وزارة التعليم العالي

هيئة التميز والإبداع

المركز الوطني للمتميزين

# انتشار الضوء في الخلاء

2017-2016

# المقدمة

يعود الفضل في اكتشاف الأمواج الكهرطيسية لعالم الفيزياء الإسكتلندي **جيمس كلارك ماكسويل**. لقد تمكن ماكسويل في عام 1860م من صياغة جميع القوانين المتعلقة بالكهربائية والمغناطيسية وتفاعلهما مع بعضهما البعض في أربع معادلات تفاضلية. ولم يتوقف الأمر عند هذا الحد بل استطاع من خلال حل هذه المعادلات التنبؤ بوجود ما يسمى بالموجات الكهرطيسية والتي تم التحقق من وجودها وإيجاد طرق لتوليدها على يد عالم الفيزياء الألماني **هينرتش هيرتز** وذلك في عام 1887م. وإن للأمواج الكهرطيسية العديد من الأنواع وتختلف حسب طول الموجة، لقد سهلت الموجات الكهرطيسية عملية نقل مختلف أنواع المعلومات بطريقة لاسلكية إلى أي مكان على سطح هذه الأرض بل وتعداها إلى الفضاء الخارجي.

ومن هنا انطلقنا حيث أن الأمواج الكهرطيسية لا تحتاج إلى وسط مادي لكي تنتقل فهي تنتقل في الفضاء وعبر الأشياء المادية بسهولة فكيف نعدُّ "الخلاء" وسطاً لانتشارها؟

كما أن الأمر ليس هكذا فحسب بل إن هناك قضية أخرى وهي قضية الفوتونات والتي تعتبر الضوء جسيمات أو بالأحرى كمات طاقية بالغة الصغر ومعدومة الكتلة وانتشارها عبر الخلاء أيضاً.

هناك العديد من الفرضيات التي تتكلم عن هذا الخلاء منها نظرية الأثير التي تمّ نقضها بعد ظهور النسبية والتي سأناقشها فيما بعد وسأذكر الخلاء وكيفية انتقال المادة والطاقة فيه وكيفية انتشار الأمواج الكهرطيسية فيه حيث تبلغ سرعة الانتشار في الفضاء الحر ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية تقريبا وهي نفس سرعة الضوء في الفراغ والذي ما هو إلا أحد أشكال الموجات الكهرطيسية كما اكتشف ذلك ماكسويل.

إشكالية البحث:

1-الموجة تنتشر ضمن وسط محدد ويمكن أن يكون مادياً أو غير مادي فإذا كان غير مادي فكيف يتم الانتشار؟

2-تهتز جزيئات الوسط المادي عند مرور الموجات الصوتية فيه بتواتر محدد لكن في حالة الأمواج الكهرطيسية يكون الوسط غير مادي فكيف تنتقل الموجات ومن يحملها وهل تهتز أي "جزيئات" بتأثير تواترها؟

3-إذا كان الضوء عبارة عن كمات من الطاقة تدعى الفوتونات فكيف تنتشر هذه الكمات في الخلاء؟

4-وضعت فرضيات كثيرة عن الخلاء في القرن السابق منها مازال قيد الصياغة ومنها ما تم إثباته وكل منها تعرض وجهة نظر مختلفة فكيف تصف كل منها طريقة الانتشار؟ وأيها تصف انتشار الضوء بالطريقة الأكثر قرباً من الواقع؟

Light in Space

# الباب الأول: الخلاء

الشكل 1: الكون الواسع يدفعنا للبحث المستمر

بعد ظهور النسبية حلت الكثير من المشاكل الفيزيائية وبدأت مرحلة جديدة من الفيزياء تركز على إيجاد نظرية شاملة متكاملة تفسّر كل ما يحدث في الكون من تغيرات أو لمعرفة ماهيته ومسعاه ولكن المتعة ليست في إيجاد تلك النظرية بل في البحث عنها وهذا ما يجعل عقول الفيزيائيين في كل مكان تعمل لكي تجد تلك النظرية رغم عدم معرفتنا ببعدها أو قربها إلّا أن الفضول وحبّ المعرفة والإيمان بوجودها يدفعنا إلى القيام بالبحث المستمر.[1]

أن تسافر متأملاً أفضل من أن تصل.

## الفصل الأول: الخلاء بالنسبة للفيزياء الحديثة

تقرّ الفيزياء الحديثة بالعديد من الفرضيات التي تصف الخلاء بالرغم من وجود الخلاف العظيم بين الفلاسفة عن وجود الخلاء ولكننا لسنا بصدد الفلسفة بل نريد وصفاً معقولاً له يمكننا من وصف حركة الأمواج الكهرطيسية فيه بما فيها الضوء نفسه.

### الأثير:[2]

في البداية اعتقد انتشار الضوء ضمن الهواء ولكن تجربة بسيطة هي تجربة الحجرة المفرغة من الهواء حيث انتشر الضوء فيها بشكل طبيعي ألغت فكرة أن الهواء ينقل الضوء وفتحت الباب لفكرة جديدة هي فكرة المادة الموجودة في الخلاء وسماها العلماء بالأثير واعتُقد بأنها من ينقل الضوء وسميَ الخلاء بالوسط الأثيري وهكذا وحسب تلك الرؤية أصبح الكون مؤلفاً من مادة وطاقة وأثير ولا وجود للخلاء ولكنها بقيت محض تخمين حتى مجيء العالمين ميكسيلون ومورلي اللذين أجريا تجربة حاسمة بغرض التأكد من الأثير ووجوده والتجربة بسيطة فباعتبار الأرض تدور حول الشمس بسرعة عشرين ميلاً في الثانية أي إنها تحدث تياراً في الأثير بتلك السرعة فقاما بإسقاط حزمة ضوئية باتجاه التيار على السطح للتأكد من ازدياد أو سرعة الضوء والغريب أن السرعة لم تتغير بل بقيت ثابتة وهذا ما دفع العلماء إلى استبعاد فكرة الأثير تماماً واعتبارها كلاماً فارغاً.

[1] Hawking. Stephen. The Universe in a Nutshell. Bantam; 1st edition (November 6, 2001)
[2] محمود. مصطفى. أينشتين والنسبية

Light in Space

وهذا يقود إلى أن الضوء ينتشر في الفراغ وأن الفراغ لا يحوي مادة لينتقل الضوء عبرها كما قد يكون الكون مؤلفاً من مادة وطاقة تسبحان في الخلاء ...

## تقودنا النسبية إلى...[3]

انفجرت الاعتراضات والاتفاقات منذ عام 1905 حتى اللحظة، حول أمر النسبية التي كشف فيها أينشتاين عن العلاقة المتبادلة بين الطاقة والكتلة والتي أثارت جدلاً وماتزال تثير جدلاً في كل النقاشات المتعلقة بالفيزياء الحديثة.

تقتضي النسبية كما صرّح أينشتاين بأن الخلاء لا يحوي مادة وأن المادة لا تختلف عن الطاقة كما لا يختلف الجليد عن الماء سوى بالمظهر الخارجي ،كما وتنفي وجود الأثير وتخبرنا النظرية بأن الكون مؤلف من أبعاد أربعة وأنها مرتبطة ببعضها ارتباطاً وثيقاً كما وتفسر الجاذبية بطريقة أخرى بوصف المادة مسبباً لانحناء الأبعاد أي أن النسيج الكوني تحكمه الأبعاد الثلاثة المكانية والزمن ووجود المادة في مكان معين من الخلاء يسبب انحناءً في هذه الأبعاد أي انحناءً في النسيج الكوني ولكن هذا لا يعطينا تفسيراً عن ماهية الخلاء بل عن علاقته بالمادة وهذا ما قاله أينشتاين بأن العلم يدرس علاقات بين الموجودات فيمكنه مثلاً تحديد طبيعة الضوء المزدوجة ولكنه لا يستطيع الجزم بماهيته الحقيقية إنما يعطي العلم وصفاً للواقع ولكنها تبقى مجرد وجهة نظر.

لو قمنا الآن بربط المفاهيم سوياً؛ بالنسبة للأثير فقد نقضناه تماماً، ولنتطرق إلى مفهوم الطاقة التي نشعر بتأثيرها علينا وعلى ما حولنا –ولن أذكر الكتلة لأنها أحد أشكال الطاقة حسب النسبية –ولنقل بأنه يحكمها المجال المكاني الزماني الذي تحدث عنه أينشتاين ويمكن افتراض هذا من نتائج الأبحاث العلمية إلا أن النسبية العامة لم تكتف بذلك بل وعرضت مفهوم الأمواج الثقالية؛ والتي اعتمدت على النتيجة الهامة للنظرية العامة للنسبية والتي تقضي بأن الحزم الضوئية تنحني بفعل حقل الجاذبية المتولد عن جسم ذو كتلة –وهذا بالنسبة لمراقب خارجي– ومن البديهي اشتداد الانحناء كلما كان الحقل أكثر قوة فيظهر الانحناء في الكتل الهائلة في نطاق حقل الجاذبية المتولد عن النجوم أو الكواكب[4]، وبما أن الكتل الضخمة تتحرك بتأثير قوى التجاذب بينها أو بتأثير قوى أخرى أحياناً فإنها تولد تغيرات في الزمكان تأخذ شكل الأمواج فتؤثر في حركة الضوء ضمن المجال الزمكاني.

## نظرية الأوتار الفائقة والأبعاد الكثيرة[5]

لم تقف الأمور هكذا فحسب بل طرحت في العقود الأخيرة نظرية مدهشة وهي نظرية الأوتار والتي تنبئ بأنّ الكواركات الضئيلة مؤلفة من جدائل طاقية متناهية الصغر تسمى بالأوتار وهي إما تأخذ شكلاً إهليلجياً فلا يمكن معرفة بدايتها من نهايتها وإما أن تأخذ شكلاً بنهايتين مثبتاً بهما إلى النسيج المكاني وهكذا تتألف المادة من الطاقة ونستطيع تفسير التحول في عالم ميكانيكا الكم كما وتنبأت النظرية بوجود أوتار طاقية مسببة للجاذبية "الجرافيتون"

---

[3] محمود. مصطفى. أينشتين والنسبية

[4] هيفن.كيندال. قصة أعظم 100 اكتشاف علمي على مر الزمن.صفحة 177. ترجمة د.جكر الريكاني. الطبعة الأولى 2010. دار الزمان للطباعة والنشر.دمشق.سوريا

[5] Video: National Science Foundation "nsf".The Elegant Universe .Hosted by: Brain Greene. Edited by: Dick Bartlett .written &produced &directed by: Julia Cort & Joseph Mcmaster. The 11thDimintion

Light in Space

ولكن وثمناً لهذه النظرية الثورية والتي أثبتت الكثير توجّبَ افتراض أحد عشر بعداً والسبب إتاحة مجالات الحرية أمام الأوتار وتخبرنا النظرية بوجود تمزقات في النسيج المكاني بين الذرات بسبب العشوائية الشديدة وأن الأوتار المتحركة تقوم بإصلاح هذه التمزقات وهذا ما يمنع من إحداث كارثة كونية بسبب التمزق.

تتنبأ النظرية بأن الكون أكثر تغيراً وحركة مما كان يظنه أينشتاين لدرجة يمكن وصفه بالعشوائي ولكنه عشوائي بالنسبة لمن لا يعرف النظرية التي تصف كل شيء أي عشوائي بالنسبة لنا، أما بالعودة للخلاء ففي عالم الكوانتم "العشوائي" تصف نظرية الأوتار بعض ما يحدث ولكنها لا تقدم ما يصف طبيعته؛ حيث تصف الأوتار المهتزّة إثر الطاقة وهي إما مثبتة بالنسيج الزمكاني أو حرة تتنقل بين الأبعاد المفترضة ، وهنا يمكن القول أن هناك شبكة كونية افتراضية (كالإنترنت) تسمى بالنسيج الزمكاني مثبت عليها جدائل طاقية وهي البنية الأساسية للكون سواءً في الخلاء أو المادة.

## الباب الثّاني: الضَّوءُ وطبيعتُهُ المزدوجة

الأمواج الكهرطيسية في كل مكان تتعرض لها أجسامنا كل يوم وكل لحظة واعتدنا عليها فهي موجودة قبل أن نوجد نحن ونرى آثارها دوماً وتتميز الأمواج الكهرطيسية بالعديد من الميزات فهي لا تحتاج وسطاً مادياً لانتشارها وتنتشر بسرعة الضوء العظيمة لذا تمَّ استخدامها في الإعلام (التلفاز والراديو والإنترنت...) وتعد القوة الكهرطيسية من أهم القوى في الطبيعة ومن أكثر القوى تأثيراً حيث أنها أكثر قوة من الجاذبية ببلايين المرات كما أنها السبب في انتشار الضوء والمسؤولة عن الكهرباء والصواعق في السماء وطبعاً بسبب الطاقة العظيمة في الفوتونات.

### الفصل الأوّل: طبيعة الموجات الكهرطيسية وخصائصها

القوة فيزيائياً هي الموجهة التي تسير الطاقة للقيام بوظيفة محددة والقوة الكهرطيسية فهي القوة المسببة لحركة الفوتونات مما يجعل المصابيح تنير في منازلنا وهي ذات القوة المسببة لجذب الأجسام الحديدية إلى مغناطيس كما أنها القوة المسببة للموجات الخفية كموجات المايكرويف. فالكهرباء والمغناطيسية وجهان لعملة واحدة ويمكن تحويل كل منهما إلى الآخر، كان الاعتقاد السائد أن القوة المغناطيسية منفصلة عن القوة الكهربائية ولكن عام 1837 اكتشف عالم الفيزياء والرياضيات الإسكتلندي جيمس ماكسويل أنهما عبارة عن قوة واحدة فوضعهما تحت لواء نظرية سماها النظرية الكهرطيسية.

عرف ماكسويل أنه يمكن النظر إلى الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي كحقلي قوة منتشرين في كل أرجاء الفضاء يمكن تمثيل حقلي القوة هذين بشبكة غير منتهية من الأسهم المنبعثة بنعومة من شحنة كهربائية.

Light in Space

أبحر ماكسويل في تخيلاته أبعد من ذلك متصوراً مقدرة الحقلين الكهربائي والمغناطيسي على الاهتزاز بتناغم دقيق يمكنهما من توليد موجة تستطيع الارتحال بذاتها عبر الفضاء دون الحاجة لأي مساعدة خارجية.[6]

تهدف دراسة هذه النظرية إلى معرفة كيف تتفاعل الأجسام المشحونة مع بعضها البعض ومع الحقول المغناطيسية.

إن القوة الكهرطيسية من أهم القوى المكتشفة في علم الفيزياء وهي واحدة من القوى الأساسية الأربعة (القوى الأخرى هي النووية الشديدة والنووية الضعيفة والجاذبية الكتلية).

الشكل: الموجات الكهرطيسية على محاور الأبعاد الثلاثة

تتمثل القوة الكهرطيسية بالموجات الكهرطيسية المميزة والتي تتكون من مجال كهربائي وآخر مغناطيسي متعامدان على بعضهما البعض في الفضاء ويتغيران بشكل دوري مع الزمن وبحيث تنتشر الموجة باتجاه يتعامد مع اتجاهي المجالين الكهربائي والمغناطيسي حسب قاعدة معينة.

إن نسبة شدة المجال الكهربائي إلى شدة المجال المغناطيسي في الموجة الكهرطيسية يسمى المعاوقة المتأصلة والتي تساوي الجذر التربيعي لحاصل قسمة النفاذية على السماحية للوسط الذي تنتشر فيه هذه الموجة. وتسير الموجات الكهرطيسية في الفراغ أو في أي وسط متجانس على شكل خطوط مستقيمة ولكنها قد تتعرض لظواهر عدة عند انتقالها من وسط إلى وسط وهي ظواهر الانعكاس والانكسار والحيود والتشتت.

فعند انتقال موجة كهرطيسية من وسط إلى وسط بينهما حد منتظم غير متعرج فإن جزءا من هذه الموجة سينعكس راجعاً في الوسط الذي جاء منه وبحيث تساوي زاوية الانعكاس زاوية السقوط بينما ينفذ الجزء المتبقي من الموجة الساقطة إلى الوسط الثاني ويسير فيه بشكل منكسر حيث تتحدد زاوية الانكسار من زاوية السقوط وكذلك معاملات الانكسار لكلي الوسطين حسب قانون سنل الشهير.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

حيث n معامل الانكسار.

إن سرعة الموجة الكهرطيسية قد تبلغ سرعة الضوء في أعلى درجة لها وتختلف من وسط لآخر حيث تحتاج لوسط انتشار مثالي تتحقق فيه السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية ويعد الخلاء الوسط الأكثر مثاليةً لانتشار الموجات وتبلغ السرعة في الخلاء $3\times10^8$ وهي نفس سرعة الضوء والذي ما هو إلا موجة كهرطيسية كما أكد ماكسويل.[7]

[6] كاكو.ميشيو. ما بعد أينشتاين ترجمة د.فايز فوق العادة صفحة 34

[7] الهوائيات وانتشار الموجات. الفيزياء التخصصية. الاتصالات.صفحة3



Light in Space

# الفصل الثاني: الضوء موجة كهرطيسية تميزها عيوننا

إنّ الضوء لهو من أعقد الألغاز في الكون حيث يختلف بخصائصه وطبيعته وطريقة انتشاره في الخلاء مما حير العلماء لعقود...

وجاء ماكسويل. واختزل كلّ ما في الفيزياء من قوانين للكهرباء والمغناطيسية في أربع معادلات رئيسية تأخذ أشكالاً عدة وهي[8]:

$$\oint \vec{E}.d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

إنها المعادلة الأولى وهي مشتقة من قانون جاوس للكهرباء والذي يبين توزيع الشحنات في سطح مغلق.

$$\oint \vec{B}.d\vec{A} = 0$$

أما هذه فقد تمَّ اشتقاقها من قانون جاوس للمغناطيسية والذي يقتضي بأن التدفق المغناطيسي خلال سطح مغلق يساوي الصفر وبمعنىً آخر إن خطوط الحقل المغناطيسي لا يمكن أن تبدأ أو أن تنتهي في أي نقطة.

$$\oint \vec{E}.d\vec{A} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

والمعادلة الثالثة مشتقة من قانون فراداي الشهير والذي يصف كيف تنشأ الحقول الكهربائية عندما يتغير التدفق المغناطيسي.

$$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

وتصف المعادلة الأخيرة نشأة الحقل المغناطيسي بتغير الحقل الكهربائي والتيار الكهربائي قد قام ماكسويل ببعض التعديل على المعادلة إلا أنها مشتقة من قانون أمبير أساساً والذي هو:

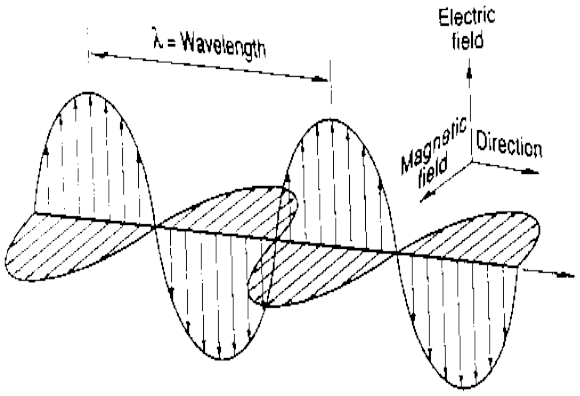
$$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 I$$

نتج عن حلّ تلك المعادلات تحديد سرعة الموجة والتي كانت نفسها سرعة الضوء (بالمصادفة) ولكنها المصادفة التي رفعت الغطاء عن أحد أعمق ألغاز الطبيعة (مملكة الفوتونات).

[8] Physics for Scientists and Engineers Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr. page 1033

Light in Space

وتبين أن الضوء ما هو إلا أمواج مؤلفة من حقول كهربائية تتحول إلى حقول مغناطيسية وبالعكس، وبعد وفاته بعشر سنوات جاءَ عالم آخر اسمه هينريخ هرتز وأثبت صحة فرضية ماكسويل تجريبياً وفتح الباب إلى عصرٍ جديد واختراعات جديدة غير مألوفة من قبل كالراديو والتلفاز وغيرهما وبالرغم من أن معادلات ماكسويل قد وضعت قوانين نيوتن جانباً وتصرفت بالزمان والمكان محدثة تشوهات إلا أن أحداً لم يلحظ ذلك حتى جاء فارس جديد على أرض المعركة واسمه آلبرت أينشتاين ولا داعي لذكر أي شيء آخر عنه فأينشتاين أشهر من نار على علم وقد أكسبته نظرياته الثورية شهرة لاحد لها وإن من المعروف أن آينشتاين قد فسر معادلات ماكسويل بطريقة جديدة منشئاً النظرية الجديدة التي غيرت مفهوم الزمان والمكان وتصوراتنا عن الضوء حتى يومنا هذا.



الشكل (2): الأمواج الكهرطيسية

لقد كان الاعتقاد لآلاف السنين أن الجسيمات والموجات كينونات منفصلة لكن هذا التفريق سرعان ما انهار مع مطلع القرن التاسع عشر لم يقتصر الأمر على ما أكده بلانك وأينشتاين من أن الضوء موجة يمتلك خصائص جسيمية فقد أدت التجارب أن الجسيمات بدورها تبدي مسلكاً موجياً وهذا ما لوحظ من سلوك الإلكترون.[9]

وتقدم عالم ألماني اسمه "هايزنبرج" وبرفقته عالم آخر "بور" ليقولا إنه من الممكن تخطي هذه الفجوة وأنه لا توجد مشكلة في كلي الاعتبارين وقدم مجموعة من المعادلات يمكن عن طريقها حساب ما يتعلق بالضوء على أن الضوء أمواج أو على أنه ذرات، ولمن يريد أن يختار الافتراض الذي يعجبه وسيجد أن المعادلات تصلح للغرضين في وقت واحد.[10]

والغريب في هذا التصور الثنائي أنه يبدو كتناقض كبير ولكن الحقيقة أنه ازدواج وليس تناقضاً على الإطلاق، فكما يقال: العلم لا يدرك ماهيات بل يدرك سلوك الموجودات ضمن نطاقات محددة.

كان هايزنبرج قد اعتبر معادلاته قوانين احتمالية إحصائية تعبر عن سلوك مجموعات هائلة من بلايين بلايين الفوتونات أما الفوتون نفسه فقد نفى هايزنبرج امكانية تحديده أو توصيفه لاستحالة "التقاطه" ودراسته.

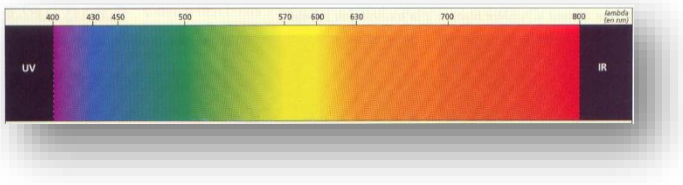
حين ننظر إلى عالم الفوتونات نجد عشوائية كبيرة لدرجة نستطيع القول بأنه مزيج غير منتظم بل ومجنون من الإشعاعات غير المنتظمة مختلفة التردد والطور، إن هذه العشوائية هي ما يصعب الدراسة الفعلية لماهية الفوتونات.

[9] كاكو.ميشيو. ما بعد أينشتاين. ترجمة د. فايز فوق العادة صفحة 57

[10] أينشتين والنسبية.محمود.مصطفى.صفحة27

Light in Space

واليوم أصبح واضحاً أن الضوء هو التمثيل المرئي لطيف كامل من الموجات الكهرطيسية ويشمل هذا النطاق ما نطلق عليه حالياً موجات الراديو التي يبلغ طولها الموجي 300 ياردة والمايكرويف التي يبلغ طولها ثلاث بوصات، وعندما تقصر الأطوال الموجية ويزداد التردد مع قصرها فإنها تنتج الطيف الضوئي المرئي والذي يتراوح بين الأحمر (25 من المليون من البوصة) إلى البنفسج (14 من المليون من البوصة)، والأطوال الموجية الأكثر قصراً تنتج الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة غاما.[11]



الشكل(3): الأمواج الكهرطيسية المرئية

أي باختصار الضوء هو موجات كهرطيسية مرئية.

## الفصل الثالث: جسيم الفوتون

ربما كانت ازدواجية الضوء شكلاً طريفاً للجمال من صنع الطبيعة ولكنه رغم غرابته إلا أنه مثير للدهشة والتفكير فقد دفع العلماء إلى إجراء التجارب لعقود والتبين فيما بعد أنهم على بعد بعيد من اكتشاف الفيزياء.

كانت أولى محاولات توصيف جسيمات الفوتونات من قبل العالم العربي ابن الهيثم الذي ألف كتاب المناظر حيث وصف الضوء بـ"حبال النور" وأنه "مجموعة من الأشعة المادية اللطيفة لها أطوال وعروض" وهذا التعبير كان الأول في وصف ماهية الضوء ولم يكتف ابن الهيثم بذلك بل أشار إلى أنه"إذا سقطت هذه الأشعة على جسم ما أسخنته وإذا تجمعت خلال عدسة مرآة مقعرة في بؤرة إلى جسم قابل للاحتراق أحرقته" وكأنه يقول أن الضوء عبارة عن طاقة.[12]

وبعد قرون أتى نيوتن ليؤكد كلامه وقال بأن الضوء عبارة عن جسيمات متناهية الصغر، أما أينشتاين ففي تفسيره للأثر الكهرضوئي أخبرنا أن الضوء عبارة عن جسيمات وسماها الفوتونات وأن طاقة كل منها هي $hf$ حيث $h$ هو ثابت بلانك و$f$ تردد الضوء الساقط ويعطي كل فوتون ساقط كل طاقته للإلكترون الذي يتحرر من المعدن.[13]

$$E = hf$$

بطريقة أوضح، عندما يتم امتصاص الفوتون من قبل الإلكترون يتم تدمير الفوتون بشكل كامل، كما يتم نقل طاقته بالكامل إلى الإلكترون الذي يقفز بدوره إلى مستوى جديد من الطاقة، وهكذا لا يعود هناك فوتون وهذا ما أنتجته

[11] إيزاكسون.والتر.أينشتاين حياته وعالمه.ترجمة هاشم أحمد صفحة 131

[12] د.أحمد فؤاد باشا.كلية العلوم.جامعة القاهرة

[13] كلية العلوم.جامعة اليرموك.إربد.الأردن.قسم الفيزياء.الفصل الثاني.المحاضرة7.د.نضال رشيدات

Light in Space

المعادلات، ويحدث عكس ذلك عند طرد الإلكترون لفوتون حيث يهبط الإلكترون إلى مستوى طاقة أقل محرراً فوتوناً فجأة.[14]

قد يسأل سائل من أين يأتي الفوتون بتلك الطريقة المفاجئة؟ ولكن من الأجدر ألا ندخل في التفاصيل ذات التعقيد الفلسفي وأن نكتفي بمعرفة الموضوع كما يُرى من الخارج ونطبق مقولة العالم ريتشارد فاينمان: "اسكت واحسب"، ولنقم بالعمليات اللازمة لاستنتاج حساب طاقة الفوتون بدءاً من معادلة أينشتاين:

$E = K + mc^2$ حيث K الطاقة الحركية

$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma mc^2$ الطاقة الكلية لجسيم نسبي

ونذكر الزخم الخطي لجسيم نسبي ويساوي:

$$p = \gamma mv$$

ثمَّ نجد بالاستفادة من المعامل $\gamma$:

$$E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2$$

وعندما الجسم بوضع السكون ينعدم الزخم وتصبح الطاقة الكلية مساوية للطاقة المتبقية (الطاقة غير الحركية) وبالنسبة لجسيم عديم الكتلة كالفوتون نعوض في المعادلة السابقة قيمة الكتلة بالصفر لينتج لدينا القانون[15]:

$$E = pc$$

إن تلك المعادلة تصف بالضبط الطاقة الكلية للفوتون والزخم الخاص به.

تتفاعل الفوتونات مع المادة بطريقتين هما الأثر الكهرضوئي وظاهرة كومبتون والفرق بينهما أنه في الأثر الكهرضوئي يتخلى الفوتون عن كامل طاقته للإلكترون ولكن في بعض الأحيان يسبب تشتت الفوتون عدم التخلي عن الطاقة كلها بل عن جزء منها فقط وهذا ما يدعى بظاهرة كومبتون، وقد قام العالم آرثر كومبتون بالتحقق من هذه الظاهرة عملياً عام 1923 فقام بإسقاط أشعة X على لوح من الكربون وحساب الفرق في الأطوال الموجية للأشعة المتشتتة ووجد كومبتون أن الأطوال الموجية المختلفة تعتمد على زاوية تشتت الأشعة المتشتتة حيث تكون أعظمية عند $180°$.

يعطى حساب الفرق بالأطوال الموجية بالعلاقة[16]:

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

[14] https://nasainarabic/r/a/1221
[15] Physics for Scientists and Engineers Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr. page1217
[16] Physics for Scientists and Engineers Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr. page1247

Light in Space

في الحقيقة تبدي الازدواجية أحياناً تضارب الأمر من ناحية تلك الطبيعة الموجية الجسيمية وللإشارة فقط، علق على ذلك أحد الساخرين بأن قال: بالتبادل، ثلاثة أيامٍ من الأسبوع تدعم فيها التجارب نظرية الفوتون، بينما تثبت الأدلة في ثلاثة أيام أخرى نظرية الموجة، وعليه من الضروري استخدام اليوم السابع من الأسبوع للصلاة من أجل الهداية الإلهية.[17]

# الباب الثالث: رحلة الضوء عبر الخلاء

لا يحتاج الضوء إلى وسط مادي لينتشر فيه فالأمواج الكهرطيسية ليست اهتزاز ذرات أو جزيئات كالأمواج الميكانيكية بل تنتشر بذاتها على هيئة حقلين مغناطيسي وكهربائي متعامدين، ولكن كيف يتحقق هذا الانتظام الدقيق في سير الحقلين لتشكيل موجة كهرطيسية؟ ومن أين تحصل على الطاقة التي تسيرها عبر الخلاء لمسافات شاسعة قبل أن تتشتت أو تحيد؟

## الفصل الأوّل: مصدر طاقة الضوء

لكي نعرف مصدر الطاقة في الأمواج الكهرطيسية يجب دراسة مثال عنها وليكن أشعة غاما $\gamma$ بما أنها من أكثر الأشعة الكهرطيسية نفاذية.

تنطلق أشعة غاما من العناصر المشعة مثل اليورانيوم، كما تنتج عن التفاعلات النووية في الفضاء، وهي قادرة على النفاذ بشكلٍ خارق لدرجة أننا نحتاج صفيحة سميكة من الرصاص لإيقافها. كما تمتاز بموجاتٍ قصيرة جداً أي أن ترددها شديد العلوّ، وهي أشعة مؤينة للمادة، وقابلة للتشتت عند ارتطامها بالغلاف الجوي للأرض[18].

نلاحظ أن أشعة غاما تنتج عندما تحدث تغيرات في نواة العنصر (انشطار، اندماج نووي... إلخ)، أي إن أشعة غاما هي الطاقة الزائدة عن التغيرات أو يمكن القول إن طاقتها ناتجة عن إعادة ترتيب النكليونات في النواة بشكل أكثر استقراراً بعد تلك الحوادث مباشرةً[19]، ومن الواضح أن الطاقة التي انطلقت ناتجة عن القوة النووية الشديدة التي تربط النكليونات داخل النواة، وبما أنها قوة هائلة تتصف أشعة غاما بالنفوذية العالية.

إذاً إن مصدر طاقة الفوتونات في أشعة غاما هو مصدر انطلاقها أي من نواة العنصر فهي عبارة عن طاقة متحررة.

لندرس مثالاً آخر قبل التطرق إلى الضوء ألا وهو الأشعة السينية، والتي تصدر عن ذرات العناصر الثقيلة بعد إثارتها ولها طول موجي أقصر بكثير من أطوال الأمواج الضوئية، وتمتلك قدرة نفوذية عالية، كما أن لها القدرة على تأيين الغازات.

---

[17] الصفحة 255. سبيلرج. نيثان. أندرسون. برايون. ترجمة أ.د. أحمد عبد الله السماحي. أ.د. فتح الله الشيخ. أفكار سبع هزت العالم. كلمات عربية للترجمة والنشر

[18] الكيمياء للصف الثالث الثانوي. المنهاج الرسمي السوري. لعام 2014-2015

[19] Chemistry. The Central Science 13Th edition Theodore L. Brown - H. Eugene Lemay, Jr. Bruce E. Bursten - Catherine J. Murphy - Patrick M. Woodward - Matthew W. Stoltzfus. Page 913

Light in Space

أما عن طريقة انبعاثها فعند تسخين سلك من التنغستين تنبعث منه إلكترونات يتم تسريعها وحين تصطدم الإلكترونات السريعة بذرات الهدف فإن جزءاً منها يؤدي إلى انتزاع إلكترون من الطبقات الداخلية في ذرات الهدف ويبقى مكانه شاغراً، ينتقل أحد الإلكترونات من طبقاتٍ أعلى في الذرة إلى المكان الشاغر وهنا تصدر فوتونات عالية الطاقة هي الأشعة السينية[20].

في الأشعة السينية تنشأ طاقة الفوتونات عن انتقال الإلكترونات إلى سويات طاقية أدنى مما يحرر تلك الطاقة على شكل كمات، أي أنه في الأشعة السينية أيضاً تصدر طاقة الفوتونات عن مصدر الإشعاع وهي أيضاً طاقة زائدة متحررة.

مما سبق نجد أن الأشعة الكهرطيسية بشكل عام تأخذ فوتوناتُها الطاقةَ من مصدر الانبعاث الإشعاعي فالطاقة الضوئية الصادرة عن الشمس تأخذ فوتوناتها الطاقة من تفاعلات الاندماج النووي التي تحدث في الشمس. وهي طاقة زائدة متحررة كباقي الأشعة الكهرطيسية.

إن هذه الطاقة الكبيرة تجعل الأمواج الكهرطيسية تحافظ على طاقتها لمسافات كبيرة وكلما كان طول الموجة أقل كلما كان ذلك دليلاً على أنها ذات طاقة أعلى لأن ترددها سيكون أكبر وبالتالي سيكون من الصعب أن تتشتت، وهذه حال أشعة غاما ذات التردد العالي، أما الأشعة الضوئية ذات التردد المنخفض نسبياً فهي تتشتت بسرعة أكبر من سرعة تشتت أشعة غاما $\gamma$ لأنها ذات طول موجي قصير.

## الفصل الثاني: انتشار الأمواج الضوئية في الخلاء

الأمواج الضوئية من وجهة نظر النسبية:

في نظرية النسبية يعرض أينشتاين ما يسمى بالزمكان ويمكن تمثيله بشبكة إحداثيات ثنائية كما في الشكل

يسبب وجود كتلة معينة انحناءً في هذه الشبكة أي تشوُّهاً في هذا المسطح كما أن الطاقة أيضاً تسبب انحناءً طفيفاً في الشبكة، وبأية حال، فإن الأمواج الضوئية هي حقلان كهربائي ومغناطيسي يسبحان عبر الخلاء أي أنهما عبارة عن طاقة ولكنها تأخذ شكلاً منتظماً عند انتشارها.

أي أن حقلاً مغناطيسياً أفضى إلى حقل كهربائي أخذ بدوره بالاهتزاز وأدى إلى حقل مغناطيسي آخر لم يلبث أن يتحول إلى حقل كهربائي جديد وهكذا، في الحقيقة إن هذه السلسلة الطويلة جداً من الحقول الكهربائية والمغناطيسية المهتزة يمكن أن ترتحل معتمدة على نفسها بشكل مشابه للموجة[21].

هكذا هي رحلة الأمواج الكهرطيسية عبر الخلاء فهي طاقة تخرج من المنبع وتنتشر بشكلٍ متناغم لتحقق شكل الموجة. والسؤال هنا لماذا تنتشر تلك الطاقة في الخلاء بشكل موجة وليس بشكلٍ اعتباطي؟

[20] الفيزياء للصف الثالث الثانوي. المنهاج الرسمي السوري. لعام 2013-2014
[21] كاكو. ميشيو. ما بعد أينشتاين. الصفحة 36

Light in Space

في الواقع للإجابة على هذا السؤال يجب معرفة سبب تولد الإشعاع بتلك الطريقة المنتظمة وبالنظر إلى النظرية الكهرطيسية للضوء فإن حركة الشحنة ذهاباً وإياباً (التذبذب) تنتج طاقة الإشعاع الكهرطيسي. فإذا كان التذبذب عالي التردد بما فيه الكفاية، سيشع الضوء المرئي[22].

بطريقة أخرى إن الحركة التي تقوم بها الشحنة هي ما يصدر الطاقة وبما أنها حركة متذبذبة فيظهر الإشعاع بشكل موجة متناظرة الشكل عبر الفضاء ثلاثي الأبعاد.

ينتقل الضوء عبر المجال الزمكاني ولكنه لا يسبب التشوه الملحوظ ذاته الذي تحدثه المادة وهذا لسببين الأول سرعته الهائلة التي يتفوق بها على جميع السرعات المعروفة حتى الآن في الكون أي أن كل فوتون لا يلبث أن يبقى في مكانه لأقل من لحظة حتى ينتقل إلى نقطةٍ أخرى، والسبب الثاني— وهو الأوجه –أن الطاقة أصلاً ليست بكثافة المادة أي أنها لا تحمل كتلة كافية وأنه حتى الأجسام التي بحجم الجبال لا تحدث تشوهاً ملحوظاً في المجال الزمكاني ويلزم الأمر أن يكون الجسم بحجم كوكبٍ أو بحجم الشمس لكي يحدث تشوهاً ملحوظاً.

## الفصل الثالث: الفوتونات في الخلاء

تعتبر الفوتونات جسيمات أو كمات من الطاقة كما أنها عديمة الكتلة كما ذكرنا ولكن لها زخم محدد وهذا ما يكسبها الطبيعة الموجية ولكن هل تنتقل الفوتونات على شكل موجات فيبدو طيفها كأمواج كهرطيسية أم أن الطبيعة الجسيمية منفصلة تماماً عن الطبيعة الموجية للضوء فالفوتونات كينونات منفصلة عن الأمواج الكهرطيسية وتنتقل بطريقة خاصة بها؟

حسناً من المعلوم أن ماكس بلانك وآلبرت أينشتاين قد قاما بتوضيح فكرة انتقال كمات الطاقة وافترض أينشتاين أن كوانتم الطاقة هو الفوتون وأنه حزم مركزة، حملت فرضية الفوتون هذه معها بعض التضمينات التي لم تكن لتتوقعها النظرية الكهرطيسية فمن ناحية، كان من الضروري اعتبار أن الفوتونات مدمجة هندسياً، أي أن الفوتون يتحرك مثل القذيفة وليس كموجة، وإلا فإن طاقة فوتون فريد قد تنتشر في جبهة موجة قطرها عدة أقدام أو حتى عدة ياردات[23].

في أوائل القرن العشرين كان الفيزيائيون يواجهون موضوع الطبيعة المزدوجة ففي تجارب معينة لهؤلاء الذين يتعاملون بصفة رئيسية مع انبثاق وامتصاص الضوء –كظاهرة الأثر الكهرضوئي–كان تطبيق نظرية الفوتون منطقياً تماماً. وعلى الجانب الآخر وفي تجارب أخرى مع الذين يتعاملون بشكل رئيسي مع انتشار الضوء (طريقة حركته من مكان إلى آخر) تصلح فرضية الموجة تماماً.[24] لقد كان الموضوع أشبه بانتقاء الأداة الأفضل لتجربة ففرضية الفوتونات تارةً وفرضية

---

22 سبيلرج. نيثان. أندرسون. برايون. ترجمة أ.د. أحمد عبد الله السماحي. أ.د. فتح الله الشيخ. أفكار سبع هزت العالم. كلمات عربية للترجمة والنشر. صفحة 242

23 الصفحة 252. سبيلرج. نيثان. أندرسون. برايون. ترجمة أ.د. أحمد عبد الله السماحي. أ.د. فتح الله الشيخ. أفكار سبع هزت العالم. كلمات عربية للترجمة والنشر

24 سبيلرج. نيثان. أندرسون. برايون. ترجمة أ.د. أحمد عبد الله السماحي. أ.د. فتح الله الشيخ. أفكار سبع هزت العالم. كلمات عربية للترجمة والنشر الصفحة 255

Light in Space

الأمواج الكهرطيسية تارةً أخرى حسب التجربة، ولكن هذا لا يمنع استخدام الخصائص المعروفة للفوتونات لوصف انتشار الضوء في الخلاء، بل طريقة لتسهيل الحسابات والرؤية المنطقية.

عند انتقال الفوتون في الفضاء لا يحدث أي تأثير عليه وبالتالي فهو لا يفقد طاقة ولدراسة طبيعة الطاقة المحركة في الفوتون نعود إلى أثر كومبتون حيث إن الفوتون يفقد جزءاً من طاقته عند الارتطام بإلكترونات وذلك بسبب زيادة طول موجته ونقصان التردد، ولكن بالطبع تبقى الطاقة الكلية محفوظة أما الطاقة المحركة فقد يطرأ عليها تغيير.

وهناك ملاحظة أخرى بالعودة لقانون سنل بأن انتشار الضوء في الأوساط الشفافة المغايرة للخلاء كالزجاج فإن الضوء يمر فيه أبطأ من مروره في الهواء أو الفراغ.

كما ذكر يعتبر النسيج الكوني مؤلفاً من شبكة احداثيات ثنائية تدعى الزمكان وأن المادة والطاقة تسبب انحناءً عبره ولكن بالنسبة للفوتونات فهي كمات طاقة ضئيلة مما يجعل قدرتها على حني الزمكان صغيرةً جداً بل وتسعى إلى الصفر.

وبالعودة إلى نظرية الأوتار الفائقة، نجد أنَّه كما أن الفوتونات حزم طاقية والأوتار الفائقة جدائل طاقية والاختلاف أن الفوتون مركز في حيز صغير للغاية ويتحرك بحرية في الخلاء بينما الوتر الفائق فهو ليس مركزاً بل يأخذ شكل خط مغلق أو مفتوح وقد يكون مثبتاً أو حراً.

Light in Space

# الخاتمة والاستنتاجات

وبعد أن تمَّ البحث بعون الله، وضعت إجاباتٍ على أسئلة إشكالية البحث، تلك الأسئلة التي كانت تطرق ذهني كلما أشعلت النور، فقمت بجمع الاستنتاجات لكي أعرضها في النهاية على النحو التالي:

ــ يتم انتشار الموجة على هيئة حقلين مغناطيسي وكهربائي متعامدين على محاور الأبعاد الثلاثة وقد تتعرض للحيود أو التشتت.

ــ عند اهتزاز الإلكترونات أو أي جسيم يحرر طيفاً أثناء حركته في مصدر الإشعاع تتولد طاقة تنتقل عبر الخلاء على هيئة معينة كالحرارة مثلاً ولكن إذا كان الاهتزاز متذبذباً أي متناغماً، تتولد موجة كهرطيسية منتظمة ويكون الإشعاع على شكل كمات من الطاقة تدعى الفوتونات.

ــ تنتقل الفوتونات عبر الخلاء بشكل قذائف وليس كموجات أي إنها لا تنتشر في الخلاء على توافق مع الموجات الكهرطيسية بل إنها مستقلة حركياً عن الشكل الموجي للضوء.

ــ إن كل نظرية فيزيائية لها ميزاتها في وصف انتقال الضوء فالنسبية العامة تفسر انحناء الضوء القادم من النجوم البعيدة كما تصف النسبية الزخم الخطي وحركة الفوتون، أما الأوتار الفائقة فهي تعرض مفهوم الطاقة على نحوٍ مختلف (بشكل جدائل أو أوتار) وهذا بدوره يغير المفهوم العام لجسيم الفوتون والذي يعد مؤلفاً من طاقة، ولكنها لا تعرض تصوراً جديداً عن انتقال الفوتونات أو الأمواج الضوئية في الخلاء.

وأخيراً أودّ الإشارة إلى أن العلم لا يقف أبداً عند حدٍّ معين، بل يستمر في التعمق أكثر فأكثر وكلما زاد التعمق زاد التعقيد وزاد فضولنا وزادت اكتشافاتنا وخبراتنا.

Light in Space

# المراجع


أينشتين والنسبية، تأليف: د. مصطفى محمود.

قصة أعظم 100 اكتشاف علمي على مر الزمن، تأليف: كيندال هيفن، ترجمة د.جكر الريكاني. الطبعة الأولى 2010 دار النشر: دار الزمان للطباعة والنشر في دمشق \ سوريا.

ما بعد أينشتاين، تأليف: د. ميشيو كاكو، ترجمة د.فايز فوق العادة

الهوائيات وانتشار الموجات الفيزياء التخصصية قسم الاتصالات، الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني، المملكة العربية السعودية، طبعة عام 1429 هـ

أينشتاين حياته وعالمه تأليف والتر إيزاكسون ترجمة هاشم أحمد.

د.أحمد فؤاد باشا، كلية العلوم جامعة القاهرة، قناة الجزيرة الوثائقية.

كلية العلوم، جامعة اليرموك، إربد، الأردن، قسم الفيزياء، الفصل الثاني، المحاضرة7، د.نضال رشيدات

أفكار سبع هزت العالم. تأليف:نيثان سبيلرج، و برايون أندرسون. ترجمة أ.د. أحمد عبد الله السماحي و أ.د. فتح الله الشيخ، دار النشر: كلمات عربية للترجمة والنشر

الكيمياء للصف الثالث الثانوي. المنهاج الرسمي السوري. لعام 2014-2015

الفيزياء للصف الثالث الثانوي. المنهاج الرسمي السوري. لعام 2013-2014

The Universe in a Nutshell, By: Stephen Hawking, Bantam; 1st edition (November 6, 2001)

Video: National Science Foundation "nsf".The Elegant Universe .Hosted by: Brain Greene. Edited by: Dick Bartlett .written &produced &directed by: Julia Cort & Joseph Mcmaster. The 11thDimintion

Physics for Scientists and Engineers Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr

Chemistry. The Central Science 13Th edition Theodore L. Brown - H. Eugene Lemay, Jr. Bruce E. Bursten - Catherine J. Murphy - Patrick M. Woodward - Matthew W. Stoltzfus.

https://nasainarabic/r/a/1221


Light in Space

# فهرس


| التصنيف | العنوان | رقم الصفحة |
|---|---|---|
| المقدمة وإشكالية البحث | - | 1 |
| الباب الأول | الخلاء | 2 |
| الفصل الأول | الخلاء بالنسبة للفيزياء الحديثة | 2 |
| الباب الثاني | الضوء وطبيعته المزدوجة | 4 |
| الفصل الأول | طبيعة الموجات الكهرطيسية وخصائصها | 4 |
| الفصل الثاني | الضوء موجة كهرطيسية تميزها عيوننا | 6 |
| الفصل الثالث | جسيم الفوتون | 8 |
| الباب الثالث | رحلة الضوء عبر الخلاء | 10 |
| الفصل الأول | مصدر طاقة الضوء | 10 |
| الفصل الثاني | انتشار الأمواج الكهرطيسية في الخلاء | 11 |
| الفصل الثالث | الفوتونات في الخلاء | 12 |
| الخاتمة والاستنتاجات | - | 14 |
| المراجع | - | 15 |
| الفهرس | - | 16 |
| فهرس الصور | - | 16 |

| الشكل | المرجع | رقم الصفحة |
|---|---|---|
| (1) | الشابكة | 2 |
| (2) | تصميم شخصي اعتماداً على المراجع المذكورة في الصفحة | 7 |
| (3) | تصميم شخصي اعتماداً على المراجع المذكورة في الصفحة | 8 |