

- Wärme muß abtransportiert werden
 + typisch Wasser & Dampf & Antrieb Turbine & Strom

1. Reaktor: Dez 1942 Univ Chicago G. Fermi & Mitarbeiter
 385 t Graphitblöcke in sphärischer Anordnung um
 40 t U & einige kW Energie; umgewandelt Fig 5-11

natürlicher Reaktor von ca. $2 \cdot 10^5$ Jahren im heutigen
 Gabun durch Wassereintrich in U-Lagerstätte (damals
 noch 3% ^{235}U in nat. U) genügend Neutronen;
 "braunte" ca. 200 000 Jahre

Nb.: selbes Prinzip der Neutronenvervielfachung trifft auf fast
 alle heute gebräuchlichen Reaktortypen (alle
 in Deutschland); nicht für sowjetische Graphit-
 moderierte Reaktoren vom Chernobyltyp (16 in Betrieb)

6. Sterne und Kerne

6.1. Primordiale Elementsynthese

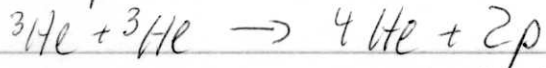
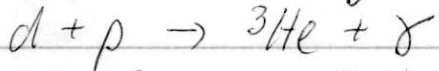
• ca $10 \mu\text{s}$ nach Urknall bei $T \approx 150 \text{ MeV} \approx 10^{12} \text{ K}$
 findet ein Phasenübergang statt

Materie bestehend aus freien Quarks und Gluonen sowie
 e, ν, γ 'kristallisiert aus' indem sich q und $\bar{q}$
 zu Hadronen verbinden $\Rightarrow$ Fig. 6-11

Hadronen zerfallen schnell, es bleiben nur
 $p, n, \bar{p}, \bar{n}$ übrig; wegen geringen Materieüberschusses
 bleiben nach $p\bar{p}$ und $n\bar{n}$ Annihilation p und
 n übrig; solange T hoch genug (einige s)
 stehen diese im Gleichgewicht

$\bar{\nu} + p \rightleftharpoons n + e^+$ und $\nu + n \rightleftharpoons p + e^-$
 dann beginnen Neutronen zu zerfallen

• sobald $T \lesssim 1 \text{ MeV}$, bilden sich erste Atomkerne
 $p + n \rightarrow d + \gamma$ 2.2 MeV Bindungsenergie



da es keine stabilen $A=5$ Kerne gibt: hier Ende
 nur noch ganz wenig ${}^7\text{Li}$

Sobald Neutronen aufgebraucht (zu Beginn
 Nukleosynthese $p:n \approx 4:1$) stoppt Nukleosynthese
 ca. 3 Minuten nach Urknall

76% (Gewicht) p

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

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

23% ${}^4\text{He}$

$1.5 \cdot 10^{-10}$ ${}^7\text{Li}$

+ e, ν, γ

} primordiale Elemente
 sind heute noch da

• Universum kühlt weit ab und expandiert
 ansonsten passiert lange nichts
 bis bei $T \approx 3000 \text{ K} \approx 1 \text{ eV}$ nach 400 000 Jahren
 neutrale Atome gebildet werden
 und Photonen entkoppeln $\rightarrow$ kosmische Hinter-
 grundstrahlung

6.2. Elementsynthese in Sternen

nach ca 10^8 Jahren Strahlungsdruck genug gering

expandierendes Gas kühlt durch Gravitation
 dabei Erwärmung
 prästellare Nebel kontrahiert und erwärmt sich
 bis T im Inneren hoch genug für untern pp Ketten
 bei ca 10^7 K $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ (schwache WW)
 produziert Wärme, stoppt allmählich Gravita-
 tionskollaps

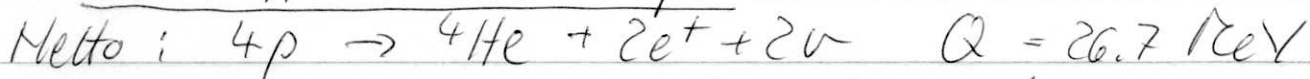
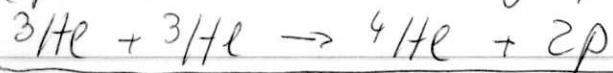
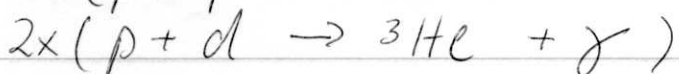
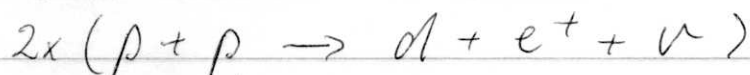
→ stabile Brennpunkt: im Inneren freigesetzte
 Fusionsenergie = Wärmestrahlung an der
 Oberfläche

die meisten Sterne - auch unsere Sonne -
 sind in dieser Phase: Verbrennen von H zu
 He

$$m_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ g} \quad T_c = 1.5 \cdot 10^7 \text{ K} \quad T_s = 5700 \text{ K}$$

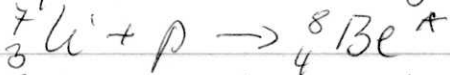
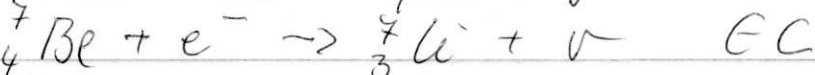
$$\text{Luminosität } L = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

1938 erklärt H. Bethe Fusionsreaktionen



pro Masse noch effizienter als Spaltung!

andere Reaktionen



oder noch seltener



Reaktionen sichtbar durch solart Neutrinos!

Heimwoßfluß auf Erdoberfläche $10^{15} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$

erster Nachweis: R. Davies und Mitarbeiter 1970

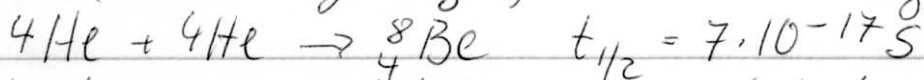
Tank mit 615 t Perchloräthylen in Homestake-Mine ($2 \cdot 10^{30}$ Cl-Atome)



Sonne wird ca $15 \cdot 10^9$ Jahre brennen, dann Brennstoff (H) verbraucht

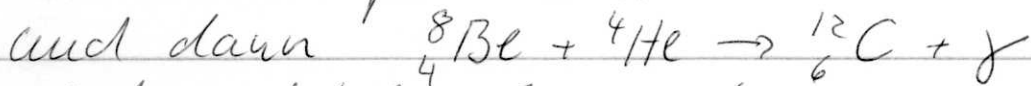
• wenn Stern groß genug: zentraler He-Kern kontrahiert wieder durch Gravitation

Wenn heiß genug, ca 10^8 K beginnt He-Brennen

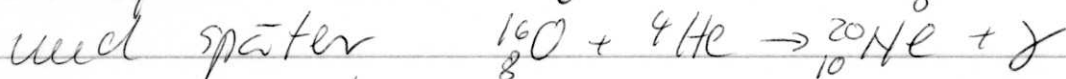
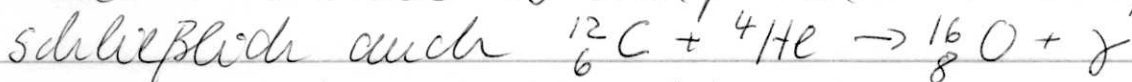


trotzdem bildet sich stabile Kerne

ca 1 ${}^8\text{Be}$ pro 10^9 He



Wieder stabile Brennphase $10^7 - 10^8$ Jahre



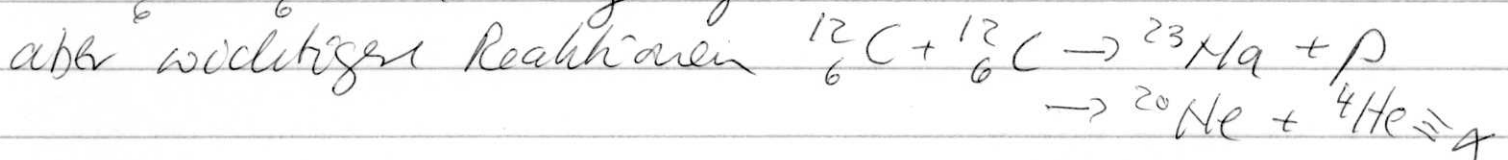
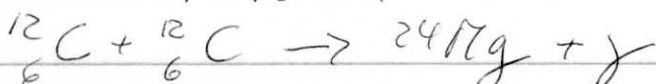
wegen zunehmender Coulombbarrieren für Ende

• Wenn He verbraucht:

- kleine Sterne: Kontraktion, bis Elektronendruck sie stoppt, kleine innere Energiequelle, stabilen restliche Energie ab "weiße Zwerge" $m < 0.7 m_\odot$

- größere Sterne: nächste Brennphase wenn

$$T \approx 6 - 7 \cdot 10^8 \text{ K} \quad m > 4 m_\odot$$



Wenn $m > 10 m_{\odot}$ fängt bei $T \geq 2 \cdot 10^9 \text{ K}$ O-Brennen
 $12\text{C} + {}^{16}\text{O}$ und ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}$ - Fusion

→ Elemente Mg, Si, P, S entstehen

- ab 10^9 K völlig neuer Reaktionstyp: jetzt wird γ -Fluoreszenz hoch genug für sogenannte photokern Reaktionen (γ, n) (γ, p) (γ, α) resultierende p, n, α haben genügend hohe Energien und können leicht von Kernen eingefangen werden
 viel schneller Reaktionen bilden Elemente bis zur Fe/Mn Region (max B/A!)

- noch schwerere Elemente durch Neutroneneinfangreaktionen und β -Zerfälle
 r -Prozess rapid neutron capture
 s -Prozess slow " "

finden wahrscheinlich in Supernova Explosionen statt.

Viele Elemente werden durch Explosion herausgeschleudert, übrig bleiben Neutronensterne (bis $1.4 m_{\odot}$) oder schwarzes Loch