

F13 - Lebensdauer von Myonen

13. Oktober 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	2
2	Versuchsaufbau	13
3	Versuchsdurchführung	17
4	Fitten statistischer Daten	40
5	Hinweise zum Versuchsprotokoll	42
A	Anhang - Histogrammüberblick	44
	Literaturverzeichnis	46

1 Physikalische Grundlagen

Die Grundlage der Teilchenphysik bildet das so genannte Standardmodell. Es wurde vor ca. 30 Jahren als Zusammenfassung aller bis dahin in der Teilchenphysik gewonnenen Erkenntnisse gebildet und bis heute in keinem wesentlichen Punkt widerlegt, jedoch auch noch nicht in allen Punkten experimentell bestätigt. Aufgebaut ist es auf drei Säulen: den Teilchen, den Wechselwirkungen und dem Higgs-Mechanismus. Teilchen und Wechselwirkungen stehen in einem engen Zusammenhang, da die Wechselwirkungen sich durch und zwischen Teilchen vollziehen. Der Higgs-Mechanismus verleiht den Teilchen ihre Masse, ist jedoch experimentell noch nicht bestätigt und soll im Folgenden auch nicht weiter betrachtet werden.

1.1 Die Teilchen

Im Standardmodell sind alle Elementarteilchen drei Gruppen zugeordnet, den Quarks, den Leptonen und den Austauschteilchen, die für die Vermittlung der Wechselwirkung zuständig sind.

Tabelle 1: Quarks

Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]	Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]
up	1,5 - 4,5	2/3	down	5 - 8,5	-1/3
charm	1000 - 1400	2/3	strange	80 - 155	-1/3
top	174300 ± 5100	2/3	bottom	4000 - 4500	-1/3

Quarks und Leptonen haben Spin $\frac{1}{2}$, sind also Fermionen. Sie sind die elementaren Bestandteile der Materie. Quarks tragen Farbladung, unterliegen also - im Gegensatz zu Leptonen - der starken Kraft, außerdem tragen sie elektrische Drittelladungen. Zusammensetzungen aus Quarks nennt man Hadronen. Bestehen diese aus einem Quark und einen Antiquark spricht man von Mesonen, bestehen sie hingegen aus drei Quarks, spricht man von Baryonen. Die Masse der Quarks ist sehr unterschiedlich und lässt sich nur sehr schwer bestimmen, sie reicht von ca. 1,5 MeV/c²(up-Quark) bis zu ca. 174 GeV/c²(top-Quark).

Tabelle 2: Leptonen

Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]	Flavor	Masse [MeV/c ²]	el. Ladung [e]
e	0,511	-1	ν_e	$< 3 \cdot 10^{-6}$	0
μ	105,66	-1	μ_ν	$< 0,19$	0
τ	1776,99	-1	τ_ν	$< 18,2$	0

Leptonen kommen in drei Familien vor: Elektron, Myon und Tauon, jeweils mit den dazugehörigen Neutrinos (vgl. Tabelle 2). Das Elektron ist stabil, Myon und Tauon hingegen zerfallen, wobei meist ein energieärmeres Lepton, also ein Elektron oder ein Myon, entsteht. Im Gegensatz zu den Neutrinos sind Elektron, Myon und Tauon einfach negativ elektrisch geladen, die Antiteilchen dementsprechend einfach positiv. Sie unterliegen der Gravitation, der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkungen. Ihre Masse reicht von 511 keV/c² bis 1777 MeV/c². Neutrinos sind nicht nur elektrisch neutral, weshalb sie auch nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen, auch ihre Masse liegt nahezu bei Null.

1.2 Die Wechselwirkungen

Es gibt vier fundamentale Wechselwirkungen: die Gravitation, die elektromagnetische, die starke und die schwache, die jeweils durch Austauschteilchen bzw. Feldquanten vermittelt werden.

Tabelle 3: Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Vermittler	wirkt auf
Gravitation	Graviton	Quarks, Leptonen
elektromagnetische	Photon	Quarks, Leptonen (nicht ν)
starke	8 Gluonen	Quarks
schwache	W^+, W^-, Z^0	Quarks, Leptonen

Die Gravitation ist die schwächste unter den vier Wechselwirkungen. Auch wenn sie wegen ihrer großen Reichweite makroskopisch sehr stark zu

sein scheint, ist sie doch in Bezug auf die kleine Masse der Elementarteilchen 10^{38} -mal schwächer als die starke Wechselwirkung. Daher ist sie für die Teilchenphysik vernachlässigbar.

Als Becquerel 1896 die Radioaktivität und damit auch den β -Zerfall des Neutrons ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) entdeckte, wurde schnell klar, dass sich der zugrunde liegende Prozess aufgrund der langen Zerfallszeit nicht mit der starken Kraft erklären lässt. Auch ein elektromagnetischer Zerfall war äußerst unwahrscheinlich, weshalb alles auf eine weitere Wechselwirkung, nämlich die schwache, hindeutete. Um die Energieerhaltung bei diesem Prozess zu gewährleisten, postuliert Pauli 1930 das Neutrino. Schwache Prozesse finden sowohl mit Quarks (hadronisch) als auch mit Leptonen (leptonisch), aber auch unter Beteiligung von Teilchen aus beider dieser Kategorien (semileptonisch), statt. Außerdem können sie sowohl geladen - dann ist das Austauschteilchen ein W^+ bzw. ein W^- - als auch ungeladen (Austauschteilchen: Z_0) ablaufen. Die Austauschteilchen koppeln an die schwache Ladung g , welche sowohl von Quarks als auch von Leptonen getragen wird. Eine besondere Eigenschaft der schwachen Wechselwirkung ist, dass sie die Parität verletzt, was sich z.B. am Myonenzerfall zeigt.

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist dahingehend besonders, dass sie bereits ein erster Schritt hin zur Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen ist. Durch Maxwells Gleichungen wurde erstmal die bis dahin getrennt betrachtete elektrische Kraft mit der magnetischen vereinigt. In der Teilchenphysik zeigt sie sich in vielerlei Erscheinungsweisen.

Die starke Wechselwirkung ist verantwortlich für den Zusammenhalt zwischen den Quarks. Je weiter diese voneinander entfernt sind, desto stärker wirkt die anziehende Kraft zwischen ihnen. Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind 8 Gluonen, die selbst Farbe, die Ladung der starken Kraft, tragen und somit auch untereinander wechselwirken können. Nötig wurde die Einführung der Farbladung nach Entdeckung des Ω^- . Da seine drei s-Quarks dem Pauli-Verbot unterliegen, musste es noch eine zusätzliche Quantenzahl geben.

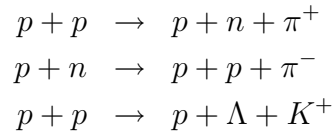
1.3 Das Myon

Dieser Versuch beschäftigt sich mit Myonen, sowohl in ihrer positiven, als auch in ihrer negativen Erscheinungsform. Das Myon ist ein Elementarteilchen. Es gehört zusammen mit dem Myonneutrino zur zweiten Generation der Leptonen. Das Myon ist in etwa 207-mal schwerer als das Elektron

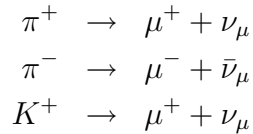
($m_{e^-} = 511 \text{ keV}$) und nicht stabil. Nach heutigem Kenntnisstand handelt es sich um ein punktförmiges Teilchen ($r_\mu < 10^{-18} \text{ m}$ [8]) ohne innere Struktur.

1.4 Myonen aus kosmischer Höhenstrahlung

Das Experiment wird mit kosmischen Myonen durchgeführt, deren Rate auf Meereshöhe ca. $100 \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad}}$ beträgt. Die kosmische Primärstrahlung besteht im Wesentlichen aus energiereichen Protonen. In den oberen Atmosphärenschichten stoßen diese mit Molekülen zusammen, wobei u.a. geladene Pionen und Kaonen entstehen. Dies erfolgt zumeist gemäß der folgenden Reaktionen:



Die dabei entstandenen Pionen und Kaonen sind nicht stabil, sondern zerfallen weiter, unter anderem in Myonen.



Beispielhaft ist das Feynmandiagramm des Pionzerfalls in Abbildung 1 dargestellt.

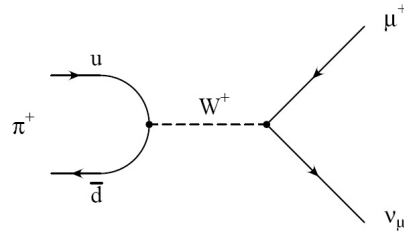


Abbildung 1: Feynmandiagramm des Pionzerfalls als Beispiel für die Entstehung von Myonen

Aufgrund der positiven Primärstrahlung gilt auch für die auf der Erdoberfläche ankommenden Myonen ein Überschuss an positiven Teilchen, der durch das Verhältnis

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

ausgedrückt werden kann.

Die in ca. 10 km Höhe erzeugten Myonen sind wegen ihrer hohen Energie relativistisch und können aufgrund der Zeitdilatation die Erde erreichen bevor sie zerfallen. Das Maximum der Energieverteilung der am Erdboden ankommenden Myonen liegt bei etwa 1 GeV (vgl. Abbildung 2). Ihre mittlere kinetische Energie liegt bei etwa 2 GeV [7].

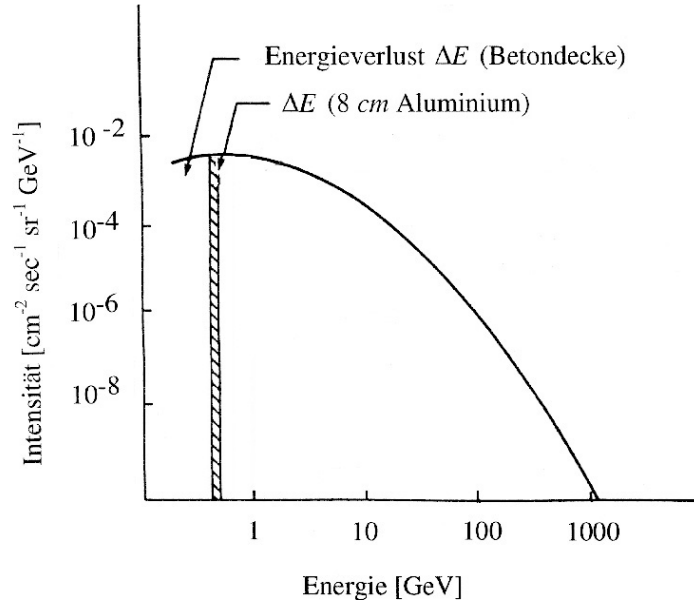


Abbildung 2: Energiespektrum der Myonen aus der Höhenstrahlung, gemessen an der Erdoberfläche.

Da Myonen nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, verlieren sie ihre kinetische Energie nur durch elektromagnetische Wechselwirkungen, d.h. vornehmlich durch Ionisation der von ihnen durchflogenen Materie. Der Energieverlust durch Bremsstrahlung ist wegen der großen Myonmasse im Gegensatz zu dem von Elektronen vergleichbarer Energie sehr klein. Er beträgt bei hohen kinetischen Energien etwa $2 \text{ MeV/g} \cdot \text{cm}^{-2}$. Dies entspricht etwa einem Energieverlust von 1 MeV in 4 m Luft in der Nähe der Erdoberfläche [7].

1.5 Die schwache Wechselwirkung

Myonen werden bei Wechselwirkung mit Materie abgebremst bis sie zerfallen oder zur Ruhe kommen. Positive Myonen zerfallen entweder als freie Teilchen oder nach Einfang eines Elektrons und damit der Bildung eines Myoniumatoms. Negativen Myonen steht ein weiterer Reaktionskanal offen, sie können von Atomkernen eingefangen werden, mit ihnen myonische Atome bilden und danach durch Kernwechselwirkung zerfallen. Der Myonenzerfall wird von der schwachen Wechselwirkung verursacht, die durch den Austausch von virtuellen Bosonen ($W^\pm, Z^0$) vermittelt wird.

Myonenzerfall Myonen zerfallen mit einer mittleren Lebensdauer von $2,19 \mu\text{s}$ zumeist gemäß den folgenden Reaktionen

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

und entsprechend des exponentiellen Zerfallsgesetzes

$$N(t) = N(t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}. \quad (1)$$

Der Zerfall des positiven Myons ist in Abbildung 3 als Feynmandiagramm dargestellt.

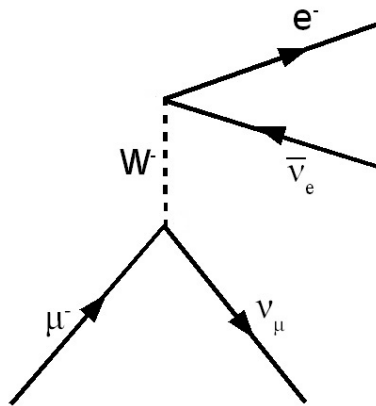


Abbildung 3: Feynmandiagramm des Myonzerfalls

Beim Zerfall geht die Ruhemasse des Myons in die Ruhemasse des Elektrons sowie in die kinetische Energie von Elektron und Neutrinos über. Die maximale kinetische Elektronenenergie beträgt $E_{max} = \frac{1}{2}m_\mu c^2$.

Aus der Lebensdauer und der Masse der Myonen kann die Fermi-Kopplungskonstante G_F der schwachen Wechselwirkung bestimmt werden. Sie ist (in natürlichen Einheiten) gegeben als

$$G_F^2 = \frac{192 \cdot \pi^3 \cdot \hbar}{\tau_0 \cdot (m_\mu \cdot c^2)^5} \quad [12].$$

Myoneneinfang Negativen Myonen steht neben dem Zerfall noch ein weiterer Reaktionskanal, der μ^- -Einfang, zu Verfügung. Wenn sie sich in Ruhe befinden und in das elektromagnetische Feld eines Atoms gelangen, werden sie von diesem eingefangen und fallen in weniger als 10^{-12} s in die K-Schale dieses Atoms. Somit tritt der Einfang des Myons

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$$

mit dem Zerfall in Konkurrenz. Durch den Einfang verkürzt sich die effektive Lebensdauer der negativen Myonen:

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

wobei τ_c die Lebensdauer bei reinem Myoneneinfang ist. Da die im Versuch untersuchte Höhenstrahlung aus einem Gemisch aus positiven und negativen Myonen besteht, erwartet man folgendes Zeitverhalten für die Anzahl der zerfallenden Myonen:

$$N(t) = N(\mu^-, t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_c}} + N(\mu^+, t_0) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_0}} \quad (2)$$

1.6 Paritätsverletzung

Eine historisch bedeutsame Erkenntnis im Zusammenhang mit dem Myonenzerfall ist, dass er eine der ersten Reaktionen war, an der klar wurde, dass die schwache Wechselwirkung die Parität verletzt. Konkret zeigt sich dies darin, dass die Zerfallselektronen seltener in Spinrichtung des ursprünglichen Myons emittiert werden als in die entgegengesetzte Richtung. Abbildung 4 veranschaulicht dies graphisch.



Abbildung 4: Paritätsverletzung beim Myonenzerfall: Das Elektron wird bevorzugt entgegen der Spinrichtung des Myons emittiert [4]

Leptonen besitzen Spin $\frac{1}{2}$. Daher heben sich die entgegengesetzt ausgerichteten Spins der beiden Neutrinos sowohl in Fall 1 als auch in Fall 2 auf. Da der Gesamtspin des Systems erhalten bleiben muss, zeigt der Spin des Elektrons in die selbe Richtung wie der des Myons. Wäre die Parität erhalten, müssten gleich viele Elektronen in und entgegen der Spinrichtung des Myons emittiert werden. In verschiedenen Messungen hat sich jedoch gezeigt, dass die Aussendung eines rechtshändigen Elektrons (in Spinrichtung des Myons, Helizität = +1), seltener stattfindet als die eines linkshändigen (entgegengesetzt der Spinrichtung des Myons, Helizität = -1).

Die räumliche Verteilung der Zerfallselektronen ist $N(\theta) \propto 1 + A \cdot \cos\theta$ um die Spinrichtung des Myons. Hierbei ist A der von der Positronenenergie abhängige Asymmetrieparameter. $A = 1$ entspricht der maximalen Zerfallspositronenenergie, $A = \frac{1}{3}$ ist der Wert, der sich beim Mitteln über alle Positronenenergien ergibt [14]. Die Berücksichtigung von Mehrfachstreuung in Aluminium und von Raumwinkeleffekten ergibt für dieses Experiment eine erwartete Asymmetrie von $A = 0,23$ [14]. Abbildung 5 veranschaulicht die Winkelverteilung graphisch anhand des Zerfalls positiver Myonen.

Ähnliche Überlegungen zur Paritätsverletzung können auch für den Pionen- bzw. Kaonenzerfall angestellt werden. Die auch hier vorhandene Asymmetrie in der Zerfallsrichtung bewirkt, dass die kosmischen Myonen polarisiert sind. Die Polarisation P hängt vom Verlauf des Energiespektrums und der beim Zerfall der Primärteilchen zur Verfügung stehenden Energie ab. Für Pionen als Primärteilchen beträgt die Polarisation $P = 0,33$, für Kaonen beträgt $P = 0,54$. Der Aufbau dieses Versuchs ist so gewählt, dass lediglich Myonen mit einer Energie größer 200 MeV detektiert werden. Die beiden

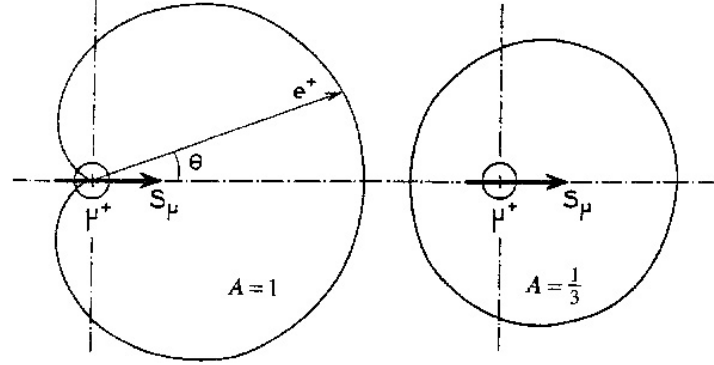


Abbildung 5: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ Winkelverteilung der Positronen nach dem Zerfall

Zerfallsneutrinos werden in einem Winkel von 180° zu der Flugrichtung des Elektrons ausgesendet (vgl. Abbildung 4).

1.7 Das magnetische Moment des Myons

Die geladenen Leptonen tragen ein magnetisches Moment ($\vec{\mu}$), welches proportional zum Spin ($\vec{s}$) des Teilchens ist. Der Betrag des magnetischen Momentes ist proportional zum Bohrschen Magneton des Teilchens und dieses ist umgekehrt proportional zur Masse des Teilchens. Für ein Myon ergibt sich das magnetische Moment zu

$$\vec{\mu}_\mu = g_\mu \cdot \mu_\mu^{Bohr} \cdot \vec{s} \quad \text{mit} \quad \mu_\mu^{Bohr} = \frac{e\hbar}{2m_\mu} \quad .$$

Der Proportionalitätsfaktor zwischen magnetischem Moment und Magneton ist der g-Faktor, der nach der Dirac-Theorie für Leptonen genau 2 beträgt [12]. Sein genauer Wert liegt etwas darüber, die Abweichung bezeichnet man als magnetische Anomalie

$$a_\mu = \frac{g_\mu - 2}{2}$$

von der Größenordnung $\frac{\alpha}{\pi}$, wobei $\alpha \approx \frac{1}{137}$ die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante ist.

Befindet sich ein Myon in einem externen Magnetfeld $\vec{B}$ senkrecht zu seinem Spin $\vec{s}$, so beginnt sein magnetisches Moment eine Larmorpräzession bei der Frequenz

$$\omega_{Larmor} = \frac{g \cdot \mu_{\mu}^{Bohr} \cdot B}{\hbar}$$

durchzuführen. Da beim Zerfall des positiven Myons das Zerfallspositron im Mittel vornehmlich in Richtung des Myonspins und damit auch in Richtung des magnetischen Momentes erfolgt, kann durch Beobachten des zeitlichen Verlaufs der Zerfallsasymmetrie in einem Ensemble von Myonen die Spinpräzession verfolgt werden.

1.8 Aktuelle Myonenforschung

Für moderne Präzisionsexperimente reichen die Flüsse kosmischer Myonen nicht in allen Fällen aus. Daher gibt es weltweit mehrere Beschleunigeranlagen, an denen intensive Strahlen von Myonen erzeugt werden. Die Eigenschaften dieser Strahlen sind im allgemeinen verschieden, sodass die Experimentatoren weltweit den jeweils für die untersuchte Fragestellung geeignetsten aus einer breiten Palette auswählen können [15]. In diesen sogenannten Mesonenfabriken werden Myonen dadurch erzeugt, dass Protonen mit typischen Energien zwischen 600 MeV und 1000 MeV auf ein Beryllium- oder Kohlenstofftarget geschossen werden, in dem nach Kernanregungen Pionen erzeugt werden, die ihrerseits in Myonen zerfallen. Diese Myonen werden in elektromagnetischen Strahlführungssystemen, bestehend aus geschickt hintereinander angeordneten magnetischen Dipol-, Quadrupol- und z.T. Solenoidfeldern gesammelt und in Experimentierareale geleitet. Dort stehen Myonenflüsse von typisch einigen 10^6 pro Sekunde auf Flächen von der Größenordnung einiger cm^2 zur Verfügung.

Aktuell ist die Myonenlebensdauer auf $2 \cdot 10^{-5}$ genau bestimmt. Zur Zeit gibt es jedoch zwei Experimente am PSI in Villingen / Schweiz, die sich zum Ziel gesetzt haben, diese auf 1 ppm (bzw. 2 ps) genau zu bestimmen. Bei FAST (Fiber Active Scintillator Target) soll dies mit Hilfe von 1536 Szintillatoren mit einem Querschnitt von $(4 \times 4) \text{ mm}^2$ bei μLAN (detector for Muon Lifetime ANalysis) mit einem fußballartigen Detektor, der durch seine Form die Polarisierungseffekte minimieren soll und zwei Lagen Szintillatoren enthält.



Abbildung 6: Zwei Detektoren zur Präzessionsmessung der Myonenlebensdauer: FAST (links) und μ LAN (rechts) am Paul Scherrer Institut in Villingen / Schweiz

2 Versuchsaufbau

Das Experiment wird mit kosmischen Myonen durchgeführt, die mit einer Rate von ca. $100 \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad}}$ auf Meereshöhe ankommen.

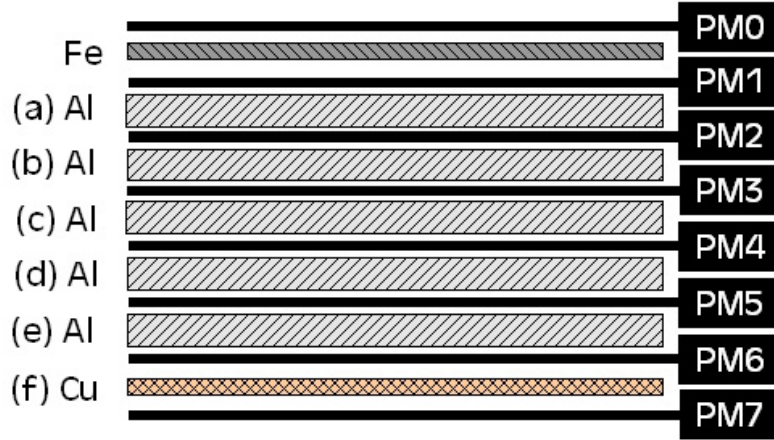


Abbildung 7: Skizze vom Detektor

Der Detektor ist aus einem abwechselnd aus Szintillatoren und Metallplatten zusammengesetzten Stapel aufgebaut. Die obere Platte besteht aus 2,5 cm Eisen, darunter folgen fünf 8 cm dicke Aluminiumplatten. Ganz unten befindet sich eine 4 cm dicke Kupferplatte. Die Szintillatoren sind jeweils 1 cm dick.

Um die Möglichkeit zu haben, die Larmorpräzession der Myonen zu beobachten, ist der Metallplattenstapel und sind die meisten der Szintillatoren im Inneren eines Magneten aufgestellt. Bei angelegtem Magnetfeld wird die Spinpräzession dadurch festgestellt, daß sich die Zählrate der Zerfallspositronen in den Szintillatoren ober- und unterhalb der Metallplatte, in der das Myon zur Ruhe kommt, periodisch ändert. Dies resultiert aus der sich mit der Larmorfrequenz drehenden räumlichen Zerfallsasymmetrie.

Für einen feststehenden Szintillator ergibt sich bei Myonen mit einer Lebensdauer τ , einer Larmorfrequenz ω_{Larmor} , einer Polarisation P und einer Asymmetrie A (vgl. Abbildung 5) eine zeitabhängige Zählrate von

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



Abbildung 8: Verschiedene Ansichten des Detektors

wobei φ vom Winkel zwischen Detektionsrichtung und ursprünglicher Myonspinnrichtung abhängt.

Ersichtlich ist nun auch, dass sich durch Anlegen eines Magnetfeldes die Polarisation der Myonen messen lässt. Der Magnet besteht aus zwei rechteckigen Spulen mit je 41 Windungen entlang der Längsseite des Detektors (vgl. Abbildung 9). Für dieses Experiment wird ein Feld von $4 \cdot 10^{-3}$ T verwendet.

An die acht Szintillatoren angeschlossen sind Photomultiplier, die ihrerseits mit den Eingängen von acht Diskriminatoren verbunden sind. Diese geben, sobald die Eingangsspannung einen eingestellten Wert überschreitet, Rechteckpulse einstellbarer Länge aus. Die Rechteckpulse werden an einen TDC (time to digital converter) weitergeleitet, der die Zeitinformation di-

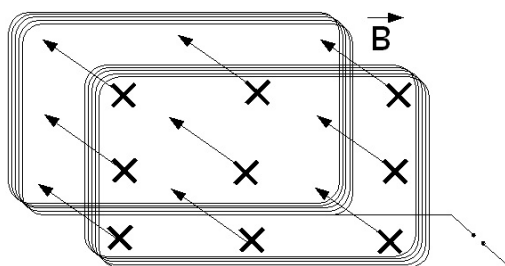


Abbildung 9: Anordnung der beiden Spulen um den Detektor zur Erzeugung eines homogenen Magnetfelds

igitalisiert und zur weiteren Verarbeitung an den Computer übergibt (vgl. Abbildung 10).

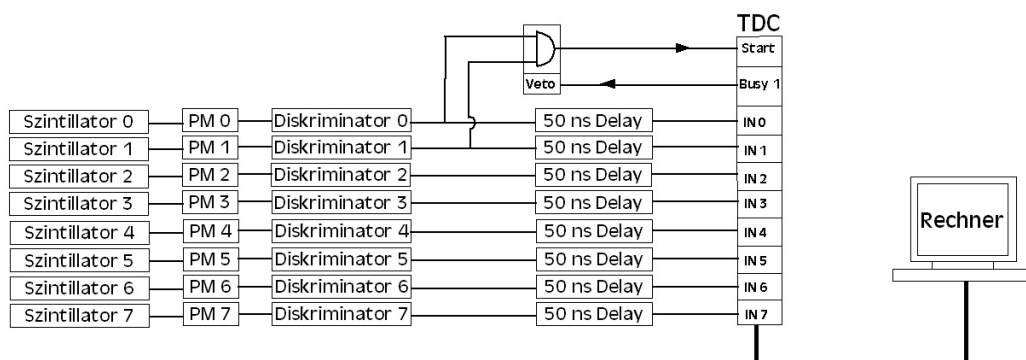


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Hardware

Die kosmischen Myonen passieren den Detektor mit großer Geschwindigkeit. Daher erscheint ein durchgehendes Myon in nur einem Zeitfenster. Wenn das Myon in einer der Metallplatten gestoppt wird, zerfällt es in zwei Neutrinos und ein Elektron bzw. Positron, das auch durch Szintillatoren detektiert werden kann (vgl. Abbildung 11). Die Dicke der Metallplatten ist so gewählt, dass sie für die hochenergetischen Zerfallselektronen bzw. -positronen in etwa der Reichweite in diesem Material entspricht. Zwischen der Detektionszeit der durchgehenden Myonen und der des Elektrons / Positrons besteht eine Differenz, die gemessen wird. Aus vielen Messungen lässt sich über das Zerfallsgesetz die mittlere Lebensdauer der Myonen bestimmen.

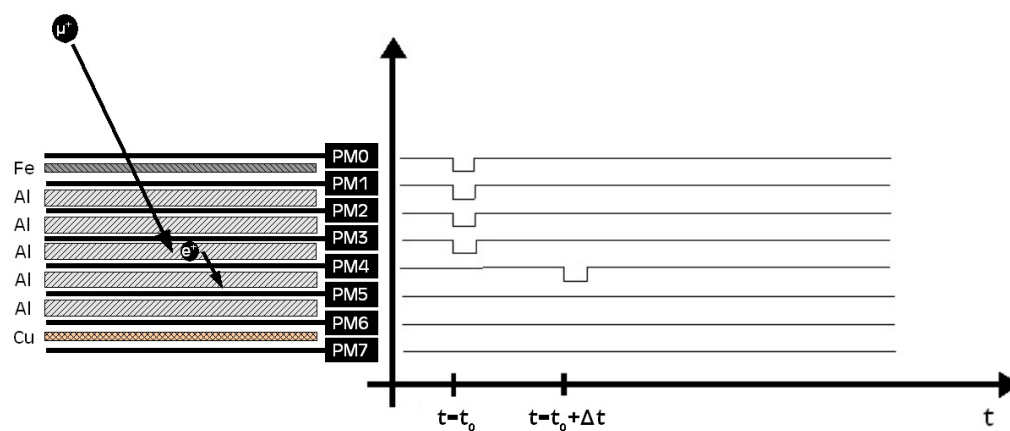


Abbildung 11: Zerfall nach unten im Detektor skizziert (links) und das zugehörige Signalmuster der Diskriminatoren (rechts)

3 Versuchsdurchführung

3.1 Überblick

Der Versuch und seine Auswertung verläuft in folgenden Schritten, die im Folgenden kurz skizziert werden. Danach folgt für jeden Schritt eine ausführlichere Anleitung.

Dokumentieren Sie bitte Ihre Messungen und Skizzen sofort im Laborbuch und machen Sie die Auswertungen (mit Ausnahme der endgültigen Anpassungen der theoretischen Kurven an die Daten) bereits während der Versuchsdurchführung. Am letzten Tag wird das Laborbuch vom Assistenten gegengezeichnet.

1. Verifizierung der Hardware

In diesem Schritt sollen Sie sich mit der Hardware (Photomultiplier, Diskriminatoren, Trigger und Auslese) vertraut machen und sich von deren Funktionsfähigkeit überzeugen. Die Ausleseelektronik wird verkabelt und die Signale werden mit dem Oszillographen überprüft.

2. Bestimmung der optimalen Betriebseinstellungen

Ziel ist es die einzelnen Zähler möglichst effizient zu betreiben ohne zu viele Rauschpulse zu registrieren. Es werden die Zeitverzögerungen der einzelnen Signale überprüft, die Diskriminatorschwellen werden optimal gesetzt und dann die Effizienz der einzelnen Zähler bestimmt. Am Ende werden eventuell die Hochspannungen der Photomultiplier optimal eingestellt. Für die endgültigen Betriebseinstellungen werden schließlich die Einzel- und Koinzidenzzählraten gemessen.

3. Datennahme und Online Überprüfung der Daten.

Hier wird die Apparatur für die Datennahme aufgesetzt und Sie machen sich mit dem Ausleseprogramm und den online Histogrammen vertraut. Nach Überprüfung der online Histogramme und der Datennahmerate werden über Nacht Daten registriert.

4. Filterung und Überprüfung der registrierten Daten

Hier machen Sie sich mit dem Filterprogramm vertraut, das aus den registrierten Daten gute Kandidaten für Myonzerfälle herausfiltert und wichtige Datenhistogramme füllt. Das Filterprogramm soll erweitert werden um neben den Up-Zerfällen auch Down-Zerfälle zu selektieren.

Ausserdem soll eine verbesserte Routine zur Selektion von Nachpulsen geschrieben werden.

Danach muss die Qualität der Daten und deren Konsistenz untersucht werden um herauszufinden, welche Datensätze für die Analyse geeignet sind. Hierfür werden vom Datenfilterprogramm bereits Histogramme gebucht, die mit Hilfe des Programmpakets ROOT angeschaut und manipuliert werden können. (*Hierzu sind keine Vorkenntnisse von ROOT erforderlich, die wenigen erforderlichen Kommandos sind in der Anleitung beschrieben. Die Daten werden i.A. auf einen Rechner des CIP Pools transferiert und können von jedem Arbeitsplatz eines CIP Pools der Physik aus mit ROOT analysiert werden*).

Als erstes werden die zeitlich verzögerten Pulse analysiert, die vom Elektron eines Myonzerfalls, von Nachpulsen der Photomultiplier oder von Dunkelpulsen stammen können. Das Nachpulsspektrum aller Röhren wird analysiert und die Rate der Nachpulse relativ zu einem detektierten Myonzerfall bestimmt.

Danach werden die gemessenen Zerfallsspektren für alle Röhren für Up- und Down-Zerfälle auf den Anteil von Nachpulsen korrigiert. Danach kann entschieden werden, welche Datensätze für die Bestimmung der Lebensdauer geeignet sind und in welchem Bereich der Zerfallszeiten die Lebensdauer bestimmt werden kann.

5. Endanalyse , Bestimmung der Lebensdauer der Myonen und systematischer Fehler.

Ein Script für die Messung der Lebensdauer aus einer Zeitverteilung verzögerter Pulse in ROOT wird geliefert. Die Fitmethode und das Skript und die darin enthaltenen Befehle werden mit dem Betreuer besprochen. Danach sollte es einfach sein, Fits für verschiedenen Datensätze und in verschiedenen Zeitbereichen durchzuführen. Ein erster Fit wird noch während der Versuchsdurchführung (am letzten Tag) durchgeführt. Danach wird erwartet, dass Sie sich überlegen, welche Datensätze am besten geeignet sind zur Bestimmung der Lebensdauer und ebenfalls wie die systematische Konsistenz der Messung überprüft werden kann und systematische Fehlerquellen abgeschätzt werden können.

6. Polarisationsmessung

Es werden auch Daten mit angeschaltetem Magnetfeld registriert, um

die Präzession des magnetischen Moments des Myons als Funktion der Zeit und die Anfangspolarisation zu messen. Statistisch erfordert das eine mindestens dreitägige Messung. Diese Messung soll zeigen, dass die Myonen polarisiert sind, d.h. der Spin und damit auch das magnetische Moment hat zum Zeitpunkt wenn das Myon stoppt eine Vorzugsrichtung relativ zum Myonimpuls. Das magnetische Moment (und damit der Spin) präzessieren im Magnetfeld mit der Larmorfrequenz um die Achse des angelegten Magnetfelds. Dies führt für hochenergetische Zerfallselektronen, die im Versuch nachgewiesen werden zu einer periodischen Änderung der Zählrate nach 'oben' bzw. nach 'unten' als Funktion der Zerfallszeit.

Der Nachweis, dass die ankommenden (positiven) Myonen polarisiert sind zeigt, dass die Parität beim Zerfall des Pions in ein Myon verletzt ist!

Gemessen wird separat die Rate der verzögerten Pulse jedes Zählers als Funktion der Zeit (Zerfallszeiten) mit und ohne angelegtes Magnetfeld. Nach Korrektur auf Nachpulse wird die Asymmetrie $A = (N(t)_{mitB} - N(t)_{ohneB}) / (N(t)_{mitB} + N(t)_{ohneB})$ bestimmt, deren Amplitude proportional zur Myonpolarisation ist und deren Periodizität die Bestimmung der Larmorfrequenz und der Anfangsphase erlaubt. Die Datennahme erfolgt übers Wochenende, die Auswertung nach Abschluss des Versuchs. Bestimmt werden soll die Larmorfrequenz, daraus mit bekanntem Magnetfeld das magnetische Moment des Myons und die Myonhelizität.

3.2 Detaillierte Anleitungen zu den einzelnen Punkten

3.2.1 Verifizierung der Hardware

Im ersten Teil des Versuchs sollen Sie mit typischen Geräten der Hochenergiephysik wie Szintillatoren, Photomultipliern, Diskriminatoren, Delays oder logischen Elementen vertraut gemacht werden und sich von deren Funktionsfähigkeit überzeugen. Hierzu werden Schaltungen verkabelt, Pulse auf dem Oszilloskop angeschaut und Zählraten gemessen.

In Abbildung 12 sehen Sie die NIM-Elektronik (NIM: nuclear instruments modules). Die einzelnen Module sind in einem speziellen Einschubrahmen untergebracht, über den die Stromversorgung gewährt wird. Von links nach

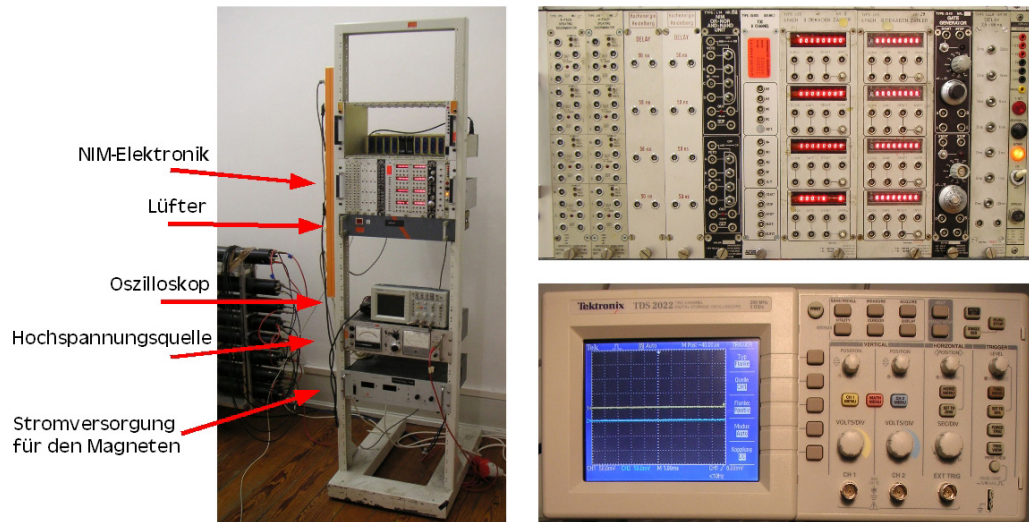


Abbildung 12: NIM-Elektronik und Oszilloskop

recht sind zu sehen: Diskriminatoren, Delays, logische Verknüpfungen, der TDC, Zähler, Gate-Generatoren und ein weiteres Delay.

- Schauen Sie sich als Einstieg in den Versuch und zur ersten Übung im Umgang mit dem Oszilloskop die Ausgangspulse der Photomultiplier an. Der Ausgangswert für die Hochspannung an den Photomultipliern sollte hierzu auf 2500V bei negativer Polarität eingestellt werden. (Sollten Sie einen anderen Wert für erforderlich halten, so besprechen Sie dies bitte vorher mit Ihrem Assistenten.) Führen Sie dies für alle acht Photomultiplier durch.

Beachten Sie dabei zunächst den Effekt, den ein Abschlusswiderstand von 50Ω im Vergleich zum oszilloskopinternen Abschlusswiderstand von $1M\Omega$ hat.

Skizzieren Sie im Laborbuch die beobachteten Photomultiplierpulsformen. Notieren Sie die Pulshöhen.

Fragen dazu:

- Wie werden in einem Photomultiplier Photonen nachgewiesen?
- Wie werden die Photonen in dem Szintillator erzeugt?

- Welche Energie deponieren relativistische Teilchen wie Myonen aus der kosmischen Strahlung in einem Szintillator?
- Welchen Einfluss hat der Abschlusswiderstand auf die Signalform?
- Wie sehen Pulse von Photomultipliern aus?
- Was bestimmt die Höhe dieser Pulse?
- Schauen Sie sich nun die Signale nach Durchgang durch den Diskriminator an. Verändern Sie Schwellen und Pulsbreiten und beobachten Sie den Effekt. Skizzieren Sie sich auch hier die beobachteten Pulsformen und notieren Sie sich die Pulshöhen.

Fragen dazu:

- Was ist die Funktionsweise der Diskriminatoren?
- Welche Auswirkungen hat das Verändern der Schwellen?
- Schauen Sie sich nun für einen Photomultiplier sein Signal vor und nach dem Diskriminator gleichzeitig auf dem Oszilloskop an. Skizzieren Sie sich das Bild.

Fragen dazu:

- Was ist zu beobachten?
- Wie lässt es sich erklären?
- Stellen Sie die Pulsbreiten aller Diskriminatoren auf einen konstanten Wert ein und notieren Sie sich diesen.
- Um näheres über die Rate einzelner Zähler als auch über die der Koinzidenzen mehrerer Zähler zu erfahren, werden im Anschluss einige Zählraten gemessen. Vergleichen Sie hierzu für ein beliebiges Paar die Zählrate eines einzelnen Zählers mit der einer Koinzidenz aus diesem und einem benachbarten. Die Rate R_{12} an zufälligen Koinzidenzen bei gegebenen Einzelraten R_1 und R_2 und mit einer Koinzidenzzeit von Δt (Pulsbreite aus vorherigem Aufgabenteil) ergibt sich zu

$$R_{12} = R_1 \cdot R_2 \cdot \Delta t.$$

Berechnen Sie die Rate der zufälligen Koinzidenzen anhand dieser Formel.

3.2.2 Bestimmung der optimalen Betriebseinstellung

Ziel ist es die einzelnen Zähler möglichst effizient zu betreiben ohne zu viele Rauschpulse zu registrieren. Es werden die Zeitverzögerungen der einzelnen Signale überprüft und gegebenenfalls eingestellt, die Diskriminatorschwellen werden optimal gesetzt und dann die Effizienz der einzelnen Zähler bestimmt. **Für die Betriebseinstellungen werden die Einzel- und Koinzidenzzählraten gemessen.**

- Zu Beginn sollen nun die Schwellen der Diskriminatoren eingestellt werden. Hierzu wird für jeden Szintillator die Dunkelpulsrate gemessen und die Schwelle so variiert, dass diese etwa 100-200Hz beträgt. Als nächstes muss die Nachweiseffizienz der Szintillatoren gemessen werden. Nutzen Sie dabei die Tatsache, dass eine Koinzidenz zwischen zwei Szintillatoren eindeutig ein durchlaufendes Teilchen signalisiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein zwischen zwei Szintillatoren gelegener Zähler von dem gleichen Teilchen getroffen wurde. Überlegen Sie sich darauf basierend eine Schaltung zur Bestimmung der Effizienz jedes einzelnen Szintillators.

Liegt die Effizienz eines Szintillators unter 90%, sollten Sie die Schwelle des dazugehörigen Szintillators herunterdrehen und danach die Effizienz erneut bestimmen.

Fragen dazu:

- Wie hängt die Nachweiseffizienz von der eingestellten Schwelle ab?
- Wie wirkt sich eine geringe Nachweiseffizienz auf die Messungen aus?

Tragen Sie die Effizienzen aller Zähler und die zugehörigen Diskriminatorschwellen in Tabellenform ins Laborbuch ein.

- Zum Abschluss des Aufgabenteils mit der Hardware sollen Sie diese so schalten, dass die Datennahme zur Lebensdauerermessung gestartet werden kann. Verwenden Sie dazu den in Abbildung 13 dargestellten Versuchsaufbau. Dieser prüft durch eine UND-Verknüpfung, ob die beiden oberen Szintillatoren koinzident angesprochen haben. Ist dies der Fall, wird die TDC-interne Uhr gestartet. Die eigentlichen Signale werden um 50 ns zeitverzögert, damit der Start des TDC vor der Ankunft der Daten erfolgt ist. An *BUSY1* liegt ein Signal an, wenn der TDC gerade

aktiv ist. Dieser Ausgang wird mit dem Veto der logischen Verknüpfung verbunden, um zu verhindern, dass eine weitere Messung gestartet wird, wenn bereits eine läuft.

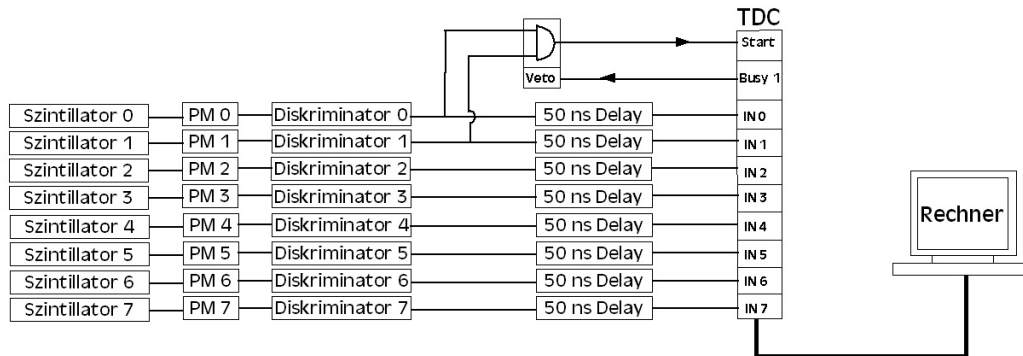


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Hardware

Prüfen Sie für jeden Detektor auf dem Oszilloskop nach, wie lange der Puls nach den Delay im Vergleich zum Startsignal für den TDC zeitverzögert ist und stellen sie diese Differenz für alle Detektoren auf die gleiche Zeit ein.

- Der TDC enthält eine interne Uhr, die bei einem Signal am Startkanal die Zeitmessung beginnt und nach $650 \mu\text{s}$ stoppt. Liegt an einen der INs ein Signal an, wird die Zeit und das Muster aller INs in den Speicher des TDC geschrieben. Bitmuster benötigen 1 Byte Speicherplatz, Zeiten 2 Byte (vgl. Abbildung 14).

3.2.3 Datennahme und online Überprüfung der Daten

Die Auslese der Daten aus dem TDC und das anschließende Speichern erfolgt mittels eines in LabVIEW geschriebenen Programms. Die Daten werden sowohl in der digitalen Form, in der sie aus dem Diskriminator kommen angezeigt als auch mittels eines Online-Eventdisplays zeitlich aufgelöst visualisiert. Zum besseren Verständnis werden daneben noch zwei Histogramme zur Anzeige aller Hits pro Detektor und zur Anzeige der auftretenden Slices gefüllt. Slices sind dabei die Anzahl der auftretenden Zeiten, die pro Ereignis in den TDC geschrieben werden.

Zeit – 2Byte	Detektormuster – 1Byte
40	00001111
2250	00010000



Abbildung 14: Schema des internen Speichers des TDC

Anhand des Histogramms zur Anzeige aller Hits pro Detektor, können Sie sich noch einmal über die Qualität Ihrer Einstellung der Schwellen am Diskriminator vergewissern. In den ersten beiden Detektoren sollten in etwa gleich viele Hits zu sehen sein, da ihre Koinzidenz überhaupt erst den Start des TDC bewirkt. Sie müssen jedoch nicht genau gleich sein, da nach dem Start der Messung auch noch Dunkelpulse oder Nachpulse registriert werden die im Histogramm berücksichtigt werden. Für alle anderen Detektoren ist ein kontinuierlicher Abfall der Anzahl der Hits zu erwarten, da auf dem Weg nach unten immer mehr Myonen zerfallen.

Nach Überprüfung der online Histogramme und der Datennahmerate werden über Nacht Daten registriert.

- In Abbildung 15 sehen Sie die Benutzeroberfläche des Ausleseprogramms. Es lässt sich in den *singlerun* Modus schalten, um einzelne Ereignisse anzuschauen und sich über die Funktionsweise klar zu werden. Bei ausgeschaltetem *singlerun* wird die Messung gestartet, und Sie werden gefragt, wo und unter welchem Namen Sie die Daten speichern möchten. Zum Starten der Messung betätigen Sie zunächst den *Initialize* und dann den *Run* Knopf.

- Machen Sie sich zu Beginn mit dem Programm vertraut.

Fragen dazu:

- Welche Werte zeigen die einzelnen Elemente auf der Benutzeroberfläche an?



Abbildung 15: Benutzeroberfläche des Ausleseprogramms

- Wie stellt sich ein Myonzerfall auf dem Eventdisplay und der digitalen Anzeige dar?
- Schauen Sie sich einige Ereignisse im *singlerun* Modus an und versuchen Sie, diese zu interpretieren.
- Die Lebensdauer der Myonen soll mit 5% Genauigkeit gemessen werden. Hierzu sollte die Messung mindestens zwei Nächte lang laufen. Starten Sie die Messung und beobachten Sie das Füllen der Histogramme.
- Neben der Lebensdauer der Myonen kann aus den selben Daten auch die wesentlich kürzere Zeit gemessen werden, in der die negativen Myonen von den Kernen des Aluminiums bzw. Kupfers eingefangen werden, die sogenannte Einfangzeit. Sie beträgt für Aluminium 880 ns.
- Für diese statistische Messung müssen Nachpulse berücksichtigt werden. Von Nachpulsen spricht man, wenn ein Detektor eigentlich nur einen Hit hatte, der Photomultiplier allerdings zwei Signale weiterlei-

tet. Dies geschieht, wenn das Primärsignal im Photomultiplier in dessen Restgas Ionen erzeugt, die zurück zur Kathode laufen und dort einen zweiten Puls auslösen. Da solche Ereignisse mit in die Messung eingehen, ist es wichtig, sie später wieder zu entfernen, um die eigentlichen Messgrößen nicht zu verfälschen.

Nach Beendigung einer Messung werden die Daten, welche während der Messung lokal auf der Platte des Versuchsrechners als Textdatei gespeichert werden, auf die Platten des CIP-Rechners transferiert. Da die Dateien zu groß für Ihren Account sind, werden sie auf temporären Speicherplatz geschrieben, der nach 50 Tagen automatisch wieder gelöscht wird. Speichern Sie in das Verzeichnis `/local/‘myname’/‘myfile’`, nachdem Sie vorher ein privates Verzeichnis mit `mkdir ‘myname’` eingerichtet haben.

3.2.4 Filterung und Überprüfung der registrierten Daten

Zur Selektion der Zerfallsereignisse wird ein in C++ geschriebenes Programm verwendet. Dieses wählt nur solche Ereignisse aus, bei denen das Myon in allen Zählern bis zum Stopppunkt gleichzeitig ein Signal gesetzt hat und danach im letzten Zähler (Zerfall nach oben) oder im Zähler darunter (Zerfall nach unten) ein weiteres verzögertes Signal. Diese verzögerten Pulse werden für jeden Zähler separat in vier verschiedene Kategorien sortiert: Zerfälle nach oben, Zerfälle nach unten, Nachpulse und alle übrigen. Des weiteren werden verschiedene Histogramme gefüllt, deren Inhalt in einer ROOT- und einer Textdatei zur weiteren Verarbeitung und Überprüfung der Datenqualität gespeichert wird.

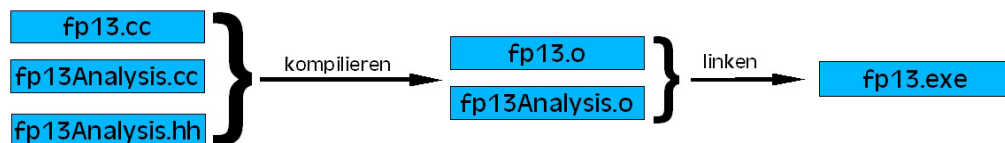


Abbildung 16: Erstellen des Analyseprogramms mit `make`

Das C++ Programm setzt sich aus vier Dateien zusammen, drei davon sind in Abbildung 16 zu sehen, eine weitere ist das `Makefile`, das den Vorgang beim Kompilieren vorgibt. `fp13Analysis.hh` ist die Datei, in der die in den anderen Dateien benötigten Funktionen und Variablen deklariert sind.

In der Datei `fp13.cc` ist die Funktion `int main()` definiert, mit der das Programm beginnt. Hier wird die Analyse mit Hilfe der Klasse `fp13Analysis` aufgerufen und gesteuert. In `fp13Analysis.cc` sind verschiedene Funktionen zur Analyse definiert, die aufgerufen werden und die Daten selektieren. **Lediglich diese Datei (`fp13Analysis.cc`) wird von Ihnen editiert und sollte daher grob verstanden werden.**

Sie finden die benötigten Dateien im Internet über die Adresse:
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/~bachmann/fp13/>
Kopieren Sie sich die Dateien `Makefile`; `setROOTpath.sh`; `fp13Analysis.hh`; `fp13Analysis.cc`; `fp13.cc`, `fp13.txt` und die Macros `Lebensdauer.C`, `Einfangzeiten.C` sowie `Asymmetrie2.C` und `Weiteres.C` für die spätere Analyse in ROOT in Ihr Verzeichnis.

- Welche Bitmuster müssen für die oben genannten vier Kategorien (Zerfälle nach oben, Zerfälle nach unten, Nachpulse und alle übrigen) vorliegen?
- Machen Sie sich mit dem Aufbau des `fp13Analysis.cc` vertraut!
- Funktionen zur Einordnung der Ereignisse in die Kategorien Zerfall nach oben und Nachpulse sind schon vorhanden. Schreiben Sie selbst eine Funktion für Zerfall nach unten und eine allgemeinere Funktion für die Nachpulse.
- Nach Ausführen der Funktionen werden einige der Rückgabewerte und globalen Variablen in Histogramme gefüllt. Machen Sie sich mit dieser Methode vertraut und erstellen und speichern Sie selbst Histogramme für die Zerfälle nach unten und die Nachpulse unter den dafür vorgesehenen Namen.
- Nun müssen Sie die verschiedenen Dateien mit dem Befehl `make` kompilieren und das dabei entstandene Programm über Ihre Messdaten laufen lassen. Hierzu müssen Sie zunächst den Befehl `source setROOTpath.sh /usr/local/root` eingeben. Zum kompilieren geben Sie `make` ein. Dadurch wird das ausführbare Programm `fp13.exe` erzeugt. Um die Datei mit dem Namen `“myfile”` zu analysieren lassen Sie dieses Programm mit dem Befehl `fp13.exe -f /local/“myname”/“myfile”` laufen.

Eine Änderung in der Datei `fp13Analysis.cc` wird nur dann wirksam, wenn Sie diese Befehlssequenz durchführen!

Die Daten der Histogramme werden ohne weitere Maßnahmen in die Datei `fp13.root` in Ihr Verzeichnis gespeichert, die im Anschluss zur weiteren Analyse verwendet wird. Diese können Sie in einem Programm Ihrer Wahl weiter verwenden. Die weitere Diskussion orientiert sich an einer Analyse mit ROOT.

Falls Sie große Probleme mit der eigenständigen Programmierung haben, lassen Sie sich bitte von Ihrem Betreuer beraten.

3.2.5 Datenbeurteilung und erste Datenauswertung

Im Folgenden muss die Qualität der Daten und deren Konsistenz untersucht werden um herauszufinden, welche Datensätze für die Analyse geeignet sind. Hierfür werden vom Datenerfassungsprogramm bereits Histogramme gebucht, die mit Hilfe des Programmpakets ROOT angeschaut und manipuliert werden können. *(Hierzu sind keine Vorkenntnisse von ROOT erforderlich, die wenigen erforderlichen Kommandos sind in der Anleitung beschrieben. Die Daten werden i.A. auf einen Rechner des CIP Pools transferiert und können von jedem Arbeitsplatz eines CIP Pools der Physik aus mit ROOT analysiert werden).*

ROOT erlaubt es die gespeicherten Histogramme graphisch darzustellen und zu fitten, was zur Ausgabe der Parameter der Fitfunktion führt. Die Schritte können zum einen direkt in einer Kommandozeile hintereinander ausgeführt werden, lassen sich aber auch in Makros schreiben, die dann komplett ausgeführt werden können.

Erste Schritte der ROOT - Analyse:

Als erstes müssen Sie den Pfad zur ROOT library setzen. Tippen Sie `source setROOTpath.sh /usr/local/root` ein und dann das Kommando `root`. Bitten Sie hierzu Ihren Betreuer um Hilfe, der Sie gerne über die aktuellen Gegebenheiten informiert. Machen Sie sich zunächst mit dem Programm vertraut, indem Sie sich einige Histogramme von einer Kommandozeile aus ansehen. Die Histogramme `h1` und `h2` sollten Ihnen bereits aus der Benutzeroberfläche des Ausleseprogramms bekannt vorkommen.

- Laden Sie die Datei mit den gespeicherten Histogrammen:
`TFile f('fp13.root')`

- Zeichnen Sie eines der zu Verfügung stehenden Histogramme, z.B. h1:
`h1->Draw('hist')` oder besser `h1->Draw('e')` (*Alte Befehle lassen sich mit den Pfeiltasten wieder in die Kommandozeile holen*)
- Wiederholen Sie den Vorgang für h7 (Zahl der Slices)
`h7->Draw('hist')` *Hier wird sich ein logarithmischer Maßstab in y empfehlen! Der kann in der Figur selbst gewählt werden: Mit der rechten Maustaste links neben die y-Achse klicken und dann Option **SetLogy** auswählen. Schauen Sie sich auch die anderen nützlichen Optionen an!*
- Schauen Sie sich als nächstes die Hitverteilungen von einzelnen Zählern und die entsprechenden Nachpulsverteilungen für Zerfälle nach oben bzw. nach unten an. Beispiel:
`a2->Draw('e')` *Hitverteilung in Zähler 2 nach oben*
`w2->Draw('samehist')` *Nachpulsverteilung aus durchlaufenden Myonen des Zählers in dasselbe Bild*
- Eine Liste aller verfügbaren Histogramme ist in Tabelle 5 in Anhang A gegeben.
- Wiederholen Sie dasselbe für einen anderen Zähler, der ein besonders ausgeprägtes Nachpulsspektrum hat. Offensichtlich müssen Sie das Spektrum auf Nachpulse korrigieren, d.h. Sie müssen sie abziehen.
- Korrektur auf Nachpulse für einen Zähler (exemplarisch):
 Hierzu müssen Sie wissen, welchen Prozentsatz an Nachpulsen Sie abziehen müssen. Dazu brauchen Sie die Zahl aller Myonen, die in Lage 2 gestoppt haben (L2stop) und diejenigen, aus denen die Nachpulse für Zähler 2 bestimmt wurden (L7). Diese Zahlen bekommen Sie aus Histogramm h8, in dem die Zahl der Startpattern pro Zähler gezeigt sind. (Beispiel: L2=34000 ; L7=15000 $\rightarrow$ Normierungsfaktor $w=34000/15000=2.27$).

Den Inhalt eines Bins können Sie sich direkt im Histogramm anzeigen lassen. Dazu geht man mit der Maus ans obere Ende des Balkens bzw. an den Datenpunkt. Falls die Funktion **EventStatus** unter **View** eingeschaltet ist, sehen Sie den Inhalt (binc) unter dem Histogramm angezeigt.

Übrigens: Rechnen können Sie in ROOT auch! Einfach die mathematische Formel eintippen z.B. `34000./15000.` und `Return`

```
a2->Draw('e')
```

```
w2->Scale(2.27)
```

```
w2->Draw('esame')
```

Die Nachpulse sind jetzt skaliert.

```
TH1D *w2s = new TH1D(*w2)
```

```
a2->Add(w2s,-1.)
```

*Jetzt werden Nachpulse normiert subtrahiert. Wenn das richtig gemacht wird, sollten die Einträge für lange Zeiten bei Zerfällen nach oben etwa Null sein (warum?!). Speichern Sie die Histogramme für einen Zähler. Ausdrucken und ins Protokollheft kleben! Hierzu in der Figur oben auf **File** klicken und **Save As** auswählen*

Sehen Sie bei all Ihren Vorgehensweisen in der rechten oberen Ecke der Fenster keine Statistikbox, geben Sie `gStyle->SetOptStat('neri')` ein und laden danach die Rootdatei neu mit `TFile f('fp13.root')`.

- Lebensdauerfit an eine auf Nachpulse korrigierte Verteilung. Vorschlag: Nehmen Sie Zähler 2, da dieser die meisten Zerfälle hat, betrachten Sie Zerfälle nach oben.

`.L Lebensdauer.C` *Lade Makro - nur um die Fitfunktion fitFunc zu definieren*

```
TF1 *f1 = new TF1('f1',fitFunc,0.,20000.,3)
```

Definiere Fitfunktion zwischen $0 < x < 20000$ mit 3 Parametern.

```
f1->SetParameters(2000.,5000.,1.)
```

Startwerte der Parameter Lebensdauer [ns], #Myon und Background setzen.

```
a2->Fit(f1,'','','e',1000.,20000.)
```

Fit im Bereich $1000 \text{ ns} < t < 20000 \text{ ns}$ und graphische Darstellung. Probieren Sie verschiedene Fitbereiche aus.

Diese Ergebnisse ausdrucken und ins Laborbuch einheften.

3.3 Endauswertung

Hiermit haben Sie gesehen, wie die Korrektur der Daten passiert und wie im Prinzip gefittet wird. Das ganze muss jetzt auf alle Zähler und auch die Zerfälle nach unten ausgedehnt werden. Hierzu werden Macros benutzt, die es erlauben umfangreiche Befehlssequenzen automatisch auszuführen.

Im ersten Schritt sollen Sie sich nach der Versuchsdurchführung einen Überblick über die Gesamtdaten verschaffen. Schauen Sie sich dazu das Makro `Weiteres.C` an und machen sich mit dem Aufbau vertraut. Führen Sie

Weiteres.C folgendermaßen aus:

- Laden des Markos:
`.L Weiteres.C`
- Ausführen einer im Makro definierten Funktion wobei die Daten aus `fp13.root` verwendet werden:
`canvas3('fp13.root')` Welche Histogramme von den einzelnen Funktionen (hier: `canvas3()`) aufgerufen werden, können Sie in Tabelle 6 in Anhang A ablesen.
- Auch hier finden Sie die Ihnen schon bekannten Histogramme `h1` und `h2` wieder.
- Schauen Sie sich auch die anderen Funktionen aus dem Makro `Weiteres.C` an.

Am Ende dieser Anleitung finden Sie einen Überblick über alle vorhandenen Histogramme und deren Verteilung auf die verschiedenen Makros. Schauen Sie sich diese genau an und führen Sie Funktionen mit ihnen aus. Achten Sie insbesondere auf Nachpulsraten und die Fluktuationen in den Zeitverteilungen der einzelnen Zähler. Welche Datensätze sollten für die Lebensdauerbestimmung in welchem Zeitfenster genutzt werden?

3.3.1 Bestimmung der Lebensdauer

- Verschaffen Sie sich nun in einem Texteditor einen Überblick über das Makro `Lebensdauer.C`.
 - Wo finden sich die schon bekannten Befehle wieder?
 - Was geschieht in den anderen Abschnitten?
 - Welche Funktion wird an die Daten angefügt?

Ein Histogramm könnte z.B. wie in Abbildung 17 aussehen. Bei beiden Abbildungen handelt es sich um das gleiche Histogramm, wobei das rechte mit logarithmischer y-Achse um Fehlerbalken dargestellt ist.

- Laden Sie das Makro `.L Lebensdauer.C` zur Bestimmung der Lebensdauer und führen Sie danach die darin enthaltene Funktion durch

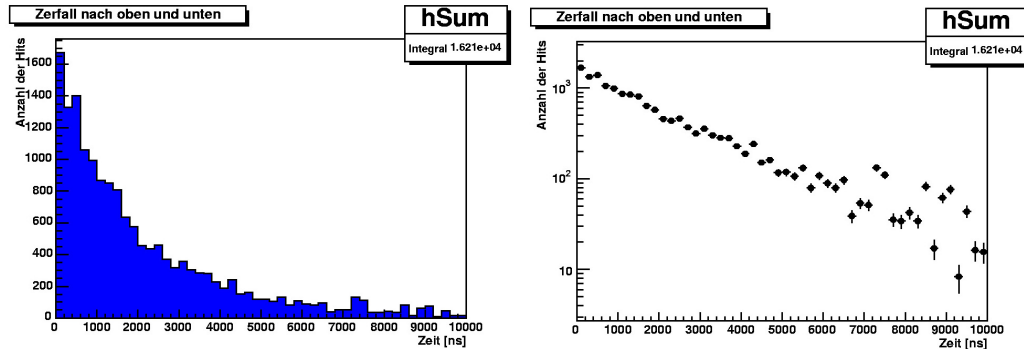


Abbildung 17: Histogramm aller Zerfälle, Anzahl der Ereignisse gegen Lebensdauer aufgetragen

`Lebensdauer(startwert, endwert, ‘‘../fp13.root’’)` aus. *startwert* und *endwert* definieren hierbei das Zeitfenster in dem der Fit durchgeführt wird. Sie werden in *ns* angegeben. Schauen Sie sich zunächst nur die ersten drei sich öffnenden Fenster an. (Die Fenster können sich gegenseitig verdecken.)

- Nehmen Sie sich an dieser Stelle ausreichend Zeit, alle Histogramme zu betrachten. Fragen dazu:
 - Wo finden Sie in den Zerfällen in den einzelnen Lagen Ähnlichkeiten?
 - Gibt es charakteristische, besonders von den anderen abweichende Histogramme?
 - Wie wirkt sich der Einfluss der Nachpulse auf die Spektren aus? Welche Konsequenzen hat das für Ihr weiteres Vorgehen?
 - Welche Muster müssen bei den Zerfällen nach oben bzw. bei den Zerfällen nach unten vorliegen, damit Nachpulse in die Spektren einfließen? Wie wirkt sich die Effizienz der Detektoren darauf aus?
- Es ist i.A. erforderlich, die Nachpulse aus den Zerfallsspektren zu eliminieren. Dies geschieht, indem das gemessene Nachpulspektrum (Histogramme x1-x7) von den gemessenen Zerfallsspektren (Histogramme a1-a7) subtrahiert wird. Hierbei muss jedoch berücksichtigt

werden, das die Anzahl der Ereignisse die zur Berechnung der Nachpulsspektrum verwendet werden nicht mit der Anzahl der Ereignisse im Zerfallsspektrum übereinstimmt. Bevor das Nachpulshistogramm vom Zerfallshistogramm abgezogen wird wird es daher mit einem Skalierungsfaktor multipliziert. Dieser ist durch das Verhältnis der Anzahl der Ereignisse die der Berechnung der Nachpulse zugrundeliegt zu der Anzahl der Ereignisse im Zerfallsspektrum gegeben. Zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren ist Tabelle 4 hilfreich. Alle dafür nötigen Informationen erhalten Sie aus Histogramm h8.

Frage dazu:

- Warum ist es nötig bei den Zerfällen nach unten die Anzahl der Startmuster mit der Ineffizienz des jeweiligen Szintillators zu multiplizieren?

Tabelle 4: Skalierungsfaktor für den Abzug der Nachpulshistogramme

Lage (Detektor)	Anzahl der Startmuster für Zerfälle nach oben	Anzahl der Startmuster für Nachpulse	Skalierungs- faktor
a (1)			
b (2)			
c (3)			
d (4)			
e (5)			
f (6)			
Lage (Detektor)	Anzahl der Startm. für Zerfälle n. unten · Ineff.	Anzahl der Startmuster für Nachpulse	Skalierungs- faktor
a (2)			
b (3)			
c (4)			
d (5)			
e (6)			

In die erste Spalte eingetragen werden die Startmuster für Zerfälle nach

oben. Für Zerfälle nach oben in Lage c sind das beispielsweise alle Durchgänge bis zu Detektor 3 aus Histogramm h8.

In die zweite Spalte eingetragen werden alle möglichen Startmuster für Nachpulse. Handelt es sich beispielsweise bei einem verzögerten Hit in Detektor 3 um einen Nachpuls, sind mögliche Startmuster hierfür Durchgänge bis zu Detektor 4, 5, 6 oder 7, die ebenfalls aus h8 zu bekommen sind. Aus diesen wird die Summe gebildet.

Der Skalierungsfaktor ist jeweils der Quotient aus dem Eintrag in die erste und dem in die zweite Spalte.

- Ziehen Sie nun durch Modifikation des Makros `Lebensdauer.C` die Nachpulse mit dem von Ihnen bestimmten Skalierungsfaktor von den Spektren ab und prüfen Sie, wie sich das Erscheinungsbild der Spektren ändert. Tragen Sie sowohl das skalierte als auch das nicht skalierte Histogramm auf, um die Bereiche und Intensitäten der Nachpulsanteile zu beurteilen. Entscheiden Sie dadurch, welche Spektren Sie in das später zu fittende Histogramm mit hineinnehmen und variieren das Makro dementsprechend.
- Im Folgenden wird mit der Funktion

$$N(t) = N(\mu)e^{-t/\tau_0} + N_{BG}$$

gefittet. Setzen Sie die Startwerte der Parameter auf Ihnen sinnvoll erscheinende Zahlen. Verändern Sie auch den Start- und den Endwert Ihres Fits.

Fragen dazu:

- Was erscheint hier als sinnvoll?
- Ab welcher Zeit trägt der Einfang negativer Myonen nicht mehr signifikant zum Spektrum bei?
- Was sagt ihnen das für Ihren Fit?

3.3.2 Verfeinerte Methode zur Lebensdauerbestimmung

Die oben beschriebene Methode zur Bestimmung der Myon-Lebensdauer beinhaltet noch einige systematische Probleme. Sie rühren daher, dass die gemessenen Zerfallsspektren neben dem Zerfall freier Myonen auch Zerfälle

von Myonen beinhalten, die von Atomen eingefangen wurden. Um dies zu berücksichtigen wird die erweiterte Fitfunktion aus Gleichung 2 verwendet, wobei es aber sinnvoll ist sie in der Form

$$N(t) = N_{\mu^+} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left(f e^{-\frac{t}{\tau_c}} + 1 \right) + N_{BG} \quad (3)$$

zu verwenden, wobei f das Verhältnis $\frac{N_{\mu^+}}{N_{\mu^-}}$ ist.

Der Fit dieser Funktion an das gemessene Zerfallsspektren wird mit Hilfe des Makros `Einfangzeiten.C` durchgeführt. Wenn Sie sich dieses Makro ansehen wird Ihnen auffallen, dass es mit dem Makro `Lebensdauer.C` praktisch identisch ist, ausser dass die Funktion `fitFunc` entsprechend obiger Fitfunktion definiert wurde. Somit unterscheiden sich auch die Parameter die beim fitten der Zerfallsspektren verwendet werden. Tragen Sie nun die in Abschnitt 3.3.1 bestimmten Skalierungsfaktoren in dieses Makro ein und laden Sie es mit dem Befehl `.L Einfangzeiten.C`. Nun können sie das Makro durch `Einfangzeiten(startwert, endwert, ‘../fp13.root’)`

Betrachten Sie die Ergebnisse des Fits und vergleichen Sie insbesondere die Ergebnisse für die Zerfälle nach unten und die Zerfälle nach oben. Überlegen und diskutieren Sie, welche der Parameter für beide Zerfallsspektren übereinstimmen sollten und bei welchen Unterschiede möglich sind. Entspricht das Ergebnis ihrer Erwartung.

Es kann vorkommen, dass die Ergebnisse des vorher beschriebenen Fit unsinnig erscheinende Ergebnisse liefert. Dies erkennt man z.B. dass der Fit sehr grosse Fehler oder unphysikalische Parameter (z.B. negative Anzahl der Myonen) liefert. Ursache hierfür sind Korrelationen zwischen den verschiedenen zu fittenden Parameter die eine sinnvolle gleichzeitige Messung aller Parameter unmöglich macht. Weiterhin ist die experimentelle Anordnung zur Bestimmung z.B. des Parameters f , also des Verhältnis von positiven zu negativen Myonen nicht geeignet, da die Ladung der Myonen nicht direkt gemessen wird. Eine solche Messung wurde aber z.B. in [16] durchgeführt. In dem in diesem Experiment relevanten Energiebereich wurde das Verhältnis zu $f=1.3 \pm 0.2$ bestimmt. Man kann nun bei der Durchführung des Fits das Verhältnis auf den gemessenen Wert festlegen. Dies führt in der Regel dazu, dass die beschriebene Fitmethode sinnvolle Ergebnisse liefert.

3.3.3 Bestimmung des systematischen Fehlers der Lebensdauer

Neben den rein statistischen Fehler, der von ROOT als Fehler auf die Fitparameter angegeben wird ist die Messung der Lebensdauer der Myonen auch

systematischen Fehlern unterworfen. Zwei systematische Fehlerquellen sollen quantitativ untersucht werden:

- **Ungenauigkeit der Nachpulskorrektur**
Die Messung der Nachpulsspektren unterliegt statistischen Schwankungen. Dies führt möglicherweise zu einer falschen Korrektur. Um dies zu berücksichtigen variieren Sie die Korrekturfaktoren für die Nachpulskorrektur (welchen Bereich halten Sie für sinnvoll?). Wie ändern sich die Fitergebnisse?
- **Einfluss des Verhältnisses f**
Im letzten Schritt wurde das Verhältnis f auf den gemessenen Wert fixiert. Dieser Wert besitzt aber selber eine experimentelle Unsicherheit. Wie ändert sich das Messergebnis für die Lebensdauer des Myons wenn man das Verhältnis f um $\pm 1\sigma$ bzw. $\pm 2\sigma$ ändert.

Geben Sie den systematischen Fehler für die Lebensdauer der Myonen aufgrund dieser Untersuchungen an.

3.3.4 Messung der Myonenpolarisation

Durch Anlegen eines Magnetfeldes lässt sich die Polarisation der Myonen messen. Der Magnet besteht aus zwei rechteckigen Spulen mit je 41 Windungen entlang der Längsseite des Detektors (vgl. Abbildung 18). Er kann über ein Netzgerät mit Strömen von bis zu 25 A betrieben werden. Dabei gilt für das magnetische Feld

$$B = I \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \frac{T}{A}.$$

Stellen Sie die Stromstärke auf 20 A. Wie groß ist dann die Feldstärke? Führen Sie diese Messung mit möglichst guter Statistik durch (bis Montag der darauffolgenden Woche).

Frage dazu:

- Warum sind die Myonen polarisiert?

Um die Polarisation zu bestimmen vergleicht man nun die Messung mit und ohne Magnetfeld. Gemäß Abschnitt 1.7 und 2 ergibt sich für einen feststehenden Szintillator aufgrund der Larmorfrequenz ω_{Larmor} eine zeitabhängige Zählrate von

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

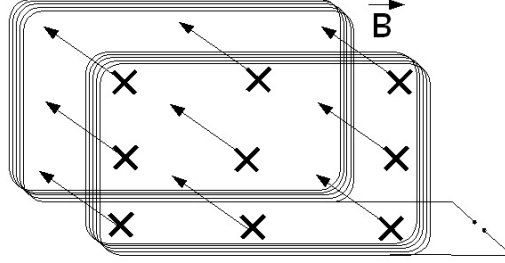


Abbildung 18: Anordnung der beiden Spulen um den Detektor zur Erzeugung eines homogenen Magnetfelds in diesem

falls ein Magnetfeld vorhanden ist. Für die Messung ohne Magnetfeld ist die Zählrate durch

$$Z^{ohne}(t) = Z_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (1 + P \cdot A \cdot \cos(\varphi)),$$

gegeben. Hieraus ergibt sich in guter Näherung die Asymmetriefunktion

$$\frac{Z^{mit}(t) - Z^{ohne}(t)}{Z^{mit}(t) + Z^{ohne}(t)} \approx \frac{P \cdot A}{2} \cdot \cos(\omega_{Larmor}t + \varphi) + c$$

Machen Sie sich klar, dass Sie durch diese Darstellungsweise eine oszillierende Funktion bekommen, bei der der exponentielle Zerfall eliminiert ist.

Diese Funktion kann mit Hilfe des Makros `Asymmetrie2.C` an die Messdaten angefitet werden. Vorher müssen jedoch noch zwei Korrekturen angebracht werden.

1. Zunächst müssen wieder die Spektren auf Ineffizienzen der Szintillatoren und Nachpulse korrigiert werden. Hierzu tragen Sie die im vorherigen Abschnitt bestimmten Korrekturfaktoren an der entsprechenden Stelle in `Asymmetrie2.C` für die Histogramme aus der Messung ohne Magnetfeld ein. Für die Messung mit Magnetfeld bestimmen sie die Faktoren neu und tragen sie wieder an der entsprechenden Stelle in `Asymmetrie2.C` ein.
2. Nun muss noch berücksichtigt werden, dass die Laufzeit der Messungen mit und ohne Magnetfeld unterschiedlich sind und daher die Anzahl der Einträge in den Histogrammen sich unterscheiden. Daher wird bei der Subtraktion bzw. Addition der Spektren das Histogramm $Z^{ohne}(t)$ mit

dem Faktor $s = Z_0^{mit}/Z_0^{ohne}$ skaliert.

Um diese Faktoren zu erhalten gehen sie wie folgt vor: Laden Sie das Makro mit dem Befehl `.L Asymmetrie2.C` und lassen es mit dem Befehl `Asymmetrie2(startwert, endwert, ‘‘../fp13.root’’)` laufen¹. Suchen sie das Canvas mit den Zerfallsspektren mit und ohne Magnetfeld. Die Skalierungsfaktoren ergeben sich aus den dort angegebenen Integralen der jeweiligen Histogramme. Beachten Sie, dass die Asymmetriefunktionen für die Zerfälle nach oben und die Zerfälle nach unten getrennt bestimmt werden und daher auch der Skalierungsfaktor für beide Asymmetriefunktionen bestimmt werden muss.

Wenn Sie nun das Makro `Asymmetrie2.C` ein weiteres mal laufen lassen, so wird es das Histogramm

$$\frac{Z^{mit}(t) - Z^{ohne}(t) \cdot s}{Z^{mit}(t) + Z^{ohne}(t) \cdot s}$$

berechnen und die Funktion

$$\frac{Z^{mit}(t) - Z^{ohne}(t) \cdot s}{Z^{mit}(t) + Z^{ohne}(t) \cdot s} = \frac{P \cdot A}{2} \cdot \cos(\omega_{Larmor}t + \varphi) + c$$

anfitten.

Ziehen Sie diese Schritte im Makro `Asymmetrie2.C` nach!

Schauen Sie sich nun die Daten der einzelnen Zähler an. Unterscheiden Sie sich von denen ohne Magnetfeld? Wählen Sie wieder die besten Datensätze aus.

Vergleichen sie wieder die Ergebnisse für die Zerfälle nach unten und nach oben. Welcher Datensatz scheint ihnen weniger systematische Probleme zu haben?

Variieren Sie auch hierbei die Startwerte der Parameter , bis die Funktion gut mit den Daten übereinstimmt. Testen Sie, wie stark die Parameter vom Fitbereich abhängen.

Fragen dazu:

- Welche Werte erwarten Sie für die Parameter? (Hinweis zu φ : Überlegen Sie sich, mit welcher Polarisierung die Myonen entstehen und an der Erdoberfläche ankommen.)

¹Beachten Sie hierbei, dass die Namen der `.root`-Dateien aus ihren Messungen mit denen übereinstimmen, die im Makro `Asymmetrie2.C` stehen.

- Stimmen die erwarteten Werte mit den vom Programm errechneten Werten überein?
- Berechnen Sie das magnetische Moment des Myons aus der gemessenen Lamorfrequenz. Warum zeigt dieses Ergebnis die Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung?
- Diskutieren Sie die Ergebnisse kritisch. Überlegen Sie insbesondere, ob Ihre Messung signifikant die Polarisation der kosmischen Myonen zeigt. Woran kann man dies quantitativ erkennen?

Untersuchung der Polarisation mit einem erweiterten Datensatz

Die Messung der Myonpolarisation ist experimentell schwierig. In diesem Praktikumsversuch ist ausserdem die Messzeit begrenzt, so dass die Messgenauigkeit statistisch begrenzt ist. Um die Analyse der Myonenpolarisation mit einer höheren Statistik durchzuführen können die eigenen Messdaten mit denen anderer Gruppen kombiniert werden. Hierzu muss man sich die Dateien `ResultsAll.root` and `AccumulatedAsymmetrie.C` von <http://www.physi.uni-heidelberg.de/~bachmann/fp13/> herunterladen und das Makro `AccumulatedAsymmetrie.C` in ROOT ausführen. Gegebenenfalls müssen die im Makro angegebenen Dateinamen angepasst werden. Auch hier sollte man sich überlegen, wie man den Fitbereich optimal wählt. Der diesen Messungen zugrundeliegende Datensatz ist um etwa einen Faktor 8 grösser, als der Datensatz den man während einer Versuchswoche gewinnt.

4 Fitten statistischer Daten

In der Hochenergiephysik, aber auch in dem hier durchzuführenden Experiment, werden physikalische Größen bestimmt, indem sehr viele Daten genommen und diese in Histogramme gefüllt werden. An diese Histogramme werden im Anschluss Funktionen gefittet. Hierzu gibt es im Allgemeinen zwei Möglichkeiten: das Minimum- χ^2 und das Maximum-Likelihood Verfahren.

- *Minimum- χ^2* : Bei dem Minimum- χ^2 Verfahren versucht der Fitalgorithmus die als

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i(mess) - y_i(fit))^2}{(\Delta y_i)^2}$$

definierte Größe zu minimieren. Für jeden einzelnen Eintrag in das Histogramm wird also die quadrierte Abweichung zwischen Eintrag und Wert des Fitparameters gebildet und diese durch das Quadrat des Fehlers auf dem jeweiligen Eintrag dividiert. Dies wird für alle Einträge und für alle Parameter gemacht, danach wird die erhaltene Funktion minimiert. Wenn die Fitfunktion die Daten gut beschreibt, erwartet man, dass bei vielen Kanälen die Abweichung der Daten von der Fitfunktion im Mittel so groß ist wie der Fehler Δy der einzelnen Einträge. Man erwartet, dass $\chi^2 = \text{NDF}$, wobei NDF die Zahl der Freiheitsgrade beim Fit ist². Das Programmpaket ROOT nimmt an, dass der Fehler Δy gleich $\sqrt{y_{mess}}$ ist. Dies ist aber nur für genügend hohe Zählraten der statistisch korrekte Fehler. Daher ist das χ^2 -Kriterium bei kleinen Zählraten kein gutes Kriterium mehr. In solchen Fällen ist die Maximum-Likelihood Methode wesentlich sinnvoller.

- *Maximum-Likelihood*: Bei der Bestimmung der Parameter der Fitfunktion mit der Maximum-Likelihood Methode wird der freie Parameter a aus dem Vergleich von N unabhängigen Messwerten x_i mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x_i|a)$ bestimmt. Dies geschieht durch Maximieren des Produkts der Einzelwahrscheinlichkeiten, also der Likelihood-Funktion:

²Die Zahl der Freiheitsgrade ist gleich der Zahl der zu fittenden Punkte minus die Anzahl der zu fittenden Parameter

$$L(x_1, \dots, x_N | a) = \prod_N^{i=1} P(x_i | a)$$

Nicht immer konvergiert ein Fit, aber auch wenn er konvergiert, sollten Sie noch einige Kriterien anwenden, um seine Güte abzuschätzen:

1. Beurteilen Sie Ihren Fit mit dem Auge. Sind die Daten gleichmäßig um die angepasste Fitfunktion verteilt oder gibt es systematische Abweichungen?
2. Wenn Sie Startwert, Endwert und Binbreite (um Bins mit keiner oder wenig Statistik zu verhindern) Ihres Fits geeignet gewählt haben, sollte $\chi^2 \approx N$ bzw. $\chi^2/N \approx 1$ sein.
3. Beachten Sie auch die Angaben, die die Fit-Routine Ihnen gibt. Wenn bei einem Parameter der Hinweis `**at limit**` erscheint, bedeutet dies, dass der Parameter an den Rand seines erlaubten Bereichs gelaufen ist.

5 Hinweise zum Versuchsprotokoll

Beim Erstellen des Protokolls sollte der Schwerpunkt auf einer kritische Beurteilung und Diskussion der Messergebnisse liegen. Es sollte klar werden welche Probleme bei der beschriebenen Messung und Datenanalyse auftreten (können), welche Maßnahmen man unternimmt um sie zu umgehen und ob Sie das Messergebnis systematisch beeinflussen. Das Ziel des Versuches, die verwendeten Methoden und die Grundlagen sollen kurz gefasst werden. Allerdings müssen natürlich die zur Datenanalyse verwendeten Gleichungen und Größen erklärt werden.

Im einzelnen sollte das Versuchsprotokoll folgende Punkte beinhalten:

- Die Effizienz der einzelnen Szintillatoren soll ermittelt werden. Bitte stellen Sie Ihre Werte (eingestellte Schwelle, Einzelzählraten und Koinzidenzzählraten und Effizienz) für alle Zähler in einer Tabelle zusammen.
- Geben Sie die von den einzelnen Szintillatoren nach Einstellung der Diskriminatoren detektierten Raten an. Hieraus kann die Rate der Zufallskoinzidenzen bei bekannter Länge der Normpulse mit Hilfe der obigen Formel abgeschätzt werden.
- Beschreiben Sie die wichtigen Schritte der Datenanalyse.
- Bestimmen Sie die Lebensdauer der Myonen. Diskutieren Sie die Ergebnisse kritisch. Wodurch kann die Messung systematisch verfälscht werden.
- Bestimmen Sie den systematischen Fehler der Lebensdauer nach der in Abschnitt ?? beschriebenen Methode.
- Berechnen Sie die Anzahl der erwarteten Myonenzerfälle im Zeitbereich $> 10\mu\text{s}$. Fragen dazu:
 - Können Sie erklären, warum für Zeiten über $10\mu\text{s}$ im wesentlichen Untergrund beobachtet wird?
 - Sind diese $10\mu\text{s}$ ein besonders ausgezeichneter Zeitpunkt?
- Bestimmen Sie aus Ihren Messwerten die Fermi-Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung G_F . Verwenden Sie dabei, dass das Myon ein Lepton ist, was u.a. bedeutet, dass der magnetische g-Faktor

bis auf die in diesem Experiment vernachlässigbaren quantenelektrodynamischen (QED) Korrekturen mit dem des Elektrons identisch ist. Denken Sie dabei an den fundamentalen Zusammenhang zwischen dem magnetischen Moment und der Masse eines punktförmigen Teilchens.

- Das magnetische Moment des Myons soll aus seiner Spinpräzession ermittelt werden. Geben Sie die ursprüngliche Spin-Richtung im Bezug auf die Bewegungsrichtung der Myonen an.
- Ermitteln Sie die Polarisation kosmischer Myonen. Welche Schlüsse über den Entstehungsprozess kosmischer Myonen lassen sich daraus ableiten?

A Anhang - Histogrammüberblick

Tabelle 5: Histogramme, die in `fp13Analysis.cc` gefüllt werden

h1:	Hits in den Lagen insgesamt
h2:	Detektor der Nachpulse (allgemein)
h3:	Lage der Zerfaelle nach oben
h4:	Lage der Zerfaelle nach unten
h5:	Detektor der Nachpulse2 (speziell)
h6:	Anzahl aller Slices
h7:	Anzahl der genommenen Slices
h8:	Startpattern
h21 (z1...z7):	Zeit des ersten Hits fuer Lage %i (z%i)
h22 (x1...x7):	Nachpulse fuer Detektor %i (x%i) (allgemein)
h23 (a1...a7):	Zerfall nach oben in Lage %i (a%i)
h24 (b1...b7):	Zerfall nach unten in Lage %i (b%i)
h25 (w1...w7):	Nachpulse2 fuer Detektor %i (w%i) (speziell)

Tabelle 6: Makros zur Auswertung

Lebensdauer.C mit Lebensdauer()
⇒ Spektren aller Lagen Zerfälle nach oben und unten skaliert
⇒ Nachpulsspektren aller Lagen
⇒ alle Zerfälle nach oben und alle Zerfälle nach unten
⇒ Lebensdauerfit
Einfangzeiten.C mit Einfangzeiten()
⇒ Spektren aller Lagen Zerfälle nach oben und unten skaliert
⇒ Nachpulsspektren aller Lagen
⇒ alle Zerfälle nach oben und alle Zerfälle nach unten
⇒ Einfangzeitenfit
Asymmetrie.C mit Asymmetrie()
⇒ Spektren aller Lagen Zerfälle nach oben und unten skaliert
⇒ Nachpulsspektren aller Lagen
⇒ alle Zerfälle nach oben und alle Zerfälle nach unten
⇒ Asymmetriefit
Weiteres.C
⇒ Canvas1() Zeit des ersten Hits für alle Detektoren (z0-z7)
⇒ Canvas2() Nachpulse pro Detektor (x0-x7)
⇒ Canvas3() Hits in Lagen gesamt, Anzahl aller Slices, Detektor der Nachpulse, Startmuster (h1, h6, h2, h8)
⇒ Canvas4() Zerfall nach oben pro Lage (a1-a6)
⇒ Canvas5() Zerfall nach unten pro Lage (b1-b6)
⇒ Canvas6() Lage der Zerfälle nach oben und Lage der Zerfälle nach unten (h3, h4)
⇒ Canvas7() Nachpulse2 pro Detektor (w0-w7)
⇒ Canvas8() Zeit des zweiten Hits für alle Lagen (o0-o7)

Literatur

- [1] Case, T.: Precision Measurement of Muon Capture und Muon Lifetime, Berkeley 2004: <http://www.npl.uiuc.edu/exp/mucapture/Abstract.doc>
- [2] DESYs KworkQuark: <http://kworkquark.net>
- [3] Grehn, J. / Bolz, J.: Metzler Physik, Hannover 1998: Schroedel
- [4] Hacker, G.: Grundlagen der Teilchenphysik, Erlangen 2003: http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/grundl_d_tph/titelseite.html
- [5] Jonker, M. et al.: Measurement of the Polarisation of Positive Muons Produced in High-Energy Antineutrino Interactions, in: Particles and Fields, Springer 1983, 211-217
- [6] Leo, W.R.: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Berlin Heidelberg New York 1994: Springer
- [7] Maier, B.: Versuch im Fortgeschrittenenpraktikum - Polarisierte kosmische Myonen, Staatsexamensarbeit, Heidelberg 1999
- [8] Martyn, H.U.: Test of QED by High Energy Electron-Positron Collision, in: Kinoshita, T.: Quantum Elektrodynamics, Singapore New Jersey London Hong Kong 1990: World Scientific, 92-157
- [9] Particle Data Group: Particle Physics Booklet, July 2002
- [10] Paul-Scherrer Institute: Scientific Report 2003, „Particles and Matter“, Villingen 2003
- [11] Perkins, D.: Hochenergiephysik, Bonn 1991: Addison-Wesley
- [12] Povh, B. / Rith, K. / Scholz, C. / Zetsche, F.: Teilchen und Kerne, Berlin Heidelberg New York 2004: Springer
- [13] Rausch, A.: Benutzerhandbuch DL605 Multihit-TDC, Heidelberg 2004
- [14] Turner, R. / Ankenbrandt, C.M. / Larsen, C.: Physical Review D, Vol. 4, 1971

- [15] Walter, M. / Gerlich, C.: F13 - Lebensdauer von Myonen, Versuchsanleitung, Heidelberg 2002
- [16] J.Kremer et. al.: Measurements of Ground-Level Muons at Two Geomagnetic Location; Physical Review Letters, Volume 83, Number 21, 4241-4244