

Christian Spiering

## **Astroteilchenphysik – Erfolge und Perspektiven**

Mit dem Begriff „Astroteilchenphysik“ werden jene interdisziplinären Forschungsfelder bezeichnet, die die Schnittmenge von Teilchenphysik, Kosmologie und Astrophysik überdecken [1]. Obwohl die Wortschöpfung kaum drei Jahrzehnte alt ist, und obwohl sie sich erst in den neunziger Jahren wirklich durchgesetzt hat, reichen die Wurzeln der Astroteilchenphysik fast ein Jahrhundert zurück.

### **Kosmische Strahlen und frühe Teilchenphysik**

Im Jahr 1912 maß der österreichische Physiker Viktor Hess während mehrerer Ballonflüge mit zunehmender Höhe einen Anstieg der ionisierenden Strahlung. Nicht lange darauf wurde klar, dass es sich dabei im wesentlichen um Protonen, leichte und schwere Kerne handelt, die aus dem Kosmos auf die Erdatmosphäre treffen, dort in 15-20 km Höhe auf Luftmoleküle stoßen und Lawinen sekundärer Teilchen auslösen. Diese Sekundärstrahlung hatte Hess gemessen (Nobelpreis 1936).

Die Erkenntnisse der Teilchenphysik speisten sich bis in die vierziger Jahre zum größten Teil aus der kosmischen Strahlung (oder *Höhenstrahlung*, so der damals gebräuchlichere Begriff). 1932 wurde das erste Anti-Teilchen – 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 sog. Mesonen. Bis Anfang der fünfziger Jahre blieb die kosmische Strahlung die Hauptquelle neu entdeckter Teilchen und legte die Grundlage des „Teilchenzoos“, zu dessen Erklärung knapp ein Jahrzehnt danach das Quarkmodell vorgeschlagen wurde. Erst in der Mitte der fünfziger Jahre traten die Teilchen-Beschleuniger ihren Siegeszug an. Die Untersuchung der Höhenstrahlung, die auch den Beginn der Laufbahn von Karl Lanius markiert, 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 vierziger 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 (Nobelpreis 1995 an Reines). Die geringe Reaktionsneigung erschwert einerseits den Nachweis dieser Teilchen, andererseits erlaubt sie 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 siebziger Jahre durch ein Experiment von Raymond Davis (USA) von Erfolg gekrönt. Davis maß 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) schon 1957 geäußert hatte. Pontecorvo hatte angenommen, dass die unterschiedlichen Neutrinosorten sich ineinander umwandeln („oszillieren“) können. Der Davis-Detektor war nur auf Neutrinos einer dieser drei Sorten, auf Elektronneutrinos, empfindlich. Die in der Sonne erzeugten Neutrinos sind ebenfalls ausschließlich Elektronneutrinos. Deren teilweise Verwandlung in Neutrinos der anderen beiden, zunächst nicht nachweisbaren Sorten täuschte darum das erwähnte Defizit vor. Es sollte noch bis zum Jahre 2001 dauern, bis die Oszillationserklärung für das solare Neutrinodefizit 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 Ruhemasse der Neutrinos ungleich Null ist. Sie stellen möglicherweise einen ersten Hinweis auf Physik jenseits des Standard-Modells der Teilchenphysik dar, und bemerkenswerter Weise 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 Koshiba (Japan), der mit seinem Kamiokande-Detektor ebenfalls solare Neutrinos gemessen hatte [2], dem aber darüber hinaus am 23. Februar 1987 der spektakuläre Nachweis von 12 Neutrinos aus einer Supernova-Explosion in der Großen Magellanschen Wolke gelungen war. Die Messung von solaren Neutrinos bestätigt sehr genau das Modell zur der Energieerzeugung im Sonneninnern, während die Neutrinos aus der Supernova 1987A eindrucksvoll die Vorstellungen über den Kollaps des Sterninnern 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.

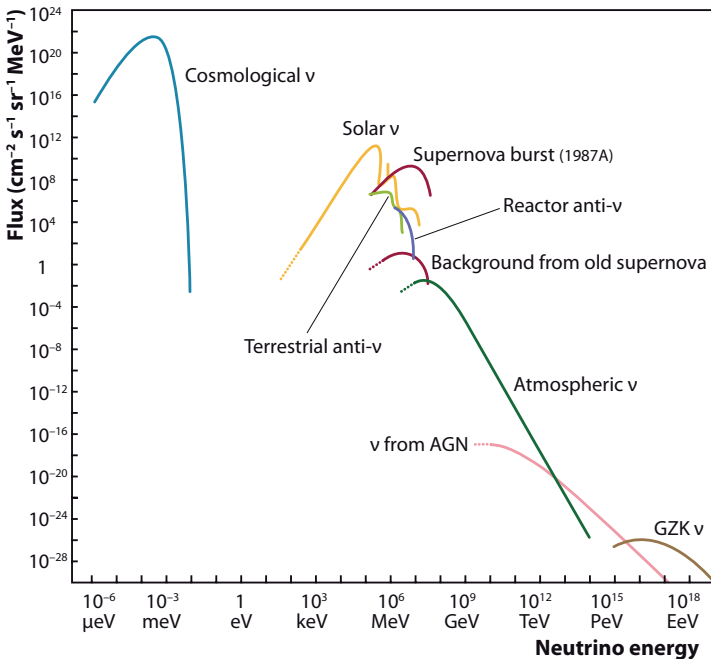


Abb.1: Das Spektrum der dominanten kosmischen und irdischen Neutrinoflüsse.

Abb. 1 zeigt ein Übersichtsspektrum von Neutrinos aus unterschiedlichen kosmischen und irdischen Quellen. Sonnen-Neutrinos, Neutrinos von der Supernova SN1987A, Neutrinos aus Kernreaktoren, aus der Erdkruste („terrestrial neutrinos“) 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 kosmischer Strahlung mit der 3K-Hintergrundstrahlung entstehen, die sog. GZK-Neutrinos (benannt nach Greisen, Zatsepin und Kuzmin). Ebenso wie Neutrinos aus Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und anderen kosmischen Beschleunigern dürften GZK-Neutrinos sehr wahrscheinlich durch die großen Neutrino teleskope der nächsten Dekade wie etwa IceCube (s.u.) nachgewiesen werden. Dagegen existiert bis heute keine praktikable Idee, wie man die extrem niederenergetischen Neutrinos aus dem Urknall (das Pendant zur 3K-Hintergrundstrahlung) messen kann.

### **Große Vereinheitlichende Theorien und der Zerfall von Protonen**

Der Kamiokande-Detektor, ein mit 3000 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), die die einheitliche Beschreibung von drei der vier Grundkräfte der Natur zum Ziel haben, sagen in ihren einfachsten Formulierungen eine Proton-Lebensdauer von  $10^{29}$ – $10^{32}$  Jahren voraus, also etwa zwanzig Größenordnungen über dem Alter des beobachtbaren Universums. Trotzdem ist ein Nachweis möglich, z.B. durch Beobachtung von  $10^{33}$  Protonen, von denen dann zehn oder mehr pro Jahr zerfallen müssten.  $10^{33}$  Protonen entsprechen etwa 3000 Tonnen Wasser. Kamiokande konnte keine Protonzerfälle nachweisen, und tatsächlich liegt die Untergrenze für die Protonlebensdauer inzwischen bei knapp  $10^{34}$  Jahren.

Eine endliche Lebensdauer von 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 achtziger Jahre immer mehr Physiker in ihren Bann zog – unter ihnen auch Karl Lanus und mich selbst [3,4].

Die jetzige Untergrenze von  $10^{34}$  Jahren für die Lebensdauer des Protons ist verlockend nahe an der Vorhersage einer großen Klasse von sog. supersymmetrischen GUT-Modellen – weniger als eine Größenordnung. Eine Verbesserung der Sensitivität des gegenwärtigen Rekordhalter-Experiments Super-Kamiokande um einen Faktor 10–30 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:  $10^4$ – $10^5$  Ereignisse, verglichen mit lediglich 12 Ereignissen für SN1987A. Supernovae strahlen nicht nur 99% 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 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 Nachweistechniken 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. Je nach Methode und tatsächlicher Größe werden die Kosten zwischen 400 und 800 M€ geschätzt, mit einem Baubeginn ab 2013/2014.

### **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 Gamma-Strahlen durch Čerenkov-Teleskope aufgetan [5]. Diese Instrumente registrieren das Licht, das durch die geladenen Sekundärteilchen aus Gammastrahl-Wechselwirkungen in den oberen Atmosphärenschichten erzeugt wird. Von der ersten Quelle im Tera-Elektronvolt (TeV)-Bereich, die 1989 entdeckt wurde, über 3 Quellen im Jahr 1996, zu nahezu 40 Quellen im Jahr 2006 hat der Hochenergie-Himmel eine verblüffende Vielfalt neuer Phänomene und interessanter Details enthüllt (Abb.2).



*Geladene kosmische Strahlen:* Das gegenwärtige Flaggschiff der Suche nach Quellen geladener kosmischer Strahlen ist das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien [6]. Dabei handelt es sich um eine 1000 km<sup>2</sup> überdeckende Anordnung von Wassertanks, bei deren Durchquerung Luftschauer-Teilchen Čerenkov-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 eine Proton, einen leichten Kern wie etwa Kohlenstoff oder einen schweren Kern wie Eisen handelt. Die pure Größe des Auger-Observatoriums erlaubt es, selbst bei Energien oberhalb von 10<sup>19</sup> eV, für die der kosmische Fluss nur etwa ein Teilchen pro Jahr und Quadratkilometer beträgt (Abb.3), eine große Anzahl von Ereignissen zu registrieren.

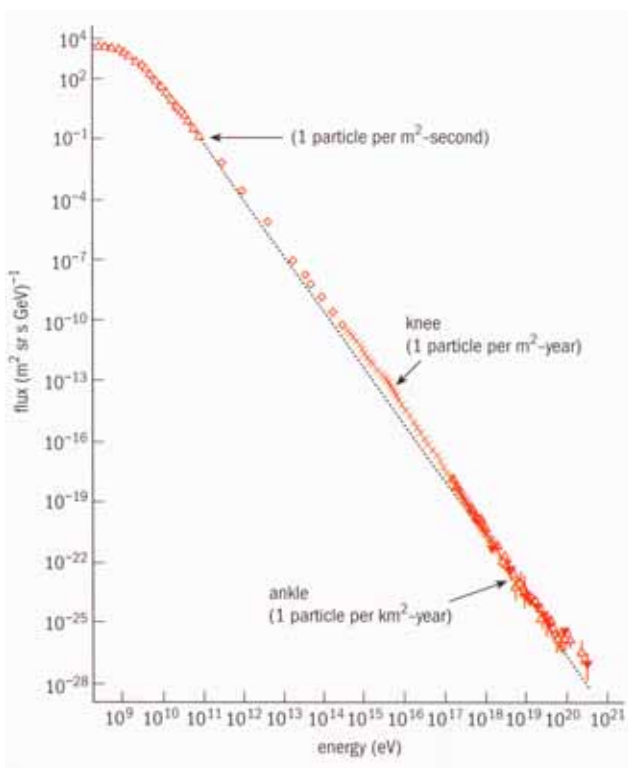


Abb.3: Das Spektrum der kosmischen Strahlung

Erst bei so hohen Energien ist die Ablenkung geladener Teilchen in kosmischen Magnetfeldern vernachlässigbar und eine Quellidentifizierung möglich. Die Auger-Daten werden darum mit hoher Sicherheit zur erstmaligen Lokalisierung von Quellen hochenergetischer Protonen und Kerne führen. Sie werden darüber hinaus 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 Schwarzes Loch und wird von diesem wie von einem Malstrom eingesaugt. Dabei werden große Mengen Gravitationsenergie freigesetzt. Diese Energie treibt riesige „Jets“ an, Materieströme, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit, senkrecht zu der ursprünglichen Materiescheibe, 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 größerer Intensität. Interessanterweise scheint die Gesamtenergie, die von allen AGN und GRB zusammengenommen 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 in Colorado/USA soll eine volle Himmelsabdeckung erreicht werden (Kosten etwa 85 M€, geplanter Baubeginn 2010). Deutsche Gruppen spielen in beiden Projekten eine dominante Rolle.

*TeV-Gammastrahlen:* Europäische Gruppen führen das Feld der erdgebundenen Gamma-Astronomie an. Die meisten der neuen Quellen in Abb.2 wurden durch H.E.S.S., eine Anordnung von vier Čerenkov-Teleskopen in Namibia, sowie MAGIC, ein Zwillingsteleskop in La Palma, etabliert, mit den federführenden Ländern Deutschland, Frankreich und Spanien. Interessant ist, dass ein beträchtlicher Anteil der Quellen vorher in keinem anderen Wellenlängenbereich gesichtet wurde (markiert als *unidentified*). Es ist darum nicht ausgeschlossen, dass hinter einigen dieser Quellen völlig neue astronomische Objektklassen und Phänomene stehen. Ein Teleskop der nächsten Generation (CTA – Cherenkov Telescope Array) wird etwa tausend Quellen erfassen können. Damit würde dieses Gebiet auf das Niveau der Standard-Astronomie



gehoben werden. Wir würden Phänomene erfassen können, die zehnmal schwächer sind als die Nachweisgrenze von H.E.S.S und MAGIC. Wir würden also einen größeren Teil des Eisberges sehen, mit dessen Spitze wir es bis jetzt zu tun haben, und völlig neue Einblicke in den Hochenergiehimmel erhalten. Die Kosten von CTA liegen bei etwa 100 M€, mit dem Bau soll 2011 begonnen werden.

Das Zeuthener Institut ist gegenwärtig neben seinen Hauptaktivitäten in der Neutrinoastronomie auch an MAGIC beteiligt, wenngleich bisher nur über eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe. Mit der Teilnahme an CTA wollen wir den Schritt zu Gamma-Astronomie jedoch in größerem Maßstab vollziehen. Wir vereinen damit in einem Hause die Analyse von Neutrino- und Gamma-Daten und folgen damit konsequent dem so genannten „Multi-Messenger“-Ansatz. Dies ist nicht anderes als eine Erweiterung des „Multi-Wavelength“-Ansatzes, also der Kombination von elektromagnetischer Information über alle Wellenlängenbereiche, von Radiowellen über sichtbares Licht bis zu Röntgen- und Gamma-Strahlen, der in der Astronomie des vorigen Jahrhunderts zum tieferen Verständnis vieler kosmischer Objekte geführt hat.

*Hochenergie-Neutrinos:* Das Potential der hochenergetischen Neutrinoastronomie liegt auf der Hand: Neutrinos können uns aus Regionen erreichen, die für alle anderen Arten von Strahlung undurchsichtig sind. Darüber hinaus können sie uns, im Gegensatz zu Gammastrahlen, einen eindeutigen Beweis dafür liefern, dass in einem kosmischen Objekt Protonen bzw. Kerne und nicht etwa nur Elektronen beschleunigt werden [7]. Physiker des Zeuthener Instituts 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 bzw. Eis herabgelassenen Fotovervielfachern nachgewiesen. Es war Karl Lanius, der im Jahr 1987 die Teilnahme des damaligen Instituts für Hochenergiephysik der AdW der DDR am Baikalexperiment initiierte und damit zum Taufpaten einer bis heute äußerst erfolgreichen Entwicklung in unserem Institut wurde. Zusammen mit deutschen Universitätsgruppen ist DESY auch prominent an IceCube [8], dem Folgeexperiment von AMANDA, beteiligt. Bei Fertigstellung von IceCube im Jahre 2011 wird ein Kubikkilometer Eis mit 4800 Fotovervielfachern bestückt sein.

AMANDA ist bei hohen Energien zwar dreißig mal so empfindlich wie Super-Kamiokande, hat aber bisher noch keine extraterrestrischen Neutrinos nachweisen können sondern „nur“ Rekord-Obergrenzen für diese Neutrinos etabliert und damit eine Reihe optimistischer theoretischer Vorhersagen aus-

schließen können (siehe auch Abb. 4). Allerdings war AMANDA von Beginn an eher als Prototyp-Teleskop und nicht als Endstufe der Entwicklung gedacht. Eine Entdeckung war und ist nicht ausgeschlossen, aber andererseits auch nicht sehr wahrscheinlich. Mit IceCube werden wir jedoch um nochmals eine Faktor 30 sensitiver sein und damit den theoretischen Vorhersagen zufolge in ein Gebiet mit hohem Entdeckungspotential vorstoßen.

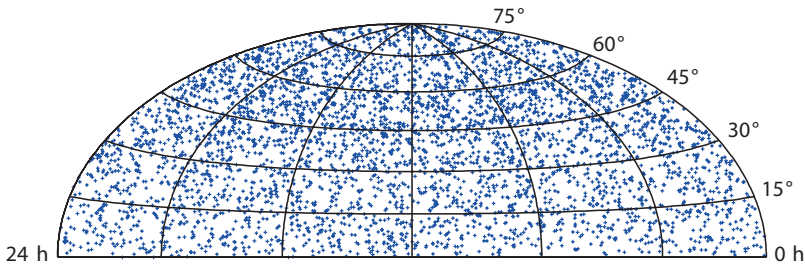


Abb.4: Himmelkarte der mit AMANDA in den Jahren 2000-2004 nachgewiesenen 4382 Neutrinos. Obwohl diese Anzahl größer ist, als die aller anderen bisherigen Experimente zusammen genommen, sieht man noch kein klares Anzeichen einer punktförmigen Quelle. Winkel- und Energieverteilung der Neutrinos sind mit der Annahme kompatibel, dass fast alle – oder alle – von ihnen beim Aufprall kosmischer Protonen und Kerne in der Erdatmosphäre erzeugt wurden. Das Folgeexperiment IceCube wird 30-100-mal so viele Neutrinos nachweisen können und damit eine Empfindlichkeit erreichen, bei der das Entdeckungspotential sehr hoch ist.

Um eine vollständige Himmelsabdeckung zu erreichen, wird gegenwärtig ein analoges Projekt im Mittelmeer vorbereitet, mit Kosten, die wahrscheinlich oberhalb derer von IceCube (200 M€) liegen werden. Eine entsprechende EU-finanzierte Entwurfsstudie soll 2010 zu einem technischen Vorschlag und gegebenenfalls 2011/12 zu Baubeginn führen.

## Dunkle Materie

Nicht alle Zweige der Astroteilchenphysik können derzeit schon preiswürdige Entdeckungen vorweisen. Alle aber stoßen mittlerweile in Regionen mit klarem Entdeckungspotential vor. Als ein Beispiel sei die Suche nach Teilchen der dunklen Materie angeführt [9]. 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.

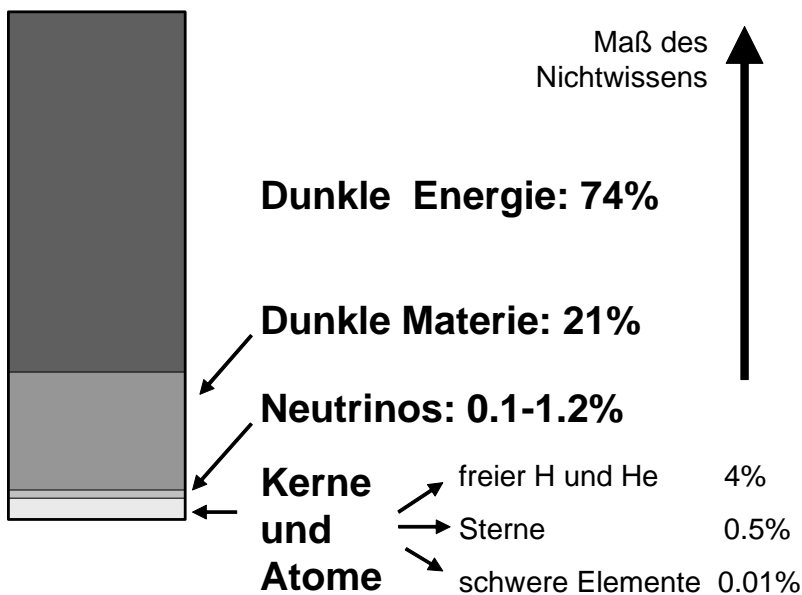


Abb. 5: Das kosmische Inventar besteht den gegenwärtigen Modellen zufolge nur zu 4% aus „normaler Materie“ (Atomkernen und Elektronen), zu 21% aus dunkler Materie und zu 74% aus dunkler Energie. Was hinter dem Schlagwort dunkle Energie steht, ist gegenwärtig völlig unklar. Hinweise darauf erwartet man allerdings eher aus der klassischen Astronomie als aus der Astroteilchenphysik.

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 Neutrinos sehr schwer zu sein. Die gegenwärtig favorisierten Kandidaten hierfür sind schwach wechselwirkende massive Teilchen – Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) – die im frühen Universum erzeugt worden sind, und hier insbesondere das leichteste Teilchen der sog. Minimal Super-Symmetrischen Modelle (MSSM) der Teilchenphysik. Typische WIMP-Suchexperimente 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, z.B. aus Germanium, Silizium oder  $\text{CaWO}_4$ , die bei Temperaturen von 10–20 mK (also 20 Milligrad über dem absoluten Nullpunkt) betrieben werden, andererseits um flüssige Edelgase wie Xenon oder Argon. Man misst die extrem geringen Licht- und Ionisationssignale (bei den Kristalldetektoren auch die Wärmeschwingungen), die durch das Rückstoß-

produkt 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 7–8 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 2–3 Experimente konvergieren, deren Preis dann bei etwa 100 M€ pro Detektor liegen wird. Die Masse der Detektoren, die gegenwärtig im Bereich einiger zehn Kilogramm liegt, wird dann auf eine Tonne oder mehr wachsen 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 darum gelegentlich eines der Zerfalls-Neutrinos aus der Richtung der Sonne beobachten. Diese Neutrinos haben eine viel höhere Energie als diejenigen, die bei den solaren Fusionsreaktionen erzeugt werden. Unterirdische Neutrinodektoren, das Baikal-Teleskop und AMANDA haben bisher keinen solchen Überschuss von der Sonne oder aus dem Erdzentrum beobachtet. IceCube wird die WIMP-Suche mit dreifachfacher Empfindlichkeit fortsetzen.

Während Astroteilchenphysiker mit den beschriebenen Methoden nach Kandidaten der dunklen Materie suchen, hoffen die Teilchenphysiker, am Large Hadron Collider LHC Hinweise auf Super-Symmetrie (SUSY)-Teilchen zu finden. Der LHC soll 2008 am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf in Betrieb gehen. Erst die Synthese aller drei Befunde – direkter und indirekter Nachweis kosmischer Kandidaten für dunkle Materie sowie Beschleuniger-Nachweis von SUSY-Teilchen – würde am Ende eine hinreichende Gewissheit verschaffen, womit man es eigentlich zu tun hat.

## Schlussbemerkung

Die Astroteilchenphysik hat über die letzten beiden Dekaden 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 Konvergenz auf einige wenige Großprojekte. Das Physics Review Committee von ApPEC (Astroparticle Physics European Coordination) hat kürzlich ein Strategiepapier für die nächsten zehn Jahre erarbeitet [10], das diesen Prozess steuern soll. Damit steht die Astroteilchenphysik vor einem ähnlichen Konzentrationsprozess wie die Teilchenphysik vor 50 Jahren.

Es ist nicht ausgeschlossen, 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 Strahlen. Vielleicht werden wir auch in der nächsten Dekade 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 neue Begriffsbildungen 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. Ein Faktor 10 Verbesserung in einem entscheidenden Teleskop-Parameter führte oft, ein Faktor 100 sehr häufig und eine Faktor 1000 fast immer zu einem unerwarteten Durchbruch [11]. 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 10 Jahre der Astroteilchenphysik auch im Einzelnen bringen mögen – sie werden in jedem Fall außerordentlich spannend!

## Literatur

1. C. Grupen, Astroteilchenphysik, Springer-Verlag 2000.
2. J. Jochum und F.v. Feilitzsch, Physikalische Blätter 56,3 (2000) 65.

3. K. Lanius, *Mikrokosmos Makrokosmos*, Urania Verlag 1986
4. C. Spiering, *Auf der Suche nach der Urkraft*, Teubner-Verlag 1986.
5. F. Aharonian, *Science* 315 (2007) 70.
6. A. Olinto, *Science* 315 (2007) 68.
7. E. Waxman, *Science* 315 (2007) 63.
8. C. Spiering, *Spektrum der Wissenschaft* 8 (2007) 38.
9. B. Sadoulet, *Science* 315 (2007) 61.
10. <http://www.aspera-eu.org>
11. Martin Harwit, *Cosmic Discovery*, Harvester Press 1981.