

Astroteilchenphysik

Erfolge und Perspektiven

Mit dem Begriff »Astroteilchenphysik« werden jene interdisziplinären Forschungsfelder bezeichnet, auf denen Teilchenphysik, Kosmologie und Astrophysik zusammenwirken. Obwohl die Wortschöpfung kaum drei Jahrzehnte alt ist, und obwohl sie sich erst in den 1990er Jahren wirklich durchgesetzt hat, reichen die Wurzeln der Astroteilchenphysik fast ein Jahrhundert zurück. Gegenwärtig erlebt die Astroteilchenphysik eine rasante Entwicklung.

Von Christian Spiering

Im Jahr 1912 wies der österreichische Physiker Viktor Hess während mehrerer Ballonflüge einen Anstieg der ionisierenden Strahlung mit zunehmender Höhe nach. Nicht lange darauf wurde klar, dass es sich dabei um Teilchenstrahlung hoher Energie, im Wesentlichen um Protonen sowie um leichte und schwere Atomkerne handelt, die aus dem Kosmos auf die Erdatmosphäre treffen, dort in 15 bis 20 Kilometer Höhe auf Luftmoleküle stoßen und dabei Lawinen sekundärer Teilchen auslösen. Diese Sekundärstrahlung hatte Viktor Hess nachgewiesen – im Jahre 1936 erhielt er für seine Entdeckung den Nobelpreis.

Die Erkenntnisse der Teilchenphysik speisten sich bis in die 1940er Jahre hinein zum größten Teil aus der kosmischen Strahlung (oder Höhenstrahlung, so der damals gebräuchlichere Begriff). Im Jahr 1932 wurde das erste Antiteilchen – das positive Elektron, kurz Positron – in der kosmischen Strahlung entdeckt, 1936 folgte ein schwerer Verwandter des Elektrons, das Myon, 1947 das Pion, erster Repräsentant der unübersehbaren Familie der so genannten Mesonen. Bis Anfang der 1950er Jahre blieb die kosmische Strahlung die Hauptquelle neu entdeckter Teilchen und lieferte die Grundlage des »Teilchenzoos«, zu dessen Erklärung knapp ein Jahrzehnt

danach das Quarkmodell vorgeschlagen wurde. Erst in der Mitte der 1950er Jahre traten die Teilchenbeschleuniger ihren Siegeszug an. Die Untersuchung der Höhenstrahlung verlor damit als Quelle neuer Erkenntnisse in der Teilchenphysik Schritt für Schritt an Bedeutung.

Die Geburt der Neutrinoastronomie

Mit einer einzigen Ausnahme verschwand die kosmische Teilchenphysik für etwa zwei Jahrzehnte aus dem Blickfeld der meisten Teilchenphysiker. Die Ausnahme stellten die Bemühungen dar, Neutrinos aus dem Sonneninnern nachzuweisen. Neutrinos waren 1930 von dem österreichischen Physiker Wolfgang Pauli zur Erklärung der »fehlenden« Energie im radioaktiven Beta-Zerfall postuliert worden.

Pauli nahm zunächst an, dass ihre geringe Reaktionswahrscheinlichkeit einen Nachweis prinzipiell verbieten würde. Nachdem in den 1940er Jahren mit den ersten Kernreaktoren extrem starke Neutrinoquellen entstanden waren, gelang es jedoch 1956 Frederick Reines und Clyde Cowan, am Savannah-River-Reaktor in den USA, eine Handvoll Neutrinoereaktionen aufzuzeichnen – dafür erhielt Reines 1995

IN KÜRZE

- Ein ganzer Zoo von Elementarteilchen strömt von außen auf die Erde ein. Die Sonne, Supernova-Überreste und Aktive Galaktische Kerne zählen zu ihren wichtigsten Quellen. Ihre Energien übertreffen die der irdischen Beschleuniger bei Weitem.
- Die Beschleunigung der geladenen Teilchen ist mit der Erzeugung von Gammastrahlen – Photonen höchster Energie – und Neutrinos verbunden. Photonen und Neutrinos erreichen die Erde ohne Ablenkung aus der Richtung ihrer Quellen.
- An der Erforschung dieser Phänomene beteiligen sich Teilchenphysiker, Astronomen und Kosmologen gleichermaßen. Sie betreffen die Grundlagen aller drei Disziplinen.

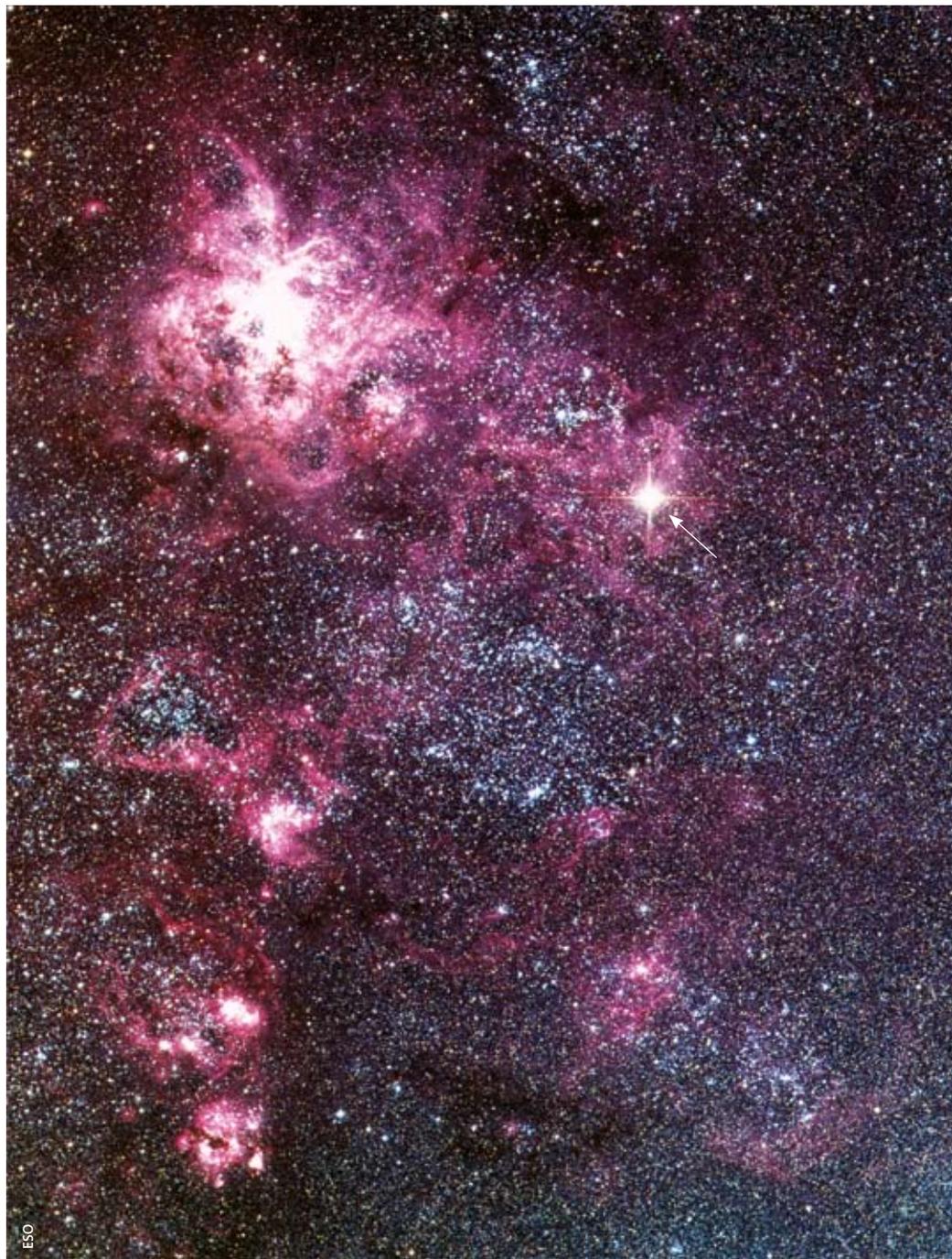
den Nobelpreis. Die geringe Reaktionsneigung erschwerte einerseits den Nachweis dieser Teilchen, andererseits erlaubt sie den Neutrinos, ungestört aus kompakten Himmelskörpern zu entweichen und unverfälschte Informationen aus deren Kernregionen zu übermitteln.

Die Bemühungen zum Nachweis von solaren Neutrinos wurden Anfang der 1970er Jahre durch ein Experiment von Raymond Davis (USA) von Erfolg gekrönt. Davis registrierte in seinem unterirdischen Detektor in der Homestake-Mine jedoch nur etwa ein Drittel des berechneten Flusses. Dieser Befund ließ zunächst Zweifel an der Messung aufkommen. Er wurde jedoch durch andere Experimente erhärtet und schließlich durch einen Mechanismus erklärt, den Bruno Pontecorvo (Dubna/UdSSR) bereits 1957 vorgeschlagen hatte.

Pontecorvo hatte angenommen, dass die drei verschiedenen Neutrinosorten sich innerhalb kurzer Zeit ineinander umwandeln (»oszillieren«) können. Der Davis-Detektor war nur für Neutrinos einer dieser drei Sorten, die Elektronneutrinos, empfindlich. Die in der Sonne erzeugten Neutrinos sind ebenfalls ausschließlich Elektronneutrinos. Weil sie sich aber auf ihrem achtminütigen Weg vom Sonneninneren zur Erde zu zwei Dritteln in Neutrinos der anderen beiden – zunächst nicht nachweisbaren – Sorten verwandeln, täuschte die gemessene Zählrate das erwähnte Defizit vor. Es sollte noch bis zum Jahre 2001 dauern, bis die Oszillationserklärung für das solare Neutrino Defizit hieb- und stichfest war und durch das Zusammenfügen der Daten vieler unterschiedlicher Experimente alle anderen Hypothesen ausgeschlossen werden konnten.

Oszillationen sind nur möglich, wenn die Neutrinos eine, wenn auch geringe, Ruhemasse besitzen. Sie stellen einen ersten Hinweis auf die Physik jenseits des ursprünglichen Standard-Modells der Teilchenphysik dar, und bemerkenswerterweise kam dieser Hinweis nicht von einem Experiment an einem Teilchenbeschleuniger, sondern aus der Astroteilchenphysik!

Raymond Davis erhielt 2002 den Nobelpreis für Physik. Er teilte ihn mit Masatoshi

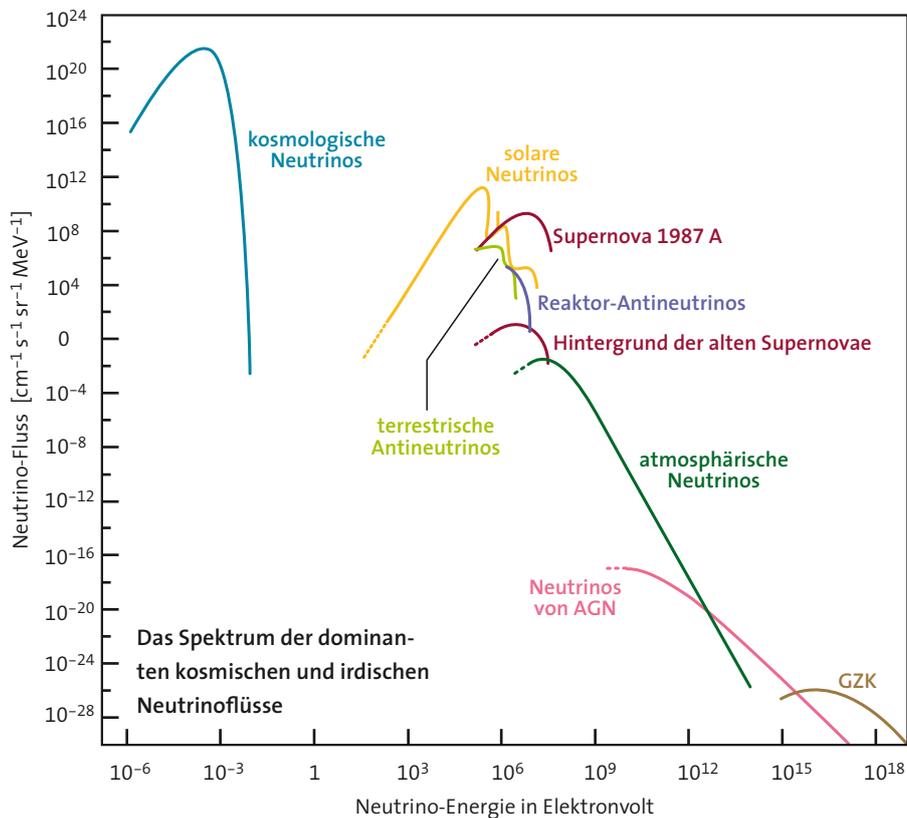


So begann die Neutrinoastronomie: Am 23. Februar 1987 konnte der japanische Detektor Kamiokande zwölf Neutrinos von der Supernova 1987A (Pfeil) in der Großen Magellanschen Wolke registrieren.

Koshiba (Japan), der mit seinem Kamiokande-Detektor ebenfalls solare Neutrinos gemessen hatte, dem aber am 23. Februar 1987 auch der spektakuläre Nachweis von zwölf Neutrinos aus einer Supernova-Explosion in der Großen Magellanschen Wolke gelungen war (Bild oben).

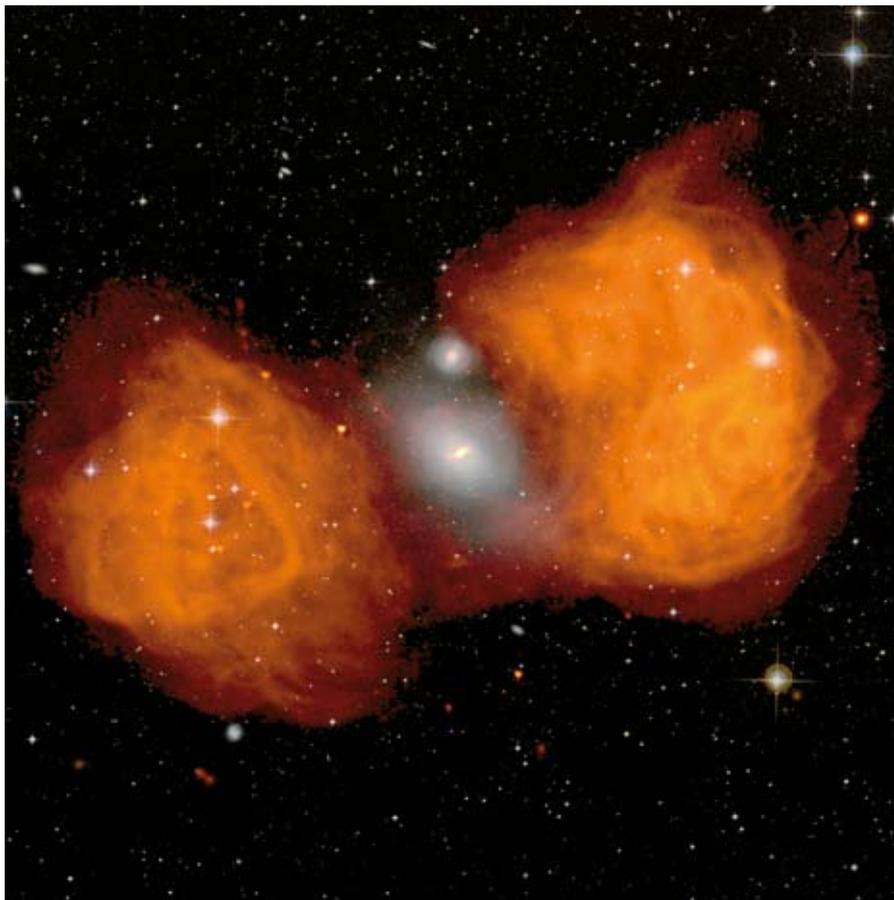
Die Messung von solaren Neutrinos bestätigt sehr genau das Modell zur Energieerzeugung im Sonneninneren, während die Neutrinos aus der Supernova 1987A eindrucksvoll die Vorstellungen über

den Kollaps des Sterninneren bei einer Supernova-Explosion bestätigten. Im Gegensatz zu dem jahrelangen Weg, der zum zweifelsfreien Nachweis der solaren Neutrinos führte, kam der Nachweis der Supernova-Neutrinos auf einen Schlag. Zudem gelang er, zeitgleich zu Kamiokande, auch dem IMB-Detektor (USA) und dem Baksan-Detektor (UdSSR). Der 23. Februar 1987 wird daher häufig als die eigentliche Geburtsstunde der Neutrinoastronomie bezeichnet.



Ch. Spiering

Die nebenstehende Grafik zeigt ein Übersichtsspektrum von Neutrinos aus unterschiedlichen kosmischen und irdischen Quellen. Sonnen-Neutrinos, Neutrinos von der Supernova 1987A, Neutrinos aus Kernreaktoren, aus der Erdkruste und aus der Atmosphäre (wo sie beim Aufprall kosmischer Primärstrahlen erzeugt werden) hat man schon nachgewiesen. Ein anderer garantierter, wenngleich noch nicht nachgewiesener Fluss ist jener von Neutrinos, die in Stößen höchstenergetischer Teilchen der kosmischen Strahlung mit Photonen der 3K-Hintergrundstrahlung entstehen, die so genannten GZK-Neutrinos (benannt nach den Physikern Greisen, Zatsepin und Kuzmin). Ebenso wie Neutrinos aus Aktiven Galaktischen Kernen (AGN, ein Beispiel zeigt das Bild unten links) und anderen kosmischen Beschleunigern dürften GZK-Neutrinos sehr wahrscheinlich durch die großen Neutrinooteleskope der nächsten Dekade wie etwa IceCube (siehe unten) nachgewiesen werden. Dagegen existiert bis heute keine praktikable Idee, wie man die extrem niederenergetischen Neutrinos aus dem Urknall (das Gegenstück zur 3K-Hintergrundstrahlung) messen kann.



NRAO/AUI/IM. Uson

Der Kern der elliptischen Riesengalaxie NGC 1316 (Bildmitte) emittiert zwei symmetrische, relativistische Plasma-Jets. Sie erzeugen die beiden 600 000 Lichtjahre großen Radioblasen (orange kodiert) auf beiden Seiten der Galaxie. Solche »zentralen Maschinen« sind höchstwahrscheinlich auch bedeutende Quellen der kosmischen Teilchenstrahlung höchster Energien.

Große Vereinheitlichende Theorien und der Zerfall von Protonen

Der Kamiokande-Detektor, ein mit dreitausend Tonnen Wasser gefüllter Tank in einer japanischen Mine, war ursprünglich mit einer ganz anderen Zielsetzung gebaut worden: dem Nachweis des Proton-Zerfalls. Die Großen Vereinheitlichenden Theorien der Teilchenphysik (Grand Unified Theories, GUTs), welche die einheitlichen Beschreibung von drei der vier Grundkräfte der Natur zum Ziel haben, sagen in ihren einfachsten Formulierungen voraus, dass die Lebensdauer des Protons 10^{29} bis 10^{32} Jahre beträgt, also etwa zwanzig Größenordnungen über dem Alter des beobachtbaren Universums. Trotzdem ist eine Messung dieser Lebensdauer möglich, zum Beispiel durch kontinuierliche Beobachtung von 10^{33} Protonen, von denen dann zehn oder mehr pro Jahr zerfallen müssten. 10^{33} Protonen entsprechen etwa dreitausend Tonnen Wasser. Kamiokande konnte keine Protonzerfälle nachweisen, und tatsächlich liegt die untere Grenze für die Lebensdauer des Protons inzwischen bei knapp 10^{34} Jahren.

Eine endliche Lebensdauer der Protonen hätte grundlegende Konsequenzen

für die Frühphase des Universums und stellt darum auch heute noch, jenseits der klaren Bestätigung von GUT-Modellen, eine zentrale kosmologische Frage dar. Der Protonzerfall ist eine klassische Demonstration des Brückenschlags zwischen Mikrokosmos und Makrokosmos, der Anfang der 1980er Jahre immer mehr Physiker in ihren Bann zog.

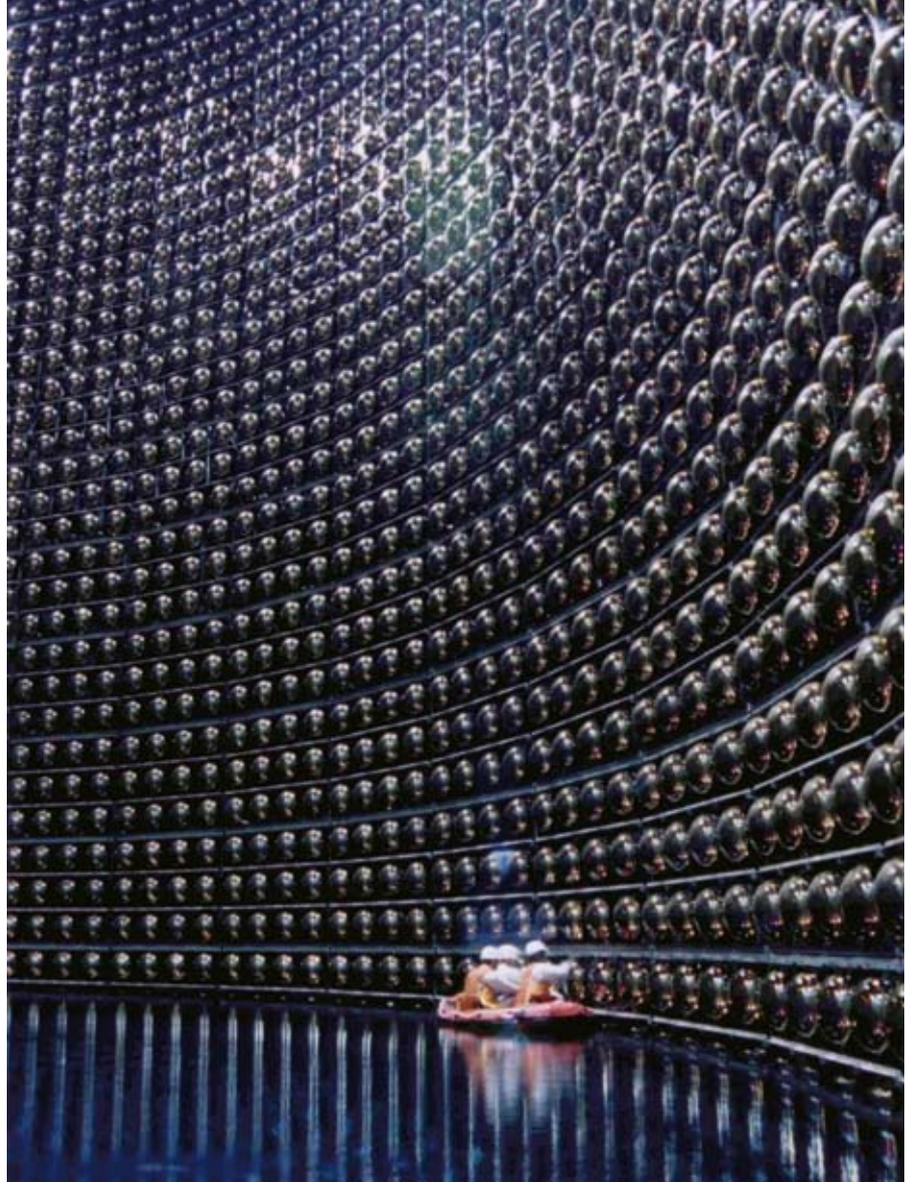
Die jetzige untere Grenze von 10^{34} Jahren für die Lebensdauer des Protons liegt verlockend nahe bei der Vorhersage einer großen Klasse von so genannten supersymmetrischen GUT-Modellen – weniger als eine Größenordnung darunter. Eine Verbesserung der Empfindlichkeit des gegenwärtigen Rekordhalter-Experiments Super-Kamiokande (Bild rechts) um einen Faktor 10 bis 30 erfordert allerdings gewaltige unterirdische Detektoren mit einer Masse im Bereich einer Megatonne. Wie im Falle von Kamiokande wäre ein solches Gerät auch zum Studium kosmischer Neutrinos geeignet. Es würde eine Supernova im Zentralbereich der Galaxis mit beispielloser Statistik nachweisen können: zehn- bis hunderttausend Ereignisse, verglichen mit lediglich zwölf Ereignissen für die Supernova 1987A.

Supernovae strahlen nicht nur 99 Prozent ihrer Energie über Neutrinos ab, sondern die meisten von ihnen würden wahrscheinlich ohne den Druck, den der von innen ausgehende Neutrinowind ausübt, gar nicht explodieren. Mit einigen zehntausend nachgewiesenen Neutrino-Ereignissen könnte der Explosionsmechanismus einer Supernova im Detail untersucht werden. Ein Megatonnendetektor würde auch präzise Untersuchungen des Sonneninnern und von Neutrinos aus dem Erdinnern erlauben.

Drei Nachweistechiken werden gegenwärtig diskutiert: Große Tanks, die a) mit Wasser (wie Kamiokande), b) mit Flüssigszintillator oder c) mit flüssigem Argon gefüllt sind. Die drei Ansätze sollen im Rahmen einer gemeinsamen Entwurfsstudie miteinander verglichen und bis etwa 2010 zu einem abgestimmten technischen Vorschlag geführt werden.

Das Hochenergie-Universum

Der Nachweis von Neutrinos von der Sonne und aus einer Supernova stellt nicht das einzige neue Fenster zum Universum dar, das durch die Astroteilchenphysik geöffnet wurde. Ein anderes Fenster hat sich durch die Beobachtung hochenergetischer



Kamioka Obs., ICRP

Super-Kamiokande besteht aus einem Tank, der mit 50 000 Tonnen hochreinem Wasser gefüllt ist. 11 200 Photomultiplier registrieren die Tscherenkow-Strahlung von Elektronen, die mit Neutrinos in Wechselwirkung treten. Die Anlage befindet sich etwa einen Kilometer unter der Erdoberfläche, um die Teilchen der kosmischen Strahlung abzuschirmen.

Gammastrahlen durch Tscherenkow-Teleskope aufgetan. Diese Instrumente registrieren das Licht, das durch die geladenen Sekundärteilchen aus Gammastrahl-Wechselwirkungen in den oberen Atmosphärenschichten erzeugt wird. Auf der nächsten Seite ist das Messprinzip am Beispiel der HESS-Teleskope in Namibia dargestellt.

Von der ersten Quelle im Teraelektronvolt-Bereich (TeV), die 1989 entdeckt wurde, über drei Quellen im Jahr 1996, zu nahezu 40 Quellen im Jahr 2006 hat der Hochenergiehimmel eine verblüffende Vielfalt neuer Phänomene und interessanter Details enthüllt. Die Grafik auf der folgenden Doppelseite unten verdeutlicht diese Entwicklung.

Allerdings konnte bisher keines dieser Objekte gleichzeitig eindeutig als Quelle

höchstenergetischer geladener kosmischer Strahlen (Protonen, Atomkerne) identifiziert werden. Die gemessenen Spektren deuten eher auf die Beschleunigung von Elektronen als auf die Beschleunigung von Protonen und Kernen in der Quellregion hin. Für einige dieser geladenen Teilchen hat man atemberaubende Energien gemessen – das Hundertmillionenfache der Energien, die mit irdischen Beschleunigern erreicht werden. Wie können kosmische Beschleuniger Protonen und Atomkerne auf so hohe Energien bringen? Handelt es sich bei den allerhöchsten Energien überhaupt um beschleunigte Teilchen, oder nicht um etwas ganz anderes – etwa um Zerfallsprodukte superschwerer Teilchen, die aus der Frühphase des Universums übrig geblieben sind? Diese Fragen sollen durch ein

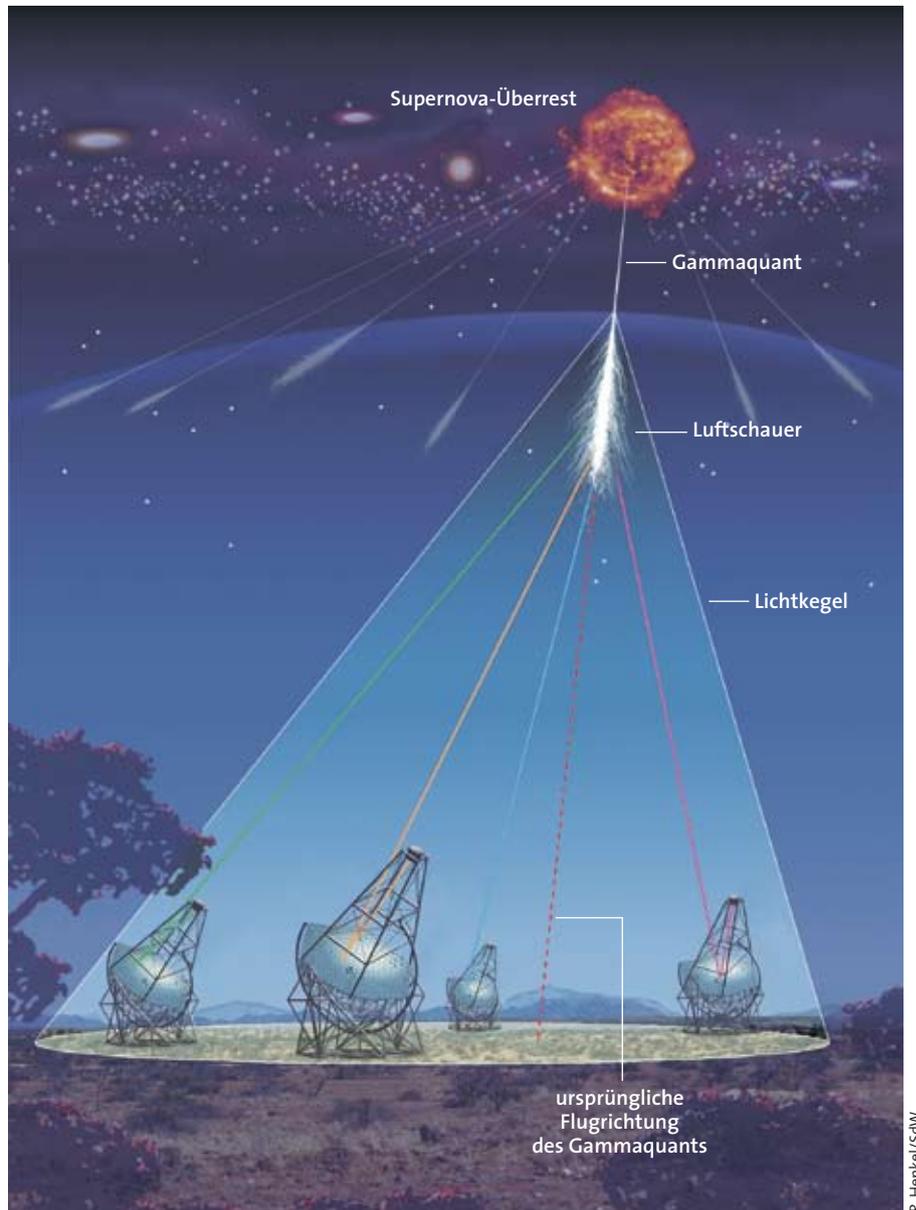
Zusammenspiel von neuen Detektoren für hochenergetische Gammastrahlung, geladene kosmische Teilchenstrahlung und Neutrinos gelöst werden.

■ **Geladene kosmische Strahlung:**

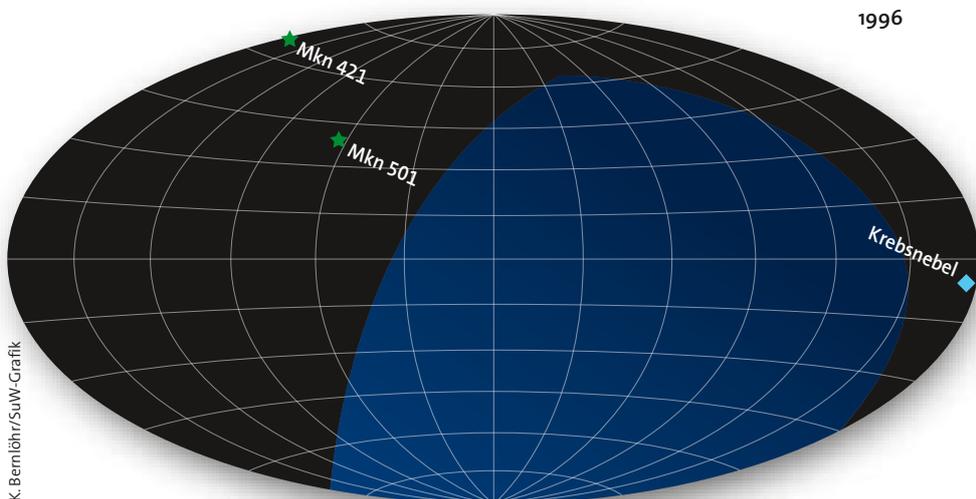
Das gegenwärtige Flaggschiff der Suche nach Quellen geladener kosmischer Teilchenstrahlung ist das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien. Das ist eine dreitausend Quadratkilometer überdeckende Anordnung von Wassertanks, bei deren Durchquerung Luftschauer-Teilchen Tscherenkow-Licht erzeugen. Die Tanks werden ergänzt durch Teleskope, die das Fluoreszenzlicht messen, das durch Luftschauer hoch in der Atmosphäre freigesetzt wird. Die Anlage kann die Richtung und Energie von Luftschauern messen und auch grob unterscheiden, ob es sich bei dem Primärteilchen um ein Proton, einen leichten Atomkern wie etwa Kohlenstoff oder einen schweren Kern wie Eisen handelt. Die pure Größe des Auger-Observatoriums erlaubt es, selbst bei Energien oberhalb von 10^{19} eV, für die der kosmische Fluss nur etwa ein Teilchen pro Jahr und Quadratkilometer beträgt (Grafik auf der rechten Seite oben), eine große Anzahl von Ereignissen zu registrieren.

Erst bei so hohen Energien ist die Ablenkung geladener Teilchen in kosmischen Magnetfeldern vernachlässigbar: Die Teilchen bewegen sich praktisch geradlinig durch den intergalaktischen Raum, und eine Identifizierung ihrer Quellen wird möglich. In den ersten Auger-Daten deutet sich auch tatsächlich eine Korrelation zwischen der Einfallsrichtung hochenergetischer Teilchen und der Verteilung naher aktiver Galaxien am Himmel an.

Die Daten werden zudem darüber Aufschluss geben, bis zu welchen Energien Objekte in unserer eigenen Galaxis Teilchen beschleunigen können und von wo ab nur noch extragalaktische Beschleuniger in Frage kommen. Im oberen Energiebereich, ab 10^{20} eV, werden die Kandidaten knapp. Genau genommen bleiben nur zwei bekannte Objektklassen übrig: Aktive Galaktische Kerne (AGN – Active Galactic Nuclei) und Gamma Ray Bursts (GRB). In beiden Fällen rotiert Materie in Form einer Scheibe um ein zentrales Schwarzes Loch und wird von diesem wie von einem Mahlstrom eingesaugt. Dabei werden große Mengen Gravitationsenergie freigesetzt. Diese Energie treibt riesige »Jets« an, Materieströme, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit,



Die vier HESS-Teleskope weisen hochenergetische Strahlung vom Boden aus nach. Ein von einer astronomischen Quelle ausgesandtes Gammaquant erzeugt in der oberen Erdatmosphäre einen Luftschauer aus sekundären Teilchen. Dieser Schauer erzeugt wiederum einen Lichtblitz, der sich kegelförmig ausbreitet und synchron von den vier Teleskopen der HESS-Anlage erfasst wird.



senkrecht zu der ursprünglichen Materie-scheibe, in den Raum ausbreiten. In den Stoßwellen entlang dieser Jets könnten Teilchen bis auf 10^{20} eV beschleunigt werden. Während AGN ihre Energie über Jahrmilliarden abgeben, strahlen GRB nur über einige Sekunden oder Minuten, dafür jedoch mit umso höherer Intensität. Interessanterweise scheint die Gesamtenergie, die von allen AGN und GRB zusammen genommen freigesetzt wird, gerade auszureichen, um auch die Energiedichte der kosmischen Strahlen zu erklären, und es liegt nahe, dieses Zusammentreffen nicht für zufällig zu halten.

Mit einer zum Auger-Observatorium in Argentinien analogen Anlage im US-Bundesstaat Colorado soll eine volle Himmelsabdeckung erreicht werden. Deutsche Forschungsgruppen spielen in beiden Projekten eine dominante Rolle.

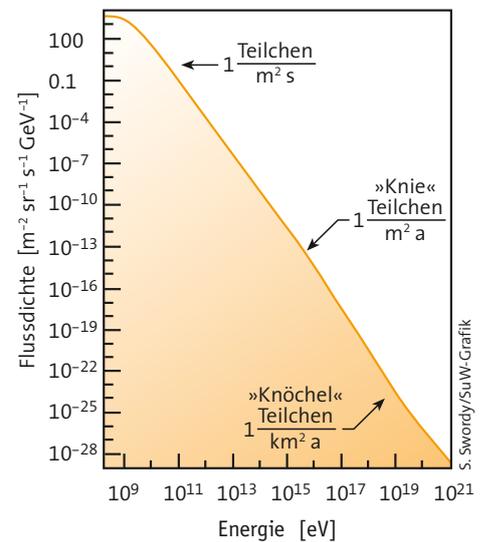
■ **TeV-Gammastrahlen:** Europäische Gruppen führen das Feld der erdgebundenen Gamma-Astronomie an. Die meisten der neuen, in der unten stehenden Grafik dargestellten Quellen wurden durch die Anlagen HESS in Namibia, eine Anordnung von vier Tscherenkow-Teleskopen (Bild links oben), sowie MAGIC auf La Palma (siehe nächste Seite) etabliert, bei denen die Länder Deutschland, Frankreich und Spanien federführend sind. Interessant ist, dass ein beträchtlicher Anteil dieser Quellen vorher in keinem anderen Wellenlängenbereich nachgewiesen wurde. Es ist darum nicht ausgeschlossen, dass hinter einigen dieser Quellen völlig neue astronomische Objektklassen und Phänomene stehen.

Ein Teleskop der nächsten Generation (das CTA – Cherenkov Telescope Array) wird etwa tausend Quellen erfassen kön-

nen. Damit würde dieses Gebiet auf das Niveau der Standard-Astronomie gehoben werden: Wir würden Phänomene untersuchen können, die zehnmal schwächer sind als die Nachweisgrenze von HESS und MAGIC. Wir würden also einen größeren Teil des Eisbergs sehen, mit dessen Spitze wir es bis jetzt zu tun haben, und völlig neue Einblicke in den Hochenergiehimmel erhalten.

■ **Hochenergie-Neutrinos:** Das Potenzial der hochenergetischen Neutrinoastronomie liegt auf der Hand: Neutrinos können uns aus Regionen erreichen, die für alle anderen Arten von Strahlung undurchsichtig sind. Und sie können uns, im Gegensatz zu Gammastrahlen, einen eindeutigen Beweis dafür liefern, dass in einem kosmischen Objekt Protonen beziehungsweise Kerne und nicht etwa nur Elektronen beschleunigt werden. DESY-Physiker in Zeuthen haben eine Schlüsselrolle bei Bau und Betrieb der beiden Pionierexperimente auf diesem Gebiet gespielt: NT200 im Baikalsee und AMANDA im südpolaren Eis. Das Licht von Neutrinoreaktionen wird dabei mit tief ins Wasser beziehungsweise Eis herabgelassenen Fotovervielfachern nachgewiesen. Zusammen mit deutschen Universitätsgruppen ist DESY auch prominent an IceCube, dem Folgeexperiment von AMANDA, beteiligt. Bei Fertigstellung von IceCube im Jahre 2011 wird ein Kubikmeter Eis mit 4800 Fotovervielfachern bestückt sein.

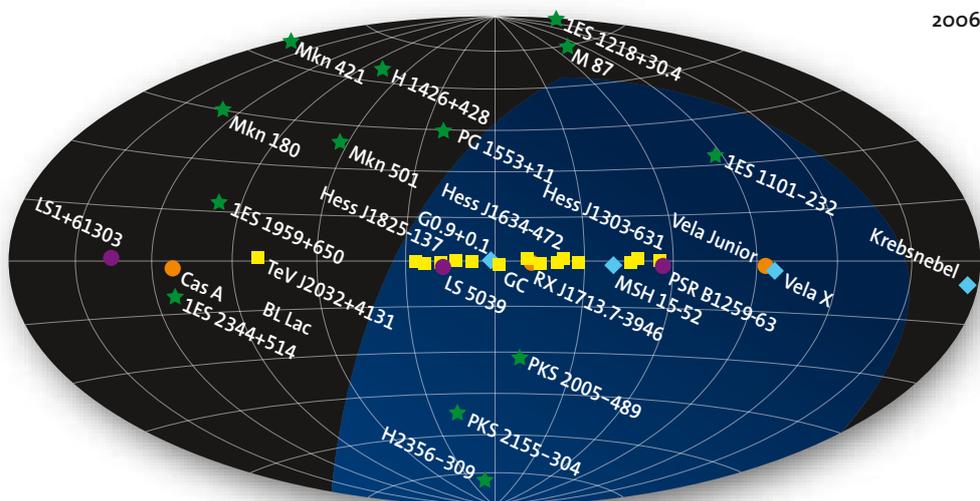
AMANDA ist bei hohen Energien zwar dreißigmal so empfindlich wie Superkamiokande, hat aber bisher noch keine extraterrestrischen Neutrinos nachweisen können, sondern »nur« Rekord-Obergrenzen für diese Neutrinos etabliert und damit eine Reihe allzu optimistischer



Das Spektrum der kosmischen Strahlung. Das »Knie« markiert die Energie, bis zu welcher in abgesprengten Supernova-Hüllen, den vermuteten Hauptquellen der galaktischen kosmischen Strahlung, ohne Weiteres Protonen beschleunigt werden können. Ab einem Bereich zwischen 10^{17} eV und 5×10^{18} eV (dem »Knöchel«) dominieren extragalaktische Beiträge.

theoretischer Vorhersagen ausschließen können (Bild auf Seite 52 unten): Obwohl die Anzahl der nachgewiesenen Neutrinos größer ist als die aller anderen bisherigen Experimente zusammen genommen, sieht man noch kein klares Anzeichen einer punktförmigen Quelle. Winkel- und Energieverteilung der Neutrinos sind mit der Annahme kompatibel, dass fast alle – oder sogar alle – von ihnen beim Aufprall kosmischer Protonen und Kerne in der Erdatmosphäre erzeugt wurden.

Allerdings war AMANDA von Beginn an eher als Prototyp-Teleskop und nicht als Endstufe der Entwicklung gedacht. Das Fol-



Die Zahl der bekannten TeV-Gammastrahlungsquellen hat sich von 1996 (ganz links) bis 2006 (links) vervielfacht. Im Jahr 1996 waren nur der Krebsnebel und zwei aktive Galaxien, Markarian 421 und Markarian 501, bekannt. Die meisten der im Jahr 2006 bekannten Quellen liegen in der galaktischen Ebene: Supernovarest, Doppelsystemen, aber auch Quellen, die noch in keinem anderen Wellenlängenbereich nachgewiesen werden konnten.



D. Dörner

Auf der kanarischen Insel La Palma arbeitet seit 2004 das Tscherenkow-Teleskop MAGIC (hinten links). Im Vordergrund ist sein derzeit im Bau befindlicher Zwilling MAGIC II zu sehen.

geexperiment IceCube (Bild rechts) wird 30 bis 100 mal so viele Neutrinos nachweisen können und damit eine Empfindlichkeit erreichen, bei der den theoretischen Vorhersagen zufolge das Entdeckungspotenzial sehr hoch ist.

Um eine vollständige Himmelsabdeckung zu erreichen, wird gegenwärtig ein analoges Projekt – KM₃NeT – im Mittelmeer vorbereitet. Eine von der Europäischen Union finanzierte Entwurfsstudie soll 2010 zu einem technischen Vorschlag und gegebenenfalls 2011/12 zum Baubeginn dieser Anlage führen.

Dunkle Materie

Nicht alle Zweige der Astroteilchenphysik können derzeit schon preiswürdige Entdeckungen vorweisen. Alle aber stoßen mittlerweile in Regionen mit klarem Entdeckungspotenzial vor. Als ein Beispiel sei die Suche nach Teilchen der Dunklen Materie angeführt. Wir glauben heute aufgrund vielfältiger Befunde, dass der größte Teil des kosmischen Inventars nicht aus jener Materie besteht, aus der auch wir selbst bestehen – also nicht aus Protonen, Neutronen und Elektronen, und auch nicht aus den anderen bekannten Teilchen,

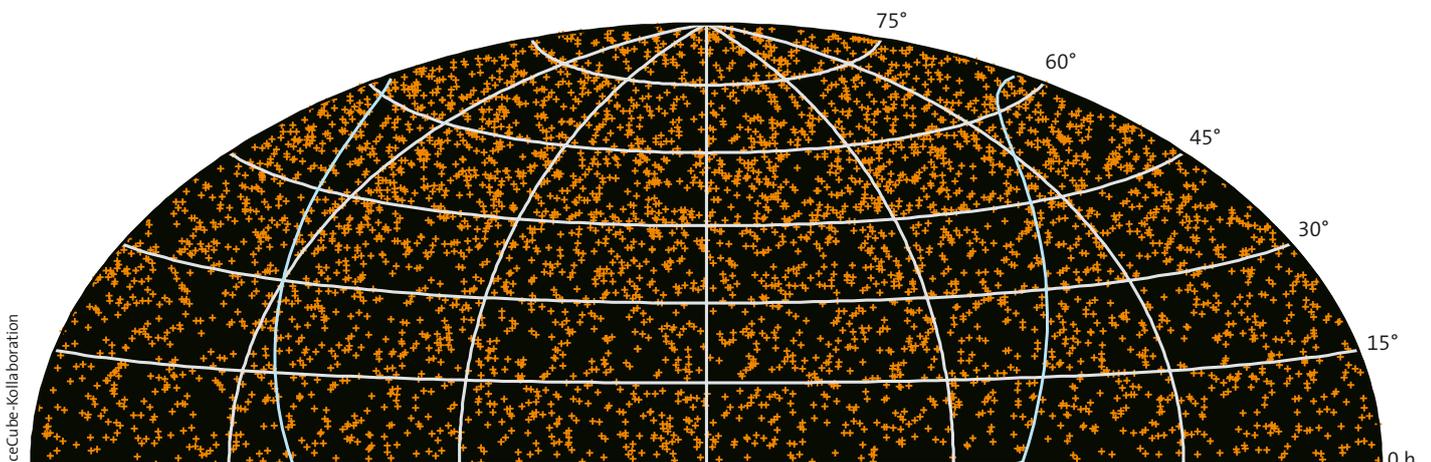
die bisher künstlich an Beschleunigern erzeugt wurden.

Die Dunkle Materie tritt nur schwach mit der normalen Materie in Wechselwirkung. Darin ist sie den Neutrinos ähnlich. Ihre Konstituenten scheinen aber im Vergleich zu den Neutrinos sehr schwer zu sein. Die gegenwärtig favorisierten Kandidaten hierfür sind schwach wechselwirkende massereiche Teilchen – Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) – die im frühen Universum erzeugt worden sind, und hier insbesondere das leichteste Teilchen der sogenannten Minimal Super-Symmetrischen Modelle (MSSM) der Teilchenphysik.

Typische Experimente zur Suche nach den WIMPs sollen die Kernrückstoßprodukte nachweisen, die bei den seltenen Reaktionen von WIMPs in unterirdischen Detektoren erzeugt werden. Bei den Detektoren handelt es sich einerseits um hochreine Kristalle, zum Beispiel aus Germanium, Silizium oder CaWO₄, die bei Temperaturen von 10 bis 20 Millikelvin (also 10 bis 20 tausendstel Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt) betrieben werden, andererseits um flüssige Edelgase wie Xenon oder Argon. Man misst die extrem geringen Licht- und Ionisationsig-

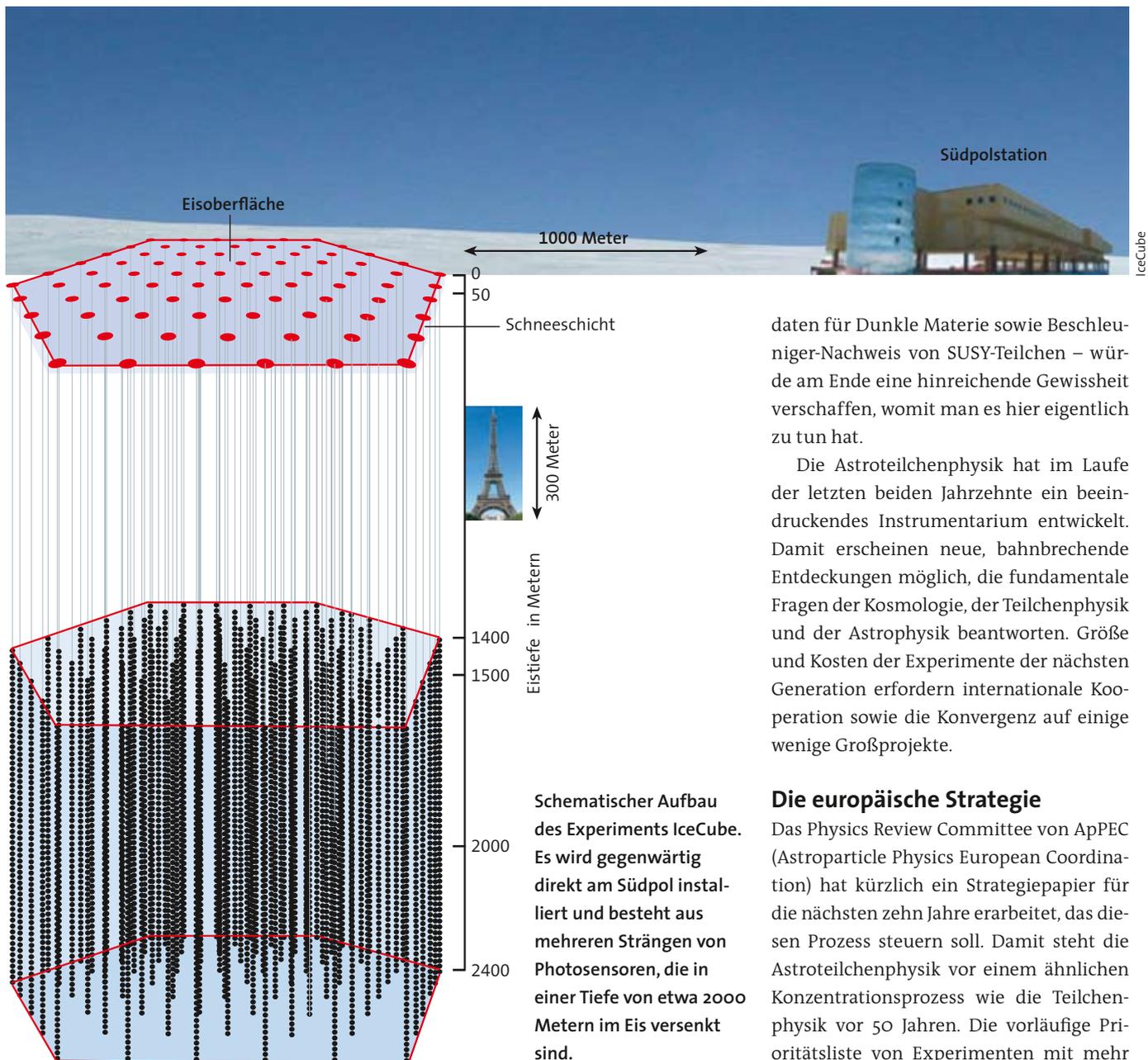
nale (bei den Kristalldetektoren auch die Wärmeschwingungen), die durch das Rückstoßprodukt erzeugt werden. Bis jetzt sind noch keine klaren WIMP-Kandidaten identifiziert worden, allerdings ist die Empfindlichkeit der Experimente in den letzten fünf Jahren um zwei Größenordnungen verbessert worden. Bis Ende 2008 wird ein zusätzlicher Faktor 10 erwartet. Damit bewegt man sich tief in den Parameterraum der MSSM-Vorhersagen hinein.

Eine nächste Generation von Detektoren, die in sieben bis acht Jahren bereitstehen könnte, wird um einen weiteren Faktor 100 empfindlicher sein und damit fast den gesamten im Rahmen des MSSM möglichen Parameterraum abdecken. Damit besteht eine sehr reale Chance, die Teilchen der Dunklen Materie direkt nachzuweisen und damit eine der fundamentalen kosmologischen Fragen zu beantworten – immer vorausgesetzt, dass es sich dabei tatsächlich um MSSM-WIMPs handelt. Auf dem Weg dahin müssen die gegenwärtigen weltweit 25 Suchexperimente rigoros auf bezahlbare zwei bis drei Experimente zusammengeführt werden. Die Masse der Detektoren, die gegenwärtig im Bereich einiger zehn Kilogramm liegt,



IceCube-Kollaboration

Diese Himmelskarte zeigt die mit AMANDA in den Jahren 2000 bis 2004 nachgewiesenen 4382 Neutrinos.



IceCube

daten für Dunkle Materie sowie Beschleuniger-Nachweis von SUSY-Teilchen – würde am Ende eine hinreichende Gewissheit verschaffen, womit man es hier eigentlich zu tun hat.

Die Astroteilchenphysik hat im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte ein beeindruckendes Instrumentarium entwickelt. Damit erscheinen neue, bahnbrechende Entdeckungen möglich, die fundamentale Fragen der Kosmologie, der Teilchenphysik und der Astrophysik beantworten. Größe und Kosten der Experimente der nächsten Generation erfordern internationale Kooperation sowie die Konvergenz auf einige wenige Großprojekte.

Die europäische Strategie

Das Physics Review Committee von ApPec (Astroparticle Physics European Coordination) hat kürzlich ein Strategiepapier für die nächsten zehn Jahre erarbeitet, das diesen Prozess steuern soll. Damit steht die Astroteilchenphysik vor einem ähnlichen Konzentrationsprozess wie die Teilchenphysik vor 50 Jahren. Die vorläufige Prioritätsliste von Experimenten mit mehr als 50 Millionen Euro Kosten umfasst die folgenden Projekte:

■ **TeV-Gammaastronomie:** Das CTA-Observatorium, möglichst mit je einem Standort auf der Nord- und Südhalbkugel. Kosten für CTA Nord/Süd: 50 beziehungsweise 100 Millionen Euro, der größte Teil davon aus Europa. Prototypen sollten bis 2011 entwickelt sein, angestrebter Baubeginn ist 2012.

■ **Hochenergie-Neutrinoastronomie:** KM3NeT, ein Teleskop auf der Kubikkilometer-Skala im Mittelmeer, als Gegenstück zu IceCube am Südpol. Gesamtkosten mindestens 200 Millionen Euro. Angestrebter Baubeginn ist 2012.

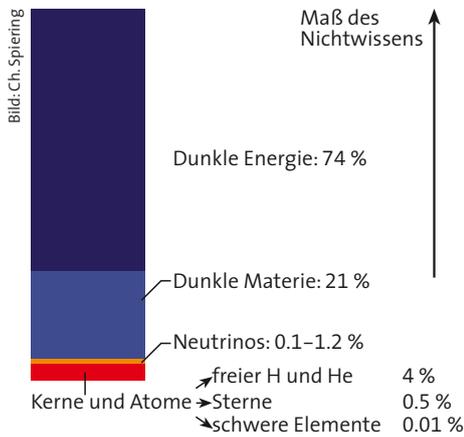
■ **Astronomie mit kosmischen Strahlen:** Auger-Nord, als Gegenstück zu Auger-Süd in Argentinien. Kosten bei 90 Millionen Euro, davon etwa die Hälfte aus Europa. Angestrebter Baubeginn ist 2011.

wird dabei auf eine Tonne oder mehr angewachsen müssen.

Die erwähnten Experimente zum »direkten« Nachweis werden flankiert durch »indirekte« Suchexperimente. WIMPs könnten aufgrund ihrer Masse von der Schwerkraft großer Himmelskörper wie etwa der Sonne eingefangen werden. Langsam aber sicher sammelt sich dort ein dichter Schwarm von WIMPs an, der im Zentrum der Sonne nahezu unbeeinflusst durch die normale Materie als unsichtbare Wolke schwebt. Gelegentlich stoßen zwei WIMPs zusammen und zerstrahlen in zwei Bündel normaler Elementarteilchen, darunter auch Neutrinos. Wenn Dunkle Materie tatsächlich aus WIMPs bestehen sollte, dann müsste man also gelegentlich eines der Zerfalls-Neutrinos aus der Richtung der Sonne beobachten. Diese Neutri-

nos besitzen eine viel höhere Energie als diejenigen, die bei den solaren Fusionsreaktionen erzeugt werden. Unterirdische Neutrinodetektoren, das Baikal-Teleskop und AMANDA haben bisher keinen solchen Überschuss von der Sonne oder aus dem Erdzentrum beobachtet. IceCube wird die WIMP-Suche mit dreißigfacher Empfindlichkeit fortsetzen.

Während Astroteilchenphysiker mit den beschriebenen Methoden nach Kandidaten der Dunklen Materie suchen, hoffen die Teilchenphysiker, am neuen Large Hadron Collider (LHC) Hinweise auf Super-Symmetrie (SUSY)-Teilchen zu finden. Der LHC soll noch in diesem Jahr am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf in Betrieb gehen. Erst die Synthese aller drei Befunde – direkter und indirekter Nachweis kosmischer Kandi-



Das kosmische Inventar besteht den gegenwärtigen Modellen zufolge nur zu vier bis fünf Prozent aus »normaler« Materie, zu 21 Prozent aus Dunkler Materie und zu 74 Prozent aus Dunkler Energie. Was hinter dem Schlagwort Dunkle Energie steht, ist gegenwärtig völlig unklar. Hinweise darauf erwartet man allerdings eher aus der klassischen Astronomie als aus der Astroteilchenphysik.

■ **Suche nach Dunkler Materie:** Ein oder zwei Experimente mit Massen von einer Tonne oder mehr. Kosten für beide Experimente einschließlich der Infrastruktur 150 bis 170 Millionen Euro. Prioritätsentscheidung 2010/11.

■ **Neutrinomasse:** Experimente zur Bestimmung der Neutrinomasse wurden in diesem Artikel nicht näher behandelt – gelegentlich werden sie eher zur Teilchenphysik als zur Astroteilchenphysik gerechnet. Die Masse der Neutrinos ist für die Kosmologie von Bedeutung. Gegenwärtig sind vier große europäische Experimente im Aufbau: KATRIN (in Karlsruhe) sowie die unterirdischen Experimente GERDA, CUORE, und Super-NEMO. Ein noch größeres Projekt auf der Skala von 100 Millionen Euro dürfte frühestens Mitte des nächsten Jahrzehnts spruchreif sein.

■ **Protonzerfall und Niederenergie-Neutrinoastronomie:** Ein großer Detektor mit einer Masse im Megatonnen-Bereich soll in weltweiter Zusammenarbeit entstehen, in enger Koordination der Europäer mit den USA und Japan. Die Kosten werden zwischen 400 und 600 Millionen Euro betragen. Die Entscheidung über die beste Technologie sollte zwischen 2010 und 2012 getroffen werden, möglicher Baubeginn ist ab 2013/14.

■ **Gravitationswellen:** Auch Gravitationswellen-Detektoren wurden in diesem

Artikel nicht behandelt – sie werden häufig eher zur Astronomie als zur Astroteilchenphysik gerechnet. Mit den Endausbaustufen der gegenwärtigen Detektoren (LIGO in den USA, VIRGO in Italien, GEO-600 in Deutschland) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit in den Jahren 2012/2013 die Entdeckung der ersten Quellen zu erwarten. Der Vorstoß in den eigentlichen Astronomie-Bereich (viele tausend Quellen) wird jedoch erst mit einem Detektor der nachfolgenden Generation beginnen. Er wird sich unter der Erde befinden und vermutlich 500 Millionen Euro kosten. Bedingung: Erste Entdeckungen müssen mit LIGO, VIRGO und GEO-600 gelingen. Parallel dazu wird LISA entwickelt, ein weltraumgestütztes Detektorsystem, das im Jahr 2018 in den Orbit gebracht werden soll.

Einiges spricht dafür, dass die Astroteilchenphysik am Beginn eines »goldenen Zeitalters« steht, ähnlich dem Zeitalter, in dem die Astronomie sich seit einem halben Jahrhundert befindet. Auf einige baldige Entdeckungen darf man getrost wetten – etwa auf die Entdeckung der Quellen kosmischer Strahlung. Vielleicht werden wir in der nächsten Dekade auch erfahren, woraus Dunkle Materie besteht und welche Massen Neutrinos haben.

Vielleicht werden wir aber auch völlig neue Phänomene entdecken, wie dies immer wieder der Fall war, wenn neue, empfindliche Geräte in Betrieb gingen. Man denke an die Entdeckung der Jupitermonde, die Entdeckung von Quasaren und Pulsaren, oder die Entdeckung von Röntgensternen – alles Phänomene, die nicht auf der »Einkaufsliste« der Wissenschaft standen, sondern teilweise völlig unerwartet kamen und die Bildung neuer Begriffe erforderten. Der erste Fall ist mit dem erstmaligen Einsatz des optischen Teleskops durch Galileo Galilei verknüpft, der zweite mit der Entwicklung von Radioteleskopen und der dritte mit dem Start von Röntgensatelliten. Eine Verbesserung um den Faktor 10 in einem entscheidenden Teleskop-Parameter führte oft, um den Faktor 100 sehr häufig und um den Faktor 1000 fast immer zu einem unerwarteten Durchbruch.

In diesem Sinne hat Francis Halzen, der Spiritus rector von IceCube, einmal bemerkt: »Nothing is guaranteed, but history is on our side.« Was die nächsten zehn Jahre der Astroteilchenphysik den Forschern auch im Einzelnen bringen mögen – sie werden in jedem Fall außerordentlich spannend!

Dieser Beitrag ist die vom Verfasser leicht überarbeitete Version eines anlässlich des 80. Geburtstages von Karl Lanus, dem langjährigen Direktor des Zeuthener Instituts, in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät, Bd. 93/2007, erschienenen Artikels.



CHRISTIAN SPIERING

leitet die Neutrino-Astrophysik-Gruppe bei DESY in Zeuthen, die an den internationalen Kollaborationen am Baikalsee und am Südpol beteiligt ist. Er ist Vorsitzender des

europäischen Strategie-Komitees zur Astroteilchenphysik.

Literaturhinweise

Gruppen, C.: Astroteilchenphysik, Springer-Verlag, 2000.

Science 315, S. 55–72, 2007: Ausgabe mit Schwerpunkt Astroteilchenphysik.

Aufmuth, P.: An der Schwelle zur Gravitationswellen-Astronomie. In: Sterne und Weltraum 1/2007, S. 26–32.

Brunner, J.: ANTARES – Astronomie in der Tiefsee. In: Sterne und Weltraum 5/2006, S. 38–45.

De Angelis, A., Peruzzo, L.: Das Gammastrahlenteleskop MAGIC. In: Sterne und Weltraum 8/2007, S. 26–36.

Wolschin, G.: Das Neutrino-Problem: Ende einer unendlichen Geschichte. In: Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 20–22.

Hörandel, J. R.: Astronomie mit geladenen Teilchen. In: Sterne und Weltraum 1/2008, S. 28–35.

Klein, U. et al.: Galaxien und Dunkle Materie. In: Sterne und Weltraum 9/2005, S. 28–36.

Spiering, Ch.: Neutrinojagd am Südpol. In: Sterne und Weltraum 12/2004, S. 30–32.

Völk, H. J.: Neue Ergebnisse der Gamma-Astronomie. In: Sterne und Weltraum 8/2006, S. 36–45.

Weitere Weblinks zum Thema, siehe unter www.astronomie-heute.de/artikel/951533.

Der vollständige Text der Astroteilchen-Roadmap ist zu finden unter:

www.aspera-eu.org

Preishammer



80mm f/6 ED APO Optik
mit Tubus mit 2"
Zenitspiegel und Koffer

~~€ 865.-~~

nur noch **€ 599.-**



80mm f/6 ED APO Optik mit opt. Tubus

~~€ 720.-~~

nur noch **€ 499.-**



127mm f/7.5 ED APO Optik
mit opt. Tubus

~~€ 1.990.-~~

nur noch **€ 1.499.-**

127mm f/7.5 ED APO Optik mit
Tubus mit 2" Zenitspiegel
und Koffer

~~€ 2.190.-~~ nur noch **€ 1.599.-**

LXD75AT Montierung mit
Stativ & Autostar #497



~~€ 729.-~~

nur noch **€ 599.-**

Poststrasse 79
66780 Rehlingen

Tel: 06835 - 500671
Fax: 06835 - 500673



APM
TELESCOPES

www.apm-telescopes.de