

---

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

---

Blatt Nr. 6

24. Mai 2012

### Aufgabe 1 $K^0$ - $\bar{K}^0$ -Oszillationen

- Wie kann man experimentell einen reinen (nicht durch  $\bar{K}^0$  verunreinigten), monoenergetischen Strahl von  $K^0$ -Teilchen erzeugen?
- Beschreiben Sie die freie Propagation der  $K^0$  im Vakuum mit Hilfe von  $K_1$  und  $K_2$ , den Eigenzuständen von  $\mathcal{CP}$ .
- Berechnen Sie die Intensität der  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  als Funktion der Eigenzeit. Setzen Sie dabei  $\Delta m$ , den Massenunterschied zwischen  $K_1$  und  $K_2$ , einmal i)  $\Delta m = \frac{\hbar}{2\tau_1}$ , und einmal ii)  $\Delta m = \frac{2\hbar}{\tau_1}$ . Dabei beschreibt  $\tau_1 = 0.9 \times 10^{-10}$ s die Lebensdauer von  $K_1$ .
- Stellen Sie die Phänomene graphisch dar.

### Aufgabe 2 Neutronen-Mixing

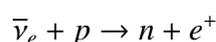
Neutron  $n$  und Antineutron  $\bar{n}$  sind genauso neutrale Teilchen wie  $K^0$  und  $\bar{K}^0$ . Wieso macht es keinen Sinn Linearkombinationen aus  $n_1$  und  $n_2$  einzuführen, wie bei  $K_1^0$  und  $K_2^0$ ?

### Aufgabe 3 Elektrisches Dipolmoment des Neutrons

- Zeigen Sie, daß das elektrische Dipolmoment (EDM) des Neutrons  $d_n$ , falls es existiert, parallel oder antiparallel zur Spinrichtung des Neutrons sein muß. Welche Symmetrien würde die Existenz eines EDM verletzen?
- Versuchen Sie, aus Dimensionsüberlegungen eine obere Grenze für das EDM des Neutrons abzuschätzen.
- Zur Messung des EDM werden Neutronen in ein kombiniertes elektrisches und magnetisches Feld gebracht. Wie groß ist die Aufspaltung der Spinzustände  $m = -1/2$  und  $m = +1/2$  für den Fall, daß das Neutron kein EDM besitzt, wie groß für den Fall eines nichtverschwindenden EDM?
- Schlagen Sie ein Meßprinzip vor, auf dessen Basis ein Experiment mit ultrakalten Neutronen zur Messung des EDM des Neutrons durchgeführt werden könnte.

### Aufgabe 4 Inverser $\beta$ -Zerfall

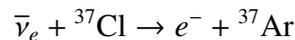
Nach der Postulierung der Neutrinos durch Pauli 1930 aufgrund der Energie- und Impulsbilanz des  $\beta$ -Zerfalls dauerte es noch über 25 Jahre bis das Neutrino auch experimentell nachgewiesen wurde. Frederick Reines und Clyde L. Cowan nutzten den inversen  $\beta$ -Zerfall, um das Antineutrino nachzuweisen (Nature **178**, 446 (1965)):



- a. Berechnen Sie die Energieschwelle für diese Reaktion.
- b. Berechnen Sie den Wirkungsquerschnitt für den inversen  $\beta$ -Zerfall, wobei  $|\mathcal{M}_{fi}|^2 \approx 4G_F^2$  (Fermi-Kopplungskonstante  $G_F = 1.17 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ ). Gehen Sie dafür von dem im Wintersemester aus Fermis Goldener Regel hergeleitetem Wirkungsquerschnitt für die Reaktion  $a + b \rightarrow c + d$  aus:

$$\sigma = \frac{2\pi}{\hbar} \frac{4\pi}{(2\pi\hbar)^3} \frac{p_f^2}{v_i v_f} |\mathcal{M}_{fi}|^2$$

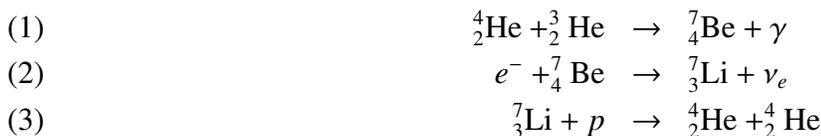
- c. Wie groß ist die mittlere freie Weglänge eines Antineutrinos mit  $E \approx 2.8 \text{ MeV}$  in Wasser?
- d. C.L. Cowan und F. Reines nutzten einen Kernreaktor als Antineutrinoquelle mit einem Fluss von  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  am Detektorort. Als Target wurde Cadmiumchlorid ( $\text{CdCl}_2$ ) in wässriger Lösung benutzt, das in einem Behälter zwischen 2 Flüssig-Szintillations-Detektoren mit Photomultipliern eingebettet wurde. Wie ist die Signatur eines Anti-neutrino-Ereignisses?
- e. Warum gelang es Raymond Davis nicht (In einem früheren Reaktor-Experiment) das Antineutrino über die Reaktion



nachzuweisen?

## Aufgabe 5 Experimenteller Nachweis solarer Neutrinos

Die pp-II-Kette ist ein Nebenzweig des Proton-Proton-Zyklus, bei dem durch die Verschmelzung von vier Protonen zu einem Helium-Kern in der Sonne Energie erzeugt wird. In der pp-II-Reaktionskette



wird in Reaktion (2) außerdem ein  $\nu_e$  mit einer festen Energie von  $E = 862 \text{ keV}$  erzeugt. Der von Sonnenmodellen vorhergesagte Fluss auf der Erde ist  $\Phi_\nu = 3.3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

- a. Welche Reaktionen eignen sich zum Nachweis von Neutrinos mit Energien im Bereich von einigen MeV? Welche Prozesse erzeugen Teilchen vergleichbarer Energie, die Untergrundsignale für die Detektion darstellen können?
- b. Das im Gran Sasso-Untergundlabor befindliche solare Neutrinoexperiment Borexino weist  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos über die elastische Streuung an Elektronen nach. Der Wirkungsquerschnitt für diese Reaktion beträgt  $\sigma_{\nu_e e}(E) = 9.2(E/\text{MeV}) \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$  ( $E$  in MeV). Als Target dienen 100 t des Flüssigszintillators Pseudocumol ( $\text{C}_9\text{H}_{12}$ ). Wie vielen Target-Elektronen entspricht das? Welche Ereignisrate erwartet man?
- c. Berechnen Sie die Rückstoßenergie des Elektrons in Abhängigkeit vom Streuwinkel  $\delta$  des Neutrinos. Wie groß ist die Maximalenergie der Rückstoßelektronen? Welche Form erwarten sie für das Energiespektrum unter der Annahme, dass alle Streuwinkel gleich wahrscheinlich sind?
- d. Die im Borexino-Experiment bestimmte Ereignisrate der  ${}^7\text{Be}$  Neutrinos beträgt  $49 \pm 3_{(stat)} \pm 4_{(sys)}$  pro Tag und 100 t. Wie lässt sich das gemessene Defizit gegenüber der in Aufgabe b) berechneten Rate erklären?