

11. Kernspaltung und Fission

11.1 Kernspaltung

Bindungsenergie in schweren Kernen macht es eher günstiger, in zwei kleinere Kerne aufzuspalten (7.5 MeV/Nukleon im Vergleich zu 8.5). für $A = 200$ können ca. 200 TeV gewonnen werden, wenn man kann da in 2 Kerne mit Rasse $A \approx 100$ spaltet.

Aber: die meisten schweren Kerne sind entweder stabil (^{208}Pb) oder zerfallen durch α -Zerfall. Spontane Spaltung sehr langsam / selten, da Coulombbarriere für Spaltung sehr hoch.

$${}_{\bar{z}}^A X \rightarrow {}_{\bar{z}/2}^{A/2} Y + {}_{\bar{z}/2}^{A/2} V \quad V_{cb}^f = \frac{1.44 \text{ MeV fm } z^2}{4 \cdot r}$$

$${}_{\bar{z}}^A X \rightarrow {}_{\bar{z}-2}^{A-4} Y + {}_2^4 \text{He} \quad V_{cb}^\alpha = \frac{1.44 \text{ MeV fm } (z-2)^2}{r} \approx \frac{1.44 \text{ MeV fm } z^2}{r}$$

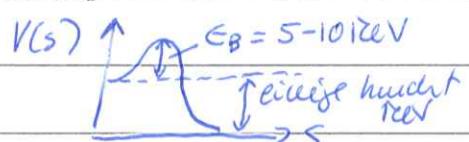
V_{cb}^α : $V_{cb}^\alpha = z/8$ bei $z = 92$ (Uran) ≈ 11.5 und Tunnelwahrscheinlichkeit exponentiell unterdrückt für Barriereförderung (siehe Skizzen)

Andere Behandlungsweise: Kern wird stark deformiert werden, bis Coulombrepulsion die beiden Hälften auseinander treibt



die meisten Kerne sind sphärisch oder leicht deformiert in Grundzustand $R_{1,2} : R_3 = 0.76$
für Deformation $\beta = 0.3$

- Kern versucht will Flüssigkeit kugelförmig seine Oberfläche zu minimieren \rightarrow sphärisch
- wenn genug Energie aufgebracht wird, um Oberflächenspannung zu überwinden \rightarrow "induzierte Spaltung"

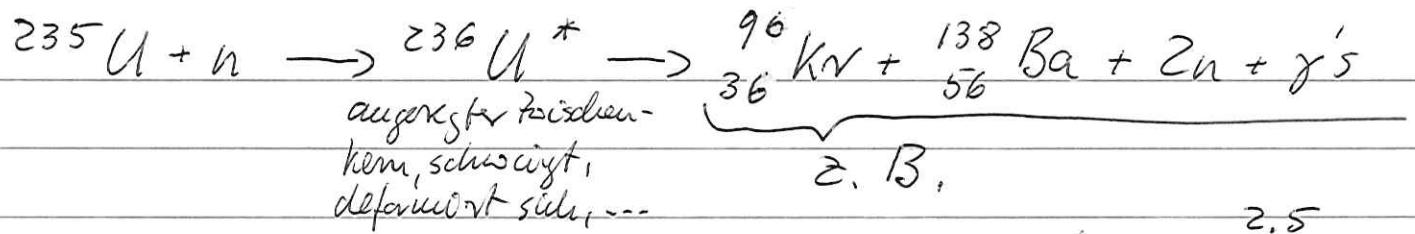


extern zugeführte Energie regt Oberflächenoszillationen an und wenn Auslenkung s aus Gleichgewichtsform zu groß \rightarrow Spaltung statt Rückkehr zu Gleichgewichtsform (Analogie elastischer Limit)

Kernspaltung entdeckt durch O. Hahn, Lise Meitner, F. Strassmann 1938: Bombardierung von ^{235}U mit Neutronen führte nicht zur Produktion schwerer Atomkerne, sondern präzise chemische Analyse zeigte Präsenz von Barium ($Z=56, A=138$) zu großen Überraschung. Entdeckt durch Lise Meitner als Spaltprodukt.

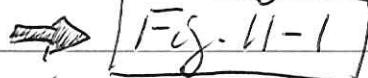
^{235}U spaltet leicht wenn es mit 'thermischen' Neutronen bombardiert wird.

'thermisch': kinetische Energie $\approx \frac{3}{2}kT$
d.h. von Größenordnung $0.025\text{ eV} \stackrel{!}{=} v = 2000\text{ m/s}$



\rightarrow 2 Spaltfragmente + einige prompte Neutronen + γ -Strahlung

setzt etwa 200-250 MeV Energie frei



83% kinetische Energie Spaltfragmente

11% Austrittsenergie "

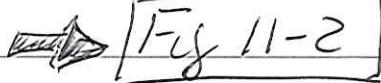
später freigesetzt in Form verzögterer ^{*}Neutronen
 β^- - und γ -Zerfällen

0.5% kinetische Energie Neutronen

* nach β -Zerfall

3.5% prompte γ -Strahlung

die emittierten Neutronen können weitere Spaltungen induzieren, müssen dann aber von $T_n = 1-2$ MeV auf thermonukleare Energie abgebremst werden
~ dann Kettenreaktion



wenn im Mittel 1 Neutron aus einer Spaltreaktion weitere Spaltungen induziert: "kritische Reaktion"
konstante Rate

> 1 superkritisch, Beschleunigung

< 1 subkritisch, Reaktion stirbt aus

Technologische Anwendungen: Kernreaktor, (Kernwaffen), Antrieb U-Boote, ...

Kontrollierte Spaltungs von $1g$ ^{235}U setzt soviel Energie frei wie Verbrennung von 2.6 t Kohle (≈ 25 MWh)

Prinzip: freigesetzte Energie in Spaltung → kin. Energie Spaltfragmente → Wärme → treibt Turbine an → elektrischer Generator
Schiffs- oder Raketentrieb

Technologische Gesichtspunkte:

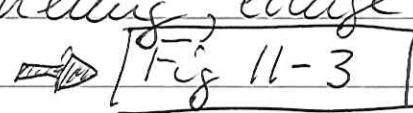
- Minimierung Neuhonenverlust: "Core" oder "Kern" des Reaktors muß groß genug sein. Es gibt eine "kritische Masse" (Oberfläche: Volumen $\propto 1/r$)
 - Vollkugel von 15 kg ^{235}U mit Radius $r > 6\text{ cm}$ ist "kritisch"
 allerdings: der größte Teil des natürlichen Uras ist ^{238}U (99.3%), ^{238}U fängt Neuhonen mit großem Wirkungsquerschnitt ein und spaltet danach nicht. Für ^{235}U ist der entsprechende gg-kern nach Neuhonen einfang durch Paarenergie stärker gebunden und daher höher angeregt bei ^{238}U ungekehrt. Höher angeregter Kern spaltet viel leichter. Für Reaktor braucht man Uran das mindest auf einige % ^{235}U angereichert ist.

- Abbremsung (Moderierung) der Neuhonen bei gleichzeitiger Minimierung Einfang außer durch ^{235}U . Moderierung durch elastische und inelastische Stöße mit Atomkernen. Optimal Wasserstoff (H oder D) in Wasser^{*}; auch benutzt Kohlenstoff (Graphit)

^{*} hat allerdings als normale Wasserstoff großen Neuhonen-einfangsquerschnitt. D besser

Abbremslänge in H_2O : 5.6 cm in C: 18.7 cm

- Kontrolle der Reaktionsrate: je nach Bedarf wird ein Neutronenabsorber weiter/weiter/aufgerückt in Reaktorkern gebracht werden. Steuerstäbe aus Cd oder B (Regulierung über die β -verzögerten Neutronen)
- Wärme muß abtransportiert werden. Typische Weise Wasser

• Erster Reaktor: 1942 Dez. E. Fermi und Mitarbeiter, Univ. Chicago. 385 t Graphitblöcke in sphärischer Einordnung um 40 t U. Keine Kühlung, einzige kW Leistung  Fig 11-3

• natürlicher Reaktor vor ca $2 \cdot 10^9$ Jahren in heutiger Gabon durch Wassereintritt in eisig U-Lagerstätte (damals noch 3% ^{235}U in nat. U) genügend Moderierung, braunte stabil ca $2 \cdot 10^5$ J.
 $t_{1/2}(^{235}U) = 7 \cdot 10^8$ J $t_{1/2}(^{238}U) = 4.5 \cdot 10^9$ J

Grund für Stabilität: stat. Schwankungen \rightarrow gestrigerte Fehl-Spaltungen \rightarrow höhere Reaktorleistung und damit Erwärmung \rightarrow Moderator (Wasser) dehnt sich aus \rightarrow verminderter Moderatorwirksamkeit \rightarrow weniger Neutronen abgetrennt \rightarrow Griffrage wahrscheinlichkeit reduziert und umgekehrt

Nb: selbst Prinzip der Moderierung trifft auf fast alle heute gebräuchlichen Reaktortypen zu (alle in D); nicht für graphitmoderierte Leichtwasserreaktoren die an den SFR entwickelt wurden, Chernobyl Typ (noch 16 in Betrieb) Funktionprinzip Reaktor  Fig 11-4

11.2 Elementsynthese im Universum

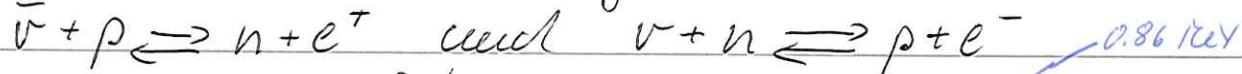
• Primordiale Elementsynthese:

- ca. $10\ \mu s$ nach Big Bang (Urkuall) ist Universum auf $T \approx 150\text{ MeV} = 10^{12}\text{ K}$ abgekühlt und es findet ein Phasenübergang statt. Quark-Gluon-Plasma ist Materie bestehend aus freien Quarks und Gluonen sowie e^-, ν, γ 'kristallisiert aus' wieder sich q und g zu Hadronen verbinden  [Fig 11-5].

Ciud. holen wo heute die kleineren in z.B.

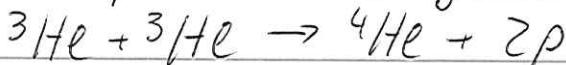
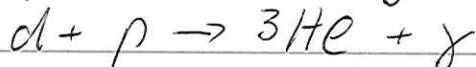
ALICE am LHC

- Hadronen zerfallen schnell, es bleiben nur p, n, \bar{p}, \bar{n} übrig; wegen eines gewissen Rateverhältnisses (noch nicht verstanden, wohin) bleiben nach $p\bar{p}$ und $n\bar{n}$ Annihilation ein kleiner Bruttostrom von p und n übrig. Solange T hoch genug stehen diese im Gleichgewicht



Nach einigen Sekunden $T < 10^{10}\text{ K}$ zu niedrig für Reaktionen und Neutrinos entkoppeln und Neutrinos beginnen zu zerfallen

- sobald $T \lesssim 1\text{ GeV}$ bilden sich erste Atomkerne



da es keine stabilen $A=5$ Kerne gibt: hier Ende nur noch ganz wenige ${}^7\text{Li}$ (${}^4\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$) & (${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He}$) sobald Neutrinos aufgebraucht (zu Beginn der Nukleosynthese $p:n \approx 4:1$) stoppt Nukleosynthese ca. 3 Minuten nach Urkuall

Kosmische Zusammenhang:

75% (Gewicht) p }

$2 \cdot 10^{-5}$ d

$8 \cdot 10^{-5}$ ^3He

24,5% ^4He

$1,5 \cdot 10^{-10}$ ^7Li

Primordiale Elemente,
sind heute noch da, Häufigkeiten
in 1960er bis 1980er J. gemessen
+ Elektronen, Neutrinos, Photonen

- Universum kühlte weiter ab und expandiert, außerdem passiert lange nichts bis bei $T \approx 3000\text{K}$
 $\stackrel{1}{=} \frac{1}{4}\text{ eV}$ nach ca 400 000 J. neutrale Atome gebildet werden und dazwischen Photonen entkoppeln \rightarrow kosmische Hintergrundstrahlung durch weitere Expansion des Universums heute nach $13 \cdot 7 \cdot 10^9$ J. auf 3 K abgekühlt
- ④ $\text{p} + \text{e} \rightleftharpoons \text{H} + \gamma$ Rückreaktion stoppt

⑤ Elementsynthese in Sternen

- für die ersten Millionen Jahre Strahlungsdruck $>$ Materiedruck, vermutlich bilden sich jetzt bereits durch Fluktuationen Regionen mit höherer Dichte dunkler Materie, Gravitation \rightarrow zunehmender Verdichtung
- nach ca 10^8 J. Strahlungsdruck genug gewusst, daß sich auch das expandierende Gas druckt und Materie um die dunkle Materie klumpen kann, Kontraktion durch Gravitation \rightarrow Gravierung des Präklastaren Nebels bis T im Zentrum hoch genug für unheilbare pp-Fusion ist, ca 10^7K $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{d} + \text{e}^+ + \nu$ (schwache WW)

Fusionsreaktion produziert Wärme, stoppt dadurch allmählich gravitativen Kollaps
 → stabile Brennphase: zur Feuer frischende Fusionsenergie = Wärmehaltung der Oberfläche (Energiehaushalt zur Oberfläche dominant durch Strahlung)

die meisten Sterne, auch unsere Sonne, sind in dieser Brennphase: Verbrennen von Wasserstoff zu Helium

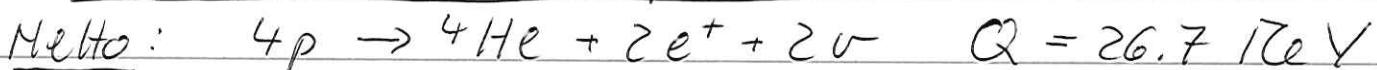
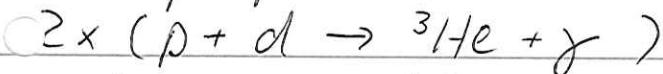
Einige oft ein Hauptreihenstern moderater Größe und Temperatur

$$m_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} \quad T_e = 1.5 \cdot 10^7 \text{ K} \quad T_s = 5700 \text{ K}$$

$$\text{Luminosität } L = 3.8 \cdot 10^{33} \text{ erg/s} = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

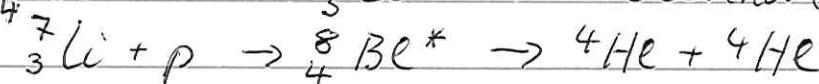
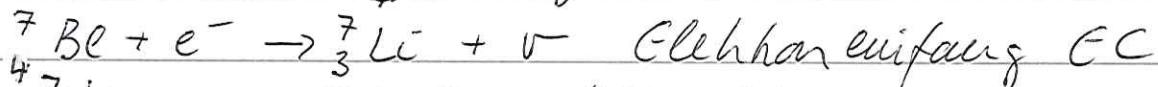
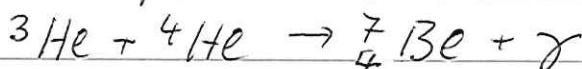
(massivere Sterne haben höhere Luminosität und verbrennen (erschöpften Wasserstoffvorrat) schneller)

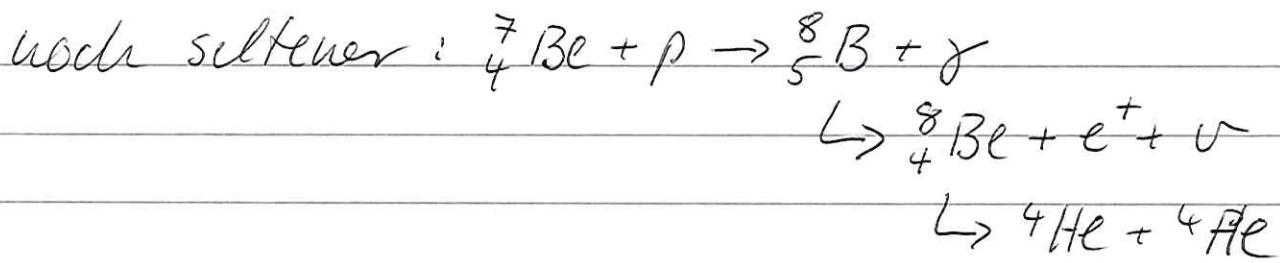
1938 erklärt H. Bethe Fusionsreaktionen i.d. Sonne:



pro Masse energetisch noch effizienter als Spaltung 1 MeV/Nukleon \leftrightarrow 7 MeV/Nukleon

andere Reaktionen in der Sonne





Reaktionen sichtbar durch solare Neutrinos!

→ Fig 11-6

solare Neutrinostrahlung auf die Erdoberfläche $10^{15}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
erster Nachweis: R. Davies und Mitarbeit 1970
Taub mit 615 t Perchloraethylen in Homestake
Mine ($2 \cdot 10^{30}$ Cl-Atome)
 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ etwa 1 Ar-Atom / 2 Tage

Sonne wird ca. $15 \cdot 10^9$ F brennen, da ein Brennstoff verbraucht.

- Wenn Stern groß genug: Zentraler He-Kern kontrahiert wieder durch Gravitation, wenn er dabei heiß genug wird, ca. 10^8 K , beginnt He-Brennen

geometrische: Fusionsreaktionen mit halb el. Coulombabst.
 \rightarrow Tunneln, Paexp-G Gamow-Faktor $G \propto 1/r^2$

$${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8_4\text{Be}^+ \quad t_{1/2} = 7 \cdot 10^{-17} \text{ s}$$

dann bildet sich stabile Kernenkette
ca 1 ${}^8\text{Be}$ pro 10^9 ${}^4\text{He}$ (Salpeter 1952)

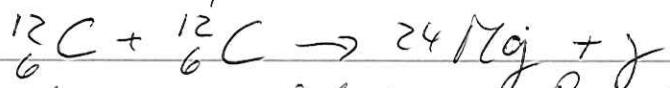
und dann ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$
wieder stabile Brennphase $10^7 - 10^8$ F.

schließlich auch ${}^{12}_6\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$
und später ${}^{16}_8\text{O} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \gamma$
zusätzlich auch (α, n) und (α, p) -Reaktionen
wegen zunehmender Coulombbarrieren zu niedrig
hier zwecke.

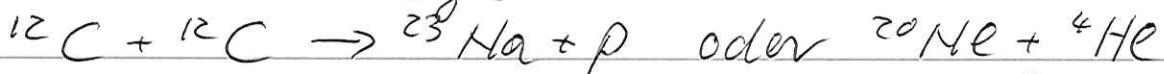
- wenn He verbraucht

→ kleine Sterne: Kontraktion bis Elektronendruck sie stoppt, keine innere Energiequelle, starten restliche Energie ab "weiße Zweig" $m < 0.7 m_{\odot}$

→ größere Sterne: längste Brennphase wird erreicht, wenn $T \approx 6 \cdot 7 \cdot 10^8 K$ $m > 4 m_{\odot}$



andere wichtige Reaktionen



wenn $m > 10 m_{\odot}$ fängt bei $T \geq 2 \cdot 10^9 K$ Sauerstoffkerne an $^{12}_{\text{C}} + ^{16}_{\text{O}}$ und $^{16}_{\text{O}} + ^{16}_{\text{O}}$ Fusion

→ Elemente Mg, Si, P, S entstehen

- ab $10^9 K$ völlig neuer Reaktionstyp möglich:

γ -Frequenzität hoch genug für sogenannte photoumlaufende Reaktionen (γ, n) (γ, p) (γ, α) daraus resultierende p, n, α haben genügend hohe Energien und können leicht von Kerren aufgefangen werden →

viel schneller Reaktionen als Fusion bilden Elemente bis zur Fe/Ir-Region (max BIA)

- schweren Elementen als Fe werden durch Neutroneneinfang reaktionen und β^- -Zerfälle erzeugt

1. langsaamer Prozess - slow neutron capture \rightarrow s-Prozess

subkriktive Neutroneneinfang und, wenn instabile Isotope produziert werden, β^- -Zerfall, Elementsynthese entlang des Stabilitätsfals bis zu Blei. Schwerne Kerne α -instabil. Passiert in Sternen mit roten

➡ Fig. 11-7 Riesen

2. schneller Prozess - rapid neutron capture $\rightarrow \underline{r}$ -Prozess in Umgebung mit sehr hohem Neutronenfluss $\approx 10^{32} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$. Abtrennung von Neutronen viel schneller als radioaktiver Zerfall; auch Elemente jenseits Blei sind weitab von Tal der Stabilität, Grenze jenseits von Uran durch Spaltung. Könnte in ^{Neutron Star Mergers oder} supernova Explosioen stattfinden? Viele Elemente werden durch Explosion herausgeschleudert, übrig bleibend Neutronenstern (bis max $2 m_0$) oder schwarzes Loch.
 (Fig. 11.7.)

Wo kommen die Neutronen z.B. für s-Prozess her?
 Reaktionen wie $_{16}^{22}\text{Ne} + \alpha \rightarrow _{12}^{25}\text{Mg} + n$

Elemente eher auf der protonreichen Seite werden durch sogenannten p-Prozess produziert
 (p,n) und (p,γ) -Reaktionen

Mehrlosigkeit in Sternen; Überblick ~~Fig. 11.8~~

- beobachtete Elementverteilung: Prozesse, die zu bestimmten Elementen und Isotopen führen, bekannt. Nur nicht davon, wo sie im Universum stattfinden.