

Name:

Gruppe:

Aufgabenblatt 7 – Experimentalphysik V – WS 2010/2011

Abgabe: Do/Fr 02./03.12.2010 (in den Übungsgruppen)

7.1 Schalenmodell (35 Punkte)

- Von Schalenstruktur eines Kerns oder eines Atoms spricht man, wenn die zugehörigen Energieniveaus sich in verschiedenen Gruppen mit jeweils ähnlichen Energien zusammenfassen lassen. Die experimentellen Hinweise für die Schalenstruktur des Atoms sind z.B. die Existenz verschiedener Serien von Spektrallinien (Balmer, Paschen, ...) oder das chemische Verhalten von Halogenen und Edelgasen. Nennen Sie zwei experimentelle Indizien für die Schalenstruktur von Atomkernen.
- Abbildung 1 zeigt die Energieniveaus, die im Schalenmodell für einen dreidimensionalen harmonischen Oszillator (links) bzw. für ein dreidimensionales Kastenpotential (rechts) gefunden werden. Geben Sie die empirisch beobachteten Schalenabschlüsse (magische Zahlen) und die Abschlüsse für das Potential eines harmonischen Oszillator bzw. das Kastenpotential an, die Sie aus der Abbildung ablesen können.
- Berechnen Sie die erwartete Energieverschiebung $\Delta_{LS} = C_{LS} \cdot \vec{L} \cdot \vec{S}$ aufgrund der Spin-Bahnwechselwirkung, die zusätzlich zum Wechselwirkungspotential auftritt:

$$V(\vec{r}_i) = V_0(r) + C_{LS} \cdot \vec{L}_i \cdot \vec{S}_i,$$

wobei $C_{LS} < 0$ gemessen wurde. In Abbildung 1 (mittlere Spalte) sind die zugehörigen Absenkungen der Energieniveaus eingetragen. Welche Zustände werden aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung abgesenkt und deshalb der darunter liegenden Schale zugeordnet?

- Warum erwartet man für $^{209}_{82}\text{Pb}$ und $^{57}_{28}\text{Ni}$ ein Anregungsspektrum, das besonders gut mit den Vorhersagen des Schalenmodells übereinstimmt.

7.2 Nukleosynthese im frühen Universum (30 Punkte)

Im frühen Universum befanden sich Neutronen und Protonen im thermischen Gleichgewicht, d.h. ihr Verhältnis war gegeben durch das Verhältnis der Boltzmannfaktoren:

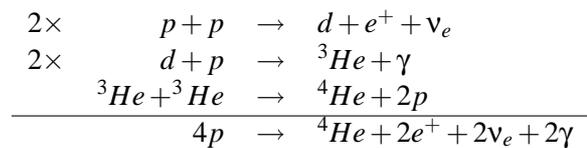
$$\frac{N_n}{N_p} = \exp\left(\frac{(m_p - m_n)c^2}{k_B T}\right)$$

- Über welche drei Reaktionen können sich Neutronen und Protonen ineinander umwandeln?
- Bei einer thermischen Energie von $k_B T = 0.8 \text{ MeV}$ (etwa 1s nach dem Urknall) wurde die Reaktionsrate der Gleichgewichtsreaktionen klein gegenüber der Expansionsrate des Universums, so dass Protonen und Neutronen nicht länger im thermischen Gleichgewicht waren ("Ausfrieren"). Berechnen Sie das Neutronen/Protonen-Verhältnis zu diesem Zeitpunkt. Welche der in (a) gefragten Reaktionen kann auch bei weiterer Abkühlung des Universums noch das Verhältnis ändern?

- c. Wie groß war das Neutron/Protonen-Verhältnis zum Zeitpunkt des Einsetzens der Nukleosynthese (etwa 300s nach dem Urknall)?
Berechnen Sie den Massenanteil von ${}^4\text{He}$ an der gesamten baryonischen Materie (alle Neutronen und Protonen) unter der Annahme, dass alle zu diesem Zeitpunkt existierenden Neutronen in Helium gebunden wurden.
Hinweis: Die Lebensdauer des Neutron ist $\tau_n = 890\text{s}$.
- d. Wie groß wäre der Massenanteil von ${}^4\text{He}$, wenn die Neutronenlebensdauer nur 100s betragen würde?

7.3 Kernfusion in der Sonne (35 Punkte)

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



- a. Welche der drei Reaktionen bestimmt die Lebensdauer (Brenndauer) der Sonne?
- b. Zeigen Sie, dass die in einem pp-Zyklus insgesamt freigesetzte Energie 26.72 MeV beträgt. Berücksichtigen Sie dabei, dass die erzeugten Positronen in Materie mit Elektronen annihilieren, wodurch zusätzliche Energie frei wird.
Hinweis: In der Sonne sind alle Atome vollständig ionisiert. Tabelliert sind meist die Atommassen, von denen man dann die entsprechenden Zahl von Elektronenmassen abziehen muss. Neutrinos können als masselos betrachtet werden.
- c. 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 mittleren thermischen Energie im Zentrum der Sonne.
*Hinweis: Benutzen Sie für die Abschätzung der Kernradien: $r_K = 1.3\text{fm} * A^{1/3}$. Die thermische Energie als Funktion der Temperatur ist gegeben durch $E = 3/2k_B T$. Die Temperatur im inneren der Sonne beträgt $T \sim 1.5 \cdot 10^7\text{K}$.*
Zur Diskussion in den Übungen: Wieso findet die Kernfusion in der Sonne trotzdem statt?
- d. Jedes im pp-Zyklus entstandene 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 $L = 3.8 \cdot 10^{26}\text{W}$. Wieviele Fusionsreaktionen finden pro Sekunde in der Sonne statt? Wie groß ist der Massenverlust der Sonne pro Jahr?
- e. Schätzen Sie den totalen Fluss an solaren Neutrinos auf der Erde ab (mittlere Entfernung Sonne-Erde: $1.49 \cdot 10^8\text{km}$).
Durch die elliptische Umlaufbahn schwankt der Abstand Sonne-Erde im Laufe eines Jahres um $\pm 3.4\%$. Was bedeutet das für die jahreszeitliche Schwankung des gemessenen Neutrinoflusses?

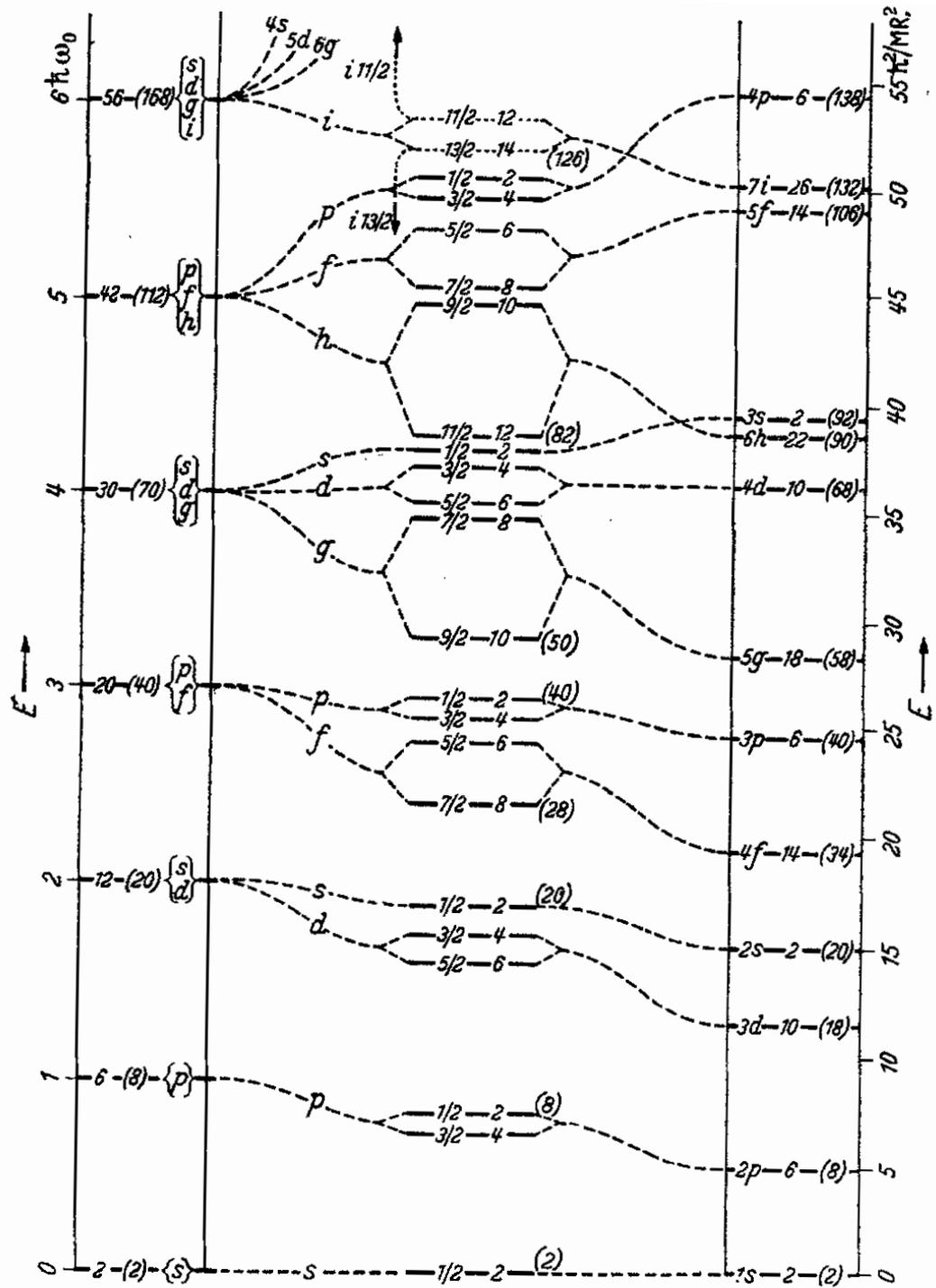


Abbildung 1: Termschema eines Nukleons. Linke Seite, (für einen dreidimensionalen Oszillator; rechte Seite für das Kastenpotential; in der Mitte für das effektive Potential im Kern (Mittelding zwischen Oszillator- und Kastenpotential)). Die ganzen Zahlen geben die Besetzungszahlen der Niveaus an. Die eingeklammerten Zahlen bedeuten die Summe der Besetzungszahlen, also die Zahl der Protonen bzw. der Neutronen, die bis zu der betreffenden Stelle untergebracht werden können. Ein Schalenabschluß liegt vor, wenn der Schritt zum nächsten Term besonders groß ist. Die halbzahlgigen Werte geben den Gesamtdrehimpuls $j = l \pm s$ eines Nukleons in dem betreffenden Niveau an. [Haxel et al., Z. Phys., 128, 295].