

5. Atomkerne

Prof. David Hunger

Physikalisches Institut, KIT Fakultät für Physik

Aufbau der Atomkerne

- Ladung, Masse
- Kernradius
- Bindungsenergie und Massendefekt

Fundamentale Eigenschaften stabiler Kerne und Kernmodelle

- Tröpfchenmodell
- Kernspins und Kernmomente

Kernkräfte, Kernzerfälle

- Deuteron, Kernkraft als Austauschkraft
- Kernzerfall, α -, β -, γ -Zerfall
- Kernspaltung, Kernreaktionen

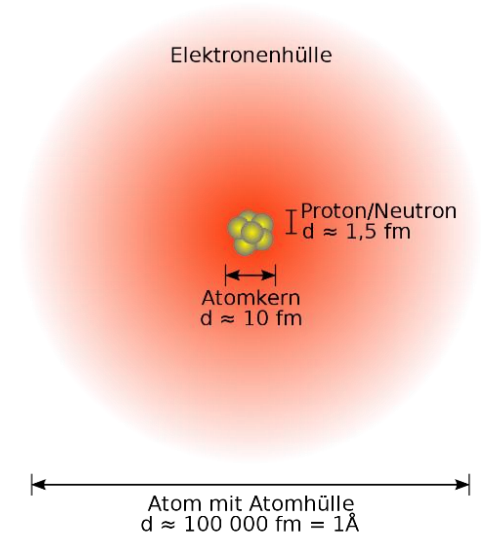
Was ist Kernphysik?

Atomhülle: beschrieben durch

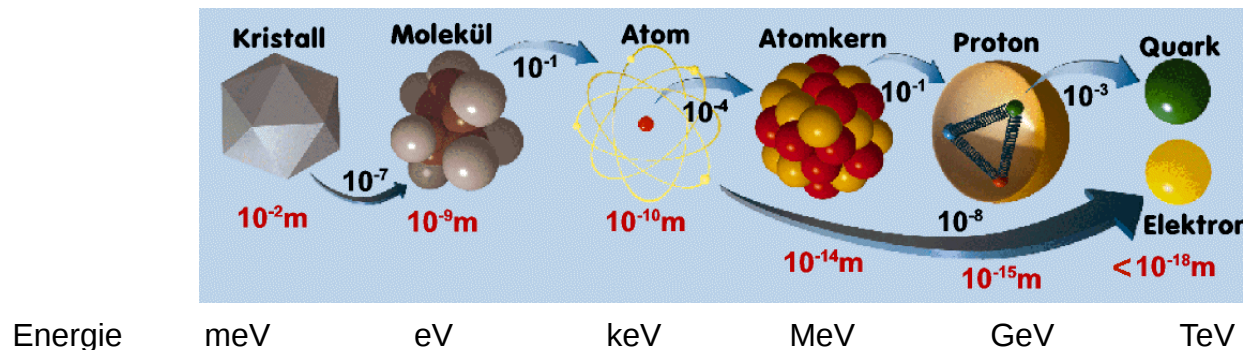
- Quantenmechanik
- Elektromagnetismus

Atomkerne: zwei neue Arten von Kräften

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung



wikipedia



Ladung, Größe und Masse der Kerne

Kernladungszahl Z

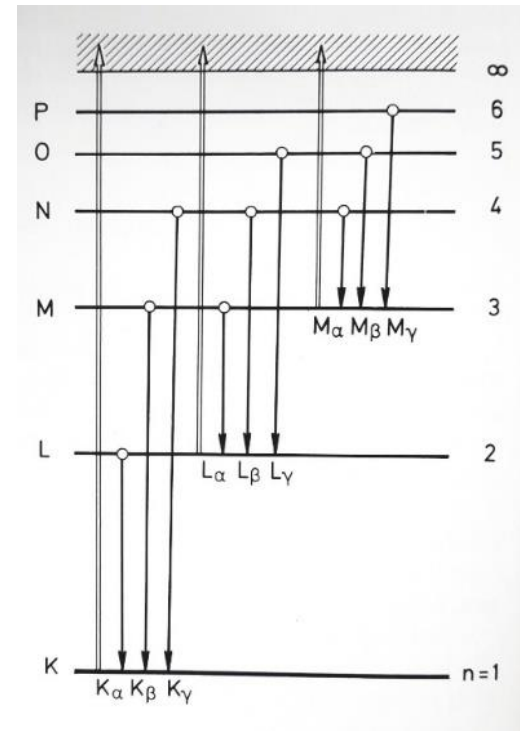
Z = Anzahl Protonen im Kern

Röntgen Spektren

- Frequenzen der K_α -Linien

$$\nu = Ry(Z - S)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

- Abschirmfaktor S , für Übergänge in $n_1 = 1$ ist $S \approx 1$



Kerngröße

Streuexperimente

- Bei zentralem Stoß ist

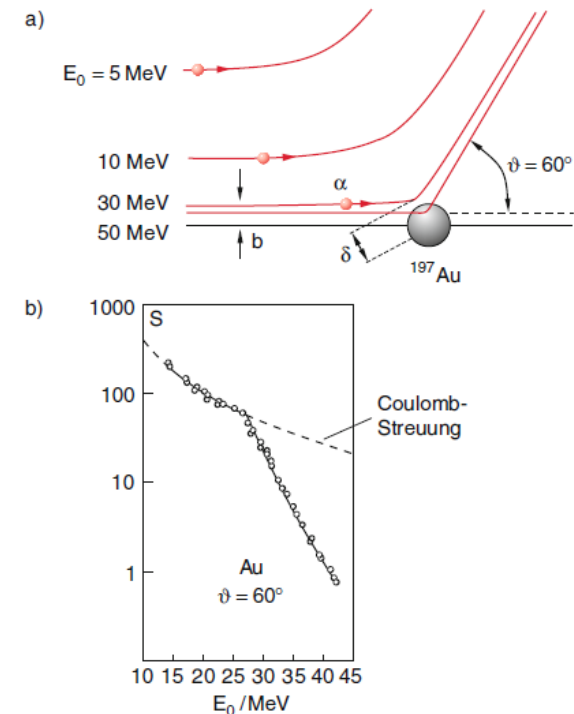
$$E_{kin} = E_{pot}$$

$$\frac{m}{2} v_0^2 = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \delta_0}$$

- mit δ_0 der minimale Abstand
- für nicht zentralen Stoß mit Stoßparameter b wird minimaler Abstand $\delta = \frac{\delta_0}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\vartheta}{2}} \right)$
- Abweichung von Coulomb Streuung lässt auf Kerngröße und Kernkräfte schließen

$$R_K \approx r_0 A^{1/3}$$

$r_0 = 1.3 \times 10^{-15} \text{m}$; $10^{-15} \text{m} = 1 \text{ Fermi}$
Nukleonenzahl A



fester Streuwinkel, variable Energie
Abweichung oberhalb kritischer Energie
 $\delta(E) \leq R_K$

Kernmasse

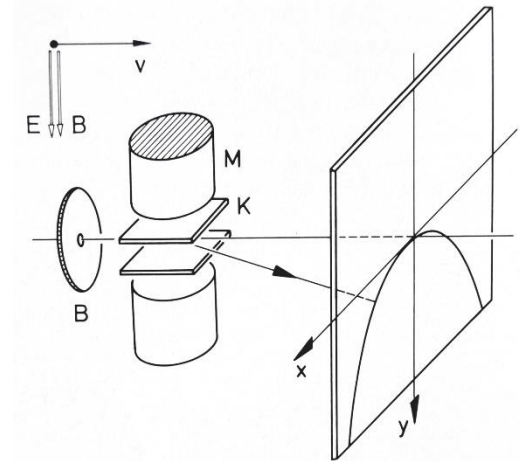
Bestimmung mit Massenspektrometer

- Bestimme e/m durch Ablenkung von ionisierten Atomen in elektrischen und magnetischen Feldern
- Methode von Thomson: Paralleles E und B Feld
- Erhalte Parabel für Teilchen fester Masse und Ladung aber variabler Geschwindigkeit v
- y - Ablenkung durch El. Feld $\propto 1/E_{kin}$
- x -Ablenkung durch mag. Feld $\propto 1/p = 1/mv$

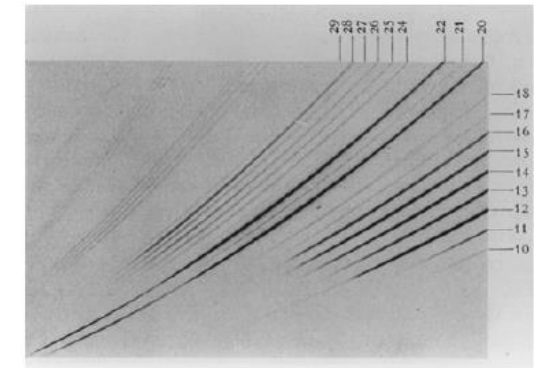
$$y = \frac{2E}{l^2 B^2} \frac{m}{e} x^2$$

- **Isotope:** Selbe Ladungszahl, versch. Massezahl
- Intensität der Linien zeigt Isotopenhäufigkeit
- Atomare Masseneinheit

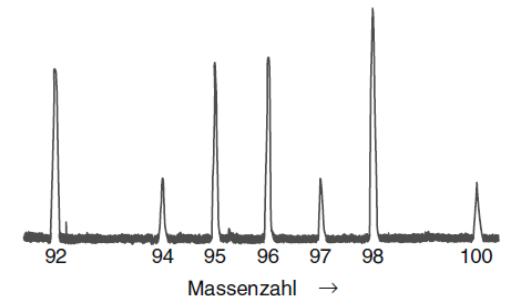
$$1 \text{ AMU} = \frac{1}{12} M\left({}^{12}_6\text{C}\right) = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$



Massenspektrum von Neon



Massenspektrum von Molybdän



Ladungsverteilung

- Bestrahlung mit schnellen Elektronen ermöglicht genaue Bestimmung von $\rho_e(r)$

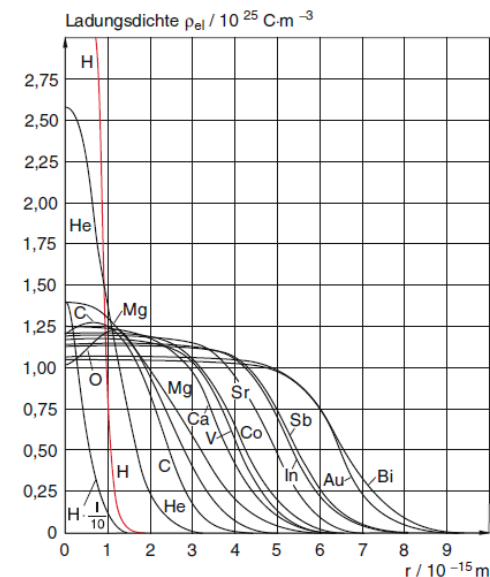
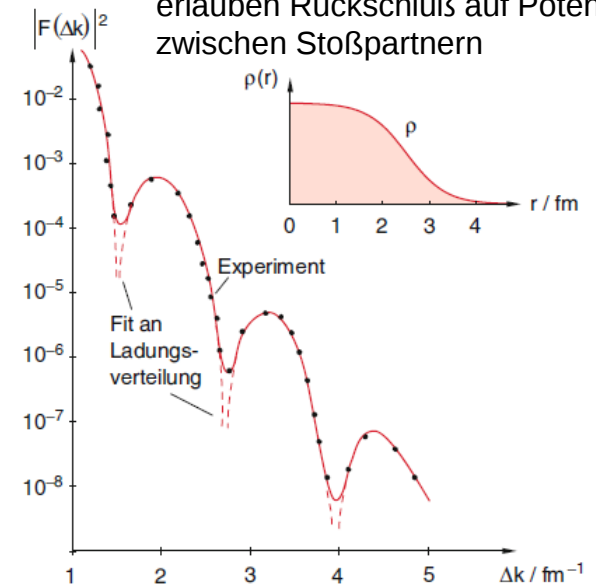
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Punkt}} F^2(q^2)$$

- mit Formfaktor

$$F^2(q^2) = \left| \int_V \rho_e(r) e^{i\hbar \Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} d^3r \right|^2$$

- Fourier Transformierte der Ladungsverteilung, folgt aus Betrachtung der Streuung im Wellenbild
- $q^2 = (p - p')^2 = (\hbar \Delta k)^2$ Impulsübertrag
- $F^2(q^2)$ beschreibt Unterschied von Streuung an punktförmiger Ladung (= Coulomb Potential) vs Streuung an Ladungsverteilung
- Näherungsweise konstante Ladungsdichte im Inneren, diffuser Rand
- Randdicke ist für schwere Kerne $\sim 2.4\text{fm}$
- i.A. nicht kugelsymmetrisch
- Ladungsverteilung weicht von Massenverteilung ab

Beugung führt zu Minima / Maxima, erlauben Rückschluß auf Potential zwischen Stoßpartnern



Neutronen, Nukleonen etc.

- Rutherford 1920: Kern aus Protonen und gleich schweren neutralen Teilchen
- Chadwick 1932: Entdeckung des Neutrons
- Wichtige Bezeichnungen der Kernphysik

Nuklidbezeichnung



Begriff	Erläuterung	Beispiel
Nukleonen	Protonen und Neutronen	
Nuklid	Kern A_ZX mit A Nukleonen: Z Protonen und $N = (A - Z)$ Neutronen	${}^7_3\text{Li}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$
Isotope	Kerne mit gleicher Protonenzahl Z , aber unterschiedlicher Neutronenzahl N	${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$; ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$
Isobare	Kerne mit gleicher Massenzahl A , aber verschiedener Protonenzahl Z	${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$;
Isotone	Kerne mit gleicher Neutronenzahl N , aber verschiedenen Werten von Z	${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{15}_7\text{N}$, ${}^{16}_8\text{O}$
Spiegelkerne	Kerne mit vertauschten Werten von Z und N ; $Z_1 = N_2$; $N_1 = Z_2$	${}^3_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$; ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{13}_7\text{N}$
Isomere Kerne	Kerne mit gleichen Z und N in ver- schiedenen Energiezuständen	${}^{12}_6\text{C} (E_1)$, ${}^{12}_6\text{C} (E_2)$

Kernspin

- Aus der Hyperfeinstruktur kann der Kernspin ermittelt werden

$$|I| = \sqrt{I(I+1)}\hbar$$

- Kernspin setzt sich zusammen aus Vektorsumme der Spins von Neutronen, Protonen (jew. $I = 1/2$), und Bahndrehimpulsen

$$I = \sum_i (I_i + L_i)$$

- Es gilt $\sum_i L_i = \mathbf{0}$ im Grundzustand der meisten stabilen Kerne

Massezahl A	Kernart (N,Z)	Kernspin Quantenzahl	Beispiel
ungerade	ug bzw gu	I halbzahlig	$I({}_1^1\text{H}) = 1/2$
gerade	gg	ganzzahlig, $I = 0$ im GZ	$I({}_6^{12}\text{C}) = 0$
gerade	uu	ganzzahlig, $I \geq 0$ im GZ	$I({}_7^{14}\text{N}) = 1$

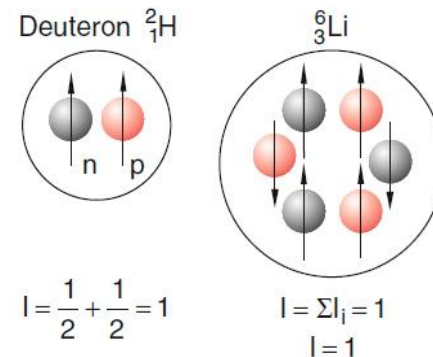
Kernspin

■ Bsp. Deuteron

$${}^2_1\text{H}: I = \sum I_p + I_n, I = 1$$

■ Bsp. Lithium

$${}^6_3\text{Li}: I = \sum I_p + I_n, I = 1$$



■ Magnetisches Kernmoment

$$\mu_I = g_I \mu_K \frac{I}{\hbar}$$

$$\mu_K = \frac{e}{2m_p} \hbar \quad \text{Kernmagneton}$$

$$g_I \quad \text{Landé Faktor}$$

■ Messung von μ_p aus Wasserstoff Feinstruktur oder Zeemaneffekt

Bindungsenergie

- Anziehende Kräfte zwischen Nukleonen führen zu Bindungsenergie
- Einstein'sche Relation $E = mc^2 \rightarrow$ negative Bindungsenergie entspricht Massendefekt

$$\Delta M = E_B / c^2$$

$$M_K = \sum m_p + \sum m_n - \Delta M$$

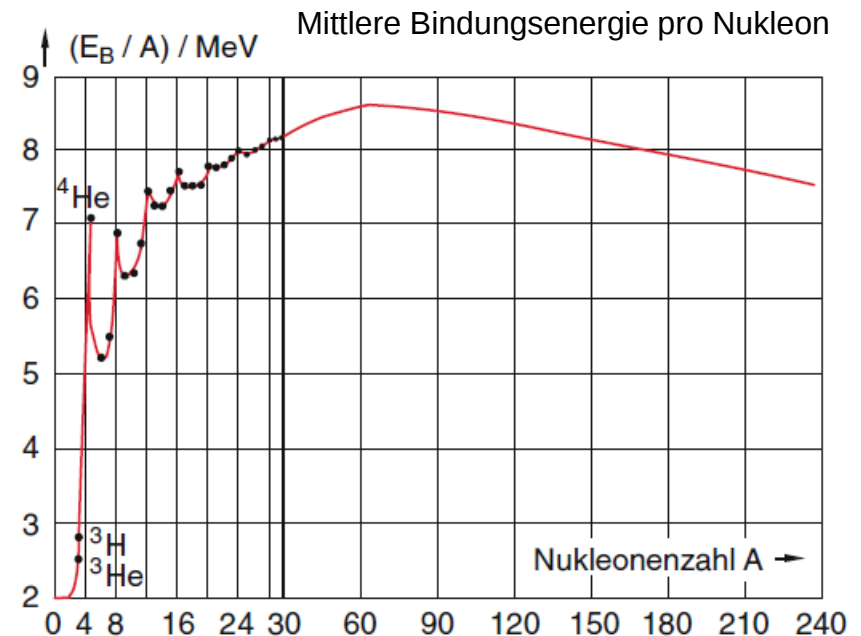
- Kernmasse ist kleiner als Gesamtmasse seiner freien Nukleonen
- Experimentelle Bestimmung mit Massenspektrometer

- Maximale Bindungsenergie pro Nukleon für $Z=62$

- Am stärksten gebundener Kern ${}^{62}_{28}\text{Ni}$

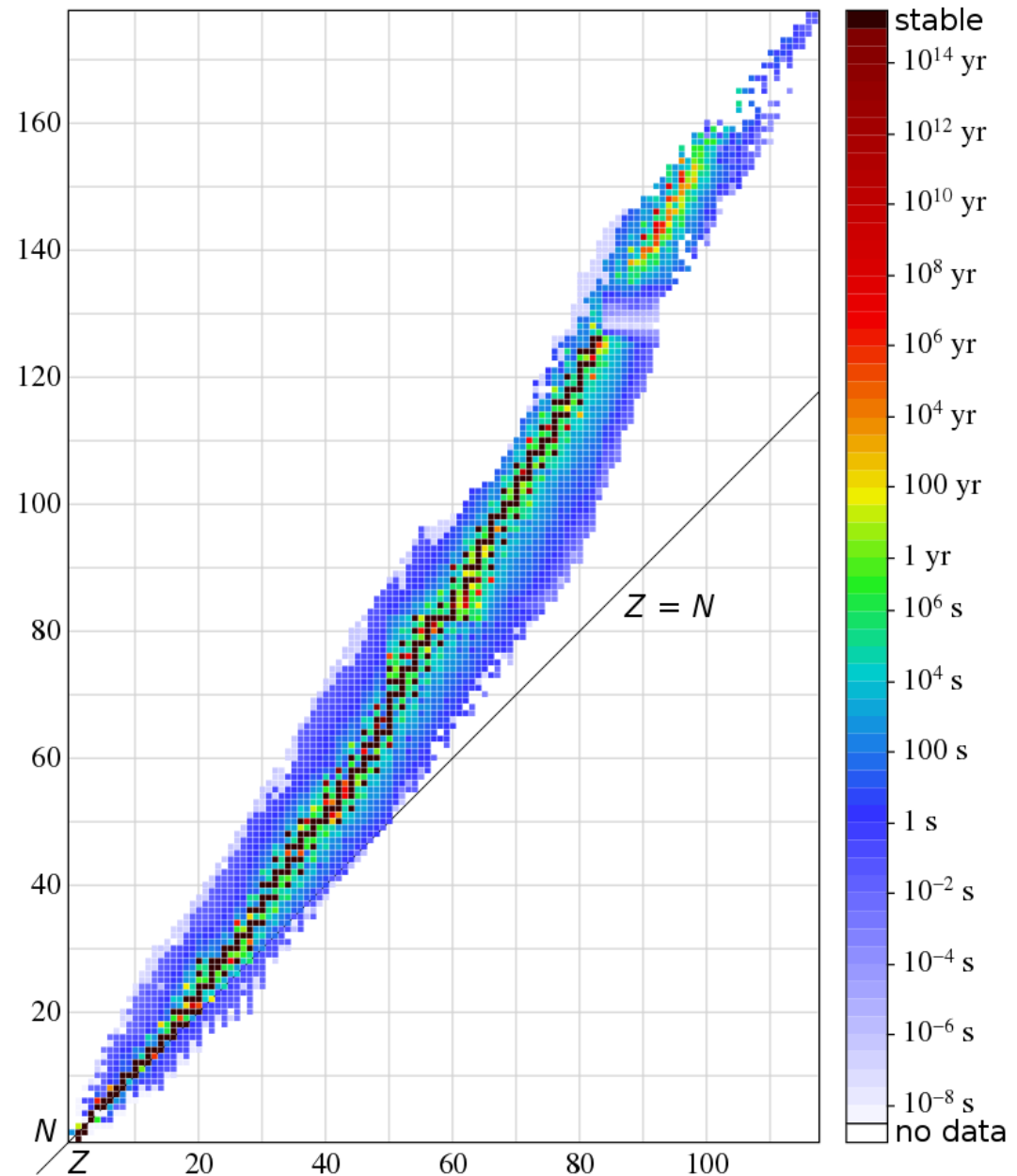
Energiegewinnung durch

- Verschmelzen von leichten Kernen (Kernfusion)
- Zerlegen von schweren Kernen (Kernspaltung)



Nuklidkarte

- Leichte Kerne liegen auf Geraden $Z = N$
- Schwerere Kerne liegen bei höheren Neutronenzahlen: Neutronen reduzieren Coulomb Abstoßung der Protonen
- viele Kerne sind instabil



Nukleonenkonfiguration

- Einfaches Modell der Kernkräfte: Kastenpotential mit Breite a

- Eigenenergien

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} k_n^2 \quad \text{mit} \quad k_n = n \frac{\pi}{a}$$

- Protonen und Neutronen haben $s = \frac{1}{2} \rightarrow$ Fermionen

- Pauli-Prinzip: Jeder Zustand kann max. von zwei Protonen und zwei Neutronen mit antiparallelem Spin besetzt werden

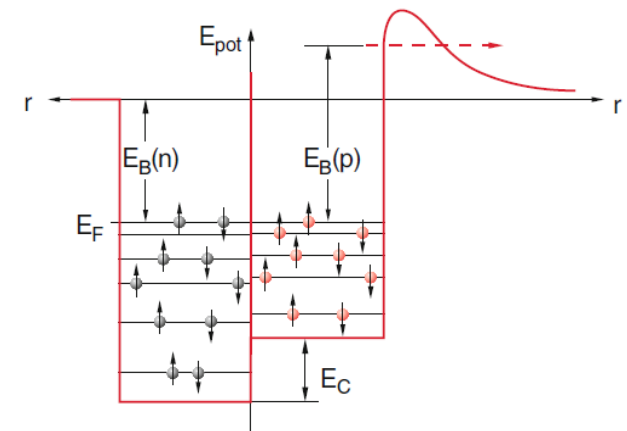
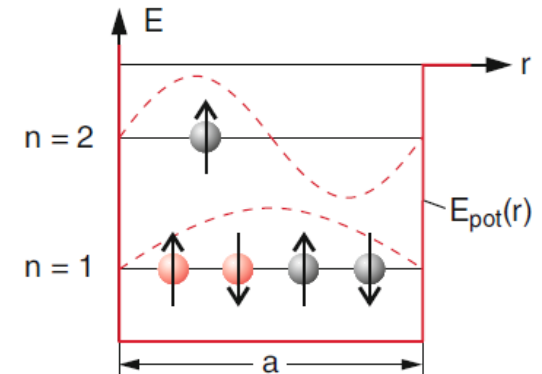
- Bei Protonen wirkt zusätzlich Coulomb Abstoßung $\rightarrow$ höhere Energie als die der Neutronen

- Zustände bis zur Fermi-Grenze E_F besetzt

- Energie zur Entfernung eines Nukleons:

- Neutron: $E_B(n)$

- Proton: $E_{B(p)} > E_B(n)$ wg. Coulomb Potential, effektiv etwas niedriger wg. Tunneln

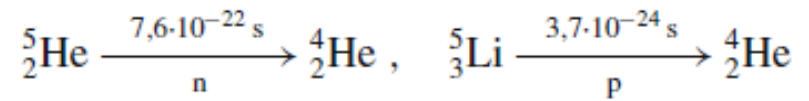
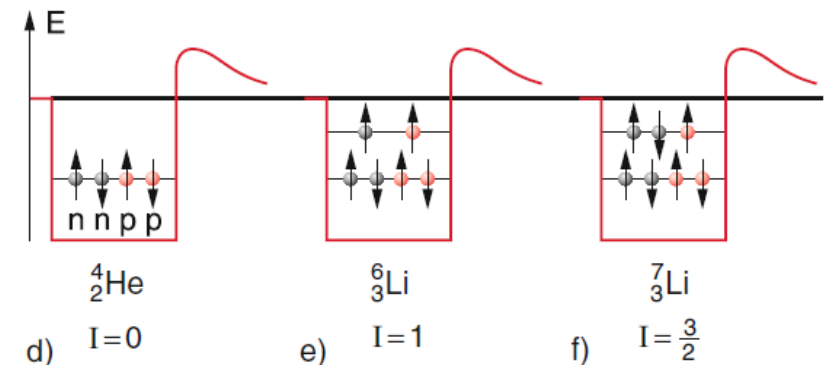
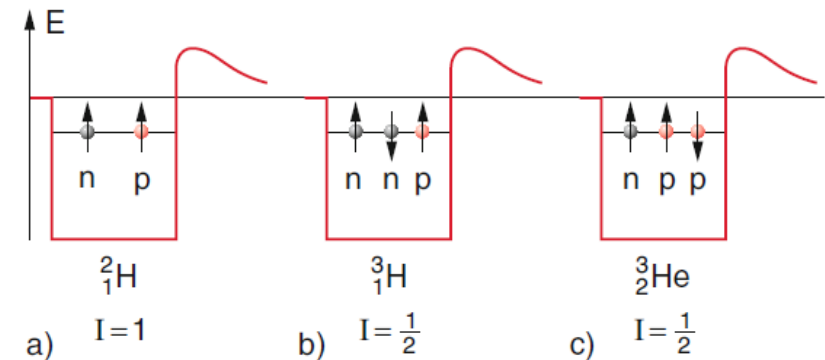


Nukleonenaufbau nach dem Pauliprinzip

- Aufbau analog zur Elektronenhülle gemäß Pauli Prinzip
- Zusätzlich: Bindungsenergie ist größer wenn Neutron und Proton parallelen Spin haben
- Ursache: Spin-abhängige Kernkraft

instabile Kerne

- He plus extra Neutron ${}^5_2\text{He}$
- He plus extra Proton ${}^5_3\text{Li}$
- In beiden Fällen ist nächst höheres Energieniveau $E > 0$, Kern zerfällt



Tröpfchenmodell

- Wegen homogener Dichte: Betrachte Kern als Flüssigkeitstropfen
- Nur nächste Nachbarn binden

„Klassische“ Beiträge zur Bindungsenergie

1. WW nur mit nächsten Nachbarn – Bindungsenergie pro Nukleon unabhängig von A , konstante Nukleonendichte

$$E_{B_1} = +a_V A$$

Volumenanteil

2. Nukleonen an der Oberfläche schwächer gebunden wg. fehlender Nachbarn; Oberfläche $\propto R^2 \propto A^{2/3}$

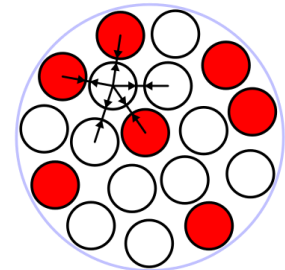
$$E_{B_2} = -a_S A^{2/3}$$

Oberflächenenergie

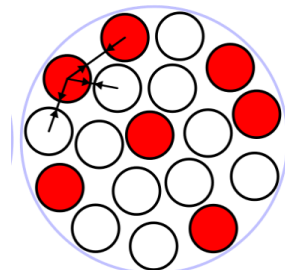
3. Coulomb Abstoßung $E_C \sim Z^2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 R$, mit $R = r_0 A^{1/3}$

$$E_{B_4} = -a_C Z^2 / A^{1/3}$$

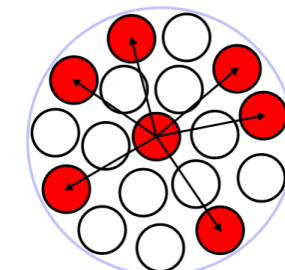
Coulomb Energie



Volumen



Oberfläche



Coulomb

Tröpfchenmodell

„Quanten“-Beiträge zur Bindungsenergie

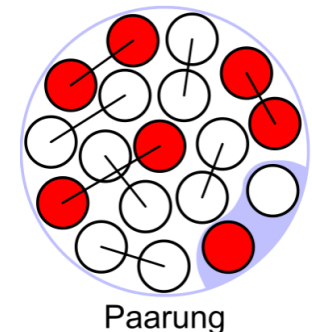
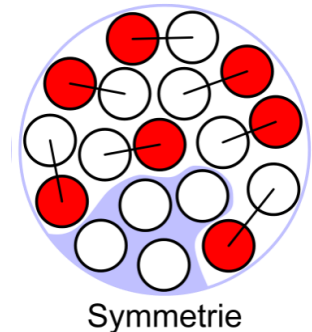
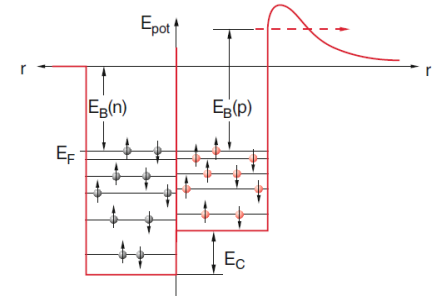
4. Pauli Prinzip: Minimale Energie für $Z=N$. Zusätzliche Neutronen erhöhen Fermi-Energie und damit kinetische Energie aller Nukleonen

$$E_{B_3} = -a_F (Z - N)^2 / A \quad \text{Asymmetrie Energie}$$

5. *gg* Kerne mit geradem Z, N stabil wegen Spin Paarung, *uu* Kerne weniger stabil

$$E_{B_5} = a_p A^{-1/2} \delta \quad \text{Paarungsanteil}$$

mit $\delta = \{+1 \text{ (gg)}, 0 \text{ (ug,gu)}, -1 \text{ (uu)}\}$



Tröpfchenmodell

Bethe-Weizsäcker Formel

$$\begin{aligned}
 E_B &= \Delta M c^2 = (Z m_p + N m_n - M_K) c^2 \\
 &= a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_F (N - Z)^2 A^{-1} \\
 &\quad - a_C Z^2 A^{-1} + \delta a_P A^{-1/2}
 \end{aligned}$$

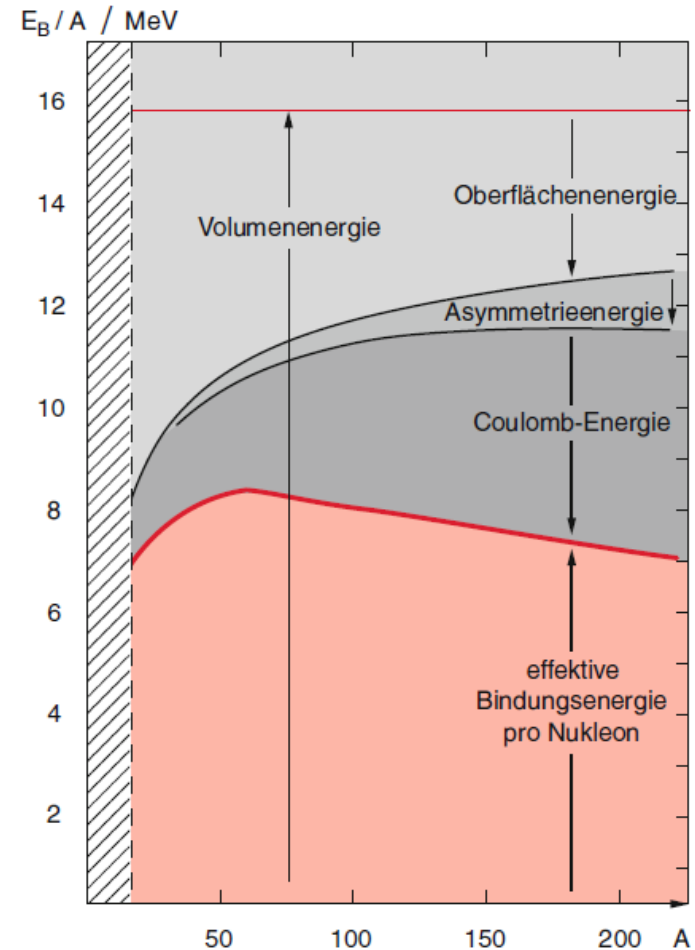
$$a_V = 15,84 \text{ MeV} ,$$

$$a_S = 18,33 \text{ MeV} ,$$

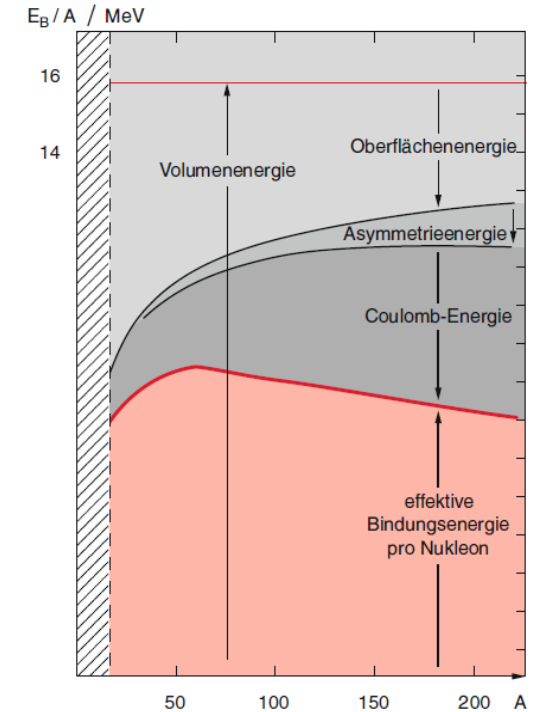
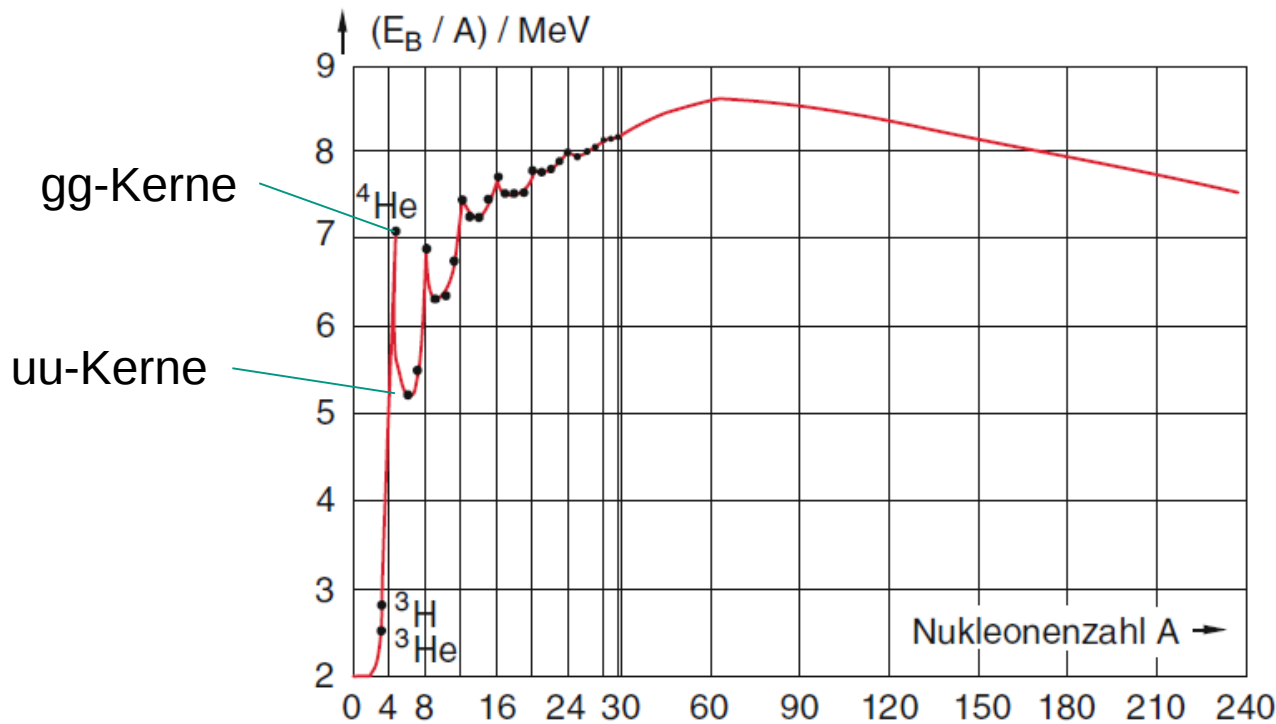
$$a_F = 23,2 \text{ MeV} ,$$

$$a_C = 0,714 \text{ MeV} ,$$

$$a_P = 12 \text{ MeV} .$$



Tröpfchenmodell



Kernkräfte

- Anziehende Kräfte zwischen Nukleonen müssen weit stärker als Coulomb Kraft sein
- Homogene Massendichte, unabhängig von Kerngröße bedeutet kurze Reichweite der Kraft

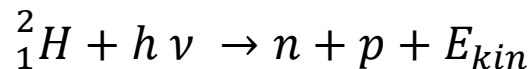
einfachstes System zur Untersuchung von Nukleon-Nukleon Kräften:

Deuteron ${}^2_1H = D = p - n$

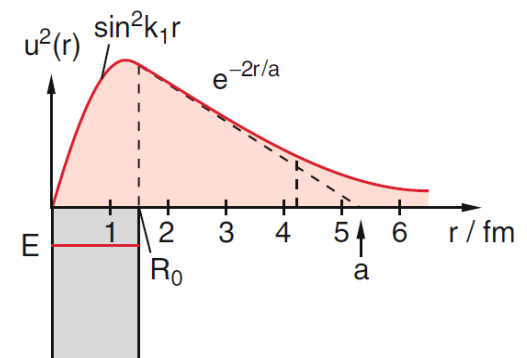
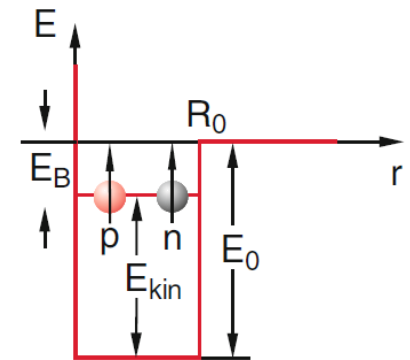
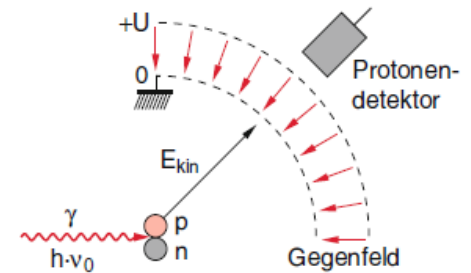
- einzig stabiles 2-Nukleon System (p-p, n-n instabil)

Bestimmung der Bindungsenergie

- Photospaltung mit γ Quanten



geringe Bindungsenergie $E_B = -2.2\text{MeV}$



Meson-Austauschmodell der Kernkräfte

Coulomb Wechselwirkung im Austauschmodell

- Bei der Streuung zweier Elektronen wird elektromagnetische Strahlung emittiert → beschleunigte Ladungen, Bremsstrahlung

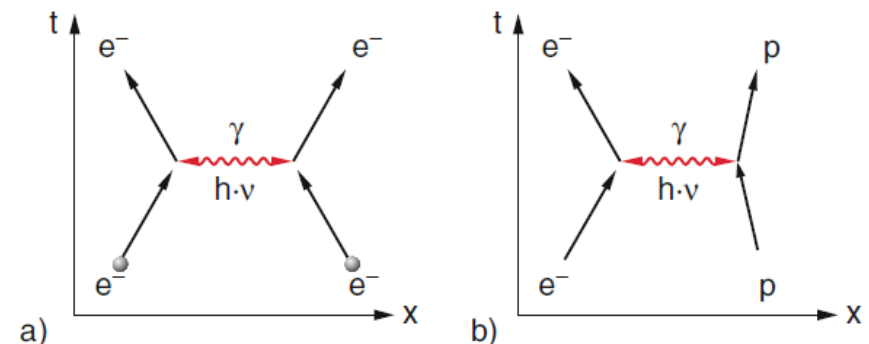
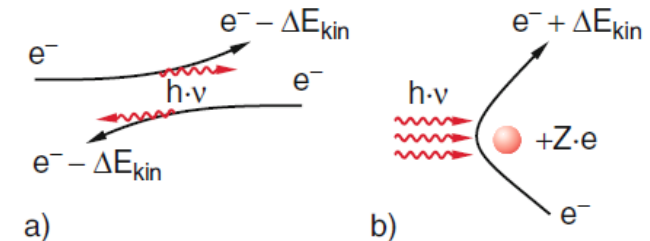
$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^- - \Delta E_{kin} + h\nu$$

- Umgekehrter Prozess: Streuung in Laserstrahl „inverse Bremsstrahlung“

$$e^- + e^- + h\nu \rightarrow e^- + e^- + \Delta E_{kin}$$

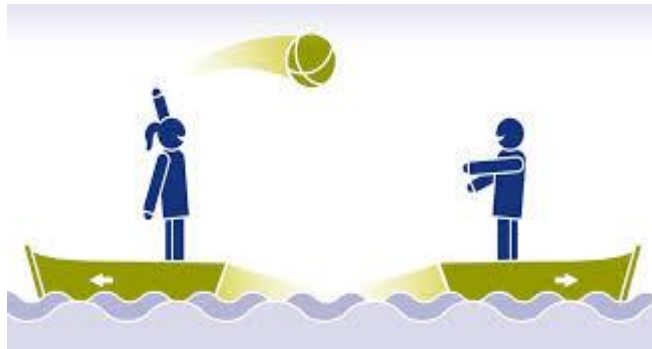
- Allgemein: Bei der WW zwischen elektrischen Ladungen werden **virtuelle Photonen** $h\nu$ emittiert und absorbiert

- Feynman-Diagramm



Austauschkräfte: Anschauliches Bild

Kräfte als Austausch von einzelnen Teilchen



Austauschkraft

- Erzeugung eines Photons erfordert Energie $E = h\nu$
- Heisenberg'sche Unschärfe

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$\rightarrow \Delta t \leq \frac{\hbar}{h\nu} = \frac{1}{2\pi\nu}$$

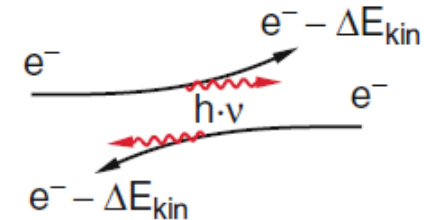
- das Photon kann nur die Zeit Δt existieren
- die Zeit hängt von der Entfernung r zwischen den wechselwirkenden Teilchen ab:

$$\Delta t = r/c$$

- Photonenergie muss mit r abnehmen

$$h\nu \leq \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{\hbar c}{r}$$

- Coulomb Wechselwirkung ist proportional zur Energie der Austauschphotonen $E_C \propto 1/r$



Inelastische Nukleonenstreuung

- Streuung von Nukleonen aneinander
- bei hohen Energien $> 200\text{MeV}$ beobachtet man neue Teilchen
 π – Mesonen oder Pionen

■ Inelastische Streuprozesse

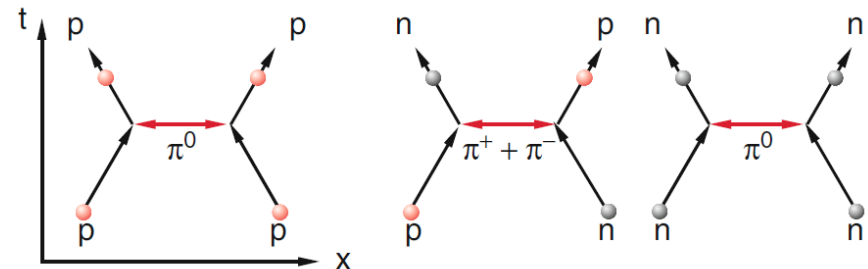
$$p + p \Rightarrow p + p - \Delta E_{\text{kin}} + \pi^0$$

$$\rightarrow p + n - \Delta E_{\text{kin}} + \pi^+$$

$$p + n \Rightarrow p + n - \Delta E_{\text{kin}} + \pi^0$$

$$\rightarrow p + p - \Delta E_{\text{kin}} + \pi^-$$

$$\rightarrow n + n - \Delta E_{\text{kin}} + \pi^+$$



- π – Mesonen sind die virtuellen Austauschteilchen der starken Wechselwirkung

Austauschmodell der starken Kernkraft

Hideki Yukawa, Nobelpreis 1949

- Bindungsenergie der starken WW proportional zur Massenenergie $E = mc^2$ der Austauscheteilchen
- Elektromagnetische WW: Photonen mit Ruhemasse 0
→ unendliche Reichweite, $V_C(r) \propto 1/r$

- Pionen mit Masse m_π

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \text{ mit } \Delta E = m_\pi c^2, r \leq c \Delta t$$

Reichweite $r \leq r_0 = \frac{\hbar}{m_\pi c}$

- Ruheenergie des Pions: $m_\pi c^2 = 139 \text{ MeV}$

$$\rightarrow r_0 = 1.4 \text{ fm}$$

- Nur wenig größer als der Radius des Protons
→ Kernkraft wirkt nur zwischen direkt benachbarten Nukleonen

- Erklärt konstante Nukleonendichte auch schwerer Kerne



Yukawa Potential

$$V(r) = \frac{g}{r} e^{-r/r_0}$$

$$m_{\pi^+}, m_{\pi^-} > m_{\pi^0}$$

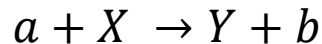
→ n-p Bindung stärker
als n-n, p-p Bindung

Kernreaktionen

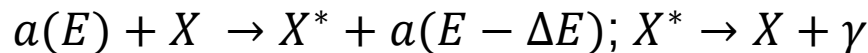
Kernreaktionen

- Inelastische Stöße mit Kernanregung, Kernspaltung, Erzeugung neuer Teilchen

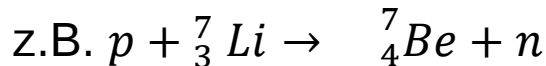
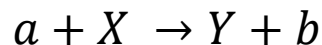
- Projektil a , Kern (X,Y) , emittiertes Teilchen b



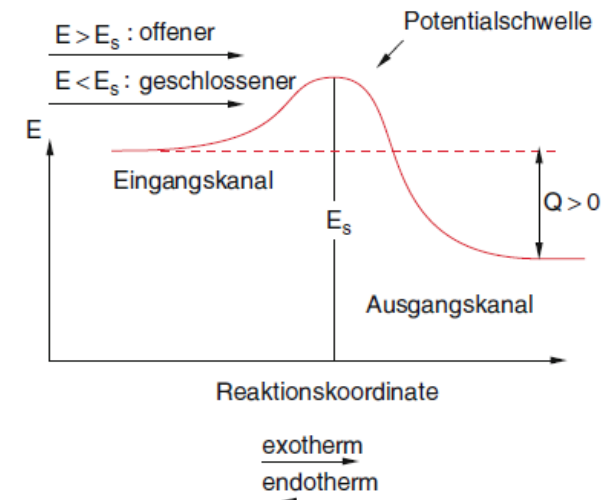
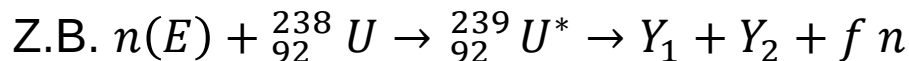
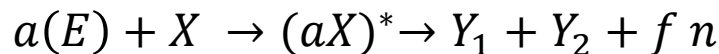
- Inelastische Streuung



- Reaktive Streuung



- Stoßinduzierte Kernspaltung



Massenbilanz

$$M(a) + M(X) = [M(b) + M(Y)] + Q/c^2, \text{ „Wärmetönung } Q\text{“}$$

- $Q > 0$: Reaktion exotherm
- $Q < 0$: Reaktion endotherm

Erhaltungssätze

- Energie und Impulserhaltung

- Erhaltung der Nukleonenzahl

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

- Erhaltung der elektrischen Ladung

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

- Drehimpuls Erhaltung

$$J(a + X) = I_a + I_X + L_{aX} = J(b + Y) = I_b + I_Y + L_{bY}$$

- Erhaltung der Parität (Verhalten bei Koordinatenspiegelung am Ursprung)

$$Y_l^m(\pi - \theta, \phi + \pi) = (-1)^l Y_l^m(\theta, \phi)$$

$$P_{a+X} = P_a P_X (-1)^{l_{aX}} = P_{b+Y} = P_b P_Y (-1)^{l_{bY}} \text{ mit } P_a, P_X \text{ „innere Parität“}$$

→ Spin

Instabile Kerne, Radioaktivität

- Kerne sind instabil wenn sie sich nach einer endlichen Lebensdauer spontan unter Aussendung von Strahlung umwandeln: Radioaktivität

- Zerfallsgesetz

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

mit Aktivität $A(t)$, $[A] = Bq$ Becquerel $[1/s]$

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

Zerfallskonstante $\lambda = 1/\tau$

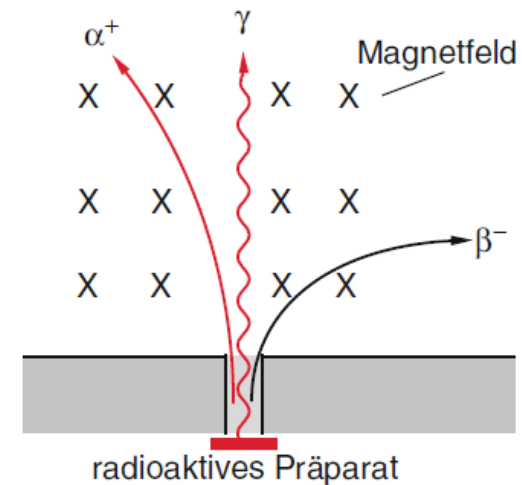
$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}, A_0 = \lambda N_0$$

- Halbwertszeit $N(t_1) = \frac{N_0}{2}$

$$t_1 = \tau \ln 2$$

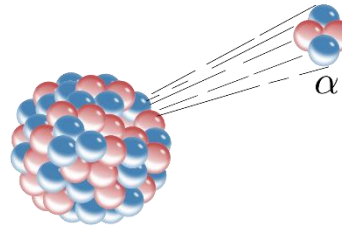
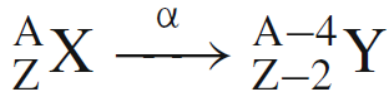
Natürliche Radioaktivität

- Alpha Teilchen: He Kerne
- Beta Teilchen: Elektronen
- Gamma Teilchen: Photonen

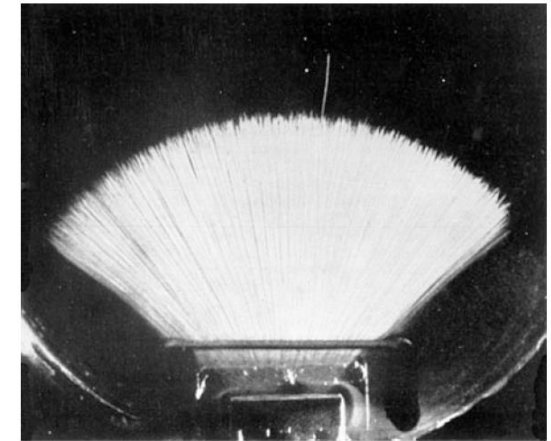


Alphazerfall

- Emission eines He Kerns



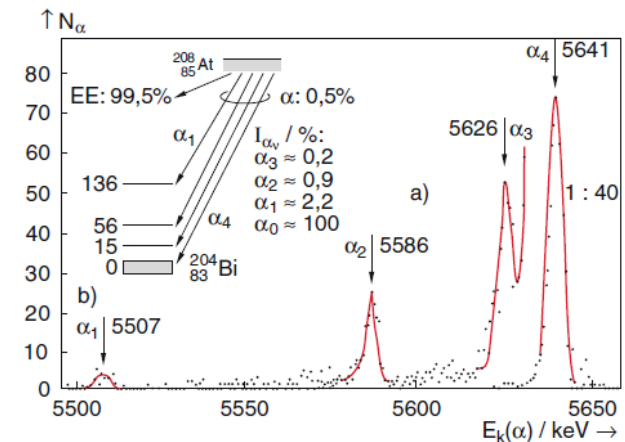
- Nachweis in Nebelkammer



- Meisten Teilchen haben selbe Reichweite / kinetische Energie

- Energiespektrum (z.B. Mit Halbleiterzähler, Szintillationszähler) zeigt diskrete Linien

- Mit $E_{kin} = E_1 - E_2$ zeigen α –Teilchen Anregungszustände von Mutter oder Tochterkern



Alphazerfall

Gamow Modell

- Kern kann aus gebundenen Nukleonen ein α – Teilchen bilden
- Durch besonders große Bindungsenergie wird kinetische Energie frei
- α – Teilchen kann Kern durch Tunneln verlassen
- Tunnelwahrscheinlichkeit für kleine λ_{dB}

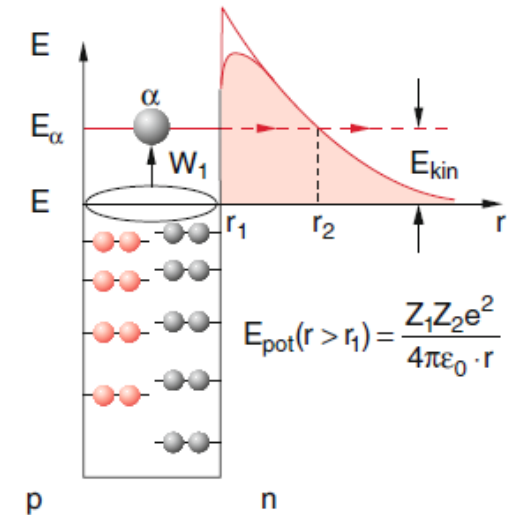
$$T = T_0 e^{-G},$$

$$G = \frac{2\sqrt{2}}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{(E_C - E)} dr \quad \text{Gamow Faktor}$$

- Zerfallswahrscheinlichkeit

$$W = W_0 W_1 T$$

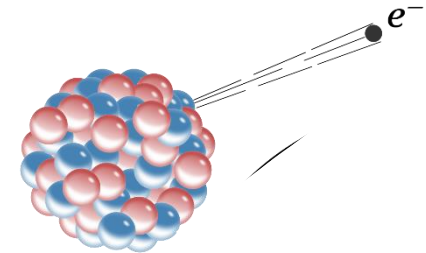
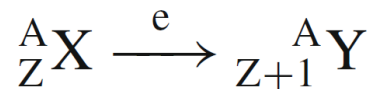
- W_0 Wahrscheinlichkeit, ein α – Teilchen zu bilden
- W_1 Rate mit der Teilchen an Potentialwall stößt
- T Transmissionswahrscheinlichkeit



Isotop	E_α / MeV	$t_{1/2}$
$^{212}_{84}\text{Po}$	8,78	0,3 μs
$^{224}_{88}\text{Ra}$	5,7	3,64 d
$^{228}_{90}\text{Th}$	5,42	1,91 a
$^{238}_{94}\text{Pu}$	5,5	$8,8 \cdot 10^1$ a
$^{230}_{90}\text{Th}$	4,68	$7,5 \cdot 10^4$ a
$^{235}_{92}\text{U}$	4,6	$7,1 \cdot 10^8$ a

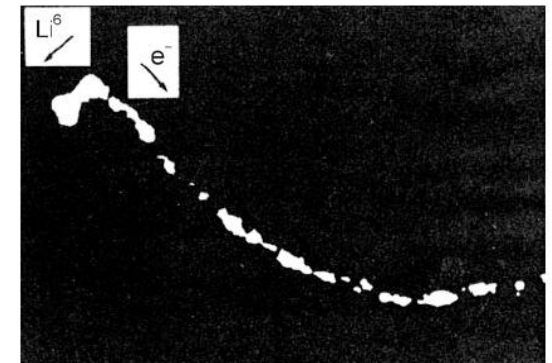
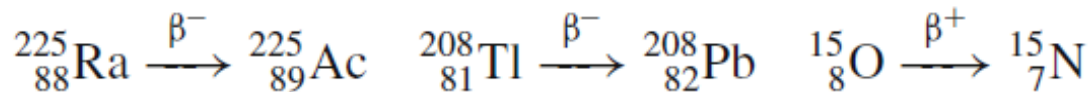
Betazerfall

- Emission eines Elektrons / Positrons aus einem Kern



- dabei wird ein Neutron in ein Proton (umgekehrt für β^+ Zerfall) umgewandelt

Beispiele

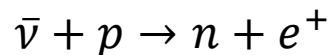


- Kontinuierliche Energieverteilung
- Maximale Energie hängt vom jew. Kern ab
- Oft wird Mutterkern und Elektron in gleichen Halbraum emittiert → brauche weiteres Teilchen

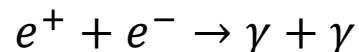
Betazerfall

Neutrinohypothese

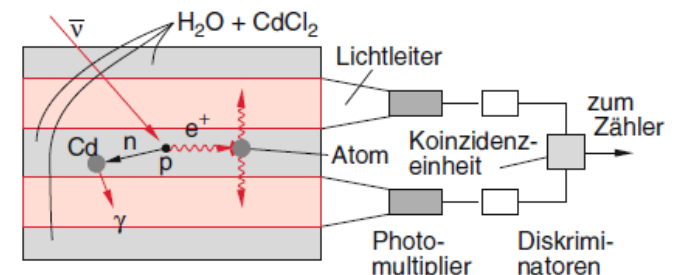
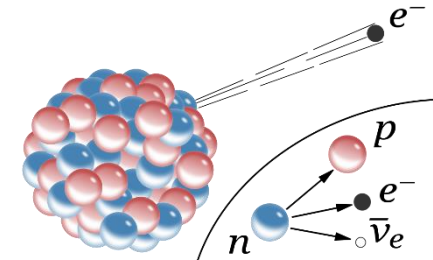
- weiteres Teilchen, Neutrino ν , wird beim β -Zerfall emittiert
- Neutral, Spin $\frac{\hbar}{2}$,
- Masse aus maximaler Energie im β -Energiespektrum
- Antiteilchen: Antineutrino $\bar{\nu}$
- Experimenteller Nachweis erst 1955 mit β -Zerfällen in Kernreaktoren



- Antineutrino wird von einem Proton eingefangen
- Positron annihiliert bei Stoß mit Elektron in Atomhülle

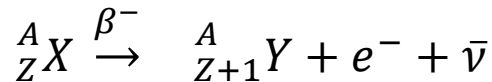


- Strahlung kann mit Szintillatoren nachgewiesen werden

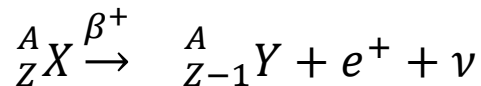


Betazerfall

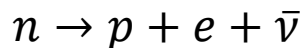
■ β^- Zerfall



■ β^+ Zerfall (Positronen Emission)



■ Zerfall freier Neutronen

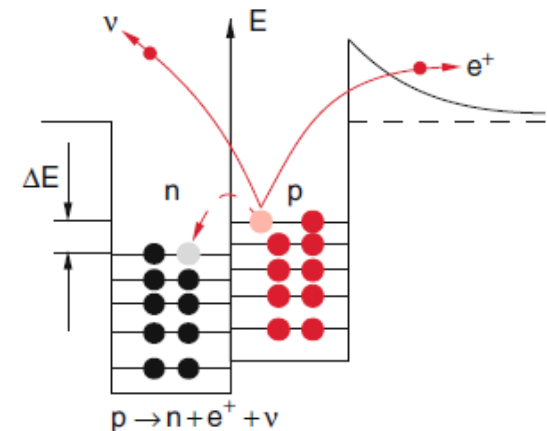
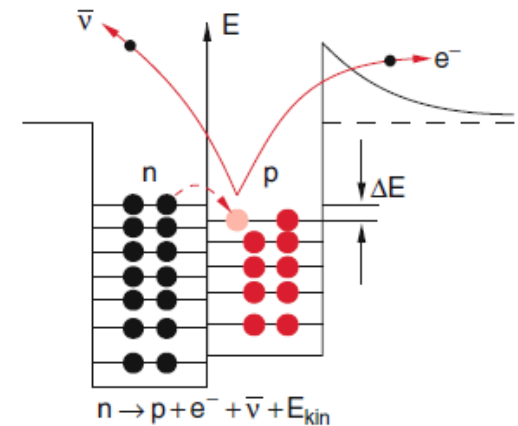
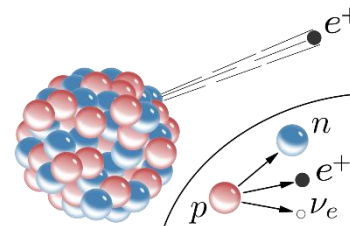
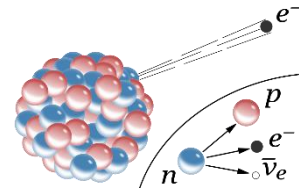


- Exotherme Reaktion wegen größerer Neutronenmasse $\rightarrow$ Neutron zerfällt spontan mit mittlerer Lebensdauer von 887 s

- freies Proton ist stabil

- Im Kern ist Neutronenzerfall nur möglich wenn die Energie des Tochterkerns niedriger ist als die des Mutterkerns

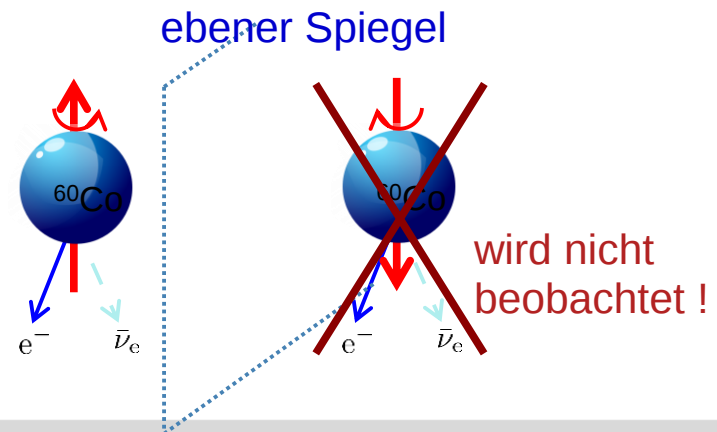
- Zerfall gebundener Protonen



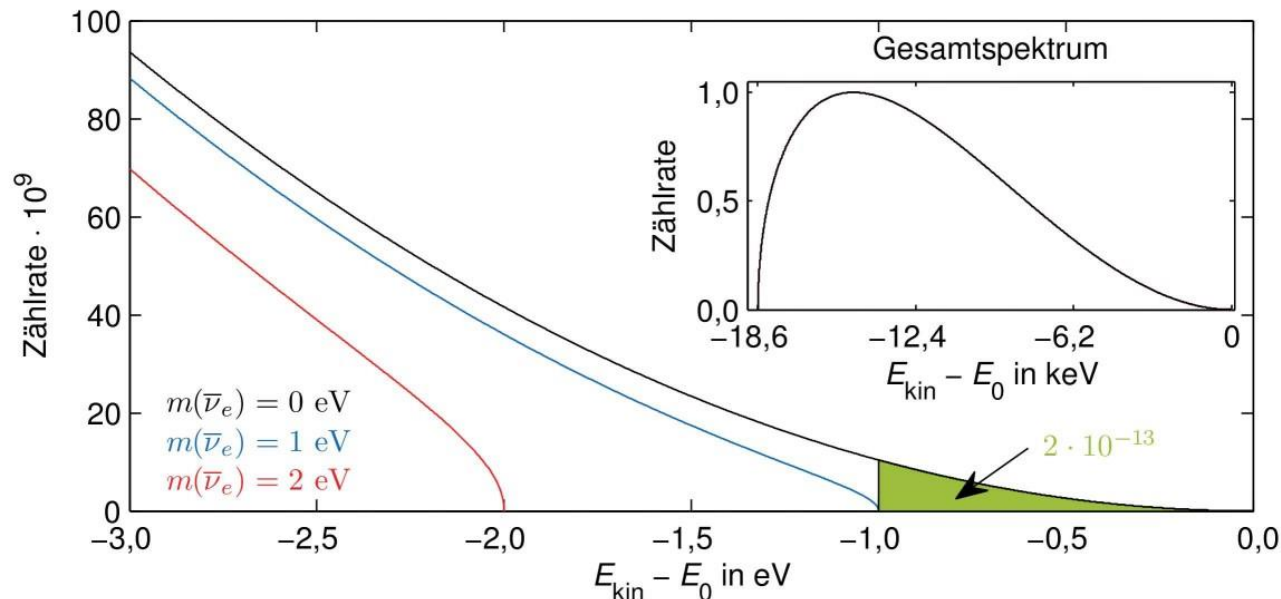
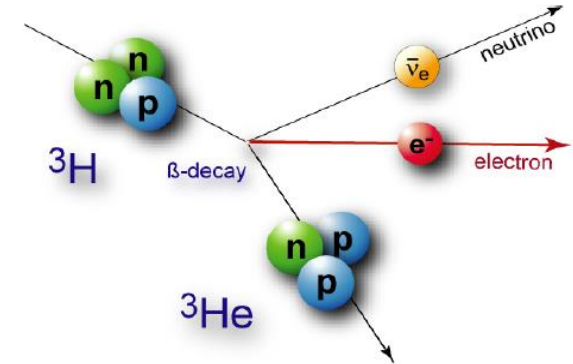
Schwache Kernkraft

β – Zerfall wird durch die **Schwache Kernkraft** verursacht

- bewirkt Energie- und Impulsaustausch beim β^- Zerfall
- Drei Austauschteilchen: $W^\pm, Z^0$
- Sehr schwer: $M_W = 80 \frac{GeV}{c^2}$ $M_Z = 91 \frac{GeV}{c^2}$
 $\rightarrow$ extrem kurze Reichweite $\sim 10^{-18}m$
- Erstmals 1983 in Proton-Antiproton Kollisionen am CERN beobachtet
- Schwache Kraft verletzt die Spiegelsymmetrie, **Paritätsverletzung**
- Erstmals im Zerfall $^{60}Co \rightarrow ^{60}Ni + e^- + \bar{\nu}_e + 2\gamma$ beobachtet
Chien-Shiung Wu (1957)



- Bestimmung der Neutrino Masse aus Tritium Zerfall
- ${}^3_1T \rightarrow {}^3_2He + e + \bar{\nu}$
- 18.6keV Zerfallsenergie= Massendifferenz Tritium – 3He – teilt sich auf Stoßpartner auf.
- Bei verschwindender Neutrinomasse kann das Elektron die volle Zerfallsenergie tragen, bei endlicher Masse nur weniger



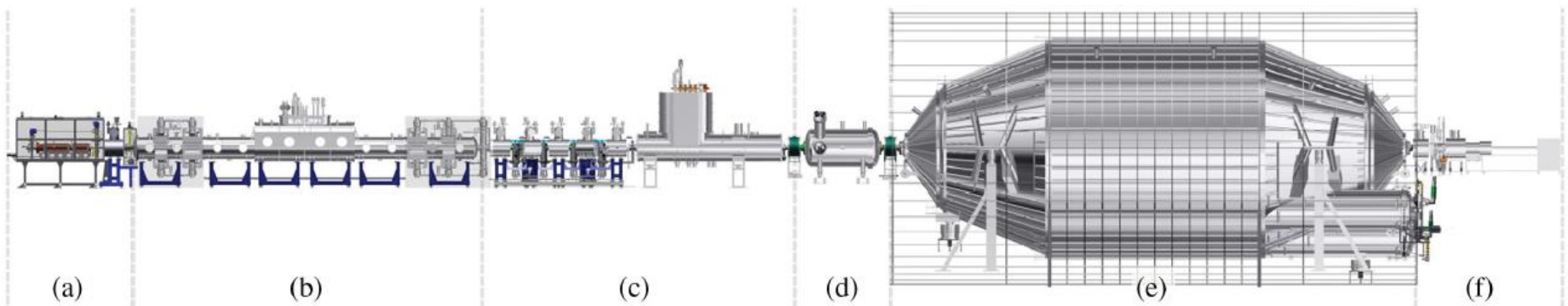
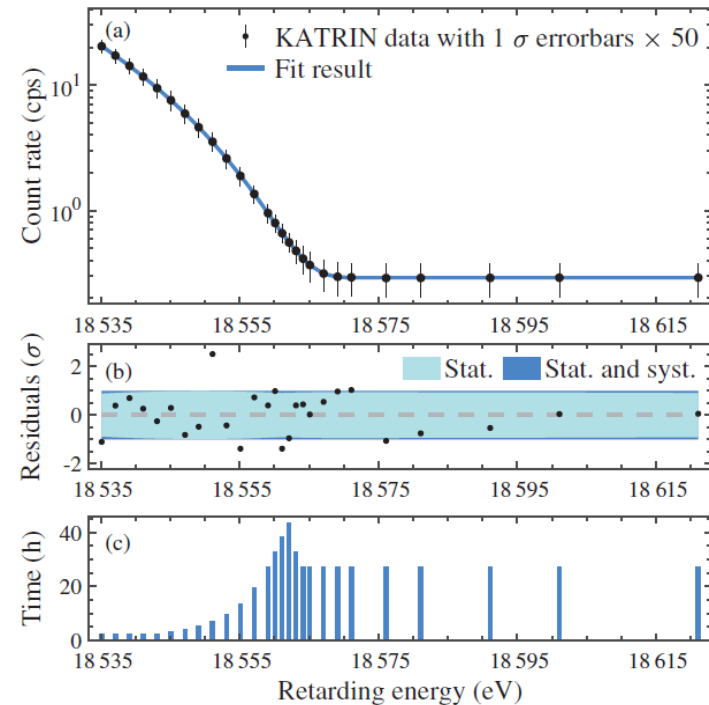
KATRIN

- Hauptspektrometer Ø 10m, Länge 24m, Gewicht 200t
- Zu groß für Autobahntransport
→ 8600km Transport auf Seeweg
- Seit 2006 am KIT



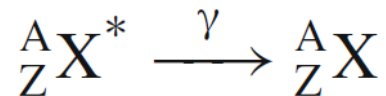
KATRIN

- Neue Ergebnisse in 2022
- Neutrinomasse < 0.9 eV
- Messung mit 5×10^{-5} Genauigkeit
- erreicht durch elektrostatischen Filter – lässt nur Elektronen mit Energie nahe 18.6keV durch mit energieabhängiger räumlicher Verteilung
- Ziel: 0.2eV Auflösung



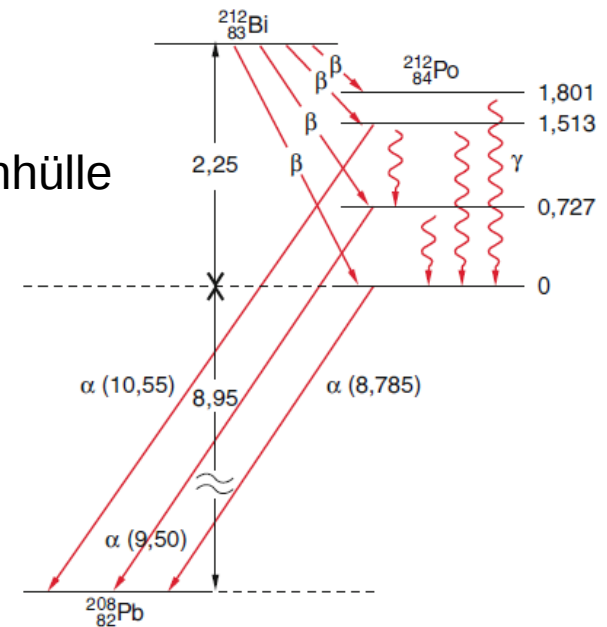
Gammazerfall

- Emission eines hochenergetischen Photons (γ – Quant) von einem angeregten Kern



- Emission eines γ Quants bei Kernzerfällen: Korreliert mit β oder α Strahlung
- Annihilationsstrahlung

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$
- Analog zu diskreten Übergängen in der Elektronenhülle
- Hohe Energie ($10^4 - 10^7$ eV)



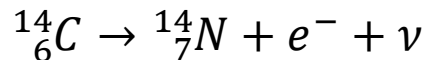
Neutronenemission: Anwendung Radiokarbondatierung

Neutronen aus der kosmischen Höhenstrahlung wandeln mit konstanter Rate

Stickstoff in Kohlenstoff um: $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$

$$\frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})} = 10^{-12}$$

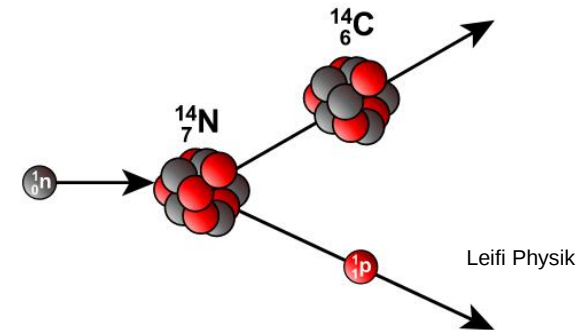
- ^{14}C ist instabil, Halbwertszeit $t_c = 5715$ Jahre



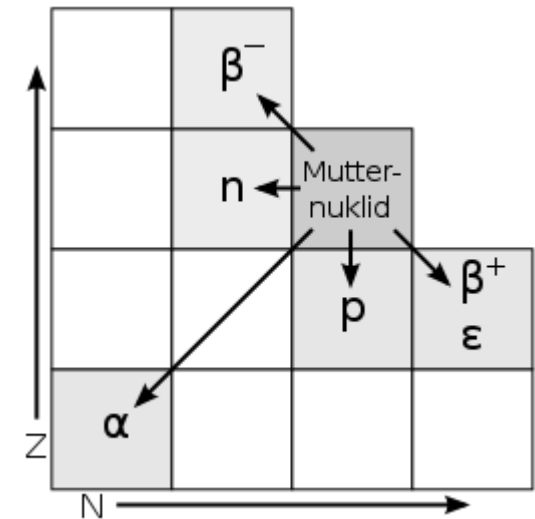
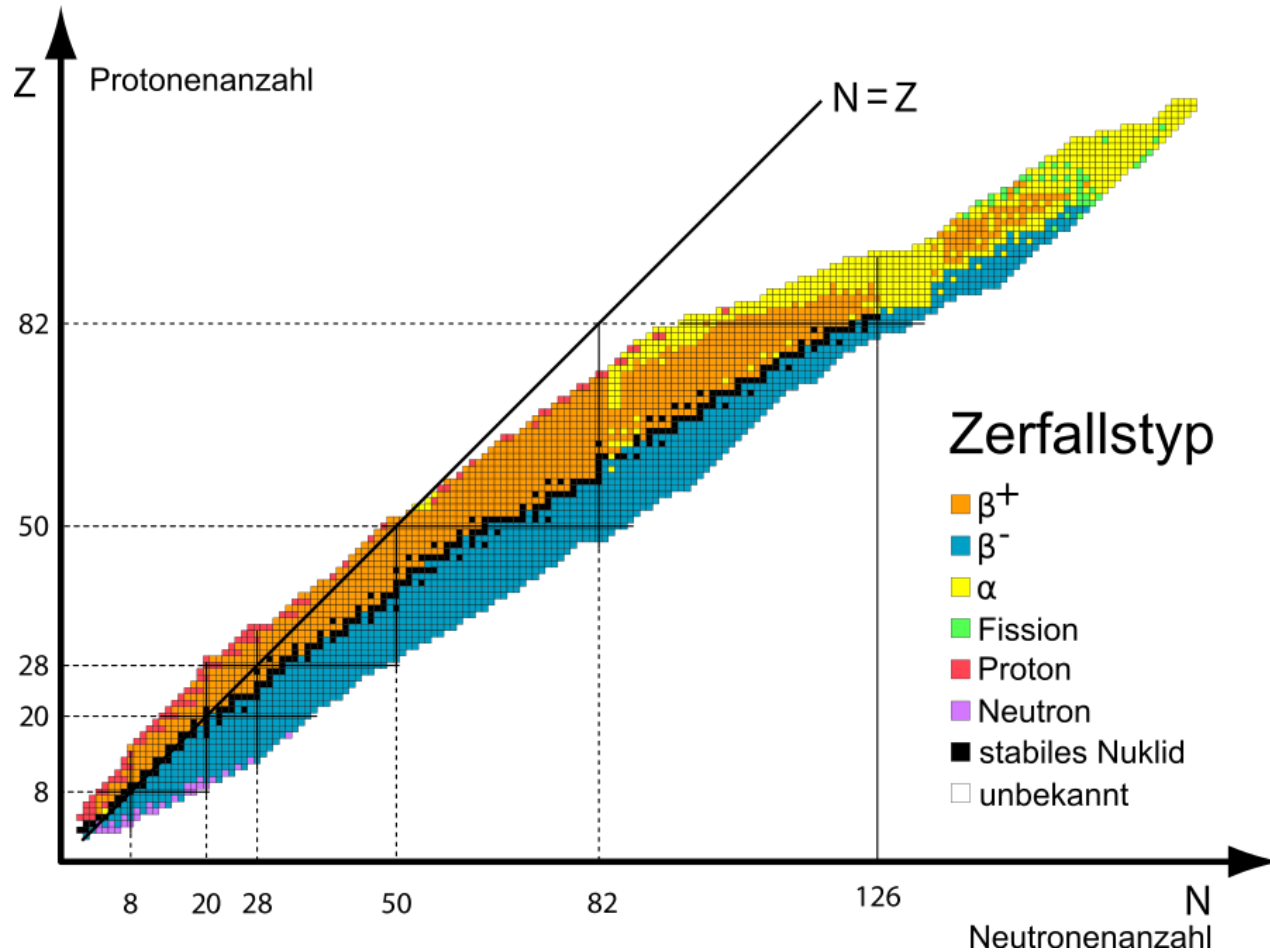
- Lebewesen nehmen Kohlenstoff auf, bauen ihn in organisches Material ein.
- Wenn der Stoffwechsel endet, findet kein Austausch mehr statt
- ^{14}C zerfällt, Verhältnis ändert sich mit der Zeit

$$\frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})}(t) = \left(\frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})} \right)_{\text{Luft}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right) \quad \text{mit } \tau_c = t_c / \ln 2$$

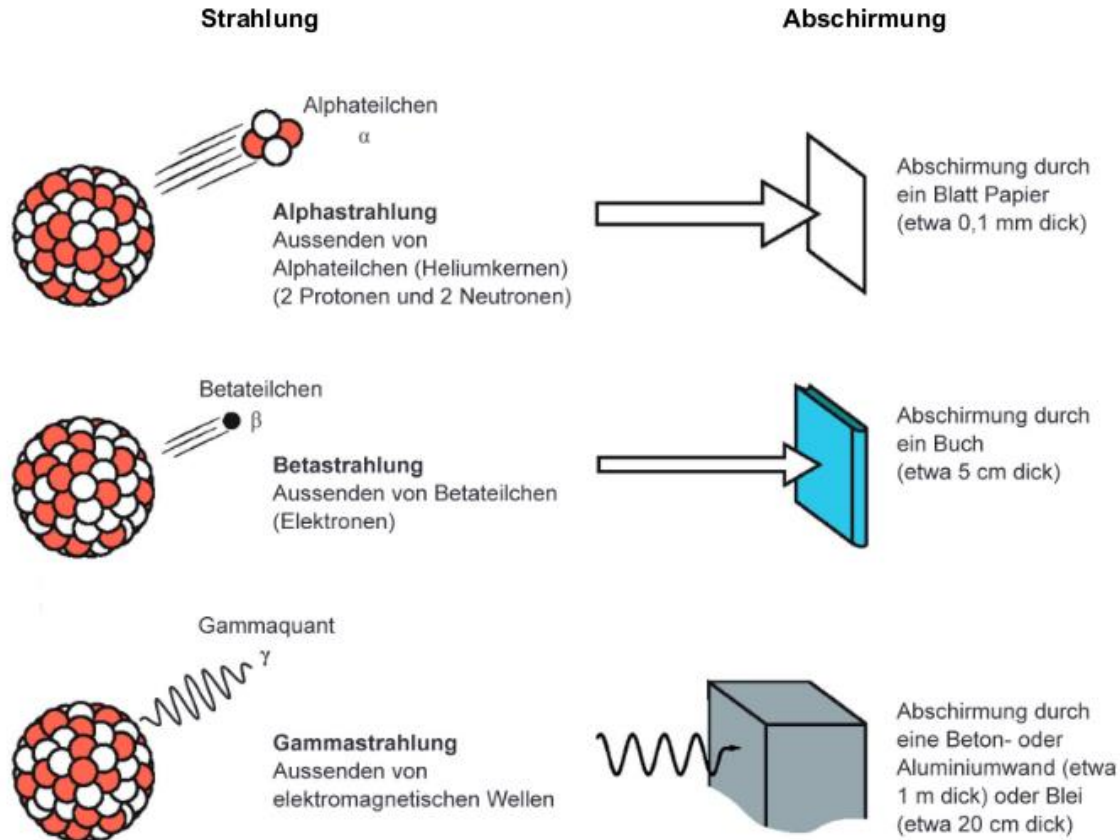
- Bestimmung des ^{14}C Anteils kann das Alter organischer Proben bestimmt werden



Nuklidkarte

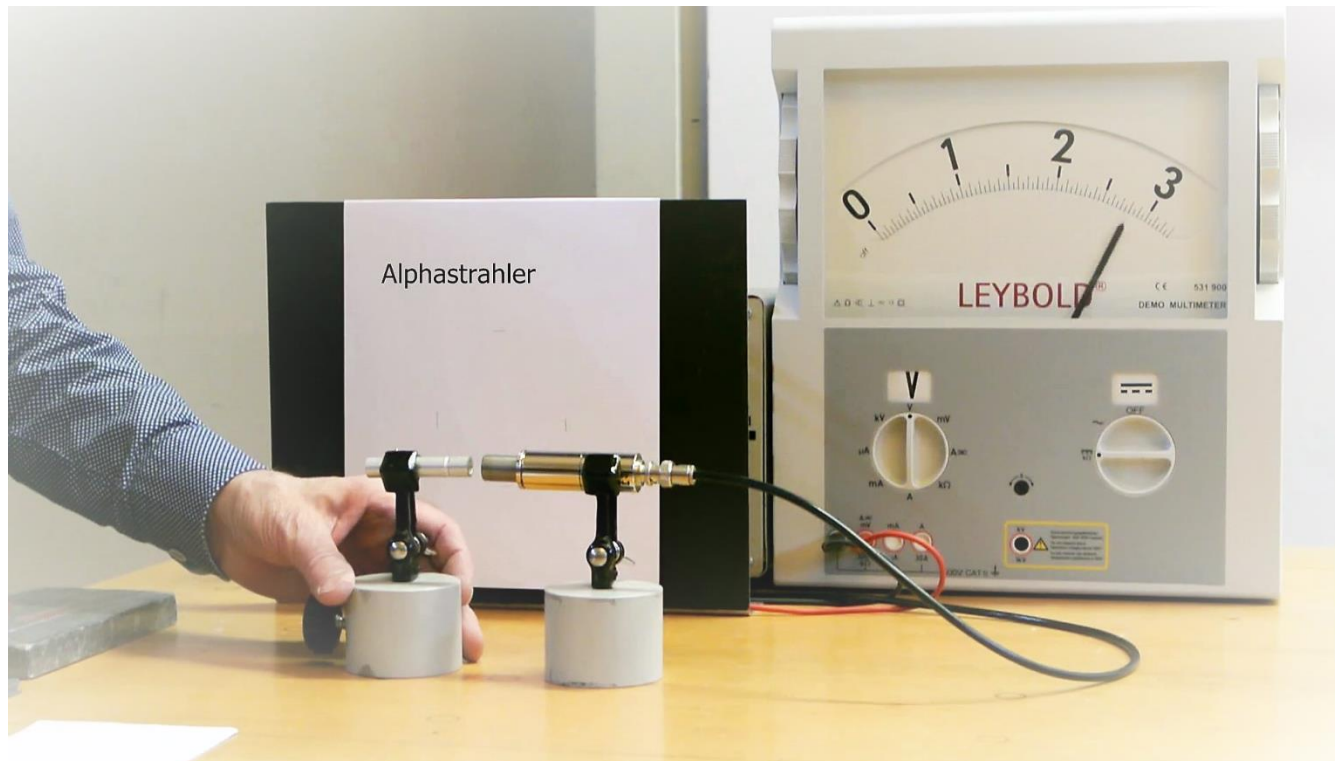


Radioaktive Strahlung



Radioaktive Strahlung

Modernes Experiment mit Schul- bzw. Praktikums-Geräten:



https://www.experimente.physik.uni-freiburg.de/H_Atom_und_Kernphysik/radioaktivitaet/reichweiteabsorptionstrahlung

Radioaktivität – Messgrößen

Grundlegende Maßeinheit: deponierte Energie

- Energiedosis: $D = \frac{E}{m}$ $[D] = 1 \frac{J}{kg} = 1 Gy$ „Gray“
- Dosisleistung dD/dt „Gray / Sekunde“

Bewertungsfaktoren für Strahlungsschäden

- Schädigung von Zellen und Organen
- Schäden an DNA, Mutationen

Bewertete Dosis $H = w \cdot D$, $[H] = 1 Sv = 1 \frac{J}{kg}$ „Sievert“

- w berücksichtigt Strahlenart, Energie, zeitliche Verteilung der Dosis

Effektive Dosis $H_{eff} = \sum_T w_T H_T$

- H_T Äquivalentdosis in Gewebeart T
- w_T Bewertungsfaktor für Gewebeart T

Biologische Wirkung von Strahlung

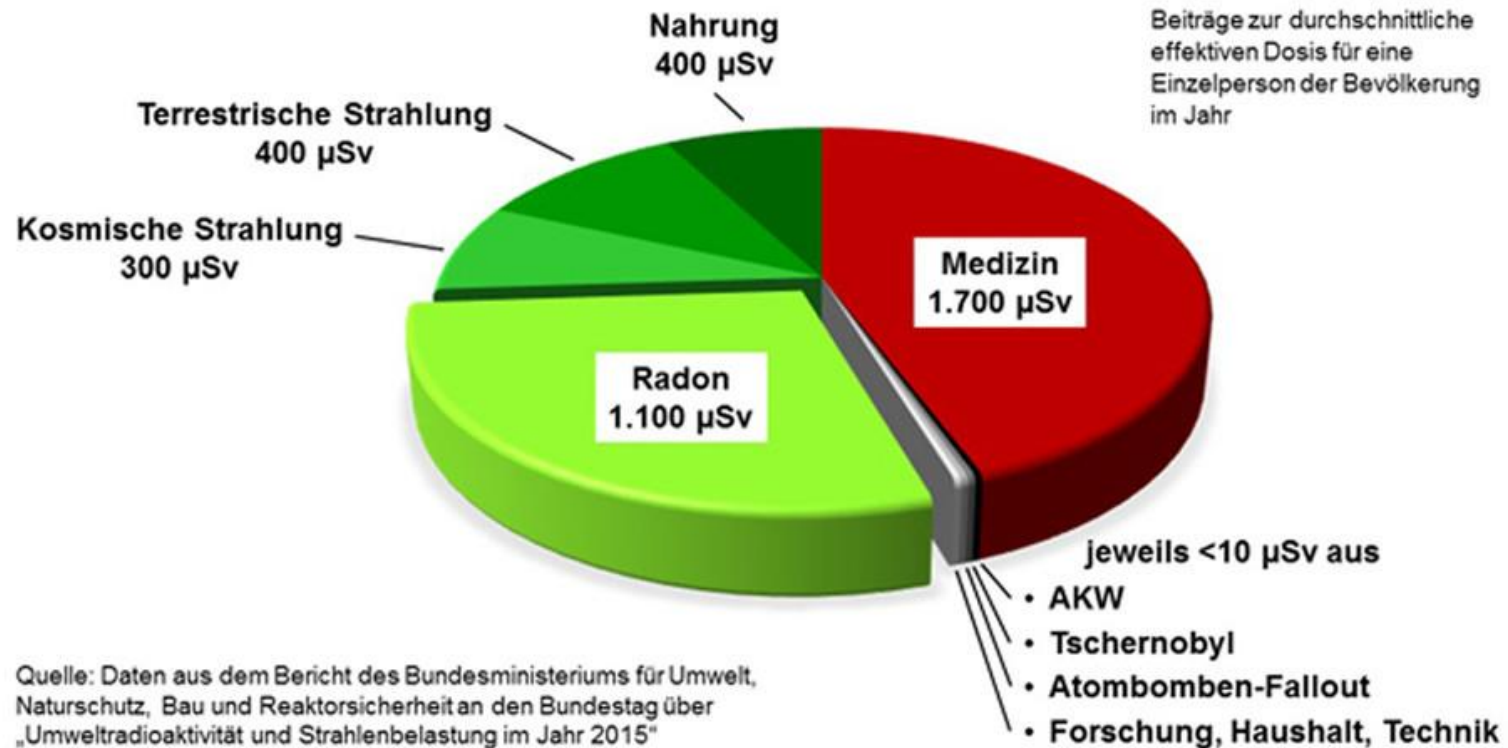
Strahlungswichtungsfaktoren nach ICRP 60

Art der Strahlung	Energiebereich	Strahlungswichtungsfaktor w_R
Photonen (typ. Gammastrahlung, Röntgenstrahlung ^[1])	alle Energien	1
Elektronen und Myonen	alle Energien	1
Neutronen	< 10 keV	5
	10 – 100 keV	10
	0,1 – 2 MeV	20
	2 – 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen	> 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne, Rückstoßkerne	alle Energien	20

ICRP = Internationalen Strahlenschutzkommission

Radioaktive Strahlung

Durchschnittliche Strahlenexposition des Menschen in Deutschland



Teilchendetektoren - Ionisationskammer

- Teilchen erzeugt durch Stöße Ionen und freie Elektronen
- Diese können durch Beschleunigungsspannung weitere Ionen-Elektronen Paare erzeugen
- Ladungsfluss erzeugt Spannungspuls

$$U(t) = Q(t)/C$$

Ionisationskammer ($U_1 < U < U_2$)

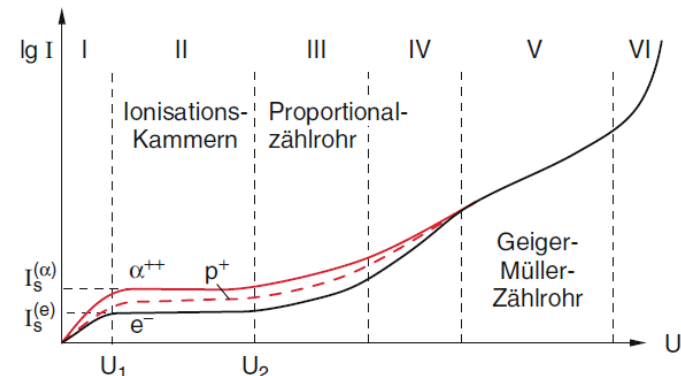
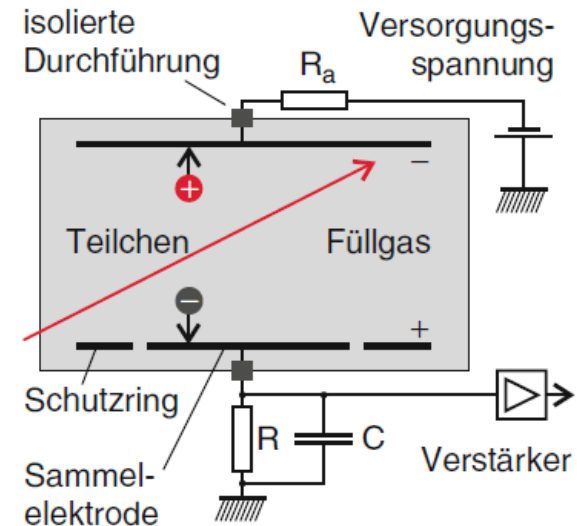
- Alle Elektronen & Ionen werden gesammelt, Sättigung

Proportional Zählrohr

- Sekundärionisation
- Ausgangsstrom proportional zu Ionisationsrate, Verstärkungsfaktor bis zu 10^4

Geiger-Müller Zählrohr

- Verstärkung so groß, dass jedes Teilchen gleich großes Signal liefert



Teilchendetektoren - Szintillationsdetektor

- Teilchen erzeugen Lichtblitze
- Nachweis durch Photomultiplier

Materialien

- anorganische Kristalle: Natriumiodid:Thallium (NaI(Tl), CsI(Tl), ZnS(Ag))
- Organische Materialien: Polystyren, Anthrazen, p-Terphenyl

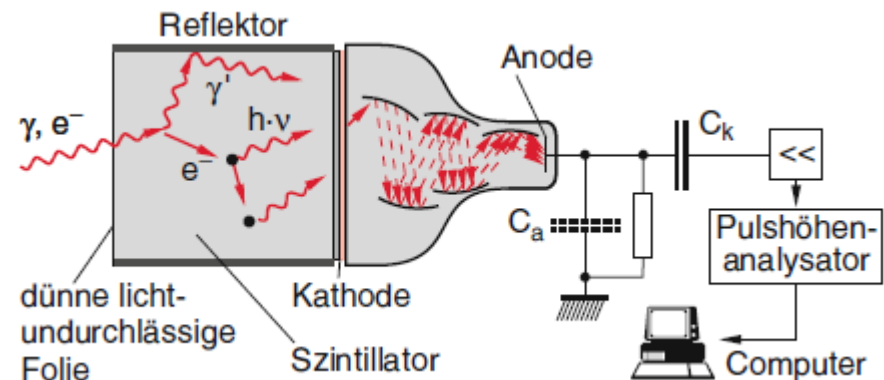
- Teilchen mit Energie E_{kin} erzeugt Photonenzahl

$$N_{ph} = \delta E_{kin}/h\nu$$

mit $\delta < 1$ Quantenausbeute

ermöglicht Detektion

- schwerer Teilchen
- Elektronen
- Gamma- Quanten
(→ Photoeffekt, Compton Effekt)



Teilchendetektoren - Halbleiterzähler

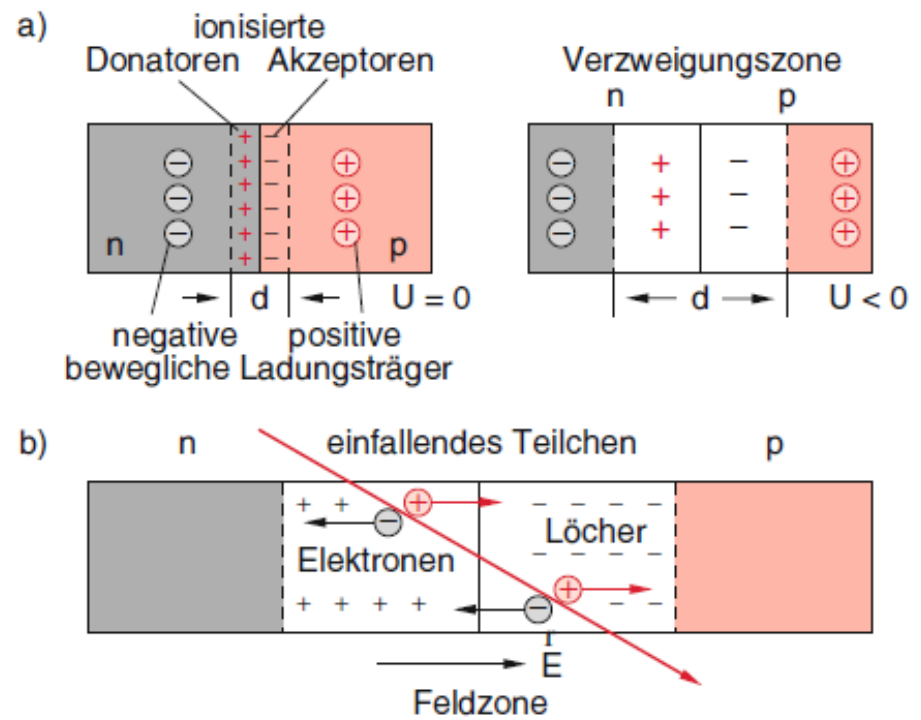
- p-n-Halbleiterdiode in Sperrrichtung
- Teilchen erzeugt Elektron-Loch Paare
- Analog zu Ionisationskammer

Vorteile

- hohe Dichte $\rightarrow$ kleineres Volumen
- geringe Energie zur Erzeugung eines e-h- Paares
- schneller wg. kürzerem Weg

Materialien

- Germanium Kristalle dotiert mit Phosphor (n) und Bor (p)



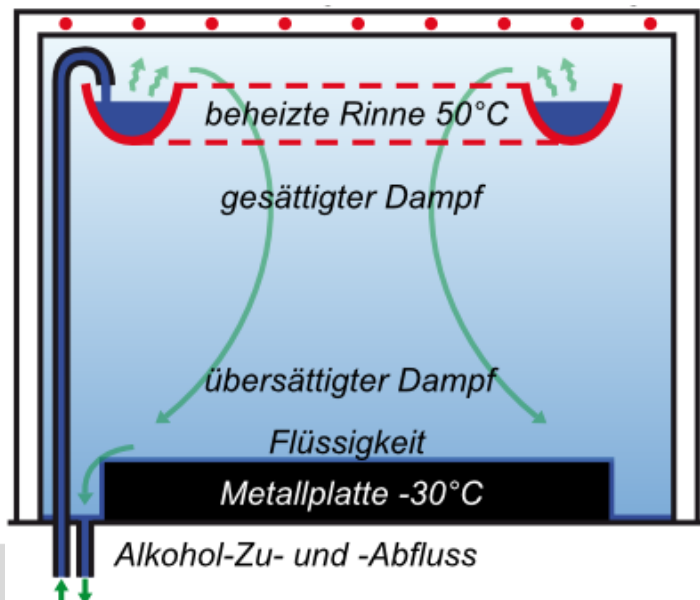
Teilchendetektoren - Spurendetektoren

Nebelkammer

- Gebildete Ionen erzeugen Wassertröpfchen
- Beobachtung durch Lichtstreuung
- Ablenkung In äußerem Magnetfeld liefert Impuls

$$\frac{mv^2}{r} = q v B \rightarrow mv = r q B$$

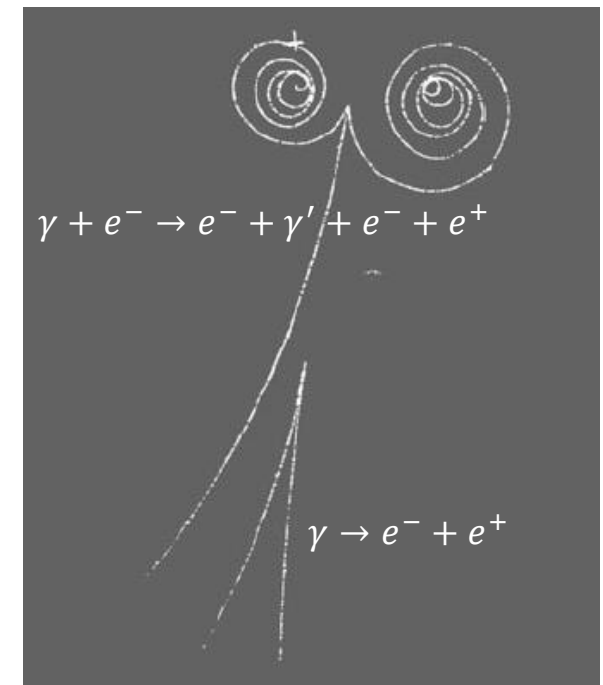
- Tröpfchendichte ermöglicht Bestimmung von Art und Energie des Teilchens



Nachweis von

- α, p, β, μ
- indirekt: γ

Gamma-Quant beschleunigt Elektron-Positron Paar



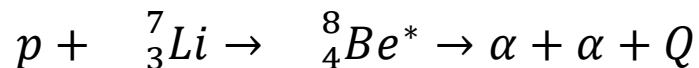
Kernspaltung

Spontane Spaltung: Deformation in ellipsoide Form, erfordert potentielle Energie

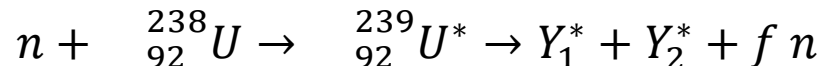
- Oberflächenenergie ΔE_S nimmt zu, Coulomb Abstoßung ΔE_C nimmt ab; spontane Spaltung wenn $\Delta E_C \geq \Delta E_S$
- Damit findet man: Kerne mit $\frac{Z^2}{A} \geq 51$ instabil

Stoßinduzierte Spaltung

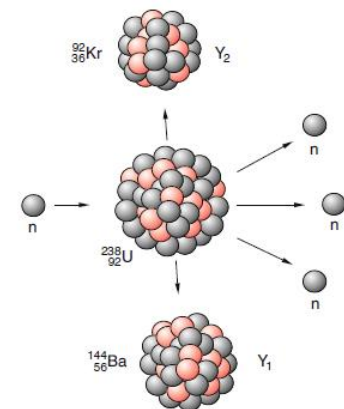
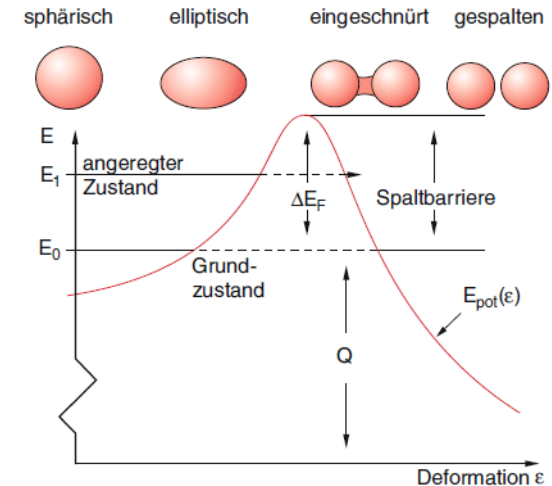
- Bsp leichter Kern: Protonenbeschuss $E_{kin} \geq \frac{1}{2} MeV$



- Bsp schwerer Kern: Uranspaltung (Hahn, Straßmann, Meitner)

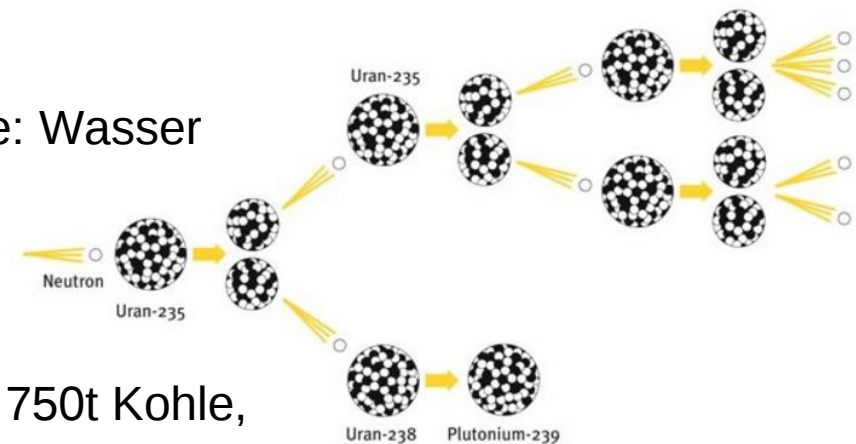
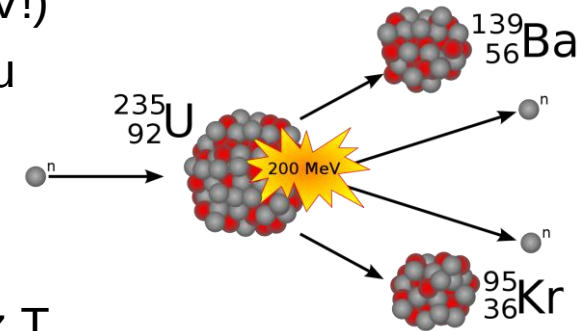


- ab Neutronenenergie $E_{kin} \geq 1 MeV$



Kernspaltung

- $^{235}_{92}\text{U}$ spaltet effektiver bei niedrigeren Energien (meV!)
 - Spaltprodukte sind positiv geladen, Abstoßung führt zu Beschleunigung – enthält ca. 80% der freiwerdenden Energie
 - Verteilung an Elementen der Spaltprodukte
 - Diese haben Neutronenüberschuss → zerfallen über z.T. lange Zerfallsketten, emittieren weitere Neutronen
 - **Kettenreaktion:** Prompte Neutronen aus erster Spaltung können weitere $^{235}_{92}\text{U}$ Kerne spalten
 - Brauche dazu geringere Energie
 - Moderator mit Masse ~ Neutronenmasse: Wasser
 - Freiwerdende Energie ca. 200MeV
 - Vergleiche mit Verbrennung eines C-Atoms zu CO_2 : 13.5eV
- Spaltung von 1kg Uran ~ Verbrennung von 750t Kohle,
mit 2700t CO_2 Emission



Kernreaktor

Vermehrungsfaktor k : Zahl der Neutronen / Spaltung

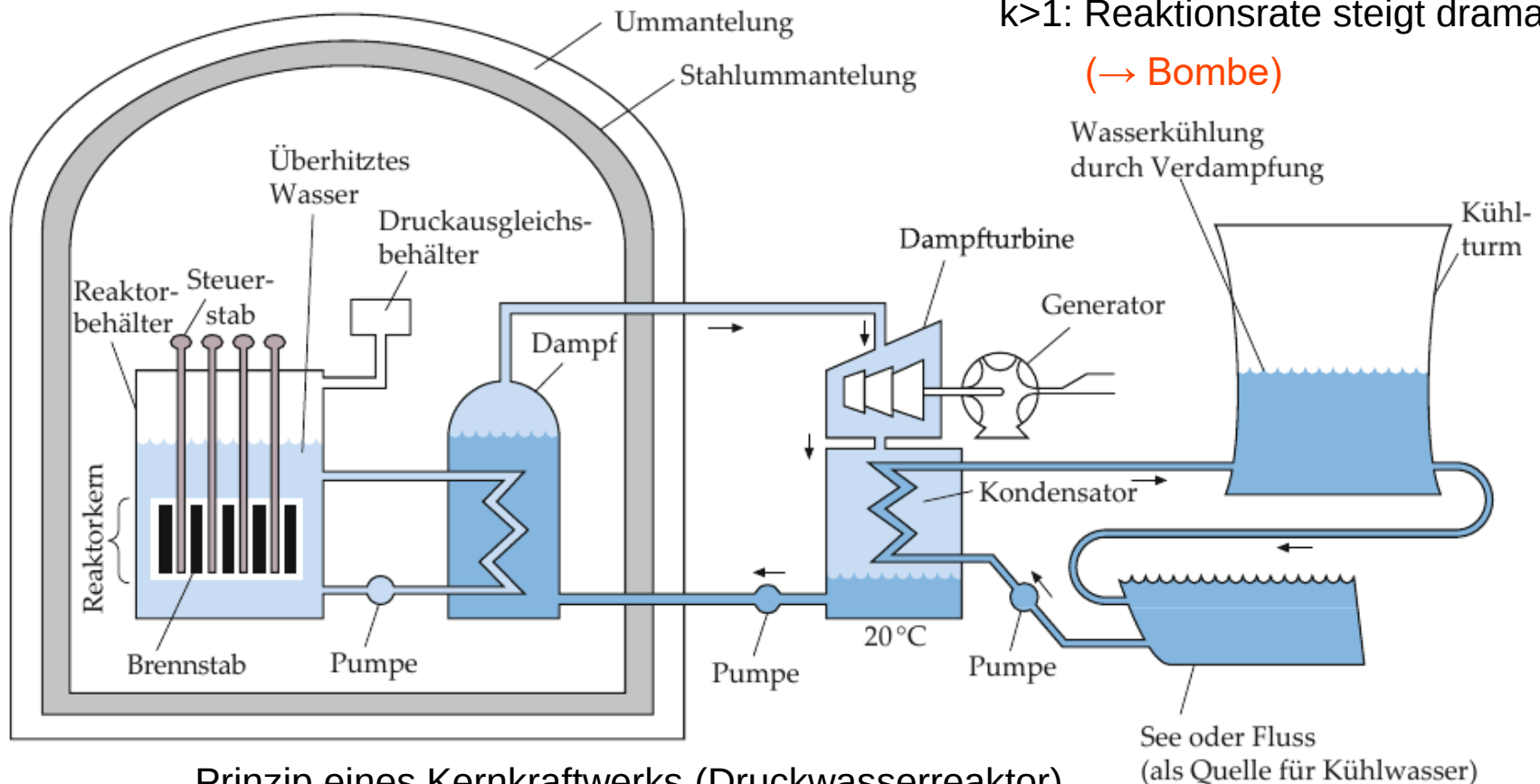
Maximum bei ^{235}U : $k=2.5$

$k < 1$: Reaktion kommt zu Erliegen

$k = 1$: Reaktion ist selbsterhaltend

$k > 1$: Reaktionsrate steigt dramatisch

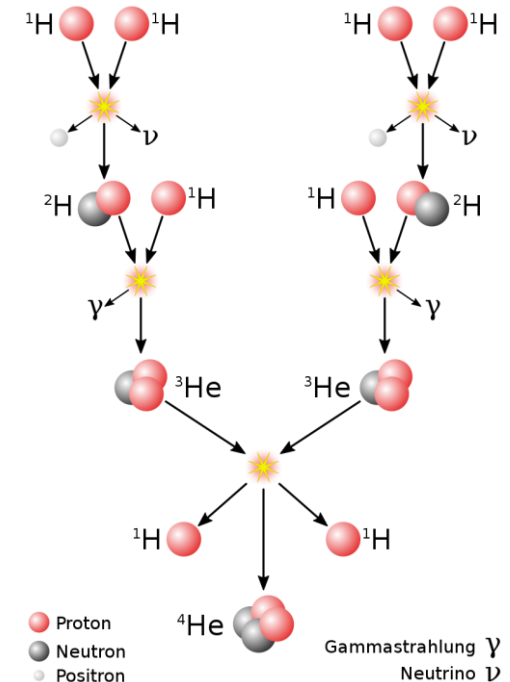
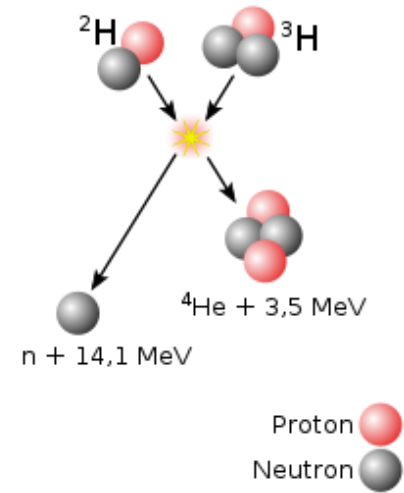
(→ Bombe)



Prinzip eines Kernkraftwerks (Druckwasserreaktor)

Kernfusion

- Zusammenstoßende Kerne können in schwereren Kern verschmelzen
- Kinetische Energie muss Coulomb Barriere überwinden $E_{kin} > Z_1 Z_2 e^2 / (4\pi\epsilon_0 (a_1 + a_2))$
z.B. ${}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n + 17,6\text{MeV}$
- erfordert $E_{kin} > 0,5\text{MeV}$
- Hauptsächlich für leichte Kerne wg. niedriger Coulomb Barriere
- Energiefreisetzung bis zu $A < 56$
- Fusion im Sterninneren führt zur Synthese der Elemente bis Eisen
- Energiegewinn pro Masse vergleichbar oder größer als bei Kernspaltung – 1kg D-T Gemisch = 100GWh oder 12000t Kohle
- Motivation für Fusionsreaktoren
- Schwierigkeit: Energiezufuhr, Einschluss



Fusionsreaktoren

Deuterium und Tritium als Reaktionspartner



Dauerhaften Fusion mit Energiegewinn:

- hohe Teilchendichte n ($>10^{20}/\text{m}^3$)
- lange „Einschlusszeiten“ τ_E ($>1000\text{s}$)
- hohe kinetischen Energien ($10\text{keV} = 10^8\text{K}$)

Aufheizen durch Energieanteil ϵ_α
der α -Teilchen

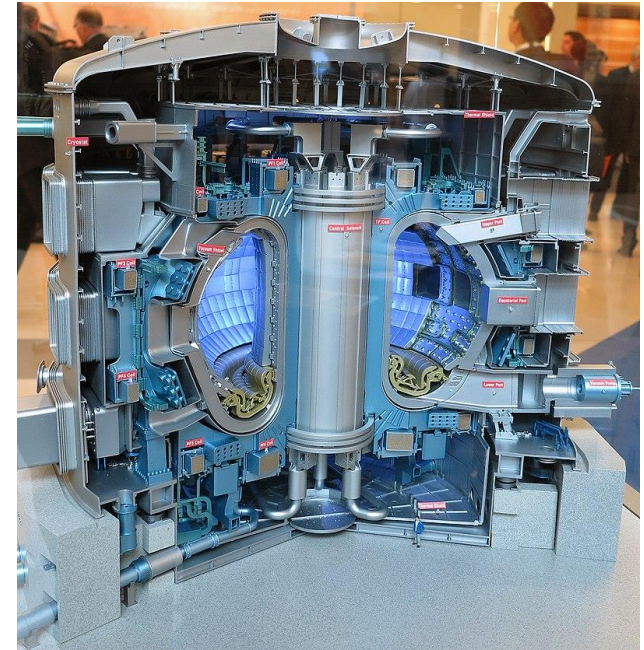
Lawson-Kriterium:

$$n \cdot \tau_E \cdot T \geq \frac{12k_B T^2}{\langle \sigma \cdot v \rangle \epsilon_\alpha}$$

Aktuelle Fortschritte (Ende 2022)

- 400s Einschluss bei 10^8K (Heifei, China)
- Energiegewinn durch Trägheitseinschluss (National Ignition Facility, USA)

ITER (Südfrankreich)



Technische Realisierung

- magnetischer Einschluss
- Trägheitseinschluss (Laser)