



Atomkerne und Radioaktivität

Institut für Kernchemie
Universität Mainz

Größenskala Atom und Kern

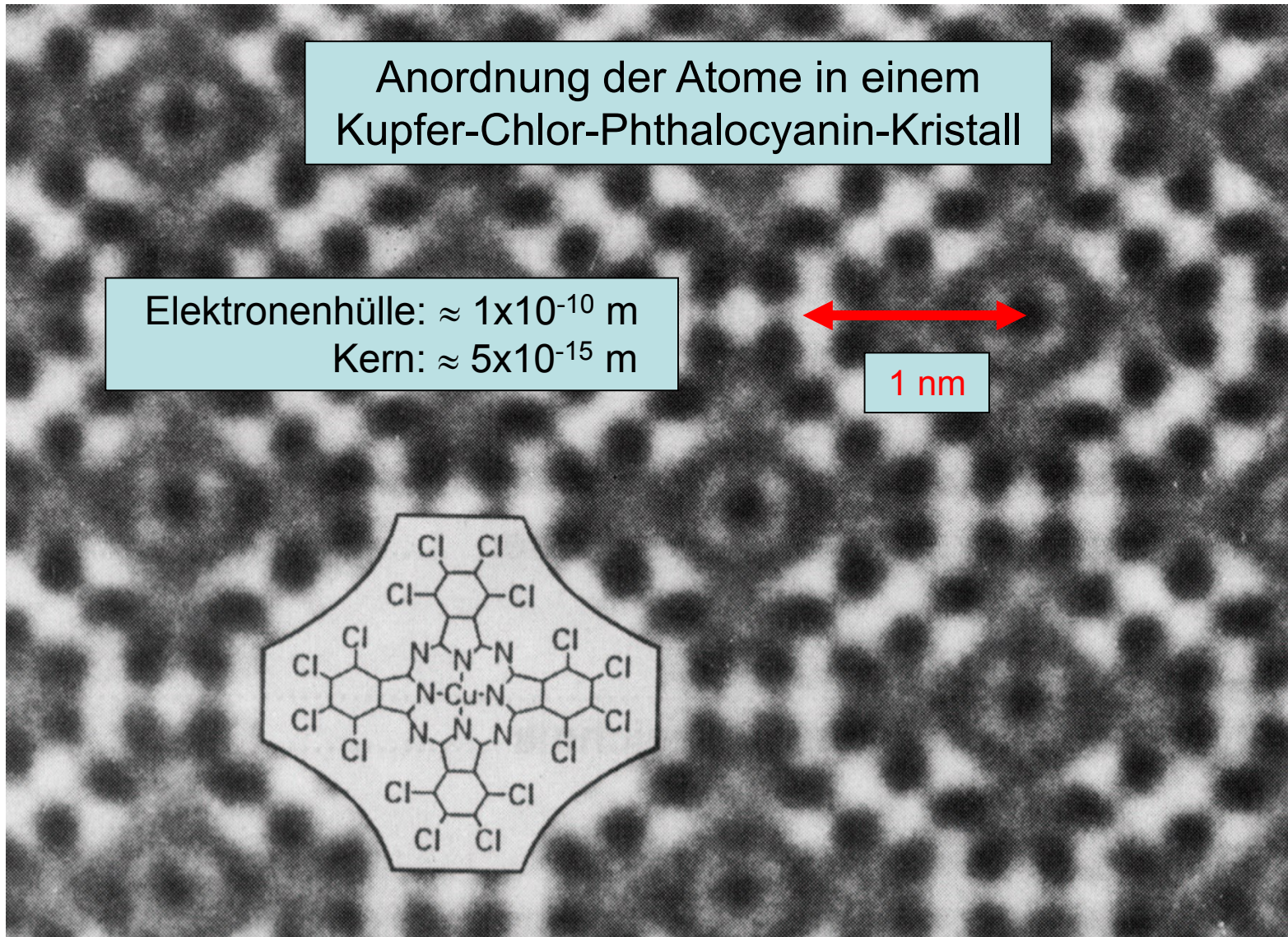
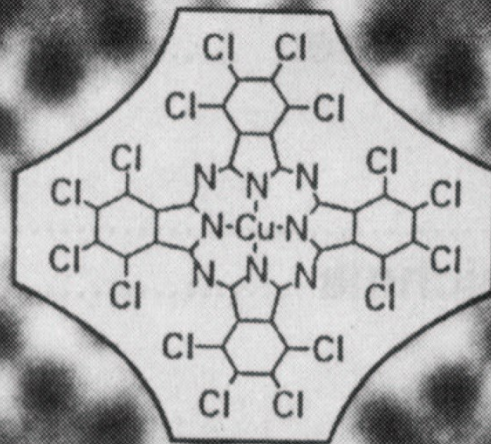


Anordnung der Atome in einem
Kupfer-Chlor-Phthalocyanin-Kristall

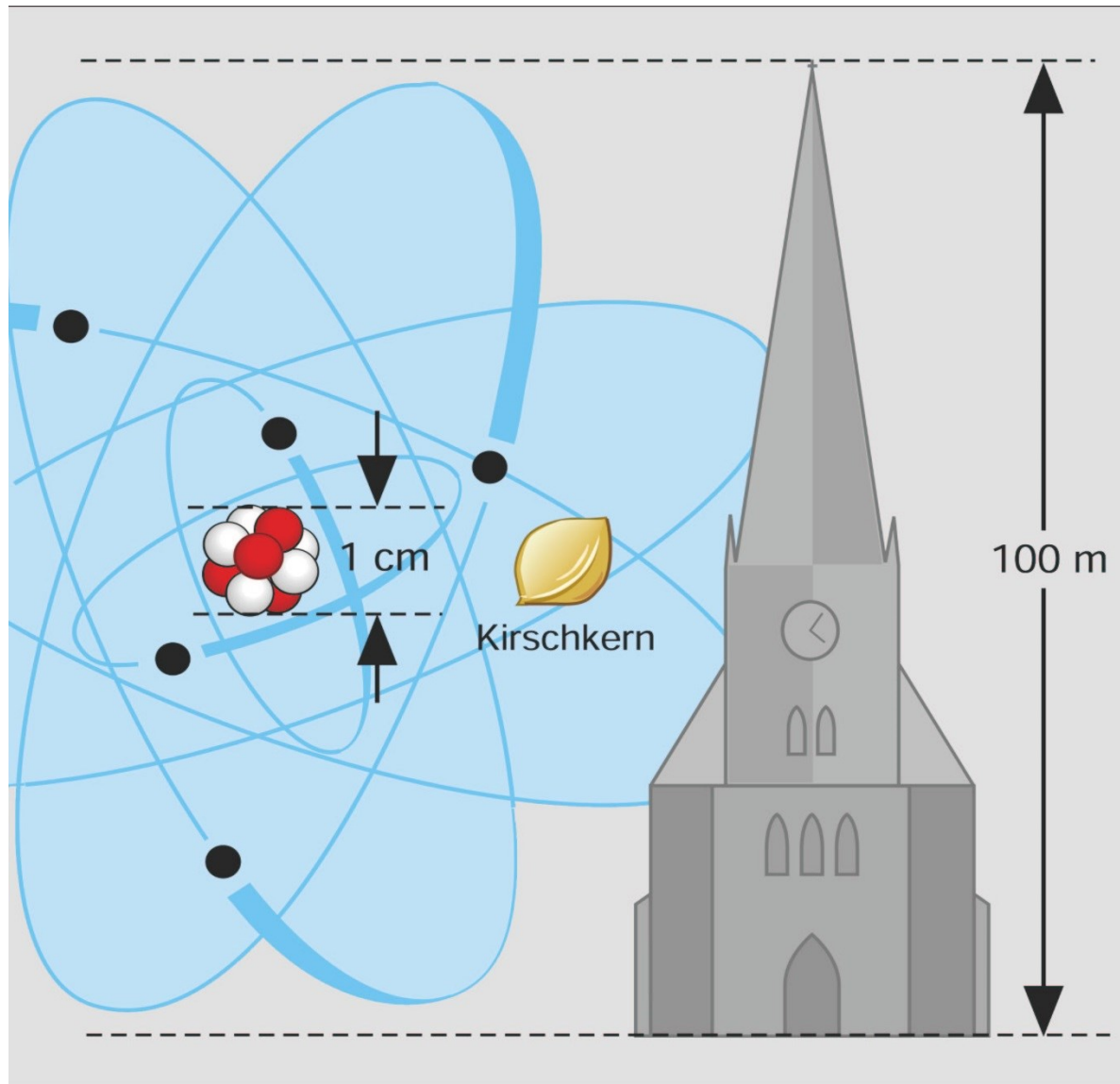
Elektronenhülle: $\approx 1 \times 10^{-10}$ m
Kern: $\approx 5 \times 10^{-15}$ m



1 nm



Größenskala Atom und Kern

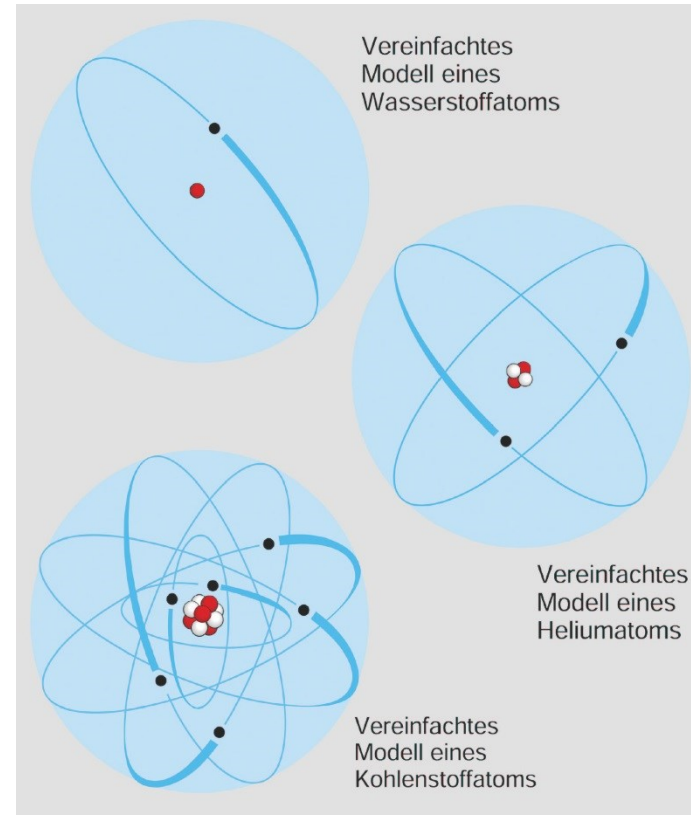


Atommodell



Elektronenhülle: $\approx 1 \times 10^{-10}$ m
Kern: $\approx 5 \times 10^{-15}$ m

Atomkern besteht aus
Neutronen und Protonen



Teilchen	Masse [kg]	Ladung [As]
Elektron	$9,10938 \times 10^{-31}$	$- 1,6022 \times 10^{-19}$
Proton	$1,67262 \times 10^{-27}$	$+1,6022 \times 10^{-19}$
Neutron	$1,67493 \times 10^{-27}$	0

Energieskala Atom und Kern



Zur Abschätzung betrachte eingeschlossenes Teilchen im atomaren Volumen bzw. im Kernvolumen.

Heisenbergsche Unschärferelation: $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$

$$\Delta E = \frac{(\Delta p)^2}{2m} \Rightarrow \Delta E \geq \frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2} \Rightarrow \frac{\Delta E_K}{\Delta E_A} = \frac{m_e (\Delta x_A)^2}{m_n (\Delta x_K)^2}$$

mit $\Delta x_A \gg 10^{-10}$ m und $\Delta x_K \gg 5 \times 10^{-15}$ m

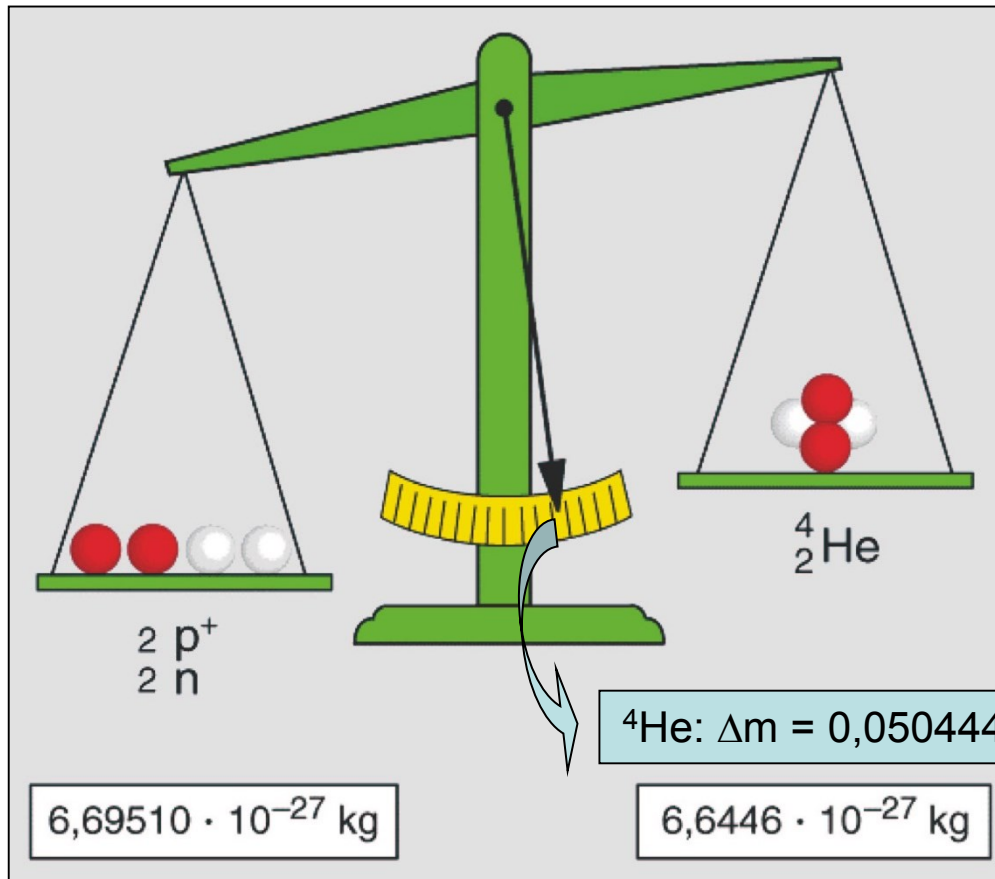
$$\Rightarrow \frac{\Delta E_K}{\Delta E_A} \approx \frac{0,511 \cdot 10^{-20}}{938 \cdot 25 \cdot 10^{-30}} \approx 2 \cdot 10^5$$

Atomare Prozesse laufen bei einigen eV ab, Kernprozesse bei 100 keV bis einigen MeV

Massendefekt und Bindungsenergie



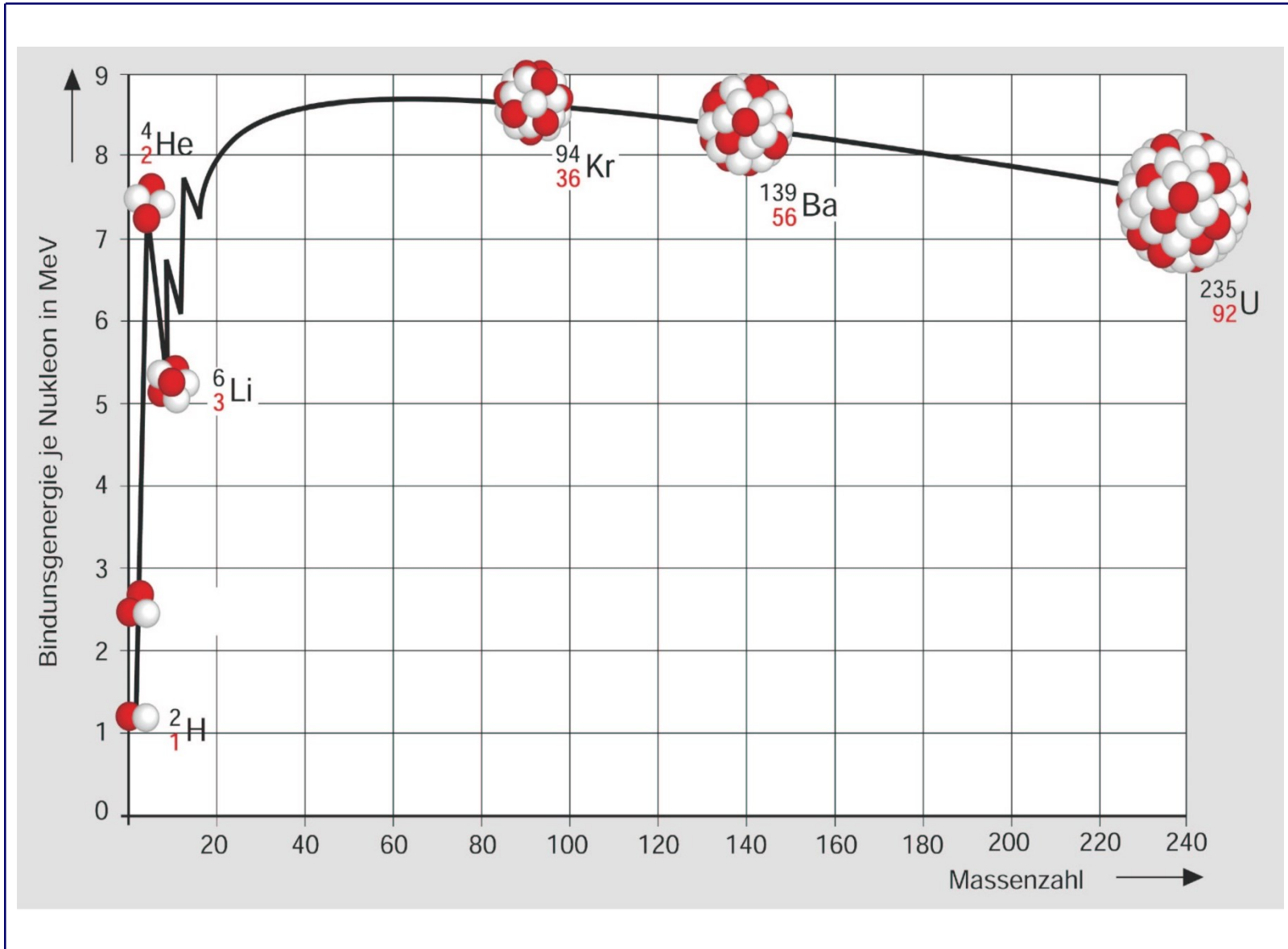
Beim Zusammenschluss von Protonen und Neutronen zu einem Atomkern tritt ein Massenverlust (Massendefekt) auf.



${}^4\text{He}: \Delta m = 0,050444 \times 10^{-27} \text{ kg} \Rightarrow 28,35 \text{ MeV}$

Massendefekt entspricht der Bindungsenergie des Kerns

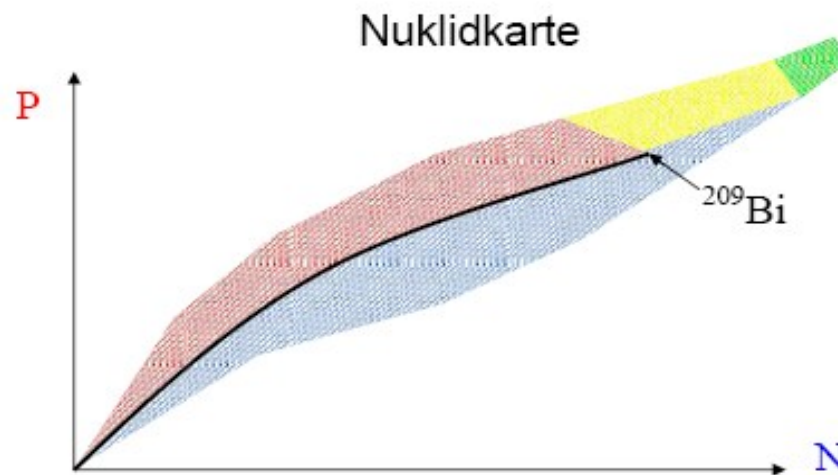
Bindungsenergie pro Nukleon





- **Z** Protonen \leftrightarrow Kernladungszahl, Ordnungszahl
- **N** Neutronen \Rightarrow Kerne mit gleichem **Z** heißen *Isotope* eines Elements
- **A** = **N** + **Z** \leftrightarrow Nukleonenzahl

\Rightarrow Schreibweise für einen Atomkern: ${}^A_Z X_N$



Mehr als 2500 bekannte Nuklide für 117 Elemente bekannt (2008), von denen 81 stabile Isotope besitzen

Verteilung der stabilen Isotope



Z gerade und **N** gerade (gg-Kerne):..... 158 Nuklide

Z gerade und **N** ungerade (gu-Kerne):..... 53 Nuklide

Z ungerade und **N** gerade (ug-Kerne):..... 50 Nuklide

Z ungerade und **N** ungerade (uu-Kerne):..... 6 Nuklide

⇒ Nukleonenpaare besonders stabil



Q-Wert (Enthalpie) einer Reaktion:

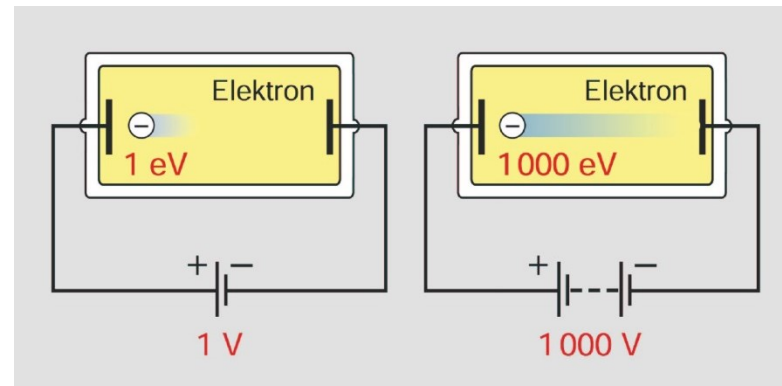
$$Q = (M_{\text{vorher}} - M_{\text{nachher}}) \cdot c^2$$

Äquivalenz von Masse und Energie

wenn Massendifferenz zwischen Ausgangs- und Endprodukten groß genug ist, kann spontaner radioaktiver Zerfall erfolgen

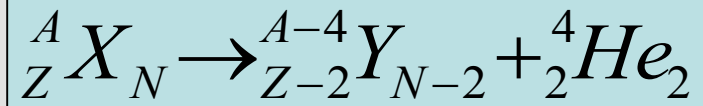
Energieeinheit [eV]:

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \text{ V} \\ &= 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

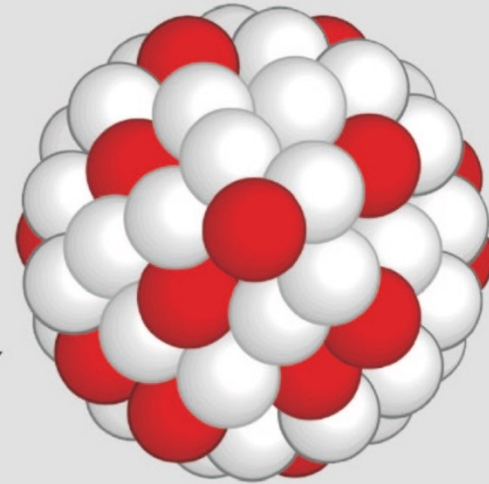
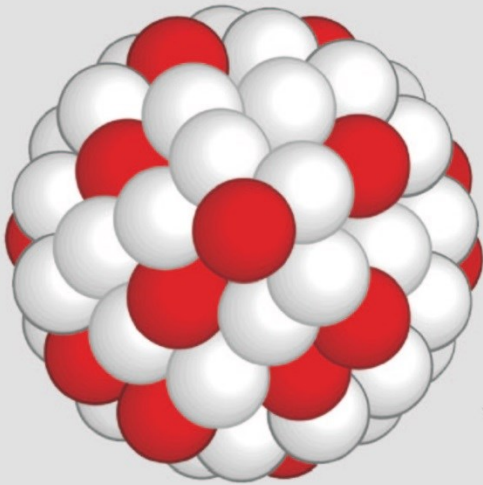


- Chemische Prozesse im Bereich von eV
- Nukleare Prozesse im Bereich von MeV

α -Zerfall

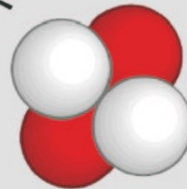


${}^{226}_{88} \text{Ra}$



${}^{222}_{86} \text{Rn}$

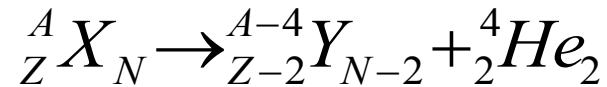
$Q_\alpha > 0$ für $A > 150$, häufig bei $Z > 83$



${}^4_2 \text{He}$

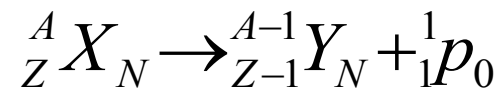


α -Zerfall



$Q_\alpha > 0$ für $A > 150$, vor allem bei $Z > 83$

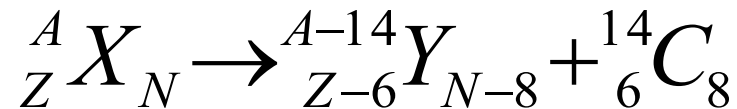
p-Zerfall (1981)



2006: 62 p-Strahler bekannt, (nur sehr protonenreiche Kerne)



^{14}C -Zerfall (1983), Clusterradioaktivität

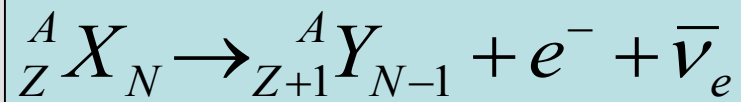


Konkurrenzprozess zum α -Zerfall, wesentlich seltener

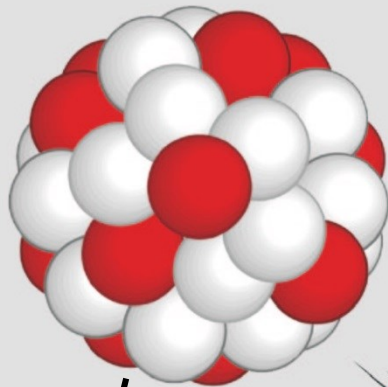
→ Gamov-Theorie (3. Tag):

- α -Teilchen bzw. ^{14}C muß Coulomb-Wall durchtunneln
- Tunnelwahrscheinlichkeit korreliert mit Höhe des Coulombwalls
- Höhe des Coulombwalls skaliert mit $Z_1 \cdot Z_2$

β^- -Zerfall (neutronenreiche Kerne)



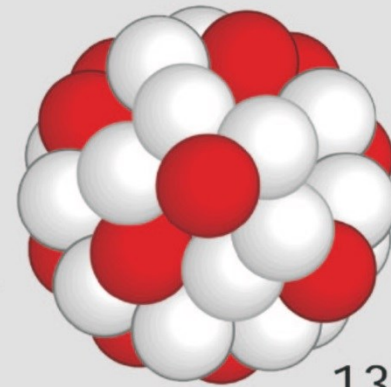
${}^{137}_{55} \text{Cs}$



$\bar{\nu}_e$

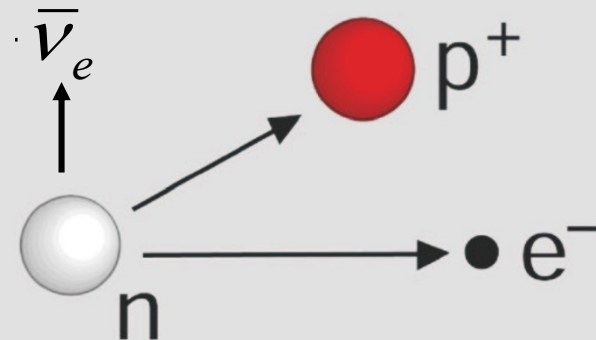
Beta $^-$ -Teilchen
(Elektron)

e^-



${}^{137}_{56} \text{Ba}$

schwache Wechselwirkung (WW)
starke WW wirkt nur auf Nukleonen





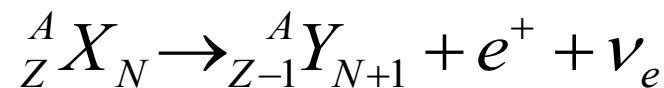
β^- -Zerfall (neutronenreiche Kerne)



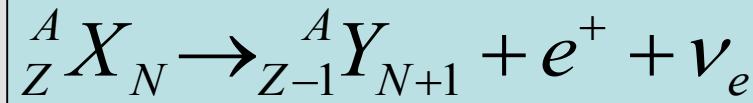
verantwortlich: schwache Wechselwirkung
 \Rightarrow starke Wechselwirkung wirkt nur auf Nukleonen (Hadronen)

**Beim β^- -Zerfall entsteht ein Element höherer Ordnungszahl
 \rightarrow künstlich erzeugte Elemente**

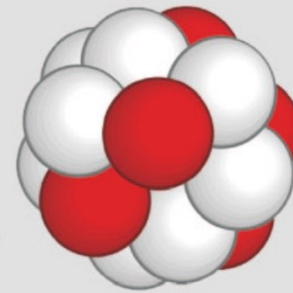
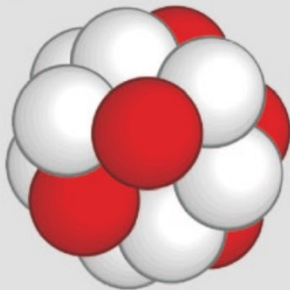
β^+ -Zerfall (neutronenarme Kerne)



β^+ -Zerfall (protonenreiche Kerne)



${}^{22}_{11}\text{Na}$

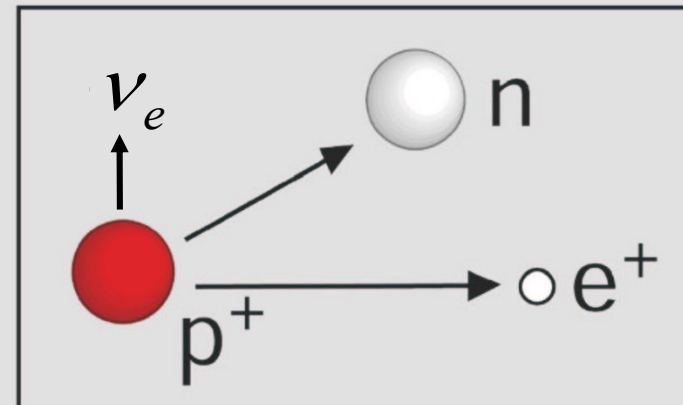


${}^{22}_{10}\text{Ne}$

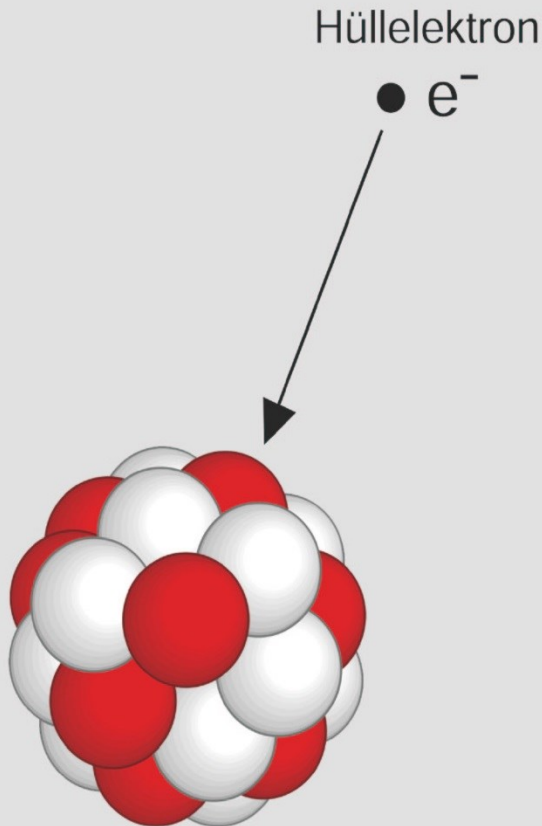
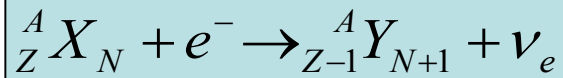
β^+ -Zerfall ist nur möglich, wenn Q groß genug, da $m_p < m_n$



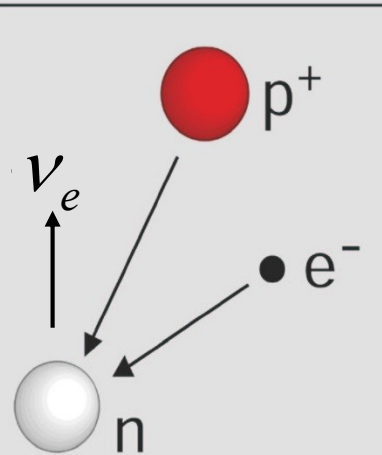
e^+
Beta⁺-Teilchen
(Positron)



Elektroneneinfang (EC, ϵ)



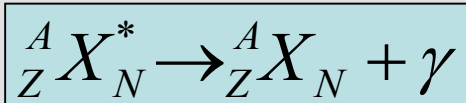
z.B. bei ${}^{40}_{19}\text{K}$



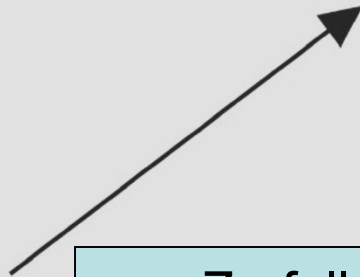
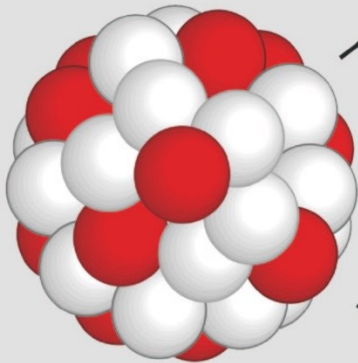
Ein Hülelektron vereinigt sich mit einem Proton des Kerns zu einem Neutron

Emission charakteristischer Röntgenstrahlung. Konkurrenz zum β^+ -Zerfall. Dieser ist nur möglich, wenn Q groß genug, da $m_p < m_n$

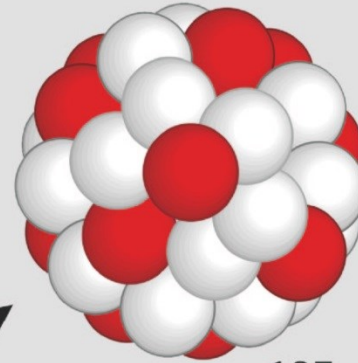
γ -Zerfall



${}^{137m}_{56}\text{Ba}$



${}^{137}_{56}\text{Ba}$



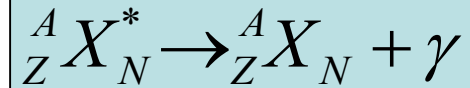
$\Rightarrow \gamma$ -Zerfall ist Folge einer Kernanregung, z.B. durch vorhergehenden α - oder β -Zerfall



Gammaquant
(Photon)

Haben angeregte Kerne "lange" Lebensdauern ($>10^{-12}$ s), spricht man von isomeren Übergängen (isomeric transitions, IT)

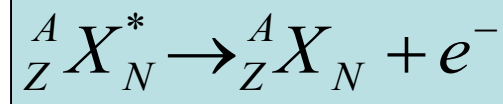
γ -Zerfall



keine Nuklidumwandlung, sondern Übergang in tieferliegenden Kernzustand unter Emission von elektromagnetischer Strahlung

kernanaloger Prozess zu (Röntgen-)fluoreszenz im Atom:
Abregung eines angeregten Zustandes unter Emission von Photonen

\Rightarrow γ -Zerfall ist Folgeprozess einer vorherigen Kernanregung, z.B. durch vorhergehenden α - oder β -Zerfall



Konkurrenzprozess zum γ -Zerfall, wenn γ -Übergänge "verboten" (\rightarrow Auswahlregeln beim γ -Zerfall)

Das Elektron wird i.a. aus der K-Schale emittiert, d.h. $E_e = E_\gamma - E_B$
 \Rightarrow monoenergetische e^- im Gegensatz zu β -Zerfall

Auf innere Konversion erfolgt Emission charakteristischer Röntgenstrahlung (Wiederauffüllen der Schalen)

Kernanaloger Prozeß zu Auger-Elektronenemission:
Energieüberschuss wird auf ein Elektron übertragen, das emittiert wird



**Konkurrenzprozess zum γ -Zerfall, wenn γ -Übergänge
"verboten" (\rightarrow Auswahlregeln beim γ -Zerfall)**

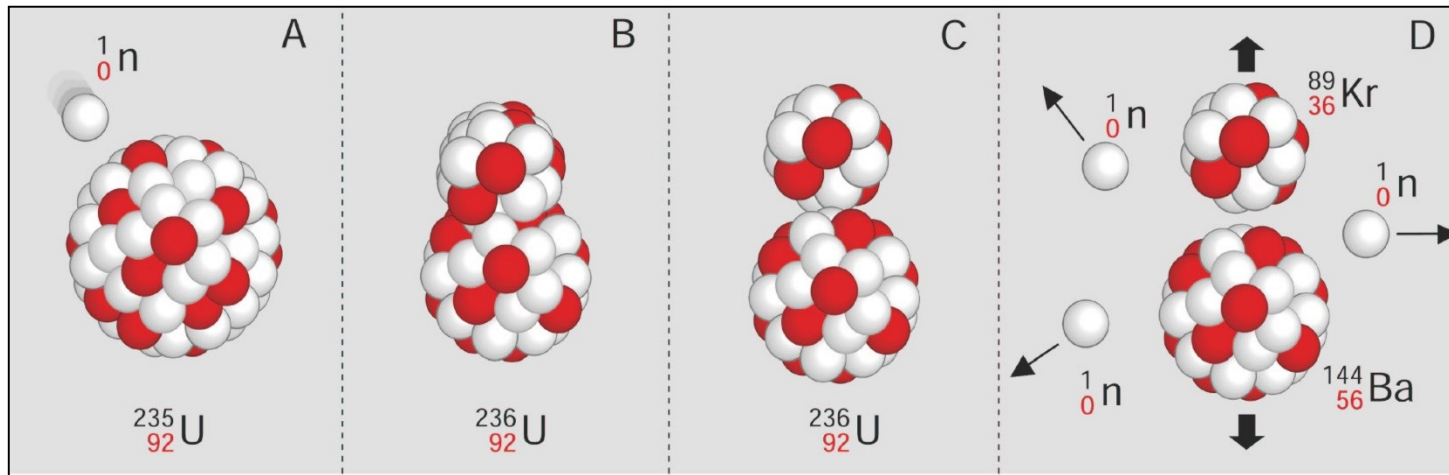
Elektron-Positron-Paar wird im Coulombfeld des Kerns spontan gebildet

Nur möglich, wenn $E_\gamma > 2 m_e c^2$

Kernspaltung (spontan / induziert)

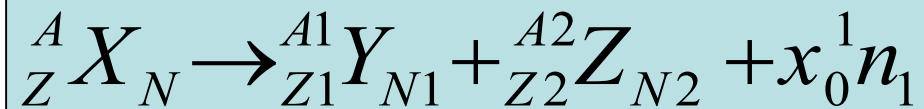


(Neutronen-) induzierte Spaltung:

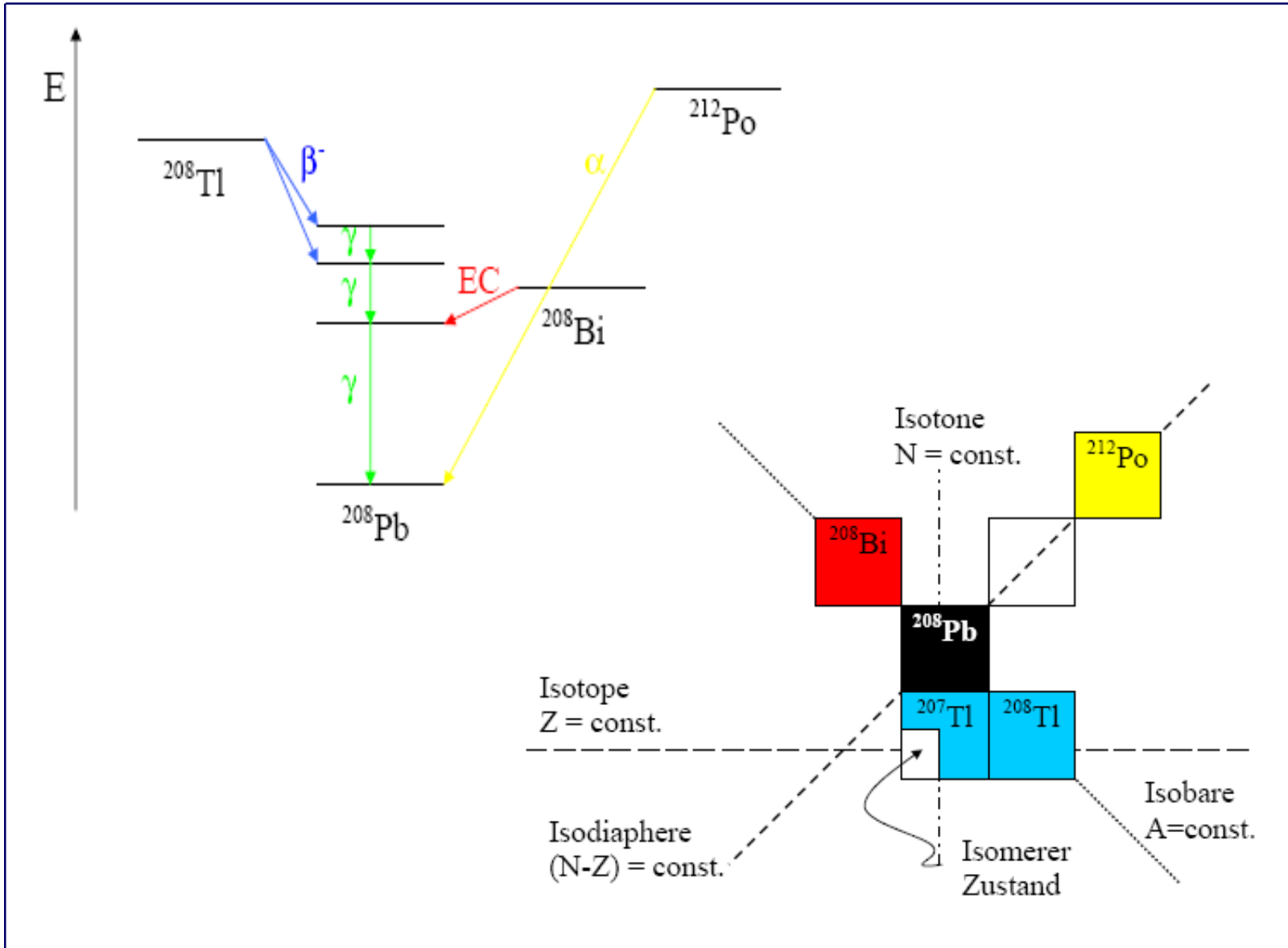


Spontanspaltung tritt bei ${}^{232}\text{Th}$ und schwereren Kernen auf

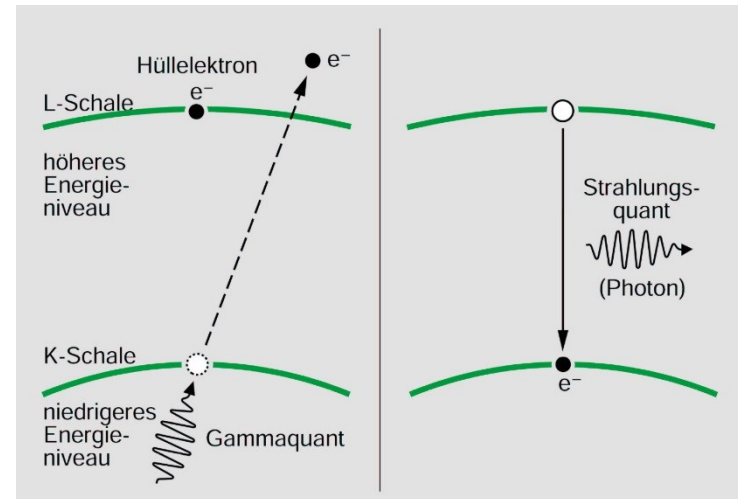
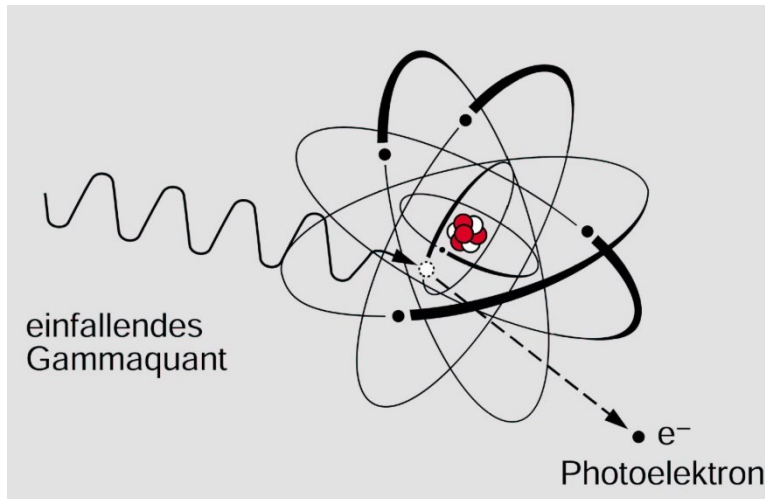
- Produkte sind weit vom Ausgangskern entfernt
- Breite Verteilung von Produkten
- Sehr großer Energieumsatz (>200 MeV)



Beispiel für ein Zerfallsschema



Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie



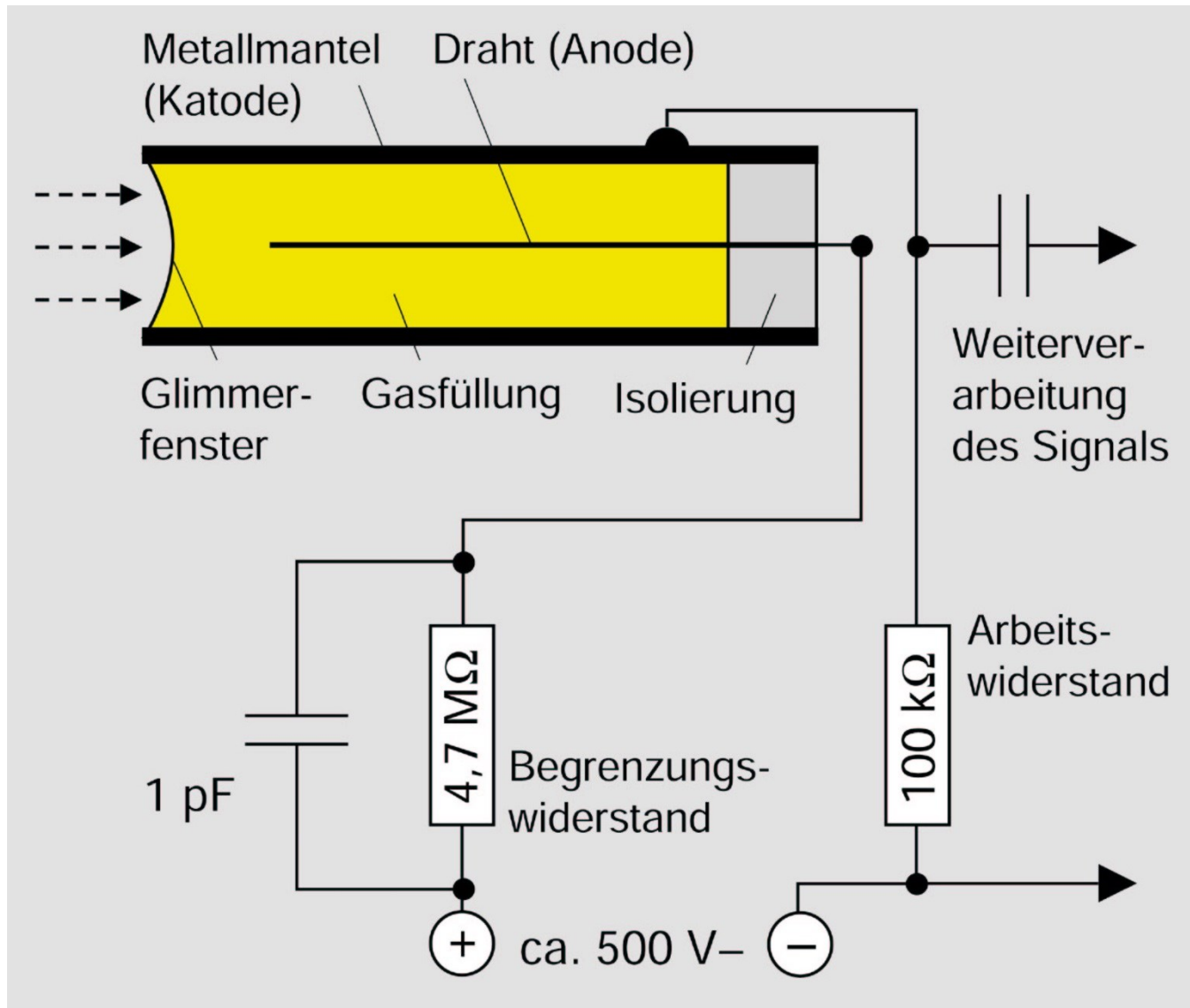
Ionisation: $M \rightarrow M^+ + e^-$

Anregung: $M \rightarrow M^*$

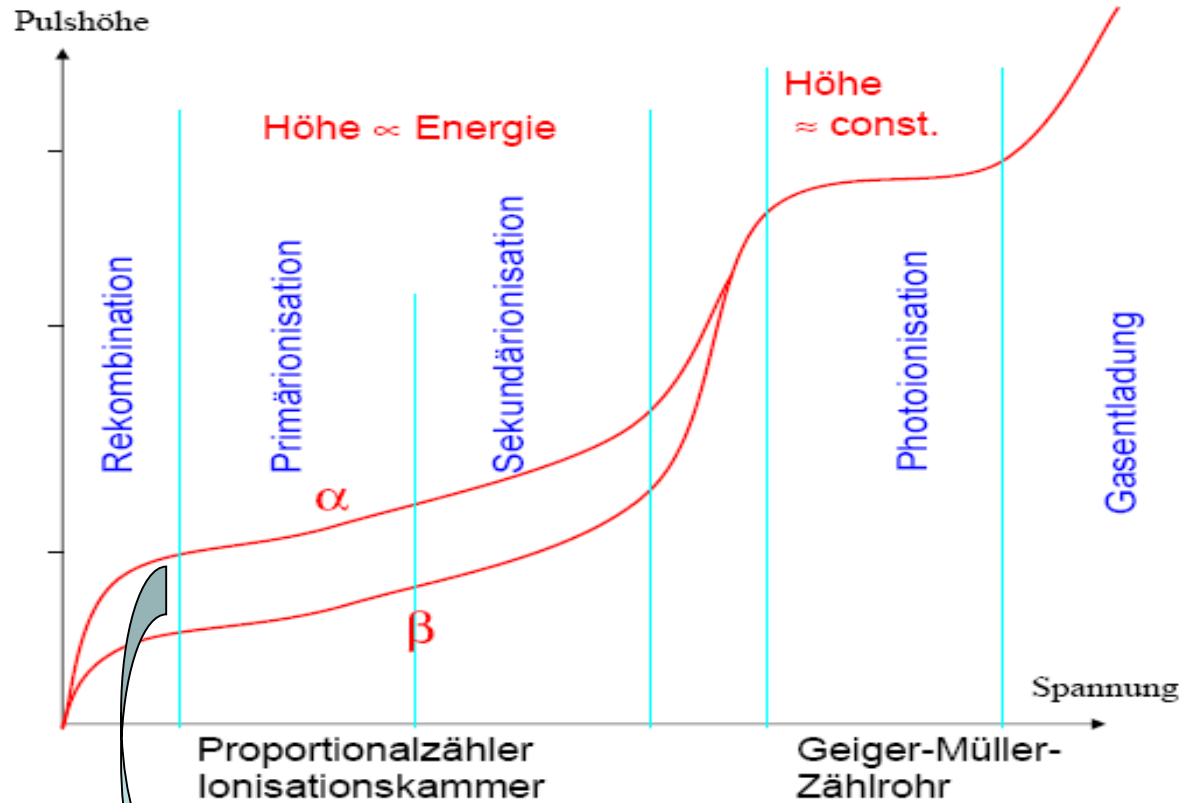
Erzeugung eines Ionenpaares in Luft: ca. 30-35 eV.

- **α -Strahlung $\approx 10^4$ Paare / cm Weglänge**
- **β -Strahlung $\approx 10^2$ Paare / cm Weglänge**
- **γ -Strahlung ≈ 1 Paar / cm Weglänge**

Ionisationskammer (Zählgas z.B. Ar/CH₄)



Eigenschaften eines Zählrohrs



Ionisationskammer:

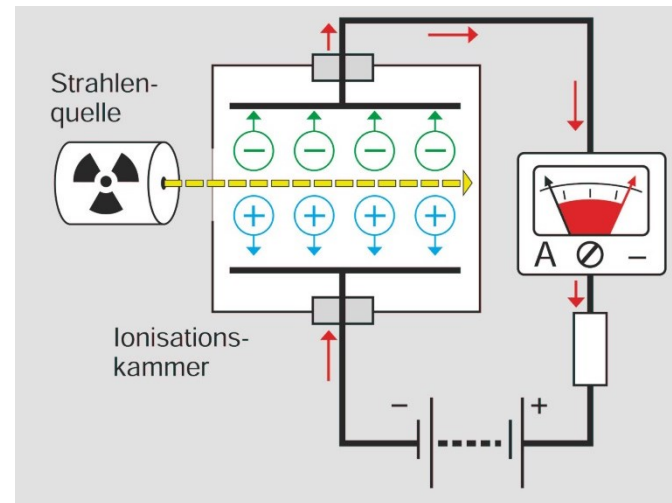
α -Teilchen erzeugt etwa 10^5 Ionenpaare
 \Rightarrow direkt verstärkbarer Strom ($\approx 10^{-14}$ As)

Proportionalzähler



Bei erhöhter Spannung werden die primär erzeugten Elektronen zur Anode beschleunigt

⇒ Stoßionisation, sekundäre Ionenpaare



⇒ Verstärkung um 3-5 Größenordnungen (mV Bereich)
 α - und β -Strahlung lassen sich elektronisch diskriminieren (Impulshöhe):

Impulshöhe \propto Teilchenenergie

⇒ oft Durchflusszähler (Zählgaserneuerung): Kontamat, Hand-Fuß-Monitor

Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ)

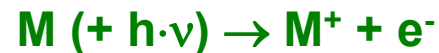


Weitere Erhöhung der Spannung: Verstärkt Stoßionisation

Außerdem: **Elektronische Anregung des Zählgases:**



dadurch lawinenartige **Photoionisation:**



Um Kathode bildet sich **Ionenwolke** (Ionen driften langsamer als e^-):

⇒ **Pulshöhe wird unabhängig von der Teilchenart**

⇒ **Totzeit:** Zeit, in der das Zählrohr kein weiteres Teilchen registrieren kann. Zugabe von "Löschgas" (Alkohol, Halogene) zur schnelleren Neutralisation der Ionenwolke (100-400 μs)

Vorteil GMZ: Hohe Impulsraten, keine Verstärkung notwendig

Nachteil GMZ: Pulshöhe energieunabhängig. Keine Spezifität

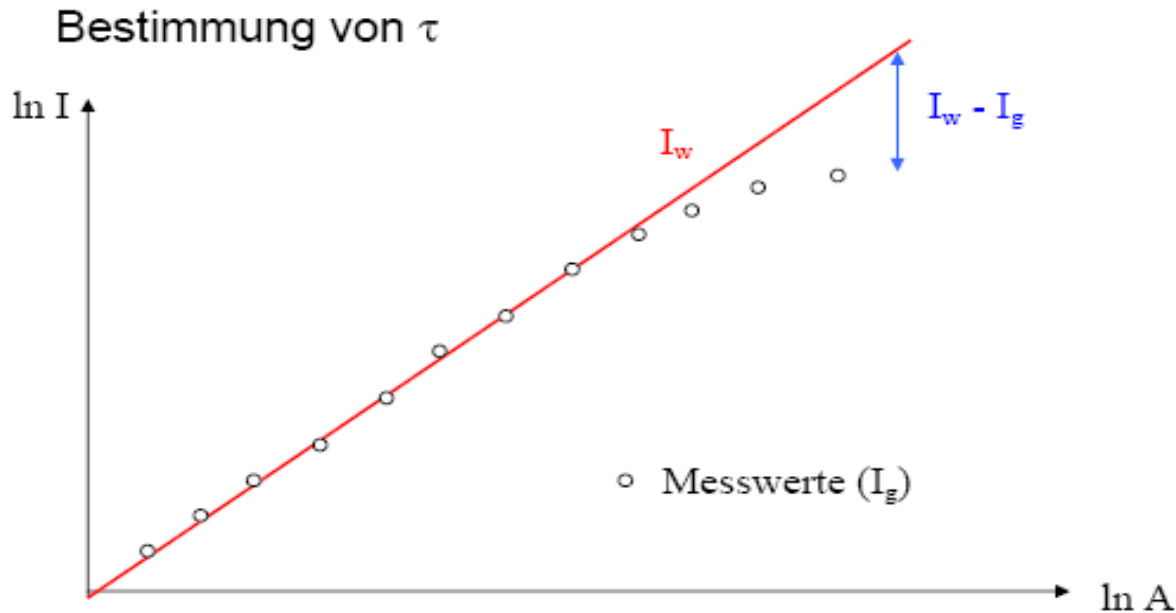


Gemessene Impulsanzahl ist kleiner als wahre Impulsanzahl
(kurz aufeinanderfolgende Teilchen ergeben nur ein Signal):

$$I_g < I_w \Rightarrow I_w - I_g = \text{Verlust an Impulsen pro Zeit}$$

Zeitbruchteil, den der Detektor "tot" ist:

$$I_g \cdot \tau; \quad I_w - I_g = I_w \cdot I_g \cdot \tau; \quad \tau = (I_w - I_g) / (I_w \cdot I_g)$$



Herstellung fester radioaktiver Präparate durch Fällungsreaktionen



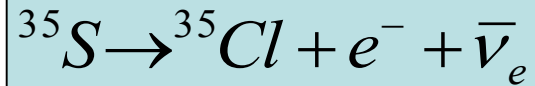
Herstellung eines ^{35}S -Präparates $\Rightarrow (^{35}\text{S} - (\beta^-) \rightarrow ^{35}\text{Cl})$

- Bestrahlung von 1,5 mg NH_4Cl im TRIGA-Reaktor: $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$
 $\Rightarrow A(^{35}\text{S}) = 500 \text{ kBq}$ mit $T_{1/2} = 87,5 \text{ d}$
- $N = (A \times T_{1/2}) / \ln 2 = (5 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \times 7,6 \times 10^6 \text{ s}) / 0,693 \Rightarrow \text{ca. } 5,5 \times 10^{12} \text{ Atome}$
 ^{35}S pro Versuch werden ca. 10^{10} Atome (10^{-15} mol) ^{35}S eingesetzt
- Glasoberfläche enthält $-\text{SiOH}$ Gruppen.

Ionenaustauscherkapazität

ca. $10^{-10} \text{ Mol/cm}^2$. Es werden aber nur ca. $10^{-15} \text{ mol } ^{35}\text{S}$ eingesetzt.

Zum quantitativen Ausfällen von $[^{35}\text{S}]\text{BaSO}_4$ muß
inaktiver Sulfatträger zugegeben werden



Zerfallsenergie verteilt sich auf Elektron und Antineutrino

⇒ kontinuierliches Elektronenspektrum

Bei abgedeckten Präparaten zählt der GMZ jeweils den

transmittierten Anteil der Elektronen

