

Einführung

1 Allgemeines

2 Mechanik

3 Wärmelehre

4 Elektrizität und Magnetismus

5 Optik

6 Schwingungen und Wellen

**7 Atomistische Struktur der Materie**

## 7 Atomistische Struktur der Materie

### 7.1 Bausteine und Aggregatzustände der Materie

**7.1.1 Atomare Einheiten:** Stoffmenge (Mol), atomare Masseneinheit, Avogadro-Konstante, Definition und Größenordnung

**7.1.2 Thermische Bewegung:** Thermische Bewegung von Atomen und Molekülen in Flüssigkeiten und Gasen; Geschwindigkeitsverteilung (qualitativ); qualitativer Zusammenhang mit der Temperatur bei Gasen; Brown'sche Bewegung

**7.1.3 Kristallgitter:** Einfache räumlich-periodische Anordnungen von Atomen im kubischen Gitter; Schwingungen um „Ruhelagen“ (qualitativ, s.a. 3.5.1)

### **7.2 Aufbau von Atomen und Molekülen** (s.a. Chem 1.2)

**7.2.1 Atome:** Aufbau aus Kern und Hülle; Masse und Radius von Atomen und ihren Kernen (Größenordnung)

**7.2.2 Bohr'sches Atommodell:** Grundzüge

**7.2.3 Moleküle:** Aufbau von Molekülen; Molekülschwingungen: Analogie zum Federpendel (s.a. 2.3.2), Einfluss der Substitution isotoper Nuklide (qualitativ); Molekülrotation (s.a. 2.3.5)

**7.2.4 Energieniveaus und Spektren** (s.a. PhAna 12.5.1):

Zusammenhang diskreter Energiestufen in Atomen mit den beobachtbaren Spektren im sichtbaren und Röntgen-Bereich; Linienspektren bei Atomen (Beispiele im Sichtbaren und bei Röntgenstrahlung); Lichtemission bei Elektronenübergängen (qualitativ); Bandenspektren bei Molekülen, Schema der Entstehung; kontinuierliche Spektren

**7.2.5 Röntgenröhre:** Aufbau, Betrieb und Wirkungsweise (s.a. 4.4.5); Grundzüge der Entstehung von Bremsstrahlung und charakteristischer Strahlung

### 7.3 Atomkerne und Kernstrahlung

- 7.3.1 Kerne und ihre Bausteine:** Proton, Neutron; Ladung und relative Masse, Vergleich mit Elektron; Kernladungszahl; Begriff isotoper Nuklide, einfache Beispiele
- 7.3.2 Kernreaktionen:** Symbole zur Darstellung von Kernreaktionen; Erhaltungssätze für Ladung und Nukleonenzahl
- 7.3.3 Radioaktivität:** Änderung von Ladung und Masse von Atomkernen in Verbindung mit  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Emission, Eigenschaften von  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung
- 7.3.4 Detektoren:** Strahlungsnachweis mittels Ionisationskammer, Zählrohr, Szintillationszähler (Grundzüge)
- 7.3.5 Zerfallsgesetz:** Definition der Aktivität; gebräuchliche Darstellungen; Halbwertszeit und mittlere Lebensdauer, Zusammenhang mit dem Zerfallsgesetz

### 7.3 Atomkerne und Kernstrahlung, Fortsetzung

**7.3.6 Absorption energiereicher Strahlung:** Durchdringungsfähigkeit von  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ - und Neutronenstrahlung in festen Stoffen; Absorptionsgesetz für  $\gamma$ -Strahlung und Röntgenstrahlung in Materie, Abhängigkeit von der Wellenlänge

**7.3.7 Dosimetrie:** Energiedosis, Energiedosisleistung, Ionendosis; gebräuchliche Einheiten

**7.3.8 Anwendungen aktiver und stabiler Nuklide:** Grundzüge der Gewinnung radioaktiver Nuklide und der Anwendung radioaktiver Atome in der Chemie und bei Pharmaka, z.B.:  $^{60}\text{Co}$  (Kobaltbestrahlungsquelle),  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Radiodiagnostik),  $^{131}\text{I}$  (Stoffwechseluntersuchung); Tracermethode; Anwendung ionisierender Strahlung zur Sterilisierung von Verbandmaterial und Verpackungen

## Experimente Atomphysik:

- Atomares Linienspektrum (Hg)
- Franck-Hertz-Versuch
- Hallwachs-Versuch
- Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

# Atom- und Kernphysik

---

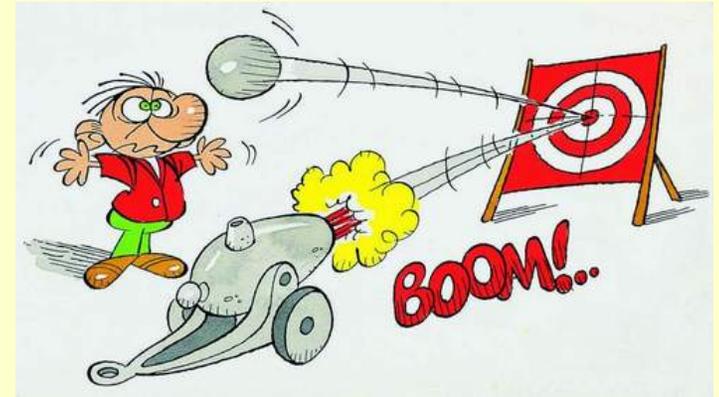
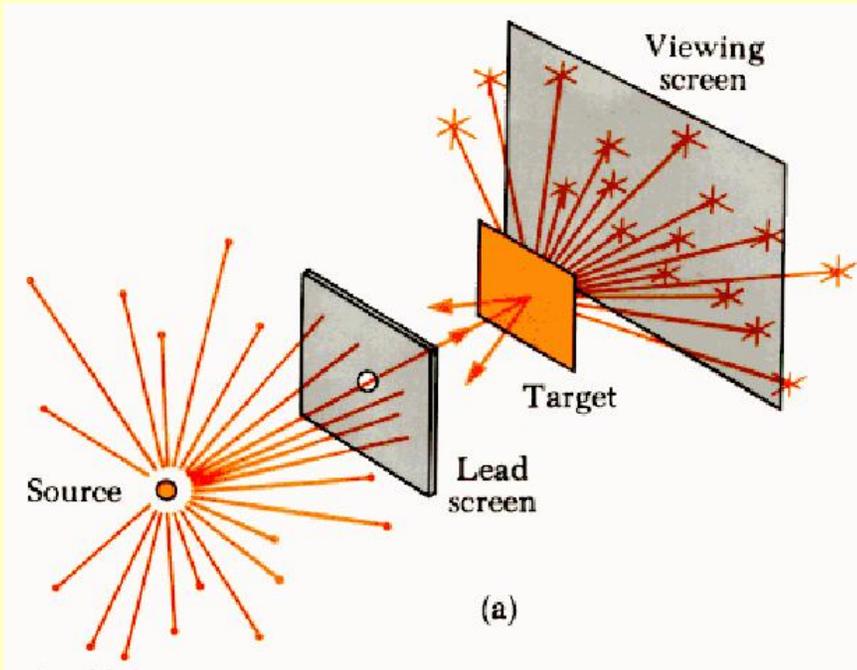
<b>Makroskopische Welt:</b>	Mechanik Thermodynamik Elektrizitätslehre Optik	} }	klassische Physik
<b>Mikroskopische Welt:</b>	Atomphysik Kernphysik Elementarteilchen ....	} }	„moderne“ Physik Quantenmechanik

**Atomphysik:** Atomhülle d. Elektronen → Aufbau v. Molekülen → Chemie

**Kernphysik:** Aufbau d. Atomkerns, Radioaktivität → Elementarteilchen

**Anwendung in der Medizin:** Röntgenstrahlung  
Kernspinresonanz  
Bestrahlungen  
Laser (siehe Optik)  
...

# Rutherford'sche Streuversuche

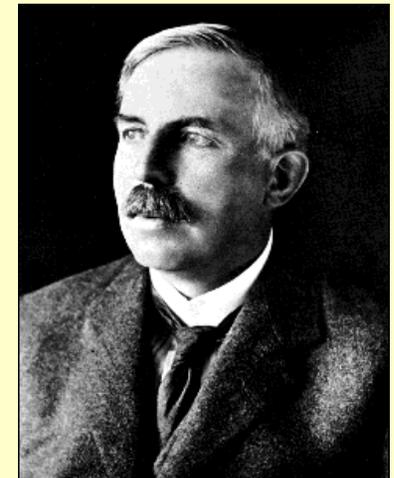


Beschuss einer Goldfolie mit  $\alpha$ -Teilchen (zweifach pos. geladenes Helium-Atom, d.h. Helium-Kern)

## Rutherford'sche Streuformel

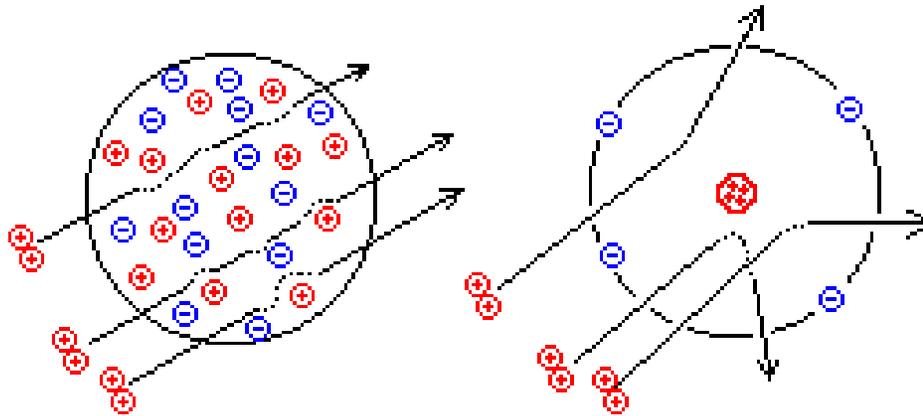
$$\frac{dn}{d\Omega} = C \frac{n}{\sin^4(\vartheta/2)}$$

Zahl der pro Raumwinkel gestreuten Projektile



# Rutherford'sche Streuversuche

## Rutherford's Experiment



Expected alpha particle scattering in two models of the atom

## Rutherford'sche Streuformel

$$\frac{dn}{d\Omega} = C \frac{n}{\sin^4(\vartheta/2)}$$

Zahl der pro Raumwinkel gestreuten Projektile

„Target“ →

$$C = \frac{Nd}{(4E_{kin})^2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(4\pi\epsilon_0)^2}$$

Häufiges Auftreten **kleiner** Streuwinkel:

→ positive Ladungen im Atom gleichmäßig verteilt

Häufiges Auftreten **großer** Streuwinkel:

→ positive Ladungen im Kern konzentriert

**Resultat:** positive Ladung im Kern konzentriert (+Z·e)  
Elektronen als Wolke um den Kern (-Z·e)  
Masse des Atoms im Kern konzentriert.

(Atom als ganzes ist neutral.)

$$r_{Atom} \approx 0,1 \text{ nm} \Rightarrow 1 \text{ \AA}$$

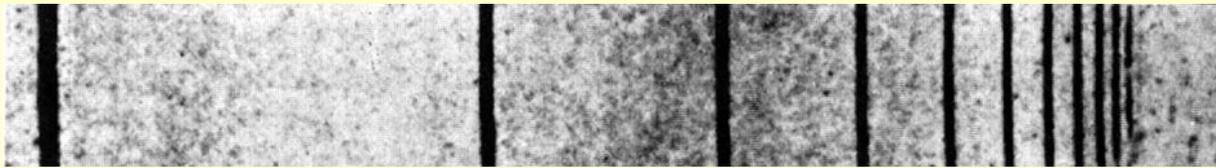
Ångström

Kernmassenzahl

$$r_{Kern} \approx r_0 \sqrt[3]{A}$$

$$r_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

# Linienenspektrum



656.3

486.1

434.0

410.2

397.0

388.9

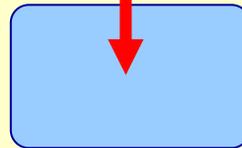
Linienenspektrum  
von Wasserstoff  
(Photoplatte = Negativ)

$$\frac{1}{\lambda} \sim \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

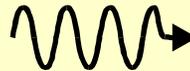
Balmer-Serie,  $n = 3, 4, 5, \dots$

Emissionsspektrum

Energie



Materie



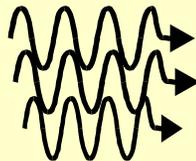
Beobachter

Spektrum der Sonne



Absorptions-  
spektrum

Weißes Licht



Materie



Beobachter

**Spektroskopie:** aus der Untersuchung der Spektrallinien

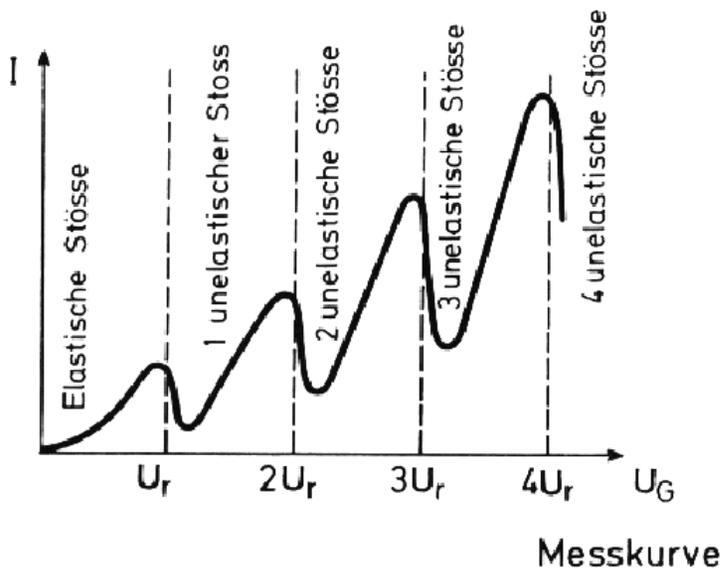
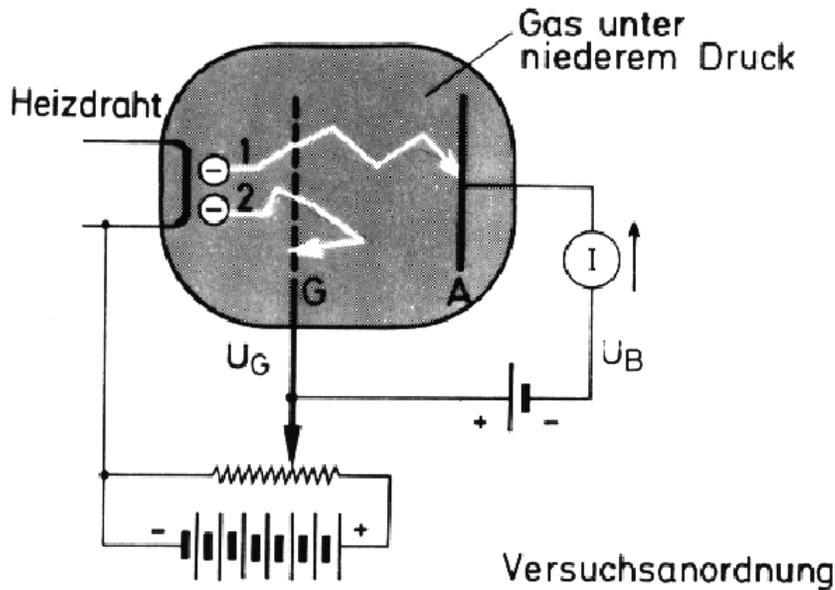
- Frequenz/Wellenlänge
- Intensität
- Linienform
- Aufspaltung
- ...



detaillierte Aussagen über

- Aufbau der Atome
- Aufbau von Molekülen,
- Eigenschaften der chemischen Bindung
- Vorkommen und Häufigkeit von Atomen/Molekülen in Materie
- Aufbau von Sternen
- Zustand der Materie (Dichte, Temperatur, Geschwindigkeit, elektrische und magnetische Felder)
- ...

# Franck-Hertz-Versuch



Beschleunigung der Elektronen zw. Heizdraht und Gitter

Abbremsung zw. Gitter und Anode

Im Normalfall erreichen die Elektronen die Anode: Stromfluss

Aber bei inelastischem Stoß (Energieabgabe) der Elektronen mit Gasatomen reicht die Energie nicht mehr aus, um die Anode zu erreichen => Stromfluss sinkt.

**Die Gasatome können die Energie der Elektronen nur in bestimmten „Paketen“ aufnehmen!**

**=> diskrete atomare Energiezustände**

James Frank, Gustav Hertz 1912 - 14  
Nobel-Preis 1925

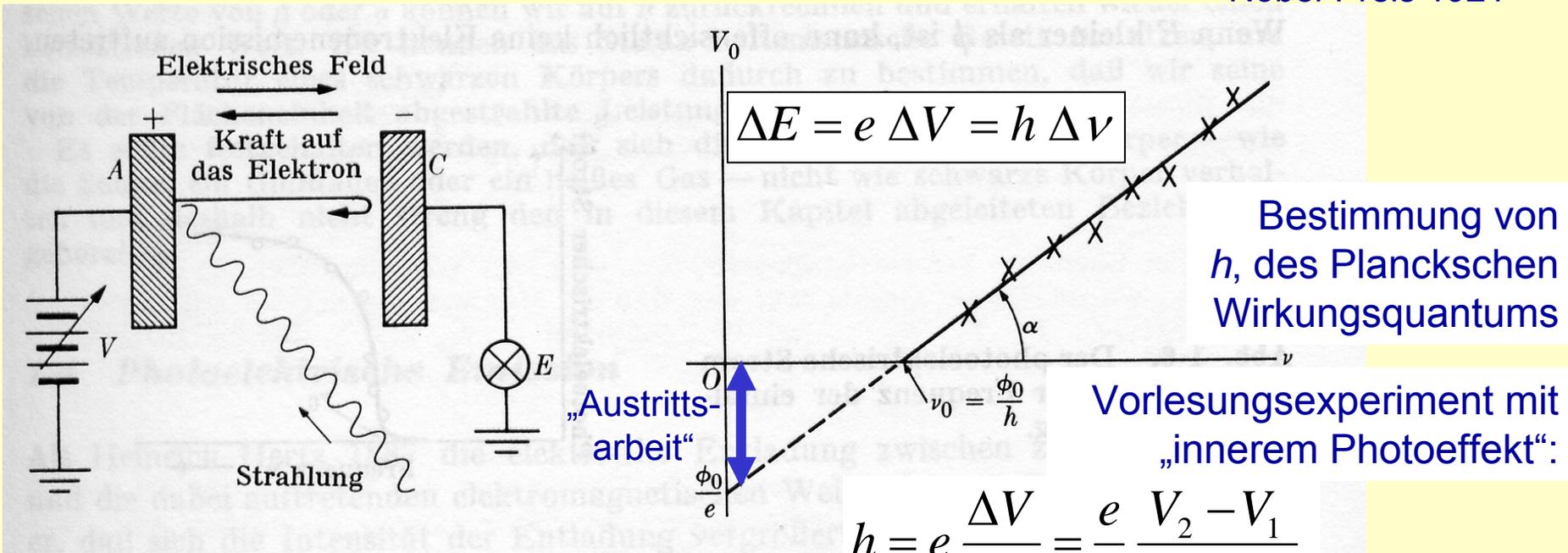
# Photoeffekt

1886 Heinrich Rudolf Hertz / 1887 Hallwachs: Negativ-aufgeladene Zinkplatte wird durch Lichteinfluss entladen, positiv-aufgeladene nicht.

- Intensität des Lichtes erhöht den Elektronenstrom.
- **Aber:** Elektronen werden erst ab einer bestimmten Licht-Frequenz ausgelöst!
- Energie dieser Elektronen steigt linear mit der Frequenz des Lichtes.

→ Licht verhält sich wie Teilchen!

Erklärung durch Einstein 1905  
Nobel-Preis 1921

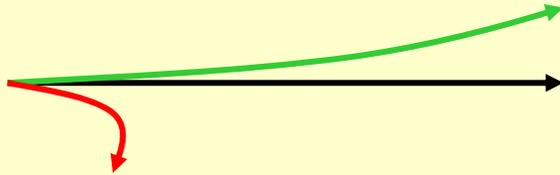


# Radioaktivität

Entdeckung/Untersuchung der Radioaktivität (Strahlung bei **Kern-Zerfall**)  
durch Becquerel, Marie und Pierre Curie

=> 3 (Haupt-)Arten radioaktiver Strahlung:

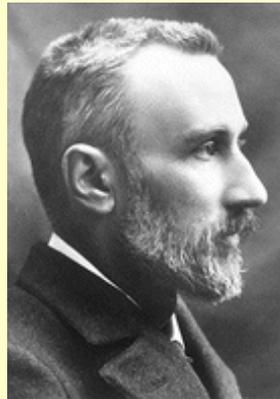
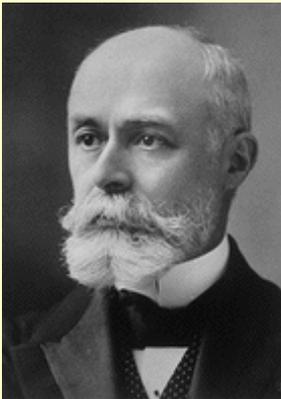
Unterscheidung z.B.  
im **Magnetfeld**:



$\alpha$ -Strahlung: He- Kerne  
Ablenkung, aber schwach

$\gamma$ -Strahlung: el.-mag. Welle  
keine Ablenkung

$\beta$ -Strahlung: Elektronen  
starke Ablenkung in andere Richtung  
(genauer  $\beta^-$ -Strahlung)



# Bohrsches Atommodell

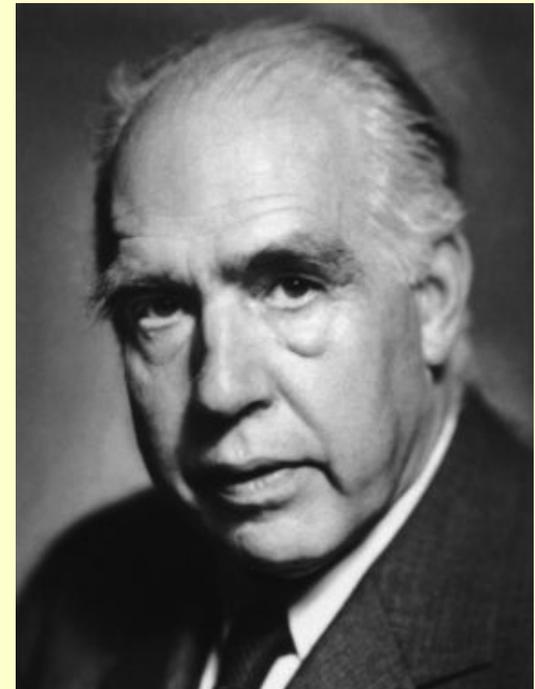
---

## Probleme des Planetenmodells:

1. Elektronen auf Kreisbahn → beschleunigte Bewegung → Abstrahlung von el.-mag. Wellen → Energieverlust → Elektron stürzt in den Kern
1. Wegen Spiralbahn mit abnehmender Beschleunigung → kontinuierliches Spektrum!

## „Lösung“ des Problems: Bohrsche Postulate 1913

Nachträgliche Rechtfertigung der Postulate durch Quantenmechanik um 1925



# Bohrsche Postulate

---

**1. Bohrsches Postulat:** die Elektronen bewegen sich auf stationären Bahnen (Zuständen) mit diskreten Energien  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , auf denen keine Energieabstrahlung erfolgt!

**2. Bohrsches Postulat:** die stationären Zustände sind dadurch festgelegt, dass der Bahndrehimpuls  $L_n$  des Elektrons auf der  $n$ -ten Bahn ganzzahlig (d.h. „gequantelt“) ist:

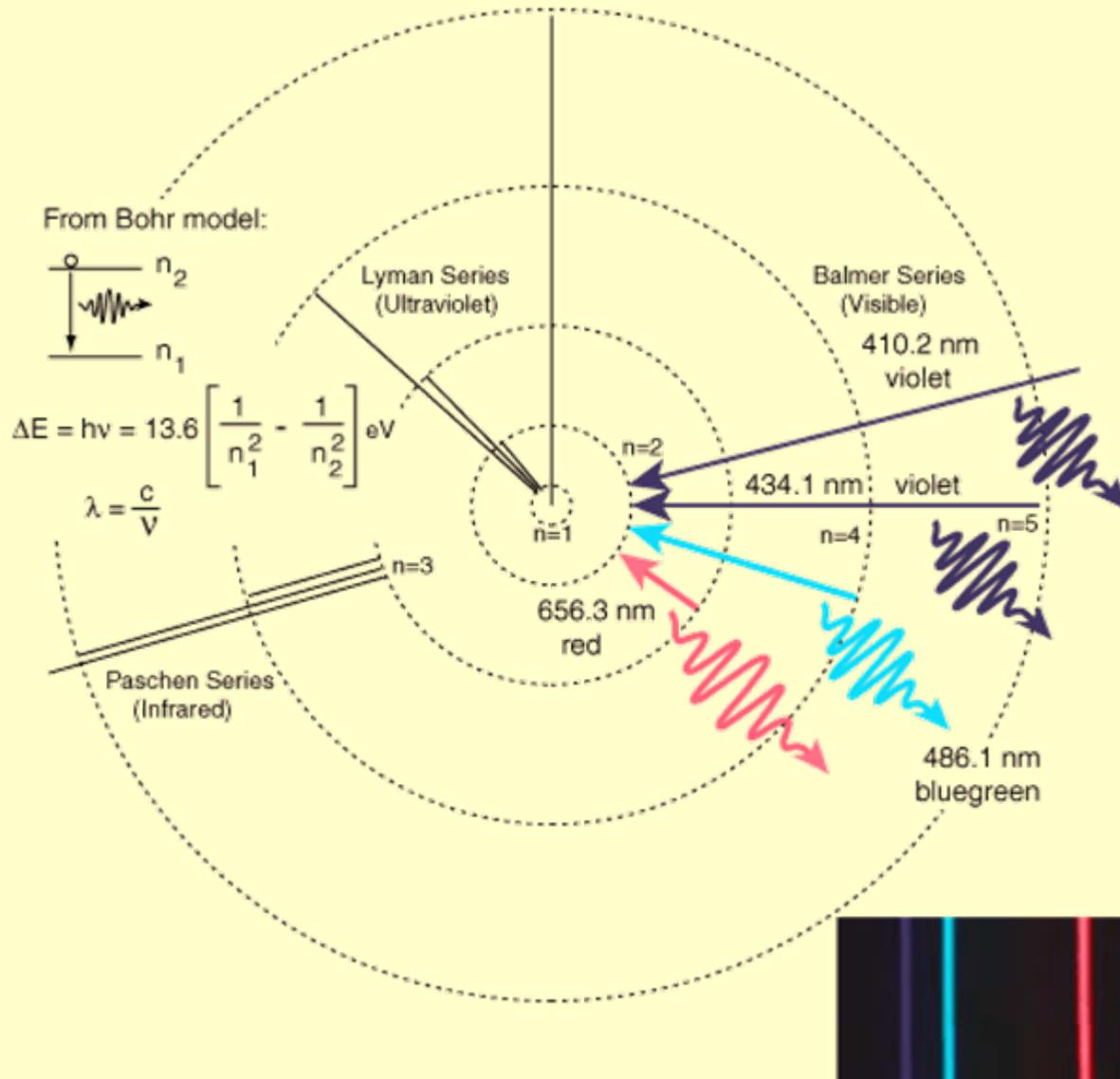
$$L_n = m_e \omega r^2 = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

$h$  ist das Plancksche Wirkungsquantum:  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js

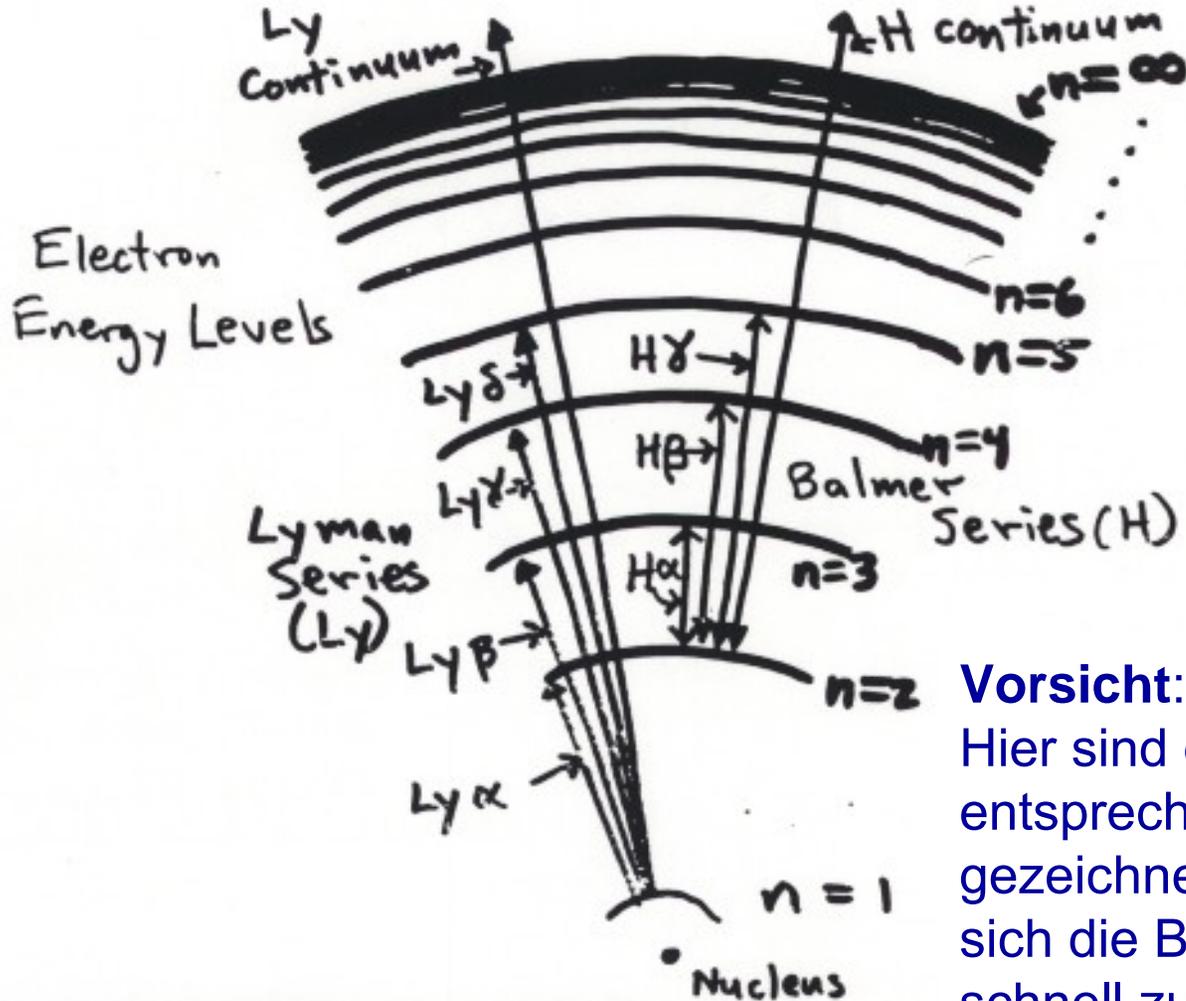
**3. Bohrsches Postulat:** die Abstrahlung von Energie (Lichtemission) erfolgt bei einem sprunghaften Übergang eines Elektrons von einer stationären Bahn höherer Energie  $E_n$  zu einer Bahn geringerer Energie  $E_m$ . Die Energiedifferenz wird in Form eines Lichtquants (Photon) emittiert.

$$E_n - E_m = h \cdot f$$

# Elektronenübergänge



# Energieniveaus symbolisch



## Vorsicht:

Hier sind die Abstände symbolisch entsprechend den Energien gezeichnet. Tatsächlich erhöhen sich die Bahnradien der Elektronen schnell zu sehr großen Werten. (Man spricht für hohe Hauptquantenzahlen  $n$  von „Rydberg-Atomen“.

# Energieniveaus quantitativ

Aus Drehimpuls-Quantisierung  $L_n = m_e \omega r^2 = n\hbar$

und Kräftegleichgewicht  
(Coulomb-K. = Zentrifugal-K.)

$$\frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m_e \omega^2 r = \frac{(n\hbar)^2}{m_e r^3}$$

folgt für die erlaubten Radien

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Z e^2 m_e} n^2 \quad \text{sowie} \quad \omega = \frac{n\hbar}{m_e r^2}$$

und damit für die

Energie-Niveaus mit  $E = E_{pot} + E_{kin}$

$$E_{pot} = -\frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z e^2 m_e}{4\pi\epsilon_0 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -(Z\alpha)^2 m_e c^2 \frac{1}{n^2} \quad \text{wobei} \quad \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

„Feinstruktur-Konstante“

$$E_{kin} = \frac{m_e}{2} (\omega r)^2 = \frac{m_e}{2} \left( \frac{n\hbar}{m_e r} \right)^2 = \frac{m_e}{2} \left( \frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar n} \right)^2 = (Z\alpha)^2 \frac{m_e c^2}{2} \frac{1}{n^2} = -\frac{E_{pot}}{2}$$

insgesamt

$$E_n = E_{pot} + E_{kin} = -(Z\alpha)^2 \frac{m_e c^2}{2} \frac{1}{n^2} = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

und damit für die Abstände bzw. Photonenenergien

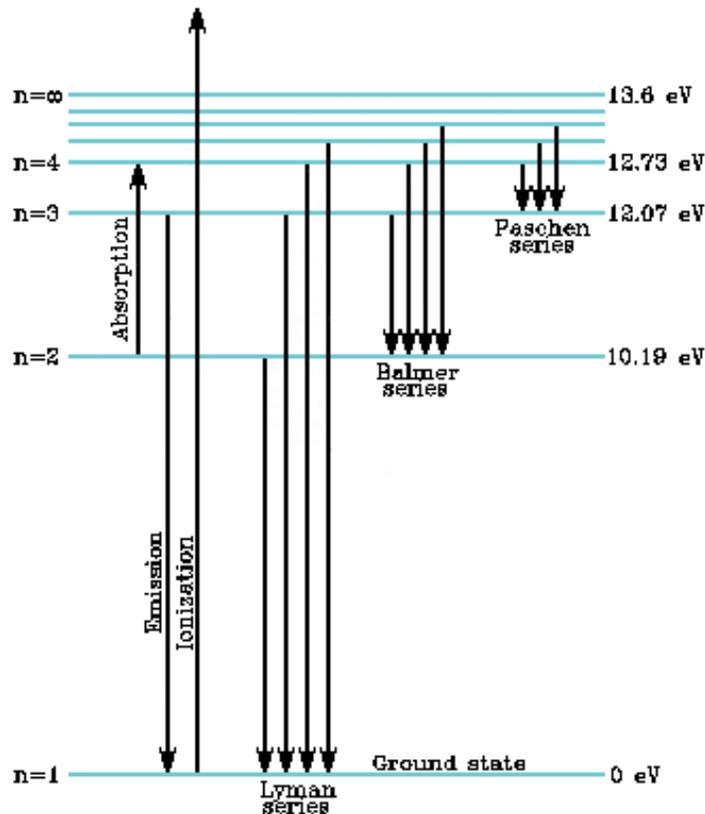
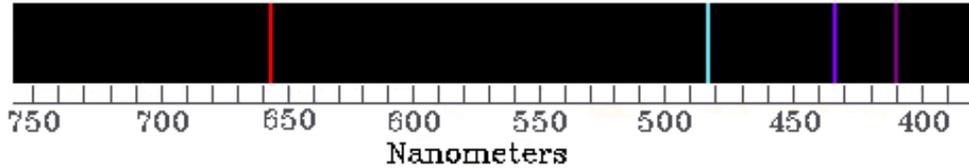
$$E_{n,m} = h\nu = (Z\alpha)^2 \frac{m_e c^2}{2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{Z^2 e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Bemerkung:

Erweiterung auf  
elliptische Bahnen  
(Sommerfeld)  
→ „entartete“  
Energieniveaus

# Rydberg-Formel

HYDROGEN



bzw. die Rydberg-Formel:

$$\nu = R_{\infty} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{c}{\lambda}$$

$$m = 1, 2, 3, \dots; n = m+1, m+2, \dots$$

mit der Rydberg-Konstanten

$$R_{\infty} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 h^3} \approx 3.2898 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

für unendl. schweren Kern

Die Wellenlänge  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

wird oft in Ångström angegeben:

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$$

Photonenenergien  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

oft in eV:  $1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$(E = e \cdot U)$

# Quantenmechanik: Materiewellen

## Welle-Teilchen-Dualismus

**Welle**  
Frequenz  $f$   
Wellenlänge  $\lambda$



**Teilchen**  
Energie  $E = h \cdot f$   
Impuls  $p = h/\lambda$

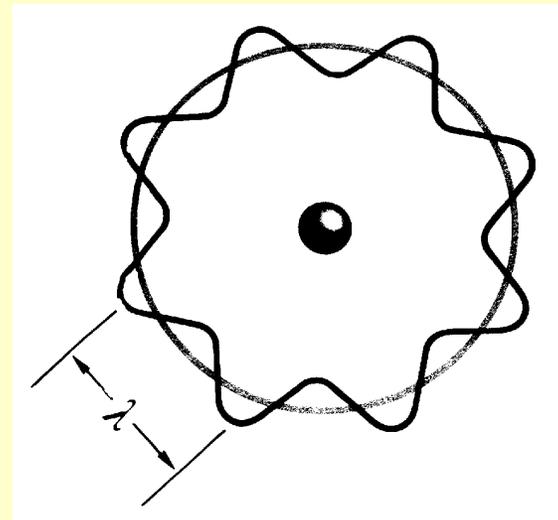


1875-1960

Gilt für **Licht (Photonen)** (Einstein)  
und für **Materie (Materiewellen)** (de Broglie)

Materiewelle beschreibt Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Teilchen an dem betrachteten Ort aufhält.

Elektronenbahn um den Kern (Bohr)  
→ stehende Materiewelle



# Quantenmechanik: Unschärferelation

Materiewelle  
 $\Psi(x)$



kein genau definierter Ort  
Wahrscheinlichkeitsaussagen  
 $|\Psi(x)|^2$

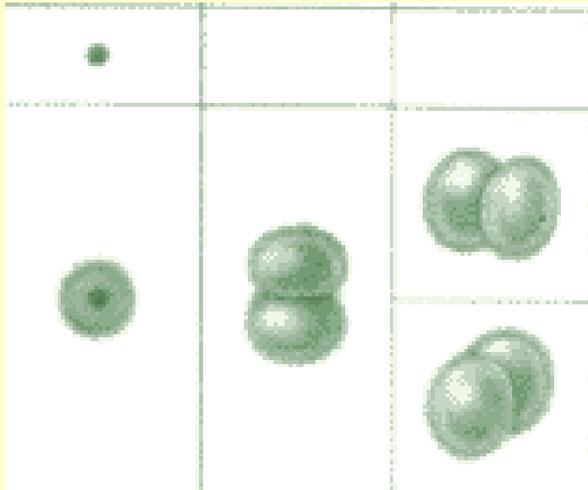


1901-1976

## Heisenbergsche Unschärferelation:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Ort  $x$  und Impuls  $p$  können nicht beliebig genau bestimmt werden. Für das Produkt aus Ortsunschärfe  $\Delta x$  und Impulsunschärfe  $\Delta p$  setzt das Plancksche Wirkungsquantum eine feste untere Grenze.



„Wolken“ der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen im Wasserstoff (Orbitale)

# Quantenmechanik: Schrödingergleichung

Zeitunabhängige **Schrödingergleichung**:

$$E \cdot \psi(x) = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x) \cdot \psi(x)$$

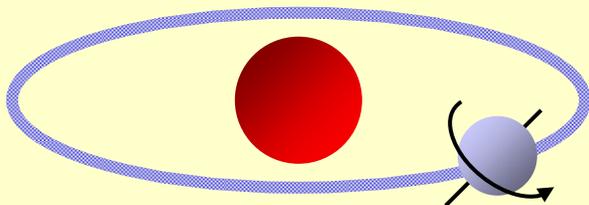
1887-1961



verknüpft **Wellenfunktion**  $\psi(x)$  mit Energie  $E$  und Potential  $V(x)$ .

Die Schrödingergleichung hat nur bestimmte Lösungen (Zustände), die durch einen Satz von Zahlen (**Quantenzahlen**) bestimmt ist:

$n$	Hauptquantenzahl	Energie $E$	$n = 1, 2, 3, \dots$
$l$	Nebenquantenzahl	Bahndrehimpuls $ \vec{L} $	$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$
$m$	magnetische Quantenzahl	z-Komponente von $\vec{L}$	$m = -l, \dots, +l$
$s$	Spinquantenzahl	Eigendrehimpuls $\vec{S}$	$s = \pm 1/2$



Elektronenspin (Eigendrehimpuls)

$$S = \pm \frac{\hbar}{2}$$

# Quantenmechanik: Orbitale

n	l=0 (s-Elektron)	l=1 (p-Elektron)			l=2 (d-Elektron)					l=3 (f-Elektron)						
	m=0	m=0	m=1	m=-1	m=0	m=1	m=-1	m=2	m=-2	m=0	m=1	m=-1	m=2	m=-2	m=3	m=-3
1																
2																
3																
4																

Abb. 10-29: Übersicht über die Knotenflächen zu den verschiedenen Tripeln der Quantenzahlen  $n$ ,  $l$  und  $m$  bis  $n = 4$ .

# Quantenmechanik: Pauliprinzip



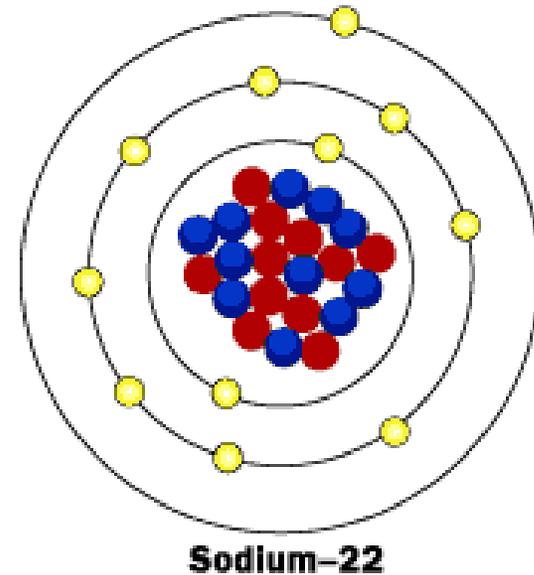
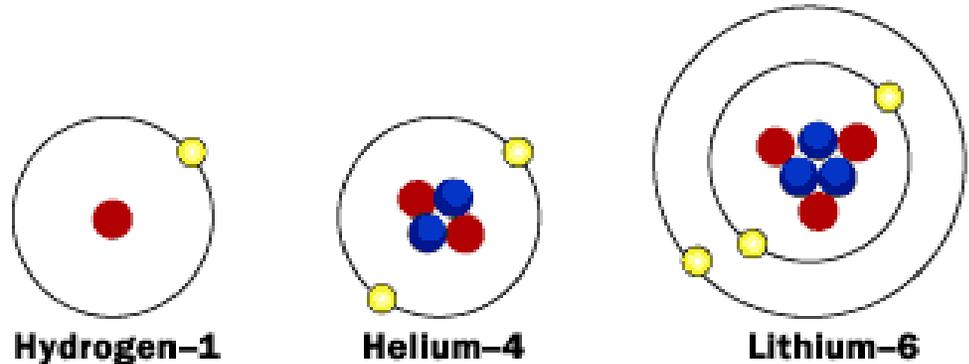
1900-1958

## Pauliprinzip:

Keine 2 Elektronen in einem Atomverbund können dieselben Quantenzahlen aufweisen.

→ Aufbau des Periodensystems

## Isotopes of Hydrogen, Helium, Lithium and Sodium



● Neutron ● Proton ● Electron

Experiment Kernphysik:

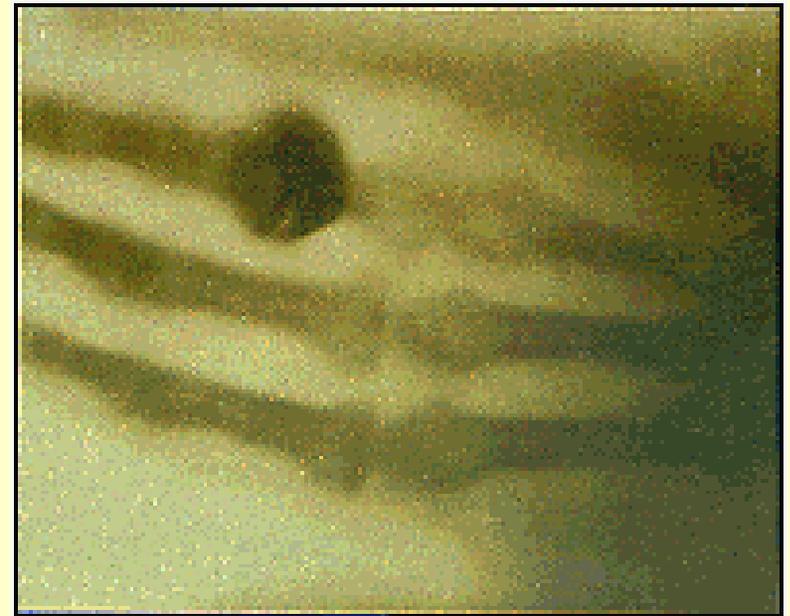
– Geiger-Müller-Zählrohr

# Röntgenstrahlung



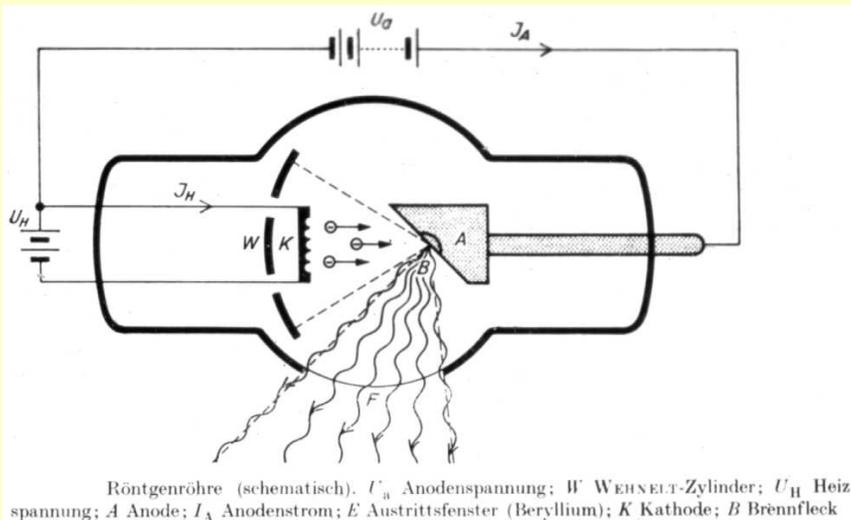
1845-1923

**Röntgenstrahlen:** elektromagnetische Welle mit Wellenlänge um  $1 \text{ \AA}$  und Energien von  $E = h f = 1000 \text{ eV}$  bis  $100.000 \text{ eV}$ . (1 keV bis 100 keV)

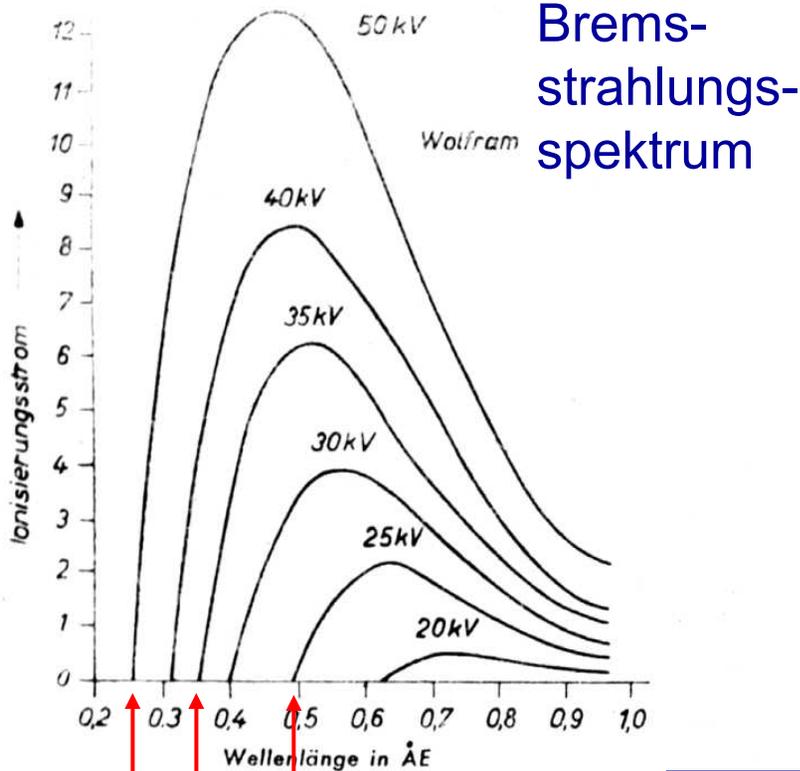


Das erste Röntgenbild

## Röntgenröhre



# Röntgenstrahlung: Bremsstrahlung



**Abbremsung** von Elektronen

$\dot{I}$

↓

$\dot{H}$  Maxwellsche Gesetze

↓

$\dot{E}$

**Abstrahlung** von elektromagnetischen Wellen

**Grenzwellenlänge** bestimmt durch:

kinetische Energie = Energie der Elektronen = Energie der Photonen

$$E_{kin} = e \cdot U_0 \qquad E_{Ph} = h \cdot f$$

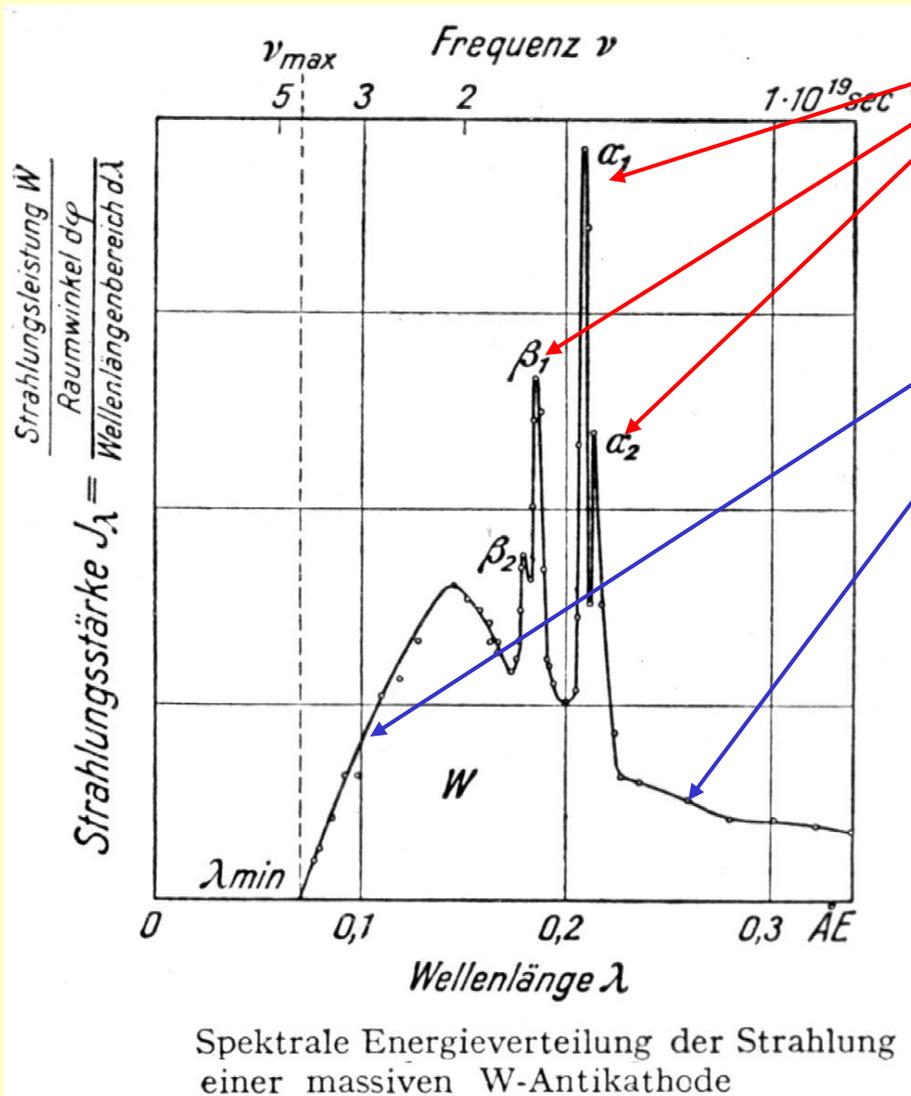
→  $\lambda_{gr} = \frac{hc}{eU_0}$

Grenze für

50 kV  
35 kV  
25 kV

Spektrale Intensitätsverteilung der Röntgenbremsstrahlung im Bereich von 0,2 bis 1,0 ÅE

# Röntgenstrahlung: charakterist. Spektrum



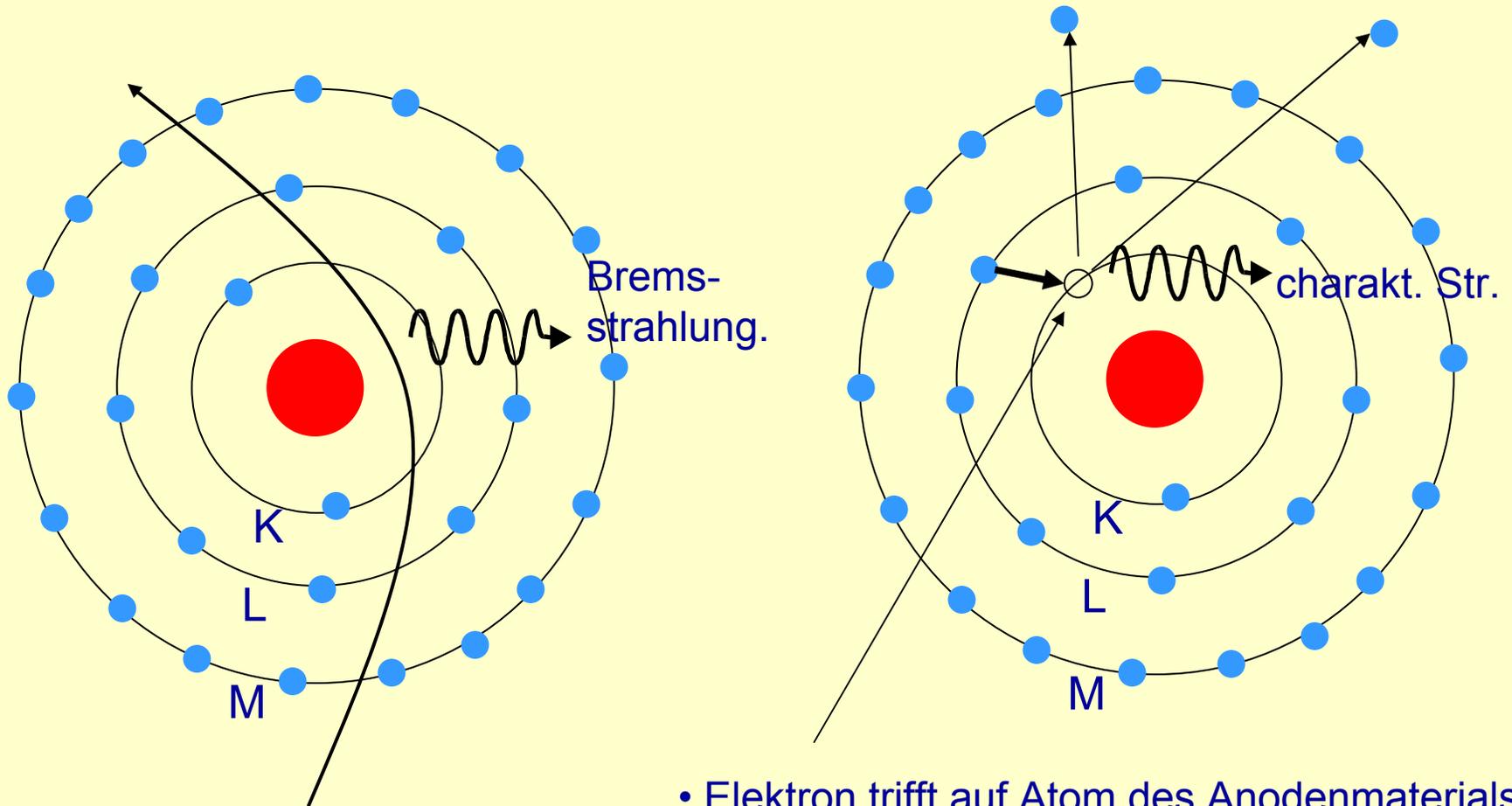
**Spitzen:**  
charakteristisches Spektrum

**Bremsspektrum**

Alle vorkommenden Wellenlängen  
größer als die Grenzwellenlänge

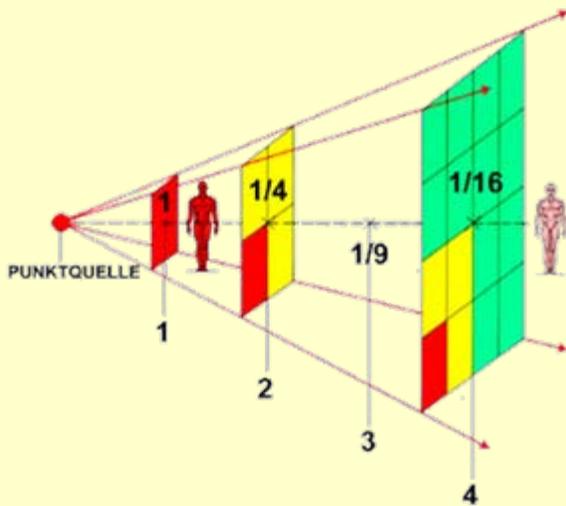
$$\lambda \geq \lambda_{gr} = \frac{hc}{eU_0}$$

# Röntgenstrahlung



- Elektron trifft auf Atom des Anodenmaterials
- Elektron schlägt weiteres Elektron aus innerer Schale (K,L,..) und fliegen weiter
- Elektron aus höherer Schale rückt nach
- Emission eines Photons (Röntgenquants)

# Abschwächung von Röntgenstrahlung

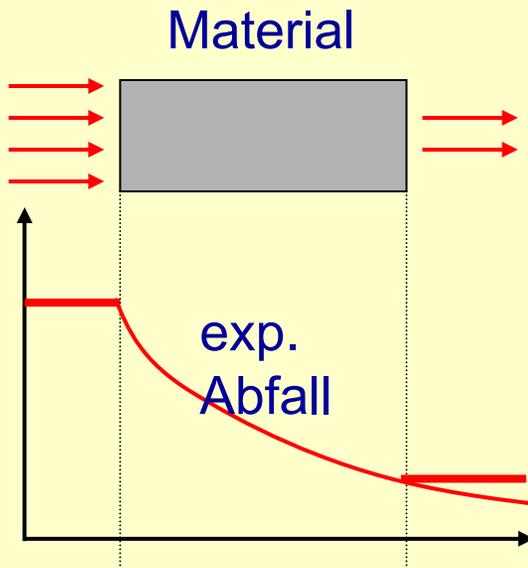


**Strahlstärke** im Vakuum  
nimmt mit dem Quadrat des  
Abstandes ab

$$I = \frac{I_0}{r^2}$$

**Strahlstärke** im Medium  
nimmt exponentiell mit dem  
Abstand ab

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu r}$$



$\mu(\lambda, Z, \rho)$  : **Schwächungskoeffizient**  
abhängig von

$\lambda$ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung

$Z$ : Kernladungszahl des Materials

$\rho$ : Massendichte der Materials

verschiedene Materialien schwächen  
verschieden stark → Unterscheidung

# Abschwächung von Röntgenstrahlung

---

## Beersches Gesetz:

$$\mu(\lambda, Z, \rho) = \rho \cdot \mu_m(\lambda, Z)$$

## Massenabsorptionskoeffizient:

$$\mu_m(\lambda, Z) \propto \lambda^3 \cdot Z^3$$

weiche (langwellige) Strahlung wird stärker absorbiert als harte (kurzwellige) Röntgenstrahlung

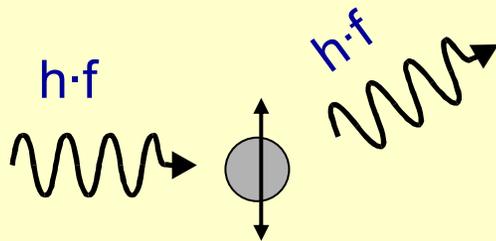
Materialien mit hoher Kernladungszahl absorbieren stärker als Materialien mit niedriger Kernladungszahl

Kohlenstoff:  $Z = 12$

Blei:  $Z = 82$



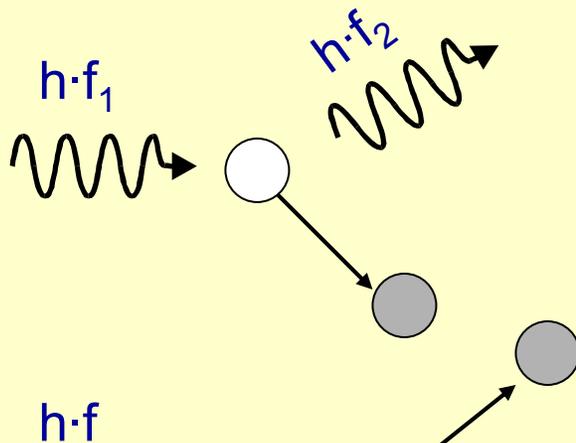
# Mechanismen der Schwächung



## Streuung:

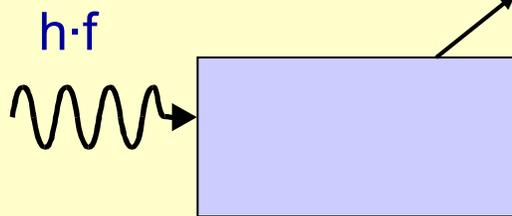
(Kohärent) **Rayleigh-Streuung:**

gestreutes Photon hat die gleiche Frequenz (Energie), aber andere Richtung



(Inkohärent) **Compton-Streuung:**

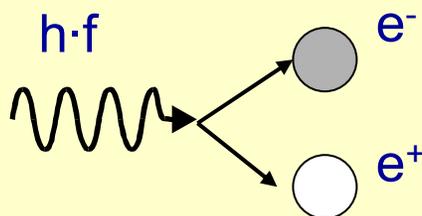
gestreutes Photon hat die kleinere Frequenz (Energie) und i.a. andere Richtung. Ein Teil der Energie wird als kinetische Energie an das Elektron abgegeben.



## Absorption:

**Photoeffekt:**

Photon wird absorbiert und löst ein Elektron aus dem Atomverband aus, das Elektron wird frei

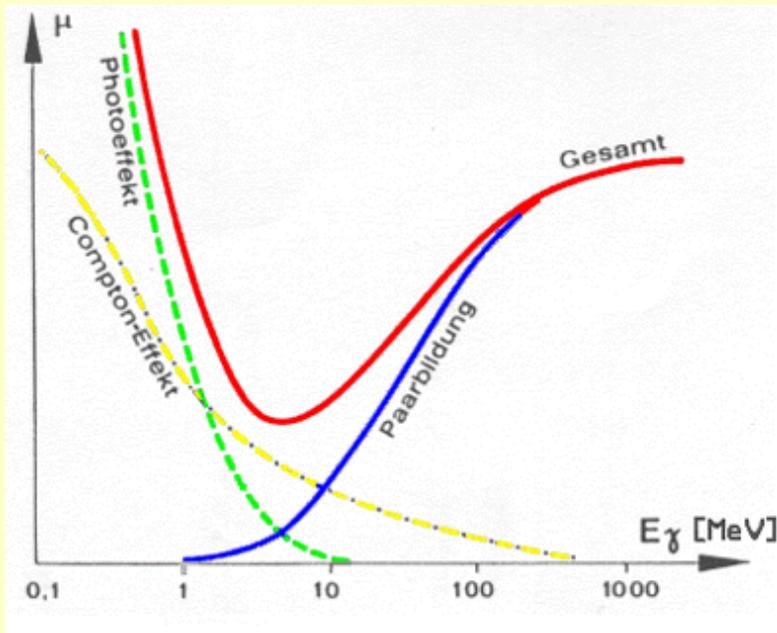


**Paarbildung:**

1 Photon erzeugt ein Elektron-Positron-Paar, mögl. ab

$$E_{\min} = m_e c^2 + m_p c^2 = 2 m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$$

# Absorption u. Nachweis v. Röntgenstrahlung

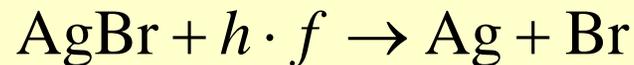


Schematischer Verlauf des Absorptionskoeffizienten als Funktion der Röntgenenergie

**Nachweis** von Röntgen-Strahlung durch:

**Lumineszenz:** Erzeugung angeregter Zustände durch Röntgen-Strahlung, Die dann durch (kaskadierte) Übergänge in den Grundzustand zerfallen und sichtbares Licht abstrahlen (Szintillationszähler)

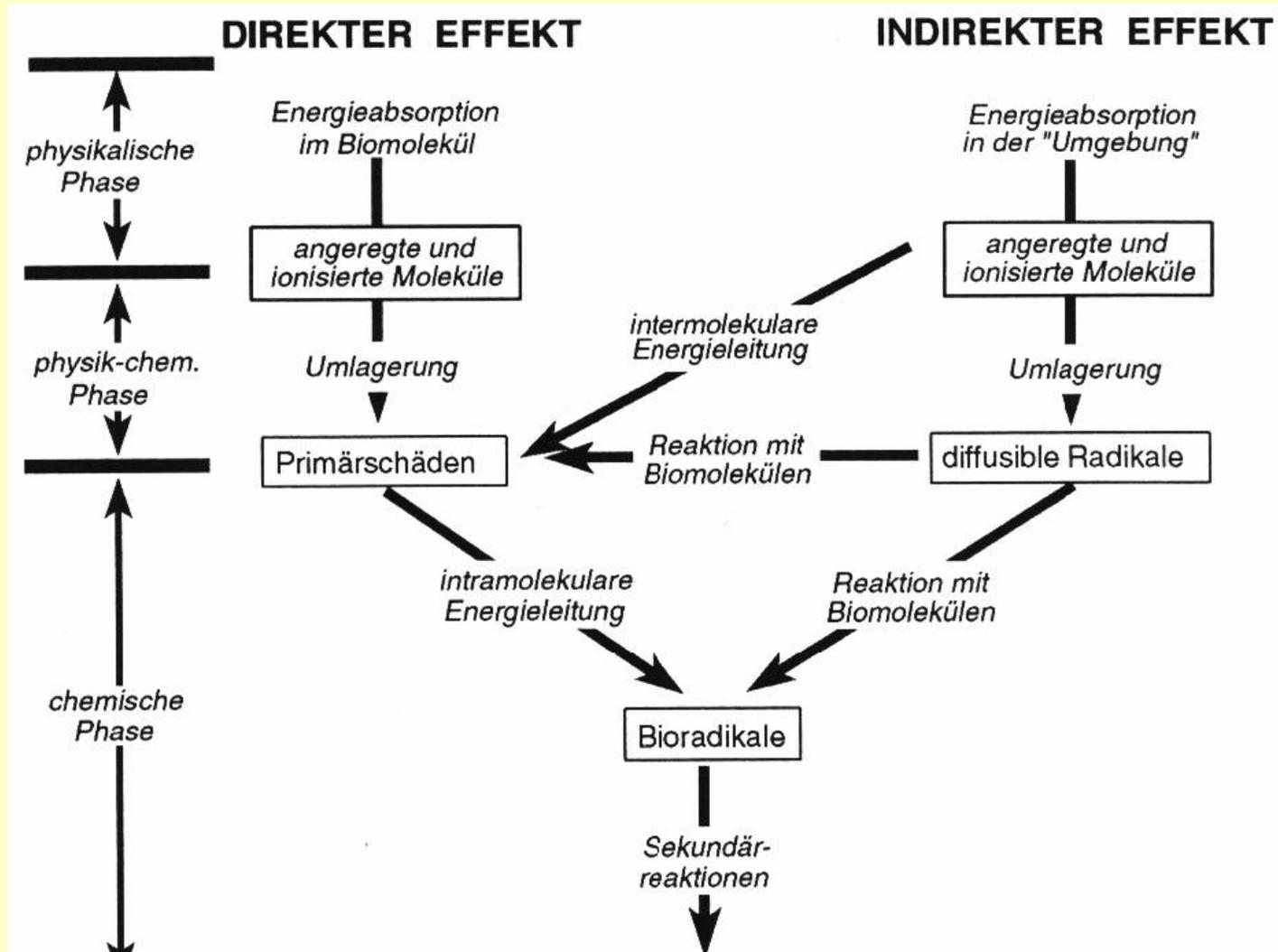
**Photochemie:** Schwärzung einer Photoplatte (Filmdosimeter)



**Photoeffekt:** Röntgen-Strahlung erzeugt in Halbleiter freie Elektronen, die als Strom messbar sind.

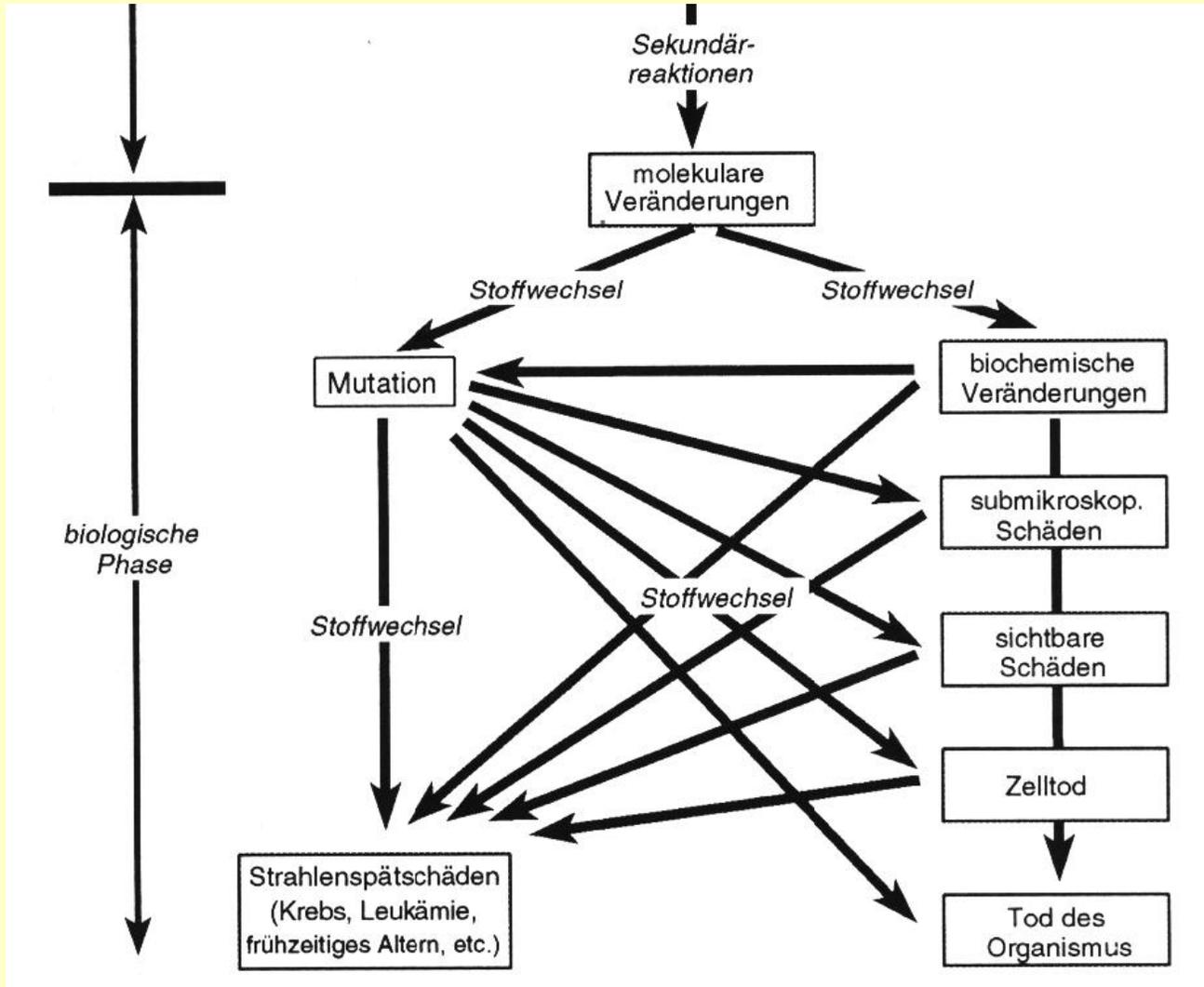
# Strahlenschäden 1

## Biologisch-chemische Wirkung von Strahlen: Physikalische und chemische Phasen



# Strahlenschäden 2

## Biologisch-chemische Wirkung von Strahlen: Biologische Phase



# Atomkern

Masse im Atomkern konzentriert

Kernradius:  $r_K = 10^{-15}$  m

2 Arten **Kernbausteine (Nukleon)**:

Atomradius:  $r_A = 10^{-10}$  m

**Proton:**  $m = 1.673 \cdot 10^{-27}$  kg,  $q = +e$

**Neutron:**  $m = 1.675 \cdot 10^{-27}$  kg,  $q = 0$

**Atomkern:**

${}^A_Z X_{(N)}$  z.B.  ${}^4_2 \text{He}_{(2)}$ ,  ${}^{197}_{79} \text{Au}_{(118)}$

X = Elementsymbol

A = Z + N: Massenzahl

Z: Protonenzahl

N: Neutronenzahl

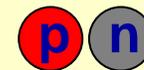
Atomare Masseneinheit:  $1 \text{ AME} = 1 \text{ u} \approx 1.66057 \cdot 10^{-27}$  kg =  $\frac{1}{12} m({}^{12}_6 \text{C})$

**Isotope**

Nuklide mit gleicher Kernladungszahl Z,  
(=> gleiche chemischen Eigenschaften)  
verschiedenen Neutronenzahlen N bzw.  
(Massenzahlen A)



${}^1_1 \text{H}$  Wasserstoff



${}^2_1 \text{H}$  Deuterium



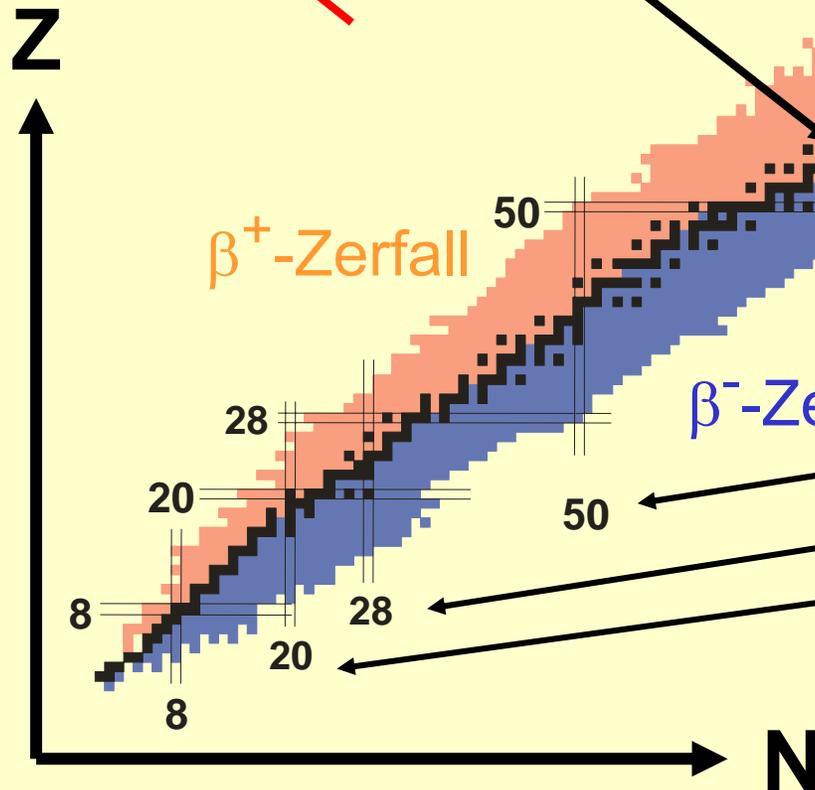
${}^3_1 \text{H}$  Tritium

Außerdem: Isotone (N konst.), Isobare (A konst.) und Isomere (angeregt)

# Nuklidkarte

Anordnung der Nuklide  
Analog zum Periodensystem  
der Elemente

Isotope —  
Isotone —  
Isobare —



Stabile Kerne

$\alpha$ -Zerfall

Spaltung

Transurane

Z = 92 Uran  
Z = 93 Neptunium  
Z = 94 Plutonium

$\beta^+$ -Zerfall

$\beta^-$ -Zerfall

Magische Zahlen

jeweils für Z und N  
8, 20, 28, 50, 82, 126

Erklärung durch

Spin-Bahn-Term der  
starken Wechselwirkung

# Bindungsenergie der Kerne

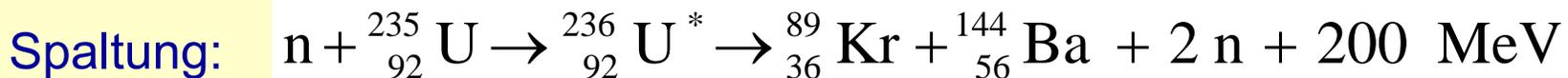
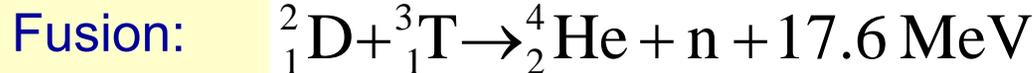
Kernmasse <  
Masse der Protonen +  
Masse der Neutronen

$$m_K = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - \Delta m$$

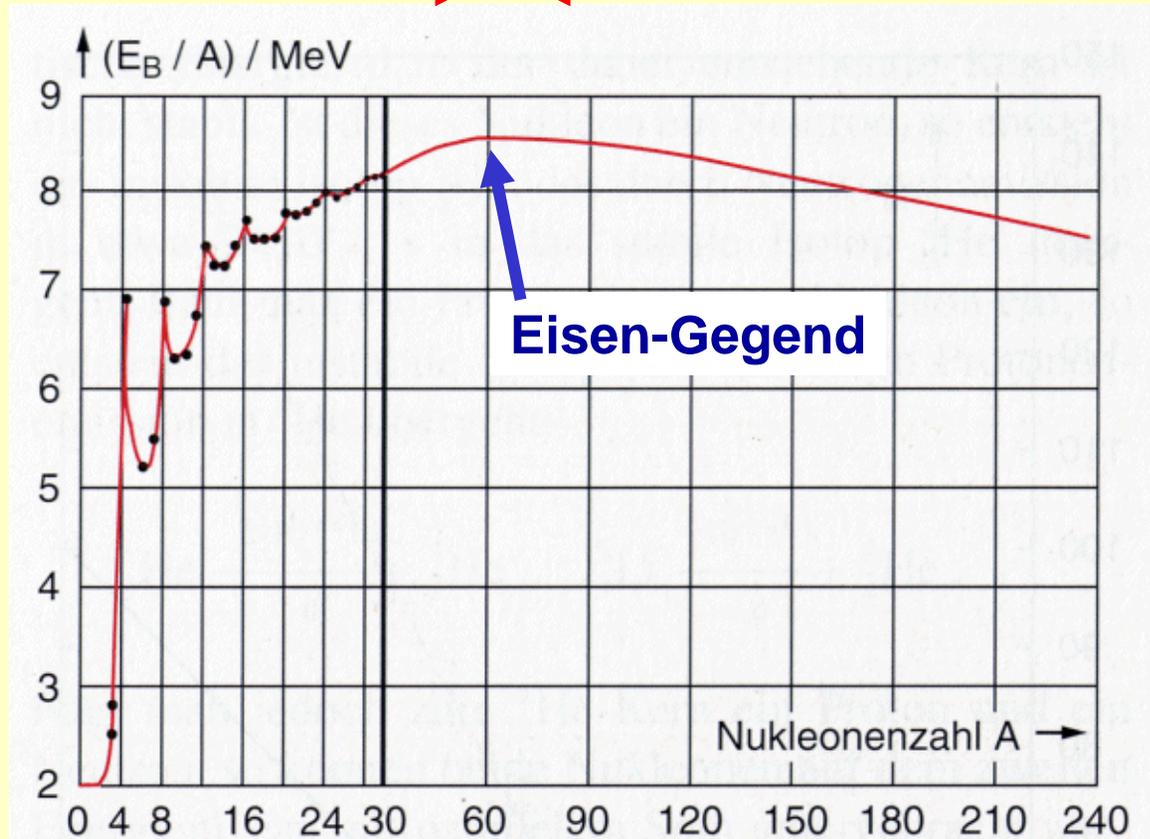
$$\Delta m \cdot c^2 = E_b$$

$\Delta m$  heißt **Massendefekt**  
entspricht

**Bindungsenergie** =  
Energie, die aufgebracht  
werden muss, um die  
Nukleonen eines Kerns  
voneinander zu trennen



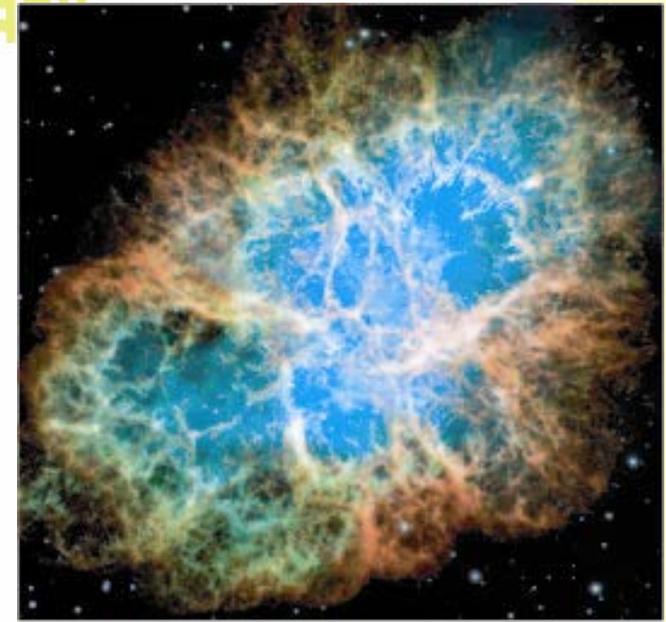
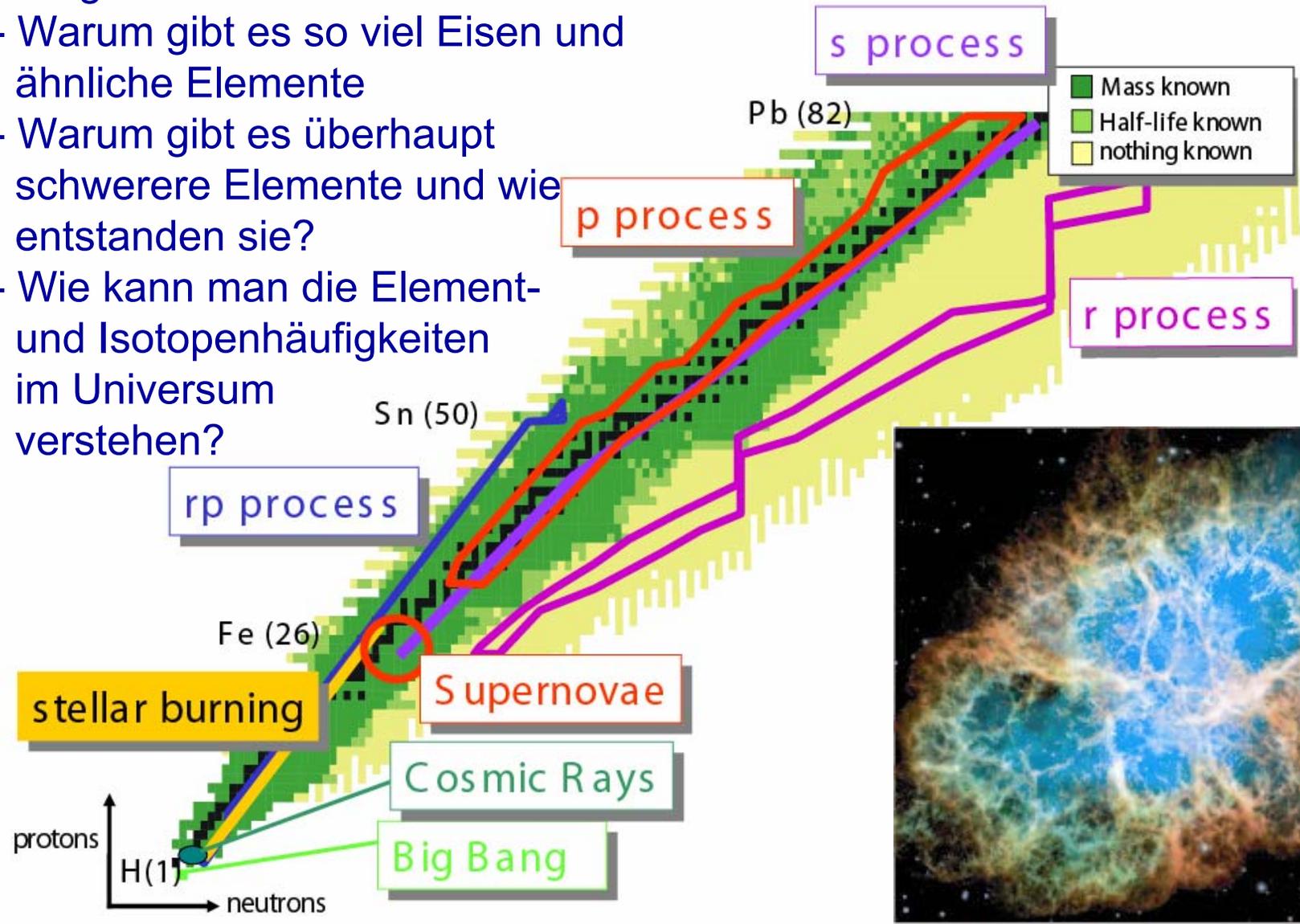
Energiegewinn durch  
Kernfusion  $\leftarrow$   $\rightarrow$  Kernspaltung



# Nucleosynthese

Fragen:

- Warum gibt es so viel Eisen und ähnliche Elemente
- Warum gibt es überhaupt schwerere Elemente und wie entstanden sie?
- Wie kann man die Element- und Isotopenhäufigkeiten im Universum verstehen?



# Kernspin und magnetisches Moment

---

**Kernspin  $I$ :**  $\vec{I} = \vec{L} + \vec{S}$

Spin  $S = \frac{1}{2}$   
Bahndrehimpuls  $L = 0, 1, 2$

Alle Atome mit ungerader Nukleonenzahl haben  $\vec{I} \neq 0$

**Magnetisches Moment**  $\vec{M} = g_I \frac{e}{2m_p} \vec{I}$

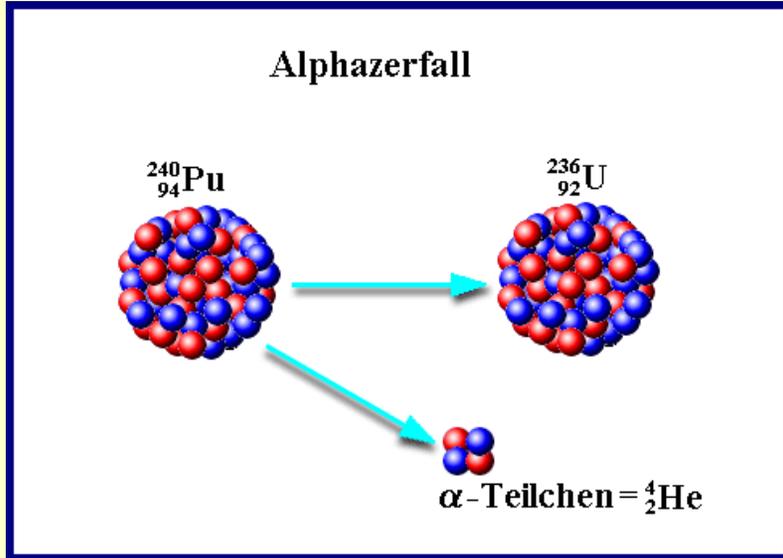
**NMR:** Der Kern eines Atoms wirkt wie ein „magnetischer Kreisel“. In einem äußeren Magnetfeld  $B$  führt er wegen der Drehimpulserhaltung eine Präzessionsbewegung durch. Legt man ein zeitlich veränderliches Querfeld  $B'$  an, so findet man bei der Präzessionsfrequenz eine ausgeprägte Resonanz.

Sie ist charakteristisch für den jeweiligen Kern (gyromagnetischen Verhältnis  $g_I$ ).

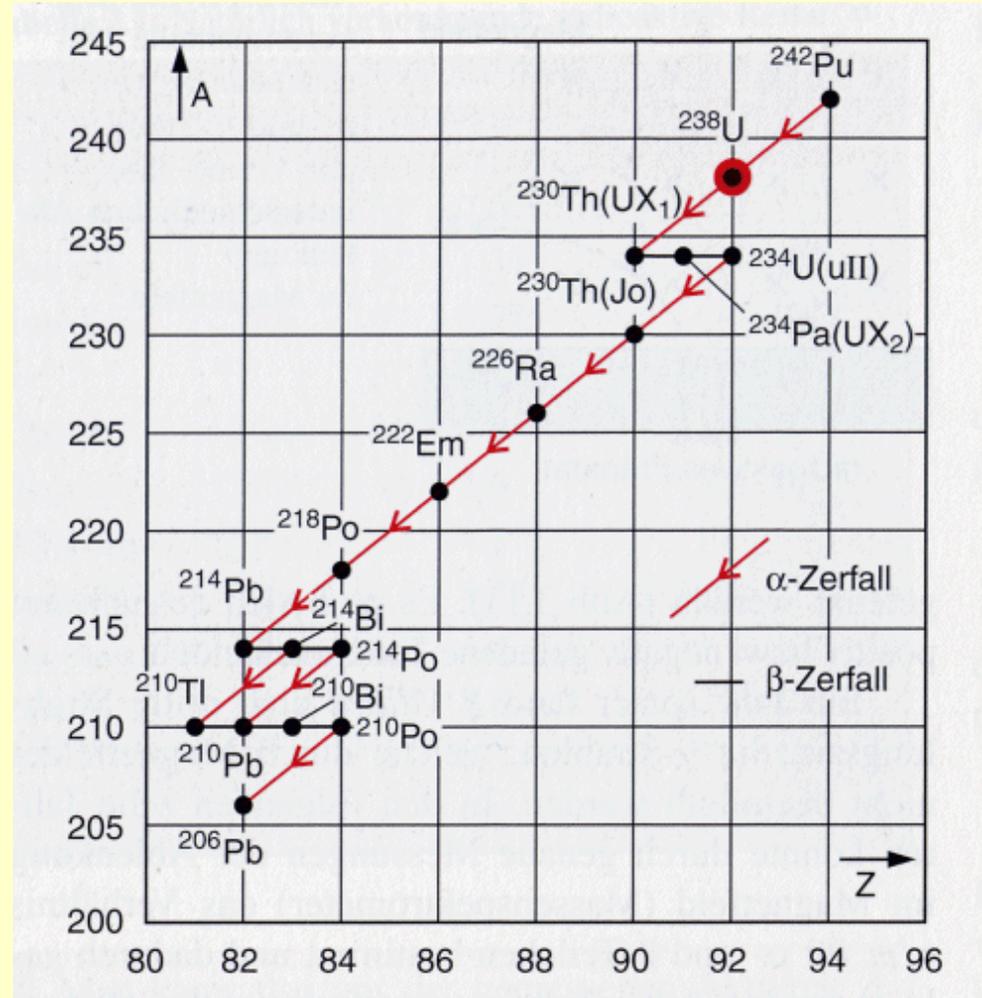
→ Kernspintomograph

# Radioaktivität

Zerfall instabiler Kerne:



Zerfallsreihe von Uran-238



# Zerfallsgesetz

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) = -A(t)$$

Analog Absorption  $\frac{dI}{dx} = -\mu I(x)$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$$
$$= N_0 2^{-t/t_{1/2}}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Lebensdauer}$$

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{Halbwertszeit}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = \dots$$

$A_0$ : Anfangsaktivität

A: momentane Aktivität

Becquerel Bq = 1/s

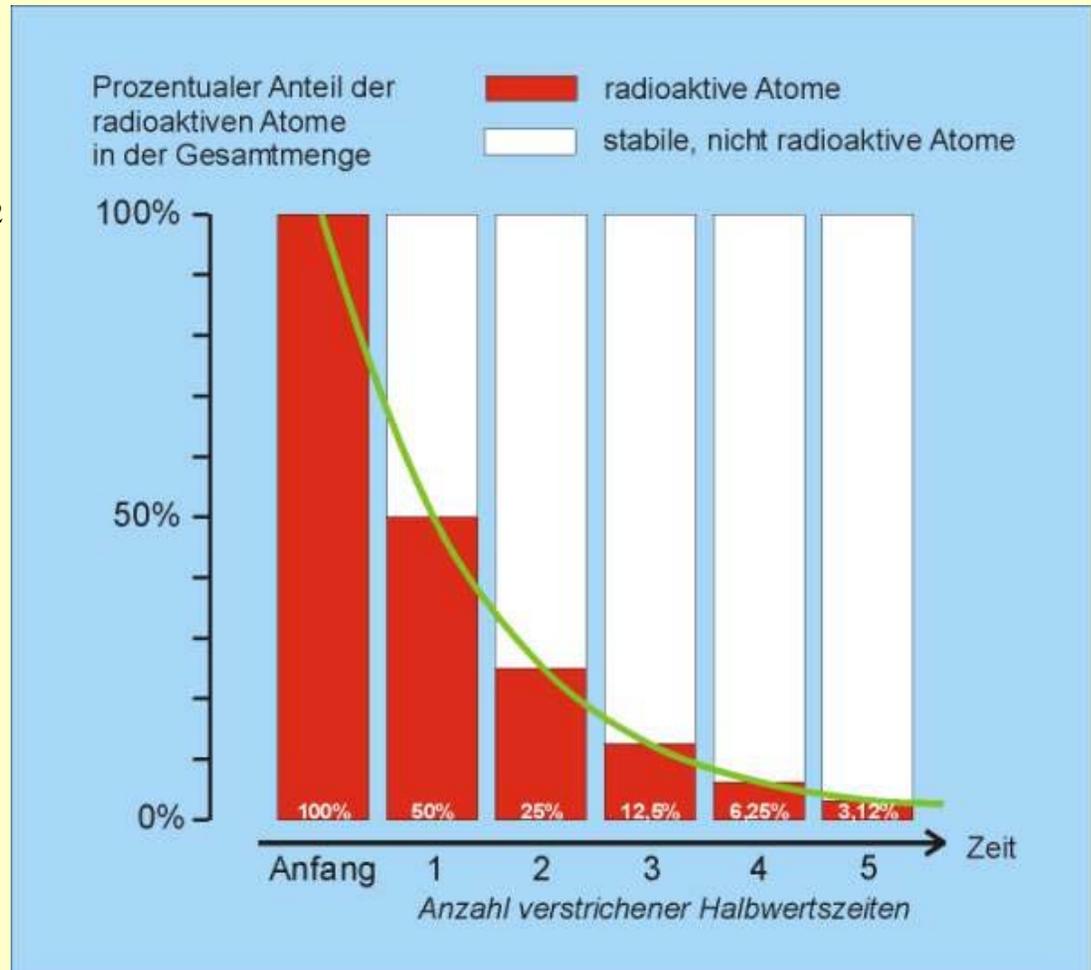
früher Curie Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq

(entspricht 1 g Radium)

$N_0$ : Anfangsmenge instabiler Kerne

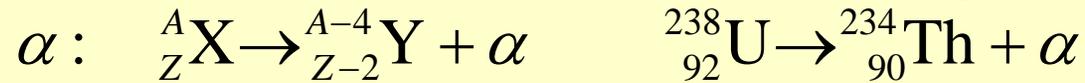
N: momentane Menge instabiler Kerne

$\lambda$ : Zerfallskonstante

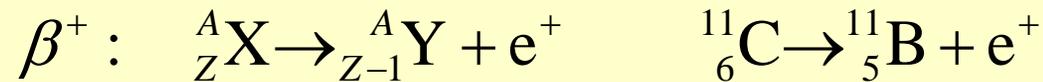
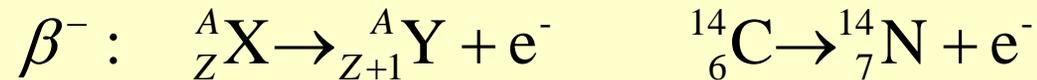


# Zerfallsarten

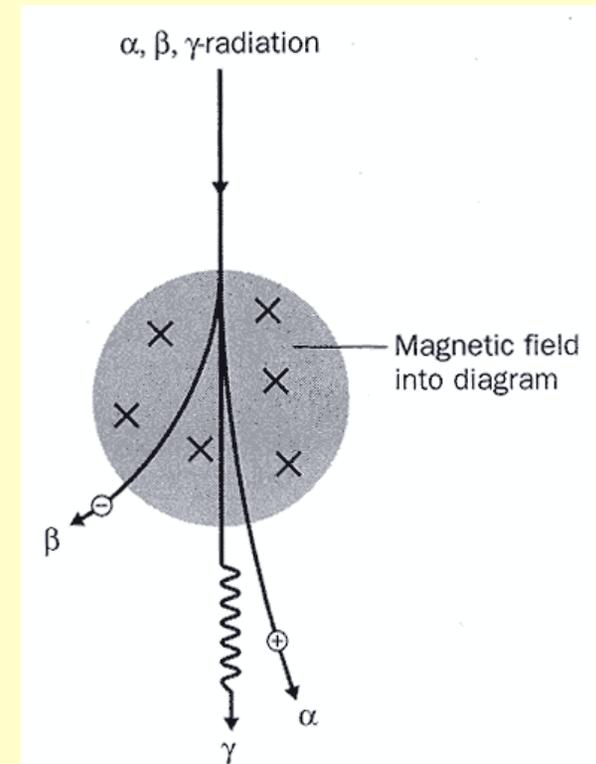
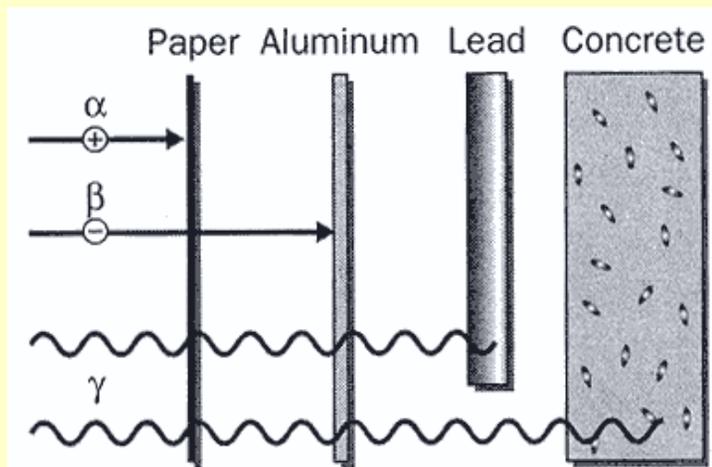
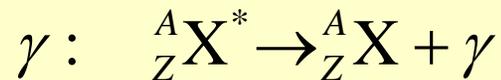
**$\alpha$ -Zerfall:** Setzt ein  $\alpha$ -Teilchen frei ( $\alpha = {}^4_2\text{He}$ )



**$\beta$ -Zerfall:** Setzt ein Elektron ( $e^-$ ) oder ein Positron ( $e^+$ ) frei



**$\gamma$ -Zerfall:** Setzt elektro-magnetische Strahlung ( $\gamma$ ) frei,  $E_\gamma = h \cdot f$

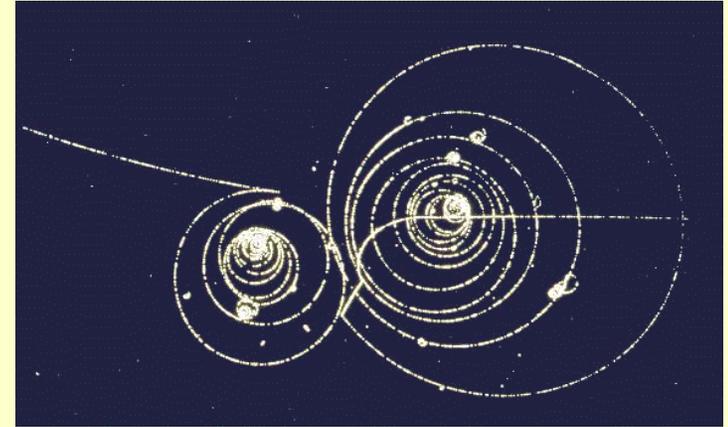


# Strahlungsdetektion 1

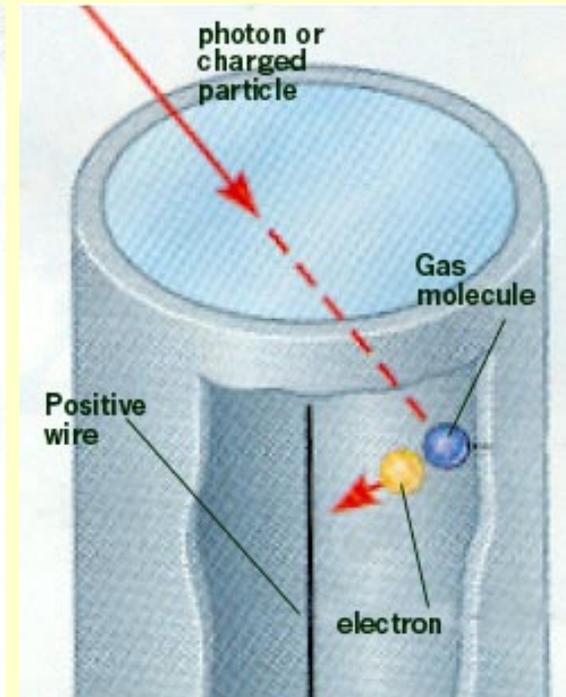
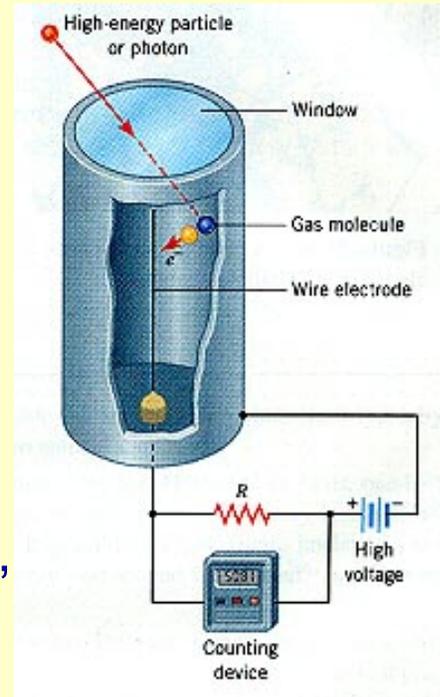
$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ : können Atome ionisieren,  
„ionisierende Strahlung“

**Nebelkammer:** Alkoholdampf in Kammer,  
Wird durch Strahlung ionisiert, an den Ionen  
kondensiert der Dampf => Teilchenspur

**Blasenkammer:** Blasenbildung in „über-  
hitzer“ Flüssigkeit.



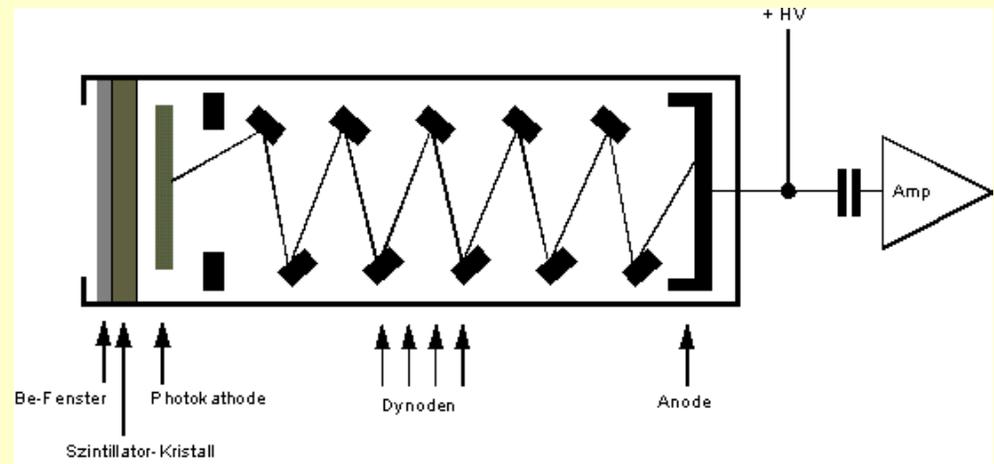
**Geiger-Müller-Zählrohr:**  
Ionisierende Strahlung in  
Metallrohr mit Argon und  
Alkoholdampf. Hohe Spannung  
(ca. 300 V) an Drahtelektrode,  
Ionisation der Argon-Atome, die  
freigesetzten Elektronen werden  
auf Drahtelektrode beschleunigt  
und erzeugen weitere Elektronen,  
Elektronenlawine auf Draht  
=> Zählimpuls



# Strahlungsdetektion 2

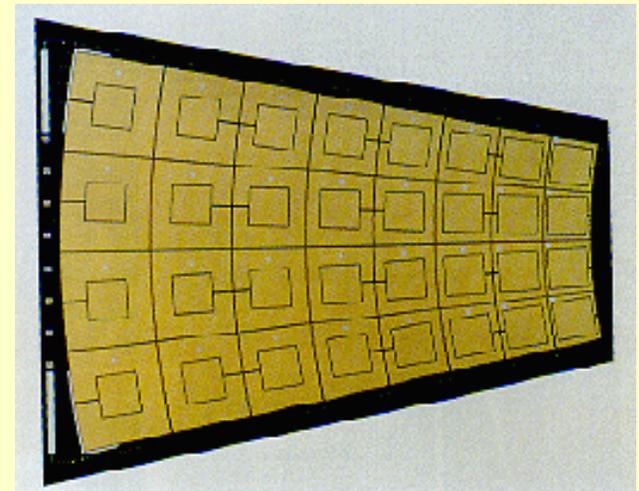
## Szintillationszähler:

basiert auf Photoeffekt:  
Radioaktive Strahlung führt bei bestimmten Materialien (NaJ) zu Photoluminiscenz (Lichtblitzen). Ein Photovervielfacher setzt Lichtblitze in elektrische Strompulse um, die gezählt werden.



## Halbleiterdetektor:

In der Sperrschicht einer Halbleiterdiode führt Strahlung zu Ionisation, was zu einem Strompuls führt, der gemessen wird.



# Dosimetrie 1

**Energiedosis** =  $\frac{\text{aus der Strahlung aufgenommene Energie}}{\text{Gewebemasse}}$

$$D_E = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

Einheit: Gy (Gray) = J / kg

früher: 1 Rad = 10 mGy  
(radiation absorbed dose)

**Ionendosis** =  $\frac{\text{Ladung der erzeugten Ionenpaare}}{\text{Gewebemasse}}$

$$D_I = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Einheit: C / kg

früher: Röntgen  
1 R = 258 mC/kg

**Äquivalentdosis** = biologische Dosis

$$D_q = q \cdot D_E$$

Einheit: Sv (Sievert) = J / kg

früher: 1 rem = 10 mSv  
(Röntgen equivalent man)

**Bewertungsfaktoren q**  
(= RBW-Faktoren, relative biologische Wirksamkeit)

Röntgenstrahlung ( $\gamma$ )	q=1
schnelle Elektronen ( $\beta$ )	q=1
therm. Neutronen (n)	q=3
schnelle Neutronen (n)	q=10
He-Kerne ( $\alpha$ )	q=15-20

# Strahlungsexposition und -schutz

---

**A**bstand maximieren

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

**A**bschirmung maximieren

$$I = I_0 e^{-\mu r}$$

**A**ufenthaltsdauer minimieren

$$I \propto t$$

**die 3 A's**

genetische Strahlenschäden ab etwa

**100 mSv/a**

max. (gesetzl.) erlaubte Äquivalenzdosis  
für gesamten Körper:

**50 mSv/a**

vgl. mit natürlicher Strahlenexposition

**ca. 1 mSv/a**

(große regionale Unterschiede aufgrund von Gesteinsarten und  
Höhe über NN, Zuwachs durch kosm. Str. 0,1 mSv/a pro 300m

sowie mit künstlicher Strahlenexposition

**ca. 0,6 mSv/a**

(ebenfalls große individuelle Unterschiede, z.B. med. Untersuchungen)

# Elementarteilchen

Tabelle 7.2. Charakteristische Daten einiger Teilchen mit Lebensdauern  $> 10^{-22}$  s

	Teilchen	Symbol	Baryonen- zahl $B$	Masse (MeV/c <sup>2</sup> )	Ladung	Spin in $\hbar$	Isospin $T$	Seltsam- keit $S$	Lebensdauer in s
	Photon	$\gamma$	0	0	0	1	0	0	$\infty$
Leptonen	Neutrino	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	$< 10^{-5}$	0	1/2	0		$\infty$
		$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	$< 10^{-4}$	0	1/2	0	0	$\infty$
		$\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	0	?	0	1/2	0		$\infty$
	Elektron	$e^+, e^-$	0	0,511	$\pm e$	1/2	0	0	$\infty$
	Myon	$\mu^-, \mu^+$	0	105,66	$\pm e$	1/2	0	0	$2,199 \cdot 10^{-6}$
Mesonen	Pionen	$\pi^+, \pi^-$	0	139,57	$\pm e$	0	1	0	$2,602 \cdot 10^{-8}$
		$\pi^0$	0	134,97	0	0	1	0	$8,4 \cdot 10^{-17}$
	Kaonen	$K^+, K^-$	0	439,71	$\pm e$	0	1/2	+1	$1,237 \cdot 10^{-8}$
		$K_S^0$	0	497,71	0	0	1/2		$8,82 \cdot 10^{-11}$
		$K_L^0$	0	497,71	0	0	1/2		$5,2 \cdot 10^{-8}$
	Eta-	$\eta$	0	548,5	0	0	0		$2,5 \cdot 10^{-17}$
		$\eta'$	0						$3,3 \cdot 10^{-21}$
	Phi-	$\phi$	0	1019	0	1	0	0	$1,5 \cdot 10^{-22}$
Psi-	$\psi$	0	3095	0	1	0	0	$10^{-20}$	
Baryonen	Proton	$p^+, p^-$	1, -1	938,26	$\pm e$	1/2	1/2	0	$\infty$
	Neutron	$n, \bar{n}$	1, -1	939,55	0	1/2	-1/2	0	918
	Lambda-	$\Lambda, \bar{\Lambda}$	1, -1	1115,59	0	1/2	0	-1, +1	$2,5 \cdot 10^{-10}$
	Sigma-	$\Sigma^+, \bar{\Sigma}^+$		1189,4	$\pm e$				$8 \cdot 10^{-11}$
		$\Sigma^0, \bar{\Sigma}^0$		1192,5	0	1/2	0		$< 10^{-14}$
	Omega-	$\Sigma^-, \bar{\Sigma}^-$		1197,3	$-e$				
	$\Omega^-$	+1	1672	$-e$	3/2	0	-2	$1,3 \cdot 10^{-10}$	

# Quarks & Co.

---

Auch die „Elementarteilchen“ sind zum Teil zusammengesetzt, Baryonen aus je 3, Mesonen aus je zwei Quarks:

Dabei gibt es drei sog. **Familien** oder **Generationen**:

u (up)	c (charm)	t (top, truth)	Ladung/e = 2/3
d (down)	s (strange)	b (bottom, beauty)	Ladung/e = -1/3

Dazu gehört jeweils ein Leptonenpaar:

e (Elektron)	$\mu$ (Myon)	$\tau$ (Tau)
$\nu_e$ (e-Neutrino)	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

Dazu die Antiteilchen, die Teilchen, durch deren Austausch die Wechselwirkung vermittelt wird und evtl. „supersymmetrische Teilchen“.

Einfache Beispiele:

**Proton:** uud

**Neutron:** udd

„**Farbladung**“: bei der starken WW analog zur Coulomb-Ladung bei der el.-mag. Wechselwirkung Reale, d.h. „direkt“ beobachtbare Teilchen sind immer „farbneutral“, d.h. Teilchen mit Antiteilchen (komplementäre Farben), oder drei ergänzende