

Atome, Moleküle & Kerne

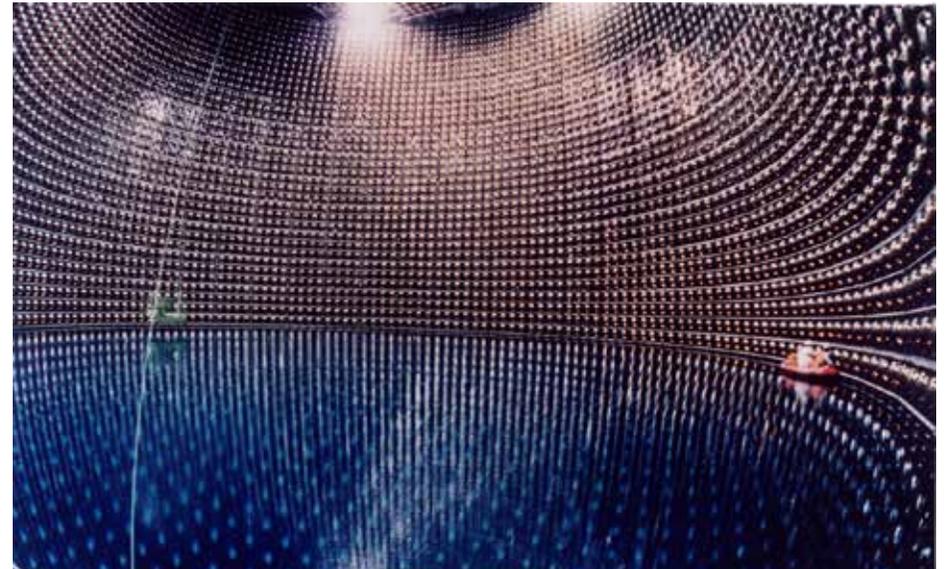
Sommersemester 2024

Vorlesung # 5, 25.04.24

Thomas Müller, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

3.1 Photonen und ihre Wechselwirkung

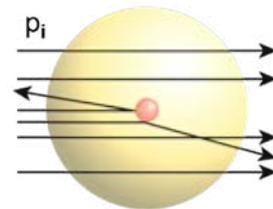
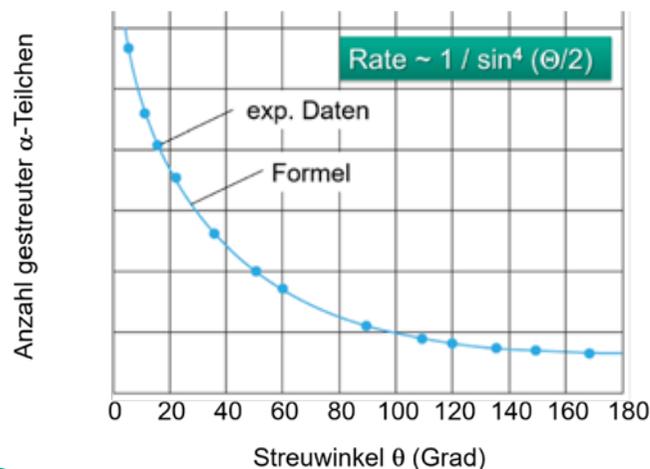
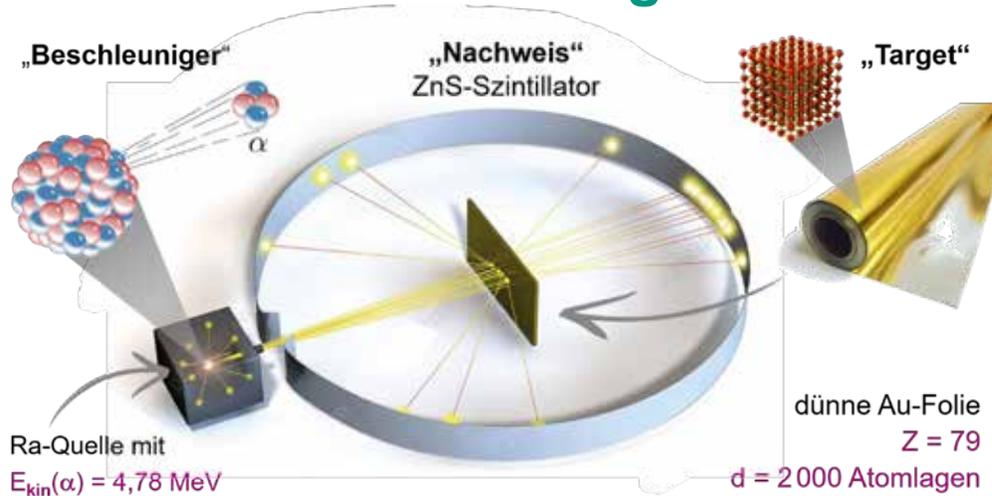
- Temperaturstrahlung, Herleitung
- Wechselwirkungen von Photonen:
 - a) Photoeffekt
Messung & Anwendungen
 - b) Compton-Effekt



Wh: Differentielle Streuquerschnitte

■ Strukturuntersuchungen mit Streuprozessen

■ Rutherford-Streuung

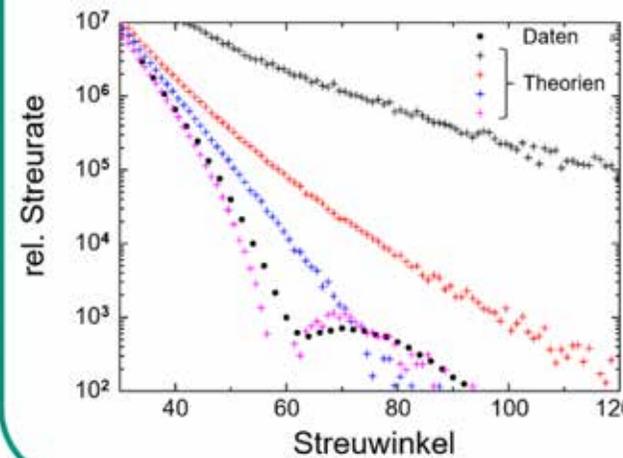
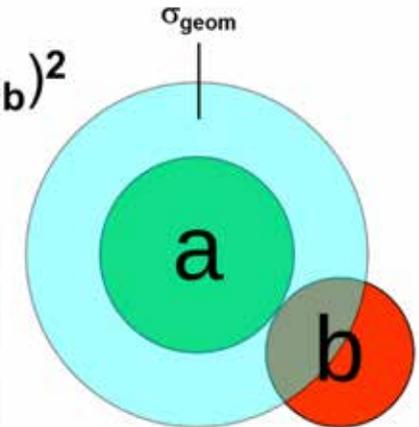


■ Wirkungsquerschnitt

$\sigma_{tot} \sim$ Gesamtrate an Streuereignissen / s [Fläche]

$1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

$\sigma_{geom} = \pi \cdot (R_a + R_b)^2$



$\sigma_{tot} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$

Wh: Strahlungsemission

- **Näherungen:** - **kleines ν :** EM Wellen-Beschreibung von **Rayleigh & Jeans**
- **großes ν :** Thermodynamische Beschreibung durch **Wien**

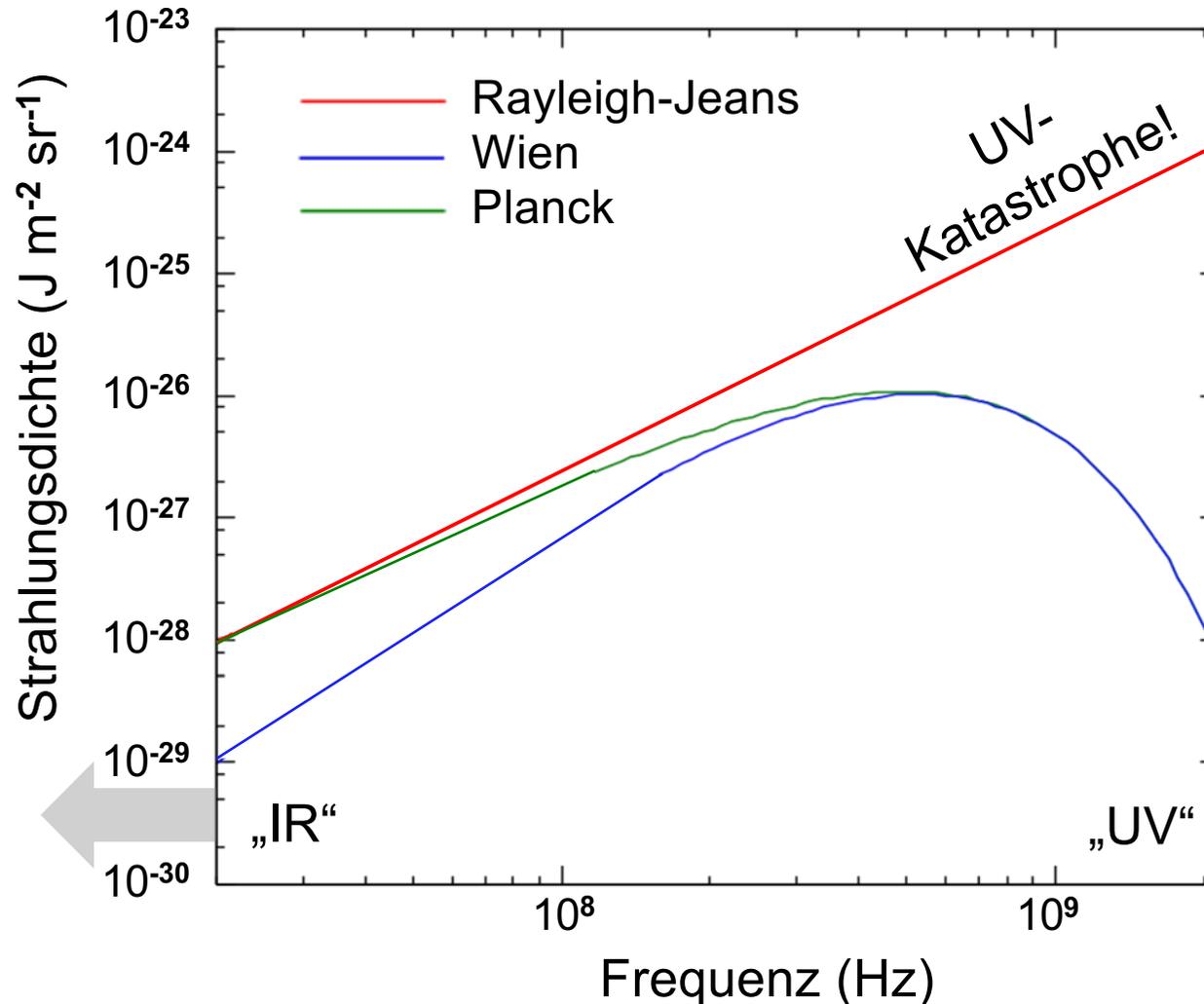
**Kleine
Frequenzen**

**Rayleigh-
Jeans
Gesetz**

$$u(\nu) \sim \frac{\nu^2}{c^3} \cdot kT$$



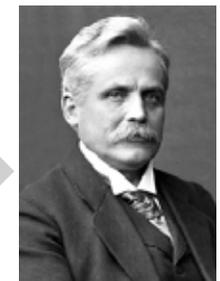
Rayleigh J. Jeans



**Große
Frequenzen**

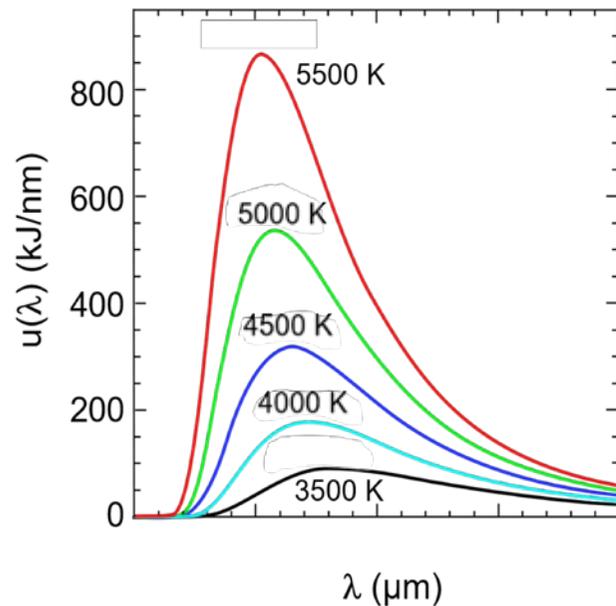
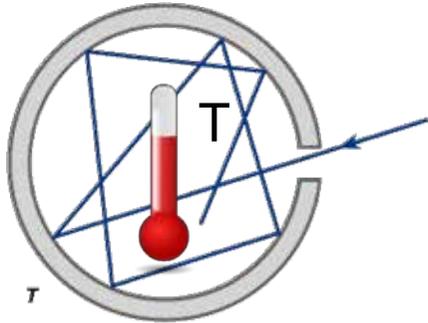
**Wiensches
Gesetz**

$$u(\nu) \sim \frac{\nu^3}{c^2} \cdot e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$



Wilhelm Wien

Temperaturstrahlung

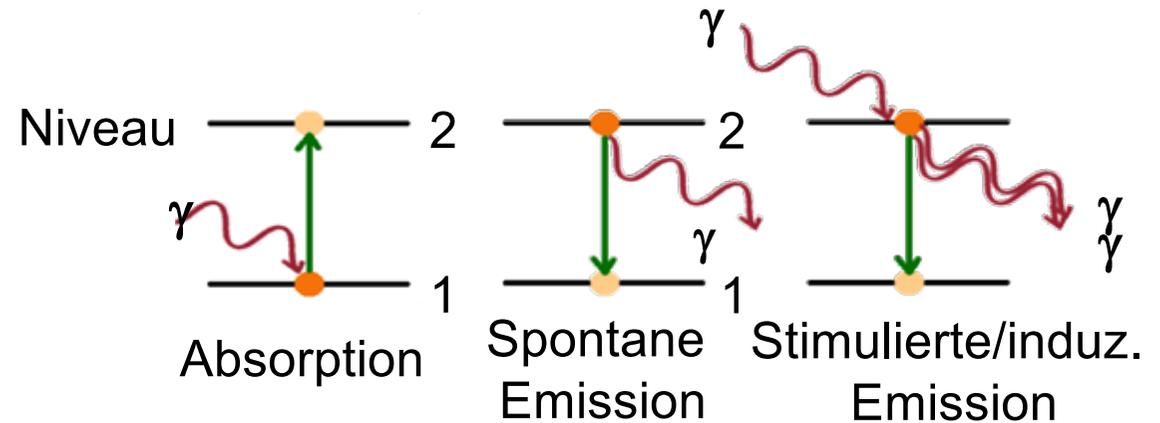


$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T)$$

$$= \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Plancksches Strahlungsgesetz

Erklärung durch Einstein (1917):



- Photonen mit $E = h \cdot \nu$
- 2 diskrete atomare Niveaus: 1, 2
- Strahler im thermischen Gleichgewicht



■ Atome wechselwirken mit externem Strahlungsfeld:

- Übergänge durch **3 Prozesse**:

Absorption:

Photon mit $E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu$ wird absorbiert

⇒ Niveau-Übergang $E_1 \rightarrow E_2$

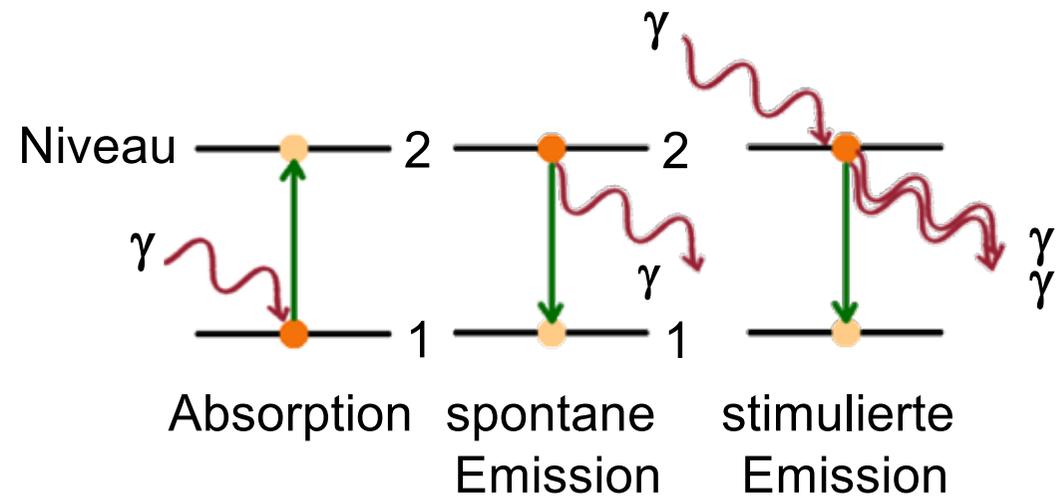
Spontane Emission:

Photon mit $E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu$ wird emittiert

⇒ Niveau-Übergang $E_2 \rightarrow E_1$

Stimulierte/induzierte Emission:

Niveau-Übergang $E_2 \rightarrow E_1$ wird durch externes Photonfeld induziert



■ Einsteinkoeffizienten

- System sei im thermodynamischen Gleichgewicht mit Boltzmann-Verteilung:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}}$$

- Absorption eines externen Photons $N_1 \rightarrow N_2$

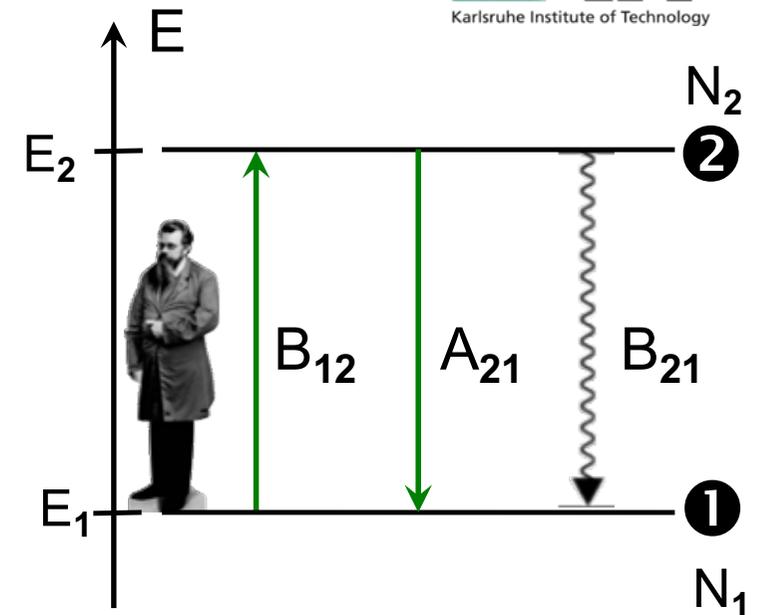
$$dN_{12} = B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\nu) \cdot dt$$

- Spontane Emission eines Photons $N_2 \rightarrow N_1$

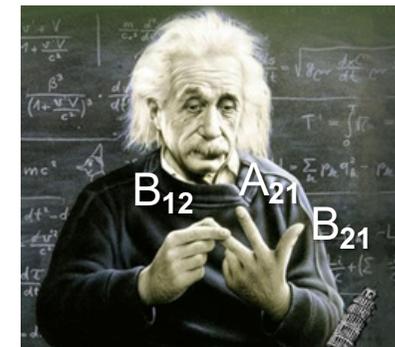
$$dN_{21,sp} = A_{21} \cdot N_2 \cdot dt$$

- Induzierte Emission eines Photons $N_2 \rightarrow N_1$

$$dN_{21,ind} = B_{21} \cdot N_2 \cdot u(\nu) \cdot dt$$



- Wahrscheinlichkeit für Übergang pro Zeiteinheit
Einsteinkoeffizienten:



■ Einsteinkoeffizienten

- thermischer Gleichgewichtszustand

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}}$$

⇒ N_2/N_1 ist stabil, kein Netto-Gewinn/Verlust

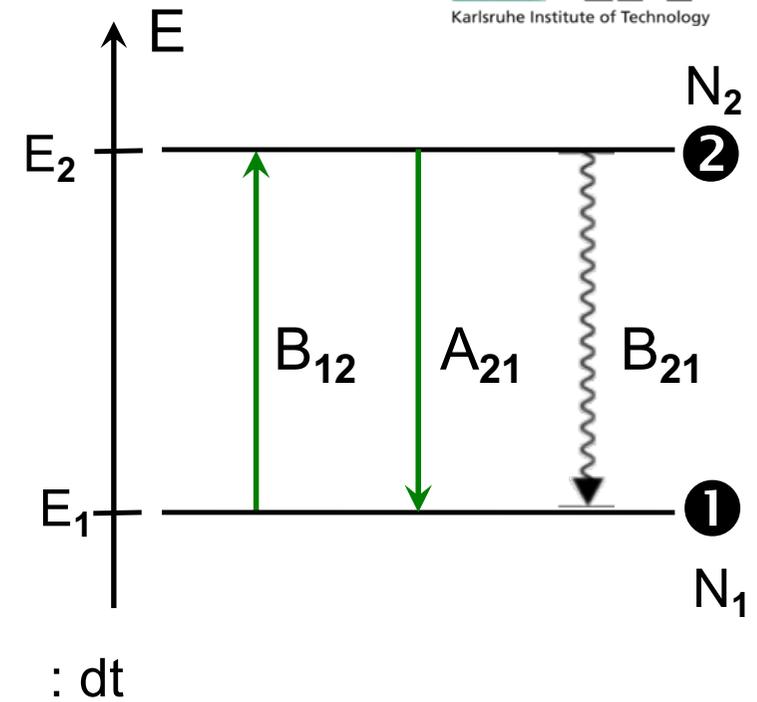
$$dN_{12} = dN_{21,sp} + dN_{21,ind} \quad | \quad : dt$$

$$B_{12} \cdot N_1 \cdot u(\nu)$$

$$A_{21} \cdot N_2$$

$$B_{21} \cdot N_2 \cdot u(\nu)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12} \cdot u(\nu)}{A_{21} + B_{21} \cdot u(\nu)}$$



■ Einsteinkoeffizienten

- daraus ergibt sich

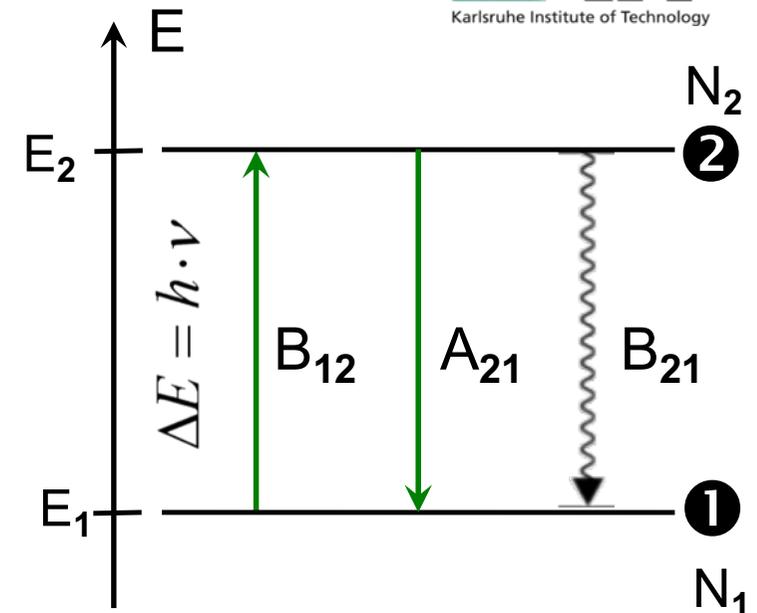
$$\frac{B_{12} \cdot u(\nu)}{A_{21} + B_{21} \cdot u(\nu)} = \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}}$$

- Übergang durch Photon mit $h \cdot \nu$

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

- damit für Strahlungsdichte $u(\nu)$:

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot e^{h\nu/kT} - B_{21}}$$



■ Einsteinkoeffizienten

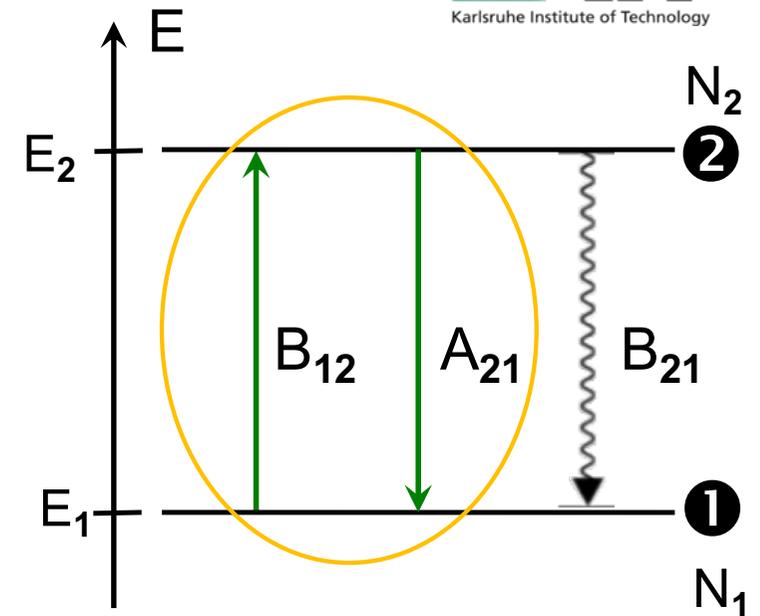
- Asymptotisches Verhalten ($T \rightarrow \infty$):

a. bei $T \rightarrow \infty$ gilt naturgemäß $u(\nu) \rightarrow \infty$

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot e^{h\nu/kT} - B_{21}} \rightarrow 0 \Leftrightarrow \boxed{B_{12} = B_{21}}$$

b. bei $h\nu \ll kT$: Rayleigh Jeans

$$u(\nu) \sim \frac{\nu^2}{c^3} \cdot kT \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{A_{21} = \frac{8\pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot B_{12}}$$



spontane Emission \sim Absorption

(Kirchhoff)

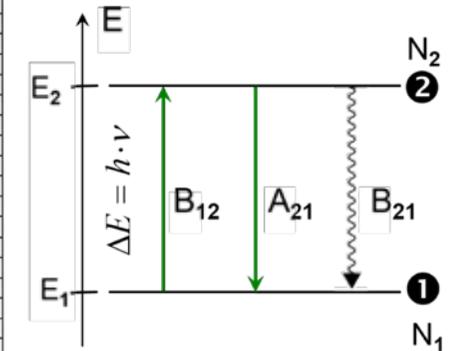
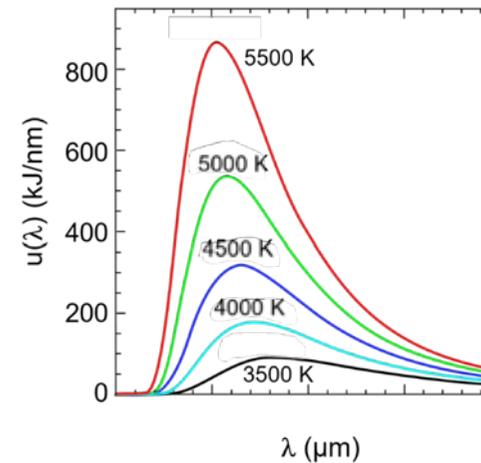
■ Leistungsdichte Schwarzer Körper

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot e^{h\nu/kT} - B_{21}}$$

mit: $B_{12} = B_{21}$ & $A_{21} = \frac{8\pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot B_{12}$

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

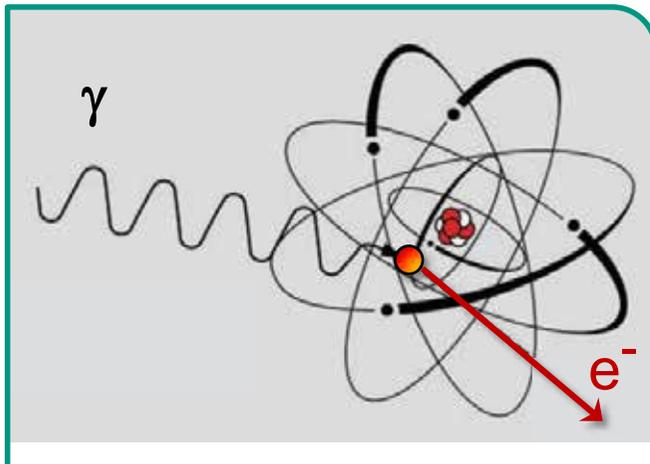
zentral: Einsteins Lichtquanten mit $h\nu$



Wechselwirkung von Photonen

- die **Wechselwirkung** von γ 's erfolgt über 3 fundamentale Prozesse:

a. Photoeffekt

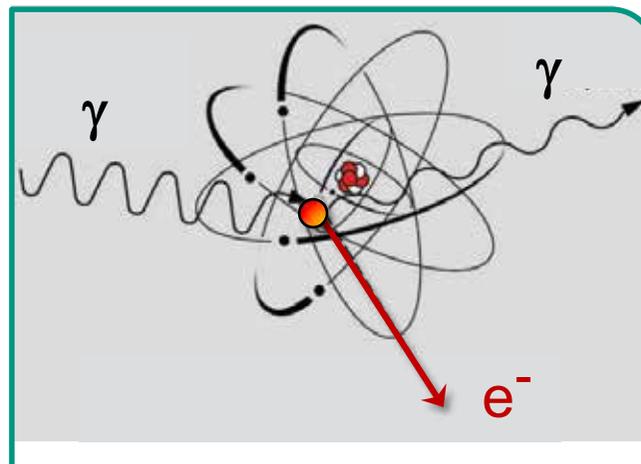


niedrige Gammaenergie

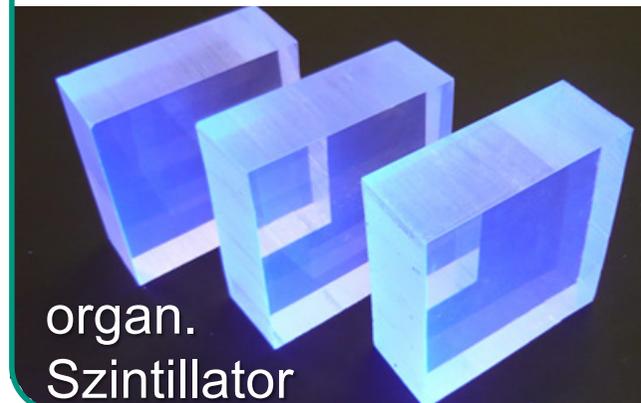


NaJ Detektor

b. Comptonstreuung

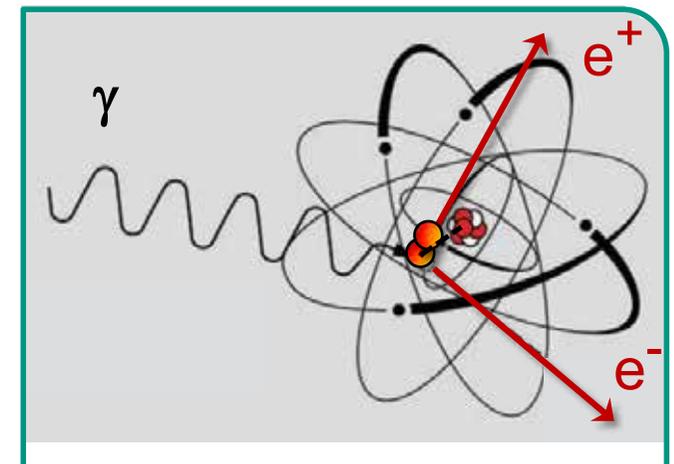


mittlere Gammaenergie

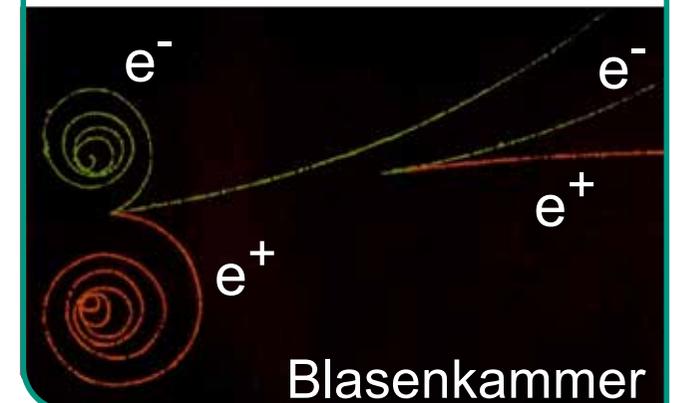


organ.
Szintillator

c. Paarbildung



hohe Gammaenergie



Blasenkammer

a. Photoeffekt

- **Photoeffekt** = Freisetzung von Elektronen nach Absorption von Photonen

Photo-Emission:

- Elektronen-Emission aus Metall- (Halbleiter-) Oberflächen
- ⇒ **Bänderstruktur** im Festkörper
charakteristische Austrittsarbeit

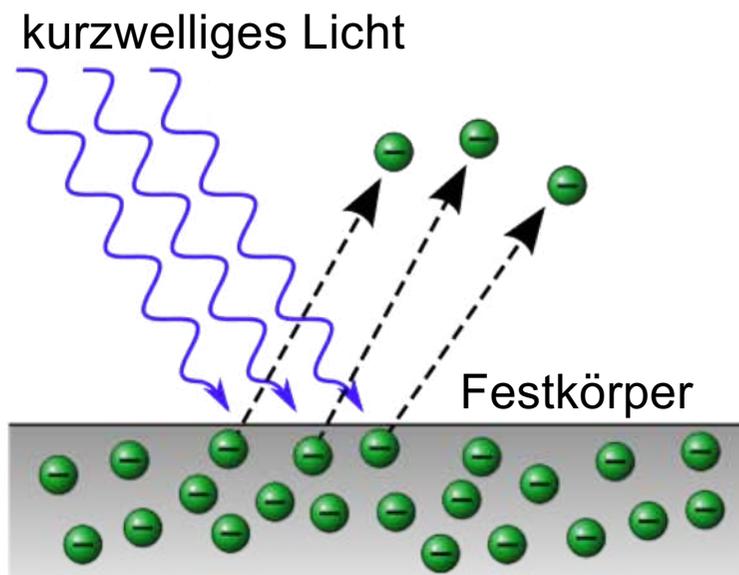
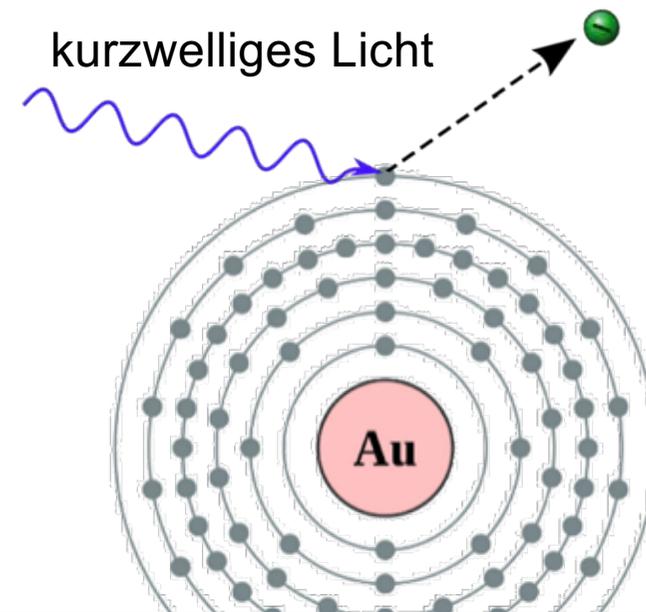


Photo-Ionisation:

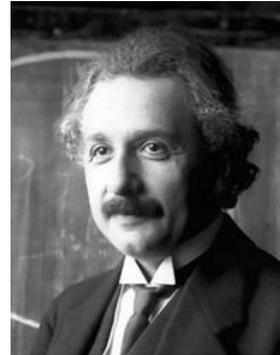
- Elektronen-Emission von einzelnen Atomen / Molekülen, z.B. in Gasen
- ⇒ Struktur der **Elektronenschalen**
charakteristische Ionisationsenergie



Photoeffekt – Einführung

- **Photoeffekt** = Freisetzung von Elektronen nach Absorption von Photonen mit Energie $E = h \cdot \nu$

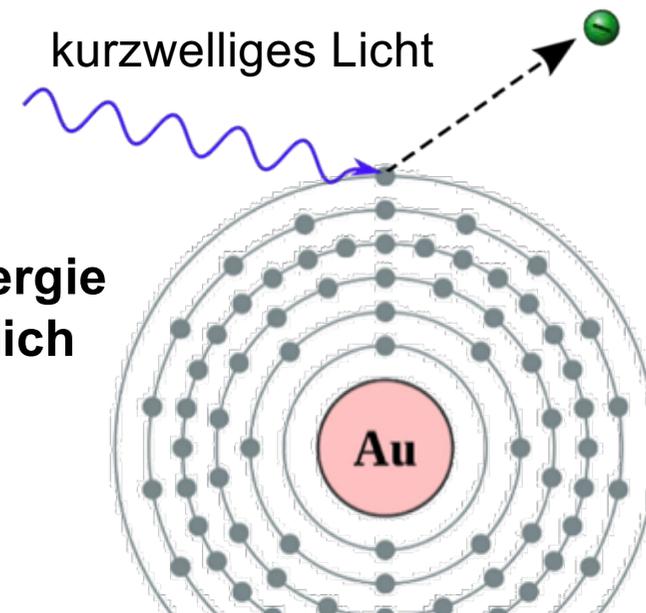
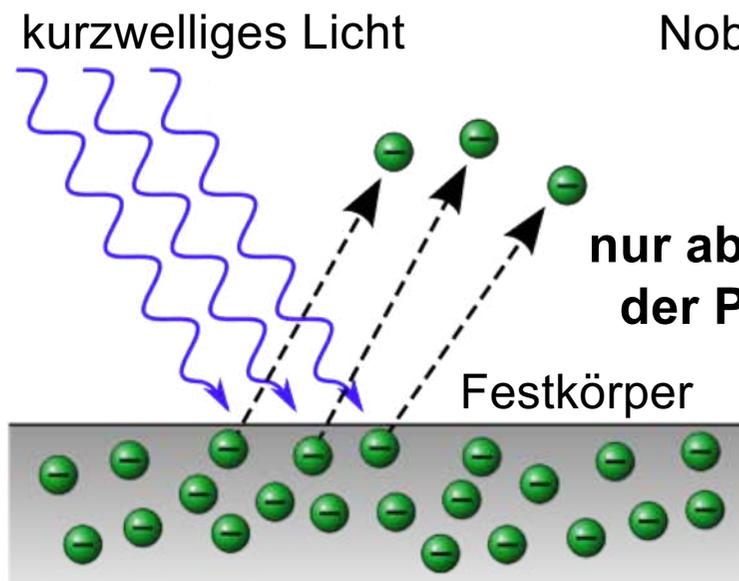
The Nobel Prize in Physics 1921 was awarded to Albert Einstein "for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect."



Albert Einstein
Nobelpreis 1921

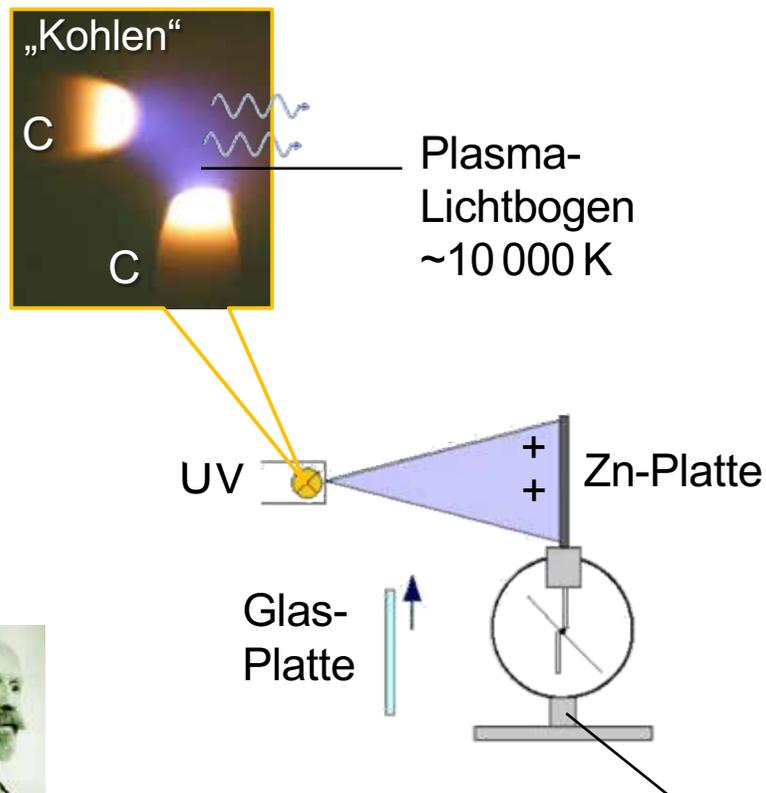


6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

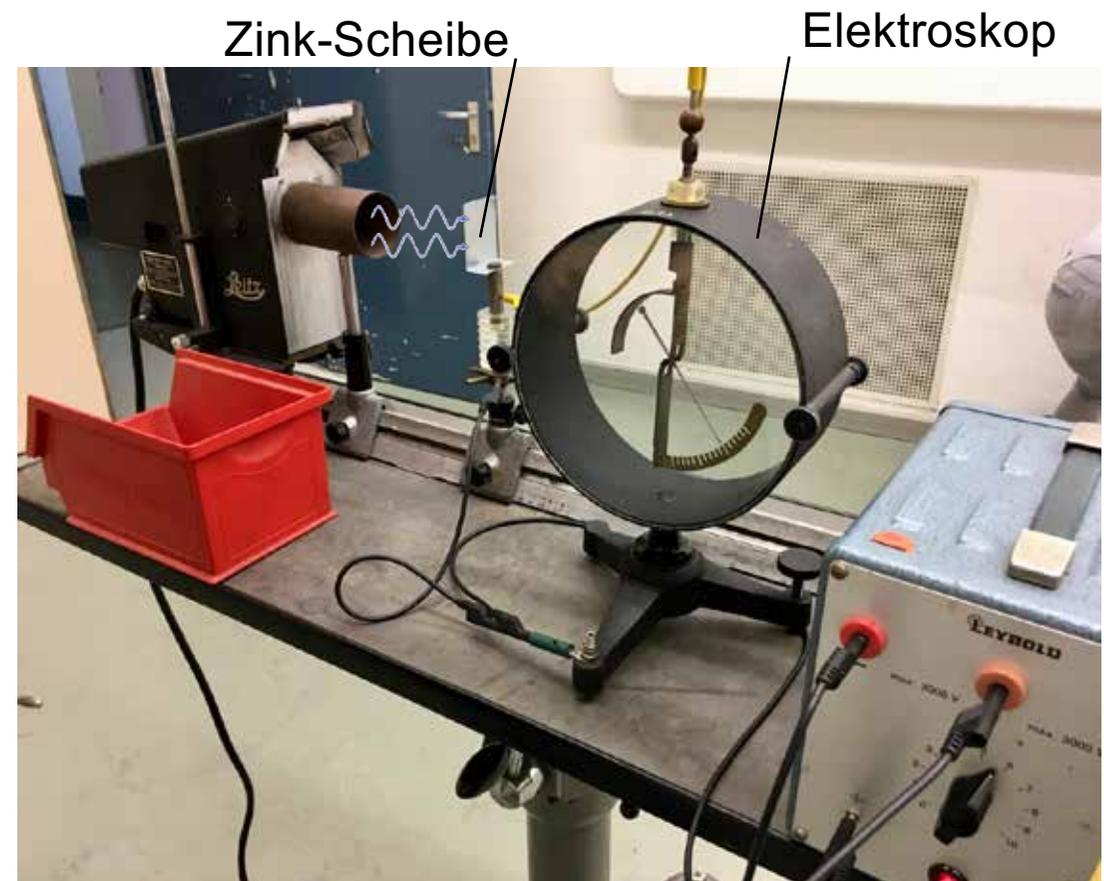


Experiment - Hallwachseffekt

- Beleuchtung einer Zink-Platte durch eine Kohle-Bogenlampe (UV Licht!)
Elektronenaustritt erzeugt positive Ladung an Oberfläche
⇒ Entladung eines vorher negativ aufgeladenen Elektroskops

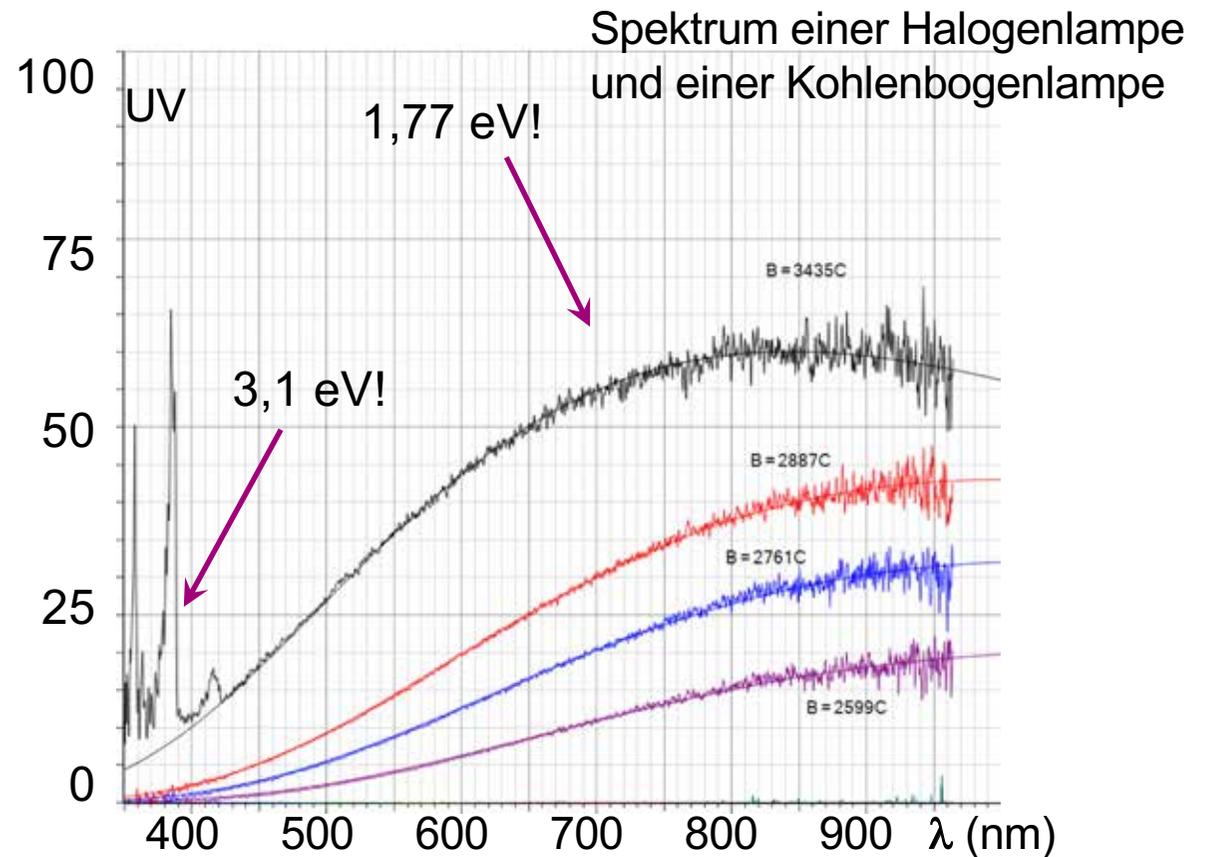
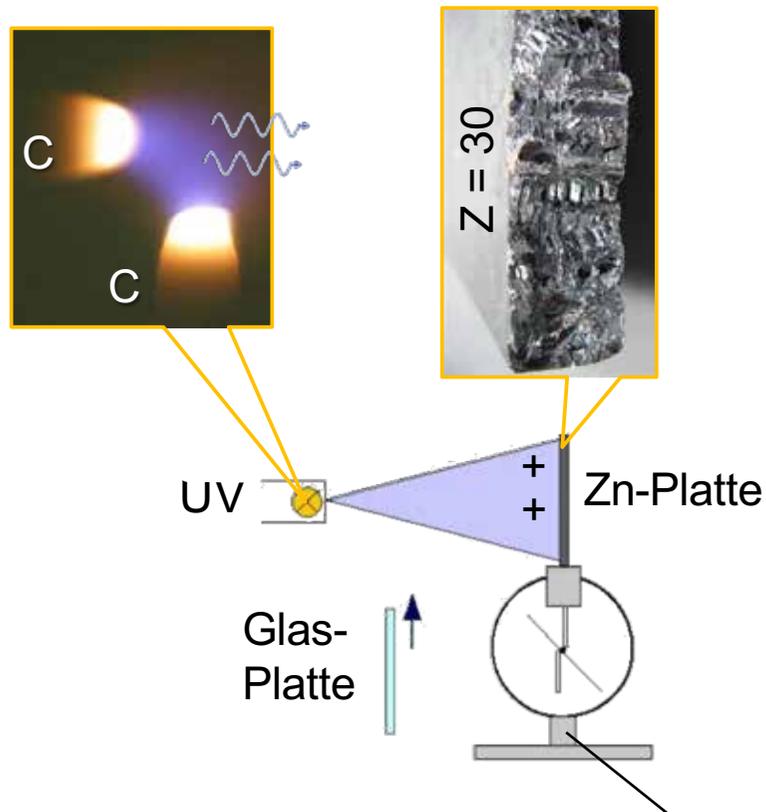


Wilhelm Hallwachs



Experiment - Hallwachseffekt

- Beleuchtung einer Zink-Platte durch eine Kohle-Bogenlampe (UV Licht!)
 - Austrittsarbeit von Elektronen in Zink: $W_A(\text{Zn}) = 4,34 \text{ eV}$
 - erforderlich: reine Metall-Oberfläche, kein Oxid oder Adsorption!

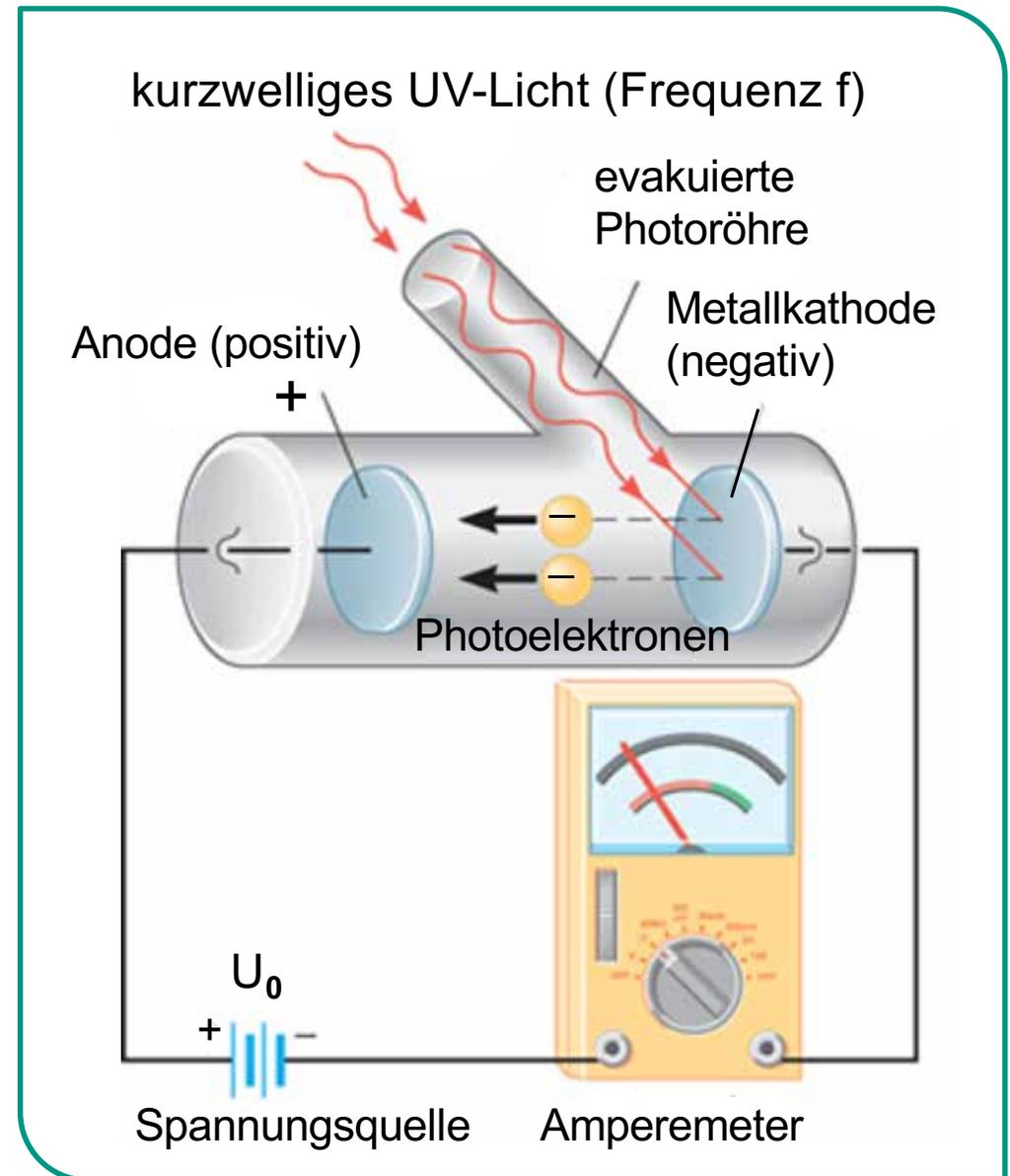


Q.: RWTH Aachen

Messung mit der Gegenfeldmethode

■ Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

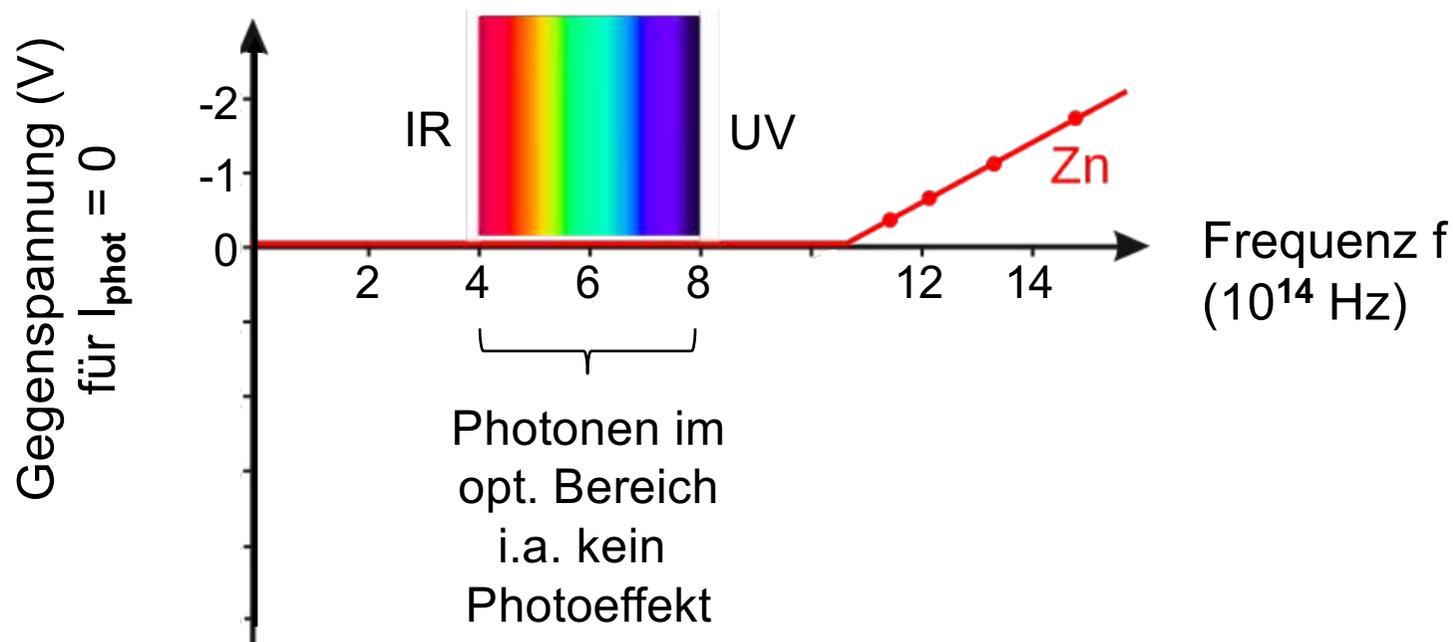
- UV-Lichtquelle mit Monochromator beleuchtet eine metallische **Photokathode**
- an evakuierte Röhre wird eine Spannung U_0 angelegt zwischen Kathode und Anode
- Photoelektronen erzeugen einen messbaren Photo-Strom I_{phot}



Photoeffekt – Gegenfeldmethode

■ Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

- variiere **Gegenspannung $U_0(f)$** bis der Photoelektronen-Strom $I_{\text{phot}} = 0$ wird für verschiedene **Frequenzen f**



Photoeffekt – Gegenfeldmethode

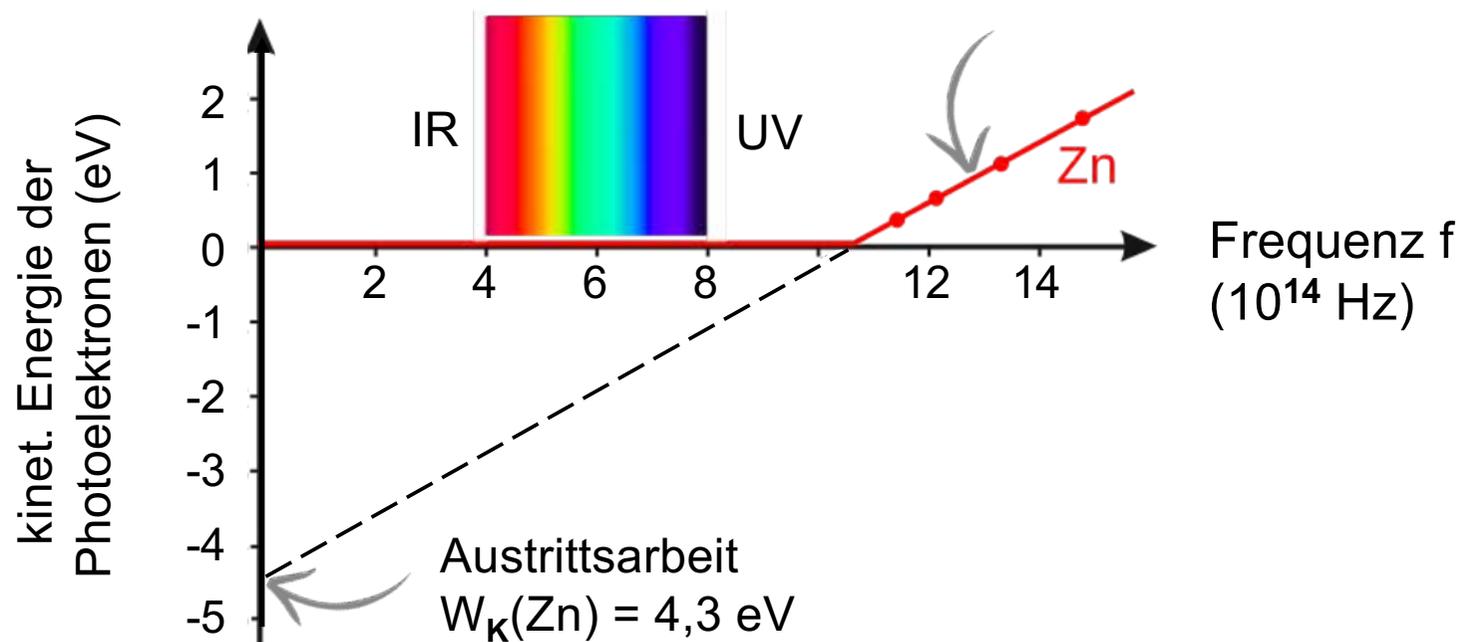
■ Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

h

- **Austrittsarbeit $W_k =$**
(minimale) thermodynamische Arbeit

Geradensteigung:

$$h = \frac{\Delta E}{\Delta f} = \frac{4,3 \text{ eV}}{10,4 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$



Photoeffekt – Austrittsarbeit

■ Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

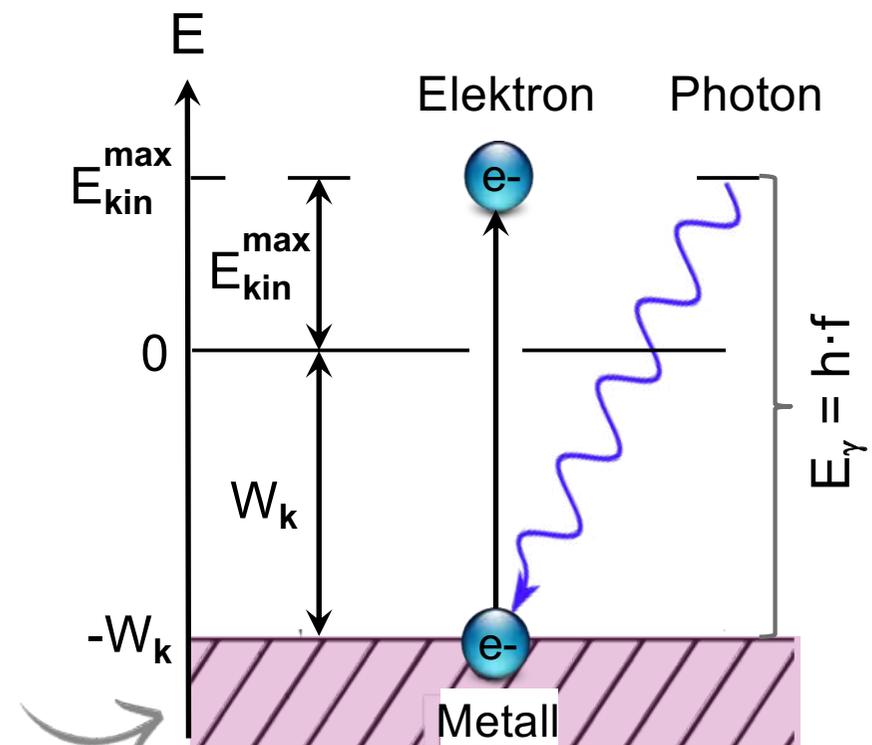
- **Austrittsarbeit W_k** =
(minimale) thermodynamische Arbeit,
die aufgebracht werden muss, um ein
Elektron aus dem Material (Fermi-Kante)
in das oberflächennahe Vakuum zu
bringen (keine kinetische Energie)

$$W_k (\text{Ru, Cs}) = 2,1 \text{ eV}$$

$$W_k (\text{Au}) = 4,8 \dots 5,4 \text{ eV}$$



Fermisee

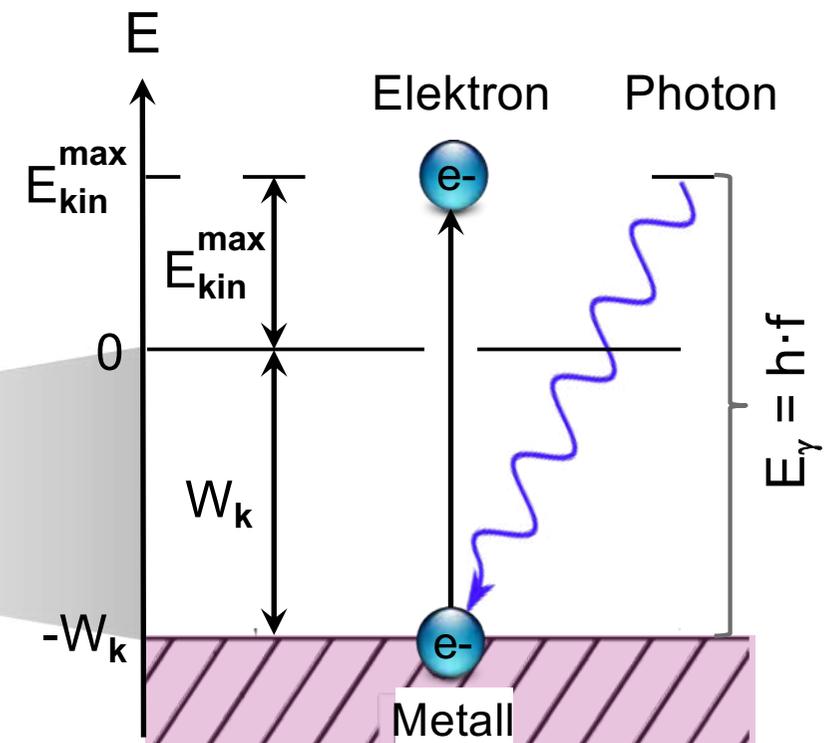
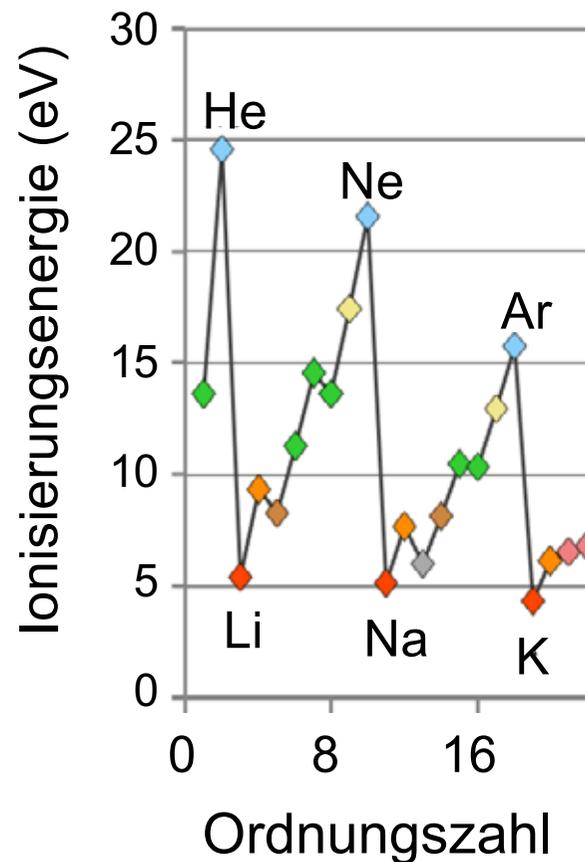


Enrico
Fermi

Austrittsarbeit & Ionisationspotenzial

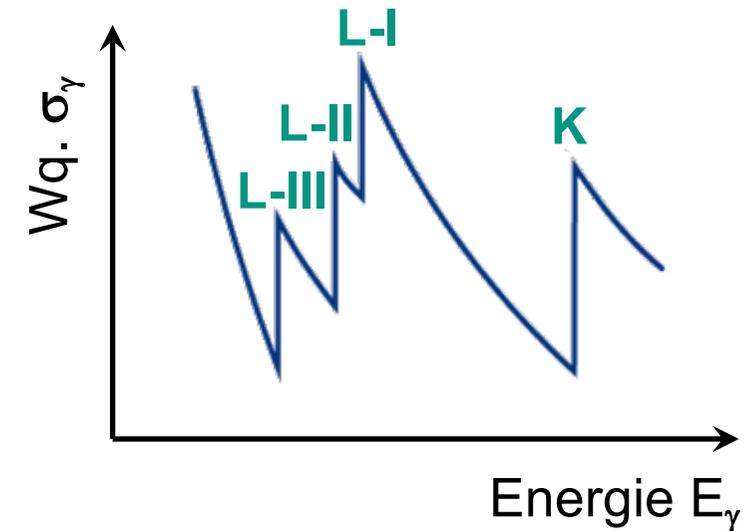
■ Ionisationspotenzial von Atomen & Austrittsarbeit

- höhere Photon-Energien erforderlich zur Ionisation von freien Atomen als zur Auslösung von Elektronen aus Festkörpern



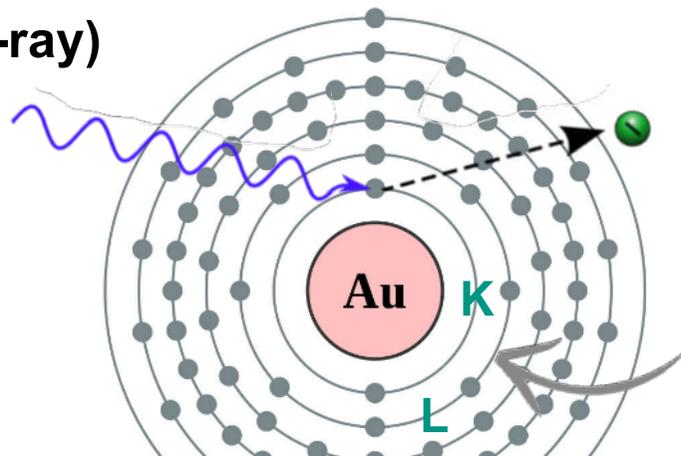
Kinematik des Photoeffekts

- masseloses γ wird von e^- in bestimmter (z.B. der innersten K-) Schale absorbiert
- „Mismatch“ der **Energie-Impuls-Relation** von Elektron & Photon führt zu **Peaks** bei σ_{tot} bei $E_\gamma \sim E_b$
(Bindungsenergie des Elektrons)



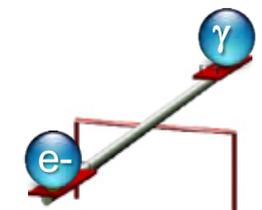
Photon (X-ray)

$$E_\gamma = p_\gamma \cdot c$$



Elektron

$$E_e = \sqrt{(p_e \cdot c)^2 + (m_e c^2)^2}$$



Schalenstruktur schwerer Atome wird sichtbar bei σ_{tot} (Photoeffekt)

Photoeffekt – Wirkungsquerschnitt

■ Photoeffekt dominiert bei

⇒ **niedrigem E_γ**

⇒ **schweren Atomkernen**

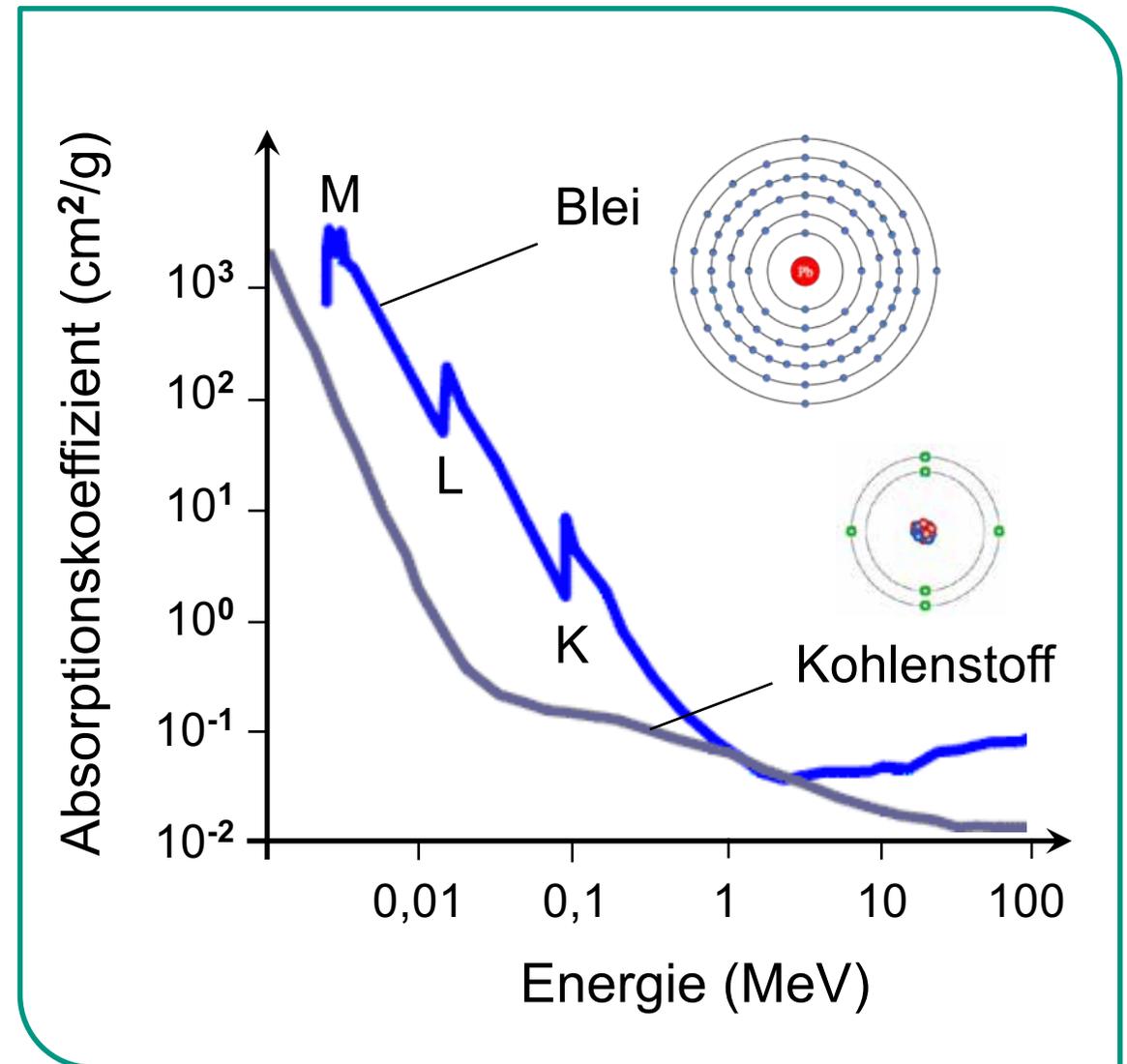
■ Energieabhängigkeit von σ

- niedrige Energien < 0,5 MeV:

$$\sigma_\gamma \sim \alpha^4 \cdot \frac{m_e^{7/2}}{E_\gamma^{7/2}}$$

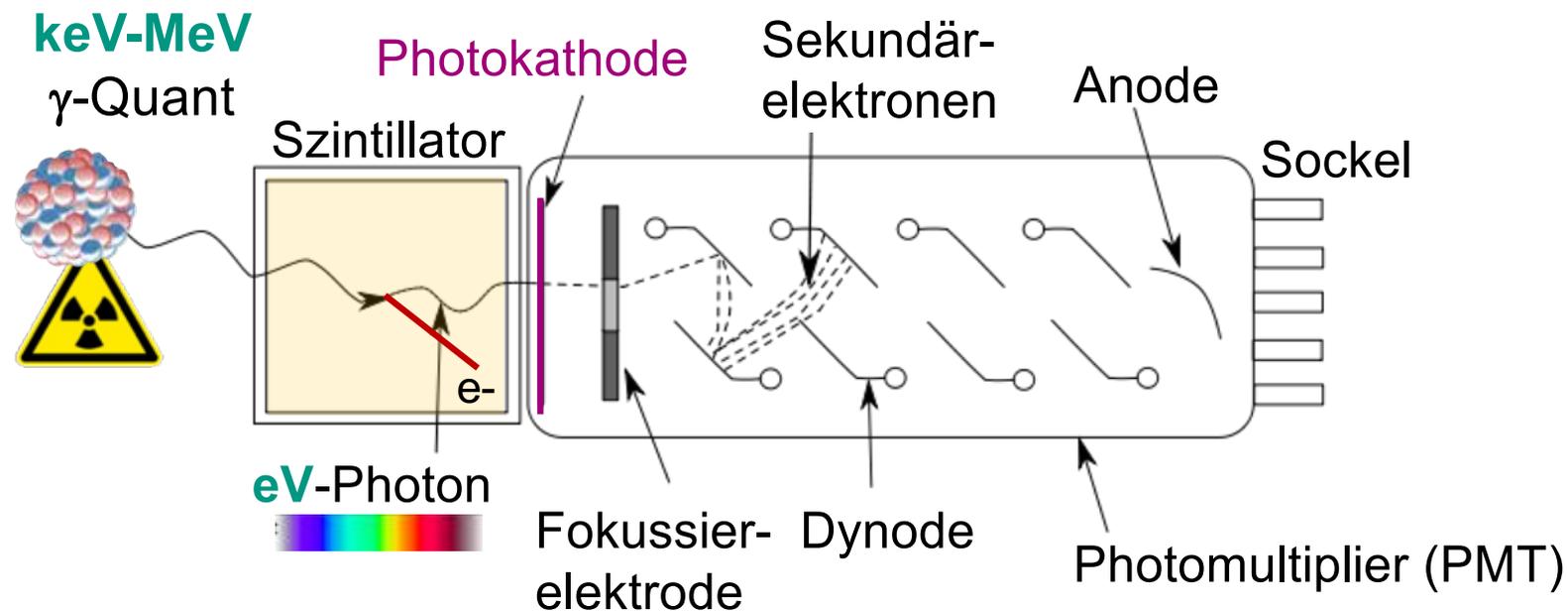
■ Z- abhängiger Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_\gamma \sim Z^5$$

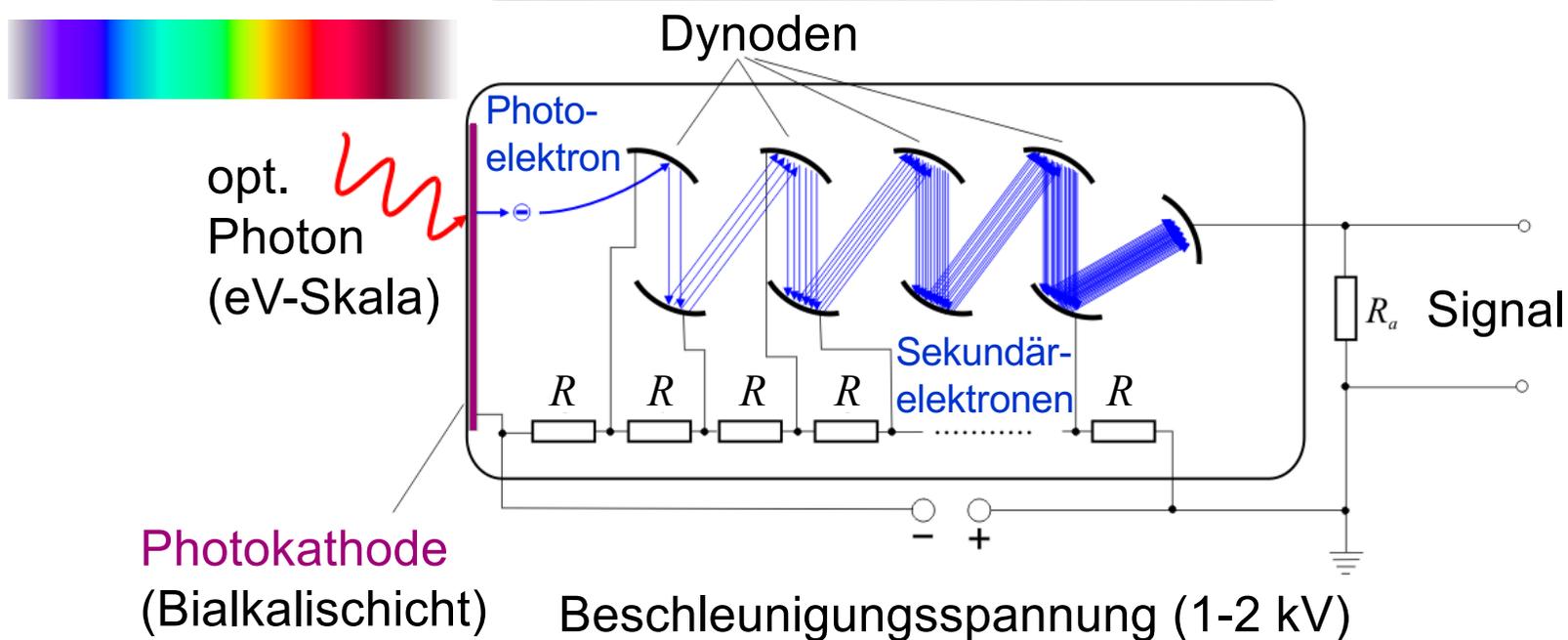
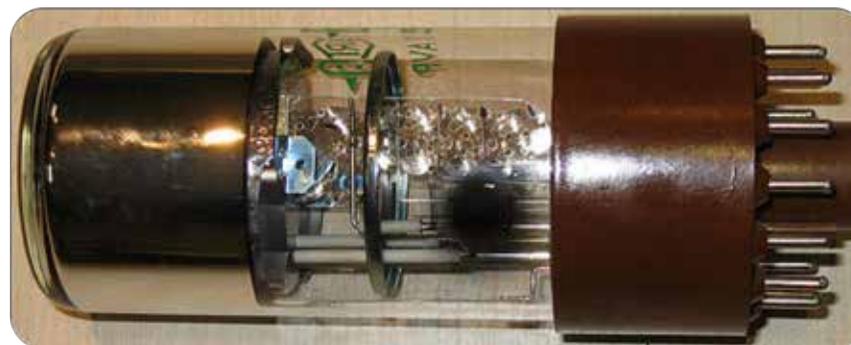


Anwendung: Photomultiplier (PMT)

- Nachweis von Szintillationslicht durch dünne **Bialkali-Photokathode** (~25% Effizienz bei $\lambda = 400 \text{ nm}$)



- Elektronenvervielfachung in der **Dynodenkette** (BeO, Mg-O-Cs), Verstärkung bis $\sim 10^8$, Signal-Laufzeit im PMT $\tau \sim 40$ ns

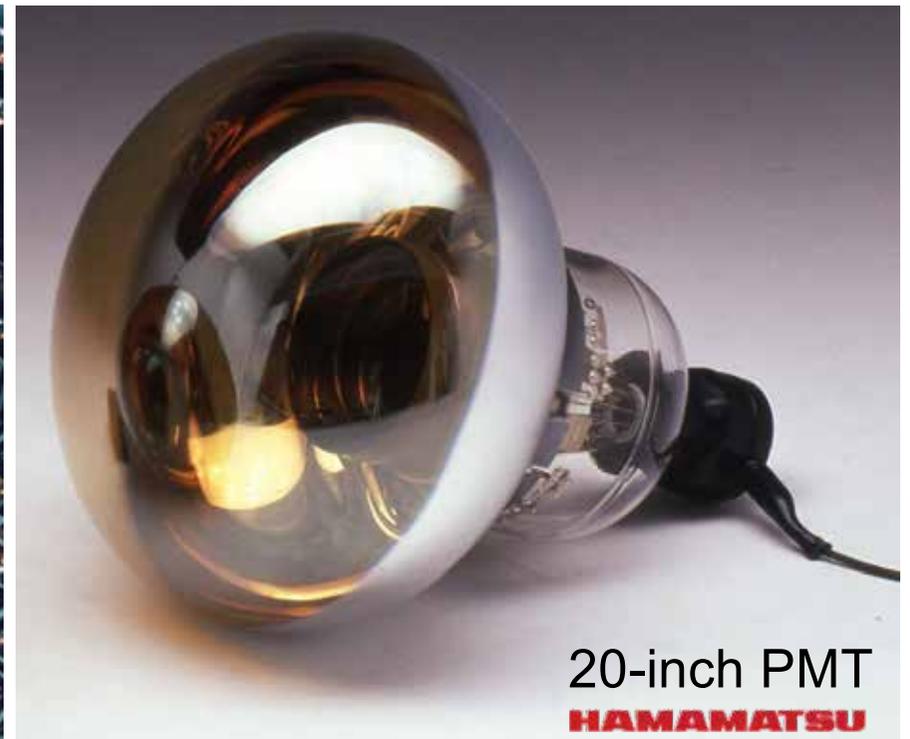
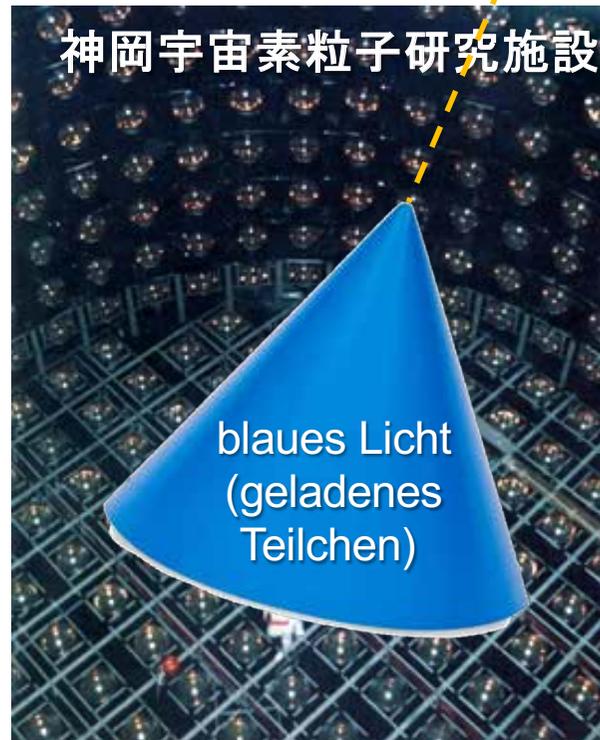
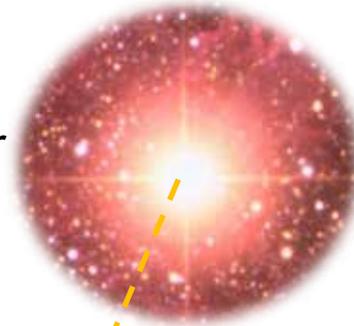


Anwendungen: PMTs für ν -Detektoren



"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

Masatoshi Koshiwa
Nobelpreis 2002

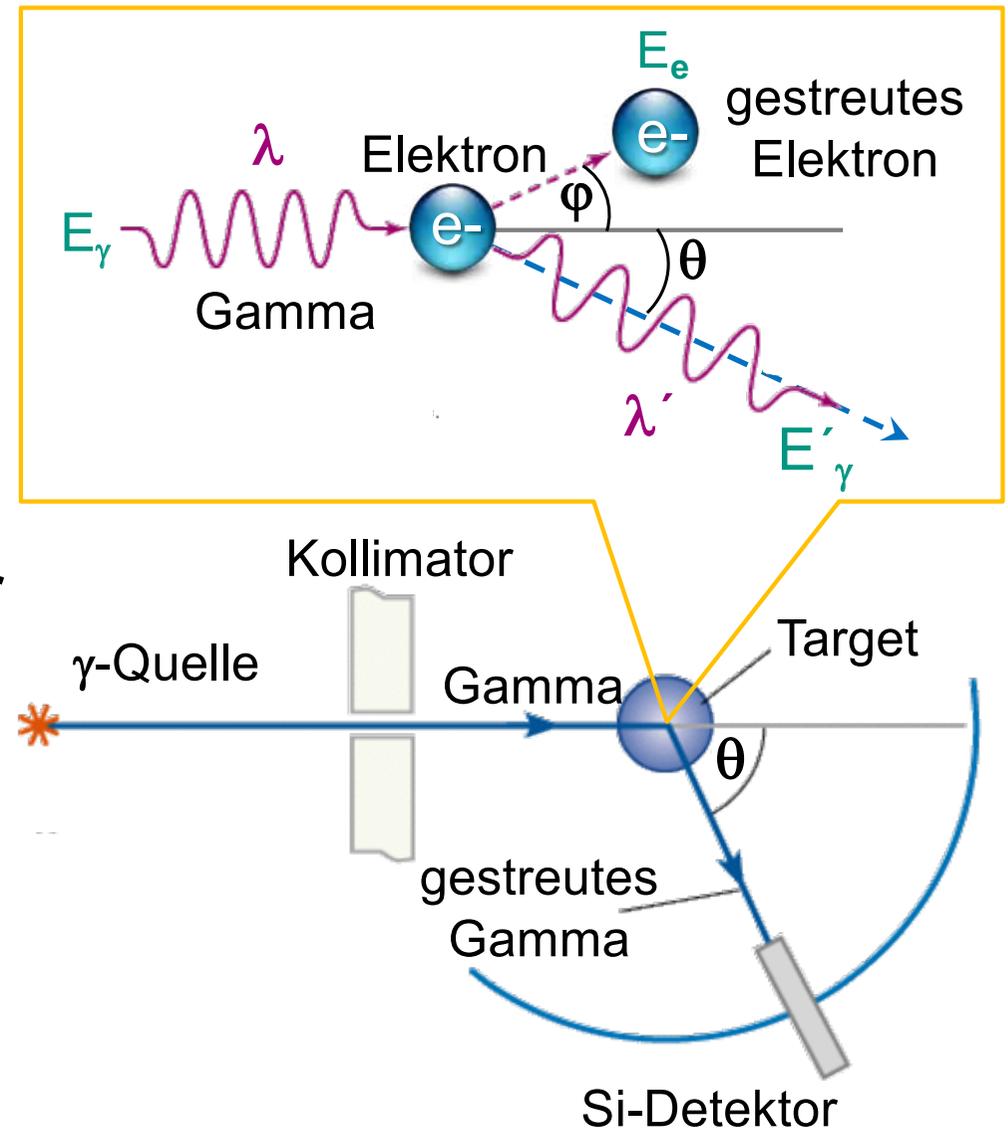


b. Compton-Effekt

■ Compton-Streuung:

inelastischer Stoßprozess
eines Gammas an einer Ladung,
i.a. an (gebundenem) Elektron

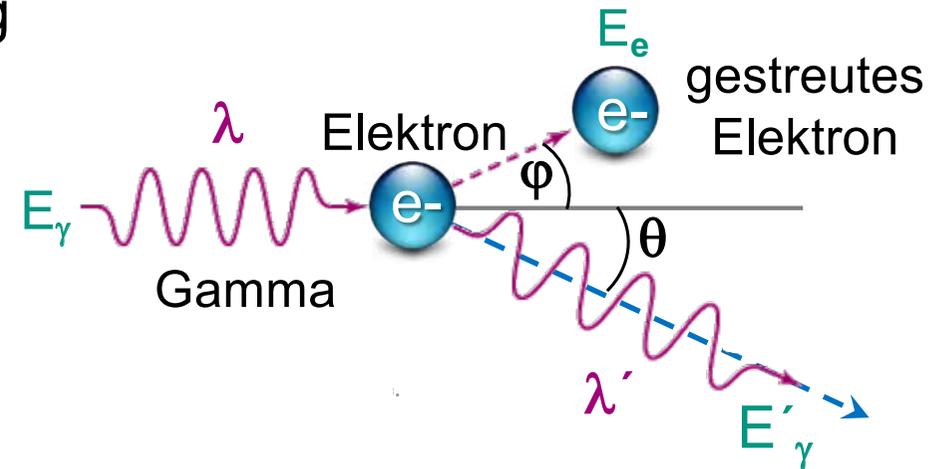
- Effekt demonstriert bei niedrigen Intensitäten den **Teilchencharakter** von Gammaquanten
- für γ 's im MeV-Bereich kann Elektronen-Bindungsenergie in der Hülle vernachlässigt werden



■ Compton-Streuung: Einmal-Streuung eines Gammas im Target

- Wellenlängen-Änderung $d\lambda$ des Gammas*:

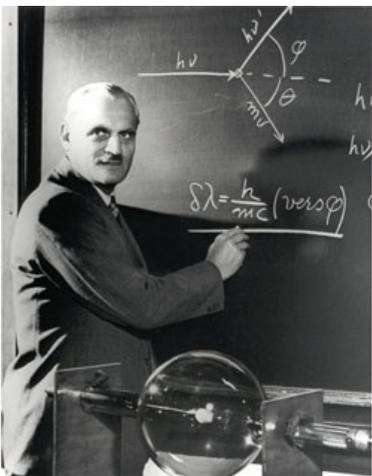
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} \cdot (1 - \cos \theta)$$



nur der **Streuwinkel θ** bestimmt Energieverlust des Gammas

$\theta = 0^\circ$ kein Energieverlust

$\theta = 180^\circ$ maximaler Energieverlust



Arthur Holly Compton
Nobelpreis 1927

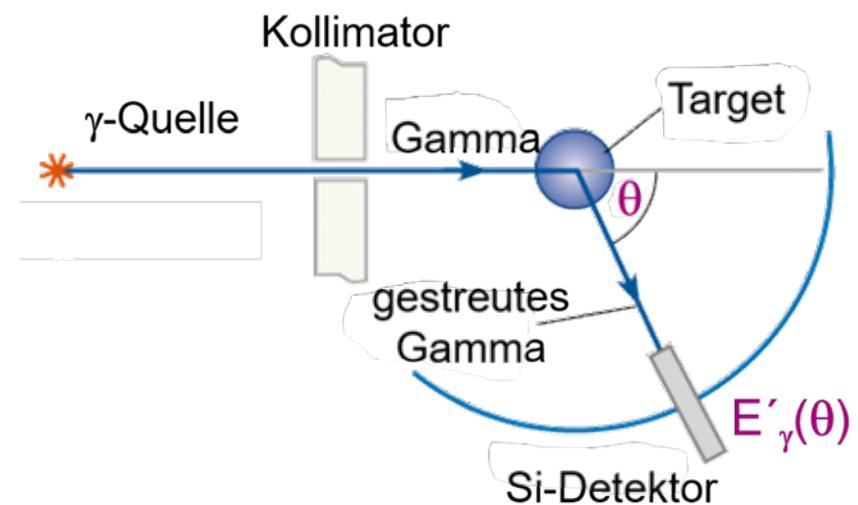
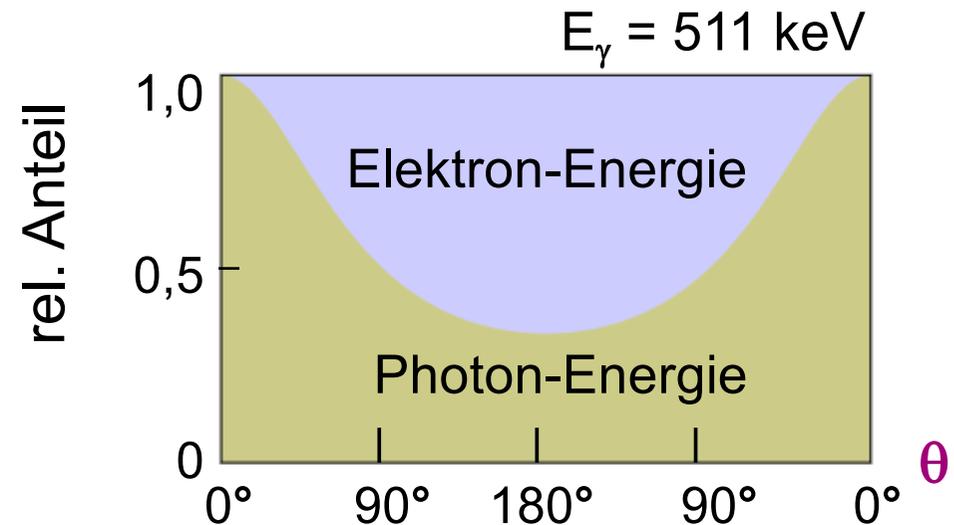
*aus Energie- und Impulssatz
(s. Haken-Wolf)

Compton-Effekt: Energieverteilungen

■ Compton-Streuung:

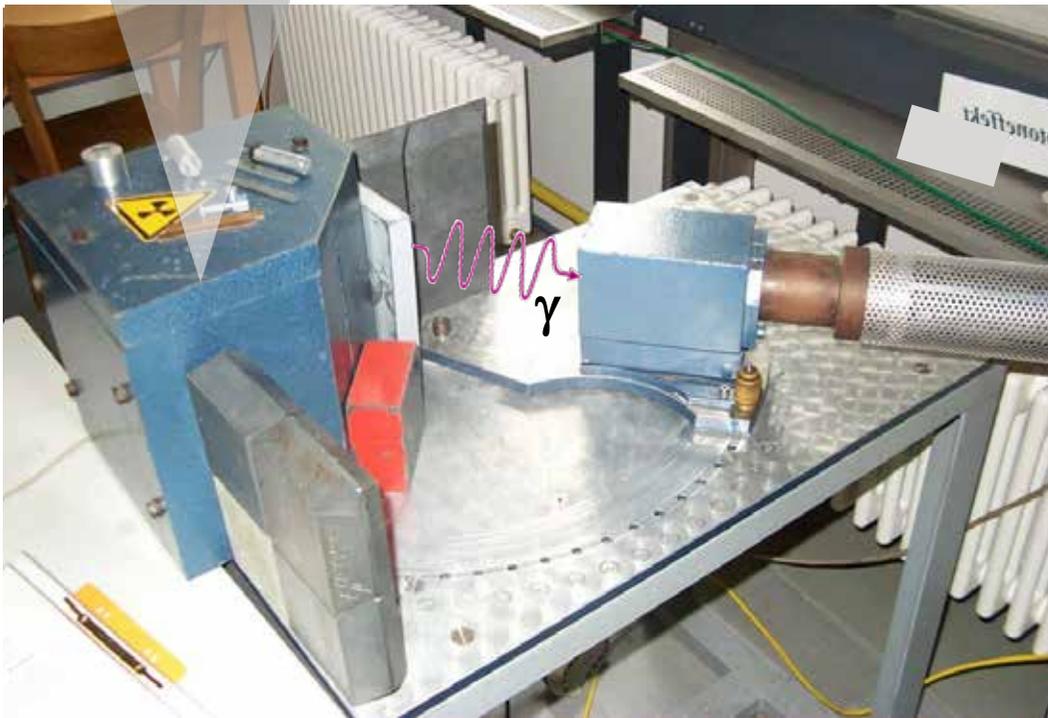
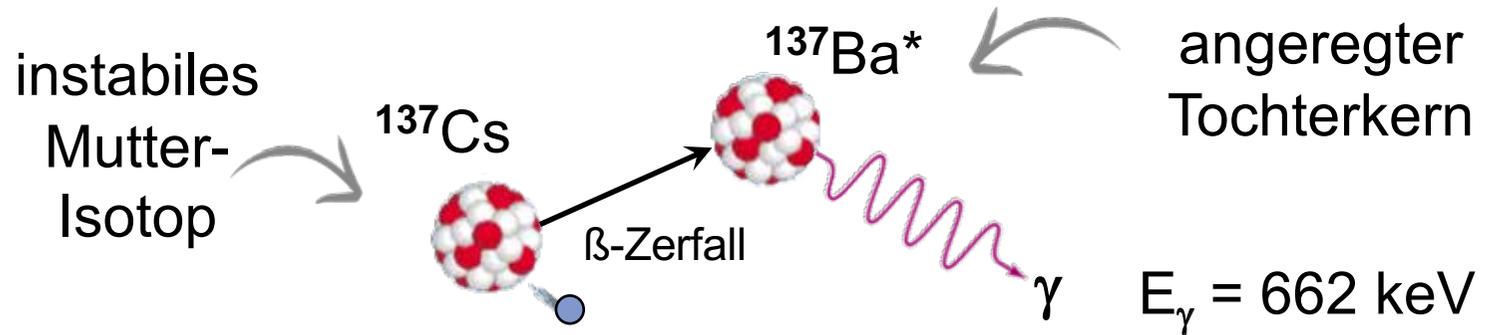
- **Streuwinkel θ** legt kinematische Variable fest
- **Energie $E'_\gamma(\theta)$** des gestreuten Gamma-Quants:

$$E'_\gamma(\theta) = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \cdot (1 - \cos \theta)}$$

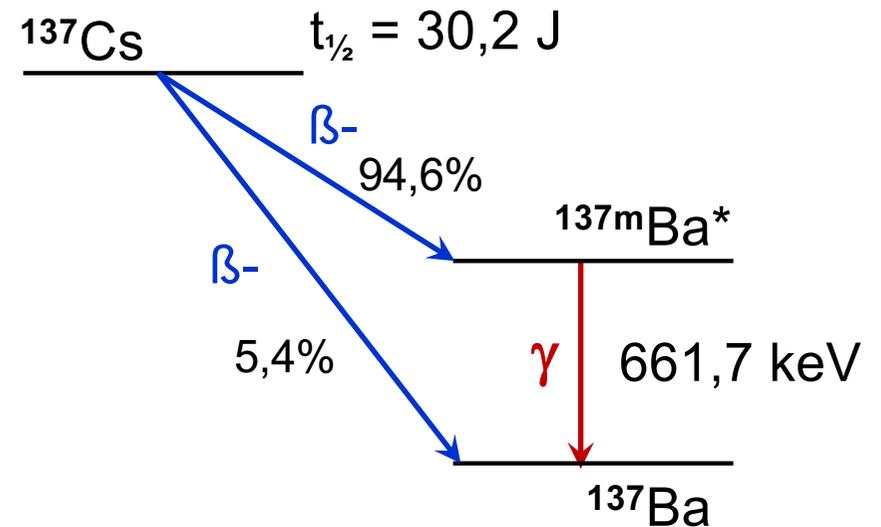


Compton-Effekt: Messung

■ Gamma-Quelle: Cs-137 Präparat emittiert Gammas



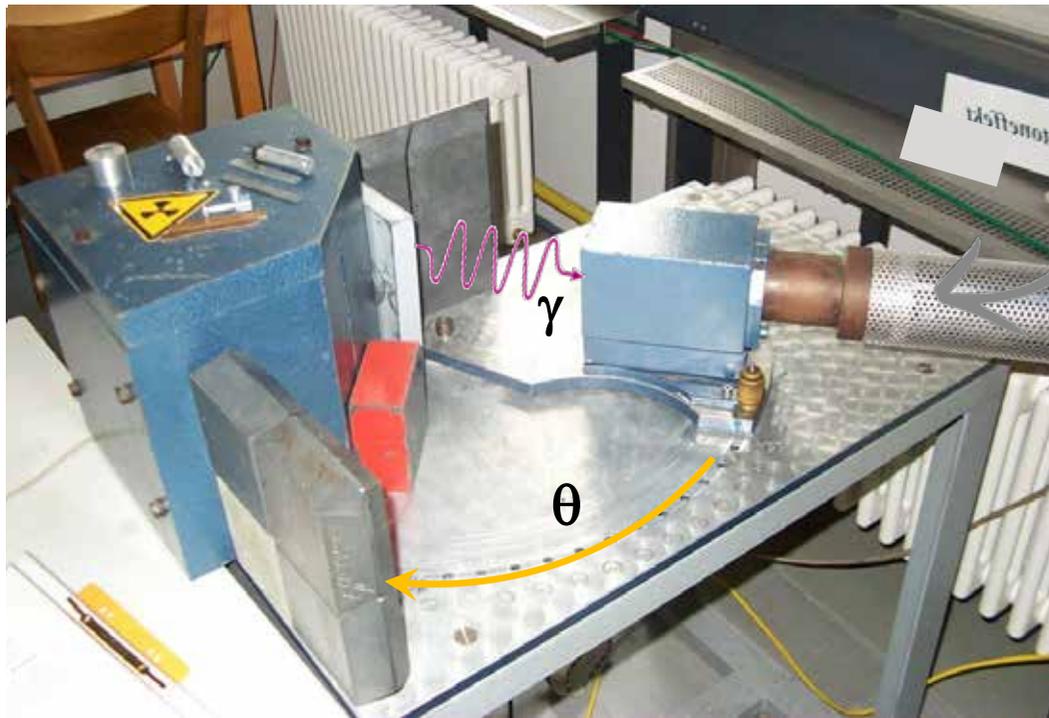
Zerfallsschema von Cs-137



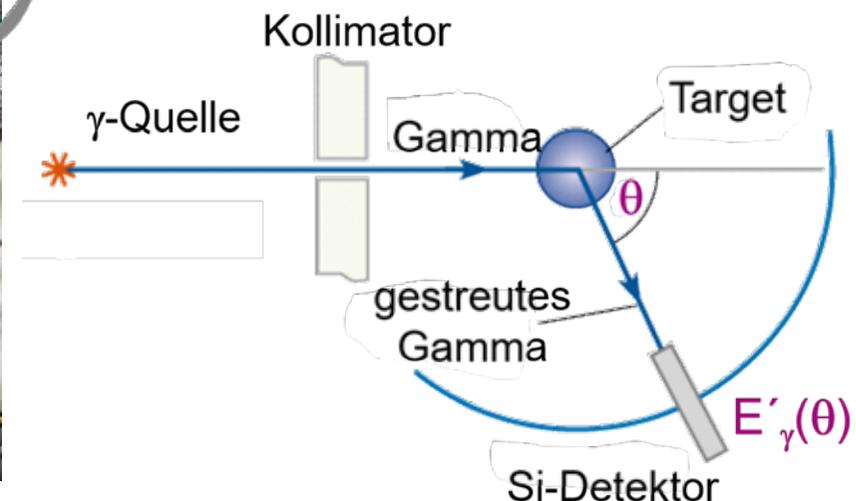
Compton-Effekt: Messung

■ Compton-Streuung experimentell:

- Nachweis von **Compton-gestreuten Gamma-Quanten** mit einem anorganischen Szintillator (NaJ)
- Ziel: Messung der Gamma-Energie als Funktion des Streuwinkels θ (Bestätigung der Compton-Formel)



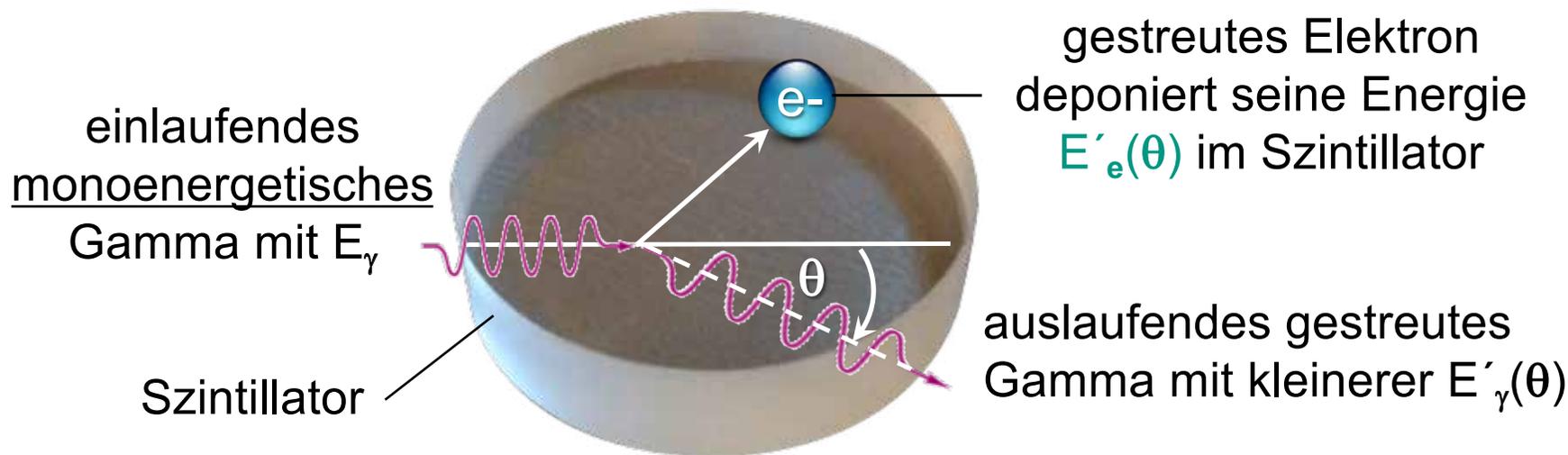
beweglicher NaJ-Detektor
mit Photomultiplier (PMT)



Compton-Effekt: Messung

■ Compton-Streuung experimentell:

- Messung der **Elektronen-Energie** aus einer Compton-Wechselwirkung in einem Szintillator



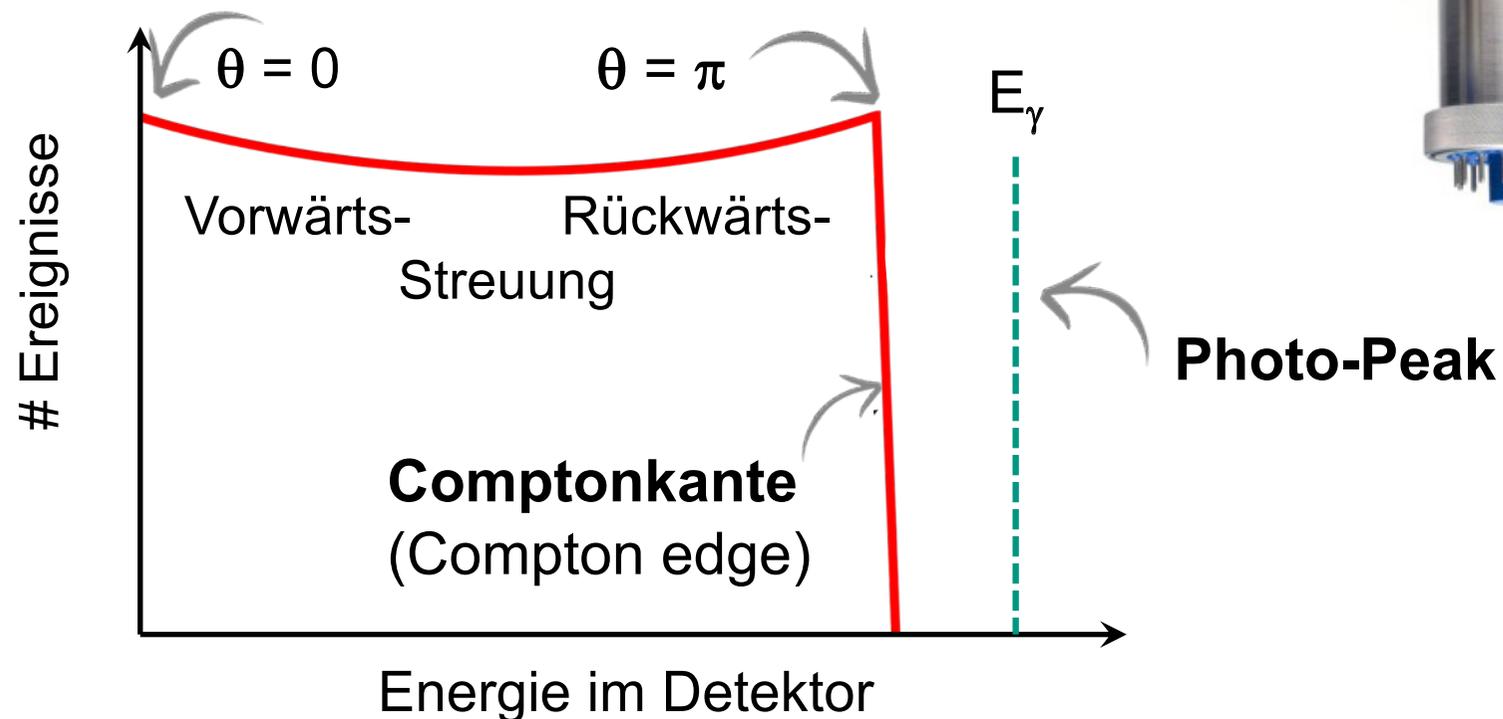
Energie des
Elektrons für
Streuwinkel θ

$$E_e'(\theta) = E_\gamma - E'_\gamma(\theta) = E_\gamma \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \cdot (1 - \cos \theta)} \right)$$

Compton-Effekt: Messung

■ Compton-Streuung experimentell:

- Messung von Gammas i.a. ohne Kenntnis des Streuwinkels θ , d.h. alle θ aus $[0, \pi]$ tragen bei
- kontinuierliches Energie-Spektrum abhängig von θ



Compton-Effekt: Messung

■ Compton-Streuung experimentell:

- maximale Energie $E_{e,\max}$ tritt auf bei $\theta = \pi$
(Gamma wird rückgestreut)

⇒ scharfe **Compton-Kante**

$$E_e'(180^\circ) = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}}$$

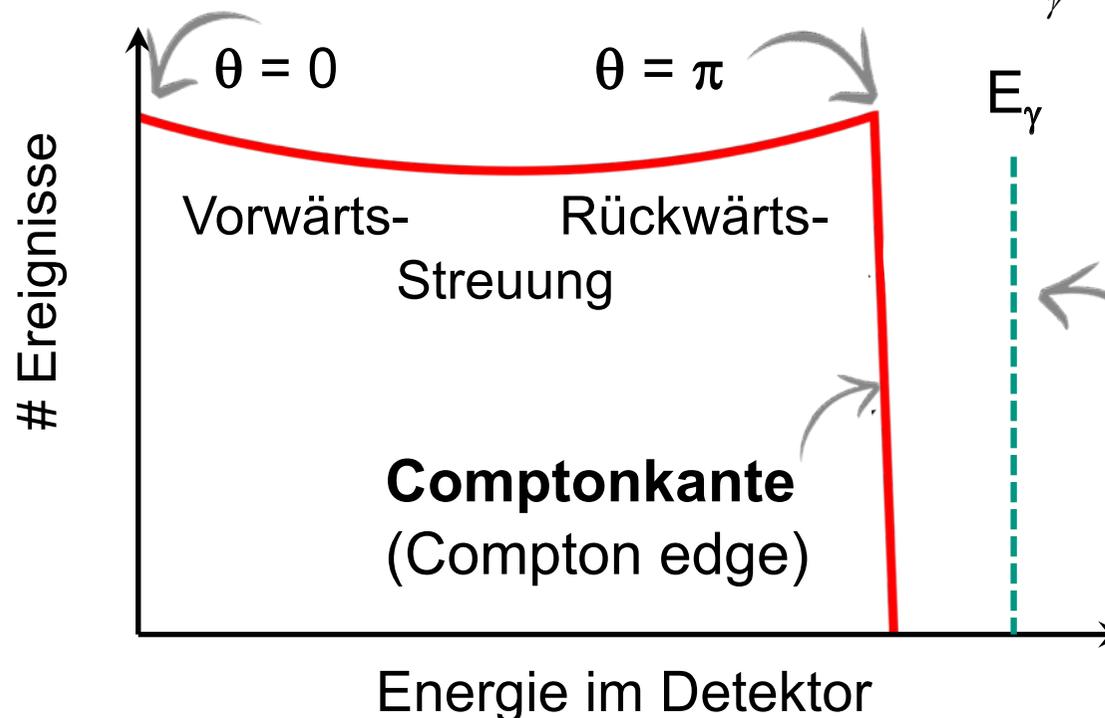
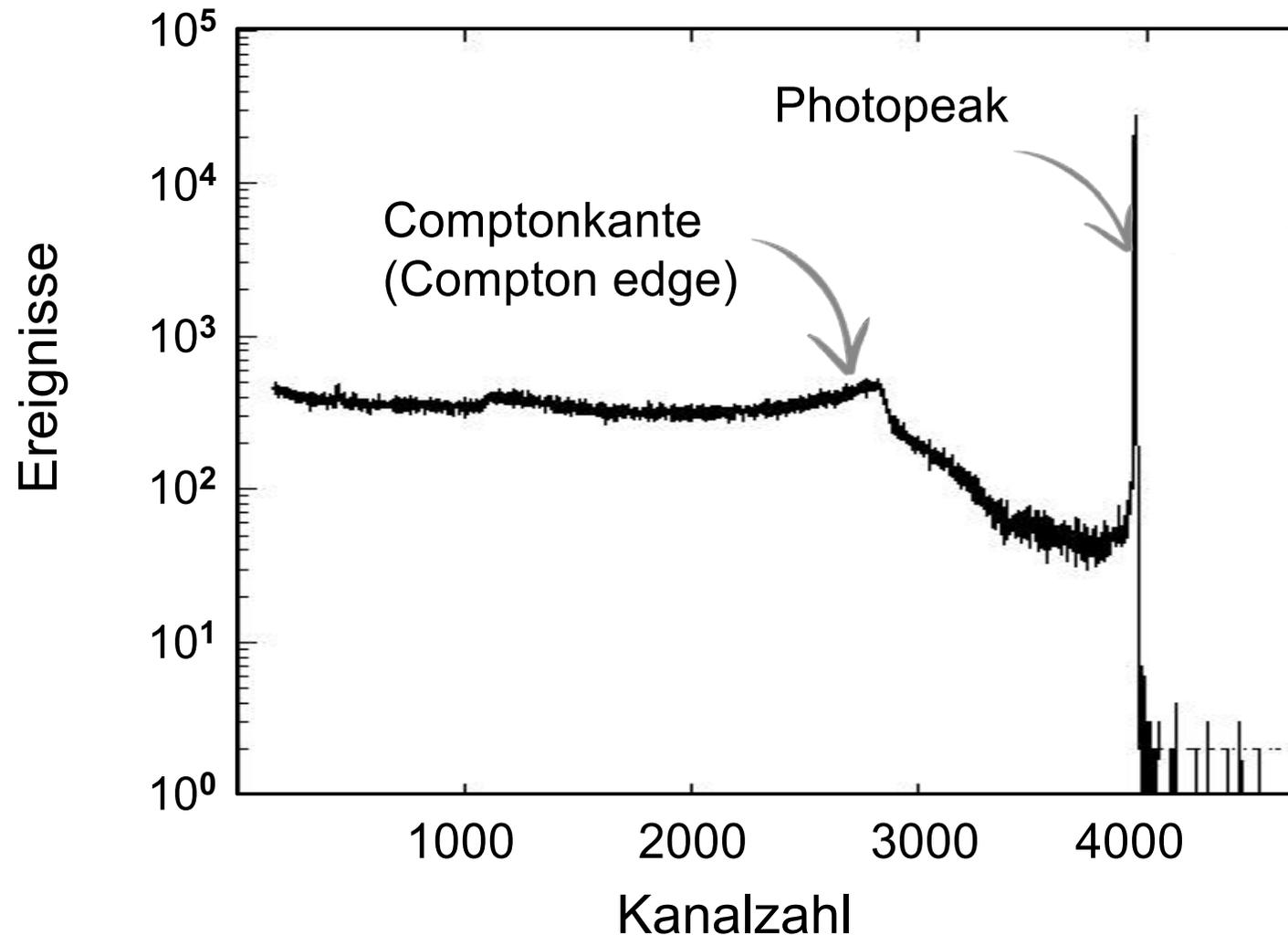


Photo-Peak
„full energy“
(Photoeffekt,
Photon absorbiert)

Compton-Effekt: Messung

- **Compton-Kontinuum:** Messung der Energie-Verteilung der gestreuten Elektronen mit hochauflösendem Ge-Detektor (P3)



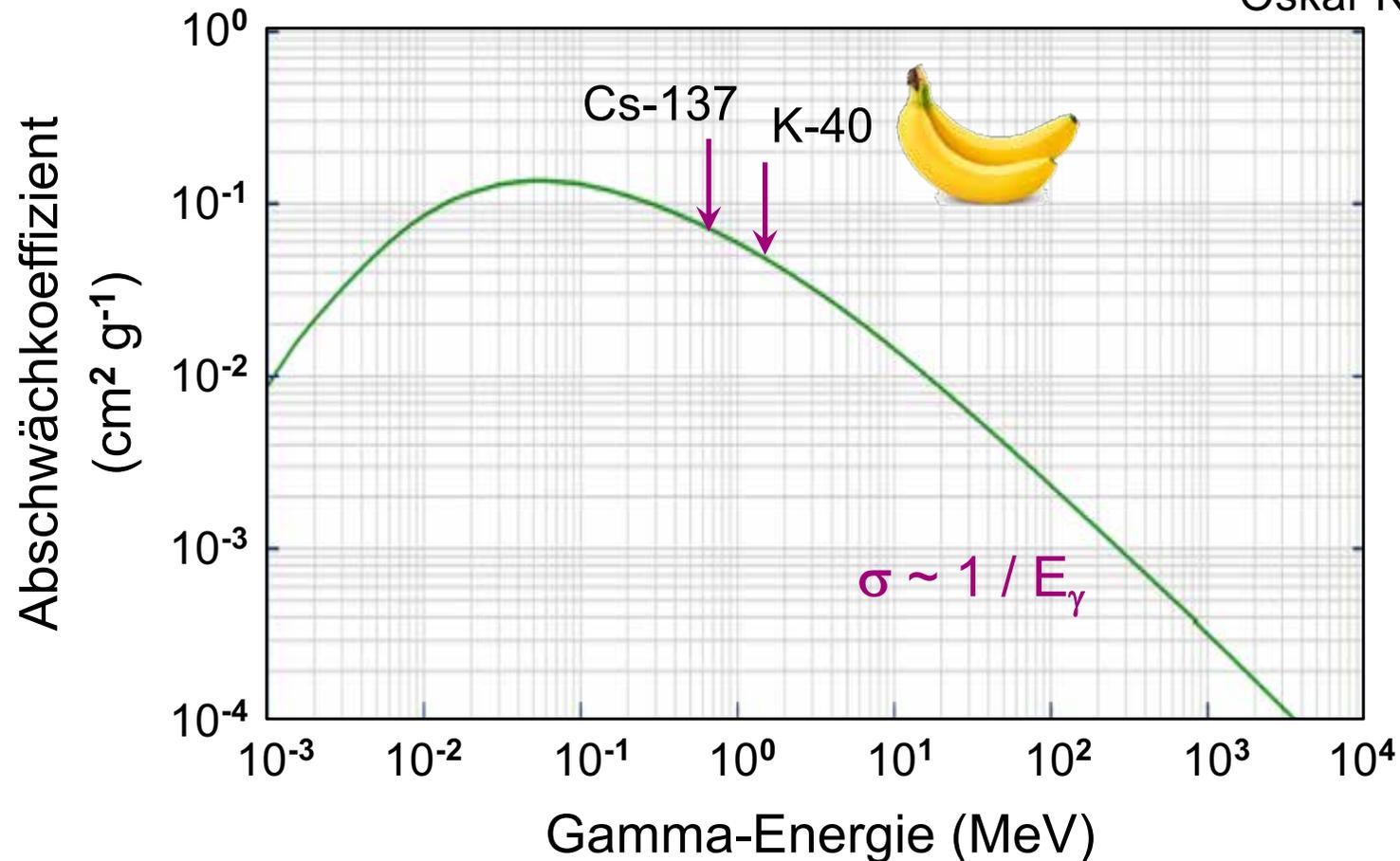
Comptoneffekt – Wirkungsquerschnitt

■ Compton-Streuquerschnitt (Klein-Nishina)

- fällt ab für hohe γ -Energien $\sigma \sim 1/E_\gamma$
- proportional zur Kernladungszahl $\sigma \sim Z$



Oskar Klein Y. Nishina



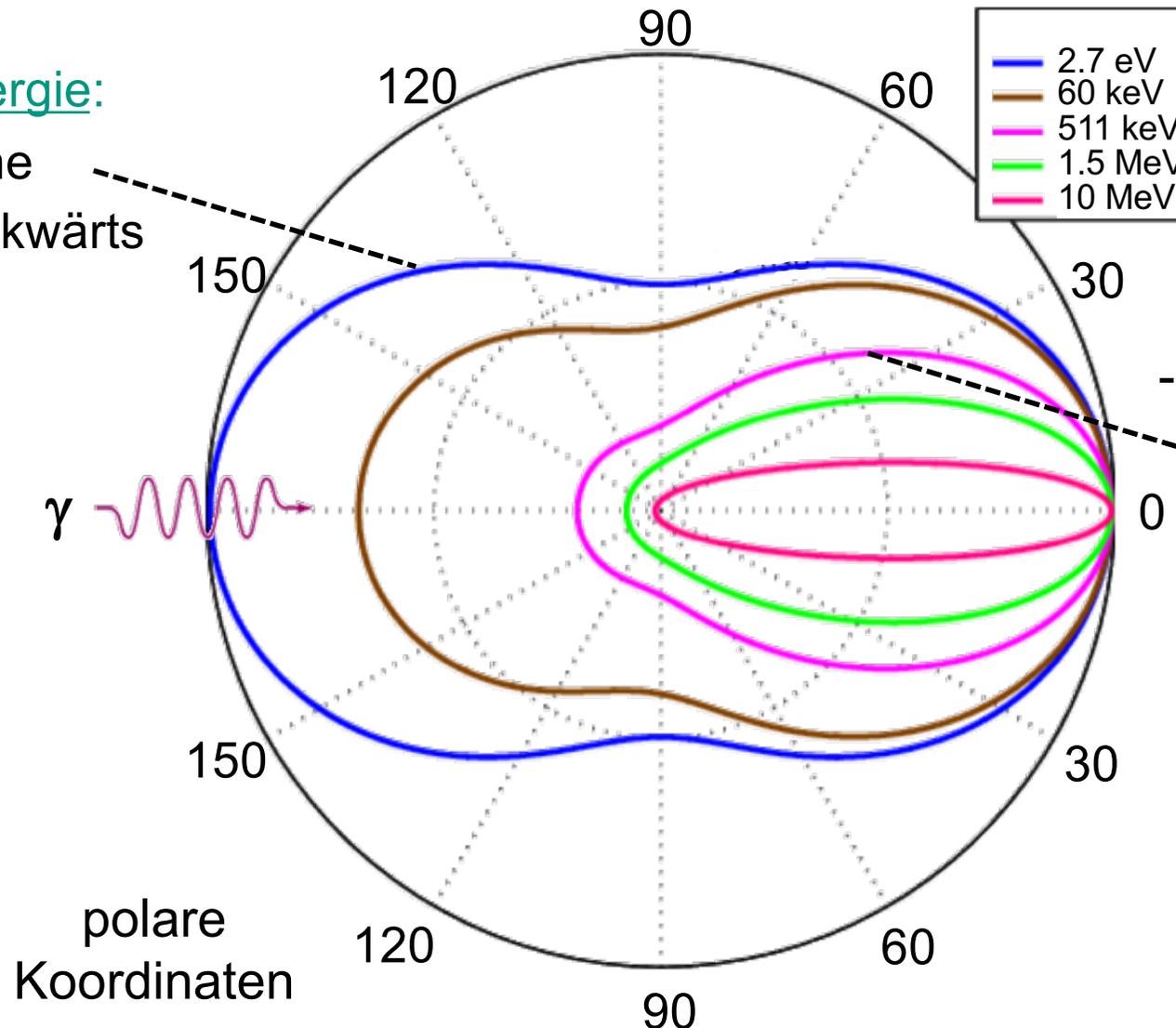
Comptoneffekt – Winkelverteilung

Winkelverteilung als Funktion der γ -Energie

- niedrige Energie:

symmetrische
vorwärts-rückwärts
Verteilung

**Thomson-
Streuung**



- hohe Energie:

asymmetrische,
vorwärts-gepeakte
Verteilung

**Compton-
Streuung**

