

Versuch 2.6:

HÖHENSTRAHLUNG

Mit modernen Szintillationsdetektoren und einer umfangreichen Messelektronik werden in diesem Versuch verschiedene Eigenschaften der Höhenstrahlung untersucht. Durch Kombinieren von Energie- und Zeitmessungen kann neben dem Bestimmen und Vergleichen der Geschwindigkeiten von γ -Strahlen und Myonen auch die Winkelabhängigkeit und der Schauercharakter der Höhenstrahlung nachgewiesen werden. Ein weiterer Schwerpunkt des Versuchs liegt im Umgang mit der verwendeten Messelektronik und eingesetzten Messtechniken (Zeit-, Energie- und Koinzidenzmessungen). Mit der an den Praktikumstag anschließenden Langzeitmessung wird die Statistik der „vom Himmel kommenden“ Strahlung untersucht und zusätzlich ein Beitrag zu einer langangelegten Intensitätsverlaufsmessung von Myonenschauern geleistet.



Abbildung 1: Polarlicht, Elektronen der kosmischen Strahlung ionisieren in Polnähe die Atmosphäre

LITERATUR:

[1] C. Grupen, Astroteilchenphysik; 2000; [2] H. Frauenfelder/E.M. Henley, Teilchen und Kerne; 2002; [3] H.V. Klapdor-Kleingrothaus/K. Zuber, Teilchenastrophysik; 1997

Literaturliste in der Bibliothek des Instituts für Kernphysik

STICHWORTE:

Zusammensetzung / Entstehung der primären und sekundären kosmischen Strahlung, Schauerbildung (hadronisch und elektromagnetisch), Beschleunigungsmechanismen, Eigenschaften von Myonen, Abschneideenergie (atmosphärisches Cut-Off), Breiteneffekt, Ost-West-Effekt, Zerfall von ^{22}Na , Szintillationsdetektoren, Energiespektrum (Abschwächung im Szintillator)

Die in der Anleitung gestellten, kursiv gedruckten Fragen dienen als Anregung zum Nachdenken, sollen aber auch im Praktikum beantwortet werden können!

1. Geschichtliche Hintergründe

Den ersten Beweis für die Existenz extraterrestrischer Strahlung lieferte am 7. August 1912 der österreichische Physiker *Victor F. Hess*¹. Er startete an diesem Tag eine Versuchsreihe, deren Ziel es war, herauszufinden, ob die stets beobachtbare Ionisation der Luft in abgeschlossenen Gefäßen von erdnahe Strahlung stammt oder nicht. Selbst bei einer starken Bleiabschirmung, die frei von radioaktiven Verunreinigungen war, stellte sich eine gewisse Ionisation ein. Es musste also eine durchdringendere ionisierende Strahlung als die bereits bekannte γ -Strahlung der radioaktiven Isotope in Bodennähe geben. Hess führte an diesem Tag Messungen mit einer Ionisationskammer in einem Freiballon durch. Entstände die gesuchte Strahlung im Erdboden, müsste die Strahlung mit steigender Höhe nachlassen. Auf den ersten 700 Höhenmetern beobachtete Hess auch eine Abnahme der Ionisationskräfte (*Warum?*), danach allerdings stiegen sie bis zum Erreichen seiner Gipfelhöhe von 5300 m an, ohne dass Hess ein Ende der Zunahme sehen konnte (*Gibt es ein Maximum, wenn ja, wo?*). Er schloss dadurch auf die Existenz einer von außen in die Erdatmosphäre eindringenden Strahlung.

Diese Hess'sche Strahlung wurde auch von R.A. Millikan (1868-1953) untersucht, der ihr dann den Namen *Kosmische Strahlung* gab.

Beim Studium der Kosmischen Strahlung wurden im Laufe der Jahre viele Elementarteilchen entdeckt:

- 1932 das Positron
- 1937 die μ -Mesonen
- 1946 die π -Mesonen
- 1952/53 die Hyperionen
- 1956 das Neutrino

Die Untersuchung der Kosmischen Strahlung ist aber auch ein Teilgebiet der Astrophysik. Die primäre Kosmische Strahlung liefert Informationen über Beschleunigungsmechanismen und Ausbreitung der Strahlung im stellaren, galaktischen und intergalaktischen Raum.

2. Versuchsziel

In diesem Versuch sollen mehrere Eigenschaften der Höhenstrahlung untersucht werden. Dieser Versuch eignet sich außerdem dazu, das häufig verwendete Messprinzip der Koinzidenz kennen zu lernen. Eine sehr lange Messzeit wird benötigt, um Myonenschauer nachzuweisen und eine Statistik der harten Komponente der Höhenstrahlung aufzunehmen. Diese Messung geht über mehrere Tage. Zwei unterschiedliche Messwerterfassungsprogramme kommen parallel zum Einsatz. Der Aufbau und die Einstellungen der Messapparatur erfolgen am Praktikumstag; die Daten können in der darauffolgenden Woche abgeholt werden.

Am Praktikumstag selbst werden andere Untersuchungen zu Eigenschaften der Höhenstrahlung durchgeführt:

- Aufnahme eines Energiespektrums
- Messung der Lichtgeschwindigkeit anhand einer ^{22}Na -Quelle und Messung der Myonengeschwindigkeit
- Messung der Azimutwinkelverteilung

¹ Victor F. Hess, 1883-1964, erhielt 1936 den Nobel-Preis in Physik für die Entdeckung der Kosmischen Strahlung [http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1936/hess-bio.html]

3. Physikalische Grundlagen

3.1. Entstehung und Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Bei der kosmischen Strahlung muss zwischen Primär- und Sekundärstrahlung unterschieden werden. Die Primärstrahlung ist eine hochenergetische Partikelstrahlung aus dem galaktischen und extragalaktischen Raum, die durch stellare Supernovae und extragalaktischen Einfall entsteht.

Durch Wechselwirkungsprozesse der Partikel der Primärstrahlung mit Atomen der Atmosphäre ist sie auf der Erdoberfläche nicht messbar. Die auf Meereshöhe registrierbare Strahlung, die Sekundärstrahlung, ist das Resultat dieser Wechselwirkungsprozesse.

Die primäre kosmische Strahlung besteht zu fast 99% aus völlig ionisierten Kernen. Der überwiegende Teil, ca. 84 %, sind Wasserstoffkerne (Protonen), 12,5 % sind Helium-Kerne, und etwa 2,5 % der primären Strahlung sind Kerne mit einer Kernladungszahl $Z \geq 3$. Elektronen kommen nur zu ca. 1 % vor.

Diese primäre Strahlung stellt eine extraterrestrische und zum Teil extragalaktische Materieprobe dar, deren chemische Zusammensetzung der Elementhäufigkeit in unserem Sonnensystem stark ähnelt und damit auf einen gemeinsamen zeitlichen und örtlichen Ursprung des gesamten Weltalls hindeutet.

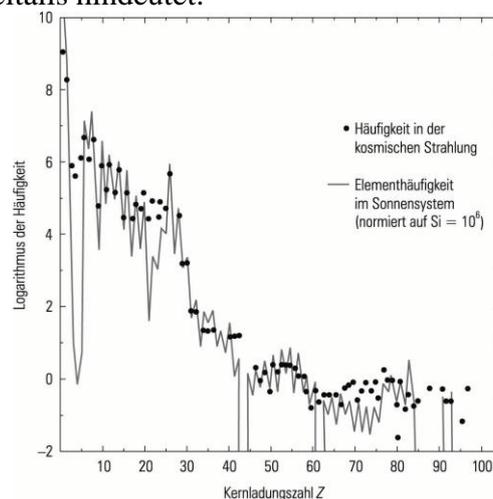


Abbildung 2: Elementhäufigkeit in der primären kosmischen Strahlung;[1] S.63

Das Energiespektrum lässt sich durch folgendes Potenzgesetz sehr gut beschreiben:

$$\frac{dN}{dE} = E^{-\gamma} \quad (1)$$

Für Energien bis $\cong 10^{15}$ eV ist $\gamma \cong 2,7$, darüber gilt $\gamma \cong 3$. Dieses „Knie“ im Spektrum deutet auf einen unterschiedlichen Ursprung der beiden Energiebereiche der kosmischen Strahlung hin. Oberhalb Energien von 10^{20} eV ist das Energiespektrum umstritten. Dies liegt daran, dass die beobachtbaren Flüsse (ab 10^{19} eV nur 2 Teilchen pro Quadratkilometer und Jahr) sehr große Nachweisdetektoren² erfordern und sehr schwer messbar sind („Knöchel“).

² Gegenstand höchst aktueller Forschung: Siehe http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home.html oder www.auger.de

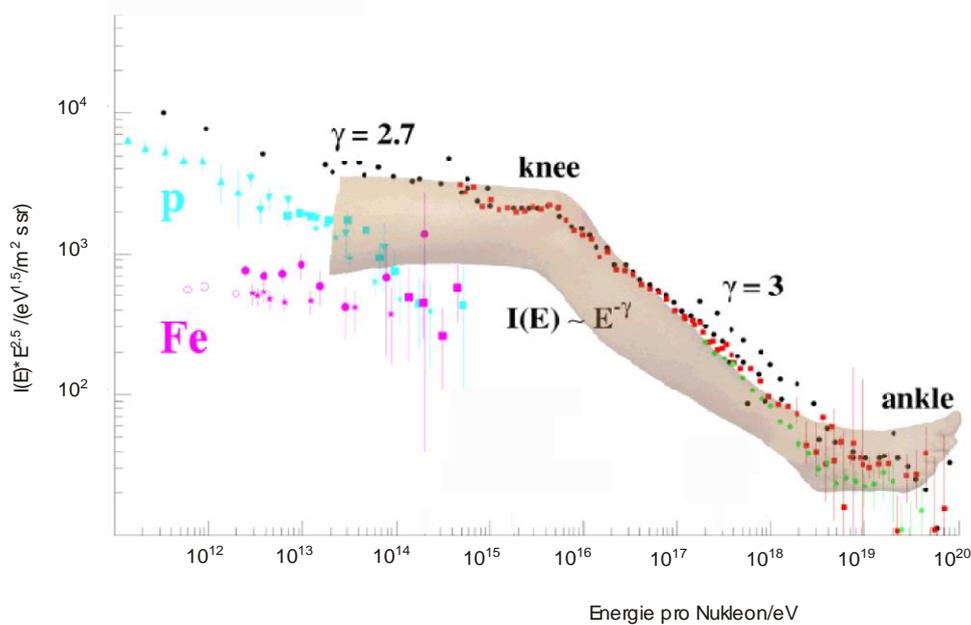


Abbildung 3: Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung, Intensitätsachse mit Faktor $E^{2,5}$ skaliert (sonst ist das Spektrum zu steil, um Strukturen erkennen zu können)

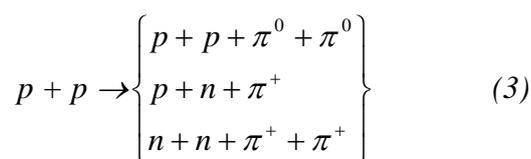
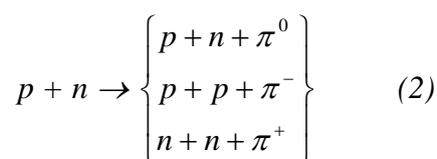
Für das Wechselwirkungsverhalten der primären kosmischen Strahlung ist die Dicke der Atmosphäre in Einheiten der charakteristischen Wechselwirkungslänge für die jeweilige Teilchensorte interessant. Für Photonen und Elektronen beträgt die Strahlungslänge $X_0 = 36,66 \text{ g/cm}^2$, für Hadronen beträgt die relevante Wechselwirkungslänge in Luft $\lambda = 90,0 \text{ g/cm}^2$. Die Massenbelegung der Atmosphäre beträgt etwa 1000 g/cm^2 (entsprechend dem atmosphärischen Druck von 1000 hPa). Dies bedeutet, dass die Atmosphäre ca. 27 Strahlungslängen bzw. 11 Wechselwirkungslängen tief/lang ist. Schon in Höhen von 15-20 km treten die ersten Wechselwirkungen auf und starten je nach Teilchen elektromagnetische und/oder hadronische Kaskaden. Bis die Strahlung auf Meereshöhe ankommt, ist von der primären kosmischen Strahlung nichts mehr erhalten.

Die entstehenden Luftschauer kann man folgendermaßen unterteilen:

- harte Komponente: Pionen, Myonen
- Nukleonen: Protonen, Neutronen, He-Kerne
- weiche Komponente: Elektronen, Positronen, Photonen
- Neutrinos

Die Propagation der primären kosmischen Strahlung lässt die Sekundärstrahlung entstehen:

Wechselwirkung der Protonen mit den Nukleonen der Atmosphäre:



Die entstandenen Protonen und Neutronen wechselwirken wieder über die gleichen Prozesse. Ein Ausgangsproton kann auf diese Weise bis zu 10^6 Sekundärteilchen erzeugen. So entstehen die sogenannten Schauer, die nachgewiesen werden können.

Die neutralen Pionen ergeben eine elektromagnetische Kaskade, die leicht absorbiert wird (weiche Komponente).



Die leptonen Zerfälle der geladenen Pionen erzeugen die durchdringende Myonen- und Neutrinkomponente.

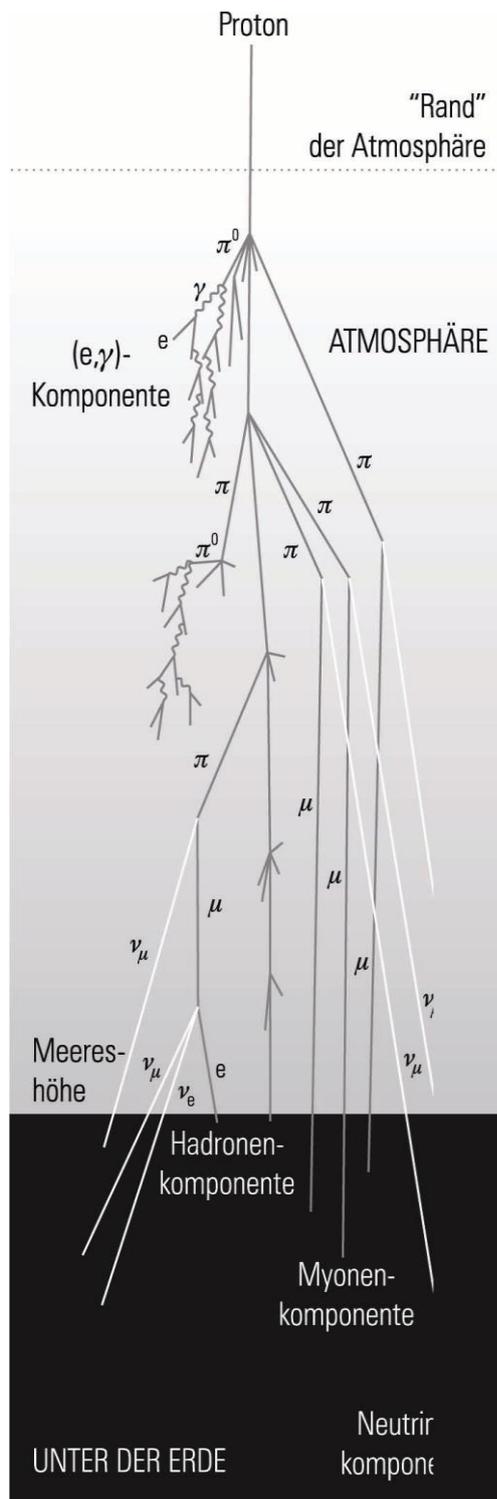
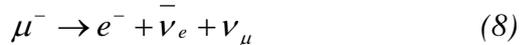
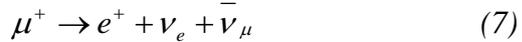


Abbildung 4: Transformation primärer kosmischer Strahlung in der Atmosphäre; [1] S.111

3.2. Eigenschaften der Myonenkomponente

Die auf Meereshöhe registrierte Strahlung besteht zu 80 % aus Myonen, zu ca. 20 % aus Elektronen und Positronen und zu ca. 1 % aus Hadronen.

Im Versuch werden fast ausschließlich hochenergetische Myonen und keine Elektronen registriert, da die weiche Komponente in der Decke absorbiert wird. Ein Teil der Myonen kann auch zerfallen und trägt über die Zerfallselektronen zur weichen und über die Zerfallsneutrinos zur Neutrinkomponente bei.



Charakteristische Werte von Myonen:

Ruhemasse: $m_\mu = 206,77 m_e = 105,66 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

Ladung: $q = \pm 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Spin: $s = \frac{1}{2} \hbar$

Lebensdauer: $\tau = (2,19703 \pm 0,00004) \cdot 10^{-6} \text{ s}$

In alter Literatur wird das Myon als μ -Meson bezeichnet. Weiterhin gebräuchlich ist die Bezeichnung schweres Elektron.

Myonen dürften mit ihrer Lebensdauer von $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ (klassisch entspricht dies bei Lichtgeschwindigkeit einem Zerfallsweg von 600 m) die Atmosphäre nicht durchdringen. Sie erreichen die Meeresoberfläche nur deshalb, weil sie sich aufgrund ihrer hohen Energien relativistisch bewegen und so aufgrund der Zeitdilatation nicht vorher zerfallen.

(Welche Lebensdauer besitzt ein Myon im Bezugssystem Erde? Wie weit kommt es dort, bis es zerfallen ist?)

4. Versuchsaufbau (Technische Grundlagen)

4.1. Detektoreinheit

Szintillationsdetektoren:

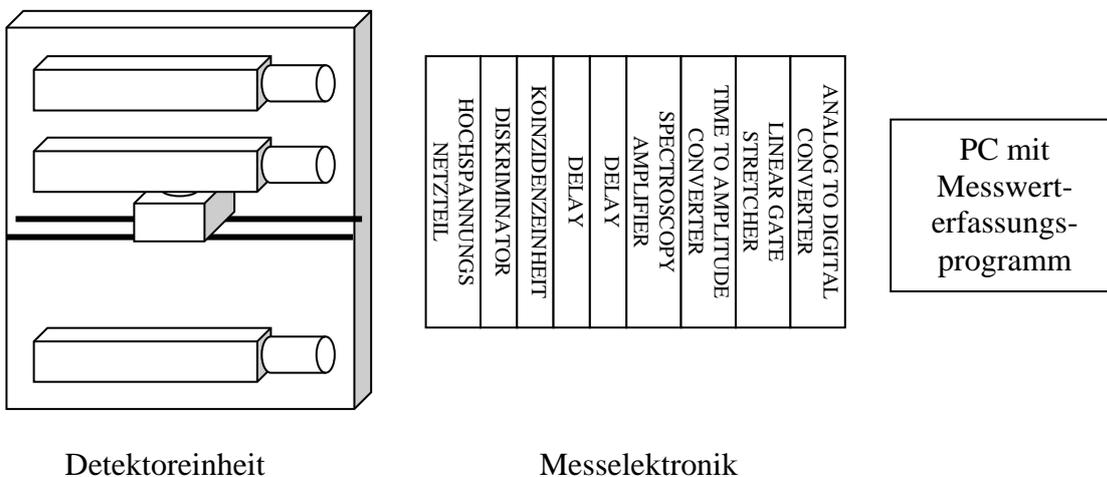
In diesem Versuch werden Plastiksziintillatoren verwendet. Diese Detektoren bestehen aus einem Trägermaterial (Plastik), in das eine geringe Menge an Szintillationsmaterial, eine fluoreszierende organische Substanz, eingearbeitet ist. Plastiksziintillatoren sind für die durchzuführenden Messungen sinnvoll, da sie sich durch eine hohe zeitliche Auflösung auszeichnen.

Beim Durchgang von energiereicher Strahlung oder geladener Teilchen werden die Atome oder Moleküle des Szintillationsmaterials angeregt und emittieren beim Übergang in den Grundzustand Lichtblitze (\rightarrow Fluoreszenz: Erreichen des Grundzustandes innerhalb von 10^{-8} s). Diese Lichtblitze werden an der lichtdicht verschlossenen Oberfläche der Detektoren durch angebrachte Aluminiumfolie reflektiert und gelangen schließlich zum Lichtleiter. Der Lichtleiter ist die Verbindung von Szintillator zu Photomultiplier.

Photomultiplier:

Die Lichtblitze treffen am Eingang des Photomultipliers auf eine Photokathode und schlagen dort einige Elektronen los, die durch ein Dynoden-System, an dem Hochspannung anliegt, beschleunigt werden. So entstehen schließlich $\sim 10^7$ Sekundärelektronen pro primärem Elektron, die dann von der Messelektronik registriert werden können.

4.2. Versuchsskizze

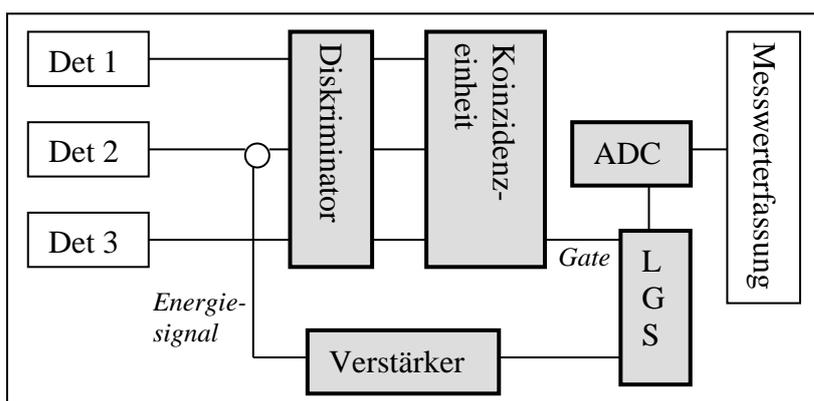


Detektoreinheit

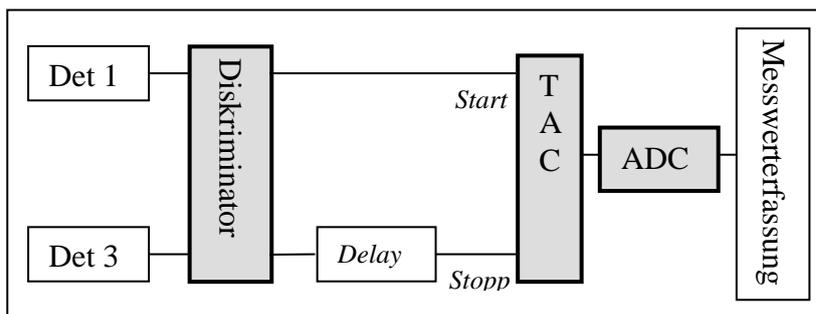
Messelektronik

(Warum spricht man bei dieser Anordnung der drehbar gelagerten Detektoren und einer Koinzidenzmessung von einem Teleskop-Detektor?)

4.3. Schaltskizze Energiemessung



4.4. Schaltskizze Zeitmessung

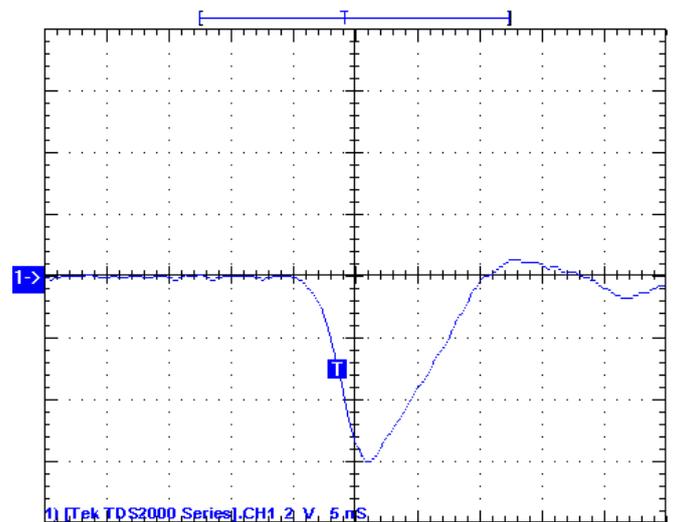


5. Versuchsdurchführung

5.1. Signale der einzelnen Elektronikkomponenten überprüfen

Vorverstärkersignale (Detektorsignale)

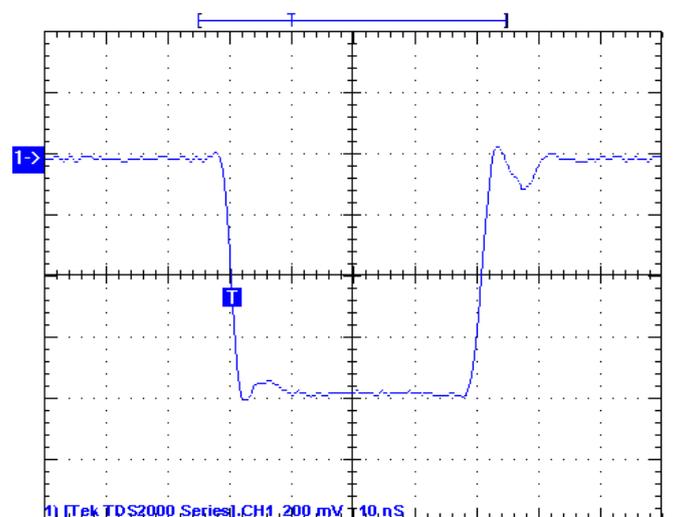
Die Photomultiplier verstärken die durch geladene Teilchen im Detektor entstandenen Signale. Je nach Menge der im Detektor deponierten Energie (abhängig von der Energie der Teilchen) variiert die Amplitude der Signale.



Diskriminatorsignale

Der Diskriminator wandelt alle Vorverstärkersignale, die einen bestimmten (einstellbaren) Schwellwert überschreiten, in logische Signale um.

(Warum wird an dieser Stelle mit einem Schwellwert gearbeitet, und in welcher Phase des Versuchs muss dieser geändert werden?)

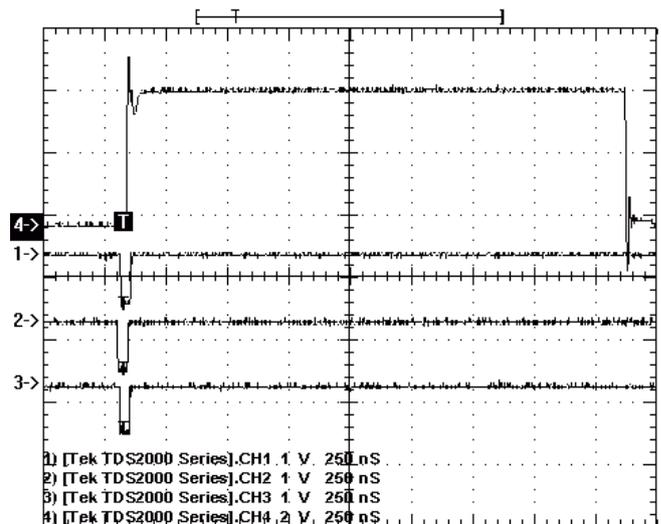


Koinzidenzeinheit

Die Koinzidenzeinheit verarbeitet schnelle Signale (\sim ns-Bereich) und gibt langsame Signale aus (\sim μ s-Bereich). Überlappen sich die vom Diskriminator kommenden Signale zeitlich, so gibt die Koinzidenzeinheit ein Signal weiter. Das Koinzidenzsignal wird als Gate für die Energiemessung benutzt (siehe Verstärkersignal).

Die Kanäle 1-3 im rechten Bild sind die Diskriminatorsignale der Detektoren 1-3. Kanal 4 ist das Ausgangssignal.

(Die Signalkabel von Detektor zu Diskriminator sind unterschiedlich lang. Warum?)



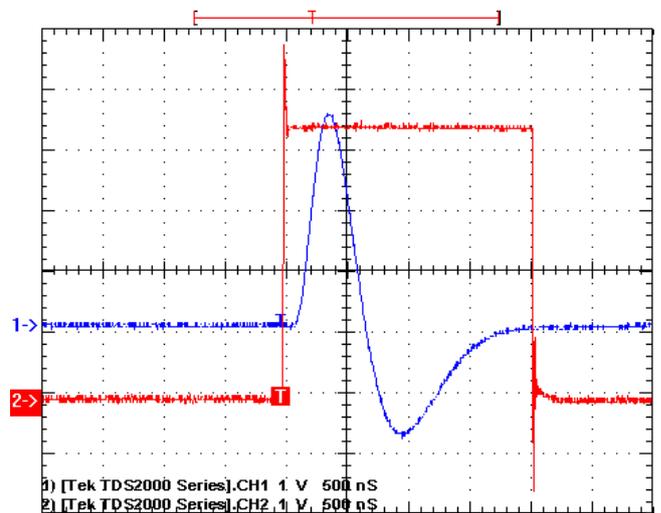
Verstärkersignal

Das Vorverstärkersignal eines Detektors wird vor dem Diskriminator gesplittet, da dieser die Energieinformation des Signals verliert.

Die Vorverstärkersignale werden vom Spectroscopy Amplifier invertiert und so umgeformt, dass sie der Analog to Digital Converter (ADC) verarbeiten kann.

Im Oszilloskop-Bild sieht man die zeitliche Übereinstimmung eines Energiesignals des Verstärkers mit dem Koinzidenzsignal. Diese beiden Signale werden an den ADC gegeben. Arbeitet der ADC im Koinzidenzmodus, werden nur diejenigen Energiesignale an das Messwerterfassungsprogramm weitergegeben, die während der Signaldauer des Koinzidenzsignals ankommen. Das Koinzidenzsignal „öffnet ein Tor“, deshalb spricht man von einem „GATE“.

Liegt das Energiesignal z.B. aufgrund unterschiedlich langer Kabellängen und damit unterschiedlich langer Signallaufzeiten nicht innerhalb des Koinzidenzsignals, kommt ein LGS (Linear Gate Stretcher) zum Einsatz.



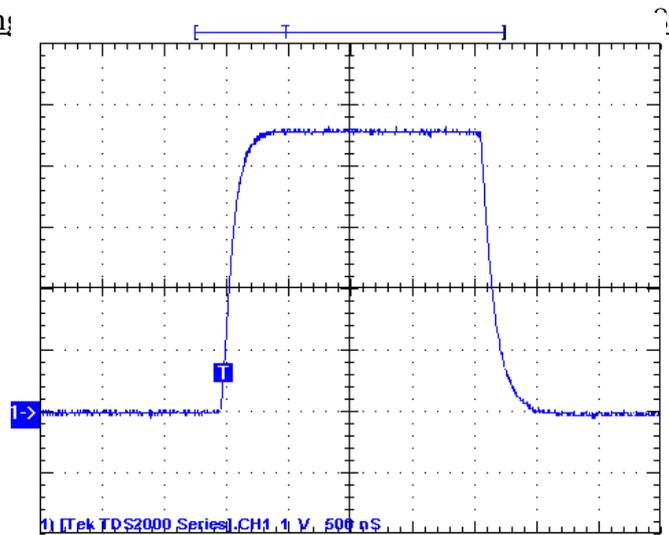
Mit diesem Bauteil kann das GATE-Signal gestreckt werden. Trifft innerhalb des gestreckten GATE-Signals nun ein Signal am INPUT-Eingang ein, gibt der LGS ein Signal am OUTPUT weiter, das direkt vom ADC verarbeitet werden kann.

Zeitsignal (TAC)

Der Time to Amplitude Converter (TAC) verfügt über einen Start- und Stopp-Eingang. Ein Signal am Start-Eingang öffnet ein Zeitfenster. Trifft innerhalb dieses Zeitfensters ein Signal am Stopp-Eingang ein, gibt der TAC ein Signal weiter. Sonst schließt er das Fenster, gibt kein Signal weiter und wartet auf das nächste Start-Signal. Je nach zeitlicher Differenz der Start- und Stopp-Signale hat das Ausgangssignal eine unterschiedlich hohe Amplitude. Diese Signale können wie die Energiesignale vom ADC verarbeitet werden. Der ADC ordnet die

Anleitung zum Versuch 2.6 Höhenstrahlung:

Signale je nach Signalhöhe einem von 1024 Kanälen zu. Im TAC-Spektrum sind Ereignisse über Zeitdifferenz aufgetragen.



5.2. Energiespektrum von Natrium – Energieeichung

Als erste Messung soll ein Energiespektrum von ^{22}Na aufgenommen werden (Messzeit: 300 s).

(Wie sieht das mit einem Plastiksintillator aufgenommene Energiespektrum aus? Wo liegen die Comptonkanten von ^{22}Na ?)

Zu Beginn muss die Schwelleneinstellung geändert werden. Für diese Messung wird das Programm MAESTRO verwendet. (Falls nötig, gibt der Betreuer eine Benutzungseinführung)

Die Handhabung radioaktiver Quellen erfolgt ausschließlich durch den Betreuer!!

Mit diesem Spektrum ist eine Energieeichung durchzuführen.

Bei weiteren Messungen mit anderen Verstärkungsparametern (*coarse- und fine-gain*) ist zu beachten, dass die Verstärkungsfaktoren des *Spectroscopy Amplifiers Ortec 472 A* energieabhängig sind (bzw. ein Offset vorhanden ist). Es muss gegebenenfalls eine erneute Energieeichung durchgeführt werden.

5.3. Starten der Energiemessung von Myonen

Über die Mittagszeit kann das Energiespektrum der Myonen aufgenommen werden. Dazu sind die Schwellen am Diskriminator einzuregeln.

(Welche Schwellenwerte sind sinnvoll?)

5.4. Winkelverteilung

Die kosmische Strahlung muss abhängig vom Zenitwinkel Θ eine unterschiedlich dicke Atmosphärenschicht durchdringen. Daher wird sie nicht gleich stark absorbiert. Die aus diesem Effekt resultierende Intensitätsverteilung ist $\cos^n \Theta$ -abhängig.

Um n zu bestimmen, ist bei $\Theta = \pm 30^\circ$ und $\Theta = \pm 60^\circ$ jeweils 10 Minuten zu messen. Für $\Theta = 0^\circ$ kann die Energiemessung der Myonen herangezogen werden³.

³ Wer Interesse hat, kann mit diesen Messwerten den Ost-West-Asymmetriekoeffizienten ausrechnen. Wegen der **viel** zu geringen Zählrate und systematischer Fehler ist dieser Wert aber mit sehr großer Vorsicht zu

betrachten. Asymmetriekoeffizient:
$$\varepsilon = \frac{\sum(I_w(\Theta) - I_o(\Theta))}{\sum(I_w(\Theta) + I_o(\Theta))}$$

Für diese Messungen muss der Versuchsaufbau in Nord-Süd-Richtung (Kompass am Gestell) ausgerichtet werden, damit die Detektoren parallel zu den Erdmagnetfeldlinien stehen.

***Vor dem Drehen des Versuchsaufbaus die Bleiklötze herausnehmen!!
Beim Drehen auf die Kabel achten!!***

(Während dieser Messungen ist es sinnvoll, sich über das Vorgehen bei den folgenden Zeitmessungen Gedanken zu machen.)

5.5. Zeitspektrum – Zeiteichung

Um ein Zeitspektrum zu eichen, wird eine Delayeinheit benutzt. Die Delayeinheit besteht aus aufgewickelten Kabeln, die sich beliebig zu- oder wegschalten lassen. Durchläuft das Signal ein zusätzliches Kabel, braucht es dazu eine linear von der Kabellänge abhängige Zeit (5 ns Verzögerung pro Meter Kabel). An der Signalform ändert sich nichts (kann mit dem Oszilloskop überprüft werden).

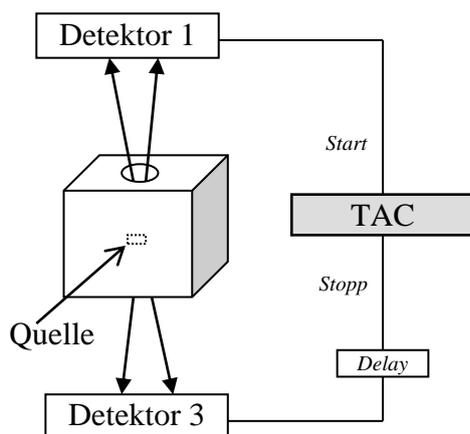
Zur Bestimmung der Eichparameter ein Diskriminatorsignal eines Detektors auf Start- und verzögert auf Stopp-Eingang des TAC geben. 3 Messpunkte genügen.

5.6. Zeitausgleich bestimmen (mehrere Messungen)

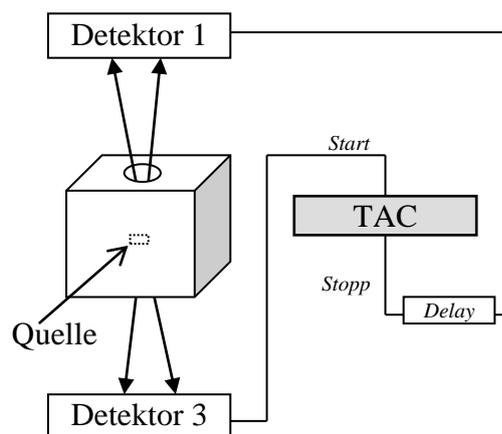
Bei der Geschwindigkeitsmessung ist es notwendig, darauf zu achten, dass die Signalwege der einzelnen Detektoren gleichlang sind, da sonst systematische Fehler die Messung verfälschen oder unmöglich machen.

Um dies zu überprüfen, wird die Na-Quelle in die Kollimierungseinheit gegeben und in einem Plot ein Spektrum der Messung 1 und ein Spektrum der Messung 2 aufgenommen (Messzeit je ~300 Sekunden).

Messung 1:



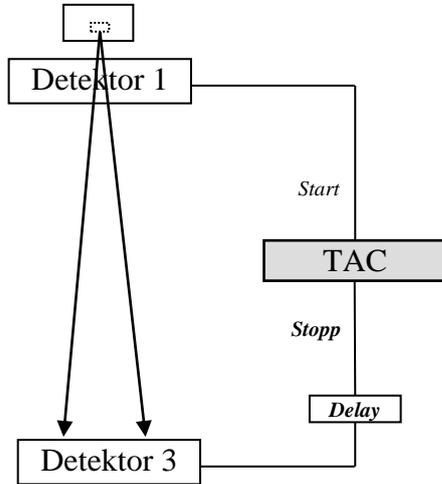
Messung 2:



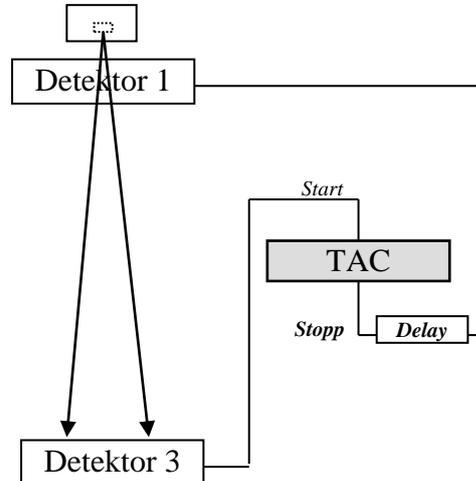
(Warum wird eine Natrium-Quelle in die Kollimierungseinheit gegeben? Welches Zeitspektrum wird erwartet? Warum ist ein Delay notwendig? Woher kommen die Abweichungen, und wie können sie ausgeglichen werden?)

5.7. Geschwindigkeitsmessung von Gamma Strahlen

Messung 1:



Messung 2:



Für diese Messungen (Messzeit: je 300 s) wird ein Bleiklotz des Kollimators in die Vorrichtung am oberen Querrahmen des Versuchs gelegt und die Quelle dort positioniert.

(Wie lässt sich mit diesen Messungen eine Flugzeitbestimmung durchführen? Warum ist ein Delay notwendig?)

Bestimmen Sie die Flugzeit, und führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch.

5.8. Geschwindigkeitsmessung von Myonen

Die Messung der Myonengeschwindigkeit erfolgt analog Punkt 5.7 (Messzeit: je 900 s).

(Welche Einstellungen müssen wieder geändert werden?)

(Welche Werte ändern sich bei der Myonen-Messung?)

5.9. Starten der Schauermessung

Versuchsaufbau horizontal ausrichten (**!!!Vorher Bleikollimator entfernen!!!**).

Aufbau: Det 1 Start - Det 3 mit Delay Stop

Bei MAESTRO unter Acquire/MCB Properties (Zeitvorwahl) folgende Einstellungen wählen:

Preset Art: Real time

Wert: 86400 s

Als GATE verwenden Sie die Zweifachkoinzidenz der äußeren Detektoren⁴.

(Warum können so Schauer gemessen werden, und warum werden die zwei Messungen parallel durchgeführt?)

⁴ Wichtig für Korrektur der Winkelverteilung: Die Zählrate bei Dreifachkoinzidenz verringert sich auf ~ 30 % der Zweifachkoinzidenzzählrate.

Ende des Praktikumstages

Empfohlene Einstellungen an den Geräten:

2 Hochspannungs-Netzteile (Ortec 556)

Hochspannung: 1,6 kV (*vorgeschrieben!!*)

Diskriminator (C.A.E.N. N413 A)

Schwellen mit Schraubenzieher an THR (Threshold: Schwelle) einstellen.

Natriummessung: *runterregeln auf ~0,011 V*

Myonenmessung: *0,140 V*

Mit Multimeter überprüfen.

Koinzidenzeinheit (Nachbau Canberra Modell 2040)

3-fach-Koinzidenz: *Kanal 1-3: Hebel Stellung AND*

2-fach-Koinzidenz: *am zu entfernenden Kanal Hebel Stellung 0*

Spectroscopy Amplifier (Ortec 472 A)

Coarse gain: 200

Fine gain: 0

Shaping time: 0,25 μ s

TAC (Ortec 567)

Range: 100 ns

Multipliiert: 1

ADC (Ortec EASY-MCA)

Koinzidenzmessung: Gate

6. Auswertung des Versuchs

Teil A:

Fertigen Sie eine verständlich erklärte Darstellung des Versuchsaufbaus mit Schwerpunkt auf die Messelektronik an. Erläutern sie die Funktionsweise und Aufgaben der einzelnen Komponenten.

Teil B:

Messergebnisse:

- Fertigen Sie ein geeichtes Energiespektrum an. Begründen Sie kurz die Form, und erläutern Sie die Bedeutung/Erkenntnisse für den Versuch.
- Vergleichen Sie die gemessenen Geschwindigkeiten (mit Fehlerbetrachtung) von γ -Strahlen und kosmischen Myonen. Was ergibt der Vergleich mit den Literaturwerten?
- Tragen Sie Ihre Messergebnisse der Intensitäts-Winkelverteilungsmessung grafisch auf. Bestimmen Sie den Parameter n der $\cos^n \Theta$ -Verteilung.

Diskutieren Sie die Auswirkungen Ihrer Schauerreihenenergieergebnisse auf die Winkelverteilungsmessung. Welche Bereinigung der Messwerte um die Schauerkoizidenzen ist sinnvoll?

Vergleichen Sie nun beide Ergebnisse mit den Literaturangaben.

- Woher kommen die Unterschiede in den Zählraten von Schauer- und Energiemessung?