

1 Einführung

1.1 Vorbemerkungen

1.1.1 Ziele der Vorlesung

Diese Vorlesung wird Ihnen die Grundlagen der Kern- und Teilchenphysik vermitteln. Dies wird geschehen durch die Diskussion der wesentlichen physikalischen Konzepte, der relevanten experimentellen Methoden und die Vorstellung relevanter Originalexperimente. Durch die Aufteilung der Vorlesungszeit in 2/3 Experiment und 1/3 Theorie erhalten Sie sowohl einen fundierten Einblick in die experimentellen Tricks und Kniffe, wie auch in die mathematischen Konzepte zur Lösung der theoretischen Probleme. Insgesamt werden Sie hierdurch ein tieferes Verständnis der Materie erhalten, was Sie in die Lage versetzt ein Gefühl für die Physik der Kerne und Elementarteilchen zu entwickeln. Neben den Grundlagen der Kern- und Teilchenphysik werden wir auch exemplarisch aufzeigen, welche wichtige Rolle Prozesse, Konzepte und experimentelle Methoden der subatomaren Physik in anderen Gebieten spielen.

Die nachfolgend aufgeführten beispielhaften Fragen, die Sie nach Ende der Vorlesung beantworten können, sollen die Tiefe und Breite des Vorlesungsthemas verdeutlichen.

- Was sind die elementare Bausteine der Materie, welche Kräfte halten sie zusammen?
- Wieso zerfallen freie Neutronen, sind aber im Atomkern stabil?
- Welche Farbe haben die Quarks?
- Warum gibt es 8 Gluonen aber nur 1 Photon und 3 W,Z-Bosonen?
- Welche Bedeutung haben Symmetrien für die Kräfte der Natur?
- Woher wissen wir, wie alt das Universum ist?
- Wie entstehen die chemischen Elemente?
- Warum brennt die Sonne und wieso so lange?
- Warum gibt es für Neutronensterne eine maximale Masse?
- Was ist die Struktur und die Dynamik von Atomkernen?
- Warum haben die Atomkerne in Materie einen so großen Abstand, wo doch der Raum zwischen ihnen im wesentlichen leer ist?

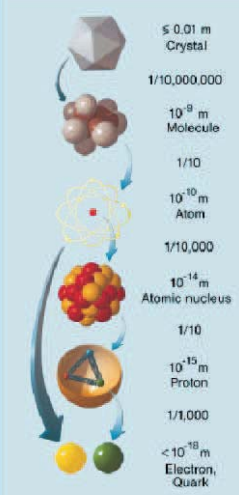
Objekte und ihre Größe	Beobachtungs-instrument	typische Energie
 $\leq 0.01\text{ m}$ Crystal $1/10,000,000$ 10^{-9} m Molecule $1/10$ 10^{-10} m Atom $1/10,000$ 10^{-14} m Atomic nucleus $1/10$ 10^{-15} m Proton $1/1,000$ $< 10^{-18}\text{ m}$ Electron, Quark	Lichtmikroskop Elektronenmikroskop Streuexperimente niederenergetisch Streuexperimente hochenergetisch	1 eV 10 keV 100 MeV 100 GeV

Abb. 1.1: Größenhierarchie verschiedener Objekte zusammen mit den notwendigen Beobachtungsinstrumenten und der relevanten Energieskala.

- Wie funktionieren Kernreaktoren und Atombomben?

In Abb. 1.1 ist die Hierarchie der Größe der Bausteine der Materie, der verwendeten Beobachtungsinstrumente und der typischen Energieskalen verdeutlicht. Während es sich bei Kristallen um makroskopische Objekte mit Ausdehnungen von Millimetern und Zentimetern handelt, haben Moleküle und Atome Größen von nur 10^{-9} und 10^{-10}m . Kristalle lassen sich durch Lichtmikroskope anschauen, während man Strukturen auf der Größenskala von Molekülen und Atomen nur durch den Einsatz von Elektronenmikroskopen, Rastertunnelmikroskopen oder Rasterkraftmikroskopen sichtbar machen kann. Atomkerne sind wiederum 10.000 mal kleiner (10^{-14}m) und man kann sie nur über Streuexperimente untersuchen. Es ist bemerkenswert, dass die Atome daher im wesentlichen leere Objekte sind und 99,97 % der Masse im winzigen Atomkern sitzt. Auch die Nukleonen (Protonen und Neutronen) und die Elementarteilchen (Quarks und Gluonen), aus denen diese aufgebaut sind, lassen sich nur durch Streuexperimente untersuchen. In den Beobachtungsinstrumenten drückt sich auch die relevante Energieskala aus, die mit der Wellenlänge der beleuchtenden Strahlung zusammenhängt, die kleiner sein muss als die Längenskala der zu beobachtenden Objekte.

Die Vorlesung Kern- und Teilchenphysik wird sich mit den Eigenschaften der Elementarteilchen, den Quarks, den Leptonen und den Austauschbosonen der Wechselwirkung sowie den subatomaren, aus diesen fundamentalen Bausteinen zusammengesetzten, Objekten beschäftigen. Hieraus entsteht ein fundamentales Bild des Aufbaus unserer Welt, das sowohl auf mikroskopischen als auch auf makroskopischen Skalen eine Rolle spielt.

1.1.2 Grobe Gliederung

Vorlesung insgesamt:

1. Kernphysik
2. Elektromagnetische Wechselwirkung
3. Starke Wechselwirkung und das Quarkmodell
4. Schwache Wechselwirkung

WS 2003/2004

- Einführung
- Massenmessungen und Bindungsenergien
- Stabilität von Kernen
- Teilchenbeschleuniger
- Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- Detektoren
- Streuung von Elektronen an Kernen
- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung
- Einteilchenbewegung im Kern
- Kernmomente
- Angeregte Kernzustände
- Elektromagnetische Übergänge
- Kernreaktionen
- Kernspektroskopie
- Energiegewinnung
- Nukleare Astrophysik
- (Elektromagnetische Wechselwirkung QED)

Literaturliste

- Povh, Rith, Scholz, Zetsche: Teilchen und Kerne (Springer 1999)
- Mayer-Kuckuk: Kernphysik (Teubner 1984)

- Krane: Introductory Nuclear Physics (Wiley & Sons 1987)
- Frauenfelder, Henley: Subatomic physics (Prentice Hall 1999)
- Segre: Nuclei and particles (Benjamin 1965)
- Ring & Schuck: The Nuclear Many Body Problem (Springer 1980)
- Perkins: Introduction to high energy physics (Addison Wesley 1986)
- Halzen, Martin: Quarks and leptons (Wiley & Sons 1984)
- Kane: Modern elementary particle physics (Addison Wesley 1987)
- Schmüser: Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker (Springer 1987)
- Bethge: Kernphysik (Springer 1996)

1.2 Einführenden Bemerkungen

1.2.1 Historische Entwicklung

Das Ende des 19. Jahrhunderts und die erste Hälfte des letzten Jahrhunderts stand ganz im Zeichen der Kernphysik, die sich aus der Entdeckung der Radioaktivität (1896 Becquerel) und des Atomkerns (1911 Rutherford) entwickelte. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde dann die Suche nach den elementarsten Bausteinen unserer Welt auf intensivste an den größten Beschleunigern der Erde betrieben.

Heute wissen wir sehr viel mehr über die Struktur der Materie, es bleiben jedoch zentrale Fragen unbeantwortet. Daher werden sowohl intensive theoretische Anstrengungen unternommen, als auch neue Beschleunigeranlagen für das Studium von Kernen und Elementarteilchen am CERN und der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt sowie neue Detektoren für die Astroteilchenphysik aufgebaut.

Die nachfolgende Liste enthält einige der wichtigsten Durchbrüche in der Geschichte der Kern- und Teilchenphysik. Eine ausführlichere Liste befindet sich z.B. in Krane, Introductory Nuclear Physics und Bethge, Kernphysik.

- Entdeckung der Röntgenstrahlung (1895 Röntgen)
- Entdeckung der Radioaktivität (1896 Becquerel)
- Entdeckung des Elektrons (1897 Thomson)
- Separation von Radium aus Erzen (1897 Curie)
- Gesetze des radioaktiven Zerfalls (1897 Rutherford, Soddy)
- Identifizierung der verschiedenen Strahlungsarten Alpha-, Beta- und Gammastrahlung (1897 Rutherford)

- Alpha-Streuexperimente zeigen Existenz des Atomkerns (1911 Rutherford, Geiger, Marsden)
- Entwicklung der Blaskammer (1912 Wilson)
- Systematik der Röntgenspektren, Begriff der Ordnungszahl, Basis für Periodensystem (1913 Mosley)
- Bohrsches Atommodell, Erklärung des Wasserstoffspektrums (1913 Bohr)
- Erste Kernreaktionen / Transmutation (1919 Rutherford)
- Entwicklung des ersten Massenspektrographen (1919 Aston)
- Entwicklung der Quantenmechanik zur Beschreibung der Atomstruktur (ab 1925 u.a. De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Born)
- Neutrinohypothese (1930 Pauli)
- Erste Teilchenbeschleuniger (1930-32 Van de Graaff, Sloan, Cockroft, Walton, Lawrence)
- Entdeckung des Neutrons (1932 Chadwick)
- Entdeckung des Positrons (1932 Anderson)
- Theorie des Betazerfalls (1934 Fermi)
- Beschreibung der Kernkräfte durch Mesonenaustausch (1935 Yukawa)
- Entdeckung des Myons (1937 Anderson, Neddermeyer)
- Entdeckung der Kernspaltung (1938 Hahn, Straßmann)
- Theorie der thermonuklearen Reaktionen in Sternen (1938 Bethe)
- Erklärung der Spaltung und Tröpfchenmodell (1939 Meitner, Frisch und Bohr, Wheeler)
- Produktion der ersten Transurane (1940 Seaborg)
- Erste kontrollierte Kettenreaktion (1942 Fermi)
- Entwicklung der Atombombe (1945 Oppenheimer etc. (Manhattan Project))
- Entdeckung des Pi-Mesons (1947 Powell)
- Schalenmodell der Kernstruktur (1949 Mayer, Jensen, Haxel, Suess)
- Entwicklung der H-Bombe (1949 Teller)
- Seltsamkeits-Hypothese (1953 Gell-Mann, Nishijima)
- Erster Nachweis von Teilchen mit Seltsamkeit (1953 am Brookhaven National Laboratory)

- Kollektives Modell für Kerne (1953 A. Bohr, Mottelson, Rainwater)
- Entdeckung des Antiprotons (1955 Chaimberlain, Segre)
- Experimenteller Nachweis des Neutrinos (1956 Reines, Cowan)
- Nachweis der Paritätsverletzung im Beta-Zerfall (1956 Lee, Yang, Wu)
- Entdeckung der Rückstoßfreien Gammaemission (1958 Mößbauer)
- Supraleitung in Atomkernen (1958 Bohr, Mottelson, Pine)
- Quarkmodell der Hadronen (1964 Gell-Mann, Zweig)
- Elektroschwache Vereinigung (1967 Weinberg, Salam)
- Nachweis von Neutronensternen / Pulsaren (1967 Hewisch)
- Entwicklung der Quantenchromodynamik (QCD) (1972 Gell-Mann)
- Nachweis des J/Y Mesons und Bestätigung des Charm Quarks (1974 Richter, Ting)
- Entdeckung des Tau-Leptons (1975 Perl)
- Entdeckung des Bottom Quarks (1977 Ledermann)
- Entdeckung der W und Z Bosonen (1983 Rubbia)
- Messung solarer Neutrinos (1960er - 1994, Davis)
- Messung von Neutrinos aus Supernova (1987 Koshiba)
- Produktion der superschweren Elemente Z=107-112 (1984-1996 Armbruster, Oganessian)
- Entdeckung des Top Quarks (1995 am Fermi National Accelerator Laboratory)
- Nachweis von Neutrino-Oszillationen (1998 mit dem Super-Kamikoande Experiment, 2001 mit dem SNO Experiment, 2003 mit dem KAMLAND Experiment)

Die obige Liste gibt einen Einblick in die Entdeckungsgeschichte der Kern- und Teilchenphysik durch die Menschheit. Es gibt natürlich auch eine andere Geschichte, nämlich die des Universums, so wie wir sie aufgrund der heutigen Erkenntnisse annehmen (Abb. 1.7):

- Urknall (Big Bang) -Erzeugung der Elementarteilchen
- Ausfrieren der Quarks als Hadronen (Baryonen, Mesonen) (1 sec)
- Bildung leichter Kerne (d, He, Li) ohne gebundene Elektronen (3 min)
- Bildung von Atomen ($3 \cdot 10^5$ Jahre)

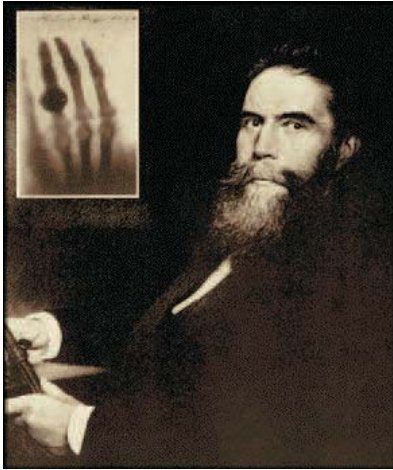


Abb. 1.2: Wilhelm Röntgen



Abb. 1.3: Henry Becquerel

- Bildung von Sternen (nukleare Elementsynthese in Sternen) (10^9 Jahre)
- Entstehung unseres Sonnensystems ($10 \cdot 10^9$ Jahre)
- Evolution bis zum Menschen ($15 \cdot 10^9$ Jahre)

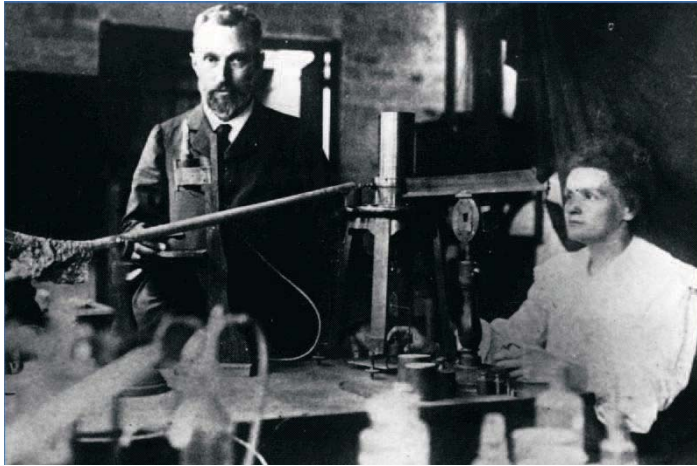


Abb. 1.4: Marie und Pierre Curie

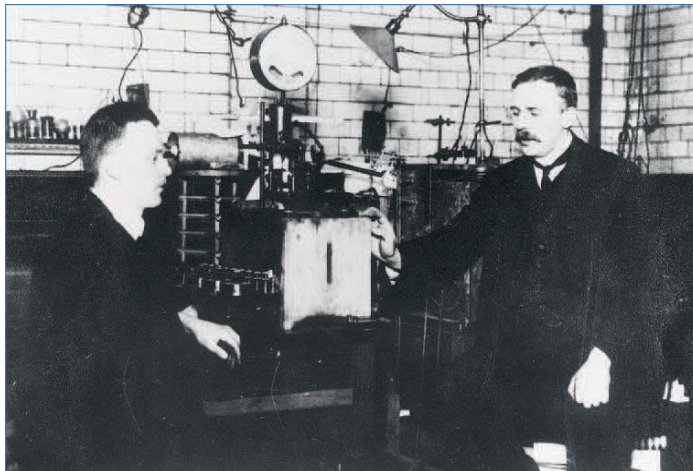


Abb. 1.5: Geiger und Rutherford

1.2.2 Gegenstand der Kern- und Teilchenphysik

Die Kern- und Teilchenphysik befasst sich mit den elementaren Bausteinen unserer Welt, den Elementarteilchen, mit Systemen, die aus diesen Elementarteilchen zusammengesetzt sind (Hadronen und Kerne), sowie mit den Wechselwirkungen zwischen sowohl den elementaren als auch den zusammengesetzten Systemen. Wir unterscheiden grundsätzlich zwischen den Quarks und Leptonen, bei denen es sich um Fermionen handelt, und den Teilchen, die die Wechselwirkungen vermitteln, den so genannten Austauschbos-



Abb. 1.6: *James Chadwick*

nen.

In der subatomaren Welt spielen alle fundamentalen Wechselwirkungen (starke und schwache Kraft, elektromagnetische Wechselwirkung und Gravitation) prinzipiell eine Rolle, auch wenn die Gravitation außer bei stellaren und kosmologischen Prozessen, vernachlässigbar ist.

Die Quarks mit ihrer drittelzahligen elektrischen Ladung sind bisher nie als freie Teilchen beobachtet worden, sie bilden zusammengesetzte Objekte, die so genannten Hadronen. Der Grund für diesen Quark-Einschluss (Confinement) ist bis heute nicht wirklich verstanden. Insgesamt gibt es sechs Quark Flavours (down, up, strange, charm, bottom, top), die jeweils eine von drei Farbladungen haben können und in drei Familien einzuordnen sind. Die Massen der Quarks sind sehr unterschiedlich und gehen von ca. $5\text{MeV}/c^2$ für *up* und *down* Quark bis $175\text{GeV}/c^2$ für das top Quark.

Bei den Leptonen unterscheiden wir zwischen Elektron, Myon und Tau-Lepton und den zugehörigen drei Neutrinos, die also auch drei Familien bilden. Während die Hadronen mit ihrer Umgebung über alle fundamentalen Kräfte wechselwirken, wirkt die starke Kraft nicht auf die Leptonen.

Zu jedem der Quarks und Leptonen existiert auch jeweils ein Antiteilchen, wie zum Beispiel das Positron als Antiteilchen zum Elektron. Die uns umgebende Materie ist jedoch nur aus den Teilchen aufgebaut und diese Asymmetrie zwischen Teilchen- und Antiteilchen, die kurz nach dem Urknall entstanden sein muss, ist bisher nicht verstanden.

Die Kräfte zwischen den Teilchen werden durch den Austausch von so genannten Austauschbosonen vermittelt. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch das Photon vermittelt, die schwache Wechselwirkung durch die geladenen W -Bosonen ($W^\pm$) und das neutrale Z^0 -Boson, und die starke Wechselwirkung durch 8 Gluonen.

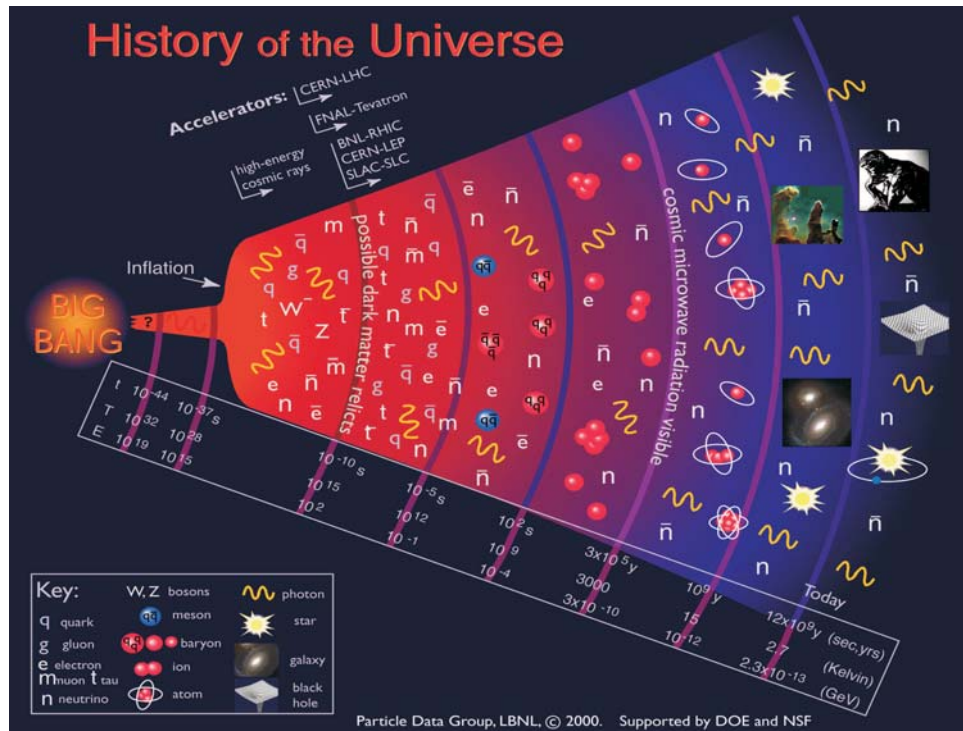


Abb. 1.7: Geschichte des Universums

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Abb. 1.8: Die fermionischen Bausteine der Materie, Quarks und Leptonen (www.particleadventure.org)

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.4	-1			
W^+	80.4	+1			
Z^0	91.187	0			

Abb. 1.9: Die bosonischen Träger der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkungen. (www.particleadventure.org)

Im so genannten Standardmodell der Elementarteilchenphysik werden die vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung und die Quantenchromodynamik zusammengefasst.

Bei den Hadronen unterscheiden wir grundsätzlich zwischen Baryonen und Mesonen. Baryonen sind im einfachsten Bild entweder aus drei Quarks oder drei Antiquarks zusammengesetzt, während Mesonen aus einem Quark und einem Antiquark bestehen. Innerhalb der Hadronen existieren jedoch auch immer noch Wolken aus Gluonen und virtuellen Quark-Antiquark-Paaren. Proton und Neutron, die Nukleonen, sind die beiden leichtesten Baryonen und bilden die Grundlage der uns umgebenden baryonischen Materie. Die Masse der Nukleonen haben Massen von fast $1\text{GeV}/c^2$, was wesentlich größer als die Masse der drei darin enthaltenen Quarks ist. Ein Großteil der Nukleonenmasse wird also durch die Gluonenwolke und die virtuellen Quark-Antiquark-Paare und deren Korrelationen beigetragen.

Die Arbeit der Teilchenphysik, der wir uns im zweiten Semester zuwenden werden, liegt im Studium der Eigenschaften der Quarks und Leptonen sowie ihrer Wechselwirkungen. Insbesondere das Verständnis des Confinements und die Frage nach dem Ursprung der doch sehr unterschiedlichen Quarkmassen sind zentrale Fragestellungen der Teilchenphysik. Zudem sucht man nach Hinweisen für eine Vereinheitlichung der vier verschiedenen Wechselwirkungen bei sehr hohen Energien, was für die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung bereits gelungen ist.

Die Kernphysik, mit der wir die Vorlesung beginnen werden, beschäftigt sich mit den Eigenschaften der kondensierten stark wechselwirkenden Materie, wobei dem Studium der Eigenschaften der Hadronen eine Übergangsrolle zwischen der Kernphysik und der Teilchenphysik zukommt. Wie im Laufe der Vorlesung klar werden wird, sind die experimentellen Methoden der verschiedenen Teilgebiete durchaus verwandt, auch wenn sie bei sehr unterschiedlichen Energieskalen eingesetzt werden. Auch bei den physikalischen Fragestellungen und theoretischen Methoden gibt es einen erheblichen Überlapp, den

wir im Rahmen der Vorlesung beleuchten wollen.

Bis heute ist die Wechselwirkung zwischen den Nukleonen nicht vollständig verstanden. Zwar ist es möglich die Kräfte zwischen einzelnen Nukleonen durch Streuexperimente sehr genau zu vermessen, eine Ableitung der Eigenschaften von Kernen mit mehr Nukleonen ist daraus aber bisher nicht möglich.

Daher war es notwendig, Modelle zu entwickeln, die die wesentlichen Eigenschaften der Kerne durch einfache Näherungen beschreiben. Das erste Modell, was für die Beschreibung von Kernen und insbesondere für die Erklärung der Kernspaltung entwickelt wurde, ist das Tröpfchenmodell. In diesem Modell wird der Kern als ein Flüssigkeitstropfen mit konstanter Dichte angesehen, der aus den miteinander wechselwirkenden Nukleonen besteht. Ein solcher Tropfen hat natürlich eine Oberfläche mit einer Oberflächenspannung und er kann Oberflächenoszillationen ausführen. Diese anscheinend sehr primitive Betrachtung funktioniert jedoch für eine Reihe von Kerneigenschaften sehr gut. Ein weiteres sehr wichtiges Beispiel für solche Modelle ist das Schalenmodell der Kerne, bei dem die einzelnen Wechselwirkungen eines Nukleons mit allen anderen Nukleonen durch ein mittleres Potential ersetzt wird, in dem die Nukleonen sich bewegen. So erhält man, ähnlich wie bei der Elektronenhülle der Atome, durch Quantenzustände charakterisierte Orbitale, die durch unterschiedlich große Energielücken getrennt sind. Gruppen von energetisch nahe beieinanderliegenden Zustände lassen sich zu sogenannten Schalen zusammenfassen.

Kerne zeigen auch die Eigenschaft der Supraleitung, also der paarweisen entgegengesetzten Kopplung von Nukleonenspins, ähnlich den Cooperpaaren in Festkörpern. Dies ist nur eine von einer Vielzahl von Konzepten und Methoden, die die Kernphysik mit anderen physikalischen Systemen verbindet. Insbesondere kann man phasenübergangsähnliche Phänomene in Kernen beobachten und man findet die aus der Kernphysik bekannte Schalenstruktur in anderen mesoskopischen Systemen, wie zum Beispiel Metallcluster. Theoretische Methoden der Kernphysik sind auf andere Gebiete übertragen worden und experimentelle Methoden der Kernphysik finden eine Breite Anwendung in der Untersuchung von, z.B. Festkörpern und Polymeren (Kernspinresonanz NMR, Neutronenaktivierung, Ionenstrahlanalytik) und in der medizinischen Diagnostik (PET, MRI = NMR) und Therapie (Bestrahlungstherapie von Tumoren).

Wir werden uns in den nächsten Wochen zunächst mit der Bestimmung wesentlicher Eigenschaften von Nukliden beschäftigen. Hierzu gehören die Masse und der Radius von Kernen, die Tatsache ob ein Nuklid stabil oder radioaktiv ist und im Falle der Stabilität, mit welcher Häufigkeit es in der Natur vorkommt. Die radioaktiven Kerne können verschiedene Arten von Strahlung emittieren, die mit Alpha-, Beta- und Gammastrahlung bezeichnet werden. Für deren Messung brauchen wir Detektoren, die auf der Wechselwirkung der verschiedenen Strahlungstypen mit Materie beruhen. Für das Studium der Kerne durch Streuexperimente sowie zur Erzeugung instabiler Kerne im Labor und deren energetischen Anregung benötigen wir Teilchenbeschleuniger. Wir werden daher die verschiedenen Nachweismethoden und Beschleunigertypen vorstellen.

Aus der Streuung von Nukleonen aneinander, den Eigenschaften des Deuterons sowie der Systematik der experimentell bestimmten Grundzustandseigenschaften lassen sich Rückschlüsse auf die starke Wechselwirkung zwischen einzelnen Nukleonen sowie die Bewegung der Nukleonen im Kern ziehen. Aus diesen Eigenschaften lassen sich Modelle

für die Einteilchenbewegung im Kern ableiten, wie zum Beispiel das Fermi-Gas Modell und das Schalenmodell, das eine zentrale Rolle bei der Beschreibung der Struktur von Kernen spielt. Diese Modelle ermöglichen es auch, Aussagen über elektromagnetische Momente und angeregte Zustände zu machen. Wie auch bei anderen Vielteilchensystemen gibt es auch in Kernen kollektive Anregungsphänomene wie Oberflächenoszillationen oder Rotationen, die durch eine kohärente Bewegung einer ganzen Anzahl von Nukleonen zustande kommen. Das Studium angeregter Kernzustände, die sogenannte Kernspektroskopie, erlaubt es dann, aus den experimentellen spektroskopischen Informationen, wie Energiezuständen und Übergangsmatrixelementen zwischen Zuständen auf die Struktur der Kerne zurückzuschließen und diese Daten mit Modellvorhersagen zu vergleichen, wodurch diese Modelle wiederum verifiziert und weiter verbessert werden können.

Im Anschluss an diese Grundlagen der Kernstrukturphysik werden wir uns der Energieerzeugung durch Kernreaktionen zuwenden, die sowohl für die Energieproduktion in Spaltreaktoren als auch für die Erzeugung der Energie in Sternen durch Fusionsreaktionen verantwortlich ist. Neben der Energieproduktion wenden wir uns anderen Themen der nuklearen Astrophysik zu, wie zum Beispiel den Abläufen nach dem Urknall (Big Bang) und der Synthese der chemischen Elemente in verschiedenen stellaren Brenn- und Explosionsprozessen.

1.2.3 Relevanz der Kern- und Teilchenphysik auf allen Skalen

Wie bereits angedeutet, spielt die Kern- und Teilchenphysik auf allen Größenskalen, also sowohl im Makrokosmos als auch im Mikrokosmos, eine wichtige Rolle. Während die typische Größenskala unserer Umgebung im Bereich von $10^1 m$ bis $10^3 m$ liegen die Grenzen des bekannten Universums bei $10^{26} m$ und die Größe der Elementarteilchen unter $10^{-21} m$. Typische Größen von Atomen liegen bei einigen Angström ($10^{-10} m$), während Kerne Größen von einigen Femtometer ($1 fm = 10^{-15} m$) haben (1 Femtometer wird auch Fermi genannt). Die Größe eines Nukleons liegt bei einem Fermi. Kernphysikalische Effekte, wie zum Beispiel die Wechselwirkung zwischen dem Kerndrehimpuls und dem Drehimpuls der Elektronenhülle (Hyperfeinwechselwirkung) werden für atomare Untersuchungen, wie zum Beispiel Laserspektroskopie von Atomen verwendet. Kernphysikalische Untersuchungsmethoden, wie zum Beispiel die Kernspinresonanz (NMR) wird für die Untersuchung der Struktur von Proteinen und bildgebende Verfahren in der Medizin eingesetzt (MRI). Ein anderes Anwendungsbeispiel ist die Beschleunigermassenspektrometrie (AMS), die zum Beispiel für die Untersuchung der Klimageschichte der Erde herangezogen wird. Nukleare Prozesse spielen die entscheidende Rolle für die Energieproduktion in unserer Sonne und allen anderen Sternen. Die Elemente, aus denen wir und unsere Umwelt bestehen, sind in mehr oder weniger explosiven nuklearen Brennprozessen entstanden. So schließt sich der Kreis zwischen dem Urknall, bei dem die Elementarteilchen entstanden sind und der Struktur des gesamten Universums, in dem kernphysikalische Prozesse eine wichtige Rolle spielen.

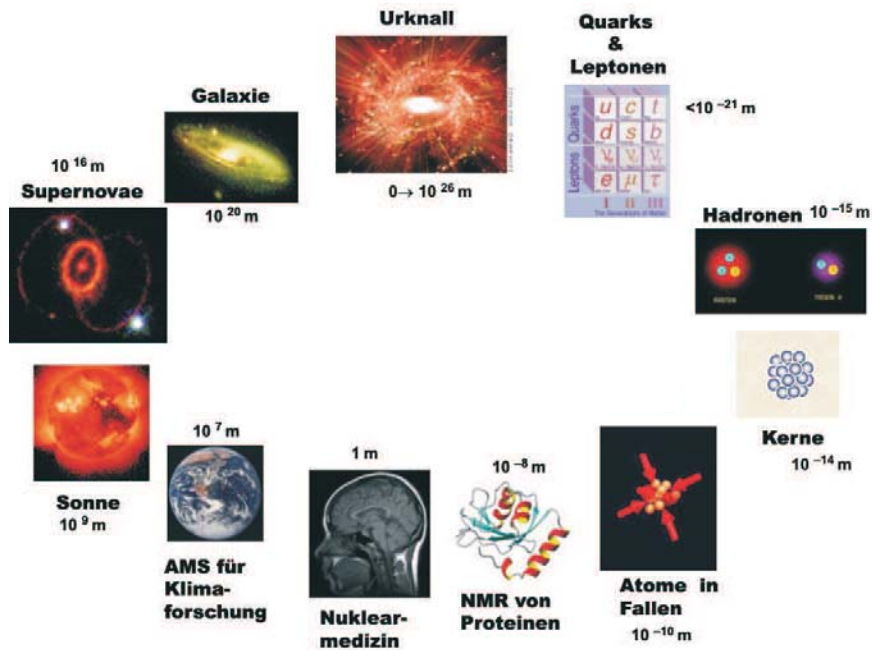


Abb. 1.10: Prozesse und Anwendungen der Kern- und Teilchenphysik spielen auf allen Größenskalen eine Rolle.

1.3 Einheiten und relevante Konstanten

Trotz der prinzipiellen Vereinheitlichung der physikalischen Einheiten durch das SI System (oder das cgs-System) verwenden viele Arbeitsgebiete der Physik ihre eigenen, den Größenordnungen und Besonderheiten der jeweiligen Objekten angepassten Einheiten. Dies trifft auch auf die Kern- und Teilchenphysik zu.

1.3.1 Länge

Kerne haben Radien in der Größe einiger Femtometer ($1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$), wobei 1 fm auch als Fermi bezeichnet wird.

1.3.2 Energie

Energien werden üblicherweise in Elektronenvolt angegeben. Dies ist die Energie, die eine Teilchen mit der Elementarladung $1e$ ($= 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}$) beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 V bekommt. $1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$. Man verwendet üblicherweise Energieeinheiten von keV , MeV und GeV .

1.3.3 Masse

Massen werden entweder in atomaren Masseneinheiten ($1u = 1/12m[^{12}\text{C}] = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{kg}$) oder gemäß der Massen-Energie-Äquivalenz $E = mc^2$ in MeV/c^2 anzugeben. Dabei ist eine atomare Masseneinheit $1u = 931,5\text{MeV}/c^2$.

1.3.4 Planck-Konstante und Lichtgeschwindigkeit

In allen physikalischen Systemen, in denen die Quantenmechanik eine Rolle spielt, verknüpft die Heisenbergsche Unschärferelation Längen- und Energieskalen. Hier spielen die Planck-Konstante (Wirkungsquantum)

$$\hbar = 6,582 \cdot 10^{-22}\text{MeVs} = 197\text{MeV fm}/c$$

und die Lichtgeschwindigkeit eine wichtige Rolle

$$c = 2,998 \cdot 10^8\text{m/s}.$$

1.3.5 Feinstrukturkonstante

Eine weitere wichtige Größe, die es ermöglicht die Ladung in einer einfachen und gut zu merkenden Art auszudrücken, ist die Feinstrukturkonstante

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

Die Feinstrukturkonstante ist auch das Maß für die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung.

1.3.6 Natürliche Einheiten

Wir sind nun in der Lage ein natürliches Einheitensystem einzuführen, bei dem wir von den Maßen (Meter, Kilogramm und Sekunde) auf die Einheiten ($\hbar, c, \text{MeV}$) oder ($\hbar, c, \text{fm}$) übergehen. Nachfolgend sind die Einheiten der wesentlichen physikalischen Größen aufgeführt:

[Energie]	=	MeV	oder	$\hbar c/\text{fm}$	($1\text{MeV} = \hbar c/197\text{fm}$)
[Masse]	=	MeV/c^2	oder	$\hbar/\text{fm} c$	($1\text{MeV}/c^2 = \hbar/197\text{fm} c$)
[Impuls]	=	MeV/c	oder	$\hbar/\text{fm}$	($1\text{MeV}/c = \hbar/197\text{fm}$)
[Länge]	=	fm	oder	$\hbar c/\text{MeV}$	($1\text{fm} = \hbar c/197\text{MeV}$)
[Zeit]	=	fm/c	oder	$\hbar/\text{MeV}$	($1\text{fm}/c \approx 3 \cdot 10^{-24}\text{s}$)
	oder	$(\hbar/mc)1/c$	oder	λ_c/c	(λ_c : Compton Wellenlänge)
[Ladung]	=	e	oder	$\sqrt{\alpha \hbar c}$	($= 1,2\sqrt{\text{MeV fm}}$)

Wie angedeutet, kann man wahlweise die Größen in MeV oder fm ausdrücken.

Um mit diesem einfachen Einheitensystem umgehen zu können, muss man sich im wesentlichen nur die beiden Zahlen 197 und 137 und die zugehörigen zentralen Relationen

$$\hbar c = 197\text{MeV fm} \quad (1.1)$$

und

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137} \quad (1.2)$$

merken.

Eine sehr beliebte weitere Vereinfachung dieses Einheitensystems ist es, die Naturkonstanten $\hbar = c = 1$ zu setzen. Damit werden die obigen Einheiten zu:

$$\begin{array}{llll} [\text{Energie}] & = & \text{MeV} & \text{oder } 1/fm \\ [\text{Masse}] & = & \text{MeV} & \text{oder } 1/fm \\ [\text{Impuls}] & = & \text{MeV} & \text{oder } 1/fm \\ [\text{Länge}] & = & fm & \text{oder } 1/\text{MeV} \\ [\text{Zeit}] & = & fm & \text{oder } 1/\text{MeV} \end{array}$$

Da nun z.B. für Massen, Energien und Impuls die gleichen Einheiten verwendet werden, muss man sich nur darüber im klaren sein, über welche physikalische Größe man redet.

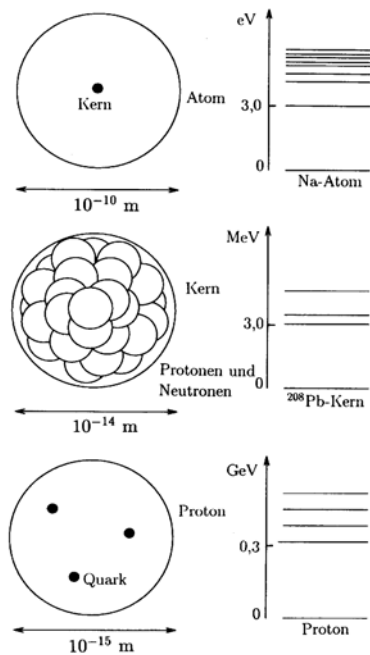


Abb. 1.11: Größen und Energieskalen von Atomen, Kernen und Nukleonen. (aus Povh et al.)

Abb. 1.11 zeigt die relevanten Energie- und Größenskalen für Atome, Kerne und das Proton.

1.4 Nomenklatur

1.4.1 Schreibweise für Nuklide

Ein Nuklid ist ein Atomkern, der aus Z Protonen und N Neutronen besteht.

Jedes Nuklid hat eine Massenzahl A , die die Summe von Protonenzahl und Neutronenzahl ist, also die Summe aller Nukleonen in diesem Atomkern.

$$A = N + Z$$

Die Ordnungszahl Z ist für das Element spezifisch. Mit q kann die Ionenladung bei der Betrachtung atomarer Prozesse angegeben werden.

Man schreibt in vollständiger Schreibweise:

$${}^A_ZX^q_N$$

Beispiel 1.1

$${}^{12}_6C_6 \text{ und } {}^{14}_6C_8$$

Natürlich reicht es völlig aus, das chemische Symbol und die Massenzahl eines Nuklids anzugeben, da somit N und Z eindeutig bestimmt sind (z.B. kann man statt ${}^{12}_6C_6$ auch einfach ${}^{12}C$ schreiben).

1.4.2 Die Nuklidkarte

Die Nuklidkarte in Abb. 1.12 bietet eine Übersicht über die bekannten Kerne. Die Farben geben für jeden Kern an ob er stabil ist (schwarz), dominant über β^+ /EC-Zerfall (rot), β^- -Zerfall (blau) oder α -Zerfall zerfällt.

In detaillierteren Nuklidkarten, wie zum Beispiel der sogenannten Karlsruher Nuklidkarte, aus der ein Ausschnitt in Abb. 1.13 gezeigt wird, werden zusätzliche Basisinformationen über die Nuklide gezeigt. So wird unter anderem für die stabilen Isotope die Elementhäufigkeit und für die instabilen Nuklide die Halbwertszeit der langlebigen Zustände (Grundzustand und isomere Zustände) und die Zerfallsarten aufgeführt.

1.4.3 Spezielle Bezeichnungen

Man gibt Nukliden mit gleichem Z , N oder A spezielle Namen:

- Isotope: Nuklide mit gleichem Z
- Isotone: Nuklide mit gleichem N
- Isobare: Nuklide mit gleichem A

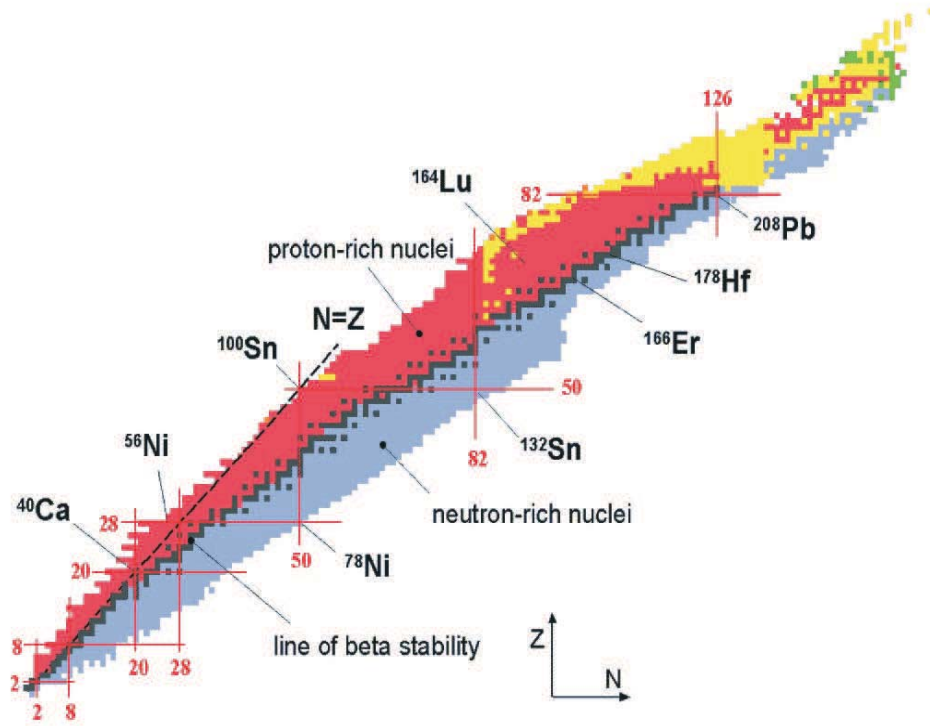


Abb. 1.12: Nuklidkarte der bekannten Kerne mit den stabilen Kernen in schwarz. In rot sind Kerne mit vorrangigem β^+ /EC- Zerfall, in blau Kerne mit vorrangigem β^- -Zerfall und in gelb Kerne mit vorrangigem α -Zerfall.

1.4.4 Halbwertszeit und Isomere

Radioaktive Kerne zerfallen in andere Kerne mit einer gewissen Zerfallswahrscheinlichkeit. Energetisch angeregte Zustände eines Korns zerfallen entweder zu energetisch tieferliegenden Zuständen oder zu Zuständen in anderen Kernen.

Die Zerfallswahrscheinlichkeit wird durch die Zerfallskonstante λ charakterisiert. Für die Aktivität A des radioaktiven Zerfalls (Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit) gilt:

$$A = -\frac{dn}{dt} = \lambda \cdot n. \quad (1.3)$$

Dabei ist n die Anzahl der zum Zeitpunkt t vorhandenen radioaktiven Kerne, bzw. der Bevölkerung des Zustandes. Die Aktivität folgt also einem Exponentialgesetz:

$$A(t) = \lambda n(t) = \lambda n_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.4)$$

mit $n_0 = n(t = 0)$. Die radioaktiven Kerne werden üblicherweise durch die Lebensdauer

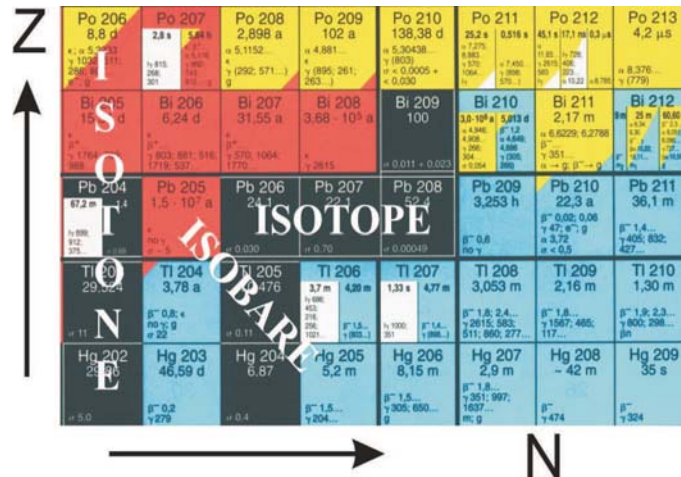


Abb. 1.13: Ausschnitt aus der Karlsruher Nuklidkarte. Außerdem ist die Verwendung der Begriffe Isotope, Isotone und Isobare angedeutet.

τ bzw. die Halbwertszeit $T_{1/2}$ charakterisiert, die zusammenhängen über $\tau = \frac{1}{\lambda}$ und $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2$.

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ eines Nuklids ist die Zeit nach der nur noch die Hälfte der beim Zeitpunkt $t = 0$ vorhandenen Nuklide vorhanden sind.

Mit Isomeren bezeichnet man energetisch angeregte metastabile Zustände, deren Halbwertszeit signifikant länger als die üblichen Halbwertszeiten für nukleare Zustände (10^{-15} - 10^{-9} s) ist. Isomere Zustände haben also Halbwertszeiten von mindestens ns (10^{-9} s) und können bis zu mehr als 10^{15} Jahren leben. Es ist möglich, dass sie auch länger leben als der Grundzustand des Kerns (energetisch niedrigster Zustand eines Kerns) in dem sie vorkommen.

Beispiel 1.2

^{180}Ta :

Der isomere Zustand bei einer Anregungsenergie von $E = 75 \text{ keV}$ hat eine Halbwertszeit von $T_{1/2} > 1,2 \cdot 10^{15} \text{ a}$, während der Grundzustand ($E = 0 \text{ keV}$) nur eine Halbwertszeit von $T_{1/2} = 8,152 \text{ h}$ hat.

1.5 Rekapitulation einiger Grundlagen

1.5.1 Welle-Teilchen Dualismus

Bei der Betrachtung physikalischer Prozesse auf der Größenskala von Kernen und Elementarteilchen spielen natürlich die Grundprinzipien der Quantenmechanik eine we-

sentliche Rolle. Insbesondere der Dualismus zwischen der Teilchen- und Wellennatur aller physikalischen Objekte ist wichtig. Für ein Teilchen mit dem Impuls $\vec{p}$ können wir einen Wellenvektor $\vec{k}$ definieren: $\vec{p} = \hbar \vec{k}$, und somit eine Wellenlänge ($\lambda = 2\pi/k$):

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (\text{de-Broglie Wellenlänge}). \quad (1.5)$$

1.5.2 Unschärferelation

Eine der wichtigsten Relationen der Quantenmechanik ist die Heisenbergsche Unschärferelation, die besagt, dass man Ort und Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau messen kann. Dies wird ausgedrückt über die Relation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (1.6)$$

Üblicherweise wird für die Abschätzung von Größenordnungen der Faktor $1/2$ in der Unschärferelation vernachlässigt.

Wenn wir Objekte wie Kerne oder Nukleonen räumlich auflösen wollen, benötigen wir "Licht" mit einer Wellenlänge, die kleiner als die Dimension des Objektes ist. Im Fall von Kernen und Teilchen verwendet man andere Teilchen, zum Beispiel Elektronen, als das "Licht".

Beispiel 1.3

Um ein Objekt mit einer Dimension R von etwa 1 fm aufzulösen, benötigen wir nach der Unschärferelation Teilchen mit einem Impuls von

$$p \geq \frac{\hbar}{R}.$$

In unserem Beispiel bedeutet dies einen Impuls von

$$p \geq \frac{197 \frac{\text{MeV fm}}{c}}{1 \text{ fm}} \simeq 200 \text{ MeV}/c.$$

Die Unschärferelation für Energie und Zeit lautet

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (1.7)$$

Eine andere Konsequenz der Unschärferelation betrifft die Betrachtung der Wechselwirkungen. Man beschreibt die Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen, wie wir später sehen werden, durch den Austausch eines Wechselwirkungsteilchens. Hat dieses Wechselwirkungsteilchen eine Masse, so kann es aus Gründen der Energieerhaltung nur für einen im Rahmen der Unschärferelation erlaubten Zeitraum existieren.

Beispiel 1.4

Ein Wechselwirkungsteilchen mit Ruhemasse von $100\text{MeV}/c^2$ kann nur für einen Zeitraum von

$$t \leq \frac{\hbar}{E} = \frac{197 \frac{\text{MeV} \cdot \text{fm}}{c}}{100 \text{MeV}} \simeq 2 \frac{\text{fm}}{c} = 6,7 \cdot 10^{-24} \text{s}$$

existieren, ohne die Energieerhaltung zu verletzen.

Wäre das Wechselwirkungsteilchen in der Lage mit Lichtgeschwindigkeit zu fliegen würde es dabei einen Weg von etwa 2fm zurücklegen.

Die Reichweite einer Wechselwirkung, die durch ein Teilchen mit einer Ruhemasse von $100\text{MeV}/c^2$ vermittelt wird, hat also eine Reichweite von unter 2fm .

1.6 Energie- und Impulserhaltung

Im Allgemeinen benötigen wir für die Beschreibung der Prozesse in der Kern- und Teilchenphysik die relativistische Kinematik. Die Energie eines Teilchens mit der Ruhemasse m_0 und dem Dreierimpuls $\vec{p}$ ist gegeben durch

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad \left(\text{mit } p = |\vec{p}| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \right) \quad (1.8)$$

Für ein Photon mit Ruhemasse $m_0 = 0\text{MeV}/c^2$ folgt

$$E = pc \quad (\text{mit } p = \hbar k). \quad (1.9)$$

Für Teilchen deren Ruhemasse klein im Vergleich zur kinetischen Energie ist, kann man diese **ultrarelativistische Näherung** auch verwenden.

Für Teilchen, die sich mit Geschwindigkeiten weit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit bewegen, kann man die **nichtrelativistische Näherung** verwenden:

$$E = mc^2 + \frac{p^2}{2m}. \quad (1.10)$$

Geschwindigkeiten werden oft in Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit gemessen. Hier wird die dimensionslose Größe $\beta = v/c$ eingeführt. Zusätzlich ist auch der relativistische Transformationsfaktor γ wichtig:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (1.11)$$

Nützlich ist auch die Beziehung:

$$\gamma\beta = \sqrt{\gamma^2 - 1}. \quad (1.12)$$

Insbesondere lässt sich die totale relativistische Energie E ausdrücken als

$$E = \gamma \cdot m_0 c^2, \quad (1.13)$$

sowie der Dreierimpuls p als:

$$p = \gamma \cdot m_0 v. \quad (1.14)$$

Beispiel 1.5

Für ein Elektron ($m_0 = 0,511 \text{ MeV}/c^2$) mit einer kinetischen Energie von $E_{kin} = 3,0 \text{ MeV}$ beträgt die Gesamtenergie

$$E = m_0 c^2 + E_{kin} = 0,511 \text{ MeV} + 3,0 \text{ MeV}$$

damit hat es einen Lorentzfaktor von

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{3,511}{0,511} = 6,87$$

und eine Geschwindigkeit von

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 0,989.$$

Dies bedeutet, dass bereits ein 3 MeV Elektron mit 98,9% der Lichtgeschwindigkeit fliegt. Würde man die ultrarelativistische Näherung verwenden, so erhält man $\gamma \simeq 5,87$ und $\beta \simeq 0,985$, also eine Abweichung von nur 0,4%.

1.6.1 Drehimpuls

Aus der klassischen Definition des Drehimpulses $\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$ ergibt sich quantenmechanisch der Drehimpulsoperator $\hat{L} = -i\hbar(\hat{r} \times \nabla)$. Wesentlich sind vor allem der Erwartungswert des Quadrats des Drehimpulsoperators

$$\langle \hat{L}^2 \rangle = l(l+1)\hbar^2$$

und der Erwartungswert der Projektion des Drehimpulsoperators auf die Quantisierungsachse z

$$\langle \hat{L}_z \rangle = m\hbar.$$

$\hat{L}^2$ und $\hat{L}_z$ haben die gleichen Eigenfunktionen und die Eigenwerte sind gleichzeitig gute Quantenzahlen. Dies gilt nicht für die beiden anderen Drehimpulskomponenten $\hat{L}_x$ und $\hat{L}_y$.

1.6.2 Fermionen, Bosonen und das Pauli-Prinzip

Eines der wichtigsten Konzepte der atomaren und subatomaren Physik ist die Unterscheidung zwischen Fermionen und Bosonen, die auf das Spin-Statistik Theorem von Pauli (1940) zurückzuführen ist. Dabei werden Teilchen mit halbzahligem Spin ($\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \dots$) als Fermionen bezeichnet. Für sie gilt die Fermi-Dirac Statistik, was bedeutet, dass sich bei der Vertauschung zweier identischer Teilchen das Vorzeichen der Gesamtwellenfunktion umkehrt. Im Gegensatz dazu werden Teilchen mit ganzzahligem Spin ($0\hbar, 1\hbar, 2\hbar, \dots$) als Bosonen bezeichnet. Für sie gilt die Bose-Einstein Statistik, bei der sich das Vorzeichen unter Vertauschung identischer Teilchen nicht ändert. Die Fermi-Dirac Statistik hat zur Konsequenz, dass sich zwei identische Fermionen nicht im exakt gleichen Zustand befinden können. Bei Vertauschung der beiden Teilchen würde ja ein identischer Zustand erzeugt, dessen Wellenfunktion jedoch ein anders Vorzeichen haben müsste. Gleichheit ist daher nur zu erreichen, wenn die Wellenfunktion insgesamt verschwindet, es einen solchen Zustand also nicht gibt. Dies ist das berühmte Pauli-Prinzip, dass eine entscheidende Rolle für die Beschaffenheit unserer Welt spielt.