

---

**Übung zur Kern- Teilchen- und Astrophysik I**  
**Prof. Dr. S. Schönert, Prof. Dr. W. Hollik**  
**Wintersemester 2011/12**

---

Blatt Nr. 12

17. Januar 2012

### Aufgabe 1 Nukleosynthese im frühen Universum

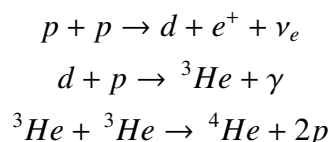
Im frühen Universum befanden sich Neutronen und Protonen im thermischen Gleichgewicht, d.h. ihre Anzahldichte ist gegeben durch

$$N_{n,p} \propto m_{n,p}^{3/2} \exp\left(-\frac{m_{n,p} c^2}{k_B T}\right)$$

- a. Über welche Reaktionen können sich Neutronen und Protonen ineinander umwandeln?
- b. Bei einer Temperatur von  $k_B T \approx 0.8 \text{ MeV}$  ( $\sim 1 \text{ s}$  nach dem Urknall) wurde die Reaktionsrate der Gleichgewichtsreaktionen klein gegenüber der Expansionsrate des Universums, so dass Protonen und Neutronen nicht länger im thermischen Gleichgewicht sind ("Ausfrieren"). Berechnen Sie das Neutronen/Protonen-Verhältnis zu diesem Zeitpunkt. Wodurch kann sich das Verhältnis anschließend (d.h. bei weiterer Abkühlung des Universums) noch ändern?
- c. Wie groß war das Neutronen/Protonen-Verhältnis zum Zeitpunkt des Einsetzens der Nukleosynthese (etwa 300 s nach dem Urknall)? Berechnen Sie den Massenanteil von  ${}^4\text{He}$  an der gesamten baryonischen Materie unter der Annahme, dass alle zu diesem Zeitpunkt existierenden Neutronen in Helium gebunden wurden.
- d. Wie groß wäre der Massenanteil von  ${}^4\text{He}$ , wenn die Neutronenlebensdauer nur 100 s betragen würde?
- e. Schätzen Sie ab, wieviel Helium in unserer Galaxis durch die in den Sternen stattfindende Nukleosynthese gebildet worden ist. Nehmen Sie dazu das Alter der Galaxis zu  $10^{10} \text{ a}$  und eine konstante Strahlungsleistung von  $L = 4 \cdot 10^{36} \text{ W}$  an. Wie vergleicht sich dieser Wert mit dem primordialen Anteil an  ${}^4\text{He}$  bei einer Gesamtmasse der Milchstraße von  $3 \cdot 10^{41} \text{ kg}$ ?

### Aufgabe 2 Kernfusion in der Sonne

In der Sonne erfolgt die Fusion von Wasserstoff zu Helium vorwiegend über den pp-Zyklus:



- a. Berechnen Sie die in einem pp-Zyklus insgesamt freigesetzte Energie. Berücksichtigen Sie dabei auch, dass die erzeugten Positronen in Materie mit Elektronen annihilieren.
- b. Nehmen Sie an, dass eine Fusion stattfindet, wenn sich die beiden Kerne gerade berühren (d.h.  $d = r_1 + r_2$ ). Die Annäherung der beiden Kerne muss gegen die abstoßende Coulombkraft geschehen. Berechnen Sie die für die einzelnen Fusionsreaktionen nötige Energie und vergleichen Sie diese mit der thermischen Energie im Zentrum der Sonne ( $T \sim 1.5 \cdot 10^7 \text{ K}$ ).

- 
- c. Wieso findet die Kernfusion in der Sonne trotzdem statt? Welche Effekte spielen hier eine Rolle?
- d. Jedes Neutrino trägt im Mittel 300 keV Energie fort. Der Rest der freigesetzten Energie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben. Die Luminosität der Sonne (in Form von elektromagnetischer Strahlung abgestrahlte Leistung) beträgt  $L_{\odot} = 3.8 \cdot 10^{26}$  W. Wieviele Fusionsreaktionen finden pro Sekunde in der Sonne statt? Wie groß ist der Massenverlust der Sonne pro Jahr?
- e. Schätzen Sie den totalen Fluss an solaren Neutrinos auf der Erde ab (mittlere Entfernung Sonne-Erde:  $1.49 \cdot 10^8$  km). Wie ändert sich dieser Fluss im Fall von Neutrinooszillationen?
- f. Nehmen Sie an, ein solares Neutrinoexperiment misst eine jahreszeitliche Schwankung des Neutrinoflusses von  $\sim 7$  %. Ist diese Schwankung ein Hinweis auf Neutrinooszillationen? Begründen Sie Ihre Antwort.