جامعة اليرموك

قسم الفيزياء

PHYS. 251 ف

Modern Physics

© د.نضال الرشيدات

تفاصيل محتوى المساق

الفصل	عنوان الفصل
الأول	النسبيَّة Relativity
الثاني	الطبيعة الجسيميَّة للأمواج Properties of Waves Particle
الثالث	الطبيعة الموجيَّة للجسيمات Wave Properties of Particles
الرابع	التركيب الذرّي Atomic Structure
الخامس	الميكانيكا الكميَّة Quantum Mechanics
السادس	نظريَّة ذرَّة الهيدروجين الكميَّة Quantum Theory of the Hydrogen Atom

Syllabus

- **Text Book**

  Concepts* of *Modern Physics, *6th edition*

  Author: Arthur Beiser

  Editor: McGraw-Hill, Inc.

- **Useful references**

  All references of the text book +

  - Quantum Physics, Gasiorowicz

  - Modern Physics Anderson

الفصل الأول: النسبيَّة الخاصَّة

Chapter 1:Theory of Special Relativity

المحاضرة ١

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء – جامعة اليرموك

٢١١٦٣ إربد الأردن

الفصل الأول : النسبيّة الخاصة

© د.نضال الرشيدات

Lecture 1

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Chapter 1 :
Theory of Special Relativity

© Dr. Nidal Ershaidat

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec1-1

Brief History

4th Century B.C : Democritus (ATOMOS = indivisible)

19th Century A.D : Chemists Dalton, Avogadro, Lavoisier, … distinguished many "kinds of atoms"

1863 : Mendeleev proposes his periodic table of "Elements" for classifying these atoms according to their masses.

1887: Perrin shows that the cathodic rays are electrons

1896: Becquerel discovers Radioactivity

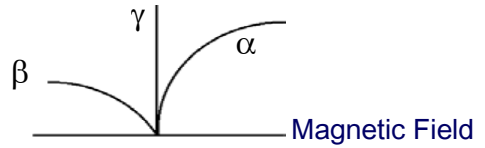
1898: P. & M. Curie identify two new elements: Polonium and Radium.

1903: Rutherford (& Mme Curie) identify three types of the naturally emitted particles. (α, β, γ).

1911: Rutherford explains Geiger-Marsden experimental results. He introduces the nucleus

Radioactivity

By simply using a deflecting magnetic field Marie Curie demonstrated that α particles are doubly positively charged*. β particles have the same characteristics as that of electrons and the γ radiation behaves like the X-rays of Roentgen but are more energetic.



*α particle were later identified as being Helium nuclei (^4He)

9

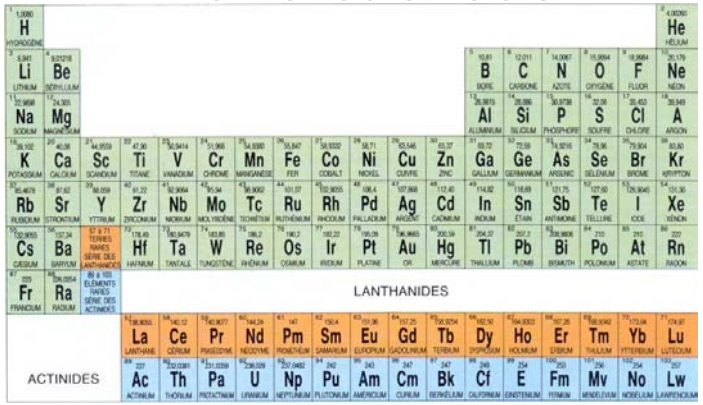
Charge of the proton = e

Studies of the hydrogen atom revealed that it contains one electron (electrons are particles seen in a cathodic tube and identified by Perrin in 1897) and a positive particle the *proton.*

The only plausible hypothesis to explain the zero charge of the hydrogen atom was to consider that the charge of the proton is equal to that of the electron*.

* Millikan measured in 1911 this charge e and found it equal to 1.6×10^{-19} C

The Periodic Table



10

The Atomic Number (Z)

The Periodic Table

A new classification replaces that of Mendeleev

it is based on the resemblance of chemical behavior of atoms strongly related to their number of electrons. This number of electrons is called the Atomic Number (symbol Z). It also represents the number of protons of an atom.

1932 سنة حاسمة

1932 A Decisive Year

النسبيّة
Relativity

Relativity

Relativity is the frame which should be used when the observer of a phenomenon and a certain quantity characteristic of this phenomenon, which we call the observable, are in relative motion.

The simple mathematical frame introduced by A. Einstein in 1905, now called Special Relativity, led to links between fundamental dynamic variables such as space and time, matter and energy and electricity and magnetism!

In his famous paper in 1905, Einstein explained that one can understand the measurements done by an observer of an observable if one assumes two postulates (مسلّمات)

Relative Motion

Motion is always defined relatively to a *fixed* frame of reference.

A passenger walking in a train is moving in a frame of reference attached to the train, but an observer on the land *observes* 2 motions: the passenger's and the train's motion.

The observer is moving with the earth in its motion around the sun!, which also moves in our galaxy (The Milky Way*)

Thus we conclude that there is no such *fixed* frame of reference!

*درب اللبانّة

الحركة النسبيَّة

تُعرَّف الحركة دائمًا نسبة إلى اطار اسنادي ثابت

يتحرك مسافر في قطار متحرك في اطار اسنادي مربوط بالقطار.
بالنسبة لمراقب على رصيف محطة القطار فإنّه يشاهد حركتيْن:
حركة القطار وحركة المسافر.
يتحرك المراقب مع الأرض التي تدور بدورها حول الشمس والتي تتحرك في مجرتنا (درب اللبانّة*)

نستنتج ممَّا سبق أنّه ليس هناك اطار اسنادي ثابت!

* Milky Way

الإطارات القصوريّة
Inertial Frames of Reference

Inertial Frames of Reference

Frames of reference in relative motion with constant speed in the same direction are called inertial references

Experiments show that a moving object has "different" lengths in 2 inertial frames. Measurement of time, mass (and hence space coordinates and energy) give different values in such frames.

A. Einstein invented a mathematical frame to take these considerations into account!

الاطارات القصوريّة

تُدعى الاطارات الاسناديّة التي تتحرك الواحدة بالنسبة للأخرى بسرعة ثابتة الاطارات القصوريّة (inertial frames of references)

تثبت التجربة أنّ طول جسم متحرك في اطارين إسناديّين يكون مختلفًا. وتُعطي قياسات الزمن والكتلة (وبالتالي قياسات احداثيّات المكان والطاقة) قيمًا مختلفة أيضًا.

وضع البرت أينشتاين الاطار الرياضي لتفسير هذه الظواهر

The Milky Way

The Milky Way
50mm f/1.4 Nikkor - Konica 3200 - 40 sec.

Postulates of Special Relativity
مسلَّميَّات النسبيَّة الخاصة

I. The laws of physics are the same in all frames of reference moving at constant velocity with respect to each other

لا تتغير *صيغة* قوانين الفيزياء في اطارات إسناديَّة تتحرك الواحدة بالنسبة للأخرى بسرعة ثابتة

II. The speed of light in free space has the same value for all inertial observers

سرعة الضوء في الفراغ هي نفسها في جميع الاطارات الإسناديَّة التي تسير بسرعة ثابتة في نفس الاتجاه الواحدة بالنسبة للأخرى!

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 1 : Relativity Lecture 1

Postulates of Special Relativity
مسلَّميَّات النسبيَّة الخاصة

I. The laws of physics are the same in all inertial frames

تبقى قوانين الفيزياء على نفس *الصيغة* في اطارات قصوريَّة

II. The speed of light in free space has the same value for all inertial observers

سرعة الضوء في الفراغ هي نفسها في جميع الاطارات الإسناديَّة التي تسير بسرعة ثابتة في نفس الاتجاه الواحدة بالنسبة للأخرى!

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 1 : Relativity Lecture 1

اينشتاين، نيوتن وماكسويل

حين وحَّد ماكسويل الكهرباء والمغناطيسيَّة في أربع معادلات أنيقة، حصلت بعض التناقضات مع قوانين الحركة (المبدأ العام للديناميكا) التي وضعها نيوتن قرنين قبل ماكسويل.

أثبت اينشتاين أن ميكانيكا نيوتن صالحة فقط في الحالات التي تكون فيها سرعة الأنظمة الميكانيكيَّة أصغر كثيراً من سرعة الضوء، أي أنَّها حالة خاصة من الميكانيكا النسبيَّة التي وضع أسسَها.

وهكذا حلَّ اينشتاين التناقضات بين ميكانيكا نيوتن والكهرُمغناطيسيَّة

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 1 : Relativity Lecture 1

المنطق ومسلَّمتَا اينشتاين

لو تغيرت قوانين الفيزياء كما يراها مراقبان في اطارَيْن إسناديَّين تفصلهما *حركة نسبيَّة* لأمكن أنْ نعرف أيًّا منها "ثابت" و أيًّا منها "متحرك". والمسلَّميَّة الأولى تتعلق بإطارات اسناديَّة تسير بسرعة ثابتة في نفس الاتجاه الواحدة بالنسبة للأخرى!

تثبت التجربة أن قياس سرعة الضوء في الفراغ هي نفسها في جميع الاطارات الاسناديَّة التي تسير بسرعة ثابتة في نفس الاتجاه الواحدة بالنسبة للأخرى!

إنَّ الحلَّ الوحيد لتفسير ذلك دون المساس بمفهوم النسبيَّة يكمن في عدم اعتبار قياسات إحداثيَّات المكان والزمن مطلقة ولكن في اعتبار أنَّها تعتمد على الحركة النسبيَّة بين المراقِب والظاهرة التي يُراقبها.

Lecture 2

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Time Dilation & Length Contraction

© Dr. Nidal Ershaidat

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec1-2

المحاضرة ٢

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء – جامعة اليرموك

٢١١٦٣ إربد الأردن

تمدد الزمن وانكماش الأطوال

© د.نضال الرشيدات

تمدُّد (تمغط) الزمن وانكماش الأطوال

إنَّ انتفاء مطلقيَّة قياسات احداثيَّات المكان والزمن يعني أنَّ مراقباً على الأرض مثلاً يرى ساعته تدق بشكل طبيعي وأنَّ مسطرته المتريّة تعمل بشكل طبيعي أيضاً، في حين أنَّه يرى ساعة موجودة في مركبة فضائيّة تبتعد بسرعة ثابتة عن الأرض، تدق بشكل أبطأ وأنَّ مسطرة متريّة موجودة في هذه المركبة أطول من مسطرته المتريَّة وبالتالي تكون قياسات المسطرة الفضائيَّة أكبر من قياسات المسطرة الأرضيَّة.

بالنسبة للمراقب على الأرض فإنَّ تمدُّداً للزمن* وانكماشاً للأطوال** قد حصلا في الاطار المرتبط بالمركبة المسافرة.

من الواضح أنه بالنسبة للمراقب المسافر فإنَّ تمدُّداً للزمن وانكماشاً للأطوال في الاطار المرتبط بالأرض قد حصلا.

* Time Dilation

** Length Contraction

تمغُّط الزمن

Time Dilation

تمدُّد (تمغط) الزمن Time Dilation

تُسمَّى الفترة الزمنيَّة بينَ حدثيْن يحدثان في نفس المكان والمُقاسة في إطار مرتبط بالساعة التي تقيس الحدثين بالزمن المميِّز.

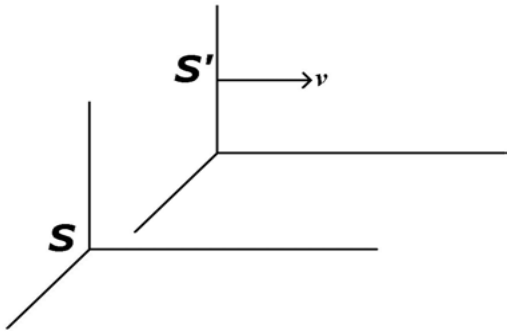
لنفرض أنَّ الساعات في اطاريْن قصوريَّين قد ضُبطت عند اللحظة t=0 في الإطار S (الأرض مثلاً) وعند اللحظة t′ = 0 في الإطار S′ (مركبة فضائيَّة مثلاً) والذي يتحرك بسرعة ثابتة v مبتعداً عن الإطار S.

لنفرض أن حدثاً في الإطار S′ حدث في فترة زمنيَّة t (بين اللحظة t′ = 0 واللحظة t).

سوف تقيس ساعة المراقب في الإطار S زمناً آخر مقداره t_0، لأنَّ بداية الحدث ونهايته بالنسبة لها حصلا في مكانيْن مختلفيْن!

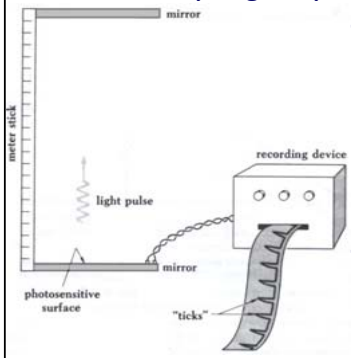
سوف نرى أنَّ $t > t_0$ وهو ما يُدعى تمدد الزمن (بالنسبة للمراقب الأرضي)

الإطاران S و S′ Frames S and S′



تمدُّد الزمن والمسلَّميَّة الثانية

لهذا الغرض سوف نستخدم ساعة خاصة (الشكل 1-2)

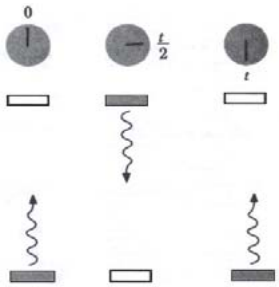


نعتبر أنَّ كلَّ دقة (tick) هي الزمن المنقضي بين انطلاق نبضة ضوء من المرآة السفلى ووصولها إلى المرآة العلويَّة ثمَّ عودتها إلى المرآة السفلى. سوف نسمِّي هذه الرحلة جيئة وذهاباً بينَ المرآتيْن **الحدث**.

إنَّ الزمن اللازم لنبضة الضوء لقطع المسافة بينَ المرآتيْن هو $t_0/2$ والذي يُساوي L_0/c

الحدث في الإطار S

يُبيِّن الشكل 1-3 كيف يرى المراقب على الأرض الحدث السابق



الشكل 1-3 :
الحدث كما تُسجله الساعة الأرضيَّة

إذا كان زمن الحدث الكلي هو t فإنَّ اللحظة t/2 هي لحظة وصول الضوء إلى المرآة العلويَّة.

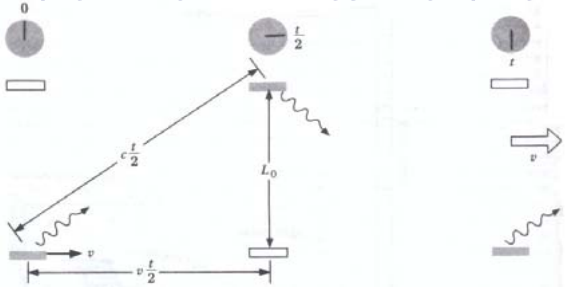
كيف يرى المراقب على الأرض حدثاً مُشابهاً يحدث في الإطار المتحرك (الذي يبتعد بسرعة ثابتة v)؟

يمثِّل الشكل الساعة الأرضيَّة.

35

الحدث في الإطار S′

يُبيِّن الشكل 1-4 كيف يرى المراقب على الأرض حدثًا مُشابهاً يحدث في الإطار S′. (المرآتان موازيتان لاتجاه سرعة الإطار S′)



الشكل 1-4 :الحدث في الإطار المتحرك كما يُسجله المراقب الأرضي

36

t بدلالة t_0

بالنسبة للمراقب الأرضي فإنَّ "نبضة الضوء" تسير في مسار متعرج (zigzag). تقطع النبضة مسافة أفقيَّة مقدارها $v \times (t/2)$ ويفضل المسلميَّة الثانية فان المسافة الكليَّة هي "حقيقةً" $c \times (t/2)$

إذا كانت المسافة بين المرآتين هي L_0 فإنَّ :

$$\left(\frac{c\,t}{2}\right)^2 = L_0^2 + \left(\frac{v\,t}{2}\right)^2 \Rightarrow \frac{t^2}{4}\left(c^2 - v^2\right) = L_0^2$$

$$t^2 = \frac{4L_0^2}{c^2 - v^2} = \frac{(2L_0/c)^2}{1-(v/c)^2} \Rightarrow t = \frac{2L_0/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{t_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad 1\text{-}1$$

37

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

β

t_0 = الزمن كما تقيسه ساعة أرضيَّة في الإطار (S)

t = الزمن كما تقيسه ساعة في الإطار المتحرك (S′)

v = سرعة الإطار المتحرك (S′) بالنسبة للاطار الثابت (S) أو السرعة النسبيَّة (Relative velocity)

β = النسبة بين v و سرعة الضوء c، $0 \le \beta \le 1$

لإنَّ β أقل أو تساوي 1 فإنَّ $t > t_0$ دائماً!

إنَّ هذا يعني أنَّ الساعة في الإطار المتحرك تدق أبطأ من الساعة الأرضيَّة بالنسبة للمراقب الأرضي

إنَّ هذا يعني أيضاً أنَّ الزمن في الإطار المتحرك يتمدَّد بالنسبة للمراقب الأرضي

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 1 : Relativity Lecture 2

38

t_0 بدلالة t بالنسبة لمراقب في الإطار S′

بالنسبة لمراقب في الإطار S′ فإنَّ تحليل الحدث بالنسبة له هو نفس التحليل السابق!

أي أنَّ الساعة في الإطار الأرضي S تدق أبطأ من ساعة الإطار S′ بالنسبة للمراقب في هذا الإطار

إنَّ هذا يعني أيضًا أنَّ الزمن في الإطار الأرضي يتمدَّد بالنسبة للمراقب في المركبة الفضائيَّة!

تُعمَّم هذه النتيجة ونقول بأنَّ الساعات في اطار متحرك بالنسبة لكل مراقب *"ثابت"* تدق أبطأ أو بعبارة أُخرى أنَّ تمدد الزمن صالح لكل الساعات!!!

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 1 : Relativity Lecture 2

انكماش الأطوال
Length Contraction
Lorentz-FitzGerald Contraction

انكماش لورنتز-فيتزجيرالد – انكماش الأطوال

تُسمَّى المسافة بينَ نقطتيْن *ساكنتيْن* أو طول جسم ساكن (L_0) بالنسبة لمراقب يقيس هذه المسافة بالطول المميِّز. وهذا الطول المميِّز هو دومًا أقصى قيمة ممكنة أيًّا كان الإطار الذي نقيسه فيه!

لنفرض أنَّ نقطة الأصل في اطاريْن قصوريَّين قد ضُبطتا عند اللحظة $t=0$ في الإطار S (الأرض مثلاً) وعند اللحظة $t' = 0$ في الإطار S' (مركبة فضائيَّة مثلاً) والذي يتحرك بسرعة ثابتة v مبتعدًا عن الإطار S.

لنفرض أنَّ المسافة (طول مميِّز لجسم ما) بينَ حدثيْن متزامنيْن في الإطار S' كما يقيسها مراقب في نفس الإطار هي L_0.

إنَّ مراقبًا آخر في الإطار S سوف يقيس المسافة L لأنَّ ساعته سوف تقيس زمنًا متمدِّدًا هو t'.

تمدد الزمن والتجربة

مثال 1: إذا كانت سرعة مركبة فضائيَّة هي 11 km/s، فما هو الفرق النسبي (الخطأ في القياس) بينَ ساعة أرضيَّة وساعة موجودة على متن المركبة؟

الحل:

$$\beta = \left(\frac{v}{c}\right) = \left(\frac{11}{300000}\right) = 3.67\times10^{-5} << 1$$

$$\frac{t}{t_0} = \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\right) = \left(1-\beta^2\right)^{-1/2}$$

وباستخدام التقريب (متسلسلة تيلور)*

$$\left(1-\beta^2\right)^{-1/2} \approx 1-\left(\frac{-1}{2}\right)\beta^2 = 1+\frac{1}{2}\beta^2$$

$$\frac{t-t_0}{t_0} = \frac{t}{t_0}-1 = \left(1+\frac{1}{2}\beta^2\right)-1 = \frac{1}{2}\beta^2 = 6.72\times10^{-10}$$

* $(1-x)^{\alpha} \underset{x<<1}{\approx} 1-\alpha x \ , \ \forall x \,\&\, \alpha \in R$

قياس تمدد الزمن

من الواضح أنَّ استخدام الساعتيْن السابقتيْن لقياس تمدد الزمن ليس عمليًّا فالدقة المطلوبة لهاتيْن الساعتيْن يجب أنْ تكون بحدود 10^{-9}!!

إنَّ سرعة اطار متحرك بالنسبة لإطار ثابت إذا أردنا أنْ يكونَ الفرق بينَ ساعة في الإطار الثابت وساعة موجودة في الإطار المتحرك يُساوي 1s يجب أنَّ تُساوي $7.1\times10^{6}\ m\ s^{-1}$ أي 0.024 c!

تتوفر لدينا بفضل المسارعات في فيزياء الطاقات العليا جسيمات تسير بسرع كافية (قد تصل إلى 0.9999 c) لكي يكون قياس تمدد الزمن ممكنًا عمليًّا.

43

Length Contraction انكماش الأطوال

نفصّل في الملحق A1 كيف نربط بينَ L و L_0 في العلاقة التالية:

$$L = L_0 \sqrt{1-(v/c)^2} = L_0 \sqrt{1-\beta^2} \qquad 2\text{-}1$$

هذه العلاقة تقول أنَّ الطول المُقاس في الإطار المتحرك يكون دومًا أقل منه في الإطار الثابت الذي يرتبط به هذا الطول!

أي أنَّ الأطوال تبدو منكمشة إذا قيست في إطار غير الإطار الذي تكون مرتبطة به!

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 1 : Relativity Lecture 2

Lecture 3

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department
Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Relativity of Mass

$E = m c^2$

© Dr. Nidal Ershaidat

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec1-3

المحاضرة ٣

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء – جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن

نسبيَّة الكتلة $E = m c^2$

© د.نضال الرشيدات

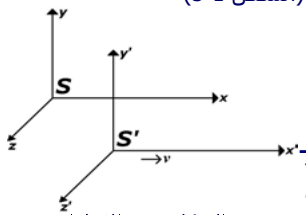
46

الكتلة في اطار النسبيَّة $m=f(v)$

تؤدي تطبيقات النسبيَّة في الديناميكا إلى نتائج مدهشة مثل نسبيَّة الكتلة وتكافؤ الكتلة والطاقة.

لِنعتبر جسيمَيْن A و B يراقبهما مراقبان في اطارَيْن قصوريَّيْن **S** و **S'** يبتعد **S'** عن **S** بسرعة ثابتة v في اتجاه مواز لمحور x) (الشكل 1-5)

سوف نفرض أنَّ الجسيمَيْن A و B يملكان نفس الخواص عندما نقيس هذه الخواص في اطار يكون فيها كلٌّ منهما ساكناً.



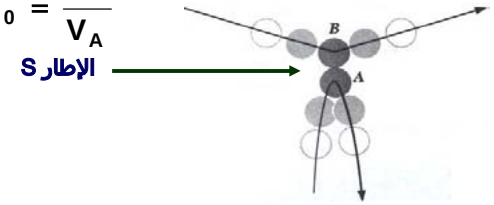
الشكل 1-5 :الإطاران القصوريَّان S و S'

The Properties of A and B are identical when determined in reference frames in which they are **at rest**

كيف يرى مراقب في الإطار S التصادم المرن؟

إنَّ مراقباً في الإطار S سوف يرى الجسيمَيْن يصطدمان في منتصف المسافة أي عند الاحداثيَّة y=Y/2، وسوف يرى الجسيم A يرتد عائداً إلى نقطة انطلاقه في الاتجاه المُعاكس. والزمن بين اللحظة التي ينطلق الجسيم A عندها ولحظة عودته إلى نقطة انطلاقه هي:

$$T_0 = \frac{Y}{V_A} \qquad 4\text{-}1$$



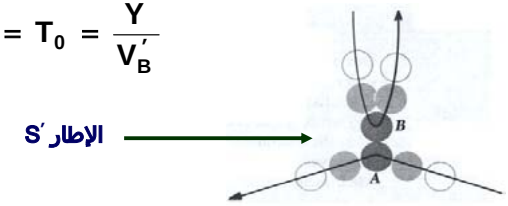
الشكل 1-6ب : التصادم كما يراه مراقب في S

© Dr. N. Ershaidat

كيف يرى مراقب في S′ التصادم المرن؟

إنَّ مراقباً في الإطار S′ سوف يرى الجسيمَيْن يصطدمان في منتصف المسافة أي عند الاحداثيَّة y′=Y/2، وسوف يرى الجسيم B يرتد عائداً إلى نقطة انطلاقه في الاتجاه المُعاكس. والزمن بين اللحظة التي ينطلق الجسيم B عندها ولحظة عودته إلى نقطة انطلاقه هي:

$$T_0' = T_0 = \frac{Y}{V_B'} \qquad 5\text{-}1$$



الشكل 1-6ج : التصادم كما يراه مراقب في S′

© Dr. N. Ershaidat

الزمن المميِّز

لنسمِّ الرحلة التي يقوم بها الجسيم A من نقطة انطلاقه وعودته إليها الحدث E في الإطار S.

يمثِّل الزمن T_0 في المعادلة 1-4 السابقة الزمن المميِّز للحدث السابق E في الإطار S.

لنسمِّ الرحلة التي يقوم بها الجسيم B من نقطة انطلاقه وعودته إليها الحدث E′ في الإطار S′.

يمثِّل الزمن T_0 في المعادلة 1-5 السابقة الزمن المميِّز للحدث السابق E′ في الإطار S′.

وكما رأينا في تمدد الزمن فإنَّ زمن الحدث E′ كما يقيسه المراقب في S هو:

$$T = \frac{Y}{V_B} = \frac{T_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad 6\text{-}1$$

* Round-trip

حفظ الزخم الخطي

إذا كان الزخم الخطي محفوظاً في الإطار S فإنَّ:

$$m_A V_A = m_B V_B \qquad 7\text{-}1$$

حيثُ يمثِّل المتغيِّران V_A و V_B، على التوالي، سرعة الجسيم A وسرعة الجسيم B كما يقيسهما مراقب في الإطار S (كما عرَّفناهما سابقاً).
وحيثُ يرمز m_A و m_B إلى كتلة الجسيم A و إلى كتلة الجسيم B كما يقيسهما مراقب في الإطار S.

تُعطى V_A بدلالة V_B من المعادلة 1-7 السابقة بالعلاقة: $V_A = \frac{m_B}{m_A} V_B$

ومن المعادلة 1-6 السابقة نجد أنَّ:

$$V_B = \frac{Y}{T} = \frac{Y}{T_0/\sqrt{1-(v/c)^2}} = V_A \times \sqrt{1-(v/c)^2} \qquad 8\text{-}1$$

حيثُ $V_A = (Y/T_0)$ من (أنظر المعادلة 1-4)

© Dr. N. Ershaidat

m بدلالة m_0 كتلة السكون (rest mass)

وبتعويض قيمة V_A من 1-8 في المعادلة 1-7 فإنّنا نجد أنّ:

$$V_A = \frac{m_B}{m_A} V_B = \frac{m_B}{m_A} V_A \sqrt{1-(v/c)^2}$$

تعني العلاقة السابقة بينَ m_A و m_B أنّ قياس الكتلة، مثله مثل الزمن والمسافة، يعتمد على سرعة المراقب النسبيّة الذي يقيسها.

- كتلة جسم متحرك m بدلالة كتلته عندما يكون ساكنًا m_0

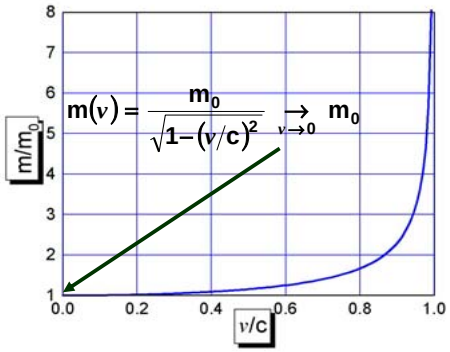
لنعتبر الآن أنّ $v >> V_A$ و $v >> V_B'$. في هذه الحالة فان مراقبًا في S سوف يرى الجسيم Bيقترب من الجسيم A بسرعة v ويصطدم به لحظيًا مكملاً طريقه. هنا $m_A = m_0$, $m = m_B$

وبالتالي:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad 10\text{-}1$$

m_0 كتلة السكون هي أصغر قيمة للكتلة

يُبيِّن الشكل 1-7 تغير m بدلالة السرعة.



الشكل 1-7: $m/m_0 = f(v/c)$

الكتلة نسبيَّة أيضًا

بالنسبة لمراقب في الإطار S′، فإنّ التحليل مشابه تمامًا للتحليل السابق في S لأنّ $m_B = m_0$, $m = m_A$

في الجدول 1-1 بعض القيم لتغير m بدلالة السرعة.

v/c	v (ms^{-1})	m/m_0
10^{-3}	3×10^5	1.0000005
0.1	3×10^7	1.0050378
0.2	6×10^7	1.0206207
0.9	2.70×10^8	2.2941571
0.99	2.97×10^8	7.0888154

استنتاجات هامة

1) سرعة الضوء في الفراغ هي أقصى سرعة ممكنة

تُبيّنا العلاقة 1-10 أنّ جسيمًا (أو نظامًا) يسير بسرعة v=c يمتلك كتلة m=∞. ولأنّ كتلة نهائيّة ليست كميّة فيزيائيّة فإنّ هذا يعني أنّ c سرعة حديّة لا يُمكن إلاّ للضوء أنْ يمتلكها!

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \underset{v\to c}{\rightarrow} \infty$$

2) جمع السرعات النسبيَّة

سوف نرى كيف تُجمع السرعات النسبيَّة. تختلف عملية الجمع هنا عنها في الميكانيكا الكلاسيكيَّة. إذا أطلقت مركبة تسير بسرعة v=0.5 c صاروخًا في اتجاه حركتها وسرعته أيضًا 0.5 c فإنَّ مراقبًا على الأرض يرى الصاروخ منطلقًا بسرعة 0.8 c وليس بسرعة c كما تُعطينا إيَّاها الميكانيكا الكلاسيكيَّة!

أثر شيرينكوف Čerenkov Effect

3) يسير الضوء بسرعة أقل من c في الأوساط الماديَّة

ولهذا فإنَّ الجسيمات الماديَّة المشحونة التي تسير بسرع عالية جدًّا في وسط مادي قد تكون سرعتها أكبر من سرعة الضوء في ذلك الوسط! وعندها فإنَّ الجسيم يُشعُّ ضوءًا خاصًّا به. تُسمَّى هذه الظاهرة أثر شيرينكوف نسبة إلى الفيزيائي الروسي الذي اكتشفها في عام 1957!

تُستخدم هذه الظاهرة في قياس سرعات الجسيمات الأوليَّة في فيزياء الطاقات العليا، وذلك بقياس طول موجة تردد ضوء شيرينكوف الناتج.

نسبيَّة الزخم الخطي – قانون نيوتن

يُعطى الزخم الخطي لجسيم بالعلاقة:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad 11\text{-}1$$

قانون حفظ الزخم الخطي صالح في الميكانيكا النسبيَّة كما في الكلاسيكيَّة.

بالنسبة لقانون نيوتن الثاني $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ فإنَّ صيغته لا تتغير في الإطارات القصوريَّة كما تفرض المسلَّمة الأولى،
ولكن يجب أخذ نسبيَّة الزخم الخطي بعين الاعتبار عند حساب مشتقة الزخم الخطي، لأنَّ الكتلة تعتمد على الزمن، أي:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\frac{dm}{dt} \qquad 12\text{-}1$$

نسبيَّة الطاقة Relativity of Energy

يُعطى قانون الشغل والطاقة الطاقة الحركيَّة لجسيم بالعلاقة:

$$K = \int_0^{\vec{s}} \vec{F} \bullet d\vec{s} = \int_0^{\vec{s}} F_{//} \bullet ds \qquad 13\text{-}1$$

ق.ش.ط = التغير في الطاقة الحركيَّة لنظام ميكانيكي يُساوي الشغل المبذول (المجموع الجبري* لِلشغول المبذولة) على هذا النظام.

تمثِّل $F_{//}$ مركبة القوة في اتجاه الازاحة ds (التي يمثِّلها المتجه $d\vec{s}$)

* جبري وليس عطا علي

61

حساب الطاقة الحركيَّة النسبيَّة

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \Rightarrow K = \int_0^s \frac{d(mv)}{dt} ds = \int_0^{mv} v\, d(mv)$$

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

$$K = m c^2 - m_0 c^2 \qquad 14\text{-}1$$

62

حساب التكامل

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

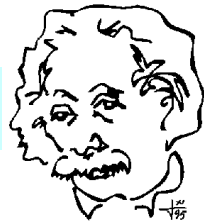
$$\int_0^v v\, d\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right) = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 \int_0^v \frac{v\, dv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$= \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \left[m_0 c^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}\right]_0^v$$

$$= \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \left[m_0 c^2 - \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right]_0^v$$

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

$$E = m c^2$$



$E = m c^2$

تُعطي المعادلة 14-1 صيغة قانون الشغل والطاقة في ميكانيكا أينشتاين النسبيَّة، وينصُّ هنا على أنَّ ***الطاقةَ الحركيَّة لجسيم تُساوي الزيادة في كتلته الناتجة عن حركته النسبيَّة مضروبة في مربع سرعة الضوء في الفراغ.***

تُكتب المعادلة 14-1 على الصيغة التالية:

$$m c^2 = m_0 c^2 + K \qquad 15\text{-}1$$

إذا اعتبرنا أنَّ طاقة الجسيم الكلِّيَّة هي $E = mc^2$، وأنَّه عندما يكون الجسيم ساكنًا ($v=0$)، أي $K = 0$، فإنَّه (لا يزال) يمتلك طاقة مقدارها m_0c^2

كتلة السكون
Rest Mass

$m_0 c^2 = E - K$

تُسمَّى m_0c^2 طاقة السكون للجسيم (Rest Energy) الذي كتلته m_0.

نُعيد صياغة العلاقة السابقة على الشكل التالي، فتصبح علاقة تربط بينَ طاقة الجسيم E وطاقة سكونه (الطاقة المكافئة لكتلته وهو ساكن) $E_0 = m_0c^2$:

$$E = E_0 + K \qquad 16\text{-}1$$

مُعامل لورنتز
Lorentz Factor γ

The Lorentz γ Factor مُعامل لورنتز

ومن هنا أصل العلاقة المشهورة جداً :

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 c^2 \qquad 17\text{-}1$$

حيثُ أدخلنا مُعامل لورنتز γ والذي يُعطى بالعلاقة:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad 18\text{-}1$$

يُمكننا كتابة الزخم الخطي بدلالة كتلة السكون على الصيغة (انظر 1-11)

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 \vec{v} \qquad 19\text{-}1$$

Energy Mass Equivalence

تكافؤ الكتلة والطاقة Mass Energy Equivalence

تمثِّل العلاقة 1-17 مبدأ تكافؤ الكتلة والطاقة والتي تعني أنَّ الطاقة يُمكن أنْ تتحول إلى كتلة (أي إلى مادة) وأن الكتلة يُمكن أنْ تتحول إلى طاقة.

إنَّ هذا يعني أيضًا أنَّ تدمير المادة يعني تولد طاقة مكافئة، وهذا الأمر معروف في الكيمياء (مثلاً يُحرق الخشب لتوليد طاقة حراريَّة) وأنَّ الطاقة يُمكن أنْ تُستخدم لتوليد المادة، وهو ما لمْ يكن معروفًا قبل أنْ يضع أينشتاين أسس النسبيَّة الخاصة!

بفضل المُسارعات فإنَّ بالامكان جعل هذا حقيقة، ففي تفاعلات الجسيمات الأوليَّة يكون الناتج جسيمات أُخرى لا تتواجد في الطبيعة ولا يُمكن الحصول عليها إلاَّ عن طريق هذه التفاعلات!

مثال: $e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow J/\Psi + \ldots$

Units

قانون حفظ الطاقة والكتلة

نعمِّم قانوني حفظ الطاقة وحفظ الكتلة ليندمجا معًا في قانون حفظ واحد هو قانون حفظ الطاقة والكتلة.

Units الوحدات

لا يتناسب نظام ***MKS*** والأبعاد على المستوى الميكروسكوبي (الذرة، النواة، الخ ...)، لذا نُفضِّل استخدام الوحدات eV و Å (أو MeV و F) للتعبير عن الطاقة والمسافات إذْ يُصبح من السهل التعبير عن الكميات التي تُصادفنا في الفيزياء الميكروسكوبية ويكفي لتحويل هذه الوحدة إلى نظام MKS معرفة أنَّ:

$$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J \qquad (19\text{-}1)$$

نفضِّل استخدام وحدة eV/c^2 للكتلة في الفيزياء الميكروسكوبيَّة والتي نحتاج فيها إلى النسبيَّة. في الجدول 1-2 التالي قيمة كتلة السكون لبعض الجسيمات الأوليَّة بهذه الوحدة.

The eV/c^2 Unit وحدة الكتلة : eV/c^2

Particle	Symbol	Mass at rest m_0(Kg)	E_0*	m_0 (in MeV/c^2)
Electron	e	9.092933×10^{-31}	$8.181\ 10^{-14}J \approx 511031eV$ $\approx 511\ KeV = 0.511\ MeV$	
Proton	p	1.672649×10^{-27}	$1.5033168 \times 10^{-10}J$ $\approx 9.3828 \times 10^{8}$ eV 938.28 MeV	938.28
Neutron	n	1.674955×10^{-27}	$1.5074959 \times 10^{-10}J \approx 9395.73118 \times 10^{8}$ eV 939.573 MeV	939.573
Alpha	α	6.644766×10^{-27}	3727.409 3727.409 MeV	

الجدول 1-2 : قيمة كتلة السكون لبعض الجسيمات الأوليَّة.

* Energy corresponding to m_0

مثال 2*: حساب الزيادة في الكتلة لبروتون ذي طاقة حركيَّة K = 500 MeV

إنَّ الطاقة الكليَّة للبروتون هي : $E = mc^2 = K + m_0 c^2$

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

$$(\Delta m) = \frac{K}{c^2} = 500\,MeV/c^2$$

$$\Delta m = (500 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}) / (3 \times 10^8)^2$$

$$\Delta m \approx 0.88 \times 10^{-27}\ kg$$

$$\frac{(\Delta m)}{M_{0_p}} \approx 0.53$$

* انظر المسألة 36 في كتاب Beiser

Next Lecture الحلقة القادمة

الجسيمات عديمة الكتلة

Massless Particles

End of Lecture 3