

Das Betaspektrum

Protokoll zum Versuch vom 05.11.2003

Projektgruppe:
(Tutor Konstantin Lenzke)

Michaela Heinrich
Mirko Stubenrauch (P)
Daniel Seidlitz
Sven Schramm
Ole Hitzemann
Christian Martick

Abstract

In unseren Versuch beschäftigen wir uns mit dem Beta-Zerfall. Wir haben das Energiespektrum von durch den Zerfall von Strontium ^{90}Sr emittierten Beta-Teilchen aufgenommen. Die entstandene Kurve hat den von uns erwarteten Verlauf verifiziert. Die daraus bestimmte Maximalenergie der Beta-Teilchen von $(2,5 \pm 0,6)\text{MeV}$ entspricht in guter Näherung dem theoretischen Wert $E_{\text{max}} = 2,274\text{MeV}$ für Strontium ^{90}Sr .

Inhalt

Abstract.....	2
Inhalt.....	3
1. Einleitung	4
2. Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Der Beta-Zerfall.....	5
2.2 Das Neutrino.....	5
2.3 Elektron im Magnetfeld.....	6
3. Versuchsaufbau.....	7
3.1 Verwendete Geräte und Bauteile	7
3.2 Aufbau.....	7
4. Durchführung.....	8
5. Auswertung	8
6. Zusammenfassung und Diskussion	12
7. Quellen und Literatur.....	12

1. Einleitung

In den Jahren 1902 bis 1909 zeigten E. Rutherford und F. Soddy, dass drei Arten radioaktiver Strahlung existieren, die als α -, β - und γ -Strahlung bezeichnet werden. Die Beta-Strahlung besteht aus Elektronen oder Positronen (β^- und β^+).

Lange Zeit konnte die Emission dieser Teilchen aus dem Kern nicht erklärt werden.

Die wichtigsten Schritte zur Beschreibung dieser Kernvorgänge waren die Entdeckung des Neutrons, 1932 von J. Chadwick und die Forschungen von W. Pauli, der auf Grund dieser 1930 die Existenz des Neutrinos postulierte, welches 26 Jahre später auch experimentell nachgewiesen werden konnte.

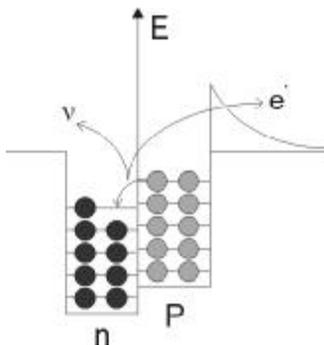
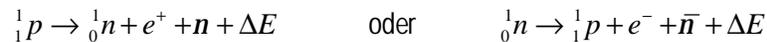
Durch die Existenz eines weiteren Teilchens konnte man sich erklären, warum die Beta-Strahlung keine diskreten Energiezustände, wie die Alpha-Strahlung, hat, sondern ein kontinuierliches Energiespektrum besitzt.

Diese Energiespektrum experimentell aufzunehmen, ist das Ziel dieses Versuchs. Aus dieser Kurve wollen wir die beim β -Zerfall von Strontium 90 frei werdende Energie ablesen und mit dem Literaturwert, der ungefähr bei $E_{\max} = 2,274\text{MeV}$ liegt, vergleichen.

2. Theoretische Grundlagen

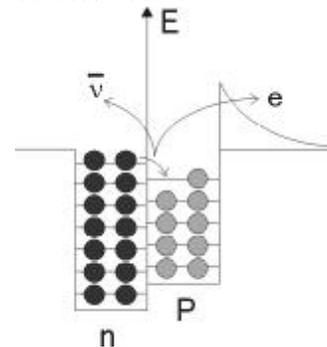
2.1 Der Beta-Zerfall

Unter dem Beta-Zerfall versteht man die Emission von Elektronen (β^-) oder Positronen (β^+) aus dem Atomkern. Dies geschieht, wenn ein Proton unter Emission eines Neutrinos und eines Positrons zum Neutron oder ein Neutron unter Emission eines Elektrons und eines Antineutrinos zum Proton wird.



Am anschaulichsten ist die Beschreibung des Betazerfalls am Potentialtopf-Modell. Demnach besetzen Protonen, genauso wie Neutronen, diskrete Energieniveaus. Nach dem Paulischen Prinzip ist ein Energieniveau mit zwei Protonen, bzw. Neutronen voll. Wenn nun bei einem nicht stabilen Isotop die besetzten Energieniveaus der Protonen höher liegen als die der Neutronen und das höchste besetzte Energieniveau der Neutronen nicht voll ist, sich also nur ein Neutron darauf befindet, dann kann ein Proton in die vorhandene Lücke fallen um in einen niedrigeren Energiezustand zu gelangen. Dies geschieht unter Emission eines Positrons und eines Neutrinos.

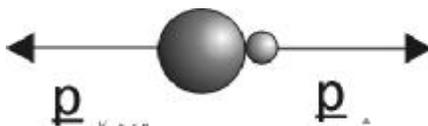
Das Gleiche kann auch geschehen, wenn ein Neutron auf einem höheren Niveau in die Lücke eines nicht vollbesetzten niedrigeren Energieniveaus fällt und unter Emission von einem Elektron und einem Antineutrino zum Proton wird. Da ein Neutron eine höhere Masse hat als ein Proton wird dabei den Leptonen mehr kinetische Energie übertragen als im ersten Fall.



2.2 Das Neutrino

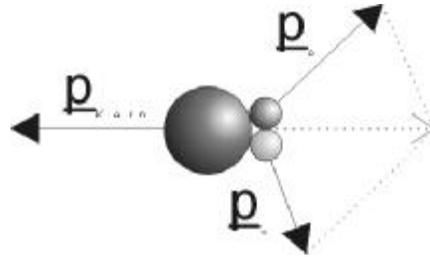
Das Neutrino ist ein elektrisch neutrales und nahezu masseloses Lepton. Auf Grund dieser Eigenschaften ist dessen Nachweis sehr schwierig. Da eine Wechselwirkung mit Materien noch nicht direkt beobachtet wurde, kann man sie bisher nur indirekt erschließen.

Die Existenz des Neutrinos wurde erstmals 1956 durch E. Reines und C. L. Cowan indirekt nachgewiesen, 26 Jahre nachdem W. Pauli dessen Existenz auf Grund experimenteller Ergebnisse postuliert hat. Er fand diverse Hinweise auf die Existenz eines dritten Teilchens.



Wenn nur ein Teilchen vom Kern emittiert wird, wie es zum Beispiel beim Alpha-Zerfall der Fall ist, dann ist der Rückstoßimpuls des Kerns vom Betrag her gleich und von der Richtung entgegengesetzt zum Impuls des emittierten Teilchens.

Im Versuch wurde jedoch beobachtet, dass nach dem Beta-Zerfall der Kern und das Elektron/Positron in den gleich Halbraum geflogen sind, was sich durch eine Impulsmitnahme durch ein weiteres Teilchen erklären lassen könnte.



Bei einem Zweikörperzerfall würde man außerdem eine diskrete Energie des emittierten Teilchens erwarten, wohingegen mit dem Vorhandensein weiterer Teilchen ein kontinuierliches Energiespektrum, das eine Wahrscheinlichkeitskurve beschreibt, gegeben wäre, vorausgesetzt der Energieerhaltungssatz gilt. Das dies der Fall ist, zeigt sich durch die Messung von Doppelzerfällen, bei denen aus einem Mutterkern auf zwei verschiedenen Wegen ein Endkern entsteht und die dabei frei gewordene Energie auf beiden Wegen gleich groß ist.

Zudem würde die Spinbilanz bei einem Zerfall ohne drittem Teilchen, welches den Spin $h/2$ haben müsste nicht aufgehen, da Kerne mit einem halbzahligen Spin wieder einen halbzahligen Spin haben nachdem sie ein Elektron mit dem Spin $h/2$ abgegeben haben.

2.3 Elektron im Magnetfeld

Elektronen mit der Geschwindigkeit v werden in einem homogenen Magnetfeld der Stärke B auf Grund der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn mit dem Radius r gelenkt. Ihren Impuls erhält man über die Kräftebilanz

$$\begin{aligned} F_L &= F_Z \\ evB &= \frac{mv^2}{r} \\ \Rightarrow p &= mv = reB \end{aligned}$$

Daraus lässt sich bei bekannter r und B ihre Energie berechnen, wobei wir auf Grund der zu erwartenden hohen Geschwindigkeiten der Elektronen den relativistischen Ansatz benutzen.

$$\begin{aligned} E &= E_{kin} + E_0 \\ E_{kin} &= \sqrt{p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2} - m_0 c^2 \end{aligned}$$

Setzt man nun ein und formt um ergibt sich für die kinetische Energie der Elektronen

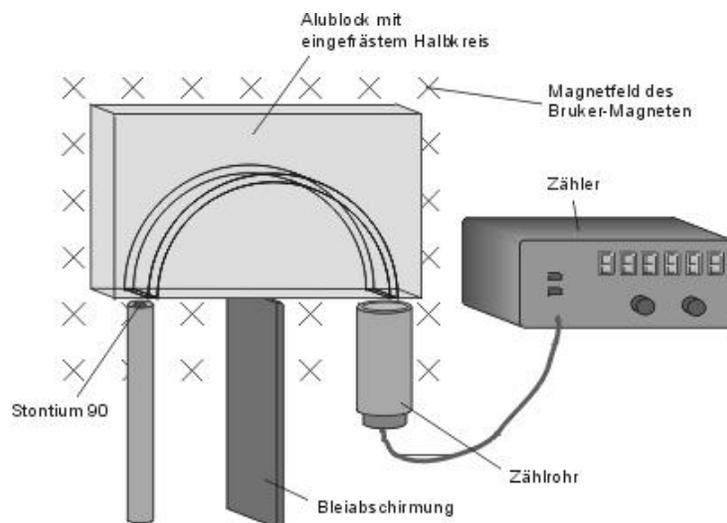
$$E_{kin} = \left(\sqrt{\frac{r^2 e^2 B^2}{m_e^2 c^2} + 1} - 1 \right) m_e c^2$$

3. Versuchsaufbau

3.1 Verwendete Geräte und Bauteile

Verwendete Geräte und Bauteile	PL Nummer
Präparat Strontium 90	-
Zählrohr	654b
Ratemeter (Berthold LB2040)	655a
Teslameter	221b
Kleiner Brukermagnet	-
Alublock mit eingefrästem halbkreisförmigen Kanal	653b
Blei	-
Stativmaterial	-

3.2 Aufbau



Zwischen die beiden Platten des kleinen Brukermagneten wird der Aluminiumblock geklemmt, in dem ein Halbkreis mit dem mittleren Radius von 39 mm ($\pm 0,2\text{mm}$) eingefräst ist. Die Polschuhe haben wir abgeschraubt damit wir ein relativ homogenes Magnetfeld bekommen. Vor dem einen Eingang wird das radioaktive Präparat Strontium 90 positioniert. Auf die andere Seite fixierten wir ein Zählrohr, das an das Ratemeter angeschlossen ist, welches das Zählrohr mit Strom versorgt. Zwischen dem Präparat und dem Zählrohr steht eine Bleiabschirmung, damit keine direkte Strahlung detektiert wird.

4. Durchführung

Nachdem wir die Geräte wie oben beschriebenen aufgebaut haben, bestimmen wir als erstes die Hintergrundstrahlung. Dazu drehen wir am Zähler die Spannung für das Zählrohr langsam auf 400 V und polen das Magnetfeld des Bruker-Magneten so um, dass die Elektronen des β -Strahlers nicht durch den Kanal des Alublocks gelangen können, sondern in die andere Richtung abgelenkt werden. Damit wird verhindert, dass der Restmagnetismus des Magneten die Messung der Hintergrundstrahlung beeinflusst, die ja ausschließlich aus γ -Strahlung besteht. Die Hintergrundstrahlung bestimmen wir insgesamt 4 mal jeweils 10 Minuten: einmal vor der eigentlichen Messung, einmal danach und zweimal zwischendurch.

Für die Aufnahme des Betaspektrums erhöhen wir die magnetische Flussdichte des Bruker-Magneten in Schritten von 10 mT und nehmen bei jedem Schritt die Anzahl der detektierten Elektronen in einem Zeitraum von 5 Minuten auf. Die magnetische Flussdichte bestimmen wir mit der Hallsonde, die wir zwischen Alublock und Magnetplatte schieben.

5. Auswertung

Wir haben vier Messergebnisse für die Hintergrundstrahlung, wobei der Fehler $\Delta N_i = \sqrt{N_i}$:

$$N_{H1} = (8,4 \pm 2,9) \frac{1}{\text{min}}$$

$$N_{H2} = (9,1 \pm 3,0) \frac{1}{\text{min}}$$

$$N_{H3} = (8,9 \pm 3,0) \frac{1}{\text{min}}$$

$$N_{H4} = (9,7 \pm 3,1) \frac{1}{\text{min}}$$

Davon nehmen wir das Arithmetische Mittel und berechnen den resultierenden Fehler aus der Formel

$$\Delta \bar{N} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (N_i - \bar{N})^2}$$

und bekommen damit

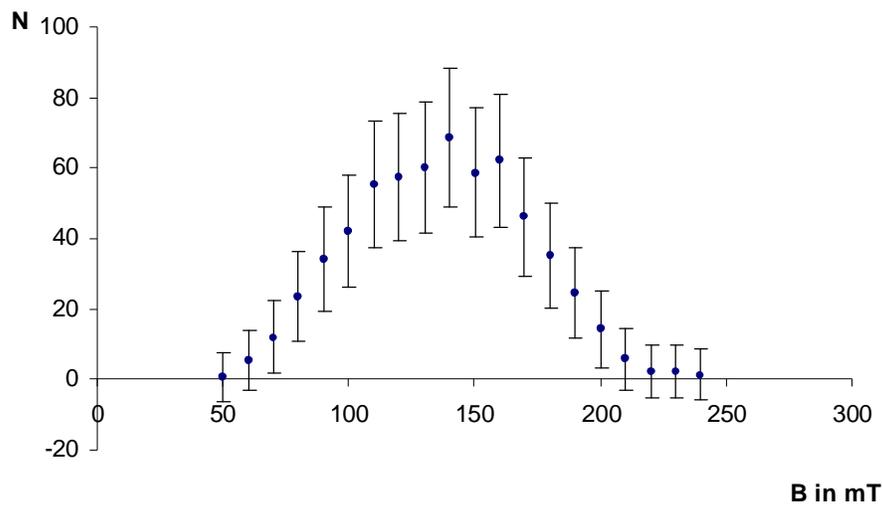
$$N_H = (9,0 \pm 0,3) \frac{1}{\text{min}}.$$

Aus den Messwerten und der Hintergrundzählrate erhalten wir nun diese Tabelle.

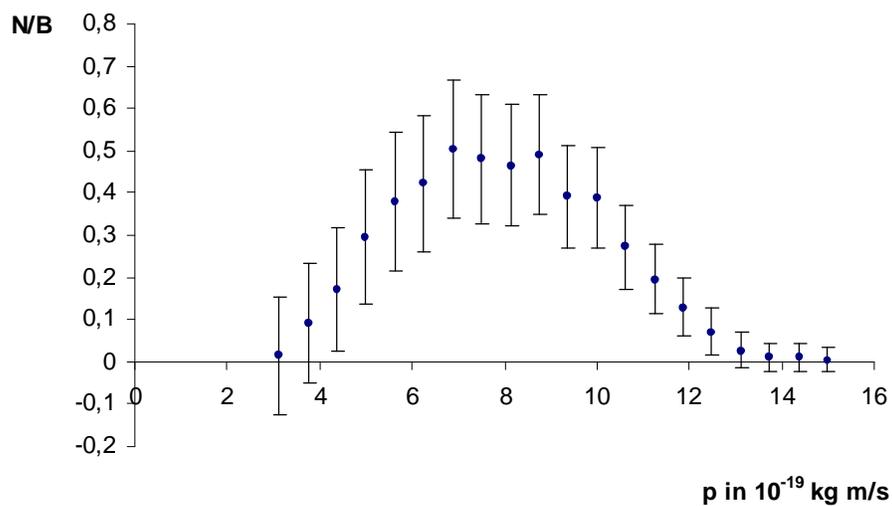
Messwerte			
$r = (3,90 \pm 0,20) \text{cm}$			
$t = 300 \text{s}$			
Messung	Magnetfeldstärke B in mT	Zählrate N in $\frac{1}{5 \text{min}}$	Zählrate N (bereinigt) in $\frac{1}{\text{min}}$
1	$5 \pm 0,1$	31 ± 6	$-2,8 \pm 1,2$
2	$10,9 \pm 0,1$	51 ± 7	$1,2 \pm 1,5$
3	$20 \pm 0,1$	41 ± 6	$-0,8 \pm 1,3$
4	$30 \pm 0,1$	41 ± 6	$-0,8 \pm 1,3$
5	$40 \pm 0,1$	43 ± 7	$-0,4 \pm 1,3$
6	$50 \pm 0,1$	49 ± 7	$0,8 \pm 1,4$
7	$60 \pm 0,1$	73 ± 9	$5,6 \pm 1,7$
8	$70 \pm 0,1$	105 ± 10	$12,0 \pm 2,1$
9	$80 \pm 0,1$	163 ± 13	$23,6 \pm 2,6$
10	$90 \pm 0,1$	216 ± 15	$34,2 \pm 3,0$
11	$100 \pm 0,1$	256 ± 16	$42,2 \pm 3,2$
12	$110 \pm 0,1$	323 ± 18	$55,6 \pm 3,6$
13	$120 \pm 0,1$	333 ± 18	$57,6 \pm 3,7$
14	$130 \pm 0,1$	347 ± 19	$60,4 \pm 3,7$
15	$140 \pm 0,1$	389 ± 20	$68,8 \pm 4,0$
16	$150 \pm 0,1$	339 ± 18	$58,8 \pm 3,7$
17	$160 \pm 0,1$	356 ± 19	$62,2 \pm 3,8$
18	$170 \pm 0,1$	276 ± 17	$46,2 \pm 3,3$
19	$180 \pm 0,1$	221 ± 15	$35,2 \pm 3,0$
20	$190 \pm 0,1$	168 ± 13	$24,6 \pm 2,6$
21	$200 \pm 0,1$	117 ± 11	$14,4 \pm 2,2$
22	$210 \pm 0,1$	74 ± 9	$5,8 \pm 1,7$
23	$220 \pm 0,1$	57 ± 8	$2,4 \pm 1,5$
24	$230 \pm 0,1$	57 ± 8	$2,4 \pm 1,5$
25	$240 \pm 0,1$	52 ± 7	$1,4 \pm 1,5$
26	$250 \pm 0,1$	38 ± 6	$-1,4 \pm 1,3$

Man sieht, dass einige Zählraten im negativen Bereich liegen. Eine Ursache dafür ist vermutlich die natürliche Schwankung der Hintergrundstrahlung im Messzeitraum, während der β -Strahler in diesem Energiebereich keine Elektronen emittiert. Da eine negative Zählrate keinen Sinn macht betrachten wir diese Werte nicht weiter, sondern nur die Messwerte zwischen Messung 6 und Messung 25.

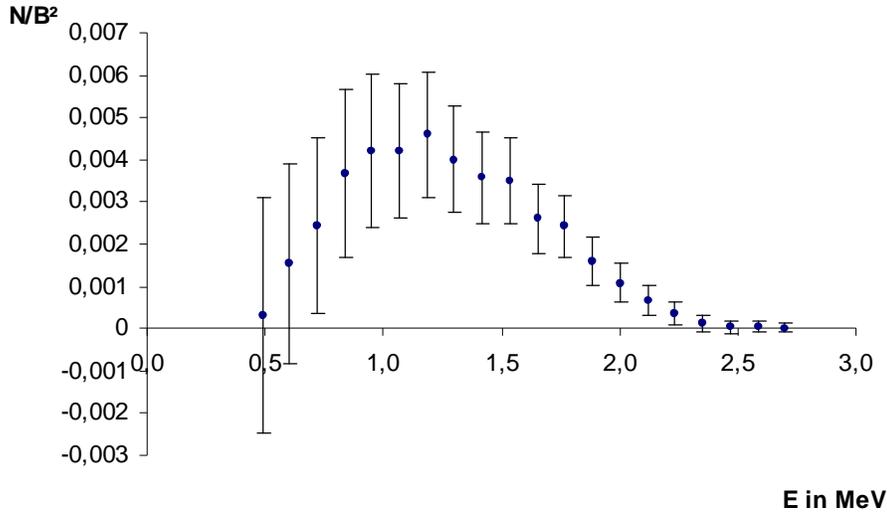
Daraus ergibt sich folgendes Diagramm.



Um den Impuls qualitativ auf der x-Achse aufzutragen, muss auf der y-Achse die Zählrate N durch die magnetische Induktion B geteilt werden um die Fensterbreite, die sich zwangsläufig durch das Fehlerintervall von r ergibt (der Kanal hat eine bestimmte Ausdehnung), nicht zu vergrößern.



Die selbe Methode benutzen wir um das Energiespektrum qualitativ darzustellen.



Um aus dieser qualitativen Aussage über die Energieverteilung eine quantitative machen zu können, müssen wir nun nach der theoretisch hergeleiteten Formel aus der magnetischen Induktion B die Energie bestimmen.

Für die Fehlerbestimmung können wir von dem nichtrelativistischen Ansatz $E \approx \frac{p^2}{2m_e}$, mit $p = reB$, ausgehen.

$$\Delta E = \frac{e^2 r^2 B^2}{m_e} \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}$$

Aus der letzten Grafik kann man ablesen, dass die Zählrate ungefähr an der Stelle $B = 220mT$ gegen Null geht. Damit befindet sich dort das Maximum der Energieverteilung. Wir nehmen die Lichtgeschwindigkeit c , die Elektronenladung e und die Elektronenmasse m_e als gegebene fehlerfreie Naturkonstanten.

Damit bekommen wir als Maximalenergie der emittierten Elektronen:

$$E_{\max} = (2,5 \pm 0,6) MeV$$

6. Zusammenfassung und Diskussion

Der von uns bestimmte Wert für die maximale kinetische Energie der von Strontium 90 emittierten Elektronen beträgt $(2,5 \pm 0,6) MeV$. Der Literaturwert beträgt $E_{\max} = 2,274 MeV$. Damit stimmt unser Wert innerhalb des Fehlerintervalls mit dem Literaturwert überein. Im Gegensatz zu anderen Gruppen ergibt sich bei uns eine Kurve für die Zählrate über der Energie, die unseren Erwartungen entsprochen hat. Dabei ist jedoch verwunderlich, dass wir keine Überlagerung unserer Kurve durch Betaspektren weiterer Zerfälle von Tochterkernen erkennen können, wie es bei vielen Projektlaborversuchen vorher. Trotzdem können wir mit dem Ergebnis zufrieden sein.

7. Quellen und Literatur

Demtröder: Experimentalphysik 4 (1. Auflage) S. 46ff
Protokoll Betaspektrum PG276