

Ignorieren Sie die ``quantenmechanischen'' Eigenschaften:
Spin, Parität
und die elektrischen & magnetischen Multipolmomente.

Wir werden diese Eigenschaften später diskutieren.

I.5 Eigenschaften der leichtesten Atomkerne

In diesem letzten Abschnitt werden zunächst einige Einheiten, danach die Charakteristika der leichtesten Kerne zusammengefasst.

I.5.1 Praktische Einheiten in der Kernphysik

Die Einheiten des SI-Systems sind nicht sehr geeignet, um die mikroskopischen Größen der Kernphysik günstig zu beschreiben. Daher werden entweder eher Teile davon benutzt, oder sogar andere Einheiten verwendet. Hiernach werden einige davon zusammengefasst.

- Länge: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \equiv 1 \text{ Fermi}$ (\sim Radius des Protons).
Dementsprechend sind typische Flächen bzw. Volumina der Ordnung ein paar fm^2 bzw. fm^3 ; für Wirkungsquerschnitte werden das Barn ($1 \text{ b} \equiv 100 \text{ fm}^2$) und seine Teile benutzt.

⁽¹⁴⁾Im klassischen Bild ist dies die Frequenz der Präzession des magnetischen Dipolmoments $\vec{\mu}$ um die Richtung des Magnetfelds $\vec{\mathcal{B}}_0$.

- Zeit: manchmal wird das fm/c für sehr kurze Zeitdauer benutzt ($1 \text{ fm}/c = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$), mit c der Vakuumlichtgeschwindigkeit.
- Energie: $1 \text{ MeV} \equiv 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ (typische Energie, die in einem kernphysikalischen Prozess ausgetauscht wird).
- Masse: wird entweder in MeV/c^2 bzw. GeV/c^2 ausgedrückt, mit $1 \text{ MeV}/c^2 = 1,783 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ (Masse des Elektrons $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$), oder in *atomaren Masseneinheiten* $^{(15)}\text{u}$, wobei

$$1 \text{ u} \equiv \frac{\frac{1}{12}M(^{12}\text{C})}{\mathcal{N}_A} = \frac{1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \text{ MeV}/c^2$$

mit M der molaren Masse und \mathcal{N}_A der Avogadro-Zahl.

Bis 1960, und somit in älteren Artikeln bzw. Lehrbüchern, war die atomare Einheit definiert durch $1 \text{ amu} \equiv \frac{1}{16}M(^{16}\text{O})/\mathcal{N}_A$.

- Elektrische Ladungen werden in Einheiten der Elementarladung e gegeben. Dann wird das elektrische Quadrupolmoment (Ladung \times Fläche) eines Kerns in e barns gemessen. Schließlich werden magnetische Dipolmomente in Einheiten des Kernmagnetons μ_N angegeben.

Mithilfe dieser Einheiten beträgt das Produkt $\hbar c \simeq 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$, d.h. $1 \text{ fm} = \hbar c/(197 \text{ MeV})$.

Dieser Umrechnungsfaktor ist interessant aus (mindestens) zwei Gründen: Erstens sind potentielle elektrostatische Energien der Form $qq'/(4\pi\epsilon_0 r) = \alpha\hbar c/r$ mit $\alpha \simeq 1/137$ der elektromagnetischen Feinstrukturkonstante. Sind die Ladungen q, q' ausgedrückt in Einheiten von e und der Abstand r in fm, dann findet man einfach die Energie in MeV. Zweitens ist der Faktor nützlich, wenn man das System „natürlicher Einheiten“ mit $\hbar = c = 1$ benutzt, in welchem Masse und Energie bzw. Länge und Zeit in MeV (oder GeV) bzw MeV^{-1} (GeV^{-1}) gemessen werden.

1.5.2 $Z = 1, N = 0$: Proton (p)

Das Proton, mit Masse $m_p = 938,272 \text{ MeV}/c^2 = 1,0073 \text{ u}$, bildet den Kern des leichtesten Wasserstoff-Isotops ^1H . Rutherford erkannte 1917, dass der ^1H -Kern auch in anderen Atomkernen vorhanden ist, entsprechend der konventionellen „Entdeckung“ des Protons.

Dem heutigen Wissen nach ist das Proton stabil, was bedeutet, dass kein Zerfall bisher experimentell beobachtet wurde. Genauer beträgt die untere Grenze über dessen mittlere Lebensdauer $T_{1/2} > 2,1 \cdot 10^{29}$ Jahre mit der Aussagewahrscheinlichkeit (confidence level, CL) 90% [28].

Das Proton hat den Spin $\frac{1}{2}$ und eine (definitionsgemäß) positive Parität: $J^P(p) = \frac{1}{2}^+$.

Es hat kein messbares elektrisches Quadrupolmoment, während sein magnetisches Dipolmoment $\mu_p = +2,79\mu_N$ ist. Das Letztere entspricht einem Landé-Faktor $g_S = 5,59$ [Gl. (I.32)] sowie einer Larmor-Frequenz $\nu_L = 42,7 \text{ MHz}\cdot\text{T}^{-1}$ [vgl. Gl. (I.35) mit $|\vec{\mathcal{B}}_0| = 1 \text{ T}, j = \frac{1}{2}$].

Wenn das Proton ein Elementarteilchen wäre, dann sollte er der Pauli-Theorie nach das magnetische Dipolmoment $\mu_p = \mu_p$ haben, d.h. $g_S = 2$. Die große Abweichung von $g_S(p)$ von 2 zeigt, dass das Proton nicht elementar ist — was durch andere Beobachtungen bestätigt ist: eigentlich besteht ein Proton aus Quarks und Gluonen, davon 3 Valenzquarks (u, u, d).

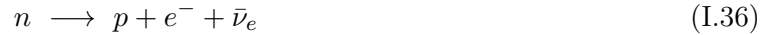
Zum Spin bzw. magnetischen Dipolmoment des Protons tragen die Spins und Bahndrehimpulse bzw. die magnetischen Dipolmomente seiner Bestandteile bei. Ob der Spin des Protons mithilfe derjenigen seiner Bestandteile quantitativ erklärt werden kann, ist noch umstritten.

⁽¹⁵⁾Relative Unsicherheiten über die Masse sind wegen der Messmethoden oft kleiner wenn ausgedrückt in atomaren Masseneinheiten.

I.5.3 $Z = 0, N = 1$: Neutron (n)

Der andere Bestandteil von Atomkernen, das elektrisch neutrale Neutron, wurde 1932 durch J. Chadwick entdeckt [7, Experiment 11]. Seine Masse ist $m_n = 939,565 \text{ MeV}/c^2 = 1,0087 \text{ u}$.

Im Gegensatz zum Proton ist das freie Neutron nicht stabil, sondern es zerfällt durch β^- -Radioaktivität⁽¹⁶⁾



mit der mittleren Lebensdauer $\tau_n = 880,3 \pm 1,1 \text{ s}$.

Bemerkungen:

* Da das Neutron keine elektrische Ladung trägt, kann seine Masse mit keiner der in Abschn. I.3.1 erwähnten Methoden gemessen werden. Stattdessen lässt sich m_n aus Messungen der Masse m_d und der Bindungsenergie $B(d)$ des Deuterons (s. unten) gewinnen: $m_n = m_d - m_p + B(d)/c^2$.

* Die mittlere Lebensdauer des freien Neutrons ist nicht gut bekannt: die oben angegebene relative Messunsicherheit beträgt 0,1 %, während die Masse mit einer relativen Genauigkeit von weniger als 10^{-9} — wenn m_n in atomaren Masseneinheiten gemessen ist — bekannt ist. Dazu tragen eigentlich zwei Gruppen von Experimenten zum angegebenen experimentellen Mittelwert von τ_n bei: einige davon finden Werte zwischen 878,5 und etwa 882,5 s; andere finden eher 886–889 s. Eine Diskussion dieser Ergebnisse kann in der neuesten *Review of particle physics* [28, S. 1380–1381] gefunden werden.

* Neben dem Zerfallskanal (I.36) wurde 2006 der seltene Zerfall $n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e + \gamma$ mit dem Verzweigungsverhältnis $3,09 \pm 0,34 \cdot 10^{-3}$ zum ersten Mal beobachtet [29].

Das Neutron hat Spin und Parität $J^P(n) = \frac{1}{2}^+$ und das magnetische Moment $\mu_n = -1,91\mu_N$.

Bemerkenswert ist, dass μ_n endlich ist, obwohl das Neutron elektrisch neutral ist! Es besteht aber aus geladenen Quarks, davon 3 Valenzquarks (u, d, d), deren Bahndrehimpulse zu seinem magnetischen Moment beitragen.

I.5.4 $Z = 1, N = 1$: Deuteron (${}^2\text{H} \equiv d$)

Ein einziger Zustand mit zwei Nukleonen ist gebunden, und sogar stabil, und zwar der Kern des durch Urey 1932 entdeckten schweren Wasserstoff-Isotops ${}^2\text{H}$ (*Deuterium*), das Deuteron, mit Masse $m_d = 1875,613 \text{ MeV}/c^2$.

Dieser Kern, obzwar stabil, ist einer der einzigen Atomkerne ohne gebundenen angeregten Zustand: jede Energiezufuhr hat entweder keinen Einfluss — so lange $E < B(d)$ — oder zerstört den Kern in seine Bestandteile. Daher kann die Bindungsenergie $B(d) = 2,225 \text{ MeV}$ sehr präzise gemessen werden — was die Basis der Messung der Neutronenmasse bildet [7, Experiment 13]. Somit hat das Deuteron die kleinste Bindungsenergie pro Nukleon aller stabilen Kerne, wie in Abb. I.10 zu sehen ist, d.h. das Deuteron ist der gebrechlichste Kern.

Das Deuteron hat Spin und Parität $J^P = 1^+$, magnetisches Dipolmoment $\mu_d = 0,857\mu_N$, und elektrisches Quadrupolmoment $Q = +0,002860 e \text{ barns}$.

Bemerkung: Die $A = 2$ -Zustände mit $Z = 2, N = 0$ („Diproton“) bzw. $Z = 0, N = 2$ („Dineutron“) sowie der Zustand mit $Z = 1, N = 1$ und den Spin 0 sind ungebunden, und bilden daher keinen echten Kern. Diese Ergebnisse liefern Information über die Form der starken Kernkraft zwischen zwei Nukleonen.

I.5.5 Schwerere Kerne

Mit $A = 3$ Nukleonen gibt es zwei gebundene Kerne, beide ohne angeregte Zustände, und zwar ${}^3\text{H}$ (*Tritium*) und ${}^3\text{He}$. Beide Atomkerne haben Spin und Parität $J^P = \frac{1}{2}^+$, und ihre jeweiligen

⁽¹⁶⁾Auf dem Quarkniveau entspricht dieser Zerfall dem Prozess $d \longrightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$.

Massen sind $m(^3\text{H}) = 2808,921 \text{ MeV}/c^2$ und $m(^3\text{He}) = 2808,391 \text{ MeV}/c^2$. Somit ist ^3He stabiler, denn $m(^3\text{He}) < m(^3\text{H})$, und in der Tat zerfällt ^3H durch β^- -Zerfall in ^3He , mit einer Halbwertszeit $T_{1/2} = 12,32$ Jahre.

Es gibt einen einzigen stabilen Atomkern mit $A = 4$ Nukleonen, den ^4He -Kern, mit sowohl dem Grundzustand — entsprechend dem α -Teilchen — als angeregten Zuständen. Der Grundzustand ist im Vergleich mit den Nachbarkernen besonders stabil, vgl. die Vergrößerung in Abb. [I.10](#), und hat Spin und Parität $J^P = 0^+$.

Die Nuklide ^4H und ^4Li könnten prinzipiell auch gebunden sein, denn ihre Bindungsenergien sind positiv. Wenn er erzeugt wird, emittiert aber ein ^4H - bzw. ^4Li -Kern sofort — d.h. in weniger als 10^{-15} s — ein Neutron bzw. Proton, weil die in Abschn. [I.3.3](#) eingeführte Separationsenergie $S_n(^4\text{H})$ bzw. $S_p(^4\text{Li})$ negativ ist.

Auf Abb. [I.10](#) erkennt man noch, dass es kein stabiles Nuklid mit $A = 5$ oder $A = 8$ gibt. Bei der Erzeugung der Kerne im frühen Universum (Kap. **Nukleare Astrophysik**) haben sich diese Lücken als äußerst wichtig erwiesen. Dagegen gibt es für $A = 6$ und $A = 7$ stabile Lithium-Isotope, und ab $A \geq 9$ gibt es immer mindestens ein stabiles (oder zumindest langlebiges) Nuklid bis $A \simeq 150$.

Aus den Bindungsenergien könnten ^5H , ^5He , ^5Li und ^5Be existieren, die zwei ersten bzw. letzten dieser Kerne haben aber eine negative Separationsenergie S_p für Protonen bzw. S_n für Neutronen, so dass sie eigentlich ungebunden sind.

Mit $A = 8$ Nukleonen sind ^8He , ^8Li , ^8Be , ^8B und ^8C bekannt, mit positiven Bindungsenergien, alle sind aber instabil: ^8C ist zu protonenreich und hat eine negative Separationsenergie für Protonen; ^8He , ^8Li und ^8B wandeln sich in weniger als eine Sekunde durch β -Radioaktivität in ^8Be um, der die kleinste Masse hat und somit β -stabil ist. Schließlich zerfällt trotz seiner schon hohen Bindungsenergie pro Nukleon ^8Be instantan in zwei α -Teilchen, die noch stabiler sind.