

### 3 Kern und Teilchen

---

#### Lernziele

- Sie wissen wie ein *Atomkern* aufgebaut ist und aus welchen Teilchen er besteht.
  - Sie kennen die Begriffe *Massen-* und *Ordnungszahl* und können sie anwenden.
  - Sie wissen wie man ein *Nukleid* beschriftet und können die richtigen Werte zuordnen.
  - Sie können die Formel für den *Atomradius* anwenden und Abschätzungen damit vornehmen.
  - Sie können Massen und *Bindungsenergien* der Atome bestimmen und selbstständig nachrechnen.
  - Sie verstehen die *radioaktive Strahlung* und wissen, welche Arten unterschieden werden.
  - Sie kennen den  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ -*Zerfall* genauer und können die drei Fälle klar voneinander unterscheiden.
  - Sie wissen, welche theoretischen Überlegungen durchgeführt wurden, um das *Neutrino* vorauszusagen.
  - Sie können die *C-14 Methode* erklären und exemplarisch eine Altersbestimmung vornehmen.
  - Sie können die verschiedenen *Elementarteilchen* gruppieren und ihre wesentlichen Eigenschaften benennen.
  - Sie kennen den Unterschied zwischen *Fermionen* und *Bosonen* sowie zwischen *Leptonen* und *Quarks*.
  - Sie kennen die verschiedenen *Wechselwirkungen* und können jeweils ein Beispiel nennen.
  - Sie verstehen in den Grundzügen, was man unter dem Begriff *Teilchenzoo* gemeint hat, und welchen Ausweg gefunden wurde.
  - Sie können den Higgs-Mechanismus mit Hilfe der Party-Analogie erklären.
- 

In diesem eher kurzen Kapitel der modernen Physik werden wir uns sowohl mit der *Kernphysik* als auch mit der *Teilchenphysik* beschäftigen. Die Kernphysik beschäftigt sich eher mit den verschiedenen Eigenschaften der Atomkerne, während die Teilchenphysik alle möglichen Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen untersucht.

Diese Unterteilung hat auch eine historische Bedeutung, da man sich zunächst mit den Kernen und erst später mit den einzelnen Teilchen beschäftigte.

#### 3.1 Kernphysik

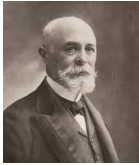
In diesem Abschnitt werden wir einerseits die Atomkerne und ihre Eigenschaften näher betrachten, andererseits aber auch die so genannte radioaktive Strahlung, die beim Zerfall entsteht.

Die Anfänge der Kernphysik gehen auf das Ende des 19. Jahrhunderts zurück, als Henry Becquerel<sup>1</sup> und dem Ehepaar Curie<sup>2</sup> die Radioaktivität entdeckten.

---

<sup>1</sup>Antoine Henri Becquerel (15. Dezember 1852 in Paris - 25. August 1908 in Le Croisic, Département Loire-Atlantique) war ein französischer Physiker.

<sup>2</sup>Marie Skłodowska Curie (7. November 1867 in Warschau, Russisches Kaiserreich - 4. Juli 1934 bei Passy, geborene Maria Salomea Skłodowska) war eine Physikerin und Chemikerin polnischer Herkunft, die in Frankreich lebte und wirkte.



H. Becquerel  
(1852-1908)

Henry Becquerel, ein französischer Physiker des späten 19. Jahrhunderts, erhielt 1903 gemeinsam mit Marie und Pierre Curie den Nobelpreis für Physik für die Entdeckung der Radioaktivität. Sein Vater war Alexandre Edmond Becquerel, der Entdecker des photoelektrischen Effekts. Marie Curie untersuchte die 1896 von Henri Becquerel beobachtete Strahlung von Uranverbindungen und prägte für diese das Wort *radioaktiv*.

Im Rahmen ihrer Forschungen, für die ihr 1903 ein anteiliger Nobelpreis für Physik und 1911 der Nobelpreis für Chemie zugesprochen wurde, entdeckte sie gemeinsam mit ihrem Ehemann Pierre Curie die chemischen Elemente Polonium und Radium. Marie Curie ist die einzige Frau unter den vier Personen, denen bisher mehrfach ein Nobelpreis verliehen wurde, und neben Linus Pauling die einzige Person, die Nobelpreise auf zwei unterschiedlichen Fachgebieten erhielt. Wie Becquerel starb auch Curie an den Folgen der radioaktiven Strahlung, deren Auswirkungen damals noch unterschätzt wurden.



M. Curie  
(1867-1934)

Die bis dahin unbekannte radioaktive Strahlung wurde von Rutherford genauer untersucht. Dabei entdeckt er, dass man im Wesentlichen drei Arten von Strahlung unterscheiden kann. Da zu diesem Zeitpunkt noch unklar war, woraus diese Strahlung bestand, bezeichnete er sie allgemein als  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ -Strahlung. Fast gleichzeitig entdeckte Rutherford den Atomkern (siehe B.2.1.1). Eine weitere wichtige Entdeckung, die zum Verständnis des Atomkerns beiträgt, ist die Entdeckung des Neutrons durch Chadwick<sup>3</sup>.

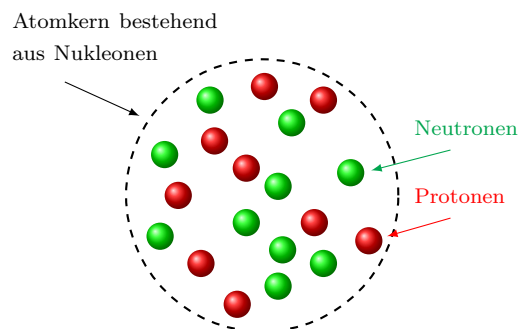


J. Chadwick  
(1891-1974)

James Chadwick war ein britischer Physiker des 20. Jahrhunderts. Für seine bahnbrechende Arbeit erhielt James Chadwick 1935 den Nobelpreis für Physik. Seine Entdeckung des Neutrons legte den Grundstein für zahlreiche weitere Entwicklungen in der Physik und hatte wichtige Anwendungen in Bereichen wie Kernenergie und Medizin. Während des Zweiten Weltkriegs arbeitete er im Rahmen des Manhattan-Projekts an der Entwicklung der 1. Atombombe und der Leitung von Oppenheimer. Weiter spielte er eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Technologien zur Nutzung der Kernspaltung.

### 3.1.1 Eigenschaft der Kerne

Wie wir seit dem Experiment von Rutherford und der Entdeckung von Chadwick wissen, besteht der Atomkern aus neutralen Neutronen und positiv geladenen Protonen. Die Gesamtheit der Teilchen im Kern wird als *Nukleonen* bezeichnet. Anbei eine Skizze eines Fluorkerns:



Wie wir aus dem Kapitel Mechanik wissen, sind Protonen und Neutronen nicht elementar. Sie bestehen aus Quarks: das Neutron aus zwei *d*-Quarks und einem *u*-Quark, das Proton aus zwei *u*-Quarks und einem *d*-Quark. Da die Massen der Quarks (der gleichen Familie) sehr ähnlich sind, haben auch die Nukleonen praktisch die gleiche Masse:

Teilchen	Masse [kg]	Masse [MeV/ $c^2$ ]
Neutron	$1.675 \cdot 10^{-27}$	939.5
Proton	$1.673 \cdot 10^{-27}$	938.3

Man erkennt, dass der Massenunterschied sehr gering ist. Genauere Berechnungen sind im folgenden Beispiel selbst durchzuführen.

#### Bsp. i.

Bestimmen Sie den Massenunterschied zwischen einem Neutron und einem Proton a) in kg und b) in MeV/ $c^2$ .

<sup>3</sup>Sir James Chadwick (20. Oktober 1891 in Bollington, Cheshire East - 24. Juli 1974 in Cambridge) war ein englischer Physiker. Er war Nobelpreisträger für Physik im Jahre 1935.

Beim Zerfall eines Neutrons entsteht unter anderem ein Elektron ( $\beta$ -Strahlung). c) Wie gross ist die kinetische Energie des Elektrons und d) welche Geschwindigkeit hat das Elektron damit (relativistisch gerechnet)?  
 Lsg: a)  $\Delta m \approx 2.0 \cdot 10^{-30}$  kg, b)  $\Delta m \approx 1.2 \text{ MeV}/c^2$ , c)  $E_{\text{kin}} \approx 0.7 \text{ MeV}/c^2$ , d)  $\frac{v}{c} \approx 0.909$

**Lösung:**

Nun kommen zwei Definitionen, welche Sie bestimmt bereits aus der Chemie kennen. Um jedoch zu garantieren, dass wir alle vom gleichen sprechen, hier nochmals:

**Def. 1:** (Massenzahl) Die Anzahl Nukleonen  $A$  in einem Kern ist die Massenzahl.

Und die zweite Definition zeigt deutlich, dass zuerst den Atomen eine Zahl zugeordnet wurde, bevor man verstanden hat, woraus die Atome wirklich bestehen.

**Def. 2:** (Ordnungszahl) Die Anzahl Neutronen nennen wir Neutronenzahl  $N$  und die Anzahl Protonen die Ordnungszahl  $Z$ . Es gilt:

$$A = N + Z,$$

wobei  $A$  die Massenzahl ist.

Wenden Sie diese Definition gleich beim nächsten Beispiel an.

**Bsp. ii.**

Das Iod-Atom mit der Ordnungszahl  $Z = 53$  hat eine Massenzahl von etwa  $A \approx 126.9$ . Bestimmen Sie die Neutronenzahl und die Anzahl Protonen.

Lsg:  $N \approx 73.9$

**Lösung:**

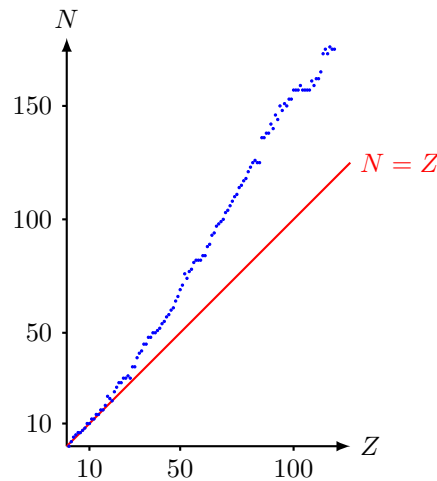
Von praktisch allen Atomen gibt es jedoch mehrere Konfigurationen, die in der Natur vorkommen. Eine bestimmte Konfiguration wird *Nuklid* genannt und wie folgt bezeichnet:



Die Ordnungszahl wird häufig nicht angegeben, da der Name X und die Ordnungszahl  $Z$  im Grunde dasselbe bedeuten, z.B.  ${}^{235}\text{U}$  und nicht  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , da 92 im Periodensystem eindeutig dem Uran zugeordnet ist. Beispielsweise sind vom Uranatom sowohl  ${}^{235}\text{U}$  als auch  ${}^{237}\text{U}$  und  ${}^{238}\text{U}$  in der Natur realisiert. Nuklide mit gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl nennt man *Isotope*.

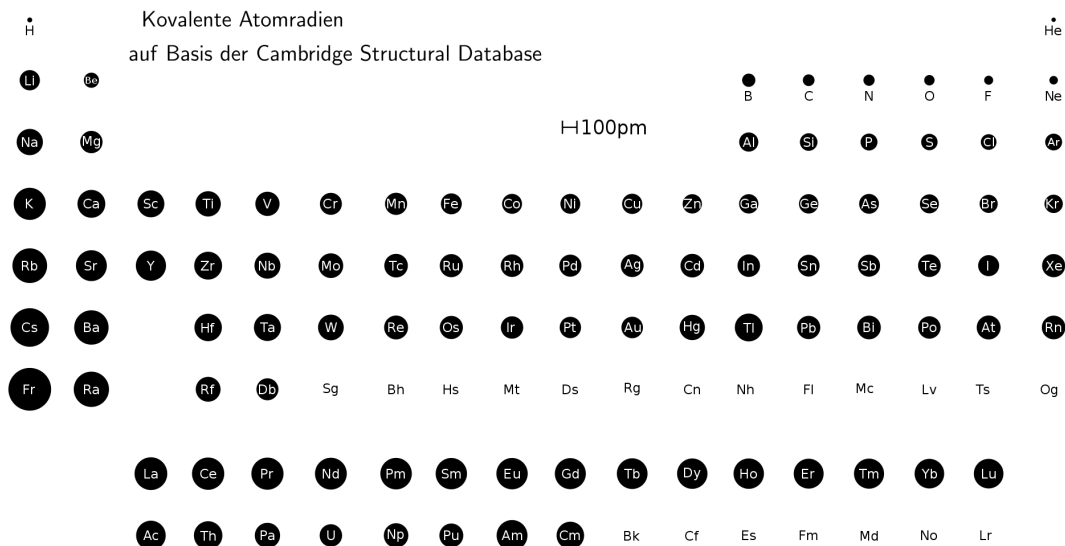
Vielleicht wissen Sie schon, dass grosse Atome, wie z.B. das Jodatome, mehr Neutronen benötigen als kleine Atome, wie z.B. das Kohlenstoffatom. Die folgende Grafik zeigt sehr anschaulich, wie die Anzahl der Neutronen bei grösseren Atomen zunimmt<sup>4</sup>

<sup>4</sup>Die Grafik ist nur für diejenigen Isotope, welche in der Regel im Periodensystem angegeben sind.



Das liegt daran, dass das Coulomb-Potential bzw. die Coulomb-Kraft quadratisch mit der Ordnungszahl zunimmt. Um dies auszugleichen, muss die Starke Kraft erhöht werden, was durch mehr Neutronen geschieht.

Die nächste interessante Grafik stellt den Radius eines Atoms der Massenzahl gegenüber. Vereinfacht könnte man annehmen, dass der Radius linear mit der Massenzahl zunimmt und somit die schwersten Atome fast 300 mal grösser wären als die leichtesten. Die Grafik zeigt jedoch ein ganz anderes Verhalten. [71]



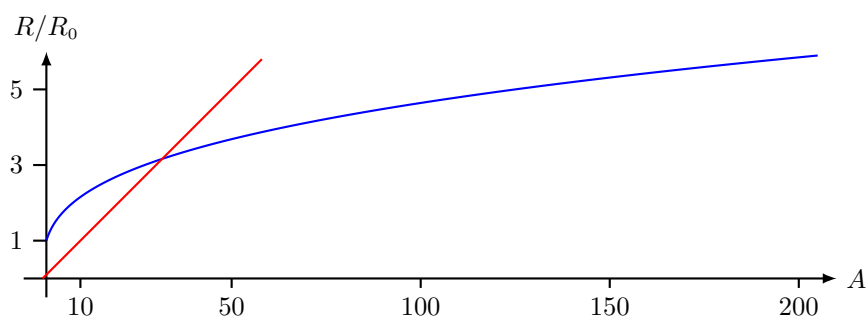
Man erkennt auch, dass die Atome nicht der Grösse nach im Periodensystem geordnet sind. Eine Funktion, welche die Grössen der Kerne von Atomen annähert ist:

**Ges. 1:** (*Kernradius*) Der Kernradius  $R$  eines Atoms mit der Massenzahl  $A$  ist:

$$R \approx R_0 \sqrt[3]{A},$$

wobei  $R_0 \approx 1.5 \text{ fm}$  sind.

Dies sieht in etwa wie folgt aus:



Diese Grafik zeigt deutlich, dass die Atomgrösse alles andere als linear zunimmt, wie der Vergleich mit der roten Kurve zeigt. Man sieht auch, dass sie zu Beginn stärker ansteigt, dann aber immer flacher wird.

### Bsp. iii.

Bestimmen Sie a) den Radius und b) die Dichte für die Isotopen der Urans- resp. Wasserstoff-Atoms.  $^{235}\text{U}$  und  $^2\text{H}$ .

Lsg: a)  $R_{\text{U}} \approx 9.26 \text{ fm}$ ,  $R_{\text{H}} \approx 1.9 \text{ fm}$ , b)  $\rho \approx 7.07 \cdot 10^{43} \text{ kg/m}^3$

Lösung:

### 3.1.2 Masse und Bindungsenergien der Kerne

Eine häufig verwendete Masseneinheit für die Atom- und Kernmasse ist die *atomare Masseneinheit*, die wie folgt definiert ist:

**Def. 3:** (*atomare Masseneinheit*) Die atomare Masseneinheit  $u$  entspricht  $1/12$  der Masse eines isolierten Atoms des Kohlenstoff-Isotops  $^{12}\text{C}$  im Grundzustand, also

$$1 \text{ u} = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

und wegen der Masse-Energie-Äquivalenz

$$1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2.$$

Das Kohlenstoffisotop  $^{12}\text{C}$  besteht aus sechs Protonen, sechs Neutronen und sechs Elektronen. Zählt man diese Bestandteile zusammen, erhält man sicher mehr als 12 u. Dies zeigt bereits, dass das Atom noch sogenannte *Bindungsenergien* besitzt. Betrachten wir zunächst das Beispiel Helium ( $^4\text{He}$ ).

### Bsp. iv.

Bestimmen Sie die Massendifferenz zwischen dem Isotop  $^4\text{He}$  und seinen Bestandteile, wobei die Bestandteile Neutronen  $m_n$  und Wasserstoff-Atome  $^1\text{H}$ , also  $m_{^1\text{H}}$  sind.

Lsg:  $\Delta m \approx 0.0304 \text{ u} \hat{=} 28.3 \text{ MeV}/c^2$

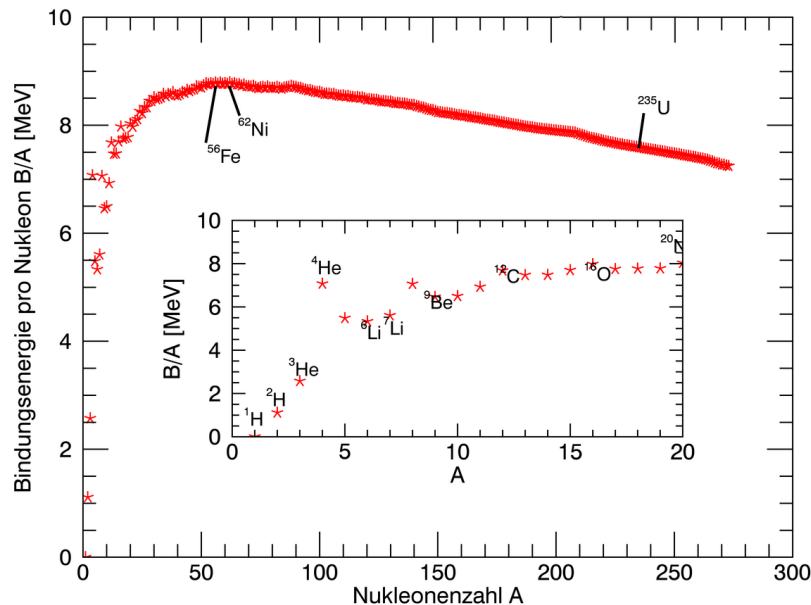
Lösung:

Diese Überlegung kann man nun für alle Atome des Periodensystems anstellen. Da dieser Massenunterschied in Form von Energie vorliegt, definiert man diese sogenannte *Bindungsenergie* wie folgt

**Def. 4:** (*Bindungsenergie*) Für die Bindungsenergie  $E_B$  eines Kerns  $^A\text{X}$  der atomaren Masse  $M_{A_X}$  mit  $Z$  Protonen und  $N = A - Z$  Neutronen gilt:

$$E_B = \left( Zm_{^1\text{H}} + (A - Z)m_n - M_{A_X} \right) c^2$$

Interessanterweise ist die Bindungsenergie in Abhängigkeit von der Massenzahl keine monoton steigende Funktion, sondern hat ihr Maximum bei Eisen, wie die folgende Grafik von [72] zeigt.



Die Grafik ist nicht ganz einfach zu lesen. Wenn wir uns links vom Eisen befinden, dann nimmt die Bindungsenergie pro Massenzahl zu, d. h. wenn wir zum Beispiel aus zwei Wasserstoffatomen  $^2\text{H}$  ein Heliumatom verschmelzen, dann besitzt das Heliumatom mehr Bindungsenergie als die Wasserstoffatome. Die Bestandteile sind also schwerer als zusammen und es kann Energie gewonnen werden. Die gleiche Überlegung in die andere Richtung führt zu einem Energieverlust. Rechts vom Eisen ist es genau umgekehrt. Wenn wir zwei leichtere Atome miteinander verschmelzen, erhalten wir ein schwereres Atom mit weniger Bindungsenergie, d. h. die Bestandteile sind schwerer, also ein Energieverlust. Lässt man aber einen schweren Kern in zwei leichtere zerfallen, so haben die leichteren mehr Bindungsenergie und damit weniger Masse, also einen Energiegewinn.

Zusammenfassend kann man sagen, dass bis zum Element Eisen die Fusion energiegewinnend ist und danach der Zerfall. Formal lässt sich dies wie folgt verdeutlichen. Betrachten wir folgende Reaktion für die Fusion



Setzen wir nun die Formel von oben ein, erhalten wir:

$$2Zm_{\text{H}} + 2(A - Z)m_{\text{n}} - E_{\text{B}}({}^A\text{X}) = Z'm_{\text{H}} + (A' - Z')m_{\text{n}} - E_{\text{B}}({}^{A'}\text{Y}) \pm E.$$

Da sich die Anzahl der Protonen und Neutronen bei einer Fusion nicht ändern darf, ist:

$$2Zm_{\text{H}} + 2(A - Z)m_{\text{n}} = Z'm_{\text{H}} + (A' - Z')m_{\text{n}}$$

und daher gilt:

$$-E_{\text{B}}({}^A\text{X}) = -E_{\text{B}}({}^{A'}\text{Y}) \pm E.$$

Da auf der linken Seite von Eisen  $E_{\text{B}}({}^{A'}\text{Y}) > E_{\text{B}}({}^A\text{X})$  ist, muss  $E > 0$  sein, also ein Energiegewinn und beim Zerfall auf der linken Seite von Eisen ein Energieverlust. Analog kann man dies auf der rechten Seite von Eisen ableiten.

Nun stellt sich natürlich die Frage, wohin diese Energie geht und in welcher Form. Die Antwort liegt auf der Hand, diese Energie tritt als *radioaktive Strahlung* auf.

### 3.1.3 Radioaktive Strahlung

Wie bereits erwähnt, geht die Entdeckung der Radioaktivität auf Antoine Henri Becquerel im Jahre 1896 zurück. Er beobachtete, dass Uransalze fotografische Platten schwärzen konnten. Später stellte er fest, dass diese neue Strahlung undurchsichtige Materialien durchdringen kann. Nur zwei Jahre später entdeckten Marie und Pierre Curie die Radioaktivität von Thoriumoxid und isolierten zwei bis dahin unbekannte, viel stärker strahlende

Stoffe, die sie Radium und Polonium taufen.

In den folgenden Jahren spielte Ernest Rutherford eine entscheidende Rolle bei der Charakterisierung dieser Strahlung. Bereits 1898 konnte er zwei Strahlungsarten unterscheiden. Dies, nachdem er die Durchdringungsfähigkeit untersucht hatte. Er nannte sie  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung. Bereits ein Jahr später konnten andere zeigen, dass diese Strahlungen unterschiedlich auf Magnetfelder reagieren und daher unterschiedlich geladen sein müssten. Im Jahr 1900 entdeckte Paul Villard eine dritte Strahlung, die sich von Magnetfeldern nicht beeinflussen liess. Rutherford prägte auch hier den Namen,  $\gamma$ -Strahlung. Die Vermutung, dass es sich bei dieser dritten Strahlung um eine elektromagnetische Strahlung handelt, konnte erst 1914 ebenfalls von Rutherford bestätigt werden.

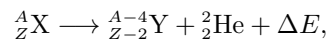
Inzwischen wissen wir sehr gut, woraus die einzelnen Strahlungsarten bestehen, und wir lernen immer mehr Strahlungsarten kennen. In diesem Kapitel beschränken wir uns jedoch auf die drei Hauptstrahlungsarten:

- Beim Alphazerfall emittiert der Atomkern ein Alphateilchen, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Dabei verringert sich die Massenzahl um 4 und die Ordnungszahl um 2.
- Beim Betazerfall emittiert der Atomkern entweder ein Elektron oder ein Positron, das im Atomkern bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton bzw. eines Protons in ein Neutron entsteht. Die Massenzahl bleibt gleich, die Ordnungszahl ändert sich um +1 bzw. -1.
- Beim Gammazerfall sendet der Atomkern ein hochenergetisches Photon aus. Masse und Ordnungszahl bleiben gleich, nur der Anregungszustand des Kerns verringert sich. Der Gammazerfall tritt meist als unmittelbare Folge eines vorangegangenen Alpha- oder Betazerfalls auf.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Durchdringungsfähigkeit der Teilchen. Alphastrahlung kann bereits durch ein Blatt Papier oder Luft abgeschirmt werden. Zur Abschirmung von  $\beta^-$ -Strahlung, also Elektronen, werden dünne Schichten aus Plexiglas oder Blech verwendet, wobei Materialien mit niedriger Ordnungszahl wegen der geringeren auftretenden Bremsstrahlung besser geeignet sind. Zur Abschirmung von  $\beta^+$ - und gleichzeitig von  $\gamma$ -Strahlung werden Materialien mit hoher Ordnungszahl verwendet, z. B. Blei.

### 3.1.4 Alpha-Zerfall

Wie bereits erwähnt, besteht das  $\alpha$ -Teilchen aus einem Heliumkern. Daraus ergibt sich für einen allgemeinen  $\alpha$ -Zerfall folgende Gleichung



wobei  ${}^A_Z\text{X}$  das Mutter- und  ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$  das Tochternuklid sind.  $\Delta E$  ist die beim Zerfall freiwerdende Energie. Der Kernphysiker und der Chemiker sprechen beim Heliumkern von einem zweiwertigen Kation, also von einem zweifach ionisierten Heliumatom.

Betrachte das folgende Beispiel und berechne die freiwerdende Energie:

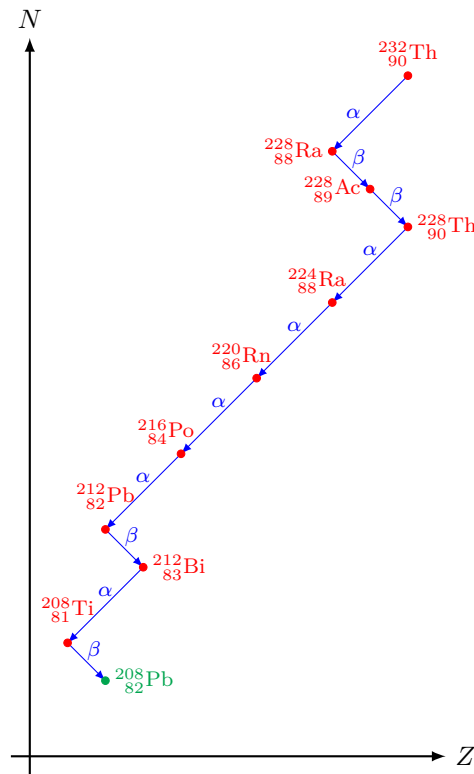
#### Bsp. v.

Betrachten Sie den  $\alpha$ -Zerfall vom Samarium-Isotop  ${}^{146}_{62}\text{Sm}$ . a) Was ist das Tochternuklid? b) Welche kinetische Energie wird dabei freigesetzt, falls das  $\alpha$ -Teilchen eine Masse von 4.0015 u, das Mutternuklid eine von 145.913 u und das Tochternuklid 141.908 u haben? Diese Energie ist praktisch vollständig in Bewegungsenergie des Heliumkerns vorhanden. c) Bestimmen Sie daraus die Austrittsgeschwindigkeit. **Lsg:** a)  ${}^{142}_{60}\text{Nd}$ , b)  $E_{\text{kin}} \approx 3.17 \text{ MeV}$ , c)  $\frac{v}{c} \approx 0.12$

**Lösung:**



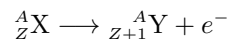
In der Regel folgt ein Zerfall auf den anderen, bis schliesslich ein stabiles Nuklid erreicht ist. Solche Zerfallsketten sind selten durch nur einen Zerfall gekennzeichnet. Meist sind alle drei Zerfallswege beteiligt. Hier ein Beispiel der Zerfallsreihe von Thorium-232 zu Blei-208, dargestellt sind die Neutronenzahl  $N$  und die Ordnungszahl  $Z$ .



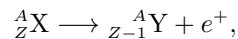
Die Beurteilung, ob ein Atomkern stabil oder instabil ist, ist nicht trivial. Schwierige quantenmechanische Berechnungen mit vielen Abschätzungen und Vereinfachungen können für die meisten Atome eine Vorhersage machen. In der Regel werden aber die instabilen Kerne zuerst experimentell gefunden. In dieser Zerfallskette ist auch der  $\beta$ -Zerfall enthalten, auf den wir etwas näher eingehen wollen, da er auch noch zu einer bahnbrechenden Entdeckung geführt hat.

### 3.1.5 Beta-Zerfall

Der  $\beta$ -Zerfall tritt bei Kernen auf, die entweder zu viele oder zu wenige Neutronen enthalten. Dabei wird entweder ein Neutron in ein Proton oder ein Proton in ein Neutron umgewandelt. Damit ist klar, dass sich die Massenzahl  $A$  nicht ändert, aber die Ordnungszahl um eins erhöht oder um eins erniedrigt wird. Daraus ergibt sich für einen allgemeinen  $\beta^-$ -Zerfall:

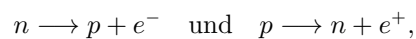


und für den  $\beta^+$ -Zerfall:



wobei  $^A_Z\text{X}$  das Mutter- und  $^A_{Z\mp 1}\text{Y}$  das Tochternuklid sind. Das  $e^-$  ist das Elektron, das  $e^+$  ist das Antiteilchen des Elektrons, nämlich das sogenannte *Positron* (vgl. das nächste Kapitel 3.2).

Da zuerst die Strahlung, also das Elektron bzw. Positron gemessen wurde, wird der Zerfall danach benannt und nicht nach der Änderung der Ordnungszahl. Auf Nukleonebene sind die  $\beta^\pm$ -Zerfälle wie folgt



wobei  $n$  das Neutron und  $p$  das Proton bezeichnet. Da das Neutron schwerer ist als das Proton, kann ein freies Proton niemals in ein Neutron zerfallen. Der  $\beta^+$ -Zerfall kann nur innerhalb eines Atomkerns stattfinden. Die Energie eines  $\beta^+$ -Zerfalls stammt also aus dem Atomkern. Der entstandene Kern muss etwas weniger Energie haben als der Ausgangskern.

Da es sich um einen *Zweikörperzerfall* handelt, ist die Berechnung sehr einfach. Betrachten wir den Fall eines  $\beta^-$ -Zerfalls innerhalb eines Atoms, zum Beispiel in Bismut-210.

#### Bsp. vi.

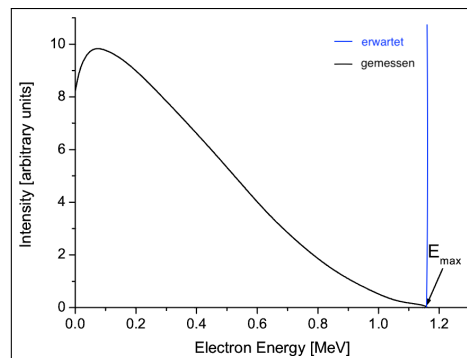
Bestimmen Sie die Gesamtenergie des Elektrons für den  $\beta^-$ -Zerfall von Bismut-210, wobei die Masse des Mutternuklids ist  $M_{\text{Bi}} \approx 209.9841 \text{ u}$ , die des Tochternuklids  $M_{\text{Po}} \approx 209.9829 \text{ u}$  und die Masse des Elektrons  $M_e \approx 5.486 \cdot 10^{-4}$  sind.

Lsg:  $E_e \approx 0.0012 \text{ u} \hat{=} 1.118 \text{ MeV}$



Lösung:

Die folgende Abbildung zeigt die Messung des Energiespektrums der Elektronen nach einem  $\beta^-$ -Zerfall für das Isotop Bismut-210.



Man sieht deutlich, dass hier etwas nicht stimmen kann. Die Energien der Elektronen streuen von Null bis zur maximalen Energie von 1.18 MeV. Im Gegensatz zu unseren Berechnungen haben die Elektronen nicht immer die gleiche Energie. Wenn man bedenkt, wie lange der Zerfall schon bekannt war, ist es erstaunlich, dass erst Wolfgang Pauli den Mut hatte, etwas Neues zu wagen.



W. Pauli  
(1900–1985)

Wolfgang Pauli war ein österreichischer Physiker des 20. Jahrhunderts, der für seine fundamentale Arbeit auf dem Gebiet der Quantenmechanik und seine Beitrag zur Entwicklung des Pauli-Prinzips bekannt ist. Pauli leistete auch wichtige Beiträge zur Quantenmechanik, insbesondere durch seine Arbeit an der Formulierung des Spin-Statistik-Theorems, das die statistischen Eigenschaften von Teilchen mit halbzahligem Spin beschreibt. Für seine herausragenden Leistungen erhielt Wolfgang Pauli 1945 den Nobelpreis für Physik. Nicht ganz so berühmt ist er für seine theoretische Entdeckung des Neutrinos.

Wolfgang Pauli postulierte 1930 aufgrund dieser und ähnlicher Messungen ein neues Teilchen. Da es im Experiment nicht nachgewiesen werden konnte und die Verteilung sich dem Maximum der Elektronenenergie nähert, postulierte er folgendes:

- Das neue Teilchen muss *elektrisch neutral* sein und
- es muss eine *sehr kleine* oder *gar keine Masse* haben.

Er tat dies zunächst nur in einem Brief an Enrico Fermi<sup>5</sup>. Er nannte das Teilchen Neutron. Als Chadwick kurze Zeit später ein neutrales Teilchen im Kern entdeckte und es Neutron nannte, taufte Fermi es kurzerhand um. Er nannte es das kleine Neutrale, vom italienischen *Neutrino*. Als Symbol erhielt es den kleinen griechischen Buchstaben  $\nu$  ('nü').



E. Fermi  
(1901–1954)

Enrico Fermi war ein herausragender italienischer Physiker des 20. Jahrhunderts, der für seine Arbeit auf dem Gebiet der Kernphysik und Quantenmechanik bekannt ist. Eine seiner bedeutendsten Leistungen war die Entwicklung der ersten erfolgreichen Theorie zur Beschreibung des Betazerfalls, die heute als Fermi-Theorie des Betazerfalls bekannt ist. Diese Theorie legte den Grundstein für das Verständnis der Schwachen Wechselwirkung, einer der vier fundamentalen Kräfte der Natur. Für seine bahnbrechenden Beiträge zur Physik erhielt Enrico Fermi 1938 den Nobelpreis.

<sup>5</sup>Enrico Fermi (29. September 1901 in Rom - 28. November 1954 in Chicago, Illinois) war ein italienischer Physiker und einer der bedeutendsten Kernphysiker des 20. Jahrhunderts.

Es dauerte fast drei Jahre, bis Pauli es wagte, es der Öffentlichkeit zu präsentieren. Bis dahin war klar, dass beim  $\beta$ -Zerfall der Energiesatz verletzt war. Aus heutiger Sicht ist es fast unglaublich, dass man bereit war, auf den Energiesatz zu verzichten. Der  $\beta^-$ -Zerfall sieht also wie folgt aus<sup>6</sup>:

$$n \longrightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e.$$

Es dauerte mehr als zwanzig Jahre, bis Clyde Cowan und Frederick Reines 1956 das erste Neutrino-Experiment durchführten und erstmals erfolgreich eine Neutrinoreaktion nachweisen konnten. Meiner Meinung nach hätten sie sofort den Nobelpreis erhalten müssen. Aus Gründen, die ich nicht kenne, wurde Ihnen der Nobelpreis erst 1995 verliehen. Da Cowan zu diesem Zeitpunkt bereits verstorben war, blieb ihm diese Ehre versagt.

Bsp. vii.

Bestimmen Sie für a) das Stickstoff-Isotop  $^{13}_7\text{N}$  und b) das Kohlenstoff-Isotop  $^{14}_6\text{C}$  die Tochterkerne nach einem  $\beta$ -Zerfall. Lsg: –

Lsg: —

Lösung:

Neben der Entdeckung des Neutrinos hat der  $\beta$ -Zerfall noch einen weiteren, bis heute wichtigen Nutzen, namlich die Altersbestimmung mit der C-14-Methode.

## C-14-Methode

Bevor wir uns der C-14-Methode zuwenden, müssen wir das Zerfallsgesetz kennen, das eine Aussage darüber macht, wie viele Kerne in einer bestimmten Zeit zerfallen. Dazu betrachten wir ein Material mit  $N$  Kernen. Nach einer Zeit  $\Delta t$  sind nur noch  $N'$  Kerne vorhanden, d.h. die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeit ist gleich:

$$\frac{N - N'}{\Delta t} = -\frac{N' - N}{\Delta t} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Dieser Quotient ist bei einem Zerfall immer negativ und wird *Aktivität* oder *Zerfallsrate* genannt. Wir definieren also:

**Def. 5:** (Aktivität) Die Aktivität oder die Zerfallsrate ist die Anzahl Zerfälle  $\Delta N$  pro Zeit  $\Delta t$ .

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

Die heutige Einheit ist:  $[A] = \text{Bq} \hat{=} \text{s}^{-1}$ , was für Becquerel steht und nach Antoine Henri Becquerel benannt ist. Diese Einheit ersetzt die alte Einheit Curie (Ci), wobei der Umrechnungsfaktor:

$$1 \text{ Ci} \hat{=} 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

ist.

Man beachte das Minuszeichen in dieser Definition. Das liegt daran, dass  $\Delta N$  negativ ist, die Aktivität aber positiv definiert ist. Da die Aktivität von der Ausgangsmenge  $N$  abhängt, definiert man die sogenannte Zerfallskonstante  $\lambda$ , die nur noch vom Material abhängt, als

**Def. 6:** (Zerfallskonstante) Die Zerfallskonstante  $\lambda$  ist die Aktivität  $A$  dividiert durch die Anzahl Kerne  $N$ , d.h.

$$\lambda = \frac{A}{N}.$$

<sup>6</sup>Der Strich über dem Neutrino bedeutet, dass es sich um ein Antiteilchen handelt, was wir jedoch erst im nächsten Kapitel zur Teilchenphysik genauer besprechen werden.

Die Einheit der Zerfallskonstante entspricht natürlich der Einheit der Aktivität:  $[\lambda] = \text{s}^{-1}$ .



Zeigen Sie, dass dieser Wert nicht mehr von der anfänglichen Kernmenge abhängt und daher zu Recht als Zerfallskonstante bezeichnet wird.

Damit lässt sich nun das Zerfallsgesetz herleiten. Es gilt:

$$\lambda N = -\frac{dN}{dt},$$

wobei wir hier bereits das Zeitintervall gegen Null streben lassen. Diese Differentialgleichung lässt sich sehr einfach durch Separation lösen. Wir erhalten:

$$-\lambda dt = \frac{1}{N} dN.$$

Durch beidseitige Integration erhalten wir schliesslich:

$$-\lambda \int_0^t dt' = \int_{N_0}^N \frac{1}{N'} dN' \Rightarrow -\lambda t = \ln \left( \frac{N}{N_0} \right).$$

Somit erhalten wir für das Zerfallsgesetz:

**Ges. 2:** (Zerfallsgesetz) Das Zerfallsgesetz gibt die Anzahl  $N$  der zu einem Zeitpunkt  $t$  noch nicht zerfallenen Atomkerne einer radioaktiven Substanz an. Diese Anzahl beträgt

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

wobei  $N_0$  die Anzahl der am Anfang ( $t = 0$ ) vorhandenen Atomkerne und  $\lambda$  die Zerfallskonstante des betreffenden Nuklids sind.

Aus diesem Gesetz ergeben sich zwei weitere Grössen, die häufig verwendet werden. Zum einen die *Halbwertszeit*  $T_{\frac{1}{2}}$  und zum anderen die *mittlere Lebensdauer*  $\tau$ . Diese werden im Folgenden selbst hergeleitet.

### Bsp. viii.

Bestimmen Sie a) die Halbwertszeit  $T_{\frac{1}{2}}$ , sofern diese die Zeit darstellt, bis es nur noch die Hälfte der Atomkerne hat und b) die mittlere Lebensdauer  $\tau$ , sofern diese die Zeit darstellt, bis es nur noch  $\frac{1}{e}$  der Atomkerne hat. c) Bestimmen Sie das Verhältnis  $T_{\frac{1}{2}}/\tau$ . Lsg: a) –, b) – c)  $T_{\frac{1}{2}}/\tau \approx 0.69$ .

**Lösung:**



Nach der Einführung in das Zerfallsgesetz kommen wir nun zur C-14-Methode. Die Bezeichnung C-14 leitet sich natürlich vom Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$  ab. Das Kohlenstoffatom kommt in der Natur hauptsächlich in drei Isotopen vor:

Isotop	NH <sup>7</sup>	$T_{\frac{1}{2}}$	ZA <sup>8</sup>	ZP <sup>9</sup>
$^{12}\text{C}$	98.9%	stabil		
$^{13}\text{C}$	1.1%	stabil		
$^{14}\text{C}$	$< 10^{-9}\%$	5730 y	$\beta^-$	$^{14}\text{N}$

<sup>7</sup>Natürliche Häufigkeit

Das Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$  wird in der Atmosphäre durch energiereiche Strahlung erzeugt. Da es organisch keinen Unterschied zum Kohlenstoffisotop  $^{12}\text{C}$  gibt, nehmen wir Kohlenstoff sowohl als C-14 als auch als C-12 mit der Nahrung auf. Solange dieser Austausch stattfindet, d.h. solange ein Lebewesen lebt, ist das Verhältnis von C-14 zu C-12 konstant. Es beträgt etwa:  $1.3 \cdot 10^{-12}$ . Stirbt nun ein Organismus, so kommt kein C-14 mehr hinzu und das Verhältnis ändert sich und wird immer kleiner. Misst man nun z.B. mit der Massenspektroskopie das aktuelle Verhältnis, so kann man daraus das Alter seit der letzten C-14-Aufnahme berechnen.

Sie fragen sich vielleicht, wie das bei Kleidungsstücken oder anderen Materialien funktioniert. Hier kann man natürlich nicht den Todeszeitpunkt bestimmen. Aber das Material besteht in der Regel aus einem natürlichen Stoff, der Kohlenstoffatome enthält. Da diese irgendwann einmal in einer Pflanze waren, hatten sie ein konstantes Verhältnis, bis sie gefällt oder gepflückt wurden. Daraus lässt sich der Pflückzeitpunkt bestimmen.

### Bsp. ix.

Wie gross ist die Zerfallsrate respektive die Aktivität in einem Gramm Kohlenstoff, falls die Halbwertszeit 5730 y und das Verhältnis  $p = 1.3 \cdot 10^{-12}$  ist?

Lsg:  $A \approx 0.25 \text{ s}^{-1}$

Lösung:

Dieses Ergebnis wird Sie vielleicht überraschen. Wenn man bedenkt, dass die Halbwertszeit 5730 y beträgt, erwartet man wahrscheinlich viel weniger. Aber es gibt sehr, sehr viele Kohlenstoffatome, und das sehr, sehr viele, das ist das, was wir nicht abschätzen können. Das übersteigt einfach unsere Vorstellungskraft.

Nun wollen wir die C-14-Methode direkt an einem Beispiel anwenden und versuchen, das Alter eines Knochens zu bestimmen.

### Bsp. x.

Bei einem Knochen von 200 g wird eine  $\beta$ -Zerfallsrate von  $A \approx 400 \text{ min}^{-1}$  gemessen. Der Knochen besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff-Verbindungen. Bestimmen Sie das Alter des Knochens. Tipp: Verwenden Sie die soeben berechnete Aktivität.

Lsg: 16 660 y

Lösung:

Nun kommen wir zum letzten Zerfall, dem Gammazerfall. Wir werden ihn aber nur ganz kurz behandeln.

### 3.1.6 Gamma-Zerfall

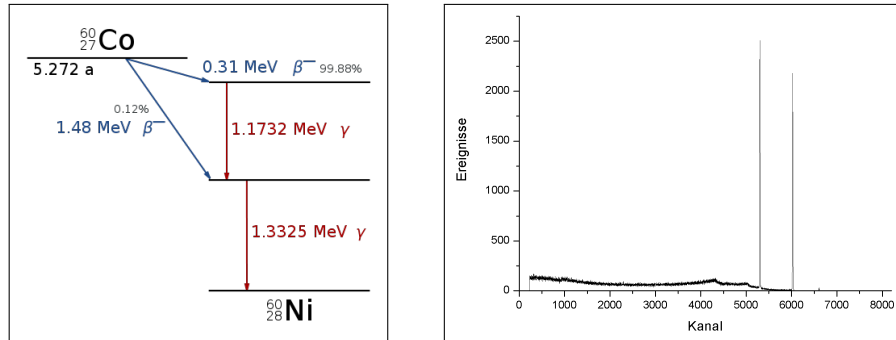
Beim  $\gamma$ -Zerfall geht ein Atom aus einem angeregten Zustand unter Aussendung eines Photons in einen Zustand niedrigerer Energie über. Diese Gammastrahlung im ursprünglichen Sinne des Wortes entsteht nach einem

<sup>8</sup>Zerfallsart

<sup>9</sup>Zerfallsprodukte

Alpha- oder Beta-Zerfall, wenn sich die Tochterkerne danach in einem angeregten Zustand befinden.

Die Wellenlängen sind diskret und materialabhängig. Sie sind daher gute Indikatoren, um das Material zu untersuchen. Die beiden folgenden Bilder aus [73] zeigen zum einen das Zerfallsschema (links) und zum anderen das gemessene Spektrum (rechts) für Cobalt-60:



Man erkennt sofort die beiden möglichen Gamma-Zerfälle im Schema, auch wenn die  $x$ -Achse des Spektrums nicht die Energie darstellt. Typisch für solche Spektrallinien ist auch, dass sie sehr schmal sind, nur etwa 0.3 eV breit. Dies kann durch die Energie-Zeit-Unschärfe erklärt werden. Die Breite der Spektrallinien stellt die Energieunschärfe  $\Delta E$  dar und die Lebensdauer eines solchen Zustandes die Zeitunschärfe  $\Delta t$ . Da die Unschärferelation

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

gilt, folgt für eine Lebensdauer von mehr als  $10^{-15}$  s

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{2\Delta t} \approx 10^{-19} \sim 1 \text{ eV}.$$

Wir wollen hier nicht weiter ins Detail gehen und beenden damit dieses kurze Kapitel zur Kernphysik und wenden uns nun der Teilchenphysik zu.

### 3.2 Teilchenphysik

Die Teilchenphysik wird heute durch das so genannte *Standardmodell der Teilchenphysik* beschrieben. In diesem Kapitel soll der historische Weg zum Standardmodell ein wenig nachgezeichnet werden. Mit der Kernphysik haben wir bereits einige Teilchen kennengelernt. Das Elektron, das Proton, das Neutron und das Neutrino. Aber das sind noch lange nicht alle bekannten Teilchen. Hier ein Überblick:

Standardmodell der Teilchenphysik									
Fermionen	Leptonen	$< 2 \cdot 10^{-6}$ 0 1/2	$\nu_e$ Elektron Neutrino	$< 0.19$ 0 1/2	$\nu_\mu$ Müon Neutrino	$< 18.2$ 0 1/2	$\nu_\tau$ Tau Neutrino	0 0 1	$\gamma$ Photon
		0.511 -1 -1/2	$e$ Elektron	106 -1 -1/2	$\mu$ Müon	$1.78 \cdot 10^3$ -1 -1/2	$\tau$ Tau	0 0 1	$g$ Gluon
		3 2/3 1/2	$u$ up	$1.27 \cdot 10^3$ 2/3 1/2	$c$ charm	$172 \cdot 10^3$ 2/3 1/2	$t$ top	$80.4 \cdot 10^3$ $\pm 1$ 1	$W^\pm$ W Boson
	Quarks	6 -1/3 -1/2	$d$ down	101 -1/3 -1/2	$s$ strange	$4.19 \cdot 10^3$ -1/3 -1/2	$b$ bottom	$91.2 \cdot 10^3$ 0 1	$Z$ Z Boson
		1.		2.		3.		$125.10 \cdot 10^3$ 0 0	$H$ Higgs Boson
		Generationen							
Masse [MeV] el. Ladung schw. Isospin								$symbol$  $Name$	

Im Laufe dieses Kapitels werden wir uns mit all diesen Teilchen beschäftigen und verstehen, wie sie mit dem Standardmodell zusammenhängen. Eine erste Frage, die sich stellt, ist, woher diese Unterteilungen kommen. Aus

der Tabelle geht hervor, dass wir zwischen Fermionen und Bosonen unterscheiden. Gleichzeitig wird innerhalb der Fermionen zwischen Quarks und Leptonen unterschieden. Ausserdem unterscheiden wir innerhalb der Gruppe zwischen oben und unten.

Wie wir in der letzten Aufgabe des letzten Kapitels gesehen haben, gibt es Teilchen mit halbzahligem Spin und Teilchen mit ganzzahligem Spin. Teilchen mit halbzahligem Spin werden Fermionen genannt, Teilchen mit ganzzahligem Spin Bosonen. Für Fermionen gilt das Ausschliessungsprinzip nach Pauli, für Bosonen nicht. In der Tabelle erkennt man dies an der dritten kleinen Zahl, die für die Fermionen entweder  $\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$  ist. Für die Bosonen hingegen ist sie 1 oder 0. Der Spin ist es auch, der innerhalb der Gruppe zwischen oben und unten entscheidet.

Es bleibt aber die Frage, wie man Quarks und Leptonen unterscheiden kann. Diese Frage kann nur beantwortet werden, wenn man die Wechselwirkungen mit einbezieht.

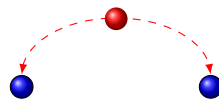
### 3.2.1 Fundamentalen Wechselwirkungen

Ganz am Anfang haben wir die vier Wechselwirkungen kennen gelernt. Diese sind:

- die Gravitationswechselwirkung,
- die elektromagnetische Wechselwirkung,
- die *schwache* Wechselwirkung und
- die *starke* Wechselwirkung.

Auf die Gravitationswechselwirkung soll hier nicht weiter eingegangen werden. Nur so viel: Jedes Teilchen unterliegt der Gravitationswechselwirkung. Allerdings ist sie in vielen Experimenten so klein, dass sie vernachlässigt werden kann. Die Gravitationswechselwirkung ist auch die einzige der drei Kräfte, die noch nicht quantisiert ist. Was bedeutet Quantisierung?

Eine quantisierte Wechselwirkung wird durch den Austausch von Bosonen beschrieben. So kann man sich eine allgemeine Wechselwirkung vorstellen:



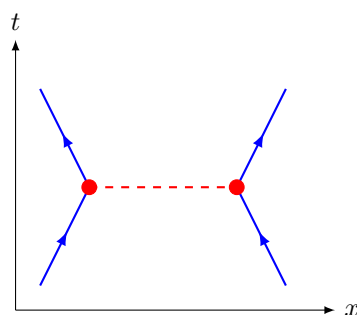
Zwei Teilchen spüren eine Kraft oder die Anwesenheit eines anderen Teilchens, indem sie ein Teilchen zwischen sich austauschen. Je nach dem führt der Austausch dieses Teilchens zu Anziehung oder Abstossung. Richard Feynman<sup>10</sup> hat für jede Wechselwirkung kleine einfache Skizzen angefertigt, die heute nicht mehr wegzudenken sind.



R. Feynman  
(1918-1988)

Richard Feynman war ein herausragender amerikanischer Physiker des 20. Jahrhunderts, der für seine fundamentale Arbeit auf dem Gebiet der Quantenmechanik, Quantenelektrodynamik und Teilchenphysik bekannt ist. Feynman war auch für seine unkonventionellen Lehrmethoden und seine Fähigkeit bekannt, komplexe physikalische Konzepte auf einfache und anschauliche Weise zu erklären. Seine Vorlesungen und Bücher, darunter *The Feynman Lectures on Physics*, haben Generationen von Physikern inspiriert und beeinflusst. Für seine bahnbrechenden Beiträge zur Physik erhielt Richard Feynman 1965 den Nobelpreis.

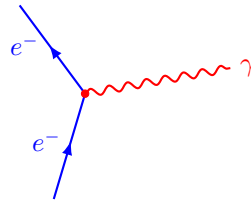
Eine Wechselwirkung wie oben würde in einem so genannten *Feynman-Diagramm* wie folgt aussehen:



<sup>10</sup>Richard Phillips Feynman (11. Mai 1918 in Queens, New York - 15. Februar 1988 in Los Angeles) war ein amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger des Jahres 1965.

In diesen Feynman-Diagrammen ist die Zeitachse immer vertikal und die Ortsachse immer horizontal. Aus diesem Grund werden sie selten oder nie gezeichnet.

Man kann sich das so vorstellen. Wenn ein Teilchen von seiner Bahn abgelenkt wird, muss ein Wechselwirkungsteilchen emittiert werden, also z.B. so:

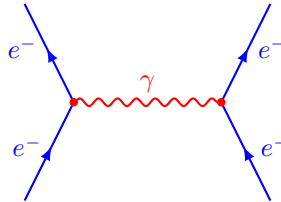


Hier wird ein Elektron ( $e^-$ ) von seiner Bahn abgelenkt und muss daher ein Photon ( $\gamma$ ) emittieren.

### Elektromagnetische Wechselwirkung

Aus den Kapiteln zur Elektrizitätslehre wissen wir, dass sowohl für die elektrische als auch für die magnetische Kraft das Teilchen eine Ladung haben muss. Aus der Sicht der elektromagnetischen Wechselwirkung müsste also die untere Hälfte der Leptonen zu den Quarks gehören. Dass dies nicht der Fall ist, zeigt die starke Wechselwirkung.

Für die elektromagnetische Wechselwirkung sieht das Diagramm für zwei sich abstossende Elektronen wie folgt aus:



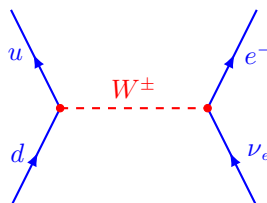
Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist das Wechselwirkungsteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung das Photon. Wie sieht es nun bei der schwachen Wechselwirkung aus?

### Schwache Wechselwirkung

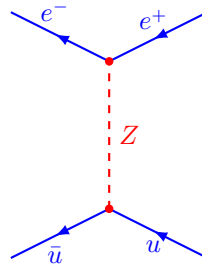
Die schwache Wechselwirkung ist für uns völlig neu und wird es wahrscheinlich auch nach diesem Abschnitt bleiben. Trotzdem wollen wir hier kurz auf zwei drei Eigenschaften eingehen. Zum einen schauen wir uns auch hier wieder die Feynman-Diagramme an. Ja! Sie haben richtig gelesen, es sind mehrere. Das liegt daran, dass es drei wechselwirkende Teilchen gibt, das sogenannte  $Z$ -Boson und die geladenen  $W^\pm$ -Bosonen.



Wir sehen, dass auch Neutrinos schwach wechselwirken. Tatsächlich wechselwirken Neutrinos nur schwach, was natürlich der Grund dafür ist, dass sie so schwer nachzuweisen sind. Man beachte, dass sich die Ladung vor und nach der Wechselwirkung mit dem  $Z$ -Boson nicht ändert. Das liegt daran, dass das  $Z$ -Boson ungeladen ist. Im Gegensatz dazu ändert sich die Ladung, wenn wir eine Wechselwirkung mit dem  $W^+$ - oder  $W^-$ -Boson betrachten.

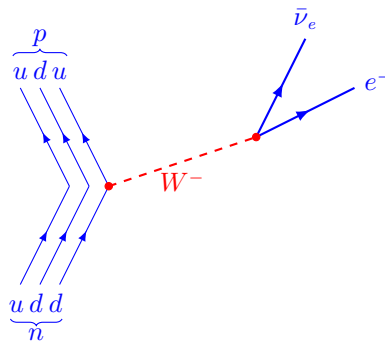


Diese Feynman-Diagramme, die wir bisher gesehen haben, sind alle Wechselwirkungsdiagramme. Man kann die Diagramme auch um  $90^\circ$  drehen und dann hat man sogenannte *Erzeugungs* und *Vernichtungsdiagramme*. Die sehen dann so aus:

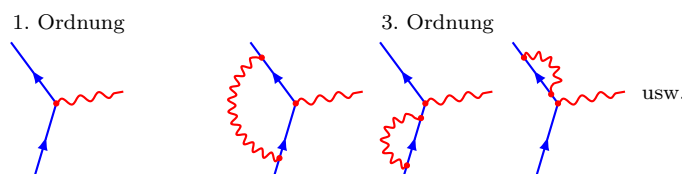


Hier werden ein up-Quark und ein anti-up-Quark vernichtet und dann wieder ein Elektron und ein Positron erzeugt. Vielleicht wundern Sie sich, warum das up-Quark nach aussen fliegt und das Positron nach innen, obwohl beide in die entgegengesetzte Richtung fliegen sollten. Das liegt an einer Konvention solcher Feynman-Diagramme, die besagt, dass *Antiteilchen immer in die entgegengesetzte Richtung gezeichnet werden*.

Nun können wir auch den  $\beta$ -Zerfall eines freien Neutrons als Feynman-Diagramm darstellen. Dabei wird bekanntlich ein Neutron in ein Proton umgewandelt, wobei ein Elektron und ein Elektron-Anti-Neutrino entstehen.



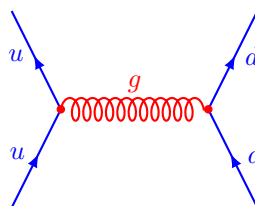
Wenn man diese Diagramme so sieht, hat man den Eindruck, dass es ganz einfach ist. Aber leider sind es zum einen nur Diagramme der *Leading*-Ordnung und zum anderen stellt jede Verbindung und jeder Punkt einen mathematischen Ausdruck dar. Die Regeln, die Feynman aufgestellt hat, geben auch an, wie diese miteinander zu verrechnen sind. Um schliesslich die Wahrscheinlichkeit eines solchen Prozesses berechnen zu können, müssen alle anderen Ordnungen eines solchen Diagramms berücksichtigt werden. Die Ordnung wird durch die Anzahl der Punkte bestimmt. Es handelt sich also um Diagramme zweiter Ordnung. Nachfolgend ein Beispiel für einen einfachen Prozess, bei dem mehrere Ordnungen<sup>11</sup> nebeneinander dargestellt werden, um die Schwierigkeit zu verdeutlichen.



Schauen wir uns nun die letzte Wechselwirkung an, die so genannte *starke* Wechselwirkung. Sie ist auch die schwierigste Wechselwirkung.

### Starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung wirkt nur zwischen Quarks und hat als Austauschteilchen das masselose Gluon. Ein typisches Feynman-Diagramm zeigt die Wechselwirkung der Quarks im Atomkern.



<sup>11</sup>Es ist zu beachten, dass es sich immer um den gleichen Prozess handelt. Mit *gleich* ist gemeint, dass bei der Messung des Anfangs- und des Endzustands nicht zwischen diesen Prozessen unterschieden werden kann.

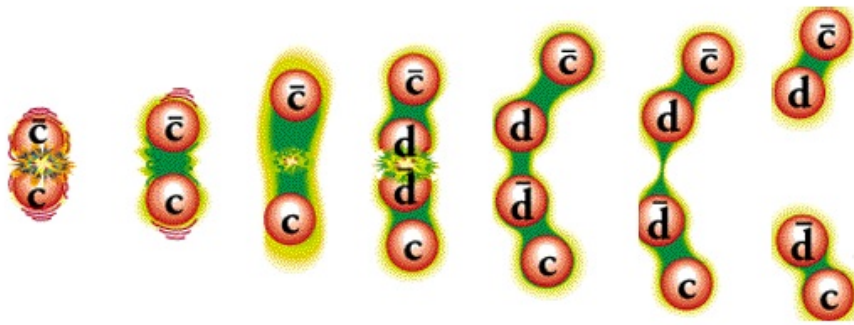


Betrachtet man ein Proton etwas genauer, so stellt man fest, dass es zwei up-Quarks und ein down-Quark enthält. Die Frage, die sich hier stellt, ist, ob es noch andere Teilchen mit zwei oder mehr Quarks gibt. Heute wissen wir, dass es Teilchen mit zwei Quarks, so genannte *Mesonen*, und Teilchen mit drei Quarks, so genannte *Hadronen*, gibt. Im Jahr 2015 gelang am CERN der erste sichere Nachweis von sogenannten *Pentaquarks*. Dabei verbinden sich vier Quarks und ein Antiquark zu einem Teilchen. Natürlich ist auch das Anti-Teilchen möglich, also vier Antiquarks und ein Quark. Da am CERN aber Protonen kollidieren, gibt es im Anfangszustand deutlich mehr Quarks als Antiquarks.

Ein besonderes Teilchen ist das  $\Delta^{++}$ -Resonanzteilchen. Dieses Teilchen besteht aus drei up-Quarks und hat einen Gesamtspin von  $\frac{3}{2}$ . Da der Drehimpuls  $l = 0$  ist, müssen die einzelnen Spins alle in die gleiche Richtung zeigen. Das bedeutet aber, dass sowohl die Spinwellenfunktion als auch die Ortswellenfunktion symmetrisch sind. Damit ist aber die gesamte Wellenfunktion des Systems symmetrisch, was für Fermionen dem Pauli'schen Ausschlussprinzip widerspricht.

Dieses wurde 1965 dadurch gerettet, dass man den Quarks eine weitere Eigenschaft zuschrieb, die man *unglücklicherweise Farbe* nannte. So erhält jedes Quark eine Farbe, nämlich *rot*, *blau* und *grün*, und jedes Antiquark die Antifarben: *antirot*, *antiblau* und *antigrün*. Die Farbwellenfunktion führt zu einer anti-symmetrischen Wellenfunktion des Systems und damit zur Rettung des Paul-Prinzips.

Die starke Wechselwirkung zeichnet sich noch durch eine weitere Eigenschaft aus, die so genannte *asymptotische Freiheit*. 1973 entdeckte man, dass die starke Wechselwirkung sehr schwach ist, wenn sich die Teilchen sehr nahe kommen, und sehr stark wird, wenn sich die Quarks voneinander entfernen. Dies erklärte auch, warum man die Quarks nie einzeln gemessen hatte. Auf dem Bild sieht man, wie zwei *c*-Quarks aufgrund ihres hohen Impulses auseinander driften, wobei die Energie so gross sein muss, dass sich wieder ein Quark-Antiquark-Paar bildet.



Da dieser Prozess bei genügend hoher Energie fortgesetzt werden kann, entstehen immer mehr neue Quark-Antiquark-Paare. Im Experiment nennt man sie dann *Teilchen-Jets*.

Nun sollte etwas klarer geworden sein, warum man die Quarks nicht zu den Leptonen zählt. Sie sind die einzigen Teilchen, die stark wechselwirken.

### 3.2.2 Teilchenzoo

In diesem Abschnitt wollen wir der Frage nachgehen, woher diese verschiedenen Teilchen kommen und ob sie wirklich alle da sind. Die zweite Frage werden wir wohl nie beantworten können, aber die erste schon.

Schon die alten Griechen vermuteten, dass es ein kleinstes unteilbares Teilchen geben müsse, das sie *átomos* nannten. Bis zur Entdeckung des heutigen Atoms dauerte es jedoch noch einige hundert Jahre. Zunächst wurde nachgewiesen, dass die Materie aus noch kleineren Teilchen bestehen muss. Erst durch das Experiment mit der Kathodenstrahlröhre wurde 1876 klar, dass Atome aus einzelnen Bausteinen zusammengesetzt sind. Das Elektron war entdeckt. Weitere Hinweise auf den Aufbau der Atome lieferte die Entdeckung der Radioaktivität durch Becquerel 1896. Durch die Streuexperimente von Rutherford 1911 konnte die atomare Struktur der Materie bestätigt werden. Der Atomkern war entdeckt. Bereits 1920 postulierte Rutherford die Existenz eines weiteren neutralen Kernbausteins, der 1932 von Chadwick entdeckt wurde. Damit waren Neutron und Proton bekannt.

Wie bereits erwähnt, löste Wolfgang Pauli mit seiner Idee des Betazerfalls das Problem der Energieerhaltung. Im Jahr 1930 postulierte er ein neues, sehr leichtes, kaum wechselwirkendes und damit neutrales Teilchen. Es wurde 1933 von Enrico Fermi *Neutrino* genannt. Der Nachweis gelang jedoch erst viele Jahre später. 1959 gelang Cowan und Reines der experimentelle Nachweis des Neutrinos, wofür sie den Nobelpreis erhielten. Anfang der 60er Jahre stellte man fest, dass es verschiedene Arten von Neutrinos gibt, Elektron- und Myon-Neutrinos.

1935 postulierte Yukawa<sup>12</sup> ein neues Teilchen zur Erklärung der Kernkraft. Er nannte es *p-Meson* oder Pion. Die Bezeichnung Meson rührt daher, dass die Masse zwischen dem leichten Elektron (daher Lepton) und den schweren Protonen und Neutronen (daher Baryonen) liegen sollte. 1937 wurde in der Höhenstrahlung ein passendes Teilchen gefunden, das ungefähr die richtige Masse hatte. Dieses Teilchen wurde Müon genannt und lange Zeit für das postulierte Pion gehalten, bis sich 1946 herausstellte, dass dieses Teilchen viel zu schwach mit den Kernen wechselwirkt. Das Problem wurde 1947 durch Powell<sup>13</sup>, der das Pion in der Höhenstrahlung nachweisen konnte, gelöst.

Doch jetzt wurde es erst richtig unübersichtlich. Einige Jahre nach Powell wurden weitere Mesonen entdeckt: Zuerst das  $K^0$ , kurz darauf das  $K^+$ , und da sie sich wie schwere Pionen verhielten, wurden sie der Familie der Mesonen zugeordnet. Beide zerfielen in Pionen. Im Laufe der Zeit wurden weitere Teilchen entdeckt:  $\eta$ -,  $\omega$ -,  $\varrho$ - und  $f$ -Mesonen.

Damit war aber noch nicht das Ende der Fahnenstange erreicht. Im Jahr 1950 entdeckte Anderson eine ähnliche Spur wie bei der Entdeckung des  $K^0$ , allerdings mit einem Pion und einem Proton, was bedeutete, dass dieses Teilchen schwerer sein musste. Es wurde daher der Familie der Baryonen zugeordnet und  $\Lambda$  genannt. In den folgenden Jahren wurden weitere schwere Teilchen entdeckt:  $\Delta$ -,  $\Sigma$ -,  $\Xi$ - und  $\Omega$ -Baryonen. Mit der Inbetriebnahme des ersten modernen Teilchenbeschleunigers 1952 im amerikanischen Brookhaven konnten die Teilchen nun *künstlich* erzeugt werden, was die Zahl der Neuentdeckungen weiter steigerte.

Viele der neu entdeckten Baryonen und Mesonen hatten eine *seltsame* (engl. strange) Eigenschaft. Sie wurden in sehr kurzer Zeit erzeugt ( $10^{-23}$  s), zerfielen aber sehr langsam ( $10^{-10}$  s). Diese *Seltenheit* beruhte darauf, dass, wie wir heute wissen, die starke Wechselwirkung für die Erzeugung und die schwache Wechselwirkung für den Zerfall verantwortlich war.

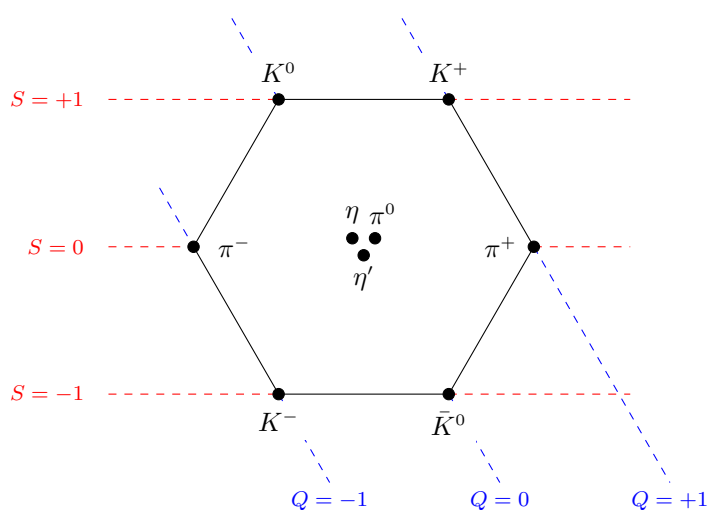
Nach der ersten Euphorie über die gefundenen Teilchen folgte die Resignation, dass man immer mehr Teilchen fand und immer weniger verstand. Die Zeit war reif, etwas Ordnung in diesen *Teilchenzoo* zu bringen. 1961 entdeckte Murray Gell-Mann<sup>14</sup> durch geschickte Anordnung von Mesonen und Baryonen eine tiefere Symmetrie. Seinen Ansatz nannte er in Anlehnung an Buddha *eightfold path*.



M. Gell-Mann  
(1929-2019)

Murray Gell-Mann war ein renommierter amerikanischer Physiker, der für seine Beiträge zur Teilchenphysik und zur Quantenfeldtheorie bekannt ist. Gell-Mann war vor allem für seine Arbeit an der Klassifizierung elementarer Teilchen und seiner Theorie der sogenannten Quarks bekannt. Er entwickelte das Quark-Modell, das besagt, dass Protonen, Neutronen und andere subatomare Teilchen aus kleineren Teilchen bestehen, die er Quarks nannte. Diese Arbeit revolutionierte das Verständnis der Teilchenphysik und führte zu einer tieferen Einsicht in die fundamentalen Kräfte und Strukturen des Universums. Für seine bahnbrechenden Beiträge zur Physik erhielt Murray Gell-Mann 1969 den Nobelpreis für Physik.

Am Beispiel der neuen Mesonen soll dies gezeigt werden. Er klassifizierte die Teilchen nach ihrer Ladung  $Q$  und nach ihrer Seltsamkeit  $S$  und erhielt das folgende Bild:



<sup>12</sup>Yukawa Hideki (23. Januar 1907 in Azabu, Tokyo - 8. September 1981 in Kyōto) erhielt 1949 als erster japanischer Physiker den Nobelpreis für seine auf der Theorie der Kernkräfte beruhende Vorhersage der Existenz von Mesonen.

<sup>13</sup>Cecil Frank Powell (5. Dezember 1903 in Tonbridge, Kent - 9. August 1969 in Bellano am Comer See) war ein britischer Physiker und Nobelpreisträger.

<sup>14</sup>Murray Gell-Mann<sup>[1]</sup> (15. September 1929 in New York, NY, USA - 24. Mai 2019 in Santa Fe, New Mexico, USA) war ein US-amerikanischer Physiker



Neutron eins sind. Daraus ergab sich eine etwas grössere Gruppe. Gell-Mann konnte zeigen, dass man auf diese Weise 27 Teilchen erhält, die sich wie folgt verteilen

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10,$$

d.h. auch ein Singulett, zwei Oktett und ein Dekuplett. Von den 27 Teilchen konnten jedoch nur 26 identifiziert werden. Gell-Mann sagte also ein weiteres Teilchen voraus. Er konnte sogar einige Eigenschaften angeben und eine geschätzte Masse berechnen. Kurz darauf wurde das  $\Omega^-$  entdeckt, das aus drei  $s$ -Quarks besteht.

Damit war wieder etwas Ordnung in den Teilchenzoo gekommen. Die meisten dieser neuen Teilchen waren also Kombinationen aus zwei oder drei Quarks. Als die Energien in den Beschleunigern immer höher wurden, konnten auch immer schwerere Teilchen entdeckt werden. Wie die einleitende Tabelle zeigt, kennen wir heute 6 verschiedene Arten von Quarks, die jeweils in zwei Gruppen zusammengefasst sind.

$$\text{Quarks: } \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix},$$

d.h. up-, down-, charm-, strange-, top- und bottom-Quark. Natürlich gab es zu jedem Teilchen auch ein Antiteilchen.

Gleichzeitig fand man auch die gleiche Anzahl von Leptonen, die ausser dem Elektron mit griechischen Buchstaben bezeichnet werden.

$$\text{Leptonen: } \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Damit war bzw. ist das Standardmodell der Teilchenphysik komplett, wäre da nicht das Problem der Masse der Teilchen.

### 3.2.3 Higg-Teilchen

Was genau ist das Problem mit der Masse? Nun, das Standardmodell der Teilchenphysik basiert im Wesentlichen auf der Annahme, dass alle Teilchen masselos sind. Wie Sie wissen, stimmt das nicht! Auch wenn wir gezeigt haben, dass der grösste Teil der Masse aus der Wechselwirkung zwischen den Teilchen stammt, bleibt immer noch ein kleiner Rest, der massiv ist. Ausserdem haben die meisten Elementarteilchen eine Masse. Nur das Photon und die Gluonen haben keine Masse. Damit ist klar, dass das Standardmodell einen Fehler hat.

Peter Higgs<sup>16</sup> und François Englert<sup>17</sup> entwickelten unabhängig voneinander einen Mechanismus, den man in das Standardmodell einfügen kann, ohne es wesentlich zu verändern, der aber den Teilchen eine Masse verleiht. Dieser Mechanismus wird heute fälschlicherweise nur Higgs-Mechanismus genannt.



P. Higgs  
(1929-heute)

Peter Higgs ist ein renommierter britischer Physiker, der für seine bahnbrechende Arbeit auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik bekannt ist. Er ist vor allem für seine theoretische Vorhersage des Higgs-Bosons bekannt, einem fundamentalen Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik. Die Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012 am Large Hadron Collider (LHC) des CERN in Genf, Schweiz, bestätigte die Theorie von Peter Higgs und markierte einen Meilenstein in der Physik. Für seine bahnbrechenden Beiträge zur Physik erhielt Peter Higgs im Jahr 2013 gemeinsam mit François Englert den Nobelpreis für Physik.

Bevor ich näher auf diesen Mechanismus eingehe, möchte ich das Happy End vorwegnehmen. Dieser Mechanismus sagte bereits 1964 die Existenz eines weiteren Teilchens voraus. In Anlehnung an den Higgs-Mechanismus wurde es Higgs-Teilchen genannt. Damit begann eine fast 50-jährige Suche nach dem Higgs-Teilchen, das in den letzten 20 Jahren fälschlicherweise *Gottes-Teilchen* genannt wurde. Wie es dazu kam, soll hier nicht unerwähnt bleiben!

Leon Lederman<sup>18</sup> veröffentlichte in den 90er Jahren ein Buch, das fälschlicherweise den Titel *The God particle. If the universe is the answer, what is the question?* betitelt wurde, obwohl er selbst das Buch *The goddamn particle. If...* betitelt hatte. Eine Anspielung auf die Schwierigkeit, dieses Teilchen zu finden. Der Verlag wollte diesen Satz nicht auf den Titel drucken und änderte ihn eigenmächtig. Womit dieses Teilchen heute eine völlig

<sup>16</sup>Peter Ware Higgs (29. Mai 1929 in Newcastle, England) ist ein britischer theoretischer Physiker.

<sup>17</sup>Baron François Englert (6. November 1932 in Etterbeek, Belgien) ist ein belgischer theoretischer Physiker und Hochschullehrer. Am 8. Oktober 2013 erhielt er gemeinsam mit Peter Higgs den Nobelpreis für Physik.

<sup>18</sup>Leon Max Lederman (15. Juli 1922 in New York City - 3. Oktober 2018 in Rexburg, Idaho) war ein US-amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger für Physik. Lederman erhielt 1988 zusammen mit Melvin Schwartz und Jack Steinberger den Nobelpreis für Physik „für die Neutrinostrahlmethode und den Nachweis der Doublett-Struktur der Leptonen durch die Entdeckung des Myon-Neutrinos“.

falsche Bedeutung bekommen hat. Aber zurück zum Higgs-Mechanismus.

Um den Higgs-Mechanismus zu erklären, gibt es eine weitere sehr schöne Anekdote, die ich direkt aus [74] entnommen habe. Der britische Wissenschaftsminister William Waldegrave forderte bereits 1993 die Physiker des CERN auf, ihm auf einem Blatt Papier zu erklären, was das Higgsteilchen ist. Und er fügte damals hinzu, dass er es dann auch verstehen wolle. Die Erklärung des Physikers David Miller hat sich durchgesetzt und wird in abgewandelter Form immer wieder verwendet: Im Original geht es um die britische Premierministerin Margaret Thatcher. Wenn die Premierministerin einen Raum voller Politiker betrete, so Miller, bilde sich sofort eine Traube von Menschen um sie herum.



Deshalb komme sie im Saal nur langsam voran. Ein Journalist hingegen, den kaum jemand kenne, könne sich völlig frei durch die Menge bewegen. Niemand halte ihn auf. Thatcher hingegen schon. Als sie weitergeht, kommen die Partygäste, denen sie sich nähert, auf sie zu. Andere wenden sich von ihr ab und wieder ihren ursprünglichen Gesprächspartnern zu. Die Premierministerin kommt also wegen ihrer grösseren „Masse“ nicht so schnell voran. Das ist der Higgs-Mechanismus und die Menschenmenge das Higgs-Feld. Miller erklärt das Higgs-Teilchen mit einem Gerücht, das unter den Partygästen die Runde macht und von der Anwesenheit der Premierministerin berichtet. Dort, wo das Gerücht diskutiert wird, würden sich immer mehr Menschen versammeln.



Diese Ansammlung von Menschen ist das Higgs-Teilchen. In der Anekdote wird auch erzählt, dass der Finanzminister gedroht habe, wenn er es nicht verstehe, werde er die Mittel für das Experiment nicht bewilligen. Heute wissen wir, dass die Mittel bewilligt wurden, also gehen wir davon aus, dass er die Erklärung verstanden hat, was ich natürlich auch von Ihnen hoffe. Etwas formaler ausgedrückt kann man sagen, dass das Higgs-Feld an die Masse gekoppelt ist. Je stärker diese Kopplung ist, desto schwerer sind die Massen. Es gibt aber auch Teilchen, die überhaupt nicht mit dem Higgs-Feld koppeln, sie haben dann keine Masse. Die grosse Leistung von Higgs und Englert war sicherlich, dass sie diesen Mechanismus in eine bestehende Theorie einbauen konnten, ohne diese gross zu verändern, denn die Theorie hatte ja schon viele sehr genaue Vorhersagen gemacht.

Damit schliessen wir dieses Kapitel zur Kern und Teilchen ab. Wenn noch etwas Zeit übrig geblieben ist, wenden wir uns noch der Kosmologie zu.



## Zusammenfassung Kapitel I3

1. Die Anzahl Nukleonen  $A$  in einem Kern ist die *Massenzahl*.

2. Die Anzahl Neutronen nennen wir Neutronenzahl  $N$  und die Anzahl Protonen die *Ordnungszahl*  $Z$ . Es gilt:

$$A = N + Z,$$

wobei  $A$  die Massenzahl ist.

3. Der *Kernradius*  $R$  eines Atoms mit der Massenzahl  $A$  ist:

$$R \approx R_0 \sqrt[3]{A},$$

wobei  $R_0 \approx 1.5 \text{ fm}$  sind.

4. Die *atomare Masseneinheit*  $u$  entspricht  $1/12$  der Masse eines isolierten Atoms des Kohlenstoff-Isotops  $^{12}\text{C}$  im Grundzustand, also

$$1 u = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

und wegen der Masse-Energie-Äquivalenz

$$1 u = 931.5 \text{ MeV}/c^2.$$

5. Für die *Bindungsenergie*  $E_B$  eines Kerns  $^A\text{X}$  der atomaren Masse  $M_{A_X}$  mit  $Z$  Protonen und  $N = A - Z$  Neutronen gilt:

$$E_B = \left( Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - M_{A_X} \right) c^2$$

6. Wir unterscheiden drei Arten von Radioaktiverstrahlung:

- Beim *Alpha-Zerfall* emittiert der Atomkern ein Alpha-Teilchen, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Hierdurch verringert sich die Massenzahl um 4 und die Ordnungszahl um 2.
- Beim *Beta-Zerfall* emittiert der Atomkern entweder ein Elektron oder ein Positron; dieses entsteht im Atomkern bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton bzw. eines Protons in ein Neutron. Die Massenzahl bleibt gleich, die Ordnungszahl ändert sich um  $+1$  bzw.  $-1$ .
- Beim *Gamma-Zerfall* emittiert der Atomkern ein hochenergetisches Photon. Massen- und Ordnungszahl bleiben gleich, nur der Anregungszustand des Kerns verringert sich. Gamma-Zerfall tritt meist als unmittelbare Folge eines vorangegangenen Alpha- oder Beta-Zerfalls auf.

7. Wolfgang Pauli postulierte aufgrund der experimentellen Befunde ein neues Teilchen, das sogenannte *Neutrino*:

- Das neue Teilchen muss *elektrisch neutral* sein und
- es muss eine *sehr kleine* oder *gar keine Masse* haben.

8. Die *Aktivität* oder die Zerfallsrate ist die Anzahl Zerfälle  $\Delta N$  pro Zeit  $\Delta t$ .

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

9. Die *Zerfallskonstante*  $\lambda$  ist die Aktivität  $A$  dividiert durch die Anzahl Kerne  $N$ , d.h.

$$\lambda = \frac{A}{N}.$$

10. Das *Zerfallsgesetz* gibt die Anzahl  $N$  der zu einem Zeitpunkt  $t$  noch nicht zerfallenen Atomkerne einer radioaktiven Substanz an. Diese Anzahl beträgt

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

wobei  $N_0$  die Anzahl der am Anfang ( $t = 0$ ) vorhandenen Atomkerne und  $\lambda$  die Zerfallskonstante des betreffenden Nuklids sind.

11. Wir unterscheiden vier Arten von Wechselwirkungen
  - die Gravitationswechselwirkung,
  - die elektromagnetische Wechselwirkung,
  - die *schwache* Wechselwirkung und
  - die *starke* Wechselwirkung.
12. Wir unterscheiden zwei Arten von Teilchen, die sogenannten *Fermionen* mit *halbzahligem Spin* und die *Bosonen* mit *ganzzahligem Spin*.
13. Die Fermionen werden weiter unterteilt in *Quarks* und *Leptonen*. Die Quarks wechselwirken auch *stark*, wohingegen die Leptonen nur *schwach* und *elektromagnetisch* wechselwirken.

## Konzeptfragen Kapitel I3



## Aufgaben Kapitel I3

Weitere einfachere Aufgaben mit ausführlichen Lösungen findet man unter:

<https://www.dropbox.com/sh/m9vlo6gwqli3nds/AABWhKMXUJG70jsXx7ovB-fDa?dl=0> in den Kapiteln ???.



### 1. Aufgabe 1

# Literaturverzeichnis

- [1] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Mars\\_Climate\\_Orbiter](http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter), Juni 2012
- [2] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales\\_Einheitensystem](http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales_Einheitensystem), Juni 2012
- [3] Wikipetzi, IngenieroLoco - Eigenes Werk. Based on File: Relations between new SI units definitions.png, CC BY-SA 4.0,  
URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40278935>
- [4] CMS Collaboration, *Combination of results on the rare decays  $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  from the CMS and LHCb experiments*, CMS-PAS-BPH-13-007
- [5] Aoyama, Tatsumi and Hayakawa, Masashi and Kinoshita, Toichiro and Nio, Makiko, *Tenth-Order QED Contribution to the Electron  $g-2$  and an Improved Value of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. Vol. 109, 2012, 10.1103/PhysRevLett.109.111807
- [6] URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Steradian>, Juni 2012
- [7] Aristoteles,
- [8] Galileo Galilei, *De motu*, 1590
- [9] DMK/DPK, *Formeln und Tafeln*, Orell Füssli, 7. Auflage, 1997
- [10] F. A. Brockhaus, *Der grosse Brockhaus*, 16. Auflage, 1955
- [11] URL: <http://www.quartets.de/acad/firstlaw.html>, September 2013
- [12] URL: <http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/me/kreis/index>
- [13] Lewis C. Epstein, *Denksport Physik*, dtv, 9. Auflage, 2011
- [14] Harry Nussbaumer, *Astronomie*, 7. Auflage, 1999, vdf Hochschulverlag AG
- [15] URL: <http://lexikon.astronomie.info/mars/beobachtung2012/>, April 2013
- [16] Matthias Bartelmann, *Das Standardmodell der Kosmologie, Teil 1 und Teil 2 in Sterne und Weltraum*, Ausgabe: August 2007
- [17] Roman Sengl et al. *Einführung in die Physik - Band 1 & 2*, 3. korrigierte Auflage 2009, Sauerländer Verlag AG
- [18] Paul A. Tipler, *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford, 2. Auflage, 1994
- [19] URL: <https://www.etsy.com/ch/listing/1230366346/precision-made-scientific-mechanical>
- [20] Hans Kammer, Irma Mgeladze, *Physik für Mittelschulen*, 1. Auflage 2010, hep Verlag AG
- [21] URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/aerodynamik-report-spritsparmodelle-aus-dem-windkanal>
- [22] Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fluid>, August 2013
- [23] Basiswissen Schule Physik, Duden Paetec, Berlin 2010
- [24] URL: <http://www.schulserver.hessen.de/>, Oktober 2013
- [25] URL: <http://www.leifiphysik.de>, September 2013
- [26] URL: <http://photos.zoochat.com>, September 2013

- [27] URL: <http://www.lab-laborfachhandel.de>, Oktober 2013
- [28] Bissig Michael, *Schwimmwelt, Schwimmen lernen - Schwimmtechnik optimieren*, Schulverlag, Bern,
- [29] URL: [https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm\\_data/lm\\_282/auto/kap09/cd259.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_282/auto/kap09/cd259.htm), März 2014
- [30] URL: <https://www.vibos.de/veranstaltung/physik-teil-3-von-4-schwingungen-und-wellen>, März 2024
- [31] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/707>
- [32] E.F.F. Chladni, *Die Akustik*, Taschenbuch Auflage 2012, Nabu Press
- [33] URL: <http://ephex.phys.ethz.ch>, Februar 2015
- [34] URL: <http://aufzurwahrheit.com/physik/quantenmechanik-5461.html>, März 2015
- [35] M. Cagnet, M. Françon, J.C. Thierr, *Atlas opitscher Erscheinungen*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1962
- [36] Bruno Cappeli et al. *Physik anwenden und verstehen*, Orell Füssli Verlag AG, 2004
- [37] Richard P. Feynman, *QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, Piper, 3. Auflage, 2018
- [38] Keith Johnson, *Physics for You: Revised National Curriculum Edition of GCSE*, Nelson Thornes, 2001
- [39] URL: <https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/TA.pdf?lang=en>, Juli 2018
- [40] Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1998
- [41] Unbekannt, *Engraving of Joule's apparatus for measuring the mechanical equivalent of heat*, Harper's New Monthly Magazine, No. 231, August, 1869
- [42] URL: <http://www.tf.uni-kiel.de>, März 2014
- [43] URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie\\_\(Thermodynamik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_(Thermodynamik)), März 2014
- [44] URL: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616\\_Dampfmaschine.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616_Dampfmaschine.jpg), März 2014
- [45] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Bcoulomb.png>, März 2014
- [46] URL: <http://www.bader-frankfurt.de/widerstandscodex.htm>, August 2014
- [47] Carl D. Anderson, *The Positive Electron*. Physical Review 43 (6): 491–494
- [48] URL: <http://pgd5.physik.hu-berlin.de/elektrostatik/ele12.htm>, Oktober 2014
- [49] URL: <http://www.aip.org/history/lawrence/radlab.htm>, Oktober 2014
- [50] URL: [http://www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/exp\\_besch/exp\\_besch\\_04.html](http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_besch/exp_besch_04.html), Oktober 2014
- [51] URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6639>, Oktober 2017
- [52] URL: <https://de.serlo.org/52586/elektromagnetische-wellen>, Oktober 2017
- [53] URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum), August 2022
- [54] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zahnradmethode>, September 2022
- [55] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-Rainbow.jpg>, November 2023
- [56] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Regenbogen>, April 2024
- [57] Proton-Proton Kollision, CERN, Lucas Taylor
- [58] Ze'ev Rosenkranz, *Albert Einstein – Derrière l'image*, Verlag Neue Zürcher Zeitung, 2005.
- [59] Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik 17 (10): 891–921.
- [60] Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Springer-Verlag, 23. Auflage, 1988

- [61] Wikipedia, [https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitt\\_der\\_Gleichzeitigkeit](https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitt_der_Gleichzeitigkeit), August 2018
- [62] URL: <http://static.a-z.ch>, Mrz 2015
- [63] Max Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, Naturwissenschaften Band 13, 1925
- [64] A. H. Compton, *The Spectrum of Scattered X-Rays*, Physical Review 22 (5 1923), S. 409–413
- [65] URL: <http://www.peter-glowatzki.de>, Mai 2015
- [66] James Franck, *Transformation of Kinetic Energy of Free Electrons into Excitation Energy of Atoms by Impacts*, Nobel Lectures, Physics 1922-1941
- [67] URL: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche>, Mai 2015
- [68] David Prutchi, Shanni Prutchi, *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects*, Wiley, 1 edition (February 7, 2012)
- [69] URL: <http://w3.pppl.gov/>, September 2015
- [70] O. Hffling, Physik. Band II Teil 1, Mechanik, Wrme. 15. Auflage. Ferd. Dummlers Verlag, Bonn 1994
- [71] Kovalente Atomradien auf Basis der Cambridge Structural Database  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge\\_Structural\\_Database](https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge_Structural_Database), April 2018
- [72] G. Audi und A.H. Wapstra, Nuclear Physics A595, 409 (1995)
- [73] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung>, April 2018
- [74] URL: <http://www.wn.de/Muenster/2012/07/Das-Wunder-von...>, Juni 2012
- [75] L. Susskind und G. Hrabovsky, *The Theoretical Minimum - What you need to know to start doing physics*, Basic Books, 2014