

RC - 04



---

---

---

## **1.4 Kernumwandlungen, Strahlungsarten, Kernreaktionen**

- 
- 
- 
- 
- **Kernumwandlungen, Strahlungsarten**

# Definition der Radioaktivität

---

---

- **spontane** Umwandlung **instabiler** Kerne unter Energieabgabe
- Energieabgabe erfolgt in Form **ionisierender Strahlung**
  - \* direkt vom Atomkern aus
  - \* indirekt durch die Kernumwandlung in der Elektronenhülle erzeugt
- spontaner exothermer Vorgang wird bezeichnet als:  
**radioaktive Umwandlung – radioaktiver Zerfall**
- Unterscheidung zwischen künstlicher und natürlicher Radioaktivität

# Arten der radioaktiven Umwandlung

---

---

---

- **Alpha – Umwandlung**
- **Beta – Umwandlung**
- **Gammaübergänge**
- **Spontane Kernspaltung**
- **Spontane Nukleonenemission**
- **Spontane Emission schwerer Teilchen**

## Alpha – Umwandlung/Zerfall

- dabei wird vom Atomkern ein Heliumkern  ${}^4_2\text{He}$  –  $\alpha$  – Teilchen – mit hoher kinetischer Energie ausgestrahlt
- Verringerung der Nukleonenzahl um vier, die Ordnungszahl um zwei Einheiten



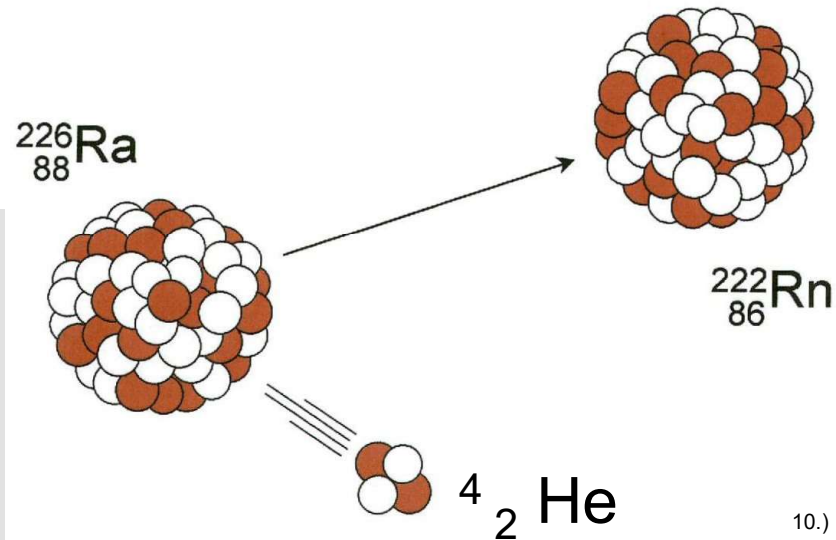
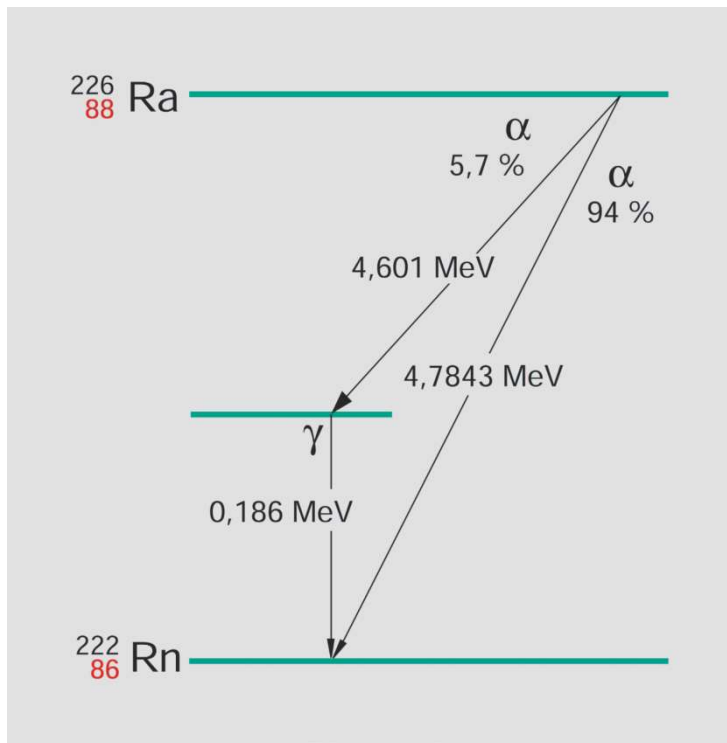
- aus energetischen Gründen ist die  $\alpha$  - Umwandlung auf schwere Nuklide ( $A > 170$ ,  $Z > 70$ ) beschränkt

### Energetische Bedingungen:

- spontane Kernumwandlungen können nur stattfinden, wenn sie exotherm verlaufen
- Bindungsenergie des Ausgangskerns muss geringer sein als die Summe der Bindungsenergien der entstehenden Kerne
- wegen großer Bindungsenergie des  $\alpha$  – Teilchens  $E_B = 28,3 \text{ MeV}$  ist bei zahlreichen schweren Kernen spontane Umwandlung möglich
- Reaktionsenergie: (ergibt sich aus der Massenbilanz  $E = m \cdot c^2$ )

$$Q = E_B ({}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}) + E_B ({}^4_2\text{He}) - E_B ({}^A_Z\text{X})$$

# Modell zur Entstehung von Alphastrahlen



10.)

# Theorie der $\alpha$ – Umwandlung

---

---

- Atomkern von Potentialwall umgeben
- Höhe  $E_c$  des Potentialwalls lässt sich berechnen = ca. 28 MeV
- Kinetische Energie des mittleren  $\alpha$  – Teilchens beträgt nur  $E_\alpha = 4,8$  MeV
- **Deutung durch G. Gamow:**

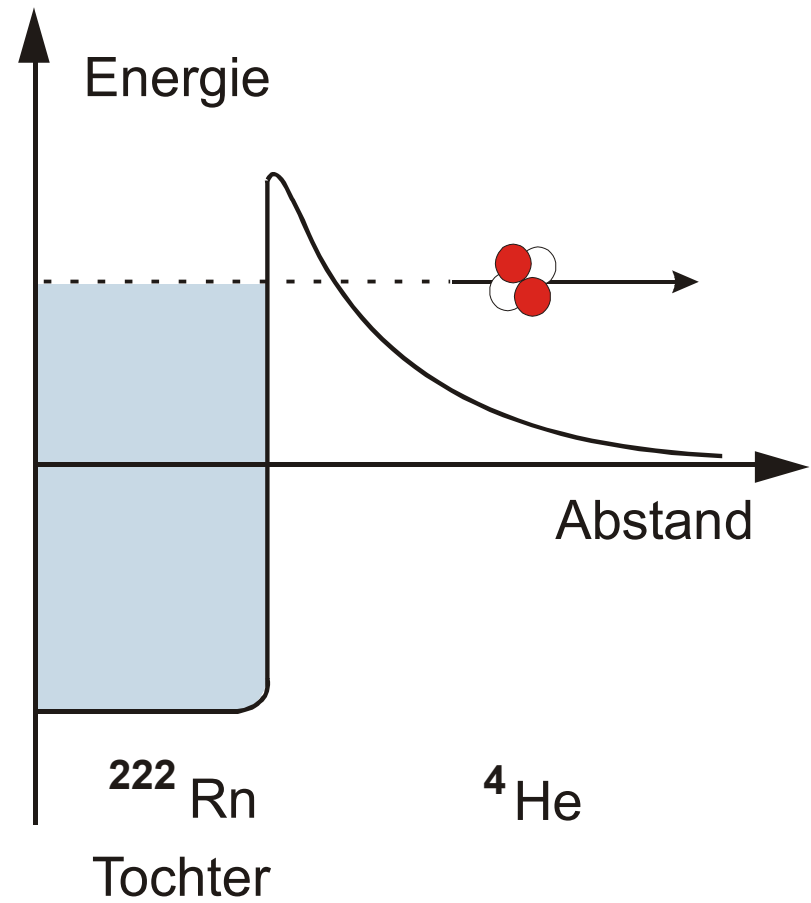
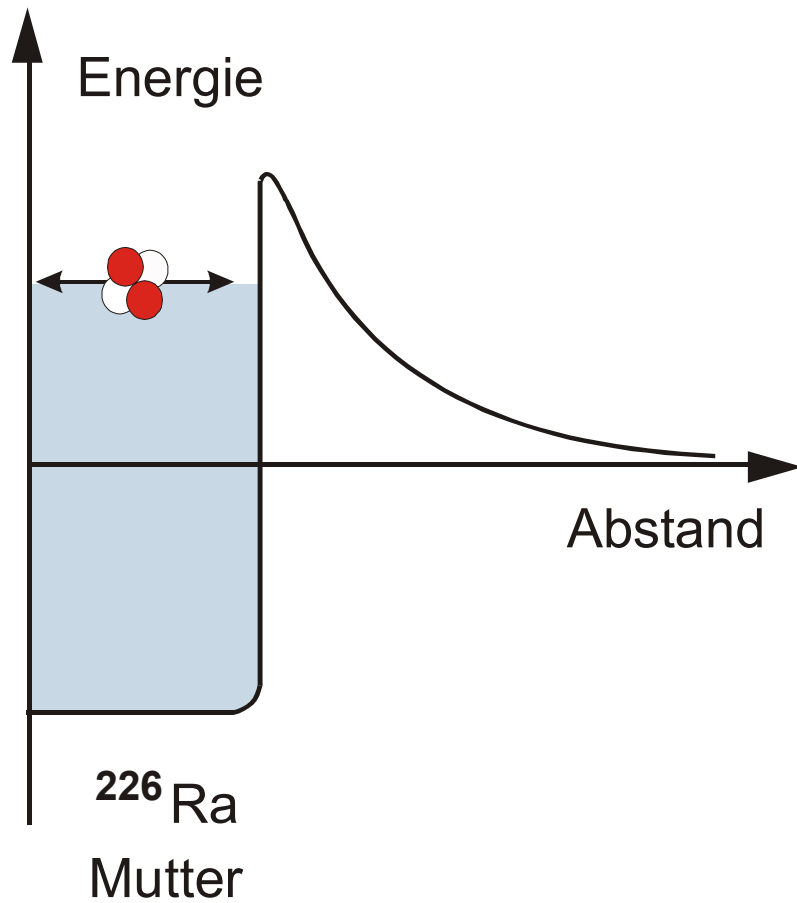
$\alpha$  – Teilchen schwingt mit hoher Frequenz im Atomkern, dabei Anstoßen und Reflektion von Potentialtopf – Wand

Wellenmechanische Theorie; es besteht gewisse Wahrscheinlichkeit, dass Teilchen auch außerhalb des Atomkerns anzutreffen sind, selbst wenn seine Energie nicht ausreicht die Coulomb – Schwelle zu überwinden

Teilchen tunnelt = Tunneleffekt

(einfache Theorie vernachlässigt Bildung des  $\alpha$  – Teilchens selbst im Atomkern, enthalten keine Abhängigkeit vom Drehimpuls u.a.)

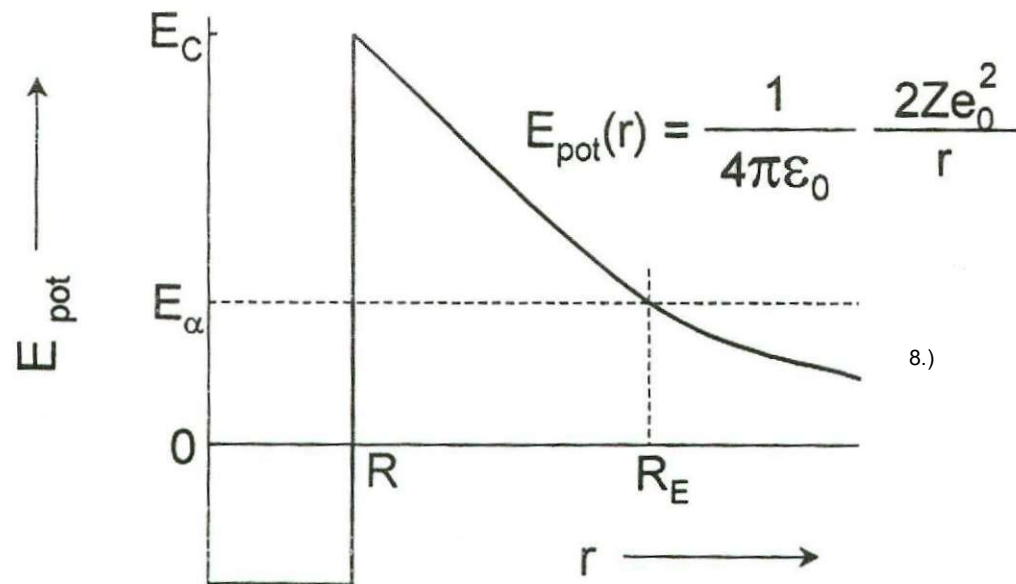
# Modell für die Emission von $\alpha$ - Teilchen



# Potentielle Energie zwischen $\alpha$ – Teilchen und Restkern der Kernladungszahl $Z$ in Abhängigkeit von der Entfernung $r$ vom Kernmittelpunkt

---

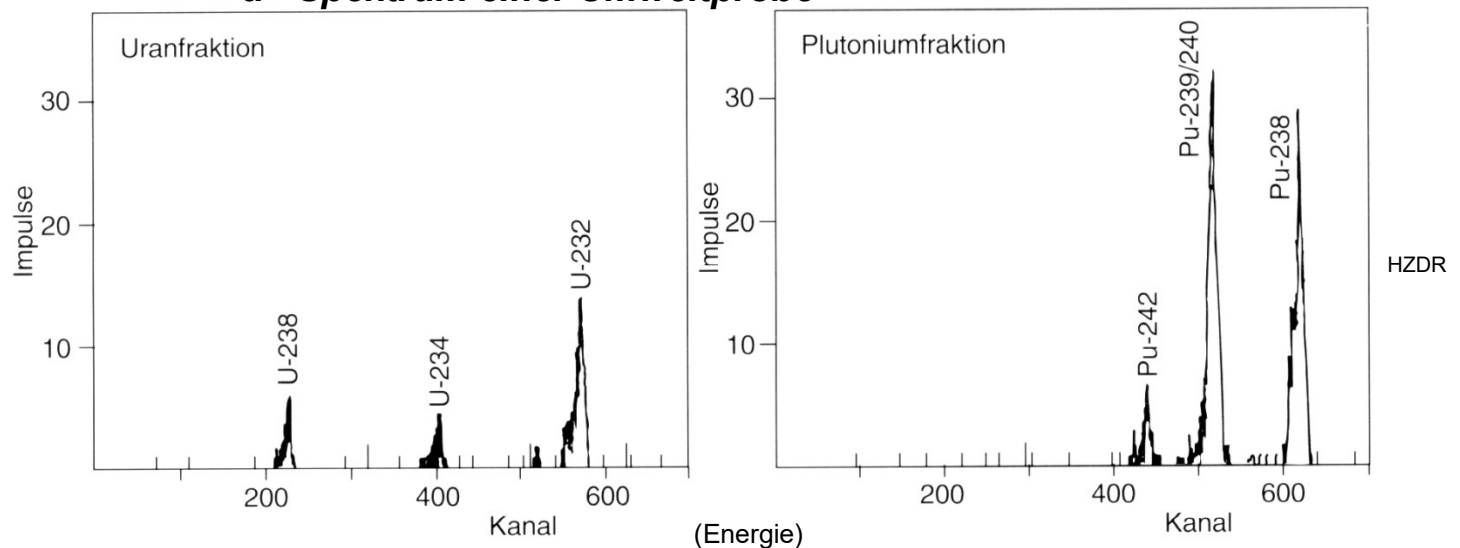
---



# $\alpha$ – Spektrum

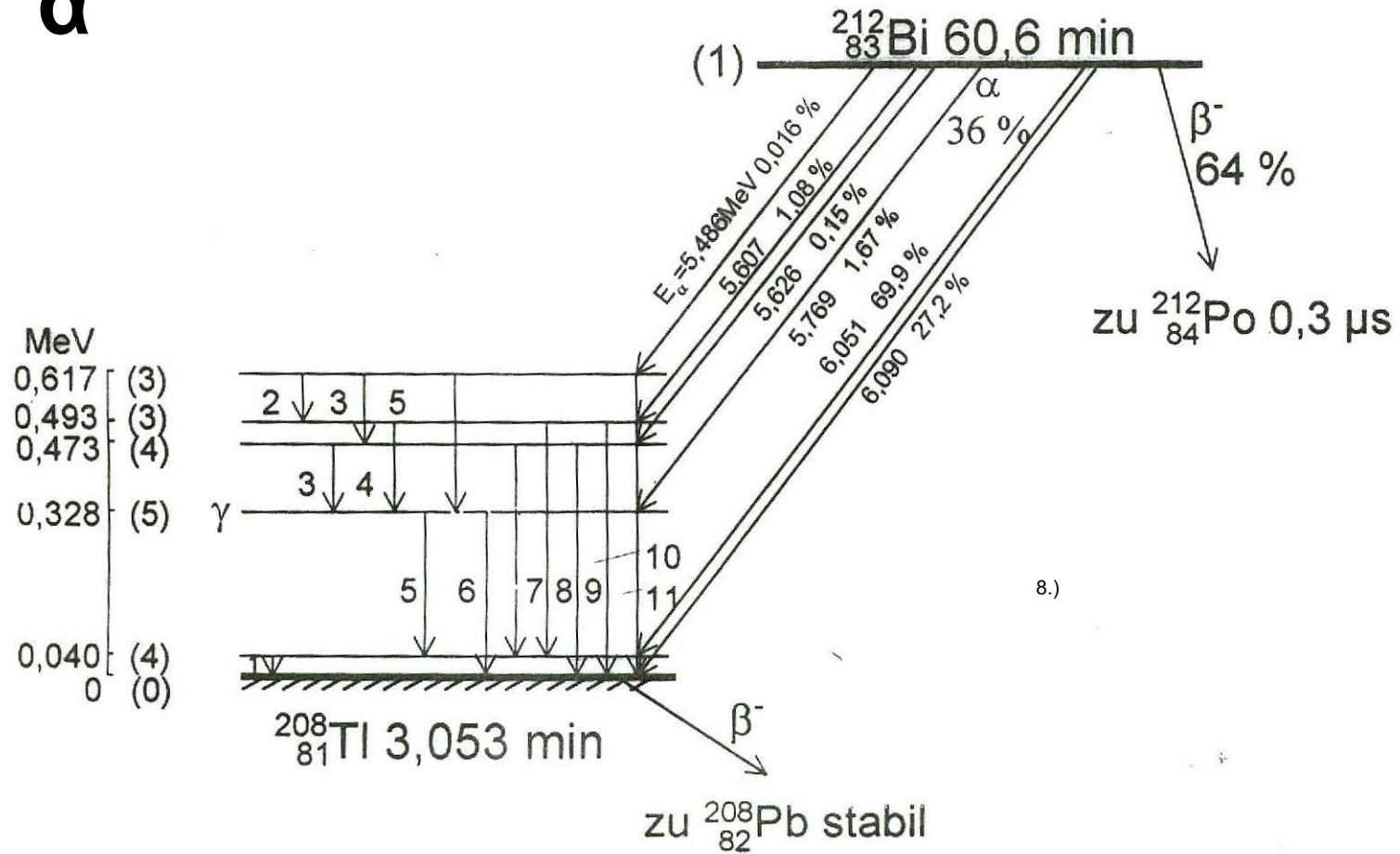
- Bei der Umwandlung der ca. 450 bekannten  $\alpha$  – Strahler werden  $\alpha$  – Teilchen mit **diskreten Energien im Bereich von 4 MeV bis 9 MeV** emittiert  
Differenz der Energie der Ausgangs- und Restkerne, bei gg - Kernen oft alle  $\alpha$  - Teilchen eine Energie
- Bei anderen Kernarten oft Übergänge in angeregte Energieniveaus – Aussendung von mehreren Gruppen von  $\alpha$  – Teilchen, die sich in der Energie unterscheiden
- Beispiel für Auftreten verschiedener Gruppen ist  $^{212}_{83}\text{Bi}$   
größtmögliche Energie ist Übergang in den Grundzustand

*$\alpha$  - Spektrum einer Umweltprobe*



# Umwandlungsschema von $^{212}_{83}\text{Bi}$

$\alpha$



## Geiger – Nuttall - Regel

---

---

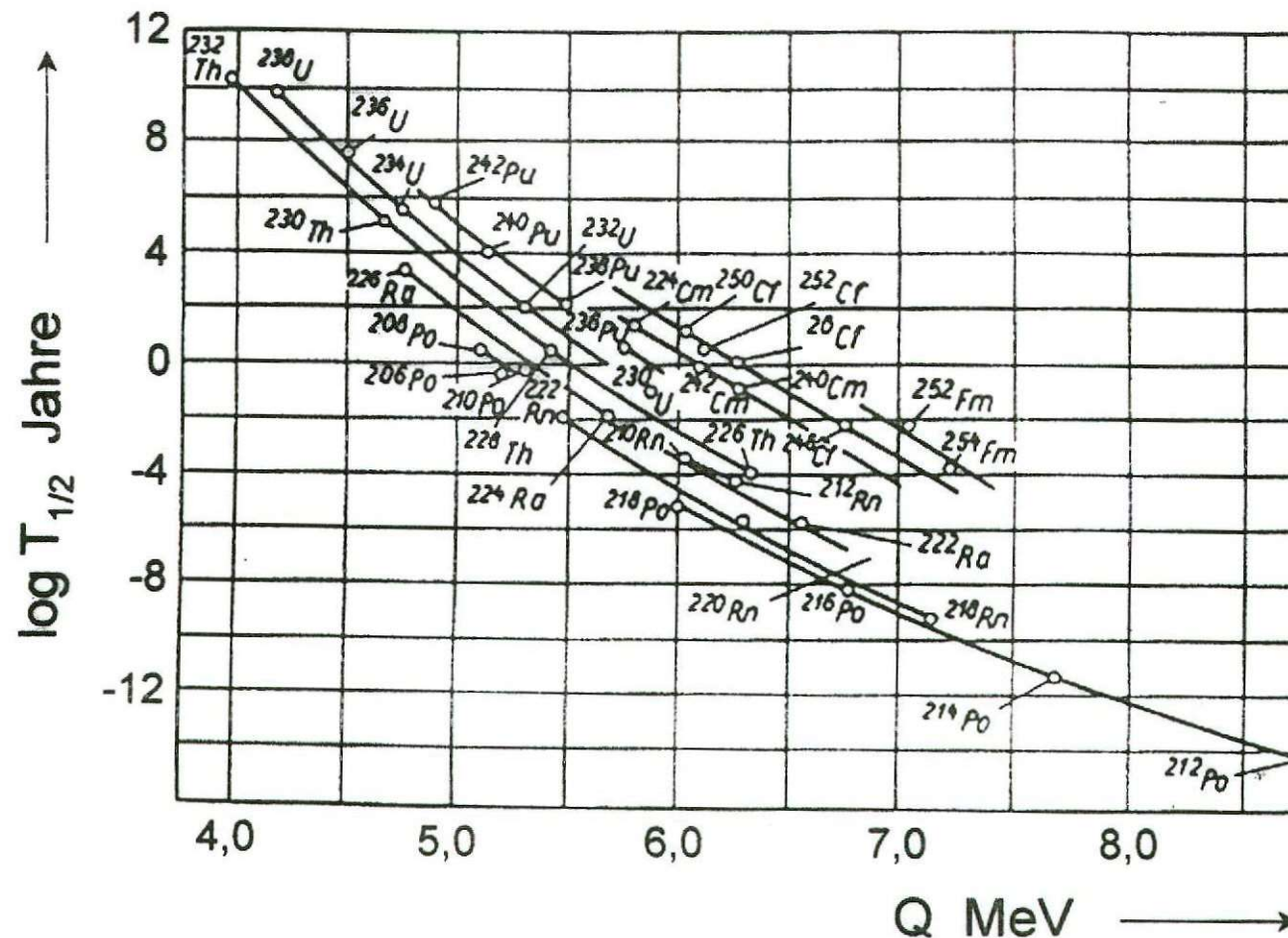
- $\alpha$  – Teilchen übernimmt wegen der kleinen Masse den überwiegenden Anteil der Energie, gesamte Umwandlungsenergie  $Q$  ist nur ca. 2% größer als kinetische Energie des  $\alpha$  – Teilchens
- Halbwertszeit der  $\alpha$  – Strahler haben große Unterschiede:  $0,3\mu\text{s}$   $^{212}_{84}\text{Po}$  und  $5 \cdot 10^{15}\text{a}$  für  $^{144}_{60}\text{Nd}$
- 1911 fanden Geiger und Nuttall eine empirische Beziehung zwischen  $Q$  – Wert (Umwandlungsenergie) und der Umwandlungskonstante  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$

$$\ln \lambda = k_1 + k_2 \ln Q$$

$$k_1, k_2 = \text{Konstanten}$$

→ mit zunehmender Umwandlungsenergie wächst die Umwandlungskonstante des  $\alpha$  – Strahlers (siehe Kurve)

# Empirischer Zusammenhang zwischen Halbwertszeit und $\alpha$ - Umwandlungsenergie für die Umwandlung von gg-Kernen in die Grundzustände ihrer Folgekerne



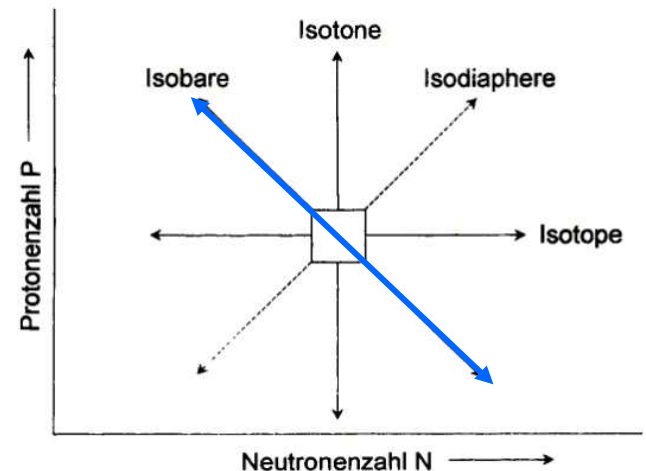
8.)

→ mit zunehmender Umwandlungsenergie wächst die Umwandlungskonstante des  $\alpha$  - Strahlers

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = \ln 2 / \lambda = 0,6931 / \lambda$$

# Beta - Umwandlung

- Arten der Umwandlung:  $\beta^-$  - Umwandlung  
 $\beta^+$  - Umwandlung  
Elektroneneinfang
- beruht auf gegenseitigen Umwandlung der Nukleonens  
Proton in Neutron; Neutron in Proton  
dabei Emission von  
Elektron oder Positron (Ladungserhaltung)  
Elektronen – Neutrino bzw. Elektronen – Antineutrino
- Ausgangskern und Folgekern stets isobar
  - **Isobare:**  
Nuklide mit Atomkernen gleicher Nukleonenzahl  
 $N + Z = \text{const.}$ , Diagonalreihen  
 $^{17}_7\text{N}$ ,  $^{17}_8\text{O}$ ,  $^{17}_9\text{F}$
- $\beta$  – Umwandlung kommt bei fast allen Elementen vor, etwa 20 natürliche und 1700 künstliche  $\beta$  – Strahler
- HWZ von 5 ms bis  $10^{24}\text{a}$

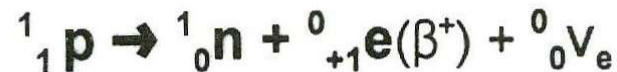


## Beta – Umwandlung

- $\beta^-$  – Umwandlung: (Elektron + Elektron-Antineutrino)



- $\beta^+$  – Umwandlung: (Positron + Elektron-Neutrino)



- Elektroneneinfang:

Umwandlung eines Protons in ein Neutron,  
dabei wird ein Hüllenelektron (meist aus K-Schale) vom Kern aufgenommen  
und ein Elektronen-Neutrino emittiert



Konkurriert oft mit  $\beta^+$  – Umwandlung, führt zu gleichen Folgekern

# Energetische Bedingungen für $\beta$ - Umwandlung

---

Emission eines Elektrons oder Positrons ist nur dann möglich, wenn die Massendifferenz zwischen Ausgangs- und Folgekern die Elektronenmasse übertrifft

Beispiel:  $\beta^-$  - Prozess

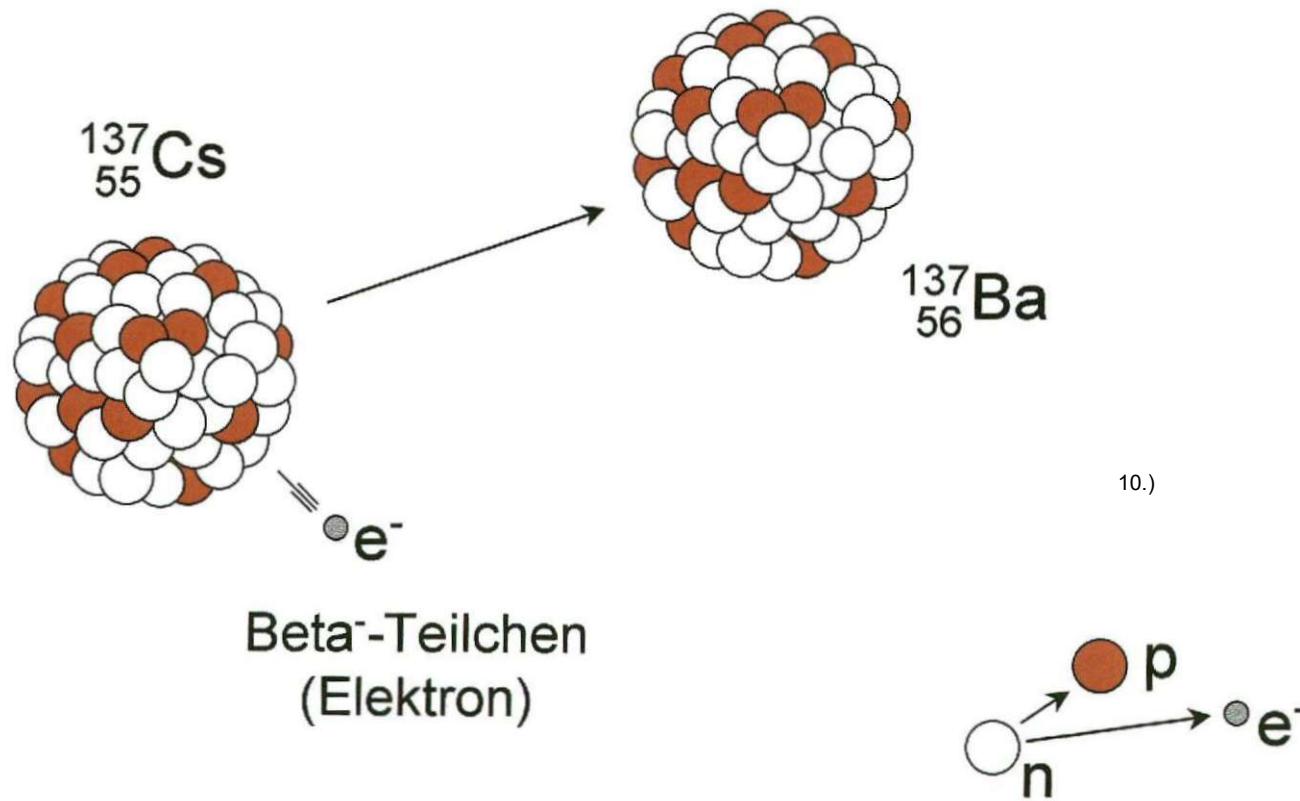
$$m_K ({}^A_Z X) > m_K ({}^A_{Z+1} Y) + m_e$$

Freiwerdende Energie

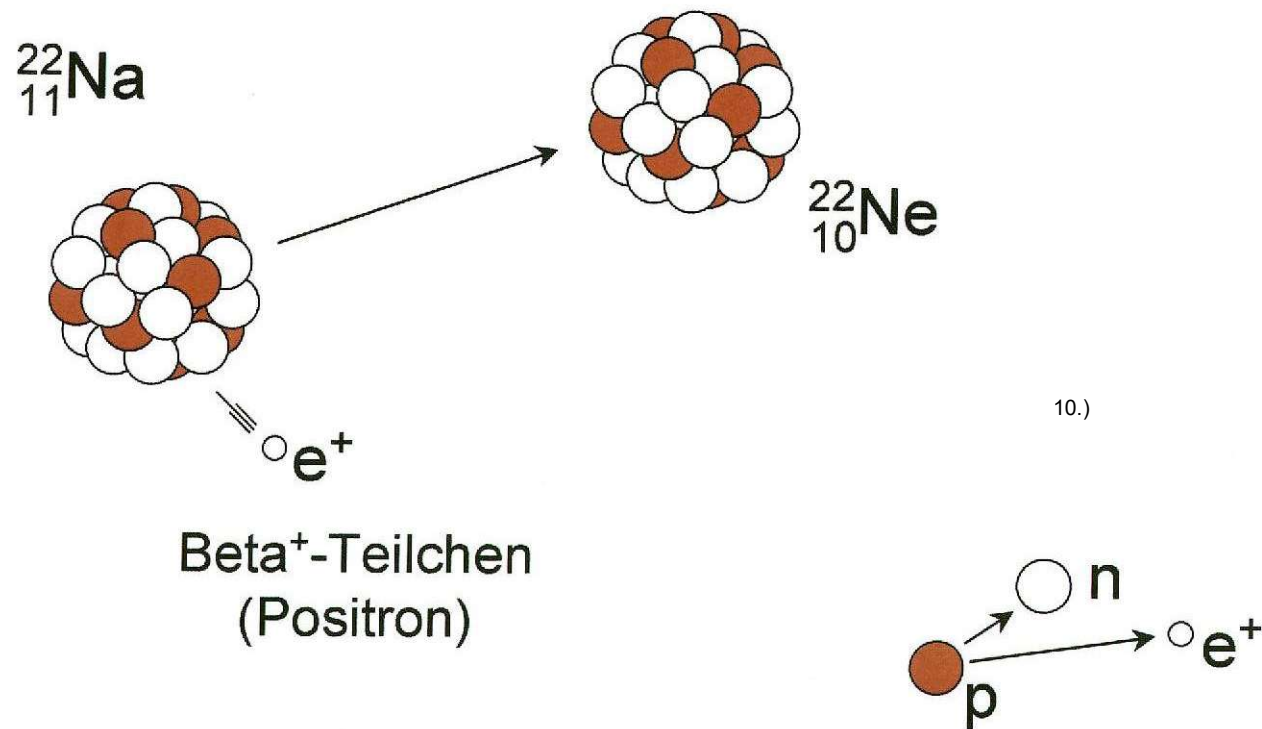
$$Q = [ m_a ({}^A_Z X) - m_a ({}^A_{Z+1} Y) ] c_0^2$$

$\beta^+$  – Prozess analog

# Modell zur Entstehung von Beta<sup>-</sup> - Strahlen



# Modell zur Entstehung der Beta<sup>+</sup> - Strahlen



# Emission von $\beta$ - Teilchen

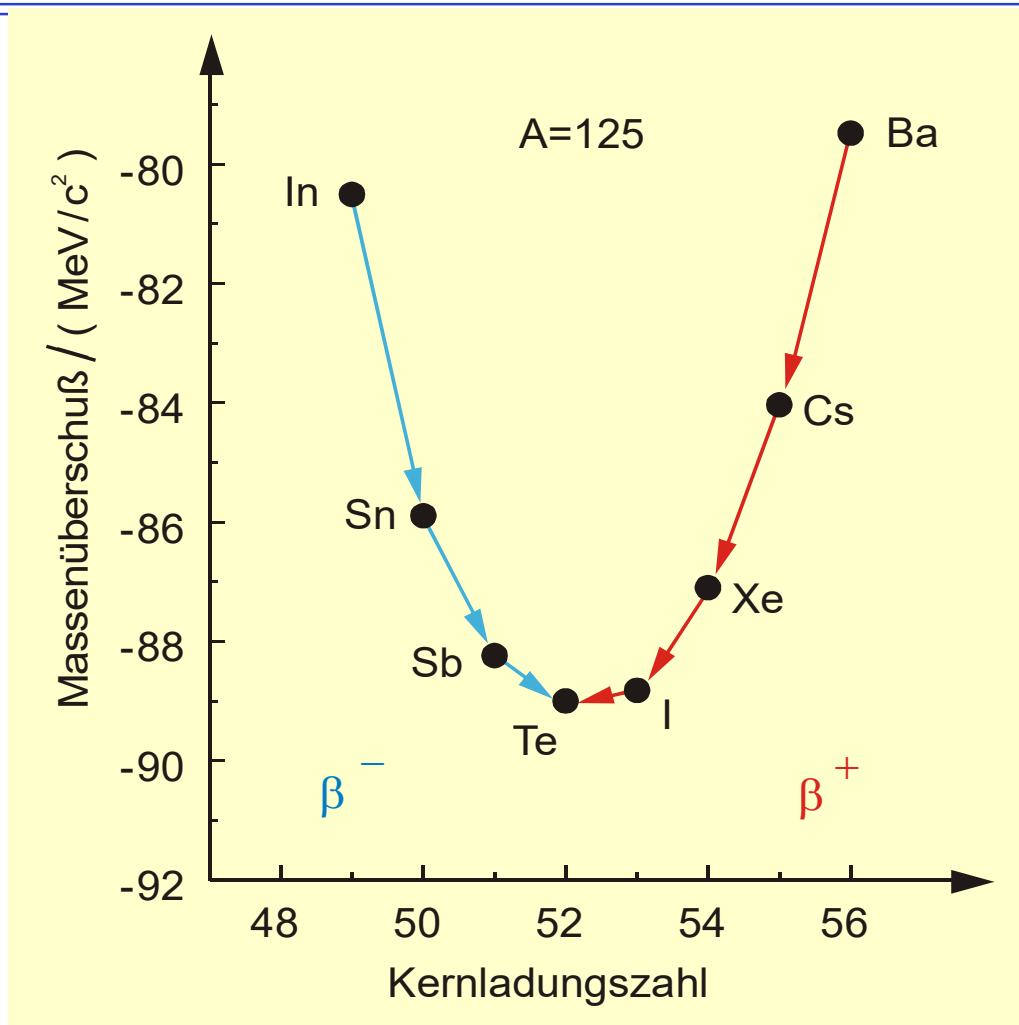
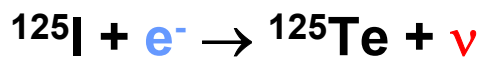
## Emission eines Elektrons:



## Emission eines Positrons:



## Elektroneneinfang:



## $\beta$ - Spektrum

- 
- 
- die freiwerdende Energie  $Q$  verteilt sich nach dem Wahrscheinlichkeitsgesetz auf die beiden emittierten Teilchen:

$$Q = E_{\beta} + E_{\nu e}$$

- Folgekern (große Masse) übernimmt zwar Impuls aber kaum Energie
- je nach Verteilung der Umwandlungsenergie auf  $\beta$  – Teilchen und Elektronen–Neu/Antineutrino besitzen die von einem radioaktiven Nuklid abgegebenen Elektronen oder Positronen ein *kontinuierliches Energiespektrum* ( von  $E_{\beta} = 0$  bis  $E_{\beta} = E_{\beta \max}$  )

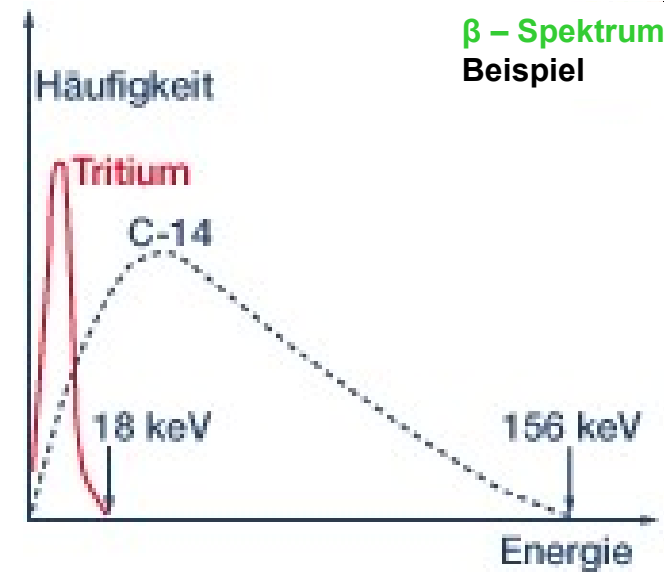
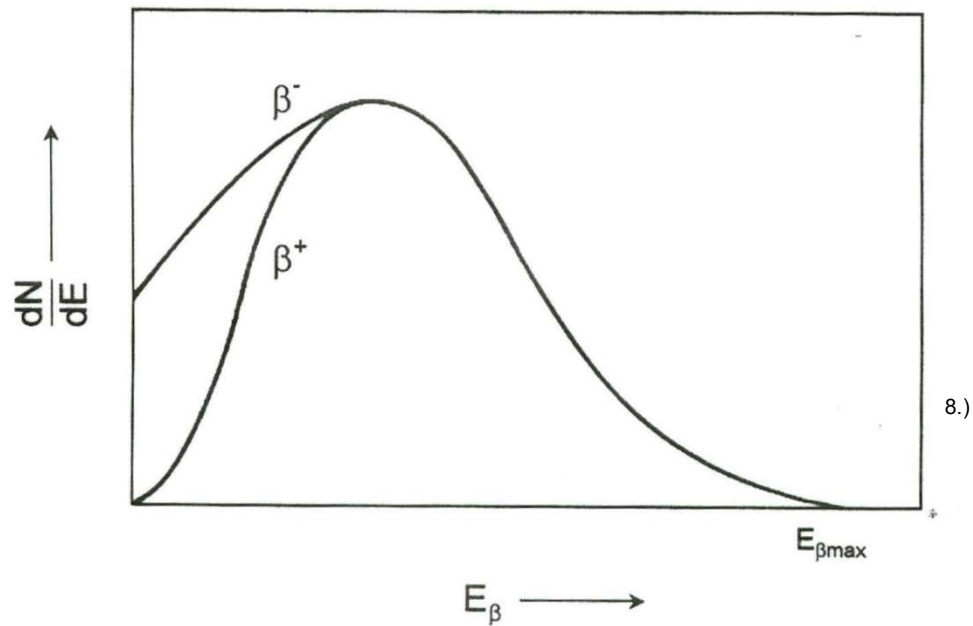
$E_{\beta \max} \sim Q$  , siehe Schema

- bei niedrigen Energien ist zwischen dem Energiespektrum der Elektronen und Positronen ein Unterschied – Grund positive Ladung des Kerns, Beschleunigung der Positronen durch Coulomb-Feld
- bei  $\beta$  – Umwandlung oft innere und äußere Bremsstrahlung

# $\beta$ - Energiespektren

## $\beta$ - Spektrum

Allgemein

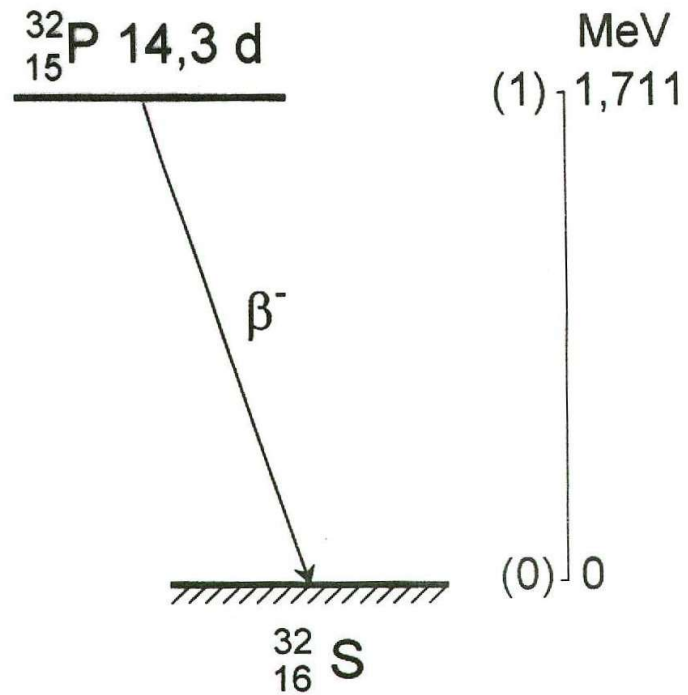


## $\beta$ - Spektrum Beispiel

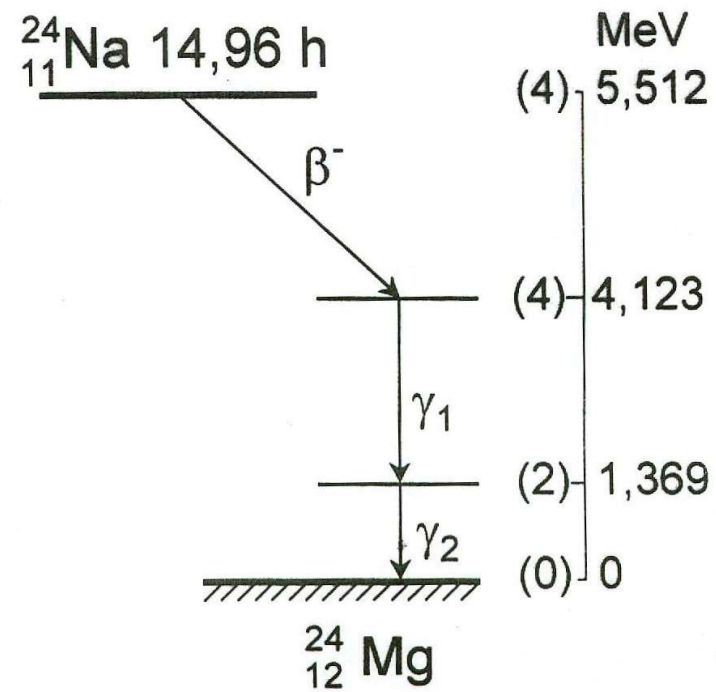
## Umwandlungsschema (Beispiele)

$\beta^-$

$^{32}_{15}\text{P}$

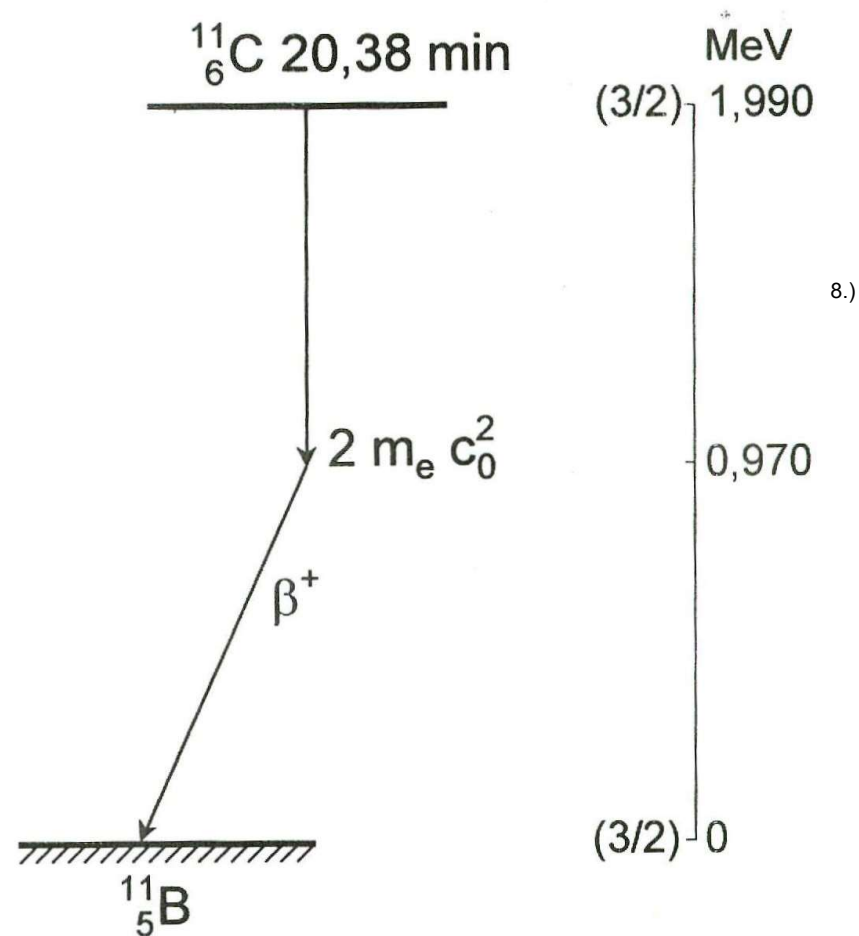


$^{24}_{11}\text{Na}$



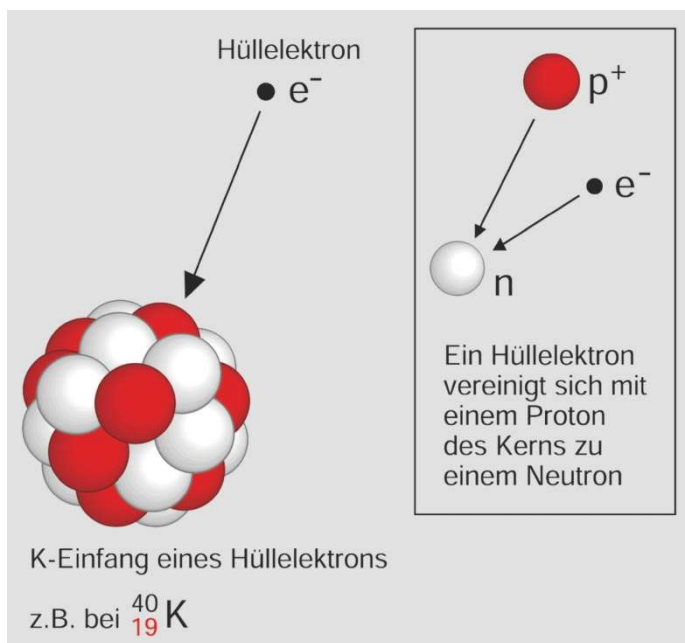
## Umwandlungsschema von $^{11}_6\text{C}$

$\beta^+$



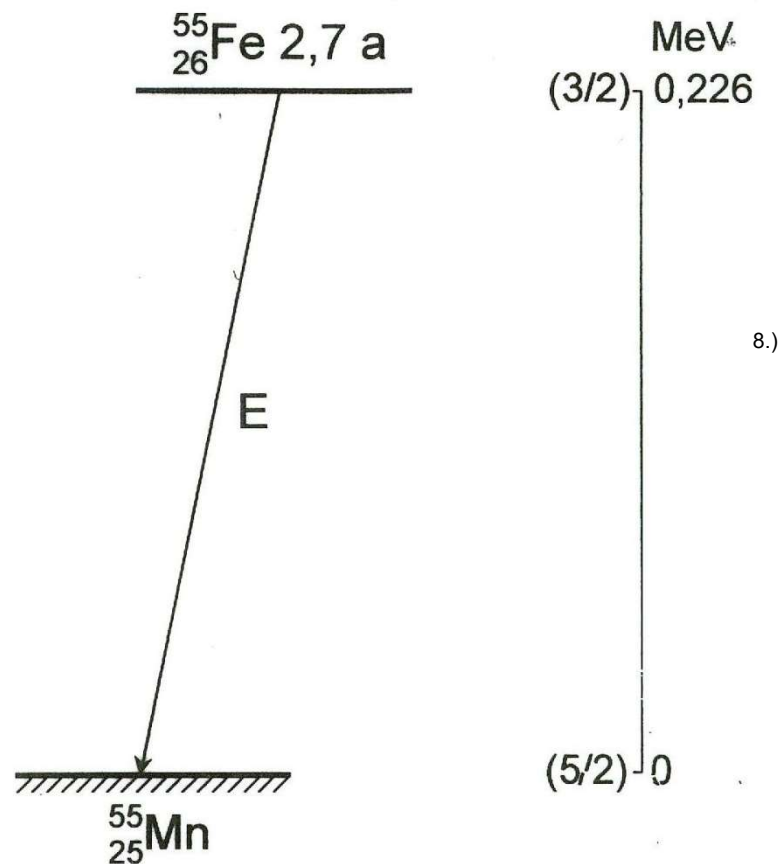
# Umwandlungsschema von $^{55}_{26}\text{Fe}$

**E**



10.)

Quelle: Informationskreis KernEnergie



# Gammaübergänge

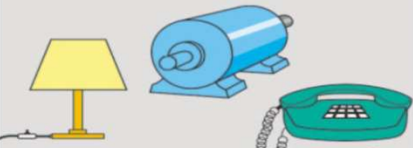

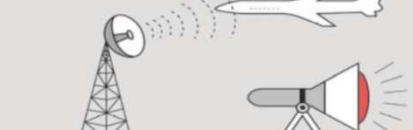


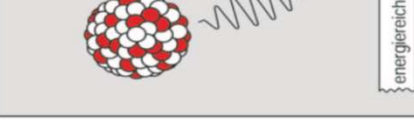
---

---

- auch Atomkern kann in energetisch angeregten Zuständen existieren (oft nach Kernumwandlungen)
  - Anregungszustände der Atomkerne liegen meist  $10^4$  bis  $10^7$  eV über dem Grundzustand  
angeregte Kerne: anderer Energieinhalt, anderer Kernspin, Größe des elektrischen und magnetischen Moments als Grundzustand
  - $\gamma$ -Übergang, Folgeerscheinung der Entstehung von angeregten Zuständen  
Abregung ohne Veränderung von Kernladungs- und Nukleonenzahl
- \* Emission von Gammastrahlung
  - \* Kernisomerie
  - \* Innere Konversion
  - \* Mößbauer-Effekt

# Frequenz, Wellenlänge und Energie elektromagnetischer Wellen

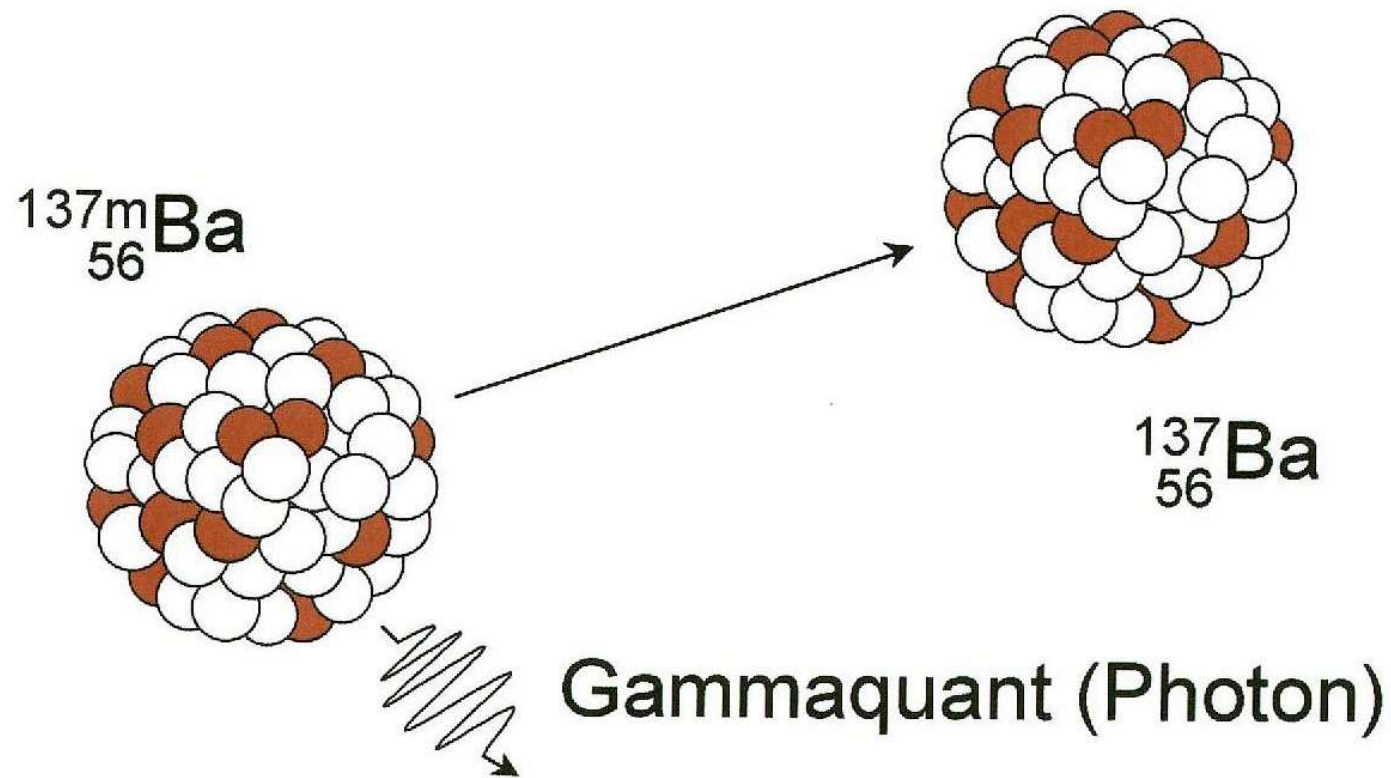
10.)

Strahlenart	Frequenz in $s^{-1}$	Wellenlänge in m	Energie	
			in eV	in J
 Niederfrequenz	$3 \cdot 10^0$	$10^8$	$1,24 \cdot 10^{-14}$	$1,99 \cdot 10^{-33}$
	$3 \cdot 10^1$	$10^7$	$1,24 \cdot 10^{-13}$	$1,99 \cdot 10^{-32}$
	$3 \cdot 10^2$	$10^6$	$1,24 \cdot 10^{-12}$	$1,99 \cdot 10^{-31}$
	$3 \cdot 10^3$	$10^5$	$1,24 \cdot 10^{-11}$	$1,99 \cdot 10^{-30}$
 Hochfrequenz UKW/KW/MW/LW	$3 \cdot 10^4$	$10^4$	$1,24 \cdot 10^{-10}$	$1,99 \cdot 10^{-29}$
	$3 \cdot 10^5$	$10^3$	$1,24 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-28}$
	$3 \cdot 10^6$	$10^2$	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$1,99 \cdot 10^{-27}$
	$3 \cdot 10^7$	10	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$1,99 \cdot 10^{-26}$
 Hochstfrequenz Radar	$3 \cdot 10^8$	1	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-25}$
	$3 \cdot 10^9$	$10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-24}$
	$3 \cdot 10^{10}$	$10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-23}$
	$3 \cdot 10^{11}$	$10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-22}$
 IR UV	$3 \cdot 10^{12}$	$10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-21}$
	$3 \cdot 10^{13}$	$10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,99 \cdot 10^{-20}$
	$3 \cdot 10^{14}$	$10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^0$	$1,99 \cdot 10^{-19}$
	$3 \cdot 10^{15}$	$10^{-7}$	$1,24 \cdot 10^1$	$1,99 \cdot 10^{-18}$
 Licht	$3 \cdot 10^{16}$	$10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^2$	$1,99 \cdot 10^{-17}$
	$3 \cdot 10^{17}$	$10^{-9}$	$1,24 \cdot 10^3$	$1,99 \cdot 10^{-16}$
	$3 \cdot 10^{18}$	$10^{-10}$	$1,24 \cdot 10^4$	$1,99 \cdot 10^{-15}$
	$3 \cdot 10^{19}$	$10^{-11}$	$1,24 \cdot 10^5$	$1,99 \cdot 10^{-14}$
 Röntgenstrahlen γ-Strahlen energiereiche Strahlung Quanten der Höhenstrahlung	$3 \cdot 10^{20}$	$10^{-12}$	$1,24 \cdot 10^6$	$1,99 \cdot 10^{-13}$
	$3 \cdot 10^{21}$	$10^{-13}$	$1,24 \cdot 10^7$	$1,99 \cdot 10^{-12}$
	$3 \cdot 10^{22}$	$10^{-14}$	$1,24 \cdot 10^8$	$1,99 \cdot 10^{-11}$
	$3 \cdot 10^{23}$	$10^{-15}$	$1,24 \cdot 10^9$	$1,99 \cdot 10^{-10}$
	$3 \cdot 10^{24}$	$10^{-16}$	$1,24 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{-9}$

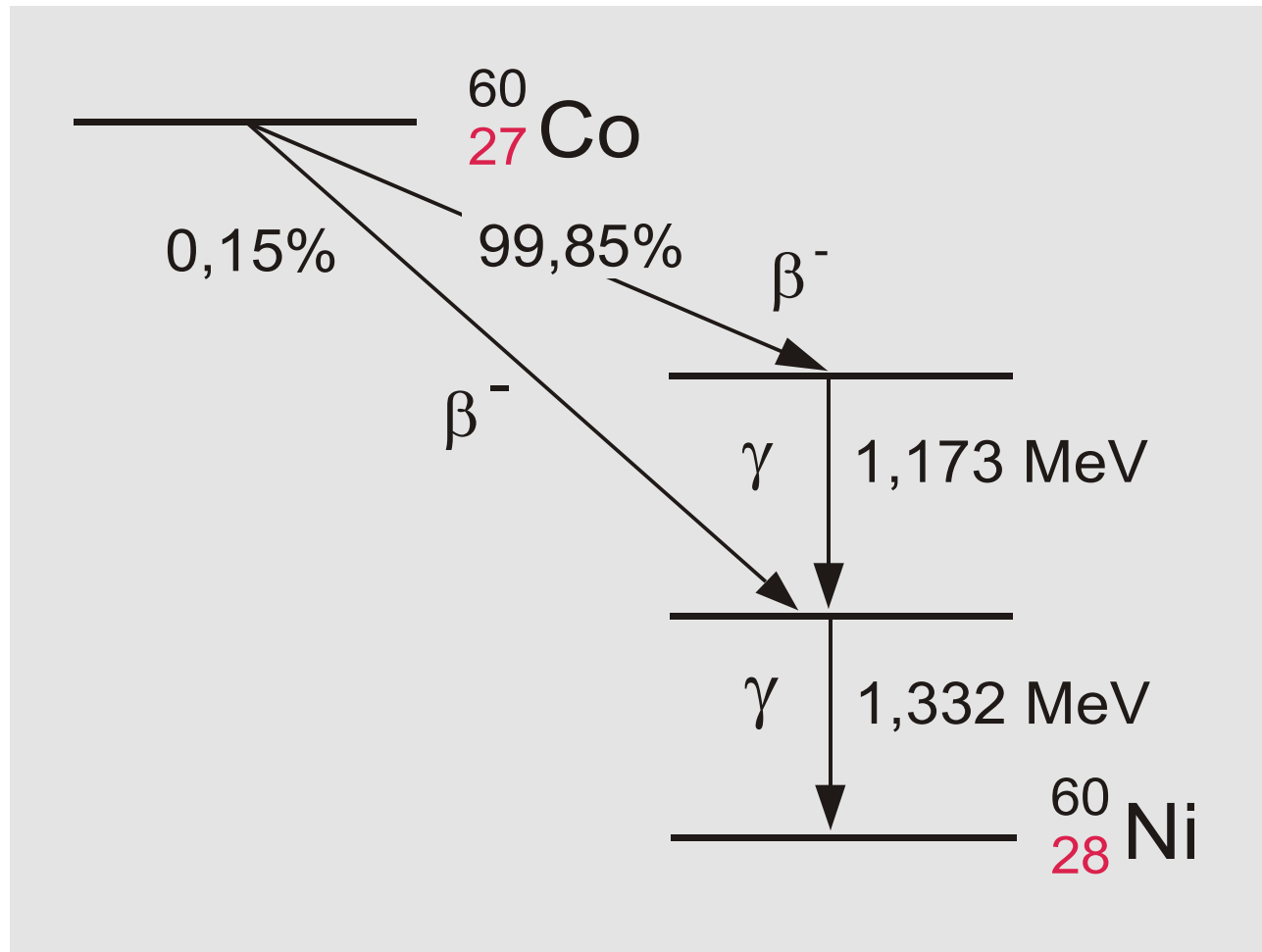
# Abgabe eines Gammaquants aus einem Atomkern (Modell)

---

---



# Emission von $\gamma$ - Strahlung



10.)

# Emission von $\gamma$ -Strahlung

---

---

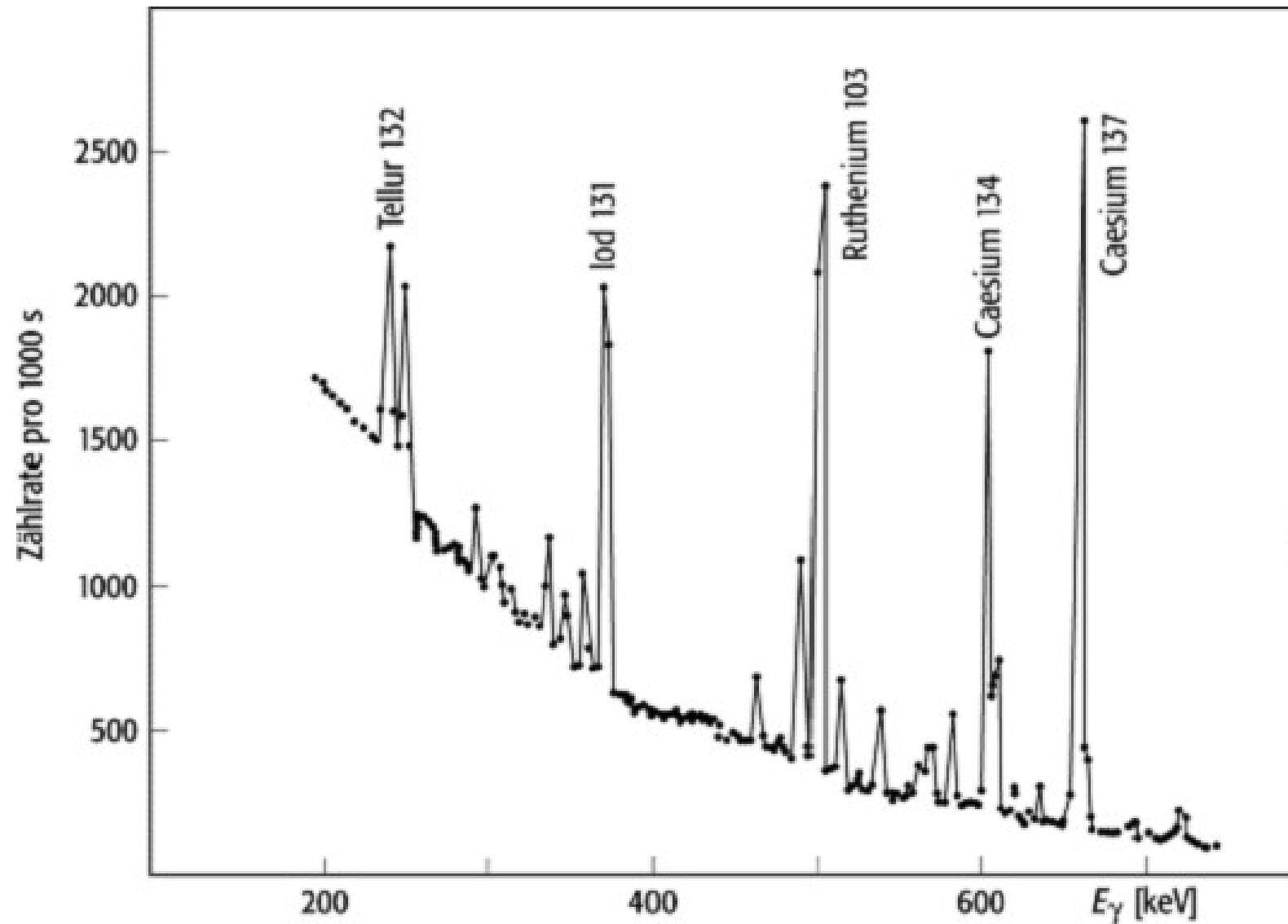
- sehr oft Übergang in energetisch tiefer liegende Zustände durch Aussendung elektromagnetischer Strahlung ( $\gamma$ -Quant, Photonen)
- oft Erreichen des Grundzustandes über Zwischenzustände (siehe Schema  $^{60}_{27}\text{Co}$ )
- Energie der  $\gamma$ -Quanten ergeben sich aus den Energiedifferenzen der Niveaus zwischen denen die Übergänge stattfinden:

$$E_{\gamma} = E_2 - E_1 = hf$$

(h = Planck-Konstante, f = Frequenz der emittierten Strahlung)

= Linienspektrum

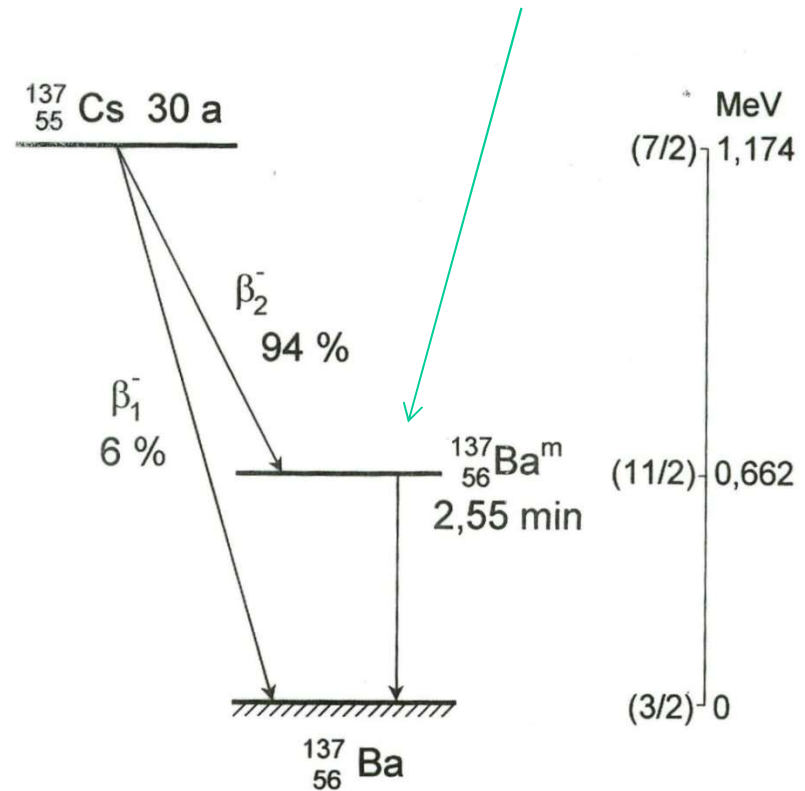
## $\gamma$ -Spektrum einer Probe



# Kernisomerie

- in einigen Fällen kann angeregter Zustand über Sekunden, Stunden, Tage, Jahre gehen
- angeregte Kerne mit messbarer Halbwertszeit = **Isomere**

Beispiel Umwandlung von  $^{137}_{55}\text{Cs}$ :



# Innere Konversion

---

---

---

- **angeregte Atomkerne können mit Hüllenelektronen in Wechselwirkung treten**
- **$\gamma$ -Übergänge verlaufen dann strahlungslos**
- **$E_\gamma$  geht direkt auf Hüllenelektronen über, statt  $\gamma$ -Quanten werden Hüllenelektronen emittiert, dadurch Ionisation des Atoms**
- **Lücke in Elektronenhülle kann aufgefüllt werden durch Emission von Röntgenstrahlung (wie bei E-Einfang) oder Energieübertragung auf anderes Elektron in anderer Schale – Aussendung Auger-Elektron**
- **Konversionselektronen sind monoenergetisch**

$$E_e = E_\gamma - E_{K,L,M\dots}$$

# Mößbauer-Effekt - I

---

---

**Optischer Fall:** Anregung zu Grundzustand: Abstrahlung von Lichtquanten

**Kernphysik:**  $\gamma$ -Emission angeregter Kerne

**Optischer Fall:** Umkehrung des Emissionsprozesses = Resonanzabsorption  
Atome im Grundzustand vermögen die von gleichartigen Atomen emittierten Lichtquanten zu absorbieren, Anregungsenergie unter Fluoreszenzlicht abzugeben

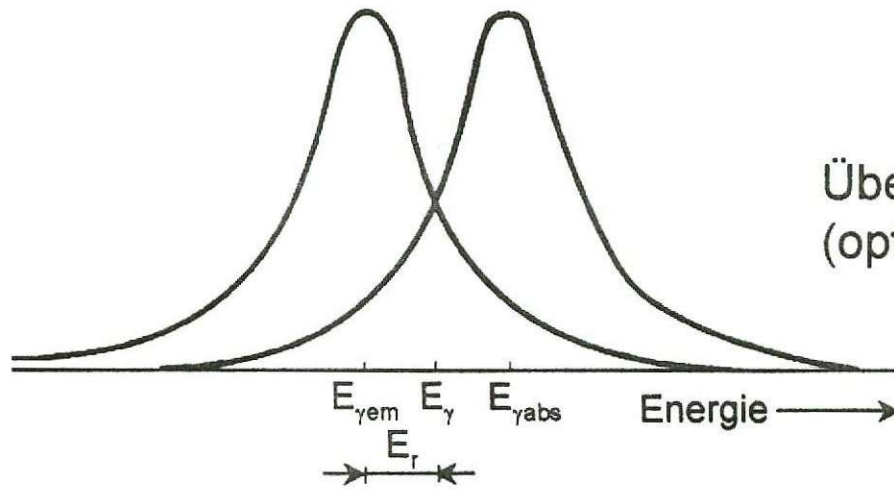
**Kernphysik: ?** ***Mößbauer-Effekt***

angeregter Zustand besitzt mittlere Lebensdauer, nach Heisenbergscher Unschärferelation zwischen Energie und Zeit entsteht eine Energieunschärfe von etwa  $10^{-7}$  eV bei einer Lebensdauer des angeregten Zustandes von  $10^{-8}$ s.

Beim Übergang angeregter Kerne in den Grundzustand erteilen die ausgesandten Quanten den emittierenden Kernen / Atomen einen Rückstoßimpuls  
Resonanzabsorption tritt dann auf, wenn sich beide Linien überlappen  
in Kernphysik treten dagegen Rückstoßenergien auf  $10^{-2} - 10^2$  eV auf, sodass Überlappung der Linien und damit Resonanzabsorption verhindert wird.

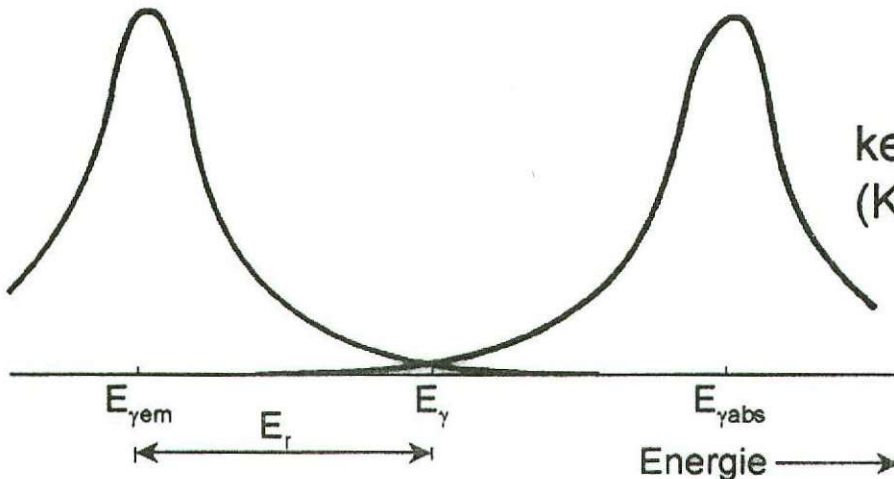
***Wie kann man experimentell lösen?***

# Lage der Emissions- und Absorptionslinien bei Berücksichtigung des Rückstoßes



Überlappung der Linien  
(optische Resonanzabsorption)

8.)



keine Überlappung der Linien  
(Kernresonanzabsorption)

Strahlungsquelle bewegt sich mit Geschwindigkeit  $v$ , so ergibt sich auf Grundlage des Dopplereffekts eine Verschiebung zwischen Emissions- und Absorptionslinie, Relativgeschwindigkeit 0 Absorption maximal  
Dopplereffekt: zeitliche Stauchung bzw. Dehnung eines Signals bei Veränderungen des Abstands zwischen Sender und Empfänger während der Dauer des Signals. Ursache ist die Veränderung der Laufzeit

# Mößbauer-Effekt- II

---

---

- 1958 entdeckte R. Mößbauer die Möglichkeit, die Resonanzbedingung nicht durch Kompensation der Rückstoßenergieverluste, sondern durch dessen Vermeidung zu erfüllen
- Atome des  $\gamma$ -Strahlers und des Absorbers in das Kristallgitter eines Festkörpers einbauen – das Kristallgitter übernimmt den gesamten Rückstoßimpuls  $M \gg m$  Rückstoßenergie vernachlässigbar, Rückstoßenergie kann aber Kristall zu Schwingungen anregen, um dies zu verhindern, wird sich bei Kernresonanzexperimenten auf kleinen Quantenenergien  $E_\gamma < 150 \text{ keV}$  beschränkt, Messung bei tiefen Temperaturen
- **Experiment**
  - \* Strahlungsquellen:  $^{191}_{76}\text{Os}^m$  (129 keV)
  - \* Absorber: nat. Ir mit  $^{191}_{77}\text{Ir}$  (38,5 %)

## Strahlungsdetektor – Absorber (Kryostat) - Strahlungsquelle

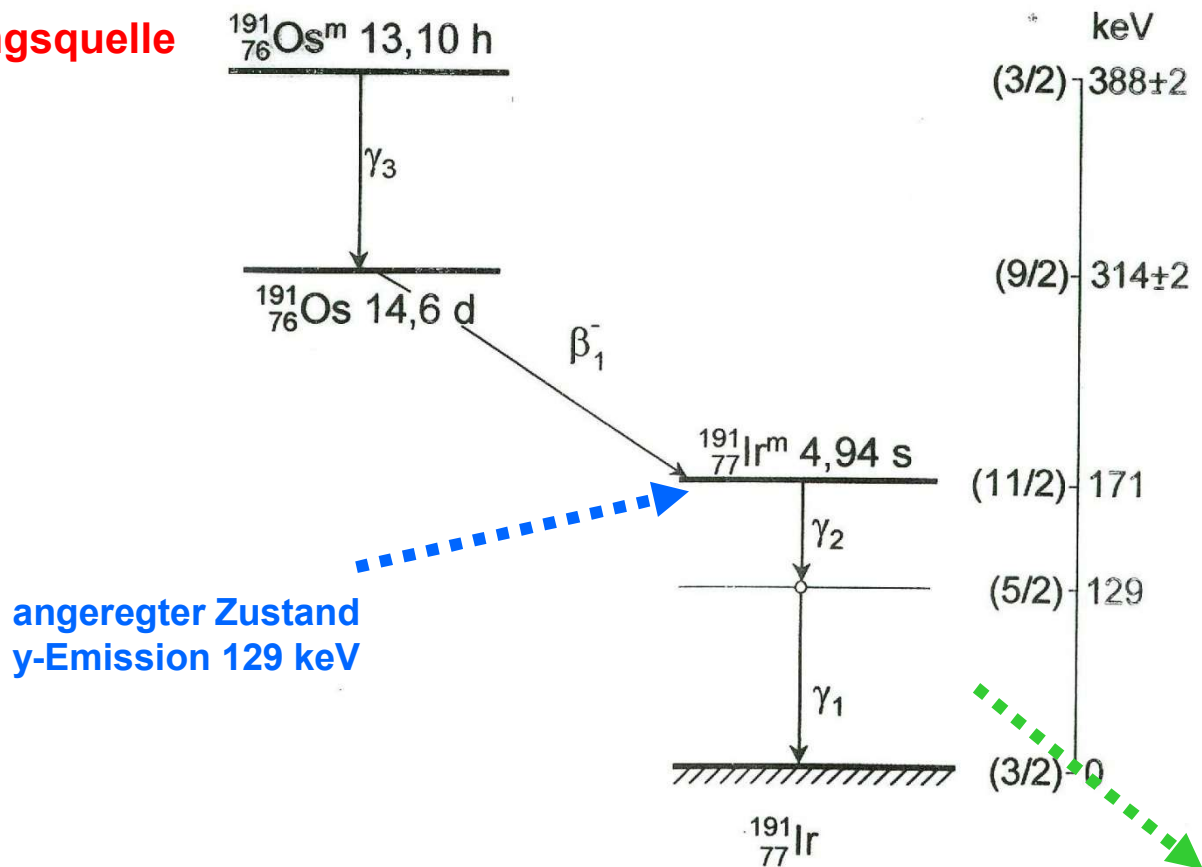
*Die Intensität von Absorption in Abhängigkeit von der Energie wird gemessen.*

*Um mit dieser absorbierten  $\gamma$ -Strahlung Spektroskopie betreiben zu können, ist es erforderlich, die  $\gamma$ -Emissionsenergie kontinuierlich über einen gewissen Bereich zu ändern.*

*Diese Änderung der  $\gamma$ -Energie erfolgt durch Relativbewegung von Quelle und Absorber zueinander unter Ausnutzung des Doppler-Effekts.*

# Umwandlungsschema von $^{191}_{76}\text{Os}^m$

**Strahlungsquelle**

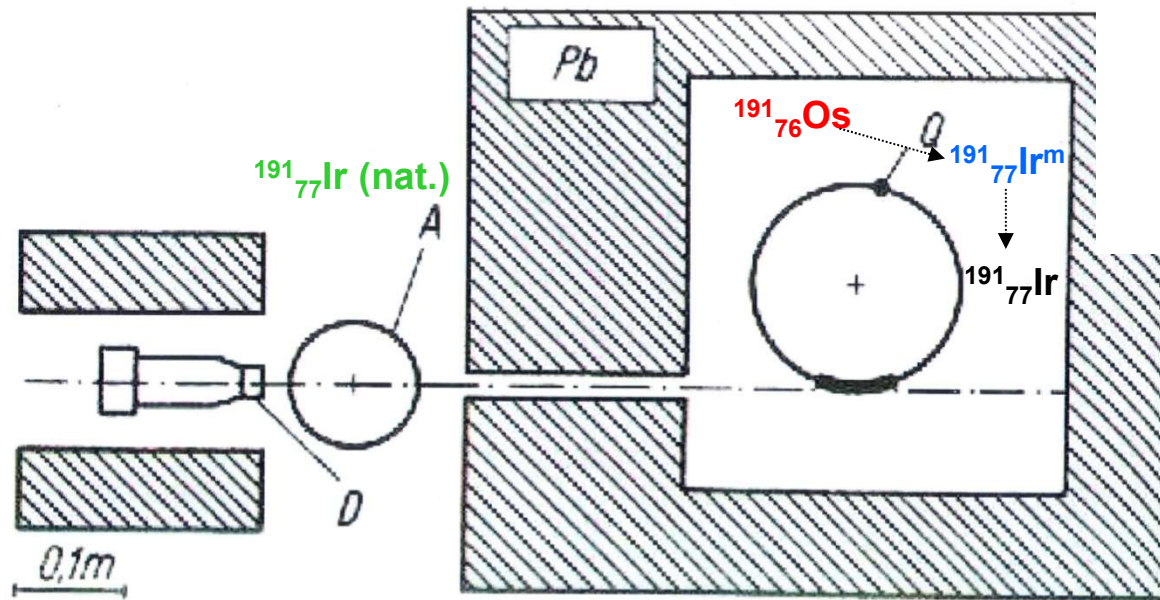


8.)

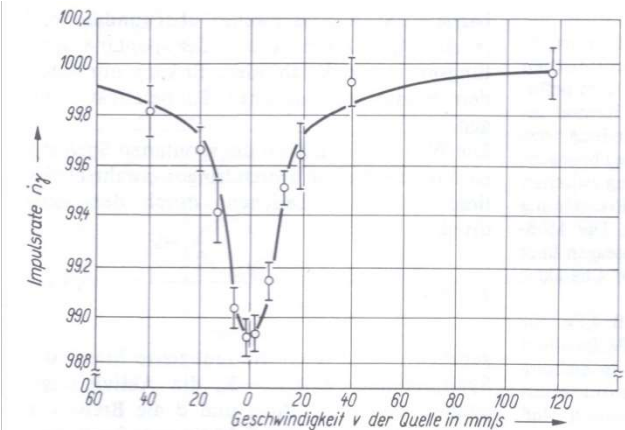
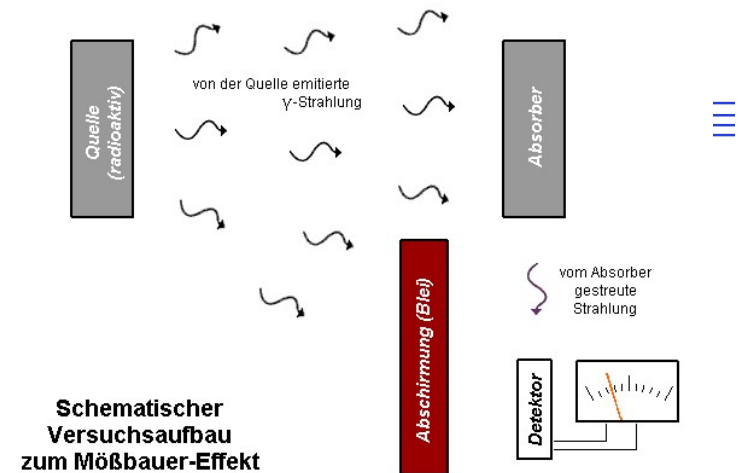
**Resonanzabsorber:**  
nat. Ir 38,5%  $^{191}_{77}\text{Ir}$

# Mößbauer-Effekt

8.)



Q: rotierender Kryostat mit der Strahlungsquelle  
A: Absorberkryostat; D: Strahlungsdetektor zum Nachweis der  $\gamma$ -Quanten



Transmission der rückstoßfreien 129-keV-  $\gamma$ -Strahlung von  $^{191}_{77}\text{Ir}$  bei  $-196^\circ\text{C}$  als Funktion der Relativgeschwindigkeit  $v$  zwischen Strahlungsquelle und Absorber

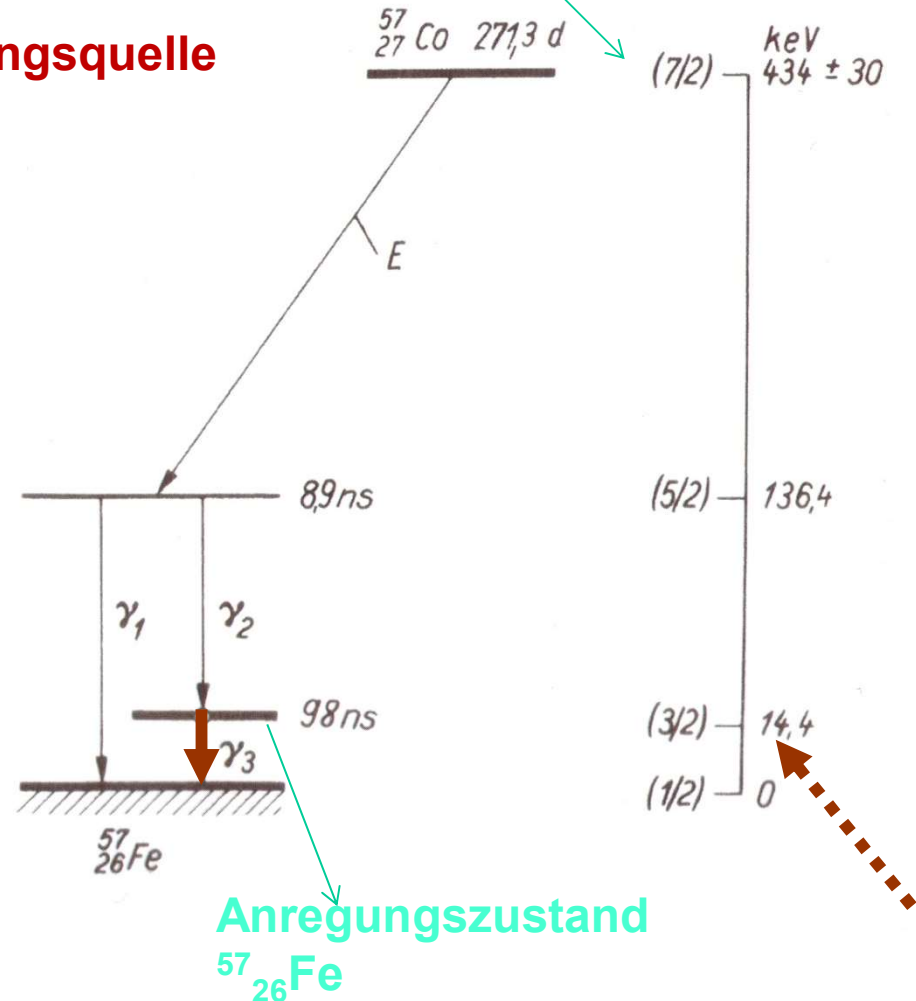
# Umwandlungsschema von $^{57}_{27}\text{Co}$

**Eisen:**  
 $^{57}_{26}\text{Fe}$

- Messung geringer Energiedifferenzen mit hoher Genauigkeit, (kleine Linienbreite  $\Gamma = 4,7 \times 10^{-9}$  eV, damit hohe Energieauflösung  $\Gamma/E_\gamma = 3 \times 10^{-13}$ )
- Lage des Energieniveaus abhängig von chemischer Umgebung  
Wertigkeit,  
Elektronendichte,  
Charakter der chem. Bindung.

**Probe nat. Fe mit  $^{57}_{26}\text{Fe}$  (2,1 %)**  
**Resonanzabsorber**

**Strahlungsquelle**



**Anregungszustand**  
 $^{57}_{26}\text{Fe}$

**Lage der Energieniveaus (Mößbauerlinie) hängt geringfügig, aber eben messbar, von der chemischen Umgebung ab; Unterscheidung  $\text{Fe}^{2+}$  /  $\text{Fe}^{3+}$**

# Spontane Kernspaltung

---

---

- **Spontanspaltung aus dem Grundzustand**

1940 Flerov, Petrzak Entdeckung am Uran

Konkurrenzreaktion zur  $\alpha$ -Umwandlung

40 spontan spaltende Nuklide bekannt

$^{238}\text{U}$  HWZ Spontanspaltung:  $8 \times 10^{15}\text{a}$ ,  $\alpha$ -Umwandlung  $4,468 \times 10^9\text{a}$

für  $^{256}_{100}\text{Fm}$  HWZ 3,2 h, man nahm an, dass höhere Elemente nicht existieren können aufgrund der Spontanspaltung, bei höheren  $Z > 106$  dominiert  $\alpha$ -Umwandlung wieder

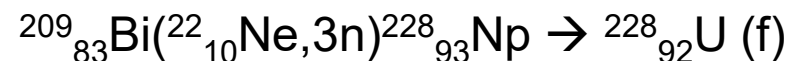
- **Spontanspaltung aus dem formisomeren Zustand**

schwere Transuraniumkerne besitzen keine Kugelgestalt, sondern sind elliptisch verformt = zwei Gleichgewichtszustände (Geometrieunterschiede-Formisomerie)

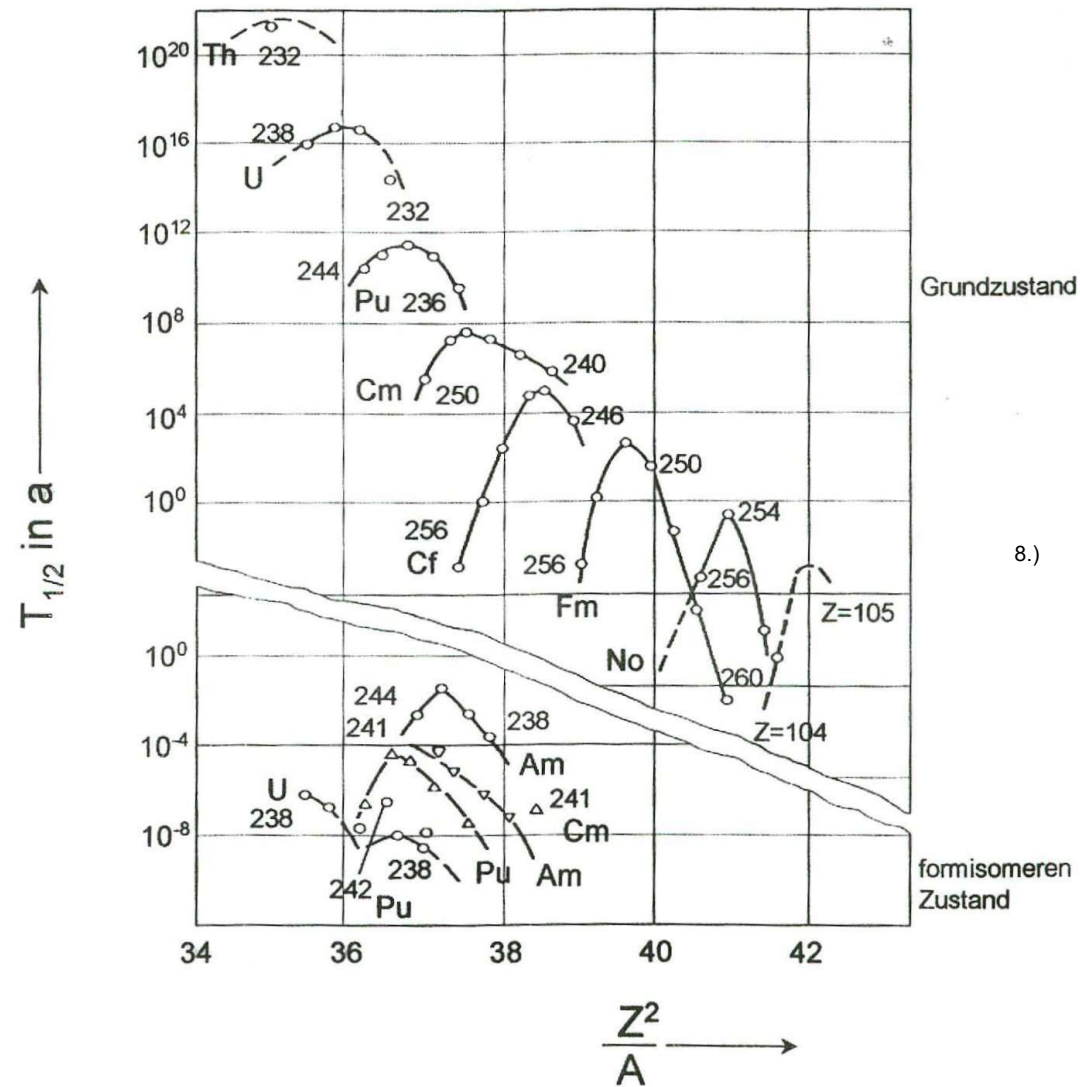
30 Nuklide bekannt, z. B.  $^{242}_{95}\text{Am}$  (Beschuss von  $^{242}_{94}\text{Pu}$  mit Neonionen) Bildung eines Formisomeren HWZ 13 ms

- **Verzögerte Spontanspaltung**

nach Kernreaktion Elektroneneinfang entstehen angeregte Folgekerne, die spontan spalten



# Halbwertszeiten für die Spontanspaltung



# Spontane Nukleonenemission

---

- diese Kernumwandlungen meist nach vorherigen Kernreaktionen, Übergänge in stabile Zustände
  - \* Emission verzögerter Neutronen
  - \* Emission verzögerter Protonen
  - \* Protonenumwandlung
- spontane Emission schwerer Teilchen (  $Z > 6$  )



- 
- 
- 
- 
- 
- **Kernreaktionen**

# Künstliche Kernreaktionen

## Entdeckung

---

---

Wie versuchten Physiker mehr über die Möglichkeit der Reaktionen von Kernen zu erfahren?



**Beschuss der Kerne durch Teilchen und  
Untersuchung/Bestimmung der Reaktionsprodukte**



**Erster Versuch von E. Rutherford:**

- **Beschuss von Stickstoffatomen mit hochenergetischen  $\alpha$ -Teilchen**

(aus dem Zerfall des  $^{210}_{84}\text{Po}$ ,  $E_{\alpha} = 5,305 \text{ MeV}$ )

- **Detektion durch Nebelkammeraufnahmen**



- **Synthese dann auch von künstlichen radioaktiven Nukliden gezeigt**

(1934, I. Curie, F. Joliot)  $^{10}_5\text{B} (\alpha, n) ^{13}_7\text{C}$  ( $\dots ^{13}_6\text{C} + \beta$ )

# Was sind Kernreaktionen?

## Arten

---

---

---

### - Radioaktive Umwandlung/Zerfall

*\* spontane Kernumwandlung*



### - Kernreaktion

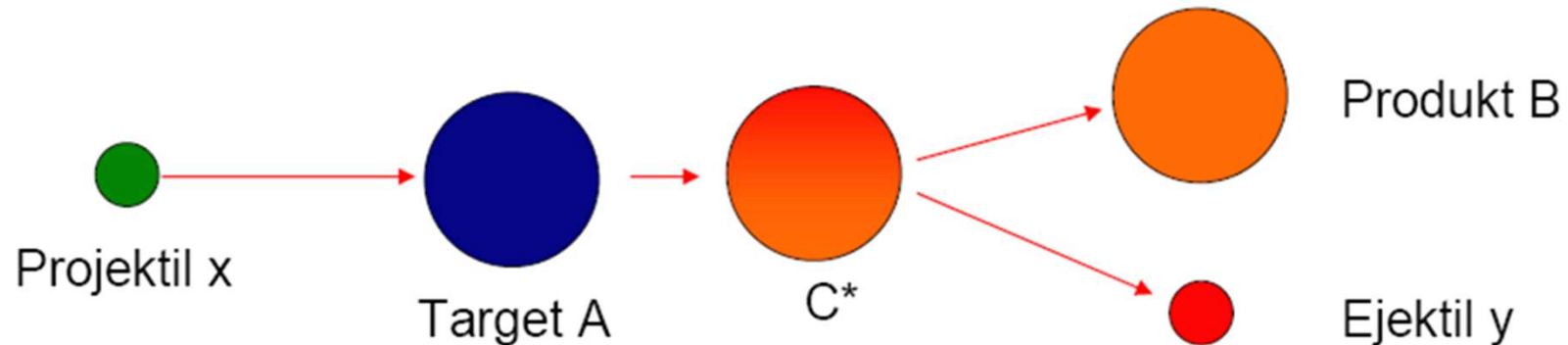
*\* induzierte Kernumwandlung*





# Kernreaktionen

## Schema/ Energetik



Eine Kernreaktion ist analog zur chemischen Reaktion mit einem Umsatz von Energie (Reaktionsenergie  $Q$ ) verbunden.



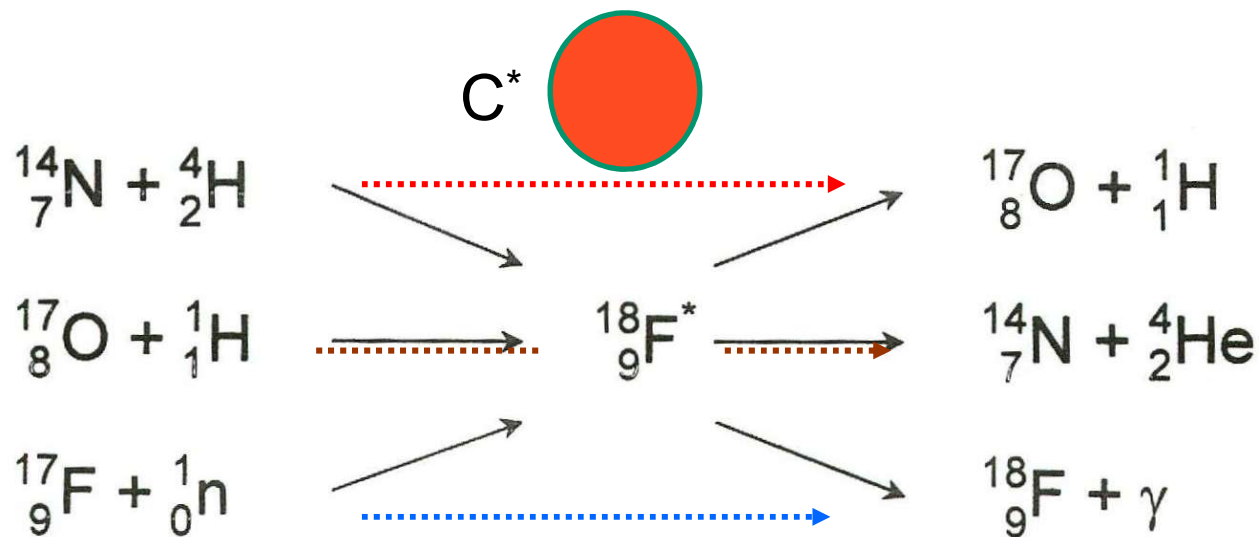
Ein positiver  $Q$ -Wert bedeutet Energiefreisetzung (exoergisch), ein negativer  $Q$ -Wert Energieabsorption (endoergisch).

Der  $Q$ -Wert ergibt sich aus den Massendifferenzen der Reaktionspartner.

$$Q = (M_A + M_x - M_B - M_y)c^2$$

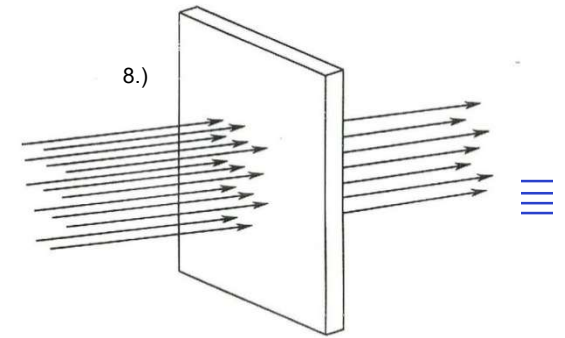
# Bildung von Zwischenkernen (Compound-Kernen)

Modell geht auf Bohr zurück: ...von Energie der Teilchen hängt Wirkungsquerschnitt der Bildung und Wahrscheinlichkeit des Zerfalls in unterschiedliche Produktkerne ab, Compound-Kern kann verschiedene Anregungsenergien besitzen, Reaktionsmöglichkeiten = Kanäle



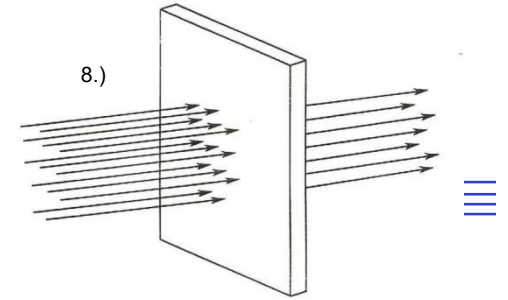
- ein bestimmter Zwischenkern lässt sich durch verschiedene Kernreaktionen bilden
- kurze mittlere Lebensdauer:  $< \tau \cdot 10^{-15} \text{ s}$
- Nachweis durch Nebelkammeraufnahmen (bei Kernreaktionen niedriger Energie,  $< 10 \text{ MeV}$ )
- seine Anregungsenergie ist gleich der Bindungsenergie des Teilchens zuzüglich der kinetischen Energie des Geschossteilchens vor der Reaktion

# Begriff Wirkungsquerschnitt I



- Neben Reaktionsenergie, ist die Ausbeute einer Kernreaktion, die **Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Kernprozesses, eine wichtige Größe** (bei Rutherfordscher Kernreaktion sind  $5 \times 10^5$   $\alpha$ -Teilchen nötig, um eine Kernreaktion auszulösen)
- Es ist **nicht** üblich, die Ausbeute durch die Zahl der notwendigen Geschossteilchen bestimmter Energie zu beschreiben, **sondern**
  - als Maß der Ausbeute dient der „**Wirkungsquerschnitt**“, Maß einer Fläche
  - alle Geschossteilchen, die auf „Zielscheibe“ treffen, lösen Kernreaktionen aus (die fiktive Größe der Zielscheibe wird so bemessen, dass alle darauf treffenden Teilchen eine Kernreaktion auslösen)
  - mittels Wirkungsquerschnitt Anzahl der Kernreaktionen berechenbar
- $\sigma$  = Barn       **$1\text{b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$**
- SI-Einheit ( $\text{m}^2$ ):     **$10^{-30} \text{ m}^2 = 1 \text{ fm}^2$**

## Begriff Wirkungsquerschnitt II



Analog der konzentrationsunabhängigen Geschwindigkeitskonstante  $k$  für eine chemische Reaktion



kann auch der Wirkungsquerschnitt beschrieben werden:

$$\mathbf{A(x,y)B:} \quad \mathbf{dN_B/dt = \sigma \times Q_x \times N_A} \quad (\mathbf{Q_x = \phi_x})$$

(dabei ist  $N_A$  Ausgangsatomzahl,  $N_B$  Produktatomzahl pro Volumeneinheit  
 $Q_x$  ist der die Reaktion auslösende Teilchenstrom ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) und  $\sigma$  der Wirkungsquerschnitt )

Abschwächung eines Teilchenstrahls nach dem Durchtreten einer Schicht von bestimmten Atomen  $Q_{x0}$  nach Durchdringen einer Dicke von  $s$  mit  $N_A$  Atomen pro Volumeneinheit und dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  auf die Flussdichte  $Q_x$

$$\mathbf{Q_x = Q_{x0} \times e^{-\sigma N_A \times s}}$$

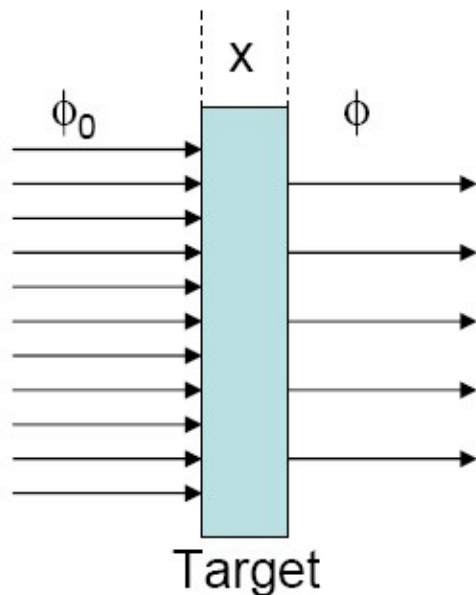
(Der Wirkungsquerschnitt gibt die Fläche an, die für die betrachtete Reaktion der Targetkern dem Teilchenstrom entgegenstellt,  
Totale Wirkungsquerschnitt setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen

# Totaler und partieller Wirkungsquerschnitt

Der partielle Wirkungsquerschnitt bezieht sich auf eine bestimmte Reaktion von  $x$  mit einem Nuklid  $A$ , z.B.  $(p,n)$ ;  $(p, 2n)$  und  $(p,p')$ . Die Summe aller partiellen Wirkungsquerschnitte ergibt den totalen Wirkungsquerschnitt.

$$\sigma_t = \sum_i \sigma_i$$

8.)



Die Abnahme der Flussdichte beim Durchgang durch ein Target der Dicke  $x$  ist ein Maß für  $\sigma_t$  ( $N_A$  ist hier als Teilchenzahl pro Volumeneinheit definiert).

$$-d\phi = \sigma \phi N_A dx$$

$$\Rightarrow \frac{d\phi}{dx} = -\sigma \phi N_A \Rightarrow \phi(x) = \phi_0 e^{-\sigma x N_A}$$

Bei „dünnen“ Targets kann die Abschwächung vernachlässigt werden, so dass die mit einer mittleren Flussdichte gerechnet werden kann.

# Wirkungsquerschnitt und Bildungsreaktion

---

---

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kernreaktion eintritt.

$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma \cdot \phi_x \cdot N_A$$

$dN_B dt$ : Zahl der gebildeten Produktatome B pro Zeiteinheit

$\phi_x$ : Flussdichte der Projektilteilchen [ $1/s \cdot cm^2$ ]

$N_A$ : Zahl der Targetatome

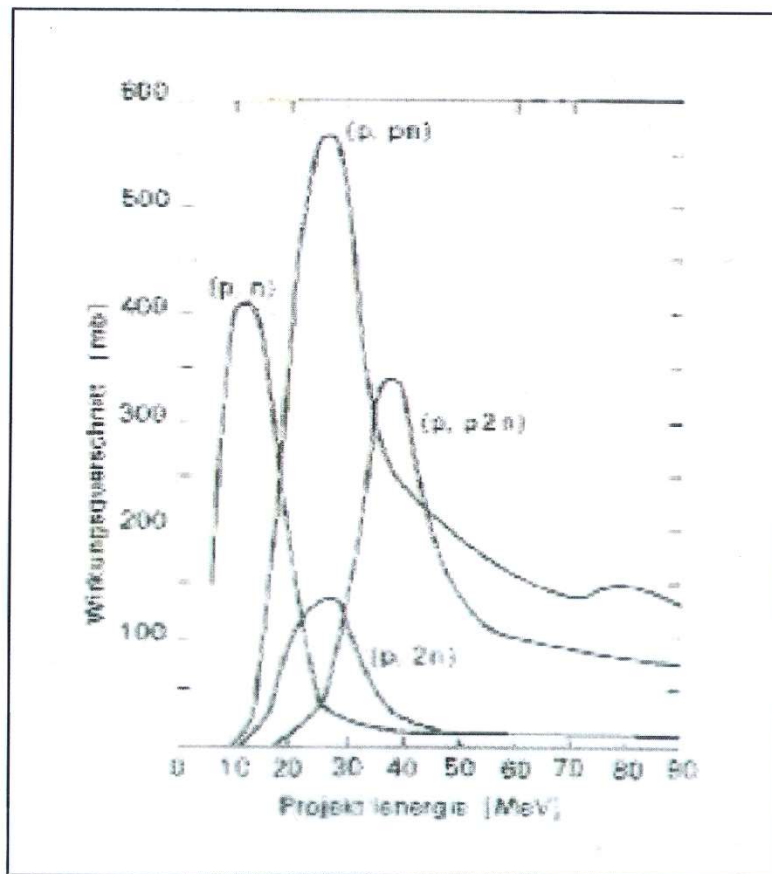
Einheit von  $\sigma$ : 1 barn =  $10^{-24} cm^2$

Typischer geometrischer Querschnitt eines Atomkerns  $\approx 10^{-24} cm^2$

→ Bei bekannter Flussdichte kann die Ausbeute von Kernreaktionen vorausberechnet werden.

# Anregungsfunktionen

- Wirkungsquerschnitt einer Reaktion ist von der Energie der Geschossteilchen abhängig = die Wahrscheinlichkeit für den Ablauf einer bestimmten Kernreaktion ist eine Funktion der Energie
- die Funktion  $\sigma(E)$  heißt Anregungs- oder Ausbeutefunktion



8.)

Anregungsfunktion für  
verschiedene Reaktionen  
von  $^{63}\text{Cu}$  mit Protonen.

# Kernreaktionen

## Zusammenfassung

---

---

- können durch geladene und ungeladene Geschosspartikel ausgelöst werden

### Wichtigste Geschosspartikel:

Neutronen (n), Protonen (p), Deuteronen (d),  $\alpha$  – Teilchen, Photonen ( $\gamma$ )  
schwere Ionen

- Kernreaktionen verlaufen wie chemische Reaktionen unter Freisetzung oder Verbrauch von Energie:  $A + x \rightarrow B + y + Q$

$Q = 0$  elastische Streuung;  $Q > 0$  exotherm;  $Q < 0$  endotherm

- Kernreaktion geht über zwei zeitlich getrennte Schritte

- Verschmelzung des Geschossteilchens mit Kern zum „Zwischen- oder Compoundkern“
- angeregter Kern (  $T < 10^{-15}\text{s}$  ) wandelt sich spontan um



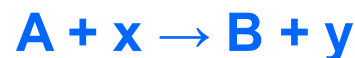
# Typen künstlicher Kernumwandlungen

---

---

## Vorgang:

ein ruhender Targetkern (A) wird durch das Eindringen eines Geschosspartikels x in einen anderen Kern (B) umgewandelt, wobei ein Teilchen y entsteht:



- |                         |                |
|-------------------------|----------------|
| - Elastische Streuung   | (x,x) Prozess  |
| - Unelastische Streuung | (x,x') Prozess |
| - Austauschreaktion     | (x,y) Prozess  |
| - Einfangreaktion       | (x,y) Prozess  |
| - Kernphotoeffekt       | (γ,y) Prozess  |
| - Kernspaltung          | (x,f) Prozess  |
| - Spallation            | (x,s) Prozess  |

# Kernreaktionstypen I

---

## - Streuung

### \* Elastische Streuung, $(x, x)$ - Prozess

Nach der Wechselwirkung verlässt das Geschossteilchen selbst oder ein anderes Teilchen der gleichen Art den Targetkern. Im Schwerpunktsystem<sup>1</sup> haben beide Teilchen die gleiche kinetische Energie.

<sup>1</sup> Bezugssystem, in dem der Schwerpunkt eines Systems von Teilchen ruht.

### \* Unelastische Streuung, $(x, x')$ - Prozess

Bei der unelastischen Streuung wird der Targetkern angeregt. Geschossteilchen  $x$  und emittiertes Teilchen  $x'$  sind von der gleichen Art, jedoch hat  $x'$  im Schwerpunktsystem eine kleinere kinetische Energie als  $x$ .

## Kernreaktionstypen II

---

---

### - Austauschreaktion, (x,y)- Prozess

Das Geschossteilchen x dringt in den Targetkern ein, und ein anderes Teilchen y wird emittiert. Wenn sich die Kernladungszahlen beider Teilchen unterscheiden, tritt eine Elementumwandlung ein.

Typische Austauschreaktionen sind die Prozesse (n,p), (n,  $\alpha$ ), (p,  $\alpha$ ), (d,n), (d,p), ( $\alpha$ , n), ( $\alpha$ , p). Schwere Geschossteilchen können auch ganze Nukleonengruppen auf die Targetkerne (oder umgekehrt) übertragen.

Solche Austauschprozesse werden Multinukleonen- Transferreaktionen genannt.

# Austauschreaktionen I

## \* Kernreaktionen mit Neutronen

als ungeladene Teilchen zu Kernreaktionen gut befähigt,  
Reaktionen hängen vom Targetkern und der Energie des Geschosses ab

### Klassifikation von Neutronen:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Langsame (thermische, epithermische) Neutronen; | $E_n < 0,5 \text{ eV}$                   |
| 2. Mittelschnelle (intermediäre) Neutronen;        | $0,5 \text{ eV} < E_n < 0,5 \text{ MeV}$ |
| 3. Schnelle Neutronen;                             | $0,5 \text{ MeV} < E_n < 20 \text{ MeV}$ |
| 4. Sehr schnelle Neutronen;                        | $E_n > 20 \text{ MeV}$                   |
- ( $E_n$  = Energie)

- für Kernreaktionen haben **thermische** Neutronen (befinden sich im Temperaturgleichgewicht mit der Umgebung) eine besondere Bedeutung,
- haben geringe kinetische Energie – Auslösung exothermer Reaktionen, dominierende Reaktion
- (n,  $\gamma$ ) mit schweren und mittelschweren Kernen,
- bei schnellen Neutronen auch (n, p) und (n,  $\alpha$ ) Reaktionen möglich,
- auch endotherme Reaktionen möglich,
- zur Spaltung sehr schwerer Kerne schnelle Neutronen mit  $E_n > 1 \text{ MeV}$  notwendig  $^{232}_{90}\text{Th}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{240}_{94}\text{Pu}$

# Austauschreaktionen II

---

## \* Kernreaktionen mit Protonen

- (p, n) Entstehung eines radioaktiven Restkern (Mattauchsche Isobarenregel)
- (p,  $\alpha$ ) auf leichte Kerne beschränkt
- (p,  $\gamma$ ) führt zu  $\beta^+$ -Strahlern

## \* Kernreaktionen mit $\alpha$ -Teilchen

Teilchen müssen sehr hohe Energien besitzen



## \* Kernreaktionen mit schweren Ionen

dadurch wurden bisher die schwersten Elemente erzeugt,  $Z > 101$

# Kernreaktionstypen III

---

## - Einfangreaktion, (x, γ)-Prozess

Das Geschossteilchen x wird vom Targetkern absorbiert und die dabei freiwerdende Energie in Form eines Photons emittiert. Einfangreaktionen werden häufig von langsamen Neutronen ausgelöst.

(siehe auch Kernreaktionen mit Neutronen)



## - Kernphotoeffekt (γ, y)-Prozess

Ein Photon wird vom Targetkern vollständig absorbiert und ein Nukleon y, meist ein Neutron, emittiert.

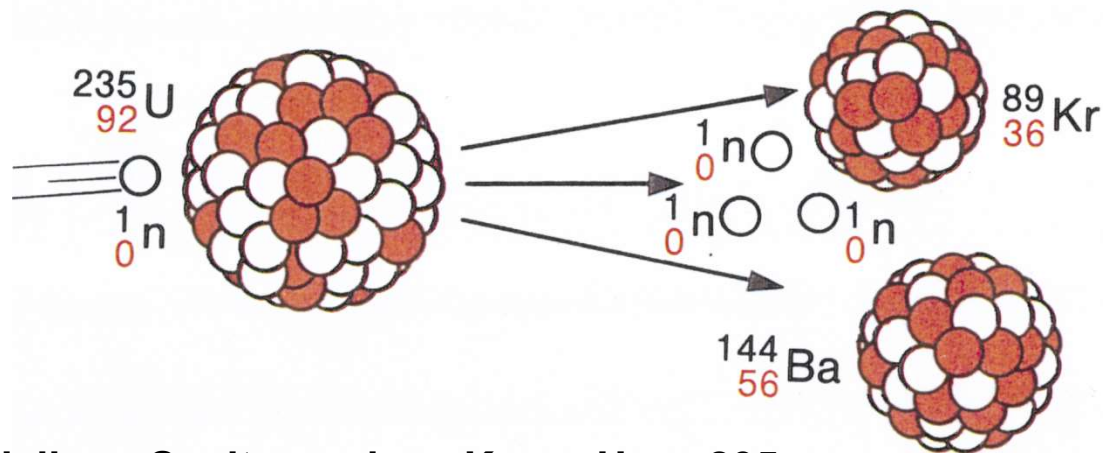
Seltener Fall, dass die γ-Energie die Bindungsenergie des Nukleons übertrifft,  $^9_4\text{Be} (\gamma, n) ^8_4\text{Be}$ , Reaktion zur Erzeugung monoenergetischer Neutronen

# Kernreaktionstypen IV

## - Kernspaltung, (x, f)-Prozess

Beim Beschuss schwerer Atomkerne mit Neutronen oder energiereichen, geladenen Teilchen kann eine Kernspaltung in zwei große Bruchstücke erzielt werden. Als Begleiterscheinung tritt eine Emission von zwei oder drei Neutronen auf

(Spaltung = fission, engl.)



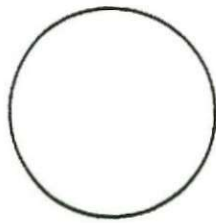
10.)

Modell zur Spaltung eines Korns Uran-235

# Schematische Darstellung der Spaltung eines Kernes nach dem Tröpfchenmodell

---

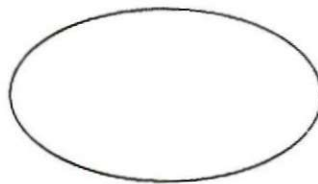
---



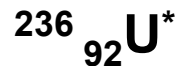
a



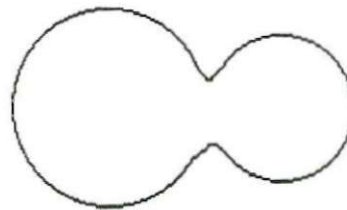
Kugel



b

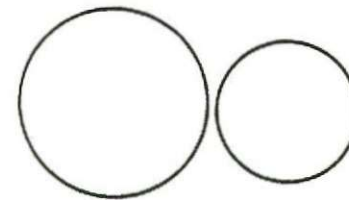


Rotationsellipsoid

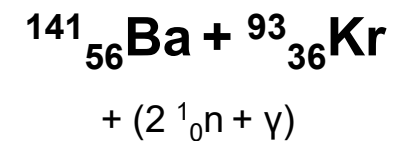


c

Einschnürung



d



Auseinanderbrechen

# Bindungsenergie

---

---

- Messungen ergaben, dass die Masse des Atomkerns stets kleiner ist als die Summe der bildenden Nukleonen

- Fehlbetrag = Massendefekt

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_k({}^A_ZX)$$

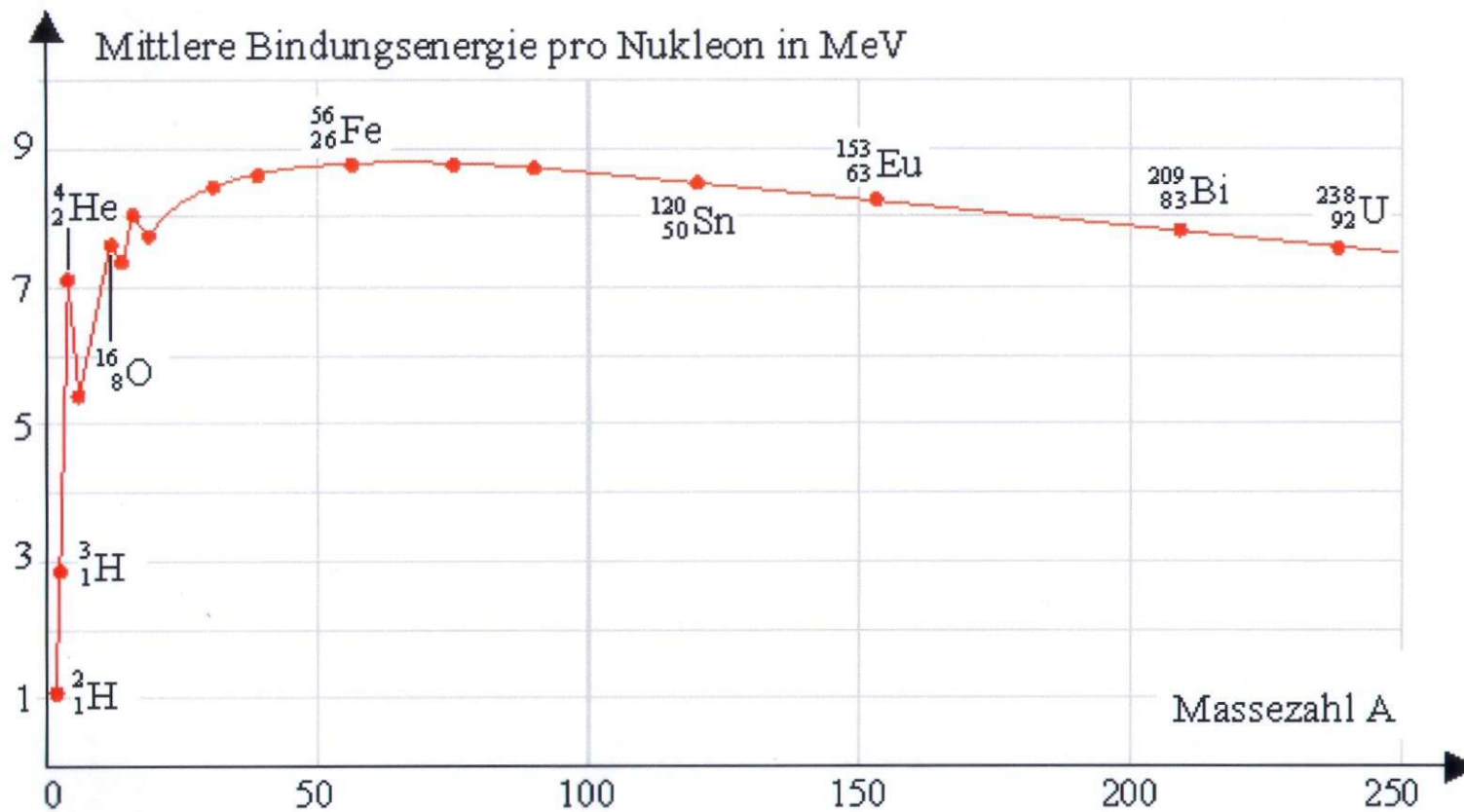
- die dem Massendefekt äquivalente Energie ist Maß für „Festigkeit“ der Nukleonenbindung = Bindungsenergie

$$E_B({}^A_ZX) = \Delta mc_0^2$$

- weitere Größe ist die mittlere Bindungsenergie je Nukleon (f)

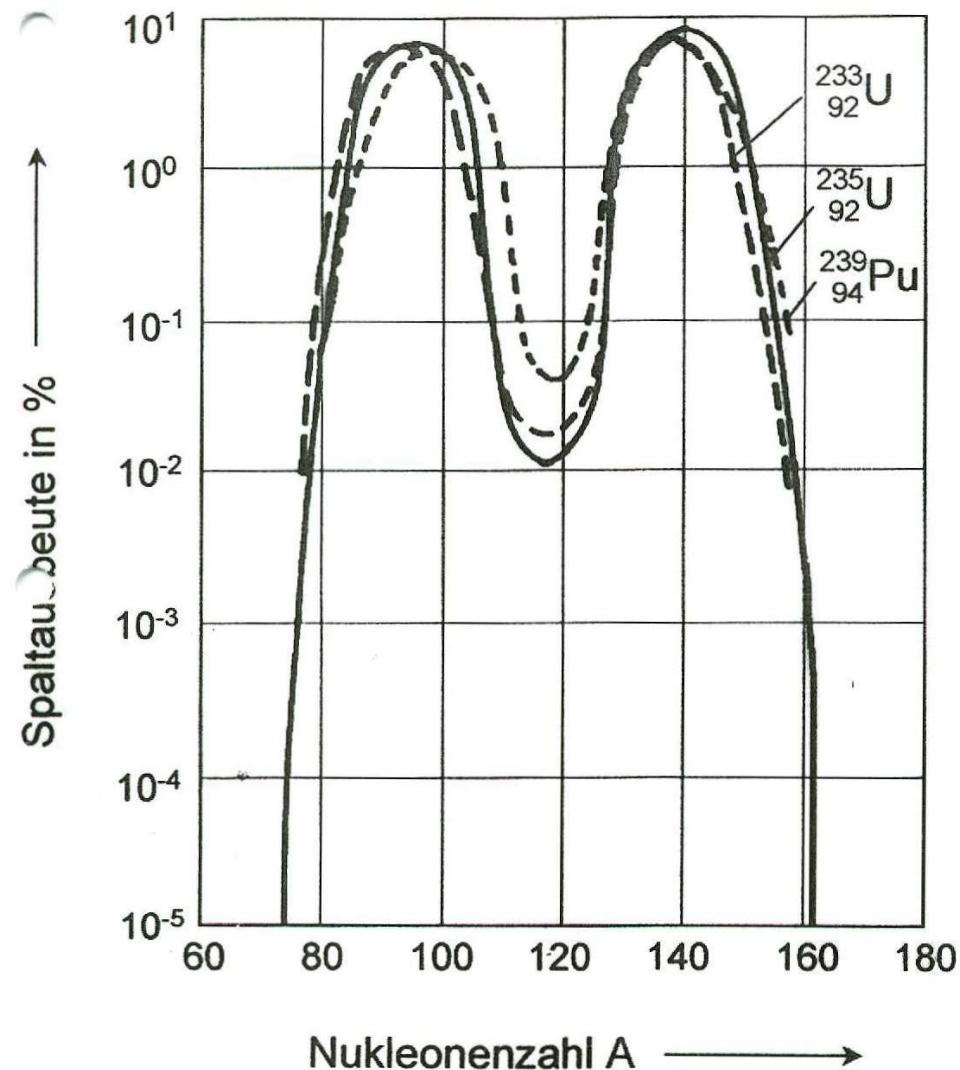
$$f = E_B({}^A_ZX) / A$$

# Bindungsenergie



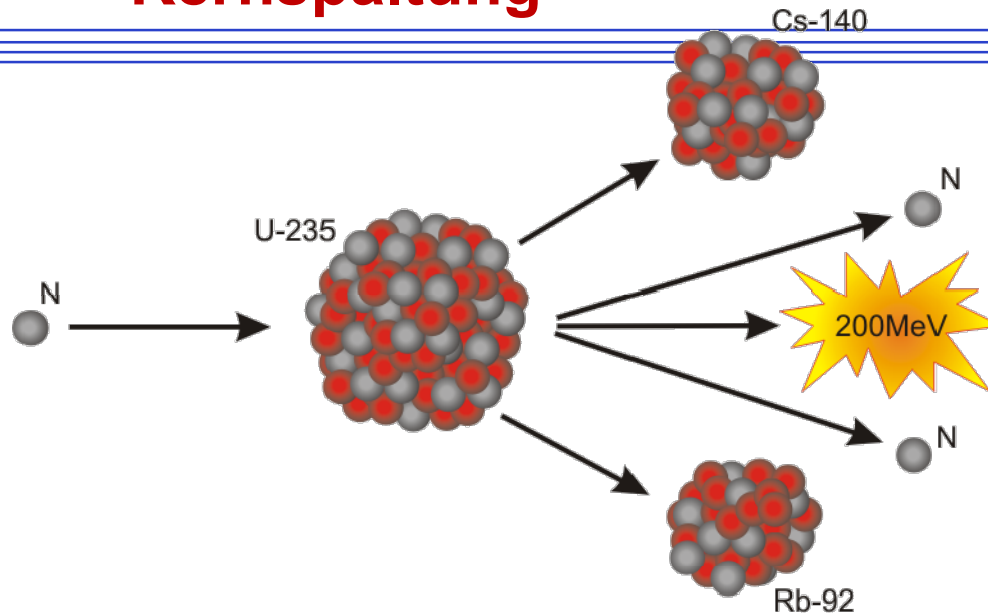
10.)

# Spalttausbeute für die Spaltung von $^{233}_{92}\text{U}$ , $^{235}_{92}\text{U}$ und $^{239}_{94}\text{Pu}$ mit thermischen Neutronen



8.)

# Aufteilung der Reaktionsenergie bei der Kernspaltung



- Freigesetzte Reaktionsenergie von ca. 200 MeV teilt sich wie folgt auf:

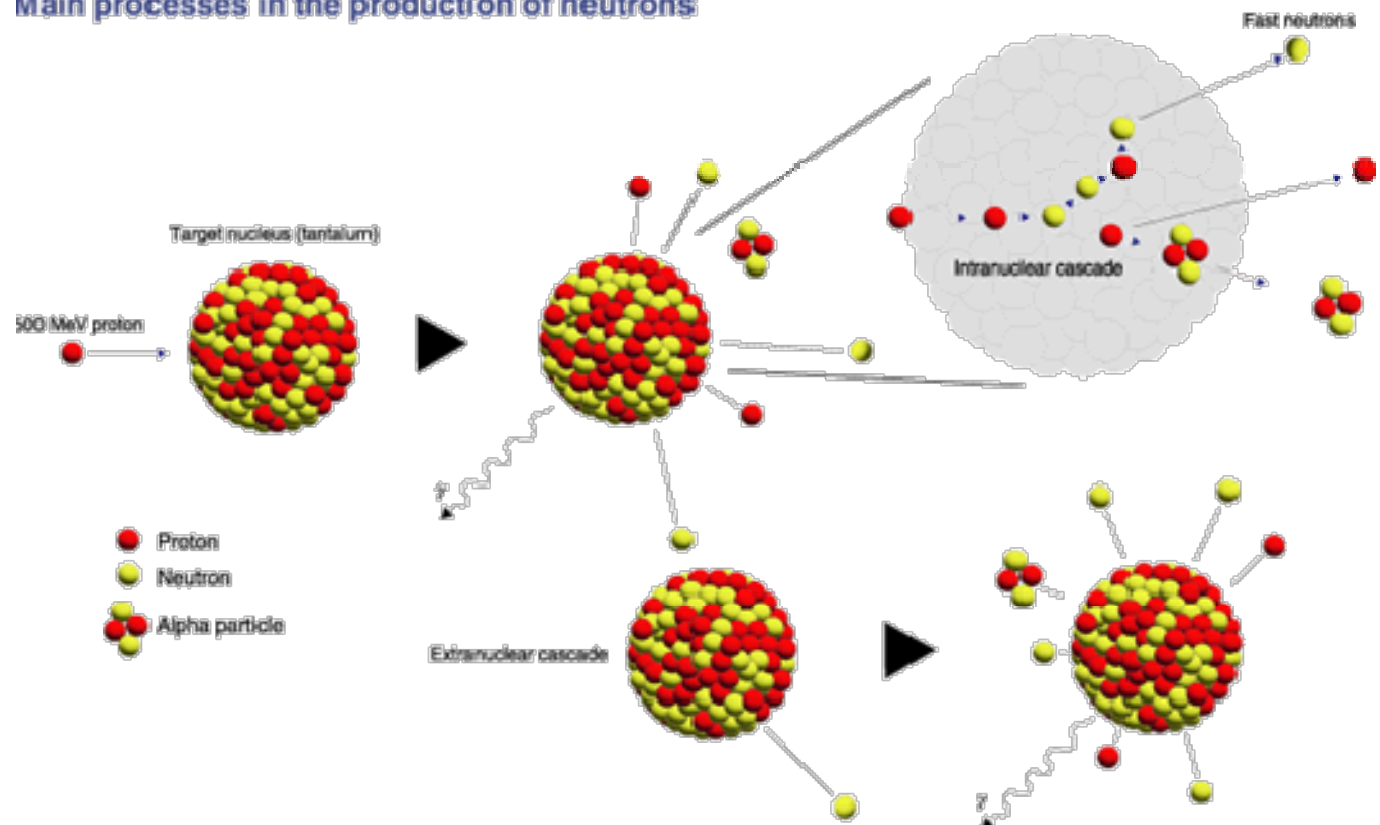
kinetische Energie der Spaltprodukte	167 MeV
kinetische Energie der Spaltneutronen	15 MeV
Energie der prompten $\gamma$ -Strahlung	18 MeV
Energie der $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlung der Spaltprodukte	11 MeV
Energie der Antineutrino-Strahlung der Spaltprodukte	10 MeV
Summe	201 MeV

# Kernreaktionstypen V

## - Spallation, (x, s)-Prozess

sehr energiereiche Geschossteilchen können eine Zersplitterung des Targetkerns bewirken. Aus dem Kern wird eine größere Zahl von Nukleonen herausgeschlagen. Sehr energiereiche Protonen (Bereich: GeV –  $E_p > 100$  MeV)

Main processes in the production of neutrons



## Beispiele für Kernreaktionen

---

---

Kernfusion in Sternen:

$$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$$
$${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$$
$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$$

Höhenstrahlung:

$${}^{14}\text{N}(n,t){}^{12}\text{C} \text{ (schnelle } n)$$
$${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C} \text{ (thermische } n)$$

Tracerproduktion am Zyklotron:  ${}^{18}\text{O}(p,n){}^{18}\text{F}$

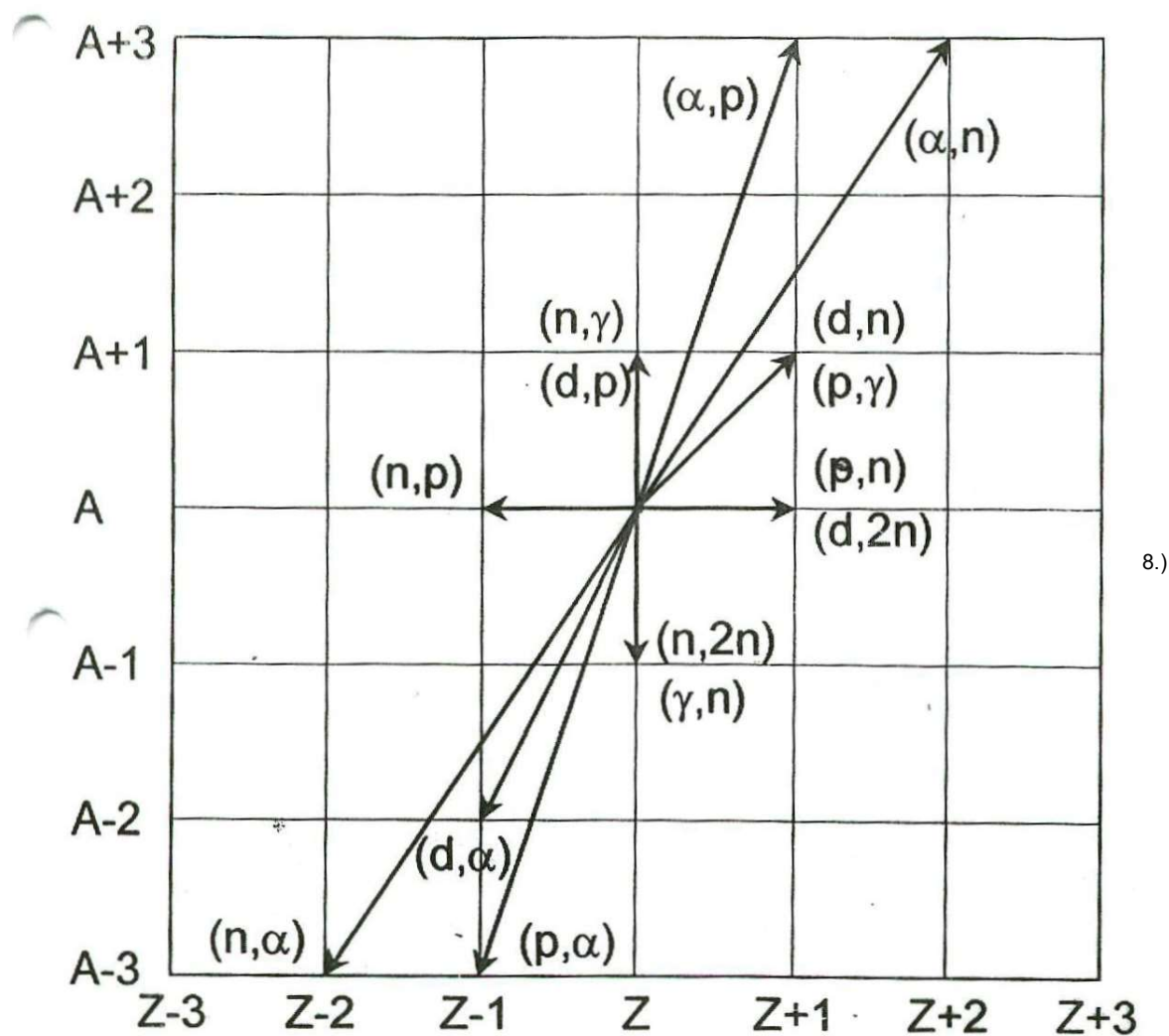
Schwerste Elemente (UNILAC):

$${}^{248}\text{Cm}({}^{22}\text{Ne}, 5n){}^{265}\text{Sg} \text{ (hot fusion)}$$
$${}^{209}\text{Bi}({}^{58}\text{Fe}, n){}^{266}\text{Mt} \text{ (cold fusion)}$$

# Mögliche Kernreaktionen

Geschoss	Reaktionsteilchen				Einfangreaktionen
	${}^1_1\text{p}$	${}^4_2\alpha$	${}^1_0\text{n}$		
	${}^1_1\text{p}$ ${}^{103}_{45}\text{Rh}(\text{p}, \text{p}) {}^{103}_{45}\text{Rh}^*$ $\gamma, 57 \text{ min}$	${}^9_4\text{Be}(\text{p}, \alpha) {}^6_3\text{Li}$ stabil	${}^{85}_{37}\text{Rb}(\text{p}, \text{n}) {}^{85}_{38}\text{Sr}^*$ $\gamma, 70 \text{ min}$	${}^{12}_6\text{C}(\text{p}, -) {}^{13}_7\text{N}^*$ $\beta^-, 10 \text{ min}$	
	${}^2_1\text{d}$ ${}^{12}_6\text{C}(\text{d}, \text{p}) {}^{13}_6\text{C}$ stabil	${}^{19}_9\text{F}(\text{d}, \alpha) {}^{17}_8\text{O}$ stabil	${}^{209}_{83}\text{Bi}(\text{d}, \text{n}) {}^{210}_{84}\text{Po}^*$ $\alpha, 136 \text{ d}$	${}^{103}_{45}\text{Rh}(\text{d}, -) {}^{105}_{46}\text{Pd}$ stabil	
	${}^4_2\alpha$ ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{p}) {}^{17}_8\text{O}$ stabil	${}^{115}_{49}\text{In}(\alpha, \alpha) {}^{115}_{49}\text{In}^*$ $\gamma, \beta^-, 57 \text{ min}$	${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, \text{n}) {}^{30}_{15}\text{P}^*$ $\beta^-, 2,6 \text{ min}$	${}^7_3\text{Li}(\alpha, -) {}^{11}_5\text{B}$ stabil	
	${}^1_0\text{n}$ ${}^{14}_7\text{N}(\text{n}, \text{p}) {}^{14}_6\text{C}^*$ $\beta^-, \approx 10^4 \text{ a}$	${}^{10}_5\text{B}(\text{n}, \alpha) {}^7_3\text{Li}$ stabil	${}^{109}_{47}\text{Ag}(\text{n}, \text{n}) {}^{109}_{47}\text{Ag}^*$ $\gamma, 40 \text{ s}$	${}^2_1\text{H}(\text{n}, -) {}^3_1\text{H}$ $\beta^-, \approx 12 \text{ a}$	
	$\gamma$ ${}^{12}_6\text{C}(\gamma, \text{p}) {}^{11}_5\text{B}$ stabil	${}^{16}_8\text{O}(\gamma, \alpha) {}^{12}_6\text{C}$ stabil	${}^3_1\text{H}(\gamma, \text{n}) {}^2_1\text{H}$ stabil	Kernresonanz - Fluoreszenz	
"Kernphotoeffekt"					

# Änderung von Nukleonenzahl (A) und Ordnungszahl (Z) bei den wichtigsten Kernreaktionen („Reaktionsspinne“)



8.)