كلية التربية

2022 -2023

القائم بالتدريس

د. مصطفى عبيد

النظرية النسبية

إعداد اعضاء هيئة تدريس قسم الفيزياء

الفرقة الثالثة – قسم الطبيعة

2022-2023

☒ مقدمه:

"ما بين الماضي و الحاضر و المستقبل، لا يوجد سوى وهم في تفكير العقل البشرى" ألبرت آينشتين

تعتمد دراستنا للفيزياء على استخدام و استنباط مفاهيم و قوانين تساعدنا على فهم الطبيعة و فهم خواص المواد المختلفة. و من المعروف أن القوانين الفيزيائية من وضع الإنسان و لذلك فهى خاضعة لحدود فهمه و إمكاناته. و ليس من الضرورة أن تكون هذه لقوانين صحيحة أو ثابتة فهناك بعض القوانين قد تصلح لتفسير ظاهرة طبيعية معينة فى أزمنة معينة و قد لا تصلح هذه القوانين فى بعض الأحيان الأخرى. لذلك وجب على العلماء استنباط، ووضع بعض القوانين والنظريات الجديدة والتى تتميز بأنها أكثر عمومية وأكثر شمولية من القوانين القديمة والتى بدورها سوف تتواءم مع الاكتشافات الحديثة.

ومن المعروف أن القانون يكون عبارة عن منطوق ما وعادة يكون على صورة علاقة رياضية تستخدم لوصف سلوك أو حدث معين نلاحظه دوما والذى يمكن من خلاله الحصول على نتائج تتفق مع الواقع أو مع النتائج العملية. و من أهم هذه القوانين فى الفيزياء ما يسمى بقوانين البقاء.

قوانين البقاء فى الفيزياء The Conservation Laws of Physics

١) قانون بقاء الكتلة Mass Conservation law

ينص هذا القانون أن الكتلة الكلية لنظام معزول مقدار ثابت أو أن المادة لا تفنى و لا تستحدث من العدم.

٢)) قانون بقاء الطاقة Energy Conservation law

و ينص على أن الطاقة الكلية (مجموع طاقتى الوضع و الحركة) لنظام ما تظل ثابتة ما لم يبذل شغل بواسطة النظام أو على النظام.

٣) قانون بقاء كمية الحركة Linear-momentum conservation law

و ينص على أن كمية الحركة لنظام كتلته m و سرعته v هى كمية ثابتة مقدارا و اتجاها بشرط عدم وجود قوة خارجية تؤثر على هذا النظام.

٤) قانون بقاء عزم كمية الحركة Angular-momentum conservation law

ينص على أن عزم كمية الحركة الكلى لنظام غير متأثر بازدواج خارجى يظل كمية ثابتة مقدارا و اتجاها.

٥) قانون بقاء الشحنة Electric –charge conservation law

و ينص على أن الشحنة الكهربية لنظام معزول كهربيا تظل كمية ثابتة.

- **اساسيات وخصائص الكون:**

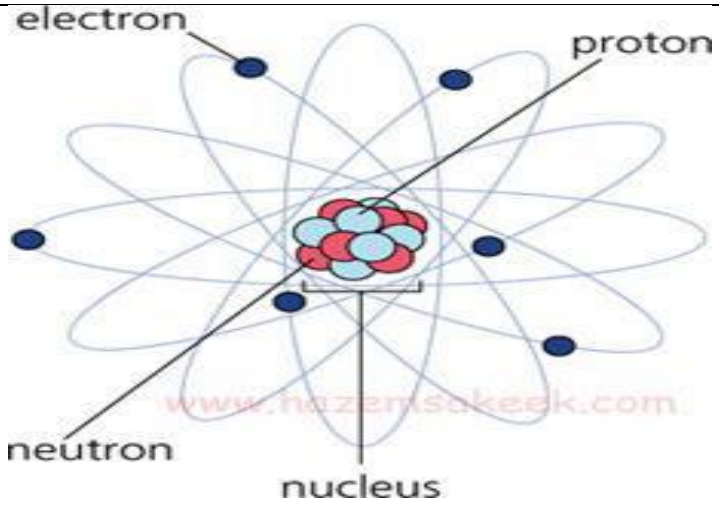
في حياتنا نحن نستخدم كميات فيزيائية أساسية مثل الكتلة والمسافة والزمن لتحديد الكثير من المعلومات حول الأشياء كان نقول أن كتلة السيارة 1000 كيلوجرام أو نقيس المسافة بين القمر والأرض بأحدث الأجهزة والتي نعرف إنها تساوي 400,000 كيلومتر تقريبا وان نحسب الزمن المستغرق لرحلة بين دولتين على أنها ساعتين وأربعون دقيقة وعشرون ثانية .هذه الكميات أيضا نستخدمها في وصف الكون الذي نعيش . دعنا نوضح بعض المعلومات المتعلقة بهذه الكميات الفيزيائية.

المكان: يتم تحديد مكان اى جسم فى الفراغ بثلاثة متغيرات هى x, y, z و تسمى بالاحداثيات الثلاثة و توجد نقطة مركزية تعرف بنقطة الاصل تسند اليها القياسات. فمثلا و انت جالس في الغرفة وأردت أن تحدد مكان المصباح الكهربي المعلق في سقف الغرفة فانك سوف تفترض نقطة مركزية تسند لها قياساتك ولتكن احد أركان الغرفة فتحدد كم يبعد المصباح عن جانبي الحائط وكم يرتفع عن سطح الأرض هذه الأبعاد الثلاثة نستخدمها طوال الوقت في تحديد مواقعنا على الأرض وكذلك نستخدمها في تحديد مواقع الأقمار الصناعية والطائرات والأبنية على الأرضودائما نختار نقطة إسناد محددة لنصف الأبعاد بالنسبة لها. وبسبب هذه الأبعاد الثلاثة أصبح لدينا مصطلحات مثل يمين ويسار وفوق وتحت وأمام وخلف.

الزمن: هو الاداة التى تقيس و تحدد بها زمن حدوث حدث ما و اعتبر الزمن هو البعد الرابع للابعاد المكانية لتصبح على الصورة (x, y, z, t). ففي الحياة العادية نستخدم الزمن كأداة لقياس وتحديد زمن حدوث حدث معين في الفضاء .مثلا نقول إن الطائرة أقلعت من المطار في الساعة الثامنة صباحا

أو أن نستخدم الزمن لتحديد موعد الاجتماع وهنا نستخدم الأبعاد الأربعة فنحدد مكان الاجتماع وزمنه ولا يمكن أن يتم الاجتماع إذا اعتمدنا فقط على تحديد المكان فقد لا يلتقي أي من المدعوين على الاجتماع مع بعضهم البعض و كذلك إذا تم تحديد موعد الاجتماع بدون تحديد المكان فقد يذهب كل مدعو في الزمن المحدد لمكان من لا يعرفه الآخرون لذلك الأبعاد المكانية والزمانية متلازمين ونستخدمهما باستمرار مع بعضهما البعض ولهذا أي انه إذا حدث أى حدث في الكون فانه يحدث في مكان وزمان محدد و سوف نطلق عليهما الزمكان spacetime.

المادة: المادة هي أي شيء يشغل حيزا في الفراغ .فأي جسم تستطيع ان تراه أو تلمسه أو يتحرك بواسطة قوة هو مادة .وكما نعلم ان المادة مكونة من بلايين الجسيمات الدقيقة التي تعرف باسم الذرات . فالماء على سبيل المثال هو عبارة عن مركب من اتحاد ذرتين هيدروجين وذرة أكسجين مع بعضهما البعض ليشكل جزئ الماء H_2O. و ان كل ذرة مكونة من ثلاثة جسيمات هي النيوترونات والبروتونات والالكترونات .النيوترونات والبروتونات.



الحركة: أي شيء يغير مكانه في الفراغ نقول انه يتحرك، وتخيل الآن الأشياء التي تتحرك حولك وإذا نظرت للأمر بشكل أوسع ستدرك انك وأنت جالس تقرأ الآن أيضا تتحرك مع حركة الكرة الأرضية وسوف تكتشف أن كل شيء في هذا الكون في حركة مستمرة.

الكتلة: الكتلة هي ما يحتويه الجسم من مادة) أي مقدار ما يحتويه الجسم من جسيمات ذرية مثل البروتونات والالكترونات والنيوترونات .(وإذا ما قمنا بضرب الكتلة في عجلة الجاذبية الأرضية نحصل على كمية فيزيائية تعرف بالوزن. على سبيل المثال فعندما نتناول الكثير من الأطعمة فان وزننا يزداد وفي الواقع كتلة الجسم هي التي ازدادت، ويجب ان ننتبه لان الكتلة لا تعتمد على مكان وجودها في الفراغ فمثلا كتلة الجسم على الأرض هي نفسها كتلته على القمر أو على المشتري أو حتى في الفراغ والذي يتغير هنا هو الوزن، لان الوزن هو مقدار تأثير الجاذبية على الكتلة ولان الجاذبية تتغير فان الوزن يتغير ولكن الكتلة تبقى ثابتة.

الطاقة: تعرف الطاقة بأنها مقياس لقدرة نظام معين على بذل شغل. وتوجد الطاقة في أشكال مختلفة مثل طاقة الوضع أو طاقة حركة أو غيرها .وكما نعلم فان الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من عدم ولكن تتحول من شكل لأخر مثل ان تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية ا وان تتحول الطاقة النووية إلى طاقة كهربية وهكذا بحيث تكون دائما طاقة النظام محفوظة.

الضوء: الضوء هو شكل من أشكال الطاقة، و هو عباره عن موجات كهرومغناطيسيه له سرعه ثابته. و الضوء عباره حزمه من الفوتونات التي تنتشر في الفراغ وقد يحدث لها انكسار او انعكاس. كما ان الضوء

يتميز ببعض الخصائص مثل حيوده عن مساره و تداخل موجاتها اذا مر من فتحات ضيقه كما توجد بعض الخصائص الاخري مثل الاستقطاب.

الفوتون: الفوتون هو كم من الطاقه و هو اقل كم من الاشعه الكهرومغناطيسيه كما انه يعتبر وحده الطاقه.

الموجة الكهرومغناطيسية: الموجة الكهرومغناطيسية هي عباره عن مجالا كًهربيا وًمجالا مًغناطيسيا مًتردد، ، وكلا من المجال الكهربي والمغناطيسي متعامدين على بعضهما البعض و أيضا هى صورة من صور الطاقة الناتجة عن الحركة الاهتزازية للشحنة فينتج عن هذه الحركة مجالين كهربي و مغناطيسى مترددين. و تردد المجال الكهربي يحدد تردد الضوء والذي يعتبر احد الخواص المميزة للضوء فالترددات التي نراها هي التي تقع في المدى بين الأحمر والأزرق والترددات التي تقع خارج هذا النطاق لا نراها بالعين المجردة مثل أمواج الميكروويف أو أمواج الراديو أو أشعة اكس . و كلما زادت تردد الأشعة الكهرومغناطيسية زادت طاقتها حيث تحدد الطاقه من العلاقه:

$$E= h. \upsilon$$

فمثلا طاقة أشعة اكس كبيرة ولذلك تستطيع هذه الأشعة اختراق أجسامنا.

نظره علماء الفيزياء لهذه الاساسيات

لفهم طبيعه اي علم من العلوم يتطلب تتبع تطور هذا العلم من مرحله الي اخري، و ان نتعرف علي اشهر علمائه الذين اسهموا في تقدمه عبر العصور، و معرفه المراحل المختلفه التي مرت بها

نظريات هذا العلم و الوقوف علي مواطن القوه و الضعف في كل نظريه من نظرياته ليؤدي الي فهم تام لهذا العلم.

و قد مرت القوانين والنظريات الفيزيائية بمراحل من التطور بدءا من الفيزياء الكلاسيكية أو النيوتنية و حتى الفيزياء النسبية الكمية مرورا بالفيزياء النسبية و الفيزياء الكمية.

الفيزياء الكلاسيكية Classical Physics

هي فيزياء الأجسام عادية الحجم و التي تتحرك بسرعات عادية والتي لا تصل إلى سرعة الضوء و هذا القسم من الفيزياء يخضع لقوانين نيوتن و لذلك تسمى في بعض الأحيان الفيزياء النيوتنية.

في نهايه القرن التاسع عشر نجحت الفيزياء الكلاسيكيه في تفسير كثير من الظواهر المرئيه و تنبأت بحركه الكواكب و الاجسام. لكنها اعتبرت ان الاجسام و الموجات لا علاقه بينهم. وكانت قوانين نيوتن للحركه و الجاذبيه هى اكتشاف عظيم فسروا بيه معظم الظواهر.

اراء نيوتن

حيث كان العالم قبل نيوتن يعم بالفوضى و الخرافات حول حركه الاجسام علي الارض و الاجرام السماويه و وضع القمر بالنسبه للارض فكانوا يظنون ان الارواح الشريره و الشياطين هي من تمسك بالاشياء و تحركها. فأتي نيوتن ليطرد هذه الخرافات و يضع ثلاث قوانين للحركه توضح ان الاجسام تتحرك نتيجه قوي تدفعها او تسحبها و يمكن قياس هذه القوي

و التعبير عنها في معادلات بسيطه. استطاع نيوتن ان يحدد مسارات كل الاشياء بدءا من اوراق الاشجار المتساقطه الي الصواريخ التي تحلق في الجو الي قذائف المدفع و حتي السحب عن طريق حساب مجموع القوى المؤثره عليها. ولم تكن هذه المسائل اكاديميه فقط بل ساعدت في وضع أساس الثوره الصناعيه، حيث سيرت هذه قوه المحركات البخاريه و القاطرات و السفن العملاقه و ساعدت في بناء الجسور و السدود من خلال حساب الضغط المؤثر علي كل قرميط و علي كل دعامه، و كانت ثوره علميه و انجاز جعل العالم يتغني باسم نيوتن.

قد طبق نيوتن نظريه القوي علي الكون نفسه من خلال اقتراح نظريه جديده للجاذبيه حيث انه عندما كان نيوتن يجلس تحت الشجره و سقطت علي راسه تفاحه بدأ يسأل لماذا لم تسقط الجاذبيه القمر كما اسقطت التفاحه؟

لذا تخيل نفسه فوق حافه جبل القي بحجر فان هذا الحجر سيسقط علي الارض بفعل الجاذبيه و كلما زادت سرعه الحجر وصل الحجر الي مكان ابعد علي الارض، و في هذه اللحظه توقع ان الحجر اذا قذه و تحرك بسرعه عاليه جدا فانه سيدور حول الارض ليصل لضرب موخره راسه. و هنا ادرك ان القمر في حاله سقوط مستمر فهو يدور حول الارض نتيجه سرعته العاليه.

و بدأ بعدها بدراسه حركه المذنبات و طبق قوانينه عليها و توقع اوقات دخولها مجال الارض و هذه القوانين هي التي تستخدم حاليا في وكاله ناسا.

كان يري نيوتن ان هذه القوي لها تاثير فوري علي الاجسام فمثلا لو اختفت الشمس فجأه، فسوف تخرج الارض عن مسارها علي الفور و تتجمد في غياهب الفضاء و سوف يعلم من في الكون ان الشمس غابت في نفس اللحظه لذلك فانه من ممكن ان يضبط كل سكان الارض ساعتهم بحيث تدق في نفس الوقت في اي مكان، فالثانيه علي الارض بذات طول الثانيه علي المريخ او المشتري و الامتار لا تطول و لا تقصر في اي مكان.

فقد رأي نيوتن المفهوم المطلق لكل من الزمن و المكان و انهما لا يتغيران لذا يمثلان مرجعيه مطلقه و نستطيع ان نحكم عن طريقهم حركه كافه الاجسام.

كما انه فسر طبيعه الضوء علي انه جسيمات متناهيه الصغر تنتشر بسرعات عاليه و قد نجح في تفسير بعض الظواهر مثل الانتشار و الانعكاس لكن فشل في تفسير ظاهره انكسار الضوء.

اراء ماكسويل

مع ظهور الكهرباء و التلغراف بدأ فكره المجالات تظهر علي يد ماكسويل. الذي لاحظ ان المجال الكهربي و المغناطيسي لا ينتقل تاثيرهم فورا كما اوضح نيوتن بل ياخذ وقت و شبه

ذلك انه لو افترضنا شبكه عنكبوتيه فلو هز الهواء احد اطرافها فان الاهتزازه تنتقل علي شكل موجه من هذا الطرف الي باقي الشبكه لتصل لنهايتها. صاغ ماكسويل جميع القوانين المتعلقة بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية وتفاعلهما مع بعضهما البعض ومع الشحنات والتيارات الكهربائية التي تنتجها في أربع معادلات تفاضلية إتجاهية.

بدأ ماكسول في دراس الضوء علي انه موجات كهرومغناطيسيه و من المعروف ان الموجه الكهرومغناطيسيه تتكون من مجالين متعامدين احداهما المجال الكهربى و الاخر المجال المغناطيسى و كلاهما متعامد في اتجاه انتشار الموجه. من وجهه نظر ماكسويل ان الضوء اذا كان عباره عن موجه فلابد له من وسط ينتشر به مثل موجه الماء لابد لها من بحر لتنتقل بداخله نتيجه اضطرابه لذا افترض ان الضوء ينتقل في وسط اسماه الاثير كما انه وضح خصائص الاثير علي انه

١. وسط صلب مرن

٢. وسط ذو كثافه صغيره و شفاف للامواج الضوئيه

٣. يهتز بصوره سريعه جدا لان تردد الامواج الضوئيه كبير جدا

٤. تتحرك النجوم و الكواكب خلاله دون مقاومه تذكر

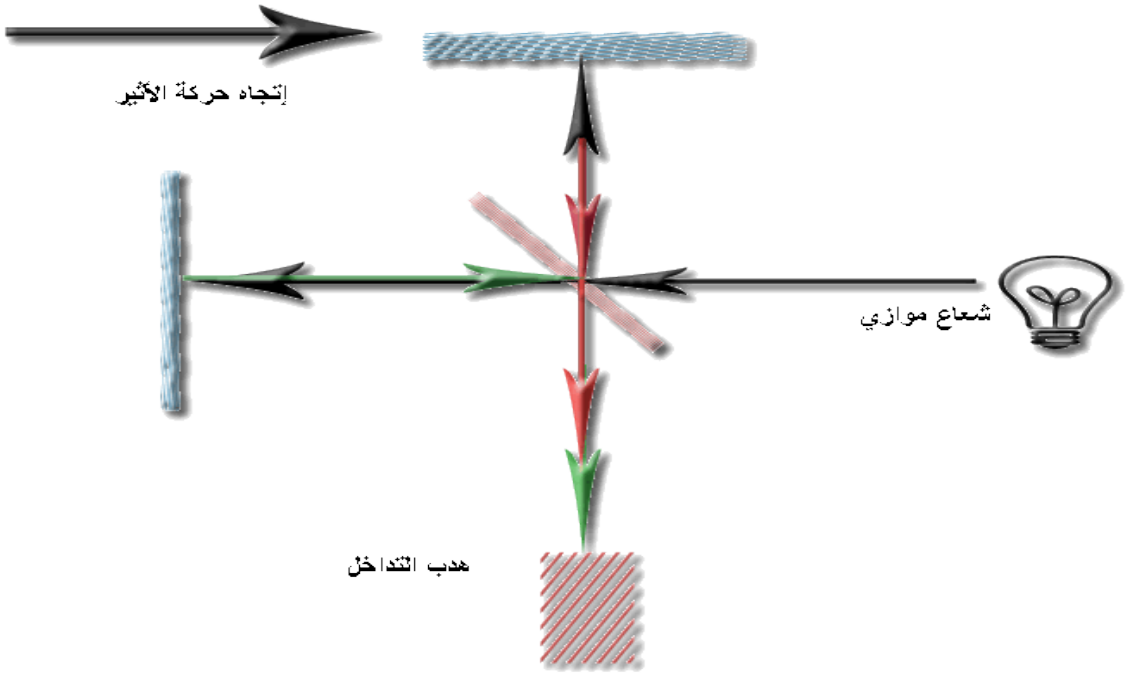
كما ان سرعه الضوء ثابته محدده لا تتأثر كما اثبتها ألبرت مايكلسن وادوارد مورلي و هو ما ناقض الفكرة التي تميل الي أن السرعات تتزايد دوماً.

لم تكن قوانين نيوتن و ماكسويل هى اساس الفيزياء الكلاسيكيه فقط بل ظن العلماء بعدهم ان مجال الفيزياء قد تم اكتشافه كاملا ولا يوجد مجال للبحث فيه الا بعض النقاط الغير هامه علي رغم تناقض النظريتين الا انهم فصلوا قوانين الاجسام لنيوتن عن قوانين الموجات لماكسويل بحيث لا تطبق اي منهم علي الاخر و اعتبرهم شيئين مختلفتين لم يملك احد الجرأه ان يسقط احداهما. الي ان ظهرت اكتشافات ماري كوري و عجزت هذه القوانين عن تفسيرها.

تجربة ميكلسون ومورلي

في عام ١٨٨٦ بدأ ميكلسون ومورلي بتجاربهم عن انتشار الضوء وسرعته في الفضاء وكانوا يعتقدوا أنهم يستطيعون تحديد هذه السرعة عن طريق تعيين سرعة الأرض في مدارها حول الشمس بالنسبة للأثير والذي هو موجود في كل مكان مثل الهواء الذي يحيط بنا ولكن الأثير موجود في كل الكون وكانت نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية قد أثبتت أن الضوء ينتشر في الفضاء في صورة أمواج وكانت الأمواج تحتاج إلى وسط افترض انه الأثير الحامل للضوء فعوم ميكلسون اكتشاف الأثير بأن يقارن سرعة الضوء المتحرك في تجاه حركة الأرض بسرعة حزمة ضوئية تتحرك في اتجاه متعامد مع حركة الأرض وعندئذ لن يبرهن الفرق بين

السرعتين على حركة الأرض فحسب بل انه يعطي فعليا سرعة الأرض في مدارها حول الشمس.



وقد بنيت هذه التجربة على أساس نظري هو أنه إذا وجد الأثير فإن حركة الأرض فيه تولد تيارا أثيريا معاكسا لسرعة الأرض مثلما تولد المركبة تيارا هوائيا يجري معاكسا لحركتها فحين تقاس سرعة الضوء على الأرض فإن تأثرها بتيار هوائي يجري معاكسا لحركتها وأثرها بتيار الأثير يتوقف على حركة الضوء هل هي موازاة لحركة الأرض أو معاكس لها أم هي متعامدة مع التيار.

يتكون الجهاز من مراتان M1 وM2 على ذراعين متعامدان احداهما فى اتجاه حركة الارض والاخر عمودي عليه حيث تتحرك الارض بسرعة v مساوية لسرعة الاثير اذا سقط شعاع من

الضوء من المصدر فانهما ينعكسان من M1 وM2 مرتدين على نفس المسار و يصلان الى نفس النقطة التى انفصلا عندها وتتكون بذلك هدب التداخل.

نفرض ان طول الذراع L وسرعة شعاع الضوء على طول الذراع (٢) arm 2 يجب ان تكون c-v عند M2 وبعد انعكاسه عند M2 يصبح c+v :

لحساب الزمن الكلي للشعاع حتى يعود الى النقطة Mo هى

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

والزمن الكلي للشعاع فى اتجاه عمودي على حركة الارض حيث ان سرعة الضوء في الاتجاه العمودي $\sqrt{c^2 - \mathrm{v}^2}$

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

$$\Delta t = \Delta t_{arm2} - \Delta t_{arm1}$$

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

ولكن يمكن كتابة المعادلة على الصورة باستخدام مفكوك ذي الحدين

$$\Delta t = \frac{Lv^2}{c^3}$$

وهذا هو الفارق الزمنى بين اللحظتين اللتين يصل فيهما الشعاع المنعكس الى التلسكوب.

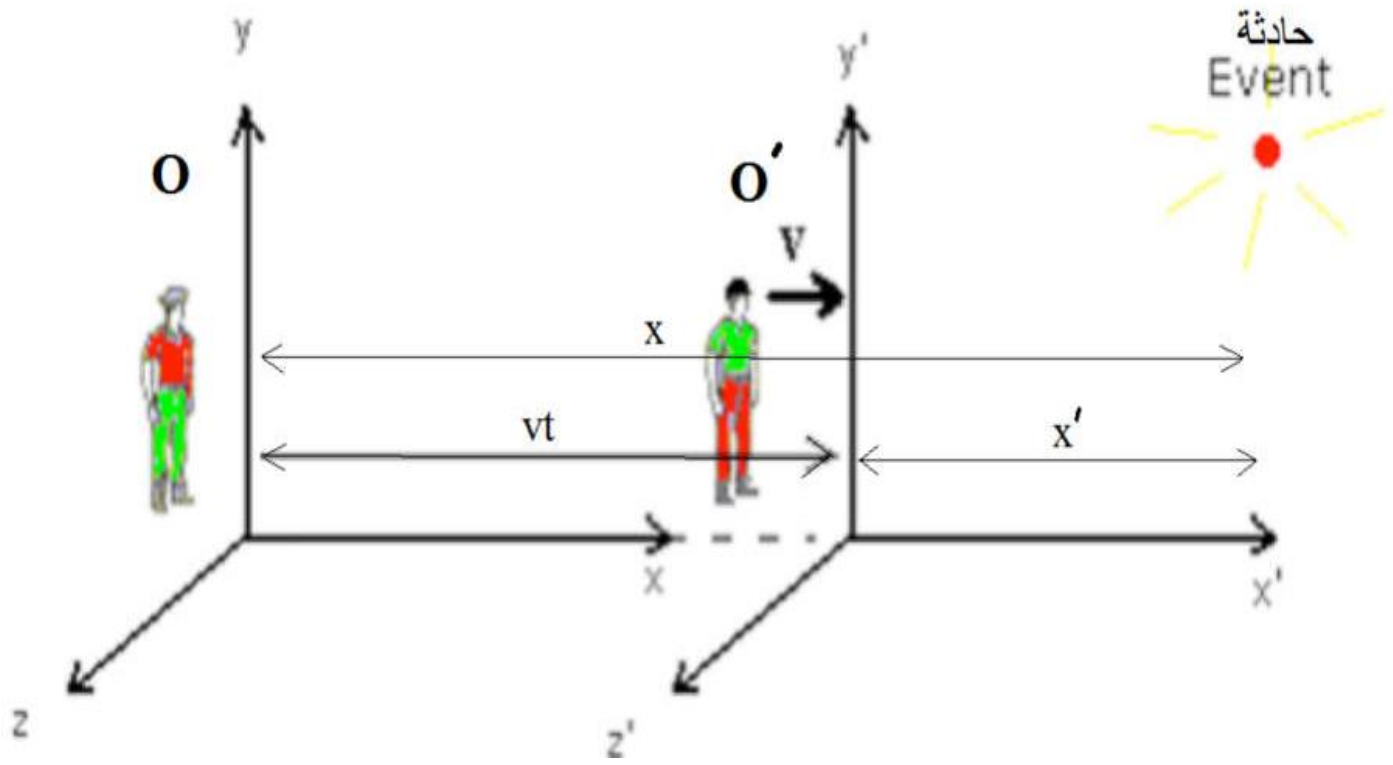
أما اذا ادير الجهاز بزاوية ٩٠ على اتجاه حركة الارض لم يشاهد ميكليسون ومورلي اي تغير في نموذج التداخل مما أظهر الحقيقة بأن سرعة الضوء واحدة لجميع الراصدين سواء كانوا فى حالة سكون أو حركة.

مبدأ النسبية الجاليلية

- **قصه!! :** في البدايه تخيل نفسك تقود سياره فارهه و ذات قوه كبيره تقوده بسرعه ١٠٠ كم/الساعه فقط و اثناء قيادتك تري صديقك ذو الدخل المحدود بسيارته القديمه في الطريق المقابل يسير بسرعه جنونيه تقريبا ٢٠٠ كم/الساعه فتتصل به لتوبخه علي سرعته الجنونيه فيقول لك انك من كنت تسير بسرعه جنونيه ليس هو و انه لم يتجاوز ١٠٠ كم/الساعه لذا اتصلا بصديق لهم ثالث يعمل في الرادار علي الطريق ليعرفوا سرعتهم.

كيف حدث ذلك كيف رأي كلا منهم الاخر يسير بسرعه ٢٠٠ كم/الساعه في حين يري نفسه انه لم يتجاوز ١٠٠ كم/الساعه و ماذا سجل و رأي صديقهم الثالث؟

لذلك في الفيزياء نحتاج لوصف أي حدث فيزيائي الي إطار مرجعي (محاور اسناد) frame of reference، و الاطار المرجعي (هو الإطار الذى يمكننا وصف حدث فيزيائى من خلاله) هو ان تصف نفسك بثلاث محاور (x, y, z). تخيل انه حدثت حاثه ما مثلا دخول مذنب الارض و المطلوب منك انت و صديقك تحديد مكان و موقع الحادثه و بما ان اتفقنا ان الحركه نسبه سيكون لدينا محاور اسناد (x, y, z) انت مركزها o و محاور لصديقك (x', y', z') هو مركزها o' كما هو موضح بالشكل ١.



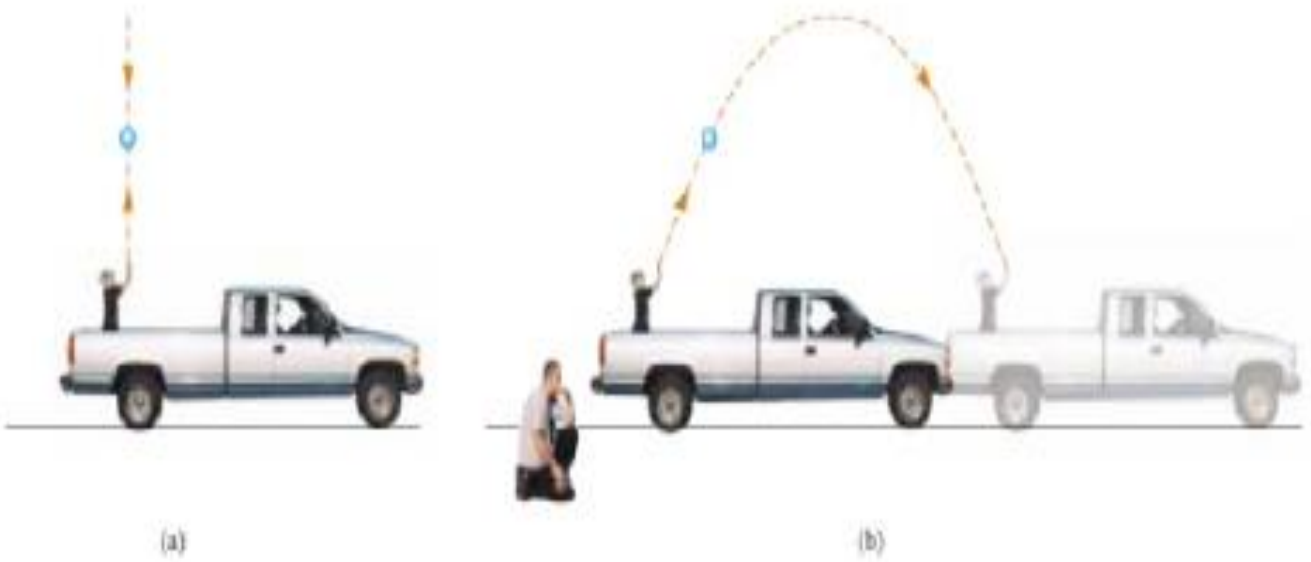
شكل ١ محاور الاسناد لجاليليو

حيث ان الاطار المرجعى القصوري هو ما يشاهد فيه الجسم غير متسارع عندما لا تؤثر عليه قوة و بالتالي اي نظام متحرك بسرعة منتظمة بالنسبة الى إطار قصوري يجب ان يكون فى إطار قصوري و بالتالي لايوجد اطار(محاور اسناد) قصوري مطلق.

هذا يعني انه اذا تم اجراء تجربة في مركبة متحركة بسرعة منتظمة فان نتائجها تكون مطابقة لنفس التجربة التى اجريت فى مركبة غير متحركة.

مثال توضيحي :

شاحنة تتحرك بسرعة ثابتة كما بالشكل (٢) و اذا رمى راكب في الشاحنة كرة لاعلى و إذا اهمل تأثير الهواء لاحظ الراكب ان الكرة تتحرك فى مسار رأسي و هذه الحركة تبدو كما لو انها رميت بواسطة شخص فى حالة سكون على سطح الارض.



الشكل (٢) (a) المراقب فى الشاحنة رأى الكرة تتحرك فى مسار رأسي عندما رميت لاعلى (b) مراقب الارض يرى مسار الكرة كقطع مكافئ

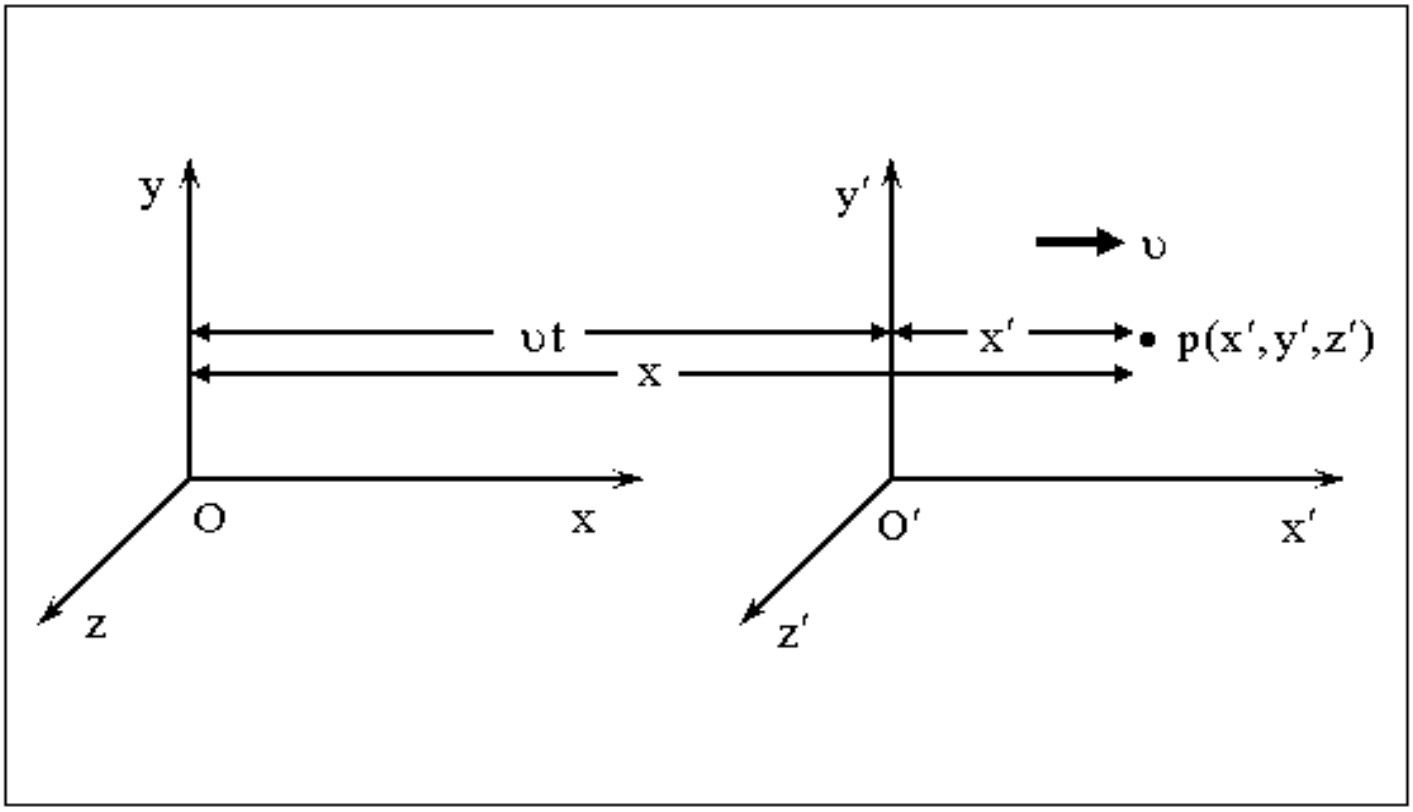
كلا المراقبين يتفقان على قوانين الفيزياء بحيث كلا منهما يرمي الكرة الى اعلى فترتفع ثم تسقط في يديهما. ولكن مسار الكرة التى رماها المراقب في الشاحنة يختلف حيث ان المراقب على الارض يرى مسار الكرة كقطع مكافئ كما بالشكل ٢ بينما يرى المراقب في الشاحنة الكرة تتحرك فى مسار رأسي. وعل الرغم من عدم اتفاقهما علي الشكل الذي تتخذه الكره ولا يتفقان علي كميات اخري مثل سرعتها، طاقته حركتها و طاقه وضعها الا انهم

يتفقان في كميات اخري تكون ثابته لا تتغير مثل الكتله، الزمن، القوه و العجله و بالتالى يتفق المراقبان على صلاحية قوانين نيوتن وانها لا تتغير من مرجع قصوري لاخر. و لكن الشئ المختلف هو الحركة النسبية لاطار بالنسبة لاخر.

نص مبدأ النسبية الجاليلية: ينص على ان قوانين الميكانيكا لابد ان تكون واحدة في كل أطر الاسناد المرجعية

تحويلات جاليليو Galilian trnsformations

تسمى المعادلات التى تربط بين إحداثيات البعد و الزمن فى أحداثيان يتحركان بالنسبة لبعضهما بسرعة ثابتة بتحويلات جاليليو أو التحويلات النيوتنية.



نفرض ان إطاران مرجعيان احدهما ساكن يرمز له S و الاخر S' يتحرك بسرعة منتظمة V في الاتجاه الموجب لمحور X كما هو موضح من الرسم.فإذا وقع حدث معين (انفجار مثلا) عند النقطة A و أن هناك مراقبين رصدا هذا الحدث بحيث بدأ الزمن عندما كانت o' منطبقة على o ($t = 0$) .و بذلك يمكننا كتابة المعادلات الآتية بين الاحداثيين S, S'

$$X' = X - vt \qquad (1)$$

$$Y'=Y \qquad (2)$$

$$Z'=Z \qquad (3)$$

$$t'=t \qquad (4)$$

و تسمى هذه المعادلات بتحويلات الإحداثيات لجاليليو. و يلاحظ أن إحداثي الزمن واحد فى الإطارين المرجعيين حيث أن الزمن فى الميكانيكا الكلاسيكية ثابت و لا يتغير بتغير الأطر الساكنة و من ثم فان الفترات الزمنية بين وقوع الأحداث تكون ثابتة و لا تتغير بتغير الأطر. و قد يبدو ذلك منطقيا بالنسبة للسرعات العادية إلا أن ذلك الافتراض يكون خاطئا إذا كانت السرعة تقترب من سرعة الضوء وهذا هو أهم تعارض بين المفاهيم الكلاسيكية و المفاهيم الحديثة التى أقرتها النظرية النسبية لأينشتين.و للحصول على تحويلات السرعة لجاليليو نفاضل العلاقات ١-٤ بالنسبة للزمن .

تحويلات السرعة الجاليلية:

افترض ان جسما يتحرك عبر ازاحة dx على طول المحور x فى فترة زمنية dt يقسها المراقب فى S باستخدام المعادلات من (١-٤) يمكن حساب الازاحة المناظرة 'dx التى يقيسها الراصد فى إطار 'S حيث يتحرك بسرعة v فى اتجاه x بالنسبة لاطارS

$$dx` = dx - v\,dt \qquad (5)$$

$$\frac{\mathrm{d\grave{x}}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{dx}}{\mathrm{dt}} - v \qquad (6)$$

و لان 'dt =dt فان

$$\grave{U}_x = \mathrm{U_x} - v \qquad (7)$$

$$\grave{U}_y = \mathrm{U_y} \qquad (8)$$

$$\grave{U}_z = \mathrm{U_z} \qquad (9)$$

حيث Ux و Ux' هما مركبتي السرعة للجسيم مقاسة بواسطة المراقبين فى S وS' على الترتيب. وهذه معادلة تحويل االسرعة الجاليلية.

مثال

باستخدام معادلة تحويل السرعة الجاليلية عين سرعة كرة البيسبول(بالنسبة للأرض)عندما يقذفها اللاعب بسرعة $90mi/h$ أثناء وقوفه داخل صندوق عربة تتحرك بسرعة $110mil/h$

- المعطيات:-

$U_x' = 90\ mi/h$

$V = 110\ mi/h$

$U_x = ?$

الحل : نستخدم معادلة تحويل السرعة الجاليلية

$$\grave{U}_x = \mathrm{U_x} - v$$

تتوقف السرعة على اتجاه قذف الكرة

١-إذا قذفت الكرة في نفس اتجاه حركة القطار فإن شخصا واقفا على الأرض

يرى الكرة تتحرك بسرعة

$$110\ \text{mi/h} + 90\ \text{mi/h} = 200\ \text{mi/h}$$

٢-اذا قذفت الكرة في الأتجاه المضاد يرى الشخص الواقف الكرة تتحرك في نفس اتجاه القطار لكن بسرعة

$$110\ \text{mi/h} - 90\ \text{mi/h} = 20\ \text{mi/h}$$

تحويلات العجله الجاليلية:

هل ستتغير العجل ماذا ستكون؟ لمعرفه ذلك ما علينا الا اشتقاق المعادلات السابقه حيث ان العجله مشتقه السرعه بالنسبه للزمن $a=du/dt$ و حيث ان السرعه v ثابته و مشتقتها صفر فان:

$$a_{x'} = a_x$$

$$a_{y'} = a_y$$

$$a_{z'} = a_z$$

من المعادلات السابقه نستطيع ان نستنتج ان العجله ثابته اي انها لا تتغير في اي مرجع قصوري.

بالنسبه لقانون نيوتن الثاني هل يثبت تحت تحويلات جاليليو ام لا؟ دعنا نختبر ذلك

ينص قانون نيوتن الثاني علي ان القوه المؤثره علي جسم ما تساوي حاصل ضرب القوه في العجله

$$f = m\ a$$

و العجله هى المشتقه الثانيه للمكان بالنسبه للزمن، اي رياضيا:

$$f = m\frac{du_x}{dt}$$

بالنسبه للراصد المتحرك بسرعه v ، الان عوض عن قيمه u'_x من تحويلات جاليليو ، ولا تنسي ان v ثابته مشتقتها صفر ستجد ان:

$$f = m\frac{dù_x}{dt} = m\frac{d}{dt}(u_x - v) = m\frac{du_x}{dt}$$

أي انه لم يتغير قانون نيوتن تحت تحويلات جاليليو.

فهل ستبقي قوانين ماكسويل؟

هل يمكن تطبيق مبدأ النسبية الجاليلية على الكهربية و المغناطيسية و البصريات؟

كانت فكره نيوتن ان كل شئ مطللق الزمان و المكان و يتم تحديد البعد بين نقطين او حدثين من خلال طول الوتر الواصل بينهم بتطبيق نظريه فيثاغورث ستكون مربع المسافه هى حاصل جمع مربع المقابل $(x_1-x_2)^2$ و مع مربع طول المجاور (y_1-y_2). وهذه النظريه في بعدين واذا طبقت في ثلاث ابعاد فانه سيضاف البعد z لتصبح المعادله:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

$$d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

كما قلنا سابقا ان ماكسويل لغي فكره الزمن اللحظي و اوضح ان انتشار الموجه يحتاج الي وقت لينتقل هذا الانتشار، لذا فان زمن انتشار الموجه سيحدد موضعها. كما انه لوصف حادثه ما لابد ان نحدد المكان و الزمان لذا ادخل العالم هيرمان مينكوفسكي الزمن كبعد رابع و يصبح تحديد الحادثه يتم من خلال الزمكان و تكون الاحداثيات علي شكل (ct, x, y, z) ليصبح تحديد المسافه الزمانيه-المكانيه طبقا للمعادله

$$(\Delta s)^2 = -c^2(t_2 - t_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

لتصبح بشكل افضل

$$(\Delta s)^2 = -c^2(\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$

ومن الملاحظ انه تم ادخال الزمن كبعد رابع في صيغه لان حاصل ضرب السرعه في الزمن يعطي المسافه كانها بعد مكاني لذا نستطيع ان نقول ان هذا بعد الزماني، كما نلاحظ ان اشارته مختلفه لان الاشاره هنا تسمي اشاره الاتفاق اى تتفق اشارات الابعاد المكانيه معا و تختلف عن اشاره بعد الزمان وقد تكون الاشاره موجبه للابعاد المكانيه و سالبه لبعد الزماني او العكس و كلاهما صحيح.

وهذا التعريف يعرف بالمتري و هو اداه لقياس المسافات الزمكانيه. لكن هو ابسط شكل للمتري فهو يقيس المسافه الزمكانيه بين نقطتين في الفضاء او زمكان مسطح اقليدي.

حيث ان معادله الموجه التي تعطي لاي داله φ هى:

$$\nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}$$

وحيث ان $v=c$ فان

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0$$

و عند تطبيق معادلات جاليلو علي معادلات ماكسويل لقد بدا عليها انها لا ينطبق عليها مبدأ النسبية لجاليليو، أي أننا إذا عوضنا في معادلات ماكسويل بالقيم التي حصلنا عليها في المعادلات السابقة لتحويلات جاليلوا فهل صورتها تبقى كما هي؟

عند تعويضنا ب x, y, z, t بمتغيراتها طبقا لتحويلات جاليليو فانه:

$$\frac{\partial x'}{\partial x} = 1 \ , \qquad \frac{\partial x'}{\partial t} = -v$$

$$\frac{\partial t'}{\partial t} = \frac{\partial y'}{\partial y} = \frac{\partial z'}{\partial z} = 1$$

$$\frac{\partial x'}{\partial y} = \frac{\partial x'}{\partial z} = \frac{\partial y'}{\partial x} = \frac{\partial t'}{\partial x} = \cdots = 0$$

من قاعده السلسله نحصل علي

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y'}\frac{\partial y'}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial z'}\frac{\partial z'}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial x}$$

بالتعويض نحصل علي

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x'}$$

و

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}=\frac{\partial^2\varphi}{\partial x'^2}\ ,\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}=\frac{\partial^2\varphi}{\partial y'^2}\ ,\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=\frac{\partial^2\varphi}{\partial z'^2}$$

و لدينا ايضا

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\frac{\partial\varphi}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial t}+\frac{\partial\varphi}{\partial y'}\frac{\partial y'}{\partial t}+\frac{\partial\varphi}{\partial z'}\frac{\partial z'}{\partial t}+\frac{\partial\varphi}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial t}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\frac{\partial\varphi}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial t}+\frac{\partial\varphi}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial t}=-v\frac{\partial\varphi}{\partial x'}+\frac{\partial\varphi}{\partial t'}$$

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}=v^2\frac{\partial^2\varphi}{\partial x'^2}-2v\frac{\partial^2\varphi}{\partial x'\,\partial t'}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial t'^2}$$

بالتعويض في المعادله الموجيه لماكسويل نجد ان

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x'^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y'^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z'^2}+\frac{1}{c^2}\left(2v\frac{\partial^2\varphi}{\partial x'\,\partial t'}-v^2\frac{\partial^2\varphi}{\partial x'^2}\right)=0$$

اي ان شكل معادله ماكسويل تغير، لذلك فإن سفينة الفضاء المتحركة ستختلف فيها الظواهر الكهربية و المغناطيسية و الضوئية عن سفينة الفضاء الساكنة. و هذا غير صحيح.

الاجسام التي تتحرك بسرعات عاليه

و يلاحظ من العلاقة (7) التي تسمى قانون جمع السرعات لجاليليو أن السرعة كما يرصدها المراقب S هي مقدار السرعة التي يرصدها المراقب S' مضاف إليها السرعة النسبية v بين الإطارين القصوريين. كما يلاحظ من المعادله ٤ أن إحداثي الزمن واحد في الإطارين المرجعيين حيث أن الزمن في الميكانيكا الكلاسيكية ثابت و لا يتغير بتغير الأطر الساكنة و من ثم فان الفترات الزمنية بين وقوع الأحداث تكون ثابتة و لا تتغير بتغير الأطر. وقد تعد هذه النتيجة عادية في حياتنا اليومية. و قد يبدو ذلك منطقيا بالنسبة للسرعات العادية ألا أن هذه النتيجة قد أدت الى تعارض كبير عندما استخدمت علي الاجسام المتحركه بسرعه تقترب من سرعه الضوء و للموجات الكهرومغناطيسية مثل موجات الضوء.

مثال: علي الاجسام المتحركه بسرعات عاليه

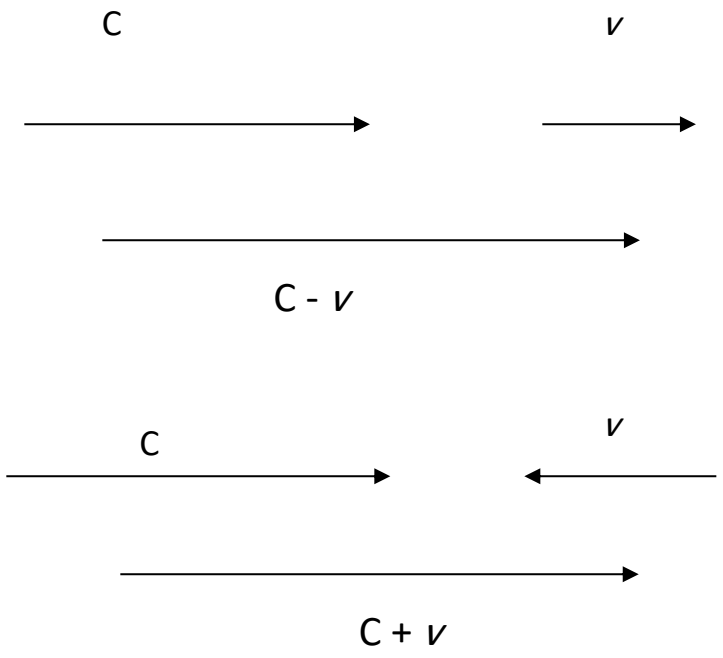
اذا انطلقت بسيارتك بسرعه تساوي ٠,٧ من سرعه الضوء و صديقك انطلق في الاتجاه المقابل بسرعه ٠,٤ من سرعه الضوء، كم ستكون السرعه النسبيه بينكم؟

من قانون جمع السرعات فان السرعه هي

$$0.7\ C + 0.4\ C = 1.1\ C$$

اي انها اكبر من سرعه الضوء!!!

مثال اخر: علي **انتشار الضوء**



نفترض نبضة ضوئية تتحرك بسرعة C في وسط (الأثير)، فإذا كان هناك راصد فى إطار هذا الوسط فانه سوف يقيس سرعة الضوء على أنها C. أما إذا كان هناك راصد أخر فى إطار مرجعى أخر و يتحرك بسرعة نسبية مقدارها v بالنسبة للإطار الأول، فان ذلك الراصد سوف يعين سرعة الضوء بالعلاقة $C - v$ إذا كان متحركا مع اتجاه النبضة الضوئية و سوف يعينها من العلاقة $C + v$ إذا كان متحركا عكس اتجاه النبضة الضوئية كما هو موضح بالشكل.

و معنى هذا أن سرعة الضوء ليست ثابتة و تختلف من إطار الى أخر و أنها ثابتة فى إطار قصورى وحيد وهو الأثير.

وهذا هو أهم تعارض بين المفاهيم الكلاسيكية و المفاهيم الحديثة التي أقرتها النظرية النسبية لأينشتين.

تحويلات لورانتز

كتب لورانتز ورقه عمل لحل المشاكل المتعلقه بمعادلات ماكسويل تحت عنوان:

"الظاهره الكهرومغناطيسه في نظام يسير باي سرعه اقل من سرعه الضوء"

افترض لورانتز ان الاجسام المتحركه في الاثير تنكمش في اتجاه حركتها نتيجه تاثير الاثير علي الكترونات الجسم المتحرك.

وضع لورنتز معادلات التحويل على الصورة

$$x' = \beta(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \alpha t + \gamma x \qquad (10)$$

حيث α, β, γ ثلاث ثوابت يجب تعيينها ويجب أن تحقق هذه المعادلات معادلة الموجة الكورية في كلا النظامين. معادلة الموجة الضوئية كما ترى من النظام الأول هي:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2 \qquad (11)$$

حيث c هي سرعة الضوء.

ومعادلة الموجة في النظام الثاني هي

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2 \qquad (12)$$

بالتعويض في المعادلات (١٠) بقيم x', y', z', t' في المعادلة (١٢) ومساواة معاملات كل كمية مع مثيلتها في المعادلة (١١) نحصل على:

$$\beta^2 - \gamma^2 c^2 = 1$$

$$\alpha^2 c^2 - \beta^2 v^2 = c^2$$

$$\alpha\gamma c^2 - \beta^2 v^2 = 0 \qquad (13)$$

وبحل هذه المعادلات تصبح معادلات لورنتز للتحويلات النسبية هي

$$x' = \beta(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \beta(t - \frac{xv}{c^2}) \qquad (14)$$

حيث

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \qquad (15)$$

و بتطبيق هذه المعادلات علي معادله الموجات الكهرومغناطيسيه وجد ان

$$\frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad , \quad \frac{\partial x'}{\partial t} = \frac{-v}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

$$\frac{\partial t'}{\partial x} = \frac{-v/c^2}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \quad , \quad \frac{\partial t'}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

$$\frac{\partial y'}{\partial y} = \frac{\partial z'}{\partial z} = 1$$

$$\frac{\partial x'}{\partial y} = \frac{\partial x'}{\partial z} = \frac{\partial y'}{\partial x} = \cdots = 0$$

من قاعده السلسله نحصل علي

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y'}\frac{\partial y'}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial z'}\frac{\partial z'}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial x}$$

بالتعويض نحصل علي

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\frac{\partial \varphi}{\partial x'} + \frac{-v/c^2}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\frac{\partial \varphi}{\partial t'}$$

وبالاشتقاق مره اخري نجد ان

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{1-(v^2/c^2)}\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x'^2} + \frac{v^2}{c^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \frac{2v}{c^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x'\,\partial t'}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y'^2}\ ,\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z'^2}$$

و بالمثل لدينا

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial y'}\frac{\partial y'}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial z'}\frac{\partial z'}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial t}$$

بالتعويض نحصل علي

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{-v}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\frac{\partial \varphi}{\partial x'} + \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}\frac{\partial \varphi}{\partial t'}$$

وبالاشتقاق مره اخري نجد ان

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{1}{1-(v^2/c^2)} \left(v^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - 2v \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x' \, \partial t'}\right)$$

بالتعويض في المعادله الموجيه لماكسويل نجد ان

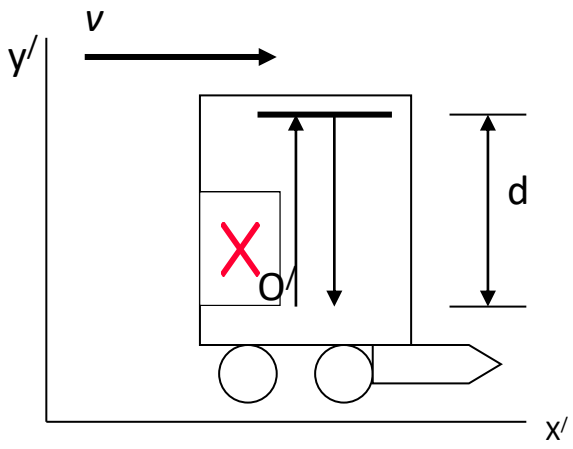
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z'^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t'^2}$$

اي ان بتطبيق هذه المعادلات علي معادله الموجات الكهرومغناطيسيه وجد انها لا تتغير ويمكننا إثبات أن سرعة الضوء ثابتة في كلا النظامين، كما نلاحظ ان الزمن اصبح نسبي مرتبط بالمكان و هو اول ارتباط للزمن بالمكان و سماه الزمن الموضعي. و كان هذا تعارض واضح مع زمن نيوتن. لكن لورانتز راي ان تحويلاته تنطبق علي الظاهره الكهرومغناطيسيه فقط. وظل متمسكا بفكر نيوتن وان الزمن مطلق وان تغيره من محاور اسناد لاخري تغير وهمي و انكماش الطول حقيقي يحدث نتيجه الحركه في الاثير. وهذا عكس اعتقاد انيشتين!

تمدد الزمن

فى البداية يجدر بنا التعرف على الآنية Simultaneity والتى تعنى حدوث الاشـــياء فى آن واحد. ولقد اعتبر نيوتن ومن جاء بعده من العلماء ان آنية الاحداث شىء مطلق حيث ان الميكانيكا النيوتونية تؤكد على ان الزمن مطلق ومقياس الزمن لا يختلف باختلاف المشـــاهدين. الا ان اينشـــتين قد تخلا عن تلك الافكار فى نظريتة النســـبية واعتبر ان آنية حدوث الاشياء امر نسبى يعتمد على حركة المشاهد. وهذا الذى سوف يتم اثباته فى يلى.

حيث أننا سوف نتحقق من ان الوقت المقاس يختلف باختلاف الأطر المرجعية كما تختلف الفترات الزمنية بين حدثين. وسـوف نشـتق العلاقة بين الفترات الزمنية المقاسـه فى إطارين قصوريين مختلفين.



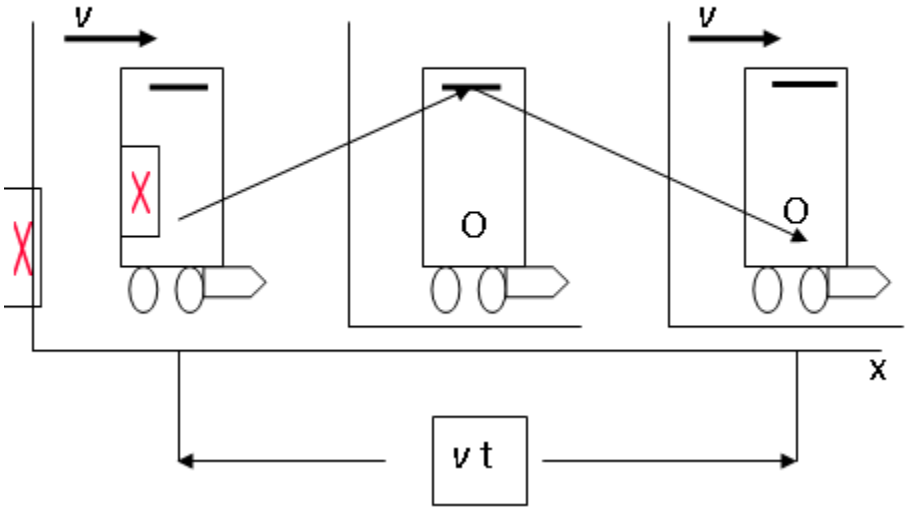
يوضح الشكل السابق أن هناك عربة تسير بسرعة منتظمة v و أن هناك راصد عند النقطة O/ و فوقه توجد مرآة مثبته فى سقف العربة و أن هناك شعاع ضوئى انبعث من أرضية العربة إلى سطح المرآة (قطع مسافة d) ثم ارتد مرة أخرى.

فإذا افترضنا أن الإشارة الضوئية استغرقت زمنا مقداره t_0 لقطع المسافة من المصدر الضوئى إلى المرآة والعودة مرة أخرى. و يعطى هذا الزمن من العلاقة:

$$t_0 = \frac{2d}{C}$$

و هذا هو الزمن الذى يقيسه المراقب الذى يتحرك مع العربة، و يسمى هذا الزمن بالزمن الحقيقى.

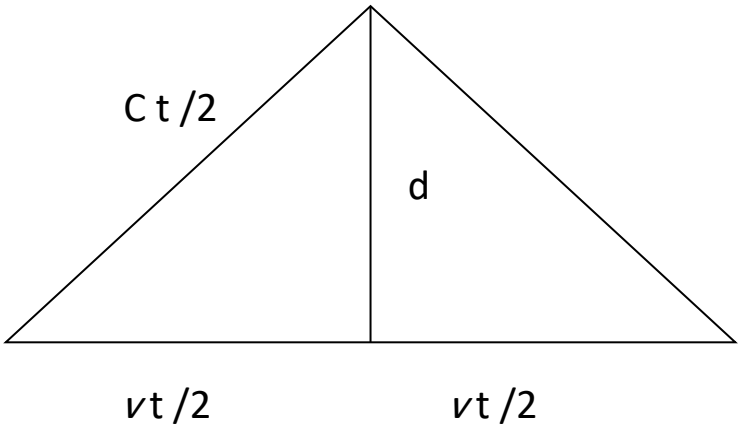
و الآن نريد تحديد الزمن الذى سوف يعينه المراقب الموجود على الأرض. فى هذه الحالة تكون العربة (المرآة و المصدر) متحركة بسرعة منتظمة مقدارها v بالنسبة لهذا الراصد كما هو موضح فى الشكل التالى.



و نلاحظ أنه فى الوقت التى تصل فيه الإشارة الضوئية إلى المرآة تكون هذه المرآة قد تحركت مسافة مقدارها $\frac{vt}{2}$ ، حيث أن t هو زمن وصول النبضة الضوئية إلى المرآة و العودة مرة أخرى كما يراه المراقب الموجود على الأرض.

و نلاحظ أنه فى الوقت التى تصل فيه الإشارة الضوئية إلى المرآة تكون هذه المرآة قد تحركت مسافة مقدارها $\frac{vt}{2}$ ، حيث أن t هو زمن وصول النبضة الضوئية إلى المرآة و العودة مرة أخرى كما يراه المراقب الموجود على الأرض.

و يتضح من الشكل السابق أن الضوء يقطع مسافة أكبر بالنسبة للملاحظ الموجود على الأرض عنه بالنسبة للملاحظ الموجود داخل العربة. ويمكننا تمثيل الشكل السابق بالشكل الآتي.



من الشكل السابق نجد أن

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

$$t = \frac{2d}{\sqrt{C^2 - v^2}} = \frac{2d}{C\sqrt{1 - v^2/C^2}}$$

بالتعويض مماسبق عن قيمة الزمن t0 نحصل على:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/C^2}} = \gamma\, t_0$$

و حيث أن γ أكبر من الواحد فان t اكبر من t_0 .

مما سبق نستنتج أن الزمن الذى يحسبه المراقب الموجود على الأرض أكبر من الزمن الذى يحسبه المراقب الموجود فى العربة و هذا ما يسمى باستطالة أو تمدد الزمن.

الأدلة التجريبية على حقيقة تمدد الزمن: استطالة الوقت ظاهرة حقيقية تم التحقق من وجودها بالعديد من الأدلة لعل من أبرزها.

١. **وجود الميونات muons** على سطح الأرض. و الميونات هى جسيمات أولية غير مستقرة لها شحنة تساوى شحنة الإلكترون و كتلتها أكبر من كتلة الإلكترون ب 207 مرة و تنتج من الأشعة الكونية فى طبقات الجو العليا و فترة عمر النصف لها 2.2 ميكروثانية إذا قيست بساعة فى إطارها المرجعى (أى ساعة تتحرك مع الميونات). فإذا كانت سرعة الميونات 0.99 من سرعة الضوء فانه سوف يقطع فى فترة عمر النصف مسافة 653.4 m قبل أن يضمحل أى أنه سوف يضمحل قبل وصوله إلى سطح الأرض. إلا أن العديد من التجارب قد بينت أن العديد من الميونات تصل إلى سطح الأرض. و يمكن تفسير ذلك على أساس ظاهرة تمدد الزمن، فإذا قسنا فترة عمر النصف بساعة على الأرض سنجد أنها تساوى γ t و بذلك تكون فترة عمر النصف طبقا للساعة الأرضية 15.59 ميكروثانية و المسافة التى يقطعها الميون خلال تلك الفترة هى 4631.82 m و هى مسافة كافية لكى يصل إلى سطح الأرض قبل أن يضمحل.

٢. فى أكتوبر عام ١٩٧٧ قام العالمان جوزيف هافل و ريتشارد كيتنج بوضع مجموعة من الساعات الذرية، و الساعة الذرية هى ساعة تصل دقتها إلى 1012 من الثانية و هى تستخدم كمقياس معيارى للوقت و تستخدم فيها ذرات السيزيوم داخل طائرة ركاب. و طافت هذه الطائرة مرتين حول الأرض و كان الهدف من ذلك هو اختبار صحة ظاهرة تمدد الزمن. وقد حصل العالمان على نتائج تتوافق مع المعادلة الاخيرة مما يؤكد ظاهرة تمدد الزمن.

التناقص الظاهرى للتوائم: إذا افترضنا وجود تؤمين (A و B) على سطح الأرض و كان عمر كل منهما ٢٠ عاما، فإذا افترضنا أن أحدهما (A مثلا) سافر إلى أحد النجوم بمركبة فضاء بسرعة 0.91 من سرعة الضوء ثم عاد إلى الأرض بعد ان قضى فترة زمنية مقدارها 5 سنوات (بحساب التوءم A)، فيكون عمره 25 عام. السؤال كم هو عمر أخيه التوءم الموجود على الأرض (B). للإجابة على هذا السؤال يجب حساب فترة الخمس سنوات بحسابات التوءم (B) وهى وفقا للمعادلة الاخيرة تكون:

$$t = \frac{5}{\sqrt{1-\frac{v^2}{C^2}}} = \frac{5}{\sqrt{1-0.8281}} = \frac{5}{\sqrt{0.1719}} = 12 \ year$$

و بذلك يكون عمر التوءم B هو 32 عاما و ليس 25 عاما مثل أخيه. و السؤال الذى يطرح نفسه الآن أيهما السن الحقيقى؟

انكماش الطول

الاطوال حالها حال الفترات الزمنية ليست مطلقة بل تختلف باختلاف الاطر المرجعية اى انها تعتمد على الاطار المرجعى الذى تقاس منه. والطول الحقيقى لجسم هو طوله الذى يقاس فى اطار مرجعى يكون فيه الجسم ساكنا اى انه مثل الزمن الحقيقى. اى بمعنى ان الطول الحقيقى هو الطول كما يقيسه شخص متواجد مع الجسم فى اطار مرجعى واحد ومن ثم يكون الجسم ساكنا بالنسبة له. اما طول الجسم الموجود فى اطار مرجعى متحرك بالنسبة للشخص الذى يقيس فيكون اقل من الطول الحقيقى وهذا التاثير يسمى انكماش الطول.

ولحساب مقدار انكماش الطول: نفرض أن مركبة فضائية تتحرك بسرعة $\mathbf{U}$ من كوكب لأخر و داخلها مراقب يريد حساب المسافة بين الكوكبين (هذا المراقب يكون فى إطار متحرك بالنسبة للكوكبين). و إذا كان هناك مراقب أخر موجود على الأرض (أى فى إطار ثابت بالنسبة للمركبة و أيضا بالنسبة للكوكبين) و يريد حساب المسافة بين الكوكبين. فإذا افترضنا أن المراقب الموجود على الأرض قاس هذه المسافة فى زمن مقداره t و وجدها L_0 و هو الطول الحقيقى. و السؤال الآن كيف سيقيس المراقب الموجود فى المركبة الطول بين الكوكبين.

نظرا لتمدد الزمن فان المراقب الموجود فى المركبة يجد أنه يقيس هذه المسافة فى زمن t_0 أقل من الزمن t. و فى هذه الحالة سوف تكون المسافة بين الكوكبين هى L .

$$L = v\, t_o$$

و بالتعويض من المعادلات السابقة عن قيمة t_0 فى المعادلة السابقة نحصل على:

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

و حيث أن المقدار v t يمثل الطول الحقيقى (L_0)، فان المعادلة السابقة تأخذ الشكل الآتي:

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

و حيث أن γ أكبر من الواحد فان الطول الظاهرى (L) يكون أقل من الطول الحقيقى (L_0) و هذا ما يسمى انكماش الطول. وبالتعويض عن قيمة γ نحصل على الشكل التالى للمعادلة السابقة:

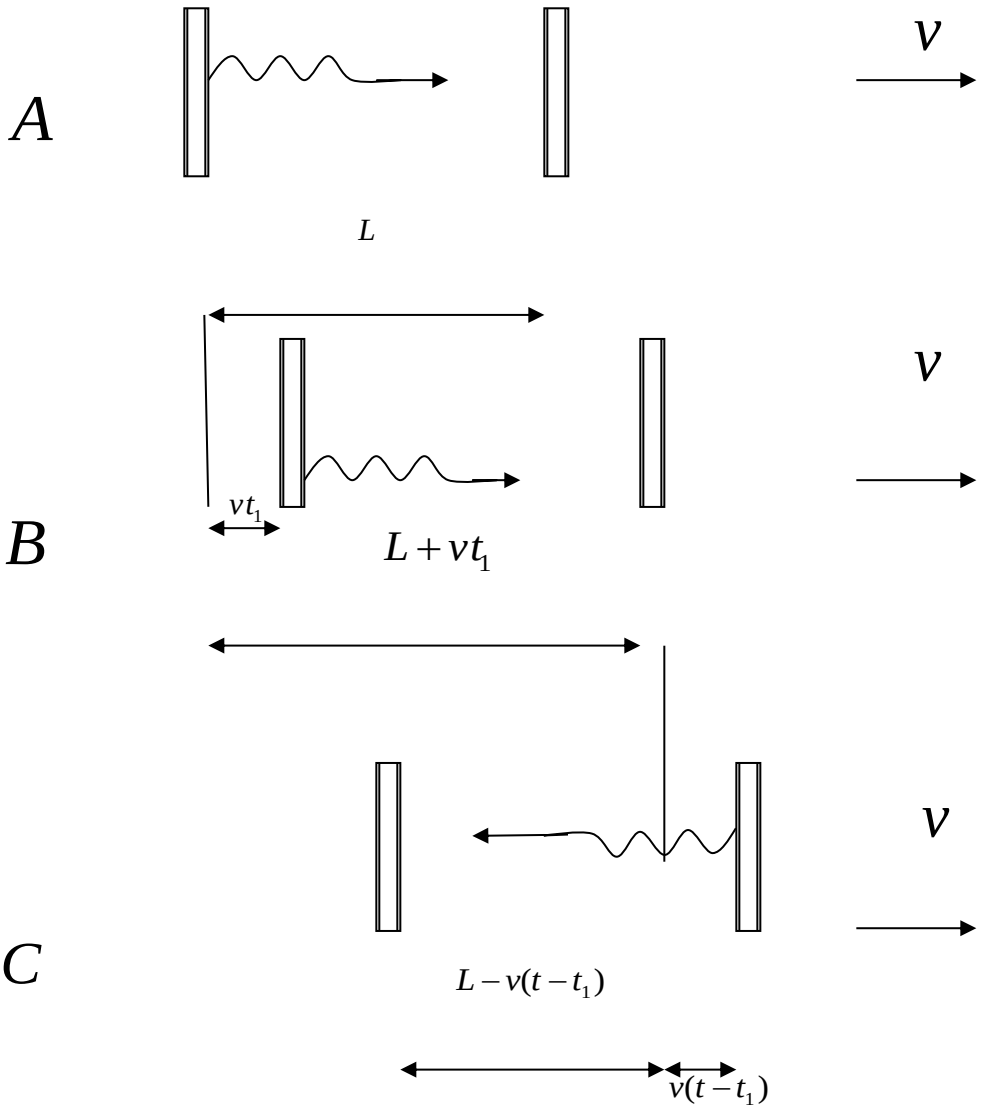
$$\mathrm{L} = \mathrm{L}_0 \left(1 - \frac{\mathrm{v}^2}{\mathrm{C}^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

اى انه اذا كانت المسافة بين جسمين كما يقيسها شخص ساكن بالنسبة للجسمين هى L_0 فان مسافر يسير بسرعة υ بالنسبة للجسمين يجد ان المسافة بين الجسمين هى L حيث L اصغر من L_0 وفى هذه الحالة يكون L_0 هو الطول الحقيقى للجسم.

إذن المسافر فى قطار تصل سرعته إلى 0.8 من سرعة الضوء مثلا سوف يرى رصيف محطة القطار أقصر ـ مما يراه الواقف على الرصـيف و كذلك الواقف على الرصـيف سـوف يرى القطار أقصرـــ مما يراه راكب القطار ، وكلا المشـــاهدين عى حق الا ان وجهتى النظر مختلفتين.

اشتقاق معادلة انكماش الطول :

تصور ان هناك ساعة ضوئية مكونة من مراتين المسافة بينهما (L) موضوعة في مركبة فضائية سرعة هذه المركبة (v) بحيث ان الاشارة الضوئية للساعة تسير ذهابا وايابا بموازاة خط سير المركبة الفضائية (شكل A ادناه).



تبدأ الاشارة من المراة الخلفية في زمن مقداره (t = 0) وتصل الى المراة الامامية في زمن مقداره (t = t1) وبذلك تقطع الاشارة مسافة مقدارها (ct1)(لماذا؟) ، في حين تبتعد المراة الامامية مسافة مقدارها (vt1) خلال نفس الفترة الزمنية (شكل B اعلاه). عليه يكون:

$$ct_1 = L + vt_1 \Rightarrow ct_1 - vt_1 = L \Rightarrow t_1(c-v) = L$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{L}{c-v} \text{----------(1)}$$

بعد ان تصل الاشارة المراة الامامية تنعكس لتصل المراة الخلفية عند زمن (t) وبذلك تقطع مسافة مقدارها { c(t-t1) } حيث ان :

$$c(t-t_1) = L - v(t-t_1)$$

حيث { v(t-t1) }تمثل المسافة التي تقطعها المراة الخلفية نحو الشعاع المنعكس خلال الفترة الزمنية (t-t1) (شكل C اعلاه) .

$$c(t-t_1) + v(t-t_1) = L \Rightarrow (t-t_1)(c+v) = L$$

$$\Rightarrow t - t_1 = \frac{L}{c+v}$$

$$\Rightarrow t = \frac{L}{c+v} + t_1 \text{.....(2)}$$

حيث ان (t) يمثل الزمن الكلي لحركة الاشارة الضوئية ذهابا وايابا

نعوض المعادلة (1) في (2) نحصل على :

$$t=\frac{L}{c+v}+\frac{L}{c-v}=\frac{L(c-v)+L(c+v)}{(c+v)(c-v)}=\frac{Lc-Lv+Lc+Lv}{c^2-v^2}$$

$$=\frac{2Lc}{c^2-v^2}=\frac{2Lc/c^2}{(c^2-v^2)/c^2}=\frac{2L/c}{\frac{c^2}{c^2}-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$t=\frac{2L/c}{1-\frac{v^2}{c^2}}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

ومن اشتقاق تمدد الزمن عندنا المعادلة (2) وفحواها

$$t=\frac{2L^{\backslash}/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

عليه ومن تعويضها في معادلة (3) اعلاه نحصل:

$$\frac{2L/c}{1-\frac{v^2}{c^2}}=\frac{2L^{\backslash}/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\Rightarrow\frac{L}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=L^{\backslash}$$

$$\Rightarrow L=L^{\backslash}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

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

والمعادلة رقم (٤) تمثل تقلص لورنس

ويكون الطول L أقل من الطول $L^{\backslash}$ الذي يقيسه المراقب $O^{\backslash}$ حيث أن المقدار تحت الجذر يكون دائماً أفل من الواحد.

مثال:

جسم يسير بسرعة (0.9c) ما هي نسبة تقلص طوله الى الطول الاصلي عند السكون؟

الحل:

$$\frac{L}{L^{\backslash}} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1-\frac{(0.9c)^2}{c^2}} = \sqrt{1-\frac{(0.9)^2 c^2}{c^2}}$$

$$\Rightarrow \frac{L}{L^{\backslash}} = \sqrt{1-0.81} = \sqrt{0.19} = 0.436$$

$$\Rightarrow \frac{L}{L^{\backslash}} = 0.436 * 100\% = 43.6\%$$

إذن سيقصر طوله بنسبة ٤٣,٦% من طوله الأصلي عند السكون

ملاحظة :

- ان الضوء الذي يصل الكاميرا او العين من اجزاء الجسم البعيدة ينبعث في وقت اسبق من وقت انبعاث الضوء من اجزاء الجسم القريبة ولذلك فان الصورة المتكونة في الكاميرا تكون مركبة.

- الاشعة الصادرة من اجزاء الجسم المختلفة لتكوّن الصورة في لحظة معينة تصدر من الجسم عندما يكون الاخير في مواضع مختلفة ، هذه الظاهرة تؤدي الى تمدد الطول الظاهري للجسم باتجاه حركته ، ونتيجة لهذا فان جسم ذا ثلاث ابعاد كمكعب يمكن ان يشاهد منحرفا ومتغير الشكل بمقدار يعتمد على زاوية النظر و النسبة (v/c) . وعليه فان شكل جسم متحرك يظهر مختلفا عن شكله في حالة السكون ولكن بطريقة مختلفة.

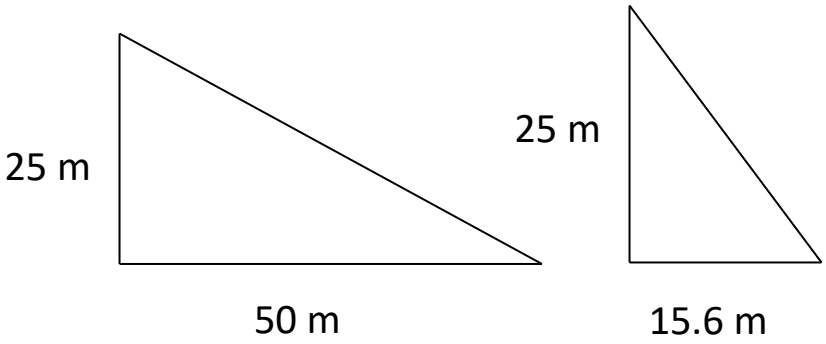
تمرين: سفينة فضائية طولها على الأرض (100 m) أصبح طولها عند الطيران (99 m) ، جد سرعة السفينة ؟

مثال: سفينة فضائية على شكل مثلث قائم الزاوية، عندما كانت فى حالة سكون كان ارتفاعها 25 متر و طولها 50 متر. فما هو شكل السفينة بالنسبة لمشاهد على الأرض عندما تتحرك بسرعة 0.95 من سرعة الضوء.

الحل: المشاهد يرى طول السفينة قد تقلص ليصبح

$$L = 50 \times \sqrt{1 - \frac{(0.95\,C)^2}{C^2}} = 15.6\,m$$

أما ارتفاع السفينة فلا يتغير حيث أنه متعامد على اتجاه الحركة كما هو موضح بالرسم.



مـثال(١): العمر الزمني لجسيم نووي قبل أن يتحول إلى صورة أخرى هو 1.8×10^{-8} ثانية وذلك حين يكون ساكنا في المعمل. ما عمر هذا الجسيم إذا أطلق بسرعة تساوى 0.95 من سرعة الضوء؟

الحـــل: في هذه الحالة فإن $\upsilon = 0.95\ c$ أي أن

$$\Delta t' = \frac{1.8\times10^{-8}}{\sqrt{1-\left(\frac{0.95\,c}{c}\right)^2}} = 5.76\times10^{-8}\ \ \text{Sec.}$$

أي أن العمر الزمني للجسيم المتحرك يصبح حوالي ثلاثة أمثال عمره الزمني وهو ساكن.

مـثال (٢): ما هي سرعة الطائرة والتي تدور الساعة الموجودة بها أبطأ بثانية لكل ساعة بالنسبة لساعة أخرى على سطح الأرض؟

الحـــل: بوضع $\Delta t' = 3601\ \text{Sec}$ ، $\Delta t = 3600\ \text{Sec}$

$$\therefore 3601 = \frac{3600}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}$$

$$\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2} = \frac{3600}{3601} \Rightarrow \left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2 = 1-\left(\frac{3600}{3601}\right)^2$$

$$\upsilon = \sqrt{1-\left(\frac{3600}{3601}\right)^2}\times c \quad \Rightarrow \quad \upsilon = 7.1\times10^{6}\ \text{m/Sec}$$

مـثال (٣): إذا كان متوسط العمر للميزون (μ) والذي يتحرك بسرعة $(0.9\,c)$ هو $6\times10^{-6}\ \text{Sec}$ احسب متوسط العمر له في النظام الساكن؟

الحــل:

$$\Delta t' = 6\times10^{-6}\ \text{Sec}\ ،\quad \upsilon = 0.9\,c$$

$$\therefore \Delta t = \sqrt{1-\left(\frac{0.9\,c}{c}\right)^2}\times 6\times10^{-6}$$

$$= \sqrt{0.19}\ \times 6\times10^{-6}$$

$$= 2.62\times10^{-6}\ \text{Sec}$$

مـثال (٤): تتحرك طائرة بالنسبة للأرض بسرعة $600\ \text{m/Sec}$ والطول الفعلي لها $50\,\text{m}$ ما هو مقدار النقص في الطول والذي يبدو أن الطائرة تنقصه بالنسبة لمشاهد على سطح الأرض؟

الحــل:

$$\upsilon = 600\ \text{m/Sec}\ ،\quad c = 3\times10^{6}\,\text{m/Sec}\ ،\quad L = 50\ \text{m}$$

$$L' = L\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}$$

$$L' = 50\sqrt{1-\left(\frac{600}{3\times10^{8}}\right)^2}$$

$$= 50\sqrt{1-4\times10^{-12}}$$

$$\therefore \Delta L \approx 10^{-10}\ \text{m}$$

تغير الكتلة مع السرعة

من أهم نتائج النظرية النسبية هو تأثير السرعة على كتلة الجسم المتحرك. فمن المعروف من الميكانيكا النيوتونية أن سرعة أي جسم كتلته m تتزايد بدون حدود إذا ما عجل بواسطة قوة F طالما استمر تأثير القوة عليه وفقا للمعادلة

$$\upsilon_t = \upsilon_0 + a\,t = \upsilon_0 + \frac{F}{m}\,t \qquad (15)$$

حيث υ_0 هي سرعته عند أي لحظة زمنية t، a هي العجلة التي يكتسبها الجسم، $a = \frac{F}{m}$. واضح أن السرعة υ_0 تزداد إلى ما لانهاية بعد زمن لا نهائي وهذه النتيجة غير صحيحة إذا اعتبرنا الفرض الأساسي للنظرية النسبية بأن هناك حد أقصى للسرعات هو سرعة الضوء. وللتغلب على هذه المشكلة يجب اعتبار أن كتلة الجسم تزداد بسرعة وفقا للمعادلة

$$m = \beta m_0 \qquad (16)$$

حيث m_0 هي كتلة السكون، m هي كتلته عندما يتحرك بسرعة υ أي أن كتلة الجسم تصبح

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} \qquad (17)$$

ويلاحظ أنه كلما اقتربت سرعة الجسم υ من سرعته الضوء تزداد كتلته زيادة كبيرة وتقترب قيمتها من ما لانهاية إذا كانت υ قريبة جدا من c. وهذه الكتلة الكبيرة تحتاج إلى قوة كبيرة لتعجيلها والقوة الكبيرة تلك غير متوفرة في الطبيعة.

كمية الحركة وطاقة الحركة لجسيم نسبوى

كمية الحركة النسبوية للجسيم المتحرك بسرعة υ تصبح

$$P = \frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} \qquad (١٨)$$

ولتعيين طاقة الحركة النسبوية للجسم نحسب الشغل المبذول W لزيادة سرعته من صفر إلي υ. عندما تؤثر قوة F على الجسم وأزاحته مسافة dx في اتجاهها فإن

$$dW = F\,dx$$

حيث

$$F = \frac{d}{dt}(m\upsilon)$$

$$dW = \left(\frac{d}{dt}(m\upsilon)\right) dx = \upsilon\, d(m\upsilon)$$

وبالتعويض عن الكتلة m من المعادلة (١٤) وإجراء التكامل نحصل على طاقة الحركة النسبوية للجسم KE

$$KE = \int_0^{\upsilon} \upsilon \, d\left(\frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}\right)$$

$$= m_0 \int_0^{\upsilon} \upsilon \left(\frac{d\upsilon}{\left[1-(\upsilon/c)^2\right]^{3/2}}\right)$$

$$= m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} - 1\right)$$

$$= m_0 c^2 (\beta - 1)$$

$$K.E = (m - m_0) c^2 \qquad (١٩)$$

أي أن طاقة الحركة لجسيم نسبوى تساوى فرق كتلتي الحركة والسكون مضروبة في مربع سرعة الضوء. وتسمى الكمية $m_0 c^2$ بطاقة السكون، mc^2 بالطاقة الكلية للجسم. وفى هذه الحالة أيضا فإن طاقة الحركة تساوى الفرق بين الطاقة الكلية للجسم وطاقة السكون له. وتسمى المعادلة

$$E = m c^2 \qquad (٢٠)$$

بمعادلة آينشتاين لتكافؤ الكتلة والطاقة.

مـثال (5): جسم كتلته خمسة كيلوجرام فما هي كتلته عندما يتحرك بسرعة مقدارها $0.6c$ ؟

الحــل: $m = 5\ \text{Kg.}$ ، $\upsilon = 0.6\,c$

$$\therefore m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}$$

$$= \frac{5}{\sqrt{1-(0.6)^2}}$$

$$= \frac{5}{\sqrt{0.64}} = \frac{50}{8}$$

$$= 6.25\ \text{Kg.}$$

مـثال (٦): كتلة جسيم يتحرك بسرعة $0.8c$ هي $100\ \text{Kg.}$ أوجد كتله سكونه؟

الحــل: $m = 100\ \text{Kg.}$ ، $\upsilon = 0.8c$

$$\because m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} \quad \Rightarrow$$

$$\therefore m_0 = m\ \sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}$$

$$\therefore m_0 = 100\ \sqrt{1-(0.8)^2}$$

$$= 100 \times 0.6$$

$$= 0.6\ \ \text{Kg.}$$

مـثال (٧):إذا نجزأ جسم ساكن تلقائيا إلى جزأين متحركان في اتجاهين متضادين والجز آن لهما كتلة سكون $5.33\ \mathrm{Kg}$ ، $3\ \mathrm{Kg}$ على الترتيب وسرعتان مقداريهما $0.8c$ ، $0.6c$ حيث c سرعة الضوء. أوجد كتلة الجسم الأصلي ؟

الحــل:

$$m_{o1} = 5.33\ \mathrm{Kg}\ ,\quad m_{o2} = 3\ \mathrm{Kg},\quad \upsilon_1 = 0.8c,\quad \upsilon_2 = 0.6c$$

∵ الطـاقــة الابتدائيــة = الطـاقــة النهائيــة

$$\because\ mc^2 = \frac{m_{o1}\,c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{0.8c}{c}\right)^2}} + \frac{m_{o2}\,c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{0.6c}{c}\right)^2}}$$

$$m_o = \frac{5.33}{\sqrt{1-0.64}} + \frac{3}{\sqrt{1-0.36}}$$

$$= \frac{5.33}{0.6} + \frac{3}{0.8}$$

$$= 12.63\ \mathrm{Kg}$$

العلاقة بين كمية التحرك والطاقة لجسم نسبى

بما أن كمية التحرك محفوظة فإنه من المفيد في غالب الأحيان التعبير عن طاقة جسم ما بدلالة كمية تحركه بدلا من سرعته كالآتي:-

$$\because\ m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} \qquad \therefore\ m^2 = \frac{m_0^2}{1-(\upsilon/c)^2}$$

بضرب كلا من الطرفين في $c^4(1-\upsilon^2/c^2)$ نحصل على

$$m^2c^4 - m^2\upsilon^2c^2 = m_0^2\,c^4$$

وباستعمال النتائج

$$P = m\upsilon\ ,\qquad E_0 = m_0\,c^2\ ,\qquad E = mc^2$$

$$E^2 - P^2c^2 = E_0^2 \Rightarrow E^2 = E_0^2 + P^2c^2$$

$$E = \sqrt{m_0^2c^4 + P^2c^2} \qquad (21)$$

وحدات الطاقة وكمية التحرك

يعرف الإلكترون فولت (eV) بطاقة جسيم شحنته تساوى شحنة إلكترون واحد بعد تحركه خلال فرق جهد مقداره فولت واحد.

$$1\ eV = 1.6\times10^{-19}\ \text{Coulomb.Volt}$$

$$eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule} \qquad (22)$$

والوحدات القياسية لكمية التحرك هي $\text{Kg}\cdot\text{m/Sec}$ إلا انه في الحسابات النسبية كثيرا ما تستعمل وحدات eV/c لكمية التحرك وتنشأ هذه الوحدات من التعبير الخاص بالطاقة وكمية التحرك $P = E/c$

مـثال (٨): أحسب كمية تحرك الإلكترون والذي طاقة حركته ١ مليون إلكترون فولت. الحــل:

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2 c^2}$$

$$E^2 = m_0^2 c^4 + P^2 c^2$$

الطاقة الكلية = طاقة الحركة + طاقة السكون

$$E = m_0 c^4 + K$$

$$\therefore (m_0 c^2 + 1\text{MeV})^2 = m_0^2 c^4 + P^2 c^2$$

$$(0.511 + 1)^2 = (0.511)^2 + P^2 c^2$$

$$1 + 2(0.511 + (0.511)^2 = (0.511)^2 + P^2 c^2$$

$$1 + 1.022 = P^2 c^2$$

$$P = \sqrt{\frac{2.022}{c^2}}$$

مـثال(9): عجل إلكترون إلى من السكون إلى سرعة مقدارها $0.5c$ احسب التغير في طاقته

الحــل:

$$E_0 = m_0 c^2 = 0.511\ \text{MeV}$$

وعند سرعة $0.5c$

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} = \frac{0.511\ \text{MeV}}{\sqrt{1-0.25}} = \frac{0.511}{\sqrt{0.95}}$$

$$E = 0.59\ \text{MeV}$$

$$K = 0.59 - 0.511 = 0.079\ \text{MeV}$$

مـثال(١٠): أحسب طاقة الحركة لإلكترون كمية تحركه $\frac{2}{c}\ \text{MeV}$

الحــل:

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (Pc)^2$$

$$(K + m_0 c^2)^2 = (m_0 c^2)^2 + (Pc)^2$$

$$(K + 0.511)^2 = \left(\frac{2\ \text{MeV}}{c} \times c\right)^2 + (0.511)^2$$

$$K = 1.55\ \text{MeV}$$

مـثال(11) أحسب سرعة إلكترون طاقة حركته $2\ \text{MeV}$

الحــل:

$$K = (m - m_0)\, c^2$$

$$K = \frac{m_0\, c^2}{\sqrt{1 - (\upsilon / c)^2}} - m_0\, c^2$$

$$2\,\text{MeV} = \frac{0.511\ \text{MeV}}{\beta} - 0.511\ \text{MeV}$$

$$\beta = \frac{0.511}{2.511} = 0.203$$

$$\beta = \frac{\upsilon}{c} \qquad \Rightarrow \qquad \upsilon = \beta c$$

$$\upsilon = 0.89\, c$$

مـثال(12)

a) أحسب كتلة وسرعة إلكترون إذا علمت أن طاقته الحركية تساوى $1.5\ \text{MeV}$

b) ما هي الطاقة مقدرة بالإلكترون فولت اللازمة كي ينتقل إلكترون من السكون إلى سرعة مقدارها تسعة أعشار سرعة الضوء.

الحـــل:

$$K = (m - m_0)\, c^2 \qquad (1)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\upsilon / c)^2}} \qquad (2)$$

من المعادلة (١)

$$m = m_0 + K / c^2$$

كتلة الإلكترون $m_0 = 9.1\times10^{-31}\ \text{Kg}$

سرعة الضوء $c = 3\times10^{8}\ \text{m/Sec}$

$$K = 1.5\,\text{MeV} = 1.5\times10^{6}\ \text{eV} = 1.5\times10^{6}\,(1.6\times10^{-19})$$

$$K = 1.5\times1.6\times10^{-13}\ \text{Joule}$$

$$m = (9.11\times10^{-31}) + \frac{1.5\times1.6\times10^{-13}}{(9\times10^{16})}$$

$$m = (9.11\times10^{-31}) + (26.7\times10^{-31})$$

$$m = 35.8\times10^{-31}\ \text{Kg}$$

أي أن الكتلة أثناء الحركة حوالي أربع مرات الكتلة السكونية للإلكترون.

أما سرعة الإلكترون فنجدها من العلاقة (٢)

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}$$

بتربيع الطرفين

$$1-(\upsilon/c)^2 = (m_0/m)^2$$

$$\frac{\upsilon^2}{c^2} = 1-\left(\frac{m_0}{m}\right)^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\upsilon}{c} = \sqrt{1-\left(\frac{m_0}{m}\right)^2}$$

$$\upsilon = c\sqrt{1-\left(\frac{m_0}{m}\right)^2} = 3\times10^{8}\times\sqrt{1-\left(\frac{9.11}{35.8}\right)^2}$$

$$\upsilon = 3\times10^{8} \times \sqrt{1-0.065} = 3\times10^{8} \times \sqrt{0.935}$$

$$\upsilon = 3\times10^{8} \times 0.968 = 2.9\times10^{8}\ \text{m/Sec}$$

(b) نحسب الطاقة اللازمة لنقل الإلكترون من السكون إلى سرعة $0.9\,c$

$$K = (m - m_0)\,c^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}$$

$$K = \left(\frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} - m_0\right) c^2$$

$$K = \left(\frac{1}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} - 1\right) m_0 c^2$$

$$\upsilon = 0.9\,c \qquad \therefore (\upsilon/c)^2 = 0.81$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0.81}} = \frac{1}{\sqrt{0.19}} = 2.29$$

$$K = (2.29-1)\,m_0 c^2 = 1.29\,m_0 c^2$$

$$K = 1.29\times9.11\times10^{-31}\times9\times10^{16}$$

$$K = 10.6\times10^{-14}\ \text{Joule} = \frac{10.6\times10^{-14}}{1.6\times10^{-19}} = 6.63\times10^{5}\ \text{eV}$$

مـثال(13): يصدر عن نظير الكوبالت ٦٠ لدى تفككه فوتونات من أشعة جاما وجسيم بيتا (إلكترون) طاقتة الحركية $0.31\ \text{MeV}$ فما هي سرعة جسيم بيتا المقذوف؟

الحــل:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}$$

بتربيع الطرفين

$$1-(\upsilon/c)^2 = (m_0/m)^2$$

$$\upsilon = c\left[1-\left(\frac{m_0}{m}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$\left(\frac{m_0}{m}\right)^2 = \left(\frac{m_0 c^2}{mc^2}\right)^2$$

للإلكترون

$$m_0 c^2 = 0.511\ \text{MeV}$$

$$K = mc^2 - m_0 c^2$$

$$mc^2 = K + m_0 c^2 = 0.31 + 0.511 = 0.821\ \text{MeV}$$

$$\upsilon = 3\times10^8 \times \left[1-\left(\frac{0.511}{0.821}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$\upsilon = 3\times10^8 \times [1-0.386]^{1/2}$$

$$\upsilon = 2.35\times10^8\ \text{m/Sec}$$

الأجسام التي ليس لها كتلة Mass less particles

هل يوجد جسيم ليس له كتلة؟ في الميكانيكا الكلاسيكية فإن الجسيم لابد أن يكون له كمية تحرك وطاقة، ولكن في النظرية النسبية هذه المعطيات لا تتحقق

$$E=\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} \quad , \quad P=\frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} \qquad (23)$$

(I) When $m_0 = 0$ and $\upsilon < c$

$$\therefore E = P = 0 \qquad (24)$$

ولذلك فإن الجسيم الذي ليس له كتلة وسرعته أقل من سرعة الضوء ليس له طاقه ولا كمية حركة.

(II) When $\upsilon = c$ and $m_0 = 0$

$$\therefore E = P = \frac{0}{0} \qquad (25)$$

ويعن ذلك أن E, P ممكن أن يأخذا أي قيم.

إذن يشترط للجسم الذي ليس له كتلة أن تكون سرعته تساوى سرعة الضوء. وهذا هو الشرط الأول.

والشرط الثاني يمكن استنتاجه كالآتي:-

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4}{1-(\upsilon/c)^2} \qquad (26)$$

$$P^2 = \frac{m_0^2 \upsilon^2}{1-(\upsilon/c)^2}$$

$$P^2 c^2 = \frac{m_0^2 \upsilon^2 c^2}{1-(\upsilon/c)^2} \qquad (27)$$

بطرح (٢) من (١)

$$E^2 - P^2 c^2 = \frac{m_0^2 c^4 - m_0^2 \upsilon^2 c^2}{1-(\upsilon/c)^2}$$

$$E^2 - P^2 c^2 = \frac{m_0^2 c^4 \left[1-(\upsilon/c)^2\right]}{1-(\upsilon/c)^2}$$

$$E^2 - P^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

$$E^2 = m_0^2 c^4 + P^2 c^2$$

$$\therefore E = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2 c^2} \qquad (28)$$

وطبقا لهذه المعادلة لو وجد جسم كتلة سكونه $m_0 = 0$ فإن العلاقة بين الطاقة وكمية الحركة تكون

$$E = Pc \qquad (29)$$

وهذا هو الشرط الثاني للجسيمات التي ليس لها كتلة سكون.

مبادئ النسبيه الخاصه

بدأ انيشتين عام ١٩٠٥ في وضع اول اسس النسبيه عن طريق نشر ورقه عمل كان الغرض منها الاجابه علي السؤال التالي و هو:

هل يمكن صياغه قوانين الديناميكا بحيث تحتفظ بصورتها اذا انتقلنا من مكان الي اخر بفرض ان احد المكانين متحرك بالنسبه للاخر؟

او بعباره اخري، **هل يمكن ان تصاغ القوانين الطبيعيه الهامه في قالب لا يتاثر شكله بحركه المكان الذي تصاغ فيه؟**

لذا وضع اينشتين مبادئ النسبيه و هى:

١. قوانين الفيزياء يجب ان تكون واحدة في جميع اطر الاسناد القصورية.

اي انه يمكن التعبير عن قانون نيوتن الثالث $F = ma$ في اي نظام ولكن قد لا يكون للقيم F, m, a نفس القيم فى كل نظام.

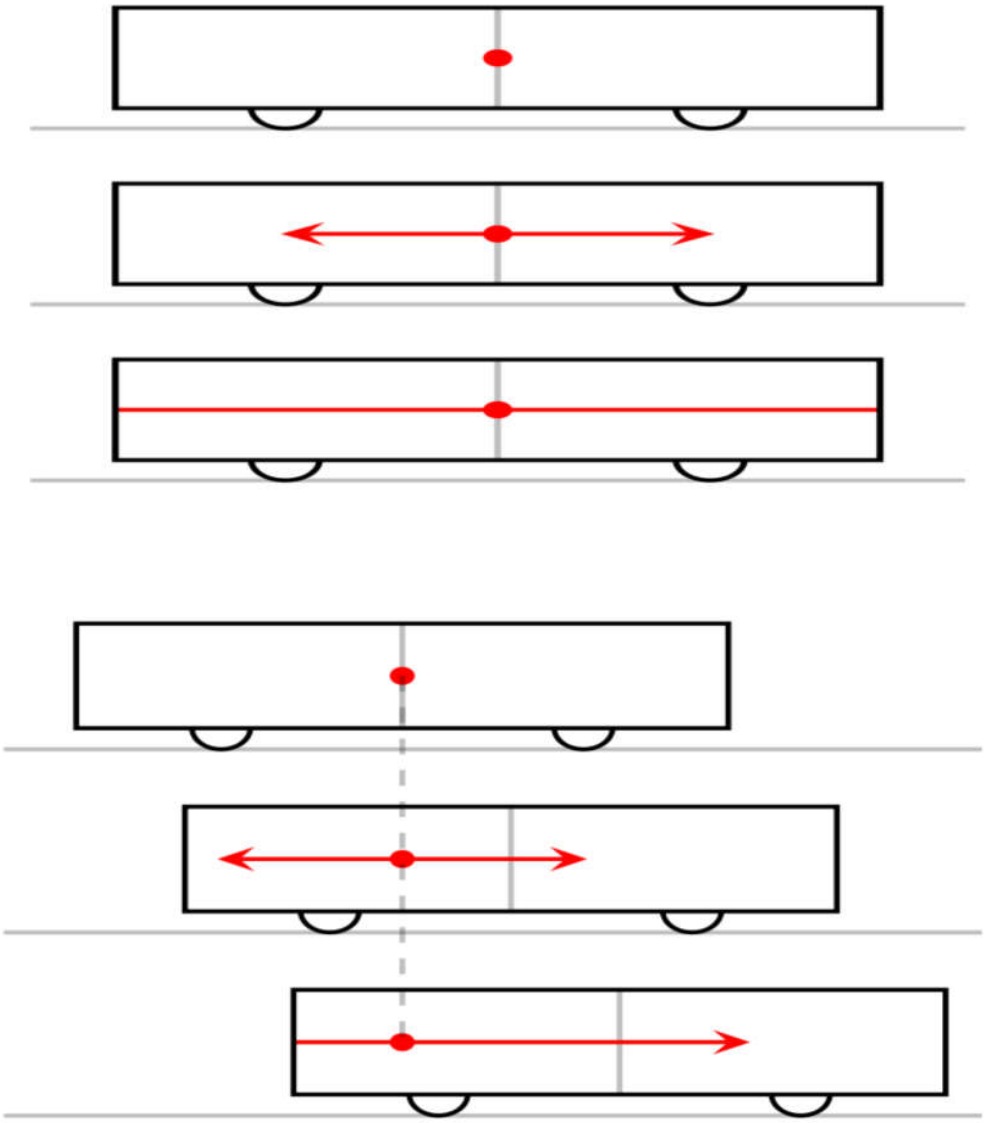
٢. ثبات سرعة الضوء. سرعة الضوء في الفراغ لها القيمة نفسها $c = 3 \times 10^8$ m/s في كل الاطر القصورية بغض النظر عن سرعة المراقب أو سرعة مصدر انبعاث الضوء.

كما هو واضح لم يضف اينشتين اي جديد فقد كان الفرض الاول موجود منذ ايام جاليلو و نيوتن و الفرض الثاني قد توصل اليه لورانتز قبل انيشتين.

ليوضح اينشتين نظريته طلب منك ان تتصور انك داخل قطار يتحرك بسرعه منتظمه قريبه من سرعه الضوء و انا اقف خارج القطار اراقب ماذا يحدث معك في الداخل. و تصور ايضا، بانه يوجد مصباح ضوئي معلق في منتصف القطار تماما. عندما يشتغل ذلك المصباح، سيصدر ضوء ينتشر في ارجاء القطار بسرعه واحده تساوي سرعه الضوء. المطلوب منك و مني، هو ملاحظه الضوء المتجه الي المقدمه و الضوء المتجه الي مؤخره القطار. و السؤال هو: هل ستصل ومضتي الضوء في نفس الوقت؟ بالنسبه لك انت داخل القطار، ستري الومضتين ستصلان في نفس اللحظه الي المقدمه و المؤخره. لكن ماذا عني؟ ساري شئلا مختلف عنك!! سأرى بان ومضه الضوء ستصل الي المؤخره قبل المقدمه! كيف يكون ذلك؟

كيف تحدث حادثتين فيراهم شخص انهما حدثا في نفس اللحظه بينما الاخر يراهما غير متزامنتين.

شرح اينشتين ذلك بان في اللحظه التي صدر فيها شعاع الضوء كان القطار تحرك مسافه الي الامام اي ان مقدمه القطار تهرب للامام من الضوء المتجه اليه اما مؤخرته فتتحرك ناحيه ومضه الضوء المتجهه اليها. لذا سأري انا المراقب من الخارج ان ومضه الضوء تصل للمؤخره قبل مقدمه القطار. بينما انت لا تري ذلك لانك في حركه منتظمه داخل القطار.



لذا انك اذا نظرت الي زمليك الذى امامك فانت تره بعد سقوط الضوء عليه وانتقاله الي عينك، و الان انظر الي ابعد نقطه لك فانت ترها بعد سقوط الضوء عليها ورجوعه الي عينك اي بعد زمن اطول. ولكن لا نحس بذلك نظرا لسرعه الضوء العاليه جدا جدا جدا.

لذا توصل اينشتين الي استنتاج ثوري و هو:

الحادثتان التي تبدوان متنزامنه بالنسبه لمرجع قصورى معين، ليست بالضروره ان تكون متزامنه لمرجع قصوري اخري.

لذا عدل اينشتين زمن وصل الضوء الي مقدمه القطار باستخدام معامل لورانتز فاصبح الزمن بالنسبه لي $\Delta t'$ اطول من الزمن بالنسبه لك داخل القطار Δt_0 كما هو موضح

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

"الساعه المتحركه تجري ببطئ بالنسبه للمشاهد الساكن"

من الواضح ان اينشتاين حرر فكره المكان و الزمن المطلقين واصبحت نسبيه الزمن ليس مجرد وهم كما اعتبرها لورانتز كما تحرر من الفكره الماديه بوجود و سط لنقل الضوء. و جعل القوانين الطبيعيه مستقله عن حركه المجموعه التي تنسب اليها، و كما قال:

"ما بين الماضي و الحاضر و المستقبل، لا يوجد سوى وهم في تفكير العقل البشرى"

عندما تنظر الي السماء فتري ضوء نجم فهذا هو حاضرك و لكن هو ماضي نجم فهذا الضوء منبعث منه منذ ملايين السنين و قد يكون مستقبل رائد فضاء سيهبط علي احد الكواكب الاخري فيرى نفس هذا الضوء.

وكانت هذه المبادئ تطبق فقط علي الحركه المنتظمه لذا سميت بالنسبيه المقيده او النسبيه الخاصه.

وقد غيرت النسبيه كثير من المفاهيم الخاصه بالقوانين فهي لم تغير من شكل قوانين نيوتن لكنها غيرت مفهومه و بالاخص القانون الثاني لنيوتن الذي افترض فيه ان الكتله ما يحتويه الجسم من ماده فهي لا تتغير بتغير سرعه الجسم و هذا ما اختلف عليه انيشتين حيث ان افترض ان الكتله نسبيه تتغير بتغير سرعه الجسم .

النظرية النسبية الخاصة

بمحاولة آينشتاين تفسير نتائج تجربة ميكلسون مورلي وضع نظريته النسبية الخاصة في العام ١٩٠٤. بهذه النظرية غير آينشتاين مفاهيم النظرية الكلاسيكية ليأتي بمفاهيم غاية في الغرابة لم يكن احد من العلماء قد فكر بها وفتح بذلك الأبواب للعلماء لعصر جديد من العلوم الفيزيائية سميت بالعصر الذري وهو الذي نعيشه الآن. فسرت النظرية النسبية العديد من الظواهر الطبيعية في الكون وشكلت قاعدة صلبة راسخة متماسكة.. وحتى يومنا هذا لازالت التجارب المختلفة التي يجريها العلماء تثبت صحة النظرية النسبية. إن النظرية النسبية غيرت مفاهيم كل شيء فخلطت المكان والزمان وجعلت من

المطلق نسبي والمستقيم محدب كما كان لها نتائج فلسفية عديدة ولكن سنحاول التركيز على الأمور العلمية.

فروض النظرية النسبية

قلنا في موضع سابق أن آينشتاين استخدم عقله وتفكيره بشكل شمولي للكون وأمعن التفكير والتأمل ليبني الفرضيات ويجري التحليلات الرياضية بشكل مجرد ويظهرها للعلماء لتطبيقها وهكذا هو الحال بالنسبة للنظرية النسبية حيث وضع آينشتاين فرضيتين لتكون أساسا للنظرية النسبية وطلب من الكل باعتبارها من المسلمات أو البديهيات وهذا ما جعل العلماء رفض الاقتناع بصحة تلك النظرية ولكن هذه النظرية أوجدت تفسيرات وقوانين للعديد من الظواهر الكونية وفي كل مرة عقدت تجربة لإبطال صحة النظرية النسبية كانت النتائج تؤكد صحتها وتعطي دليلا جديدا على دقتها وشموليتها..

فروض النظرية النسبية هما فرضيتان الأولى متعلقة بالأثير والفرضية الثانية متعلقة بالضوء.

الفرضية الأولى تنفي وجود الأثير لأن حسب نسبية آينشتاين لا يوجد مطلق يمكن إسناد كل شيء إليه مثل ما فعل العلماء بفرضية الأثير.

الفرضية الثانية تقول أن سرعة الضوء في الفراغ ثابتة ولا تعتمد على سرعة المشاهد.

شرح الفرضية الأولى

توضح الفرضية الأولى للنظرية النسبية أن لا وجود للأثير وكان هذا مخالف لكافة العلماء ذلك الوقت... وبفرضية أن الأثير غير موجود فأن المكان المطلق لا وجود له ولا يوجد إلا المكان النسبي والسرعة النسبية. ويوضح اينشتاين ذلك بمثال مركبتين فضائيتين في الكون فلا يستطيع رواد المركبة الأولى من تحديد سرعة مركبتهم إلا بمقارنتها بالنسبة للأجرام المتناثرة حولها أو بالنسبة للمركبة الثانية إذا مرت بالجوار وكذلك الحال بالنسبة للمركبة الثانية وأي شخص يحاول إيجاد سرعة المركبة فإنه سيجدها بالنسبة لسرعة أخرى. وحيث أن كل شيء في الكون يتحرك حركة دائمة ومعقدة فإن أي سرعة تحدد على أساس مقارنتها بسرعة أخرى..

مثال: إذا كنت في سفينة فضائية تسير بسرعة ١٠ ألاف كيلومتر في الساعة بالنسبة للأرض ولاحظت أن سفينة أخرى تقترب منك وتجاوزت سفينتك فإن أجهزة الرصد لديك سوف تقدر سرعة السفينة التي مرت بقربك على أنها ٢٠٠٠ كيلو متر في الساعة وبما أن سرعتك

بالنسبة للأرض معروفة (١٠ ألاف كيلومتر في الساعة) فإن سرعة السفينة الفضائية الأخرى بالنسبة للأرض ستكون ١٢ ألف كيلو متر في الساعة.

لاحظ هنا أننا أرجعنا قياساتنا للسرعات بالنسبة للأرض فما بالك لو أننا أصبحنا لا نرى الأرض في هذا الكون الفسيح وان السرعة التي انطلقنا بها تغيرت فكل ما نستطيع قوله هو أن سرعة السفينة الأخرى هو ٢٠٠٠ كيلو متر في الساعة. ولكن هذا الرقم يعبر عن احتمالات عديدة كأن تكون أنت واقف والسفينة مرت عنك بسرعة ٢٠٠٠ كيلو متر في الساعة أو أن تكون أنت متحرك بسرعة ١٠٠٠ كيلو متر في الساعة وهي بسرعة ٣٠٠٠ كيلو متر في الساعة أو أن تكون تلك السفينة واقفة وأنت متحرك في اتجاه الأرض بسرعة ٢٠٠٠ كيلو متر في الساعة وهكذا . وهذا يعني أنك بحاجة إلى شيء ثابت ليرشدك على من هو المتحرك وكم هي سرعتك واتجاهك ولهذا اسند العلماء كل ذلك إلى الأثير ليهربوا من حقيقة النسبية.. ولكن آينشتاين لم يهرب من الاعتراف بأن الأثير وَهم .... واقر بأن كل حركة نسبية.

ماذا عن السرعة على الأرض؟ نذكر هنا ما قاله العالم نيوتن بأننا لا نعرف سفينة تتحرك في البحر أم واقفة بأي اختبار نجريه داخل السفينة ويجب علينا أن نلجأ لاختبارات تصلنا بخارج السفينة. كأن نراقب من على سطحها حركة الماء أو حركة الجبال لنحدد ما إذا كانت متحركة أم ثابتة أو هل هي تقترب من الشاطئ أم تبتعد عنه.

كما أننا عندما نقول أن سرعة السيارة ١٠٠ كيلو متر في الساعة فهذا يكون بالنسبة للأرض فإذا لم نجد ما الشيء الذي نقيس بالنسبة له فحديثنا عن السرعة لا معنى له كما لا يمكننا باستخدام كل وسائل التكنولوجيان معرفة ما إذا كنا نتحرك أو لا.. لأن كل حركة نسبية ولا يمكن أن نتكلم عن حركة مطلقة.

شرح الفرضية الثانية

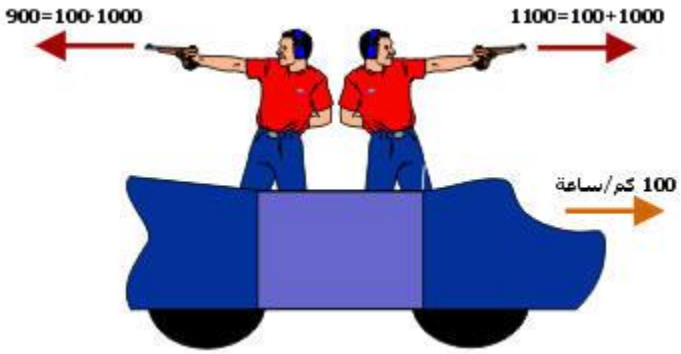
لم يكن من الصعب فهم المقصود بالفرضية الأولى للنظرية النسبية بالرغم من صعوبة قبول هذه الفرضية من قبل العلماء في ذلك الوقت لأن العديد من الظواهر التي قابلت العلماء فسرت على أساس وجود الأثير ونسب كل شيء إليه، ولهذا كان من الصعب الاعتراف بفشل فرضية الأثير وهدم كل استنتاجاتهم، فحاول الكثير من العلماء إثبات خطأ النظرية النسبية. أما الفرضية الثانية والمتعلقة بثبات سرعة الضوء ثابتة في الفراغ مهما تغير مكان المشاهد أو الراصد لسرعة الضوء.

لتوضيح الجملة الأخير سوف نضرب مثالين من واقع الحياة اليومية.

مثال (١) : عندما نكون في سيارة سرعتها ١٠٠ كم/ساعة فإننا نرى الأجسام الثابتة وكأنها هي التي تتحرك بنفس السرعة وفي الاتجاه المعاكس. ولكن عندما تأتي سيارة من الاتجاه

المعاكس تسير بسرعة ١٠٠ كم/ساعة فإن سرعتها بالنسبة لنا تكون ٢٠٠ كم/ساعة (لا حظ هنا أننا جمعنا السرعتين في حالة اقتراب السيارة منا)، وإذا تجاوزنا سيارة سرعتها ٨٠ كم/ساعة نقيس سرعتنا بالنسبة لهذه السيارة على أنها ٢٠ كم/ساعة (لاحظ هنا أننا طرحنا السرعتين في حالة ابتعادنا عن السيارة الأخرى). وإذا كانت السيارة الأخرى تسير بنفس سرعة سيارتنا فإننا نقيس سرعة تلك السيارة بالنسبة لنا على أنها صفر أي أنها ثابتة بالنسبة لنا.

مثال (٢): لنفرض سيارة تسير بسرعة ١٠٠ كم/ساعة كما في الشكل وقام شخص بإطلاق رصاصة من مسدس في اتجاه حركة السيارة علماً بأن سرعة الرصاصة بالنسبة للمسدس هي ١٠٠٠ كم/ساعة ثم استدار نفس الشخص وأطلق رصاصة أخرى في اتجاه معاكس لحركة السيارة.



فإذا ما قام شخص على الطريق وقاس سرعة الرصاصة في الحالة الأولى سيجد أنها ١١٠٠ كم/ساعة وفي الحالة الثانية سيجد سرعة الرصاصة ٩٠٠كم/ساعة. وهذا يعود إلى أن سرعة السيارة تجمع مع سرعة الرصاصة في الحالة الأولى وتطرح منها في الحالة الثانية.

هذا التسلسل المنطقي للموضوع محسوس لنا ونعرفه جيداً ولا غرابة في ذلك ولكن ماذا يحدث إذا استبدل المسدس بمصدر ضوئي هنا يتدخل آينشتاين ويقول أن الوضع مختلف فسرعة الضوء تبقى ثابتة في كلا الحالتين وتساوي ٣٠٠ ألف كم / الثانية وهذا لا يتغير مهما بلغت سرعة السيارة ولو فرضنا جدلاً أن السيارة تسير بسرعة الضوء فإن الضوء المنبعث من المصباح سينطلق أيضا بنفس سرعة الضوء.

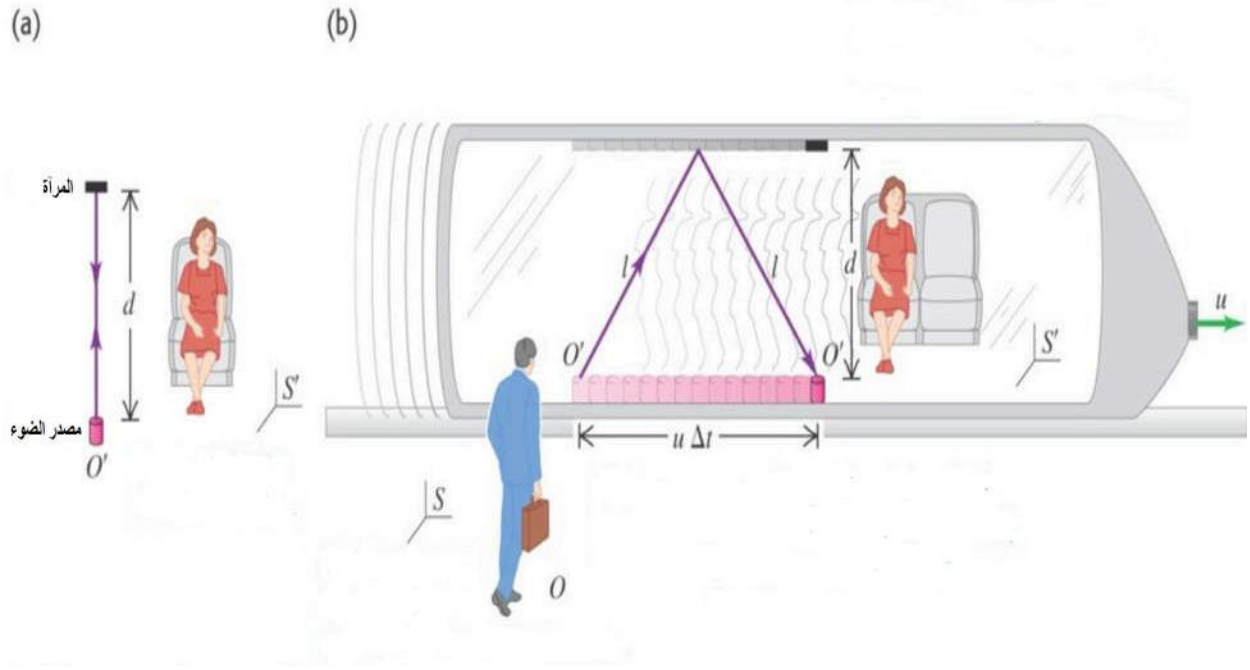
بالطبع هذا غريب على مفاهيمنا ويتحدى آينشتاين بذلك مفاهيم العلماء السابقين ويقول لهم عندما سألوه كيف يمكن تصديق هذا ((ما العمل إذا كان هذا هو من قوانين الكون الأساسية؟)) لم يتوصل آينشتاين لهذه الفرضية بإجراء التجارب وتحليل النتائج أنما توصل إليها بعد طرح أسئلة لنفسه حول ثبات الكون والتفكير فيه ليصل إلى هذه الفرضية التي طلب من العلماء التسليم بها ليبنوا عليها العديد من التفسيرات للظواهر الكونية. ولكن العلماء كانوا بحاجة إلى أدلة وبراهين للاقتناع بهذه الفرضية فقام الفلكيون برصد الضوء الواصل إلى الأرض من أحد النجوم في الفضاء وكان الهدف من هذه التجربة إثبات خطأ

فرضية ثبات سرعة الضوء. وذلك بالاعتماد على أن النجم عندما يدور حول مركزه يكون مرة مبتعد عنا ومرة أخرى يكون النجم مقترب منا. وعلى هذا الأساس توقع العلماء أن يرصدوا سرعتين مختلفتين للضوء في حالة اقتراب النجم وابتعاده (توقع العلماء أن تكون سرعة الضوء وهو مقترب أكبر منها وهو مبتعد). ولكن المراصد الفلكية لم تقيس أي تغير في سرعة الضوء.

و فيما يلي بعض من نتائجها.

١ – نسبيه الزمن

كما اوضحنا سابقا فقد استطاع نيوتن ان ينتزع صوره الزمان المطلق التى رسخها نيوتن بانه نسبي يعتمد علي وضع الراصد و لاشتقاق نسبيه الزمن فتصور وجود آمرأه جالسه داخل قطار يتحرك بسرعه ثابته قصوريه مقدارها v ناحيه اليمين كما بالشكل التالي



سنسمي مرجعها المتحرك ب 'S. و يوجد رجل في الخارج ينظر الي داخل القطار، و سنسمي مرجعه الساكن ب S. يوجد داخل القطار مصباح ضوئي يشع من الاسفل ليضرب السقف ليعود مره اخري الي نقطه انطلاقه. اي ينطلق من النقطه 'O ليعود اليها كما في a و b من الشكل السابق.

بالنسبه للمرأه ستري رحله شعاع الضوء ذهابا و ايابا كما في الشكل a و نسمي المسافه التي يقطعها شعاع الضوء في الذهاب او الاياب ب d فستكون المسافه التي يقطعها شعاع الضوء ذهابا و ايابا هى 2d . ستقيس المرأه زمن رحله الذهاب و الاياب بساعتها الخاصه و ليكون زمن Δt_0 فان الزمن بالنسبه للمرأه سيحدد بالتالي

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

بالنسبه للرجل خارج القطار، سيبدوا رحله الشعاع مختلفه عما ستراها المرأه و ذلك بسبب حركه القطار نفسها. فعندما يبدأ شعاع الضوء رحلته، سيتحرك القطار ناحيه اليمين قليلا بسرعه مقدارها v اي مسافه مقدارها $v\Delta t$. بالتالي لن يعود الضوء ظاهريا الي نفس النقطه التي انطلق منها. سيبدوا الامر بالنسبه للرجل كما بالشكل b. تعطي المسافه l بحسب نظريه فيثاغورث كالتالي:

$$l = \sqrt{d^2 + (v\,\Delta t/2)^2}$$

نفترض ان كلا من الرجل و المرأه متفقين علي نفس قيمه الطول d في قياساتهم. و نعلم ان سرعه الضوء ثابته بغض النظر عن وضع الراصد. اذن سيستغرق شعاع الضوء بالنسبه للرجل زمنا قدره

$$\Delta t = \frac{2l}{c} = \frac{2}{c}\sqrt{d^2 + (v\Delta t/2)^2}$$

بالتعويض عن قيمه d فان

$$\Delta t = \frac{2l}{c} = \frac{2}{c}\sqrt{(c\Delta t_0/2)^2 + (v\Delta t/2)^2}$$

و بتربيع طرفي المعادله

-

$$(\Delta t)^2 = \frac{4}{c^2}\left[(c\Delta t_0/2)^2 + (v\Delta t/2)^2\right]$$

$$(\Delta t)^2 = \frac{4}{c^2}\frac{c^2{\Delta t_0}^2}{4} + \frac{4}{c^2}\frac{v^2\Delta t^2}{4}$$

$$(\Delta t)^2 - \frac{v^2\Delta t^2}{c^2} = {\Delta t_0}^2$$

$$(\Delta t)^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = {\Delta t_0}^2$$

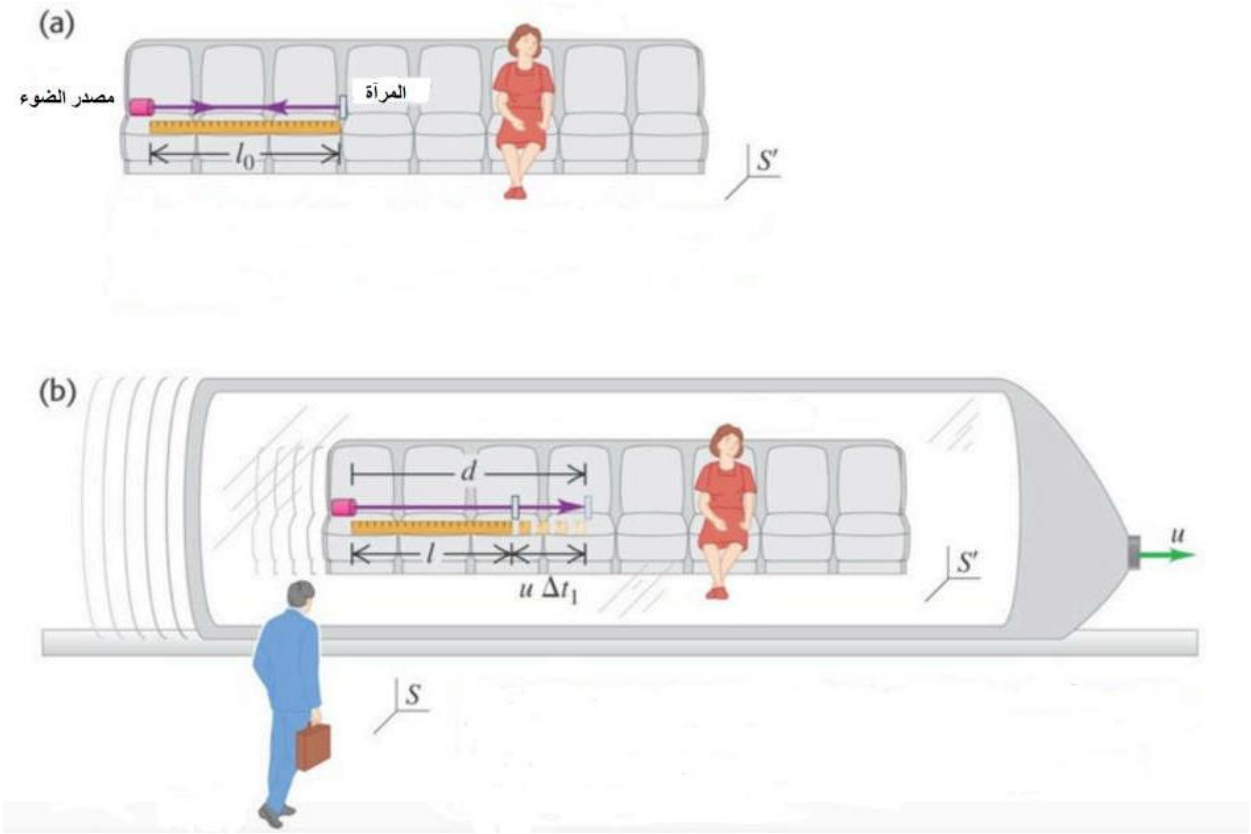
$$(\Delta t)^2 = \frac{{\Delta t_0}^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

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

اي انك انت المتحرك مع القطار وتنظر الي انا في الخارج، تستطيع ان تعتبر نفسك ساكنا و انا من يتحرك بنفس السرعه، و بذلك تصبح معادله تاخر الزمن صحيحه ايضا بالنسبه لك انت في الداخل اي انك ستري الزمن يجري ببطئ خارج القطار بينما يجري بشكل طبيعي داخل القطار. وانا سأري الزمن يجري ببطئ داخل القطار بينما يجري بشكل طبيعي خارج القطار. وليس فينا احد صحيح و الاخر مخطئ. كلانا محق و السبب طبيعه الزمن النسبي نفسها.

٢ – نسبيه البعد المكاني

لنعد مره اخري الي مرجعي المرأه و الرجل و القطار. سنضع مسطره بشكل افقي داخل القطار. و يوجد شعاع ضوئي، يقطع رحله الزهاب و الاياب عل طول المسطره و ذلك عن طريق خروجه من نقطه بدايه المسطره و اصطدامه بمرأه ليعود مره اخري الي نقطه انطلاقه، كما واضح في الشكل التالي



ستقيس المرأه طول المسطره و لنرمز لها ب l_0 سيستغرق شعاع الضوء لاتمام رحله الذهاب و الاياب علي طول المسطره بحسب قياس المرأه زمنا قدره

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c}$$

مثلما راينا في نسبيه الزمن سيبدوا وضع رحله الذهاب و الاياب بالنسبه للرجل خارج القطار مختلفه. فعندما يبدأ شعاع الضوء رحلته من نقطه بدايه المسطره، سيتحرك القطار مسافه مقدارها $v\Delta t$ نتيجه لسرعه القطار v

بالنسبه للرجل سنرمز لطول المسطره ب l. بينما الزمن المستغرق في رحله الذهاب ب Δt_1 و الزمن المستغرق لرحله الاياب Δt_2.

و خلال رحله الذهاب سيتحرك القطار ناحيه اليمين و مصدر الضوء و المسطره و المرأه جميعهم كما مبين من الشكل السابق. و بالتالي لن يكون المسار المقطوع لشعاع الضوء هو l بل سيكون المسار الظاهري هو d و الذي يقدر ب

$$d = l + v\Delta t_1$$

و طلما ان سرعه الضوء ثابته فان

$$d = c\Delta t_1$$

بمساواه المعادلتين فان

$$c\Delta t_1 = l + v\Delta t_1$$

$$c\Delta t_2 - v\Delta t_2 = l$$

$$\Delta t_2(c - v) = l$$

و بالتالي فان

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c - v}$$

و بالنسبه لرحله الاياب للضوء فانها ستستغرق زمن

$$d' = l - v\Delta t_2$$

و طلما ان سرعه الضوء ثابته فان

$$d' = c\Delta t_2$$

بمساواه المعادلتين فان

$$c\Delta t_2 = l - v\Delta t_2$$

$$c\Delta t_2 + v\Delta t_2 = l$$

$$\Delta t_2(c + v) = l$$

و بالتالي فان

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c + v}$$

و يكون محصل زمن الذهاب و الاياب المستغرق لرحله الضوء هو

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v}$$

$$\Delta t = \frac{l(c+v) + l(c-v)}{(c-v)(c+v)}$$

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

$$\Delta t = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c(1 - v^2/c^2)}$$

و حيث ان

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

فان

$$\frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2l}{c(1 - v^2/c^2)}$$

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

كما ان

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c}$$

بمساواه المعادلتين نحصل علي

$$\frac{2l_0}{c} = \frac{2l/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

اي ان

$$l = l_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

مـثال (٤): تتحرك طائرة بالنسبة للأرض بسرعة $600\ \mathrm{m/Sec}$ والطول الفعلي لها $50\mathrm{m}$ ما هو مقدار النقص في الطول والذي يبدو أن الطائرة تنقصه بالنسبة لمشاهد على سطح الأرض؟

الحــل: $\upsilon = 600\ \mathrm{m/Sec}$ ، $c = 3\times10^{6}\ \mathrm{m/Sec}$، $\mathrm{L} = 50\ \mathrm{m}$

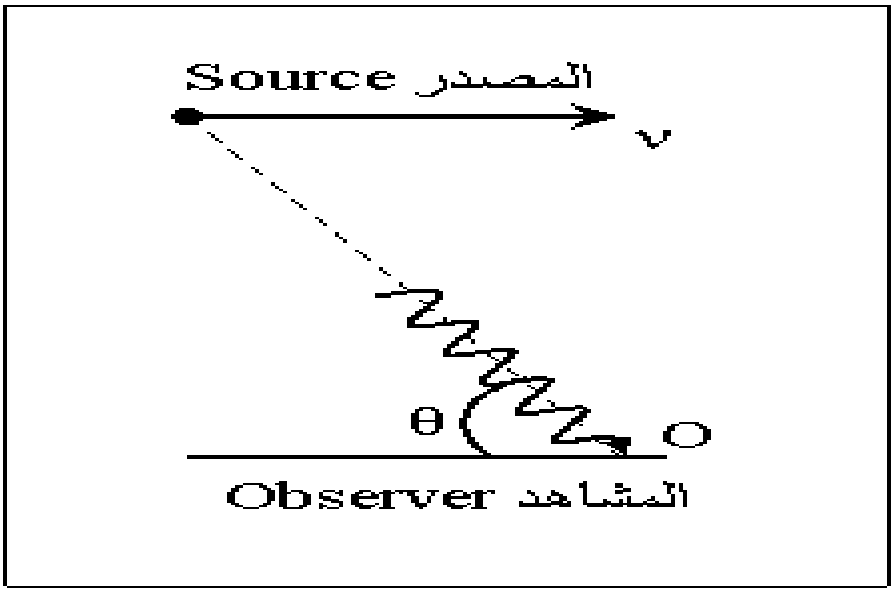
$$\mathrm{L}' = \mathrm{L}\sqrt{1 - \left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}$$

$$L' = 50\sqrt{1-\left(\frac{600}{3\times10^{8}}\right)^{2}}$$

$$= 50\sqrt{1-4\times10^{-12}}$$

$$\therefore\ \Delta L \approx 10^{-10}\ \text{m}$$

تأثير دوبلر في النظرية النسبية The relativistic Doppler effect



ظاهرة دوبلر من الظواهر الفيزيائية المعروفة والتي نلاحظها في حياتنا العملية حينما تمر سيارة إسعاف أو سيارة الإطفاء مسرعة وبينما يصدر عنها صوت الإنذار فإننا نسمع ترددات مختلفة بينما تكون السيارة مقتربة منا او مبتعدة عنا وهذا الصوت يختلف تردده عن التردد الذي يسمعه سائق السيارة لأنه يكون ثابت بالنسبة للصوت، ومن هذا يمكن تعريف ظاهرة دوبلر على إنها إزاحة للتردد نتيجة للحركة النسبية بين المصدر والمراقب. فعندما يكون المصدر مقترب من المراقب يكون التردد المقاس أعلى من التردد الأصلي أي مزاح ناحية الترددات الأعلى بينما يكون التردد اقل من التردد المقاس أي مزاح ناحية الترددات الأقل إذا كان المصدر مبتعدا عن المراقب. وظاهرة دوبلر تعتمد على السرعة النسبية بين المصدر والمراقب.

إذا كنا نتعامل مع تردد الأمواج الصوتية الصادرة عن حركة سيارة او طائرة حيث تكون السرعات اقل بكثير من سرعة الضوء فإننا نتحدث عن ظاهرة دوبلر الكلاسيكية أما إذا كنا نتعامل مع الأمواج الكهرومغناطيسية التي تنتشر بسرعة الضوء فإننا نتحدث عن ظاهرة دوبلر النسبية..

ظاهرة دوبلر النسبية

يستخدم الفلكيون ظاهرة دوبلر في قياس سرعة النجوم والمجرات بالنسبة للأرض وإذا كانت مقتربة منا أو مبتعدة عنا من خلال قياس تردد الأشعة الكهرومغناطيسية الصادرة عن النجوم ومقارنتها بتلك الترددات الصادرة عندما تكون في المختبر أي ثابتة بالنسبة للمراقب.

في حالة التعامل مع سرعات قريبة من سرعة الضوء فإن ظاهرة دوبلر الكلاسيكية لا تأخذ في الحسبان فرضيات النظرية النسبية في ان سرعة الضوء ثابتة بالنسبة لجميع محاور الاسناد. ولهذا سنقوم باستخدام معادلات التغير في التردد في حالة السرعات الكبيرة .

نفرض أن مصدرا يرسل أشعة كهرومغناطيسية بتردد قدره ν بالنسبة لمشاهد في حالة السكون للمصدر. نفرض أن نفس المصدر في حالة حركة بالنسبة لمشاهد آخر والذي يقيس تردد الموجات الصادرة من المصدر ν. ويعطى التردد ν والذي يسجله مشاهد عند O بمعادلة دوبلر

$$\nu = \frac{\nu_0 \sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}{1-(\upsilon/c)\cos\theta} \qquad (30)$$

ويكون عندنا الحالات الآتية:-

١. لو كان المصدر والمشاهد يتحركان تجاه بعضهما $\theta = 0^0$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{c+\upsilon}{c-\upsilon}} \quad \Rightarrow \quad \nu > \nu_0 \qquad (30)$$

٢. لو كان المصدر والمشاهد يتحركان بعيدا عن بعضيهما $\theta = 180^0$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{c-\upsilon}{c+\upsilon}} \quad \Rightarrow \quad \nu < \nu_0 \qquad (31)$$

٣. لو كان الإشعاع مستعرض لاتجاه الحركة $\theta = 90^0$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1-(\upsilon/c)^2} \quad \Rightarrow \quad \nu < \nu_0 \qquad (32)$$

مسائل وتمارين

١ جسيم نصف عمره عند السكون 10-7s . اذا كانت سرعته عند تكوينه 0.99c ما المسافة التي يقطعها الجسيم قبل اضمحلاله ؟

$$y = vt\backslash = 0.99c \times 10\text{-}7\ s = 0.99 \times 3 \times 108\ m/s \times 10\text{-}7\ s = 29.7m$$

$$\frac{y}{y^{\backslash}} = \sqrt{1 - v^2/c^2} \Rightarrow y^{\backslash} = \frac{y}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{29.7m}{\sqrt{1 - \frac{(0.99c)^2}{c^2}}} = \frac{29.7m}{\sqrt{1 - 0.98}} = \frac{29.7}{\sqrt{0.02}} = \frac{29.7m}{0.1414}$$

$$y^{\backslash} = 210m$$

٢ ما السرعة التي يجب ان تسير يها مركبة فضائية بالنسبة للارض لكي يمضي يومان بالنسبة للارض مقابل كل يوم في السفينة الفضائية؟

$$t = \frac{t^{\backslash}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow 2 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow 4 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow 4 = \frac{1}{\frac{c^2 - v^2}{c^2}} \Rightarrow 4 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}$$

$$\Rightarrow 4c^2 - 4v^2 = c^2 \Rightarrow 4v^2 = 3c^2 \Rightarrow v^2 = \frac{3}{4}c^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{3}{4}}\ c \Rightarrow v = 0.866\,c$$

٣ سفينة فضائية تتحرك بسرعة 0.98c ما الوقت اللازم بالنسبة للارض لعقرب الدقائق لساعة موجودة في السفينة الفضائية كي يعمل دورة كاملة؟

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \Rightarrow t = \frac{1\text{hour}}{\sqrt{1 - \frac{(0.98c)^2}{c^2}}} \Rightarrow t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0.98)^2\, c^2}{c^2}}} \Rightarrow t = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.96}}$$

$$\Rightarrow t = \frac{1}{\sqrt{0.04}} \Rightarrow t = \frac{1}{0.2} = 5\,\text{hours}$$

٤ رائد فضاء طوله على الارض 6ft يضطجع في سفينة فضائية تتحرك بسرعة 0.9c بوضعية موازية لحركة السفينة ، ما طول الرائد :

أ- بالنسبة لشخص اخر في نفس السفينة؟

ب- بالنسبة لشخص على الارض ؟

الجواب:

أ- بالنسبة للشخص في نفس السفينة يبقى الطول نفسه = 6ft

ب- بالنسبة لشخص على الارض يكون :

$$\frac{L}{L'} = \sqrt{1 - v^2/c^2} \Rightarrow L = L'\sqrt{1 - v^2/c^2} = 6\,\text{ft} * \sqrt{1 - \frac{(0.9c)^2}{c^2}} = 6\,\text{ft} * \sqrt{1 - \frac{0.81c^2}{c^2}} = 6\,\text{ft} * \sqrt{1 - 0.81}$$

$$L = 6\,\text{ft} * \sqrt{0.19} = 6\text{ft} * 0.436 = 2.6\,\text{ft}$$

.٥ عصا طولها 1m قذفت بسرعة عالية جدا لدرجة ان طولها قد تقلص الى 50cm ما مقدار سرعتها؟

$$\frac{L}{L'}=\sqrt{1-v^2/c^2}\Rightarrow\frac{0.5}{1}=\sqrt{1-v^2/c^2}\ \Rightarrow(0.5)^2=1-\frac{v^2}{c^2}\ \Rightarrow 0.25=1-\frac{v^2}{c^2}\Rightarrow 0.25=\frac{c^2-v^2}{c^2}$$
$$\Rightarrow 0.25c^2=c^2-v^2\ \Rightarrow\ v^2=0.75c^2\ \Rightarrow v=\sqrt{0.75}\ c\Rightarrow v=0.866\ c=2.6*10^8 m/s$$

٦ جسيم يجتاز بسرعة 0.5c سفينة فضائية تسير بالنسبة للارض بسرعة 0.9c جد سرعة هذا الجسيم بالنسبة للارض؟

$$V_X=\frac{V_x'+V}{1+\frac{V\,V_x'}{C^2}}=\frac{0.5c+0.9c}{1+\frac{(0.9c)(0.5c)}{c^2}}=\frac{1.4c}{1+\frac{0.45c^2}{c^2}}=\frac{1.4c}{1.45}=0.9655c$$

٧ رجل كتلته على الارض 100kg جلس في سفينة فضائية متحركة فاصبحت كتلته 101kg بالنسبة لمشاهد على الارض ، جد سرعة السفينة الفضائية؟

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\ \Rightarrow\ \frac{m}{m_0}=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\ \Rightarrow\ \frac{m_0}{m}=\sqrt{1-v^2/c^2}\ \Rightarrow\ \frac{m_0^2}{m^2}=1-v^2/c^2$$
$$\Rightarrow\ \frac{v^2}{c^2}=1-\frac{m_0^2}{m^2}\ \Rightarrow\ v^2=\left(1-\frac{m_0^2}{m^2}\right)c^2$$
$$\Rightarrow\ v=\sqrt{1-\frac{m_0^2}{m^2}}\ c\ =\sqrt{1-\frac{(100)^2}{(101)^2}}\ c\ =\sqrt{1-\frac{10000}{10201}}\ c\ =\sqrt{1-0.98}\,c\ =0.14c$$
$$\Rightarrow\ v=0.14*\ 3*10^8=4.2*10^8 m/s$$

٨ ما السرعة التي يجب ان يتحرك بها الكترون لكي تكون كتلته مساوية للكتلة السكونية للبروتون؟

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \Rightarrow \frac{m}{m_0}=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \Rightarrow \frac{m_0}{m}=\sqrt{1-v^2/c^2} \Rightarrow \frac{m_0^2}{m^2}=1-v^2/c^2$$

$$\Rightarrow \frac{v^2}{c^2}=1-\frac{m_0^2}{m^2} \Rightarrow v^2=\left(1-\frac{m_0^2}{m^2}\right)c^2$$

$$\Rightarrow v=\sqrt{1-\frac{m_0^2}{m^2}}\ c = \sqrt{1-\frac{(9.1*10^{-28})^2}{(1.67*10^{-24})^2}}\ c = \sqrt{1-\frac{8.28*10^{-55}}{2.7889*10^{-48}}}\ c = \sqrt{0.999}\,c$$

$$\Rightarrow v=0.999\,c = 0.999*\ 3*10^8 = 2.997*10^8\, m/s$$

٩ إذا علمت أن الزمن الحقيقي لبقاء جسم ما هو 100x10-6sec

كم يبدو زمن بقائه إذا كان متحركاً في المختبر بسرعة = 0.96c

كم تبلغ المسافة التي يقطعها الجسيم في المختبر خلال فترة بقائه؟

كم تبلغ المسافة التي يقطعها الجسيم بالنسبة لمراقب ثابت في مجموعة إسناد الجسيم؟

يقاس الزمن الحقيقي لجسم من خلال مراقب ثابت بالنسبة للحدث وهذا يعني ان

t'=100x10-6sec

بتطبيق معادلة التأخير الزمني لايجاد المطلوب الأول

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

t=2.6x10-4sec

(ب) المسافة التي يقطعها الجسيم في المختبر خلال فترة بقائه x

X = v t =74880m

(جـ) المسافة التي يقطعها الجسيم بالنسبة لمراقب ثابت في مجموعة إسناد الجسيم

$$x' = x\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

x' = 2x104m

١٠ إذا علمت انه يمكننا مشاهدة مسارات الجسيمات النووية غير المستقرة ذات الطاقات العالية عن طريق الآثار التي تخلفها تلك الجسيمات عند مرورها في أنواع معينة من المواد، وإذا علمت أن طول مسار أي من هذه الجسيمات يعتمد على سرعة الجسيم وزمن بقائه، وقد وجد في أحد التجارب أن هذه الجسيمات، وكانت سرعته تساوي ٠,٩٩٥c، أن طول المسار الذي خلفه = mm1.25. ما هو زمن البقاء الحقيقي لهذا الجسيم؟

الذي يقيس الزمن الحقيقي هو المراقب الثابت بالنسبة للحدث ومن معطيات السؤال نفترض ان المراقب O' متحرك مع الجسيمات.

X'=0, X=1.25mm, t'=??

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

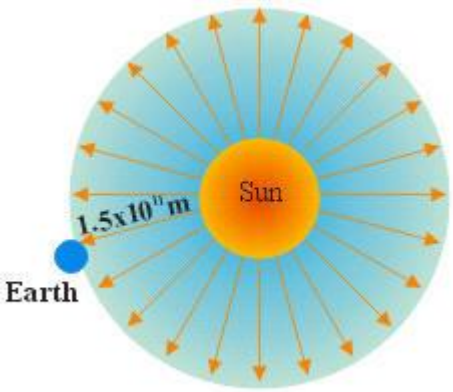
$$t' = \frac{x\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{v}$$

t' = 4.2 x 10-13sec

١١ إذا علمت أن شدة الإشعاع الشمسي =٢1.4x103watt/m عند قياسه على بعد يساوي نصف قطر مدار الأرض حول الشمس والذي يبلغ 1.5x1011m أوجد معدل النقص في كتلة الشمس (أي الكتلة المفقودة في الثانية الواحدة)؟

I = 1.4 x 103watt/m2

وهذه شدة الاشعة التي قيست على بعد من الارض والشمس تبث اشعتها على محيط كرة نصف قطرها r



A=4r2=2.83 x 1022m2

E = 2.83 x 1022m2 x 1.4 x 103watt/m2

E=mc2

m=E/c2=4.4 x 109kg

١٢ نجم يتحرك بالنسبة للأرض بسرعة نسبية كبيرة جداً لدرجة أن الخط الطيفي الأزرق من طيف الهيدروجين والمفروض أن طوله الموجي (الذاتي) =٤٣٤٠ انجستروم يصل إلينا من هذا النجم وقد أزيح نحو الأحمر من الطيف ويكون طوله الموجي المقاس٦٠٠٠ انجسترم. ما هي سرعة النجم المذكور بالنسبة للأرض؟

نطبق ظاهرة دوبلر في حالة الازاحة ناحية الأحمر

$$\frac{\nu}{\nu'}=\frac{\lambda'}{\lambda}=\frac{1-B}{\sqrt{1-B^2}}$$

′=4340Å , =6000Å

v=9.4x107m/s^2

---

١٣ يدعي احد الفيزيائيين في محكمة المرور ان السبب في تخطيه إشارة مرور حمراء (′=6000A) هو ظاهرة " دوبلر", إذ انه رأى لون الضوء وقد ازيح نحو الاخضر (=5500A) نتيجة تحركه بالنسبة للإشارة. كم كانت سرعته عندما اجتاز إشارة المرور؟

نطبق ظاهرة دوبلر في حالة الازاحة ناحية الأزرق

$$\frac{\lambda'}{\lambda}=\frac{1+B}{\sqrt{1-B^2}}$$

′=6000Å , =5500Å

v=2.85 x 107m/s2