

KAPITEL I

Eigenschaften von Atomkernen

-
- I.1 Bausteine von Atomkernen 2
 - I.2 Größe des Atomkerns 5
 - I.2.1 Klassische Streutheorie 5
 - I.2.2 „Rutherford'sches“ Streuexperiment und Entdeckung des Atomkerns 9
 - I.2.3 Streuung an ausgedehnten Verteilungen 13
 - I.2.4 Dichteverteilungen von Atomkernen 15
 - I.3 Masse des Atomkerns 18
 - I.3.1 Grundlagen der Massenmessung 19
 - I.3.2 Bindungsenergie 19
 - I.3.3 Separationsenergien 21
 - I.4 Quantenmechanische Eigenschaften des Atomkerns 22
 - I.4.1 Spin 22
 - I.4.2 Parität 22
 - I.4.3 Elektrische und magnetische (Multipol-)Momente 23
 - I.5 Eigenschaften der leichtesten Atomkerne 25
 - I.5.1 Praktische Einheiten in der Kernphysik 25
 - I.5.2 $Z = 1, N = 0$: Proton (p) 26
 - I.5.3 $Z = 0, N = 1$: Neutron (n) 27
 - I.5.4 $Z = 1, N = 1$: Deuteron (${}^2\text{H} \equiv d$) 27
 - I.5.5 Schwerere Kerne 27
-

In diesem ersten Kapitel werden die grundlegenden Charakteristika von Atomkernen gesammelt, beginnend mit deren Zusammensetzung (Abschn. I.1). Danach fokussiert sich die Diskussion erstens auf klassische Aspekte des Kerns — Radius (Abschn. I.2) und Masse (Abschn. I.3) —, wobei die experimentellen Methoden zu deren Bestimmung kurz diskutiert werden. Dagegen befasst sich Abschnitt I.4 mit eher quantenmechanischen Eigenschaften. Schließlich werden die leichtesten stabilen Atomkerne in Abschn. I.5 kurz dargestellt.

Das ganze Kapitel bleibt eher phänomenologisch und beschränkt sich darauf, die Eigenschaften zu beschreiben, ohne irgendein Modell zu ihrer Erklärung in Betracht zu ziehen. Solche Modelle werden im Kap. ?? diskutiert.

I.1 Bausteine von Atomkernen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der wahrscheinlich schon bekannten Zusammensetzung von Atomkernen. Dazu werden ein paar wichtige Begriffe definiert und Notationen eingeführt.

Vom Altertum bis zum 19. Jahrhundert haben zuerst Philosophen, danach Naturwissenschaftler die Atomtheorie postuliert und allmählich experimentell nachgewiesen (für eine kurze Übersicht dieser historischen Entwicklung, s. den ersten Vortrag von W. Heisenberg^(a) in Ref. [11]). Zwischen

^(a)W. HEISENBERG, 1901–1976

der Entdeckung des Elektrons durch J. J. Thomson^(b) in 1897 und der Entdeckung des Neutrons durch J. Chadwick^(c) in 1932 (vgl. Experiment 11 in Ref. [7]) hat sich dann ein genaueres Bild des Atoms kristallisiert: In einem Atom ist die Hülle negativ geladener Elektronen (Symbol: e^-) um einen positiv geladenen Atomkern⁽ⁱ⁾ gebunden, der fast die gesamte Masse des Atoms trägt. Wiederum besteht der Atomkern aus zwei Arten von Bausteinen, und zwar aus *Protonen* (Symbol: p) und *Neutronen* (Symbol: n), die zusammen als *Nukleonen*⁽ⁱⁱ⁾ (Symbol: N) bezeichnet werden.

Bemerkungen:

* Im Folgenden wird das Symbol N nur selten für Nukleon verwendet, um die mögliche Verwechslung mit der Neutronenzahl [Gl. (I.1a)] zu vermeiden.

* Hier wurde Nukleon nur als Sammelbegriff für Proton und Neutron verwendet, wie meistens der Fall ist. Manchmal hat Nukleon einen präziseren Sinn.

* Bekannterweise sind das Proton und das Neutron keine Elementarteilchen, sondern sie bestehen aus Quarks — die nach dem heutigen Wissen elementar sind — und Gluonen — die die starke Wechselwirkung zwischen Quarks vermitteln. Somit stellt sich die Frage, ob man den Atomkern als gebundenen Zustand von Quarks betrachten sollte. Für manche Probleme der Kernphysik — grob gesagt, solange die typisch ausgetauschten Energien kleiner als etwa 100 MeV bleiben — stellen jedoch die Nukleonen die geeigneten Freiheitsgrade dar.

Genauso wie ein chemisches Element durch die Anzahl seiner Protonen charakterisiert wird, lässt sich ein gegebener Atomkern, auch *Nuklid*⁽ⁱⁱⁱ⁾ genannt,⁽¹⁾ durch die Anzahlen seiner Bestandteile gekennzeichnet, und zwar durch

Ordnungs-, Kernladungs-^(iv) oder *Protonenzahl* Z : Anzahl der Protonen im Atomkern;
Neutronenzahl N : Anzahl der Neutronen im Atomkern;
Massen-^(v) oder *Nukleonenzahl* A : gesamte Anzahl der Protonen und Neutronen im Kern.

(I.1a)

Natürlich gilt die triviale Gleichung

$$Z + N = A. \quad (\text{I.1b})$$

Mithilfe dieser Zahlen lautet die übliche Schreibweise für ein Nuklid

$${}^A_Z\text{X}_N \quad \text{oder einfacher} \quad {}^A_Z\text{X} \quad \text{oder} \quad {}^A_Z(), \quad (\text{I.1c})$$

wobei X das „chemische“ Symbol des Periodensystems für das Element mit Ordnungszahl Z ist. Wird dieses Symbol verwendet, so ist die Ordnungszahl Z schon festgelegt: somit kann sie weggelassen werden. Beispielsweise bezeichnen ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ und ${}^{208}\text{Pb}$ das gleiche Nuklid mit 82 Protonen und 126 Neutronen.

Fast alle Kerne können angeregt werden, wie Atome, so dass es manchmal verschiedene Nuklide mit denselben Z und N und einer Lebensdauer größer als 10^{-9} s existieren kann, sogenannte *Isomere*,^(vi) die unterschiedliche Eigenschaften besitzen.⁽²⁾

⁽¹⁾ Als „Nuklid“ wird manchmal — wie z.B. durch die IUPAC, vgl. die **entsprechende Seite** in der online-Version des „Gold Book“ — explizit ein elektrisch neutrales Objekt definiert, d.h. nicht nur der Atomkern sondern das ganze Atom einschließlich der Elektronen. Dahingegen werden in der Liste der Energiezustände solcher Nuklide die atomaren Anregungszustände nicht berücksichtigt, was dem Autor dieser Zeilen inkonsequent aussieht. Hiernach wird Nuklid Synonym für Atomkern sein.

⁽²⁾ Die untere Grenze der Lebensdauer ist natürlich rein konventionell und hängt vom Autor ab. Dazu beschränken einige die Bezeichnung „Isomer“ auf angeregte Zustände.

(i) nucleus (ii) nucleon (iii) nuclide (iv) atomic number, nuclear charge number (v) (atomic) mass number (vi) nuclear isomer

^(b) J. J. THOMSON, 1856–1940 ^(c) J. CHADWICK, 1891–1974

Atomkerne mit gleicher Protonenzahl und unterschiedlichen Neutronenzahlen werden *Isotope* genannt, z.B. ^{12}C und ^{14}C . Nuklide mit derselben Neutronenzahl und unterschiedlichen Protonenzahlen werden *Isotone* genannt, z.B. ^{14}C und ^{16}O mit je 8 Neutronen. Schließlich werden Nuklide mit der gleichen Massenzahl und unterschiedlichen Anzahlen von Protonen (und daher auch von Neutronen) werden *Isobare* genannt, z.B. ^{14}C und ^{14}N .^(vii)

Die bekannten Nuklide⁽³⁾ werden in einer *Nuklidkarte*^(viii) eingetragen, die ihre wichtigen Eigenschaften zusammenfasst: Stabilität bzw. Halbwertszeit für instabile Atomkerne (vgl. Kap. Radioaktivität); Häufigkeit der unterschiedlichen Isotope für natürlich vorkommende Nuklide; Zerfallsarten, mit ihren jeweiligen Wahrscheinlichkeiten falls der Atomkern verschiedenen Zerfallskanälen folgen kann (vgl. Kap. Radioaktivität). Frei zugängliche Nuklidkarten mit zusätzlichen Informationen findet man im Internet z.B. auf <http://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> oder <https://www-nds.iaea.org/livechart/>.

⁽³⁾Im Oktober 2025 sind mehr als 4000 Nuklide, inklusive Isomere, bekannt, darunter etwa 3300 „wohl charakterisiert“ sind.

^(vii)isotope / isotone / isobar ^(viii)table/chart of nuclides