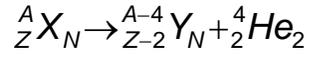


### 4.3 $\alpha$ -Zerfall



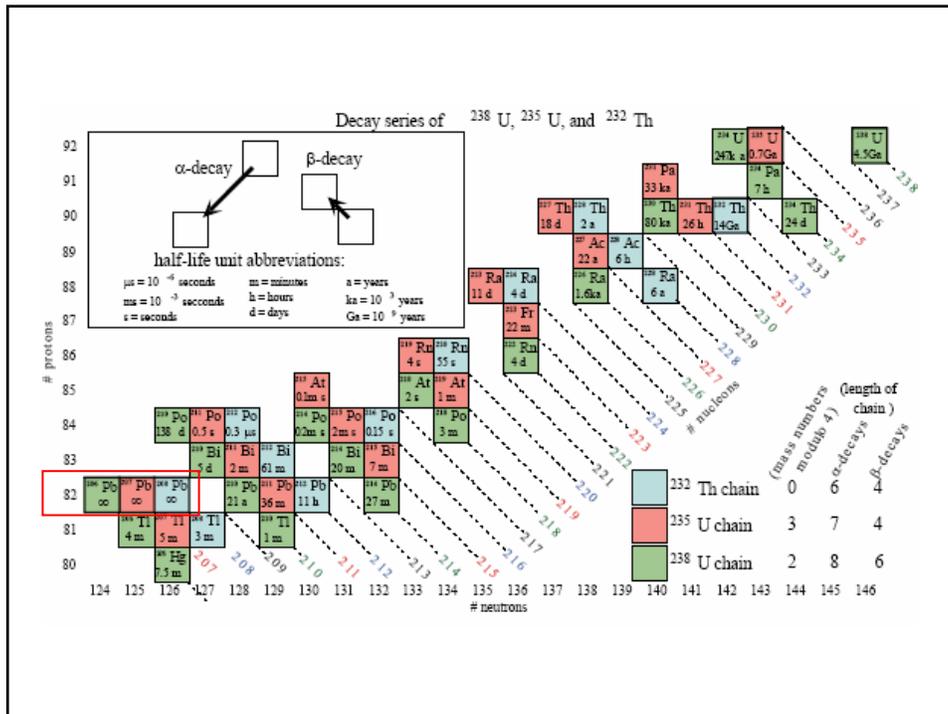
Zerfälle lassen sich 4 verschiedenen Zerfallsketten zuordnen:

| A    | Reihe     | Mutterkern          | $T_{1/2}$             |
|------|-----------|---------------------|-----------------------|
| 4n   | Thorium   | ${}^{232}\text{Th}$ | $1.4 \cdot 10^{10}$ a |
| 4n+1 | Neptunium | ${}^{237}\text{Np}$ | $2.1 \cdot 10^6$ a    |
| 4n+2 | Uranium   | ${}^{238}\text{U}$  | $4.5 \cdot 10^9$ a    |
| 4n+3 | Aktinium  | ${}^{235}\text{U}$  | $7 \cdot 10^8$ a      |

Längste Halbwertszeit

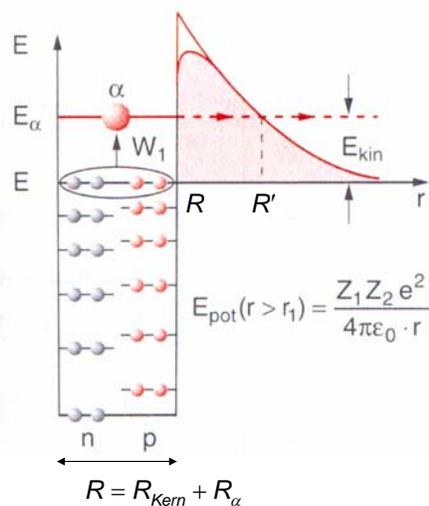
Kommt natürlich nicht mehr vor

Benennung erfolgt nach langlebigsten Isotops größter Masse



### a) Modell des $\alpha$ -Zerfalls

Gamov, Cordon, Henry, 1928



Stark bindendes effektives Potential innerhalb des Kern.

Bindungsenergie äußerer Nukleonen

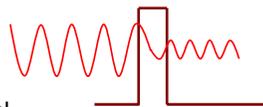
$$E_B(2n, 2p) = 4 \cdot (5 \dots 6 \text{ MeV})$$

Bindungsenergie  $\alpha$

$$E_B^\alpha = 28.3 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{kin}}^\alpha = 4.3 \dots 8.3 \text{ MeV}$$

### Tunnelprozess durch Potentialbarriere



→ Tunnelwahrscheinlichkeit für Rechteckpotential

$$\text{Transmission } T = e^{-2\kappa\Delta r} \quad \kappa = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(V_0 - E)}$$

→ Transmission für Coulomb-Potential

$$\text{Gamov Faktor } T = e^{-2G} \quad G = \frac{1}{\hbar} \int_R^{R'} \sqrt{2m_\alpha(V_0(r) - E_\alpha)} dr \sim \frac{1}{\sqrt{E_\alpha}}$$

Integral kann für  $1/r$  Potential in geschlossener Form angegeben werden

## b) Zerfallsrate

$$\Gamma = \omega(\alpha) \cdot \nu \cdot e^{-2G}$$

Tunnelwahrscheinlichkeit

Stoßrate mit Potentialwand  $\nu = \frac{v_\alpha}{2R}$

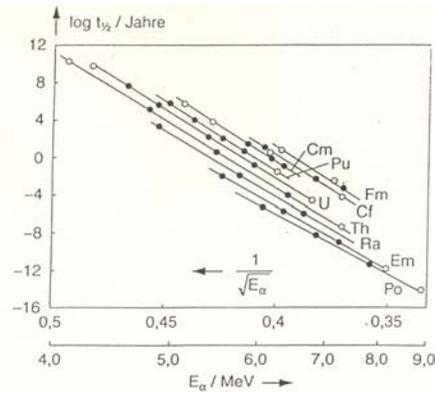
Bildungswahrscheinlichkeit für  $\alpha$

|                        | $T_{1/2}$         | $E_\alpha$ | $T_\alpha$            |
|------------------------|-------------------|------------|-----------------------|
| $^{212}_{84}\text{Po}$ | 0.3 $\mu\text{s}$ | 8.8 MeV    | $1.3 \times 10^{-13}$ |
| $^{224}_{88}\text{Ra}$ | 3.6 d             | 5.7 MeV    | $5.9 \times 10^{-26}$ |
| $^{144}_{66}\text{Nd}$ | $10^{15}$ a       | 1.8 MeV    | $2.2 \times 10^{-42}$ |

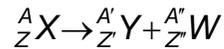
Vorhersage:

Geiger-Nuttal'sche Regel

$$\ln T_{1/2} \sim \ln \frac{1}{\Gamma} = c + 2G = c + \tilde{c} \frac{1}{\sqrt{E_\alpha}}$$



## 4.4 Kernspaltung



Kernspaltung prinzipiell möglich wenn  $Q = m(A, Z) - m(A', Z') - m(A'', Z'') > 0$

Ist für  $\frac{Z^2}{A} > 18.3$  der Fall (Annahme symmetr. Spaltung)

I.a. müssen Bruchstücke wie bei  $\alpha$  Zerfall Potentialbarriere durchtunneln:

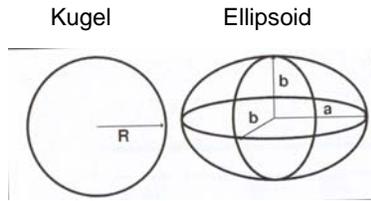
- (i) Spontane Spaltung schwerer Kerne sehr unwahrscheinlich
- (ii) Stoßinduzierte Spaltung (z.B. Beschuss mit Neutronen)

### a) Spontane Kernspaltung

Deformation des Kern:

Damit sich Kern spalten kann muss sich kugelförmige Gestalt deformieren:

Verringerung der Bindungsenergie  $\rightarrow$  Coulomb-Abstoßung überwiegt



Halbachsen: a und b

$$a = R(1 + \varepsilon)$$

$$b = R/\sqrt{1 + \varepsilon} \approx R(1 - \frac{1}{2}\varepsilon)$$

$$\text{Oberfläche } S = 4\pi R^2(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \dots)$$

Aufgrund der Verformung um Deformationsparameter ändert sich sowohl Oberflächenenergie als auch Coulomb-Energie des Kerns:

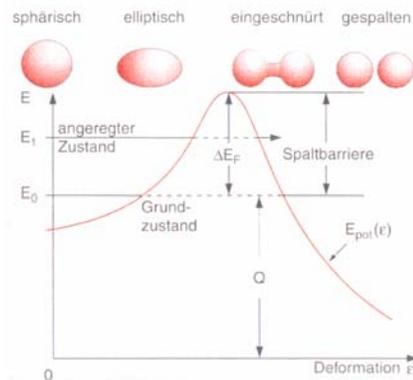
$$E_S = -a_s A^{2/3}(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2) \quad \text{Oberflächenenergie nimmt zu.}$$

$$E_C = -a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}(1 - \frac{1}{5}\varepsilon^2) \quad \text{Coulomb-Abstoßung verringert sich.}$$

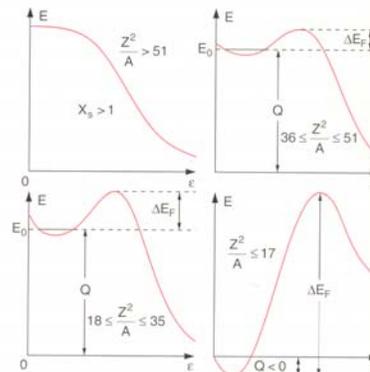
$$\Delta B(\varepsilon) = -\frac{\varepsilon^2}{5A^{1/3}}(a_c Z^2 - 2a_s A)$$

>0 → Bindungsenergie verringert sich mit Deformation

Spontane Spaltung:  $\frac{Z^2}{A} > \frac{2a_s}{a_c} \approx 50$



Aufgrund von Tunneffekt können auch Kerne mit  $Z^2/A < 50$  spontan spalten:



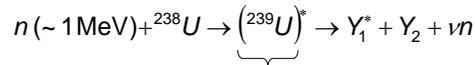
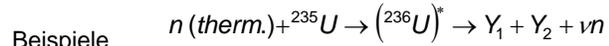
$\Delta E_F = \text{Spaltbarriere}$

Bem.: Schalenstruktur führt häufig zu asymmetrischer Spaltung

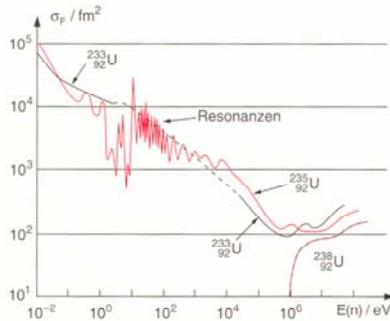
### b) Stoßinduzierte Kernspaltung

Bei Kernen mit  $Z^2/A < 50$  kann Spaltung durch Zuführen von Energie - etwa durch Beschuss mit Neutronen (keine Coulomb-Barriere) – erreicht werden.

→ In manchen Fällen reichen bereits thermische Energien.



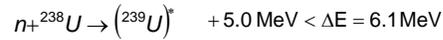
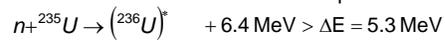
Zwischen/Compound-Kern



${}^{235}\text{U}$  wird bereits von langsamen Neutronen mit sehr viel größerem WQ als  ${}^{238}\text{U}$  gespalten

Ursache ist die bei der Bindung des Compound-Kerns freiwerdende Bindungsenergie. Aufgrund der Paarungsenergie wird für  ${}^{236}\text{U}$  weit mehr Energie frei

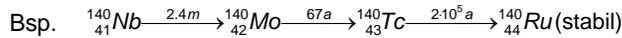
Bindungsenergie Spaltbarriere



### c) Eigenschaften der Kernspaltung

i) Spaltung ist i.a. asymmetrisch. Es entstehen eine Vielzahl angeregter Tochterkerne.

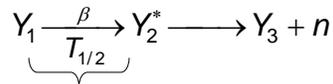
ii) Neutronen-Überschuss in Tochterkernen:  
 $\beta^-$  instabil →  $\beta^-$  Zerfallsketten mit langlebigen Tochterkernen.



Langlebige Strahler → radioaktiver Müll

iii) Angeregte Spaltbruchstücke mit Neutronen-Überschuss  
 → prompte ( $\Delta t < 10^{-16}\text{ s}$ ) Neutronen-Emission

iv) Verzögerte Neutronen ( $\Delta t = 0.2 \dots 60\text{ s}$ )



Verzögerung

## 4.5 Dosimetrie und Strahlenschutz

### a) Messgrößen

Teilchenfluss  $\Phi = \frac{d^2N}{dFdt}$   $[\Phi] = 1 m^{-2}s^{-1}$

Aktivität  $A = -\frac{dN}{dt}$   $[A] = 1 Bq = 1 s^{-1}$  (Becquerel)

Veraltete Einheit: 1 Ci (Curie) =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Bq

Energiedosis  $D = \text{Absorbierte Strahlungsenergie} / \text{Masseneinheit}$

$[D] = 1 \text{ Gy (Gray)} = 1 \text{ J/kg} = 6.24 \cdot 10^{12} \text{ MeV/kg}$

Veraltete Einheit: 1 rad = 0.01 Gy

Energiedosisleistung  $dD/dt$

Äquivalentdosis  $H$  berücksichtigt die relative biologische Wirksamkeit (RBW) der Strahlung im Vergleich zur  $\gamma$  Strahlung

$H = Q \cdot D$   $Q = \text{Qualitätsfaktor (RBW)}$

$[H] = 1 \text{ Sv (Sievert)} = 1 \text{ J/kg}$

Veraltete Einheit: 1 rem = 0.01 Sv

|            | Strahlungsart                      | Qualitätsfaktor Q (RBW) |
|------------|------------------------------------|-------------------------|
| Normierung | $\gamma$                           | 1                       |
|            | $e^\pm \mu^\pm$                    | 1                       |
|            | Neutronen mit $E < 10 \text{ keV}$ | 5                       |
|            | 10 keV...100keV                    | 10                      |
|            | 100 keV ... 2 MeV                  | 20                      |
|            | 2 MeV ... 20 MeV                   | 10                      |
|            | > 20 MeV                           | 5                       |
|            | Protonen, $E > 2 \text{ MeV}$      | 5                       |
|            | $\alpha$ , Spaltfragmente          | 20                      |

Beispiel: Mensch im Abstand von 2 m von punktförmiger Neutronen-Quelle mit Aktivität  $A=10^{10}$  n/s, Neutron-Energie  $\sim 1\text{MeV}$

$$\rightarrow \text{Fluß} \quad \Phi = \frac{A}{4\pi R^2} = 2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Annahme: Neutronen deponieren  $\sim 20\%$  ihrer Energie im Körper

$$F = 0.8 \text{ m}^2, M = 75 \text{ kg}$$

$$\text{Dosisleistung} \quad \frac{dD}{dt} = \frac{\Phi F E_n^{\text{eff}}}{M} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{s}) = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Gy/s}$$

$$\text{Äquivalent Dosisleistung} \quad \frac{dH}{dt} = Q \frac{dD}{dt} = 20 \cdot 5 \cdot 10^{-8} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{s}) = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/s}$$

$$Q = 20$$

$$\text{Für 1h:} \quad H = 3,6 \text{ mSv}$$

## b) Auswirkung von Strahlung

Frühschäden (bei einmaliger Bestrahlung):

- $\approx 250 \text{ mSv} \rightarrow$  Veränderungen des Blutbildes
- $\approx 1 \text{ Sv} \rightarrow$  Akute Strahlenkrankheit (Erbrechen, Kopfschmerzen)
- $\approx 4 \text{ Sv} \rightarrow$  Schwere Strahlenerkrankung,  $\sim 50\%$  Todesfälle
- $\approx 7 \text{ Sv} \rightarrow$  Letale Dosis, (min. 90% Todesfälle)

Somatische Spätschäden (Krebs, Leukämie):

Es ist strittig ob eine Schwellendosis existiert (falls ja, wäre sie sehr gering). Bei steigender Strahlenbelastung steigt die Wahrscheinlichkeit zu erkranken.

Genetische Schäden:

Bestrahlung bewirkt Mutation in Chromosomen der Keimzellen. (Wird heute auch bewusst zu Erzeugung von Pflanzen-Mutationen eingesetzt). Auch hier gilt: Je höher die Strahlungsdosis desto höher die Wahrscheinlichkeit lebensfähige Mutationen hervorzubringen.

### c) Strahlenschutzbestimmungen in Deutschland

ICRP (International Commission on Radiological Protection) Empfehlung:

- maximal 20 mSv/a (gemittelt über 5 Jahre)
- aber stets weniger als 50 mSv im Jahr

Grenzwerte für beruflich-strahlenexponierte Personen:

Beruflich nicht strahlenexponiert: < 1 mSv/a

Beruflich strahlenexponiert Kat. B: < 6 mSv/a

Beruflich strahlenexponiert Kat. A: < 20 mSv/a

Grenzwerte für Räume / Gelände:

Überwachungsbereich: > 1 mSv/a

Kontrollbereich: > 6 mSv/a

Sperrbereich: > 3 mSv/h

### d) Jährliche Belastung durch natürliche und zivilisatorische Quellen

| Quelle  | Dosis [mSv] |
|---|-------------|
| <b>Natürliche Strahlenquellen</b>                       |             |
| Kosmische Strahlung                                     | 0.3         |
| Terrestrische Strahlung                                 | 0.4         |
| Inhalation von Radon                                    | 1.1         |
| Nahrungsaufnahme  | 0.3         |
|   | 2.1         |
| <b>Künstliche Strahlenquellen</b>                       |             |
| kerntechnische Anlagen                                  | <0.01       |
| medizinische Anwendungen                                | 2           |
| Anwendungen in Technik u. Haushalt                      | <0.01       |
| berufliche Strahlenexposition<br>(Bevölkerungsmittel !) | <0.01       |
| besondere Vorkommnisse                                  | 0           |
| Fallout von Kernwaffenversuchen                         | <0.01       |
| Tschernobyl   | <0.015      |
|   | 2           |

Bevölkerungsmittel