

# Relativitätstheorie

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts hielten viele Wissenschaftler die Physik für im Wesentlichen abgeschlossen. Anscheinend gab es nur noch wenige Rätsel zu lösen, so etwa das Ätherproblem und das Problem mit der Strahlung schwarzer Körper.

50 Jahre später waren diese beiden Fragen beantwortet und haben zu den beiden größten Umwälzungen in unserer Vorstellung der Welt geführt: die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik.

# Relativitätstheorie

Seit den ersten ernsthaften Untersuchungen von Licht gab es zwei Lager in der Physik: die einen hielten Licht für Teilchen, die anderen für Wellen.

James Clerk Maxwell stellte in den 1860er Jahren vier Gleichungen auf, welche alle damals bekannten Phänomene von Elektrizität und Magnetismus erklären konnten:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= \rho & \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} & \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t}\end{aligned}$$

# Relativitätstheorie

Daraus ergab sich eine Gleichung, welche die Physiker von der Theorie der Schwingungen von Saiten kannten, die Wellengleichung

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}.$$

Der große Erfolg der Maxwellschen Theorie des Elektromagnetismus führte dazu, dass danach fast alle Physiker vom Wellenmodell überzeugt waren: die Maxwellschen Gleichungen lieferten für elektromagnetische Strahlung eine Wellengleichung. Hertz konnte später zeigen, dass Licht und Radiowellen elektromagnetische Wellen sind. Später wurde klar, dass auch infrarote, ultraviolette und Röntgenstrahlung elektromagnetische Wellen waren.

# Relativitätstheorie

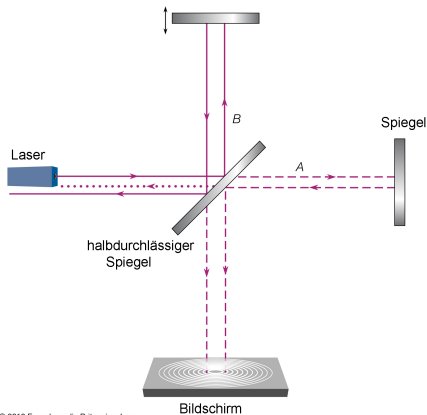
Nach den Vorstellungen der klassischen Physik mussten Wellen ein Medium haben, in dem sie sich ausbreiten: schließlich musste ja irgendetwas schwingen. Die Physiker nannten dieses Medium den Äther.

In zahlreichen Experimenten versuchten sie, den Äther nachzuweisen. Das bekannteste dieser Experimente wurde von Michelson und Morley durchgeführt.

Wenn sich die Erde durch den Äther bewegt, wird sie sich gegenüber dem Äther manchmal in der gleichen und manchmal in der entgegengesetzten Richtung bewegen. Wenn man also die Geschwindigkeit des Lichts in zwei verschiedenen Richtungen misst, sollte sich das Ergebnis unterscheiden.

# Relativitätstheorie

Dieses Experiment haben Michelson und Morley mit großer Präzision 1881 und 1887 durchgeführt:



# Relativitätstheorie

Das Ergebnis von Michelson und Morley war eindeutig: Licht breitet sich in jeder Richtung mit immer derselben Geschwindigkeit aus.

Manche Physiker waren nicht bereit, die Theorie vom Äther aufzugeben. George Francis FitzGerald (1889) und Hendrik Antoon Lorentz (1892) erklärten den negativen Ausgang des Experiments damit, dass alle Objekte in Bewegungsrichtung verkürzt werden, und zwar um den Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

# Relativitätstheorie

Eine ganz andere und radikale Idee wurde von Albert Einstein 1905 vorgestellt:

- ▶ Es gibt keinen Äther. Licht bewegt sich im Vakuum fort.
- ▶ Die Lichtgeschwindigkeit ist für alle Beobachter konstant.

Die zweite Forderung ist alles andere als intuitiv: Wenn ein Stern mit halber Lichtgeschwindigkeit auf uns zurast, bewegt sich sein Licht relativ zu uns nur mit einfacher Lichtgeschwindigkeit.

# Relativitätstheorie

Einsteins Annahmen haben drastische Konsequenzen.

- ▶ Längenkontraktion: Ein bewegtes Objekt erscheint einem ruhenden Beobachter in Bewegungsrichtung um den Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$
 verkürzt.

- ▶ Weil ruhende und bewegte Beobachter die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen, muss die Zeit in bewegten Systemen langsamer ablaufen, und zwar um den Faktor

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



# Relativitätstheorie

Einsteins Vorhersagen erschienen vielen unglaublich; es dauerte 15 Jahre, bis er den Nobelpreis für Physik erhielt, und er bekam ihn nicht für seine Relativitätstheorie, sondern für eine andere Arbeit, die er 1905 veröffentlicht hatte.

Dass Zeit in bewegten Systemen langsamer abläuft (Zeitdilatation), kann man heute sehr gut messen. 1971 brachten Hafele und Keating vier Atomuhren an Bord eines Linienflugzeugs und flogen damit zweimal um die Erde, einmal ost- und einmal westwärts.

# Relativitätstheorie

Heute ist die Zeitdilatation ein ständig beobachtetes Phänomen: GPS basiert darauf, Uhren auf dem Erdboden mit Uhren auf Satelliten zu vergleichen; ohne die Relativitätstheorie wären die Zeitabweichungen der Uhren in den Satelliten bereits innerhalb eines einzigen Tages spürbar messbar.

Der erste experimentelle Nachweis der Zeitdilatation wurde in den 1930er Jahren geführt. 1936 entdeckten Anderson und Neddermeyer bei der Untersuchung kosmischer Strahlung Teilchen, die wie Elektronen negativ geladen, aber viel schwerer waren. Diese zerfielen nach einer mittleren Lebensdauer von  $2 \mu\text{s}$  in Elektronen.

# Relativitätstheorie

Diese Myonen entstehen in einer Höhe von 10 bis 15 km, wenn kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft. Sie bewegen sich dann mit Geschwindigkeiten von bis zu 99,8 % der Lichtgeschwindigkeit. Sie könnten daher innerhalb ihrer Lebensdauer eine Strecke von etwa 600 m zurücklegen; auf der Erde würde kein einziges dieser Myonen ankommen. Dennoch werden sie gemessen.

# Relativitätstheorie

Erklärung:

Die Myonen bewegen sich relativ zu uns mit  $v = 0,998c$ , also läuft ihre Zeit um den Faktor

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,998^2}} \approx 15,8$$

langsamer. Sie leben also 15,8-mal so lang wie ruhende Myonen und können daher 15,8-mal so weit (also etwa 10 km) fliegen, bevor sie zerfallen.

## Relativitätstheorie

Das Myon hat von seinem Standpunkt aus aber immer noch eine Lebensdauer von  $2 \mu\text{s}$ ; wie kann es in dieser Zeit die Erde erreichen?

Antwort: die Entfernung zum Erdboden von etwa 10 km wird in Bewegungsrichtung des Myons um den Faktor  $\sqrt{1 - 0,998^2} \approx 0,063$  verkürzt; das Myon muss also statt 10 km nur etwa 630 m zurücklegen, und das ist innerhalb seiner Lebensdauer machbar.

# Relativitätstheorie

Die bekannteste Formel Einsteins ist ebenfalls eine Folge seiner Grundannahme, dass die Lichtgeschwindigkeit in jedem inertialen Bezugssystem gleich ist:

$$E = mc^2.$$

Sie besagt, dass Energie und Masse äquivalent sind. Jede Energie besitzt Masse, und Masse lässt sich in Energie verwandeln.

# Relativitätstheorie

Auch dies hat weitreichende Konsequenzen: beschleunigt man Objekte, haben diese kinetische Energie. Diese ist äquivalent zu Masse; also haben bewegte Objekte eine größere Masse.

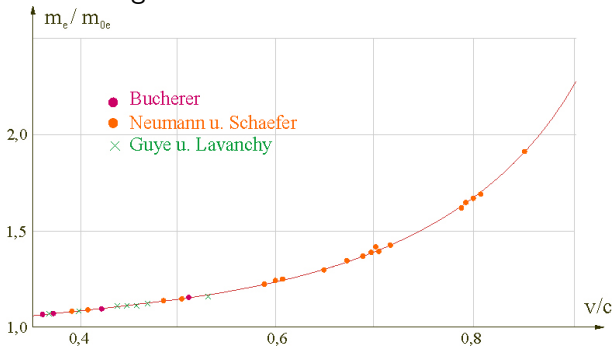
In Teilchenbeschleunigern werden Elementarteilchen wie Elektronen oder Protonen mit Hilfe von Magnetfeldern auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die zusätzliche Masse der Teilchen muss dabei ständig ausgeglichen werden, sonst würden die Teilchen ihre Kreisbahn verlassen.

Einsteins Vorhersage:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

# Relativitätstheorie

Weil die Masse von Teilchen mit ihrer Geschwindigkeit zunimmt, muss man immer mehr Energie aufwenden, um sie weiter zu beschleunigen. Insbesondere kann man Teilchen mit Ruhemasse nicht auf Lichtgeschwindigkeit (oder gar darüber hinaus) beschleunigen.





# Relativitätstheorie

Die Gleichung  $E = mc^2$  hat auch erklärt, wie die Sonne ihre Energie erzeugt. Dass alles andere nicht funktioniert, war damals schon klar:

Video [Energie Sonne](#)

# Relativitätstheorie

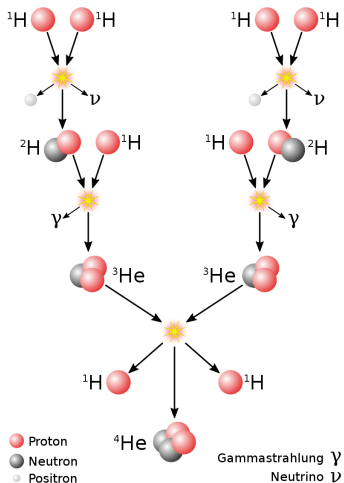
Arthur Eddington hat 1920 Kernfusion als Energiequelle der Sonne vorgeschlagen. Weil man wusste, dass Sterne zum großen Teil aus Wasserstoff und Helium bestehen, vermutete man die Verschmelzung von Helium zu Wasserstoff als Grundreaktion. Erst 1939 konnte Bethe verschiedene Prozesse im Detail verstehen. Dabei werden im wesentlichen vier Wasserstoffkerne (Protonen) zu einem Heliumkern (zwei Protonen, zwei Neutronen) verschmolzen, natürlich unter Abgabe von zwei Positronen (positiv geladene Antiteilchen der Elektronen) zur Erhaltung der Ladungsbilanz.

# Relativitätstheorie

Die Existenz von Positronen hatte der Physiker Dirac vorhergesagt: beim Versuch, die damals junge Quantentheorie mit der speziellen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen, kam er auf eine Gleichung, die eigentlich das Elektron beschreiben sollte, die aber bei der relativistischen Beschreibung zwei Lösungen besaß, von denen eine ein Teilchen mit positiver Ladung beschreibt. Später wurden auch Antiteilchen anderer Elementarteilchen entdeckt: Antiproton, Antineutron, Antineutrino; treffen Materie und Antimaterie aufeinander, löschen sie sich gegenseitig aus (unter Abgabe von Energie, meist in Form von Photonen).

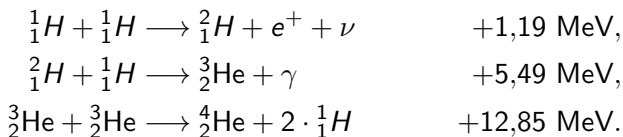
# Relativitätstheorie

Die Verschmelzung der vier Protonen zum Heliumkern verläuft wie folgt:



# Relativitätstheorie

Der Gesamtprozess sieht also so aus:



Um in der Sonne die Energie zu erzeugen, die sie abstrahlt, sind pro Sekunde etwa  $10^{38}$  solcher Prozesse nötig.

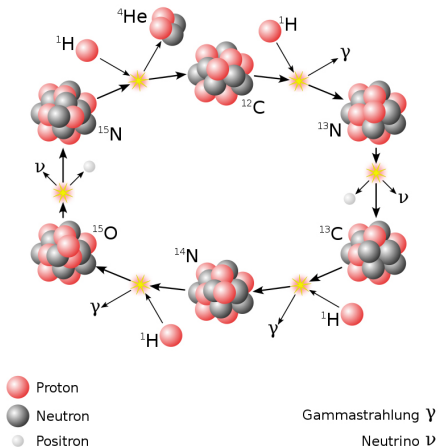
Die Sonne verliert pro Sekunde  $5 \cdot 10^9$  kg ihrer Masse durch Umwandlung in Energie.

# Relativitätstheorie

Bei der Kernspaltung (Atombombe, Kernreaktor) werden umgekehrt schwere Atomkerne in leichtere gespalten: um Atomkerne schwerer als die von Eisen zu produzieren, muss man Energie aufwenden. Bei der Atombombe, die die USA 1945 auf Hiroshima warfen, wurden 1 g von 1 kg Uran in Energie verwandelt.

# Relativitätstheorie

Eine zweite Möglichkeit der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium bietet der Bethe-Weizsäcker-Zyklus:



## Relativitätstheorie

Weil der Bethe-Weizsäcker-Zyklus Kohlenstoffkerne als Katalysator benötigt, kann er nur in Sternen ablaufen, welche genügend Kohlenstoff enthalten. Die ältesten Sterne, die sich nach dem Urknall bildeten, mussten ihre Energie aus der Verschmelzung von Protonen zu Heliumkernen gewinnen.

In heutigen Sternen hängt es an Temperatur, Druck und Zusammensetzung, welche Prozesse der Stern zur Energiegewinnung nutzen kann.