

Pestalozzi-Gymnasium Dresden
Pestalozziplatz 22
01127 Dresden

Schuljahr 2005/2006

BELL
aus dem Fach:

Physik

Thema:

Aufbau eines Praktikumsversuches zur Bestimmung
der durchschnittlichen Lebensdauer von Myonen

Verfasser: Richard Pausch
Kurs: 12/3
Betr. Fachl.: Herr Engelmann

Abgabedatum: 13.01.2006

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
I. Einleitung	4
II. Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen	5
A. Myonen	5
1. Elementarteilchen	5
2. Kosmische Strahlung	6
3. Entdeckung der Myonen	7
4. Entstehung von Myonen	7
5. Mittlere Lebensdauer	9
6. Relativistische Effekte	11
B. Detektorphysik	12
1. Begriffserklärung	12
2. Szintillatoren	13
3. Photomultiplier	14
4. Signalform	16
5. Elektronik	16
6. Allgemeiner Aufbau eines Szintillationsdetektors	18
C. Prinzip der Myonen-Lebensdauerermessung	19
D. Aufbau und Inbetriebnahme der Messanordnung	21
1. Aufbau des Detektors	21
2. Untersuchung der Lichtundurchlässigkeit	22
3. Fokussierung der Photomultiplier	23
4. Einstellen der Diskriminatorschwelle	23
5. Abgleich der Photomultiplierspannung durch Plateaumessungen	24
6. Abgleich der Photomultiplierspannung mit einer Leuchtdiode	27
E. Bestimmung der mittleren Lebensdauer	28
1. Grundlagen	28
2. Aufbau der Messanordnung	28
3. Zeitspektrum	30
4. Fit-Rechnung	31
5. Ergebnisse	33
6. Besonderheiten bei Myonen und Anti-Myonen	33
F. Einsatz im Praktikum	34
III. Schlussbetrachtung	36
IV. Anhang	37

A. Literaturverzeichnis.....	37
B. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	39
V. Eidesstattliche Erklärung	40

Vorwort

Mein Interesse lag schon immer bei den Naturwissenschaften. Ein Praktikum, das ich im 9. Schuljahr an der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität (TU) Dresden absolvierte, war für mich eine neue Erfahrung. Ich durfte selbständig Experimente durchführen und diese auswerten. Für meine Besondere Lernleistung wollte ich ein Thema bearbeiten, welches sich mit Physik beschäftigt. So lag es nahe, mich für mein BELL-Thema wieder an die TU Dresden zu wenden. Dazu erkundigte ich mich beim Institut für Kern- und Teilchenphysik der Universität, ob ich Messungen zur kosmischen Strahlung durchführen könnte. Dort war man gerade dabei, neue Praktikumsversuche zu konzipieren, die sich mit der mittleren Lebensdauer von Myonen beschäftigen, und schlug mir vor, dabei mitzuwirken. So kam es, dass ich am Aufbau eines Praktikumsversuchs teilnahm.

Das Thema war sehr interessant, und ich lernte viel über kosmische Teilchenphysik, Teilchendetektoren, Messmethoden und über das Physikstudium. Lehrreich war auch meine Teilnahme an dem Fortgeschrittenenpraktikum, für den die hier beschriebene Messapparatur entwickelt wurde.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr. Eckstein, Herrn Professor Schubert und Herrn Fatterschneider herzlich für die Unterstützung, die umfangreichen Erklärungen und die vielen interessanten Gespräche bedanken. Ohne ihre Hilfe hätte ich diese Arbeit nicht verfassen können.

I. Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist die Zusammenfassung einer Besonderen Lernleistung (BELL), die am Institut für Kern- und Teilchenphysik der Technischen Universität Dresden erbracht wurde. Sie leistete einen Beitrag zur Neuentwicklung und zum praktischen Aufbau des Versuchs „Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen“. Dieses Experiment sollte zur Ausbildung der Physikstudenten im Rahmen des Fortgeschrittenenpraktikums im fünften Semester eingesetzt werden.

Um das Thema zu bearbeiten, war es nötig, Grundwissen zur Kern- und Teilchenphysik zu erwerben und typische Arbeitsmethoden und Instrumente der experimentellen Kernphysik nicht nur kennen zu lernen, sondern auch praktisch anzuwenden. Besonderes Augenmerk galt dabei natürlich den Myonen, den Detektoren zum Nachweis ionisierender Strahlung, der Elektronik zur Verarbeitung der Detektorsignale sowie einigen Verfahren der Datenanalyse.

Auf der Grundlage des erworbenen Wissens wurden dann konkrete Arbeiten durchgeführt, die sehr unterschiedliche Anforderungen stellten: theoretische Abschätzungen, mechanische Konstruktionsarbeiten mit einem CAD-Programm, praktische Aufbauarbeiten, kleinere Experimente von einfachen Funktionstests bis hin zu schon recht umfangreichen Messreihen mit anschließender Datenanalyse, die zur Optimierung des Versuchsaufbaus nötig waren.

Die Erprobung der gesamten Messanordnung mit einer wirklichen Bestimmung der Myonenlebensdauer gehörte zu den abschließenden Aufgaben, die für diese BELL bearbeitet wurden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit trugen dazu bei, dass der Versuch im Herbst 2005 in das Praktikumsprogramm der Fachrichtung Physik integriert werden konnte und seitdem für die Ausbildung der Studenten zur Verfügung steht.

II. Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

A. Myonen

1. Elementarteilchen

Unsere Welt besteht aus Atomen, den kleinsten, unteilbaren Teilchen, so glaubte man bis zum Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts. Diese Theorie wurde um 400 v. Chr. von den griechischen Philosophen Demokrit von Abdera und Leukipp von Milet entwickelt. Sie sahen die Atome als kleinste Bestandteile der Materie an. Zwischen den Atomen lag nach ihrer Theorie leerer Raum. Wenn sich mehrere Atome zusammenschlossen, entstanden neue Substanzen.

Jahn Dalton griff diese Idee Anfang des neunzehnten Jahrhunderts wieder auf. Auch seine Theorie besagte, dass Atome die kleinsten, unteilbaren Teilchen der Materie seien, aber er erklärte, dass verschiedene Atome auch unterschiedliche Massen hätten, dass man Atome nicht aus anderen Atomen erschaffen könne, dass Moleküle immer den gleichen Anteil an Atomen besäßen, und dass bei chemischen Reaktionen Atome umgelagert, aber nicht verändert würden.

Die Vorstellung der unteilbaren Atome geriet 1897 durch den Physiker Joseph John Thomson ins Wanken, als dieser entdeckte, dass Atome bei elektrischen Leitungsvorgängen Elektronen abgeben.

Diese Theorie wurde 1906 von Ernest Rutherford, Thomsons Schüler, erweitert, indem er nachwies, dass Atome aus einem positiv geladenen Kern und einer negativ geladenen Hülle bestehen. Die Atomhülle enthält die Elektronen. Der Kern enthält Protonen, massereiche, positiv geladene Teilchen.

1932 entdeckte der englische Physiker James Chadwick das Neutron, ein neutrales, schweres Teilchen, welches auch im Atomkern zu finden ist. So verfiel allmählich die Theorie der unteilbaren Atome.

Mit der Entwicklung der Blasenkammer durch Donald Glaser im Jahre 1960 wurde es möglich, Atombruchstücke in Teilchenbeschleunigern zu sehen. Das führte zur Entdeckung vieler neuer Teilchen. Diese unterteilte man später in Leptonen, Hadronen und Wechselwirkungsteilchen. 1964 entwickelte Murrey Gell-Mann die Theorie des Quarks, die besagt, dass Hadronen aus Quarks aufgebaut sind, Teilchen, die nicht alleine auftreten können. Beispielsweise besteht ein Proton aus einem Down- und zwei Up-Quarks. Seither unterteilt man die Elementarteilchen in drei Leptonen mit den drei dazugehörigen Neutrinos und in 6 Quarks. Weiterhin gibt es zu jedem dieser Teilchen noch ein Antiteilchen. Außerdem ordnet die-

se Theorie jeder der vier fundamentalen Kräfte ein bis zwei Wechselwirkungsteilchen zu. Zum Beispiel wird der elektromagnetischen Wechselwirkung das Photon zugeschrieben. All diese Teilchen werden heute als Elementarteilchen bezeichnet. Da man Quarks nie einzeln findet, bezeichnet man auch die Hadronen meist als Elementarteilchen, obwohl diese aus Quarks bestehen.

2. Kosmische Strahlung

Die Leitfähigkeit von staubfreier Luft war lange Zeit ungeklärt. Im Jahre 1901 äußerte der Brite Charles Thomson Rees Wilson die Vermutung, dass die Luftmoleküle durch hochenergetische, nicht terrestrische Strahlung ionisiert werden und die Luft so elektrisch leitfähig wird. Da er diese Strahlung mit Röntgenstrahlung verglich, wunderte ihn die Tatsache, dass sich diese „kosmische Strahlung“ nicht abschirmen ließ, und so verwarf er diese Theorie.

Bei Messungen auf dem Eiffelturm oder während Ballonflügen stellte man eine erhöhte Strahlenbelastung fest. Aber erst als Victor Franz Hess 1912 einen Ballonflug mit äußerst präzisen Ionisationskammern durchführte und durch seine Messungen eindeutig die kosmische Herkunft dieser Strahlung nachwies, war das Problem der Leitfähigkeit der Luft geklärt. Die Möglichkeiten der kosmischen Strahlung für die Wissenschaft wurden erst später erkannt, als klar wurde, dass es sich dabei um viele bisher unerforschte Teilchen handelte. Für die Entdeckung der kosmischen Strahlung erhielt Hess 1936 den Nobelpreis.

Heute weiß man, dass sich die kosmische Strahlung zu etwa 97% aus Nukleonmaterial, vor allem Protonen und Alphateilchen, zusammensetzt. Weitere 3% bestehen aus Elektronen. Diese Teilchen bezeichnet man als primäre kosmische Strahlung. Sie sind hochenergetisch und werden überwiegend von unserer Sonne ausgesendet. Es gibt aber auch Teilchen, die von anderen Sternen kommen. Hierbei findet man auch besonders energiereiche Teilchen, die vermutlich von Supernova-Explosionen stammen. Da die kosmische Strahlung meist elektrisch geladen ist, wird sie vom Erdmagnetfeld abgelenkt und erzeugt so die Polarlichter an Nord- und Südpol, wenn sie in die Atmosphäre eindringt.

Die meisten dieser Teilchen erreichen den Erdboden aber nicht ungebremst, sondern erzeugen auf Grund ihrer hohen Energie bei Zusammenstößen mit den Luftmolekülen so genannte Teilchenschauer. Dabei handelt es sich um die Reste zerplatzter Atomkerne oder anderer Reaktionsprodukte. Diese Schauer neuer Teilchen bezeichnet man als sekundäre kosmische Strahlung.

3. Entdeckung der Myonen

Im Jahre 1935 veröffentlichte der japanische Physiker Hideki Yukawa eine neue Theorie für Kernkräfte, die Theorie der starken Wechselwirkung. Dabei sagte er die Existenz eines schweren Teilchens mit 250-facher Elektronenmasse, eines Mesons, früher auch Mesotron oder Yukon genannt, voraus. Während dieser Zeit untersuchte man die kosmische Strahlung mit Hilfe von Nebelkammern und entdeckte, dass die sekundäre kosmische Strahlung (siehe Entstehung von Myonen) aus positiv und negativ geladenen Teilchen besteht. Wissenschaftler fanden heraus, dass es sich bei diesen Teilchen um Elektronen und Positronen handeln musste, aber es gab auch Beobachtungen, die nicht mit diesen beiden Teilchen erklärt werden konnten. Zum Beispiel waren einige negativ geladenen Teilchen sehr durchdringend und legten lange Strecken in den Nebelkammern zurück. Schließlich beschäftigten sich Carl David Anderson und Seth Neddermeyer vom California Institute of Technologies mit diesem Phänomen. Zuerst glaubten sie, dass diese Effekte auf bisher unbekannte, schwerere Elektronen zurückzuführen seien und entdeckten 1937 ein negativ geladenes Teilchen mit 207-facher Elektronenmasse und kurzer Lebensdauer in der kosmischen Strahlung. Sie nahmen an, dass dieses Teilchen zu der bisher unbekannt Gruppe der Mesotrone gehört, da ihre Masse zwischen dem Elektron und dem Proton lag. Yukawa erkannte in diesem Teilchen das von ihm vorausgesagte Meson wieder. Es stellte sich aber bald heraus, dass es sich nicht um Mesonen handelte; diese wurden erst 1947 von Cecil Powell entdeckt, der dafür den Nobelpreis bekam.

Das von Anderson und Neddermeyer entdeckte Teilchen, welches man heute als Myon (μ) bezeichnet, gibt der Wissenschaft bis heute Rätsel auf. Am deutlichsten wird das an dem Ausspruch des Physikers Isodore Rabi, der einmal fragte ‚Who ordered that?’¹ – „Wer hat das bestellt?“ – und damit verdeutlichte, wie unerwartet das Myon für die Physik war.

4. Entstehung von Myonen

Die Myonen, die im Praktikum untersucht werden sollen, stammen aus der sekundären kosmischen Strahlung, werden also durch ein natürliches Phänomen

¹ University of Michigan, Measurement of Muon lifetime, Seite 1
http://phys-advlab.physics.lsa.umich.edu/Phys441%5F442/Muon%20Lifetime/muon_lifetime.pdf

erzeugt. Es gibt auch die Möglichkeit, Myonen mit Hilfe spezieller Quellen zu erzeugen; dies spielt aber bei diesem Praktikumsversuch keine Rolle.

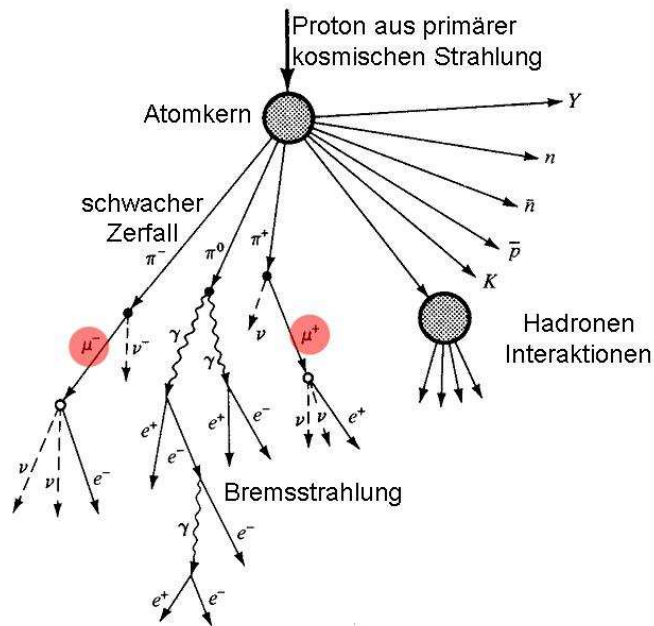


Abbildung 1 Kosmischer Teilchenschauer ²

Die primäre kosmische Strahlung kann auf Atomkerne der Luft treffen und dabei Teilchenschauer erzeugen. Trifft ein Proton oder ein Kern aus der Primärstrahlung einen Atomkern in der Atmosphäre, meist handelt es sich dabei um Sauerstoff- oder Stickstoffkerne, dann treten Teilchen- und Kernreaktionen auf. Dabei werden unter anderem Elektronen, Protonen und Neutronen sowie deren Antiteilchen, Kaonen, Atomkerne und verschiedenste Pionen freigesetzt. Diese Reaktionsprodukte und die aus ihnen resultierenden Teilchen nennt man, wie schon gesagt, sekundäre kosmische Strahlung, da sie erst in der Erdatmosphäre entsteht.

Pionen sind nicht stabil, sie besitzen eine sehr kurze Lebensdauer. Die Halbwertszeit beträgt nur $2,6 \cdot 10^{-8}$ Sekunden. Ein neutrales Pion zerfällt in zwei Gammaquanten. War es positiv geladen, zerfällt es auf Grund der schwachen Wechselwirkung in ein positiv geladenes Anti-Myon und ein Myonenneutrino. Ein negativ geladenes Pion dagegen zerfällt auf Grund der gleichen Wechselwirkung in ein negativ geladenes Myon und ein Anti-Myonenneutrino:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}$$

² nach [8]

In dieser Zerfallskette entstehen Myonen. Sie bewegen sich nach der „Geburt“ annähernd mit Lichtgeschwindigkeit. Dabei fliegt ein Teil der Myonen in Richtung Erdboden, wo man sie für den Praktikumsversuch „verwenden“ kann.

Myonen besitzen selbst eine recht kurze Lebensdauer von nur $2,2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden und zerfallen schließlich. Genau dieser Effekt soll mit diesem Praktikumsexperiment untersucht werden.

5. Mittlere Lebensdauer

Alle instabilen Teilchen besitzen eine mittlere Lebensdauer. Besser bekannt ist der Begriff der Halbwertszeit. Dieser wird vor allem zur Beschreibung radioaktiver Zerfälle verwendet. Die Halbwertszeit gibt an, wie lange es dauert, bis die Hälfte einer Menge instabiler Teilchen zerfallen ist; die mittlere Lebensdauer dagegen gibt an, wie lange ein instabiles Teilchen durchschnittlich existiert:

$$T_{1/2} = \frac{t}{\log_{\frac{1}{2}} \frac{N}{N_0}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$\tau = \int_0^{\infty} p(t) \cdot t \, dt = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} t \, dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$T_{1/2} = \tau \ln 2$$

Hierbei bedeutet:

$T_{1/2}$ Halbwertszeit

τ mittlere Lebensdauer

λ Zerfallskonstante

N_0 Zahl der ursprünglich vorhandenen Teilchen

N Zahl der nach Ablauf der Zeit t noch vorhandenen Teilchen

Die Funktion $p(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen gerade die Lebensdauer t besitzt. Für radioaktive Zerfälle ist $p(t)$ eine Exponentialfunktion (siehe Abbildung 2):

$$p(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda}$$

Wahrscheinlichkeitsverteilung

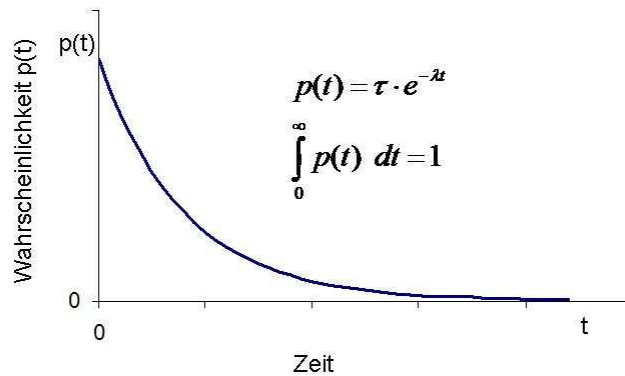
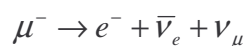
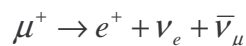


Abbildung 2 Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lebensdauer beim radioaktiven Zerfall

Es gibt drei Arten von (radioaktiven) Zerfällen. Beim Alphazerfall wird ein Heliumkern abgegeben, beim Betazerfall werden Elektronen ausgestoßen, und beim Gammazerfall wird hochenergetische, elektromagnetische Strahlung, die so genannte Gammastrahlung, frei. Der Myonenzerfall ist eine Sonderform des Betazerfalls.

Betazerfälle treten in der Natur oft auf. Zum Beispiel wird bei der Umwandlung von Caesium-137 zu Barium-137 Betastrahlung abgegeben. Auch wenn ein Neutron zu einem Proton zerfällt, werden Elektronen und Anti-Elektron-Neutrinos frei. Beim Myonenzerfall tritt das gleiche auf, bloß dass hier anstatt von Protonen Myonen-Neutrinos gebildet werden. Zerfällt ein Myon, so entstehen ein Elektron, ein Myon-Neutrino und ein Anti-Elektron-Neutrino. Bei einem Anti-Myon dagegen entstehen ein Positron, ein Anti-Myon-Neutrino und ein Elektron-Neutrino:



Wie zuvor erwähnt, gibt die Halbwertszeit an, nach welcher Zeit nur noch die Hälfte des Stoffes vorhanden ist. Da es sich hierbei um statistische Werte handelt, kann man nicht die Lebensdauer eines einzelnen Teilchens vorhersagen; dafür lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten angeben.

Bei einer Lebensdauerermessung müssen deshalb viele einzelne Myonen betrachtet werden. Es wird untersucht, welche Lebensdauer mit welcher Wahrscheinlichkeit auftritt, und somit die Häufigkeitsverteilung der Lebensdauer bestimmt. Dabei ergibt sich eine exponentielle Funktion (siehe Abbildung 2). Viele Myonen

zerfallen relativ schnell, während einige wenige relativ lange Lebensdauern aufweisen. Im Prinzip kann man das Experiment folgendermaßen betrachten: Man untersucht nacheinander eine große Anzahl von Myonen. Dabei stellt man für jedes einzelne Myon fest, welche Zeit bis zu seinem Zerfall vergeht. So misst man praktisch die Wahrscheinlichkeitsverteilung und kann daraus die durchschnittliche Lebensdauer berechnen.

Dass die Myonen dabei nicht gleichzeitig gemessen werden, spielt keine Rolle. Im Gegensatz zu radioaktiven Substanzen gibt es hier keine Anfangsmenge, die zerfällt, aber man kann alle untersuchten Myonen dieser Menge gleichsetzen, obwohl sie nicht gleichzeitig existieren. Es ist so, als ob man bei einer radioaktiven Substanz einzelne Atome betrachtet und ihre Zerfallszeit messen und nach dem Zerfall zum nächsten Atom übergehen würde. Es ist also egal ob man nacheinander die individuellen Lebensdauern bestimmt oder alle gemessenen Myonen als eine Menge instabiler Teilchen betrachtet und von der Halbwertszeit auf die mittlere Lebensdauer schließt; das Ergebnis ist das gleiche.

Ein zunächst etwas verwirrender Fakt ist, dass es bei der Lebensdauerbestimmung keine Rolle spielt, wie lange das Myon vor Beginn der Messung bereits existiert hat. Die Lebensdauer von Elementarteilchen lässt sich nicht mit der von Menschen vergleichen. Ein Elementarteilchen hat eine von der Vorgeschichte unabhängige Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Zeit zu existieren. Diese ändert sich nicht, auch wenn es schon sehr lange „lebt“. Das heißt, wenn ein Teilchen eine 50%ige Chance hat, die nächste Stunde zu überleben, und nach dieser Stunde noch existiert, beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass es eine weitere Stunde nicht zerfällt, immer noch 50%. Für das Experiment bedeutet das, dass es egal ist, wie lange die eingefangenen Myonen schon existiert haben; ihre durchschnittliche Lebensdauer lässt sich trotzdem bestimmen.

6. Relativistische Effekte

Da die Myonen in den oberen Schichten der Atmosphäre entstehen, müssen sie etwa 10 km zurücklegen, bevor sie die Erdoberfläche erreichen. Obwohl sie sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, dürfte nach den ersten 450 Metern eigentlich nur noch die Hälfte der Myonen existieren, da ihre Halbwertszeit dann bereits verstrichen ist. Nur etwa $3 \cdot 10^{-5} \%$ der Myonen könnten bei Normalnull (Meeresspiegelhöhe) ankommen. Trotzdem erreichen uns etwa 100 Myonen pro Quadratmeter und Sekunde. Es werden aber bei weitem nicht so viele Myo-

nen in der Atmosphäre gebildet, als dass diese Zahlen stimmen könnten. Der Widerspruch lässt sich nur mit Hilfe der Relativitätstheorie verstehen.

Den Effekt, der hier auftritt und den Widerspruch auflöst, nennt man relativistische Zeitdilatation. Er wurde von Albert Einstein entdeckt. Da die Myonen annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fliegen, vergeht für sie die Zeit langsamer. Während $2,2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden auf der Erde verfließen, verstreicht für die Myonen nur einen Bruchteil dieser Zeit; ihre Anzahl wird deshalb nicht halbiert. Wie weit sie es durch die Atmosphäre schaffen, hängt also auch davon ab, wie stark die Zeit für sie im Vergleich zur Umgebungszeit gedehnt wird. Da die Zeitdilatation von der Eigengeschwindigkeit abhängt und diese wiederum von der kinetischen Energie der Teilchen, die aber von Myon zu Myon variiert, haben die Myonen unterschiedliche mittlere Reichweiten. Beispielsweise kann ein Myon der Energie 10 GeV durchschnittlich 600 km weit fliegen, bevor es zerfällt. Dieser Effekt verursacht die hohe Zählrate von Myonen an der Erdoberfläche und ist so gleichzeitig ein Beweis für die Richtigkeit der Relativitätstheorie.

Die Zeitdilatation kann nach Einstein aus folgender Formel berechnet werden:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

t ist die Zeit auf der Erde, t' die Eigenzeit des Myons, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, und c stellt die Lichtgeschwindigkeit dar. Man kann sehen, dass sich t und t' erst dann deutlich unterscheiden, wenn sich die Geschwindigkeit des Myons der Lichtgeschwindigkeit nähert.

B. Detektorphysik

1. Begriffserklärung

Unter einem Detektor versteht man in der Teilchenphysik eine Apparatur, die bestimmte Teilchen nachweisen kann.

Ein Szintillationsdetektor besteht üblicherweise aus einem Szintillator, einem Lichtsignalverstärker (Photomultiplier) und der Elektronik, welche die Detektorausgangssignale entsprechend der vorgesehenen bzw. der erforderlichen Weiterverarbeitung formt; im vorliegenden Fall werden logische Signale erzeugt.

2. Szintillatoren

Ein Szintillator ist eine lichtdurchlässige Substanz, in der ionisierende Teilchen Lichtsignale hervorrufen. Dieser Prozess heißt Szintillation. Zu unterscheiden ist die Szintillation vom Cherenkov-Effekt, bei dem die nachzuweisenden Teilchen sehr schnell – nämlich schneller als das Licht im entsprechenden Medium – sein müssen, um zum Beispiel in Wasser oder Glas eine Art „Überschallknall“ des Lichtes hervorzurufen.

Der Prozess der Szintillation lässt sich folgendermaßen beschreiben: Zunächst schlagen die Myonen (oder andere geladene, energiereiche Elementarteilchen oder hochenergetische Quanten) einige Elektronen der im Szintillator vorhandenen Atome aus ihren Bahnen und ionisieren zum Teil die Atome. Andere Atome werden nur angeregt; ihre Elektronen springen auf eine höhere Bahn. Dieser Zustand entspricht nicht dem Normalzustand des Szintillators. Um zu diesem zurück zu gelangen, geben die angeregten Atome unter anderem Lichtquanten ab. Beim herausgeschlagenen Elektron rutschen die übrigen Elektronen nach, wobei diese dabei auch Lichtquanten abgeben. Das freigewordene Elektron dagegen kann den ganzen Prozess fortsetzen, denn es kann andere Elektronen heraus schlagen oder weitere Atome anregen, wenn es noch ausreichend Energie besitzt. Ein eingedrungenes Myon löst so eine Art Kettenreaktion aus, die zur Abgabe von Photonen führt. Diese Photonen werden genutzt, um das Eindringen des Myons in ein Signal umzuwandeln. Je mehr Energie das Myon im Szintillator abgeben konnte, desto mehr Photonen werden freigesetzt, und desto größer ist das im Szintillator erzeugte Lichtsignal.

Es gibt zwei Typen von Szintillatoren: organische und anorganische. Organische Szintillatoren können fest, flüssig oder gasförmig sein. Am häufigsten werden Plastikszintillatoren verwendet, die sich leicht mechanisch bearbeiten lassen. Die meisten Plastikszintillatoren, die auch polymerisierte Szintillatoren genannt werden, benötigen zusätzlich eine Beimischung von Substanzen, die die Wellenlänge der emittierten Strahlung ändert, da viele Plastikszintillatoren undurchsichtig für das von ihnen abgestrahlte Szintillationslicht sind. Anorganische Szintillatoren haben dagegen oft eine Dotierung, um durch die so entstehenden zusätzlichen Energiebänder Licht im sichtbaren Bereich abzustrahlen.

Verschiedene Szintillatoren unterscheiden sich in Lichtausbeute und Dauer des Nachleuchtens. Unter Lichtausbeute versteht man die Zahl der emittierten Lichtquanten (Photonen) pro Energieeinheit, die das eingedrungene Teilchen im Szintillator abgegeben hat. Da Myonen bereits sehr energiereich sind, bedarf es keiner besonders hohen Lichtausbeute, wie sie zum Beispiel bei Gammastrah-

lungsdetektoren benötigt wird. Da wir aber später Zeitmessungen mit dem Detektor durchführen wollen, sollte das Nachleuchten des Szintillators relativ kurz sein. Weiterhin bedarf es eines großen Szintillators, da Myonen hochenergetische Teilchen sind, die erst abgebremst werden müssen. Für solche Experimente eignen sich flüssige organische Szintillatoren oder deren festes Äquivalent, polymerisierte Szintillatoren, besonders gut, da man sie in beliebiger Größe herstellen kann und sie sehr kurze Nachleuchtzeiten besitzen.

Der an der TU Dresden für die Myonenmessungen verwendete Szintillator ist ein polymerer Szintillator von einem früheren Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg. Für den Versuchsaufbau wurden fünf Szintillatorplatten à 218 cm x 9,2 cm x 2 cm eingesetzt. Damit möglichst viel Licht im Szintillator von einem Ende zum andern gelangen kann, sind die Außenwände mit reflektierendem Material umgeben. Dieses gehört zwar streng genommen nicht mehr zum Szintillator, ist aber bei solch großen Szintillatorplatten dringend notwendig, da ansonsten zu wenig Licht an den Photomultipliern ankäme und das Signal sehr klein ausfallen würde.

3. Photomultiplier

Der Photomultiplier (abgekürzt PM) ist eine Apparatur, mit der man sehr schwache Lichtsignale, bis hin zu einzelnen Photonen, verstärken und nachweisen kann.

Vom Aufbau her handelt es sich um eine Vakuumröhre, die hinter einer Glasabdeckung eine so genannte Photokathodenschicht als Eintrittsfläche für die Lichtquanten besitzt (Abbildung 3). Lichtquanten oder Photonen können Elektronen aus dieser Schicht recht leicht herausschlagen, die so genannten Photoelektronen, die dann weiter in die Vakuumröhre wandern. Durch eine elektrische Spannung werden die Photoelektronen zu einer ersten Elektrode (Dynode) hin gelenkt und dabei beschleunigt, so dass jedes einzelne von ihnen beim Auftreffen mehrere Elektronen aus der Dynode herausschlagen kann. Diese Elektronen nennt man Sekundärelektronen. Der Prozess wiederholt sich an einer Reihe weiterer Dynoden. An jeder Dynode liegt eine positivere elektrische Spannung an, so dass die Elektronen von Dynode zu Dynode beschleunigt werden und jedes Mal weitere Elektronen herausschlagen. Dies führt zu einem lawinenartigen Anstieg der Anzahl der Sekundärelektronen, deren Anzahl sich exponentiell zur Anzahl der Dynoden verhält. Die meisten Photomultiplier besitzen 10 Dynoden und haben so eine Verstärkung von n^{10} , wobei n die Verstärkung je Dynodenstufe be-

deutet. Die Verstärkung je Stufe hängt von der Spannung zwischen den Dynoden ab. Typische Werte sind $n = 3 \dots 10$. Nach den Dynoden werden die Sekundärelektronen von einer Anode aufgenommen, dem Pluspol, der meist über einen Widerstand mit der elektronischen Erde (Masse) verbunden ist und von dem dann das Signal abgenommen werden kann.

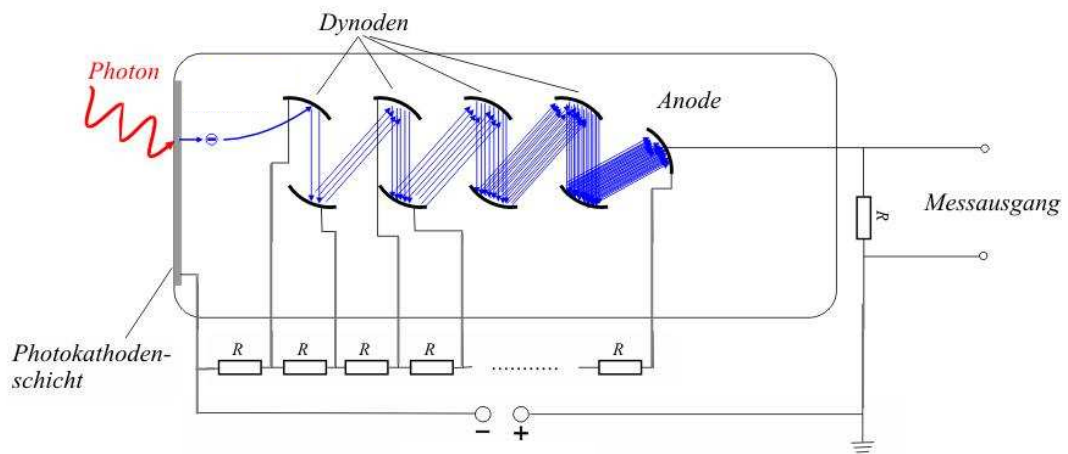


Abbildung 3 Aufbau und Funktionsweise eines Photomultipliers ³

Um die Dynodenspannungen mit Hilfe eines Spannungsteilers aus einer einzigen Versorgungsspannung zu erzeugen, bedarf es einer Hochspannung von 1,5 ... 2,5 kV. Der Spannungsteiler ist meist im Photomultiplier-Gehäuse untergebracht. Oft lässt sich die Spannung einzelner Dynoden mit Hilfe von Regelwiderständen ändern. Dadurch ändert sich die Fokussierung der Elektronen und damit die Verstärkung.

Ab und zu lösen sich auch ohne Lichteinwirkung Elektronen von den Dynoden oder von der Photokathode ab und verursachen so ein Signal, welches als Rauschen bezeichnet wird. Andere ungewollte Signale werden zum Beispiel durch einfallende Gammastrahlung im Szintillator hervorgerufen. Diese durch andere, hier nicht interessierende Teilchen ausgelösten Signale werden als Untergrundstrahlung bezeichnet. Die Elektronik hat anschließend die Aufgabe, Myonensignale von Untergrundstrahlungs- und Rauschimpulsen zu unterscheiden (Diskriminierung).

³ nach [11]

4. Signalform

Das Ausgangssignal am Photomultiplier, das PM-Signal, hat einen steilen Anstieg und fällt dann exponentiell ab. Die Höhe (Amplitude) und die Abfalldauer (die Zeit, bis das Signal wieder auf eine Spannung von etwa null Volt zurückgegangen ist) hängen vom Szintillator und vom Photomultiplier ab. Besitzt der Szintillator eine hohe Lichtausbeute, bzw. ist die Spannung am Photomultiplier und damit die Verstärkung hoch, dann werden die Ausgangssignale größer, sie haben eine größere Amplitude. (In unserem Versuchsaufbau wären die Signale negativer, da bei den verwendeten Einstellungen der Photomultiplier ein negatives Signal abgibt – siehe Elektronik.)

Die Amplitude der Signale ist außerdem umso größer, je mehr Lichtquanten die Photokathode treffen, je höher also die Energieabgabe des nachgewiesenen Teilchens im Szintillator war.

Die Länge des Signals wird überwiegend vom Szintillatormaterial und dessen Nachleuchteigenschaften (der so genannten Lichtzerfallszeit) beeinflusst. Bei dem von uns verwendeten Plastikszintillator ist die Abfallzeit relativ kurz, sie beträgt nur wenige Nanosekunden ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$).

5. Elektronik

Die Signale aus dem Photomultiplier kann man nicht gleich zur Auswertung nutzen. Man benötigt elektronische Schaltungen, um aus dem PM-Signal auf Myonen, oder welche Teilchen man gerade untersucht, schließen zu können.

Neutrinos verursachen praktisch keine Signale in dem von der TU Dresden verwendeten Szintillator, da sie elektrisch neutral sind, nur sehr selten Reaktionen auslösen und kaum Energie im Szintillator abgeben. Gammastrahlung, vor allem die natürliche radioaktive Untergrundstrahlung der Wände, erzeugt aber Signale. Hinzu kommen Rauschsignale der Photomultiplier selbst. Hier muss man wissen, dass ein Myon aus der kosmischen Strahlung im Mittel weitaus mehr Energie besitzt als natürliche Gammastrahlung oder Rauschimpulse. Die PM-Signale der Gammaquanten bzw. der Rauschimpulse sind daher auch meist kleiner als Myonensignale.

Zur Isolierung der Myonen- von den Gammasignalen schaltet man einen Diskriminator hinter den Photomultiplier (Abbildung 4). Das ist eine elektronische Baugruppe mit einer einstellbaren Schwellenspannung (Spannung U_S). Überschreitet die Signalamplitude am Diskriminatoreingang betragsmäßig diese Schwellen-

spannung, dann erzeugt der Diskriminator ein logisches Signal. Bei diesem Signal handelt es sich um einen standardisierten Spannungsimpuls, dessen Amplitude und Form festgelegt ist. Ein Standard für logische Signale ist beispielsweise das so genannte NIM-Signal, ein rechteckförmiger Spannungsimpuls mit einer Amplitude von -0.8 V . Ein weiterer Standard ist das TTL-Signal, dessen Amplitude aber $+4\text{ V}$ beträgt. Der NIM-Standard wurde für die ersten Messungen verwendet. In einer neu entwickelten Elektronik wurde dieser dann später durch den TTL-Standard ersetzt. Um Verwirrung durch diese beiden Signaltypen zu vermeiden, wird im weiten Verlauf nur vom NIM-Standard die Rede sein. Alle Aussagen gelten natürlich gleichermaßen für den TTL-Standard.

Bleibt die Amplitude am Diskriminatoreingang betragsmäßig unterhalb der Schwellenspannung, so liegen am Ausgang 0 V an.

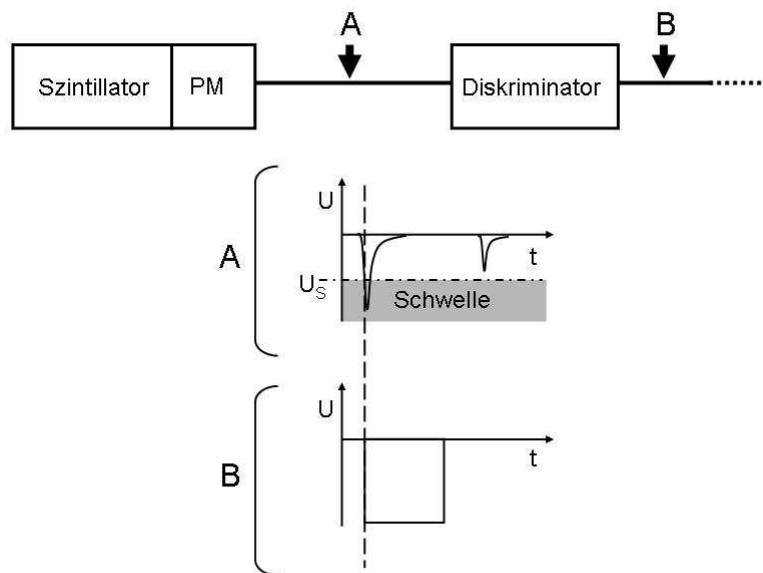


Abbildung 4 PM-Signale und Elektronik (schematisch)

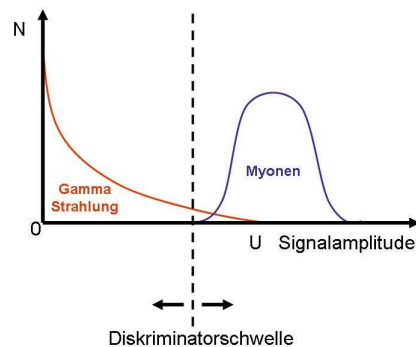


Abbildung 5 Richtig eingestellte Diskriminatorschwelle (schematisch)

Um nun Myonensignale vom Photomultiplier zu erkennen, sollte man die Schwellenspannung so wählen, dass viele Myonensignale über die Schwelle kommen (Abbildung 5). Trotzdem sollte sie nicht zu niedrig gewählt werden, damit so wenig wie möglich Gammastrahlung die Schwelle überschreitet. Die Energie der Teilchen und Gammaquanten ist statisch verteilt; deshalb ist die Wahl der optimalen Schwellenspannung schwierig und zusätzlich immer von der Verstärkung des Photomultipliers abhängig (siehe Plateaumessung).

Es gibt noch weitere elektronische Baugruppen, die aber später beschrieben werden, da sie zur Lebensdauerermessung und nicht zur Identifizierung von Myonen genutzt werden.

6. Allgemeiner Aufbau eines Szintillationsdetektors

Ein Szintillationsdetektor besteht aus einem Szintillator und einem Photomultiplier, dessen Glasfenster mit der dahinter liegenden Photokathode zum Szintillator gerichtet ist. Die ganze Konstruktion muss lichtdicht eingepackt sein, damit kein Licht aus der Umgebung zum Photomultiplier gelangt und dort Signale erzeugt. Die Innenseite der Szintillatorummantelung sollte dagegen gut reflektieren, damit ein großer Teil des Lichts, das im Szintillator entsteht und diesen sonst verlassen würde, wieder zurück gestreut wird und so doch noch auf den Photomultiplier treffen kann. Nur die Flächen, die den Kontakt zu den Photomultipliern bilden, bleiben von einer Ummantelung frei.

Um eine erhöhte Messgenauigkeit zu erreichen, befestigt man oft zwei Photomultiplier am Szintillator. Dabei werden die Photomultiplier in Koinzidenz geschaltet, das heißt, ein Signal wird nur dann als Teilchen gewertet, wenn beide Lichtverstärker gleichzeitig ein Signal geben, welches über der Schwelle liegt.

Dieser Gleichzeitigkeit der Signale sind aber Grenzen gesetzt, da das Licht eines irgendwo im Szintillator eingefangenen Teilchens unterschiedlich lange Zeiten bis zum Erreichen beider Photomultiplier brauchen kann. Dieses Problem wird gelöst, indem man die logischen Signale etwas länger formt und mit einer UND-Schaltung verknüpft. Immer dann, wenn beide Signale überlappen, werden sie als koinzident gewertet (siehe Abbildung 6). Damit erfasst man auch alle annähernd gleichzeitigen Signale und kann sogar die „Schärfe“ der Gleichzeitigkeit (Koinzidenzbreite) mit Hilfe der Impulslänge einstellen.

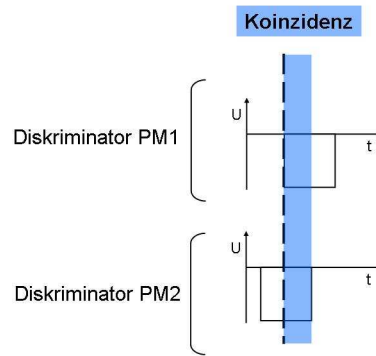


Abbildung 6 Koinzidenz zweier Diskriminatorsignale

C. Prinzip der Myonen-Lebensdauerermessung

Die Versuchsanordnung zielt darauf ab, Myonen in einem Detektor (Szintillator) einzufangen, ihren Zerfall zu beobachten und mit Hilfe einer Zeitmessung zwischen Einfang und Zerfall auf die mittlere Lebensdauer der Myonen zu schließen. Der Szintillator ist so dick, dass er wenigstens einige der Myonen aus der kosmischen Strahlung völlig abbremsen kann. Diese bleiben im Detektor stecken und zerfallen schließlich. Da ein Myon sowohl beim Eintritt in den Szintillator als auch beim Zerfall Licht im Szintillator hervorruft, können die Photomultipliersignale für diese Messung verwendet werden.

Betrachten wir erst einmal die Signale, die vom Diskriminator ausgegeben werden. Wir wissen, dass logische Signale gleichermaßen für Myonen, Gammastrahlung oder Rauschen stehen können, da die Schwelle nur grob Myonen- von Rausch- oder Gammaimpulsen trennen kann. Da Myonen relativ schnell zerfallen, wissen wir, dass es auch Signale geben muss, die kurz hintereinander, in ungefähr $10 \mu\text{s}$, auftreten. Sehen wir also zwei NIM-Signale kurz hintereinander, können wir mit hoher Wahrscheinlichkeit sagen, dass dabei ein Myon eingefangen wurde und im Szintillator zerfallen ist (Abbildung 7).

Es könnte sich dabei aber auch um zufällig sehr kurz hintereinander auftretende Gammaeinfänge handeln. Deshalb sind die Diskriminatorschwellen und die Versorgungsspannung der Photomultiplier so zu wählen, dass möglichst wenig Untergrundstrahlung „angezeigt“ wird (siehe Plateaumessung). Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Rausch- oder Myonenimpulse kurz hintereinander auftreten, ist dann auf Grund der geringen Zählrate sehr klein.

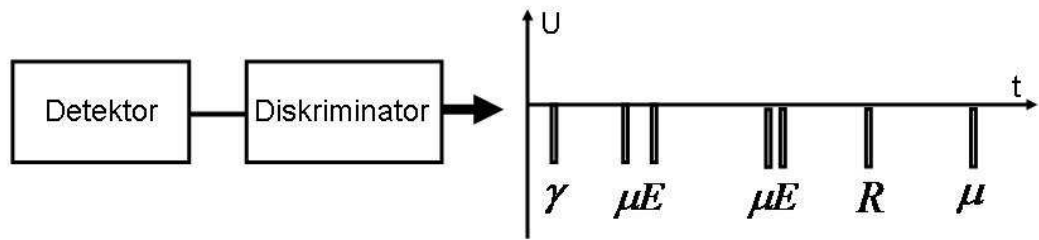


Abbildung 7 Signale am Diskriminator-Ausgang (schematisch):

- R ein Rauschimpuls
- γ ein Gamma Ereignis
- μ ein Myonendurchflug
- μE ein Myoneneinfang

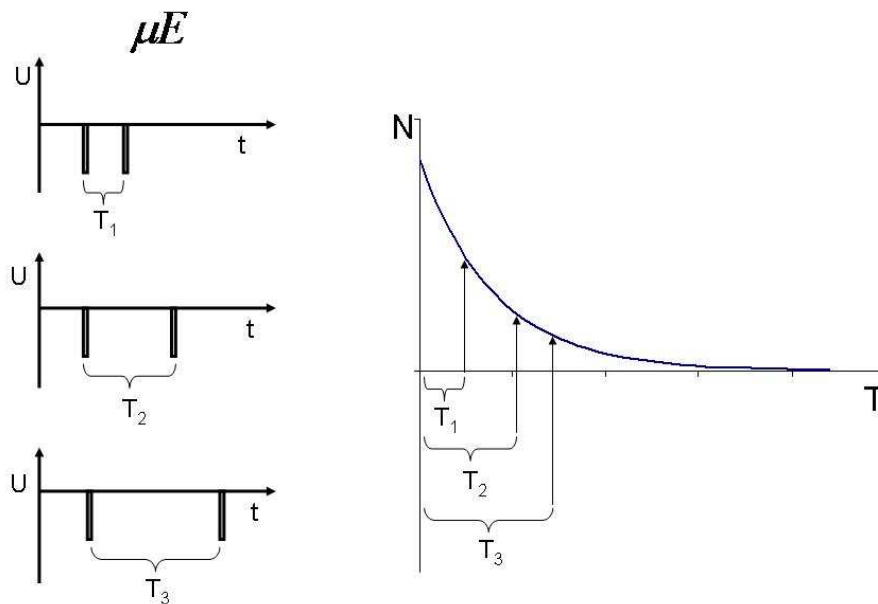


Abbildung 8 Häufigkeitsverteilung der Zeitabstände (Zeitspektrum): N ist die Zahl der Ereignisse, bei denen der Zeitabstand T gemessen wurde.

Das Prinzip der Lebensdauerermessung ist nun folgendes: Man sucht alle Ereignisse, bei denen zwei Signale innerhalb eines Zeitfensters von ungefähr $10 \mu\text{s}$ auftreten, und misst in diesem Fall den Zeitabstand zwischen den Signalen. Die Schaltung hierzu wird später beschrieben. Dann stellt man die Anzahl der Ereignisse N , in denen ein bestimmter Zeitabstand T auftritt, als Funktion des Zeitabstands dar (Abbildung 8), und erhält ein Zeitspektrum. Dieses entspricht der Häufigkeitsverteilung der Myonen-Lebensdauer (Abbildung 2).

Es ergibt sich eine Exponentialfunktion. Aus dieser kann man auf die mittlere Lebensdauer und die Halbwertszeit schließen (siehe Fit-Rechnung).

D. Aufbau und Inbetriebnahme der Messanordnung

1. Aufbau des Detektors

Für den Aufbau des Experiments waren Szintillatoren aus dem DESY-Experiment vorgesehen, da diese vorhanden waren aber nicht genutzt wurden. Da die Szintillatorplatten noch in ihrer vom Experiment stammenden lichtdichten Verpackung steckten, mussten sie erst von dieser befreit werden. Anschließend wurden die am wenigsten zerkratzten herausgesucht, um im späteren Szintillatorblock Lichtverluste durch Absorption an Kratzern zu vermeiden. Danach musste entschieden werden, wie viele Platten übereinander gelegt werden sollten. Die größten zur Verfügung stehenden Photomultiplier besaßen eine Photokathode von 138 mm Durchmesser. Der Querschnitt von fünf Szintillatorplatten entsprach dieser Größe am besten.

Das Ziel war es, an beiden Enden des Szintillators einen Photomultiplier anzuschließen, um durch eine Koinzidenzschaltung die Rauschimpulse gegenüber echten Myonensignalen zu unterdrücken. Der Aufbau sollte aber zuerst nur mit einem Photomultiplier getestet werden.

Da mehrere Photomultiplier dieser Größe zur Auswahl standen, wurde zuerst getestet, welche zwei am wenigsten Rauschsignale lieferten. Dafür wurden die Photomultiplier in einer Dunkelkammer ohne Szintillator betrieben. Die Lichtverstärker wurden jeweils an einen Diskriminator und dieser an einen Zähler angeschlossen, der jedes über der Diskriminatorschwelle liegende Signal zählte. Dabei wurden die Versorgungsspannung des Photomultipliers und die Höhe der Schwelle variiert. Da Photomultiplier ohne Szintillator nur durch Eigenrauschen Signale erzeugen, wurden diejenigen Photomultiplier ausgewählt, die die geringsten Zählraten aufwiesen.

Anschließend wurde eine Aluminiumhalterung konstruiert, die die Szintillatorplatten und ihre Umwicklung halten sollten. Von dieser wurden in der TU-eigenen Werkstatt drei Exemplare hergestellt. Als diese fertig waren, wurden die fünf Szintillatorplatten zuerst mit drei Lagen weißen Tyvec-Papiers, anschließend mit zwei weiteren Schichten dünner Aluminiumfolie und am Ende noch mit schwarzer Plastikfolie eng umwickelt. Alles wurde mit absolut lichtundurchlässigem „Scotch Tape“, einem speziellen schwarzen Klebeband, fixiert. Frei gelassen wurden nur

die beiden kleinsten Flächen des Quaders für den Kontakt mit den Photomultipliern.

Die drei Halterungen wurden anschließend sofort angebracht und fein justiert, um die Szintillatorplatten in ihrer Lage zu fixieren. Nachdem die Szintillatorplatten eben lagen und nicht mehr verrutschen konnten, wurde der erste Photomultiplier mit einem Siliconpad auf den Szintillator aufgesetzt. Eine solche Scheibe aus Silikon kann Unebenheiten am Szintillator und am Photomultiplier ausgleichen. Anschließend wurde der Übergang zwischen Szintillator und Photomultiplier mit schwarzer Folie und Scotch Tape lichtdicht verdeckt.

Um diese Konstruktion zu testen, wurde die zweite Öffnung erst einmal lichtdicht verklebt. Als alles ordnungsmäßig funktionierte und die Lichtdichtheit nachgewiesen wurde, konnte auch der zweite Photomultiplier angeschlossen werden.

2. Untersuchung der Lichtundurchlässigkeit

Wenn sich Löcher oder durchscheinende Flächen in der Detektorhülle befinden, kann Licht aus der Umgebung auf die Photokathode des Detektors gelangen und Signale erzeugen. Selbst sehr kleine Lichtmengen erzeugen ständig Photoelektronen und verstärken dadurch das Rauschen des Photomultipliers. Deshalb muss der Detektor auf seine Lichtundurchlässigkeit getestet werden.

Ein dauerhaftes Lichtsignal, das durch Umgebungslicht und undichte Stellen in der Detektorhülle entsteht, kann man aber praktisch nicht von einem starken Rauschen des Photomultipliers oder von einem Nachleuchten (Phosphorisieren) des Szintillators, welches noch Tage nach dem Zusammenbau auf Grund der vorherigen hohen Lichtbelastung auftritt, unterscheiden. Das erschwert die Suche nach undichten Stellen. Um dieses Problem zu umgehen, haben wir eine tragbare Schreibtischlampe für die Überprüfung der Lichtdichtheit verwendet. Deren Lichtstärke schwankt mit einer Frequenz von 50 Hz, und die damit erzeugten Detektorsignale können wegen dieser Eigenschaft auf einem Oszilloskop leicht von anderen Signalen unterschieden werden. Wird also beim Bewegen der Lampe eine Sinuskurve auf dem angeschlossenen Oszilloskop angezeigt, weiß man, dass die beschienene Fläche ein „Lichtleck“ besitzt und weiter verklebt werden muss.

3. Fokussierung der Photomultiplier

Bei der so genannten Fokussierung der einzelnen Photomultiplier wird die maximale Signalverstärkung bei einer gegebenen Hochspannung gesucht. Dabei stellt man die Spannungsverhältnisse zwischen ausgewählten einzelnen Dynoden so ein, dass eine Maximierung des Ausgangssignals erreicht wird. Das geschieht mit Hilfe von Reglern am Photomultipliergehäuse. Die Fokussierung wurde für beide Lichtsignalverstärker durchgeführt.

4. Einstellen der Diskriminatorschwelle

Um nun eine geeignete Diskriminatorschwelle für die zukünftigen Messungen zu bestimmen, wurden Zählratenmessungen an den beiden Photomultipliern durchgeführt. Das Ziel bestand darin, die Schwelle so einzustellen, dass man möglichst alle Myonen erkennt, ohne zu viele Gammaereignisse einfließen zu lassen (siehe Abbildung 5).

Bei der Messung wurde der Ausgang des Diskriminators (siehe Abbildung 4) an einen digitalen Zähler gelegt. Die Zählrate wurde bei einer bestimmten Photomultiplier-Spannung für verschiedene Diskriminatorschwellen gemessen und als Funktion der Schwellenspannung grafisch dargestellt. Diese Messreihen wurden für mehrere unterschiedliche Versorgungsspannungen des Photomultipliers durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 zu sehen.

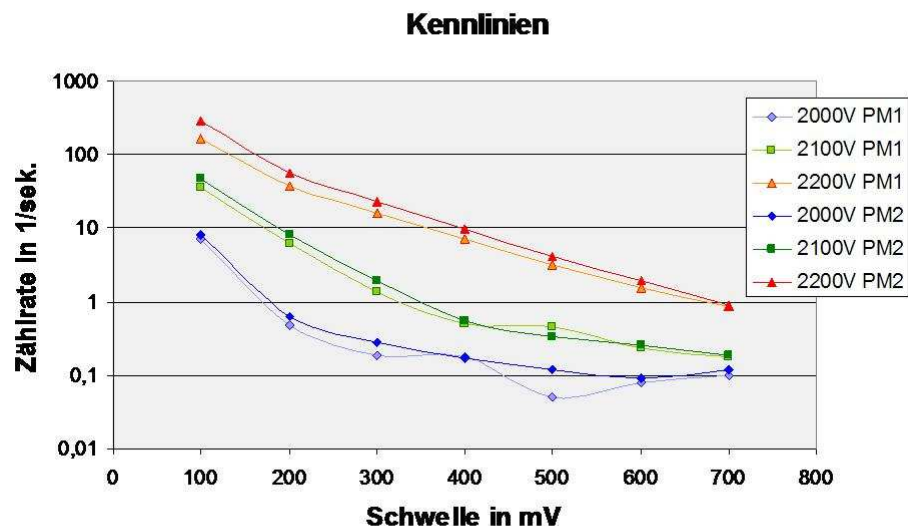


Abbildung 9 Zählrate eines Photomultipliers bei unterschiedlicher Spannung als Funktion der Diskriminatorschwelle

Wenn die Schwelle zu hoch liegt, ist die Zählrate gering. Es werden zwar nur wenige Gammaquanten, aber auch nicht alle Myonen gezählt. Dann benötigt die Aufnahme von Zeitspektren lange Messzeiten, da nur sehr hochenergetische Myonen Signale erzeugen. Wählt man dagegen eine zu niedrige Schwellenspannung, werden nicht nur Myonen über die Schwelle gelangen, sondern auch vermehrt Gammastrahlen, was eine Verfälschung der Zeitspektrenmessung zur Folge hätte. Die Zählrate steigt dann.

Leider ist es unmöglich, in dieser einfachen Messanordnung eindeutig zwischen Gamma- und Myonenereignissen zu unterscheiden. Es gibt kein Plateau, also kein Abflachen der Kurve, aus dem man schließen könnte, dass nun keine Gammas mehr gezählt werden. Deshalb konnte die Schwellenspannung nur abgeschätzt werden. Sie wurde so gewählt, dass bei der höchsten zulässigen PM-Spannung von 2200 V eine Zählrate erreicht wird, die ungefähr so groß ist wie die erwartete Myonenzählrate, also zwischen 10 und 50 pro Sekunde. Die Diskriminatorschwelle wurde auf 300 mV festgesetzt.

5. Abgleich der Photomultiplier-Spannung durch Plateaumessungen

Die Plateaumessung wurde durchgeführt, um die optimalen Betriebsspannungen für die beiden Photomultiplier des Detektors zu finden. Sie ist eine Form der Koinzidenzmessung. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt.

Bei der Koinzidenzmessung nutzt man aus, dass beide Photomultiplier an denselben Szintillator gekoppelt sind. Man verbindet beide Diskriminatorausgänge mit einem logischen UND, auch Koinzidenz genannt. Das ist eine elektronische Schaltung, die nur dann ein Signal abgibt, wenn an beiden Eingängen gleichzeitig ein Signal liegt. Schließt man den UND-Baustein an einen Zähler an, ist der Aufbau der Plateaumessung komplett.

Wir nehmen einmal an, dass die beiden Detektor-Spannungen und die Diskriminatorschwellen richtig eingestellt sind. Trifft nun ein Myon auf den Szintillator, dann müssten beide Photomultiplier ein relativ großes Signal abgeben, das über der Diskriminatorschwelle liegt, und der Zähler spricht an. Wenn beide Diskriminatoren gleichzeitig ansprechen, dann kann man mit großer Sicherheit sagen, dass es sich bei diesem Ereignis um ein Myon handelt. Andere Möglichkeiten wären ein sehr hochenergetisches Gammaquant oder zufällige, gleichzeitig in beiden Photomultipliern auftretende sehr starke Rauschimpulse. Dies ist aber sehr unwahrscheinlich.

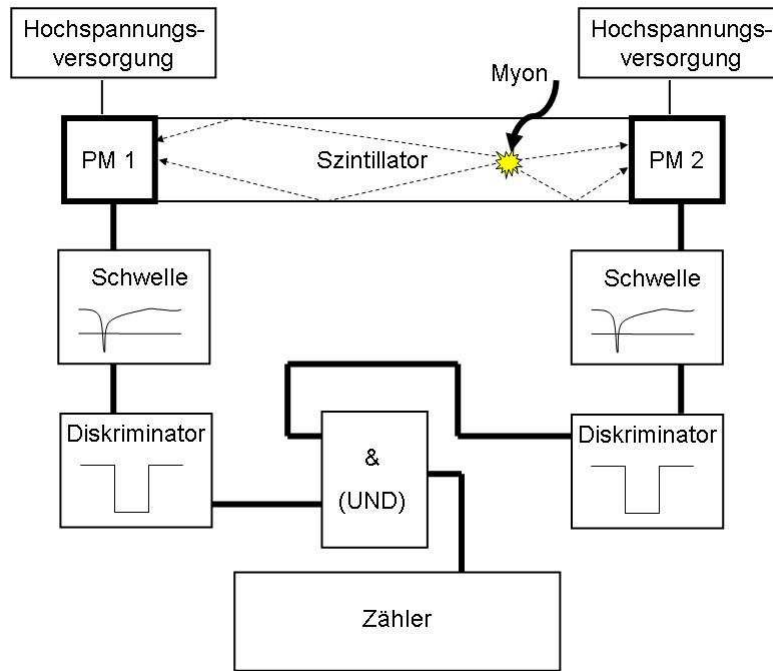


Abbildung 10 Schema der Koinzidenzmessung

Sind die Diskriminatorschwellen aber zu niedrig oder die Detektorspannungen zu hoch eingestellt, dann werden zu viele Gamma- oder Rauschimpulse als Myonen gezählt (Abbildung 11). Umgekehrt erkennt man nicht alle Myonen, wenn eine Diskriminatorschwelle zu hoch oder eine PM-Spannung zu niedrig ist. Dazwischen liegt ein Plateau, bei dem gerade alle Myonen nachgewiesen und nur wenige Gammaimpulse gezählt werden. Dieses Plateau sollte mit der Messung gefunden werden. Da die Diskriminatorschwelle bereits eingestellt war, musste nur noch die PM-Spannung variiert werden.

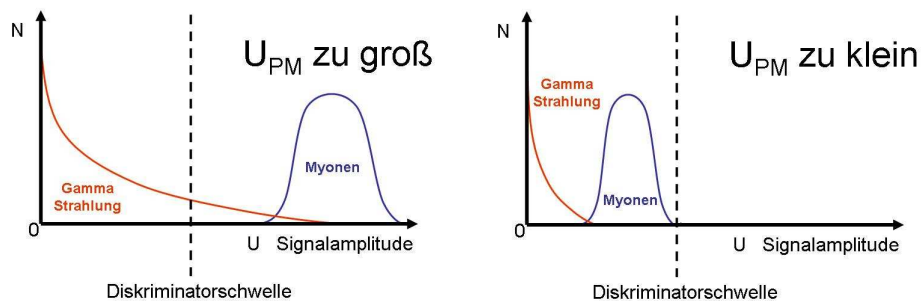


Abbildung 11 Signalamplituden bei zu kleiner und zu großer PM-Spannung U_{PM}

Nun wird die Betriebsspannung des einen Photomultipliers (PM2) auf den kleinsten, nach den Ergebnissen der Einzelzählrate noch sinnvollen Wert, in diesem Fall 1700 V, gestellt. Man startet die Messung bei diesem minimalen Wert und hält dabei die Spannung des anderen Photomultipliers (PM1) bei 1900 V. Anschließend startet man den Zähler und misst die Koinzidenzzählrate für einen bestimmten Zeitraum. Wir verwendeten eine Zeitspanne von 100 Sekunden. Danach führten wir die Spannung von PM2 in 50-V-Schritten bis auf 2500 V und wiederholten dabei die Messung. Diese Prozedur wurde bei einer Betriebsspannung von 2000 V und 2100 V für PM1 wiederholt.

Betrachtet man den Graphen der Koinzidenzzählrate zur Spannung, so sieht man, dass die Zählrate erst ansteigt, dann zu einem Plateau abflacht und anschließend wieder ansteigt (Abbildung 12). Dieser Effekt tritt zu Tage, da bei geringer Spannung zunächst nicht alle Myonen gezählt werden können. Fährt man nun die Spannung hoch, steigt die Zählrate, da mehr Myonen vom Photomultiplier angezeigt werden. Irgendwann wird der Großteil der Myonen durch den Photomultiplier erfasst, und es kommt zu keinem weiteren Anstieg der Zählrate. Erhöht man die Betriebsspannung weiter, erreicht die Empfindlichkeit des Photomultipliers den Energiebereich der Gammastrahlung. Dadurch fängt die Zählrate wieder an zu steigen. Erhöht man nun die Spannung noch weiter, wird die Kurve wieder abflachen, da die Koinzidenzzählrate nicht über der Einzelzählrate des Photomultipliers PM1 liegen kann.

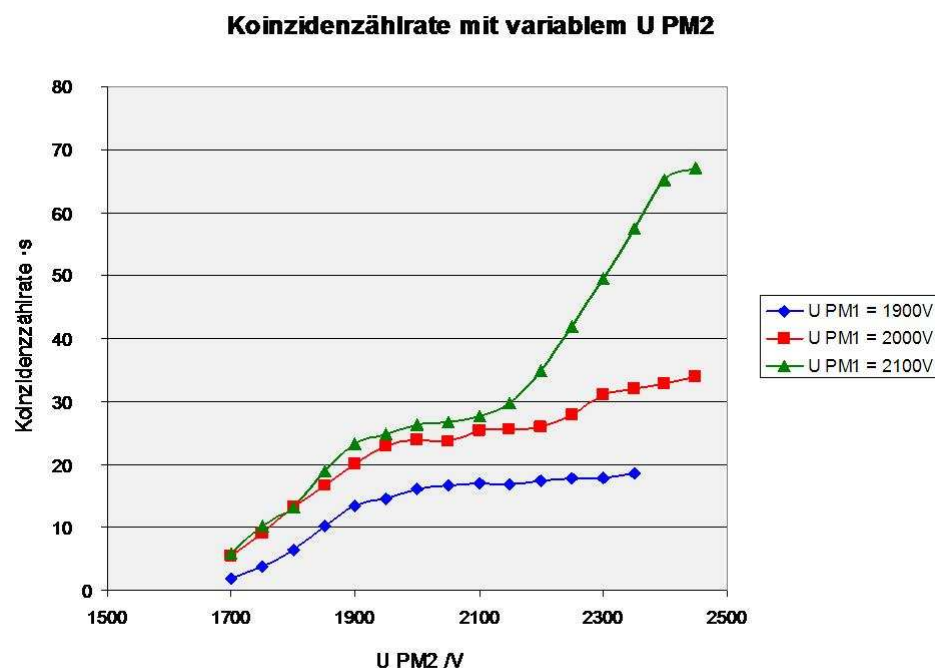


Abbildung 12 Ergebnisse einer Plateaumessung

Danach muss die Messung natürlich mit vertauschten Rollen für PM1 und PM2 wiederholt werden.

Das Plateau zeigt also an, bei welcher Betriebsspannung man die meisten Myonen messen kann, ohne dabei durch zu viele Gammaereignisse beeinflusst zu werden. Anfangs lagen diese Werte für den einen Photomultiplier bei 1900V und bei dem anderen bei 2100V. Bei einer neuen Fokussierung im November 2005 wurde aber die Einstellung der beiden Photomultiplier so verändert, dass sie nun beide bei einer Betriebsspannung von 2000V am besten arbeiten.

6. Abgleich der Photomultiplierspannung mit einer Leuchtdiode

Bei diesem Abgleich der Photomultiplierspannungen versucht man, die beiden Photomultiplier so aufeinander einzustellen, dass ihre Verstärkung gleich groß ist, sie also bei einem Ereignis in der Mitte des Szintillators ein Signal gleicher Amplitude ausgeben. Aus diesem Grund nennt man das Verfahren auch amplitudengleiche Messung.

Signale von Myonen kommen in der Regel nicht aus der Mitte des Szintillators. Auf Grund der unterschiedlichen Abstände zu den Photomultipliern unterscheiden sich die Lichtmengen, die an den beiden Enden des Szintillators und an den beiden Photokathoden ankommen, und auch bei gleicher Verstärkung werden sich die Signale unterscheiden. Myonenereignisse konnten deshalb nicht für diesen Abgleich genutzt werden.

Stattdessen wurde eine Leuchtdiode (Light Emitting Diode, abgekürzt LED) auf die Mitte des zuvor geöffneten Szintillators gesetzt und danach alles wieder lichtundurchlässig verschlossen. Die LED konnte an einem elektronischen Pulsgenerator angeschlossen werden. So wurde ein immer gleichstarker, regelmäßiger Lichtblitz im Szintillator erzeugt, der an beiden Photomultipliern mit gleicher Intensität ankam. Theoretisch sollte man bei gleicher Betriebsspannung an den Photomultipliern ein Signal gleicher Amplitude sehen. Da aber die Fokussierung unterschiedlich war, ergaben sich auch unterschiedliche Amplituden.

Um nun die Amplitude der beiden Photomultiplier gleich einzustellen, wurden deren Signale parallel am Oszilloskop betrachtet. Dabei stellten wir bei einem PM die Betriebsspannung fest ein und veränderte die Spannung am zweiten, bis die Amplituden der beiden Signale gleich waren. Beide Spannungen wurden in einer Tabelle notiert. Später sollte man anhand dieser Tabelle die Betriebsspannung der beiden PM so aufeinander abstimmen können, dass Ereignisse in der Mitte

des Szintillators von beiden Photomultipliern mit gleicher Amplitude angezeigt werden. So vermeidet man, dass schwache Szintillationsereignisse, die näher am weniger verstärkenden Photomultiplier stattfinden, eher angezeigt werden als stärkere Ereignisse, die nahe am hoch verstärkenden Photomultiplier auftreten. (Erstere werden angezeigt, weil die Lichtintensität auf die kurze Distanz zum niedrig verstärkenden PM noch nicht stark abgenommen hat; im zweiten Fall hat die Lichtintensität durch die lange Distanz zum niedrig verstärkenden PM bereits so stark abgenommen, dass dieser kein Signal mehr erzeugt und es deshalb nicht zur Koinzidenz kommt.)

Bei den jetzigen Messungen spielt dieser Amplitudenunterschied keine Rolle mehr, da nach der Neufokussierung beide Photomultiplier gleiche Amplituden bei gleicher Betriebsspannung aufweisen.

E. Bestimmung der mittleren Lebensdauer

1. Grundlagen

Obwohl ein Großteil der Myonen den Szintillator einfach durchfliegt, bleiben doch einige in ihm stecken und zerfallen nach einer gewissen Zeit. Diese Zeiten kann man messen und auswerten, um die mittlere Lebensdauer der Myonen zu berechnen. Die genaue Zeit zwischen Eindringen und Zerfall lässt sich bestimmen, weil sowohl beim Eindringen als auch beim Zerfall Lichtsignale im Szintillator entstehen. Beim Zerfall werden diese aber im Gegensatz zum Eindringen durch die entstandenen Elektronen oder Positronen verursacht.

2. Aufbau der Messanordnung

Um die mittlere Lebensdauer der Myonen zu bestimmen, muss man die Lebensdauer vieler einzelner Myonen messen. Die dazu verwendete Anordnung ist ähnlich aufgebaut wie die Koinzidenzmessanlage bei der Plateaubestimmung (Abbildung 10). Hinzu kommen aber noch zusätzliche Schaltungen zur Aufnahme von Zeitspektren (Abbildung 13):

Der Ausgang der UND-Schaltung wird nicht an einen Zähler, sondern an einen monostabilen Multivibrator, an den Eingang einer weiteren UND-Schaltung und an den Start-Eingang eines digitalen Zeitmessers (TDC – Time-to-Digital Converter) angeschlossen. Der monostabile Multivibrator arbeitet als Impulsformer. Vom Prinzip ähnelt er einem Diskriminator mit einem langen, festgelegten Ausgangs-

impuls. Er erzeugt nach einer kurzen Verzögerung ein langes NIM-Rechtecksignal von etwa $10,3 \mu\text{s}$ Länge. Dieses Signal geht an den zweiten Eingang des logischen UND. Der Ausgang des UND ist am Stopp-Eingang der Zeitmessung angeschlossen.

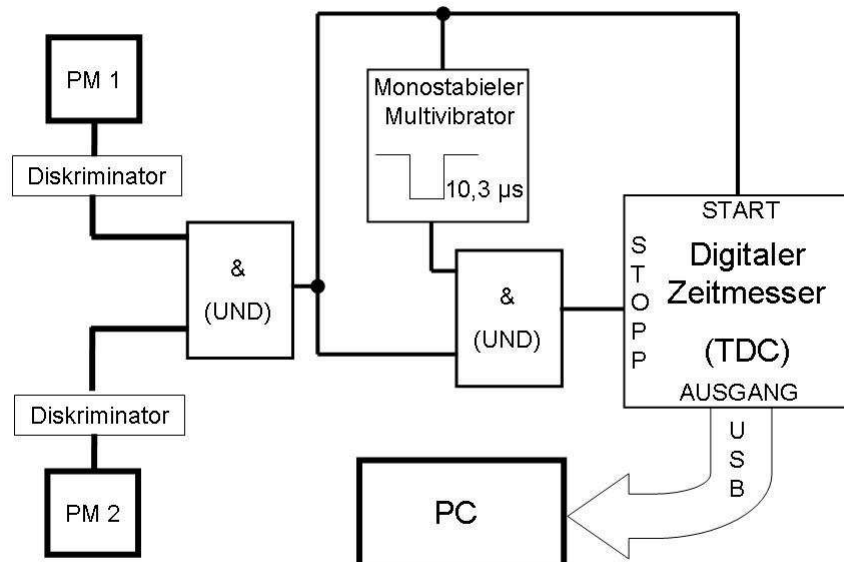


Abbildung 13 Messschaltung zur Aufnahme von Zeitspektren

Wird ein Myon im Szintillator eingefangen, so erzeugt es ein Lichtsignal, welches ein NIM-Signal am Ende des ersten logischen UND zur Folge hat. Dieses Signal startet die digitale Zeitmessung und gleichzeitig das $10,3 \mu\text{s}$ lange Multivibratorsignal. Es geht auch in den Eingang des zweiten UND. Hier kommt es aber auf Grund der geringen Verzögerung des Multivibrators nicht zur Koinzidenz. Zerfällt nun das Myon innerhalb von $10,3 \mu\text{s}$, erzeugt es wieder ein Lichtsignal, welches schließlich als Signal am ersten UND ausgegeben wird. Diesmal werden aber keine Zeitmessung und kein Multivibratorsignal gestartet, da diese bereits laufen. Im zweiten UND kommt es nun aber zur Koinzidenz, da das Multivibratorsignal vom Myonen-Einfang noch anliegt. Dies führt zu einem Signal am Stoppeingang des TDC und damit zu einer gültigen Zeitmessung. Das Ergebnis wird gespeichert. Der TDC kann Zeitintervalle von maximal $10,3 \mu\text{s}$ messen. Wird ein Start gegeben und erfolgt in den $10,3 \mu\text{s}$ kein Stopp, so wird diese Messung verworfen. In der neu aufgebauten kompakten Elektronik erfolgt die Speicherung in Form eines Spektrums von 256 Kanälen (8 Bit): Der gesamte Zeitmessbereich von $10,3 \mu\text{s}$ wird in Intervalle von etwa $0,04 \mu\text{s}$ Breite eingeteilt, da der TDC mit einem 24-MHz-Takt betrieben wird. Für jedes mögliche Zeitintervall gibt es einen Kanal, einen Speicherplatz im Spektrum. Wird eine Zeit gemessen, die im Inter-

vall eines Kanals liegt, so wird zu dem dort vorhandenen Wert eine Eins addiert. Angefangen wird natürlich in jedem Kanal bei Null. Nach einer gewissen Zeit weiß man, wie oft die Lebensdauer eines Myons in dem entsprechenden Zeitintervall liegt. Diese Daten werden regelmäßig von einem Computer via USB-Kabel abgefragt und im Rechner gespeichert, wo sie dann ausgewertet werden können. Bei den ersten Lebensdauerermessungen wurde noch eine andere Elektronik verwendet. Das Zeitspektrum bestand nur aus 32 Kanälen. Das Prinzip der Messung war aber das gleiche.

Ein Problem dieses Verfahrens ist, dass man nicht sagen kann, ob ein Myon wirklich im Szintillator stecken geblieben und zerfallen ist, oder ob zufällig zwei Myonen kurz nacheinander durch den Szintillator geflogen sind. Dies ist zwar relativ unwahrscheinlich, aber eine Quelle für einen systematischen Fehler. Dieses Problem ließe sich mit einem zweiten Detektor direkt unterhalb des ersten, der in Anti-Koinzidenz geschaltet sein müsste, lösen. Dieser Messaufbau wäre aber sehr aufwändig.

3. Zeitspektrum

Die Daten, die im Rechner gespeichert werden, nennt man ein Zeitspektrum. Sie sind eine Darstellung der Häufigkeit einer Myonenlebensdauer über dieser Lebensdauer. Die Zeit zwischen Einfang und Zerfall wird hierbei durch einen Kanal ausgedrückt. Jeder Kanal entspricht einem bestimmten schmalen Zeitintervall, also einer bestimmten Lebensdauer.

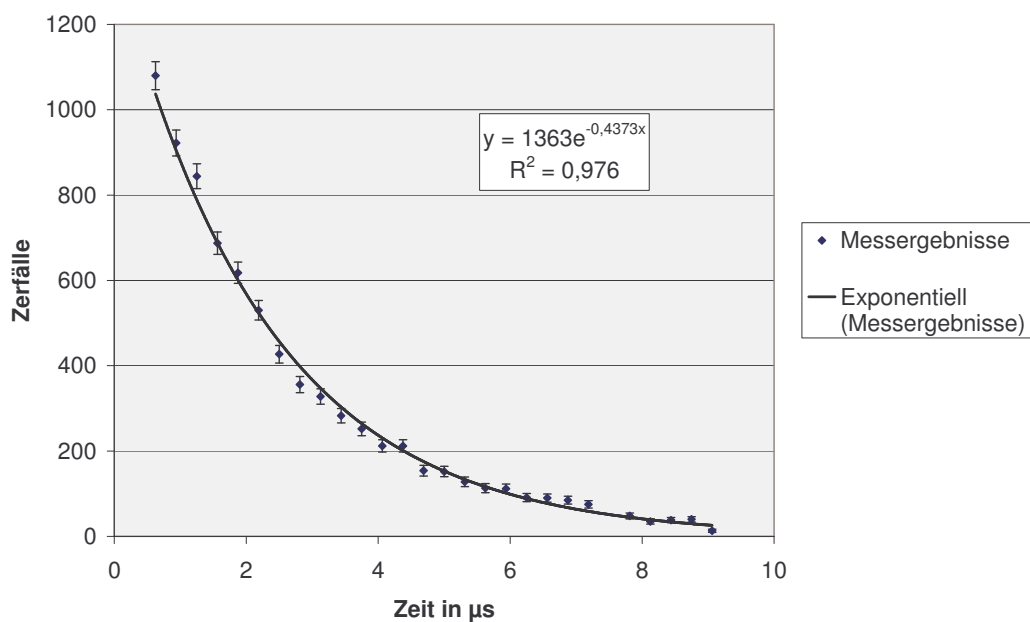


Abbildung 14 Zeitspektrum des Myonenzerfalls in linearer Darstellung

Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abbildung 14 dargestellt. Da diese noch mit der alten Elektronik durchgeführt wurde, besteht das Zeitspektrum aus 32 Kanälen. Die Messpunkte zeigen die Zahl der gezählten Ereignisse (Zerfälle) in jedem einzelnen Kanal. Auch die statistischen Messfehler sind für jeden Messpunkt angezeigt. Die durchgezogene Linie stellt eine Exponentialfunktion dar, die mit Hilfe von Excel als Fit-Kurve durch die Messpunkte gelegt wurde. Die Messpunkte folgen wirklich wie erwartet einer Exponentialfunktion. Das sieht man am besten in einer logarithmischen Darstellung (Abbildung 15).

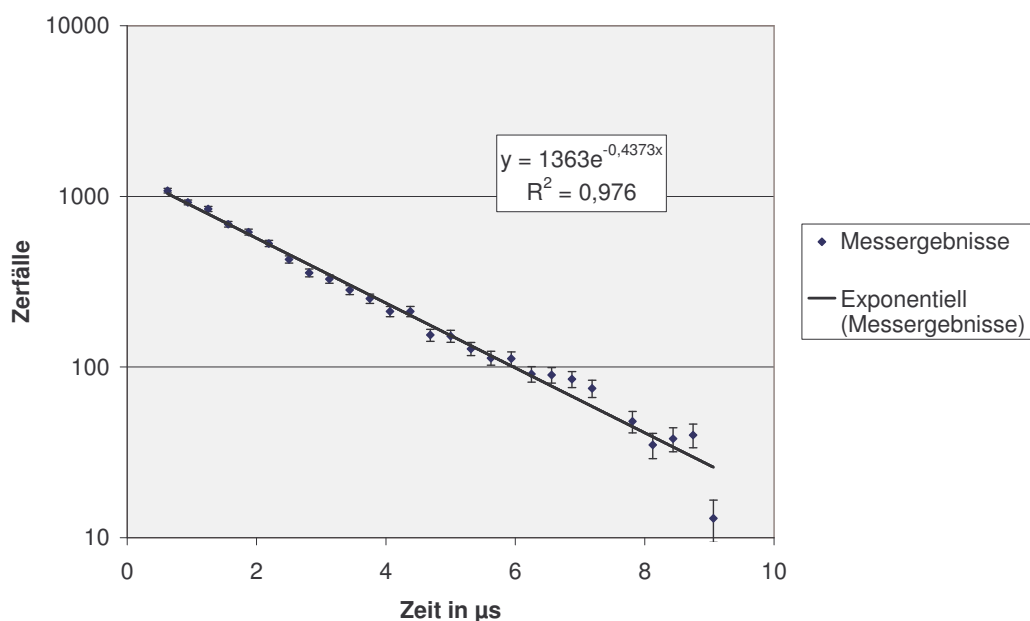


Abbildung 15 Zeitspektrum des Myonzerfalls in logarithmischer Darstellung

4. Fit-Rechnung

Aus der Form, genauer gesagt aus der Steilheit der abfallenden Kurve lässt sich die mittlere Lebensdauer der Myonen über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten berechnen. Dazu ist es aber zuvor nötig, eine Exponentialfunktion so „durch die Messwerte zu legen“, das sie die Messung möglichst gut beschreibt.

Das ist notwendig, weil es immer Messungenauigkeiten gibt, die Messwerte deshalb nie exakt auf einer exponentiellen Kurve liegen und die Aufnahme von nur drei Messwerten, die eine eindeutige Exponentialfunktion ergeben würden, statistisch unklug wäre. Anders ausgedrückt: Man findet keine Exponentialfunktion, die

genau durch alle Messwerte geht. Was man also braucht, ist eine Funktion, die die geringste Abweichung von den Messwerten aufweist.

Um eine solche Funktion zu erhalten, gibt es verschiedenste Methoden, die als Fit-Verfahren bezeichnet werden. Solche Verfahren werden heute in den verschiedensten Computerprogrammen mit angeboten. Beispielsweise besitzen die Taschenrechner, die in der Schule verwendet werden, oder Microsoft Excel, eine solche Rechenoperation. Diese wurde für die Fit-Funktion in Abbildung 14 und Abbildung 15 verwendet.

Eine weit verbreitete Methode ist die χ^2 -Annäherung (spricht sich „chi Quadrat“) oder die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, die ich näher erklären möchte. Die Zahl χ gibt an, wie groß die Abweichung einer Funktion von einem gegebenen Messwert ist. Zusätzlich wird die Abweichung durch den Fehler des Messwertes geteilt, um zu gewährleisten, dass ungenaue Messwerte weniger gewichtet werden als sehr genaue. Weiterhin gibt χ an, in welche Richtung die Abweichung erfolgt, also ob die Funktion über oder unter dem Messwert liegt. χ^2 ist das Quadrat von χ . Diese Zahl ist unabhängig von der Richtung der Abweichung. Ist $\chi^2 = 0$, dann stimmt die Funktion exakt mit dem Messwert überein. Je größer χ^2 jedoch ist, desto weiter liegen Messwert und Funktion auseinander. Um nun die optimale Exponentialfunktion für alle Messwerte zu finden, summiert man die χ^2 aller Messwerte. Im Fall eines Spektrums aus 256 Kanälen heißt das:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{256} \chi_i^2 = \sum_{i=1}^{256} \frac{(N_i - f_i)^2}{\sigma_i^2} = \sum_{i=1}^{256} \frac{(N_i - f_i)^2}{N_i}$$

Die Formelzeichen haben folgende Bedeutung:

- i Nummer (Index) eines Kanals des TDC-Zeitspektrums
- χ_i^2 Fehlerquadrat für den Kanal i
- N_i Messwert im Kanal i
- f_i Wert der Exponentialfunktion an der Stelle von N_i
- $\sigma_i = \sqrt{N_i}$ statistischer Fehler des Messwerts N_i

Nun werden die Parameter der möglichen Exponentialfunktion, die Zerfallskonstante λ und ein Normierungsfaktor, variiert. An dem Punkt, an dem die Summe χ^2 am kleinsten ist, beschreibt die korrespondierende Exponentialfunktion die

Messwerte am besten. Das Verfahren ist ausführlich in der Versuchsanleitung [10] beschrieben und wird im Praktikum bei der Auswertung verwendet.

In der Praxis kommt noch hinzu, dass die Ergebnisse besonders kurzer bzw. besonders langer Messzeiten sehr ungenau sind und ihr absoluter Fehler größer ist als die Wurzel aus den Messwerten. Daher werden diese Werte in der Rechnung nicht mitberücksichtigt, da sie das Ergebnis stark verfälschen würden.

5. Ergebnisse

Hat man nun die am besten passende Exponentialfunktion für die Messwerte bestimmt, so kann man daraus die mittlere Lebensdauer von Myonen berechnen (siehe Myonen / Mittlere Lebensdauer). Hierzu setzt man die experimentell bestimmte Exponentialfunktion mit der Häufigkeitsverteilung des Zerfallsgesetzes gleich, welches ebenfalls durch eine Exponentialfunktion beschrieben wird, und erhält daraus die Zerfallskonstante. Mit den Daten der Fit-Funktion aus Abbildung 14 und Abbildung 15 erhält man folgendes Ergebnis:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$N_0 = 1363$$

$$\lambda = 0,4373 \mu s^{-1}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 2,29 \mu s$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 1,59 \mu s$$

Eine Auswertung neuer Messdaten mit der kompakten Elektronik und mit dem im Praktikum genutzten Auswerteprogramm ergab eine durchschnittliche Lebensdauer von $2,29 \pm 0,05 \mu s$. Diese weicht vom bekannten Wert von $2,197 \mu s$ leicht ab. Zu erklären ist dies durch systematische Fehler wie das Fehlen einer Anti-Koinzidenz oder durch die Bewegung der Myonen im Szintillator.

Diese Ergebnisse sind für den einfachen Aufbau der Messung meiner Meinung nach erstaunlich genau.

6. Besonderheiten bei Myonen und Anti-Myonen

Erstaunlicherweise gibt es bei solchen Messungen einen Unterschied zwischen der Lebensdauer von Myonen und Anti-Myonen, der sich zwar nicht mit dem hier beschriebenen Messaufbau nachweisen lässt, aber trotzdem einer Erwähnung wert ist.

Myonen sind negativ geladene Teilchen. Dringen diese Teilchen in Materie wie den Szintillator ein und werden dort gestoppt, werden sie von den positiv geladenen Atomkernen angezogen und können von diesen sogar wie ein Elektron eingefangen werden. Da sich für ein eingefangenes Myonen aber nun auch noch andere Reaktionsmöglichkeiten bieten, wie beispielsweise eine Reaktion mit einem Proton des Kerns, erhöht sich dessen Zerfallswahrscheinlichkeit, und die Lebensdauer verringert sich je nach dem „einfangenden“ Atomkern.

Die positiv geladenen Anti-Myonen werden dagegen nicht vom Atomkern angezogen, und ihre mittlere Lebensdauer bleibt unverändert. Daher besitzen Myonen im Vergleich zu Anti-Myonen in einem solchen Experiment eine geringere mittlere Lebensdauer.

F. Einsatz im Praktikum

Die Experimentieranordnung befindet sich jetzt im Keller des Andreas-Schubert-Baus der Technischen Universität Dresden. Abbildung 16 zeigt ein Foto der Apparatur.



Abbildung 16 Messanordnung im Keller des Andreas-Schubert-Baus der TU Dresden

Die Messapparatur wurde im Institut für Kern- und Teilchenphysik der TU Dresden für das Fortgeschrittenenpraktikum von Physikstudenten aufgebaut. Dieses Praktikum wird meist von Studenten im fünften Semester besucht. Es beschäftigt sich mit der Lebensdauer von Myonen und der schwachen Wechselwirkung.

Die Studenten werden in drei Gruppen zu je zwei Personen aufgeteilt. Eine Gruppe arbeitet an einer anderen, dem hier beschriebenen Experiment sehr ähnlichen Messanordnung, bei der die Myonen aber in Kupfer gestoppt werden und es eine Anti-Koinzidenz gibt. Eine zweite Gruppe führt die hier beschriebenen Experimente in verkürzter Form aus, und die dritte Gruppe beschäftigt sich mit den verschiedenen Methoden der Fit-Rechnung. Während des Tages wechseln die Gruppen ihre Aufgabenbereiche. Anschließend stellt jede Gruppe ihre Ergebnisse vor. Die Anlage wird einmal pro Woche, am Freitag, von diesen Studenten genutzt. Über das Wochenende lässt ein Betreuer dann eine Messung für ein Zeitspektrum laufen, welches die Studenten dann am Montag nach ihrem Praktikum erhalten und auswerten. Am Ende soll jeder von ihnen selbstständig die mittlere Lebensdauer mit Hilfe verschiedener Fit-Methoden aus den Messdaten ermitteln.

Weitere Informationen zum Praktikumsversuch an der TU Dresden finden sich auch im Internet [10].

III. Schlussbetrachtung

Im Rahmen der Besonderen Lernleistung zum Thema „Aufbau eines Praktikumsversuches zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen“ wurden am Institut für Kern- und Teilchenphysik der TU Dresden folgende Aufgaben weitgehend eigenständig bearbeitet:

1. Durchführung von Rauschmessungen an verschiedenen Photomultipliern und anschließende Auswahl zweier geeigneter Lichtverstärker,
2. Konstruktion der Detektormechanik, speziell der Halterungen mit Hilfe eines CAD-Programms,
3. Mitwirkung beim Aufbau des Szintillationsdetektors,
4. Durchführung verschiedener Messreihen zur Optimierung der Versorgungsspannung der Photomultiplier,
5. Durchführung von Messungen zur Ermittlung von Lebensdauerspektren von Myonen und deren Auswertung.

Während der Aufbau- und Entwicklungsphase wurden alle Messungen noch mit Standardgeräten der Kern- und Teilchenphysik durchgeführt. Zeitgleich entwickelte und baute das Elektroniklabor des Instituts eine spezielle, kompaktere Versuchselektronik. Ein Programm zur Übertragung und Verarbeitung der Messdaten der neuen Elektronik, die über ein USB-Kabel mit einem Computer verbunden werden konnte, wurde erstellt. Mit dieser neuen Ausstattung wurden die letzten Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Versuchsaufbau voll funktionsfähig ist.

Im Wintersemester 2005/2006 konnte der Versuch erstmals im Fortgeschrittenenpraktikum für Physiker im Studienbetrieb verwendet werden.

IV. Anhang

A. Literaturverzeichnis

- [1] Breuer, Hans und Rosemarie
Dtv-Atlas Physik Band 2
Deutscher Taschenbuch Verlag, München
2000

- [2] Coughlan, Guy und Dodd, James
Elementarteilchen – Eine Einführung für Naturwissenschaftler
Verlag Vieweg, Braunschweig/ Wiesbaden
1991

- [3] Fritsch, Harald
Elementarteilchen - Bausteine der Materie
Verlag C. H. Beck, Nordlingen
2004

- [4] Genz, Henning
Elementarteilchen
S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main
2003

- [5] Hartmann, Werner und Bernhard, Fritz
Fotoervielfacher und ihre Anwendung in der Kernphysik
Akademie Verlag, Berlin
1957

- [6] Leo, W.R.
Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
Springer-Verlag, Berlin
1994

- [7] Meiling, Wolfgang
Kernphysikalische Elektronik
Akademie-Verlag, Berlin
1975
- [8] [http://phys-advlab.physics.lsa.umich.edu/
Phys441%5F442/Muon%20Lifetime/muon_lifetime.pdf](http://phys-advlab.physics.lsa.umich.edu/Phys441%5F442/Muon%20Lifetime/muon_lifetime.pdf)
-07.01.2006
- [9] [http://online.physics.uiuc.edu/courses/phys403/303Project/Fall2004/
MuonCountingRevisited_by_JoseHipolitoGarciaGracia_Fall2004.pdf](http://online.physics.uiuc.edu/courses/phys403/303Project/Fall2004/MuonCountingRevisited_by_JoseHipolitoGarciaGracia_Fall2004.pdf)
-07.01.2006
- [10] <http://hep.phy.tu-dresden.de/iktp/lehre/fprak/muon/LM.html>
-07.01.2006
- [11] <http://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>
-07.01.2006
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Szintillator>
-07.01.2006
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/Myon>
-07.01.2006
- [14] http://www.federmann.co.at/vfhess/Kapitel/7_3.html
-07.01.2006
- [15] <http://nobelprize.org/physics/laureates/1949/yukawa-bio.html>
-07.01.2006

B. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1	Kosmischer Teilchenschauer 8 nach [8]
Abbildung 2	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lebensdauer beim radioaktiven Zerfall..... 10
Abbildung 3	Aufbau und Funktionsweise eines Photomultipliers 15 nach [11]
Abbildung 4	PM-Signale und Elektronik (schematisch) 17
Abbildung 5	Richtig eingestellte Diskriminatorschwelle (schematisch)..... 17
Abbildung 6	Koinzidenz zweier Diskriminatorsignale..... 19
Abbildung 7	Signale am Diskriminator-Ausgang (schematisch): 20
Abbildung 8	Häufigkeitsverteilung der Zeitabstände (Zeitspektrum): N ist die Zahl der Ereignisse, bei denen der Zeitabstand T gemessen wurde. 20
Abbildung 9	Zählrate eines Photomultipliers bei unterschiedlicher Spannung als Funktion der Diskriminatorschwelle..... 23
Abbildung 10	Schema der Koinzidenzmessung 25
Abbildung 11	Signalamplituden bei zu kleiner und zu großer PM-Spannung U_{PM} 25
Abbildung 12	Ergebnisse einer Plateaumessung 26
Abbildung 13	Messschaltung zur Aufnahme von Zeitspektren 29
Abbildung 14	Zeitspektrum des Myonenzerfalls in linearer Darstellung 30
Abbildung 15	Zeitspektrum des Myonenzerfalls in logarithmischer Darstellung..... 31
Abbildung 16	Messanordnung im Keller des Andreas Schubert Baus der TU Dresden 34

Alle Bilder, bei denen keine Quelle angegeben ist, wurden von mir selbst entworfen und erstellt.

V. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum

Richard Pausch