

# Atome & Kerne

Sommersemester 2019 Vorlesung # 5, 07.05.19

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

#### **Teilchen-Welle Dualismus**

- Einsteinkoeffizienten und Schwarzkörperstrahlung
- Photon-Wechselwirkungen:
  - a) Photoeffekt
     Messung & Anwendungen
     b) Compton-Effekt







### differentielle Streuquerschnitte

#### Strukturuntersuchungen mit Streuprozessen





### Materiewellen & Photonen

#### **Quantennatur von Photonen**

#### **Materiewellen**







#### Ableitung durch Einstein (1917): - Photonen mit $E = h \cdot v$ Niveau - 2 diskrete atomare Niveaus: 1, 2 5500 K 800 Absorption spontane stimulierte/induz. u(Դ) (kJ/nm) 600 5000 K Emission Emission 400 4500 K 4000 K 200 3500 K Photonλ (µm) Prozesse $u(v,T) = \frac{4\pi}{c}I(v,T)$ erklären alles $=\frac{8\pi h\nu^3}{r^3}\cdot\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}$ Planck & Einstein

- Atome wechselwirken mit externem Strahlungsfeld:
  - Übergänge durch 3 Prozesse:

### Absorption:

Photon mit  $E = E_2 - E_1 = h \cdot v$ wird absorbiert  $\Rightarrow$  Niveau-Übergang  $E_1 \rightarrow E_2$ 

#### spontane Emission:

Photon mit  $E = E_2 - E_1 = h \cdot v$ wird emittiert (Lebensdauer  $\tau$ )  $\Rightarrow$  Niveau-Übergang  $E_2 \rightarrow E_1$ 

#### **stimulierte/induzierte Emission**: Niveau-Übergang $E_2 \rightarrow E_1$ wird durch <u>externes</u> 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  $\underline{externen}$  Photons  $N_1 \rightarrow N_2$ 

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

- spontane Emission eines Photons  $N_2 \rightarrow N_1$ 

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

- induzierte Emission eines Photons  $N_2 \rightarrow N_1$ 

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



 Wahrscheinlichkeit für Übergang pro Zeiteinheit Einsteinkoeffizienten:





#### 8 07.05.2019 G. Drexlin – AK05

### Planck Verteilung - Herleitung

### 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  $h\cdot \nu$ 

 $E_2 - E_1 = hv$  $= e^{-hv/kT}$ 

- damit für Planck´sche Strahlungsdichte u(v):

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









#### Leistungsdichte Schwarzer Körper



Anzahl N<sub>2</sub>

N(0)

### Atomare Übergänge – spontane Emission

#### Lebensdauer und Zerfallsbreite

- angeregtes Niveau N<sub>2</sub> zerfällt über
   <u>spontane</u> Emission eines Photons
- Zustand N<sub>2</sub> charakterisiert durch:
  - exponentielle Abnahme der Anzahl N<sub>2</sub> mit Lebensdauer τ

 $N(t) = N(0) \cdot e^{-t/\tau}$ 

τ

Zeit t

 $\Rightarrow$  endliche (natürliche) Linienbreite  $\Gamma$ 



spontane Emission  $\tau = \frac{1}{A_{21}}$ 

Fourier-

Transformation







### Atomare Übergänge – stimulierte Emission

#### Externe Photonen wechselwirken

stimulierte/induzierte Emission: Niveau-Übergang  $E_2 \rightarrow E_1$  wird durch <u>externes</u> Photonfeld induziert

wichtig für Laser, Kap. 9.4

- Absorption + stimulierte Emission:
   Verstärkung des externen Felds wenn
   N<sub>2</sub> > N<sub>1</sub> (Besetzungsinversion)









# Wechselwirkung von Gammas



**die Wechselwirkung** von  $\gamma$ 's erfolgt über 3 fundamentale Prozesse:

organ.

#### **Photoeffekt**



niedrige Gammaenergie



#### Comptonstreuung

#### Paarbildung



## Photoeffekt – Einführung



#### 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 · v

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."



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



### Experimente - Hallwachseffekt

16



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



### Experimente - Hallwachseffekt



CHALLENGE

Beleuchtung einer Zink-Platte durch eine Kohle-Bogenlampe (UV Licht!)

- Austrittsarbeit von Elektronen in Zink:  $W_A (Zn) = 4,34 \text{ eV}$
- erforderlich: reine Metall-Oberfläche, kein Oxid oder Adsorption!



### Photoelektronenerzeugung bei KATRIN



#### **Erzeugung eines Elektronenstrahls durch UV-Licht**

- UV-Lichtquelle: Xe-Gasentladung für UV-A-B-C
- Ziel: Beeinflussung von Plasma-Eigenschaften
- wichtig: Austrittsarbeit von Elektronen aus Gold-Oberfläche (Vakuum!)



### Photoeffekt – Gegenfeldmethode



#### Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

- UV-Lichtquelle mit Monochromator beleuchte eine metallische **Photokathode**
- an evakuierte Röhre wird
   eine Spannung U<sub>0</sub> angelegt
   zwischen Kathode und Anode
- Photoelektronen erzeugen einen messbaren Photo-Strom I<sub>phot</sub>



### Photoeffekt – Gegenfeldmethode



### Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

variiere Gegenspannung U<sub>0</sub>(f) bis der Photoelektronen-Strom
 I<sub>phot</sub> = 0 wird f
ür verschiedene Frequenzen f



## Photoeffekt – Gegenfeldmethode



- Austrittsarbeit W<sub>k</sub> =

Geradensteigung:



### Photoeffekt – Austrittsarbeit

### Bestimmung von Austrittsarbeiten in metallischen Festkörpern

#### - Austrittsarbeit W<sub>k</sub> =

(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_{\kappa} (Ru, Cs) = 2,1 eV
W_{\kappa} (Au) = 4,8 - 5,4 eV
```







### Austrittsarbeit & Ionisationspotenzial



#### Ionisationspotenzial von Atomen & Austrittsarbeit

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



### Photoeffekt – Wirkungsquerschnitt



# 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<sub>tot</sub> bei E<sub>γ</sub> ~ E<sub>b</sub> (Bindungsenergie des Elektrons)



#### Elektron

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

Schalenstruktur schwerer Atome wird sichtbar bei  $\sigma_{tot}$ (Photoeffekt)

### Photoeffekt – Wirkungsquerschnitt



#### Photoeffekt dominiert bei

- $\Rightarrow$  niedriges  $E_{\gamma}$
- ⇒ schwere Atomkerne
- 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





### Fun with Facts: Nachweis von X-Rays







# Photoeffekt – Wirkungsquerschnitt



### Photoeffekt dominiert bei

- $\Rightarrow$  niedriges  $E_{\gamma}$
- ⇒ schwere Atomkerne
- 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



Plastik-Szintillatoren (organ. Material C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>)



kaum/kein Photoeffekt da niedriges Z !



### Anwendung: Photomultiplier (PMT)



Nachweis von Szintillations<u>licht</u> (keine Gammas!) durch dünne Bialkali-Photokathode (~25% Effizienz bei λ = 400 nm)





### Photomultiplier (PMT)



Elektronenvervielfachung in der Dynodenkette (BeO, Mg-O-Cs), Verstärkung bis ~ 10<sup>8</sup>, Signal-Laufzeit im PMT τ ~ 40 ns



### Anwendungen: PMTs für v-Detektoren





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

Masatoshi Koshiba Nobelpreis 2002





### **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-Effekt

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

- Wellenlängen-Änderung dλ des Gammas\*:

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





gestreutes λ Elektron Elektron Gamma

nur der Streuwinkel  $\theta$  bestimmt Energieverlust des Gammas

kein Energieverlust  $\theta = 0^{\circ}$ 

 $\theta = 180^{\circ}$  maximaler Energieverlust

\*aus Energie- und Impulssatz (s. Haken-Wolf, S. 67)



### Compton-Effekt: Energieverteilungen

#### Compton-Streuung:

Streuwinkel θ legt kinematische
 Variable fest

- Energie  $E'_{\gamma}(\theta)$  des gestreuten Gamma-Quants:

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







#### **Gamma-Quelle:** Cs-137 Präparat emittiert Gammas



#### 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)





NaJ

PMT

### Compton-Streuung experimentell:

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



gestreutes Elektron deponiert seine Energie  $E'_{e}(\theta)$  im Szintillator

auslaufendes gestreutes Gamma mit kleinerer  $E'_{\gamma}(\theta)$ 



Energie des Elektrons für Streuwinkel θ

$$E_{e}'(\theta) = E_{\gamma} - E'_{\gamma}(\theta) = E_{\gamma}$$

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

Erv

### Compton-Streuung experimentell:

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



E<sub>YVN</sub>

NaJ

PMT

Compton-Streuung experimentell:



 $\mathsf{E}_{\gamma \mathcal{V}_{\mathcal{U}}}$ 



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



### Comptoneffekt – Wirkungsquerschnitt



Y. Nishina

#### Compton-Streuquerschnitt (Klein-Nishina)

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



#### Oskar Klein 10<sup>0</sup> Cs-137 K-40 Abschwächkoeffizient 10-1 (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) 10<sup>-2</sup> 10<sup>-3</sup> $\sigma \sim 1 / E_{\gamma}$ 10-4 10<sup>-2</sup> 10-3 10-1 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>1</sup> 104 Gamma-Energie (MeV)

### Comptoneffekt – Winkelverteilung



#### Winkelverteilung als Funktion der γ-Energie





# EINSTEIN SIMPLIFIED 3 4 11/1VIIN 1111 s.hakis