

Romain-Rolland-Gymnasium

Weintraubenstraße 3

01099 Dresden

KOMPLEXE LEISTUNG

Kosmische Strahlung

Selbstgebaute Nebelkammern eignen sich, um kosmische Strahlung nachzuweisen
und teilchenphysikalische Vorgänge zu veranschaulichen

Fach: Physik

Verfasser: Katharina Gudat

Klasse: 10/3

Begleitlehrer: Frau Pabst

Abgabetermin: 31.04.2021

Bewertung:

.....

Unterschrift des Begleitlehrers

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Historische Einführung	4
3. Kosmische Strahlung	5
3.1 Primärstrahlung	5
3.1.1 Zusammensetzung	5
3.1.2 Beschleunigungsmechanismen	6
3.2 Sekundärstrahlung	9
3.2.1 Die Entstehung der Sekundärstrahlung	9
3.2.2 Ihr Nachweis	11
4. Der Nebelkammerversuch	12
4.1 Funktionsweise einer Nebelkammer	12
4.2 Beobachtete Spuren	13
5. Zusammenfassung	15
6. Literaturverzeichnis	16
Danksagungen	17
Anhang	18
Eidesstattliche Erklärung	19

1. Einleitung

Obwohl wir Menschen es nicht bemerken, umgeben uns zu jedem Zeitpunkt Teilchen aus den Tiefen des Alls - die kosmische Strahlung. In unserem Alltag spielt sie keine Rolle, aber für die Wissenschaft ist sie sehr wichtig. So konnten in der kosmischen Strahlung zum Beispiel Teilchen wie das Myon und das Positron nachgewiesen werden.

Heutzutage beschäftigen sich weltweit viele Arbeitsgruppen mit der Erforschung von Teilchen aus dem Universum, zum Beispiel das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien, das H.E.S.S. - Teleskop in Namibia, das Kamiokande - Experiment in Japan und das IceCube - Experiment in der Antarktis. Für Schüler ist es leider schwierig, diese Experimente und Observatorien zu verstehen, weil sie sehr komplex sind. Noch schwieriger ist es aber, an Beobachtungsdaten heranzukommen, und selber beobachten kann man die kosmische Strahlung deshalb auch nicht.

Die Nebelkammer macht solche Beobachtungen mit einfachen Mitteln auch für Schüler möglich. Sie ermöglicht die Beobachtung von Teilchenspuren und kann so die Existenz kosmischer Strahlung, die Gültigkeit der Relativitätstheorie und sogar das Vorkommen von Antimaterie nachweisen. Dass all das mit einer selbst zusammenbaubaren Diffusionsnebelkammer möglich ist, soll diese Arbeit zeigen. Vor allem soll eine Möglichkeit gezeigt werden, wie man sich als Schüler mit den abstrakten und komplexen Vorgängen der Teilchenphysik beschäftigen kann.

Zunächst soll in einem historischen Überblick die Forschungs- und Entdeckungsgeschichte der kosmischen Strahlung und der Nebelkammer kurz vorgestellt werden. Danach werden die theoretischen Hintergründe zur kosmischen Strahlung behandelt, um eine Einführung in dieses spannende Thema zu geben. Es wird auf die Quellen und den Ursprung der Teilchen, die Umwandlungsprozesse beim Auftreffen auf die Atmosphäre und relativistische Effekte im Zusammenhang mit den Myonen der Sekundärstrahlung eingegangen.

Im zweiten Teil der Arbeit geht es um den Nebelkammerversuch. Zunächst soll die Funktionsweise des Experiments erklärt werden, danach wird auf die beobachteten Spuren eingegangen und es werden Schlüsse aus den Beobachtungen gezogen.

Zum Schluss wird im Fazit auf die These dieser Arbeit eingegangen - „Selbstgebaute Nebelkammern eignen sich, um kosmische Strahlung nachzuweisen und teilchenphysikalische Vorgänge zu veranschaulichen“.

2. Historische Einführung

Erste Hinweise auf die Existenz der kosmischen Strahlung fanden sich am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts. Wissenschaftler in verschiedenen Ländern führten Experimente mit Elektroskopen durch und beobachteten, dass sich die Metallplättchen des Gerätes nach einer bestimmten Zeit von selbst entluden. Das ist nur möglich, wenn die Luft eine gewisse Restleitfähigkeit hat. Es wurden also verschiedene Hypothesen aufgestellt, woher diese Leitfähigkeit der Luft kommt. Zwei populäre Theorien waren zum einen der Ursprung der Strahlung in der Erde (ähnlich wie radioaktive Strahlung) und zum anderen der Ursprung der Strahlung im Weltall.

Um zu überprüfen, ob die Strahlung aus dem All kommt, führte der Physiker Theodor Wulf im Jahr 1910 mehrere Experimente mit dem Elektroskop auf dem Eiffelturm durch, aber die von ihm veröffentlichten Ergebnisse wurden nicht anerkannt und kaum beachtet. Erst der Ballonversuch von Victor Franz Hess im Jahr 1912 auf 5000 m Höhe konnte unwiderlegbar zeigen, dass zumindest eine Komponente der Strahlung mit der Höhe zunimmt. Diese Beobachtung wurde 1913 durch Werner Kolhörster bestätigt, der 1928 außerdem den Teilchencharakter dieser Strahlung nachweisen konnte. Für die Entdeckung der damals „Höhenstrahlung“ genannten kosmischen Strahlung erhielt Hess 1936 den Nobelpreis in Physik.

Die Entwicklung der Nebelkammer fand etwa zur selben Zeit statt, schon um die Jahrhundertwende beschäftigte sich der schottische Wissenschaftler Charles Thomson Rees Wilson mit Wolkenbildung und Kondensation und entwickelte im Laufe seiner Forschung die Expansionsnebelkammer. Für die Entwicklung der sogenannten „Wilsonschen Nebelkammer“ erhielt er 1927 den Nobelpreis für Physik. Ein paar Jahre später, ungefähr 1936, entwickelte Alexander Langsdorf die Diffusionsnebelkammer.

Mithilfe von Nebelkammern konnten in der kosmischen Strahlung wichtige Entdeckungen gemacht werden. Sowohl das Positron (1932) als auch das Myon (1937) wurden so entdeckt. Mit der Entdeckung des Positrons konnte erstmals die Existenz von Antimaterie nachgewiesen werden - außerdem wurde dadurch die Dirac-Theorie bestätigt und Carl David Anderson, der Entdecker, erhielt 1936 gemeinsam mit Hess den Nobelpreis für Physik.

Heute dienen Nebelkammern vor allem zur Demonstration und komplexere Observatorien sind an ihre Stelle getreten. Vor allem die Neutrino- und die Gammaastronomie gewinnen immer mehr an Bedeutung für die Erforschung des Universums, aber auch die Luftschauer der Sekundärstrahlung werden untersucht. Nur durch das Zusammenlegen vieler Daten aus verschiedenen Versuchen kann ein möglichst genaues Bild unseres Universums entstehen.

3. Kosmische Strahlung

Der Begriff „kosmische Strahlung“ bezeichnet Teilchen, die in verschiedenen Prozessen im Universum beschleunigt werden und dann durch das All fliegen. Sichtbares Licht wird normalerweise nicht zur kosmischen Strahlung gezählt.¹ Die kosmische Strahlung wird in Primärstrahlung und Sekundärstrahlung unterteilt, beide werden im Folgenden vorgestellt.

Der Bereich der Astroteilchenphysik, wie die Forschung an kosmischer Strahlung auch genannt wird, ist deshalb so interessant, weil er zwei große Bereiche der Physik verbindet - die Astronomie und die Teilchenphysik.

3.1 Primärstrahlung

Als Primärstrahlung wird der Teil der kosmischen Strahlung bezeichnet, der die Erdatmosphäre noch nicht erreicht hat und sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch das Universum bewegt.

3.1.1 Zusammensetzung

In den Quellen der Strahlung werden durch sich ändernde Magnetfelder geladene Teilchen beschleunigt. Dabei handelt es sich nur bei einem sehr kleinen Teil um Elektronen ($\approx 2\%$) und hauptsächlich um Atomkerne ($\approx 98\%$). Das sind zum größten Teil Protonen ($\approx 87\%$), zu einem kleineren Teil Alphateilchen ($\approx 12\%$) und nur zu einem sehr kleinen Teil ($\approx 1\%$) schwerere Atomkerne. Diese Verteilung spiegelt in etwa die Häufigkeit der Elemente im Universum wider.

Diese geladenen Teilchen können durch Wechselwirkungen aber zum Teil schon in den Quellen selbst andere Teilchen wie Neutrinos oder Photonen (γ -Strahlung) erzeugen, die dann ebenfalls auf die Erde treffen können. Der Vorteil beim Beobachten der Neutrinos und Photonen ist, dass sie nicht durch interstellare Magnetfelder abgelenkt werden können. Deshalb sind Neutrino- und γ -Astronomie heutzutage wichtige Teilbereiche dieses Forschungsgebiets.

Die Teilchen werden durch unterschiedliche Mechanismen auf Energien von bis zu 10^{19} eV bzw. 10^{20} eV beschleunigt [2], Energien, die die Leistung heutiger Teilchenbeschleuniger weit übertreffen (zum Vergleich: die Schwerpunktsenergie des LHC beträgt „nur“ $14 \cdot 10^{12}$ eV). Die höchstenergetischen Teilchen, die aus Quellen außerhalb unserer Milchstraße stammen, sind aber sehr selten - der Teilchenfluß für Teilchen mit Energien oberhalb von 10^{19} eV beträgt nur 1 Teilchen pro km^2 und Jahr.

¹ Licht höherer Energien ist allerdings ionisierend und kann deshalb indirekt auch Spuren in der Nebelkammer hinterlassen

3.1.2 Beschleunigungsmechanismen

Teilchen mit Energien von bis zu 10^9 eV stammen aus Quellen in der Nähe der Erde, vor allem der Sonne. Jeder Stern kann Teilchen auf diese Energien beschleunigen. Dafür gibt es zwei theoretisch mögliche Mechanismen: den Zyklotron-Mechanismus und die Beschleunigung durch Sonnenfleckenpaare.

Beim Zyklotron-Mechanismus werden Teilchen durch starke zeitveränderliche Magnetfelder in Form von Sonnenflecken beschleunigt. Die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses erzeugt dabei elektrische Felder, in denen geladene Teilchen beschleunigt werden können.

Die Sonnenflecken auf der Sonne können Magnetfeldstärken von bis zu 0,4 Tesla haben und sich bis zu $R=10^7$ m ausdehnen. Es gilt für die Energie:

$$E = eU \quad \text{mit} \quad U = - \frac{d\phi}{dt}, \text{ der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses, und } \phi = B\pi R^2, \text{ dem magnetischen Fluss}$$

Ein Teilchen, das um das Magnetfeld herumgeführt wird, erhält also die Energie:

$$E = e\pi R^2 \frac{dB}{dt}$$

Die maximal erreichbare Energie durch diesen Prozess liegt also (für einen Sonnenfleck mit $B = 0,4$ T bei einer Lebensdauer von einem Tag und einer Ausdehnung von $R = 10^7$ m) bei [1]:

$$E = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \pi \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \cdot \frac{0,4 \text{ Vs}}{86\,400 \text{ s m}^2} = 2,32 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,45 \cdot 10^9 \text{ eV}$$

Die gemessenen Energien der Teilchen können damit gut erklärt werden, allerdings würde der Mechanismus Führungskräfte benötigen, die die Teilchen um das Magnetfeld der Sonnenflecken herumführen. Außerdem kommen Sonnenflecken oft paarweise vor. Aus diesem Grund erscheint ein weiterer Mechanismus plausibler.

Auch bei der Beschleunigung durch Sonnenfleckenpaare werden durch zeitlich veränderliche Magnetfelder elektrische Felder erzeugt, die geladene Teilchen beschleunigen können. Die Sonnenflecken bewegen sich dabei aufeinander zu und der sich bewegende elektrische Dipol erzeugt elektrische Felder. Auch dieses Modell kann Teilchenenergien von bis zu 10^9 eV erklären.

In unserer Milchstraße können Teilchen auf Energien von bis zu etwa 10^{16} eV beschleunigt werden. Auch dafür werden mehrere Mechanismen in Betracht gezogen, die hier kurz vorgestellt werden sollen.

Es können beispielsweise Teilchen durch Supernovaexplosionen beziehungsweise die dadurch entstehende Schockfront beschleunigt werden. Teilchen können entweder auf eine Schockfront treffen und an ihr reflektiert werden

oder zwischen einer äußeren und einer inneren Schockfront hin und her reflektiert werden. Ein auf die Schockfront treffendes Teilchen gewinnt bei der Reflexion die Energie [1]:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m (v + (u_1 - u_2))^2 - \frac{1}{2} m v^2$$

(m - Masse des Teilchens; v - Geschwindigkeit des Teilchens vor dem Aufprall; u₁ - Geschwindigkeit der Schockfront; u₂ - Geschwindigkeit des von der Schockfront wegströmenden Gases; (u₁ - u₂) - tatsächliche Geschwindigkeit des Gases) Es ergibt sich ein relativer Energiezuwachs von:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2 v (u_1 - u_2) + (u_1 - u_2)^2}{v^2}$$

Da $v \approx c$ und damit $v \gg u_1, u_2$ ist der quadratische Term vernachlässigbar und es ergibt sich (vereinfacht):

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2 (u_1 - u_2)}{v}$$

In einem nicht-vereinfachten, relativistischen Modell ergibt sich ein Energiezuwachs von:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{3} \frac{(u_1 - u_2)}{c}$$

Ähnliche Energien werden auch beim Hin-und-Her-Reflektieren zwischen zwei Schockfronten erreicht. Der vorgestellte Mechanismus wird auch als Fermi-Mechanismus 1. Ordnung bezeichnet, da er linear in der Relativgeschwindigkeit ist. Er kann Energien von bis zu 10^{14} eV erklären.

Auch Pulsare und Doppelsternsysteme kommen als Quellen kosmischer Strahlung in unserer Milchstraße in Frage. Beim Kollaps von Sternen wird auch das Magnetfeld verstärkt, und da Pulsare rotieren, verändert es sich mit der Zeit und induziert ein elektrisches Feld, das wiederum geladene Teilchen beschleunigen kann. In Doppelsternsystemen aus einem Pulsar oder Neutronenstern und einem normalen Stern zieht der Pulsar bzw. Neutronenstern Materie in Form von geladenem Plasma vom normalen Stern ab. Es bildet sich eine Akkretionsscheibe und sogenannte Jets, in denen Teilchen auf bis zu 10^{16} eV beschleunigt werden können.

Die Teilchen mit höheren Energien von bis zu 10^{19} eV stammen aus Quellen, die außerhalb unserer Galaxie liegen. Pulsare in der Milchstraße können zwar auch Teilchen auf so hohe Energien beschleunigen, diese Teilchen verlassen die Milchstraße dann aber, da die Bahnen der Teilchen ab Energien von circa 10^{15} eV vom Magnetfeld der Milchstraße nicht mehr stark genug gekrümmt werden.

Außerhalb der Milchstraße können Teilchen beispielsweise in aktiven galaktischen Kernen (AGN - Active Galactic Nuclei) oder Gamma Ray Bursts beschleunigt werden. Auch in aktiven galaktischen Kernen bildet sich eine Akkretionsscheibe um das Zentrum der Galaxie (z.B. ein schwarzes Loch) und es entstehen Jets, die die Teilchen auf Energien von bis zu 10^{20} eV beschleunigen. Da die Teilchenrate dieser hochenergetischen Teilchen so gering ist, ist es aber schwierig, genaueres über die Beschleunigungsmechanismen herauszufinden, und wie die Teilchen beschleunigt werden, ist noch nicht sicher.

Auch nach der Beschleunigung in den ursprünglichen Quellen können die Teilchen über den Fermi-Mechanismus 2. Ordnung zusätzliche Energie gewinnen, indem sie mit interstellaren Magnetwolken interagieren. Magnetwolken sind Staubwolken mit Magnetfeldern, in denen die Teilchendichte höher ist als bei normalen Staubwolken. Der Mechanismus funktioniert ähnlich wie der Fermi-Mechanismus 1. Ordnung, der relative Energiegewinn ist dabei aber relativ gering und beträgt:

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{u^2}{v^2}$$

3.2 Sekundärstrahlung

Sobald die primäre kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft, beginnen Wechselwirkungsprozesse, bei denen die sekundäre kosmische Strahlung (Sekundärstrahlung) entsteht, die auf der Erde gemessen werden kann.

Im Jahr 1927 fand der niederländische Physiker Jacob Clay gemeinsam mit seiner Frau Tettje Clay-Jolles heraus, dass die Intensität der kosmischen Strahlung, die auf der Erde gemessen werden kann, von der geomagnetischen Breite abhängt. Das deutete darauf hin, dass es sich bei der Strahlung um geladene Partikel handelt, denn Photonen würden vom Erdmagnetfeld nicht beeinflusst werden. Da die Teilchen an den Polen parallel zu den Magnetfeldlinien in die Atmosphäre eintreten, wirkt dort die Lorentz-Kraft nicht - je näher man dem Äquator kommt, desto stärker wird sie. Das lässt sich direkt aus der Formel ableiten:

$$\vec{F} = e (\vec{v} \times \vec{B}), \text{ für } v \parallel B \text{ ist } (\vec{v} \times \vec{B}) = 0 \text{ und damit auch } \vec{F} = 0$$

Außerdem wird die Intensität der Strahlung durch die Sonnenaktivität beeinflusst. Bei starker Sonnenaktivität wird das solare Magnetfeld stärker und vor allem Teilchen mit Energien unter 10^9 eV werden dadurch vom Erreichen der Erdatmosphäre abgehalten.

3.2.1 Die Entstehung der Sekundärstrahlung

Wenn die Primärstrahlung, die hauptsächlich aus Protonen besteht, auf die Erdatmosphäre trifft, kollidieren die hochenergetischen Protonen mit den Atomen der Luft. In einer Höhe von 15 - 20 km geschieht das besonders häufig, dieser Bereich wird deshalb nach seinen Entdeckern als Regener-Pfotzer Maximum bezeichnet.

Beim Auftreffen auf die Atmosphäre stoßen die Protonen vor allem mit Stickstoff- und Sauerstoffatomen zusammen und es treten Spallationsreaktionen auf, bei denen Nukleonen und Hadronen gebildet werden. Am häufigsten sind das Pionen (Kaonen kommen aufgrund ihrer höheren Masse nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 - 15 % gegenüber Pionen vor). Hier sollen deshalb nur die Zerfälle der Pionen behandelt werden.

Pionen sind die leichtesten Mesonen, da sie nur aus up- und/oder down-Quarks beziehungsweise deren Antiteilchen bestehen (Abb. 1). Es gibt drei Arten von Pionen: Das positiv geladene ($\pi^+ \rightarrow u\bar{d}$), das negativ geladene ($\pi^- \rightarrow \bar{u}d$) und das neutrale Pion ($\pi^0 \rightarrow$ Überlagerung der Zustände $u\bar{u}$ und $d\bar{d}$).

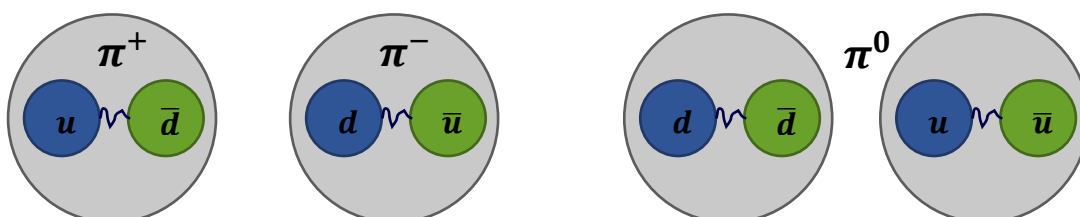


Abb. 1: positives, negatives und neutrales Pion

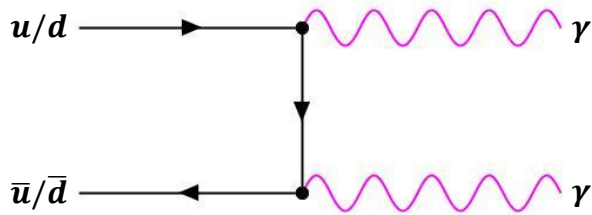


Abb. 2: π^0 - Zerfall in zwei Photonen

Das neutrale Pion hat eine wesentlich kürzere Lebensdauer ($8,5 \cdot 10^{-17}$ s) als die geladenen Pionen ($2,6 \cdot 10^{-8}$ s). Das liegt daran, dass es über die elektromagnetische Wechselwirkung in zwei Photonen zerfällt (Abb. 2), indem sich die Quarks und Antiquarks gegenseitig annihilieren.

Die geladenen Pionen zerfallen über die schwache Wechselwirkung in ein Antimyon und ein Myon-Neutrino (positives Pion, Abb. 3) bzw. in ein Myon und ein Anti-Myon-Neutrino (negatives Pion, Abb. 4). Prinzipiell wäre es zwar möglich, dass die W-Bosonen in ein Elektron bzw. Positron und ein Anti-Elektron-Neutrino bzw. ein Elektron-Neutrino zerfallen, aber dieser Prozess wird gegenüber dem Zerfall in Myonen um $1,23 \cdot 10^{-4}$ unterdrückt. [4]

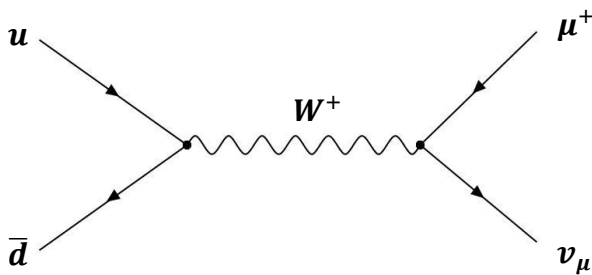


Abb. 3: π^+ - Zerfall in ein Antimyon und ein Myon-Neutrino

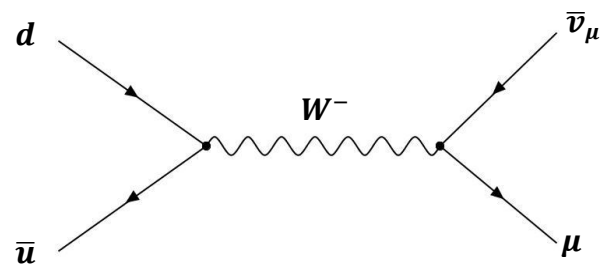


Abb. 4: π^- - Zerfall in ein Myon und ein Anti-Myon-Neutrino

Die beim Zerfall des neutralen Pions entstehenden Photonen können Elektronen aus den Atomen der Luft schlagen und lösen so elektromagnetische Kaskaden aus. Die bei der Spallation neben den Pionen entstehenden Hadronen erzeugen hadronische Kaskaden. Es entstehen also ausgedehnte Teilchenschauer aus Sekundärteilchen in der Atmosphäre, die schließlich den Erdboden erreichen und dort von Teilchendetektoren erfasst werden können.

Auf Meereshöhe sind ungefähr 80 % der aufkommenden geladenen Teilchen Myonen [1], die somit den größten Teil der Sekundärstrahlung darstellen. Nach klassischer Betrachtung wäre das eigentlich gar nicht möglich - mit einer Lebensdauer von $2,2 \cdot 10^{-6}$ s und einer Geschwindigkeit von etwa $0,9998 \cdot c$ müssten sie eigentlich

nach 659,411 m in ein Elektron, ein Anti-Elektron-Neutrino und ein Myon-Neutrino zerfallen.

Bei relativistischer Betrachtung zeigt sich aber:

$$t_E = t_0 \cdot \gamma \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,9998^2)}} = 50,002$$

$$t_E = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot 50 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$s = v \cdot t_E = 0,9998 \cdot c \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 32,97 \text{ km}$$

Durch die Zeitdilatation bzw. Längenkontraktion können die Myonen die Erde erreichen und ihr Nachweis bestätigt damit die Relativitätstheorie.

3.2.2 Ihr Nachweis

In der Nebelkammer können natürlich nur Teilchen aus der Sekundärstrahlung sichtbar gemacht werden. Da Elektronen und Positronen auch beim Beta-Zerfall entstehen, eignen sich für den Nachweis der kosmischen Strahlung vor allem Myonen. Neutrinos und Photonen, die auch zur Sekundärstrahlung gehören, können in der Nebelkammer nicht nachgewiesen werden. Wie der Nebelkammerversuch funktioniert, wie die Teilchenspuren aussehen und was alles mit der Nebelkammer gezeigt werden kann, wird im nächsten Abschnitt erklärt.

4. Der Nebelkammerversuch

In diesem Teil der Arbeit wird zunächst auf den experimentellen Aufbau einer Nebelkammer eingegangen, bevor einige der beobachtbaren Spuren vorgestellt werden.

4.1 Funktionsweise einer Nebelkammer

Wie in der historischen Einführung schon angesprochen wurde, gibt es zwei Arten von Nebelkammern, die Expansions- und die Diffusionsnebelkammern. Beide beruhen auf der Übersättigung von Luft - in einer Expansionsnebelkammer wird diese Übersättigung durch Expandieren des Gases erreicht, in einer Diffusionsnebelkammer durch einen Temperaturunterschied. Hier wurde eine vom Netzwerk Teilchenwelt entwickelte und bereitgestellte Diffusionsnebelkammer zum Selberbauen verwendet. [3]²

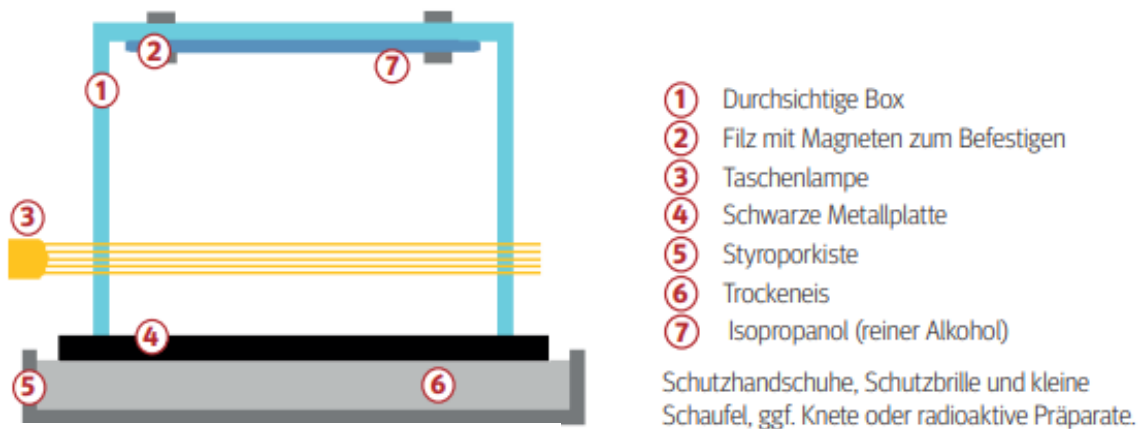


Abb. 5: Schematischer Aufbau einer Nebelkammer (Grafik von Netzwerk Teilchenwelt)

In eine Styroporbox wird Trockeneis (Temperatur: -78°) gegeben. Darauf werden eine Metallplatte und eine durchsichtige Box gestellt. Oben in der Box wird mit Magneten ein mit Isopropanol durchtränkter Filz befestigt. Da der Alkohol sehr leicht flüchtig ist, wird die Luft oben in der Nebelkammer mit Alkoholdampf gesättigt. Unten in der Kammer ist die Luft aber viel kälter, es entsteht also eine Übersättigung, da kalte Luft weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann als warme Luft. In diesem übersättigten Zustand am Boden der Nebelkammer können Kondensationskeime dafür sorgen, dass der Alkoholdampf zu Tröpfchen kondensiert.

Solche Kondensationskeime sind zum Beispiel feine Staubpartikel, aber auch Ionen. Wenn elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen wie zum Beispiel Elektronen, Myonen, Positronen oder Alpha-Teilchen die Luft durchqueren, können sie mit Atomen in der Luft zusammenstoßen und so Elektronen aus ihren Schalen lösen.

² Foto des Versuchsaufbaus im Anhang, Abb. 1

Es entsteht also ein Ion. Je höher der Impuls des hindurchfliegenden Teilchens ist (d.h. je schwerer oder je schneller bzw. energiereicher es ist), desto mehr Ionen werden erzeugt und desto mehr Kondensationskeime liegen vor. An diesen Ionen kondensiert der Alkoholdampf und es entsteht eine Spur. Diese Spur ist abhängig von der Masse, der Geschwindigkeit und der Reichweite des durch die Kammer fliegenden Teilchens.

4.2 Beobachtete Spuren

In einer Nebelkammer können nur ionisierende, also geladene Teilchen sichtbar gemacht werden. Das sind:

- Elektronen und Positronen
- Myonen
- Alpha-Teilchen³

Elektronen und Positronen sind die leichtesten der hier aufgeführten Teilchen, sie erzeugen also schmale Spuren, die nicht zwingend geradlinig sind, je nachdem, wie viel Energie das betreffende Teilchen hat. Fliegt ein niederenergetisches Elektron durch die Nebelkammer, kann es an den Atomen der Luft gestreut und abgelenkt werden und ändert häufig seine Richtung. Wenn das Elektron mehr Energie hat, kann es nicht so leicht abgelenkt werden und erzeugt eine gerade, dünne Spur.



Abb. 6: Elektron-/Positronspuren (niedrige Energie)



Abb. 7: Elektron-/Positronspuren (höhere Energie)

Auch Antimaterie kann in der Nebelkammer sichtbar gemacht werden. Das Positron hat die gleichen Eigenschaften wie das Elektron, nur die Ladung ist unterschiedlich. Aus diesem Grund kann der hier durchgeführte Versuch die beiden Teilchen nicht unterscheiden. Das wäre aber möglich, wenn ein starkes Magnetfeld an die Kammer angelegt wird. Die Lorentz-Kraft würde dann dafür sorgen, dass sich die Teilchenbahnen in unterschiedliche Richtungen krümmen.

Die Elektronen, die man in der Nebelkammer beobachten kann, kommen aus verschiedenen Prozessen. Sie können beim Beta-Zerfall oder als Zerfallsprodukte von Myonen entstehen. Außerdem können die, zum Beispiel von Photonen, aus der

³ Auch das Proton und das Tau sind geladene Teilchen, aber Taus zerfallen sehr schnell in Myonen und kommen in der Sekundärstrahlung auf der Erdoberfläche nicht vor. Obwohl Protonen einen großen Teil der Primärstrahlung ausmachen, wandeln sie sich beim Treffen auf die Erdatmosphäre in andere Teilchen um.

Atomhülle gelösten Elektronen weitere Elektronen aus ihrer Atomhülle lösen und so auch ionisieren. Positronen entstehen zum Beispiel beim β^+ - Zerfall.

Myonen haben zwar dieselbe Ladung wie Elektronen, sind aber etwa 200-Mal schwerer (106 MeV - Masse des Myons, 511 keV - Masse des Elektrons). Außerdem kommen die Myonen in der Nebelkammer aus der Sekundärstrahlung und haben höhere Energien als die im Beta-Zerfall entstehenden Elektronen. Durch die höhere Energie und Masse streuen Myonen nicht so leicht und ionisieren stärker. Das führt dazu, dass die Spur eines Myons gerade und dicker ist als die eines Elektrons oder Positrons.

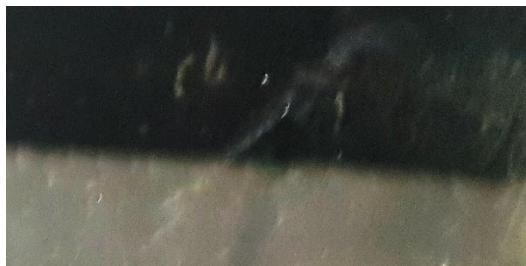


Abb. 8: Myonenspur



Abb. 9: Myonen- und Alphateilchenspur

Die Tatsache, dass sich Myonen in der Nebelkammer beobachten lassen, weist sowohl die Existenz der kosmischen Strahlung als auch die Relativitätstheorie nach, ohne deren Effekte sie vor dem Erreichen der Atmosphäre in Elektronen zerfallen würden.

Auch Alphateilchen kann man in der Nebelkammer beobachten. Da Alphateilchen aus vier Nukleonen aufgebaut sind und somit eine Masse von rund 4 u haben, hinterlassen sie sehr dicke Spuren. Da Alphateilchen eine kurze Reichweite haben, sind die Spuren nicht sehr lang. Außerdem können sie die Wand der Nebelkammer nicht durchqueren und die beobachtbaren Alphateilchen müssen in der Kammer beim Zerfall des gasförmigen Radionuklids ^{222}Rn entstanden sein, das eine Halbwertszeit von ca. 4 Tagen hat.



Abb. 10: Alphateilchenspuren (radioaktiver Zerfall)



Abb. 11: Alphateilchenspur

Neben den bloßen Teilchenspuren kann man auch teilchenphysikalische Prozesse in der Nebelkammer beobachten. Da so etwas nicht so oft vorkommt, dauert das aber eine Weile und die Beobachtungszeit sollte entsprechend lang sein. Es können zum Beispiel Streuungen beobachtet werden, wenn ein Teilchen an einem Atom der Luft streut.



Abb. 12: Teilchenstreuung

5. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, in das spannende Thema der kosmischen Strahlung und der Astroteilchenphysik auf theoretischer Ebene einzuführen und gleichzeitig eine Möglichkeit aufzuzeigen, sich mit relativ einfachen Mitteln praktisch damit zu beschäftigen.

Die These der Arbeit - „Selbstgebaute Nebelkammern eignen sich, um kosmische Strahlung nachzuweisen und teilchenphysikalische Vorgänge zu veranschaulichen“ - kann als bestätigt angesehen werden. Die Fotos des Nebelkammerversuchs zeigen, dass sich dieses Experiment sehr gut eignet, um Teilchenspuren sichtbar zu machen. Kosmische Strahlung, Antimaterie und Teilchenstreuung sind Dinge, die mithilfe der Nebelkammer nachgewiesen werden konnten. Auch die Dokumentation der Spuren klappt sehr gut.

Auch wenn in der Wissenschaft die Nebelkammern schon lange nicht mehr zum Gewinnen neuer Erkenntnisse gebraucht werden, sind sie ideal für Demonstrationszwecke und können jedem einen Einstieg in die hier behandelten Themen der (Astro)Teilchenphysik ermöglichen.

Um den Versuch zu erweitern, kann zum Beispiel ein starkes Magnetfeld an die Nebelkammer angelegt werden. Auch das Platzieren einer Wärmequelle oben auf der Nebelkammer kann die Effizienz des Versuchs steigern und verbreitert die Schicht, in der Spuren beobachtet werden können. Auch zur Veranschaulichung von Radioaktivität eignet sich der Versuch sehr gut, durch das Platzieren eines radioaktiven Präparats können die radioaktiven Zerfälle gut gezeigt werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Grupen, Claus: Einstieg in die Astroteilchenphysik. Grundlagen, Messungen und Ergebnisse aktueller Forschung. Aufl. 2. Springer Verlag 2018.
- [2] Joachim-Herz-Stiftung, Netzwerk Teilchenwelt: Broschüre *Unterrichtsmaterial zur Teilchenphysik - Kosmische Strahlung*. Hamburg 2016.
https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/material/Band3_UnterrichtsmaterialTP_2016.pdf, Zugriff am: 05.03.2021
- [3] Netzwerk Teilchenwelt: Broschüre *Teilchenspuren sichtbar machen - Handreichung zum Selbstbau einer Nebelkammer*. Dresden 2020.
https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Selbstbau_einer_Nebelkammer.pdf, Zugriff am: 03.03.2021
- [4] Lohrmann, Erich: Quarkmodell der Hadronen. In: Einführung in die Elementarteilchenphysik. Teubner Studienbücher Physik. Vieweg+Teubner Verlag 1990.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-322-87201-2_6, Zugriff am 07.03.2021
- [5] https://pulsar.sternwarte.uni-erlangen.de/wilms/teach/astrosem07/kosmische_strahlung.pdf, Zugriff am 28.11.2020
- [6] <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0506/skripte/accel02.pdf>, Zugriff am 29.11.2020
- [7] http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/Sonne.Poellmann.pdf, Zugriff am 08.03.2021
- [8] http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/QuellenKS.pdf, Zugriff am: 29.11.2020

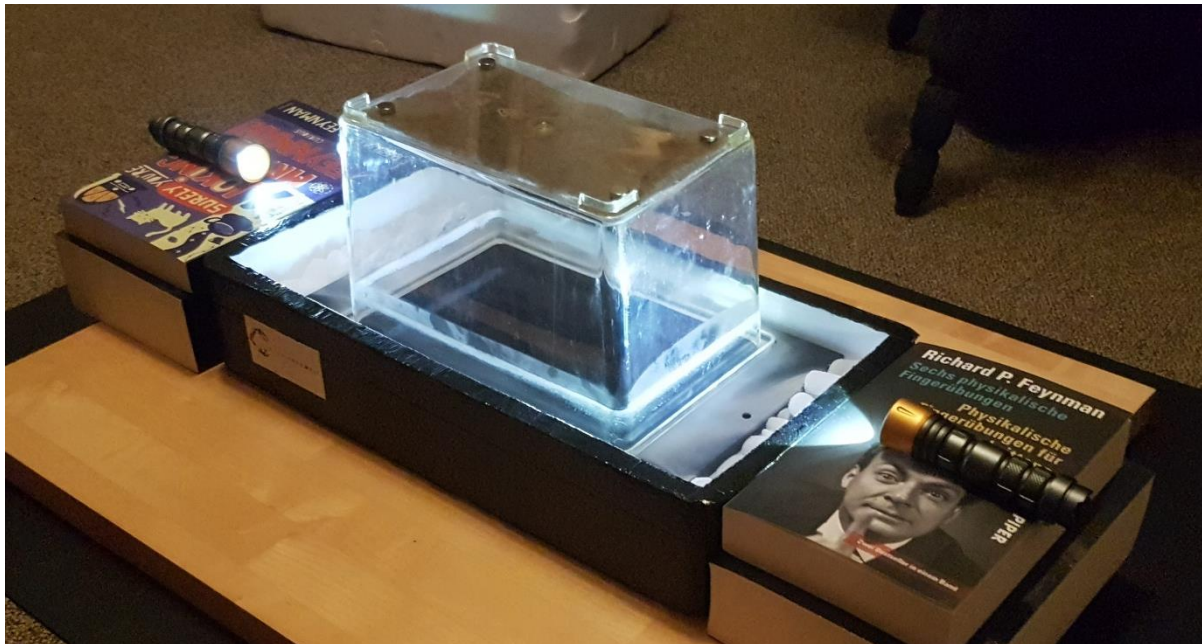
Danksagungen

Diese Arbeit ist als Komplexe Leistung am Romain-Rolland-Gymnasium entstanden. Hier möchte ich allen danken, die mich im Laufe meiner Arbeit unterstützt haben.

Frau Pabst, meine betreuende Fachlehrerin, die diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht hat; Frau Dr. Bilow und alle anderen Mitarbeiter vom Netzwerk Teilchenwelt, die mir die Nebelkammer sowie Broschüren und Begleitmaterialien zur Verfügung gestellt haben und Steffen Turkat vom IKTP an der TU Dresden, der das Konzept der Arbeit gelesen und mir bei inhaltlichen Fragen geholfen hat.

Anhang

Abbildung 1 - Versuchsaufbau



Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angaben der Quellen als Übernahmen kenntlich gemacht.

Moritzburg 25.6.2021 K. Gudat
Ort Datum Unterschrift