

F13 – Lebensdauer von Myonen

kurze besondere Auswertung
ausgeführt: 21.1.-28.1.2008

Betreuer: Adrian Perieanu

Katharina Hübner und Paul Seyfert

In diesem Versuch wird die Lebensdauer von Myonen gemessen. Hierzu werden diese abgebremst und die Zeit gemessen bis die gebremsten Myonen zerfallen. Außerdem kann man mit einer Messung mit Magnetfeld die Larmorfrequenz und daraus das magnetische Moment der Myonen bestimmen und die Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung nachweisen.

This experiment is designed to measure the muon lifetime. For this purpose the muons are decelerated and the time until the muon's decay is determined. Furthermore the Larmor frequency can be evaluated by means of a measurement with magnetic field and the magnetic moment of the muon can be calculated and parity violation can be proofed.

Unsere Ergebnisse sind / our results are:

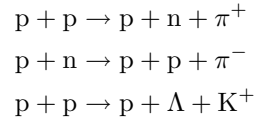
lifetime	τ_0	$(1961,0 \pm 66,4) \text{ ns}$
cuppling constant	G_F	$(1,233 \pm 0,021) \cdot 10^{-11} \text{ MeV}^{-2}$
lamor frequency	ω_{Lamor}	$(5,562 \pm 1,7) \text{ MHz}$
magnetic moment	μ_{Myon}	$(4,6 \pm 1,4) \cdot 10^{-7} \frac{\text{eV}}{\text{T}}$

Als besondere Auswertung testiert: Datum, Unterschrift:

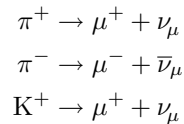
1 Grundlagen

1.1 Entstehung und Zerfall von Myonen

Die kosmische Primärstrahlung besteht hauptsächlich aus Protonen. Diese stoßen mit den Molekülen der oberen Atmosphärenschichten zusammen. Dabei entstehen Kaonen und Pionen:



Die so entstandenen Teilchen zerfallen weiter, unter anderem in Myonen:



Es kommt also eine Mischung aus positiven und negativen Myonen bei uns an. Da auch die Primärstrahlung positiv ist, herrscht ein Überschuss an positiven Myonen:

$$\frac{\#\mu^+}{\#\mu^-} \approx 1,25$$

Sie haben im Mittel eine kinetische Energie von 2 GeV und eine Lebensdauer von 2,19 s. Myonen unterliegen der schwachen Wechselwirkung und zerfallen in Elektronen beziehungsweise Positronen und Neutrinos:

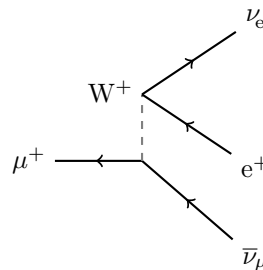
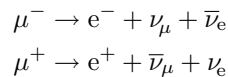


Abbildung 1: μ^+ -Zerfall

Negative Myonen können darüber hinaus von einem Proton eingefangen werden und ein Atom bilden. Das Myon fällt jedoch innerhalb von $\tau_c = 10^{-12}$ s in den Kern. Durch diesen Prozess verkürzt sich die effektive Lebensdauer τ der negativen Myonen folgendermaßen:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_c}$$

Insgesamt erwartet man für die Mischung aus positiven und negativen Myonen das folgende Zeitverhalten für die Anzahl der Myonen:

$$N(t) = N(\mu^-, t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_c}} + N(\mu^+, t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}} \quad (1)$$

1.2 Paritätsverletzung

Bei Paritätserhaltung erwartet man gleich viele in Spinrichtung wie entgegen der Spinrichtung des Myons emittierte Elektronen. Allerdings beobachtet man eine häufigere Emission entgegen der

Spinrichtung des Myons. Die räumliche Verteilung der Elektronen ist $N(\theta) \propto 1 + A \cos \theta$ um die Spinrichtung des Myons.

Legt man ein äußeres Magnetfeld an, so präzediert der Myonenspin mit der Larmorfrequenz $\omega_{\text{Larmor}} = \frac{g \cdot \mu_{\mu}^{\text{Bohr}} \cdot B}{\hbar}$. Da die Emission der Elektronen asymmetrisch ist, kann man über die Oszillation der Verteilung der Elektronenflugrichtung die Larmorfrequenz bestimmen. Die Zählrate eines Szintillators ist demnach

$$Z(t) = Z_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (1 + P \cdot A \cdot \cos(\omega_{\text{Larmor}} \cdot t + \varphi)) \quad (2)$$

wobei P die Polarisierung der Myonen ist.

2 Versuchsanordnung und Durchführung

Der Detektor besteht aus sich abwechselnden Schichten von Metallplatten und 1cm dicken Szintillatoren. Die oberste Metallplatte besteht 2,5 cm Eisen, dann folgen fünf Mal 8 cm Aluminium und ganz unten 4 cm Kupfer.

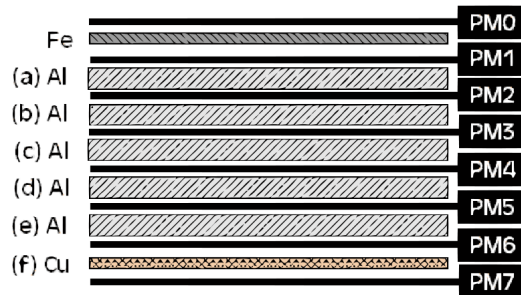


Abbildung 2: Aufbau des Detektors

An die Szintillatoren sind Photomultiplier angeschlossen. Deren Signale werden weiterverarbeitet und schließlich die zeitliche Abfolge der Signale unmittelbar nach Eintreffen eines Myons (das heißt nach Ansprechen der ersten beiden Szintillatoren) gespeichert. Man unterscheidet Zerfälle nach oben und Zerfälle nach unten. Bei Zerfällen nach oben wird das Elektron nach oben emittiert und in der gleichen Szintillatorschicht registriert, unter der das Myon zum Stillstand kommt. Bei Zerfällen nach unten wird das Elektron eine Schicht weiter unten detektiert. Misst man die Zeit zwischen Detektion des Myons und des Elektrons und mittelt über sehr viele Ereignisse, so erhält man die Lebensdauer des Myons.

Legt man im Bereich des Detektors ein Magnetfeld ($B = 4 \cdot 10^{-3}$ T) an, und geleitet wird.

3 Auswertung

3.1 Korrektur einiger systematischer Fehler

Bevor die Daten verwendet werden können müssen noch einige systematischen Fehler ausgeglichen werden, die das Ergebnis sonst verfälschen.

In einigen Fällen treten Nachpulse auf. Dies geschieht, wenn das Primärsignal im Photomultiplier in dessen Restgas Ionen erzeugt, die zurück zur Kathode laufen und dort einen zweiten Puls auslösen. Man könnte also einen Nachpuls in der untersten vom Myon angesprochenen Szintillatorschicht fälschlicherweise für einen Zerfall nach oben halten. Um dies auszugleichen wird für die Ereignisse, bei denen ein Myon, aber kein Elektron detektiert wurde (d.h. die ersten n Szintillatoren sprechen an, es fehlt aber das zeitlich versetzte Signal in Schicht n oder $n+1$) ermittelt ob es einen Nachpuls in einer der Schichten 1 bis $n-1$ gegeben hat und für jeden Szintillator der Anteil der Ereignisse mit Nachpuls bestimmt. So erhält man die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zerfallsmuster, das aussieht wie ein Zerfall nach oben eigentlich ein Nachpuls ist und kann diesen systematischen Fehler rausrechnen.

Desweiteren kann es passieren, dass ein Zerfall nach oben fälschlicherweise für einen Zerfall nach unten gehalten wird, weil die letzte Szintillatorschicht nicht auf das Myon anspricht. Dazu bestimmt

PM 0	$\leq 48,87 \%$
PM 1	4,28 %
PM 2	2,84 %
PM 3	2,97 %
PM 4	7,29 %
PM 5	4,37 %
PM 6	5,74 %
PM 7	$\leq 23,60 \%$

Tabelle 1: Ineffizienzen der Photomultiplier

man in einem Vorexperiment die Ineffizienzen der einzelnen Zähler indem man ermittelt wie oft ein Szintillator anspricht, wenn der Zähler darüber und der Zähler darunter ein Ereignis detektiert hat. Damit berechnet man die Wahrscheinlichkeit bei einem Zerfallsmuster wie bei einem Zerfall nach unten eigentlich einen Zerfall nach oben vorliegen zu haben.

Schließlich kann es auch passieren, dass ein Nachpuls in der Schicht $n + 1$ für einen Zerfall nach unten gehalten wird. Dabei müsste das Myon eigentlich bis zur Schicht $n + 1$ vorgedrungen sein, das heißt der Detektor in Schicht $n + 1$ war ineffizient. Das korrigiert man ebenso wie die anderen Nachpulse, nur dass man die Nachpulsrate noch mit der Ineffizienz multipliziert.

3.2 Ermittlung der Lebensdauer aus der Messung ohne Magnetfeld

Für jeden Szintillator wird in einem Histogramm die Anzahl der Zerfälle über der Zerfallszeit aufgetragen. Gewichtet mit der Gesamtzahl der gemessenen Zerfälle jedes Szintillators wird daraus ein gemeinsames Diagramm erstellt und der erwartete zeitliche Verlauf, der im Grundlagenteil erklärt wurde (Gleichung (1)) angefitet. Das Diagramm ist in (Abb. 3) abgebildet. Die Lebensdauer τ_0 ist dabei ein Fitparameter und wurde zu $(1991 \pm 34,5)$ ns bestimmt. Dabei wurde allerdings lediglich der statistische Fehler berücksichtigt. In der Fitfunktion kommt das Verhältnis f von positiven zu negativen Myonen vor. Dieses ist ebenfalls fehlerbehaftet und beträgt $f = 1,3 \pm 0,2$. Variiert man nun f um 1σ bis 2σ so kann man den daraus entstandenen Fehler abschätzen: $\Delta\tau_0 = 35$ ns. Eine weitere Fehlerquelle sind die Skalierungsfaktoren, die man aus dem Nachpulsspektrum und den Ineffizienzen der Szintillatoren ermittelt, und mit denen die einzelnen Histogramme gewichtet werden. Variiert man diese um circa 5%, so erhält man daraus einen Fehler $\Delta\tau_0 = 20$ ns. Desweiteren hat der Fitbereich einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Messergebnis. Der daraus resultierenden Fehler beträgt etwa $\Delta\tau_0 = 40$ ns. Unser Endergebnis beträgt demzufolge:

$$\tau_0 = (1961,0 \pm 66,4) \text{ ns} \quad (3)$$

Der Literaturwert für die Lebensdauer von Myonen ist $2,19703 \pm 0,00004 \mu\text{s}$. Dieser weicht etwa $3,5\sigma$ von unserem Ergebnis ab. Unser Messwert stimmt also nicht im Rahmen der Fehler mit dem zu erwartenden Wert überein. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass das sehr wohl der Fall ist, wenn man das Verhältnis von positiven zu negativen Ionen nicht festlässt, sondern zu einem Fitparameter macht. Das Endergebnis ist dann $\tau_0 = (2110,0 \pm 94,5)$ ns. Allerdings wird dann aber das Verhältnis f zu $0,7155 \pm 0,0780$, was unrealistisch ist. Außerdem ist die Diskrepanz zwischen diesem Verhältnis bei Zerfällen nach oben ($f \approx 2$) und Zerfällen nach unten ($f \approx 0,6$) sehr groß, ganz abgesehen davon, dass f nicht von den übrigen Fitparametern unabhängig ist.

Aus der Lebensdauer und der Masse der Myonen kann man die Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung bestimmen:

$$G_F = \sqrt{\frac{192 \cdot \pi^3 \cdot \hbar}{\tau_0 \cdot (m_\mu c^2)^5}} = (1,233 \pm 0,021) \cdot 10^{-11} \text{ MeV}^{-2} \quad (4)$$

Der Literaturwert ist $G_F = 1,166 \cdot 10^{-11} \text{ MeV}^{-2}$. Wie nicht anders zu erwarten unterscheidet er sich signifikant von unserem gemessenen Wert.

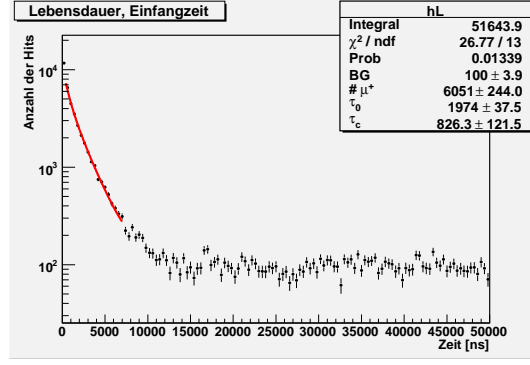


Abbildung 3: Lebensdauer von Myonen

3.3 Nachweis der Paritätsverletzung mit der Messung mit Magnetfeld

Für die Messung mit Magnetfeld erstellt man das Histogramm analog zur vorherigen Messung. Allerdings ist ein direkter Fit äußerst ungenau. Deshalb benutzt man folgende Relation zwischen dem Histogramm ohne und mit Magnetfeld, wobei die beiden Histogramme mit der jeweiligen Gesamtzahl an Ereignissen gewichtet werden:

$$\frac{Z_{mit}(t) - Z_{ohne}(t)}{Z_{mit}(t) + Z_{ohne}(t)} \approx \frac{P \cdot A}{2} \cdot \cos(\omega_{\text{Larmor}} \cdot t + \varphi) + c \quad (5)$$

Das Histogramm mit dem zugehörigen Fit ist in (Abb. 4) abgebildet. Diesem entnimmt man die Larmorfrequenz und deren statistischen Fehler $\omega_{\text{Larmor}} = (5,562 \pm 0,161)$ MHz. Der systematische Fehler aus den Skalierungsfaktoren ist hier 0,62 MHz, der aus dem Verhältnis von positiven zu negativen Myonen beträgt 1,0 MHz und der aus dem Fitbereich 2,5 MHz. Insgesamt ergibt dies:

$$\omega_{\text{Larmor}} = (5,562 \pm 1,7) \text{ MHz} \quad (6)$$

Hieraus berechnet man das magnetische Moment des Myons:

$$\mu_{\text{Myon}} = \frac{\hbar \omega_{\text{Larmor}}}{B} = (4,6 \pm 1,4) \cdot 10^{-7} \frac{\text{eV}}{\text{T}} \quad (7)$$

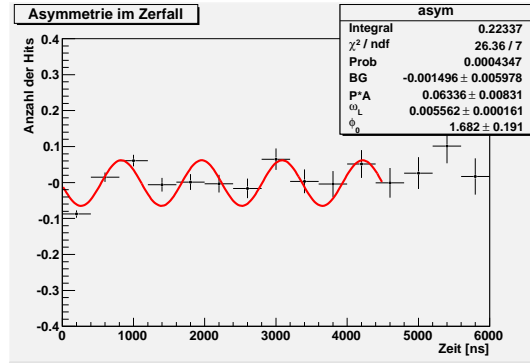


Abbildung 4: Messung der Larmorfrequenz

Der theoretische Wert beträgt $\mu_{\text{Myon}} = 2,8024 \cdot 10^{-7} \text{ eV/T}$, ist also signifikant von dem von uns gemessenen verschieden. Das liegt zum einen an der mangelnden Statistik – drei Tage Messung sind nun mal zu kurz – und zum anderen hängt es wahrscheinlich mit dem gleichen systematischen Problem zusammen, das wir bei der Messung mit Magnetfeld auch schon hatten und wohl im Versuchsaufbau begründet liegt.

Aus dem magnetischen Moment des Myons kann man die Myonenmasse bestimmen, was uns

einen weiteren Wert für die schwache Kopplungskonstante liefert:

$$\begin{aligned} m_\mu &= \frac{e\hbar}{2\mu_{\text{Myon}}} \\ &= (64 \pm 20) \text{ MeV}/c^2 \\ \Rightarrow G_F &= (4,31 \pm 3,37) \text{ MeV}^{-2} \end{aligned}$$

Im Gegensatz zum oben bestimmten Wert, ist dieser zwar mit dem Literaturwert verträglich, jedoch mit einem wesentlich höheren Fehler behaftet.

Außerdem kann man das Produkt der Asymmetrie mit der Polarisation bestimmen: $P \cdot A = 0,06336 \pm 0,00831$ Mit $A = 0,23$ (berechneter Wert aus der Anleitung) erhält man die Polarisation $P = 0,275 \pm 0,036$. Da dieser Wert im Rahmen der Fehler signifikant von Null verschieden ist, kann man schließen, dass die ankommenden Myonen polarisiert sind und damit die Parität verletzt ist. Berücksichtigt man andererseits unsere schlechten Messergebnisse bei den übrigen Messungen, sollte man den Fehler um einiges größer schätzen und nicht auf die Verlässlichkeit des Ergebnisses setzen.

4 Diskussion

Bei diesem Versuch haben wir eine Methode zur Bestimmung der Lebensdauer von Myonen kennengelernt. Prinzipiell hat das Verfahren funktioniert, zur wirklichen Bestimmung der Lebensdauer reicht unser Versuchsaufbau allerdings nicht, da es systematische Fehler gibt, die wir nicht ausreichend kontrollieren können, und die das Ergebnis einseitig beeinflussen. Außerdem war unsere Messzeit viel zu kurz für eine ausreichende Statistik, besonders die Messung mit Magnetfeld hätte erheblich mehr Zeit gebraucht um aussagekräftig zu sein.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: μ^+ -Zerfall	1
Abb. 2: Aufbau des Detektors	2
Abb. 3: Lebensdauer von Myonen	4
Abb. 4: Messung der Larmorfrequenz	4

Literatur

F13 - Lebensdauer von Myonen (2005), URL <http://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/FP/anleitungen/F13.pdf>.

K. Zapp and J. Stachel, *Physik V - Kern- und Teilchenphysik* (2006).

Particle Data Group, *Particle data booklet* (2008), URL <http://pdg.lbl.gov>.

H. Frauenfelder and E. M. Henley, *Teilchen und Kerne* (Oldenbourg, München [u.a.], 1999), ISBN 3-486-24417-5, 978-3-486-24417-5.