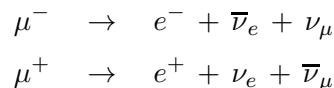


Das Myonen-Experiment von Rossi und Hall (1941)

Diese Ergänzung entstammt im Wesentlichen dem Buch **H.&M. Ruder: Die Spezielle Relativitätstheorie**, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden (1993)

Myonen und kosmische Strahlung

Myonen (μ^- und μ^+ , sprich: "Müon") sind instabile geladene Teilchen,¹ die entstehen, wenn **kosmische Strahlung**² in die Erdatmosphäre eindringt. Sie zerfallen nach kurzer Zeit in ein Elektron resp. Positron, ein Neutrino und ein Antineutrino:



Die Halbwertszeit dieser Zerfälle beträgt im Ruhesystem der Myonen $T_{1/2} \approx 1.52\mu\text{s} = 1.52 \cdot 10^{-6} \text{ s}$.

Das tatsächlich durchgeführte Myonen-Experiment

Ein Experiment dieser Art wurde 1941 von **B. Rossi** und **D.B. Hall** durchgeführt. Ein Detektor (Plastik-Scintillationszähler) wurde so gebaut, dass er nur Myonen einer ganz bestimmten Geschwindigkeit registriert. Ein Myon muss, um gezählt zu werden, im Szintillator zur Ruhe kommen und dort zerfallen. Man kann einen bestimmten Geschwindigkeitswert aussondern, indem man nur diejenigen Myonen berücksichtigt, die in einer bestimmten, relativ geringen Schichtdicke des Plastikmaterials nach Durchlaufen einer bestimmten Schichtdicke von Materie (Eisen und Luft) steckenbleiben. Myonen mit einer geringeren Geschwindigkeit als der ausgewählten werden abgestoppt, bevor sie die Plastikschrift erreichen; solche mit höherer Geschwindigkeit durchschlagen die Plastikschrift und werden ebenfalls nicht registriert.

Wie schon erwähnt, entstehen Myonen beim Eintreten kosmischer Strahlen in die Erdatmosphäre, also in grosser Höhe ($\approx 10 \text{ km}$). Sie bewegen sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zur Erde hin. Das Experiment (vgl. Bild) besteht in der Messung des Zerfalls dieser schnellen Myonen im Laborsystem, verglichen mit dem Zerfall im Ruhesystem der Myonen.

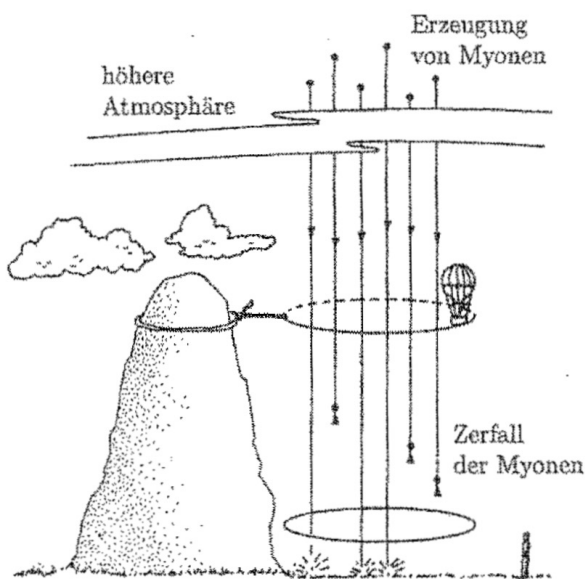


Bild: Das Myonen-Experiment von Rossi und Hall 1941 (aus Einsteins Ideen, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 1988)

¹Myonen sind in der Teilchenphysik die "schwereren Brüder" der Elektronen e^- und Positronen e^+ . Abgesehen davon, dass sie viel mehr Masse besitzen und deshalb auch instabil sind, verhalten sie sich nämlich gleich wie jene und zählen deshalb zur selben Teilchenfamilie (Leptonen).

²Diese kosmische Strahlung besteht typischerweise aus hochenergetischen Protonen und γ -Teilchen. Ein einziges Primärteilchen erzeugt eine ganze Teilchenschauer, zu der eben auch Myonen gehören, die bis zur Erdoberfläche vordringen können.

Dazu wurde ein Detektor A in einer Höhe von 1910 m auf dem Gipfel des Mt. Washington, New Hampshire, aufgestellt. Dieser Detektor war so eingestellt, dass nur solche Myonen gezählt wurden, die sich mit einer Geschwindigkeit zwischen $0.9950c$ und $0.9954c$, also im Mittel mit 99.52 % der Lichtgeschwindigkeit, bewegten. Es ergab sich eine Zählrate von 563 ± 10 Myonen pro Stunde. Ein baugleicher Detektor B, aufgestellt in einer Höhe von nur 3 m über dem Meeresspiegel, ergab eine Zählrate von 408 ± 9 Myonen pro Stunde. (Das Experiment setzt natürlich voraus, dass die Intensität der kosmischen Strahlung zeitlich und räumlich über die im Experiment auftretenden Zeiten und Abstände konstant ist.)

Das Resultat des Myonen-Experimentes

Wir wollen nun das Messergebnis auswerten. Dazu sei zuvor an das Zerfallsgesetz erinnert:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$N_0 = 563$ ist die Zahl der Myonen zur Zeit $t = 0$ ($\hat{=}$ gezählte Myonen pro Stunde im Detektor A), $N(t)$ die Zahl der zur Zeit t noch nicht zerfallenen Myonen und $T_{1/2}$ die Halbwertszeit, die sich für ruhende Myonen aus einer weiteren Messung zu $T_{1/2} = 1.52 \mu\text{s}$ ergibt.

Nach diesem Zerfallsgesetz können wir die Anzahl der in einer bestimmten Zeit t noch nicht zerfallenen ruhenden Myonen berechnen:

Abgelaufene Zeit t in μs	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Anzahl der noch nicht zerfallenen Myonen	563	357	227	144	91	58	37	23	15

Betrachten wir den Flug der Myonen im System der Erdoberfläche, so können wir die Flugzeit zwischen Bergspitze und Meereshöhe berechnen:

$$t_{\text{Flug}} = \frac{1907 \text{ m}}{0.9952 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6.4 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 6.4 \mu\text{s}$$

Würden nun bewegte Myonen in genau der gleichen Weise zerfallen wie ruhende, so würde man erwarten, dass in Meereshöhe nach $6.4 \mu\text{s}$ langer Flugzeit noch etwa 31 Myonen pro Stunde gezählt werden. Die tatsächliche Messung ergab jedoch eine Zählrate von 408 Myonen pro Stunde. Nach der "Uhr" der bewegten Myonen wurde dieser Höhenunterschied also in weniger als $1 \mu\text{s}$ durchlaufen! Die genaue Rechnung, nämlich

$$408 = 563 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

ergibt $t = 0.71 \mu\text{s}$. D.h., die bewegte Uhr eines Myons geht bei einer Geschwindigkeit von $v = 0.9952c$ um den Faktor $\frac{6.4}{0.71} \approx 9$ langsamer als eine ruhende Uhr. Nach dieser tatsächlich durchgeführten Messung ist also $\gamma_{\text{exp}} \approx 9$. Vergleicht man dies mit dem errechneten Wert für $v = 0.9952c$, also

$$\gamma_{\text{th}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.9952c}{c}\right)^2}} = 10.2 \quad ,$$

so findet man innerhalb der experimentellen und statistischen Fehler eine befriedigende Übereinstimmung.

Fassen wir noch einmal zusammen: Wir können auf Meeresniveau noch zahlreiche Myonen feststellen, obwohl sie in etwa 10 km Höhe entstehen; sie fliegen bedeutend weiter als nur

$$c \cdot T_{1/2} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1.52 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 456 \text{ m}$$

Sie "leben länger"! – Aus der Sicht der Erdoberfläche unterliegen sie markant dem Effekt der Zeitdilatation, weil sie sich eben sehr schnell bewegen.