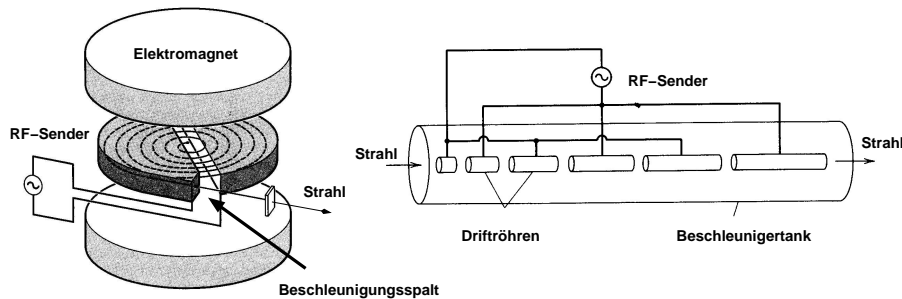


Übung zur Kern- Teilchen- und Astrophysik I
Prof. Dr. S. Schönert, Prof. Dr. W. Hollik
Wintersemester 2013/14

Blatt Nr. 11

8. Januar 2014

Aufgabe 1 : RF-Beschleuniger



Im Gegensatz zum Tandembeschleuniger werden RF-Beschleuniger (Radiofrequenz-Beschleuniger) mit Wechselspannung betrieben. Daher kann die gleiche Spannung auch mehr als zweimal durchlaufen werden. Ausserdem brauchen die Ionen nicht umgeladen werden wie im Tandembeschleuniger. Typische Bauformen sind ein Zyklotron (Abbildung, links) und ein Linearbeschleuniger (Abbildung, rechts). Im Zyklotron wird die Beschleunigungsspannung am Beschleunigungsspalt, der zweimal pro Umlauf durchlaufen wird, angelegt. Im Linearbeschleuniger findet die Beschleunigung zwischen den Driftröhren statt.

- Warum müssen die Ionen aus der Quelle gepulst in einen RF-Beschleuniger eingeschossen werden?
- Überlegen sie sich, wann die Ionenpakete relativ zur Phase der Wechselspannung eingeschossen werden müssen, damit der Beschleuniger auch beschleunigt (Phasenstabilität). Warum werden Ionen mit leicht unterschiedlicher Energie in einem RF-Beschleuniger auf die gleiche Energie "fokussiert"?
- Leiten sie eine Formel zur Berechnung der Längen der Driftröhren in einem Linearbeschleuniger für nichtrelativistische bzw. relativistische Teilchen der Masse m her.
- Das originale Zyklotron in Berkeley, erbaut von E. O. Lawrence, der dafür 1939 den Nobelpreis erhielt, hatte einen Radius von 12.5 cm und ein Magnetfeld von 1.3 T. Berechnen sie die maximale Energie für Protonen und die dazugehörige Frequenz der angelegten Wechselspannung. Mit dem späteren Ausbau zum heutigen "88-Inch Cyclotron" (Durchmesser = 88") lässt sich welche Energie für Protonen erreichen (gleiche Magnetfeldstärke angenommen)?

Aufgabe 2 Nukleosynthese im frühen Universum

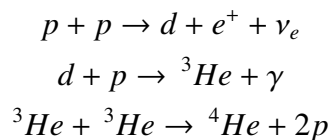
Im frühen Universum befanden sich Neutronen und Protonen im thermischen Gleichgewicht, d.h. ihre Anzahldichte ist gegeben durch

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

- Über welche Reaktionen können sich Neutronen und Protonen ineinander umwandeln?
- 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?
- 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.
- Wie groß wäre der Massenanteil von ${}^4\text{He}$, wenn die Neutronenlebensdauer nur 100 s betragen würde?
- 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} 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 3 Kernfusion in der Sonne

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



- Berechnen Sie die in einem pp-Zyklus insgesamt freigesetzte Energie. Berücksichtigen Sie dabei auch, dass die erzeugten Positronen in Materie mit Elektronen annihilieren.
- 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 ($T \sim 1.5 \cdot 10^7 \text{ K}$).
- Wieso findet die Kernfusion in der Sonne trotzdem statt? Welche Effekte spielen hier eine Rolle?
- 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 $L_\odot = 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Wieviele Fusionsreaktionen finden pro Sekunde in der Sonne statt? Wie groß ist der Massenverlust der Sonne pro Jahr?
- Schätzen Sie den totalen Fluss an solaren Neutrinos auf der Erde ab (mittlere Entfernung Sonne-Erde: $1.49 \cdot 10^8 \text{ km}$). Wie ändert sich dieser Fluss im Fall von Neutrinooszillationen?
- 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.