

# TEILCHEN- PHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10

Erstellt in Kooperation mit Netzwerk Teilchenwelt

**KOSMISCHE  
STRAHLUNG**

JOACHIM  
HERZ

STIFTUNG



---

## Impressum

Herausgeber: Joachim Herz Stiftung,  
Langenhorner Chaussee 384, 22419 Hamburg  
Autor: T. Karg, A. Schulz, C. Schwerdt, U. Behrens  
Layout und Gestaltung: Nicole Keller, Annett Schuft, Kristina Düllmann  
Druck und Verarbeitung: Druckerei Siepmann GmbH, Hamburg  
1. Auflage 2016  
Der Inhalt ist urheberrechtlich geschützt.

Das vorliegende Heft wurde im Rahmen des Kooperationsprojektes  
„Unterrichtsmaterial Teilchenphysik“ der Joachim Herz Stiftung und des  
Netzwerk Teilchenwelt erstellt. Das Material wurde federführend vom  
Netzwerk Teilchenwelt unter Leitung von Prof. Dr. Michael Kobel erarbeitet.



DRUM HAB' ICH MICH DER MAGIE ERGEBEN, [...] DASS ICH ERKENNE, WAS DIE WELT IM INNERSTEN ZUSAMMENHÄLT

J.W. Goethe, Faust, Der Tragödie Erster Teil

# LIEBE LEHRKRÄFTE,

es war ein magischer Moment, als im Juli 2012 am CERN der Nachweis des Higgs-Bosons verkündet wurde. Es folgte ein Jahr voller magischer Anziehungskraft für die Teilchenphysik, mit so viel öffentlicher Aufmerksamkeit für das Feld wie nie zuvor, gipfelnd im Nobelpreis für François Englert und Peter Higgs im Herbst 2013. Und die Erfolge der Teilchenphysik gingen weiter: 2015 folgte z. B. ein Nobelpreis in der Astroteilchenphysik.

Dieses Interesse macht selbstverständlich auch vor der Schule nicht halt, die meisten von Ihnen kennen entsprechende Schülerfragen, viele von Ihnen haben versucht, Aspekte der Teilchenphysik in den Unterricht zu integrieren. Oft fehlte es bisher an passenden Materialien. Über zwei Jahre haben das Netzwerk Teilchenwelt und die Joachim Herz Stiftung in einer Reihe von Workshops mit Lehrkräften und Wissenschaftlern\* daran gearbeitet, Unterrichtsmaterial zu entwickeln, das Lehrkräften Ideen, Anregungen und Hintergrundinformationen zur Vermittlung der Teilchen- und der Astroteilchenphysik geben soll: fachlich korrekt und gleichzeitig praktisch einsetzbar. Herausgekommen ist eine ganze Heft-Reihe: Forschungsmethoden, Teilchen und Wechselwirkungen sowie kosmische Strahlung und Mikrokurse. Die Materialien stehen in gedruckter Form sowie unter [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp) und [www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de) kostenfrei zur Verfügung.

Ich bedanke mich herzlich bei den vielen Lehrkräften, die in ihrer Freizeit unsere Teilchenphysik-Workshops besucht und an den Materialien mitgearbeitet haben, für diesen Band insbesondere bei Anette Holder, Sabine Juckelandt, Maïke Parplies und Hannes Stoppel. Mein besonderer Dank gilt zudem dem Team des Netzwerk Teilchenwelt unter Leitung von Michael Kobel. Gemeinsam mit Thomas Unkelbach in Köln wurde dieses Material in vielen Nachtsitzungen für LEIFiphysik.de aufbereitet. Meine Kollegin Jenny Meßinger-Koppelt hat die ganze Zeit die Fäden zwischen Dresden, Genf, Hamburg, Köln und Zeuthen in der Hand gehalten und sichergestellt, dass die vielen großartigen Impulse am Ende tatsächlich in fertige Materialbände münden.

Wir hoffen mit dem Material Impulse zur stärkeren Verankerung der Teilchenphysik in der Schule zu setzen und freuen uns über Ihre Rückmeldungen.

**Jörg Maxton-Küchenmeister**

Bereichsleiter Naturwissenschaften,  
Joachim Herz Stiftung

## HINWEISE ZUR ARBEIT MIT DEN MATERIALIEN

Das vorliegende Unterrichtsmaterial bietet Ihnen und Ihren Schülern Einblicke in das faszinierende Forschungsfeld der Astroteilchenphysik. Dabei steht die experimentelle Untersuchung von kosmischen Teilchen am Beispiel der Myonen im Vordergrund.

In den KAPITELN 1 und 2 werden zunächst einige Hintergrundinformationen für Lehrkräfte, wie beispielsweise Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, benötigte Vorkenntnisse der Schüler, Lernziele sowie fachliche und methodische Hinweise gegeben.

KAPITEL 3 beschäftigt sich dann mit der kosmischen Strahlung an sich. Mit Hilfe der Betrachtung von Teilchen in einer Nebelkammer gelingt der Einstieg in das Thema der Astroteilchenphysik. Neben den Spuren bereits bekannter Teilchen wie z. B. Elektronen und Alpha-Teilchen begegnen den Schülern hier erstmalig auch Myonen. Mittels anderer Experimente werden diese dann genauer untersucht. Die Experimente und Fachtexte werden durch entsprechende Aufgaben ergänzt. Abschließend wird dann die Entstehung der Myonen thematisiert.

In KAPITEL 4 finden sich die vollständigen Lösungen zu allen Aufgaben.

KAPITEL 5 bietet einen Überblick über weiterführende Materialien zum Thema kosmische Strahlung.

\* Zur besseren Lesbarkeit der Unterrichtsmaterialien verwenden wir das generische Maskulinum. Selbstverständlich sind dabei stets alle Geschlechter gleichermaßen gemeint.





# INHALT

<b>S. 7</b>	<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>
<b>S. 8</b>	<b>2</b>	<b>INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE</b>
S. 8	2.1	Inhaltliche Anknüpfungspunkte im Lehrplan
S. 8	2.2	Vorkenntnisse
S. 8	2.3	Lernziele
S. 9	2.4	Methodische Hinweise
S. 9	2.5	Fachliche Hinweise
S. 9	2.5.1	Begriff mittlere Lebensdauer
S. 9	2.5.2	Zerfallskurve und Lebensdauer
<b>S. 11</b>	<b>3</b>	<b>KOSMISCHE STRAHLUNG</b>
S. 12	3.1	Teilchen in der Nebelkammer bzw. Blaskammer
S. 14	3.2	Wie können Myonen gemessen werden?
S. 14	3.2.1	Aufbau und Funktionsweise des CosMO- Experiments
S. 15	3.2.2	Auswertung vorhandener Datensätze mit Cosmic@Web
S. 16	3.3	Woher kommen die Myonen?
S. 16	3.3.1	Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen
S. 16	3.3.2	Bestimmung der Flugrichtung und Geschwindigkeit der Myonen
S. 17	3.3.3	Überlegungen zum Entstehungsort der Myonen
S. 17	3.3.4	Messung der Lebensdauer von Myonen
S. 22	3.4	Sekundäre kosmische Strahlung
S. 22	3.4.1	Luftschauermessung mit dem CosMO-Experiment
S. 24	3.5	Quellen primärer kosmischer Strahlung
S. 25	3.6	Aktuelle Forschung
<b>S. 26</b>	<b>4</b>	<b>LÖSUNGEN</b>
<b>S. 27</b>	<b>5</b>	<b>ERGÄNZENDE MATERIALIEN</b>
<b>S. 28</b>	<b>6</b>	<b>REFERENZEN</b>



# 1 EINLEITUNG

Ein Themenfeld, nahe an gegenwärtiger Forschung, spannend, hochaktuell und kompetenzfördernd im Physikunterricht der Sekundarstufe II anzubieten und zu lehren, ist das Bedürfnis vieler Lehrkräfte. Die Behandlung von Astroteilchenphysik – im Speziellen der kosmischen Strahlung – bietet hierfür geeignete Möglichkeiten. Viele Inhalte der Astroteilchenphysik können im schulischen Physikunterricht thematisiert werden, knüpfen direkt an zentrale Prinzipien der Physik an und vermitteln einen Wissensschatz, der auch auf andere alltägliche Fragestellungen übertragen werden kann. Das Thema kann auf Grundlage von Wissensinhalten behandelt werden, die im klassischen Unterricht meist bereits verpflichtend unterrichtet wurden. Erworbenene Kenntnisse werden auf diese Weise wiederholt, gefestigt und auf die neuen Sachverhalte übertragen.

Darüber hinaus stehen Schülerexperimente zur Verfügung, die den Experimenten der Astroteilchenphysik sehr ähnlich sind und damit die experimentellen Methoden und naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen der Grundlagenforschung in diesem Bereich direkt erleben und erlernen lassen. Des Weiteren können die aktuellen Experimente der Astroteilchenphysik, deren Weiterentwicklungen, Entdeckungen und Ergebnisse leicht im Internet verfolgt werden. Schüler können dadurch für Grundlagenforschung begeistert und zu selbstständiger Arbeit angeregt werden.

Ziel der im folgenden vorgestellten Materialien ist es, mit dem Thema kosmische Strahlung „klassische“ Phänomene der Physik im Unterricht der Sekundarstufe II zu behandeln und parallel einen Einblick in das spannende Forschungsgebiet der experimentellen Astroteilchenphysik zu geben.

Das Material wurde aufbauend auf allgemein voraussetzbaren Wissensinhalten der Sekundarstufe II entwickelt und ist damit für alle Bundesländer geeignet.

Nach einer Einführung in die Astroteilchenphysik steht zunächst die Erkundung der Myonen im Mittelpunkt. Diese Teilchen gehören zur sekundären kosmischen Strahlung und entstehen durch die Wechselwirkung von primären kosmischen Teilchen aus dem Weltall mit der Erdatmosphäre. Es wird anhand von Experimenten und Überlegungen erarbeitet, woher die Myonen stammen und welche Eigenschaften sie besitzen. Anschließend wird näher auf die in der Erdatmosphäre entstehenden Teilchenschauer und die Quellen von primären kosmischen Teilchen eingegangen sowie ein Einblick in deren spannende Entdeckungsgeschichte und ein Überblick über aktuelle Forschungsfragen gegeben.

Darüber hinaus werden zwei Versuche für Schüler vorgestellt, mit deren Hilfe die kosmische Strahlung experimentell untersucht werden kann. Dies ist zum einen das CosMO-Experiment, ein Szintillationszähler-Experiment, welches an vielen Standorten im Netzwerk Teilchenwelt<sup>1</sup> zur Ausleihe zur Verfügung steht, und zum anderen Cosmic@Web<sup>2</sup>, welches den Abruf vielseitiger Datensätze von verschiedenen Langzeitexperimenten über das Internet ermöglicht. Von zu Hause oder dem Klassenzimmer aus wird es so für die Jugendlichen möglich, die kosmische Strahlung wie ein Astroteilchenphysiker zu erforschen.

<sup>1</sup> <http://www.teilchenwelt.de>

<sup>2</sup> <http://cosmicatweb.desy.de>

# 2 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE

## 2.1 INHALTLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Sofern Astroteilchenphysik nicht verbindlich im Lehrplan Physik der gymnasialen Oberstufe verankert ist, kann es in vielen Wahlbereichen integriert werden.

Im Rahmen der Behandlung von Elektronik können die Messmethoden der kosmischen Strahlung bearbeitet werden, in Kosmologie kann auf die Quellen kosmischer Teilchen eingegangen werden oder im Bereich Elementarteilchenphysik bzw. Atom- und Kernphysik können Myonen und deren Untersuchungsmöglichkeiten behandelt werden. Auch im Bereich Astronomie oder Teilchenphysik kann ein Exkurs in die Astroteilchenphysik eingeplant werden.

## 2.2 VORKENNTNISSE

Die Schüler sollten vor der Beschäftigung mit den Materialien Vorkenntnisse zu folgenden physikalischen Inhalten besitzen:

- Bewegung elektrisch geladener Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld
- Kraftwirkung von elektrischen und magnetischen Feldern
- Aufbau von Atomen
- Photoeffekt, um die Funktionsweise eines Photomultipliers zu erklären (siehe ergänzendes Material unter 5.3)
- Radioaktivität, speziell Eigenschaften radioaktiver Strahlung, Nachweisgeräte für Teilchen sowie Zerfallsgesetz

Darüber hinaus sind Kenntnisse zum Standardmodell der Teilchenphysik und der Ionisation von Atomen und Molekülen hilfreich.

Für die Aufgaben in 3.3 sind Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie Voraussetzung.

Wenn diese Vorkenntnisse nicht vorhanden sind, ist es jedoch auch möglich an den entsprechenden Stellen diese Inhalte einzuführen.<sup>3</sup>

## 2.3 LERNZIELE

Das Ziel dieser hier vorgestellten Materialien ist es, den Schülern einen Überblick über das Forschungsfeld der Astroteilchenphysik zu vermitteln, inhaltliche Einblicke in das Thema zu ermöglichen, die Komplexität und Vielfältigkeit von Forschungswegen aufzuzeigen und verständlich zu machen, wie Grundlagenforschung funktioniert.

Darüber hinaus sollen die Jugendlichen die Möglichkeit erhalten, zu üben, wie bekannte Prinzipien auf neue Sachverhalte übertragen werden können sowie das Reden und Diskutieren über Physik zu schulen.

Dabei werden verschiedene Herangehensweisen in der Problemlösung aufgezeigt. Im experimentellen Bereich stehen vor allem Kreativität in der Planung, Durchführung und Auswertung von Messungen, sowie das Interpretieren von Daten und Schlussfolgern für neue, weiterführende und eventuell genauere Messungen und Untersuchungen im Mittelpunkt.

**Im Bereich Experimentieren werden folgende Lernziele verfolgt:**

Die Schüler

- wenden zwei verschiedene Methoden zur Messung kosmischer Teilchen an (die Nebelkammer und ein Szintillationszähler-Experiment).
- beschreiben die Messtechnik des Szintillationszähler-Experimentes (Szintillatoreffekt, Photomultiplier als Bauelement, Datenaufzeichnung mit einer DAQ-Karte).
- erproben das Messverhalten der Detektoren und interpretieren die gemessenen Daten unter Beachtung des jeweils gewählten Versuchsaufbaus.
- ermitteln experimentell Eigenschaften von Myonen (Einfallrichtung, Geschwindigkeit, Lebensdauer).
- weisen experimentell Teilchenschauer nach und diskutieren deren Entstehung.
- nutzen mathematische Beschreibungen, um Messdaten interpretieren zu können und daraus Erkenntnisse zu gewinnen (Zerfallsgesetz, e-Funktion).
- erlernen das Auswerten großer Datensätze und interpretieren diese.

**Mit den in Kapitel 3.3 vorgestellten Aufgaben werden folgende Lernziele verfolgt:**

Die Schüler

- wenden die Zeitdilatation bzw. Längenkontraktion unter Beachtung unterschiedlicher Bezugssysteme auf die Myonenbewegung an und führen dazu Berechnungen durch.
- bestimmen das Zerfallsgesetz für Myonen und den Lorentzfaktor.
- vertiefen gewonnenes Wissen zum Teilchenschauer.

<sup>3</sup> Eine Zusammenfassung zum Thema elektrisches und magnetisches Feld findet sich im Material „Forschungsmethoden“ dieser Hefreihe sowie bei LEIFIPhysik (<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/bewegte-ladungen-in-feldern>).



## 2.4 METHODISCHE HINWEISE

Mit Hilfe der Betrachtung von Teilchen in einer Nebelkammer gelingt der Einstieg in das Thema der Astroteilchenphysik. Neben den Spuren bereits bekannter Teilchen wie z. B. Elektronen und Alpha-Teilchen begegnen den Schülern hier erstmalig auch Myonen. Mittels anderer Experimente werden diese dann genauer untersucht.

Sowohl die Experimente als auch die vorhandenen Daten unter Cosmic@Web bieten zahlreiche Möglichkeiten nachzuempfinden, wie Wissenschaftler arbeiten:

- wissenschaftliche Fragen aufbringen,
- Vermutungen aufstellen,
- Experimente planen und die Auswahl der Daten festlegen,
- Experimente und Datenanalyse durchführen,
- Ergebnisse diskutieren und interpretieren,
- Ergebnisse darstellen und berichten,

und dadurch neue Erkenntnisse über Teilchen gewinnen.

Grundlegende Anleitungen für die Experimente liegen den Experimentiersets<sup>4</sup> des Netzwerk Teilchenwelt bei. Für das Arbeiten mit den Daten findet sich eine Anleitung auf Cosmic@Web.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die im Folgenden thematisierten Inhalte zu erarbeiten. Bei den Experimenten zur Messung kosmischer Teilchen kann es je nach Interessen und neu aufkommenden Fragen notwendig und sinnvoll sein, vom vorgeschlagenen Erarbeitungsweg abzuweichen. Das sollte auch nicht gescheut werden. Die Experimente bieten Gestaltungsspielräume und lassen Platz für kreative Ideen und eigene Entdeckungen. Diese Freiräume sollten genutzt werden, denn das schafft Begeisterung und Engagement und fördert freies Denken.

Freiräume existieren ebenso beim Arbeiten mit den vorhandenen Daten auf Cosmic@Web. Durch die Auswahl unterschiedlicher Parameter und Datensätze können sehr umfangreiche Aspekte diskutiert werden.

Gerade weil Astroteilchenphysik so vielfältig und kein Pflichtstoff für den Unterricht ist, können hier die Freiräume ausgenutzt werden und die Chance zum Lernen über die Natur von Grundlagenforschung ergriffen werden.

Beim Arbeiten mit diesen Materialien sollte bedacht werden, dass die beim Experimentieren erzielten Messergebnisse statistischen Schwankungen unterliegen. Bei den Messungen können auch Spezialfälle auftreten, die zwar eine sehr kleine Wahrscheinlichkeit haben, aber nicht ausgeschlossen sind. So gibt es z. B. bei der Untersuchung der Richtung eines Myons die Möglichkeit, dass zwei Myonen in sehr kurzem Abstand die Detektoren durchfliegen. Wenn dabei der untere Detektor zuerst getroffen wird, sieht es zunächst so aus, als wäre ein Myon von unten gekommen. Der statistische Charakter der kosmischen Strahlung sollte daher in die Betrachtungen einfließen und diskutiert werden.

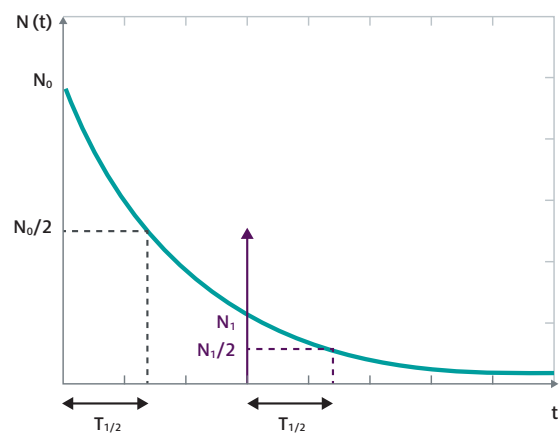
## 2.5 FACHLICHE HINWEISE

### 2.5.1 Begriff mittlere Lebensdauer

Aus dem Unterricht ist vermutlich bisher nur der Begriff der Halbwertszeit bekannt. Der Unterschied zwischen Halbwertszeit und mittlerer Lebensdauer ist kein physikalischer Effekt, sondern lediglich eine andere Darstellung des Zerfallsgesetzes. Wir betrachten hier einzelne Teilchen, deshalb wird mit der mittleren Lebensdauer gerechnet. Gegebenenfalls sollte dieser Gedankengang mit den Schülern diskutiert werden.

### 2.5.2 Zerfallskurve und Lebensdauer

Die aus dem Experiment erhaltene Funktion  $N : t \rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$  beschreibt die Zerfallskurve von Myonen.



**Abb. 1:** Hier geht eine wichtige Eigenschaft der Exponentialfunktion ein: Der Verlauf der e-Funktion ist in jedem Ausschnitt der gleiche und unterscheidet sich prinzipiell nur durch den Anfangswert  $N_0$ ,  $N_1$ . Deshalb ist das „Vorleben“ der Myonen und der Standort (respektive die Höhe) nicht wichtig.

<sup>4</sup> [http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische\\_teilchen/schuelerexperimente/cosmo\\_experiment](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/cosmo_experiment)

An dieser Stelle ist nicht die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  für uns interessant, sondern die mittlere Lebensdauer  $\tau$ . Die mittlere Lebensdauer ist der Mittelwert der statistischen Verteilung der Lebensdauern. Sie ist der Kehrwert der Zerfallskonstanten und damit die Zeit, nach der nur noch  $\frac{1}{e} = 37\%$  aller Myonen vorhanden sind.

$$\tau = \frac{\text{Lebenszeit aller Teilchen}}{\text{Anzahl der Teilchen}} = \frac{\int_0^{\infty} N(t)t \, dt}{\int_0^{\infty} N(t) \, dt}$$

Der Zähler ergibt:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} N(t) \cdot t \, dt &= \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} \cdot t \, dt \\ &\stackrel{\otimes}{=} N_0 \left[ \underbrace{-\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \cdot t}_0 \right]_0^{\infty} - N_0 \int_0^{\infty} -\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \, dt \\ &= N_0 \left[ -\frac{1}{\lambda^2} \cdot e^{-\lambda t} \right]_0^{\infty} = N_0 \cdot \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned}$$

An der Stelle  $\otimes$  wurde eine partielle Integration durchgeführt. Der Nenner berechnet sich wie folgt:

$$\int_0^{\infty} N(t) \, dt = \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} \, dt = \frac{1}{\lambda} \cdot N_0$$

Zusammengesetzt erhalten wir:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} N(t) \cdot t \, dt}{\int_0^{\infty} N(t) \, dt} = \frac{N_0 \cdot \frac{1}{\lambda^2}}{N_0 \cdot \frac{1}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda}$$

# 3 KOSMISCHE STRAHLUNG

Die Astroteilchenphysik ist ein junges Forschungsfeld im Schnittpunkt von Teilchenphysik, Astrophysik, Astronomie und Kosmologie. Astronomen und Teilchenphysiker untersuchen eigentlich entgegengesetzte Extreme: Die einen untersuchen das Allergrößte, die anderen das Allerkleinste. Astronomen wollen das unvorstellbar große Weltall erkunden. Sie beobachten das Universum nicht nur durch Photonen des sichtbaren Lichts, sondern nutzen das gesamte Spektrum elektromagnetischer Strahlung von Radiowellen bis zur höchstenergetischen Gammastrahlung. Astroteilchenphysiker untersuchen Neutrinos, geladene Teilchen und Gravitationswellen, um mehr über den Aufbau des Universums und die Prozesse bei der Sternentwicklung zu erfahren.

Astronomen und Astroteilchenphysiker beobachten mit ihren Teleskopen Sterne und Galaxien bis zu Entfernungen von Milliarden Lichtjahren. Teilchenphysiker untersuchen hingegen mit Teilchendetektoren die elementaren Bausteine unserer Welt und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken.

Was verbindet die Forschungsthemen? Die Geschichte des Kosmos und seiner Bausteine lassen sich nicht ohne die Teilchenphysik erklären. Die kosmische Teilchenstrahlung aus dem Weltall erreicht weit höhere Energien als Teilchen in von Menschen gebauten Beschleuniger auf der Erde. Wissenschaftler möchten das gesamte Universum als gigantisches Labor nutzen, um die kosmischen Beschleuniger zu verstehen. Sie überprüfen die Gültigkeit grundlegender Gesetze der Physik und untersuchen Regionen, in denen Schwerkraft, Dichte und Temperatur extrem hoch sind – etwa dort, wo Sterne explodieren oder gar in sich zusammenfallen und dann ein Schwarzes Loch bilden.

Aus dem Kosmos treffen ununterbrochen Teilchen auf die Erdatmosphäre. Dabei können sie mit den Atomkernen der Luft wechselwirken und eine Vielzahl neuer Teilchen erzeugen. Wir spüren oder sehen diese vielen verschiedenen Teilchen nicht, obwohl sie auch durch uns hindurchfliegen. Mittels spezieller Experimente ist es aber möglich, kosmische Teilchen zu messen und ihre Eigenschaften zu untersuchen. Die Messung dieser Teilchen bietet neue Möglichkeiten, die Prozesse in Sternen, Galaxien und im Universum besser zu verstehen. So wird beispielsweise die Energie der kosmischen Teilchen untersucht: Messungen haben ergeben, dass die kosmischen Himmelsboten verschiedene Energien besitzen. Diese können enorm hoch sein, bis zu 10 Millionen Mal höher als die Energie der Protonen, die am Large Hadron Collider LHC<sup>5</sup> am CERN<sup>6</sup> beschleunigt werden. Astroteilchenphysiker versuchen zu verstehen, wie solch hohe Energien im Kosmos erzeugt werden können.

In der Physik wird die Vielzahl kosmischer Teilchen auch als kosmische Strahlung bezeichnet. Sie wurde zwar schon vor über 100 Jahren von Victor Franz Hess<sup>7</sup> entdeckt, doch sind bis heute viele grundlegende Fragen nur teilweise geklärt oder gar unbeantwortet. So wird auch aktuell noch nach Quellen der kosmischen Strahlung gesucht und die Beschleunigungsmechanismen, die solch hochenergetische Teilchen erzeugen, werden erforscht. Unklar ist auch, welche Wechselwirkungen die kosmische Strahlung auf dem Weg durch das Weltall erfährt und bis zu welchen Energien Teilchen beschleunigt werden.

Die folgenden Abschnitte versuchen das Phänomen der kosmischen Strahlung zu erklären, wobei diese Fragen im Mittelpunkt stehen werden:

- Woher kommt die kosmische Strahlung?
- Wie kann man kosmische Teilchen nachweisen?
- Was sind kosmische Teilchen eigentlich und welche Eigenschaften haben sie?

<sup>5</sup> Der Large Hadron Collider (LHC) ist ein Teilchenbeschleuniger am CERN in Genf. Mit 27 km Länge ist er der größte Teilchenbeschleuniger weltweit.

Am LHC werden Teilchen bei hohen Energien zur Kollision gebracht um so neue Teilchen zu erzeugen und zu untersuchen.

<sup>6</sup> CERN (= Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist die Europäische Organisation für Kernforschung mit Sitz in Genf (Schweiz).

<sup>7</sup> Victor Franz Hess (1883 – 1964) war österreichischer Physiker und Nobelpreisträger.

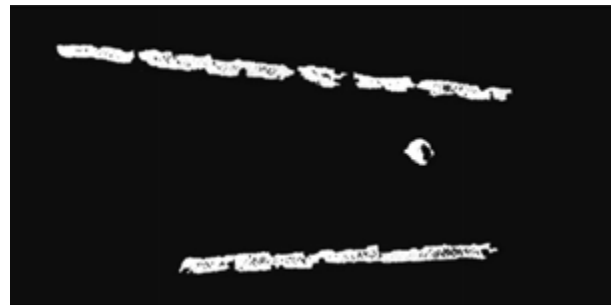
### 3.1 TEILCHEN IN DER NEBELKAMMER BZW. BLASENKAMMER

In diesem Abschnitt werden die Erfindung der Nebelkammer, ihre Funktionsweise und die damit verbundenen Nachweismethoden sowie Entdeckungen von einigen Elementarteilchen erläutert.

Im Jahre 1911 gelang Charles Thomas Wilson<sup>8</sup> der erste Nachweis von Spuren, die Alpha- und Betateilchen in einer Nebelkammer hinterließen. Für die Entwicklung der nach ihm benannten Wilsonschen Nebelkammer zum Nachweis radioaktiver Strahlung und anderer geladener Elementarteilchen wurde er 1927 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. 1936 erhielt Carl D. Anderson<sup>9</sup> für die Untersuchungen der kosmischen Strahlung in einer Nebelkammer und der damit verbundenen Entdeckung des Positrons den Nobelpreis für Physik, zusammen mit Victor Franz Hess für dessen Arbeiten zur Entdeckung der kosmischen Strahlung. Mit der vergleichsweise einfachen Methode einer Nebelkammer kann man auch heute noch den kosmischen Teilchen auf die Spur kommen.

Eine Nebelkammer ist ein Detektor, in dem übersättigter Alkoholdampf erzeugt wird. Wenn elektrisch geladene Teilchen die Kammer durchqueren, ionisieren sie entlang ihrer Flugbahn Gasmoleküle im Alkoholdampf. Diese Gasmoleküle lösen eine Kondensation von winzigen Flüssigkeitstropfen aus. So entstehen sichtbare Teilchenspuren, ähnlich den Kondensstreifen hinter Flugzeugen. Elektrisch neutrale Teilchen wie Photonen und Neutronen hinterlassen keine Spuren. Die Aufnahmen verschiedener Teilchenspuren in einer Nebelkammer sind in Abb. 2 zu sehen.

Die kurzen, nur wenige Zentimeter langen und dicken Nebelspuren werden von Alpha-Teilchen verursacht, die in Luft (und auch Alkoholdampf) eine mittlere Reichweite von nur etwa 5 cm haben (Abb. 2 oben). Da Alpha-Teilchen bereits durch ein Blatt Papier absorbiert werden, können sie nicht durch die Glashaube der Kammer von außen kommen, sondern müssen von einem radioaktiven Bestandteil der Luft in der Kammer ausgehen. In der Tat handelt es sich hier um Zerfälle verschiedener Nuklide des radioaktiven Edelgases Radon, das sich in der Luft geschlossener Räume anreichern kann.



**Abb. 2:** Nebelkammerspuren von Alpha-Teilchen (oben), Protonen (Mitte) und Elektronen (unten).

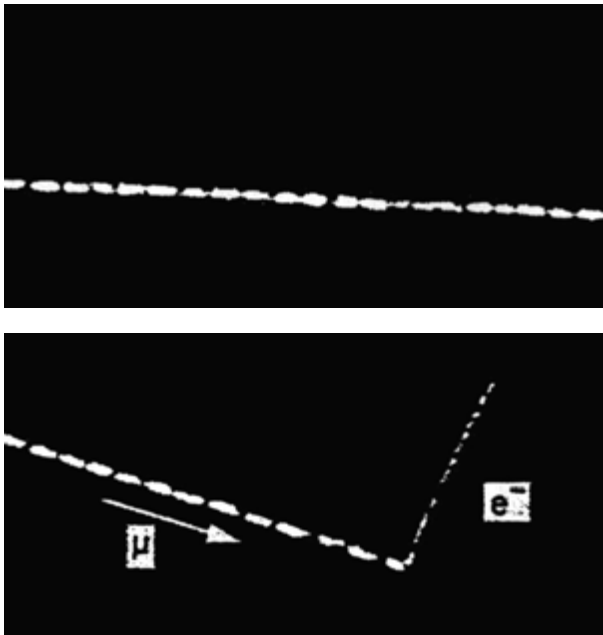
(Quelle: Markus Breig/KIT)

Ähnlich dicke, jedoch meistens sehr viel längere Nebelspuren verursachen energiereiche Protonen, die aufgrund von Sekundärprozessen in der Atmosphäre entstanden sind. Sie können den Glasmantel der Kammer durchdringen. Ist ihre Energie danach niedrig genug, kommt es zu Wechselwirkungen mit den Elektronen der Gasatome in der Kammer und zur Erzeugung einer Spur. Diese ist ähnlich zur Spur der Alpha-Teilchen. Treffen die Teilchen senkrecht in die übersättigte Alkoholdampfschicht, ist nur ein „Nebelfleck“ sichtbar (Abb. 2 Mitte).

Sehr viel zahlreicher sind in einer Nebelkammer die dünnen und auch meist viel längeren Nebelspuren (Abb. 2 unten). Diese werden durch Elektronen und Positronen hervorgerufen. Eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Teilchensorten, die unterschiedlich elektrisch geladen sind, ist zunächst nicht möglich. Sie könnte nur erfolgen, wenn zur Ablenkung der Teilchen ein starkes Magnetfeld senkrecht zum Kammerboden angelegt würde. Die Richtungsänderung kommt von einem Stoß mit einem Molekül. Elektronen mit kleiner Energie werden durch die Stöße stärker abgelenkt. In Abb. 2 unten sind oben Elektronen mit größerer und unten mit kleinerer Energie

<sup>8</sup> Charles Thomas Rees Wilson (1869 - 1959) war ein schottischer Physiker, der vor allem für seine Erfindung der Nebelkammer bekannt ist, für die er 1927 den Nobelpreis für Physik erhielt.

<sup>9</sup> Carl David Anderson (1905 - 1991) war ein amerikanischer Physiker, der für seine Entdeckung des Positrons zusammen mit Victor Franz Hess 1936 den Nobelpreis für Physik erhielt.



**Abb. 3:** Nebelkammerspur eines Myons (oben) und eines Myons, das sich umwandelt (unten).

(Quelle: Markus Breig/KIT)

abgebildet. Die vielen langen, dünnen Bahnen weisen auf schnellfliegende (also energiereiche) Elektronen hin. Elektronen mit geringerer Geschwindigkeit erzeugen kürzere Nebelspuren, die zum Teil durch Streuung gekrümmt oder geknickt erscheinen. Ihre Spuren sehen durch Vielfachstreuung an den Atomhüllen der übersättigten Dampfschicht verschnörkelt und verschlungen aus.

In Abb. 3 oben ist ein Teilchen zu sehen, welches bisher im Schulunterricht noch nicht näher untersucht wurde: das Myon. Die Spur des Myons verläuft gerade durch den gesamten Detektor. Bei einer sehr langen Beobachtung einer Nebelkammer kann man manchmal die Umwandlung eines Myons in ein Elektron und weitere nicht-beobachtbare Teilchen finden, wie in Abb. 3 unten gezeigt. Myonen sind ein Hauptbestandteil der sogenannten sekundären kosmischen Strahlung (vgl. Kapitel 3.4). Nachfolgend wollen wir uns daher mit Myonen und ihren Eigenschaften genauer beschäftigen.



#### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Welche Grundeigenschaft müssen Teilchen besitzen, damit sie in einer Nebelkammer Spuren hinterlassen?
- Woher stammen die Alpha-Teilchen, die in einer Nebelkammer beobachtet werden können?
- Wie ist der Unterschied im Aussehen der Spuren von Protonen und Elektronen zu beschreiben?
- Was ist das Charakteristische an den Spuren, die von den Myonen in der Nebelkammer erzeugt werden?

## 3.2 WIE KÖNNEN MYONEN GEMESSEN WERDEN?

**Um die kosmische Strahlung genau erforschen zu können, bauen Astroteilchenphysiker gemeinsam mit Ingenieuren weltweit immer größere und empfindlichere Experimente. Auf der Welt gibt es eine Handvoll von ihnen, jedoch ist es für Jugendliche nahezu unmöglich, diese Experimente zu nutzen. Welche Möglichkeiten gibt es für junge Menschen, sich mit dem Thema zu befassen?**

Um die heute so wichtigen Instrumente der experimentellen Grundlagenforschung auch Schülern und Studierenden zugänglich zu machen, haben Wissenschaftler kleinere und vereinfachte Experimentieraufbauten entwickelt, mit denen die grundlegenden Messungen der Astroteilchenphysik durchgeführt werden können. Diese Experimente bestehen aus Komponenten, wie sie auch in den Großexperimenten genutzt werden.

Zur Messung und Untersuchung von Myonen werden unter anderem Szintillationszähler genutzt. Das CosMO-Experiment (**C**osmic **M**uon **O**bserver-Experiment) besteht aus solchen Szintillationszählern. Ergänzt mit einigen weiteren Komponenten können damit Myonen gezählt werden. Eine weitere Möglichkeit zum Experimentieren für Jugendliche bieten die sogenannten Kamiokannen (siehe ergänzendes Materialien unter 5.2), auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

### 3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des CosMO-Experiments

Für die Untersuchung von Myonen werden drei Komponenten benötigt: Detektoren, Gerät zum Auslesen der Daten (Datenauslesekarte) und Computer. Das CosMO-Experiment<sup>10</sup> besteht aus diesen Komponenten (siehe Abb. 4 und 5). Die Detektoren registrieren Signale, die durch die Datenauslesekarte an den Computer übertragen und anschließend mit dem Messprogramm Muonic ausgewertet werden. Der Aufbau und die Funktionsweise von CosMO sieht im Detail wie folgt aus:

**Die Detektoren:** Das CosMO-Experiment besteht aus drei Detektoren, die – soweit es die Kabellängen zulassen – beliebig im Raum positioniert werden können. Jeder Detektor besteht aus einem Szintillator, der Licht aussendet, wenn elektrisch geladene Teilchen durch ihn hindurchfliegen. Der Szintillator befindet sich in einem Metallgehäuse. Elektronen und Protonen werden dadurch zum größten Teil abgeschirmt. Da häufig mit zwei bzw. drei übereinanderliegenden Detektoren gearbeitet wird, ist es noch sicherer, dass es sich um Myonen handelt, die registriert werden. Das Lichtsignal ist jedoch so schwach, dass man es im Hellen und mit dem menschlichen Auge nicht

erkennen kann. Daher muss der Detektor lichtundurchlässig verbaut und durch optische Fasern an einen sogenannten Silizium-Photomultiplier angeschlossen werden. Dieser registriert das schwache Lichtsignal, verstärkt es und wandelt es in ein elektronisches Signal um. Damit wird aus dem optischen Signal, welches das elektrisch geladene Teilchen im Detektor erzeugt hat, ein messbares elektronisches Signal.

**Die Datenauslesekarte:** Das elektronische Signal wird mithilfe der Datenauslesekarte (Data Acquisition- oder DAQ-Karte) verarbeitet, durch weitere Informationen ergänzt und an den Computer übertragen. Wichtig ist z. B., wann genau das Teilchen den Detektor passiert. Dafür wird das Signal mit einer genauen Zeitinformation durch die DAQ-Karte ergänzt. Um Rausch- und Störsignale, die häufig eine niedrige Amplitude haben, auszuschließen, kann eine untere Amplitudenschwelle eingestellt werden, ab der ein Signal aufgezeichnet wird. Auch kann die DAQ-Karte die Ankunftszeiten der Signale mehrerer Detektoren miteinander vergleichen: Eine Messung, bei der nur Ereignisse gespeichert werden, wenn mehrere Detektoren gleichzeitig ein Signal registriert haben, nennt man Koinzidenzmessung.

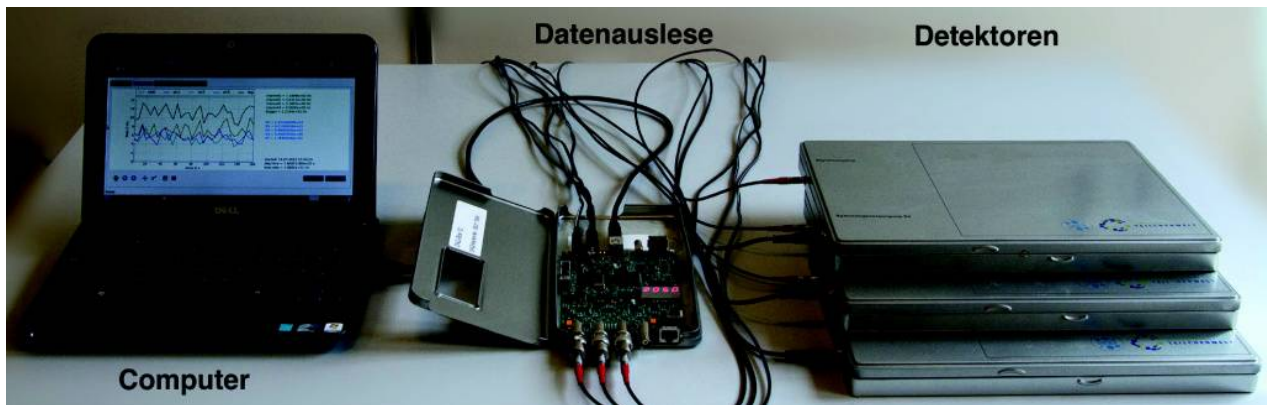
**Der Computer:** Etwa ein Teilchen pro Minute und Quadratmeter erreicht den Erdboden auf Meeressniveau. Für die Größe eines Szintillationszählers des CosMO-Experiments bedeutet dies, dass ungefähr sechs Teilchen pro Sekunde den Detektor passieren. Dementsprechend viele Signale werden registriert, weshalb eine computerbasierte Datenauswertung unumgänglich ist. Zum einen können so die Messungen gespeichert werden, zum anderen wird die Auswertung großer Datenmengen schneller und einfacher. Unter Nutzung des Auswerteprogramms Muonic oder selbst programmierter Software kann die Rate der Teilchen untersucht werden.

Bevor die in Kapitel 3.3 vorgestellten Experimente durchgeführt werden können, müssen Aufbau und Kalibrierung der Versuchsanordnung<sup>11</sup> erfolgen.

Wie bei allen Experimenten ist die wichtigste Komponente aber nicht elektronischer Natur – alles Messen und Auswerten ist bedeutungslos ohne eine sorgfältige Planung der Experimente und die Interpretation der Daten. Daher bleibt die wichtigste Aufgabe, die Daten zu interpretieren, zu diskutieren und herauszufinden, was sie über die Physik verraten. Die Kapitel 3.3 bis 3.5 geben entsprechende Anregungen zu geeigneten Fragestellungen und deren Auswertung.

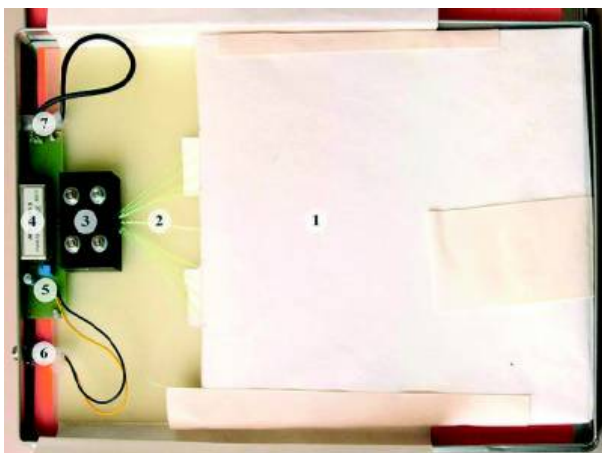
<sup>10</sup> [http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische\\_teilchen/schuelerexperimente/cosmo\\_experiment](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/cosmo_experiment)

<sup>11</sup> siehe Anleitungen CosMO-Experiment unter [http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische\\_teilchen/schuelerexperimente/cosmo\\_experiment](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/cosmo_experiment)



**Abb. 4:** Das Szintillationszähler-Experiment CosMO, wie es im Netzwerk Teilchenwelt entwickelt wurde und bundesweit zum Einsatz kommt.

(Quelle: DESY).



**Abb. 5:** eine offene Szintillatorbox: 1. in Papier eingewickelter Szintillator, 2. optische Fasern, 3. Halterung mit eingebautem Photomultiplier, 4. Spannungsumwandler, 5. Spannungsregler, 6. Anschluss für das Netzteil, 7. Signalausgang.

(Quelle: DESY).

#### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Wie sind der Aufbau und die Funktionsweise der wesentlichen Komponenten des CosMO-Experimentes?

#### 3.2.2 Auswertung vorhandener Datensätze mit Cosmic@Web

Neben der eigenen Messung von Myonen kann die Natur der kosmischen Strahlung auch mithilfe vorhandener Datensätze von Langzeitexperimenten erforscht werden. Derartige Daten stehen bei Cosmic@Web zur Verfügung<sup>12</sup>. Auf der Seite finden sich auch Erläuterungen, Auswertungsbeispiele und mögliche Fragestellungen für das Arbeiten mit den Daten.

Bei Großexperimenten in der Astroteilchenphysik spielen verschiedene Faktoren eine entscheidende Rolle bei der Standortwahl. Je nach Experiment und Fragestellung benötigt man eine optimale Höhe in Gebirgen oder maximale Tiefe in Bergwerken, im Ozean oder Eis, oder auch viele klare Nächte ohne Einfluss von Streulicht. Die Experimente befinden sich daher in den meisten Fällen an sehr speziellen Standorten und somit in einiger Entfernung vom täglichen Arbeitsort der meisten Forscher. Die gemessenen Daten werden in der Regel über das Internet bereitgestellt. Die Auswertung und Analyse ist damit unabhängig vom Ort möglich.

Wie bei Großexperimenten werden auch unter Cosmic@Web Messdaten aus unterschiedlichen Experimenten zur Erforschung der kosmischen Strahlung im Internet zur Verfügung gestellt und können analysiert werden. Es ist z. B. möglich, die Anzahl gemessener Myonen in Abhängigkeit von anderen Größen wie Luftdruck und Umgebungstemperatur zu untersuchen. Mit Detektoren auf dem Forschungsschiff „Polarstern“ lassen sich z. B. Teilchenraten in Abhängigkeit von der Schiffsposition bestimmen.

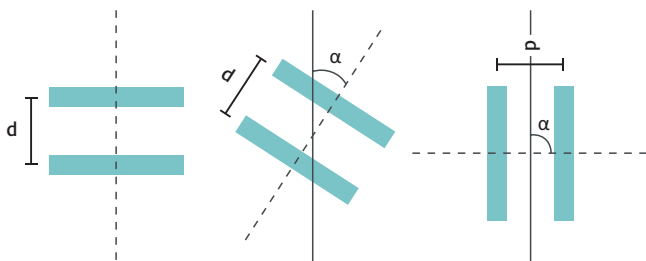
<sup>12</sup> <http://cosmicatweb.desy.de>

### 3.3 WOHER KOMMEN DIE MYONEN?

Fragen, die sowohl mit dem CosMO-Experiment als auch mit den Daten auf Cosmic@Web untersucht und im Nachfolgenden erörtert werden, sind z. B. „Fliegen Myonen durch uns hindurch? Aus welchen Richtungen erreichen kosmische Teilchen die Erde? Und wie lange ‚leben‘ diese Teilchen?“

#### 3.3.1 Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

Als erstes kann die Ankunftsrichtung der Myonen bestimmt werden. Dazu werden zwei Detektoren in einem Abstand  $d$  von etwa 30 cm übereinander positioniert, und es wird gemessen, wie viele Myonen pro Sekunde nacheinander durch beide Detektoren hindurchfliegen. Eine Anzahl pro Zeiteinheit wird Rate genannt. Diese Messung wird für verschiedene Winkel zur Vertikalen (Zenitwinkel  $\alpha$ ) durchgeführt wie in Abb. 6 dargestellt.



■ Detektorplatten

Abb. 6: Winkelmessung: Die beiden Detektoren werden zur Vertikalen (durchgezogene Linie) verkippt.

Dabei werden bei einem Zenitwinkel von  $0^\circ$  vertikal einfallende und bei einem Zenitwinkel von  $90^\circ$  horizontal einfallende Myonen gemessen. Die Messung liefert das in Abb. 7 gezeigte Ergebnis.

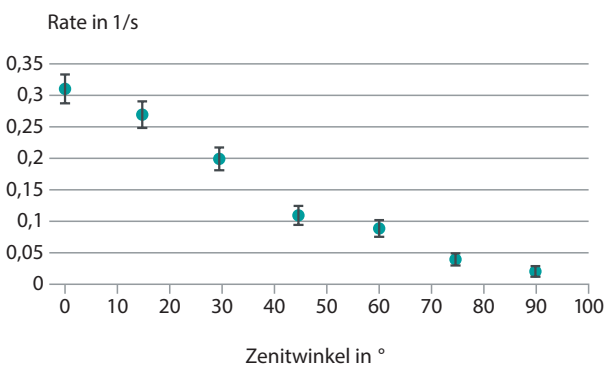


Abb. 7: Winkelmessung: Rate der Myonen in Abhängigkeit des Zenitwinkels.

Die Rate der vertikal einfallenden Myonen ist am höchsten. Aus horizontaler Richtung erreichen nur sehr wenig Myonen die Messanordnung. Leider ist der Abstand zwischen den Detektoren zu klein, um sicher messen zu können, welcher der beiden zuerst getroffen wird. Die Myonen sind zu schnell für die Zeitaufösung der DAQ-Karte. Ob der Herkunftsort oberhalb oder unterhalb der Detektoren liegt, muss daher in weiteren Experimenten untersucht werden.

#### 3.3.2 Bestimmung der Flugrichtung und Geschwindigkeit der Myonen

Jetzt werden nur die Myonen betrachtet, die aus vertikaler Richtung einfallen. Um zu untersuchen, ob die Myonen von oben, also aus dem Himmel, oder von unten aus der Erde kommen, müssen wir ein Experiment konstruieren, das uns erlaubt festzustellen, welcher Detektor zuerst durchquert wurde. Liegen die Detektoren direkt übereinander, ist der Zeitunterschied zwischen den Signalen zu klein, um ihn mit der DAQ-Karte messen zu können. Um einen messbaren Abstand zwischen den Signalen zu erreichen, wird der Abstand  $d$  zwischen den Detektoren auf etwa 3 m erhöht.

Bei der Betrachtung der Pulsdatei<sup>13</sup> zeigt sich, dass die obere Platte zuerst anspricht, d. h. es gibt keine Myonen, die von unten aus der Erde kommen. Die Flugrichtung der Myonen ist damit bestimmt: Sie kommen immer von oben.

Des Weiteren wird folgende Verteilung für die Flugzeit  $t$  der Myonen zwischen den beiden Detektoren gemessen (vgl. Abb. 8).

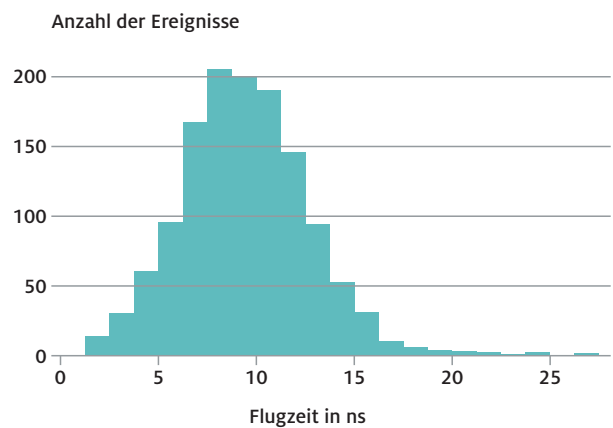


Abb. 8: Verteilung der Flugzeiten der Myonen in ns bei einem Abstand zwischen den Detektoren von  $d = 2,80$  m.



Mit dem Abstand  $d = 2,80 \text{ m}$  zwischen den Detektoren berechnet sich mithilfe der Gleichung  $v = \frac{d}{t}$  die Geschwindigkeit der Myonen. Die mittlere Flugzeit beträgt  $9,40 \text{ ns}$ . Damit lässt sich die mittlere Geschwindigkeit berechnen:

$$v = \frac{2,80 \text{ m}}{9,40 \text{ ns}} = 298 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,99 \cdot c .$$

Die Breite der Verteilung beinhaltet vor allem die Messgenauigkeit der Detektoren. Dadurch können auch scheinbar Geschwindigkeiten über der Lichtgeschwindigkeit gemessen werden.

Die Myonen kommen also von oben aus dem Himmel und bewegen sich fast mit Vakuumlichtgeschwindigkeit.

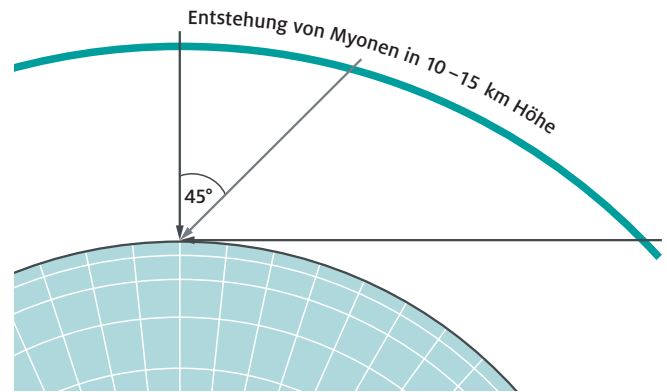
### 3.3.3 Überlegungen zum Entstehungsort der Myonen

Mit der Messung im vorangegangenen Abschnitt haben wir gezeigt, dass die Myonen von oben kommen.

Nun stellt sich die Frage des genauen Entstehungsorts: Liegt er im Universum, also weit außerhalb unserer Atmosphäre oder in der Atmosphäre der Erde? Die Winkelmessung hat gezeigt, dass deutlich mehr Myonen vertikal einfallen als horizontal. Da für die aus horizontaler Richtung einfallenden Myonen der Weg durch die Atmosphäre um einige Kilometer länger ist als für die vertikal einfallenden (siehe Abb. 9), bedeutet dies, dass die Zahl der nachgewiesenen Myonen von ihrer Fluglänge durch die Atmosphäre beeinflusst wird. Dies deckt sich mit einer Beobachtung von Viktor Hess, der vor mehr als 100 Jahren mit einem Heißluftballon in über 5000 Meter Höhe stieg. Er beobachtete bei diesem Flug, dass die Intensität (also Zahl der Teilchen) der von ihm entdeckten kosmischen Höhenstrahlung mit steigender Höhe zunahm. Es muss also einen Effekt geben, der die Zahl der Myonen in der Atmosphäre auf einer Strecke von wenigen Kilometern abnehmen lässt.

Dafür kann man zwei Vermutungen aufstellen: Wenn es einen Prozess in der Erdatmosphäre geben sollte, der auf einer Strecke von wenigen Kilometern einen messbaren Teil der Myonanzahl absorbiert, würde es diese Abnahme erklären. In diesem Fall kann aus den Messungen nicht geschlossen werden, woher die Myonen kommen. Der Entstehungsort der Myonen könnte entweder weit weg im Universum liegen (wenn die Myonen lange genug leben, um uns zu erreichen) oder nahe bei uns in der Atmosphäre. Wenn Myonen allerdings instabil sind, sich also nach einiger Zeit in andere Teilchen umwandeln, könnten sie je nach Lebensdauer möglicherweise nur begrenzte Strecken von einigen Kilometern zurücklegen. Auch dies könnte die Abnahme ihrer Anzahl erklären, dann müssten sie allerdings in der Atmosphäre entstehen, damit auf der Erdoberfläche noch genügend für die Beobachtung übrig sind.

Zwischen diesen Erklärungsmöglichkeiten kann experimentell unterschieden werden, wenn Umwandlungen von Myonen entdeckt und ihre Lebensdauer gemessen wird.



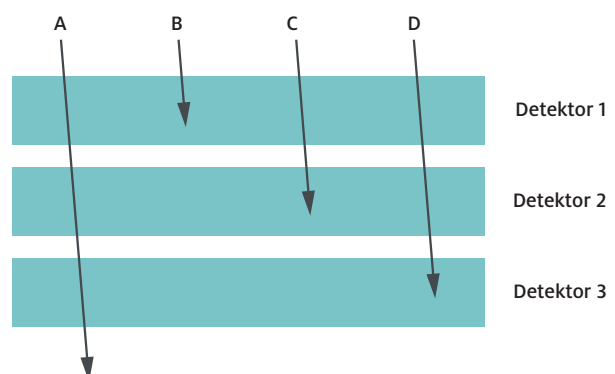
**Abb. 9:** Grafik zur Erläuterung der Wegstrecke der Myonen aus 10 km Höhe. Die Darstellung ist zur besseren Anschauung nicht maßstabsgerecht.

### 3.3.4 Messung der Lebensdauer von Myonen

Versuchen wir nun im nächsten Schritt herauszufinden, ob Myonen „zerfallen“. Wandeln sich Myonen auf ihrem Weg zum Erdboden in andere Teilchen um, so muss ihre Lebensdauer begrenzt sein. Um die Lebensdauer der Myonen zu untersuchen, werden Ereignisse betrachtet, bei denen ein Myon im Detektor zerfällt. In diesem Fall sollten kurz hintereinander zwei Signale in einem Detektor registriert werden: Dabei stammt das erste Signal vom ursprünglichen Myon und das zweite von seinem Umwandlungsprodukt.

Die Detektoren werden so eingestellt, dass mehrere Signale und ihr Zeitpunkt gemessen werden. Es muss bei dieser Messung sicher gestellt werden, dass zunächst ein Myon gemessen wird, das sich dann umwandelt.

Dazu müssen wir verschiedene Fälle betrachten um sicher zu stellen, dass wir nur Signale von Myonenzerfällen werten. In Abb. 10 sind vier mögliche Fälle dargestellt.



**Abb. 10:** Es werden die folgenden vier Fälle betrachtet: das Myon durchquert alle drei Detektoren (Fall A) oder es kommt in einem der Detektoren zur Ruhe und wandelt sich um (Fall B – D).

**Generell gilt für die nachfolgenden vier Fälle:**

- Die Detektoren messen nur geladene Teilchen.
- Ein Elektron kann zwar in einem Detektor registriert werden. Seine Energie reicht jedoch nicht aus, um einen zweiten zu passieren.
- Alpha-Teilchen könnten in einem Detektor ebenfalls einen Puls erzeugen. Durch den Zerfall von Radon in der Luft im Detektor könnten Alpha-Teilchen dort entstehen und ein Signal liefern. Alpha-Teilchen können jedoch nicht die Detektorhülle passieren, d. h. weder einfallen noch wieder austreten.
- Myonen können ausreichend Energie besitzen, um alle drei Detektoren zu durchqueren.

Im Fall A wird in allen drei Detektoren kurz hintereinander ein Signal registriert. Da nur ein Myon alle drei Detektoren nacheinander passieren kann, muss diese Spur zu einem Myon gehören. Das Teilchen ist zwar als Myon identifiziert, seine Umwandlung kann aber nicht beobachtet werden.

Im Fall B werden im oberen Detektor zwei Signale gemessen. Es kann aber nicht sicher gestellt werden, dass es sich hierbei um einen Myonenzerfall handelt. Zwei kurz hintereinander einfallende Elektronen oder entstehende Alpha-Teilchen könnten die gleichen Signale liefern.

Im Fall C wird im oberen Detektor ein Signal, im zweiten Detektor zwei Signale und im unteren Detektor kein Signal gemessen. Ein Teilchen muss also durch den oberen Detektor hindurchfliegen und sich dann im zweiten umwandeln. Elektronen und Alpha-Teilchen können wir bei unseren Betrachtungen ganz ausschließen. Nur ein Myon kann durch mehrere Detektoren fliegen. Daher ist es in diesem Fall sicher, dass wirklich ein Myonzerfall beobachtet wurde.

Im Fall D wird je ein Signal in den beiden oberen Detektoren und zwei Signale im unteren gemessen. In diesem Fall ist sicher, dass ein Myon alle Detektoren passiert hat. Das zweite Signal im unteren Detektor könnte jedoch auch von einem anderen Teilchen stammen, wie oben beschrieben. Dadurch kann nicht sicher gestellt werden, dass das Myon zerfallen ist. Deswegen wird auch dieser Fall aus den Messungen ausgeschlossen. Und es wird im Folgenden nur der Fall C betrachtet.

Der Zeitpunkt  $t_0$  des ersten Signals im Detektor 2 wird gemessen. Das zur Ruhe gekommene Myon wandelt sich dann in ein Elektron um. Dieses Elektron erzeugt im Detektor 2 ein zweites Signal, das zum Zeitpunkt  $t_e$  gemessen wird. Der Zeitunterschied zwischen den beiden Signalen ist  $\Delta t = t_e - t_0$ .

	A	B	C	D
<b>Detektor 1</b>	1 Signal	2 Signale	1 Signal	1 Signal
<b>Detektor 2</b>	1 Signal	kein Signal	2 Signale	1 Signal
<b>Detektor 3</b>	1 Signal	kein Signal	kein Signal	2 Signale
<b>Vorgang</b>	Myon durchquert alle 3 Detektoren	Myonumwandlung oder zwei andere Teilchen	Myon durchquert 1. Detektor und wandelt sich im 2. Detektor um	Myon durchquert 1. und 2. Detektor und wandelt sich im 3. Detektor um oder Fall A + Signal von anderem Teilchen
<b>Deutung</b>	Myon, aber keine Umwandlung	keine Identifikation des Teilchens möglich	Myonumwandlung	Myon, aber nicht sicher von Fall A unterscheidbar

**Tab. 1: Zusammenfassung der vier möglichen Fälle.**

Im nachfolgenden Diagramm ist die Anzahl der Ereignisse mit verschiedenen Zeitunterschieden  $\Delta t$  dargestellt. Der Versuch wird über mehrere Tage durchgeführt, um eine ausreichende Anzahl an Myonumwandlungen messen zu können.

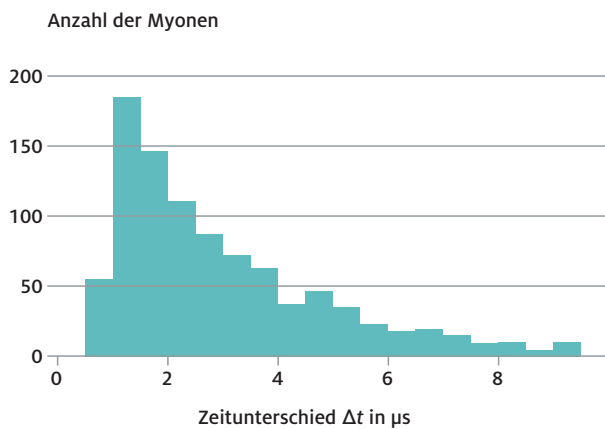


Abb. 11: Anzahl Ereignisse mit verschiedenen Zeitunterschieden  $\Delta t$ .

Die Verteilung der Zeitunterschiede folgt einer Exponentialfunktion. Für solche Teilchenumwandlungen gelten dieselben Gesetze wie für den Kernzerfall, daher wird auch hier von „Zerfallsgesetz“ gesprochen.

Das Ergebnis des Experiments lässt sich gut durch die Funktion<sup>14</sup>  $N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$ , die eine Zerfallskurve darstellt, beschreiben (siehe Abb. 11). Dabei kann die mittlere Lebensdauer  $\tau$  entweder über eine Kurvenanpassung an das Diagramm ermittelt werden oder über die Mittelung aller Messwerte der Lebensdauern von Null bis unendlich – was aber experimentell schwierig ist. Aus dem Diagramm lässt sich für das Myon eine mittlere Lebensdauer von  $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  bestimmen.

Die Messung der Lebensdauer ist unabhängig von der Dauer des Vorlebens der Myonen: Wie lange sie schon unterwegs waren, bevor sie im Detektor zur Ruhe gekommen sind, spielt für die Messung keine Rolle. Elementarteilchen – genau wie Atomkerne – altern nicht: zu jeder Zeit ist die Wahrscheinlichkeit für eine Umwandlung gleich groß.

Mithilfe der Geschwindigkeits- und Lebensdauermessung kann berechnet werden, welche Strecke  $\Delta x$  die Myonen zurücklegen, bevor sie sich umwandeln:  $\Delta x = v \cdot \Delta t = 660 \text{ m}$ .

Da die Myonen in der oberen Atmosphäre in 10 bis 15 km Höhe entstehen, sollten sie aus klassischer Sicht also gar nicht auf dem Erdboden ankommen. Und doch können sie mit dem CosMO-Experiment nachgewiesen werden. Wie kann das sein? Die Antwort liefert Einsteins Spezielle Relativitätstheorie, die wir in den nachfolgenden Aufgaben näher betrachten wollen.



#### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

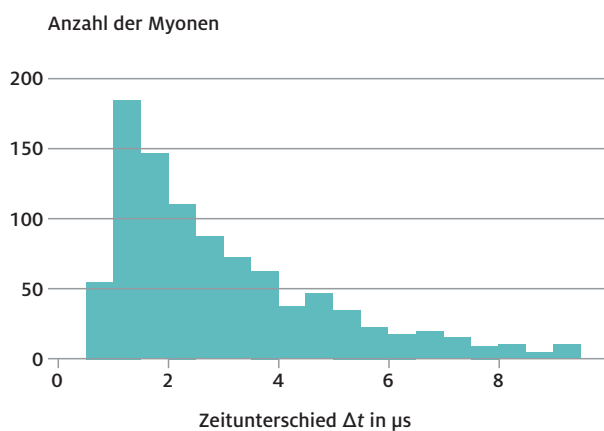
- Aus welcher Richtung erreichen uns die Myonen?
- Wo entstehen die Myonen?
- Haben Myonen eine endliche Lebensdauer?

<sup>14</sup> Diese Formel beschreibt dasselbe, wie das Zerfallsgesetz in der Form  $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$

# AUFGABEN

## 1 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER $\tau$

Betrachte die in der Abbildung dargestellte Verteilung der Zeitunterschiede zwischen den zwei Signalen mit der Anzahl Myonen  $N(t)$  mit  $\Delta t = t_e - t_o$ . Die mittlere Lebensdauer lässt sich daraus entweder durch eine Kurvenanpassung oder durch einfache Mittelwertbildung der Zerfallszeiten aller zur Ruhe gekommenen Myonen bestimmen. Warum ist die Methode der einfachen Mittelwertbildung jedoch nicht gut umzusetzen?



## 2 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

a) Ein Myon entsteht in einer Höhe  $h = 10 \text{ km}$  durch Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Atomkernen der Atmosphäre. Es bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von ca.  $v = 0,9998 \cdot c$  in Richtung der Erdoberfläche. Myonen wandeln sich nach kurzer Zeit um, bei Myonen wird eine mittlere Lebensdauer von ca.  $\tau = 2,2 \mu\text{s}$  gemessen. Berechne klassisch, wie weit ein Myon in  $2,2 \mu\text{s}$  fliegen kann.

b) Tatsächlich können Myonen auf der Erdoberfläche nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis steht scheinbar im Widerspruch zu dem Ergebnis aus Aufgabe 2a). Dieser Widerspruch kann mit einer relativistischen Betrachtung des Problems aufgelöst werden.

Beobachten wir von der Erde aus diese Teilchen, so können wir feststellen, dass im Vergleich zu unserer Zeit  $t$  ihre Zeit  $t_b$  (mit b für bewegt) langsamer vergeht. Oft wird dies mit der Aussage „bewegte Uhren gehen langsamer“ ausgedrückt:

$$t_b = t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = t \cdot 1/\gamma$$

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

wird der sogenannte Lorentzfaktor gekennzeichnet, eine in der gesamten Speziellen Relativitätstheorie wichtige Größe.

Begründe die Beziehung  $t > t_b$ ! Wie ändert sich  $\gamma$ , wenn sich die Geschwindigkeit  $v$  des Myons der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  nähert?

Das langsamere Gehen der bewegten Uhr wird Zeitdilatation genannt. Ein weiterer Begriff in der Speziellen Relativitätstheorie ist die Längenkontraktion. Sie beschreibt die gleiche Situation wie die Zeitdilatation aus einem anderem Blickwinkel:

Ein Beobachter **Bert** fliege mit den Myonen Richtung Erde mit. In seinem Bezugssystem ruhen die Myonen und er misst daher eine mittlere Lebensdauer  $\tau_{\text{Bert}} = 2,2 \mu\text{s}$ . Für einen Beobachter **Ernie** auf der Erde bewegt sich Bert aber mit sehr hoher Geschwindigkeit.

Berechne die Zeit, die demnach Beobachter **Ernie** für die mittlere Lebensdauer der Myonen gemessen hat.

c) Ein Beobachter **Bert**, der sich im System des Myons befindet und sich mit dem Myon bewegt, misst mit seiner Uhr eine durchschnittliche Lebensdauer der Myonen von  $\tau_{\text{Bert}} = 2,2 \mu\text{s}$ . Er kann auch die zurückgelegte Strecke  $l_{\text{Bert}}$  messen. Die von der Erde aus gemessene Strecke  $l$  ist größer als  $l_{\text{Bert}}$ . Die Beziehung lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$l = l_{\text{Bert}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = l_{\text{Bert}} \cdot \gamma$$

Berechne, welche Strecke  $l$  ein Myon innerhalb seiner mittleren Lebensdauer aus Sicht von Ernie (auf der Erde) zurücklegen kann. Kann es die Erdoberfläche erreichen?

d) Auch aus der Sicht vom bewegten Beobachter **Bert** erreichen die Myonen die Erdoberfläche. Wie sieht seine Rechnung aus?

# AUFGABEN

## 3 EXPERIMENT VON ROSSI UND HALL

Das Experiment von Rossi und Hall aus dem Jahr 1941 bestätigt die Zeitdilatation der Speziellen Relativitätstheorie.

In einer Höhe von 1910 m, auf dem Gipfel des Mount Washington, wurden mithilfe eines Detektors Myonen registriert, die sich mit einer Geschwindigkeit von  $v = 0,995 \cdot c$  bewegten. Rossi und Hall erhielten eine Zählrate von 563 Myonen pro Stunde.

Nun wurde die Messung in einer Höhe von 3 m über dem Meeresspiegel wiederholt und sie erhielten eine Zählrate von 408 Myonen pro Stunde.

- a) Berechne die Flugzeit der Myonen im Laborsystem.
- b) Aus einem Versuch mit Myonen wurde die mittlere Lebensdauer eines Myons mit  $\tau = 2,2 \mu\text{s}$  ermittelt. Bestimme das Zerfallsgesetz für Myonen mit dieser Angabe und berechne, wie viele Myonen theoretisch registriert werden sollten.
- c) Bestimme anhand der Messungen des Myonen-Experiments und dem Zerfallsgesetz die Zeit, die für das Myon vergangen ist.
- d) Bestimme den Lorentzfaktor  $\gamma$ , der aus diesem Experiment abgeleitet wurde und vergleiche mit dem theoretischen Wert, der sich aus der Lorentztransformation ergibt.



### TIPP:

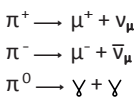
Siehe dazu auch

<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/erster-einblick/versuche#lightbox=/themenbereiche/erster-einblick/lb/erster-einblick-myonen-loesung>

### 3.4 SEKUNDÄRE KOSMISCHE STRALUNG

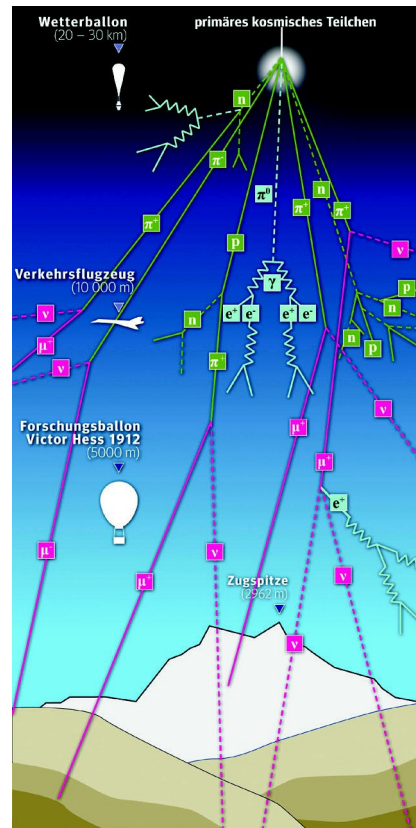
Im Folgenden geht es darum, wie die Myonen in der Atmosphäre entstehen. Es treffen ununterbrochen Teilchen aus dem Kosmos auf die Erdatmosphäre. Dabei können sie mit den Atomkernen der Luft wechselwirken und eine Vielzahl neuer Teilchen erzeugen.

Das Universum wird von der sogenannten primären kosmischen Strahlung, größtenteils Protonen, mit zum Teil sehr hohen Energien, durchströmt. Wenn ein Teilchen der kosmischen Strahlung auf einen Atomkern in der Erdatmosphäre trifft, kommt es zu einer Wechselwirkung, ganz analog zu den Proton-Proton Kollisionen an dem Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider LHC am CERN. Alles, was am LHC produziert wird, passiert also permanent auch in unserer Erdatmosphäre. In kosmischen Beschleunigern, wie z. B. Supernova-Explosionen, erreichen Teilchen allerdings weit höhere Energien als im weltgrößten Teilchenbeschleuniger. Dabei können je nach Energie des kosmischen Teilchens eines oder viele neue Teilchen erzeugt werden. Diese werden als sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet. Die hierbei am häufigsten erzeugten Teilchen sind die Pionen:  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  und  $\pi^0$ . Pionen haben eine sehr kurze Lebensdauer. Geladenen Pionen wandeln sich in Myonen  $\mu^-$  oder Anti-Myonen  $\mu^+$  und Myon-Neutrinos  $\nu_\mu$  oder Anti-Myon-Neutrinos  $\bar{\nu}_\mu$  um, während sich das neutrale Pion in zwei Photonen  $\gamma$  umwandelt:



Die so entstehenden Myonen können auf der Erdoberfläche nachgewiesen werden.

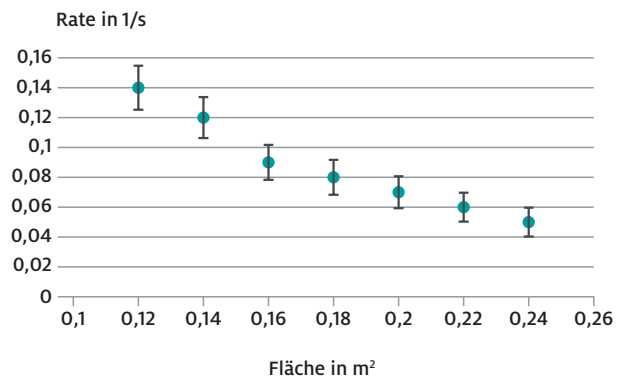
Trifft ein primäres kosmisches Teilchen mit sehr hoher Energie auf die Atmosphäre, kann es passieren, dass Pionen mit genügend Energie erzeugt werden, die ihrerseits wieder in Reaktionen mit Atomkernen in der Atmosphäre neue Teilchen erzeugen können. Auch die Photonen aus der Umwandlung der neutralen Pionen können bei genügend hoher Energie Elektron-Positron-Paare erzeugen. Es entsteht ein sogenannter ausgedehnter Luftschauer (vgl. Abb. 12), bei dem eine Vielzahl von Teilchen gleichzeitig über eine große Fläche verteilt auf der Erdoberfläche ankommen. Je höher die Energie des primären kosmischen Teilchens ist, desto mehr Sekundärteilchen werden in der Atmosphäre erzeugt und die Fläche, auf der die Sekundärteilchen auf dem Boden nachgewiesen werden können, wächst entsprechend.



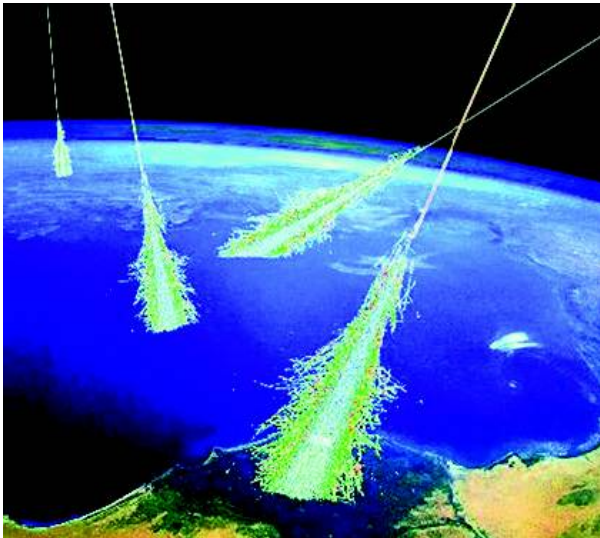
**Abb. 12:** Ein kosmisches Teilchen trifft auf die Erdatmosphäre und erzeugt einen Schauer aus neuen Teilchen. (Quelle: Netzwerk Teilchenwelten)

#### 3.4.1 Luftschauermessung mit dem CosMO-Experiment

Um ausgedehnte Luftschauer mit dem CosMO-Experiment nachzuweisen, werden die einzelnen Detektoren wieder in Koinzidenz ausgelesen. Diesmal werden die Detektoren jedoch nicht übereinander, sondern nebeneinander positioniert. So kann registriert werden, wenn mehrere Teilchen gleichzeitig über eine durch den Abstand der Detektoren gegebene Fläche auf der Erde ankommen. Indem der Abstand zwischen den Detektoren vergrößert wird, variiert man die gegebene Fläche. Das Messergebnis ist in Abb. 13 dargestellt.



**Abb. 13:** Schauermessung: Luftschauerrate in Abhängigkeit der Fläche, die von den Detektoren aufgespannt wird.



**Abb. 14:** Grafische Darstellung von Luftschauern, die durch kosmische Strahlung erzeugt werden.

(Quelle: Simon Swordy/University of Chicago, NASA)

Die Fläche, auf der die Schauerteilchen am Boden ankommen, ist ein Maß für die Energie des primären kosmischen Teilchens. Es wird beobachtet, dass ausgedehnte Luftschauer (wie in Abb. 14) viel seltener vorkommen und dass die Rate kosmischer Teilchen mit wachsender Fläche stark abnimmt. Es gibt also weniger hochenergetische kosmische Teilchen als niederenergetische.

Aus den Forschungsergebnissen der letzten Jahre ist bekannt, dass primäre kosmische Teilchen Energien bis über 100 EeV ( $= 10^{20}$  eV) haben können, das entspricht der kinetischen Energie eines stark geschlagenen Tennisballs<sup>15</sup>.

Das ist etwa zehn Millionen Mal höher als die Energie der Protonenstrahlen am Large Hadron Collider LHC. Solche Teilchen sind allerdings sehr selten. Mit so hohen Energien erreicht etwa 1 Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert die Erde. Um diese Teilchen überhaupt nachzuweisen und zu untersuchen, werden riesige Detektoren benötigt, wie z. B. das Pierre Auger Observatorium in Argentinien, das auf einer Fläche von 3000 km<sup>2</sup> ausgedehnte Luftschauer messen kann. Das ist eine Fläche, die drei mal größer ist als Berlin.

Während die kosmische Strahlung bei niedrigen Energien hauptsächlich aus Protonen besteht, ist ihre Zusammensetzung bei den höchsten Energien noch nicht endgültig geklärt. Den Hauptteil bilden leichte Atomkerne von Wasserstoff (Protonen) bis Eisen, die in Sternen gebildet werden können. Es wurde auch untersucht, ob Photonen vorkommen; sie können aber höchstens einen sehr kleinen Teil der Strahlung ausmachen. Eine zukünftige genauere Messung der Zusammensetzung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung wird wichtige Hinweise auf ihre Quellen geben.



#### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Welche beiden Formen der kosmischen Strahlung gibt es?
- Wie entsteht die sekundäre kosmische Strahlung?

#### INFOBOX: STECKBRIEF „MYON“

Das Myon wird auch als Geschwisterpartikel des Elektrons bezeichnet, da es die gleichen Eigenschaften (elektrische, schwache und starke Ladung, Spin) wie das Elektron besitzt, jedoch eine 207mal größere Masse. Daher kann es sich in ein Elektron, ein Myon-Neutrino und ein Elektron-Antineutrino umwandeln. Die mittlere Lebensdauer beträgt  $2,2 \cdot 10^{-6}$  s. Elektron, Myon und Tauon bilden zusammen mit den zugehörigen Neutrinos die Teilchenklasse der Leptonen.

Myonen werden in Magnetfeldern durch die Lorentzkraft abgelenkt. Sehr energiereiche Myonen durchdringen mühelos auch Gebäude und Erdreich.

Myonen entstehen in einer Höhe von etwa 10 bis 15 km durch Reaktion der aus dem All kommenden primären kosmischen Strahlung mit Atomkernen der Erdatmosphäre. Je nach Energie des kosmischen Teilchens können bei der Wechselwirkung ein oder viele neue Teilchen erzeugt werden. Die am häufigsten erzeugten Teilchen sind Pionen. Sie haben eine sehr kurze Lebensdauer und wandeln sich u. a. in Myonen um. Die so entstehenden Myonen können auf der Erdoberfläche nachgewiesen werden.

Myonen wurden 1936 erstmals in der sekundären kosmischen Strahlung mit Hilfe einer Nebelkammer entdeckt. Die Entdeckung war so überraschend, dass sie von dem bekannten Physiker Isidor Isaac Rabi (1898 – 1988, amerikanischer Physiker, Entdecker der Kernspinresonanz) mit den Worten kommentiert wurde: „Who ordered that?“ - Wer hat das bestellt?

## AUFGABE

#### Film: The fantastic voyage of Nino the Neutrino

Schau dir den Film *The fantastic voyage of Nino the Neutrino* an und beantworte folgende Fragen:

- Welche Teilchen sind am Anfang vorhanden?
- Welche Teilchen entstehen aus den anfangs vorhandenen Teilchen im Verlauf der Reise?



**HINWEIS:** <http://ippog.web.cern.ch/resources/2012/fantastic-voyage-nino-neutrino-sun-earth>

Filmlänge: 5:49 min, Sprache: Italienisch mit englischen Untertiteln

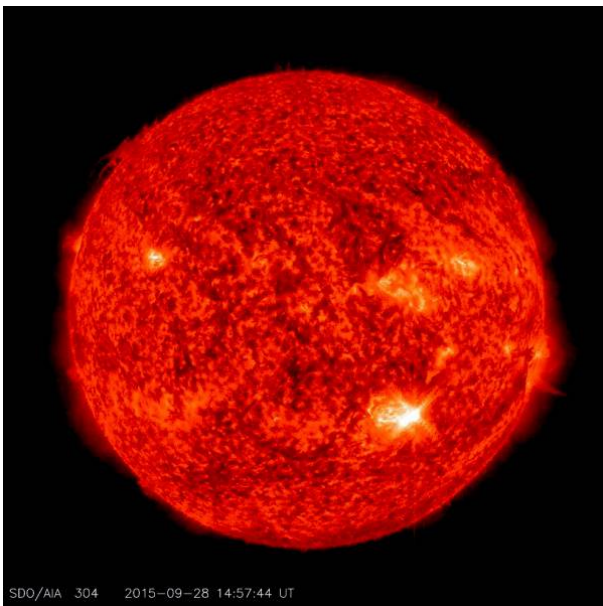
<sup>15</sup> 1 eV = 1 Elektronenvolt ist die Energiemenge, um welche die kinetische Energie eines Teilchens mit der elektrischen Ladung 1 zunimmt, wenn es eine Beschleunigungsspannung von 1 Volt durchläuft. E steht für die Vorsilbe „Exa“, das entspricht  $1 \cdot 10^{18}$ .

### 3.5 QUELLEN PRIMÄRER KOSMISCHER STRALUNG

Die kosmische Strahlung wurde zwar schon vor über 100 Jahren entdeckt, doch sind viele grundlegende Fragen auch heute nur teilweise geklärt oder noch unbeantwortet. So wird auch heute noch nach Quellen der kosmischen Strahlung gesucht und es werden die Beschleunigungsmechanismen, die solch hochenergetische Teilchen erzeugen, erforscht.

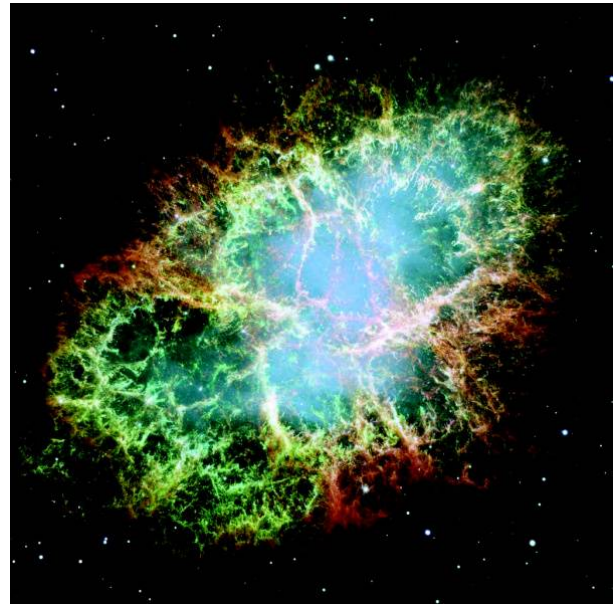
Die geladenen kosmischen Teilchen werden auf ihrem Weg von der Quelle zur Erde durch Magnetfelder abgelenkt. Deshalb kann man bei der Messung auf der Erde nicht mehr auf ihren Ursprungsort schließen. Anhand der Energie, die ein Teilchen der primären kosmischen Strahlung besitzt, können die Astroteilchenphysiker aber abschätzen, welches die wahrscheinlichsten Quellen sind. Es werden folgende drei Unterscheidungen getroffen:

- Teilchen mit einer Energie von bis zu  $10^9$  eV stammen größtenteils von der Sonne. Der Sonnenwind und Sonneneruptionen beschleunigen die Teilchen, sodass sie unsere Erdatmosphäre erreichen können (siehe Abb. 15).
- Teilchenenergien von  $10^{10}$  bis  $10^{16}$  eV werden in galaktischen Quellen in der Milchstraße erzeugt. Als wahrscheinlichste Beschleuniger gelten Pulsare, Doppelsternsysteme und die Druckwellen von Supernovae (siehe Abb. 16).
- Teilchen mit Energien im Bereich  $10^{16}$  bis  $10^{20}$  eV sind sehr selten und werden extragalaktischen Quellen im Weltall zugewiesen. Mechanismen in aktiven Galaxienkernen könnten die Teilchen auf derartig hohe Energien beschleunigen. Wie Teilchen solch hohe Energien erreichen können und ob diese Energie eine obere Grenze darstellt, ist nicht eindeutig geklärt (siehe Abb. 17).



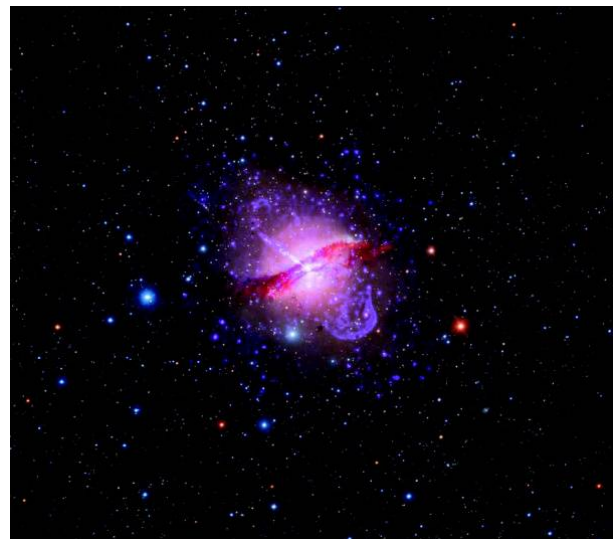
**Abb. 15:** Aufnahme von der Sonnenoberfläche

(Quelle: NASA/SDO)



**Abb. 16:** Krebsnebel: Reste einer Supernova, die von der Erde aus im Jahr 1054 zu beobachten war. Entfernung: 6300 Lichtjahre.

(Quelle: NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU))



**Abb. 17:** Die aktive Galaxie Centaurus A. In ihrem Zentrum befindet sich ein 55 Millionen Sonnenmassen schweres schwarzes Loch.

(Quelle: X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: Rolf Olsen; Infrared: NASA/JPL-Caltech)

#### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Wie oder wonach werden die Quellen klassifiziert, die die Astroteilchenphysiker beobachten bzw. messen?



### 3.6 AKTUELLE FORSCHUNG

**Das neu gewonnene Wissen aus den Beschleunigerexperimenten half, die kosmische Strahlung besser zu verstehen. Heute möchten die Wissenschaftler herausfinden, welche Quellen die kosmischen Teilchen erzeugen und welche Beschleunigungsmechanismen den Teilchen zu derart hohen Energien verhelfen.**

Bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts spielten die aus dem fernen Kosmos ständig auf uns einfallenden Teilchen eine führende Rolle bei der Erforschung der Elementarteilchen. Viele neue Teilchen wurden in der kosmischen Strahlung entdeckt und untersucht. Mit dem technologischen Fortschritt im Bau von Beschleunigeranlagen wurde es jedoch möglich, Teilchen in gezielten Experimenten an Beschleunigern zu beobachten. Die Eigenschaften von Teilchen ließen sich so wesentlich genauer untersuchen und man musste nicht mehr auf das zufällige Eintreffen von Teilchen aus dem Kosmos warten. Neue Teilchen, ihre Wechselwirkungen und Zerfalleigenschaften wurden so nach und nach entdeckt. Am Large Hadron Collider LHC am CERN haben Teilchenphysiker mit der Entdeckung eines neuen Teilchens, einem Higgs-Boson, im Jahr 2012 einen großen Durchbruch gefeiert. Für die theoretische Überlegungen und Berechnungen, die die Existenz dieses Teilchens vorausgesagt haben, erhielten der Belgier François Englert und der Brite Peter Higgs im Jahr 2013 den Physik-Nobelpreis.

Heute lässt sich die Astroteilchenphysik vielleicht am besten durch die wissenschaftlichen Fragen charakterisieren, die sie beantworten will<sup>16</sup>:

- Wie entstand das Universum, und warum besteht es nur aus Materie und nicht zu gleichen Teilen aus Materie und Antimaterie?
- Woraus besteht die rätselhafte Dunkle Materie?
- Welche Rolle spielen Neutrinos für die Entwicklung des Universums?
- Was können wir mithilfe von Neutrinos über das Innere der Sonne und der Erde sowie über Sternexplosionen erfahren?
- Was ist der Ursprung der kosmischen Strahlung? Wie sieht die Landkarte des Universums bei höchsten Energien aus?
- Was können uns Gravitationswellen über kosmische Prozesse und über die Natur der Gravitationskraft sagen?

Um diesen Grundlagen unserer Existenz auf die Spur zu kommen, bauen Astroteilchenphysiker weltweit immer größere und sensitivere Experimente, wie z. B. IceCube am Südpol, MAGIC auf La Palma, H.E.S.S. in Namibia oder das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien. Sie nutzen die unterschiedlichen Himmelsboten wie Neutrinos, hochenergetische Gammastrahlung oder Protonen bzw. schwere Atomkerne, um neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Spezielle Informationen zu den einzelnen Experimenten finden sich unter:

- IceCube-Observatorium am Südpol  
<http://icecube.wisc.edu/>
- MAGIC-Teleskope auf La Palma  
<https://magic.mpp.mpg.de/>
- H.E.S.S.-Teleskope in Namibia  
<https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS>
- Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien  
<http://www.auger.org>



#### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Welche wissenschaftlichen Fragestellungen bilden heute das Fundament für die tägliche Arbeit der Astroteilchenphysiker?

# 4 LÖSUNGEN

## LÖSUNGEN ZU AUFGABEN AUS KAPITEL 3.3

### Aufgabe 1: Experimentelle Ermittlung der mittleren Lebensdauer $\tau$

Sowohl die sehr langen als auch die sehr kurzen Lebensdauern sind experimentell nicht messbar. Bei einer langen Lebensdauer müsste man für die Messung unendlich lang warten, bei einer sehr kurzen Lebensdauer kann man die zwei Signale nicht trennen.

### Aufgabe 2: Berechnung der Lebensdauer von Myonen

$$a) \quad s = v \cdot t = 0,9998 \cdot c \cdot 2,2 \mu\text{s} = 660 \text{ m}$$

Die Myonen müssten aus klassischer Sicht längst zerfallen sein, bevor sie die Erdoberfläche erreichen können.

$$b) \quad t = t_{\text{Bert}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 50 \cdot t_{\text{Bert}} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Ernie auf der Erde misst für die mittlere Lebensdauer der bewegten Myonen eine 50-mal so lange Zeit.

c) Aus Sicht von Ernie auf der Erde kann ein Myon deshalb im Mittel eine Strecke von  $50 \cdot 660 \text{ m} = 33 \text{ km}$  zurücklegen. Die Myonen werden die Erde erreichen.

d) Im Bezugssystem des bewegten Beobachters **Bert** ruhen die Myonen und haben eine Lebensdauer von  $2,2 \mu\text{s}$ . Die Erde nähert sich mit  $v = 0,9998 \cdot c$ . Wegen der Längenkontraktion nimmt **Bert** Längen, die sich in einem relativ zu ihm bewegten Bezugssystem befinden, verkürzt wahr. Er ermittelt einen Abstand zur Erde von:

$$h_{\text{Bert}} = h \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 200 \text{ m}$$

Da aus seiner Sicht die Myonen während ihrer Lebensdauer 660 m zurücklegen können, erreichen sie leicht die Erdoberfläche.

### Aufgabe 3: Experiment von Rossi und Hall

$$a) \quad t_{\text{Flug}} = \frac{s}{v} = \frac{1910 \text{ m} - 3 \text{ m}}{0,995 \cdot c} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 6,4 \mu\text{s}$$

b) Zerfallsgesetz allgemein:  $N: t \mapsto N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

$$\text{Zerfallsgesetz konkret: } N: t \mapsto 563 \cdot e^{-\frac{t}{2,2 \mu\text{s}}}$$

$$\text{Anzahl der Myonen: } N(6,4 \mu\text{s}) = 563 \cdot e^{-\frac{6,4 \mu\text{s}}{2,2 \mu\text{s}}} = 31$$

c) Mittels  $N: t \mapsto 563 \cdot e^{-\frac{t}{2,2 \mu\text{s}}}$  erhalten wir:

$$N(t) = 408 \text{ eingesetzt in den Term}$$

$$\text{des Zerfallsgesetzes: } 408 = 563 \cdot e^{-\frac{t_b}{2,2 \mu\text{s}}}$$

$$\text{Nach } t \text{ auflösen: } \frac{408}{563} = e^{-\frac{t_b}{2,2 \mu\text{s}}}$$

$$\ln \frac{408}{563} = \ln e^{-\frac{t_b}{2,2 \mu\text{s}}} = -\frac{t_b}{2,2 \mu\text{s}}$$

$$t_b = -\ln \frac{408}{563} \cdot 2,2 \mu\text{s} = 0,71 \mu\text{s}, \text{ also weit unter der mittleren Lebensdauer des Myons.}$$

d) Bestimmung des Lorentzfaktors mittels

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

$$\gamma = \frac{t}{t_b} = \frac{6,4 \mu\text{s}}{0,71 \mu\text{s}} = 9,0$$

Bestimmung des theoretischen Werts:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,9995 \cdot c)^2}{c^2}}} = 10,0$$

## LÖSUNGEN ZU AUFGABEN AUS KAPITEL 3.4

### Aufgabe zum Film: The fantastic voyage of Nino the Neutrino

a) Am Anfang gibt es Neutrinos, Protonen und Photonen.

b) Nach der Reaktion der Protonen mit den Atomen in der Erdatmosphäre entstehen Pionen, die in Myonen und Neutrinos zerfallen. Wer ganz genau hinsieht, stellt fest, dass eine Pion-Sorte in zwei Photonen zerfällt. Die Myonen erreichen die Erdoberfläche und dringen in die Erde hinein, dort wandeln auch sie sich um. Durch die Erde hindurch fliegen nur die Neutrinos.

# 5 ERGÄNZENDE MATERIALIEN

## 5.1 MATERIAL ZU NEBELKAMMER UND BLASENKAMMER

### Material auf LEIFiPhysik

<http://www.leifiphysik.de/content/radioaktivitaet-einfuehrung-nebelkammer-schulversuch>

### Material auf Netzwerk Teilchenwelt

Myonen lassen sich auf der Erde auch mit einer selbst gebauten Nebelkammer nachweisen. Eine Anleitung zum Selbstbau einer Nebelkammer befindet sich in der „Materialsammlung für Lehrkräfte“ des Netzwerk Teilchenwelt.

<http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/selbstbau-einer-nebelkammer/>

### Auswertung von Blasenkamerbildern

[https://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble\\_chambers/BCwebsite](https://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite)

<https://sites.google.com/site/306physics/particlephysics/bubblechamberexercises>

## 5.2 DAS KAMIOKANNEN-EXPERIMENT

### Kosmische Strahlen in einer Kaffeekanne nachweisen

<http://kamiokanne.uni-goettingen.de/>

[http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische-teilchen/schuelerexperimente/kamiokannen\\_experiment/index\\_ger.html](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische-teilchen/schuelerexperimente/kamiokannen_experiment/index_ger.html)

## 5.3 PHOTOMULTIPLIER

### Aufbau und Funktionsweise eines Photomultipliers

<http://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

<http://psi.physik.kit.edu/103.php>

### Speziell beim CosMO-Experiment verwendete Photodetektoren

<http://de.wikipedia.org/wiki/Avalanche-Photodiode>

## 5.4 DAS MYONEN-EXPERIMENT AM CERN

### Material auf LEIFiPhysik

<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/spezielle-relativitaets-theorie/versuche#Myonen-Experiment%20in%20Cern>

## 5.5 HISTORIE ZUR ENTDECKUNG DER KOSMISCHEN STRAHLUNG

### Artikel auf Welt der Physik

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/entdeckung-der-kosmischen-strahlung/>

### Artikel im Physik Journal

<http://astro.desy.de/outreach/e111525/e111645/EinHhenflugderPhysik.pdf>

### Broschüre (engl.)

[http://www.zeuthen.desy.de/exps/2012\\_VictorHess/booklet/broschuere\\_hess\\_conference\\_web.pdf](http://www.zeuthen.desy.de/exps/2012_VictorHess/booklet/broschuere_hess_conference_web.pdf)

## 5.6 KOSMISCHE STRAHLUNG

### Online-Informationen für den Schulunterricht ausgearbeitet

<http://education.web.cern.ch/education/Chapter2/Teaching/cosmic.html>

## 5.7 QUELLEN KOSMISCHER STRAHLUNG

### Portal Welt der Physik

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro>

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/>

### Bildergalerien von Quellen

<http://www.eso.org/public/images/>

<http://hubblesite.org/gallery/>

<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/home/som/>

## 5.8 AKTUELLE FORSCHUNGSPROJEKTE

### Portal Welt der Physik

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/detektoren>

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/>

### KAT – Komitee für Astroteilchenphysik

[http://www.astroteilchenphysik.de/KAT\\_Webseiten/Offentlichkeitsarbeit\\_files/neue\\_fenster\\_zum\\_kosmos.pdf](http://www.astroteilchenphysik.de/KAT_Webseiten/Offentlichkeitsarbeit_files/neue_fenster_zum_kosmos.pdf)

## 6 REFERENZEN

<http://www.teilchenwelt.de>

<http://www.leifiphysik.de>

<http://www.weltderphysik.de>

[http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische\\_teilchen](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen)

<http://kworkquark.desy.de>

[http://www.astroteilchenphysik.de/KAT\\_Webseiten/Offentlichkeitsarbeit\\_files/neue\\_fenster\\_zum\\_kosmos.pdf](http://www.astroteilchenphysik.de/KAT_Webseiten/Offentlichkeitsarbeit_files/neue_fenster_zum_kosmos.pdf)

Bachelorarbeit „Das Astroteilchen-Projekt im Netzwerk Teilchenwelt – Messung der Lebensdauer kosmischer Myonen mit dem CosMO-Experiment“, David Winderlich, Berlin, 2014.

Bachelorarbeit „Das Astroteilchen-Projekt im Netzwerk Teilchenwelt: Messung der Geschwindigkeit kosmischer Myonen mit dem CosMO-Experiment“, Sarah Heydemann, Berlin, 2014.

Broschüre *Nebelspuren – Was sie uns über Radioaktivität verraten*, Herausgeber: Forschungszentrum Karlsruhe.



---

## DIE JOACHIM HERZ STIFTUNG

Die gemeinnützige, wirtschaftlich unabhängige und politisch neutrale Joachim Herz Stiftung fördert Bildung, Wissenschaft und Forschung in den Programmbereichen Naturwissenschaften, Wirtschaft und Persönlichkeitsbildung. Die Hamburger Stiftung wurde im Sommer 2008 gegründet. [www.joachim-herz-stiftung.de](http://www.joachim-herz-stiftung.de)

Der Programmbereich Naturwissenschaften führt Kinder und Jugendliche an die Naturwissenschaften heran und fördert den wissenschaftlichen Nachwuchs auf dem Weg in die Wissenschaftskarriere. Denn naturwissenschaftliche Allgemeinbildung und das Interesse an neuen Forschungsfragen sind Voraussetzungen für individuelle Urteilsfähigkeit und gesellschaftliche Weiterentwicklung.

Ziel des Themenfeldes „Naturwissenschaften vermitteln“ ist es, den naturwissenschaftlichen Unterricht durch zeitgemäße Materialien und flankierende Lehrerfortbildungen zu stärken. Gemeinsam mit dem Netzwerk Teilchenwelt hat die Joachim Herz Stiftung in enger Abstimmung mit Lehrkräften, Didaktikern und Wissenschaftlern Unterrichtsmaterialien zum Thema Teilchenphysik entwickelt, um aktuelle und forschungsnaher Fragestellungen aus den Naturwissenschaften für die Schule aufzubereiten. Die entstandenen Materialien stehen unter [www.leifphysik.de/tp](http://www.leifphysik.de/tp) und [www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de) kostenfrei zum Download zur Verfügung.

### Für weitere Informationen zum Unterrichtsmaterial Teilchenphysik und zu LEIFphysik schreiben Sie uns:

leifi@joachim-herz-stiftung.de  
Joachim Herz Stiftung  
Programmbereich Naturwissenschaften  
Langenhorner Chaussee 384  
22419 Hamburg

Die gemeinnützige, wirtschaftlich unabhängige und politisch neutrale Joachim Herz Stiftung fördert Bildung, Wissenschaft und Forschung in den Programmbereichen Naturwissenschaften, Wirtschaft und Persönlichkeitsbildung. Die Hamburger Stiftung wurde im Sommer 2008 gegründet. [www.joachim-herz-stiftung.de](http://www.joachim-herz-stiftung.de)

Der Programmbereich Naturwissenschaften führt Kinder und Jugendliche an die Naturwissenschaften heran und fördert den wissenschaftlichen Nachwuchs auf dem Weg in die Wissenschaftskarriere. Denn naturwissenschaftliche Allgemeinbildung und das Interesse an neuen Forschungsfragen sind Voraussetzungen für individuelle Urteilsfähigkeit und gesellschaftliche Weiterentwicklung.

Ziel des Themenfeldes „Naturwissenschaften vermitteln“ ist es, den naturwissenschaftlichen Unterricht durch zeitgemäße Materialien und flankierende Lehrerfortbildungen zu stärken. Gemeinsam mit dem Netzwerk Teilchenwelt hat die Joachim Herz Stiftung in enger Abstimmung mit Lehrkräften, Didaktikern und Wissenschaftlern Unterrichtsmaterialien zum Thema Teilchenphysik entwickelt, um aktuelle und forschungsnahe Fragestellungen aus den Naturwissenschaften für die Schule aufzubereiten. Die entstandenen Materialien stehen unter [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp) und [www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de) kostenfrei zum Download zur Verfügung.