكي يصل إلى المرآة فإنه يجب أن يترك المصباح الضوئي بزاوية بالنسبة إلى الاتجاه الرأسي. بمقارنة الشكل 6.1 a مع الشكل 6.1 b نجد أن الضوء يتحرك مسافة أكبر في الحالة (b) بالمقارنة مع الحالة (a). (لاحظ أن لا أحد من المراقبين يعرف أنه يتحرك. كل مراقب في حالة سكون في محور اسناده القصوربي).

طبقاً للفرضية الثانية للنظرية النسبية الخاصة فإن كلا المراقبين يجب أن يقيس سرعة النبضة الضوئية c. حيث أن الضوء يتحرك مسافة أكبر طبقاً لقياسات المراقب O فإن الفترة الزمنية Δt كما يقيسها المراقب O تكون أكبر من الفترة الزمنية Δt_p التي يقيسها

المراقب O'. للحصول على علاقة بين هاتين الفترتين الزمنتين، دعنا نقوم باستخدام المثلث الموضح في الشكل 6.1 c. من نظرية فيثاغورث نحصل على المعادلة التالية:

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

بالحل بالنسبة إلى Δt نحصل على ما يلي:

$$\Delta t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.6)$$

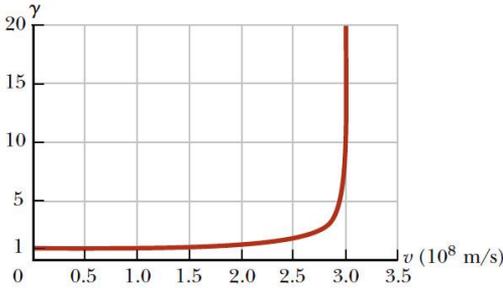
حيث ان $\Delta t_p = 2d/c$ ، يمكننا ان نعبر عن هذه النتيجة على النحو التالي:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_p \quad (1.7) \quad \text{معادلة التأخير الزمني}$$

حيث ان

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.8)$$

حيث ان γ تكون دائما اكبر من الوحدة، فان المعادلة (7.1) توضح ان الفترة الزمنية Δt



الشكل 7.1 منحنى γ مقابل السرعة v . عندما تصل السرعة إلى سرعة الضوء فان γ تزداد بشكل كبير

المقاسة بواسطة المراقب المتحرك بالنسبة للساعة اكبر من الفترة الزمنية Δt_p المقاسة بواسطة مراقب ثابت بالنسبة للساعة. هذا التأثير يعرف باسم التأخير الزمني time dilation.

اننا لا يمكن ان نلاحظ التأخير الزمني في حياتنا اليومية، وهذا امر مفهوما من خلال المعامل γ . حيث ان المعامل γ يأخذ قيما لا تساوي الواحد فقط في حالات السرعات العالية جدا كما هو موضح في الشكل 7.1 والجدول 1.1. على سبيل المثال لسرعة تصل

إلى $0.1c$ فان قيمة γ تساوي 1.005. لهذا فان التأخير الزمني يكون فقط بمقدار 0.5% عندما تكن السرعة تساوي 0.1 من سرعة الضوء. ان السرعات التي نتعامل معها في حياتنا اليومية اقل بكثير من $0.1c$ ، لذلك فاننا لن نلاحظ أي تأخير زمني في حياتنا العادية.

الجدول 1.1 قيم γ عند سرعات مختلفة

v/c	γ
0	1
0.0010	1.0000005
0.010	1.00005
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

اذا تحركت الساعة بالنسبة لك، فان الفترة الزمنية بين دقاتها سوف تبدو أطول من الفترة الزمنية بين دقات الساعة التي تكون في محور اسنادك (أي ثابتة بالنسبة لك). لهذا فاننا نقول ان الساعة المتحركة تكون دقاتها ابطء من الساعة التي في محور اسنادك بمعامل γ . لذا فاننا نقوم بتعميم هذه النتيجة بان نقول ان كل

العمليات الفيزيائية بما فيها الميكانيكية والكيميائية والبيولوجية تكون ابطء عندما تقاس هذه العمليات التي تحدث في محور اسناد متحرك بالنسبة للمراقب. على سبيل المثال دقات نبضات قلب رجل فضاء يتحرك في الفضاء تكون بمعدلها الطبيعي بالنسبة لساعة داخل المركبة الفضائية. كلا من ساعة المركبة الفضائية ودقات نبضات قلبه تتباطئ بالنسبة لساعة مراقب على الأرض مع ان رجل الفضاء لا يشعر ابدا ببطء في أي شيء يدور حوله في المركبة الفضائية.

سؤال للتفكير 3.3

افترض ان مراقب O' على قطار كما هو موضح في الشكل 6.1 يوجه فلاش ضوئي على مؤخرة القطار ويقوم بتشغيله واطفائه مما يرسل نبضات من الضوء في اتجاه جدار مؤخرة

القطار. كلا من O و O' يقيسان الفترة الزمنية بين مغادرة النبضة المصباح الضوئي وعندما تصل نهاية القطار. أي من المراقبين يقيس الزمن الاصيل بين هذين الحدثين؟ (a) المراقب O' (b) المراقب O (c) لا احد منهما.

سؤال للتفكير 4.1

طاقم من الفضائيين في مركبة فضاء يشاهدون فيلم مدته ساعتين. تتحرك المركبة الفضائية بسرعة عالية. هل مراقب على الأرض يشاهد شاشة عرض الفيلم في المركبة الفضائية باستخدام تلسكوب قوي سوف يقيس زمن عرض الفيلم (a) أطول من أو (b) اقصر من (c) او يساوي ساعتين.

التأخير الزمني هي ظاهرة حقيقية وقد تم التحقق منها عمليا من خلال عدة تجارب. واحدة من هذه التجارب التي قام بها كلا من هافيل J. C. Hafele و كيتينج R. E. Keating وقد أعطت دليلا مباشرا على التأخير الزمني. حيث تم قياس الفترات الزمنية بأربعة ساعات ذرية في طائرة نفاثة وقورنت النتائج مع الفترات الزمنية بواسطة ساعات ذرية مرجعية على الأرض. لمقارنة هذه النتائج مع النظرية، تم اعتبار العديد من العوامل، بما فيها التسارع والتباطؤ بالنسبة للأرض، والاختلافات في اتجاه الحركة ومجال الجاذبية الأرضية الضعيف الذي يؤثر على الساعات في الطائرة النفاثة بالمقارنة مع الساعات الأرضية. لقد تبين ان النتائج تتوافق بشكل جيد مع توقعات النظرية النسبية وقد تم شرحها بدلالة الحركة النسبية بين الأرض والطائرة النفاثة. في ورقتهم العلمية ذكر هافيل و كيتينج انه بالنسبة لمقياس الزمن الذري لمركز البحرية الامريكية فان الساعات المتحركة فقدت 59 ± 10 نانوثانية خلال حركتها في اتجاه الشرق واكتسبت 273 ± 7 نانوثانية خلال حركتها في اتجاه الغرب.

مثال اخر للتأخير الزمني يشتمل على رصد الميونات muons وهي جسيمات غير مستقر تمتلك شحنة تساوي شحنة الالكترتون وكتلته تساوي 207 مرة كتلة الالكترتون. تنتج الميونات من خلال تصادم الاشعة الكونية مع الذرات الموجودة في طبقات الغلاف

الجوي العالية. جسيمات الميونات المتحركة بسرعات قليلة جدا في المختبر تمتلك فترة بقاء وهو الزمن الاصيلي Δt_p (زمن بقاء الميون قبل ان يضمحل) ويساوي $2.2 \mu s$. اذا قمنا باعتبار ان الزمن $2.2 \mu s$ هو متوسط بقاء جسيم الميون وافترضنا ان الميون يتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فاننا نستطيع ان نحسب المسافة التي يتحركها الميون خلال فترة بقائه وهي تقريبا

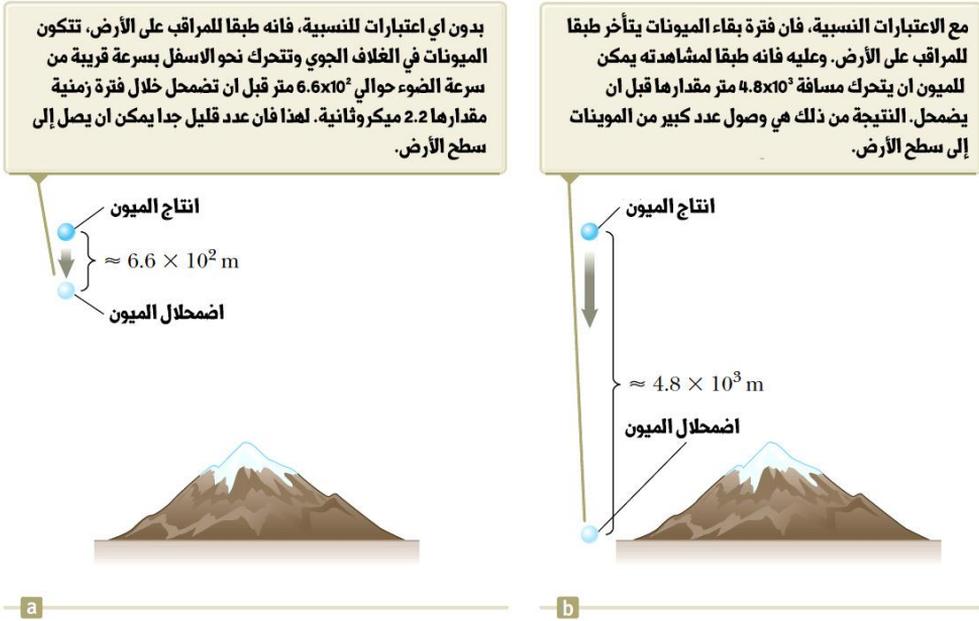
$$(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})(2.2 \times 10^{-6} \text{ s}) \approx 6.6 \times 10^2 \text{ m}$$

وهذه هي المسافة التي يستطيع ان يقطعها جسيم الميون خلال فترة بقائه قبل ان يضمحل ويتلاشي كما هو موضح في الشكل 8.1 a. وعليه فانه من غير المحتمل ان تصل هذه الجسيمات إلى سطح الأرض من ارتفاعات شاهقة في طبقات الغلاف الجوي العالية حيث يتم انتاجها. لقد بينت التجارب العملية على أي حال انه هناك عدد كبير من جسيمات الميون تصل إلى سطح الأرض. وتفسير هذا الامر يأتي من خلال التأخير الزمني. حيث ان زمن بقاء الميونات بالنسبة لمراقب على الأرضي يكون اكبر بسبب التأخير الزمني بمقدار $\gamma \Delta t_p$. على سبيل المثال اذا كانت سرعة الميونات هي $0.99c$ ، وبالتالي فان $\gamma \approx 7.1$ وعليه فان فترة بقاء الميون بالنسبة لمراقب على الأرض سوف تكون $\gamma \Delta t_p \approx 16 \mu s$ ، فان المسافة التي تقطعها هذه الجسيمات سوف تكون

$$(0.99)(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})(16 \times 10^{-6} \text{ s}) \approx 4.8 \times 10^3 \text{ m}$$

كما هو موضح في الشكل 8.1 b.

في العام 1976 في مختبر الجمعية الاوربية للبحوث النووية (CERN) في جنيفا، حقنت جسيمات ميون في خزان على شكل حلقة كبيرة لتصل سرعتها إلى $0.9994c$ تقريبا. تنتج الكترونات بعد اضمحلال الميونات وقد تم رصدها من خلال كواشف مثبتة حول الحلقة لتمكن العلماء من قياس معدل اضمحلال الميونات وتقدير زمن بقائها. لقد وجد ان زمن بقاء الميونات المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء تصل إلى ما يعادل 30 مرة زمن بقاء الميونات المستقرة وهذا يتفق تماما مع توقعات النظرية النسبية.



الشكل 8.1 حركة ميون طبقا لمراقب على الأرض

مثال 1.1 ما هو الزمن الدوري لبندول **What is the Period of the Pendulum**

إذا كان الزمن الدوري لبندول هو 3.00 s في محور اسناد البندول. ما هو الزمن الدوري له عندما يقاس بواسطة مراقب يتحرك بسرعة $0.960c$ بالنسبة للبندول؟

الحل

تصور المسألة: دعنا نغير محور الاسناد، فبدلا من المراقب المتحرك بسرعة $0.960c$ ، يمكننا المسألة من وجهة نظر مكافئة وهي ان المراقب ساكن والبندول هو المتحرك بسرعة $0.960c$ ويمر على المراقب الساكن. بالتالي فان البندول عبارة عن مثال لساعة متحركة بسرعة كبيرة بالنسبة للمراقب.

تصنيف المسألة: بالاعتماد على الخطوة التي اعتبرناها لتصور المسألة، يمكننا ان نصنف هذه المسألة على انها تطبيق على موضوع التأخير الزمني.

تحليل المسألة: الفترة الزمنية الاصلية تقاس في محور اسناد ساكن بالنسبة للبندول والتي

هي $\Delta t_p = 3.00s$.

باستخدام المعادلة 7.1 لايجاد مقدار التأخير الزمني:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.960c)^2}{c^2}}} \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.9216}} \Delta t_p$$

$$= 3.57(3.00s) = 10.7s$$

الخلاصة: هذه النتيجة توضح ان البندول المتحرك يأخذ زمن أطول لاكمال دورة كاملة من البندول في حالة سكون. يزداد الزمن الدوري بمقدار $\gamma = 3.57$.

ماذا لو؟ ماذا لو ان سرعة المراقب ازدادت بمقدار 4.00%؟ هل يزداد التأخير الزمني بمقدار 4.00%؟

الإجابة: بالاعتماد على السلوك الغير خطي لـ γ كدالة في v في الشكل 7.1، فاننا نؤمن ان الزيادة في Δt سوف يختلف عن 4.00\$.

نقوم بحساب السرعة الجديدة اذا ازدادت بمقدار 4.00%:

$$v_{new} = (1.040)(0.960c) = (0.9984c)$$

باجراء عملية حساب التأخير الزمني مرة أخرى نحصل على مايلي:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.9984c)^2}{c^2}}} \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.9968}} \Delta t_p$$

$$= 17.68(3.00s) = 53.1s$$

وعليه نستنتج ان الزيادة في السرعة بمقدار 4.00% ينتج عنها زيادة بمقدار 400% في التأخير الزمني!

مثال 2.1 كم استغرقت رحلتك How Long Was Your Trip؟

افتراض انك قمت بقيادة سيارتك في رحلة عمل بسرعة 30.0%. اذا كان مديرك ينتظرك عند جهة الوصول وتوقع ان تأخذ الرحلة مدة زمنية مقدارها 5.0h. عندما وصلت متأخرا كان عذرك ان ساعتك في السيارة قد سجلت فترة زمنية مقدارها 5.0h لكن عندما قادت السيارة بسرعة فان ساعتك أصبحت ابطأ من ساعة مديرك في مكتبه. اذا كانت ساعة سيارتك قد اشارت فعلا إلى 5.0h، فكم هو الزمن الذي قاسه مديرك والذي كان في حالة سكون بالنسبة للأرض؟

الحل

تصور المسألة: المراقب هو مديرك الساكن بالنسبة للأرض. الساعة في سيارتك تتحرك بسرعة 30m/s بالنسبة لمديرك.

تصنيف المسألة: السرعة المنخفضة 30m/s تقترح ان نصنف هذه المسألة على انها مسألة تعتمد على المبادئ والمعادلات الكلاسيكية. ولكن بالاعتماد على نص المسألة فان الساعة المتحركة تعمل بشكل ابطأ من الساعة الساكنة وعلى أي حال فاننا نصنف هذه المسألة على انها تطبيق على التأخير الزمني.

تحليل المسألة: الفترة الزمنية الاصلية تقاس في محور اسناد السيارة وهي $\Delta t_p = 5.0h$.

باستخدام المعادلة 8.1 لحساب مقدار γ نحصل على ما يلي:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3.0 \times 10^1 m/s)^2}{(3.0 \times 10^8 m/s)^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 10^{-14}}}$$

اذا قمت بإيجاد قيمة γ باستخدام الآلة الحاسبة فانك سوف تحصل على القيمة 1. عوضا عن ذلك سوف نقوم باستخدام المفكوك التحليلي لها حيث ان

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

باستخدام المعادلة 7.1 لايجاد مقدار التأخير الزمني الذي يقيسه مديرك نحصل على:

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

$$= 5.0h + 2.5 \times 10^{-14} = 5.0h + 0.90ns$$

الخلاصة: مديرك سوف تقدم ساعته 0.090 ns عن ساعة سيارتك. لذا عليك ان تفكر في تقديم عذرا افضل!

معضلة التوأم The Twin Paradox

نتيجة مثيرة لظاهرة التأخير الزمني هي معضلة التوأم twin paradox والموضحة في الشكل 9.1. اعتبر الان تجربة تشتمل على مجموعة من التوائم احدهما اسمه سيبدو والآخر اسمه جوسلو. عندما بلغا من العمر 20 عاما، قام سيبدو برحلة بطولية بدأت من الأرض وإلى كوكب X، يبعد هذا الكوكب مسافة 20 سنة ضوئية. السنة الضوئية (ly) عبارة عن المسافة التي يقطعها الضوء في الفراغ في عام واحد. علاوة على ان المركبة الفضائية التي استخدمها سيبدو تستطيع ان تصل لسرعة 0.95c بالنسبة إلى محور اسناد أخيه التوأم على الأرض. بعد او وصل سيبدو الكوكب X اصبح يشعر بالغبرة والرغبة في العودة إلى الأرض فقام على الفور بالعودة إلى الأرض بنفس السرعة وهي 0.95c. عند عودته أصيب سيبدو بالصدمة عندما اكتشف ان جوسلو قد تقدم بالعمر بمقدار 42 عاما واصبح عمره 62 عاما في حين ان سيبدو قد تقدم بالعمر بمقدار 13 عاما فقط.

معضلة التوأم لا تكمن في انها قد تقدا بالعمر بمعدلات مختلفة. هنا اين تكمن المعضلة. من محور اسناد جوسلو لقد كان في حالة سكون بينما أخيه سافر بعيدا عنه بسرعة كبيرة جدا ومن ثم عاد اليه. على أي حال وطبقا لسيدو لقد كان في حالة سكون بالنسبة لمحور اسناده في المركبة الفضائية بينما جوسلو والأرض تباعدا عنه ومن ثم عادا مرة أخرى. لهذا بينما قد نتوقع ان سيبدو سوف يدعي ان جوسلو قد تقدم بالعمر بمعدل ابطأ منه. الحالة تبدو متماثلة من وجهة نظر كل واحد من الاخوين التوأمين. أي من التوأمين يتقدم بالعمر بمعدل ابطأ؟

الحالة ليست متماثلة كما تبدو. دعنا نعتبر مراقب ثالث يتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة لجوسلو. طبقا للمراقب الثالث فان جوسلو لا يتغير في محاور الاسناد. سرعة جوسلو

بالنسبة للمراقب الثالث تكون دائما هي نفسها لا تتغير. يلاحظ المراقب الثالث ان سيبدو يتسارع خلال رحلته عندما يتباطئ وعندما يبدأ الحركة في اتجاه العودة إلى الأرض، وينتج عن ذلك تغير في محاور الاسناد في هذه العملية. من وجهة نظر المراقب الثالث فان هناك



الشكل 9.1 معضلة التوأم. يقوم سيبدو برحلة إلى نجم يبعد مسافة 20 سنة ضوئية ويعود إلى الأرض.

مختلف حول حركة جوسلو عندما نقارنها مع حركة سيبدو. لهذا لا يوجد أي معضلة: فقط جوسلو في محور اسناد وحيد وهو الذي يستطيع ان يقوم بحسابات وتوقعات صحيحة بالاعتماد على النظرية النسبية. جوسلو يجد انه بدلا من يتقدم بالعمر 42 عاما يجد ان سيبدو قد تقدم بالعمر بمقدار

$$\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} (42\text{years}) = 13 \text{ years}$$

من هذه الأعوام الـ 13 يستغرق سيبدو 6.5 عاما مسافرا في اتجاه الكوكب X و 6.5 عاما في رحلة العودة.

سؤال للتفكير 5.1

افترض رجل فضاء يحصل على اجره حسب مقدار الزمن الذي يقضيه مسافرا في الفراغ. بعد رحلة سفر طويلة بسرعة قريبة من سرعة الضوء c ، هل يتقاضى رجل الفضاء اجره طبقا لـ (a) ساعة الأرض (b) ساعة المركبة الفضائية (c) لا ساعة منهما؟

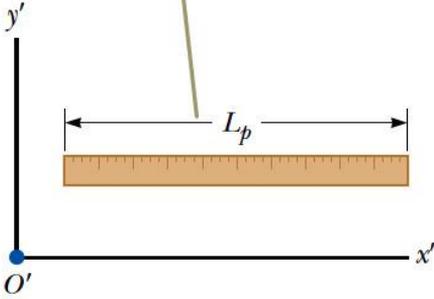
الانكماش الطولي Length Contraction

ان قياس المسافة بين نقطتين يعتمد أيضا على محور الاسناد المرجعي للمراقب. يعرف الطول الاصيلي proper length (L_p) لجسم بانه الطول المقاس بواسطة مراقب في حالة سكون بالنسبة للجسم. ان الطول المقاس للجسم بواسطة محور اسناد مرجعي متحرك بالنسبة للجسم يكون دائما اقل من الطول الاصيلي. هذا التأثير يعرف باسم الانكماش الطولي length contraction.

الطول الاصيلي: كما في الفترة الزمنية الاصلية فانه من المهم جدا في الحسابات النسبية ان نعرف بشكل صحيح المراقب الذي يقيس الطول الاصيلي. ان الطول الاصيلي بين نقطتين في الفراغ تكون دائما هي المقاسة بواسطة المراقب الثابت بالنسبة للنقطتين. في الأغلب لا تكون الفترة الزمنية الاصلية والطول الاصيلي مقاسة بواسطة نفس المراقب.

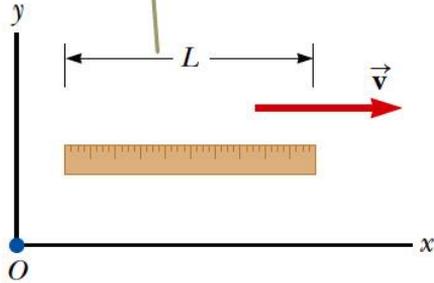
لفهم موضوع الانكماش الطولي، اعتبر مركبة فضائية تتحرك بسرعة v من نجم إلى اخر. يوجد لدينا مراقب على الأرض وأخر داخل المركبة الفضائية. يكون المراقب في حالة سكون على الأرض (وأيضا يفترض انه في حالة سكون بالنسبة للنجمين) وقيس المسافة بين النجمين وهي تعتبر المسافة الاصلية L_p . طبقا لهذا المراقب، فان الفترة الزمنية اللازمة للمركبة الفضائية لاكمال رحلتها هي $\Delta t = L_p/v$. اما المراقب داخل المركبة الفضائية فانه يرصد مسار النجمين عند نفس الموضع بالنسبة له. لهذا يقيس المراقب داخل المركبة الفضائية الفترة الزمنية Δt_p وهي الفترة الزمنية الاصلية. بسبب ظاهرة التأخير الزمني فان الفترة الزمنية الاصلية ترتبط مع الفترة الزمنية المقاسة على الأرض من خلال العلاقة $\Delta t_p = \Delta t/\gamma$. حيث ان المراقب داخل المركبة الفضائية يصل إلى النجم الثاني خلال فترة

تقاس مسطرة بواسطة مراقب في محور اسناد متصل مع المسطرة وقياسها بالطول الاصيلي L_p .



a

تقاس مسطرة بواسطة مراقب في محور اسناد بحيث ان المسطرة تتحرك بسرعة بالنسبة له ويجد ان طول المسطرة اقل من طولها الاصيلي.



b

الشكل 10.1 طول مسطرة يقاس بواسطة مراقبين.

الشكل 10.1 a. طول المسطرة L المقاس بواسطة المراقب الساكن على الأرض يكون اقل من L_p بمقدار $(\sqrt{1 - v^2/c^2})$ كما هو موضح في الشكل 10.1 b. لاحظ ان الانكماش الطولي يظهر فقط في الطول على امتداد اتجاه الحركة.

زمنية مقدارها Δt_p فانه يستنتج ان المسافة بين النجمين تعطى على النحو التالي:

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

حيث ان الطول الاصيلي يكون $L_p = v \Delta t$ نجد ان الانكماش الطولي يعطى بالعلاقة:

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1.9)$$

حيث ان $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ هو معامل اقل من الوحدة. اذا كان الطول الاصيلي لجسم هو L_p عندما يقاس بواسطة مراقب في حالة سكون بالنسبة للجسم، وطوله L عندما يتحرك بسرعة v في اتجاه يوازي طوله يكون اقصر من طوله الاصيلي طبقا للمعادلة 9.1.

على سبيل المثال، افترض ان مسطرة تتحرك مارة بمراقب ثابت على الأرض وكانت سرعة المسطرة هي v كما في الشكل 10.1. يكون طول المسطرة كما يقيسه مراقب في محور اسناد متصل بالمسطرة هو الطول الاصيلي L_p كما هو موضح في

الطول الأصلي والفترة الزمنية الأصلية يعرفان بشكل مختلف. الطول الأصلي يقاس بواسطة مراقب تكون نقطتي البداية والنهاية لطول الجسم ساكنتين بالنسبة له في الفراغ. تقاس الفترة الزمنية الأصلية بمراقب يرصد حدثين وهو في نفس الموضع في الفراغ. كمثال على هذه النقطة، دعنا نعود إلى اضمحلال الميون المتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء. مراقب في مجموعة اسناد الميون يقيس الفترة الزمنية الأصلية، بينما مراقب على الأرض يقيس الطول الأصلي (المسافة بين نقطة انتاج الميون ونقطة اضمحلاله كما هو موضح في الشكل 8.1 b. في محور اسناد الميون لا يكون هناك أي تأخير زمني، لكن المسافة التي قطعها ليصل إلى سطح الأرض اقل عندما تقاس من محور اسناده. بالمثل، في محور اسناد مرجعي على الأرض، يكون هناك تأخير زمني ولكن المسافة التي يقطعها تكون هي المسافة الأصلية. لهذا فانه عندما نقوم بالحسابات على الميون في كلا محوري الاسناد فان نتيجة التجربة في محور اسناد تكون نفس نتيجة التجربة النهائي في محور الاسناد الأول تكون نفسها في محور الاسناد الثاني: أي ان ميونات اكثر من ما هو متوقع تصل إلى الأرض بدون تأثيرات النظرية النسبية.

سؤال للتفكير 6.1

انت تستعد لرحلة إلى نجم اخر. خلال الرحلة سوف تتحرك بسرعة مقدارها $0.99c$. ففكرت اذا ما كنت بحاجة إلى شراء ملابس جديدة بحجم اقل لانك سوف تكون انحف خلال الرحلة بسبب ظاهرة الانكماش الضوئي. كما انك تفكر بتوفير بعض النقود بحجز غرفة اصغر لتنام بها لانك سوف تكون اقصر عندما تستلقى للنوم. هل عليك ان (a) تشتري ملابس اصغر، أو (b) تحجز غرفة اصغر، أو (c) لا تقوم بأي شيء مما سبق، أو (d) ان تقوم بالامرين معا؟

سؤال للتفكير 7.1

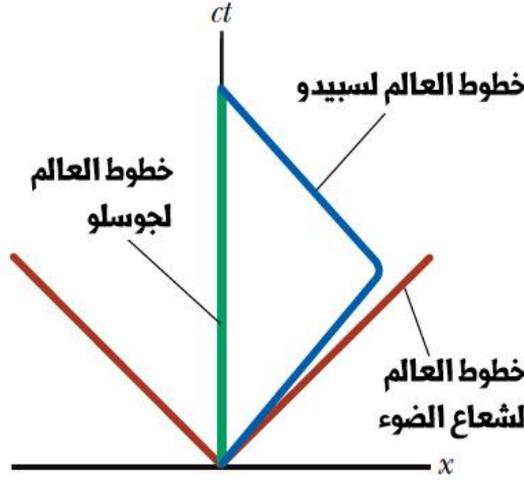
انك تقوم بمراقبة مركبة فضائية تتحرك بعيدا عنك. انك تلاحظ ان قياسها اقصر عندما كانت على الأرض وساكنة بالنسبة لك. كما انك ترى ان الساعة من خلال نافذة المركبة

الفضائية يتحرك عقربها بسرعة ابطاً من عقارب ساعة يدك. بالمقارنة مع حالة المركبة الفضائية على الأرض ماذا سوف تقيس اذا عادت المركبة الفضائية وأصبحت تتحرك مقتربة منك بنفس السرعة؟ (a) يصبح طول المركبة الفضائية أطول والساعة تعمل بسرعة اكبر. (b) المركبة الفضائية تكون أطول ولكن ساعتها تعمل بشكل ابطاً. (c) المركبة الفضائية تكون اقصر وساعتها تعمل بشكل اسرع. (d) المركبة الفضائية تكون اقصر وساعتها تعمل بشكل ابطاً.

منحنيات المكان والزمان Space-Time Graphs

في بعض الأحيان يكون من المفيد ان نمثل الحالة الفيزيائية بمنحنى المكان والزمان space time graph، بحيث ان ct تكون احد الاحداثيات وان الموضع x يكون هو الاحداثي السيني. تمثل معضلة التوأم على مثل هذا المنحنى كما هو في الشكل 11.1 من وجهة نظر جوسلو. مسار يمر خلال المكان والزمان يعرف باسم الخط العالمي world line. عند نقطة الأصل فان خطوط العالم لسبيدو (الخط الأزرق) وجوسلو (الخط الأخضر) يتطابقان مع بعضها البعض لان التوأمين في نفس الموضع عند نفس اللحظة. بعد ان يغادر سبيدو الأرض منطلقاً في رحلته فان خط العالم يتباعد عن خط العالم لآخيه. يكون الخط العالمي لجوسلو رأسياً لانه يبقى ثابت في المكان. عندما يعود سبيدو لجوسلو فان الخطوط العالمية لهما تتطابقان مرة أخرى. من المستحيل لسبيدو ان يمتلك خط عالمي يتقاطع مع مسار شعاع ضوئي يغادر الأرض عندما غادر سبيدو الأرض. ليتحقق ذلك فان على سبيدو ان يتحرك بسرعة اكبر من c (وهذا مستحيل كما هو موضح في الفصلين 6.1 و 7.1).

خطوط العالم لأشعة الضوء هي خطوط قطرية على منحنيات المكان والزمان، وترسم عند زاوية مقدارها 45° إلى اليمين او اليسار للمحور الرأسي (افترض ان المحور x والمحور ct لهما نفس المقياس)، ويعتمد على اذا ما كان شعاع الضوء في اتجاه زيادة أو نقصان x . كل الاحداث المستقبلية الممكنة لجوسلو وسبيدو تقع فوق محور x وبين



الشكل 11.1 معضلة التوأم على منحنى المكان والزمان. التوأم الذي بقي على الأرض يمتلك خط عالمي على امتداد المحور ct (الأخضر). مسار التوأم المسافر في المكان والزمان يمثل بخط عالمي يتغير اتجاهه (الأزرق). الخطوط باللون الأحمر الداكن هي خطوط عالمية لاشعاع ضوء تتحرك في اتجاه محور x الموجب (إلى اليمين) أو اتجاه محور x السالب (على اليسار).

الخطوط الحمراء الداكنة في الشكل 11.1 لأنه لا يمكن لأي منهما ان يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. الاحداث القديمة فقط التي تعرض لها كلا من جوسلو وسبيدو تحدث بين خطين عالميين 45° متماثلين يقتربان من نقطة الأصل من اسفل محور x .

اذا قمنا بتدوير الشكل 11.1 حول محور ct ، فان الخطوط الحمراء الداكنة ترسم مخروط، ويعرف هذا المخروط بمخروط الضوء، والذي يعمم الشكل 11.1 في بعدين من ابعاد المكان. يمكننا ان نتخيل محور y يخرج خارج الصفحة. كل الاحداث المستقبلية لمراقب عند نقطة الأصل يجب ان تقع داخل مخروط الضوء. يمكننا ان نتخيل دوران اخر يعمم مخروط الضوء لثلاثة ابعاد في المكان تشمل على محور z ، لكن بسبب متطلبات الابعاد الأربعة (ثلاثة للمكان وواحد للزمان) لا يمكننا القيام بتمثيله على ورقة رسم بعدين.

مثال 3.3 رحلة إلى النجم سيرويس A Voyage to Sirius

بدأ رجل فضاء رحلة إلى سيرويس والذي يبعد عن الأرض مسافة تصل إلى 8 سنوات ضوئية. يقوم رجل الفضاء بقياس زمن الرحلة ويجدها 6 سنوات. اذا كانت المركبة الفضائية تتحرك بسرعة ثابتة تصل إلى $0.8c$ ، كيف يمكن لمسافة 8 سنوات ضوئية ان تتفق مع الستة سنوات التي قاسها رجل الفضاء؟

الحل

تصور المسألة: مراقب على الأرض يقيس الزمن اللازم للضوء ليقطع المسافة بين الأرض إلى سيرويس ويجدها 8 سنوات. يقيس رجل الفضاء الفترة الزمنية لرحلته ويجدها 6 سنوات. هل كان رجل الفضاء يتحرك بسرعة أعلى من سرعة الضوء.

تصنيف المسألة: حيث ان رجل الفضاء يقيس المسافة بين الأرض والنجم سيرويس في حالة حركة بالنسبة لرجل الفضاء، فاننا نصنف هذه المسألة على انها تطبيق على موضوع الانكماش الطولي. كما يمكن ان نمذج رجل الفضاء كجسيم يتحرك بسرعة ثابتة.

تحليل المسألة: تمثل المسافة 8 سنوات ضوئية الطول الأصلي للمسافة بين الأرض والنجم بواسطة مراقب على الأرض يرصد الجسمين في حالة سكون.

نحسب الانكماش الطولي المقاس بواسطة رجل الفضاء باستخدام المعادلة 9.1 على النحو التالي:

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

باستخدام نموذج جسيم يتحرك بسرعة ثابتة لايجاد الفترة الزمنية المقاسة بواسطة ساعة رجل الفضاء نحصل على ما يلي:

$$\Delta t = \frac{L}{v} = \frac{5 \text{ ly}}{0.8c} = \frac{5 \text{ ly}}{0.8(1 \text{ ly/yr})} = 6 \text{ yr}$$

الخلاصة: لاحظ اننا استخدمنا قيمة سرعة الضوء والتي تعادل $c = 1 \text{ ly/yr}$. تتطلب

الرحلة فترة زمنية اقل من 8 سنوات لرجل الفضاء لان المسافة بين الأرض وسيروس بالنسبة له تكون اقصر.

ماذا لو؟ ماذا لو تم رصد هذه الرحلة باستخدام تلسكوب قوي جدا على الأرض؟ عند أي زمن يرى الراصد على الأرض ان رجل الفضاء قد وصل إلى سيروس؟
الإجابة: الفترة الزمنية التي يقيسها الراصد على الأرض لوصول رجل الفضاء تعطى على النحو التالي:

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

لكي يتمكن الراصد على الأرض من رؤية ورصد وصول مركبة الفضاء إلى سيروس فان شعاع ضوئي يجب ان يعود من سيروس إلى الأرض ويدخل التلسكوب. هذه الرحلة تتطلب فترة زمنية مقدارها

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

وعليه فان الراصد يرى لحظة الوصول بعد مرور $10 \text{ yr} + 8 \text{ yr} = 18 \text{ yr}$. اذا قام رجل الفضاء فورا بالعودة إلى الأرض فانه يصل طبقا لقياسات الراصد على الأرض خلال فترة زمنية مقدارها 20 yr بعد الانطلاق. أي عامين بعد ان يرى الراصد لحظة الوصول! بالإضافة إلى ان رجل الفضاء يتقدم بالعمر 12 عاما فقط.

مثال 3.4 معضلة العصا في الاسطبل The Pole-in the-Barn Paradox

في موضوع معضلة التوأم التي تمت مناقشتها هي عبارة عن معضلة كلاسيكية في النسبية. هناك معضلة كلاسيكية أخرى وهي على النحو الموضح. افترض رياضي يتحرك بسرعة $0.75c$ ويحمل معه عصا افقية طولها 15 m في اتجاه اسطبل طوله 10m. يوجد للاسطبل باب أمامي وباب خلفي وهما مفتوحين. مراقب على الأرض يمكنه بشكل آني ولحظي

ان يغلق ويفتح البابين بحيث ان الرياضي والعصا يحتجزان للحظة من الزمن داخل الاسطبل ومن ثم يكملان في اتجاه الخروج من الاسطبل من الباب الخلفي. هل كلا من الرياضي والمراقب على الأرض يتفقان على ان الرياضي يمكنه ان يمر خلال الاسطبل بسلام؟

الحل

تصور المسألة: من خلال خبرتنا في الحياة العملية قد نستغرب من ان عصا طولها 15 m تدخل في اسطبل طوله 10 m ولكننا اصبحنا متعودين على هذه النتائج المفاجأة في الحالات النسبية.

تصنيف المسألة: العصا في حالة حركة بالنسبة للمراقب على الأرض بحيث ان المراقب يقيس طول العصا منكشمة، حيث ان الاسطبل الساكن يمتلك طول أصلي يساوي 10 m. لذا فاننا نصنف هذا المثال على انه مسألة انكماش طولي.

تحليل المسألة: باستخدام المعادلة 9.1 لايجاد الطول المنكمش للعصا طبقا للمراقب على الأرض نحصل على ما يلي:

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

وعليه فان المراقب الأرضي يقيس طول العصا اقل بقليل من طول الاسطبل وبالتالي لا يوجد أي مشكلة ان تتواجد العصا بالكامل داخل الاسطبل. المعضلة تظهر عندما نعتبر وجهة نظر الرياضي.

باستخدام المعادلة 9.9 لايجاد الطول المنكمش للاسطبل طبقا للمراقب الرياضي نحصل على ما يلي:

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

حيث ان العصا تكون في محور اسناد ساكن بالنسبة للرياضي فانه يقيس طولها الأصلي

يساوي 15 m. الان تبدو الحالة اكثر سوء: كيف يمكن لعصا طولها 15 m ان تتواجد داخل اسطبل طوله 6.6 m؟ بالرغم من ان هذا السؤال هو حالة كلاسيكية وتطرح كسؤال بشكل متكرر بالرغم من انه امر غير هام. اننا نسأل هل يتمكن الرياضي من العبور من الاسطبل بسلام؟

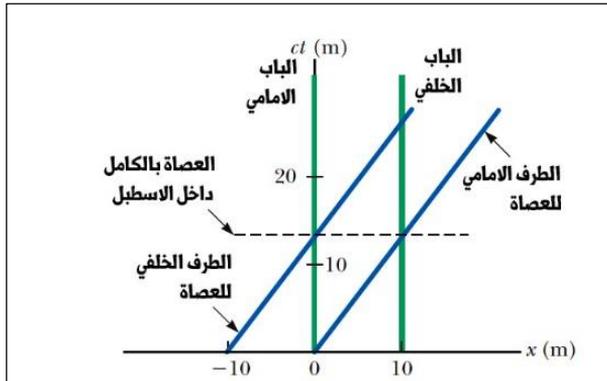
يقع حل هذه المعضلة في موضوع نسبية الأنية. يتم اغلاق البابين في نفس اللحظة كما يرصده المراقب الأرضي. حيث ان البابين في موضعين مختلفين فانهما لا ينغلقان في نفس اللحظة كما يرصده الرياضي. الباب الخلفي يغلق ومن ثم يغلق الباب الامامي، مما يسمح

لطرف العصا الامامي ان يخرج من الاسطبل. الباب الامامي للاسطبل لا يغلق حتى يعبر طرف العصا الخلفي.

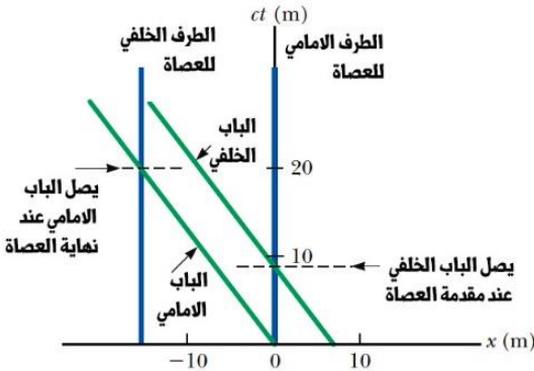
يمكننا ان نحلل هذه المعضلة باستخدام منحني المكان والزمان. يوضح الشكل 12.1

منحني المكان والزمان من وجهة المراقب الأرضي. نختار $x = 0$ كموضع الباب الامامي للاسطبل عند الزمن $t = 0$ كاللحظة التي يكون عندها طرف العصا الامامي عند الباب الامامي للاسطبل.

الخطوط العالمية للبابين يفصلها مسافة مقدارها 10 m وهي خطوط رأسية لان الاسطبل لا يتحرك بالنسبة لهذا



a



b

الشكل 12.1 منحنيات المكان والزمان لمعضلة العصا والاسطبل (a) من وجهة نظر المراقب على الأرض و(b) من وجهة نظر الرياضي.

المراقب. بالنسبة للعصا فاننا نتبع خطين عالميين مائلين خط واحد لكل طرف من العصا المتحركة. هذه الخطوط تفصلها مسافة مقدارها 9.9 m افقيا، وهي منكمشة بالنسبة للمراقب الأرضي. كما هو موضح في الشكل 12.1 a فان العصا تدخل بالكامل داخل الاسطبل في لحظة محددة.

يوضح الشكل 12.1 b منحنى المكان والزمان طبقا للرياضي. هنا تكون الخطوط العالمية للعصا منفصلة بمسافة مقدارها 15 m وعمودية لان العصا في حالة سكون بالنسبة لمحور اسناد الرياضي (حيث ان العصا يحملها بيده ويجري بها). يندفع الاسطبل في اتجاه الرياضي، وبالتالي فان خطوط العالم للبوابة الامامية والخلفية للاسطبل تكون مائلة إلى اليسار. الخطوط العالمية للاسطبل منفصلة بمسافة مقدارها 6.6 m، وهو الطول المنكمش كما يراه الرياضي. الطرف الامامي للعصا يترك البوابة الخلفية للاسطبل بفترة قبل ان يدخل الطرف الخلفي للعصا للاسطبل. لهذا فان فتح الباب الخلفي يحدث قبل اغلاق الباب الامامي.

من وجهة نظر المراقب الأرضي، نستخدم نموذج جسيم يتحرك بسرعة منتظمة لايجاد الزمن بعد $t = 0$ الذي عنده يدخل الطرف الخلفي للعصا للاسطبل.

$$(1) \quad t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{9.9m}{0.75c} = \frac{13.2m}{c}$$

من وجهة نظر الرياضي، استخدم نموذج جسيم يتحرك بسرعة ثابتة لايجاد الزمن الذي عنده يترك الطرف الخلفي للعصا للاسطبل.

$$(2) \quad t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{6.6m}{0.75c} = \frac{8.8m}{c}$$

نحسب الزمن الذي عنده يدخل الطرف الخلفي للعصا الباب الامامي للاسطبل على النحو التالي:

$$(3) \quad t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{15m}{0.75c} = \frac{20m}{c}$$

الخلاصة: من المعادلة (1)، فان العصا يجب ان تكون بالكامل داخل الاسطبل في الزمن الذي يقابل $ct = 13.2 m$. تتوافق هذه الحالة مع النقطة على محور ct في الشكل 12.1 a

حيث ان العصا تكون داخل الاسطبل. من المعادلة (2)، فان طرف المقدمة للعصا يترك الاسطبل عند $ct = 8.8 \text{ m}$. تتوافق هذه الحالة مع النقطة على المحول ct في الشكل 12.1 b حيث تصل نهاية مدخل الاسطبل عند مقدمة العصا. المعادلة (3) تعطي $ct = 20 \text{ m}$ ، والتي تتفق مع اللحظة الموضحة في الشكل 12.1 b عند تصل مقدمة مدخل الاسطبل طرف العصا الخلفي.

تأثير دبلر في النسبية The Relativistic Doppler Effect

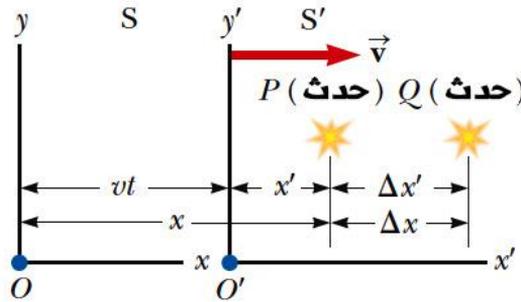
نتيجة هامة أخرى لظاهرة التأخير الزمني هي الانزياح في تردد الضوء الصادر من الذرات في حالة حركة مقابل الضوء الصادر بواسطة الذرات في حالة سكون. هذه الظاهرة تعرف باسم ظاهرة دبلر Doppler effect، وهي ظاهرة معروفة من قبل النسبية في الفيزياء الكلاسيكية عند التعامل مع الأمواج الصوتية. حيث انه في حالة الأمواج الصوتية فان حركة المصدر الصوتي بالنسبة لوسط الانتشار تختلف عن حركة المراقب بالنسبة للوسط. اما بالنسبة للأمواج الضوئية يجب ان تدرس بطريقة مختلفة لانها لا تحتاج إلى وسط لتنتشر فيه، ولا توجد طريقة لتمييز حركة المصدر الضوئي عن حركة المراقب.

اذا كان مصدر الضوء والمراقب يقتربان من بعضهما البعض بسرعة نسبية مقدارها v ، فان التردد f' الذي يقيسه المراقب يكون على النحو التالي:

$$f' = \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}} f \quad (1.10)$$

حيث ان f هو تردد المصدر كما يقيسه مراقب ساكن بالنسبة للمصدر. هذه معادلة انزياح دبلر النسبية وهي تختلف عن معادلة انزياح دبلر للصوت التي تعتمد فقط على السرعة النسبية v للمصدر والمراقب وكذلك فان معادلة انزياح دبلر النسبية متحققة لسرعات كبيرة تصل إلى سرعة الضوء. كما تتوقع فان المعادلة تتنبأ بأن $f' > f$ عندما يقترب كلا من المصدر والمراقب من بعضهما البعض. كما يمكننا ان نحصل على معادلة لحالة ان المصدر والمراقب يبتعدان عن بعضهما البعض باستبدال القيم السالبة لـ v في المعادلة 10.1.

الاستخدام الأكثر تشويقاً لظاهرة دبلر النسبية هو قياس الانزياحات في تردد الضوء المنبعث بواسطة الاجرام السماوية المتحركة مثل المجرات وغيرها. لقد وجد ان الضوء المنبعث بواسطة ذرات مادة يكون في منطقة الطيف البنفسجي عند رصده في المختبر اما الضوء المبعث من نفس المادة في الاجرام السماوية قد ازيح ناحية الطيف الأحمر مما يشير إلى ان هذه الاجرام السماوية تبتعد عنا. قام العالم الفلكي الأمريكي ادوين هابل Edwin Hubble في الفترة (1889 - 1953) باجراء قياسات دقيقة ومكثفة على هذا الانزياح ناحية الأحمر red shift ليؤكد ان معظم المجرات تتحرك مبتعدة عنا مما يشير إلى ان الكون في حالة توسع.



الشكل 13.1 حدثين عند النقطتين P و Q تم رصدهما بواسطة مراقب في حالة سكون في محور اسناد S ومراقب اخر في محور اسناد S' والذي يكون متحركا إلى اليمين بسرعة v .

5.1 معادلات تحويلات لورنز The Lorentz Transformation Equations

افترض حدثين يحدثان عند النقطتين P و Q وقد تم رصدهما بواسطة مراقبين احدهما كان في حالة سكون في محور الاسناد S والأخر كان في محور اسناد S' يتحرك إلى اليمين بسرعة مقدارها v كما هو موضح في الشكل 13.1. أشار المراقب في محور الاسناد S إلى الحدثين باستخدام الاحداثيات المكانية والزمانية (x, y, z, t) ، والمراقب في محور الاسناد S' أشار للحدثين باستخدام الاحداثيات (x', y', z', t') . تتوقع المعادلة 1.1 ان المسافة بين نقطتين لحدثين في الفراغ لا تعتمد على سرعة المراقب: $\Delta x = \Delta x'$. حيث ان هذا التوقع يتناقض مع ظاهرة الانكماش الطولي، لذا فان تحويلات جاليليو غير متحققة عندما تقترب v من

سرعة الضوء. في هذا الفصل سوف نعرض معادلات التحويلات الصحيحة التي يمكن ان نطبقها على كل السرعات في المدى $0 < v < c$.

المعادلات التي تحقق كل السرعات والتي سوف تمكننا من ان نقوم بتحويل الاحداثيات من S إلى S' تعرف باسم معادلات تحويلات لورنز Lorentz transformation equations:

$$x' = \gamma(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad (1.11)$$

تم تطوير معادلات التحويلات هذه بواسطة العالم هيندريك لورنز Hendrik A. Lorentz (1853 - 1928) في العام 1890 بالتواصل مع الكهرومغناطيسية. انه اينشتين على أي حال هو من تعرف على أهميتها الفيزيائية واتخذ الخطوة الكبيرة لتفسيرها داخل اطار عمل النظرية النسبية الخاصة.

لاحظ الفرق بين معادلات جاليليو ولورنز. في حالة جاليليو فان $t = t'$. في حالة لورنز فان قيمة t' أسندت إلى الحدث الذي رصده المراقب O' في محور اسناد S' كما هو موضح في الشكل 13.1 بالاعتماد على كلا من الزمن t والاحداثي المكاني x كما قيس بواسطة المراقب O في محور اسناد S ، والذي يتوافق مع تشخيص الحدث في أربعة احداثيات مكانية وزمنية (x, y, z, t) . بمعنى انه في النسبية لا ينفصل مفهوم المكان عن الزمان بل انهم متداخلان مع بعضهما البعض.

اذا رغبت في تحويل الاحداثيات في محور اسناد S' إلى احداثيات في محور اسناد S كل ما هو عليك القيام به هو استبدال v بواسطة $-v$ وتبديل إشارة الفاصلة في معادلات الاحداثيات 11.1:

$$x = \gamma(x' + vt') \quad y = y' \quad z = z' \quad t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right) \quad (1.12)$$

عندما تكون $v \ll c$ فان معادلات تحويلات لورنز تختزل لمعادلات جاليليو. عندما تقترب v من الصفر فان $v/c \ll 1$ ولهذا فان $\gamma \leftarrow 1$ والمعادلة 11.1 تختزل إلى معادلات تحويلات المكان والزمان لجاليليو المعادلة 1.1.

في الكثير من الحالات نرغب في ان نعرف الفرق في الاحداثيات بين حدثين او الفترة الزمنية بينهما كما يرصدهما مراقبين O و O'. من المعادلتين 11.1 و 12.1 يمكننا ان نعبر عن الفرق بين المتغيرات الأربعة x, x', t, t' في الصورة التالية:

$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$ $\Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x\right)$	$S \rightarrow S' \quad (1.13)$
$\Delta x = \gamma(\Delta x' - v\Delta t')$ $\Delta t = \gamma\left(\Delta t' - \frac{v}{c^2}\Delta x'\right)$	$S' \rightarrow S \quad (1.14)$

حيث ان $\Delta x' = x'_2 - x'_1$ و $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ هما الفرق المقاس بواسطة المراقب O' و $\Delta x = x_2 - x_1$ و $\Delta t = t_2 - t_1$ هما الفرق المقاس بواسطة المراقب O. (لم نشمل في هذه الصيغ الاحداثيين y و z لانهما لا يتأثران بالحركة على امتداد المحور x).

مثال 5.1 حول الأنية والتأخير الزمني Simultaneity and Time Dilation

(A) استخدم معادلات تحويلات لورنز في صورها المختلفة لاثبات ان الأنية ليست مقدارا مطلقا.

الحل

تصور المسألة: تخيل حدثين يحدثان في نفس اللحظة ومنفصلين في المكان كما يتم رصدهما بواسطة مراقب في محور اسناد S' بحيث ان $\Delta t' = 0$ و $\Delta x' \neq 0$. تمت هذه القياسات بواسطة المراقب O' الذي يتحرك بسرعة v بالنسبة إلى O.

تصنيف المسألة: تجربنا صيغة المثال ان هذا السؤال يتضمن استخدام تحويلات لورنز.

تحليل المسألة: من الصيغة الخاصة بـ Δt المعطاة في المعادلة 14.1، نوجد الفترة الزمنية Δt التي يقيسها المراقب O وهي على النحو التالي:

$$\Delta t = \gamma \left(\Delta t' + \frac{v}{c^2} \Delta x' \right) = \gamma \left(0 + \frac{v}{c^2} \Delta x' \right) = \gamma \frac{v}{c^2} \Delta x'$$

الخلاصة: الفترة الزمنية لنفس الحدثين كما يقيسهما المراقب O ليست صفراً، لذلك فإن الحدثين لا يحدثان في نفس اللحظة بالنسبة للمراقب O.

(B) استخدم معادلات تحويلات لورنز بصورها المختلفة لاثبات ان الساعة المتحركة تؤجر او بمعنى انها ابطأ من الساعة التي تكون في حالة سكون بالنسبة للمراقب.

الحل:

تصور المسألة: تخيل ان المراقب O' يحمل ساعة يستخدمها في قياس الفترة الزمنية $\Delta t'$. لقد وجد ان حدثين يحدثان في نفس اللحظة عند نفس الموضع بالنسبة لمحور اسناده ($\Delta x' = 0$) لكن عند ازمنا مختلفة ($\Delta t' \neq 0$). المراقب O' يتحرك بسرعة v بالنسبة إلى المراقب O.

تصنيف المسألة: تجربنا صيغة المثال ان هذا السؤال يتضمن استخدام تحويلات لورنز.

تحليل المسألة: من الصيغة الخاصة بـ Δt المعطاة في المعادلة 14.1، نوجد الفترة الزمنية Δt التي يقيسها المراقب O وهي على النحو التالي:

$$\Delta t = \gamma \left(\Delta t' + \frac{v}{c^2} \Delta x' \right) = \gamma \left(\Delta t' + \frac{v}{c^2} 0 \right) = \gamma \Delta t'$$

الخلاصة: هذه النتيجة هي معادلة التأخير الزمني التي سبق وان حصلنا عليها (المعادلة 7.1)، حيث ان $\Delta t' = \Delta t_p$ وهي الفترة الزمنية الأصلية المقاسة بواسطة الساعة المحمولة بواسطة المراقب O'. لهذا فان المراقب O يقيس الساعة المتحركة بانها تعمل ببطأ.

6.1 معادلات تحويل لورنز للسرعة The Lorentz Velocity Transformation Equations

افترض مراقبين في حالة حركة بالنسبة لبعضهما البعض وكلاهما يرصد حركة جسم. عرفنا في السابق حدث عندما يحدث في لحظة ما من الزمن. الان دعنا نفسر الحدث كحركة جسم. نعلم من تحويلات السرعة لجاليليو (انظر المعادلة 2.1) متحققة للسرعات

المنخفضة. كيف يمكننا ان نربط قياسات المراقبين لسرعة الجسم مع بعضهما البعض اذا كانت سرعة الجسم او السرعة النسبية للمراقبين قريبة من سرعة الضوء؟ مرة أخرى نعتبر S' محور اسناد متحرك بسرعة v بالنسبة إلى S. افترض جسم يمتلك مركبة سرعة u'_x مقاسة في محور اسناد S', حيث ان

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} \quad (1.15)$$

باستخدام المعادلة 11.1 يكون لدينا ما يلي:

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

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

بالتعويض عن هاتين القيمتين في المعادلة 15.1 نحصل على ما يلي:

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

الحد dx/dt هو مركبة السرعة u_x للجسم كما يقيسه المراقب في محور اسناد S وبالتالي فان هذه الصيغة تصبح على النحو التالي:

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \quad (1.16)$$

اذا كان للجسم مركبات سرعة على امتداد محوري y و z، كما يقيسها المراقب في محور اسناد S' تكون على النحو التالي

$$u'_y = \frac{u_y}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \quad \& \quad u'_z = \frac{u_z}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \quad (1.17)$$

لاحظ ان u'_y و u'_z لا تحتويان على v في البسط لأن السرعة النسبية على امتداد محور x. عندما تكون v صغيرة جدا بالمقارنة مع سرعة الضوء c (الحالة الكلاسيكية او الحالة الغير نسبية) فان مقام المعادلة 16.1 يؤول إلى الوحدة وتصبح بذلك $u'_x \approx u_x - v$ وهي

نفس معادلة تحويل السرعة لجاليليو. وعندما تكون $u_x = c$ فإن المعادلة 16.1 تصبح على النحو التالي:

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

تبين هذه النتيجة ان السرعة المقاسة بواسطة المراقب في محور الاسناد S تكون c وقياسها المراقب في محور الاسناد S' تساوي c أيضا، بدون الاعتماد على السرعة النسبية بين S وS'. هذه النتيجة تتفق تماما مع الفرضية الثانية لاينشتين: سرعة الضوء يجب ان تكون c بالنسبة لكل محاور الاسناد المرجعية القصورية. علاوة على اننا وجدنا ان سرعة جسم لا يمكن ان تكون اكبر من c . هذا يعني ان سرعة الضوء هي السرعة القصوى. سوف نعود لهذه النقطة لاحقا.

للحصول على u_x بدلالة u'_x ، نقوم باستبدال v بـ $-v$ في المعادلة 16.1 ونستبدل أدوار كلا من u_x و u'_x على النحو التالي:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \quad (1.18)$$

ملاحظة: على ماذا يتفق المراقبين؟ لقد رأينا العديد من القياسات التي قام بها كلا من المراقبين O و O' ولم يتفقا معا: (1) الفترة الزمنية بين حدثين يحدثان في نفس المكان في احد محاور الاسناد، و(2) المسافة بين نقطتين وتبقى ثابتة في احد محاور الاسناد، (3) مركبات السرعة لجسم متحرك، و(4) اذا ما كان حدثين في موضعين مختلفين في كلا محوري الاسناد حدثا في نفس اللحظة او لا. يتفق المراقبين على (1) السرعة النسبية للحركة v بالنسبة لبعضها البعض، و(2) سرعة الضوء، و(3) آنية حدثين حدثا في نفس المكان والزمان في بعض محاور الاسناد.

سؤال للتفكير 8.1

تخيل انك تقود سيارتك في طريق سريع بسرعة قريبة من سرعة الضوء. (i) يوجد امامك فني يقف على الأرض ويقوم بتشغيل مصباح كهربى وينطلق شعاع ضوئى رأسياً إلى الأعلى كما يرصده الفنى. بالنسبة لك كمراقب للشعاع الضوئى، هل تقيس مقدار المركبة الرأسية للضوء (a) تساوي c أو (b) اكبر من c أو (c) اقل من c ؟ (ii) اذا قام الفنى بتوجيه المصباح الضوئى مباشرة عليك بدلا من توجيهه إلى الأعلى، هل تقيس مقدار المركبة الأفقية لسرعة الضوء على انها (a) تساوي c أو (b) اكبر من c أو (c) اقل من c .

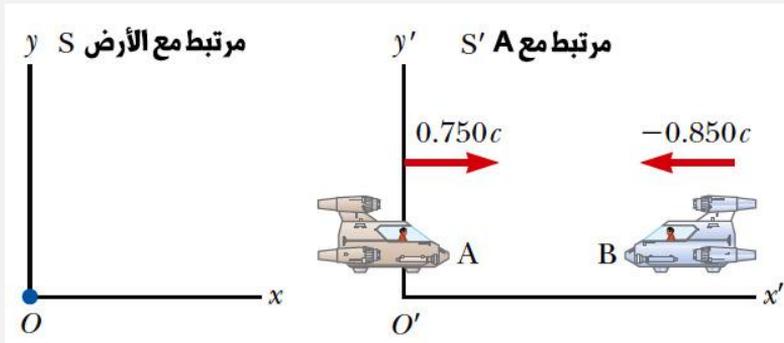
مثال 6.1 السرعة النسبية لمركبتين فضائيتين Relative Velocity of Two Spacecraft

مركبتين فضائيتين A و B تتحركان في اتجاهين متعاكسين كما هو موضح في الشكل 14.1. يقيس مراقب على الأرض سرعة المركبة الفضائية A تساوي $0.750c$ وسرعة المركبة الفضائية B تساوي $0.850c$. أوجد مقدار سرعة المركبة B كما يقيسها ركاب المركبة A.

الحل

تصور المسألة: يوجد لدينا مراقبين، المراقب الأول O على الأرض والمراقب الثانى O' على المركبة الفضائية A. الحدث هو حركة المركبة الفضائية B.

تصنيف المسألة: حيث ان المسألة تطلب منا ان نوجد سرعة المراقب. فاننا نصنف هذا المثال على انه تطبيق على تحويلات لورنز للسرعة.



الشكل 14.1 مركبتين فضائيتين A و B تتحركان في اتجاهين متعاكسين. سرعة المركبة

الفضائية B بالنسبة إلى المركبة الفضائية A اقل من c وقد تم الحصول عليها من معادلة تحويل السرعة النسبية.

تحليل المسألة: المراقب على الأرض في حالة سكون في محور الاسناد S ويقوم بقياسين، كل قياس لمركبة فضائية. نريد ان نقوم بحساب سرعة المركبة الفضائية B كما يقوم بقياسها ركاب المركبة الفضائية A. لهذا فان $u_x = -0.850c$. سرعة المركبة الفضائية A هي أيضا سرعة المراقب الذي يكون في حالة سكون في المركبة الفضائية A (محور الاسناد S') بالنسبة للمراقب في حالة سكون على الأرض. لهذا فان $v = 0.750c$.

احصل على السرعة u'_x للمركبة الفضائية B بالنسبة للمركبة الفضائية A باستخدام المعادلة 16.1 على النحو التالي:

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} = \frac{-0.850c - 0.750c}{1 - \frac{-0.850c - 0.750c}{c^2}} = -0.977c$$

الخلاصة: تشير الإشارة السالبة إلى ان المركبة الفضائية B تتحرك في اتجاه محور x السالب كما يقيسها ركاب المركبة الفضائية A. هل هذا متوقع مع توقعاتك من الشكل 14.1؟ لاحظ ان السرعة اقل من c . هذا يعني ان جسم له سرعة اقل من c في محور اسناد معين يجب ان يمتلك سرعة اقل من c في محور اسناد اخر.

إذا استخدمت معادلة تحويل السرعة لجاليليو في هذا المثال فانك سوف تجد ان

$$u'_x = u_x - v = -0.850c - 0.750c = -1.60c$$

وهذا مستحيل. معادلة تحويل جاليليو لا تعمل في الحالات النسبية.

ماذا لو؟ ماذا لو ان المركبتين الفضائيتين تتجاوزان بعضهما البعض؟ ما هي السرعة النسبية الان؟

الإجابة: الحسابات تستخدم المعادلة 16.1 تشتمل فقط على سرعات المركبتين الفضائيتين ولا تعتمد على موضعها. بعد ان يتجاوزوا بعضهما البعض، يكون لهما نفس السرعة، لذلك فان سرعة المركبة الفضائية B كما يرصدها ركاب المركبة A هي $-0.977c$. الفرق الوحيد بعد ان يتجاوزا بعضهما البعض هو ان المركبة الفضائية B تتراجع عن المركبة الفضائية A بينما كانت تقترب من المركبة الفضائية قبل ان يتجاوزا بعضهما البعض.

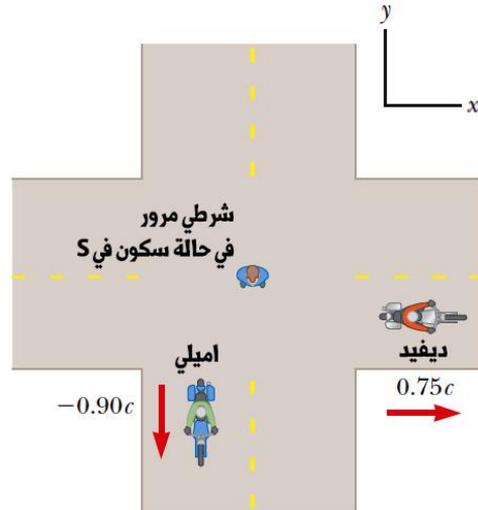
مثال 7.1 السرعة النسبية لدراجتين ناريتين Relativistic Leaders of the Pack

راكبي دراجة نارية اسمها ديفيد وايميلي يتسابقان بسرعة نسبية على مسارين متعامدين كما هو موضح في الشكل 15.1. ما هي سرعة ايميلي كما يقيسها ديفيد؟

الحل

تصور المسألة: المراقبين هما ديفيد وشرطي المرور في الشكل 15.1. الحدث هو حركة راكبة الدراجة النارية ايميلي. يمثل الشكل 15.1 الحالة كما يرصدها شرطي المرور في محور اسناد ساكن هو S . محور الاسناد S' يتحرك مع المراقب ديفيد.

تصنيف المسألة: حيث ان المثال يطلب ان نوجد سرعة المراقب، فاننا نصنف هذه المسألة على انها تطبيق على تحويلات السرعة لرونز. الحركة هنا في بعدين.



الشكل 15.1 يتحرك ديفيد إلى الشرق بسرعة مقدارها $0.75c$ بالنسبة إلى شرطي المرور، وتحرك ايميلي إلى الجنوب بسرعة مقدارها $0.90c$ بالنسبة لشرطي المرور.

تحليل المسألة: نعرف مركبات السرعة لديفيد وايميلي بالنسبة إلى شرطي المرور.

$$v_x = v = 0.75c \quad v_y = 0 \quad \text{ديفيد}$$

$$u_x = 0 \quad u_y = -0.90c \quad \text{اميلي}$$

باستخدام المعادلتين 16.1 و 17.1 لحساب u'_x و u'_y لاميلى كما يقيسها ديفيد نحصل على

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

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{(0.75c)^2}{c^2}} (-0.90c)}{1 - \frac{(0)(0.75c)}{c^2}} = -0.60c$$

باستخدام نظرية فيثاغورث نجد ان سرعة اميلي كما يقيسها ديفيد على النحو التالي:

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

الخلاصة: هذه السرعة اقل من c وهذا متفق مع نص النظرية النسبية الخاصة.

7.2 كمية الحركة الخطية النسبية Relativistic Linear Momentum

لوصف حركة جسيمات داخل اطار خصائص النظرية النسبية الخاصة، فانه علينا ان نستبدل معادلات تحويلات جاليليو بمعادلات تحويلات لورنز. حيث ان قوانين الفيزياء يجب ان تبقى بدون تغير تحت تحويلات لورنز، فانه يجب ان نعمم قوانين نيوتن وتعريفات كمية الحركة الخطية والطاقة لتحقق معادلات تحويلات لورنز ومبدأ النظرية النسبية. هذه التعريفات العامة يجب ان تختزل لتعريفات الميكانيكا الكلاسيكية (الغير نسبية) عندما تصبح السرعة v اقل كثير من سرعة الضوء c .

في البداية لنسترجع معلوماتنا حول نموذج النظام المعزول الذي يكون فيه جسيمين (او اجسام يمكن اعتبارها كجسيمات) يتصادمان، فان كمية الحركة الكلية للنظام المكون من جسيمين تبقى ثابتة. افترض اننا نرصد هذا التصادم في محور الاسناد S ونتأكد ان كمية

حركة النظام محفوظة. الان تخيل اننا نقيس كمية حركة الجسمين بواسطة مراقب اخر محور اسناده S' يتحرك بسرعة \vec{v} بالنسبة لمحور الاسناد الأول. باستخدام معادلة تحويلات لورنز للسرعة والتعريف الكلاسيكي لكمية الحركة الخطية $\vec{P} = m\vec{u}$ (حيث ان \vec{u} هي سرعة الجسم)، فنجد ان كمية الحركة الخطية لا تكون محفوظة بالنسبة للمراقب في محور الاسناد S' . حيث ان قوانين الفيزياء تكون نفسها في كل محاور الاسناد المرجعية القصورية فان كمية الحركة للنظام يجب ان تكون محفوظة في كل محاور الاسناد. لدينا الان تناقض. في ضوء هذا التناقض وبافتراض ان معادلة تحويل لورنز للسرعة معادلة صحيحة فانه يجب ان نعدل تعريف كمية الحركة الخطية وبذلك فان كمية الحركة للنظام المعزول محفوظة لكل المراقبين. لاي جسم فان المعادلة النسبية الصحيحة لكمية الحركة الخطية التي تحقق هذا الشرط تكون على النحو التالي:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\vec{u} \quad (1.19)$$

وهذا تعريف كمية الحركة الخطية النسبية، حيث ان m هي كتلة الجسم و \vec{u} هي سرعة الجسم. عندما تكون u اقل من c ، فان $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-1/2}$ تؤول إلى الوحدة و \vec{p} تؤول إلى $m\vec{u}$. لهذا فان معادلة النسبية لـ \vec{p} تختزل إلى صيغة كلاسيكية عندما u تكون اقل جدا من c كما هو متوقع.

تؤثر القوة النسبية \vec{F} على جسم كمية حركته الخطية هي \vec{p} وتعرف على النحو التالي:

$$\vec{F} \equiv \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (1.20)$$

حيث ان \vec{p} تعطى بواسطة المعادلة 1.19. هذه الصيغة هي الصيغة النسبية لقانون نيوتن الثاني، وهي في نفس الوقت تحقق أيضا الميكانيكا الكلاسيكية في حالة السرعات المنخفضة وتتوافق مع الحفاظ على كمية الحركة الخطية لنظام معزول ($\vec{F}_{ext} = 0$) لكلا من النسبية والكلاسيكية.

لقد تركت كمسألة في نهاية هذا الفصل (المسألة 74) لتبين انه تحت الشروط النسبية، فان التسارع \vec{a} للجسيم يتناقص تحت فعل القوة الثابتة بحيث ان $\alpha \propto (1 - u^2/c^2)^{3/2}$. هذا التناسب يبين ان سرعة الجسيم تؤول إلى c ، والتسارع الناتج عن أي قوة محدودة تؤول إلى الصفر. وعليه فانه من المستحيل ان يتسارع الجسيم من السكون إلى سرعة $u \geq c$. هذه الجملة تعزز ان سرعة الضوء هي السرعة القصوى وهي اقصى سرعة للكون. هي اقصى سرعة ممكنة لانتقال الطاقة وتبادل المعلومات. أي جسم له كتلة يجب ان يتحرك بسرعة اقل من سرعة الضوء.

مثال 8.1 كمية الحركة الخطية للإلكترون Linear Momentum of an electron

الالكترون كتلته $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ يتحرك بسرعة مقدارها $0.750c$. اوجد مقدار كمية حركته النسبية وقارن هذه القيمة مع كمية الحركة المحسوبة بالصيغ الكلاسيكية.

الحل

تصور المسألة: تخيل الالكترون يتحرك بسرعة عالية. يمتلك الالكترون كمية حركة ولكن مقدارها لا يعطى بالعلاقة $p = mu$ لان سرعته نسبية.

تصنيف المسألة: نصنف هذا المثال على انه مسألة تعويض مباشر.

تحليل المسألة: باستخدام المعادلة 19.1 مع التعويض عن $u = 0.750c$ لايجاد ما يلي:

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

$$p = \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.750)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{\sqrt{1 - \frac{(0.750c)^2}{c^2}}}$$

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

الصيغة الكلاسيكية (استخدامها غير صحيح هنا) تعطي

$$p_{\text{classical}} = m_e u = 2.05 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s.}$$

وعليه فان النتيجة النسبية الصحيحة اكبر بـ 50% من النتيجة الكلاسيكية.

8.1 الطاقة النسبية Relativistic Energy

لقد رأينا ان تعريف كمية الحركة الخطية يتطلب تعميمها لتصبح متوافقة مع فرضيتي اينشتين. هذا الاستنتاج يعني ان تعريف طاقة الحركة يجب ان يتم تعديلها أيضا.

لاشتقاق الصيغة النسبية لنظرية الشغل والطاقة، تخيل جسيم يتحرك في بعد واحد على امتداد محور x . اذا كان هناك قوة في اتجاه محور x تتسبب في حدوث تغير في كمية الحركة طبقا للمعادلة 20.1. فيما يلي سوف نفترض ان الجسيم يتسارع من السكون إلى سرعة محددة هي u . يكون الشغل المبذول بواسطة القوة F على الجسيم على النحو التالي:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dp}{dt} dx \quad (1.21)$$

لاجراء هذا التكامل وإيجاد مقدار الشغل المبذول على الجسيم وطاقة الحركة النسبية كدالة في u ، نقوم بحساب مقدار الكمية dp/dt على النحو التالي:

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

بالتعويض في المعادلة 21.1 عن dp/dt و $dx = udt$ نحصل على ما يلي:

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

حيث اننا استخدمنا الحدين 0 و u في التكامل لان التكامل قد تغير من t إلى u . باجراء التكامل نحصل على ما يلي:

$$W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 \quad (1.22)$$

نعلم ان الشغل المبذول على نظام يحتوي على جسيم في الميكانيكا الكلاسيكية يساوي التغير في كمية الحركة للجسيم. حيث اننا افترضنا ان السرعة الابتدائية للجسيم تساوي

صفر، فان طاقة حركته الابتدائية تساوي صفر. لهذا فان الشغل W في المعادلة 22.1 يكافئ طاقة الحركة النسبية K :

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 \quad (1.23)$$

وهذه معادلة الطاقة النسبية. تم اثبات هذه المعادلة عمليا باستخدام معجلات لتعجيل جسيمات عند طاقات عالية جدا.

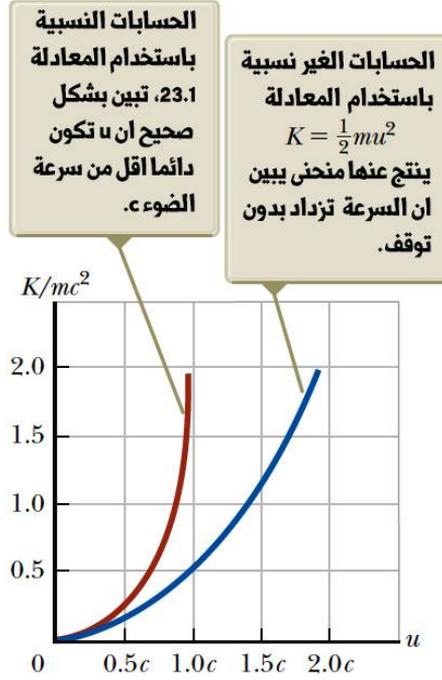
عند سرعات منخفضة، حيث ان $u/c \ll 1$ ، فان المعادلة 23.1 يجب ان تختزل إلى الصيغة الكلاسيكية $K = \frac{1}{2} mu^2$. يمكننا ان نتحقق من هذا باستخدام المفكوك ذو الحدين $\beta \ll 1$ لـ $(1 - \beta^2)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \beta^2 + \dots$ ، حيث ان الحدود ذات القوى العالية لـ β تهمل في المفكوك. (في النسبية عادة ما يستخدم الرمز β للتعبير عن u/c أو v/c). في حالتنا هذه فان $\beta = u/c$ وبالتالي فان

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

بالتعويض عن هذه النتيجة في المعادلة 23.1 نحصل على ما يلي:

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

وهذا عندما تكون $u/c \ll 1$. وهذه هي الصيغة الكلاسيكية لطاقة الحركة. في الشكل 16.1 منحى للمقارنة بين الصيغة النسبية والكلاسيكية. في الحالة النسبية لا يمكن للجسيم ان يتحرك بسرعة تفوق c ، بغض النظر عن طاقة الحركة. لاحظ ان المنحنيين متفقين بشكل جيد عندما $u \ll c$.



الشكل 16.1 منحني مقارنة بين طاقة الحركة النسبية والغير نسبية لجسيم متحرك. نلاحظ ان الطاقتين قد تم رسمهما كدالة في سرعة الجسيم u .

الحد الثابت mc^2 في المعادلة 23.1، لا يعتمد على سرعة الجسيم ويعرف باسم طاقة السكون *rest energy* ويرمز لها بـ E_R للجسيم:

$$E_R = mc^2 \quad (1.24)$$

تبين المعادلة 24.1 ان الكتلة هي شكل من اشكال الطاقة حيث ان c^2 هي ببساطة معامل تحويل ثابت. تبين هذه الصيغة أيضا ان كتلة صغيرة من المادة تقابل كمية هائلة من الطاقة، وهذا هو امر أساسي في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات الأولية.

الحد γmc^2 في المعادلة 23.1 والذي يعتمد على سرعة الجسيم، هو عبارة عن مجموع طاقة الحركة وطاقة السكون. وتعرف باسم الطاقة الكلية E :

$$E = K + mc^2 \quad (1.25)$$

أو

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma mc^2 \quad (1.26)$$

وهي الطاقة الكلية النسبية للجسيم.

في الكثير من الحالات يتم قياس كمية الحركة الخطية أو طاقة جسيم وليس السرعة. لهذا فانه من المفيد ان نمتلك صيغة تربط بين الطاقة الكلية E وكمية الحركة الخطية النسبية p ، وذلك من خلال استخدام المعادلتين $E = \gamma mc^2$ و $p = \gamma mu$. بتربيع هاتين المعادلتين واجراء عملية الطرح يمكننا ان نتخلص من u (انظر المسألة 44). نحصل في النهاية على المعادلة التالية:

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad (1.27)$$

وهذه علاقة الطاقة مع كمية الحركة لجسيم في النسبية. عندما يكون الجسيم في حالة سكون فان $p = 0$ وبالتالي فان $E = E_R = mc^2$.

نعلم ان للضوء طبيعة مزدوجة فجسيم الضوء يعرف باسم فوتون *photon* وهي جسيمات تمتلك كتلة تساوي صفر. وبالتالي بالتعويض عن $m = 0$ في المعادلة 27.1 نجد ان

$$E = pc \quad (1.28)$$

هذه المعادلة هي الصيغة الدقيقة التي تربط بين الطاقة الكلية وكمية الحركة الخطية للفوتونات والتي تتحرك دائما بسرعة الضوء في الفراغ.

في النهاية، حيث ان الكتلة m للجسيم لا تعتمد على حركته فان m يجب ان تمتلك نفس القيمة في كل محاور الاسناد. لهذا السبب فان m في الاغلب تسمى الكتلة الثابتة. على الجانب الاخر حيث ان كلا من الطاقة الكلية وكمية الحركة للجسيم يعتمدان على السرعة فان هاتين الكميتين تعتمدان على محور الاسناد المرجعي الذي تقاس فيه.

عندما نتعامل مع جسيمات دون ذرية فانه من المناسب ان نعبر عن طاقتها بوحدة الالكتران فولت لان الطاقة تعطى لهذه الجسيمات من خلال تعجيلها في فرق جهد. معامل التحويل بين وحدة الجول ووحدة الالكتران فولت هو على النحو التالي:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

على سبيل المثال، كتلة الكتران هي $9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$. وعليه فان طاقة السكون للالكتران تكون على النحو التالي:

$$\begin{aligned} m_e c^2 &= (9.109 \times 10^{-31} \text{ kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s}^2) = 8.187 \times 10^{-14} \text{ J} \\ &= (8.187 \times 10^{-14})(1 \text{ eV}/1.602 \times 10^{-19} \text{ J}) = 0.511 \text{ MeV} \end{aligned}$$

سؤال للتفكير 9.1

فيما يلي ازواج من الطاقة - الجسيم 1 يمتلك طاقة E و $2E$ ، والجسيم 2 يمتلك طاقة E و $3E$ ، والجسيم 3 يمتلك طاقة $2E$ و $4E$ - وهي تمثل طاقة السكون والطاقة الكلية للجسيمات الثلاثة المختلفة أرتب الجسيمات من الأعلى إلى الأصغر طبقاً لـ (2) الكتلة و (b) طاقة الحركة، و (c) السرعة.

مثال 8.1 طاقة بروتون سريع The Energy of a Speedy Proton

(A) أوجد طاقة السكون لبروتون بوحدة الالكتران فولت.

الحل

تصور المسألة: حتى مع ان البروتون لا يتحرك الا انه يمتلك طاقة مرتبطة مع كتلته. اذا تحرك البروتون فانه يصبح يمتلك طاقة اكثر، مع الطاقة الكلية تساوي طاقة السكون وطاقة الحركة.

تصنيف المسألة: العبارة "طاقة السكون" تقترح ان نستخدم النسبية لحل هذه المسألة.

تحليل المسألة: استخدم معادلة 24.1 لايجاد طاقة السكون على النحو التالي:

$$E_R = m_p c^2 = (1.673 \times 10^{-27} \text{kg})(2.998 \times 10^6 \text{m/s})^2$$

$$= (1.504 \times 10^{-10} \text{J}) \left(\frac{1.00 \text{eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{J}} \right) = 938 \text{MeV}$$

(B) اذا كانت الطاقة الكلية للبروتون اكبر بثلاثة مرات من طاقة سكونها، ما هي السرعة التي يمتلكها البروتون؟

الحل:

باستخدام المعادلة 26.1 لربط الطاقة الكلية للبروتون مع طاقة السكون:

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

بالحل بالنسبة لـ u

$$1 - \frac{u^2}{c^2} = \frac{1}{9} \rightarrow \frac{u^2}{c^2} = \frac{8}{9}$$

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

(C) احسب طاقة الحركة للبروتون بوحدته الالكترن فولت.

الحل:

باستخدام المعادلة 25.1 لايجاد طاقة الحركة للبروتون على النحو التالي:

$$K = E - m_p c^2 = 3m_p c^2 - m_p c^2 = 2m_p c^2$$

$$= 2(938 \text{MeV}) = 1.88 \times 10^3 \text{MeV}$$

(D) ما هي كمية حركة البروتون؟

الحل:

استخدم المعادلة 27.1 لحساب كمية الحركة على النحو التالي:

$$E^2 = p^2 c^2 + (m_p c^2)^2 = (3m_p c^2)^2$$

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

$$p = \sqrt{8} \frac{m_p c^2}{c} = \sqrt{8} \frac{938 \text{ MeV}}{c} = 2.65 \times 10^3 \text{ MeV}/c$$

الخلاصة: وحدة كمية الحركة في الجزء (D) هي MeV/c، وهي وحدة تستخدم في فيزياء الجسيمات. للمقارنة يمكنك ان تقوم بحل هذه المسألة باستخدام المعادلات الكلاسيكية.

ماذا لو؟ في الفيزياء الكلاسيكية، اذا تضاعفت كمية الحركة للجسيم، وازدادت طاقة الحركة بأربعة مرات. ماذا يحدث لطاقة حركة البروتون في هذا المثال اذا تضاعفت كمية الحركة؟

الإجابة: بالاعتماد على ما قدر رأينا في النسبية حتى الان، فانه من المتوقع ان لا تزداد طاقة الحركة بأربعة مرات.

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

باستخدام هذه النتيجة في المعادلة 27.1 لايجاد الطاقة الكلية الجديدة على النحو التالي:

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

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

$$E_{new} = 33(m_p c^2) = 5.7 m_p c^2$$

باستخدام المعادلة 25.1 لايجاد طاقة الحركة الجديدة نحصل على ما يلي:

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

هذه القيمة اكبر بقليل من ضعفي طاقة الحركة التي قمنا بحسابها في الجزء (C)، وليس أربعة مرات. بصفة عامة فان معامل ازدياد طاقة الحركة اذا تضاعفت كمية الحركة يعتمد على كمية الحركة الابتدائية ولكنها تقترب من 4 مع اقتراب كمية الحركة من صفر. في هذه الحالة الأخيرة فان الفيزياء الكلاسيكية تصف هذه الحالة بشكل صحيح.

9.1 الكتلة والطاقة Mass and Energy

تمثل المعادلة 26.1 ($E = \gamma mc^2$) الطاقة الكلية للجسيم. تقترح هذه المعادلة الهامة ان الجسيم حتى عندما يكون في حالة سكون أي عندما تكون $\gamma = 1$ فانه لا يزال يمتلك طاقة هائلة من خلال كتلته. التجربة الاكيدة حول اثبات مبدأ تكافؤ الكتلة والطاقة تحدث في التفاعلات النووية والجسيمات الأولية بحيث يحدث تحول للكتلة إلى طاقة حركة. وعليه فانه لا يمكننا ان نستخدم مبادئ الحفظ على الطاقة في الحالات النسبية كما تعودنا في الفيزياء الكلاسيكية، يتوجب علينا ان نعدل مبدأ الحفظ على الطاقة ليشتمل على طاقة السكون كصورة من صور تخزين الطاقة.

يعتبر هذا المبدأ هاما جدا في العمليات الذرية والنووية بحيث يكون التغير المصاحب في الكتلة جزء كبير نسبيا من كتلته الابتدائية. في مفاعل نووية على سبيل المثال تتعرض نواة اليورانيوم لعمليات انشطارية، وهي عبارة عن تفاعلات ينتج عنها أجزاء اخف من المادة وتمتلك طاقة حركية كبيرة. في حالة ^{235}U ، المستخدم كوقود في محطات الطاقة النووية يتعرض لعملية انشطار ينتج عنها نواتين وبضعة نيوترونات. مجموع الكتل الكلية لهذه الأجزاء المنشطرة تكون اقل من كتلة ^{235}U بمقدار Δm . وهذا يقابله طاقة تعطى بـ Δmc^2 ترتبط مع فرق الكتلة وتساوي تماما مجموع طاقات حركة الأجزاء المنشطرة. تمتص طاقة الحركة مع حركة الأجزاء المنشطرة خلال الماء مما تسبب في ارتفاع الطاقة الداخلية للماء وترتفع درجة حرارته. هذه الطاقة الداخلية تستخدم لانتاج بخار لتحريك توربينات توليد الطاقة الكهربائية.

الان لنعتبر تفاعل اندماجي أساسي بحيث ان ذرتين ديتيريوم تتحدان مع بعض لتشكّل ذرة هيليوم. النقص في الكتلة الناتج عن تكوين ذرة هيليوم من ذرتين ديتيريوم يعطى بـ $\Delta m = 4.25 \times 10^{-29} \text{ kg}$. وعليه فان الطاقة المقابلة للتغير في الكتلة والتي تنتج عن تفاعل اندماجي واحد تساوي $\Delta mc^2 = 3.83 \times 10^{-12} \text{ J} = 23.9 \text{ MeV}$. لتقدير مقدار هذه النتيجة سوف نقوم باعتبار تحويل جرام واحد من الديتيريوم إلى هيليوم، فان الطاقة المتحررة سوف تكون بمقدار يصل إلى 10^{12} J !. وهذا مقدار من الطاقة يصل تكلفه انتاجها بالوسائل الأخرى ما يقارب \$30,000 انتجت بتحويل جرام واحد من الديتيريوم.

سوف ندرس المزيد من التفاصيل حول العمليات النووية في الفصل السابع من هذا الكتاب.

مثال 8.1 تغير الكتلة في الاضمحلال الإشعاعي Mass Change in a Radioactive Decay

نواة ^{216}Po غير مستقرة لها نشاط إشعاعي. تضمحل هذه النواة إلى ^{212}Pb باطلاق جسيمات الفا وهي عبارة عن انوية ذرة الهيليوم ^4He . الكتل على النحو التالي:

$$m_i = m(^{216}\text{Po}) = 216.001915 \text{ u}$$

$$m_f = m(^{212}\text{Pb}) + m(^4\text{He}) = 211.991898 \text{ u} + 4.002603 \text{ u}$$

(A) اوجد التغير في الكتلة في هذا النشاط الاضمحلاي.

الحل

تصور المسألة: النظام في الحالة الابتدائية هو نواة ^{216}Po ، تخيل ان كتلة النظام تتناقص خلال الاضمحلال وتتحول إلى طاقة حركة لجسيمات الفا ونواة ^{212}Pb بعد الاضمحلال.

تصنيف المسألة: سوف نستخدم المبادئ التي تم مناقشتها في هذا الجزء ونصنف هذا المثال على انه مسألة تعويض مباشرة.

نحسب التغير في الكتلة على النحو التالي:

$$\Delta m = 216.001915u - (211.991898u + 4.002603u)$$

$$= 0.007414u = 1.23 \times 10^{-29}kg$$

(B) اوجد مقدار طاقة التي تمثل هذا التغير في الكتلة.

الحل:

باستخدام المعادلة 24.1 لايجاد الطاقة المصاحبة لهذا التغير في الكتلة على النحو التالي:

$$E = \Delta mc^2 = (1.23 \times 10^{-29}kg) \left(3.00 \times \frac{10^8m}{s} \right)^2$$

$$= 1.11 \times 10^{-12}J = 6.92MeV$$

10.1 النظرية النسبية العامة The General Theory of Relativity

النظرية النسبية العامة هي نظرية وضعها العالم ألبرت أينشتاين نشرها عام 1915، وهي تعميم للنظرية النسبية الخاصة والتي غيرت مفهوم النسبية في قياس الكميات الفيزيائية ليصبح نظاما معتمدا على أربعة أبعاد يكون الزمن البعد الرابع فيها، وبالتالي لم يعد من الدقة بمكان الحديث عن الكميات الفيزيائية بإهمال البعد الزمني النسبي والذي تمثله السرعة. لقد أضافت النظرية النسبية العامة فكرة تحذب الفراغ بوجود المادة، وهو الأمر الذي يعني أن الخطوط المستقيمة تشوه او تتحذب تحت تأثير الكتلة، وقد تم التحقق من النظرية النسبية العامة عندما تحقق تنبؤ أينشتاين بالتباعد الظاهري لنجمين في فترة كسوف الشمس وذلك يعود إلى تحذب مسار الضوء القادم من النجمين بسبب مرورهما بالقرب من الشمس ذات الكتلة الهائلة نسبيا وبالتالي انحرف خط سير الضوء القادم من النجمين.

تفسر لنا النظرية النسبية العامة الجاذبية بطريقة تختلف تماما عن تفسير نيوتن لها، حيث ان اينشتين من خلال نظريته النسبية العامة اعتبر الجاذبية على انها تشوه deformation في الزمان والمكان تحدثه الكتلة في جوارها، على هذا الأساس يمكننا تفسير دوران جسم حول الأرض بأنه سير للجسم بشكل مستقيم على الخط المحيطي "الجيوذيوي" للزمان والمكان المحيط بالأرض، تماما كما يسير الانسان بشكل مستقيم على الارض على طول الخط الجيوذيوي لها. وعلى هذا الاساس فان وجود المادة هو ما يحدد هندسة الزمان والمكان.

حتى هذه اللحظة نحن كنا نتجنب الإجابة المباشرة على اللغز الغريب وهو ان الكتلة تمتلك خاصيتين مختلفتين وهما: خاصية التجاذب بين الكتل وخاصية القصور التي تمثل مقاومة الجسم للتسارع. للتمييز بين هاتين الخاصيتين سوف نستخدم الرمز g و i لنكتب المعادلتين التاليتين:

$$F_g = m_g g \quad \text{خاصية التجاذب}$$

$$\sum F = m_i a \quad \text{خاصية القصور}$$

لقد تم اختيار قيمة ثابت الجاذبية G لتجعل مقدار كلا من m_i و m_g متساويين عددياً. بغض النظر عن كيف تم اختيار الثابت G ، فإن التناسب الدقيق لـ m_i و m_g قد تم التوصل لها بشكل عملي وبدقة عالية تصل لبضعة أجزاء في 10^{12} . لهذا تبدو كلا من الكتلة التجاذبية والكتلة القصورية متناسبة تماماً.

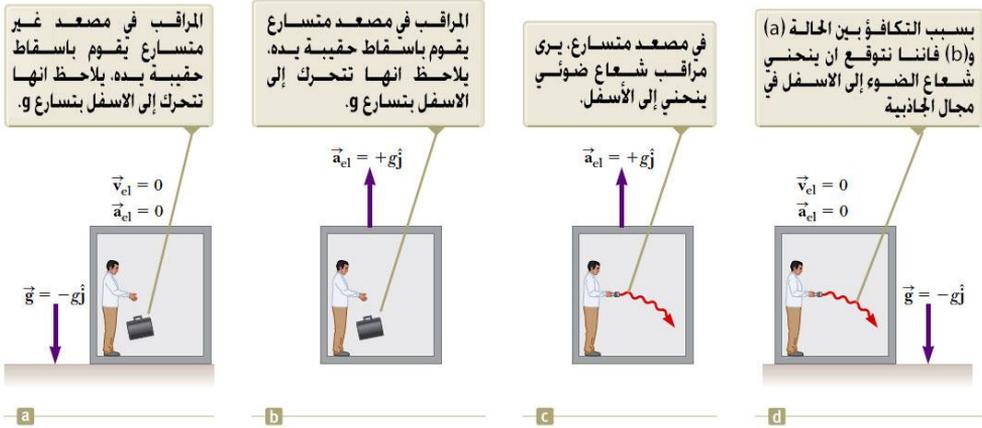
لماذا؟ تبدو الكتلة على انها تشتمل على مفهومين مختلفين وهما: قوة التجاذب التبادلية بين كتلتين وقوة المقاومة او الممانعة لكتلة متسارعة. هذا السؤال الذي حير نيوتن والكثير من الفيزيائيين الاخرين للعديد من السنوات قد تمت الإجابة عنه بواسطة اينشتين في العام 1916 عندما نشر نظريته في الجاذبية والتي تعرف بالنظرية النسبية العامة *general theory of relativity*. ولكون هذه النظرية تحتوي على الكثير من الرياضيات المعقدة فاننا سوف نقدم بعض التلميحات حول اناقته وجمالها.

اننا نميز في الفيزياء بين محاور اسناد قصورية ومحاور اسناد غير قصورية، حيث يمكن لأي جسم أن يحافظ على حركته المنتظمة في محاور الاسناد القصورية ما لم يخضع لقوة ما أو يتأثر بجسم آخر ضمن نفس محاور الاسناد، في حين تكتسب الأجسام في محاور الاسناد غير القصورية تسارعا ناجما عن حركة النظم نفسه وتسارعه وليس نتيجة تأثير جسم داخلي ضمن النظام. تتم تفسير مقاومة هذا التسارع بقوى افتراضية ندعوها قوى القصور *inertial forces*

في حالة الحركة المستقيمة للنظام القصورى او قوى قصورية طاردة في حالة الحركة الدورانية للنظام القصورى. هذه القوى تعتبر قوى افتراضية غير فيزيائية في الميكانيك الكلاسيكي النيوتني لكن في النسبية العامة ليس هناك مجالاً لمثل هذا التمييز حسب مبدأ التكافؤ، ولتوضيح هذا الامر دعنا نضرب هذا المثال التخيلي الذي طرحه اينشتين لتفسير فكرته.

من وجهة نظر اينشتين فان السلوك المزدوج للكتلة كان دليلاً قوياً ورابطاً أساسياً بين السلوكين. لقد بين انه لا توجد تجربة ميكانيكية (مثل سقوط جسم) يمكن ان تميز بين الحالتين الموضحتين في الشكلين 17.1 a و b. في الشكل 17.1 a يقف شخص في مصعد

على سطح كوكب ويشعر بانه مضغوطا ناحية الأرضية بسبب قوة الجاذبية. اذا ترك حقيبته الممسك بها فانه سيلاحظ انها تتحرك ناحية الأرضية بتسارع $\vec{g} = -g\hat{j}$. اما في الشكل 17.1 b يكون الان الشخص في المصعد ولكنه يتسارع إلى الأعلى في الفراغ بـ $\vec{a}_{el} = +g\hat{j}$. يشعر الشخص بانه مضغوطا في اتجاه الأرضية بنفس القوة التي في الشكل 17.1 a. اذا قام بترك حقيبته الممسك بها بيده فانه سيلاحظ انها تتحرك نحو الأرضية بتسارع مقداره g ، وهو يساوي تماما الحالة الأولى. في كل حالة فان الجسم الذي تركه المراقب يتعرض إلى تسارع مقداره g نحو الأسفل بالنسبة لأرضية المصعد. في الشكل 17.1 a يكون الشخص في حالة سكون في محور اسناد قصوري في مجال الجاذبية الأرضية الناتج عن الكوكب. في الشكل 17.1 b يكون الشخص في محور اسناد غير قصوري يتسارع في فراغ عديم الجاذبية. لقد ادعى اينشتين ان هاتين الحالتين متكافئتين تماما.



الشكل 17.1 (a) مراقب في حالة سكون في مصعد في مجال جذبي منتظم يعطى بـ $\vec{g} = -g\hat{j}$ في اتجاه الأسفل. (b) المراقب في منطقة انعدام للجاذبية، لكن المصعد يتحرك للأعلى بتسارع $\vec{a}_{el} = +g\hat{j}$. طبقا لأينشتين فان محور الاسناد في (a) و(b) متكافئين في كل شيء. لا توجد تجربة يمكن ان تميز أي فرق بين محوري الاسناد. (c) يشاهد مراقب شعاع من الضوء في مصعد متسارع. (d) يتوقع اينشتين سلوك شعاع ضوئي في مجال جذبي.

اخذ اينشتين هذه الفكرة لمدى ابعده من ذلك وافترض انه لا توجد تجربة ميكانيكية او غيرها يمكن ان تميز بين هاتين الحالتين. هذا يشمل كل ظاهرة (ليس فقط الميكانيكية) لها نتائج مدهشة. على سبيل المثال افترض نبضة ضوئية انطلقت بشكل افقي عبر مصعد كما هو موضح في الشكل 17.1 c، بحيث ان المصعد كان يتسارع إلى الأعلى في الفراغ. من وجهة نظر المراقب في محور اسناد قصوري خارج المصعد فان الضوء سوف يتحرك في مسار مستقيم بينما تتسارع أرضية المصعد إلى الأعلى. اما طبقا لمراقب في المصعد فان المسار المقذوف للنبضة الضوئية سوف ينحني إلى الأسفل بالنسبة لأرضية المصعد (والمراقب) التي تتسارع نحو الأعلى. لهذا فانه بالاعتماد على التساوي بين الجزئين (a) و(b) للشكل، افترض اينشتين ان شعاع الضوء يجب أيضا ان ينحني للأسفل بواسطة مجال الجاذبية كما هو موضح في الشكل 17.1 d. وبالفعل أوضحت التجارب هذه الظاهرة وتحقق من هذا التأثير بالرغم من ان مقدار الانحناء كان صغيرا. لقد تم توجيه شعاع ليزر إلى الأفق ووجد انه ينحني عن مساره باقل من 1cm بعد ان يقطع مسافة مقدارها 6000 km. (لم يسبق لنيوتن ان توقع ان يكون هناك أي انحناء في نظريته للجاذبية).

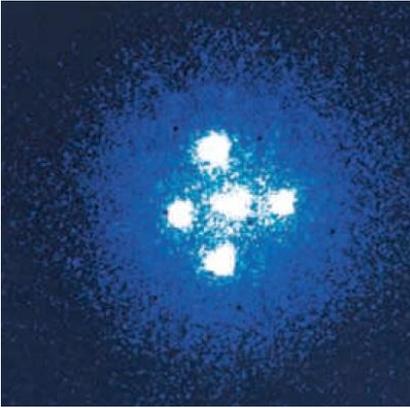
فرضيتي اينشتين للنظرية النسبية العامة هما على النحو التالي:

- كل قوانين الطبيعة لها نفس الشكل للمراقبين في أي محور اسناد سواء كانت متسارعة أو لا.
- في جوار أي نقطة فان الجاذبية تكافئ أي محور اسناد متسارع في الفراغ عديم الجاذبية (مبدأ التكافؤ).

ان واحد من النتائج المبهرة التي تتوقعها النظرية النسبية العامة هو ان الزمن يتغير بالجاذبية. ان الساعة الموجودة في الجاذبية تعمل ابطأ من ساعة تعمل في انعدام الجاذبية. كما ان ترددات الاشعاع المنبعث من الذرات في وجود مجال جاذبية قوي ينزاح ناحية الأحمر لترددات اقل عندما يقارن مع نفس الانبعاث في وجود مجال ضعيف. لقد تم رصد هذا الانزياح ناحية الأحمر الجذبي في الخطوط الطيفية المنبعثة من النجوم الهائلة. كما

انه قد تم التحقق أيضا من ذلك على الأرض بمقارنة ترددات اشعة جاما المنبعثة من انوية منفصلة عن بعضها البعض بمسافات رأسية تساوي 2m.

تقترح الفرضية الثانية ان المجال الجذبي يمكن ان يتحول عند أي نقطة اذا اخترنا محور اسناد متسارع مناسب، يسقط سقوطا حرا. لقد طور اينشتين طريقة مبتكرة لوصف التسارع اللازم لجعل مجال الجاذبية ينعدم. لقد حدد مفهوم تحذب المكان والزمان الذي يصف تأثير الجاذبية عند أي نقطة. في الواقع فان تحذب المكان والزمان قد استبدل بالكامل نظرية نيوتن للجاذبية. طبقا لاينشتين لا يوجد هناك أي شيء كالقوة الجاذبية. ان وجود الكتلة يتسبب في تحذب المكان والزمان بجوار الكتلة وهذا التحذب يفرضه مسار المكان والزمان الذي يتبعه كل الاجسام المتحركة بحرية.



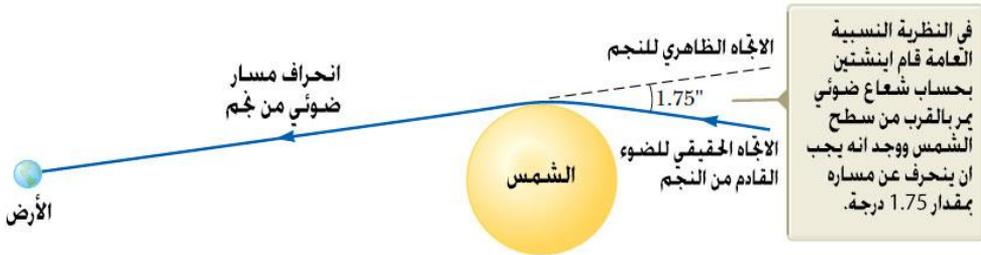
البقع الأربعة المضيئة هي عبارة عن صور لنفس المجرة التي قد انحرفت حول كتلة هائلة موضوعة بين المجرة والأرض. يعمل الجسم الهائل كعدسة تسبب في تركيز الاشعة المتباعدة الصادرة عن المجرة وتجميعها على الأرض. جدير بالذكر انه اذا كان الجسم الهائل بين المجرة والأرض له كتلة منتظمة التوزيع فاننا سوف نرصد حلقة دائرية بدلا من النقاط الأربعة.

كمثال على تأثيرات تحذب المكان والزمان تخيل مسافرين يتحركان على مسارين متوازيين يبعدان عن بعضهما البعض بضعة امتار على سطح الأرض ويحافظان على اتجاه الشمال على امتداد خطين من خطوط الطول. عندما يرصدان بعضهما البعض بالقرب من خط الاستواء فان كل واحد سوف يدعي ان مسارهما متوازيان تماما. ومع وصولهما الى القطب الشمالي فانها يلاحظان انها يتحركان بالقرب من بعضهما البعض ويتقابلان عند القطب الشمالي. لهذا فانها يدعيان انها يتحركان على مسارين متوازيين لكن يقتربان من بعضهما البعض، كما لو ان هناك قوة تجاذبية بينهما. يستنتج المسافرين هذه النتيجة بالاعتماد على خبرتهما اليومية للحركة على اسطح مستوية. من خلال هذا التمثيل

التخيلي نستنتج انهما يتحركان على اسطح منحنية، وان الشكل الهندسي للاسطح المنحنية تسبب هذا التقارب وليست الجاذبية. بطريقة مشابهة فان النظرية النسبية العامة تستبدل دلالات القوى بحركة الاجسام خلال مكان وزمان منحني او محذب.

واحدة من توقعات النظرية النسبية العامة هو ان اشعة الضوء تمر بالقرب من الشمس يجب ان تنحرف في مكان وزمان منحني بسبب كتلة الشمس. لقد تم التحقق من هذا التوقع عندما رصد الفلكيون انحراف اشعة الضوء بجوار الشمس عندما حدث كسوف كلي للشمس والذي حدث مباشرة بعد الحرب العالمية الأولى كما هو موضح في الشكل 18.1. عندما تم الإعلان عن هذا الاكتشاف اصبح اينشتين مشهورا عالميا.

اذا أصبح تركيز الكتلة كبيرا جدا كما هو متوقع عند استنزاف كل الوقود النووي لنجم هائل وينهار إلى حجم صغير جدا يعرف باسم الثقب الأسود black hole. فانه في هذه الحالة يكون تحذب المكان والزمان كبيرا جدا داخل مسافة محددة من مركز الثقب الأسود وعندها فان كل المادة والضوء ينحسر داخل الثقب الأسود.



الشكل 19.1 انحراف شعاع ضوئي مستقيم يمر بالقرب من الشمس. بسبب هذا التأثير فان الشمس او أي جسم اخر يمكن اعتباره عدسة جاذبية *gravitational lens*.

□

مفاهيم وتعريفات واساسيات

الصيغة النسبية لكمية الحركة الخطية linear momentum لجسيم يتحرك بسرعة \vec{u} هي

$$\vec{p} = \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\vec{u} \quad (1.19)$$

القوة النسبية \vec{F} المؤثرة على جسيم كمية حركته الخطية هي \vec{p} تعرف على النحو التالي:

$$\vec{F} \equiv \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (1.20)$$

الفرضيتان الاساسيتين للنظرية النسبية هما:

1. مبدأ النسبية: قوانين الفيزياء يجب ان تكون نفسها في كل محاور الاسناد المرجعية القصورية.

2. ثبات سرعة الضوء: ان سرعة الضوء في الفراغ لها نفس القيمة $c = 3.00 \times 10^8$ m/s في كل محاور الاسناد القصورية، بغض النظر عن سرعة المراقب او سرعة المصدر الباعث للضوء.

النتائج الثلاثة للنظرية النسبية الخاصة هي على النحو التالي:

- الاحداث التي تحدث في نفس اللحظة بالنسبة لمراقب ليست بالضرورة ان تحدث في نفس اللحظة بالنسبة لمراقب اخر في حالة حركة بالنسبة للأول.
- الساعات المتحركة بالنسبة لمراقب تتحرك ببطء بمعامل $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. تعرف هذه الظاهرة بالتأخير الزمني time dilation.
- تقاس اطوال الاجسام المتحركة اقل من الطول الأصلي حيث تبدو منكشمة في اتجاه الحركة بمعامل $1/\gamma = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$. تعرف هذه الظاهرة باسم الانكماش الطولي length contraction.

لتحقيق فرضيات النظرية النسبية يجب ان نقوم باستبدال معادلات جاليليو للتحويلات بمعادلات لورنز:

$$x' = \gamma(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad (1.11)$$

حيث ان $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ ومحور الاسناد S' يتحرك في اتجاه محور x بسرعة v بالنسبة لمحور الاسناد S.

الصيغة النسبية لمعادلة لورنز لتحويل السرعة هي

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \quad (1.16)$$

حيث ان u'_x هي المركبة x لسرعة جسم كما تقاس في محور الاسناد S' و u_x مركبته كما تقاس في محور الاسناد S.

الصيغة النسبية لطاقة حركة جسيم تعطى بالعلاقة التالية:

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 \quad (1.23)$$

الحد الثابت mc^2 في المعادلة (23.1) يعرف بطاقة السكون E_R للجسيم:

$$E_R = mc^2 \quad (1.24)$$

الطاقة الكلية للجسيم تعطى بالعلاقة التالية:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma mc^2 \quad (1.26)$$

كمية الحركة الخطية النسبية لجسيم ترتبط مع الطاقة الكلية من خلال المعادلة التالية:

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad (1.27)$$

أسئلة موضوعية Objective Questions

1. أي من العبارات التالية تعتبر فرضيات أساسية للنظرية النسبية الخاصة؟ هناك أكثر من عبارة صحيحة. (a) الضوء يتحرك خلال مادة تعرف بالاثير. (b) تعتمد سرعة الضوء على محور الاسناد المرجعي القصوري الذي يقاس فيه. (c) تعتمد قوانين الفيزياء على محور الاسناد القصوري المرجعي. (d) تعتبر قوانين الفيزياء متكافئة في كل محاور الاسناد المرجعية القصورية. (e) لا تعتمد سرعة الضوء على محور الاسناد القصوري الذي تقاس فيه.

2. نقوم بقياس حجم مكعب في حالة سكون بمقدار V_0 . ومن ثم نقوم بقياس نفس المكعب عندما يمر عنك في اتجاه يوازي جانب واحد من المكعب. سرعة المكعب هي $0.980c$ بحيث ان $\gamma \approx 5$. هل الحجم المقاس يكون (a) $V_0/25$ أو (b) $V_0/5$ أو (c) V_0 أو (d) $5V_0$ أو (e) $25V_0$ ؟

3. عندما تتحرك سيارة بسرعة v مبتعدة عن مراقب على الأرض، أي من العبارات التالية تكون صحيحة عن قياس سرعة شعاع الضوء الصادر عن مصابيحها؟ هناك أكثر من عبارة صحيحة. (a) يقيس المراقب على الأرض سرعة الضوء على انها $c + v$. (b) يقيس سائق السيارة سرعة الضوء على انه c . (c) يقيس المراقب على الأرض سرعة الضوء على انه c . (d) يقيس سائق السيارة سرعة الضوء على انها $c - v$. (e) يقيس المراقب على الأرض سرعة الضوء على انها $c - v$.

4. مركبة فضائية لها شكل كروي تتحرك بسرعة $0.500c$ وتمر على مراقب على الأرض. ما هو شكل العربة التي يرصدها مراقب عندما تمر عنه؟ (a) كروي (b) شكل اسطواني ممتددة على اتجاه حركتها (c) شكل وسادة دائرية، مسطحة على امتداد اتجاه الحركة (d) شكل مخروطي رأسه في اتجاه حركته.

5. رجل فضاء يتحرك في مركبة فضائية في الفضاء الخارجي في خط مستقيم بسرعة ثابتة مقدارها $0.500c$. أي من المؤثرات التالية سوف يتعرض لها رجل الفضاء؟ (a) سوف يشعر انه اثقل وزنا. (b) يشعر بصعوبة في التنفس. (c) معدل نبضات القلب سوف

تتغير. (d) احد ابعاد المركبة الفضائية سوف يصبح اقصر. (e) لا توجد إجابات صحيحة.

6. تتحرك مركبة فضائية وتمر عن الأرض بسرعة ثابتة. يقيس مراقب على الأرض دقائق عقرب ساعة بمعدل يساوي ثلث معدل ساعة على الأرض. ما هو معدل دقائق الساعة على الأرض كما يقيسها مراقب في المركبة الفضائية؟ (a) انها تدق بمعدل اكبر بثلاثة مرات من ساعته. (b) انها تدق بمعدل ثلاثة مرات مقارنة بساعته. (c) انها تدق بنفس معدل ساعته. (d) انها تدق بمعدل ثلث ساعته. (e) انها تدق بمعدل اقل من ثلث ساعته.

7. ساعتان متماثلتين وضعتا بجانب بعضهما البعض وتم ضبطهما بدقة. واحدة بقت على الأرض والأخرى وضعت في مدار دائري حول الكرة الأرضية وتدور بسرعة في اتجاه الشرق. (i) يقوم مراقب على الأرض بالقياسات، هل الساعة المتحركة (a) تتحرك اسرع من الساعة على الأرض، أو (b) تتحرك بنفس المعدل، أو (c) تتحرك بمعدل اقل؟ (ii) عادت الساعة المتحركة إلى موضعها الأصلي، وبعد ذلك، ماذا يحدث؟ (a) قراءتها تتأخر اكثر فاكث عن الساعة الأرضية. (b) انها تتأخر عن الساعة الأرضية بمعدل ثابت. (c) انها تتزامن مع الساعة الأرضية. (d) انها تقدم عن الساعة الأرضية بمقدار ثابت. (e) انها تقدم اكثر واكثر عن الساعة الأرضية.

8. فييا يلي ثلاثة جسيمات كلها تمتلك طاقة كلية مقدارها E : (a) فوتون، و (b) بروتون، و (c) إلكترون. رتب مقداير كمية الحركة للجسيمات من الأكبر إلى الأصغر.

9. (i) هل سرعة الكترون لها قيمة قصوى؟ (a) نعم وهي سرعة الضوء c (b) نعم بسرعة أخرى (c) لا (ii) هل مقدرا كمية حركة الالكترون تمتلك قيمة قصوى؟ (a) نعم وهي $m_e c$ (b) نعم بقيمة أخرى (c) لا. (iii) هل يكون لطاقة حركة الالكترون قيمة قصوى؟ (a) نعم وهي $m_e c^2$ (b) نعم وهي $1/2 m_e c^2$ (c) نعم بقيمة أخرى (d) لا.

10. جسم فلكي بعيد (نجم الكويزار) يتحرك مبتعدا عنا بسرعة تساوي نصف سرعة الضوء. ما هي سرعة الضوء الذي سوف نستقبله من نجم الكويزار؟ (a) اكبر من c (b) يساوي c (c) بين $c/2$ و c (d) بين 0 و $c/2$.

أسئلة نظرية Conceptual Questions

1. سرعة الضوء في الماء هي 230 Mm/s . افترض الكترولن يتحرك خلال الماء بسرعة 250 Mm/s . هل هذا يتناقض مع مبدأ النسبية؟ اشرح.

2. اشرح لماذا عندما نقيس طول ساق فانه من الضروري ان نرصد موضعي طرفي الساق قد تم رصدهما في نفس اللحظة.

3. يصل قطار في اتجاهك بسرعة كبيرة عندما كنت تقف على رصيف الانتظار. عندما يمر مراقب في القطار عنك فانكما تقومان ببدء بتشغيل مقطوعة موسيقية لبيتهوفن بواسطة جهاز MP3. (a) طبقا لك أي من المشغلين سوف ينتهي من المعزوفة قبل الاخر؟ (b) ماذا لو؟ طبقا للمراقب على القطار أي من المشغلين ينتهي من المعزوفة قبل الاخر؟ (c) أي من المشغلين في الحقيقة ينتهي من المعزوفة أولا؟

4. اذكر ثلاثة طرق في حياتنا اليومية سوف تتغير اذا كانت سرعة الضوء هي 50 m/s فقط.

5. كيف يمكن التعبير عن التسارع على منحنى المكان والزمان؟

6. اشرح كيف يستخدم تأثير دبلر مع أمواج الميكروويف لتحديد سرعة السيارات.

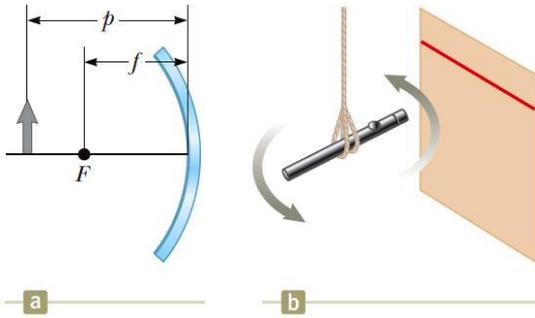
7. في العديد من الحالات، وجد نجم بالجوار يمتلك كوكب كبير يدور حوله، بالرغم من ان الضوء من القادم من الكوكب لا يمكن رؤيته بصورة منفصلة عن ضوء النجم. باستخدام فكرة نظام يدور حول مركز ثقله وظاهرة انزياح دبلر للضوء، اشرح كيف يمكن لرجل فضاء ان يحدد وجود الكوكب الغير مرئي.

8. يتحرك جسيم بسرعة اقل من $c/2$. اذا تضاعفت سرعة الجسيم، ماذا يحدث لكمية حركته؟

9. اعطي تفسيراً فيزيائياً لتوضيح انه من المستحيل ان نقوم بتسريع جسم كتلته m إلى سرعة الضوء حتى مع التأثير عليه بقوة متواصلة.

10. (a) تصف ميكانيكا نيوتن بشكل صحيح اجسام تتحرك بسرعات عادية والميكانيكا النسبية تصف اجسام تتحرك بسرعات عالية جداً. (b) الميكانيكا النسبية تحتزل إلى ميكانيكا نيوتن في حالة ان الجسم اصبح يتحرك بسرعات صغيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء. ناقش ذلك بالمقارنة مع كلا من (a) و (b).

11. انه يقال ان اينشتين في مستقبل عمره طرح هذا الاستفسار، "ماذا أرى في المرآة اذا حملتها معي وترحكت بسرعة قريبة من سرعة الضوء؟ كيف يمكنك ان تجاوب على هذا الاستفسار؟



الشكل CQ1.12

12. (i) وضع جسم عند الموضع $p > f$ من مرآة مقعرة كما هو موضح في الشكل CQ1.12a، حيث ان f هو البعد البؤري للمرآة. في خلال فترة زمنية محدودة تحرك الجسم إلى اليمين عند نقطة بؤرة المرآة F

اثبت ان صورة الجسم تتحرك بسرعة اكبر من سرعة الضوء. (ii) مؤشر ليزر معلق بشكل افقي ويدور بسرعة كبيرة كما هو موضح في الشكل CQ1.12b. اثبت ان بقعة الضوء التي تظهر على الشاشة البعيدة يمكن ان تتحرك عبر الشاشة بسرعة اكبر من سرعة الضوء. (iii) ناقش ان التجريبتين (i) و (ii) لا يمكن ان تنتهك مبدأ ان المادة والطاقة والمعلومات يمكن ان تتحرك بسرعة اكبر من سرعة الضوء في الفراغ.

13. بالنسبة لمحاور الاسناد المرجعية كيف تختلف النظرية النسبية العامة عن النظرية النسبية الخاصة؟

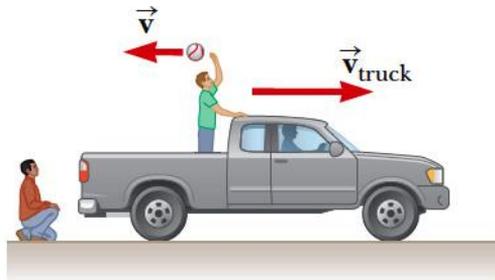
14. ساعتين متماثلتين في نفس المنزل واحدة في الطابق العلوي والأخرى في الطابق السفلي. أي من الساعتين تعمل بشكل ابطأ؟ اشرح.

مسائل Problems

1. تشير لمسائل تطبيق مباشر 2. تشير لمسائل متوسطة الصعوبة 3. تشير إلى مسائل تحدي. 1. مسائل لها حل مفصل في دليل الطالب الإرشادي 1. تشير إلى مسائل لها حل مفصل فيديو على موقع داعم للكتاب. QIC تشير إلى مسائل تحتاج إلى حل وتفسير S تشير إلى مسائل رمزية تتطلب تفسير GP تشير إلى مسائل إرشادية Shaded تشير إلى مسائل مزدوجة تطور مفاهيم برموز وقيم عددية.

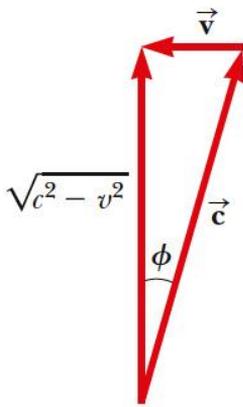
الفصل 1.1 مبدأ جاليليو للنسبية The Principle of Galilean Relativity

1. تتحرك العربة في الشكل P1.1 بسرعة مقدارها 10.0 m/s بالنسبة إلى الأرض. القي الشخص الواقف على العربة كرة للخلف بسرعة مقدارها 20.0 m/s بالنسبة للعربة. ما هي سرعة الكرة كما يقيسها المراقب على الأرض؟



الشكل P1.1

2. لاحظ مراقب في محور اسناد مختبر ان قانون نيوتن الثاني متحقق. افترض ان قياس القوى والكتل يكون متساوي في أي محور اسناد مرجعي لسرعات صغيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء. (a) اثبت ان قانون نيوتن الثاني متحقق أيضا لمراقب يتحرك بسرعة ثابتة وصغيرة بالنسبة لسرعة الضوء، وبالنسبة لمحور اسناد المختبر. (b) اثبت ان قانون نيوتن الثاني غير متحقق في محور اسناد يتحرك مرورا بالمختبر بتسارع ثابت.



الشكل P1.3

3. تبلغ سرعة الأرض في مدارها 29.8 km/s. اذا كان هذا هو مقدار السرعة \vec{v} للرياح الاثرية في الشكل P1.3، اوجد الزاوية ϕ بين سرعة الضوء \vec{c} في الفراغ ومحصلة سرعة الضوء اذا كان هناك اثير.

4. سيارة كتلتها 2000 kg تتحرك بسرعة مقدارها 20.0 m/s تصطدم بسيارة ساكنة أخرى كتلتها 1500 kg وتلتصق بها عند إشارة مرور. اثبت ان كمية الحركة محفوظة في محور اسناد يتحرك بسرعة 10.0 m/s في اتجاه حركة السيارة.

الفصل 2.1 تجربة ميكلسون مورلي The Michelson-Morley Experiment

الفصل 3.1 مبدأ اينشتين للنسبية Einstein's Principle of Relativity

الفصل 4.1 نتائج النظرية النسبية الخاصة

Consequences of Special Theory of Relativity

5. ما هي السرعة التي يجب ان تتحرك بها عصاة طولها متر لتتكمش ويصبح طولها 0.500 m؟

6. **QC** عصاة طولها متر تتحرك بسرعة مقدارها 0.900c بالنسبة إلى سطح الأرض وتقرب من مراقب في حالة سكون بالنسبة لسطح الأرض. (a) ما هو طول العصاة كما

يقيسه المراقب؟ (b) كيف تتغير اجابتك للجزء (a) اذا بدأ المراقب بالركض في اتجاه العصاة؟

7. ما هي السرعة التي تتحرك بها ساعة اذا كان معدل دقاتها يعادل نصف معدل دقات ساعة في حالة سكون بالنسبة للمراقب؟

8. يتكون جسيم الميون muon في طبقات الجو العليا ويتحرك بسرعة تصل إلى $0.990c$ في اتجاه مراقب على سطح الأرض لمسافة مقدارها 4.6 km قبل ان يضمحل ويتحول إلى الكترون ونيوترون ومضاد النيوترون ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$). (a) ما هي الفترة الزمنية التي يعيشها الميون كما تقاس في محور اسناده؟ (b) ما هي المسافة التي تقطعه الأرض كما تقاس في محور اسناد الميون؟

9. يبعد نجم 5.00 ly (هي وحدة قياس المسافة وتعرف بالسنة الضوئية) عن الأرض. ما هي السرعة التي يجب تتحرك بها مركبة فضائية في رحلة إلى النجم وتكون فيها المسافة المقطوعة كما يقيسها مراقب في المركبة الفضائية وتساوي 2.00 ly ؟

10. يتحرك رجل فضاء في مركبة فضائية بسرعة $0.500c$ بالنسبة إلى الأرض. يقيس رجل الفضاء نبض قلبه بمعدل 75.0 نبضة لكل دقيقة. نبضات قلب رجل الفضاء ترسل بواسطة الراديو إلى الأرض عندما كانت مركبته الفضائية تتحرك في اتجاه عمودي على الخط الواصل بين المركبة والمراقب على الأرض. (a) ما هو معدل نبضات قلب رجل الفضاء كما يقيسه مراقب على الأرض؟ (b) ماذا لو؟ ما هو معدل نبضاته اذا أصبحت سرعة المركبة الفضائية $0.990c$ ؟

11. يقود فيزيائي سيارته ويقطع الإشارة المرورية. عندما اوقفه رجل البوليس قال له ان ظاهرة دبلر جعلته يرى الضوء الأحمر الذي طوله الموجي 650 nm يبدو اخضر وطوله الموجي 520 nm . الا ان رجل البوليس اصدر له مخالفة مرورية. ما هي السرعة التي كان يتحرك بها الفيزيائي طبقا لوجهة نظره؟

12. يمر رجل فضاء على مركبة فضائية تتحرك بسرعة عالية. يجبرك رجل الفضاء ان طول مركبته 20.0 m وانه يقيس طول مركبتك المماثلة لمركبته 19.0 m. طبقا لملاحظتك، (a) ما هو طول مركبتك، و (b) ما هو طول المركبة الفضائية لرجل الفضاء، و (c) ما هي سرعة رجل الفضاء بالنسبة لمركبتك؟

13. تتحرك مركبة فضائية مبتعدة عن الأرض بسرعة $0.800c$. يقوم مراقب في المركبة الفضائية بقياس الفترة الزمنية لدورانها حول نفسه دورة واحدة يساوي 3.00 s. ما هي الفترة الزمنية اللازمة لهذه الدورة طبقا لمراقب على الأرض؟

14. ما هي قيمة v التي تجعل $\gamma = 1.010$ ؟ لاحظ انه لسرعات اقل من هذه القيمة فان كلا من التأخير الزمني والانكماش الطولي يتأثران بمقدار اقل من 1%؟

15. قطار سريع طوله الأصلي 100 m يتحرك بسرعة مقدارها $0.950c$ عندما يمر من خلال نفق طوله الأصلي يساوي 50.0 m. عندما يرصد مراقب خارج النفق يجد ان القطار بالكامل يدخل النفق؟ اذا كان كذلك فما هو الزمن الكلي لتمر نهاية القطار الخلفية من النفق؟

16. التوأمان سيبدو وجوسلو تركا الأرض إلى الكوكب X الذي يبعد 20.0 ly في محور اسناد بحيث ان كلا الكوكبين في حالة سكون. التوأمين لهما نفس العمر وغادرا في نفس اللحظة على مركبتين مختلفتين. تتحرك مركبة سيبدو بسرعة $0.950c$ وجوسلو بسرعة $0.75c$. (a) احسب فرق العمر بين التوأمين بعد ان تهبط مركبة جوسلو على الكوكب X. (b) أي من التوأمين اكبر؟

17. مركبة فضائية طولها الأصلي 300 m تمر بمراقب على الأرض. طبقا لهذا المراقب، فانه يتطلب فترة زمنية مقدارها $0.750 \mu\text{s}$ لتمر المركبة الفضائية من نقطة ثابتة. احسب سرعة المركبة الفضائية كما يقيسها مراقب على الأرض.

S.18 مركبة فضائية طولها الأصلي L_p تمر بمراقب على الأرض. طبقاً لهذا المراقب فإنه يتطلب فترة زمنية مقدارها Δt لتمر المركبة الفضائية من نقطة ثابتة. احسب سرعة المركبة الفضائية كما يقيسها مراقب على الأرض.

19. تتحرك ساعة ذرية بسرعة 1000 km/h لمدة 1.00 h كما تقاس بواسطة ساعة مماثلة على الأرض. عند نهاية الفترة الزمنية 1.00 h ما مقدار النانوثانية التي تأخرها الساعة المتحركة بالمقارنة مع ساعة على الأرض؟

20. كوكب فضائي يدور في مجرة تبعد عنا عدة سنوات ضوئية. مستوى مدار الكوكب عمودي على الخط الواصل بين المجرة والشمس، بحيث ان الكوكب في موضع ثابت بالنسبة للشمس. قام سكان هذا الكوكب ببث راديو على القناة الثانية عند تردد 57.0 MHz . اذا كان خط الأفق نحونا في مستوى مدار الكرة الأرضية. اوجد الفرق بين الترددات العالية والترددات المنخفضة التي يستقبلها نتيجة للحركة المدارية للأرض حول الشمس.

21. يتراجع مصدر ضوئي عن مراقب بسرعة v_s صغيرة بالمقارنة مع c . (a) اثبت ان الانزياح في الطول الموجي يعطى بالعلاقة

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v_s}{c}$$

تعرف هذه الظاهرة بالانزياح نحو الأحمر لان الضوء المرئي ينزاح ناحية الأحمر. (b) قياسات طيفية للضوء عند $\lambda = 397 \text{ nm}$ والقادم من مجرة يظهر انزياح نحو الأحمر بمقدار 20.0 nm . ما هي سرعة المجرة؟

22. QIC في العام 1963 يدور رجل فضاء حول الأرض 22 مرة، وذكر في الصحف ان في كل دورة زاد عمر رجل الفضاء 2 مليثانية لكل ثانية. (a) افترض ان رجل الفضاء كان على ارتفاع 160 km فوق الأرض في مدار دائري، احسب الفارق الزمني بين شخص على الأرض ورجل الفضاء لـ 22 دورة. يمكنك ان تستخدم التقريب التالي:

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} \approx 1 + \frac{x}{2}$$

لقيم x صغيرة. (b) هل في اعتقادك ان الصحافة قد أعطت معلومات دقيقة؟ اشرح.

23. رصد رادار شرطة المرور سرعة سيارة (P1.23) على النحو التالي. تصدر أمواج ميكروويف بتردد معروف بدقة في اتجاه السيارة. السيارة المسرعة تعكس أمواج الميكروويف بانزياح دبلر. تستقبل الأمواج المنعكسة وتندمج مع الأمواج الصادرة. تحدث ظاهرة الضربات بين اشارتي أمواج الميكروويف. يقاس تردد الضربات. (a) لموجة كهرومغناطيسية تنعكس وتعود إلى مصدرها الأصلي عن مرآة سرعتها v ، اثبت ان الموجة المنعكسة لها التردد

$$f' = \frac{c+v}{c-v} f$$

حيث ان f هو تردد المصدر. (b) لاحظ ان v اقل بكثير من c ، اثبت ان تردد الضربات يمكن ان يكتب على النحو $f_{beat} = 2v/\lambda f$. (c) ما هو تردد الضربات الذي يقاس للسيارة عندما يكون سرعتها 10.0 m/s اذا كان تردد أمواج الميكروويف 30.0 GHz ؟ (d) اذا تم قياس تردد الضربات في الجزء (c) بدقة في حدود $\pm 5.0 \text{ Hz}$ ، ما هي دقة قياس السرعة؟



الشكل P1.23

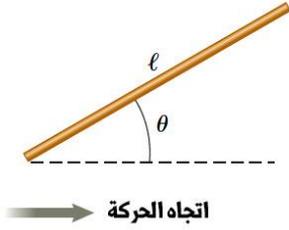
الفصل 5.1 معادلات تحويلات لورنز

The Lorentz Transformation Equations

24. رصد مراقب 1 نبضتين ضوئيتين تصدران من نفس المكان، لكن تفصلهما فترة زمنية مقدارها $3.00 \mu\text{s}$. اما المراقب 2 فقد رصد الفترة الزمنية بين النبضتين تساوي $9.00 \mu\text{s}$. (a) ما سرعة المراقب 2 بالنسبة للمراقب 1؟ (b) طبقا للمراقب 2 ما هو الفارق المكاني للنبضتين؟

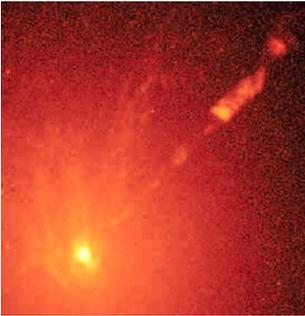
25. ضوء فلاشي احمر عند الموضع $x_R = 3.00 \text{ m}$ والزمن $t_R = 1.00 \times 10^{-9} \text{ s}$ ، وضوء فلاشي ازرق عند $x_B = 5.00 \text{ m}$ و $t_B = 9.00 \times 10^{-9} \text{ s}$ ، كل هذه القياسات في محور الاسناد S . اما محور الاسناد S' تتحرك بسرعة منتظمة إلى اليمين ونقطة الأصل لها عند نفس النقطة لـ S عند $t = t' = 0$. تم رصد كلا الضوئين الفلاشين عند نفس الموضع في محور الاسناد S' . (a) اوجد السرعة النسبية بين S و S' . (b) اوجد موضع الضوئين الفلاشين في محور الاسناد S' . (c) عند أي زمن يصدر الضوء الفلاشي الأحمر في محور الاسناد S' ؟

26. مراقب 1 في محور اسناد S يقيس حدثين في نفس اللحظة. الحدث A عند النقطة $(50.0 \text{ m}, 0, 0)$ عند اللحظة $9:00:00$ وهو الزمن العالمي في 15 يناير من العام 2010. الحدث B عند النقطة $(150 \text{ m}, 0, 0)$ عند نفس اللحظة. اما المراقب 2 في محور الاسناد S' يتحرك بسرعة $0.800c$ ، وقد لاحظ أيضا الحدثين. في محور الاسناد S' ، أي حدث يحدث أولاً وما هو الفارق الزمني بين الحدثين؟



الشكل P1.27

27. ساق متحركة طولها $l = 2.00 \text{ m}$ وموجهة بزاوية $\theta = 30.0^\circ$ بالنسبة لاتجاه الحركة كما هو موضح في الشكل P1.27. سرعة الساق $0.995c$. (a) ما هو الطول الأصلي للساق؟ (b) ما هي الزاوية في محور الاسناد الأصلي؟



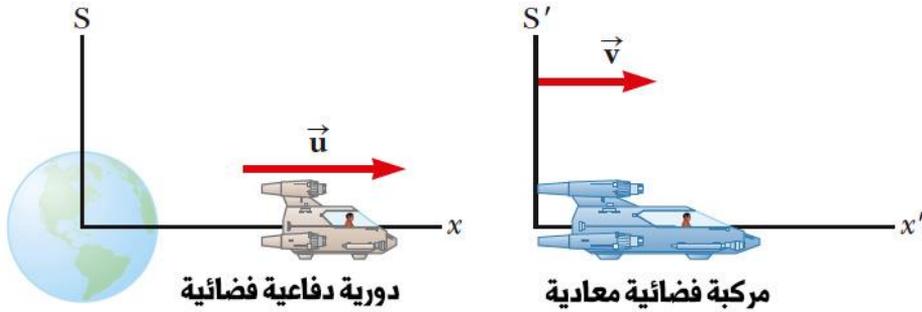
الشكل P1.28

الفصل 6.1 معادلات تحويل السرعة لرونز The Lorentz Velocity Transformation Equations

28. يوضح الشكل P1.28 مواد منبعثة في الجزء الأيمن العلوي من الصورة صادرة من مجرة في الجزء اليسر السفلي. يعتقد ان هذه الانبعاثات هي ثقوب سوداء في مركز المجرة. افترض انبعاثين من المواد صدرت من

مركز المجرة في اتجاهين متعاكسين. سرعة كل من انبعثين $0.750c$ بالنسبة لمركز المجرة. احسب سرعة كل انبعث بالنسبة للآخر.

29. تتحرك مركبة فضائية معادية مبتعدة عن الأرض بسرعة $v = 0.80c$ كما هو موضح في الشكل P1.29. اذا لحقت دورية دفاعية فضائية تلك المركبة بسرعة $u = 0.90c$ بالنسبة إلى الأرض. يقيس مراقب على الأرض سرعة تجاوز المركبة الدفاعية للمركبة المعادية بسرعة نسبية مقدارها $0.10c$. ما هي سرعة المركبة الدفاعية بالنسبة للمركبة المعادية كما يقيسها ركاب المركبة الدفاعية؟



الشكل P1.29

7.1 كمية الحركة الخطية النسبية Relativistic Linear Momentum

30. احسب كمية الحركة لالكترون يتحرك بسرعة مقدارها (a) $0.010c$ و (b) $0.500c$ و (c) $0.900c$.

31. يمتلك الكترون كمية حركة اكبر بثلاثة مرات كمية حركته الكلاسيكية. (a) اوجد سرعة الالكترتون. (b) ماذا لو؟ كيف تتغير النتيجة اذا كان الجسيم بروتون؟

32. اقصى سرعة لطريق سريع هي 90.0 km/h . افترض ان قيمة المخالفة المرورية متناسب مع مقدار تجاوز كمية حركة السيارة لكمية الحركة عند السرعة القصوى المحددة. اذا علمت ان المخالفة للقيادة بسرعة 190 km/h (أي ان هناك 100 km/h اعلى من السرعة

(b) القصوى هي \$80.0\$. ما هي المخالفة المستحقة للسرعة (a) \$1090 \text{ km/h}\$ ؟ (b) \$1,000,000,090 \text{ km/h}\$ ؟

33. تتحرك كرة جولف بسرعة مقدارها \$90.0 \text{ m/s}\$. ما مقدار الاختلاف في مقدار كمية الحركة النسبية \$p\$ عن قيمة كمية الحركة الكلاسيكية \$mu\$ ؟ أي اوجد النسبة \$(p - mu)/mu\$.

34. الصيغة الغير نسبية لكمية الحركة لجسيم هي \$p = mu\$ تتوافق مع التجربة العملية اذا كانت \$u \ll c\$. لاي سرعة يصبح استخدام هذه المعادلة يعطي خطأ في قياس كمية الحركة بمقدار يساوي (a) \$1.00\%\$ و (b) \$10.0\%\$ ؟

35. جسيم غير مستقر في حالة سكون يفصل تلقائيا إلى جسيمين بكتلتين غير متساويتين. كتلة الجزء الأول \$2.50 \times 10^{-28} \text{ kg}\$، وكتلة الجزء الاخر \$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}\$. اذا كانت سرعة الجزء الاخف هي \$0.893c\$ بعد الانفصال ما هي سرعة الجزء الاثقل ؟

الفصل 8.1 الطاقة النسبية Relativistic Energy

36. مجموعة من البروتونات في معجل في مختبر فيرمي بالقرب من ولاية شيكاغو الامريكية تعجل إلى طاقة كلية تصل لـ 400 مرة من طاقة سكونها. (a) ما هي سرعة هذه البروتونات بدلالة \$c\$ ؟ (b) ما هي طاقة حركتها بوحدة \$\text{MeV}\$ ؟

37. يتحرك بروتون بسرعة \$0.950c\$. احسب (a) طاقة سكونه، و (b) الطاقة الكلية للبروتون، و (c) طاقة حركته.

38. Q1C (a) اوجد طاقة الحركة لمركبة فضائية كتلتها \$78.0 \text{ kg}\$ انطلقت من النظام الشمسي بسرعة مقدارها \$106 \text{ km/s}\$ باستخدام المعادلة الكلاسيكية \$K = \frac{1}{2} mu^2\$. (b) احسب طاقة حركته باستخدام المعادلة النسبية. (c) اشرح النتيجة بالمقارنة بين الاجابتين في كلا من (a) و (b).

39. بروتون في معجل طاقة عالية يتحرك بسرعة مقدارها \$c/2\$. استخدم نظرية طاقة الحركة والشغل لايجاد الشغل اللازم لزيادة سرعته إلى (a) \$0.750c\$ و (b) \$0.995c\$.

40. اثبت ان أي جسم يتحرك بسرعة اقل من عشر سرعة الضوء، طاقة الحركة النسبية تتوافق مع نتيجة المعادلة الكلاسيكية $K = \frac{1}{2} mu^2$ إلى اقل من 1%. لهذا فانه في كل الحالات تعتبر المعادلة الكلاسيكية كافية لوصف هذه الاجسام.

41. الطاقة الكلية لبروتون ضعف كتلة سكونه. اوجد كمية الحركة للبروتون بوحدة MeV/c .

42. اعتبر الالكترونات تسرع لطاقة كلية مقدارها 20.0 GeV في معجل ستانفورد الخطي طوله 3.00 km . (a) ما هي قيمة المعامل γ للالكترونات؟ (b) ما هي سرعة الالكترونات عند هذه الطاقة؟ (c) ما هو طول المعجل الخطي في محور اسناد الالكترون عندما يتحرك بسرعات عالية؟

43. مركبة فضائية كتلتها $2.40 \times 10^6 \text{ kg}$ تتسارع إلى سرعة مقدارها $0.700c$. (a) ما مقدار اقل طاقة يتطلبها التسارع من وقود المركبة الفضائية، افترض ان كفاءة المركبة 100%؟ (b) ما مقدار كمية الوقود اللازم لتزويد المركبة بهذه الطاقة اذا كانت كل طاقة السكون للوقود تحولت بالكامل إلى طاقة حركة للمركبة الفضائية؟

44. اثبت ان علاقة كمية الحركة والطاقة في المعادلة 27.1 وهي $E^2 - p^2c^2 + (mc^2)^2$ ، تتبع الصيغة $E = \gamma mc^2$ و $p = \gamma mu$.

45. اذا كانت طاقة السكون للالكترون هي 0.511 MeV وطاقة السكون للبروتون هي 938 MeV . افترض ان كلا الجسمين يمتلك طاقة حركة مقدارها 2.00 MeV . اوجد سرعة (a) الالكترون و (b) البروتون. (c) ما مقدار الزيادة في سرعة الالكترون بالنسبة للبروتون؟ (d) اعد الحسابات في الأجزاء من (a) إلى (c) بافتراض ان كلا الجسمين يمتلكان طاقة حركة مقدارها 2000 MeV .

46. اعتبر سيارة تتحرك بسرعة u . هل طاقة حركتها الفعلية أكبر أو أقل من $\frac{1}{2} mu^2$ ؟ خمن مقدار الاختلاف في طاقة الحركة الفعلية عن $\frac{1}{2} mu^2$. في اجابتك اذكر الكميات التي استخدمتها كبيانات والقيم التي قدرت قياسها لها.

47. بيون في حالة سكون ($m_\pi = 273 m_e$) يضمحل إلى ميون ($m_\mu = 207 m_e$) ومضاد نيوتريينو ($m_\nu \approx 0$). ومعادلة التفاعل على النحو $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$. اوجد (a) طاقة حركة الميون و (b) طاقة مضاد النيوتريينو بوحدة الالكتران فولت.

48. كجسيم غير مستقر كتلته $m = 3.34 \times 10^{-27} \text{ kg}$ في حالة سكون. يضمحل الجسيم إلى كتلتين يتحركان في اتجاه محور x بسرعة $u_1 = 0.987c$ للكتلة الأولى وبسرعة $u_2 = -0.868c$ للكتلة الثانية. من هذه المعلومات نرغب في الحصول على كتلة كلا من 1 و 2. (a) هل النظام الابتدائي للجسيم الغير مستقر والذي ينقسم إلى جزئين يكون معزولا او غير معزولا؟ (b) بالاعتماد على اجابتك للجزء (a) ما هما النموذجين المناسبين لهذه الحالة؟ (c) أوجد قيم γ للجزئين بعد الاضمحلال. (d) باستخدام احد النموذجين في الجزء (b) اوجد العلاقة بين الكتلتين m_1 و m_2 ، (e) استخدم النموذج الثاني في الجزء (b) اوجد العلاقة الثانية بين الكتلتين m_1 و m_2 . (f) قم بحل العلاقتين في الجزء (d) والجزء (e) انيا للكتلتين m_1 و m_2 .

49. نجمين هائلين ينهاران بانفجار سوبرنوفيا ينتج عنهما انوية كل الذرات في النصف السفلي من الجدول الدوري بواسطة الاندماج للانوية الصغيرة. هذه المسألة يمكن نمذجتها بالعملية التالية. جسيم كتلة $m = 1.99 \times 10^{-26} \text{ kg}$ يتحرك بسرعة $\vec{u} = 0.500c\hat{i}$ تصطدم بشكل مباشر وتلتصق بجسيم كتلته $m' = m/3$ يتحرك بسرعة $\vec{u}' = -0.500c\hat{i}$. ما هي كتلة الجسيم الناتج؟

50. **SQIC** نجمين هائلين ينهاران بانفجار سوبرنوفيا ينتج عنهما انوية كل الذرات في النصف السفلي من الجدول الدوري بواسطة الاندماج للانوية الصغيرة. هذه المسألة يمكن نمذجتها بالعملية التالية. جسيم كتلة m يتحرك على امتداد محور x بمركبة سرعة $+u$ تصطدم بشكل مباشر وتلتصق بجسيم كتلته $m/3$ يتحرك على امتداد محور x مركبة سرعة $-u$. ما هي الكتلة M للجسيم الناتج؟

الفصل 9.1 الكتلة والطاقة Mass and Energy

51. Q/C عندما يتحد 1.00 g من الهيدروجين مع 8.00 g من الاكسجين يتكون 9.00 g من الماء. خلال هذا التفاعل الكيميائي تتحرر طاقة مقدارها 2.86×10^5 J. هل كتلة الماء اكبر او اصغر من كتلة المواد الداخلة في التفاعل؟ (b) ما مقدار الفرق في الكتلة؟ (c) اشرح اذا ما كان التغير في الكتلة يمكن رصده او لا.

52. في محطة توليد بالطاقة النووية يتم استبدال قضبان الوقود كل ثلاثة أعوام. يمكن للمحطة ان تحول الطاقة بمعدل 1.00 GW. افترض ان المحطة تعمل بسعة مقدارها 80.0% لمدة ثلاثة أعوام، ما هي مقدار الكتلة المفقودة للوقود؟

53. الطاقة الصادرة عن الشمس هي 3.85×10^{26} W. ما مقدار النقصان في كتلة الشمس كل ثانية؟

54. اشعة جاما (عبارة عن فوتونات ذات طاقة عالية) يمكن ان ينتج منها الكترون (e^-) وبوزيترون (e^+) لهما نفس الكتلة عندما يدخلان في مجال كهربي لنواة ثقيلة بحيث ان $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$. ما هو مقدار اقل طاقة لاشعة جاما تلزم لانجاز هذه العملية؟

الفصل 10.1 النظرية النسبية العامة The General Theory of Relativity

55. يتحرك قمر صناعي لنظام تحديد المواقع (GPS) في مدار دائري بزمن دوري 11 ساعة و58 دقيقة. (a) احسب نصف قطر المدار. (b) احسب سرعته. (c) يبث القمر الصناعي بتردد مقداره 1,575.42 MHz في محور اسناد القمر الصناعي. عندما يتم رصد هذه الإشارة على سطح الأرض بواسطة مستقبلات GPS كما هو موضح في الشكل P1.55، ما هو التغير البسيط في هذا التردد بسبب التأخير الزمني؟ (d) الانزياح نحو الأزرق الجذبي للتردد طبقا للنظرية النسبية العامة، وقد سميت بالانزياح ناحية الأزرق للدلالة على التغير ناحية الترددات العالية. مقدار التغير البسيط هذا يعطى بـ

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta U_g}{mc^2}$$



الشكل P1.55

حيث ان U_g هو التغير في طاقة الجهد الجذبي لنظام الجسم والأرض عندما تتحرك كتلة الجسم m بين نقطتين حيث تم رصد الإشارة. احسب هذا التغير البسيط في التردد الناتج عن التغير في موضع القمر الصناعي من سطح الأرض إلى موضعه المداري. (e) ما هو التغير الكلي البسيط في التردد بسبب كلا من التأخير الزمني والانزياح ناحية الأحمر الجذبي؟

إجابات أسئلة للتفكير

1. (c)
2. (d)
3. (d)
4. (a)
5. (a)
6. (c)
7. (d)
8. (i) (c); (ii) (a)
9. (a) $m_3 > m_2 = m_1$ (b) $K_3 = K_2 \Rightarrow K_1$ (c) $u_2 > u_3 = u_1$

إجابات المسائل الفردية

1. 10.0 m/s في اتجاه اليسار
3. 5.70×10^{-3} أو درجة 9.94×10^{-5} rad
5. $0.866c$
7. $0.866c$
9. $0.917c$
11. $0.220c$
13. 5.00 s
15. يقيس المراقب على الأرض ان الطول يساوي 31.2 m، لذا فان القطار السريع يكون بالكامل داخل النفق مع فراغ يساوي 18.8 m.
17. $0.800c$
19. 1.55 ns
21. (b) $0.0504c$
23. (c) 2.00 kHz (d) $0.075 \text{ m/s} \approx 0.17 \text{ mi/h}$
25. (a) $2.50 \times 10^8 \text{ m/s}$ (b) 4.98 m (c) $-1.33 \times 10^{-8} \text{ s}$
27. (a) 17.4 m (b) 3.30°

29. $0.357c$

31. (a) $\frac{2\sqrt{2}}{3}c = 0.943c = 2.83 \times 10^8 \text{ m/s}$ (b) الإجابة هي نفسها

33. 4.51×10^{-14}

35. $0.285c$

37. (a) 938 MeV (b) 3.00 GeV (c) 2.07 GeV

39. (a) $5.37 \times 10^{-11} \text{ J} = 335 \text{ MeV}$ (b) $1.33 \times 10^{-9} \text{ J} = 8.31 \text{ GeV}$

41. $1.63 \times 10^3 \text{ MeV}/c$

43. (a) $8.63 \times 10^{22} \text{ J}$ (b) $9.61 \times 10^5 \text{ kg}$

45. (a) 0.979c (b) 0.0652c (c) 15.0 (d) 0.999 99997c; 0.948c; 1.06

47. (a) 4.08 MeV (b) 29.6 MeV

49. $2.97 \times 10^{-26} \text{ kg}$

51. (a) اصغر (b) $3.18 \times 10^{-12} \text{ kg}$ (c) انها جزء صغير جدا لا يمكن قياسه

53. $4.28 \times 10^9 \text{ kg/s}$

55. (a) $2.66 \times 10^7 \text{ m}$ (b) 3.87 km/s (c) -8.35×10^{-11}
(d) 5.29×10^{-10} (e) $+4.46 \times 10^{-10}$

د. حازم فلاح سكيك
استاذ الفيزياء المشارك بجامعة الازهر - غزة



- ★ رئيس قسم الفيزياء بجامعة الازهر - غزة في الفترة 1993-1998
 - ★ مؤسس وعميد كلية الدراسات المتوسطة بجامعة الازهر - غزة من الفترة 1996-2005
 - ★ عميد القبول والتسجيل بجامعة الازهر - غزة في الفترتين 1998-2000 و 2007-2008
 - ★ مدير الحاسب الالي بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 1994-2000
 - ★ رئيس وحدة تكنولوجيا المعلومات بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 2000-2005
 - ★ مؤسس موقع الفيزياء التعليمي
 - ★ مؤسس اكااديمية الفيزياء للتعليم الالكتروني
 - ★ مؤسس مركز الترجمة العلمي
 - ★ مؤسس قناة الفيزياء التعليمي على اليوتيوب
 - ★ مؤسس ورئيس تحرير مجلة الفيزياء العصرية
- لمزيد من المعلومات يرجى زيارة
الشبكة الفيزياء التعليمية

www.hazemsakeek.net