

Westfälische
Wilhelms-Universität
Münster

Die Entdeckung der Teilchennatur des Lichts

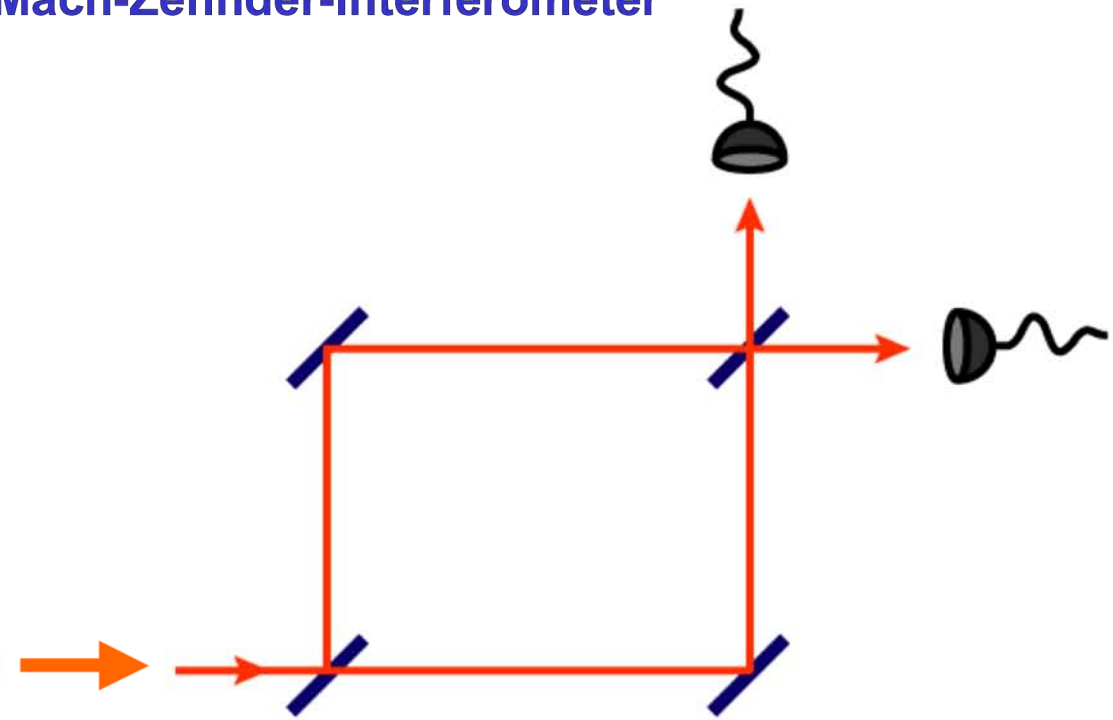


Klaus Reygers

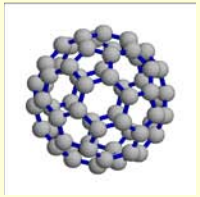
Münster, 28.11.2005

Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

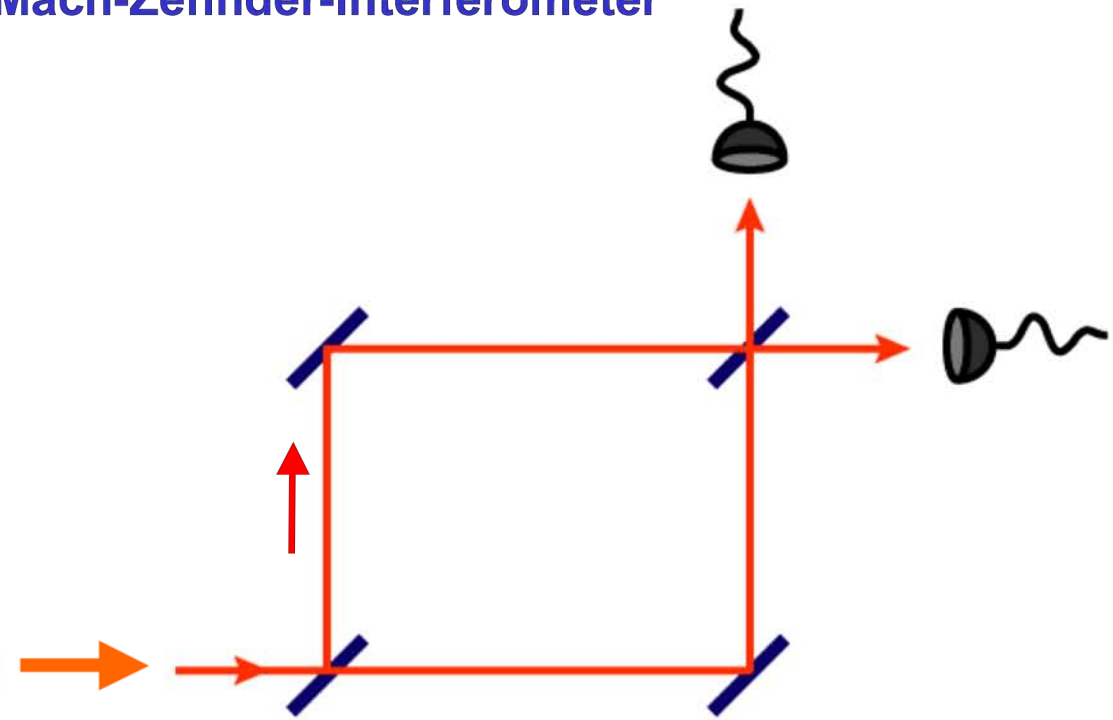


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

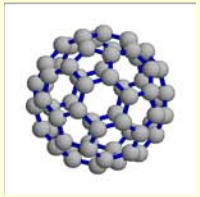


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

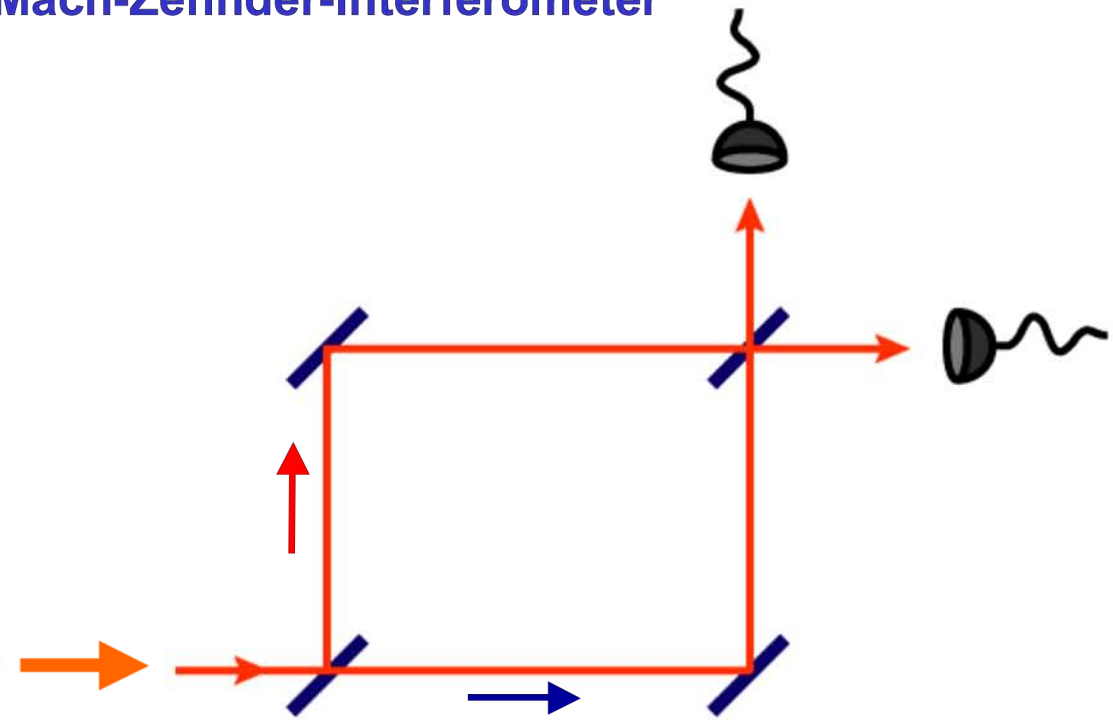


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

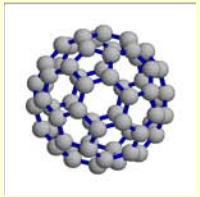


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

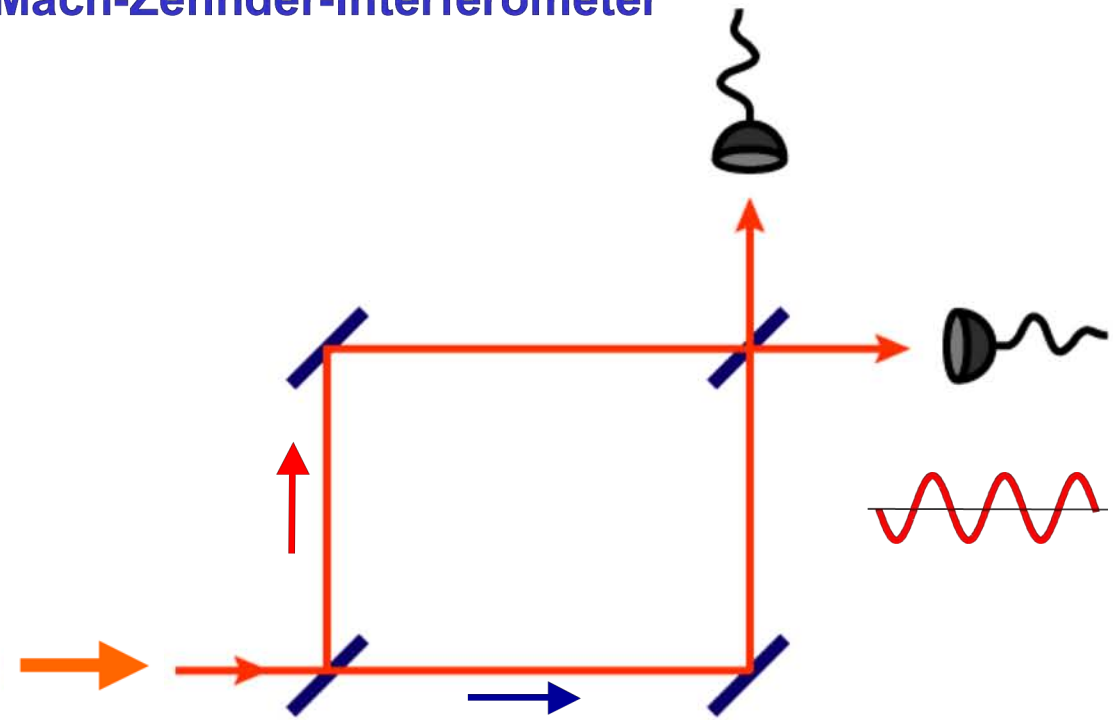


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

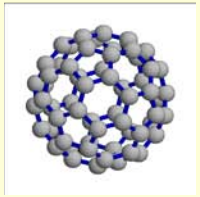


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

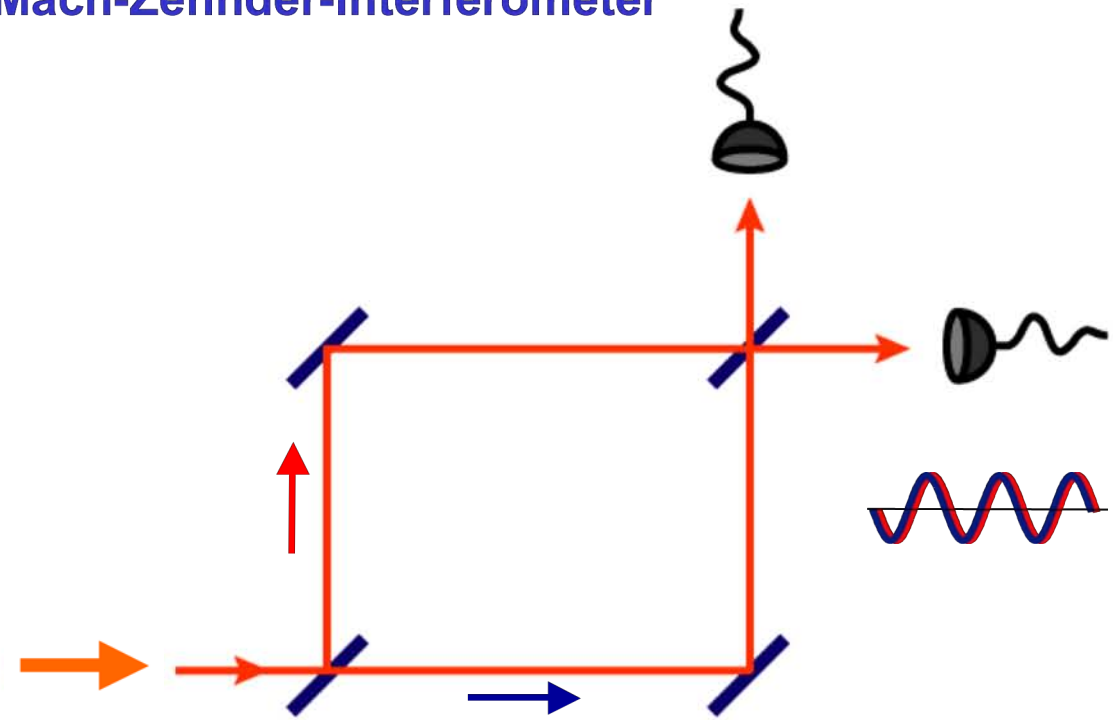


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

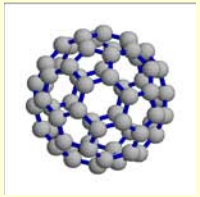


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

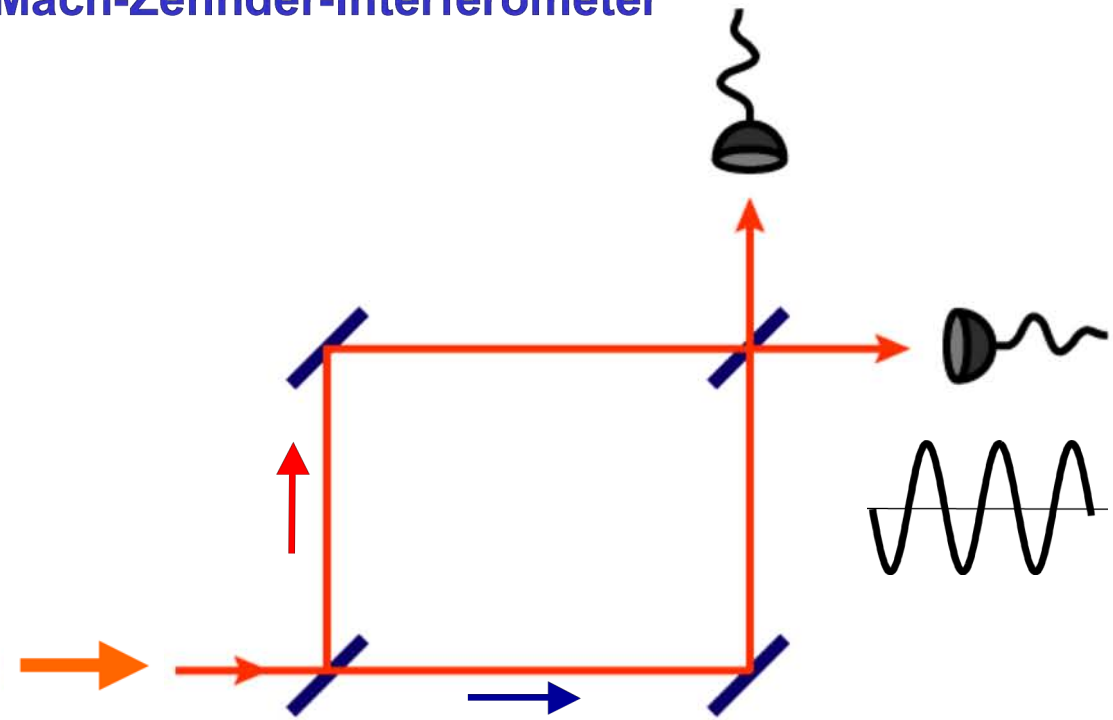


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

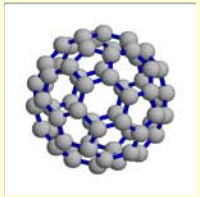


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

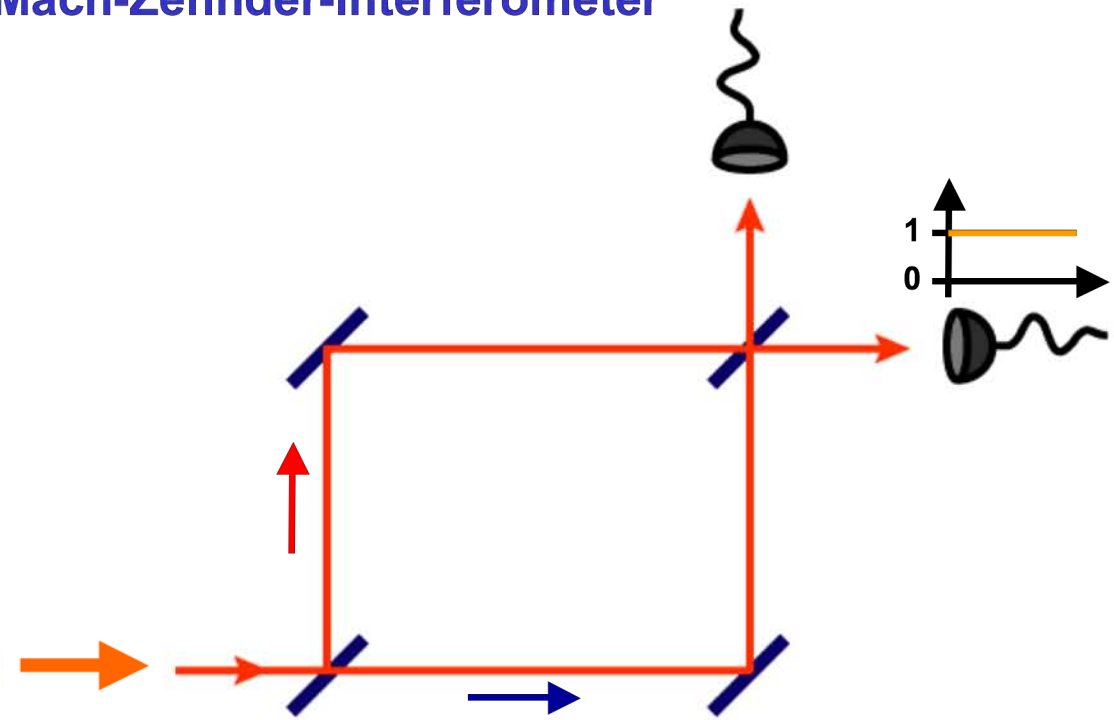


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

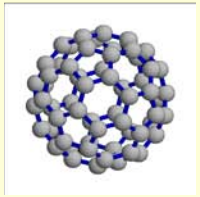


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

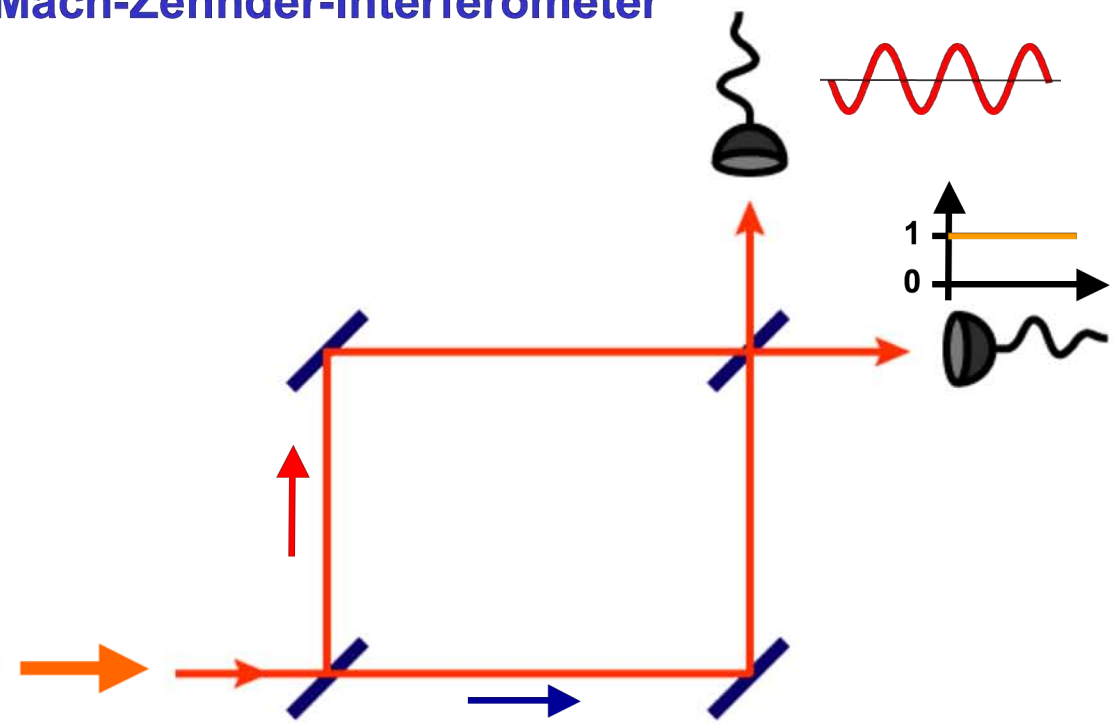


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

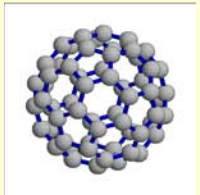


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

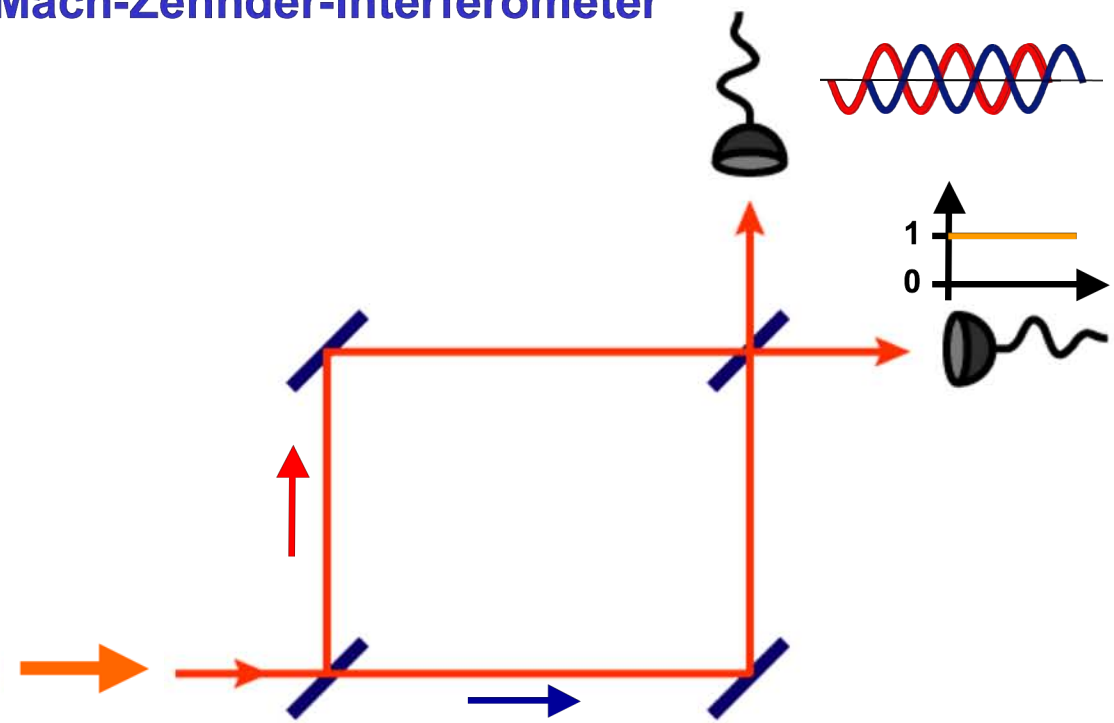


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

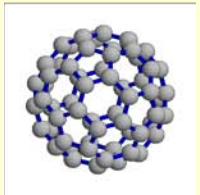


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

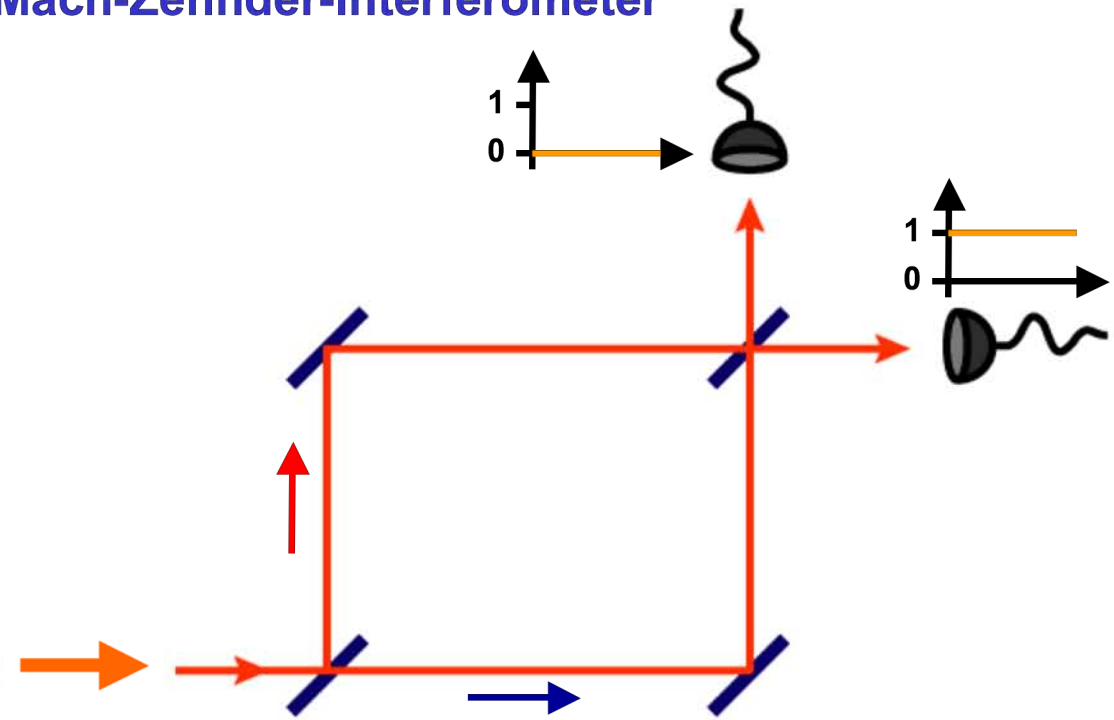


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

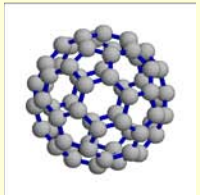


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

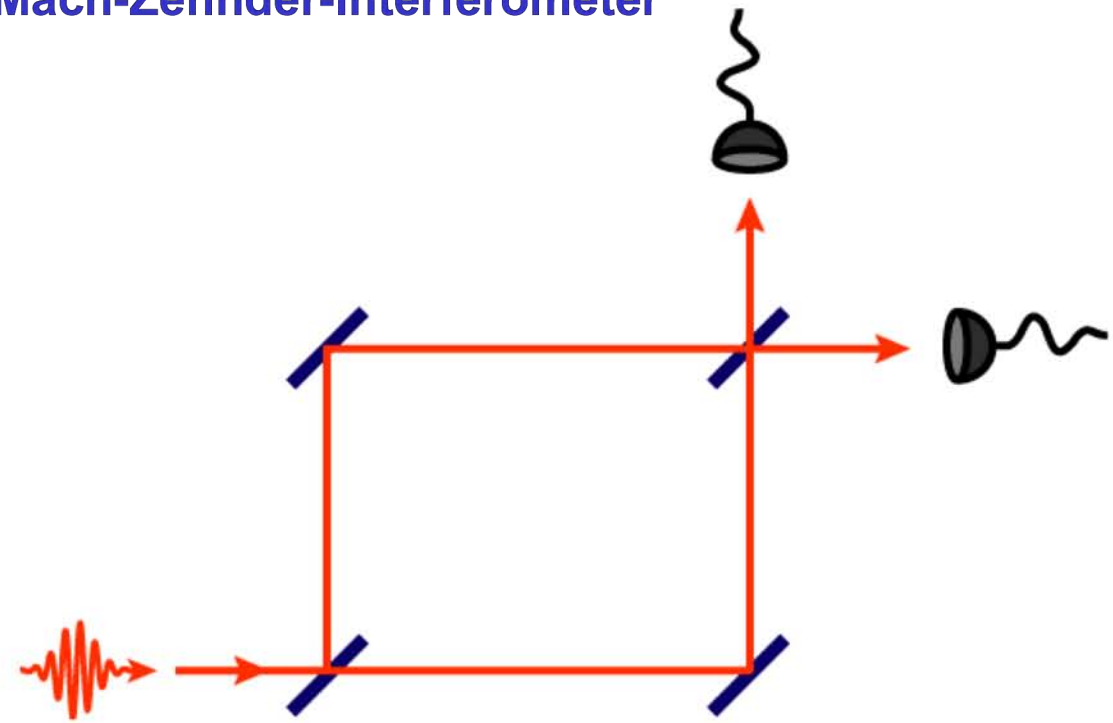


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

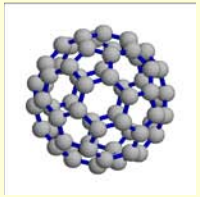


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

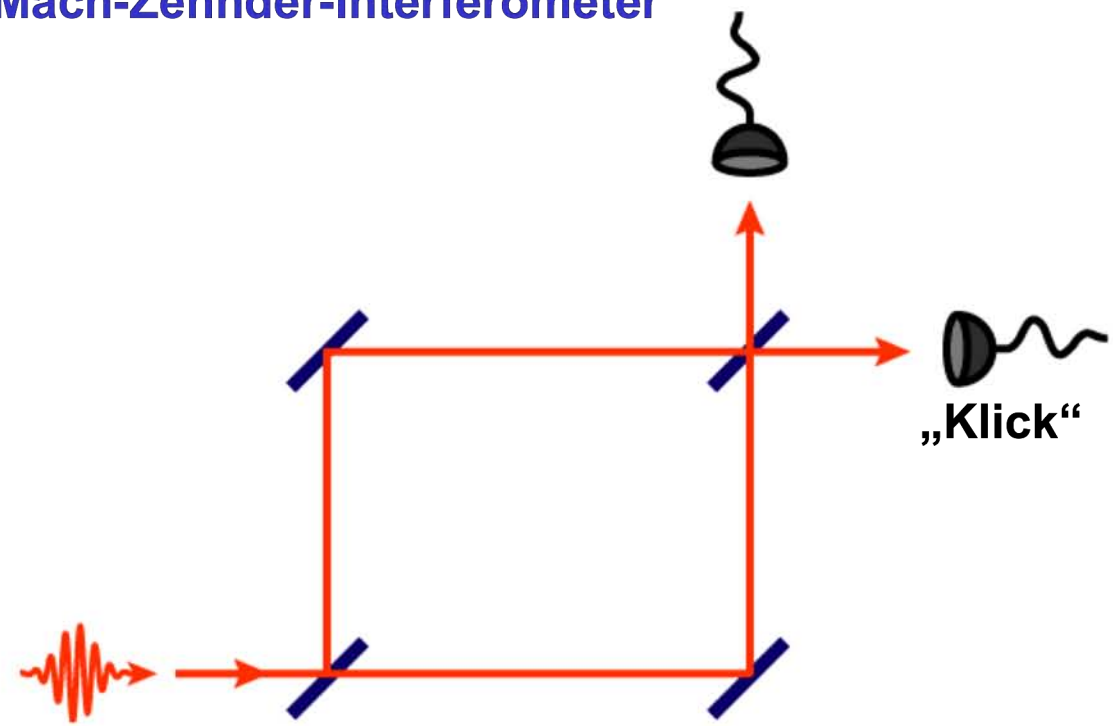


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

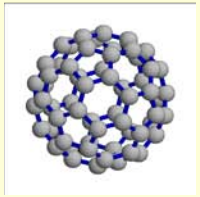


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

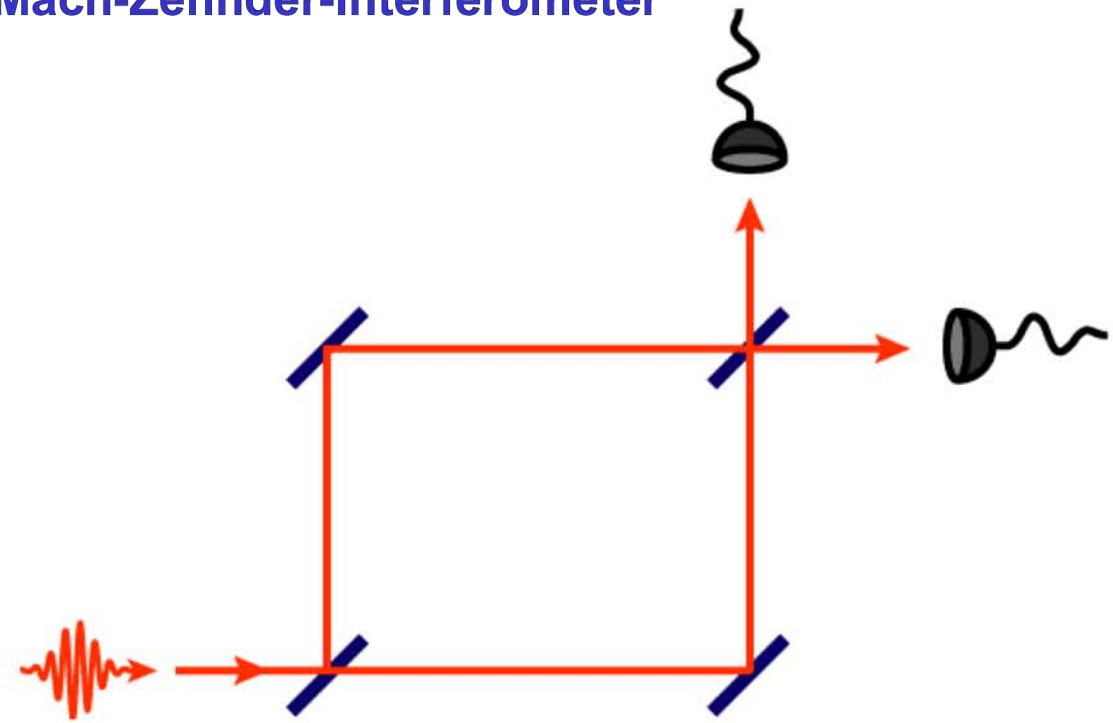


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

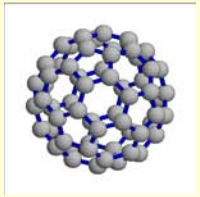


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer

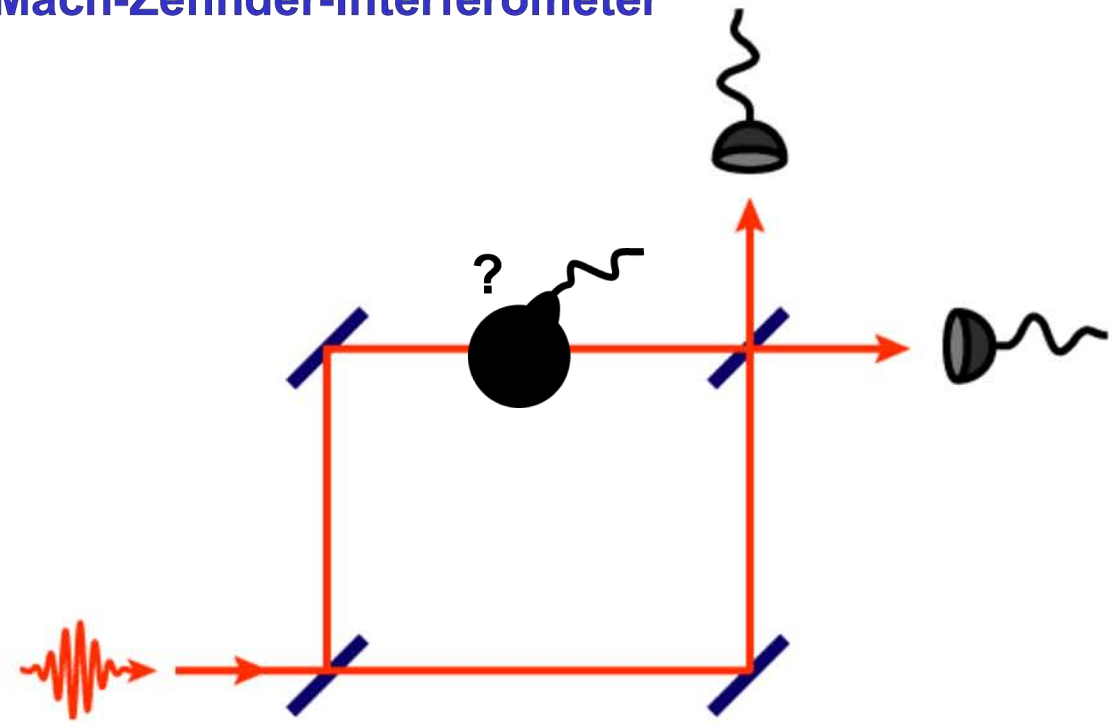


- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen

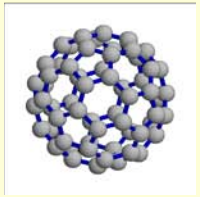


Die heutige Sicht: Welle-Teilchen-Dualismus

Mach-Zehnder-Interferometer



- Wellen- und Teilchenaspekt, abhängig von experimenteller Situation
- Theoretisch alles im Griff, Vorstellung nicht immer einfach
- Experiment auch mit Materieteilchen möglich, z.B. mit C_{60}-Molekülen



Wie ist die heutige Sicht entstanden? (I)

	Wellenaspekt	Teilchenaspekt
1690	Huygens („Traité de la lumière “): Erklärung von Brechung und geradliniger Lichtausbreitung	
1705		Isaac Newton („Opticks“): Korpuskeltheorie
1801	Thomas Young: Doppelspaltversuch, Nachweis von Interferenz	
1814	A. Fresnel: Interferenz und Polarisation	
1864	James C. Maxwell: Licht = elektromagnetische Welle	
1886	Heinrich Hertz: experimentelle Bestätigung e.m. Wellen	
1887		A. Michelson, A. Morley: Widerlegung der Äther-Theorie

Wie ist die heutige Sicht entstanden? (II)

	Wellenaspekt	Teilchenaspekt
1887/88		H. Hertz, W. Hallwachs: Fotoelektrischer Effekt
1905		A. Einstein: Lichtquantenhypothese
1912	M. von Laue: Beugung von Röntgenstrahlung	
1916		R. Millikan: Bestätigung von Einsteins Formel zum Fotoeffekt
1923		Arthur Compton: Streuung von Röntgenstrahlung an „freien“ Elektronen

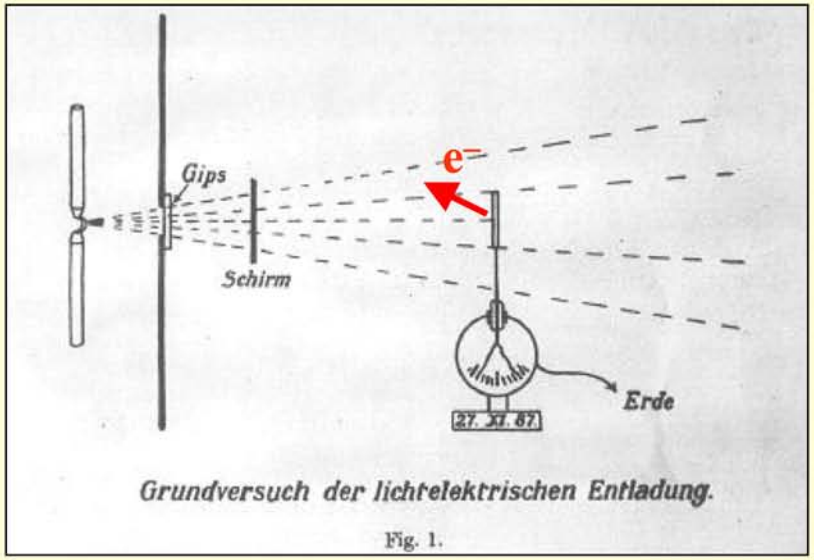
- Endeckung der Teilchennatur des Lichts wird häufig als logischer und geradliniger Prozess dargestellt
- Tatsächlich war es viel interessanter!

Die Entdeckung des Fotoeffekts

- Heinrich Hertz beobachtet, dass ultraviolette Strahlung die Bildung von Funkenentladungen begünstigt
- Genauere Untersuchungen durch W. Hallwachs (1887)
  - Bestrahlte Metallplatte lädt sich positiv auf
  - Aufladung jedoch nur bis auf ein Haltepotential von einigen Volt möglich
- Weitere Messungen durch Lenard:
  - Freigesetzte Teilchen = Elektronen
  - Kinetische Energie der Elektronen unabhängig von Lichtintensität

Wilhelm Hallwachs (1859 - 1922)

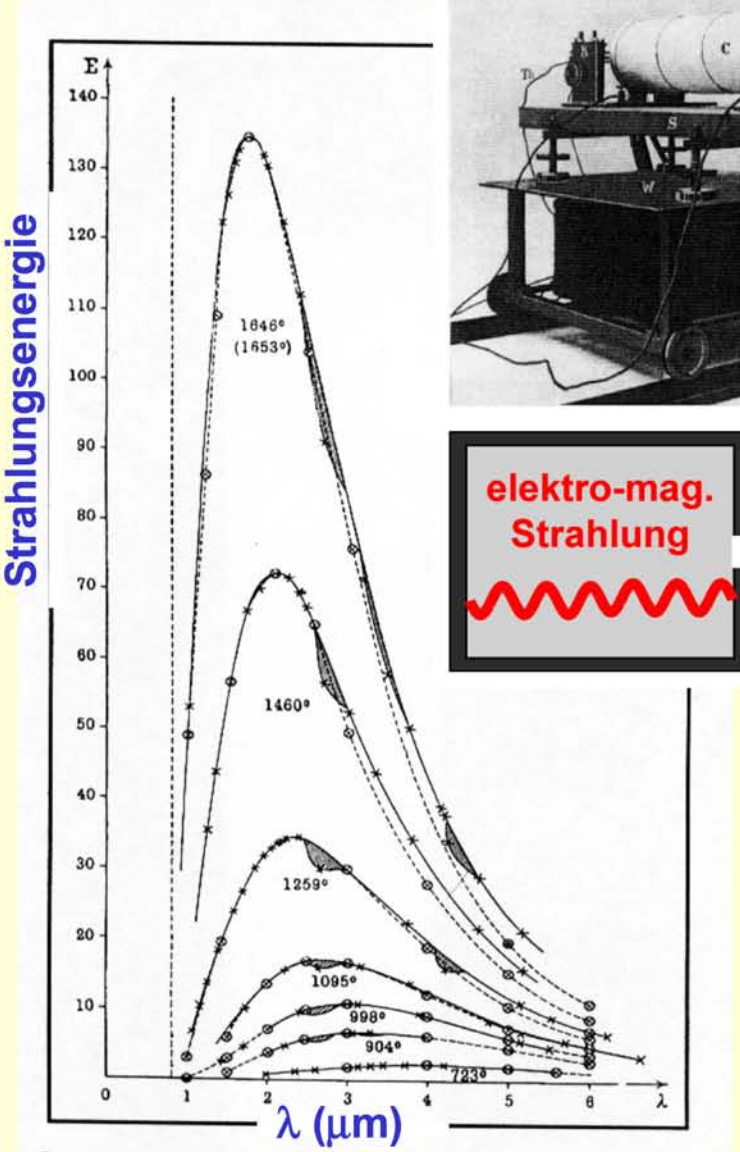




Grundversuch der lichtelektrischen Entladung.

Fig. 1.

Schwarze Strahler





- 7.10.1900:
  Max Planck errät Strahlungsformel

Spektrale Strahlungsenergiedichte:

$$u_\nu(\nu,T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\,\frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)}-1}$$

- Spätere Herleitung:
  Resonatoren (= Atome) der Frequenz ν können Energie nur in Paketen der Größe $h\cdot\nu$ abstrahlen
- Emittierte Strahlung betrachtet Planck als klassische elektromagnetische Welle

Einsteins Lichtquantenhypothese (1905) (I)

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;*
von A. Einstein.

- Einstein vergleicht Hohlraumstrahlung und ideales Gas

Entropieänderung bei Volumenänderung:

Hohlraumstrahlung:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta \nu} \lg\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

Ideales Gas:

$$S - S_0 = R\left(\frac{n}{N}\right) \lg\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

Einsteins Lichtquantenhypothese (1905) (I)

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;*
von A. Einstein.

- Einstein vergleicht Hohlraumstrahlung und ideales Gas

Entropieänderung bei Volumenänderung:

Hohlraumstrahlung:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \lg\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

Ideales Gas:

$$S - S_0 = R\left(\frac{n}{N}\right) \lg\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

$$E/n = R\beta\nu/N \ldots h\nu$$

Einsteins Lichtquantenhypothese (1905) (I)

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;*
von A. Einstein.

- Einstein vergleicht Hohlraumstrahlung und ideales Gas

Entropieänderung bei Volumenänderung:

Hohlraumstrahlung:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \lg\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

Ideales Gas:

$$S - S_0 = R\left(\frac{n}{N}\right) \lg\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

$$E/n = R\beta\nu/N \ldots h\nu$$

- Folgerung

Monochromatische Strahlung von geringer Dichte (innerhalb des Gültigkeitsbereiches der Wienschen Strahlungsformel) verhält sich in wärmetheoretischer Beziehung so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten von der Größe $R\beta\nu/N$ bestünde.

Einsteins Lichtquantenhypothese (1905) (II)

- Erst im letzten Teil (§8) geht er auf den Fotoeffekt ein:

Energie des freigesetzten Elektrons:

Planckscches Wirkungsquantum *h*

$$\frac{R}{N}\beta\nu - P.$$

Austrittsarbeit

- Vorstellung vom Lichtquantum:

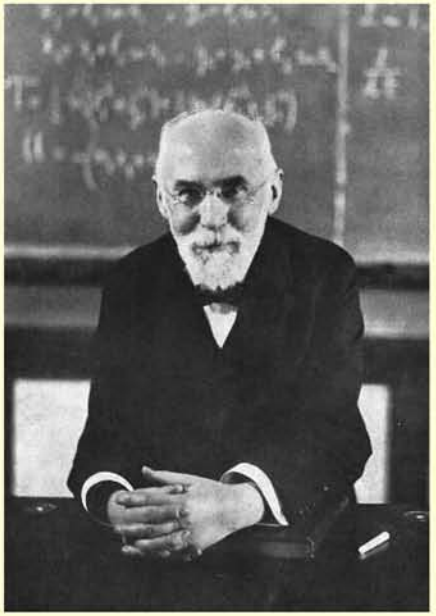
> Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

- Begriff „Photon“ 1926 eingeführt von G. Lewis,
  Lewis Photon entspricht nicht unserem heutigen Begriff

Reaktionen auf Lichtquantenhypothese

- Große Skepsis
- Viele prominente Kritiker, u. a. Lorentz, Planck, Sommerfeld, Thomson
- Planck (Salzburg-Konferenz 1909):
  - Lichtquanten im Widerspruch zur Maxwell-Theorie
  - Wie sollen Lichtquanten interferieren?
- Lorentz (~1910):
  - Viel wahrscheinlicher, dass Fotoeffekt durch Betrachtung der Atomstruktur verstanden werden kann

Hendrik Lorentz
(1853-1928)



Einsteins Antwort

- Einsteins Vorstellung vom Photon:
  - Singulärer Punkt, umgeben von Vektorfeld
  - Viele Photonen können ebene Welle bilden
  - Interferenz somit möglich

Einsteins Photon (!?):

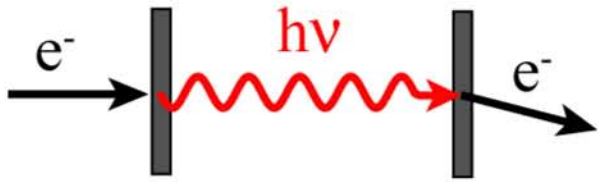


- Weitere Einsicht (J. Stark, A. Einstein, ~1910):
  - Photonen besitzen linearen Impuls $h\nu/c$
  - Im klassischen Emissionsprozess wird dagegen kein Impuls übertragen

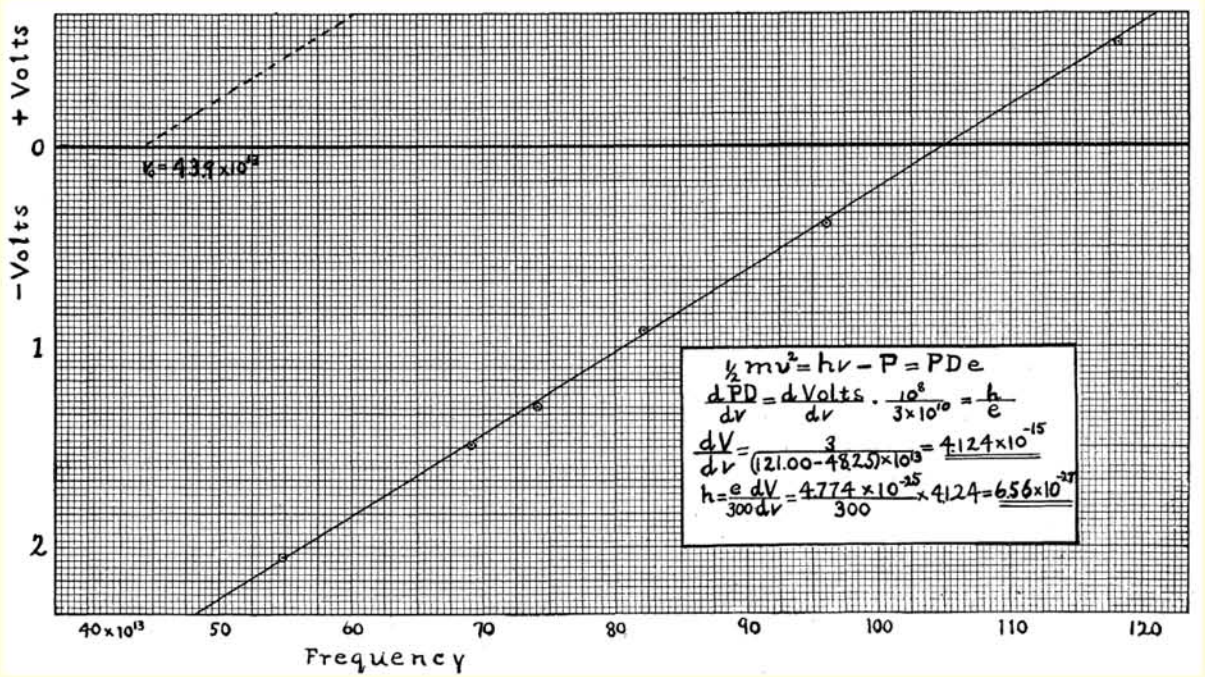


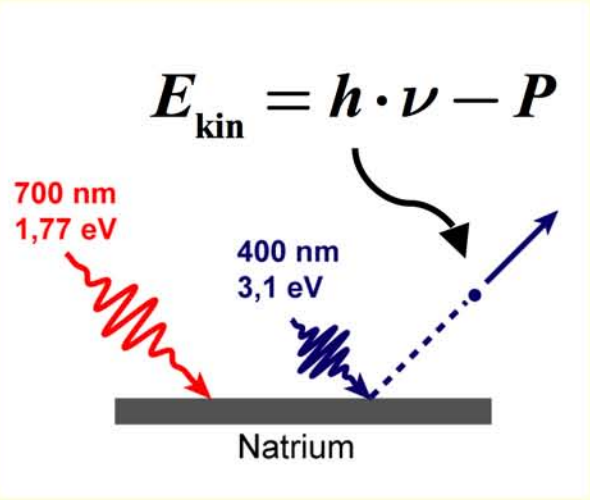
Kugelwelle
• kein Impulsübertrag bei Emission
• Intensität/Fläche nimmt ab

Kathodenstrahlen:



Millikans Messungen zum Fotoeffekt (1916)





Phys. Rev. 7, 355 (1916)

- Genaue Messung von Plancks „*h*“ (Unsicherheit 0,5%)
- Perfekte Übereinstimmung mit Einsteins Formel
- War die Lichtquantenhypothese damit akzeptiert?

Millikans Interpretation (1916)

Robert Millikan
(1868-1953)



Nein!

Phys. Rev. 7, 355 (1916)

It was in 1905 that Einstein[2] made the first coupling of photo effects and with any form of quantum theory by bringing forward the bold, not to say the reckless, hypothesis of an electro-magnetic light corpuscle of energy $h\nu$, which energy was transferred upon absorption to an electron. This hypothesis may well be called reckless first because an electromagnetic disturbance which remains localized in space seems a violation of the very conception of an electromagnetic disturbance, and second because it flies in the face of the thoroughly established facts of interference.

Despite then the apparently complete success of the Einstein equation, the physical theory of which it was designed to be the symbolic expression is found so untenable that Einstein himself, I believe, no longer holds to it.

Millikans Interpretation (1950)

- Im Alter von 82 Jahren schreibt Millikan in seiner Autobiographie:

„Dies erschien mir, wie auch vielen anderen, eine Sache allergrößter Wichtigkeit zu sein, denn es bewies einfach und unwiderlegbar, so dachte ich, *dass das emittierte Elektron, das mit der Energie hν entweicht, diese Energie durch direkte Übertragung von hν Energieeinheiten vom Licht zum Elektron erhält* und deshalb kaum eine andere Interpretation erlaubt als jene, die Einstein ursprünglich vorgeschlagen hat, nämlich die semi-korpuskulare oder Photon-Theorie des Lichts selbst.“

Einsteins Nobelpreis (1921)



„für seine Dienste an der Theoretischen Physik und speziell für seine Entdeckung des Gesetzes des fotoelektrischen Effekts“

- Hatte das Nobelpreiskomitee damit Einsteins Lichtquantenhypothese anerkannt?
- Nein! Die Begründung bezieht sich explizit auf die Entdeckung des Gesetzes und mit Absicht nicht auf die zugrunde liegende Theorie

Einsteins Gegner



Allvar Gullstrand

und sein Fürsprecher



Carl Wilhelm Oseen

Arthur Compton

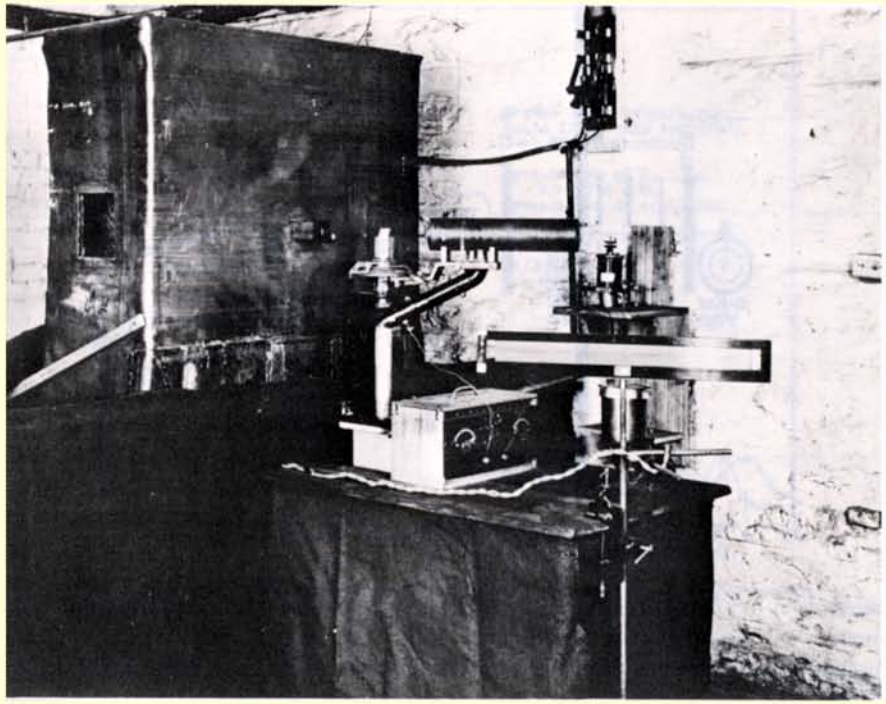


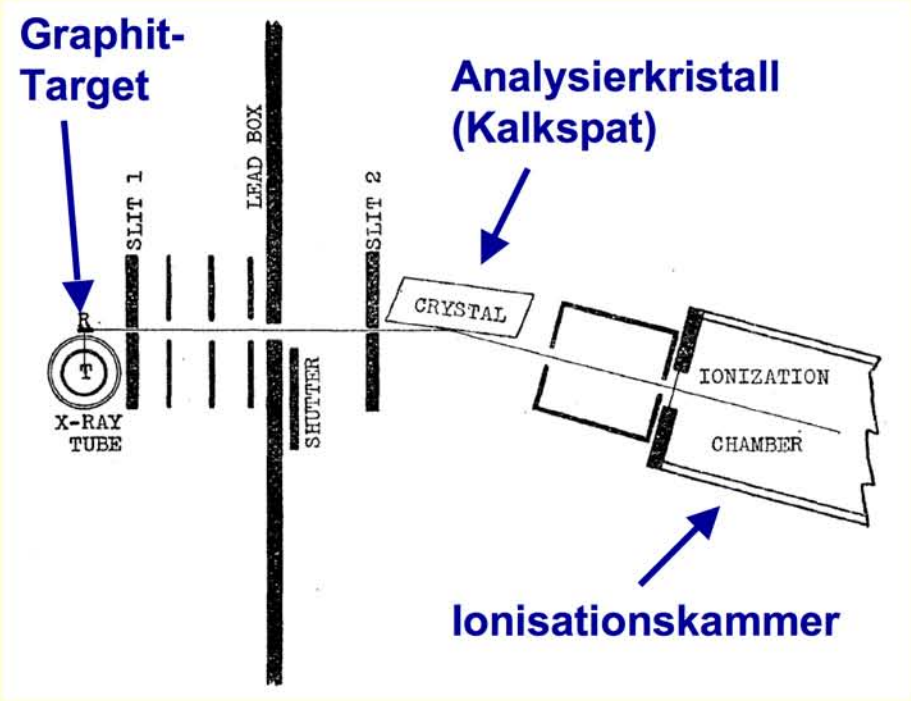
Stephen Deutch photo / Courtesy of AIP Niels Bohr Library

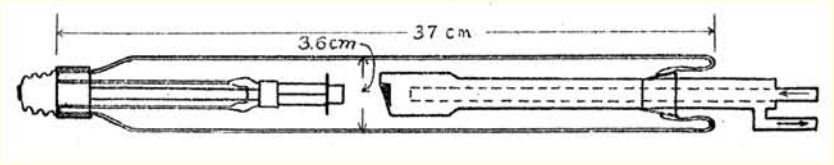
Arthur Compton
(1892-1962)

Nobelpreis 1927 zusammen mit Charles Wilson

Comptons Experiment



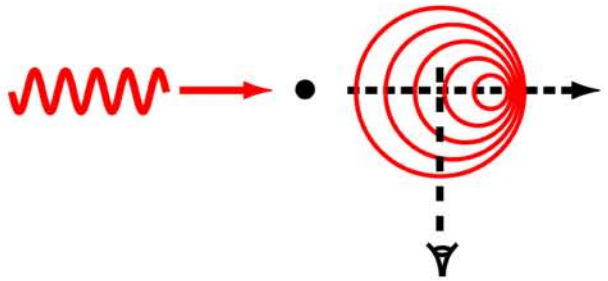




Röntgenröhre:
Molybdän K_α-Linie (λ = 70,8 pm)

Comptons anfängliche Deutung der Daten

- Comptons Theorie (Oktober 1922)

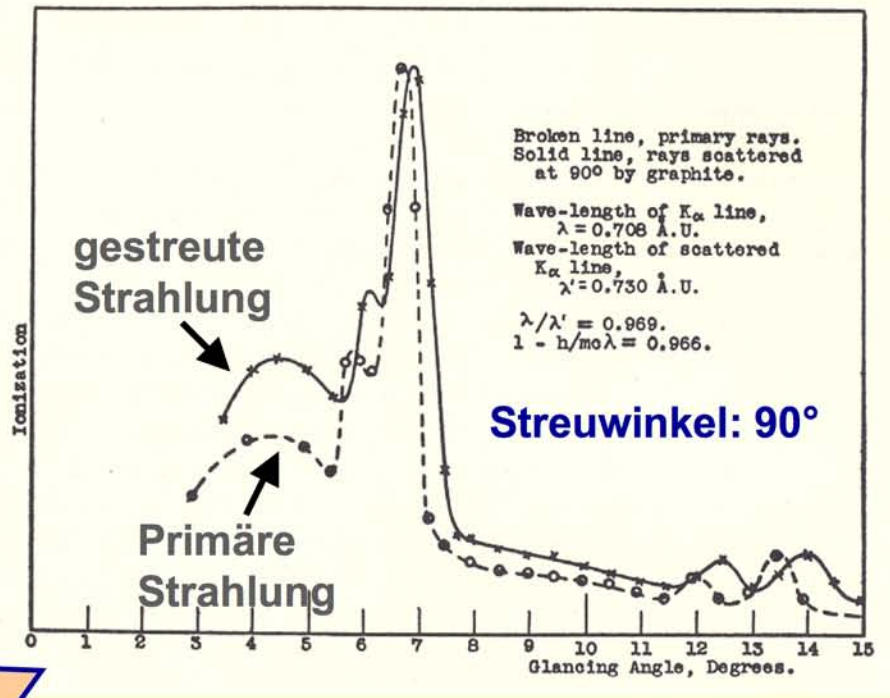


1. Impulserhaltung

$$mv = h/\lambda$$

2. Dopplereffekt (bei 90°)

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = 1 - \frac{v}{c}$$

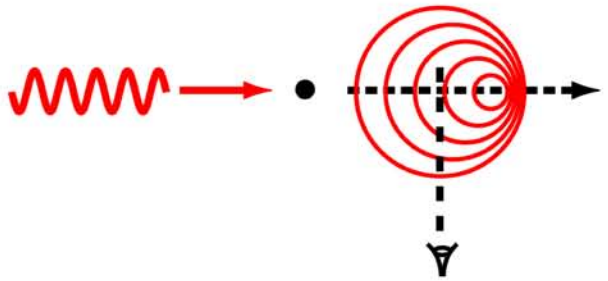


Genaue Übereinstimmung mit Messung

- Falsche Theorie bestätigt mit richtigen Daten!
- Theorien kommen und gehen, gute Daten sind für die Ewigkeit!

Comptons anfängliche Deutung der Daten

- Comptons Theorie (Oktober 1922)

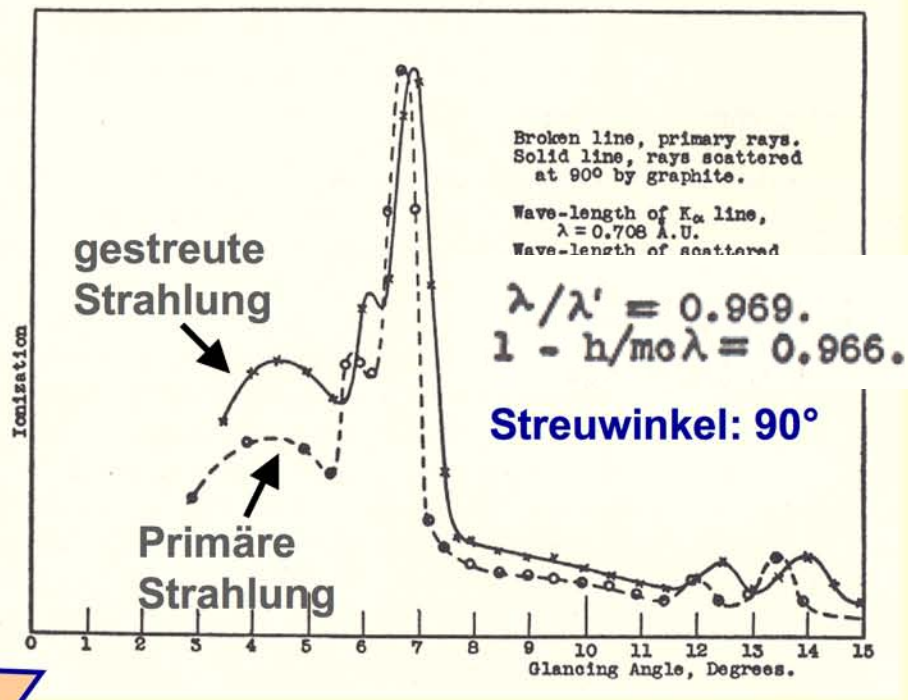


1. Impulserhaltung

$$mv = h/\lambda$$

2. Dopplereffekt (bei 90°)

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = 1 - \frac{v}{c}$$

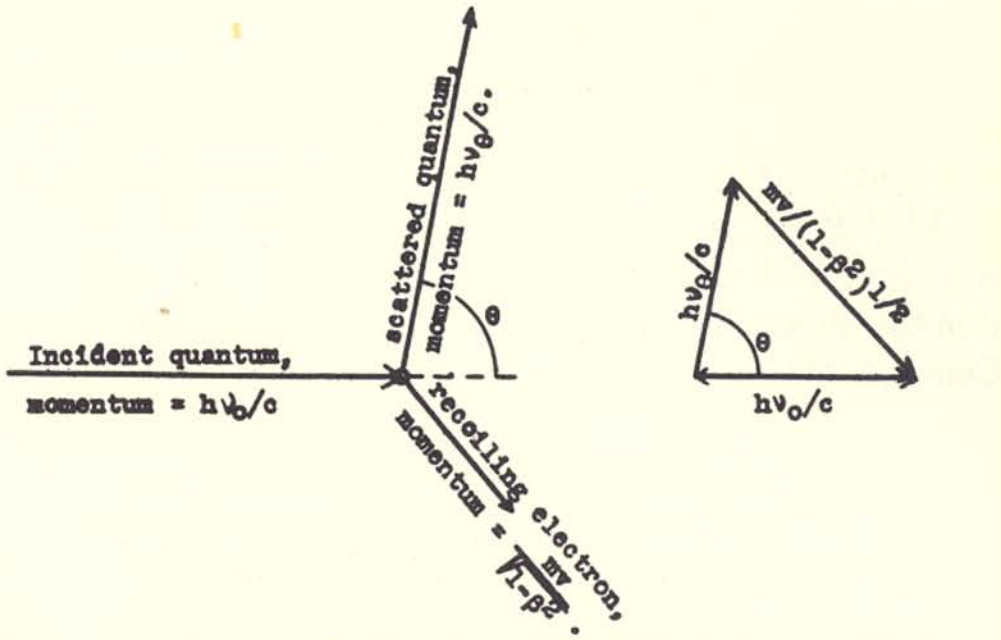


Genaue Übereinstimmung mit Messung

- Falsche Theorie bestätigt mit richtigen Daten!
- Theorien kommen und gehen, gute Daten sind für die Ewigkeit!

Comptons Durchbruch (1923)

- Neuer Ansatz: Billardstoß zw. Photon und Elektron:
  - Impulserhaltung
  - Energieerhaltung



- Ergebnis:

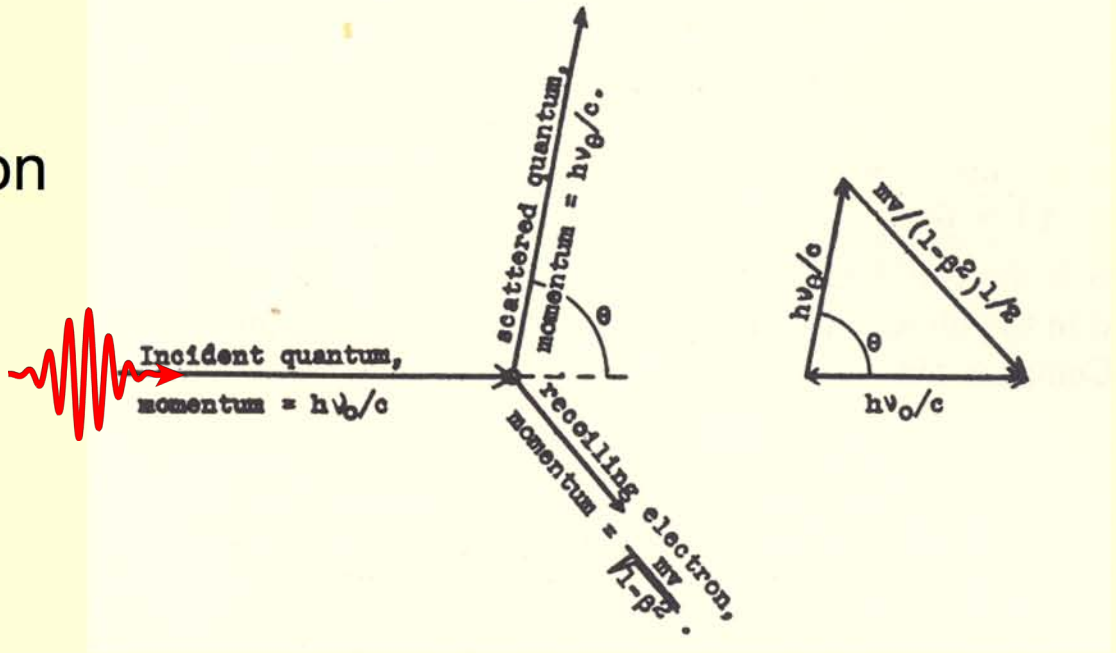
Phys. Rev. 21, 484 (1923)

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

- Fast zeitgleich findet Peter Debye das gleiche Resultat

Comptons Durchbruch (1923)

- Neuer Ansatz:
  Billardstoß zw. Photon und Elektron:
  - Impulserhaltung
  - Energieerhaltung



- Ergebnis:

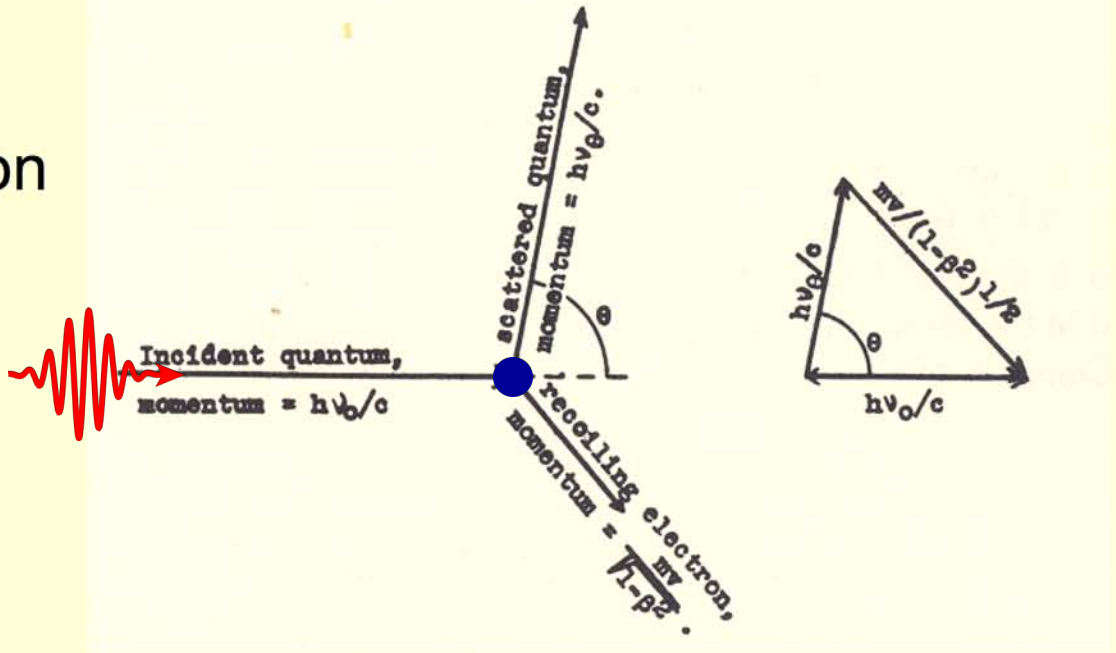
Phys. Rev. 21, 484 (1923)

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

- Fast zeitgleich findet Peter Debye das gleiche Resultat

Comptons Durchbruch (1923)

- Neuer Ansatz:
  Billardstoß zw. Photon und Elektron:
  - Impulserhaltung
  - Energieerhaltung



- Ergebnis:

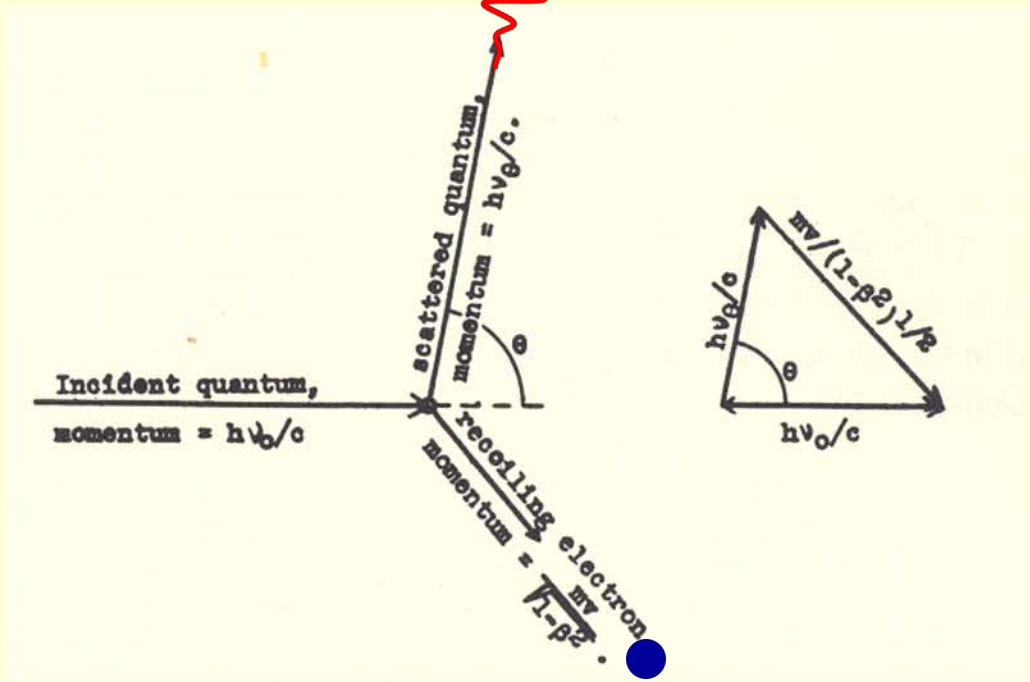
Phys. Rev. 21, 484 (1923)

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

- Fast zeitgleich findet Peter Debye das gleiche Resultat

Comptons Durchbruch (1923)

- Neuer Ansatz: Billardstoß zw. Photon und Elektron:
  - Impulserhaltung
  - Energieerhaltung



- Ergebnis:

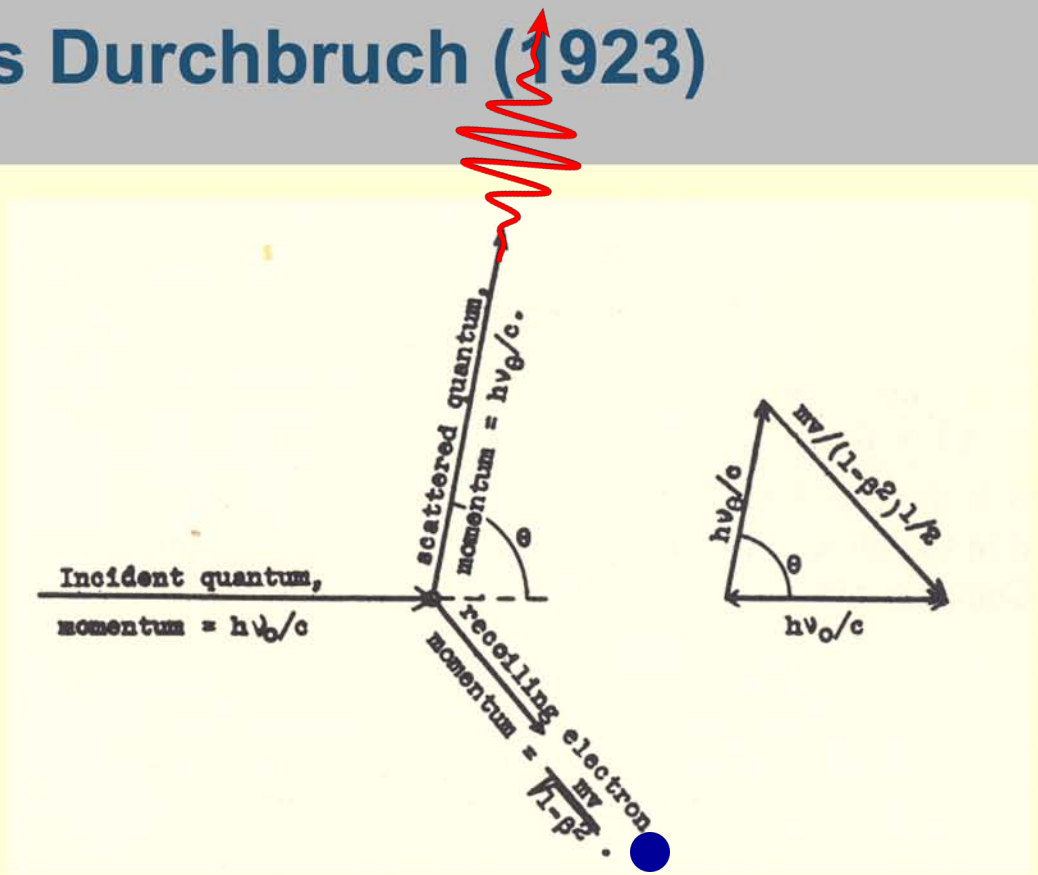
Phys. Rev. 21, 484 (1923)

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

- Fast zeitgleich findet Peter Debye das gleiche Resultat

Comptons Durchbruch (1923)

- Neuer Ansatz: Billardstoß zw. Photon und Elektron:
  - Impulserhaltung
  - Energieerhaltung



- Ergebnis:

Phys. Rev. 21, 484 (1923)

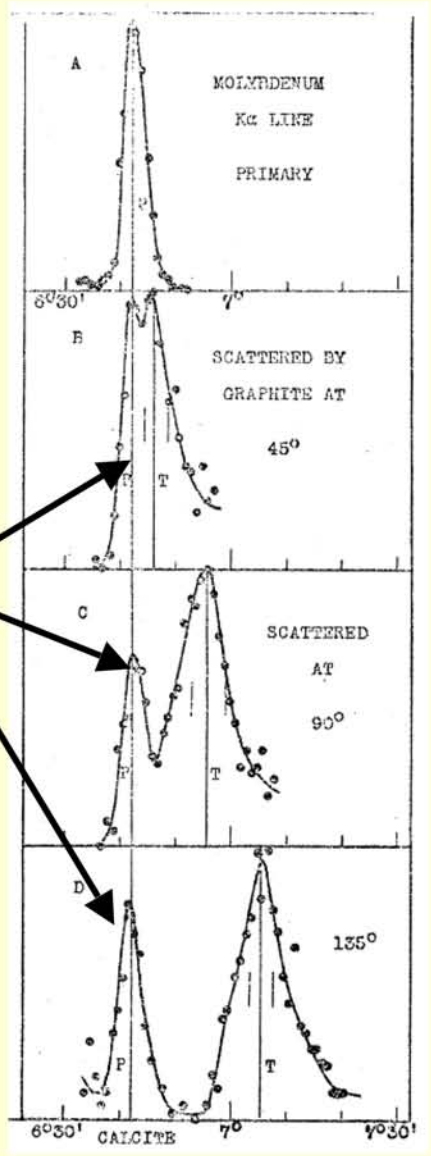
$$\Delta\lambda = \lambda_\theta - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c}(1-\cos\theta)$$

Compton-Wellenlänge: 2,42 pm

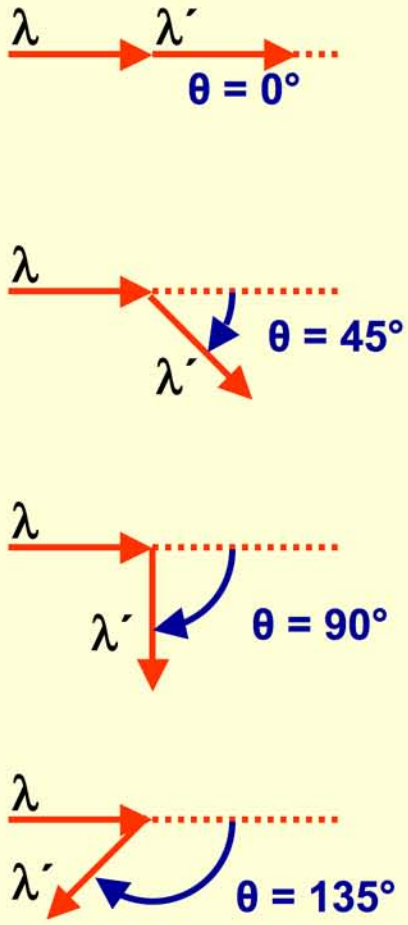
- Fast zeitgleich findet Peter Debye das gleiche Resultat

Weitere experimentelle Bestätigung (I)

Unverschobene Linie:
Streuung an stark gebundenem Elektron bzw. an ganzem Atom



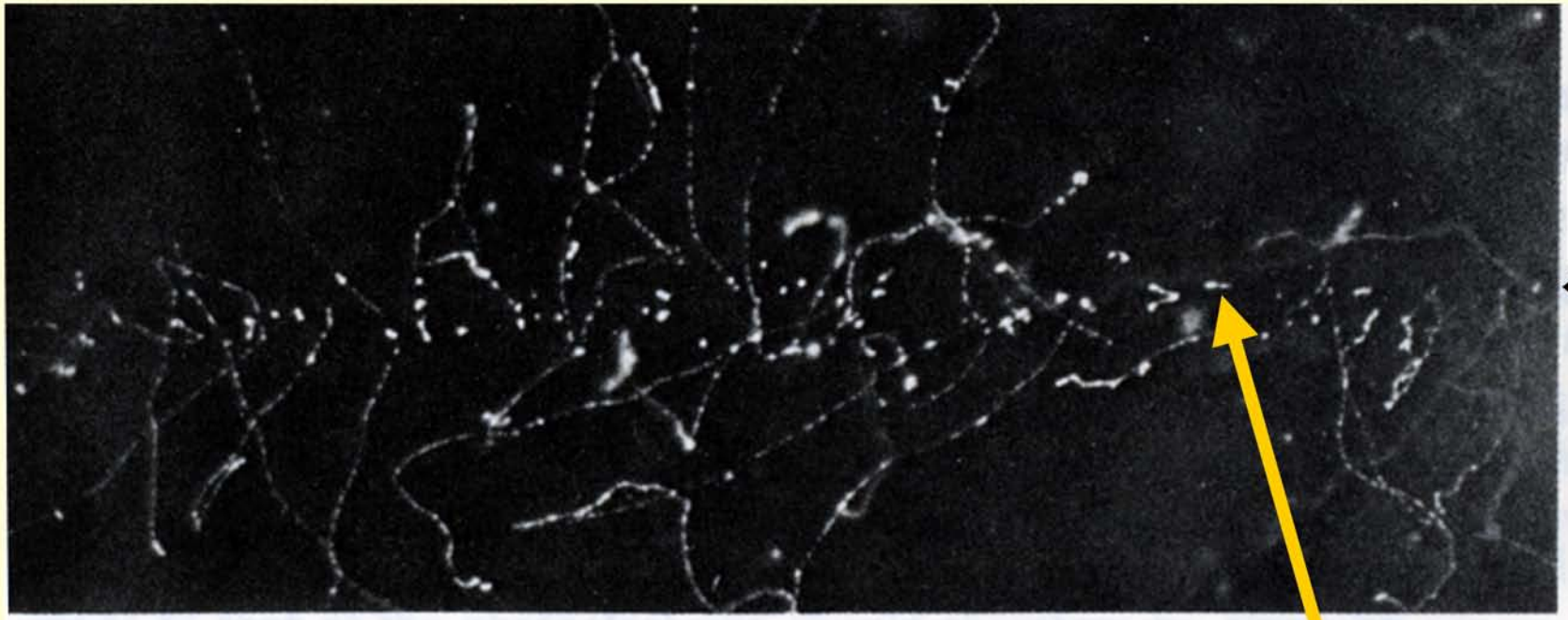
Messung der Winkelabhängigkeit:



A. Compton, Phys. Rev. 22, 409 (1923)

Weitere experimentelle Bestätigung (II)

Nachweis der Rückstoßelektronen mit Nebelkammern:



Röntgen-strahlung

Reproduced by permission of the Royal Society of London



Charles Wilson (1869-1959)



Walther Bothe (1891-1957)

Länge der kurzen Spuren entspricht Erwartung für Compton-Streuung

Das kurze Leben der BKS-Theorie (1924-1925)

- Bohr war auch jetzt noch nicht bereit, Teilchennatur des Lichts zu akzeptieren
- Bohr, Kramers und Slater schlagen alternative Theorie vor
- Hoher Preis:
  Energie- und Impulserhaltung sollen nur im statistischen Mittel gelten
- Widerlegung der BKS-Theorie 1925 durch Geiger und Bothe:
  Koinzidenter Nachweis von Elektron und Photon



Niels Bohr

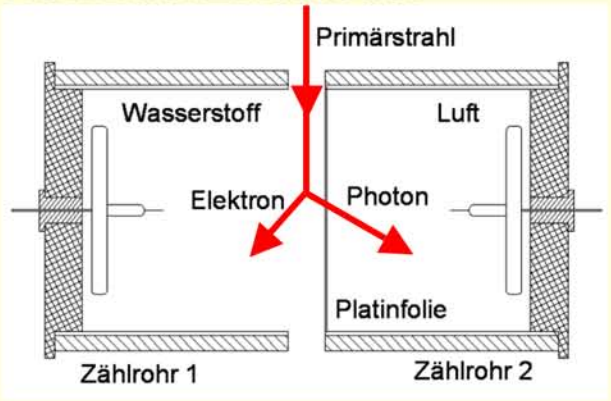


Hendrick Kramers



John Slater

Koinzidenzmethode:

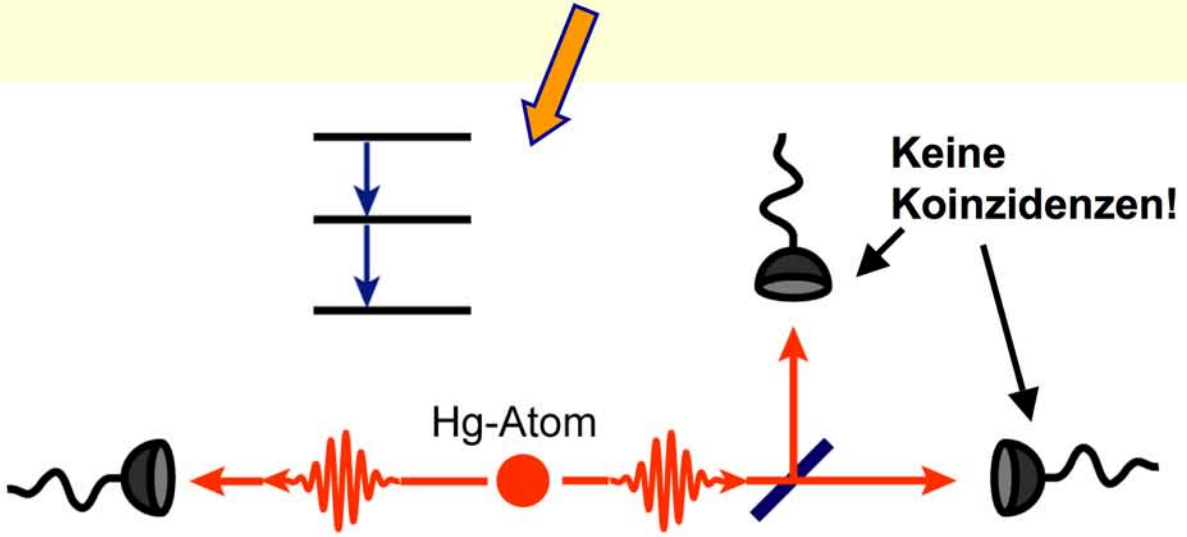


Fazit bis hierhin

- Erst ab etwa 1925 war Teilchenaspekt des Lichts allgemein anerkannt
- Offen blieb, wie sich Wellen- und Teilchenaspekt vereinbaren ließen
- Dieses Problem wurde in den 1940er Jahren mit der Entwicklung der QED gelöst

Endgültiger Nachweis der Teilchennatur des Lichts in den 1970er Jahren

- Semi-klassische Beschreibung des Fotoeffekts im Prinzip möglich (Lamb, Scully, 1960er Jahre)
- Endgültiger Beweis der Quantennatur des Lichts
  - Bei einzelnen Photonen: Keine Koinzidenzen nach Strahlteilung
  - Photon ist unteilbares Teilchen



J. Clauser, Phys. Rev. D 9, 853 (1974)

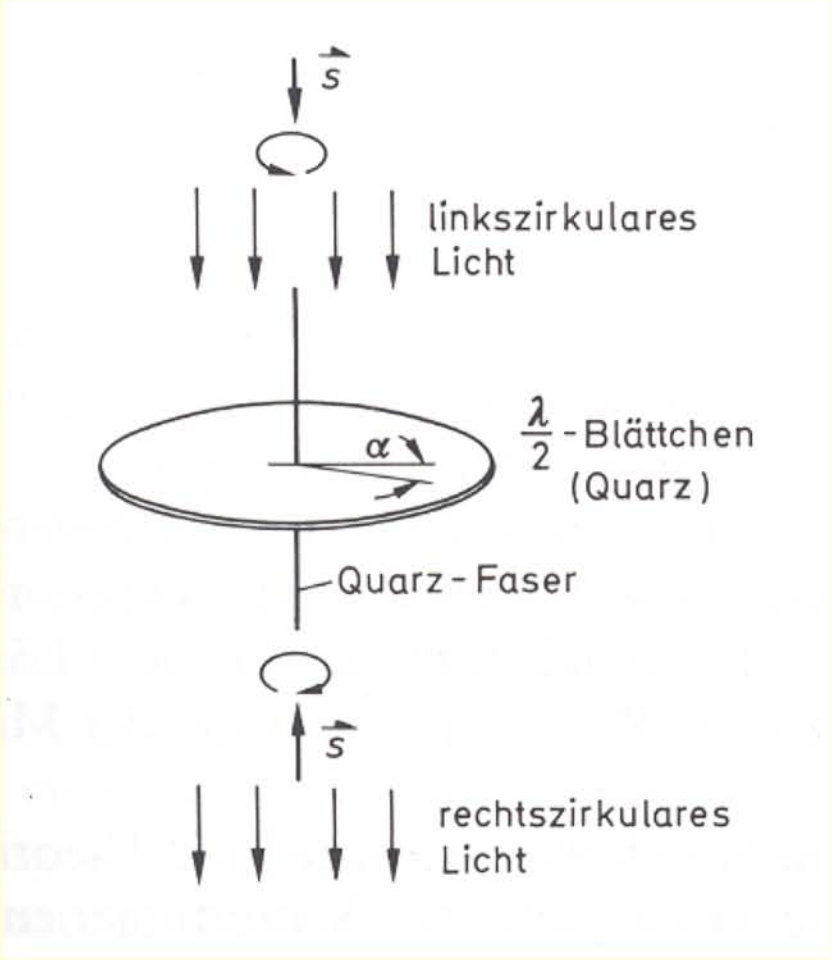
Ähnliches Experiment:
Kimble, Dagenais, Mandel, Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)

„Photon-Antibunching“

Eigenschaften des Photons

	Limit	Methode
Masse	$m_\gamma < 10^{-49}$ kg	z.B. Dispersion von Sternenlicht
Ladung	$q_\gamma < 5\times10^{-30}\ e$	Ablenkung in galaktischen Magnetfeldern
Spin	$\hbar$	z.B. Messung makroskopischer Drehimpulse

Erste makroskopische Messung des Photonspins:

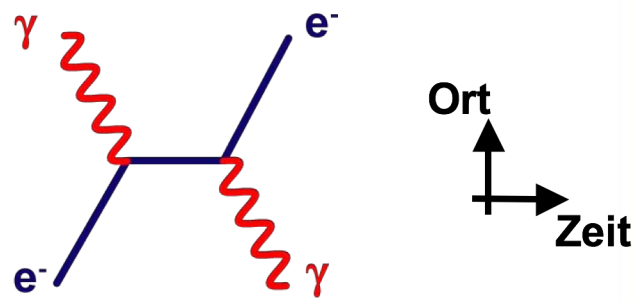


R. Beth, Phys. Rev. 50, 115 (1936)

Die starke Seite des Photons

- Mit Photonen lässt sich die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen untersuchen
- Solche Messungen werden von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt

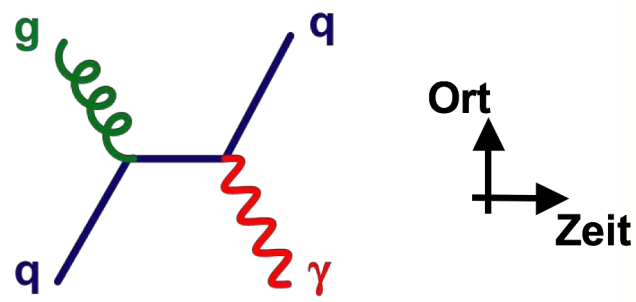
Compton-Streuung:



Die starke Seite des Photons

- Mit Photonen lässt sich die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen untersuchen
- Solche Messungen werden von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt

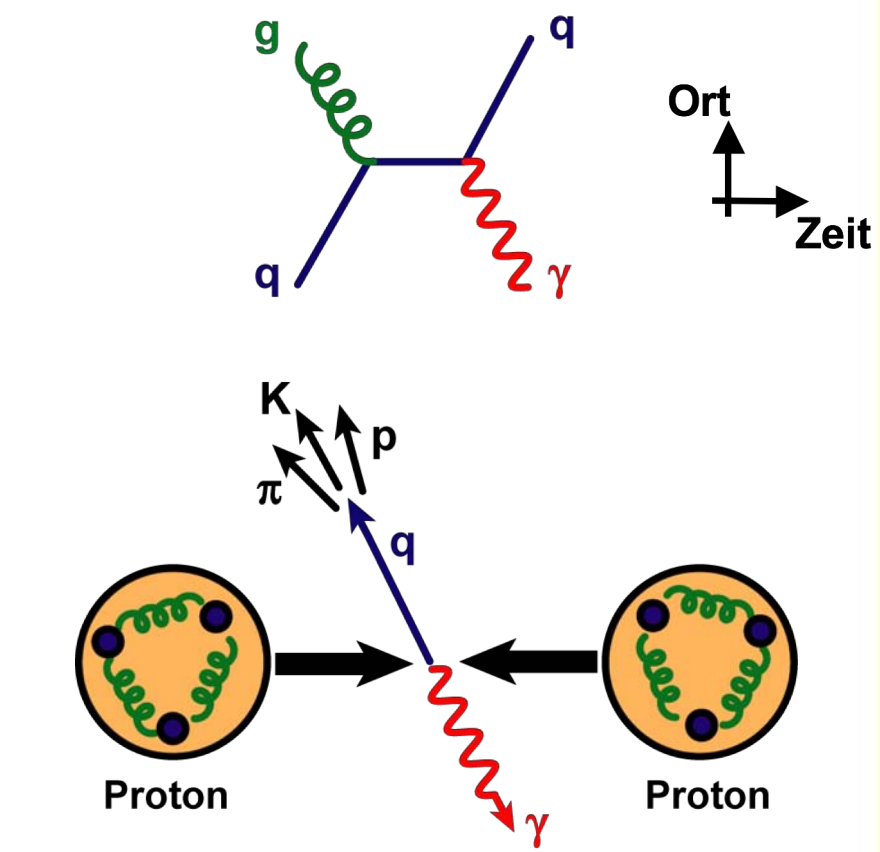
Quark-Gluon-Compton-Streuung:



Die starke Seite des Photons

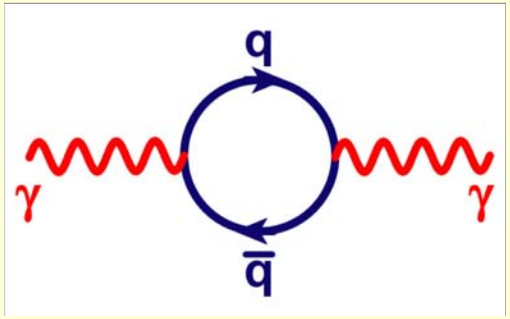
- Mit Photonen lässt sich die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen untersuchen
- Solche Messungen werden von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt

Quark-Gluon-Compton-Streuung:

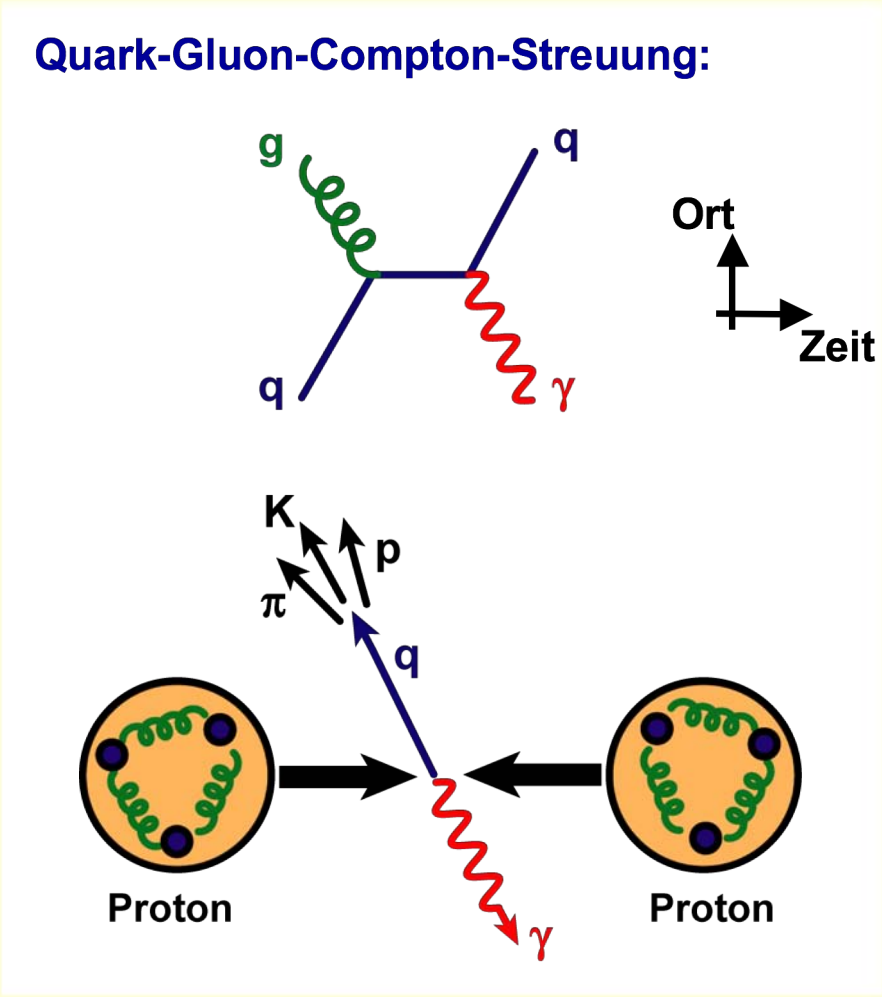


Die starke Seite des Photons

- Mit Photonen lässt sich die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen untersuchen
- Solche Messungen werden von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt
- Das Photon kann als stark wechselwirkendes Teilchen betrachtet werden!



Quark-Gluon-Compton-Streuung:





„Für den Rest meines Lebens will ich nachdenken, was Licht ist.“

Albert Einstein, 1916

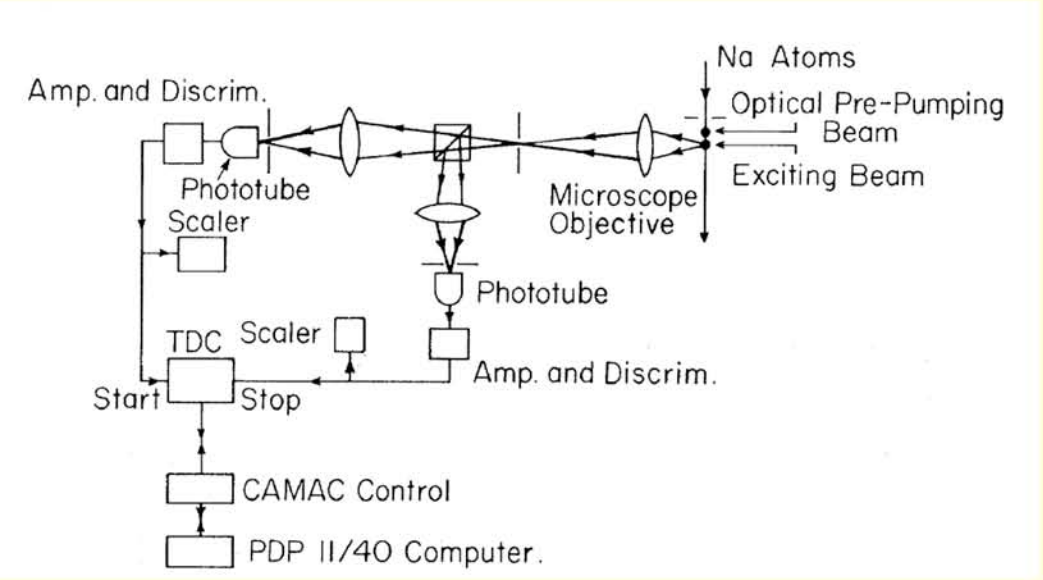
Literatur

- Richard A. Campos, *Still Shrouded in Mystery: The Photon in 1925*, physics/0401044
- Bergmann, Schäfer, Band 3, Optik
- Ashok Muthukrishnan, Marlan O. Scully, M. Suhail Zubairy, *The concept of the photon—revisited*, OPN Trends, 2003
- H. Paul, Photonen, Teubner Verlag
- Roger H. Stuewer: *The Compton Effect – Turning Point in Physics*, 1974
- Roger H. Stuewer, Einstein's Revolutionary Light-Quantum Hypothesis, http://photon2005.fuw.edu.pl/photon/
- Anton Zeilinger, Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Markus Aspelmeyer, *Happy centenary, photon*, NATURE, VOL 433, 20.01.2005

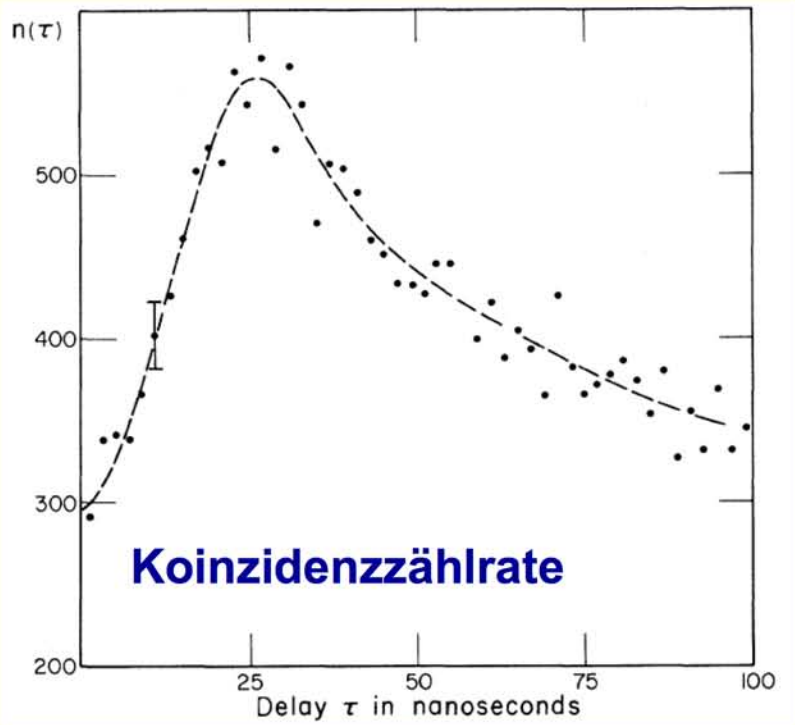
Zusatzfolien

„Fünfzig Jahre intensiven Nachdenkens
haben mich der Antwort auf die Frage
‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht näher gebracht.
Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein,
er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich.“
Albert Einstein, 1951

Photon Anti-bunching



Kimble, Dagenais, Mandel, Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)



Millikans Interpretation (1950)

- Im Alter von 82 Jahren schreibt Millikan in seiner Autobiographie:

„This seemed to me, as it did to many others, a matter of very great importance, for it … proved simply and irrefutably I thought, *that the emitted electron that escapes with the energy hν get that energy by direct transfer of hν units of energy from the light to the electron* and hence scarcely permits of any other interpretation than which Einstein had originally suggested, namely that of the semi-corpuscular or photon theory of light itself“