

Kernzerfälle

Bezeichnungen:

Z = Kernladungszahl = Ordnungszahl = Anzahl der Protonen im Nuklid

N = Anzahl der Neutronen im Nuklid

A = $N + Z$ = Massenzahl

${}^A_Z X = X - A =$ Nuklid (Atomkern) mit Elementbezeichnung X , Z Protonen und Massenzahl A

$m(Z, A) = m({}^A_Z X)$ = Masse des Kerns ${}^A_Z X$ (Nuklidmasse)

Definition der atomaren Masseneinheit:

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \text{ Atommasse}({}^1_6 \text{C}) = 1,6605519 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,604 \text{ MeV/c}^2$$

Isotope:

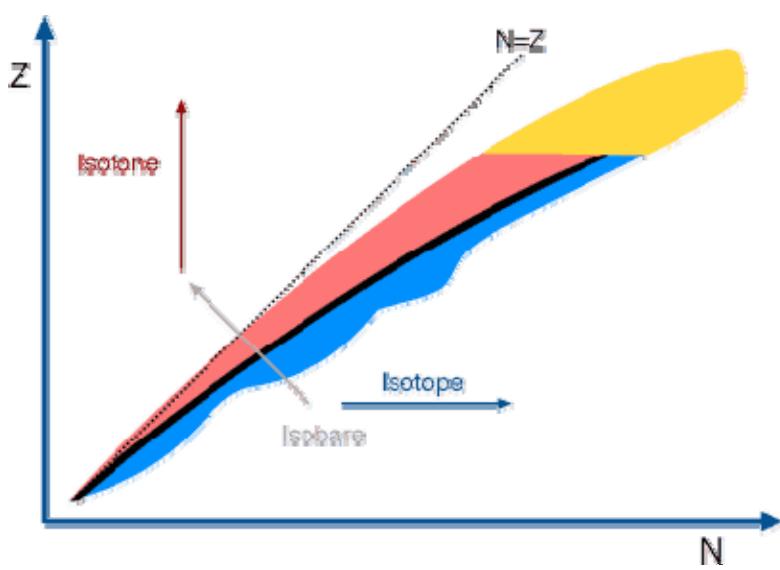
Nuklide mit gleicher Ordnungszahl ($Z = \text{const}$); Isotope eines Nuklids (Atoms) unterscheiden sich in der Neutronenzahl, nicht in der Kernladungszahl. In der Nuklidkarte (Rechtsachse: N , Hochachse: Z) finden sich Isotope auf einer Parallelen zur N -Achse.

Isobare:

Nuklide mit gleicher Massenzahl ($A = Z + N = \text{const}$); in der Nuklidkarte finden sich Isobare auf einer Orthogonalen zur 1. Winkelhalbierenden. Beim β -Zerfall sind Mutter- und Tochterkern Isobaren.

Isotone:

Nuklide mit gleicher Neutronenzahl ($N = \text{const}$); Isotone eines Nuklids unterscheiden sich in der Protonenzahl, nicht in der Neutronenzahl. In der Nuklidkarte finden sich Isotone auf einer Orthogonalen zur N -Achse.

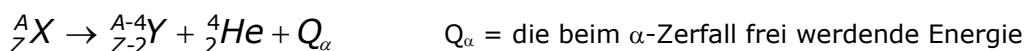


Der schwarze Bereich ist das "Tal der Stabilität", das alle stabilen Nuklide enthält, zu denen die instabilen hin zerfallen. Instabile protonenreiche Nuklide befinden sich im roten Bereich über dem Tal der Stabilität, die neutronenreichen radioaktiven Nuklide im blauen Bereich darunter. Beide zerfallen hauptsächlich per β -Zerfall. Die schweren instabilen Nuklide im gelben Bereich zerfallen hauptsächlich durch α -Zerfall oder Spontanspaltung.

Aus der Nuklidkarte ist weiter zu erkennen, daß die schweren stabilen Nuklide mehr Neutronen als Protonen enthalten; das "Tal der Stabilität" weicht von der linearen Auftragung $N = Z$ um so weiter ab, je größer die Nukleonzahl ist.

I. α -Zerfall

Allgemeine Zerfallsformel für den α -Zerfall:



α -Zerfall ist energetisch möglich und findet in der Regel auch statt, falls gilt:

$$\Delta m = m(Z, A) - [m(Z-2, A-4) + m(2, 4)] > 0$$

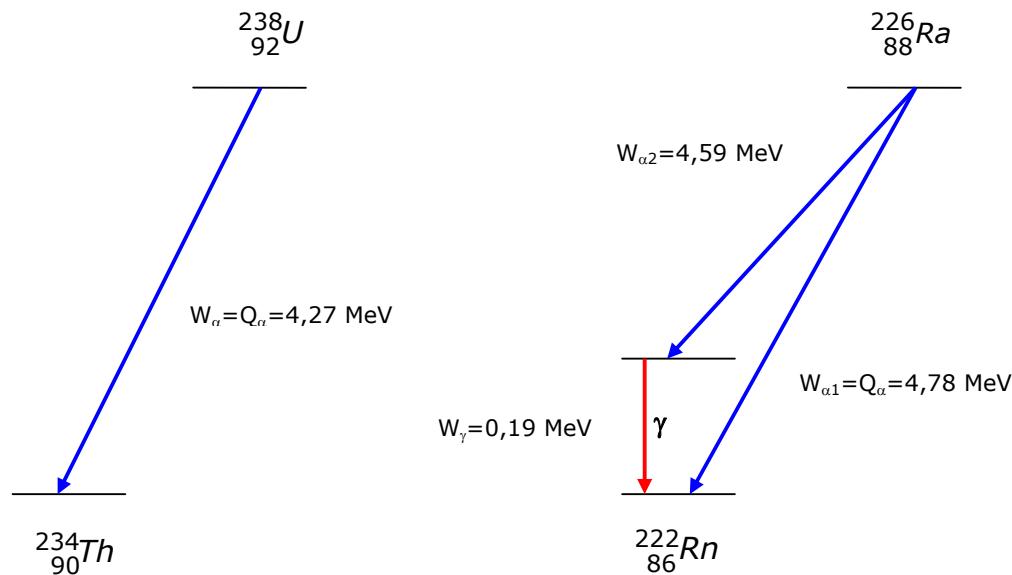
Bei diesem Zerfall wird nach $E = m \cdot c^2$ die Energie $Q_\alpha = \Delta m \cdot c^2$ frei, die das emittierte α -Teilchen nahezu vollständig als kinetische Energie W_α erhält (beachte: die Rückstoßenergie des Tochterkerns ist wegen $m(Z-2, A-4) \gg m(2, 4)$ vernachlässigbar; wegen der Impulserhaltung erhalten Tochterkern und α -Teilchen betragsmäßig gleiche, entgegengesetzte gerichtete Impulse).

Beispiele: α -Zerfall von U-238 und Ra-226



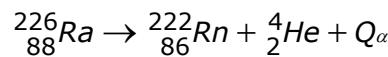
$$\begin{aligned} \text{Freigesetzte Energie: } Q_\alpha &= \Delta m \cdot c^2 \\ &= [m(92, 238) - m(90, 234) - m(2, 4)] \cdot c^2 \\ &= [238,00031 - 233,99422 - 4,0015061] u \cdot c^2 \\ &= 0,0045839 u \cdot c^2 \\ &= 0,0045839 \cdot 931,604 \text{ MeV}/c^2 \cdot c^2 \\ &= 4,27 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Energieniveauschema für den α -Zerfall von U-238 und Ra-226:



Beim Zerfall des Radiums beobachtet man die Besonderheit, daß Ra-226 mit einer Wahrscheinlichkeit von 5,4 % in einen angeregten Zustand des Tochterkerns Rn-222 zerfällt; der angeregte Kern fällt in den Grundzustand unter Emission eines γ -Quants der Energie $W_\gamma = Q_\alpha - W_{\alpha 2} = W_{\alpha 1} - W_{\alpha 2}$.

Reaktionsformeln:

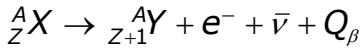


Übungsaufgabe: Berechne Q_α für den Zerfall des Ra-226 und bestimme die Geschwindigkeit der α -Teilchen.

II. β -Zerfall

Allgemeine Zerfallsformel

für den β^- -Zerfall:



Q_β = die beim β -Zerfall frei werdende Energie

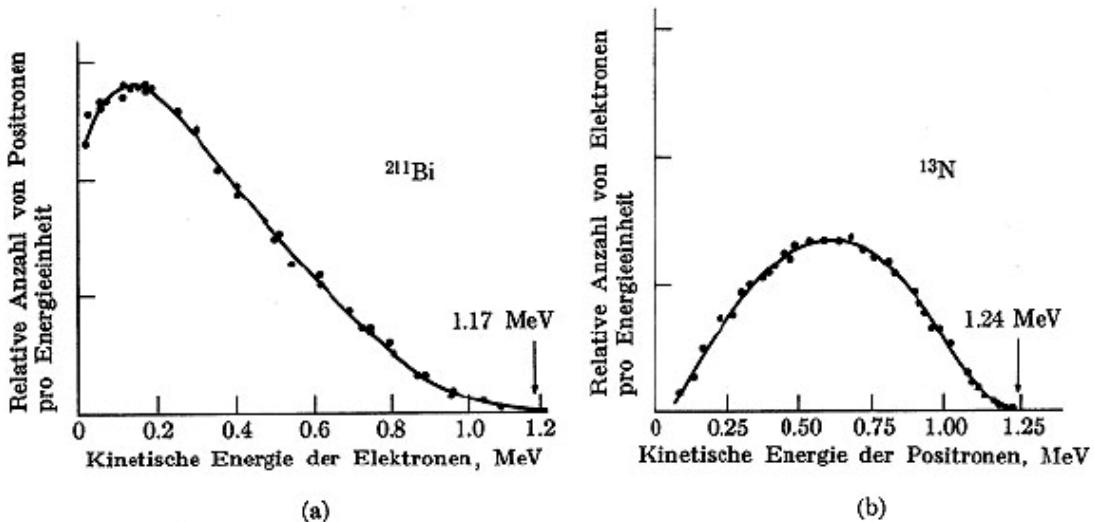
β -Zerfall ist energetisch möglich und findet auch statt, falls gilt:

$$\Delta m = m(Z, A) - [m(Z+1, A) + m_0] > 0 \quad (\beta^- \text{-Zerfall})$$

$$\Delta m = m(Z, A) - [m(Z-1, A) + m_0] > 0 \quad (\beta^+ \text{-Zerfall})$$

mit m_0 = Ruhemasse des Elektrons = $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg = 511 keV/c²

Dabei wird die Energie $Q_\beta = \Delta m \cdot c^2$ freigesetzt. Die β -Teilchen besitzen ein kontinuierliches Energiespektrum mit einer maximalen kinetischen Energie $W_{\max} = Q_\beta$.



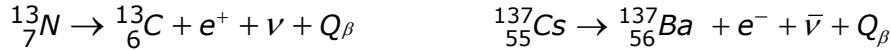
Die Beobachtung, daß die β -Teilchen eine kontinuierliche Energieverteilung aufweisen, schien den Energieerhaltungssatz zu verletzen. Wolfgang Pauli postulierte (zunächst 1930 in einem privaten Brief an Enrico Fermi, für die Fachwelt publiziert 1933) ein beim β -Zerfall auftretendes hypothetisches Teilchen (Neutrino), welches einen Teil der frei werdenden Energie Q_β übernimmt. Cowan und Reines gelang erst 1956 der experimentelle Nachweis der Existenz des Neutrinos durch die Beobachtung des inversen β -Zerfalls an einem Kernreaktor:



Für diese Entdeckung wurden Cowan und Reines 1995 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Beispiele: β^+ -Zerfall von N-13 und β^- -Zerfall von Cs-137

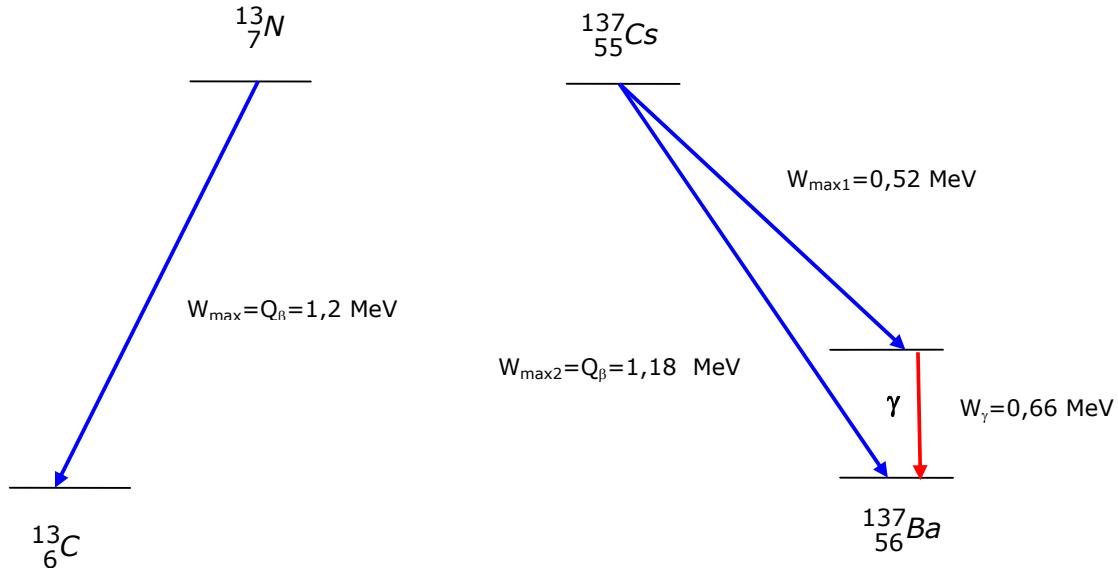
Reaktionsformeln:



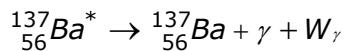
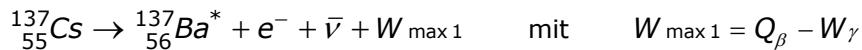
Freigesetzte Energie beim β^+ -Zerfall von N-13:

$$\begin{aligned} Q_\beta &= \Delta m \cdot c^2 \\ &= [m(7, 13) - m(6, 13) - m_0] \cdot c^2 \\ &= [m(7, 13) - m(6, 13)] \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 \\ &= [13,001899 - 13,000063] u \cdot c^2 - 511 \text{ keV} \\ &= 0,001836 u \cdot c^2 - 511 \text{ keV} \\ &= 0,001836 \cdot 931,604 \text{ MeV} - 511 \text{ keV} \\ &= 1,710 \text{ MeV} - 511 \text{ keV} \\ &= 1,199 \text{ MeV} \approx 1,2 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Energieniveauschema für den β^+ -Zerfall von N-13 und den β^- -Zerfall von Cs-137:



Auch beim β -Zerfall findet man bei einigen Nukliden die Besonderheit, daß zunächst ein angeregter Zustand des Tochterkerns erreicht wird, z. B. bei Cs-137:



Übungsaufgabe: Berechne Q_β für den Zerfall des Cs-137.

Ermittle die Geschwindigkeit (als Vielfaches der Lichtgeschwindigkeit c) und die relativistische Masse m (als Vielfaches der Ruhemasse m_0) der schnellsten β -Teilchen.