

Einteilung der Vorlesung

VL1. Einleitung

Die fundamentalen Bausteine und Kräfte der Natur

VL2. Experimentelle Grundlagen der Atomphysik

2.1. Masse, Größe der Atome

2.2. Elementarladung, spezifische Ladung des Elektrons

2.3 Massenspektroskopie

2.4. Struktur der Atome, Rutherford-Streuversuch

VL3. Photonen (Quanteneigenschaften des Lichts I)

3.1. Photoeffekt

3.2. Comptoneffekt

VL4. Photonen (Quanteneigenschaften des Lichts II)

4.1. Gravitationseffekte des Photons

4.2. Temperaturstrahlung

VL5. Materiewellen (Welleneigenschaften von Teilchen)

5.1. Beugung und Interferenz von Elektronen

5.2. Materiewellen und Wellenpakete

5.3. Heisenbergsche Unschärferelation

Teilchencharakter des Lichts: Photonen

Wellencharakter des Lichts bewiesen durch Interferenzen
(Huygens, Young)

Teilchencharakter des Lichts (=Existenz der Photonen)
bewiesen durch

3.1 Photoeffekt

3.2 Thompson-, Raleigh- und Comptonstreuung

4.1 Gravitationseffekte des Photons

4.2 Plancksche Hohlraumstrahlung

Heute: 3.1 und 3.2

Folien auf dem Web:

<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/>

Teilweise benutztes Skript:

<http://www.wmi.badw-muenchen.de/E23/lehre/skript/>

Teilchen-Welle “Dualismus”

Photonen beschreiben elektromagnetische Wechselwirkung als Austauschteilchen der QED (QED=Quantum Electrodynamics = relat. Quantenfeldtheorie des Elektromagnetismus).

Wie kann man Wellencharakter und Teilchencharakter vereinbaren?
Beispiele

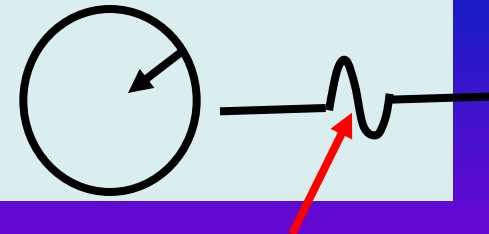


1. Dipolantenne: unendlich viele Photonen lassen Quantencharakter verschwinden: “Glättung” der Wellen;

Analogie: kontinuierliche Erzeugung von Wellen in einem Seil $\Rightarrow$ stehende Wellen

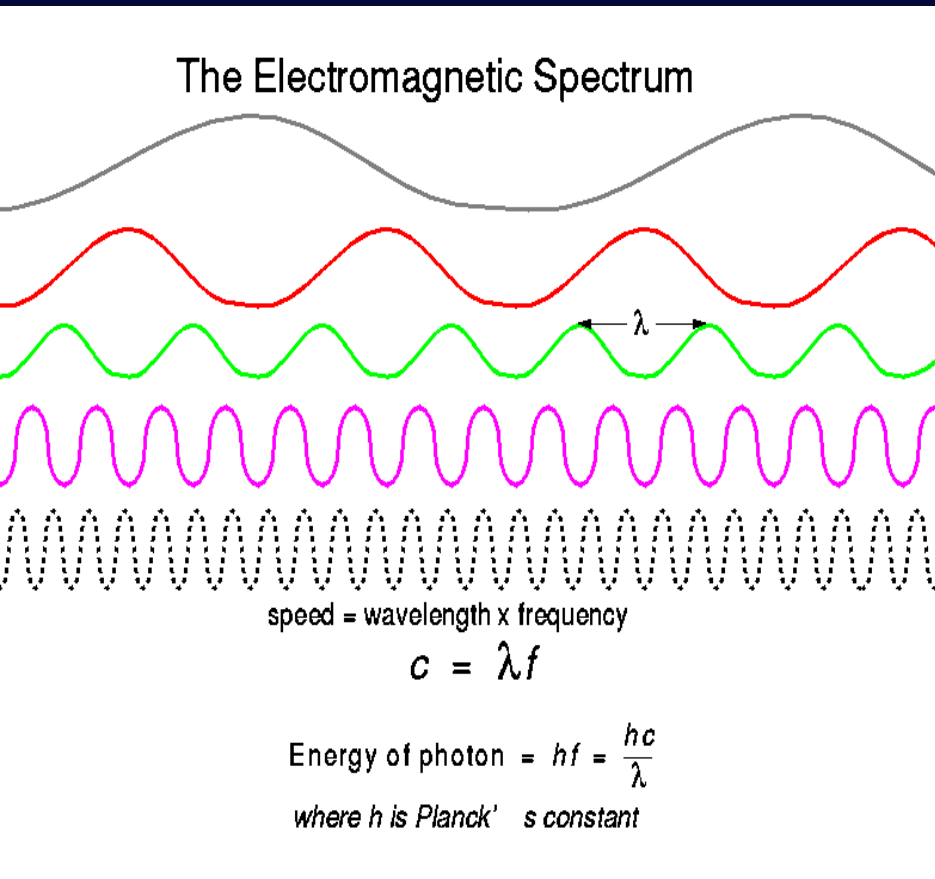
2. Übergang im Atom: Photon mit Frequenz $h\nu$;

Analogie: EINE Schwingung im Seil $\Rightarrow$ “Teilchen”



Energiepaket

Warum revolutionär?



Erwarte naiv, dass die
Lichtintensität $\propto$ Amplitude²

(wie Energiedichte im Kondensator
 $= 1/2 \epsilon E^2$) und bei höherer Intensi-
tät sollten elektrische Kräfte (eE)
auf Elektronen größer sein.

DIES IST FALSCH:

**Kräfte NUR VON DER FREQUENZ
ABHÄNGIG, nicht von AMPLITUDE!**

BEWEIS: PHOTOEFFEKT

Versuche zum Photoeffekt

1888 Hallwachs:

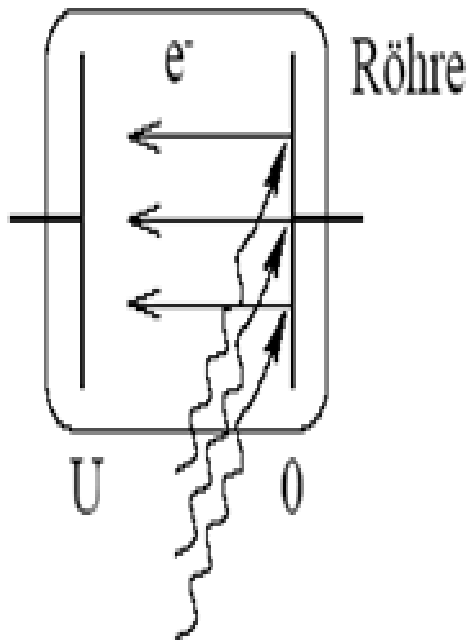
**Negativ geladenes Elektrometer entlädt sich durch Licht,
ein positiv geladenes Elektrometer NICHT!!**



Erklärung später durch Einstein: Licht besteht aus Teilchen (Photonen), wodurch die Strahlung mit nur EINEM Elektron wechselwirkt und nicht über viele Elektronen verteilt wird. Daher sehr effektiv.

Millikanversuch zum Photoeffekt

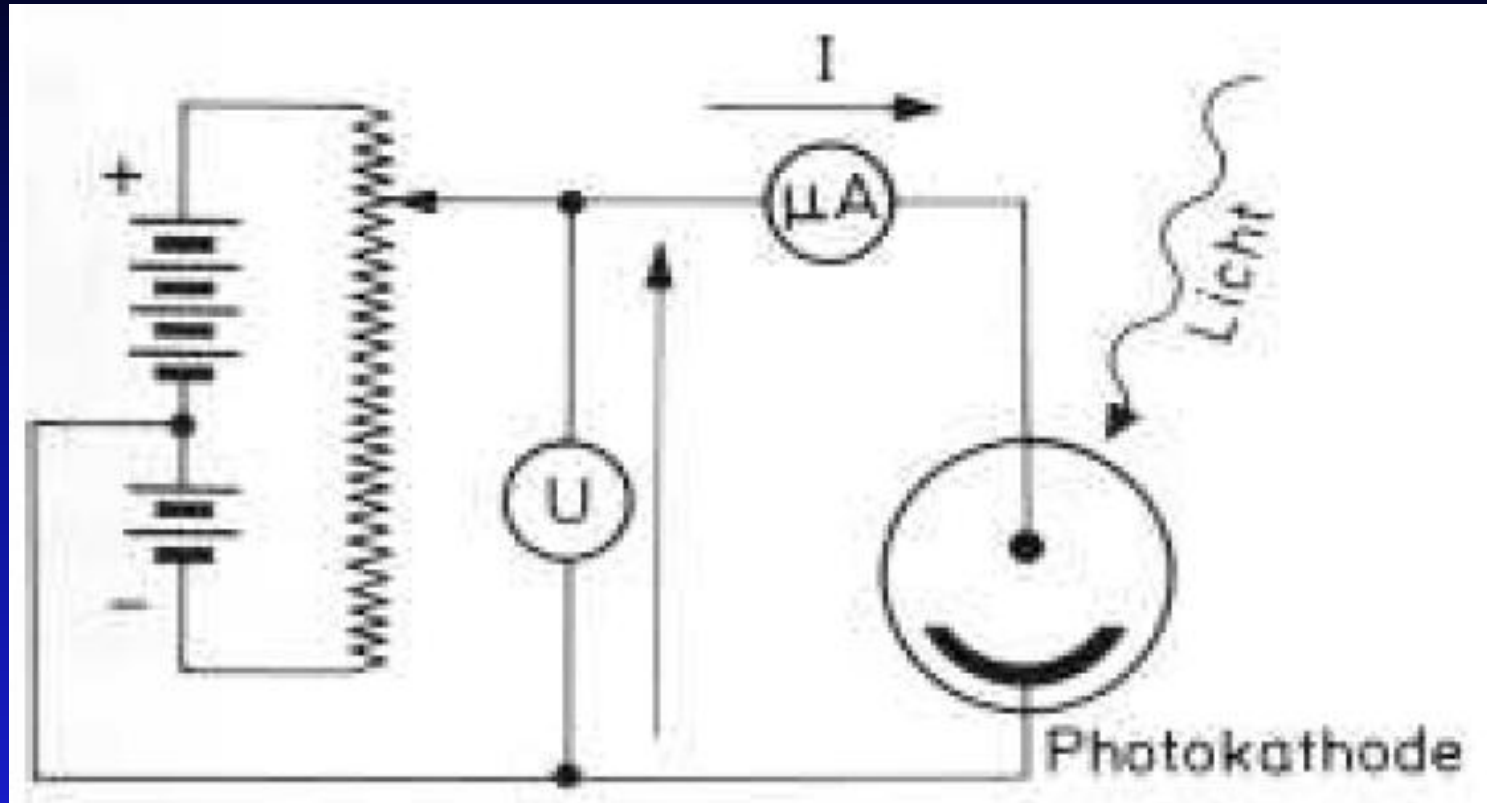
Der Millikanversuch (1916)



“Primitive” Energiemessung:

Ist die Spannung U negativ (verzögernd) und so gewählt ($U = -U_0$), dass die Elektronen gerade gestoppt werden, d.h. gerade kein Strom mehr fließt, gilt $E_k = |eU_0|$.

Photoeffekt-Messungen



Spannung kann sowohl >0 als <0 gewählt werden:
alle Elektronen werden angesaugt bei $U>0$ bis $I=I_{\text{max}}$
oder abgebremst bei $U<0$ bis $I=0$. Dann gilt: $E_{\text{kin}}=eU_0$

Der Photoeffekt

Beobachtung:

die gemessene elektrische Stromstärke - also die Anzahl der freigesetzten Elektronen, ist proportional zur Intensität des eingestrahlten Lichts ist,

die kinetische Energie der Elektronen hängt nur von der Frequenz des Lichts ab, nicht von der Intensität.

Der Photoeffekt

Das Problem:

Nach der klassischen Physik sollte eine Erhöhung der Lichtintensität (höheres E-Feld!) zu einem Anstieg der von einem Elektron absorbierten Energie führen!

Und damit auch zu einer größeren kinetischen Energie der herausgelösten Elektronen.
Dies wurde nicht beobachtet.

Der Photoeffekt

Die Lösung:

Planck hatte aus der Schwarzkörperstrahlung postuliert: elektromagnetische Wellen sind durch die Emission and Absorbtion von Licht gequantelt, wobei das Wirkungsquant h eine zentrale Rolle spielt und die Energie der Quanten gegeben ist durch: $h\nu$ (h =Plancksche Konstante, ν =Frequenz) (siehe nächste VL)

Einstein:

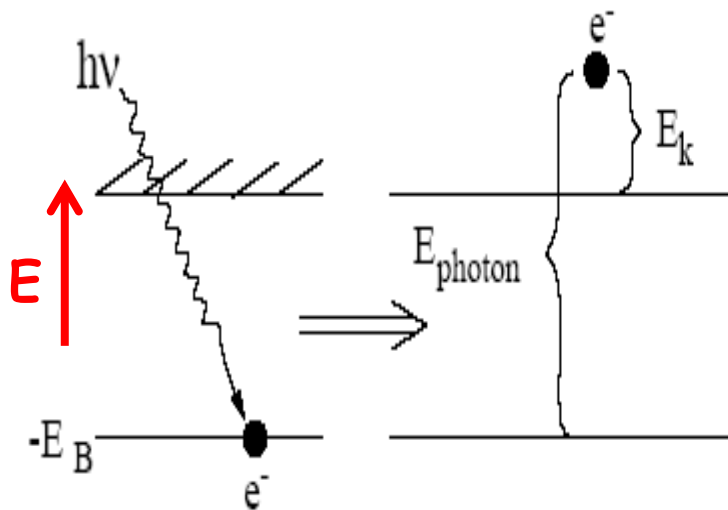
Photoeffekt = Kollision von Lichtquant (Photon) mit gebundenem Elektron. Vorhersagen:

- 1) Kinetische Energie des Elektrons: $E_{\text{kin}} = h\nu - E_B$ (=Bindungsenergie)
- 2) Anzahl der Elektronen $\propto$ Anzahl der Photonen (=Lichtintensität)

Diese Vorhersagen Einstein's wurden durch Experimente von Millikan bestätigt.

Der Photoeffekt nach Einstein (Nobelpreis)

Grundprozess in der Deutung von Einstein (Veröff. 1905, „Über einen die Erzeugung und Verwandlung von Licht betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“):



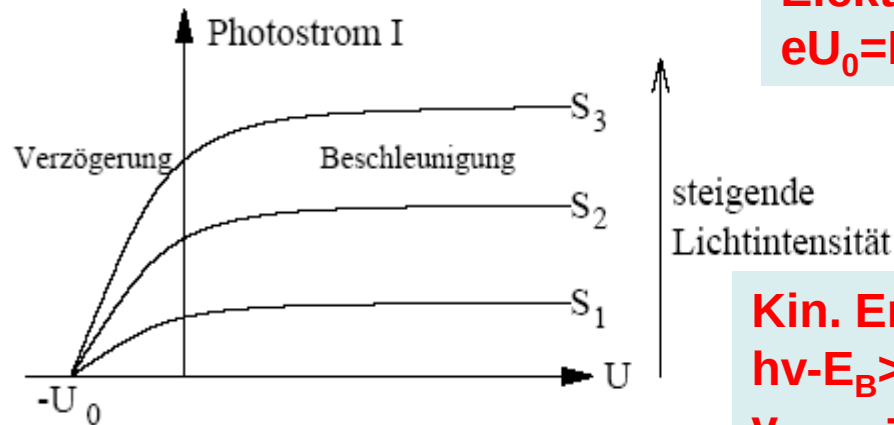
Übertragung der Gesamtenergie eines Photons $E = h\nu$ auf ein gebundenes Elektron mit Bindungsenergie $-E_B$ führt zu einem freien Elektron mit kinetischer Energie E_K .

Einsteins Vorhersage:

$$E_k = h\nu - E_B$$

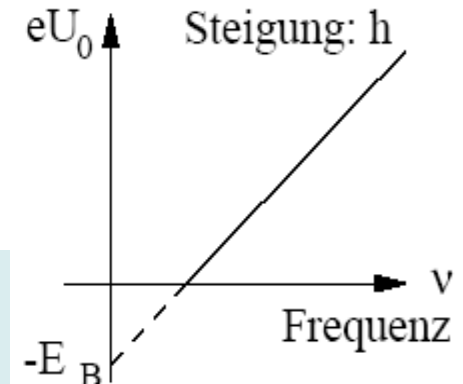
Beobachtung

Beobachtung:



Kin. Energie des Elektrons:
 $eU_0 = E_{\text{kin}} = h\nu - E_B$

Kin. Energie > 0 für
 $h\nu - E_B > 0$, oder
 $\nu_{\text{Grenze}} = E_B/h$



1. Die notwendige Stoppspannung U_0 steigt linear mit der Frequenz ν , ist aber unabhängig von der Lichtintensität S .
2. Der Photostrom I , d.h. die Zahl der Elektronen, ist proportional zur Lichtintensität S .

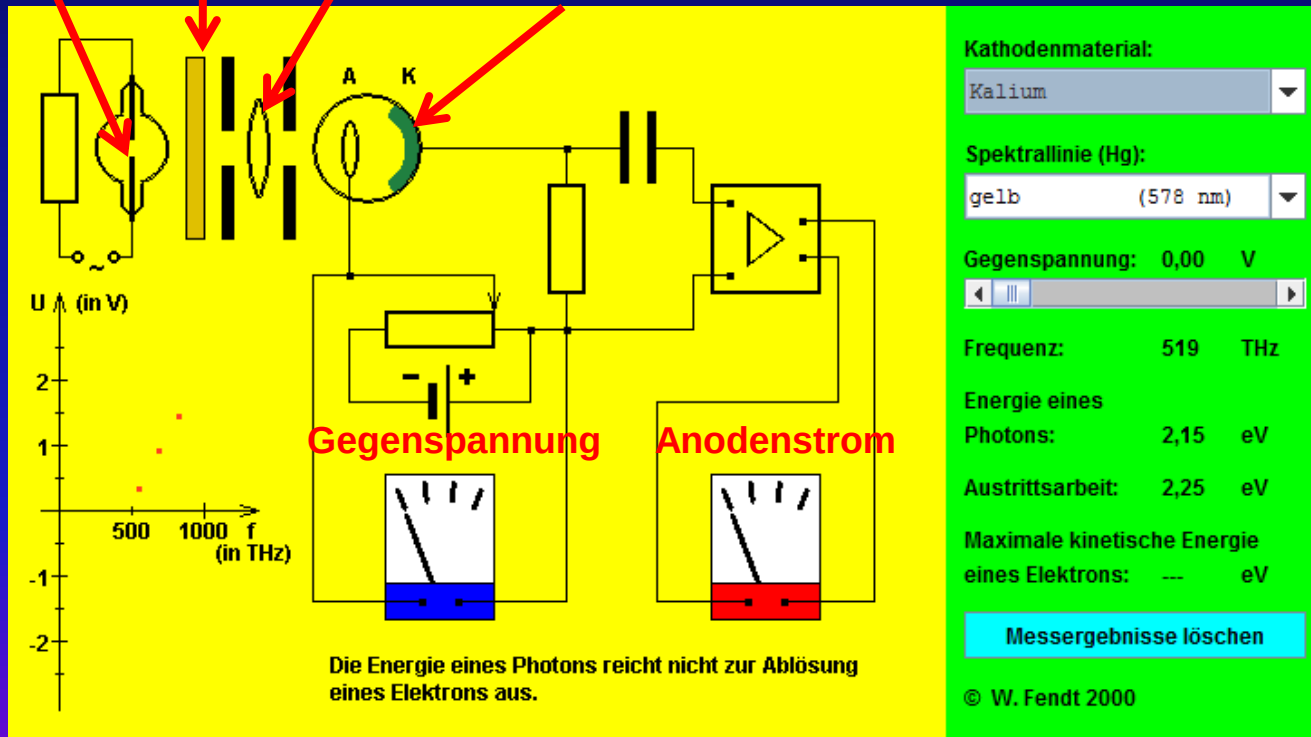
Typische Zahlenwerte sind z.B. $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ (orange), $E_\nu = 2.0 \text{ eV}$, $E_B = 0 \dots 1 \text{ eV}$, je nach Material. Die Planck'sche Konstante h lässt sich aus der Steigung h bestimmen, es ergibt sich der Zahlenwert:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Photoeffekt-Messungen

Messung der Elektronen-Energie durch Gegenspannung

Gasentladung Linse
Farbfilter Vakuum mit Kathode und Anode



<http://www.walter-fendt.de/ph14d/index.html>

Zusammenfassung Wellenbild vs. Teilchenbild

1) Im Wellenbild

Im klassischen Wellenbild ist dieses Ergebnis völlig unverständlich!

- a) Erwartung: $\vec{E}$ verursacht erzwungene Schwingungen der Elektronen; eine Erhöhung von $\vec{E}$ müsste größere Amplituden und damit (bei Abtrennung) größere kinetische Energien erzeugen; stattdessen ist nur der Sättigungsstrom von der Feldstärke abhängig und gerade nicht E_k bzw. U_0 .
- b) Energiebetrachtung: Lichtstrom sei $10^{-10} \text{ W/cm}^2 \Rightarrow 10^9 \text{ eV/cm}^2\text{s}$. Die Absorption des Lichtes sei in den ersten 10 Atomlagen $\Rightarrow 10^{16} \text{ Atome/cm}^2$; der Lichtstrom verteilt sich also auf 10^{16} Atome. Erst in 10^7 s (1 Jahr) würde sich dann im Mittel eine Energie von 1 eV auf 1 Atom ansammeln – eine offensichtlich unsinnige Vorstellung.

Zusammenfassung Wellenbild vs. Teilchenbild

Folgerung: Die Energie muss diskontinuierlich auftreten, sie muss sich temporär auf ein einzelnes Elektron konzentrieren

⇒ radikaler Bruch mit der klassischen Wellenvorstellung

2) Im Teilchenbild

Ein Quant benimmt sich wie ein klassisches Teilchen in einem Stoß mit Energie- und Impulserhaltung. Der Impuls wird auf das Elektron und an das Gitter übertragen, die Energieerhaltung ist über $E_K = E_\nu - E_B$ gesichert. Die Intensität, also die Anzahl der Photoelektronen ist proportional zur Zahl der Quanten N_ν :

$$eU_0 = h\nu - E_B$$

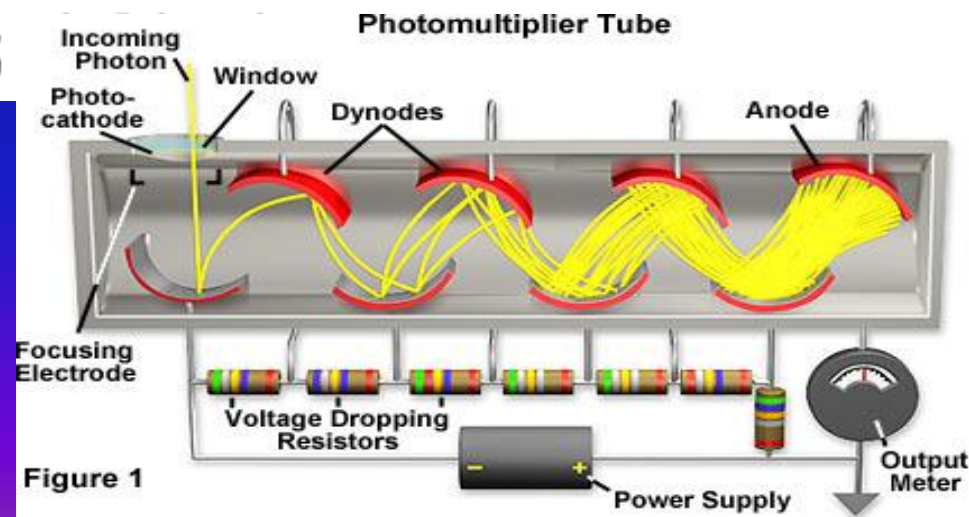
Strom $I = \text{Zahl der Photoelektronen} \propto \text{Zahl der Quanten } N_\nu$

Im Teilchenbild lässt sich also alles ganz zwanglos erklären. Es dauerte von 1905 an ein Jahrzehnt, bis diese Vorstellung akzeptiert war (1913 ging anlässlich der Empfehlung Einsteins für einen Sitz in der Preussischen Akademie der Wissenschaften ein Brief Planck's an das Preussische Erziehungsministerium, worin er schrieb: „... ist gelegentlich spekulativ wie bei der Lichtquantenhypothese ...“).

Anwendung des Photoeffekts

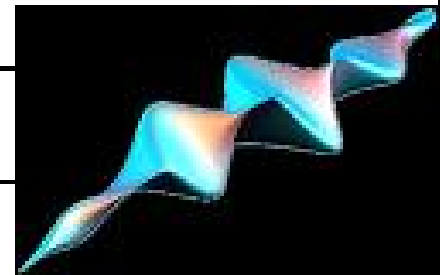
Allgemein lässt sich der Photoeffekt zum qualitativen und quantitativen Nachweis von Licht verwenden. Er wird in vielen technischen Geräten ausgenutzt:

1. Photodioden(Halbleiter); ortsempfindlich: CCD's (z.B. in Fernseh- oder, zunehmend, Stillbild-Kameras) **CMOS-cameras: Photodioden auf Si-wafer mit Verstärker und Adressierung für jeden Pixel.**
2. Photomultiplier; Empfindlichkeit bis zur Messung einzelner Photonen; exzellente Zeitauflösung (im Bereich $< 10^{-9}$ s);



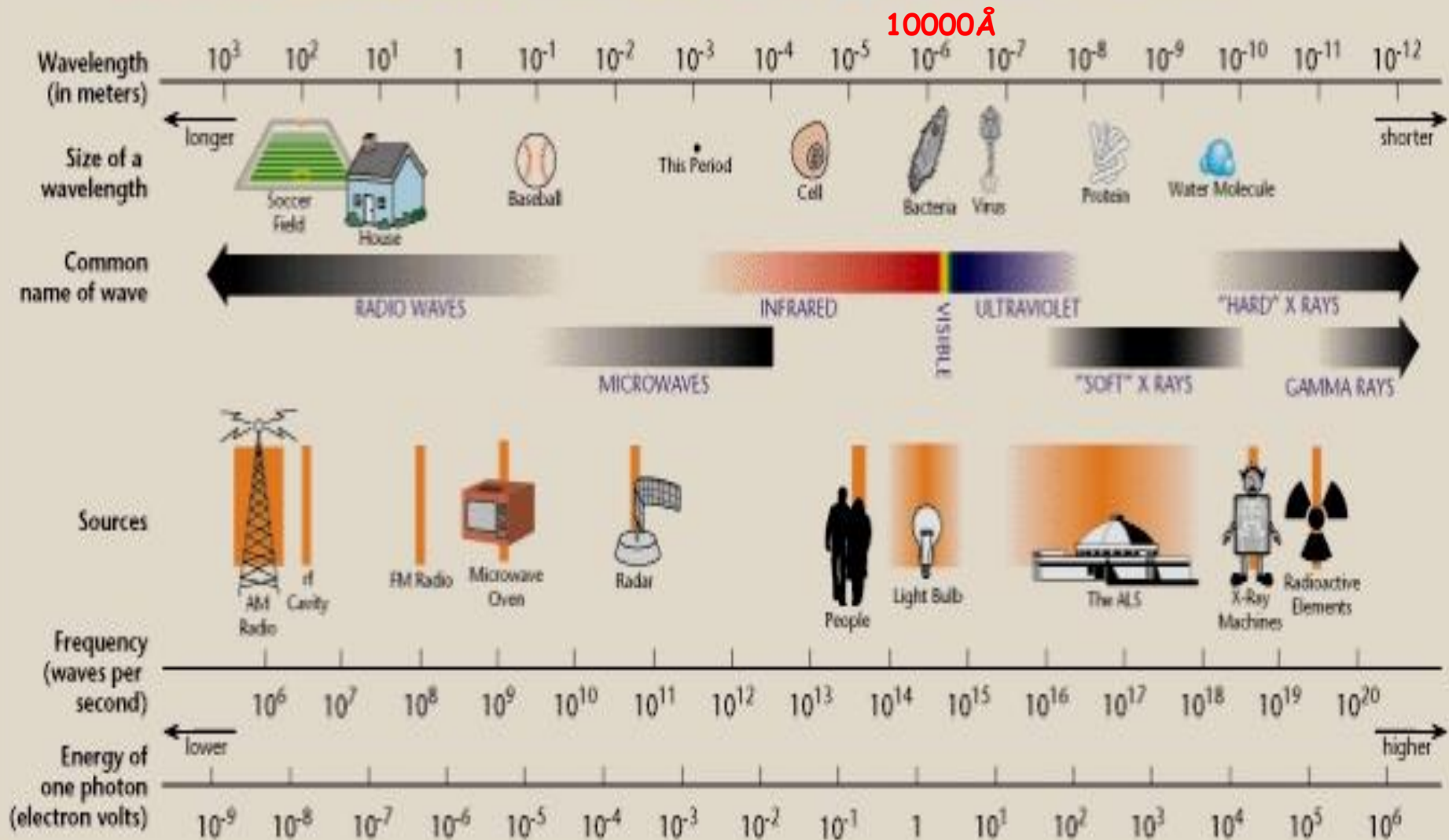
Eigenschaften des Photons

Energie	$h\nu$ (h = Plancksche Konstante = $6,6 \times 10^{-34}$ Js)
Impuls	$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$
Geschwindigkeit	c
Ruhemasse	0
Relativistische Masse	$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{p}{c}$
Eigendrehimpuls (Spin)	$1 \hbar = \frac{1h}{2\pi}$



Das Photon ist das Energiequant der elektromagnetischen Wellen, d.h. Licht hat wie von Einstein postuliert nicht nur Wellencharakter, sondern auch Teilchencharakter mit den oben angegebenen Eigenschaften (Einstein bekam den Nobelpreis für den photoelektrischen Effekt und nicht wie gemeinhin angenommen für die Relativitätstheorie).

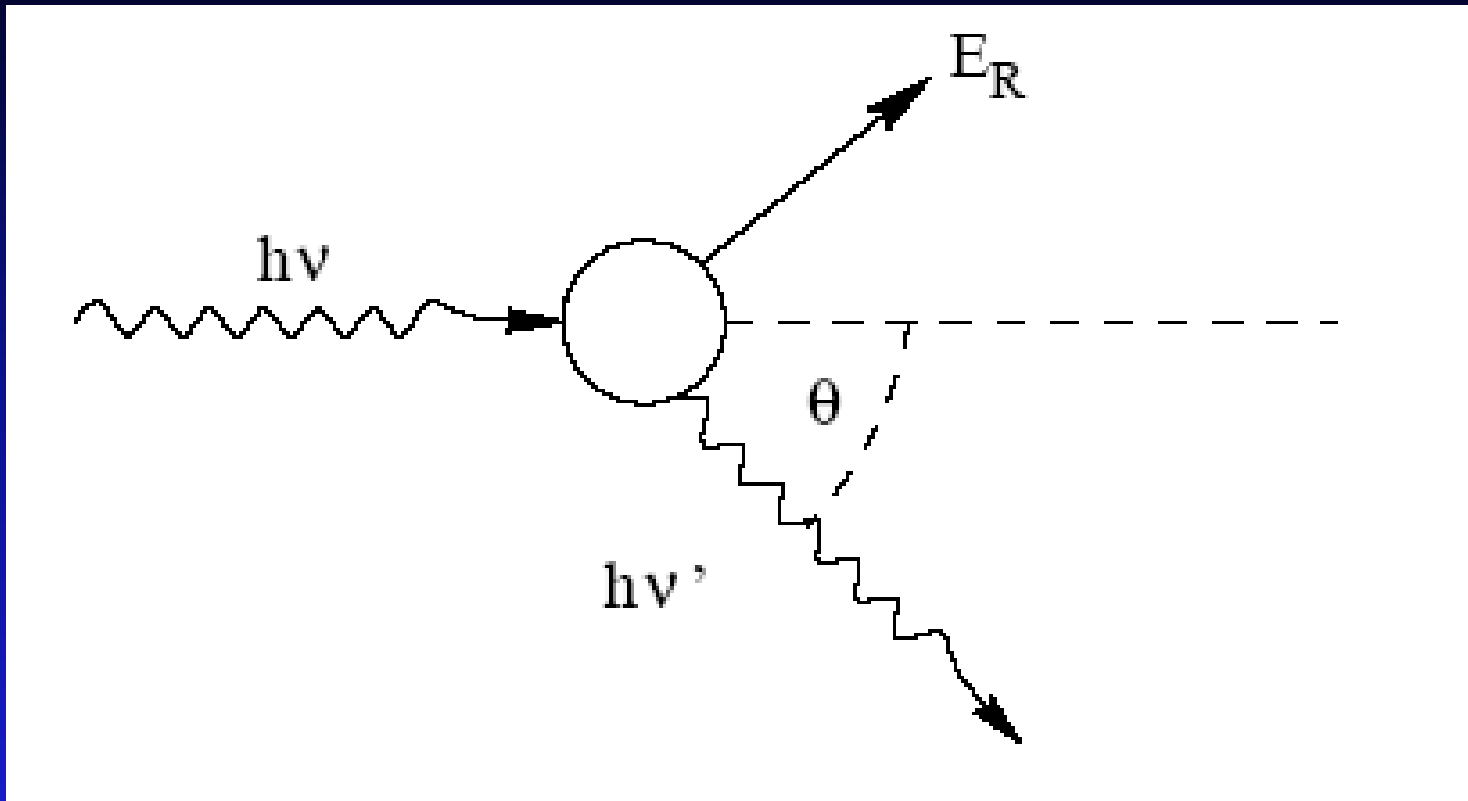
THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



3.2. Compton Streuung

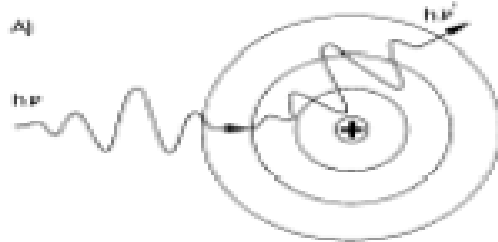
(=Streuung von Photonen an Elektronen)

Streuprozesse der Photonen

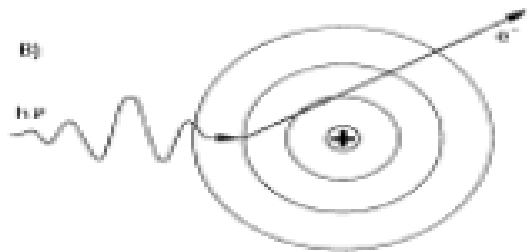


Allgemeine Darstellung eines Streuprozesses: wenn das Photon Teilchencharakter hat, soll es eine Impulsänderung erfahren, d.h. seine Frequenz (“Farbe”) ändern.

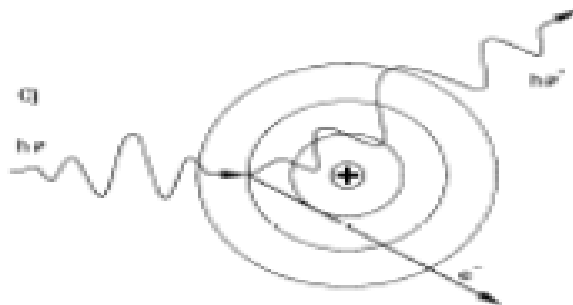
Wechselwirkung zwischen Photonen und Materie



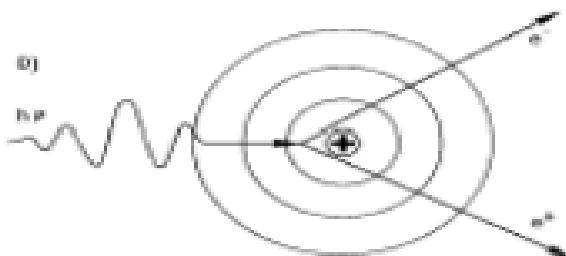
A) Kohärente Streuung
Thompson
Rayleigh
klassische Streuung



B) Photoeffekt
Teilchencharakter



C) Compton-Effekt
Teilchencharakter



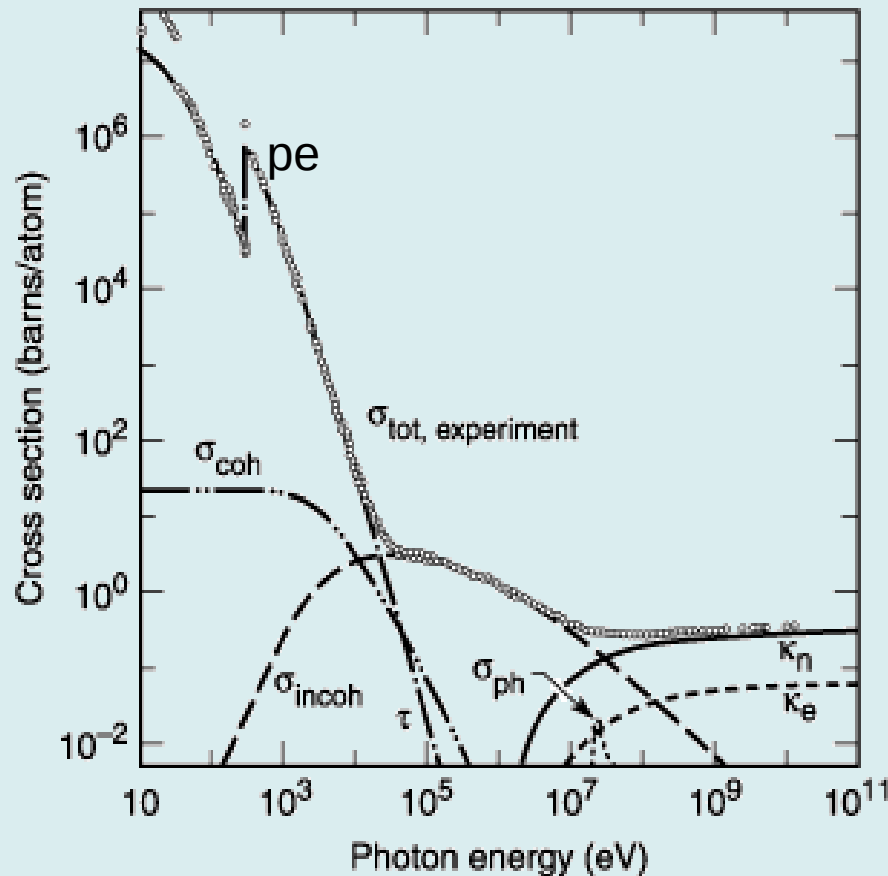
D) Paarbildung
Energie->Masse

Wechselwirkung zwischen Photonen und Materie

- unter 1 eV nur Wärmeentwicklung (Wärmestrahlung),
- 1 eV bis 100 keV Photoeffekt, Raleigh
- 50 keV bis 1 MeV Compton-Effekt,
- 1,022 bis 6 MeV Paarbildung,
- 2,18 bis 16 MeV Kernphotoeffekt.
- höhere Energien: Photodesintegration

Höhere Energie = höhere Frequenz, d.h. kleinere Wellenlänge oder bessere Auflösung

Wechselwirkung zwischen Photonen und Blei



Total photon cross section in carbon, as a function of energy, showing the contributions of different processes:

pe, atomic photo-effect (electron ejection, photon absorption);

coherent scattering (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited);

incoherent scattering (Compton scattering off an electron);

κ_n **pair production, nuclear field;**

κ_e **pair production, electron field; ,**

ph: photonuclear absorption (nuclear absorption, usually followed by emission of a neutron or other particle). (courtesy of J. H. Hubbell.)

Thompson und Rayleigh-Streuung

Falls $h\nu$ vergleichbar wird mit $|E_B|$, kann die Bindung nicht länger vernachlässigt werden. Elektronen mit der Resonanzfrequenz ω_0 erfahren dann erzwungene Schwingungen mit der Amplitude

$$x = A \sin \omega t \quad \text{mit} \quad A \propto \frac{E_{x,0}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \delta^2 \omega^2}}$$

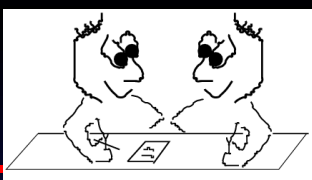
Entsprechend der obigen Betrachtung der Streustrahlung $\propto \overline{\ddot{p}^2} = e^2 \overline{\ddot{x}^2}$ ergibt sich dann

$$\sigma_{\text{Rayl}} \propto \left(\frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \right) \cdot \sigma_{\text{Thompson}}$$

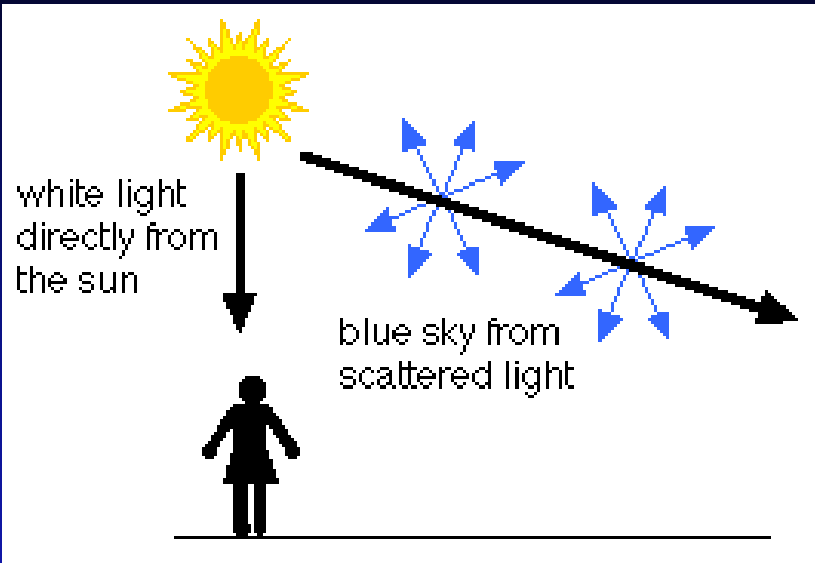
Grenzfälle:

a) $h\nu \gg E_B$, d.h. $\omega \gg \omega_0$ (bisher) $\Rightarrow \sigma \propto \frac{\omega^4}{\omega^4} = \text{const} \Rightarrow$ Thompsonstreuung

b) $h\nu \ll E_B$, d.h. $\omega \ll \omega_0$ (neu) $\Rightarrow \sigma \propto \frac{\omega^4}{\omega_0^4} \Rightarrow$ Rayleighstreuung

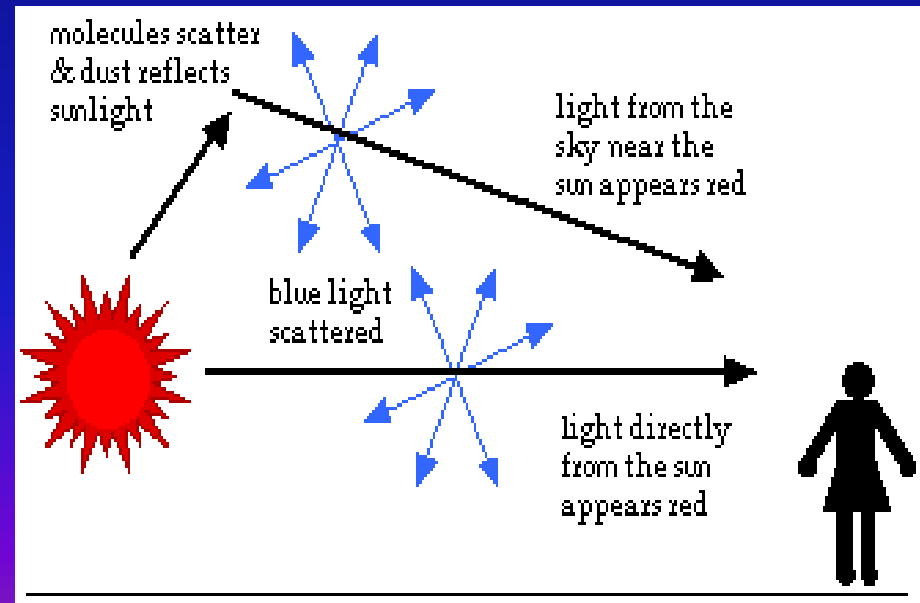


Warum ist der Himmel blau und Sonnenuntergang rot?



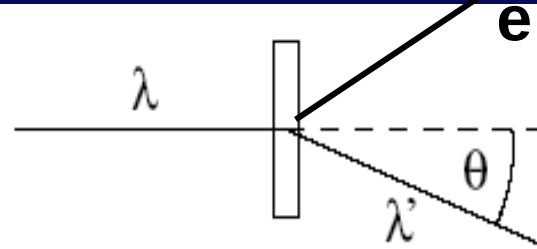
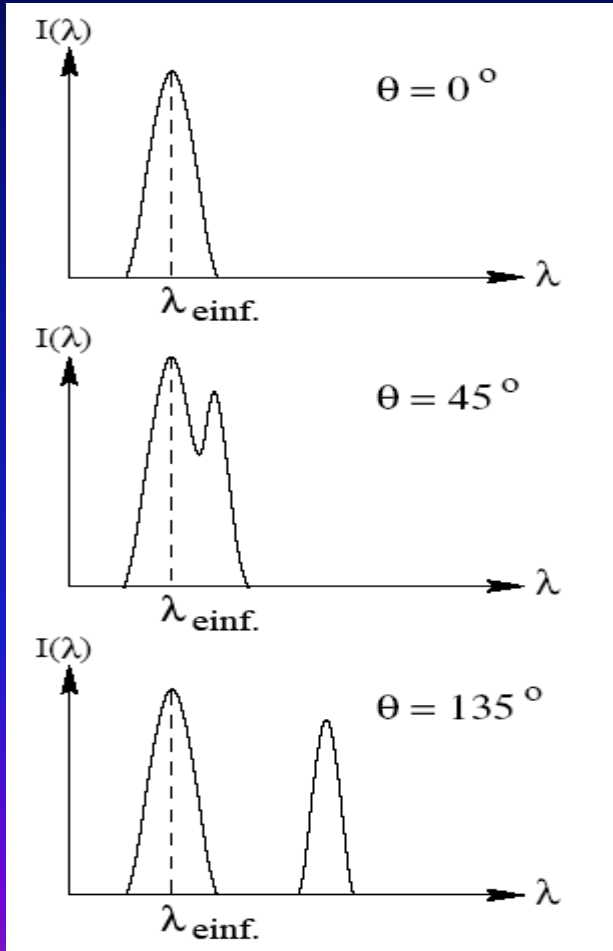
Rayleigh-Streuung regt Atome am stärksten an für blaues Licht, das auch wieder emittiert wird.

Abends wird blaues Licht durch Rayleigh-Streuung am stärksten absorbiert. Verunreinigungen nahe der Erde können durch Anregungen wunderschöne Farben beimischen



Compton-Streuung (reiner Quanteneffekt) (Thompson und Raleigh-Streuung klassisch)

Compton (1922): Streuexperimente mit Photonen im Röntgenbereich (20 keV) ($E > \text{Bindungsenergie der Elektronen}$)



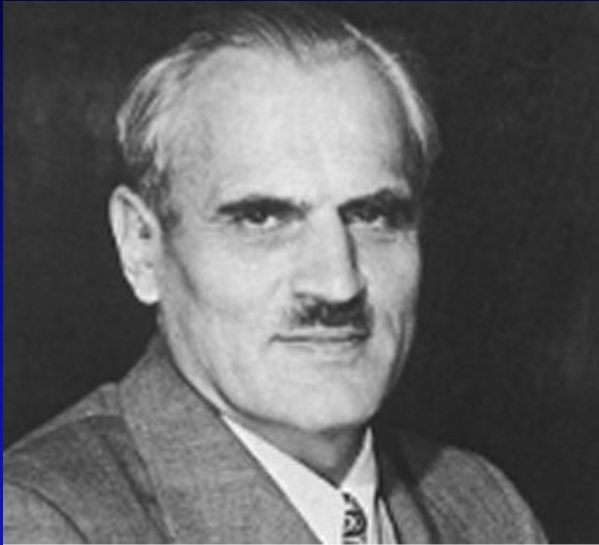
Gemessen wird: Streuwinkel und Energie ($=hc/\lambda$) des gestreuten Photons

Erste Beobachtung:

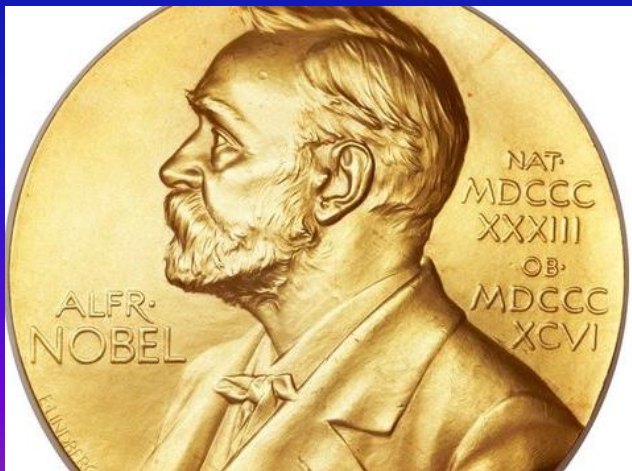
Aufteilung des Peaks der Streustrahlung bei großen Streuwinkeln in zwei getrennte Peaks.

Der konstante, nicht winkelabhängige Peak entspricht der schon behandelten Thompson-Streuung; der zweite, dessen Lage sich mit zunehmendem Winkel zu immer größeren Wellenlängen verschiebt, resultiert aus der Compton-Streuung.

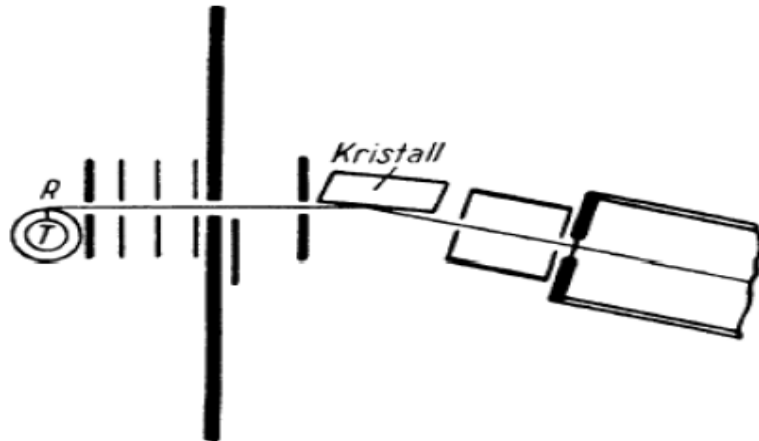
Compton: Nobelpreis 1927



- Prof. für Physik St. Louise und Chicago
- Untersuchte die Kernreaktion im natürlichen Uran und Plutonium
- Wellenlängenbestimmung von Gammastrahlen und Röntgenstrahlen
- Entdeckte 1923 den Compton- Effekt, mit dem ein eindeutiger Beweis für die korpuskulare oder Quantennatur des Lichtes erbracht wurde
- Nobelpreis für Physik zus. mit C. T. R. Wilson 1927



Experimentelle Anordnung



Versuchsanordnung von Compton
(Molybdäncathode T, Streuung am Graphit R,
Kristall als Wellenlängendetektor)

Oder mit $h\nu = E = hc/\lambda$

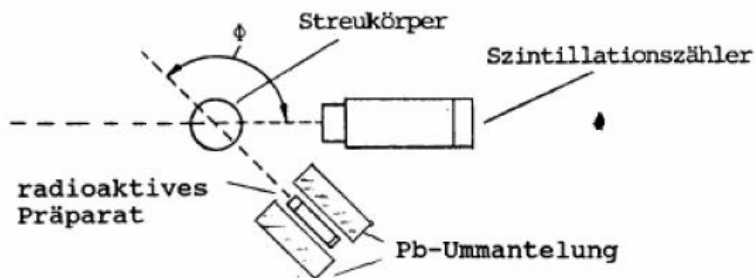
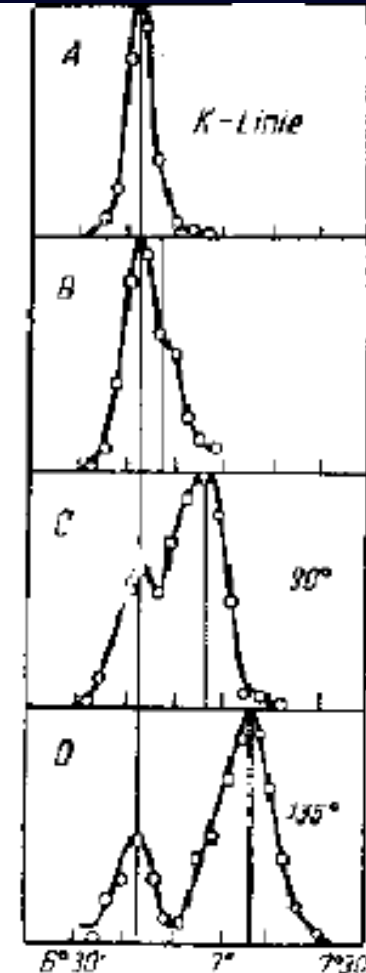
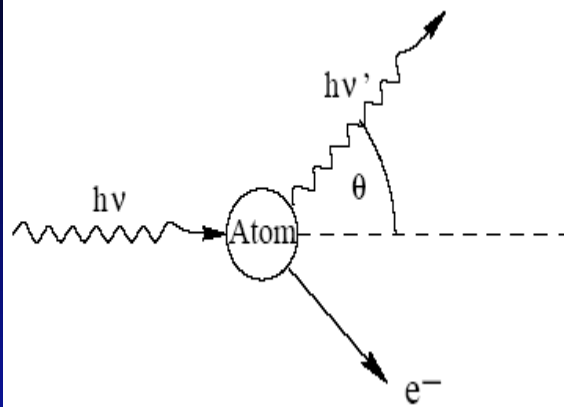


Abb.6 Versuchsanordnung zum Compton Effekt



COMPTON-Effekt bei der Streuung
der K-Linie des Molybdäns

Deutung der “verschobenen” Compton-Strahlung



Wechselwirkung eines Quants mit einem „freien“ Elektron, d.h. ein elastischer Stoß unter Berücksichtigung von Energie- und Impulserhaltung. Im Gegensatz zum Photoeffekt verschwindet das Photon nicht, sondern es verliert nur Energie.

Impulserhaltung:
$$\vec{p}_\nu = \vec{p}_{\nu'} + \vec{p}_e \quad (1)$$

Energieerhaltung:
$$m_e c^2 + h\nu = E_e + h\nu' \quad (2)$$

rel. Energiegleichung für e^- :
$$0 = c^2 p_e^2 + m_e^2 c^4 - E_e^2 \quad (3)$$

Relativistisch, da kinetische Energie und Masse des Elektrons vergleichbar sind!

Lösung der E,p-Erhaltungssätze

rel. Energiegleichung für e^- :

$$0 = c^2 p_e^2 + m_e^2 c^4 - E_e^2$$

(aus (1))

(aus (2))

$$\Rightarrow 0 = c^2 (\vec{p}_\nu - \vec{p}_{\nu'})^2 + m_e^2 c^4 - (m_e c^2 + h(\nu - \nu'))^2 \quad (4)$$

mit

$$(\vec{p}_\nu - \vec{p}_{\nu'})^2 = p_e^2 = p_\nu^2 + p_{\nu'}^2 - 2p_\nu p_{\nu'} \cos \theta \quad (\text{Cosinussatz})$$

$$\text{Aus (4)} \quad h^2 (\nu^2 + \nu'^2 - 2\nu\nu' \cos \theta - (\nu - \nu')^2) = 2m_e c^2 h (\nu - \nu')$$

$$h\nu\nu' (1 - \cos \theta) = m_e c^2 (\nu - \nu')$$

$$\text{mit } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

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

$$\text{mit } \lambda' - \lambda = \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

Compton

Wellenlänge

$$\lambda_c = h/m_e c$$

Schlussfolgerung: Peakverschiebung $\Delta\lambda$ als Fkt. von θ wird durch Energie-Impulserhaltung beschrieben $\Rightarrow$ elektromagn. Strahlung hat Teilchencharakter bei Energien ab keV Bereich.

Diskussion der Compton-Streuung

1. $\Delta\lambda \propto \lambda_c$, unabhängig von λ , jedoch θ -abhängig.

$\Delta\lambda$ immer >0 , $\lambda' > \lambda$ bzw. $\nu' < \nu$. Die Energiedifferenz geht in das Elektron über.

$\Delta\lambda$ enthält h ; **der Comptoneffekt ist ein reiner Quanteneffekt.**

Das ganze Photon wird an einem Elektron gestreut. Historisch brachte diese Erkenntnis den endgültigen Durchbruch der Quantenhypothese $E = h\nu$.

2. $\lambda_c = 2.43 \cdot 10^{-12}$ m entspricht (als Merkregel)

a) der Wellenlänge eines Photons mit $h\nu = m_e c^2$, **Da $h/\lambda = h\nu/c = mc$**

b) der „de-Broglie-Wellenlänge eines Elektrons mit der Geschwindigkeit c “.

3. Sichtbares Licht: $\lambda \approx 400 \dots 700 \text{ nm} \Rightarrow \Delta\lambda = 10^{-6} \lambda$. Dies ist schwer zu beobachten. Bei Röntgenstrahlung sind die Effekte jedoch (relativ gesehen) viel größer und daher leicht beobachtbar.

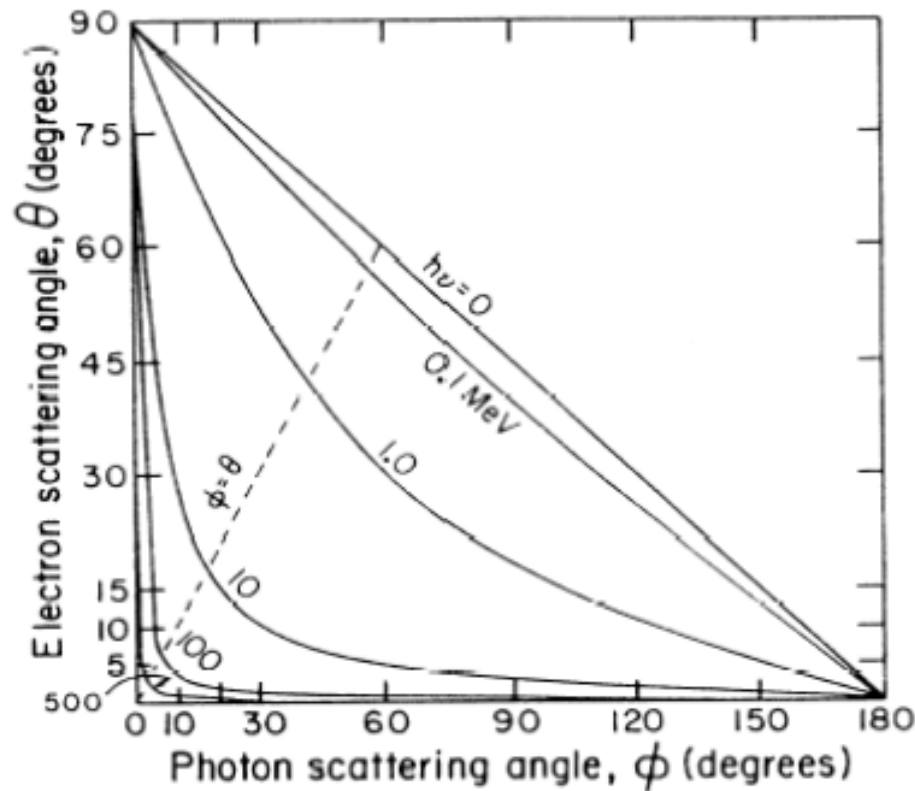
Z.B. $E=1 \text{ keV} \rightarrow \lambda=12\text{\AA} \rightarrow \Delta\lambda/\lambda=0.8 \%$

Z.B. $E=1 \text{ MeV} \rightarrow \lambda=0.012\text{\AA} \rightarrow \Delta\lambda/\lambda=80\%$

Korrelation der Winkelverteilungen

Comptoneffekt

Winkelbeziehung



Relativistische Streuung

Eine genauere Behandlung unter Verwendung der relativistischen Wellenmechanik führt auf die „Klein-Nishina-Gleichung“ (s. Lehrbücher). Für unpolarisierte Strahlung gilt:

$$\frac{d\sigma_e}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \left(\frac{\nu'}{\nu} \right)^2 \left(\frac{\nu}{\nu'} + \frac{\nu'}{\nu} - \sin^2 \theta \right)$$

Zum Mitnehmen

Die elektromagnetische Strahlung hat bei kurzen Wellenlängen Teilchencharakter, d.h. die Strahlung besteht aus Wellenpakete die bestimmte Energie und Impuls haben.

Experimentell wurde diese Quantisierung der e.m. Wellen beobachtet durch:

Photoeffekt

Comptonstreuung

die alle nur verstanden werden können, wenn die Lichtquanten oder Photonen eine

Energie $h\nu$

Impuls $h\nu/c = h/\lambda$

Masse $m = E/c^2 = h\nu/c^2 = p/c$

besitzen.