

# Kapitel 6 - Kernzerfälle

Radioaktiv  $\rightarrow$  Ex. von Kernen

zB Elementumwandlungen

Zerfallsges:

Aktivität  $A = - \frac{dN}{dt} = \lambda N$   $[A] = 1 \text{ Bq}$

Zerfallskonst  
|  
λ

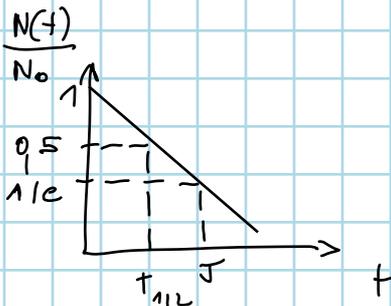
Statistische Aussage über große Anzahl nicht einzelnes

$\approx$  QM  $| \psi |^2 \approx$  Wahrscheinlichkeit

$\rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$   $N_0 = N(t=0)$

$\lambda$  kann exp bestimmt werden f. Subst die sich deutl.

messbar verringern.



Steigung  $\approx \lambda$

langsame Zerfälle: Massengleichromeder

Halbwert

aus  $A$  &  $N$   $\lambda$  bestimmen

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$\left\| \begin{aligned} \frac{A_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda t} \\ \frac{1}{2} &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \right. \quad \left| \begin{aligned} \ln \frac{1}{2} &= -\lambda t \\ \ln 2 &= \lambda t \quad \checkmark \end{aligned} \right.$$

Kann man in  $N(t)$  einsetzen  $N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}$

$T$ : mittlere Lebensdauer:

$$T = \langle t \rangle = - \frac{\int_0^{\infty} t \, dN}{N_0} = - \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN}{dt} dt}{N_0}$$





f. Zeiten, die klein geg  $t_{1/2}$  Menge Tochter  $\propto t$   
 Enkel  $\propto t^2$  usw

Zeiten, die lang geg  $t_{1/2}$  v. Tochterprod, kurz geg  $t_{1/2}$  Mutter  
 radioaktives GGW  $\rightarrow$  Substanzmenge & Lebensdauer

Lösung:

$$\dot{N}_1 = -\lambda_1 N_1$$

$$\dot{N}_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\dot{N}_3 = \lambda_2 N_2$$

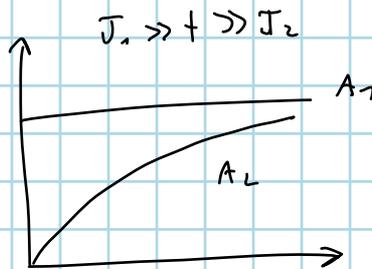
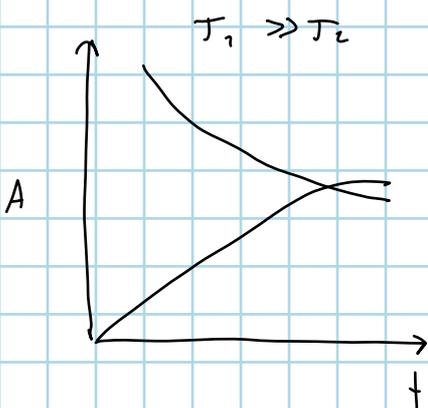
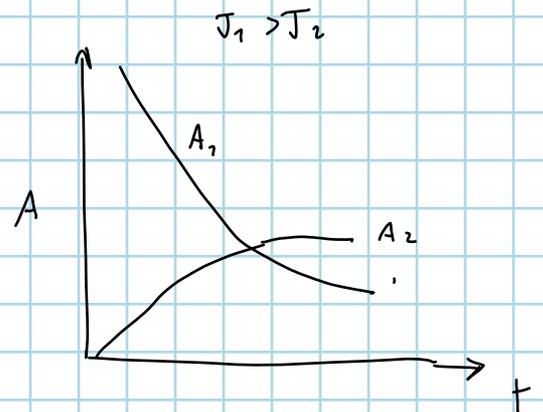
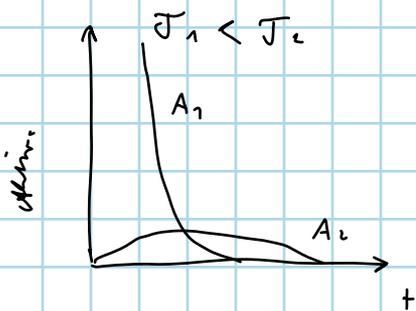
$$N_1(t) = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

$$N_3(t) = N_{10} \left[ 1 - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}) \right]$$

$$T_1 = \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{--} \quad \parallel \text{ mittl. Zerfallszeit}$$

$\parallel$  1. zerf. schneller



### Datierungsverfahren

Weitere Isotope:  $^{40}_{18}\text{K}$ ,  $^{127}_{53}\text{I}$ ,  $^{248}_{96}\text{Sm}$ ,  $^{187}_{75}\text{Re}$

Erdatalter mit Isotopen bestimmt :  $4,6 \cdot 10^9$  a

Kondyten Entstehungsalter: 3 - 4,4 Mrd

Zeitunterschiede von  $10^6$  a mit  $\beta$  Zerfall von  $^{129}\text{I}$  ( $t_{1/2} = 15 \cdot 10^6$ )

& Spontanzpaltung von  $^{244}\text{Pu}$  ( $t_{1/2} = 82 \cdot 10^6$ )

Sehrige Mengen damals enthalten - Zerfallsgrad feststellbar in Meteoriten

Erdreich: Radiocarbon durch  $^{14}\text{C}$

Atmosph:  $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$  d kosm. Strahlung

//  $t_{1/2} = 5730$  a  $\beta$  Zerfall zurück zu  $^{14}\text{N}$

$^{14}\text{C}$  über  $\text{CO}_2$  in Kreislauf  $^{14}\text{C}$  Anteil:  $1,5 \cdot 10^{-12}$

Geht nimmt nach Tod ab!  $\rightarrow$  Durch Aktiv. den Zeitp. bestimmen

Altersbestimmung nur nach Eichung, da  $p_n$  in kosm. Strahl

schwankt (Sonnenzyklus)

Vergleich mit Jahresringen d Bäume:

$\sim 8000$  Jahre zurückverfolgen

Stark beeinflusst - sinkt d. Verbrennung v Kohle & Öl

steigt d. Kernwaffenversuche

Nachweisgrenzen d. Beschleuniger Massenzahl. stark herabsetzen

Atome direkt gezählt - Radioaktivität / Gesamtzahl

bestimmen Verh bis  $10^{-10} - 10^{-16}$  messbar (VERA)



Langzeitige Mülldecks als Sonden erzeugt. Weg d Biosphäre

kann verfolgt werden  $10^5 - 10^8$  Müll reichen aus

$^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$  alle  $10^6$  a

## Dosis und natürl. Strahlenbelastung

Überall Radionuklide in Spuren  $\rightarrow$  alle Körper radioaktiv

70 kg & 20-30 a, 9000 Bq //  $\approx$  9000 Zerfälle/s

Dominierend:  $^{40}\text{K}$   $10^9$  a (0,012% von K)

Lebensmittel: 40 Bq/kg

Belastung messen: Dosis & Dosisrate

Energie-, Ionen-, äquivalenzdosis

Energiedosis  $D_E = \frac{\Delta E}{\Delta m}$   $[D_E] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Gy (Gray)}$   
(auf Masseneinheit übertr. Energie)

rad. Strahl hat ionisier. Wirkung - Ionen, die in Gas d. Strahlung entst.

$$D_I = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad [D_I] = \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Energiedosis & Ionen dosis hängen über mittl. Energie z. Ionenpaarverz.

zusammen Gas: 34 eV

biologische Wirkung: Ionisationsdichte entl. d. Strahlengr.

Dichte umso größer, je massiver T d. Strahlung

$\rightarrow$  Q Qualitätsfaktor

$$H = Q D_E \quad [H] = \text{Sv}$$

Äquivalenzdosis

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$$

Qualitätsf.

Strahlung	Q		
Röntgen, $\gamma$	1	$E_n > 20 \text{ MeV}$	5
$e^-$ $e^+$	1	p außer Rückstoß	
n $E_n < 10 \text{ keV}$	5	$E_p > 2 \text{ MeV}$	5
10-100 keV	10	L-T, großfr. schw. Ionen, Rückstoß	20
100 keV - 2 MeV	20		

## Dosisrate / Dosisleistung

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

D steht f. alle

Sind geringe Strahlendosen problematisch?

Strahlenschutz: alles was über natürliche Variation hinausgeht

Ø Strahlenbel. : zw. 2 & 6 mSv/a

Zimmerluft - Radon: 2,5 mSv/a

• kosmische Str. von h abhängig 0,3 mSv/a AT  
Gladbach: 3 mSv/a

Flug Wien / NY: 0,03 mSv/a

• terrestr. Str. K, U, Th im Boden: 0,5 Sv/a

große Unterschiede

• Inhalation: Radon aus Boden od. Baumaterial  
2,5 mSv/a Raum: 5-8x Außenluft

• Ingestion: Trinkw. / Nahrung: 0,3 mSv

• med. Diagn.: Röntgen: 1,5 mSv/a

• Kernwaffen / Unfälle: 1960 - 80: 4,5 mSv

Tschernobyl: 1. J: 0,5 mSv; dann 0,1; dann

0,01 mSv

übermüdete Personen: 50 mSv/a

Strahlung wirkt direkt od. indirekt auf lebende Zellen

↓  
reißt od. gestörte T können Bindungen in org. Molekülen

aufbrechen (direkt)

indirekt: ionisierte Atom od  $e^-$  aus Molekülen einfangen

akute Schäden innerh. weniger Wochen

hohe Dosen mit k. Bestrahlung Voraussetzung

Schnellwert  $\approx 200 \text{ mSv}$

Spätschäden n. Jahren od. Jahrzehnten

$100 \text{ mSv}$  : Strahlenrisiko f. Krebs 05%

natürliches: 20%

Reichweiden ?  $\alpha$  wenige cm (Kautschoggummi)

$\beta$  bis 1m in Luft / Metallfolie

$\gamma$  dicke Blei bzw. Betonwand

Schäden	D	Folgen
200-500 mSv		Blutbild kurzzeitig
500-1000		länger merkbare Veränd.
1-2 Sv		schwere Blutbild-V. reinem Todesf.
4,5 Sv		50% Todesf.
7 Sv		+

## Alphaerfall

$\alpha$  stark gebunden, können Mutterkern verlassen, wenn

$$Q > \phi$$

$$m(A, Z) = m(A-4, Z-2) + m(4, 2) + Q$$

$Q_\alpha$  teilt sich gem E & p Satz auf Tochterkern &  $\alpha$  auf!

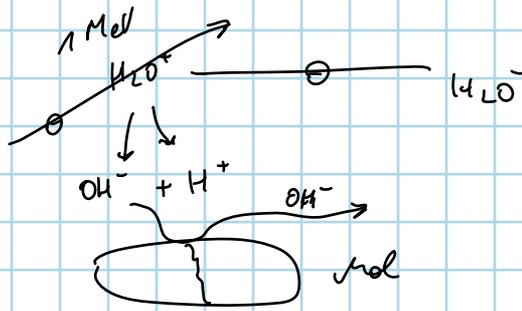
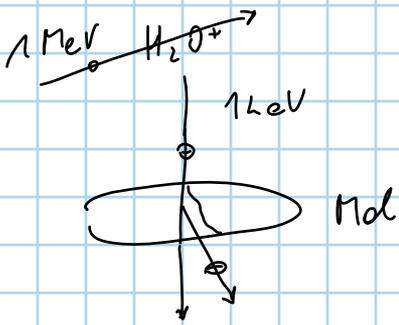
$$T_\alpha = \frac{Q_\alpha}{1 + m_\alpha / m_{TK}}$$

Spektrum zeigen Liniencharakter - Übereinst mit Zweifeldchen, d. d. Zerfalls

Voriger Abschnitt:

dichte Einr.

indichte



⊖ Ionenspur

Nebelkammer:

↳ Zerfall von  $^{214}\text{Bi}$   
 kann auch  $\beta$  zu  $^{214}\text{Po}$  machen  
 →  $\lambda$  von  $^{214}\text{Bi}$  - längere Spur

$\lambda$  von  $\lambda$  hängt mit Reichweite zusammen  
 |  
 Max. f. Energie

E größer,  $t_{1/2}$  kleiner  $Q_\alpha$  hängt mit  $t_{1/2}$  zusammen

$$\log \frac{t_{1/2}}{s} = c_1 + \frac{c_2}{\sqrt{Q_\alpha / \text{MeV}}} \quad ??$$

?  $c_1$  &  $c_2$  elem.-abhängig

$\lambda - E$  zw. 4 & 9 MeV in Reihen, aber  $t_{1/2}$  zw.

$10^{-7} s$   $10^{15} a$

scheinbarer Widerspruch. 8,8 MeV  $\lambda$  Str. von  $^{212}\text{Po}$

können nicht in Kern hinein  $^{218}\text{U}$ , aber emitt. selber

$\lambda$  mit  $E = 4,2 \text{ MeV}$  Ursache: Tunneleffekt

$\lambda - T$  von außen muss gegen Pot. Barriere anlaufen  $V = \frac{Ze + \hbar c}{r}$

Energie muss höher als Barriere an R sein

Inneres:  $Z_p \& Z_p$  mit WS  $\omega_B$  zu L-T

$E_B$  ist hoch genug damit  $\alpha T$  pos E hat

Zerfallskonst  $\lambda = \omega_B \cdot f \cdot \omega_D$

$\omega_B$  WS zur Bildung  
 $\omega_D$  WS zum Durchdringen

$\omega_B$  von Modell abhängig  $\rightarrow$  Annahme:  $\omega_B = 1 \rightarrow$  Im Mittel immer 1T da

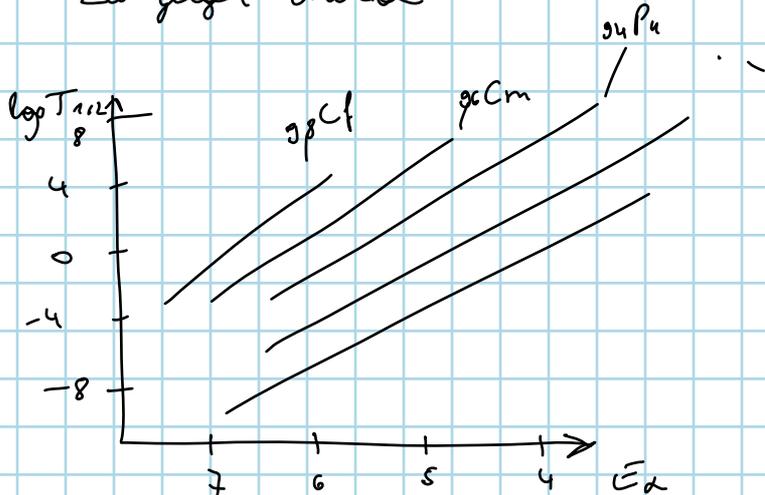
$f = \frac{v_\alpha}{2R}$  // Kehrwert d Zeit, den  $\alpha$  durch Kern braucht

$\approx 10^{20}/s$

$v_\alpha$ : dass  $E_{kin}$  am Boden des Toppes

$\rightarrow$  Während LD eines  $^{238}U$  Kerns schlägt  $< 10^{22}$   $\alpha$  geg Wand

Zu geringer Mittel



Durchdringung WS des Walls erhält man aus der Log der

SGL  $\sim \exp^{-2}$  im Innenraum & Außenraum

$R_2(r) = u_2(r)/r$

$u_2''(r) = \frac{2m_\alpha}{\hbar^2} [U(r) - E_\alpha] u_2(r)$

$U(r) = V_c(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2m_\alpha r^2}$  //  $V_c$ : Coulomb

$$u_e(r) = A e^{-\int dr k(r)}$$

auslaufende Welle

// WKB Näherung: erste Ableg.

von  $k(r)$  ignoriert man

$\approx$  langsam veränd. Poti

$$\rightarrow u_0 = e^{-2 \int_R^{R'} dr k(r)} = e^{-2 \int_R^{R'} dr \sqrt{\frac{2m_e}{\hbar^2} [U(r) - E_e]}}$$

G

$$\frac{d}{dr} A e^{-\int k(r) dr} = -A e^{-\int k(r) dr} \cdot k(r)$$

B

$$\frac{d}{dr} B = k(r)^2 \cdot u(r) \quad \checkmark$$

G: Gamow Faktor

Darstellung f. s. Wellen:  $l=0$

$$U(r) = V_c(r) = \frac{Z Z_p k_c}{r}$$

$$G = -2 \int_R^{R'} \sqrt{\frac{2m_e}{\hbar^2} \left( \frac{Z Z_p k_c}{r} - E_e \right)} dr$$

$$= \frac{2}{\hbar} \sqrt{4m_e Z_p k_c R'} \left( \arccos \sqrt{\frac{R}{R'}} - \sqrt{\frac{R}{R'} - \frac{R^2}{R'^2}} \right)$$

$R$  &  $R'$  d.  $V_c$  bzw.  $E$  ausdrücken

$$V_c(R') = E_e$$

$$V_c(R) = V_c(R)$$

$$G = 4 Z_p \sqrt{\frac{2m_e c^2}{E_e}} \left( \arccos \sqrt{\frac{E_e}{V_c(R)} - \frac{E_e^2}{V_c(R)^2}} \right)$$

$V_c$  ist  $\gg$  als  $E_e \rightarrow$  arccos d.  $\frac{E_e}{V_c}$  &  $E_e^2$  vernachl.

$$G = 4 Z_p \left( \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2m_e c^2}{E_e}} - \sqrt{\frac{2m_e c^2}{V_c(R)}} \right)$$

$e^{-G}$ : Erklärung d. sign. Nutzf. Perz.  $\propto \frac{1}{\sqrt{Q_e}} \dots$

$\alpha$  T ohne  $Q=0$ : Erhöhung des Werts, Emission erschwert

Bisher: Für Anfangs & EZ nur 4 nucl. d.  $\alpha$  unterz.

Wenn nicht so, Behinderung d.  $\alpha$

Ex: Messung mit Halbleitendet.

$\alpha$  Zerfall gut zum Nachweis von Elementen

Element mit hohem A: Supers Kerosen:  $\alpha$  als Nachweis

## Kernspaltung

Bezieht auch auf Tunnel Effekt zB  $^{238}\text{U}$  mit n beschrieben

Beschreibung zB auf Basis Tröpfchenmodell

spontane Spaltung möglich  $Q$  Wert positive

WS wieder von Potentialhöhe abhängig die MK stabilisiert

Beiträge zur Ruheenergie die von Deform. abhängen:

Oberflächenenergie: nimmt  $\propto$  Oberfläche zu

Coulomb E: nimmt ab // homogen gel. Tröpf:  
∫ über Kernvol

kleine Def: ellipt., als Form mit  $B_1$  als Def. - Parameter

$$\sqrt{\frac{r}{R}}$$

$\Delta E_{\text{ob}}(B) = E_{\text{ob}}(\text{ungel.})$  // & B abh.

$$E_{\text{ob}} \propto R^2 \quad E_c \propto \frac{1}{R}$$

→ rel.  $\Delta E_{\text{ob}} \approx \underbrace{2 \Delta E_c}_{\text{geht über in and Hilfe}}$

E<sub>ref</sub>: folgt quadr. Parabel hat f. Kugel Min.

Steilheit d. Parabel & ind. Gesamth. d. Spaltbarriere

mind d.  $\frac{E_c}{E_d}$  festgelegt  $\rightarrow$  Verh. als Max einfl

Cond:  $\frac{z^2}{A^{1/3}}$       Oberfl:  $a_s A^{2/3}$   
 $\approx C = C_0 A^{1/3}$

$\rightarrow S = \frac{z^2}{A}$  // Spaltparameter

Für  $2 a_s A^{2/3} - a_c z^2 A^{-1/3} = 0$

$\Delta$  doppelt so groß ??  $\rightarrow \frac{2 a_s}{a_c} = \frac{z^2}{A} = \xi_c = 47$

kritischer Spaltparam.

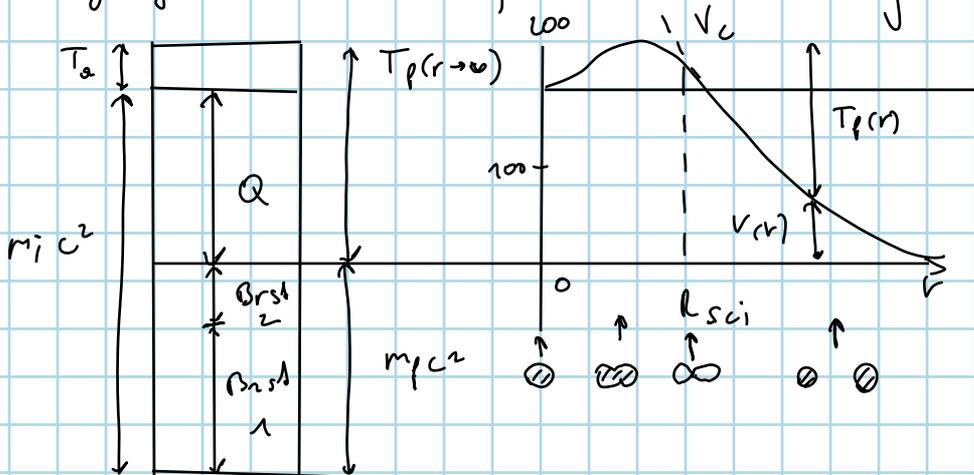
Nur Abschätzung, da kleine Deformationen  
& Schalenefekte vernachl.

Verh:  $\xi/\xi_c$  mit  $t_{112}$  (für Spaltanzgr)

<sup>238</sup>U       $\xi/\xi_c = 0,75$        $t_{112} = 5,9 \cdot 10^{15} a$

<sup>252</sup>Cf      0,81       $t_{112} = 66 a$

geringe Zunahme von  $\xi$  - starke Verring. von  $t_{112}$



Erst Kerneinschwingung bei größ. Def führt zu niedrig  $E_{\text{ex}}$

$E_c$  sinkt stark ab

$E_{\text{def}}$  steigt zuerst langsam an und wird const (max)

→ also Satz von Defompar: Es ist Sattelpunkt, da

nur in 1 Par max in allen anderen min

Sattelpunkt  $E$  U bis Pu:  $\sim 4 \text{ MeV}$

zunehmende Def → zun. Einstr. → Beta fällt schneller

bis Ableitungspunkt Def  $E$  hier etwa gleich wie im GZ

Nach Trennung:  $E_{\text{ex}}$  hoch

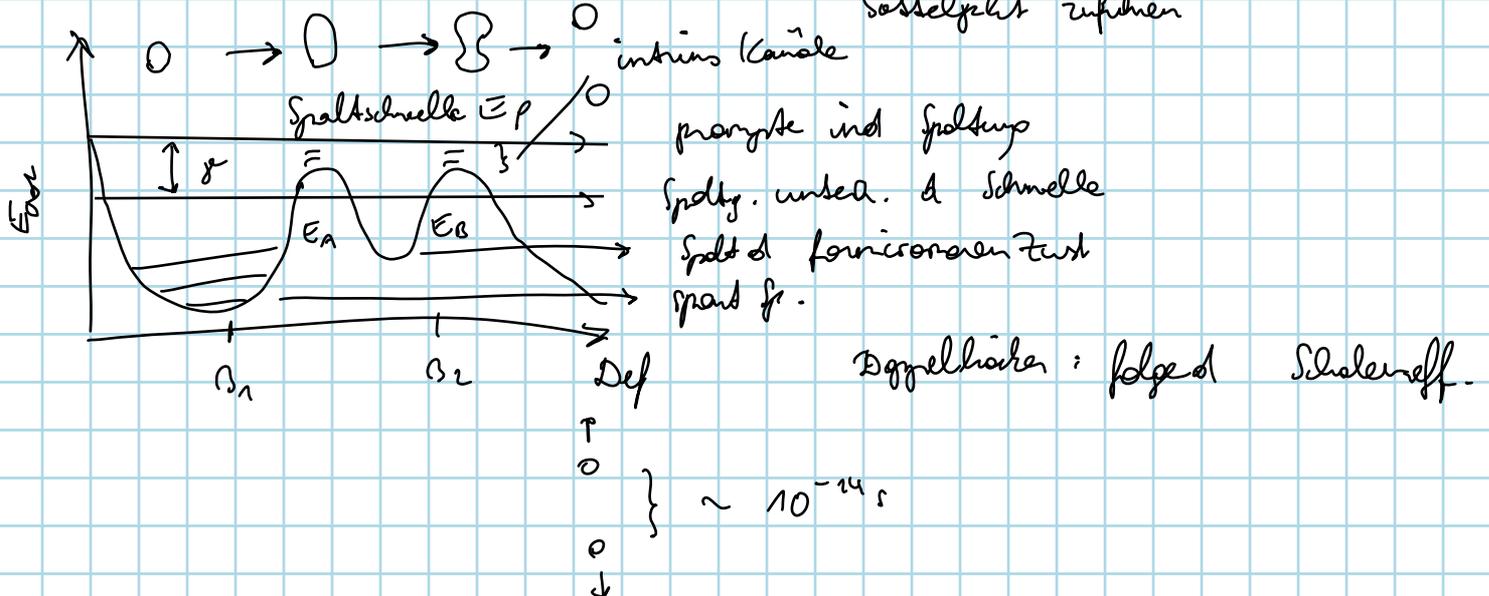
$E_{\text{ex}}$ :  $\frac{1}{r}$  — setzt abh. d. Spaltmod.

$E_B$  / Neutron von Uran von 7,6 auf 8,5 MeV →  $\sim 200 \text{ MeV}$

werden frei  $\sim 0,9 \cdot 235$

Größteil  $\sim 170 \text{ MeV}$  als  $E_{\text{kin}}$  Rest als Anregungs  $E$  und führt zu abstr. von  $n$  od  $\gamma$  Emis.

Verlauf  $E_{\text{ex}}$  & Kerndef: // ändern Spaltg: Diff  $E$  zwischen GZ & Sattelpunkt zuführen



U & Pu sind im GZ leicht deformiert

QM: min von  $E_{pot}$  nicht fix  $E_0 \approx \frac{\pm \omega}{2}$   $E_{pot}$  ändern

Schaleneff: 2. Minimum mit Achsenverh. 2:1 des Ellipsoids  
(formisomerer Zustand)

Kann d. Spaltung &  $\beta$ -Zerfall in GZ zerfallen

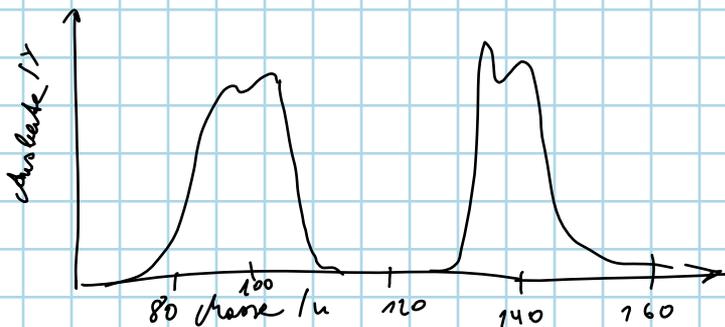
Auf formisom. Zust. baut Rotationsbande auf, mit hohem

Trägheitsmoment.

Schaleneff in GZ negativ & am Sattelpkt pos: Spaltbarriere erhöht sich um einige MeV zum Trägfermod.

Trägfermod: symmetrische Verteilung der Spaltprodukte erwartet  
Experimentell nur bei stark angeregten Kernen  $\rightarrow$  spalten

Spontan spaltende od d. niedere E in gespaltenen Kerne asymm



Ausbildung versch. gr  
Spaltprod. hängt mit  $n_{sp}$   
 $n$ -Zahl & Z zusammen

Wenn Kerne Spaltbarriere aus GZ durchtunneln, dann spontane Spaltung

$t_{1/2} \gg$  als bei  $\alpha$  Zerfall  $^{238}\text{U} : t_{1/2 \text{ sp}} = 6 \cdot 10^{15} \text{ a}$

$t_{1/2 \alpha} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$

induzierte Spaltung aufg. n Einfang viel interessanter

U: 99%  $^{238}\text{U}$  0,7%  $^{235}\text{U}$

$n$  Streuzahl  $\rightarrow$   $^{238}\text{U}(n, -)^{239}\text{U}$  — mit 4,8 MeV — 1 MeV unter Sattelpkt

$n$  mit 1,5 MeV können  $^{238}\text{U}$  spalten

$n$  Ionen  $\rightarrow$   $^{235}\text{U}(n, )^{236}\text{U}$  infolge d. Paarungs E  
 höhere Anregungs E  $\approx$  6,4 MeV

$\rightarrow$  0,1 MeV drüber - spaltet

Infolge des  $\frac{1}{v}$  Verhaltens mit großem Wirkungsquerschnitt

Bedeutung f. Kernspaltung: Emission einzelner  $n$  im Spaltvorg.

pro Kern werden  $\sim 2,5$   $n$  frei

Ursache: Verringerung des  $n$

Überschusses von schweren zur mittelschweren.

Kernen im Stabilitätsdal d. Nukl. Karte

Verringerung: Emission von  $n$  od. Betazerfälle

Beide finden statt & werden ausgenutzt

Frei werdende  $n$  führen zu Kettenreaktion

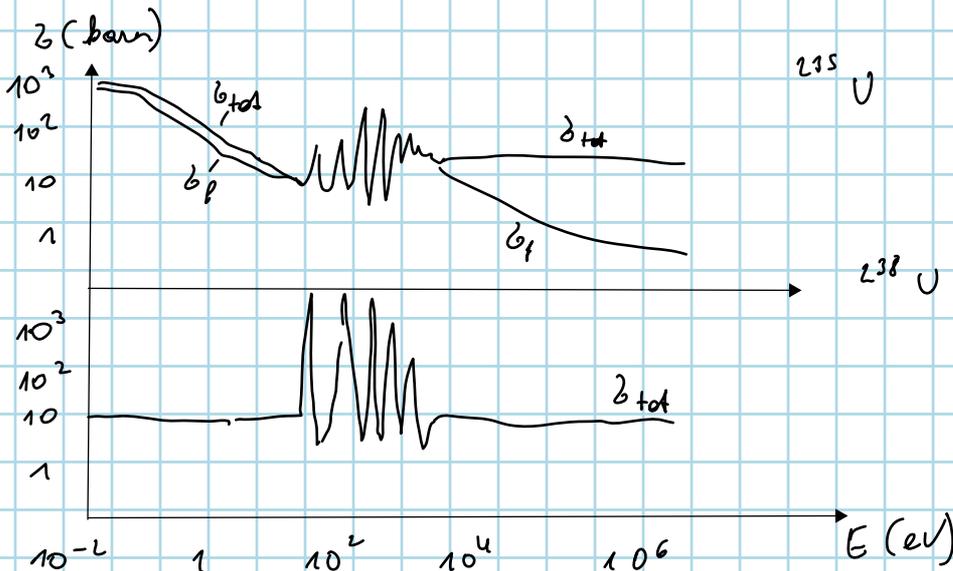
3 davon Sekunden - weniger als 1% verzögerte  $n$

$\rightarrow$  Multiplikationsf. d.  $n$  in Ketten langsam änderbar

$\rightarrow$  Reaktion steuerbar

Energie bei Kernspaltung zu chem. Energie (z.B. Verb.) extrem groß

$1/1000 \cdot m_0 c^2$   $10^6 \times$  größer als chem. Prozesse!



$\sigma_f$ : Fission

$\sigma_{tot}$ : totale