

Maturitätsarbeit an der Kantonsschule Oerlikon Zürich

Koinzidenzmessung der kosmischen Höhenstrahlung

Nicolas Camenzind Klasse 6p

21. Januar 2008

betreut durch Christian Prim dipl. umweltnatw. ETH; Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Der Teilchenzoo	5
2.1	Der Begriff elementar	5
2.2	Das Schalenmodell	5
2.3	Das Elektron, ein Lepton	7
2.4	Antimaterie	8
2.5	Die Quarks	9
2.6	Hadronen, Mesonen und Baryonen	10
2.7	Fermionen und Bosonen	10
2.8	Die vier Grundkräfte der Physik	11
2.8.1	Die elektromagnetische Kraft	11
2.8.2	Die Starke Kraft	12
2.8.3	Die Schwache Kraft	13
2.8.4	Die Gravitation	14
2.8.5	Die vier Grundkräfte im Vergleich	15
2.9	Das Standardmodell	15
3	Die kosmische Strahlung	17
3.1	Elementhäufigkeit der primären kosmischen Strahlung	17
3.2	Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung	18
3.3	Die sekundäre kosmische Strahlung	20
3.4	Die drei Komponenten eines Luftschauers	20
4	Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT)	24
4.1	Inertialsystem, Raum und Zeit	24
4.2	Das Michelson Morley Experiment	25
4.3	Einsteins Postulate	26
4.4	Der Begriff der Gleichzeitigkeit	26
4.5	Die Zeitdilatation	27
4.6	Die Längenkontraktion	29
4.7	Die berühmteste Gleichung der Physik	30
5	Die verschiedenen Experimentbestandteile	32

Inhaltsverzeichnis

5.1	Ziel	32
5.2	Szintillator	32
5.2.1	Organische Szintillatoren	32
5.2.1.1	Organische Kristalle	33
5.2.1.2	Organische Flüssigkeiten	34
5.2.1.3	Plastik Szintillatoren	34
5.2.2	Gas Szintillatoren	34
5.2.3	Essentielle Eigenschaften von Szintillatoren	35
5.3	Photonmultiplier (PM)	35
5.3.1	Wichtiger Parameter im Zusammenhang mit Photonmultipliern	38
5.4	NIM Technologie	40
5.4.1	Hochspannungsmodul	40
5.4.2	Scaler (Zähler)	41
5.4.3	Diskriminator	41
5.4.4	Koinzidenzmodul	42
6	Kalibrierung	43
6.1	Einstellen der Idealspannung	43
6.2	Schwelleneinstellung des Diskriminators	45
6.3	Effektivität des Szintillators	46
7	Experimentaufbau	48
8	Die drei Experimente	50
8.1	Koinzidenzratemessung der kosmischen Höhenstrahlung	50
8.1.1	Analyse zu Experiment 1	51
8.2	Koinzidenzmessung der Materialabhängigkeit	53
8.2.1	Analyse zu Experiment 2	55
8.3	Messung von EAS	56
8.3.1	Analyse zu Experiment 3	58
9	Fazit	59

1 Einleitung

Meine Maturarbeit beschäftigt sich mit der Messung der kosmischen Höhenstrahlung. Dieses Thema fällt in den Bereich der Teilchenphysik, welches ein Gebiet ist, das mich enorm interessiert. Ich wollte mit diesen Experimenten einen Einblick in dieses überaus spannende Gebiet der Physik erlangen. Deshalb war es notwendig, sich zuerst mit den physikalischen Grundlagen auseinander zu setzen, bevor dann die Experimente durchgeführt werden konnten.

In einem ersten Teil werden die Grundlagen behandelt, die zum Verstehen der Experimente notwendig sind. Im zweiten Teil werden die Experimente selber, deren Durchführung und Analyse beschrieben.

Ziel war es, eine Arbeit zu schreiben, die die theoretischen Grundlagen einführt, in dessen Mittelpunkt aber eine Experimentreihe steht. Dank der Möglichkeit meine Experimente am Paul Scherrer Institut (PSI) durchführen zu können, war es mir möglich meine Ziele umzusetzen.

Persönlich war es eine wertvolle Erfahrung eine solche Arbeit zu verfassen und meine Experimente durchführen zu können. Ein Höhepunkt war auch der Aufenthalt am PSI. Ein besonderer Dank geht an Prof. Urs Langenegger und Doktorandin Sarah Dambach, die mich nicht nur während meinem Aufenthalt am PSI unterstützt haben. Sie ermöglichten mir einen Einblick in den Bereich der Teilchenphysik zu erlangen, den ich sonst wohl nicht in diesem Umfang erlangt hätte. Ebenfalls ein Dank geht an Herrn Christian Prim, der mir während der gesamten Zeit für Fragen zur Seite stand. Zuletzt möchte ich meiner Familie danken, die mich während der ganzen Zeit begleitet und unterstützt hat.

2 Der Teilchenzoo

2.1 Der Begriff elementar

Befasst man sich mit Elementarteilchen, muss zuerst Klarheit darüber herrschen, was elementar bedeutet. Gemäss Definition ist ein Teilchen dann elementar, wenn es keine innere Struktur hat, also nicht aus anderen Teilchen aufgebaut ist. Das Streben nach dem Elementaren war schon früher von grosser Bedeutung. Im Altertum glaubte man, dass sich die Welt aus den Elementen Feuer, Luft, Wasser und Erde zusammensetzen lässt. Empedokles war der Begründer dieser Theorie. Demokritos war der Erste, der dem heutigen Wissen nahe kam. Er glaubte, dass die Atome (vom Griechischen „atomos“, was übersetzt unzerlegbar bedeutet) die Bausteine der Materie seien. Alles könne man aus Atomen und dem leeren Raum zusammensetzen, glaubte er.

2.2 Das Schalenmodell

Der Grundstein für die heutigen Atommodelle legte das Rutherfordsche Atommodell (Kern/Hülle Modell) anfangs des 20. Jahrhunderts. Aus diesem ging hervor, dass ein Atom einen schweren Kern haben muss, der von einer Hülle umgeben ist. Dabei ist der Kern positiv geladen, die Hülle hingegen negativ. Der Kern hat einen ungefähren Durchmesser von $10^{-15} - 10^{-14}$ m und ist aufgebaut aus einfach positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Die Hülle hat einen Durchmesser von $10^{-10} - 10^{-9}$ m und besteht aus einfach negativ geladenen Elektronen, wie man später durch weitere Experimente herausfand. Normalerweise sind Atome immer ungeladen, das heisst sie besitzen sicher gleich viele Elektronen wie Protonen. Lange Zeit galten diese drei Teilchen als Elementarteilchen, was aber gemäss heutigem Wissen nur auf das Elektron zutrifft. Die

Tabelle 2.1: Die wichtigsten Eigenschaften dieser drei Teilchen

Name	Symbol	Ladung [e]	Masse [u]
Elektron	e^-	Einfach negativ	$\sim \frac{1}{2000} u$
Proton	p^+	Einfach positiv	$1 u$
Neutron	n^0	0	$1 u$

elektrische Ladung ist immer ein Vielfaches der Elementarladung [HKhLM⁺03] e , wobei e eine Naturkonstante ist und den Wert $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C hat. Für die Masse nimmt man die atomare Masseneinheit [HKhLM⁺03] u (Unit). Diese ist ebenfalls durch eine Naturkonstante gegeben. Dabei hat die atomare Masseneinheit den Wert $u = 1.660540 \cdot 10^{-24}$ g. Das Schalenmodell ist folgendermassen aufgebaut: Um einen Kern, bestehend aus Protonen und Neutronen liegen konzentrische, kreisähnliche Bahnen, auf denen sich die Elektronen bewegen. Diese Bahnen werden als Schalen bezeichnet. Jede Schale hat eine Ordnungszahl, beginnend mit der Innersten ($n=1$). Dabei ist n die Hauptquantenzahl [HKhLM⁺03, S. 390 ff]. Wenn man sich dieses Modell etwas genauer ansieht, erkennt

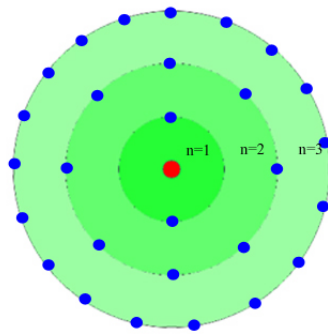


Abbildung 2.1: Das Schalenmodell. Elektronen sind blau gekennzeichnet und der Kern rot (bestehend aus Protonen und Neutronen)

man, dass die Anzahl von Elektronen schalenabhängig ist. Die Maximalanzahl an Elektronen pro Schale ergibt sich aus der Formel [HKhLM⁺03]: $n = 2n^2$. Von Bedeutung ist, dass das Schalenmodell eigentlich nicht ganz korrekt ist. Gemäss heutigen Kenntnissen der Quantenphysik ist bekannt, dass die Position des Elektrons innerhalb des Atoms nicht genau bestimmt werden kann. Dies ist in der Unschärferelation [HKhLM⁺03] von Werner Heisenberg beschrieben:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (2.1)$$

Hier ist Δx die Unsicherheit des Ortes des Quantenobjekts und Δp die Unsicherheit des Impulses. Demzufolge bewegen sich Elektronen auch nicht auf Kreisbahnen. Man kann lediglich die Wahrscheinlichkeit des Aufenthaltsortes mit einer gewissen Genauigkeit angeben. Nach der Unschärferelation wird der Ort des Quantenobjekts umso ungenauer je genauer der Impuls ermittelt wird und umgekehrt. Trotzdem kann dieses Modell eine sehr nützliche Vorstellung vom so genannten Quantensprung geben, auf den später eingegangen wird.

2.3 Das Elektron, ein Lepton

Mit der Entdeckung des Elektrons im Jahre 1897 [Fri04] hatte man auch das erste wirkliche Elementarteilchen gefunden, denn bis heute hat man keine innere Struktur des Elektrons feststellen können. Um z.B. das Elektron oder irgendein anderes Elementarteilchen einer „Gruppe“ zuordnen zu können, muss man die verschiedenen Eigenschaften der Elementarteilchen kennen. Diese werden anhand des Elektrons erklärt.

- *Der Spin:* Jedes Teilchen hat einen Spin. Darunter versteht man den Eigendrehimpuls eines Teilchens. Vereinfacht kann man sich z.B. das Elektron als einen Tennisball vorstellen. Wenn sich der Tennisball um seine eigene Achse dreht, hat er einen gewissen Eigendrehimpuls. Beim Elektron ist der Spin $I = \pm \frac{1}{2}$. Dass der Spin sowohl positiv als auch negativ sein kann, ergibt sich wiederum aus der Quantentheorie. Anschaulich bedeutet es lediglich, dass sich ein Elektron z.B. nach rechts, aber auch nach links drehen kann, wobei rechts herum positiv bedeutet und links herum negativ. Der Spin ist ebenfalls eine Quantenzahl, die so genannte Spinquantenzahl s . Der Spin ist immer ein Mehrfaches des Planckschen Wirkungsquantums h . Allerdings verwendet man oft nicht h sondern \hbar , wobei $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ist und bei der Spinangabe oftmals weggelassen wird.
- *Die Masse:* In der Elementarteilchenphysik hat sich eine andere Einheit als Unit durchgesetzt, das Elektronenvolt [Fri04]. Die Kurzschreibweise ist folgendermassen: $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Ein eV ist jene Energie, die ein Teilchen (mit der Elementarladung $1 e$) erfährt, wenn es mit einer Spannung von $U = 1\text{V}$ beschleunigt wird. Die Frage, wie man jetzt von der Energie J auf die Masse kommt, liefert Einstein. Durch die Formel $E = mc^2$ kann man ohne Probleme die Masse m ausrechnen. Diese ist Teil von Kapitel 3.
- *Die Ladung:* Die Ladung ist bereits aus dem vorhergehenden Kapitel bekannt. Wichtig ist, dass sie immer ein Mehrfaches der Elementarladung $1 e$ ist. Die Ladung wird nach dem Teilchen als Exponent geschrieben. Bsp.: e^-
- *Die Lebensdauer:* Die Lebensdauer von Teilchen kann ganz unterschiedlich sein. Dabei ist die Lebensdauer die durchschnittliche Zeit, bis ein Teilchen zerfällt, oder sich in andere Teilchen umwandelt. Die Zeit wird praktisch immer in Sekunden angegeben.

Man beschränkt sich hier auf diese vier Eigenschaften, obwohl es noch andere geben würde. Anhand dieser Eigenschaften kann man nun die Elementarteilchen in verschiedene Gruppen einteilen. Als erste Gruppe werden hier die Leptonen eingeführt. Der Name Lepton stammt vom griechischen leptos, was so viel wie leicht bedeutet. Es sind also Teilchen mit einer kleinen Masse. Insgesamt gibt es 6 verschiedene Leptonen und zu jedem Lepton gehört auch noch ein Antilepton. Das Elektron ist das bekannteste Lepton

und gehört zu den Leptonen der 1. Generation. Alle Leptonen scheinen keine innere Struktur zu haben, sind also elementar. Das Ganze wird anhand Tabelle 2.2 [Dem98] veranschaulicht. Man erkennt, dass alle Leptonen den Spin $I = \frac{1}{2}$ haben. Zudem besteht

Tabelle 2.2: Leptonentabelle

	Name	Symbol	Masse in MeV	Lebensdauer	Spin
1. Generation	Elektron	e^-	0.511	∞	$\frac{1}{2}$
	Elektron-Neutrino	ν_e	$< 10^{-5}$	∞	$\frac{1}{2}$
2. Generation	Myon	μ^-	105.7	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	$\frac{1}{2}$
	Myon-Neutrino	ν_μ	< 0.25	$\infty?$	$\frac{1}{2}$
3. Generation	Tau	τ^-	1777	$3 \cdot 10^{-12}$ s	$\frac{1}{2}$
	Tau-Neutrino	ν_τ	< 35	$\infty?$	$\frac{1}{2}$

jede Generation aus einem Lepton und seinem dazugehörenden Neutrino. Sicher stabil ist dabei nur die 1. Generation. Häufig wird auch der Begriff Flavour (engl. für Aroma) gebraucht. Bei den Leptonen gibt es 6 verschiedene Flavours. Das Elektron ist z.B. ein Flavour oder das Tau-Neutrino.

2.4 Antimaterie

Viele Science-Fiction-Fans werden jetzt aufhorchen, denn wie z.B. in Star-Trek wird das Raumschiff mit Antimaterie [Brö76] angetrieben. Was aber ist Antimaterie genau? Zu jedem „normalen“ Teilchen existiert sein dazugehörendes Antiteilchen. Das Antiteilchen unterscheidet sich weder im Spin noch in der Masse von seinem „normalen“ Teilchen. Jedoch hat die Ladung Q ein umgekehrtes Vorzeichen. Auch andere Quantenzahlen ändern ihr Vorzeichen. Wenn Antimaterie mit normaler Materie zusammentrifft, annihilieren beide, was soviel wie zerstrahlen bedeutet. Daraus entstehen entweder Photonen oder Mesonen. Am Besten wird das Ganze in der Elektron-Positron Zerstrahlung [Ber02] (Positron = Antielektron) veranschaulicht.

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad (2.2)$$

Man erkennt, dass das Elektron e^- mit einem Positron e^+ annihiliert und zwei Photonen γ entstehen. Ein Antiteilchen wird allgemein mit einem Querstrich über dem Symbol des Teilchens geschrieben. Bsp.: Das Antimyon wird folgendermassen geschrieben: $\bar{\mu}$. Analog könnte man auch μ^+ schreiben, da man anhand der Ladung sofort darauf schliessen kann, dass es sich um ein Antimyon handelt.

2.5 Die Quarks

Leptonen sind aber nicht die einzigen Elementarteilchen. Die Theorie forderte die Existenz weiterer Teilchen, die man Quarks nennt. Protonen und Neutronen sind z.B. aus jeweils drei Quarks aufgebaut. Insgesamt gibt es sechs verschiedene Quarks, die in Tabelle 2.3 [Dem98] näher beleuchtet werden. Die Tabelle zeigt, dass eine Generation jeweils

Tabelle 2.3: Die sechs verschiedenen Quarks

	Name	Symbol	Masse in MeV	Ladung
1. Generation	Up-Quark	u	≈ 5	$+\frac{2}{3}$
	Down-Quark	d	≈ 10	$-\frac{1}{3}$
2. Generation	Charm-Quark	c	≈ 1500	$+\frac{2}{3}$
	Strange-Quark	s	≈ 150	$-\frac{1}{3}$
3. Generation	Top-Quark	t	$\approx 1.7 \cdot 10^5$	$+\frac{2}{3}$
	Bottom-Quark	b	≈ 4500	$-\frac{1}{3}$

aus zwei Quarks besteht. Die Ladungen bleiben immer gleich. Nicht aufgeführt wird der Spin, da er für alle Quarks gleich gross ist, nämlich $\frac{1}{2}$. Ebenso existiert natürlich zu jedem Quark das dazu gehörige Antiquark. Auch hier gibt es die sechs Flavours, z.B. den Flavour Up oder Bottom. Sehr wichtig ist, dass die Quarks noch eine weitere Ladung in sich tragen, welche die Leptonen oder andere Teilchen nicht haben. Es ist die so genannte Farbladung. Im Kapitel der Starken Kraft wird dies näher erläutert. Die Zusammensetzung [Dem98] des Protons und Neutrons sieht wie folgt aus. Das Proton besteht aus folgenden Quarks:

$$p^+ = \{u, u, d\} \quad (2.3)$$

Zum Beweis, dass die Ladung des Protons wirklich einfach positiv ist:

$$Q = \left(2 \cdot \frac{2}{3} - 1 \cdot \frac{1}{3}\right) \cdot e = +1 \cdot e \quad (2.4)$$

Für das Neutron nach dem gleichen Muster:

$$n^0 = \{u, d, d\} \quad (2.5)$$

Und die Ladung:

$$Q = \left(1 \cdot \frac{2}{3} - 2 \cdot \frac{1}{3}\right) \cdot e = 0 \cdot e \quad (2.6)$$

Da man auch bei den Leptonen von drei Generationen spricht, können sie wie in Tabelle 2.4 zusammen aufgeführt werden. Nur Teilchen der ersten Generation sind stabil. Teilchen der 2. und 3. Generation zerfallen oder gehen in leichtere Teilchen über.

Tabelle 2.4: Quark/Leptonen Tabelle

Generation:	1. Generation	2. Generation	3. Generation
Quarks	u	c	t
	d	s	b
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e^-	μ^-	τ^-

2.6 Hadronen, Mesonen und Baryonen

Im [Dem98] Gegensatz zu den Leptonen kommen die Quarks nie alleine vor, sondern sie bilden immer Gruppen, die Hadronen genannt werden. Insgesamt gibt es zwei Gruppen von Hadronen: Die Mesonen und die Baryonen. Die Gliederung basiert auf der Anzahl Quarks. Mesonen bestehen immer aus zwei Quarks, einem Quark und einem Antiquark $\{q, \bar{q}\}$ und Baryonen aus deren drei. Der Spin von Baryonen ist immer halbzahlig, wogegen der Spin von Mesonen immer ganzzahlig ist. In Tabelle 2.5 [Dem98] sind die wichtigsten Mesonen und Baryonen aufgelistet.

Tabelle 2.5: Quarkaufbau einiger Baryonen und Mesonen

Baryonen		Mesonen	
Teilchen	Quarkbausteine	Teilchen	Quarkbausteine
p^+	$2u + d$	π^-	$d + \bar{u}$
n^0	$u + 2d$	π^+	$u + \bar{d}$
Σ^-	$2d + s$	K^-	$s + \bar{u}$
Σ^+	$2u + s$	K^0	$d + \bar{s}$
Σ^0	$u + d + s$	K^+	$u + \bar{s}$
Ξ^-	$d + 2s$	π^0	$u\bar{u} + d\bar{d}$
Ξ^0	$\bar{u} + 2s$	η	$u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$
		η'	$u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$

2.7 Fermionen und Bosonen

Leptonen und Quarks können auch aufgrund des Spins gruppiert werden. Dabei werden jene Teilchen mit einem halbzahligen Spin Fermionen genannt, jene mit einem ganzzahligen Bosonen. 1924/25 formulierte der österreichische Physiker Wolfgang Pauli sein bekanntes Ausschlussprinzip, auch Pauli-Prinzip genannt. Es besagt, dass in einem Atom

niemals zwei Elektronen identische Quantenzahlen besitzen. Das heisst, sie müssen sich um mindestens eine unterscheiden. Das Pauli-Prinzip gilt für alle Teilchengruppen, ausser den Bosonen, die gegen dieses Prinzip verstossen. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit den vier Grundkräften der Physik, welche ebenfalls ins Standardmodell mit einfließen.

2.8 Die vier Grundkräfte der Physik

In der Physik gibt es vier Grundkräfte, mit welchen man alle Vorgänge beschreiben kann. Diese spielen auch in der Teilchenphysik eine entscheidende Rolle, da es so genannte Kraftteilchen gibt, welche die jeweilige Kraft „übertragen“. Diese Austauschteilchen nennt man auch Eichbosonen. Nachfolgend werden die vier Kräfte mit den dazu gehörenden Eichbosonen erläutert.

2.8.1 Die elektromagnetische Kraft

Die elektromagnetische Kraft (em. Kraft) sollte hinlänglich bekannt sein. Beispielsweise stossen sich gleichnamig geladene Körper ab und ungleichnamig geladene ziehen sich an, wie Abbildung 2.2 schematisch darstellt. Genauso funktioniert dies auch bei Teil-

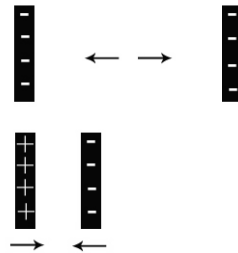


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der elektromagnetischen Kraft

chen. Protonen stossen sich gegenseitig ab, da sie gleich geladen sind. Umgekehrt ziehen sich Elektronen und Protonen an. Dies widerspricht aber dem eingeführten Atommodell. Demzufolge könnten die Protonen nie im Kern zusammen gehalten werden. Die Lösung dieses Problems wird das nächste Kapitel liefern. Das Eichboson der em. Kraft ist das Photon, das schon bei der Zerstrahlung von Elektron und Positron vorkam. Das Symbol des Photons ist das Gamma γ . Photonen sind reine Energie. Das Photon [Brö76] besitzt keine Masse und auch seine Ladung ist 0. Es besitzt aber einen Spin, der ganzzahlig sein muss, da es ja ein Eichboson ist. Der Spin beträgt 1. Wichtig ist, dass Photonen untereinander nicht wechselwirken können, da sie ungeladen sind. Jedoch beschreibt eine

Theorie die Wechselwirkung der em. Kraft. Diese Theorie bezeichnet man als Quantenelektrodynamik (QED).

2.8.2 Die Starke Kraft

Der Starke Kraft [Dem98] unterliegen nur die Quarks. Sie ist dafür verantwortlich, dass die Protonen im Kern zusammen gehalten werden, denn die Starke Kraft ist grösser als die Abstossung zwischen den Protonen im Kern. Somit ist sie stärker als die em. Kraft. Bei der Starke Kraft gibt es nicht nur ein Eichboson sondern gleich deren acht. Man nennt sie Gluonen. Wenn zwei Quarks miteinander wechselwirken, tauschen sie Gluonen aus. Jedes Quark hat eine Farbe. Daher gibt es auch eine Farbladung. Die Gluonen tragen zwei Farben. Allerdings sind das nur Modellanschauungen. Natürlich tragen weder Quarks noch Gluonen wirklich Farbe. Doch dieses Modell vereinfacht die Anschauung der Starke Kraft enorm. Insgesamt gibt es 3 Farben und die jeweiligen Antifarben: rot (r), grün (g), blau (b), antirot \bar{r} , antigrün \bar{g} , antiblau \bar{b} . Ein Quark hat immer nur eine Farbe, während die Gluonen aus zwei Farben bestehen. Diese kann man mit den Linearkombinationen [PRSZ04] wie folgt darstellen:

$$\sqrt{\frac{1}{2}}(r\bar{r} - g\bar{g}) \quad (2.7)$$

$$\sqrt{\frac{1}{6}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}) \quad (2.8)$$

Eigentlich gibt es noch ein neuntes Gluon, welches aber farbneutral ist und deshalb nicht wechselwirkt. Als Linearkombination [PRSZ04] dargestellt sieht es folgendermassen aus:

$$\sqrt{\frac{1}{3}}(r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b}) \quad (2.9)$$

Ein wesentlicher Unterschied zur em. Kraft besteht darin, dass Gluonen untereinander wechselwirken, da sie ebenfalls eine Farbladung tragen. Das erfolgt aus der additiven Farbmischung. Hadronen sind farbneutral, mit Farben ausgedrückt „weiss“. Denn Hadronen können nur als Mesonen oder Baryonen vorkommen. Bei den Mesonen sind jeweils eine Farbe und die Antifarbe gegeben. Bei den Baryonen sind es die drei Farben, die insgesamt weiss (= farbneutral) ergeben. Das Ganze sieht man in Abbildung¹ 2.3 dargestellt. Gelb, Lila und Türkis entsprechen hier den Farben Antirod, Antigrün und Antiblau. Im Meson beispielsweise wechselwirken die beiden Quarks andauernd. Dabei tauschen sie die ganze Zeit Gluonen aus. Bei diesem Vorgang ändern sie ihre Farbe fortwährend. Im Mittel kommt jede Farbe gleich oft vor. Innerhalb eines Femtometers (10^{-15} m) ist die Starke Kraft relativ schwach. Das heisst, die Quarks können sich relativ frei bewegen. Mit zunehmendem Abstand steigt die starke Kraft aber und strebt dann einem konstanten

¹http://www.webpromotionportal.com/additive_farbmischung.jpg

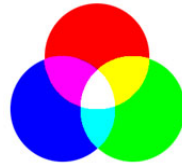


Abbildung 2.3: Farbkreis zur Analogie der Starken Kraft

Wert entgegen². Wenn zwei Quarks voneinander entfernt werden, müsste man unheimlich viel Energie aufwenden. Irgendwann ist genügend Energie vorhanden, sodass sich ein neues Meson bildet. Die vorhandene Energie wird also zur Erzeugung eines neuen Mesons gebraucht. Man nennt dies auch Confinement, was soviel wie Einschluss bedeutet. Es soll veranschaulichen, dass die Quarks untereinander eingeschlossen sind und nicht alleine vorkommen können. Um ein einzelnes Quark zu erhalten bräuchte man unendlich viel Energie. In Abbildung³ 2.4 sieht man die Entstehung eines neuen Mesons, wenn genügend Energie vorhanden ist. Am Anfang steht das Meson $\{c, \bar{c}\}$. Die beiden Quarks entfernen

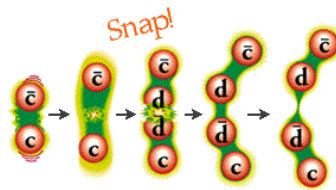


Abbildung 2.4: Entstehung eines neuen Mesons

sich in der Folge immer mehr voneinander, bis genügend Energie vorhanden ist, um ein neues Meson zu erzeugen, in diesem Fall das Meson $\{d, \bar{d}\}$. Am Schluss bilden sich dann zwei neue Mesonen, wobei sich ein Quark des anfänglichen Mesons mit einem Quark des neu entstandenen Mesons wieder zu einem neuen Meson bindet. Hier $\{d, \bar{c}\}$ und $\{\bar{d}, c\}$.

2.8.3 Die Schwache Kraft

Die Schwache Kraft ist für den Zerfall zuständig. Dabei unterscheidet man zwei verschiedene Prozesse [Dem98] der schwachen Wechselwirkung:

1. Wenn sich die elektrische Ladung ändert, wird dies auch als Reaktion der geladenen Ströme bezeichnet. Bsp.: β – Zerfall des Neutrons:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_0 \quad (2.10)$$

²http://www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_et/sm_et_qua2a.html

³http://particleadventure.org/german/frameless/quark_confinement.html

2. Wenn sich die elektrische Ladung nicht ändert, nennt man diese neutrale Ströme. Bsp.: Zerfall des τ -Leptons:

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \quad (2.11)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (2.12)$$

Die Schwache Kraft ist dafür verantwortlich, dass ein Teilchen in ein anderes übergehen kann. Es ändert also seinen Flavour. Dies geschieht nur bei der Wirkung der Schwachen Kraft. So gehen die Leptonen und Quarks der zweiten und dritten Generation irgendwann in ein Quark oder Lepton der ersten Generation über, weil nur Teilchen der ersten Generation stabil sind. Wenn man den Zerfall ebenfalls durch den Austausch von Teilchen beschreiben will, muss man drei Teilchen annehmen. Es gibt das so genannte W^\pm -Boson, welches sowohl einfach positiv als auch einfach negativ geladen sein kann. Dadurch ist es für die Reaktionen der geladenen Ströme zuständig. Für die neutralen Ströme ist das Z^0 -Boson zuständig. Wie ihr Name schon sagt, ist die Schwache Kraft relativ schwach. Die Eichbosonen der Schwachen Kraft sind aber sehr schwer. Es war früher schwierig, die Schwache Kraft nachzuweisen, denn die Prozesse der Schwachen Kraft⁴ werden oft durch den Effekt der em. Kraft überdeckt, da diese stärker ist als die Schwache Kraft. Ein Beispiel dafür ist die Elektron-Elektron Streuung⁵.

$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^- \quad (2.13)$$

Dies besagt, dass zwei Elektronen miteinander wechselwirken, indem sie ein γ austauschen. Aber der gleiche Effekt könnte durch ein Z^0 beschrieben werden, ist aber viel schwerer nachzuweisen.

2.8.4 Die Gravitation

Die Gravitation ist ein schwieriges Gebiet, denn das Austauscheteilchen für die Gravitation haben die Forscher bis heute noch nicht gefunden, obwohl die Theorie es fordert. Es wird allerdings schon heute als Graviton bezeichnet. Hinzu kommt, dass man nicht weiss, wie man die Gravitation mathematisch in der Quantentheorie beschreiben kann. Deshalb wird hier nicht näher darauf eingegangen, denn die Gravitation ist in den meisten Fällen der Teilchenphysik vernachlässigbar. Aber im Alltag erlebt man die Folgen der Gravitation immer wieder. Dies hängt damit zusammen, dass der Mensch eine viel grössere Masse besitzt. Elementarteilchen jedoch besitzen nur eine sehr geringe Masse, weshalb man die Gravitation bei Vorgängen von Elementarteilchen vernachlässigen kann. Umgekehrt ist es beispielsweise in der Quantentheorie. Sie ist für Vorgänge im Mikrokosmos entscheidend, hingegen für menschliche Grössenordnungen vernachlässigbar.

⁴http://www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_ww/sm_ww_sch1.html, zweiterAbschnitt

⁵http://www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_ww/sm_ww_sch1.html

2.8.5 Die vier Grundkräfte im Vergleich

In Tabelle 2.6 [Dem98] werden die wichtigsten Eigenschaften der Eichbosonen aufgeführt. Die Kopplungskonstante⁶ α ist ein Maß für die Kopplungsstärke der jeweiligen Wech-

Tabelle 2.6: Fundamentale Bosonen

Wechselwirkung	Boson	Masse	Kopplungsstärke α
Starke Kraft	Gluon	10MeV	1
em. Kraft	Photon γ	0	$\frac{1}{137}$
Schwache Kraft	W^\pm	80GeV	10^{-6}
	Z^0	91.2GeV	10^{-6}
Gravitation	Graviton	0?	10^{-31}

selwirkung. Es ist offensichtlich, dass die Starke Kraft wirklich am stärksten und die Gravitation am schwächsten ist.

2.9 Das Standardmodell

In den vorhergehenden Kapiteln wurde Schritt für Schritt die verschiedenen Bestandteile des Standardmodells vorgestellt. Nun wird das Ganze zusammengefügt und in Tabelle 2.7 und 2.8 [Dem98] vereinigt.

⁶<http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/erlangen/de/lexikongk.html>

2 Der Teilchenzoo

Tabelle 2.7: Das Standardmodell

	Generation	Symbol	Spin	Masse in MeV	Ladung in e
Quarks	1.	u	$\frac{1}{2}$	≈ 5	$+\frac{2}{3}$
		d	$\frac{1}{2}$	≈ 10	$-\frac{1}{3}$
	2.	c	$\frac{1}{2}$	≈ 1500	$+\frac{2}{3}$
		s	$\frac{1}{2}$	≈ 150	$-\frac{1}{3}$
	3.	t	$\frac{1}{2}$	$\approx 1.7 \cdot 10^5$	$+\frac{2}{3}$
		b	$\frac{1}{2}$	≈ 4500	$-\frac{1}{3}$
Leptonen	1.	e^-	$\frac{1}{2}$	0.511	-1
		ν_e	$\frac{1}{2}$	$< 10^{-5}$	0
	2.	μ^-	$\frac{1}{2}$	105.7	-1
		ν_μ	$\frac{1}{2}$	< 0.25	0
	3.	τ^-	$\frac{1}{2}$	1777	-1
		ν_τ	$\frac{1}{2}$	< 33	0

Tabelle 2.8: Die vier Grundkräfte der Physik

Wechselwirkung	Boson	Masse	Kopplungsstärke α
Starke Kraft	Gluon	10MeV	1
em. Kraft	Photon γ	0	$\frac{1}{137}$
Schwache Kraft	W^\pm	80GeV	10^{-6}
	Z^0	91.2GeV	10^{-6}
Gravitation	Graviton	0?	10^{-31}

3 Die kosmische Strahlung

Im ersten Kapitel wurden die verschiedenen Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen vorgestellt. Nun stellt sich die Frage, wie z.B. Teilchen der 2. Generation entdeckt wurden, obwohl sie instabil sind. Man wird sehen, dass die kosmische Strahlung früher die Quelle war, um neue Teilchen zu entdecken. Als ihr Entdecker gilt Victor Hess [Gru00] im Jahre 1912.

3.1 Elementhäufigkeit der primären kosmischen Strahlung

Unter der primären kosmischen Strahlung versteht man jene Strahlung, die von der Atmosphäre noch unbeeinflusst ist. Sie kann durch die Ausbreitung im Galaktischen bzw. Extragalaktischen leicht modifiziert werden. Ihre Entstehung liegt also im Kosmos. Entstehungsquellen können Supernova-Explosionen, schwarze Löcher, Neutronensterne und Doppelsternsysteme sein. In diesen Quellen wird die primäre kosmische Strahlung auch beschleunigt. Den grössten Anteil der kosmischen Strahlung stellen Protonen. Die Elementhäufigkeit der primären kosmischen Strahlung gleicht sehr jener der Solaren. Sie [PDHVKK97] setzt sich etwa aus $\approx 98\%$ Kernen und $\approx 2\%$ Elektronen zusammen. Die Anzahl Kerne unterteilt sich in $\approx 87\%$ Protonen, $\approx 12\%$ α -Teilchen (Helium-Atomkern, zwei Protonen und zwei Neutronen) und $\approx 1\%$ schwerer Elemente. Abbildung 3.1 [PDHVKK97] zeigt sowohl die Elementhäufigkeit der primären kosmischen Strahlung als auch die Elementhäufigkeit im Sonnensystem.

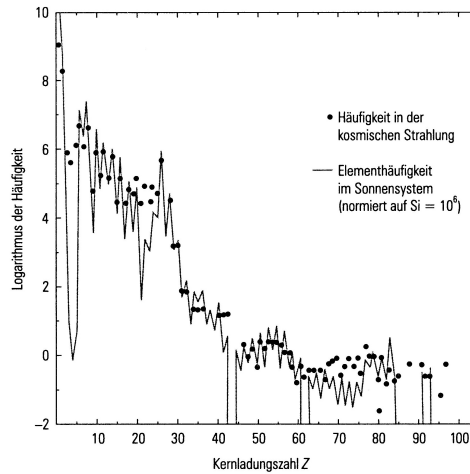


Abbildung 3.1: Elementhäufigkeit der primären Strahlung und die Elementhäufigkeit im Sonnensystem

Trotz Ähnlichkeiten gibt es Unterschiede. Diese findet man einerseits im Bereich der Elemente Lithium, Beryllium und Bor ($Z = 3 - 5$), andererseits bei solchen unterhalb von Eisen ($Z = 26$). Doch wie kommen diese zustande? Die erhöhte Häufigkeit von Lithium, Beryllium und Bor kann auf die Fragmentation der schwereren Kerne Kohlenstoff ($Z = 6$) und Sauerstoff ($Z = 8$) zurückgeführt werden. Ebenso reichert das relativ häufige Eisen mittels Spallation die darunter liegenden Elemente an. Dabei spielt der 11-jährige Sonnenfleckenzyklus eine entscheidende Rolle. Bei aktiver Sonne ist die Intensität reduziert, denn das stärkere Magnetfeld der Sonne schirmt den Teilchenfluss partiell ab. Allerdings hat die Sonne vor allem Einfluss auf Energien unterhalb von 10 GeV.

3.2 Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung

Ein Rätsel bildet bis heute das Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Abbildung 3.2 [PDHVKK97] zeigt dieses. Der gut ersichtliche Knick bei ca. 10^{15} eV wird als Knie bezeichnet und die Verflachung bei ca. 10^{19} eV als Knöchel. Nach dem Knie fällt das Spektrum steiler ab und wird nach dem Knöchel wieder flacher. Man erkennt also, dass die Intensität mit steigender Energie abnimmt. Deshalb sind Teilchen mit hoher Energie extrem selten. Ein Teilchen mit einer Energie oberhalb von 10^{19} eV hat eine Rate von 1 Teilchen [Gru00] pro km^2 pro Jahr. Das Problem ist nun, dass die Messung solch hoch-energetischer Teilchen nur indirekt erfolgen kann. Die direkte Messung z.B. mittels Ballon ist nur für Teilchen einiger hundert GeV möglich. Danach muss auf indirekte Messungen zurückgegriffen werden. Das Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung

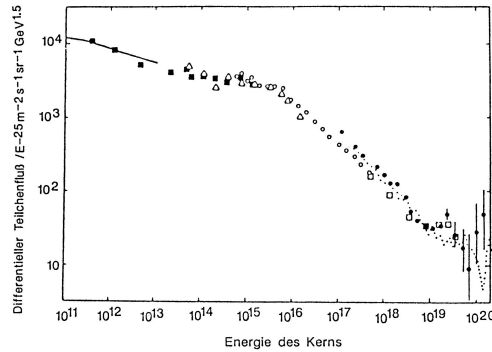


Abbildung 3.2: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Die Intensität wird dabei häufig mit einer Potenz der Primärenergie multipliziert, da sonst keine Strukturen sichtbar wären

wird über einen weiten Bereich ziemlich präzise durch ein Potenzgesetz [PDHVKK97] beschrieben:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (3.1)$$

N ist dabei die Teilchenanzahl, E die Energie und γ nennt man Spektralindex. Bis zu Energien von ca. 10^{15} eV, also bis im Bereich des Knies, nimmt der spektrale Index den Wert [PDHVKK97] $\gamma \approx 2.7$ an. Das Energiespektrum wird danach steiler. Somit ändert sich der Wert von γ . Ab hier nimmt γ den Wert $\gamma \approx 3$ an. Nun stellt sich aber die Frage, durch was sowohl das Knie als auch der Knöchel zustande kommen, und was bei Energien von 10^{20} eV geschieht. Die primäre kosmische Strahlung wird in einer Quelle erzeugt und beschleunigt. Ein Grund für das Knie könnte folgende Herleitung [Gru00] sein:

$$p = e \cdot \phi \cdot B \quad (3.2)$$

(p entspricht dem Impuls, ϕ dem Krümmungsradius und B dem effektiven, weiträumigen galaktischen Magnetfeld). Folgende Werte werden eingesetzt: $B = 10^{-10}$ T und für $\phi = 5$ pc ($1 \text{ pc} = 3.0857 \cdot 10^{16}$ m). Daraus folgt:

$$p_{max} = 4.6 \cdot 10^6 \text{ GeV}/c = 4.6 \cdot 10^{15} \text{ eV}/c \quad (3.3)$$

Ab diesem p_{max} beginnen Teilchen die Milchstraße zu verlassen. Deshalb wird das Energiespektrum zu höheren Energien steiler. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass in diesem Energiebereich das Energiemaximum erreicht wird, welches von Supernova-Explosionen geliefert werden kann. Für den Knöchel nimmt man an, dass dort eine extragalaktische Komponente eine Rolle spielt. Bei Energien von 10^{20} eV ist es enorm schwierig, eine Aussage zu machen. Es gibt zurzeit zahlreiche Experimente, welche diesen

Energiebereich untersuchen. Ein Vorschlag ist der so genannte GZK-Cutoff, auf den hier nicht genauer eingegangen wird (siehe Astroteilchenphysik, Claus Grupen, S. 65).

3.3 Die sekundäre kosmische Strahlung

Die im vorhergehenden Kapitel erläuterte primäre kosmische Strahlung ermöglicht es, die sekundäre kosmische Strahlung zu verstehen. Das Primärteilchen, meistens ein Proton, erreicht den Atmosphärenrand. In der Atmosphäre gibt es zahlreiche Moleküle wie Sauerstoff O₂, Stickstoff N₂ oder das von Auto produzierte Kohlendioxid CO₂. Das Proton stösst nun mit einem der Atome dieser Moleküle zusammen. Nach dem gleichen Prinzip funktionieren Beschleuniger, in welche man zwei Teilchen aufeinander schießt und aus der daraus entstehenden Energie neue Teilchen erzeugt werden. In der Atmosphäre entstehen in erster Linie Pionen und Kaonen. Die neutralen Pionen zerfallen mit einer Lebensdauer von $1.78 \cdot 10^{-16}$ s nach dem folgendem Muster [PDHVKK97]:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (3.4)$$

Die geladenen Pionen mit einer Lebensdauer von $2.55 \cdot 10^{-8}$ s in:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3.5)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (3.6)$$

3.4 Die drei Komponenten eines Luftschauers

Ein Luftschauer breitet sich kaskadenartig aus, weil die einzelnen Teilchen miteinander wechselwirken und somit immer neue Sekundärteilchen erzeugt werden. Bei einer Primärenergie [Kna97] $E > 100$ TeV beginnen Teilchen den Erdboden zu erreichen. In solchen Fällen spricht man auch von einem ausgedehnten Luftschauer (EAS, extensive Air Shower). Die Sekundärteilchen zerfallen oder wechselwirken solange, bis die vorhandene Energie nicht mehr gross genug ist, um neue Teilchen zu erzeugen. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Anzahl der Sekundärteilchen wieder ab (die Atmosphäre absorbiert fortlaufend Teilchen). Das Schauermaximum [Kna97] liegt für eine Primärenergie von 10^{15} eV auf einer Höhe von etwa 5000 m und bei hohen Energien von 10^{20} eV auf Meereshöhe. Das Schauermaximum ist schwach logarithmisch von der Primärenergie abhängig. Insgesamt besteht ein Schauer wie nachfolgend erläutert aus drei Komponenten.

1. *Elektromagnetische Komponente:* Sie wird von den neutralen Pionen ausgelöst. Bekannt ist, dass neutrale Pionen nach dem Muster $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ zerfallen. Die neu entstandenen γ erzeugen mittels Paarkonversion Elektronen und Positronen $2\gamma \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-$. Die Elektronen erzeugen durch Bremsstrahlung ein e^- und ein γ , $e^- \rightarrow e^- + \gamma$. Das γ erzeugt wiederum mittels Paarkonversion ein Elektron

- Positron Paar und das Elektron erzeugt wieder Bremsstrahlung usw. Es breitet sich ein elektromagnetischer Schauer aus. Der grösste Teil der Energie fliesst in die elektromagnetische Komponente, da auch geladene Pionen in Myonen/Antimyonen und Neutrinos/Antineutrinos übergehen: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. Die Myonen können ebenfalls zerfallen: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Sie tragen also ebenfalls zur elektromagnetischen Komponente bei, weil dabei auch Elektronen entstehen.

2. *Hadronische Komponente:* Die hadronische Komponente bildet den Kern des Schauers ($r < 20\text{m}$) und besteht aus folgenden Hadronen: Kernen, Protonen, Neutronen und Mesonen. Die hadronische Komponente nimmt mit der atmosphärischen Tiefe zu, erreicht ihr Maximum und nimmt anschliessend wieder exponentiell ab. Sofern das Primärteilchen ein Hadron ist, befindet sich zu Beginn die gesamte Energie in der hadronischen Komponente.
3. *Myonische Komponente:* Die myonische Komponente entsteht durch den Zerfall der geladenen Pionen. Der grösste Anteil an jenen Teilchen, welche den Erdboden erreichen, besteht aus Myonen, da diese relativ schwer sind, nur sehr selten Bremsstrahlung erzeugen und durch die Atmosphäre fast nicht absorbiert werden. Die Anzahl der Myonen nimmt stetig zu und erreicht einen Wert, der sich nur noch leicht verändert. In Abbildungen 3.3 [Gru00] ist der Teilchenfluss der verschiedenen Komponenten durch die Atmosphäre dargestellt. Ersichtlich ist, dass zu Beginn die Zahl der Elektronen und Protonen am grössten ist. Mit dem immer tieferen Eindringen in die Atmosphäre nimmt die Zahl der Elektronen und vor allem der Protonen extrem schnell ab. Im Gegensatz dazu fällt die Intensität der Myonen nur gering aus, da sie nie so stark absorbiert werden wie z.B. Elektronen. Bei genügender Tiefe überwiegt dann die Anzahl an Myonen. Im zweiten Bild in Abbildung 3.3 sind zusätzlich die Neutrinos sowie Pionen und Neutronen eingezeichnet. Natürlich überwiegen die Neutrinos die Myonen bei weitem, da sie ja selbst nicht wechselwirken. Ihre Anzahl nimmt solange zu, bis keine neuen Neutrinos durch den Zerfall von Teilchen geliefert werden.

Allerdings sollten Myonen den Erdboden gar nicht erreichen, da sie eine Lebensdauer von lediglich $2.2 \cdot 10^{-6}$ s haben. Warum sie dies trotzdem tun, liegt in der speziellen Relativitätstheorie begründet, welche im dritten und letzten Theorieteil erläutert wird. Bei hohen Energien nimmt die Anzahl der Myonen deshalb ab, weil dort zunehmend mehr Teilchen aus der elektromagnetischen und hadronischen Komponente den Erdboden erreichen und somit der relative Anteil an Myonen kleiner wird. Der Abstand von der Schauerachse beträgt etwa 500 m. Manchmal bezeichnet man die Neutrino Komponente als eigenständige Komponente, meisten jedoch fasst man sie mit der myonischen zusammen, da auch sie aus dem Zerfall von geladenen Pionen und Kaonen hervorgeht. In Abbildung 3.4 [Kna97] ist eine schematische Darstellung der verschiedenen Kompo-

3 Die kosmische Strahlung

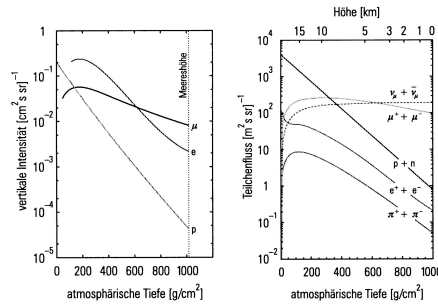


Abbildung 3.3: Der Teilchenfluss der verschiedenen Komponenten. Man kann deutlich die Absorption durch die Atmosphäre erkennen. Ebenfalls deutlich sichtbar wird, dass Myonen die grösste Anzahl an Teilchen auf Meereshöhe haben.

nennten dargestellt. Der Zenitwinkel spielt bei der Messung der Teilchen eine wichtige

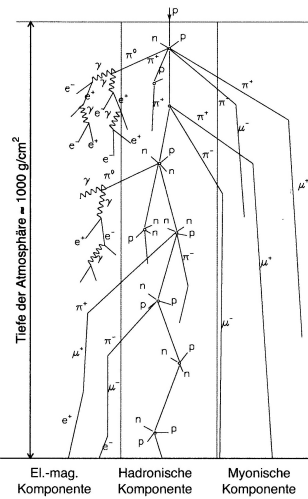


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines Luftschauers. Deutlich erkennbar sind dabei die drei verschiedenen Komponenten und ihr Verlauf durch die Atmosphäre.

Rolle. Je nach Zenitwinkel können mehr oder weniger Teilchen gemessen werden, da ihr Weg durch die Atmosphäre länger oder kürzer ist, und somit die Anzahl an absorbierten Teilchen variieren kann. Je nach Primärteilchen kann der Luftschauer anders aussehen. In Abbildung 3.5 [Kna97] sind drei verschiedene Primärteilchen und die daraus erzeugten Luftschauer abgebildet. Der erste Luftschauer wurde durch ein Photon, der zweite durch ein Proton und der dritte durch ein Eisenatom (Fe) ausgelöst. Alle Primärteilchen haben

3 Die kosmische Strahlung

eine Energie von 10^{14} eV. Ausserdem sind nur Teilchen mit $E > 10$ GeV gezeichnet, wodurch der Schnitt von Elektronen und Photonen reduziert wurde, welche eine mittlere Energie von ≈ 10 MeV haben. Zu erkennen ist, dass der γ - Schauer am spätesten wechselwirkt und nur Elektronen und Photonen erzeugt werden. Das schwere Proton beginnt schon in einer Höhe von etwa 25 km und der Eisenschauer bereits ab etwa 36 km Höhe zu wechselwirken. Auch die kaskadenartige Aufspaltung ist beim Eisenschauer am grössten. Es muss bedenkt werden, dass Eisen ein Atom ist, ein Proton hingegen „nur“ ein Nukleon.

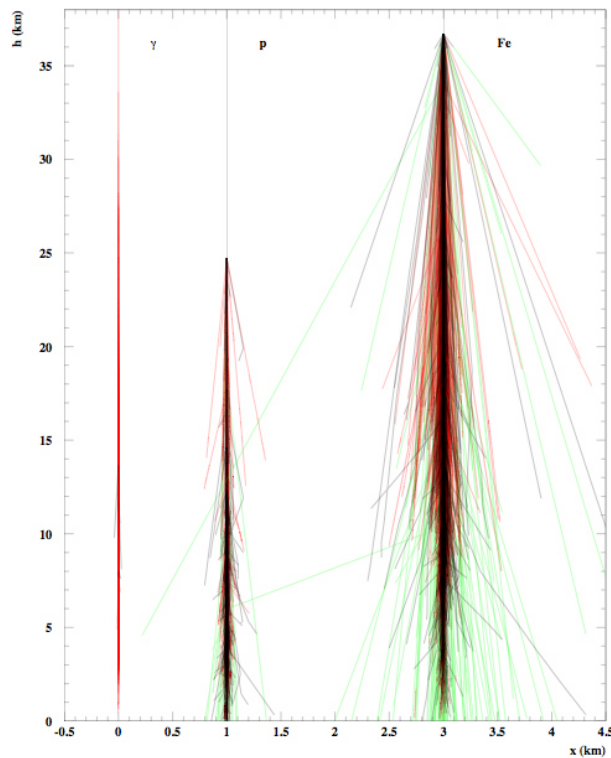


Abbildung 3.5: Drei Luftschauer, welche durch unterschiedliche Primärteilchen ausgelöst wurden. Man sieht, dass die Höhe, ab welcher das Primärteilchen zu wechselwirken beginnt unterschiedlich ist. Auch die Breite der verschiedenen Luftschauer ist unterschiedlich. Rot: Elektronen und Photonen, Grün: Myonen, Schwarz: Hadronen.

4 Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT)

Dieser letzte Theorieteil widmet sich der Speziellen Relativitätstheorie, kurz SRT, von Albert Einstein. Sie ist für die Experimente insofern von Belang, da sie den Grund liefert, warum Myonen und andere instabile Teilchen den Erdboden erreichen.

Die SRT hat die Physik des 20. Jahrhunderts enorm geprägt. Sie gilt zusammen mit der Quantenmechanik als die grösste Entdeckung des letzten Jahrhunderts in der Physik. Zu bedenken ist ferner, dass bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts davon ausgegangen wurde, das Wesentliche in der Physik bereits herausgefunden zu haben. Nur noch gewisse Details, so schien es, waren zu untersuchen.

4.1 Inertialsystem, Raum und Zeit

Die SRT widersprach der klassischen Physik von Grund auf. Deshalb werden zuerst gewisse Definitionen der klassischen Physik betrachtet [HKhLM⁺03, S. 425], um die Prinzipien der SRT besser zu verstehen.

- „Raum und Zeit existieren objektiv und insbesondere auch unabhängig vom Bewegungszustand eines Körpers.“
- „Es gibt keine Wechselbeziehung zwischen Raum und Zeit, d.h., sie beeinflussen sich nicht gegenseitig.“
- „Der Raum ist unendlich ausgedehnt. Alle Punkte und alle Richtungen des Raumes sind gleichberechtigt.“
- „Die Zeit ist unendlich ausgedehnt und nur von einer Dimension. Alle Zeitpunkte sind gleichberechtigt.“
- „Raum und Zeit sind universell, d.h., die räumlichen Abmessungen eines Körpers und die Zeitdauer eines Vorganges sind unabhängig vom Bezugssystem.“

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in der klassischen Physik von einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit ausgegangen wurde. Dabei spielte der Äther eine wichtige Rolle. Der Äther, so dachte man, sei das Medium, in dem sich die Menschen bewegen. Dieser kann so verstanden werden wie das Wasser und die Fische, die darin schwimmen. Äther und absoluter Raum waren also praktisch identisch. Der Äther spielte später noch eine wichtige Rolle, denn er konnte experimentell nicht nachgewiesen

werden. Ebenfalls wichtig für das Verständnis der SRT ist der Begriff Inertialsystem. Definitionsgemäss [HKhLM⁺03, S. 425] sind „Inertialsysteme Bezugssysteme, in denen das Trägheitsgesetz gilt. Dabei sind alle Inertialsysteme gleichberechtigt. In ihnen gelten die gleichen physikalischen Gesetze.“

4.2 Das Michelson Morley Experiment

Der amerikanische Physiker Albert A. Michelson hatte am Ende des 19. Jahrhunderts ein Experiment entwickelt, mit dem man die Existenz des ruhenden Äthers, in dem sich die Erde bewegt, nachweisen wollte. Hierfür nutzte er das unten abgebildete Michelson Interferometer¹. Das Experiment funktionierte wie folgt: Ein Lichtstrahl wird auf einen

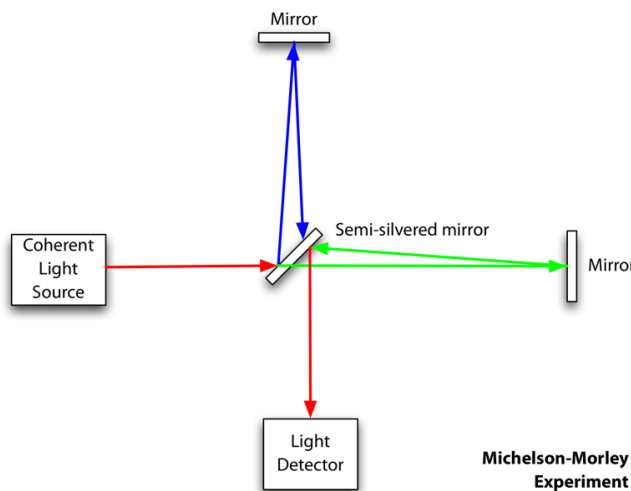


Abbildung 4.1: Das von Michelson entwickelte Interferometer, um die Existenz des Äthers zu beweisen

halbdurchlässigen Spiegel (Semi-silvered mirror) in der Mitte gerichtet. Dort teilt sich der Lichtstrahl in zwei Richtungen auf. Diese gelangen zu den jeweiligen Spiegeln, an welchen sie reflektiert werden und schliesslich wieder über den halbdurchlässigen Spiegel zu einem Lichtdetektor. Die beiden Strecken (grün und blau) sind dabei gleich lang. Wenn es einen Äther gibt - davon war man überzeugt - so brauchte derjenige Lichtstrahl sicher länger, welcher senkrecht zur Erdbewegung verlief, als jener parallel zur Erdbewegung verlaufende. Die Apparatur wurde auf einer massiven Steinplatte aufgebaut, welche in einem mit Quecksilber gefülltem Trog schwamm. Dadurch sollten störende Schwingungen vermieden werden. Doch erstaunlicherweise brauchte das Licht für beide Strecken die genau gleiche Zeit. Michelson wiederholte das Experiment, doch auch beim zweiten

¹http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment

Versuch sprach alles gegen die Existenz eines Äthers. Das war ein Schock für die damalige Zeit, denn die experimentellen Versuche sprachen klar gegen die Existenz eines absoluten Raumes mit einem Äther und somit gegen die klassische Physik. Dennoch zweifelten viele Physiker lieber am Experiment als an der klassischen Physik. Ob dieses Experiment entscheidend war für die zwei Postulate von Einstein ist bis heute umstritten.

4.3 Einsteins Postulate

Einsteins Relativitätstheorie liegen zwei Postulate [HKhLM⁺03, 430] zu Grunde. Auf den ersten Blick wirken die Postulate relativ harmlos, doch sie hatten für die damalige Zeit gravierende Folgen.

1. „Alle Inertialsysteme sind bezüglich physikalischer Gesetze gleichberechtigt. Die fundamentalen Naturgesetze gelten in jedem Inertialsystem in gleicher Weise.“
2. „Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist in allen Inertialsystemen stets gleich gross. Sie ist unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle und des Beobachters bei der Messung. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt $c = 299792.486$ km/s

Das erste Postulat wird auch als Relativitätsprinzip bezeichnet. Das zweite nennt man das Postulat von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Das Relativitätsprinzip ist unvereinbar mit der Vorstellung eines bevorzugten Bezugssystems, dem absoluten Raum. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit führte Einstein zu einem weiteren wichtigen Punkt in der SRT, dem Begriff der Gleichzeitigkeit.

4.4 Der Begriff der Gleichzeitigkeit

Der Begriff der Gleichzeitigkeit musste ebenfalls neu definiert werden, da es nun keinen absoluten Raum mehr gab. Einstein stellte dazu ein Gedankenexperiment auf, das in Abbildung 4.2 [HKhLM⁺03] dargestellt ist. Ein sehr langer Zug (Inertialsystem S') bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit. Dabei kennzeichnet Punkt A' das Ende des Zuges und Punkt B' den Anfang. Daneben ist ein Bahndamm (Inertialsystem S). Nun werden sowohl vom Punkt A als auch vom Punkt B aus Lichtblitze entsandt in Richtung M resp. M'. M und M' kennzeichnen einen Beobachter im jeweiligen System, der sich genau in der Mitte zwischen A und B resp. A' und B' aufhält. Da sich der Zug mit hoher Geschwindigkeit entfernt, erreicht der von B ausgesandte Lichtblitz zuerst M'. Erst später kommt auch der von A ausgesandte Lichtblitz bei M' an. Im Inertialsystem S registriert der Beobachter M beide Lichtblitze gleichzeitig (dritte Skizze). Es gibt also einen wesentlichen Unterschied! „Zwei Ereignisse, die in einem Inertialsystem S an verschiedenen Orten gleichzeitig stattfinden, erfolgen in einem dazu bewegten Inertialsystem S' nicht gleichzeitig [HKhLM⁺03, S. 433].“ Dies bezeichnet man auch als Relativität der Gleichzeitigkeit.

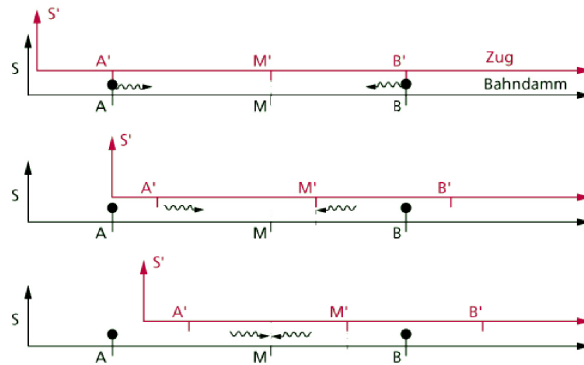


Abbildung 4.2: Einsteins Gedankenexperiment zur Gleichzeitigkeit

4.5 Die Zeitdilatation

Mit der Anerkennung der Relativität der Gleichzeitigkeit ist es unmöglich, dass es eine absolute Zeit gibt. Einstein stellte sich die Frage, von was die Zeit eines Vorganges abhängig ist, und wie sie sich verändert, wenn man sie aus einem dazu bewegten Inertialsystem betrachtet. Dazu stellte er wieder ein Gedankenexperiment auf, das in Abbildung 4.3 [HKhLM⁺03] zu sehen ist. Im Inertialsystem S befinden sich zwei synchronisierte Lichtuhren A und B . Eine Lichtuhr besteht aus zwei Spiegeln an jedem Ende, welche den Lichtstrahl hin und her reflektieren. Die Laufzeit des Lichts ist dabei ein Maß für die Zeitdauer. Man weiß, dass sich das Licht mit $c \approx 300000 \text{ km/s}$ ausbreitet. Einstein nahm nun an, dass seine Lichtuhren eine Länge von $l = 30 \text{ cm}$ haben. Demnach braucht das Licht für eine Strecke 1 ns . In einem dazu bewegten Inertialsystem S' befindet sich eine dritte Lichtuhr C , welche sich mit hoher Geschwindigkeit v fortbewegt. Nun werden die unterschiedlichen Wege, die das Licht in den verschiedenen Inertialsystemen zurücklegen muss etwas genauer betrachtet. Aus der Sicht des Inertialsystems S wird das Licht genau viermal reflektiert, d.h. es braucht eine Zeitdauer von 4 ns . Aber das Licht der Lichtuhr C , vom Inertialsystem S aus betrachtet, muss einen weiteren Weg zurücklegen $c \cdot t$ (denn die Strecke ist die Zeit mal die Geschwindigkeit, $s = v \cdot t$). Es wird daher nur zweimal reflektiert 2 ns . Vom Inertialsystem S' aus betrachtet sieht es so aus, als ob das Licht in C genau einmal hin und her läuft, während der Bewegung von A nach B . Man weiß, dass die Lichtgeschwindigkeit immer gleich ist. Demzufolge muss je nach Sichtweise die Zeit als gedehnt interpretiert werden. Dieses Phänomen nennt man auch Zeitdilatation.

In seinem Ruhesystem dauert demzufolge ein physikalischer Vorgang am kürzesten (Eigenzeit). Dagegen erscheint in einem dazu bewegten Inertialsystem S' die Zeit desselben Vorganges gedehnt. Aus Abbildung 4.3 kann man diese Zeitdehnung errechnen.

4 Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT)

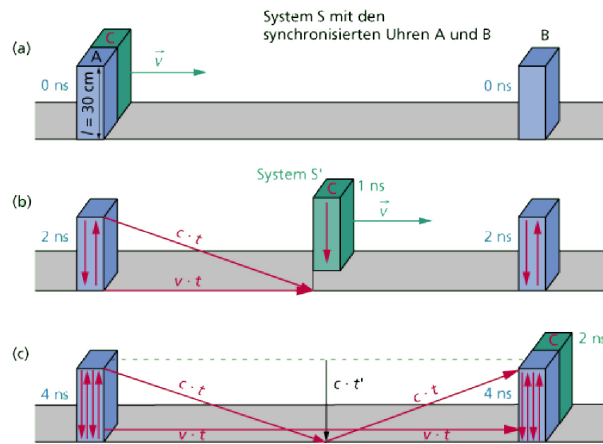


Abbildung 4.3: Einsteins Gedankenexperiment zur Zeitdilatation

Dazu betrachte man das rechtwinklige Dreieck und wendet den Satz des Pythagoras an, um eine Gleichung zu erhalten, die man anschliessend nach t (Zeit im Inertialsystem S) umstellen kann:

$$(c \cdot t)^2 = (v \cdot t)^2 + (c \cdot t')^2 \quad (4.1)$$

Nun stellt man die Gleichung nach t um und erhält:

$$t = t' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (4.2)$$

$$t = t' \cdot \gamma \quad (4.3)$$

Jetzt sieht man auch den Grund, warum die klassische Physik im Alltag noch problemlos anwendbar ist. Bei kleinen Geschwindigkeiten v ist der Wert von $\gamma \approx 1$. Je grösser die Geschwindigkeit v ist, desto grösser wird auch die Zeitdehnung. Das erklärt nun auch, warum Myonen den Erdboden erreichen: Man weiss, dass Myonen in $2.2 \mu\text{s}$ zerfallen und sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit fortbewegen $v = 0.9995 c$. Für einen ruhenden Beobachter auf der Erde scheint ihre Zeit gedehnt. Man setzt in die Formel für $t' = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ und $v = 0.9995 c$ ein und erhält somit für das gesuchte t :

$$t = 2.2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.9995}{1}\right)^2}} \quad (4.4)$$

$$t = 69 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (4.5)$$

Für einen Beobachter auf der Erde hat ein Myon demzufolge eine mittlere Lebensdauer von $69 \mu\text{s}$. Dies ist etwa das 30-fache der normalen Lebensdauer und ein experimenteller Beweis für die SRT.

4.6 Die Längenkontraktion

Nachdem [HKhLM⁺03] Einstein die Zeitdilatation entdeckt und mathematisch hergeleitet hatte, stiess er auf ein neues Problem. Dieses stellte er sich wieder in einem Gedankenexperiment vor. Hierbei geht es darum, dass auch die Länge eines Körpers nicht universal ist sondern ebenfalls vom Betrachter in einem dazu bewegten Inertialsystem abhängig ist. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 4.4 [HKhLM⁺03]. Man stelle sich

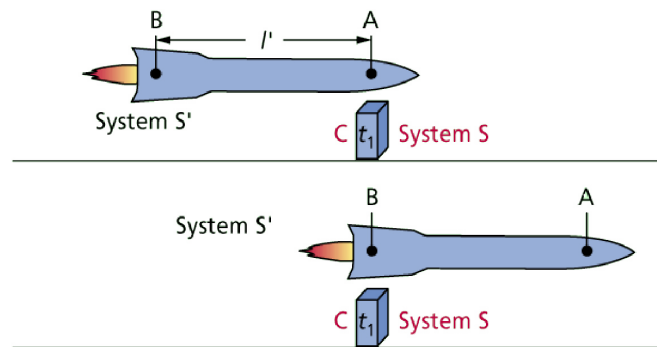


Abbildung 4.4: Einsteins Gedankenexperiment zur Längenkontraktion

eine Rakete vor, die in den beiden Punkten A und B jeweils eine Lichtuhr hat. Der Abstand zwischen diesen beiden Lichtuhren wird als Länge l bezeichnet. Hinzu kommt ein zweites Inertialsystem S, in welchem ein Beobachter bei der Lichtuhr C steht. Nun wird angenommen, dass sich die Rakete mit hoher Geschwindigkeit fortbewegt. Für die Länge im Inertialsystem S' erhält man folgende Gleichung:

$$l' = c \cdot \Delta t' \quad (4.6)$$

Für den Betrachter im Inertialsystem S erhält man eine kürzere Zeit, da man nun in der Zeitmessung die Zeitdilatation berücksichtigen muss.

$$l' = c \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

$$\Delta t = \Delta t' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4.8)$$

Nun wird das Verhältnis zwischen l und l' angeschaut:

$$\frac{l}{l'} = \frac{c \cdot \Delta t}{c \cdot \Delta t'} = \frac{\Delta t}{\Delta t'} \quad (4.9)$$

$$l = l' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4.10)$$

l ist die Länge im Inertialsystem S und demzufolge l' die Länge im Inertialsystem S'. v ist wiederum die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Inertialsystemen und c die Lichtgeschwindigkeit. Wie schon bei der Zeitdilatation erkennt man Erstaunliches: Ein Körper besitzt die grösste Länge, die so genannte Eigenlänge, in seinem Ruhesystem. In jedem dazu bewegten Inertialsystem wirkt seine Länge verkürzt.

4.7 Die berühmteste Gleichung der Physik

Es gibt noch einen entscheidenden Punkt in der SRT, den man erwähnen muss. Es handelt sich hierbei um die berühmteste Formel [HKhLM⁺03] der Welt $E = m \cdot c^2$. Diese Formel besagt, dass jeder Form von Masse eine Energie zugeordnet werden kann und umgekehrt. Es ist enorm wichtig, zwischen der Ruhemasse und der dynamischen Masse zu unterscheiden. Die Ruhemasse m_0 ist jene Masse, die ein Beobachter, welcher sich in einem Inertialsystem befindet, welches relativ zum Körper ruht, registriert. Wenn man aber z.B. Teilchen anschaut, welche beschleunigt werden, nimmt ihre Masse zu. Diese Masse nennt man auch dynamische Masse m . Berechnen lässt sich dieser Massenzuwachs wie folgt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (4.11)$$

Dies ist z.B. für Teilchenbeschleuniger enorm wichtig, weil die Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden und somit eine signifikante Massenzunahme zu erkennen ist. Die Formel $E = m \cdot c^2$ besagt also, dass die Energie proportional zur dynamischen Masse eines Körpers ist. Analog kann man natürlich auch die Ruheenergie eines Körpers ausrechnen:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 \quad (4.12)$$

Wenn sich ein Körper bewegt, nimmt seine Energie respektive Masse zu. Dieser Energiezuwachs wird auch relativistische kinetische Energie E_{kin} genannt. Dabei wird als Masse die Differenz zwischen der dynamischen und Ruhemasse des bewegten Körpers genommen:

$$E_{kin} = (m - m_0) \cdot c^2 \quad (4.13)$$

$$E_{kin} = m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right) \quad (4.14)$$

Die Gesamtenergie eines Körpers ist demnach die Addition der Ruheenergie und der kinetischen Energie.

$$E_{tot} = E_0 + E_{kin} \quad (4.15)$$

5 Die verschiedenen Experimentbestandteile

5.1 Ziel

Das Ziel des Experimentes war es, die Koinzidenzrate der kosmischen Höhenstrahlung in Abhängigkeit verschiedener Parameter zu messen. Zum einen wurde die Koinzidenzrate in Abhängigkeit des Winkels, zum andern die Absorption durch Materialien gemessen. Ausserdem konnte noch während zwei Tagen ein Experiment zur Messung von EAS gestartet werden. Unter Koinzidenz versteht man das gleichzeitige Eintreffen von Signalen, welche durch das zu messende Objekt ausgelöst wurden. Die Veranschaulichung der Koinzidenzrate wird in den folgenden Kapiteln näher aufgezeigt.

5.2 Szintillator

Um die kosmische Strahlung zu messen werden oft so genannte Szintillatoren [Leo94] verwendet. Sie detektieren die Teilchen und erzeugen einen Lichtblitz, Photonen, in Form von Lumineszenz. Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Lumineszenz. Wenn die Emission von Photonen im Bereich von 10^{-8} s erfolgt, spricht man von Fluoreszenz, danach von Phosphoreszenz. Somit gibt es auch zwei Komponenten: Eine schnelle, die durch Fluoreszenz ausgelöst und eine langsame, die durch Phosphoreszenz hervorgerufen wird. Diese Photonen werden anschliessend durch einen Photonmultiplier (PM) verstärkt und können mittels Oszilloskop angeschaut werden. Der grosse Vorteil von Szintillatoren ist die Tatsache, dass man dank ihrer Linearität Rückschlüsse auf die Energie des Cosmic ziehen kann (als Cosmic bezeichnet man ein Teilchen der kosmischen Strahlung). Das heisst, dass das Signal, welches man sich auf dem Oszilloskop anschauen kann, proportional zur Energie des Cosmics ist. Ein weiterer Vorteil von Szintillatoren ist ihre kurze Ansprechzeit. Es gibt verschiedene Typen von Szintillatoren, die je nach Anwendung besser oder schlechter geeignet sind und im Folgenden vorgestellt werden.

5.2.1 Organische Szintillatoren

Ein organischer Szintillator [Leo94] besteht meistens aus Kohlenwasserstoff mit Benzolringen (C_6H_6). Sie zeichnen sich vor allem durch eine enorm kurze Abklingzeit aus, welche

nur einige Nanosekunden beträgt. Die Emission von Photonen geschieht dabei durch Anregung von freien Valenzelektronen. Wenn man sich die Bahnen des Schalenmodells aus Abschnitt 2.2 als diskrete Energiestufen (Siehe Abbildung¹ 5.1) vorstellt, ergibt sich eine gute Vorstellung vom Quantensprung. Ein Cosmic dringt in das Szintillatormaterial ein

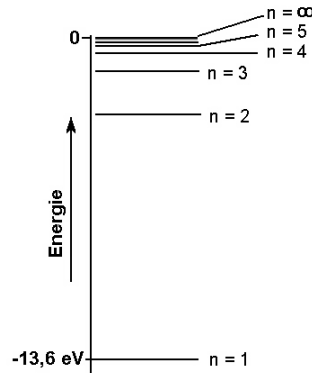


Abbildung 5.1: Die diskreten Energiestufen eines Atom. Die Stufe $n = 1$ ist dabei die energetisch günstigste. Für das Wasserstoffatom hat $n = 1$ den Wert -13.6 eV.

und beginnt mit den Atomen wechselzuwirken. Dabei wird die kinetische Energie des Cosmics auf ein Atom übertragen. Nun wird ein Elektron von einer tieferen Energiestufe auf eine höhere angeregt. Nach einer gewissen Zeit fällt das Elektron wieder auf das tiefere Energieniveau zurück. Dabei wird ein Photon mit der Energie der Differenz der beiden Energieniveaus ausgesandt. Diese Energie entspricht auch der abgegebenen kinetischen Energie des Cosmics an das Szintillatormaterial. Dieses Photon wird nun bis zum PM geleitet, wo es anschliessend verstärkt wird. Dieser Vorgang widerspiegelt sich in der schnellen Komponente. Die langsame Komponente verzögert sich dadurch, dass das Atom zuerst mit einem anderen Atom wechselwirkt und der Vorgang dann in diesem geschieht.

5.2.1.1 Organische Kristalle

Organische Kristalle [Leo94] bestehen meistens aus Anthracen ($C_{14}H_{10}$), trans-Stilbene ($C_{14}H_{12}$) und Naphthalin ($C_{10}H_8$). Anthracen hat dabei die höchste Lichtausbeute von organischen Szintillatoren. Herausragendes Merkmal Organischer Kristalle ist ihre geringe Ansprechzeit von wenigen Nanosekunden. Allerdings werden sie heute nicht mehr so oft eingesetzt, da sie sehr harte Kristalle sind, welche nur schwer formbar sind. Ihre Brüchigkeit ist ein weiterer negativer Aspekt.

¹http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_2/vlu/bohrsche_atommodell.vlu/Page/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_2/kap2_6/kap26_6.vscml.html

5.2.1.2 Organische Flüssigkeiten

Organische Flüssigkeiten [Leo94] sind nichts anderes als eine flüssige Lösung aus einem oder mehreren organischen Szintillatoren. Der Vorgang bei organischen Flüssigkeiten unterscheidet sich allerdings ein wenig von anderen Szintillatoren. Hier wird das Lösungsmittel ionisiert und diese Energie wird auf die gelösten organischen Flüssigkeiten übertragen, wo wiederum die Anregung von Elektronen stattfindet. Dieser Vorgang erfolgt sehr schnell und ist durchaus effektiv. Typische Lösungsmittel sind Xylen (C_8H_{10}), Toluol (C_7H_8) und Benzol (C_6H_6). Häufige organische Szintillatoren in dieser Lösung sind PBD ($C_{20}H_{14}N_2O$), PPO ($C_{15}H_{11}NO$) und POPOP ($C_{24}H_{16}N_2O_2$). Die Effektivität steigt mit zunehmender Konzentration an und erreicht ein Maximum kurz vor der Sättigung der Lösung. Ein grosser Vorteil von diesem Szintillatortyp besteht darin, dass je nach Messung ein Stoff beigemischt werden kann, der auf die gewünschten Teilchen sehr gut anspricht. Ausserdem sind sie relativ günstig in der Herstellung. Zum Einsatz kommen sie auch in einem sehr bekannten Experiment am Pierre-Auger-Observatorium², das sich mit der höchstenergetischen kosmischen Strahlung befasst. Der grösste Nachteil von organischen Flüssigkeiten ist ihre sehr sensible Reaktion auf Verunreinigung in der Lösung. Diese Verunreinigungen kommen vor allem durch Sauerstoff zustande und können das Messresultat erheblich verfälschen.

5.2.1.3 Plastik Szintillatoren

Plastik Szintillatoren [Leo94] sind die wohl meist gebrauchten Szintillatortypen. Sie sind eine feste Form der organischen Flüssigkeiten und zeichnen sich durch eine sehr kurze Abklingzeit von 2-3 ns. Dazu kommt eine relativ hohe Lichtausbeute. Ausserdem sind sie sehr preiswert in der Herstellung. Dadurch, dass ihre Form leicht giessbar ist, sind sie enorm flexibel und können so optimal angepasst werden. Deshalb sind sie auch in verschiedenen Formen und Grössen erhältlich. Der grösste Nachteil von plastik Szintillatoren ist ihr Alterungseffekt. Bei den Experimenten kamen ebenfalls plastik Szintillatoren zum Einsatz.

5.2.2 Gas Szintillatoren

Gas Szintillatoren [Leo94] bestehen meistens aus Edelgasen wie Xenon, Krypton, Argon und Helium. Bei diesem Szintillatortyp werden die einzelnen Atome unabhängig von den anderen angeregt, wodurch sie eine extrem schnelle Ansprechzeit von ungefähr 1 ns haben. Problematisch ist allerdings, dass die emittierten Photonen eine Wellenlänge besitzen, die im Bereich der Ultraviolettstrahlung liegt. Da die meisten PMs auf diese Photonen ineffizient reagieren, muss man einen so genannten wavelength shifter einbringen. Das ist ein Stoff, der ein emittiertes Photon aufnimmt und energetisch tiefere Photonen abstrahlt.

²www.auger.org

Eine Erhöhung des Druckes führt zu einer Steigerung der Effektivität. Allerdings sind diese Massnahmen sehr kostenspielig.

5.2.3 Essentielle Eigenschaften von Szintillatoren

Obwohl es von Vorteil ist, einen für die Anwendung spezifischen Szintillator zu verwenden, gibt es dennoch grundlegende Eigenschaften, die für alle Szintillatoren gleichermaßen wichtig sind. Eine davon ist die Lichtausbeute. Für Szintillatoren ist enorm wichtig, dass sie eine hohe Lichtausbeute haben. Dies bedeutet, dass die Energie des Cosmic optimal in Photonen umgewandelt wird, denn von der Lichtausbeute hängt die Effektivität des Szintillators ab. Die Lichtausbeute wird auch vom Cosmic beeinflusst, d.h. je nach Cosmic (welche die gleiche Energie haben) kann die Energie in eine unterschiedliche Anzahl von Photonen umgewandelt werden. Normalerweise werden ca. 30% [Leo94] aller Photonen überhaupt detektiert. Angestrebt wird natürlich eine möglichst hohe Lichtausbeute, was die Genauigkeit des Experimentes erhöht. Die Linearität wurde bereits zuvor erwähnt. Allerdings stimmt diese Linearität nicht immer. In den meisten Fällen ist sie lediglich eine gute Annäherung. Auch hier ist entscheidend, welche Art von Teilchen gemessen wird. Denn die Ionisierung des Szintillatormaterials ist von Teilchen zu Teilchen unterschiedlich.

Eine zweite essentielle Eigenschaft für Szintillatoren ist ihre Ansprechzeit. Es ist wichtig, dass diese möglichst kurz gehalten werden kann. Dies wird aber von den meisten Szintillatormaterialien gewährleistet.

5.3 Photonmultiplier (PM)

Der Photonmultiplier ist direkt mit dem Szintillator verbunden. Ein PM wandelt die eintreffenden Photonen in Elektronen um und verstärkt diese dann so, dass man am Schluss einen elektronischen Puls messen kann. Somit besteht ein PM aus drei Teilen:

1. *Fotokathode*: Beim Auftreffen der Photonen auf die Fotokathode werden einzelne Elektronen herausgeschlagen. Diese Elektronen werden auch Fotoelektronen genannt. Den Effekt selbst nennt man den äusseren lichtelektrischen Effekt [HKhLM⁺03]. Dabei muss eine bestimmte Austrittsarbeit W_A geleistet werden, damit überhaupt Elektronen herausgeschlagen werden können. Wenn die Energie des Photons kleiner ist als die Austrittsarbeit W_A , passiert nichts. Sobald das Photon mehr Energie besitzt als für das herauszuschlagende Elektron notwendig wäre, wird diese Energie in kinetische Energie umgewandelt.

$$E = W_A + E_{kin} \quad (5.1)$$

Eine gute Fotokathode zeichnet sich dadurch aus, dass sie möglichst viele Photonen in Fotoelektronen umwandelt. Das Ganze wird mit der Quanteneffektivität

ausgedrückt. Die Quanteneffektivität [Leo94] ist beim PM das Verhältnis von absorbierten Photonen auf der Fotokathode zu den emittierten Fotoelektronen:

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{Anzahl emittierter Fotoelektronen}}{\text{Anzahl absorbierter Photonen auf der Fotokathode}(\lambda)} \quad (5.2)$$

Hier ist λ die Wellenlänge des absorbierten Photons auf der Fotokathode. Wünschenswert wäre ein Verhältnis von 1:1, so dass für jedes eintreffende Photon ein Elektron ausgestrahlt wird.

2. *Das Electron-Optical Input System:* Damit wird der Bereich zwischen der Fotokathode und der ersten Dynode bezeichnet. Für diesen Bereich sind zwei Eigenschaften von zentraler Bedeutung:
 - a) Eine möglichst hohe Effektivität. Das heisst, es wäre optimal, wenn alle emittierten Fotoelektronen bis zur ersten Dynode gelangen ohne dass ihr Austrittsort aus der Fotokathode eine Rolle spielt.
 - b) Die Zeit, die ein Fotoelektron braucht, um bis zur ersten Dynode zu gelangen, muss möglichst unabhängig vom Austrittsort des Fotoelektrons sein.

Es ist klar, dass nicht alle Fotoelektronen den gleich langen Weg haben. Deshalb muss ein äusserst ausgeklügeltes Spannungsfeld erzeugt werden, damit diese zwei Punkte erfüllt werden. Ein typisches Spannungsfeld ist in Abbildung 5.2 [Leo94] dargestellt. Dies ist aber nicht die einzige Problematik. Jedes Fotoelektron besitzt

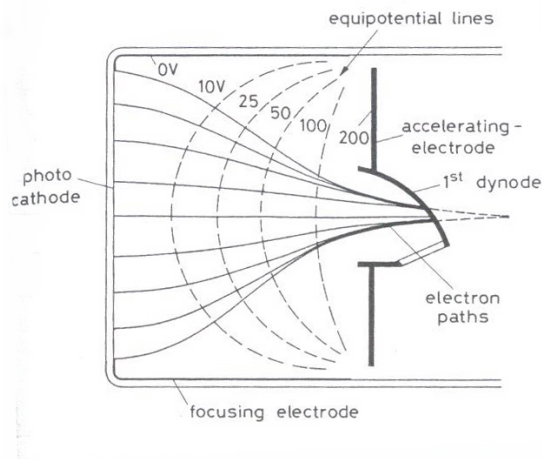


Abbildung 5.2: Das Electron-Optical Input System eines typischen PMs. Da der Weg von der Fotokathode bis zur ersten Dynode nicht für alle Fotoelektronen gleich ist, muss ein ausgeklügeltes Spannungsfeld erzeugt werden.

eine unterschiedliche Energie, was zur Folge hat, dass Elektronen mit grosser Energie die erste Dynode schneller erreichen als energieärmere Elektronen. Ausserdem spielt es eine Rolle, in welche Richtung das Elektron aus der Fotokathode austritt. Diesen Effekt nennt man auch transit time spread [Leo94] (Ausdehnung der Durchgangszeit). Wenn man die Gesamtgeschwindigkeit des Elektrons als Linearkombination aus der Richtung senkrecht zur Fotokathode und parallel zur Fotokathode beschreibt, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$v = v_{\perp} + v_{\parallel} \quad (5.3)$$

Ein Elektron, dessen Richtungsanteil parallel zur Fotokathode sehr gross ist, braucht einen deutlich längeren Weg als ein Elektron, mit einem grossen Richtungsanteil senkrecht zur Fotokathode. Es ist für die Genauigkeit des Experimentes wichtig, dass diese Zeit möglichst kurz gehalten wird und für alle Fotoelektronen die gleiche ist. Der Effekt der transit time spread kann durch folgende Gleichung angenähert werden:

$$\Delta t = -\sqrt{\frac{2m_e W}{e^2 E^2}} \quad (5.4)$$

Mit m_e : Masse des Elektrons; e : Ladung des Elektrons; E : Stärke des elektrischen Feldes; W : Energieanteil senkrecht zur Fotokathode, $\frac{v_{\perp}^2}{2m_e}$; Δt liegt bei modernen PMs bei 0.5 ns. In der Abbildung 5.3 [Leo94] ist ein Spannungsfeld von einem modernen und schnellen PM.

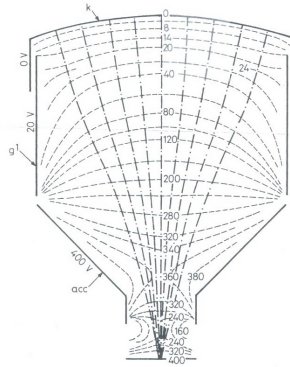


Abbildung 5.3: Ein äusserst ausgeklügeltes Spannungsfeld eines schnellen PMs, so dass weder Austrittsort noch Austrittsrichtung oder Energie des Fotoelektrons eine Rolle spielen.

3. *Dynode*: Der mittlere Teil des PM besteht meistens aus 10 - 14 Dynoden. Die Aufgabe der Dynoden ist es, den elektronischen Puls zu verstärken. Wenn nun das

herausgeschlagene Fotoelektron auf die erste Dynode trifft, lösen sich dort mehrere Sekundärelektronen, welche zur zweiten Dynode beschleunigt werden. Für diese Beschleunigung wird eine Hochspannungsquelle benötigt. Am Schluss erhält man ein Signal, das ca. um den Faktor [Leo94] 10^7 verstärkt wird.

4. *Anode*: Die nun grosse Anzahl an Sekundärelektronen werden an einem Punkt gebündelt, der Anode, und kann anschliessend gemessen werden. Abbildung³ 5.4 zeigt den schematischen Aufbau eines PMs.

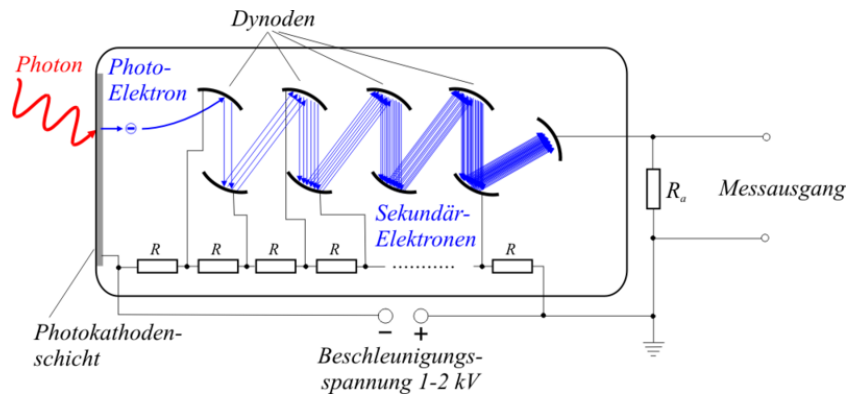


Abbildung 5.4: Aufbau eines PMs. Deutlich zu erkennen ist, wie sich die Anzahl der Sekundärelektronen pro Dynode stark erhöht und somit zu einem messbaren Resultat führt.

5.3.1 Wichtiger Parameter im Zusammenhang mit Photonmultipliern

Neben den essentiellen Eigenschaften ist die Gesamtverstärkung (Gain) der aussagekräftigste Parameter für die Effektivität eines PMs. Sie hängt von der Anzahl Dynoden und dem secondary emission factor [Leo94] δ ab. Dieser Faktor ist eine Funktion der Energie des Primärelektrons (Fotoelektron). Somit ergibt sich die Gleichung:

$$\delta = K \cdot V_d \quad (5.5)$$

Dabei ist K eine Proportionalitätskonstante und V_d die Potenzialdifferenz zwischen den Dynoden. Nach Einbezug der Anzahl Dynoden ergibt sich die gesuchte Gesamtverstärkung des PMs aus der Gleichung:

$$G = \delta^n = (K \cdot V_d)^n \quad (5.6)$$

³<http://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

G ist dabei die Gesamtverstärkung des PMs. Aus dieser Verstärkung resultiert ein gut messbarer elektronischer Puls, der über ein Oszilloskop als zeitlicher Verlauf einer Spannung aufgezeichnet werden kann. Ein Oszilloskop zeichnet den zeitlichen Verlauf einer Spannung auf. In Abbildung 5.5 ist ein typischer zeitlicher Verlauf dieses elektronischen Pulses dargestellt (auf das violette Signal wird später eingegangen).

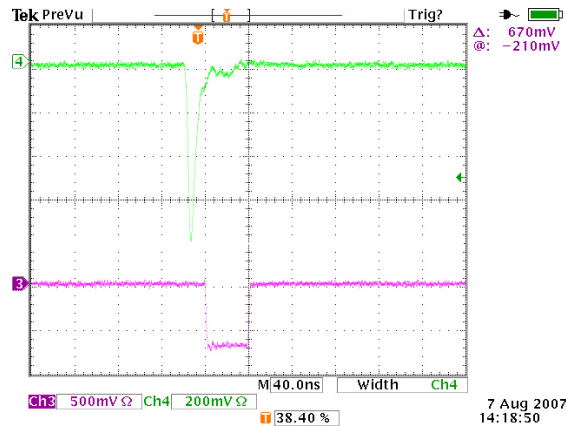


Abbildung 5.5: Durch eine radioaktive Quelle ausgelöstes Signal, welches bei der Kalibrierung aufgenommen wurde. Grün: Der elektronische Puls, welcher von einem Strontium Isotop (^{90}Sr) ausgelöst wurde (β – Strahlung). Die x-Achse ist die Zeitskala und die y-Achse die Spannungsskala. Der Puls erstreckt sich etwa über eine Zeitspanne von 20 ns.

Das Ziel ist es, ein möglichst sauberes Signal zu bekommen. Es gibt allerdings ein störendes Rauschen [Leo94], das im Zusammenhang mit elektromagnetischen Wellen vorkommt und das Resultat beeinflusst. Ursprungsorte für Rauschen sind Orte, welche unter Hochspannung stehen. Rauschen kann als Überlagerung von elektromagnetischen Wellen angeschaut werden. Je höher die Spannung gewählt wird, desto grösser wird auch der Einfluss des Rauschens. Jedoch braucht es eine gewisse Spannung zur Beschleunigung der Teilchen. Im Kapitel der Kalibrierung wird auf dieses Problem eingegangen. Ebenfalls wurde bereits die Wichtigkeit der Lichtausbeute erwähnt. Um diese zu erhöhen umwickelt man den Szintillator mit Alufolie. Dadurch werden Photonen an der Alufolie reflektiert und können die Fotokathode doch noch erreichen. Damit möglichst kein Licht aus der Umgebung das Messresultat verfälscht, wird der Szintillator zusätzlich mit schwarzem Klebeband umwickelt. Ein Bild eines fertig präparierten Szintillators ist in Abbildung 5.6 dargestellt.



Abbildung 5.6: Ein mit Alufolie und anschliessend Klebeband umwickelter Szintillator. Die Alufolie dient zur Reflexion der Photonen und das Klebeband zur Abschirmung von Photonen aus der Umgebung. Dieser Szintillator kam bei den Experimenten zum Einsatz.

5.4 NIM Technologie

NIM Elektronik ist eine Art Baukasten, der in der Teilchen- und Atomphysik früher häufig zum Einsatz kam. Die verschiedenen Module sind über so genannte NIM-Kabel miteinander gekoppelt. Ein Modul ist z.B. ein Scaler, der die Anzahl Events zählt. Um sich dies besser zu veranschaulichen, dient Abbildung 5.7. Auf vier dieser NIM-Module wird nun einzeln eingegangen.

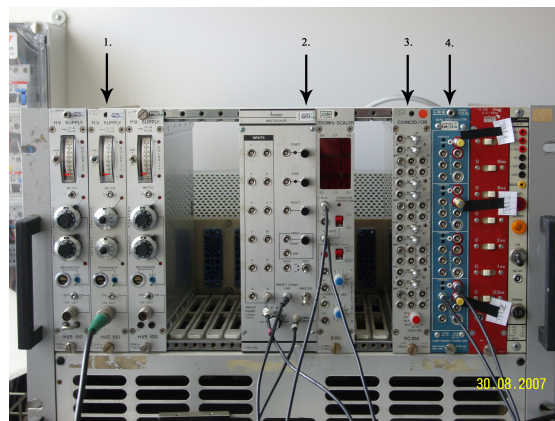


Abbildung 5.7: Verschiedene Module der NIM-Elektronik. Die einzelnen Module sind durch Stecker mit einer Stromquelle verbunden. 1. Hochspannungsmodul, 2. Scaler (Zähler), 3. Koinzidenzmodul, 4. Diskriminator.

5.4.1 Hochspannungsmodul

Das Hochspannungsmodul liefert die nötige Spannung, damit die Teilchen beschleunigt werden. Die gewünschte Spannung wird manuell eingestellt. Die Hochspannungsquelle wird direkt mit dem entsprechenden PM gekoppelt. Erst durch Einschalten dieser kann

der PM ein messbares Signal erzeugen. Eine der grössten Schwierigkeiten war es, genügend Hochspannungsquellen zu finden. Obwohl drei funktionierende PMs vorhanden waren, konnten nur zwei eingesetzt werden, da ein drittes einsatzfähiges Hochspannungsmodul fehlte. Vorab sei hier erwähnt, dass die Genauigkeit der Messung mit drei PMs resp. Szintillatoren natürlich hätte verbessert werden können.

5.4.2 Scaler (Zähler)

Der Scaler zählt die Anzahl Events über eine gewisse Zeitspanne. Es ist vorteilhaft, möglichst viele Messungen zu machen, um den statistischen Fehler so klein wie möglich zu halten. Meistens wurde über eine Zeitspanne von 1000 s gemessen. Das Problem des Scalers ist, dass er nur standardisierte Signale zählen kann. Da die Signale unterschiedlich aussehen, ist es zwingend notwendig, diese zu vereinfachen und zu vereinheitlichen. Nach einer Messung muss der Scaler wieder auf Null gesetzt werden. Anfangs war das Problem, dass man nach jeder Messung 1000 s warten musste, bis eine neue gestartet werden konnte. Dies beanspruchte natürlich eine enorme Zeit, konnte aber gegen Ende des Experimentes geschickt modifiziert werden, so dass die Wartezeit von 1000 s entfiel.

5.4.3 Diskriminator

Der messbare elektronische Puls, welcher mittels Oszilloskop angeschaut werden kann (siehe Abbildung 5.5), ist von Cosmic zu Cosmic unterschiedlich. Energiereiche Cosmic haben einen grösseren Puls als energieärmere. Der Scaler erwartet aber ein Standard-signal. Hier kommt nun der Diskriminator ins Spiel. Er wird direkt mittels NIM-Kabel an den PM gekoppelt. Sobald ein gewisser Wert der Pulshöhe erreicht ist - die Schwelle - wandelt der Diskriminator jedes Signal in ein Standard-signal um. Dabei spielt es keine Rolle wie gross der Puls des Cosmic ist, denn das Diskriminatorsignal ist für alle Pulse, welche die Schwelle erreichen, gleich (Siehe dazu Abbildung 5.5). Das violette Signal entspricht dem Diskriminatorsignal. Auf dem Oszilloskop ist sowohl das direkt nach dem PM gemessene Signal (grün) als auch das Diskriminatorsignal (violett) sichtbar. Das grüne Signal ist von Cosmic zu Cosmic unterschiedlich, das violette Signal hingegen immer gleich. Das Oszilloskop dient nur zur Anschauung der verschiedenen Signale, wäre aber für die Experimente nicht notwendig. Es ist aber vorteilhaft, wenn man zur Überprüfung das Oszilloskop zu Hilfe ziehen kann. Bei der Kalibrierung spielt das Oszilloskop eine wichtige Rolle. Ebenfalls soll erwähnt sein, dass das Diskriminatorsignal immer leicht verzögert ist im Vergleich zum normalen Pulssignal des Cosmics. Deshalb ist es auf der x-Achse (Zeitachse) auch leicht verschoben. Diese Zeitverschiebung kommt durch die Laufzeit des Signals durch die Kabel zustande. Die grösste Schwierigkeit bei der Kalibrierung des Diskriminators bestand darin, die Schwelle richtig einzustellen.

5.4.4 Koinzidenzmodul

Das Koinzidenzmodul dient zur Messung der Koinzidenz, in diesem Fall das gleichzeitige Eintreffen von verschiedenen Diskriminatorsignalen. In den Experimenten kamen zwei Szintillatoren resp. PMs zum Einsatz. Beide PMs wurden an verschiedene Diskriminatoren gekoppelt. Ziel war es, jedes Cosmic zu zählen, das sowohl durch den ersten, als auch durch den zweiten Szintillator erfasst wurde.

Zu bedenken war auch, dass das Signal eine gewisse Laufzeit durch die Kabel braucht. Deshalb war es wichtig, für beide PMs gleich lange Kabel zu verwenden. Sonst wäre es nie zu einer Koinzidenz gekommen. Natürlich hat die Koinzidenz einen Toleranzbereich, da das Cosmic von einem Szintillator zuerst erfasst wird und danach den Weg zum zweiten Szintillator noch zurücklegen muss. Dieser beträgt aber nur wenige ns, ist aber natürlich abhängig vom Abstand der zwei Szintillatoren. Sobald zwei Signale gleichzeitig eintreffen, leitet das Koinzidenzmodul ein Signal zum Scaler weiter, wo es gezählt wird. Abbildung 5.8 zeigt den schematischen Schaltplan der Versuchsanordnung.

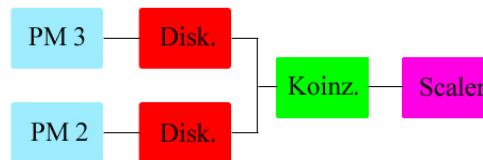


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Mittels Oszilloskop kann entweder der normale elektronische Puls, das Diskriminatorsignal oder aber auch das Koinzidenzsignal dargestellt werden, jedoch maximal vier verschiedene Signale.

6 Kalibrierung

Die grösste Zeit des Experimentes beanspruchte die Kalibrierung der Messgeräte. Zudem war es erforderlich, zuerst ein gewisses Gefühl für die Grössen und verschiedenen Messgeräte des Experimentes zu erlangen. Die Kalibrierung war aber ein überaus wichtiger Schritt in der Vorbereitung des Experimentes, da sie massgebend für die Genauigkeit der Messresultate war. Ausserdem konnte man mittels Kalibrierung Schwächen der Elektronik entdecken und diese bei der Fehlerrechnung mit einbeziehen. In Tabelle 6.1 sind die Eigenschaften der verwendeten Geräte aufgeführt.

Tabelle 6.1: Wichtige Eigenschaften der bei den Experimenten verwendeten Geräte

	PM 1	PM 2	PM 3
Masse des gekoppelten Szintillator	20 × 20 cm	20 × 30 cm	12 × 12 cm
Plateaubereich	1.68 - 1.88 kV	1.56 - 1.84 kV	1.58 - 1.86 kV
Idealspannung	1.78 kV	1.64 kV	1.72 kV
Schwellenwert	-	- 710 mV	- 3.2 V

6.1 Einstellen der Idealspannung

Die erste Kalibrierung, die vorgenommen wurde, war die Einstellung der Idealspannung für die PMs. Die Problematik wurde in den vorhergegangenen Kapiteln schon kurz angesprochen. Je höher man die Spannung wählte, desto mehr Fotoelektronen erreichten die erste Diode, d.h. ein sehr gut messbares Signal. Leider konnte nicht mehr unterschieden werden, ob das Signal nun durch ein Fotoelektron oder durch Rauschen zustande gekommen war. Ab einer gewissen Spannung wurde das Rauschen so gross, dass es die Diskriminatorschwelle des Diskriminators erreichte und somit in die Koinzidenzmessung miteinfluss. Dennoch wurde versucht, eine möglichst hohe Spannung zu wählen, denn ein Szintillator hatte zudem eine gewisse Ineffektivität, was bedeutete, dass nicht alle Photonen den PM erreichten. Ausserdem war es erwünschenswert möglichst viele Events zu erhalten, um den statistischen Fehler gering zu halten. Natürlich wurde die Spannung nicht so hoch gestellt, dass das Messresultat verfälscht wurde.

Zur Bestimmung der Idealspannung eines PMs war eine radioaktive Quelle nötig, welche konstant Strahlung aussandte. Die Kalibrierung erfolgte mit einem Strontium Isotop (^{90}Sr). Die Quelle wurde auf den Szintillator gelegt und nicht mehr bewegt, denn nicht alle Stellen des Szintillators waren gleich effektiv. Wichtig war ebenfalls, dass die Messungen zur Kalibrierung über gleich lange Zeitspannen erfolgten. Begonnen wurde mit einer sehr tiefen Spannung, so dass fast keine Events gezählt werden konnten (Scaler zeigt möglichst 0 Events an). Danach wurde die Spannung sukzessive jeweils um 0.02 kV erhöht. Die Messresultate zeigten zu Beginn einen klaren Anstieg. Danach flachte die Kurve ab und stieg zum Schluss wieder an. Es bildete sich also ein Plateaubereich. Der Mittelwert dieses Plateaus war dann die gesuchte Idealspannung. Allerdings konnte aus den oben erwähnten Gründen auch eine etwas höhere Spannung genommen werden, solange sich diese noch im Plateaubereich befand. Die Messung dieser Idealspannung für PM 2 ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Natürlich wurde diese Messung für alle drei ver-

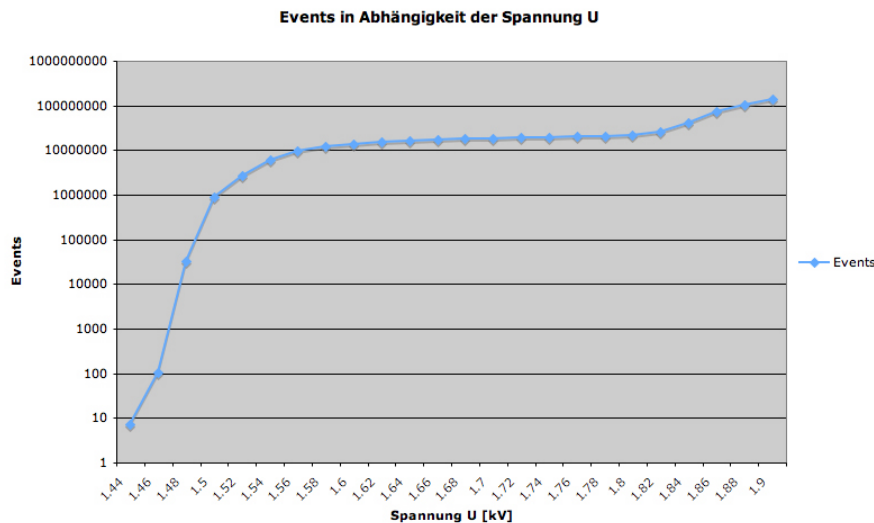


Abbildung 6.1: Anzahl Events in Abhängigkeit der Spannung U für PM 2. Jede Messung lief über eine Zeitspanne von 100 s. Gut ersichtlich ist der Plateaubereich welcher sich über eine Spannung von 1.56 bis 1.84 kV erstreckt. Zu erwähnen ist, dass die y-Achse logarithmisch skaliert wurde.

schiedenen PMs durchgeführt und anschliessend verglichen. Zu diesem Zeitpunkt war noch nicht klar, dass nur zwei einsatzfähige Hochspannungsquellen zur Verfügung stehen würden. Bei der Kalibrierung der Idealspannung wurde keine Koinzidenz gemessen. Nach dem Diskriminator lief das Signal direkt zum Scaler. Die Schwelleneinstellung spielte noch keine grosse Rolle, da das Rauschen dort Oberhand gewinnt, wo der Plateaubereich wieder verlassen wird. Abbildung 6.2 zeigt nun noch die Kalibrierung aller drei PMs.

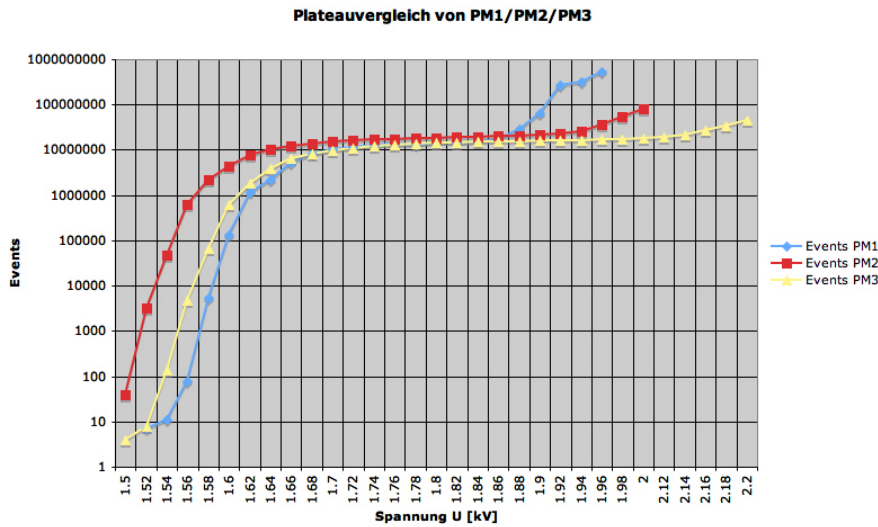


Abbildung 6.2: Plateauvergleich aller 3 PMs. Alle Messungen liefen über eine Zeitspanne von 100 s. Unterschiede sind darin zu erkennen, dass je nach PM der Plateaubereich länger oder kürzer ist. Schlussendlich wurden PM 2 (rote Kurve) und PM 3 (gelbe Kurve) genommen, welche fast identische Kalibrierungsmessung zeigten. Es handelt sich wiederum um eine logarithmische Skalierung der y-Achse.

6.2 Schwelleneinstellung des Diskriminators

Sobald die Idealspannung gefunden war, konnte die Diskriminatorschwelle eingestellt werden. Allerdings erwies sich dies als nicht allzu einfach, da auch hier die ersten beiden Diskriminatoremodule nicht funktionierten.

Die Einstellung erfolgte wiederum mittels radioaktiver Quelle. Ab hier wurde nun immer die Idealspannung für alle PMs verwendet, welche in der Tabelle 6.1 ersichtlich sind. Die korrekte Einstellung der Diskriminatorschwelle bestand aus zwei Hauptschritten:

1. Die Versuchsanordnung war ähnlich wie bei der Einstellung der Idealspannung. Der PM wurde mit dem Diskriminatoremodul gekoppelt und später zur Überprüfung auch mit dem Scaler. Auf dem Oszilloskop wurde sowohl das Diskriminatorsignal als auch der elektronische Puls ausgegeben (siehe Abbildung 5.5). Die Diskriminatorschwelle musste mittels Schraubenzieher am Diskriminatoremodul manuell eingestellt werden. Am Oszilloskop bestimmte ein Trigger, wie hoch ein Puls sein musste, damit er auf dem Oszilloskop aufgezeichnet wurde. Dieser Trigger wurde nun so hoch gedreht, bis kein Signal der radioaktiven Quelle mehr aufgezeichnet wurde. Anschliessend drehte man den Trigger vorsichtig zurück, bis ein konstantes Signal

zu sehen war. Dies bedeutete, dass möglichst alle Events der radioaktiven Quelle zu sehen waren. Somit wurde auch gewährleistet, dass die Diskriminatorschwelle nicht zu tief war und durch das Rauschen verringert wurde. Am Oszilloskop konnte man nun die Höhe des Triggers ablesen.

2. Mit einem Voltmeter konnte nun die abgelesene Spannung (Höhe des Triggers) am Diskriminatoremodul eingestellt werden. Vorteilhaft wäre es gewesen, die Diskriminatorschwelle elektronisch einstellen zu können. Bei korrekter Diskriminatorschwelle war auf dem Oszilloskop neben dem konstanten elektronischen Puls auch ein permanentes Diskriminatorsignal zu sehen.

Anschliessend wurde mit dem Scaler die eingestellte Diskriminatorschwelle überprüft, indem nur die Anzahl Cosmic gemessen wurde. Da eine erwartete Rate¹, die $70 \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}}$ beträgt, bekannt ist, konnte nun der errechnete Wert und die Messung verglichen werden.

6.3 Effektivität des Szintillators

Zusätzlich wurde noch vor den eigentlichen Experimenten die Effektivität des Szintillators gemessen. Grund dafür war, dass festgestellt wurde, dass es Unterschiede gab, an welchem Ort auf dem Szintillator die radioaktive Quelle platziert wurde. Dazu wurde jede Szintillatorfläche (siehe Tabelle 6.1) in sechs bis acht gleich grosse Teilflächen unterteilt. Die radioaktive Quelle wurde anschliessend immer in der Mitte einer Teilfläche platziert und die Anzahl Events während 10 s gemessen. Zu erwarten war, dass - je näher die Teilfläche am PM ist - umso grösser die Anzahl Events ist. Grund: Die Wahrscheinlichkeit ist grösser, dass Photonen die Fotokathode erreichen. Ausserdem sollten Flächen, die den gleichen Abstand zum PM haben, etwa die gleiche Anzahl Events messen. Abbildung 6.3 zeigt das Messresultat.

Bei den drei Szintillatoren gab es unterschiedlich grosse Schwankungen. Das war ein weiterer Grund, die Experimente mit Szintillator 2/ 3 resp. PM 2/ 3 durchzuführen. Diese Ineffektivität des Szintillators war mit ein Grund, dass der errechnete Wert für die Teilchenrate immer grösser war als der gemessene. Allerdings konnte man etwa abschätzen, ob der gemessene Wert unter Einbeziehung dieser Ineffektivitäten realistisch war. Es soll hier erwähnt sein, dass natürlich nicht nur der Szintillator eine gewisse Ineffektivität hatte, sondern auch der PM. Die Messung der Effektivität wurde am Ende der Kalibrierung vorgenommen und diente vor allem zur Überprüfung der gesamten Kalibrierung.

¹<http://pdg.lbl.gov/2007/reviews/cosmicrayrpp.pdf>

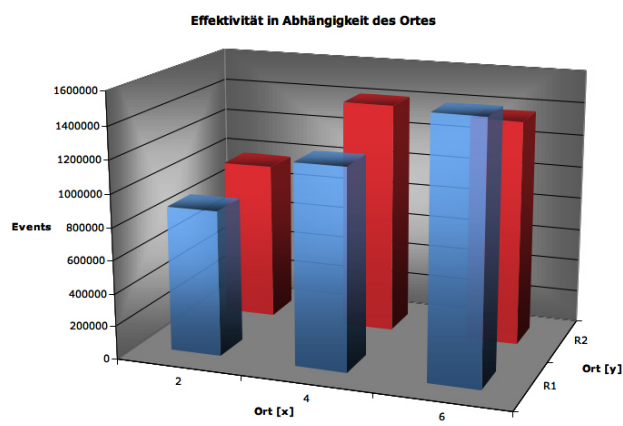


Abbildung 6.3: Effektivität in Abhängigkeit des Ortes. Zur Veranschaulichung: Der PM würde rechts mit dem Szintillator gekoppelt werden. Man erkennt, dass je grösser die Distanz zwischen PM und der entsprechenden Teilfläche des Szintillators ist, umso geringer ist die Anzahl gemessener Events. Allerdings gab es auch leichte Abweichungen von Teilflächen, die gleich weit entfernt waren. Grund dafür war der Alterungseffekt von Plastik Szintillatoren und die damit verbundene Ineffektivität.

7 Experimentaufbau

Zur Messung der Koinzidenzrate der kosmischen Höhenstrahlung in Abhängigkeit des Winkels musste eine geeignete Apparatur gebaut werden, welche mobil und drehbar war. Das Grundgerüst wurde durch Stangen gefertigt, an denen auch Halterungen für die PMs befestigt werden konnten. Das gesamte Gerüst wurde auf einer Palette befestigt und wurde mittels Hubwagen transportiert. PM 2 wurde in die obere Halterung eingefügt und PM 3 in die untere, wie in Abbildung 7.1 zu sehen ist. Der Abstand zwischen beiden

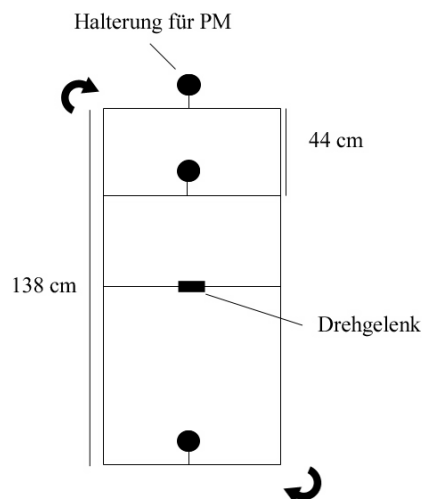


Abbildung 7.1: Frontansicht des beweglichen Teils der Messstation. Der Winkel θ beträgt bei dieser Ansicht $\theta = 0^\circ$.

Szintillatoren betrug 138 cm. Dieser Abstand spielte eine entscheidende Rolle für die Grösse des Raumwinkels. Für die erwartete Teilchenrate gilt:

$$70 \cdot \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}} \quad (7.1)$$

Sr steht dabei für Steradian und ist ein Mass für den Raumwinkel. Der Raumwinkel wird über folgende Gleichung definiert:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (7.2)$$

Dabei ist die Fläche A die projizierte Fläche auf einer Kugel, die den Radius r hat. Eigentlich müsste man die projizierte Fläche mittels Integralrechnung berechnen. Zur Vereinfachung wurde angenommen, dass die Fläche von Szintillator 2 die projizierte Fläche ist. Somit erhält man mit $A = 0.06 \text{ m}^2$ und $r = 1.38 \text{ m}$ einen Raumwinkel von:

$$\Omega = \frac{0.06 \text{ m}^2}{(1.38 \text{ m})^2}, \Omega = 0.0315 \text{ sr} \quad (7.3)$$

Der Raumwinkel trägt dazu bei wie genau die Messung ist. Mit einem dritten Szintillator hätte dieser Raumwinkel noch besser eingeschränkt werden können. Ausserdem bestand mit zwei Szintillatoren die Möglichkeit, dass ein Teilchen A vom Szintillator 2 und ein Teilchen B vom Szintillator 3 gleichzeitig erfasst wurden, somit als ein Teilchen erscheinen, das vom Scaler erfasst wurde. Mit drei Szintillatoren wäre diese Möglichkeit wesentlich unwahrscheinlicher gewesen. In Abbildung 7.2 ist die gesamte Messstation abgebildet.

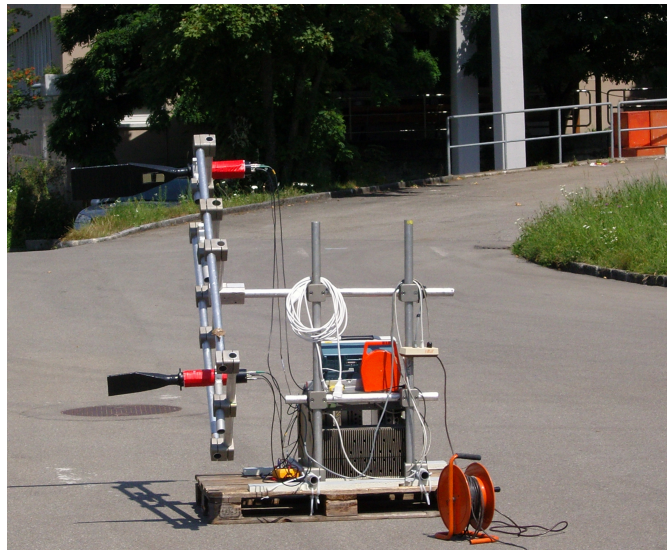


Abbildung 7.2: Seitliche Ansicht der Messstation. Das Bild wurde bei einer Koinzidenzmessung in Abhängigkeit des Winkels aufgenommen. In dieser Abbildung hat θ den Wert $\theta = 70^\circ$.

8 Die drei Experimente

Insgesamt gelangten drei verschiedene Experimente am PSI zur Durchführung und werden im Folgenden vorgestellt und analysiert.

8.1 Koinzidenzratemessung der kosmischen Höhenstrahlung

Das längste Experiment diente zur Bestimmung der Koinzidenzrate der kosmischen Höhenstrahlung in Abhängigkeit des Winkels θ . Mit dem Winkel θ ist der Winkel der Szintillatoren zum Erdboden gemeint. Dabei entspricht $\theta = 0^\circ$, wenn die Szintillatorenflächen parallel zum Erdboden sind. Bei senkrechtem Stand der Szintillatorenflächen beträgt θ demnach 90° . Dabei wurde mit einem Winkel von $\theta = 0^\circ$ begonnen. Messungen wurden für die Winkel $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ vorgenommen. Für jeden Winkel wurde

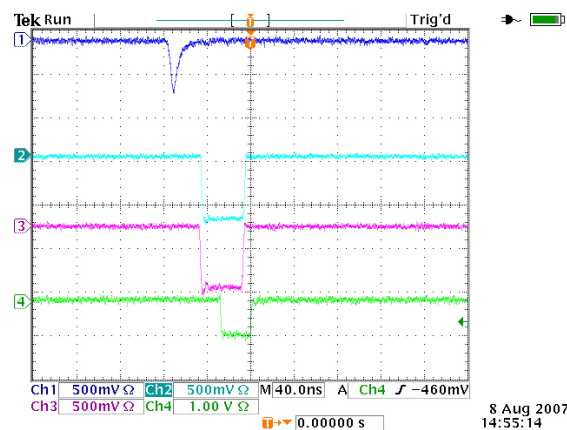


Abbildung 8.1: Verschiedene Signale auf dem Oszilloskop. Blau: Elektronischer Puls, Türkis/ Violett: Diskriminatorsignal, Grün: Koinzidenzsignal. Dank dem zeitlichen Verlauf erkennt man, dass zuerst der elektronische Puls, dann leicht verzögert die Diskriminatorsignale und nochmals verzögert das Koinzidenzsignal aufgezeichnet werden. Grund für die Verzögerung ist die Laufzeit des Signals durch die NIM-Kabel. Da das Oszilloskop nur vier verschiedene Signale aufzeichnen kann, ist in der Abbildung nur ein elektronischer Puls aufgeführt.

die Messung in zwei unterschiedlichen Himmelsrichtungen durchgeführt, welche senk-

recht aufeinander stehen. Zum einen wurden Messungen in Richtung Nord-Ost und zum anderen in Richtung Süd-Ost vorgenommen. Eine Messung dauerte insgesamt 1000 s. Die Zeitdauer wurde absichtlich so lange gewählt, um den statistischen Fehler möglichst gering zu halten. Dennoch wurde bei grossen Winkeln nur eine geringe Anzahl Events gemessen, so dass der statistische Fehler grösser ist. Die obige Abbildung 8.1 zeigt die verschiedenen Signale, die bei dieser Messung aufgenommen wurden.

Zu erwarten war, dass man mit einem kleinen Winkel eine grössere Anzahl Events erhält als mit einem grossen Winkel. Grund für diese Annahme war, dass der Weg der Cosmics durch die Atmosphäre für kleine Winkel kleiner ist als für grosse. Da auf dem Erdboden vor allem Myonen gemessen werden (siehe Abbildung 3.3), ist die Distanz durch die Atmosphäre entscheidend, da sie instabil sind und zusätzlich über eine grössere Distanz absorbiert werden können.

Die Messungen wurden in unterschiedlichen Himmelsrichtungen durchgeführt, da der Einfluss der Sonne gemessen werden sollte. In Tabelle 8.1 sind die Messresultate aufgelistet. Der statistische Fehler wurde in dieser Tabelle nicht aufgelistet. Er errechnet sich

Tabelle 8.1: Messresultate zur Koinzidenzmessung in Abhängigkeit des Winkels θ

Richtung: Süd-Ost		Richtung: Nord-Ost	
Winkel in [°]	Anzahl Events	Winkel in [°]	Anzahl Events
0°	75	0°	86
20°	68	20°	71
35°	43	35°	50
50°	23	50°	18
70°	19	70°	9
90°	12	90°	9

allerdings sehr einfach: statistischer Fehler = $\sqrt{\text{Anzahl Events}}$. Die Messungen sind zusätzlich in Abbildung 8.2 grafisch dargestellt.

8.1.1 Analyse zu Experiment 1

Die Messergebnisse der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des Winkels bestätigten die Erwartungen. Mit zunehmendem Winkel verringerte sich die Anzahl Events stark. Der Grund hierfür war der längere Weg durch die Atmosphäre und der damit verbundenen Absorption der Cosmics. Einen markanten Sprung der Anzahl Events gab es bei beiden

Himmelsrichtungen beim Übergang von $\theta = 35^\circ$ zu $\theta = 50^\circ$. Bei diesem Übergang wurde die Anzahl Events halbiert. Ebenfalls halbiert hatte sich die Anzahl Events beim Übergang von $\theta = 50^\circ$ zu $\theta = 70^\circ$ in nordöstlicher Himmelsrichtung. Wodurch diese markanten Übergänge in der Anzahl Events zustande kamen, lässt sich aus diesem Experiment nicht schliessen. Dabei muss aber beachtet werden, dass bei dieser geringen Anzahl Events der

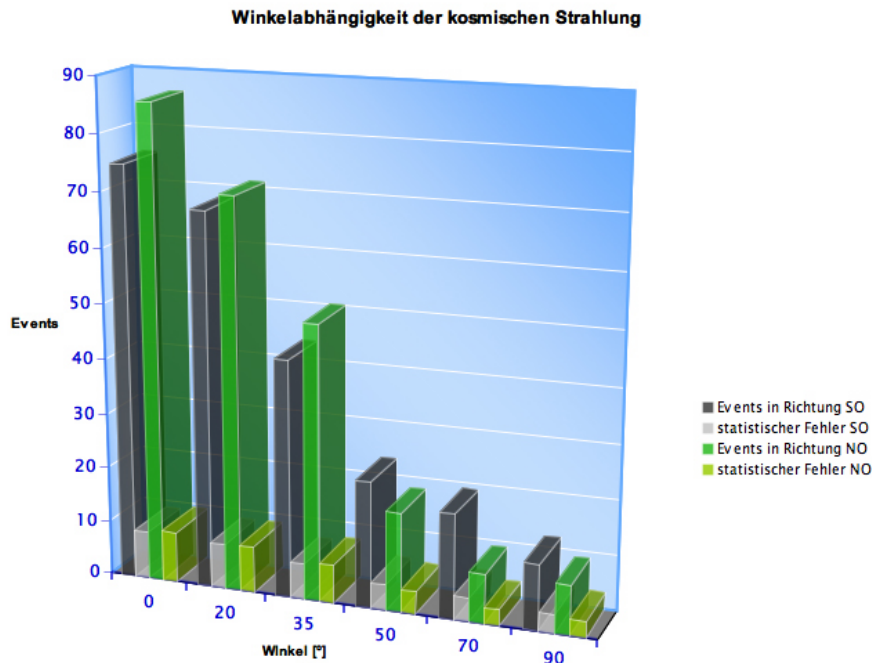


Abbildung 8.2: Ergebnisse der Messung der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des Winkels θ . Schwarz: Messergebnisse in Richtung Nord-Ost, Grau: Statistischer Fehler in Richtung Nord-Ost. Dunkelgrün: Messergebnisse in Richtung Süd-Ost, Hellgrün: Statistischer Fehler in Richtung Süd-Ost. Der statistische Fehler ist bei einer geringen Anzahl Events prozentual grösser als bei einer grossen Anzahl Events.

statistische Fehler eine grössere Rolle spielt. Im Bezug auf Abhängigkeit zur Himmelsrichtung liess sich kein erheblicher Unterschied feststellen. Dies bestätigte die Tatsache, dass kein signifikanter Unterschied in der Anzahl Events beobachtet wurde, wenn man die Szintillatoren direkt auf die Sonne richtete oder von ihr abwandte. Dies war ein Testdurchlauf, um zu sehen, ob die gesamte Messstation wunschgemäss funktionierte. Die Vermutung ist, dass die Strahlung der Sonne energetisch zu gering ist im Vergleich zu jener, welche ausserhalb des Sonnensystems ihren Ursprung hat.

Die Genauigkeit der Messergebnisse hätte sicherlich durch längere Messungen verbes-

sert werden können. Somit hätte man auch feststellen können, ob der Sprung von $\theta = 50^\circ$ zu $\theta = 70^\circ$ in nordöstlicher Himmelsrichtung nur aufgrund des statistischen Fehlers zustande kam, oder ob das Resultat bestätigt würde. Die Wahl von 1000 s war aus zeitlichen Gründen so bestimmt worden. Ziel war es, das Experiment an einem Tag zu beenden, da gleiche Bedingungen über die gesamte Länge des Experimentes herrschen sollten. Zusätzlich muss erwähnt sein, dass die nächst längere Messung aus technischen Gründen bereits 10000 s gedauert hätte, was zeitlich nicht realisierbar gewesen wäre.

8.2 Koinzidenzmessung der Materialabhängigkeit

Bei der Messung der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des zu durchdringenden Materials (Stockwerke) wollte man die Absorption der kosmischen Strahlung erforschen. Das Experiment hatte den gleichen Aufbau wie bei der Messung der Koinzidenzrate der kosmischen Höhenstrahlung in Abhängigkeit des Winkels. Während des gesamten Versuches hatte θ den Wert $\theta = 0^\circ$. Ansonsten wäre es schwer gewesen, Aussagen darüber zu machen, ob es sich um Absorption der Atmosphäre oder um Absorption des Materials handle.

Bei diesem Experiment wurde PM 3 (siehe Tabelle 6.1) auf die mittlere Haltung befestigt, so dass der Abstand zwischen PM 2 und PM 3 nur noch 44 cm betrug. Durch dies veränderte sich auch der Raumwinkel, und man erhielt eine grössere Anzahl Events. Der neue Raumwinkel hatte einen Wert von:

$$\Omega = \frac{0.06 \text{ m}^2}{(0.44 \text{ m})^2} \quad , \Omega = 0.3099 \text{ sr} \quad (8.1)$$

Dieses Experiment wurde in einem vierstöckigen Haus durchgeführt. In jedem Stockwerk wurde über 1000 s bei $\theta = 0^\circ$ gemessen. Zusätzlich wurden noch Messungen im ersten und zweiten Untergeschoss vorgenommen. Die Decken der verschiedenen Stockwerke waren aus massivem Beton und hatten eine entsprechende Dicke. So liess sich feststellen, wie stark die kosmische Höhenstrahlung durch diese Betondecken absorbiert wurde.

Zu erwarten war, dass mit zunehmendem Stockwerk die Anzahl Events steigen würden. Allerdings war die Vorhersage schwierig, ob man im zweiten Untergeschoss noch Cosmic messen würde. Zusätzlich erhielt man durch diese Messung eine gewisse Vorstellung für die Energie der Cosmics, da sie schliesslich massive Betonschichten durchqueren mussten. Ebenfalls war nicht klar, in welchem Masse sich die Anzahl Events von Stockwerk zu Stockwerk verringern würde. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 8.2 aufgelistet. In der Tabelle wurde zusätzlich der statistische Fehler in Prozent aufgeführt. Abbildung 8.3 stellt diese Messergebnisse noch grafisch dar.

Tabelle 8.2: Messresultate zur Koinzidenzmessung in Abhängigkeit des zu durchdringenden Materials

Stockwerk:	Anzahl Events	statistischer Fehler [%]
2. Untergeschoss	284	≈ 5.985 %
1. Untergeschoss	287	≈ 5.923 %
Erdgeschoss	300	≈ 5.666 %
1. Stock	337	≈ 5.341 %
2. Stock	342	≈ 5.263 %
3. Stock	366	≈ 5.191 %
4. Stock	486	≈ 4.526 %
4. Im Freien	501	≈ 4.391 %

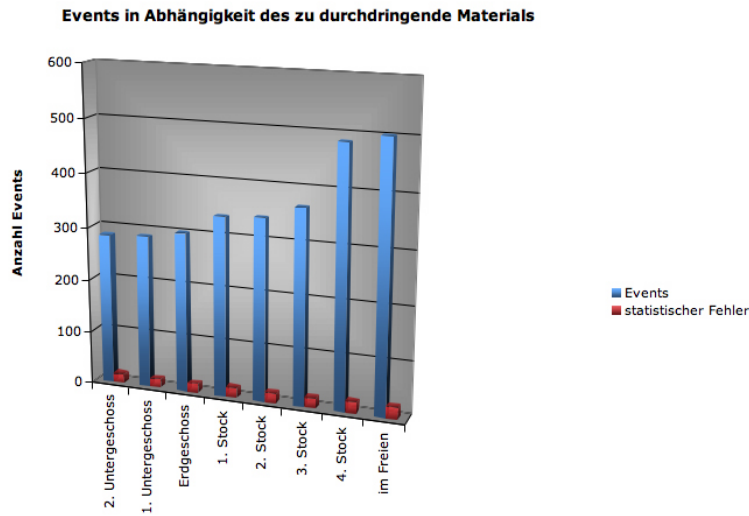


Abbildung 8.3: Ergebnisse zur Messung der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des zu durchdringenden Materials (Stockwerke). Der statistische Fehler wurde ebenfalls eingezeichnet. Da man bei dieser Messung im Vergleich zur Messung der Winkelabhängigkeit viele Events hat, ist der statistische Fehler prozentual gesehen klein. Blau: Anzahl gemessene Events auf den unterschiedlichen Stockwerken. Rot: Statistischer Fehler.

8.2.1 Analyse zu Experiment 2

Die Vermutungen zur Messung der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des Stockwerks wurden praktisch alle bestätigt. Je höher man die Messung durchführt, umso grösser war die Anzahl gemessener Cosmics. Klar zu erkennen ist, dass eine Absorption der kosmischen Höhenstrahlung durch die Betonschichten stattfand. Interessant ist dabei, dass aus Abbildung 8.2 eine gewisse Regelmässigkeit erkennbar ist. Jeweils zwei Stockwerke zeigen eine etwa gleiche Anzahl an gemessenen Cosmics. Solche Paare sind 1. und 2. Untergeschoss, 1. und 2. Stock. Ebenfalls Gemeinsamkeiten zeigen die Messung im 4. Stock und im Freien. Dazwischen gibt es jeweils eine Übergangsstufe. Das heisst, dass sich die Anzahl Events stark vom 1. Untergeschoss zum 1. Stock und vom 2. Stock zu dem Messergebnis im 4. Stock ändert. Die Übergangsstufen entsprechen den Messergebnissen des Erdgeschosses und des 3. Stocks. Warum es diese Gemeinsamkeiten gibt, ist im Bereich 4. Stock/ Freien sowie 1./ 2. Untergeschoss nachvollziehbar. Damit ein Cosmic im 4. Stock gemessen werden kann, muss die zur Durchdringung einer Betonschicht benötigte Energie relativ gering sein. Vermutlich ist der grösste Teil der kosmischen Höhenstrahlung, welche den Erdboden erreicht, genug energetisch, um ohne grössere Probleme diese erste Betonschicht zu durchqueren. Ähnliches gilt für die Messresultate im 1./ 2. Untergeschoss. Diese Strahlung muss verhältnismässig energiereich sein, um sechs resp. sieben Betonschichten zu durchqueren. Eine Schlussfolgerung könnte sein, die Stockwerke als Energieniveaus anzuschauen, welche erst ab einer gewissen kinetischen Energie erreichbar sind. Klar ist, dass im 4. Stock und im Freien sowohl energiereiche als auch energiearme Strahlung gemessen wurde, wogegen in den Untergeschossen ausschliesslich energiereiche.

Ob diese Übergänge von energieärmer zu energiereicher Strahlung tatsächlich bei den Übergangsstufen 3. Stock und Erdgeschoss stattfindet, lässt sich nur mit dieser Messung nicht sagen. Sicherlich ist der Verlauf flussend und kann nicht klar den Stockwerken eingeteilt werden. Ausserdem gibt es keine klare Grenze für energiearme und energiereiche Strahlung. Wie viel Energie ein Cosmic haben muss, um bis in das Untergeschoss vorzudringen, wurde nicht gemessen, da nicht die Energie eines Cosmic sondern nur die Anzahl von Interesse war.

Man hätte diese Experiment sicherlich verbessern können, indem man den grossen Abstand (138 cm) zwischen beiden Szintillatoren gewählt hätte. Dadurch wäre die Genauigkeit des Raumwinkels erhöht worden. Die Konsequenz wäre gewesen, dass die Anzahl Events stark gesunken wäre und man somit für aussagekräftige Messergebnisse längere Messungen hätte durchführen müssen. Da dies aus zeitlichen Gründen nicht realisierbar war, wurde bereits in der Analyse zum Experiment die Koinzidenzrate in Abhängigkeit des Winkels erwähnt. Für diese beiden ersten Experimente gilt, dass sie mit einem dritten Szintillator hätten optimiert werden können.

8.3 Messung von EAS

Bei der Messung von EAS (extensive Air Shower) wurde die Messstation abgebaut. Neu wurden die Szintillatoren flach auf den Boden im 4. Stock gelegt, da das Wetter keine Messung im Freien zuließ. Natürlich wurde wiederum die Koinzidenz gemessen. Abbildung 8.4 zeigt den neuen Versuchsaufbau. Um EAS zu messen wurde nun der Szintillator 2

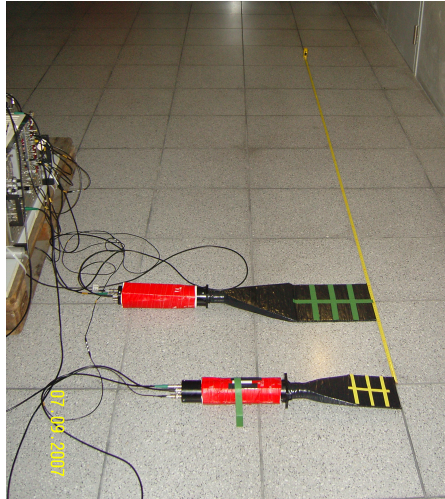


Abbildung 8.4: Neuer Versuchsaufbau. Beide Szintillatoren wurden parallel nebeneinander gelegt. Das Bild wurde während der Messung von EAS aufgenommen.

immer weiter von Szintillator 3 entfernt. Der Abstand konnte via Messband abgelesen werden. Zu Beginn wurden die beiden Szintillatoren direkt nebeneinander gelegt. Der grösste Abstand zwischen Szintillator 2 und 3 betrug 17 m. Ziel der Messung war der Nachweis von EAS. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf dem Erdboden aufgrund ihrer hohen Energie einen sehr grossen Radius haben. Durch diesen grossen Radius können sie sich über mehrere Meter erstrecken. Wenn nun bei grossem Abstand zwischen den Szintillatoren eine hohe Anzahl Events gemessen wird, kann man auf einen EAS schliessen. Dazu wird natürlich wiederum die Koinzidenzrate gemessen, da praktisch alle Teilchen eines EAS innerhalb von wenigen ns den Erdboden erreichen. Dieses Experiment wurde bereits von Pierre Auger um 1938¹ durchgeführt.

Tabelle 8.3 zeigt die Messergebnisse zum Nachweis von EAS. Ab einer Distanz von 1.8 m zwischen den Szintillatoren wurden längere Messungen vorgenommen. Deshalb sind in der Tabelle zusätzlich die Anzahl Events auf 1000 s herunter gerechnet angegeben. Auch die Messergebnisse zum Nachweis von EAS wurden noch grafisch dargestellt und sind in Abbildung 8.5 dargestellt.

¹http://www.auger.org/cosmic_rays/timeline.html

Tabelle 8.3: Messresultate zum Nachweis von EAS

Distanz zwischen Szintillatoren [m]	Anzahl Events	Events pro 1000 s
0	167	167
0.3	43	43
0.6	20	20
0.9	18	18
1.2	17	17
1.5	10	10
1.8	70	7
5	30	3
17	32	1.28

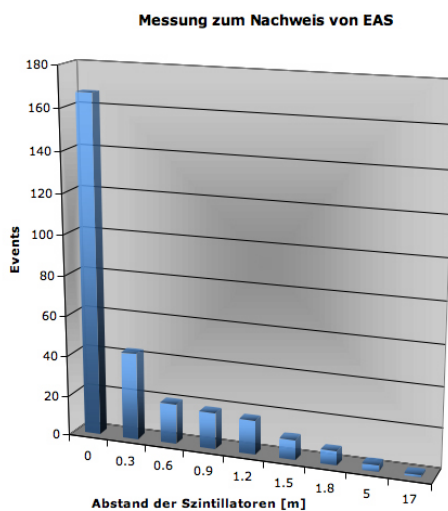


Abbildung 8.5: Messresultate zum Nachweis von EAS. Für die Abstände 1.8 m und 5 m zwischen den Szintillatoren wurde die Messung über eine Dauer von 10000 s vorgenommen. Für den Abstand von 17 m wurde die Dauer auf 25000 s erhöht. In der Abbildung sind aber alle Werte auf 1000 s heruntergerechnet. Der statistische Fehler wurde hier nicht dargestellt, da es nur um den Nachweis von EAS ging.

8.3.1 Analyse zu Experiment 3

Aus der Grafik ist zu entnehmen, dass während der Messung keine EAS nachgewiesen werden konnten. Man erkennt, dass mit kleinem Abstand eine hohe Anzahl Events gemessen wurden. Danach nimmt die Anzahl mit zunehmendem Abstand der beiden Szintillatoren sukzessive ab. Das lässt darauf schliessen, dass während der Messung kein EAS registriert, sondern vereinzelt Teilchen gemessen wurden, die ihren Ursprung in unterschiedlichen Luftschauern haben. Bei der Messung eines EAS würde der Scaler auch bei grossem Abstand zwischen den Szintillatoren eine grosse Anzahl Events registrieren. Allerdings gibt es keine einheitliche Definition, ab welcher Energie des Primärteilchens man von einem EAS spricht. Zu erkennen ist jedoch, dass es einen gewissen Abstand gibt, bei dem sich die Anzahl Events kaum ändert. Vermutlich waren diese durch Luftschauer ausgelöst worden, die im Mittel häufig vorkommen und einen Radius von ungefähr 0.6 m haben. Allerdings müsste diese These durch weitere Messungen bestätigt werden.

Das Experiment zum Nachweis von EAS wurde am Schluss durchgeführt. Es bestand keine Möglichkeit, über eine längere Zeitdauer zu messen, was die Chance erhöht hätte EAS nachzuweisen. Mit grösseren Szintillatorenflächen wäre es zudem wahrscheinlicher gewesen, EAS nachzuweisen.

Zurzeit werden Experimente durchgeführt, die Aufschluss über die hochenergetische kosmische Strahlung geben sollen. Hierfür wird eine riesige Fläche mit organischen Flüssigkeitsszintillatoren abgedeckt, um eine möglichst grosse Messfläche zu erreichen. Leider war es nicht möglich, eine grössere Fläche mittels Szintillatoren abzudecken. Doch das Experiment war aus rein historischen Gründen faszinierend.

9 Fazit

Das Fazit des Aufenthalts am PSI und mit den damit verbundenen Messungen fällt sehr positiv aus, obwohl keine EAS nachgewiesen werden konnten. Es war möglich, einen Einblick in einen sehr spannenden Teilbereich der Physik zu erhalten und eigenständige Experimente aufzubauen und durchzuführen. Gewiss bestünde Verbesserungspotenzial, wodurch die Genauigkeit der Messungen erhöht werden könnte. Auch drängen sich einige Fragen und Thesen auf, die in den Analysen angesprochen wurden, aber bestätigt werden müssten.

Obwohl sich die gesamten Messungen inklusive der Kalibrierung nur über rund zwei-einhalb Wochen hinzogen, wurden die gesteckten Ziele erreicht, die da waren:

1. Erarbeitung der theoretischen Grundlagen
2. Aufbau eines Experimentes
3. Durchführung
4. Analyse der Messergebnisse

Die Resultate sind in dieser wissenschaftlichen Arbeit dokumentiert. Es war eine sehr lehrreiche Erfahrung.

Literaturverzeichnis

- [Ber02] Professor Dr. Christoph Berger. *Elementarteilch; Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten*. Springer Verlag, 2002.
- [Brö76] Bernhard Bröcker. *dtv-Atlas zur Atomphysik*. Deutscher Taschenbuch Verlag dtv, 1976.
- [Dem98] Professor Dr. Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 4; Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer Verlag, 1998.
- [Fri04] Harald Fritsch. *Elementarteilchen; Bausteine der Materie*. C.H. Beck Wissen Verlag, 2004.
- [Gru00] Claus Grupen. *Astroteilchenphysik; Das Universum im Licht der kosmischen Strahlung*. Vieweg Verlag, 2000.
- [HKhLM⁺03] Detlef Hoche, Dr. Josef Küblbeck, Prof. Dr. habil. Lothar Meyer, Dr. Rainer Reichwald, Dr. Gerd-Dietrich Schmidt, and Dr. Oliver Schwarz. *Physik Duden*. Dudenverlag, 2003.
- [Kna97] Dr. Johannes Knapp. Vergleich hadronischer wechselwirkungsmodelle zur simulation ausgedehnter luftschauer der kosmischen strahlung. Master's thesis, Universität Karlsruhe (TH), 1997.
- [Leo94] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments; A How-to Approach*. Springer Verlag, 1994.
- [PDHVKK97] Dr. Kai Zuber Professor Dr. Hans Volker Klapdor-Kleingrothaus. *Teilchenphysik*. B. G. Teubner, 1997.
- [PRSZ04] Bogdan Povh, Klaus Rith, Christoph Scholz, and Frank Zetsch. *Teilchen und Kerne; Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. Springer Verlag, 2004.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Das Schalenmodell. Elektronen sind blau gekennzeichnet und der Kern rot (bestehend aus Protonen und Neutronen)	6
2.2	Schematische Darstellung der elektromagnetischen Kraft	11
2.3	Farbkreis zur Analogie der Starken Kraft	13
2.4	Entstehung eines neuen Mesons	13
3.1	Elementhäufigkeit der primären Strahlung und die Elementhäufigkeit im Sonnensystem	18
3.2	Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Die Intensität wird dabei häufig mit einer Potenz der Primärenergie multipliziert, da sonst keine Strukturen sichtbar wären	19
3.3	Der Teilchenfluss der verschiedenen Komponenten. Man kann deutlich die Absorption durch die Atmosphäre erkennen. Ebenfalls deutlich sichtbar wird, dass Myonen die grösste Anzahl an Teilchen auf Meereshöhe haben.	22
3.4	Schematische Darstellung eines Luftschauers. Deutlich erkennbar sind dabei die drei verschiedenen Komponenten und ihr Verlauf durch die Atmosphäre.	22
3.5	Drei Luftschauer, welche durch unterschiedliche Primärteilchen ausgelöst wurden. Man sieht, dass die Höhe, ab welcher das Primärteilchen zu wechselwirken beginnt unterschiedlich ist. Auch die Breite der verschiedenen Luftschauer ist unterschiedlich. Rot: Elektronen und Photonen, Grün: Myonen, Schwarz: Hadronen.	23
4.1	Das von Michelson entwickelte Interferometer, um die Existenz des Äthers zu beweisen	25
4.2	Einsteins Gedankenexperiment zur Gleichzeitigkeit	27
4.3	Einsteins Gedankenexperiment zur Zeitdilatation	28
4.4	Einsteins Gedankenexperiment zur Längenkontraktion	29
5.1	Die diskreten Energiestufen eines Atom. Die Stufe $n = 1$ ist dabei die energetisch günstigste. Für das Wasserstoffatom hat $n = 1$ den Wert -13.6 eV.	33

5.2	Das Electron-Optical Input System eines typischen PMs. Da der Weg von der Fotokathode bis zur ersten Dynode nicht für alle Fotoelektronen gleich ist, muss ein ausgeklügeltes Spannungsfeld erzeugt werden.	36
5.3	Ein äussert ausgeklügeltes Spannungsfeld eines schnellen PMs, so dass weder Austrittsort noch Austrittsrichtung oder Energie des Fotoelektrons eine Rolle spielen.	37
5.4	Aufbau eines PMs. Deutlich zu erkennen ist, wie sich die Anzahl der Sekundärelektronen pro Dynode stark erhöht und somit zu einem messbaren Resultat führt.	38
5.5	Durch eine radioaktive Quelle ausgelöstes Signal, welches bei der Kalibrierung aufgenommen wurde. Grün: Der elektronische Puls, welcher von einem Strontium Isotop (^{90}Sr) ausgelöst wurde (β -Strahlung). Die x-Achse ist die Zeitskala und die y-Achse die Spannungsskala. Der Puls erstreckt sich etwa über eine Zeitspanne von 20 ns.	39
5.6	Ein mit Alufolie und anschliessend Klebeband umwickelter Szintillator. Die Alufolie dient zur Reflexion der Photonen und das Klebeband zur Abschirmung von Photonen aus der Umgebung. Dieser Szintillator kam bei den Experimenten zum Einsatz.	40
5.7	Verschiedene Module der NIM-Elektronik. Die einzelnen Module sind durch Stecker mit einer Stromquelle verbunden. 1. Hochspannungsmodul, 2. Scaler (Zähler), 3. Koinzidenzmodul, 4. Diskriminator.	40
5.8	Schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Mittels Oszilloskop kann entweder der normale elektronische Puls, das Diskriminatorsignal oder aber auch das Koinzidenzsignal dargestellt werde, jedoch maximal vier verschiedene Signale.	42
6.1	Anzahl Events in Abhängigkeit der Spannung U für PM 2. Jede Messung lief über eine Zeitspanne von 100 s. Gut ersichtlich ist der Plateaubereich welcher sich über eine Spannung von 1.56 bis 1.84 kV erstreckt. Zu erwähnen ist, dass die y-Achse logarithmisch skaliert wurde.	44
6.2	Plateauvergleich aller 3 PMs. Alle Messungen liefen über eine Zeitspanne von 100 s. Unterschiede sind darin zu erkennen, dass je nach PM der Plateaubereich länger oder kürzer ist. Schlussendlich wurden PM 2 (rote Kurve) und PM 3 (gelbe Kurve) genommen, welche fast identische Kalibrierungsmessung zeigten. Es handelt sich wiederum um eine logarithmische Skalierung der y-Achse.	45

6.3	Effektivität in Abhängigkeit des Ortes. Zur Veranschaulichung: Der PM würde rechts mit dem Szintillator gekoppelt werden. Man erkennt, dass je grösser die Distanz zwischen PM und der entsprechenden Teilfläche des Szintillator ist, umso geringer ist die Anzahl gemessener Events. Allerdings gab es auch leichte Abweichungen von Teilflächen, die gleich weit entfernt waren. Grund dafür war der Alterungseffekt von Plastik Szintillatoren und die damit verbundene Ineffektivität.	47
7.1	Frontansicht des beweglichen Teils der Messstation. Der Winkel θ beträgt bei dieser Ansicht $\theta = 0^\circ$	48
7.2	Seitliche Ansicht der Messstation. Das Bild wurde bei einer Koinzidenzmessung in Abhängigkeit des Winkels aufgenommen. In dieser Abbildung hat θ den Wert $\theta = 70^\circ$	49
8.1	Verschiedene Signale auf dem Oszilloskop. Blau: Elektronischer Puls, Türkis/ Violett: Diskriminatorsignal, Grün: Koinzidenzsignal. Dank dem zeitlichen Verlauf erkennt man, dass zuerst der elektronische Puls, dann leicht verzögert die Diskriminatorsignale und nochmals verzögert das Koinzidenzsignal aufgezeichnet werden. Grund für die Verzögerung ist die Laufzeit des Signals durch die NIM-Kabel. Da das Oszilloskop nur vier verschiedene Signale aufzeichnen kann, ist in der Abbildung nur ein elektronischer Puls aufgeführt.	50
8.2	Ergebnisse der Messung der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des Winkels θ . Schwarz: Messergebnisse in Richtung Nord-Ost, Grau: Statistischer Fehler in Richtung Nord-Ost. Dunkelgrün: Messergebnisse in Richtung Süd-Ost, Hellgrün: Statistischer Fehler in Richtung Süd-Ost. Der statistische Fehler ist bei einer geringen Anzahl Events prozentual grösser als bei einer grossen Anzahl Events.	52
8.3	Ergebnisse zur Messung der Koinzidenzrate in Abhängigkeit des zu durchdringenden Materials (Stockwerke). Der statistische Fehler wurde ebenfalls eingezeichnet. Da man bei dieser Messung im Vergleich zur Messung der Winkelabhängigkeit viele Events hat, ist der statistische Fehler prozentual gesehen klein. Blau: Anzahl gemessene Events auf den unterschiedlichen Stockwerken. Rot: Statistischer Fehler.	54
8.4	Neuer Versuchsaufbau. Beide Szintillatoren wurden parallel neben einander gelegt. Das Bild wurde während der Messung von EAS aufgenommen.	56

8.5 Messresultate zum Nachweis von EAS. Für die Abstände 1.8 m und 5 m zwischen den Szintillatoren wurde die Messung über eine Dauer von 10000 s vorgenommen. Für den Abstand von 17 m wurde die Dauer auf 25000 s erhöht. In der Abbildung sind aber alle Werte auf 1000 s heruntergerechnet. Der statistische Fehler wurde hier nicht dargestellt, da es nur um den Nachweis von EAS ging. 57

Tabellenverzeichnis

2.1	Die wichtigsten Eigenschaften dieser drei Teilchen	5
2.2	Leptonentabelle	8
2.3	Die sechs verschiedenen Quarks	9
2.4	Quark/Leptonen Tabelle	10
2.5	Quarkaufbau einiger Baryonen und Mesonen	10
2.6	Fundamentale Bosonen	15
2.7	Das Standardmodell	16
2.8	Die vier Grundkräfte der Physik	16
6.1	Wichtige Eigenschaften der bei den Experimenten verwendeten Geräte . .	43
8.1	Messresultate zur Koinzidenzmessung in Abhängigkeit des Winkels θ . . .	51
8.2	Messresultate zur Koinzidenzmessung in Abhängigkeit des zu durchdrin- genden Materials	54
8.3	Messresultate zum Nachweis von EAS	57

Index

Symbols	
W^\pm -Boson	14
Z^0 -Boson	14
α -Teilchen	17
A	
Abklingzeit	32, 34
absoluter Raum	24
absolute Zeit	24
Absorbation	53, 55
annihilieren	8
Ansprechzeit	33–35
Antimaterie	8
Antiteilchen	8
Antiquark	9, 10
Atmosphäre	51
Atom	5
Atommodell	5
Schalenmodell	6, 33
B	
Boson	10
C	
Confinement	13
Cosmic	51, 53, 55
D	
die vier Grundkräfte	11
Doppelsternsystem	17
E	
EAS	20, 32, 56, 58
Eichboson	11, 14, 15
Einsteins Postulate	26
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	26
Relativitätsprinzip	26
Elektronenvolt	7
elementar	5
Elementarladung	6
Elementarteilchen	5, 7, 9
Elektron	5, 7, 17, 20, 21, 33, 35
Gluon	12
Graviton	14
Lepton	7
Myon	21, 28, 51
Neutrino	8, 21
Neutron	5, 9, 21
Photon	8, 11, 32–34
Positron	8, 20
Proton	5, 9, 17, 20, 21
Quarks	9, 10, 12
Energie	30
relativistische kinetische Energie	30
Energiespektrum	18
Experiment	43, 50
Experiment 1	50, 53
Experiment 2	53, 55
Experiment 3	56, 58
F	
Farbladung	12
Antifarbe	12
Fermion	10
Flavour	8, 9
Fotoelektron	43
G	
Generation	8, 9

INDEX

GZK-Cutoff	20		
H			
Hadron	10		
Baryon	10, 12		
Meson	8, 10, 12, 21		
Kaon	20		
Pion	20, 21		
Hauptquantenzahl	6		
Spinquantenzahl	7		
I			
Idealspannung	43, 44		
Plateaubereich	44		
Inertialsystem	25, 26, 29		
K			
Kalibrierung	43		
Knie	18, 19		
Knöchel	18, 19		
Koinzidenzmessung	43		
Koinzidenzrate	32, 48, 50, 53, 55, 56		
Kopplungskonstante	15		
L			
Lepton	8, 10		
Lichtausbeute	33–35, 39		
Lichtgeschwindigkeit	26		
Luftschauer	20, 22, 58		
Elektromagnetische Komponente	20		
Hadronische Komponente	21		
Myonische Komponente	21		
Neutrino-Komponente	21		
Luminiszenz	32		
Fluoreszenz	32		
Phosphoreszenz	32		
Längenkontraktion	29		
Eigenlänge	30		
Gedankenexperiment	29		
Lösungsmittel	34		
M			
Masse	30		
		dynamische Masse	30
		Ruhemasse	30
		Messgerät	43
		Messstation	48, 49, 56
		Messung	50, 55, 56, 58
		Events	51, 53, 55, 56, 58
		Michelson Interferometer	25
N			
		Neutronensterne	17
		NIM Elektronik	40
		Diskriminator	41
		Diskriminatorschwelle	43, 45, 46
		Hochspannungsmodul	40
		Koinzidenzmodul	42
		Scaler	41
O			
		Oszilloskop	32, 39
		Trigger	45
P			
		Paarkonversion	20
		Pauli Prinzip	11
		Photonmultiplier	32, 35, 37, 43, 48
		Anode	38
		Dynode	37
		Electron-Optical Input System	36
		Fotokathode	35
		Gesamtverstärkung	38
		Quanteneffektivität	36
		secondary emission factor	38
		transit time spread	37
		Pierre Auger	56
		Plankschen Wirkungsquantum	7
		Primärenergie	20
		primären kosmischen Strahlung	17
		Primärteilchen	20–22, 58
Q			
		Quantensprung	33

INDEX

R	
Raumwinkel	48, 49, 53, 55
Rauschen	39, 43
Relativität der Gleichzeitigkeit . . .	26
Gedankenexperiment	26
Ruhesystem	27, 30
S	
schwarze Löcher	17
sekundäre kosmische Strahlung . . .	20
Sekundärelektron	38
Sekundärteilchen	20
Signal	39, 41, 43
elektronischer Puls	35, 37, 46
Sonnenfleckenzyklus	18
Spannungsfeld	36, 37
Spezielle Relativitätstheorie . . .	24, 29
Spin	7, 9
Eigendrehimpuls	7
Standardmodell	15
statistischer Fehler	41, 51
Strontium	44
Supernova-Explosionen	17, 19
Szintillator	32, 35, 46, 50, 55, 56
Gas Szintillator	34
organischer Szintillator	32–34
organische Flüssigkeiten	34
organische Kristalle	33
plastik Szintillator	34
T	
Teilchenrate	18
U	
Ultraviolettstrahlung	34
Unschärferelation	6
V	
Valenzelektronen	33
Z	
Zeitdilatation	27, 29
Eigenzeit 27	
Zerfall 13	
Ä	
Äther	24, 25
ä	
äusserer lichtelektrischer Effekt . . .	35