

Spurensuche in der Welt der *Quanten*

Die Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik zwar bis in viele Einzelheiten erklärt, doch fundamentale Fragen bleiben offen. Der »Large Hadron Collider«, der neue europäische Beschleuniger, wird zur Klärung dieser Fragen beitragen. Sein Vorstoß in ganz neue Energiebereiche verspricht den Beginn einer neuen Ära der Teilchenphysik.

Von Martin Gorbahn und Georg Raffelt

IN KÜRZE

- Der neue Teilchenbeschleuniger in Genf wird Elementarteilchen auf Energien beschleunigen, die im Kosmos 10^{-13} Sekunden nach dem Urknall herrschten. Damit wird er Strukturen der Materie untersuchen, die einem Zehntausendstel des Protonenradius entsprechen.
- Mit diesem Vordringen in experimentelles Neuland wollen die Physiker Widersprüche auflösen, die in ihrer Beschreibung des innersten Aufbaus der Materie nach wie vor bestehen.
- In dem neu erschlossenen Energiebereich wird vielleicht nicht nur das »Standardmodell der Teilchenphysik« vervollständigt werden – möglicherweise wird auch das Rätsel der Dunklen Materie gelöst.

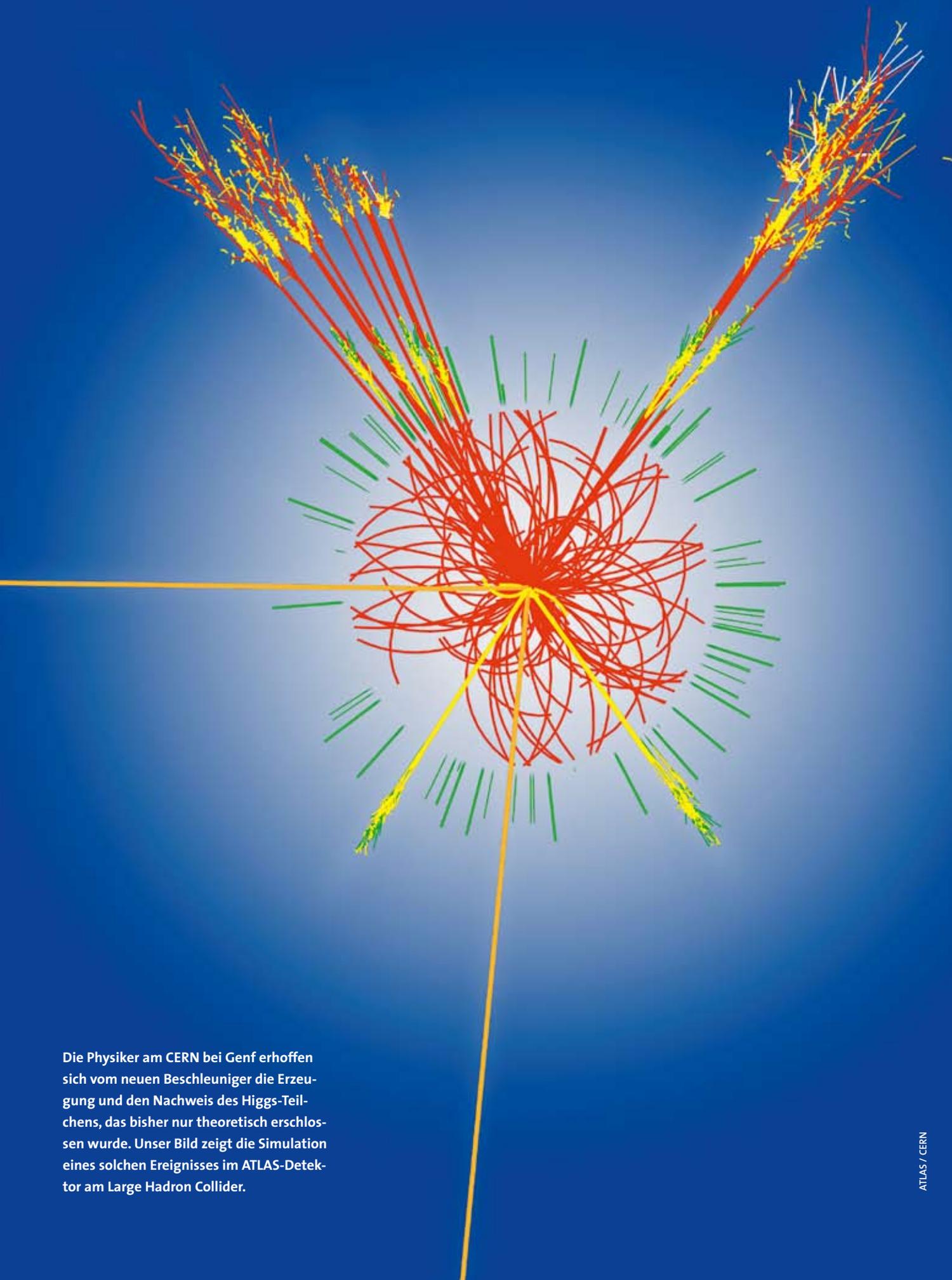
Seit Anfang des Jahres 2010 werden am CERN in Genf Protonen auf Höchstgeschwindigkeit beschleunigt: Die Energie, mit der die Physiker sie am Large Hadron Collider (LHC) zusammenstoßen lassen, übersteigt diejenige früherer Teilchenbeschleuniger um ein Vielfaches. Damit ist es zum ersten Mal möglich, die Naturkräfte bei einem Abstand der wechselwirkenden Elementarteilchen von 10^{-19} Metern zu untersuchen, was etwa dem zehntausendsten Teil des Durchmessers eines Protons entspricht.

Dieser Abstand spielt in der Teilchenphysik als »elektroschwache Skala« eine entscheidende Rolle: Erst, wenn sich zwei Teilchen bis auf 10^{-19} Meter nahe kommen, beginnen die Eigenschaften zweier Naturkräfte zu verschmelzen – die elektromagnetische und die »schwache« Kraft verhalten sich dann annähernd gleich (siehe Grafik auf S. 54). Deshalb spricht man hier von der »elektroschwachen Vereinheitlichung« an der »elektroschwachen Skala«. Zentrale Eigenschaften des derzeitigen Standardmodells der Teilchenphysik (kurz »Standardmodell«) lassen sich bei diesen kleinsten Abständen erforschen, und neuartige Phänomene sind hier zu

erwarten. Die in der Öffentlichkeit viel diskutierte Erzeugung künstlicher Schwarzer Mini-Löcher gehört dabei eher ins Reich gewagter, wenn auch anregender Spekulationen. Gleichwohl weiß man, dass sich Eigenschaften und Dynamik des Mikrokosmos just an der elektroschwachen Skala grundlegend ändern. Deren Untersuchung ist damit ein Meilenstein auf dem Weg ins Innere der Materie.

Die TeV-Skala

Um die Kräfte zu erforschen, die zwischen den Elementarteilchen wirken, benötigt man laut der heisenbergschen Unschärferelation (siehe »Unschärferelation und Äquivalenz« auf S. 48–49) umso höhere Energien, je kleiner die zu untersuchenden Abstände sind. Die elektroschwache Skala entspricht dabei einer Energie von rund 1 Teraelektronvolt (TeV oder 10^{12} eV), etwa dem Tausendfachen der Ruhemasse des Protons. Ungefähr 10^{-13} Sekunden nach dem Urknall kühlte die heiße Frühphase des Universums auf Temperaturen ab, die der Energie von 1 TeV entsprechen. Die Naturgesetze, die bei immer höheren Energien und damit kleineren Abständen gelten, bestimmten



Die Physiker am CERN bei Genf erhoffen sich vom neuen Beschleuniger die Erzeugung und den Nachweis des Higgs-Teilchens, das bisher nur theoretisch erschlossen wurde. Unser Bild zeigt die Simulation eines solchen Ereignisses im ATLAS-Detektor am Large Hadron Collider.

Unschärferelation und Äquivalenz von Masse und Energie

Die Teilchenphysik ist untrennbar mit der Quantentheorie verbunden. Die Unschärferelation ist ein quantenphysikalisches Gesetz, das Werner Heisenberg (1901 – 1976) entdeckte – hier dargestellt in seiner eigenen Handschrift. In ihrer einfachsten Form besagt die Unschärferelation, dass Ort q und Impuls p eines Objekts nicht gleichzeitig exakt bestimmbar sind:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{1}{2} \hbar$$

Dieses Naturgesetz ist jedoch wegen der Kleinheit der Naturkonstanten \hbar (»*h quer*«, das Plancksche Wirkungsquantum h dividiert durch 2π), nur für Elementarteilchen von praktischer Bedeutung.

Um physikalische Gesetze bei kleinen Abständen zu erforschen, benötigt man hohe Impulse der beteiligten Teilchen, denn wenn die Ortsunschärfe Δq klein sein soll, muss die Unschärfe des Impulses Δp und damit der Impuls selbst umso größer sein. Dies ist analog zur Optik, wo die Winkelauflösung eines Mikroskops oder Teleskops mit der Lichtfrequenz zunimmt. Man benötigt also

hohe Impulse und damit hohe Energien, um den Mikrokosmos zu erforschen, weshalb Teilchenphysik oft mit Hochenergiephysik gleichgesetzt wird. Der höchsten Energie eines Teilchenbeschleunigers entspricht demnach ein kleinster Abstand, der noch räumlich aufgelöst und untersucht werden kann.

Eine andere Naturkonstante ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit c , welche die Rolle der relativistischen Grenzgeschwindigkeit spielt, also der größten Geschwindigkeit, mit der Energie oder Information übertragen werden kann. Nach der einsteinschen Beziehung

$$E = mc^2$$

ist jeder Energie eine ihr äquivalente Masse zugeordnet. Deshalb unterscheiden Teilchenphysiker oft nicht zwischen Masse und Energie und messen beide in den gleichen Einheiten Elektronvolt (eV), nämlich der Energie, die ein Teilchen mit einer elektrischen Elementarladung e nach Durchlaufen der elektrischen Spannung 1 Volt gewinnt. Die Ruhemasse des Protons ist $0,935 \text{ GeV}/c^2$ oder

die Entwicklung des Universums zu jeweils früheren Zeiten, denn gleich nach dem Urknall kühlte sich die extrem heiße »Ursuppe« rapide ab und durchlief verschiedene Phasen, in denen die Gesetze der Mikrophysik bei den jeweiligen Energieskalen den Ton angaben. Die Physiker erforschen diese Entwicklung in umgekehrter Richtung, indem sie die Struktur der Materie bei immer höheren Energien und kleineren Abständen untersuchen. Die kosmische Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie sowie die Dunkle Materie sind vermutlich Relikte aus jener extrem heißen Frühzeit – beiden verdankt unser Universum seine Existenz, aber das Standardmodell kann beide nicht erklären.

Vier Kräfte und das Standardmodell

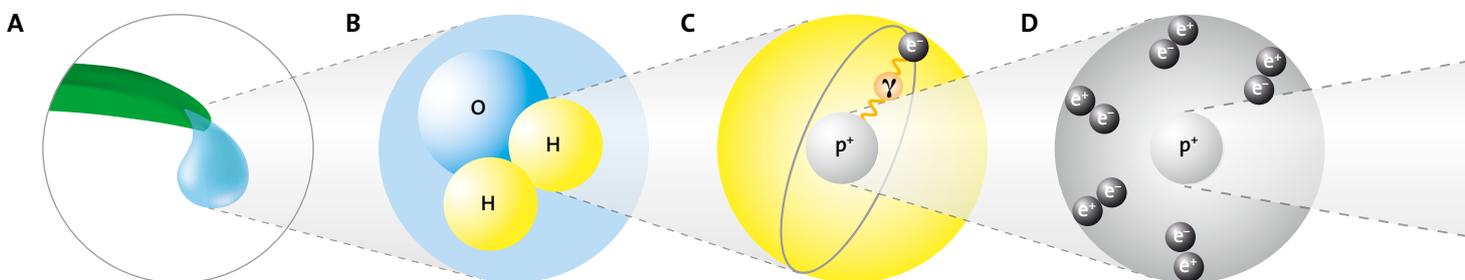
Die Gesetze des Mikrokosmos, die im Standardmodell zusammengefasst sind, bedürfen also der Erweiterung. Aber was versteht man überhaupt unter dem »Standardmodell der Teilchenphysik«? Wo liegen seine Stärken, wo seine Grenzen? Wie können Kräfte bei verschiedenen Abständen so unterschiedlich wirken? Und welche Aussagen über den Aufbau der Welt erhoffen sich die Physiker von den Experimenten am LHC und anderswo?

Um diesen Fragen nachzugehen, kommen wir nicht umhin, die Quantenwelt der Elementarteilchen mit ihren manchmal bizarren Eigenschaften zu erläutern. Die Quantenfeldtheorie und ihre Sym-

metriebeziehungen als Grundlage der Teilchenphysik sind neben der Allgemeinen Relativitätstheorie wohl die abstraktesten und zugleich erfolgreichsten theoretischen Gebäude, die je errichtet wurden, und wir können hier lediglich versuchen, einen ersten Einblick in die Zusammenhänge dieses komplizierten Konstrukts zu geben. Auf unserem Weg in die Welt des immer Kleineren orientieren wir uns an der unten stehenden Bildsequenz »Aufbau der Materie«: Dort ist unser Weg in zehn Schritten A bis J dargestellt.

Eine Eigenschaft der Quantenfeldtheorie ist von besonderer Bedeutung: Sowohl Materieteilchen als auch deren Wechselwirkungen sind Quantenfelder. Teilchen-

Aufbau der Materie



10 ⁻² Meter	10 ⁻⁹ Meter	10 ⁻¹⁰ Meter	10 ⁻¹³ Meter
Ein Wassertropfen mit 4 mm Durchmesser besteht aus ungefähr 10 ²¹ Wassermolekülen.	Das Wassermolekül besteht aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen.	Das Wasserstoffatom besteht aus einem Elektron (e ⁻) und einem Proton (p ⁺). Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch das Photon (γ) ausgetauscht.	Vakuumperturbationen von Elektronen und Positronen schirmen die Ladung des Protons nach außen hin ab.

eben einfach 0,935 GeV (wobei 1 GeV = 10⁹ eV ist und c = 1 gesetzt wird). Die Ruhemasse des Elektrons beträgt in dieser Ausdrucksweise 0,511 MeV (1 MeV = 10⁶ eV), das heißt die Masse des Protons ist rund 2000-mal größer als die Masse des Elektrons.

Eine wichtige Folge der Unschärferelation ist, dass die Reichweite einer Kraft umgekehrt proportional zur Masse jenes Teilchens ist, das dem Kraftfeld entspricht. Die elektrische Kraft hat eine unendliche Reichweite, weil das Photon exakt masselos ist, während die »schwache Kraft« gar nicht schwach ist, sondern nur kurzreichweitig, denn die Massen der Z- und W-Bosonen entsprechen fast der hundertfachen Protonenmasse.

Die volle Bedeutung der Unschärferelation kommt zum Tragen, wenn die Regeln der Quantenphysik mit denen der Relativitätstheorie vereinigt werden. Die Unschärferelation betrifft dann allgemeinere Größen. Beispielsweise lassen sich die elektrische und die magnetische Feldstärke nicht gleichzeitig exakt bestimmen und können damit auch nicht gleichzeitig verschwinden. Selbst der »leere Raum« enthält also elektromagnetische »Vakuumfluktuationen« und damit Energie, die nach Einstein die Raumzeit krümmt. Der Zusammenhang mit der Dunklen Energie, die zur beschleunigten Expansion des Universums führt, ist bis heute nicht geklärt – dies ist ein Beispiel für die Schwierigkeit, die Quantenfeldtheorie als Grundlage der Teilchenphysik mit der Allgemeinen Relativitätstheorie als Grundlage der Gravitationsphysik unter einen Hut zu bringen.

physiker sprechen – etwas salopp – von Teilchen, obwohl sie eigentlich Quantenfelder meinen. Die Kräfte zwischen Materieteilchen werden durch den Austausch von Wechselwirkungsteilchen übertragen (siehe dazu »Teilchen, Kräfte, Quantenfelder« auf S. 52f.). Das Standardmodell beinhaltet drei Kräfte:

- Die **elektromagnetische Kraft** wirkt auf atomaren Abständen und bindet das Elektron und das Proton zum Wasserstoffatom; ihr Austauschteilchen ist das Photon. (Schritt A bis C im »Aufbau der Materie«)

- Die **starke Kraft** wirkt auf Kernabständen und bindet drei Quarks zu einem Proton; ihre Austauschteilchen sind die Gluonen. (Schritt E im »Aufbau der Materie«)

- Die **schwache Kraft** wirkt bei Abständen, kleiner als 10⁻¹⁸ Meter – dem tausendsten Teil des Protondurchmessers – und ist für den Beta-Zerfall der Kerne verantwortlich; ihre Austauschteilchen sind die W-Bosonen und Z-Bosonen (Schritt G bis I im »Aufbau der Materie«).

Die Austauschteilchen koppeln jeweils an die Ladungen der Materieteilchen. Dabei können Materieteilchen unterschiedliche elektrische, schwache oder auch starke Ladungen tragen: So haben Elektronen nur eine elektrische und eine schwache Ladung, Quarks dagegen haben auch eine starke. Wie stark die Austauschteilchen an die entsprechenden Ladungen ankoppeln, wird durch die jeweilige Kopplungskon-

stante beschrieben. Es existieren drei Kopplungskonstanten – jeweils eine für die elektromagnetische, die starke und die schwache Kraft. Der Wert der Kopplungskonstanten hängt vom Abstand (und damit auch von der Energie) ab, bei dem die entsprechenden Wechselwirkungen stattfinden (siehe »Teilchen, Kräfte, Quantenfelder«, S. 52f.).

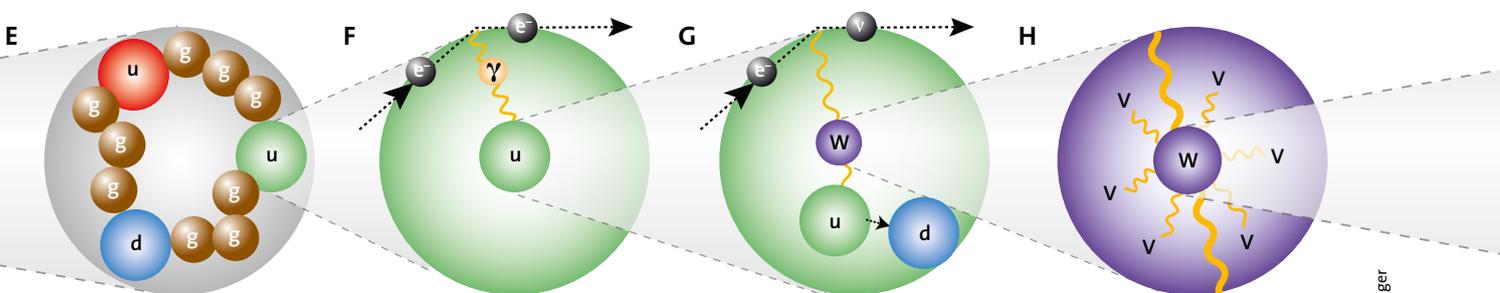
Weitere ungelöste Fragen beschert uns die Gravitation: Diese vierte »Naturkraft« lässt sich bisher einfach nicht in das Schema des Standardmodells einbinden. Sie wirkt nicht auf Ladungen, sondern auf Masse, und Energie und ist stets anziehend. Dadurch summiert sich ihr Einfluss, weshalb sie trotz ihrer geringen Stärke auf kosmischen Skalen maßgebend ist.

Reise zur elektroschwachen Skala

Die vier verschiedenen Wechselwirkungen sind also auf verschiedenen Abstandsskalen bestimmend. Dass die elektromagnetische Wechselwirkung im Großen oft keine Rolle spielt, liegt daran, dass normale Materie elektrisch neutral ist, da sich die Wirkung positiver und negativer Ladungen buchstäblich neutralisiert.

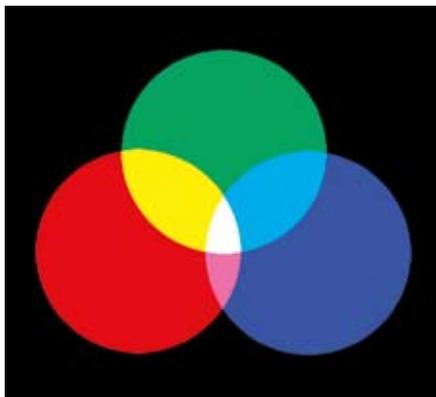
Wie wir sehen werden, neutralisiert sich auch die starke Wechselwirkung, die beispielsweise Quarks zu Protonen und Neutronen bindet, auf größeren Abständen, obwohl ihre Austauschteilchen, die Gluonen, masselos sind. Die schwache

Diese Bildfolge illustriert in zehn Schritten den »Aufbau der Materie« von der makroskopischen Skala bis hinab zur vermuteten Vereinigung aller Kräfte.



10 ⁻¹⁶ Meter	10 ⁻¹⁷ Meter	10 ⁻¹⁸ Meter	10 ⁻¹⁹ Meter
Das Proton besteht aus zwei Up-Quarks (u) und einem Down-Quark (d). Die Bindungsenergie der Gluonen (g) liefert den größten Beitrag zur Protonenmasse.	Der Austausch des neutralen Photons bestimmt die Wechselwirkung von Elektron und Up-Quark.	Die Wechselwirkung des geladenen W-Bosons (W) wird immer wichtiger. Dabei entspricht der Abstand von 10 ⁻¹⁸ Metern ungefähr der Masse des W-Bosons.	Das W-Boson koppelt mit seiner schwachen Ladung ans Vakuum (V) und erhält so seine Masse.

Exzellenzcluster Universe/Urknall Ollinger



Drei Farben addieren sich zur Farbe Weiß. Dieses Bild liefert eine Analogie dafür, dass ein im Sinne der Quantenchromodynamik neutrales Proton aus drei Quarks mit unterschiedlicher QCD-Ladung (Farbladung) besteht.

Wechselwirkung hingegen hat die besondere Eigenschaft, dass ihre Austauschteilchen, die W- und Z-Bosonen, große Massen haben und hierdurch die Reichweite der Kraft eingeschränkt ist.

Die große Masse dieser Bosonen bereitet den Teilchenphysikern großes Kopfzerbrechen, denn grundsätzlich, das heißt ohne die Mitwirkung eines zusätzlichen Mechanismus, sind Austauschteilchen masselos. Eine minimale Erweiterung des Standardmodells zur Lösung des Problems führt zur Annahme des Higgs-Teilchens (oder kurz »Higgs«), das bisher allerdings nicht gefunden wurde. Der LHC wird in den hier maßgeblichen Energiebereich vorstoßen (Schritt I in der Bildfolge »Aufbau der Materie«) und möglicherweise den entscheidenden Hinweis auf die Existenz des Higgs-Teilchens erbringen – könnte aber auch ganz andere, sogar noch spannendere Lösungen liefern. So mancher Teilchenphysiker hofft, das Higgs möge nicht auftauchen und es komme stattdessen zu unerwarteten Entdeckungen jenseits des Standardmodells!

Aber eins nach dem anderen. Um besser zu verstehen, wie Teilchenmassen in einer

Quantenfeldtheorie entstehen, warum Kräfte bei verschiedenen Abständen unterschiedlich wirken und welche neuen Phänomene an der elektroschwachen Skala, also bei Teraelektronvolt-Energien und den entsprechenden Abständen von 10^{-19} Metern auftreten mögen, begeben wir uns auf eine Reise ins Innere der Quantenwelt zu immer kleineren Abständen.

■ **Elektromagnetische Wechselwirkung:** Beginnen wir bei atomaren Abständen, also bei ungefähr 10^{-10} Metern (Schritt C in der Bildfolge »Aufbau der Materie«), und betrachten das Wasserstoffatom. Es ist ein elektrisch neutraler, gebundener Zustand aus einem positiv geladenen Proton und einem negativ geladenen Elektron. Seine Masse ist die Summe aus Proton- und Elektronmasse, abzüglich des Massenäquivalents der Bindungsenergie. Dabei trägt die Bindungsenergie über die einsteinsche Äquivalenz von Energie und Masse nur rund 13 Milliardstel zur Gesamtmasse des Wasserstoffatoms bei.

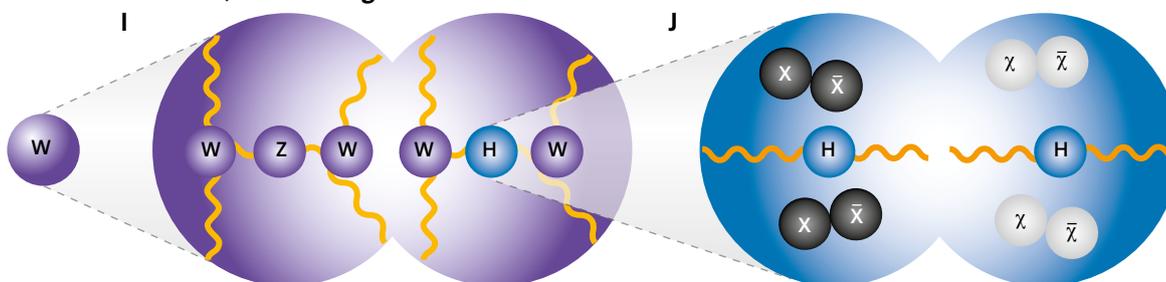
Zoomen wir nun tausendfach näher an das Proton heran (Schritt D). Bei Abständen kleiner als 10^{-13} Meter koppelt das

vom Elektron ausgestrahlte Photon immer stärker an das Proton. Da die Masse des Elektrons genau diesem Abstand entspricht, kommt hier eine weitere Eigenschaft der Quantenfeldtheorie zum Tragen: Bei diesen Abständen entstehen und vergehen ständig Paare von Elektronen und Positronen, also den Antiteilchen der Elektronen. Da diese Teilchenpaare aus dem leeren Raum entstehen, spricht man auch von Vakuumfluktuationen. Die Teilchenpaare umgeben das Proton, wobei die positiven Ladungen etwas abgestoßen, die negativen Ladungen etwas angezogen werden. Durch diese »Polarisierung des Vakuums« wird die ursprüngliche Ladung des Protons teilweise nach außen hin abgeschirmt.

Durchdringen wir nun diese Wolke von Teilchenpaaren, so steigt die Stärke der elektromagnetischen »Austauschwechselwirkung« umso mehr an, je näher wir dem Proton kommen. Bei noch kleineren Abständen tragen auch Paare von Quarks und Antiquarks zur Abschirmung der elektrischen Ladung bei – und damit zum Anwachsen der elektromagnetischen Kopplungskonstanten bei kleinen Abständen.

■ **Starke Wechselwirkung:** Vergrößern wir erneut tausendfach (Schritt E in der Bildfolge »Aufbau der Materie«). Erst bei 10^{-16} Metern wird die innere Struktur des Protons sichtbar: Es besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark. Die Massen der Quarks liefern aber nur einen Bruchteil der Protonmasse, die Bindungsenergie (beziehungsweise deren Massenäquivalent) dagegen den größten Teil. Um zu erklären, woher die große Bin-

Aufbau der Materie, Fortsetzung



10^{-19} Meter

W-Bosonen wechselwirken, indem sie ein Photon, ein Z-Boson oder ein Higgs-Teilchen (H) austauschen. Für Higgs-Massen größer als 1 TeV wäre die Wechselwirkung der W-Bosonen keine schwache Kraft mehr.

10^{-32} Meter

Vakuumfluktuationen von Wechselwirkungsteilchen (X) der Großen Vereinheitlichten Theorien ändern die Masse des Higgs-Bosons um 10 Größenordnungen. Supersymmetrische Partnerteilchen (χ) würden diese Massenänderung aufheben.

Aktuelle Neuerscheinungen und Empfehlungen

www.science-shop.de

► Astrophysik Aktuell

Hrsg. von A. Burkert, H. Lesch, H. Hetznecker und N. Heckmann



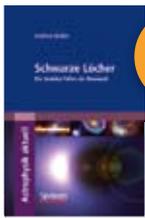
Neu!

1. Aufl. 2010, 232 S.
57 Abb. in Farbe, kart.
€ (D) 19,95 / € (A) 20,50 /
CHF 27,-
Bestell-Nr. 3146

Adalbert Pauldrach

Dunkle kosmische Energie

Das Universum expandiert beschleunigt! Maßgebend daran beteiligt, scheint eine noch unbekanntere „Dunkle Energie“ zu sein. Adalbert Pauldrach erläutert in diesem Astrophysik-aktuell-Band, welche wesentlichen Puzzesteine in unserem Bild vom Universum zu legen sind, um die Signaturen einer Dunklen kosmischen Energie zu erkennen. Dabei öffnet sich für den Leser ein spannender Werkzeugkasten der Astrophysik, in dem numerische Simulationen, Lichtkurven und Spektraldiagnostik bereitgestellt werden, um dem Rätsel der „Dunklen Energie“ auf die Spur zu kommen.



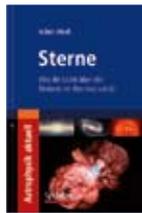
Neu!

1. Aufl. 2010, 206 S.,
60 Abb. in Farbe, kart.
€ (D) 16,95 /
€ (A) 17,42 / CHF 23,-
Bestell-Nr. 2921

Andreas Müller

Schwarze Löcher

Das Buch von Andreas Müller stellt kompakt die aufregende Entdeckungsgeschichte Schwarzer Löcher dar – von den anfänglichen Spekulationen um Schwarze Löcher bis zu gesicherten astronomischen Beobachtungen, die kaum Zweifel an der Existenz Schwarzer Löcher lassen. Dieses Buch deckt alle wichtigen Aspekte des Forschungsgebiets ab: die Eigenschaften Schwarzer Löcher, ihre Wechselwirkung mit Licht und Materie, ihre Beschreibung mit Einsteins Relativitätstheorie, die astronomischen Objekte, die mit ihnen verknüpft sind sowie die modernen Forschungswege auf diesem spannenden Gebiet.



1. Aufl. 2008, 124 S.,
43 Abb., kart.
€ (D) 15,- /
€ (A) 15,42 / CHF 23,50
Bestell-Nr. 2593

Achim Weiß

Sterne

Sterne sind die Elementküchen des Kosmos, und in ihrem Licht – genauer: anhand ihrer Strahlungsspektren – lassen sich die chemischen Elemente identifizieren, die in einem Stern vorhanden sind. Zusätzlich bietet die Helligkeit wichtige Hinweise auf die Entfernung und die Leuchtkraft, und schließlich kann man aus den verschiedenen Beobachtungsbefunden an unzähligen Sternen und verschiedenen Sterntypen auch die Entwicklungsgeschichte ganzer Galaxien und des Universums ableiten.



1. Aufl. 2008, 160 S.,
49 Abb., kart.
€ (D) 14,95 /
€ (A) 15,37 / CHF 23,50
Bestell-Nr. 2699

Helmut Hetznecker

Kosmologische Strukturbildung

Die Frage, wie sich aus der chaotischen Ursuppe des frühen Universums die Sterne und Galaxien bilden konnten, die wir zu Milliarden beobachten, führt die Astronomen zu immer neuen Rätseln. Sie stehen vor der komplexen Aufgabe, die Welteninseln aus Gas, Staub und Dunkler Materie anhand physikalischer Gesetze rechnerisch entstehen zu lassen. Heute erhalten wir großartige Einblicke durch moderne Supercomputer, die den Lauf des Universums im Zeitraffer nachvollziehen – von den Quantenfluktuationen bis zu den Galaxien.

Die weiteren Bände:

Ralf Klesen, **Sternentstehung**, Bestell-Nr. 2262, Bernd Lang, **Das Sonnensystem**, Bestell-Nr. 2328, Helmut Hetznecker, **Die Expansionsgeschichte des Universums**, Bestell-Nr. 2472

► Comins Astronomie – endlich auf deutsch



Neu!

1. Aufl. 2011, 516 S.
520 Abb. in Farbe, geb.
€ (D) 59,95 / € (A) 61,63 /
CHF 80,50
Bestell-Nr. 3105

Neil F. Comins

Astronomie

Der amerikanische Lehrbuchklassiker für Collegekurse in Astronomie vermittelt einen Einstieg der besonderen Art: In seiner leicht lesbaren Sprache fast ganz ohne Formeln und mit zahlreichen Astrophotos und Illustrationen ist dieses Lehrbuch didaktisch raffiniert auf das Wesentliche reduziert, das Physikstudierende und angehende Physiklehrer wissen müssen und leicht lernen können; für Schüler und Hobby-astronomen bietet es sich zum autodidaktischen Lernen und Schmökern an – und am Ende bleiben nicht nur die wenigen wirklich wichtigen Formeln aus der Schulphysik nachhaltig im Gedächtnis.

Aus dem Inhalt

1. Erkunden des Nachthimmels
 2. Gravitation und die Bewegung von Planeten
 3. Licht und Teleskope
 4. Erde und Mond
 5. Die anderen Planeten und ihre Monde
 6. Vagabunden des Sonnensystems
 7. Die Sonne, unser besonderer, ganz gewöhnlicher Stern
 8. Sterne und ihre Eigenschaften
 9. Das Leben der Sterne – von der Geburt bis ins mittlere Alter
 10. Wie Sterne sterben
 11. Die Galaxien
 12. Kosmologie
 13. Astrobiologie
- Glossar

Inkl. REDSHIFT-Himmelsführungen auf Comins-Website

Jetzt bequem bestellen:

► unter www.science-shop.de
► per E-Mail: info@science-shop.de

► telefonisch: + 49 6221 9126-841
► per Fax: + 49 711 7252-366

► per Post: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Science-Shop • Postfach 810680 • D- 70523 Stuttgart

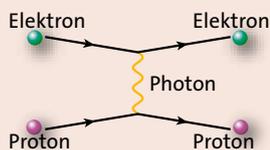
Science-Shop.de

Teilchen, Kräfte, Quantenfelder

Die Eigenschaften der Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte (die Physiker nennen sie auch »Wechselwirkungen«) sind untrennbar miteinander verknüpft. Die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung sind jeweils bei unterschiedlichen Abständen von Bedeutung. Sie gehorchen ähnlichen Prinzipien: geladene Teilchen ziehen sich an oder stoßen sich ab, wobei die Wechselwirkung durch das zugehörige (Kraft-) Feld vermittelt wird.

Die Physiker des 19. Jahrhunderts erkannten, dass elektrische und magnetische Felder gemeinsam als Elektromagnetismus zu verstehen sind und selbstständig als elektromagnetische Wellen existieren. An der Schwelle zum 20. Jahrhundert erkannte Max Planck, dass die Anwendung der Thermodynamik auf elektromagnetische Wellen zu einer Quantisierung führt. Diese Quantisierung wiederum erklärt, wie Einstein 1905 zeigte, weshalb Atome elektromagnetische Wellen in diskreten Portionen absorbieren oder emittieren. Ein solches Quant, das Photon, trägt die Energie $E = h\nu$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum, eine fundamentale Naturkonstante, und ν die Lichtfrequenz ist.

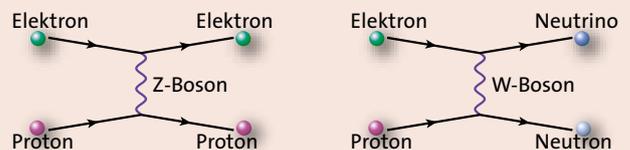
Damit wird klar, dass »Kraftfelder« zwischen Teilchen selbst die Rolle von Teilchen spielen. Man interpretiert dann etwa die Wechselwirkung zweier elektrisch geladener Teilchen als Austausch eines Photons zwischen den beiden Teilchen und spricht von einer »Austauschwechselwirkung«. Dabei bezeichnet die Kopplungskonstante die Stärke dieser **elektromagnetischen Wechselwirkung**. Diese Wechselwirkung (hier zum Beispiel: die Streuung eines Elektrons an einem Proton) wird in einem »Feynman-Graphen« als Austausch eines Photons dargestellt:



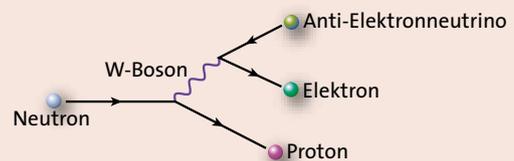
Die **schwache Wechselwirkung** wird in ähnlicher Weise durch den Austausch des neutralen Bosons Z^0 und der elektrisch geladenen Bosonen W^+ und W^- vermittelt, die jedoch Massen von rund

0,1 TeV besitzen, was ihre Reichweite einschränkt. (Unter einem **Boson** versteht man ein Teilchen mit ganzzahligem Spin, oder innerem Drehimpuls, in Einheiten von $h/2\pi$; alle Austauschbosonen haben Spin 1.) Ungefähr bei dem Abstand der elektroschwachen Skala sind die schwache und die elektromagnetische Kraft vergleichbar (siehe »Die elektroschwache Vereinheitlichung« auf S. 54). Allerdings erfordert die schwache Wechselwirkung keine elektrische Ladung und wirkt auch auf Neutrinos.

Bemerkenswerterweise übertragen die (elektrisch geladenen) W-Bosonen W^+ und W^- eine elektrische Elementarladung, sodass die miteinander wechselwirkenden Teilchen ihre Ladung ändern, etwa vom Proton zum Neutron oder vom Elektron zum Neutrino. Dieses Feld überträgt also nicht nur eine Kraft, sondern verändert auch die Identität der Teilchen. Die folgenden Beispiele zeigen die Streuung von Teilchen mittels schwacher Wechselwirkung (Z- oder W-Austausch), links ohne, rechts mit Ladungsänderung:



Noch interessanter ist die Rolle der schwachen Wechselwirkung beim Zerfall des freien Neutrons, das eine mittlere Lebensdauer von rund 15 Minuten hat. Alle Teilchen zerfallen in leichtere, falls die Erhaltung von Energie, Drehimpuls, elektrischer Ladung und anderer Quantenzahlen gewährleistet ist. Durch Vermittlung des W-Bosons zerfällt das Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Elektronneutrino:



Die große Masse des W-Bosons (ungefähr hundertmal so groß wie die Masse des Neutrons) bewirkt die lange Lebensdauer des

dungsenergie kommt und wie die Quarks überhaupt zu einem elektrisch geladenen Proton gebunden werden können, ist eine weitere Wechselwirkung notwendig: die in den 1960er Jahren entwickelte Quantenchromodynamik (QCD). Sie ist die Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung. Ihr Name (*chromos* – griechisch für: Farbe) geht auf eine Analogie zur Farbmischung zurück (siehe Bild auf S. 50 oben). Denn die Quarks tragen immer eine von drei möglichen QCD-Ladungen – so, wie in der Farbenlehre jedes Pigment eine von drei Grundfarben trägt. Die Summe dreier verschiedener QCD-Ladungen ergibt Null, einen neutralen Wert also, oder – um in der Analogie zu bleiben – die Farbe Weiß.

Bei niedrigen Energien treten Quarks nur in gebundenen QCD-neutralen Zuständen, wie dem Proton, auf. Bei Abständen, die größer als der Protonenradius sind, ist dementsprechend die starke Wechselwirkung nach außen hin abgeschirmt. Einzelne Quarks können nicht frei existieren, sodass ihre Interpretation als echte Teilchen einst umstritten war. Sehen wir aber weiter in das Proton hinein und untersuchen die Quarks mit höheren Energien, so verhalten sie sich wie annähernd freie Teilchen (man spricht von »asymptotischer Freiheit«) – eine weitreichende Erkenntnis, für die erst im Jahr 2004 der Nobelpreis für Physik an David Gross, Hugh David Politzer und Frank Wilczek verliehen wurde.

Für das Phänomen der asymptotischen Freiheit ist die Abstandsabhängigkeit der QCD entscheidend. Zwar schirmen, ähnlich wie in der Elektrodynamik, Quark-Antiquark-Paare die starke Wechselwirkung ab, jedoch haben Vakuumfluktuationen der Gluonenfelder den umgekehrten und stärkeren Effekt. Damit wird die starke Wechselwirkung bei kleinen Abständen – und damit großen Energien – immer schwächer. Bei der gegenteiligen Situation jedoch – größeren Abständen und kleineren Energien – wächst die Kopplung der starken Wechselwirkung immer weiter an. Die entsprechenden Energien sind viel größer als die Up- und Down-Quark-Massen,

Neutrons. Streuung und Zerfall mittels Austauschbosonen sind ganz ähnliche Phänomene, doch hat der Zerfall keine Entsprechung außerhalb der Quantenwelt.

Die »Kraftfelder« spielen also eine viel allgemeinere Rolle als die klassischen »Kräfte«, und ihre »Anregungen« sind selbstständige Teilchen. Umgekehrt werden etwa Elektronen als Anregungen des zugehörigen Feldes angesehen. Der wesentliche Unterschied besteht in ihrem Spin, ihrem inneren Drehimpuls: 1 für Austauschbosonen und $\frac{1}{2}$ für »Materieteilchen« (zum Beispiel Elektronen). Teilchen mit halbzahligem Spin werden als **Fermionen** bezeichnet und verhalten sich oft ganz anders als Bosonen. Beide sind jedoch angeregte Zustände der jeweiligen Quantenfelder. Die Quantenfeldtheorie ist eine unausweichliche Konsequenz der Vermählung der Relativitätstheorie, in der Raum und Zeit eine einheitliche Rolle spielen, mit der Quantenmechanik, in der Raum und Zeit unterschiedlich behandelt werden.

Wir kennen drei Arten von Materieteilchen oder Fermionen, je nach den Wechselwirkungen, denen sie unterliegen (siehe Bild rechts). Die **ungeladenen Leptonen** oder Neutrinos spüren (neben der Gravitation) lediglich die schwache Wechselwirkung. Die **geladenen Leptonen** (Elektron, Myon, Tau-Lepton) tragen eine negative elektrische Elementarladung und unterliegen damit zusätzlich der elektromagnetischen Wechselwirkung. Schließ-

Fermionen, Spin 1/2				
Quarks		Leptonen		
	elektrische Ladung +2/3	elektrische Ladung -1/3	elektrische Ladung -1	elektrische Ladung 0
1. Familie	Up (u)	Down (d)	Elektron (e ⁻)	Elektron-Neutrino (ν _e)
2. Familie	Charm (c)	Strange (s)	Myon (μ)	Myon-Neutrino (ν _μ)
3. Familie	Top (t)	Bottom (b)	Tauon (τ)	Tau-Neutrino (ν _τ)

fundamentale Kräfte		Gravitation (Schwerkraft)
		schwache Kraft
		elektromagnetische Kraft
		starke Kraft

Exzellenzcluster Universe/Ulrike Ollinger/ SuW-Grafik

lich kennen wir die **Quarks**, die einerseits $-1/3$ oder $+2/3$ der elektrischen Elementarladung tragen, andererseits aber auch »Farbladungen«, die sie zusätzlich zur elektromagnetischen Wechselwirkung auch der starken Wechselwirkung unterwerfen. Letztere wird durch masselose **Gluonen** vermittelt.

Die Fermionen ordnen sich zu einer Art Periodensystem aus drei Familien mit zunehmender Masse. Die erste Familie beinhaltet ein Up- und ein Down-Quark, ein Elektron und ein Neutrino. Während auf die Quarks alle vier Kräfte wirken,

wechselwirken die Neutrinos nur mit der schwachen Kraft und der Gravitation. Die Fermionen der anderen Familien unterscheiden sich von den Fermionen der ersten lediglich durch ihre größeren Massen. Die drei Varianten jedes Fermions bezeichnet man als seine *Flavours* (englisch für Geschmacksrichtung oder Duftnote). Zu jedem geladenen Fermion gibt es ein Antifermion mit umgekehrter Ladung, während wir noch nicht wissen, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. Wir wissen auch nicht, warum es mehr als eine Familie gibt und warum genau drei.

was dazu führt, dass sie im farbneutralen Proton eingesperrt sind.

Das starke Anwachsen der QCD-Kopplungskonstanten bei großen Abständen erklärt auch, warum die Bindungsenergie des Protons viel größer ist als die Massensumme seiner Quarks. Die QCD liefert damit einen Mechanismus, wie eine Wechselwirkung, oder Dynamik, Teilchenmassen erzeugen kann. Fast die gesamte Masse der gewöhnlichen Materie in unserem Universum geht auf die innere Bindungsenergie der Protonen und Neutronen zurück und entstammt damit der starken Wechselwirkung. Wie wir sehen werden, macht der Mechanismus der dynamischen Massenerzeugung die QCD

zu einem attraktiven Prototypen für zusätzliche Wechselwirkungen jenseits des Standardmodells. Zu diesen kommen wir später noch. Zunächst zurück zu unserer Reise zu immer kleineren Abständen hin zur elektroschwachen Skala.

■ **Schwache Wechselwirkung:** Blicken wir noch tiefer in das Proton hinein – und beschießen eines seiner Up-Quarks mit einem Elektron (siehe Schritt F auf S. 49 in der Bildfolge »Aufbau der Materie«). Da das Elektron keine QCD-Ladung trägt, kann es nur über ein W-Boson, Z-Boson oder Photon mit dem Up-Quark wechselwirken. Die Umwandlung eines Protons in ein Neutron entspricht der

Umwandlung eines Up-Quarks in ein Down-Quark. Da sich hierbei die elektrische Ladung des Quarks ändert, muss ein geladenes W-Boson an dem Prozess beteiligt sein. Dieses W-Boson wandelt auch das Elektron in ein Neutrino um. Der Austausch eines elektrisch geladenen Wechselwirkungsteilchens wird auch »geladener Strom« genannt. Dieser Begriff steht dem Begriff des »neutralen Stroms« gegenüber, für den zwei elektrisch neutrale Austauschteilchen, das Z-Boson und das Photon, verantwortlich sind. Beim »neutralen Strom« bleibt das Elektron nach der Wechselwirkung ein Elektron und wird nicht in ein Neutrino umgewandelt.

Bei größeren Abständen als 10^{-18} Meter dominiert der neutrale Strom, da der Austausch von Photonen langreichweitig ist, jener von W- und Z-Bosonen aber kurzreichweitig.

Nähern wir uns aber dem Up-Quark immer weiter bis zu Abständen von 10^{-18} Metern (Schritt G auf S. 49 in der Bildfolge »Aufbau der Materie«) – was Massen von 80 Gigaelektronvolt entspricht – so verhalten sich geladener und neutraler Strom annähernd gleich (siehe Bild unten).

Dieses gleiche Verhalten der beiden Wechselwirkungen bei kleinen Abständen stellt eine Symmetrie zwischen den Kopplungen der Photonen, Z-Bosonen und W-Bosonen dar, nämlich die Symmetrie der elektroschwachen Wechselwirkung des Standardmodells. Dabei tragen Photonen gar keine Ladung, während Z-Bosonen eine schwache Ladung tragen

(sie unterliegen der schwachen Wechselwirkung), und W-Bosonen sowohl schwach als auch elektromagnetisch wechselwirken.

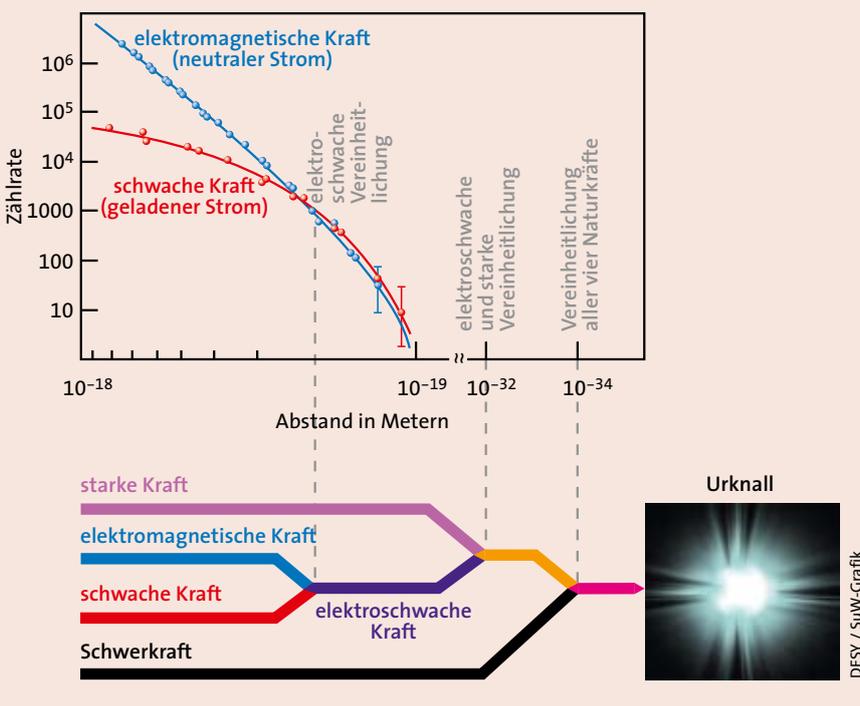
Die Aufhebung (oder »Brechung«) dieser Symmetrie bei größeren Abständen (kleineren Energien) geschieht im Standardmodell durch den Higgs-Mechanismus. Bei dieser »spontanen Symmetriebrechung« spielt wieder das Vakuum der Quantenfeldtheorie, also der Zustand niedrigster Energie aller Quantenfelder, eine zentrale Rolle. Ganz abgesehen von Vakuumfluktuationen entspricht dieser Zustand nicht zwangsläufig dem Verschwinden aller Felder, vielmehr besitzt das Vakuum eine klassische Feldstärke, die der Masse von W- und Z-Bosonen entspricht. Das Vakuumfeld trägt schwache Ladung, und da unter den Austauschteilchen nur W- und Z-Bosonen schwach

wechselwirken, erfahren nur sie die Feldstärke, die im leeren Raum existiert: Sie »koppeln ans Vakuum«, wie sich Teilchenphysiker ausdrücken, und erhalten dadurch ihre Masse. Entscheidend ist, dass die eigentlich masselosen W- und Z-Bosonen ihre Massen indirekt durch die Kopplung ans Vakuum erhalten. Damit sind sie durch die elektroschwache Symmetrie selbst bestimmt.

Die Massen der W- und Z-Bosonen wurden exakt gemessen, und viele Einzelheiten dieser gewagten Theorie sind verifiziert. Jener geheimnisvolle Mechanismus aber, der auch im Vakuum existiert und die W- und Z-Massen indirekt erzeugt, bleibt vorläufig im Bereich der Spekulation. Im Standardmodell erzeugt das Higgs-Feld das benötigte Vakuum. Das zum Higgs-Feld gehörige Teilchen wurde aber bisher nicht gefunden. Ob die elektroschwache Symmetriebrechung nun durch ein Higgs-Feld oder einen anderen Mechanismus erzeugt wird, ist die zentrale Frage, die bei Abständen von 10^{-19} Metern (entsprechend Energien an der TeV-Skala) zu klären ist. Dies ist das Hauptziel der Wissenschaftler am LHC.

Die elektroschwache Vereinheitlichung

Das Bild veranschaulicht die Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Kraft auf der Skala 10^{-18} bis 10^{-19} Meter, wie sie beispielsweise beim HERA-Experiment am DESY in Hamburg gemessen wurde. Dabei wird beobachtet, wie häufig und in welcher Weise ein Elektron und ein Proton bei bestimmten Abständen wechselwirken. Nur die schwache Wechselwirkung kann elektrische Ladung übertragen und dabei das Elektron in ein Neutrino umwandeln – hier spricht man vom »geladenen Strom« (rote Messpunkte). Die elektromagnetische Wechselwirkung trägt nur zum »neutralen Strom« (blaue Messpunkte) bei. Bei Abständen, die kleiner sind als 2×10^{-18} Meter, verhalten sich geladener und neutraler Strom annähernd gleich, weshalb man von »elektroschwacher Vereinheitlichung« spricht. Im Bereich noch kleinerer Skalen (10^{-32} bis 10^{-34} Meter) geht es dann um die Vereinheitlichung aller Kräfte.



Elektroschwache Symmetriebrechung bei 10^{-19} Metern

Von den vielen Mechanismen, welche die elektroschwache Symmetrie brechen, ist der Higgs-Mechanismus die minimale Erweiterung des Standardmodells – minimal in dem Sinne, dass nur ein einziges weiteres Quantenfeld, das Higgs-Feld, eingeführt werden muss. Seine Eigenschaften sind dabei so gewählt, dass sein Grundzustand genau das Vakuum der elektroschwachen Symmetriebrechung erzeugt. Die Masse des Higgs-Teilchens ist dabei ein unbestimmter Parameter.

■ **Unzulänglichkeiten des Higgs-Modells:** Dabei entspricht die Einführung des Higgs-Felds weniger einer Erklärung als eher einer Beschreibung der elektroschwachen Symmetriebrechung. Dieses Modell ähnelt daher ein wenig dem Modell des Äthers im 19. Jahrhundert: Ein allumfassendes Feld wird theoretisch eingeführt, welches das Gewünschte leistet – hier: eine Symmetrie bricht.

Allerdings: Obwohl das Higgs-Modell mit allen experimentellen Befunden im Einklang steht, wurde das Higgs-Teilchen selbst bislang nicht gefunden. Es ist lediglich bekannt, dass seine Masse mindestens

115 GeV betragen muss – eine Masse, die derjenigen von 115 Protonen entspricht.

Aber gibt es eine obere Grenze für die Higgs-Masse? Um das herauszufinden, schießen wir in einem Gedankenexperiment zwei W-Bosonen aufeinander – auf Abstände von 10^{-19} Metern (Schritt I auf S. 50 in der Bildfolge »Aufbau der Materie«). Die W-Bosonen treten dabei untereinander in Wechselwirkung, indem sie ein Photon, ein Z-Boson oder ein Higgs-Teilchen austauschen. Der Beitrag des Higgs-Teilchens zum Austausch wächst mit seiner Masse: Für eine Higgs-Masse von 115 GeV ist der Beitrag des Higgs-Bosons mit denjenigen von Z-Boson und Photon noch vergleichbar. Für Higgs-Massen größer als 1 TeV wächst der Beitrag des Higgs-Austauschs so stark an, dass die Wechselwirkung der W-Bosonen keine schwache Kraft mehr ist: Entweder ist das Higgs-Teilchen also leichter als 1 TeV oder eine neuartige Wechselwirkung muss spätestens an der TeV-Skala einsetzen.

Für Physiker ergibt sich daraus, dass am CERN mit Sicherheit etwas Neues entdeckt werden muss: Entweder das Higgs-Teilchen – oder eine neuartige starke Kraft an der TeV-Skala.

Zoomen wir nun zu immer kleineren Abständen, so erreichen wir die so genannte »Skala der großen Vereinheitlichung« bei etwa 10^{-32} Meter (Schritt J in der Bildfolge »Aufbau der Materie«). Hier treten neue, sehr schwere Teilchen mit Massen von 10^{15} GeV auf. Diese Teilchen koppeln an das Higgs-Boson des Standardmodells und ändern so die Masse des Higgs-Teilchens. Dies ähnelt der Abstandsabhängigkeit der Kopplungskonstanten, jedoch wird im Fall des Higgs-Bosons die Masse nicht um eine, sondern um zehn Größenordnungen geändert.

Auf kürzesten Distanzen von 10^{-32} Metern scheinen also W- und Z-Boson viel größere Massen zu haben, als experimentell gemessen wurde, und der Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung scheint an der Skala der großen Vereinheitlichung stattzufinden, nicht an der TeV-Skala. Dass trotz der Vakuumfluktuationen die Massen der W- und Z-Bosonen an der TeV-Skala verbleiben, anstatt zur Skala der großen Vereinheitlichung getrieben zu werden, dass also die »Hierarchie« dieser Skalen erhalten bleibt, wird von Physikern als unnatürlich betrachtet und mit dem Begriff »Hierarchieproblem« bezeichnet.

Erweiterungen des Standardmodells

Physiker haben zahlreiche Erweiterungen des Standardmodells ersonnen. Viele von ihnen lassen sich in eine von fünf Kategorien einteilen:

- 1. Große vereinheitlichte Theorien:** Bei Abständen von 10^{-32} Metern können die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft vereinheitlicht werden. Bei diesen kleinen Abständen würden sich die drei Kräfte gleich verhalten. Diesen Theorien zufolge müssen neue Teilchen existieren – die sogenannten X-Teilchen – mit Massen, die 10^{15} -mal so groß wären wie diejenige des Protons.
- 2. Erweiterte Higgs-Modelle:** Die Brechung der elektroschwachen Symmetrie, aber auch der Großen Vereinheitlichten Theorien, kann durch verschiedene Higgs-Modelle erzeugt werden. Wie viele Higgs-Teilchen existieren und was für Eigenschaften sie haben ist jedoch nicht bekannt. Das Standardmodell selbst enthält nur ein Higgs-Teilchen.
- 3. Supersymmetrie:** Die Supersymmetrie ist eine Theorie, die jedem Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zuordnet. Sie löst das so genannte Hierarchieproblem des Higgs-Modells. Viele Physiker glauben, dass deshalb das Higgs-Modell mit der Supersymmetrie einhergehen müsste.
- 4. Technicolor-Theorien:** Hier wird eine neue Kraft eingeführt, die – der QCD ähnelnd – bei kleineren Abständen immer schwächer wird. Bei Abständen größer als 10^{-19} Meter wächst die neue Kraft sehr stark an und bricht die elektroschwache Symmetrie. Es wird kein Higgs-Teilchen benötigt – womit sich auch das Hierarchieproblem erübrigt.
- 5. Extradimensionen:** Wenn es mehr als drei Raumdimensionen gäbe, würden sich die Eigenschaften der Teilchen ändern. Auch in Theorien mit Extradimensionen lässt sich die elektroschwache Symmetrie brechen, ohne dass ein Higgs-Teilchen benötigt wird.

Jenseits des Standardmodells

Etliche Physiker haben nun viele verschiedene Erweiterungen des Standardmodells ersonnen (siehe den Informationskasten oben). Eines der Ziele ist dabei die Lösung des Hierarchieproblems. Dabei gibt es zwei mögliche Wege: Entweder man erweitert das Higgs-Modell durch eine zusätzliche Symmetrie (»Supersymmetrie«) oder man erzeugt die Symmetriebrechung durch einen zum Higgs-Modell alternativen Mechanismus.

■ **Supersymmetrie:** Die Supersymmetrie ist die einzig bekannte Möglichkeit, das Hierarchieproblem des Higgs-Modells zu lösen. Hierbei spielt folgende Erkenntnis eine entscheidende Rolle: Fermionen (Teilchen mit halbzahligem Spin) und Bosonen (Teilchen mit ganzzahligem Spin) tragen zum Hierarchieproblem mit entgegengesetzten Vorzeichen bei. Die Supersymmetrie ordnet nun jedem Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zu. Jedem Fermion steht dabei ein Boson gegenüber, jedem Boson ein Fermion. Bei ungebrochener Supersymmetrie müssten die Massen und Kopplungskonstanten der Teilchen mit denen ihrer supersymme-

trischen Partner übereinstimmen; ihre Beiträge zu der Vakuumfluktuation würden sich exakt aufheben.

Allerdings ließ sich bislang experimentell zu keinem bekannten Elementarteilchen das theoretisch postulierte, supersymmetrische Partnerteilchen finden. Deshalb kann die Supersymmetrie in der Natur nicht exakt realisiert, sondern muss gebrochen sein. Soll jedoch die Supersymmetrie weiterhin das Hierarchieproblem lösen, so darf die Brechung der Supersymmetrie nicht zu stark sein. Der Unterschied in den Massen der Teilchen und ihrer supersymmetrischen Partnerteilchen entspricht dabei gerade der Stärke der Supersymmetriebrechung. Die supersymmetrischen Partnerteilchen des Standardmodells dürften deshalb keine Massen tragen, die viel größer als 1 TeV wären.

Diese neuen supersymmetrischen Partnerteilchen ändern – abermals durch den Beitrag von Quantenfluktuationen – die Wechselwirkungen des Standardmodells. So ändert sich beispielsweise die Abstandsabhängigkeit der Kopplungskonstanten, und bei einem Abstand von 10^{-32} Metern wechselwirken alle drei Kräfte gleich stark. Diese Vereinheitlichung der

Kräfte ist ein großer theoretischer Erfolg der Supersymmetrie. Aber auch Prozesse, die im Standardmodell zwar erlaubt, aber stark unterdrückt sind, erfahren möglicherweise starke Änderungen.

■ **Dynamische elektroschwache Symmetriebrechung:** Eine Möglichkeit, das Hierarchieproblem zu umgehen, besteht darin, die Massen der W- und Z-Bosonen dynamisch, das heißt durch eine neue Kraft, zu erzeugen – wodurch das Higgs-Boson überflüssig werden würde. Zu den gängigen Modellen, die elektroschwache Symmetriebrechung dynamisch zu erklären, zählen die von der QCD inspirierten »Technicolor«-Theorien. Wie wir gesehen haben, können in der QCD allein durch die starke Wechselwirkung Massen erzeugt werden. Auch erzeugt die QCD eine spontane Symmetriebrechung, die der Symmetriebrechung des Standardmodells ähnelt: Die starke Wechselwirkung der QCD lässt eine Kombination von Quark- und Anti-quark-Feldern einen Wert annehmen, der dem Vakuum des Standardmodells ähnelt. Jedoch ist die Brechung der elektroschwachen Symmetrie durch die QCD viel zu schwach: W- und Z-Bosonen wären viel zu leicht. In »Technicolor«-Theorien wird daher nun eine neue Kraft eingeführt, welche die richtigen Massen für W- und Z-Bosonen dynamisch erzeugt. Allerdings lässt sich der gleiche Mechanismus nicht verwenden, um auch noch Massen der Fermionen zu erzeugen – deshalb müssen die »Technicolor«-Theorien auf komplizierte Weise erweitert werden.

Ein anderer Blickwinkel auf die TeV-Skala

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Physik bei Abständen von 10^{-19} Metern zu untersuchen: Entweder man versucht, wie oben beschrieben, mit hohen Energien neue schwere Teilchen zu erzeugen, oder aber man untersucht bestimmte Eigenschaften leichter Teilchen mit hoher Präzision.

So kann man zählen, wie oft ein Teilchen in eine bestimmte Gruppe anderer Teilchen zerfällt: Beispielsweise wie oft ein so genanntes Strange-Quark in ein Down-Quark, ein Neutrino und ein Antineutrino zerfällt (siehe oben »Das NA62-Experiment«). Im Standardmodell findet dieser Prozess erst bei Abständen von 10^{-18} Metern statt: Eine Vakuumfluktuation, die ein Top-Quark – das schwerste bekannte Elementarteilchen – beinhaltet,

Das NA62-Experiment am CERN

Beim NA62-Experiment am CERN soll der äußerst selten stattfindende Zerfall eines elektrisch geladenen Kaons in ein elektrisch geladenes Pion, ein Neutrino und ein Antineutrino gemessen werden (siehe Bild unten). Dabei will man unbekannte Eigenschaften der Physik jenseits des Standardmodells testen. Das Kaon enthält ein Strange-Quark, das beim Zerfall zwei Neutrinos abstrahlt, seine Masse ändert und damit zum Down-Quark wird. Dieses Down-Quark wird zum Bestandteil eines neuen Teilchens: des Pions. Das Strange-Quark gleicht dem Down-Quark, ist aber schwerer. Seine ungewöhnlichen Eigenschaften beim Zerfall brachten ihm den Titel *Strange* (englisch für seltsam) ein. Im Standardmodell erwartet man, dass nur jedes zehnmilliardste (10^{-10} -te) Kaon in ein Pion und ein Neutrino-Paar zerfällt. Eine Abweichung von diesem Wert könnte nur durch Physik jenseits des Standardmodells erzeugt werden.

Für die Messung dieses Zerfalls werden beim NA62-Experiment große Mengen an Kaonen erzeugt (A), andere erzeugte Teilchen werden in der so genannten Beam-Pipe (B) herausgefiltert. Der Impuls des elektrisch geladenen Kaons wird vor dem Eintreten in eine Vakuumkammer gemessen (C) – der Impuls des elektrisch geladenen Pions wird in den Teilchendetektoren am Ende der Vakuumkammer bestimmt (D). Nun ist Vorsicht geboten: Das Kaon zerfällt 10^9 -mal häufiger in ein zweites, elektrisch neutrales Pion als in ein Neutrino-Paar (E). Um das Neutrino-Paar vom neutralen Pion zu unterscheiden, wird aus den Impulsen des geladenen Kaons und Pions die relativistische Masse des Neutrino-Paars berechnet. Diese Masse muss sich von der des neutralen Pions unterscheiden. Die Experimentalphysiker sprechen davon, dass sie den Pion-Untergrund abziehen. Dabei gehen sie ähnlich einem Bildhauer vor: Von einem Steinblock werden alle ungewünschten Teile – der Untergrund – entfernt, bis nur noch die gewünschte Skulptur übrig bleibt: der zu messende Zerfall.

Exzellenzcluster Universe/Ulrike Ollinger

ist für diesen Zerfall verantwortlich. Da das Top-Quark nur sehr schwach an Strange- und Down-Quarks koppelt, findet der Zerfall im Standardmodell nur sehr selten statt. Jedoch ist dies nicht für die oben diskutierten Erweiterungen des Standardmodells der Fall: Das Strange-Quark würde viel häufiger in das Down-Quark und die Neutrinos zerfallen, falls keine weiteren Annahmen erforderlich sind.

Experimente, die diese oder ähnliche Zerfälle untersuchen, werden gegenwärtig in den USA, Japan und der Schweiz durchgeführt. Sie ermöglichen einen anderen, neuen Blick auf die TeV-Skala. In Kombination mit der direkten Suche nach neuen schweren Teilchen kann man so besser zwischen den verschiedenen Erweiterungen des Standardmodells unterscheiden.

Dunkle Materie – Wunder an der elektroschwachen Skala?

An der elektroschwachen Skala wird vielleicht nicht nur das Standardmodell der Teilchenphysik vervollständigt werden: Möglicherweise wird auch das Problem der rätselhaften Dunklen Materie gelöst, deren Gravitationswirkung die Entwicklung der Galaxien und die Dynamik des Kosmos bestimmt. Es ist seit langem klar, dass es sich dabei nicht um »normale« Materie etwa in Form kompakter Sterne oder Schwarzer Löcher handeln kann. Andererseits kennen wir bisher kein Teilchen, das als Kandidat in Frage käme. Neutrinos treten nicht mit Photonen in Wechselwirkung und erscheinen somit dunkel, ihre Masse ist aber zu klein, um die gravitative Wirkung der Dunklen Materie im Universum zu erklären. Außerdem sind Teilchen mit kleinen Mas-

sen ausgeschlossen, da sie durch ihre schnelle Diffusionsgeschwindigkeit die Bildung kosmischer Strukturen behindern würden. Was man braucht, ist »Kalte Dunkle Materie«, also Teilchen, die im frühen Universum rechtzeitig langsam wurden, sodass die Materie schon bald zu Galaxien klumpen konnte.

Es wird seit langem spekuliert, dass WIMPs (englisch: *Weakly Interacting Massive Particles* – schwach wechselwirkende Teilchen mit Masse) diese Rolle spielen könnten, also Teilchen, die den Neutrinos ähneln, aber eine weitaus größere Masse haben. Wenn die Massen dieser Teilchen und die Stärke ihrer Wechselwirkung etwa der elektroschwachen Skala entsprächen, könnte die Kalte Dunkle Materie im Universum ganz einfach erklärt werden – ein Sachverhalt, der auch als »WIMP-Wunder« bekannt ist. Das Wunder besteht darin, dass aus ganz anderen Überlegungen heraus erneut die elektroschwache Skala auftaucht.

Ganz konkret stellt man sich vor, dass jene supersymmetrischen Teilchen, die nur schwach wechselwirken, ideale WIMP-Kandidaten sind. Im besonderen das leichteste der »Neutralinos«, das sind die supersymmetrischen Partnerteilchen des Photons, Z-Bosons und Higgs-Teilchens, käme als Kandidat für die Dunkle Materie in Frage. Solche Teilchen können am LHC gefunden werden, aber auch in Experimenten, die direkt nach jenen Teilchen suchen, welche die Dunkle Materie unserer Galaxis ausmachen und die daher auch jedes Labor auf der Erde durchströmen müssten. In diesen Experimenten sucht man nach extrem seltenen Ereignissen, in denen ein WIMP einem Atomkern, beispielsweise in einem Germaniumkristall, einen kleinen Rückstoß versetzt. Weltweit werden zahlreiche solcher Projekte vorangetrieben, sodass Teilchen jenseits des Standardmodells, und insbesondere an der elektroschwachen Skala, nicht nur am LHC auftauchen könnten.

Horizont der Quantenwelt

Es steht außer Frage, dass wir die Welt im Kleinsten mit Hilfe der Quantenfeldtheorie in vielerlei Hinsicht exzellent verstehen, aber es steht ebenso außer Frage, dass das Standardmodell der Teilchenphysik unvollständig ist. In den vergangenen Jahren haben sich viele Einzelheiten geklärt, insbesondere im Bereich

der QCD und Neutrinophysik – Themen, die wir hier nur gestreift haben. Auf dem Weg zu immer kleineren Abständen beziehungsweise immer höheren Energien ist die TeV-Skala ein bisher unerreichter Horizont, an dem sich neue Landschaften auftun müssen – und wäre es »nur« die Entdeckung des Higgs-Teilchens. Auch als Kolumbus nach Westen segelte, waren ihm neue Entdeckungen sicher, und wäre es »nur« der Seeweg nach Indien gewesen. Schon bald werden wir wissen, ob die Reise zur TeV-Skala einen neuen Kontinent voller neuartiger Phänomene eröffnet. Ob nun die Teilchen der Dunklen Materie, das Higgs-Teilchen oder neue starke Wechselwirkungen – die Kräfte und Teilchen bei Abständen von 10^{-19} Metern bergen Geheimnisse, die zu entschlüsseln die Teilchenphysiker aufgebrochen sind.



MARTIN GORBAHN

erforscht am Exzellenzcluster Universe und am Institute for Advanced Study der TU München die Welt im Kleinen jenseits des Standardmodells, die Massen der Teilchen und ihre Hierarchie.



GEORG RAFFELT forscht am MPI für Physik und im Exzellenzcluster Universe an der Schnittstelle von Astroteilchenphysik und Kosmologie. Sein besonderes Interesse gilt den Neutrinos und der

Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie.

Literaturhinweise

Bartelmann, M.: Dem Dunklen Universum auf der Spur. In: *Sterne und Weltraum* 8/2010, S. 32–43.

Brück, J.: Countdown für den Urknall. In: *Sterne und Weltraum* 9/2008, S. 48–55.

Pössel, M.: Zeitreise zum Anfang des Alls. In: *Spektrum der Wissenschaft* 9/2005, S. 15–16.

Rau, W.: Auf der Suche nach der Dunklen Materie. In: *Sterne und Weltraum* 1/2005, S. 32–42.

Weblinks zum Thema:

www.astronomie-heute.de/artikel/1044001

Vixen®

**Astronomische Teleskope
und Zubehör aus Japan**

**Vixen High-Precision
Äquatoriale Montierungen**

*Made in Japan



Die legendäre GP2 (Great-Polaris) Montierung *GoTo nachrüstbar Tragkraft: 10,7kg

Art-Nr. 5904
UVP: 469 Euro



Die legendäre stabile GPD2 (GP-Deluxe) Montierung *GoTo nachrüstbar Tragkraft: 15,6kg

Art-Nr. 3991
UVP: 1.029 Euro



Die hochwertige stabile GoTo-SXW Montierung Tragkraft: 13,9kg

Art-Nr. 2502
UVP: 1.789 Euro



Die kompromislose stabile GoTo-SXD Montierung Tragkraft: 20,6kg

Art-Nr. 2503
UVP: 2.669 Euro



Die ultimative GoTo NEW ATLUX-Montierung Tragkraft: 32,5kg

Art-Nr. 3690
UVP: 5.899 Euro

Vixen Europe GmbH
<http://www.vixen-europe.com/>



Kleinhülsen 16/18,
40721 Hilden, Germany
Telefon 02103 / 89787-0
F a x 02103 / 89787-29

<http://vixen-shop.eu/>

Neu! Restposten