

Warum kann ein Myon den Erdboden erreichen?

Name: Marie [REDACTED]

Betreuer: Benjamin [REDACTED], Jannes [REDACTED]

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Theorie	3
2.1. Entdeckung des Myons	3
2.2. Eigenschaften des Myons	3
2.3. Entstehung eines Myons	4
2.4. Zeitdilatation	4
2.5. Myonendetektion	6
3. Experimente	7
3.1. Kalibrierung von Detektorplatten	7
3.2. Geschwindigkeitsmessung der Myonen	8
3.2.1. Durchführung	8
3.2.2. Ergebnis und Auswertung	8
3.3. Das Lebensdauerexperiment	9
3.3.1. Durchführung	9
3.3.2. Ergebnis und Auswertung	10
4. Beantwortung der Fragestellung	11
5. Zusammenfassung	11
6. Quellen	12

1. Einleitung

Die Myonen sind Elementarteilchen. Wir haben die Möglichkeit sie mit Messgeräten, den Szintillatoren zu erfassen und können so verschiedenste Messungen anstellen. Beispielsweise ist es möglich die Geschwindigkeit, sowie die Lebensdauer der Myonen zu messen. Ich möchte zudem die Frage beantworten warum Myonen den Erdboden erreichen, da sie eine Lebenszeit von $2,19 \mu\text{s}$ aufweisen. Ich möchte in dieser Arbeit diese Frage beantworten, weil ich mich für die Zeitdilatation interessiere. Außerdem werde ich noch einige Experiment mit Myonen vorstellen.

2. Theorie

In diesem Teil der Arbeit möchte ich grundlegendes Wissen über die Myonen vermitteln. Es ist notwendig, um die Beantwortung meiner Frage zu verstehen.

2.1. Entdeckung des Myons

Das Myon wurde 1937 von den Physikern Carl David Anderson und Seth Henry Neddermeyer während Forschungen an der kosmischen Strahlung mit Hilfe einer Nebelkammer entdeckt. Die Wissenschaftler sollen damals "Who ordered that?" gesagt haben, da diese Entdeckung sehr unerwartet aufkam. Erst 10 Jahre später wurde das Myon als ein Elementarteilchen derselben Gruppe des Elektrons zugeordnet und gehörte somit auch zu den Leptonen [1] [2].

2.2. Eigenschaften des Myons

Das Myon ist ein instabiles Elementarteilchen welches wie das Elektron eine negative Ladung besitzt. Instabile Teilchen haben die Eigenschaft, dass sie nach einer gewissen Zeit in andere Teilchen zerfallen. Bei einem Myon entspricht das etwa einer Zeit von $2,19 \mu\text{s}$, was im Vergleich zu anderen Elementarteilchen einer langen

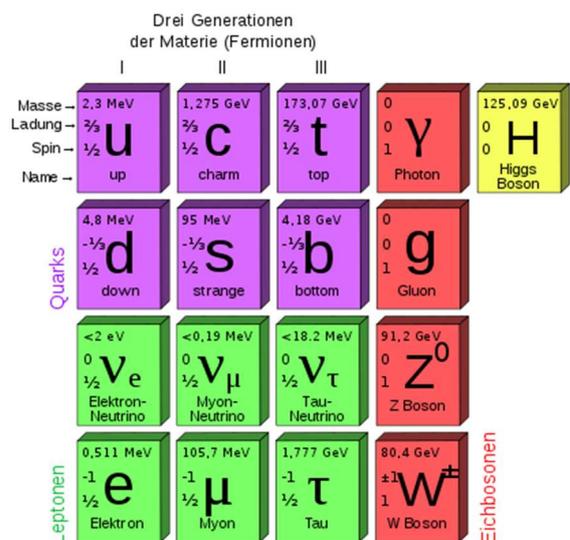


Abb.1 Standardmodell

Existenz entspricht. Die Lebensdauer entspricht der Zeit in der ein Myon mit der Wahrscheinlichkeit von 36,8 Prozent bereits zerfallen ist [3]. Ein Myon hat eine rund 207 fache größere Masse als das Elektron [4]. Im Standardmodell gehören das Myon und das Elektron der Familie der Leptonen an (s. Abb. 1). Bei den Leptonen gibt es zu jedem Teilchen immer ein Neutrino Teilchen. Zum Beispiel gibt es Elektronen-Neutrinos, Positron-Neutrinos und Myon-Neutrinos [5]. Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons und das Myon hat als Antiteilchen das Antimyon. Außerdem kann man über dieses Elementarteilchen noch sagen, dass es einen halbzahligen Spin besitzt und somit den Fermionen¹ angehört. Es gibt einen positiven und negativen Spin. Der Spin wird fälschlicherweise oft als Drehimpuls des Teilchens bezeichnet, beschreibt aber im Grunde nur eine Quantenzahl [6]. Zudem unterliegt ein Myon der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung.² [4]

2.3. Entstehung des Myons

Die Myonen entstehen teilweise aus Kollisionen der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre. Diese Strahlung besteht aus Atomkernen mit verschiedener Größe und Energie. Sie wurde 1912 von dem Physiker Victor Hess mit Hilfe eines Heißluftballons entdeckt, als er die elektrische Leitfähigkeit der Luft erforschte [7]. Die kosmischen Teilchen stoßen auf Atomkerne in der Atmosphäre. Daraus folgen einige Zerfälle aufeinander. Aus den Teilchen entstehen erst Pionen, dann Neutrinos und daraus Myonen. Dies geschieht in etwa 10 Kilometern Höhe. Von dort aus „fällt“ das Myon in 0,9994 facher Lichtgeschwindigkeit zum Erdboden [4].

2.4. Zeitdilatation

Nach seiner Entstehung hat ein ruhendes Myon eine Lebensdauer von rund 2,19 μs [4]. Da sich das Teilchen in nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegt, kann es in dieser Zeit theoretisch eine Strecke von 656,3 Meter zurücklegen [8]:

$$299711 \text{ km/s} * 2,19 \mu\text{s} \times 10^6 = 0,6563 \text{ km} = 656,3 \text{ m}^3$$

Ich stelle mir nun die Frage, warum wir Myonen trotzdem hier bei uns im Labor messen können, wenn sie doch in 10 Kilometer Höhe entstehen. Der Grund dafür ist

¹ Für weitere Recherchen: <http://www.quantenwelt.de/elementar/fermionen.html>

² Für weitere Recherchen: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/schwachwechselwirkung>

³ Ich werde diese Rechnung mit meinen eigenen Messungen später überprüfen.

die Zeitdilatation. Zum Verständnis: Dilatation bedeutet so viel wie Ausdehnung, also Zeitausdehnung [9]. Ein zusätzliches Beispiel für die Erklärung ist der Speicherring. Hier werden Protonen auf Materie geschossen und daraus entstehen dann die

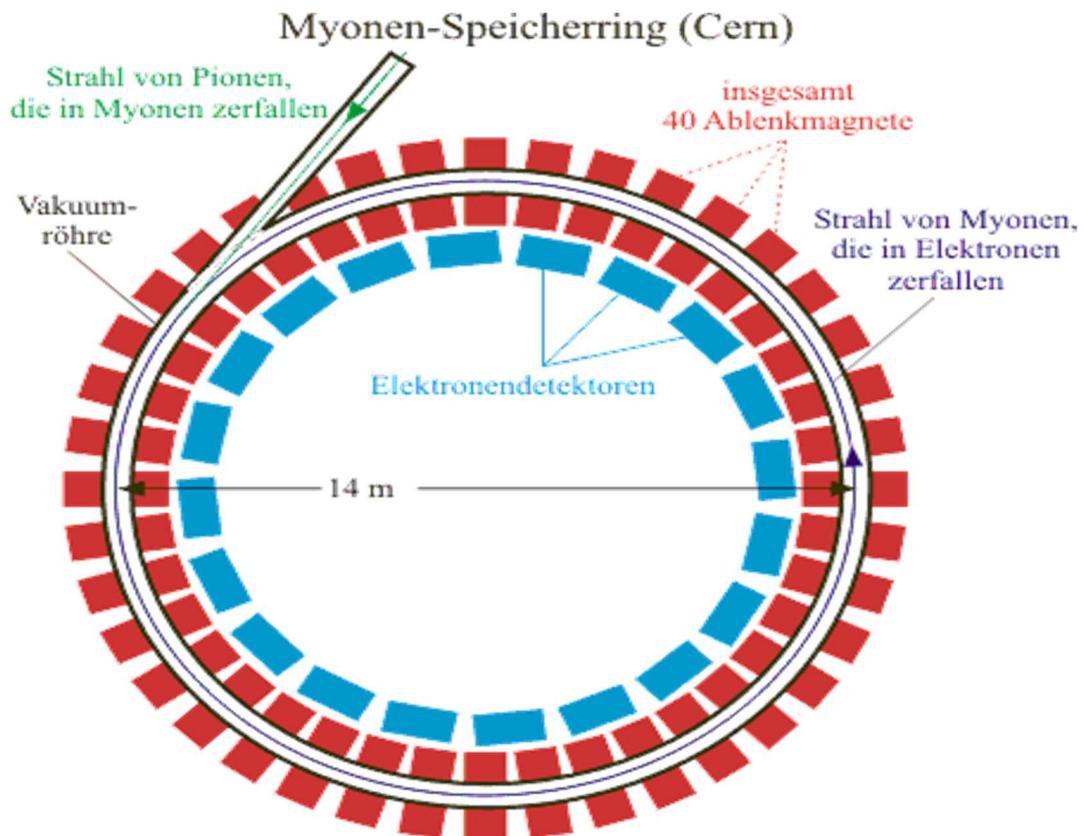


Abb. 2 Myonen- Speicherring

Myonen. Diese werden dann durch ein starkes Magnetfeld auf einer Kreisbahn gehalten. Wenn dann ein Myon zerfällt, entstehen ein Myon-Neutrino, ein Positron-Neutrino und ein Elektron. Da das Elektron eine sehr kleine Masse hat, wird es von der Bahn abgelenkt und kann von Detektoren erfasst werden. So konnte die ungefähre Lebensdauer von etwa 48 Mikrosekunden ermittelt werden. Wie man nun feststellt, hat das beschleunigte Myon eine viel längere Lebensdauer als oben angegeben (aus [4]) von einem ruhenden Myon angenommen wurde. Das hängt von der Bewegung des Myons ab [10] [11].

Alles in unserem Universum besitzt dieselbe Physik und somit muss sich das Myon auch nach der speziellen Relativitätstheorie richten.⁴ Die erste Überlegung war also:

⁴ Diese wurde von Albert Einstein (14. März 1879 – 18. April 1955) vor der allgemeinen Relativitätstheorie im 20. Jahrhundert entwickelt. Den Ansatz für die spezielle Relativitätstheorie hatte Einstein durch ein verallgemeinertes Relativitätsprinzip des Physikers Isaac Newton [9]

wenn die Geschwindigkeit des Lichts eine Konstante in einem Bezugssystem ist, dann kann die Zeit keine Konstante sein. Das heißt, die Zeit verläuft für jede Person und jeden Gegenstand verschieden, sie ist also relativ. Zum Verständnis kann man sich einen schnell fahrenden Zug vorstellen. In diesem befindet sich jemand mit einer Taschenlampe. Er schaltet sie so ein, dass das Licht in Fahrtrichtung scheint. Wenn man kurz darüber nachdenkt, klingt es nur logisch, wenn das Licht sich nun schneller bewegen würde. Aber das ist falsch! Die Lichtgeschwindigkeit ist eine Konstante und wenn man sich vorstellt eine Person am Bahnsteig würde die Geschwindigkeit des Lichts im Zug messen, dann würde eine Person im Zug dieselbe Geschwindigkeit messen.

Wenn man also nun die spezielle Relativitätstheorie auch auf die Myonen anwendet, dann dehnt ein Myon mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auch die Zeit. Von uns aus gesehen hat es auch eine längere Lebensdauer, doch für das Myon sind trotzdem nur $2,19 \mu\text{s}$ vergangen. Also selbst wenn wir unseren Körper auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigen und alle um uns herum schneller altern würden als wir, würde uns die Zeit die wir haben genauso lang vorkommen. [12] [13].

2.5. Myonendetektion



Abb. 3 Aufbau Myonenmessung

Der Myonendetektor wird verwendet um die Myonen zu zählen, die durch den Detektor fliegen. In ihm befindet sich ein Szintillator. Dieser kann Teilchen erkennen, die auf ihre Umgebung ionisierend wirken und ein Signal in Form von Licht weitergeben. Ein Photosensor (MPPC oder PMT) wandelt das Licht in ein elektrisches Signal um. Dieses elektrische Signal wird von einer Data Acquisition Karte (kurz: DAQ-

Karte) verarbeitet und an den Computer weitergeleitet. Dieser kann die Daten mit Hilfe des Programms muonic in einem Diagramm darstellen. Außerdem wird ein Treshold benötigt, damit am Computer nur die Myonen in einem Diagramm dargestellt werden. Da Myonen eine größere Energie als beispielsweise Elektronen besitzen, kann so das elektrische Rauschen so ausgeschnitten werden. [14]

3. Experimente

Mit Hilfe der Experimente möchte ich die Fragestellung meiner Arbeit genauer beantworten und beweisen.

3.1. Kalibrierung von Detektorplatten

Um verschiedenste Messungen durchführen zu können, muss zunächst die Kalibrierung vorgenommen werden. Durch sie kann der richtige Threshold ermittelt werden, der für den jeweiligen Detektor zur Myonenmessung benötigt wird. In der Tabelle kann man die Thresholds mit den dazugehörigen Myonenraten sehen:

Threshold in mV	Myonenrate in Hz
50	224,2
51	547,7
55	526,3
60	273,4
100	80,7
105	31,1
110	29,3
150	15,5
200	9,9

Da wir herausfinden wollen, ab wann der Computer nur noch die Myonen zählt und nicht mehr das elektrische Rauschen, muss man ermitteln, ab welchem Threshold ein „Knick“ nach unten in der Kurve zu sehen ist. In diesem Fall liegt der bei 105 mV. Es gibt einen weiteren „Knick“ in die Höhe bei ca. 55 mV. Er zeigt den Wert der im elektrischen Rauschen liegt an.

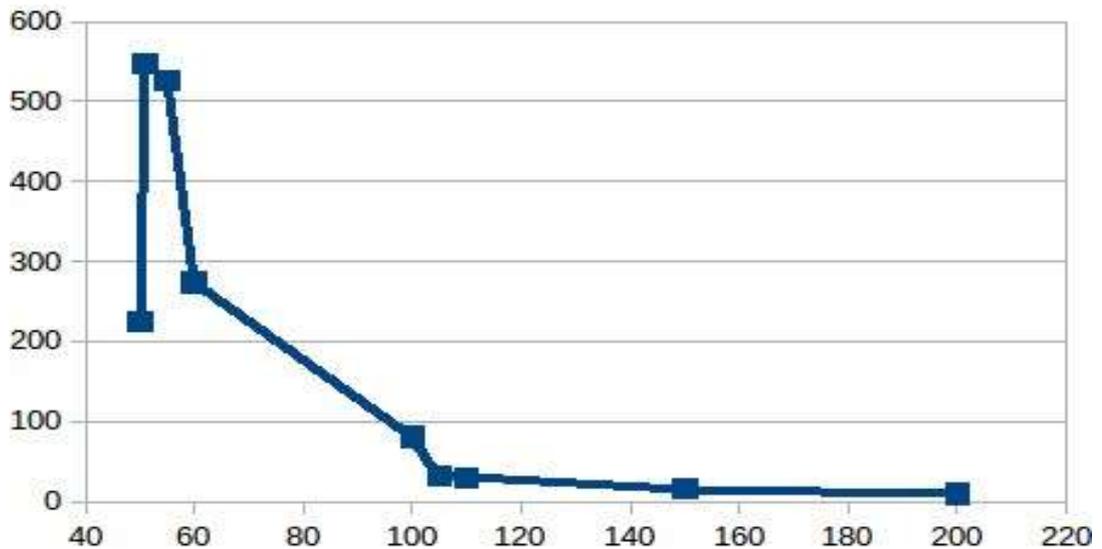


Abb. 4 Kalibrierung

Die Kalibrierung wurde mit allen Detektorplatten durchgeführt, die für die Experimente benötigt werden:

Detektor	Threshold in mV
Detektor 114	95 mV
Detektor 40	150 mV
Detektor 28	210 mV
Detektor 6	240 mV
Detektor 14	180 mV

3.2. Geschwindigkeitsmessung der Myonen

Das Ziel dieses Experiments ist die Ermittlung der Geschwindigkeit von Myonen.

3.2.1. Durchführung

Man benötigt zunächst zwei cosMO- Detektoren die im Höhenabstand von zwei Metern in ein Regal gelegt wurden. Es wurden der Detektor 114 auf channel 0 mit einem Treshold bei 95 mV und Detektor 40 auf channel 2 mit einem Treshold bei 150 mV verwendet. Dann wurden das Notebook, die DAQ- Karte (Nummer 6989) und die Detektoren mit Kabeln verbunden. Die Messung wurde 6 Tage lang durchgeführt, im Zeitraum vom 05.06.2019, 10:54 Uhr bis 11.06.2019, 12:58 Uhr.

3.2.2. Ergebnis und Auswertung:

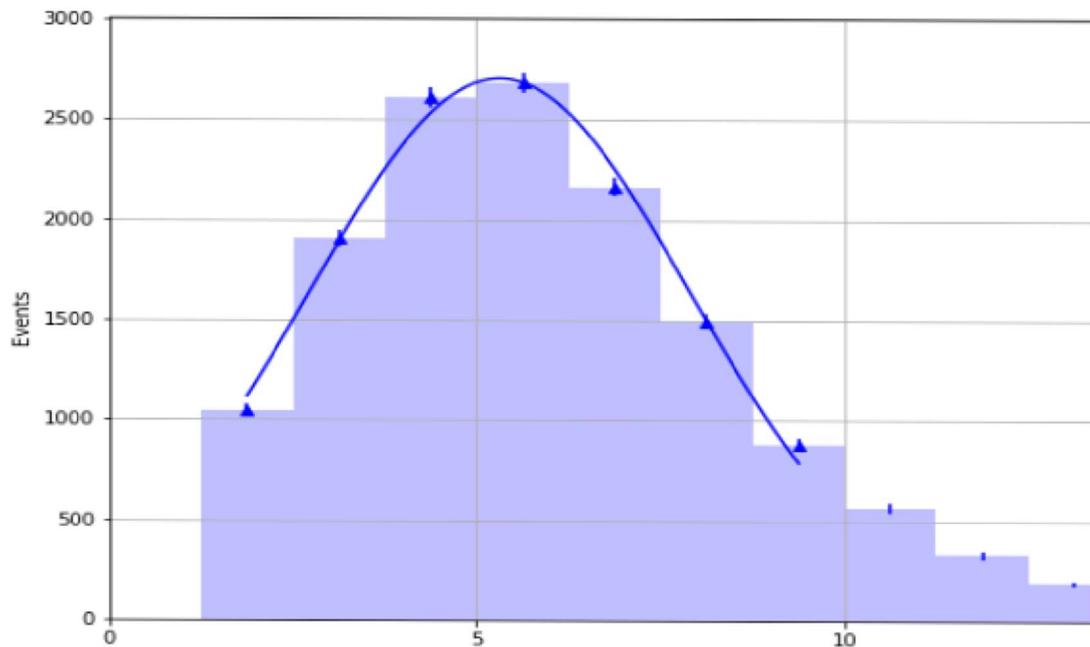


Abb. 5 Geschwindigkeitsexperiment

Die Werte haben sich in einer Gaußkurve angeordnet und im Durchschnitt haben die Myonen zwischen den Platten 5,3 ns benötigt. Das würde bedeuten, dass sich die Myonen laut des Graphen im Durchschnitt sogar mit 377000 km/s bewegen. Da wir aber wissen, dass die Myonen sich nicht in Überlichtgeschwindigkeit bewegen können, muss es an Messfehlern oder anderen Ungenauigkeiten liegen. Es kann zum Beispiel sein, dass der Threshold zu niedrig gelegt wurde und somit auch das elektrische Rauschen gemessen habe. Außerdem ist die Auflösung der Detektoren nicht bis auf 1 ns genau. So kann die Strecke, die die Myonen zwischen den Detektoren zurücklegen, Ungenauigkeiten beim Runden der Werte aufweisen. Mit dem folgendem Wert für die Lichtgeschwindigkeit, habe ich die Geschwindigkeit eines Myons berechnet:

$$299711 \times 0,9994 = 299531,17 \text{ km/s [6]}$$

Mit dem Ergebnis meiner Messung von 377000 km/s liege ich deutlich über dem erwarteten Wert.

3.3. Das Lebensdauerexperiment

Das Lebensdauerexperiment wird zur Ermittlung der Zeit, die das Myon vor seinem Zerfall⁵ hat (also die Zeit zwischen den Pulsen in der Ersten und Zweiten Platte), durchgeführt.

3.3.1. Durchführung

Als Erstes muss man, wenn nicht schon durchgeführt, wieder die Kalibrierung wie oben erklärt vornehmen. Danach wurden wieder die DAQ- Karte (Nummer 6539), drei Detektoren und das Notebook mit Kabeln verbunden. Es wurden der Detektor 28 auf Channel 0 mit dem Treshold bei 210 mV, Detektor 6 auf Channel 1 mit dem Treshold bei 240 mV und Detektor 14 auf Channel 2 mit dem Treshold bei 180 mV verwendet. Um die Lebensdauer messen zu können, muss man zunächst die oberen Detektoren (also Channel 0 und 1) auf Twofold einstellen. Das bedeutet, dass man das Myon nur dann misst, wenn es durch beide Platten hindurchgeht. Um dann die Umwandlung messen zu können, muss man zusätzlich noch ein Veto in den untersten Detektor einstellen, weil wir erreichen wollen, dass das Myon in der zweiten Platte zerfallen ist. Also ist es das Ziel ein Signal in jeweils den beiden oberen Platten zu bekommen, aber nicht in der Letzten. Gleichzeitig wollen wir aber unsere Messung auch einschränken und überprüfen, ob es nicht Zufall war, dass dieser Prozess gemessen wurde, denn es hätten auch zwei unterschiedliche Teilchen hindurch fliegen können. Deshalb muss zusätzlich noch eine Zeitbegrenzung eingestellt werden. So werden nur die Ereignisse in einer Zeit von 10 μ s gezählt und in ein Diagramm eingetragen. Die Messung wurde 6 Tage vom 05.06.2019, 10:02 Uhr bis 11.06.2019, 12:56 Uhr durchgeführt.

⁵ Elementarteilchen und somit die Myonen sind unteilbar. Deshalb ist „Zerfall“ der falsche Begriff für den Prozess. Man kann sich den Vorgang sich wie eine Umwandlung vorstellen. Das Myon zerfällt nach seiner Existenz in ein Myon- Neutrino, ein Positron- Neutrino und ein Elektron.

3.3.2. Ergebnis und Auswertung

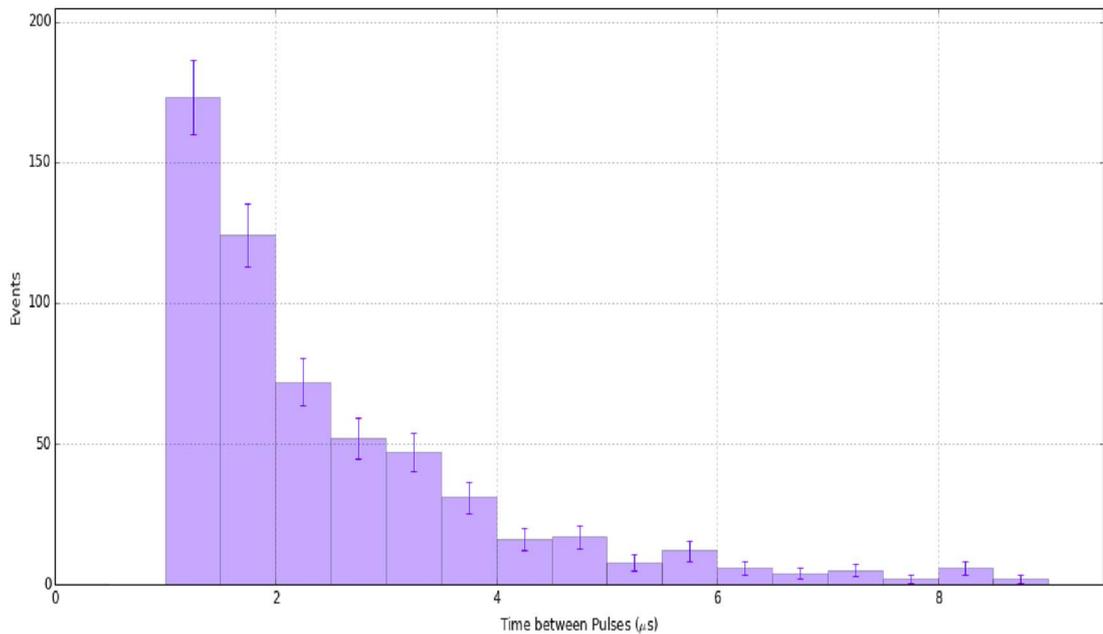


Abb. 6 Lebensdauerexperiment

Insgesamt wurden 577 Myonen gezählt. Sie ordnen sich wie eine Exponentialfunktion an. Die Meisten sind in einem Zeitraum von 1– 2 μs zerfallen. Durchschnittlich haben die Myonen 2,23 μs benötigt. Das ist ungefähr verträglich mit dem Wert von 2,19 μs aus einer Quelle[3]. Die Ungenauigkeiten können entstanden sein, als ich die Tresholds eingestellt habe. Weitere Ungenauigkeiten entstehen, wenn die Detektoren, die DAQ-Karte und das Notebook nicht ganz synchronisiert sind. Außerdem wird in der Quelle ein Durchschnittswert angegeben, der von den eigenen Messungen abweichen kann.

4. Beantwortung der Fragestellung

Die Frage die ich mir am Anfang dieser Arbeit gestellt habe, war: Warum können Myonen den Erdboden erreichen? Ich habe einmal die Strecke berechnet die ein Myon laut meiner Messwerte zurücklegen würde.

$$377000 \text{ km/s} * 2,23 \mu\text{s} * 10^6 = 0,8407 \text{ km} = 840,7 \text{ m}$$

Selbst wenn das Myon die Möglichkeit hätte, sich auf Überlichtgeschwindigkeit zu bringen, wäre es ihm nicht möglich den Erdboden zu erreichen. Es würde gerade mal

840,7 m zurücklegen. Daraus muss man schließen, dass die Myonen der Zeitdilatation wie oben erklärt unterliegen. Beweisen lässt es sich mit: $s/v = t$

Ich habe die Zeit für unser Bezugssystem mit Literaturwerten berechnet [6] [11].

$$10 \text{ km} : 299531,17 \text{ km/s} = 0,000033385 = 33,385 \mu\text{s}$$

Wie man erkennt hat das Myon länger Zeit um den Erdboden zu erreichen als zuvor angenommen. Somit hat sich Einsteins spezielle Relativitätstheorie wieder bestätigt. Durch die hohe Geschwindigkeit der Myonen nahe der Lichtgeschwindigkeit können sie die Zeit dehnen und wir können sie im Labor erfassen.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit habe ich mich mit den Eigenschaften der Myonen beschäftigt und den physikalischen Gesetzen denen sie unterliegen. Theoretisch würden die Myonen den Erdboden niemals erreichen. Mit Hilfe der speziellen Relativitätstheorie und somit der Zeitdilatation, wird jedoch die Zeit gedehnt und die Myonen können eine weitere Strecke zurücklegen als zuvor angenommen. So können wir sie bei uns im Labor messen.

6. Quellen

6.1. Internetquellen:

- [1] <http://kworkquark.desy.de/lexikon/lexikon.myon/2/index.html> (11.06.2019)
- [2] http://physik.uibk.ac.at/hephy/Hess/diplomarbeit/Kapitel/7_3.html
(11.06.2019)

- [3] <http://www.quantenwelt.de/elementar/lebensdauer.html>

- [4] <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Myon> (06.06.2019)

- [5] <http://www.quantenwelt.de/elementar/leptonen.html> (13.06.2019)

- [6] <https://www.chemie.de/lexikon/Spin.html> (06.06.2019)
- [7] <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/dieenergiereichsten-himmelskoerper/> (06.06.2019)
- [8] Formelsammlung, Verlag: Duden Schulbuch
- [9] <https://www.duden.de/rechtschreibung/Dilatation> (06.06.2019)
- [10] <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/myonenzerfallund-zeitdilatation> (13.06.2019)
- [11] <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/myonenzerfallund-zeitdilatation> (06.06.2019)
- [12] [11]https://www.helles-koepfchen.de/albert_einstein/die_relativitaetstheorie.html (11.06.2019)
- [13] Literatur: Warum ist $E=m \cdot c^2$?, Verlag: Kosmos, Autoren: Brian Cox, Jeff Forshaw
- [14] <https://www.weltderphysik.de/thema/albert-einstein-und-die-relativitaetstheorie/>(13.06.2019)

6.2. Bildquellen:

Abb. 1 Standardmodell: <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>

Abb. 2 Myonen

Speicherring: <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/versuche/myonen-experiment-cern> Abb. 3 Aufbau

Myonenmessung:

https://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/cosmo_experiment/index_ger.html

Abb. 4 Kalibrierung: eigene Aufnahme

Abb. 5 Geschwindigkeitsexperiment: eigene Aufnahme

Abb. 6 Lebensdauerexperiment: eigene Aufnahme