

Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung #06

Eigenschaften stabiler Kerne 2.5 Nukleare Astrophysik

- Big Bang Nukleosynthese
- Kernfusion in Sternen,
- Supernovae





Wiederholung:Yukawa-Potenzial & Kernreaktionen



Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung vermittelt durch den Austausch von massebehafteten Mesonen (π , ρ , σ , ω) mit Reichweite < 2 fm **Yukawa-Potenzial** :

$$V_{Yukawa}(r) = g_s \cdot \frac{1}{r} \cdot e^{-\left(\frac{m_{\pi}c}{\hbar}\right) \cdot r}$$



Kernreaktionen: elastisch/inelastisch, Aufstellung eines Modells

- Erhaltungsgrößen Ettot, ptot, Ltot
- Parität P mit $P_A \cdot P_a (-1)^{\ell_a} = P_B \cdot P_b (-1)^{\ell_b}$

Kernreaktionen: endotherm/exotherm, Reaktions-Q-Wert Inelastische Reaktionen für angeregte Kernniveaus A*

- Schwellenenergie $E_{thres} = Q(1+m_a/m_A)$

pick-up



Fusionsreaktionen & Tunneleffekt



- Fusionsreaktionen: hohe Coulomb-Barriere selbst bei leichten Kernen $V_c \sim 5 \text{ MeV}$
- Fusion von Kernen basiert daher auf dem quantenmechanischen **Tunneleffekt** Wahrscheinlichkeit für Transmission T:

 $T = e^{-G(E)}$

- mit Gamow-Faktor G
- Fusionsreaktionen finden statt im engen Gamov-Fenster $E_0 \pm \frac{1}{2} \cdot \Delta E_0$
- ultra-relativistische Schwerionen-Reaktion (ALICE am LHC, FAIR): Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma









2.5 Nukleare Astrophysik



Nukleare Astrophysik: theoretische & experimentelle Untersuchungen von: -Nukleosynthese-Reaktionen in ersten 3 Min. nach dem Urknall (Big Bang)

- Kernprozesse im Innern von Sternen (Sonne, Supernovae) zentrale Fragestellung: wie sind die Elemente im Universum entstanden?





Elemententstehung



Kernfusion: Big Bang (bis ⁷Li), Sterne (bis ⁵⁶Ni), Rote Riesen, Super-Novae





Elementhäufigkeit im Universum







1. Primordiale Nukleosynthese - Historie



- **1940:** Gamov und Alpher alle Elemente entstehen im frühen Universum durch Neutroneinfang & ß-Zerfall
- **1957:** Fowler et al. schwere Elemente nur in Sternen
- **1964:** Hoyle et al. He-4 Produktion ist primordial
- 1965: J. Peebles erste moderne BBN Berechnung
- **1970:** H. Reeves Deuterium zur Messung der Baryonendichte
- **1977:** Schramm et al. BBN beschränkt die Anzahl der v–Generationen (Link: Teilchenphysik-Kosmologie)
- **1992:** COBE Satellit misst erstmals Temperatur-Fluktuationen bei der 3 K Hintergrundstrahlung (heißer Urknall)
- 2003: WMAP misst präzise den Baryonenanteil Ω_b aus der Analyse von Schallwellen in der CMB Resultate in guter Übereinstimmung mit BBN







die BBN (Big Bang Nukleosynthese):

- beschreibt die Entstehung der leichten Elemente (D, ³He, ⁴He, ⁷Li) in den ersten drei Minuten nach den Urknall (die 'thermonukleare Explosion' des Universums) im Intervall T = 10⁹ 10¹¹ K
- sagt die beobachteten Häufigkeiten der leichten Elemente korrekt voraus (Variation über 10 Größenordnungen!)
- ist ein wesentlicher Stützpfeiler der Big Bang Theorie
- ermöglicht einen Einblick in die Physik des frühen Universums
- wesentliche Motivation: genaue Bestimmung der Baryonendichte Ω_b bzw. des Verhältnisses η (Baryonen/Photonen)
- ist ein guter Testfall f
 ür neue Theorien (Anzahl v–Generationen, sterile Neutrinos, neuartige Teilchen - Gravitinos): Astroteilchenphysik
- ist wichtiger Teil der Nuklearen Astrophysik (+ Elementsynthese in Sternen)



Nukleosynthese – zeitliche Einordnung



























BBN wird in **detaillierten Modellrechnungen** untersucht, dabei Variation von Dichte Ω_b der Baryonen, Neutronlebensdauer τ_n , Anzahl N_v der v–Generationen dann: Vergleich der Rechnungen mit Beobachtungen





BBN - keine schweren Elemente



BBN: keine schwereren Elemente als ⁷Li und ⁹Be, da

- rasches Anwachsen der Coulomb-Barrieren
- die Elemente mit A = 5 8 extrem instabil sind (⁸Be)
- die Dichte für die Tripel-Alpha-Reaktion $3\alpha \rightarrow {}^{12}C^*$ (s.u.) nicht hoch genug ist

b alle schwereren Kerne werden in Sternen gebildet





14



BBN - Resultate





die Kombination experimenteller Resultate von D, ³He, ⁴He und ⁷Li ergibt im Rahmen der systematischen Fehler konsistente Resultate (Konkordanz): Bestimmung des Baryonen-Photonen-Verhältnisses η

da N(γ) bekannt ist aus der Hintergrund-Strahlung (CMBR), ergibt sich für die **Baryonendichte** Ω_b :

$0.034 \leq \Omega_{\rm b} \leq 0.048$

die Baryonen (Protonen & Neutronen) tragen nur zu ~ 4-5 % zur gesamten Energiedichte Ω_{tot} im Universum bei (dunkle Energie & dunkle Materie)



BBN erlaubt Tests fundamentaler Physik – enge Wechselbeziehung zwischen Kosmologie, Kernphysik und Teilchenphysik Frage: wie viele Teilchengenerationen gibt es im Universum? N = 3,...Schramm et al. leiten aus BBN (⁴He-Rate) erste Obergrenzen ab für N.,: 1977: N_y < 7 1980: N_y < 4

 N_v (BBN) = 2.4 ± 0.4 heutiger Wert



grundlegende Idee:

⁴He-Rate ist abhängig von der Expansionsrate des Universums bei T = 1 MeV, d.h. von der Energiedichte aller relativistischen Teilchen: Photonen, Elektronen & **Neutrinos**





Teilchenphysik: Bestimmung der **Anzahl der** v–**Generationen** aus der 'unsichtbaren' Zerfallsbreite des schweren Z⁰ Bosons der elektroschwachen Kraft am LEP- e⁻e⁺ - Speicherring (CERN), Reaktion: e⁺ + e⁻ \rightarrow Z⁰



2. Kernfusion in Sternen

Sonne als typischer Hauptreihenstern bezieht Energie aus Kernfusion:

Energieerzeugung: H-Fusion ${}^{4}H \rightarrow {}^{4}He + 2 e^{+} + 2 v_{e}$ Energietransport innen: radiativ (lokales Strahlungsgleichgewicht) Energietransport außen: konvektiv

VOLUME 55

MARCH 1, 1939

PHYSICAL REVIEW

Energy Production in Stars*

H. A. BETHE Cornell University, Ithaca, New York (Received September 7, 1938)

It is shown that the most imbortant source of energy in It is shown that the most important source of energy in ordinary stars is the reactions of carbon and mitrogen with protons. These reactions form a cycle in which the original nucleus is reproduced, rit, C^{n} +H = N³, N³⁰ = C³⁰+e^{*}, C^{2n} +H = N¹⁶, N³⁰+H = O²⁰, O^{20} = N¹⁰+e^{*}, N³⁰+H = C²¹ +Het. Thus carbon and nitrogen merely serve as catalysts for the combination of four protons (and two electrons) into an α-particle (§7).

The carbon-nitrogen reactions are unique in their Ine carbon-nitrogen reactions are unique in their cyclical character (38). For all nuclei lighter than carbon, reaction with protons will lead to the emission of an *a*-particle so that the original nucleus is permanently destroyed. For all nuclei heavier than fluorine, only radiative canture of the protons occurs, also destroying the original nucleus. Oxygen and floorine reactions mostly lead back to nitrogen. Besides, these heavier nuclei react much more slowly than C and N and are therefore unimportant for the energy production. The agreement of the carbon-nitrogen reactions with

integration of the Eddington equations gives 19. For the integration of the Eddington equations gives 19. For the brilliant star Y Cygni the corresponding figures are 30 and 32. This good agreement holds for all bright stars of the main sequence, but, of course, not for giants. For fainter stars, with lower central temperatures, the reaction $H+H=D+e^+$ and the reactions following it, are

believed to be mainly responsible for the energy pr tion. (§10) It is shown further (§5-6) that no elements heavier than

Het can be built up in ordinary stars. This is due to the fact, rectance can be call up to orange years. Init is due to have the fact, mentioned above, that all elements up to boron are disin-tegrated by proton bombardment (a-emission!) rather than built up (by radiative capture). The instability of Bet reduces the formation of heavier elements still further. The production of neutrons in stars is likewise negligible. The heavier elements found in stars must therefore have existed already when the star was formed.

Finally, the suggested mechanism of energy production The agreement of the carbon-nitrogen reactions with is used to draw conclusions about astrophysical prouenns, observational data (§7,9) is excellent. In order to give the such as the mass-luminosity relation (§10), the stability correct energy evolution in the sun, the central tempera-ture of the sun would have to be 18.5 million degrees while (§12).

§1. INTRODUCTION

T^{HE} progress of nuclear physics in the last few years makes it possible to decide rather definitely which processes can and which cannot occur in the interior of stars. Such decisions will be attempted in the present paper, the discussion being restricted primarily to main sequence stars. The results will be at variance with some current hypotheses.

The first main result is that, under present conditions, no elements heavier than helium can be built up to any appreciable extent. Therefore we must assume that the heavier elements were built up before the stars reached their present state of temperature and density. No attempt will be made at speculations about this previous state of stellar matter.

The energy production of stars is then due entirely to the combination of four protons and two electrons into an α -particle. This simplifies the discussion of stellar evolution inasmuch as

* Awarded an A. Cressy Morrison Prize in 1938, by the New York Academy of Sciences.

the amount of heavy matter, and therefore the opacity, does not change with time.

The combination of four protons and two electrons can occur essentially only in two ways. The first mechanism starts with the combination of two protons to form a deuteron with positron emission, viz.

 $H+H=D+e^+$ (1)

The deuteron is then transformed into He⁴ by further capture of protons; these captures occur very rapidly compared with process (1). The second mechanism uses carbon and nitrogen as catalysts, according to the chain reaction

> $C^{ii}+H=N^{ii}+\gamma$. $N^{13} = C^{13} + e^4$ $C^{13}+H=N^{14}+\gamma$, $O^{\iota s} = N^{\iota s} + e^{+}$ (2) N^{14} +H= O^{15} + γ N^{15} +H=C¹²+He

The catalyst C12 is reproduced in all cases except about one in 10,000, therefore the abundance of carbon and nitrogen remains practically unchanged (in comparison with the change of the number of protons). The two reactions (1) and

434

Hauptreihensterne: Fusionsenergie $\Delta E = 4.28 \times 10^{-12} \text{ J} = 26.73 \text{ MeV}$

nach Verbrauch des H im Kern: **Tripel-** α -**Reaktion** $3 \alpha \rightarrow {}^{12}C$ (He-Brennen) ⁴He + ⁴He + 95 keV $\leftrightarrow {}^{8}Be + \gamma$ ⁸Be + ⁴He $\leftrightarrow {}^{12}C + 7.28$ MeV [F. Hoyle: Vorhersage einer ${}^{12}C$ Resonanz!]

Elementsynthese in massereichen Sternen

Kernfusionsreaktionen in massereichen Sternen führen zu Elementen der ⁵⁶Fe-Gruppe, stark ansteigende Coulomb-Barrieren der Kerne: fortschreitende Reaktionsschritte erfolgen mit höheren Zentral-Temperaturen

 $T = 10^7 \text{ K} \rightarrow T > 10^9 \text{ K}$

Fe-Kern mit Chandrasekhar Masse

Kernschalenbrennen - I

Kernschalenbrennen - II

innere Zwiebelschalenstruktur eines massereichen Sterns M > 10 M_{\odot} ⁴He 14N⁴He ²²Ne 16 12C⁴He ²⁴Mg 20Ne ³²S 28**S**i ⁵⁶Ni $T > 10^9$ K: Photodesintegration von Kernen Neutrinokühlung

Neonbrennen (T = 10^9 K) ²⁰Ne + $\gamma \rightarrow 16$ O + ⁴He ²⁰Ne + ⁴He \rightarrow ²⁴Mg + γ ²⁰Ne + n \rightarrow ²¹Ne + γ ²¹Ne + ⁴He \rightarrow ²⁴Mg + n Sauerstoffbrennen (T = 2×10^9 K) $16O + 16O \rightarrow 32S + \gamma$ $^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{31}S + n$ $^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{24}Mg + 2 \times ^{4}He$ Siliziumverschmelzen (T > 3.5 × 10⁹ K) $^{28}Si + \gamma \rightarrow ^{24}Mg + ^{4}He$ ²⁸Si + ⁴He \leftrightarrow ³²S + γ $^{32}S + ^{4}He \leftrightarrow ^{36}Ar + \gamma$ ⁵²Fe + ⁴He ↔ ⁵⁶Ni $+\gamma$

SNII – Elementsynthese im r-Prozess

