محاضرات فى

الفيزياء الحديثة

للفرقة الثانية

تربية عام – العلوم البيولوجي والجيولوجي

2023 - 2022

إعداد: أم.د.عماد على احمد

القائم بالتدريس

د. إيمان فؤاد السيد مدرس الفيزياء

جدول المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
الفصل الأول **السلوك الجسيمى للإشعاع الكهرومغناطيسي**	
مقدمة	1
مقدمـــــــة	8
اشعاع الجسم الاسود	11
التاثير الكهروضوئى	18
تأثير كمبتون	20
انتاج الأزواج	
الفصل الثاني **السلوك الموجى للجسيمات**	
الطبيعة الموجية للمادة وموجات "دي برولي"	38
سرعة موجات دي برولي	40
سرعة الموجة وسرعة المجموعة	52
سرعة المجموعة وسرعة الجسيم	
مبدأ عدم التأكد لهايزنبرج	
الطبيعة الموجية للمادة وموجات "دي برولي"	63
الفصل الثالث **النظرية النسبية الخاصة**	
مقدمة	67
اساس النظرية النسبية	72
تحويلات جاليليو	75
تجربة ميكلسون ومورلى.....	78
تمدد الزمن	80
انكماش الطول	
تحويلات لورانتز.....	

الفصل الأول

السلوك الجسيمى للإشعاع الكهرومغناطيسي

- **مقدمـــــــــة:**

عرفت الجسيمات مثل السيارة والالكترون بانها كتل mass وان لحركتها زخما بينما عرفت الامواج مثل الضوء والصوت بانها حركة motion وانها حين تحمل الطاقة فانها تفعل ذلك من خلال الوسط الذى تنتقل فيه (راجع تعريف الحركة الموجيه)، وايضا عرفت الجسيمات بانها عبارة عن مادة اى انها تحتل مكانا صغيرا كان او كبيرا وهذه من اهم الصفات والخواص المميزة للجسيمات بالاضافة الى كونها متجزاة قطعا Discrete وعلى الجانب الاخر فان الامواج عرفت بانها ممتدة اى لا يحصرها مكان ومتصلة Continuous.

ولكن شهدت نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين العديد من الظواهر الفيزيائية التى كشفت عن صفات جسيمية للامواج وصفات موجيه للجسيميات الامر الذى فتح ابوابا جديدة فى علم الفيزياء غيرت الكثير من المفاهيم السابقة وفسرت كثيرا من الامور فى ذلك الحين وايضا وفرت آفاقا

جديدة لتطبيقات عملية كثيرة نتج عنها تنقيات حديثة وفرت الكثير من الوقت والجهد والمال واصبحنا نتعامل بها فى كافة انشطة حياتنا اليومية العصرية مثل اجهزة الحاسب الالى و اجهزة الاتصالات سواء المحمول او التى عبر الاقمار الصناعية بالاضافة الى اجهزة الليزر والمجسات البصرية تحت الحمراء و الفوق بنفسجية وايضا لا ننسى الاجهزة الطبية العظيمة والمتطورة وغيرها الكثير.

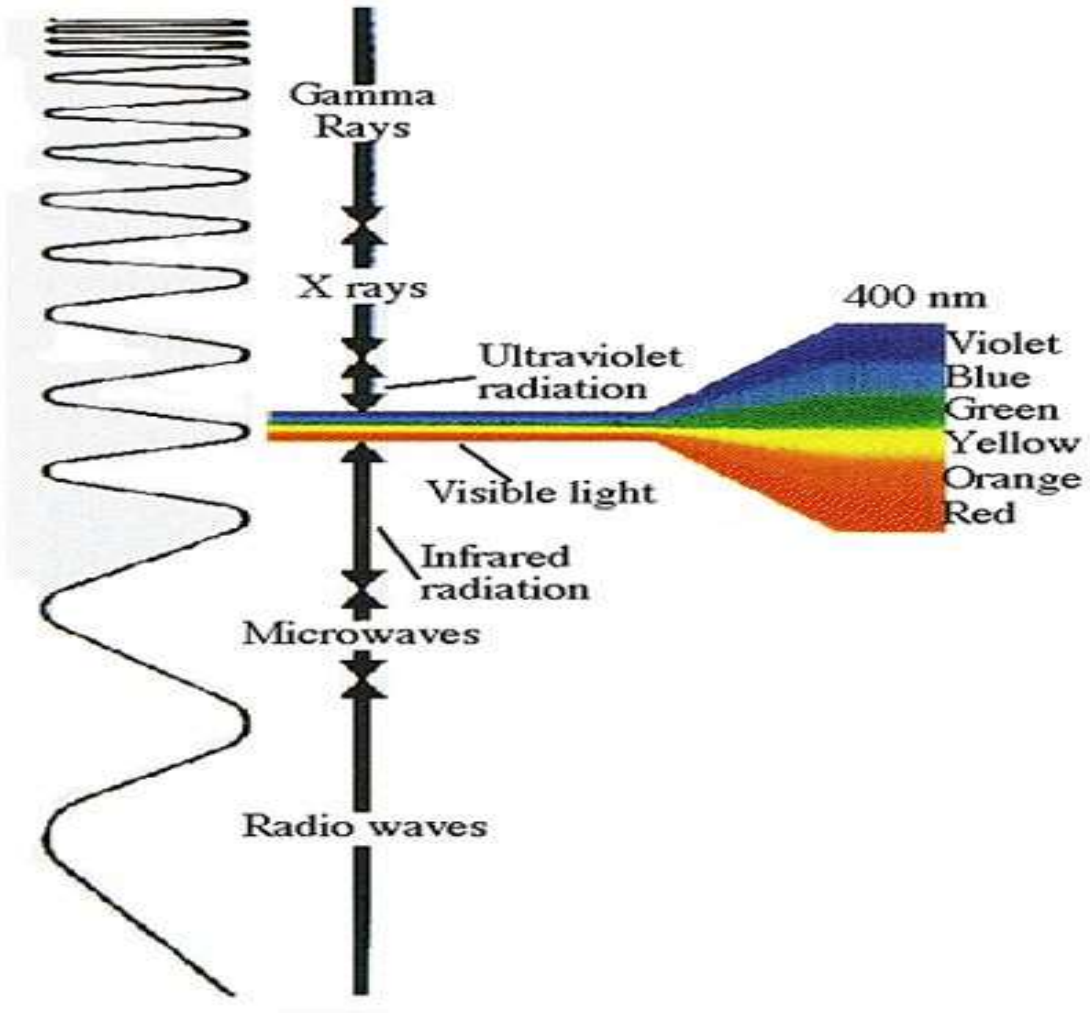
وفيما يلى سوف نتعرف على ثلاث ظواهر اساسية من تلك الظواهر التى تترجم لنا السلوك الجسيمى للموجات هى:

- اشعاع الجسم الاسود Blackbody Radiation
- ظاهرة التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect
- ظاهرة كمبيتون Compton Effect

• اشعاع الجسم الاسود

الاشعاع الكهرومغناطيسى والضوء

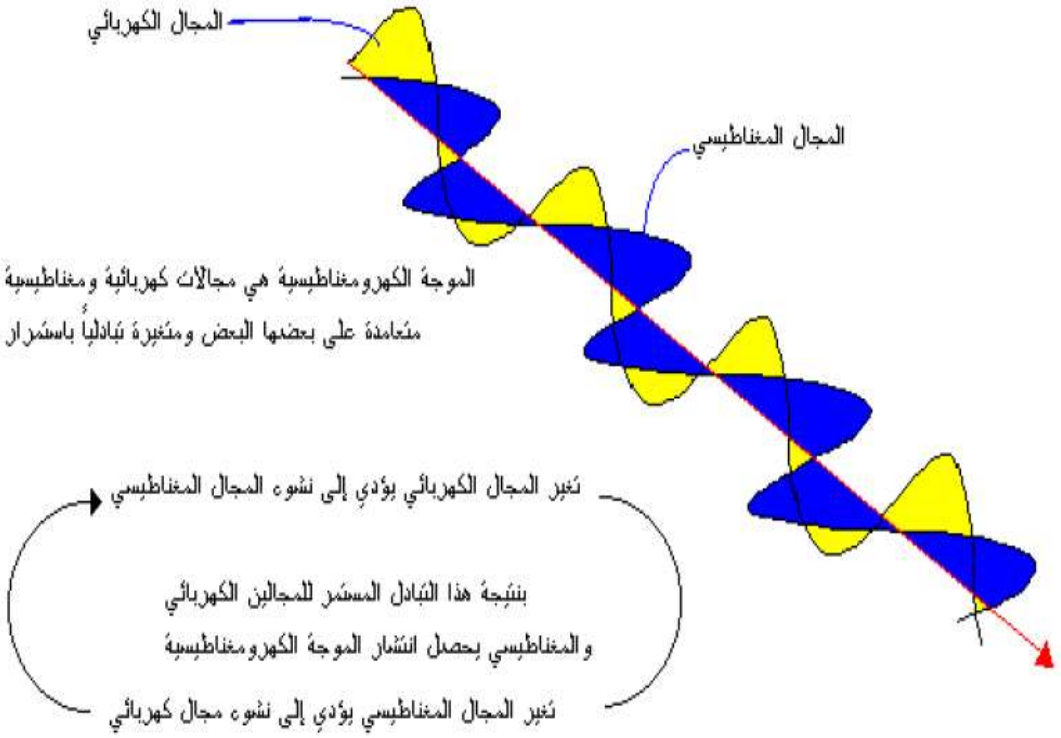
المجال الكهرومغناطيسى هو مجال مكون من تألف مجالين ومغناطيسى معا فى حالة حركية دائمة. وهو خاصية للزمكان تظهر عند توفر الطاقة فيه بانماط معينة. والنمط العام للمجال الكهرومغناطيسى هو النمط الموجى.



فى منتصف القرن التاسع عشر كان عدد من علماء قد تاكدوا من ان الاشعاع الحرارى والضوء ايضا هى امواج صرف وذلك من خلال ما شاهدوه من ظواهر الانكسار والانعكاس والتداخل والحيود. ثم نجح ماكسويل فى الكشف عن حقيقة ان الاشعاعات الحرارية وكذلك الضوء هو امواج كهرومغناطيسية تتالف من تداخل مجالين متغيرين تغير احداهما يسهم فى تكوين الآخر، وهما المجال الكهربائى والمجال المغناطيسى كما بالشكل التالى. وبعملية التغير المستمرة تنتشر الموجه الكهرومغناطيسية خلال الفراغ بسرعة الضوء ومقدارها $3x10^8$ م/ث. وهذه السرعة يمكن كتابتها بالصورة التالية:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

مما يعنى انها صفة للفراغ. وهذا مما يجعلها ثابت كونى مستقلة عن الحالة الحركية للمراجع.



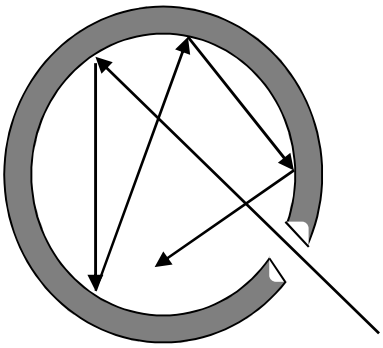
اشعاع الجسم الاسود

من المعروف ان الاجسام عند اى درجة حرارة تنبعث عنها اشعاعات حرارية. هذه الاشعاعات ذات اطوال موجيه تختلف باختلاف درجة حرارة الجسم ففى درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة الغرفة تكون تلك الاشعاعات ذات اطوال موجيه كبيرة اى فى المنطقة تحت الحمراء ولذلك فهى لا ترى بالعين وكلما ارتفعت درجة حرارة الجسم كلما قصر الطول الموجى للاشعة المنبعثة منه لتصبح فى المنطقة المرئية من الطيف وبارتفاع درجة الحرارة يتغير لون الوهج من الاحمر الى الاصفر ويمكن ملاحظة ذلك فى المصباح الكهربى

ذو الفتيلة المصنوعة من التنجستين. وبدراسة الاطياف المنبعثة من الاجسام المتوهجة وجد انها تتكون من أطوال موجيه مختلفة تمتد من الاشعة تحت الحمراء الى المرئية الى فوق البنفسيجيه ولذلك فهى تسمى بالطيف المستمر.

وطبقا للفيزياء الكلاسيكية تنبعث الاشعاعات الحرارية من جسيمات مشحونة متذبذبة قرب سطح الجسم المشع كما يحدث فى هوائيات البث اللاسلكى التى تنبعث عنها الموجات الكهرومغناطيسية كموجات الراديو. وفى نهاية القرن التاسع عشر ثبت ان نظرية الاشعاع الحرارى هذه غير قادرة على تفسير الاطوال الموجيه فى الطيف المستمر الصادر عن الجسم الاسود.

والجسم الاسود هو الجسم الذى يمتص جميع الاشعاعات الساقطة عليه ويمكن تمثيلة بفجوة ذات ثقب ضيق كما هو موضح فى الشكل المقابل:



وطبقا للنظرية الكهرومغناطيسية التى نجحت فى تفسير خصائص الضوء والحرارة فان هنالك شدة الاشعاع الحرارى (وكذلك الضوئى) ينبغى ان تتناسب طرديا مع مربع التردد. وهذا يعنى ان زيادة التردد تؤدى الى زيادة الشدة.

والصيغة هذه كانت تسمى قانون رايلى . جينز وتقضى ان يكون كثافة توزيع الطاقة فى تجويف ذى سطوح عاكسة مثالية عند درجة حرارة T كما يلى:

$$u(v)dv = \frac{8\pi kT}{c^3}v^2 dv$$

حيث ان $k = 1.38x10^{-23}\ J/K$ هو ما يسمى ثابت بولتزمان.

لكن الواقع التجريبى يبين ان هذا غير صحيح اذ ان شدة الاشعاع تتناسب طرديا مع التردد عند الترددات المنخفضة. لكن الحال ينقلب عندما تبلغ الترددات قدرا كبيرا اذ تنخفض الشدة.

بصيغة اخرى فان قانون رايلي وجينز ينص على ان شدة الاشعاع المنبعث لكل وحدة طول موجي تتناسب طردية مع درجة الحرارة (كلفن) وعكسيا مع القوة الرابعة للطول الموجي وياخذ الصورة التالية:

$$I(\lambda,T) = \frac{2\pi\ c\ K\ T}{\lambda^4}$$

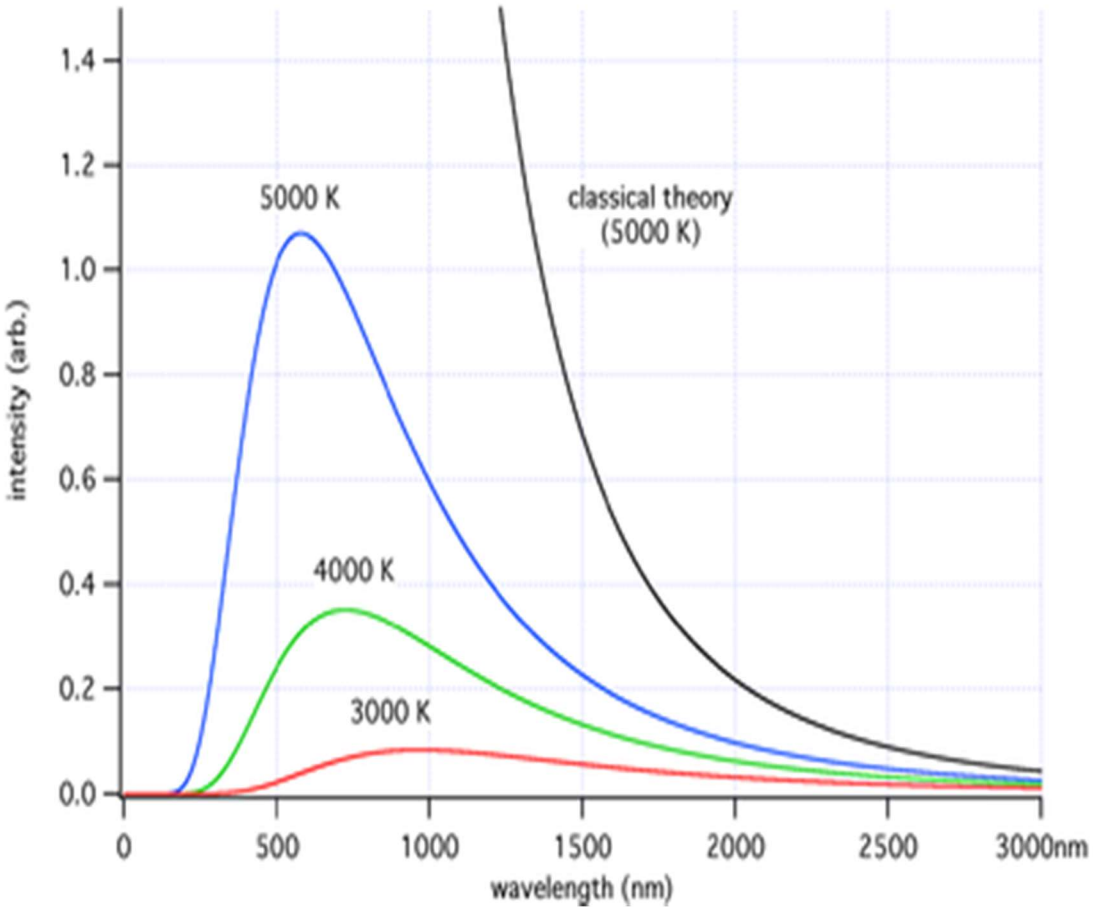
ولقد اعتبر رايلي وجينز ان ذرات الجسم الاسود تعمل كمذبذبات تنبعث عنها اشعاعات كهرومغناطيسية عند جميع الاطوال الموجيه وان الطاقة التى تنبعث عن كل متذبذب تتناسب مع درجة الحرارة. الا ان هذا النموذج تعطى نتائج جيدة عند الاطوال الموجيه الكبيرة وتفشل فى تحقيق النتائج العملية عند الاطوال الموجيه القصيرة كما يتضح فى الشكل التالى. لذا سميت هذه المشكلة الفيزيائية مسألة اشعاع الجسم الاسود. وهذا يتضح من المنحنيات التالية:

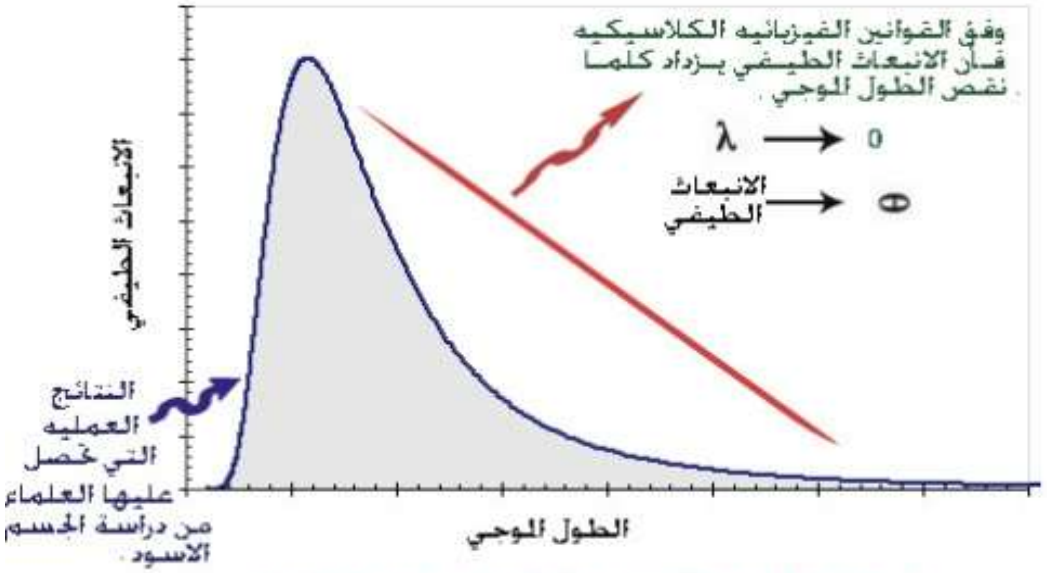
تمثل المنحنيات الطاقة المنبعثة لوحدة المساحات للجسم الأسود عند أطوال موجية مختلفة.

عند كل درجة حرارة هناك قيمة معينة للطول الموجي (قيمة عظمى) تكون عندها الطاقة المنبعثة لوحدة المساحات أكبر مايمكن .(فسر ذلك)

كلما زادت درجة حرارة الجسم فإن قيمة المنحنى تنزاح تدريجياً نحو الطول الموجي الأقل (ماذا يحدث للتردد؟؟) وبالتالي ينتقل الإشعاع تدريجياً إلى منطقة الطيف المرئي .

بزيادة درجة الحرارة تزداد المساحة تحت المنحنى (ماذا يحدث للطاقة ؟؟)





يمثل هذا الشكل العلاقه بين الطول الموجي والانبعاث الطيفي وفق القوانين الفيزيائيه الكلاسيكيه والنتائج العمليه التي تحصل عليها العلماء .

و قبل ذلك توصل العالم النمساوي ستيفان عام 1879م إلى ان الطاقة الاشعاعية الكلية المنبعثه عن أي جسم, تتناسب طردياً مع القوه الرابعة لدرجة حرارته المطلقة. وكان هذا الاستنتاج مبنياً على ما توصل اليه العالم تندال (Tyndal) إذ تمكن من قياس معدل إنبعاث الحرارة بالاشعاع من سلك ساخن من البلاتين. وبعد ذلك تمكن العالم بولتزمان من إثبات قانون ستيفان نظريا, فسمي القانون بقانون ستيفان – بولتزمان, فقد توصلا الى أن الطاقة الكلية التي تصدر عن الجسم تعطى بالعلاقة:

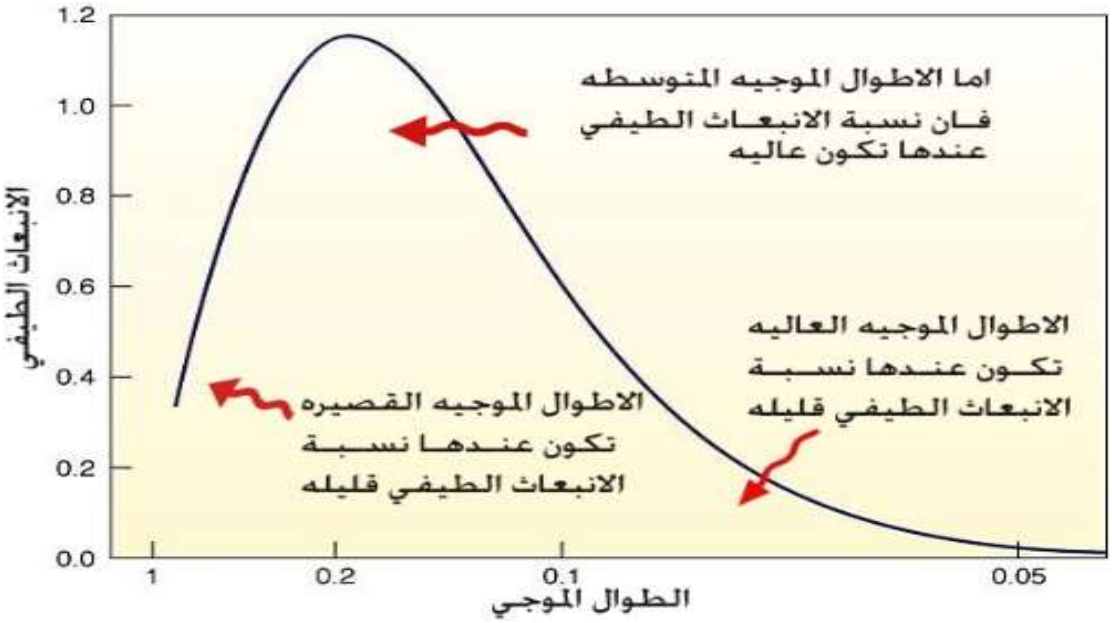
$$E(T) = \sigma T^4$$

حيث σ هو ثابت ستيفان بولتزمان $\sigma = 5.667x10^{-8}\ {}^{w}\!/_{m^2k^4}$

ويتضح ان هذا الثابت هو ثابت عام اى لا يعتمد على المادة أو طبيعتها أو شكلها.

وبقيت الامور على هذا الحال وبقيت هذه المشكله الى ان جاء المنقذ والباحث الذي فك رموز القضيه العالم بلانك عام 1900 وهز الاوساط العلميه, وغير نظرات العلماء, وحرر عقولهم من النظريات الفيزيائيه الجامده حيث قال بان الطاقات الضوئيه غير متصله ولكنها تتكون من اكمام. فاوجد بلانك مبدأ في غاية الاهميه في الفيزياء الحديثه, الا وهو مبدأ تكميم الاشعاع. اي ان طاقة الاشعاع تاخذ قيماً محدده ولا تاخذ قيماً عشوائيه.

وبتوضيح اكثر قال بلانك ان طاقة الاشعاع تاخذ قيماً محدده وانه عند الاطوال الموجيه العاليه تكون هنالك نسبه متدنيه لها قيماً متدنيه من الطاقه وكذلك عند الاطوال الموجيه القليله تكون نسبة الطاقات المنخفضه قليله, لكن عند الاطوال الموجيه المتوسطه تكون هنالك اعلى نسبه من الطاقات. كما في الشكل التالى:



وقد وضع بلانك معادلة لاشعاع الجسم الاسود فسرت تماما نتائج التجارب العملية عند جميع الاطوال الموجيه كما يتضح من الشكل التالى وقانون بلانك لاشعاع الجسم الاسود هو:

$$I(\lambda,T)=\frac{2\pi\, h\, C^2}{\lambda^5\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1\right)}$$

حيث h ثابت يسمى ثابت بلانك $h=6.626\,x\,10^{-34}\ \ J.S.$

وفى هذه النظرية وضع ماكس بلانك فرضين اساسين هما:

<u>الفرض الاول:</u> لكل من الجزئيات المتذبذبة التى ينبعث عنها الاشعاع عدد من وحدات الطاقة المنفصلة E_n تعطى بالعلاقة الاتية:

$$E_n=n\,h\,v$$

حيث n عدد صحيح يسمى العدد الكمى، ν تردد الجزىء المتذبذب، E_n طاقة الحزىء وهى طاقة مكماع وهذا يعنى انها مضاعفات لكمية محدودة.

<u>الفرض الثانى:</u> الجزئيات المتذبذبة تمتص او تنبعث منها الطاقة على هيئة كمات منفصلة بكل منها قدر من الطاقة وهذه الكمات تسمى فوتونات وانبعاث او امتصاص تلك الكمات ينتج عن انتقال الجزئيات المتذبذبة من احد الحالات المكماه الى اخرى. فاذا تغير العدد الكمى n بمقدار واحد صحيح فان كمية الطاقة التى يمتصها او يشعها الجزىء المتذبذب تساوى $h\nu$ كما هو واضح من المعادلة السابقة اى ان طاقة الفوتون الناتجة عن انتقال الجزىء من حالة مكماه الى الحالة التى تليها تعطى بالعلاقة:

$$E = h\nu$$

والجزئيات تمتص او تبعث طاقة على شكل فوتونات او كمات عندما تنتقل من حالة مكماه الى اخرى فقط. وذا ما ظلت فى حالتها المكماه فانها لا تفقد و لا تكتسب اى قد من الطاقة.

لعل اهم ما اضافة بلانك للفيزياء بصفة عامة ولفيزياء الجسيمات الميكروسكوبية بصفة خاصة هو افتراضه لوجود حالات الطاقة المكماه التى يمكن للجزىء ان يتذبذب بينها فهو محكوم بهذه المستويات او الحالات كما ان الطاقة عندما تنبعث او تمتص بواسطة تلك الجسيمات او الجزئيات فانها تنبعث او تمتص على شكل كمات او فوتونات ذات طاقة محددة يعتمد مقدارها على تردد الفوتون او الكم كما اضاف ثابتا جديدا لم يكن معروفا من قبل هو ثابت بلانك h وهذه المفاهيم الجديدة كان لها اكبر الاثر على تطور الفيزياء الحديثة مع بداية القرن العشرين.

مثال: احسب الطاقة لفوتون تردده $v = 6\,x\,10^{14}\ \ Hz$ وهو فى المنطقة الزرقاء من الطيف المرئى، ثم احسب الطول الموجى لهذا الاشعاع؟

$$E = h\,v = 3.98x10^{-19}\ \ J\ =\ 2.45\ \ eV$$

اما الطول الموجى فيحسب من العلاقة التالية:

$$\because\quad C = \lambda v$$

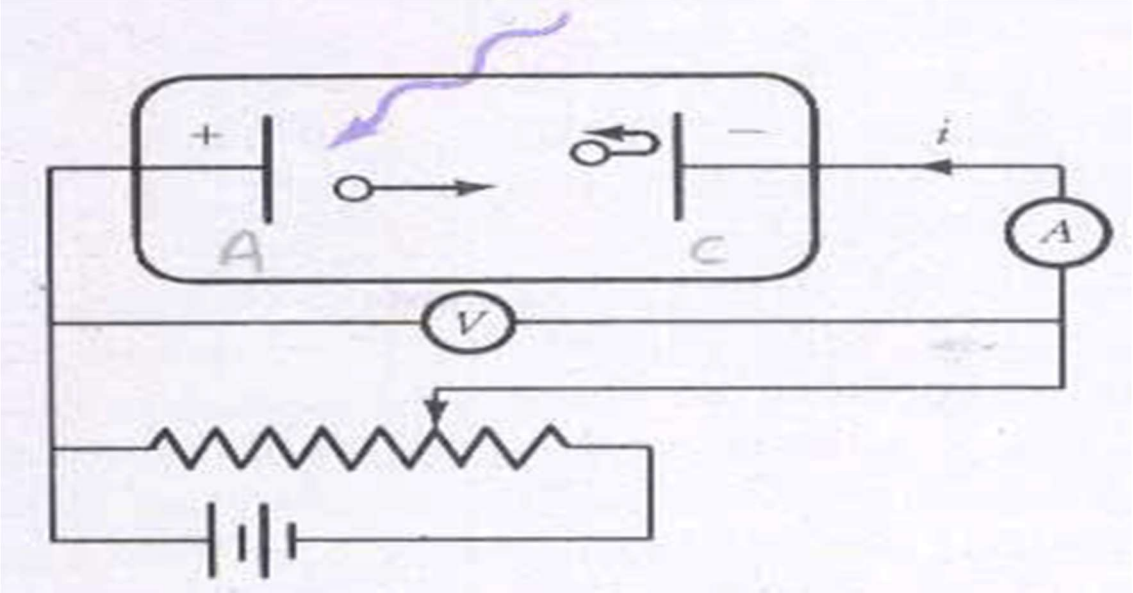
$$\therefore\quad \lambda = \frac{C}{v} = 500\ nm$$

• التاثير الكهروضوئى

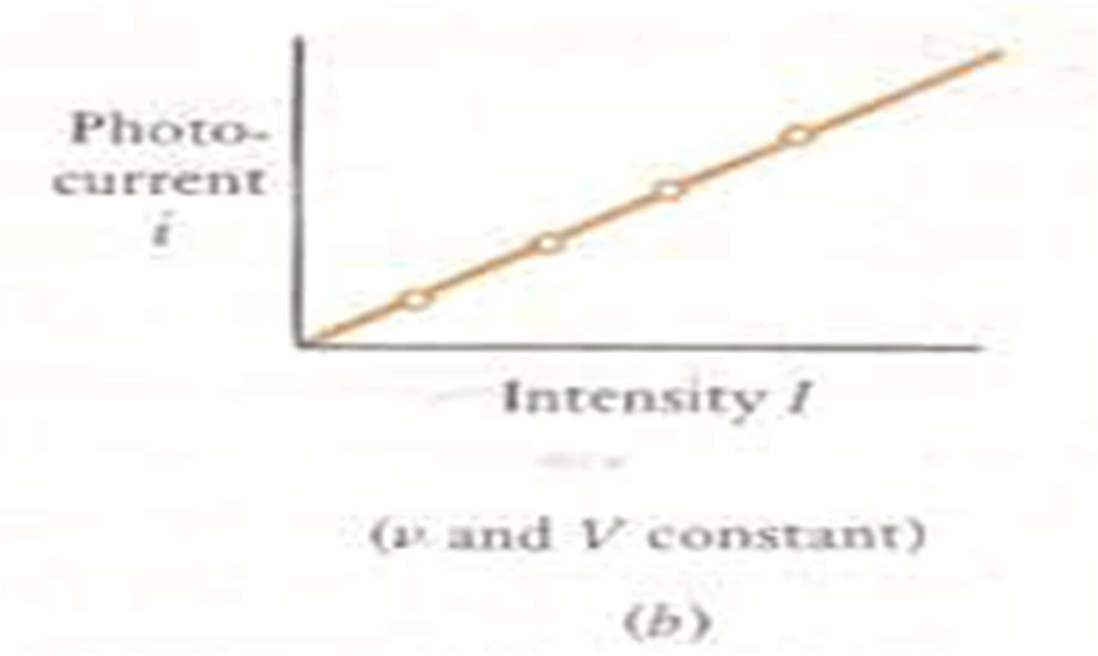
الظاهرة الكهروضوئية هي عملية انبعاث الإلكترونات من أسطح المعادن، مثل الليثيوم والسيزيوم ، عندما يسقط عليها إشعاع كهرومغناطيسي (عادة أشعة مرئية أو فوق بنفسجية) ذي طول موجي مناسب. ولتفسير ما يحدث هو أن جزء من طاقة الشعاع الكهرومغناطيسي يمتصها الإلكترون المرتبط بالمعدن فيتحرر منه ويكتسب طاقة حركة. ونتيجة لتحرر هذه الالكترونات يتولد تيار ويسمى بالتيار الكهروضوئي. وتعتمد هذه العملية على العديد من المتغيرات وهي:

- تردد الشعاع الكهرومغناطيسي
- شدة الشعاع الكهرومغناطيسي
- التيار الكهروضوئي الناتج
- طاقة حركة الإلكترون المتحرر من سطح المعدن
- نوع المعدن

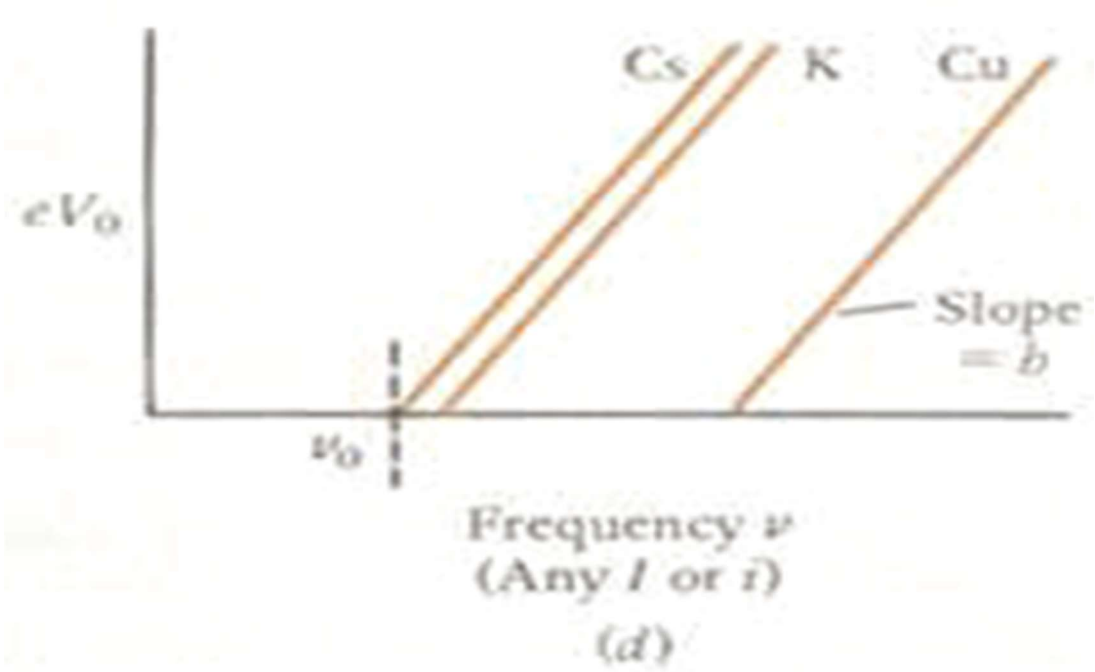
ولفهم تأثير العوامل السابقة الذكر على التيار الكهروضوئي، نستخدم الدائرة الكهربية الموّضحة في الشكل أدناه.



في الشكل أعلاه يمثل اللوح A الأنود والذي يسقط علية الشعاع الكهرومغناطيسي، واللوح C يُمثل الكاثود الذي تتجمع فيه الإلكترونات المتحررة من السطح A. لقد وُجد من هذه التجربة أن شدة التيار الكهروضوئي الناتج يتناسب طردياً مع المعّدل الزمني لانبعاث الإلكترونات الضوئية وذلك عند ثبوت التردد وفرق الجهد بين اللوحين، وبمعنى أخر، أن التيار الكهروضوئي يزداد بزيادة شدة الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة على الأنود، كما هو موّضح في الشكل التالي.



أما إذا ثبتنا تردد الأشعة الساقطة وشدتها، فإن التيار الكهروضوئي يقل بزيادة فرق الجهد المطبّق بين اللوحين، حتى تصل قيمته إلى الصفر. وعندها تكون قيمة فرق الجهد هي V_0 والتي تُسمى بجهد الإيقاف (stopping potential). ولا يعتمد جهد الإيقاف على شدة الأشعة الكهرومغناطيسية، بل يعتمد على ترددها وتختلف باختلاف المعدن، كما هو موّضح في الشكل أدناه.



تجدر الإشارة هنا أن أدني تردد (ν_0) مطلوب لانبعاث الإلكترونات من السطح المعدني يُسمى بتردد العتبة (threshold frequency) ولا يمكن أن نحصل على تيار كهروضوئي إلا إذا كان تردد الأشعة الكهرومغناطيسية أكبر من تردد العتبة. بالإضافة إلى ذلك، وّجد أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة من أي سطح معدني تتناسب طردياً مع تردد الأشعة الساقطة عليها، أي أن:

$$\frac{1}{2} m \, \mathrm{v}_{\max}^{2} = e V_0 = h\nu - h\nu_0$$

حيث أن V_{max} هي السرعة القصوى للإلكترونات المتحررة، وهي غير متساوية بالنسبة للإلكترونات ولا تتوقف على شدة الضوء الساقط، و h هو ثابت بلانك ويُمثل ميل المنحنى وهو ثابت لكل المعادن.

لم يتمكن العلماء من إيجاد تفسير لنتائج التجارب العملية للظاهرة الكهروضوئية إلا بعد أن قام العالم ألبرت آينشتاين في عام 1905م بتطبيق نظرية الكم على الإشعاع الكهرومغناطيسي. فطبقاً لنظرية الكم إن الأشعة الكهرومغناطيسية التي تعاملنا معها في الفيزياء الكلاسيكية على إنها موجات تنتشر في الفراغ، تصبح في نظرية الكم جسيمات تسمى الفوتونات (photons) كل فوتون يحمل طاقة E تعتمد على تردده من خلال المعادلة التالية:

$$E = h\nu$$

حيث $h = 6.63 \times 10^{-34}\ J.s$ هو ثابت بلانك.

من وجهة نظر ميكانيكا الكم، يحتوي الشعاع الضوئي ذو التردد ν على عدد من الفوتونات طاقة كل فوتون $h\nu$. ويصطدم كل فوتون مع إلكترون واحد

مرتبط بسطح المعدن، فإذا كانت طاقة الفوتون أكبر من طاقة ربط الإلكترون بالمعدن فإن الفوتون يُحرر الإلكترون من سطح المعدن، وتتحول بقية طاقة الفوتون إلى الإلكترون المتحرر على صورة طاقة حركة (kinetic energy) تمكنه من الوصول إلى الكاثود. ونكتب معادلة حفظ الطاقة علي الصورة التالية

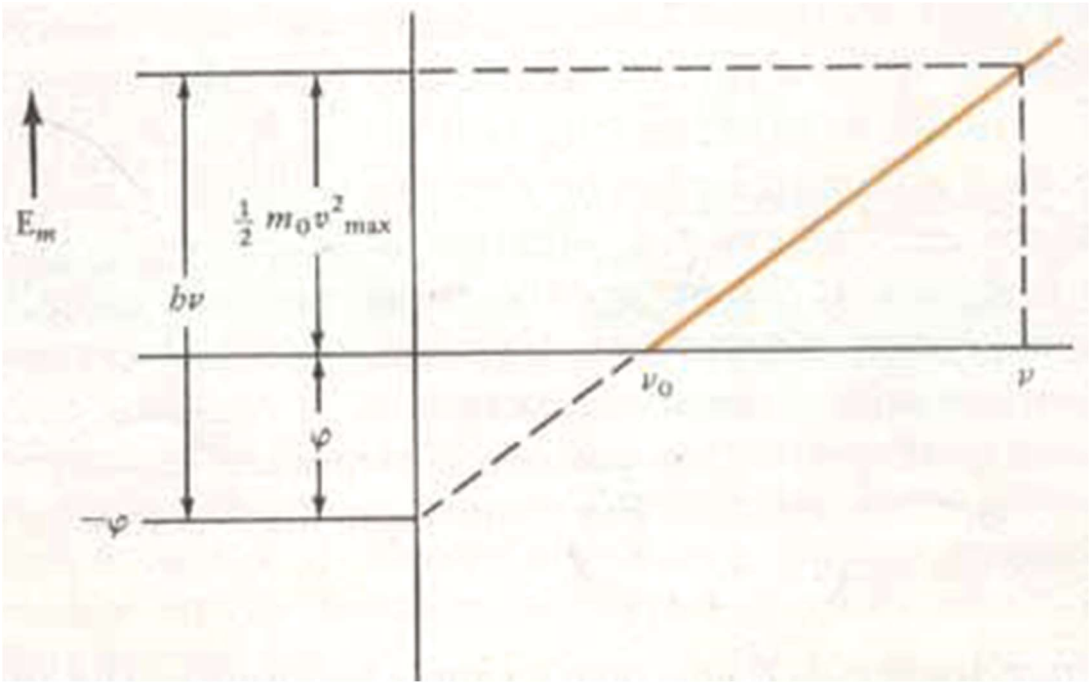
$$h\nu = \frac{1}{2} m \mathbf{v}_{\mathbf{max}}^{\mathbf{2}} + h\nu_0$$

حيث يمثل الطرف الأيسر من المعادلة الطاقة التي يحملها الفوتون الساقط على سطح المعدن والتي يكتسبها الإلكترون المرتبط بسطح المعدن. يتحرر الإلكترون الأقل ارتباطاً بسطح المعدن مكتسباً طاقة حركية أما الطرف الأيمن من المعادلة يعطي طاقة الإلكترون التي يكتسبها من الفوتون على صورة طاقة حركية وطاقة ربط. ويعبر عن طاقة ربط الإلكترون بسطح المعدن بالرمز $\phi_0 = h\nu_0$ والذي يعرف على انه دالة الشغل (work function) والتي تُعّرف على إنها مقدار الشغل اللازم بذله لتحرير الإلكترون الأقل إرتباطا

بسطح المعدن. وتعتمد دالة الشغل على نوع المعدن المستخدم. ويمكن كتابة المعادلة السابقة على الصورة التالية

$$h\nu = \frac{1}{2} m \mathrm{v}_{\max}^2 + \phi_0$$

نلاحظ من هذه المعادلة إن طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية يجب أن تكون أكبر من دالة الشغل للحصول على تيار كهربي. إذا رسمنا التردد مع طاقة حركة الإلكترون، نجد أن المعادلة أعلاه هي معادلة خط مستقيم، كما هو موّضح في الشكل التالي:



مثال : إشعاع تردده ($f = 5\times10^{14}\,Hz$) ، باعتبار أن ثابت بلانك ($h = 6.6\times10^{-34}\,J.S$) احسب طاقة الفوتون لهذا الإشعاع .

الحل :

$$E = hf = 6.6\times10^{-34}\times5\times10^{14} = 3.3\times10^{-19}\,J$$

مثال : إشعاع طول موجته ($\lambda = 6000\ A^{\circ}$) ، باعتبار أن ثابت بلانك ($h = 6.6\times10^{-34}\,J.S$)، وأن سرعة الضوء ($C = 3\times10^{8}\,m/s$)، احسب طاقة الفوتون لهذا الإشعاع. ($1\ A^{\circ} = 10^{-10}\,m$)

الحل :

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}}{6000\times10^{-10}} = 5\times10^{14}\,Hz$$

$$E = hf = 6.6\times10^{-34}\times5\times10^{14} = 3.3\times10^{-19}\,J$$

تمرين : سقط إشعاع طول موجته ($4500\,A^{\circ}$) على سطح كاثود خلية كهروضوئية دالة الشغل له ($1.5\ eV$)، باعتبار أن ثابت بلانك ($h = 6.6\times10^{-34}\,J.S$) وسرعة الضوء ($C = 3\times10^{8}\,m/s$) وشحنة الإلكترون

$(q_e = 1.6\times10^{-19}C)$ وكتلته $(m_e = 9.1\times10^{-31}kg)$ و $(1A^0 = 10^{-10}m)$

احسب:

1- تردد فوتون الإشعاع الساقط .

2- طاقة فوتونات الإشعاع الساقط .

3- طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المتحررة.

4- السرعة القصوى للإلكترونات الضوئية المتحررة.

5- تردد العتبة.

6- طول موجة تردد العتبة.

مناقشات حول الظاهرة الكهروضوئية

- يعتمد مقدار التيار على

1- تردد الضوء الساقط

2- شدة الضوء الساقط

3- فرق الجهد بين المهبط والمصعد

- نتائج تجربة التاثير الكهروضوئي

1. عند سقوط شعاع ضوئي على السطح الفلزي تنبعث منه الكترونات في فترة زمنية قليلة جدا حتى لو كانت شدة الضوء ضعيفة

2. عند ثبوت تردد الضوء وفرق الجهد فان شدة التيار تتناسب مع شدة الضوء الساقط
3. عند ثبوت شدة الضوء وزيادة الجهد الموجب للمصعد تزداد شدة التيار الى ان تصل الى قيمة ثابته (تيار الاشباع)
4. اذا اصبح جهد المصعد سالبا والمهبط موجبا وعند ثبات التردد وشدة الضوء وبزيادة الجهد السالب فان قيمة التيار لا تصل الى الصفر مباشرة ولكن عند قيمة محددة (جهد الايقاف)
5. جهد الايقاف لا يعتمد على شدة الضوء الساقط وانما على تردد الضوء
6. لكل فلز تردد خاص ويجب ان يزيد التردد عن هذه القيمة حتى تنبعث الالكترونات (تردد العتبه)
7. الطاقة الحركية للالكترونات تتناسب طرديا مع جهد الايقاف ولا تكون متساوية ولا تعتمد على شدة الضوء الساقط

ملاحظة : عند سقوط الضوء يقوم كل فوتون باعطاء طاقته لالكترون واحد فقط

- علل :

1. سرعة الالكترونات لا تكون متساوية : بسبب حدوث الظاهرة الكهروضوئية على اعماق مختلفة من سطح الفلز وضياع جزء من طاقة الحركة اثناء التصادم

2. لا تعتمد سرعة الالكترونات على شدة الضوء الساقط لان زيادة شدة الضوء الساقط يزيد عدد الالكترونات حيث ان كل فوتون يعطي طاقته لالكترون واحد فقط

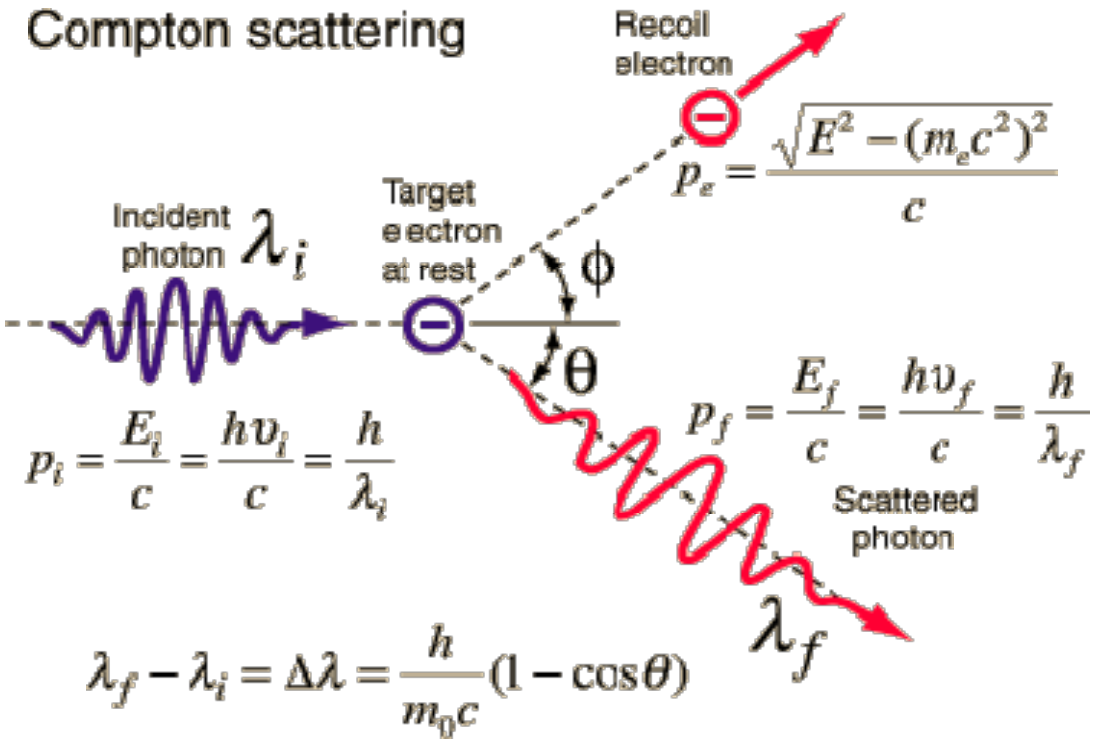
مقارنه بين التفسير الكلاسيكي والتفسير الكمي للظاهرة الكهروضوئية

وجه المقارنة	التفيسر الكلاسيكي	التفسير الكمي
تاثير شدة الضوء	زيادة شدة الضوء يزيد من طاقة حركة الالكترونات	شدة الضوء لا تغير الطاقة الحركية فالطاقة الحركية تعتمد على جهد الايقاف الذي لا يعتمد على شدة الضوء الساقط
التردد	الظاهرة الكهروضوئية تحصل عند أي تردد ويمكن تجميع الطاقة الى ان يتمكن الالكترون من التحرر ومغادرة السطح	بما ان الضوء عبارة عن كمات فان الالكترون لا يتحرر الا اذا وصل تردد الضوء الساقط الى الحد المطلوب
زمن تحرير الالكترونات	الالكترون ينغمس في الموجة ويمتص الطاقة تدريجيا فاذا كانت شدة الضوء قليلة اخذ فترة طويلة	الزمن اللازم هز زمن تصادم الفوتون بالالكترون حتى لو كانت شدة الضوء قليلة

• تأثير كمبتون

فى عام 1922م اجرى آثر كمبتون تجربة على تشتت الاشعة السينية X– Ray بواسطة الالكترونات فى هدف من الجرافيت كما بالشكل التالى. ومن الناحية العملية اعتبرت هذه التجربة نصرا كبيرا للنظرية الفوتونية للضوء كما اكدت ان الفوتون كمية حركة P وطاقة كما اكدت ان النظرية الفوتونية ليست صحيحة فقط فى حالة الضوء المرئى والاشعة فوق البنفسجية بل صحيحة ايضا فى حالة الاشعة السينية.

حيث اسقط كمبتون شعاع من مصدر للاشعة السينية طوله الموجى λ على هدف من الجرافيت كما بالشكل وقاس العلاقة بين شدة الاشعة المستطارة من الهدف فى زوايا مختلفة وطولها الموجى. لم يتمكن كمبتون من تفسير النتائج التى حصل عليها باستخدام النظرية الموجيه للضوء، فطبقا لهذه النظرية الاشعة الكهرومغناطيسية التى ترددها v_0 عندما تسقط على مادة فان الالكترونات الموجودة فى الهدف الساقط عليه تلك الاشعة تتذبذب بنفس التردد. اى ان الشعاع المستطار يجب ان يكون له نفس التردد والطول الموجى للشعاع الساقط وهوما لم يحدث فى هذه التجربة.



حاول كمبتون تفسير نتائج تجربتة على اساس النظرية الفوتونية للضوء فاعتبر ان الشعاع الساقط على الهدف T يتكون من فوتونات لها طاقة E = hυ وكمية حركة $P = \frac{h}{\lambda}$ وعندما يسقط الفوتون على الالكترون فى الهدف يتصادم معه كما يحدث بين كرتى بلياردو كما هو موضح بالشكل ويتم التصادم بين كل فوتون والكترون واحد وهكذا مع باقى الفوتونات الساقطة والكترونات الهدف T . وحيث ان الالكترون يكتسب جزئا من طاقة الفوتون على شكل طاقة حركية فان الفوتون المستطار بعد التصادم تكون طاقتة اقل من الفوتون الساقط. نفرض انها اصبحت E\ ومن ثم يتغير تردد الفوتون

المستطار ويصبح $v^{\backslash}$ وبالتالى يزداد طوله الموجى الى $\lambda^{\backslash}$ وهو ما يحدث تماما فى تجربة كمبتون.

استخدم كمبتون فى تجربتة اسبكترو متر كما هو موضح فى الشكل التالى لدراسة العلاقة بين شدة الاشعة السينية المستطارة بواسطة الكترونات الهدف المصنوع من الجرافيت وطولها الموجى وذلك عند زوايا استطارة مختلفة مختلفة. ولقياس شدة الاشعة المستطارة غرفة تاين وكان الطول الموجى للشعاع الساقط من جهاز توليد الاشعة السينية $\lambda_0 = 0.075\ \text{nm}$ والمنحنيات كما فى الشكل تبين العلاقة بين شدة الاشعة المستطاره والطول الموجى عند 90 ، 135 وزاوية الصفر. وفى كل من تلك المنحنيات توجد قمتان لشدة الاشعة المستطارة احدهما عند λ_0 والاخرى $\lambda^{\backslash}$ والقمة التى عند λ_0 قد حدثت نتيجة لاستطارة الاشعة السينية بواسطة الكترونات متماسكة داخل عنصر الجرافيت فلم تتغير طاقتها اما القمة المزاحه عند $\lambda^{\backslash}$ فقد نتجت عند استطارة الاشعة بواسطة الكترونات طليقة فى عنصر الكربون ومن ثم اكتسبت تلك الالكترونات طاقة حركة من الفوتونات الساقطة عليها فقللت من طاقتها وبالتالى تغير ترددها وطولها الموجى.

جد كمبتون ان الفرق بين القمتين $(\lambda^{\backslash} - \lambda_0)$ يتغير بتغير زاوية الاستطارة (θ) ومن ثم استنبط العلاقة التالية:

$$\lambda^{\backslash} - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

وهذه المعادلة تسمى معادلة الازاحة لكمبتون وفيها m هى كتلة الالكترون الذى احدث الاستطارة والمقدار $\frac{h}{mc}$ يسمى طول موجه كمبتون λc وقيمتها هى

$$\lambda c = \frac{h}{mc} = 0.00243\ nm$$

الفصل الثاني

السلوك الموجى للجسيمات

• الطبيعة الموجية للمادة وموجات "دي برولي"

في سبيل تفسير نتائج العديد من التجارب العملية التي تتضمن التفاعل بين الطاقة الإشعاعية (الموجات الكهرومغناطيسية / الإشعاع) والمادة، كإشعاع الجسم الأسود – التأثير الكهروضوئي – ظاهرة كومبتون، كان من الضروري إعطاء الطاقة الإشعاعية بعض الخواص المميزة للجسيمات أكثر من تلك المميزة للموجات.

فمن المعروف أن كمية الطاقة لهكذا جسيم من الطاقة الإشعاعية (فوتون) تعطى من العلاقة:

$$E = h\upsilon$$

حيث h ثابت "بلانك Plank"، و υ تردد الإشعاع، هذا التردد υ عادةً ما يحسب من قياسات الطول الموجي λ للإشعاع باستخدام العلاقة:

$$\upsilon = \frac{c}{\lambda}$$

حيث c سرعة الضوء، والطول الموجي λ يحسب فقط من بعض التجارب التي تتضمن التداخل والحيود وهي الظواهر المميزة للموجات.

وعلى الرغم من الحقيقة القائلة بأن "الإشعاع يمتلك الطبيعة المزدوجة، فإنه لا يُظهر أبداً كلا الصفتين في تجربة واحدة"، أي أنه في تجربةٍ ما معينة يتصرف كجسيم أو كموجة.

وبحلول العام 1920 أصبحت فكرة ثنائية الموجات الكهرومغناطيسية مقبولة لدى العلماء بالرغم من عدم وضوحها، واستمروا في جمع المعلومات التجريبية واعتادوا على تفسير الظواهر إما باستعمال الصفة الموجية أو الصفة الجسيمية للضوء (الموجات الكهرومغناطيسية).

وفي العام 1924 تقدم العالم الفيزيائي الفرنسي "لويس دي برولي Louis de Broglie" في أطروحته لنيل درجة الدكتوراه من جامعة باريس، وفيها إقترح إقتراحاً مفاده "أنه طالما أن الضوء (الموجات الكهرومغناطيسية) يتصرف تصرفاً مزدوجاً وله صفة موجية وأخرى جسيمية، فربما تكون للمادة أيضاً طبيعة موجية بالإضافة لطبيعتها الجسيمية".

ولقد كانت فكرته في ذلك الوقت مخالفة للمفاهيم السائدة ولم يكن لها أي مبرر تجريبي، وبمرور مدة لا تتجاوز الثلاث سنوات أصبح لها مكانة هامة في أوساط العلماء وكان لها دور هام في تطوير ميكانيكا الكم.

فطبقاً لفرضية "دي برولي" فإن الطبيعة المزدوجة يجب أن لا تقتصر على الإشعاع وحده، بل تشمل كل المكونات الأساسية للمادة وعليه، فإن الإلكترونات، البروتونات، الذرات والجزيئات يجب أن تُظهر نوعاً من الحركة الموجية مصاحبة لهم.

هذا، وقد استعمل "دي برولي" في فرضيته نتائج كلاً من النظرية النسبية الخاصة وميكانيكا الكم، فمن النسبية نجد أن طاقة الفوتون هي:

$$E = cP \quad \Rightarrow \quad P = \frac{E}{c} \qquad (1)$$

حيث P كمية حركة الفوتون، ولكن طاقة هذا الفوتون تعطى في ميكانيكا الكم من العلاقة:

$$E = h\upsilon \quad : \quad \upsilon = \frac{c}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad E = \frac{hc}{\lambda} \qquad (2)$$

وبالتعويض في (1)، نحصل على:

$$P = \frac{hc}{\lambda c} \Rightarrow \boxed{P = \frac{h}{\lambda}} \Leftrightarrow \boxed{\lambda = \frac{h}{P}} \quad (3)$$

لذلك، وحسب إقتراح "دي برولي" فإن الجسيمات المادية التي لها كمية حركة P يمكن أن يكون لها خاصية موجية وأطوال موجية خاصة بها.

ولكن كمية الحركة لجسيم كتلته m يتحرك بسرعة v هي: $P = mv$

وعليه يكون طول الموجة الخاص به والمصاحب له هو:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{mv}} \quad (3`)$$

وهنا يُعرف طول الموجة λ بـ "طول موجة "دي برولي" للجسيم "

ومن المناسب في كثير من الأحيان كتابة هذه العلاقة بدلالة طاقة الحركة T للجسيم، على النحو التالي:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \qquad T = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{P^2}{2m} \qquad P = \sqrt{2mT}$$

إذاً:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mT}}} \quad (3``)$$

ولجسيم مثل الإلكترون يكتسب سرعته v تحت تأثير فرق جهد مقداره V ، تكون طاقة حركته هي:

$$T = eV \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}}} \quad (3```)$$

ولقد كانت تجربة "دافيسون وجرمر Davison and Germer" أول تأكيد لهذه الفرضية، حيث لاحظ هذان العالمان أن توجيه حزمة متوازية من الإلكترونات أحادية الطاقة على بلورة نيكل، يؤدي إلى تكون نهايات عظمى وصغرى للإلكترونات المتشتتة ويتشكل مخطط حيود pattern diffraction مشابه تماماً لحيود الإشعة السينية X-rays .

● سرعة موجات دي برولي

إن سرعة موجات "دي برولي" المصاحبة لحركة الجسيم ليست بالضرورة مساوية لسرعة الجسيم نفسه، حيث يمكن إيجاد العلاقة بين السرعتين بسهولة على النحو التالي:

فبفرض أن λ هو طول موجة "دي برولي" المصاحبة، و υ هي التردد فإن سرعة الموجة w هي:

$$w = \lambda \upsilon$$

وطاقتها الكلية هي:

$$E = h\upsilon \quad \Rightarrow \quad w = \lambda\omega = \lambda\frac{E}{h} = E\frac{\lambda}{h} = \frac{E}{P} = \frac{E}{mv}$$

حيث P هي كمية حركة الجسيم المتحرك بسرعة v ، ولكن من النسبية تكون طاقته الكلية هي:

$$E = mc^2$$

وعليه:

$$w = \frac{mc^2}{mv} \qquad \boxed{w = \frac{c^2}{v}} \qquad (4)$$

وحيث أن السرعة v لأي جسيم مادي دائماً أصغر من السرعة c ، فإن سرعة موجة "دي برولي" المصاحبة له يجب أن تكون أكبر من سرعة الضوء وهذا غير ممكن.

أي أن هذا الجسيم لا يستطيع اللحاق بموجته المصاحبة له، لذلك افترض أن الموجات المادية المصاحبة للجسيم تكون عبارة عن مجموعة من الموجات group of waves وكل موجة في هذه المجموعة تختلف عن الأخرى في التردد والطول الموجي بمقدار صغير، ولذلك ستختلف سرعة إنتشار "المجموعة" التي تتكون من مجموع الموجات المختلفة عن سرعة كل موجة على حدة وستظهر على شكل "حزمة أو نبضة wave packet" تنطلق بنفس سرعة الجسيم.

هذا، وتختلف سرعة موجات "دي برولي" عن الموجات الكهرومغناطيسية (الضوء) في أمر هام جداً وهو أن سرعة موجة "دي برولي" دالة في الطول الموجي حتى في الفراغ (الخالي من المادة). ويمكن إثبات ذلك ما يلي:

حيث:

$$w = \frac{E}{P} \qquad \Rightarrow \qquad w^2 = \frac{E^2}{P^2}$$

ولكن من النسبية يمكن أن تعطى الطاقة الكلية من العلاقة:

$$E^2 = c^2P^2 + m_o{}^2c^4$$

وعليه:

$$w^2 = \frac{c^2P^2 + m_o{}^2c^4}{P^2} = c^2 + \frac{m_o{}^2c^4}{P^2} = c^2\left(1 + \frac{m_o{}^2c^2}{P^2}\right)$$

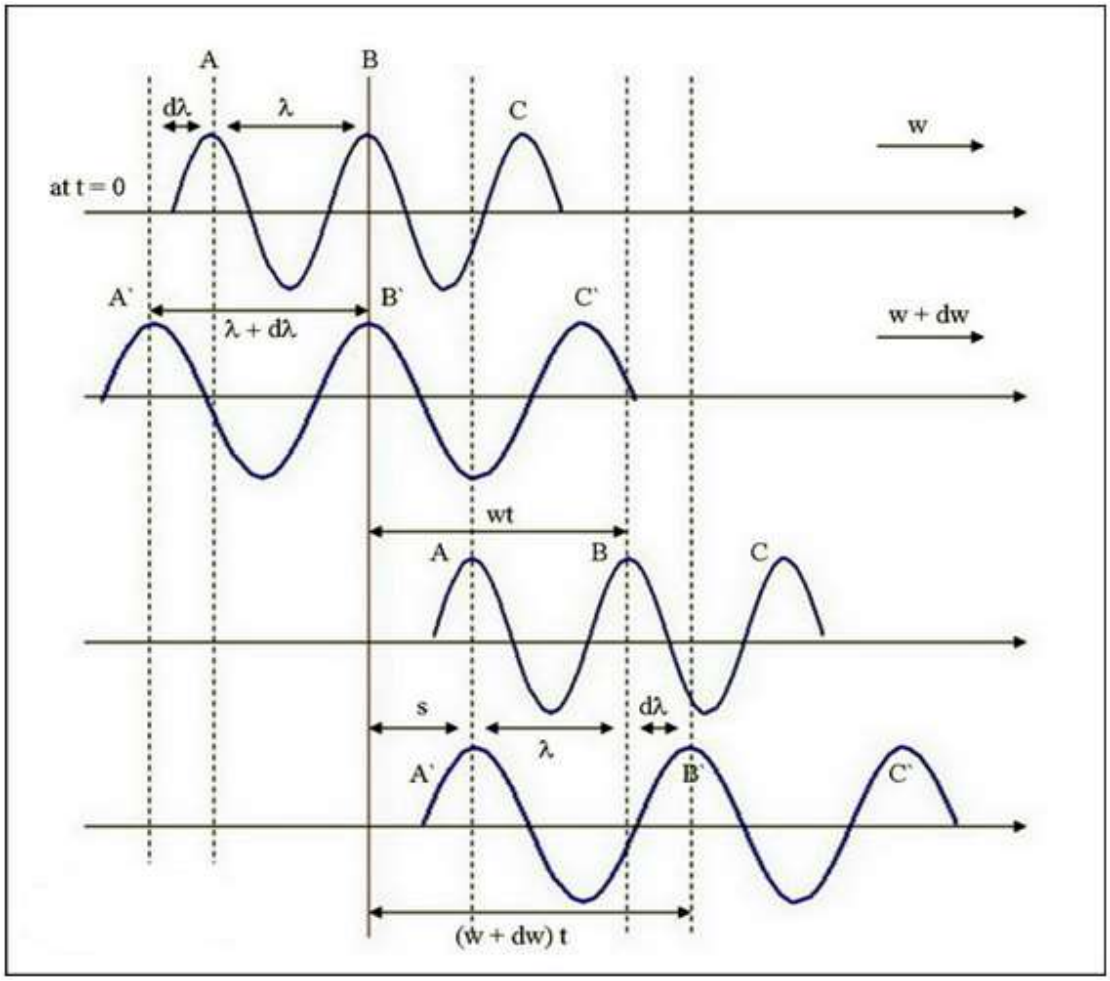
إذاً:

$$\boxed{w = c\sqrt{1 + \frac{m_o{}^2c^2}{h^2}\lambda^2}} \qquad (5)$$

ومنها نجد أنه لجسيم كتلته السكونية "m(node) > 0" تكون سرعة موجته المصاحبة له أكبر من سرعة الضوء، وأيضاً نجد أن سرعة موجة "دي برولي" دالة في الطول الموجي، وللفوتونات (حيث "m(node) = 0") تكون سرعة الموجة هي نفسها سرعة الضوء.

● سرعة الموجة وسرعة المجموعة

في أي وسط مبدد للطاقة، والذي فيه تعتمد سرعة الموجة w على طول موجتها λ ، تنتشر الموجات ذات الأطوال الموجية المختلفة خلال هذا الوسط كمجموعة group بسرعة u والتي تختلف عن السرعة w . ولإيجاد العلاقة بين هاتين السرعتين نعتبر موجتين مختلفتين قليلاً في الطول الموجي تنتشران خلال الوسط المذكور كما هو مبين بالشكل التالي:



والذي فيه الموجة العليا ABC ذات الطول الموجي λ تتحرك بسرعة w، في حين تنتشر الموجة السفلية A`B`C ذات الطول الموجي λ + d λ بسرعة w + dw في نفس إتجاه الموجه الأولى.

فاعتبار اللحظة التي تتوافق فيها قمتان، ولتكن القمتان B,B`، هي اللحظة t = 0 فإن سعة الموجة المحصلة ستكون نهاية عظمى عند هذا الموضع. وبعد زمن t ستسبق القمة B` القمة B بمسافة قدرها d λ، الأمر الذي يجعل القمة A تتوافق مع A` وعليه فإن أقصى سعة ستكون عند هذا الموضع الجديد.

والأن بفرض أن المسافة المقطوعة خلال الزمن t هي s فإن سرعة المجموعة u ستعطى من العلاقة:

$$\boxed{u = \frac{s}{t}}$$

ولكن:

$$wt = s + \lambda \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{s = wt - \lambda}$$

وعليه:

$$u = \frac{wt - \lambda}{t} \quad \Rightarrow \quad \boxed{u = w - \frac{\lambda}{t}} \qquad (6)$$

ولكننا نجد أيضاً أن:

$$(w + dw)t = wt + tdw = wt + d\lambda$$

$$\Rightarrow \quad tdw = d\lambda \quad \Rightarrow \quad \boxed{t = \frac{d\lambda}{dw}}$$

بالتعويض في (6) نحصل على:

$$\boxed{u = w - \lambda \frac{dw}{d\lambda}} \qquad (7)$$

وهي المعادلة التي تبين العلاقة بين سرعة المجموعة u وسرعة الموجة w (للموجات المنفردة في المجموعة). وإذ لم يكن هناك أي تبديد للطاقة، على سبيل المثال انتشار الضوء في الفراغ، فإن "dw / d λ = 0" وعليه فإن:

$$u = w$$

أي أن سرعة المجموعة هي نفسها سرعة الموجة.

● سرعة المجموعة وسرعة الجسيم

يمكن بسهولة إثبات أن سرعة المجموعة u من أمواج "دي برولي" هي نفسها سرعة الجسيم v، وذلك على النحو التالي:

$$w = c\sqrt{1+\{m_o c/h\}^2\lambda^2}$$

$$\frac{dw}{d\lambda} = c\frac{1}{2\sqrt{1+\{m_o c/h\}^2\lambda^2}}\left(2\{m_o c/h\}^2\lambda\right) = \frac{c\{m_o c/h\}^2\lambda}{\sqrt{1+\{m_o c/h\}^2\lambda^2}} \qquad \times\frac{c}{c}$$

$$\frac{dw}{d\lambda} = \frac{c^2\{m_o c/h\}^2\lambda}{c\sqrt{1+\{m_o c/h\}^2\lambda^2}} = \frac{c^2\{m_o c/h\}^2\lambda}{w}$$

بالتعويض في (7):

$$u = w - \lambda\frac{dw}{d\lambda} = w - \lambda\frac{c^2\{m_o c/h\}^2\lambda}{w} = w - \frac{c^2\{m_o c/h\}^2\lambda^2}{w} \qquad \times\frac{w}{w}$$

$$\boxed{uw = w^2 - c^2\{m_o c/h\}^2\lambda^2} \qquad (8)$$

لكن:

$$w^2 = c^2\left(1+\{m_o c/h\}^2\lambda^2\right) = c^2 + c^2\{m_o c/h\}^2\lambda^2$$

بالتعويض مرة أخرى في (8):

$$uw = w^2 - c^2\{m_o c/h\}^2\lambda^2 = c^2 + \left[c^2\{m_o c/h\}^2\lambda^2\right] - \left[c^2\{m_o c/h\}^2\lambda^2\right]$$

لنحصل على:

$$uw = c^2 \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{w = \frac{c^2}{u}} \qquad (9)$$

ولكن من المعادلة (4) نجد أن:

$$\boxed{w = \frac{c^2}{v}}$$

وعليه فإن:

$$\boxed{u = v} \qquad (10)$$

أي أن سرعة مجموعة موجات "دي برولي" المصاحبة لحركة الجسيم هي نفسها سرعة الجسيم، وبمعنى آخر تتحرك موجات "دي برولي" متزامنةً مع الجسيم.

ملحوظة هامة: سرعة الموجة هي w وسرعة المجموعة هي u وسرعة الجسيم هي v.

• مبدأ عدم التأكد لهايزنبرج

يعتبر مبدأ عدم التأكد أو مبدأ الريبة من أهم المبادئ في نظرية الكم بعد أن صاغه العالم الألماني هايزنبرج عام 1925 وينص هذا المبدأ على أنه لا يمكن تحديد خاصيتين مقاستين من خواص جملة كمومية إلا ضمن حدود معينة من الدقة، أي أن تحديد أحد الخاصيتين بدقة متناهية (ذات عدم تأكد ضئيل) يستتبع عدم تأكد كبير في قياس الخاصية الأخرى، ويشيع تطبيق هذا المبدأ بكثرة على خاصيتي تحديد الموضع والسرعة لجسيم أولي. فهذا المبدأ معناه أن الإنسان ليس قادرا على معرفة كل شيء بدقة 100%. ولا يمكنه قياس كل شيء بدقة 100%، إنما هناك قدر لا يعرفه ولا يستطيع قياسه. وهذه الحقيقة الطبيعية تخضع للمعادلة المكتوبة أدناه والتي يتحكم فيها h ثابت بلانك. ونتائج هذا المبدأ شيء هائل حقاً، فإذا كانت القوانين الأساسية للفيزياء تمنع أي عالماً مهما كانت له ظروفا مثالية من الحصول على أية معلومات مؤكدة تماما. ومعنى ذلك أنه لا يستطيع أن يتنبأ بحركة الأشياء مستقبلاً بدقة متناهية، بل تظل هناك نسبة ولو صغيرة من عدم

التأكد. ومعنى هذا المبدأ أنه مهما كان الإحكام وتطوير وسائلنا في القياس فلن يمكننا ذلك من التوصل إلى معرفة كاملة للطبيعة من حولنا.

وقد وصف هايزنبرج عدم سريان المقولة "أننا نستطيع التنبؤ بالمستقبل إذا عرفنا الماضي بدقة كبيرة، وقال أن سبب عدم استطاعتنا معرفة المستقبل تنبع من حقيقة عدم استطاعتنا معرفة الحاضر بدقة".

ومبدأ عدم التأكد، أو عدم اليقين معناه أن علم الفيزياء لا يستطيع أن يفعل أكثر من أن تكون لديه تنبؤات إحصائية فقط. فالعالم الذي يدرس النشاط الإشعاعي للذرات مثلا، يمكنه أن يتنبأ فقط بأن من كل ألف مليون ذرة راديوم مليونان فقط سوف يصدران أشعة جاما في اليوم التالي، لكنه لا يستطيع معرفة أي ذرة من مجموع ذرات الراديوم سوف تفعل ذلك. ويمكننا القول أنه كلما زادت عدد الذرات كلما قل عدم التأكد وكلما نقص عدد الذرات كلما زاد عدم التأكد. وكانت هذه النظرية مقلقة للعلماء في وقتها لدرجة أن عالماً كبيراً بوزن آينشتين قد رفضها أول الأمر.

$$\triangle P_x \triangle x \simeq h$$

حيث :

$\triangle P_x$ عدم التأكد في كمية التحرك.

$\triangle x$عدم التأكد في الموقع.

h ثابت بلانك.

عدم التأكد الحاصل هو نتيجة لعملية القياس نفسها، والتي تؤثر فيها أجهزة القياس على الكميات المقاسة، بما فيها الضوء المستخدم نفسه.

الجزء الثالث

النظرية النسبية الخاصة

مقدمة

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 القوانين 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 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.و من أهم هذه القوانين فى الفيزياء ما يسمى بقوانين البقاء. ومن اهمها:

- **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.

- **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.

- **قانون بقاء الشحنة**

- **Electric–charge conservation law**

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

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. وقبل دراسة النظرية النسبية أو الفيزياء النسبية لابد من إلقاء الضوء على الفيزياء الكلاسيكية او فيزياء الأجسام التى توصف من خلال قوانين الميكانيكا النيوتنية.

الفيزياء الكلاسيكية Classical Physics

هي فيزياء الأجسام عادية الحجم والتي 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. و أوجه القصور في الفيزياء الكلاسيكية أنها فشلت في وصف الأجسام التي تتحرك بسرعات عالية تقترب من سرعة الضوء. فمثلا لم تضع الميكانيكا النيوتنية حدا لأعلى سرعة يصل إليها الجسم فلا مانع لديها أن تصل سرعة الجسم إلى سرعة الضوء و هذا مخالف للتجربة التي أثبتت أن سرعة الجسم لا يمكن أن تصل إلى سرعة الضوء مهما و صلت القدرة على تعجيل هذا الجسم.

الفيزياء النسبية Relativity Physics

هي الفيزياء الأجسام التي تتحرك بسرعات عالية جدا تقترب من سرعة الضوء. وهذا القسم من الفيزياء يخضع لقوانين أينشتين أو النظرية النسبية.

فقد استطاع العالم أينشتين في بدايات القرن السابق (1905) من وضع النظرية النسبية التي استطاعت أن تزيل تلك المتناقضات التي نشأت من قصور النظرية الكلاسيكية. و تعد هذه النظرية واحدة من أعظم الإنجازات فى القرن العشرين. و قد اشتهرت هذه النظرية بصعوبتها و في الواقع هذه الصعوبة لا ترجع إلى صعوبة المعالجة الرياضية لموضوعات هذه النظرية و لكن يرجع إلى وجوب إعادة النظر في مفاهيمنا عن الكثير من الأشياء مثل الزمن و الحركة و السكون و السرعة.

و من المهم أن نعلم أن الفروق بين القوانين الحديثة و القديمة فروق صغيرة ولابد أن يكون هناك نقاط مشتركة بين الحديث و القديم. فالنظريات الحديثة تعد اكبر تعميما و شمولا من النظريات القديمة.

مبدأ التناظر The Correspondence Principle

إذا فرضنا أو اقترحنا نظرية جديدة لشرح حدث ما أو ظاهرة طبيعية بحيث تكون هذه النظرية الحديثة أكثر شمولية من نظيرتها القديمة فانه لابد من وجود دليل ليرشدنا عن الطريقة التي تتناظر بها هذه النظرية مع النظرية الأقل عمومية. و هذه الدليل يسمى بمبدأ التناظر. و كان بوهر أول من طبق هذا المبدأ على النظرية الذرية.

و ينص هذا المبدأ على " أن أى نظرية فيزيائية جديدة أيا كانت مواصفاتها لابد و أن تؤول إلى النظرية الأقل عمومية منها كحالة خاصة من الأولى".

The correspondence Principle: “We know in advance that any new theory in physics, whatever its character or details, must reduce to the well-established classical theory to which it corresponds when it is applied to circumstances for which the less general theory is know to hold”.

مثال: البصريات الهندسية و البصريات الموجية

من خلال دراستنا السابقة فى الفصل الدراسى الاول للبصريات تعرفنا على أنه إذا مر ضوء طوله الموجي أكبر بكثير من عرض الفتحة لكى ينفذ من خلالها، فان الضوء النافذ ينتشر في خطوط مستقيمة و يمكننا في هذه الحالة دراسة بعض الظواهر الضوئية التي تعتمد على الطبيعة الهندسية للضوء (بصريات هندسية geometrical optics or rays) مثل الانعكاس و الانكسار و التشتت و ....

أما إذا كان الطول الموجى للضوء الساقط أكبر من أو في حدود عرض الشق، فان انتشار الضوء النافذ لا يمكن دراسته من خلال البصريات الهندسية حيث ان الظواهر الضوئية المصاحبة للضوء في هذه الحالة مثل الحيود و التداخل و الاستقطاب و .....لا تفسر إلا من خلال الطبيعة الموجية للضوء أو من خلال البصريات الفيزيائية physical optics or waves . و في هذه الحالة يمكننا القول أن البصريات الهندسية تعتبر حالة خاصة من البصريات الفيزيائية.

و يعتبر هذا المثال تطبيق هام لمبدأ التناظر، إذ أن البصريات الموجية هي الأشمل و هي التى تشرح كل الظواهر الطبيعية للضوء بما فيها الحالات الخاصة التي تختص بها البصريات الهندسية.

- معنى الحركة و السكون و الإطار المرجعى:-

من المعروف لدينا أن الجسم الذى لا تؤثر عليه قوى خارجية يكون فى حالة سكون. إلا أن الجسم الذى لا تؤثر عليه قوى خارجية يمكن ان يوجد ليس فقط فى حالة سكون بل أيضا فى حالة حركة منتظمة على خط مستقيم. و تسمى هذه القاعدة فى الفيزياء بقانون القصور الذاتى (القانون الأول لنيوتن) و الذى ينص على أن الجسم يظل ساكنا أو متحركا بسرعة منتظمة ما لم تؤثر عليه قوة خارجية تؤثر على حالته. إلا أن هذا القانون يبدو غير واضح فى حياتنا اليومية بسبب وجود قوة الاحتكاك التى تؤثر عكسيا على الأجسام المتحركة.

أما الإطار المرجعى هو الإطار الذى يمكننا وصف حدث فيزيائى من خلاله. و من خلال دراستنا السابقة نجد أن جمع قوانين الميكانيكا النيوتنية صالحة

لكل الأطر المرجعية الساكنة. و الإطار المرجعى الساكن Inertial Frame of reference هو من ينطبق عليه قانون نيوتن الأول للحركة. اى انه هو النظام الذى لاتؤثر عليه قوة.

و معنى هذا أن أى نظام يسير بسرعة منتظمة بالنسبة لنظام أخر ساكن يعتبر أيضا نظاما ساكنا. و من المستحيل عمليا الحصول على إطار مرجعى قصورى حقيقى تماما لان ذلك يتطلب فراغ خالى من المادة و معزول عن أى كتلة.

■ اساس النظرية النسبية

لكى نستطيع ان نصف حدثا فيزيائيا فلابد من وضع اطار مرجعى. ومن دراستنا للميكانيكا النيوتونية نجد ان جميع قوانينها صالحة لكل الاطر المرجعية الساكنة. والاطار المرجعى الساكن كما هو معرف مسابقا بانه هو النظام الذى لاتؤثر عليه قوة، اى انه اى نظام يسير بسرعة منتظمة بالنسبة لنظام اخر ساكن يعتبر ايضا نظاما ساكنا وهذا يعنى اننا لو اجرينا تجربة فيزيائية فى معمل ساكن فان نتائجها تنطبق تماما مع نتائج التجربة اذا

اجريت داخل مركبة تسير بسرعة منتظمة، ومن ذلك نستنتج ان جميع قوانين الميكانيكا النيوتونية تعطى نتائج متساوية بالنسبة لجميع الاطر المرجعية الساكنة.

وضع ألبرت آينشتاين عام 1905 نظريتة الشهيرة للنسبية الخاصة والتي كان لها أعظم الأثر في الدراسات الفيزيائية. وقد جاءت هذه النظرية تتويجا لبحوث الفيزياء في القرن التاسع عشر، وخاصة ما توصل إليه ماكسويل من أن جميع الظواهر الكهربية والمغناطيسية تجمعها نظرية كهرومغناطيسية واحدة تدعو لوجود موجات كهرومغناطيسية تسير بسرعة الضوء. **تقوم نظرية آينشتاين للنسبية الخاصة على فرضين أساسيين هما:**

1. القوانين الفيزيائية فى جمع الأطر المرجعية الساكنة واحدة لا تتغير.

ومعنى ذلك أنه يمكننا أجراء تجربة فيزيائية معينة فى معمل ساكن و نحصل على نفس النتائج تماما لو كان هذا المعمل متحرك بسعة منتظمة، طالما أننا طبقنا نفس القوانين الفيزيائية فى الحالتين. ويعرف هذا المبدأ بمبدأ نسبية الحركة و هو يعتبر أساس للميكانيكا الكلاسيكية.

2. سرعة الضوء فى الفراغ مقدار ثابتة لا تعتمد على المرجع القصورى أو على المصدر أو على الراصد.

و ســوف نرى فيما بعد أن المبدأ الثانى هو أســاس الاختلاف بين الفيزياء الكلاسيكية و الفيزياء الحديثة.

نتيجة للفرض الأول نجد أنه لا يمكن قياس السرعات المطلقة وإنما تتحدد فقط السرعات بالنسبة لجسم آخر. فإذا تكلمنا عن سرعة سيارة فإنها تكون بالنسبة للأرض أما إذا وجدت سيارة أخرى تسير بنفس سرعة السيارة الأولى وفى نفس اتجاهها فإن السرعة التي يراها شخص في السيارة الثانية تكون صفرا وهكذا بالنسبة لشخص في السيارة الأولى فإنه سوف يرى السيارة الثانية تتحرك بسرعة تساوى صفر. وكنتيجة لفروض آينشتاين يمكننا بواسطة المنطق إثبات أن سرعة الضوء هي الحد الأعلى للسرعات جميعها وأنه لا يمكن لأي جسيم يحمل طاقة أن يعجل لسرعة الضوء.

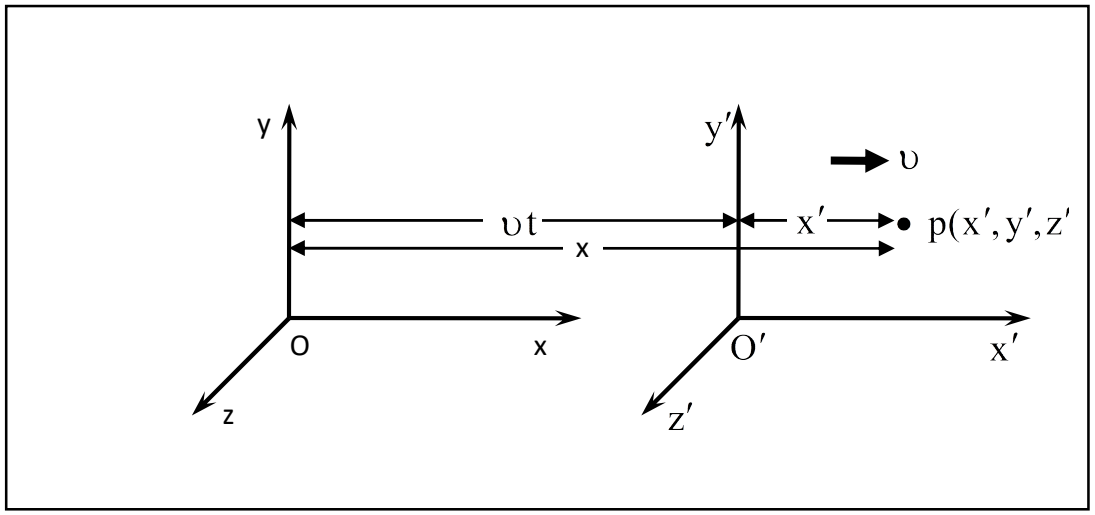
ولدراسة النظرية النسبية يجب أولا دراسة قوانين التحويل بين النظم القصورية المختلفة وأهم هذه التحويلات هي تحويلات جاليليو وتحويلات لورنتز.

تحويلات جاليليو

في الحركة النسبية تعتمد قيم السرعة والعجلة لأي نقطة مادية على محاور الإسناد (الاطار المرجعى) التي تعتمد فيها هذه القيم. نفرض أن راصدين يتحركان بالنسبة لبعضهما ويرصدان في نفس الوقت جسما متحرك، نجد أنهما يصفان الجسم نفسه متحركا بسرعات مختلفة ومسارات مختلفة. ولكن يمكن أن تتفق الوصفتان إذا أجريت تحويلات في معادلة أحد الراصدين بحيث تأخذ في الاعتبار الحركة النسبية للراصدين. وتعرف هذه بالتحويلات الجاليلية نسبة إلي جاليليو أول من حل تحولات الحركة من نظام قصوري إلي نظام قصوري آخر.

أهم فرض في التحويلات الجاليلية هو ثبات المسافة والزمن بالنسبة للراصدين في النظامين القصوريين. بالنظر الى الشكل التالى يمكننا ان نعبر عن ذلك رياضيا باعتبار محاور إحداثيات (x, y, z)، (x', y', z') يعرفان النظامين المتحركان معا في الاتجاه الموجب للمحور السيني بسرعة نسبية υ. ونفرض أن نقطتي الأصل O ، O' كانتا منطبقتين عند الزمن

$t = 0$



بعد فترة زمنية t ترتبط إحداثيات نقطة مثل p بالنسبة للنظام الأول بإحداثيات نفس النقطة بالنسبة للنظام الثاني بالمعادلات

$$x' = x - \upsilon t \ ;$$
$$y' = y \ ;$$
$$z' = z \qquad (1)$$

ونعبر عن انطباق الزمن في المجموعتين بالمعادلة

$$t = t' \qquad (2)$$

تسمى هذه المعادلات بالتحويلات الجاليلية وتتبني كل فروضها على أساس قوانين نيوتن، وعلى ذلك فهي صحيحة فقط طالما اعتمدت صحة هذه القوانين وذلك في حالة السرعات الصغيرة بالنسبة لسرعة الضوء.

تحويلات السرعة والعجلة لجاليليو

يمكن الحصول على تحويلات السرعة والتسارع بمفاضلة تحويلات جاليليو كما يأتي:

$$u' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} = \frac{d}{dt}(x - \upsilon t)$$

$$\therefore \quad u' = \frac{dx}{dt} - \upsilon = u - \upsilon \qquad (3)$$

حيث u' السرعة في الإحداثيات المتحركة، u هي السرعة في الإحداثيات الثابتة، υ هي السرعة النسبية بين الإحداثيتين.

وبالنسبة للعجلة فإننا نفاضل المعادلة (3) فنحصل على

$$a' = \frac{du'}{dt'} = \frac{du'}{dt} = \frac{d}{dt}(u - \upsilon)$$

$$\therefore \quad a' = \frac{du}{dt} = a \qquad (4)$$

حيث a' هي العجلة في الإحداثيات المتحركة، a العجلة في الإحداثيات الثابتة وذلك باعتبار أن السرعة υ هي سرعة ثابتة. وبالنظر إلى المعادلة (3) نجد أنه هناك تناقض مع الفرض الثاني للنظرية النسبية إذا ما سارت

الإحداثيات أو النظام المتحرك بسرعة الضوء. فإذا وضعنا سرعة الضوء في الإحداثيات المتحركة

$$c' = \frac{dx'}{dt'},$$

ووضعنا سرعة الضوء في الإحداثيات الثابتة

$$c = \frac{dx}{dt},$$

فإنه من الواضح تبعا للمعادلة (3) أن

$$c' = c - \upsilon$$

أي أن سرعة الضوء تكون متغيرة وهذا تناقض واضح مع الفرض الثاني لآينشتاين. لذا كان لابد من وضع نظام آخر من التحويلات يفي بالغرض ولا يتعارض مع فروض النظرية النسبية الخاصة وهذا ما قام به العالم لورنتز.

نجاح تحويلات جاليليو

استطاعت تحويلات جاليليو فى برهنة العديد من القوانين مثل قانون بقاء كمية الحركة و الطاقة و قانون نيوتن الثانى.

مثال: طبيعة انتشار الصوت

نفترض نبضة صوتية تتحرك بسرعة $320\ ms^{-1}$ بالنسبة للراصد فى الإطار S و أن هناك راصد أخر يستقل طائرة تتحرك بسرعة $150\ ms^{-1}$ ، فإذا كانت:

1. الطائرة تتحرك فى نفس اتجاه الصوت، فان السرعة التى يرصدها المراقب الموجود فى الطائرة تكون $170\ ms^{-1}$.
2. الطائرة تتحرك عكس اتجاه الصوت، فان السرعة التى يرصدها الماقب الموجود فى الطائرة تكون $470\ ms^{-1}$.

وهذه النتيجة طبيعية و منطقية لان موجات الصوت هى موجات ميكانيكية ولذلك تحتاج وسط لكى تنتقل من خلاله.

فشل تحويلات جاليليو

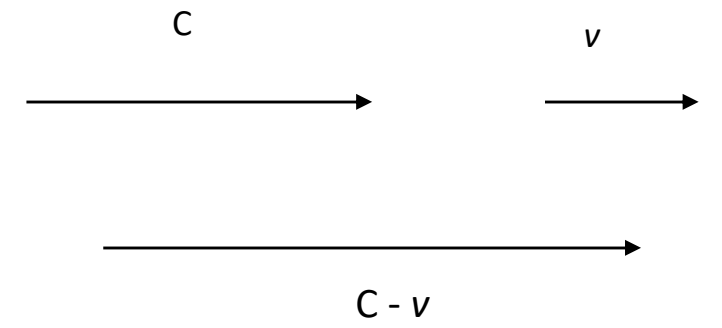
فشلت هذه التحويلات فى اثبات عدم تغير قوانين الكهرومغناطيسية و خاصة نظرية انتشار الضوء.

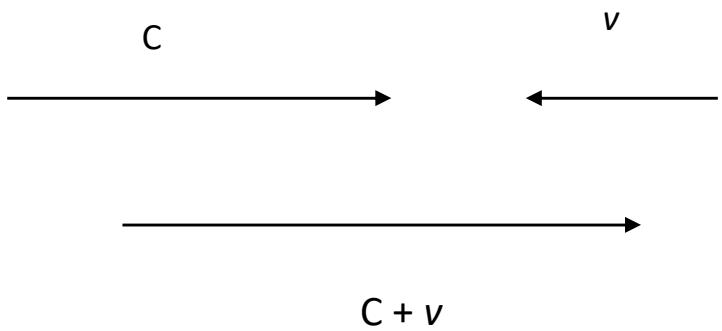
مثال: طبيعة انتشار الضوء

نفترض نبضة ضوئية تتحرك بسرعة C فى وسط (سمى قديما 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.

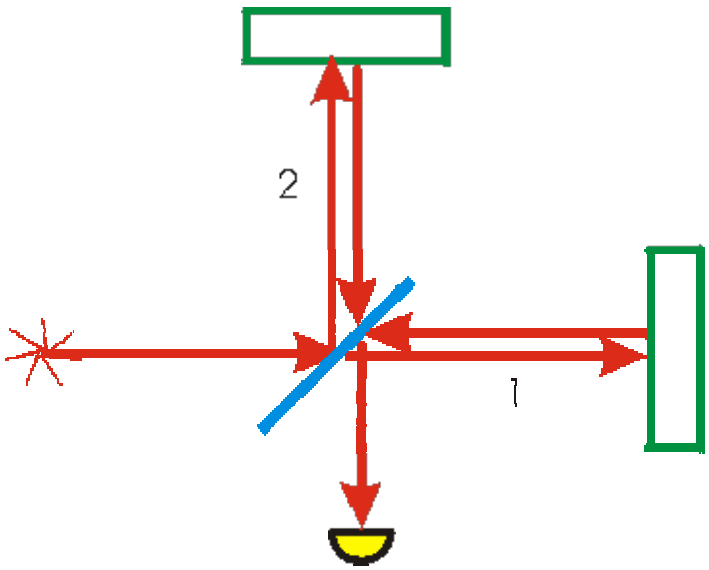
هذا و حاول العلماء فى نهاية القرن التاسع عشر إثبات وجود الأثير عن طريق قياس سرعة الضوء فى أنظمة قصورية مختلفة و ملاحظة اختلاف النتائج و هل يوجد نظام وحيد تكون فيه سرعة الضوء غير سرعته فى الأثير (C). و كان العالمان ميكلسون و مورلى هما أول من أجرى مثل هذه التجارب وسوف نذكر . و كانت المفاجئة أن سرعة الضوء فى كل الأطر القصورية ثابتة و لا تعتمد على الإطار أو الراصد او حتى المصدر الضوئى. و فشلت كل هذه التجارب فى إيجاد هذا الوسط. وللدهشة فان هذه النتائج المعملية قد وضعها اينشتين على صورة فرضه الثانى فى النظرية النسبية الخاصة. و نلاحظ أن جميع هذه التجارب أجريت مع الأخذ فى الاعتبار صحة تحويلات جاليليو أو لاثبات صحة هذه التحويلات.

و بذلك فان الفرض الثانى لاينشتين يتعارض مع تحويلات جاليليو. و الآن يجب أن يكون لدينا تحويلات معينة تتفق و فروض اينشتين و مع النتائج العملية أيضا.

■ تجربة ميكلسون ومورلى

في عام 1880 م أراد مايكلســـون العالم الفيزيائي الأمريكي إثبات انتقال الأرض في الأثير مع ادوارد مورلي ولم يكن العلماء بحاجة إلى تجارب لإثبات فرضية وجود الأثير ولكن تجربة بسيطة تثبت وجود الأثير ستزيد من تثبيت أركان علم الفيزياء , وتوقعوا أن ســـرعة الضـــوء لن تكون هي نفســـها بحســـب ما إذا تم قياســـها في الاتجاه نفســـه لحركة الأرض أو في الاتجاه المعاكس. ويمثل مسار الأرض شعاع في احد اتجاهاتها ثم تخالفه في الاتجاه الآخر , وتوقع العلماء قياس اختلاف رتبه 30 كم/ث بمقارنة هاتين السرعتين من خلال جهاز مايكلسون الذي يتكون من الآتي:

- لوحان متماثلان من الزجاج ومائلان بزاوية 45 درجة
- مرآتان عاكستان فضيتان.
- ومصدر ضوئي أحادي اللون.



فكرة عمل جهاز مايكلسون

بعد خروج الشعاعين1 و 2 من نفس المصدر , فإنهما يتداخلان ويكونان أهداب تداخل وهي عبارة عن مناطق مضيئة ومناطق مظلمة تتغير بتغير سرعة الضوء ويكون ذلك حسب فرق الطور النسبي , وتلك العلاقة في الطور تكون صحيحة في كلا الطولين المرئيين للمسارين , وهي تعتمد على حركة الجهاز النسبية عبر الأثير .

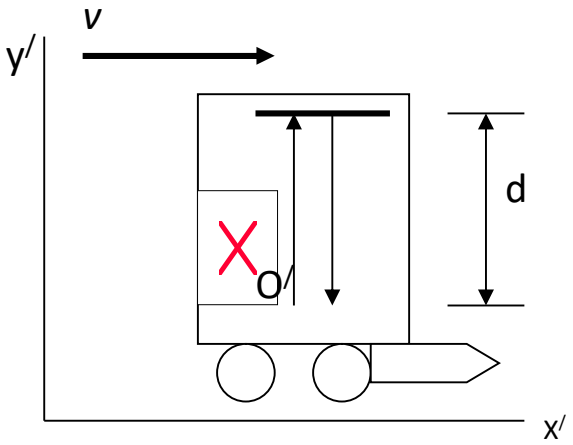
توقع العلماء عند هذا الدوران بالنسبة للأثير أن يحدث تغير في الأهداب المتكونة نتيجة التداخل بحيث تكون المضيئة مكان المظلمة و لتقليل الاهتزازات والاضطرابات الناتجة عن الحركة خلال الدوران, فان مايكلسون ومورلي ركبا الجهاز على سطح أحجار صخرية كبيرة موزونة بالزئبق وقاما أيضا بإضافة تحسينات للجهاز من خلال إتقان القياس عن طريق مرايا إضافية ساهمت في زيادة الطول L وقد كانت النتيجة على غير المتوقع , فلم يحدث تغير في الأهداب كما كان متوقعا ونتيجة الإزاحة المقاسة دون تردد (تداخل منتظم) , وكانت الإزاحة المتوقعة 0.4 هدبه, والإزاحة الناتجة كانت اقل بعشرين جزء منها , وقد تكون اقل بأربعين جزء . وقد أعيدت التجربة عدة مرات في مناطق مختلفة على الأرض وفي أوقات مختلفة ولكن لم يحدث التغير الذي توقعه العالمان مايكلسون ومورلي وكان ذلك عام 1902 م

هذه النتيجة السلبية التي تعنى استحالة وجود الأثير اختلفت نتائجها العملية مع النظرية صدمت العلماء في صحة نظرياتهم الكلاسيكية وتمسكهم بوجود الأثير

■ 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 شـــــىء 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 الاشـــياء امر نسبى يعتمد على حركة المشاهد. وهذا الذى سوف يتم اثباته فى يلى.

حيث أننا سـوف نتحقق من ان الوقت المقاس يختلف باختلاف الأطر المرجعية كما تختلف الفترات الزمنية بين حدثين. وسوف نشتق العلاقة بين الفترات الزمنية المقاسه فى إطارين قصوريين مختلفين.



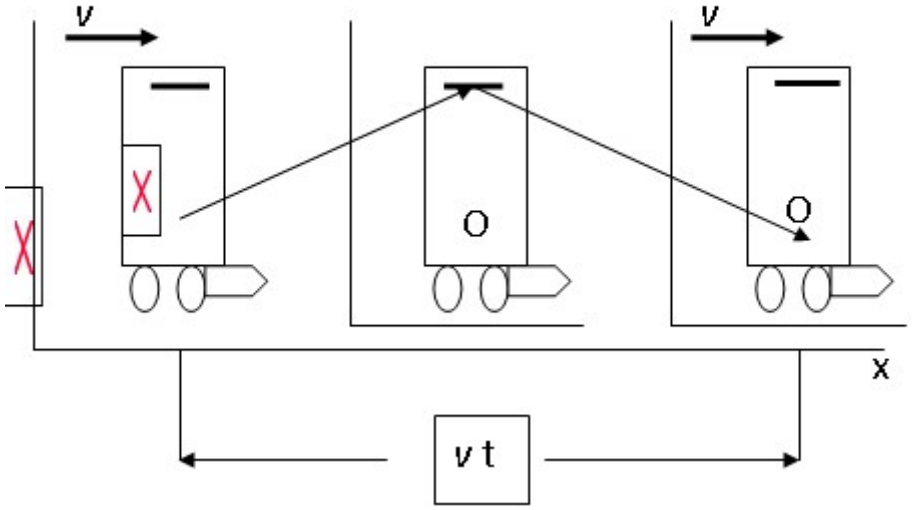
يوضح الشكل السابق أن هناك عربة تسير بسرعة منتظمة v و أن هناك راصد عند النقطة $O^{/}$ و فوقه توجد مرآة مثبته فى سقف العربة و أن هناك شعاع ضوئى انبعث من أرضية العربة إلى سطح المرآة (قطع مسافة d) ثم ارتد مرة أخرى.

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.

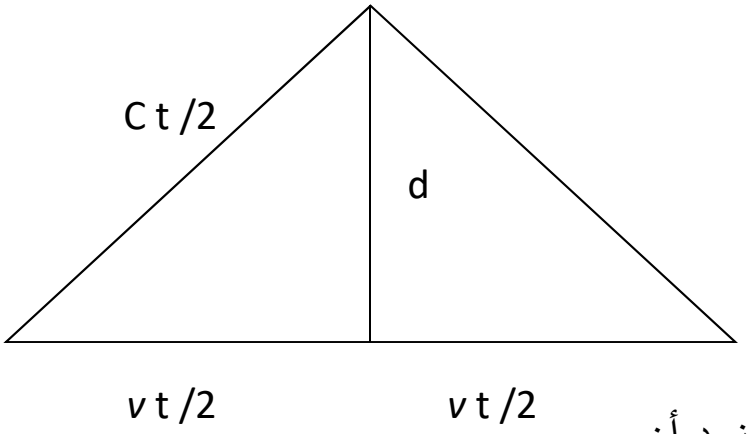
و الآن نريد تحديد الزمن الذى سوف يعينه المراقب الموجود على الأرض. فى هذه الحالة تكون العربة (المرآة و المصدر) متحركة بسرعة منتظمة مقدارها v بالنسبة لهذا الراصد كما هو موضح فى الشكل التالى.



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 بالنسـبة 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 t_0 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 يحســـبه المراقب الموجود فى العربة و هذا ما يســـمى باستطالة أو تمدد الزمن.

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

1. 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 $\gamma\, t$ 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.

2. فى أكتوبر عام 1977 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 20 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 υ 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 السـابقة عن قيمة t_0 فى المعادلة السـابقة 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 يسـمى انكماش الطول. وبالتعويض عن قيمة γ نحصل على الشكل التالى للمعادلة السابقة:

$$L = L_0 \left(1 - \frac{v^2}{C^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

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.

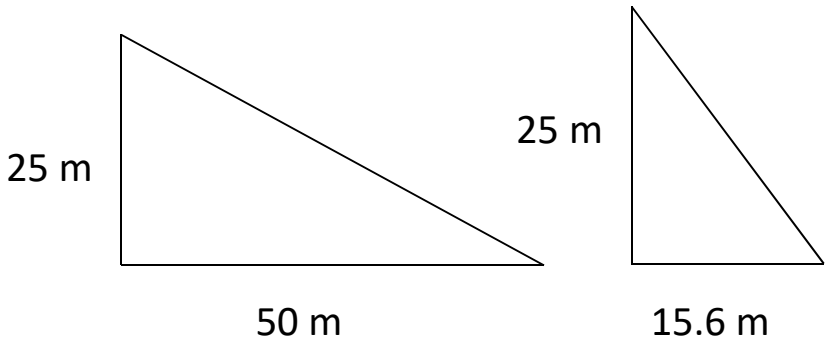
إذن المسافر فى قطار تصل سرعته إلى 0.8 من سرعة الضوء مثلا سوف يرى رصيف محطة القطار أقصر مما يراه الواقف على الرصيف و كذلك الواقف على الرصيف سوف يرى القطار أقصر مما يراه راكب القطار ، وكلا المشاهدين عى حق الا ان وجهتى النظر مختلفتين.

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 الســـفينة فلا يتغير حيث أنه متعامد على اتجاه الحركة كما هو موضح بالرسم.



- تحويلات لورانتز Lorentz transformations

نفرض إطاران مرجعيان ساكنان S, S/ و النظام S/ يتحرك بسرعة منتظمة v فى الاتجاه الموجب لمحور X كما هو موضح من الرسم (انظر تحويلات جاليليو). فإذا وقع حدث معين (وميض مثلا) عند النقطة A و أن هناك مراقبين رصدا هذا الحدث بحيث أن t = t/ = 0 عندما كانت o/ منطبقة على o أى عندما $x = x' = 0$ اذا اصدر المراقب الموجود فى S/ وميضا فانه بعد زمن t/ يجد نفسه هذا المراقب فى مركز كرة ضوئية نصف قطرها $r' = ct'$ حيث c سرعة الضوء. و معادلة هذه الكرة على الصورة:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = r'^2 = (ct')^2 \qquad (1)$$

و بالمثل يجد نفسه المراقب S بعد زمن t فى مركز كرة ضوئية معادلتها هى :

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 = (ct)^2 \qquad (2)$$

نلاحظ من المعادلتين السابقتين أن سرعة الضوء واحدة لم تتغير بالنسبة للمراقبين أو بالنسبة للإطارين، و هذا يتفق مع الفرض الثانى للنظرية النسبية

الخاصة. و نلاحظ أيضا أن معادلة الدائرة لها نفس الصيغة الرياضية فى الحالتين و هذا يتوافق مع الفرض الأول لأينشتين.

التحويلات المطلوبة هى عبارة عن المعادلات التى تربط بين المتغيرات (x , y , z, t) و المتغيرات ($x^{/}$, $y^{/}$, $z^{/}$, $t^{/}$) و التى يمكن من خلالها تحويل أى من المعادلتين إلى المعادلة الأخرى.

و بدراستنا للإطارين المرجعيين S, $S^{/}$ نلاحظ أن الاختلاف بين المعادلتين السابقتين يرجع فقط الى المتغيرات (x , t) و ($x^{/}$, $t^{/}$). و بذلك فان معادلات التحويل $y = y^{/}$ و $z = z^{/}$ لا ينتج عنها أى اختلاف (حيث أن الفضاء متماثل). و بسبب تماثل الفضاء و انتظام قوانين الطبيعة فيمكن افتراض أن معادلات التحويل بين المتغيرات (x , t) و ($x^{/}$, $t^{/}$) هى معادلات خطية يمكن أن تكتب على الصورة:

$$x' = a_1 x + a_2 t \qquad (3)$$

$$t' = b_1 x + b_2 t \qquad (4)$$

حيث أن a_1, a_2 , b_1 b_2 هى ثوابت يجب تعينها لمعرفة معادلات التحويل.

و عندما يكون $x' = 0$ أى فى مركز الإسناد S' يكون $x = vt$ و

بالتعويض بهذه القيمة فى المعادلة (3) نحصل على:

$$x' = a_1 x - a_1 vt = a_1 (x - vt) \qquad (5)$$

و بالتعويض من المعادلتين (4) و (5) فى المعادلة (1) مع الأخذ فى

الاعتبار أن $y = y'$ و $z = z'$ يمكننا الحصول على:

$$a_1^2 (x - vt)^2 + y^2 + z^2 = c^2 \left(b_1 x + b_2 t\right)^2$$

و هذه المعادلة تاخذ الصورة الأتية:

$$\left(a_1^2 - c^2 b_1^2\right) x^2 + y^2 + z^2 = \left(c^2 b_2^2 - a_1^2 v^2\right) t^2 + 2xt\left(v a_1^2 + b_1 b_2 c^2\right) \qquad (6)$$

و بمقارنة

معاملات المعادلتين (6) و (2) نحصل على:

$$a_1^2 - c^2 b_1^2 = 1$$

$$c^2 b_2^2 - a_1^2 v^2 = c^2 \qquad b_1 b_2 c^2 + a_1^2 v = 0$$

و بحل المعادلات الثلاثة الأخيرة يمكننا الحصول على:

$$a_1 = b_2 = 1 \Big/ \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$b_1 = -\frac{v}{c^2} \Big/ \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

و بالتعويض عن قيم المعاملات السابقة فى المعادلة (5) ، (4) نحصل على العلاقة الاتية:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} = \gamma\,(x - vt)$$

حيث أن

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

و يسمى γ معامل لورنتز.

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

و بذلك تصبح معادلات التحويل هى:

$$x' = \gamma\,(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z \qquad \longrightarrow \qquad (7)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

تعرف هذه المعادلات الأربعة بتحويل لورنتز نسبة للعالم الهولندى Lorentz و الذى حصل عليها عام 1903 أى قبل النظرية النسبية لأينشتين بعامين. هذا و قد حصل لورنتز على هذه المعادلات أثناء دراسة حركة الجسيمات المادية فى المجال الكهرومغناطيسى. و لكن لم يفطن لورنتز إلى أهمية هذه المعادلات، حيث استخدم السرعة v لكى تعبر عن سرعة الجسيم بالنسبة للأثير (و الذى لا وجود له فى الحقيقة). و عندما جاءت النظرية النسبية لأينشتين و استخدمت هذه المعادلات بمعالجة مختلفة، حيث تشير v فى هذه الحالة أن النظام S' يتحرك بسرعة منتظمة v بالنسبة للنظام S .

و لذلك تسـمى هذه المعادلات أحيانا معادلات لورنتز – أينشـتين و التى تعتبر الأساس للنظرية النسبية لأينشتين.

و يمكننا الحصـول تحويل لورنتز – أينشتين العكسـى إذا افترضـنا أن إطار الإسـناد $S^{/}$ يتحرك بسـرعة v- بالنسـبة لإطار الإسـناد S. و يمكننا ذلك رياضـا بالتعويض عن v ب v- و نسـتبدل القيم ذات الشـرطة بنظيراتها بدون شرطة كما يلى

$$x = \gamma\left(x' + vt'\right)$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c2}\right)$$

(8)

ملاحظات على معادلات لورنتز – أينشتين:

1) من العلاقة الأخيرة من المعادلة (7) نلاحظ أن الزمن $(t^{/})$ ليس مطلقا كما أشار من قبل جاليليو بل أنه يتوقف على المقداريين x و t .و هذا

ما يؤكد أن أى حدث لابد من تمثيله بأربع أحداثيات للزمان و المكان (x, y, z,. t) أى أن الزمان و المكان غير منفصلين بل يدخلان فى نسيج واحد فى النظرية النسبية لأينشتين.

2) إن معادلات جاليليو تعتبر حالة خاصة من لورنتز – أينشتين،أى أن مبدأ التناظر هنا موجود. حيث أنه عندما يكون $v << c$ فان معامل لورنتز $\gamma \approx 1$ و كذلك $vx/c^2 \to 0$ و بذلك تؤول معادلات لورنتز – أينشتين إلى معادلات جاليليو. و بذلك يمكننا القول أن تحويل لورنتز – أينشتين هو تحويل عام و يكون صحيحا فى جميع الحالات بينما يقتصر استعمال تحويل جاليليو على السرعات العادية التى نستخدمها فى حياتنا اليومية.

3) يلاحظ أيضا من معادلات تحويل لورنتز – أينشتين أنه لا توجد سرعة أكبر من سرعة الضوء لأن المقدار $\sqrt{\left[1-v^2/c^2\right]}$ يصبح تخيليا عندما $v > c$.