

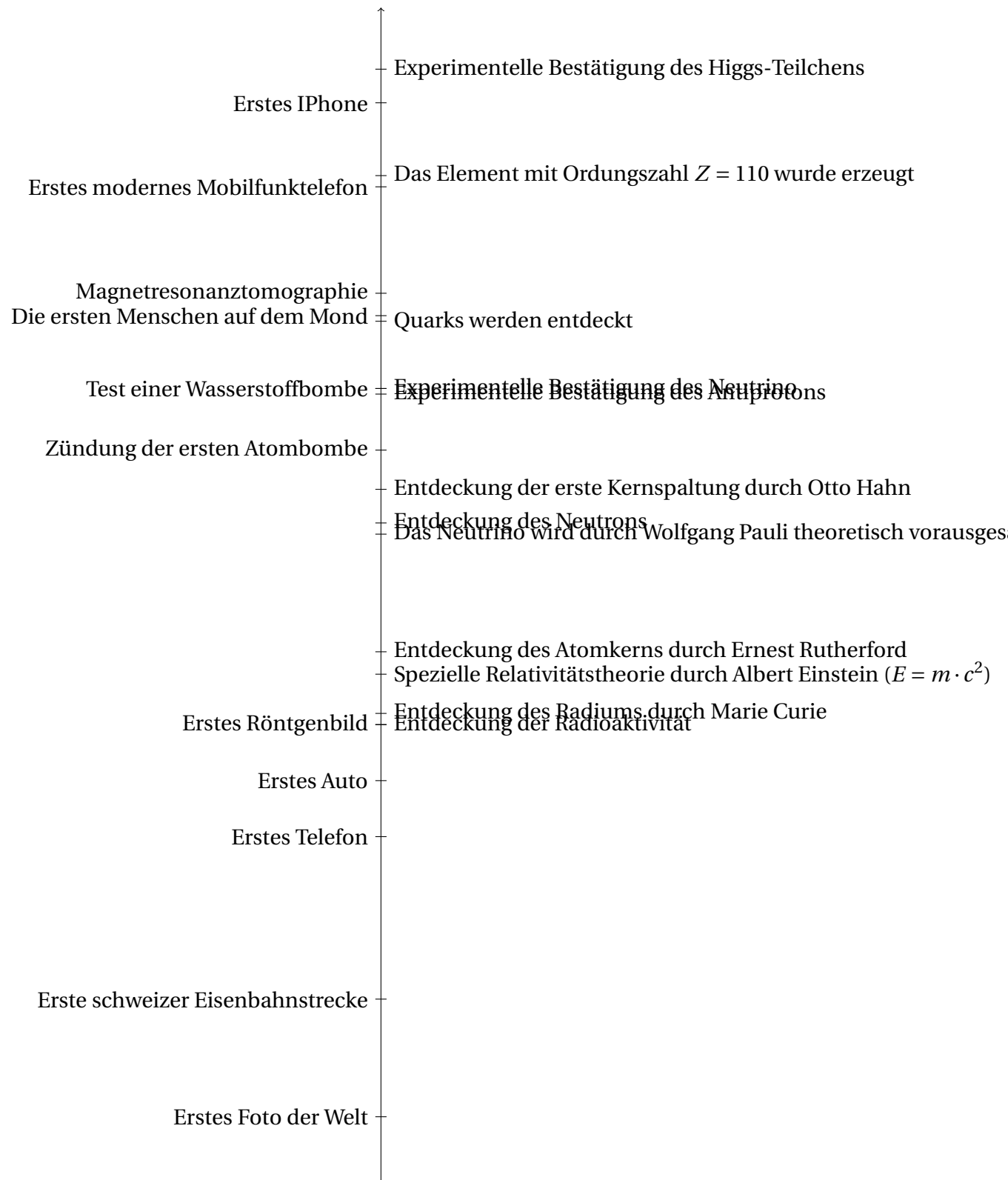
Kernphysik

Abschnitte dieses Dossies stammen aus dem Leitprogramms “Radioaktivität” der ETH Zürich. Das vollständige Leitprogramm können Sie unter <http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/mp/radioakt/index> finden.

Einführung

Die Kernphysik gehört zu den neueren Entwicklungen der Physik und beschäftigt sich, wie der Name schon sagt, mit den Kernen der Atome.

AUFGABE 1: Der Zeitstrahl auf der nächsten Seite zeigt auf der linken Seite technische Entwicklungen und auf der rechten Seite Ereignisse, die mit der Kernphysik zusammenhängen. Ergänzen Sie Jahreszahlen beim Zeitstrahl.



Jedes Atom besitzt einen elektrisch positiven Kern um den elektrisch negativ geladene Elektronen kreisen. Ein neutrales Atom besitzt gleich viele positive Ladungen im Kern wie negative Ladungen in seiner Hülle. Die Elektronen, besonders die in der äusseren Hülle bestimmen die chemischen Eigenschaften des Atoms.

Der Kern besteht aus *Nukleonen*, so nennt man die Teilchen, die den Kern bilden. Es sind elektrisch positiv geladenen *Protonen* und elektrisch neutrale *Neutronen*. Die Anzahl Z der Protonen bestimmt die Art des Atoms, ein Atom mit acht Protonen ist zum Beispiel immer ein Sauerstoffatom. Gleichnamige Ladungen stossen sich ab, deshalb braucht der Atomkern Neutronen, um die abstossende Wirkung der Protonen zu kompensieren. Ohne diese wäre der Kern nicht stabil. Die Anzahl der Neutronen in einem Kern wird mit N angegeben. Die Summe von Ordnungszahl Z und Neutronenzahl N nennt man Massenzahl A . Kern mit gleicher Ordnungszahl und unterschiedlicher Massenzahl nennt man *Isotope*.

In leichten Kernen sind etwa gleich viele Protonen wie Neutronen. Schwere Kerne hingegen haben mehr Neutronen als Protonen.

Atomkerne sind etwa 10 fm im Durchmesser. Ein fm ist ein Femtometer: $1 \text{ fm} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Zum Vergleich, der Durchmesser eines Atoms ist etwa 100 000 fm gross.

AUFGABE 2: Überlegen Sie sich ein Beispiel um sich die Grössenverhältnisse von Atomkern und Atomhülle besser vorzustellen.

Bindungsenergie

Die Energie, die notwendig ist, um die Teile eines stabilen Systems voneinander zu trennen, heisst Bindungsenergie.

Folgendes Beispiel soll dies erläutern.

Um zwei Magnetstückchen zu trennen, die infolge der magnetischen Kraft aneinander gebunden sind, muss man eine gewisse Arbeit leisten. Am Anfang sind die Magnetstückchen gebunden, und am Schluss sind sie frei. Wir können die zugefügte Energie als Bindungsenergie der zwei Magnetstückchen bezeichnen.

Im Atomkern wirken zwei verschiedene Kräfte: die elektromagnetische Abstossung zwischen den Protonen und die starke Wechselwirkung, die alle Nukleonen aneinander bindet.

Die Bindungsenergie eines Kerns ist die Arbeit, die notwendig ist, um alle Kernteile voneinander zu trennen. Oder äquivalent: Die Bindungsenergie eines Atomkerns ist die Energie, die freigesetzt würde, wenn man aus freien Nukleonen einen Kern bilden würde.

Die Bindungsenergie des Kernes ist viel grösser als die Arbeit, die notwendig ist, um ein Elektron von einem Atom zu trennen.

Oft benützt man auch die Bindungsenergie pro Nukleon. Sie ist definiert als das Verhält-

nis der Bindungsenergie des Kerns zur Anzahl seiner Nukleonen.

AUFGABE 3: Die Entweichgeschwindigkeit auf der Erdoberfläche beträgt $v = 11,2 \text{ km/s}$. Wie gross ist die Bindungsenergie eines 70 kg schweren Menschen?

Lösung 4,4 GJ

Eine grosse Bindungsenergie zu haben, bedeutet für ein System, sehr stabil zu sein. Man braucht nämlich viel Energie, um es auseinander zu nehmen. Ein fallendes Objekt sucht sich immer die tiefst mögliche Lage aus, wo die Bindungsenergie für das System Objekt-Erde am grössten ist. Auch die Nukleonen gruppieren sich möglichst zu einer Konfiguration mit hoher Bindungsenergie, wo sie stärker gebunden sind. Die Bindungsenergie eines Kerns hängt von der Protonenzahl Z und der Neutronenzahl N ab. Es gibt energetisch günstige Kombinationen von (N, Z) , für welche die Bindungsenergie hoch ist, und ungünstige, für die die Bindungsenergie niedrig ist.

Das schwerste, noch ganz stabile Nuklid ist Bi-209 (Wismut). Darüber hinaus kennt man heute Kerne bis etwa zur Massenzahl $A=270$ (Z bis 110). Wesentlich schwerere Kerne kann es nicht geben, weil die zusammenhaltende Kernkraft nur kurze Reichweite hat, während die auseinandertreibende elektromagnetische Abstossung langreichweitig ist.

Ausnahme: Der Neutronenstern bildet eine exotische Ausnahme. Was diesen übergrossen „Kern“, zusammenhält ist die Gravitationskraft. Sie ist zwar 1040mal schwächer als die Kernkraft, aber langreichweitig, und bei einer Masse von etwa 1057 Nukleonen (d.h. $A=1057$) übertrifft sie alle anderen Kräfte (Niederer 1990, 2.5).

Wie kann man die Bindungsenergie messen?

Wenn man die Masse aller Nukleonen eines Kerns addiert, so bekommt man einen Wert, der immer grösser ist als die Masse des Kerns. Diese Massendifferenz ist charakteristisch für jeden Kern. Sie wird Massendefekt genannt. Man kann diese Diskrepanz wie folgt verstehen: Nach Einstein lässt sich die Energie in Masse ausdrücken und umgekehrt. Die Gleichung lautet:

$$E = m \cdot c^2$$

Dabei ist E die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit.

Nehmen wir an, man füge einem Kern eine Energiemenge zu, die gleich seiner Bindungsenergie ist, dann werden seine Nukleonen wieder frei. Aus der Äquivalenz von Masse und Energie entspricht dies einer Zunahme der Masse $\Delta m = \Delta E/c^2$. Bilden umgekehrt zwei isolierte Nukleonen einen Kern, so wird die entsprechende Bindungsenergie freigesetzt. Dies entspricht nach Einstein einem Massenschwund $\Delta m = \Delta E/c^2$.

In Abbildung 1 ist die Bindungsenergie pro Nukleon für stabilere Kerne gezeigt. (1eV (Elektronenvolt) ist ein Mass für die Energie in der Atom- und Kernphysik: $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$. Also: $1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$. Diese Energie ist am grössten für Kerne mit Massenzahl um 60 (Fe: Eisen). Für schwerere Kerne nimmt die Bindungsenergie pro Nukleon ab. Der Grund

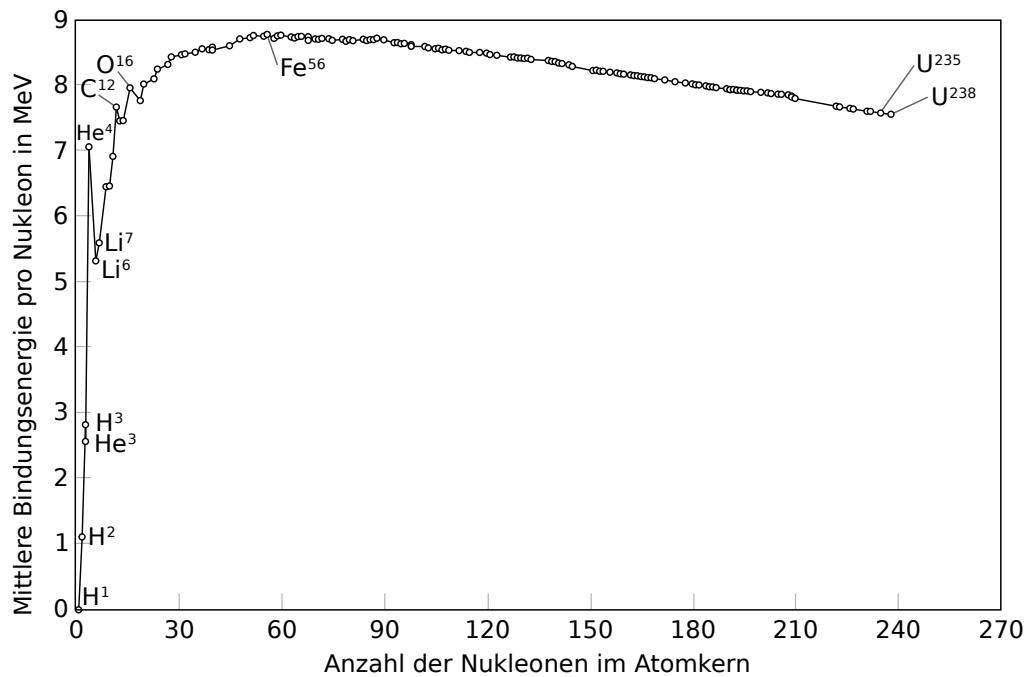


Abbildung 1: Bindungsenergie pro Nukleon

ist, dass die zusammenhaltende Kraft unter den Nukleonen (die starke Wechselwirkung) eine sehr kurze Reichweite hat, während die abstossende Kraft unter den Protonen (elektromagnetische Kraft) langreichweitig ist. Deshalb spürt ein Proton die Abstossung aller anderen Protonen, auch der weit entferntesten, aber nur die Anziehung der unmittelbar nahen Nukleonen.

Wir berechnen die Bindungsenergie von Fe^{56} (Eisen). Die Nukleonenzahl A ist 56. Aus Abbildung 1 lesen wir ab, dass die Bindungsenergie pro Nukleon für Fe^{56} ca. 8,6 MeV beträgt. Somit hat Fe^{56} eine totale Bindungsenergie $E_B = 56 \cdot 8,6 \text{ MeV} = 481,6 \text{ MeV}$.

AUFGABE 4:

- Beschreiben Sie in einem Sätzen was die Bindungsenergie ist.
- Welche Wechselwirkung (Kraft) hält die Atomkerne zusammen? Welche Wechselwirkung (Kraft) wirkt gegen das Zusammenhalten?
- Welcher Kern hat die höchste Bindungsenergie pro Nukleon im Atomkern? Wie hoch ist diese Energie in Joule?
- Warum kann man die Bindungsenergie kurzlebiger Kerne aus deren Zerfallsprodukten bestimmen?
- Wo in der Grafik stehen die Kerne, die sich fusionieren lassen? Wo die, die bei der Spaltung Energie freigeben? Können Sie das erklären?

AUFGABE 5: In der Abbildung 1 ist ${}^3_2\text{He}$ und ${}^3_1\text{H}$ aufgeführt. Welches der beiden sollte stabiler sein? Stimmt das?

AUFGABE 6: Berechnen Sie mit Hilfe der Abbildung 1 die Bindungsenergie des ${}^{16}_8\text{O}$ Kerns.

AUFGABE 7: Nehmen Sie an ein Kern der Massenzahl $A = 240$ wird in zwei Kerne der mit der Massenzahl $A = 120$ gespalten. Bestimmen Sie aus der Abbildung 1 die dabei freiwerdende Energie.

AUFGABE 8: In der Sonne werden Wasserstoffkerne zu Heliumkernen fusioniert. Wie viel Energie wird dabei frei. Benutzen Sie die 1 zum Lösen der Aufgabe.

Radioaktivität

Die Aufgaben auf dieser Seite sind als Ergänzung des Kapitels 2: Radioaktivität, des Leitprogramms “Radioaktivität” der ETH Zürich zu verstehen. Das vollständige Leitprogramm können Sie unter <http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/mp/radioakt/index> finden.

Übersicht

Im Jahre 1896 entdeckte Becquerel bis dahin unbekannte Strahlen. Diese neuen “radioaktiven” Strahlen wurden intensiv erforscht und die gewonnenen Erkenntnisse in der Kerntechnologie vielfältig umgesetzt. Die anfänglich euphorische Zustimmung musste einer allgemeinen Skepsis weichen. Heute ist der Begriff “Radioaktivität” in aller Munde. Die Diskussion ist im Gange. Die Meinungen sind geteilt und oft festgefahren. Steigen Sie ein, diskutieren Sie mit! Dieses Kapitel bietet Ihnen den physikalischen Hintergrund dazu.

Einleitung

“Radioaktivität” ist in aller Munde. Doch was versteht man darunter?

Das Duden Fremdwörterbuch schreibt dazu:

Radioaktivität:

Eigenschaft der Atomkerne gewisser Isotope, sich ohne äussere Einflüsse umzuwandeln und dabei bestimmte Strahlen auszusenden.

Nun ein bisschen mehr dazu.

Die Entdeckung der Radioaktivität

Becquerel entdeckte 1896, dass Uransalze auch bei vollkommener Dunkelheit eine Photoplatte durch seine lichtdichte Verpackung hindurch zu schwärzen vermochten. Becquerel schloss, dass die Schwärzung nur durch eine vom Uransalz stammende Strahlung verursacht werden konnte. Er nannte diese Strahlung dann auch “Uranstrahlung”.

Kurz darauf fand das Ehepaar Curie, dass weitere Minerale zum Teil noch wesentlich stärker strahlten. Alle diese Materialien brauchten nicht zuerst zum Strahlen angeregt zu werden. Sie strahlten spontan und selbständig. Pierre und Marie Curie prägten für dieses “aktive” Strahlen den Begriff “Radioaktivität”.

Heute kennt man rund 1500 verschiedene Nuklide. Lediglich 249 davon sind stabil (nicht radioaktiv). Der Rest sind instabile Radionuklide (radioaktive Nuklide). Diese erstrecken sich über alle Elemente. Das heisst es gibt kein Element, das nicht mindestens ein radioaktives Isotop besässe.

Woher stammt die ionisierende Strahlung?

Um diese Frage beantworten zu können, wurden viele Versuche durchgeführt. Dazu wurden u.a.:

- die verschiedensten Substanzen (chemische Verbindungen) untersucht,
- die Proben extremen Temperaturen ausgesetzt,
- die Proben extremen Drücken ausgesetzt

und vieles mehr.

All diese Versuche beeinflussen die Elektronenhülle der untersuchten Atome. Doch die Strahlung wurde durch diese Veränderungen nicht beeinflusst. Einzig die Anzahl der vorhandenen radioaktiven Kerne war für die Intensität (Stärke) der Strahlung ausschlaggebend.

Schlussfolgerung: Die Strahlung wird nicht aus der Atomhülle emittiert. Die Strahlung muss aus dem Kern stammen.

Natürliche Strahlung, künstliche Strahlung

Von den ca. 1500 heute bekannten Nukliden kommen rund 500 in der Natur seit Milliarden Jahren vor. 249 davon sind stabil, der Rest ist radioaktiv. Die Strahlung, die beim Zerfall dieser Radionuklide ausgesandt wird, nennen wir natürliche ionisierende Strahlung.

Die restlichen rund 1000 Nuklide gibt es jedoch erst wieder, seit dem sich der Mensch mit Kernforschung und Kerntechnik auseinandersetzt. Dies sind rund 100 Jahre. Diese Nuklide sind künstlich entstanden. Sie alle sind radioaktiv. Die Strahlung dieser Gruppe Radionuklide wird künstliche ionisierende Strahlung genannt.

Warum heisst es oben "erst wieder seit rund 100 Jahren"? Was war denn vorher?

Die künstlichen Nuklide sind eigentlich gar nicht neu. Sie gab es schon früher einmal. In der Zwischenzeit waren sie jedoch auf der Erde ausgestorben. Diese künstlich erzeugten Nuklide sind nämlich alle radioaktiv. Doch ihre Lebensdauer ist kurz. Das heisst, sie haben die vielen Milliarden Jahre, die seit ihrer Entstehung vergangen waren, nicht überlebt. Darum fand man sie auch nicht mehr in der Natur. Jetzt gibt es sie wieder.

Doch nicht nur der Mensch erzeugt solche Radionuklide. Auch heute werden noch derartige Nuklide im Universum erzeugt. Die Theorie sagt nämlich, dass alle im Universum vorkommenden Elemente, die eine höhere Atommasse als Eisen aufweisen, in Supernovaen (explodierende Sterne grosser Masse) entstanden sein müssen.

AUFGABE 9: Aus welchem Teil des Atoms stammen die radioaktiven Strahlen?

Strahlenarten

Es gibt verschiedene Arten radioaktiver Strahlen. Diese lassen sich in mehrere Gruppen einteilen. In diesem Abschnitt werden Sie die drei wichtigsten Strahlenarten kennen lernen.

Rutherford entdeckte schon 1898, dass es mindestens zwei Arten radioaktiver Strahlen geben muss (Segrè 1981, 61). Er nannte diese α - und β -Strahlen. Später wurden als weitere Sorte die γ -Strahlen entdeckt.

Man führte verschiedene Experimente mit diesen Strahlen durch. Unter anderem untersuchte man auch deren elektrisches und magnetisches Verhalten. Hier die Ergebnisse:

- α -Strahlen sind doppelt geladene Heliumkerne.
- β -Strahlen lassen sich leicht durch Magnetfelder ablenken. Sie verhalten sich wie Elektronen.
- γ -Strahlen passieren die magnetischen und elektrischen Felder unbeeinflusst. Sie verhalten sich wie Lichtstrahlen.

Der Alpha-Zerfall

1904 wurde bekannt, dass bei Radiumverbindungen, die α -Strahlen aussenden, Helium auftritt. Dieses Helium konnte nur beim Zerfall des Radiums entstanden sein. Alle weiteren Versuche führten zur folgenden Feststellung:

Beim α -Zerfall werden Teilchen ausgesandt. Alle diese Teilchen bestehen aus 2 Protonen und aus 2 Neutronen. Diese Teilchen sind also Heliumkerne.

Die ausgesandten Teilchen werden α -Teilchen genannt.

Nach einem α -Zerfall fehlen dem ursprünglichen Nuklid 2 Protonen und 2 Neutronen. Das ursprüngliche Element hat sich also durch den Zerfall in ein neues gewandelt.

AUFGABE 10: Radon-222 ($^{222}_{86}\text{Rn}$) sendet beim Zerfall ein α -Teilchen aus. In welches Element wandelt sich das Radon durch diesen Zerfall? Lösen Sie die Aufgabe mit Hilfe des Periodensystems.

Der Beta-Zerfall

Beim β -Zerfall werden ebenfalls Teilchen ausgesandt. Diese Teilchen verhalten sich wie Elektronen. Zum Beispiel werden sie, dank ihrer kleinen Masse, leicht in Magnetfeldern abgelenkt. Man nennt diese Teilchen β -Teilchen.

Es gibt 2 Sorten von β -Teilchen.

Bei den einen stimmen Masse, Ladung und Verhalten genau mit denen der Elektronen überein. Hier werden also Elektronen ausgesandt. Eine derartige Strahlung heisst β^- -Strahlung. (Sprich: "Beta-Minus-Strahlung". Minus weil das emittierte Elektron negativ geladen ist.)

Die zweite Sorte der ausgesandten Teilchen unterscheidet sich von den Elektronen lediglich durch ihre Ladung. Elektronen sind negativ geladen. Diese Teilchen jedoch sind positiv geladen. Sie werden Positronen genannt. Eine derartige Strahlung heisst denn auch β^+ -Strahlung (Sprich: "Beta-Plus-Strahlung").

Woher stammen diese Elektronen und Positronen? Gibt es im Kern freie Elektronen oder Positronen?

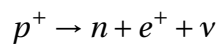
Nein, im Kern gibt es weder freie Elektronen noch freie Positronen. Überlegungen der Quantenphysik, auf die wir hier nicht näher eingehen, sagen, dass Elektronen und Positronen im Kern nicht frei existieren können.

Experimente haben aber gezeigt, dass sich Neutronen in Protonen und Protonen in Neutronen umwandeln können. Bei diesen Umwandlungen entstehen dann die gesuchten Elektronen beziehungsweise Positronen.

Betrachten wir eine solche Umwandlung. In diesem Beispiel soll ein Proton in ein Neutron umgewandelt werden. Wir wissen, das Proton ist positiv geladen, das Neutron ist ungeladen. Bei der Umwandlung muss also noch ein Teilchen entstehen, das die positive Ladung aufnehmen kann. Sonst wäre die Gesamtladung nach der Umwandlung nicht gleich der Gesamtladung vor der Umwandlung. (Denn auch hier gilt das Gesetz der Ladungserhaltung. Dieses besagt, dass bei jedem Umwandlungsprozess die Summe der Ladungen erhalten bleiben muss.) Das Positron erfüllt diese Aufgabe. Es hat die gleiche Masse wie ein Elektron, ist jedoch positiv geladen.

Da es keine freien Positronen im Kern geben kann, werden diese nach der Entstehung sofort aus dem Kern emittiert.

In Kurzform lautet diese Reaktion:



Ursprünglich glaubte man, der β -Zerfall verletze das Gesetz der Energieerhaltung. Heute weiss man mehr:

1. Das beim β^- -Zerfall erzeugte Proton und das freigesetzte Elektron haben eine kleinere Totalenergie als das ursprüngliche Neutron. Beim β -Zerfall entsteht aber noch ein drittes Teilchen. Dieses wird Anti-Neutrino ($\bar{\nu}$) genannt. Es wird ebenfalls aus dem Kern emittiert und trägt den Rest der Energie, die beim Zerfall entsteht, mit sich. Das Anti-Neutrino ist ungeladen. Weil die Totalenergie der Teilchen nach dem Zerfall (Proton, Elektron, Anti-Neutrino) kleiner ist als vor dem Zerfall (Neutron) ist ein freies Neutron instabil (radioaktiv).
2. Das beim β^+ -Zerfall erzeugte Neutron und das freigesetzte Positron haben eine kleinere Totalenergie als das ursprüngliche Proton. Beim β^+ -Zerfall entsteht ebenfalls ein drittes Teilchen. Dieses wird Neutrino (ν) genannt. Es wird aus dem Kern emittiert und trägt den Rest der Energie, die beim Zerfall frei wird, mit sich. Das Neutrino ist ungeladen. Weil die Totalenergie der Teilchen nach dem Zerfall (Neutron, Positron, Neutrino) grösser ist als vor dem Zerfall (Proton) ist ein freies Proton

stabil. Die für den β^+ -Zerfall nötige Energie stammt aus der höheren Bindungsenergie des übrigbleibenden Atomkerns.

AUFGABE 11: Stelle die Reaktionsgleichung für die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton auf. (Achtung: Das Antineutrino nicht vergessen.)

Wie beim α -Zerfall wird auch beim β -Zerfall der Kern verändert. Das heisst die Substanzen (Elemente) vor und nach dem Zerfall sind nicht mehr die selben.

- Beim β^- -Zerfall geht ein Neutron des Kerns in ein Proton über. Die Ordnungszahl des Kerns erhöht sich um 1. Dadurch entsteht ein anderes chemisches Element.
- Beim β^+ -Zerfall geht ein Proton des Kerns in ein Neutron über. Die Ordnungszahl senkt sich um 1. Auch hier ändert das chemische Element.

AUFGABE 12: C-14 ist ein β^- -Strahler. Das heisst, C-14 emittiert beim Zerfall ein Elektron. In welches Element verwandelt sich der Kohlenstoff durch den Zerfall? Lösen Sie die Aufgabe mit Hilfe des Periodensystems.

Die Gamma-Strahlung

Nach einem α - oder β -Zerfall ist der Kern oft in einem angeregten Zustand. Das heisst, im Kern befindet sich noch Energie, die abgebaut werden sollte. Dieser Energieabbau erfolgt durch Aussenden elektromagnetischer Strahlung.

Diese Strahlung hat die gleiche Natur wie sichtbares Licht. Auch Licht ist eine elektromagnetische Strahlung. Doch die γ -Strahlung ist viel kurzwelliger und darum viel energiereicher als das Licht.

Der angeregte Kern gibt jedoch seine Energie nicht kontinuierlich ab. γ -Strahlen werden in einzelnen Portionen (Quanten) ausgesandt. Die Physiker sagen, es wird ein Photon oder γ -Quant ausgesandt.

Obwohl kein eigentlicher Kernzerfall stattfindet, sprechen die Physiker auch hier von einem Zerfall, dem γ -Zerfall. In dieser Sprechweise könnten Sie etwa sagen: "Der angeregte (energiereiche) Zustand des Kerns zerfällt in einen energieärmeren Zustand und in ein γ -Quant, das ausgesandt wird".

Beim γ -Zerfall werden die Nukleonen des Kerns weder umgewandelt noch ausgesandt. Das bedeutet, dass vor und nach dem Energieabbau das gleiche Element vorhanden ist. Der Kern strahlt einzig Energie ab.

Aktivität

Sie wissen, dass Radionuklide spontan zerfallen und dabei Teilchen aussenden. Wenn Sie zum Beispiel eine Salatprobe vor sich haben, möchten Sie aber auch sagen können, wie

oft in dieser Probe ein Zerfall stattfindet. Sie brauchen also ein Mass, das beschreibt, wie intensiv Ihre Probe strahlt. Zu diesem Zweck definieren wir die Aktivität:

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl Kernzerfälle}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Die Einheit der Aktivität ist 1 Becquerel = 1 Zerfall/Sekunde: $[A] = 1 \text{ Bq}$.

Zusammenfassung

Der radioaktive Zerfall hat rein statistischen Charakter. Man kann also von einem Kern nicht sagen, wann er zerfällt, sondern nur, wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, dass er in einer gewissen Zeitspanne zerfällt. Damit gleichbedeutend ist die Aussage, wie viele Zerfälle aus einer riesigen Anzahl von Nukliden stattfinden.

Wie viele radioaktive Kerne in einer gewissen Zeit zerfallen, hängt von zwei Grössen ab:

- Zum einen ist dies die Anzahl vorhandener Kerne. Denn, je mehr Kerne vorhanden sind, desto mehr können auch zerfallen.
- Zum anderen ist es die Zerfallswahrscheinlichkeit. Sie ist ein Mass dafür, wie “gerne” ein Kern zerfällt.

Diese Art von Abhängigkeit wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

Dabei ist $N(t)$ die Anzahl radioaktiver Kerne zur Zeit t , N_0 ist die Ursprüngliche Anzahl radioaktiver Kerne und λ ist die Zerfallswahrscheinlichkeit. Die Einheit der Zerfallswahrscheinlichkeit ist $[\lambda] = \text{s}^{-1}$.

Die Aktivität ist proportional zur Anzahl radioaktiver Kerne. Die Proportionalitätskonstante ist die Zerfallswahrscheinlichkeit.

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

wobei $A_0 = \lambda \cdot N_0$ ist.

AUFGABE 13:

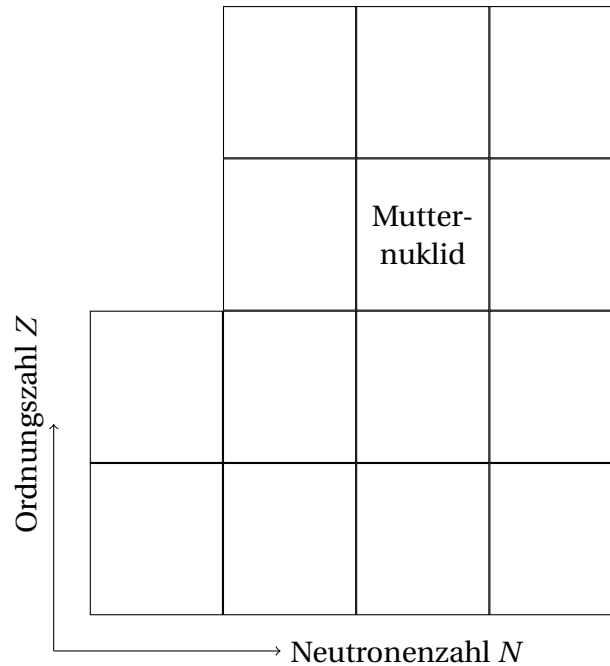
Eine Probe mit 1 mg reinem Radium-226 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) hat etwa $2,7 \cdot 10^{18}$ Kerne. Die Zerfallswahrscheinlichkeit beträgt $13,8 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$.

- a) Wie gross ist die Aktivität dieser Probe?
- b) Wie viele Kerne zerfallen in 15 Minuten?

c) Wie gross ist die Aktivität noch nach diesen 15 Minuten?

AUFGABE 14: C-11 ist ein β^+ -Strahler. In welches Element wandelt sich das Kohlenstoff durch den Zerfall?

AUFGABE 15: Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus einer Nuklidkarte. Zeigen Sie durch Pfeile, wohin das Mutternuklid durch α -, β^- - und β^+ -Zerfall zerfällt?



AUFGABE 16: Die Isotope, die in der Isotopenkarte links von den stabilen Isotope stehen, sind oft β^+ -Strahler. Die Isotope rechts der stabilen Isotope sind oft β^- -Strahler. Wie können Sie sich das erklären?

AUFGABE 17: Beim Zerfall eines Radium-222 Kerns in einen Radon-118 Kern wird ein Heliumkern frei (α -Strahler).

a) Welche kinetische Energie hat der Heliumkern?

b) Welcher Geschwindigkeit entspricht das?

Tipp: Es gilt Energieerhaltung.

$^{222}_{88}\text{Ra}$: 222,0153618 u mit einer Bindungsenergie von 1 708 677,123 keV.

$^{218}_{86}\text{Rn}$: 218,0055863 u mit einer Bindungsenergie von 1 687 062,361 keV.

${}^4_2\text{He}$: 4,002 603 2 u mit einer Bindungsenergie von 28 295,673 keV

Lösung a) 6,681 MeV, b) $17,9 \cdot 10^6$ m/s

AUFGABE 18: Stellen Sie sich vor alle Schüler in der Klasse sind radioaktive Kerne, die mit der Zeit zerfallen können. Ob ein Schüler zerfällt oder nicht wird beim Würfeln entschieden. Würfelt ein Schüler eine 6, so zerfällt er und setzt sich hin. In jeder Runde würfeln alle noch aktiven Kerne.

Bestimmen Sie die Anzahl der stehenden Schüler für die ersten fünf Würfelrunden.

Halbwertszeit $T_{1/2}$

Die Zerfallskonstante ist eine unanschauliche Grösse. Deshalb führen wir die Halbwertszeit $T_{1/2}$ ein.

Die Halbwertszeit besagt, nach welcher Zeit sich die Zahl der Nuklide und damit die Aktivität halbiert haben wird.

Nach Ablauf einer zweiten Halbwertszeit hat sich die Zahl der Nuklide erneut halbiert. Sie ist nun die Hälfte der Hälfte, also ein Viertel. Nach dem Verstreichen einer weiteren Halbwertszeit beträgt die Nuklidzahl ein Achtel, dann ein Sechzehntel usw. Mathematisch zusammengefasst lässt sich schreiben:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

beziehungsweise für die Aktivität

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

AUFGABE 19:

Fiktive Annahme: Vor 10 Milliarden Jahren hätten $1 \cdot 10^{13}$ kg (10 Milliarden Tonnen) Pu-244 existiert. In der Zwischenzeit wäre jedoch dieses Plutonium ständig zerfallen. Pu-244 ist eines der langlebigsten künstlichen Elemente. Seine Halbwertszeit beträgt $8,3 \cdot 10^7$ Jahre.

Welche Masse wäre von diesen ursprünglichen $1 \cdot 10^{13}$ kg Pu-244 heute noch vorhanden?

Beziehung zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten

Zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten gilt eine einfache Beziehung. Diese herauszufinden ist Ihre Aufgabe. Dazu eine kleine Hilfe: Nach Verstreichen einer Halbwertszeit wird die ursprüngliche Anzahl Radionuklide auf die Hälfte geschrumpft sein. Es gilt:

$$t = T_{1/2} \quad \text{und} \quad N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}.$$

Durch einsetzen erhalten Sie

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot T_{1/2}).$$

AUFGABE 20: Ermitteln Sie nun daraus den Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten. Lösen Sie dazu diese Gleichung nach λ auf.

AUFGABE 21: Wie gross ist Halbwertszeit in Aufgabe 18.

AUFGABE 22: In Physiklabor haben wir also radioaktive Proben Ra-226. Bestimmen Sie mit der Nuklidkarte die vollständige Zerfallsreihe dieses Elements.

Musterlösungen

LÖSUNG 3:

$$E_B = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 4390,4 \cdot 10^6 \text{ J}$$

LÖSUNG 22:

