

Handbuch zu den Schlüsselexperimenten des KLP Physik Grundkurs Qualifikationsphase

Schlüsselexperiment 23: „Myonenzerfall“

0. Grundlegende Idee des Versuchs

Im Experiment „Myonenzerfall“ weisen instabile Teilchen eine geschwindigkeitsabhängige Lebensdauer auf. So kann das relativistische Phänomen der Zeitdilatation aufgezeigt und erklärt werden, ebenso wie der komplementäre Effekt der Längen- bzw. Lorentzkontraktion.

1. Bezug zu den Kompetenzen des Lehrplans

Mit Bezug zum Experiment „Myonenzerfall“ werden für den Grundkurs im KLP folgende Kompetenzbeschreibungen genannt:

Die Schülerinnen und Schüler

- erläutern qualitativ den Myonenzerfall in der Erdatmosphäre als experimentellen Beleg für die von der Relativitätstheorie vorhergesagte Zeitdilatation (E5, UF1).
- erläutern die relativistische Längenkontraktion über eine Plausibilitätsbetrachtung (K3),
- beschreiben Konsequenzen der relativistischen Einflüsse auf Raum und Zeit anhand anschaulicher und einfacher Abbildungen (K3).

2. Fachliche und fachmethodische Hinweise

Das Schlüsselexperiment „Myonenzerfall“ basiert auf den Untersuchungen u.a. von Bruno Rossi und David B. Hall Anfang der 1940er Jahre zur Variation der Zerfallsrate von Myonen (μ^-) in Abhängigkeit von ihrem Impuls [2-5]. Sie beobachteten, dass die Lebensdauer bzw. Halbwertszeit dieser instabilen Teilchen entsprechend der Vorhersagen der Relativitätstheorie von ihrer Relativgeschwindigkeit zum Beobachter abhängt. Auch später wurde die Halbwertszeit von Myonen (teilweise künstlich in Teilchenbeschleunigern erzeugt) zur Bestätigung der Relativitätstheorie herangezogen (z.B. David Frisch und James Smith im Jahre 1963 und John Bailey *et al.* im Jahre 1977 [6][7]).

Myonen sind Elementarteilchen, d.h. sie sind laut des Standardmodells nicht weiter strukturiert. Sie haben eine Ruhemasse von ca. $106 \text{ MeV}/c^2$, die ca. 200-mal größer ist als die von Elektronen. Myonen tragen wie diese eine negative elektrische Ladung und sind ebenfalls Leptonen, d.h. sie sind vergleichsweise leichte Materieteilchen, die nicht der starken Wechselwirkung unterliegen und den Spin $1/2$ tragen. Neben der elektrischen Ladung tragen sie noch die schwache Ladung $-1/2$ (also die dritte Komponente des vektoriiellen schwachen Isospins). Das Antimyon (μ^+) trägt entsprechend Ladungen mit umgekehrten Vorzeichen.

Da die Ruhemasse des Myons zwischen der des Elektrons und des Protons liegt, wurde es früher μ -Meson genannt (noch früher auch „Mesotron“). Der Begriff „Meson“ wurde damals für solch „mittelschwere“ Teilchen verwandt. In den 1960er Jahren wurde dann die

Bezeichnung Meson auf Teilchen mit starker Wechselwirkung beschränkt, zu denen das Myon als Lepton nicht gehört.

Aufgrund der hohen Ruhenergie bzw. Ruhemasse entstehen Myonen auf der Erde nicht durch lokale natürliche Prozesse. Sie können künstlich durch Teilchenbeschleuniger erzeugt werden, oder entstehen in hochenergetischen Prozessen in der oberen Atmosphäre, die durch kosmische Strahlung ausgelöst werden. Diese sogenannte kosmische Strahlung wurde zuerst 1912 von Victor Franz Hess auf Ballonfahrten nachgewiesen [1]. Da ihre Natur und Quelle zunächst unklar war, nannte man sie zunächst Höhenstrahlung. Heute nennt man sie kosmische Strahlung.

Diese kosmische Strahlung darf nicht mit der kosmischen Hintergrundstrahlung verwechselt werden. Dabei handelt es sich um eine nahezu isotrope Mikrowellenstrahlung, die das gesamte Universum erfüllt. Sie entstand 380000 Jahre nach dem Urknall durch die Rekombination von Elektronen und Protonen zu neutralem Wasserstoff. Durch die Expansion des Universums und die daraus resultierende Rotverschiebung entspricht ihre Energie einer Temperatur von ca. 3 K und ist damit zu gering, um Myonen zu erzeugen.

Kosmische Strahlung wird nach ihrem Ursprung in Solarstrahlung (Sonnenwind) und hoch- bzw. höchstenergetische galaktische bzw. extragalaktische Teilchenstrahlung (im Bereich von 10^{20} eV, d.h. ca. 10^1 J). Je nach Quelle handelt es sich um Protonen, Alphateilchen und einen geringen Anteil von schwereren Atomkernen.

Trifft diese primäre kosmische Strahlung auf Atome der Erdatmosphäre in ca. 10 km Höhe, so werden ähnlich wie bei Kollisionen im Detektor eines Teilchenbeschleunigers sekundäre Teilchenschauer erzeugt. Aus einem Proton der Energie von 10^{15} eV entstehen mehr als eine Million Sekundärteilchen. Nur ein kleiner Teil von ihnen erreicht auch die Erdoberfläche ([10], siehe Abb. 1).

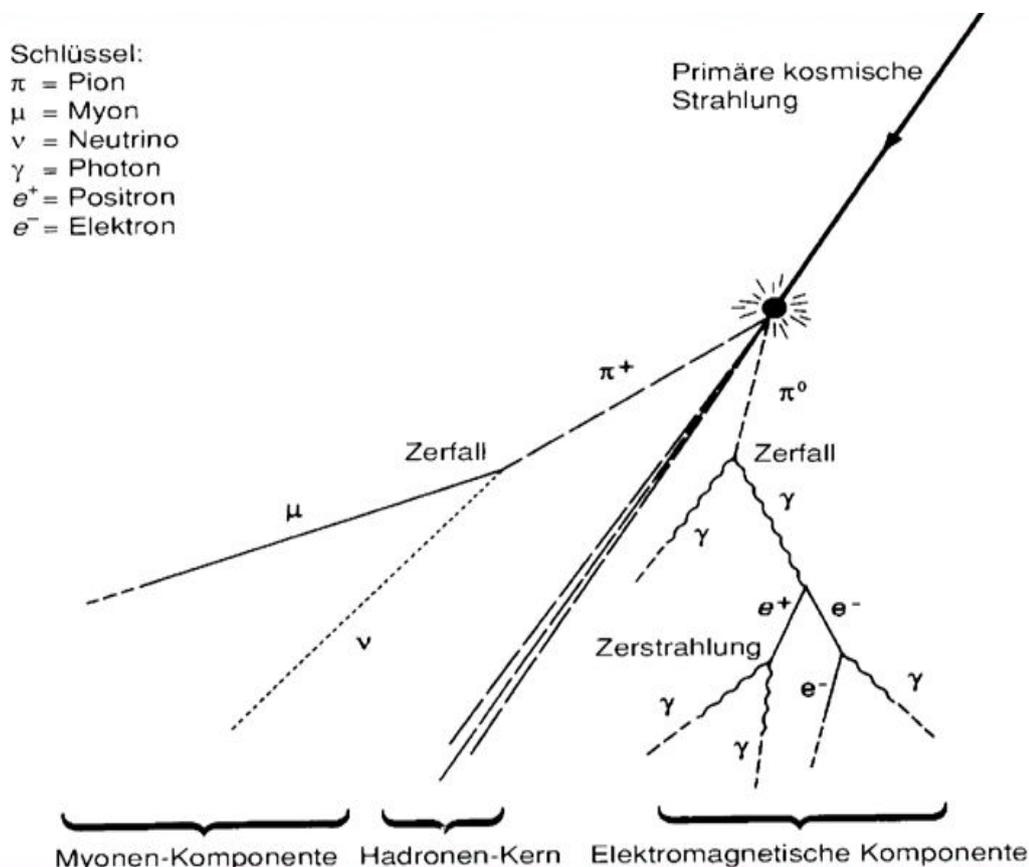


Abbildung 1: Die Entstehung von Teilchenschauern in der Erdatmosphäre (aus [13]).

Die folgenden Beschreibungen zur Entstehung und dem Zerfall der Myonen dienen der Erläuterung für die Lehrkraft: Durch Kollision mit Stickstoff- und Sauerstoffkernen zerplatzen diese (Spallation) und es entstehen Neutronen, Protonen, geladene (π^+ , π^-), und neutrale (π^0) Pionen. Die neutralen Pionen zerstrahlen direkt in Photonen, die geladenen zerfallen in Myonen μ^- bzw. Antimyonen μ^+ :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Die Myonen sind ebenfalls instabil und zerfallen in Elektronen und Neutrinos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Der Zerfall wird durch die schwache Wechselwirkung vermittelt, d.h. es entsteht ein intermediäres W^- -Boson, welches in ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt (siehe Abb. 2).

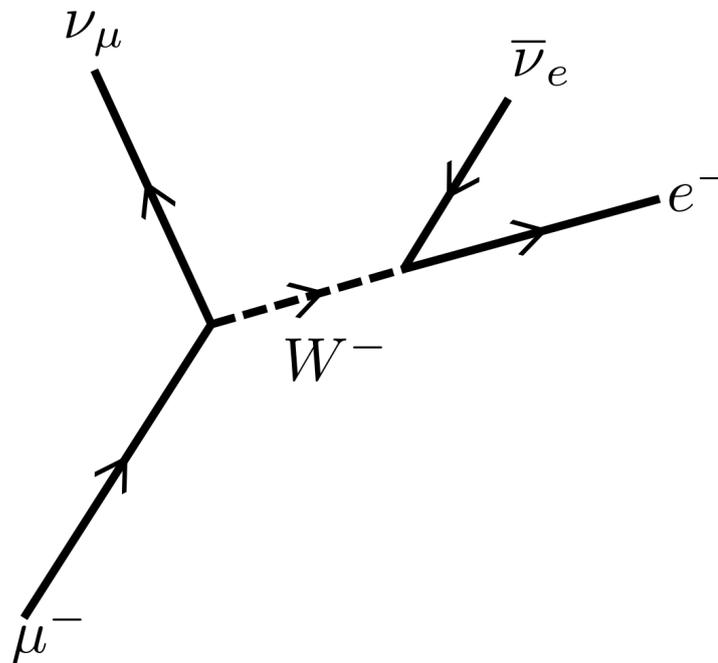


Abbildung 2: Der Zerfall des Myons wird durch die schwache Wechselwirkung vermittelt (aus [9]).

Ein Schauer hat eine weiche elektromagnetische Komponente, unter anderem durch den Zerfall von neutralen Pionen und der Zerstrahlung von Positron-Elektronen-Paaren, eine harte myonische sowie eine hadronische Komponente, die vorwiegend Protonen und Neutronen enthält. Die Komponenten lassen sich unabhängig voneinander auf der Erde registrieren.

In den ursprünglichen Experimenten von Rossi und Hall [2] bzw. Frisch und Smith [6] wurden Myonendetektoren an Orten auf unterschiedlichen Höhen installiert (siehe Abb. 3).

Für die Zahl der Myonen gilt das Zerfallsgesetz, d.h. nach der Halbwertszeit $T_{1/2}$ ist die Hälfte der ursprünglichen Zahl N_0 zerfallen:

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

Die folgende Herleitung des Zerfallsgesetzes zur Basis e ist für den Unterricht optional: Durch einfache Umformung (d.h. ohne Anwendung einer Differenzialgleichung) erhält man

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

Mit den Beschreibungen

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \text{ bzw. } \tau = \frac{1}{\lambda}$$

für die Zerfallskonstante λ bzw. die Lebensdauer τ erhält man

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Es gilt:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta t = \frac{\Delta s}{v}$$

Daher kann das Zerfallsgesetz auch in Abhängigkeit der zurückgelegten Flugstrecke Δs bei konstanter, bekannter Myonengeschwindigkeit v geschrieben werden:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\Delta s}{v \cdot \tau}}$$

D.h. wenn die Zahl der Myonen in verschiedenen Höhen detektiert wird, entsprechen die Messwerte aufgrund der dazwischenliegenden Teilchenflugstrecke der Zahl zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Entstehung der Myonen in der oberen Atmosphäre. Wenn die Messwerte zu verschiedenen Zeiten aufgenommen werden (was historisch der Fall war), setzt dies eine konstante Myonenentstehungsrate voraus (was üblicherweise gegeben ist).

Die kinetischen Energien der Teilchen und damit ihre Geschwindigkeiten erhält man ebenfalls aus den Detektordaten, da Metallschichten bestimmte Geschwindigkeiten filtern und die Myonen abbremsen. Aus den Messdaten kann auch die Ruhelebensdauer der Myonen ermittelt werden.

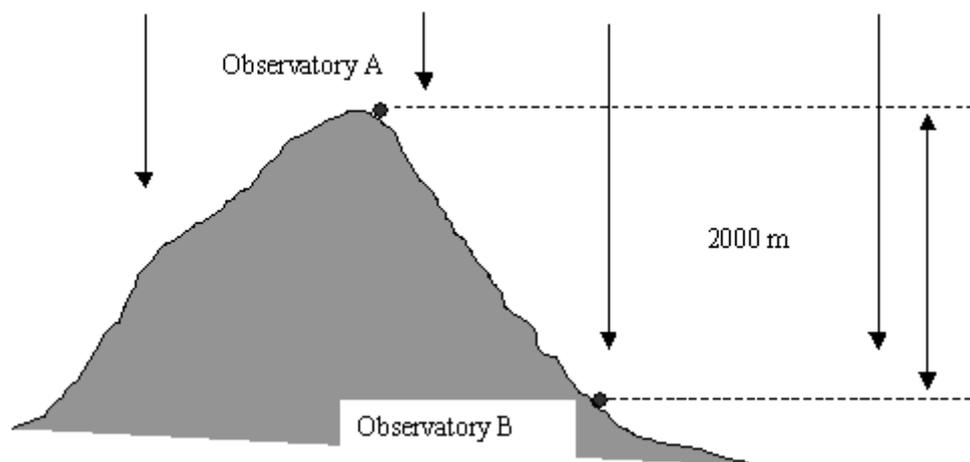


Abbildung 3: Die Lage der zwei Teilchendetektoren mit bekanntem vertikalen Abstand auf dem Gipfel und am Fuße eines Berges (aus [15]).

In klassischer Sicht erwartet man eine exponentiell abfallende Kurve der Myonenzahl in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer bzw. der Flugzeit. Man beobachtet allerdings eine wesentlich flachere Kurve (siehe Abb. 4).

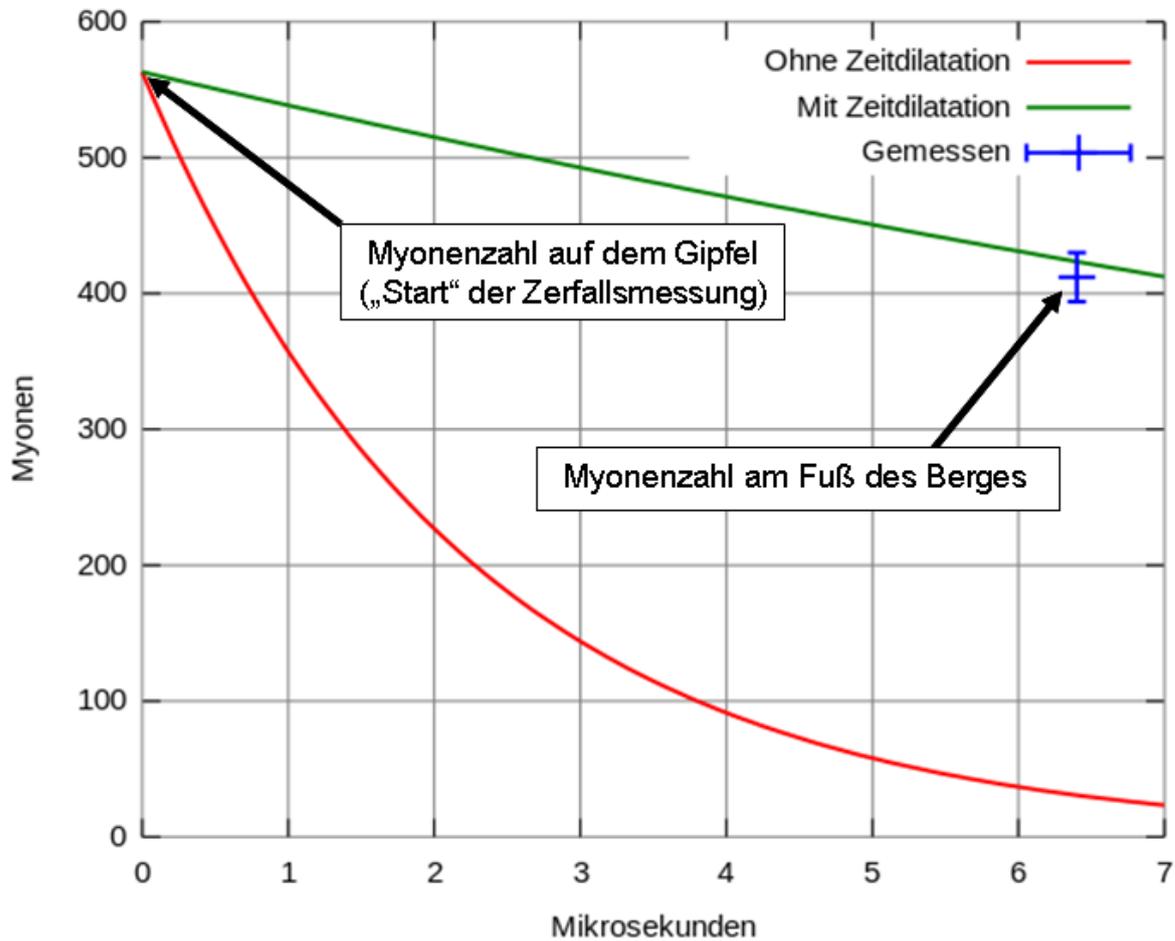


Abbildung 4: Der klassisch berechnete exponentielle Abfall der Myonenzahl in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich mit der relativistischen Zerfallskurve und einem real gemessenen Wert (aus [8], nach [6], ergänzt).

Konkret haben Myonen eine mittlere Ruhelebensdauer von $\tau_0 \approx 2,2 \mu\text{s}$ [9]. Auch bei einer Geschwindigkeit, die ca. 99,5 % der Lichtgeschwindigkeit entspricht, könnten sich die Teilchen nach ihrer Entstehung in ca. 10 km Höhe nach klassischer Sichtweise nur ca. 659 m weit fortbewegen:

$$\Delta s = v \cdot \tau = 0,995 \cdot c \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 659 \text{ m}$$

Da die Myonen auf der Erde nachweisbar sind, müssten sie eine mittlere Lebensdauer von ca. $34 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ haben:

$$t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{10 \text{ km}}{0,995 \cdot c} \approx 34 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Die Berechnung der erhöhten Lebensdauer ergibt sich im Erdbeobachtersystem aufgrund der relativistischen Zeitdilatation:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,995 \cdot c)^2}{c^2}}} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 22 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

mit der vom ruhenden Beobachter im Myonsystem gemessenen Zeit Δt , der Zeit im bewegten Myonsystem $\Delta t' = \tau_0$, der Myongeschwindigkeit v , die ca. 99,5 % der Lichtgeschwindigkeit c entspricht. Damit erreicht die Lebensdauer im bewegten Bezugssystem die Größenordnung der nötigen Flugzeit vom Entstehungsort zum Erdboden.

Ein Beobachter im Myonsystem bemerkt keine Verlangsamung der Zeit im Myonsystem, beobachtet aber trotzdem die Ankunft auf der Erdoberfläche. Für ihn erscheint der Raum des Erdbezugssystems kontrahiert. Diese Lorentzkontraktion kann mittels der bekannten Zeitdilatation hergeleitet werden. Für das Erdbeobachtersystem ergibt sich für die zurückgelegte Strecke (diese Herleitung kann optional auch im Unterricht durchgeführt werden, siehe auch Abschnitt 6):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Für das bewegte Myonensystem ergibt sich

$$v = \frac{\Delta s'}{\Delta t'}$$

Somit erhält man:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta s'}{\Delta t'} \Leftrightarrow \Delta s' = \Delta s \frac{\Delta t'}{\Delta t}$$

Da die Myonenzeit aus Sicht des Erdbeobachters gedehnt ist, kann man Δt durch $\gamma \cdot \Delta t'$ ersetzen und es ergibt sich:

$$\Delta s' = \Delta s \frac{\Delta t'}{\gamma \cdot \Delta t'} \Leftrightarrow \Delta s' = \frac{\Delta s}{\gamma} \Leftrightarrow \Delta s' = \Delta s \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

D.h. der umgebende Raum in Flugrichtung erscheint aus Sicht eines Beobachters im Myonsystem gestaucht (Raum bzw. Lorentzkontraktion; siehe Abb. 5).

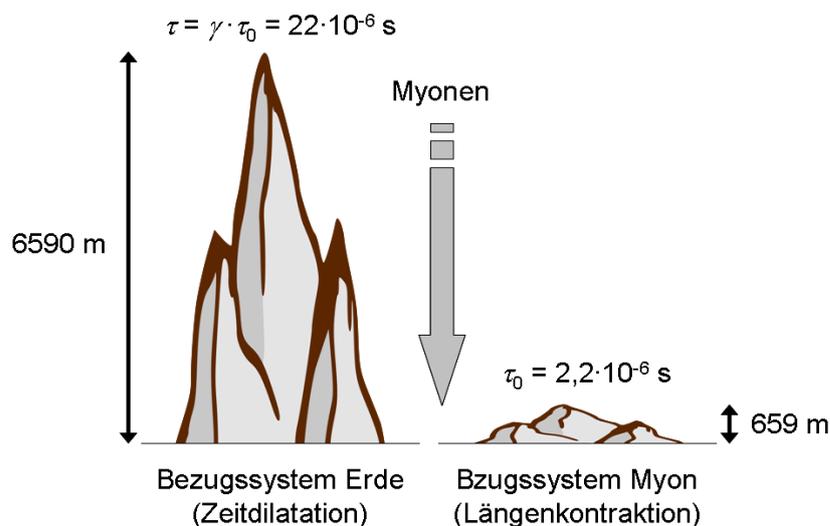


Abbildung 5: Die Raumkontraktion aus Sicht eines Beobachters im Myonsystem (nach[14]).

3. Fachdidaktische Hinweise

Wie oben dargestellt, ist die Entstehung der sekundären kosmischen Strahlung und damit der hier interessanten Myonen recht komplex und geht weit über die vom Kernlehrplan

geforderten Kompetenzen hinaus. Da in diesem Experiment die relativistischen Effekte der Zeitdilatation und Längenkontraktion und weniger die astroteilchenphysikalischen Inhalte im Vordergrund stehen, sollte beim Einstieg in das Experiment die Entstehung der Teilchenschauer didaktisch stark reduziert werden. Eine kurze Abgrenzung der kosmischen Strahlung von der kosmischen Hintergrundstrahlung ist aber angezeigt, da dieser Begriff den Schülerinnen und Schülern häufig aus den Medien bekannt ist.

Der relativistische Effekt der Zeitdilatation sollte im Vorfeld im Unterricht im Rahmen des Gedankenexperiments zur Lichtuhr behandelt worden sein, damit hier auf die erworbenen Kompetenzen zurückgegriffen werden kann. So kann das Experiment als Beispiel bzw. experimenteller Beweis für die Zeitdilatation und gleichzeitig zur Einführung des Effekts der Längenkontraktion dienen.

Nachdem beide Effekte bekannt sind, sollte den Schülerinnen und Schülern noch einmal verdeutlicht werden, dass es sich um komplementäre Effekte je nach Position des Beobachters handelt (Zeitdilatation im Myonsystem für den Beobachter auf der Erde, Längenkontraktion des Erdsystems – also der Flugstrecke durch die Atmosphäre – für den Beobachter im Myonsystem).

Ein weiterer wichtiger Hinweis sollte bezüglich der Tatsache gegeben werden, dass der Raum ausschließlich in Flugrichtung der Myonen kontrahiert und nicht orthogonal dazu.

Ferner sollte erwähnt werden, dass das Myon, wäre es kein punktförmiges Elementarteilchen, sondern ein ausgedehntes Objekt wie z.B. ein Atomkern oder ein Ball, aus Sicht des Erdbeobachters ebenfalls gestaucht wäre (siehe Abb. 6).

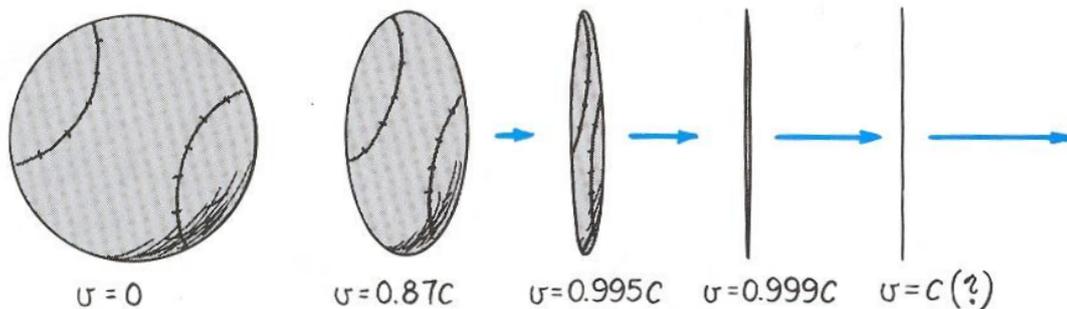


Abbildung 6: Längenkontraktion eines Balles, der sich mit hoher Geschwindigkeit an einem Beobachter vorbeibewegt (aus [11], nach [12], verändert).

4. Computergestützte Modelle und Videos des Myonenzerfalls

Da häufig keine Apparate zur realen Messung von Myonen in den Schulen vorhanden sind, kann zur Veranschaulichung auf Applets zurückgegriffen werden.

Hier ein recht aufwendiges Applet, welches die Sammlung und Auswertung von „Messdaten“ erlaubt:

http://www.kcvs.ca/site/projects/physics_files/specialRelativity/muonDecay/muonDecay.swf

Weitere Applets zur speziellen Relativitätstheorie:

<http://www.kcvs.ca/site/projects/specialRelativity.html>

Ein sehr einfaches Applet mit englischem Video:

<http://www.foothill.edu/~marasco/4dlabs/4dlab1.html>

Ein Video von br alpha-Centauri: Harald Lesch mit „Was sind Myonen?“:

<http://www.br.de/fernsehen/ard-alpha/sendungen/alpha-centauri/alpha-centauri-myonen-harald-lesch100.html>

5. Vorschlag für das Vorgehen im Unterricht

Der Einstieg in das Myonenzerfallsexperiment kann über einen Steckbrief der Myonen erfolgen, der die mittlere Lebensdauer, die hohe Ruhenergie (welche eine natürliche Entstehung auf der Erdoberfläche verhindert), Entstehungsprozess und –ort enthält. Die dann vorgestellte Nachweisbarkeit der Myonen auf der Erde führt dann zu einem Konflikt, den die Schüler aufgrund ihrer Vorkenntnisse hinsichtlich der Zeitdilatation lösen können: Der Beobachter auf der Erde sieht die Myonen als bewegte und damit langsamer laufende „Uhren“.

6. Alternativen und weitere fakultative Möglichkeiten

Herleitung bzw. Plausibilitätsbetrachtung zur Längenkontraktion

Das Myonenzerfallsexperiment kann nicht nur als Beispiel für die Zeitdilatation dienen, sondern es bietet sich an, mit seiner Hilfe auch die Längenkontraktion (Lorentzkontraktion) plausibel zu machen. Nach der oben beschriebenen Vorgehensweise stellt sich nämlich die Frage, warum im Bezugssystem der Myonen auf ihrem Weg zur Erdoberfläche statistisch nur wenige Zerfälle stattfinden, denn ihre mittlere Lebensdauer ist ihnen ja inhärent und eine mitbewegte Uhr läuft in ihrem Bezugssystem schließlich nicht langsamer.

Dieser zweite Konflikt kann dann über die Frage aufgelöst werden, welche weitere Größe ebenfalls relativistischen Effekten unterliegen muss, wenn die Dauer des Fluges – der ähnlich lang wie die mittlere Lebensdauer der Myonen unter dem Effekt der Zeitdilatation sein muss – und die Geschwindigkeit der Myonen feststehen: Es kommt nur noch die zurückzulegende Strecke als ausschlaggebende Größe in Frage. Damit kann die Längenkontraktion über die einfache Gleichsetzung der Myonengeschwindigkeit beschrieben in beiden Bezugssystemen eingeführt werden (siehe auch Abschnitt 2).

Realexperimente und Visualisierungen der Längenkontraktion

Das Netzwerk Teilchenwelt bietet zwei Experimente zum Nachweis von Myonen an, die mit Schülern entweder in der eigenen Schule oder in einem Teilchenwelt-Stützpunkt durchgeführt werden können. Dies ist die Übersichtsseite Netzwerks:

<http://www.teilchenwelt.de/angebote/astroteilchen-experimente/>

Das CoSMO-Experiment mit Flächenszintillationszählern:

http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/cosmo_experiment/index_ger.html

Das Kamiokanden-Experiment, bei dem Tscherenkow-Strahlung in Wasser nachgewiesen wird:

[http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische teilchen/schuelerexperimente/kamiokannen experiment/index_ger.html](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/schuelerexperimente/kamiokannen_experiment/index_ger.html)

Die Webseite Tempolimit Lichtgeschwindigkeit bietet eine Vielzahl von Visualisierungen, die die Längenkontraktion darstellen. Häufig gehen diese über den Kernlehrplan hinaus, können aber als Ausblick für interessierte Schülerinnen und Schüler dienen. Dies ist die Übersichtsseite:

<http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/ueberblick/ueberblick1.html>

7. Quellen

- [1] Victor Franz Hess: [Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten](#). In: *Physikalische Zeitschrift*. 13, S. 1084–1091 (1912).
- [2] Bruno Benedetto Rossi; David B. Hall: *Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum*. In: *Physical Review*. 59, Nr. 3, S. 223-228 (1941).
[doi:10.1103/PhysRev.59.223](https://doi.org/10.1103/PhysRev.59.223).
- [3] Bruno Benedetto Rossi; Kenneth Greisen; Joyce C. Stearns; Darol K. Froman; Phillipp G. Koontz: *Further Measurements of the Mesotron Lifetime*. In: *Physical Review*. 61, Nr. 11-12, S. 675-679 (1942). [doi:10.1103/PhysRev.61.675](https://doi.org/10.1103/PhysRev.61.675).
- [4] Bruno Benedetto Rossi; Norris Nereson: *Experimental Determination of the Disintegration Curve of Mesotrons*. In: *Physical Review*. 62, Nr. 9-10, S. 417-422 (1942). [doi:10.1103/PhysRev.62.417](https://doi.org/10.1103/PhysRev.62.417).
- [5] Bruno Benedetto Rossi; Norris Nereson: *Further Measurements on the Disintegration Curve of Mesotrons*. In: *Physical Review*. 64, Nr. 7-8, S. 199-201 (1943). [doi:10.1103/PhysRev.64.199](https://doi.org/10.1103/PhysRev.64.199).
- [6] David H. Frisch; James H. Smith: *Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons*. In: *American Journal of Physics*. 31, Nr. 5, S. 342-355 (1963).
[doi:10.1119/1.1969508](https://doi.org/10.1119/1.1969508)
- [7] J. Bailey; K. Borer; F. Combley; H. Drumm; F. Krienen; F. Lange; E. Picasso; W. von Ruden; F. J. M. Farley; J. H. Field; W. Flegel; P. M. Hattersley: *Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit*. In: *Nature*. 268, Nr. 5618, S. 301–305 (1977). Bibcode: [1977Natur.268..301B](#).
[doi:10.1038/268301a0](https://doi.org/10.1038/268301a0).
- [8] [https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitdilatation bewegter Teilchen](https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitdilatation_bewegter_Teilchen)
- [9] <https://de.wikipedia.org/wiki/Myon>
- [10] [https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmische Strahlung](https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmische_Strahlung)
- [11] <http://physics12university.weebly.com/lesson-5-length-contraction.html>
- [12] http://www.patana.ac.th/secondary/science/anrophysics/relativity_option/images/length_cont1.JPG bzw.
http://www.patana.ac.th/secondary/science/anrophysics/relativity_option/commentary.html
- [13] http://images.slideplayer.org/1/649185/slides/slide_21.jpg bzw.
<http://slideplayer.org/slide/649185/>

- [14] <http://u2.lege.net/cetinbal/clasmecrelativity.htm>
- [15] http://www.antonine-education.co.uk/Image_library/Physics_5_Options/Turning_points/Muon_9.gif bzw. http://www.antonine-education.co.uk/Pages/Physics_5_Options/Turning_points/TP_06/turning_points_6.htm