

# Übersicht gkg ... pharm. Prüf.

Einführung

1 Allgemeines

2 Mechanik

3 Wärmelehre

4 Elektrizität und Magnetismus

5 Optik

6 Schwingungen und Wellen

**7 Atomistische Struktur der Materie**

# 7.1 aus gkg ... pharm. Prüf.

## 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 aus gkg ... pharm. Prüf.

### 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 aus gkg ... pharm. Prüf.

### 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

## 7.3f aus gkg ... pharm. Prüf.

### 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

## Experimente Atomphysik:

- Atomares Linienspektrum (Hg)
- Franck-Hertz-Versuch (Ne)
- Hallwachs-Versuch (= äußerer Photoeffekt)
- Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums  
(mit innerem Photoeffekt)

# Atom- und Kernphysik

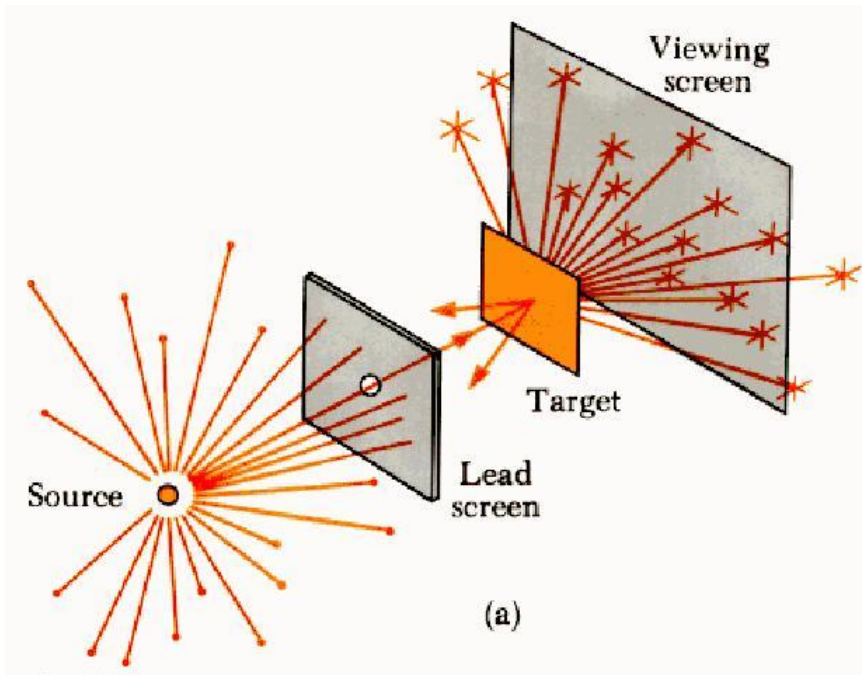
<b>Makroskopische Welt:</b>	Mechanik Thermodynamik Elektrizitätslehre Optik	} }	klassische Physik
<b>Mikroskopische Welt:</b>	Atomphysik Kernphysik Elementarteilchen ....	} }	„moderne“ Physik Quantenmechanik

**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

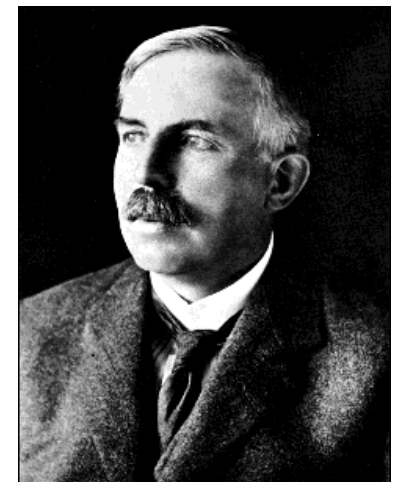


Beschuss einer Goldfolie mit  $\alpha$ -Teilchen (zweifach pos. geladenes Helium-Atom, d.h. Helium-Kern)

## Rutherford'sche Streuformel

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

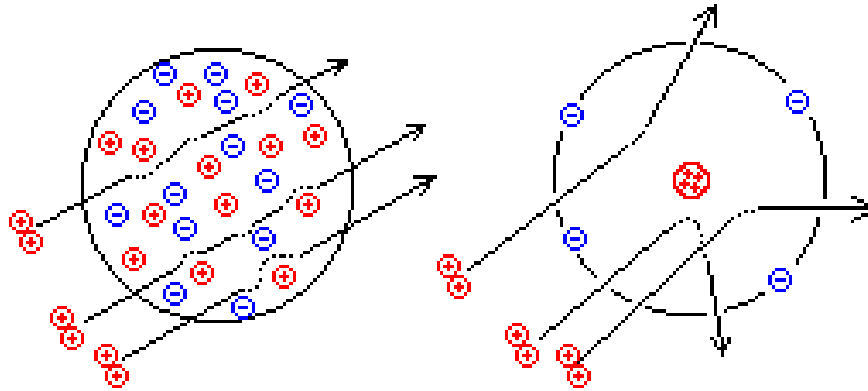
Zahl der pro Raumwinkel gestreuten Projektile





# Rutherford'sche Streuversuche

## Rutherford's Experiment



Expected alpha particle scattering in two models of the atom

Häufiges Auftreten **kleiner** Streuwinkel hätte bedeutet:

→ positive Ladungen im Atom gleichmäßig verteilt

Tatsächlich: 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.  
(Planetenmodell von Rutherford)

Bemerkung: Atom als ganzes ist neutral.

## Rutherford'sche Streuformel

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

Zahl der pro Raumwinkel gestreuten Projektile

„Target“ →

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

Außerdem:

Bestimmung der Größe des Kerns

Kernmassenzahl

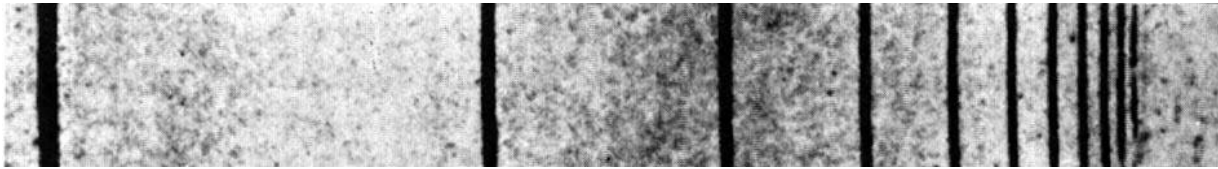
$$r_{Kern} \approx r_0 \sqrt[3]{A}$$

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

Vgl. Atom Ångström

$$r_{Atom} \approx 0,1 \text{ nm} = 1 \text{ Å}$$

# Linienenspektrum



656.3

486.1

434.0

410.2

397.0

388.9

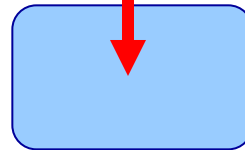
Linienenspektrum  
von Wasserstoff  
(Photoplatte = Negativ)

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

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

Emissionsspektrum

Energie

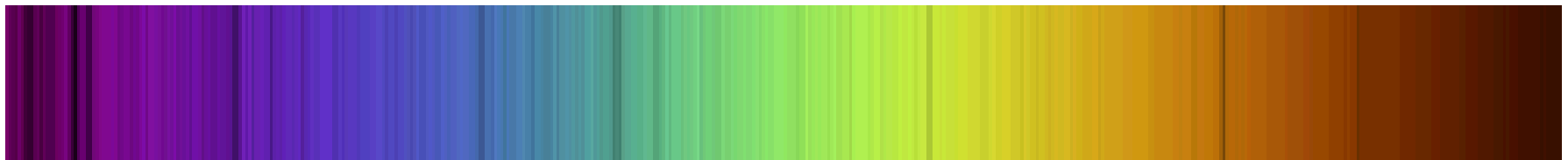


Materie



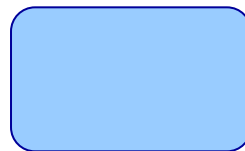
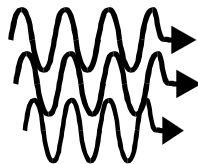
Beobachter

Spektrum der Sonne



Absorptions-  
spektrum

Weißes Licht



Materie



Beobachter

# Linienpektrum

**Spektroskopie:** aus der Untersuchung der Spektrallinien

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

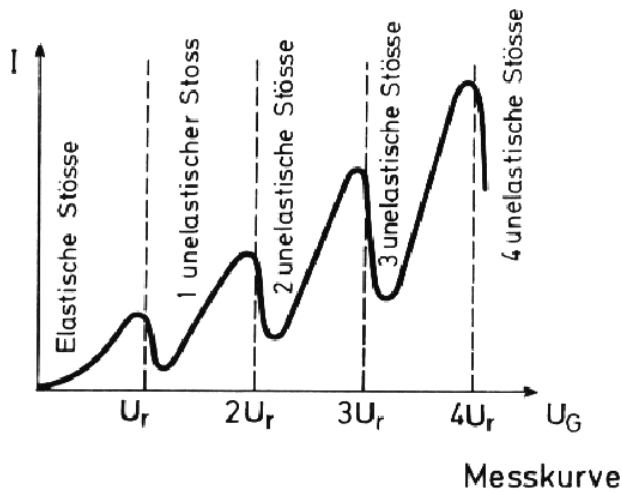
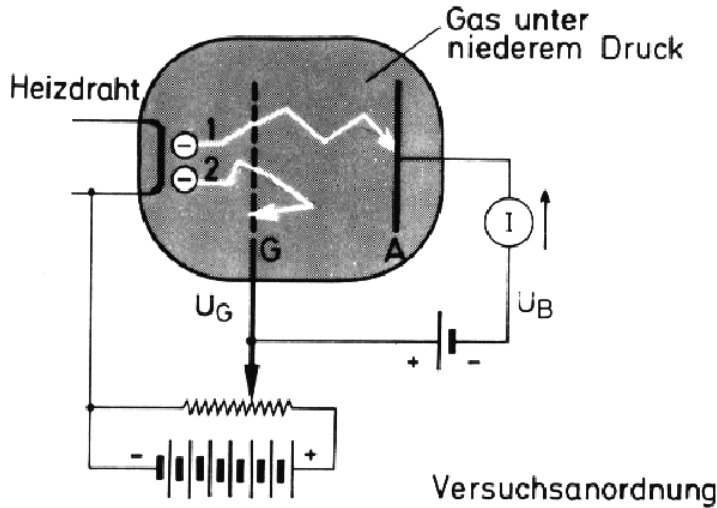


detaillierte Aussagen über

- 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

James Frank, Gustav Hertz 1912 - 14  
Nobelpreis 1925



Beschleunigung der Elektronen zw. Heizdraht und Gitter (G)

Abbremsung zw. Gitter (G) und Anode (A)

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

Energie der beschleunigten Elektronen

$$E_{kin} = eU$$

**Einheit 1eV (Elektronenvolt):** Energie, die eine Elementarladung beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 1V erhält:  $1\text{eV} = 1e \cdot 1\text{V} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 1\text{V} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{J}$

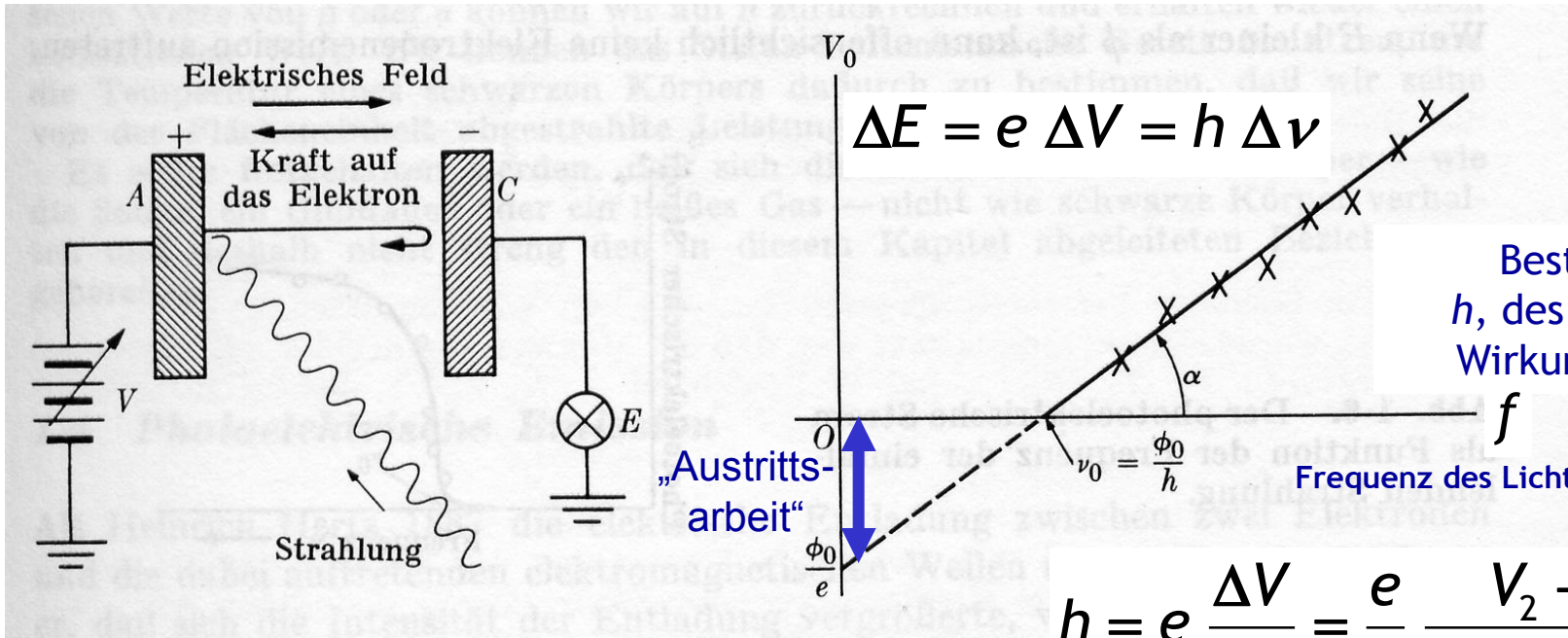
# Photoeffekt

Erklärung durch Einstein 1905  
Nobel-Preis 1921

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!  $E = hf$



Vorlesungsexperiment mit  
„innerem Photoeffekt“:

$$h = e \frac{\Delta V}{\Delta \nu} = \frac{e}{c} \frac{V_2 - V_1}{1/\lambda_2 - 1/\lambda_1}$$

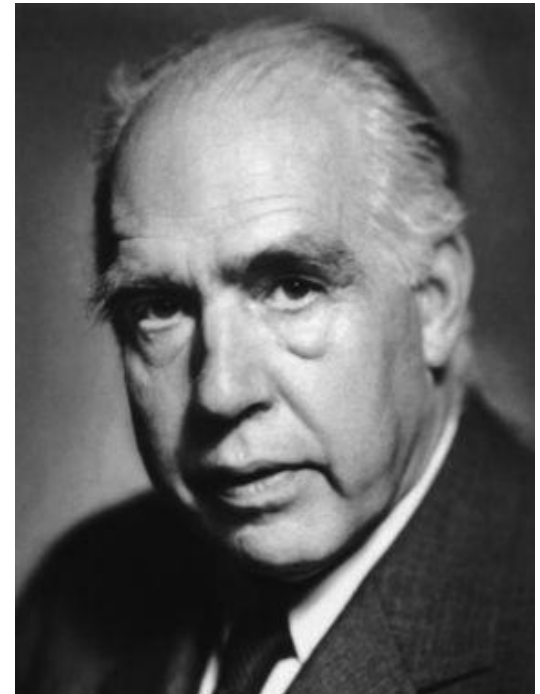
# Bohrsches Atommodell

## Probleme des Planetenmodells:

1. Elektronen auf Kreisbahn → beschleunigte Bewegung → Abstrahlung von el.-mag. Wellen → Energieverlust → Elektron stürzt in den Kern
2. 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

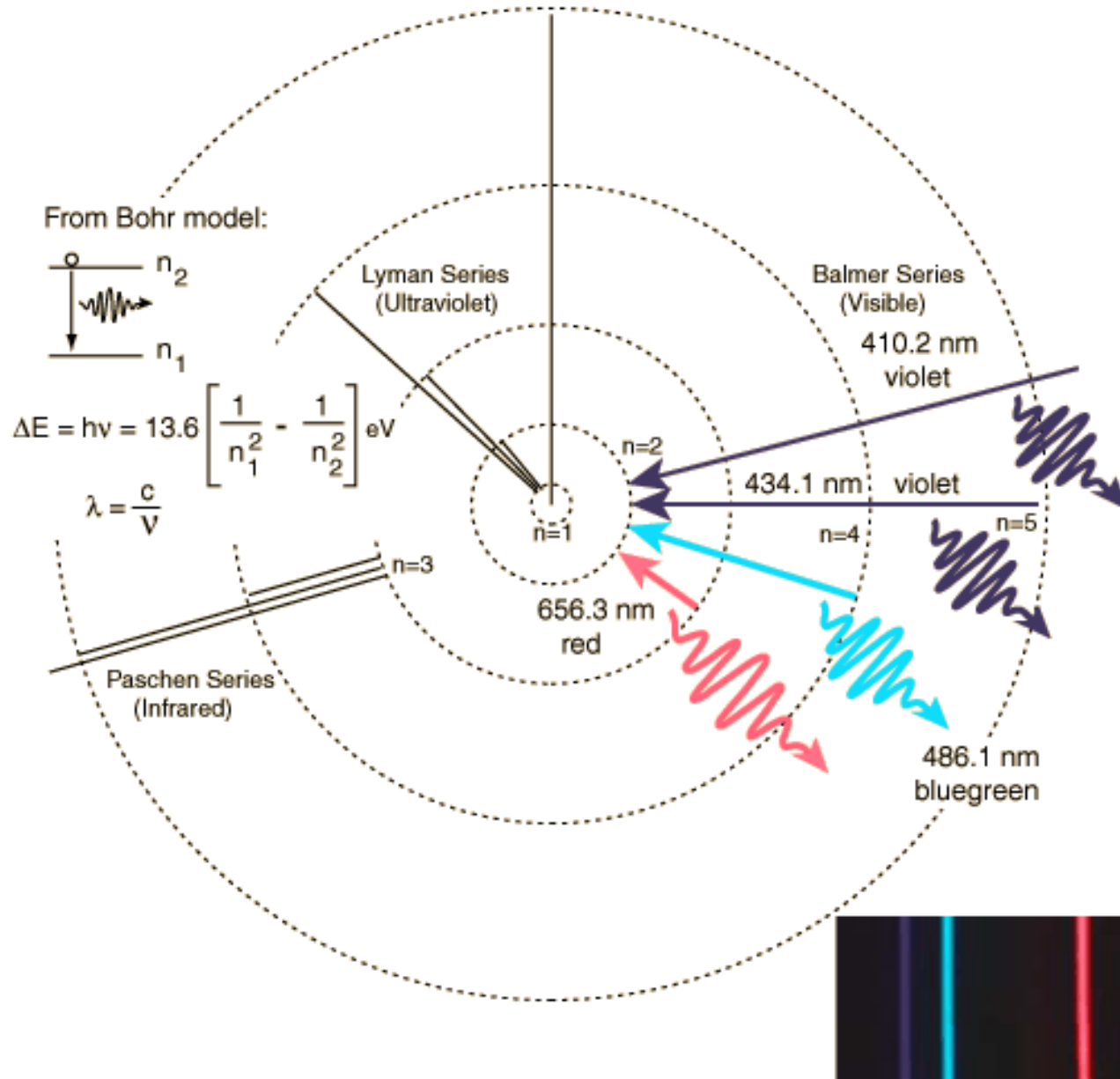
Bemerkungen:  $n = 0, 1, 2, \dots$

Mit „ $n$ “ ist hier die Drehimpulsquantenzahl gemeint, nicht die „Hauptquantenzahl“.

**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.

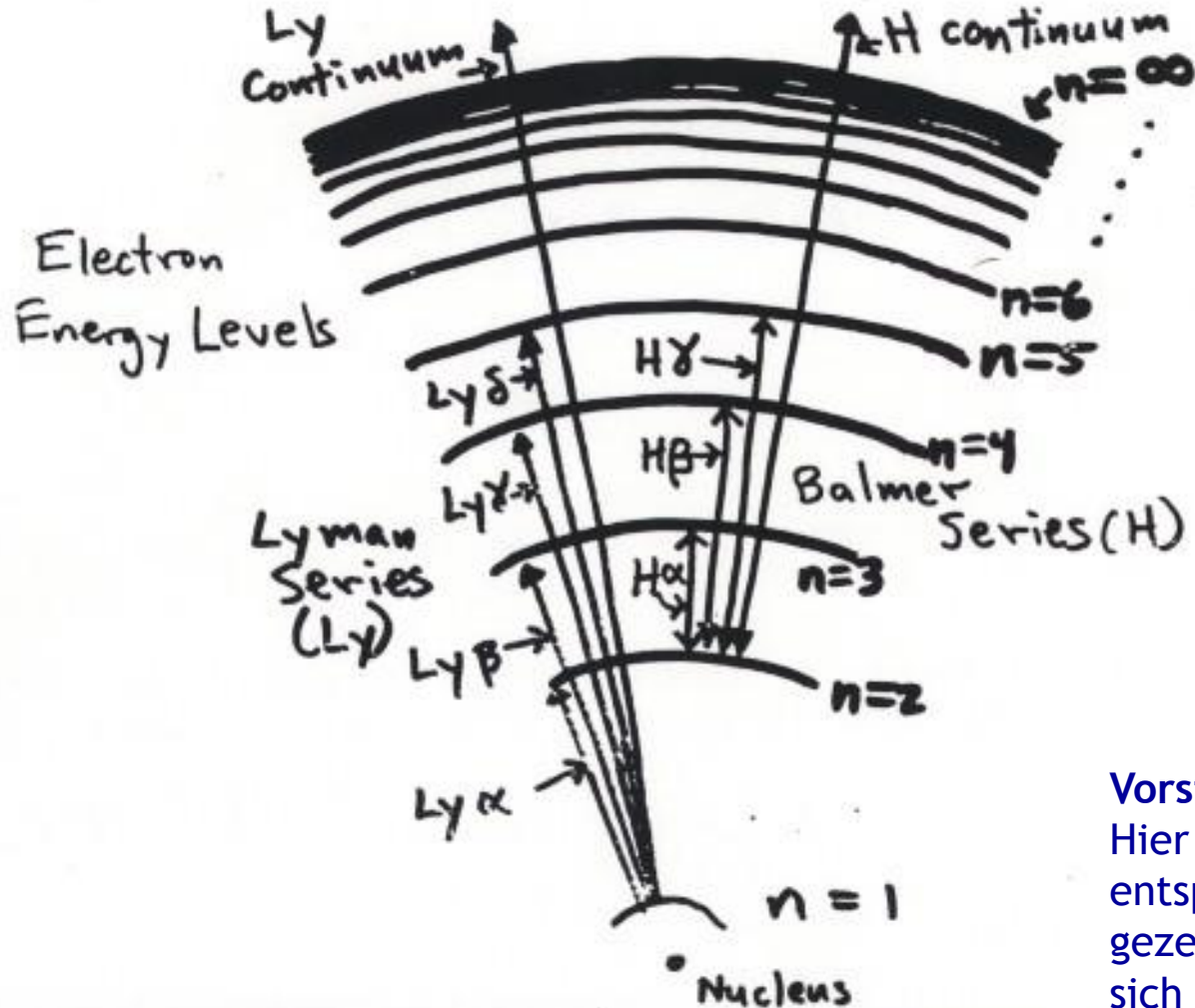
$$E_n - E_m = h \cdot f$$

# 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 nach Bohr, 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

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Z e^2 m_e} n^2$$

sowie  $\omega = \frac{n\hbar}{m_e r^2}$

und damit für die

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

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

wobei  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$

„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

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

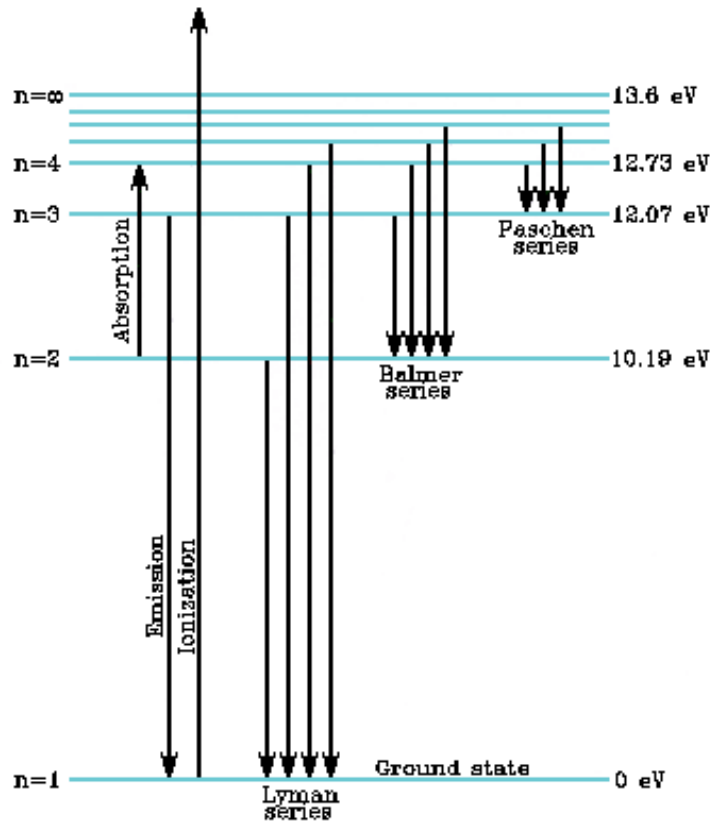
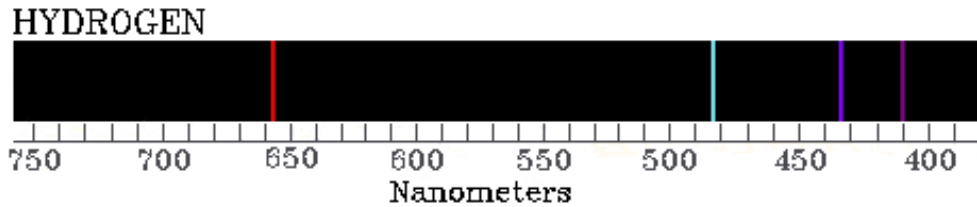
und damit für die Abstände bzw. Photonenenergien

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

Bemerkung:

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

# Rydberg-Formel



bzw. die Balmer-Formel:

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

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

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  $\lambda = \frac{c}{f}$

wird oft in Ångström angegeben:

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

Photonenenergien  $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$

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  $p = h/\lambda$

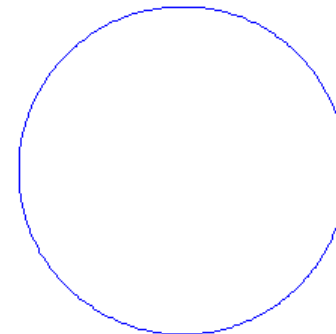


1875-1960

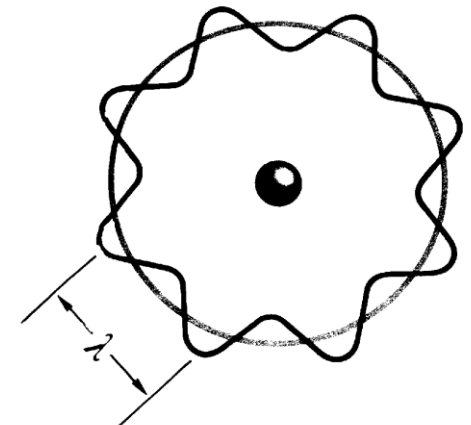
Gilt für **Licht (Photonen)** (Einstein)  
und für **Materie (Materiewellen)** (de Broglie)

Materiewelle (komplexe Zahlenwerte!) beschreibt (mit Betragsquadrat)  
Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Teilchen an  
dem betrachteten Ort aufhält.

Elektronenbahn um den Kern (Bohr)  
→ stehende Materiewelle



Wikipedia  
=> Glocke



# Quantenmechanik: Unschärferelation

Materiewelle  
 $\Psi(x)$



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

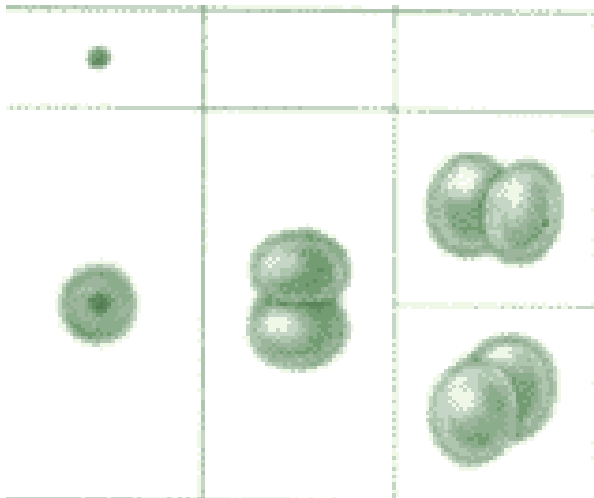


1901-1976

## 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.



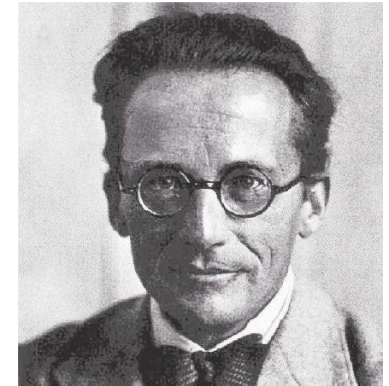
„Wolken“ der Aufenthaltswahrscheinlichkeit  
der Elektronen im Wasserstoff (Orbitale)

# Quantenmechanik: Schrödingergleichung

Zeitunabhängige **Schrödingergleichung**:

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

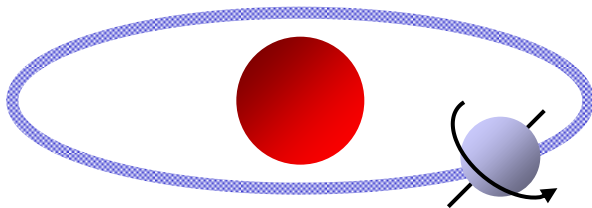
1887-1961



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 Typen der Quantenzahlen n, l und m bis n = 4.

# Quantenmechanik: Pauliprinzip

## Pauliprinzip:

Keine 2 Elektronen in einem Atomverbund können dieselben Quantenzahlen aufweisen.

→ Aufbau des Periodensystems der Elemente

$l = 0$  (s):  $2 \times 1 = 2$  Zustände  
 $l = 1$  (p):  $2 \times 3 = 6$  Zustände  
 $l = 2$  (d):  $2 \times 5 = 10$  Zustände  
 $l = 3$  (f):  $2 \times 7 = 14$  Zustände

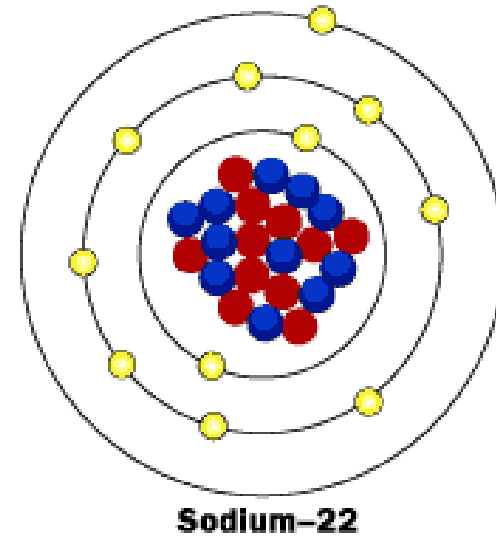
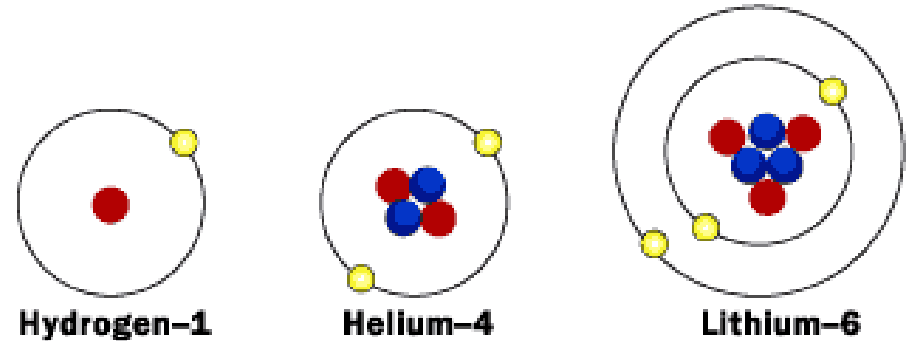
...

→ in  $n$ -ter Schale  $2 \times n^2$   
(aber nicht sofort vollständige Besetzung aller Unterschalen!  
Beispiel: 4s vor 3d)

1900-1958



## Isotopes of Hydrogen, Helium, Lithium and Sodium



● Neutron      ● Proton      ● Electron



# Experimente

Experiment ionisierende Strahlung  
(Röntgenstrahlung und Kernstrahlung)

– Geiger-Müller-Zählrohr

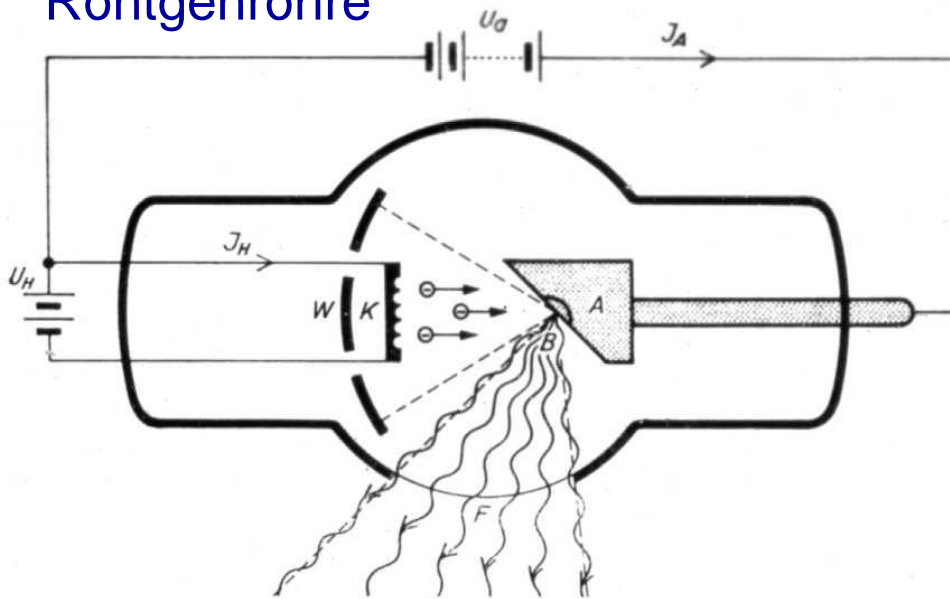
# Röntgenstrahlung



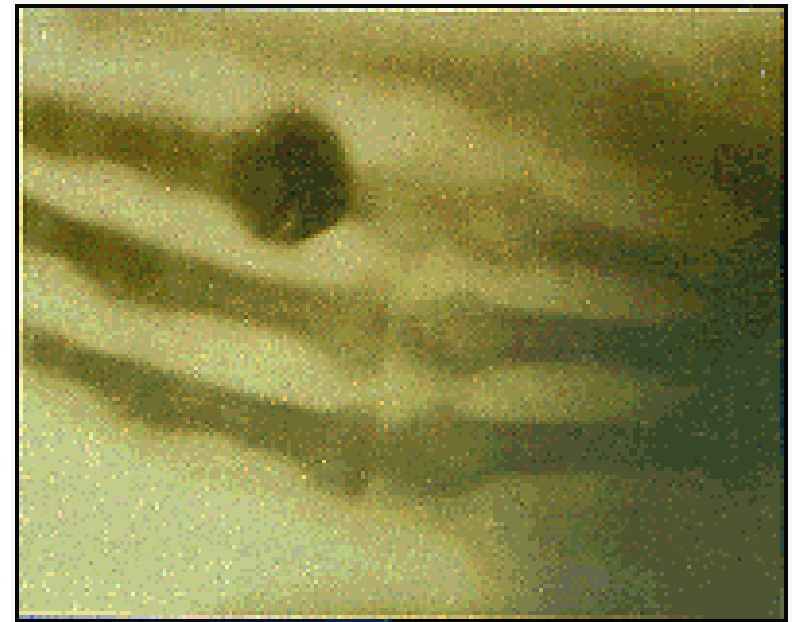
1845-1923

**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)

## Röntgenröhre

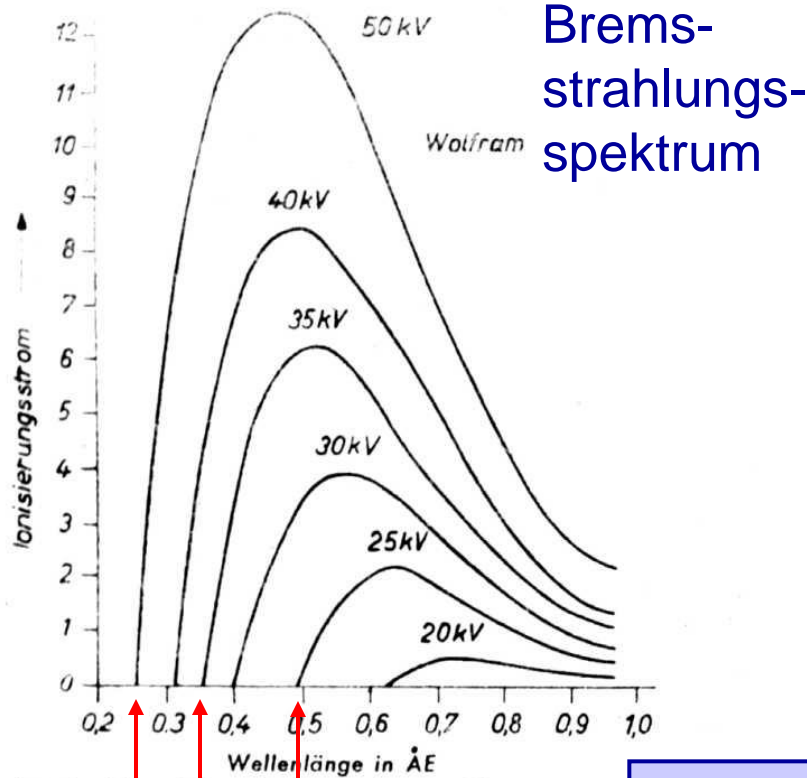


Röntgenröhre (schematisch).  $U_a$  Anodenspannung;  $W$  WEHNELT-Zylinder;  $U_H$  Heizspannung;  $A$  Anode;  $I_A$  Anodenstrom;  $E$  Austrittsfenster (Beryllium);  $K$  Kathode;  $B$  Brännfleck



Das erste Röntgenbild

# Röntgenstrahlung: Bremsstrahlung



↓  
 $\dot{I}$     **Abbremsung**  
 von Elektronen

↓  
 $\dot{H}$     **Maxwellsche**  
 Gesetze

↓  
 $\dot{E}$     **Abstrahlung**  
 von elektro-  
 magnetischen Wellen

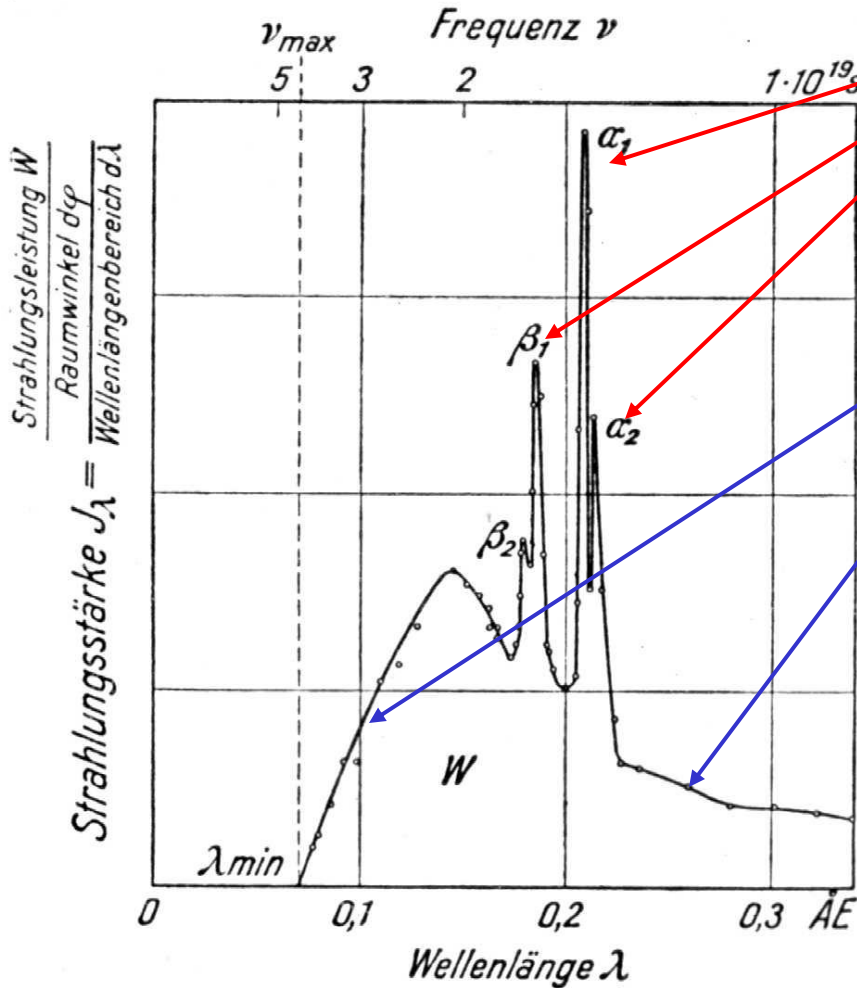
Grenze für

50 kV    35 kV    25 kV

**Grenzwellenlänge** bestimmt durch:  
 Pot. Energie der Elektronen  $E_{kin} = e \cdot U_0$   
 = Kin. Energie der Elektronen  
 = Energie der Photonen  $E_{ph} = h \cdot f$

$$e \cdot U_0 = h f = \frac{h c}{\lambda} \quad \longrightarrow \quad \lambda_{gr} = \frac{h c}{e U_0}$$

# Röntgenstrahlung: charakterist. Spektrum



**Spitzen:**  
charakteristisches Spektrum

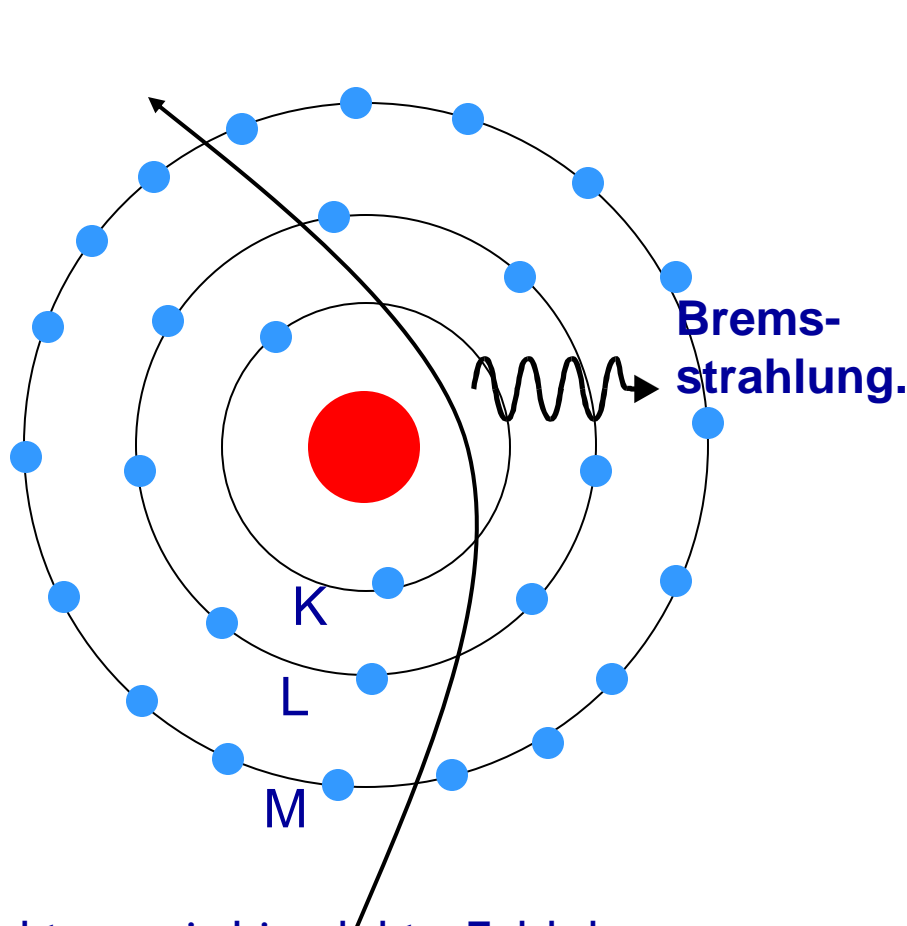
**Bremsspektrum**

Alle vorkommenden Wellenlängen  
größer als die Grenzwellenlänge

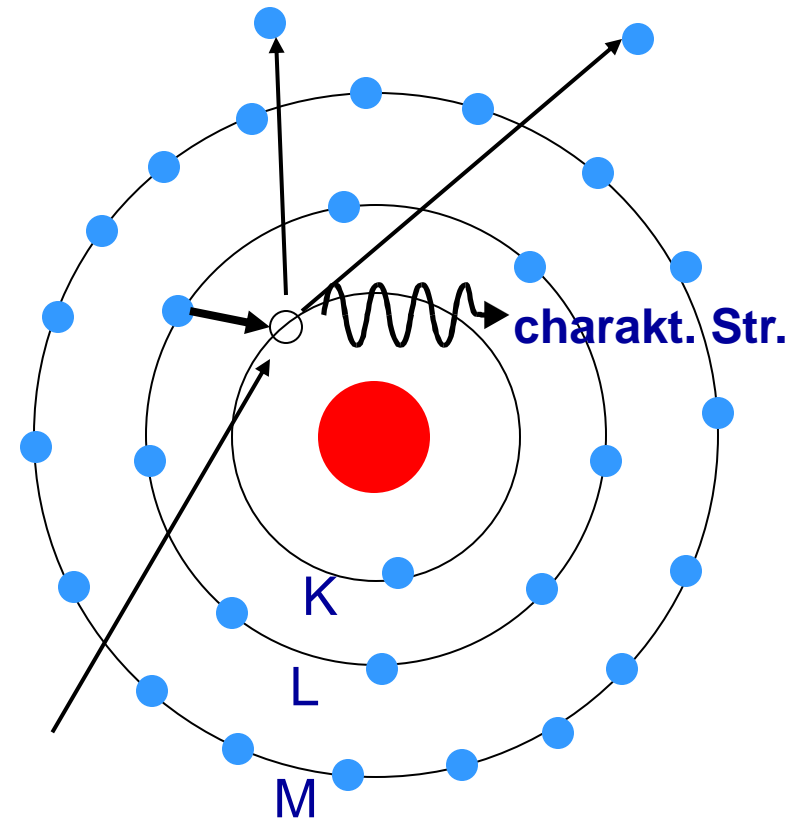
$$\lambda \geq \lambda_{gr} = \frac{hc}{eU_0}$$

Spektrale Energieverteilung der Strahlung  
einer massiven W-Antikathode

# Röntgenstrahlung

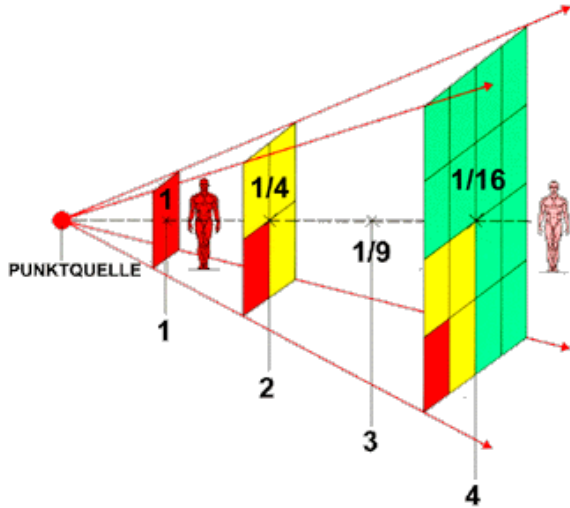


- Elektron wird in elektr. Feld des Atomkerns abgelenkt und abgebremst
- Abbremsung führt zur Abstrahlung (Maxwellsche Gesetze)
- Abstrahlung (Emission) eines Photons (Röntgenquants)



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

# Abschwächung von Röntgenstrahlung



**Strahlstärke** im Vakuum  
nimmt mit dem Quadrat des  
Abstandes (von Punktquelle) ab

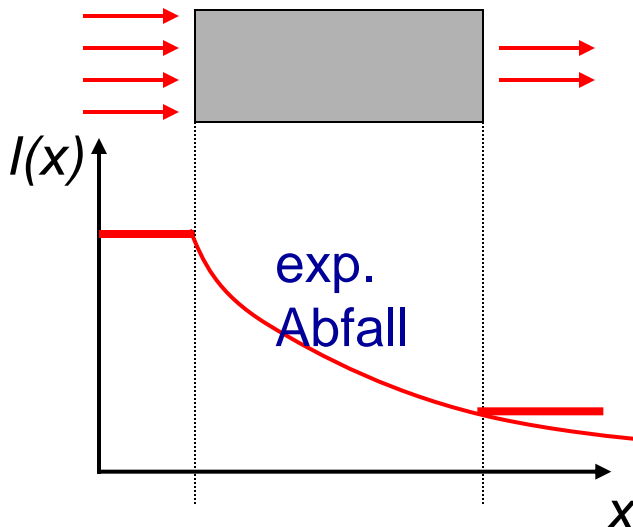
$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

**Strahlstärke** im Medium  
nimmt exponentiell mit dem  
Abstand ab (analog exp. Zerfall)

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

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Material



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

$\lambda$ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung

$Z$ : Kernladungszahl des Materials

$\rho$ : Massendichte der Materials

verschiedene Materialien schwächen  
verschieden stark  $\longrightarrow$  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

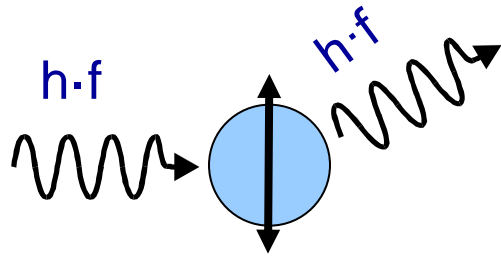
z.B. Blei ( $Z = 82$ ) stärker als Kohlenstoff ( $Z = 12$ )

⇒ Strukturen auf Röntgenbildern

(CT = Computer-Tomographie: Rechner konstruiert Schnittbilder aus vielen Röntgenaufnahmen von verschiedenen Winkeln)



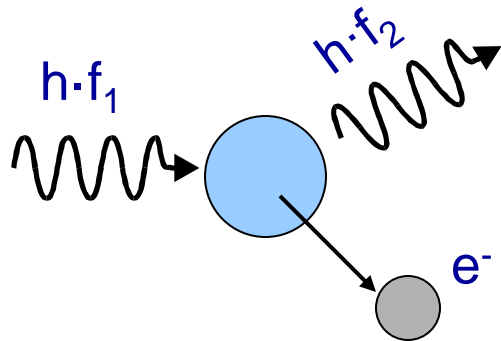
# Mechanismen der Schwächung



## Streuung:

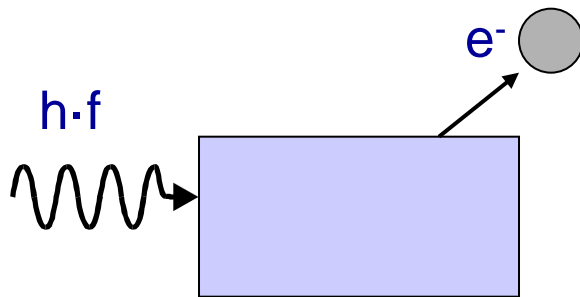
### (Kohärent) Rayleigh-Streuung:

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.

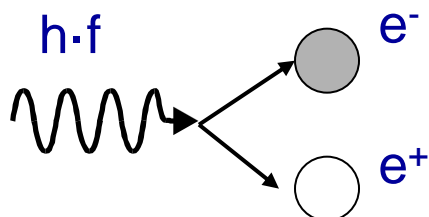


## Absorption:

### Photoeffekt (Festkörper) bzw.

### Photoionisation (Atome, Moleküle in der Gasphase):

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



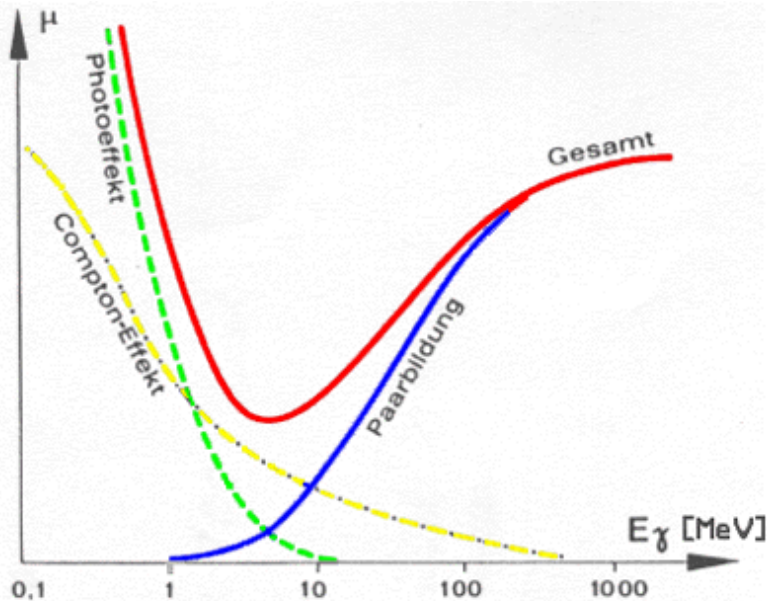
## Paarbildung:

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

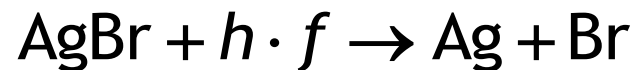


Schematischer Verlauf des Absorptionskoeffizienten als Funktion der Röntgenenergie (bzw.  $\gamma$ -Energie)

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)

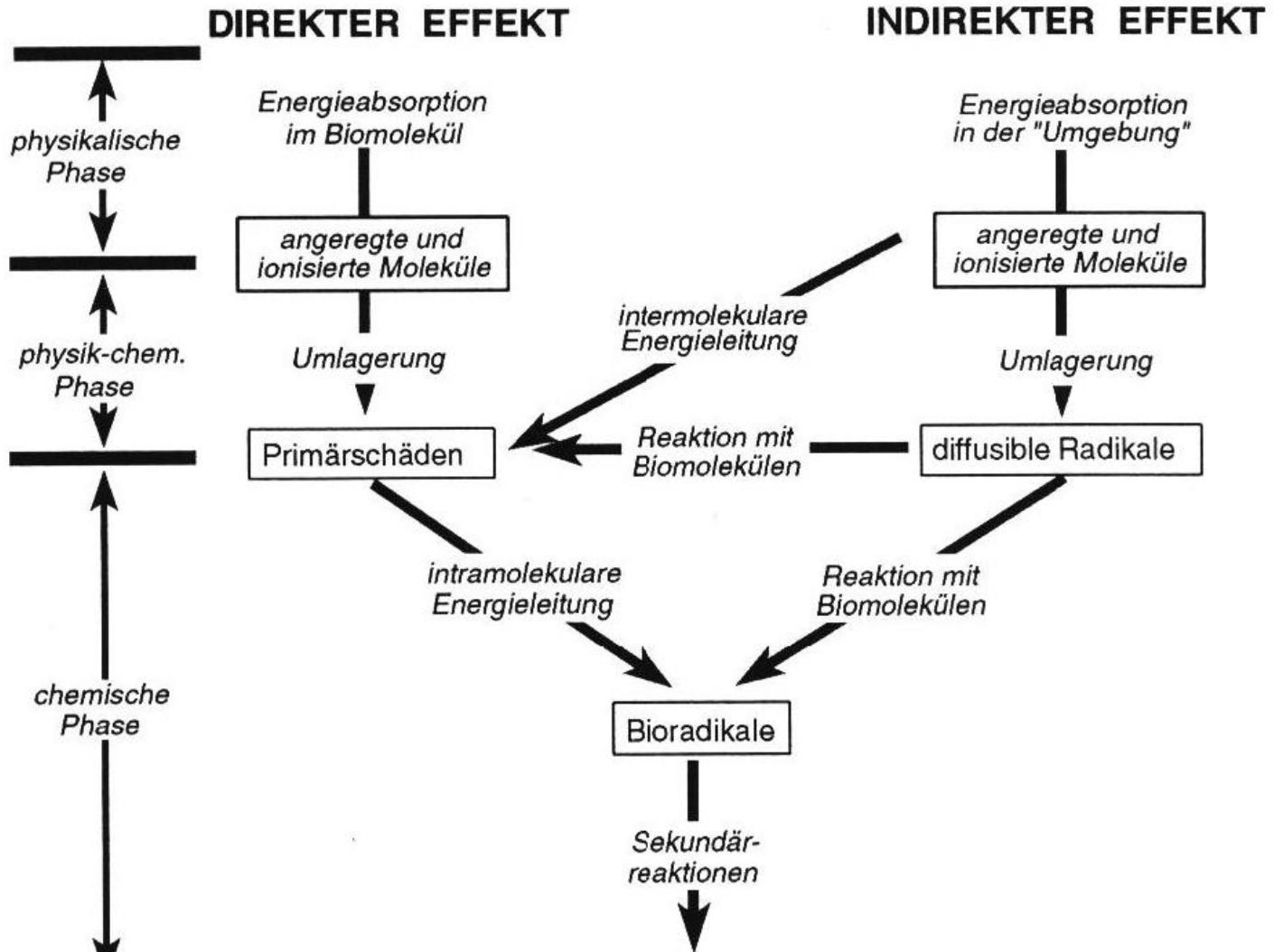
**Photochemie:** Schwärzung einer Photoplatte (Filmdosimeter)



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

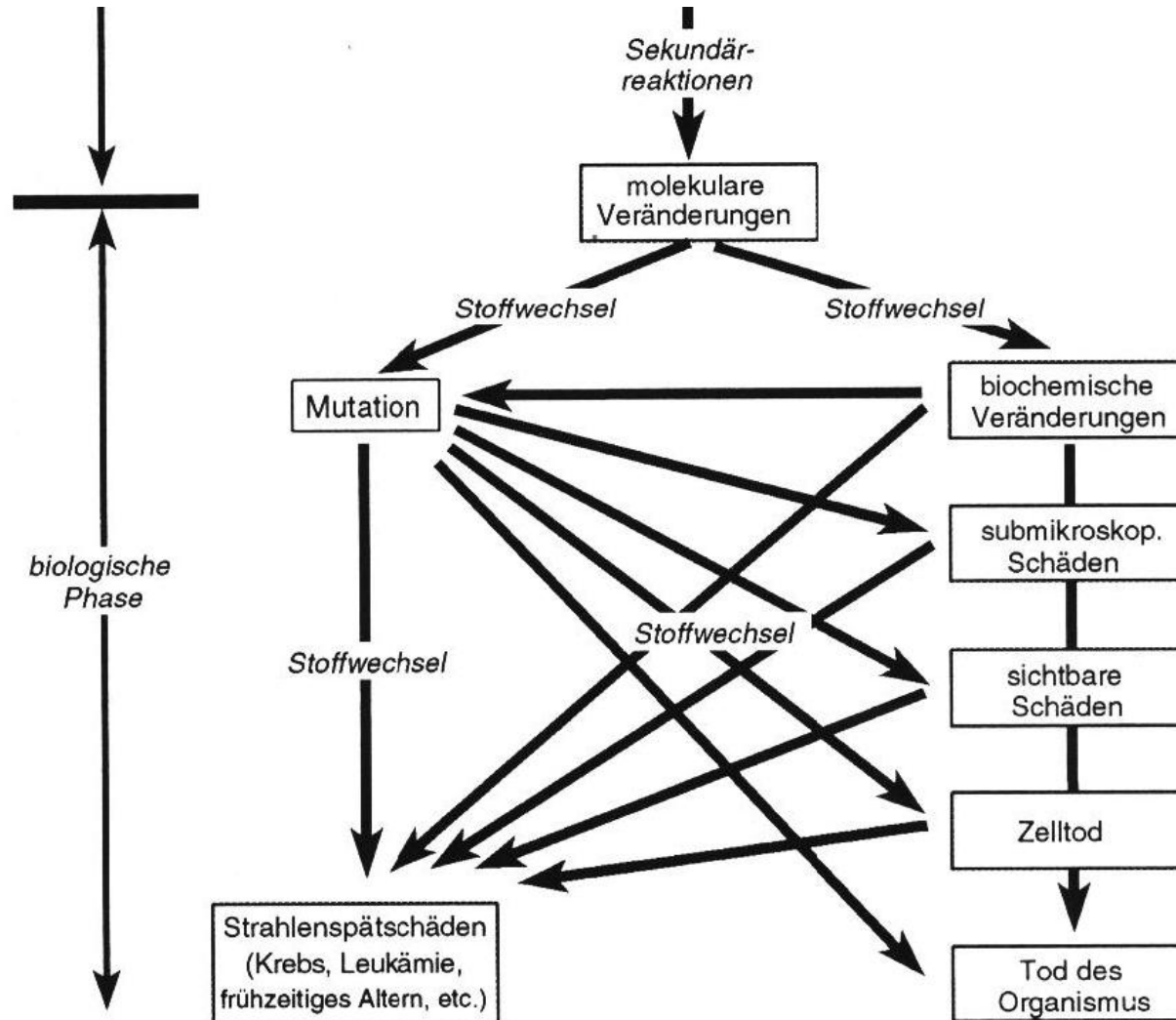
# Strahlenschäden 1

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



# Strahlenschäden 2

## Biologisch-chemische Wirkung von Strahlen: Biologische Phase



# Atomkern

Masse im Atomkern konzentriert  
2 Arten **Kernbausteine (Nukleon)**:

Kernradius:  $r_K \approx 10^{-15} \text{ m}$   
Atomradius:  $r_A \approx 10^{-10} \text{ m}$

**Proton:**  $m = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $q = + e$

**Neutron:**  $m = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $q = 0$  (mittl. Lebensdauer ca. 15 min)  
vgl. Elektron:  $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  (also ca. 1/2000 von Proton, Neutron)

**Atomkern:**  ${}^A_Z\text{X}_{(N)}$       X = Elementsymbol  
A = Z + N: Massenzahl  
Z: Protonenzahl  
N: Neutronenzahl

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

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

## Isotope

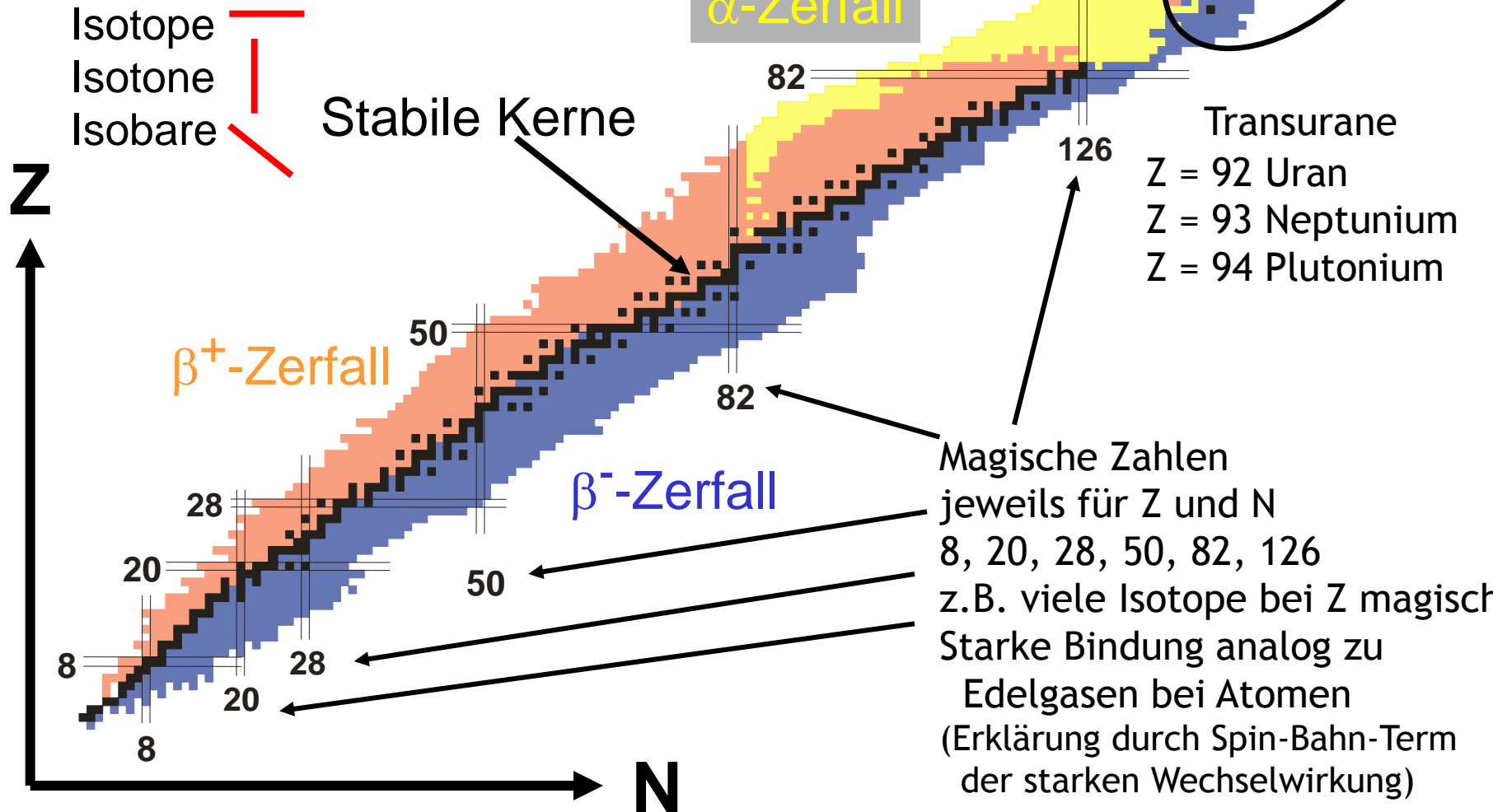
Nuklide mit gleicher Kernladungszahl Z,  
(=> gleiche chemischen Eigenschaften)  
verschiedenen Neutronenzahlen N bzw.  
Massenzahlen A



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

# Nuklidkarte

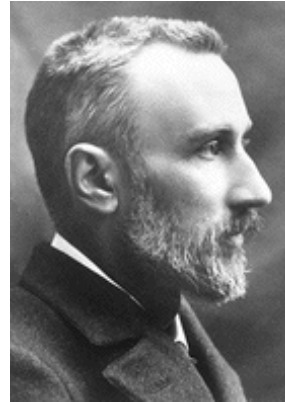
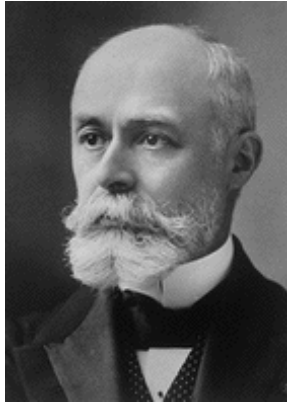
Anordnung der Nuklide  
analog zum Periodensystem  
der Elemente



# Radioaktivität

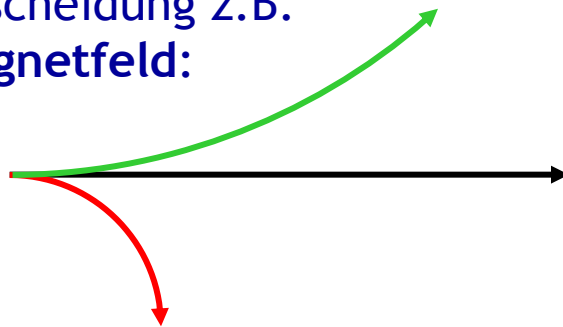
Nicht alle Atomkerne sind stabil.

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)

# Bindungsenergie der Kerne

Kernmasse <  
Masse der Protonen +  
Masse der Neutronen

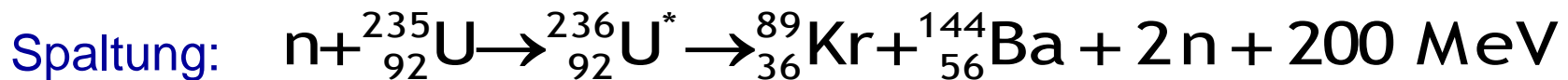
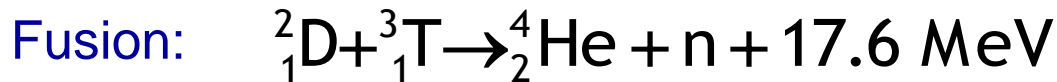
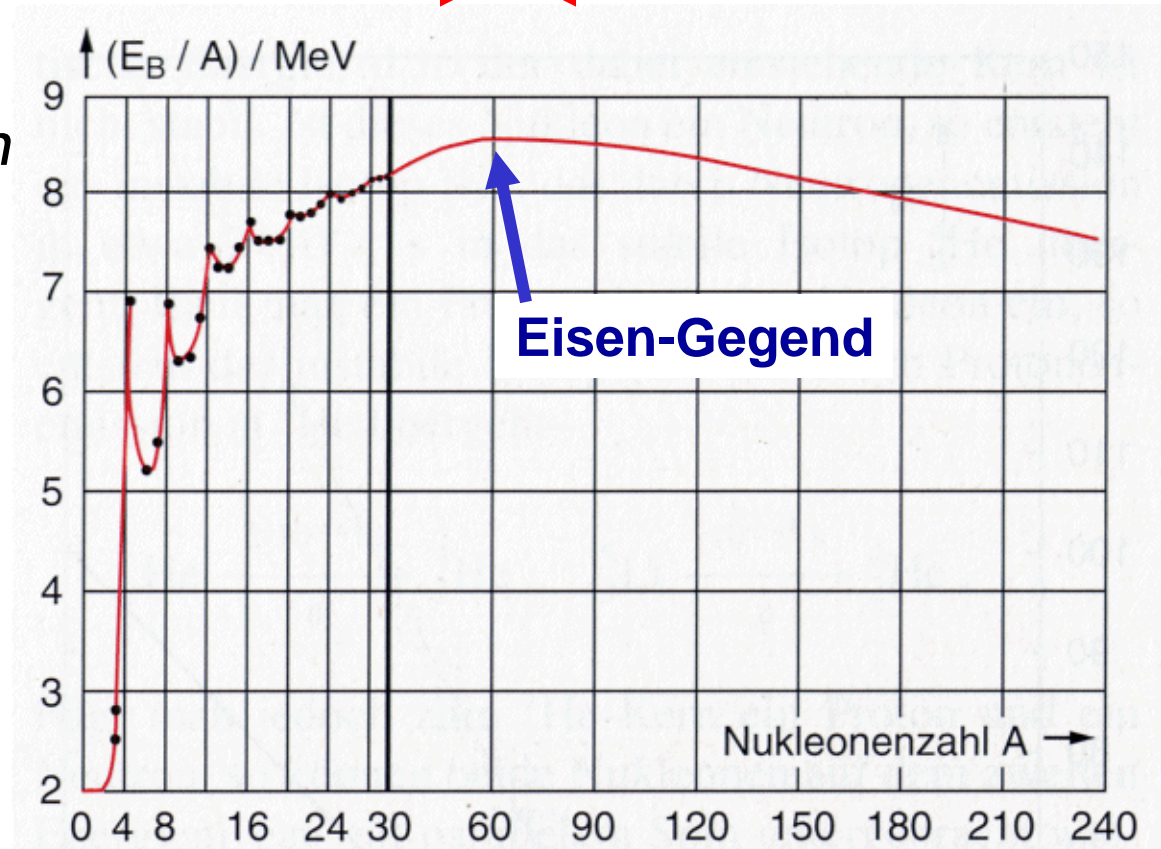
$$m_K = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - \Delta m$$

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

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

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

Energiegewinn durch  
**Kernfusion** → ← **Kernspaltung**

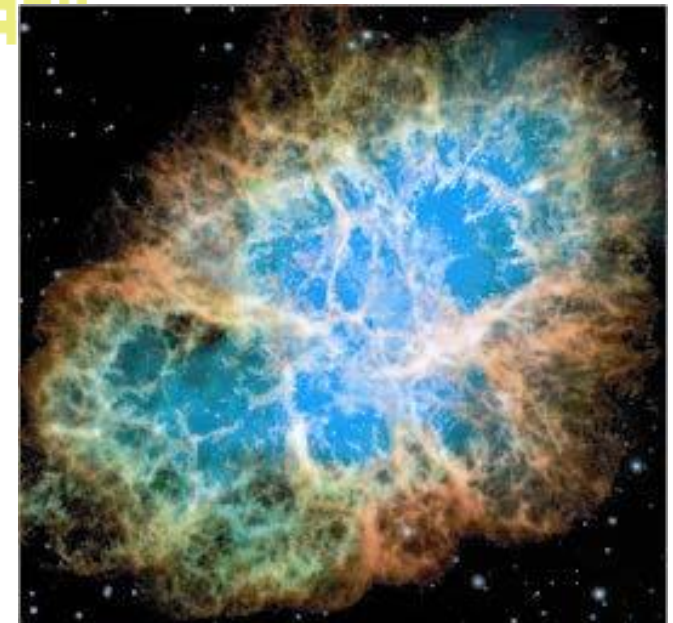
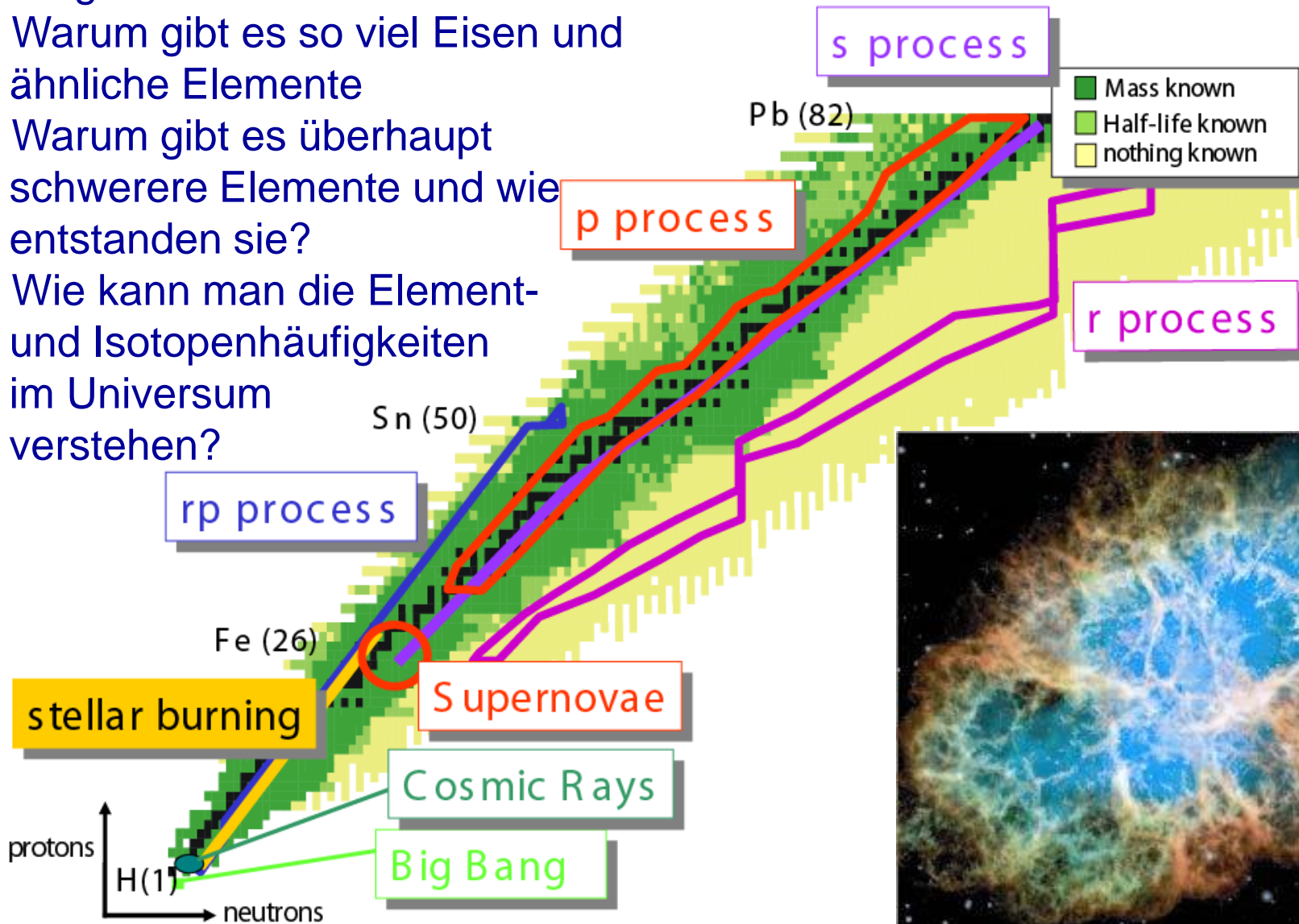




# Nucleosynthese

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

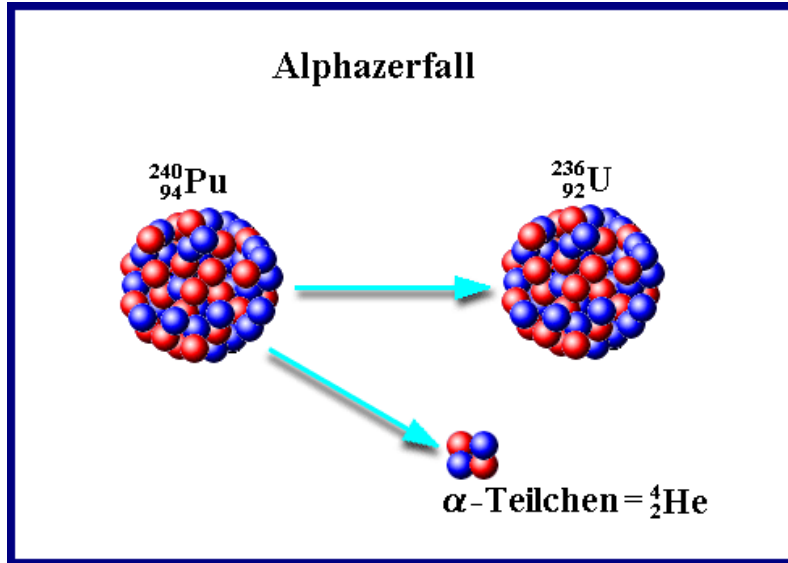
**NMR:** Der Kern eines Atoms wirkt wie ein „magnetischer Kreisel“. In einem äußeren Magnetfeld  $B$  führt er wegen der Drehimpulserhaltung eine Präzessionsbewegung durch. Legt man ein zeitlich veränderliches Querfeld  $B'$  an, so findet man bei der Präzessionsfrequenz eine ausgeprägte Resonanz.

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

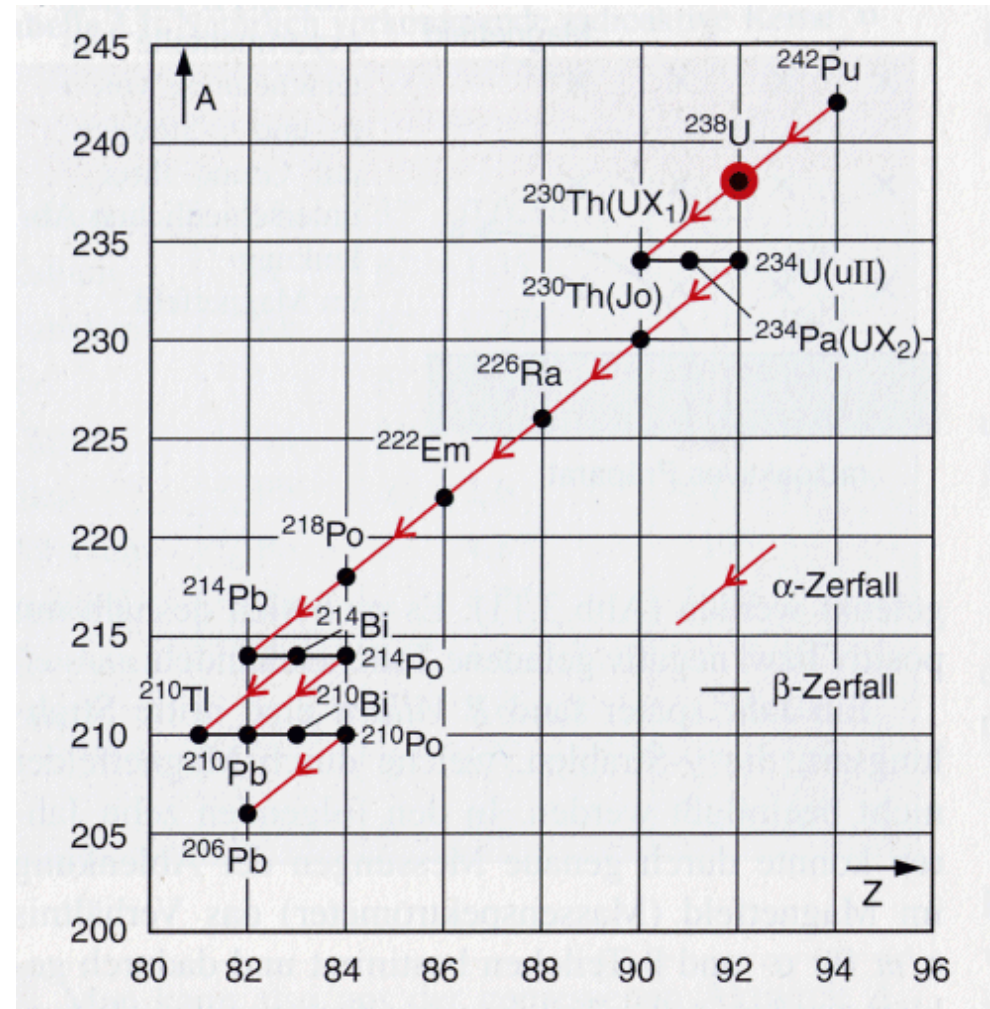
→ Kernspintomograph = MRI (magnetic resonance imaging)

# Radioaktivität

Zerfall instabiler Kerne:



Zerfallsreihe von Uran-238



# Zerfallsgesetz

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

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

$N_0$ : Anfangsmenge instabiler Kerne  
 $N$ : momentane Menge instabiler Kerne  
 $\lambda$ : Zerfallskonstante

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

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \quad \text{Lebensdauer}$$

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 \approx 0,693 \tau \quad \text{Halbwertszeit}$$
$$= \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = \dots \text{„Aktivität“}$$

$A_0$ : Anfangsaktivität

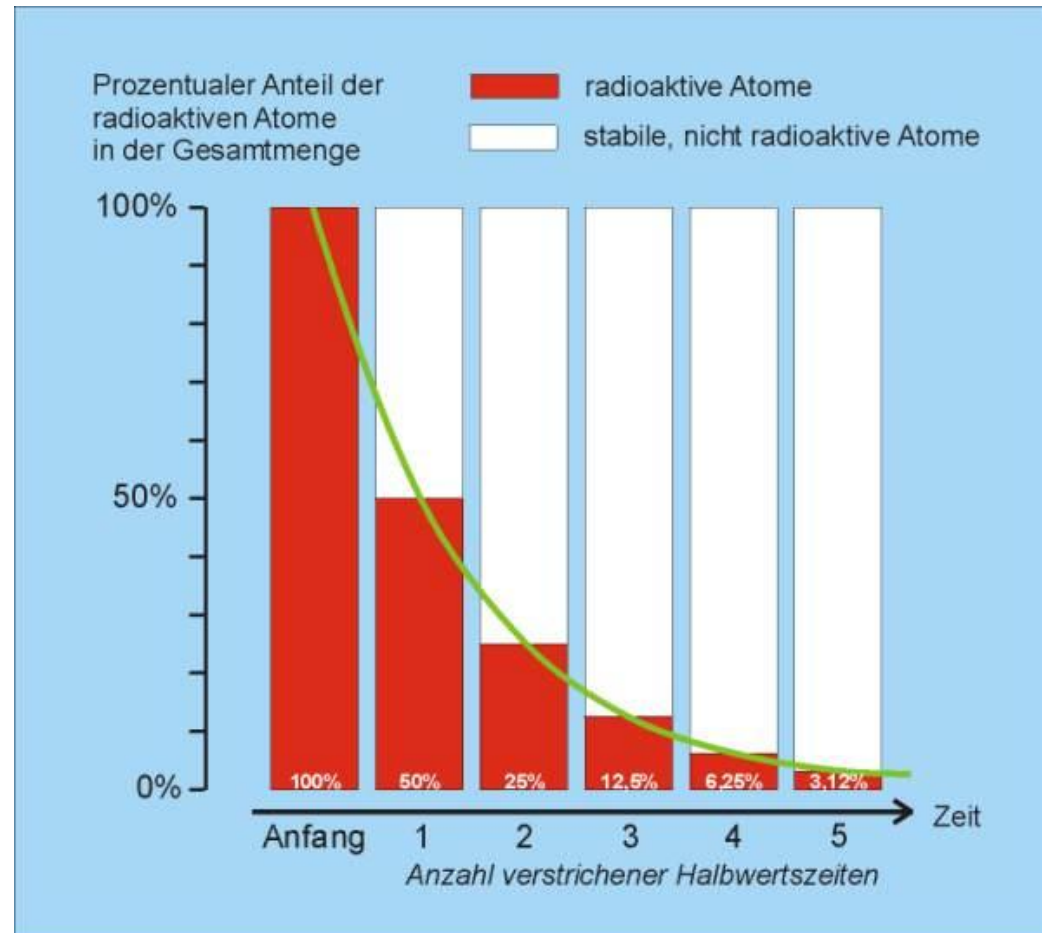
Einheit: Becquerel Bq = 1/s

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

(entspricht 1 g Radium)

Natürliche spez. Aktivität des

Menschen: ca. 70 Bq/kg (80%: K-40)

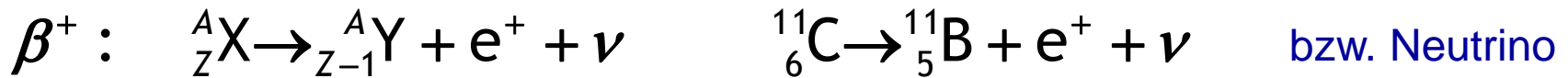
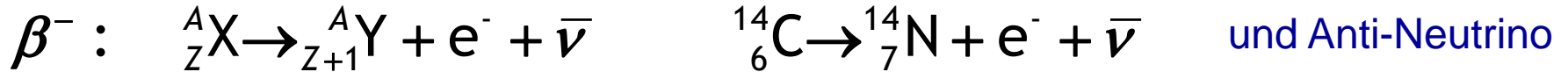


# Zerfallsarten

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

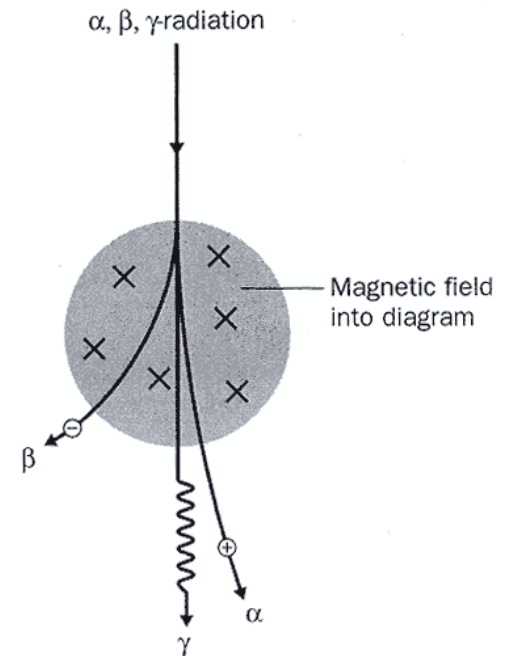
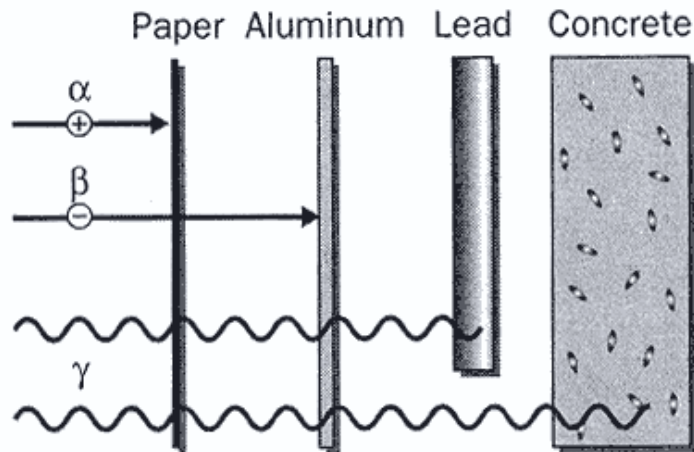
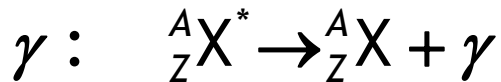


**$\beta$ -Zerfall:** Setzt ein Elektron ( $e^-$ ) oder ein Positron ( $e^+$ ) frei



Bemerkung: Dreikörperzerfall, daher kontinuierliches Energiespektrum

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



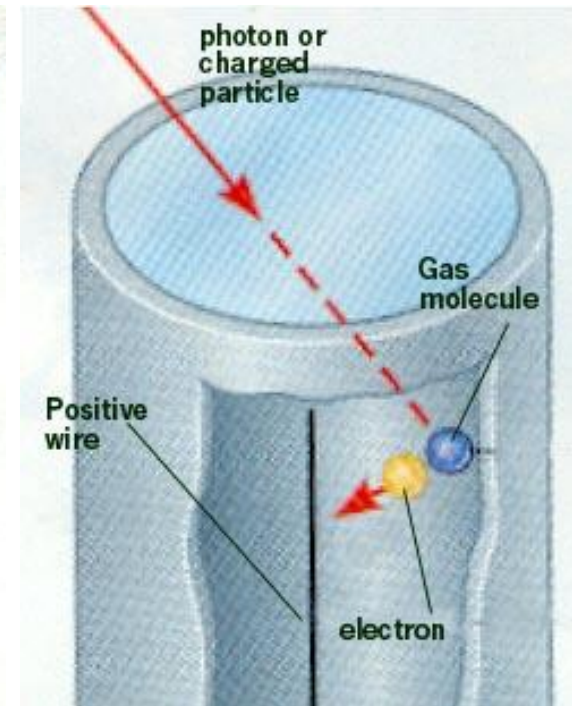
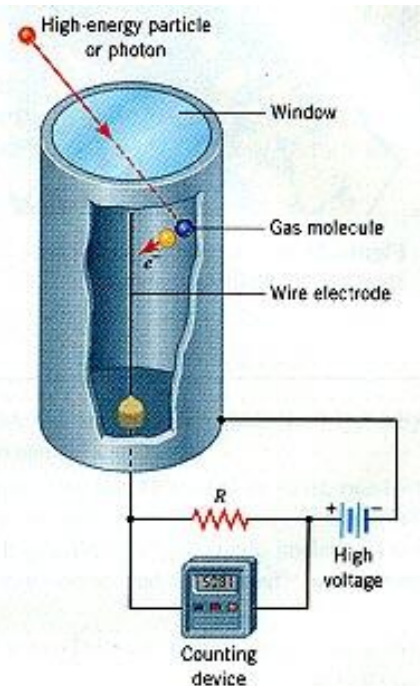
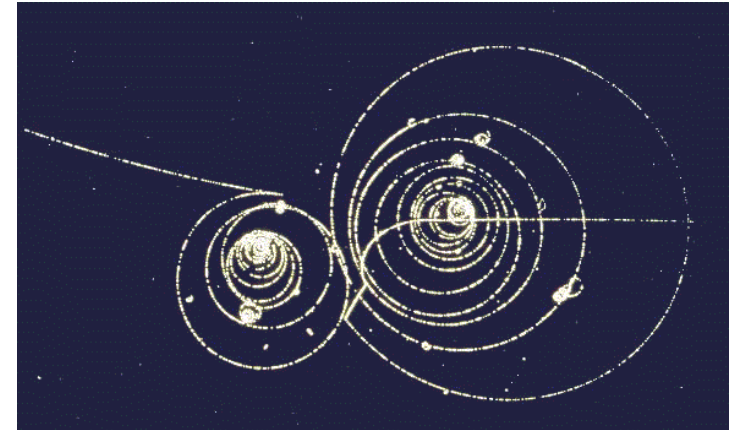
# Strahlungsdetektion 1

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

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

**Blasenkammer:** Blasenbildung in „über-  
hitzter“ 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





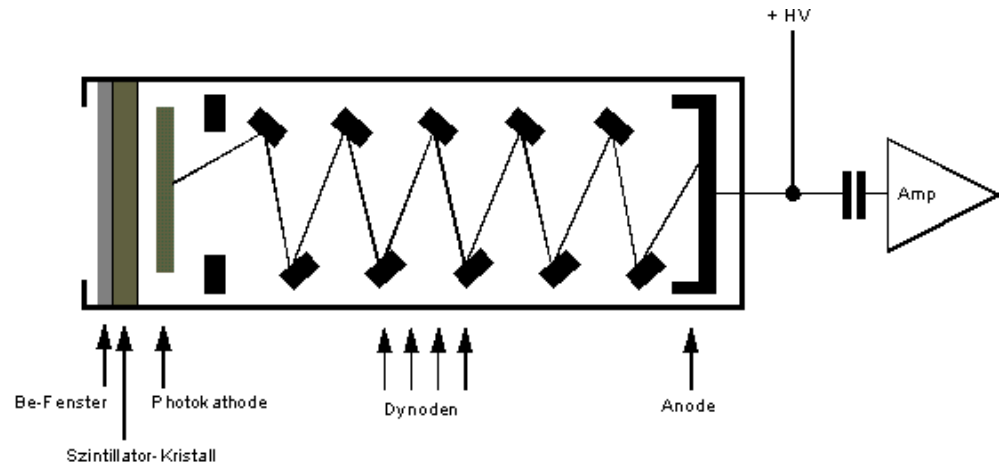
# Strahlungsdetektion 2

## Szintillationszähler:

basiert auf Photoeffekt:

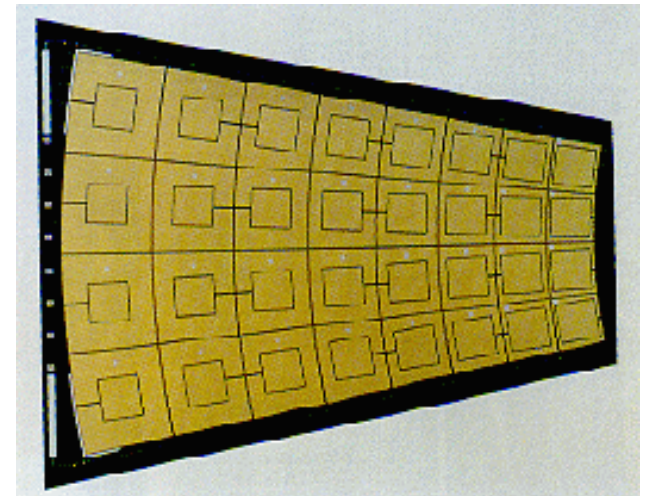
Radioaktive Strahlung führt bei bestimmten Materialien (NaJ) zu Photoluminiszenz (Lichtblitzen).

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)

$\frac{\text{Energiedosis in Gewebe}}{\text{Ionendosis in Luft}} = \text{ca. } 1 \text{ Rad/R für Gamma-/Röntgen-Str. von } 10 \text{ keV bis } 10 \text{ MeV}$

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

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

# Strahlungsexposition und -schutz

**A**bstand maximieren

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

**A**bschirmung maximieren  
(z.B. durch Bleischürze)

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

$$I \propto t$$

**die 3 A's**

**A**ufenthaltsdauer minimieren

Letaldosis „LD50“ (50 % Überlebenschance)  
Bei rascher homogener Ganzkörperbestrahlung

4 Sv

max. (gesetzl.) erlaubte Äquivalenzdosis für gesamten Körper: 50 mSv

genetische Strahlenschäden ab etwa

100 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)

künstlicher Strahlenexposition (z.B. med. Untersuchungen)  
(große individuelle Unterschiede)

ca. 0,6 mSv/a

Eigenstrahlung (K-40, C-14, Ra-226)

ca. 0,3 mSv/a



# Elementarteilchen

	Teilchen	Symbol	Baryonen- zahl $B$	Masse (MeV/ $c^2$ )	Ladung	Spin in $\hbar$	Isospin $T$	Kompo- nente $T_3$	Seltsam- keit $S$	Lebensdauer in s
Leptonen	Photon	$\gamma$	0	0	0	1	0	0	0	$\infty$
	Neutrino	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	$< 10^{-5}$	0	1/2	0	0	0	$\infty$
		$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	$< 10^{-4}$	0	1/2	0	0	0	$\infty$
		$\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	0	?	0	1/2	0	0	0	$\infty$
		Elektron	$e^+, e^-$	0	0,511	$\pm e$	1/2	0	0	0
Myon	$\mu^-, \mu^+$	0	105,66	$\pm e$	1/2	0	0	0	$2,199 \cdot 10^{-6}$	
Mesonen	Pionen	$\pi^+, \pi^-$	0	139,57	$\pm e$	0	1	$\pm 1$	0	$2,602 \cdot 10^{-8}$
		$\pi^0$	0	134,97	0	0	1	0	0	$8,4 \cdot 10^{-17}$
	Kaonen	$K^+, K^-$	0	493,7	$\pm e$	0	1/2	$\pm 1/2$	+1, -1	$1,238 \cdot 10^{-8}$
		$K_S^0$	0	497,71	0	0	1/2	-1/2	+1	$8,93 \cdot 10^{-11}$
		$K_L^0$	0	497,71	0	0	1/2	+1/2	-1	$5,2 \cdot 10^{-8}$
	Eta-	$\eta$	0	548,5	0	0	0	0	0	$2,5 \cdot 10^{-17}$
	Rho	$\rho$	0	768,5	0, $\pm 1$	1	0	0	0	$3,3 \cdot 10^{-21}$
	Phi-	$\phi$	0	1019	0	1	0	0	0	$1,5 \cdot 10^{-22}$
Psi-	$\psi$	0	3095	0	1	0	0	0	$10^{-20}$	
Baryonen	Proton	$p^+, p^-$	1, -1	938,26	$\pm e$	1/2	1/2	$\pm 1/2$	0	$\infty$
	Neutron	$n, \bar{n}$	1, -1	939,55	0	1/2	1/2	$\mp 1/2$	0	887
	Lambda-	$\Lambda, \bar{\Lambda}$	1, -1	1115,68	0	1/2	0	0	-1, +1	$2,5 \cdot 10^{-10}$
	Sigma-	$\Sigma^+, \bar{\Sigma}^+$	1, -1	1189,4	$\pm e$	1/2	1	$\mp 1$	-1, +1	$8 \cdot 10^{-11}$
	Sigma-	$\Sigma^0, \bar{\Sigma}^0$	1, -1	1192,5	0	1/2	1	$\mp 1$	-1, +1	$< 10^{-14}$
	Xi-	$\Xi^-$	1	13	0	1/2	1/2	-1/2	-2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
	Omega-	$\Omega^-$	+1	1672	$-e$	3/2	0	0	-3	$1,3 \cdot 10^{-10}$

# Quarks & Co.

Baryonen		Mesonen	
Teilchen	Quarkbausteine	Teilchen	Quarkbausteine
Proton p	2u + d	$\pi^-$	d + $\bar{u}$
Neutron n	u + 2d	$\pi^+$	u + $\bar{d}$
$\Sigma^-$	2d + s	$K^-$	s + $\bar{u}$
$\Sigma^+$	2u + s	$K^0$	d + $\bar{s}$
$\Sigma^0$	u + d + s	$K^+$	u + $\bar{s}$
$\Xi^-$	d + 2s	$\pi^0$	u $\bar{u}$ + d $\bar{d}$
$\Xi^0$	$\bar{u}$ + 2s	$\eta$	$u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}$
		$\eta'$	$u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$

**Tabelle 7.11.** Aufbau der Welt aus elementaren Teilchen ...

Fermionen	Familie			elektr. Ladung	Farbe	Spin
	1	2	3			
Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	—	1/2
	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	-1	—	1/2
Quarks	u	c	t	+2/3	r, g, b	1/2
	d	s	b	-1/3	r, g, b	1/2

# 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

# Multiple-Choice-Test

Von 5 vorgeschlagenen Antworten A, B, C, D und E ist jeweils nur eine richtig. Beispiele:

Ein Körper, der im Abstand  $r$  von einem sehr kleinen radioaktiven Strahler für eine Zeit  $t$  der Bestrahlung ausgesetzt wird, erfährt eine Belastung mit einer Energiedosis, die proportional ist zu  
(A)  $1/r$  (unabhängig von  $t$ ), (B)  $t/r$ , (C)  $1/r^2$  (unabh. von  $t$ ), (D)  $t/r^2$ , (E)  $t^2/r$

Bei welchen der einzelnen neutralen Atome der folgenden Elemente liegt eine abgeschlossene äußere Elektronenschale vor?  
(1) Lithium, (2) Kohlenstoff, (3) Fluor  
(A) Bei keinem, (B) nur 1, (C) nur 2, (D) nur 3, (E) nur 1 und 2

Welche Aussage über Geiger-Müller-Zählrohre trifft **nicht** zu?

- (A) Zählrohre sind möglichst gut evakuiert.
- (B) Nach der Ionisation werden Elektronen zum positiven Draht gezogen.
- (C) Der kurzzeitige Stromfluss durch den äußeren Arbeitswiderstand erzeugt dort einen Spannungsimpuls.
- (D) Die Zahl der Elektronen wird durch weitere Stoßionisationen in Drahtnähe vergrößert.
- (E) Mit Zählrohren lassen sich energiereiche, ionisierende Strahlenarten nachweisen.

Siehe auch z.B. Barth,Ziegengeist: Physik, Kurzlehrbuch und Prüfungsfragen ...  
bzw. die CD von Ratiopharm