

Photon

Photonen (von altgriechisch φῶς *phōs* „Licht“; Einzahl „das Photon“), auch **Lichtquanten** oder **Lichtteilchen**, sind anschaulich gesagt die Energie-„Pakete“, aus denen elektromagnetische Strahlung besteht.

Physikalisch wird das Photon als Austauschteilchen betrachtet. Nach der Quantenelektrodynamik gehört es als Vermittler der elektromagnetischen Wechselwirkung zu den Eichbosonen und ist somit ein Elementarteilchen. Das Photon hat keine Masse,^[Anm. 1] aber eine Energie und einen Impuls – die beide proportional zu seiner Frequenz sind – sowie

Photon (γ)	
Klassifikation	
Elementarteilchen <u>Boson</u> <u>Eichboson</u>	
Eigenschaften	
<u>elektrische Ladung</u>	neutral
<u>Masse</u>	masselos
<u>Spin</u> ^{Parität}	1 [−]
<u>Wechselwirkungen</u>	<u>elektromagnetisch</u>

einen Drehimpuls. Ist sein Aufenthalt auf ein System mit endlichem Volumen beschränkt, liefert es proportional zu seiner Energie einen Beitrag zur Masse des Systems.

Inhaltsverzeichnis

Forschungsgeschichte

Bezeichnung

Energiegehalt

Weitere Eigenschaften

Erzeugung und Detektion

Masse

Theoretische Formulierung

Experimentelle Befunde

Gravitation

Spin

Photonen im Vakuum

Photonen in optischen Medien

Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Literatur

Weblinks

Anmerkungen

Einzelnachweise

Forschungsgeschichte

Seit der Antike gab es verschiedene, einander teilweise widersprechende Vorstellungen von der Natur des Lichts. Bis Anfang des 19. Jahrhunderts konkurrierten Wellen- und Teilchentheorien miteinander (*siehe Abschnitt Geschichte im Artikel Licht*). Dann schien die Wellennatur des Lichts durch viele Phänomene (z. B. Interferenz- und Polarisationserscheinungen) bewiesen und wurde durch die 1867 aufgestellten Maxwellschen Gleichungen als elektromagnetische Welle verstanden. Daneben gab es auch Indizien für einen Teilchencharakter. Ein historisch wichtiges Experiment hierzu war im Jahre 1887 die Beobachtung des Photoelektrischen Effekts durch Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs.

Die Entdeckung der Quantisierung der elektromagnetischen Strahlung ging im Jahr 1900 vom planckschen Strahlungsgesetz aus, das die Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers beschreibt. Um dieses Gesetz theoretisch erklären zu können, musste Max Planck annehmen, dass die Oberfläche des schwarzen Körpers zu jeder Frequenz nur diskrete, zur Frequenz proportionale Energiemengen mit dem elektromagnetischen Feld austauschen kann. Planck selbst stellte sich allerdings nur den Energieaustausch quantisiert vor, noch nicht die elektromagnetische Strahlung an sich.

Albert Einstein stellte dann 1905 in seiner Publikation zum photoelektrischen Effekt die Lichtquantenhypothese auf. Ihr zufolge ist Licht ein Strom von „in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen, und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können“.^[1] Aufgrund verbreiteter Zweifel an diesen Ansichten wurden diese Arbeiten erst 1919^[Anm. 2] (Planck) und 1922^[Anm. 3] (Einstein) mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Vielfach wurde der Teilchencharakter der elektromagnetischen Strahlung aber weiterhin bezweifelt, bis Arthur Compton und Walter Bothe in den Jahren 1923–1925 nachweisen konnten, dass Röntgenstrahlung auf einzelne Elektronen genau so wirkt wie der Beschuss mit einzelnen Teilchen, deren Energien und Impulse Werte wie Lichtquanten entsprechend der Wellenlänge der benutzten Röntgenstrahlen haben. Für die Entdeckung und Interpretation des nach ihm benannten Compton-Effekts erhielt Compton 1927 (als einer von zwei Ausgezeichneten) den Nobelpreis für Physik.

Die formale Quantentheorie des Lichtes wurde seit 1925 beginnend mit Arbeiten von Max Born, Pascual Jordan und Werner Heisenberg entwickelt. Die heute gültige Theorie der elektromagnetischen Strahlung ist die Quantenelektrodynamik (QED); sie beschreibt auch die Lichtquanten. Sie geht in ihren Anfängen auf eine Arbeit von Paul Dirac im Jahre 1927 zurück, in der die Wechselwirkung von quantisierter elektromagnetischer Strahlung mit einem Atom analysiert wird.^[2] Die QED wurde in den 1940er Jahren entwickelt und 1965 mit der Verleihung des Nobelpreises für Physik an Richard Feynman, Julian Schwinger und Shin'ichirō Tomonaga gewürdigt. In der QED ist das elektromagnetische Feld selbst quantisiert und das Photon seine elementare Anregung.

Albert Einstein schrieb 1951 in einem Brief an seinen Freund Michele Besso:

„Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Antwort der Frage ‚Was sind Lichtquanten‘ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich ...“^[3]

Bezeichnung

Das Wort *Photon* leitet sich vom griechischen Wort für Licht, $\phi\acute{\omega}\varsigma$ (*phôs*), ab. Der Name war durch verschiedene Autoren schon seit 1916 für eine kleine Energiemenge, die einen photochemischen oder photoelektrischen Effekt auslösen kann, eingeführt worden, wurde aber kaum beachtet.^[4] Max Planck z. B. sprach in seiner Nobelpreisrede 1920 noch von „Lichtquanten“. Endgültig wurde der Name durch Arthur Compton bekannt gemacht,^[4] der sich dabei auf eine Veröffentlichung des Chemikers Gilbert Newton Lewis im Jahre 1926^[5] berief. Lewis verwandte den Begriff im Rahmen eines von ihm vorgeschlagenen Modells der Wechselwirkung von Atomen mit Licht. Dieses Modell sah unter anderem fälschlich eine Erhaltung der Photonenzahl vor und wurde allgemein nicht anerkannt.

Für das Photon wird im Allgemeinen das Symbol γ (gamma) verwendet. In der Hochenergiephysik ist dieses Symbol allerdings reserviert für die hochenergetischen Photonen der Gammastrahlung (Gamma-Quanten), und die in diesem Zweig der Physik ebenfalls relevanten Röntgenphotonen erhalten häufig das Symbol *X* (von *X-Strahlen* und Englisch: *X-ray*).

Energiegehalt

Jedes Photon transportiert eine Energie E :

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

wobei ν und λ Frequenz und Wellenlänge des Lichts sind. Die Konstanten c und h sind die Lichtgeschwindigkeit und die Planck-Konstante.

Gibt man, wie in der Atom- und Teilchenphysik üblich, die Energie des Photons in Elektronenvolt (eV) an, so ergibt sich:^{[6][7]}

$$E = h\nu = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot (\nu/\text{Hz}) \quad 1 \text{ eV} \triangleq \nu = 241,8 \text{ THz}$$

$$= hc / \lambda = 1,240 \cdot 10^{-6} \text{ eV} / (\lambda/\text{m}) \quad 1 \text{ eV} \triangleq \lambda = 1,240 \text{ }\mu\text{m}$$

Beispiel: Rotes Licht mit 620 nm Wellenlänge hat eine Photonenenergie von ca. 2 eV.

Das Photon mit der bislang höchsten Energie, mehr als 100 TeV, wurde 2019 von chinesischen Wissenschaftlern aus einem Detektorfeld in Tibet vermeldet. Es stammte wahrscheinlich aus dem Krebsnebel.^[8]

Weitere Eigenschaften

Jegliche elektromagnetische Strahlung, von Radiowellen bis zur Gammastrahlung, ist in Photonen gequantelt. Das bedeutet, die kleinstmögliche Energiemenge an elektromagnetischer Strahlung bestimmter Frequenz ist ein Photon. Photonen haben eine unendliche natürliche Lebensdauer, das heißt, sie unterliegen keinem spontanen Zerfall. Sie können aber bei einer Vielzahl physikalischer Prozesse erzeugt oder vernichtet werden. Ein Photon besitzt keine Masse. Daraus folgt, dass es sich im Vakuum immer mit Lichtgeschwindigkeit c bewegt, sofern es in einem Zustand mit wohldefiniertem Impuls ist, also durch eine einzig ebene Welle darzustellen ist. Sonst bewegt es sich mit der Gruppengeschwindigkeit der beteiligten ebenen Wellen. Ein Photon im Überlagerungszustand von Impulsen mehrerer Richtungen bewegt sich auch im Vakuum langsamer als die Lichtgeschwindigkeit (*siehe Bessel-Strahl*). In optischen Medien mit einem Brechungsindex $n > 1$ ist die Gruppengeschwindigkeit aufgrund der Wechselwirkung der Photonen mit der Materie um den Faktor n verringert.

Erzeugung und Detektion

Photonen können auf vielerlei Arten erzeugt werden, insbesondere durch Übergänge („Quantensprünge“) von Elektronen zwischen verschiedenen Zuständen (z. B. verschiedenen Atom- oder Molekülorbitalen oder Energiebändern in einem Festkörper). Photonen können auch bei nuklearen Übergängen, Teilchen-Antiteilchen-Vernichtungsreaktionen (Annihilation) oder durch beliebige Fluktuationen in einem elektromagnetischen Feld erzeugt werden.

Zum Nachweis von Photonen können unter anderem Photomultiplier, Photoleiter oder Photodioden verwendet werden. CCDs, Vidicons, PSDs, Quadrantendioden oder Foto-Platten und Filme werden zur ortsauflösenden Detektion von Photonen benutzt. Im IR-Bereich werden auch Bolometer eingesetzt. Photonen im Gammastrahlen-Bereich können durch Geigerzähler einzeln nachgewiesen werden. Photomultiplier und Avalanche-Photodioden können auch zur Einzelphotonendetektion im optischen Bereich verwendet werden, wobei Photomultiplier im Allgemeinen die niedrigere Dunkelzählrate besitzen, Avalanche-Photodioden aber noch bei niedrigeren Photonenenergien bis in den IR-Bereich einsetzbar sind.

Masse

Das Photon ist ein Elementarteilchen mit der Masse $m = 0$.^[Anm. 1] Neben experimentellen Messungen, die diese Tatsache sehr gut belegen (s. u.), ist dies auch theoretisch gut begründet.

Ein ruhendes physikalisches System erfährt trotzdem wegen der Äquivalenz von Masse und Energie einen Massenzuwachs $\Delta m = E/c^2$, wenn es ein Photon der Energie E aufnimmt.

Theoretische Formulierung

Siehe auch: Quantenelektrodynamik

Im Rahmen der Quantenelektrodynamik sind die Photonen die Übermittler der elektromagnetischen Wechselwirkung; die Bewegungsgleichung der Photonen muss demnach den klassischen Maxwell-Gleichungen

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = 0$$

gehörchen (in diesem Abschnitt sei nur das Verhalten im Vakuum betrachtet). Die Lagrange-Dichte, die über den Lagrange-Formalismus zu den Maxwell-Gleichungen führt, lautet

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

ohne einen Masseterm des Photons der Gestalt $A_\mu m_\gamma^2 A^\mu$. Ein solcher Term ist verboten, da er die Invarianz der Lagrange-Dichte unter den klassischen Eichtransformationen des elektromagnetischen Feldes verletzt. Auch in höheren Ordnungen quantenelektrodynamischer Störungstheorie bleibt die Masse des Photons durch die Eichsymmetrie geschützt.

Da das Higgs-Teilchen keine elektrische Ladung trägt, erhält das Photon darüber hinaus – im Gegensatz zu den anderen Eichbosonen der elektroschwachen Wechselwirkung – keine Masse durch den Higgs-Mechanismus.

Experimentelle Befunde

Wenn die Masse des Photons verschieden von Null wäre, dann würde sie sich durch verschiedene Folgen bemerkbar machen. Keine von ihnen ist bisher beobachtet worden. Die Genauigkeit der Experimente erlaubt die Aussage, dass eine eventuelle Photonenmasse in jedem Fall unter $10^{-18} \text{ eV}/c^2$ liegen muss, das ist der 10^{27} ste Teil der Masse des Wasserstoffatoms.

Falls Photonen Masse hätten,

- dann würde sich für das elektrostatische Feld einer Punktladung statt des Coulomb-Potentials ein Yukawa-Potential ergeben, also ein zusätzlicher exponentieller Abschwächungsfaktor. Dass dies in Laborexperimenten nicht beobachtet wurde, lässt darauf schließen, dass eine eventuelle Masse des Photons nicht größer als $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ eV}/c^2$ sein kann.^{[9][10]}
- dann hätte das Feld eines magnetischen Dipols eine Komponente antiparallel zum Dipol, die in erster Näherung räumlich konstant und proportional zur angenommenen Masse des Photons ist. Durch Vermessung des Erdmagnetfelds kann die Existenz eines solchen Beitrags soweit ausgeschlossen werden, dass die eventuelle Masse des Photons nicht oberhalb $2,3 \cdot 10^{-15} \text{ eV}/c^2$ liegen kann.^[11]
- dann würden sich für das Magnetfeld eines rotierenden Dipols Änderungen ergeben, die sich im Fall der Sonne am Sonnenwind bis zum Abstand des Pluto auswirken würden.^{[9][12]} Solche Abweichungen konnten bislang nicht nachgewiesen werden, woraus sich die

momentan (Stand: 2020) niedrigste experimentelle Obergrenze von $10^{-18} \text{ eV}/c^2$ für eine eventuelle Photonenmasse ergibt.^[10]

- dann wäre die Konstante c , die in der Relativitätstheorie Raum und Zeit in Beziehung zueinander setzt (üblicherweise „Lichtgeschwindigkeit“ genannt), nicht identisch mit der Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum.

Gravitation

Photonen werden auch vom Gravitationsfeld beeinflusst. Dies lässt sich nicht klassisch als Massenanziehung erklären, denn Photonen haben keine Masse. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie aber folgen Photonen, wie alle nicht von anderen Kräften beeinflussten Körper auch, einer Geodäte der gekrümmten Raumzeit. Die Ablenkung im Schwerfeld ist dabei doppelt so groß wie es nach der klassischen Physik für ein mit Lichtgeschwindigkeit bewegtes, massebehaftetes Teilchen zu erwarten wäre (siehe auch Tests der allgemeinen Relativitätstheorie).

Photonen gehören selbst zu den Quellen der Gravitation, indem sie mit ihrer Energiedichte die Krümmung der Raumzeit beeinflussen (siehe Energie-Impuls-Tensor in der allgemeinen Relativitätstheorie).

Spin

Zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen mit Energie E und Kreisfrequenz ω haben nach den Maxwell-Gleichungen einen Drehimpuls der Größe E/ω , pro Photon mit $E = \hbar\omega$ also genau den Drehimpulsbetrag von \hbar . Photonen sind also Spin-1-Teilchen und somit Bosonen. Es können also beliebig viele Photonen denselben quantenmechanischen Zustand besetzen, was zum Beispiel in einem Laser realisiert wird.

Während etwa der Elektronenspin parallel oder antiparallel zu einer *beliebig* vorgegebenen Richtung ist,^[13] kann der Photonenspin wegen fehlender Masse nur parallel oder antiparallel zur Flugrichtung, also zu seinem Impuls, orientiert sein. Die Helizität der Photonen einer zirkular polarisierten Welle ist daher eine charakteristische Größe. Wird durch einen Spiegel die Ausbreitungsrichtung umgekehrt, oder wird die Rotationsrichtung umgekehrt, zum Beispiel durch eine $\lambda/2$ -Platte, so wechselt die Helizität das Vorzeichen.

Linear polarisierte elektromagnetische Wellen bestehen aus der Überlagerung von rechts und links polarisierten Photonen. Auch ein einzelnes Photon kann linear polarisiert werden, indem zwei entgegengesetzt zirkular polarisierte Zustände überlagert werden. Der Erwartungswert des Drehimpulses längs der Flugrichtung ist dann Null, jedoch ist in einem linear polarisierten Photon mit je 50 % Wahrscheinlichkeit ein links oder ein rechts zirkular polarisiertes Photon zu finden.

Photonen im Vakuum

Photonen in einem Zustand mit wohldefiniertem Impuls bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. Die Dispersionsrelation, d. h. die Abhängigkeit der Kreisfrequenz ω eines Photons von seiner Kreiswellenzahl k , ist im Vakuum linear, denn es gelten die quantenmechanischen Zusammenhänge

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

und

$$p = \hbar k$$

sowie die Energie-Impuls-Relation

$$E = pc.$$

Photonen in optischen Medien

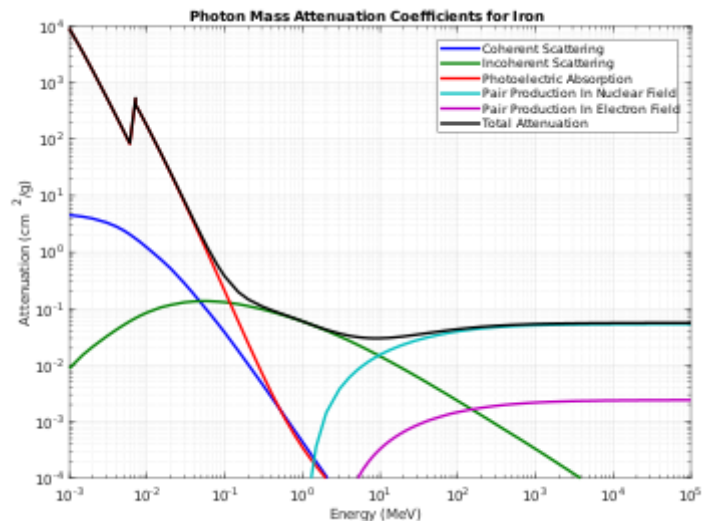
In einem optischen Medium wechselwirken Photonen mit dem Material. Durch Absorption kann ein Photon vernichtet werden. Dabei geht seine Energie in andere Energieformen über, beispielsweise in elementare Anregungen (Quasiteilchen) des Mediums wie Phononen oder Exzitonen. Möglich ist auch, dass das Photon sich durch ein Medium ausbreitet. Dabei wird es durch eine Abfolge von Streuprozessen behindert, in denen Teilchen des Mediums virtuell angeregt werden. Photon und Reaktion des Mediums zusammen kann man durch ein Quasiteilchen, das Polariton, beschreiben. Diese elementaren Anregungen in Materie haben üblicherweise keine lineare Dispersionsrelation. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist niedriger als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

In Experimenten der Quantenoptik konnte die Geschwindigkeit der Ausbreitung von Licht in einem verdünnten Gas von geeignet präparierten Atomen auf wenige Meter pro Sekunde gesenkt werden.^[14]

Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Photonen, die auf Materie treffen, können je nach Energiebereich unterschiedliche Prozesse auslösen:

- kohärente Streuung an kleinen Teilchen wie Molekülen oder Staub (Rayleigh-Streuung) – dominant bei kleinen Energien (0 bis einige eV)
- Streuung an Elektronen, bei geringen Energien als Thomson-Streuung ohne Energieübertrag beschreibbar, bei hohen Energien als Compton-Streuung – dominant im Bereich von ca. 100 keV bis einigen MeV (harte Röntgenstrahlung, nukleare Gammastrahlung)
- Anregung höherenergetischer Zustände in Atomen, photochemische Prozesse – bei wenigen eV
- Freisetzung von Elektronen (Photoeffekt) – bei wenigen eV (sichtbares Licht, UV) bis vielen keV (Röntgenstrahlung), dominant im Energiebereich weicher Röntgenstrahlung
- Freisetzung von Nukleonen (Kernphotoeffekt) – bei sehr hohen Energien (viele MeV); Aufspaltung von Deuterium schon ab 2,18 MeV möglich



Massenschwächungskoeffizient von Eisen für hochenergetische Photonen (schwarze Kurve) mit Beiträgen verschiedener Effekte. Bei Röntgenstrahlung dominiert der Photoeffekt (rot), Rayleigh-Streuung (blau) spielt fast keine Rolle. Im Bereich nuklearer Gammastrahlung dominiert Compton-Streuung (grün), und bei höheren Energien wird Paarbildung immer relevanter.

- Bildung von Elektron-Positron-Paaren – dominant ab einigen MeV

Literatur

- Chandrasekhar Roychoudhuri, A.F. Kracklauer, Kathy Creath (Hrsg.): *The nature of light: What is a photon?* CRC, 2008, ISBN 978-1-4200-4424-9, eingeschränkte Vorschau (<https://books.google.de/books?id=Z6hWmaHZFigC>) in der Google-Buchsuche.
- Harry Paul: *Photonen: Eine Einführung in die Quantenoptik*. 2. Auflage. Teubner, Stuttgart 1999, ISBN 3-519-13222-2. (Teubner-Studienbücher Physik)
- Klaus Hentschel: *Einstein und die Lichtquantenhypothese*. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau*. 58(6), 2005, ISSN 0028-1050, S. 311–319.
- Klaus Hentschel: *Lichtquanten. Die Geschichte des komplexen Konzepts und mentalen Modells von Photonen*. Springer, Heidelberg, 2017, ISBN 978-3-662-55272-8 (Online (<http://www.springer.com/de/book/9783662552728>))
- Liang-Cheng Tu, Jun Luo, George T. Gillies: *The mass of the photon*. In: *Reports on Progress in Physics*. 68, Nr. 1, 2005, doi:10.1088/0034-4885/68/1/R02, S. 77–130.
- Richard Feynman: *QED. The Strange Theory of Light and Matter*. 1985. (dt. *QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. 1987, ISBN 3-492-21562-9)

Weblinks

 **Wiktionary: Photon** – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen

 **Commons: Photon** (<https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Photon?uselang=de>) – Sammlung von Bildern, Videos und Audiodateien

- QuantumLab-Experimente (<http://www.quantumlab.de/>) mit einzelnen Photonen: Beweis der Existenz, Quantenzufall, Verschränkung,... (FAU Erlangen-Nürnberg)
- Klaus Hentschel: Light quanta – The maturing of a concept by the stepwise accretion of meaning (<https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/24257>), in: *Physics and Philosophy* (an online journal, freely available since April 2007).

Zu Wechselwirkung von Photonen mit Photonen:


- Homepage des SLAC Experiment 144 (<http://www.slac.stanford.edu/exp/e144/e144.html>) (englisch)
- Jan A. Lauber: A small tutorial in gamma-gamma Physics (<http://www.hep.ucl.ac.uk/opal/gamma/gamma/gg-tutorial.html>) (englisch)

Anmerkungen

1. In älterer Literatur findet man noch eine Unterscheidung zwischen „Ruhemasse“ m_0 und „relativistischer Masse“ m_{rel} , wobei letztgenannte vom Beobachter abhängt und mit der Gesamtenergie E über die Beziehung $E = m_{\text{rel}}c^2$ verknüpft ist. Dieses Konzept gilt generell als veraltet. Ganz verfehlt wäre es, dem Photon (von Licht der Frequenz ν) die Massen $m_0 = 0$ und $m_{\text{rel}} = h\nu/c^2$ zuzuweisen, weil es Photonen in Ruhe nicht gibt. Diese „Photonenmasse“ wird zwar in populärwissenschaftlicher Literatur manchmal herangezogen, um die gravitative Ablenkung von Licht und die Existenz von schwarzen Löchern zu erklären, kann sie aber nicht korrekt beschreiben.
2. 1918 wurde kein Physik-Nobelpreis vergeben. Ende 1919 erhielten Johannes Stark den Physik-Nobelpreis 1919 und Max Planck den Physik-Nobelpreis 1918 (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/).

3. Der Physik-Nobelpreis 1921 (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/) wurde erst 1922 Albert Einstein zugesprochen, wobei die Lichtquantenhypothese noch aus der Begründung ausgespart blieb. Zugleich erhielt Niels Bohr den Physik-Nobelpreis für 1922.

Einzelnachweise

1. Albert Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. In: *Annalen der Physik*. Band 322, Nr. 6, 1905, S. 133 (Online (<http://einstein-annalen.mpiwg-berlin.mpg.de/annalen/alphabetical/HUN315QN>) [abgerufen am 24. Januar 2012]).
2. Paul Dirac: *The Quantum Theory of Emission and Absorption of Radiation*. In: *Proc. Roy. Soc. A*114, 1927. (online) (http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Dirac_QED_1927.pdf).
3. zitiert nach Paul. Harry Paul: *Photonen: Experimente und ihre Deutung*. Akademie-Verlag, Berlin 1985, ISBN 3-528-06868-X, eingeschränkte Vorschau (https://books.google.de/books?id=_eiEBwAAQBAJ&pg=PA7#v=onepage) in der Google-Buchsuche.
4. Helge Kragh: *Photon: New light on an old name* (<http://arxiv.org/abs/1401.0293>). arXiv, 28. Februar 2014.
5. Gilbert N. Lewis: *The Conservation of Photons*. In: *Nature*. Band 118, 1926, S. 874–875. doi:10.1038/118874a0 (online (<http://www.nobeliefs.com/photon.htm>)).
6. *CODATA Recommended Values*. (<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?hev>) National Institute of Standards and Technology, abgerufen am 30. Juli 2019. Wert für h in der Einheit eVs, eingesetzt in das Produkt $h c$.
7. *CODATA Recommended Values*. (<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>) National Institute of Standards and Technology, abgerufen am 30. Juli 2019. Wert der Lichtgeschwindigkeit, eingesetzt in das Produkt $h c$.
8. Amemori u. a.: First detection of photons with energy beyond 100 TeV from an astrophysical source (<https://journals.aps.org/prl/accepted/bc074YafQ241106c876588830ab038fcada76d198>), *Phys. Rev. Lett.*, 13. Juni 2019.
9. Alfred Scharff Goldhaber, Martin Nieto: *Photon and graviton mass limits*. In: *Rev. Mod. Phys.* Band 82, 2010, S. 939, doi:10.1103/RevModPhys.82.939 (<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.939>).
10. P. A. Zyla et al. (Particle Data Group): *2020 Review of Particle Physics*. (https://pdg.lbl.gov/2020/listings/contents_listings.html) In: *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020, 083C01 (2020). Abgerufen am 24. März 2022 (englisch).
11. Alfred S. Goldhaber, Michael Nieto: *New Geomagnetic Limit on the Mass of the Photon*. In: *Physical Review Letters*. Band 21, 1968, S. 567, doi:10.1103/PhysRevLett.21.567 (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.21.567>) (online (http://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevLett.21.567?casa_token=EHZE4eWLSv0AAAAA:uj0n5bchC_ag8tnyeEJ_ar5-h-AYXR9EZYS5Vkh1_gavpi9EhOhe6EFhVBXceoNrK-txct3iilldD) [PDF; abgerufen am 6. März 2020]).
12. What is the mass of a photon? (http://www.desy.de/user/projects/Physics/ParticleAndNuclear/photon_mass.html) Abgerufen am 10. August 2011.
13. Siehe z. B. pro-physik.de (<https://web.archive.org/web/20090212001945/http://www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=10053>) (Memento des Originals (<https://redirecter.toolforge.org/?url=http%3A%2F%2Fwww.pro-physik.de%2FPhy%2FleadArticle.do%3Flaid%3D10053>) vom 12. Februar 2009 im *Internet Archive*)  Info: Der Archivlink wurde automatisch eingesetzt und noch nicht geprüft. Bitte prüfe Original- und Archivlink gemäß [Anleitung](#) und entferne dann diesen Hinweis. über *Spin-Hall-Effekt jetzt auch mit Photonen*

14. L. Vestergaard Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, C. H. Behroozi: *Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas*. In: *Nature*. Band 397, 1999, S. 594–598, doi:10.1038/17561 (<https://doi.org/10.1038/17561>).

Abgerufen von „<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Photon&oldid=235973088>“

Diese Seite wurde zuletzt am 31. Juli 2023 um 09:37 Uhr bearbeitet.

Der Text ist unter der Lizenz „Creative-Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ verfügbar; Informationen zu den Urhebern und zum Lizenzstatus eingebundener Mediendateien (etwa Bilder oder Videos) können im Regelfall durch Anklicken dieser abgerufen werden. Möglicherweise unterliegen die Inhalte jeweils zusätzlichen Bedingungen. Durch die Nutzung dieser Website erklären Sie sich mit den Nutzungsbedingungen und der Datenschutzrichtlinie einverstanden.

Wikipedia® ist eine eingetragene Marke der Wikimedia Foundation Inc.