

A cosmic source in the upper left corner emits several bright, white lines representing cosmic rays that travel across the dark space and strike the Earth's surface. The Earth's horizon is visible at the bottom, showing a blue and white atmosphere and a purple-tinged landscape.

Neue Fenster zum Kosmos

Astroteilchenphysik
in Deutschland

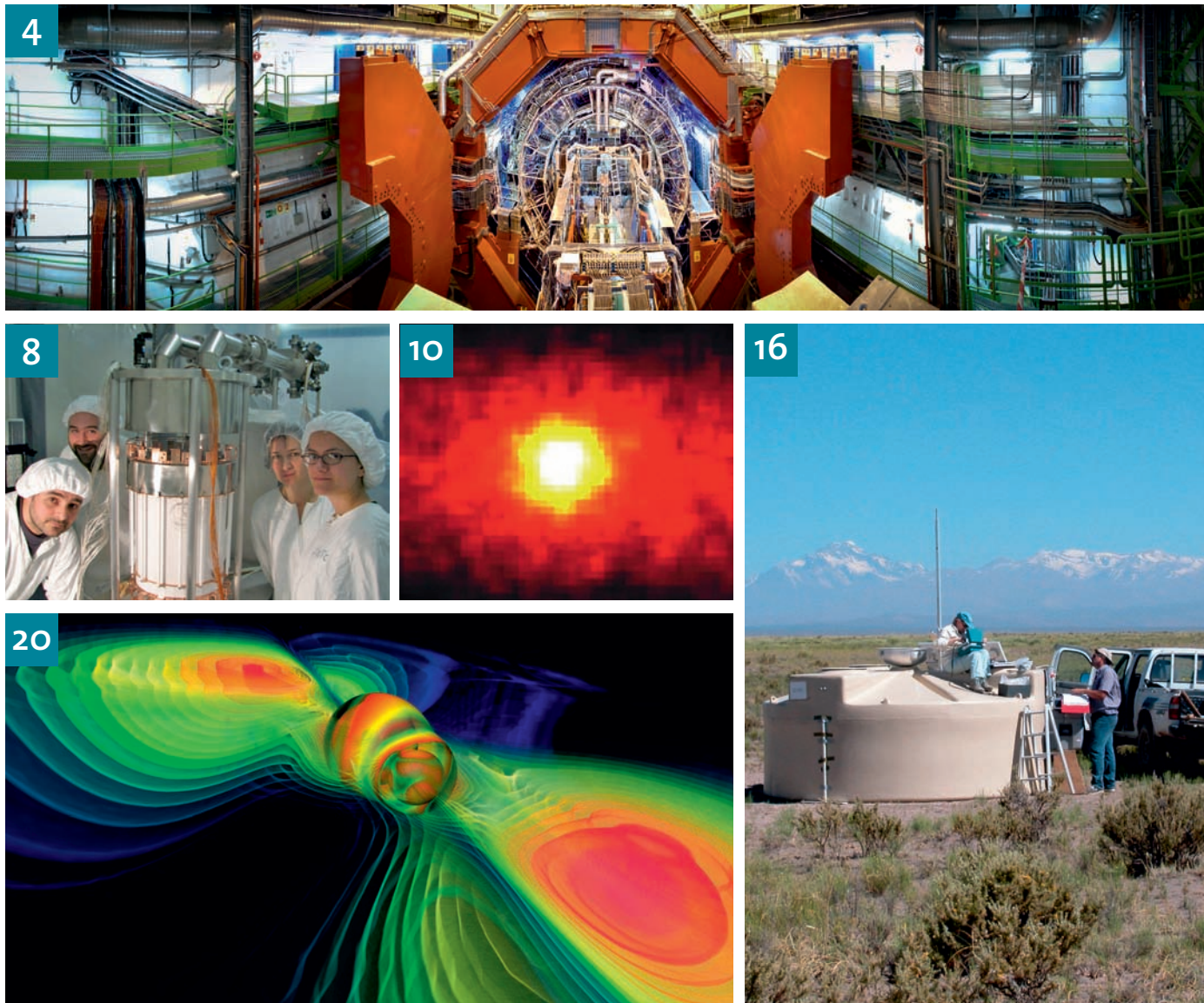
KAT

Komitee für Astroteilchenphysik



HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

Allianz für Astroteilchenphysik



3 Editorial

4 Das ganz Große und das ganz Kleine

Astronomen nehmen das Universum in den Blick, Teilchenphysiker den Mikrokosmos – und haben doch dasselbe Ziel.

8 Die Jagd nach der Dunklen Materie

Die normale Materie segelt wie ein Schiff auf einem Ozean Dunkler Materie. Woraus besteht diese rätselhafte Substanz?

10 Neutrinos – Geisterteilchen mit kosmischer Botschaft

Da sie Materie fast spurlos durchdringen, bieten Neutrinos einzigartige Einsichten in grundlegende Vorgänge im Kosmos.

14 Karte: Großanlagen der Astroteilchenphysik

16 Das Universum bei extremen Energien

Mit riesigen Detektoren für energiereiche Teilchen werden völlig neue kosmische Landschaften sichtbar.

20 Einsteins Vermächtnis

Kilometerlange Interferometer sind Gravitationswellen auf der Spur. Der direkte Nachweis steht unmittelbar bevor.

22 Astroteilchenphysik für alle

Die Suche nach Antworten auf die Grundfragen der Natur begeistert Studierende ebenso wie das breite Publikum.

24 Hightech und Anwendungen

Zahlreiche Disziplinen – von der Medizintechnik bis zur Umweltforschung – profitieren von den innovativen Verfahren und Produkten der Astroteilchenphysik.

27 Übersicht: Forschungsprojekte der Astroteilchenphysik mit deutscher Beteiligung

27 Impressum

28 Karte: Astroteilchenphysik-Zentren in Deutschland



Dr. Christian Spiering,
Vorsitzender des Komitees
für Astroteilchenphysik

Liebe Leserinnen und Leser,

in dieser Broschüre berichten wir über die Astroteilchenphysik, ein junges Forschungsfeld im Schnittpunkt von Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie. Wir möchten Ihnen eine spannende und dynamische Wissenschaftsrichtung vorstellen und Ihnen ein Gefühl für die starke Rolle Deutschlands in diesem Feld vermitteln. Und wir wünschen uns, dass dieses Heft ein wenig von der Begeisterung, die wir als Forscher verspüren, auf Sie überträgt.

Die Astroteilchenphysik lässt sich vielleicht am besten durch die wissenschaftlichen Fragen charakterisieren, die sie beantworten will:

- Wie entstand das Universum, und warum besteht es nur aus Materie und nicht zu gleichen Teilen aus Materie und Antimaterie?
- Woraus besteht die rätselhafte Dunkle Materie?
- Welche Rolle spielen Neutrinos für die Entwicklung des Universums?
- Was können wir mit Hilfe von Neutrinos über das Innere der Sonne und der Erde sowie über Sternexplosionen erfahren?
- Was ist der Ursprung der kosmischen Strahlung? Wie sieht die Landkarte des Universums bei höchsten Energien aus?
- Was können uns Gravitationswellen über kosmische Prozesse und über die Natur der Gravitationskraft sagen?

Bei der Suche nach Antworten sind wir in Teilbereichen schon ein gutes Stück vorangekommen. Zum Beispiel wurden Neutrinos von der Sonne und von einer weit entfernten Sternexplosion entdeckt – im Jahr 2002 gab es dafür sogar einen Nobelpreis. Bei anderen Fragen haben wir gute Gründe anzunehmen, dass wir von spektakulären Entdeckungen gar nicht mehr weit entfernt sind, etwa bei der Suche nach Gravitationswellen und nach der Dunklen Materie. Auch ist die Landkarte des Hochenergie-Universums mittlerweile nicht mehr völlig weiß. Da, wo wir die ersten Schritte in unbekanntes Territorium gesetzt haben, möchten wir jedoch dieses Gebiet schließlich vollständig erkunden. Dazu sind weit größere (und auch kostspieligere) Anlagen nötig. Über einige der großen Zukunftsprojekte berichten wir in diesem Heft.

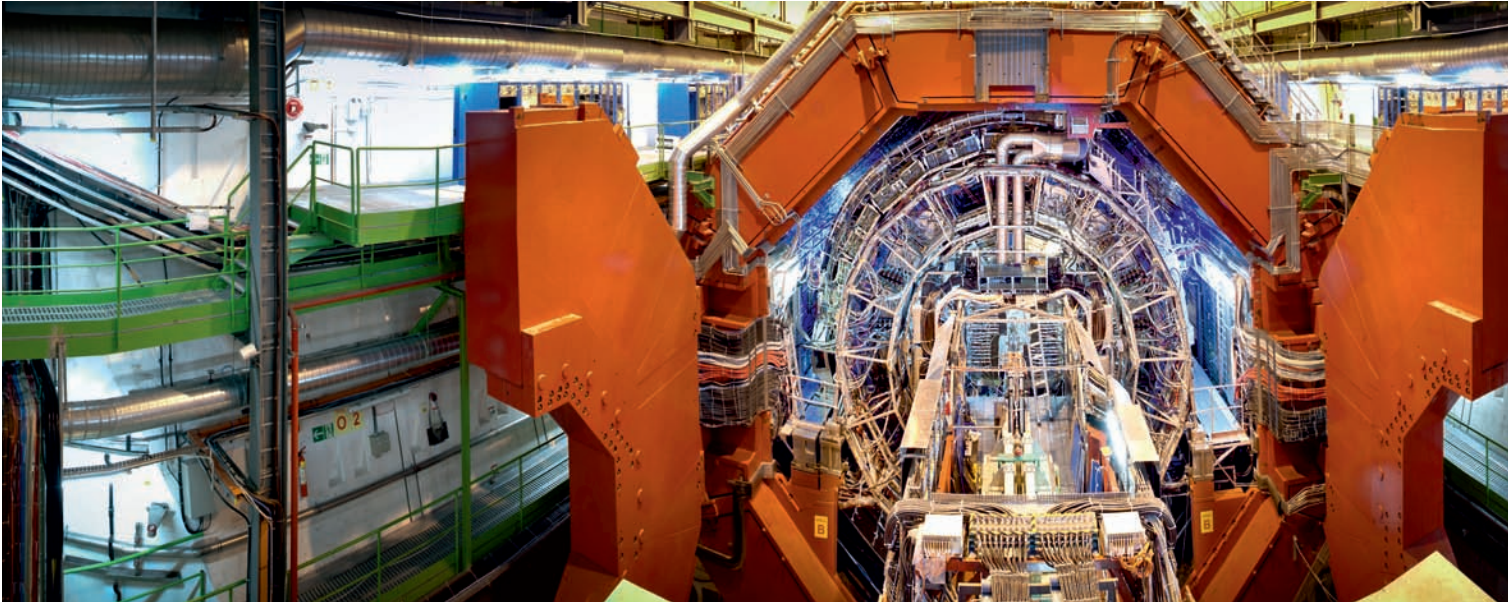
Astroteilchenphysik in Deutschland wird in erster Linie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Helmholtz-Gemeinschaft (HGF), die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert, also

durch Ihre Steuergelder. Ein Grund mehr, Ihnen zu schildern, wozu wir die Mittel verwenden. Grundlagenforschung und das Bestreben, die Natur zu verstehen, sind sicherlich die bestimmende Motivation der meisten Wissenschaftler, sich solchen Projekten zu widmen. Doch die neuen Erkenntnisse und die Entwicklung von neuer Hochtechnologie schaffen auch Fortschritt bei ganz praktischen Dingen, wie zum Beispiel für Umweltfragen oder medizinische Anwendungen. Davon können Sie sich auf den hinteren Heftseiten überzeugen. Zudem erfahren Sie, welche Rolle die Astroteilchenphysik für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses spielt.

Herausgeber dieser Broschüre ist das Komitee für Astroteilchenphysik (KAT; siehe www.kat-astroteilchen.de), das aus neun gewählten Vertreterinnen und Vertretern des Felds besteht. Dieses Gremium koordiniert die Zusammenarbeit der Astroteilchenphysiker/-innen in Deutschland. Die Zusammenarbeit hat durch die im Jahr 2011 etablierte Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik – kurz HAP – einen mächtigen Schub bekommen (siehe www.hap-astroteilchen.de und <http://twitter.com/astrohap>). Dafür erhalten die beiden größten Helmholtz-Institute auf unserem Gebiet (das Karlsruher Institut für Technologie KIT und das Deutsche Elektronensynchrotron DESY mit seinem Standort in Zeuthen bei Berlin), zusammen mit den assoziierten Universitäten, eine fünfjährige Zusatzförderung.

Bereits vor gut zehn Jahren hat das BMBF damit begonnen, eine eigene Förderlinie für die Astroteilchenphysik einzurichten, die als Verbundforschung bezeichnet wird. Den Universitätsgruppen eröffnete das die Möglichkeit, sich in Zusammenarbeit mit Helmholtz-Zentren oder Max-Planck-Instituten an längerfristigen großen Forschungsprojekten zu beteiligen und hierbei viele junge Leute an aktuellsten Problemen der Grundlagenforschung auszubilden. Die Zahl der Universitätsgruppen und ihrer Mitarbeiter ist seither rasant angestiegen, und ohne ihre frischen Ideen und Beiträge könnten viele Projekte gar nicht erst durchgeführt werden. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft ergänzt das Spektrum der Forschungsförderung insbesondere durch die Ermöglichung vieler kleinerer Projekte, die auf kürzerer Zeitskala durchgeführt werden.

A handwritten signature in dark ink, reading "Christian Spiering". The signature is written in a cursive, flowing style.



Mit dem ALICE-Detektor am Large Hadron Collider in Genf zeichnen Forscher die Kollisionstrümmer von Bleiatomen auf, die mit annähernd Lichtgeschwindigkeit aufeinandergeschossen werden. Dabei wird der Zustand des Universums simuliert, der eine zehnmilliardstel Sekunde nach dem Urknall herrschte.

Das ganz Große und das ganz Kleine

Astronomen und Teilchenphysiker untersuchen eigentlich entgegengesetzte Extreme: die einen das Allergrößte, die anderen das Allerkleinste. Nachdem sie aber in immer größere Entfernungen vorstießen, haben sie erkannt, dass ihre Gebiete aufs Engste miteinander verbunden sind.

Astronomen wollen das unvorstellbar große Weltall ergründen, Physiker nehmen die Welt des Allerkleinsten unter die Lupe. Während die einen mit ihren Teleskopen Sterne, Galaxien und riesige Galaxienhaufen bis in Entfernungen von Milliarden Lichtjahren beobachten, untersuchen die anderen mit Teilchendetektoren die elementaren Bausteine unserer Welt und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken.

Die Stufenleiter von den kleinsten bis zu den größten Dimensionen erstreckt sich dabei über 61 Größenordnungen: von 10^{-35} Metern, der so genannten Planck-Länge, unter-

halb deren die bekannten physikalischen Gesetze nicht mehr anwendbar sind, bis hin zum Durchmesser des beobachtbaren Teils des Universums, 10^{26} Meter. Oder, wenn man es in Zeitmaßstäben ausdrücken will: von 10^{-43} Sekunden nach dem hypothetischen Punkt null des Urknalls bis zur Gegenwart, 13,7 Milliarden Jahre später. Auch 61 Größenordnungen!

Trotz dieser Schwindel erregenden Spannweite der Dimensionen hängen das ganz Große und das ganz Kleine eng miteinander zusammen. Die Geschichte des Kosmos und das kosmische Inventar lassen sich nicht ohne die Teilchenphysik erklären. Und

irdische Experimentierstätten reichen nicht aus, die energiereichste kosmische Teilchenstrahlung zu erzeugen, die uns aus den Weiten des Weltalls erreicht. Wissenschaftler möchten das gesamte Universum als gigantisches Labor nutzen, um die kosmischen Beschleuniger zu verstehen, um die Gültigkeit grundlegender Gesetze der Physik zu überprüfen und um Regionen zu untersuchen, in denen Schwerkraft, Dichte und Temperatur extrem hoch sind – etwa dort, wo Sterne explodieren oder gar in sich zusammenfallen und dann ein Schwarzes Loch bilden.

Seit rund 80 Jahren ist bekannt, dass sich das Universum ausdehnt. Einst muss der



Der Stoff, aus dem wir Menschen sind

Im Urknall entstanden nur die leichten Elemente Wasserstoff und Helium sowie in geringen Mengen Lithium, Beryllium und Bor. Alle schwereren Elemente – also auch Kohlenstoff und Sauerstoff, Grundbausteine unseres Lebens – wurden erst später in Sternen produziert. Durch Supernovae wurden sie dann ins All geschleudert. Wir verdanken unsere Existenz dem Ende von Sternen!

Der Ursprung leichter Elemente im Urknall ist gut verstanden, die Elementsynthese in Sternen bis hin zum Eisen zumindest im Prinzip. Details zur Entstehung noch schwererer Elemente bis hin zum Uran sind dagegen weit weniger klar. Die Forscher gehen das Problem von mehreren Seiten an. Zunächst einmal verfeinern sie ihre Simulationen von Supernova-Explosionen. Zum anderen stellen sie die relevanten Kernprozesse an Schwerionen-Beschleunigern auf der Erde nach. Schließlich studieren sie mit Satellitendetektoren die Gammastrahlen, die beim Zerfall der frischgebackenen Elemente aus einem Supernova-Ausbruch emittiert werden. Solchen Fragen widmet sich das Gebiet der nuklearen Astrophysik.

Teil des Weltalls, den wir heute sehen, auf ein winziges Raumgebiet konzentriert und demzufolge extrem dicht und heiß gewesen sein. Von diesem Urknall ausgehend expandierte der Kosmos und kühlte sich ab. Dabei entstand nach und nach die heute bekannte Materie. Im mächtigsten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem Large Hadron Collider (LHC) bei Genf, können Physiker den Zustand des Universums bei weniger als einer milliardstel Sekunde nach dem Urknall künstlich herstellen. Wenn sie zum Beispiel im ringförmigen Tunnel des Beschleunigers die schweren Kerne von Bleiatomen aufeinanderschießen, dann entsteht am Ort der Kollision ein heißes Plasma aus Quarks und Gluonen, wie es das Universum im Alter von billionstel und milliardstel Sekunden erfüllte. Die Physiker studieren das Feuerwerk sekundärer Teilchen, die bei den Kollisionen entstehen: Dadurch können sie nachvollziehen, wie sich eine hunderttausendstel Sekunde nach dem Urknall die Quarks und Gluonen zu Protonen und Neutronen verbanden, also zu jenen Teilchen, aus denen sich in einem nachfolgenden Schritt die Atomkerne bildeten.

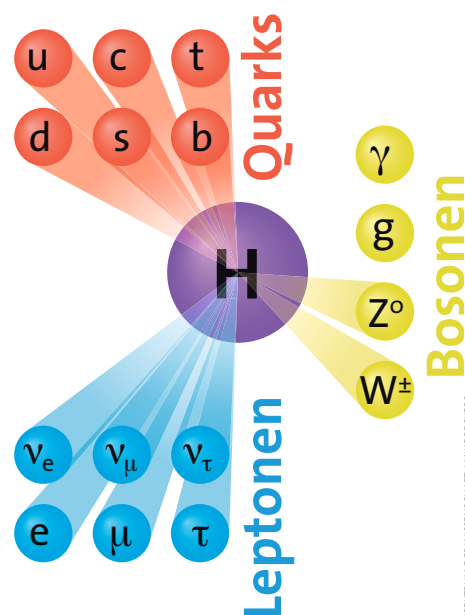
Die beiden gewichtigsten Gründe für den Bau des LHC betrafen jedoch die Theorie, mit der sich seit vier Jahrzehnten die Ergebnisse sämtlicher teilchenphysikalischen Experimente präzise erklären lassen: das Standardmodell der Teilchenphysik. Einerseits fehlt der Schlussstein dieses theoretischen Gebäudes noch, das viel zitierte Higgs-Teilchen. Die Experimente am LHC sollen es

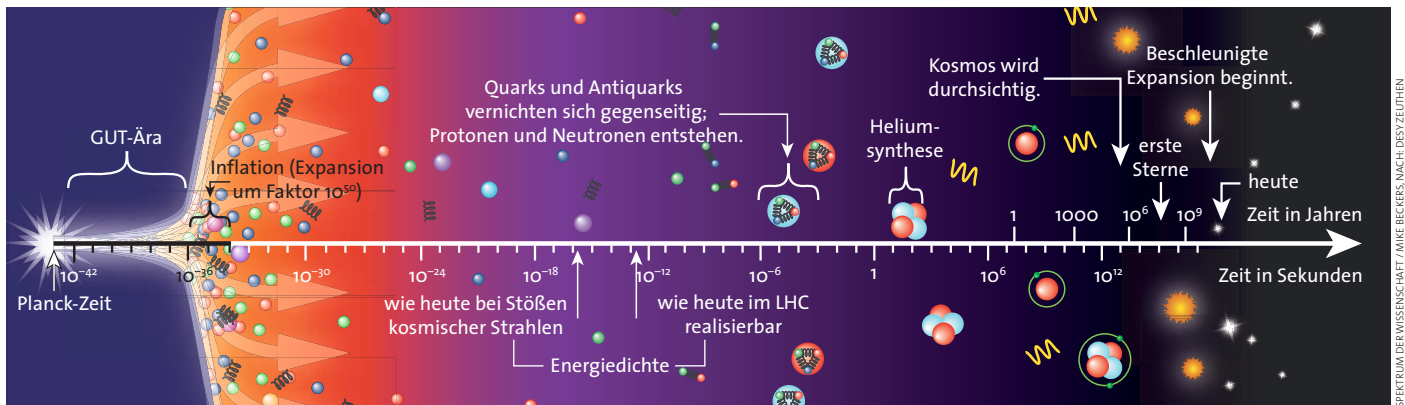
nachweisen. Andererseits glauben die Physiker aber, dass selbst das Standardmodell noch keine abschließende Beschreibung der Welt ist. Sie wollen deshalb einen Schritt darüber hinausgehen. Dabei treffen Kosmologie und Teilchenphysik erneut aufeinander. Wenn Elementarteilchen miteinander in Wechselwirkung treten, spielen drei der vier Grundkräfte im Universum eine Rolle. (Die vierte Grundkraft, die Schwerkraft oder Gravitation, macht sich nur über makroskopische Distanzen hinweg bemerkbar.) Theoretische Überlegungen sprechen dafür, dass diese drei Kräfte kurz nach dem Urknall gar nicht unterscheidbar, sondern noch zu einer Art Urkraft verschmolzen waren. Genau die-

sen Zustand soll eines Tages eine »Große Vereinheitlichte Theorie« (englisch: Grand Unified Theory, GUT) beschreiben und auch erklären, wie diese Urkraft schließlich doch in die Grundkräfte zerfiel.

Noch gibt es zahlreiche Kandidaten für eine solche Theorie jenseits des Standardmodells. Vieles spricht dafür, dass sie supersymmetrisch sein muss. Den so genannten SUSY-Theorien zufolge gibt es für jede Teilchensorte, die wir kennen, eine noch unbekannte Partnersorte. Die SUSY-Zwillinge sind einander in fast jeder Hinsicht gleich; sie unterscheiden sich nur in ihrer Masse und in ihrem Spin, also in ihrem inneren Drehimpuls.

Das Standardmodell der Teilchenphysik: Sechs Quarks und sechs Leptonen bilden die Grundbausteine der Natur. Protonen zum Beispiel bestehen aus zwei u-Quarks und einem d-Quark, Neutronen aus zwei d-Quarks und einem u-Quark. Das bekannteste Lepton ist das Elektron (e). Von den geheimnisvollsten Leptonen, den Neutrinos (ν), gibt es drei Sorten: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Die Kräfte zwischen den Teilchen werden durch den Austausch von Bosonen vermittelt: Photonen (γ) für die elektromagnetische Kraft, Gluonen (g) für die starke Kraft, W- und Z-Teilchen für die schwache Kraft. Das Higgs-Teilchen (H) ist dafür verantwortlich, dass W- und Z-Teilchen, Leptonen und Quarks eine Masse haben. Sein Fund würde das Standardmodell abschließen.





Die Entwicklung des Universums: Was in den ersten 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall (Planck-Zeit) geschah, lässt sich physikalisch noch nicht beschreiben. In der darauf folgenden GUT-Ära (Ära der Großen Vereinheitlichten Theorien) waren drei der vier Fundamentalkräfte (elektromagnetische, starke und schwache Kraft) in einer »Urkraft« vereint. Von 10^{-36} bis 10^{-34} Sekunden blähte sich das Universum explosionsartig um 50 Größenordnungen auf (»Inflation«). Quarks und Antiquarks vernichteten sich nach etwa 10^{-6} Sekunden; die

wenigen »überlebenden« Quarks kumpten zu Protonen und Neutronen zusammen. Die Kerne der leichtesten Elemente (vor allem Helium) bildeten sich etwa eine Minute später. Erst nach 300 000 Jahren war das Universum so kühl, dass die freien Elektronen von den Kernen eingefangen wurden, und es wurde durchsichtig. Sterne erzeugten nach einigen hundert Millionen Jahren schwere Elemente. Als das Universum halb so alt war wie heute, begann sich die Expansion zu beschleunigen: der erste Hinweis auf »Dunkle Energie«.

Seit zwei Jahrzehnten zieht keine Idee die Teilchenphysiker mehr in ihren Bann als die Supersymmetrie. Einer der Gründe für ihre Begeisterung: SUSY könnte endlich erklären, woraus die Dunkle Materie besteht, über die Astronomen seit den 1930er Jahren rätseln.

Schritt für Schritt haben die Astronomen nämlich herausgefunden, dass der größte Teil der Materie im Universum unsichtbar ist. In unseren Teleskopen sehen wir zwar Sterne und Galaxien und sogar den kosmischen Staub und das Gas, das vielerorts den Raum erfüllt. Doch es scheint dort noch etwas anderes zu geben, und davon sogar ziemlich viel: Dunkle Materie! Diese unsichtbare Materie macht sich durch ihre Gravitationskraft bemerkbar. Ohne ihre Anziehungskraft würden Galaxienhaufen auseinanderstieben. Ohne Dunkle Materie würden auch die Außenbezirke unserer Galaxis viel langsamer rotieren, als sie es tatsächlich

tun. Die Astronomen schätzen, dass 90 Prozent unserer Galaxis aus Dunkler Materie bestehen.

Dies ist aber noch nicht einmal das größte Rätsel, dem sich die Astronomen gegenübersehen. Vor 14 Jahren fanden sie heraus, dass der Löwenanteil des Universums bislang praktisch übersehen wurde. Zwei Arbeitsgruppen unter Leitung der Physiker Saul Perlmutter in den USA sowie Brian Schmidt und Adam Riess in Australien wollten 1998 messen, wie viel die Ausdehnung des Universums von ihrem ursprünglichen Schwung verliert. Paradoxerweise stellten sie aber genau das Gegenteil fest: Das Universum dehnt sich seit etwa sieben Milliarden Jahren mit stetig anwachsender Geschwindigkeit aus. Ein klarer Befund, für den die drei 2011 den Physik-Nobelpreis erhielten. Eine überzeugende Erklärung für den Effekt steht bisher noch aus. Allerdings, um mit Goethe zu sprechen: »Denn eben wo Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein.« Hier heißt das Wort »Dunkle Energie«. Es scheint in der Tat so, als wenn eine unbekannte Energie das Universum wie einen Hefeteig auftreibt.

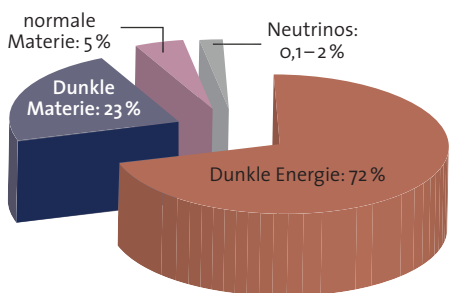
Wenn man die Dunkle Energie in die Bilanz miteinbezieht und nun die Rechnung für das gesamte Universum aufmacht, dann kommt man für die »normale« Materie nur noch auf magere 5 Prozent. Auf das Konto

von Dunkler Materie gehen immerhin 23 Prozent. Der große Rest, nämlich 72 Prozent, muss aus Dunkler Energie bestehen.

Was die Dunkle Energie betrifft, so haben die Teilchenphysiker kaum etwas aus ihrem reichhaltigen Arsenal an exotischen Teilchen und Kräften anzubieten, was dieses Phänomen erklären könnte.

Dunkle Materie aus WIMPs?

Anders ist es bei der Suche nach Dunkler Materie. Sie ist aufs Engste mit der Suche nach neuen Teilchen verknüpft. Diese müssen eine Masse haben, weil sie sich ja gerade durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen. Außerdem müssen sie elektrisch neutral sein, dürfen nur ganz schwach mit normaler Materie in Wechselwirkung treten und Licht weder aussenden noch reflektieren – sonst wären sie nicht »dunkel«. Neutrinos haben zwar einige der gewünschten Eigenschaften: Sie sind neutral und wechselwirken nur schwach mit Materie. Doch obwohl sie die häufigsten Teilchen im Universum sind, tragen sie höchstens zwei Prozent zu der Gesamtmasse bei. Gegenwärtig gelten darum WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, schwach wechselwirkende massereiche Teilchen) als aussichtsreichste Kandidaten. Die WIMP-Masse dürfte irgendwo zwischen dem 10- und 1000-Fachen der Protonenmasse liegen. Genau solche Teilchen werden von den



Das kosmische Inventar

SUSY-Theorien vorhergesagt. Weltweit sind Forscher daher mit immer präziseren Instrumenten auf der Suche nach ihnen (siehe Beitrag ab S. 8). Es sind aber auch weitere Teilchenkandidaten im Rennen, die unter anderem auf so kryptische Namen wie Axion, Q-Ball oder WIMPzilla getauft wurden.

WIMPs müssten sich, ebenso wie Neutrinos, auf Grund ihrer schwachen Wechselwirkung sehr früh vom Rest der Materie »entkoppelt«, also praktisch nicht mehr mit ihr reagiert haben. Dazu musste die Dichte der Urmaterie einen gewissen Wert unterschritten haben, und dieser Zeitpunkt setzte für WIMPs bei etwa 10^{-10} Sekunden ein, für Neutrinos bei etwa einer hundertstel Sekunde.

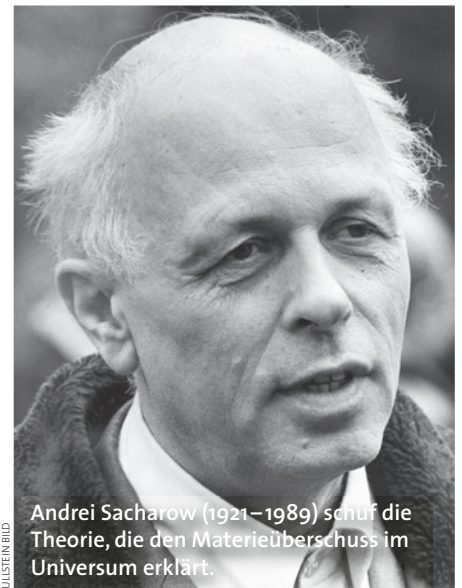
Wo ist die Antimaterie?

Im Jahr 1930 vermutete Paul Dirac, ein Physiker an der University of Cambridge in England, dass zu jedem Teilchen ein so genanntes Antiteilchen existieren müsse. Es würde genau dieselbe Masse haben, aber die entgegengesetzte Ladung. Tatsächlich: Zwei Jahre später wurde das Positron entdeckt – das positiv geladene Antiteilchen des negativ geladenen Elektrons. Mittlerweile kennt man die Antiteilchen von praktisch jedem Elementarteilchen. Sogar ganze Antiatome haben Forscher schon hergestellt. Erstmals gelang dies 1995 am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN, das auch die Heimat des LHC ist. In diesen Atomen kreist nicht ein Elektron um ein Proton, sondern ein Positron um ein Antiproton.

Die Naturgesetze behandeln Materie und Antimaterie gleich. Darum müsste nach dem Urknall eigentlich genauso viel Materie wie Antimaterie vorhanden gewesen sein. Aber bis jetzt hat man trotz aller Anstrengungen keine nennenswerten Mengen von Antimaterie im Weltraum gefunden. Gegenwärtig erforscht das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) auf der Internationalen Raumstation (ISS) die wenigen Antiteilchen, die vorwiegend in Reaktionen der kosmischen Strahlung entstehen.

Wo ist die Antimaterie also geblieben? Andrei Sacharow (1921–1989), weithin bekannt als Vater der sowjetischen Wasserstoffbombe sowie als späterer Bürgerrechtler und Friedensnobelpreisträger, fand 1967 erstmals eine mögliche Antwort. Sacharow nahm an, dass im Universum anfangs Materie und Antimaterie in gleichen Mengen vorhanden waren. Durch eine winzige Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie entwickelte sich dieser Anfangszustand in einen Zustand, bei dem eine Winzigkeit mehr Materie vorhanden war. Während sich das Universum ausdehnte und dabei abkühlte, trafen Materie und Antimaterie aufeinander und zerstrahlten in pure Energie. Übrig blieb nur der kleine Materieüberschuss. Dieser, so Sacharow, sei der Stoff, aus dem wir gemacht sind: Protonen, Neutronen, Elektronen.

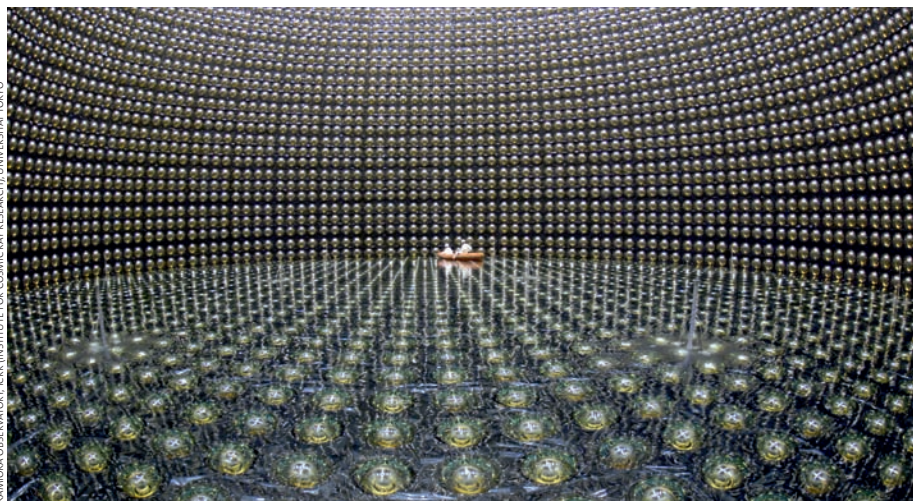
Wie es zu der Symmetriebrechung gekommen sein könnte, wird noch untersucht. Eine wichtige Rolle haben möglicherweise



Andrei Sacharow (1921–1989) schuf die Theorie, die den Materieüberschuss im Universum erklärt.

Neutrinos gespielt (siehe Beitrag ab S. 10). Aber auch Protonen bieten eine denkbare Erklärung. Sacharow erkannte, dass seine Erklärung nur funktioniert, wenn Protonen, die Grundbausteine des Kosmos, nicht ewig existieren, sondern eines Tages zerfallen. Genau dies sagen auch die bisherigen Ansätze für eine Große Vereinheitlichte Theorie vorher. Allerdings soll die Halbwertszeit des Zerfalls mindestens 10^{31} Jahre betragen – was 10^{21} -mal länger wäre als das bisherige Alter des Universums. Anders gesagt: Protonen zerfallen extrem selten. Will man messen, wie stabil Protonen sind, muss man also sehr viele davon während einer sehr langen Zeit beobachten. Außerdem müssen sich die Apparaturen sehr tief unter der Erde befinden, um sie von der kosmischen Strahlung abzuschirmen. Die nämlich zeigt sich als störender Effekt in den Messergebnissen.

Solche Experimente führen Forscher tatsächlich durch. Im japanischen Detektor Super-Kamiokande werden 50 000 Tonnen Wasser, die 10^{33} Protonen enthalten, permanent mit Detektoren überwacht. Diese müssten etwa 100 Zerfälle pro Jahr beobachten. Bis jetzt sind die Physiker allerdings noch nicht fündig geworden, sondern haben lediglich die untere Grenze für die Lebensdauer des Protons auf stattliche 10^{34} Jahre hochgeschraubt. Weltweit arbeitet man daher an noch größeren und empfindlicheren Detektoren. Einige SUSY-Theorien sagen nämlich eine Halbwertszeit von 10^{35} Jahren voraus. Hätten sie Recht, dann läge eine Jahrhundertentdeckung in Reichweite.



Der Superkamiokande-Detektor in einer japanischen Zinkmine: 11 000 an den Wänden befestigte Sensoren fahnden nach Lichtblitzen, die in 50 000 Tonnen hochreinem Wasser durch Protonzerfälle oder durch Neutrinoereaktionen erzeugt werden.

Die Jagd nach der Dunklen Materie

Die normale Materie ist wie ein Schiff, das auf einem Ozean von Dunkler Materie segelt. Noch ist unklar, woraus diese Substanz besteht. Eine neue Generation hochempfindlicher Detektoren könnte in den nächsten Jahren das Rätsel lösen.

Wir glauben heute, dass gewöhnliche Atome, wie wir sie aus unseren Schulbüchern kennen, nur fünf Prozent des kosmischen Inventars ausmachen. Weitere 23 Prozent entfallen auf die geheimnisvolle Dunkle Materie, die für Teleskope unsichtbar ist, weil sie Licht weder aussendet noch reflektiert. Dunkle Materie macht sich nur durch ihre Gravitationswirkung auf die sichtbare gewöhnliche Materie bemerkbar.

Woraus könnte diese rätselhafte Substanz bestehen? Aus einem unbekannten Teilchen? Wie im vorigen Kapitel erwähnt, haben Physiker eine Reihe von Kandidaten anzu-bieten. Gegenwärtig favorisiert werden die WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles,

WIMP-Signale vortäuschen könnte. Auch die zum Detektorbau verwendeten Materialien müssen höchste Reinheit haben. Ein einziger Fingerabdruck auf einem Sensor würde alles zunichtemachen.

■ **Indirekte Methode:** Treffen irgendwo im Weltraum WIMPs aufeinander, vernichten sie sich gegenseitig. Dabei entstehen leichtere Endprodukte wie Neutrinos, Gammastrahlen oder Antiteilchen, die wir als »Marker« mit unseren Detektoren nachweisen können. Solche Zusammenstöße von WIMPs geschehen vermutlich dort besonders häufig, wo die Schwerkraft im Lauf der Jahr-milliarden viele WIMPs eingesammelt hat – beispielsweise im Zentrum der Sonne oder im Zentralbereich der Milchstraße. Einen der

Die Kombination verschiedener Suchstrategien bringt Physiker auf die Spur der Dunklen Materie

schwach wechselwirkende massereiche Teilchen). Doch wie lassen sie sich nachweisen? Wie können wir das Unsichtbare sichtbar machen? Dazu gibt es drei Strategien:

■ **Direkte Methode:** Man weist die Signale nach, die entstehen, wenn ein WIMP auf einen Atomkern trifft und ihn leicht anschubst. WIMPs reagieren jedoch ähnlich selten wie Neutrinos, außerdem sind die Signale winzig. Darum befinden sich die Detektoren tief unter der Erde, wo die kosmische Strahlung als Störquelle weitgehend ausgeschlossen ist. Zusätzlich muss die radioaktive Strahlung des umgebenden Gesteins penibel abgeschirmt werden, weil sie

Detektoren, die solche Teilchen nachweisen könnten, hat der Spaceshuttle Endeavour am 16. Mai 2011 bei seinem letzten Flug auf die Internationale Raumstation gebracht. Das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) untersucht dort nicht nur die Zusammensetzung der kosmischen Teilchen, die auf den Detektor treffen, sondern hält auch nach Antiteilchen Ausschau, die bei der Zerstrahlung von WIMPs entstehen.

■ **Künstliche Erzeugung:** Der Theorie zufolge bilden sich supersymmetrische WIMPs auch dann, wenn im Large Hadron Collider (LHC) bei Genf Protonen mit höchster Energie aufeinandergeschossen werden.



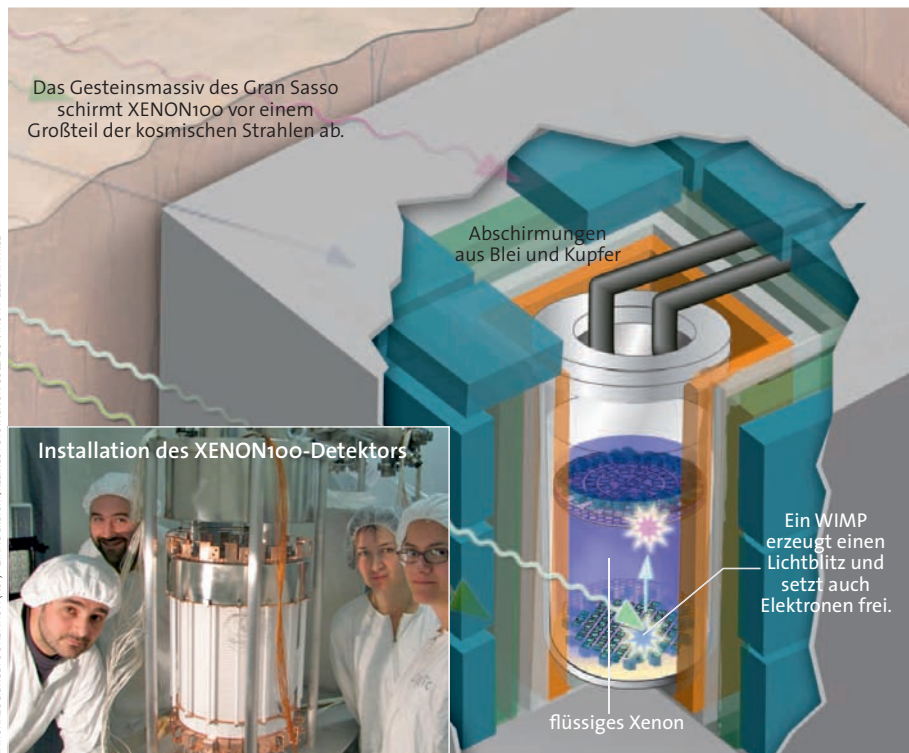
Endgültige Klarheit über den Charakter der Dunklen Materie erhoffen sich die Physiker von der Kombination aller drei Methoden.

Direkte Suche in Untergrundlabors

Europas größtes unterirdisches Labor befindet sich in den Abruzzen, 1500 Meter unter dem Gran-Sasso-Massiv. Dort sucht eine italienische Gruppe seit 14 Jahren mit ihrem Detektor DAMA (Dark MATter) nach WIMPs. Sie stellte fest, dass die in hochreinen Kristallen aus Natriumjodid registrierten Lichtsignale ihre Häufigkeit im Jahresrhythmus verändern: etwas mehr im Sommer, etwas weniger im Winter. Das ist genau das, was man für WIMP-Reaktionen erwartet. Denn die Erde rotiert um die Sonne und verändert damit im Jahresrhythmus ihre Relativgeschwindigkeit zu dem »Ozean« aus Dunkler Materie, in dem unsere Galaxis schwimmt. Ist die erste Beute also schon im Netz?

Vielleicht. Vielleicht auch nicht. Denn so spannend dieses Ergebnis ist – es ist kaum zu vereinen mit den Negativresultaten anderer Detektoren, die mit alternativen Methoden inzwischen weit empfindlicher geworden sind als DAMA.

Die Empfindlichkeit der Experimente zur Suche nach Dunkler Materie hat sich in den letzten fünf Jahren etwa verdreißigfacht. Am weitesten ist dabei eine Anordnung vorgeprescht, bei der das WIMP über einen kleinen Lichtblitz nachgewiesen wird, der bei seinem Aufprall auf flüssiges Xenon entsteht. Zusätzlich werden durch Ionisation auch Elektronen freigesetzt. Aus der Kombination der beiden Messwerte – Licht



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PHYSIK / RAFAEL ELANG

Im CRESST-Experiment werden Detektoren aus hochreinen Kristallen eingesetzt.

und Ladung – kann man weit besser als bei DAMA (das nur Licht misst) echte WIMP-Signale von vermeintlichen unterscheiden. Als Material werden 100 Kilogramm flüssiges Xenon genutzt. Daher heißt das Experiment, das sich ebenfalls im Gran-Sasso-Labor befindet, XENON100.

Bislang hat XENON100 noch keine WIMP-Kandidaten registriert. Der Detektor stößt aber inzwischen mit seinen Ausschlussgrenzen in jene Region vor, die von den Supersymmetrie-Theorien für WIMPs vorhergesagt wird. Eine Entdeckung kann also ganz nahe sein! Das XENON-Team arbeitet bereits an einem zehnmal so großen Detektor namens XENON1T (für: eine Tonne), der 2015 in Betrieb gehen soll. Deutsche Gruppen lei-

ten dabei, nach ihren US-amerikanischen Kollegen, den größten Beitrag.

Einen anderen Weg als XENON schlagen die so genannten kryogenen Experimente zur WIMP-Suche ein. Dabei werden gewisse Kristalle bis fast auf den absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt – auf zehn Millikelvin, das sind minus 273,14 Grad Celsius. Dann sind die Atome in ihren Positionen regelrecht eingefroren. Stößt ein WIMP auf einen solchen tiefgekühlten Kristall, regt es ihn zu winzigen Schwingungen an, die sich mit empfindlichen Detektoren als Temperaturanstieg nachweisen lassen. Registriert man zwei verschiedene Messgrößen – den Temperatursprung zusammen mit einem Lichtblitz oder, alternativ, einem Ladungs-

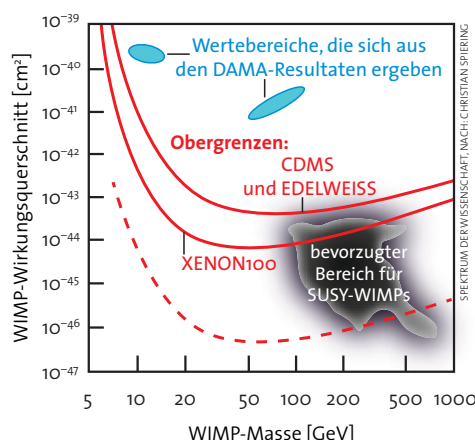
signal –, sind WIMPs gut von vermeintlichen Signalen zu unterscheiden. Das CRESST-Experiment im Gran-Sasso-Labor weist Temperatur- und Lichtsignale in Kristallen aus Kalziumwolframat nach. Zwei weitere Detektoren, EDELWEISS in den französischen Alpen sowie ein US-amerikanisches Experiment, setzen dagegen auf den Nachweis von Temperatur- und Ladungssignalen in Germaniumkristallen. Deutsche Forscher sind sowohl an CRESST wie auch an EDELWEISS beteiligt.

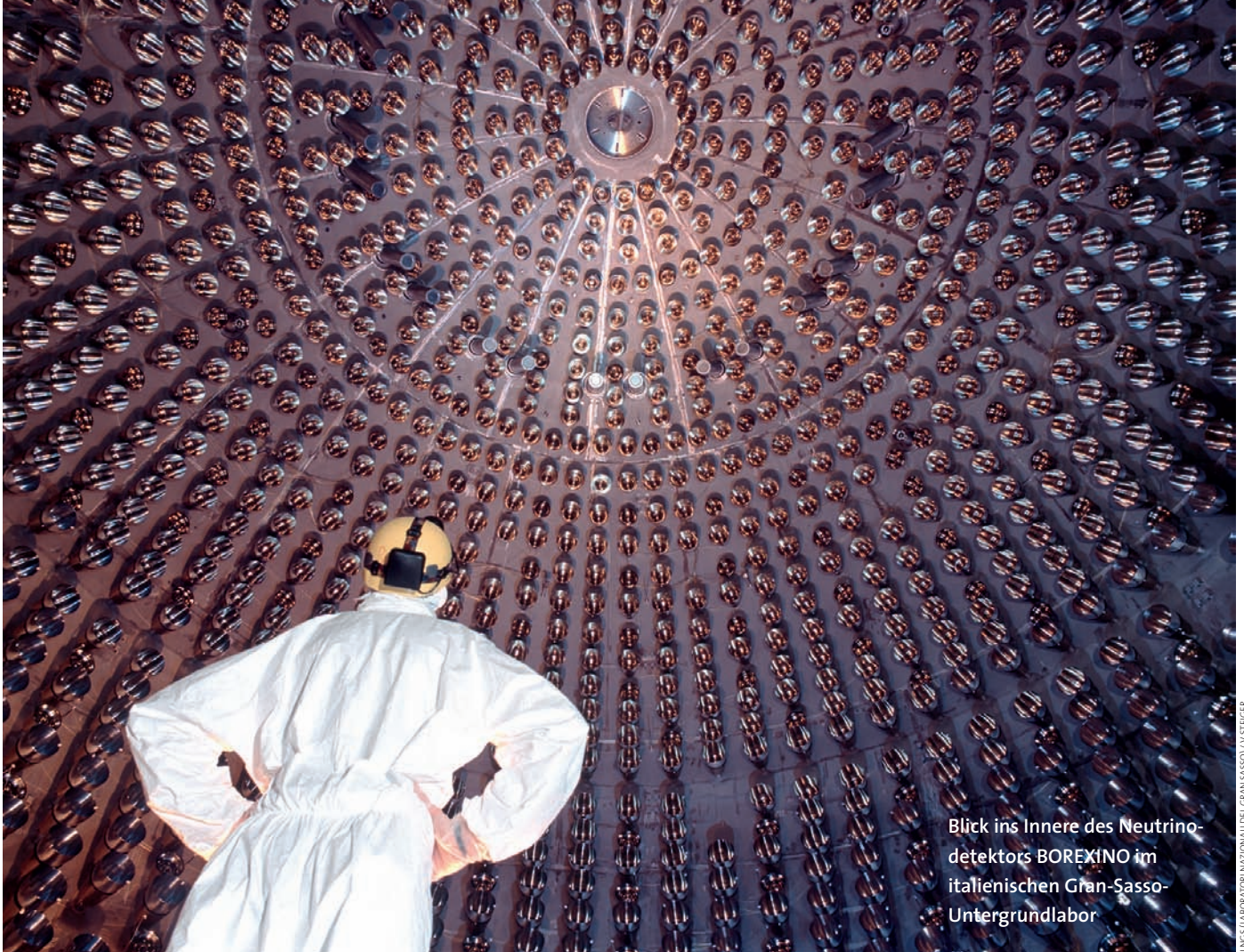
Die Germaniumdetektoren wurden noch nicht fündig, CRESST dagegen hat zwei Dutzend Signale registriert, die verdächtig nach WIMP-Ereignissen aussehen und sich nicht recht durch andere Effekte erklären lassen. Mit einer verbesserten Anordnung will die CRESST-Gruppe die Unklarheiten ausräumen.

In Zukunft wollen jedoch CRESST und EDELWEISS an einem Strang ziehen. Die gemeinsame Detektormasse der beiden Experimente beträgt derzeit einige Dutzend Kilogramm. Ab 2015 wollen die Teams schrittweise den Ein-Tonnen-Detektor EURECA errichten (European Underground Rare Event Calorimeter Array). Andere Gruppen in Europa, den USA, Japan und China planen ebenfalls Anlagen von einer oder gar mehreren Tonnen Detektormasse.

Damit dürfte noch in diesem Jahrzehnt die Stunde der Wahrheit schlagen: Wenn WIMPs wirklich existieren, werden wir sie finden. Ansonsten wankt unser Theoriegebäude, und wir müssen neue Erklärungen für die geheimnisvolle Dunkle Materie finden. So oder so steht uns eine spannende Dekade bevor!

Die Reaktionswahrscheinlichkeit der WIMPs (»Wirkungsquerschnitt«, vertikale Achse) und ihre Masse (horizontale Achse) sind noch unbekannt. DAMA hat die Werte zwar schon eingegrenzt (blau); andere Experimente wie CDMS, EDELWEISS und XENON100 haben jedoch alle Parameterkombinationen ausgeschlossen – auch die von DAMA vorhergesagten –, die oberhalb der durchgezogenen Kurven liegen. Die neuen Ein-Tonnen-Detektoren werden bald auch den von SUSY-Modellen vorhergesagten Parameterbereich ausloten (gestrichelte Kurve).





Blick ins Innere des Neutrino-
detektors BOREXINO im
italienischen Gran-Sasso-
Untergrundlabor

L'ES (LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO) / A. STEIGER

Neutrinos – Geisterteilchen mit kosmischer Botschaft

Billionen von Neutrinos durchqueren in jeder Sekunde unbemerkt unseren Körper. Mit nahezu Lichtgeschwindigkeit rasen sie durch den Raum, ohne Spuren zu hinterlassen. Aber so geisterhaft diese Teilchen auch sein mögen: Sie stellen einen einzigartigen Schlüssel zu grundlegenden Fragen des Kosmos dar.

Die Geschichte der Neutrinos begann mit einem Überraschungswurf. Im Jahr 1930 sagte der Physiker und spätere Nobelpreisträger Wolfgang Pauli ihre Existenz voraus, bekannte aber gleichzeitig: »Ich habe etwas Schreckliches getan: Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann.« Atomphysiker waren beim radioaktiven Zerfall bestimmter Elemente auf eine Unge-

heimtheit gestoßen. Wenn ein Atomkern zerfiel, besaß jedes der Bruchstücke eine bestimmte Energie. Doch die Summe der Teilenergien war stets geringer als die Gesamtenergie des Ausgangskerns. Das war jedoch ein Ding der Unmöglichkeit, denn Energie kann nicht einfach verschwinden. Zur Lösung des Dilemmas vermutete Pauli, dass ein unsichtbares, bis dahin unbekanntes Teilchen – das Neutrino – diese fehlende Energie bei dem Zerfall davontrug.

Zum Glück irrte sich Pauli in der Annahme, Neutrinos seien nicht nachweisbar. In Kernreaktoren entstehen beim radioaktiven Zerfall sehr viele dieser Teilchen, die dann in die Umgebung hinausschießen. Der starke Neutrinofluss bot die Möglichkeit, zumindest einige wenige von ihnen aufzuspüren. Dieses Kunststück gelang 1956 am Kernreaktor Savannah River in den USA. Aus dem Fluss von 10^{24} Neutrinos löste ein knappes Dutzend ein Signal in dem Nachweisinstru-

Die Sonne im »Licht« der Neutrinos. Über mehrere Jahre registrierten Forscher mit dem Superkamiokande-Detektor in Japan solare Neutrinos und zeichneten die Richtung ihrer Herkunft auf. Von der Erde aus gesehen liegt die Sonnenscheibe innerhalb eines Winkels von 0,5 Grad. Da die Winkelgenauigkeit für diese Neutrinos sehr gering ist, ist das Kamio-kande-Bild der Sonne (weißer und gelber Bereich) über mehr als 20 Grad verschmiert. Die wichtige Information steckt allerdings nicht in der genauen Richtung, sondern in Anzahl und Energie der Neutrinos.

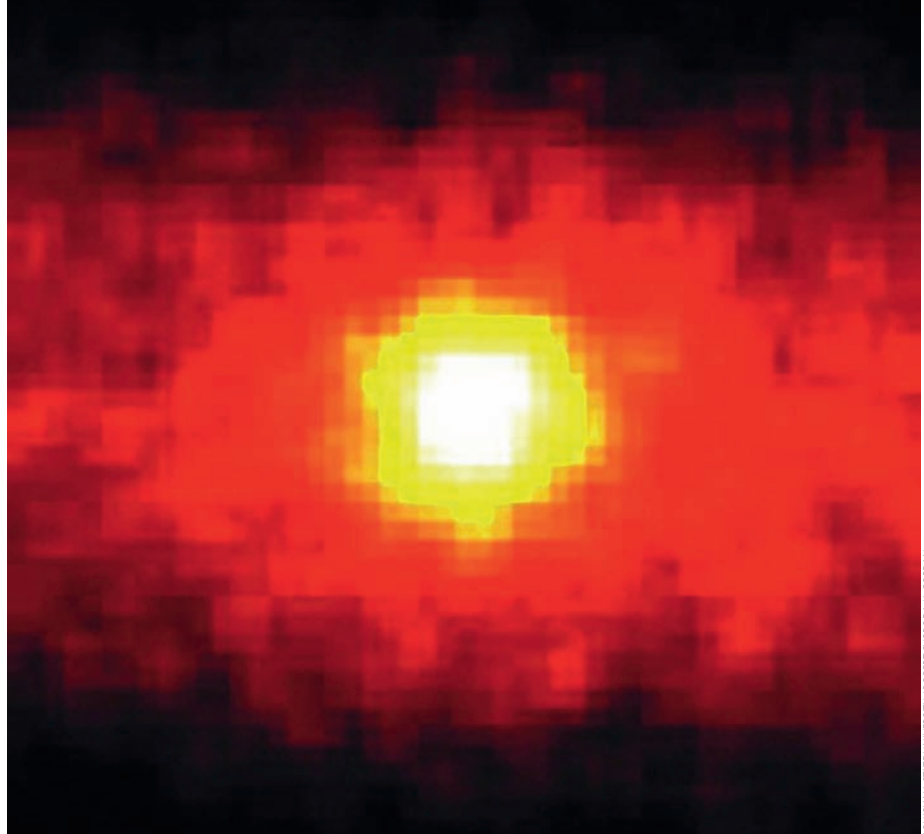
ment aus. Der US-amerikanische Forscher Frederick Reines erhielt für den Nachweis 1995 den Physik-Nobelpreis.

Heute wissen wir, dass es drei Neutrino-sorten gibt: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Sie sind die leichtesten bekannten Elementarteilchen. Wie groß ihre Massen genau sind, wissen Physiker nicht. Sie konnten nur ermitteln, dass sie weniger als vier Millionstel der Elektronenmasse betragen.

Obwohl Neutrinos kaum mit Materie reagieren, spielen sie eine wesentliche Rolle für die Entwicklung des Universums und für unsere eigene Existenz. Sekundenbruchteile nach dem Urknall trugen Neutrinos möglicherweise dazu bei, dass von dieser Explosion nicht nur reine Energie, sondern auch Materie übrig geblieben ist. Einige Sekunden später spielten sie eine wichtige Rolle bei der Entstehung der ersten, leichten Elemente. Und schließlich sorgen Neutrinos nach heu-



Wolfgang Pauli (1900–1958) sagte 1930 die Existenz von Neutrinos voraus.



LOUISIANA STATE UNIVERSITY / ROBERT SOBODA, K. GORDAN

tigem Wissen dafür, dass massereiche Sterne am Ende ihres Lebens als Supernovae explodieren. Dadurch werden schwere Elemente – wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff – in den Weltraum geschleudert, wo sie für die Entstehung von Planeten und Lebewesen zur Verfügung stehen. Ohne Supernovae könnte das Eisen, das im Innern von Sternen entsteht, niemals nach außen gelangen. Ohne Eisen wiederum gäbe es kein Hämoglobin, das für den Sauerstofftransport in unserem Blut unerlässlich ist.

Besonders hervorgetan haben sich Neutrinos als kosmische Boten. Indem sie als einzige Teilchen ungehindert aus den heißen Zentralbereichen von Sternen nach außen dringen, liefern sie uns entscheidende Informationen über die dort ablaufende Synthese von chemischen Elementen.

Kosmische Botenteilchen

Die nächstgelegene Neutrinoquelle im Universum ist die Sonne. In ihrem Zentrum finden Kernreaktionen statt, bei denen enorme Mengen dieser Teilchen frei werden. In jeder Sekunde durchqueren auf der Erde etwa 60 Milliarden solare Neutrinos eine Fläche von der Größe eines Daumennagels. Dennoch stößt kaum ein Dutzend von ihnen mit einem Atom im Erdinnern zusammen. Der Rest fliegt ungestört durch unseren Planeten hindurch.

So paradox es klingt, aber gerade deshalb eignen sich Neutrinos als kosmische Boten.

Sie können fast ungehindert die dicksten Materieschichten durchdringen und aus Regionen entweichen, in die wir nicht hineinschauen können – zum Beispiel aus dem Kern der Sonne. Lichtteilchen, die im Zentralbereich entstehen, prallen ständig auf Atome und benötigen deshalb mehr als 100 000 Jahre, bis sie an die Oberfläche gelangen. Neutrinos hingegen durchqueren dieselbe Strecke nahezu ungehindert in gut zwei Sekunden.

Der erste Nachweis von Sonnenneutrinos gelang Anfang der 1970er Jahre Raymond Davis vom Brookhaven National Laboratory. Allerdings maß Davis nur etwa ein Drittel der berechneten Neutrinorate. Dieser Befund ließ Zweifel sowohl an der Messung wie auch an dem Modell über die Energieerzeugung im Innern der Sonne aufkommen. Andere Experimente bestätigten jedoch Davis' Messungen, so dass man die Lösung des Rätsels in einer Neutrinoeigenschaft suchte.

Schon 1957 hatte Bruno Pontecorvo vom Institut für Kernforschung in Dubna (damalige Sowjetunion) angenommen, dass sich die unterschiedlichen Neutrinosorten ineinander umwandeln können. Physiker sprechen vom Oszillieren zwischen den unterschiedlichen Identitäten. Davis konnte mit seinem Detektor ausschließlich Elektron-Neutrinos nachweisen, die tatsächlich in großer Zahl im Zentrum der Sonne frei werden. Auf dem Weg zur Erde wandelt sich aber nach Pontecorvos Theorie der größte Teil



LAGUNA im Größenvergleich mit der Münchner Frauenkirche. Der Detektor könnte mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit, flüssigem Argon oder Wasser gefüllt sein. Die erste dieser Varianten ist im Bild links zu sehen. Sie würde tief unter der Erde in einer 100 Meter hohen Kaverne stehen.

von ihnen in die anderen beiden Sorten um. Und für diese war Davis' Detektor blind. Es sollte noch bis zum Jahr 2001 dauern, bis die Oszillationserklärung für das solare Neutrino Defizit hieb- und stichfest war und alle anderen Hypothesen ausgeschlossen werden konnten.

Raymond Davis erhielt 2002 den Physik-Nobelpreis zusammen mit Masatoshi Koshiba von der Tokai-Universität in Tokio, der mit seinem Kamiokande-Detektor ebenfalls solare Neutrinos gemessen hatte. Darüber hinaus war Koshiba jedoch noch eine spektakuläre Entdeckung gelungen: Am 23. Februar 1987 wies er mit Kamiokande zwölf Neutrinos nach, die bei der Explosion eines Sterns in der Großen Magellanschen Wolke frei geworden waren. Die Neutrinos dieser Supernova bestätigten eindrucksvoll die Vorstellungen über die Explosion von Sternen am Ende ihrer Entwicklung. Der 23. Februar 1987 wird daher häufig als die eigentliche Geburtsstunde der Neutrino-Astronomie angesehen.

Erforschung des Inneren der Sonne

Die solare Neutrino-Astronomie hat inzwischen eine Präzision erreicht, von der man vor 20 Jahren nur träumen konnte. Das gegenwärtig empfindlichste Experiment auf diesem Gebiet heißt BOREXINO. Herz dieser Anlage im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso in den Abruzzen ist ein kugelförmiger Tank, der mit 300 000 Litern einer speziellen Flüssigkeit gefüllt ist. Stößt darin

ein Neutrino mit einem Atom zusammen, so entsteht ein schwacher Lichtblitz, der von Lichtsensoren an den Tankwänden aufgezeichnet wird.

Mit BOREXINO lassen sich die Reaktionsvorgänge im Sonneninneren bis auf wenige Prozent genau überprüfen – und weil das quasi in Echtzeit möglich ist, könnten wir damit auch sehen, wenn plötzlich der Sonnenofen im Inneren schwächeln würde. Ferner konnten Physiker mit BOREXINO erstmals eindeutig Neutrinos nachweisen, die bei Kernzerfällen im Erdinneren entstehen. Dabei stellte sich heraus, dass diese natürlichen radioaktiven Zerfälle für etwa die Hälfte der Erdwärme verantwortlich sind.

Zurzeit planen europäische Physiker das Experiment LAGUNA (Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics). Es soll 10- bis 20-mal größer sein als BOREXINO. Damit könnte es von einer Supernova in unserem Milchstraßensystem einige zehntausend Neutrinos registrieren – eine Goldgrube für die Astrophysik ebenso wie für die Teilchenphysik! Der Detektor könnte darüber hinaus mit zehnfach verbesserter Empfindlichkeit nach dem Protonzerfall suchen, den die Großen Vereinheitlichten Theorien vorhersagen.

LAGUNA würde auch den dünnen Neutrino-Nebel aufspüren, der von allen jemals explodierten Supernovae übrig geblieben sein muss und der Informationen über frühe Phasen des Universums enthält. Außerdem wäre es möglich, vom europäischen Beschleunigerzentrum CERN in Genf einen

Neutrinostrahl auf LAGUNA zu lenken. Dabei könnte man grundlegende Eigenschaften der Teilchen untersuchen, die eng mit dem Ursprung des Universums zusammenhängen.

Hat das Neutrino eine Masse?

Bruno Pontecorvos Theorie der Neutrinooszillationen ist heute unbestritten. Man hat den Effekt für kosmische Neutrinos gemessen wie auch für Neutrinos aus Kernreaktoren und Teilchenbeschleunigern. Pontecorvo zufolge können jedoch Neutrinos nur oszillieren, wenn sie eine Masse haben. Leider sagen die Oszillationsbefunde nur etwas über die Differenz der drei Massen aus, nicht über die Massen selbst. Die Masse muss man aber kennen, wenn man abschätzen will, wie groß der Anteil der Neutrinos an der Masse der gesamten Materie im Weltall ist. Für Kosmologen ist dies eine ganz entscheidende Frage.

Es gibt jedoch Möglichkeiten, die absoluten Massen zu bestimmen. Dabei misst man die Energie der Elektronen aus dem radioaktiven Zerfall einer Substanz und bestimmt dadurch – wie zu Zeiten Paulis, nur viel präziser – die fehlende Energie. Daraus wiederum lässt sich die Neutrinomasse berechnen. Das bisher genaueste Experiment dieser Art lief an der Universität Mainz. Aus ihm ergab sich, dass die Masse der Elektron-Neutrinos weniger als zwei Elektronvolt beträgt. Das ist eine unter Teilchenphysikern gebräuchliche Masseneinheit, in der das Elektron eine Masse von 511 000 Elektronvolt besitzt.

Derzeit entsteht am Karlsruher Institut für Technologie das Instrument KATRIN (»Karlsruhe Tritium Neutrino«-Experiment). Mit einem riesigen Spektrometer wird KATRIN Elektronen aus dem Zerfall des radioaktiven Wasserstoffisotops Tritium mit zehnmal höherer Genauigkeit vermessen als seine Vorgänger. Wenn KATRIN 2014 anläuft, wird es Neutrinomassen bis herunter zu 0,2 Elektronvolt nachweisen können. Damit

deckt es den gesamten Massenbereich ab, der für Kosmologen interessant ist.

Eine der faszinierendsten Fragen wollen europäische Physiker mit ihrem Experiment GERDA (Germanium Detector Array) klären. Sie geht auf eine Theorie des italienischen Physikers Ettore Majorana von der Universität Neapel aus dem Jahr 1937 zurück. Majorana stellte damals die Hypothese auf, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein könnten. Wenn Neutrinos Majorana-Teilchen wären, dann dürften sie neueren Theorien zufolge eine entscheidende Rolle dafür gespielt haben, dass sich im Urknall Materie und Antimaterie nicht vollständig gegenseitig vernichtet haben. Bei vollständiger Vernichtung gäbe es heute überhaupt keine Materie im Universum, sondern ausschließlich Strahlung. Es muss folglich einen kleinen Überschuss an Materie gegenüber der Antimaterie gegeben haben. Wie dieser Bruch der vollständigen Symmetrie damals zu Stande kam, ist eine der weitreichendsten Fragen sowohl der Teilchenphysik als auch der Kosmologie.

Lässt sich Majoranas Hypothese überprüfen? Die Antwort lautet: Ja. Es gibt nämlich einen radioaktiven Zerfallsprozess, der nur für Majorana-Neutrinos möglich ist, den so genannten neutrinolosen doppelten Beta-Zerfall. Der zweifelsfreie Nachweis dieses Prozesses würde nicht nur die Majorana-Natur des Neutrinos beweisen, sondern auch, dass es eine Masse hat und wie groß diese Masse ist.

Weltweit wird in den nächsten zwei bis vier Jahren ein halbes Dutzend Experimente einen möglichen ersten Hinweis auf diesen



KATRIN COLLABORATION

Mit dem KATRIN-Spektrometer wollen Forscher die Masse des Elektron-Neutrinos genauer als je zuvor vermessen.



KATRIN COLLABORATION

Der Detektor GERDA befindet sich in einem mit spezieller Folie ausgekleideten Wassertank, der Störsignale abschirmt.



PUBLIC DOMAIN

Ettore Majorana (1906–1938) postulierte, Neutrinos seien ihre eigenen Antiteilchen.

Zerfall überprüfen können, der vor knapp zehn Jahren von einem deutsch-russischen Team gemeldet wurde. Spitzenreiter ist hier das GERDA-Experiment. Es wurde unter der Leitung von deutschen Max-Planck- und Universitätsinstituten ebenfalls im Gran-Sasso-Labor gebaut und misst dort seit 2011 die Zerfälle von Germanium-76.

Mehr als ein halbes Jahrhundert nach ihrer Entdeckung haben die rätselhaften Neutrinos nichts an Faszination verloren – im

Gegenteil. Mit verbesserten Experimenten tritt die Neutrinforschung gerade in eine neue Phase ein. Für das kommende Jahrzehnt verspricht sie Antworten auf eine Reihe grundlegender Fragen, mit denen sie die gesamte Spannweite von der subatomaren Welt bis hin zum gesamten Universum abschreitet – eine Entwicklung, von der wohl selbst unkonventionelle Denker wie Wolfgang Pauli oder Ettore Majorana nicht einmal träumen konnten.

Großanlagen der Astroteilchen- physik

- Axion-Suche
- Untergrundlabors
- Unterwasser-Eis-Neutrino-Teleskope
- Gammastrahl-Teleskope
- Luftschaueranlagen für geladene kosmische Strahlen
- Gravitationswellen-Interferometer

Pierre Auger Observatory
Argentinien

Die wichtigsten Astroteilchen-Experimente in europäischen Untergrundlabors

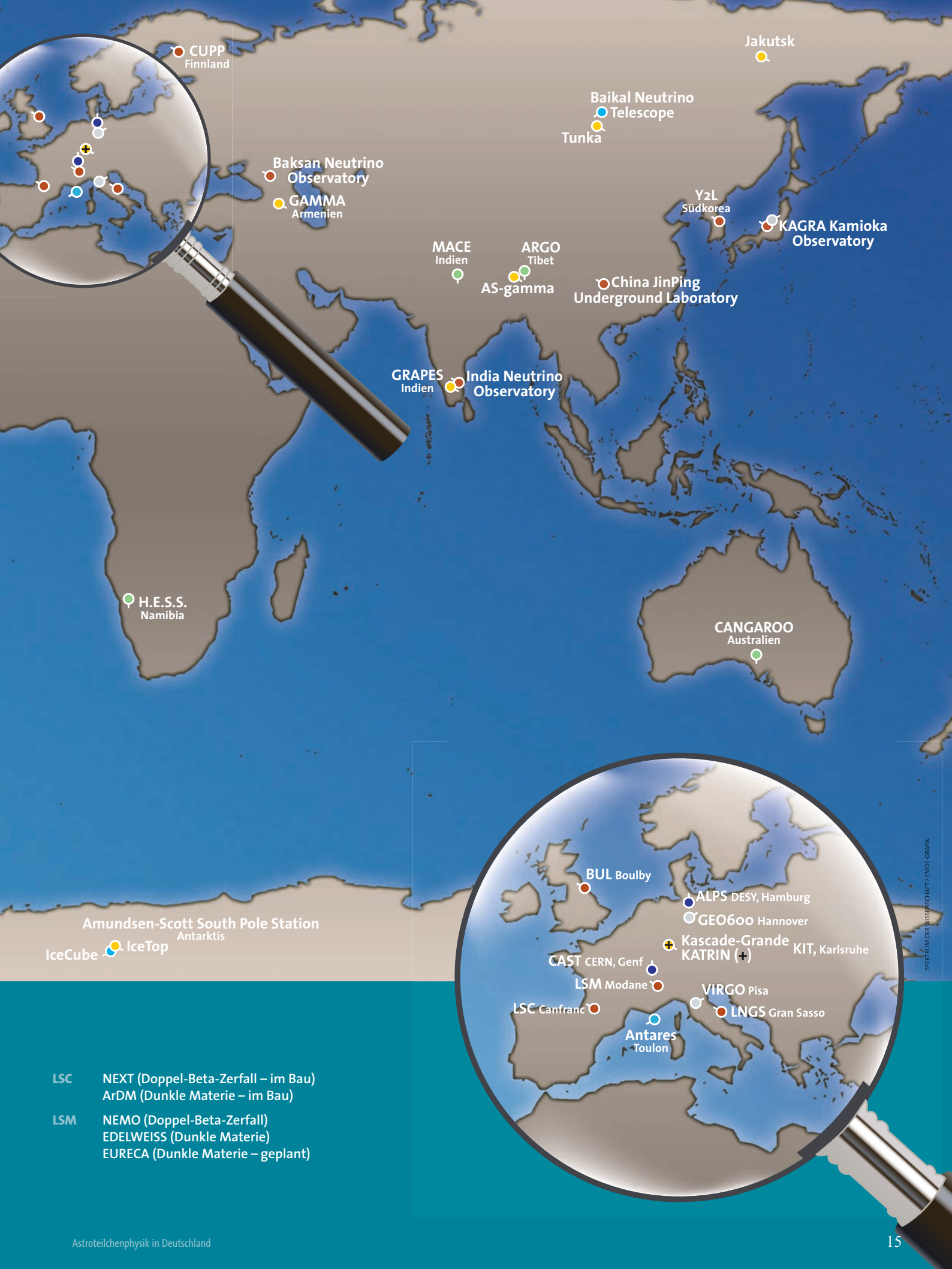
Baksan SAGE (Sonnenneutrinos)
BUST (Supernovaneutrinos)

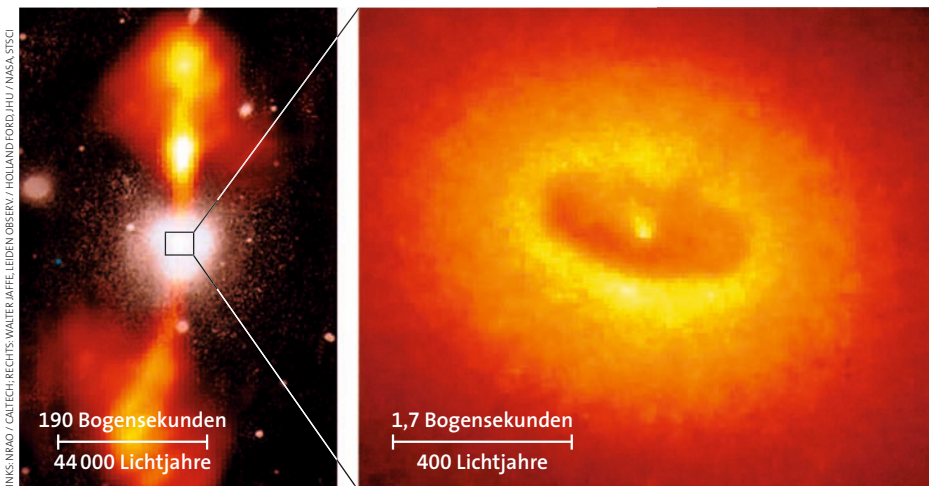
BUL DRIFT (Dunkle Materie – Entwicklung)
Zeplin (Dunkle Materie)

CUPP EMMA (kosmische Strahlung)
LAGUNA (p-Zerfall, Neutrino-
(Astro)physik – geplant)

LNGS (Gran Sasso)
COBRA (Doppel-Beta-Zerfall – Prototyp)
CUORE (Doppel-Beta-Zerfall – im Bau)
GERDA (Doppel-Beta-Zerfall)
CRESST (Dunkle Materie)
DAMA/LIBRA (Dunkle Materie)
DarkSide (Dunkle Materie – geplant)
WARP (Dunkle Materie)

XENON100 (Dunkle Materie)
XENON1T (Dunkle Materie – im Bau)
BOREXINO (Sonnenneutrinos)
LVD (Supernova-Neutrinos)





Quellen kosmischer Strahlen mit Energien von mehr als einer Milliarde Gigaelektronvolt gibt es vermutlich nur außerhalb unserer eigenen Galaxis. Die Bilder zeigen NGC 4261, eine so genannte aktive Galaxie, in deren Kern ein Schwarzes Loch von mehreren Milliarden Sonnenmassen sitzt. Das Schwarze Loch saugt Materie auf Spiralbahnen in sich hinein. Ein Teil der dabei freigesetzten Energie beschleunigt Teilchen – entweder nahe dem Galaxienkern oder entlang der riesigen Materieströme (»Jets«, linkes Bild), die bis zu einer Million Lichtjahre lang werden können.

Das Universum bei extremen Energien

Wenn Sterne explodieren oder Schwarze Löcher Materie verschlingen, schleudern sie energiereiche Teilchen ins All und auch in Richtung Erde. Mit riesigen Detektoren für kosmische Strahlen, Gammastrahlen und Neutrinos kommen ihnen Physiker auf die Spur und entdecken völlig neue kosmische Landschaften.

Vor genau 100 Jahren, im August 1912, stieg der österreichische Physiker Victor Hess mit einem Ballon in eine Höhe von über 5000 Metern auf. Er wollte prüfen, ob die ionisierende Strahlung, die radioaktive Stoffe im Material der Erdkruste aussenden, mit wachsender Entfernung von der Erdoberfläche abnimmt. Doch das Gegenteil war der Fall: Ab 1000 Meter Höhe stieg die Strahlung stetig an. Irgendetwas Ionisierendes, das aus dem Kosmos kam, schien die Erdatmosphäre zu bombardieren!

Als Hess 1936 für seine Entdeckung den Nobelpreis bekam, hatten er und seine Fachkollegen bereits herausgefunden, dass der größte Teil dieser kosmischen Strahlung aus elektrisch geladenen Teilchen besteht: zu 99 Prozent aus Protonen, also den Kernen von Wasserstoffatomen, und Atomkernen

schwererer Elemente, zu einem Prozent aus Elektronen. Gut zwei Jahrzehnte später stellte man erstaunt fest, dass einige dieser kosmischen Partikel Schwindel erregende Energien aufweisen. Einige übertreffen die Energie der Teilchen im Superbeschleuniger LHC um das Zehnmillionenfache! Wie schafft die Natur das?

Und nicht genug damit: Die Gesamtenergie der kosmischen Strahlung unserer Milchstraße ist etwa genauso groß wie die Energie, die in galaktischen Magnetfeldern oder in Sternenlicht steckt. Purer Zufall oder eine feine Balance? Wie immer die Antwort lautet mag: Kosmische Strahlen sind offenbar keine Randerscheinung, sondern ein zentrales Phänomen des Kosmos! Ihre Herkunft ist eines der großen Rätsel der Astrophysik.

Teilchen mit extrem hohen Energien können nur bei den gewaltigsten kosmischen Ereignissen entstehen – zum Beispiel



Ein Aufstieg mit dem Ballon führte Victor Hess (Mitte) 1912 zur Entdeckung der kosmischen Strahlung.



Das Alpha Magnetic Spectrometer AMS (Pfeil) auf der Internationalen Raumstation dient der Suche nach Antimaterie im Universum. Mit ihm lässt sich das Spektrum niederenergetischer kosmischer Strahlung mit bisher unerreichter Präzision messen.

misches Strahlen und Gammastrahlen – nicht durch Gaswolken oder sonstige materielle Hindernisse aufgehalten werden. Die Kehrseite der Medaille ist freilich, dass sie viel schwerer nachzuweisen sind.

Um möglichst viel über die kosmischen Quellen herauszufinden, versuchen die Wissenschaftler, alle drei hochenergetischen Strahlungsarten einzufangen: kosmische Strahlung, Gammastrahlen und Neutrinos.

Fahndung im Weltall und auf der Erde

Unter den Teilchen der kosmischen Strahlung, die pro Sekunde auf einen Quadratmeter treffen, ist im Schnitt immerhin eines, dessen Energie 100 GeV oder mehr beträgt. Da reicht schon ein Detektor auf einem Satelliten aus, um genügend davon einzufangen. Das gegenwärtige Topexperiment für GeV-Energien ist das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), das am 16. Mai 2011 mit dem letzten Flug des Spaceshuttles zur Internationalen Raumstation gebracht wurde.

Doch mit zunehmender Energie fällt der Fluss der kosmischen Strahlung steil ab: Nur etwa einmal im Jahr wird ein Quadratmeter von einem Teilchen getroffen, dessen Energie eine Million GeV erreicht! Und rund eine Million Jahre müsste man warten, um mit einem Quadratmeter Detektorfläche ein

wenn Gasströme in den Strudel eines massereichen Schwarzen Lochs geraten, sich dabei stark erhitzen und die Energie teilweise in die Beschleunigung von Kernteilchen umgesetzt wird. Die kosmische Strahlung, die auf die Erde trifft, erzählt uns von solchen atemberaubenden Prozessen, verrät uns aber leider nicht, wo sie stattfinden. Elektrisch geladene Teilchen werden nämlich auf ihrer weiten Reise immer wieder durch Magnetfelder abgelenkt. Die Richtung, aus der sie auf die Erde treffen, ist also nicht die Richtung, aus der sie ursprünglich stammen – im Unterschied zu Licht, das uns auf gerader Linie erreicht.

Energie. Falls die Gammastrahlung von denselben Quellen stammt wie die kosmische Teilchenstrahlung, würde sie uns direkt deren Herkunft preisgeben. Doch ist dies tatsächlich der Fall?

Die entscheidenden Hinweise könnten Neutrinos geben. Da sie nur bei Kernreaktionen entstehen, haben sie ihre Reise einst gemeinsam mit einem Atomkern begonnen. Anders gesagt: Jede Quelle hochenergetischer Neutrinos ist immer auch eine Quelle kosmischer Strahlung. Und die Neutrinos verraten uns deren Position, da sie auf ihrem Weg durchs All nicht von Magnetfeldern abgelenkt und – anders als kos-

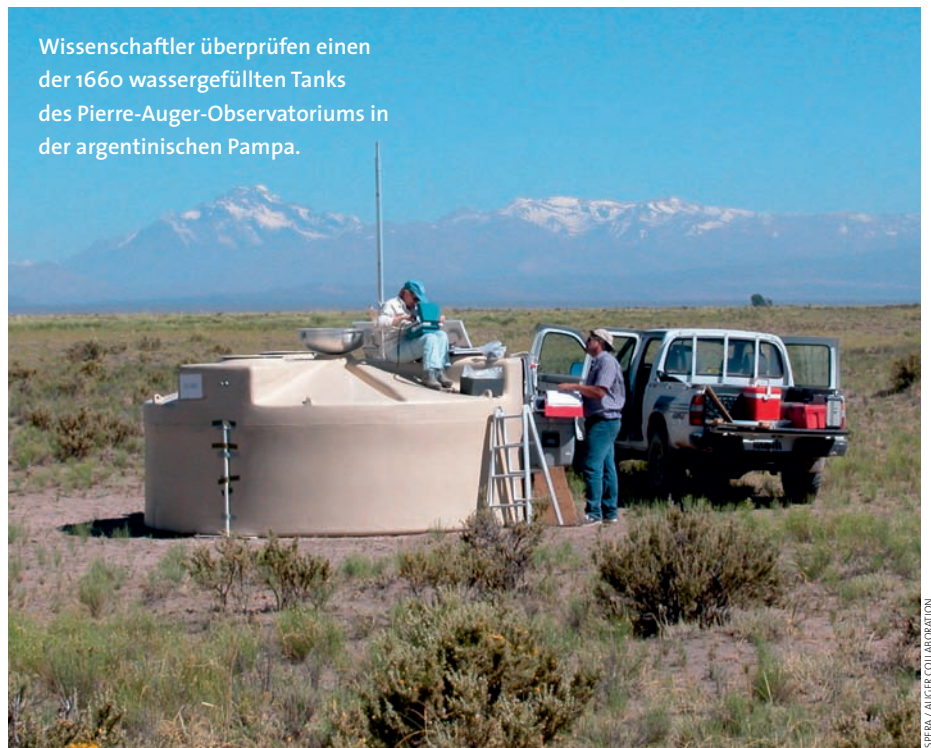
Wo sind die Quellen?

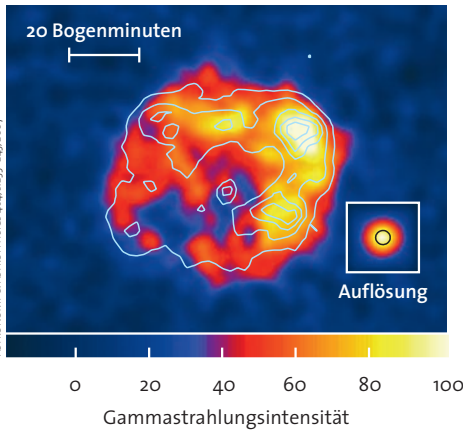
Nur für die Teilchen der allerhöchsten Energien haben die Wissenschaftler eine Chance, die Position der Quellen zumindest grob zu ermitteln, denn ihre Ablenkung ist relativ gering. Leider sind derart energiereiche Teilchen äußerst selten: Auf einen Quadratkilometer der Erdoberfläche trifft nur alle fünf bis zehn Jahre eines dieser superenergetischen Geschosse.

Glücklicherweise dürften die vermuteten Quellen neben den geladenen Partikeln auch neutrale Teilchen oder Strahlung aussenden: Neutrinos und Gammastrahlen. Diese kosmischen Boten breiten sich geradlinig aus, so dass ihre Herkunftsrichtung zurück auf ihre Quellen weist.

Tatsächlich haben die Forscher schon mehr als 150 Quellen am Himmel entdeckt, die extrem harte Gammastrahlen aussenden, mit Energien bis zu einigen hunderttausend Gigaelektronvolt ($1 \text{ GeV} = 1 \text{ Milliarde Elektronvolt}$), dem Zigfachen der LHC-

Wissenschaftler überprüfen einen der 1660 wassergefüllten Tanks des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Pampa.





Der Supernova-Überrest RX J1713.7-3946 im Gammalicht, aufgezeichnet mit Hilfe des H.E.S.S.-Teleskops in Namibia. Die hellen Bereiche hoher Intensität bezeichnen Gebiete, in denen wahrscheinlich kosmische Strahlen auf Materiewolken treffen. Die hellblauen Konturen geben die von einem Satelliten gemessene Intensität im Röntgenlicht an.

Teilchen mit zehn Milliarden GeV zu registrieren.

Die Physiker haben deshalb ein indirektes Verfahren entwickelt: Mit riesigen Anordnungen auf dem Erdboden registrieren sie die Teilchenkaskaden, die entstehen, wenn ein energiereiches Teilchen auf ein Molekül in der Erdatmosphäre prallt. Dabei löst es einen regelrechten Schauer weiterer Teilchen aus, die ihrerseits ebenfalls mit Luftmolekülen in Wechselwirkung treten. Am Ende geht auf einer Fläche mit hundert Meter Durchmesser eine Vielzahl von Partikeln aus dem »Luftschauer« auf die Erde nieder.

Kosmische Strahlung bis etwa 100 Millionen GeV, die hauptsächlich aus unserer Milchstraße stammen dürfte, wird mit drei Luftschaueranlagen von etwa einem Quadratkilometer Größe untersucht: dem KASCADE-Grande-Experiment in Karlsruhe und, ebenfalls mit deutscher Beteiligung, dem Tunka-Experiment in Sibirien und dem IceTop-Experiment am Südpol. Doch die

Größe dieser Anlagen verblasst gegenüber derjenigen des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Pampa, das extragalaktische Quellen entdecken soll. Hier spielt Deutschland zusammen mit den USA eine führende Rolle.

Bei dieser Messanlage (benannt nach dem französischen Physiker Pierre Auger, der in den 1930er Jahren das Phänomen der Luftschauer untersuchte) stehen auf einer Fläche von 3000 Quadratkilometern im Abstand von jeweils 1,5 Kilometern insgesamt 1660 wassergefüllte Tanks. Treten Teilchen aus einem Luftschauer in einen der Tanks ein, so lösen sie darin winzige Lichtsignale aus. Die Tanks werden ergänzt durch zahlreiche Teleskope, die das Fluoreszenzlicht aufzeichnen, das die Teilchenkaskaden in der Atmosphäre erzeugen. Auch die Radiosignale, welche die Luftschauer aussenden, wollen die Forscher demnächst auswerten.

Indem sie all diese Daten kombinieren, gewinnen sie schließlich Aufschluss über Richtung, Energie und bis zu einem gewis-

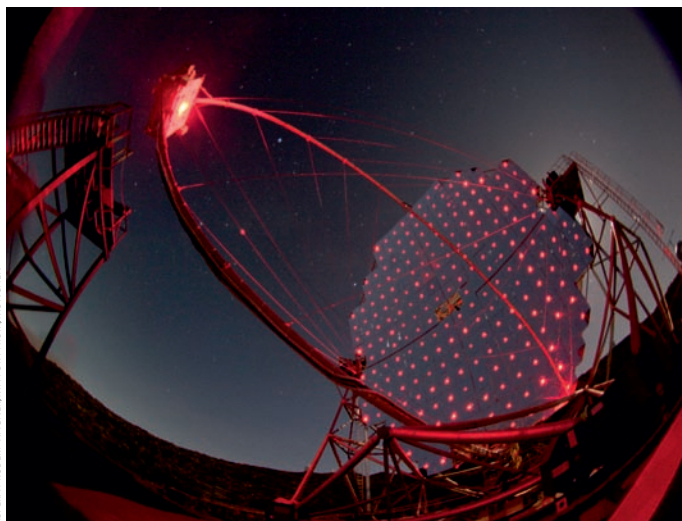
sen Grad über die Masse des ursprünglichen kosmischen Teilchens. Die pure Größe des Auger-Observatoriums erlaubt es, selbst bei Energien, für die der kosmische Fluss nur etwa ein Teilchen pro Jahr und Quadratkilometer beträgt, eine große Anzahl von Ereignissen zu registrieren.

Das Auger-Observatorium hat bereits viele wertvolle Informationen über das Energiespektrum und die Massenzusammensetzung der extragalaktischen kosmischen Strahlung geliefert. Auch erste Hinweise auf deren kosmische Quellen sind dabei. Um diesen Befund abzusichern, sind jedoch mehr und bessere Daten nötig. Weltweit wird daher überlegt, wie man die energiereichsten Teilchen des Universums mit neuen, noch größeren Detektorfeldern oder vielleicht auch vom Weltraum aus in genügender Anzahl dingfest machen kann.

Der Himmel im Gammalicht

Auch Gammastrahlen hoher Energie lösen in großer Höhe über dem Erdboden Luftschauer aus. Diese Teilchenkaskaden erzeugen einen bläulichen Lichtblitz (Tscherenkowlicht genannt), der von speziellen Teleskopen registriert werden kann. Im Jahr 1989 entdeckte man mit einem solchen Tscherenkow-Teleskop erstmals eine Quelle von Gammastrahlung im Bereich von 1000 GeV – den Krebsnebel, einen leuchtenden Rest eines explodierten Sterns. Seither breitet sich vor den Augen der Physiker allmählich eine Landschaft voller erstaunlicher Phänomene aus. Mehr als 150 Quellen kosmischer Gammastrahlung kennen sie mittlerweile: Supernova-Reste, umeinander kreisende Doppelsterne und aktive Galaxien. Viele Quellen strahlen ruhig vor sich hin, andere leuchten plötzlich einige Tage oder Wochen zehnmal so stark wie sonst – und niemand kann sagen, was dort vor sich geht. Wieder andere Quellen wurden vorher in überhaupt keinem anderen Wellenlängenbereich gesichtet – ein weiteres Rätsel.

Die Durchbrüche der jüngeren Zeit auf diesem Gebiet sind insbesondere zwei Teleskopanlagen zu verdanken. Das nach Victor Hess benannte H.E.S.S.-Teleskop (High Energy Stereoscopic System) in Namibia sammelt das Tscherenkowlicht von Luftschauern in vier Teleskopschüsseln mit je zwölf Meter Durchmesser. Die zwei MAGIC-Teleskope (Major Atmospheric Gamma-ray Im-



Auch am klaren Nachthimmel über den Kanarischen Inseln fahnden Forscher nach Gammastrahlung aus dem Kosmos. Das Foto zeigt eines der beiden MAGIC-Teleskope auf La Palma, deren Spiegel einen Durchmesser von je 17 Metern aufweisen.



Das zukünftige Cherenkov Telescope Array (CTA) soll aus zahlreichen Einzelteleskopen unterschiedlicher Größe bestehen.

GABRIEL PEZ DÍAZ, INSTITUTO DE ASTRONOMÍA DE CANARIAS (SERVICIO MULTIMEDIA)

ging Cherenkov Telescopes) auf den Kanarischen Inseln weisen sogar je 17 Meter Spiegeldurchmesser auf. Auch bei Bau und Betrieb dieser Instrumente nimmt Deutschland eine Führungsrolle ein.

Das große Zukunftsprojekt dieses Gebiets heißt CTA (Cherenkov Telescope Array). Es vereint alle weltweit in dem Feld arbeitenden Experten aus Europa, aus den USA, aus Japan, aus Indien und aus Südamerika. CTA soll aus 50 bis 100 Einzelteleskopen unterschiedlicher Größe bestehen. Seine Empfindlichkeit wird zehnmal besser sein als die

von MAGIC und H.E.S.S. Zudem kann es die Richtung der Gammastrahlen und damit ihren kosmischen Ursprung viel genauer bestimmen. Auch den Messbereich wird CTA gewaltig erweitern, zu niedrigen ebenso wie zu hohen Energien hin. Die Forscher erwarten, mit CTA mehr als 1000 neue Quellen zu entdecken. Aus den Feinheiten der gemessenen Spektren werden sie dann auch sicherer als jetzt ablesen können, ob die jeweilige Quelle vorwiegend Protonen oder vorwiegend Elektronen beschleunigt.

Neutrinosuche im antarktischen Eis

Die Himmelskarte energiereicher Neutrinos ist bis jetzt noch leer, wenn man einmal von denjenigen Neutrinos absieht, die durch Stöße kosmischer Strahlen in der Erdatmosphäre erzeugt wurden (so genannte atmosphärische Neutrinos). Ein unbekannter Kontinent, der die Erkundung regelrecht herausfordert.

Die »Erkundungsinstrumente« werden tief im Wasser von Seen oder Ozeanen oder gar im antarktischen Eis installiert. Verteilt über ein möglichst großes Volumen registrieren sie das Tscherenkwlicht, das bei den seltenen Neutrinoreaktionen durch sekundäre, geladene Teilchen erzeugt wird. Die interessantesten Teilchen kommen dabei – von unten! Was aus dieser Richtung kommt,

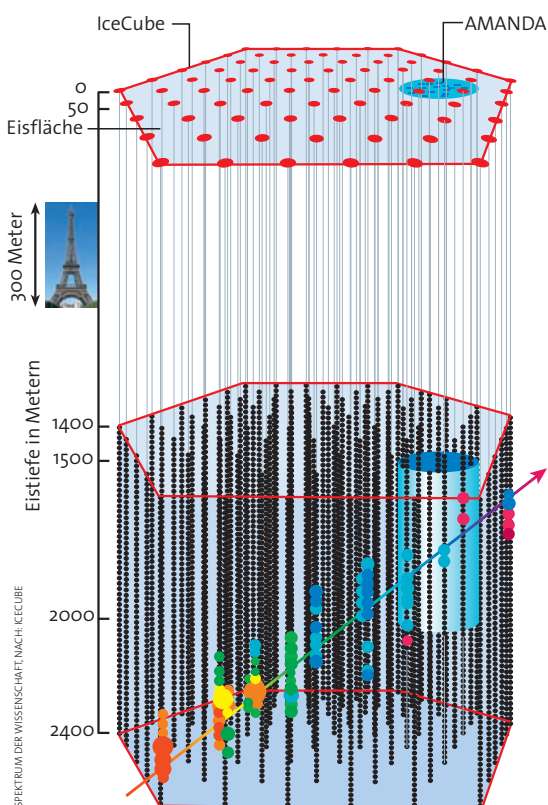
Ein Myon aus einer Neutrinoreaktion tritt von links unten in IceCube ein und wird von einigen Dutzend Lichtsensoren registriert (farbige Punkte).

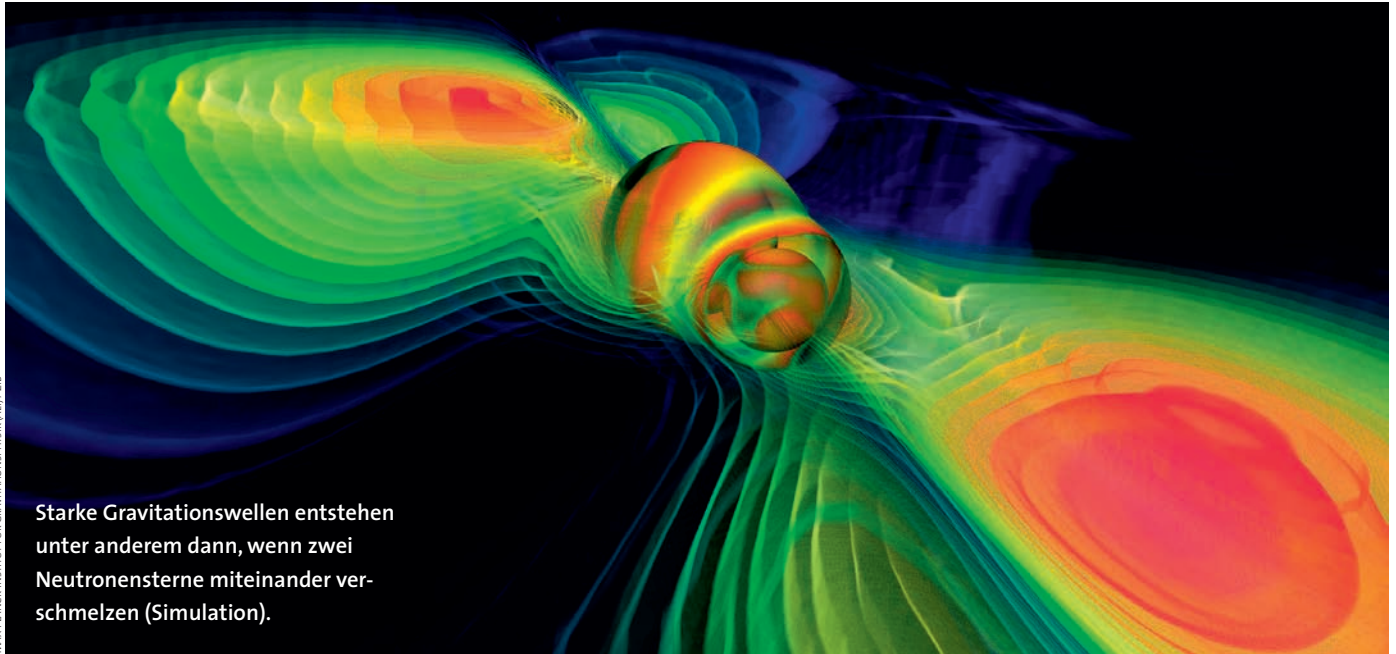
muss zuvor die Erde und damit tausende Kilometer Gestein durchquert haben. Das aber schaffen nur Neutrinos. Ein von unten kommendes Sekundärteilchen ist daher mit großer Sicherheit durch ein Neutrino ausgelöst worden.

Die Suche nach hochenergetischen kosmischen Neutrinos begann mit einem bescheidenen Detektor im sibirischen Baikalsee. Russische und deutsche Forscher installierten Sensoren in druckfesten Glaskugeln und ließen diese 1000 Meter in den See hinab. 1994 registrierten sie die ersten beiden von unten nach oben laufenden Teilchen. Dabei handelte es sich um atmosphärische Neutrinos, denn der Baikalsee-Detektor war viel zu klein, um die seltenen Neutrinos kosmischen Ursprungs einzufangen. Längst aber hat er Nachfolger bekommen.

Zunächst sammelte das Neutrino-teleskop AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array) Daten. Einige hundert Meter vom geografischen Südpol entfernt registrierte es Teilchen, die vom Nordhimmel stammten. Für den AMANDA-Nachfolger IceCube, der direkt unter der US-amerikanischen Amundsen-Scott-Station liegt, wurde sogar ein ganzer Kubikkilometer des antarktischen Eispansers in 1,5 bis 2,5 Kilometer Tiefe mit Lichtsensoren bestückt. An 86 Kabelsträngen hängen in regelmäßigen Abständen jeweils 60 Detektoren – insgesamt also 5160 Stück. Mit etwa einem Fünftel der beteiligten Wissenschaftler stellt Deutschland nach den USA das stärkste Kontingent bei IceCube. Seit seiner Fertigstellung 2010 hat der Detektor etwa 100 000 meist atmosphärische Neutrinos aufgezeichnet.

Bald soll IceCube weitere Verstärkung bekommen. Schon jetzt sammelt eine Gruppe europäischer Universitäten Erfahrungen mit dem ANTARES-Detektor (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch project) im Mittelmeer vor Toulon, der ebenso groß ist wie AMANDA (und damit 30-mal kleiner als IceCube). Sein Nachfolger KM3NeT (kurz für: Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop) wird dagegen ein Volumen von sechs Kubikkilometern einnehmen und ergänzend zu IceCube jene energiereichen Neutrinos vermessen, die vom Südhimmel her die Erde durchqueren. Auch an ANTARES und KM3NET ist eine deutsche Universität beteiligt.





Starke Gravitationswellen entstehen unter anderem dann, wenn zwei Neutronensterne miteinander verschmelzen (Simulation).

Einsteins Vermächtnis

Mit kilometerlangen Interferometern wollen Physiker Gravitationswellen nachweisen. Damit werden sie nicht nur ein völlig neues Fenster in den Kosmos öffnen, sondern auch die letzte noch fehlende Bestätigung für Einsteins allgemeine Relativitätstheorie liefern.

Mit der allgemeinen Relativitätstheorie legte Albert Einstein vor knapp 100 Jahren die bisher genaueste Beschreibung der Gravitation, der Schwerkraft, vor. Die meisten der Phänomene, die sich zwangsläufig aus dieser Theorie ergeben, wurden in den vergangenen Jahrzehnten bestätigt. Nur eines hat sich bisher hartnäckig einem direkten Nachweis widersetzt: Gravitationswellen.

Gravitationswellen sind winzige Verformungen der Raumzeit. Immer dann, wenn kompakte Himmelskörper wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher miteinander verschmelzen oder Sterne als Supernovae explodieren, sollten sie Einsteins Vorhersage zufolge den Raum erzittern lassen. Die Verwerfungen breiten sich wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus und

sollten den Abstand zwischen Objekten rhythmisch dehnen und stauchen.

Der zu erwartende Effekt ist freilich winzig: Die Gravitationswellen, die von einer Supernova in einer nahen Galaxie ausgehen, würden den Abstand zwischen Erde und Sonne nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms verändern, und auch das nur für ein paar Millisekunden! Das wusste bereits Einstein, der sich darum sicher war,

Die Gravitationswelleninterferometrie entwickelt sich schnell. Während GEO600 über zwei 600 Meter lange Arme verfügt, besteht das künftige Einstein Telescope E.T. aus drei jeweils zehn Kilometer langen Interferometerarmen (Illustration nicht maßstabsgetreu). Die Arme der geplanten Satellitenmission eLISA/NGO sollen sogar einige Millionen Kilometer lang sein.

dass man Gravitationswellen nie direkt werden nachweisen können.

Indirekt gelang das schon in den 1970ern. Über Jahre hinweg hatten die US-Amerikaner Russell Hulse und Joseph Taylor zwei extrem kompakte Neutronensterne beobachtet.



DEUTSCHE LUFTBILD-HAMBURG / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK (AEI) /
LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER

tet, die einander eng umkreisen. Einsteins Theorie zufolge müssten sie dabei kontinuierlich Energie in Form von Gravitationswellen abgeben. Dadurch müsste sich die Rotationsgeschwindigkeit ändern. Genau das stellten die beiden fest und erhielten dafür 1993 den Nobelpreis für Physik.

Verräterisches Flackern im Interferenzmuster

Bald aber werden Physiker Gravitationswellen mit kilometerlangen Interferometern direkt messen und damit Einsteins Vermächtnis vollständig erfüllen. Im Zentrum eines solchen Interferometers arbeitet ein extrem leistungsstarker Laser. Sein Strahl wird aufgeteilt und dann im Hochvakuum entlang zweier senkrecht zueinander stehender Röhren geschickt. Am Ende dieser »Arme« reflektieren erschütterungsfrei aufgehängte Spiegel die beiden Strahlen zurück zu ihrem Ausgangspunkt. Dort überlagern sie sich und erzeugen ein Interferenzmuster. Eine Gravitationswelle, die über diese Anordnung hinwegläuft, würde den Raum entlang der beiden Arme unterschiedlich stauchen und dadurch zu einem kurzen Flackern im Interferenzmuster führen. Im letzten Jahrzehnt konnten die Forscher die Laserleistung drastisch erhöhen und störendes Rauschen besser aus ihren Daten filtern. Innovationen wie diese stammen vor allem von deutschen Wissenschaftlern.

Gegenwärtig gibt es vier solcher Rieseninterferometer: In Deutschland horcht GEO600 ins All, ein Gravitationswellendetektor bei Hannover mit 600 Meter langen Armen. Ebenfalls auf der Suche nach kosmischen Signalen sind das italienische Observatorium VIRGO mit drei Kilometer Arm-

länge sowie zwei LIGO-Detektoren in den USA, deren Arme je vier Kilometer lang sind.

Der anfallende Datenwust wird nach periodischen Signalen oder kurzen Ausschlägen durchforstet, die sich in dem Rauschen verbergen könnten – bislang ohne Erfolg. Immerhin sind die Detektoren schon so empfindlich, dass sie das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher im Umkreis von einigen hundert Millionen Lichtjahren hätten entdecken müssen. Allerdings geschieht so etwas nur alle zehn bis hundert Jahre. Man braucht also sehr viel Geduld.

Das soll sich demnächst allerdings ändern. Bis 2015 stehen umfangreiche Verbesserungen an den gegenwärtigen Anlagen an. Japanische Wissenschaftler beginnen zudem mit dem Bau einer Drei-Kilometer-Anlage, dem LCGT. Alle gemeinsam werden dann ein kosmisches Volumen überwachen, das tausendmal so groß ist wie jenes, das die jetzigen Interferometer im Blick haben. Damit dürfen die Forscher in jedem Jahr auf zehn bis hundert Entdeckungen hoffen. Nach einem vier Jahrzehnte langen Marsch beginnt so zaghaft die Gravitationswellenastronomie und öffnet ein neues Fenster ins All.

Mit dem Superprojekt E.T. unter die Erde

Mit den ersten klaren Signalen von Gravitationswellen in der Tasche, will die weltweite Gemeinde der Gravitationswellenforscher schließlich ein Superprojekt verwirklichen: E.T., das Einstein Gravitational Wave Telescope. Dieses Instrument soll eine Armlänge von zehn Kilometern haben und Gravitationswellen bis hinab in den Frequenzbereich von wenigen Hertz nachweisen. Seine Arme werden unterirdisch verlaufen, damit der

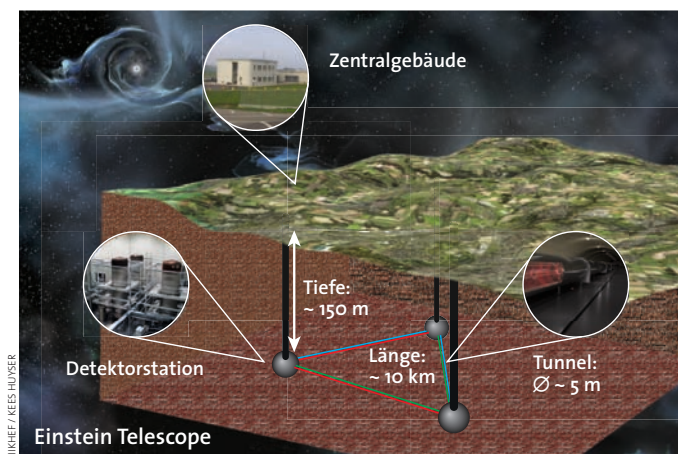
Laserstrahl besser von störenden Einflüssen in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche abgeschirmt ist.

E.T. wird viele tausend Ereignisse pro Jahr registrieren – und vielleicht sogar Gravitationswellen aufspüren, die im Verlauf des Urknalls ausgelöst wurden. Diese Wellen schwingen allerdings am stärksten im Bereich von einigen Millihertz. Um so niederfrequente Signale nachzuweisen, braucht man ein Interferometer, dessen Arme Millionen Kilometer lang sind. Und das geht nur im Weltraum.

Detektor-Trio im All mit Rekordarmlänge

Das Weltraumprojekt für Gravitationswellen heißt eLISA/NGO (eLISA steht für European Laser Interferometer Space Antenna, NGO für New Gravitational Observatory). Es soll aus drei Raumsonden bestehen, welche einige Millionen Kilometer voneinander entfernt durch das All fliegen und die Eckpunkte eines riesigen, dreieckigen Interferometers bilden. Wesentliche technische Aspekte von LISA sollen 2014 mit einem Prototyp, dem LISA Pathfinder, getestet werden. Wenn dieses Unternehmen erfolgreich ist, soll eLISA/NGO im Jahr 2022 abheben.

Mit E.T. und LISA wird man den Frequenzbereich von Millihertz bis Kilohertz abdecken. Sechs Größenordnungen! Zum Vergleich: Von Radarwellen über Infrarotlicht, sichtbares Licht und UV-Strahlung bis zu weicher Röntgenstrahlung sind es auch sechs Größenordnungen. Dann werden Gravitationswellen einen ähnlich differenzierten Blick auf die gewaltigsten Ereignisse im Kosmos eröffnen wie elektromagnetische Wellen – eine fantastische Vorstellung!



Astroteilchenphysik für alle

Die Astroteilchenphysik widmet sich grundlegenden Fragen des Kosmos. Ihre Themen stimulieren die Fantasie einer breiten Öffentlichkeit, und populäre Vorträge der beteiligten Forscher sind inzwischen Publikumsmagneten. Schon Schüler erfahren bei Experimenten zur kosmischen Strahlung ganz praktisch, was Wissenschaft bedeutet. Viele fangen dabei Feuer und überlegen sich, später Natur- oder Ingenieurwissenschaften zu studieren.

Die Astroteilchenphysik ist wie geschaffen dafür, Laien für die Grundlagenforschung zu begeistern. Sie stellt fundamentale Fragen, die nicht von ungefähr häufig als Rätsel bezeichnet werden: Das Rätsel der Dunklen Materie, von der wir immer noch nicht wissen, woraus sie besteht; die ungeklärte Herkunft der energiereichsten Teilchen, die uns aus den Tiefen des Kosmos erreichen; die Botschaft, die uns die geisterhaften Neutrinos aus dem Innern von Sternen überbringen. Und endlich: die Bedeutung von allem für die Entstehung jener atemberaubenden Welt, die uns die Astronomen mit

ihren wunderschönen Bildern zeigen; und damit – wie könnte es anders sein – auch die Rolle für unsere eigene Existenz!

So faszinierend diese Fragen sind, so beeindruckend sind auch die Mittel, mit denen die Wissenschaftler sie beantworten wollen. Die technischen Lösungen bewegen sich am Rande des Machbaren, und die häufig exotischen Standorte der Experimente tragen ein Übriges zur Faszination bei.

Das alles macht die Astroteilchenphysik, ähnlich wie die Astronomie, zu einem Publikumsmagneten. In der Tat herrscht überall dort, wo sich diese junge Wissenschaftsdisziplin präsentiert, überwältigender Andrang. Tage der offenen Tür, Lange Nächte

der Wissenschaften, populärwissenschaftliche Vorträge etwa in der Berliner URANIA oder im Deutschen Museum in München und auch Sonntagsvorlesungen an Universitäten sind bestens besucht. Vorträge mit Titeln wie »Neutrinos – Geheimschrift des Kosmos« bringen es auf Zehntausende Abrufe bei YouTube.

Vielerorts kann man auch die praktischen Seiten dieser Wissenschaft kennen lernen und dabei begreifen, wie Grundlagenforschung funktioniert. Bei »Forschungswochen« an mehr als einem Dutzend Universitäten und Forschungszentren können Schüler und ihre Lehrer schon seit Jahren eigene Versuche mit kosmischer Strahlung durchführen. Untersuchungsmaterial liefert der Kosmos frei Haus, und schon mit kleinen Anordnungen, die auf einen Schultisch passen, lassen sich lehrreiche Messungen durchführen: Um welche Teilchensorten handelt es sich? Aus welchen Richtungen stammen die Teilchen? Wie hoch sind ihre Energien? Und ist ihre Zahl tatsächlich vom Wetter abhängig?

Mit einer simplen wassergefüllten Thermoskanne können Schüler sogar nachvollziehen, wie das unterirdische japanische Neutrinoexperiment Super-Kamiokande funktioniert. An der »Kamiokanne« nämlich (siehe Foto links) ist ein Fotoelektronenvervielfacher angebracht. Wenn Teilchen das Wasser durchdringen – unsichtbar und unhörbar –, registriert er das Licht, das sie darin erzeugen.

Andere Teilchenzähler für die Schülerbildung haben ein griffiges Laptopformat. Ebenso wie die Kamiokannen werden sie auf Anfrage an Schulen ausgeliehen. Solche Zähler waren auch bei Schiffsreisen in die

Schüler untersuchen die kosmische Strahlung mit zwei aus Thermoskannen hergestellten Teilchenzählern, die auf Grund ihrer Form und in Anspielung auf den japanischen Neutrinodektektor Kamiokande »Kamiokanne« genannt werden.





Antarktis mit an Bord, zuerst auf dem schwedischen Eisbrecher »Oden« und danach auf dem Forschungsschiff »Polarstern« des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven. Auf ihrer Route haben sie aufgezeichnet, wie die Zahl der auf die Erde prasselnden Teilchen von der geografischen Breite abhängt und welche Rolle das Erdmagnetfeld dabei spielt. Die gewonnenen Daten können Schüler nun bald über das Internet auswerten.

Mittlerweile sind all diese Aktivitäten innerhalb des deutschlandweiten Cosmic-Projekts gebündelt und in das »Netzwerk Teilchenwelt« integriert. Zu diesem Netzwerk haben sich 22 deutsche Forschungsinstitute sowie das CERN zusammengeschlossen. Mit dem Cosmic-Projekt erwerben Jugendliche neben Grundlagenwissen zur Teilchen- und Astroteilchenphysik auch Kenntnisse darüber, wie sie eigene Forschungsergebnisse darstellen können. Sie erfahren, wie man wissenschaftliche Daten korrekt auswertet und beurteilt, und sie werden spielerisch an Dinge herangeführt, die uns auch im Alltag begegnen. Wer zum Beispiel die Statistik für die Auswertung von Teilchenreaktionen verstanden hat, tappt nicht mehr so leicht in die Fallen, die uns manche statistische Angabe in Presse und Fernsehen stellt.

Die Öffentlichkeitsarbeit auf dem Gebiet ist auch international vernetzt. Das europäische Netzwerk der Astroteilchenphysik ASPERA (Link siehe Kasten) bietet über seinen monatlich erscheinenden Newsletter aktuelle und allgemeinverständliche Informationen über Neuigkeiten in der Astroteilchenphysik. Und in Deutschland nutzt die Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik sogar soziale Netzwerke wie Facebook und Twitter, um tagesaktuell auf interessante Neuigkeiten des Gebiets hinzuweisen.

Unterdessen wächst die Anzahl begabter und enthusiastischer Studierender der Astroteilchenphysik stetig. An 26 deutschen Universitäten ist die Disziplin mittlerweile ein eigenständiges Lehrfach. Auch Graduiertenschulen und Sommerschulen widmen sich ihr. Im Jahr 2011 haben fast hundert Studierende den Master oder das Diplom auf diesem Gebiet erworben, und etwa fünfzig wurden sogar über Themen aus der Astroteilchenphysik promoviert. Dabei haben die angehenden Wissenschaftler die Arbeit in internationalen Großprojekten gelernt, haben mit innovativer Technologie gearbeitet und selbst mitgeholfen, die Grenzen des technisch Möglichen zu erweitern. All das macht sie zu begehrten Mitarbeitern für High-Tech-Firmen.



In einer Funkenkammer befinden sich mehrere unter Hochspannung stehende Platten, umgeben von einem Edelgas. Energiereiche Teilchen aus dem All schlagen Elektronen aus dessen Atomhülle, wodurch das Gas leitet und ein Funke zwischen den Platten überspringt. Eine rötlich leuchtende Ionisationsspur demonstriert so den Weg kosmischer Teilchenstrahlung.

Astroteilchenphysik im Internet

Komitee für Astroteilchenphysik (KAT):
www.kat-astroteilchen.de

Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik (HAP):

www.hap-astroteilchen.de

Netzwerk Teilchenwelt:

www.teilchenwelt.de

ASPERA, das europäische Netzwerk zur Förderung der Astroteilchenphysik:

www.astroparticle.org

Auf Twitter:

<http://twitter.com/teilchenwelt>

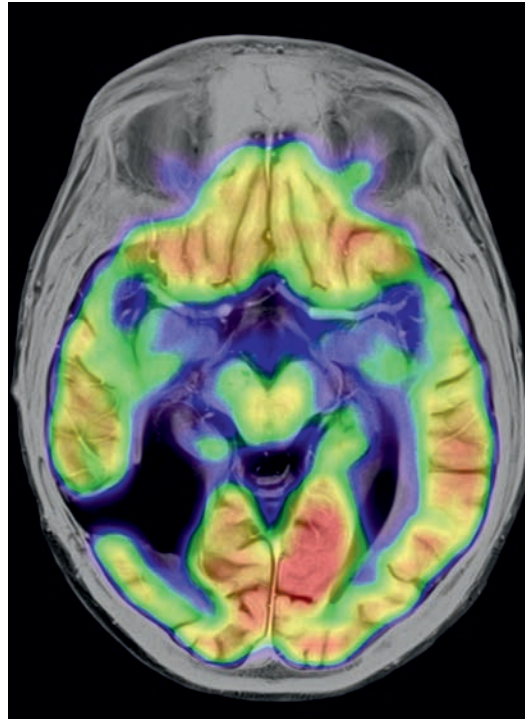
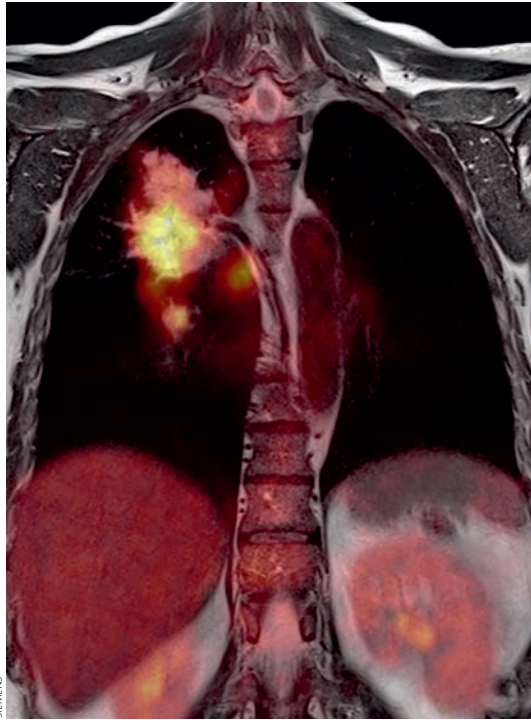
<http://twitter.com/astrohap> (HAP)

<http://twitter.com/astroparticle>

(ASPERA)

HAP daily news

<http://astrohap.tumblr.com/>



Technische Innovationen aus der Astroteilchenphysik führen zu unerwarteten Anwendungen. Zum Beispiel lassen sich nun magnetresonanztomografische Aufnahmen (graue Bildbereiche) und positronenemissionstomografische Bilder (farbige Bereiche) kombinieren, etwa um Krebsmetastasen zu lokalisieren (links) oder die verschiedenen Regionen des Gehirns (rechts) zu untersuchen.

Hightech und Anwendungen

Dass die Teflonpfanne ein Nebenprodukt der Raumfahrt sein soll, ist eine Legende. Andererseits brachte die Raumfahrt eine Fülle von kaum mehr wegzudenkenden Entwicklungen hervor – von der satellitengestützten Wettervorhersage bis zur GPS-Navigation. Auch die Astroteilchenphysik führte schon zu zahlreichen Innovationen, die sich sehen lassen können.

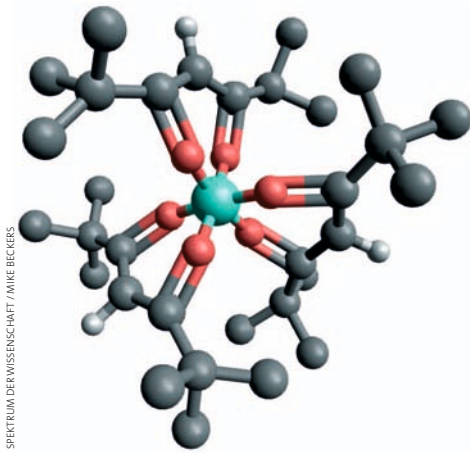
Astroteilchenphysik bewegt sich an den Grenzen des Machbaren. Sie erfordert den Nachweis kleinster Lichtblitze von einigen milliardenstel Sekunden Dauer. Experimente zur Suche nach Dunkler Materie oder zum Nachweis von Sonnenneutrinos benötigen Materialien von unvorstellbarer Reinheit. Für das Pierre-Auger-Observatorium musste man ausgeklügelte Kommunikationstechniken entwickeln, um die 1660 Messtanks zeitsynchronisiert betreiben zu können. Einige Anlagen befinden sich in unwirtlichen Umgebungen – tief im Ozean, im antarktischen Eis oder auf hohen Bergen – und stellen in puncto Zuverlässigkeit und Temperaturtoleranz

höchste Anforderungen. Viele der dafür notwendigen Entwicklungen haben mittlerweile ihren Weg in die praktische Anwendung gefunden. Einige Beispiele:

■ **Von Neutrinos zur Nahrungsmittelchemie.** Einige Experimente zum Nachweis von Neutrinos nutzen organische Flüssigkeiten, denen das Metall Gadolinium zugesetzt werden muss. Da sich Gadolinium aber in solchen Flüssigkeiten nicht löst, kamen Forscher des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg auf die Idee, die Gadoliniumatome in andere Moleküle einzubetten. Diese Trägermoleküle wiederum sind nach außen hin so beschaffen, dass sie sich in der Flüssigkeit lösen. Das Prinzip wurde gemeinsam mit

einem Nahrungsmittelhersteller zu voller Produktionsreife entwickelt und wird inzwischen – mit anderen Substanzen – bei der Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt.

■ **Von Luftschauern zur Medizintechnik.** Seit Jahrzehnten setzen Physiker Fotoelektronenvervielfacher ein, um schwache Lichtsignale nachzuweisen. Die Technik ist bewährt, stößt aber auch an Grenzen: Die aus einer Elektronenröhre bestehenden Fotoelektronenvervielfacher sind nur schwer zu miniaturisieren, ihre Empfindlichkeit ist nicht besonders hoch, und sie lassen sich nicht in Magnetfeldern betreiben. Vor allem wegen der ersten beiden Punkte haben Astroteilchenphysiker die Entwicklung von



SPERTRUM DER WISSENSCHAFT / ANKE BECKERS

Gadoliniumatome (grün) lösen sich in organischen Substanzen nur, wenn man sie in andere Moleküle einbettet. Entwickelt wurde das Verfahren für Neutrinodetektoren, nun wird es auch in der Lebensmittelchemie eingesetzt.

empfindlichen Lichtdetektoren auf Halbleiterbasis (Silizium-Photomultiplier, SiPM) vorangetrieben. SiPMs sind kleiner, zuverlässiger und können – was ihren Anwendungsbereich erheblich erweitert – auch in Magnetfeldern eingesetzt werden. Mit ihnen konnten Ingenieure zwei medizinische Bildgebungsverfahren elegant kombinieren: die Positronenemissionstomografie (PET) und die Magnetresonanztomografie (MRT). Bei der PET wird dem Patienten eine leicht radioaktive Substanz injiziert, deren Zerfall Positronen erzeugt. Diese zerstrahlen mit Elektronen zu Gammaquanten, die den Körper verlassen und in Nachweiskristallen Lichtblitze erzeugen. Solange man für deren Nachweis Fotoelektronenvervielfacher einsetzte, war ein Einbau in ein MRT-Gerät nicht möglich, da dort starke Magnetfelder zum Einsatz kommen. Lichtdetektoren auf Halbleiterbasis schufen Abhilfe: Jetzt können Ärzte MRT und PET gleichzeitig mit einem kompakten Gerät durchführen und auf diese Weise krankes Gewebe sowohl genau lokalisieren als auch klar identifizieren.

■ **Von Gravitationswellen zur Klimakunde.** Im Rahmen des GRACE-Projekts (Gravity Recovery and Climate Experiment) vermessen zwei deutsch-amerikanische Satelliten seit 2002 das Schwerfeld der Erde. Sie arbeiten hochpräzise: Überfliegt eine der beiden Sonden eine Region mit höherer Schwerkraft als

die andere, wird sie etwas beschleunigt, und dadurch entfernen sich die Satelliten ein klein wenig voneinander. Aus dieser Abstandsänderung lässt sich die jeweils herrschende Erdanziehungskraft ermitteln. Mit GRACE messen die Forscher, wie die Masse an der Oberfläche der Erde verteilt ist und wie sich Eisbedeckungen oder Wasserspiegel verändern. Das Folgeprojekt GRACE-FO (GRACE Follow-on) soll noch genauere Daten liefern. Dafür wird 2016 ein Interferometer ins All starten, um mit Laserstrahlen den Abstand zwischen beiden Satelliten noch präziser zu messen – eine Technologie, die ursprünglich für das Gravitationswellenprojekt LISA entwickelt worden war (siehe Beitrag S. 20). Dank ihrer werden die Detektoren für noch kleinere klimatisch bedingte Änderungen des Schwerfelds empfindlich sein.

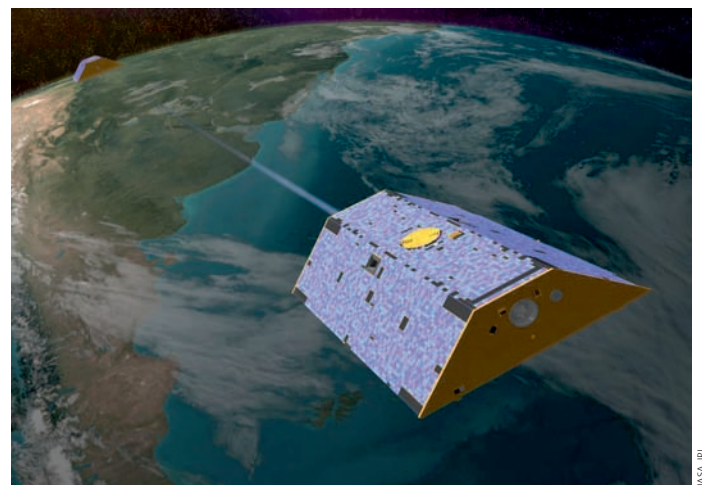
■ **Von Dunkler Materie zur Halbleiterproduktion.** Viele der Kristalldetektoren, mit denen Astroteilchenphysiker nach der Dunklen Materie suchen (siehe Beitrag auf S. 8), arbeiten bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt. Mit solchen extrem gekühlten Kristallen kann man auch die Energie von Röntgenstrahlung messen – zehnmal genauer als mit üblichen Methoden. Das lässt sich nutzen, um Halbleiterchips auf Verunreinigungen durch Fremdatome zu untersuchen. Richtet man nämlich den Strahl eines Elektronenmikroskops auf ein Halbleiterelement, so entsteht an dessen Oberfläche Röntgenstrahlung, die charakteristisch für die jeweilige Atomsorte ist. Mit gekühlten Kristallen kann man die Strahlung extrem genau vermessen und selbst wenige Fremdatome aufspüren.

Mit dem Satelliten-duo GRACE (Fotomontage) vermessen Forscher das Schwerfeld der Erde. Beim Folgeprojekt GRACE-FO kommen laserinterferometrische Methoden zum Einsatz, wie sie für den Nachweis von Gravitationswellen entwickelt wurden.

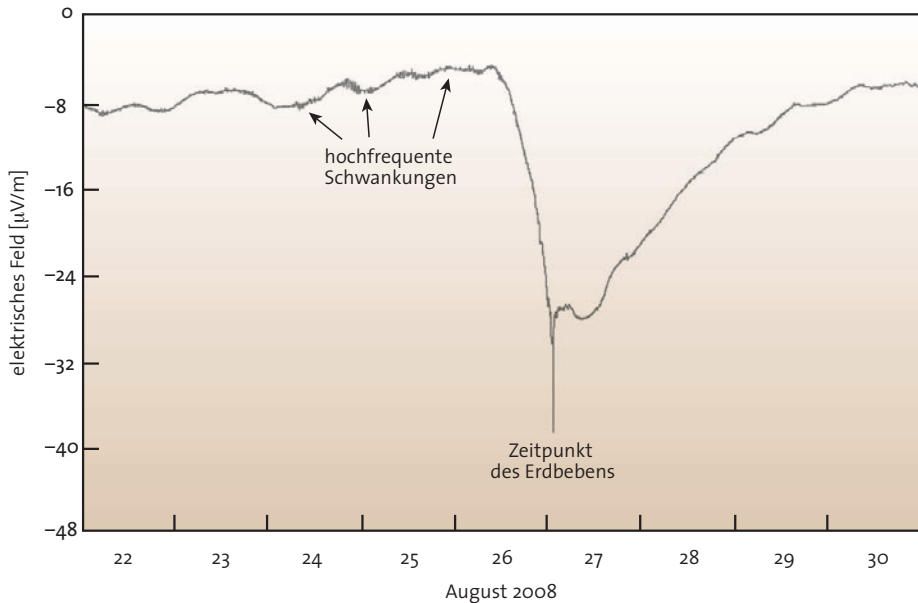
Hightechnologien, die in die Praxis überführt werden, sind das eine, die Nutzung der Astroteilchenanlagen selbst für die angewandte Forschung das andere. Die Resultate berühren Gebiete wie Atmosphärenphysik und -chemie, Klimatologie, Geologie, Seismologie, Glaziologie, Weltraumwetter, Meeresbiologie und Leben unter extremen Bedingungen. Wieder einige Beispiele:

■ **Frühalarm bei magnetischen Sonnenstürmen.** Gelegentlich schleudert die Sonne gewaltige Mengen ionisierter Materie ins All. Ein solcher Materiestrom erreicht uns üblicherweise nach wenigen Tagen. Dann erzeugt er nicht nur farbenprächtige Nord- und Südlichter, sondern verformt auch das irdische Magnetfeld und stört die Satellitenkommunikation und den Flugverkehr. Noch bevor der Sonnensturm die Erde erreicht, verändert er jedoch die Form der Magnetfelder in unserem Sonnensystem. Dies wiederum wirkt sich auf die Wege der schnellen kosmischen Teilchenstrahlung aus. Luftschauernanlagen registrieren deren Ablenkung schon Stunden oder Tage, bevor die Sonnenteilchen eintreffen, und können daher eine Frühwarnung abgeben.

■ **Erdbebenvorhersage.** Könnte man Erdbeben vorhersagen, ließen sich viele Menschenleben retten. Noch ist dies nicht möglich, doch eine Reihe von physikalischen Phänomenen gibt immerhin Hinweise auf bevorstehende Erschütterungen. Dazu zählen Veränderungen der elektrischen Felder in der Erdkruste und der Erdatmosphäre. Sie lassen sich erkennen, indem man in einem wenig leitenden Medium die Spannung



NASA/JPL



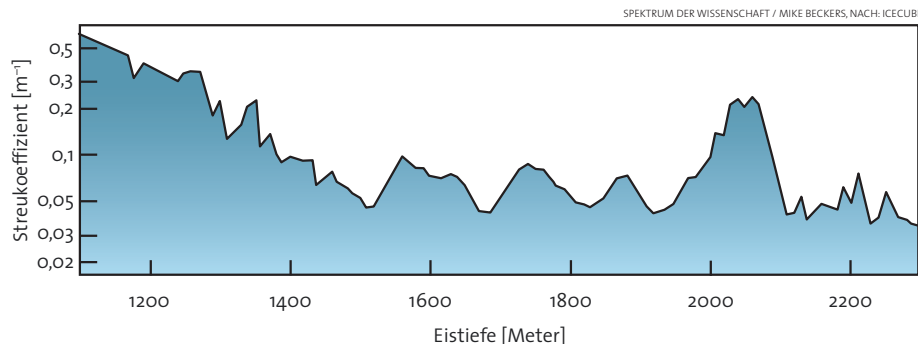
Einem Erdbeben am 27. August 2008 gingen hochfrequente elektrische Schwankungen des Erdfelds voraus, die ein Neutrinodetektor im Baikalsee registrierte. Solche Messungen könnten in Zukunft bei der Erdbebenvorhersage helfen.

über eine große Höhendistanz misst. Der Baikalsee mit mehr als einem Kilometer Tiefe und einer geringen Leitfähigkeit des mineralarmen Wassers bietet für die Aufzeichnung des vertikalen elektrischen Erdfelds beste Voraussetzungen. Gemessen wird über 1250 Meter entlang der Trossen, mit denen der dort installierte Neutrinodetektor verankert ist. Tatsächlich veränderte sich einige Stunden vor einem mittelstarken Erdbeben am 27. August 2008 die Spannung drastisch. Interessanterweise war es schon Tage vorher zu winzigen Schwankungen der Messwerte gekommen. Signale wie diese könnten zu künftigen Frühwarnsystemen für Erdbeben beitragen.

■ **Überwachung der Atmosphärenqualität.** Für Luftschaueranlagen ist die Erdatmosphäre ein Teil des Detektors. Deswegen wer-

den über solchen Anlagen kontinuierlich die Temperatur, die Dichte, der Schwebstoffgehalt und andere Parameter aufgezeichnet. Diese Daten werden auch in meteorologische Netzwerke eingespeist und liefern so Messungen aus Regionen, in denen es keine anderen Wetterstationen gibt.

■ **Bestimmung von Walpopulationen im Mittelmeer.** Extrem energiereiche Neutrinos lösen bei einer Reaktion in Wasser winzige Schallsignale aus. Zu deren Nachweis haben Forscher spezielle »Hydrophone« entwickelt. Mit einer Testanlage im Mittelmeer konnten sie auch die Laute von Walen aufzeichnen und feststellen, dass dort erheblich mehr Pottwale leben als gedacht. Anhand der akustischen Signale ließen sich sogar Walmännchen, Walweibchen und Waljunge unterscheiden.



■ **Klimakunde im ewigen Eis.** Schicht für Schicht konserviert der kilometerdicke antarktische Eisschild die Niederschläge, die sich im Lauf von Jahrmillionen auf dem Eis ablagern. Die Schichten enthalten auch kleine Verunreinigungen in Form von Staub oder Asche. Sie liefern einzigartige Datensätze, mit deren Hilfe sich klimatische Veränderungen und Vulkanausbrüche über Hunderttausende von Jahren hinweg untersuchen lassen. Die Ausbreitung von Lichtsignalen im IceCube-Neutrinoteleskop am Südpol wird von diesen Staubschichten beeinflusst. Darum liefert IceCube sozusagen nebenbei Daten zum Staubeintrag mit einer Auflösung von einigen Metern (das entspricht je nach Tiefe einigen hundert bis tausend Jahren). Noch genauere Daten erhält man mit speziellen Sonden, die man in die frisch gebohrten Löcher für die Trossen von IceCube herablässt: einige Millimeter! Mit diesen Sonden ist man auf von Vulkanausbrüchen herrührende dünne Ascheschichten sensitiv. Es zeigte sich, dass Vulkane eine weit größere Rolle als Klimafaktor spielen dürften als bisher angenommen: Ihre Eruptionen traten häufig etwa gleichzeitig mit globalen Klimaänderungen auf.

■ **Entstehung von Blitzen.** Blitzschläge verursachen weltweit jedes Jahr Milliarden-schäden und töten hunderte Menschen. Welche Prozesse diese energiereichen atmosphärischen Entladungen auslösen, ist jedoch noch nicht endgültig geklärt. Kosmische Strahlung könnte dabei eine Rolle spielen: Möglicherweise »spurt« sie den Weg durch die Atmosphäre, entlang dessen sich schließlich ein Blitz ausbreitet. Die Korrelation zwischen Teilchenschauern und Blitzen wird unter anderem am Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien und mit den Luftschauerdetektoren KASCADE-Grande (Karlsruhe) und Tunka (Sibirien) untersucht.

Das Neutrinoteleskop IceCube dient auch der Klimaforschung. Das Diagramm zeigt den vom Detektor gemessenen Streukoeffizienten des antarktischen Eises als Funktion der Tiefe. Er lässt Rückschlüsse auf Ascheschichten zu, die sich vor Zehntausenden von Jahren infolge von Vulkanausbrüchen ablagerten.

Forschungsprojekte der Astroteilchenphysik mit deutscher Beteiligung

	Forschungsgegenstand	Standort	deutsche Teilnehmer
IM WELTRAUM			
AMS	Dunkle Materie, Antimaterie		KIT, Universitäten Aachen, Erlangen
Pamela	Dunkle Materie, Antimaterie		Universität Siegen
INTEGRAL	Gammastrahlung, Antimaterie, Nukleosynthese		MPE, MPA, Universitäten Bamberg/Erlangen, Tübingen
Fermi	Gammastrahlung, Dunkle Materie		MPE, MPP, DESY-Z
JEM-EUSO	kosmische Strahlung (geplant)		KIT, Universitäten Erlangen, Tübingen
LISA-Pathfinder	Gravitationswellen (Start 2014)		AEI, MPE
eLISA/NGO	Gravitationswellen (geplant)		AEI, MPE
AUF DER ERDE			
KATRIN	Neutrinomasse	Karlsruhe (im Bau)	KIT, MPIK, Universitäten Bonn, Fulda, Mainz, Münster
TCHIPS	Hidden Photons (Dunkle Materie)	Hamburg	DESY-HH, Universität Hamburg
CAST	Axionen (Dunkle Materie)	Schweiz: Genf	GSI, MPP, MPE, MPS, Universitäten Darmstadt, Freiburg, Frankfurt
KASCADE-Grande	kosmische Strahlen	Karlsruhe	KIT, Universitäten Siegen, Wuppertal, MPIfR
Tunka	kosmische Strahlen	Russland: Tunka-Tal	DESY-Z, KIT, Universität Hamburg
IceTop	kosmische Strahlen	Südpol	DESY-Z, Universitäten Aachen, Berlin (HU), Bochum, Bonn, Dortmund, Mainz, München (TU), Wuppertal
Pierre-Auger-Observatorium	kosmische Strahlen	Argentinien	KIT, Universitäten Aachen, Hamburg, Siegen, Wuppertal
H.E.S.S.	Gammastrahlung	Namibia	MPIK und Sternwarte Heidelberg, DESY-Z, Universitäten Berlin (HU), Bochum, Erlangen, Hamburg, Tübingen
MAGIC	Gammastrahlung	Spanien: Kanarische Inseln	MPP, DESY-Z, Universitäten Dortmund, Würzburg
VERITAS	Gammastrahlung	USA: Arizona	DESY-Z, Universität Potsdam
HiSCORE	Gammastrahlung	Russland: Tunka-Tal (Prototyp-Phase)	DESY-Z, Universität Hamburg
CTA	Gammastrahlung	Festlegung 2012 (Prototyp-Phase)	alle H.E.S.S.-, MAGIC- und VERITAS-Partner
GEO-600	Gravitationswellen	Hannover	} AEI, MPE, Universitäten Berlin (HU), Bremen, Hannover, Heidelberg, Jena, Tübingen
LIGO	Gravitationswellen	USA: Washington/Louisiana	
E.T.	Gravitationswellen	noch festzulegen (geplant)	
UNTERTAGE			
BOREXINO	Sonnenneutrinos	Italien: LNGS	MPIK, Universitäten Hamburg, München (TU)
SNO+	Doppel-Beta-Zerfall, Neutrinos	Kanada: Sudbury Lab. (im Bau)	Universität Dresden
LAGUNA	Proton-Zerfall, Neutrinos	Finnland: Pyhäsalmi (geplant)	Universitäten Aachen, Hamburg, München (TU), Tübingen
CRESST	Dunkle Materie	Italien: LNGS	MPP, Universitäten Tübingen, München (TU)
EDELWEISS	Dunkle Materie	Frankreich: LSM	KIT
EURECA	Dunkle Materie	Frankreich: LSM (geplant)	alle CRESST- und EDELWEISS-Partner
XENON	Dunkle Materie	Italien: LNGS	MPIK, Universitäten Mainz, Münster
GERDA	Doppel-Beta-Zerfall	Italien: LNGS	MPIK, Universitäten München (TU), Dresden, Tübingen
COBRA	Doppel-Beta-Zerfall	Italien: LNGS (Prototyp-Phase)	Universitäten Dortmund, Dresden, Erlangen, Hamburg
UNTERWASSER / IM EIS			
NT-200	hochenergetische Neutrinos	Russland: Baikalsee	bis 2008: DESY
IceCube	hochenergetische Neutrinos	Antarktis: Amundsen-Scott-Station	DESY-Z, Universitäten Aachen, Berlin (HU), Bochum, Bonn, Dortmund, Mainz, München (TU), Wuppertal
PINGU	Neutrino-Oszillationen	Antarktis (geplant)	IceCube-Partner und Universität Erlangen
ANTARES	hochenergetische Neutrinos	Mittelmeer vor Toulon	Universität Erlangen
KM3NeT	hochenergetische Neutrinos	Mittelmeer (Prototyp-Phase)	Universitäten Erlangen, Tübingen

Helmholtz-Zentren: KIT (Karlsruher Institut für Technologie), DESY-HH, DESY-Z: Deutsches Elektronensynchrotron, Standorte in Hamburg bzw. Zeuthen, GSI Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt.

Max-Planck-Institute: MPIK, MPP, MPE, MPS, MPIfR: Max-Planck-Institute für Kernphysik (Heidelberg), Physik (München), Extraterrestrische Physik (Garching), Sonnensystemforschung (Katlenburg-Lindau) und Radioastronomie (Bonn), AEI: Albert-Einstein-Institute in Hannover und Potsdam.

LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso; LSM: Laboratoire Souterrain de Modane

Herausgeber:

KAT
Komitee für Astroteilchenphysik
www.kat-astroteilchen.de

Verantwortlich:
Dr. Christian Spiering
DESY
Platanenallee 6, D-15738 Zeuthen
christian.spiering@desy.de

Mit finanzieller Unterstützung von



DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft



Eine Publikation von:

Spektrum CUSTOM
PUBLISHING

Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg,
www.spektrum.de/cp

Leitung: Dr. Joachim Schüring

Redaktionsleiter: Dr. Uwe Reichert

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Bärbel Wehner

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.),
Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg,
Gabriela Rabe

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft
6/2012

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft /
Reinhold Henkel; Krebsnebel: ESO

Standorte der Astroteilchenphysik in Deutschland

