

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

— Institut für Physik —

Versuchsanleitung zum Fortgeschrittenen-Praktikum

Messung der Myon-Lebensdauer

Dr. Oliver Maria Kind, Dr. Sebastian Mergelmeyer
19. Juni 2019

AG Experimentelle Elementarteilchenphysik
Physiklabor 1, 2'424

1 Allgemeine Vorbemerkungen

Ziel dieses Versuches ist es, die mittlere Lebensdauer des Myons experimentell zu bestimmen. Dazu gehört auch das Erlernen teilchenphysikalischer Grundpraktiken, d. h. zum einen der Umgang mit Teilchendetektoren und der dazugehörigen Meßelektronik, und zum anderen eine konsequente statistische Analyse und Interpretation der gewonnenen Meßergebnisse.

1.1 Durchführung

Die Versuchsdurchführung gliedert sich in zwei Teile. Am ersten Versuchstag wird die Versuchsanordnung aufgebaut, geeicht, und die Messung des Myonlebensdauerspektrums gestartet. Die Messung läuft über Nacht, mindestens jedoch 12 Stunden lang. Am zweiten Versuchstag wird die Messung beendet und anschließend die Lebensdauer des Myons durch statistische Analyse der Meßdaten vor Ort ermittelt.

1.2 Vorkenntnisse

Grundlagen der Elementarteilchenphysik und der Physik der Teilchendetektoren, aber auch der Elektronik und Statistik sind notwendige Voraussetzung zur erfolgreichen Durchführung dieses Versuchs.

Beachten Sie, daß die angegebene Literatur bereits vor der Durchführung des Versuchs zu lesen ist, insbesondere mit Hinblick auf das Prinzip des Experiments, die Datenauslese und anschließende statistische Auswertung. Am Ende dieses Abschnitts findet sich ein Fragenkatalog, der zur Orientierung bei der Vorbereitung dienen soll. Zu Beginn eines jeden Versuchstages findet eine Eingangsprüfung statt; am ersten Tag zum experimentellen Aufbau, am zweiten Tag zur statistischen Analyse. In beiden Prü-

fungen ist ein grundlegendes Verständnis des Versuchs sowie der notwendigen experimentellen und statistischen Methoden nachzuweisen; andernfalls darf der Versuch am vereinbarten Termin nicht absolviert werden. Weiterhin finden sich im Abschnitt 1.4 spezielle Aufgaben, welche vor Versuchsbeginn zu bearbeiten sind. Diese dienen zum einen einer Vertiefung des Verständnisses des Versuchs und sind zum anderen notwendige Vorarbeiten für die Durchführung desselben. Die Lösungen sind dem betreuenden Assistenten am jeweiligen Versuchstag in schriftlicher Form vorzulegen. Eine Nichtbearbeitung der Aufgaben führt ebenfalls zu einer Wiederholung des Versuchs.

Die zusätzlich zu dieser Anleitung notwendigen Vorkenntnisse finden sich fast ausnahmslos in dem Buch von LEO [Leo94], welches in der Bibliothek (Schrödingerzentrum) zur Verfügung steht. Die folgende Liste soll einen kurzen Überblick über die notwendigen Grundkenntnisse sowie weiterführende Literatur geben.

- Eigenschaften des Myons, Myonzerfall, Zerfallsgesetz, mittlere Lebensdauer [Gri87, HM84]
- Kosmische Strahlung, Schauerbildung, Pionzerfall, Durchgang geladener Teilchen durch Materie, Strahlungslänge, Energieverlust durch Ionisation, Bremsstrahlung [Leo94]
- Szintillatoren: Funktionsweise, Kenngrößen, Vor- und Nachteile, Einsatzgebiete, Aufbau und Prinzip von Photomultipliern, Lichtleiter (*light guides*) [Leo94, Kle05, Gru93]
- Meßelektronik und Logikschaltungen: Meßverstärker, Diskriminator- und Koinzidenzschaltungen, Zeitmessung (*time to amplitude converter*), Analog-Digital-Wandler, *single channel analyser*, *multi channel analyser*, *trigger*, BOOLSCHNE ALGEBRA, Signalübertragung auf Kabeln, NIM- und TTL-Standard [Leo94]

- Grundlagen der Statistik, Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Mittelwertbildung, Stichproben, Histogrammierung, Hypothesentests, Parametertests und Maximum-Likelihood, χ^2 -Anpassungsfit und Interpretation, Fehlerrechnung, statistische und systematische Fehler [Leo94, Bar95, Bra99, Bar00, VL98]

1.3 Fragenkatalog (exemplarisch)

1.3.1 Myonzerfall

- Warum erreichen Myonen trotz einer vergleichsweise kurzen Lebensdauer von ca. $2 \mu\text{s}$ überhaupt den Erdboden? Wie ist es möglich, die Lebensdauer der Myonen innerhalb des Detektorsystems zu messen, obwohl diese doch schon eine Flugzeit, welche mehreren km entspricht, hinter sich haben?

1.3.2 Detektoren

- Welche Formen von Energieverlust treten beim Durchgang von geladenen Teilchen durch Materie auf? Wie sieht der Verlauf der BETHE-BLOCH-Kurve in Abhängigkeit vom LORENTZ-BOOST $\beta\gamma$ bzw. vom Impuls des Teilchens aus? Warum spielt Bremsstrahlung für die im Energiebereich betrachteten Myonen keine Rolle? Erklären Sie das Funktionsprinzip des verwendeten Bleiabsorbers.
- Wie funktioniert ein Szintillator? Was ist ein Wellenlängenschieber? Wodurch wird die Zeitauflösung des Photomultipliers maßgeblich bestimmt? Welchen Quellen von Rauschen gibt es?

1.3.3 Schaltelektronik

- Durch welche Spannungswerte sind Logiksignale im Fast-NIM-Standard definiert?

1.3.4 Statistik

- Was ist ein Histogramm? Wie berechnen sich Erwartungswert und Varianz innerhalb eines Kanals? Was passiert beim Zusammenfassen mehrerer benachbarter Kanäle des Histogramms (*rebinning*)?
- Was versteht man unter einem *maximum likelihood*? Erklären Sie den Zusammenhang zum χ^2 -Parameterfit. Welche Voraussetzungen müssen für die Anwendung eines χ^2 -Fits erfüllt sein? Welchen Erwartungswert hat man an das χ^2 pro Freiheitsgrad und warum? Wie sind Abweichungen zu diesem Erwartungswert zu interpretieren?
- Wie berechnen sich die statistischen Unsicherheiten der Ergebnisse eines Parameterfits?
- Was versteht man unter systematischen Effekten eines Experiments, und welche Möglichkeiten ihrer Handhabung gibt es? Machen Sie sich den Unterschied zwischen statistischen und systematischen Unsicherheiten einer Messung klar.

1.4 Vorbereitende Aufgaben

Die folgenden Aufgaben sind vor Versuchsbeginn zu bearbeiten.

Aufgabe 1.4a: Berechnen Sie unter Zuhilfenahme von Glg. 9 die normierte Wahrscheinlichkeitsdichte $\rho(t)$ für den Myonzerfall, und zeigen Sie, daß τ_μ gleich dem Zeiterwartungswert von $\rho(t)$ ist (*mittlere Lebensdauer* des Myons im Ensemble).

Aufgabe 1.4b: Berechnen Sie die maximale Energie des im Myonzerfall freiwerdenden e^\pm unter Benutzung von Energie- bzw. Impulserhaltung. Gehen Sie dazu wie folgt vor:

Betrachten Sie zunächst einen allgemeinen Zweikörperzerfall $A \rightarrow B + C$. Schreiben Sie die Bilanzgleichung der beteiligten Viererimpulse des Zerfalls im Ruhesystem von Teilchen A auf. Davon ausgehend zeigen Sie, daß für die Energie E_B des Teilchens B gilt

$$E_B = \frac{m_A^2 + m_B^2 - m_C^2}{2m_A}, \quad (1)$$

wobei m_A, m_B, m_C die Massen der beteiligten Teilchen bedeuten.

Führen Sie nun den Dreikörperzerfall des Myons auf einen Zweikörperzerfall zurück, indem Sie die beiden Neutrinos zu einem Zweiteilchensystem mit $E_{2\nu} = E_{\nu_\mu} + E_{\nu_e}$ bzw. $\vec{p}_{2\nu} = \vec{p}_{\nu_\mu} + \vec{p}_{\nu_e}$ zusammenfassen. Benutzen Sie Glg. 1, um einen Ausdruck für die Energie des auslaufenden Elektrons zu finden. Für welche Konfiguration der auslaufenden Zerfallsteilchen wird die Elektronenergie maximal? Geben Sie einen Zahlenwert für diese Energie an!

Aufgabe 1.4c: Welchen LORENTZ-Boost $\beta\gamma$ besitzt ein minimalionisierendes Teilchens etwa? Wie groß ist der zugeordnete Impuls eines (a) Elektrons, (b) Myons und (c) eines Protons?

Aufgabe 1.4d: Berechnen Sie grob den Energieverlust eines minimalionisierenden Teilchens beim Durchgang durch 10 cm Blei bzw. 6 cm Aluminium. Nehmen Sie dabei der Einfachheit halber an, daß sich der Energieverlust in der Umgebung des Minimums nicht ändert.

Aufgabe 1.4e: Für den Schaltungsaufbau des Versuchs stehen Steckverbindungen mit Längen von 20 bzw. 30 cm zur Verfügung. Berechnen Sie die Verzögerungszeiten von Signalen für die gegebenen Kabellängen. Alle Kabel sind vom Typ RG58U mit einer Impedanz von 50Ω . Sind die Verzögerungszeiten für diesen Versuch von Belang?

Aufgabe 1.4f: Alle NI-Module in diesem Versuch sind so eingestellt, daß die erzeugten Logiksignale eine Breite von ca. 10 ns besitzen. Welche minimale Verzögerungszeit erwarten Sie für eine einzelne Koinzidenzeinheit?

Aufgabe 1.4g: Betrachten Sie die 3-fach Koinzidenz innerhalb der Schaltung 5 mit Hinblick auf Ihre Ergebnisse aus den Aufgaben 1.4e und 1.4f. Zeichnen Sie ausgehend von den Photomultipliern ein Zeitablaufdiagramm für diesen Teil der Schaltung. Inwieweit ist daher Schaltung 5 zu modifizieren, und wie realisieren Sie dies technisch?

Aufgabe 1.4h: Schreiben Sie Glg. 14 in einer geschickteren Form hinsichtlich des Parameterfits bei der Auswertung.

2 Einführung

2.1 Elektroschwache Theorie und Myonzerfall

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik kennt drei Leptonfamilien

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}, \quad (2)$$

sowie deren Antiteilchen. Die geladenen Leptonen e, μ und τ unterscheiden sich nicht in der Stärke ihrer elektromagnetischen

und schwachen Wechselwirkung. Lediglich ihre Massen sind verschieden [Y+06]:

$$\begin{aligned} m_e &= 0.510\,998\,92(4)\text{ MeV}, \\ m_\mu &= 105.658\,369(9)\text{ MeV}, \\ m_\tau &= 1776.99^{+0.29}_{-0.26}\text{ MeV}. \end{aligned} \quad (3)$$

Sowohl Myonen als auch Tauonen sind instabil:

$$\tau_\mu = 2.197\,03(4)\,\mu\text{s}, \quad \tau_\tau = 290.6(10)\text{ fs}. \quad (4)$$

Dabei zerfallen Myonen in beinahe 100 % aller Fälle schwach über den Austausch eines W-Bosons



Prozesse höherer Ordnung, bei denen zusätzlich noch ein Photon im Endzustand auftritt, sind sehr selten. In der V-A-Theorie erhält man für die Zerfallsbreite des Myons in führender Ordnung (im Falle von kleinen Impulsüberträgen im Vergleich zur Masse des W-Bosons):

$$\Gamma_{\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192 \pi^3}. \quad (6)$$

Die hierbei auftretende Kopplungskonstante G_F der (alten) FERMI-Theorie ist verknüpft mit der elektroschwachen Kopplungskonstanten g_W durch

$$\frac{g_W^2}{8 M_W^2} = \frac{G_F}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Die Zerfallswahrscheinlichkeit Γ führt zu einer konstanten Zerfallsrate für Myonen

$$\Gamma = -\dot{N}/N, \quad (8)$$

Die Integration dieser Gleichung ergibt dann

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_\mu}, \quad (9)$$

wobei $\tau_\mu = 1/\Gamma$ und $N(t)$ die Anzahl der überlebenden Myonen zur Zeit t bedeuten. In diesem Versuch wird allerdings nicht $N(t)$ direkt gemessen, sondern die Anzahl von Zerfällen von Myonen, welche mehr oder weniger zufällig ins Detektorsystem einlaufen. Die Anzahl von Zerfällen im Zeitintervall $t+dt$ ergibt sich durch Differentiation von Glg. (9)

$$-dN(t) = \frac{N_0}{\tau_\mu} e^{-t/\tau_\mu} dt. \quad (10)$$

2.1.1 Myonische Atome und Kerneinfang

Bei der Bestimmung der Lebensdauer ist jedoch zu beachten, daß negativ geladene Myonen mit den positiv geladenen Atomkernen des Materials, in dem sie sich befinden, myonische Atome bilden können. Hierbei wird das μ^- in einer vernachlässigbar kurzen Zeitspanne von weniger als 1 ns vom Coulombfeld des Kerns eingefangen und in der K-Schale gebunden. Der mittlere Radius dieses Zustandes ist um das Massenverhältnis von Elektron zu Myon (~ 200) kleiner als bei vergleichbaren elektronischen Atomen, was zu einer starken Überlappung von Myon- und Kernwellenfunktion führt.¹ Es besteht daher die Möglichkeit, daß das Myon über die Reaktion $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ vom Kern absorbiert wird, welche in Konkurrenz zum freien Zerfall des μ^- tritt. Da der Kerneinfang über die schwache Wechselwirkung verläuft, ist die mittlere Einfangzeit von derselben Größenordnung wie die des freien Myonzerfalls und führt daher zu einer effektiven, nicht mehr zu vernachlässigenden Verlängerung der Myonlebensdauer τ_0 :

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{Q}{\tau_\mu} + \Lambda_C, \quad (11)$$

¹Beachtenswert ist hier, daß die Überlappungswahrscheinlichkeit von der Kernladungszahl Z des umgebenden Mediums über $\sim Z^4$ abhängt.

Material	$\Lambda_C [\mu\text{s}^{-1}]$	Q
Al	0.7054 ± 0.0013	0.993
Cu	5.676 ± 0.037	0.967
Pb	13.45 ± 0.18	0.844

Tabelle 1: Einfangraten und Huff-Faktoren für μ^- in verschiedenen Kernmaterialien. [SMR87]

Werte für die Einfangraten Λ_C und Huff-Faktoren Q von Myonen in verschiedenen Materialien sind in Tab. 1 gegeben. Das Zerfallsgesetz für Myonen (Glg. 9) muß demgemäß modifiziert werden:

$$N(t) = N_{\mu^+} \left(e^{-t/\tau_{\mu}} + \frac{1}{f} e^{-t/\tau_{\text{eff}}} \right), \quad (12)$$

wobei f das Verhältnis zwischen positiv und negativ geladenen Myonen angibt. Dies ist experimentell bestimmt zu [Kem05]:

$$f = N_{\mu^+}/N_{\mu^-} = 1.270(3). \quad (13)$$

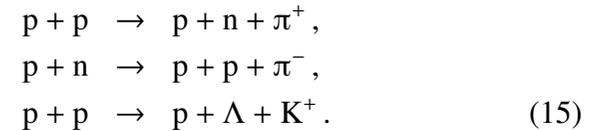
Analog zu Glg. 10 erhält man für die Anzahl der Zerfälle im Zeitintervall $t+dt$:

$$-dN(t) = N_{\mu^+} \left(\frac{1}{\tau_{\mu}} e^{-t/\tau_{\mu}} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \cdot \frac{1}{f} e^{-t/\tau_{\text{eff}}} \right) dt. \quad (14)$$

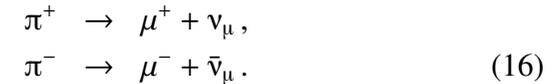
2.2 Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung stellt eine ergiebige und zugleich preiswerte Quelle für Myonen dar. Beim Auftreffen der primären kosmischen Strahlung, welche überwiegend aus energiereichen Protonen besteht, auf die oberen Atmosphärenschichten werden ausgedehnte Teilchenschauer ausgelöst, die sich bis hinunter zum Erdboden entwickeln. Dabei entstehen zunächst durch Kernwech-

selwirkung der einfallenden Protonen häufig Pionen



Diese zerfallen dann in Myonen



Da die Atmosphäre etwa 28 Strahlungslängen bzw. 12 Kernwechselwirkungslängen dick ist, werden alle (langlebigen) Teilchen mit Ausnahme der Myonen (und Neutrinos) fast vollständig absorbiert und erreichen den Erdboden nur selten. Der mittlere Energieverlust dE/dX von Myonen beträgt etwa $2 \text{ MeV} \cdot \rho/\text{gcm}^2$ (ρ). In der Nähe der Erdoberfläche gilt für Luft $dE/dX = 250 \text{ MeV km}^{-1}$. Im Gegensatz zu Elektronen spielt Bremsstrahlung im betrachteten Energiebereich der Myonen keine Rolle.

Der Fluß der Myonen auf Meeresebene beträgt etwa $200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Da die kosmische Strahlung abhängig vom Zenitwinkel θ unterschiedlich dicke Atmosphärenschichten durchdringen muß, führt dies zu einer Winkelabhängigkeit des Myonflusses wie $\cos^2\theta$. Aufgrund der positiven Primärkomponente gibt es etwas mehr positive als negative Myonen; das Verhältnis beträgt, wie schon erwähnt, 1.270(3). Das Impulsspektrum der Myonen aus der kosmischen Strahlung, gemessen bei vertikalem Einfall, ist in Abb. 1 dargestellt. Das Maximum der Verteilung liegt unterhalb von 1 GeV, und die Verteilung fällt steil mit steigendem Impuls ab. Die mittlere Energie der Myonen auf Meeresebene beträgt etwa 2–2.5 GeV.

Neben den Myonen treten auch Neutronen und schnelle Protonen bzw. Pionen in den Schauern der kosmischen Strahlung auf. Abbildung 2 enthält Vorhersagen für die betreffenden Anteile bzw. deren Flüsse.

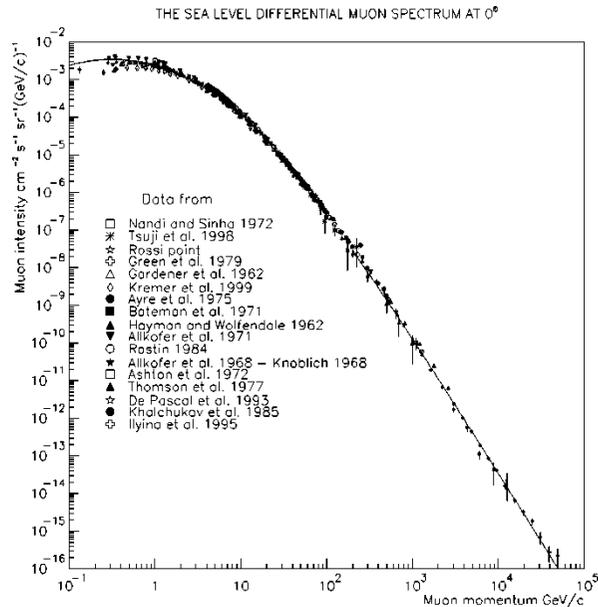


Abbildung 1: Verschiedene Messungen des Impulsspektrums von Myonen aus der kosmischen Strahlung auf Meeresniveau für verschiedene magnetische Breitengrade [Kem05].

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Die Myonen durchqueren zunächst einen ca. 10 cm dicken Bleiabsorber, welcher zur Abschirmung anderer Teilchen dient, und werden danach mittels des Szintillators SC1 registriert. Dieser und die beiden anderen Szintillatoren besitzen eine Fläche von 50 cm × 30 cm. Im nachfolgenden, 6 cm dicken Aluminiumblock werden die Myonen weiter gestoppt, um dann möglichst in Ruhe zu zerfallen. Beim Zerfall wird das Myon bzw. das Zerfallselektron/-positron von den umgebenden Detektoren SC2 und SC3, welche aus Platten von Szintillatormaterial bestehen,

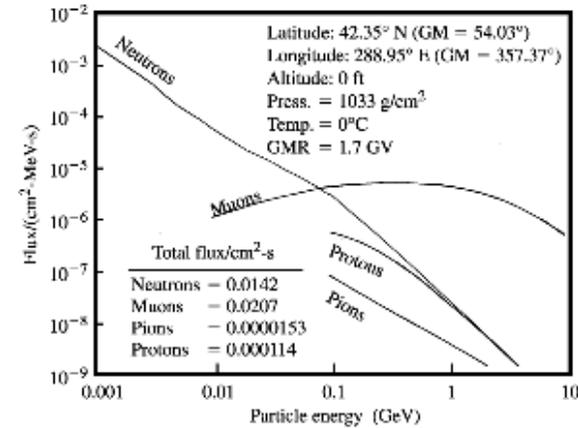


Abbildung 2: Vorhersage für die Flüsse der verschiedenen Teilchensorten in der kosmischen Strahlung auf Meeresniveau in Abhängigkeit ihrer Energie. Die integrierten Flüsse sind ebenfalls angegeben.

nachgewiesen. Charakteristisch für den Zerfallsprozeß ist also ein (im Rahmen der Detektorauflösung gleichzeitig auftretendes) gleichzeitiges Signal (Koinzidenz) in den Detektoren SC1 und SC2, gefolgt von einem um einige μs verzögerten Signal in SC2 oder SC3. Die Zeitdifferenzen zwischen Ankuft und Zerfall der Myonen sind zu messen und zu histogrammieren.

Alle hier verwendeten Szintillatoren sind Plastikszintillatoren NE102A, die über Lichtleiter aus Plexiglas mit Photomultipliern vom Typ H7360-02 der Firma Hamamatsu (s. Anhang C) verbunden sind. Diese enthalten neben der Hochspannungsversorgung auch einen Verstärker und einen Diskriminator für die Ausgangssignale. Letzterer dient der Unterdrückung von Rauschsignalen, welche meist durch thermische Emission von Elektronen in der Photokathode des Photomultipliers entstehen, und die in der Regel deutlich niedrigere Pulshöhen besitzen als die zu messen-

den Signale. Zusätzlich sind die Szintillatoren SC2 und SC3 zur weiteren Rauschunterdrückung beidseitig (links/rechts) mit Photomultipliern bestückt. Damit lassen sich Signale der spontan emittierten thermischen Elektronen effektiv unterdrücken, da solche Signale im jeweils linken und rechten Photomultiplier zeitlich unkorreliert auftreten. Die Ausgangssignale der Photomultiplier genügen dem TTL-Standard und werden über Koaxialkabel der weiteren Ausleseelektronik zugeführt. Die zur Verfügung stehenden Elektronikmodule sind in Anhang B aufgelistet.

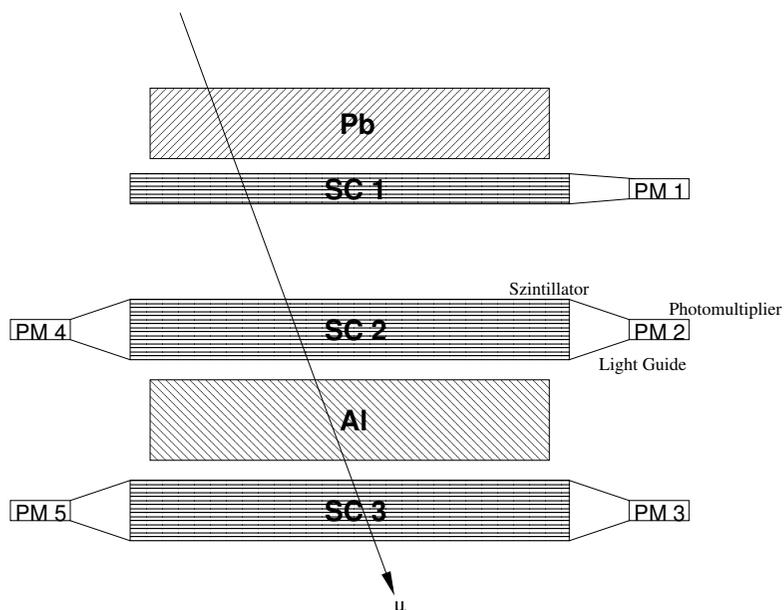


Abbildung 3: Detektoranordnung zur Messung der Myonlebensdauer

4 Erster Versuchstag: Versuchsdurchführung

4.1 Inbetriebnahme

Bei allen Schaltungen ist zu beachten, Signalkabel ggf. mit der passenden Impedanz abzuschließen. Bitte denken Sie vor allem in der warmen Jahreszeit daran, während der Messungen den Lüfter zur Kühlung der Ausleseelektronik einzuschalten. Der Schalter hierzu befindet sich auf der linken Seite am Sockel des NIM-Crates.

Die Spannungsversorgung der Photomultiplier wird mit den fünf grünen Tasten links eingeschaltet. Weiterhin müssen die Signale der Photomultiplier von TTL-Pegel auf NIM-Standard gebracht werden. Dies geschieht mithilfe eines *level converters*. Dabei ist zu beachten, daß sich der zugehörige Kippschalter des Konverters in der Stellung COMPL befindet, damit die NIM-Signale die korrekte Polarität erhalten.

4.2 Laufzeitverhalten von Signalen

Bei der Messung solcher kurzer Zeitdifferenzen wie der mittleren Lebensdauer des Myons ist es wichtig, sich über das Laufzeitverhalten der Signale innerhalb der Schaltung klar zu werden und mögliche Einflüsse auf die Messung zu erkennen.

Aufgabe 4.2a: Messen Sie mithilfe des Oszilloskops die Verzögerungszeit einer beliebigen Koinzidenzeinheit. Als Eingangssignale benutzen Sie dazu Pulse des Szintillatorblocks SC2 (d. h. PM2 und PM4 in Koinzidenz).² Überlegen Sie

²Damit verhindern Sie infolge der Rauschunterdrückung unerwünschte Störsignale in den Oszillogrammen.

sich eine geeignete Schaltung zur Messung der Verzögerung einer Koinzidenzeinheit und realisieren Sie diese. Zur Speicherung von Oszillogrammen benutzen Sie bitte beiliegende Diskette. Mit dem PRINT-Knopf des Oszilloskops können Sie das aktuelle Bild als EPS-Datei auf Diskette abspeichern. Die einzelnen Dateien erhalten hierbei eine fortlaufende Nummerierung. Entspricht die gemessene Verzögerung Ihrer Erwartung?

4.3 Bestimmung der Ereignisraten

Die beiden folgenden Aufgaben sind gleichzeitig zu bearbeiten, um Zeit für notwendige Umbauarbeiten zu sparen.

Aufgabe 4.3a: Bestimmen Sie die Ereignisraten in den Photomultipliern 1–5 zunächst einzeln und sodann für Koinzidenzen in PM2 und PM4 bzw. PM3 und PM5. Benutzen Sie dazu den *quad scaler*. Messen Sie jeweils mindestens viermal und mitteln Sie Ihr Ergebnis in geeigneter Weise. Tragen Sie Mittelwert und Fehler in eine Meßwerttabelle ein. Wieviel Effizienzverlust erhalten Sie für die Szintillatoren SC2 und SC3 bei der Forderung einer Links-/Rechtskoinzidenz?

Messen Sie außerdem die Raten für die Koinzidenzen $SC1 \wedge SC2$, $SC1 \wedge SC2 \wedge SC3$, $SC1 \wedge SC2 \neg SC3$, $SC2 \wedge SC3$ und $SC2 \vee SC3$.

Auch die Messung der Raten in den einzelnen Szintillatoren alleine ist wichtig, d. h. $SC1 \neg SC2 \neg SC3$, $\neg SC1 \wedge SC2 \neg SC3$ und $\neg SC1 \neg SC2 \wedge SC3$.

Prüfen Sie, ob Ihre Raten untereinander konsistent sind.

Aufgabe 4.3b: Beobachten Sie gleichzeitig die dazugehörigen Signale am Oszilloskop mit einer sinnvollen(!) Zeitbasis von 20–400 ns, und speichern Sie zu jeder Konfiguration

mindestens ein Bild. Benutzen Sie beide Eingangskanäle des Oszilloskops und ggf. auch den Eingang zur externen Triggerung. Fügen Sie alle Bilder und deren aussagekräftige Interpretation in Ihr Protokoll ein. Wie häufig sehen Sie Mehrfachtreffer auf einem Kanal?

4.4 Zeiteichung

Um die Myonslebensdauer messen zu können, muß zuvor das Ausgangssignal des *time amplitude converters* (TAC) geeicht werden. Dazu werden gemäß der Schaltung in Abb. 4 am Szintillator SC1 zufällig auftretende Ereignisse ausgelesen, welche jeweils das Startsignal an den TAC geben. Die auftretenden Pulsdauern sind hierbei genügend klein ($\lesssim 10$ ns), um die Messung nicht zu beeinflussen. Mittels eines *fan-out*-Moduls³ werden die Pulse dupliziert und durch ein variables Verzögerungselement (*delay*) verzögert, und damit der TAC gestoppt.

Der Eingangspuls wird nun mittels eines der beiden (identischen) Pulsgeneratoren des *dual timer*, welche Pulsdauern von 50 ns bis 10 s erlauben, verzögert. Das Signal startet die Ausgabe eines Pulses mit voreingestellter Länge Δt am Generator. Damit aber die Verzögerung nicht durch neuerliche Eingangssignale gestört wird, muß der Ausgang OUT des Generators auf den VETO-Eingang zurückgekoppelt werden. Der verzögerte Puls kann mit dem Oszilloskop am zweiten Ausgang OUT des *timers* beobachtet werden. Der END MARKER-Ausgang des Pulsgenerators, welcher einen 15 ns langen Puls, der zum Ende des Generatorpulses ausgelöst wird, produziert, dient dem TAC als STOP-Signal. Stellen Sie den Meßbereich des TAC auf 0 bis 20 μ s ein. Beachten Sie, daß die Kippschalter der *gates* für START und STOP auch bei Nichtanschluß immer in der

³Benutzen Sie hierzu eines der in den Koinzidenzmodulen integrierten *fan-out*-Module (ODER mit nur einem Eingang!).

Antikoinzidenz-Stellung stehen müssen, da der TAC ansonsten kein Signal akzeptieren würde.

Aufgabe 4.4a: Beobachten Sie das analoge Ausgangssignal des TAC am Oszilloskop. Wie breit ist dieses Signal und wie groß ist seine Verzögerung gegenüber dem STOP-Signal? Stellen Sie mithilfe des zweiten Kanals am Oszilloskop eine Verzögerung von genau $4\ \mu\text{s}$ ein. Entspricht die Höhe des TAC-Ausgangssignals Ihrer Erwartung? Tragen Sie das Oszillogramm in Ihr Protokoll ein!

Die eingestellte Verzögerung wird in Bezug gesetzt zur Ausgangsspannung des TAC, welche mittels des *multi channel analysers* (MCA) am PC sichtbar ist. Aufgrund der endlichen Auflösung des ADC können dabei gleichzeitig mehrere Kanäle ansprechen, wobei die Breite dieser Verteilung ein Maß für die Zeitauflösung der Schaltung ist.

Aufgabe 4.4b: Erstellen Sie durch Messung bei etwa 15–20 verschiedenen, für den nachfolgenden Versuch relevanten Zeitverzögerungen, eine Eichung, welche den Zusammenhang zwischen Zeitintervall und ADC-Kanal angibt. Dabei sind die Zeiten unbedingt mithilfe des Oszilloskops exakt einzustellen. Ein einfaches Ablesen der Einstellskala des *delay* ist hier nicht ausreichend, da diese insbesondere am unteren Ende des Einstellbereiches ein starkes nichtlineares Verhalten aufweist. Tragen Sie alle Messungen in ein *einzelnes* Spektrum ein und speichern es. Dieses wird dann am zweiten Versuchstag ausgewertet. Vergessen Sie nicht, sich die eingestellten Verzögerungszeiten zu jeder Messung in der richtigen Reihenfolge zu notieren.

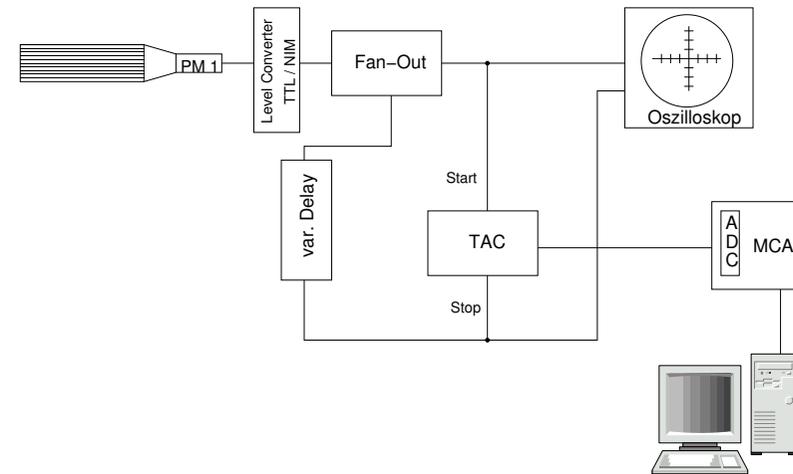


Abbildung 4: Blockschaltbild zur Bestimmung der Zeiteichung

4.5 Messung der Myonlebensdauer

Die Messung der Myonlebensdauer erfolgt mittels der Schaltung in Abb. 5. Ein von oben einlaufendes Myon, welches in der Aluminiumschicht des Detektors zerfällt, löst zunächst nur Signale in den Szintillatoren SC1 und SC2, aber nicht in SC3 aus. Eine solche Signatur startet die Zeitmessung des TAC.

Beim nachfolgenden Zerfall des Myons treten grundsätzlich zwei Möglichkeiten auf: (1) Das auslaufende e^\pm wird in Vorwärtsrichtung emittiert und daher im Szintillator SC3 aber nicht in SC2 oder SC1 nachgewiesen. (2) Zerfallselektronen, die in Rückwärtsrichtung laufen, werden im Szintillator SC2 evtl. auch in SC1 registriert. Der Szintillator SC3 darf in diesem Fall kein Signal erzeugen. Falls eine der beiden Zerfallssignaturen auftritt, wird die Zeitmessung des TAC gestoppt und die gemessene Zeitspanne an den MCA weitergegeben, dort gespeichert und histogrammiert. Benutzen Sie ihre Ergebnisse aus Abschnitt 4.3, um zu entscheiden, ob die für das STOP-Signal geforderten Antikoinzidenzen

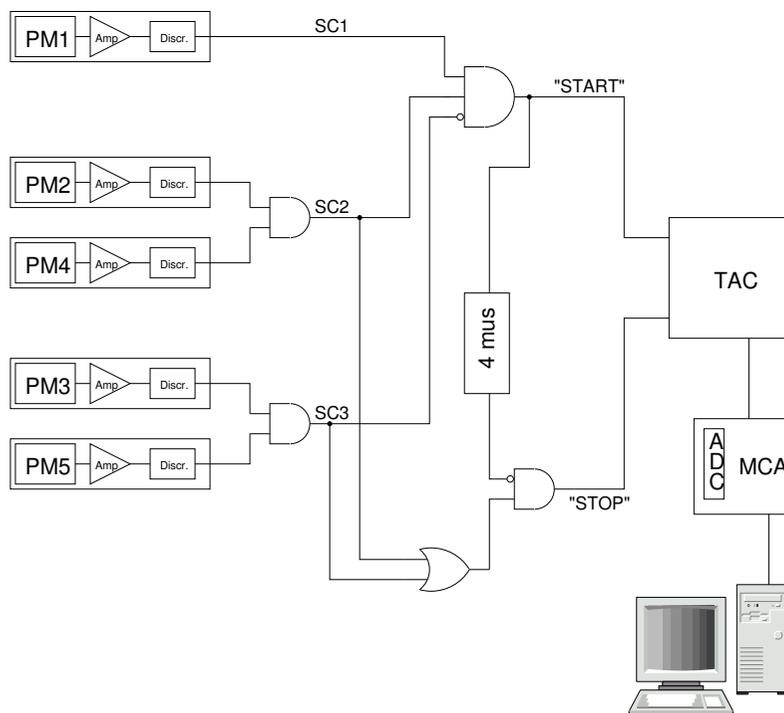


Abbildung 5: Bestimmung der Myonlebensdauer

wirklich notwendig sind.

Aufgabe 4.5a: Nehmen Sie das Spektrum zunächst *ohne* die u. g. Verzögerungsschaltung etwa 30 min lang auf, und verifizieren Sie die Notwendigkeit einer Verzögerung von $4 \mu\text{s}$. Tragen Sie das aufgenommene Spektrum in Ihr Protokoll ein und interpretieren Sie es!

Da die in diesem Versuch eingesetzten Photomultiplier sehr sensitiv sind, werden auch sehr viele Untergrundereignisse registriert, welche die Messung empfindlich stören. Um zumindest eine Teil des Untergrunds zu eliminieren, werden alle STOP-Signale verworfen, welche sich innerhalb eines Zeitfensters von $4 \mu\text{s}$ nach

dem eingegangenen START-Signal ereignen. Dies wird erreicht, indem der auf $4 \mu\text{s}$ verlängerte START-Puls (*gate*) in Antikoinzidenz mit dem STOP-Signal geschaltet wird. Dazu wird der zugehörige *gate*-Eingang des TAC genutzt. Beachten Sie, daß diese Eingänge mit (positivem!) TTL-Pegel betrieben werden. Die NIM-Signale sind daher geeignet zu konvertieren.

Aufgabe 4.5b: Messen Sie nun mit der $4 \mu\text{s}$ -Unterdrückung über einen längeren Zeitraum hinweg (mehrere Stunden bzw. Tage) und sammeln so genügend viele Zerfallszeiten, sodaß am MCA das zu erwartende exponentielle Zerfallsspektrum sichtbar wird, aus dem die Zerfallszeit des Myons bestimmt werden kann.

Bestimmen Sie außerdem die Rate der registrierten Myonzerfälle, und schätzen Sie grob die Meßzeit ab, welche notwendig ist, um die mittlere Lebensdauer auf 1 % genau bestimmen zu können.

5 Zweiter Versuchstag: Auswertung

Ziel der Auswertung ist die Extraktion der mittleren Myonlebensdauer aus dem aufgenommenen Spektrum der Zerfallszeiten sowie die Bestimmung des zugehörigen statistischen und systematischen Fehlers. Zur statistischen Auswertung der Meßdaten steht Ihnen die Vorlage eines Jupyter-Notebooks zur Verfügung. Verbinden Sie sich über einen Web-Browser mit dem Notebook-Server und laden Sie die Dateien der Vorlage hoch. Öffnen Sie das Notebook `muonfit.ipynb`.

5.1 Eichkurve

Zunächst werden die Ergebnisse der Zeiteichung benutzt, um mittels eines Fits die Eichgerade zu ermitteln. Damit ist dann der

funktionale Zusammenhang zwischen Kanalnummer des MCAs und der Zeitmessung des TAC bekannt.

Aufgabe 5.1a: Vermessen Sie die Positionen und Breite der Spitzen in Ihrem Eichspektrum. Tragen Sie Ihre Ergebnisse zusammen mit den jeweils eingestellten Verzögerungszeiten in eine Tabelle in Ihr Protokoll ein. Erstellen Sie aus den Zeit-Kanal-Wertepaaren und deren statistischen Fehlern ein Diagramm. Führen Sie damit einen Fit durch, um die Eichkurve zu erhalten. Tragen Sie sowohl das Diagramm als auch die Ergebnisse des Fits (inklusive des χ^2 -Wertes!) in Ihr Protokoll ein. Wie gut ist die Annahme eines linearen Zusammenhangs erfüllt?

5.2 Rebinning

Das Spektrum der Lebensdauer sollte vor dem Fit einem *rebinning* unterworfen werden, d. h. mehrere benachbarte Kanäle (*bins*) werden zusammenzufaßt.

Aufgabe 5.2a: Führen Sie ein geeignetes Rebinning des geeichten Zerfallsspektrums durch. Begründen Sie Ihre Wahl des Rebinnings im Protokoll.

5.3 Bestimmung der mittleren Lebensdauer

Durch einen χ^2 -Fit des in Abschnitt 2.1 entwickelten Zerfallsgesetzes der Myonen ist die mittlere Lebensdauer zu bestimmen. Bedenken Sie dabei, daß das in ihrem Spektrum noch Untergrundereignisse vorhanden sind.

Aufgabe 5.3a: Überlegen Sie sich, wie Untergrundereignisse das Zerfallsspektrum beeinflussen können. Eventuell helfen hier Ihre Ergebnisse aus Abschnitt 4.3. Welche möglichen

Arten von Untergrund erwarten Sie? Entwickeln Sie ein oder mehrere Modelle, um den Untergrund in Ihrem Spektrum beschreiben zu können.

Aufgabe 5.3b: Führen Sie nun einen χ^2 -Anpassungsfit an Ihre Daten durch, um die mittlere Myonlebensdauer zu bestimmen. Tragen Sie das Spektrum mit der überlagerten Fitfunktion sowie die Werte und statistischen Unsicherheiten aller Parameter ins Protokoll ein. Erläutern Sie Ihre Vorgehensweise (Einstellungen für Startwerte von Parametern, fetthaltene Parameter etc.). Äußern Sie sich auch zur Güte des Fits.

Beachten Sie, dass τ_{eff} von τ_{μ} abhängt und daher nicht als Parameter des Modells auftauchen sollte.

5.4 Systematik

Dieses Experiment ist – wie jedes andere auch – nicht frei von systematischen Einflüssen. Diese sollen untersucht werden.

Aufgabe 5.4a: Ermitteln Sie quantitativ den Einfluß der Unsicherheit in den Parametern $f = N_{\mu^+}/N_{\mu^-}$ und Λ_C auf Ihr Meßergebnis. Diskutieren Sie weitere mögliche systematische Fehlerquellen und quantifizieren Sie diese. Fassen Sie *alle* Ergebnisse in einer Tabelle oder einem Diagramm zusammen und kommentieren diese. Bestimmen Sie aus den signifikanten Anteilen den gesamten systematischen Fehler der Messung.

5.5 Endergebnis

Aufgabe 5.5a: Geben Sie Ihr Ergebnis für die mittlere Lebensdauer der Myonen inklusive der statistischen und systematischen Unsicherheiten an. Vergleichen Sie mit dem aktuellen

Literaturwert durch Berechnung des Konfidenzniveaus Ihres
Resultats.

A Zur Berechnung des Myonflusses

Der Fluß kosmischer Strahlen auf Meeresebene beträgt bei senkrechtem Einfall

$$j(\theta=0, \phi) = 110 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}. \quad (17)$$

Damit ergibt sich der vom Polarwinkel abhängige Fluß zu

$$\begin{aligned} j(\theta, \phi) &= 110 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \cdot \cos^2\theta \\ &= 0.66 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \cdot \cos^2\theta. \end{aligned} \quad (18)$$

Die Integration über alle Raumwinkel im Bereich $0 < \theta < \pi/2$ und $0 < \phi < 2\pi$ lautet dann

$$\begin{aligned} \int_{2\pi} j(\theta, \phi) \cos\theta \, d\Omega &= 0.66 \cdot \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos^3\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \\ &= -0.66 \cdot \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos^3\theta \, d\cos\theta \, d\phi \\ &= 1.04 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1} = 173.3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Dabei rührt der zusätzliche $\cos\theta$ -Term aus der Tatsache, daß ein kosmisches Teilchen, welches unter einem Winkel θ einläuft, die horizontale Fläche des Detektors um eben diesen Faktor verkürzt sieht.

B Liste der verwendeten NIM-Module

- LeCroy NIM Model 688 AL Level Adapter (TTL/NIM)
- LeCroy NIM Model 465 Triple 4-Fold Logic Unit
- LeCroy NIM Model 622 Quad 2-Fold Logic Unit

- CAEN Dual Timer Model N93B
- CAEN Quad Scaler and Preset Counter/Timer Model N145
- Ortec TAC/SCA Model 567

C Datenblatt des Hamamatsu-Photomultipliers

Head-on PMT Photon Counting Head H7360 Series



The H7360 series is a wide sensitive area photon counting head device containing a 25-mm (1") head-on photomultiplier tube, high-voltage power supply circuit and photon counting circuit. Since those circuits are designed for wide band, the H7360 series can operate at a high count rate. The high voltage supply for photomultiplier tube and the discriminator level are preset to optimum values so that photon counting can be performed just by connecting a +5 V supply and a pulse counter.

The H7360-01 is of low noise, the H7360-02 has enhanced detection efficiency in the visible range, and the H7360-03 covers sensitivity from the visible to near infrared.

A mount flange (E6264) is provided as an option for easy installation to measurement equipment.

Product Variations

Type No.	Spectral Response	Features
H7360-01		Low noise
H7360-02	300 nm to 650 nm	High detection efficiency
H7360-03	300 nm to 850 nm	For visible to near IR range

Specifications

Parameter		H7360 Series			Unit	
Suffix		-01	-02	-03		
Input Voltage		+4.75 to +5.25			V	
Max. Input Voltage		+6			V	
Max. Input Current		140			mA	
Effective Area		φ22			mm	
Peak Sensitivity Wavelength		375	420	420	nm	
Count Sensitivity	Typ.	300 nm	1.4×10^5	2.3×10^5	2.1×10^5	$s^{-1} \cdot pW^{-1}$
		400 nm	2.7×10^5	4.1×10^5	2.5×10^5	
		500 nm	1.7×10^5	3.4×10^5	2.0×10^5	
		600 nm	4.6×10^4	5.7×10^4	1.3×10^5	
		700 nm	—	—	7.8×10^4	
Count Linearity *1		6.0×10^6			s^{-1}	
Dark Count *2	Typ.	15	60	5000	s^{-1}	
	Max.	80	300	15000		
Pulse-pair Resolution		18			ns	
Output Pulse Width		9			ns	
Output Pulse Height *3	Typ.	3			V	
Recommended Load Resistance		50			Ω	
Signal Output Logic		Positive logic			—	
Operating Ambient Temperature		+5 to +40			°C	
Storage Temperature		-20 to +50			°C	
Weight	Main Body	140			g	
	Mount Flange	25				

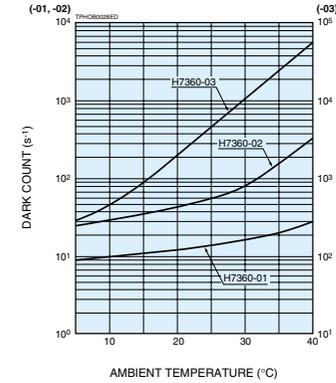
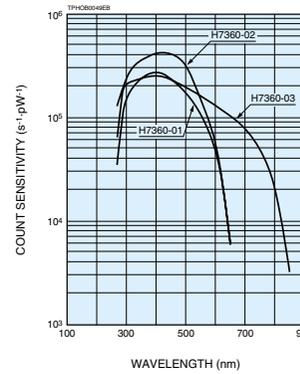
*1: Random pulse, at 10 % count loss

*2: After 30 minute storage in darkness

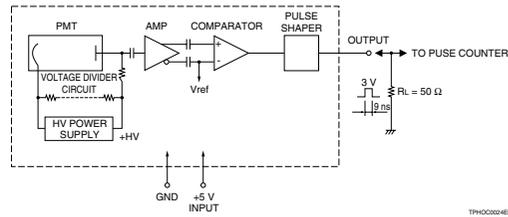
*3: With input voltage +5 V, Load resistance 50 Ω and Coaxial cable RG-174/U (450 mm)

Photon Counting Heads

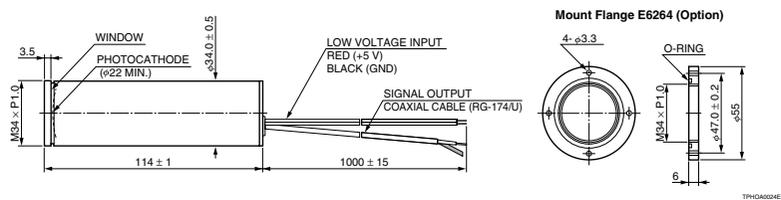
Characteristics (Count sensitivity, Dark count)



Block Diagram



Dimensional Outlines (Unit: mm)



Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Vorbemerkungen	2
1.1	Durchführung	2
1.2	Vorkenntnisse	2
1.3	Fragenkatalog	3
1.3.1	Myonzerfall	3
1.3.2	Detektoren	3
1.3.3	Schaltelektronik	3
1.3.4	Statistik	3
1.4	Vorbereitende Aufgaben	3
2	Einführung	4
2.1	Elektroschwache Theorie und Myonzerfall . . .	4
2.1.1	Myonische Atome und Kerneinfang . .	5
2.2	Kosmische Strahlung	6
3	Versuchsaufbau	7
4	Erster Versuchstag: Versuchsdurchführung	8
4.1	Inbetriebnahme	8
4.2	Laufzeitverhalten von Signalen	8
4.3	Bestimmung der Ereignisraten	9
4.4	Zeiteichung	9
4.5	Messung der Myonlebensdauer	10
5	Zweiter Versuchstag: Auswertung	11
5.1	Eichkurve	11
5.2	Rebinning	12
5.3	Bestimmung der mittleren Lebensdauer	12
5.4	Systematik	12
5.5	Endergebnis	12
A	Zur Berechnung des Myonflusses	14

B	Liste der verwendeten NIM-Module	14
C	Datenblatt des Hamamatsu-Photomultipliers	15

Literatur

- [Bar95] Roger Barlow. *Statistics*. The Manchester physics series. Wiley, 1995.
- [Bar00] Roger Barlow. *SLUO Lectures on Statistics and Numerical Methods in HEP: Lecture 5: Systematic Errors*. Manchester University, August 2000.
<http://www.hep.man.ac.uk/u/roger/slue5.ps>.
- [Bra99] Siegmund Brandt. *Datenanalyse*. Spektrum Akademie Verlag, 4th edition, 1999.
- [Gri87] David Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. Wiley & Sons, 1987.
- [Gru93] Claus Grupen. *Teilchendetektoren*. BI-Wissenschaftsverlag, 1993.
- [HM84] Francis Halzen and Alan D. Martin. *Quarks and Leptons*. Wiley & Sons, 1984.
- [Kem05] J. Kempa. The muon energy spectra at various geomagnetic latitudes. In *29th International Cosmic Ray Conference*, volume 6, pages 57–60, Pune, India, 2005.
- [Kle05] Konrad Kleinknecht. *Detektoren für Teilchenstrahlung*. Teubner, 4th edition, 2005.
- [Leo94] W.R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer, 2nd edition, 1994.
- [SMR87] T Suzuki, David F Measday, and JP Roalsvig. Total nuclear capture rates for negative muons. *Phys. Rev. C*, 35(6):2212, 1987.
- [VL98] Blobel V and E. Lohrmann. *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Teubner, Stuttgart, 1998.
- [Y+06] W.-M. Yao et al. Review of Particle Physics. *Journal of Physics G*, 33, 2006.
<http://pdg.lbl.gov>.