

Erwin - Strittmatter - Gymnasium

Schuljahr 2017/18

Mittelstraße 1

03130 Spremberg

Seminararbeit
im W-Seminar „Teilchenphysik“

Messungen zu Myonen der kosmischen Strahlung
Nachweis, Geschwindigkeitsermittlung und Untersuchung des
Gebäudeeinflusses

von

Marius Melcher

Betreuende Lehrkraft: Herr Reichel

Betreuer des Praktikums: Steffen Turkat

Abgabe: 20.10.2017

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Arten kosmischer Strahlung	4
2.1 Primäre kosmische Strahlung	4
2.1.1 Zusammensetzung und Entstehung	4
2.1.2 Abschirmung der Erde durch das Magnetfeld	6
2.2 Sekundäre kosmische Strahlung	7
2.2.1 Entstehung	7
2.2.2 Myonen	8
3. Messungen zur kosmischen Strahlung	9
3.1 Physikalische Effekte im Zusammenhang mit kosmischer Strahlung	10
3.1.1 Cherenkov-Effekt	10
3.1.2 Szintillation	11
3.2 Nachweis kosmischer Strahlung mithilfe von Photomultipliern	12
3.2.1 Aufbau	12
3.2.2 Funktionsweise von Photomultipliern	13
3.2.3 Messergebnisse und Auswertung	15
3.3 Geschwindigkeitsmessung von Myonen	16
3.3.1 Aufbau	16
3.3.2 Messergebnisse und Auswertung	17
3.4 Einfluss von Gebäuden auf kosmische Strahlung	19
3.4.1 Aufbau	20
3.4.2 Messergebnisse und Auswertung	21
4. Zusammenfassung und Fazit	23
5. Literaturverzeichnis	25
6. Anhang	27
7. Eidesstattliche Erklärung	31

1. Einleitung

In der Teilchenphysik untersucht man die kleinsten uns bekannten Bestandteile des Universums - die Elementarteilchen. Um neue Erkenntnisse zu gewinnen, beschleunigt man am Large Hadron Collider (LHC) in der Schweiz, dem größten Teilchenbeschleuniger der Welt, Teilchen in einem ca. 27 km langen Tunnel annähernd auf Lichtgeschwindigkeit. Dabei werden Energien von bis zu $14 \cdot 10^{12}$ eV erreicht. Allerdings treffen ohne künstliche Beschleuniger wie diesen ständig hochenergetische Teilchen auf die Erde. Bevor sie mit Atomen in der Atmosphäre wechselwirken, haben sie Energien von bis zu 10^{20} eV - also ein Vielfaches der künstlich erreichten Energie. Diese Teilchen werden als kosmische Strahlung bezeichnet und sind das Thema dieser Arbeit. Im Rahmen eines einwöchigen Praktikums an der TU – Dresden hatte ich die Gelegenheit mehrere Experimente durchzuführen und Messwerte zu sammeln, die hier ausgewertet werden.

Die kosmische Strahlung wurde am Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckt. Zu Beginn wurde sie auch Höhenstrahlung genannt. Der Österreicher Victor Hess wird als einer der ersten Entdecker angesehen. Im Jahr 1912 führte er mehrere Ballonflüge bis auf eine Höhe von 5000 m durch. Er wollte eigentlich die Höhenabhängigkeit ionisierender Strahlung untersuchen und vermutete daher, dass mit steigender Höhe die Strahlung abnimmt, da sich der Abstand zu Quellen von natürlicher Radioaktivität in der Erdkruste vergrößert. Hess stellte allerdings fest, dass die Strahlenbelastung mit steigender Höhe leicht zunimmt. Daraus schlussfolgerte er, dass sich um eine Strahlung handeln musste, deren Ursprung außerhalb der Erde liegt. Für diese Entdeckung erhielt er 1936 den Nobelpreis für Physik^{2;3}.

Heute versucht man mit unterschiedlichen Experimenten durch die kosmische Strahlung Erkenntnisse zu gewinnen. Man erhofft sich die meisten Erkenntnisse von der Untersuchung von den energiereichen Teilchen, da Reaktionen mit Teilchen dieser hohen Energie auch in den ersten Minuten des Universums stattfanden. Das Problem dabei ist, dass mit steigender Energie immer weniger Teilchen die Erde erreichen. Man muss also, um diese zu detektieren, möglichst große Flächen abdecken. So werden bei dem Pierre Auger Observatorium in

Argentinien ca. 1600 Detektoren auf einer Fläche von über 3000 km² zur Erfassung energiereicher Teilchen genutzt.

Vor allem die Frage nach der Herkunft dieser Teilchen ist interessant. Denn bisher gibt es nur Theorien, wie die Teilchen auf eine derart hohe Energie beschleunigt werden.

2. Arten kosmischer Strahlung

Die kosmische Strahlung wird in primäre und in sekundäre kosmische Strahlung aufgeteilt. Die Teilchenstrahlung, welche direkt auf die äußere Erdatmosphäre trifft wird als primäre kosmische Strahlung bezeichnet. In der Atmosphäre trifft sie dann auf Luftmoleküle, was unterschiedliche Wechselwirkungen hervorruft, bei denen neue Teilchen entstehen. Diese aus der primären Strahlung entstehenden Teilchen werden als sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet und können teilweise auf der Erdoberfläche detektiert werden.

2.1 Primäre kosmische Strahlung

2.1.1 Zusammensetzung und Entstehung

Die primäre kosmische Strahlung besteht zu ca. 98 % aus ionisierten Atomen und zu ca. 2 % aus Positronen und freien Elektronen. Die Vielzahl der ionisierten Atome setzt sich zu 87 % aus Protonen, zu 12 % aus Heliumkernen und zu einem Prozent aus noch schwereren Atomkernen zusammen¹. Allerdings werden bei der kosmischen Strahlung meist nur die geladenen Teilchen betrachtet. Es treten weiterhin Neutrinos und Photonen auf. Diese werden allerdings meist separat betrachtet und sind daher auch nicht in der Statistik mitaufgeführt².

Die kinetische Energie der Teilchen hängt vom Entstehungsprozess ab und variiert daher sehr stark. Sie liegt zwischen 10⁷ eV und 10²⁰ eV. Es ist lediglich bekannt,

dass Teilchen mit einer Energie von bis zu 10^9 eV durch die Sonne erzeugt werden³. Diese besteht aus heißem Plasma. Hierbei handelt es sich, aufgrund der hohen Temperaturen, um ein ionisiertes Gas aus Wasserstoff und Helium. Die Elektronen in der Sonnenatmosphäre bewegen sich allerdings, aufgrund ihrer geringeren Masse, schneller als die positiven Ionen. Es fließt also ein elektrischer Strom, welcher ein Magnetfeld induziert. Das Plasma fließt entlang der Feldlinien. Diese Plasmabögen werden auch Flares genannt. Da diese allerdings in Bewegung sind, kommt es vor, dass sich zwei Feldlinien treffen. Das wiederum führt zu einer Umstrukturierung des Magnetfeldes. Dieser Vorgang wird Rekonnexion genannt. Durch entstehende Inhomogenitäten im Magnetfeld wird das Plasma ins Weltall geschleudert. Dieser gesamte Vorgang wird als Sonneneruption bezeichnet und setzt Teilchen mit Energien von bis zu 10^9 eV frei^{4,7}.

Hinzu kommen die Sonnenwinde. Dabei werden Teilchen in der Korona stark beschleunigt, aufgrund der hohen Temperaturen in dieser Schicht. Es werden Temperaturen von bis zu zwei Millionen Kelvin erreicht. Die geladenen Teilchen werden auf Geschwindigkeiten von $400 \frac{km}{s}$ bis $800 \frac{km}{s}$ beschleunigt. Diese Geschwindigkeiten reichen aus, um das Gravitationsfeld der Sonne zu verlassen. Während es sich also bei Sonneneruptionen zu kurzen Ausstößen von Plasma kommt, werden ständig Sonnenwinde angegeben. Diese haben allerdings nur Energien von maximal 10^7 eV und haben daher kaum Einfluss auf die Erde⁵.

Der Ursprung der kosmischen Strahlung mit Energien über 10^9 eV ist nicht genau bekannt und ist daher Gegenstand aktueller Forschung. Bei Energien von 10^9 eV bis 10^{18} eV gehen Wissenschaftler davon aus, dass der Ursprung innerhalb der Milchstraße liegt. Hier könnte es sich um Schockwellenfronten von Supernova - Explosionen handeln. Bei Energien von 10^{18} eV bis 10^{20} eV geht man von einem Ursprung außerhalb der Milchstraße aus, da innerhalb der Milchstraße keine Quelle so großer Energien bekannt ist. Die primäre kosmische Strahlung kann also aufgrund ihres Ursprungs unterteilt werden in: solare, galaktische und extragalaktische kosmische Strahlung³.

Mit einer maximalen Energie von 10^{20} eV ist die kosmische Strahlung sehr interessant für die Wissenschaft. Der Mensch kann am LHC Teilchenkollisionen

mit einer maximalen Energie von $14 \cdot 10^{12}$ eV künstlich erzeugen⁶. Es bietet sich also mit der kosmischen Strahlung die Möglichkeit, Teilchen mit einer um ein Vielfaches größeren kinetischen Energie zu untersuchen. Teilchen mit höheren Energien sind allerdings viel seltener. So beträgt der Fluss von Teilchen mit einer Energie von 10^{19} eV in etwa ein Teilchen pro km^2 pro Jahr. Also müssen Detektoren sehr große Flächen abdecken um eine signifikante und daher statistisch sinnvolle Anzahl an Teilchen dieser Energie messen zu können².

2.1.2 Abschirmung der Erde durch das Magnetfeld

Die primäre kosmische Strahlung trifft allerdings nicht direkt und in voller Stärke auf die Erdoberfläche. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen interagieren die Teilchen mit den Atomen in der Erdatmosphäre, was in 2.2.1 genauer erklärt wird. Zum anderen ist die Erde durch ihr eigenes Magnetfeld geschützt.

Wie bereits erklärt wurde, besteht die primäre kosmische Strahlung zu großen Teilen aus geladenen Teilchen. Daher werden Teilchen durch ein Magnetfeld, wie das der Erde, je nach Energie, stark oder weniger stark abgelenkt. Hochenergetische Teilchen werden nur zu einem vernachlässigbaren Anteil abgelenkt. Niederenergetische Teilchen koppeln in die Magnetfeldlinien der Erde ein und bewegen sich spiralförmig entlang der Linien zum Nord oder zum Südpol. Zusätzlich kommt es zu einer Verformung des Erdmagnetfeldes. Auf der Tag-Seite staucht sich das Magnetfeld, während sich auf der der Sonne abgewandten Seite ein Schweif bildet [Abb. 1]. Ein Teil der Teilchen fliegt auf dem Schweif weiter durch das Weltall, ohne die Erde zu treffen⁸.

Da die Feldlinien allerdings an den Polen zusammenlaufen, können sich über diesen die Teilchen der Erdoberfläche leichter nähern. Daher interagieren über den Polarregionen mehr Teilchen der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre als über anderen Breitengraden. Es kommt zum sichtbaren Phänomen der Polarlichter, was auch auf anderen Planeten zu finden ist. Bei starker Sonnenaktivität ist dieses auch über mittleren Breitengraden zu beobachten, da die Teilchen mehr Energie haben als gewöhnlich und daher auch weiter entfernt von den Polen in größeren Mengen in die Erdatmosphäre gelangen^{7;4}.

2.2 Sekundäre kosmische Strahlung

2.2.1 Entstehung

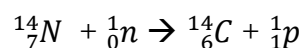
Ein Teil der primären kosmischen Strahlung gelangt trotz des magnetischen Feldes in die Erdatmosphäre. Hier stoßen sie, in etwa 15 bis 20 km Höhe, mit den Atomen in der Luft, also meist mit Stickstoff- oder Sauerstoffatomen, zusammen. Es entstehen neue Teilchen, welche als sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet werden. Diese Teilchen wiederum erzeugen durch weitere Wechselwirkungen ebenfalls neue Teilchen. Es kommt zu einer sogenannten Teilchenkaskade. So erzeugt ein Primärproton mit einer Energie von 10^{15} eV durchschnittlich ca. eine Million Sekundärteilchen⁵.

Die entstehenden Teilchen werden in hadronische, elektromagnetische und myonische Komponente unterteilt [Abb. 2]. Bei den Hadronen handelt es sich um Teilchen die aus Quarks aufgebaut sind. In Teilchenschauern entstehen sie durch die starke Wechselwirkung. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Kaonen, Pionen, Protonen und Neutronen sowie deren Anti-Teilchen. Pionen machen etwa 70% der hadronischen Schauer aus. Die drei Varianten der Pionen, also π^+ ($u\bar{d}$), π^- ($d\bar{u}$) und π^0 (Überlagerungszustand) entstehen dabei zu gleichen Anteilen. Neutrale Pionen mit einer Lebensdauer von $8,4 \cdot 10^{-17}$ s zerfallen meist in zwei Gammaquanten. Geladene Pionen haben eine längere Lebensdauer von 26 ns und zerfallen in Myonen und Neutrinos^{2;5}.

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

Kaonen zerfallen in Pionen, Myonen, und Neutrinos. In der hadronischen Komponente erreichen lediglich vereinzelte Protonen und Neutronen die Erdoberfläche².

Die hadronische Komponente ist weiterhin für eine wichtige Reaktion verantwortlich - die Entstehung von ^{14}C Atomen. Die entstehenden freien Neutronen reagieren dabei mit Stickstoffatomen in der Luft^{2;5}.



Da das entstehende ^{14}C Atom ist radioaktiv und hat eine Halbwertszeit von 5730 Jahren. Es wird durch lebende Organismen aufgenommen. Nach ihrem Tod nimmt aufgrund des Zerfalls die Anzahl der ^{14}C Atome ab. Wird dieser tote Organismus (z.B. ein Baum) gefunden, kann anhand der von den restlichen ^{14}C - Atomen ausgehenden Strahlung das Alter bestimmt werden. Dies ist vor allem in der Archäologie bedeutsam.

Die hadronische Komponente macht allerdings nur 1 % des Teilchenschauers auf Meereshöhe aus². Die elektromagnetische Komponente macht mit ca. 90 % den Großteil des Schauers aus, auch wenn nur ein Bruchteil davon den Erdboden erreicht. Sie besteht aus Gammaquanten(Photonen), Elektronen und Positronen. Die Komponente stammt hauptsächlich aus der hadronischen Komponente, da neutrale Pionen in zwei γ -Quanten zerfallen².

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

Diese Photonen wiederum, können ein Elektron-Positron-Paar erzeugen. Diese können weitere Photonen emittieren, die erneut Elektron-Positron-Paare erzeugen. Es entsteht ein elektromagnetischer Teilchenschauer der am Erdboden messbar ist. Sie stellen 19 % der auf der Erdoberfläche ankommenden Teilchen dar³.

2.2.2 Myonen

Die myonische Komponente ist der dritte Teil der sekundären kosmischen Strahlung. Sie für die Wissenschaft von besonderer Bedeutung, da sie ca. 80 % der auf Meereshöhe ankommenden geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung darstellt und daher gut messbar ist. Auf Meereshöhe haben sie eine Flussdichte von etwa ein Teilchen pro cm^2 und Minute. Die Myonen (μ^-) bzw. Antimyonen (μ^+) entstehen durch den Zerfall von den geladenen Pionen und Kaonen, die in der hadronischen Komponente bereits genannt wurden².

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \text{ oder } \pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu$$

Kaonen zerfallen entweder direkt in Myonen oder in Pionen, die wiederum in Myonen zerfallen. Der Zerfall von Pionen stellt also die bedeutendste Quelle der Myonen in der kosmischen Strahlung dar⁵.

Zerfall in Myonen: $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ oder $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Zerfall in Pionen: $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ oder $K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$

Die Eigenschaften der Myonen ähneln denen der Elektronen, was sich durch das Standardmodell erklären lässt. Beide Elementarteilchen gehören zu den Leptonen. Wobei das Elektron ein Lepton der ersten und ein Myon ein Lepton der zweiten Generation ist. Daher kann man das Myon gewissermaßen als „schweres Elektron“ bezeichnen. Beide haben eine Ladung von $Q = 1e$ und einen Spin von $\frac{1}{2}$. Sie unterscheiden sich allerdings in der Masse. Myonen haben eine Masse von $m_\mu = 1,883 \cdot 10^{-28}$ kg, während die Masse der Elektronen $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg beträgt. Myonen haben eine rund 207-mal größere Masse. Allerdings ist ein Elektron stabil, während ein Myon nach $2,197 \cdot 10^{-6}$ s zerfällt⁵.

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e \text{ oder } \mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$$

Myonen entstehen in einer Höhe von ca. 10 km. Doch die kurze Lebensdauer wirft eine Frage auf: Warum können Myonen auf Meereshöhe detektiert werden? Selbst wenn man von annähernder Lichtgeschwindigkeit ausgeht, ergibt sich folgendes:

$$s = v \cdot t$$

$$s = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 2,197 \cdot 10^{-6} s = 659,1 \text{ m}$$

Theoretisch müssten also bereits nach 659 m alle Myonen in Elektronen und Neutrinos zerfallen sein, trotzdem machen sie 80 % der auf Meereshöhe gemessenen geladenen Teilchen aus. Wie es dazu kommt wird in 3.3.2 erklärt^{3;9}.

3. Messungen zur kosmischen Strahlung

Aufgrund der Interaktion der primären kosmischen Strahlung mit Teilchen in der Erdatmosphäre, kann auf der Erde nur die sekundäre kosmische Strahlung gemessen werden. Hauptsächlich werden dabei Myonen, bzw. Anti-Myonen, detektiert, da diese einen Großteil der an der Oberfläche ankommenden Teilchen

ausmachen. Da die Strahlung allerdings nicht sichtbar ist und kaum Einfluss auf unsere Umgebung hat, müssen für Messungen verschiedene physikalische Effekte ausgenutzt werden.

3.1 Physikalische Effekte im Zusammenhang mit kosmischer Strahlung

3.1.1 Cherenkov-Effekt

Der Cherenkov-Effekt tritt ein, wenn ein geladenes Teilchen sich in einem Medium schneller bewegt als das Licht. Ist das der Fall, wird die sogenannte Cherenkov-Strahlung emittiert.

Dieser Effekt lässt sich auf atomarer Ebene erklären. Durchquert ein geladenes Teilchen ein Medium, wie z.B. Wasser, können sich kurzzeitig Dipole bei den umgebenden Atomen bilden. Dies lässt sich gut am Beispiel Wasser erklären. Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Da das Sauerstoffatom über eine größere Elektronegativität verfügt, werden die Elektronen in der Bindung näher an dieses gezogen. Es entsteht ohne äußeren Einfluss ein Dipol. Da die Elektronen näher am Sauerstoffatom sind, bildet sich auf der Seite ein negativer Pol. Auf der Seite der Wasserstoffatome fehlen nun die Elektronen - es entsteht ein positiver Pol. Wenn nun ein negativ geladenes Teilchen das Wasser durchquert, wird vor allem die positive Seite der umgebenden Wassermoleküle angezogen. Für den Cherenkov Effekt muss das Teilchen allerdings nicht von selbst einen Dipol bilden. Der Vorbeiflug geladener Teilchen reicht, damit sich die Atome kurzzeitig polarisieren².

Diese zeitlich veränderlichen Dipole führen zur der Entstehung von elektromagnetischen Wellen. Im Normalfall ordnen sich die Dipole gleichmäßig an. Die Wellen benachbarter Atome treffen aufeinander und löschen sich dabei gegenseitig aus, sodass kaum Strahlung nach außen dringt. Wenn sich allerdings ein geladenes Teilchen schneller als das Licht durch das Medium bewegt, können sich die Dipole nicht mehr regelmäßig anordnen. Die Strahlung löscht sich nun

nicht mehr gegenseitig aus. Die entstehende Strahlung breitet sich kegelförmig in Bewegungsrichtung des vorbeifliegenden Teilchens aus. Die Ausbreitungsform lässt sich vereinfacht mit der kegelförmigen Wellenfront hinter einem Schiff vergleichen, das sich ebenfalls schneller bewegt, als die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserwellen.

Diese Strahlung, bestehend aus Photonen, wird Cherenkov-Licht genannt. Diese können nun auf verschiedene Weisen durch Detektoren nachgewiesen werden. Dieser Effekt ist sehr gut für den Nachweis kosmischer Strahlung geeignet, da eine extrem hohe Geschwindigkeit vorausgesetzt wird. In der normalen Luft erzeugt kosmische Strahlung fast keine Cherenkov-Strahlung, da die Teilchen dort die Lichtgeschwindigkeit im Normalfall nicht erreichen. Im Wasser allerdings breitet sich das Licht „nur“ mit einer Geschwindigkeit von $225\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ aus, während sich viele Teilchen der kosmischen Strahlung dort schneller bewegen. Dieser Effekt tritt zum Beispiel in Atomkraftwerken auf. Dort erzeugen bei der Kernspaltung entstehende Elektronen für ein bläuliches Licht im umgebenden Wasserbecken³.

Da Myonen geladene Teilchen sind und einen Großteil der an der Erdoberfläche ankommenden kosmischen Teilchen ausmachen, lässt sich kosmische Strahlung sehr gut durch den Cherenkov Effekt anzeigen. In einem normalen Umfeld bewegen sich kaum geladene Teilchen neben der kosmischen Strahlung schneller als das Licht, weshalb der Fehlerquotient bei Nachweisen mithilfe des Cherenkov-Effekts kaum durch andere, nicht erwünschte, beeinflusst wird.

3.1.2 Szintillation

Das Prinzip der Szintillation ähnelt dem Cherenkov Effekt. Es wird durch geladene Teilchen hervorgerufen. Bestimmte Materialien absorbieren die Energie von geladenen Teilchen. Diese Energie führt dazu, dass sich Elektronen im Atom weiter vom Kern entfernen - sie sind dann auf einem höheren Energieniveau. Das Atom befindet sich nun im sogenannten „angeregten“ Zustand, da die Elektronen, die vom Kern angezogen werden, sich von diesem entfernt haben. Die Elektronen kehren nach kurzer Zeit wieder in ihr ursprüngliches Energieniveau zurück. Dabei werden, ähnlich dem Cherenkov-Effekt, Photonen emittiert. Diese können erneut z.B. mit

Hilfe von Photomultipliern (siehe 3.2.2) detektiert werden. Szintillatoren sind dabei meist Kristalle oder Flüssigkeiten, unter anderem weil sie lichtdurchlässig sein müssen.

Im Gegensatz zum Cherenkov-Effekt tritt die Szintillation nicht unmittelbar nach dem Cherenkov-Effekt auf, sondern nach einer kurzen Verzögerung, da das Licht erst bei der Rückkehr in den Ausgangszustand frei wird. Des Weiteren wird die Szintillation auch zur Messung von radioaktiver Strahlung verwendet, was bei Messungen zur kosmischen Strahlung Fehler hervorrufen kann³.

3.2 Nachweis kosmischer Strahlung mithilfe von Photomultipliern

3.2.1 Aufbau

Der Nachweis von kosmischer Strahlung erfolgt unter Ausnutzung des Cherenkov-Effekts (siehe 3.1.1). Dafür wird eine modifizierte Thermoskanne, welche auch Kamiokanne genannt wird, genutzt. Damit die kosmische Strahlung in der Kanne Cherenkov-Licht erzeugt, wird die Kanne mit Wasser gefüllt – so ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilchen schneller als die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium sind, höher. Die innere Beschichtung der Kanne sorgt dabei dafür, dass das entstehende Licht nicht von der Oberfläche absorbiert wird. So wird sichergestellt, dass die meisten Photonen detektiert werden. Auf die Kanne wird ein Photomultiplier geschraubt (siehe 3.2.2). [Abb. 3] Dieser ist wie der normale Deckel der Thermoskanne mit Kunststoff umgeben, um den Innenbereich vor äußerem Licht zu schützen. So wird die größte mögliche Genauigkeit erreicht.

Der Photomultiplier wird dann mit einer Hochspannungsquelle und einer DAQ-Karte verbunden. Diese Karte ist für die Datenerfassung zuständig. Sie leitet die Daten des Detektors weiter an einen Laptop. Dort werden die detektierten Myonen, mithilfe einer speziellen Software namens Myonic gezählt, gespeichert und grafisch dargestellt.

Um zusätzlich den Einfluss des Wassers auf den Cherenkov-Effekt aufzuzeigen, wird parallel der gleiche Versuch durchgeführt - nur ist die Thermoskanne leer. Theoretisch müsste in der Thermoskanne mit dem Wasser deutlich mehr Licht detektiert werden, da dort die Geschwindigkeit des Lichts mit $225\,000 \frac{km}{s}$ deutlich geringer ist als in der Luft und somit Cherenkov-Licht (siehe 3.1.1) erzeugt wird. Dieser Schritt ist hilfreich um das, durch den Photomultiplier verursachte, „Rauschen“ (siehe 3.2.2) zu ermitteln.

3.2.2 Funktionsweise eines Photomultipliers

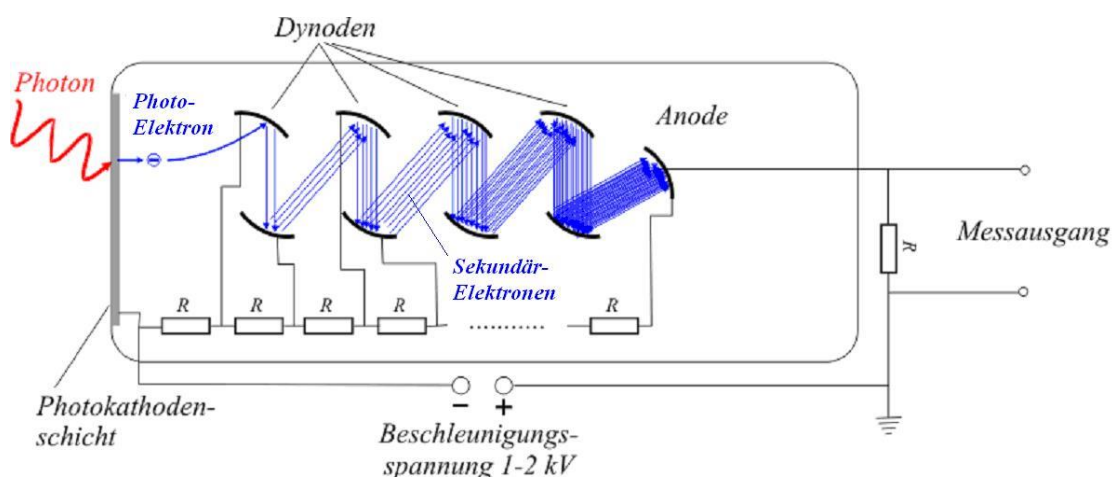
In dem vorhergehend beschriebenen Versuchsaufbau entstehen vereinzelt Lichtblitze. Dieses Licht ist allerdings zu schwach um es mit herkömmlichen Detektoren in nutzbare Signale umzuwandeln. Der Photomultiplier wandelt die entstehenden schwachen Lichtsignale in elektrische Signale um, welche dann verstärkt und für die Auswertung genutzt werden können.

Um eine höchst mögliche Geschwindigkeit zu erreichen und Signalverluste zu vermeiden, ist im gesamten Photomultiplier ein Vakuum. Zu Beginn treffen die Photonen auf eine Photokathode. Dabei handelt es sich um eine dünne Metallplatte, in der die Außenelektronen der Metallatome nur schwach gebunden sind. Die eintreffenden Photonen schlagen also einige Elektronen aus der Metallschicht. Dieser Effekt wird „Photoeffekt“ genannt. Dabei wird das Photon durch ein Metallatom absorbiert. Aufgrund der Energie des eintreffenden Photons löst sich daraufhin ein Elektron aus dem Atom. Die kinetische Energie dieses Elektrons ist vom Kathodenmaterial und von der Energie des Photons abhängig.

Diese Elektronen werden von einer positiv geladenen, ringförmigen Anode angezogen und von der negativ geladenen Photokathode selbst abgestoßen. Dann treffen sie auf eine Elektrode. Die Elektroden in einem Photomultiplier werden auch „Dynoden“ genannt. Diese Dynoden nehmen, wie die Photokathode, die Elektronen auf. Da die Elektronen nun über mehr kinetische Energie verfügen wird auch mehr Energie absorbiert. Das wiederum führt zur erneuten Emission von Elektronen. Nun werden aufgrund der erhöhten Energie allerdings mehr Elektronen herausgelöst. Durch ein anliegendes elektrisches Feld werden die Elektronen zu

einer weiteren Dynode hin weiter beschleunigt. Diese Erhöhung der kinetischen Energie hat zur Folge, dass bei der nächsten Dynode ebenfalls mehr Elektronen herausgelöst werden als aufgenommen wurden. Dieser Prozess wird mehrmals wiederholt. Daher wird der Stromfluss immer stärker. Je mehr Dynoden verwendet werden, desto stärker wird der Stromfluss. Um eine ausreichende Verstärkung zu erhalten, muss weiterhin die positive, an den Dynoden anliegende Spannung mit jeder Dynode größer werden. So wird die stetige Beschleunigung der Elektronen gewährleistet³.

Die verstärkte Ladung wird dann von einer Anode am Ende aufgenommen. Dann wird üblicherweise ein $50\ \Omega$ Widerstand geschaltet um eine Spannung Messen zu können. Diese ist das Ergebnis dieses Aufbaus und kann weiter verwendet werden. Je nach Aufbau und Material der Dynoden wird das anfängliche Signal um den Faktor 10^3 bis 10^7 verstärkt. Zwischen dem Eintreffen der Photonen und dem Eintreffen der Elektronen an der Anode vergehen im Normalfall ca. 5 ns.



Grafik 2: Funktionsweise des Photomultipliers

Quelle: https://www.zeuthen.desy.de/exps/physik_begreifen/chris/PhotomultiSkizze.jpg (Stand: 09.10. 17)

Photomultiplier haben allerdings mehrere Schwachstellen. Um an der Photokathode ein Elektron heraus zu lösen muss das Photon eine, ja nach Material unterschiedliche, Energie überschreiten. So kommt es vor, dass für das Ergebnis relevante Photonen nicht registriert werden. Des Weiteren tritt ein „Rauschen“ auf.

Durch thermische Energie der Umgebung werden ebenfalls Elektronen aus der Photokathode herausgelöst und daher auch im Messergebnis angezeigt. Daher ist es häufig sinnvoll durch einen Versuch in einem lichtleeren Raum - einem sogenannten „Dunkelversuch“ durchzuführen um das Hintergrundrauschen zu ermitteln³.

Photomultiplier werden in der Teilchenphysik meist im Zusammenhang mit der Cherenkov-Strahlung und mit der Szintillation verwendet. Die entstehenden schwachen Lichtsignale werden so verstärkt und gezählt um über längere Zeiträume hinweg Statistiken aufzustellen. Auch außerhalb der Physik spielen sie eine Rolle. So werden sie zum Beispiel in der Medizin genutzt um in der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) durch radioaktive Markierungsstoffe entstehende Photonen zu detektieren².

3.2.2 Messergebnisse und Auswertung

Medium	Zeit in s	Ereignisse	Ereignisse pro s
Luft	56370	38431	0,6818
Wasser	56360	113901	2,021

Tabelle 1: Myonenraten beim Kamiokannenexperiment

Die Myonenrate bei der mit Wasser gefüllten Kamiokanne ist ca. drei Mal größer als die Rate der mit Luft gefüllten Kamiokanne. In der mit Wasser gefüllten Kanne sind also aufgrund des Cherenkov-Effekts, Photonen entstanden. Durch diesen relativ einfach aufgebauten Versuch konnte also nachgewiesen werden, dass sich Teilchen mit einer Geschwindigkeit über der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Wasser, also $225\,000 \frac{km}{s}$, bewegen. Dabei handelt es sich um die Teilchen der sekundären kosmischen Strahlung. Im nachfolgenden Versuch(3.3) wird die Geschwindigkeit der Teilchen genauer ermittelt.

Allerdings wurden auch in der Kanne, welche mit Luft gefüllt ist, Signale gezählt. Das lässt sich durch das bereits erwähnte Rauschen erklären. Das Experiment ist zwar möglichst dicht verschlossen, allerdings konnten von außen trotzdem einige Photonen eindringen und das Ergebnis verfälschen. Auch ein elektrisches Rauschen der einzelnen Module kann ein leicht abweichendes Ergebnis verursachen.

3.3 Geschwindigkeitsmessung von Myonen

Im vorherigen Experiment konnte ermittelt werden, dass Teilchen der kosmischen Strahlung in Wasser die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts, welche in dem Medium $225\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ beträgt, überschreitet und so den Cherenkov-Effekt auslöst.

3.3.1 Aufbau

Die Geschwindigkeit von Myonen lässt sich mithilfe von experimentellen Messwerten nach der Formel: $v = \frac{s}{t}$ berechnen. Dazu werden zwei Szintillator-Platten in einem bekannten Abstand übereinander platziert. Um möglichst genaue Messergebnisse zu erhalten, sollte dieser Abstand möglichst hoch sein. In diesem Fall waren es 2,35 m. Szintillator-Platten bestehen aus einem Szintillator und einem Photomultiplier. Myonen erzeugen im Szintillator schwache Lichtsignale (siehe 3.1.2). Diese werden durch einen Photomultiplier (siehe 3.2.2) verstärkt und an eine DAQ-Karte weitergeleitet [Abb. 4]. Dort werden die Einzelsignale an einen Laptop weitergeleitet und mit der Software Myonic ausgewertet.

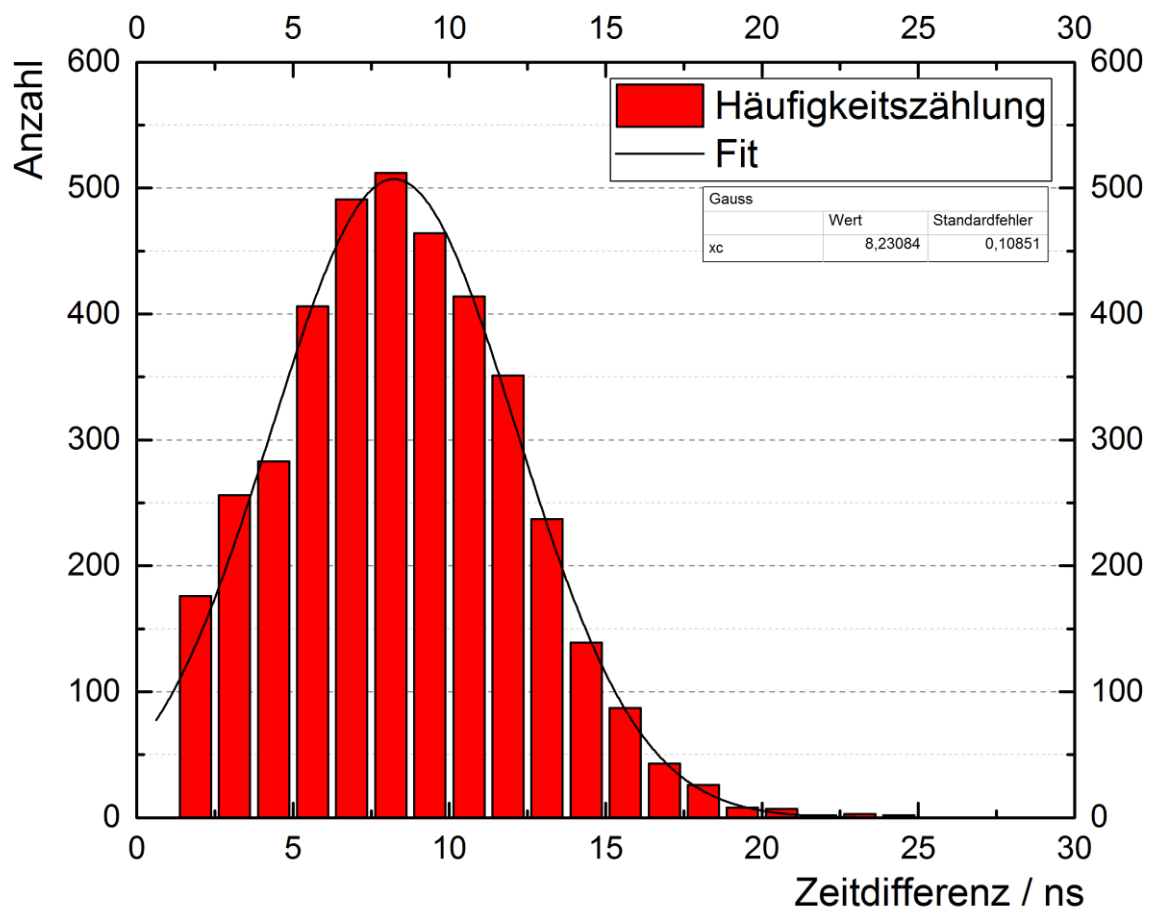
In dem Fall dieser Messung sind einige Einstellungen im Programm notwendig. Da eine Vielzahl von Myonen durch die kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre treffen ist es möglich, dass die beiden Szintillator-Platten von zwei unterschiedlichen Myonen ausgelöst werden. Daher wird zum einen eingestellt, dass zuerst die obere und dann die untere Szintillator-Platte ausgelöst werden muss und zum anderen werden nur Ergebnisse berücksichtigt, bei denen die beiden Platten in einer maximalen Zeitspanne von 50 ns aktiviert werden. So wird zwar

die Zahl der Fehler reduziert, allerdings sind trotzdem Fehler möglich. Um diese auszugleichen wurde diese Messung über einen Zeitraum von ca. 140 Stunden durchgeführt um eine Vielzahl von Ereignissen statistisch auszuwerten zu können. So lässt sich eine durchschnittliche Zeitdifferenz ermitteln und eine Geschwindigkeit errechnen.

3.3.2 Messergebnisse und Auswertung

Bei der Messung wurden mehrere Zeitdifferenzen ermittelt. Mithilfe der Gaußverteilung kann ein möglichst präziser Mittelwert der Ergebnisse ermittelt werden. Die entstehende Funktion kann mit der Gleichung $N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$

beschrieben werden.



Grafik 3: Ermittelte Zeitdifferenz mit Gauss – Fit

Daraus ergibt sich ein Mittelwert von $t = 8,23084 \cdot 10^{-9} \text{ s}$, mit dem die Geschwindigkeit der Myonen ermittelt werden kann.

$$v_{\mu} = \frac{s}{t}$$

$$v_{\mu} = \frac{2,35\text{m}}{8,23084 \cdot 10^{-9}\text{s}}$$

$$v_{\mu} = 285\,511\,563,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Aus diesen Messergebnissen ergibt sich also eine Geschwindigkeit von $2,85512 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, was ca. 95 % der Lichtgeschwindigkeit sind. Durch genauere Messanlagen wurde ein Wert von 99,8 % der Lichtgeschwindigkeit ermittelt⁹. Die Messungenauigkeit lässt sich durch folgende Fehlerquellen erklären: Erstens können zwei unterschiedliche Myonen die Szintillator-Platten aktivieren, indem sie zufällig in der eingestellten Zeitspanne von 50 ns je eine der Platten durchqueren. Zum anderen ist für die verwendete Technik schwer, Zeitdifferenzen von wenigen Nanosekunden exakt zu bestimmen.

Es ergibt sich also mit dem exakten Wert und einer Lebensdauer von $2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ folgende Gleichung:

$$s = v \cdot t$$

$$s = 0,998c \cdot 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 657,78\text{m}$$

Die Myonen müssten also sogar bereits nach 657,78 m in Elektronen und Neutrinos zerfallen, doch warum sind sie auf der Erde messbar? Die Antwort findet man in der Relativitätstheorie, genauer im Phänomen der Zeitdilatation. Die, von Albert Einstein aufgestellte, Theorie besagt, dass die Zeit nicht für alle Objekte absolut gleichzeitig verläuft. So vergeht für einen ruhenden Beobachter eine bestimmte Zeit t , während für sich bezüglich seines Bezugssystems bewegendes Objekt die Zeit t' vergeht. Die Zeit t' ist dabei im Bezugssystem des Beobachters kleiner als die Zeit t . Aus der Sicht eines ruhenden Beobachters, also in einem ruhenden Bezugssystem, vergeht also die Zeit für bewegte Objekte, bzw. Objekte in einem bewegten System, langsamer. Daraus ergibt sich die Formel:

$$t' = t \cdot \gamma$$

Wobei γ der Lorentzfaktor ist und sich wie folgt berechnet:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\gamma_{\mu} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}}} = 15,82$$

Während also für die Myonen eine Sekunde vergeht, vergehen für den ruhenden Beobachter 15,82 Sekunden. Das gilt natürlich auch für die Zerfallszeit der Myonen. Während also für die Myonen $2,197 \cdot 10^{-6}$ s vergehen, vergeht für den Beobachter das rund 16 - fache der Zeit. Daher kann man nun den Lorentzfaktor in die Ursprungsgleichung $s = v \cdot t$ einsetzen³.

$$s = v \cdot (t \cdot \gamma_{\mu})$$

$$s = 0,998c \cdot (2,197 \cdot 10^{-6} \text{s} \cdot 15,82)$$

$$s = 10406,108 \text{ m}$$

Wenn man also die Relativitätstheorie mit einbezieht, zerfallen Myonen erst nach 10,406 km. So erklärt sich also, warum bei ca. 10 km Höhe entstehende Myonen auf Meereshöhe gemessen werden können.

3.4 Einfluss von Gebäuden auf kosmische Strahlung

Alle bisherigen Versuche wurden im Erdgeschoss vom 6-stöckigen Andreas-Schubert-Bau der TU – Dresden [Abb. 5] durchgeführt. Das zeigt, dass Teilchen der kosmischen Strahlung offenbar in der Lage sind mehrere Decken zu durchdringen. Daher ist eine genauere Bestimmung, bzw. der Nachweis, des Durchdringungsvermögens der kosmischen Strahlung sehr hilfreich.

3.4.1 Aufbau

Um den Einfluss von Gebäuden auf Myonen zu untersuchen, werden erneut Szintillator-Platten verwendet (siehe 3.1.2). Drei dieser Platten werden in einem drehbaren Rad befestigt [Abb. 6]. Dabei sind sie parallel übereinander angeordnet. Es werden also Myonen gemessen die durch alle drei Platten fliegen. Wie bei der Messung der Geschwindigkeit (siehe 3.3.1) ist es wichtig die Fehler zu minimieren. Um die Anzahl an Ereignissen zu verringern, bei denen alle Platten aktiviert werden, obwohl kein einzelnes Teilchen alle drei Platten durchquert hat, wird die dritte Platte eingebaut. Diese verringert die Wahrscheinlichkeit für diesen Fall, ist aber für die sonstigen Messungen irrelevant, da es unmöglich ist die erste und die letzte zu durchqueren, ohne dabei die mittlere Platte auszulösen.

Die Platten werden dabei mit einer DAQ-Karte verbunden, die die Daten an den Laptop weiterleitet, wo die Daten durch die Software Myonic gezählt und dargestellt werden. Erneut wird eingestellt, dass die Teilchen zuerst die obere, dann die mittlere und dann die untere Platte durchqueren müssen. Das muss in einer Zeitspanne von 50 ns geschehen. So wird die Zahl falscher Ereignisse minimiert.

Der Aufbau ermöglicht es die Einfallswinkel geladener Teilchen, in Abhängigkeit des Einfallswinkels, zu ermitteln. Mit dem Rad werden nun möglichst viele Messungen durchgeführt. In dem Fall wurde in 15° Schritten gemessen. Dabei wird jeder Einfallswinkel zweimal gemessen. Einmal kommen die Teilchen aus Richtung des Fensters und einmal aus Richtung der Wand. Die Winkel, die in Richtung Fenster gerichtet sind, werden von nun an als positive Winkel betrachtet, während ihre gegenüberliegenden Winkel negativ bezeichnet werden. Wenn die Wände einen dämpfenden Einfluss auf kosmische Strahlung haben, ist die Ereignisrate bei den positiven Winkeln höher als bei den negativen mit demselben Betrag.

3.4.2 Messergebnisse und Auswertung

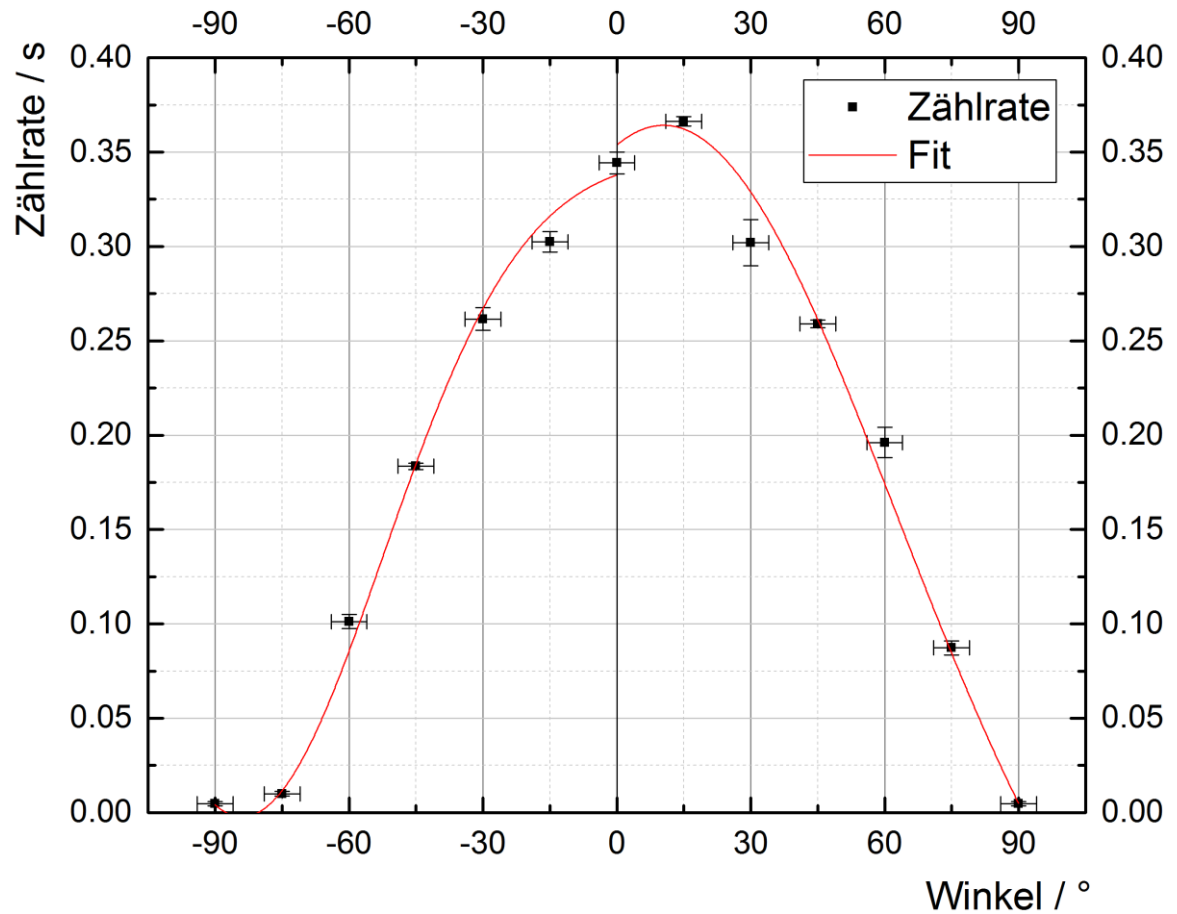
Winkel in °	Zeit in s	Ereignisse	Ereignisse pro s
90	3430	16	0,00466
75	6380	557	0,0873
60	3065	601	0,196
45	63250	16383	0,259
30	2010	607	0,302
15	58425	21401	0,366
0	10585	3644	0,344
-15	10047,33	3047	0,302
-30	7210	1886	0,261
-45	65800	12075	0,184
-60	7210	730	0,101
-75	6207	62	0,001
-90	3430	16	0,00466

Tabelle 2: Abhängigkeit der Myonenrate vom Einfallswinkel

Die Messergebnisse zeigen, dass die Einfallsrate der Myonen bei den positiven Winkeln höher ist als bei den negativen Winkeln mit demselben Betrag. Es kommen also mehr Myonen aus Fensterrichtung als aus Wandrichtung. Die Myonen interagieren also mit dichter Materie, wie z.B. Beton, sodass nicht alle Myonen diese durchqueren. Es konnte also nachgewiesen werden, dass Gebäude abschirmend auf Myonen wirken.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Myonenrate bei niedrigen Winkeln, also nahe dem Zenit, am höchsten ist. Das lässt sich dadurch erklären, dass sich mit zunehmendem Winkel, die Strecke der Myonen durch die Erdatmosphäre wächst. Es wird also immer wahrscheinlicher, dass die Myonen zerfallen oder mit anderen Teilchen interagieren. Das bedeutet, dass theoretisch bei der 0° - Messung die meisten Myonen ermittelt werden sollten. Allerdings wurde bei der 15° - Messung in Richtung des Fensters die höchste Myonenrate ermittelt. Dabei muss beachtet werden, dass Myonen aus dieser Richtung weniger dichte Materie durchquert haben als die, die aus Richtung des Zenits das Messgerät treffen (0° - Messung). Das Gebäude wirkte also stärker abschirmend auf die 0° Messung. Somit ist durch diese

Messung nicht ausgeschlossen, dass, ohne Abschirmung, die meisten Myonen aus Zenit - Richtung kommen.



Grafik 4: Grafische Darstellung der Myonenrate

4. Fazit und Zusammenfassung

Durch mehrere relativ einfach aufgebaute Versuche, konnten viele Informationen über die kosmische Strahlung erhalten werden. Beim Kamiokannenexperiment konnte, mithilfe des Cherenkov- Effektes, nachgewiesen werden, dass sich durch einen normalen Raum Teilchen mit über $2,25 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ bewegen, ohne dass für den Mensch sichtbare Auswirkungen entstehen. Durch den zweiten Versuch konnten mehr Informationen über die kosmische Strahlung, speziell über Myonen erhalten werden. Es wurde ermittelt, dass sich die Myonen mit ca. 95% der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Dabei war eine relativistische Betrachtung notwendig, um zu erklären, warum die Myonen, die eine Zerfallszeit von ca. $2,2 \cdot 10^{-6}$ s haben, überhaupt die Meereshöhe erreichen. Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit vergeht für sie die Zeit langsamer, weswegen sie es schaffen den Erdboden zu erreichen, obwohl für den ruhenden Beobachter auf der Erde deutlich mehr als $2,2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden vergehen. Alle Versuche wurden in einem geschlossenen Gebäude durchgeführt, also ist es Myonen möglich dichte Materie wie Beton zu durchdringen. Wie der dritte Versuch allerdings gezeigt hat, haben Gebäude trotzdem eine dämpfende Wirkung auf den Myonenfluss.

Der Ergebnisse der Experimente wurden dabei zwar durch verschiedene bereits genannte Faktoren verfälscht, jedoch stimmte der aus den Messwerten abzulesende Trend stets mit den bestehenden Theorien überein. Somit war es ohne größere, aufwendige und teure Versuchsaufbauten möglich, die kosmische Strahlung, ein sonst nicht wahrnehmbares Phänomen, nachzuweisen und sogar Aussagen über deren Eigenschaften zu treffen. Somit könnte, mithilfe dieser Experimente, einem breiteren Publikum diese abstrakte Erscheinung veranschaulicht werden.

In einem größeren Rahmen ermöglicht die kosmische Strahlung, die ein wichtiges Kernelement der Astroteilchenphysik darstellt, Aussagen über weit entfernte Systeme und sogar Galaxien zu treffen. So vermutet man, dass die Teilchen von Supernovae, Pulsaren oder durch schwarzen Löchern stammen.

Weiterhin ist ein genaues Verständnis von kosmischen Teilchen und vor allem von Myonen höchst relevant für alle Szintillations- und Cherenkov-Experimente, wie beispielsweise den nobelpreisdotierten Neutrinoexperimenten SNO+ und Super-Kamiokande. Kosmische Myonen sind hier für einen dominanten Messuntergrund verantwortlich, obwohl Experimente dieser Art zur Abschirmung dieser Strahlung kilometertief unter dem Erdboden betrieben werden.

5. Literaturverzeichnis

- ¹ Knödlseider, Michael(2008): Kosmische Strahlung – Energie und Zusammensetzung. http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/KosStrahl.pdf (Stand: 03.10.17)
- ² Brand, Matthias(2010): Aufbau und Test eines Wasser-Cherenkov-Detektors zur Demonstration kosmischer Strahlung. http://www.uni-muenster.de/Physik.KP/AGWeinheimer/Files/theses/Bachelor_Matthias_Brandt.pdf (Stand: 13.05.17)
- ³ Kutsch, Tobias(2015): Messung der kosmischen Höhenstrahlung durch Kamiokanne-Detektoren. www.ikp.uni-koeln.de/groups/reiter/theses/Kutsch_exam.pdf (Stand: 16.05.17)
- ⁴ Pöllman, Christoph(2009): Sonnenaktivität. http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/Sonne.Poellman.pdf (Stand: 03.10.17)
- ⁵ Völkle, Hansruedi(2010): Die kosmische Strahlung. <http://www.unifr.ch/sfsn/pdf/kosmische%20Strahlung.pdf> (Stand: 03.10.17)
- ⁶ Evans, Lyndon/ Bryand, Philip(2007): LHC Machine. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08001.pdf> (Stand: 13.05.2017)

- ⁷ Hülsberg, Marcel(2012): Sonneneruptionen und ihre Auswirkungen auf kosmische Strahlung.
http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Downloads/2012_MarcelHu__lsberg.pdf (Stand: 07.10.17)
- ⁸ Leitenberger, Bernd(2016): Strahlenbelastung von Satelliten und Raumsonden. <https://www.bernd-leitenberger.de/strahlung.shtml> (Stand: 07.10.17)
- ⁹ Pörtner, Lukas(2013): Myonen und Zeitdilatation. <http://www.physik.uni-bielefeld.de/~yorks/pro13/poertner.pdf> (Stand: 08.10.17)

6. Anhang

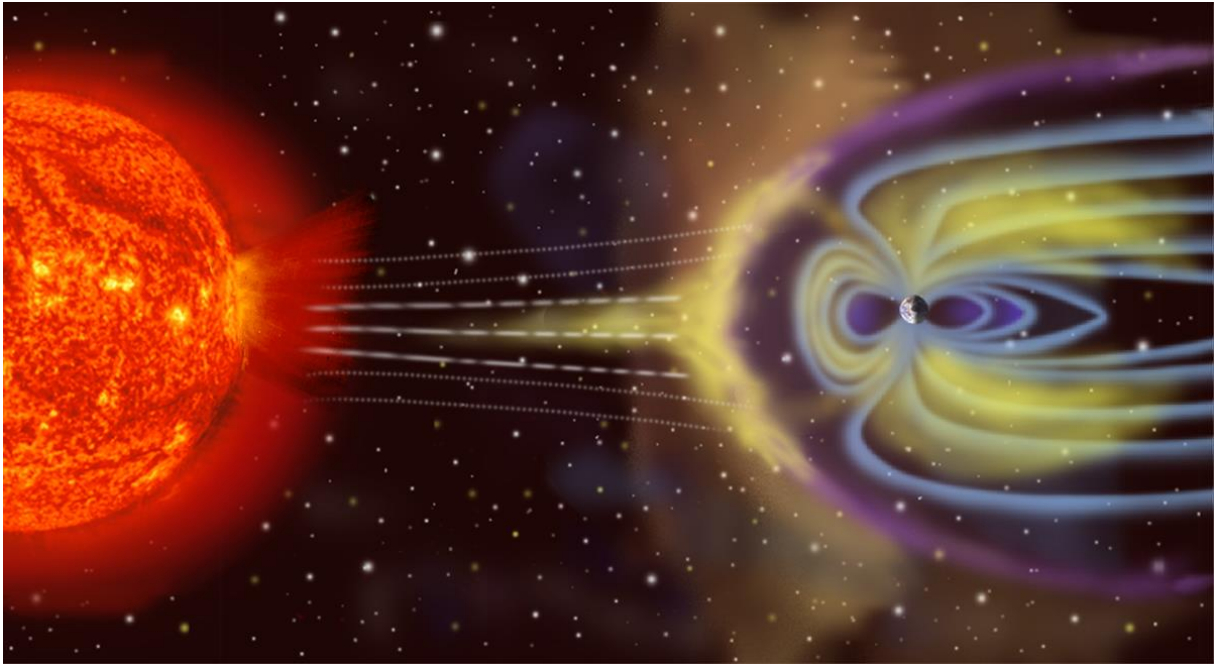


Abb. 1: Verformung des Erdmagnetfeldes durch solare kosmische Strahlung

Quelle:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Magnetosphere_rendition.jpg

(Stand: 7.10.17)

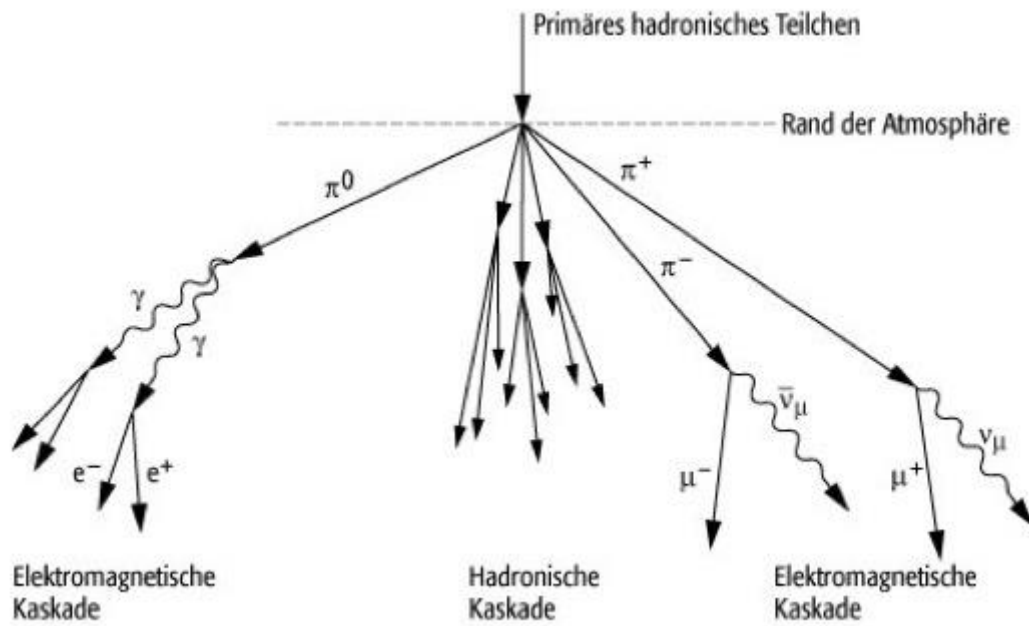


Abb. 2: Einteilung der sekundären kosmischen Strahlung

Quelle: http://www.spektrum.de/lexika/images/physik/fff12453_w.jpg

(Stand: 7.10.17)



Abb. 3: Zwei angeschlossene Kamiokannen



Abb. 4: Anschluss der Szintillatorplatten an eine DAQ – Karte

Quelle:

http://physik-begreifenzeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/cosmo_experiment/index_ger.html (Stand : 09.10.17)



Abb. 5: Andreas Schubert Bau

Quelle: <https://navigator.tu-dresden.de/gebaeude/asb> (Stand: 09.10.17)



Abb. 6: Auf den Winkel 15° ausgerichtete Szintillatorplatten

7. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Seminararbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Unterschrift des Verfassers