

8.5 Raum

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Zeitdilatation, also die Verlangsamung der Zeit für sich schnell bewegende Körper, wurde von Albert Einstein zunächst ohne jegliche experimentelle Grundlage entwickelt. Ein experimenteller Nachweis der Zeitdilatation gelang erst viele Jahre später: 1941, durch die beiden Physiker Bruno Rossi und David Hall. Diese untersuchten den Zerfall von instabilen Myonen in der Erdatmosphäre (Myonenzerfall):

Auf ihrem Weg um die Sonne ist die Erde einem kontinuierlichen Strom aus hochenergetischen Teilchen ausgesetzt. Diesen Teilchenstrom bezeichnet man als kosmische Strahlung. Kosmische Strahlung besteht größtenteils aus hochenergetischen (sehr schnellen) Protonen (87%), Elektronen und vollständig ionisierten Atomen, die von der Sonne (Sonnenwind, Sonneneruptionen), der Milchstraße oder fernen Galaxien emittiert werden. Ein großer Teil der kosmischen Strahlung wird vom Erdmagnetfeld abgelenkt. Trotzdem treffen ca. 1000 Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde auf die Erdatmosphäre.

Durch Wechselwirkung mit den Gasmolekülen der Erdatmosphäre entstehen sog. Teilchenschauer mit einer großen Anzahl an Sekundärteilchen, von denen aber nur ein geringer Teil die Erdoberfläche erreicht. Dieser wird als sekundäre kosmische Strahlung bzw. sekundäre Höhenstrahlung bezeichnet. Eine Gruppe der Höhenstrahlung sind die instabilen Myonen. Diese entstehen bei der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre und sind das Endprodukt einer Reihe von Reaktionen, die beim Auftreffen der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre ablaufen. Es ist mittlerweile auch möglich Myonen in Teilchenbeschleunigern wie dem CERN künstlich zu erzeugen und zu untersuchen. Aus zahlreichen Experimenten ist deshalb bekannt, dass Myonen ähnliche Eigenschaften wie die bekannteren Elektronen besitzen. So besitzen beide Teilchenarten die gleiche elektrische Ladung, sie unterscheiden sich jedoch durch ihre Masse. Das Myon hat eine rund 200-mal größere Masse als das Elektron. Zudem sind Elektronen stabile Elementarteilchen, wohingegen Myonen nur eine kurze Lebensdauer besitzen und nach kurzer Zeit in andere, stabilere Elementarteilchen zerfallen. Ruhende Myonen zerfallen mit einer Halbwertszeit von $t_h = 1,52 \cdot 10^{-6} \text{s}$. Das bedeutet, dass nach dieser Zeit nur noch die Hälfte der ursprünglichen Myonen vorhanden sind. Nach einer weiteren Halbwertszeit ist dann von dieser Hälfte wiederum die Hälfte der Myonen zerfallen, usw.

Der Zerfall der Myonen kann physikalisch mit dem sog. Zerfallsgesetz beschrieben werden:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_h} t}$$

Dabei ist $N(t)$ die Anzahl der Myonen zu einem bestimmten Zeitpunkt t und N_0 die Anfangsmenge der Myonen.

Bei ihrem Experiment arbeiteten die Physiker Rossi und Hall mit zwei auf unterschiedlichen Höhen positionierten Teilchendetektoren, mit der die Anzahl der Myonen gemessen werden konnte. Die Detektoren befanden sich in Echo Lake (3240m) und Denver (1616m) im Bundesstaat Colorado (USA) und besaßen somit einen Höhenunterschied von 1624m zueinander. Rossi und Hall bestimmten in ihrem Experiment die Anzahl der Myonen, die in einem festgelegten Zeitintervall jeweils auf die Detektoren auftrafen. Gemäß dem Zerfallsgesetz und aufgrund der sehr geringen Halbwertszeit war zu erwarten, dass die Anzahl der Myonen, die mit dem höher gelegenen Detektor gemessen wurden,

sehr groß, die Anzahl der mit dem niedriger gelegenen Detektor gemessenen Myonen aber verhältnismäßig klein sein sollte. Genaue Messungen ergaben jedoch, dass die Anzahl der mit dem niedrigen Detektor gemessenen Myonen wesentlich größer war, als dies nach dem Zerfallsgesetz zu erwarten gewesen wäre. In Denver wurden also wesentlich mehr Myonen gemessen als dies eigentlich der Fall sein sollte! Eine Erklärung für die Diskrepanz zwischen Theorie und experimentellen Messwerten liefert die spezielle Relativitätstheorie:

Die Myonen bewegen sich bei ihrem Flug durch die Erdatmosphäre mit einer Geschwindigkeit von $v \approx 0,99c$. Für einen Beobachter auf der Erde, der sich relativ zu den Myonen in Ruhe befindet, unterliegen die Myonen deshalb der Zeitdilatation. Das hat zur Folge, dass für einen Beobachter auf der Erde (Rossi und Hall) die Halbwertszeit der Myonen um den Faktor $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ zunimmt. Das Zerfallsgesetz besitzt also nach wie vor seine Gültigkeit, jedoch zerfallen aufgrund der größeren Halbwertszeit eine geringere Anzahl an Myonen, als dies ohne Berücksichtigung der Zeitdilatation zu erwarten gewesen wäre. Somit kann auch eine höhere Anzahl an Myonen mit dem niedriger gelegenen Detektor gemessen werden.

Zusammengefasst zeigt das Experiment von Rossi und Hall zweifelsfrei, dass die Myonen der Zeitdilatation unterliegen, wodurch dieser Aspekt der speziellen Relativitätstheorie bewiesen werden konnte.

Neben dem Nachweis der Zeitdilatation kann am Beispiel des Myonenzerfalls noch ein weiteres Phänomen der speziellen Relativitätstheorie verdeutlicht werden, die sog. Längenkontraktion. Betrachtet man die Bewegung der Myonen noch einmal genau, ergibt sich ein scheinbarer Widerspruch. Für den ruhenden Beobachter auf der Erde unterliegen die Myonen der Zeitdilatation. Im Bezugssystem der Myonen ist jedoch keine Zeitdilatation spürbar. Für die Myonen vergeht die Zeit also ganz normal.

Die Myonen fliegen mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,99c$ in Richtung Erdboden. Da es sich um die Relativgeschwindigkeit zwischen Myonen und Erde handelt, ist diese für den Beobachter auf der Erde genauso groß wie für die Myonen. Der Beobachter auf der Erde sieht die Myonen mit der Geschwindigkeit v_{Erde} auf sich zubewegen, wohingegen sich für die Myonen die Erde mit der Geschwindigkeit v_{Myon} auf sich zubewegt. Am Betrag der Geschwindigkeit ändert sich in beiden Fällen nichts. v_{Erde} ist somit gleich v_{Myon} .

Stellt man nun die Gleichung für beide Geschwindigkeiten auf so ergibt sich ein scheinbarer Widerspruch:

$$v_{Erde} = \frac{s}{t} \quad \text{und} \quad v_{Myon} = \frac{s}{t'}$$

Da t' kleiner als t ist, können beide Geschwindigkeit eigentlich nicht gleich groß sein. Der Widerspruch kann behoben werden, wenn man annimmt, dass für die Myonen nicht nur die Zeit langsamer abläuft, sondern sich auch die Strecke s zwischen den Myonen und der Erdoberfläche verringert. Aus der Strecke s wird somit die zusammengestauchte Strecke s' . Hieraus folgt:

$$v_{Erde} = v_{Myon}$$

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

Durch Einsetzen der Formel für die Zeitdilatation $t' = t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ und Multiplikation mit t ergibt sich:

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

$$s = \frac{s'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

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

Die Strecke zwischen Myonen und der Erdoberfläche verkürzt sich also um den Faktor $\sqrt{1 - (v/c)^2}$. Dieser nur in Bewegungsrichtung auftretende Effekt wird Längenkontraktion genannt:

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

Merkbar tritt die Längenkontraktion, wie die Zeitdilatation, erst bei Geschwindigkeit ab 10% der Lichtgeschwindigkeit auf.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Längenkontraktion von einem ruhenden Beobachter auf der Erde nicht wahrgenommen werden kann. Die Strecke zwischen den Myonen und der Erdoberfläche wird für einen Beobachter auf der Erde nicht kürzer. Die Längenkontraktion kann nur aus der Perspektive der Myonen wahrgenommen werden. So verkürzt sich für die Myonen die Flugbahn bis zur Erdoberfläche um den Faktor $\sqrt{1 - (v/c)^2}$.

Zusammengefasst kann also festgehalten werden, dass der ruhende Beobachter auf der Erde nur beobachtet, dass die Myonen der Zeitdilatation unterliegen, wohingegen die Zeit für die Myonen ganz normal abläuft und diese stattdessen eine Kontraktion des Raums in Bewegungsrichtung beobachten können.

Die Ursache dafür, dass Rossi und Hall in ihrem Experiment mehr Myonen als erwartet gemessen haben kann also auf zwei verschiedene Art und Weisen erklärt werden.

- Aus der Perspektive des Beobachters auf der Erde unterliegen die Myonen der Zeitdilatation. Deshalb können mehr Myonen die Erdoberfläche erreichen.
- Aus der Perspektive der Myonen unterliegt die Strecke in Flugrichtung der Längenkontraktion. Deshalb können mehr Myonen die Erdoberfläche erreichen.

Beide Erklärungen sind richtig und hängen nur vom Blickwinkel des Betrachters ab. Es ist einfach alles relativ ☺.

Grenzbetrachtungen:

Ist die Geschwindigkeit eines Körpers sehr klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit ($v \ll c$), so geht der Quotient in der Klammer v/c gegen Null und s' ist ungefähr gleich s . Der Raum wird also nur unmerklich kontrahiert.

Bewegt sich ein Körper hingegen fast mit Lichtgeschwindigkeit ($v \rightarrow c$) so geht der Quotient v/c gegen 1 und die Wurzel geht gegen Null. In diesem Fall würde der Raum s' sehr stark kontrahiert. Für einen mit Lichtgeschwindigkeit fliegenden Körper würde der Raum bis auf den Wert Null kontrahiert.
