

Lebensdauer kosmischer Myonen

Paul Becker Alina Nasr-Esfahani
(paul.becker@udo.edu) (alina.esfahani@udo.edu)

Durchführung: 16.05.2018, 1. Abgabe: 08.06.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	2
1.1	Eigenschaften von Myonen	2
1.2	Definition der Lebensdauer	2
2	Durchführung	3
3	Auswertung	5
3.1	Kalibrierung der Messapparatur	5
3.2	Zeitauflösung der Messapparatur	5
3.3	Untergrundrate	5
3.4	Bestimmung der Lebensdauer	7
4	Diskussion	8

1 Theorie

Myonen werden in der Atmosphäre durch Kollision von Teilchen dort mit Protonen aus extragalaktischen Quellen erzeugt. Da sie sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen, erreichen sie trotz ihrer kurzen Lebensdauer den Erdboden. Der Zerfall in ein Elektron und zwei Neutrinos kann mit Hilfe eines geeigneten Versuchsaufbaus gemessen und so die Lebensdauer der Myonen bestimmt werden.

1.1 Eigenschaften von Myonen

Durch die Kollision von Protonen aus extragalaktischen Quellen wie z. B. Supernova-Überresten und aktiven Galaxienkernen werden Pionen erzeugt, welche in Myonen und Myon-Antineutrinos bzw. Antimyonen und Myon-Neutrinos zerfallen.

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \text{bzw.} \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.1.1)$$

Mit einer durchschnittlichen Energie von 4 GeV (auf Meereshöhe) [2] sind Myonen relativistisch und können trotz einer Lebensdauer von $2.197 \mu\text{s}$ [2] den Erdboden erreichen.

Myonen sind Leptonen, besitzen einen Spin von $\hbar/2$ und gehorchen der Fermi-Dirac-Statistik. Sie gehören zur zweiten Leptonengeneration und haben eine Masse von 206 GeV [2]. Sie zerfallen in ein Elektron und zwei Neutrinos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{bzw.} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \quad (1.1.2)$$

Das Myon kann auch anstelle eines Elektrons durch ein Atom gebunden werden, dieser Prozess ist allerdings sehr selten.

1.2 Definition der Lebensdauer

Die Wahrscheinlichkeit dW , dass ein instabiles Teilchen in einem infinitesimalen Zeitraum dt zerfällt ist konstant λ , wobei diese Konstante spezifisch für eine Teilchensorte ist. Wenn eine Anzahl N Teilchen vorhanden ist, ist die Änderung der Teilchenzahl dN

$$dN = -N dW = -N \lambda dt \quad (1.2.1)$$

lediglich von der Zerfallskonstanten λ und der Zeitdauer dt abhängig. Integration liefert dann die Teilchenzahl zu einem beliebigen Zeitpunkt t

$$N(t) = N_0 \exp -\lambda t. \quad (1.2.2)$$

Da die Verteilung der Lebensdauer t der Teilchen einer Exponentialverteilung

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \lambda \exp -\lambda t dt \quad (1.2.3)$$

folgt, ist ihre charakteristische Lebensdauer $\tau = 1/\lambda$.

2 Durchführung

Die Myonen, die gemessen werden sollen, entstehen größtenteils aus Pionzerfällen in der oberen Atmosphäre. Aufgrund ihrer relativistischen Energie erreichen sie den Erdboden. Durch Wechselwirkung mit Materie geben sie einen Teil ihrer kinetischen Energie ab. Bei Durchgang durch einen Szintillator in einem Edeltank regt die abgegebene Energie das Szintillatormaterial an, sodass bei der Rückkehr in den Grundzustand Photonen im kurzwelligen sichtbaren bis UV-Bereich emittiert werden. Diese Photonen werden mit zwei Sekundärelektronenvervielfachern (SEV) detektiert, die an den Enden des Tanks angebracht sind. Niederenergetische Myonen können innerhalb des Detektionsvolumen in ein Elektron zerfallen, welches ebenfalls durch einen Lichtblitz ein Signal auslöst. Der zeitliche Abstand zwischen dem Myon- und dem Elektronsignal ist dann die Lebensdauer des Myons im Tank.

Um nicht den zeitlichen Abstand verschiedener Myonen zu messen, sondern die Lebensdauer zerfallender Myonen, wird eine elektronische Stoppuhr verwendet. Nur wenn das Stoppsignal innerhalb der Suchzeit T_S auf das Startsignal folgt, wird die Zeitdifferenz als Messwert für die Lebensdauer verwendet. Dies wird durch eine monostabile Kippstufe realisiert. Durch einen Startpuls wird für die Zeit T_S ein Signal auf ein AND-Gatter gelegt; wenn in dieser Zeit ein weiterer Puls eintrifft, wird dies als Stoppsignal interpretiert und die Zeitdifferenz dazwischen gemessen, andernfalls geht die Apperatur in den Grundzustand zurück und das nächste eintreffende Myon fungiert wieder als Startpuls. Der zeitliche Abstand zwischen Start- und Stoppsignal wird mit einem Zeit-Amplituden-Konverter (TAC) in einen Spannungspuls umgewandelt, dessen Höhe linear mit der Dauer zusammenhängt. Die Höhe des Pulses wiederum wird mit einem Vielkanalanalysator ausgewertet. Der gesamte Messaufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Dieses Messverfahren gelingt, da die Abklingdauer des organischen Szintillators mit 10 ns kleiner und der zeitliche Abstand verschiedener Myonen größer ist, als die mittlere Lebensdauer, die gemessen werden soll.

Der Diskriminator in Abbildung 1 dient dazu, Dunkelpulse zu filtern. Diese Dunkelpulse werden durch thermische Bewegung von Elektronen ausgelöst und besitzen in der Regel eine geringere Amplitude als Photonenpulse. Um keine echten Pulse zu verlieren, wird die Schwelle, bei der Pulse durchgelassen werden, nicht zu hoch eingestellt und als weiterer Filter eine Koinzidenz verwendet; nur wenn ein Signal von beiden SEVs eintrifft, wird es als Myonsignal akzeptiert.

Zur Einstellung der richtigen Diskriminatorschwelle wird zunächst ein Zählwerk angeschlossen und beide SEVs werden so eingeregelt, dass in beiden Kanälen jeweils eine Rate von 20 bis 40 pro Sekunde gemessen wird. Daraufhin wird die Koinzidenz eingestellt, indem eine Verzögerung so lange variiert wird bis ein Minimum in der Zählrate eintritt. Der TAC wird mit Hilfe eines Doppelpulsgenerators kalibriert; die Pulse werden mit einer Frequenz von 1 kHz erzeugt und die Linearität zwischen dem Abstand der Pulse und der Amplitude der resultierenden Spannung gezeigt. Die eigentliche Messung wird über mindestens 24 Stunden durchgeführt, um eine ausreichende Statistik zu erhalten, außerdem wird zum Ende der Messung notiert, wie viele Startpulse ohne Stoppsignale und wie viele Startpulse mit Stoppsignalen aufgetreten sind.

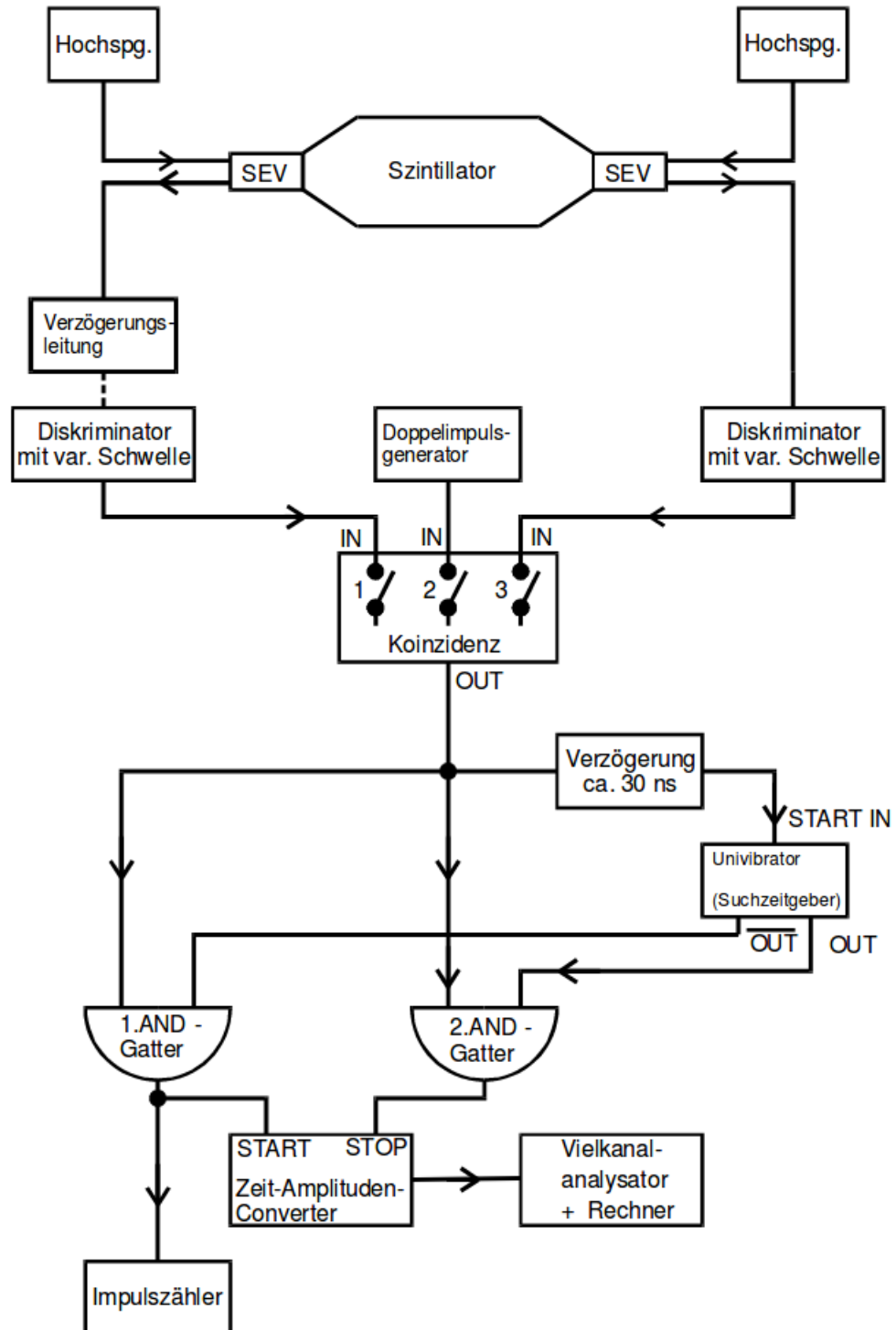


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Messapparatur [3]

3 Auswertung

In diesem Abschnitt wird die Lebensdauer kosmischer Myonen aus den Messdaten gewonnen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es erforderlich die Messapparatur zu kalibrieren. Alle Fehler werden im Folgenden mit Hilfe des `python`-Paktes `uncertainties` [1] berechnet, welches eine automatische Gauß'sche Fehlerfortpflanzung bereitstellt.

3.1 Kalibrierung der Messapparatur

Die Daten über die Lebensdauer wird mit Hilfe eines Vielkanalanalysators (VKA) gewonnen. Der VKA teilt die gemessenen Lebensdauern in 512 Kanäle (Bins) eines Histogrammes ein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Zusammenhang zwischen gemessener Lebensdauer und Kanal linear zusammenhängt.

Somit ist es sinnvoll diesen Zusammenhang über eine lineare Funktion

$$f(c) = Ac + B \quad (3.1.1)$$

anzunehmen.

Die Ausgleichsrechnung in 2 liefert somit

$$t(c) = (0,0454 \pm 0,00003) \frac{\mu\text{s}}{\text{Kanal}} - (0,035 \pm 0,004) \mu\text{s} \quad (3.1.2)$$

Im der weiteren Auswertung ist lediglich der Parameter A von Interesse.

3.2 Zeitauflösung der Messapparatur

Um verschiedene Signallaufzeiten zwischen den SEV's und der Koinzidenz ausgleichen zu können, werden Verzögerungsleitungen benutzt, um weitere Verzögerungen in das System einbringen zu können. Durch Messung der Myonen-Zählrate unter Variation der Verzögerungszeiten lässt sich die Auflösungszeit Δt_K der Koinzidenzschaltung als Breite einer Gaußglocke bestimmen.

3.3 Untergrundrate

Um die Untergrundrate N_B abschätzen zu können, wird die Wahrscheinlichkeit betrachtet, mit der ein Myon im Tank bei gestarteter Messung in einem Zeitintervall von $T_S = 10 \mu\text{s}$ ein Stopp-Signal erzeugt. Unter der Annahme dass das Auftreten von Myonen normalverteilt ist, lässt sich die Wahrscheinlichkeit p_i einer Messung von i Myonen durch eine Poissonverteilung abschätzen:

$$p_i = \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}, \quad (3.3.1)$$

wobei der Erwartungswert der Messung eines Myons mit λ bezeichnet wird. Dieser Erwartungswert wird mit der Myonenzählrate identifiziert. Somit liefert die Poissonverteilung die Wahrscheinlichkeit für die Messung eines Myons.

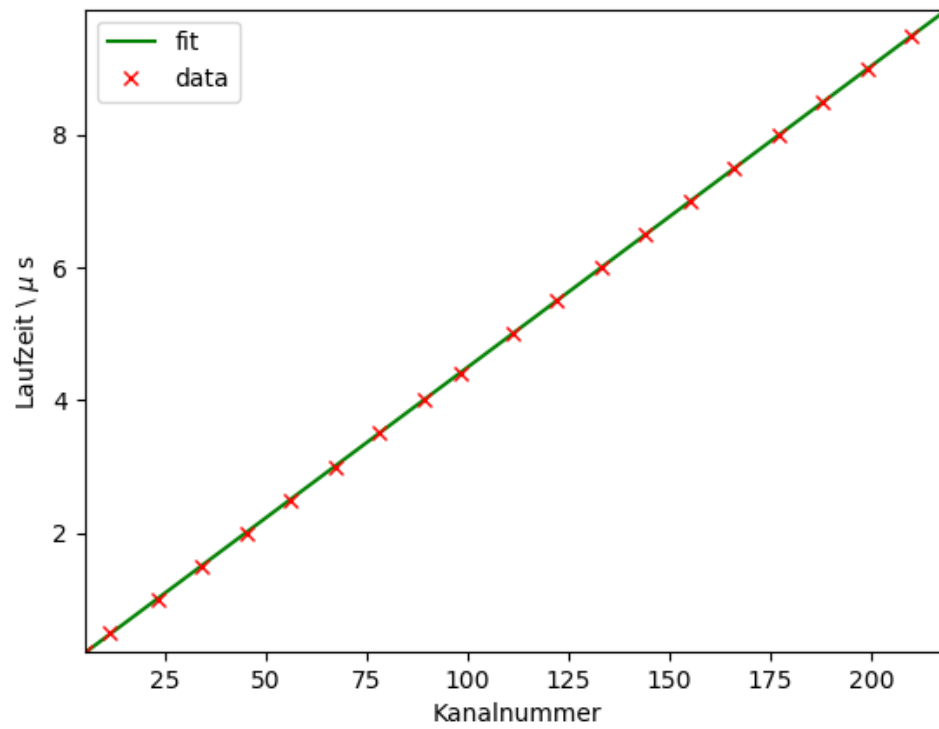


Abbildung 2: Lineare Ausgleichsrechnung zur bestimmung der proportionalität zwischen Kanälen und Zeit

A	B
$10,0192 \pm 0.0001$	7.33 ± 0.01

Tabelle 1: Ergebnisse für die Koeffizienten A und B der Ausgleichsrechnung

Zur Berechnung der Untergrundrate ist es notwendig, die durchschnittliche Anzahl an Myonen zu bestimmen, die in einer Sekunde den Tank passieren.

$$f = \frac{N_{\text{Start}}}{t_{\text{Messung}}} = 2,28 \frac{\text{myonen}}{\text{s}} \quad (3.3.2)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass genau ein weiteres Myon innerhalb der Suchzeit den Tank durchquert berechnet sich gemäß

$$P = \frac{(T_s \cdot f)^k}{k!} \exp f \cdot T_s = 0,00002\%, \quad (3.3.3)$$

wobei $k = 1$ gilt.

Somit ergeben sich bezogen auf die Startimpulse

$$N_{\text{Err}} = 32.53 \quad (3.3.4)$$

Fehlmessungen. Werden jetzt noch die einzelnen Kanäle berücksichtigt ergibt sich folgende Untergrundrate:

$$U = 0,07 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}. \quad (3.3.5)$$

3.4 Bestimmung der Lebensdauer

Zur Bestimmung der Individuallebensdauer der Myonen werden in Abbildung 3 die Daten logarithmiert und an das Ergebnis eine Funktion gemäß

$$f(x) = Ax + B \quad (3.4.1)$$

gefittet.

Anschließend wird ein Koeffizientenvergleich unter Berücksichtigung des logarithmierten Zerfallsgesetzes

$$\ln(N(t)) = -\lambda t + \ln N_0 \quad (3.4.2)$$

durchgeführt. Hieraus folgt für die Zerfallskonstante

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = (0,0191 \pm 0,0001) \cdot \frac{1}{\text{Kanal}}, \quad (3.4.3)$$

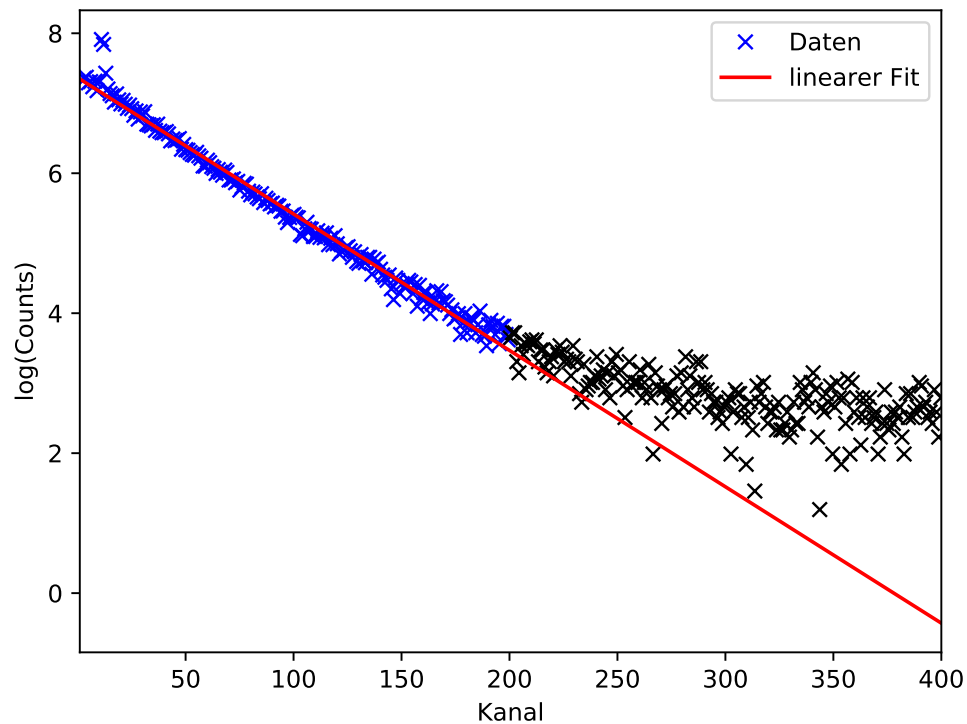


Abbildung 3: lineare Ausgleichsrechnung zur bestimmung der Zerfallskonstante

wobei an dieser Stelle berücksichtigt werden muss, dass gemäß 3.1 ein Zusammenhang zwischen Kanal und Wartezeit besteht. Somit kann die Lebensdauer durch Sekunden anstatt Kanäle ausgedrückt werden, woraus

$$\tau = \frac{(0,0454 \pm 0,00003) \frac{\mu\text{s}}{\text{Kanal}}}{\lambda} = (2,330 \pm 0,002) \mu\text{s} \quad (3.4.4)$$

folgt.

4 Diskussion

Der experimentell bestimmte Wert für die Myonlebensdauer beträgt $(2,330 \pm 0,002) \mu\text{s}$. Dieser stimmt mit einem relativen Fehler von 5,6 %, gut mit dem Theoriewert [2] überein. Der Fehler lässt sich eventuell durch eine noch längere Messung reduzieren.

Literatur

- [1] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. 2018. URL: <http://uncertainties-python-package.readthedocs.io/en/latest/#>.
- [2] C. Patrignani u. a. „Review of Particle Physics“. In: *Chin. Phys. C* 40.10 (2016), S. 100001. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.

- [3] Fortgeschrittenen Praktikum. *Versuchsanleitung Versuch 59*. TU Dortmund. Dortmund, Deutschland, 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/MASTER/SKRIPT/V59.pdf>.