

Elektroschwacher Phasenübergang

$$t = 10^{-11} \text{ s}, kT \approx 100 \text{ GeV}$$

vorher: elektroschwache Vereinheitlichung
e.m. und schwache WW nicht unterscheidbar
 γ, W, Z ähnliche Eigenschaften.

Phasenübergang durch spontane Symmetriebrechung (Higgs-Mechanismus)
e.m. und schwache WW unterscheidbar

Bildung von Hadronen

$$t \approx 1 \mu\text{s}, kT \approx 100 \text{ MeV}$$

vorher: Quark-Gluon-Plasma

nachher: Hadronen

kg. $m_v = m_d$ ungefähr $n_p = n_n$

T zu hoch, um Kerne zu bilden
($E_B \approx 7 \text{ MeV}$) $\Rightarrow$ freie p, n

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

thermisches Gleichgewicht
weitere Abkühlung: $\sigma(\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n) \ll \sigma(e^+ n \rightarrow \bar{\nu}_e p)$
(wg. $m_n \gg m_p$) $\Rightarrow$ n/p-Verhältnis sinkt.

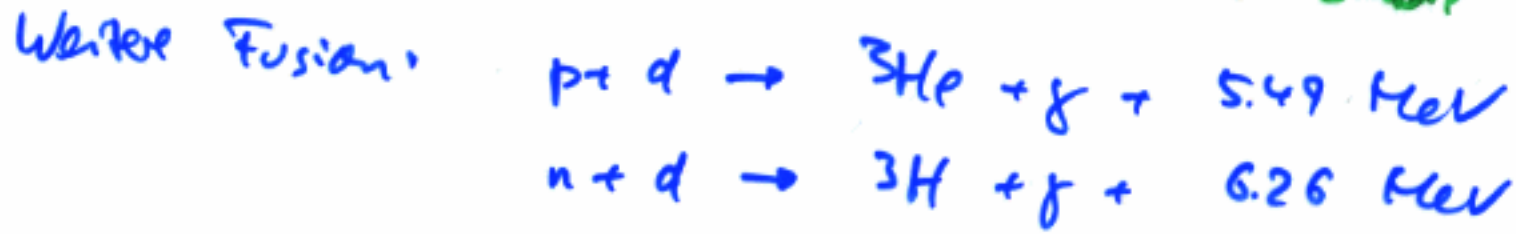
Primordiale Elementsynthese

$t = 200 \text{ s}$

88% Protonen, 12% Neutronen

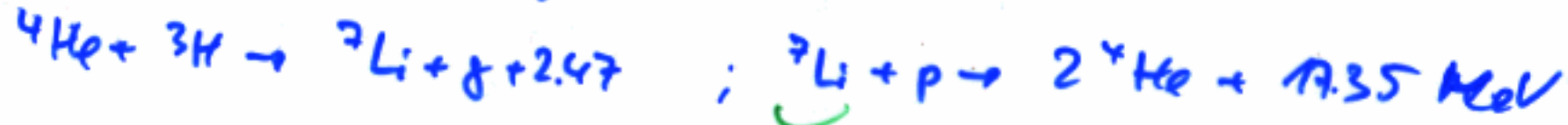


Nach $t = 200 \text{ s}$ T so klein, dass für $\leftarrow$ nicht mehr genug Energie zur Verfügung steht. $\Rightarrow$ Deuteronen stabil!



Dann ${}^3\text{H} + p$, ${}^3\text{He} + n$, ${}^3\text{He} + d$, $d + d \Rightarrow$ Erzeugung von ${}^4\text{He}$

${}^4\text{He}$ besonders stabil



wird sofort wieder zerstört!

$\Rightarrow$ alle Neutronen enden in ${}^4\text{He}$

$\Rightarrow$ schwere Kerne werden nicht gebildet (erst später in Sternen)

$\Rightarrow$ 24% Anteil von ${}^4\text{He}$ im Universum, Rest fast nur ${}^1\text{H}$

bis ca $t = 30 \text{ min}$: Coulomb-Barriere verhindert weitere Fusionen

Sternentwicklung und Elementsynthese

Sterne entstehen durch Kontraktion von interstellarem Gas und Staub, fast nur aus primordialen Wasserstoff und Helium.

Durch Kontraktion Erhitzung im Zentrum

T, P groß genug $\Rightarrow$ Fusion von Kernen beginnt

Strahlung verhindert weitere Kontraktion

Temperaturgefälle im Stern nach Virialsatz: $\langle E_{\text{kin}}(r) \rangle = \frac{1}{2} \langle E_{\text{pot}}(r) \rangle$

Im Zentrum erzeugte Energie wird vorwiegend durch Strahlung an die Oberfläche transportiert. Photonen: sehr viele Stöße, viele Tausend Jahre bis zur Oberfläche. Neutrinos: direkt mit $\approx c$. Chemische Zusammensetzung ändert sich im Wesentlichen nur im Zentrum der Sterne.

Fusionsreaktionen

Gleichgewicht : abgestrahlte Energie = durch Fusion produzierte Energie

besonders effektiv: Fusion von H zu He (7.07 MeV Bindungsenergie)

Voraussetzung: T hoch genug, um Coulomb-Barriere zu überwinden.

Analog zum α -Zerfall: Tunnel-Wahrscheinlichkeit e^{-2G}

mit Gamov-Faktor $G = \frac{\pi \alpha Z_1 Z_2}{v/c}$ (nicht nötig, dass $E > E_{\text{coul.}}$)

Reaktionsrate pro Volumen: $\dot{N} = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$
 ↑ ↑
 Dichten
 wa ↓ Geschwindigkeit

Geschwindigkeitsverteilung im Plasma der Temperatur T :

Maxwell-Boltzmann-Verteilung $n(v) \propto e^{-\frac{m v^2}{2kT}} = e^{-E/kT}$

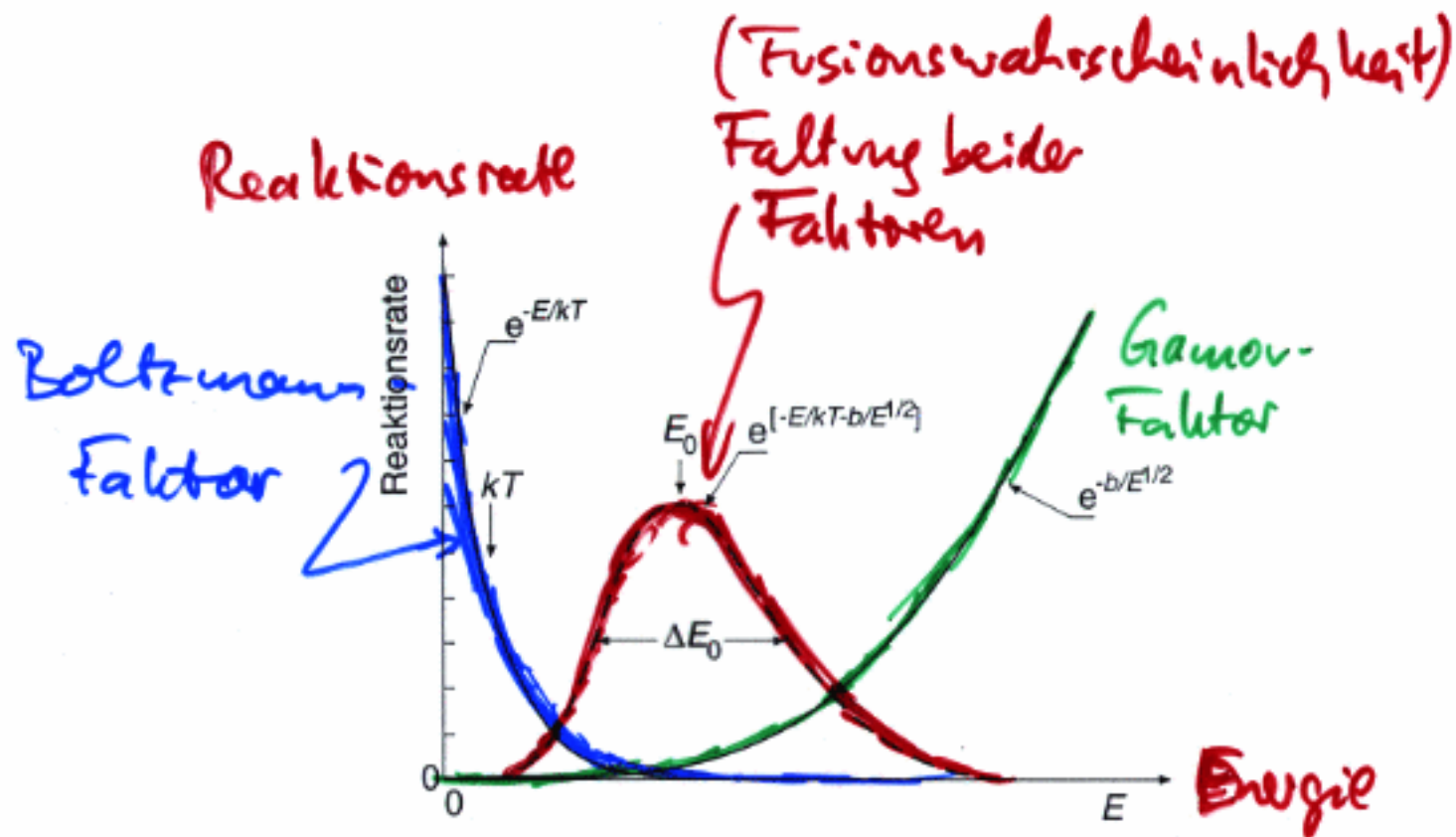


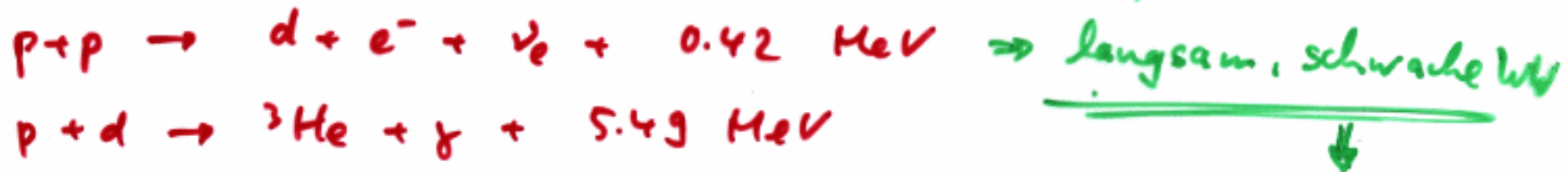
Abb. 19.10. Schematische Darstellung der Faltung der Maxwell-Verteilung $\exp\{-E/kT\}$ und des Gamow-Faktors $\exp\{-b/E^{1/2}\}$ zur Berechnung der Rate von Fusionsreaktionen. Das Produkt dieser Kurven ist proportional zur Fusionswahrscheinlichkeit (gestrichelte Kurve). Die Fusion spielt sich im Wesentlichen in einem recht schmalen Energieintervall der Breite ΔE_0 ab. Das Integral über diese Kurve ist proportional zur gesamten Reaktionsrate.

Je höher Z , desto höher muss T sein, damit Fusion möglich ist:

1. H-Fusion, dann 2. He-Fusion, erst später Fusion schwerer Kerne
 Schwere Sterne: Druck und Dichte höher im Zentrum
 $\Rightarrow$ Reaktionsrate größer $\Rightarrow$ Schwere Sterne kurzlebiger als leichte.

Wasserstoffverbrennung:

Stene mit $M > \frac{1}{10}$ Sonnenmasse erreichen $T > 10^7 \text{ K}$ und
zünden Wasserstoff-Fusion: Proton-Proton-Zyklus



↓
legt Lebensdauer
des Sterns fest



Solange Wasserstoff-Vorrat reicht, brennt Stern stabil

Sonne: ca. 10^{10} Jahre

$\frac{1}{2}$ davon bereits vergangen



netto auch: $4p \rightarrow d + 2e^+ + 2\nu_e + 26.72 \text{ MeV}$, aber höhere Coulomb-
C = Katalysator; sehr viel schneller als pp Zyklus (Barriere höher sein)

Heliumverbrennung

Nach Ausschöpfen des H-Vorrats $\Rightarrow$ Kollaps des He-Sterns durch Gravitation. Sehr kleine Sterne: keine weitere Fusion, Kollaps bis zum Weißen Zwerg (Fermi-Druck des Elektronengases stoppt Kollaps)

Schwere Sterne heizen bis $T \approx 10^8 \text{ K}$ und $\rho \approx 10^8 \text{ kg/m}^3$ auf $\Rightarrow$ Heliumverbrennung setzt ein. H in Schale heizt auf und fusioniert $\Rightarrow$ Ausdehnung durch Strahlungsdruck, niedrigere Temperatur an Oberfläche $\Rightarrow$ Rotverschiebung $\Rightarrow$ Roter Riese.

Synthetisierung schwererer Kerne als ${}^4\text{He}$ nicht möglich?

$A=5$, $A=8$ keine stabilen Kerne...

Salpeter 1952: $T \approx 10^8 \text{ K}$: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightleftharpoons {}^8\text{Be}$ therm. Gleichgewicht
 $\rho = 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$: Gleichgewicht $\frac{1 {}^8\text{Be}}{10^9 {}^4\text{He}}$

reicht für ${}^4\text{He} + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}^*$ (resonanter 0^{++} -angeregter Zustand)

$\Rightarrow \approx 1\%$ aller Kerne im Universum schwerer als Helium, fast alle durch diesen Prozess erzeugt

Verbrennung zum Eisen

Wenn He-Vorrat verbraucht, bestehen Sterne hauptsächlich aus ^{12}C .
Sterne im Massenbereich der Sonne werden zu weißen Zwergen.

Massivere Sterne: α mit ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne etc.

oder direkte Fusion $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \alpha + 4.62 \text{ MeV}$

→ Elemente zwischen C und Fe werden bevölkert. etc.

Zwiebelschalenförmig: Fe im Zentrum → H außen.

letzte Phase (Silizium zu Eisen) nur wenige Tage

→ keine Energiequelle mehr vorhanden (E_B von Fe ist maximal)

Strahlungsdruck fällt weg, Stern kollabiert. Gewaltige Implosion

→ Materie im Zentrum gewaltiges T und p → enorme Explosion

Schlagartige Emission von mehr Energie als zuvor in ganzem Leben.

(Supernova). Schleudert Sternmaterie in interstellaren Raum,

später Baumaterial für neue Sterne. Im Zentrum entsteht:

$m < m_{\text{Sonne}} \rightarrow$ weißer Zwerg

$m_{\text{Sonne}} < m < 2 m_{\text{Sonne}} \rightarrow$ Neutronenstern; $m > 2 m_{\text{Sonne}}:$ Schwarzes Loch

Synthese schwerer Kerne ($> \text{Fe}$)

durch Anlagerung von langsamen Neutronen

s-Prozess (langsamer Prozess): in Sternen

Neutron-Einfang $\rightarrow$ β -Zerfall
entlang des Stabilitätsstrahls

Grenze: Blei, alle Kerne $> \text{Pb}$ sind
 α -instabil.

r-Prozess (schneller Prozess): Während Supernova-Explosion
mit enormen Neutron-Flüssen,
Neutronen-Anlagerung viel schneller
als α - und β -Zerfall.
auch Elemente $> \text{Pb}$
Obere Grenze bei Transuranen durch
spontane Spaltung gegeben.