

Grundlegende Eigenschaften der Atomkerne:

- β -Zerfall (Teil I)

Motivation

Für die Beschreibung der Elementsynthese in astrophysikalischen Umgebungen sind insbesondere gute Kenntnisse über die β -Zerfallseigenschaften von instabilen Kernen fernab vom Tal der Stabilität nötig.



Wiederholung: Stabilität der Kerne

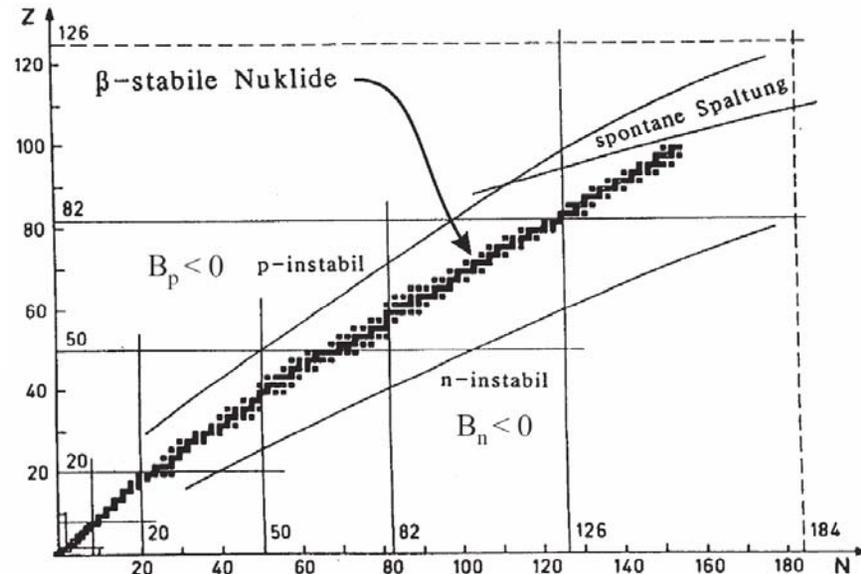
Weizsäcker - Massenformel für Massen

$$m(Z, A) = Zm_H + (A - Z)m_n - a_V A + a_S A^{2/3} + a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + a_A \frac{(Z - A/2)^2}{A} \pm \delta$$

aus der Massenformel erhält man:

$$m(Z, A) = \gamma Z^2 - \beta Z + \alpha A \pm \delta$$

Für isobare Ketten (Isotope mit gleichem A)
ist $m(Z, A)$ eine quadratische Funktion von Z .



Stabile, in der Natur vorkommende Kerne bilden ein schmales Band in der N - Z -Ebene der Nuklidkarte.

β - Zerfall

Für Isotope mit deutlichem Neutronenüberschuß ist es energetisch günstig, wenn sich ein Neutron in ein Proton umwandelt.

Bei neutronenarmen Kernen findet der umgekehrte Prozeß statt, die Umwandlung eines Protons in ein Neutron.

Diese β -Zerfälle beruhen auf der ***schwachen Wechselwirkung***.

β^- - Zerfall

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

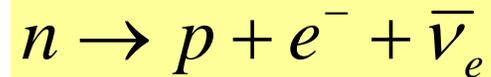
β^+ - Zerfall

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$

β^- - Zerfall

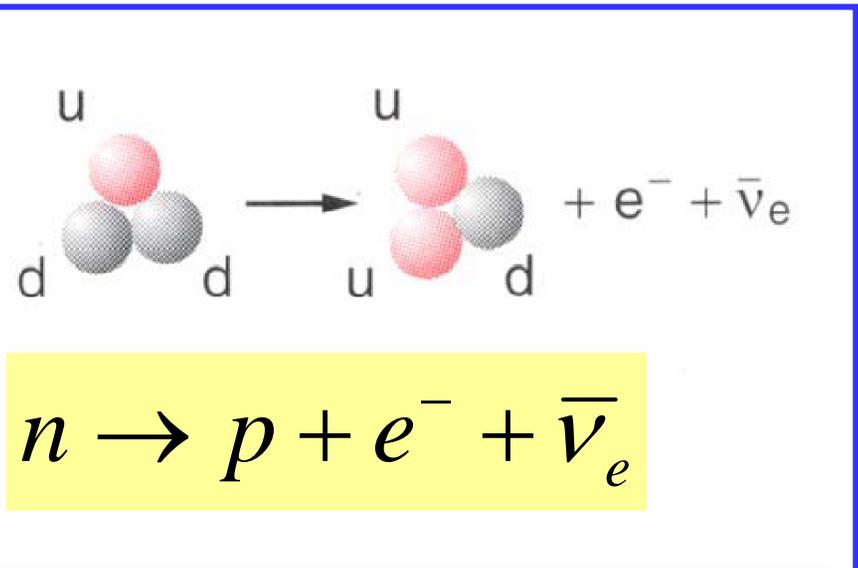
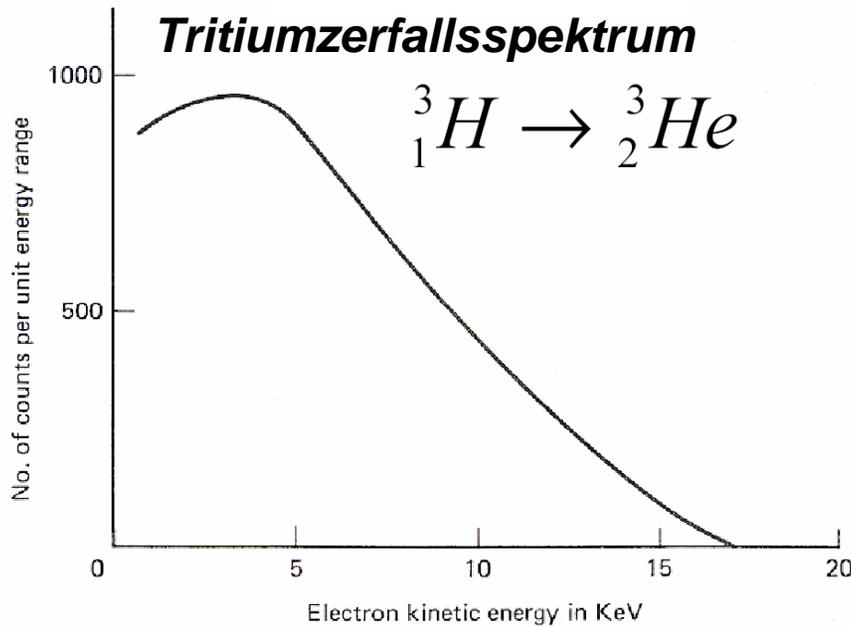
Den elementaren Prozeß des β^- -Zerfalls findet man bei der Umwandlung des schwereren Neutrons in ein Proton.



Dabei wird ein **Elektron und ein Elektron-Antineutrino gleichzeitig** emittiert.

Die Lebensdauer τ des Neutrons beträgt 889 ± 2 Sekunden.

Das β^- -Spektrum zeigt eine kontinuierliche Verteilung bis zu einer maximalen Energie von 782 keV. Die jeweils verbleibende Energie wird vom elektrisch neutralen Antineutrino (Ruhemasse < 7.2 eV/c) weggetragen.



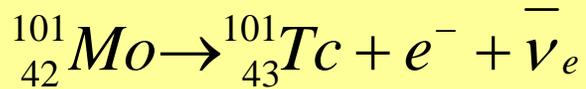
β^- - Zerfall

β^- - Zerfälle sind möglich falls die Bedingung erfüllt ist:

$$M(A,Z) > M(A,Z+1)$$

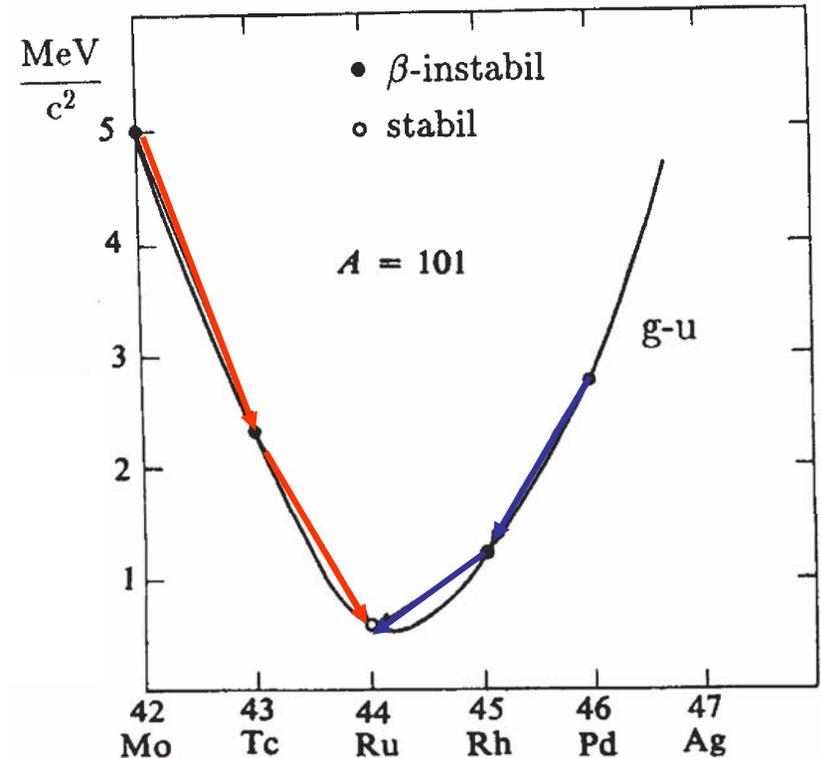
Die Ruhemasse des Antineutrinos $< 7 \text{ eV}/c^2$ kann man vernachlässigen.

Beispiel: Massenparabel der $A=101$ Isobare



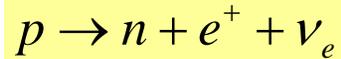
${}_{44}^{101}\text{Ru}$ ist stabil

Was sind Zerfälle von ${}^{101}\text{Pd}$ und ${}^{101}\text{Rh}$?



β^+ - Zerfall

In neutronenarmen Kernen kann sich ein Proton in ein Neutron umwandeln:



Dabei wird ein Positron e^+ , das Antiteilchen des Elektrons (positive Ladung, gleiche Masse) und ein Elektron-Neutrino ν_e emittiert.

Energiebilanz des β^+ -Zerfalles: $Q = M(A, Z) - M(A, Z-1) + 2m_e$

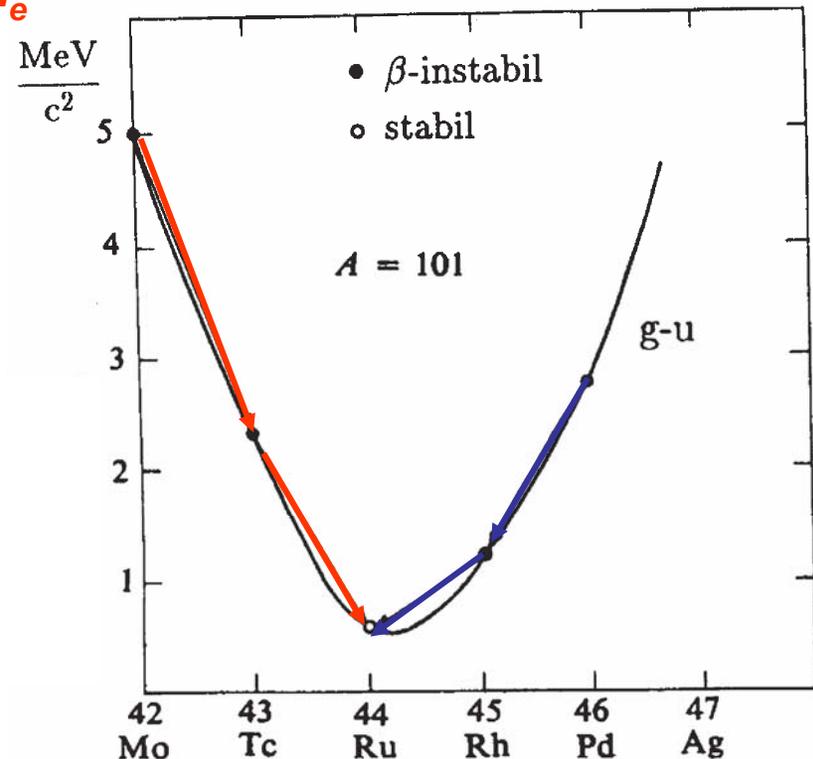
Bedingung für Zerfall: $M(A, Z) > M(A, Z-1) + 2m_e$

Der Term $2m_e$ berücksichtigt, daß ein Positron gebildet wird und ein Elektron vom Mutteratom übrig ist.

Folgende -Zerfälle werden bei $A = 101$ beobachtet:

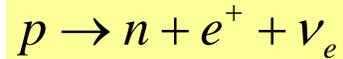


${}_{44}^{101}\text{Ru}$ ist stabil



β^+ - Zerfall vs. Elektroneneinfang

In neutronenarmen Kernen kann sich ein Proton in ein Neutron umwandeln:



Dabei wird ein Positron e^+ , das Antiteilchen des Elektrons (umgekehrte Ladung, gleiche Masse) und ein Elektron-Neutrino ν_e emittiert.

Energiebilanz des β^+ -Zerfalles: $Q = M(A,Z) - M(A,Z-1) + 2m_e$

Bedingung für Zerfall: $M(A,Z) > M(A,Z-1) + 2m_e$

Elektroneneinfang (electron capture; EC)

In Konkurrenz zum β^+ -Zerfall, kann der Elektroneneinfang-Prozess energetisch günstiger Protonen in Neutronen umwandeln:



K-Elektronen befinden sich mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Kern und werden bevorzugt eingefangen.

Bedingung für Zerfall: $M(A,Z) > M(A,Z-1) + \varepsilon$

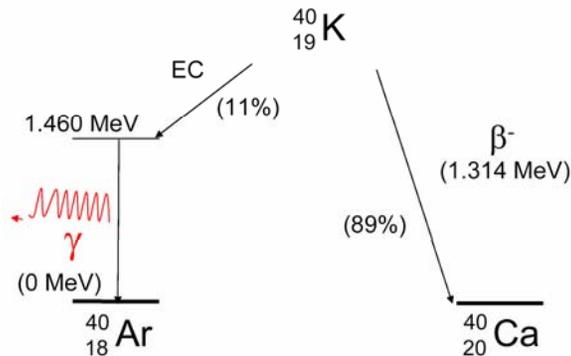
ε ist Anregungsenergie des Lochs im Tochteratom.

β -Zerfall in geraden Kernen

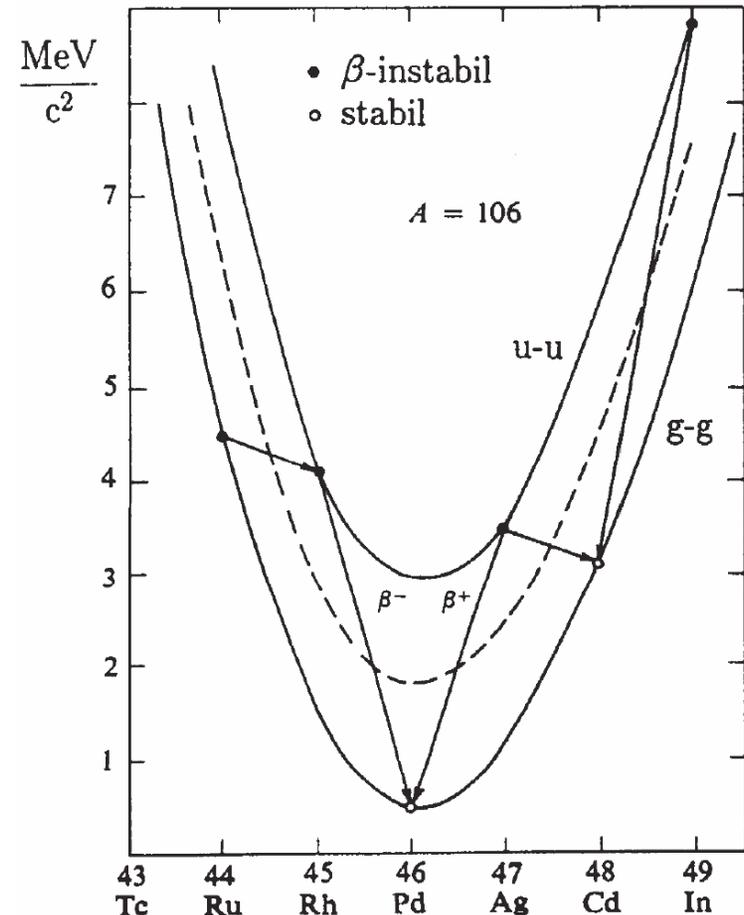
In Isobaren mit geraden Massenzahlen gibt es wegen der Paarungsenergie (δ) zwei getrennte Parabeln, eine für g-g-Kerne und eine höherliegende für u-u-Kerne. Die Differenz ist 2δ , die doppelte Paarungsenergie.

Konsequenzen:

- Alle u-u-Kerne haben mindestens einen stärker gebundenen isobaren g-g-Kern und sind daher instabil.
- Ausnahmen: ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$, wegen der hohen Asymmetrieenergie.
- Einige u-u-Kerne können sich sowohl durch β^+ - wie β^- -Zerfall umwandeln, z.B. ${}^{40}\text{K}$ zerfällt in ${}^{40}\text{Ar}$ (EC) oder ${}^{40}\text{Ca}$ (β^-).

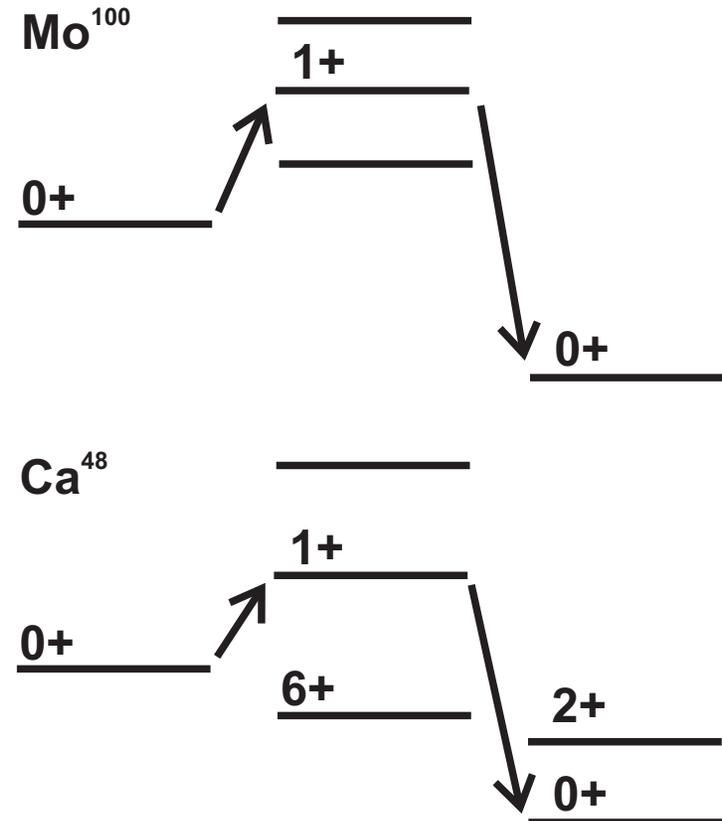
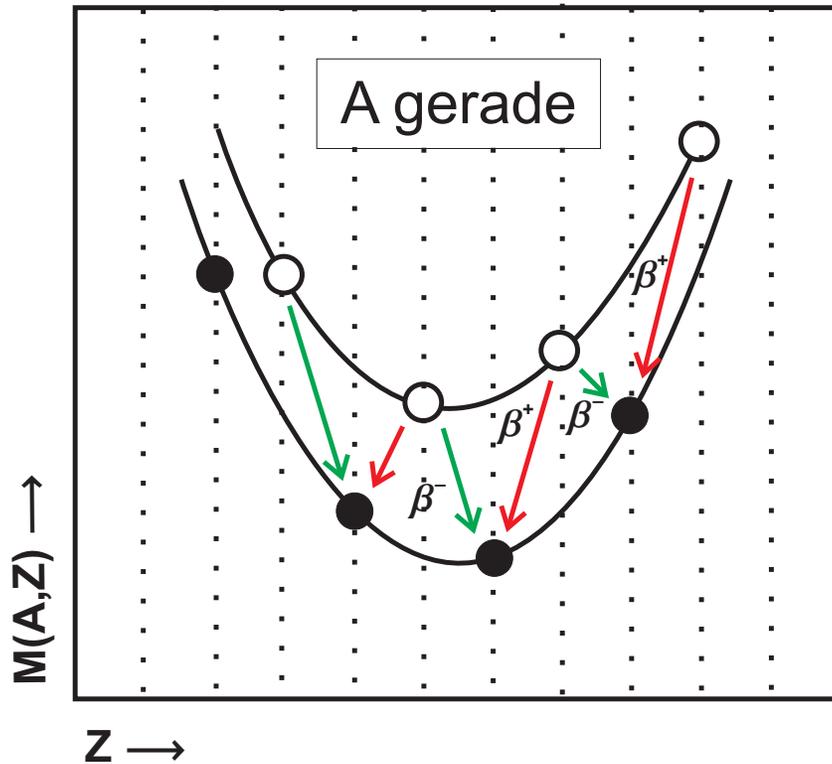
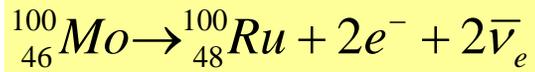


Massenparabel für $A=106$ Isobare



Doppelter β -Zerfall

Einige gg-Kerne haben schwache Doppel- β -Zerfallskanäle



Zusammenfassung

β^- - Zerfall

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

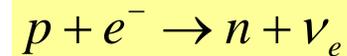
β^+ - Zerfall

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$

- β^- - Zerfälle sind möglich falls: $M(A,Z) > M(A,Z+1)$
- β^+ - Zerfälle sind möglich falls: $M(A,Z) > M(A,Z-1) + 2m_e$
Der Term $2m_e$ berücksichtigt, daß ein Positron gebildet wird und ein Elektron vom Mutteratom übrig ist.

- Elektroneneinfang (electron capture; EC)



In Konkurrenz zum β^+ -Zerfall, kann der Elektroneneinfang-Prozeß energetisch günstiger Protonen in Neutronen umwandeln:

Bedingung für Zerfall: $M(A,Z) > M(A,Z-1) + \varepsilon$
 ε ist Anregungsenergie des Lochs im Tochteratom.