



2013
highlights der **physik**

Vom **Urknall** zum **Weltall**

Wissenschaftsmagazin

Vom Urknall zum Weltall

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium
für Bildung und Forschung
Deutsche Physikalische
Gesellschaft e. V. (DPG)

AUTOR

Dr. Thomas Bürke

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard Wassermann

REDAKTION UND LEKTORAT

Dr. Axel Carl
Dr. Ralph Dieter
Dr. Jens Kube
Timo Meyer

KONZEPT UND GESTALTUNG

iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bonn
ius.pr@dpg-physik.de

August 2013

Die Highlights der Physik im Internet:
www.physik-highlights.de

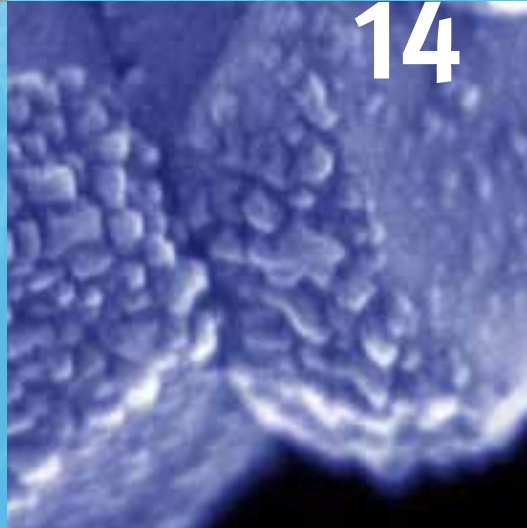




4



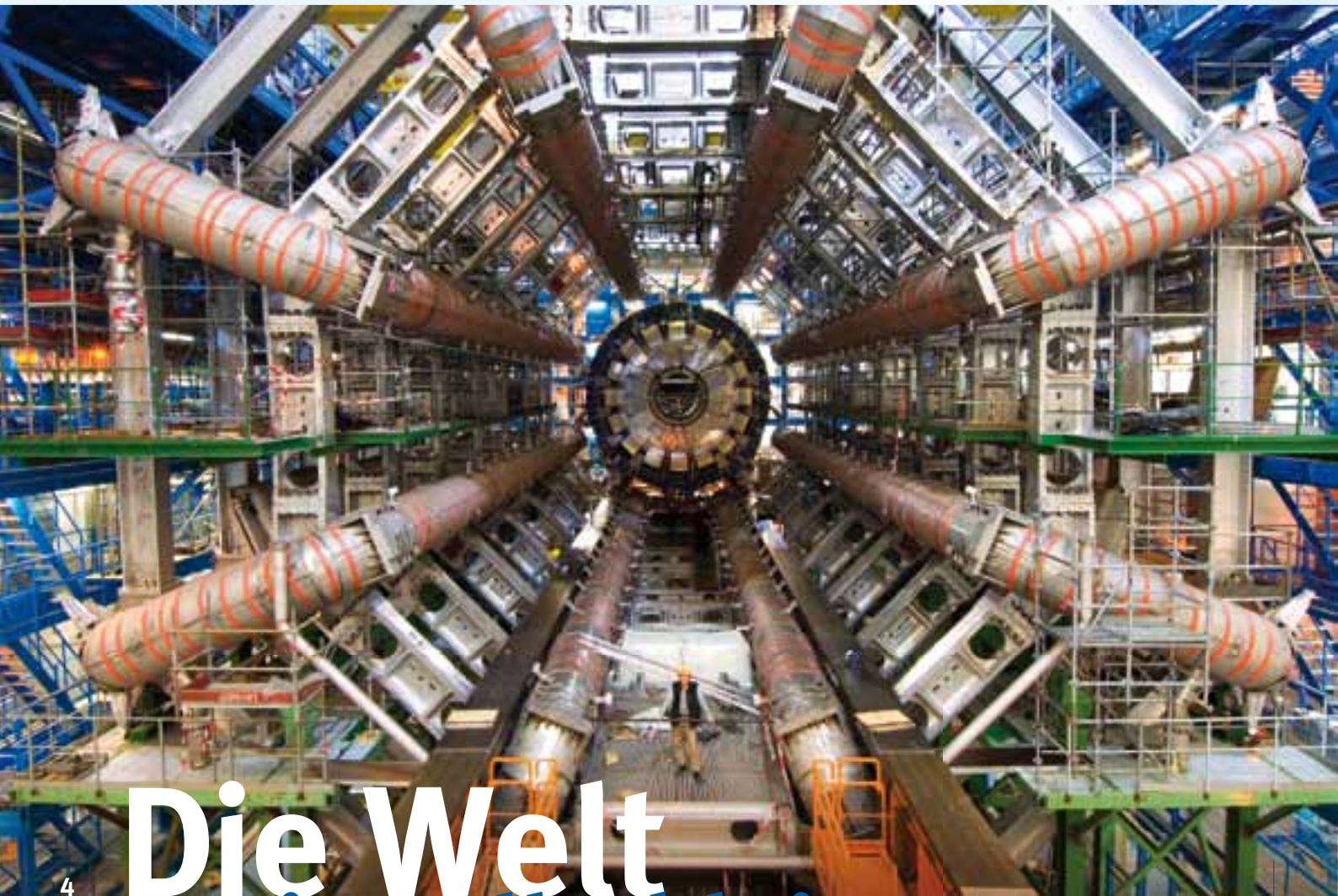
20



14

INHALT

- 4 Die Welt im Allerkleinsten
- 14 Teilchen als Sonden
- 20 Teilchen nah und fern



4

Die Welt im Allerkleinsten

Es war am „Tag ohne Gestern“, als mit dem Urknall aus einem punktförmigen, nahezu unendlich heißen und dichten Urzustand Zeit und Raum und die gesamte Materie des Universums entstanden. Danach ging alles rasend schnell. Bereits in den ersten Milliardstel Sekunden nach der Geburt der Welt wurden die Weichen für deren weitere Entwicklung gestellt. Obwohl Physiker mittlerweile einen Großteil der im Urknall abgelaufenen Vorgänge zu verstehen glauben, haben sie auf eine entscheidende Frage keine Antwort: Warum gibt es überhaupt Materie?

Niemand weiß, wie es zum Urknall kam. Der allererste Moment, der Startschuss gewissermaßen, lässt sich mit den bekannten Gesetzen der Physik nicht beschreiben, weil Dichte und Temperatur nahezu unendlich groß waren. Erst wenn es gelingt, die Relativitätstheorie mit der Quantenphysik zu einer übergeordneten Theorie zu vereinen, wird man dieser tiefgründigen Frage hoffentlich näher kommen.

Trotz dieser Ungewissheit haben die Kosmologen Hinweise darauf gefunden, dass das winzige Baby-Universum gleich nach der Geburt mit unvorstellbarer Geschwindigkeit gewachsen ist. Es hat sich im

wahrsten Sinne des Wortes aufgeblasen, weswegen Theoretiker von der inflationären Phase sprechen. Im Bruchteil einer Sekunde expandierte der Raum mit Überlichtgeschwindigkeit. Das widerspricht nicht der Relativitätstheorie, nach der sich keine Körper und keine Information schneller als das Licht bewegen können. Dem Raum ist dies möglich. Am Ende dieser Phase war das Universum nicht größer als eine Orange.

Einige Millionstel Sekunden danach existierte ein unvorstellbar heißer, brodelnder Brei aus Elementarteilchen und Strahlung. Seit dieser Frühphase des Kosmos hat auch das Higgs-Feld eine entschei-

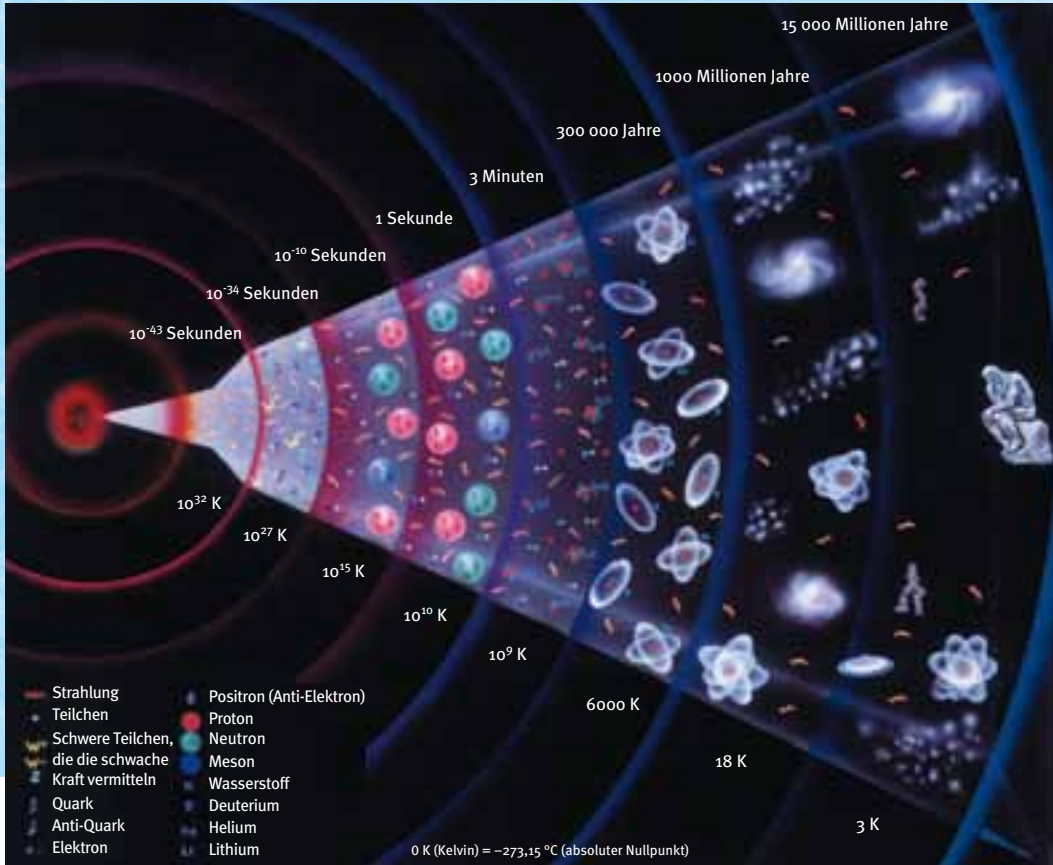
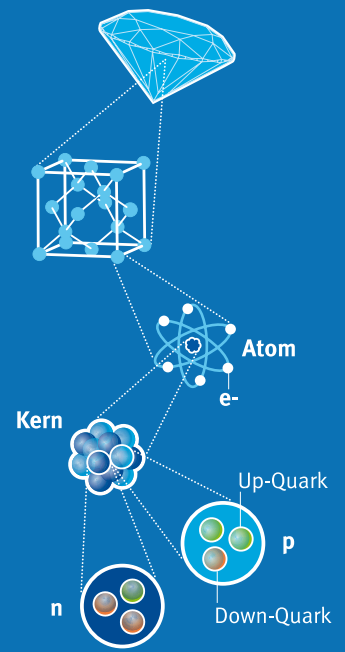
dende Aufgabe: Es sorgt dafür, daß einige Teilchenarten eine Masse besitzen, wie Quarks und Elektronen. Lichtteilchen (Photonen) dagegen haben keine Masse. Nach welchen Regeln die Masse verteilt wird, versucht die moderne Quantenphysik zu erklären.

Die Existenz des Higgs-Feldes blieb vier Jahrzehnte lang reine Theorie. Doch Dank des Riesenbeschleunigers **LHC** am CERN in Genf – zu wesentlichen Teilen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert – konnten Physiker kürzlich dessen Existenz nachweisen. Genauer gesagt wurde das Higgs-Teilchen entdeckt, das man gewissermaßen als Materialisierung des Feldes auffassen kann.

Das Universum dehnte sich weiter aus und kühlte sich ab. Bald lagerten sich jeweils drei Quarks und deren Klebeteilchen, die Gluonen, zu den Kernbausteinen Proton und Neutron zusammen. Je

◀ Blick in das Innere eines Giganten: ATLAS am LHC in Genf, mit 46 Metern Länge, 25 Metern Durchmesser und 7000 Tonnen Gewicht der größte jemals in der Welt gebaute Teilchendetektor. In ATLAS beobachtet man den Zusammenstoß von Protonen bei höchsten Energien. Dabei wurde auch das Higgs-Teilchen entdeckt. Wesentlich für die Funktion von ATLAS sind die acht riesigen supraleitenden Magnetspulen, mit denen man Teilchenbahnen krümmt. (Bild: Maximilien Brice/CERN)

▶ Unsere materielle Welt besteht aus Atomen, die Atomkerne aus Protonen und Neutronen und diese wiederum aus den Quarks. Wie aus unterschiedlichen Kombinationen dieser winzigsten Elemente die Kernbauteile aufgebaut sind, zeigt diese Grafik. Zwei Up- und ein Down-Quark ergeben beispielsweise ein Proton, ein Up- und zwei Down-Quarks ein Neutron. (Infografik: ius)



◀ Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute (schematisch). Die obere Skala zeigt den zeitlichen Verlauf vom Nullpunkt der Zeit bis heute, 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall. Aus einem punktförmigen, nahezu unendlich heißen und dichten Urzustand (links) bildete sich das Quark-Gluon-Plasma und aus diesem „Urgas“ in Bruchteilen von Sekunden Protonen und Neutronen, dann zusammen mit den Elektronen die ersten Elemente, Wasserstoff und Helium, später daraus die Sterne und Galaxien. Wie die untere Skala zeigt hat sich das Weltall seit dem Urknall durch andauernde Expansion bis heute auf 2,7 Kelvin (etwa minus 270° Celsius) abgekühlt. (Bild: CERN)

größer und kühler das Universum wurde, desto langsamer bewegten sich die Teilchen im Urgas und konnten sich zu den ersten kleinen Atomkernen zusammenfinden. Nach nur drei Minuten war der gesamte Baukasten der Materie fertig. Er bestand zu drei Vierteln aus Wasserstoffkernen und einem Viertel Helium. Nur in ganz geringen Mengen gab es die Atomkerne von Lithium, Beryllium und Bor.

Doch das Urgas war immer noch so heiß, dass die Kerne nicht die schnellen Elektronen einfangen konnten, um neutrale Atome zu bilden. Das geschah erst etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall, als die Temperatur auf etwa 3000 Grad Celsius gesunken war. Die ersten Elemente entstanden: Wasserstoff und Helium sowie in geringen Mengen Lithium und Beryllium. Alle schwereren Substanzen, wie die für uns lebenswichtigen Stoffe Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff, wurden erst viel später im Innern der Sterne durch Kernfusion erbrütet.

Das Urgas, in dem sich die beschriebenen Vorgänge ereignet haben, lässt sich mit keinem Teleskop beobachten. Der Grund: Es war undurchsichtig. Das Licht wurde nämlich unablässig an den Teilchen, insbesondere den freien Elektronen, gestreut wie in dichtem Nebel. Doch nachdem sich die Atome gebildet hatten, waren die freien Elektronen aus dem Gas entfernt, und die Lichtteilchen konnten sich nahezu ungehindert bewegen: Der Nebel lichtete sich. Die damals frei werdende Strahlung durchzieht bis heute das Universum und ist am gesamten Himmel als kosmische Hintergrundstrahlung nachweisbar. Sie gibt uns Auskunft über die Bedingungen, wie sie 380 000 Jahre nach dem Urknall herrschten. Sie enthält aber zudem viele Informationen über die Entstehungsphase des Universums und macht sie so zu einem einzigartigen Zeugen vom Beginn der Welt. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist zudem das beste Indiz für die Urknalltheorie.

Die bislang genaueste Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung gelang mit dem Weltraumteleskop Planck der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Sie bestätigt das bisherige Urknallmodell inklusive inflationärer Ausdehnung mit außerordentlicher Präzision. Die Ergebnisse, die auch durch gezielte Förderung aus Deutschland möglich geworden sind, sind aber noch längst nicht komplett ausgewertet und werden die Forscher noch lange Zeit beschäftigen.

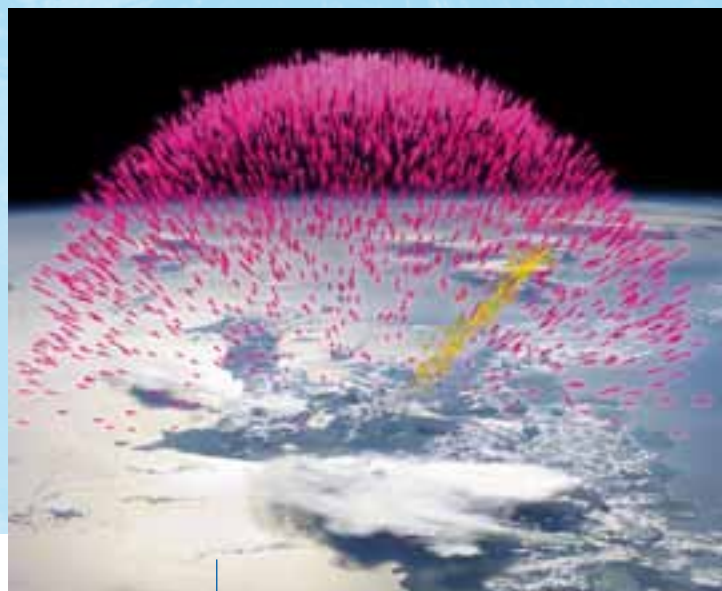
In dem bisherigen Szenario des Urknalls haben wir einen wichtigen Akteur außer Acht gelassen: die Antimaterie. Diese geheimnisvolle Substanz, bei der Viele eher an Science Fiction als an realistische Wissenschaft denken, muss damals in großen Mengen entstanden sein. Antiteilchen sind die Spiegelbilder der normalen Teilchen. Sie besitzen im Wesentlichen dieselben Eigenschaften, wie Masse, Lebensdauer oder Spin. Auch ihre elektrischen Ladungen



▲ Die USS Enterprise kann nur dank eines speziellen Reaktors Vollgas geben, der aus der gegenseitigen Vernichtung von Materie und Antimaterie Energie gewinnt. (Bild: picture alliance/akg-images)

► Auf der Suche nach Antimaterie im All stieß das Weltraumteleskop Fermi auch auf eine ganz irdische Positronen-Quelle: Gewitterwolken. In Gammablitzten schleudern sie Antimaterie ins All. (Bild: NASA/GSFC)

► Die Satellitenaufnahme, jüngst gemessen mit dem Weltraumteleskop „Planck“, zeigt, dass die Verteilung der Materie im All 380 000 Jahre nach dem Urknall nicht ganz gleichförmig gewesen ist. Die roten Bereiche entsprechen wärmeren Gebieten mit geringerer Materiedichte, die blauen kühleren Bereichen mit höherer Materiedichte. Auch der Anteil der ominösen „dunklen Materie“ von 27 % kann aus den Daten berechnet werden. Man glaubt, dass die Schwankungen dadurch bedingt sind, dass die Phasenübergänge bei der Bildung der Elementarteilchen an einigen Stellen schneller als an anderen verliefen und sich so lokal „Klumpchen“ bildeten, die Keimzellen der ersten Sterne. (Bild: ESA and the Planck Collaboration)



sind gleich groß, aber sie haben entgegengesetztes Vorzeichen: Elektronen sind negativ, Antielektronen (Positronen genannt) sind positiv geladen. Und das hat Konsequenzen.

Stößt ein Teilchen mit einem Antiteilchen derselben Sorte zusammen, so lösen sich beide in Strahlung auf. Materie und Antimaterie vernichten sich also gegenseitig und werden zu reiner Energie. Dieser Vernichtungsdrang der beiden Materiearten (Physiker sprechen von Annihilation) fasziniert nicht nur Science-Fiction-Fans, wenn das **Raumschiff Enterprise** seinen Warp-Antrieb hochfährt, sondern auch Teilchenphysiker und Kosmologen. Denn die Annihilation birgt ein tiefgründiges Rätsel in sich: Warum gibt es überhaupt Materie?

Zerstörungskampf im Urknall

Wenn Materie und Antimaterie komplett spiegelverkehrt wären, müssten im Urknall

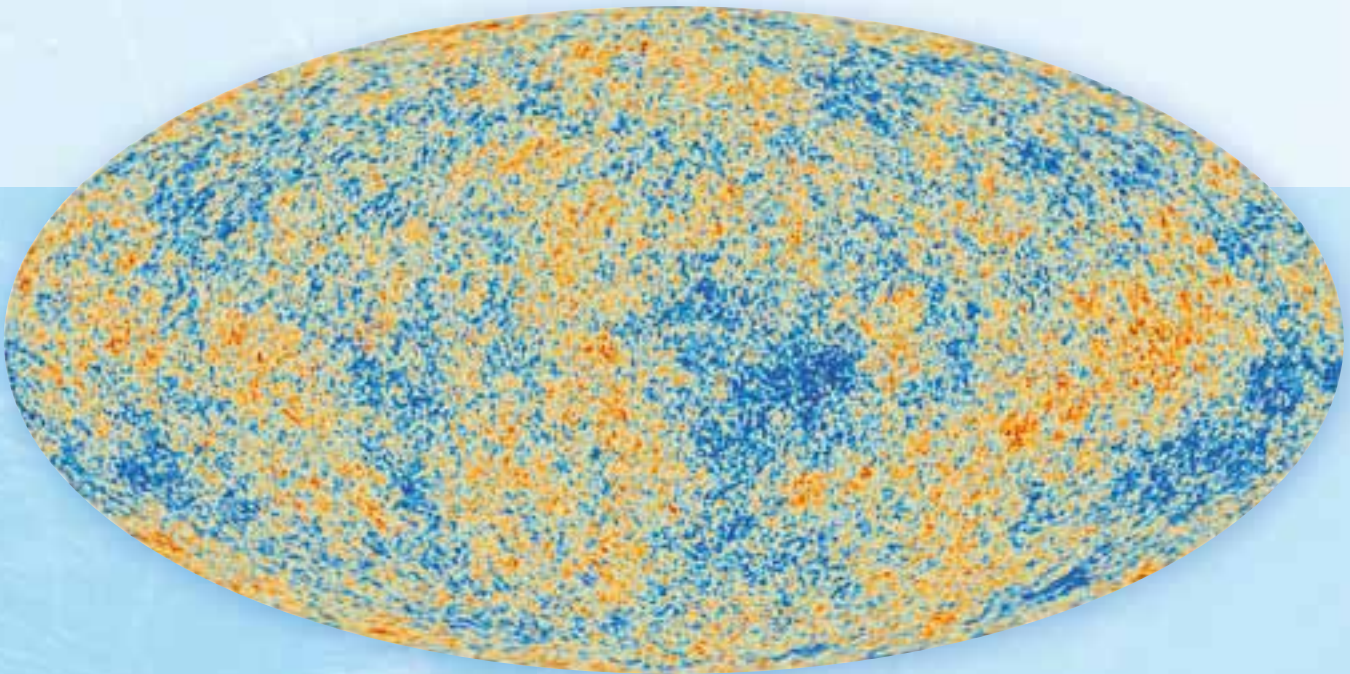
genauso viele Teilchen wie Antiteilchen entstanden sein, so dass sich alle materiellen Partner gegenseitig zerstört hätten. Doch beim Zerstrahlen von jeweils mehreren Milliarden Materie-Antimaterie-Paaren muss ein Teilchen übrig geblieben sein. Das ist etwa so, als würden an einem Tag alle auf der Erde lebenden Männer und Frauen heiraten und dabei bliebe ein Mensch als Single übrig. Diese Differenz erscheint sehr gering, lässt sich aber nicht mit einem rein zufälligen Überschuss erklären.

Die winzige Abweichung von der perfekten Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie ist dafür verantwortlich, dass es im Universum Materie gibt und nicht nur Strahlung. Ihr verdanken wir unsere Existenz. Warum die Natur die eine Materieart geringfügig bevorzugte, ist eine zentrale Frage der Teilchenphysik.

Dabei gibt es durchaus Antimaterie im All. Astronomen haben entdeckt, dass

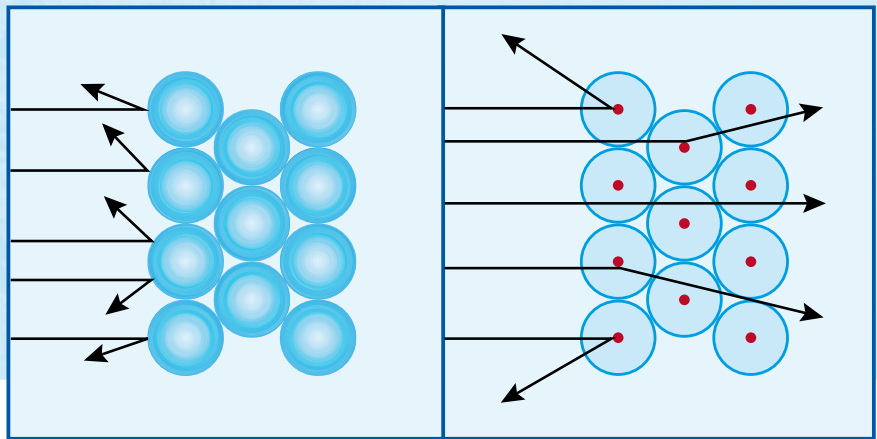
das Erdmagnetfeld in großer Höhe Milliarden von Antiprotonen gefangen hält und es in der Umgebung des Zentrums unserer Milchstraße eine große Menge an **Positronen** gibt. Doch diese Teilchen stammen nicht aus dem Urknall. Die Antiprotonen in der Erdmagnetosphäre entstehen, wenn Teilchen der kosmischen Strahlung mit hoher Energie mit Atomkernen der oberen Lufthülle zusammenstoßen. In den dabei stattfindenden Kernreaktionen entstehen neue Teilchen, darunter auch Antiprotonen.

Teilchen der kosmischen Strahlung können auch tiefer in die Atmosphäre eindringen und bei Kernstößen Antiteilchen erzeugen, die dann in Richtung Erdboden weiterfliegen. Dieses Phänomen ermöglichte ihre Entdeckung im Jahre 1932 durch den amerikanischen Physiker Carl Anderson. Doch erst 1955 gelang es einer Gruppe in Berkeley (USA) erstmals auch, Antiprotonen mit einem Teilchenbeschleuniger herzustellen. Beide Entde-



▼ Rutherfords Arbeiten bilden zusammen mit den Erkenntnissen von Max Planck und anderen die Grundlagen der Quantenmechanik. (Bild: Library of Congress, Prints & Photographs Division)

▼ Vor Rutherfords Streuversuchen hatte man angenommen, Atome seien massiv (linkes Bild). Auf sie abgefeuerte Teilchen müssten in jedem Fall stets abprallen. Nach Rutherfords Versuchen wusste man es besser. Die auf die Goldfolie geschossenen Alphateilchen gingen meistens geradewegs hindurch. Nur bei Kontakt mit einem Atomkern (rot) wurden sie abgelenkt. (Infografik: ius)



ckungen wurden mit Nobelpreisen in Physik geehrt. Heute verfolgen Physiker am CERN in Genf das ehrgeizige Ziel, Antwasserstoffatome herzustellen und für längere Zeit in einem Magnetfeld zu speichern, um sie detailliert zu untersuchen und ihre Eigenschaften mit denen normaler Wasserstoffatome zu vergleichen. Weitere Untersuchungen werden zukünftig auch an dem im Bau befindlichen Antiprotonen- und Ionenlabor FAIR in Darmstadt durchgeführt, dessen größter Geldgeber das Bundesministerium für Bildung und Forschung ist.

Schrotschüsse in der Nanowelt

Am Beginn der Jahrzehnte dauernden Suche nach dem atomaren Aufbau der Materie steht ein Experiment, das **Ernest Rutherford** im Frühjahr 1909 an der Universität Manchester ausführte. Sein Streuversuch offenbarte erstmals die innere Struktur von Atomen.

Rutherford hatte herausgefunden, dass beim radioaktiven Zerfall von Radium mit hoher Geschwindigkeit kleine Teilchen herausflogen, die er mit dem griechischen Buchstaben Alpha bezeichnete. Heute wissen wir, dass es sich dabei um positiv geladene Heliumkerne handelt, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen zusammengesetzt sind. Rutherford kam nun auf die Idee, diese Alphateilchen als Sonden zur Erschließung der unsichtbaren Welt der Atomkerne zu benutzen.

Er beauftragte mit dieser Aufgabe seine beiden Schüler: Ernest Marsden und Hans Geiger, der später das nach ihm benannte Zählrohr zur Registrierung radioaktiver Strahlung erfand. In einem dunklen Kellerlabor platzierten sie neben einer starken Radiumquelle extrem dünne Folien wahlweise aus Blei, Gold oder Aluminium. Um diese Anordnung herum stellten sie Zinksulfid-Schirme auf, die beim Auftreffen eines Alphateilchens aufblitzten. Auf diese Weise konnten sie die

Flugbahnen der Teilchen

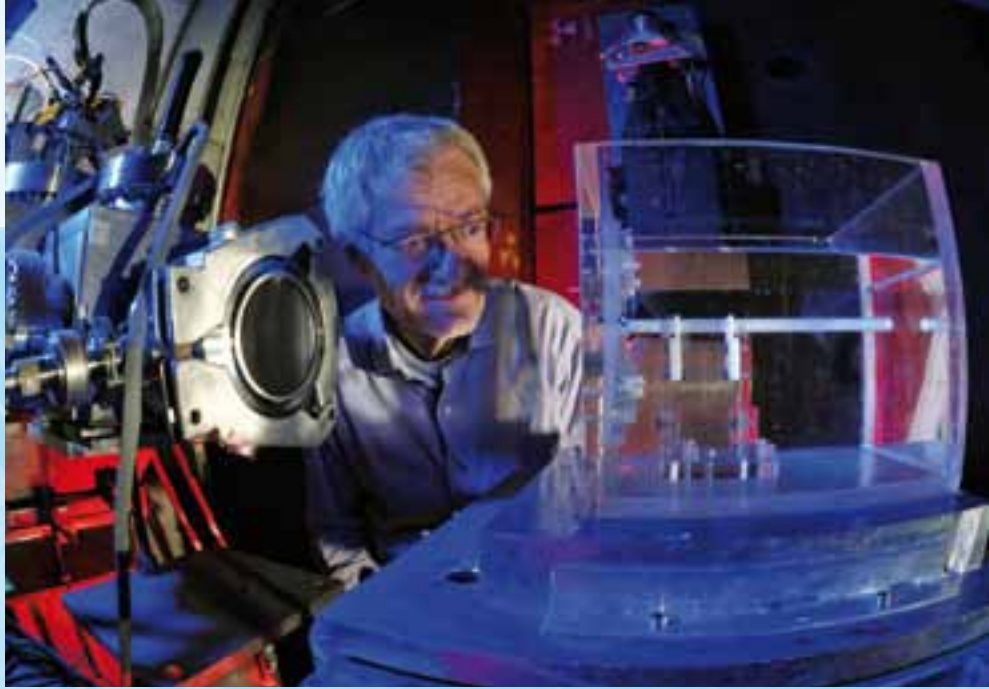
rekonstruieren. Wie erwartet, flogen die meisten von ihnen durch die Folien nahezu ungehindert hindurch. Aber in einem von 8000 Fällen wurde eines stark abgelenkt und schoss im Extremfall sogar in die Ausgangsrichtung zurück.

Rutherford zog daraus den Schluss: Atome sind weitgehend leer. Im Zentrum vermutete er einen winzigen Atomkern, der in großen Abständen von Elektronen umkreist wird. Alle positiv geladenen Alphateilchen waren deswegen nahezu ungehindert durch die Metallfolien bzw. die äußeren, negativ geladenen Elektronenwolken hindurchgesaust. Nur wenn ein Alphapartikel in die Nähe des positiv geladenen Atomkerns kam, wurde es in dessen starken elektrischen Feld abgelenkt.

Das Wasserstoffatom ist fast hunderttausend Mal so groß wie sein Kern, das Proton. Zum Vergleich: Wäre der Kern so groß wie ein Stecknadelkopf, dann hätte



▼ Viel leerer Raum: Wäre das Wasserstoffatom so groß wie ein Stecknadelkopf, dann hätte die Atomhülle die Größe des Berliner Olympiastadions. (Bild: Tobi 87/Wikimedia)



▲ Hoffnung für Krebspatienten? Michael Holzschneider und seine KollegInnen erforschen mit dem Antiproton Cell Experiment (ACE) am CERN eine neuartige Therapiemethode, die darauf beruht, dass sich Materie und Antimaterie beim Zusammentreffen gegenseitig auslöschen. Im Experiment wird ein Strahl aus Antiprotonen (im Bild von links kommend) in einen Behälter (rechts) geleitet, der Tumorgewebe eines Hamsters enthält. Beim Eintritt in das Gewebe vernichtet ein Antiproton ein Proton im Kern einer Krebszelle und es entstehen Gammastrahlen, die die ganze Zelle und einige umliegende kranke Zellen zerstören. (Bild: Maximilien Brice, Carolyn Lee/CERN)



die Atomhülle die Größe des **Berliner Olympiastadions**. Die Bausteine der Materie sind also wirklich, wie Rutherford herausfand, überwiegend leer. Heute wissen wir, dass beispielsweise ein Goldatom einen Außendurchmesser von 270 Pikometer (10^{-12} Meter), sein Kern jedoch nur von 8 Femtometer (10^{-15} Meter) hat. Das Atom ist also 34.000-mal größer als sein Kern.

Rutherfords Entdeckungen bildeten zusammen mit den Arbeiten von Planck die Grundlagen der Quantenmechanik. 1913 entwickelte Rutherfords Schüler Niels Bohr erste systematische Vorstellungen über den Aufbau der Atome. Es war die Geburtsstunde des Bohrschen Atommodells. Es besagt, dass die Elektronen einen Atomkern nur auf Bahnen mit fest vorgegebenen Abständen umkreisen können, ähnlich wie Planeten die Sonne. Die Anzahl der Bohrschen Bahnen und der darauf platzhabenden Elektronen sind durch die sogenannten Quantenzahlen gegeben. In diesem – heute überhol-

ten – Bild verstand man damals zum ersten Mal die Grundregeln für den Aufbau der Materie und damit das periodische System der Elemente. Beginnend mit dem leichtesten Element, dem Wasserstoff, bestehend aus einem Elektron auf der ersten Bohrschen Bahn außen und einem Proton im Kern, reicht es bis zum stabilen Uran mit 92 Elektronen auf 6 Elektronenbahnen (Elektronenschalen) außen und 92 Protonen zusammen mit 146 Neutronen im Kern.

In Rutherfords Streuversuchen waren die Teilchen relativ groß und ihre Geschwindigkeiten klein. Außerdem hing die Schussrate von der Aktivität der radioaktiven Quelle ab. Dies alles änderte sich mit dem Bau von Teilchenbeschleunigern. Man unterscheidet Linear- und Ringbeschleuniger. In beiden lassen sich elektrisch geladene Partikel in elektrischen Feldern beschleunigen. In Ringbeschleunigern kann man sie durch Magnetfelder auf Kreisbahnen zwingen. Außerdem kann man Geschosse mit

unterschiedlichen Größen und Eigenschaften verwenden und auf die jeweilige Fragestellung zuschneiden. Mit steigender Teilchengeschwindigkeit, sprich höherer Energie, sondieren die Streuexperimente immer kleinere Abstände und offenbaren immer feinere Details der Welt um uns herum.

HERA blickt ins Proton

In den 1950er Jahren vermuteten die Theoretiker dann, dass Protonen nicht unteilbar sind, sondern aus noch kleineren Teilchen bestehen. Will man das Innere eines Protons mit Streuversuchen erkunden, so benötigt man noch kleinere Teilchen. Die Wahl fiel auf die negativ geladenen Elektronen, die nicht einmal ein Zehntausendstel des Protonendurchmessers besitzen.

Im Beschleunigerzentrum SLAC in Kalifornien entdeckte man so Ende der 1960er Jahre mit Elektronenstreuversuchen die Bausteine der Protonen: die Quarks. Und

▼ An der erfolgreichen Suche nach dem Higgs-Teilchen mit dem CMS (Compact Muon Solenoid) haben viele Wissenschaftler ihren Anteil. Ein Teil der 3200 Physiker und Physikerinnen, die in der CMS-Kollaboration zusammenarbeiten, vor einem maßstabgerechten Bild des CMS-Detektors. In dieser Halle wurde der Detektor aufgebaut und dann Stück für Stück in den 100 Meter unter der Halle befindlichen Beschleunigertunnel des Large Hadron Colliders abgelassen. (Bild: Michael Hoch/CERN)



man fand sogar heraus, wie viele davon sich in einem Proton befanden, nämlich drei. Doch damit war das Geheimnis des Protonenaufbaus noch nicht gelüftet.

Das Proton – so klein es auch ist – birgt einige Rätsel in sich. Streuexperimente offenbarten nämlich, dass sich neben den Quarks noch andere Bausteine im Proton tummeln. Wesentlich zur Aufklärung dieser Frage trug die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg bei.

Bis dahin hatten die Physiker Elektronen auf ruhende Protonen geschossen. Bei HERA beschritt man erstmals den Weg, beide Teilchenarten in einem 6,3 Kilometer langen Ringbeschleuniger gegeneinander umlaufen und die Strahlen an zwei Stellen zur Kollision bringen zu lassen. Dort standen große Detektoren, mit denen die in unterschiedlichen Richtungen wegfliegenden Fragmente vermessen wurden. Durch den gegenseitigen Umlauf erhöhte man die Geschwindigkeit (Energie),

mit der die Teilchen aufeinanderstießen und damit auch die Empfindlichkeit der Untersuchungen.

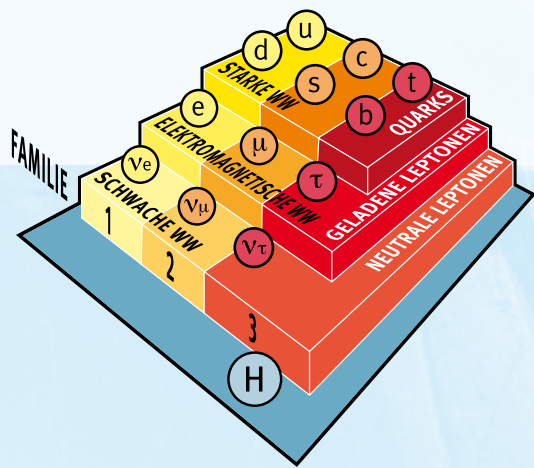
Dazu benötigte man zwei getrennte, technisch höchst anspruchsvolle Beschleuniger. So etwas hatte zuvor niemand versucht. Die Teilchen auf Spur halten sollten extrem starke Magnetfelder, die sich nur mit supraleitenden Spulen erzeugen ließen. Hierfür müssen die Spulen bis auf minus 271 Grad Celsius gekühlt werden. Um dieses frostige Klima über die 6,3 Kilometer des HERA-Beschleunigers aufrechtzuerhalten, baute DESY die damals größte Kälteanlage Europas. Das Konzept der supraleitenden Spulen wird mittlerweile weltweit eingesetzt, zuletzt im [Large Hadron Collider \(LHC\)](#) am CERN.

Mit dem Super-Elektronenmikroskop HERA konnten Protonen nun mit etwa 2600-mal größerer Energie durchleuchtet werden als beim SLAC. Damit ermöglichte HERA den weltweit schärfsten Blick ins Proton – bis

hinunter zu Strukturen, die $1/2000$ des Protonendurchmessers aufwiesen.

Mit Forschungen an HERA gelang es auch das Problem zu lösen, das zuvor mal als die Spin-Krise bezeichnet wurde. Der Spin (von englisch „spin“ – Drall) ist physikalisch der Eigendrehimpuls der Elementarteilchen, nur quantenmechanisch zu verstehen. Klassisch entspricht er in etwa der Drehung eines Kreisel um seine Rotationsachse. Alle Elementarteilchen haben einen Spin, auf dem auch ihre magnetischen Momente beruhen. Der Spin des Protons sollte sich aus der Summe seiner Bausteine, also dem Spin von drei Quarks ergeben. Ende der 1980er Jahre fand man in Experimenten am CERN jedoch, dass die drei Quarks nur etwa ein Viertel des Wertes lieferten. Wo blieb der Rest?

HERMES, der speziell für HERA Messungen des Spins gebaute Detektor am DESY in Hamburg, lieferte schließlich die Lösung. Wie immer ist alles komplizierter als gedacht. Es gibt im Proton viele Quarks und



◀ Das Standardmodell bringt Ordnung in die Vielfalt der Bausteine der Materie und die Kräfte, die sie zusammenhalten. (Grafik: DESY)

INFO

Das Standardmodell

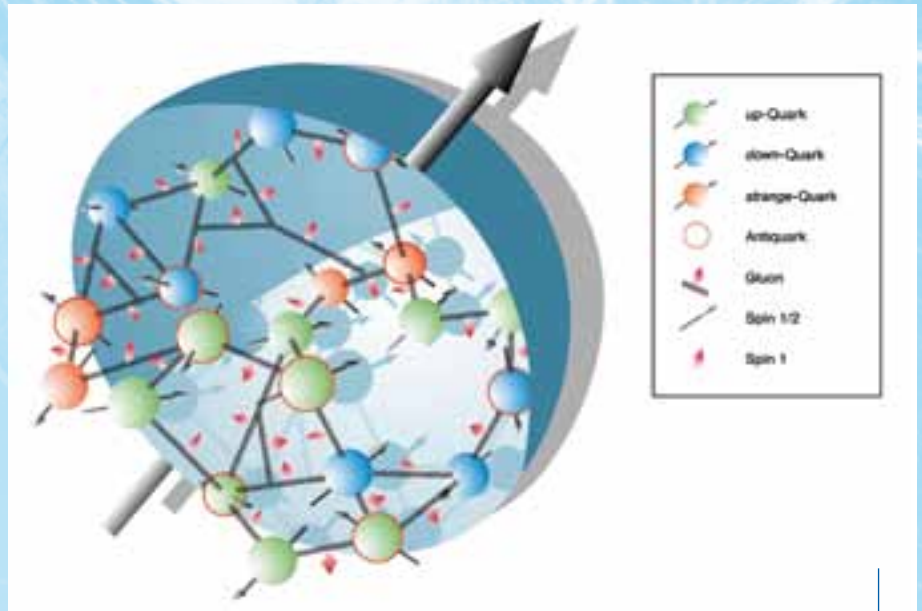
Das Standardmodell der Elementarteilchen ist der Baukasten der Natur. Er enthält drei Arten von Bausteinen, Quarks, Neutrinos und Elektronen, sowie drei Arten von Kraft- bzw. Austauschteilchen. Das sind das Photon für die elektromagnetische Kraft, die für Elektrizität und Magnetismus verantwortlich ist, das Gluon der Starken Kraft, die die Atomkerne zusammenhält, und die Weakonen der Schwachen Kraft W^+ , W^- und Z^0 . Sie vermitteln eigentlich keine anziehende oder abstoßende Kraft, sondern wandeln Teilchen ineinander um (radioaktiver Zerfall).

Jede dieser Teilchenarten kommt in drei Familien vor. Während die Teilchen der zweiten und dritten Quark- und Elektronenfamilie nach Bruchteilen von Sekunden zerfallen, sind die Neutrinos in allen drei Familien stabil.

Alle Elementarteilchen besitzen einen halbzahligen Spin, Austauschteilchen einen ganzzahligen. Physiker sprechen von Fermionen bzw. Bosonen.

Eine übergeordnete Stellung in diesem Baukasten hat der Higgs-Mechanismus. Er vereint schwache und elektromagnetische Kraft zur grundlegenden elektroschwachen Kraft. Durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erhalten Teilchen ihre Masse, es macht sie träge. Das Higgs-Feld ist überall, aber nicht direkt messbar. Sein Nachweis gelingt jedoch indirekt, indem das dazugehörige Elementarteilchen nachweist, das Higgs-Boson. Es wurde gerade am LHC im CERN entdeckt.

Außerdem gibt es eine vierte Grundkraft, nämlich die Schwerkraft, die Gravitation. Sie fügt sich nicht in das Standardmodell ein. Ob mit ihr ein Austauschteilchen, das Graviton, verbunden ist, ist bislang unbekannt.



▲ Intensive Forschung mit dem Experiment HERMES am Ringbeschleuniger HERA am Forschungszentrum DESY in Hamburg haben ergeben, dass die innere Struktur eines Protons sehr viel komplizierter ist als früher gedacht. Im Proton hat man es eher mit einem „Gewimmel“ von Teilchen und Antiteilchen zu tun, in dem unablässig Quark-Antiquark-Paare sowie Gluonen erzeugt und wieder vernichtet werden. Frühere Experimente konnten dieses Gewimmel nicht sehen, weil sie mit zu wenig Energie in das Proton schauten. Auch die „Spin-Krise“ konnte damit entschärft werden, weil durch das „Gewimmel“ erhebliche Bahndrehimpulsanteile zum Protonenspin entstehen. (Grafik: DESY)

ihre Bindungsteilchen, die Gluonen. Die zerfallen ständig in Quark-Antiquark-Paare und weitere Gluonen. Auf extrem kurzer Zeitskala findet also ein ständiges Werden und Vergehen der Teilchenarten statt. Wichtig für den Spin des Protons ist jedoch „der Tanz der Quarks durch das Proton“. Dabei erzeugen sie auch einen Drall, einen Bahndrehimpuls. Der trägt ca. 60% zum gesamten Spin des Protons bei. Wie ganz genau der Spin des Protons zustande kommt, ist aber immer noch Gegenstand der Forschung.

Als unerwartet spannend erweist sich auch die Frage, welche Bauteile des Protons zu dessen Gesamtmasse beitragen. Quarks besitzen eine bestimmte Ruhemasse, die sich experimentell messen lässt. Die **Gluonen** sind jedoch – wie Photonen – masselos. Man würde also erwarten, dass die Summe der drei Quarkmassen die Protonenmasse ergibt. Aber weit gefehlt: Sie machen nur etwa ein Prozent aus. Woher kommt der Rest?

Ihn liefern die Gluonen. Sie besitzen nämlich sehr hohe Bindungsenergien, und damit gemäß $E = mc^2$ auch eine Masse. Materie ist so etwas wie kondensierte Energie. Da die Protonen und die ebenfalls aus drei Quarks bestehenden Neutronen im Atom fast die gesamte Masse stellen, ergibt sich hieraus also die faszinierende Erkenntnis: Die Masse der gesamten uns bekannten Materie ist zu fast 99 Prozent die Bindungsenergie der Gluonen.

Schwächlinge gesucht

Als Physiker in den 1930er Jahren den radioaktiven Zerfall untersuchten, stießen sie auf ein zunächst unerklärliches Rätsel: Der Energieerhaltungssatz schien verletzt zu sein. Erst die Postulierung eines bis dahin unbekanntes Teilchens durch Wolfgang Pauli löste das Problem. Es erhielt den Namen Neutrino – kleines Neutrales. Nachweisen ließen sich diese schwer fassbaren Teilchen allerdings erst 1956.



Ein verzweifelter Ausweg

„Liebe radioaktive Damen und Herren.“ Mit diesen Worten richtete der Physiker Wolfgang Pauli am 4. Dezember 1930 einen Brief an seine Kollegen mit weit reichenden Folgen. Physiker hatten den Betazerfall radioaktiver Elemente untersucht, bei dem aus dem zerfallenden Kern ein Elektron herausschoss. Dieses besaß aber stets weniger Energie, als bei dem Zerfall insgesamt frei werden musste. War der fundamentale Energieerhaltungssatz verletzt, nach dem Energie nicht verloren gehen kann?

Um dieses unverständliche Verhalten zu erklären, postulierte Pauli als verzweifeltsten Ausweg die Beteiligung eines unsichtbaren Elementarteilchens am Betazerfall – das Neutrino. Es sollte die fehlenden Energiebeiträge mitnehmen, so dass beim Zerfall die Erhaltungssätze erfüllt waren.

▲ (Bild: CERN)



▲ Die Teilchen im LHC fliegen durch ein 27 km langes Strahlrohr. Sie werden durch Magnete auf ihrer Bahn gehalten. Während routinemäßig geplanter Betriebspausen werden die Ablenkmagnete und andere Komponenten kontrolliert und optimiert. (Bild: Maximilian Brice/CERN)



◀ Telegramm von Fred Reines und Clyde Cowan an Wolfgang Pauli anlässlich der Entdeckung von Neutrinos. (Bild: CERN)

Neutrinos kommen in drei Familien vor und haben die verblüffende Fähigkeit, zwischen diesen Familien zu wechseln. Physiker sprechen von Neutrino-Oszillationen. Außerdem sind Neutrinos so leicht, dass sich ihre Masse bis heute nicht messen ließ. Die genaueste Neutrinowaage wird derzeit am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) aufgebaut. Das 73 Meter lange Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN) misst den Betazerfall von Tritium, dessen Zerfallsenergie 18 600 Elektronenvolt beträgt. Mit KATRIN werden nun die energiereichsten Elektronen gemessen. Die Differenz von deren Energie und der Zerfallsenergie besitzt dann das unsichtbare Neutrino, dessen Masse sich aus $E = mc^2$ ergibt. KATRINs untere Nachweisgrenze liegt bei 0,2 Elektronenvolt. Zum Vergleich: Das Elektron wiegt 2,5 Millionen Mal mehr.

Enrico Fermi verband den Betazerfall mit einer neuen Naturkraft, der Schwachen Kraft. Sie sollte von bestimmten Teilchen

übertragen werden, den Weakonen, nach dem englischen Wort weak für schwach. Weitere Experimente führten schließlich zu der Vorhersage, dass es drei Arten dieser Schwächlinge geben müsse: positiv und negativ geladene W-Teilchen sowie ein neutrales Z-Teilchen. Nach den theoretischen Vorarbeiten konnte die Jagd auf die Weakonen beginnen.

Den Sieg trug schließlich eine internationale Arbeitsgruppe am CERN davon. Dort wurde ein Beschleuniger so umgebaut, dass er in einem Ring Protonen und Antiprotonen gegeneinander umlaufen lassen konnte. Bei den an zwei Stellen stattfindenden Kollisionen lösten sich die beiden Teilchenarten in einen Energieblitz auf, in dem sich sofort neue Teilchen bildeten – darunter die gesuchten W- und Z-Teilchen. Damit waren alle vom Standardmodell vorhergesagten Kräfte teilchen nachgewiesen. Für diese grandiose Leistung erhielten Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984 den Physik-Nobelpreis.

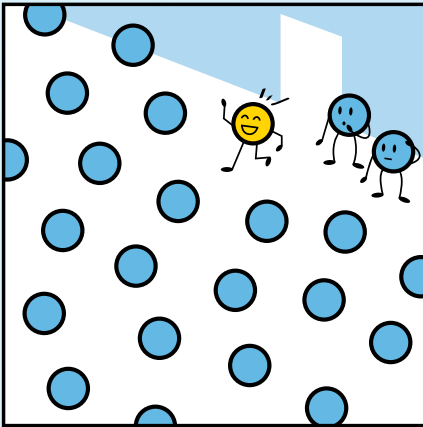
Schlussstein Higgs-Teilchen

Die Mitglieder des Standardmodells sind alle gefunden worden, doch ein ganz spezielles Teilchen verblieb jahrzehntelang auf der Fahndungsliste der Forscher: das Higgs-Teilchen. In den 1960er Jahren hatte die Theorie der Elementarteilchen ein großes Problem: Eigentlich dürfte es nur masselose Teilchen geben. Auf Photonen und Gluonen trifft das zu, nicht jedoch auf alle anderen Teilchen. 1964 erweiterten der britische Theoretiker Peter Higgs und unabhängig von ihm die Physiker Robert Brout und François Englert die Theorie um den sogenannten Higgs-Mechanismus, der die Existenz eines universell im Raum vorhandenen Feldes (das Higgs-Feld) erforderte. Masselose Teilchen sollten es nicht spüren und sich deshalb mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Andere Teilchen aber spüren dieses Feld, wodurch sie eine Masse erhalten und deshalb nie Lichtgeschwindigkeit erreichen können. Die Stärke dieser Wechselwirkung bestimmt ihre Masse.

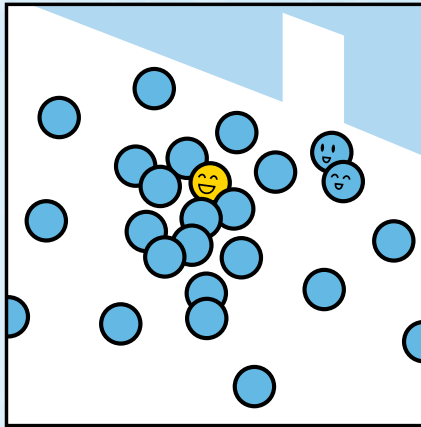


▼ Wie man sich den Higgs-Mechanismus, der manchen Teilchen Masse verleiht, vorstellen kann, zeigt eine mittlerweile berühmte Analogie: Alice (das gelbe Teilchen in der Grafik) ist ein Star. Kommt sie auf eine Party, ist sie sofort umringt von Fans. Dieser sich mit Alice durch den Raum bewegende Pulk an Partygästen bzw. die Wechselwirkung mit ihnen verlangsamt Alice, genauso als hätte sie mehr Körpermasse. In diesem Bild ist Alice das Teilchen, das Masse erhält. Die Partygäste repräsentieren das Higgs-Feld. (Infografik: ius)

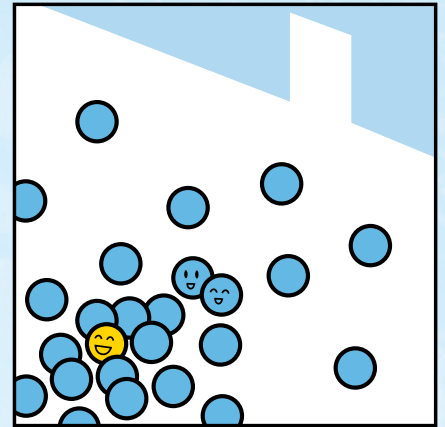
▲ Zu Lebzeiten verewigt: Peter Higgs. Wissenschaftler am CERN haben das nach ihm benannte Teilchen kürzlich nachgewiesen. (Bild: Ranga Yogeshwar)



A



B



C

12

In der Quantenphysik können sich Felder in Form von Teilchen manifestieren. Zum Beispiel ist das Photon das Teilchen des elektromagnetischen Feldes. In gleicher Weise äußert sich auch das Higgs-Feld als Teilchen – und dieses galt es nachzuweisen. Da im Laufe der Jahrzehnte klar wurde, dass das Higgs-Teilchen sehr massereich sein muss – nach Einstein und $E = mc^2$ bedeutet das: sehr energiereich – war der Bau des bis heute größten Ringbeschleunigers nötig: des Large Hadron Collider (LHC) am CERN.

In einer 27 Kilometer langen Teilchenrennbahn werden hier gegenseitig umlaufende Protonen an vier Stellen mit einer Energie von bislang acht Billionen Elektronenvolt (8 TeV) zur Kollision gebracht. Ab 2014 soll der LHC sogar 14 TeV erreichen. Jede der 1232 Spulen erzeugt ein Magnetfeld von 8,3 Tesla – etwa dreimal so stark wie das Magnetfeld in einem modernen Kernspingerät

wie sie in der Medizin zu finden sind. Rund 80 000 Tonnen an Material wurden verbaut, plus 34 000 Tonnen für vier Detektoren, mit denen die Physiker die Teilchenkollisionen analysieren. Zum Vergleich: Der Eiffelturm wiegt 10 000 Tonnen.

Alle Teilchen im Ring wiegen nicht einmal so viel wie ein Staubkorn. Weil sie sich aber fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, besitzen sie zusammen etwa die kinetische Energie eines mit Tempo 150 fahrenden 40-Tonnen-LKWs.

Im Jahr 2012 verkündeten die Physiker, sie hätten am LHC eine neue Art von Teilchen gefunden, die sich in den Energieblitzen der Protonenkollisionen materialisiert. Nach dem derzeitigen Stand besitzt es alle für das **Higgs-Teilchen** vorhergesagten Eigenschaften. Mit einer Masse, die einer Energie von 125 Gigaelektronenvolt entspricht, wäre es dann etwa so

schwer wie ein Iod-Atom. Damit ist, wenn sich die Identität des mutmaßlichen Higgs-Teilchens bestätigt, der letzte Baustein des Standardmodells gefunden. Doch haben wir damit den Aufbau der Materie endgültig verstanden?

Sicher nicht, denn viele Fragen bleiben offen, zum Beispiel die nach einer unerklärlichen Übereinstimmung der elektrischen Ladung. Elektronen sind die Träger der negativen Elementarladung. Quarks besitzen exakt ein oder zwei Drittel der Elementarladung. Deswegen ist es möglich, dass sich drei Quarks zu einem Proton mit genau einer positiven Elementarladung zusammenlagern können. Nur die identische Größe der elektrischen Ladung von Elektronen und Protonen, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, ermöglicht die Existenz stabiler, elektrisch neutraler Atome. Elektronen und Quarks gehören aber zwei voneinander unabhängigen Familien an,

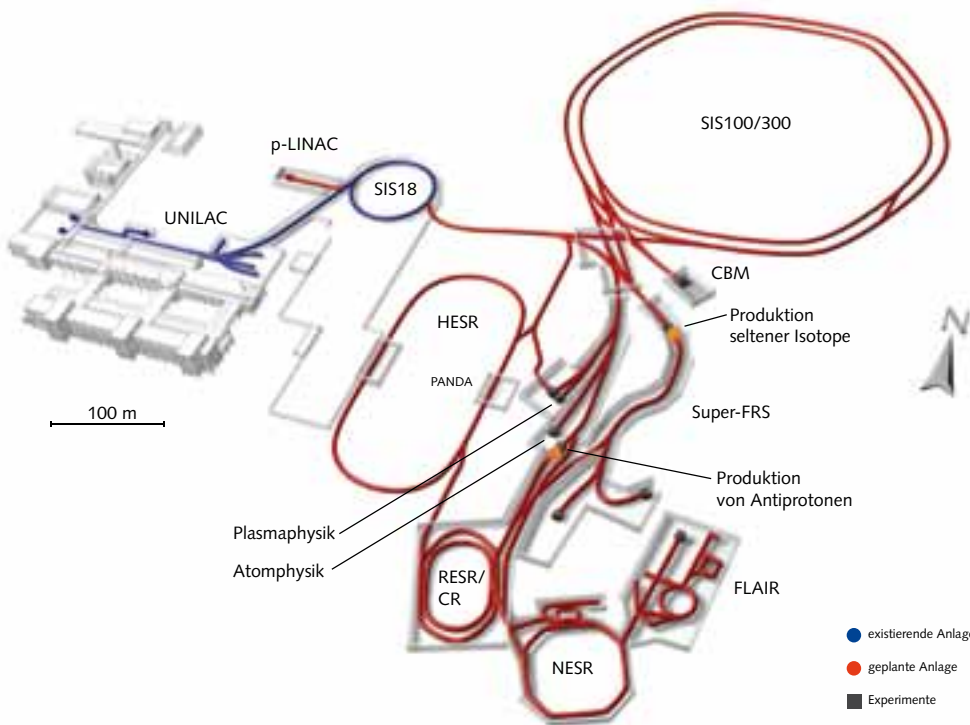
Faire Forschung

Zurzeit entsteht in unmittelbarer Nachbarschaft des GSI Helmholtz-zentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt eine weltweit einzigartige Anlage namens „Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)“ eine internationale Forschungsinfrastruktur auf deutschem Boden – zu einem Großteil finanziert durch das BMBF. Ab 2018 wird sie den Forschern ganz neue Einblicke in die Physik der Teilchen und Antiteilchen ermöglichen. Es wird aber auch Forschungsmöglichkeiten für Materialwissenschaften, Biologie und Medizin geben.

Die Teilchen beginnen ihre Reise in bereits vorhandenen Beschleunigern und gelangen von dort in zwei große Ringe mit jeweils 1100 Metern Umfang, in denen sie bis auf 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Mit elektromagnetischen Weichen lassen sich die Teilchen aus diesen Ringen auslenken und in andere Beschleunigerbahnen einkoppeln, wo sie mit speziellen Messgeräten untersucht werden. Auf diese Weise wird es möglich sein, gleichzeitig vier unterschiedliche Forschungsprogramme durchzuführen.

Die Protonen beispielsweise schießt man auf ein festes Material und erzeugt so durch Kernstöße Antiprotonen. Diese kann man dann mit Protonen zur Kollision bringen, um die Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen zu studieren. Hiermit will man auch prüfen, ob es von Theoretikern vorhergesagte Glueballs gibt – Teilchenzustände, die ausschließlich aus Gluonen bestehen.

Mit schweren Ionen will man unter anderem kurzlebige Kerne studieren, die eine zentrale Rolle in astrophysikalischen Ereignissen wie Supernovae spielen. Lässt man schwere Kerne frontal kollidieren, so erzeugt man hoch komprimierte Kernmaterie, wie sie kurz nach dem Urknall existierte oder auch im Innern von Neutronensternen vorkommt. Hier vermuten Theoretiker neue Formen von Quarkmaterie.



▲ Die Beschleunigerringe und Experimentierstationen von FAIR. Das Facility for Antiproton and Ion Research ist eine neue internationale Beschleuniger-Anlage zur Forschung mit Antiprotonen und Ionen. (Bild: GSI/FAIR)

nämlich den Leptonen und Bosonen. Was also ist für diese exakte Feinabstimmung der Ladungen verantwortlich? Zufall kann es nicht sein. Deshalb suchen Physiker nach einer übergeordneten Theorie, die alle Grundkräfte der Natur zusammenfasst. Vermutlich waren sie am Beginn von Raum und Zeit in einer einzigen Urkraft vereint, die sich in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall aufspaltete.

Einen möglichen Erklärungsansatz bietet die über das Standardmodell hinausgehende Theorie der Supersymmetrie, kurz Susy. Sie besagt, dass es zu jedem Elementarteilchen ein Pendant gibt, ein Spiegelteilchen. Ihr Nachweis mit dem LHC würde eine neue Ära der Teilchenphysik einläuten. Ebenfalls auf der Fahndungsliste stehen die mutmaßlichen Teilchen der Dunklen Materie. Auch sie könnten sich in Zusammenstößen von Protonen bemerkbar machen.

Zurück zum Urknall

Einmal pro Jahr kreisen im LHC nicht Protonen, sondern mehr als zweihundertmal so schwere Blei-Atomkerne. Wenn diese Teilchen zusammenprallen, verdichtet sich die Materie, und es entstehen Temperaturen bis zu zehn Billionen Grad – Bedingungen, wie sie weniger als eine Zehnmilliardstel Sekunde nach dem Urknall herrschten. Damals war die gesamte Materie ein Gemisch aus Quarks, Gluonen und Strahlung. Ziel ist es, mit den Bleikollisionen die Eigenschaften eines solchen Quark-Gluon-Plasmas zu studieren. Hier kommen dann auch Kosmologen ins Spiel, denn sie wollen wissen, wie die Weichen für die Entwicklung des Universums gestellt wurden. Insbesondere wollen Physiker den eingangs geschilderten Kampf zwischen Materie und Antimaterie verstehen. Hierfür studieren sie auch den Zerfall von Quarks und Antiquarks.

Extreme Forschung an extremen Orten

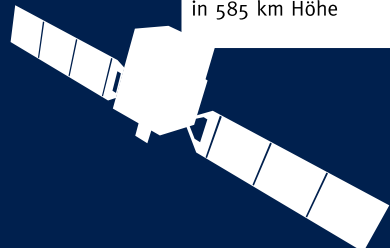


AMS-02

Untersuchung kosmische Höhenstrahlung
Erdumlaufbahn, in 400 km Höhe
Internationale Raumstation ISS

FGST

Gammastrahlen-Observatorium
Satellitengestützt
Erdumlaufbahn, in 585 km Höhe



SNOLAB

Untergrundlabor für Astroteilchenphysik
Vale Creighton Mine, nahe Sudbury, in 2000 m Tiefe
Ontario, Kanada

Sanford Underground Research Facility/ Homestake Mine

Untergrundlabor für Astroteilchenphysik
nahe Rapid City, in 1478 m Tiefe
South Dakota, USA

VERITAS

Detektoren für kosmische Gammastrahlung
nahe Amado, auf dem Mount Hopkins
Arizona, USA

ANTARES

Neutrino-Detektor
Mittelmeer, in 2500 m Tiefe, 30 km vor der Küste von Toulon
Südfrankreich

Pierre-Auger-Observatorium

Detektor für kosmische Strahlung
Hochebene Pampa Amarilla, nahe Malargüe
Argentinien

Wollen Astroteilchenphysiker exotischen Partikeln aus dem All auf die Spur kommen, müssen sie nicht nur extrem empfindliche Detektoren bauen, sondern diese auch an extremen Orten errichten. Die nur schwach wechselwirkenden Neutrinos sucht man mittels riesiger unterirdischer Detektoren, die durch 1000 Meter Fels gegen alle anderen Teilchenarten abgeschirmt sind. Viele Großlabore liegen deshalb im Inneren großer Gebirgsketten, in ausgedienten Minen oder Salzstöcken. Für kosmische Gammastrahlung hingegen gehen die Forscher gern in die Berge oder in die Wüste. Eine trockene Atmosphäre, ein durch Stadtbeleuchtung ungestörter dunkler Nachthimmel und die klare Luft in großer Höhe sind perfekt, um beispielsweise Teilchenschauer und Tscherenkow-Licht zu beobachten.

Einige Beispiele für Detektoren, Observatorien und Labore an extremen Orten der Welt zeigt die Infografik.

(Infografik: Timo Meyer, Marleen Schwalm)



BNO
Neutrino-Detektor
Baksan, 3500 m tief im
Kaukasus Hochgebirge
Russland

BAIKAL
Neutrino-Detektor
Baikalsee, Sibirien,
in 1100 m Tiefe
Russland

Tunka
Detektor für
kosmische Strahlung
und hochenergetische
Gammastrahlung
Tunkatal, Sibirien,
in der Nähe des
Baikalsees
Russland

EDELWEISS II
Dunkle-Materie-
Detektor
Laboratoire Souterrain
de Modane (LSM)
Modane,
in 1700 m Tiefe
Frankreich

Borexino
(Detektor für
Sonneneutrinos)
Opera
(Detektor für
Sonneneutrinos)

**CRESST II und
XENON100** (Dunkle-
Materie-Detektoren)
Laboratori Nazionali
del Gran Sasso (LNGS)
nahe L'Aquila,
1400 m tief im Gran
Sasso, Gebirgsmassiv
Italien

Super-Kamiokande
Neutrino-Detektor
nahe Hida,
in 1000 m Tiefe
Japan

ARGO-YBJ
Detektor für
kosmische Strahlung
in 4300 m Höhe
Autonome Region
Tibet

MAGIC
Detektoren für
kosmische Gamma-
strahlung
Roque de los
Muchachos,
in 2200 m Höhe
La Palma

HIGRO
Detektoren für
Gammastrahlen
Hanle, in 4300 m
Höhe
Indien

H.E.S.S.
Detektoren für
kosmische Gamma-
strahlung
Farm Göllschau,
Khomas-Hochebene
Namibia

**IceCube Neutrino
Observatory**
Detektor für Hoch-
energie-Neutrinos
Amundsen-Scott-
Südpolstation,
in fast 2500 m Tiefe
Antarktis

CANGAROO
Hochenergie-Gamma-
strahlen-Teleskop
Woomera
Sperrgebiet
Australien



16

Teilchen als Sonden

20 nm

Lichtmikroskope haben uns schon zu Galileis Zeiten die Welt des Mikrokosmos eröffnet. Elektronenmikroskope machen uns seit 1931 die Strukturen der Nanowelt zugänglich. Heute kann man mit Teilchenstrahlen einzelne Atome sichtbar machen. Der Superbeschleuniger LHC ermöglicht es sogar, in das Innere von Atomkernen zu blicken. Hier findet man die Urbausteine der Materie, so wie sie beim Urknall entstanden sind.

Mikroskope nutzen Linsen und die Beugung des Lichts zur vergrößerten Abbildung von Gegenständen. Da die Auflösungsgrenze immer durch die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts begrenzt ist, erkennt man mit einem Lichtmikroskop Details von etwa 200 Nanometer Größe. Will man kleinere Strukturen auflösen, muss man also Licht mit kürzeren Wellenlängen benutzen. Röntgenstrahlen schienen da gleich nach ihrer Entdeckung besonders geeignet. Aber es fand sich kein Material, aus dem man eine Röntgenlinse bauen konnte.

Wir verdanken es der genialen Einsicht des französischen Physikers Louis de

Broglie, der 1924 entdeckte, dass sich Teilchen auch wie Wellen verhalten können, wobei die Wellenlänge mit wachsender Masse und Geschwindigkeit abnimmt.

De Broglies Entdeckung ermöglichte es im Prinzip, mit Teilchen sehr hoch auflösende Mikroskope zu bauen. Aber es dauerte noch ein paar Jahre, bis Ernst Ruska verstand, auch Linsen für Elektronenstrahlen aus elektromagnetischen Spulen zu bauen. 1931 baute er das erste **Elektronenmikroskop**, 1986 erhielt er dafür den Nobelpreis. Heute können wir mit Elektronenmikroskopen den Aufbau und die chemische Zusammensetzung auf atomarer

Skala sichtbar machen und bis zu 0,05 Nanometer kleine Details abbilden.

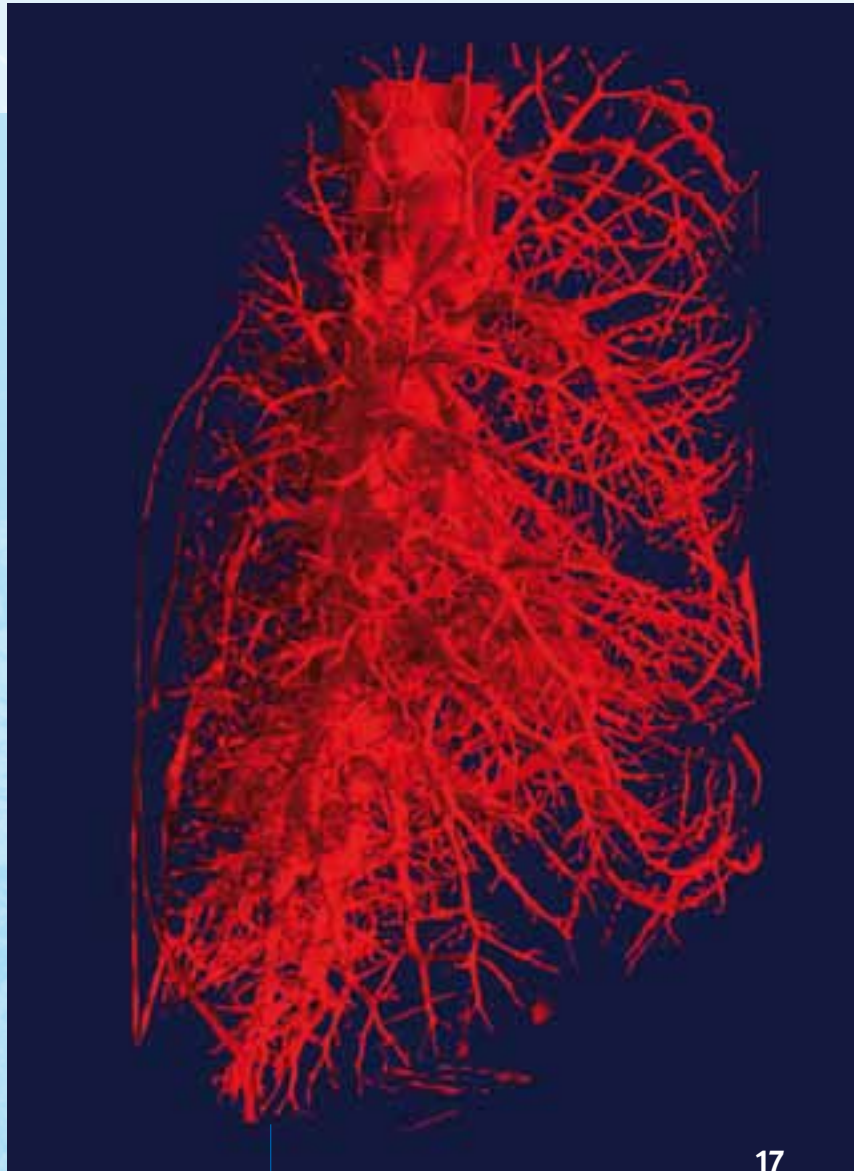
Mit Neutronen auf Entdeckungstour

Mit zunehmendem physikalischen Wissen und neuen technischen Erkenntnissen der Atom- und Kernphysik wurden auch Neutronen als Sonden für Strukturuntersuchungen immer wichtiger. Bremsst man die aus einem Reaktor austretenden Neutronen in einem Moderator (z.B. gewöhnliches Wasser) ausreichend ab, so besitzen diese eine De-Broglie-Wellenlänge von 0,1 bis 1 Nanometer, was im Bereich der Atomabstände in Molekülen und Festkörpern liegt. Gegenüber Röntgen- und Elektronenstrahlen, die im Wesentlichen an der Elektronenhülle der Atome gestreut werden, dringen die nicht geladenen Neutronen weit in die Materie ein. Sie treten bevorzugt mit den Atomkernen

◀ Raster-Elektronenmikroskopische Aufnahme von Rutheniumoxid (RuO_2) Nanopartikeln auf Zinnoxid (SnO_2). Man verwendet diese Materialien zum Beispiel bei der katalytischen Reinigung von Abwässern. (Bild: (Bild: F. Krumeich/ETH Zürich)

▶ Neutronen in der Medizinforschung: Auf neutronentomographischen Aufnahmen lassen sich die Funktionsweise und der Zustand eines gesamten Organs – wie hier einer Rattenlunge – beobachten. Man muss das Gewebe nicht mehr entnehmen wie für eine Mikroskopuntersuchung und erhält deutlich präzisere Bilder als mit Röntgenstrahlen. (Bild: Robert Metzke/TUM)

▼ Neutronenstrahlen erlauben es, Motoren im Betrieb zu untersuchen. So lässt sich beispielsweise die Verteilung des Schmieröls beobachten und optimieren. (Bild: KSPG AG)



in Wechselwirkung, wobei die Stärke der Streuung von der Atomsorte abhängt.

Neutronen durchdringen Metalle besser als Röntgenstrahlen, werden aber von Wasserstoff sehr stark geschwächt, da sie von den gleich schweren Protonen (Wasserstoffkernen) abprallen wie Billardkugeln. Das ermöglicht es zum Beispiel, die Verteilung von **Öl innerhalb eines laufenden Motors** zu beobachten, weil das Schmiermittel aus Kohlenwasserstoffen besteht.

Genauso lassen sich Kunststoffteile und bestimmte Flüssigkeiten in geschlossenen Metallbehältern sichtbar machen.

Aber auch für biologische Untersuchungen eignen sich Neutronen – sogar für räumliche Aufnahmen. Dazu dreht man die Probe, fertigt Bilder aus verschiedenen Blickwinkeln an und errechnet dann wie in der Medizin eine Computertomographie.

Ein Beispiel ist die Neutronentomographie einer **Rattenlunge**. Unter dem Mikroskop können die Wissenschaftler zwar die Strukturen der Lunge erkennen, doch präparierte Gewebeschnitte geben nicht die tatsächlichen Verhältnisse einer funktionierenden Lunge wieder. Auch Röntgentomographie führte nicht zum Erfolg, weil das Lungengewebe vor allem Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoffatome enthält, während die feinen Luftkanäle vor allem Stickstoff und Sauerstoff enthalten. Diese Elemente absorbieren Röntgenstrahlung aber kaum. Daher ist das ideale bildgebende Verfahren in diesem Fall Neutronentomographie, weil die Wasserstoffatome die Neutronen besonders stark streuen, die anderen Atome jedoch nicht.

Bei diesen Untersuchungen im makroskopischen Bereich werden Neutronen als Teilchen beschrieben. Zur vollen Leis-

tungsfähigkeit laufen die neutralen Atombausteine auf, wenn sie bei Streuexperimenten als Wellen in Erscheinung treten. Sie eröffnen eine der wirkungsvollsten Methoden zur Untersuchung von Kristallstrukturen, vor allem von Metallen und metallischen Legierungen, weil sie tief in das Volumen dieser Festkörper eindringen.

Sowohl die physikalischen Grundlagen für die Strukturuntersuchungen mit Neutronen als auch die benutzten Verfahren sind seit fast hundert Jahren bekannt. Sie entsprechen nämlich genau denen der Röntgenstrahluntersuchungen. Mit Neutronen lassen sich aber vor allem Aussagen über Schwingungen von Kristallgittern machen, physikalisch Phononen genannt. Auch Fehlstellen in der Gitterstruktur werden sichtbar. Für viele technische Anwendungen vor allem metallischer Legierungen ist dies von großer Bedeutung.

INFO

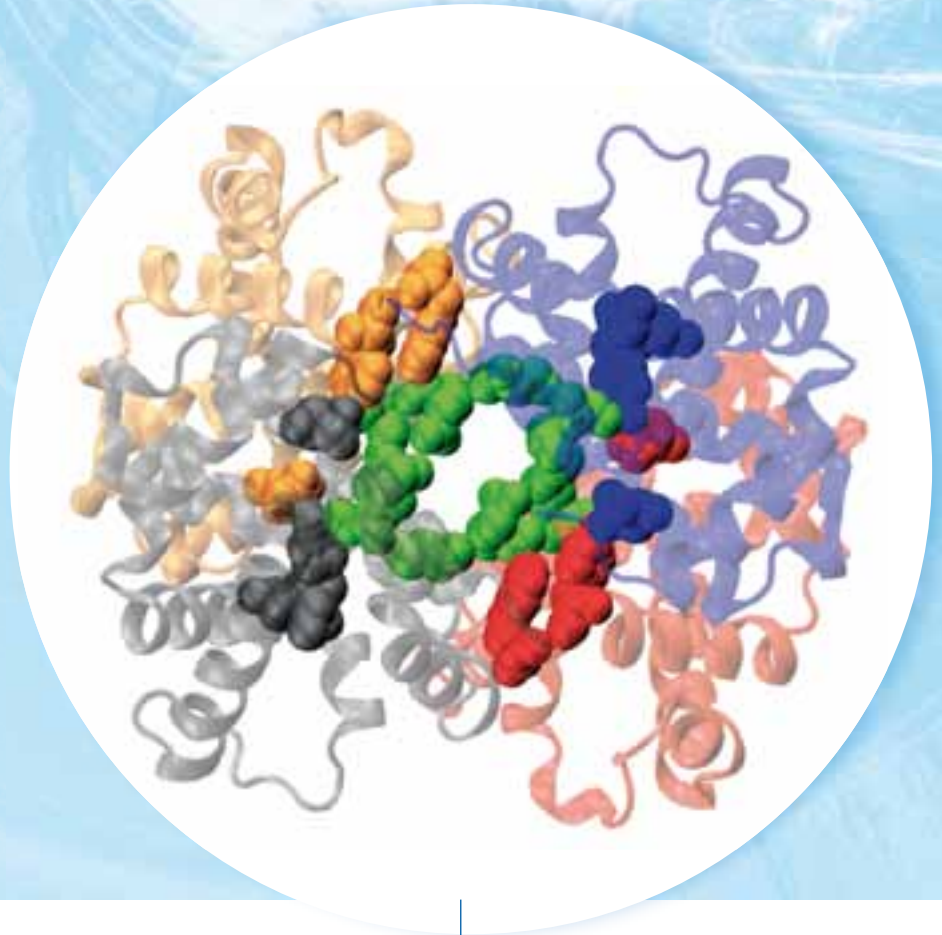
Wenn es Funken schlägt und Blasen wabern

Unser Körper ist einem unablässigen Strom von Teilchen ausgesetzt. Sie stammen sowohl von der kosmischen Strahlung als auch vom Zerfall natürlich vorkommender radioaktiver Elemente im Gestein. Vor allem das Gas Radon trägt zur natürlichen Radioaktivität bei. Alle diese Teilchen lassen sich eindrucksvoll mit einer Nebelkammer oder einer Funkenkammer sichtbar machen.

In einer Nebelkammer befindet sich eine etwa einen Zentimeter dicke, mit übersättigtem Alkoholdampf gefüllte Kammer. Durchquert ein Teilchen aus dem All oder der Erde diese Schicht, oder findet im Dampfraum ein Zerfall beispielsweise eines Radonatoms statt, so werden die Alkoholmoleküle entlang der Fluglinien dieser Teilchen ionisiert – Elektronen werden aus den Atomen herausgeschossen. Das wirkt auf den bis dahin völlig durchsichtigen Alkoholdampf wie ein kaltes Fenster in einer Waschküche. Der Alkohol kondensiert, und es entsteht eine Nebelspur aus Alkoholtröpfchen. Form und Länge der Spur erlauben Rückschlüsse auf die Art des Teilchens und dessen kinetische Energie. Ein Knick in einer solchen Spur ist ein sicheres Zeichen dafür, dass ein Teilchen innerhalb der Kammer mit einem anderen Teilchen oder Molekül zusammengestoßen ist.

In einer Funkenkammer sind mehrere unter Hochspannung stehende Platten mit gegenseitigen Abständen von einigen Millimetern übereinander gestapelt. In den Zwischenräumen befindet sich ein Edelgas. Dringt ein Teilchen darin ein, so schlägt es Elektronen aus den Hüllen der Edelgasatome. Längs der Spur vermehren sich die Ladungsträger lawinenartig. Schließlich sind so viele Elektronen und Ionen frei, dass sich ein Funke zwischen den Platten ausbildet, der die Hochspannung entlädt. Der Funke wiederum regt die Edelgasatome zu einem roten Leuchten an, das die Ionisationsspur verrät.

▼ Hühner-Hämoglobin: Die vierfarbig markierten Untereinheiten, an denen die Sauerstoffbindung stattfindet, sind je nach Spezies aus verschiedenen Aminosäuren zusammengesetzt. Sie bestimmen die temperaturabhängige Elastizität des Moleküls. (Bild: Forschungszentrum Jülich)



Moderne Analysemethoden erlauben es seit langem, auch die Struktur von verknäulten Biomolekülen zu untersuchen. Ein Beispiel ist das lebenswichtige **Hämoglobin**, das den Sauerstoff in der Lunge aufnimmt und im Körper verteilt. Mit Neutronenstreuung ließ sich ermitteln, wie ein bestimmter Teil des komplexen Biomoleküls, die sogenannte Höhle, an dieser Aufgabe beteiligt ist. Diese Höhlen sind bei unterschiedlichen Lebewesen mal mehr, mal weniger steif ausgebildet. Interessanterweise hat die Evolution die Steifigkeit bei jedem Lebewesen so eingestellt, dass die Leistungsfähigkeit bei der jeweiligen Körpertemperatur optimal ist.

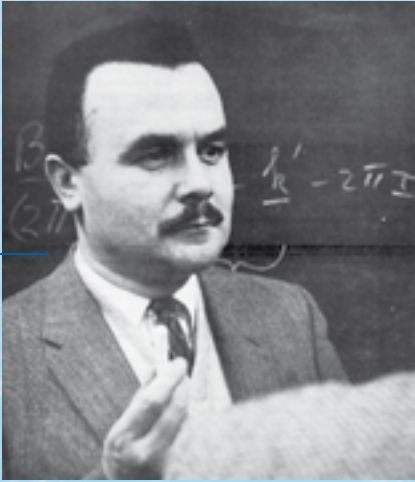
Der Arbeitsbereich von Neutronen ist aber noch erheblich breiter. Da Neutronen ein magnetisches Moment haben, sich also in gewisser Weise wie Minimagnete verhalten, reagieren sie auf die atomaren magnetischen Momente und inneren Magnetfelder eines Materials, die im Wesentlichen durch die Elektronen gebildet

werden. Das macht Neutronen zu idealen Sonden für die Bestimmung magnetischer Strukturen auf atomarer Skala. Unsere Erkenntnisse über technisch wichtige magnetische Werkstoffe beruhen auf solchen Untersuchungen. Der vielfältige Einsatz dieser Sonden hat den Begründern dieser Neutronenstreu-Technik, **Bertram N. Brockhouse und Clifford G. Shull**, 1994 den Nobelpreis für Physik eingebracht – etwa vier Jahrzehnte nach ihren bahnbrechenden Experimenten.

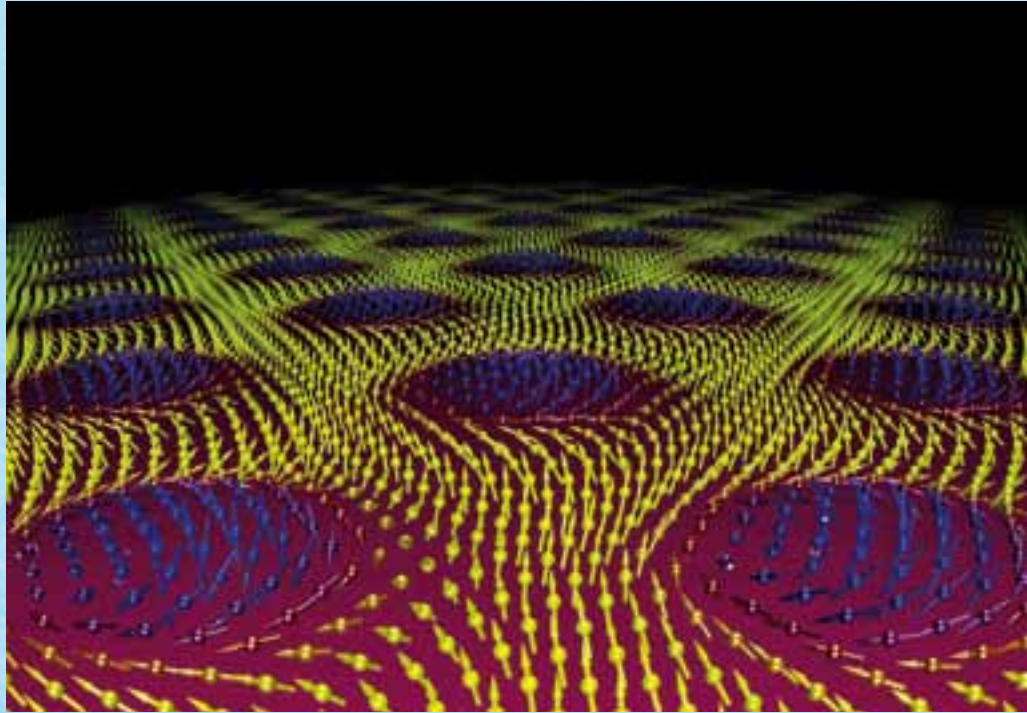
Neutronen sind nur im Innern des Atomkerns stabil; ein freies, nicht gebundenes Neutron zerfällt bei einer Lebensdauer von knapp 15 Minuten in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino. Deswegen müssen Neutronen für experimentelle Untersuchungen immer frisch nachproduziert werden.

Möglichkeiten hierfür bieten Forschungsreaktoren wie die Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) der Technischen

▼ Für seine Forschung zur Neutronenstreuungstechnik erhielt Brockhouse 1994 gemeinsam mit Shull den Nobelpreis für Physik. (Bild: Wikimedia)



▼ Kombination von Neutronenstreuexperimenten und Computersimulationen unter zur Hilfenahme von Ergebnissen aus magnetkraftmikroskopischen Untersuchungen erlauben die Visualisierung eines Gitters aus magnetischen Spinwirbeln. Die Theoretische Analyse dieser Daten ergibt sogar Hinweise auf von Paul Dirac Anfang der dreißiger Jahre vorhergesagte magnetische Monopole. Eine wichtige Anwendung könnten zukünftige, extrem kompakte und langlebige Datenspeicher sein. (Grafik: Sebastian Mühlbauer, TUM)



◀ Ein Pionier der Neutronenforschung: Clifford Shull forschte bereits Mitte des 20. Jahrhunderts zur Neutronenbeugung und -spektrometrie und entwickelte neuartige Gerätetechniken. (Bild: Courtesy of Oak Ridge National Laboratory, U.S. Dept. of Energy)

Universität München oder der BER II des Helmholtz-Zentrums Berlin in Wannsee. Hier liefert die Spaltung von Uran-235 einige Milliarden Neutronen pro Quadratmeter und Sekunde. Besonders interessant für Wissenschaftler ist der große Energie- und damit auch Wellenlängenbereich, mit dem die Neutronen aus dem Reaktor kommen. Das ermöglicht es, die Struktur von Materie auf einer Längenskala von einem Zehntel Nanometer bis in den Mikrometerbereich zu untersuchen.

Die zweite Möglichkeit, einen Neutronenstrahl zu erzeugen, bieten Spallationsquellen. Sie kommen gänzlich ohne Kernspaltung aus. Hier werden in einem Teilchenbeschleuniger Protonen beinahe auf Lichtgeschwindigkeit gebracht und auf einen Bleiklotz gelenkt. Prallt ein Proton auf einen Bleiatomkern, so heizt er diesen auf. Um gewissermaßen Dampf abzulassen, spuckt der Kern 20 bis 30 Neutronen aus. Diese haben anfänglich sehr hohe Geschwindigkeiten und müssen

erst in Tanks mit Wasser oder flüssigem Wasserstoff abgebremst werden, bevor sie in eine Experimentierstation gelangen.

Die derzeit stärkste Neutronenschleuder dieser Art ist die Spallation Neutron Source SNS im amerikanischen Oak Ridge. Eine zehnmal intensivere Quelle soll in den nächsten Jahren im schwedischen Lund entstehen – die ESS (European Spallation Source). Diese Europäische Spallationsquelle, an deren Vorbereitung deutsche Forscher mit Finanzierung durch das BMBF maßgeblich beteiligt sind, gehört zu den wichtigsten wissenschaftlichen Großprojekten in Europa. Ihre Laufzeit ist auf 40 Jahre veranschlagt.

Röntgenfilme aus der Nanowelt

Seitdem Wilhelm Conrad Röntgen Ende des Jahres 1895 die erste Aufnahme einer Hand präsentierte, die von geheimnisvollen X-Strahlen durchleuchtet war, begleitet

uns seine bahnbrechende Entdeckung auf Schritt und Tritt. Ohne Röntgenaufnahmen wäre der medizinische Fortschritt im 20. Jahrhundert undenkbar gewesen. Insgesamt stehen 20 Nobelpreise mit der Röntgenstrahlung in Zusammenhang.

Eine völlig neue Qualität erreicht die Forschung mit den seit einigen Jahren verfügbaren Röntgenlasern. Mit ihnen lässt sich die atomare Struktur der Materie aufklären. Erzeugt wird diese Blitzlichtlampe für den Nanokosmos von rasend schnellen Elektronen.

Wenn Elektronen im Magnetfeld auf einer Kreisbahn beschleunigt werden, senden sie in Flugrichtung Strahlung aus, die sogenannte Synchrotronstrahlung. Teilchenphysiker ärgern sich über sie, denn durch sie verlieren die Elektronen an Energie und lassen sich nicht auf die gewünschten hohen Geschwindigkeiten bringen. Die Synchrotronstrahlung lässt sich jedoch zu Strukturuntersuchungen



◀ Beim millimetergenauen Transport des Hauptspektrometers von KATRIN nach Karlsruhe war höchste Konzentration gefragt. (Bild: Karlsruhe Institute of Technology)



◀ KATRIN von innen: Der Edelstahltank des Hauptspektrometers. (Bild: Michael Zacher/Universität Münster)

geschickt nutzen, weil die auf einer Kreisbahn herumsausenden Elektronen wie viele kleine Scheinwerfer wirken und kontinuierlich Synchrotronstrahlung abgeben. Dabei gilt, je schneller die Elektronen sind, desto kürzer ist die Wellenlänge und desto enger der Abstrahlwinkel. Das bietet die Möglichkeit, mit nahezu lichtschnellen Elektronen intensive Röntgenstrahlung zu erzeugen.

Die brillianteste Synchrotronstrahlungsquelle der Welt befindet sich im DESY in Hamburg. Dort wurde der bereits bestehende 2,3 Kilometer lange Elektronenring PETRA so umgebaut, dass er seit 2010 Röntgenstrahlung liefert. An 14 Messplätzen mit bis zu 30 Instrumenten arbeiten jährlich rund 3000 Forscher. PETRA III liefert neue Erkenntnisse in nahezu allen technisch-wissenschaftlichen Bereichen, wie Medizin, Pharmazie, Chemie, Materialwissenschaft, Nanotechnologie, Energietechnik und Elektronik. Auch Kunsthistoriker nutzen die Anlage.

So konnten sie beispielsweise den Alterungsprozess von Farbpigmenten in Gemälden von [Vincent van Gogh](#) aufklären.

Röntgen- und Neutronenstrahlen decken etwa denselben Wellenlängenbereich ab und eignen sich beide ausgezeichnet, um die atomare Struktur von Materie zu studieren. Da sie unterschiedlicher Natur sind, ergänzen sie sich in ihren Forschungsmöglichkeiten. Mit Neutronen lassen sich Veränderungen, Defekte, Schwingungen und magnetische Eigenschaften von Atomgittern in Festkörpern ideal untersuchen. Das gilt vor allem für größere Materialproben, weil Neutronen tiefer in sie eindringen können als Röntgenstrahlung. Letztere hingegen macht eher unterschiedliche Elemente sichtbar.

Zukünftig lässt sich mit Röntgenlasern die Strahlintensität und die Wiederholrate der Pulse noch um einige Größenordnungen steigern. In dieser Hinsicht gilt als das Mikroskop der Zukunft der

Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich, der European XFEL. Seine Röntgenblitze werden hundert Millionen Mal stärker und ein Tausendstel kürzer sein als bei PETRA III.

Der European XFEL entsteht derzeit unterhalb einiger Vororte der Stadt Hamburg. In einem geradlinigen, 3,4 Kilometer langen Beschleuniger werden Elektronen bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht. Die Teilchen besitzen alle dieselbe Energie und Richtung und sind zu Paketen mit einem Durchmesser von einem zehntel Millimeter zusammengefasst.

Im European XFEL und vergleichbaren Freie-Elektronen-Lasern leitet man die schnellen Elektronen durch einen sogenannten Undulator, eine Anordnung von Magneten mit abwechselnder Polarität. Das periodisch wechselnde Magnetfeld zwingt die Teilchen auf einen rasanten Slalomkurs, bei dem sie ständig beschleunigt werden und deshalb gebün-

► Ein Röntgenanalyse in der DESY-Anlage PETRA III half, das Rätsel um Verfärbungen an wertvollen Gemälden von Vincent van Gogh (hier: Blumen in blauer Vase) zu lösen. Ein zum Schutz aufgetragener Firnis hatte die Verfärbungen der Ursprungsfarben verursacht.



▼ Eine Messtation in der FLASH-Experimentierhalle, Wegbereiter für den European XFEL. (Bild: DESY)



▼ Beschleunigungsstrukturen aus Niob, so genannte Resonatoren, werden in supra-leitenden Linearbeschleunigern eingesetzt. (Bild: DESY)



delte (Bremsstrahlung) Röntgenblitze aussenden. Da diese Blitze schneller sind als die vor ihnen fliegenden Elektronen, überholen sie diese Teilchen. Beim Vorbeifliegen wirken sie auf die Elektronen ein, indem sie einige beschleunigen, andere abbremsen. Als Folge davon rücken die Elektronen nach und nach näher zusammen und bewegen sich in vielen dünnen Scheibchen. Das Entscheidende: Sämtliche Elektronen in einer Scheibe strahlen jetzt im Gleichtakt. Dadurch entstehen extrem kurze und intensive Röntgenblitze alle im gleichen Takt, wie Laserlicht.

Der **European XFEL** ist ein europäisches Projekt, an dem sich 14 Länder beteiligen, und das zum Großteil durch das BMBF finanziert wird. Das DESY betreibt den Beschleuniger. Der European XFEL verläuft in Tunneln unter der Erde – vom DESY in Hamburg-Bahrenfeld bis in das schleswig-holsteinische Schenefeld im Kreis Pinneberg. Dort entsteht ein Forschungscampus,

auf dem internationale Wissenschaftlerteams experimentieren werden. Erstes Licht erwarten die Forscher Ende 2015.

Schon jetzt läuft ein 260 Meter langer Prototyp, der Freie-Elektronen-Laser in Hamburg (FLASH). Er dient einerseits als Experimentierfeld für den European XFEL, ermöglicht aber auch schon hochkarätige Forschung. **FLASH** hat es sogar bereits als schnellste Kamera ins Guinness-Buch der Rekorde gebracht: mit Bildfolgen von 50 Femtosekunden. Eine Femtosekunde ist der Millionste Teil einer Milliardstel Sekunde. Damit lassen sich Filme von ganz schnellen chemischen Prozessen erstellen.

FLASH arbeitet bei Wellenlängen von 4 bis 45 Nanometern und einer extrem kurzen Belichtungszeit. Damit war es beispielsweise möglich, die Zerlegung eines Iodmoleküls in seine Einzelbausteine zu verfolgen. Hierfür schossen Forscher einen kurzen Laserpuls in das Iodgas hinein und verfolgten dann mit schnellen Röntgenblit-

zen, wie das Molekül zerfiel. Zuerst flogen nach 75 Femtosekunden die beiden äußeren Valenzelektronen aus dem Molekül raus, nach weiteren 120 Femtosekunden brach die Molekülbindung auf, und die beiden Iod-Atome spritzten auseinander.

Der European XFEL wird die Fähigkeiten von FLASH um das Hundertfache übertreffen. Er gilt als Eldorado für die Forschung. Mit einem Wellenlängenbereich von 0,05 bis 6 Nanometern wird er noch kleinere Details zeigen, mit seiner höheren Lichtstärke sind noch kürzere Belichtungszeiten möglich. Die ultrakurzen Röntgenblitze erlauben unter anderem, die einzelnen Etappen der Umordnung atomarer und elektronischer Strukturen bei (bio-)chemischen Reaktionen zu untersuchen und zu einem Film aus der Nanowelt zusammensetzen. Damit würde zum Beispiel für Biologen ein Traum in Erfüllung gehen. Sie könnten den biomolekularen „Maschinen“ auf atomarer Skala bei der Arbeit zuschauen.



22

Teilchen nah und fern

Unablässig rasen Teilchen aus dem Kosmos in die Erdatmosphäre. Sie zeugen von den energiereichsten Vorgängen im Universum. Die schnellsten von ihnen besitzen einige Zehnmillionen Mal mehr Energie als die Protonen im LHC. Ihre Herkunft ist eines der großen Rätsel der Astrophysik.

Am 7. August 1912 bestieg der österreichische Physiker Victor Franz Hess in Aussig an der Elbe den Korb eines mit Wasserstoff gefüllten Fesselballons. Begleitet wurde er von einem Ballonführer und einem Meteorologen; mit an Bord befanden sich unter anderem mehrere Elektrometer, mit denen Hess in verschiedenen Höhen die elektrische Leitfähigkeit der Luft messen wollte. Bis in 5350 Meter Höhe stieg der Ballon auf, wobei Hess etwa alle tausend Meter eine Messung ausführte. Das Ergebnis war überraschend: Die Leitfähigkeit nahm ab 2000 Meter Höhe rapide zu und erreichte in 5000 Meter Höhe einen Wert, der doppelt so hoch war wie am Boden. Diese Ballonfahrt gilt heute als Entdeckung der kosmischen Strahlung. Warum?

Bis dahin waren die Physiker davon überzeugt, dass die Luft durch den Zerfall radioaktiver Stoffe im Boden ionisiert wird. Die Ionen führen dazu, dass die Luft Elektrizität leitet. Dann aber hätte die Leitfähigkeit mit zunehmendem Abstand vom Boden abnehmen müssen. Da genau das Umgekehrte der Fall war, musste die ionisierende Strahlung von oben, sprich aus dem Weltraum, kommen. Hess nannte sie Höhenstrahlung.

Hess' Ergebnisse und seine Deutung stießen auf heftigen Widerspruch bei den Kollegen. Doch weitere, mitunter waghalsige Ballonaufstiege, auch von Werner Kolhörster bis in 9300 Meter Höhe, bestätigten die Messungen eindeutig.

Als Hess 1936 für die Entdeckung der kosmischen Strahlung mit dem Physik-Nobelpreis geehrt wurde, war deren Zusammensetzung weitgehend bekannt. Sie entspricht etwa derjenigen der Sonnenmaterie: 87 Prozent Protonen, 12 Prozent Heliumkerne und ein Prozent schwerere Atomkerne. Hinzu kommen noch, wie man heute weiß, Elektronen, Neutrinos und Gammastrahlen.

Die kosmische Strahlung ist ein bedeutender Bestandteil der Milchstraße. Die Energie aller Teilchen ist etwa so groß wie diejenige aller Magnetfelder und des gesamten Sternenlichts. Zufall oder Notwendigkeit? Diese Frage ist noch unbeantwortet.

Teilchen mit Energien bis zu 10 MeV (Millionen Elektronvolt) werden in den Magnetfeldern der Sonne beschleunigt. Energiereichere Partikel entstehen in unterschiedlichen Quellen in unserer

◀ Teilchenschauer treten auf, wenn energiereiche kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft. (Bild: ASPERA/Novapix/L. Bret)

▶ Am Rand des Detektorfeldes des Auger-Observatoriums gibt es 27 solcher Teleskope. Es sind Spiegelteleskope mit zeitlich hochauflösender Kamera zum Nachweis des Fluoreszenzlichtes eines Teilchenschauers. Damit ist es möglich, die Richtung der einfallenden kosmischen Teilchen zu bestimmen. (Bild: Pierre Auger Observatory)

▼ Wartungsarbeiten an einem der autonom betriebenen Teilchendetektoren des Pierre-Auger-Observatoriums. Teilchen aus dem Weltraum erzeugen blaues Cherenkovlicht im Wasser, das von hochempfindlichen Sensoren im Tank nachgewiesen wird. Im Verbund gibt es 1660 Tanks – im Hintergrund die schneebedeckten Anden. (Bild: Pierre Auger Observatory)



Milchstraße, wie den mit Magnetfeldern durchzogenen Wolken explodierender Sterne, sogenannter Supernovae, und Neutronensternen. Ganz selten schießen Teilchen mit Energien bis zu 10^{20} eV in die Atmosphäre hinein. Damit übertreffen sie die Energie der Protonen im LHC um mehr als das Zehnmillionenfache. Ein solches Teilchen besitzt die Energie eines kräftig geschlagenen Tennisballs, ist aber nur 10^{-15} -mal so groß. Die Herkunft dieser **kosmischen Flitzer** ist eines der großen Rätsel der Astrophysik.

Luftschauer über der argentinischen Pampa

Anders als Licht kommen die elektrisch geladenen Teilchen nicht auf geraden Wegen zu uns, weil sie auf ihrer weiten Reise durchs All von Magnetfeldern abgelenkt werden. Deswegen lässt sich ihre Herkunft bislang nicht direkt bestimmen.

Lediglich die energiereichsten Partikel bleiben relativ unbeeindruckt von den Magnetfeldern. Nur bei ihnen haben Forscher eine Chance, die Quellen zu ermitteln. Doch ausgerechnet sie sind extrem selten. Auf einer Fläche von einem Quadratkilometer gelangt durchschnittlich nur alle zehn bis hundert Jahre eines in die Erdatmosphäre. So lange wollen die Forscherinnen und Forscher natürlich nicht warten. Zum Glück gibt es einen indirekten Weg, die Teilchen nachzuweisen.

Stößt nämlich ein energiereiches Teilchen in der Atmosphäre in 20 bis 30 Kilometer Höhe mit einem Atomkern der Luftmoleküle zusammen, so zerplatzen beide Partikel in viele neue Teilchen, die weiter in Richtung Erdboden rasen. Diese treffen erneut auf Atomkerne und lösen weitere Teilchen aus. Am Boden kommt schließlich eine aus Milliarden von Teilchen bestehende Lawine mit bis zu zehn Kilometern Durchmesser an.

Diese so genannten Luftschauer entdeckte 1938 der französische Physiker Pierre Auger, dem zu Ehren ein internationales Observatorium in der argentinischen Pampa benannt wurde. Auf einer Fläche von 3000 Quadratkilometern, was mehr als der dreifachen Fläche von Berlin entspricht, stehen in einem Abstand von jeweils 1,5 Kilometern 1660 mit gereinigtem Wasser gefüllte Tanks. Rauschen Teilchen eines Luftschauers in das Wasser, so lösen sie darin einen kurzen Lichtblitz aus, den empfindliche Detektoren im Innern der Tanks registrieren. Im Normalfall trifft ein Schauer mehrere Tanks.

Zudem kommen im **Auger-Observatorium** Teleskope zum Einsatz. Ein Luftschauer erzeugt nämlich in der Hochatmosphäre auch eine schwache UV-Leuchtspur, die die Teleskope mit zehn Millionen Aufnahmen pro Sekunde aufzeichnen. Die Spur entsteht, wenn die Teilchen mit Stickstoffmolekülen in der Luft zusammensto-



INFO

Observatorium Thermoskanne

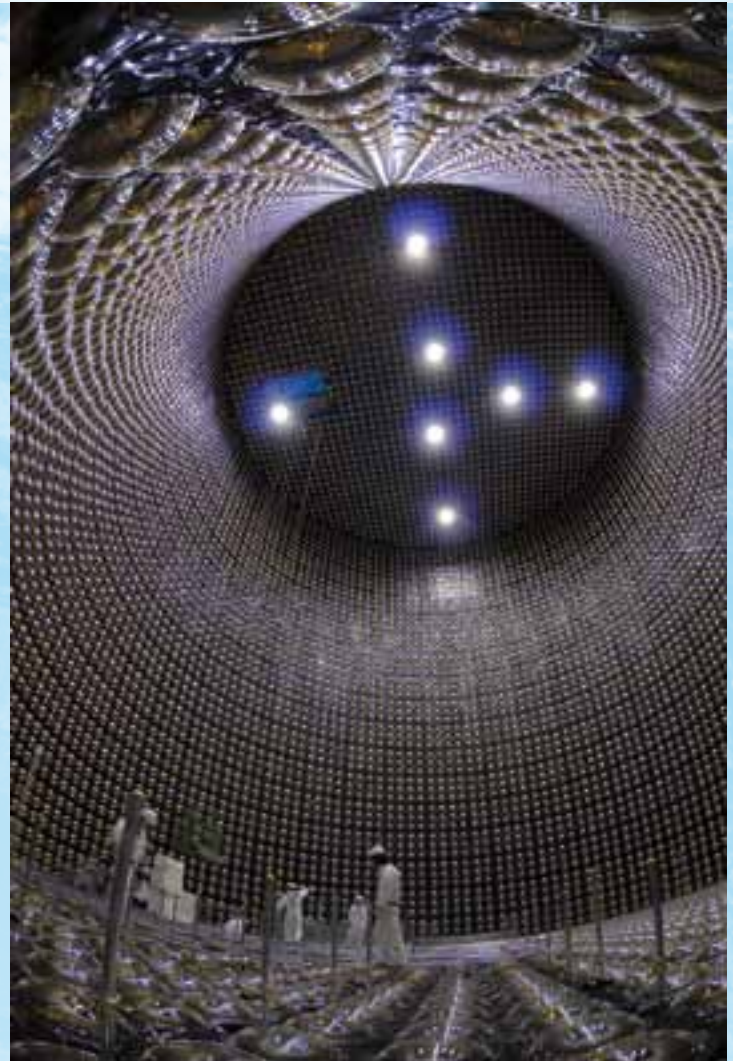
Man muss nicht unbedingt bis an den Südpol oder in die argentinische Pampa reisen, um Teilchen der kosmischen Strahlung nachzuweisen. Eine einfache Thermoskanne und ein wenig elektronisches Equipment tun es auch. Dazu füllt man die Kanne mit Leitungswasser und verschließt sie lichtdicht mit einem Lichtsensor, einem sogenannten Photomultiplier, der mit einer Hochspannungseinrichtung versorgt wird. Eine Messelektronik zeichnet nun Lichtblitze auf, die der Photomultiplier im Innern der Kanne registriert. Fertig ist die nach dem riesigen japanischen Detektor Kamiokande benannte Kamiokanne.

Hervorgerufen werden die Lichtblitze von Myonen. Sie entstehen als Sekundärteilchen, wenn Primärteilchen der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre mit Atomkernen der Luft zusammenstoßen. Diese Sekundärteilchenschauer bestehen zu 80 Prozent aus Myonen, die die Fähigkeit besitzen, Materie nahezu ungehindert zu durchdringen – also auch die Wand der Thermoskanne. Die Myonen rasen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre. Geraten sie in das Wasser der Kanne, so ist ihre Geschwindigkeit in diesem Medium größer als die des Lichts. Als Folge davon senden sie Tscherenkow-Strahlung aus, die der Photomultiplier registriert.

Mit der Kamiokanne kann im Unterricht die Rate, die Verteilung der Ursprungsrichtung und die Lebensdauer kosmischer Myonen gemessen werden. Und ganz nebenbei lernen Schülerinnen und Schüler, wie Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung funktionieren.

ßen und diese – ganz ähnlich wie beim Polarlicht – zum Leuchten anregen. Die Empfindlichkeit der Instrumente ist so hoch, dass sie das Leuchten einer 30 Kilometer entfernten 40-Watt-Glühbirne aufnehmen könnten, die mit nahezu

► Die japanische Super-Kamiokande ist den Neutrinos mit über 10 000 Detektoren auf der Spur. (Bild: Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo)



Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre rast. Aus der Summe der Informationen aus den Tanks und den Teleskopen lassen sich Einfallsrichtung, Energie und Art des ursprünglichen Primärteilchens berechnen, das aus den Weiten des Weltalls auf die Erdatmosphäre traf.

Die bisherigen Ergebnisse deuten auf einen Typ von Hauptverdächtigen als Beschleuniger der energiereichsten Teilchen hin: supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien. Mächtige Magnetfelder in ihrer Umgebung beschleunigen die Teilchen bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit. Heißester Kandidat ist die 12 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie Centaurus A.

Abschließend geklärt ist der Ursprung der schnellsten Partikel indes nicht. Die rasanten Protonen stoßen bei ihrer Reise durchs All nämlich auf die überall vorhandene Hintergrundstrahlung, ein Relikt des Urknalls. Diese Kollisionen bremsen die Partikel so stark ab, dass sie höchstens

etwa 150 Millionen Lichtjahre zurücklegen können. In diesem Umkreis um unser Milchstraßensystem gibt es aber offenbar nicht genügend aktive Galaxien, um den gesamten Teilchenfluss zu erklären.

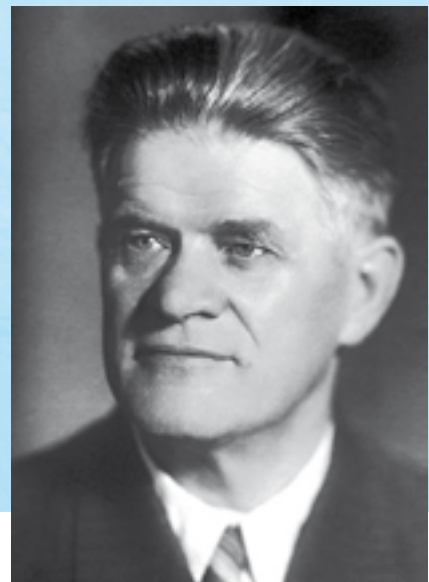
Lichtblitze über Namibia und Teneriffa

In den irdischen Beschleunigern treffen schnelle Teilchen auf Materie und erzeugen bei den Kollisionen eine Schar neuer Teilchen. Dasselbe geschieht in den kosmischen Pendanten. Auch dort prallen Partikel zusammen und lösen dabei unter anderem Gammastrahlung und Neutrinos aus. Da weder Gammaquanten noch Neutrinos eine Ladung besitzen, werden sie von den interstellaren Magnetfeldern nicht abgelenkt und entfernen sich geradlinig von ihrem Ursprungsort. Das ermöglicht es, die Positionen dieser kosmischen Quellen auf trickreiche Weise am Himmel zu lokalisieren.



▲ Das H.E.S.S.-Teleskop-System in Namibia sucht nach hochenergetischen Teilchen und deren Ursprung im Weltraum. Es besteht aus vier Teleskopen mit 12 m Durchmesser und einem mit 28 m Durchmesser. (Bild: H.E.S.S. Collaboration, Frikkie van Greunen)

► Der russische Physiker Pawel Alexejewitsch Tscherenkow entdeckte 1934 die Tscherenkow-Strahlung. Dafür erhielt er 1958 zusammen mit Ilja Michailowitsch Frank und Igor Jewgenjewitsch Tamm den Nobelpreis für Physik. (Bild: Wikimedia, Nobel foundation)



Hochenergetische Gammastrahlung durchdringt zwar den Weltraum, aber nicht die Erdatmosphäre. Sie ist deshalb für erdgebundene Teleskope unsichtbar. Beim Eintritt dieser Strahlung in die Erdatmosphäre, können die Gammateilchen aber mit Atomkernen der Luftmoleküle zusammenstoßen und einen Schwarm von sehr schnellen Sekundärteilchen auslösen. Der Vorgang ist mit einem bläulichen Tscherenkow-Lichtblitz in Flugrichtung der Primärstrahlung verbunden, die sich mit erdgebundenen Teleskopen empfangen lässt. Sowohl die Teilchen der kosmischen Strahlung als auch die Gammastrahlen machen sich also durch Tscherenkow-Leuchten der von ihnen erzeugten sekundären Teilchen bemerkbar. Die Astroteilchenphysiker sind aber in der Lage, beide Arten bei den Beobachtungen zu unterscheiden.

Die größten Observatorien zur Beobachtung der hochenergetischen Gammastrahlung sind das [High Energy Stereo-](#)

[scopic System \(H.E.S.S.\)](#) in Namibia und das Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope (MAGIC) auf Teneriffa. An beiden Projekten sind deutsche Institute führend beteiligt. H.E.S.S. besteht aus vier Teleskopen mit jeweils 12 Metern Durchmesser sowie einem 30-Meter-Teleskop. MAGIC verfügt über zwei 17-Meter-Teleskope. Da die Tscherenkow-Blitze mit mehreren Teleskopen gleichzeitig beobachtet werden, lassen sich deren räumliche Orientierung in der Atmosphäre und damit auch die Herkunftsrichtung am Himmel rekonstruieren. Nach mehreren Stunden oder Nächten Beobachtungszeit entsteht so ein Bild der kosmischen Quelle, wobei sich auch die Energie der ursprünglichen Gammastrahlung ermitteln lässt.

Auf diese Weise haben die Forscher bislang mehr als 150 Hochenergie-Objekte entdeckt. Es handelt sich um sehr exotische Himmelskörper, wie Neutronensterne, Kugeln mit nur 25 Kilometer Durch-

messer, in denen typischerweise das ein- einhalbfache einer Sonnenmasse so dicht komprimiert ist, wie die Materie in einem Atomkern. Neutronensterne rotieren sehr schnell und beschleunigen in elektrischen Feldern die Teilchen in ihrer Umgebung. Auch in den Explosionswolken von Supernovae werden Teilchen gehörig auf Touren gebracht, wie Aufnahmen mit H.E.S.S. belegen.

Mit H.E.S.S. und MAGIC ließen sich, wie schon auf Grund der Beobachtungen des Auger-Observatoriums vermutet, supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentralbereichen aktiver Galaxien als effektive Teilchenschleudern ausmachen. Allerdings sind nur Gammastrahlen mit Energie bis zu 10^{13} eV nachweisbar. Ob die Schwarzen Löcher auch in der Lage sind, Teilchen bis auf 10^{20} eV zu beschleunigen, ist umstritten.

Weitere Aufschlüsse erhoffen sich die Forscher von einem noch größeren Hoch-



INFO

Spurenstoffen auf der Spur

Bei H.E.S.S., MAGIC und dem Pierre-Auger-Observatorium ist die Atmosphäre gewissermaßen Teil des Detektors. Ihre chemische Zusammensetzung interessiert dabei nicht. Atmosphärenforscher hingegen haben genau das zum Ziel: Sie suchen nach Substanzen, sogenannten Spurenstoffen, die die Luftqualität oder gar das Klima beeinträchtigen.

Das Instrument Crista-NF (Cryogenes Infrarot-Spektrometer und Teleskop für die Atmosphäre) von der Universität Wuppertal zum Beispiel kann auf einen Schlag die Konzentrationen von verschiedenen Spurenstoffen, wie H_2O , O_3 und N_2O in einem Höhenbereich zwischen 5 und 30 Kilometern messen. Es besteht aus einem Teleskop und einem Spektrographen, der die für jede Molekülsorte charakteristische Infrarotstrahlung registriert. Für die Messkampagnen wird Crista-NF in dem russischen Höhenforschungsflugzeug M55-Geophysica installiert.



Eine andere Technik nutzen Wuppertaler Forscher mit dem Instrument Mirah (Measurements of Stable Isotope Ratios in Atmospheric Trace Gases on Halo). Es arbeitet in dem Höhenforschungsflugzeug Halo des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), wo es während des Fluges Luftproben sammelt, die später im Labor analysiert werden. Die Spurengase enthalten unterschiedliche stabile Isotope, wie Kohlenstoff-12 und Kohlenstoff-13, deren Verhältnis zum Beispiel von der Quelle der Spurengase abhängt. Es ändert sich auch bei chemischen Reaktionen: Je länger die Moleküle eines Stoffes in der Luft waren, desto stärker hat sich ihre mittlere Isotopenzusammensetzung geändert. Isotope stellen damit eine Art Fingerabdruck für die jeweiligen Prozesse dar, die Konzentration und Verteilung eines Spurengases beeinflussen. Das ermöglicht es, dynamische Prozesse, wie den Austausch von Luftmassen und deren Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre zu ermitteln. Unter Umständen lassen sich sogar Luftverschmutzer aufspüren.

◀ Links: Das Höhenforschungsflugzeug HALO geht unter anderem den Ursachen von Luftverschmutzung nach. (Bild: DLR/Andreas Minikin)
Rechts: Mit dem Labor in die Luft: Innenansicht des HALO-Flugzeugs und seiner wissenschaftlichen Ausrüstung. (Bild: HALO/DLR)



▲ Als Detektoren im arktischen Forschungsprojekt IceCube dienen Digital Optische Module (DOM). Das Bild zeigt die Absenkung eines solchen DOMs in die Tiefen des Eises. (Bild: Mark Krasberg/NSF)

energie-Observatorium, dem Cherenkov Telescope Array (CTA). Nach derzeitiger Planung sollen bis Anfang 2014 jeweils ein Standort auf der Süd- und einer auf der Nordhalbkugel benannt werden. Dort werden viele Teleskope mit Spiegeldurchmessern von 5, 12 und 23 Metern stehen. Dadurch soll sich die Empfindlichkeit gegenüber H.E.S.S. und MAGIC verzehnfachen und der Energiebereich der beobachtbaren Teilchenschauer vergrößern. Deutschland ist sowohl bei H.E.S.S. und MAGIC als auch beim zukünftigen CTA führend beteiligt.

Neutrino-Suche im Eis

Eine weitere Möglichkeit, die stärksten kosmischen Beschleuniger ausfindig zu machen, bieten Neutrinos. Auch sie – besonders die hochenergetischsten von ihnen – entstehen in der turbulenten Umgebung der kosmischen Beschleuniger.

Ihr Vorteil, jedes Hindernis im All nahezu ungehindert durchdringen zu können, wird allerdings für ihren Nachweis zum Nachteil. Man braucht schon einen riesigen Detektor, damit zumindest eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht, dass darin einmal ein kosmisches Neutrino mit einem Atomkern zusammenstößt und sich dadurch bemerkbar macht.

Mit **IceCube** haben Forscher einen solchen gewaltigen Detektor in der Tiefe des antarktischen Eisschildes realisiert. Es ist ein internationales Projekt, an dem deutsche Institute maßgeblich beteiligt sind. In jahrelanger Arbeit haben sie an langen Kabeln mehr als 5000 lichtempfindliche Sensoren unterhalb der Amundsen-Scott-Forschungsstation im Eis direkt am Südpol versenkt. In einem Bereich zwischen 1,5 bis 2,5 Kilometern Tiefe überwachen sie einen Eiskwürfel mit einem Volumen von einem Kubikkilometer. Sobald ein Neutrino darin mit einem Atomkern

zusammenstößt, entsteht auch hier im klaren Eis der Antarktis Tscherenkow-Strahlung, die sowohl Energie als auch Herkunftsrichtung des Neutrinos verrät.

Seit der Inbetriebnahme im Dezember 2010 hat IceCube schon weit mehr als 100 000 Ereignisse registriert, jedoch konnten die verantwortlichen Himmelskörper noch nicht ausfindig gemacht werden. Im April 2013 ging den Forschern zwei Neutrinos mit der Rekordenergie von einer Billion Elektronvolt (10^{15} eV) ins Netz. Von welchem Himmelskörper die beiden Ernie und Bert genannten Neutrinos kamen, ließ sich jedoch noch nicht ermitteln.

Ergänzt wird IceCube von einer Anordnung von 160 Wassertanks, verteilt über einen Quadratkilometer auf dem Eis. Diese IceTop genannte Anlage weist Teilchenschauer nach demselben Prinzip nach wie das Pierre-Auger-Observatorium, ist aber

Kosmische Wolkenbildung

Welchen Einfluss die kosmische Strahlung auf die Wolkenbildung – und damit möglicherweise auch auf das Klimasystem – hat, wird am Experiment CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets) am CERN untersucht.

Ein von der Sonne abströmender Teilchenwind führt ein interplanetares Magnetfeld mit sich, das die Erde vor energiearmen Teilchen der kosmischen Strahlung abschirmt. Die Stärke des Magnetfeldes schwankt mit dem elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne, und damit variiert auch der Beschuss der Erdatmosphäre mit kosmischen Teilchen.

In der Luft erzeugen die kosmischen Strahlungsteilchen elektrisch geladene Moleküle. An diese Ionen lagern sich schneller andere Moleküle an als an die neutralen Teilchen. Diese größeren Molekülverbände, Cluster genannt, könnten als Kondensationskeime für Aerosole (Schwebeteilchen) fungieren. Aerosole streuen das Sonnenlicht in den Weltraum zurück und fördern die Wolkenbildung. Beide Vorgänge beeinflussen das Klima.

Das Experiment CLOUD besteht aus einer Atmosphärenkammer, in der die Forscher Teilchen hineinschießen, die der natürlichen kosmischen Strahlung entsprechen. Nach den bisherigen Ergebnissen verstärkt die kosmische Strahlung die Bildung von Clustern, beispielsweise von Schwefelsäure. Allerdings ist nicht geklärt, ob diese Teilchen bis zur Größe von Aerosolen weiterwachsen und so wirklich einen nennenswerten Einfluss auf das Klima haben.

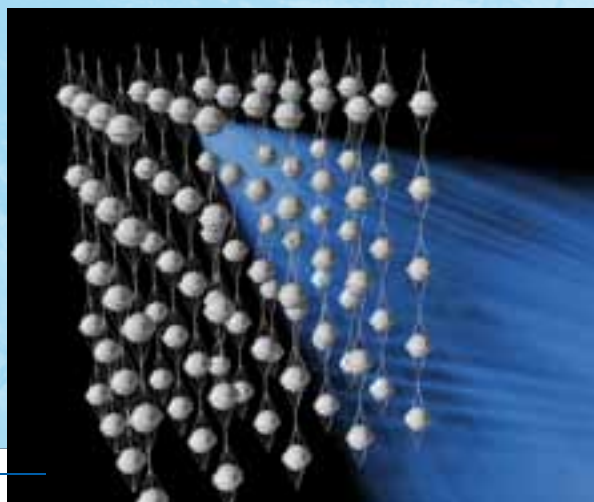
Ein ähnliches Ziel verfolgen Forscher der Universität Wuppertal und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Sie haben in dem Bereich des Luftschauerexperiments Cascade-Grande digitale Kameras installiert, mit denen sie nach Kondensstreifen suchen, die in wenigen Kilometern Höhe in zeitlicher und räumlicher Korrelation mit Luftschauern entstehen könnten. Ergebnisse werden mit Spannung erwartet.

INFO



► Mit Versuchen in der CLOUD-Kammer gehen Forscher dem möglichen Zusammenhang von kosmischer Strahlung und Wolkenbildung nach. (Bild: CLOUD/CERN)

► Computersimulation des IceCube-Teleskops, das Neutrinos unter den besonderen Bedingungen des antarktischen Eises aufspürt. Blau dargestellt: auftreffende Tscherenkow-Strahlung. (Bild: NSF)



wegen der geringeren Ausdehnung für einen kleineren Energiebereich von 10^{14} eV bis 10^{18} eV empfindlich. Gleichzeitige Messungen von IceTop und IceCube verbessern die Bestimmung von Energie und Masse der Primärteilchen.

Antimaterie in der kosmischen Strahlung

Im Mai 2011 brachte das Space-Shuttle Endeavour erstmals ein Instrument zur Suche nach kosmischen Strahlungsteilchen zur Internationalen Raumstation ISS. Das fast sieben Tonnen schwere Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) misst seitdem die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung. In jeder Sekunde empfängt es rund tausend Teilchen, bestimmt deren Ladung, Energie und Masse. Besonders spannend ist hier der Nachweis von Antimaterieteilchen. Da diese in der Atmosphäre

zerstrahlen, müssen die Messungen im Weltall stattfinden.

Das Experiment Pamela an Bord des russischen Forschungssatelliten Resurs DK1 fand bereits vor einigen Jahren bei Energien oberhalb von 10 GeV einen unerwartet hohen Anteil an Positronen, also Anti-Elektronen. Woher kommen sie? Von unbekanntem Himmelskörpern, beispielsweise Neutronensternen? Es gibt auch exotischere Ideen. So vermuten einige Theoretiker, dass die Antiteilchen beim Zerstrahlen von hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie oder der Supersymmetrie frei werden. Oder handelte es sich vielleicht nur um einen Messfehler?

Das AMS konnte diesen Zweifel im Frühjahr 2013 ausräumen, als es den Überschuss an Positronen mit größerer Genauigkeit bestätigte. Doch die Herkunft der Teilchen ist nach wie vor rätselhaft.



Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Partner



Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



Medienpartner



Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2013: Vom Urknall zum Weltall“ (Wuppertal, 17.09. – 21.9.2013), Infos: www.physik-highlights.de