

Photon

Le **photon** est le quantum d'énergie associée aux ondes électromagnétiques (allant des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible), qui présente certaines caractéristiques de particule élémentaire. En théorie quantique des champs, le photon est la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique. Autrement dit, lorsque deux particules chargées électriquement interagissent, cette interaction se traduit d'un point de vue quantique comme un *échange* de photons.

L'idée d'une quantification de l'énergie transportée par la lumière a été développée par Albert Einstein en 1905, à partir de l'étude du rayonnement du corps noir par Max Planck, pour expliquer l'effet photo-électrique qui ne pouvaient pas être compris dans le cadre d'un modèle ondulatoire classique de la lumière, mais aussi par souci de cohérence théorique entre la physique statistique et la physique ondulatoire^[4]. La découverte de l'effet Compton en 1923, donnant également des propriétés corpusculaires à la lumière, et l'avènement de la mécanique quantique et de la dualité onde-corpuscule, amène à considérer ce quantum comme une particule, nommée *photon* en 1926.

Les photons sont des « paquets » d'énergie élémentaires, ou quantum de rayonnement électromagnétique, qui sont échangés lors de l'absorption ou de l'émission de lumière par la matière. De plus, l'énergie et la quantité de mouvement (pression de radiation) d'une onde électromagnétique monochromatique sont égales à un nombre entier de fois celles d'un photon.

Le concept de photon a donné lieu à des avancées importantes en physique expérimentale et théorique, telles que les lasers, les condensats de Bose-Einstein, l'optique quantique, la théorie quantique des champs et l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique. Le photon est une particule de spin égal à 1, c'est donc un boson^[5], et sa masse est nulle.

L'énergie d'un photon de lumière visible est de l'ordre de 2 eV, ce qui est extrêmement faible : un photon seul est invisible pour l'œil d'un animal et les sources de rayonnement habituelles (antennes, lampes, laser, etc.) produisent de très grandes quantités de photons, ce qui explique que la nature « granulaire » de l'énergie lumineuse soit négligeable dans de nombreuses situations étudiées par la physique. Il est cependant possible de produire des photons un par un grâce aux processus suivants :

- transition électronique ;
- transition nucléaire ;
- annihilation de paires particule-antiparticule.

1 Historique

1.1 Origine du terme « photon »

Les photons ont originellement été appelés « **quanta lumineux** » (*das Lichtquant*) par Albert Einstein^[4]. Le nom moderne « photon » est dérivé du mot grec qui signifie “lumière”, *φῶς, φωτός* (translittéré *phos, photos*). Ce nom a été proposé par Frithiof Wolfers dans une note présentée à l'Académie des sciences par Aimé Cotton le 26 juillet 1926^[6], à propos d'une répulsion que les photons étaient censés subir de la part de la matière. Il a également été mis en avant par le chimiste Gilbert N. Lewis, dans une lettre à *Nature* datée du 29 octobre et publiée le 18 décembre 1926^[7], à propos d'une théorie spéculative dans laquelle les photons étaient « incroyables et indestructibles ». Bien que ni la théorie de Wolfers ni celle de Lewis ne méritassent beaucoup d'attention, le nouveau nom, *photon*, fut adopté par la communauté scientifique. Il se répandit d'autant plus rapidement qu'il avait déjà commencé à être utilisé dès 1924, comme en témoignent les publications du bio-chimiste René Wurmser^{[8],[9]}. John Joly avait même déjà proposé le nom de *photon* en 1921, mais c'était pour désigner l'énergie correspondant à un stimulus élémentaire allant de la rétine au cerveau^[10].

En physique, un photon est représenté par le symbole γ , la lettre grecque gamma. L'utilisation de ce symbole pour le photon provient probablement des rayons gamma, qui furent découverts en 1900 par Paul Ulrich Villard^{[11],[12]}. En 1914, Rutherford et Edward Andrade^[13] démontraient que ces rayons gamma étaient une forme de lumière. En chimie et en optique, les photons sont habituellement symbolisés par $h\nu$, l'énergie du photon, où h est la constante de Planck et la lettre grecque ν (nu), sa fréquence. À l'occasion, le photon peut être symbolisé par hf , où sa fréquence est identifiée par f .

1.2 Développement de la notion de « quanta de lumière »

La description de la lumière a suivi au cours de l'histoire un curieux mouvement de balancier entre une vision corpusculaire et une vision ondulatoire. Dans la plupart des théories jusqu'au XVIII^e siècle, on considère que la lumière est constituée de particules. Bien que des modèles ondulatoires soient proposés par René Descartes (1637)^[14], Robert Hooke (1665)^[15] et Christian Huygens (1678)^[16], les modèles particuliers restent dominants,

en partie en raison de l'influence d'Isaac Newton^[17]. Un changement de paradigme a lieu à partir de la mise en évidence des phénomènes d'interférences et de diffraction de la lumière par Thomas Young et Augustin Fresnel au début du XIX^e siècle, et en 1850 les modèles ondulatoires deviennent la règle^[18] à la suite de l'expérience menée par Léon Foucault sur la vitesse de propagation de la lumière. La prédiction par Maxwell en 1865 du fait que la lumière soit une onde électromagnétique^[19], suivie de la confirmation expérimentale de Hertz en 1888^[20], semble porter un coup de grâce aux théories corpusculaires de la lumière.

La théorie ondulatoire de Maxwell ne rend cependant pas compte de toutes les propriétés de la lumière. Cette théorie prédit que l'énergie d'une onde lumineuse dépend seulement de l'amplitude de l'onde, mais pas de sa fréquence ; or de nombreuses expériences indiquent que l'énergie transférée de la lumière aux atomes dépend seulement de la fréquence et non de l'amplitude. Par exemple, certaines réactions chimiques ne sont possibles qu'en présence d'une onde lumineuse de fréquence suffisante : en dessous d'une fréquence seuil, quelle que soit l'intensité incidente, la lumière ne peut amorcer la réaction. De manière similaire, dans l'effet photoélectrique, les électrons ne sont éjectés d'une plaque de métal qu'au-dessus d'une certaine fréquence, et l'énergie des électrons émis dépend de la fréquence de l'onde, et non de son amplitude. Dans le même ordre d'idée, les résultats obtenus à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle sur le rayonnement du corps noir^[21] sont reproduits théoriquement par Max Planck en 1900 en supposant que la matière interagissant avec une onde électromagnétique de fréquence ν ne peut recevoir ou émettre de l'énergie électromagnétique que par paquets de valeur bien déterminée égale à $h\nu$ – ces paquets étant appelés des *quanta*^{[22],[23]}.

Puisque les équations de Maxwell autorisent n'importe quelle valeur de l'énergie électromagnétique, la plupart des physiciens pensaient initialement que cette quantification de l'énergie échangée était due à des contraintes encore inconnues sur la matière qui absorbe ou émet la lumière. En 1905, Einstein fut le premier à proposer que la quantification de l'énergie soit une propriété de la lumière elle-même^[4]. Bien qu'il ne remette pas en cause la validité de la théorie de Maxwell, Einstein montre que la loi de Planck et l'effet photoélectrique pourraient être expliqués si l'énergie de l'onde électromagnétique était localisée dans des quanta ponctuels qui se déplaçaient indépendamment les uns des autres, même si l'onde elle-même était étendue continuellement dans l'espace^[4]. Dans son article, Einstein prédit que l'énergie des électrons émis lors de l'effet photoélectrique dépend linéairement de la fréquence de l'onde. Cette prédiction forte sera confirmée expérimentalement par Robert Millikan en 1916, ce qui lui vaudra – parallèlement à ses expériences sur les gouttes chargées – le prix Nobel de 1923^[24]. En 1909 et en 1916, Einstein montre que, si la loi de Planck du rayonnement du corps noir est exacte, les quanta d'éner-

gie doivent également transporter une impulsion $p = h/\lambda$, ce qui en fait des particules à part entière^[réf. nécessaire]. L'impulsion du photon a été mise en évidence expérimentalement par Arthur Compton^[25], ce qui lui valut le prix Nobel de 1927.

1.3 Objections à l'hypothèse des quanta de lumière

Pendant tout le début du XX^e siècle cependant, la notion de photon reste discutée, principalement en raison de l'absence d'un formalisme permettant de combiner les phénomènes ondulatoires avec les phénomènes corpusculaires nouvellement découverts. Ainsi en 1913, dans une lettre de recommandation en faveur de l'admission d'Einstein à l'académie des sciences de Prusse, Planck écrit^[26] :

« Il ne faut pas trop lui tenir rigueur de ce que, dans ses spéculations, il ait occasionnellement pu dépasser sa cible, comme par exemple avec son hypothèse des quanta de lumière. »

De nombreux effets mettant en évidence la nature quantifiée de la lumière peuvent en fait être également expliqués par une théorie semiclassical, dans laquelle la matière est quantifiée mais la lumière est considérée comme un champ électromagnétique classique. Parmi les phénomènes ainsi explicables, on peut par exemple citer l'existence d'un seuil dans l'effet photoélectrique, la relation entre l'énergie de l'électron émis et la fréquence de l'onde, le regroupement des photoélectrons dans un interféromètre Hanbury Brown et Twiss, ainsi que la statistique poissonnienne des comptes^[27]. Contrairement à une idée répandue, l'effet photoélectrique n'est donc pas la preuve absolue de l'existence du photon (bien que certaines expériences sur l'effet photoélectrique ne puissent cependant pas être expliquées par une théorie semiclassical^[27]).

L'expérience de Compton donne une existence plus tangible au photon, puisque ce dernier montre que la diffusion des électrons par les rayons X s'explique bien en attribuant au photon le moment cinétique prédit par Einstein. Cette expérience marque une étape décisive, après laquelle l'hypothèse des quanta de lumière emporte l'adhésion de la majorité des physiciens^[24]. Dans une dernière tentative de sauver la variation continue de l'énergie électromagnétique et de la rendre compatible avec les expériences, Bohr, Kramers et Slater développent un modèle basé sur deux hypothèses drastiques^[28] :

- L'énergie et l'impulsion ne sont conservées qu'en moyenne, mais pas lors des processus élémentaires tels que l'absorption et l'émission de lumière. Cela permet de réconcilier le changement discontinu de l'énergie de l'atome avec les variations continues de l'énergie de la lumière.

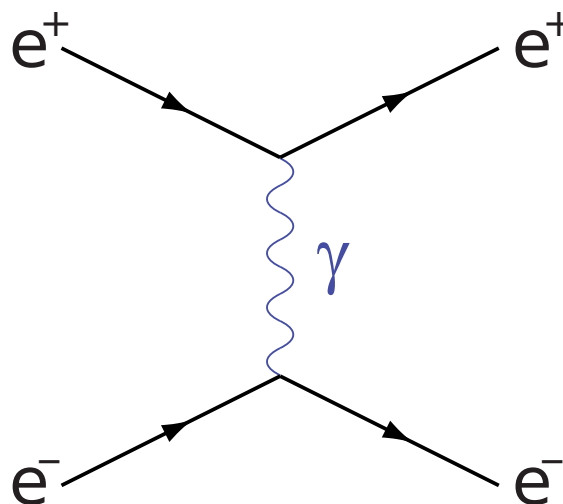
- La causalité est abandonnée. Par exemple, l'émission spontanée est simplement une émission induite par un champ électromagnétique "virtuel".

Cependant, des expériences de diffusion Compton plus précises montrent que l'énergie et l'impulsion sont conservées extraordinairement bien lors des processus élémentaires, et également que le recul de l'électron et la génération d'un nouveau photon lors de la diffusion Compton obéissent à la causalité à moins de 10ps près. En conséquence, Bohr et ses collaborateurs donnent à leur modèle "des funérailles aussi honorables que possible"^[29]. Sur le front théorique, l'électrodynamique quantique inventée par P.A.M. Dirac parvient à donner une théorie complète du rayonnement – et des électrons – expliquant la dualité onde-corpuscule. Depuis cette époque, et notamment grâce à l'invention du laser, les expériences confirment de manière de plus en plus directe l'existence du photon et l'échec des théories semi classiques^[30]. Il est notamment devenu possible de mesurer la présence d'un photon sans l'absorber, démontrant ainsi de manière directe la quantification du champ électromagnétique^{[31],[32]}, de sorte que la prédiction d'Einstein est considérée comme prouvée.

1.4 Prix Nobel en lien avec la notion de photon

Prix Nobel attribués en lien avec la notion de photon :

- 1918 : Max Planck *extquotedblin recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta extquotedbl*^[33]
- 1921 : Albert Einstein *extquotedblfor his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect extquotedbl*^[34]
- 1923 : Robert A. Millikan *extquotedblfor his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect extquotedbl*^[35]
- 1927 : Arthur H. Compton *extquotedblfor his discovery of the effect named after him extquotedbl*^[36] (partagé avec Charles Thomson Rees Wilson)
- 1965 : Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger et Richard P. Feynman *extquotedblfor their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles extquotedbl*^[37]
- 2005 : Roy J. Glauber *extquotedblfor his contribution to the quantum theory of optical coherence extquotedbl*^[38] (partagé avec John L. Hall et Theodor W. Hänsch)



Un diagramme de Feynman de l'échange d'un photon virtuel (symbolisé par la ligne ondulée et le gamma, γ) entre un positron et un électron.

2 Propriétés physiques

2.1 Charge

Le photon n'a pas de charge électrique^[39], les expériences étant compatibles avec une charge électrique inférieure à $1 \times 10^{-35} e$ ^[2] (anciennes estimations maximales : $5 \times 10^{-30} e$ ^[40]). Un photon a deux états de polarisation possibles et est décrit par trois paramètres continus : les composantes de son vecteur d'onde, qui déterminent sa longueur d'onde λ et sa direction de propagation. Les photons sont émis à partir de plusieurs processus, par exemple lorsqu'une charge est accélérée, quand un atome ou un noyau saute d'un niveau d'énergie élevé à un niveau plus faible, ou quand une particule et son antiparticule s'annihilent. Des photons sont absorbés par le processus inverse, par exemple dans la production d'une particule et de son antiparticule ou dans les transitions atomiques et nucléaires vers des niveaux d'énergie élevés.

2.2 Masse et quantité de mouvement

Le photon est également sans masse, mais possède une quantité de mouvement. Les expériences sont compatibles avec une masse inférieure à $\times 10^{-54}$ kilogramme^[1], soit $5 \times 10^{-19} eV/c^2$ (des estimations antérieures plaçaient la limite supérieure à $6 \times 10^{-17} eV/c^2$ ^{[40],[41]} et $1 \times 10^{-18} eV/c^2$ ^[2]); on admet généralement que le photon a une masse nulle.

Pourtant, il semble exister un paradoxe concernant cette notion à l'égard du photon. Ainsi, selon l'équation $E = h\nu$ (où h est la constante de Planck et ν la fréquence du rayonnement électromagnétique) qui permet de calculer l'énergie de toute particule élémentaire, et selon l'équivalence entre

l'énergie et la masse donnée par l'équation $E = mc^2$, on pourrait conclure a priori que le photon présente bien une masse non nulle. Selon cette idée, le photon ultraviolet étant plus énergétique que celui de la lumière visible il aurait ainsi une masse plus grande. Mais l'équation $E = mc^2$ ne s'applique que dans un référentiel où la particule est au repos. Comme le photon a la vitesse c (la vitesse de la lumière dans le vide) dans tous les référentiels, il faut utiliser la forme plus générale de cette équation : $E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$, qui prend en compte la quantité de mouvement p . Cette équation admet une masse invariable nulle $m = 0$ à condition que E et p soient reliées par $E = c p$, ce qui est bien le cas du photon ou de toute particule sans masse.

2.3 Spin

Le photon possède également un spin qui est indépendant de sa fréquence, et qui est égal à 1, ce qui autorise a priori trois valeurs pour sa projection : $-1, 0$ et 1 . La valeur 0 est cependant interdite par la théorie quantique des champs, du fait de la masse nulle du photon. L'amplitude du spin est $\sqrt{2}\hbar$ et la composante mesurée dans la direction de propagation, appelée hélicité, doit être $\pm\hbar$. Les deux hélicités possibles correspondent aux deux états possibles de polarisation circulaire du photon (horaire et anti-horaire). Comme en électromagnétisme classique, une polarisation linéaire correspond à une superposition de deux états d'hélicité opposée.

2.4 Autres propriétés

- Le photon est théoriquement stable, avec une limite inférieure de sa durée de vie, déterminée à partir de la limite supérieure de sa masse, de 10^{18} ans^[1].
- La lumière monochromatique de fréquence ν est constituée de photons d'énergie E dépendant uniquement de ν :

$$E = \hbar\omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

et de quantité de mouvement (ou *impulsion*) p :

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$$

où $\hbar = h/2\pi$ (constante de Dirac ou constante de Planck réduite), \mathbf{k} est le vecteur d'onde du photon, d'amplitude $k = 2\pi/\lambda$ et dirigé selon la direction de propagation du photon, et $\omega = 2\pi\nu$ est sa fréquence angulaire. Comme pour les autres particules, un photon peut se trouver dans un état dont l'énergie n'est pas bien définie, comme dans le cas d'un paquet d'onde. Dans ce cas, l'état du photon est décomposable en une superposition d'ondes monochromatiques de longueurs d'onde voisines (via une transformée de Fourier).

- Les formules classiques de l'énergie et de la quantité de mouvement des radiations électromagnétiques peuvent être ré-exprimées en termes d'événements reliés aux photons. Par exemple, la pression des radiations électromagnétiques sur un objet provient du transfert de quantité de mouvement des photons par unité de temps et de surface de cet objet.
- Lorsqu'ils se déplacent dans la matière, les photons interagissent avec les charges électriques présentes dans le milieu pour donner lieu à de nouvelles quasiparticules ; ainsi, dans un diélectrique, une onde de polarisation coexiste avec l'onde électromagnétique pour donner une onde couplée dont la relation de dispersion est différente ; lorsque cette onde est quantifiée, on obtient des particules qui ne sont pas des photons, mais des polaritons, issus du couplage entre les photons et le champ de polarisation quantifié de la matière. Les polaritons se déplacent moins vite que les photons dans le vide ; schématiquement, on peut dire que le photon se déplace toujours à la même vitesse mais qu'il est absorbé et réémis, un peu plus tard, par les atomes de la matière, ce qui donne l'impression – macroscopiquement – que la lumière ralentit.

3 Modèles

3.1 Bille de lumière

La première image que l'on a du photon est la « bille de lumière », la lumière serait composée de grains qui voyageraient à $299\,792\,458$ m/s (Vitesse de la lumière).

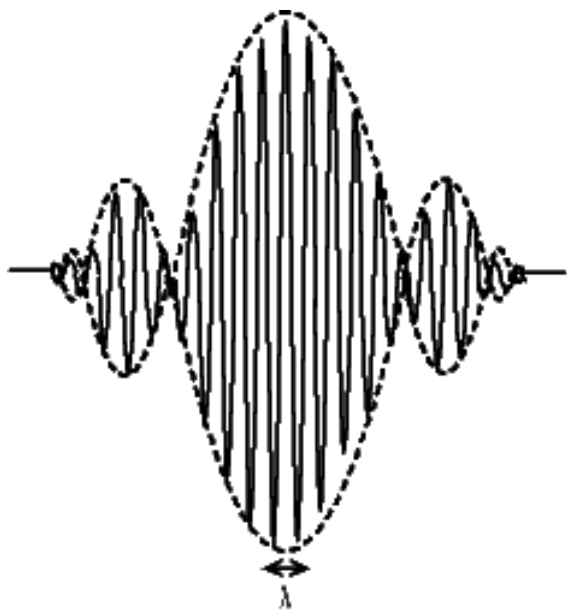
Dans ce modèle, un flux d'énergie lumineuse donné est décomposé en billes dont l'énergie dépend de la longueur d'onde λ et vaut $h.c/\lambda$. Ainsi, pour une lumière monochromatique (c'est-à-dire dont le spectre se résume à une seule longueur d'onde), le flux d'énergie est composé en beaucoup de billes « molles » si la longueur d'onde est grande (du côté du rouge), ou de peu de billes « dures » si la longueur d'onde est petite (du côté du bleu) — les qualificatifs « molles » et « dures » sont relatifs à la quantité d'énergie qu'elles comportent.

Si la lumière est composée de plusieurs longueurs d'onde, alors le flux d'énergie se compose de billes de « duretés » diverses.

Cette vision, simpliste selon les normes actuelles, ne permet pas d'expliquer correctement toutes les propriétés de la lumière.

3.2 Paquet d'onde

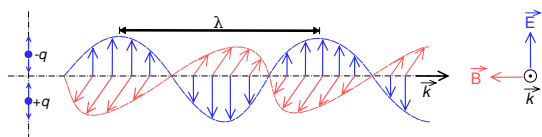
On peut représenter au premier abord les photons par des paquets d'onde : l'onde électromagnétique n'est pas une



le paquet d'onde, un modèle du photon : on a une onde monochromatique de longueur d'onde λ inscrite dans une enveloppe de largeur finie.

sinusoïde d'extension infinie, il y a une enveloppe d'amplitude importante encadrée par d'autres enveloppes nettement moins significatives.

3.3 Dualité onde-corpuscule



Onde électromagnétique : oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique, modèle du dipôle vibrant. Le vecteur \vec{k} indique la direction de propagation de l'onde.

Le photon est un concept pour expliquer les interactions entre les rayonnements électromagnétiques et la matière. Comme pour les autres particules élémentaires, il a une dualité onde-particule. On ne peut parler de photon en tant que particule qu'au moment de l'interaction. En dehors de toute interaction, on ne sait pas — et on ne peut pas savoir — quelle « forme » a ce rayonnement. On peut imaginer que le photon serait une concentration qui ne se formerait qu'au moment de l'interaction, puis s'étalerait, et se reformerait au moment d'une autre interaction. On ne peut donc pas parler de « localisation » ni de « trajectoire » du photon.

On ne peut en fait voir le photon que comme une particule quantique, c'est-à-dire un objet mathématique défini par sa fonction d'onde qui donne la probabilité de présence. Attention à ne pas confondre cette fonction et l'onde électromagnétique classique.

Ainsi, l'onde électromagnétique, c'est-à-dire la valeur du champ électrique et du champ magnétique en fonction de l'endroit et du moment ($\vec{E}(\vec{x}, t)$ et $\vec{B}(\vec{x}, t)$), a donc deux significations :

- macroscopique : lorsque le flux d'énergie est suffisamment important, ce sont les champs électrique et magnétique mesurés par un appareil macroscopique (par exemple antenne réceptrice, un électroscope ou une sonde de Hall) ;
- microscopique : elle représente la probabilité de présence des photons, c'est-à-dire la probabilité qu'en un endroit donné il y ait une interaction quantifiée (c'est-à-dire d'une énergie $h\nu$ déterminée).

4 Notes et références

- [1] « Étranges neutrinos », *Pour la science*, n° 431, 2013, p. 7
- [2] (en) C. Amsler *et al.* (Particle Data Group), « Review of Particle Physics : Gauge and Higgs bosons », *Physics Letters B*, vol. 667, 2008 +2009 partial update, p. 1 (lire en ligne)
- [3] Un photon dans le vide se déplace à la « vitesse de la lumière », ce qui implique d'après la théorie de la relativité que, dans son « référentiel », toutes les durées sont nulles (ce qui empêche d'ailleurs de définir réellement un référentiel attaché à un photon).
- [4] Françoise Balibar, *Einstein 1905, de l'éther aux quanta*, éditions PUF, 1992, (ISBN 2130042986^[à vérifier : ISBN invalide])
- [5] La matière quant à elle est constituée de fermions, comme, entre autres, les quarks dont sont faits les noyaux atomiques, et les électrons qui leur sont liés.
- [6] F. Wolfers, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, t. 183, juillet-décembre 1926, p. 276-277 : « Une action probable de la matière sur les quanta de radiation », sur *Gallica* (consulté le 15 février 2014)
- [7] (en) GN Lewis, « The conservation of photons », *Nature*, vol. 118, 1926, p. 874–875
- [8] René Wurmser, « Sur l'activité des diverses radiations dans la photosynthèse », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, vol. 181, septembre 1925, p. 374-376 (lire en ligne)
- [9] René Wurmser, « Le rendement énergétique de la photosynthèse chlorophyllienne », *Annales de physiologie*, vol. 1, 1925, p. 47 (lire en ligne), note de bas de page 60
- [10] (en) J. Joly, « A quantum theory of colour vision », *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 92, 1921, p. 219 (DOI 10.1098/rspb.1921.0020)
- [11] (en) P Villard, « Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium », *Comptes Rendus*, vol. 130, 1900, p. 1010–1012

- [12] (en) P Villard, « Sur le rayonnement du radium », *Comptes Rendus*, vol. 130, 1900, p. 1178–1179 (fr)
- [13] (en) E Rutherford, « The Wavelength of the Soft Gamma Rays from Radium B », *Philosophical Magazine*, vol. 27, 1914, p. 854–868
- [14] René Descartes, *Discours de la méthode*, 1637
- [15] Robert Hooke, *Micrographia : or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon...*, 1665 (' lire en ligne)
- [16] Christian Huygens, *Traité de la lumière*, 1678
- [17] Isaac Newton, *Opticks*, Dover Publications, 1730, Book II, Part III, Propositions XII–XX ; Queries 25–29 p.
- [18] Jed Z. Buchwald, *The Rise of the Wave Theory of Light : Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*, University of Chicago Press, 1989
- [19] (en) James Clerk Maxwell, « A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, 1865, p. 459–512 (lire en ligne [PDF]) Cet article suit une présentation par Maxwell à la Royal Society le 8 décembre 1864.
- [20] (en) H Hertz, « Über Strahlen elektrischer Kraft », *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, vol. 1888, 1888, p. 1297–1307 (de)
- [21] « Wilhelm Wien Nobel Lecture » du 11 décembre 1911.
- [22] (en) M Planck, « Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum », *Annalen der Physik*, vol. 4, 1901, p. 553–563 (de)
- [23] « Max Planck's Nobel Lecture » du 2 juin 1920.
- [24] « Robert A. Millikan's Nobel Lecture » du 23 mai 1924.
- [25] (en) A Compton, « A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements », *Physical Review*, vol. 21, 1923, p. 483–502
- [26] (en) Anton Zeilinger, « The quantum centennial », *Nature*, vol. 408, 2000, p. 639–641
- [27] (en) L. Mandel, « The case for and against semiclassical radiation theory », *Progress in optics*, vol. XIII, 2000, p. 27–68
- [28] (en) N Bohr, « The Quantum Theory of Radiation », *Philosophical Magazine*, vol. 47, 1924, p. 785–802 Également dans *Zeitschrift für Physik*, **24**, 69 (1924).
- [29] A Pais, *Subtle is the Lord : The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982
- [30] Ces expériences produisent des corrélations qui ne peuvent être expliquées par une théorie classique de la lumière, puisqu'elles résultent du processus quantique de la mesure. En 1974, Clauser a montré une violation d'une inégalité de Cauchy-Schwarz classique (*Phys. Rev. D* **9** :853). En 1977, Kimble et ses collaborateurs ont démontré un effet de dégroupement de photons à l'aide d'un interféromètre Hanbury Brown et Twiss, alors qu'une approche classique montrerait un groupement des photons (*Phys. Rev. Lett.* **39** :691). Cette approche a également été suivie par Grangier et ses collaborateurs en 1986 (*Europhys. Lett.* **1** :501). Voir également la discussion et les simplifications faites par Thorn *et al.*, *Am. J. Phys.* **72** :1210 (2004).
- [31] (en) M Brune, « Quantum Rabi Oscillation : A Direct Test of Field Quantization in a Cavity », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, 1996, p. 1800–1803
- [32] (en) S Gleyzes, « Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity », *Nature*, vol. 446, 2007, p. 297–300
- [33] *En reconnaissance des services rendus pour l'avancement de la physique dans la découverte des quantas d'énergie*, Fondation Nobel, « The Nobel Prize in Physics 1918 » (consulté le 26 décembre 2007)
- [34] *Pour les services rendus à la physique théorique, spécialement pour la découverte de la loi de l'effet photoélectrique*, Fondation Nobel, « The Nobel Prize in Physics 1921 » (consulté le 26 décembre 2007)
- [35] *Pour son travail sur les charges électriques élémentaires et sur l'effet photoélectrique*, Fondation Nobel, « The Nobel Prize in Physics 1923 » (consulté le 26 décembre 2007)
- [36] *Pour la découverte de l'effet portant son nom*, Fondation Nobel, « The Nobel Prize in Physics 1927 » (consulté le 26 décembre 2007)
- [37] *Pour leur travail fondamental sur l'électrodynamique quantique, avec de profondes conséquences sur la physique des particules élémentaires*, Fondation Nobel, « The Nobel Prize in Physics 1965 » (consulté le 26 décembre 2007)
- [38] *Pour sa contribution à la théorie quantique de la cohérence optique*, Fondation Nobel, « The Nobel Prize in Physics 2005 » (consulté le 26 décembre 2007)
- [39] (en) V V Kobychev, « Constraints on the photon charge from observations of extragalactic sources », *Astronomy Letters*, vol. 31, 2005, p. 147–151 (DOI 10.1134/1.1883345)
- [40] [PDF] Particle Physics Booklet
- [41] Cette limite doit cependant être ramenée à 10^{-14} eV/c² si les modèles galactiques utilisés s'avèrent erronés, voir (en) Eric Adelberger, Gia Dvali et Andrei Gruzinov, « Photon-Mass Bound Destroyed by Vortices », *Physical Review Letters*, vol. 98, n° 1, 2007, p. 010402 (PMID 17358459, DOI 10.1103/PhysRevLett.98.010402, Bibcode 2007PhRvL..98a0402A, arXiv hep-ph/0306245) preprint

5 Voir aussi

5.1 Articles connexes

- Électrodynamique quantique

- Théorie quantique des champs
- Optique
- Phénomène optique
- Lumière

5.2 Bibliographie

5.2.1 Ouvrages de vulgarisation

- Richard Feynman ; *Lumière & matière : une étrange histoire*, InterEditions (1987), (ISBN 2-7296-0154-6). Réédition en poche dans la collection Points Sciences **86**, Le Seuil (1999), (ISBN 2-02-014758-0).
- Richard Kidd, James Ardini & Anatol Anton ; *Evolution of the modern photon*, American Journal of Physics **57** (1) (janvier 1989), p. 27-35.

5.2.2 Ouvrages de référence

- Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc & Gilbert Grynberg, *Photons et atomes – Introduction à l'électrodynamique quantique*, [détail des éditions].

5.2.3 Sur le concept de « fonction d'onde » pour le photon

- Iwo Bialynicki-Birula ; *Photon wave function*, Progress in Optics **36**, Emil Wolf, Editor, Elsevier (1996). ArXiv : quant-ph/0508202.
- Felix Bussièrès et Y. Soudagar ; *Le problème de la localisation du photon*, Séminaire donné dans le cadre du cours « Optique quantique », PHS 6201, École Polytechnique de Montréal (avril 2006). lire en ligne[PDF].

5.3 Liens externes

- (en) Caractéristiques du photon[PDF] (*Particle Data Group*)



- Portail de la physique



- Portail de l'optique

6 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

6.1 Texte

- **Photon** *Source* : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photon?oldid=107790655> *Contributeurs* : Tarquin, Athymik, COLETTE, Looxix, Yves, Hemmer, Orthogaffe, Kelson, Agilulfe, Cdang, HasharBot, Roudoule, Jusjih, Conorta, Koyuki, P-e, Emmanuel legrand, Grum, LeYaYa, Dhenry, Phe, MedBot, Didierv, Sam Hocevar, Anarkman, Phe-bot, JB, Bibi Saint-Pol, MI, Clatourre, Jef-Infojef, Xtalbot, Poulpy, Cfoellmi, Deansfa, Leag, Gemme, JeanClem, Yurik, Sherbrooke, Chobot, Stanlekub, David Berardan, Eurêka, Gzen92, RobotQuistnix, FlaBot, DC2, YurikBot, Eskimbot, Medium69, Adelesal, Jerome66, Litlok, Ginkgo, Loveless, Jean-Christophe BENOIST, Le gorille, KoS, Hanwei, Chlewbot, Alo, Zweistein, Soubok, Barraki, SashatoBot, Jmax, TiChou, Euterpia, Pld, MetalGearLiquid, Liquid-aim-bot, Rominandreu, Guérin Nicolas, PieRRoBoT, Axel1258, JeanPhir, YSidlo, A Pirard, Thijs !bot, En passant, Escarbot, Klinfran, Kropotkine 113, Rémi, Starus, Nono64, Dirac66, Dfeldmann, PouX, Numbo3, Stargateur, Haltopub, LeGéantVert, Salebot, Pamputt, Zorrobot, Mohamedchikhi, AlnokaBOT, Flot, TXiKiBoT, VolkovBot, Tognopop, AmaraBot, Mathieu Perrin, Lylvic, Tu'imalila, AlleborgoBot, Spin, Gz260, SieBot, Louperibot, Olivier tanguy, Punx, JLM, Kyro, Tizeff, Elgauchito, DumZiBoT, DeepBot, Dumontierc, ToePeu.bot, PixelBot, Skippy le Grand Gourou, Alexbot, HerculeBot, WikiCleanerBot, SilvononBot, ZetudBot, LinkFA-Bot, Luckas-bot, Kein Einstein, Jotterbot, DSisyphBot, ArthurBot, Le sourcier de la colline, Cantons-de-l'Est, Nelson34, Abracadabra, Xqbot, RibotBOT, JackBot, TobeBot, RedBot, Florn88, Ripchip Bot, EmausBot, HRoestBot, Gaano, WikitanvirBot, ChuispastonBot, Jules78120, SenseiAC, Nicophil, Omrini, Titlutin, Janiss, Chrisanion, StarusBot, Hawk-Eye-Bot, Houterdam, Addbot, HolgerFiedler, Azertydu35CS, Shrekros1, Zebulon84bot, Tognopop3 et Anonyme : 81

6.2 Images

- **Fichier:Electron-positron-scattering.svg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Electron-positron-scattering.svg> *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Electron-positron-scattering.svg> *Artiste d'origine* : JabberWok
- **Fichier:Gtk-dialog-info.svg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Gtk-dialog-info.svg> *Licence* : LGPL *Contributeurs* : <http://ftp.gnome.org/pub/GNOME/sources/gnome-themes-extras/0.9/gnome-themes-extras-0.9.0.tar.gz> *Artiste d'origine* : David Vignoni
- **Fichier:Logo_physics.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Logo_physics.svg *Licence* : CC-BY-2.5 *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Military_laser_experiment.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Military_laser_experiment.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* :
 Cette image a été publiée par les *United States Air Force* sous l'identifiant 090809-F-5527s-0001.
 Ce bandeau n'indique rien sur le statut de l'œuvre au regard du droit d'auteur. Un bandeau de droit d'auteur est requis. Voir Commons :À propos des licences pour plus d'informations.
Artiste d'origine : US Air Force
- **Fichier:Onde_electromagnetique.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Onde_electromagnetique.svg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Self, based on [Image:Onde electromagnetique.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Onde_electromagnetique.png) *Artiste d'origine* : SuperManu
- **Fichier:Photon_paquet_onde.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Photon_paquet_onde.png *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Refraction_of_daylight_through_a_prism.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/Refraction_of_daylight_through_a_prism.jpg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : T.Voekler

6.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0