

1

Historische Anfänge

Die Anfänge der Kern- und der Teilchenphysik liegen am Ende des 19. Jahrhunderts. Hallwachs, ein Student von H. Hertz, zeigte 1888, dass sich eine Metallplatte unter Bestrahlung mit ultraviolettem Licht elektrisch auflädt. Im folgenden Jahr konnte Lenard zeigen, dass es sich bei der emittierten Strahlung um Kathodenstrahlung handelte. Diese waren bereits 1858 von Plücker entdeckt worden. Diese Arbeiten waren Grundlage für Einsteins Theorie des Photoeffektes. 1892 konnte Lenard als Assistent von H. Hertz in Bonn die Kathodenstrahlen durch ein dünnes Fenster aus dem Vakuum austreten lassen, um mit ihnen zu experimentieren. Fünf Jahre später zeigte J. J. Thompson, dass das Verhältnis Masse zu Ladung (m/e) bei den Kathodenstrahlen viel kleiner ist als bei Ionen. Er nannte die Kathodenstrahlen Elektronen. 1897 fand Zeeman die Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld (Zeeman-Effekt). Dieser Effekt wurde von Lorentz in seiner Erweiterung der Maxwell'schen Theorie mit Elektronen erklärt. Sie fanden einen viel präziseren Wert für (m/e) und auch das negative Vorzeichen im Vergleich zu Ionen.

Eine ganz andere Strahlung fand 1896 Becquerel: Sie stammte aus dem Uran und schwärzte Photoplatten. Das Ehepaar Pierre und Marie Curie suchte weitere Strahler in der Pechblende und fanden dabei zwei neue Elemente: das Polonium und das Radium. Letzteres strahlt viel stärker als das Uran.

Als den Vater der Kernphysik kann man E. Rutherford bezeichnen. Er fand 1903, dass die radioaktive Strahlung aus 3 Komponenten bestand: α -, β - und γ -Strahlen. Die α - und β -Strahlen wurden in magnetischen Feldern in unterschiedliche Richtungen abgelenkt, sie haben also Ladungen mit unterschiedlichen Vorzeichen. Im Gegensatz dazu ist die γ -Strahlung ungeladen. Die α -Strahlen konnten als ${}^4_2\text{He}$ -Kerne identifiziert werden, die β -Strahlen als Elektronen und die γ -Strahlen als elektromagnetische Wellen. Die Ursprünge dieser drei Strahlungen sind verschiedene Zerfallsprozesse in Kernen. Zu diesen drei Zerfallsprozessen gehören drei fundamentale Wechselwirkungen, die für die Zerfälle verantwortlich sind. α -Zerfälle werden durch die starke Wechselwirkung, β -Zerfälle durch die schwache Wechselwirkung und γ -Zerfälle durch die elektromagnetische oder Coulomb-Wechselwirkung hervorgerufen. Das Studium dieser drei Wechselwirkungen sowie die durch sie bestimmte Struktur der subatomaren Materie sind Gegenstand dieses Buches. Die vierte fundamentale Wechselwirkung ist die Gravitation. Sie ist sehr viel schwächer noch als die schwache Wechselwirkung. Sie spielt daher bei den Objekten unseres Interesses keine Rolle. Die Teilchen, die an der starken Wechselwirkung teilnehmen, heißen Hadronen.

Sie können elektrisch geladen und ungeladen sein. Gleiches gilt für Teilchen, die nur an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen. Sie heißen Leptonen.

Die Radioaktivität A eines Strahlers, der aus N Teilchen besteht, ist

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N. \quad (1.1)$$

Integration ergibt

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.2)$$

wobei λ der Zerfallskonstanten und N_0 der Zahl der radioaktiven Teilchen zur Zeit $t = 0$ entsprechen. Man definiert die Halbwertszeit als die Zeit, in der die Hälfte aller Teilchen zerfallen sind. Dann ist

$$N(t_{1/2}) = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}. \quad (1.3)$$

Daraus ergibt sich der Zusammenhang von Halbwertszeit und Zerfallskonstante

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (1.4)$$

Die Lebensdauer ist durch

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.5)$$

gegeben. Die drei Wechselwirkungen haben unterschiedliche Stärken, wie schon in den Namen angedeutet. Als Folge daraus ergeben sich unterschiedliche Lebensdauern für die Wechselwirkungen. Typische Werte für die Lebensdauern von Teilchen sind:

Typ Wechselwirkung	\approx Lebensdauern (s)
starke	$< 10^{-20}$
schwache	$> 10^{-10}$
elektromagnetische oder Coulomb	$10^{-20} - 10^{-10}$.

Im Thompson'schen Modell der Atome (gemeinsam mit Thomson formuliert) bestand ein Atom mit der Massenzahl A aus einer Kugel, die A Protonen (elektrisch positiv geladenes Teilchen großer Masse) und A Elektronen enthält. Aber Lenard zeigte 1903 durch Untersuchung des Durchgangs von Elektronen durch Materie, dass Atome im Wesentlichen leerer Raum sind. Aus den Streuexperimenten von Marsden und Geiger schloss Rutherford 1911 auf einen winzigen Kern, der praktisch die ganze Masse enthält, sowie auf eine Elektronenhülle mit Z Elektronen ($Z =$ Ordnungszahl im Periodensystem). Der Kern bestand demnach aus A Protonen und $A - Z$ Elektronen. Rutherford führte bereits 1919 die erste künstliche Elementumwandlung durch. Das Proton wies er als elementares Teilchen erstmals ebenfalls 1919 in der Reaktion



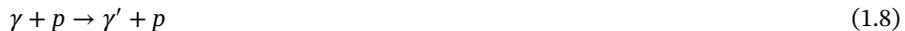
nach. Dieses Bild des Atoms änderte sich erst durch die Entdeckung des Neutrons nach einigen Irrwegen. Walter Bothe und Herbert Becker untersuchten die Reaktion



Tab. 1.1 Eigenschaften der Bausteine des Atoms. Für die Massen wurde die Umrechnung $1 \text{ eV}/c^2 = 1.78266173170 \times 10^{-36} \text{ kg}$ benutzt.

Teilchen	Masse (MeV)	Ladung (e)	Lebensdauer	Spin (\hbar)
e	0.510 998 902(21) [1]	-1	$> 2 \times 10^{22}$ Jahre	1/2
p	938.271 998(38) [1]	+1	$> 1.6 \times 10^{25}$ Jahre	1/2
n	939.565 330(38) [1]	0	888.6(3.5) s	1/2
γ	$< 6.7 \times 10^{-25}$ [2]	0	∞	1

wobei die α -Teilchen aus dem radioaktiven Zerfall des Poloniums stammten. Sie interpretierten aber das neutrale Teilchen als Röntgen-Strahlung, was, wie wir heute wissen, eine Fehlinterpretation war. Frederic Joliot und seine Frau Irene, geb. Curie studierten den gleichen Prozess. Sie fanden, dass die neutrale Strahlung Protonen aus Paraffin schlagen kann. Sie nahmen γ -Strahlung als Ursache an, was ebenfalls falsch war. Die Entdeckung des Neutrons blieb der Rutherford'schen Schule vorbehalten. James Chadwick fand, dass die Geschwindigkeit des Protons aus dem Paraffin etwa ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit betrug. Für die Reaktion



mit p dem Proton müsste ein einlaufendes γ -Quant die Energie von 50 MeV gehabt haben. Aber γ -Strahlen aus Zerfällen haben nur wenige MeV Energie. Er schloss daher auf die Existenz eines neutralen Teilchens (1932), des Neutrons, das etwa die gleiche Masse wie das Proton haben muss. Ein Atomkern des Elementes mit Z Elektronen und mit der Massenzahl A sollte daher aus Z Protonen und $N = A - Z$ Neutronen bestehen.

Einige Eigenschaften der Atombausteine sind in der Tab. 1.1 zusammengestellt. Sie werden weiter unten durch weitere Eigenschaften ergänzt. Da die Massen der Protonen und Neutronen ungefähr gleich sind, sprechen wir manchmal von ihnen als Nukleonen. Ein Kern hat also A Nukleonen. Die Bausteine der Materie haben alle den Spin 1/2.

Eine schöne Darstellung der historischen Entwicklung der Kern- und Teilchenphysik hat Segrè gegeben [3]. Eine sehr anspruchsvolle Geschichte der Atom-, Kern- und Teilchenphysik stammt von A. Pais [4]. Die Geschichte der Teilchenphysik anhand von Reproduktionen der Originalarbeiten wurde von Cahn und Goldhaber verfasst [5].

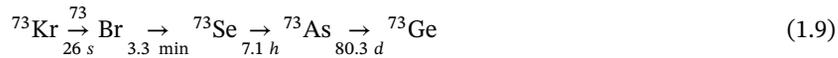
Kern- und Teilchenphysik benutzen im Großen und Ganzen die gleichen Methoden zur Untersuchung ihrer Objekte. Durch die verschiedenen Energieskalen sehen jedoch die Geräte unterschiedlich aus. Ein weiterer Unterschied ist mehr prinzipieller Natur: Die Kernphysik ist nicht einfach ein Vielfaches der Teilchenphysik, da die gebundenen Konstituenten sich prinzipiell anders verhalten können als die freien Teilchen. So ist zum Beispiel das freie Proton stabil, im Kern kann es aber durchaus über einen β -Zerfall in ein Neutron übergehen. Umgekehrt ist das freie Neutron instabil, es gibt jedoch stabile Kerne, was bedeutet, dass ein Neutron darin stabil ist.

Den Lebensdauern der Kerne sieht man daher nicht direkt die den Zerfällen zugrunde liegende Wechselwirkung an. Anders verhält es sich wie schon diskutiert bei den Zerfällen freier Teilchen.

1.1 Aufgaben

1. Berechnen Sie die Masse eines Protons (Elektrons) in kg.

2. Es sei $\hbar = c = 1$. Wie groß sind 1 m, 1 s und 1 kg in den sich ergebenden Einheiten? Wir sehen später, dass 1 b (barn) = 10^{28} m² ist. Wie groß ist 1mb in GeV⁻²?
3. Wir betrachten die radioaktive Zerfallskette



Stellen sie das System gekoppelter Differentialgleichungen für die Kette auf und lösen Sie es.

4. In einer Kernreaktion werden pro Sekunde 500 ⁷³Kr-Kerne erzeugt. Die Produktion erfolgt für 10 min. Wie viele ⁷³Se-Kerne gibt es 10 min nach Ende der Produktion? Hinweis: Die aufzustellende Differentialgleichung kann mit der Methode der Variation der Konstanten gelöst werden.
5. Die zwei häufigsten Isotope im Uranerz haben folgenden Häufigkeiten und Halbwertszeiten:

Isotop	Häufigkeit (%)	$t_{1/2}$ (a)
²³⁵ U	0.720	7.038×10^8
²³⁸ U	99.275	4.468×10^9

(1.10)

Nehmen Sie an, dass bei der Entstehung des Urans die beiden Isotope ²³⁵U und ²³⁸U gleich häufig vorhanden waren. Wann ist das Uran entstanden? Die Erdkruste ist etwa 2.5×10^9 Jahre alt. Welcher Anteil des ²³⁸U ist nach der Einlagerung in die Erdkruste zerfallen?