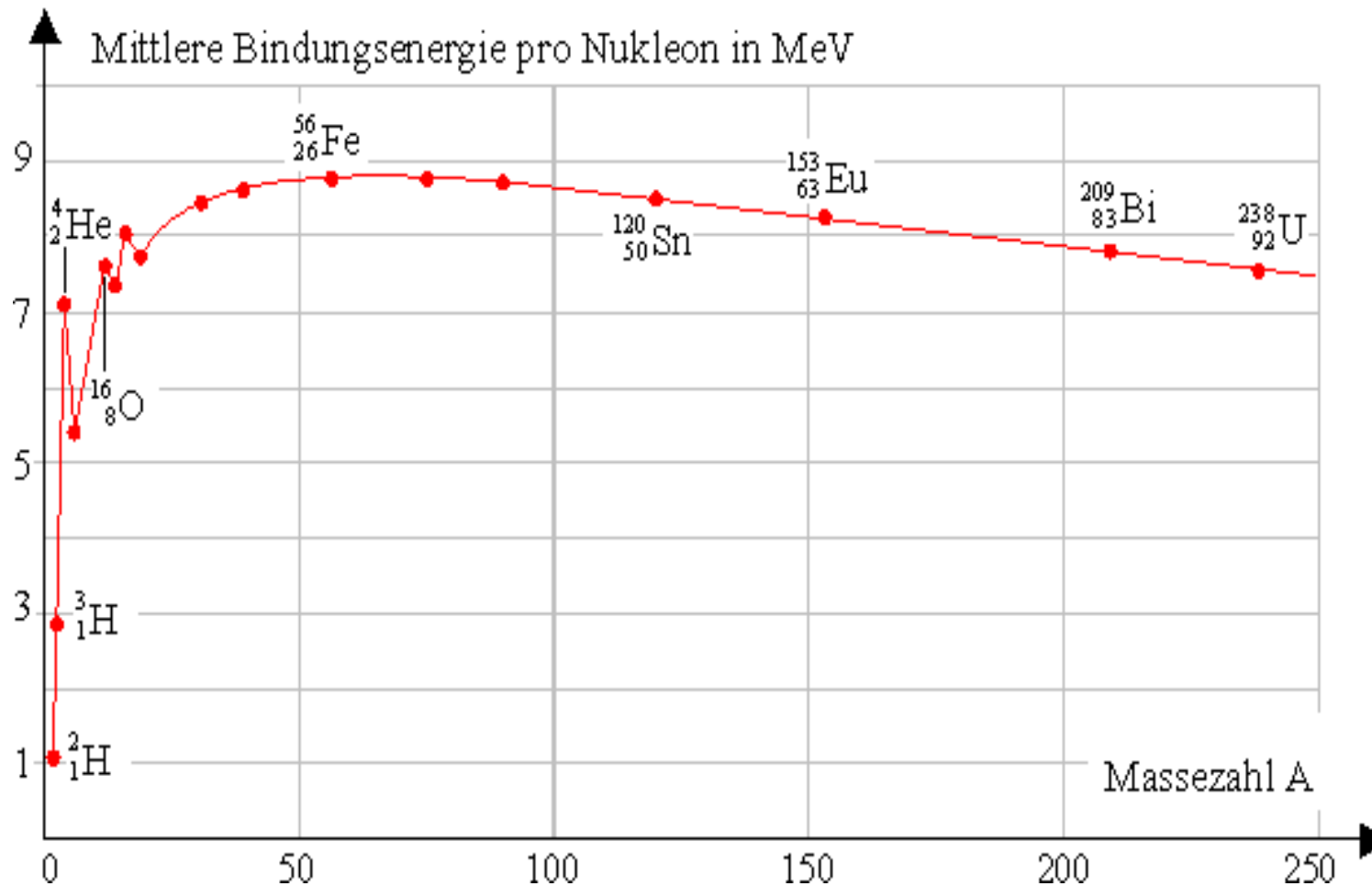


Bindungsenergie von Kernen

$$M(Z,A) c^2 = Z m_p c^2 + (A-Z) m_n c^2 - E_B(Z,A)$$

E_B : Kernbindungsenergie, in dieser Definition > 0



Maximum bei $A=56$: $E_B/A = 8.7$ MeV, danach sehr leichter Abfall (nahezu konstant für große)

Bethe-Weizsäcker Formel:

$$B = a_V A - a_O A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{Asym} \frac{(N - Z)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$a_V \approx 15.7 \text{ MeV}$$

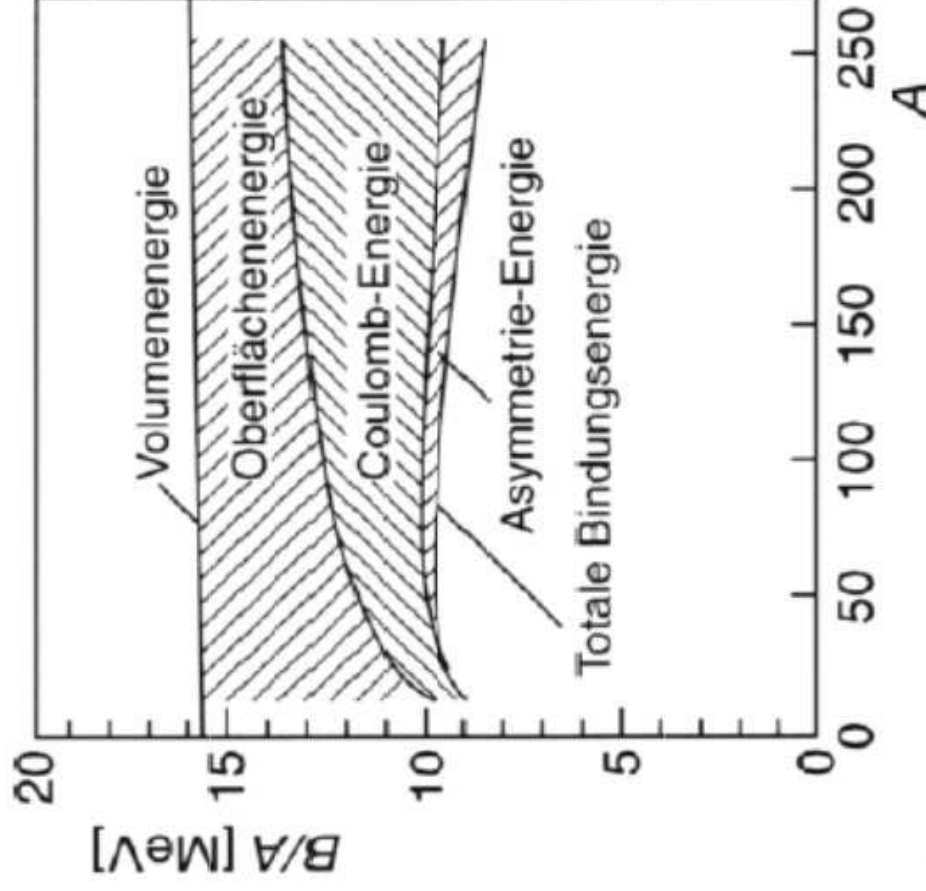
$$a_O \approx 17.2 \text{ MeV}$$

$$a_C \approx 0.7 \text{ MeV}$$

$$a_{Asym} \approx 22.5 \text{ MeV}$$

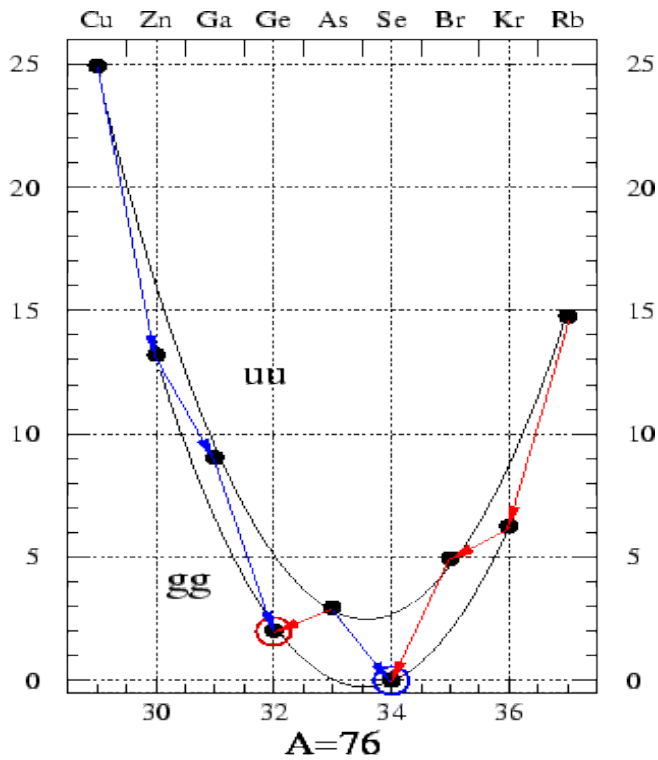
s.a.
Povh

$$\delta = \begin{cases} +11.2 \text{ MeV} & \text{gg - Kerne} \\ 0 \text{ MeV} & \text{ug - Kerne} \\ -11.2 \text{ MeV} & \text{uu - Kerne} \end{cases}$$



↑ Erlaubt die Berechnung des Q-Wertes von radioaktiven Zerfällen / Spaltungs- und Fusions-Prozessen

beta-Zerfall

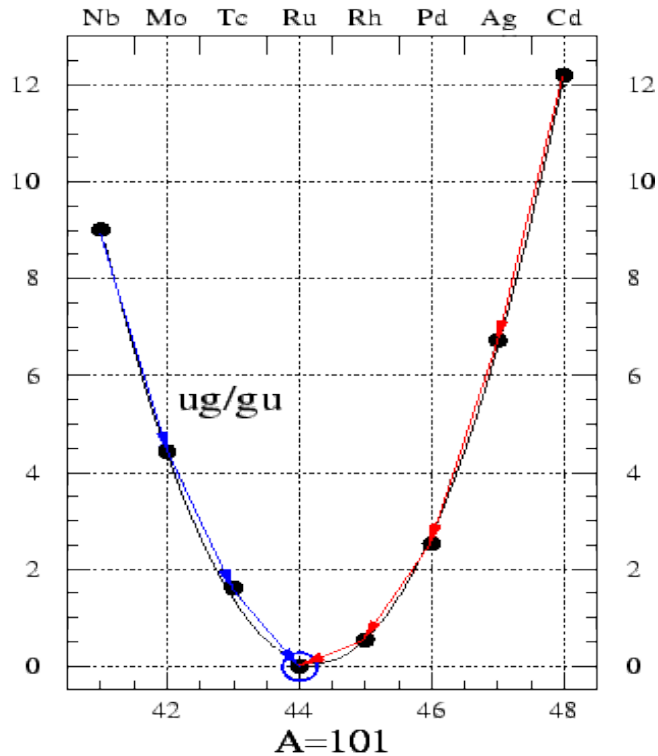


gg/uu Kerne:

$gg \rightarrow uu \rightarrow gg \rightarrow uu \rightarrow gg \rightarrow \dots$

aufgrund des Paarungsterms gibt es zwei Parabeln

Es gibt in der Regel zwei (gegen beta-Zerfall) stabile gg-Kerne. Je nach Steilheit der Parabeln kann es auch Stabile uu-Kerne geben.



ug Kerne:

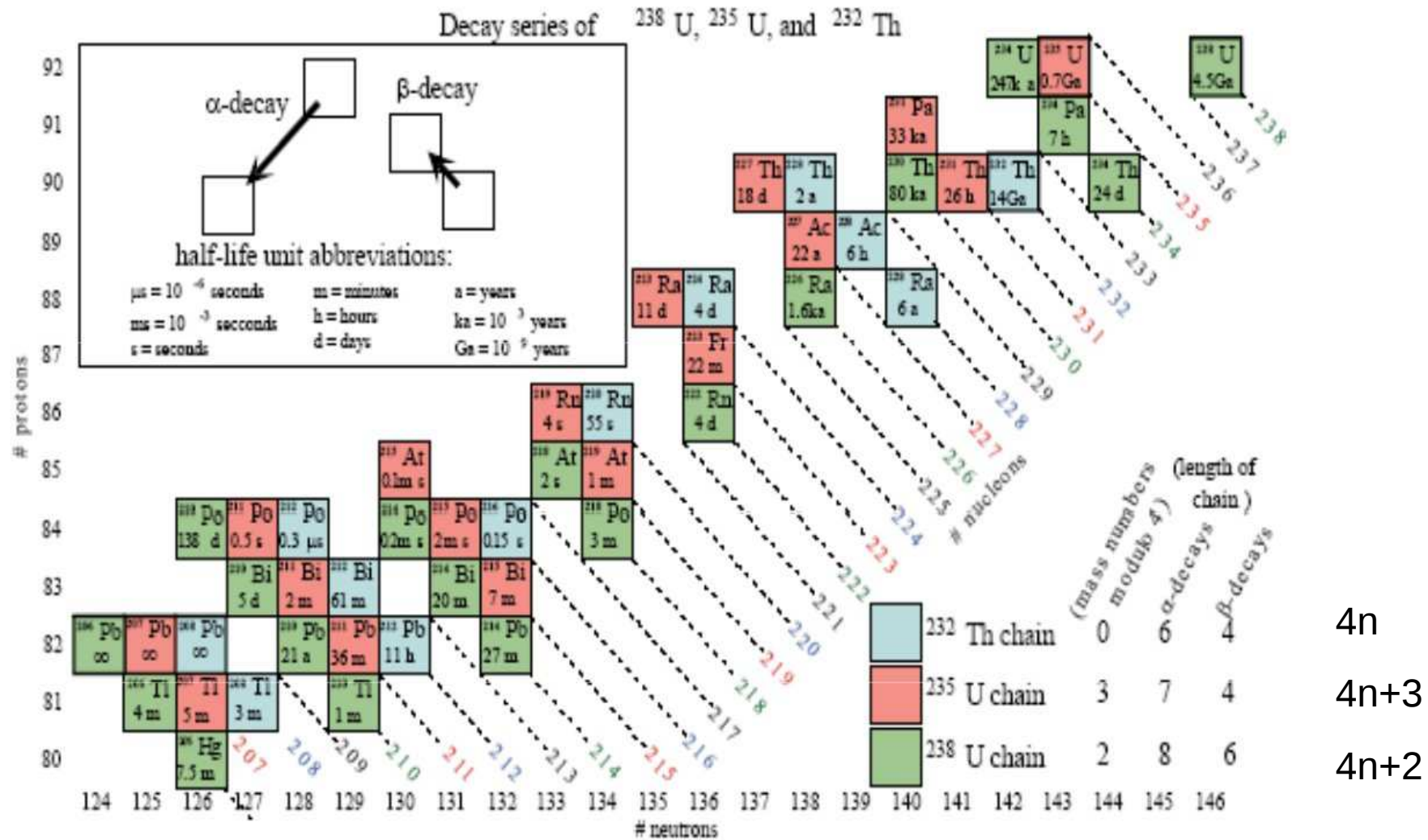
$ug \rightarrow gu \rightarrow ug \rightarrow gu \rightarrow \dots$

Es gibt ein stabiles Isobar.

β^- Zerfall

β^+ Zerfall oder electron capture (EC)

Radioaktive Zerfallsreihe



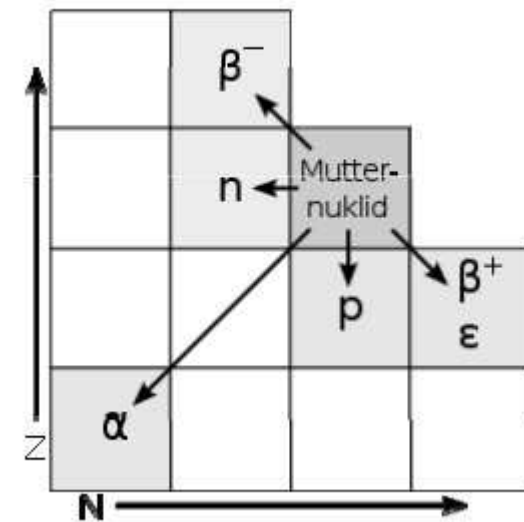
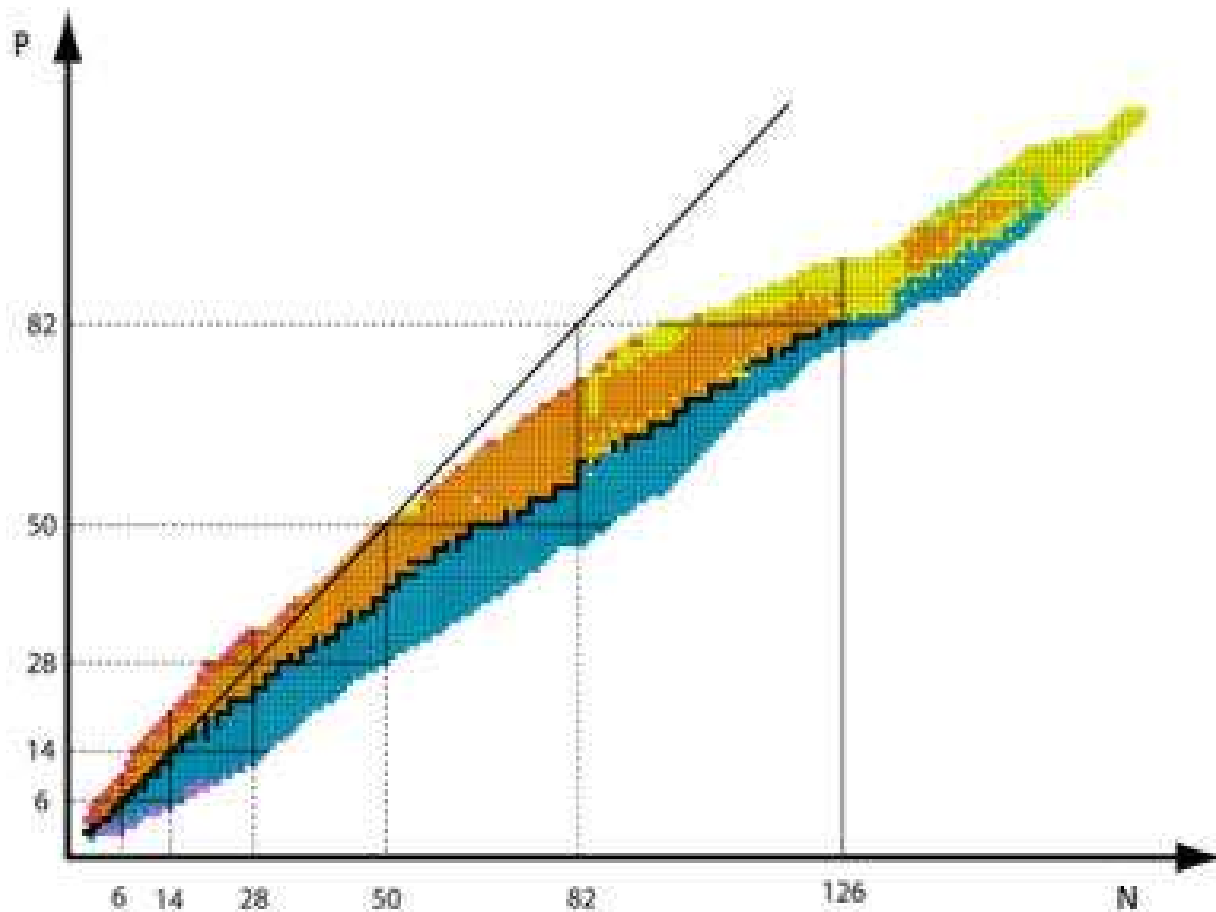
Die 4. Zerfallsreihe = Neptunium-237 (a. Plutonium 241) \rightarrow Thallium-205
 kommt in der Natur nicht mehr vor (bereits vollständig zerfallen)

$4n+1$

Stabile und instabile Nukleonen

Stabile Kerne beschränken sich auf schmales Band in N-Z Ebene

Bei schweren Kernen wird zur Überwindung Der Coulomb-Barriere mehr Neutronen eingebaut ($N > Z$)



Stabile Kerne

β^- Zerfälle

β^+ Zerfälle + EC

α -Zerfälle

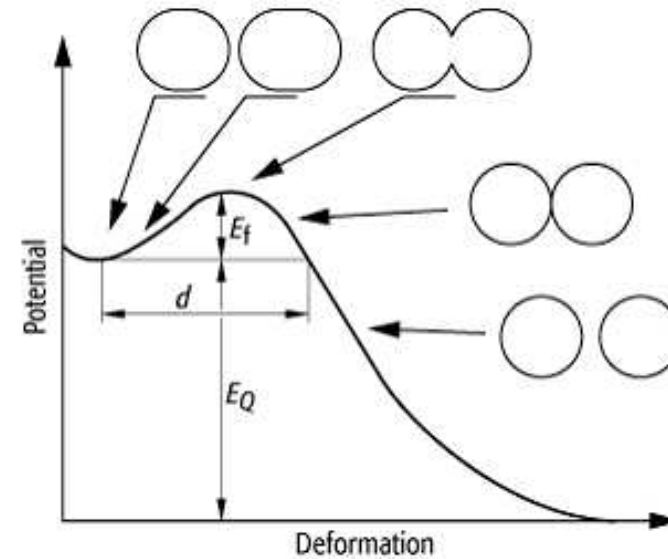
Spaltung

Spontane Spaltung

Verformung der Nukleonverteilung zu Ellipsoid

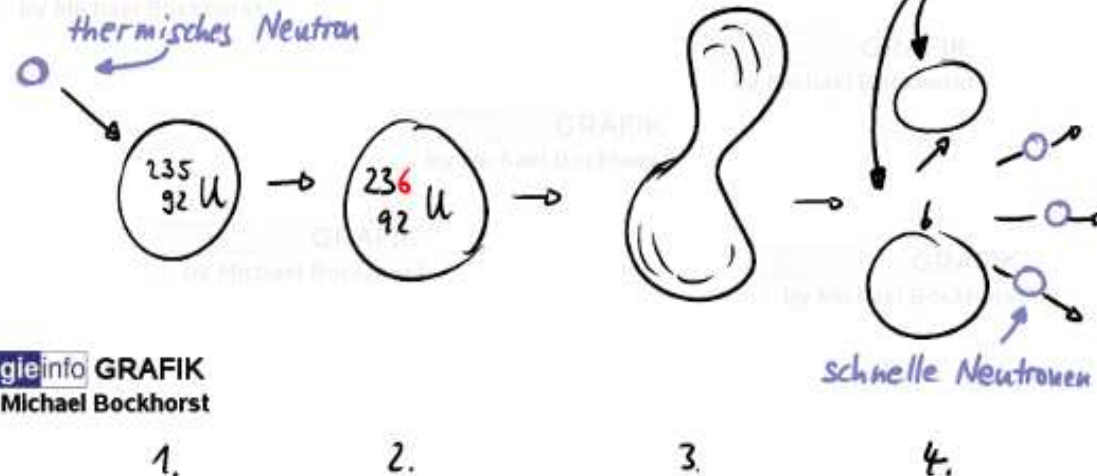
Bindungsenergie verringert sich wegen vergrößerter Oberfläche

gleichzeitig sinkt Coulomb-Abstoßung

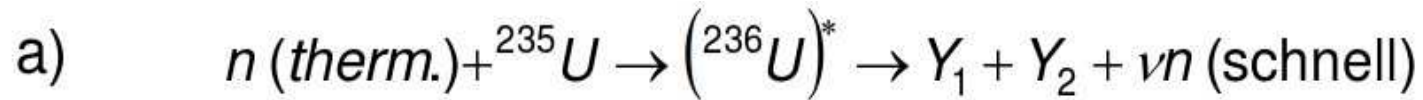


Induzierte Spaltung:

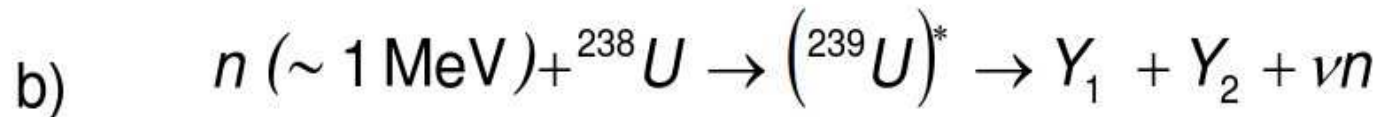
Vier-Phasen-Modell der Kernspaltung von Uran-235



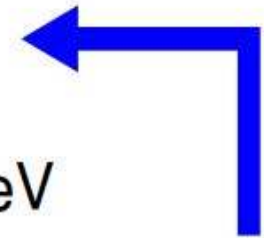
Induzierte Spaltung



$$E_B = m({}^{235}\text{U}) + m_n - m({}^{236}\text{U}) = 6.4 \text{ MeV} > \Delta E_{\text{Spalt}} \approx 5.8 \text{ MeV}$$



$$E_B = m({}^{238}\text{U}) + m_n - m({}^{239}\text{U}) = 4.8 \text{ MeV} < \Delta E_{\text{Spalt}} \approx 6.4 \text{ MeV}$$



Bei genügend hoher Neutron-Energie ist gelegentliche Spaltung von ${}^{238}\text{U}$ möglich.

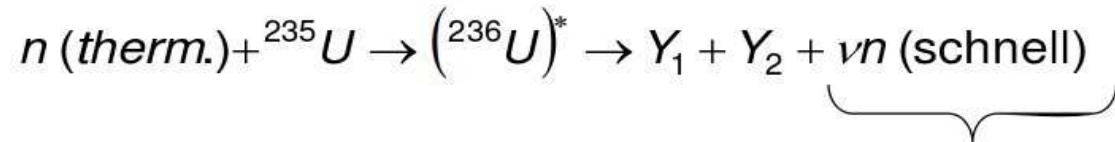
Warum kann man ${}^{235}\text{U}$ bereits mit thermischen Neutronen spalten?

a) $ug \rightarrow gg$: Paarungsenergie wird als zusätzliche Energie frei

b) $gg \rightarrow ug$: Paarungsenergie wird zusätzlich benötigt

Kernspaltung in Kernkraftwerke

Kettenreaktion nur mit thermischen Neutronen und Spaltung von ^{235}U möglich



Im Mittel 2.3 Neutronen (schnell)

Neben direkten Neutronen entstehen auch verzögerte (1ms ... 1min) Neutronen (~1%) die für Steuerung eines Reaktors wichtig sind.

Energiebilanz bei Spaltung

E_{kin} der Spaltfragmente	167	±	5 MeV
E_{kin} aller Spaltneutronen	5	±	0.2 MeV
prompte γ -Strahlung	8	±	1.5 MeV
verzögerte γ -Strahlung	6	±	1 MeV
E_{kin} der e^- aus dem β -Zerfall	6	±	1 MeV
E_{kin} der $\bar{\nu}_e$ aus dem β -Zerfall	12	±	2.5 MeV
Summe Q	204	±	6 MeV

Nutzbare Energie

$$Q - E_{kin}(\nu) = 192 \text{ MeV}$$



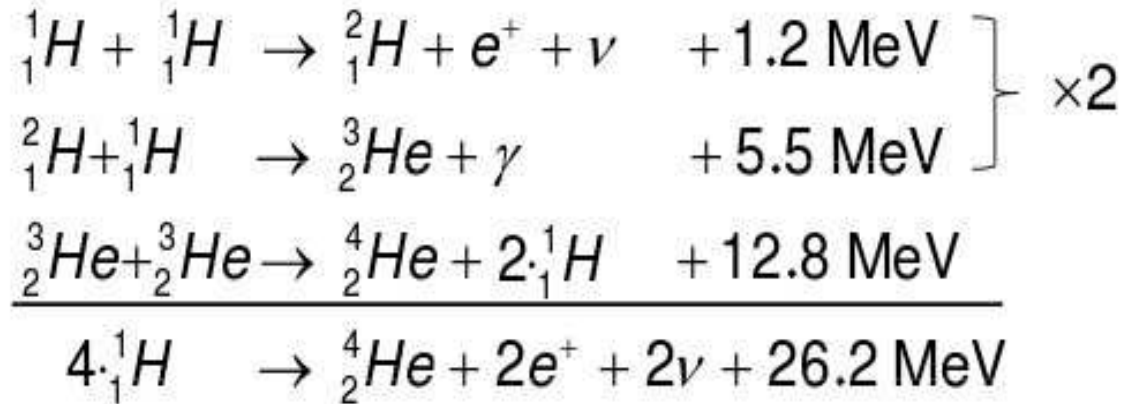
$$1\text{g U} \equiv 2.55 \text{ MWh}$$

Nachwärme: anfänglich bis zu 10% der Leistung. Aufgrund radioaktiver Zerf.

Wenn Masse des $^{235}\text{U} > 49 \text{ kg}$ (kritische Masse), dann werden schnelle Neutronen ausreichend abgebremst, um selbst wieder Kernreaktionen zu induzieren. (23 kg bei reflektierendem Wassermantel)

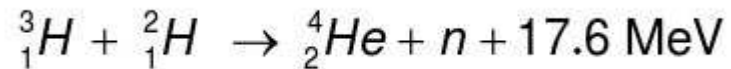
Energiegewinnung durch Fusion

a) pp-Zyklus der Sonne



Prozess wird durch erste Reaktion (schwache WW) limitiert
→ lange Lebensdauer der Sonne

b) Fusionsreaktoren nutzen einen Prozess der starken WW



Brennphasen : Stern mit $M = 25 M_{\odot}$

Fusion of	Time to complete	Core temperature (K)	Core density (kg m^{-3})
H	7×10^6 yr	6×10^7	5×10^4
He	5×10^5 yr	2×10^8	7×10^5
C	600 yr	9×10^8	2×10^8
Ne	1 yr	1.7×10^9	4×10^9
O	0.5 yr	2.3×10^9	1×10^{10}
Si	1 day	4.1×10^9	3×10^{10}

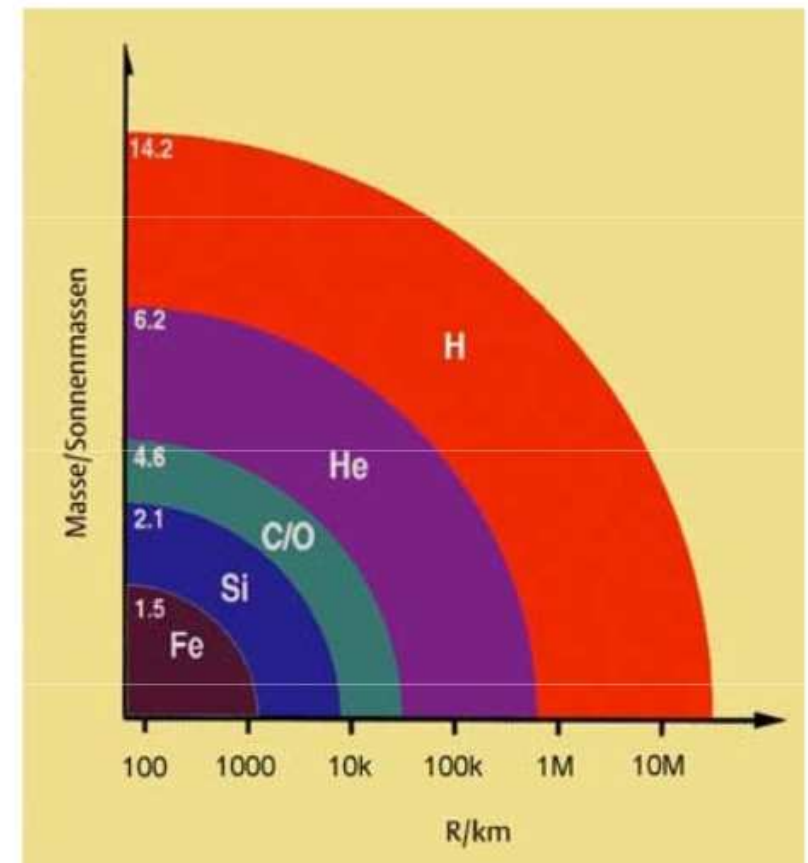
Brenndauern werden mit steigender Temperatur immer kürzer.

Endstadium :

Im Endstadium hat ein massereicher Stern eine Zwiebelschalenstruktur:

Eisenkern und äußere Schalen in denen noch Fusionsprozesse laufen.

Stark aufgebläht: Roter Riesenstern



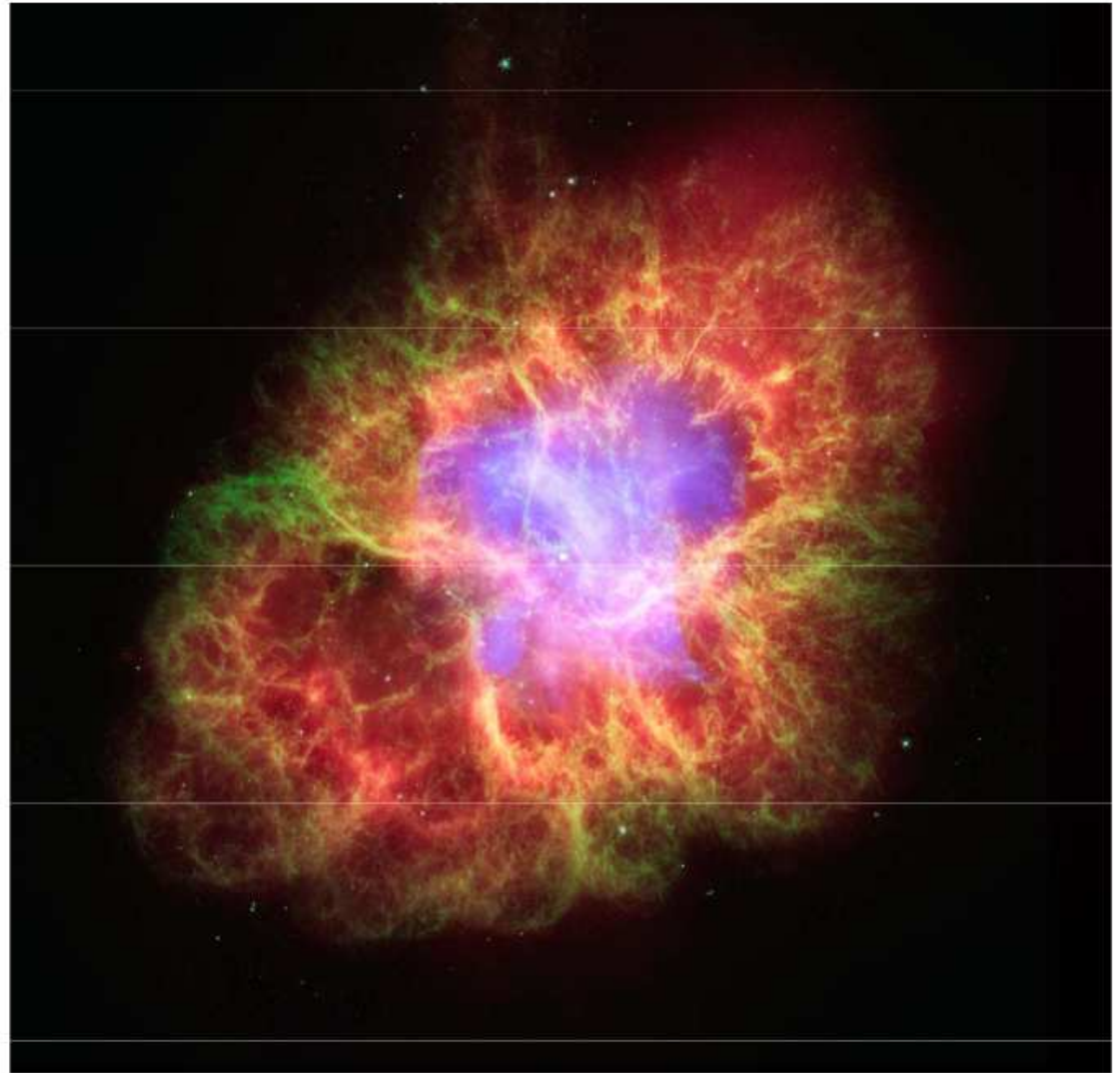
Durch Fusion in Sternen können alle Elemente bis $^{56}\text{Fe}/^{56}\text{Ni}$ gebildet werden. Alle anderen Elemente werden durch Neutronen-Einfang und nachfolgendem Beta-Zerfall gebildet.

Notwendig:
Neutronenreiche Umgebung
z.B. Supernova Explosionen.

- Rapid-Neutron Capture
(r-Prozesse)
- Slow-Neutron Capture
(s-Prozesse)

Rapid/slow bezieht sich auf den Neutroneneinfang, der schneller/langsamer als β - Zerfallszeit ist.

(Gegenstand aktueller
Forschung)



NGC 1952SST – Überreste einer Supernova