محاضرات في الفيزياء النسبية

جامعة جنوب الوادي

2022-2023

مقدمه الي النسبيه الخاصه

"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 بغض الأحيان الأخرى. لذلك وجب على العلماء استنباط و وضع بعض القوانين و النظريات الجديدة و التى تتميز بأنها أكثر عمومية و أكثر شمولية من القوانين القديمة و التى بدورها سوف تتواءم مع الاكتشافات الحديثة.

و من المعروف أن القانون يكون عبارة عن منطوق ما و عادة يكون على صورة علاقة رياضية تستخدم لوصف سلوك أو حدث معين نلاحظه دوما و الذى يمكن من خلاله الحصول على نتائج تتفق مع الواقع أو مع النتائج العملية.

اساسيات و خصائص 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,t 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.

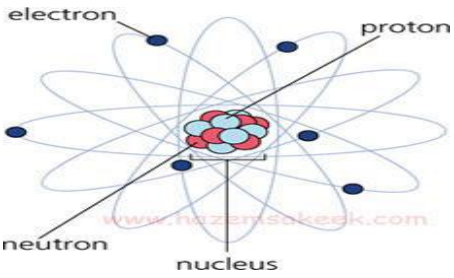
1. الزمن : هو الاداة التى تقيس و تحدد بها زمن حدوث حدث ما و اعتبر الزمن هو البعد الرابع للابعاد المكانية لتصبح على الصورة (x,y,z,t).

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 البعضوكذلك 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 البعضولهذا أي انه إذا حدث أي spacetime. سوف نطلق عليهما الزمكان حدث في الكون فانه يحدث في مكان وزمان محدد.

2. 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 لها تعريفين مهمين، فالتعريف الأول عام ويستخدم في كل الأحوال ويعرفه الجميع على ان 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

الفوتون

الفوتون هو الضوء الذي نراه عندما تصدر الذرة طاقة .ففي النموذج الذري الالكترونات تدور في مدارات محددة حول النواة المكونة من بروتونات ونيوترونات . ولهذه المدارات طاقات محددة فعندما ينتقل الإلكترون من مدار مرتفع إلى مدار منخفض فانه يفقط طاقة تصدر على شكل فوتون يحمل فرق الطاقة بين المدارين وعندما ينتقل الإلكترون من مدار منخفض إلى مدار مرتفع فانه يمتص طاقة تساوي بالضبط فرق الطاقة بين المدارين وقد تكون هذه الطاقة التي يمتصها هي فوتون وفي هذه الحالة نقول ان الذرة أصبحت مثارة لان الإلكترون اكتسب طاقة مكنته من الانتقال من مداره حول النواة إلى مدار ابعد .ولكن حالة الإثارة تلك لا تدوم طويلا فما يلبث ان يعود الإلكترون إلى مداره الأصلي مطلقا الطاقة التي اكتسبها في صورة فوتون وتتكرر هذه العملية طالما توفرت مصدر طاقة لإثارة الالكترونات (وبهذا نحصل على الضوء في أنابيب الفلوريسنت).

الموجة الكهرومغناطيسية

أما الموجة الكهرومغناطيسية فهي أيضا صورة من صور الطاقة الناتجة عن الحركة الاهتزازية للشحنة.فينتج عن هذه الحركة مجالا كًهربيا وًمجالا مًغناطيسيا مًتردد، ومن هنا جاءت تسمية هذه الأمواج بالأمواج الكهرومغناطيسية، وكلا من المجال الكهربي والمغناطيسي متعامدين على بعضهما البعض. 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 .ولكما زادت تردد الأشعة الكهرومغناطيسية زادت طاقتها .فمثلا طاقة أشعة اكس كبيرة ولذلك تستطيع هذه الأشعة اختراق أجسامنا.

نظره علماء الفيزياء لهذه الاساسيات

هذا 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 اقتتراح 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 الر، 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.

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.

فالمعادلة الأولى هي قانون جاوس ومفادها أن أي شحنة كهربائية نقطية في الفضاء تولد حولها مجالا كهربائيا تنطلق خطوطه من مكان الشحنة .أما المعادلة الثانية فهي قانون جاوس للمغناطيسية ومفادها أنه لا وجود للشحنات المغناطيسية ولذلك فإن خطوط المجال لا بد وأن تكون منغلقة على نفسها. أما االمعادلة الثالثة فهي قانون فارادي للحث ومفادها أن المجال المغناطيسي المتغير مع الزمن يولد حوله مجالا كهربائيا تتناسب قيمته وتوزعه في الفضاء مع معدل تغير كثافة المجال المغناطيسي مع الزمن. أما المعادلة الرابعة فهي شكل معدل لقانون أمبير فبعد أن قام ماكسويل بتحويله من شكله التكاملي إلى شكله التفاضلي أضاف حدا جديدا أطلق عليه اسم تيار الإزاحة (displacement current) وهذه الإضافة هي من أهم إسهامات ماكسويل في مجال الكهرومغناطيسية حيث مكنته من التنبؤ بوجود الموجات الكهرومغناطيسية. وبإضافة تيار الإزاحة لمعادلة أمبير أصبح مفاد معادلة ماكسويل

الرابعة أن التيار الكهربائي أو المجال الكهربائي المتغير مع الزمن يولد حوله مجالا مغناطيسيا تتناسب قيمته وتوزعه في الفضاء مع قيمة واتجاه التيار وكذلك مع معدل تغير شدة المجال الكهربائي مع الزمن.

بدأ ماكسول في دراس الضوء علي انه موجات كهرومغناطيسيه ينتقل في وسط اسماه الاثير كما انه وضح خصائص الاثير علي انه

1. وسط صلب مرن
2. وسط ذو كثافه صغيره و شفاف للامواج الضوئيه
3. يهتز بصوره سريعه جدا لان تردد الامواج الضوئيه كبير جدا
4. تتحرك النجوم و الكواب 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 تتازيد 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 1886 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 (2) 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 $\sqrt{c^2 - \mathrm{v}^2}$

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

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

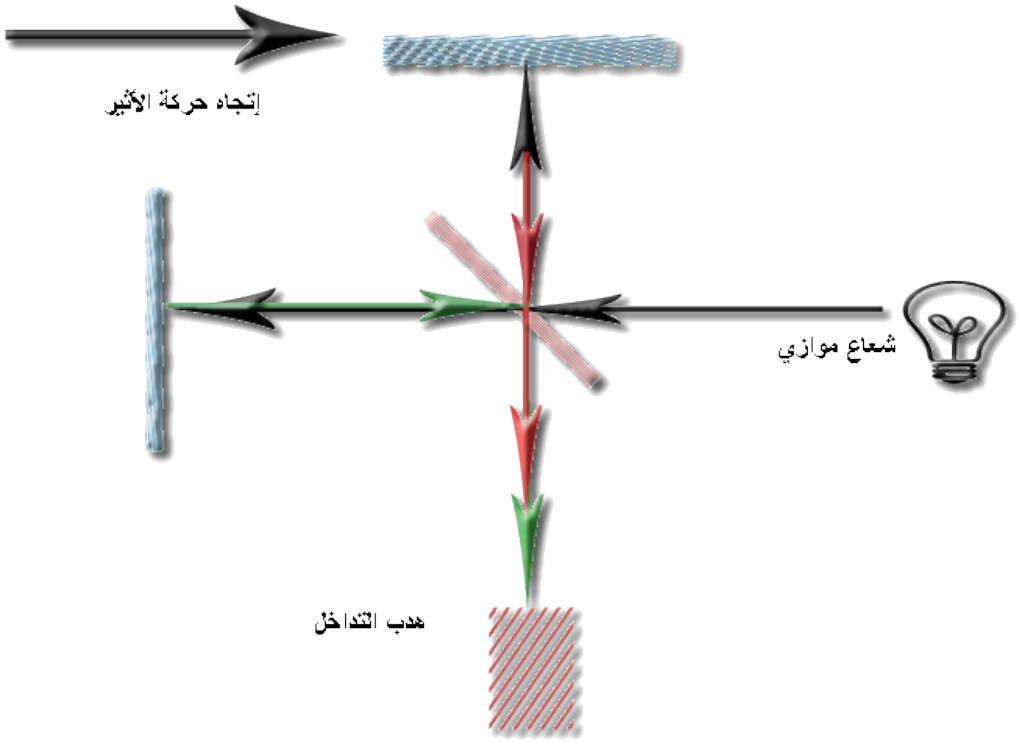
$$= \frac{2L}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \frac{2L}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

ولكن يمكن كتابة المعادلة على الصورة باستخدام مفكوك ذي الحدين

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

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

أما اذا ادير الجهاز بزاوية 90 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.



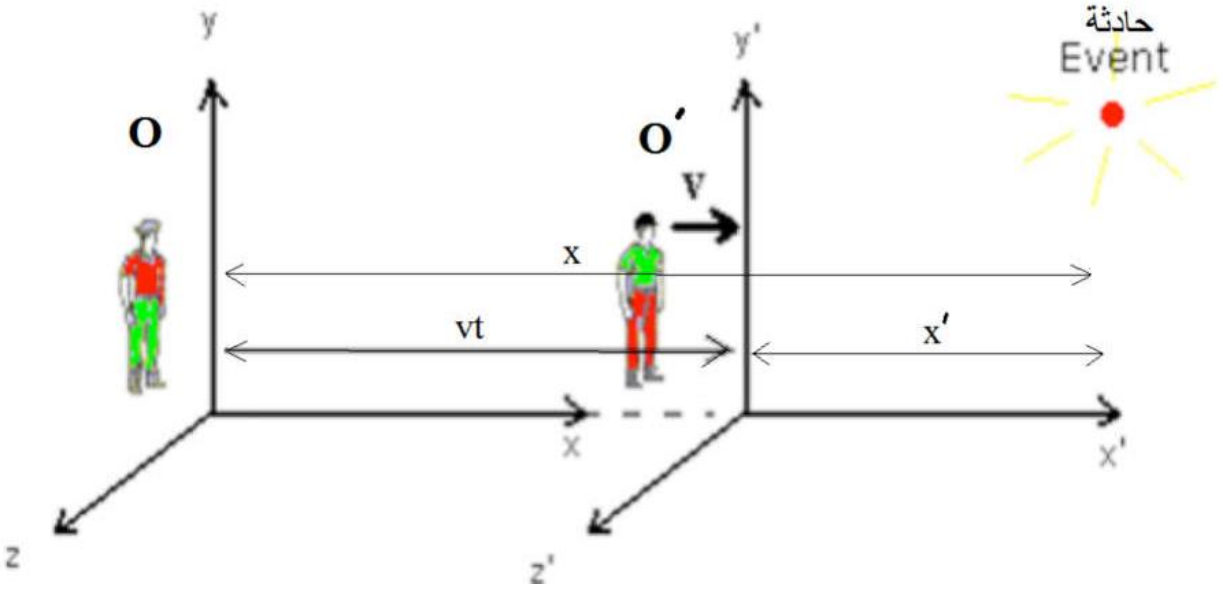
مبدأ النسبية الجاليلية

قصه!! قصه فصيح

في البدايه تخيل نفسك تقود سياره فارهه و ذات قوه كبيره تقوده بسرعه 100 كم/الساعه فقط و اثناء قيادتك تري صديقك ذو الدخل المحدود بسيارته القديمه في الطريق المقابل يسير بسرعه جنونيه تقريبا 200 كم/الساعه فتتصل به لتوبخه علي سرعته الجنونيه فيقول لك انك من كنت تسير بسرعه جنونيه ليس هو و انه لم يتجاوز 100 كم/الساعه لذا اتصلا بصديق لهم ثالث يعمل في الرادار علي الطريق ليعرفوا سرعتهم.

كيف حدث ذلك كيف رأي كلا منهم الاخر يسير بسرعه 200 كم/الساعه في حين يري نفسه انه لم يتجاوز 100 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 1.



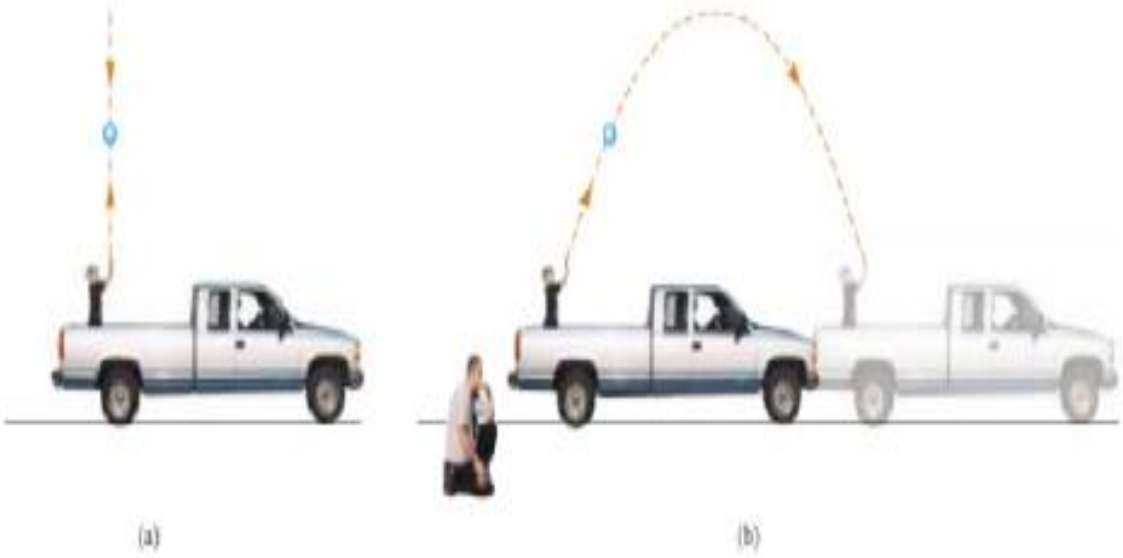
شكل 1 محاور الاسناد لجاليليو

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

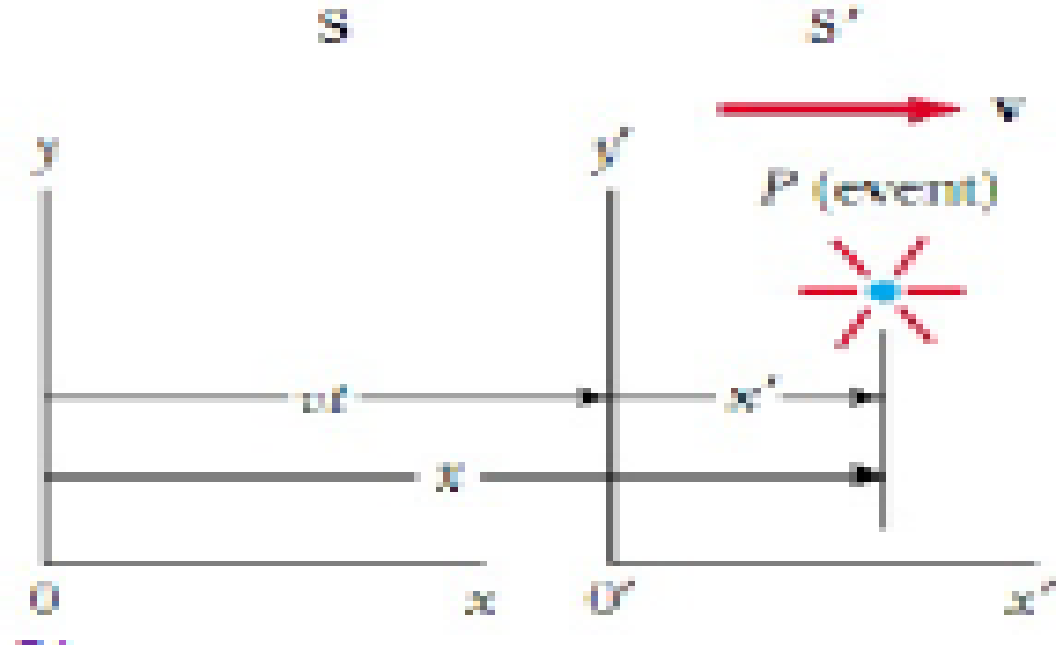
كلا المراقبين يتفقان على قوانين الفيزياء بحيث كلا منهما يرمي الكرة الى اعلى فترتفع ثم تسقط في يديهما. ولكن مسار الكرة التى رماها المراقب في الشاحنة يختلف حيث ان المراقب على الارض يرى مسار الكرة كقطع مكافئ كما بالشكل 2 بينما يرى المراقب في الشاحنة الكرة تتحرك فى مسار رأسي. وعل الرغم من عدم اتفاقهما علي 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 فى 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 (4 - 1) بالنسبة للزمن .

<u>تحويلات السرعة الجاليلية:</u>

افترض ان جسما يتحرك عبر ازاحة dx على طول المحور x فى فترة زمنية dt يقسها المراقب فى S باستخدام المعادلات من (4-1) يمكن حساب الازاحة المناظرة 'dx التى يقيسها الراصد فى إطار 'S حيث يتحرك بسرعة v فى اتجاه x بالنسبة لاطارS

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

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

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:-
- $90mi/h = U_x'$
- $110mi/h = V$
- $=U_x$ ؟

الحل : نستخدم معادلة تحويل السرعة الجاليلية

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

تتوقف السرعة على اتجاه قذف الكرة

1-إذا قذفت الكرة في نفس اتجاه حركة القطار فإن شخصا واقفا على الأرض يرى الكرة تتحرك بسرعة

$$110mi/h + 90\ mi/h = 200\ mi/h$$

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

110 mi/h - 90 mi/h = 20 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:*

$$a=\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{du_x}{dt}$$

الان عوض عن قيمه u_x من المعادله ، ولا تنسي ان v ثابته مشتقتها صفر ستجد ان:

أي انه لم يتغر قانون نيوتن تحت تحويلات جاليليو.

فهل ستبقي قوانين ماكسويل؟

هل يمكن تطبيق مبدأ النسبية الجاليلية على الكهربية و المغناطيسية و البصريات؟
لقد بدا أن معادلات ماكسويل لا ينطبق عليها مبدأ النسبية , أي أننا إذا عوضنا في معادلات ماكسويل بالقيم التي حصلنا عليها في المعادلات السابقة أعلاه فإن صورتها لا تبقى كما هي، لذلك فإن سفينة الفضاء المتحركة ستختلف فيها الظواهر الكهربية و المغناطيسية و الضوئية عن سفينة الفضاء الساكنة.
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 4 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 الجسام المتحركه بسرعات عاليه

اذا انطلقت بسيارتك بسرعه تساوي 0.7 من سرعه الضوء و صديقك انطلق في الاتجاه المقابل بسرعه 0.4 من سرعه الضوء, كم ستكون السرعه النسبيه بينكم؟

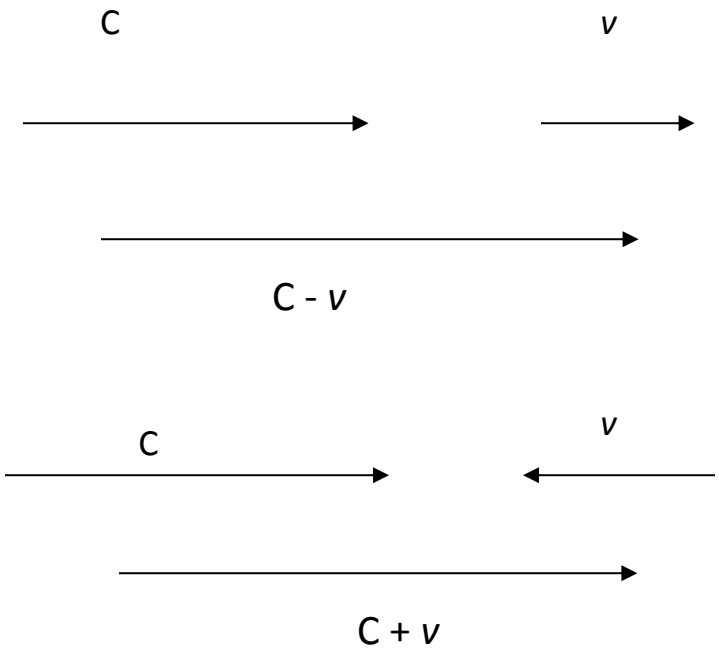
من قانون جمع السرعات فان السرعه هي

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

اي انها اكبر من سرعه الضوء!!!

مثال اخر: علي **انتشار الضوء**

نفترض نبضة ضوئية تتحرك بسرعة c فى 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

$$x' = \beta(x - \upsilon t)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \alpha t + \gamma x \qquad (10)$$

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

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

حيث c هي سرعة الضوء.

ومعادلة الموجة الكورية في النظام الثاني هي

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

بالتعويض في المعادلات (10) بقيم x', y', z', t' في المعادلة (12) ومساواة معاملات كل كمية مع مثيلتها في المعادلة (11) نحصل على

$$\begin{aligned} &\beta^2 - \gamma^2 c^2 = 1 \\ &\alpha^2 c^2 - \beta^2 \upsilon^2 = c^2 \\ &\alpha\gamma c^2 + \beta^2 \upsilon = 0 \end{aligned} \qquad (13)$$

وبحل هذه المعادلات تصبح معادلات لورنتز للتحويلات النسبية هي

$$\begin{aligned} x' &= \beta(x - \upsilon t) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \beta\left(t - \frac{x\upsilon}{c^2}\right) \end{aligned} \qquad (14)$$

حيث

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

وعند تطبيق هذه المعادلات علي معادله الموجات الكهرومغنطيسيه 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!

مبادئ النسبيه الخاصه

بدأ انيشتين عام 1905 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:

1- 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.

2- 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.

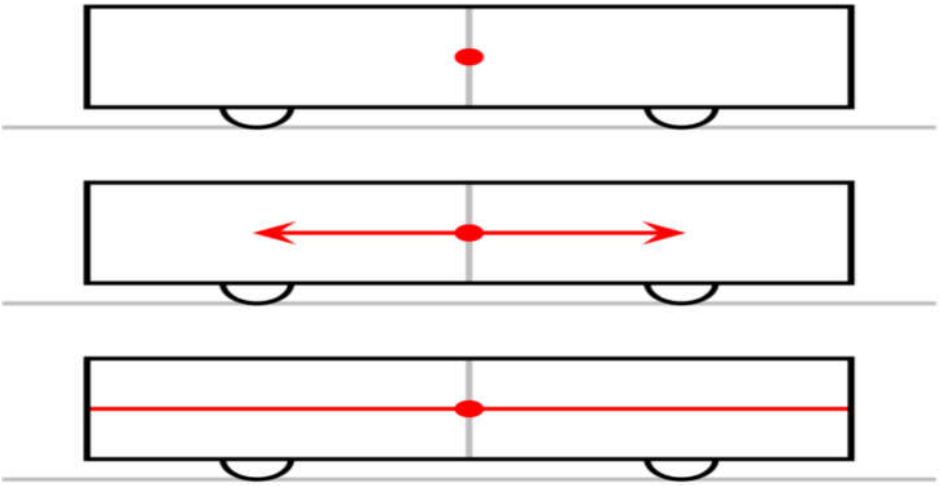
كما هو واضح لم يضف اينشتين اي جديد فقد كان الفرض الاول موجود منذ ايام جاليلو و نيوتن و الفرض الثاني قد توصل اليه لورانتز قبل انيشتين.

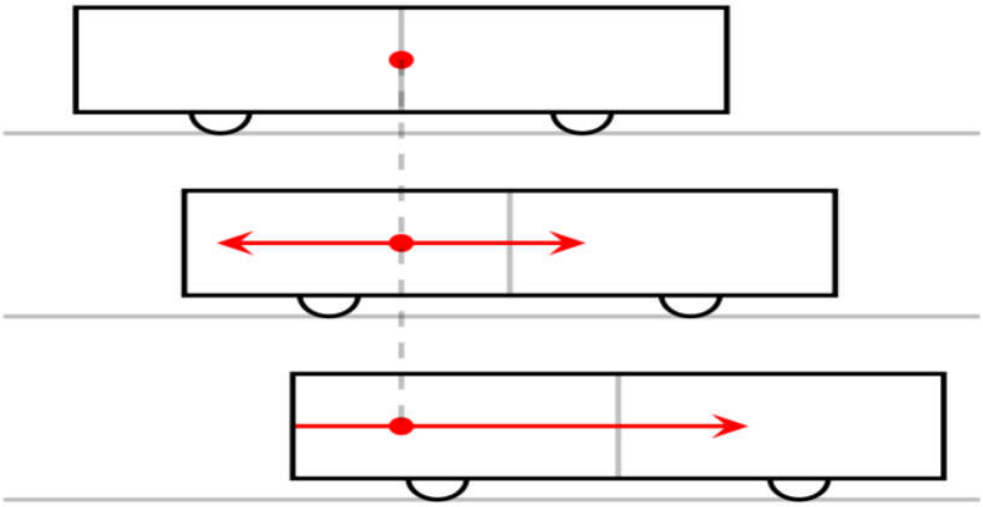
ليوضح اينشتين نظريته طب منك ان تتصور انك داخل قطار يتحرك بسرعه منتظمه قريبه من سرعه الضوء و انا اقف خاج القطار اراقب ماذا يحدث معك في

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 شخس 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 البمراقب 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.

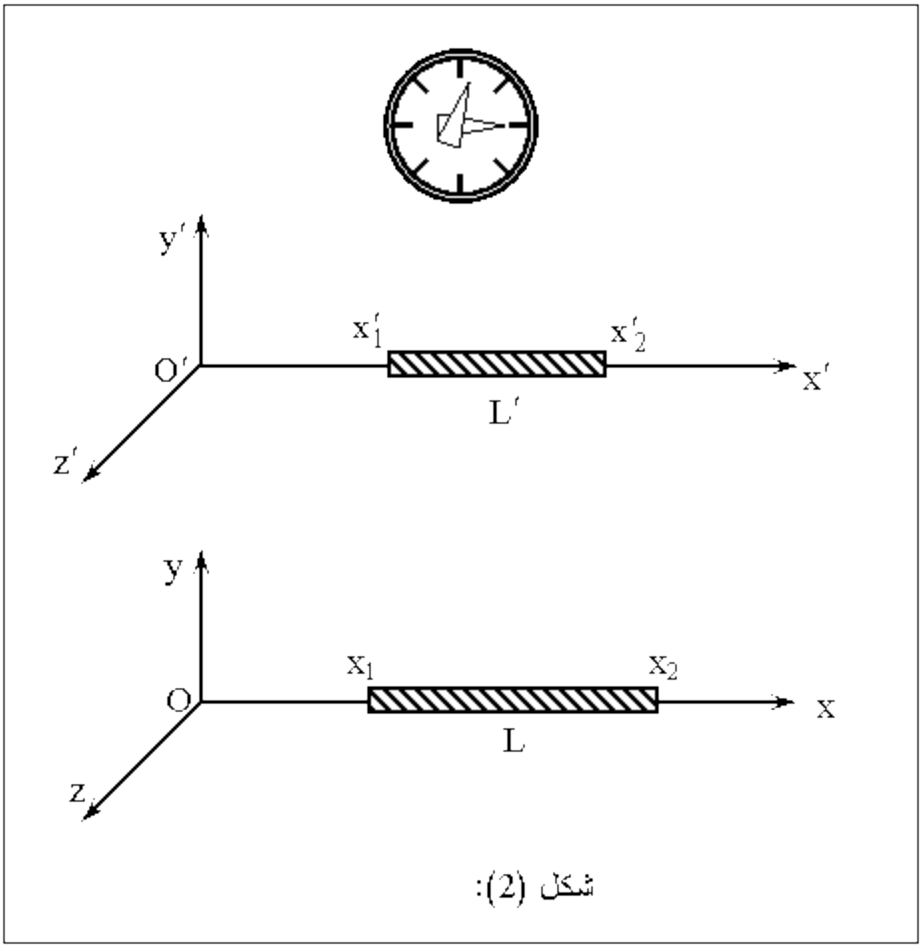
وكانت هذه المبادئ تطبق فقط علي الحركه المنتظمه لذا سميت بالنسبيه المقيده او النسبيه الخاصه.

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 علي سبيل المثال: لو لديك ثقل يزن 1 كجم و هو حاصل ضرب كتلته في عجله الجاذبيه و تاكدت من ذلك بوضعه علي الميزان. هل هيغير وزن الثقل اذا اسقط من علي ارتفاع ليسقط علي الميزن هل سيسجل نفس الوزن لحظه سقوطه؟ ولما لا يسجل اذا كانت عجله الجاذبيه ثابته؟

و فيما يلي بعض من نتائجها.

1-تمدد الزمن وانكماش الطول

تظهر تحويلات لورنتز مفاهيم جديدة تماما بالنسبة للطول والزمن. فإذا أخذنا قضيبا طوله L موازيا للمحور x' ومتحركا معه بسرعة نسبية v بالنسبة لراصد في نظام آخر، وكانت إحداثيات النظام المتحرك هي (x', y', z') والثابت (x, y, z). نفرض أن طول القضيب بالنسبة للراصد في النظام الثابت هو L كما هو موضح في شكل (2).



شكل (2):

من هذا الشكل نجد أن

$$L' = x'_2 - x'_1 \qquad (16)$$

حيث x_1,x_2 هما إحداثيات نهايتي القضيب في النظام $O'(x',y',z')$، طول القضيب نفسه هو $L_2=x_2-x_1$ في النظام $O(x,y,z)$. باستخدام تحويلات لورنتز من المعادلات (14) في المعادلة (16) نجد أن

$$L' = \beta(x_2 - \upsilon t) - \beta(x_1 - \upsilon t)$$

$$= \beta(x_2 - x_1)$$

$$= \beta L$$

لكن

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

$$\therefore\ L = \sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}\ L' \qquad (17)$$

وحيث أن المقدار $L = \sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}$ هو دائما أقل من الواحد الصحيح وأكبر من الصفر وذلك لأن $\upsilon \le c$ دائما فإن المقدار $L \le L'$ أي أن الطول المقاس بالنسبة للراصد الساكن يكون أقل من ذلك بالنسبة للمتحرك وهذا هو ما يسمى بانكماش الطول.

أما إذا اعتبرنا مسألة انكماش الزمن والفترات الزمنية بواسطة راصدين يتحركان بالنسبة لبعضهما فإننا نستخدم تحويلات لورنتز للزمن

$$t' = \beta\left(t - \frac{x\upsilon}{c^2}\right) \qquad (18)$$

ونفرض ساعة مثبتة في نقطة ما في نظام متحرك O' بالنسبة لنظام آخر O. نفرض أن الفترة الزمنية بين وقتين متتاليين كما يراها الراصد في النظام الثابت O هي $\Delta t = t_2 - t_1$. أما إذا كان الراصد متحركا مع النظام O' المحتوى على الساعة فإنه يجد أن نفس الفترة الزمنية هي $\Delta t' = t'_2 - t'_1$. وباستخدام المعادلة (18) نجد أن

$$\Delta t' = \beta\left(t_2 - \frac{x\upsilon}{c^2}\right) - \beta\left(t_1 - \frac{x\upsilon}{c^2}\right)$$

$$\Delta t' = \beta \Delta t \qquad (19)$$

ونظرا لأن β أكبر من الواحد الصحيح دائما فإن المقدار $\Delta t' > \Delta t$ أي أن الزمن يكون أكبر إذا قيس بواسطة راصد ساكن بالنسبة للساعة أي أن الساعة المتحركة تكون متأخرة كما تبدو لراصد ساكن بمعنى أن الزمن يتحدد بالنسبة إليه.

وتظهر أهمية التمدد الزمني في عمليات انبعاث الإشعاع والتفتت النووي وتفاعلات الجسيمات الأولية وذلك لأن سرعاتها تكون كبيرة جدا وقريبة من سرعة الضوء مما يجعل التغير في قيمة β كبيرا.

مثال(1): 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؟

الحـل: 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.

مثال (2): ما هي سرعة الطائرة والتي تدور الساعة الموجودة بها أبطأ بثانية لكل ساعة بالنسبة لساعة أخرى على سطح الأرض؟

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

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

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

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

مثال (3): 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؟

الحل:

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

$$\therefore \Delta t=\sqrt{1-\left(\frac{0.9\,c}{c}\right)^2}\times6\times10^{-6}$$

$$=\sqrt{0.19}\times6\times10^{-6}$$

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

مثال (4): 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؟

الحل:

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

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

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

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

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

2. 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

$$\upsilon_t = \upsilon_0 + a\,t = \upsilon_0 + \frac{F}{m}\,t \qquad (20)$$

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

$$m = \beta m_0 \qquad (21)$$

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

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} \qquad (22)$$

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.

3. كمية الحركة وطاقة الحركة لجسيم نسبوى

كمية الحركة النسبوية للجسيم المتحرك بسرعة υ تصبح

$$P = \frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} \qquad (23)$$

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 (22) وإجراء التكامل نحصل على طاقة الحركة النسبوية للجسم KE

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

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

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

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

$$K.E = (m - m_0)\, c^2 \qquad (24)$$

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

$$E = m\, c^2 \qquad (25)$$

بمعادلة آينشتاين لتكافؤ الكتلة والطاقة.

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

الحل:

$m = 5$ Kg. ، $\upsilon = 0.6\,c$

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

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

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

$= 6.25 \ \text{Kg.}$

مثال (6): كتلة جسيم يتحرك بسرعة $0.8c$ هي $100 \ \text{Kg.}$ أوجد كتله سكونه؟

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

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

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

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

$$= 100 \times 0.6$$

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

مثال (7):إذا نجزأ جسم ساكن تلقائيا إلى جزأين متحركان في اتجاهين متضادين والجز آن لهما كتلة سكون $5.33 \ \text{Kg}$ ، $3 \ \text{Kg}$ على الترتيب وسرعتان مقداريهما $0.8c$ ، $0.6c$ حيث c سرعة الضوء. أوجد كتلة الجسم الأصلي ؟

الحل:

$$m_{01} = 5.33 \ \text{Kg} \ , \ m_{02} = 3 \ \text{Kg}, \ \upsilon_1 = 0.8c, \ \upsilon_2 = 0.6c$$

∵ الطاقة الابتدائية = الطاقة النهائية

$$\because mc^2 = \frac{m_{01}c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{0.8c}{c}\right)^2}} + \frac{m_{02}c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{0.6c}{c}\right)^2}}$$

$$m_0 = \frac{5.33}{\sqrt{1-0.64}} + \frac{3}{\sqrt{1-0.36}}$$

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

$$= 12.63 \text{ Kg}$$

4. 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

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

وباستعمال النتائج

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

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

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2c^2} \qquad (26)$$

5. وحدات الطاقة وكمية التحرك

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

$$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{Coulomb.Volt}$$

$$eV = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{Joule} \qquad (27)$$

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

مثال (8): أحسب كمية تحرك الإلكترون والذي طاقة حركته 1 مليون إلكترون فولت. الحل:

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

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

الطاقة الكلية = طاقة الحركة + طاقة السكون

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

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

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

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

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

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

** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** **

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

الحل:

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

وعند سرعة $0.5c$

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

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

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

مثال(10): أحسب طاقة الحركة لإلكترون كمية تحركه $\frac{2}{c}$ MeV

الحل:

$$E^2 = \left(m_0 c^2\right)^2 + (Pc)^2$$

$$\left(K + m_0 c^2\right)^2 = \left(m_0 c^2\right)^2 + (Pc)^2$$

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

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

** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** **

مثال(11) أحسب سرعة إلكترون طاقة حركته 2 MeV

الحل:

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

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

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

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

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

$$\upsilon = 0.89\, c$$

مثال(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.

الحل:

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

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

من المعادلة (1)

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

كتلة الإلكترون

$$m_0 = 9.1 \times 10^{-31}\ \text{Kg}$$

سرعة الضوء

$$c = 3 \times 10^8\ \text{m/Sec}$$

$$K = 1.5\,\text{MeV} = 1.5 \times 10^6\ \text{eV} = 1.5 \times 10^6\,(1.6 \times 10^{-19})$$

$$K = 1.5 \times 1.6 \times 10^{-13}\ \text{Joule}$$

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

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

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

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

أما سرعة الإلكترون فنجدها من العلاقة (2)

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

بتربيع الطرفين

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

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

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

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

$$\upsilon = 3\times10^8\times0.968 = 2.9\times10^8\ \text{m/Sec}$$

** ** ** ** ** ** ** **

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

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

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

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

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

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

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

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

$$K = 1.29 \times 9.11 \times 10^{-31} \times 9 \times 10^{16}$$

$$K = 10.6 \times 10^{-14} \text{ Joule} = \frac{10.6 \times 10^{-14}}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.63 \times 10^{5} \text{ eV}$$

مثال(13): يصدر عن نظير الكوبالت 60 لدى تفككه فوتونات من أشعة جاما وجسيم بيتا (إلكترون) طاقتة الحركية $0.31\ \text{MeV}$ فما هي سرعة جسيم بيتا المقذوف؟

الحل:

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

بتربيع الطرفين

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

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

$$\left(\frac{m_0}{m}\right)^2=\left(\frac{m_0c^2}{mc^2}\right)^2$$

$m_0c^2=0.511\ \text{MeV}$ للإلكترون

$$K=mc^2-m_0c^2$$

$$mc^2=K+m_0c^2=0.31+0.511=0.821\ \text{MeV}$$

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

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

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

6. 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

$$E=\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} \quad , \quad P=\frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}} \qquad (28)$$

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

$$\therefore E = P = 0 \qquad (29)$$

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

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

$$\therefore E = P = \frac{0}{0} \qquad (30)$$

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:-

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4}{1-(\upsilon/c)^2} \qquad (31)$$

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

$$P^2 c^2 = \frac{m_0^2 \upsilon^2 c^2}{1-(\upsilon/c)^2} \qquad (32)$$

بطرح (32) من (31)

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

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

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

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

$$\therefore E = \sqrt{m_0^2 c^4 + P^2 c^2} \qquad (33)$$

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

$$E = Pc \qquad (34)$$

وهذا هو الشرط الثاني للجسيمات التي ليس لها كتلة سكون.

مسائل

1. أثبت أن سرعة جسيم نسبوى υ تحدد بالمعادلة

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

حيث E هي طاقته الكلية

2. زيدت سرعة إلكترون من $2.7\times10^8\ \mathrm{m/Sec}$ إلى $2.97\times10^8\ \mathrm{m/Sec}$ أوجد نسبة الزيادة في كتلته.

3. أوجد سرعة الجسيم النسبوى الذي كتلته تساوى ضعف كتلته سكونه وأوجد كمية حركته.

4. طول سفينة فضاء $200\,\mathrm{m}$ ماذا يجب أن تكون سرعتها بالنسبة للأرض حتى يراها راصد أرضى بطول $100\,\mathrm{m}$

5. يحتاج حدث معين إلي زمن قدره $3\ \mu\mathrm{Sec}$ لكي يحدث داخل ذرة فإذا تحركت الذرة بسرعة $10^{-8}\ \mathrm{m/Sec}$ فما هو الزمن الذي يقيسه راصد في المعمل لذلك الحدث.

6. شوكة رنانة ترددها $500\,\mathrm{Hz}$ على الأرض. ماذا يكون ترددها داخل سفينة فضاء تسير بسرعة تساوى $0.9c$ ؟

7. في جهاز تعجيل البروتونات أمكن إعطاء البروتونات طاقة حركية مقدارها $1.6\times10^{-7}\,\mathrm{Joule}$ ماذا يكون اختلاف سرعة البروتون عن سرعة الضوء؟ وماذا تكون كمية حركته؟

المراجع المستخدمة