

Warum gibt es vier Wechselwirkungen?

Das wissen wir nicht. Der Traum ist eine Vereinigung aller fundamentaler Prozesse zu einer einzigen Wechselwirkung, wie es Maxwell schon bei der Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus vorführte und wie es in der jüngeren Vergangenheit auch bei der elektro-schwachen Wechselwirkung demonstriert wurde.



Warum gibt es drei Familien?

Auch hier gibt es bisher keine Antwort. Wir wissen nur, dass die „Kopien“ der Bestandteile gewöhnlicher Materie existieren. Nach heutigem Wissensstand gibt es nicht mehr als drei Familien.

Warum sind die Massen der Materiebausteine und Wechselwirkungsteilchen so weit gestreut?

Die Antwort des Standardmodells auf diese Frage ist die Vorhersage des sogenannten „Higgs Bosons“. Physiker suchen schon seit mehr als 15 Jahren nach diesem Teilchen, zuerst am LEP, einem Elektron-Positron Beschleuniger am CERN (bei Genf), und heute an einem Proton-Antiproton Beschleuniger am Fermilab bei Chicago. Die große Hoffnung ist, das Higgs Boson mit dem LHC zu entdecken. Der LHC ist ein großer Protonenbeschleuniger, der momentan am CERN gebaut wird und 2007 erste Daten nehmen soll.



niger am CERN (bei Genf), und heute an einem Proton-Antiproton Beschleuniger am Fermilab bei Chicago. Die große Hoffnung ist, das Higgs Boson mit dem LHC zu entdecken. Der LHC ist ein großer Protonenbeschleuniger, der momentan am CERN gebaut wird und 2007 erste Daten nehmen soll.

Warum fehlt Antimaterie im Universum ?

Kurz nach dem Urknall, in dem das heutige Universum seinen Anfang fand, gab es der Theorie nach genauso viel Materie wie Antimaterie. Beide sollten sich später gegenseitig ausgelöscht haben, so dass keinerlei Materie zurückbleiben sollte.

Offensichtlich ist dies nicht der Fall : Unser Universum ist daher vermutlich das Resultat einer kleinen Störung des ursprünglichen Gleichgewichts. Ein kleiner Überschuss an Materie damals macht heute die sichtbare Materie aus. Niemand weiß genau, wo dieser anfängliche Unterschied herkommt, aber die Untersuchung von einigen subtilen Aspekten der schwachen Wechselwirkung verspricht, Licht in diese Angelegenheit zu bringen.



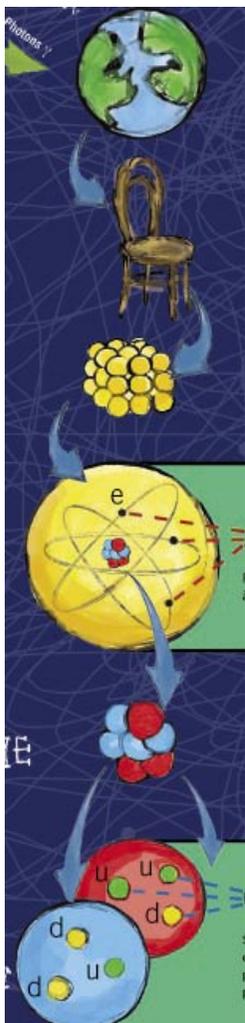
Das Poster zeigt die kleinsten Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen, die durch spezielle Teilchen vermittelt werden. Elementarteilchen sind punktförmig und haben keine bisher bekannte innere Struktur. Sie besitzen fundamental unterschiedliche Eigenschaften, die sie eindeutig voneinander unterscheiden. Die Prozesse, an denen diese Teilchen beteiligt sind, werden in einem einheitlichen theoretischen Rahmen, dem Standardmodell der Teilchenphysik, beschrieben. Es wurde in den 1960er und 1970er Jahren entwickelt. Dieses Modell basiert einerseits auf der Quantenmechanik, die das Verhalten von Materie bei sehr kleinen Abständen beschreibt, andererseits baut es auf Einsteins spezieller Relativitätstheorie auf, die bewegte Objekte mit nahezu Lichtgeschwindigkeit beschreibt. Mit wenigen, experimentell messbaren Parametern (sog. freie Parameter) beschreibt das Standardmodell mit nur zwölf Elementarteilchen alle bisher bekannten mikroskopischen Phänomene.

1. Was zeigt dieses Poster ?



Die Elementarteilchen werden in der Mitte des Posters nach ihrem Typ und ihrer Familie klassifiziert, die Teilchen rechts nach den Wechselwirkungen, die sie vermitteln. Zusätzlich gibt ein „Dimensionsturm“ Größe und Struktur verschiedener Objekte an. Oben links ist eine Übersicht über in der Sonne stattfindende Prozesse. Ein kurzer Text zur Antimaterie steht unten links auf dem Poster.

Der Dimensionsturm



Die linke Seite zeigt, in welcher Form Materie der angegebenen Größe auftritt. Auf makroskopischen Skalen (Skalen des täglichen Lebens) finden wir Objekte der Größenordnung von Metern. Größere Objekte werden von Astronomen in Form von Galaxien etc. beobachtet.

Auf kleineren Skalen erkennt man, dass sich Materie aus Molekülen zusammensetzt, die wiederum aus einer Ansammlung von Atomen bestehen. Die Atome besitzen eine Größe von 10^{-10} m.

Der Hauptanteil der Masse eines Atoms ist im Atomkern konzentriert, der aus Protonen und Neutronen (sog. Nukleonen) besteht. Letztere sind keine Elementarteilchen: Seit den 1960^{er} Jahren weiß man, dass Nukleonen aus punktförmigen Teilchen, den Quarks und Gluonen, zusammengesetzt sind.

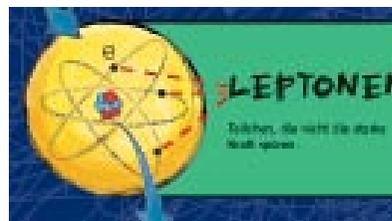
Elementare Bausteine

Elementarteilchen unterscheiden sich in ihrer Masse, in ihrer elektrischen Ladung und in ihrem Spin. Der Spin ist eine innere Eigenschaft der Elementarteilchen: Er ähnelt einer Rotationsachse und besitzt Eigenschaften, die denen eines kleinen Magneten ähneln. Teilchen mit ganzzahligem Spin (0,1,2,...) sind sog. Bosonen, während Teilchen mit halbzahligem Spin ($1/2, 3/2, \dots$) als Fermionen bezeichnet werden. Letztere gehorchen dem Pauli Ausschlussprinzip. (Das Feld der Teilchenphysik ist sehr international: Satyendranath Bose war Inder, Enrico Fermi Italiener und Wolfgang Pauli wurde in Österreich geboren.)

Das Pauliprinzip besagt, dass sich zwei identische Fermionen innerhalb eines Systems nicht im gleichen Quantenzustand befinden können. Dieses Prinzip erklärt auch, warum Elektronen in einer Schalenstruktur um einen Atomkern angeordnet sind und nicht alle in den Grundzustand der niedrigsten Energie zurückfallen. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl an Bosonen in einem gegebenen Quantenzustand nicht beschränkt. Dies wird beim Laser ausgenutzt, in dem eine große Anzahl an Photonen in den gleichen Zustand versetzt wird.

Teilchenphysiker unterscheiden zwischen „Materieteilchen“ und „Wechselwirkungsteilchen“. Materieteilchen, mittig auf dem Poster abgebildet, wechselwirken mitei-

Leptonen



Leptonen (griech.: „leichte Teilchen“) werden von der schwachen Wechselwirkung beeinflusst, nicht jedoch von der starken Kraft. Das Elektron (e) und sein Begleiter das Elektron-Neutrino (ν_e) bilden die erste Familie. Ihre Duplikate in den anderen zwei Familien sind das 1937 in der kosmischen Strahlung entdeckte Myon (μ), das Tau (τ), welches erstmals 1976 an einem Beschleuniger produziert wurde, und die zugehörigen Neutrinos (ν_μ und ν_τ).

Elektron, Myon und Tau sind enge Verwandte mit derselben elektrischen Ladung q_e und gleichen Eigenschaften, obwohl ihre Massen sehr verschieden und die Geschmacksrichtungen (Flavors) eindeutig zugeordnet sind. Wie auch bei der zweiten und dritten Quarkgeneration sind Myon und Tau instabil und zerfallen in leichtere Leptonen.

Neutrinos sind elektrisch neutral und wechselwirken nur sehr selten mit Materie. Ein Neutrino kann die gesamte Erde ohne jegliche Wechselwirkung durchqueren! Neutrinos sind demnach schwer nachzuweisen. Sie werden in großen Mengen in stellaren Verbrennungsprozessen produziert. Diese Teilchen wurden 1930 vorgeschlagen, um verblüffende Eigenschaften des Betazerfalls zu erklären. Es zeigte sich, dass Neutrinos in drei verschiedenen Geschmacksrichtungen auftreten: Das Elektron-Neutrino (ν_e), das 1956 entdeckt wurde, das Myon-Neutrino (ν_μ , 1964) und das Tau-Neutrino (ν_τ , 2000). Lange Zeit war man der Auffassung, dass Neutrinos absolut masselos seien. Experimentelle Ergebnisse aus den letzten Jahren beweisen allerdings, dass Neutrinos auf ihrem Weg „oszillieren“ können: Sie wechseln teilweise ihre Geschmacksrichtung, während sie z.B. von der Sonne zur Erde fliegen. Solche Oszillationen gibt es nur, wenn Neutrinos eine von Null verschiedene Masse besitzen, sie sind also nicht masselos!

4. Einige offene Fragen

Trotz der scheinbaren Einfachheit des Posters bleiben viele Rätsel bisher ungelöst. Ausgehend von den Informationen auf dem Poster stößt man auf die folgenden Fragen.

top (= oben, t) und bottom (= unten, b). Diese ausgefallenen und scheinbar willkürlichen Namen sind mit der Geschichte der Entdeckung der Quarks verknüpft. Die "up" und "down" Quarks weisen sehr ähnliche Eigenschaften auf, inklusive einer Symmetrie, die ähnlich zu der Beschreibung von Spin 1/2 Teilchen ist. Das "strange" (engl. : „seltsam“) Quark erhielt seinen Namen durch die „seltsamen“ Erscheinungen, die erstmals in den 1950er Jahren in Hadronen, die dieses Quark beinhalten, beobachtet wurden. Das Charm-Quark wurde 1975 entdeckt und erstmals eingeführt, um (durch Zauberei (=charm)) experimentelle Beobachtungen zu erklären, die der Theorie nach nicht hätten auftreten dürfen. Abschließend wurden die "top" und "bottom" Quarks, die man 1977 und 1995 entdeckte, in Analogie zu up und down benannt. Das b Quark nennt man manchmal auch "beauty" („Schönheit“).

Quarks spüren die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung. (Sie wechselwirken auf Grund ihrer Masse auch gravitativ, was aber vernachlässigt werden kann). Ihre elektrische Ladungen ($1/3 q_e$ und $-2/3 q_e$) sind Bruchteile der Elektronenladung q_e , die einen Zahlenwert von $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb besitzt. Quarks können nie einzeln beobachtet werden, da sie in Dupletts oder Tripletts innerhalb beobachtbarer Teilchen gefangen gehalten werden. Aus Symmetriegründen und wegen des Auftretens bestimmter Invarianzen sind Quarks in drei verschiedene Familien unterteilt. Die erste enthält das u und das d Quark. Sowohl Protonen als auch Neutronen sind aus unterschiedlichen Kombinationen dieser beiden Quarks zusammengesetzt : uud bildet ein Proton und udd ein Neutron. Die beiden anderen Familien sind einfach schwerere Varianten der ersten, sie zerfallen in leichtere Quarks oder Leptonen. Ihre sehr kurze Lebensdauer ist kleiner als 10^{-10} s. Die Massen der Quarks sind sehr unterschiedlich: Das top Quark z.B. ist ca. 180 mal schwerer als ein Proton, das selbst aus drei leichten Quarks besteht. Zusätzlich besitzen Quarks eine dreikomponentige „Farbladung“. Diese Farbladung, die nicht in der Tabelle aufgelistet ist, spielt in der starken Wechselwirkung eine ähnliche Rolle wie die elektrische Ladung im Elektromagnetismus.

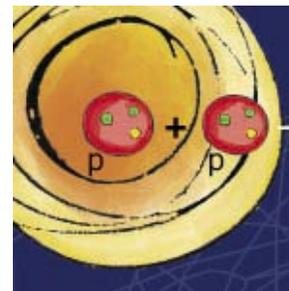
Obwohl Quarks nicht direkt in Experimenten beobachtet werden, kann man hunderte verschiedener Teilchen - Hadronen genannt - erzeugen und vermessen, die entweder aus drei Quarks oder aus einem Quark/Antiquark-Paar bestehen. Drei-Quark-Verbindungen, zu denen auch Protonen und Neutronen gehören, nennt man Baryonen (aus dem Griechischen, „schwere Teilchen“), während Quark-Antiquark Verbindungen als Mesonen (griech.: „mittelschwere Teilchen“) bezeichnet werden.

einander, indem sie die Wechselwirkungsteilchen „austauschen“ - rechts abgebildet. Es gibt drei „Familien“ von Materieteilchen, wobei die erste Familie die gewöhnliche Materie aufbaut. Die anderen beiden Familien werden nur in der kosmischen Strahlung und an Hochenergie-Teilchenbeschleunigern beobachtet. Materieteilchen sind in zwei Kategorien unterteilt, die Quarks und die Leptonen. Die starke Kraft wirkt auf Quarks, nicht aber auf Leptonen. Alle Materieteilchen sind Fermionen.

Alle physikalischen Phänomene, die im Universum auftreten, können durch vier fundamentale Wechselwirkungen (Kräfte) beschrieben werden. Auf subatomarem Niveau können diese Wechselwirkungen durch die ausgetauschten Wechselwirkungsteilchen gekennzeichnet werden – rechts abgebildet. Alle Wechselwirkungsteilchen sind Bosonen.

Die Sonne

Im Inneren der Sonne finden Prozesse aller vier Wechselwirkungen statt. Die Prozesse in der Sonne sind ein Beispiel für die wichtige Rolle, die Wechselwirkungen in unserer Welt spielen. Die Gravitation ist im Inneren der Sonne so stark, dass die extreme Dichte von Wasserstoff die elektrostatische Abstoßung zwischen Protonen überwindet und die Fusion von zwei Protonen zu einem Deuteron hervorruft. Dieser Prozess wird von der schwachen Wechselwirkung geregelt. Bei der vorherrschenden Fusionsrate brennen Sterne langsam auf astronomischen Zeitskalen ab.



Nach der ursprünglichen Fusion von Protonpaaren produziert eine Kette von nuklearen Reaktionen, die auch durch die starke Wechselwirkung vermittelt werden, eine große Vielfalt von schweren Kernen. Die Energie, die in solchen Prozessen frei wird, wird in elektromagnetische Energie umgewandelt, d.h. in Wärme und in Licht, was wir jeden Tag erfahren.

Antimaterie



Obwohl das Universum scheinbar komplett aus Materie besteht, haben Beobachtungen und Experimente gezeigt, dass zu jedem Materieteilchen ein zugehöriges Antiteilchen gehört, das abgesehen von einer entgegengesetzten Ladung die glei-

chen Eigenschaften wie das Materieteilchen besitzt. Man hätte daher zusätzlich zu Quarks und Leptonen eine Tabelle von Antiquarks und Antileptonen einführen können. Die bekannte Antimaterie wird entweder künstlich an Beschleunigern produziert oder sie entsteht in Reaktionen zwischen Teilchen der kosmischen Strahlung mit gewöhnlicher Materie.

2. Die fundamentalen Wechselwirkungen

Gravitation Universelle Anziehungskraft, Planeten, Galaxien, ... GRAVITON?
Schwache Kraft Radioaktive Zerfälle, Z^0, W^+, W^-
Elektromagnetische Kraft Elektrizität, Magnetismus, ionische Bindungen und Kristalle, Chemie, PHOTON
Starke Kraft Bindungen in Nukleonen & Kerne, GLUON

Zwei der vier fundamentalen Wechselwirkungen sind offensichtlich Teil des täglichen Lebens und der „klassischen“ Physik: Die Gravitation und der Elektromagnetismus. Die beiden Kräfte besitzen eine unendliche Reichweite mit einer quadratisch mit dem Abstand zwischen den Teilchen abnehmenden Stärke. In der Quantentheorie bedeutet dies, dass das ausgetauschte Wechselwirkungsteilchen masselos sein muss. Es handelt sich hierbei um das Photon im Elektromagnetismus und eventuell um ein Graviton in der Gravitation. Die Schwerkraft stellt ein Problem in der fundamentalen Beschreibung von Kräften dar. Man kann sie bisher nicht innerhalb der Quantenfeldtheorie beschreiben, obwohl diese die anderen drei Kräfte sehr erfolgreich beschreibt. Die allgemeine Relativitätstheorie, die die Gravitation beschreibt, und die Quantenmechanik scheinen nur schwer zu vereinigen zu sein. Dieses Problem beeinflusst die Teilchenphysik jedoch nicht, da die Gravitation hier nur eine untergeordnete Rolle spielt und i.A. auf Grund ihrer geringen Stärke auf mikroskopischen Skalen vernachlässigt werden kann.

Die beiden anderen Kräfte, die schwache und die starke Wechselwirkung, wurden im 20. Jahrhundert bei der Untersuchung von Atomkernen entdeckt. Um die Bindung von Protonen und Neutronen im Atomkern zu erklären, führte man die starke Kraft ein, die der elektrostatischen Coulomb-Kraft auf subatomarem Niveau entgegenwirkt. Die Coulomb-Kraft drückt Protonen auseinander, lässt aber ungeladene Neutronen un-

beeinflusst. Diese Kernkraft wirkt nur auf kurzen Distanzen (10^{-15} m) mit hoher Intensität. Sie ist ein Aspekt der starken Wechselwirkung, die den Aufbau der beobachteten Teilchen aus Quarks erklärt. Es ist heute bekannt, dass Nukleonen (d.h. Protonen und Neutronen) und viele andere Teilchen, die z.T. erst in den letzten 50 Jahren entdeckt wurden, nicht wirklich „elementar“ sind. Sie bestehen aus Quarks, die über den Austausch von Gluonen wechselwirken. Die Gluonen „kleben“ die Quarks zusammen. „Glue“ ist das englische Wort für Kleber/kleben. Die Gluonen, deren Existenz 1979 nachgewiesen werden konnte, haben genau wie die Photonen keine Masse. Die starke Wechselwirkung besitzt nur eine sehr beschränkte Reichweite. Daher beeinflusst sie weder makroskopische Prozesse, noch ist sie auf atomarem Niveau wirksam.

Die vierte und letzte Wechselwirkung ist die schwache Kraft, die für den Betazerfall verantwortlich ist. Diese Kraft wirkt auf Grund der hohen Masse der vermittelnden Teilchen - den W und Z Bosonen, die ca. 80 mal schwerer sind als Protonen! - ebenfalls auf subatomaren Skalen. Diese Wechselwirkungsteilchen konnten das erste Mal 1984 am CERN, dem großen europäischen Forschungslabor in Genf (Schweiz), nachgewiesen werden. Makroskopisch ist die schwache Wechselwirkung für therm nukleare Verbrennungen in Sternen verantwortlich. Sie ermöglicht die Fusion von zwei Protonen zu einem Deuteriumkern (das ist ein Proton und ein Neutron in einem gebundenen Zustand). Dabei werden Positronen und Neutrinos emittiert. Eine der wichtigsten Errungenschaften der Teilchenphysik ist die Vereinigung der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung in einem gemeinsamen Modell, in welchem beide Kräfte als Teilaspekte einer gemeinsamen Kraft auftreten. Die Krönung dieser theoretischen Erkenntnis ist die Entdeckung der W und Z Bosonen als Vermittler der Kraft und die Untersuchung ihrer Eigenschaften.

3. Quarks und Leptonen

Quarks



Quarks sind die Bestandteile der Nukleonen, die den Hauptanteil der „gewöhnlichen“ Materie ausmachen. Außerdem bilden sie die Teilchenklasse der sogenannten Hadronen. Es gibt sechs Sorten (oder auch „flavors“ - „Geschmacksrichtungen“ genannt): up (= nach oben, u), down (= nach unten, d), charm (= bezaubern, c), strange (= seltsam, s),