

Das Energiespektrum der Betastrahlung

Matthias Borchardt, Bonn

Illustrationen von: M. Borchardt und W. Zettlmeier

Die Tatsache, dass die Betastrahlung ein kontinuierliches Energiespektrum aufweist, bereitete den Kernphysikern anfangs des 20. Jahrhunderts einiges Kopfzerbrechen. Den gängigen Kernmodellen zufolge erwartete man nämlich diskrete Energiewerte, so wie man es bei der Alpha- und Gammastrahlung gemessen hatte. Wie wurde das Rätsel gelöst?

Der Beitrag bietet Anregungen, wie sich dieses spannende Thema in den Physikunterricht der Oberstufe gewinnbringend einbinden lässt. Die **Computersimulation** eines Betaspektrometers ermöglicht dabei einen schüleraktivierenden und differenzierenden Zugang zur Thematik. Weitere Materialien eröffnen den Blick in die rätselhafte Welt der Neutrinos, die nicht umsonst gerne als Geisterpartikel bezeichnet werden.



Das Ice-Cube Experiment zum Nachweis von Neutrinos
Foto: Jamie Yang, IceCube Collaboration

II/F

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 12

Dauer: 4–8 Stunden

Ihr Plus:

- ✓ Schüleraktivierende Materialien
- ✓ Unterschiedliche Anforderungsniveaus
- ✓ Möglichkeiten der Vertiefung
- ✓ Computersimulation auf **CD-ROM 55**

Inhalt:

- Aufbau eines Betaspektrometers
- Aufnahme von Betaspektren mithilfe eines simulierten Experiments
- Auswertung und Interpretation der Messdaten
- Neutrino-Hypothese von Wolfgang Pauli
- Nachweis von Neutrinos

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Einordnung des Themas

Im Bereich der Kernumwandlungsprozesse stellt der **Betazerfall** sicher eines der interessantesten und rätselhaftesten Phänomene dar:

- Wie kann es sein, dass Elektronen mit großer Geschwindigkeit den Atomkern verlassen, obwohl dort überhaupt keine Elektronen vorhanden sind?
- Warum ergibt sich ein **kontinuierliches Energiespektrum** der Elektronen, obwohl der Kern diskrete Energieniveaus aufweist?
- Wie lässt sich die Energie der Elektronen experimentell bestimmen?
- Warum konnte man die Neutrinos, die **Wolfgang Pauli** (1900–1958) 1930 postulierte, erst 26 Jahre später nachweisen?
- Welche Eigenschaften haben diese geheimnisvollen Geisterteilchen?

Fragestellungen, die ein spannendes Themengebiet der Kernphysik eröffnen und ausgezeichnete Motive für den Physikunterricht in der Oberstufe liefern. Die Idee, die kinetische Energie der Betateilchen durch die Ablenkung innerhalb eines homogenen Magnetfeldes zu bestimmen, knüpft an bekannte Inhalte an und ermöglicht einen schülergerechten Zugang zum Thema. Weitere Fragestellungen schließen sich nahezu nahtlos an.

Fachlicher Hintergrund

Ein Atomkern lässt sich als **Potentialtopf** für seine Nukleonen auffassen, denn die starke Wechselwirkung begrenzt die Ausdehnung des Kerns auf einen winzigen Raumbereich. Teilchen, die in einem solchen Potentialtopf gebunden sind, können aufgrund quantenmechanischer Gesetzmäßigkeiten nur **diskrete Energiewerte** annehmen. Wenn nun ein angeregter Atomkern Energie in Form radioaktiver Strahlung abgibt, kann dies nur in Stufen geschehen. Die Strahlung sollte daher ein diskretes Energiespektrum aufweisen. Dies ist bei Alpha- und Gammastrahlung auch der Fall. Bei der Betastrahlung zeigt sich dagegen ein völlig anderes Bild – das **Spektrum ist kontinuierlich**.

Der österreichische Physiker Wolfgang Pauli formulierte die Hypothese, dass außer dem Elektron ein weiteres, offenbar kaum nachweisbares Teilchen ausgestoßen wird und sich die Zerfallsenergie stochastisch auf die beiden Partikel verteilt. Dies behauptete Pauli im Jahr 1930, aber es sollten noch viele Jahre vergehen, bis man den **Nachweis für die Existenz dieses Geisterteilchens** tatsächlich erbringen konnte. Dies gelang den beiden amerikanischen **Physikern Frederick Reines** (1918–1998) und **Clyde L. Cowan** (1919–1974), die das **Neutrino** 1956 experimentell nachweisen konnten.

Übrigens nannte Wolfgang Pauli sein postuliertes Teilchen zunächst „Neutron“. Erst als einige Jahre später Enrico Fermi das „richtige“ Neutron entdeckte, schlug dieser vor, das Geisterteilchen Paulis in „Neutrino“ umzubenennen.

Didaktische Aspekte

Das Thema bietet vielseitige Anknüpfungspunkte für den Physikunterricht. Genannt seien der **radioaktive Zerfall**, die **Strahlungsarten** und ihr **Nachweis**, die Berechnung der **Zerfallsenergie** über den **Massendefekt**, die Funktionsweise eines **Magnetfeldspektrometers**, die **Auswertung** und Interpretation der Messwerte und vieles mehr.

Möglichkeiten der Unterrichtsgestaltung:

Die Materialien können unterschiedlich ausgewählt werden – abhängig von der Kursart, dem Lehrplan, dem Vorwissen und dem Leistungsvermögen der Schüler sowie der zur Verfügung stehenden Zeit.

Für einen **Grundkurs** bieten sich die Materialien **M 1, M 2, M 3, M 5** und **M 6** an.

Im **Leistungskurs** sollte **M 4** noch dazu genommen werden.

Material **M 7** eignet sich für **Referatsthemen** und Material **M 8** als ergänzendes, differenzierendes Material, unter Umständen aber auch für eine umfangreichere **Hausaufgabe**. Vier von den zehn zur Verfügung stehenden Präparaten werden in den Materialien verwendet. Die übrigen lassen sich aber durchaus in einem Leistungskurs noch als zusätzliches, differenzierendes Aufgabenmaterial verwenden, indem Ihre Schüler die in den Materialien formulierten Aufgabenstellungen auf diese weiteren Präparate anwenden. Rechenergebnisse und mögliche Auswertungen dazu finden Sie auf der **CD-ROM 55**.

Einige Arbeitsblätter enthalten Hinweise („Wussten Sie, dass ...“) auf interessante Anwendungen bestimmter Betastrahler. Diese Kontexte werden dort nur kurz angerissen, bieten aber gute Möglichkeiten für Vertiefungen in Form von Schülerreferaten oder Hausaufgaben.

Bezug zu den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz

Allg. physikalische Kompetenz	Inhaltsbezogene Kompetenzen Die Schüler ...	Anforderungsbereich
F 1, F 2, F 3, F 4, E 1, E 2, E 3, E 4, K 1, K 2, K 5	... stellen eine Massenbilanz des radioaktiven Betazerfalls auf und berechnen daraus die Zerfallsenergie,	II
F 1, F 2, F 4, E 1, E 3, E 4, E 5, K 1, K 2, K 4, K 5	... erklären die Funktionsweise eines Magnetfeldspektrometers,	I / II
F 1, F 2, F 3, F 4, E 1, E 2, E 4, E 7, E 9, K 1, K 5	... nehmen ein Betaspektrum auf, berechnen die kinetischen Energien und stellen die Daten mithilfe einer Tabellenkalkulation dar,	II
F 1, F 2, F 4, E 1, E 2, E 3, E 5, E 10, K 1, K 2, K 5, K 7, B 2, B 4	... diskutieren und bewerten die Ergebnisse vor dem Hintergrund einer physikalischen Fragestellung,	II–III
F 1, F 2, F 3, F 4, E 4, K 1, K 5	... wenden Formeln aus der Relativitätstheorie an und leiten Sie teilweise her,	II / III
F 2, F 4, E 1, E 2, K 1, K 3, K 5, K 7, B 1, B 2	... recherchieren anhand von historischen Dokumenten und dem Internet,	I / II
F 1, F 2, F 4, E 1, E 3, E 10, K 1, K 3, K 5, K 7, B 1, B 2	... erkennen, dass die Einführung eines neuen Teilchens, nämlich des Neutrinos, das kontinuierliche Spektrum erklärt.	II

Für welche Kompetenzen und Anforderungsbereiche die Abkürzungen stehen, finden Sie auf der beiliegenden **CD-ROM 55**.

Materialübersicht

- ⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch Fo = Folie
 Wh = Wiederholungsblatt

M 1	Wh	Frischen Sie Ihr Wissen auf! – Wiederholungsblatt
M 2	Ab	Der Zerfall von Tritium – die Massenbilanz
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Taschenrechner
⌚ D: 20 min		
M 3	Ab, SV	Der Zerfall von Tritium – das Energiespektrum
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Computersimulation „Betaspektrum.exe“
⌚ D: 60 min		<input type="checkbox"/> Taschenrechner
M 4	Ab	Nun wird's relativistisch!
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Computersimulation „Betaspektrum.exe“
⌚ D: 85 min		<input type="checkbox"/> Taschenrechner
M 5	Ab	Die Geister des Herrn Pauli
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Internet
⌚ D: 40 min		
M 6	Ab	Der Brief des Herrn Pauli
M 7	Ab	Der Nachweis von Neutrinos
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Internet
⌚ D: 40 min		
M 8	Ab	Betastrahler, die auch Gammastrahler sind
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Computersimulation „Betaspektrum.exe“
⌚ D: 85 min		<input type="checkbox"/> Taschenrechner

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 18.

Minimalplan

Für einen **Grundkurs** bieten sich die Materialien **M 1**, **M 2**, **M 3**, **M 5** und **M 6** an.

Im **Leistungskurs** sollte **M 4** noch dazu genommen werden.

M 7 eignet sich für **Referatsthemen** und **M 8** als ergänzendes, differenzierendes Material, unter Umständen aber auch für eine umfangreichere **Hausaufgabe**.

M 1 Frischen Sie Ihr Wissen auf! – Wiederholungsblatt

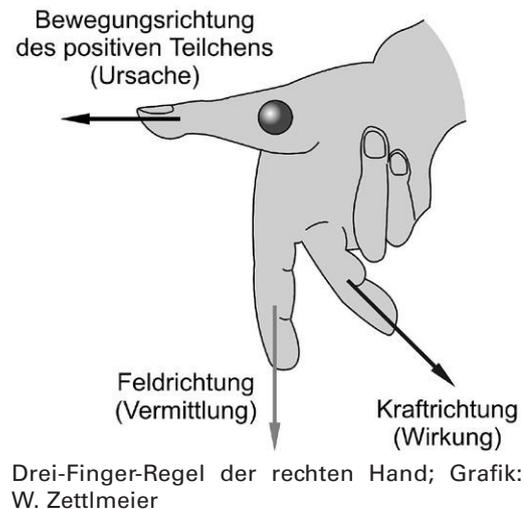
Geladene Teilchen im Magnetfeld

Auf geladene Teilchen, die sich durch ein Magnetfeld bewegen und dabei Feldlinien schneiden, wirkt die **Lorentzkraft**. Wenn der Geschwindigkeitsvektor orthogonal zur Magnetfeldrichtung steht, gilt für den Betrag der Lorentzkraft die Formel

$$F_L = q \cdot v \cdot B.$$

Die Richtung der Lorentzkraft kann mithilfe der **Drei-Finger-Regel** ($q < 0 \rightarrow$ Linke Hand, $q > 0 \rightarrow$ rechte Hand) ermittelt werden. Die Lorentzkraft wirkt im homogenen Magnetfeld als kreisbildende Kraft, also als Zentripetalkraft, und es gilt daher:

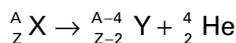
$$F_{\text{Rad}} = F_L, \text{ also } \frac{m \cdot v^2}{r} = q \cdot v \cdot B.$$



Radioaktive Strahlung

Ein energetisch angeregter Atomkern kann Energie abbauen, indem er radioaktive Strahlung abgibt. Als natürliche Strahlungsarten unterscheiden wir:

- Die **Alphastrahlung**: Der Atomkern schleudert einen Heliumkern (zwei Protonen, zwei Neutronen) heraus. Die Ordnungszahl des Tochterelements sinkt dabei um zwei:



Alphastrahlung lässt sich leicht abschirmen, da ihr Durchdringungsvermögen in Materie gering ist.

- Die **Betaminusstrahlung**: Im Atomkern verwandelt sich ein Neutron in ein Proton. Verantwortlich dafür ist die schwache Wechselwirkung. Dabei entsteht ein Elektron, das zusammen mit einem Antineutrino mit großer Geschwindigkeit den Kern verlässt. Betastrahlung ist also Elektronenstrahlung. Die Ordnungszahl des Tochterelements steigt um eins. Zur Abschirmung von Betastrahlung sind Materialdicken von einigen Millimetern bis Zentimetern notwendig.
- Die **Gammastrahlung**: Der Atomkern gibt Energie in Form von energiereichen Photonen (Gammaquanten) ab. Die Zusammensetzung des Kerns ändert sich dabei nicht. Die Strahlung kann sehr reichweitig sein und Materie gut durchdringen.

Die Strahlungsarten sind unterscheidbar, wenn man sie durch ein Magnetfeld schickt, da die Lorentzkraft bei Alpha- und Betastrahlung in unterschiedliche Richtungen wirkt und bei Gammastrahlung gar nicht auftritt.

Massendefekt und Zerfallsenergie

Vergleicht man die Masse des Mutterkerns mit den Massen der Teilchen, die sich nach dem radioaktiven Zerfall ergeben, stellt man fest, dass Masse verloren gegangen ist. Dieser Massendefekt ist wegen $E = m \cdot c^2$ äquivalent zur abgegebenen Zerfallsenergie. Es gilt:

$$Q = \Delta m \cdot c^2 = [m_{\text{Mutter}} - (m_{\text{Tochter}} + m_{\text{Teilchen}})] \cdot c^2.$$

Kernmassen werden meist in der Einheit u (atomare Masseneinheit) und die Energien in der Einheit MeV (Mega-Elektronenvolt) angegeben.

Der Zusammenhang zwischen den Einheiten Elektronenvolt und Joule lautet:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

M 2 Der Zerfall von Tritium – die Massenbilanz

Welche Energie sollten die Elektronen der Betastrahlung theoretisch haben?

Aufgaben

- Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium (${}^3_1\text{H}$) entsteht aufgrund der kosmischen Strahlung in den oberen Atmosphärenschichten und gelangt durch Konvektionsströmungen zur Erdoberfläche. Tritium ist ein reiner Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren.

Schreiben Sie die Zerfallsgleichung für den radioaktiven Zerfall von Tritium auf.

- Aus der Quantenphysik wissen wir, dass Teilchen, denen man einen begrenzten Aufenthaltsraum zur Verfügung stellt, nur ganz bestimmte Energiewerte annehmen können. So besitzen die Elektronen in der Hülle eines Atoms diskrete Energien, da sie im Coulombfeld des Kerns gebunden sind, sich also in einem Potentialtopf befinden. Auch der Atomkern lässt sich gut mit dem Modell eines Potentialtopfes beschreiben, denn die starke Wechselwirkung begrenzt den Aufenthaltsbereich der Nukleonen auf einen extrem kleinen Raumbereich.

Wechselt der Kern also von einem höheren Energieniveau in ein tieferes, so sollte die abgegebene Energie, also die kinetische Energie der Elektronen, einen ganz bestimmten, festen Wert aufweisen. Diese Energie können wir berechnen, wenn wir die Masse des Ausgangskerns mit den Massen des Tochterkerns und des ausgestoßenen Elektrons vergleichen.

Rechnen Sie nach, dass die beim Betazerfall von Tritium ausgestoßenen Elektronen eine kinetische Energie von **0,0186 MeV** aufweisen sollten.

Stellen Sie dazu eine **Massenbilanz** auf und verwenden Sie die folgenden Kernmassen:

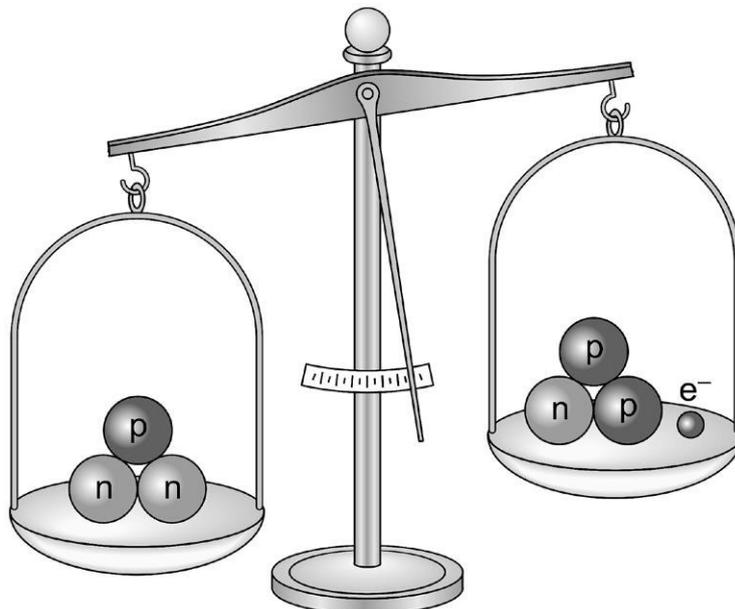
Tritium ${}^3_1\text{H}$: $m_{\text{H}^3} = 3,01550069 \text{ u}$

Helium ${}^3_2\text{He}$: $m_{\text{He}^3} = 3,01493214 \text{ u}$

Elektron e^- : $m_e = 0,000548579909 \text{ u}$

Atomare Masseneinheit: $1 \text{ u} = 1,660\,539\,040 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

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



Grafik: W. Zettlmeier

M 4 Nun wird's relativistisch!

Die meisten Betastrahler senden Elektronen aus, die hochenergetisch sind und somit relativistische Geschwindigkeiten aufweisen. Daher macht sich die relativistische Massenzunahme bei der Ablenkung im Magnetfeld deutlich bemerkbar.

Die Anwendung der klassischen Formeln für die Geschwindigkeit und die kinetische Energie würden zu völlig falschen Ergebnissen führen. Die Einbindung der Relativitätstheorie zur Auswertung hochenergetischer Betastrahlung ist daher unumgänglich.

Aufgaben

Untersuchen Sie exemplarisch den Zerfall von **Phosphor-32**:

- Schreiben Sie die Zerfallsgleichung für den radioaktiven Zerfall von P-32 auf.

Welche Energie sollten die Elektronen aufgrund der Massenbilanz haben?

- Rechnen Sie nach, dass die beim Betazerfall von P-32 ausgestoßenen Elektronen eine Energie von **1,71 MeV** aufweisen sollten. Stellen Sie dazu eine Massenbilanz auf und verwenden Sie die folgenden Kernmassen:

$$\text{Phosphor } {}_{15}^{32}\text{P}: \quad m_{\text{P}32} = 31,9656786 \text{ u}$$

$$\text{Schwefel } {}_{16}^{32}\text{S}: \quad m_{\text{S}32} = 31,9632945 \text{ u}$$

$$\text{Elektron } e^-: \quad m_e = 0,000548579909 \text{ u}$$

$$\text{Atomare Masseneinheit: } 1 \text{ u} = 1,660\,539\,040 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

Welche Energien haben die Elektronen tatsächlich?

- Unter Berücksichtigung der Relativitätstheorie ergeben sich für die Geschwindigkeit und die kinetische Energie der Elektronen, die im Zählrohr nach Durchlaufen des Magnetfeldes registriert werden, die folgenden Formeln (Herleitung als Aufgabe für Experten auf der nächsten Seite):

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m_0 \cdot c}{e \cdot B \cdot r}\right)^2}} \quad \text{und} \quad E_{\text{kin}} = m_0 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right).$$

- Starten Sie das Simulationsprogramm „Betaspektrum.exe“³ und machen Sie sich mit den Funktionen des Programms vertraut. Lesen Sie auch die Informationen zum Programm („Info-Button“).
- Nehmen Sie nun ein Energiespektrum von **Phosphor-32** auf, indem Sie die magnetische Flussdichte B schrittweise (z. B. in Schritten von 0,01 Tesla) erhöhen und die entsprechenden Zählraten in einer Tabelle notieren.



Albert Einstein während einer Vorlesung in Wien (1921) © Ferdinand Schmutzer (1870–1928); Wikimedia (gemeinfrei)

M 4 Nun wird's relativistisch! – Fortsetzung

Aufgabe 3

- c) Verwenden Sie ein Tabellenkalkulationsprogramm (Excel, OpenOffice Calc) und geben Sie in den ersten beiden Spalten Ihre Versuchsergebnisse ein. In der dritten Spalte soll nun das Geschwindigkeitsverhältnis v/c und in der vierten Spalte die kinetische Energie berechnet werden. Verwenden Sie dafür die oben angegebenen relativistischen Formeln. In der fünften Spalte rechnen Sie die Werte der kinetischen Energie in MeV um. Stellen Sie dann das Energiespektrum grafisch dar (Diagramm), indem Sie die Energie (in MeV) der x-Achse und der Zählrate der y-Achse zuordnen. Sie können auch eine ausgleichende Kurve (Regressionskurve oder Trendlinie) durch die Messpunkte legen. Drucken Sie anschließend Ihr Ergebnis aus.
- d) Geben Sie die Geschwindigkeit der energiereichsten Elektronen in Prozent der Lichtgeschwindigkeit an.

Wussten Sie, dass ...

das Phosphor-Isotop P-32 in der medizinischen Strahlentherapie erfolgreich eingesetzt wird? Das Isotop weist für diese Anwendung nämlich günstige Eigenschaften auf, denn es ist ein reiner Betastrahler mit relativ kurzer Halbwertszeit und hoher Strahlungsenergie.



Für Experten

4. a) Leiten Sie die Formel für die Geschwindigkeit der im Magnetfeld abgelenkten Elektronen her:

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m_0 \cdot c}{e \cdot B \cdot r}\right)^2}}$$

Tipp:

Verwenden Sie den Ansatz: „Die Lorentzkraft wirkt als kreisbildende Kraft“ und benutzen Sie an geeigneter Stelle die Formel für die relativistische Masse:

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Außerdem könnte die folgende Ersetzung hilfreich sein: $v = c \cdot \frac{v}{c}$.

- b) Leiten Sie nun die Formel für die relativistische kinetische Energie her:

$$E_{\text{kin}} = m_0 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right)$$

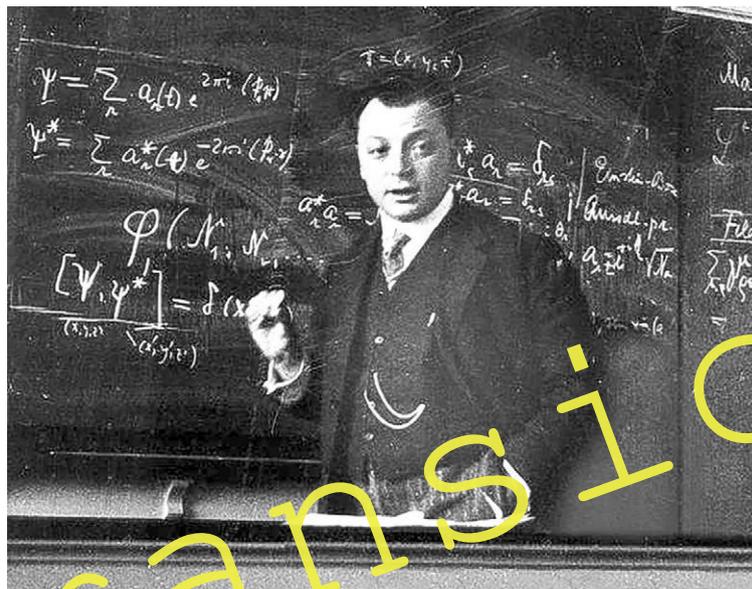
Tipp:

Verwenden Sie: $E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_0$ mit $E_{\text{ges}} = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ und $E_0 = m_0 \cdot c^2$.

M 5 Die Geister des Herrn Pauli

Die Energien der Elektronen beim Betazerfall sind offenbar kontinuierlich verteilt und liegen stets unter der Maximalenergie, die sich aus der Massenbilanz des Zerfalls ergibt. Das Auftreten eines kontinuierlichen Spektrums scheint aber der Theorie der diskreten Energieverteilung im Atomkern zu widersprechen.

Diese Diskrepanz zwischen Theorie und experimentellen Ergebnissen bereitete den Kernphysikern gegen Ende der 1920er Jahre enormes Kopfzerbrechen, bis der österreichische Physiker **Wolfgang Pauli** (1900–1958) schließlich einen gewagten Vorschlag zur Lösung des Problems unterbreitete.



Wolfgang Pauli – ein theoretischer Physiker
Foto: Wolfgang Pauli-Archiv, CERN

Aufgaben

1. Recherchieren Sie mithilfe Ihres Physikbuchs oder des Internets, wie Wolfgang Pauli **1930** das Rätsel um die kontinuierliche Energieverteilung der Betateilchen zu lösen versuchte.
2. Wolfgang Pauli war sich seiner kühnen Hypothese zunächst selbst nicht ganz sicher und verfasste einen Brief (**M 6**) an die Physikerin Lise Meitner und an weitere Kollegen. Der Brief ist nicht nur wegen seines physikalischen Inhalts berühmt geworden, sondern auch wegen des humorvollen Stils, in dem Pauli ihn verfasst hatte. Lesen Sie den Brief und recherchieren Sie, welche Aussagen Paulis bzgl. der Eigenschaften des Neutrinos aus heutiger Sicht zutreffend bzw. nicht zutreffend sind. Gehen Sie dabei vor allem auf die Masse und die ionisierende Wirkung (Wechselwirkung mit Materie) des Neutrinos ein.
3. Erklären Sie, warum die Neutrinos oft auch als **Geisterteilchen** bezeichnet werden.

M 7 Der Nachweis von Neutrinos

Aufgaben

1. Der erste Nachweis von Neutrinos gelang im Jahre 1956 den beiden amerikanischen Physikern Frederick Reines und Clyde L. Cowan. Erst 1995 erhielt Reines für die gemeinsamen Forschungen zum Neutrino den Nobelpreis für Physik – sein Kollege war bereits 1974 verstorben.

Recherchieren Sie im Internet, welche Grundidee dem Experiment von Reines und Cowan zugrunde lag und wie der Nachweis von Neutrinos gelang.

Schreiben Sie die wesentlichen Fakten auf.

Tipp:

Eine gute Internetquelle in diesem Zusammenhang ist:

<https://www.timaio.org/2015/11/19/eine-kurze-geschichte-des-neutrinos/>

2. Inzwischen gab und gibt es zahlreiche weitere, meist sehr aufwendige Experimente zum Nachweis von Neutrinos. Eine Versuchsanordnung der letzten Jahre, die auch in der Öffentlichkeit verstärkt wahrgenommen wurde, ist das sog. „IceCube-Projekt“.

Recherchieren Sie im Internet oder in wissenschaftlicher Literatur, wie dieses Experiment aufgebaut ist und wie es funktioniert. Schreiben Sie die wesentlichen Aspekte auf



Das Neutrino-Teleskop besteht aus 5160 äußerst empfindlichen Lichtsensoren, die im antarktischen Eis versenkt wurden. Foto: Jamie Yang, IceCube Collaboration

3. Auch wenn die Neutrinos kaum zu bemerken sind und eine extrem kleine Masse haben, spielen sie in der modernen Kosmologie eine wichtige Rolle. Recherchieren und beschreiben Sie mit wenigen Sätzen, warum diese Geisterteilchen für die Astronomie und die Kosmologie von besonderem Interesse sind.

M 8 Betastrahler, die auch Gammastrahler sind – Fortsetzung

Für Experten – ein relativistischer Fall

Der Zerfall des Cäsium-Isotops Cs-137 läuft ebenfalls in zwei Stufen ab. Nach dem Betazerfall findet nämlich ein weiterer Energieabbau durch Aussenden von Gammastrahlung statt.

Allerdings erreichen die Betateilchen bei diesem Präparat relativistische Geschwindigkeiten, sodass die Formeln der Relativitätstheorie für die Berechnung der Energie verwendet werden müssen.

3. a) Rechnen Sie nach, dass beim Betazerfall des **Blei-Isotops Cs-137** eine Zerfallsenergie von **1,176 MeV** freigesetzt wird. Stellen Sie dazu eine **Massenbilanz** auf und verwenden Sie die folgenden Kernmassen:

$$\text{Cäsium } {}_{55}^{137}\text{Cs} : \quad m_{\text{Cs}137} = 136,87691822 \text{ u}$$

$$\text{Barium } {}_{56}^{137}\text{Ba} : \quad m_{\text{Ba}137} = 136,87510716 \text{ u}$$

$$\text{Elektron } e^- : \quad m_e = 0,000548579909 \text{ u}$$

$$\text{Atomare Masseneinheit:} \quad 1 \text{ u} = 1,660\,539\,040 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

- b) Wählen Sie im Simulationsprogramm das **Isotop Cs-137** aus und ermitteln Sie durch vorsichtiges Hochfahren des Magnetfeldes die magnetische Flussdichte, bei der die energiereichsten Elektronen noch gerade das Zählrohr erreichen.
- c) Berechnen Sie mithilfe der relativistischen Formeln (M 4) die maximale kinetische Energie der Betateilchen in der Einheit MeV.

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m_0 \cdot c}{e \cdot B \cdot r}\right)^2}} \quad \text{und}$$

$$E_{\text{kin}} = m_0 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right)$$

- d) Berechnen Sie nun die Energie der Gammastrahlung, indem Sie die Differenz der gesamten Zerfallsenergie und der maximalen kinetischen Energie der Betateilchen bilden.

Wussten Sie, dass ...

für präzise Messungen mit empfindlichen Gammaskpektrometern Blei-Abschirmungen notwendig sind, deren Eigen-Radioaktivität möglichst gegen null gegen sollte?

Der natürliche Gehalt an radioaktivem Pb-210 kann sich dabei als äußerst störend erweisen. Daher verwendet man bevorzugt Blei, dessen Gewinnung lange Zeit zurückliegt, wie dies beispielsweise bei Trimmgewichten aus gesunkenen Schiffen oder historischen Kanonenkugeln der Fall ist. Bei diesen alten Bleigegegenständen ist der Gehalt an Pb-210 aufgrund der vergleichsweise kurzen Halbwertszeit von 22 Jahren nämlich stark gesunken. Dieses Altblei ist in der Kernphysik daher sehr begehrt und wird gerne zur Herstellung von Abschirmungen für Präzisionsmessungen eingesetzt.



Erläuterungen und Lösungen

M 2 Der Zerfall von Tritium – die Massenbilanz

1. Zerfallsgleichung: ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}$
2. Die kinetische Energie der Betateilchen ergibt sich aus dem Vergleich der Kernmasse des Mutterkerns mit der Kernmasse des Tochterkerns, wobei auch das ausgestoßene Elektron in die Massenbilanz mit einbezogen werden muss:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = [m_{\text{H}_3} - (m_{\text{He}_3} + m_e)] \cdot c^2 = 2,98037245 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 0,0186 \text{ MeV}$$

M 3 Der Zerfall von Tritium – das Energiespektrum

1. Die Elektronen, die das Präparat mit großer Geschwindigkeit verlassen, treten in das homogene Magnetfeld ein und werden aufgrund der Lorentzkraft auf kreisförmige Bahnen gezwungen. Die Radien dieser Kreisbahnausschnitte sind abhängig von der Geschwindigkeit, also der kinetischen Energie, der Betateilchen. Da Präparat und Zählrohr orthogonal zueinander auf festen Positionen montiert sind, gelangen nur Elektronen in das Zählrohr, die eine bestimmte kinetische Energie aufweisen. Durch Veränderung der magnetischen Flussdichte lassen sich auf diese Weise Elektronen mit unterschiedlichen Energien nachweisen. Die Stärke des Magnetfeldes ist daher ein Maß für die Energie der eingefangenen Betateilchen.
 3. Sobald man in der Simulation das Magnetfeld erhöht, erkennt man, dass die Elektronenbahnen weit aufgefächert werden. Jedem Bahnradius entspricht eine andere kinetische Energie der Teilchen. Allein an dieser Darstellung erkennt man bereits, dass die Energie der Elektronen offenbar nicht diskret, sondern kontinuierlich verteilt ist.
 4. und 5.
- a) Die Zentripetalkraft wird durch die Lorentzkraft erzeugt:

$$F_{\text{Rad}} = F_L \Rightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = e \cdot v \cdot B$$

$$\Leftrightarrow m \cdot v = e \cdot B \cdot r$$

Letzteres wird quadriert und mit

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ ergibt sich:}$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{(e \cdot r)^2}{2 \cdot m_e} \cdot B^2.$$

Da das Computerprogramm die Zählraten stochastisch um den theoretischen Wert (Sollwert) leicht verteilt, ergeben sich bei verschiedenen Messreihen etwas unterschiedliche Zählraten. Als Zeitintervall wurden 10 Sekunden eingestellt.

b)

B/T	N	$E_{\text{kin}} / \text{J}$	$E_{\text{kin}} / \text{MeV}$
0,001	308	1,26807E-17	7,915E-05
0,002	331	5,07229E-17	0,0003166
0,003	348	1,14127E-16	0,0007123
0,004	364	2,02892E-16	0,0012664
0,005	384	3,17018E-16	0,0019787
0,006	394	4,56506E-16	0,0028493
0,007	374	6,21356E-16	0,0038782
0,008	358	8,11567E-16	0,0050654
0,009	324	1,02714E-15	0,0064109
0,010	273	1,26807E-15	0,0079147
0,011	218	1,53437E-15	0,0095768
0,012	154	1,82603E-15	0,0113972
0,013	96	2,14304E-15	0,0133758
0,014	36	2,48542E-15	0,0155128
0,015	9	2,85316E-15	0,0178081
0,0155	1	3,04655E-15	0,019015

Der RAABE Webshop: Schnell, übersichtlich, sicher!



Wir bieten Ihnen:



Schnelle und intuitive Produktsuche



Übersichtliches Kundenkonto



Komfortable Nutzung über
Computer, Tablet und Smartphone



Höhere Sicherheit durch
SSL-Verschlüsselung

Mehr unter: www.raabe.de