

Astroteilchenphysik – Ein Forschungsgebiet im Aufbruch

J. Blümer, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

Einleitung

Astroteilchenphysik ist ein faszinierender Bereich der Naturwissenschaften an den Schnittstellen von Astronomie, Astrophysik, Kosmologie und Elementarteilchenphysik. Sie verknüpft unser Wissen von den größten Strukturen im Universum mit dem über die kleinsten Bausteine der Materie und den Kräften zwischen ihnen. Die Aktivitäten in diesem jungen Feld sind unlängst dramatisch gestiegen; für viele Kolleginnen und Kollegen dürfte der Nachweis von Neutrinos aus der Explosion der Supernova SN 1987A in der Großen Magellanschen Wolke vor gerade zwanzig Jahren ein Schlüsselereignis gewesen sein. Heute ist Astroteilchenphysik selbstständig geworden und hat in vielen Ländern weltweit ein eigenes Profil in Forschung und Lehre entwickelt. Wir möchten Ihnen mit dieser Ausgabe der „Nachrichten“ einen Überblick über die Karlsruher Aktivitäten im Helmholtz-Programm Astroteilchenphysik geben, das im Forschungsbereich Struktur der Materie angesiedelt ist.

Unser Bild vom Universum

Zu den spannendsten Erkenntnissen der jüngeren Vergangenheit zählt die Einsicht, dass die Erforschung des Allergrößten durch die Kosmologie und des Allerkleinsten durch die Teilchenphysik auf unzertrennliche Weise vielfältig miteinander verbunden sind. Die Teilchenphysik untersucht die Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen. Diese Teilchen und Kräfte sind entscheidend für die Entwicklung des Universums, ins-

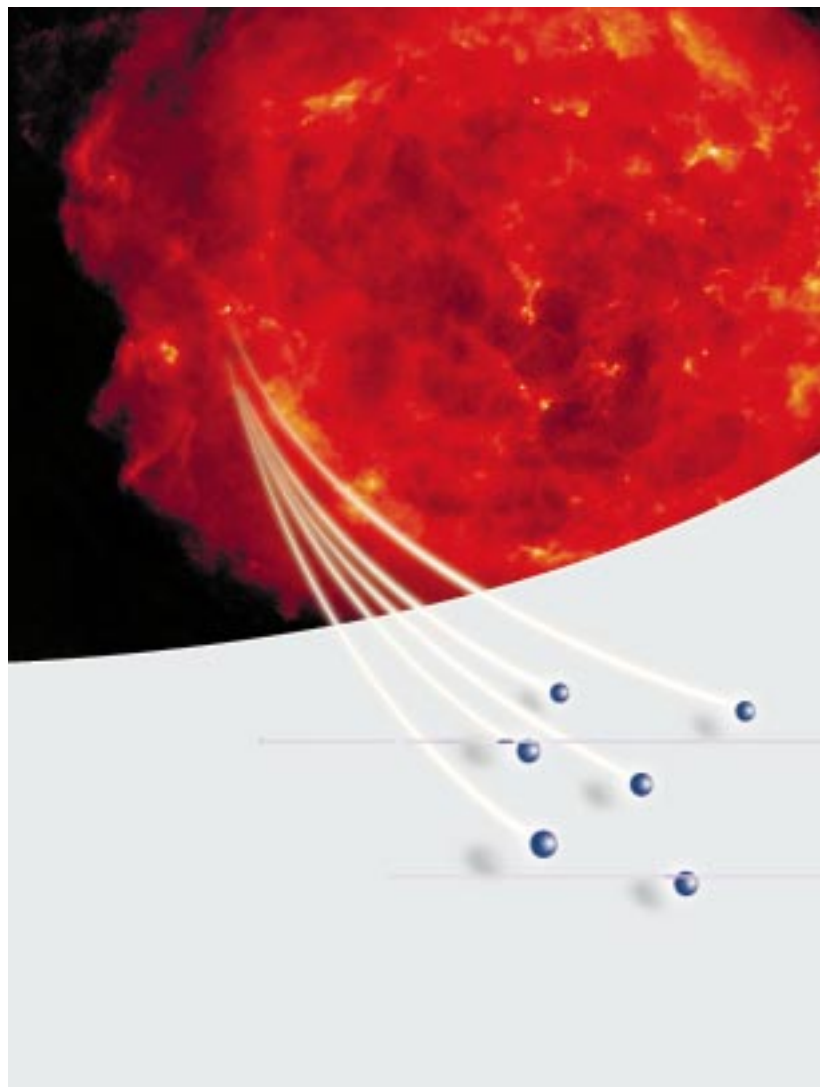


Abb. 1: Dieser expandierende „Nebel“ mit einem Durchmesser von rund 15 Lichtjahren und in einer Entfernung von rund zehntausend Lichtjahren ist der Überrest der Supernova Cas A (Cassiopeia A), deren Licht die Erde vor rund 330 Jahren erreicht hat. Neben dieser Farbdarstellung einer Aufnahme von Richard Tuffs (MPI Kernphysik, Heidelberg) mit dem VLA Radioteleskop gibt es optische, infrarote und Röntgenaufnahmen dieses vielstudierten Himmelsobjekts. Eine Supernova-Explosion wie Cas A wird durch die Implosion eines massereichen Sterns am Ende seiner Entwicklung ausgelöst, bei der ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch entsteht. Neben der optisch sichtbaren Explosion wird sowohl ein starker „Neutrino blitz“ wie auch ein Gravitationswellensignal ausgesendet. Die ins interstellare Medium laufenden Stoßwellen von Supernova-Explosionen gelten als wichtige Beschleuniger für die allgegenwärtige „kosmische Strahlung“, deren Erforschung eines der zentralen Anliegen der Astroteilchenphysik ist. [1]

besondere kurz nach dem Urknall. Eine unsichtbare Materieform, die Dunkle Materie, bestimmt darüber hinaus die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen. Die Natur der Dunkle-Materie-Teilchen und die Rolle von Neutrinos sind zentrale Fragen für Astrophysiker wie auch Teilchenphysiker. Schließlich ist auch die Frage nach der Herkunft der Teilchen der kosmi-

schen Strahlung nur in Zusammenarbeit von Wissenschaftler/innen aus diesen beiden Disziplinen lösbar.

In der Astroteilchenphysik am Forschungszentrum Karlsruhe arbeiten wir auf einem beträchtlichen, aber gut fokussierten Teil der gesamten wissenschaftlichen Bandbreite: Nukleare Astrophysik er-

forscht die Entstehung der Elemente. Kosmische Strahlung in einem extrem weiten Energiebereich gibt uns Aufschlüsse über die eigene Milchstraße (KASCADE-Grande) und über Physik in ganz extremen Umgebungen, die wir beispielsweise als supermassive Schwarze Löcher mit Millionen von Sonnenmassen im fernen Universum beobachten (Pierre-Auger-Observatorium). Die Struktur des Universums wollen wir durch zwei Präzisionsexperimente aufklären helfen: Der sorgfältig abgeschirmte Detektor EDELWEISS im Untergrundlabor des Fréjus-Tunnels sucht direkt nach schweren Teilchen der Dunklen Materie und das Karlsruhe Tritium Neutrino-Experiment KATRIN wird die Masse des Elektron-Neutrinos mit bisher unerreichter und kosmologisch relevanter Genauigkeit messen oder eingrenzen. Neutrinos sind (nach Photonen) die zweithäufigsten Teilchen im Kosmos: selbst eine kleine Neutrinomasse von einem Millionstel der Elektronmasse spielt eine Rolle im Energiebudget des Universums und insbesondere bei dessen Strukturbildung.

Unsere Forschungen sind abgestimmt mit den Fragen, die in unserer Partnereinrichtung DESY (ebenfalls eine Institution in der Helmholtz-Gemeinschaft) vor allem in Zeuthen/Berlin bearbeitet werden. Hier geht es darum, hochenergetische Neutrinos aus fernen Himmelskörpern als Sonde zu benutzen. Nur Neutrinos können sich wegen ihrer geringen Reaktionsbereitschaft auch bei hohen Energien völlig ungestört geradlinig ausbreiten – allerdings ist ihr Nachweis aus dem gleichen Grund schwierig und erfordert etwa die Instrumen-

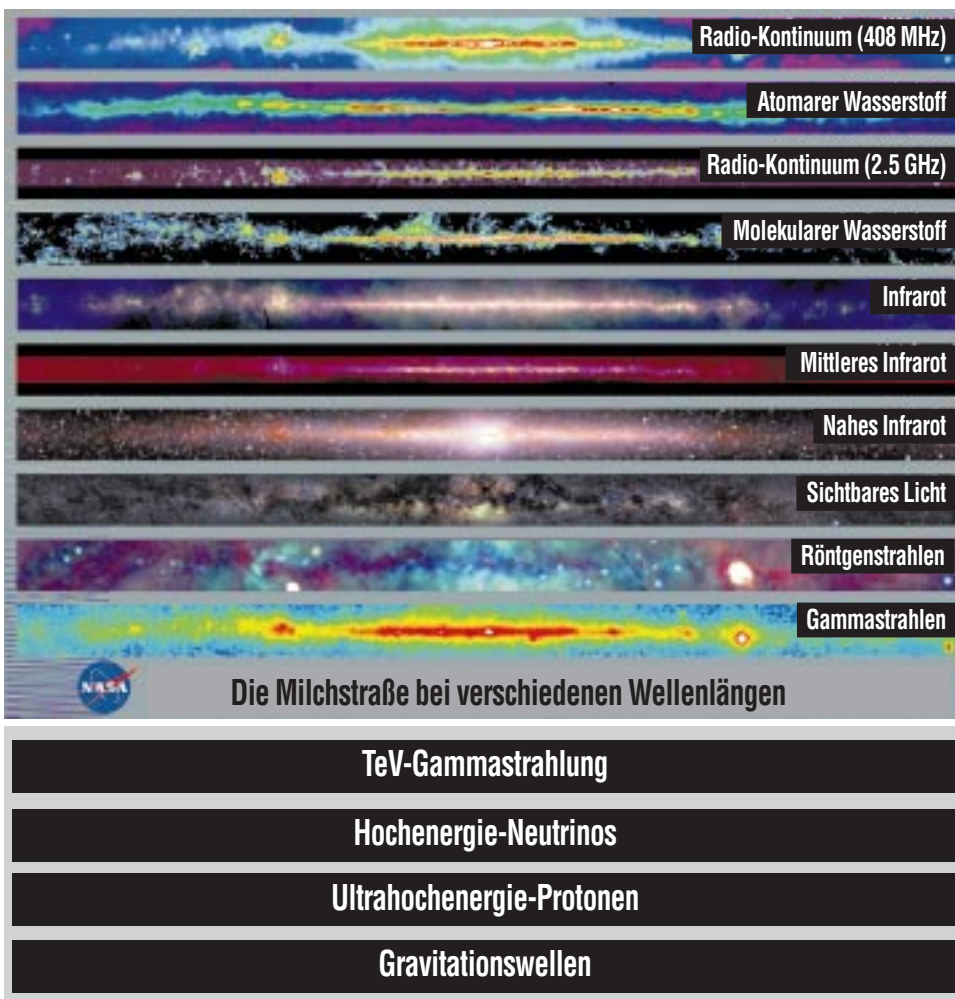


Abb. 2: Oben: Die Milchstraße sieht im elektromagnetischen Licht bei verschiedenen Wellenlängen völlig anders aus [2]. Diese Informationsvielfalt erlaubt uns Rückschlüsse auf die Prozesse, die im Universum ablaufen. Unten: Die Astroteilchenphysik erweitert das klassische Licht zu sehr viel höheren Energien (TeV-Gammaastronomie) und fügt ganz neue Sondenteilchen hinzu: Neutrinos, ultra-hochenergetische Protonen und Gravitationswellen. Solche Multi-Messenger-Himmelskarten erfordern neuartige Beobachtungsinstrumente.

tierung eines ganzen Kubikkilometers Eis in der Antarktis mit Lichtsensoren (AMANDA/IceCube). Eine interessante und vielversprechende Option besteht darin, die Daten solcher Neutrinooteleskope mit denen der Gamma-Astronomie (Experimente H.E.S.S. und MAGIC) und schließlich auch mit denen des Pierre-Auger-Observatoriums zu kombinieren, um das eingangs skizzierte Multi-Messenger-Bild des Kosmos erstellen zu können.

Die Herausforderungen der Astroteilchenphysik liegen in einem interdisziplinären Zusammenspiel von Teilchenphysik, Astrophysik, Astronomie und Kosmologie. Die technologischen Ansprüche an die Beobachtungsinstrumente und Experimentiereinrichtungen sind hoch und teilweise ungewohnt: einige unserer Anlagen befinden sich in Untergrundlabors oder fernab der etablierten Infrastruktur zum Bei-

spiel in der argentinischen Pampa am Fuß der Anden. Andererseits kann die technologische Qualität und Komplexität beispielsweise der kryogenen Anlagen, die mit radioaktivem Tritium im KATRIN-Spektrometer arbeiten, nur an einem Hochtechnologiezentrum wie hier in Karlsruhe geleistet werden.

In allen Bereichen sind die engen Vernetzungen mit Universitäten, Max-Planck-Instituten und internationalen Einrichtungen auf der ganzen Welt eine Selbstverständlichkeit. Das Helmholtz-Programm Astroteilchenphysik hat so in kurzer Zeit die Sichtbarkeit eines hohen und hellen Leuchtturms erreicht.

Entstehung der Elemente

Die Entstehung der schweren Elemente im Innern von alten oder gar explodierenden Sternen ist eng

verknüpft mit Altersbestimmungen der Galaxie und der Zusammensetzung der interstellaren Materie. Diese spielt eine wichtige Rolle bei der Ausbreitung und Wechselwirkung der kosmischen Strahlung, die in einem weiten Energiebereich vermutlich in den heftigen Schockwellen von Supernova-Explosionen entsteht. Abb. 3 zeigt einen Vergleich der relativen Elementhäufigkeiten auf der Erde und in der kosmischen Strahlung. Die geladenen Teilchen von Protonen bis zu Kernen schwerer als Eisen bewegen sich im Magnetfeld der Milchstraße auf chaotischen Bahnen – eher wie ein Gas als eine vermeintlich geradlinige Strahlung. Mit dem Instrumentarium der Kernphysik können wir verstehen, welche Elemente in den späten Entwicklungsstadien massiver Sterne entstehen, wie die Sterne am Ende der Energieproduktion unter ihrer Eigengravitation kollabieren und die Materie in gigantischen Schockwellen in das Weltall hinaus schleudern. Zu einem quantitativen Verständnis benötigen wir Reaktionswahrscheinlichkeiten beispielsweise von Neutronen, Protonen, Gammaquanten und Alphateilchen unter möglichst genau den Bedingungen, die im Innern von massiven Sternen herrschen.

Galaktische Kosmische Strahlung und neue Nachweismethoden

Supernova-Explosionen sind die wahrscheinlichsten Quellen der galaktischen kosmischen Strahlung, die in einem Energiebereich von einigen Giga-Elektronenvolt (GeV) bis hin zu 10^{18} eV im Magnetfeld der Milchstraße gefangen

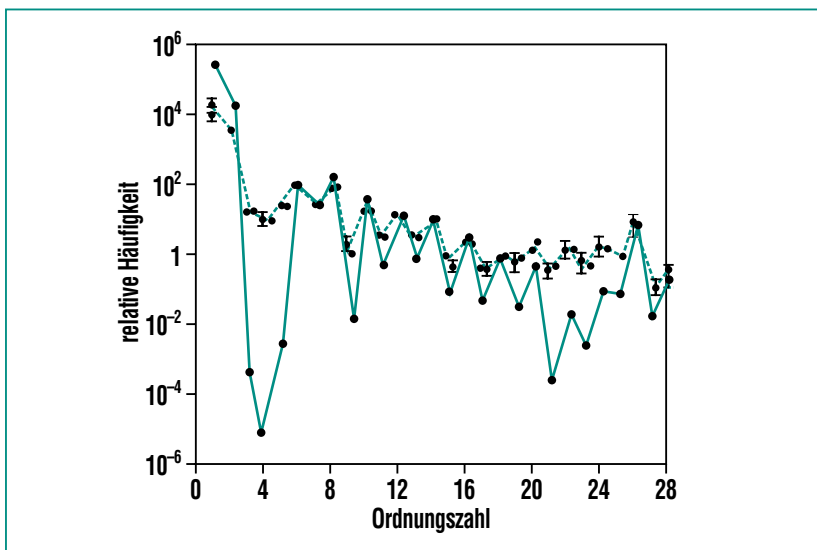


Abb. 3: Ein Vergleich der relativen Häufigkeiten von Elementen in der kosmischen Strahlung (gestrichelte Linie) und auf der Erde (durchgezogene Linie) zeigt global große Ähnlichkeiten. Die markanten Unterschiede rühren von Spallationsprozessen im interstellaren Medium her und liefern wertvolle Aufschlüsse über die Ausbreitung der kosmischen Strahlung. [3]

gehalten wird. Die Aufenthaltsdauer beträgt mehrere Millionen Jahre, während derer die Teilchen mit der interstellaren Materie Kernreaktionen eingehen können, bevor sie schließlich entweichen: bei höherer Energie vergleichsweise früher und bei höherer Ladungszahl vergleichsweise später. Dieser Diffusionsprozess geht einher mit der Schockbeschleunigung in den vermuteten Quellen, die für höher geladene Teilchen wie etwa Eisenkerne mit einer Ladungszahl von 26 viel effizienter ist als für leichte, einfach geladene Protonen. Das Zusammenspiel von Supernova-Explosion mit einer Maximalenergie und der Diffusion aus der Milchstraße hinaus sollte an einer Änderung der Elementzusammensetzung erkennbar sein, die als das sogenannte „Knie“ im Energiespektrum der kosmischen Strahlung von unserem Detektor KASCADE-Grande auch beobachtet wird. Die Datensammlung wird noch knapp zwei Jahre er-

fordern. Erste Ergebnisse zeigen, dass tatsächlich mit zunehmender Energie die schweren Teilchen dominieren; bei den ultra-hohen Energien im Messbereich des Pierre-Auger-Observatoriums scheinen dagegen wieder Protonen vorzuherrschen.

Die Radiodetektion ausgedehnter Luftschauer, die von hochenergetischen Teilchen aus dem Kosmos ausgelöst werden, ist eine neuartige Methode, die mit großer Intensität von zahlreichen Gruppen auf der Welt verfolgt wird. Wir haben hier im Forschungszentrum Karlsruhe eine herausragende Position, denn KASCADE-Grande ist derzeit das einzige Luftschauerexperiment in der „richtigen“ Größe, um die noch nicht ganz verstandenen Radiosignale mit Teilchendetektoren zu kalibrieren (LOPES-Projekt) und dann in größeren Anlagen wie dem Pierre-Auger-Observatorium zu nutzen, dort allerdings bei viel höheren En-

ergien und mit sehr viel kleineren Ereignisraten. Wir haben diesem Thema einen eigenen Artikel gewidmet.

Extragalaktische Kosmische Strahlung

Jenseits von 10^{18} bis 10^{19} eV bewegen sich die Teilchen der kosmischen Strahlung auf zunehmend geraden Bahnen und können nicht in der Milchstraße eingesperrt bleiben. Die Teilchenenergien sind nahezu unglaublich: mehr als 10^{20} eV sind beobachtet worden, das sind mehr als 50 Joule in einem einzigen Teilchen! Mit Supernova-Explosionen kann das bei weitem nicht erklärt werden. So wird vermutet, dass diese ultra-hochenergetischen Teilchen extragalaktischen Ursprungs sind. Als Beschleuniger kommen nur die energiereichsten Phänomene in Betracht, deren Schockwellen auch noch gigantische Ausmaße haben müssen – oder ganz neue physi-

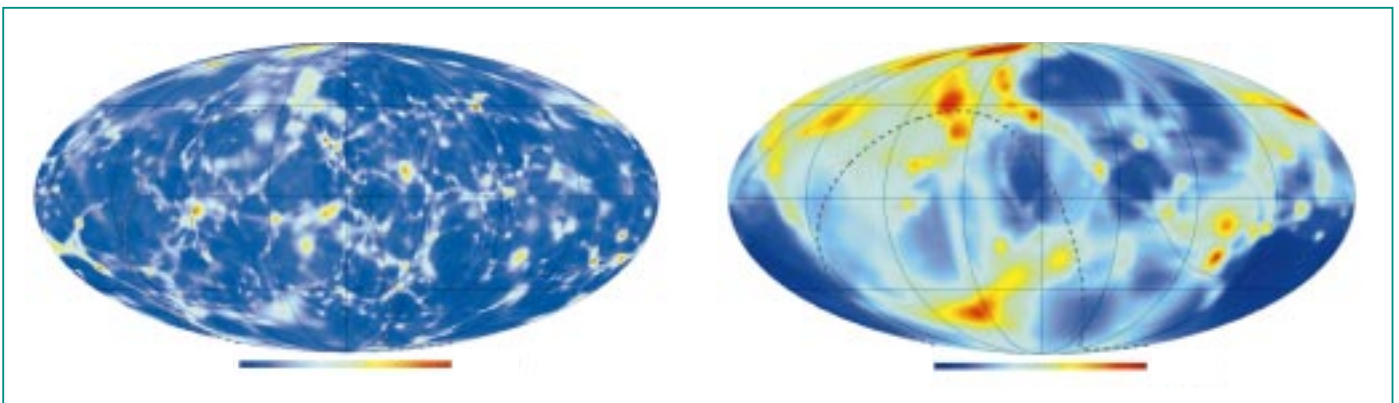


Abb. 4: In einer Simulation wurden Protonen mit verschiedenen Energien entsprechend der astronomisch beobachteten Materieverteilung erzeugt und zur Erde propagiert. Dabei wurden die Streuprozesse in Hintergrundstrahlungsfeldern und die Ablenkung im galaktischen Magnetfeld berücksichtigt. Links: Bei Energien oberhalb von $10^{19,5}$ eV beobachtet man fast das gesamte sichtbare Universum bis zu Entfernungen von mehreren hundert Megaparsec. Die Ablenkung der Protonen ist stark und die Himmelskarte ist fast isotrop. Rechts: Bei mindestens $10^{20,5}$ eV können die Protonen nur aus unserer kosmischen Nachbarschaft (< 100 Mpc) stammen; die Bahnen werden kaum abgelenkt. Die Himmelskarte solcher Teilchen zeigt starke Anisotropien und liefert Strukturinformation über das hochenergetische Universum [4].

kalische Prozesse jenseits der etablierten Vorstellungen. Da die Teilchen sich auf zunehmend geraden Bahnen durch die schwachen intergalaktischen Magnetfelder bewegen, kann man oberhalb von $10^{19,5}$ eV erwarten, dass die Ablenkungen nur noch wenige Grad betragen, und dass man die Quellen direkt auf einer Himmelskarte identifizieren kann. Abb. 4 zeigt, wie Karten der astronomisch bekannten Materieverteilung in der simulierten Beobachtung von Protonen bei $10^{19,5}$ eV und $10^{20,5}$ eV aussehen könnten.

Vor diesem Hintergrund entwickeln, bauen und betreiben wir in einer internationalen Kollaboration von 17 Ländern das Pierre-Auger-Observatorium. Das 3000 km² große Süd-Observatorium in der argentinischen Provinz Mendoza wird mit seiner Technik, ersten Ergebnissen sowie der teilchenphy-

sikalischen Modellierung von Luftschauern in mehreren Artikeln dieser Ausgabe der „Nachrichten“ beschrieben. Das geplante Nord-Observatorium soll ab 2009 mit Hilfe einer auf 10.000 km² nochmals vergrößerten Messfläche erstmals die „Proton-Astronomie“ bei voller Himmelsabdeckung ermöglichen (Abb. 5).

Suche nach Dunkler Materie

Die Struktur des Kosmos wird durch die sichtbaren Objekte (Gaswolken, Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen) nur unzureichend charakterisiert. Die Beobachtung von Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien, die Lichtablenkung in den Gravitationslinsen großer Galaxienhaufen, und die Präzisionsmessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, dass es beträchtliche Mengen unsichtba-

rer Materie von noch unbekannter Art geben muss, und dass darüber hinaus sogar noch eine so genannte Dunkle Energie das Universum dominiert (Abb. 6). Die Astroteilchenphysik hat die Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie mit verschiedenen Methoden aufgenommen. Empfindliche, gut abgeschirmte Detektoren in tiefen Untergrundlaboren versuchen, die schwachen und seltenen Rückstöße zu finden, die die Teilchen der Dunklen Materie mit den Atomkernen des Detektors bewirken. Alternativ suchen wir nach der charakteristischen Strahlung, die bei der gegenseitigen Vernichtung von solchen Teilchen entstehen könnte. Die Teilchenphysiker am CERN in Genf werden darüber hinaus nach Signaturen der Dunkle-Materie-Teilchen in den Teilchenkollisionen suchen, die in Kürze im LHC-Speicherring des CERN stattfinden werden.

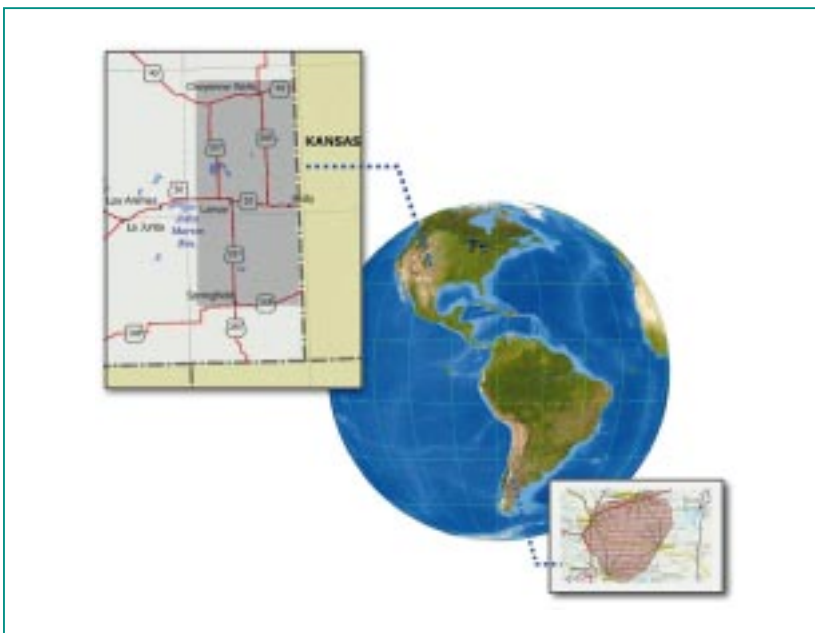


Abb. 5: Mit einem Nord-Observatorium in Süd-Ost-Colorado/USA erreicht das Pierre-Auger-Projekt eine vollständige Himmelsabdeckung. Der Maßstab der beiden Landkarten ist ungefähr gleich.

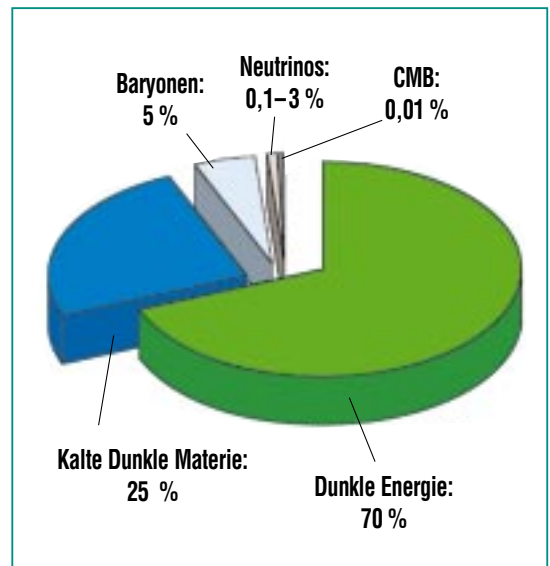


Abb. 6: Masse-Energie-Budget des Universums. Nur etwa fünf Prozent entfallen auf die bekannten Teilchen (Baryonen), die sich zu den astronomischen Objekten formiert haben [1].

Die Masse des Neutrinos

Könnten Neutrinos die Dunkle Materie des Universums sein? Die im Urknall entstandenen Neutrinos haben heute eine Dichte von 336 Neutrinos pro Kubikzentimeter. Somit tragen sie in geringem Maße zur Dunklen Materie bei. Kosmologische Präzisionsbestimmungen ermöglichen es, die Summe der Neutrinomassen auf indirektem Wege stark einzuschränken. Sicher ist man sich darin, dass die Massen sehr klein sind. Damit müssen sich diese Teilchen im frühen Universum sehr schnell bewegt haben und selbst ein kleiner Anteil von Neutrinos muss die kosmische Strukturbildung sichtbar anders beeinflusst haben, als man es vom Hauptanteil der Kalten Dunklen Materie erwartet, deren Teilchen langsam waren.

Die Elementarteilchenphysik ist ebenso an einer Bestimmung der Neutrinomassen interessiert: es gibt keine Theorie, die die beobachteten Teilchenmassen erklärt!

Gibt es nur drei Familien von Quarks und Leptonen wie in Abb. 7 gezeigt? Warum sind Neutrinos so viel leichter als alle anderen Teilchen? Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen? Der Neutrinosektor gibt seit jeher dem Standardmodell der Teilchenphysik die größten Rätsel auf.

Es ist daher von größter Wichtigkeit, die Absolutmassen der Neutrinos experimentell zu bestimmen – ein extrem schwieriges Unterfangen. Das KATRIN-Experiment ist das derzeit größte Einzelprojekt des Forschungszentrums Karlsruhe. Die Aufgabe erfordert internationale Zusammenarbeit an unserem Hochtechnologie-Labor. Hier kommen unterschiedlichste Kompetenzen zusammen: Kryotechnik und Tritiumhandhabung, Elementarteilchen- und Neutrino-physik, Detektorentwicklung, präzise Hochspannungstechnik, Ultrahochvakuum, Prozessüberwachung und Projektabwicklung gehen Hand in Hand – ein Paradebeispiel sowohl für die Helm-

holtz-Mission als auch für die Leistungsfähigkeit des „Karlsruhe Instituts für Technologie“, der gemeinsamen Plattform von Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe.

Zusammenfassung

Eine historisch bislang einmalige Messung gelang am 23. Februar 1987, als rund zwanzig Neutrinos von der Supernova 1987A auf der Erde nachgewiesen werden konnten. Heute, zwanzig Jahre später ließe sich die nächste galaktische Supernova nicht nur in der elektromagnetischen Strahlung vom Radio- bis zum Gammabereich beobachten, sondern wahrscheinlich auch mit Neutrinodetektoren und vielleicht sogar mit Gravitationswellen-Detektoren. In der Zwischenzeit hat sich die Astroteilchenphysik zu einem ungeheuer dynamischen Feld entwickelt, das immer mehr Forscherinnen und Forscher aus den benachbarten Disziplinen anzieht. Das Helmholtz-Programm Astroteilchenphysik mit den Beiträgen des Forschungszentrums Karlsruhe und des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY ist in dieser Entwicklung bestens aufgestellt.

Literatur

- [1] *Kosmische Spurensuche – Astroteilchenphysik in Deutschland*, Hrsg. Komitee für Astroteilchenphysik, Juli 2006; <http://www.astroteilchenphysik.de/>
- [2] *NASA-Internet*: <http://adc.gsfc.nasa.gov/mw/>
- [3] H. Goenner, *Einführung in die Kosmologie*, Spektrum Akademischer Verlag 1994
- [4] E. Armengau, *Pierre Auger Collaboration, private Mitteilung* 2006

	Quarks		Leptonen	
	Ladung +2/3	Ladung -1/3	Ladung -1	Ladung 0
1. Familie	Up u	Down d	Elektron e	e-Neutrino ν_e
2. Familie	Charm c	Strange s	Myon μ	μ -Neutrino ν_μ
3. Familie	Top t	Bottom b	Tauon τ	τ -Neutrino ν_τ
	Gravitation			
	Schwache Wechselwirkung			
	Elektromagnetische Wechselwirkung			
	Starke Wechselwirkung			

Abb. 7: Das Standardmodell der Teilchenphysik weist drei Familien von Quarks und Leptonen sowie vier fundamentale Kräfte auf, die jedoch vermutlich Niederenergiephänomene einer einzigen, einheitlichen Kraft sind. Die Zahl der Familien, die Teilchenmassen und zahlreiche Aspekte der Wechselwirkungen sind noch unverstanden [1].