

Komplexe Leistung

im Fach Physik

zum Thema:

***"Die Lebensdauer von Myonen aus
der Höhenstrahlung"***

von Moritz Kopsch; Kl. 11/PH1

Betreuer: Uwe Kopte /

Arnd Sörensen (TU Dresden)

Abgabe: 02.05.2014

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	03
2. Physikalische Grundlagen	
2.1 Standardmodell der Teilchenphysik.....	05
2.2 Einordnung des Myons in das Standardmodell der Teilchenphysik.....	07
2.3 Erhaltungsgrößen und Bedeutung der Relativitätstheorie.....	08
3. Bestimmung der Lebensdauer	
3.1 Nachweis von Myonen.....	10
3.2 Statistische Auswertung.....	12
4. Nachwort.....	15
5. Anhänge.....	16
6. Literaturverzeichnis.....	18

1. Vorwort

Wie dem Titel zu entnehmen ist, befasst sich diese komplexe Leistung mit Myonen und deren Lebensdauer. Natürlich geht dem voraus, dass ich mich mit Myonen und Teilchenphysik im Allgemeinen beschäftigt habe. Die meisten Menschen, denen ich davon erzählt habe, meinten sofort, sie hätten keine Ahnung davon und den Begriff "Myon" noch nie gehört. Dementsprechend schwer ist es manchmal, diese Themenwahl für eine Belegarbeit nachzuvollziehen.

Das grundlegende Interesse an der Physik als solches war schon fast immer vorhanden bei mir, ebenso eine Art Abscheu gegenüber praktischen Tätigkeiten. Die Messdaten bei Experimenten habe ich von Anfang an lieber vorher berechnet, als auf das zu vertrauen, was das Messgerät tatsächlich anzeigt. Ich hatte immer diese Vorliebe für theoretische Betrachtungen, weil praktische Untersuchungen von vornherein ihre systematischen und zufälligen Fehler haben, die das Ergebnis doch relativieren. In der Theorie gibt es Regeln, nach denen sich alles zu richten hat. Deswegen sind errechnete Ergebnisse eindeutig, wenn auch für die Realität manchmal noch zu verallgemeinernd und damit unzutreffend. Dennoch habe ich lieber mit Formeln hantiert, als Versuchsanordnungen und Schaltkreise zusammenzubasteln. Aber wieso dann ausgerechnet Teilchenphysik?

Dahinter steckt ein etwas romantischer Gedanke. Unsere Welt ist sicher noch nicht komplett erforscht und es ist fragwürdig, ob dieser Zustand überhaupt einmal eintreten kann. Doch viele Phänomene, die auf unserem Planeten selbst stattfinden, lassen sich in Laboratorien genau untersuchen. Ich habe mich immer mehr für Gedankenexperimente interessiert, die nicht so einfach nachzuweisen oder zu widerlegen sind. Ein prominentes Beispiel ist die Idee des Higgsteilchens, die bereits in den 1960er Jahren entstand, aber erst im letzten Jahr tatsächlich bestätigt werden konnte. Peter Higgs glaubte selbst nicht daran, dass er die Entdeckung des nach ihm benannten Teilchens noch miterleben würde, wie er bei der WDR-Sendung "Quarks & Co" meinte. Das etwas Derartige zum Beispiel auf dem Gebiet der Mechanik so lange ungeklärt bliebe, ist beinahe undenkbar. Ich hatte immer das Gefühl, eines Tages könnte ich selbst eine solche Theorie aufstellen und niemand wäre dann in der Lage, mir auf dem derzeitigen Wissensstand zu widersprechen. Deswegen wollte ich nicht in dem Maßstab denken, in dem wir

leben. Stattdessen habe ich mich für die ganz großen und die ganz kleinen Dinge interessiert. Die Teilchenphysik der Astronomie als grundlegende Richtung für diese komplexe Leistung vorzuziehen, war dann aber eher eine intuitive Entscheidung, begünstigt durch die bereits erwähnte, sensationelle Entdeckung eines neuen Teilchens.

Zu einer komplexen Leistung wie dieser gehört aber dennoch auch ein praktischer Teil. Glücklicherweise hat sich die Möglichkeit ergeben, einige Messdaten in Dresden aufzunehmen, die dazu dienen, die Lebensdauer der Myonen zu bestimmen. Es handelt sich dabei um ein Experiment, das an sich äußerst unspektakulär ist. Wer an Physik denkt, der hat ein Bild von Raketenwissenschaftlern oder riesigen Zahnrädern vor sich. Mein praktischer Anteil bestand darin, einen Startknopf zu drücken und zu hoffen, dass dieser schwarze Kasten neben mir ein paar verwertbare Ergebnisse liefert. Mir wurde oft gesagt, vor allem hinsichtlich meines Studienwunsches, dass diese Tätigkeit dem Alltag eines Physikstudenten schon recht nahe komme und die meisten praktischen Versuche nicht besonders aufregend seien. Dass dies eigentlich sogar in meinem Interesse sei, wie bereits erwähnt, konnten die Wenigsten glauben. Allerdings ist dieser Versuch im Nachhinein für mich persönlich doch noch sehr interessant geworden. So ganz bewusst, was für unglaubliche Dinge hinter diesen Messdaten stecken, war ich mir zu dem Zeitpunkt nämlich noch nicht. Aber genau das soll Inhalt und zugleich Sinn und Zweck dieser Arbeit werden: Dem Interessierten die wundervolle und unglaubliche Welt der Teilchenphysik ein wenig näher bringen.

2. Physikalische Grundlagen

2.1 Standardmodell der Teilchenphysik

Schon immer haben Menschen versucht, eine Antwort auf alles zu finden. Eine Antwort darauf, woher wir kommen, wie alles angefangen hat und wohin es geht, wenn es vorbei ist. Goethes Faust war nicht die erste tragische Gestalt, die sich solche Fragen gestellt hat. "Was die Welt im Innersten zusammenhält" war lange Zeit ein Rätsel. Viele Philosophen haben ihre Theorien dazu aufgestellt. Unzählige Versuche gab es, die Welt zu erklären und fast genauso viele Menschen, die daran gescheitert sind.

Stünde Faust gerade vor einem Computer mit Internetzugang, könnte Google ihm eine schnelle Antwort geben: Die schwache, starke und elektromagnetische Wechselwirkung sind dafür verantwortlich, dass die Welt tatsächlich so existieren kann. Welche Rolle die Gravitation dabei genau spielt, lässt sich vielleicht sagen, wenn die 1916 von Einstein vorausgesagten und kürzlich bestätigten Gravitationswellen besser untersucht wurden. Heute hat die Wissenschaft also ihre ganz eigene Theorie, die unsere Welt erklärt: Das Standardmodell der Teilchenphysik. Es umfasst die meisten bekannten Teilchen und die bereits genannten Wechselwirkungen zwischen ihnen. Es war in der Lage, eine Brücke zwischen der Quantenmechanik und Einsteins Relativitätstheorie zu schlagen und viele Teilchen, die es vorausgesagt hat, konnten auch nachgewiesen werden. Andersherum gab es keine Entdeckungen von Teilchen, die dem Standardmodell widersprechen würden. Seine Gültigkeit gilt als gesichert und vielleicht kann durch die Gravitationswelle und das dazugehörige "Graviton" auch noch die Gravitation als vierte Wechselwirkung mit in die Theorie aufgenommen und damit dem Ziel der alles erklärenden Weltformel ein Stück näher gekommen werden. Aber das steht noch buchstäblich in den Sternen.

Doch was sagt das Standardmodell der Teilchenphysik nun eigentlich aus? In aller erster Linie ordnet es die Elementarteilchen in verschiedene Gruppen. Auf der einen Seite stehen die Quarks, auf der anderen die Leptonen. Quarks sind Teilchen, aus denen Hadronen, also zum Beispiel Protonen oder Neutronen, bestehen. Von ihnen gibt es sechs verschiedene: Up-, Down-, Strange-, Charm-, Bottom-, und

Top-Quark. Das sind recht interessante Namen und zu den jeweiligen Teilchen, beziehungsweise zu den Quarks allgemein, gibt es eine ganze Menge zu erzählen. Allerdings geht es uns eher um das Myon und dieses finden wir in der anderen Gruppe.

Die Leptonen sind in drei so genannte Generationen unterteilt, das Elektron, das Myon und das Tauon. In diese Generationen gehören noch jeweils Neutrinos, die den Namen Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tauon-Neutrino tragen. Diese besitzen im Gegensatz zu den ersten drei Teilchen keine Ladung und nur eine extrem geringe Masse, die es ihnen erlaubt, nahezu jedes Material ungehindert zu durchqueren. Dementsprechend schwer ist es, sie experimentell nachzuweisen oder zu untersuchen. Etwas leichter machen es einem da jene Leptonen, die eine Ladung besitzen und sich auch "einfangen" lassen. Elektronen, Myonen und Tauonen sind sich generell sehr ähnlich. Aber dazu mehr unter dem nächsten Gliederungspunkt.

Denn neben diesen Elementarteilchen trifft das Standardmodell der Teilchenphysik, wie bereits erwähnt, auch Aussagen über die Wechselwirkung zwischen Leptonen und Quarks. Dafür sind Eichbosonen verantwortlich. Diese Botenteilchen sind Überträger der Grundkräfte der Physik. Die starke Wechselwirkung, die die Quarks beieinander hält, wird von Gluonen ausgeübt. Die schwache Wechselwirkung hingegen wird erst durch W^+ , W^- und Z -Bosonen möglich. Diese tritt zum Beispiel bei Zerfallsprozessen radioaktiver Elemente auf. Für die elektromagnetische Wechselwirkung sind Photonen verantwortlich. Ihren Einfluss sehen wir jeden Tag. Genau genommen ist er sogar essentiell zum Sehen; natürlich gehören das Licht und die Elektrizität zu dieser Wechselwirkung.

Doch all diese Botenteilchen wären bedeutungslos ohne Materie, also Quarks und Leptonen. Beschäftigen wir uns jetzt mit dem Teilchen, das sich sogar in den Titel dieser komplexen Leistung schleichen konnte: Das Myon.

2.2 Einordnung des Myons in das Standardmodell der Teilchenphysik

Wenn eine ganze Belegarbeit nur diesem Teilchen gewidmet wurde, dann muss es eigentlich sehr besonders und wichtig sein. Zumindest können wir an dieser Stelle einmal festhalten, dass das Myon äußerst interessant ist. Wir wissen bereits, dass es sich um ein Lepton handelt. Doch woher kommt denn nun unser Myon?

Wenn sich kosmische Strahlung der Erde nähert, dann finden Reaktionen zwischen den Protonen aus dem All und Atomkernen in der Atmosphäre statt. Dabei entstehen Pionen. Das sind Mesonen, eine weitere Art der Hadronen. Diese ganzen Teilchenbezeichnungen sollen uns jetzt nicht weiter stören. Nobelpreisträger Enrico Fermi meinte schon: "If I could remember the names of all these particles, I'd be a botanist". Wichtig für uns ist nur, dass Pionen sehr schnell zerfallen und zwar immer durch die schwache Wechselwirkung. Dabei entstehen ein Myon und ein Myon-Neutrino. Je nach Ladung des zerfallenen Pions handelt es sich dann um ein negativ geladenes Myon oder um sein Antiteilchen, also ein positives Myon. Damit ist uns nun seine Herkunft bekannt: Die so genannte Höhenstrahlung. Diese besitzt einen positiven Ladungsüberschuss. Deswegen gibt es prinzipiell auch mehr positive Myonen als negative.

Aber die Frage ist doch: "Who ordered that?". So beschrieb Isidor Isaac Rabi 1934 die Entdeckung des Myons. Bestellt hatte das nämlich niemand so wirklich. Anfangs meinte man, dass die Amerikaner Carl David Anderson und Seth Neddermeyer ein Teilchen in der kosmischen Strahlung gefunden hätten, das ein japanischer Forscher bereits so oder so ähnlich vorhergesagt hatte und etwa die 250fache Masse eines Elektrons haben musste. Dass es sich bei dieser Voraussage um ein Pion handelte und die beiden Wissenschaftler eigentlich das Myon entdeckt hatten, wurde erst einige Jahre später erkannt. Zu dieser Verwechslung kam es, wegen der ähnlichen Ruhemassen dieser beiden Teilchen. Das Myon besitzt nämlich tatsächlich eine Masse, die rund 200 mal so groß ist, wie die des Elektrons. Genau gesagt beträgt sie $105,7 \text{ MeV}/c^2$, aber diese eigenartige Einheit der Masse macht jetzt schon auf den nächsten Gliederungspunkt aufmerksam.

2.3 Erhaltungsgrößen und Bedeutung der Relativitätstheorie

Ein Elektronenvolt (kurz "1 eV") beschreibt die Energiezunahme eines Elektrons, das durch eine Spannung von einem Volt beschleunigt wird. Als Teilchenphysiker macht man sich dabei oftmals die Masse-Energie-Äquivalenz zunutze, die uns Einstein damals hinterlassen hat. Sein $E=mc^2$ hat uns nämlich gelehrt, dass Masse und Energie im Prinzip dasselbe sind. Deswegen nutzt man eine Energieeinheit, um die Masse der Teilchen zu beschreiben. Das c^2 finden wir auch in dieser Einheit wieder. Doch meistens betrachten wir die Bewegung eines Teilchens in einem System, in dem c den Wert 1 erhält. Somit dürfen wir das c^2 getrost ignorieren und erhalten dieselbe Einheit für Masse und Energie eines Teilchens. Physik kann so einfach sein.

Aber wenn wir uns bei Geschwindigkeiten nahe der absoluten Lichtgeschwindigkeit bewegen, dann müssten doch relativistische Effekte bei unseren Betrachtungen auftreten, richtig? Ja natürlich tun sie das und an dieser Stelle sei Gott einmal gedankt dafür. Denn um die sagenumwobene, wichtigste Erkenntnis meiner komplexen Leistung einmal vorweg zu nehmen: Die Lebensdauer der Myonen beträgt nur etwa 2,2 μs . In der Höhenstrahlung entsteht unser neues Lieblingsteilchen aber ungefähr 10 km entfernt vom Erdboden. Nach Adam Riese, beziehungsweise Isaac Newton und seiner klassischen Mechanik, schafft das Myon damit nicht viel mehr als 600 Meter auf dem Weg zu uns und unseren Messgeräten. Da es nun aber eine so hohe Energie und damit auch Geschwindigkeit besitzt, tritt die Zeitdilatation auf. Für uns auf der Erde, also praktisch unbewegt, überlebt das Myon mehr als 30 mal so lange. Das ist immer noch nicht viel, reicht aber für den Weg bis zum Erdboden. Für das Myon selbst, wäre wohl eher eine Längenkontraktion zu spüren, die dafür sorgt, dass es nur noch etwas mehr als 300 m hinter sich bringen muss, um uns zu erreichen. Wir müssen also kein Camp auf dem Mount Everest aufschlagen und können stattdessen in unserem gemütlichen Versuchskeller bleiben und dort bei einer Tasse Tee fröhlich Ereignisse zählen lassen. Wie wir das machen, sehen wir uns aber erst ein wenig später an.

Denn da stand ja gerade noch etwas von Erhaltungsgrößen. Dass Energie und Impuls Erhaltungsgesetzen unterliegen, wissen wir schon. Das ist insofern praktisch, als man bei Zerfallsprozessen zum Beispiel die für uns mehr oder weniger unsichtbaren Neutrinos erkennen kann; dies erfolgt durch den einfachen Vergleich des Impulses vorher mit dem der entstandenen Zerfallsprodukte. Denn der muss immer gleich sein. Fehlt etwas, so ist dem Detektor ein Teilchen unentdeckt entwischt. Diese Angewohnheit der Neutrinos haben wir auch schon kennengelernt. Aber für den Nachweis von Myonen sind ganz andere Erhaltungsgrößen noch sehr wichtig.

Da hätten wir nämlich zum Beispiel die Ladung. Wozu brauchen wir die? Wenn wir uns die Lebensdauer von Myonen ansehen wollen, dann spielt deren Ende eine wichtige Rolle. Teilchen dürfen sich genauso fragen, was nach dem Tod kommt. Wir müssen das über unser Myon sogar unbedingt wissen, weil es nicht in einer gewaltigen Explosion zerfällt und wir auch sonst nicht einfach sehen, wann wir unsere Messung stoppen sollten. Stattdessen müssen wir vorher in Erfahrung bringen, was von dem Myon nach dem Zerfall noch übrig ist. Die Ladung hilft uns dabei, weil wir dann sagen können, welche Teilchen dafür in Frage kommen. Ein Lepton hinterlässt nach dem Zerfall immer Leptonen mit niedrigerer Masse. Da hätten wir nur Elektronen und deren Antiteilchen. Die Ladungserhaltung sagt uns jetzt, dass also aus einem positiven Myon ein Positron wird und aus einem negativen ein Elektron. Aber das ist noch nicht alles. Das Standardmodell der Teilchenphysik verlangt noch eine weitere Erhaltung, die wir nicht ignorieren dürfen. Es kann nicht einfach vorher ein Myon da sein und nachher nicht mehr. Das klingt zwar eigentlich korrekt, weil unser Myon natürlich zerfällt, aber es muss eine "Myonigkeit" übrig bleiben, die sich in Neutrinos widerspiegelt. Nun kommt also das Myon-Neutrino ins Spiel, welches auch das Antimyon-Neutrino sein kann, wenn wir ein positives Myon vorliegen hatten. Allerdings haben wir auch nachher eine "Elektronigkeit", die vorher nicht da war. Deswegen muss diese neutralisiert werden durch ein Antielektron-Neutrino, wenn ein Elektron entsteht und ein einfaches Elektron-Neutrino bei Positronen. Also:

$$\begin{aligned} \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (\text{wobei der Strich über "v" dafür steht, dass es sich} \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (\text{um ein Antineutrino handelt}) \end{aligned}$$

3. Bestimmung der Lebensdauer

3.1 Nachweis von Myonen

Die Zerfallsprodukte zu kennen, ist für den Anfang schon nicht schlecht. Aber das ergibt für uns noch keine Lebensdauer. Natürlich brauchen wir einen Versuchsaufbau und die Möglichkeit, Teilchen zu detektieren. Zum Glück ist das an unserem Gymnasium schwer zu realisieren, sodass ich die Gelegenheit bekam, direkt in Dresden an der Technischen Universität dieses Praktikum durchzuführen. Denn da gibt es die nötige Technik.

Wir bedienen uns bei diesem Versuch einer Apparatur die aus so genannten Szintillatoren und Photomultipliern besteht. Unser Experiment beginnt damit, dass wir auf ein Myon warten, das sich in unsere Versuchsanordnung verirrt. Das klingt, als würde das sehr lange dauern. Aber die Höhenstrahlung, die uns erreicht, besteht zu mehr als 70 % aus Myonen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit recht hoch ist, in einer Sekunde wesentlich mehr als nur eines dieser Teilchen zu erwischen. Aber wie sieht diese Anordnung denn aus?

Äußerst unspektakulär, um das mal voranzustellen. Wir sehen davon nicht viel mehr, als ein paar schwarz beklebte, längliche Platten, die über Kabel mit einem Oszillographen verbunden sind. Dieses Gerät zeigt uns mit Linien oder Kurven Spannungen an (siehe Abb. 1). Bei den Platten handelt es sich um die Szintillatoren. An ihren Enden befinden sich die Photomultiplier. Insgesamt gibt es davon drei Stück. Ähnlich einer mehrstöckigen Erdbeertorte, von oben nach unten gesehen, sind zwei von ihnen übereinander geschichtet, darauf folgen eine Kupferplatte, die unsere Myonen einfangen soll, und der letzte Szintillator (siehe Abb. 2 und 3). Von unseren Teilchen merken wir aber auch damit nicht viel. Dazu dient die Spannungsmessung. Denn das einzige Signal, das wir empfangen, ist elektrisch. Wie funktioniert nun das alles und was sind eigentlich Szintillatoren und Photomultiplier?

Wenn Teilchen durch Materie fliegen, dann geben sie üblicherweise etwas Energie ab. Ein Szintillator ist ganz einfach ein Material, welches mit solcher Energie Lichtsignale erzeugt, sprich: Es fängt an zu leuchten. Bei einem einzelnen Myon sehen wir davon aber nichts. Deswegen brauchen wir noch etwas, um dieses

Signal zu verstärken. Der Photomultiplier vermehrt, wie man sich wegen seines Namens denken kann, Lichtsignale. Das Licht des Szintillators trifft auf die so genannte Photokathode. Das heißt, dass die Photonen, die das Licht vermitteln, an dieser Kathode Elektronen herauslösen. Diese einzelnen Elektronen treffen nun wiederum auf Dynoden. Das sind einfach Elektroden, aus denen sie weitere Elektronen "herausschlagen". Dieser Vermehrungsprozess verläuft exponentiell. Das heißt, dass mit jeder Dynode die Anzahl der wandernden Elektronen um ein vielfaches erhöht wird. Damit die Elektronen auch weiterhin wandern, müssen sie von den nächsten Elektroden angezogen werden. Diese brauchen also eine positive Ladung, welche durch eine anliegende Spannung erzielt werden kann. Diese Hochspannung wirkt sich auf die Empfindlichkeit des Photomultipliers aus und kann dazu führen, dass auch Koinzidenzen, also unerwünschte Ereignisse, die das Ergebnis verfälschen, aufgenommen werden. Das könnten zum Beispiel andere Teilchen sein, die normalerweise nicht die richtige Menge an Energie abgeben, aber dennoch fälschlicherweise als Myonen erkannt werden. Wenn dann genügend Elektronen frei sind, treffen diese auf eine Anode, an der eine Spannung erzeugt wird, die gemessen werden kann. Wir erhalten also ein Spannungssignal von einem durchfliegenden Teilchen, das uns anzeigt, dass da etwas war.

Bei unserem Versuch können wir jetzt verschiedene Signale aufnehmen, je nachdem, was für Teilchen es waren und bei welchen Szintillatoren etwas erkannt wurde. Unser Myon sollte im Idealfall in den oberen beiden ein Signal hinterlassen, aber keines im unteren, da es im Kupfer gestoppt werden soll. Erhalten wir eine solche Kombination, wird die Zeitmessung gestartet. Für uns sind die häufiger vorkommenden, positiven Myonen interessanter, da negative Myonen von dem elektromagnetischen Feld der Atomkerne des Kupfers eingefangen werden und das ihre Lebensdauer beeinflusst. Positiven Myonen geschieht das nicht. Das macht keinen besonders großen Unterschied aus, allerdings betrachten wir deswegen vorwiegend die entstehenden Positronen. Diese werden nämlich das Kupfer wieder verlassen und treten dann entweder nach oben oder unten aus. Das bedeutet, dass wir von einem dieser Szintillatoren ein Stoppsignal für unsere Messung bekommen. Das machen wir einige Male und erhalten Ergebnisse, die wir nun noch auswerten dürfen. Die Lebensdauer können wir nämlich nicht einfach irgendwo ablesen.

3.2 Statistische Auswertung

Ergebnis unserer tagelangen Messung sind nun mehr als 20000 Myonen, die uns bei diesem Versuch ins Netz gegangen und zerfallen sind. Jedes einzelne von ihnen hat eine gewisse Zeit lang überlebt. Gebe ich diese Messdaten einem Mitschüler, dann versucht er eine exponentielle Regression zu finden und davon eine mittlere Lebensdauer abzulesen. Ganz so einfach machen wir uns das aber nicht. Stattdessen gehen wir wissenschaftlicher vor. Wir verwenden eine immer noch recht simple Auswertungsmethode, die uns aber ein genaueres Ergebnis liefert. Diese nennt sich *Maximum-Likelihood-Methode*. Der Name verrät uns schon, dass es um eine Wahrscheinlichkeit geht. Wir verwenden eine Funktion, die uns die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisse liefert. Anders gesagt suchen wir uns eine Lebensdauer, die es wahrscheinlich macht, exakt unsere Messergebnisse zu erhalten. Das bedeutet, dass wir den Wert für die mittlere Lebensdauer τ (gesprochen: "Tau") ermitteln, bei dem wir an der Maximum-Likelihood-Funktion einen Hochpunkt erhalten. Diese Funktion ergibt sich nämlich als Produkt aus den Einzelwahrscheinlichkeiten unserer Messwerte, also im Prinzip der Anzahl an zerfallen Myonen in einem gewissen Zeitspektrum. Die Ergebnisse, die wir erhalten haben, umfassen 256 Zeitkanäle, die je $1/24 \mu\text{s}$ lang sind. Zerfällt nun ein Myon nach zum Beispiel $1,5 \mu\text{s}$, so erhalten wir einen Ereignisseintrag im 37. Kanal. Zum Berechnen verwenden wir der Einfachheit halber die Kanalmitte. Außerdem sehen wir uns in diesem Fall nur die Kanäle von 16 bis 235, da es davor zu Ergebnissen kommt, die aufgrund der sehr kurzen Zeitspanne nicht verwertbar sind. Wir gehen dabei davon aus, dass Kanal 16 mit der Zeit 0 beginnt. Die Verteilung der Ereignisse ist in einem Säulendiagramm in Abbildung 4 zu sehen. Unsere Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erhalten wir aus dem exponentiellen Zerfallsgesetz, welche nun angibt, wie wahrscheinlich es ist, eine einzelne, bestimmte Zerfallszeit zu messen, wenn wir von einem beliebigen τ ausgehen. Diese lautet nun:

$$P(t_i|\tau) = \frac{1}{\tau} e^{-t_i/\tau} \quad \text{Daraus bilden wir den Logarithmus der}$$

Likelihood-Funktion, weil sich davon das Maximum leichter ablesen lässt. Davon bilden wir die Ableitung und setzen diese Null, um den Hochpunkt zu erhalten, wie wir es im Mathe-Unterricht gelernt haben. Das Ergebnis sieht dann so aus:

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N} \sum t_i$$

Das sieht hochwissenschaftlich aus. Eigentlich sagt es uns aber nur, dass wir die Summe unserer gemessenen Zeiten durch die Anzahl insgesamt erhaltener Ereignisse teilen müssen. Das entspricht praktisch einem Mittelwert. Nun können wir uns gratulieren, denn wir erhalten damit die mittlere Lebensdauer der Myonen! Das würden wir zumindest, wenn wir die Ereignisse bis zu einer unendlichen Zeit messen, also unendlich viele t_i haben. Da das aber nicht machbar ist, müssen wir unsere Formel noch modifizieren. Denn momentan ergeben unsere Ereignisse keine Wahrscheinlichkeit von 1. Das müssen sie aber laut dem 2. Axiom der Wahrscheinlichkeitstheorie, das Kolmogorow aufgestellt hat. Deswegen erhalten wir mit dieser Formel aber auch nicht τ , sondern schreiben darüber ein kleines Dach.

Wir normieren nun unsere Wahrscheinlichkeitsverteilung so, dass sie 1 ergibt. Dazu brauchen wir einen Korrekturterm:

$$P(t_i|\tau) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t_i}{\tau}} \frac{1}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}$$

Jetzt kommt also noch ein T ins Spiel, welches für die Gesamtzeit steht, die wir messen. Wenn wir jetzt wieder unseren Hochpunkt suchen, erhalten wir folgende Formel:

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N} \sum t_i + \frac{T e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}$$

Wir erhalten nun also wieder ein vorläufiges τ , wenn wir unser erstes Ergebnis mit dem Korrekturterm addieren. Allerdings müssen wir noch beachten, dass es sich nicht um gleichwahrscheinliche t_i handelt. Stattdessen betrachten wir eine Anzahl K unterschiedlicher Kanäle, die dazu führt, dass wir nicht nur die Summe aller t_i durch N teilen, sondern die einzelnen t_i vorher mit der Anzahl der in diesem Kanal erhaltenen N_i multiplizieren und daraus die

Summe bilden. Das sieht dann wie folgt aus:

$$\hat{t} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K N_k \cdot t_k + \text{Korrekturterm}$$

Wir ignorieren nun zunächst den Korrekturterm, um ein erstes τ zu ermitteln. Denn da sich in diesem Term auch das τ befindet, bedingen sich die beiden. Das ist nicht einfach berechenbar und wir brauchen dafür ein vorläufiges τ , das wir ohne Korrekturterm errechnen. Mit den ermittelten Messwerten beträgt dieses etwa 2,030698 μs . Verrechnet man dieses Ergebnis nun mit dem Korrekturterm, immer und immer wieder, so wird die Differenz zwischen einem Wert und dem nächsten irgendwann so klein, dass der Korrekturterm vernachlässigt werden kann und man auf eine mittlere Lebensdauer von 2,16565 μs kommt, welche nicht weiter von der Korrektur beeinflusst wird.

Verglichen mit dem wissenschaftlich anerkannten Wert von 2,197 μs wird deutlich, dass es sich um keine besonders verlässliche Methode handelt, obwohl unser Ergebnis doch schon sehr nah daran liegt. Dennoch gibt es andere Auswertungs- und Messverfahren, die bessere Ergebnisse liefern, aber mir nicht möglich sind. Ich und der Leser müssen uns also jetzt damit zufrieden geben, wie es da steht. Für mich ist es jetzt aber an der Zeit, ein letztes Resümee zu ziehen und meine Arbeit abzuschließen.

4. Nachwort

Damit ist für mich also, was diese komplexe Leistung angeht, fast alles gesagt. Aber natürlich sollte sich jeder Leser der Tatsache bewusst sein, dass zum Thema der Teilchenphysik und sogar zum Myon noch längst nicht alles gesagt wurde. Ich weiß genau, dass sie, obwohl sich die Teilchenphysik mit Dingen beschäftigt, die eine mikroskopisch kleine Masse besitzen, keine besonders leichte Kost ist. Für mich war diese komplexe Leistung der nötige Anstoß, um mich näher mit diesem Feld der Physik zu beschäftigen. Anfangs denkt man nur daran, wie viel Arbeit auf einen zukommt, wenn man hört, dass hierfür zehn oder mehr Seiten geschrieben werden müssen. Aber ich für meinen Teil weiß jetzt ziemlich sicher, dass ich keine Angst vor dem harten Studentenalltag haben muss, wenn ich Physik studieren möchte.

Natürlich war das alles sehr viel Arbeit, aber ich fühle mich in einer Theorie bestätigt. Ich vergleiche die Teilchenphysik ein wenig mit einem Tier im Zoo. Jeder Besucher sieht bei erster Betrachtung einen Elefanten. Doch für ein kleines Kind kann er aufgrund seiner schieren Größe bedrohlich wirken, während eine erwachsene Person eher einen sanften Riesen in ihm sieht. Jeder hat seine ganz eigene Perspektive, bevor er das Infoschild vor dem Gehege genauer betrachtet. Vielleicht ist der Besucher ein Mädchen, das in dem Elefanten ihr rosa Lieblingsstofftier sieht. Und je nachdem, wo ihre Eltern mit ihr in den Zoo gegangen sind, sieht sie auf der Infotafel die Worte "Der Elefant", "The elephant" oder vielleicht auch "l'éléphant". Meiner Meinung nach, verhält es sich mit der Teilchenphysik ähnlich. Am einfachsten kommt man durch Medien an Informationen zu diesem Thema, die versuchen, es ansprechend zu verpacken. Ich sehe mir den Elefanten aber ungern im Fernsehen an, wo nur die schönsten und interessantesten Bilder gezeigt werden. Für meine komplexe Leistung durfte ich mir das Thema sogar im "Zoo" ansehen und mir ein eigenes Bild machen. Aber jetzt habe ich das Bedürfnis, den Elefanten in echt zu sehen, ihn in freier Wildbahn zu erleben. Speziell nach meinem Praktikum in Dresden wusste ich genau, dass mich das noch in Zukunft beschäftigen wird, auch nachdem ich die Belegarbeit hinter mir habe. Ich wusste: Die Teilchenphysik ist mein rosa "Elephant".

5. Anhänge



Abb. 1: Monitor eines Oszillographen

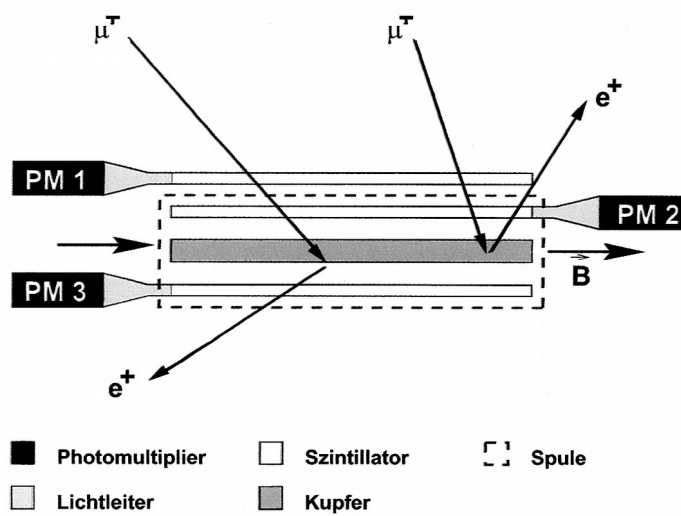


Abb. 2: Prinzip-Skizze des Versuchs

(Quelle: <http://hep.phy.tu-dresden.de/iktp/lehre/fprak/muon/muon.pdf>)



Abb. 3: Versuchsanordnung

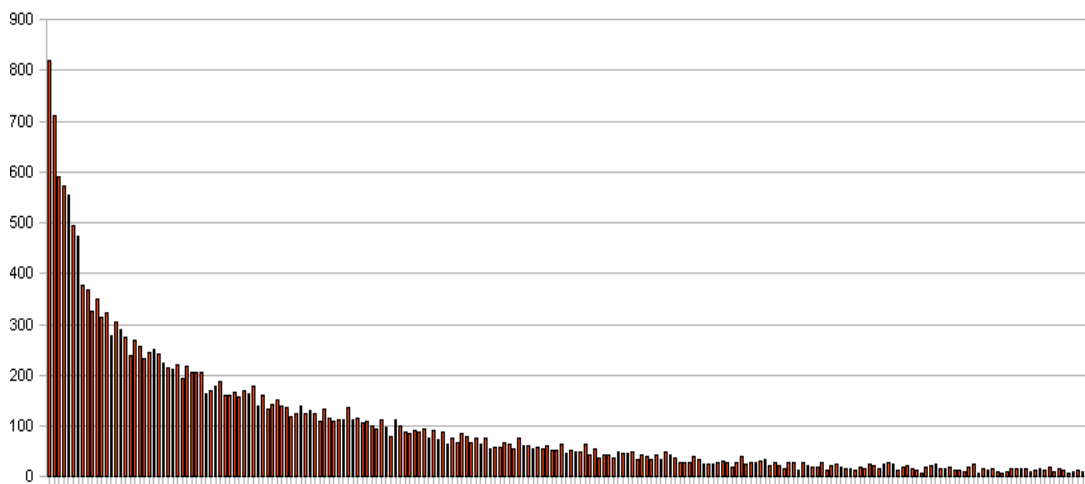


Abb. 4: Verteilung der Messergebnisse (Anzahl N ; y-Achse) auf K Kanäle (Nr. 16 bis 235; x-Achse)

6. Literaturverzeichnis

Federmann, Georg: Viktor Hess und die Entdeckung der kosmischen Strahlung

In: http://www.federmann.co.at/vfhess/Kapitel/7_3.html

(zugegriffen am 29.03.2014)

Greuling, Heinz: Peter Higgs - der Mann und das Teilchen

In: <http://www1.wdr.de/fernsehen/wissen/quarks/sendungen/sbcern106.html>

(zugegriffen am 15.03.2014)

o.V.: Das Standardmodell der Teilchenphysik

In: http://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik

(zugegriffen am 29.03.2014)

o.V.: Die Leptonen

In: <http://www.atlas.uni-wuppertal.de/oeffentlichkeit/Leptonen.html>

(zugegriffen am 29.03.2014)

o.V.: Die vier Wechselwirkungen – Erhaltungssätze und Erhaltungsgrößen

In: http://erlangen.physicmasterclasses.org/sm_ww/sm_ww_erh1.html

(zugegriffen am 15.03.2014)

o.V.: Elektronenvolt

In: <http://www.einstein-online.info/lexikon/elektronenvolt>

(zugegriffen am 29.03.2014)

o.V.: LHC – Szintillator

In: <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=szintillator>

(zugegriffen am 29.03.2014)

o.V.: Praktikumsversuch – Lebensdauer von Myonen

In: <http://hep.phy.tu-dresden.de/iktp/lehre/fprak/muon/muon.pdf>

(zugegriffen am 17.11.2013)

o.V.: Who ordered that

In: <http://www.physics.rutgers.edu/~karin/228/slides/5-3-10.pdf>

(zugegriffen am 29.03.2014)

Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegeben Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und alle sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht und im Literaturverzeichnis aufgeführt habe.

Löbau, den 14.05.2014

Moritz Kopsch