

# Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum

## Landé-Faktor des Myons

– Vorbereitung –

Armin Burgmeier

Robert Schittny

### 1 Grundlagen

In diesem Versuch wollen wir die Lebensdauer und den Landé-Faktor des Myons bestimmen. Dazu analysieren wir der kosmischen Höhenstrahlung entstammende Myonen.

#### 1.1 Höhenstrahlung

Die kosmische Höhenstrahlung besteht zum größten Teil aus Protonen mit Energien zwischen  $10^6$  eV und  $10^{21}$  eV. Diese Teilchen werden *Primärteilchen* genannt. Durch Wechselwirkungen mit der Erdatmosphäre verlieren sie Energie und erzeugen *Sekundärteilchen*, im wesentlichen Protonen, Neutronen und Pionen. Diese erzeugen so lange weitere Sekundärteilchen, bis deren Energie nicht mehr zur weiteren Erzeugung ausreicht. Die Gesamtheit an Sekundärteilchen die, von einem Primärteilchen erzeugt wird, bezeichnet man auch als *Kernkaskade*.

Die Pionen der Kernkaskade zerfallen weiter. Die neutralen Pionen zerfallen rasch ( $\tau = 8,4 \cdot 10^{-17}$  s) in zwei Photonen, die durch Paarbildung Elektron/Positron-Paare erzeugen. Durch Bremsstrahlung in den elektrischen Feldern der umliegenden Kerne entstehen hierbei wieder Photonen, und der Prozess wiederholt sich solange bis die Photonenenergien so klein sind, dass keine Paarbildung mehr möglich oder von anderen Wechselwirkungen unterdrückt ist. Dies nennt man die *elektromagnetische Kaskade*. Teilchen der Kern- und der elektromagnetischen Kaskade erreichen die Erdoberfläche wegen Wechselwirkung mit der Materie der Luft in der Regel nicht.

**Pion-Zerfall** Die geladenen Pionen zerfallen in Myonen und Myon-Neutrinos:

## 1 Grundlagen

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Ein Zerfall in Elektron bzw. Positron ist auch denkbar, allerdings ist dieser wegen der Helizität unterdrückt. Die Helizität  $H$  gibt an, ob der Spin eines Teilchens parallel ( $H = +1$ ) oder antiparallel ( $H = -1$ ) zum Impuls des Teilchens ausgerichtet ist. Erstere Teilchen bezeichnet man auch als *rechtshändig* und letztere als *linkshändig*. In der Natur treten nun bevorzugt linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen auf (auch als Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung bekannt). Die Wahrscheinlichkeit dafür geht dabei proportional mit der Geschwindigkeit der Teilchen. Für Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit gilt immer, dass Teilchen linkshändig und Antiteilchen rechtshändig sind.

Da Pionen Bosonen mit Spin 0 sind, muss der Spin von Myon und Neutrino wegen der Drehimpulserhaltung unterschiedlich ausgerichtet sein. Da das Neutrino nur eine sehr kleine Masse hat erhält es nahezu immer die bevorzugte Helizität. Myonen sind jedoch deutlich schwerer als Elektronen, und damit langsamer, sodass eine Helizitätsverletzung bei Myonen sehr viel wahrscheinlicher ist.

**Myoneinfang** Die  $\mu^-$  können nun genauso wie Elektronen von Kernen eingefangen werden. Da es sich um andere Teilchen als Elektronen handelt gelangen sie direkt in die innerste Schale (das Pauliprinzip gilt nur bei identischen Teilchen, dies ist also auch erlaubt, wenn die innerste Schale schon mit Elektronen besetzt ist). Dort findet in der Regel analog zum Elektroneneinfang ein Myoneneinfang statt, der den Kern ändert:

$$p + \mu^- \rightarrow n + \nu_\mu$$

Dieser Prozess ist beim  $\mu^-$  wahrscheinlicher als beim Elektron, da der Radius der Bohrschen Bahn kleiner ist, bzw. die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Bereich des Kerns erheblich größer. Aus diesem Grund sind auf der Erdoberfläche nahezu nur noch  $\mu^+$  nachzuweisen, bei denen dieser Prozess nicht stattfindet.

**Myon-Zerfall** Die Myonen zerfallen mit einer Lebensdauer von  $\tau = 2,19 \cdot 10^{-6}$  s in Elektronen bzw. Positronen:

$$\begin{aligned}\mu^+ &\rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e\end{aligned}$$

Das entspricht einer Wegstrecke von etwa 600 m. Da die kinetische Energie der Myonen allerdings ein Vielfaches ihrer Ruhemasse beträgt ( $\gamma = E_{tot}/E_0 \approx 100$ ), machen sich relativistische Effekte bemerkbar. Aus dem System des Myons betrachtet erscheint die Strecke bis zur Erdoberfläche kontrahiert, von der Erde aus gesehen vergeht die Zeit für das Myon langsamer, sodass es erst später zerfällt. Effektiv beträgt die Wegstrecke daher

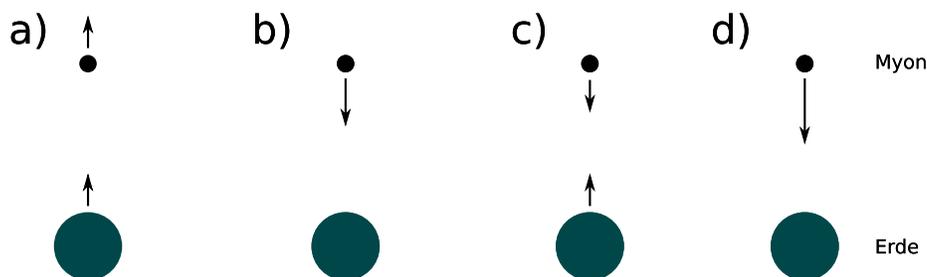


Abbildung 1: a: Entgegen der Richtung der Erde ausgesandtes Myon im Ruhesystem des Pions. b: Die vorherige Situation im Ruhesystem der Erde. c: In die Richtung der Erde ausgesandtes Myon im Ruhesystem des Pions. d: Die vorherige Situation im Ruhesystem der Erde.

etwa 60 km, was dafür ausreicht, dass ein signifikanter Anteil der  $\mu^+$  an der Erdoberfläche ankommt und nachgewiesen werden kann.

**Polarisation** Man nennt einen Myonenstrom *polarisiert*, wenn eine Spinausrichtung dominiert, also deutlich häufiger vorkommt als die andere. Beim Zerfall des Pions, welches das Myon erzeugt, kann es vorkommen, dass, vom Pion-Ruhesystem aus betrachtet, das Myon entweder in Richtung der Erde oder entgegengesetzt emittiert wird. In beiden Fällen ist wie oben diskutiert die Spinausrichtung antiparallel zum Impuls, es handelt sich also um ein linkshändiges Antiteilchen. Außerdem ist die Energie des Myons immer gleich.

Von der Erde aus betrachtet stellt sich dies jedoch anders dar (siehe Abbildung 1.1): Der Impuls und damit die Energie des Myons ist im Ruhesystem der Erde größer, wenn es in Richtung der Erde emittiert wurde, und kleiner, wenn es in die entgegengesetzte Richtung ausgesandt wurde. In letzterem Fall ist auch zu erkennen, dass durch die Transformation der Impuls seine Richtung ändert. Da der Spin seine Ausrichtung beibehält, ändert sich damit die Helizität des Teilchens: Entgegen der Erde ausgesandte Myonen sind rechtshändig, in Richtung der Erde ausgesandte Myonen sind linkshändig.

Die Polarisation der Myonen ist somit abhängig von ihrer Energie: Höherenergetische Myonen sind linkshändig, niederenergetischere rechtshändig.

## 1.2 Landé-Faktor

Ein magnetisches Moment  $\mu$  im Magnetfeld  $B$  erfährt eine Kraft:

$$\frac{d\mu}{dt} = \gamma \mu \times \mathbf{B} \quad (1)$$

wobei  $\gamma$  das gyromagnetische Verhältnis bezeichnet. Dies entspricht einer Präzession mit der Frequenz

$$\omega = \gamma |\mathbf{B}| = \frac{g\mu_B}{\hbar} |\mathbf{B}| \quad (2)$$

## 2 Messprinzip

mit dem Landé-Faktor  $g$ . Für einen Spin  $1/2$  beträgt er etwa 2. Durch Messung der Präzessionsfrequenz  $\omega$  kann er bei bekanntem  $B$  direkt ermittelt werden:

$$g = \frac{\hbar\omega}{\mu_B |\mathbf{B}|} \quad (3)$$

## 2 Messprinzip

Wir wollen in diesem Versuch die Lebensdauer und den Landé-Faktor des Myons bestimmen.

### 2.1 Nachweis des Myon-Zerfalls

Das Ende der Lebensdauer  $\tau$  eines  $\mu^+$  wird durch das Auftreten des dabei entstehenden Positrons gekennzeichnet. Das Spektrum der Zerfallspositronen hat dabei die Form

$$\frac{dN}{d\varepsilon d\Omega} = \frac{\varepsilon^2}{2\pi} ((3 - 2\varepsilon) - P(1 - 2\varepsilon) \cos \theta) , \quad (4)$$

mit der Polarisation  $P$ , der relativen Positronenenergie  $\varepsilon = E/E_{max}$  mit  $E_{max} = m_\mu c^2/2$  und dem Winkel  $\theta$  zwischen Spin des Myons und Impuls des Positrons.

Das Spektrum weist also eine räumliche Asymmetrie bezüglich des Spins des Myons auf, wobei das Positron bevorzugt in Richtung des Spins ausgesandt wird. Die Asymmetrie wächst dabei mit höheren Energien.

Niederenergetische Positronen erreichen den Detektor überhaupt nicht, weshalb beim Nachweis eine untere Schwelle besteht.

### 2.2 Prinzip der Messung

Zur Messung der mittleren Lebensdauer  $\tau$  der Myonen wird als Startzeitpunkt die Abbremsung des Myons im Detektor verwendet, als Stoppzeitpunkt das Auftreten des Positrons aus dem Zerfall des Myons. Für viele wiederholte Messungen erhalten wir dadurch die Anzahl  $N(t)$  an Myonen, die nach der Zeit  $t$  zerfallen. Diese folgt dem Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (5)$$

Zur Messung des Landéfaktors des Myons benötigen wir zusätzlich die Präzessionsfrequenz  $\omega$ , die wir über zwei Ergänzungen erhalten. Einerseits wird ein konstantes Magnetfeld über das Stopptarget gelegt, so dass die Spins der einfallenden Myonen präzedieren. Andererseits werden nur die Positronen gemessen, die in eine bestimmte Richtung emittiert werden. Die Zählrate ist dann mit der Präzessionsfrequenz moduliert und am kleinsten, wenn der Myonenspin entgegen der Emissionsrichtung der Positronen zeigt, am größten bei gleicher Richtung.

### 3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus drei übereinanderliegenden Szintillatorplatten, wobei sich zwischen der zweiten und dritten Platte eine gleich dicke Kupferplatte befindet, die die Myonen stoppen soll.

Der Start einer Lebensdauermessung erfolgt bei einer Koinzidenz der beiden oberen zusammen mit einer Antikoinzidenz mit dem unteren Szintillator, also  $1 + 2 + \bar{3}$ . Dies entspricht einem gestoppten Myon. Erreicht nun ein Positron entweder den zweiten oder dritten Szintillator (also über oder unter der Kupferplatte, in der das Myon gestoppt wurde), kann die Lebensdauermessung beendet werden. Um zufällige Stopps durch weitere Ereignisse der Höhenstrahlung zu vermeiden, wählt man  $2 + \bar{3}$  oder  $3 + \bar{2}$ . Eine weitere Verbesserung stellt die Signatur  $1 + 2 + \bar{3}$  dar, die allerdings eine Verringerung der Zählrate mit sich bringt, da sie die Schwelle für den Positronennachweise hin zu höherer Asymmetrie und somit höherer Energie verschiebt.

Beim letzten besprochenen Fall haben nun aber Start- und Stoppsignal die gleiche Signatur, was den Start des TAC (Zeit-Amplituden-Konverter) verhindert. Um eine Messung trotzdem zu ermöglichen, wird im Startkreis eine Verzögerung von wenigen Nanosekunden eingebaut. Ein  $1 + 2 + \bar{3}$ -Signal erreicht damit den Starteingang erst, wenn das Stoppsignal bereits vorbei ist, was die Messung startet. Beim nächsten Signal spricht zuerst das Stoppsignal an, was die Messung beendet. Der unmittelbar darauf folgende (falsche) Start wird ignoriert, weil der TAC einige Zeit braucht, um das Amplitudensignal zu generieren und dabei die Eingänge ignoriert.