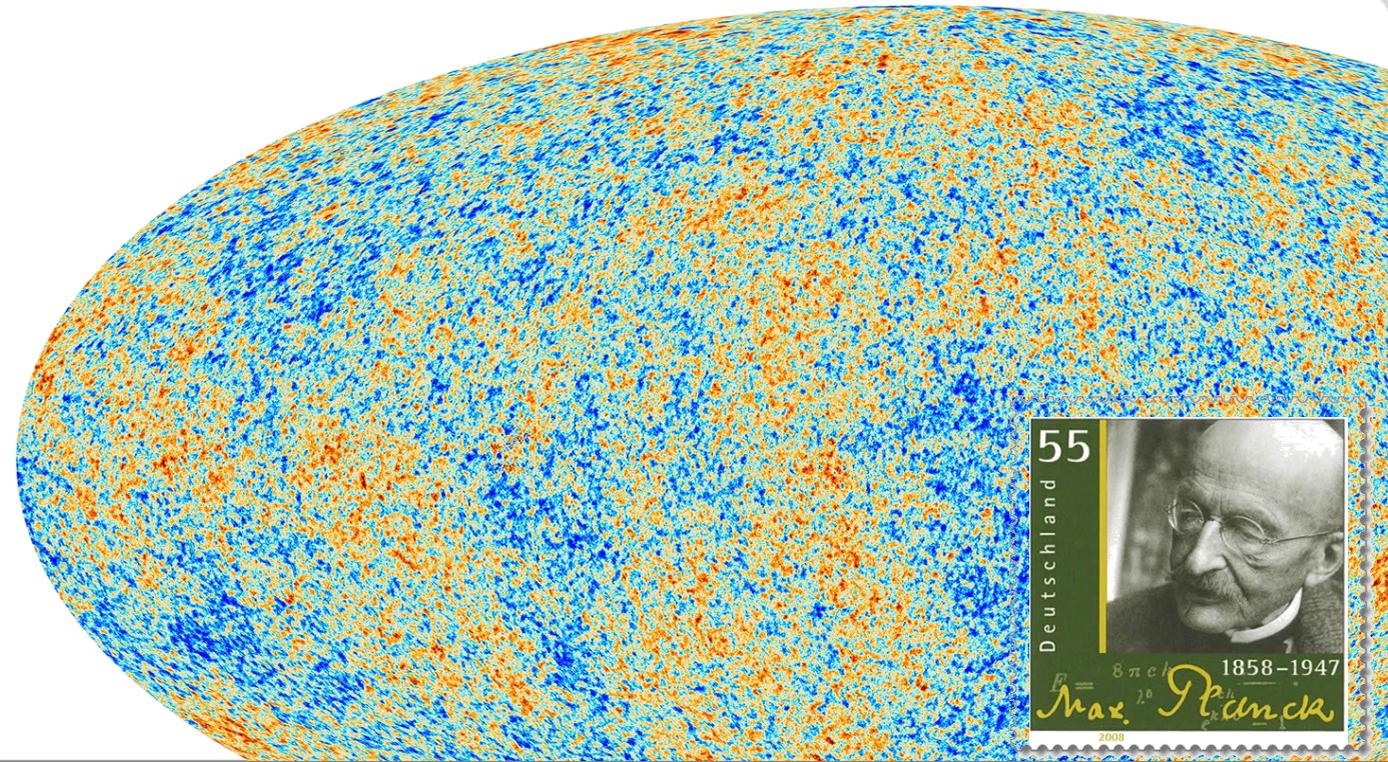


# Atome & Kerne

Sommersemester 2019  
Vorlesung # 4, 02.05.17



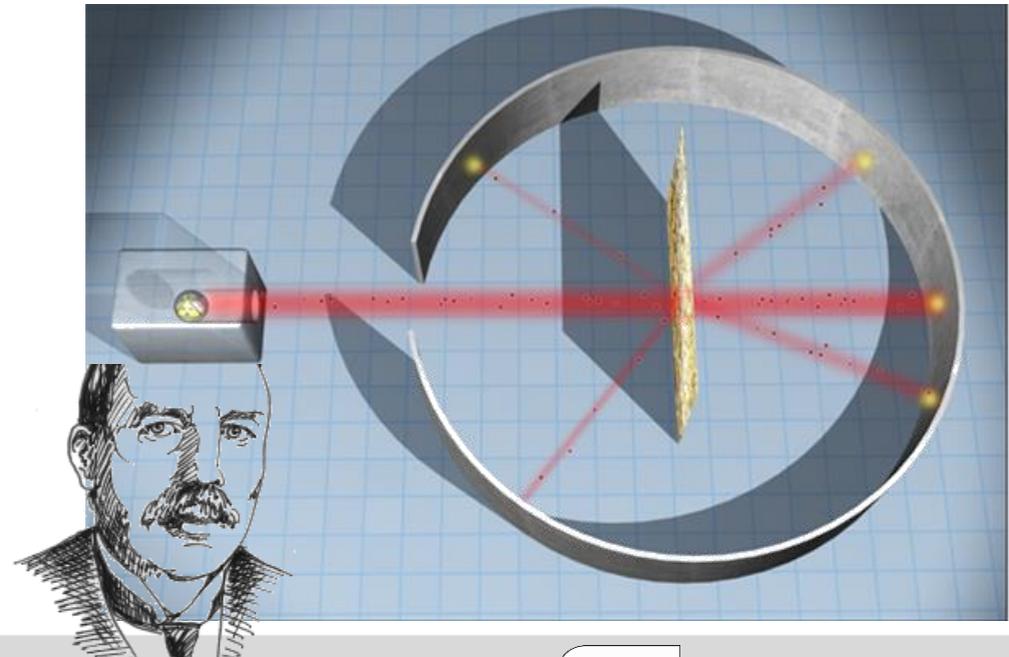
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

## Experimentelle Grundlagen – Atome

- Rutherford-Streuung & Atommodell
- Wirkungsquerschnitt (Grundlagen)

## Teilchen-Welle Dualismus

- Eigenschaften von Photonen
- schwarzer Strahler
- Planck-Verteilung

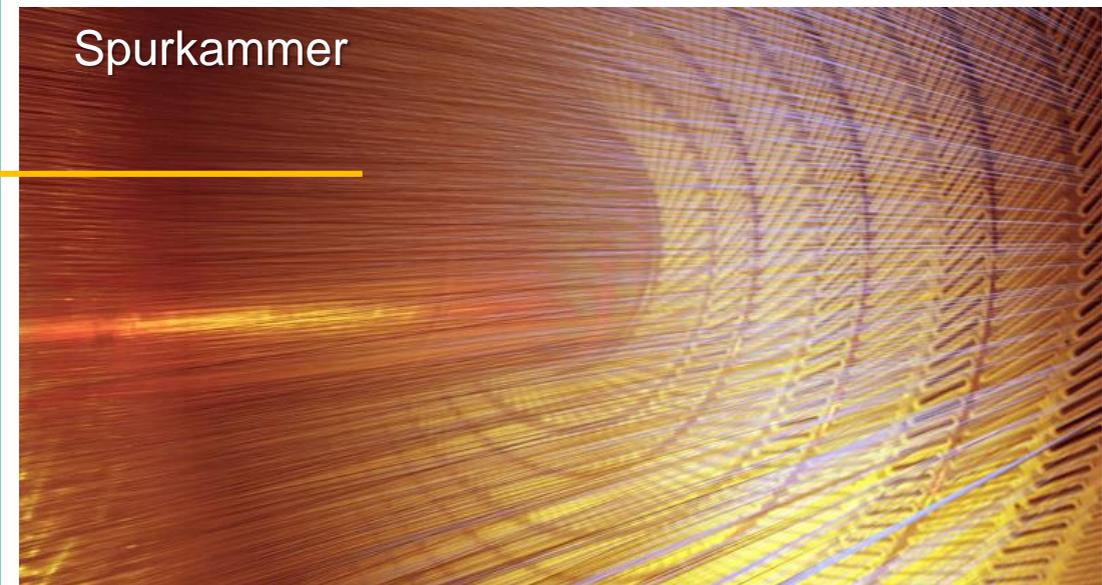
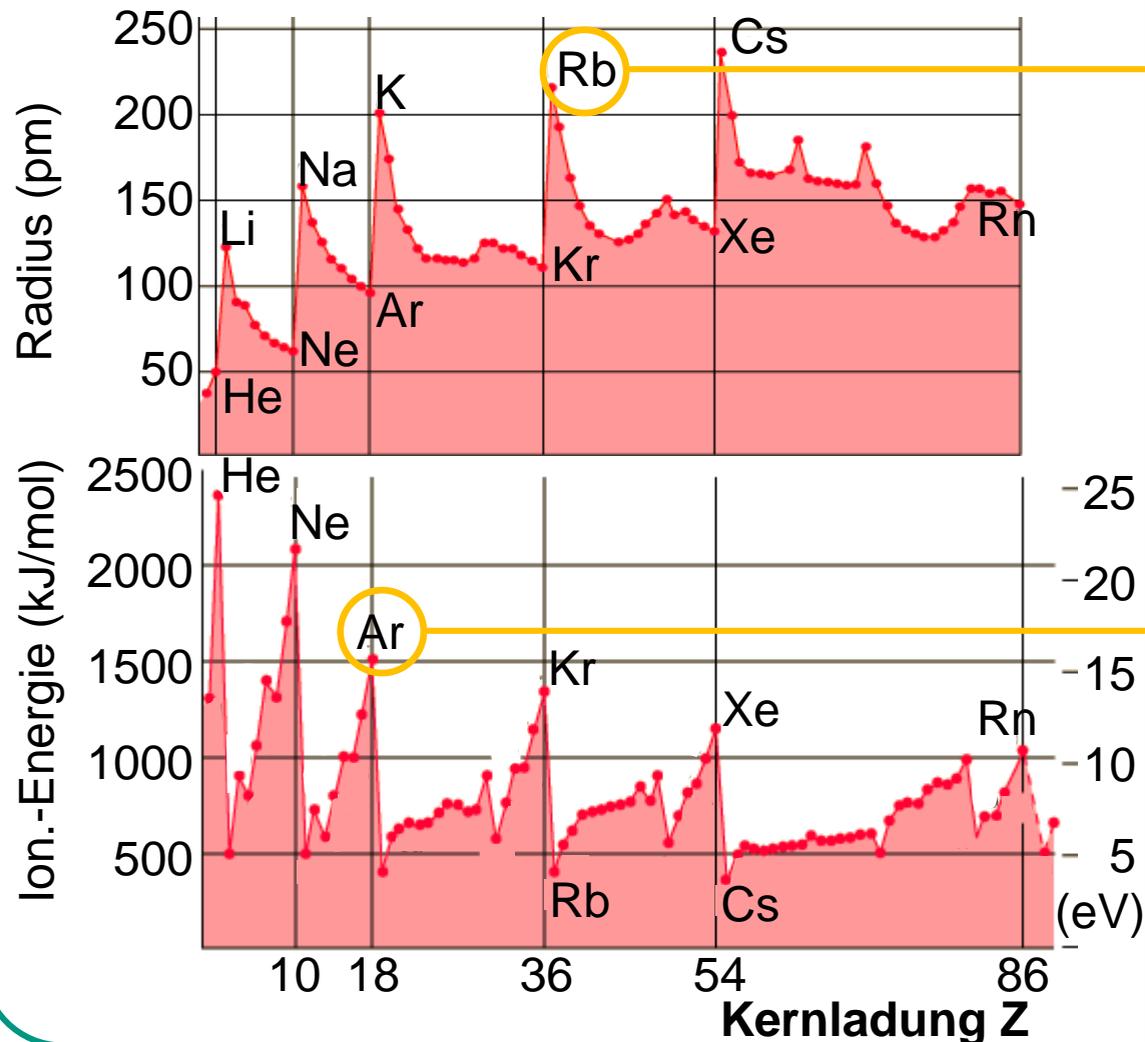


# Atome – Eigenschaften & Anwendungen



■ Atom-Eigenschaften ⇒ Rydberg-Zustände Detektorauslegung

## ■ Atome: Größe & Ionisationsenergie



# Streuexperimente & Struktur der Materie



1908: Rutherford  
Atomkern

$\alpha$ -Teilchen

1956: Hofstadter  
Größe des Protons

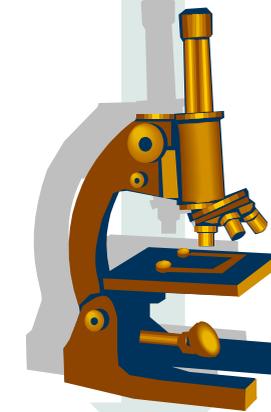
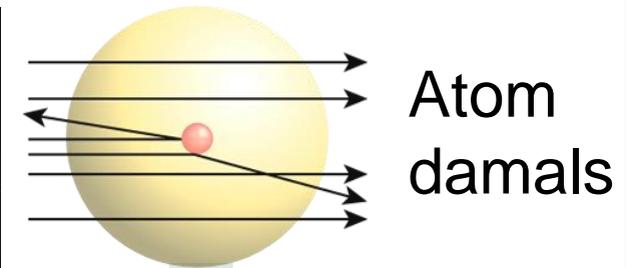
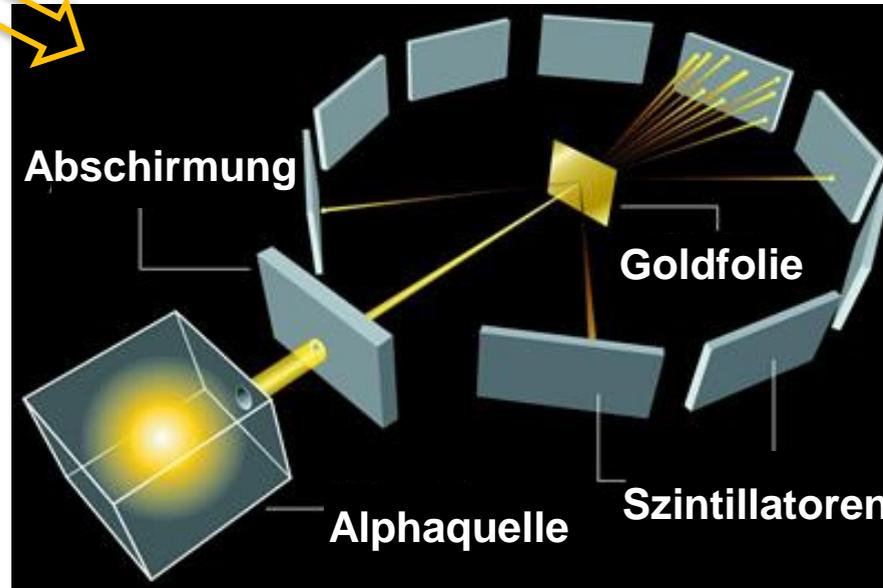
Elektronen

1962: Kendall et al.  
Entdeckung Quarks

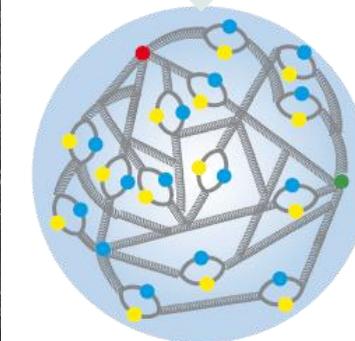
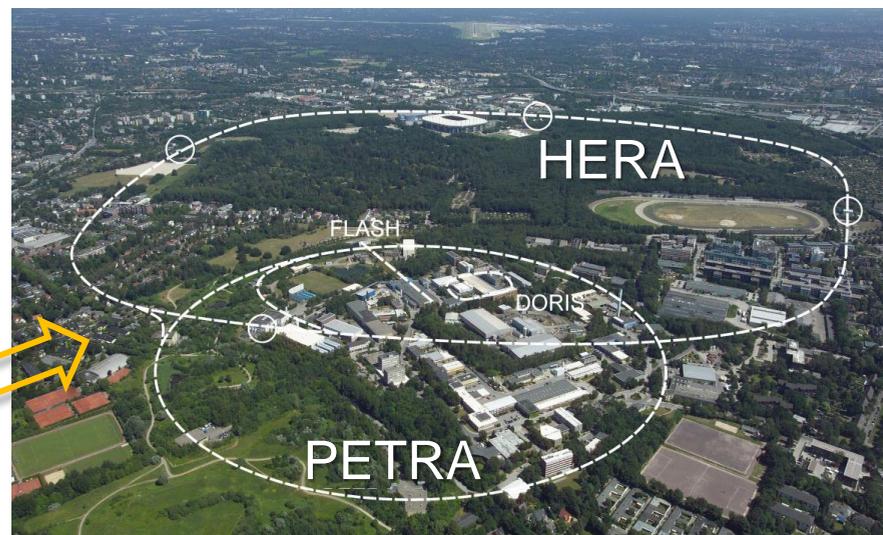
Elektronen

1992: HERA  
(DESY)  
Aufbau Proton

Elektronen, Myonen



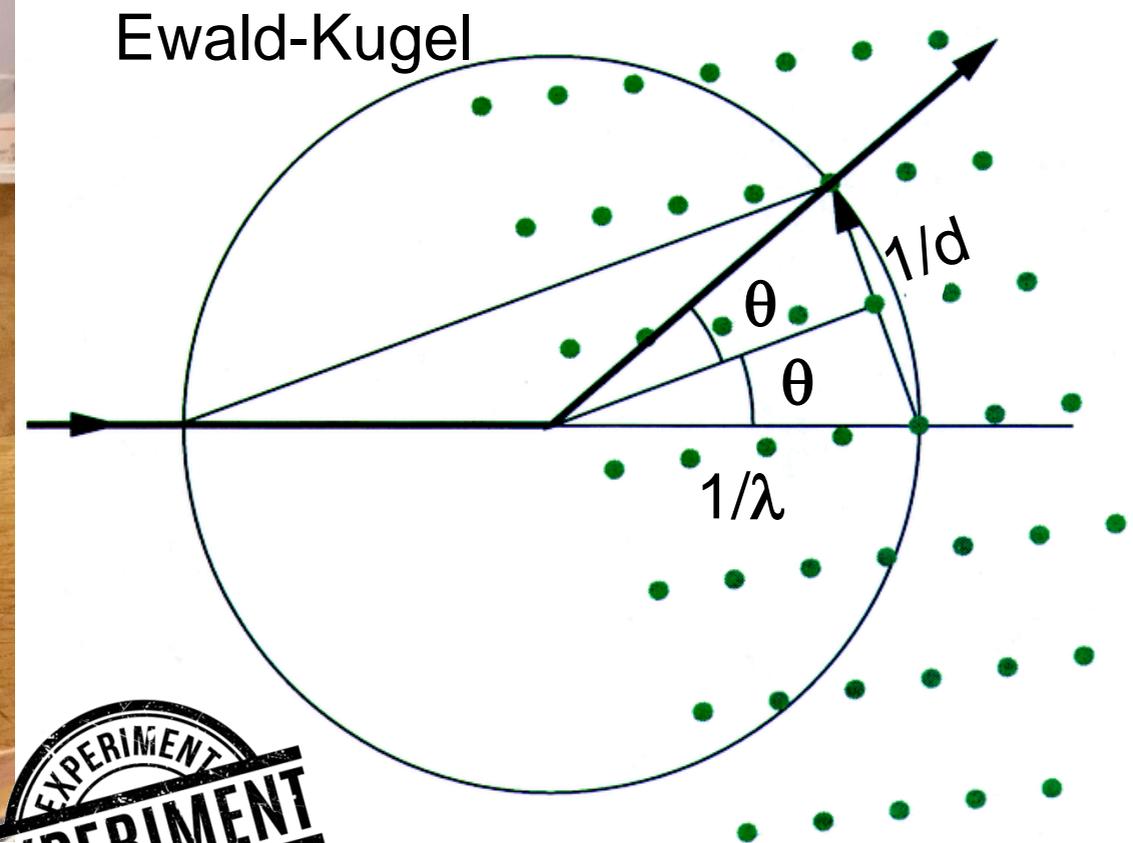
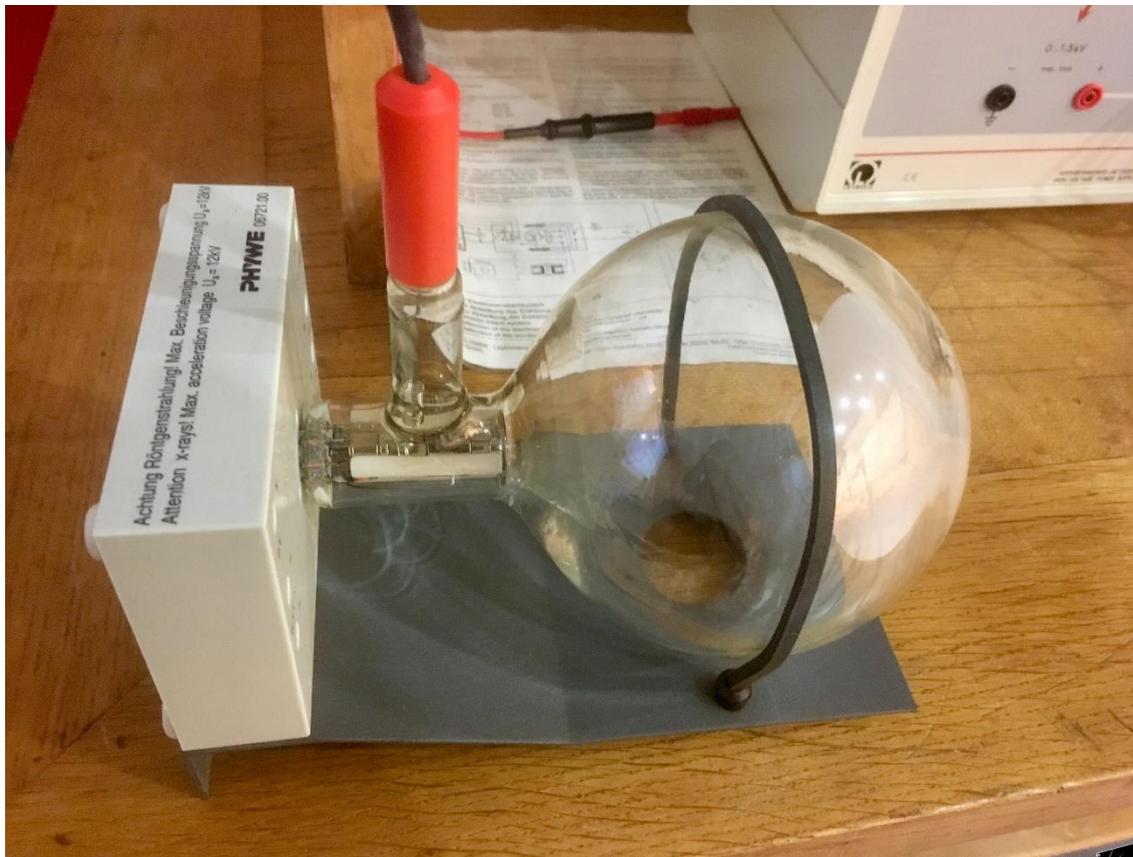
Faktor  
~10000



Proton  
heute

## ■ Röntgenbeugung

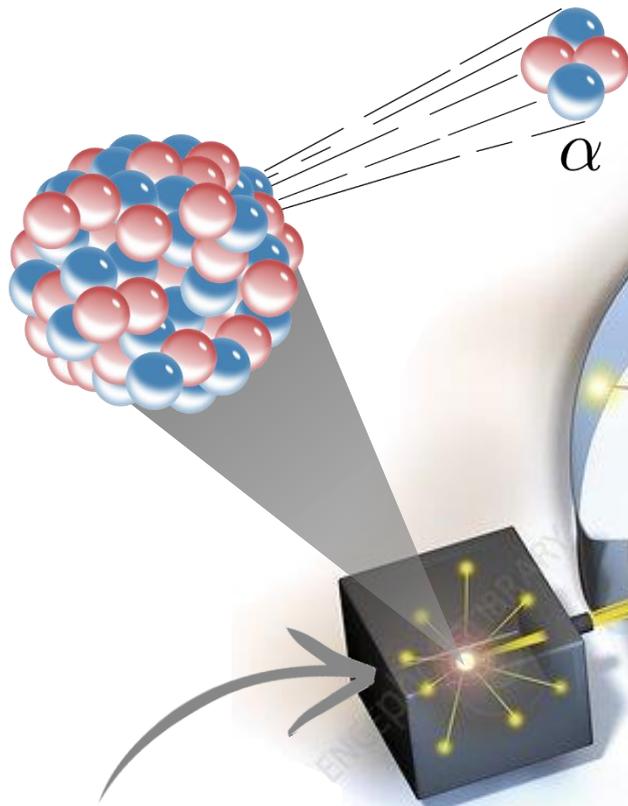
- Elektronen erzeugen Röntgenstrahlung über Abbremsung (Bremsstrahlung) (hier:  $U_{\max} = 12 \text{ kV}$ )
- Röntgenstrahlung zur Ausmessung der **Kristallstruktur** (s. Physik 6)



# Rutherford-Streuung & die Atom-Struktur

- **1909:** Rutherford, Geiger und Marsden untersuchen in Manchester die **Streuung von  $\alpha$ -Teilchen** ( $^4\text{He}$ -Kerne) an sehr dünnen Goldfolien

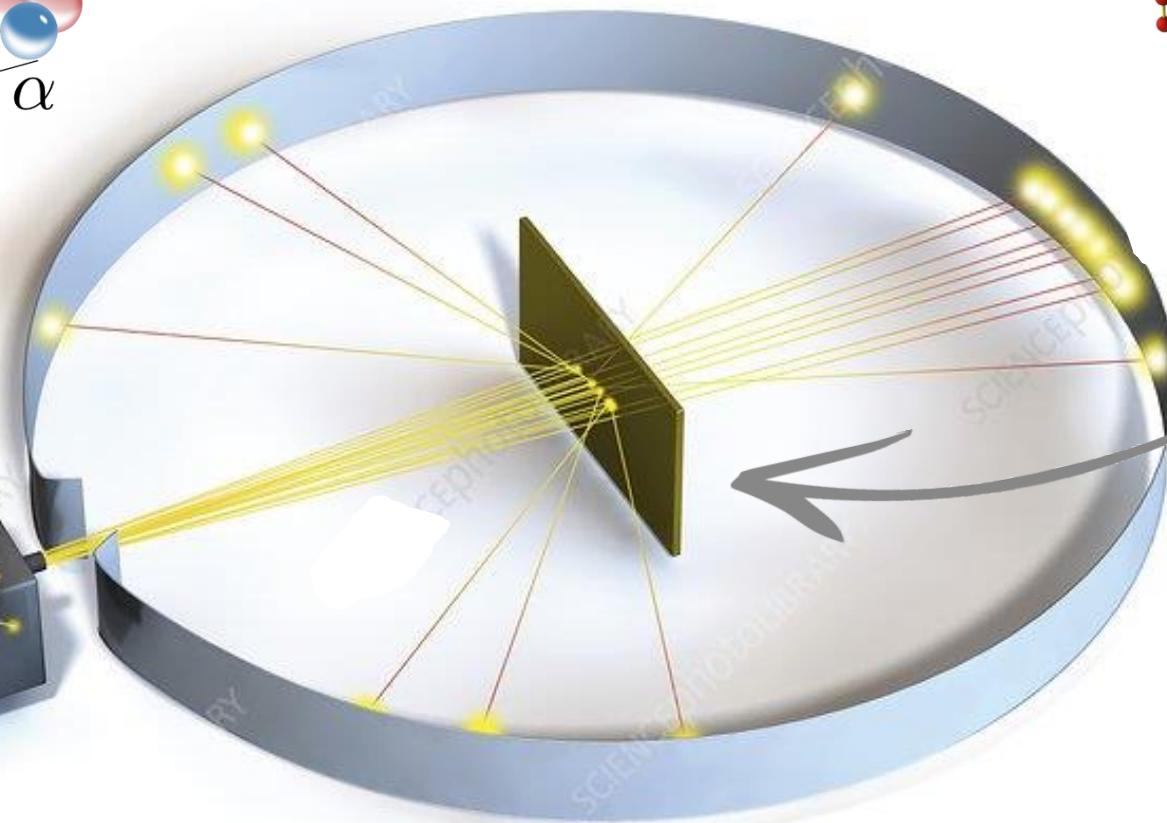
„Beschleuniger“



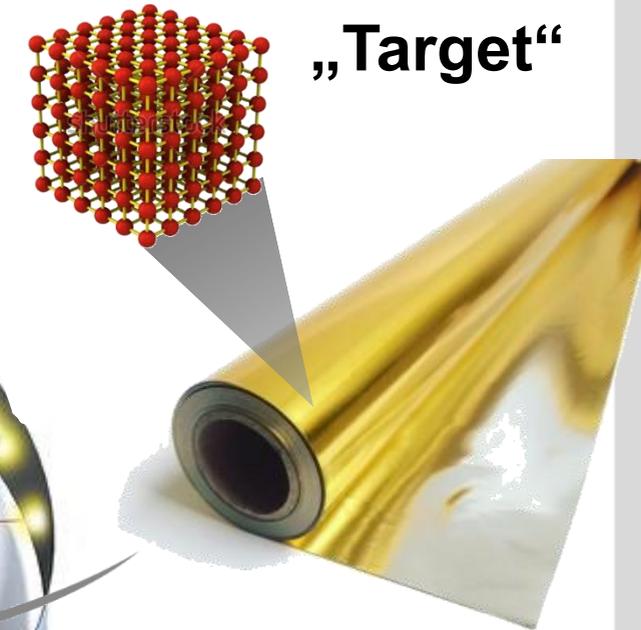
Ra-Quelle mit

$$E_{\text{kin}}(\alpha) = 4,78 \text{ MeV}$$

„Nachweis“  
ZnS-Szintillator



„Target“



dünne Au-Folie

$$Z = 79$$

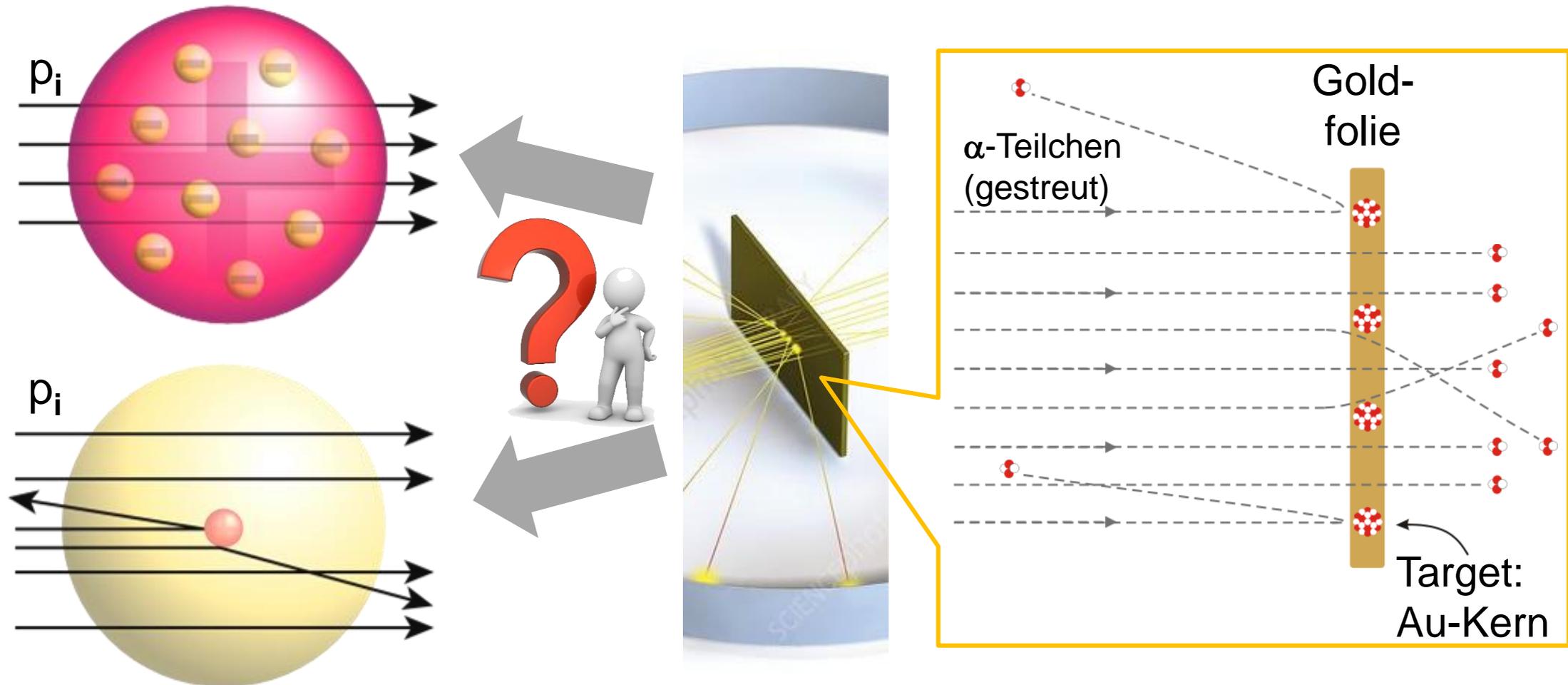
$$d = 2000 \text{ Atomlagen}$$

# Rutherford-Streuung & die Atom-Struktur

## ■ Ziel: experimentelle Winkelverteilung der gestreuten $\alpha$ -Teilchen

↪ Rückschlüsse über Struktur des Streuzentrums (Atomkern)

⇒ **Test verschiedener Atommodelle:** Thomson vs. Rutherford



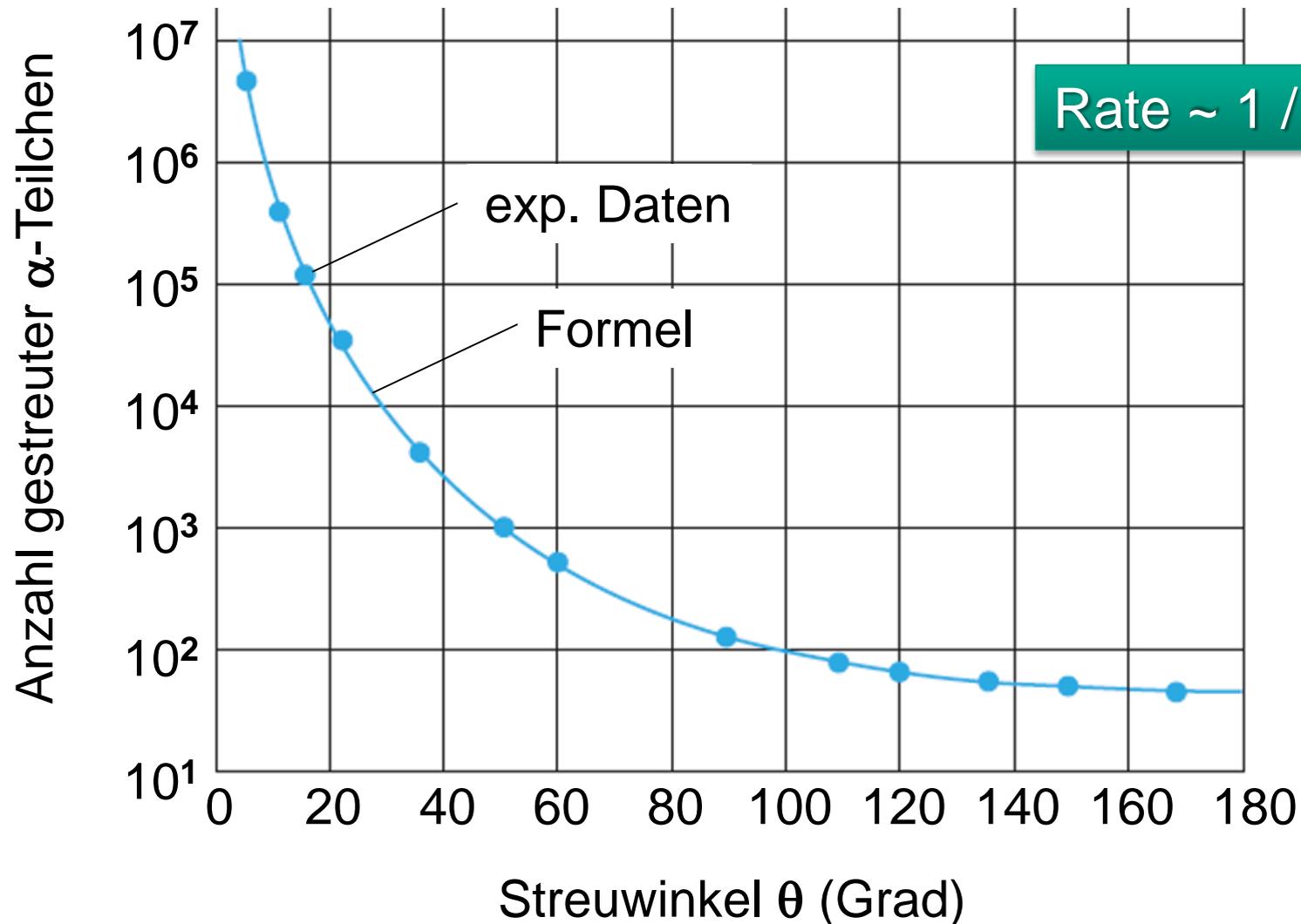
# Rutherford-Streuung & die Atom-Struktur

## ■ Resultate: experimentelle Winkelverteilung der gestreuten $\alpha$ -Teilchen

↪ Ereignisse mit großen Streuwinkeln (bis zu  $180^\circ$ )



★ **VERY** ★  
**IMPORTANT**



„Rutherford-Streuformel“



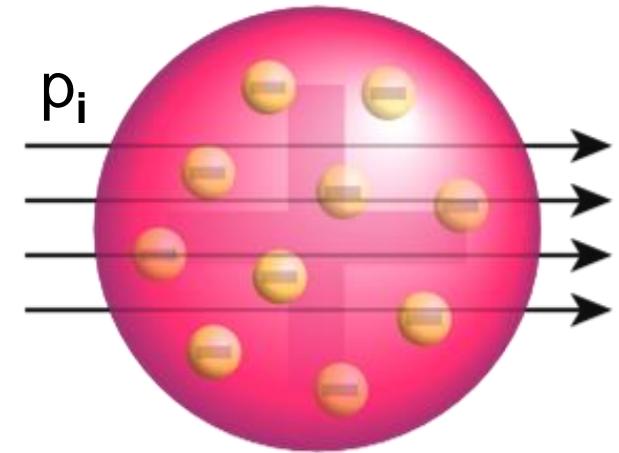
- **Atom-Modell von JJ Thomson (1904):** Elektronen in einer Kugel aus gleichmäßig verteilter positiver Ladung (**Rosinenkuchen-Modell**)

## $\alpha$ -Streuung an leichten Elektronen

- $\alpha$ 's können nur an Elektronen streuen, diese interagieren als gleichmäßig verteilte Ladungen,  
⇒ **keine** Rückstreuung von  $\alpha$ 's

$$\frac{m_e}{m_\alpha} \approx 10^{-4} \quad \text{maximaler Impulstransfer } \Delta p \sim 10^{-4} p_i$$

**nur sehr kleine Streuwinkel  $\Theta \sim 0^\circ$**



J. J. Thomson  
**Entdecker des Elektrons**  
Nobelpreis 1906



$$m_\alpha = 4 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_e = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_{\text{Au-197}} = 197 \text{ GeV}/c^2$$



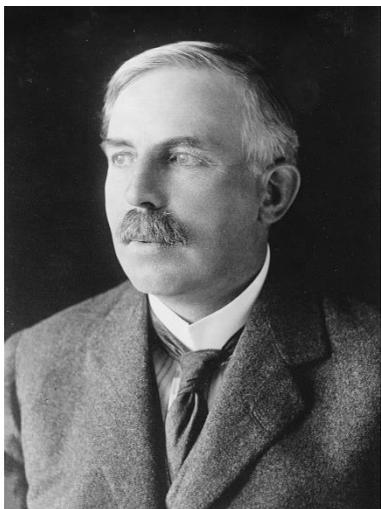
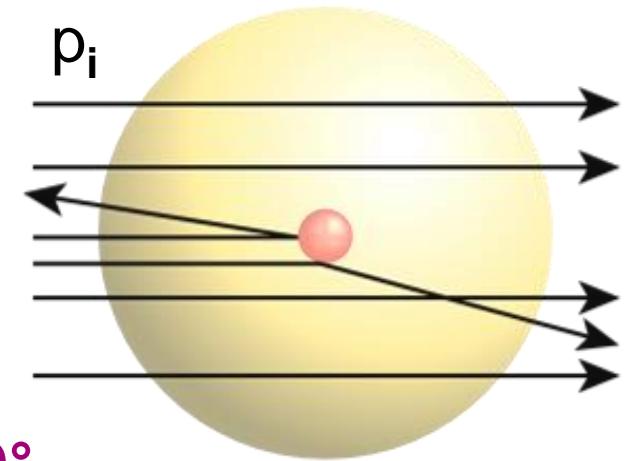
# Atommodell-2: Atomkern von Rutherford

- **Atom-Modell von Lord Rutherford (1904):** Elektronen (in der Atom-Hülle) umkreisen einen quasi-punktförmigen Atomkern

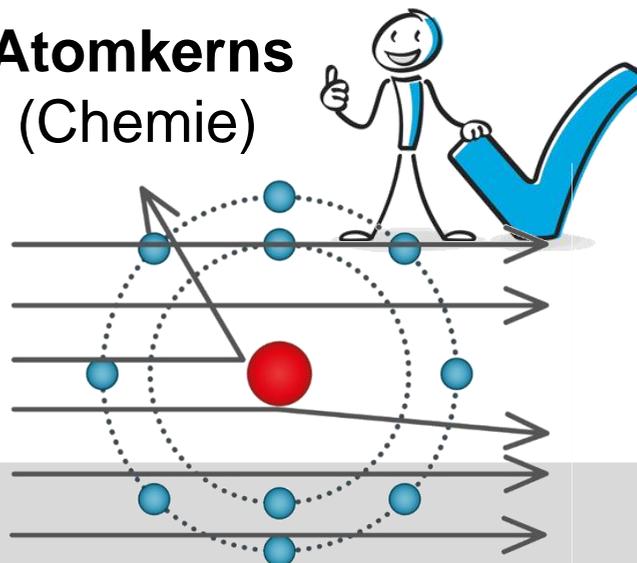
## $\alpha$ -Streuung an schweren Gold-Kernen

- **positive Ladungen nur im Kern lokalisiert,**  
⇒ Rückstreuung von  $\alpha$ 's am Coulomb-potenzial des Gold-Kerns mit  $A = 197$

$\frac{m_{Au-197}}{m_\alpha} \approx 50$  maximaler Impulstransfer  $\Delta p \sim 2 \cdot p_i$   
**auch große Streuwinkel bis  $\Theta_{max} \sim 180^\circ$**



Lord Rutherford  
**Entdecker des Atomkerns**  
Nobelpreis 1908 (Chemie)



$m_\alpha = 4 \text{ GeV}/c^2$   
 $m_e = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$   
 $m_{Au-197} = 197 \text{ GeV}/c^2$

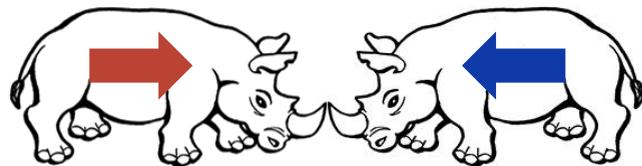
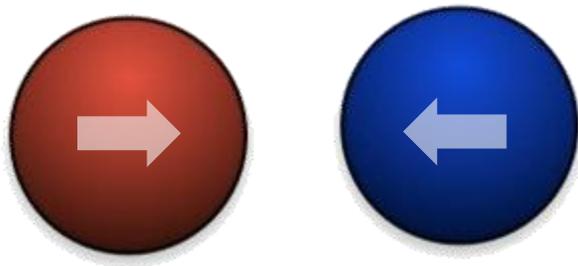


■ Frage: wann erreiche ich einen sehr hohen Impulstransfer bei einem Stossprozeß? Die Massen der Stoßparameter...

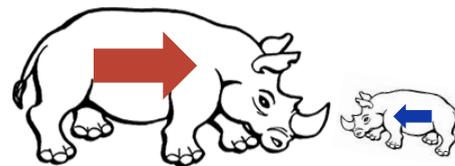
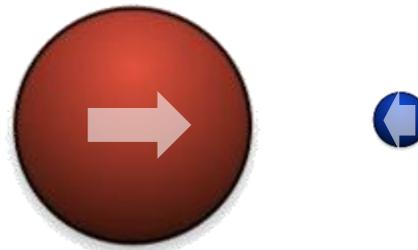
- A) ... sind gleich groß!
- B) ... sind möglichst verschieden groß!
- C) ... spielen kaum eine Rolle (Hauptsache: zentral)!

SHELDON COOPER  
presents  
**FUN** WITH ~~FLAGS~~  
Facts

A



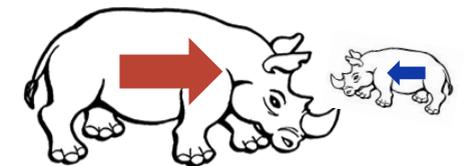
B



C

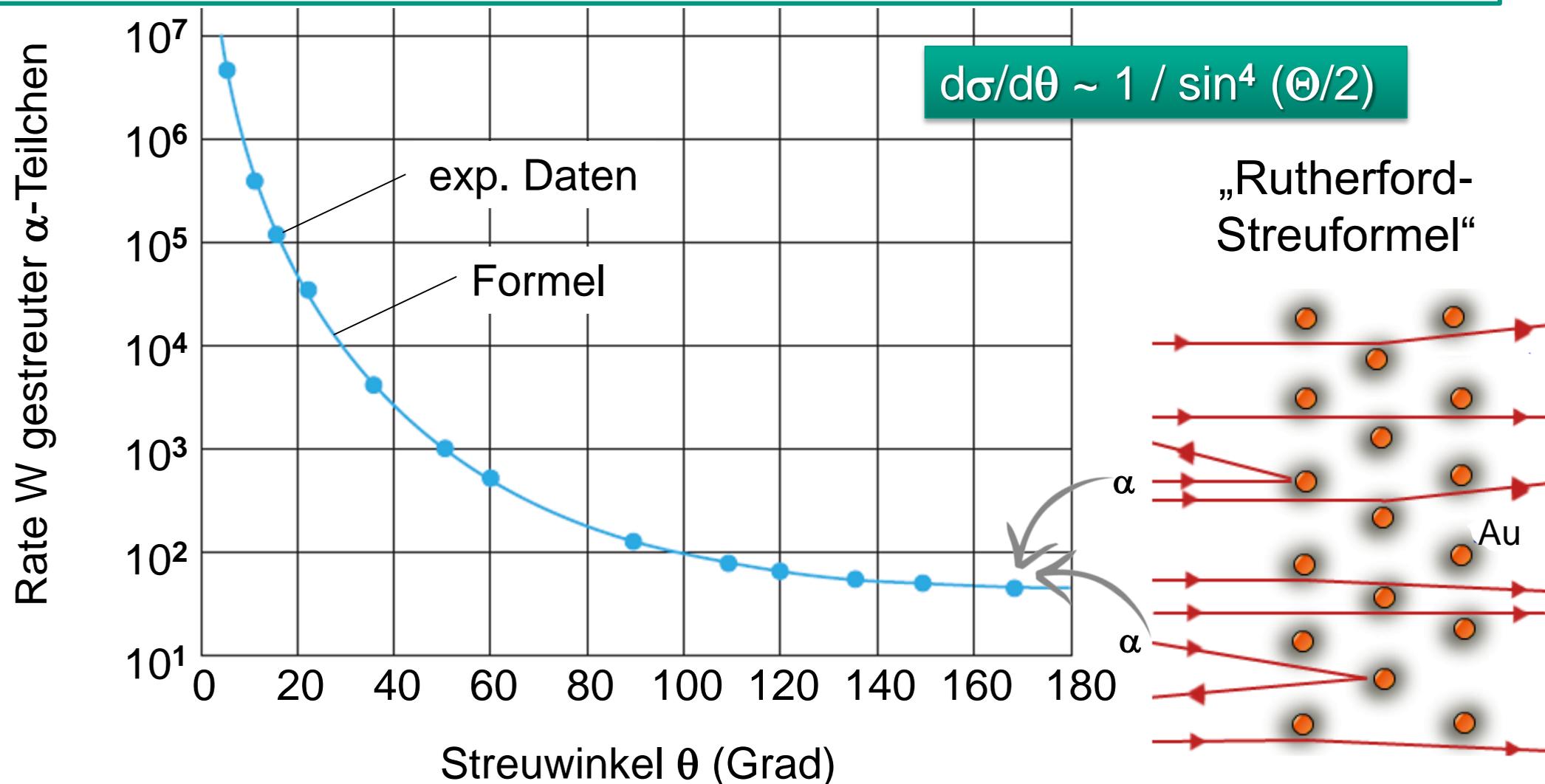
ACH, EGAL

Hauptsache zentral



# Rutherford-Streuquerschnitt

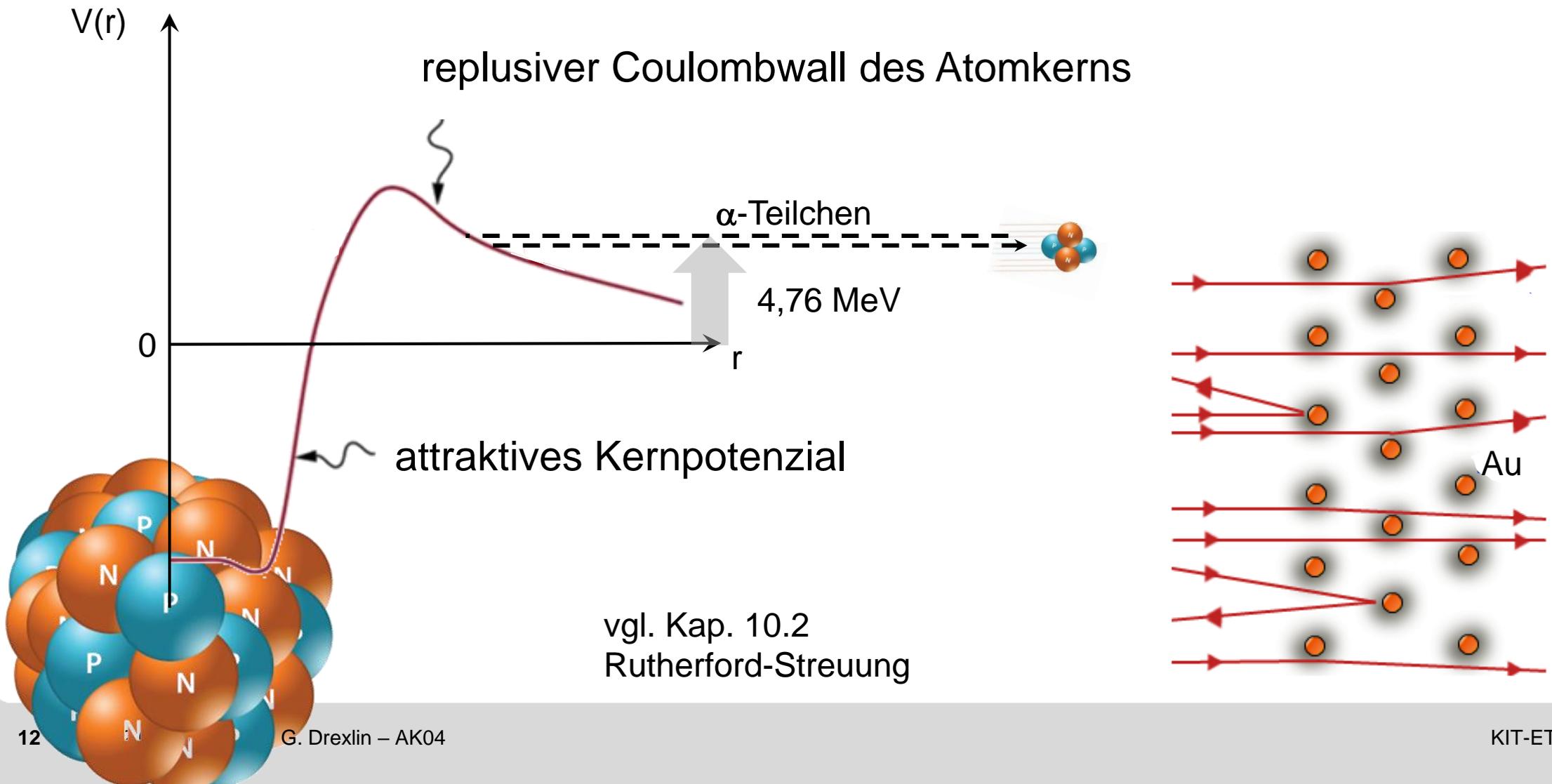
- **Differentieller Wirkungsquerschnitt  $d\sigma/d\theta$** : Rate  $W$  der unter einem bestimmten Streuwinkel  $\theta$  gestreuten Teilchen (hier:  $\alpha$ -Teilchen), wichtig: dünnes Target, nur Einzelstreuung, keine Mehrfachstreuung



# Rutherford-Streuquerschnitt

## ■ Differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\theta$ :

$\alpha$ -Teilchen können nicht bis zum Kernvordringen, trotz  $E_{\text{kin}} = 4,76 \text{ MeV}$   
 $\alpha$ -Teilchen werden nicht absorbiert, keine Kernfusion



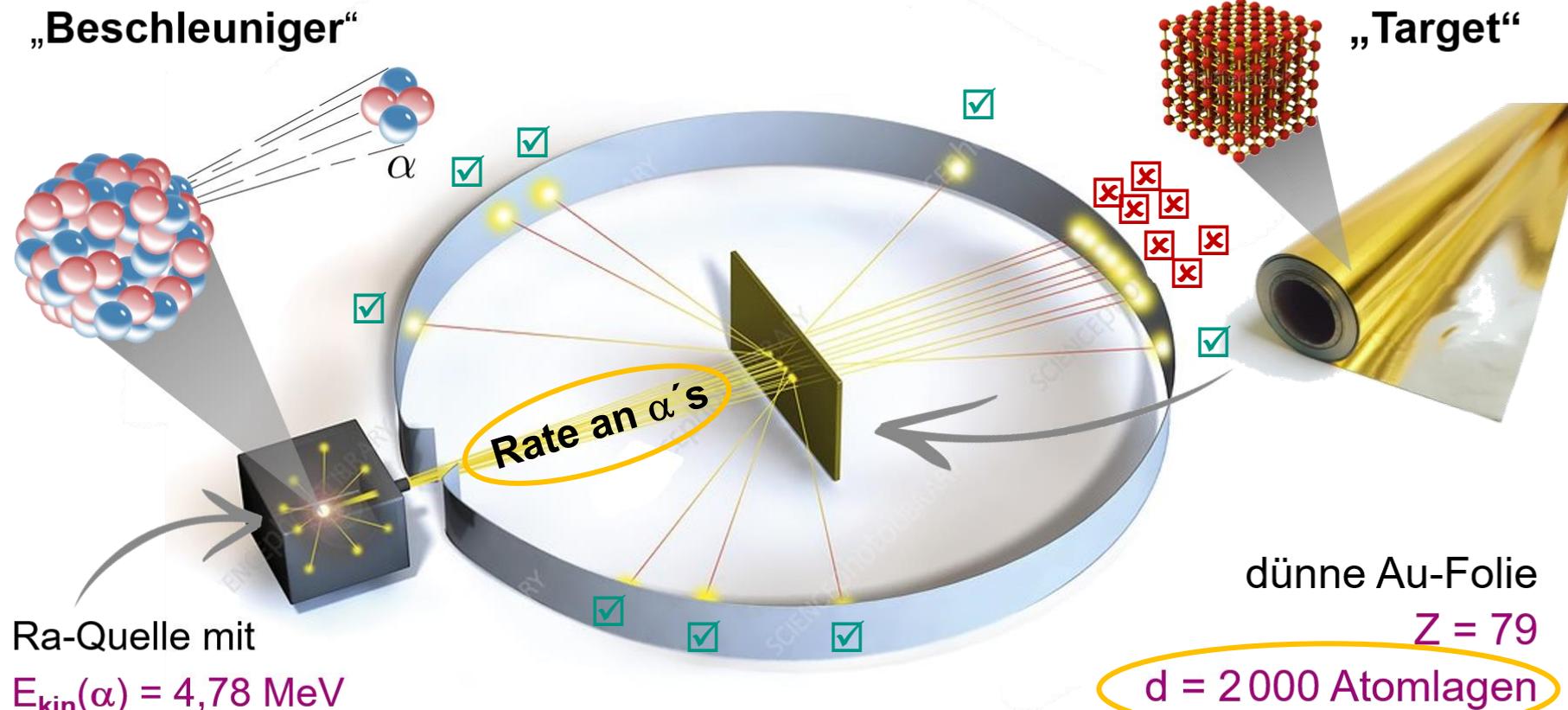
# Wirkungsquerschnitt

## ■ Totaler Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{tot}}$

$\sigma_{\text{tot}}$  = ein Mass für Wahrscheinlichkeit einer (Streu-)Reaktion

$\sigma_{\text{tot}} \sim$  Gesamtrate an Streuereignissen / s

ungestreute  $\alpha$ -Teilchen



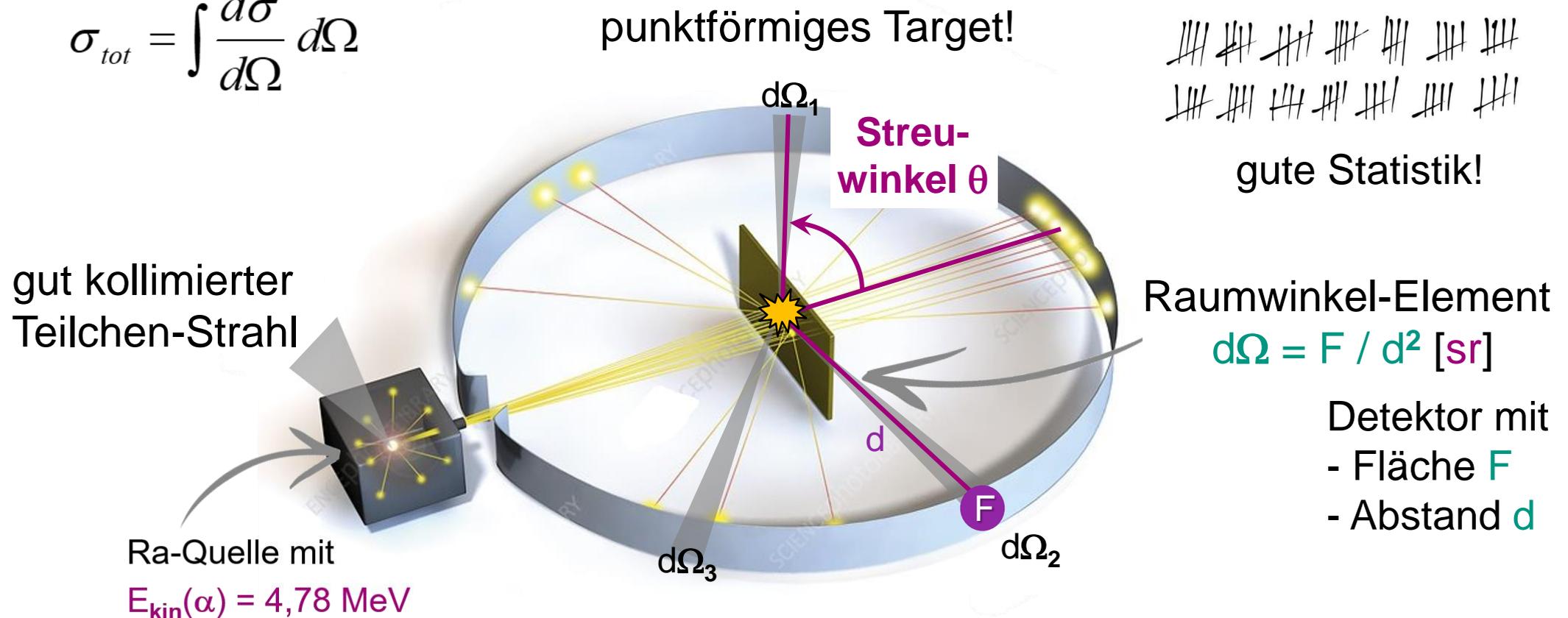
# Wirkungsquerschnitt - differentiell

## ■ differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$

$d\sigma/d\Omega$  = ein Mass für Wahrscheinlichkeit einer winkelabhängigen (Streu-)Reaktion in das Raumwinkelement  $d\Omega$

## $\sigma_{tot}$ aus Integration des differentiellen Wirkungsquerschnitts

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

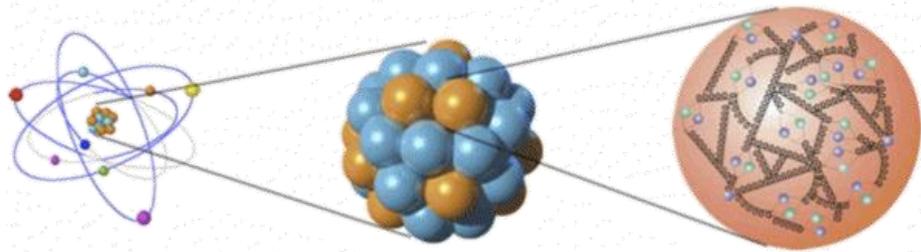


# Wirkungsquerschnitt - differentiell

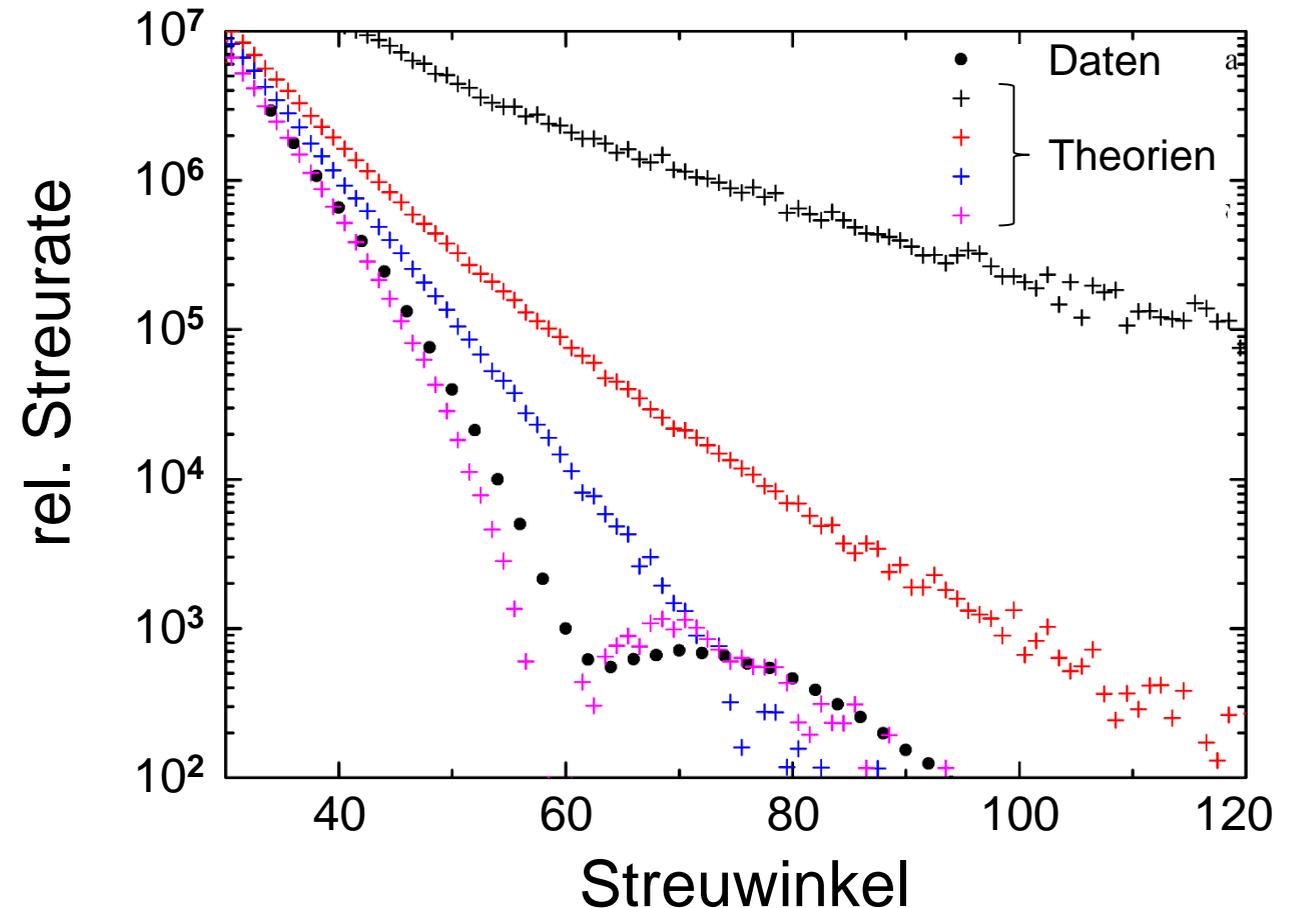
## ■ differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$

$d\sigma/d\Omega$  = experimentelle Daten lassen durch Vergleich mit Theorie Rückschlüsse zu auf das **Streupotenzial** (z.B. Coulombfeld)

$d\sigma/d\Omega$  wichtig für die Aufklärung der Struktur von Atomen/Kernen



Was ist die Einheit eines totalen/differentiellen Wirkungsquerschnitts?



# Freie Weglänge & Wirkungsquerschnitt

## ■ Mittlere freie Weglänge $\lambda$ [in cm]:

durchschnittliche Weglänge eines Teilchens im Target für eine Reaktion

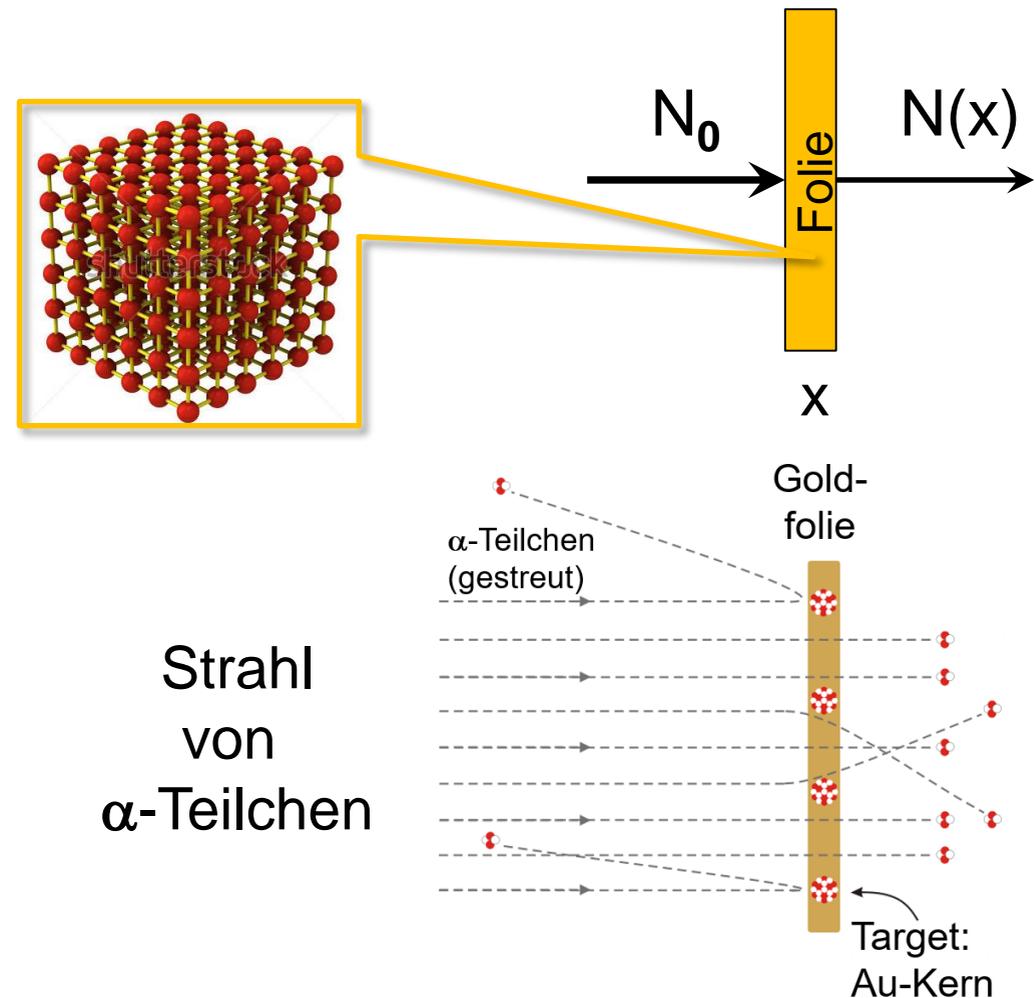
$$N(\lambda) = N(0) \times (1/e) \quad [\Rightarrow 1/e \text{ der Teilchen noch ohne Stoßprozess}]$$

$$\lambda = \frac{1}{n_{\text{Target}} \cdot \sigma_{\text{tot}}}$$

[cm] (pointing to  $\lambda$ )  
[cm<sup>-3</sup>] (pointing to  $n_{\text{Target}}$ )  
[cm<sup>2</sup>] (pointing to  $\sigma_{\text{tot}}$ )

$\sigma_{\text{tot}}$ : **Wirkungsquerschnitt**  
mit Einheit [Fläche]:

$n_{\text{Target}}$



# Freie Weglänge & Wirkungsquerschnitt

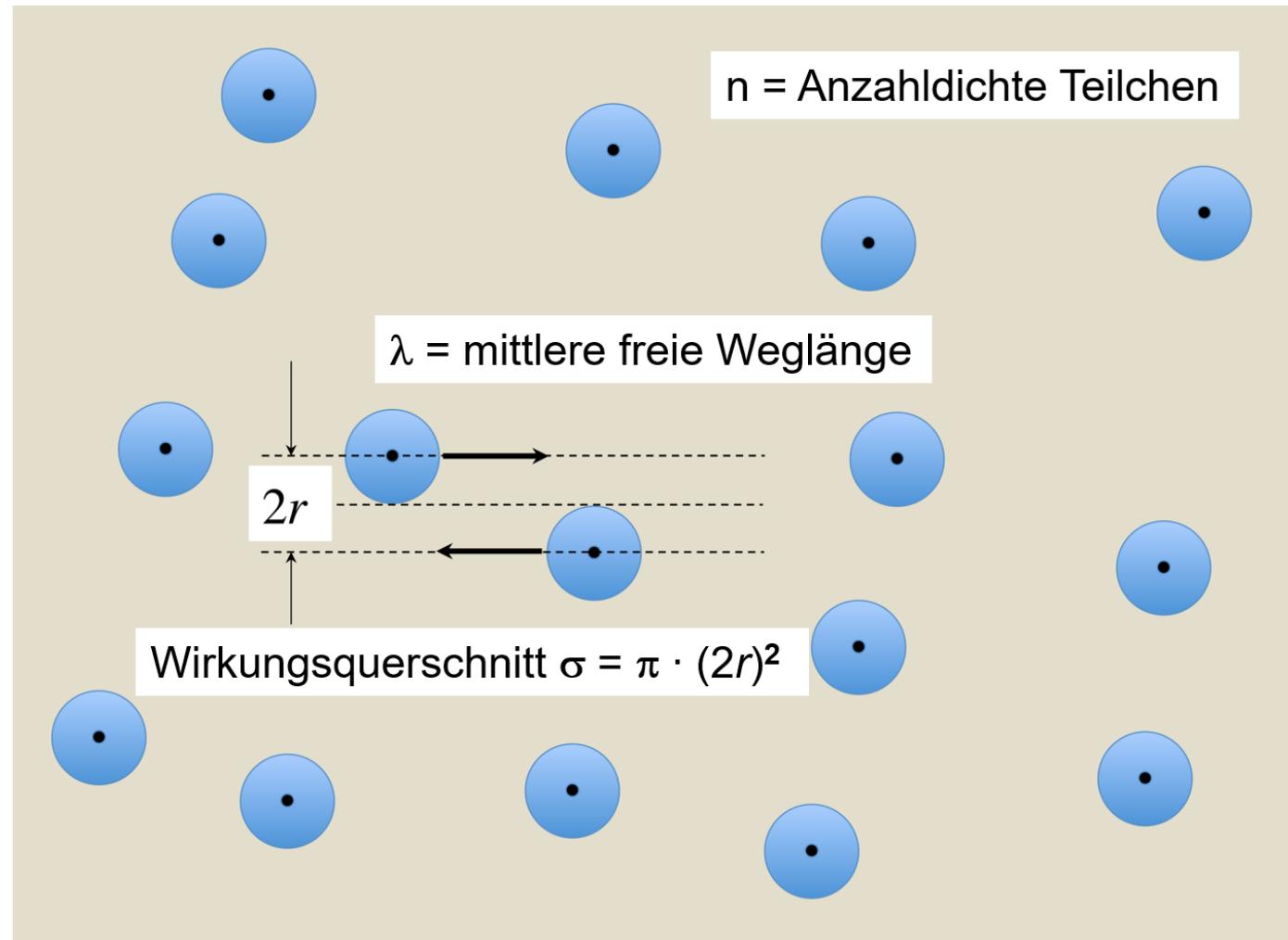
- Beispiel: Stoßprozesse von Gasteilchen (harte Kugel mit Radius  $r$ ) - **Wirkungsquerschnitt  $\sigma$**  ist verknüpft mit ihrer **geometrischen Größe**
  - hier  $\sigma_{\text{tot}} = \pi \cdot (r+r)^2$

$[cm^2]$

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{1}{n_{\text{Target}} \cdot \lambda}$$

$[cm^{-3}]$        $[cm]$

**Kontaktwechselwirkung:**  
Stoß, sobald die Kugeln  
sich berühren



# Freie Weglänge & Wirkungsquerschnitt

- Beispiel: Stoßprozesse von Billardkugeln (harte Kugel mit Radius  $r$ ) - **Wirkungsquerschnitt**  $\sigma$  ist verknüpft mit ihrer **geometrischen Größe**
  - hier  $\sigma_{tot} = 4 \pi \cdot r^2$  ( $\sim$  Kreisfläche der Billard-Kugel:  $\pi \cdot r^2$ )

$[cm^2]$

$$\sigma_{tot} = \frac{1}{n_{Target} \cdot \lambda}$$

$[cm^{-3}]$   $[cm]$



**Kontaktwechselwirkung:**  
Stoß, sobald die Kugeln  
sich berühren



# Wirkungsquerschnitt

## ■ Totaler Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{tot}}$

$\sigma_{\text{tot}}$  = ein Mass für Wahrscheinlichkeit einer (Streu-)Reaktion

$\sigma_{\text{tot}} \sim$  Gesamtrate an Streuereignissen / s

- Einheit des Wirkungsquerschnitts  $\sigma_{\text{tot}}$  [Fläche]:

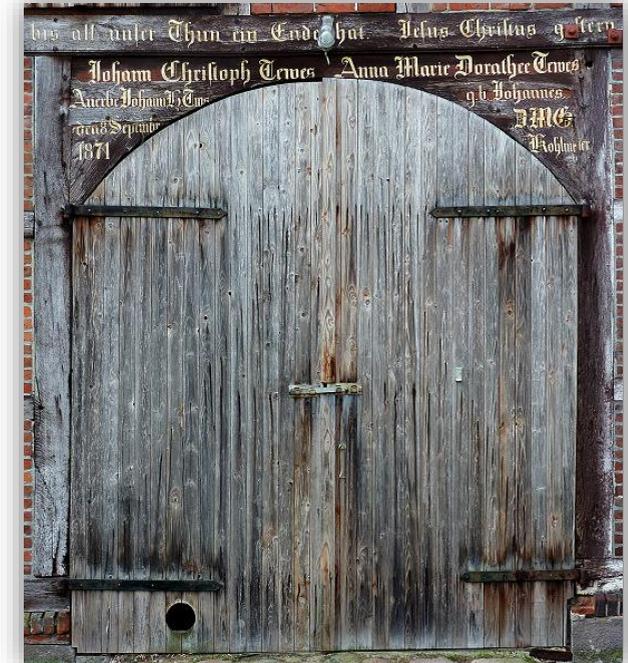
$$1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ Mb} = 10^{-18} \text{ cm}^2$$

- Größe von  $\sigma_{\text{tot}}$  ist abhängig von Target:  
(Atom [pm], Kern & Nukleon [fm])  
& der Art der Wechselwirkung  
(z.B. elektromagnetisch, stark, ...)

[ barn = Scheunentor ]

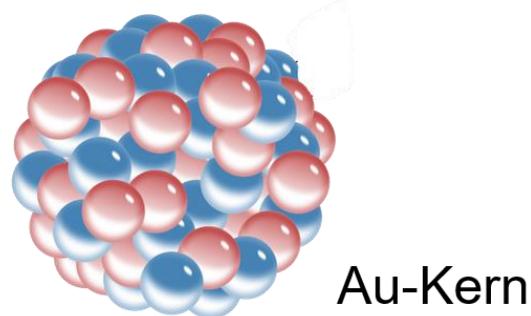
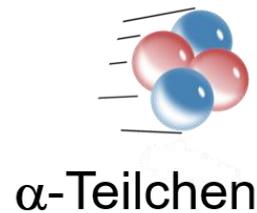


# Geometrischer Wirkungsquerschnitt

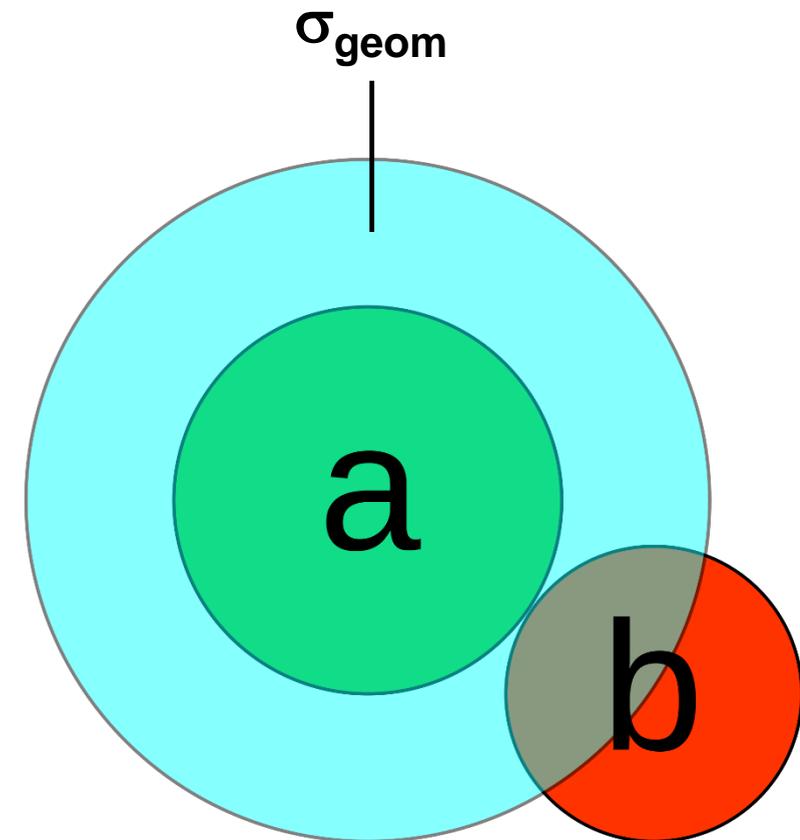
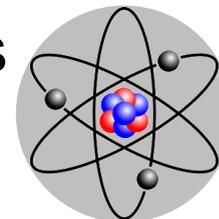
- Beispiel: Stoßprozesse unterschiedlich großer Teilchen (s. Rutherford)
  - harte Kugeln mit Radien  $r = R_a$  und  $r = R_b$
  - Reaktion erfolge, sobald sich beide Kugeln berühren

- Bestimmung der (blauen) Trefferfläche = Kreisfläche mit  $A = \pi \cdot (R_a + R_b)^2$

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



- falls  $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{tot,geom}}$   
Reaktion erfolgt, wenn Projektil das Target (Atom, Kern, Nukleon) trifft  
**Target = schwarze Scheibe**



# Wirkungsquerschnitte von Atomen/Kernen

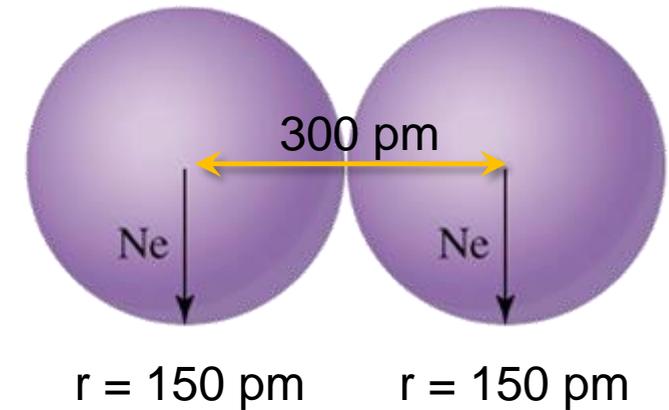
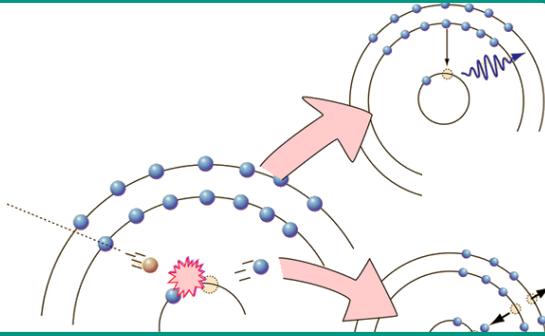
## ■ Totaler Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{tot}}$

### Atom-/Molekülphysik:

$$1 \text{ Mb} = 10^{-18} \text{ cm}^2$$



$$1 \text{ kb} = 10^{-21} \text{ cm}^2$$



Beispiel: Neonatom-Neonatom-Stöße

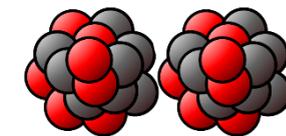
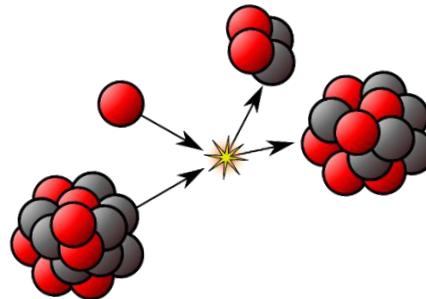
$$\sigma_{\text{tot,geom}} = \pi \cdot (300 \text{ pm})^2 = 2,827 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2 = 2827 \text{ Mb}$$

### Kernphysik:

$$1 \text{ kb} = 10^{-21} \text{ cm}^2$$



$$1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2$$



$$r = 2,585 \text{ fm} \quad r = 2,585 \text{ fm}$$

Beispiel: Neonkern-Neonkern-Stöße

$$\sigma_{\text{tot,geom}} = \pi \cdot (2 \cdot 2,585 \text{ fm})^2 = 0,84 \text{ barn}$$

# Wirkungsquerschnitte der Astrophysik

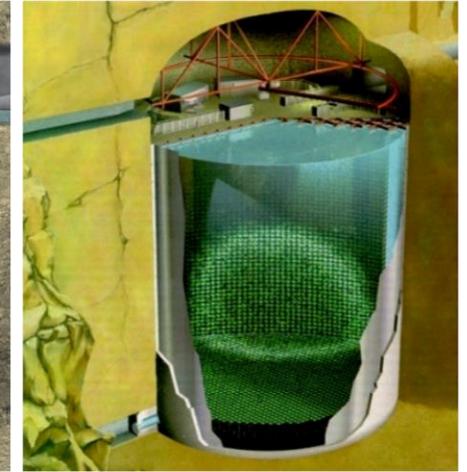
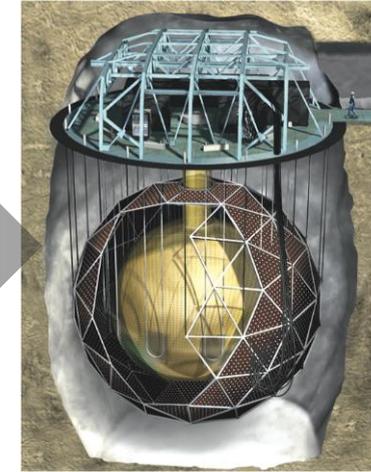
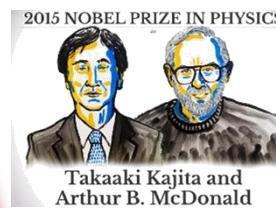
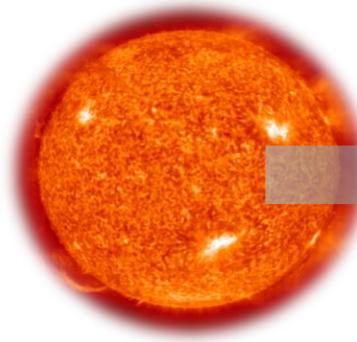
## ■ Totaler Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{tot}}$

### Neutrino-physik:

Sonnenneutrinos

$$= 10^{-41} \text{ cm}^2$$

~ 1 Ereignis / Tag

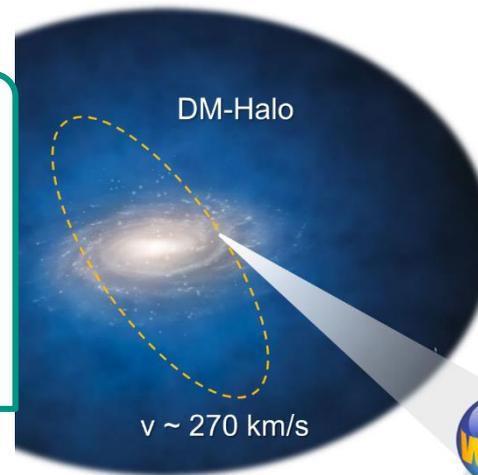


### Suche nach Dunkler Materie:

WIMPs

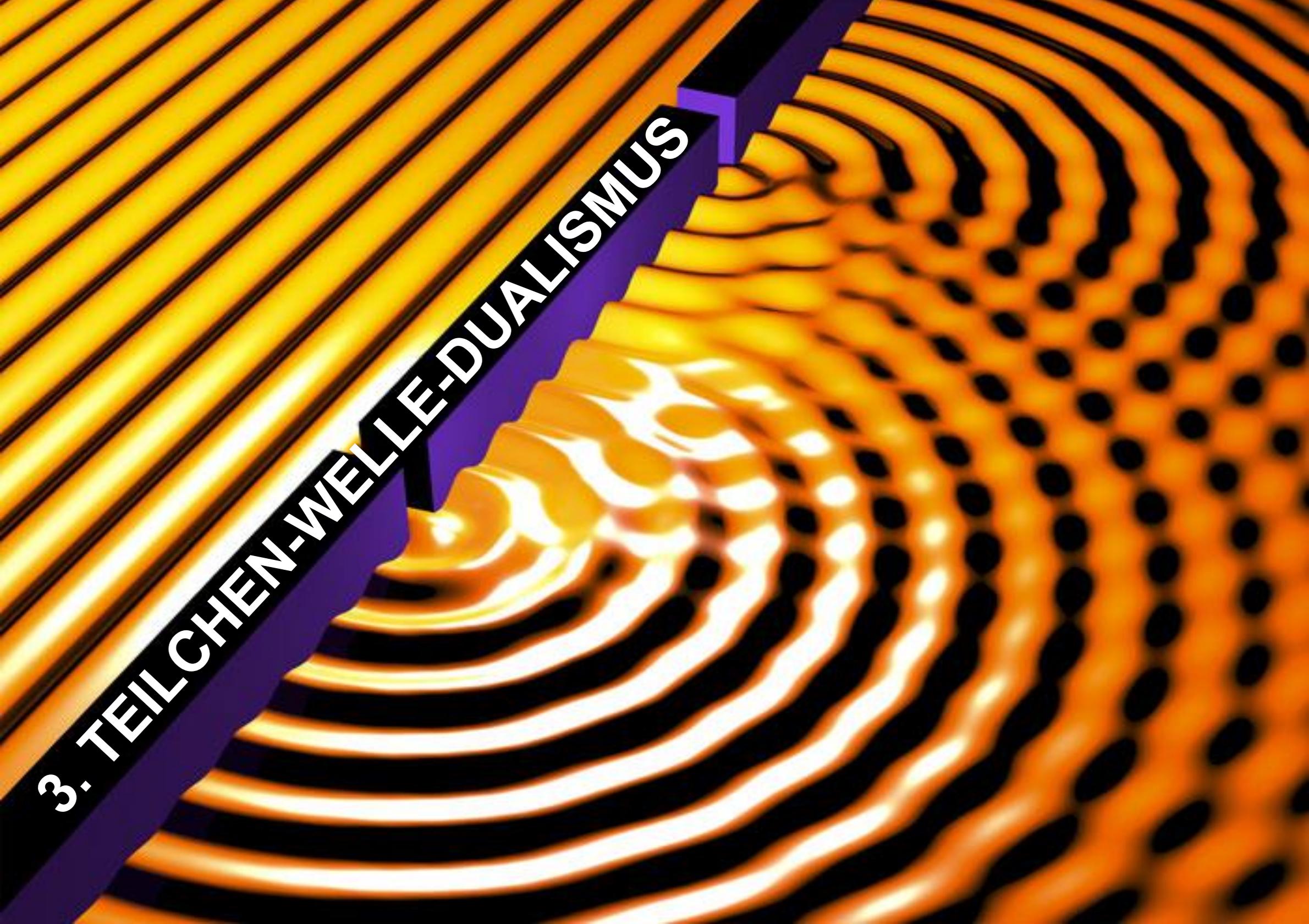
$$\text{bis zu } 10^{-49} \text{ cm}^2$$

~ 1 Ereignis / Jahr



Wirkungs-  
Querschnitte  
- Zusatz-  
Info

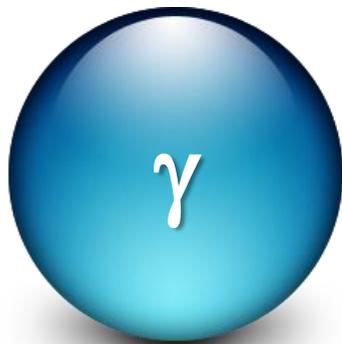




### 3. TEILCHEN-WELLE-DUALISMUS

# Teilchen-Welle Dualismus - Einführung

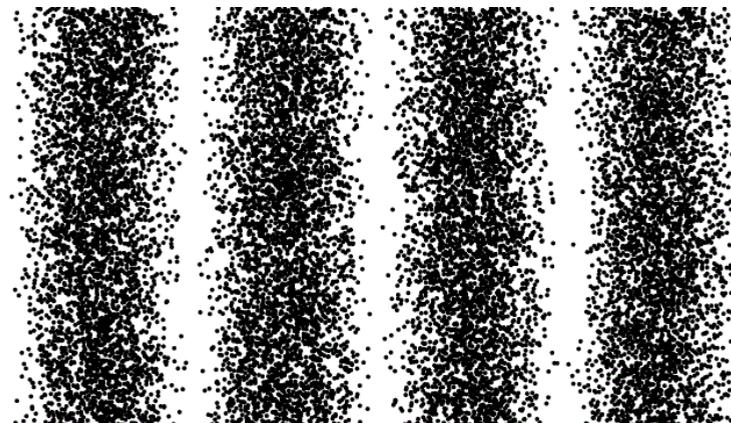
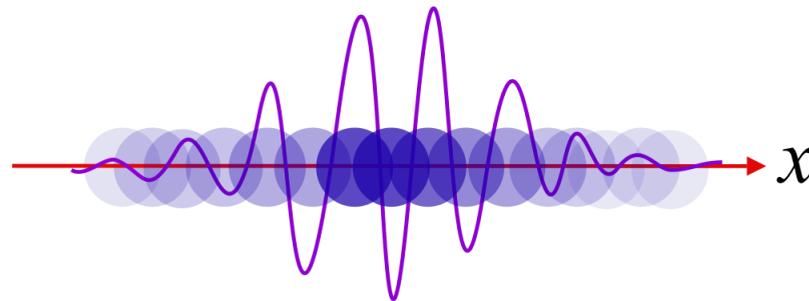
- **Alle Teilchen** (Licht, Elektronen, besitzen auch **Wellencharakter: Teilchen-Welle Dualismus**
  - von grundlegender Bedeutung für die Quantenmechanik (Wellenfunktion)



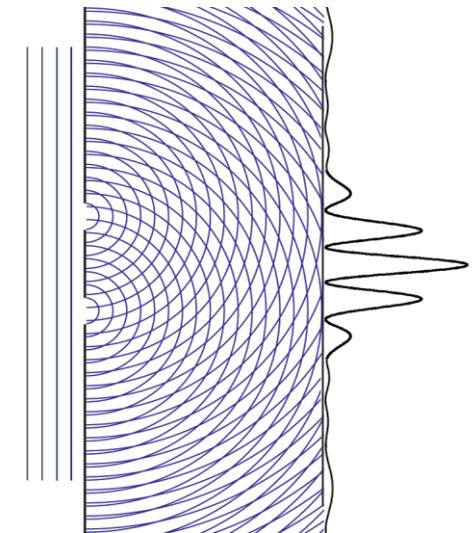
**Photon als Teilchen:**  
Energiequant des  
Elektromagnetischen  
Felds

$$E_{\gamma} = h \cdot f$$

punktförmige Teilchen mit  
Wellenfunktion  $\Psi(x)$



Interferenz von Elektronen

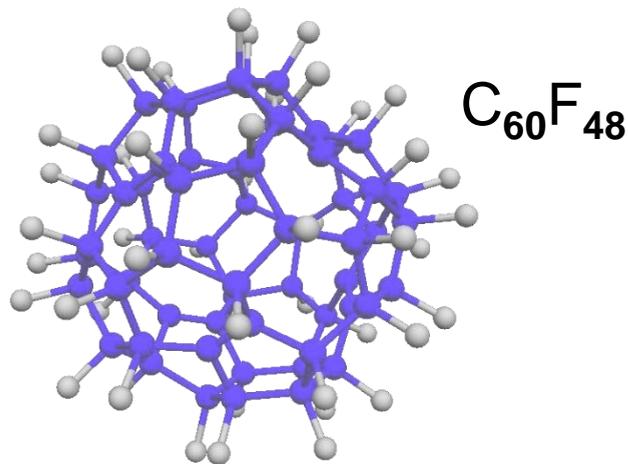


**Photon als Welle:**  
Inferenz am Doppelspalt  
mit konstruktiver/  
destruktiver Interferenz

$$E_{\gamma} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

# Teilchen-Welle Dualismus - Einführung

- **Alle Teilchen** (Licht, Elektronen, Kerne, Atome, Moleküle, Cluster...) **besitzen auch Wellencharakter: Teilchen-Welle Dualismus**
  - von grundlegender Bedeutung für die Quantenmechanik (Wellenfunktion)



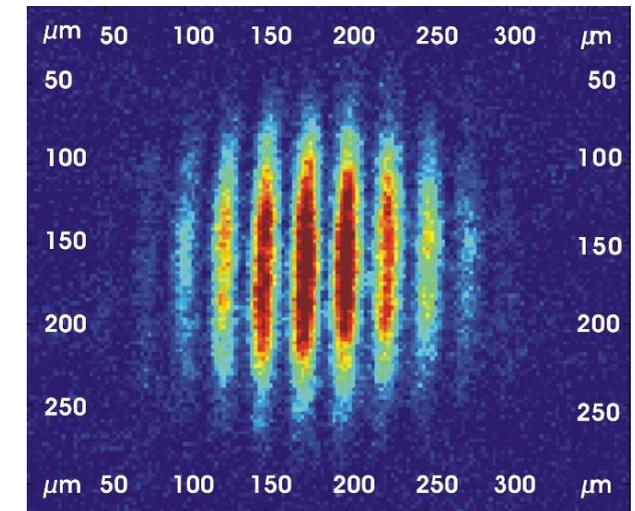
## Atome/Moleküle als Teilchen:

Makromoleküle wie

- Fullerene (Buckyballs)
- Biomoleküle (bis zu 7000 u)



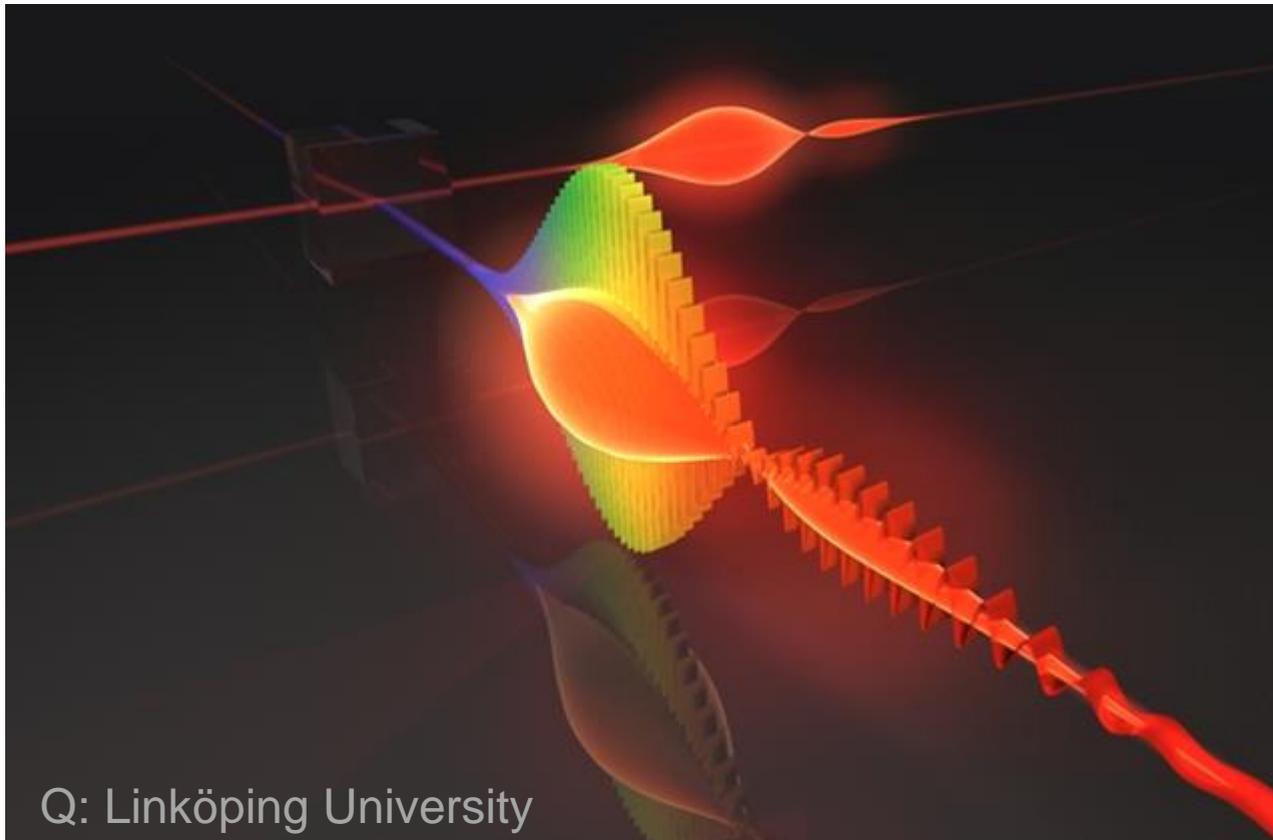
Aufbau  
Atom-  
Interferometer



## Atome/Moleküle als Welle:

Interferometrie mit Atomen  
mit konstruktiver/  
destruktiver Interferenz

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

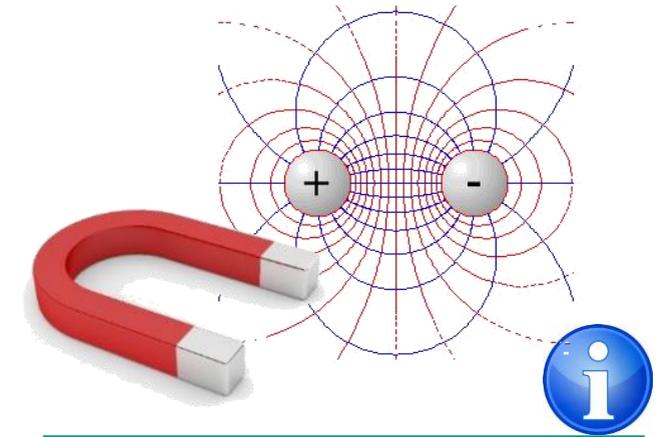


## 3.1 PHOTONEN UND IHRE WECHSEL- WIRKUNG

# 3.1 Photonen & ihre Wechselwirkung

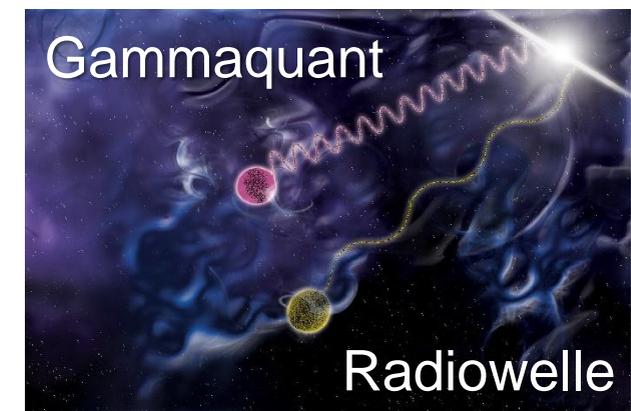
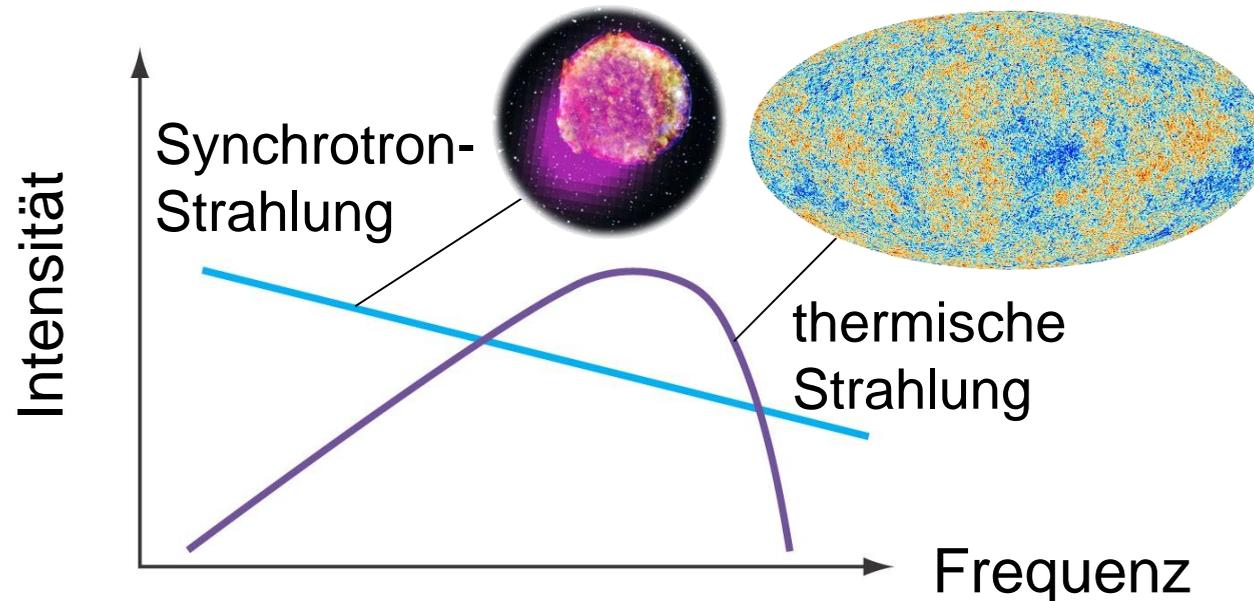
## ■ Photon

- Träger des elektromagnetischen Feldes:  
„virtuelle“ Photonen
- **reelle** Photonen entstehen bei Prozessen der **elektromagnetischen Wechselwirkung**
- Schwarzkörper (thermische Strahlung) [Kap. 3.1]
- nicht-thermische Strahlung [Kap. 9.2]:  
Synchrotronstrahlung, Bremsstrahlung, ...



### Photon

Masse	$m = 0$
Spin	$J = 1$
Parität	$P = -1$



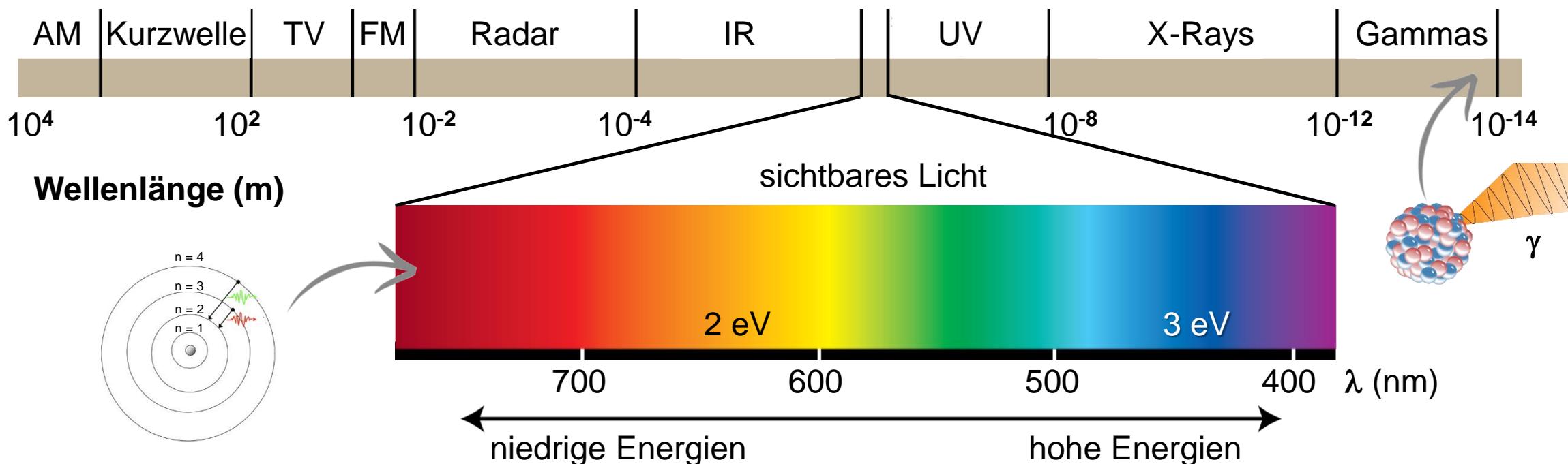
# Photonen - Grundlagen

## ■ Atomphysik

- IR, optisch & UV: Übergänge äußerer Hüllenelektronen (Photoeffekt)
- Röntgenstrahlung: Übergänge innerer Hüllenelektronen (Photoeffekt)

## ■ Kernphysik

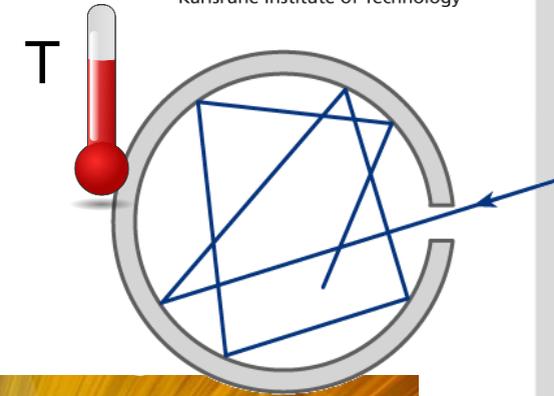
- Gammastrahlung: Streuung (Comptoneffekt), Paarbildung, Abregung angeregter Kern-Niveaus



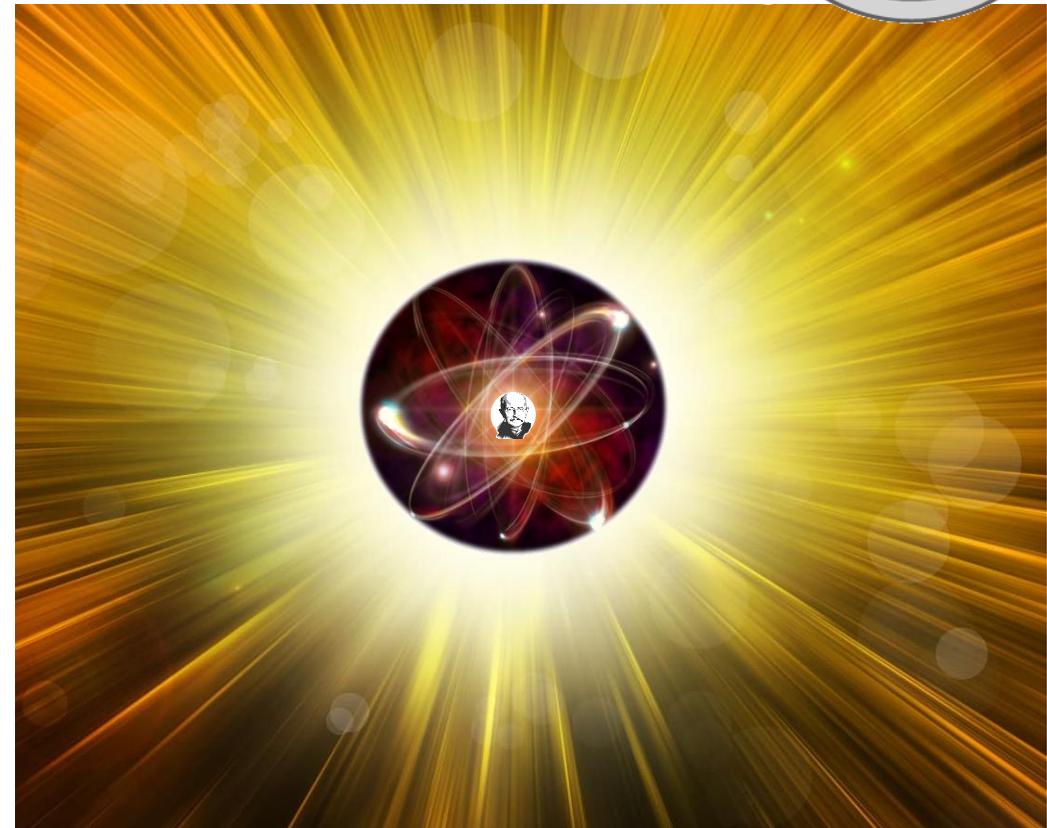
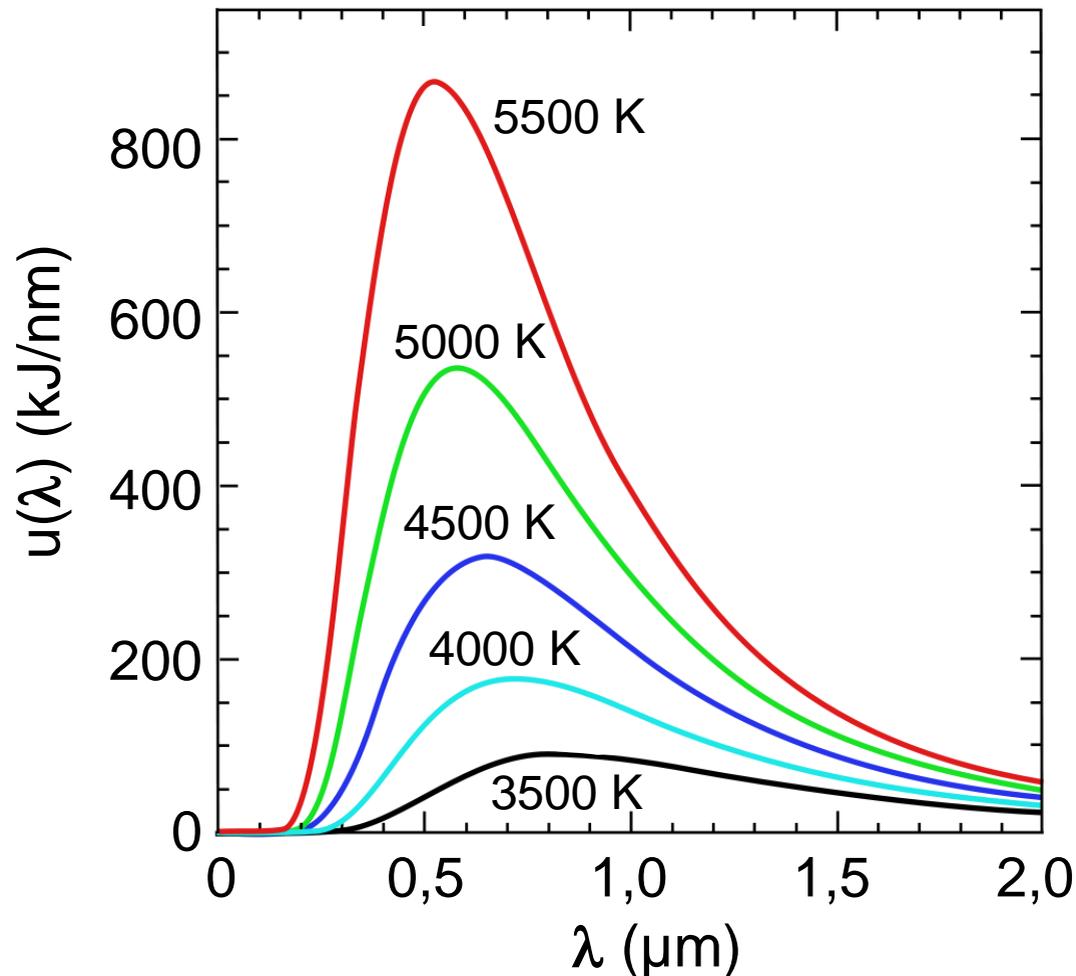
# Temperaturstrahlung

## ■ Thermische Schwarzkörper-Strahlung

- emittiert von Körper in thermodynam. Gleichgewicht
- ⇒ Hohlraum (Absorption elektromagnetischer Strahlung)



## ■ Planck-Verteilung

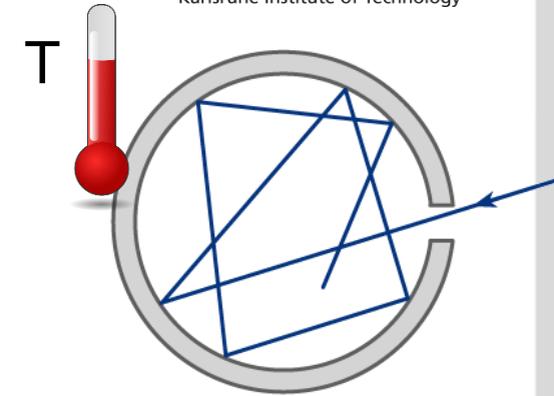


Urknall der  
Quantenphysik

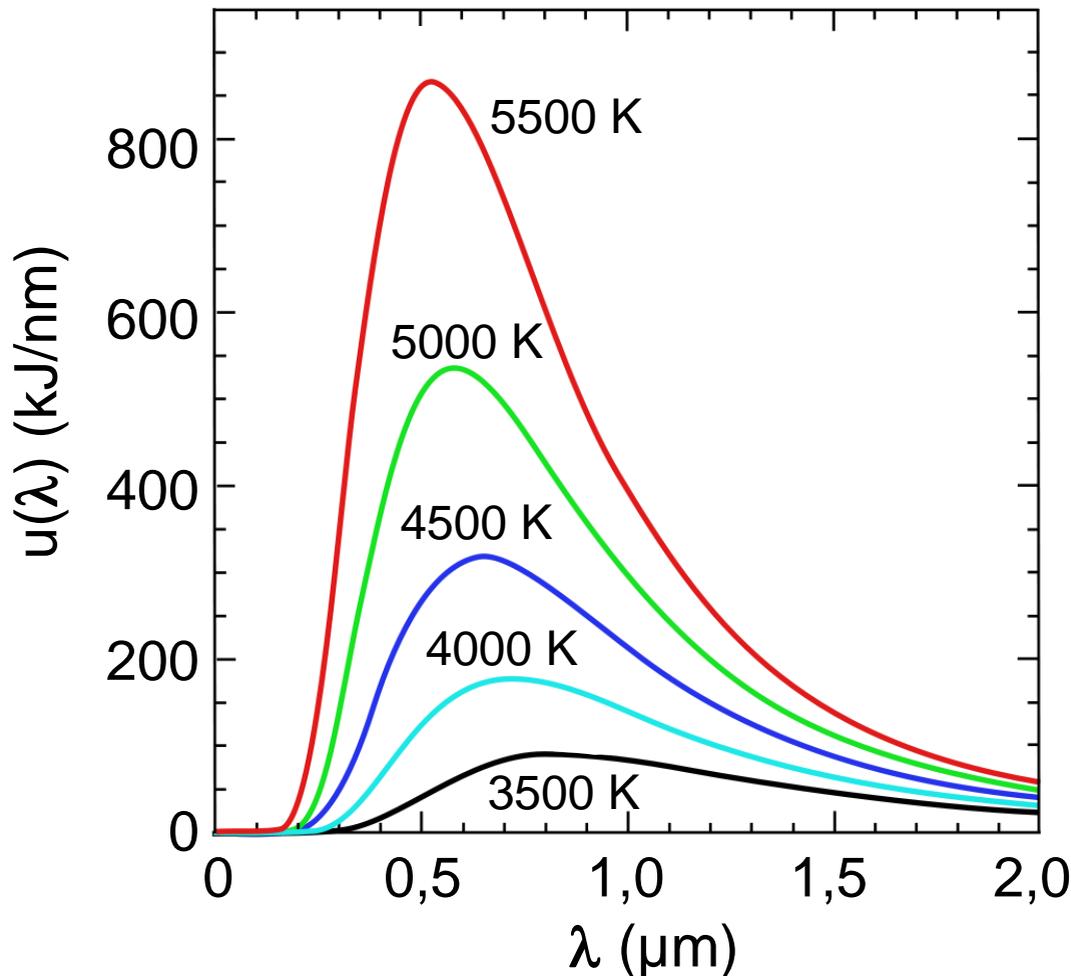
# Temperaturstrahlung

## ■ Thermische Schwarzkörper-Strahlung

- emittiert von Körper in thermodynam. Gleichgewicht
- ⇒ Hohlraum (Absorption elektromagnetischer Strahlung)



## ■ Planck-Verteilung



**spektrale Energiedichte  $u(\nu, T)$ :**  
- nur abhängig von  $\nu$  und  $T$ ; in [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]

$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



Nobel-  
preis 1918

Max Planck



# Schwarzkörper-Strahlung & Planck

## ■ Thermische Schwarzkörper-Strahlung

- zeigt die **Quantisierung des elektromagnetischen Felds**
- einzelne diskrete Quanten: Photonen mit  $E = h \nu$



## ■ Planck'sches Wirkungsquantum $h$

- Entdeckung durch Planck in 1899/1900 begründet die Quantenmechanik  
führt zu Teilchen-Welle Dualismus der modernen Physik

$$h = 6,626\,070\,040(81) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$
$$= 4,135\,667\,662(25) \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$$



- Dimension einer **Wirkung**  
Energie  $\times$  Zeit (skalare Größe)
- $h$  = elementares Wirkungsquantum

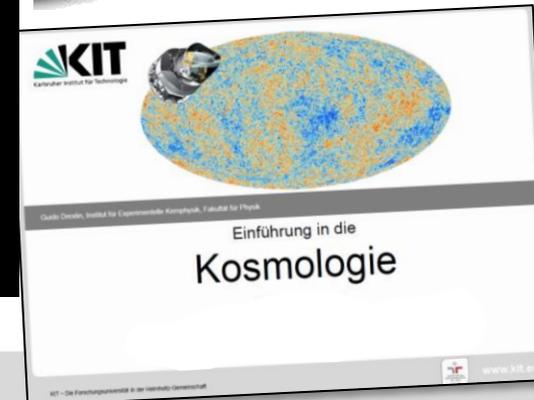
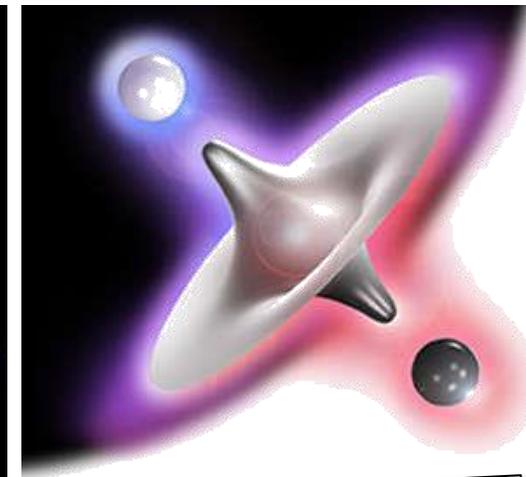
# Das Universum – ein schwarzer Strahler

## ■ Kosmische Hintergrundstrahlung (Cosmic Microwave Background Radiation: CMB) – das Echo des Urknalls

- entstanden aus Materie-Antimaterie-Annihilation ( $t \sim 10^{-4}$  s)
- entkoppelt 380 000 a nach Big Bang von Materie („Ausfrieren“)

Hintergrundstrahlung

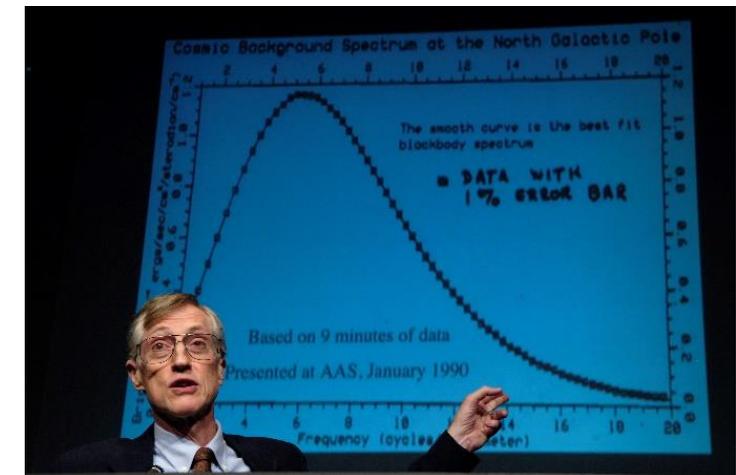
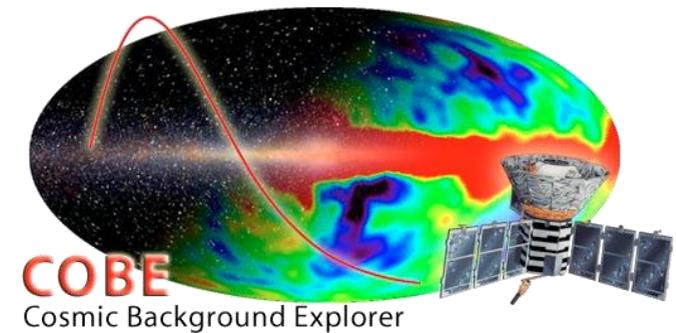
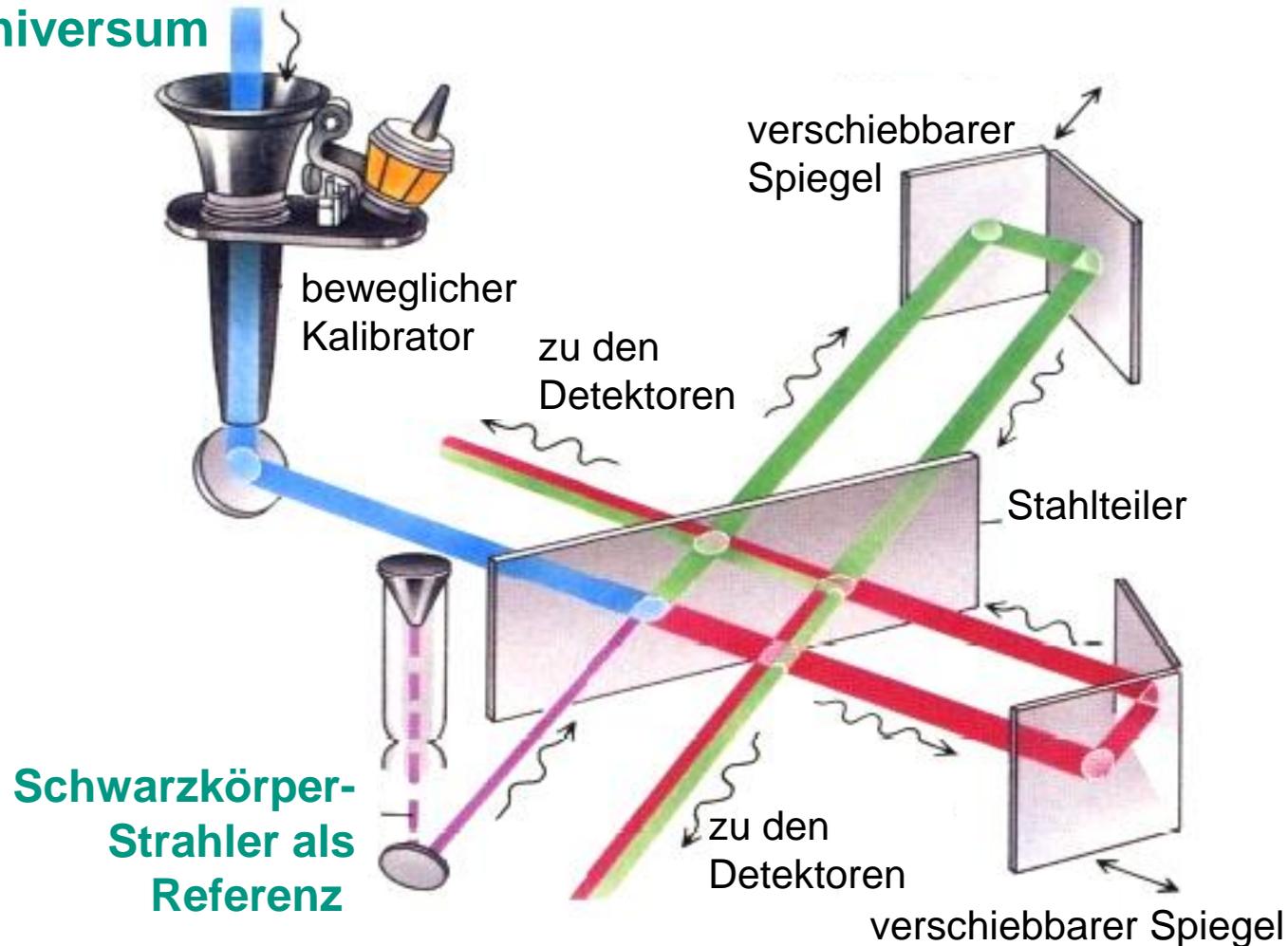
dunkle Energie 13.8 Mrd. Jahre



# Das Universum – ein schwarzer Strahler

- **Temperaturmessungen mit FIRAS auf dem COBE Satelliten**
  - Interferometrie-Messungen von Mather

## Photonen-Hintergrund Universum

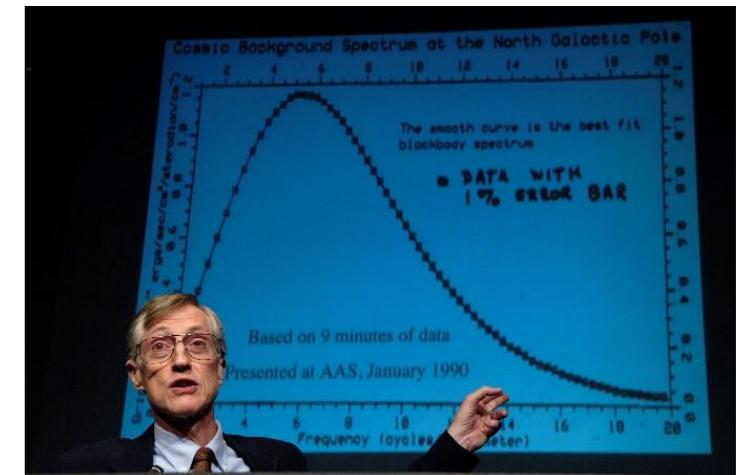
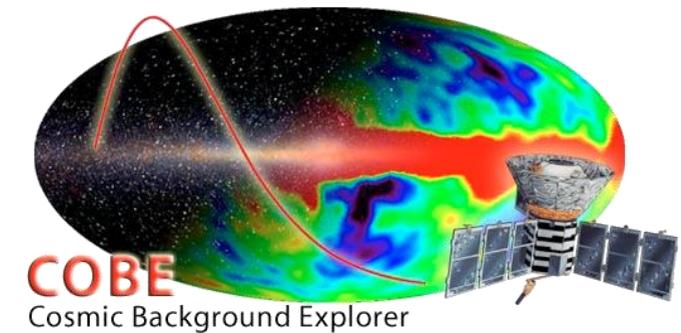
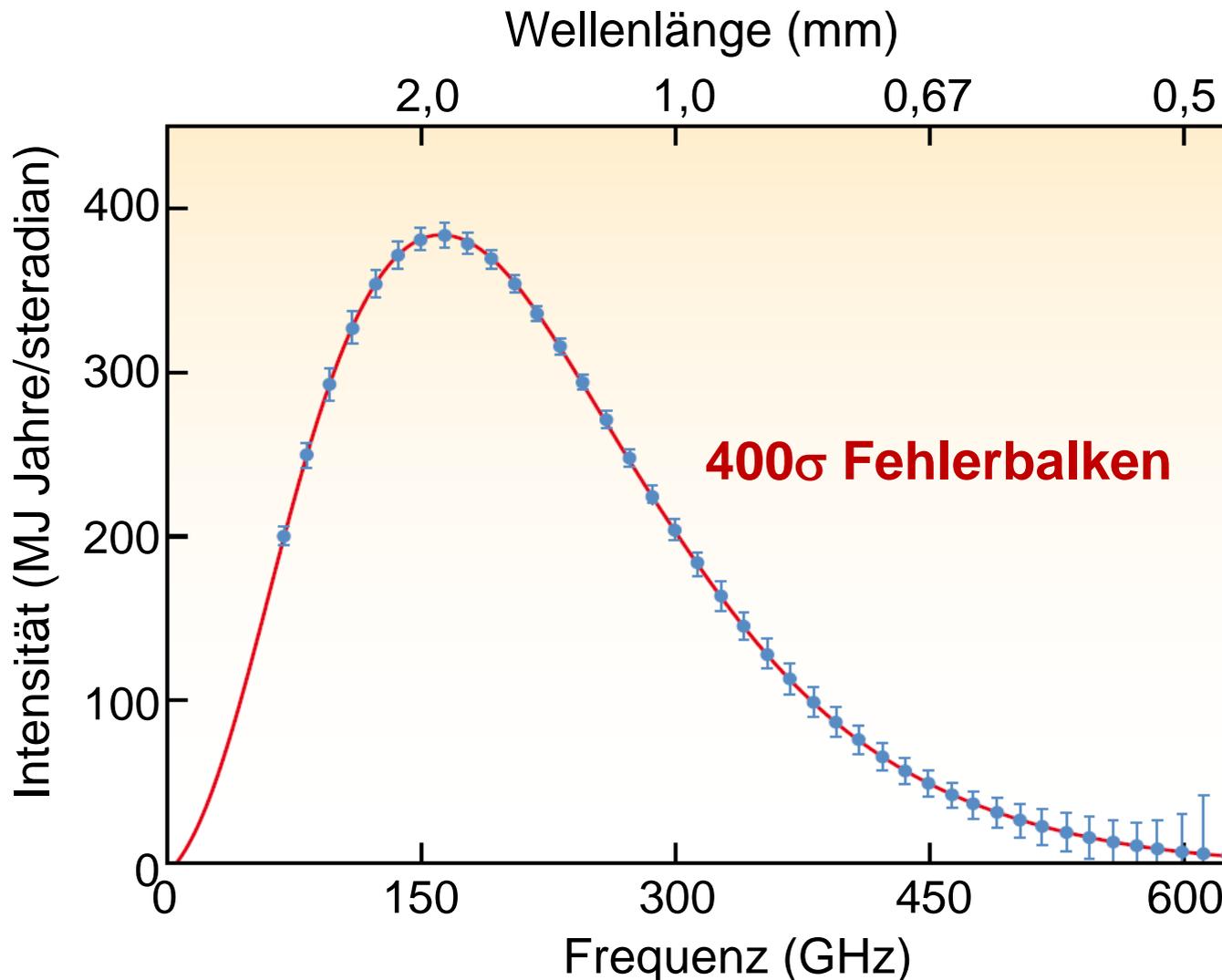


John C. Mather

# Das Universum – ein schwarzer Strahler

## ■ Temperaturmessungen mit FIRAS auf dem COBE Satelliten

- Interferometrie-Messungen von Mather zeigen für die CMB ein perfektes Schwarzkörperspektrum mit  $T = 2,725 \text{ K}$



John C. Mather -  
**9 min. Messzeit** mit FIRAS:  
perfekter Schwarzkörper

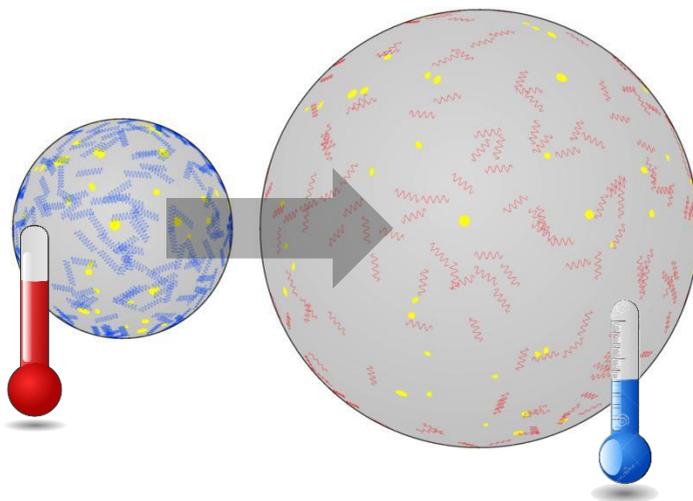
Nobelpreis 2006



# Wiensches Verschiebungsgesetz

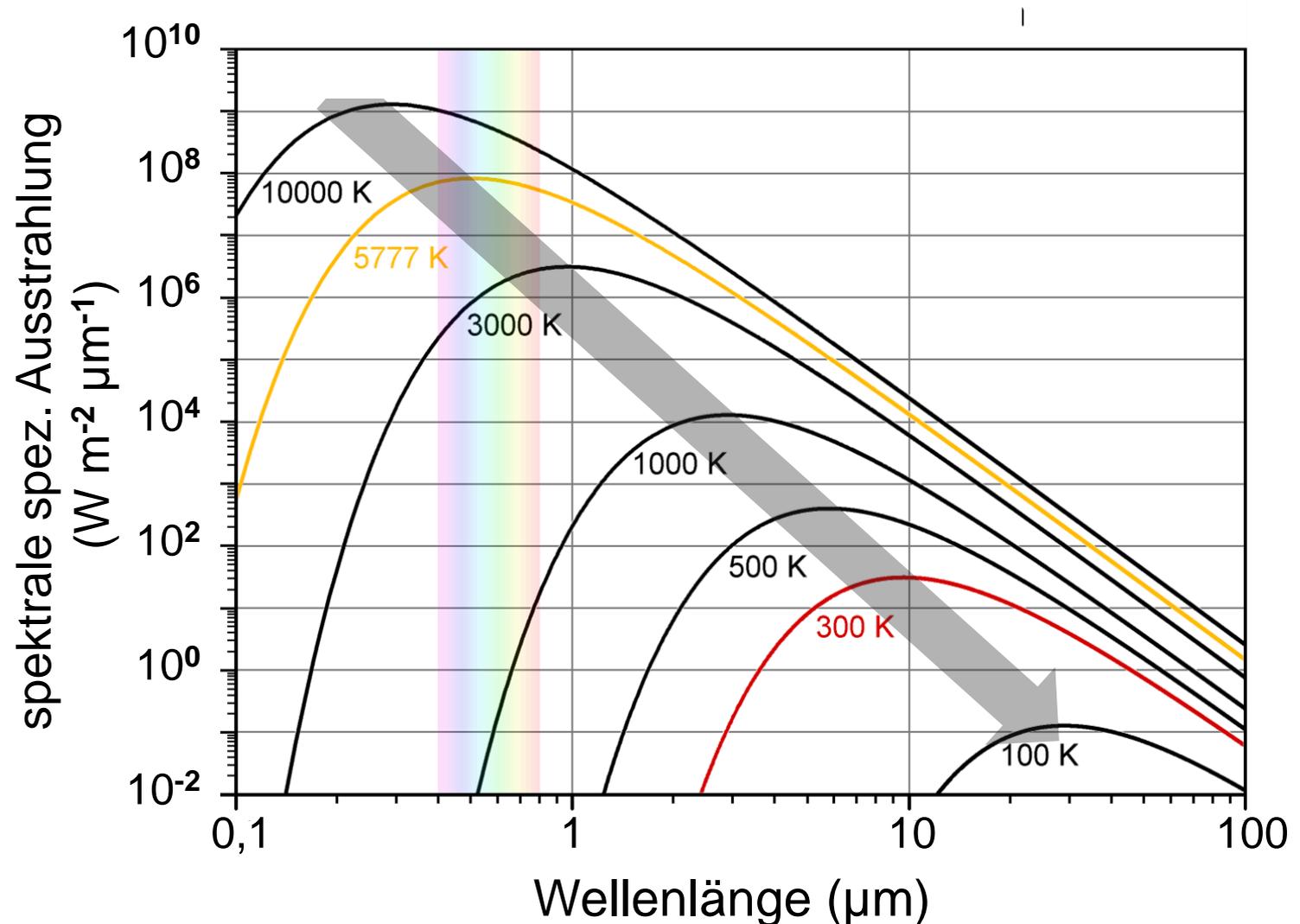
- Universum kühlt sich bei seiner Expansion ab (immer Planck-Verteilung)
  - Beschreibung durch **Wiensches Verschiebungsgesetz**

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,897 \text{ mm K}$$



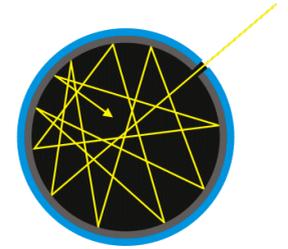
frühes  
Universum

heutiges  
Universum



# Universum als Schwarzkörper

- Schwarzkörperstrahlung = **dichteste räumliche Packung** von Photonen, d.h. 1 Photon im Volumen  $V = \lambda^3$  für die Photonendichte gilt  $\rho_\gamma \sim 1 / \lambda^3$



- mit heutiger  $T = 2,725 \text{ K}$  ergibt sich unter Nutzung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

$$u_\gamma = 4.39 \cdot 10^{-14} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Energiedichte

$$\rho_\gamma = \frac{u_\gamma}{c^2} = 4.65 \cdot 10^{-31} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Omega_\gamma = 5.05 \times 10^{-5}$$



Stefan-Boltzmann Gesetz

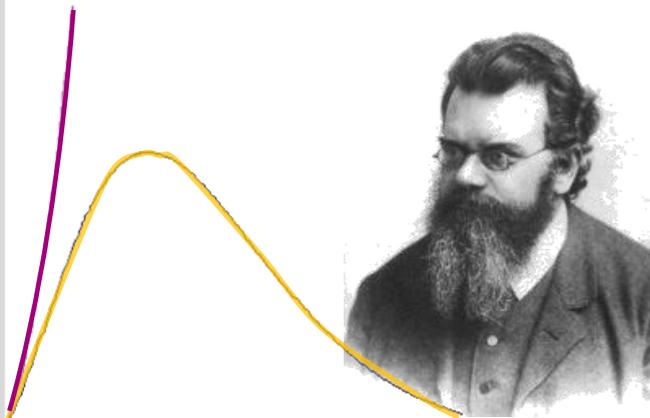
$$u_\gamma = \frac{\pi^2}{15h^3c^3} (kT)^4$$



## ■ Frage: warum ist die Schwarzkörperstrahlung so wichtig in der Atomphysik?

- A) die Strahlung ist klassisch nur näherungsweise beschreibbar
- B) alle Atome im Universum geben die 3 K Hintergrundstrahlung ab
- C) alle Atome im Universum sind im thermischen Gleichgewicht

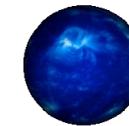
A



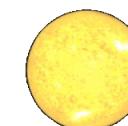
B



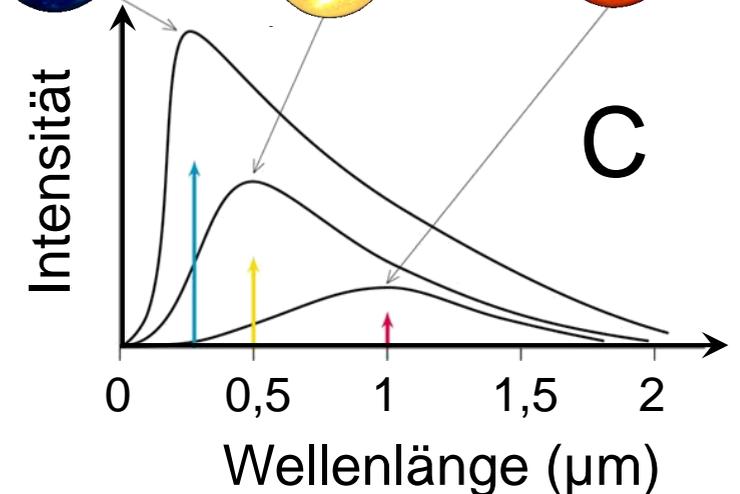
12000K  
 $\lambda = 250 \text{ nm}$



6000K  
 $\lambda = 500 \text{ nm}$



3000K  
 $\lambda = 1000 \text{ nm}$



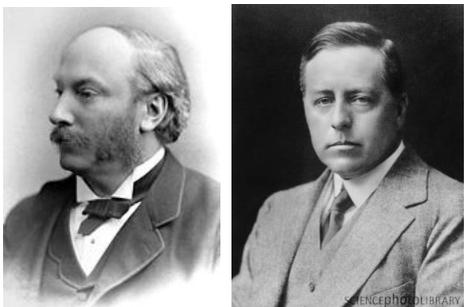
# Planck-Verteilung & Näherungen

- **Näherungen:** - **kleines  $\nu$ :** Wellen-Beschreibung von **Rayleigh & Jeans**
- **großes  $\nu$ :** thermodynamische Beschreibung durch **Wien**

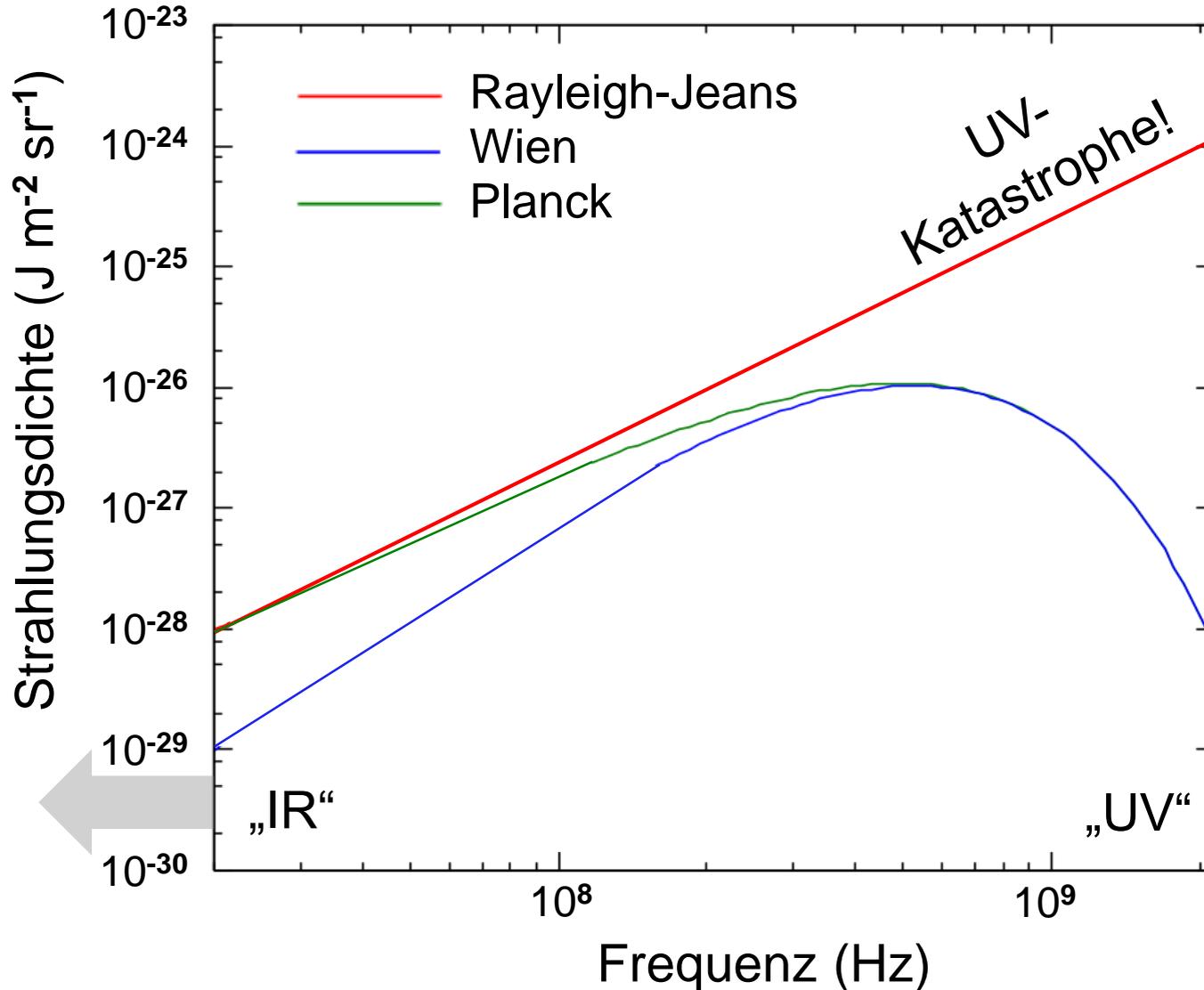
kleine  
Frequenzen

**Rayleigh-  
Jeans  
Gesetz**

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



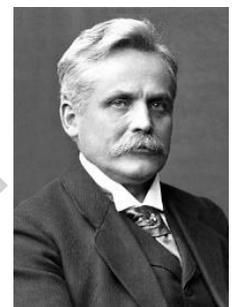
Rayleigh J. Jeans



große  
Frequenzen

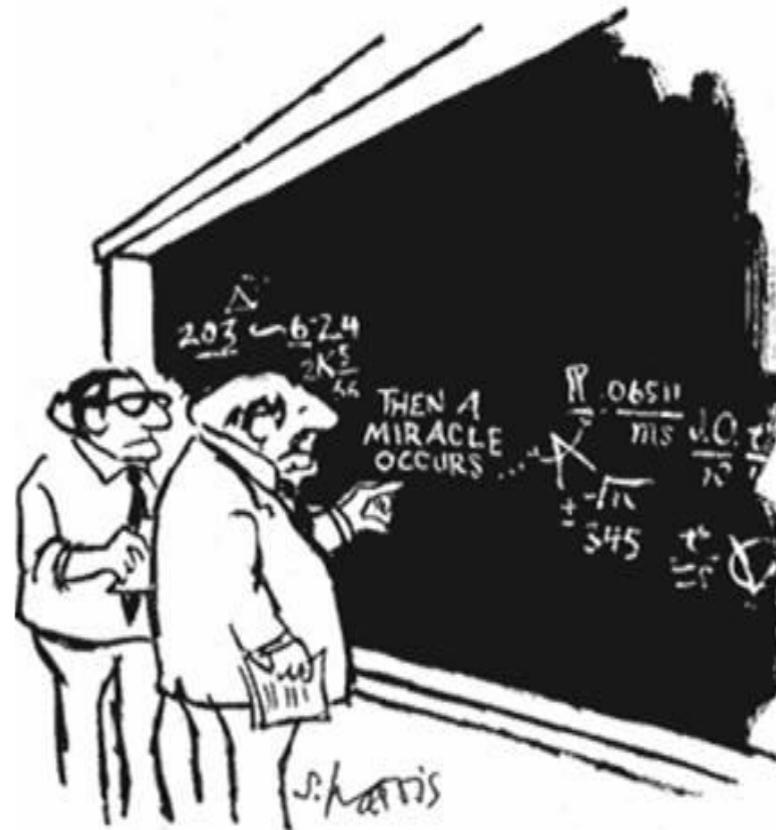
**Wiensches  
Gesetz**

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



Wilhelm Wien

# Planck's Herleitung 2019



"I THINK YOU SHOULD BE MORE EXPLICIT HERE IN STEP TWO."