

KOSMISCHE SPURENSUCHE

**Astroteilchenphysik
in Deutschland**
Ein Forschungsgebiet
im Aufbruch

Titelbild

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.



KOSMISCHE SPURENSUCHE

Astroteilchenphysik in Deutschland

Ein Forschungsgebiet
im Aufbruch

VORWORT



Astroteilchenphysik verknüpft unser Wissen von den größten Strukturen im Universum mit dem über die kleinsten Bausteine der Materie und den Kräften zwischen ihnen. Sie ist ein faszinierender Bereich der Naturwissenschaft, der an den Schnittstellen von Astronomie, Astrophysik, Kosmologie und Elementarteilchenphysik lebt. Die Aktivitäten in diesem jungen Feld sind in den letzten zwei Jahrzehnten dramatisch gestiegen; für viele Kolleginnen und Kollegen dürfte der Nachweis von Neutrinos aus der Explosion der Supernova SN 1987A in der Großen Magellanschen Wolke ein Schlüsselerlebnis gewesen sein. Heute ist Astroteilchenphysik selbständig geworden und hat in vielen Ländern weltweit ein eigenes Profil entwickelt. Wir möchten Ihnen mit diesem Bericht einen Überblick über die Akteure in Deutschland und die Projekte mit deutscher Beteiligung geben.

Herausgeber dieser Schrift ist das Komitee für Astroteilchenphysik, das sich aus gewählten Fachkolleginnen und Fachkollegen sowie Vertretern von Politik und Wissenschaftsorganisationen zusammensetzt: wir stellen uns am Ende der Broschüre ausführlicher vor. Inhaltlich und organisatorisch leben wir mit unscharfen Rändern, was gerade auch einen Reiz der Interdisziplinarität ausmacht. Der Faszination der Astroteilchenphysik sind in Deutschland über vierhundert Forscherinnen und Forscher an knapp vierzig Instituten gefolgt.

Mit dieser Broschüre wenden wir uns an die interessierte Öffentlichkeit und die Steuerzahler, die ein Recht darauf haben zu erfahren, welche spannenden Forschungen wir mit öffentlichen Geldern durchführen. Unser Ziel ist es, Interesse zu wecken und unsere Begeisterung weiter zu geben. In diesem Sinne richten wir uns ebenso an Schüler und Studenten, Politiker und Entscheidungsträger, potentielle Sponsoren und schließlich an die Gemeinschaft der Astroteilchenphysik selbst. Die Broschüre soll auch eine Leistungsschau der deutschen Astroteilchenphysik im internationalen Umfeld sein. Wir geben daher zunächst eine kurze Einführung in die Themen, bevor wir die größeren Projekte im Einzelnen vorstellen, die ja überwiegend außerhalb der großen Labore als eigenständige Großgeräte betrieben werden. Ein Anhang mit Kontaktdaten und Internetadressen soll Sie, liebe Leserinnen und Leser, zu weiteren Recherchen anregen – sprechen Sie uns an!

In einem nächsten Schritt wollen wir dann über die Bestandsaufnahme hinausgehen und nach einer intensiven Diskussion mit allen Beteiligten die großen Vorhaben und Zukunftsperspektiven im nächsten Jahrzehnt identifizieren.

Wir wünschen viel Freude bei der Lektüre!

Johannes Blümer
Vorsitzender des Komitees
für Astroteilchenphysik

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG

1 Kosmologie und Teilchenphysik: Die Welt im Großen und im Kleinen	8
2 Neutrinos: Botschafter aus dem Universum und dem Inneren der Materie	12
3 Kosmische Strahlung und die energiereichsten Himmelskörper	18
4 Gravitationswellen: am Puls des Universums	22

KOSMOLOGIE UND DUNKLE MATERIE

Theoretische Teilchenkosmologie: vom Urknall bis heute	28
Das Weltraumobservatorium Planck: Bilder des Mikrowellen-Himmels	30
Virgo: Supercomputer simulieren die kosmische Strukturentstehung	32
CRESST: Jagd auf Teilchen der Dunklen Materie	34
EDELWEISS: Dunkle-Materie-Teilchen im Kristall	36

NEUTRINOS, AXIONEN UND NUKLEARE ASTROPHYSIK

Theoretische Neutrino-physik	40
KATRIN: eine Waage für Neutrinos	42
GERDA: Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?	44
Double-Chooz: Oszillationen von Reaktor-Neutrinos	46
Supernovae, Hypernovae und verschmelzende Sterne	48
Borexino: Spektroskopie von Sonnen-Neutrinos mit Borexino und LENA	50
CAST: Axionen aus dem Inneren der Sonne	52
Nukleare Astrophysik: Elementsynthese im Universum	54

KOSMISCHE STRAHLUNG

Kosmische Strahlung:

Das nichtthermische Universum58

Das Pierre-Auger-Observatorium:

Teilchensuche in der argentinischen Pampa60

KASCADE-Grande:

Luftschauer über Karlsruhe62

LOPES „sieht“ Radioblitze

kosmischer Strahlungsteilchen.....64

AMS sucht Antimaterie und Dunkle Materie..... 66

Das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)

zeigt die Galaxis in einem neuen Licht68

MAGIC: das Gammateleskop

neuer Technologie.....70

GLAST: das Weltraumobservatorium

für die Gammaastronomie72

Baikal-NT200, AMANDA und IceCube:

Neutrinoastronomie in Wasser und Eis74

ANTARES und KM₃NeT:

Tiefsee-Neutrino teleskope im Mittelmeer76

Akustische Neutrinosuche:

Horchposten für hochenergetische Neutrinos78

GRAVITATIONSWELLEN

Gravitationswellen-Astronomie:

Theoretische Berechnung und
Astrophysikalische Quellen82

Geo600 und LISA:

den Gravitationswellen auf der Spur84

ANHANG

1 | Standorte, Forschungsgruppen und
Kontaktadressen88

2 | Forschungsförderung und
wissenschaftliche Vernetzung96

Schon immer haben Menschen versucht, die Entwicklung des ganzen Universums, die Eigenschaften der Materie und die Natur der fundamentalen Kräfte zu begreifen. Heute ahnen wir, daß Quantenfluktuationen im frühen Universum die Keimzelle für Galaxiencluster im heute noch expandierenden Universum gewesen sein könnten. Astroteilchenphysik verbindet Quarks mit dem Kosmos, um diese Zusammenhänge aufzuklären.

Zeit seit dem Urknall (Jahre)

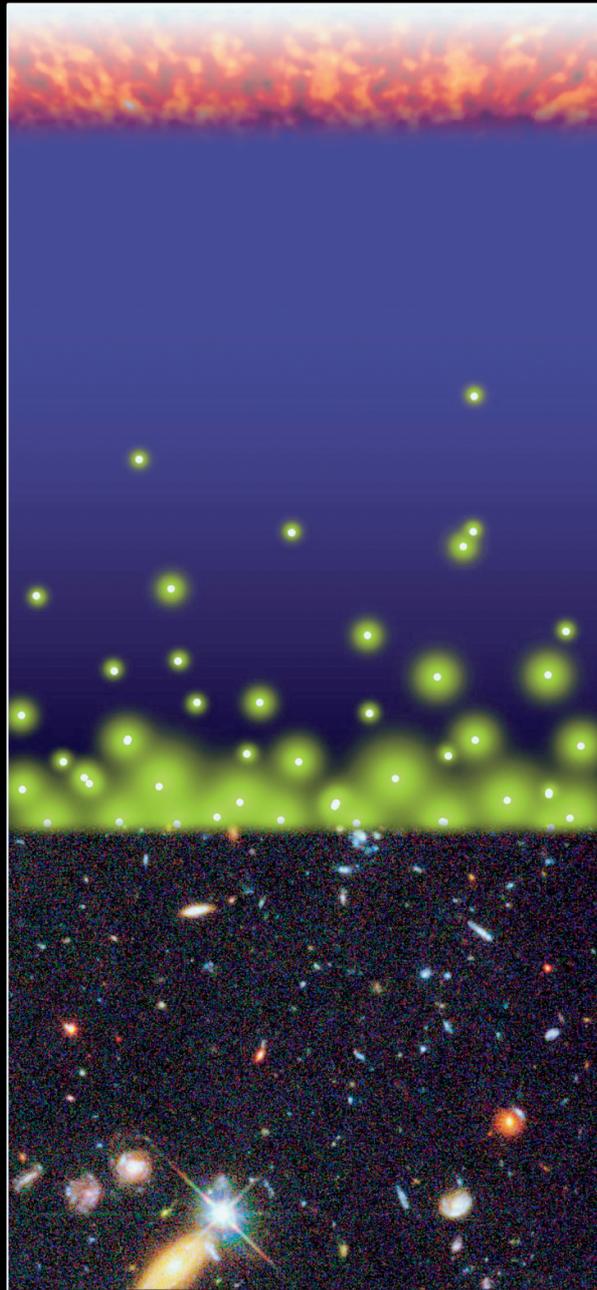
~ 300 Tausend

~ 200 Millionen

~ 1 Milliarde

~ 9 Milliarden

13,7 Milliarden



Urknall

Universum gefüllt mit ionisiertem Gas

Universum wird neutral und durchsichtig

Das "Dunkle Zeitalter" beginnt

Erste Galaxien und Quasare entstehen

Re-Ionisation beginnt

Die kosmische Renaissance: Ende des "Dunklen Zeitalters"

Re-Ionisation beendet
Das Universum ist transparent

Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

Heute: Astronomen erklären das Universum

Die Kosmologen haben heute bereits eine gute Vorstellung von der Evolution des Universums seit dem Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren.

1 | Kosmologie und Teilchenphysik: Die Welt im Großen und im Kleinen

Die Kosmologie ist die wohl umfassendste und älteste Wissenschaft. Sie beschreibt das Universum als Ganzes, seine Entstehung, seine vergangene und zukünftige Entwicklung und seinen Aufbau. Sie versucht, ein Weltbild zu entwerfen und zu erklären, warum die Welt so ist, wie wir sie vorfinden. Kosmologie im weitesten Sinne umfasst somit Physik, Astronomie, Philosophie und Theologie. Zu den aufregendsten Erkenntnissen der jüngeren Vergangenheit zählt die Einsicht, dass die Erforschung des Allergrößten (die Kosmologie) und des Allerkleinsten (die Teilchenphysik) auf unzertrennliche Weise miteinander verbunden sind.

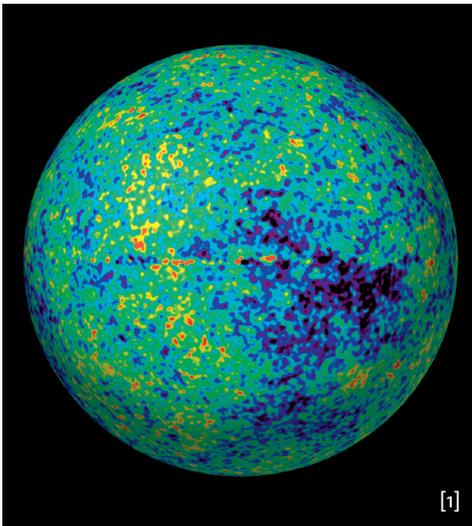
Die Teilchenphysik untersucht die Eigenschaften der Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen. Diese sind entscheidend für die Entwicklung des Universums, insbesondere in der Anfangsphase. Seit zwei Jahrzehnten ist zudem immer deutlicher geworden, dass eine unsichtbare Materieform, die Dunkle Materie, die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen bestimmt. Mit der Natur der Dunkle-Materie-Teilchen und mit der Frage, welche Rolle Neutrinos hierbei spielen, beschäftigen sich sowohl Astronomen als auch Teilchenphysiker. Schließlich ist auch die Frage nach der Herkunft der Teilchen der kosmischen Strahlung, die unablässig auf unseren Planeten einströmen, nur im Zusammenspiel von Physikern aus diesen beiden Disziplinen lösbar.

Kosmologie im Umbruch – Dunkle Materie und Dunkle Energie

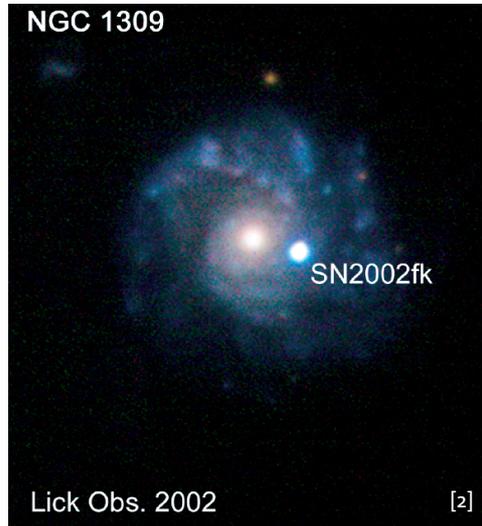
In den vergangenen Jahren hat die Kosmologie einen großen Umbruch erlebt. Eine Ursache hierfür sind genaue Beobachtungen der kosmischen Mikrowellenstrahlung. Sie liefern Aufschlüsse über den Zustand des Universums, als dieses etwa 380 000 Jahre alt war (**Abb. 1**).

➔ [Planck S.30](#)

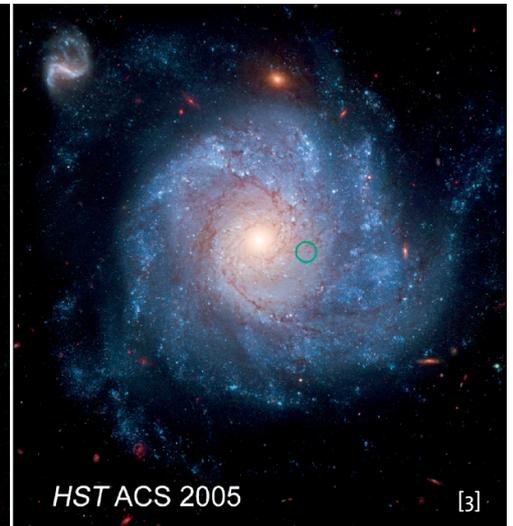
Gleichzeitig ist es gelungen, im Rahmen großer Himmelsdurchmusterungen die Verteilung der Galaxien bis in große Entfernungen räumlich zu kartieren. Hieraus lässt sich ermitteln, wie sich einerseits die Galaxien selbst und andererseits die größten Strukturen im Universum, die Galaxienhaufen, im Laufe der vergangenen Milliarden Jahre entwickelt haben. Und schließlich ist es gelungen, aus Beobachtungen weit entfernter Sternexplor-



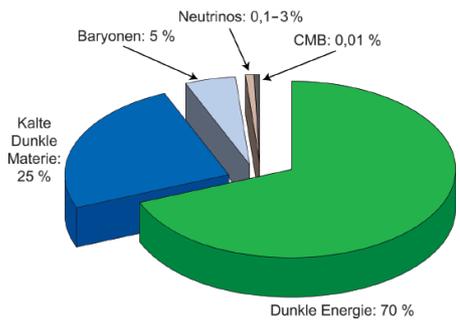
[1]



[2]



[3]



[4]

Abb. 1: Sphärische Darstellung der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am Himmel. Hier werden Strukturen sichtbar, die als Keimzellen der heutigen Galaxien angesehen werden. Teilchen der Dunklen Materie spielten hierbei eine entscheidende Rolle. (Foto: NASA/WMAP Science Team)

Abb. 2 und 3: Spiralgalaxie NGC 1309. Links eine Aufnahme des Lick Observatoriums aus dem Jahre 2002, das die Supernova 2002fk zeigt, die für einige Wochen fast so hell leuchtete wie die gesamte Muttergalaxie. Das rechte Bild zeigt die gleiche Galaxie in einer Aufnahme des Hubble Space Teleskops im Jahr 2005, wo der Ort der Supernova, die längst abgeklungen ist, durch einen Kreis gekennzeichnet ist. (Lick Aufnahme: W. Li und A. V. Filippenko. HST Aufnahme: NASA/ESA, Hubble Heritage Team und A. Riess)

Abb. 4: Dieses Diagramm veranschaulicht die Anteile der insgesamt im Universum vorhandenen Energie und Materie. Die uns vertraute Materie trägt hierzu nur etwa 5 % bei. CMB (Cosmic Microwave Background) steht für kosmische Mikrowellenstrahlung. Mit „Baryonen“ meint man die normale Materie.

sionen, so genannter Supernovae (Abb. 2, 3), den zeitlichen Ablauf der Ausdehnung des Universums zu rekonstruieren.

All diese Beobachtungen, die das Verhalten des Universums zu ganz verschiedenen Epochen seiner Geschichte zeigen, ergeben ein in sich geschlossenes Bild des Universums (Abb. 5. 7). Das aber konfrontiert uns mit großen Rätseln.

Das heutige kosmologische Modell legt zunächst die Gesamtdichte aller Materie und Energie im Universum fest. Demnach trägt die Materie nur etwa 30 % zur Gesamtbilanz bei. Doch nur etwa 1/6 hiervon ist die uns vertraute Materie aus Protonen, Neutronen und Elektronen, aus der alle Sterne, Planeten und auch wir Menschen bestehen. Der größte Teil ist unsichtbar und wird daher Dunkle Materie genannt. Sie sendet kein Licht

aus und verschluckt auch keines, sondern macht sich ausschließlich über ihre Schwerkraftwirkung bemerkbar. Die Natur der Dunklen Materie ist indes völlig unklar. Vermutlich besteht sie aus einer uns unbekanntem Art von Teilchen.

Den weitaus größten Anteil an der Gesamtdichte von Materie und Energie macht aber etwas anderes aus: ein Energiefeld, das den Kosmos beschleunigt auseinander treibt. Man nennt dies Dunkle Energie. Sie wirkt also der Materie entgegen, die mit ihrer Schwerkraft die Expansion des Raumes bremst. Nach heutiger Kenntnis überwiegt hierbei die Dunkle Energie (Abb. 4), so dass sich das Universum auf ewige Zeit ausdehnen wird.

Damit besitzen die Kosmologen zwar ein Weltmodell, das mit allen Beobachtungsfunden in Einklang steht, das uns aber vor

ein großes Rätsel stellt: Die Zusammensetzung des Universums ist uns zu mehr als 95% unbekannt.

Hier berühren sich Kosmologie und Teilchenphysik. Die zentralen Fragen der Kosmologie nach der Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie verlangen nach konkreten Vorstellungen der Teilchenphysik, um welche Arten von Teilchen oder Quantenfeldern es sich bei beiden handeln könnte. Aus der Kosmologie allein können die Antworten nicht kommen. Umgekehrt ergeben sich aus den Theorien über den Aufbau der Materie Erwartungen an das Verhalten des Universums sowie den Aufbau und die Entwicklung seiner Strukturen. Hier erwarten wir eine fruchtbare Zusammenarbeit von Astro- und Teilchenphysik mit weit reichenden kosmologischen Konsequenzen. ➔ [Teilchenkosmologie](#) S.28

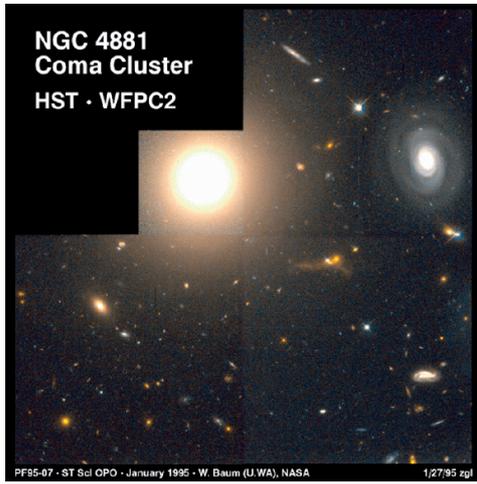


Abb. 5: Beobachtungen des Coma-Galaxienhaufens (hier eine Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble) führten schon vor 70 Jahren zu der Vermutung, dass es große Mengen an unsichtbarer Dunkler Materie geben muss. (Foto: NASA/ESA)



Abb. 6: Ohne die Schwerkraftwirkung der Dunklen Materie würden sich Spiralgalaxien nicht so schnell drehen, wie es beobachtet wird. Gezeigt ist die Spiralgalaxie M 83. (Foto: ESO)

Suche nach den Dunklen Teilchen

Schon der Schweizer Astronom Fritz Zwicky bemerkte um 1933, dass es sehr viel mehr Materie im Universum gibt als man bis dahin annahm. Er schloss dies aus den Bewegungen von Galaxien im Coma-Galaxienhaufen (Abb. 5). Sie waren viel zu schnell, als dass die sichtbare Materie sie mit ihrer Schwerkraft im Haufen hätte halten können. Dazu war zehnmal mehr Materie notwendig. Beobachtungen von Spiralgalaxien bestätigen dieses Bild (Abb. 6). Die Geschwindigkeiten, mit der die Sterne um deren Zentren laufen, sind viel zu hoch. Gäbe es nur die sichtbaren Sterne, Gas und Staub, so würden diese Galaxien auseinander fliegen. In beiden Fällen vermutet man riesige Mengen an Dunkler Materie, die diese Gebilde zusammen halten.

Ein wichtiges Instrument zum Nachweis Dunkler Materie sind auch so genannte Gravitationslinsen geworden. Bei diesem Phänomen lenken große Massenansammlungen wie Galaxienhaufen Licht mit ihrem Schwerfeld ab. Sie wirken dadurch wie gewaltige Linsen. Befindet sich zufällig ein Himmelskörper hinter einer solchen Gravitationslinse, so sehen wir von ihm ein verzerrtes Bild. Aufnahmen von Gravitationslinsen dienen dazu, die Gesamtmasse in dem Galaxienhaufen (der „Linse“) zu ermitteln. Auch diese

Methode offenbart die gewaltigen Mengen an Dunkler Materie (Abb. 7).

Von dieser unsichtbaren Substanz ist immerhin zweierlei bekannt. Zum einen kann die Dunkle Materie nicht mit Licht wechselwirken. Dies schließt man aus den gemessenen Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund. Zum anderen muss die Geschwindigkeit der Teilchen, aus denen die Dunkle Materie mutmaßlich zusammengesetzt ist, sehr viel kleiner sein als die des Lichts. Wäre sie der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar, wären kosmische Strukturen bis etwa zur Größe von Galaxien durch die rasche Bewegung der Teilchen zerstört worden. Insbesondere schließt man aus der Verteilung der Galaxien im Raum, dass die kleinsten Strukturen zuerst entstanden sind und erst nachfolgend die größeren, wie Galaxienhaufen. Hieraus ergibt sich die Eigenschaft, dass sich die Teilchen der Dunklen Materie im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit relativ langsam bewegen. Man spricht deshalb von Kalter Dunkler Materie.

Die Kosmologen haben aus der Theorie weitere starke Hinweise auf die Eigenschaften der Dunklen Materie erhalten. So kann man in aufwändigen Computersimulationen verfolgen, wie sich in der Evolution des Universums erst die Galaxien

gebildet haben, die sich dann zu den riesigen Galaxienhaufen zusammenfanden. Damit diese Rechnungen zu den heute beobachtbaren Strukturen führen, muss man die Existenz von Dunkler Materie annehmen. Sie bildete bereits im jungen Universum Massenansammlungen, in welche die normale Materie hineinströmte und sich zu Galaxien verdichtete.

➔ [Virgo S.32](#)

Der Theorie der kosmischen Inflation zufolge entstanden die Dichteschwankungen im frühen Universum aus Quantenfluktuationen, die innerhalb kürzester Zeit auf kosmologische Skalen vergrößert wurden.

➔ [Teilchenkosmologie S.28](#)

Dabei sollten auch Gravitationswellen entstanden sein, deren Entdeckung eine Herausforderung für zukünftige Experimente darstellt.

➔ [Geo600/LISA S.84](#)

Nach einer noch jungen Hypothese ist es auch denkbar, dass sich Teilchen der Dunklen Materie in den Galaxienzentren, wo ihre Dichte besonders hoch ist, gegenseitig vernichten können. Ist dies tatsächlich der Fall, so müsste man die hierbei frei werdende Gammastrahlung mithilfe geeigneter Teleskope nachweisen können.

➔ [H.E.S.S. S.68](#) ➔ [MAGIC S.70](#) ➔ [GLAST S.72](#)

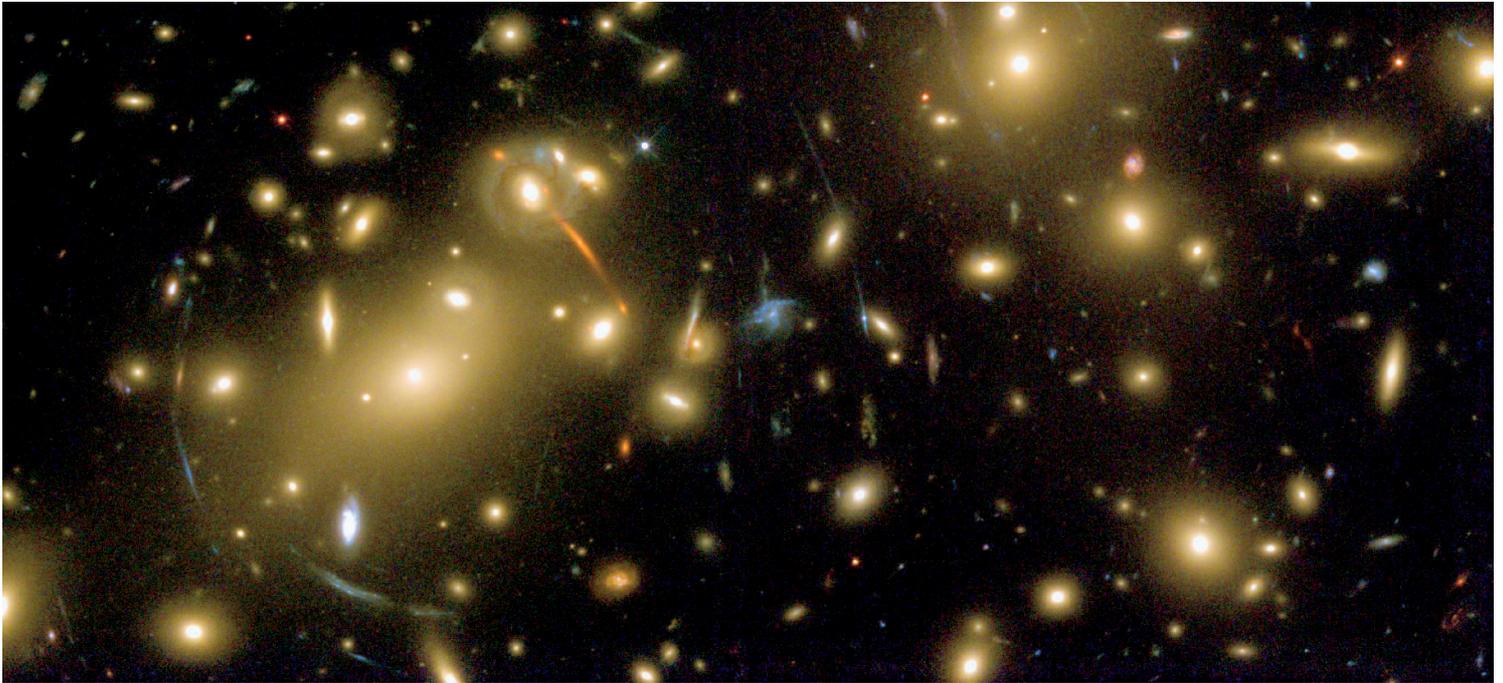


Abb. 7: Der Galaxienhaufen Abell 2218 wirkt als Gravitationslinse. Weit hinter dem Haufen stehende Galaxien erscheinen deshalb sichelförmig. Mit Aufnahmen dieser Art bestimmt man die Menge an Dunkler Materie im Innern von Galaxienhaufen. (Foto: NASA/ESA)

Doch worum handelt es sich bei der Dunklen Materie? Neutrinos galten lange Zeit als Kandidaten für sie. Das kann man heute ausschließen, wie später noch erläutert wird. An dieser Stelle müssen die Teilchenphysiker den Kosmologen zu Hilfe kommen und Vorschläge machen, welche Art von Teilchen überhaupt in Frage kommen. Umgekehrt zieht die Kosmologie das Standardmodell der Teilchenphysik in Zweifel.

Der heute wohl vielversprechendsten Hypothese zu Folge könnte es sich um Elementarteilchen handeln, deren Existenz die Theorie der Supersymmetrie fordert. Um einige der von ihr vorgeschlagenen Teilchen nachzuweisen, sind bereits Experimente in Planung und im Bau, wie etwa am Large Hadron Collider am CERN.

Gleichzeitig laufen Experimente oder sind im Aufbau, mit denen man die Teilchen der Dunklen Materie direkt nachweisen will. Da diese Partikel mit der normalen Materie nur sehr schwach wechselwirken, müssen diese Experimente unter extremen Bedingungen stattfinden. So werden einige im Gran-Sasso-Labor installiert, wo sie eine 1,5 km dicke Gesteinsschicht des Appenin vor unerwünschten Störteilchen aus dem Kosmos und der Atmosphäre abschirmt.

➔ [CRESST S.34](#) ➔ [EDELWEISS S.36](#)

Dunkle Energie beschleunigt die Expansion

Während Teilchenphysiker und Kosmologen bei der Frage nach der Natur der Dunklen Materie konkrete Lösungsansätze vorschlagen, ist die Lage bei der Dunklen Energie erheblich mysteriöser. Damit sie die beobachtete beschleunigte Ausdehnung des Universums verursachen kann, muss ihr Druck negativ sein. Das allein läuft zwar der Intuition zuwider, ist aber theoretisch möglich. Bestimmte Arten postulierter Quantenfelder können tatsächlich einen negativen Druck erzeugen, der so wirkt, als verursache er eine abstoßende Gravitation. Modelle dafür zu konstruieren, ist Aufgabe der Teilchenphysik. Allerdings bleibt hier ein erheblicher Spielraum offen, weil konkrete experimentelle Einschränkungen fehlen.

➔ [Teilchenkosmologie S.28](#)

Der für die beschleunigte Expansion notwendige negative Druck verhindert, dass die Dunkle Energie Strukturen bilden kann. Dennoch greift sie in die kosmische Strukturbildung ein, weil sie den Ablauf der kosmischen Ausdehnung verändert. Kosmische Strukturen aus Dunkler Materie mussten bei ihrer Entstehung gegen die allgemeine Ausdehnung des Universums anlaufen. Abhängig vom Modell für die Dunkle Energie bildeten sich diese

Strukturen früher oder später in der kosmischen Geschichte, und entsprechend werden auch die Zentralbereiche dieser Gebilde mehr oder weniger dicht. Computersimulationen sind hier zu einem wichtigen Werkzeug der Kosmologen geworden.

➔ [Virgo S.32](#)

Auf welche Weise können wir mehr über die Dunkle Energie erfahren? Zum einen werden Kosmologen genauer herausfinden, wie sich die Expansion des Universums seit dem Urknall entwickelt hat. Beobachtungen bestimmter Sternexplosionen (Supernovae vom Typ Ia) und des schwachen Gravitationslinseneffektes großer kosmischer Strukturen erscheinen hierfür derzeit am besten geeignet. Ferner wird das Studium der erwähnten indirekten Auswirkungen der Dunklen Energie auf die kosmischen Strukturen den Zusammenhang zwischen Teilchenphysik, Kosmologie und beobachtender Astronomie weiter vertiefen. Erst wenn wir wissen, worum es sich bei der Dunklen Materie und der Dunklen Energie handelt, werden wir die gesamte Evolution des Kosmos bis in die Zukunft verstehen.



Abb. 8: Clyde Cowan (links) und Fred Reines (rechts) vor ihrem Experiment „Poltergeist“, mit dem sie Mitte der 1950er-Jahre erstmals Neutrinos nachwiesen. (www.ps.uci.edu/physics/reinesphotos.html)

2 | Neutrinos: Botschafter aus dem Universum und dem Inneren der Materie

Schon seit mehreren Jahrzehnten interessieren sich verstärkt Physiker und Kosmologen für eine Art von Teilchen: die Neutrinos. Sie sind Außenseiter im Zoo der Elementarteilchen. Mit normaler Materie gehen sie nur eine extrem schwache Wechselwirkung ein, was ihren Nachweis erheblich erschwert. So wäre beispielsweise eine mehrere hundert Lichtjahre dicke Bleischicht nötig, um Neutrinos abzuschirmen, die in Fusionsprozessen in der Sonne entstehen. Außerdem ist ihre Ruhemasse ungewöhnlich gering. Bis Mitte der 1990er-Jahre nahmen die Physiker sogar an, dass diese Teilchen masselos sind. Neutrinos entstehen beispielsweise in Kernreaktionen und spielen eine zentrale Rolle im Spannungsfeld zwischen Elementarteilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie.

Geisterteilchen als kosmische Botschafter

Wegen der enormen Durchdringungsfähigkeit glaubten viele Physiker, man würde diese 1930 von Wolfgang Pauli postulierten „Geisterteilchen“ nie nachweisen können. Dennoch gelang dies erstmals Mitte der 1950er-Jahre den amerikanischen Physikern Clyde Cowan und Fred Reines. Mit einer Apparatur, die sie „Poltergeist“ nannten, registrierten sie Neutrinos aus dem Hanford-Kernreaktor (Abb. 8). Heutzutage werden sie in großer Zahl bei Kernkollisionen in Teilchenbeschleunigern erzeugt (Abb. 9 und 10) und lassen sich auch anschließend nachweisen.

Mittlerweile ist es mit unterschiedlichen Experimenten möglich, zum Beispiel Neutrinos nachzuweisen, die im Innern der Sonne entstehen. Die Sonnenmodelle ließen sich mit Hilfe des gemessenen Neutrinstroms genau überprüfen. Mittlerweile sind sogar die kleinen jährlichen Intensitätsschwankungen des Sonnenneutrino-Flusses aufgrund der Elliptizität der Erdbahn messbar. Von entscheidender Bedeutung für die Astrophysik ist, dass die schwache Wechselwirkung der Neutrinos einen Blick ins Innere von Himmelskörpern ermöglicht, das uns sonst verborgen bliebe.

➔ [Borexino/LENA S.50](#)

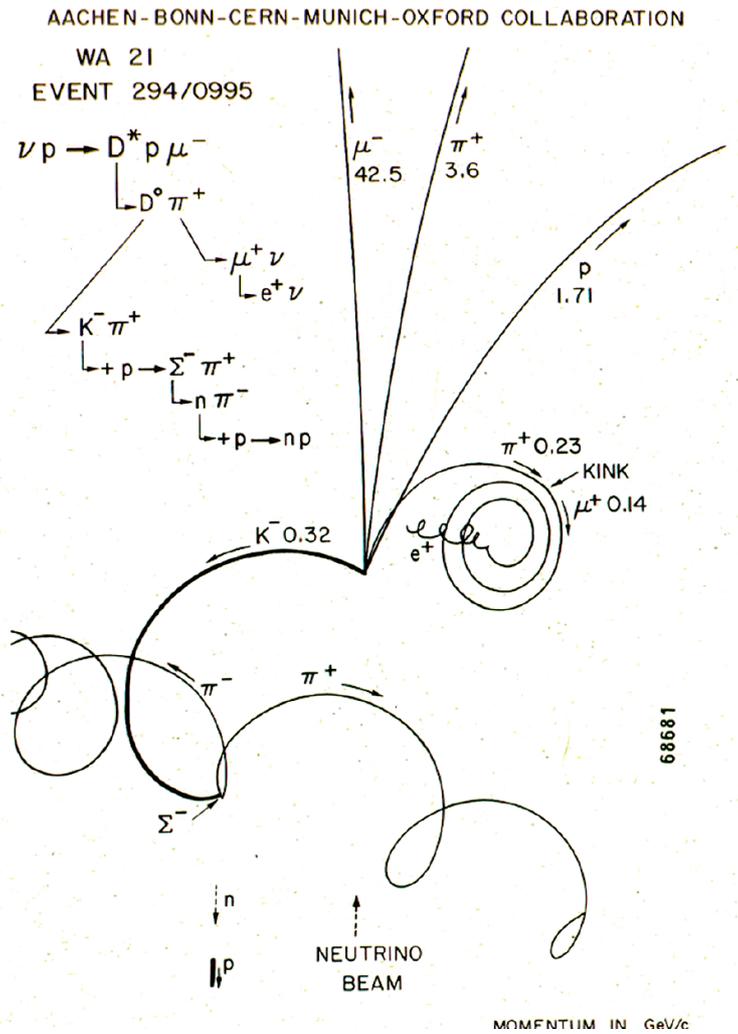
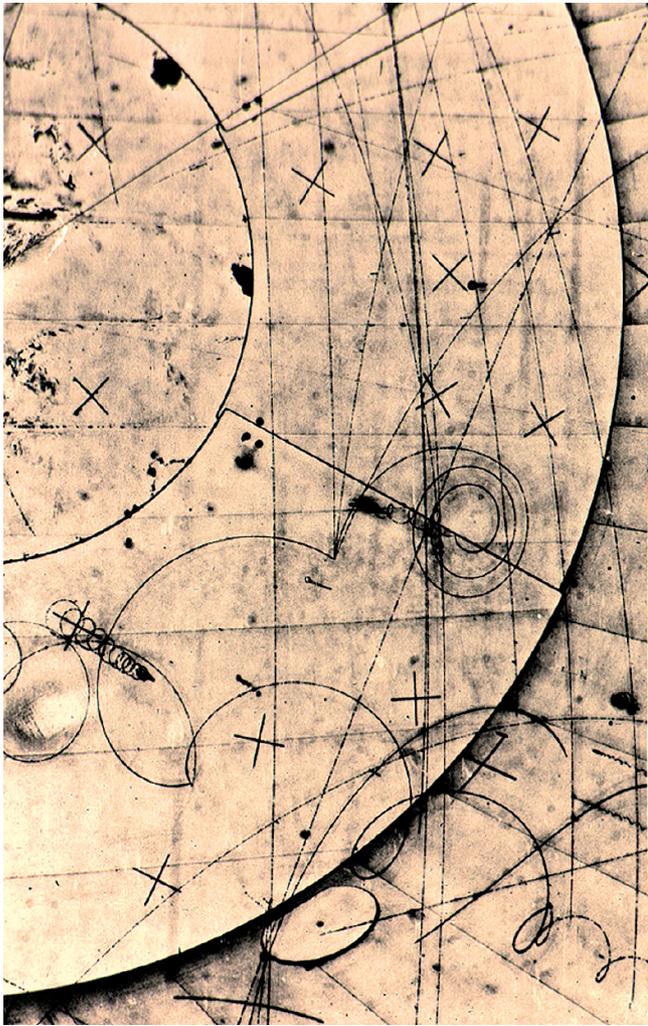


Abb. 9: Reaktion eines von unten kommenden (unsichtbaren) Neutrinos mit einem Proton (p). Hierbei wird kinetische Energie auf das Proton übertragen und es entstehen ein negativ geladenes Myon (μ^-) und ein angeregtes Meson D^* . Letzteres zerfällt rasch in ein D^0 -Meson und ein Pi-Meson (π^+). (Foto: CERN)

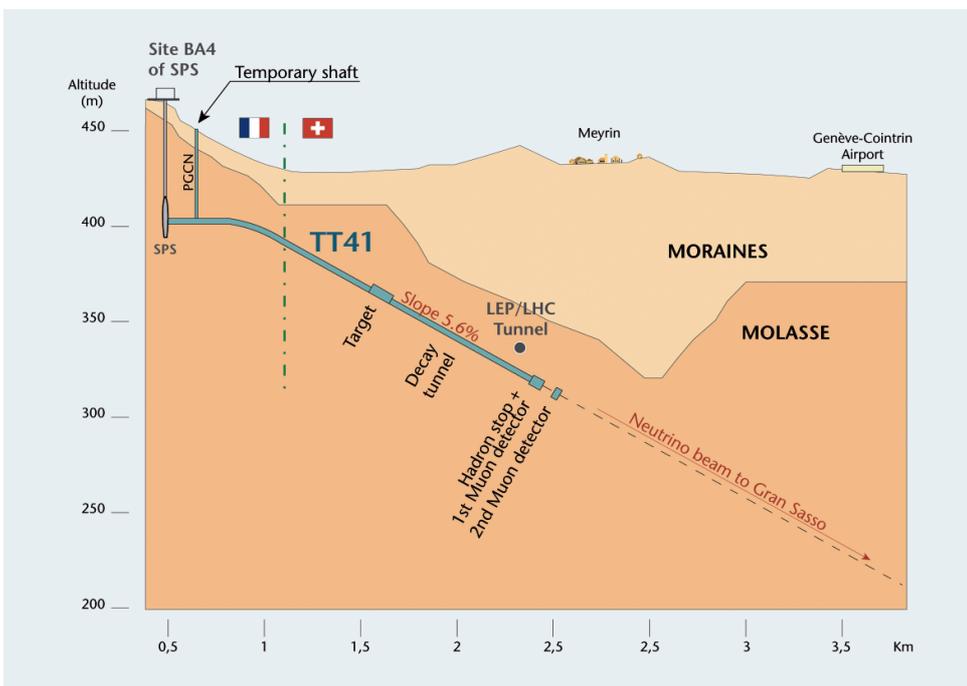


Abb. 10: Im europäischen Teilchenlaboratorium CERN wird ein Beschleunigerexperiment zur Untersuchung von Neutrinos aufgebaut. In diesem „CERN Neutrinos to Gran Sasso-Experiment“ (CNCS) werden Protonen aus dem SPS-Beschleuniger auf ein Material (Target) geschossen. Hierbei entstehen Myon-Neutrinos, die anschließend durchs Erdinnere fliegen. Im 730 km entfernten Gran-Sasso-Laboratorium werden die ankommenden Myon-Neutrinos nachgewiesen. Aus der Anzahl der ankommenden Neutrinos lässt sich ermitteln, wie viele der Myon-Neutrinos sich auf dem Weg in Elektron- oder Tau-Neutrinos umgewandelt haben. Der OPERA-Detektor im Gran Sasso soll zum ersten Mal die bei Neutrinooszillationen entstehenden Tau-Neutrinos direkt nachweisen.

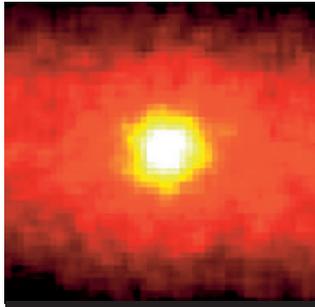


Abb. 11a: Falschfarbenbild der Sonne im „Licht“ der Neutrinos. Es entstand aus dem Sonnenneutrino-Fluss, gemessen mit dem japanischen Detektor Super-Kamiokande. Die Winkelauflösung ist allerdings sehr gering, so dass die sichtbare Sonne nur ein kleiner Punkt im Zentrum dieses Bildes ist. (Foto: B. Svoboda, LSU)

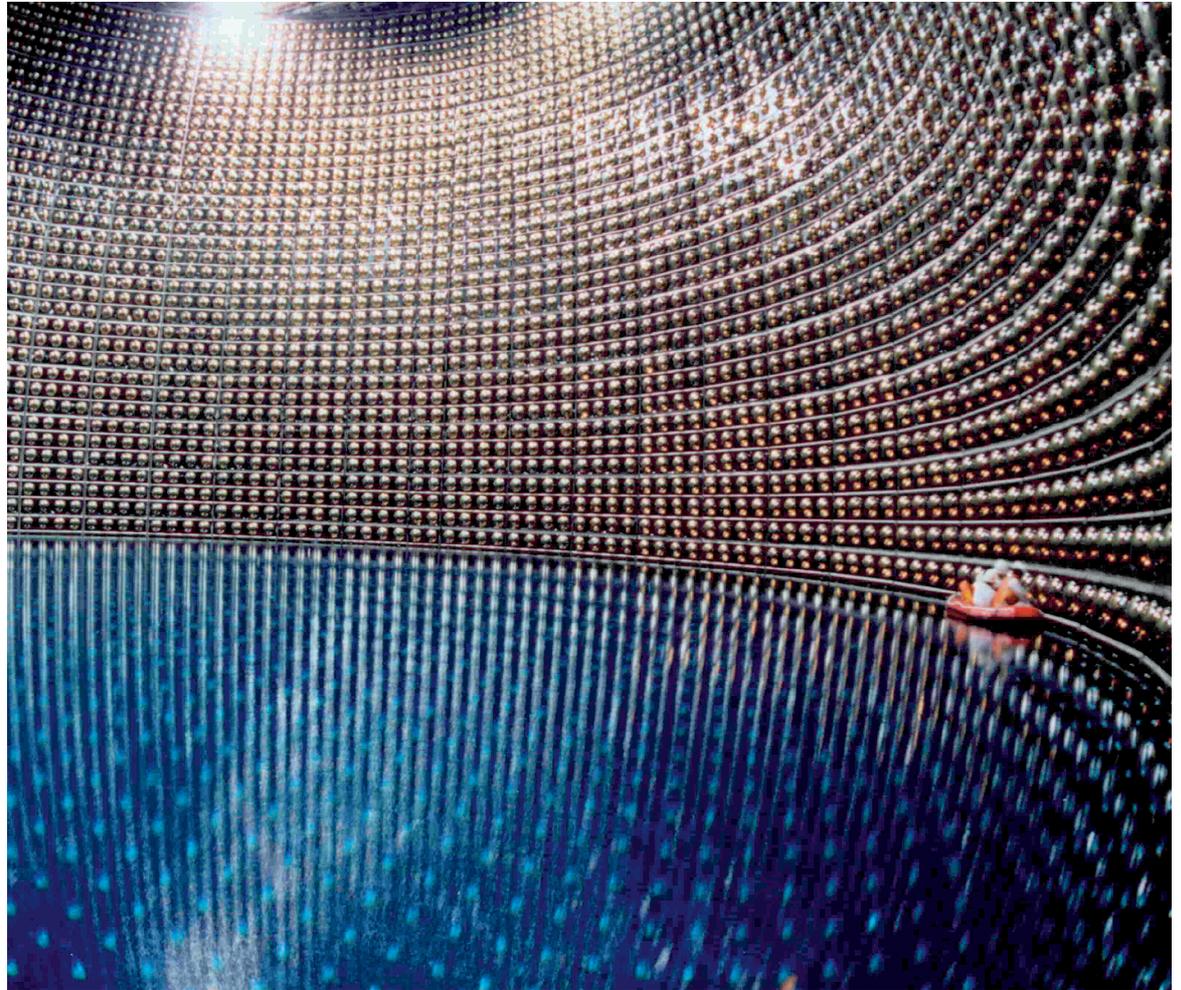


Abb. 11: Der Innenraum des japanischen Super-Kamiokande Neutrinoobservatoriums zum Zeitpunkt der ersten Befüllung mit ultrareinem Wasser im Jahre 1996. Der Detektor ist ein zylindrischer Hohlraum mit einer Höhe und einem Durchmesser von jeweils rund 40 m. Neutrinos erzeugen in dem 50 000 t fassenden Wasservolumen gelegentlich Elektronen, die ihrerseits Lichtblitze (Tscherenkow-Licht) aussenden, das von den rund 12 000 Lichtsensoren (Photomultiplier-Röhren) aufgefangen wird. (Foto: Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo)

Neutrinos entstehen auch in enormen Mengen, wenn ein massereicher Stern seinen Brennstoff verbraucht hat und als Supernova explodiert. Bei einem solchen Vorgang bricht der innere Teil des Sterns in sich zusammen, und es entsteht ein ultrakompakter Neutronenstern. Hierbei verdichtet sich die Materie und wird enorm heiß. In diesem Plasma bilden sich innerhalb weniger Sekunden Neutrino-Antineutrino-Paare. Ein solcher Neutrinoblitz setzt eine Energiemenge in Neutrinos frei, die rund 15% des Massenäquivalents einer Sonnenmasse entspricht.

➔ [Supernovae S. 48](#)

Eine historisch bislang einmalige Messung gelang in diesem Zusammenhang am 23. Februar 1987, als rund zwanzig Neutrinos von der Supernova 1987A (**Abb. 12**)

nachgewiesen werden konnten. Dies gelang mit dem japanischen Kamiokande II Detektor, dem Vorläufer des in **Abb. 11** dargestellten Super-Kamiokande Observatoriums, sowie mit dem amerikanischen IMB Detektor und dem sowjetischen BST Experiment.

Es ist bemerkenswert, dass Kamiokande und IMB ursprünglich gebaut worden waren, um nach dem Zerfall des Protons zu suchen, denn es wird vermutet, dass diese Teilchen nicht völlig stabil sind. Jedoch selbst Super-Kamiokande hat noch keinen Hinweis auf Protonzerfälle gefunden, so dass man noch empfindlichere Instrumente braucht, um diesen extrem seltenen Prozess zu finden.

➔ [Borexino/LENA S. 50](#)

In unserer Galaxie ereignen sich pro Jahrhundert nur einige wenige Supernovae. Heute sind die Forscher weltweit mit mehreren Neutrinodetektoren für die nächste galaktische Supernova gerüstet. Eine Supernova in unserer Galaxie ließe sich dann nicht nur im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom Radio- bis zum Gammabereich beobachten, sondern erstmals sehr wahrscheinlich auch mit Neutrinodetektoren und vielleicht sogar mit Gravitationswellendetektoren. Dies würde unsere Kenntnisse solcher Sternexplosionen bedeutend erweitern.

➔ [Borexino/LENA S. 50](#) ➔ [Baikal/AMANDA/ IceCube S. 74](#) ➔ [Geo600/LISA S. 84](#)

Die systematische Untersuchung der Sonnenneutrinos und die Entdeckung

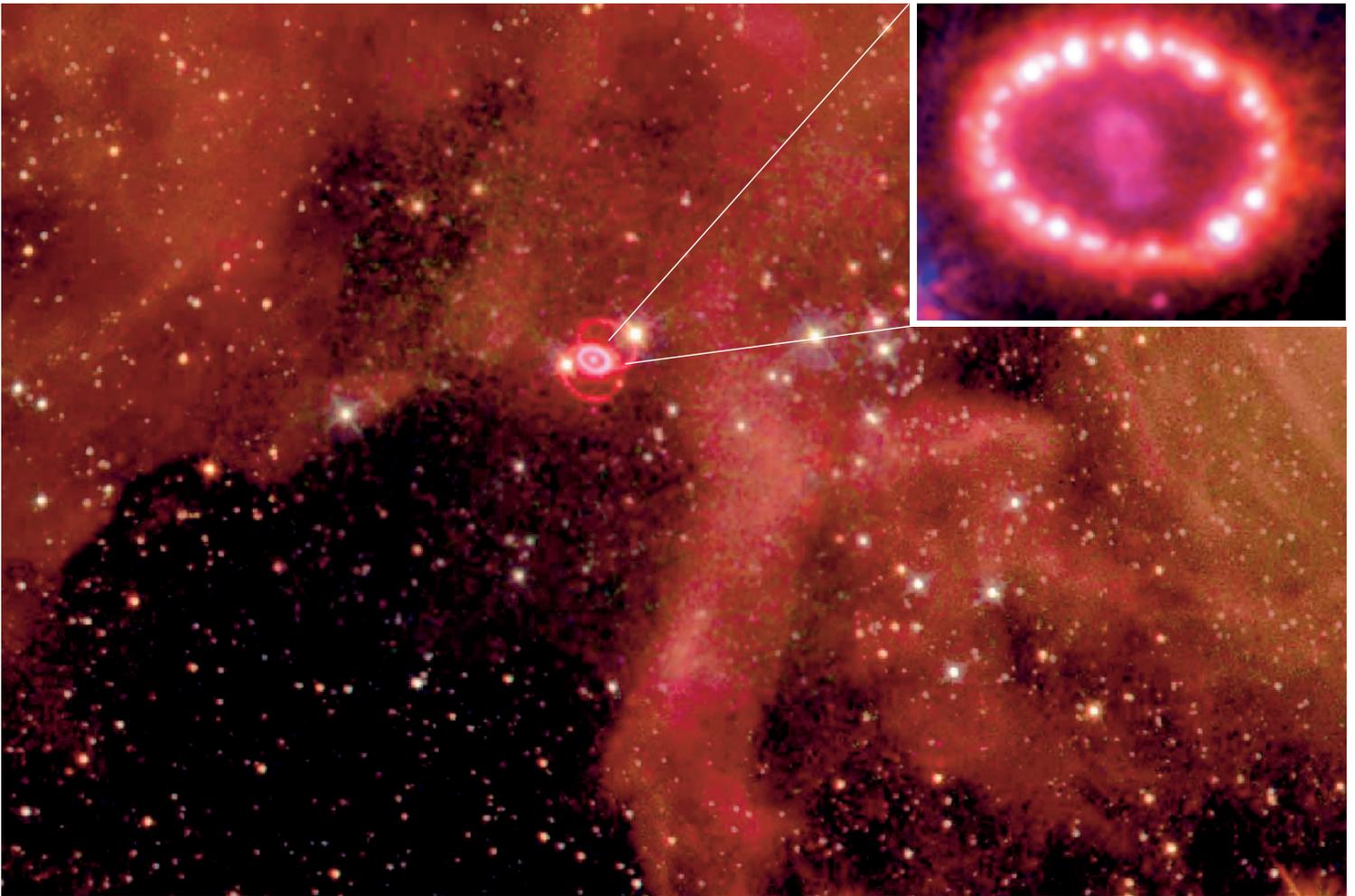


Abb. 12: Als am 23. Februar 1987 in der Großen Magellanschen Wolke die Supernova 1987A aufleuchtete, konnten auch einige Neutrinos von ihr nachgewiesen werden. Diese Aufnahme entstand mehrere Jahre nach der Explosion. Die Ringe bestehen aus Gas, das der Vorläuferstern der Supernova lange vor seiner Explosion abgestoßen hat. Die Detailaufnahme vom November 2003 zeigt helle Gaswolken in einem Ring mit etwa einem Lichtjahr Durchmesser. Sie leuchteten auf, als die Schockwelle der Explosion in diesen bereits vorhandenen Gasring hineinraste und lokal stark aufheizte. (Foto: NASA/ESA)

der Neutrinos von der Supernova 1987A sind erst der Beginn der Neutrinoastronomie. Vor allem die rätselhaften astrophysikalischen Beschleuniger der energiereichen kosmischen Strahlung sollten nach gängiger Vorstellung auch im „Neutrino Licht“ hell leuchten. Da Neutrinos in galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern nicht abgelenkt werden (im Gegensatz zu den Protonen und Atomkernen der kosmischen Strahlung), würde eine Neutrinomessung direkt auf den Ursprungsort am Himmel deuten.

Neutrinoobservatorien haben indes wegen der seltsamen Eigenschaften dieser Teilchen keinerlei Ähnlichkeit mit optischen Teleskopen. Forscher suchen sich geeignete Medien, wie Wasser, Eis oder organische Flüssigkeiten, in denen eintreten-

de Neutrinos schwache Lichtblitze auslösen. Diese beobachten sie dann mit empfindlichen Detektoren. Das bisher größte Neutrinoobservatorium existiert am Südpol, wo in der AMANDA genannten Anlage 677 Photomultiplier ein Volumen von etwa 0,1 Kubikkilometer antarktisches Eis überwachen. Mit dem Ausbau zum Kubikkilometer großen IceCube-Experiment (4800 Photomultiplier) wurde inzwischen begonnen. Im Mittelmeer sind ähnliche Experimente geplant oder bereits als Prototypen gebaut.

➔ [Baikal/AMANDA/IceCube S.74](#) ➔ [ANTARES S.76](#)

Verwandlungskünstler der Quantenwelt

Wie passen Neutrinos in das heute bekannte Baukastensystem der Elementarteilchen? Alle normale Materie besteht aus Quarks, die sich aufgrund

der „starken Wechselwirkung“ oder „Farbkraft“ untrennbar zu Protonen und Neutronen verbinden. Diese lagern sich zu Atomkernen zusammen und umgeben sich aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einer Hülle aus Elektronen. Kern und Elektronenhülle kennzeichnen die Atome, die Bausteine der uns bekannten Materie (**Abb. 13**).

Diese bekannten Mitglieder des Teilchenzoos werden heute in drei Familien eingeteilt. Die erste Familie bildet die normale Materie. Sie besteht aus Up- und Down-Quarks sowie Elektronen und Elektron-Neutrinos. Letztere unterliegen weder der elektromagnetischen noch der Farbkraft, sondern „spüren“ lediglich die schwache Kraft und die Gravitation.

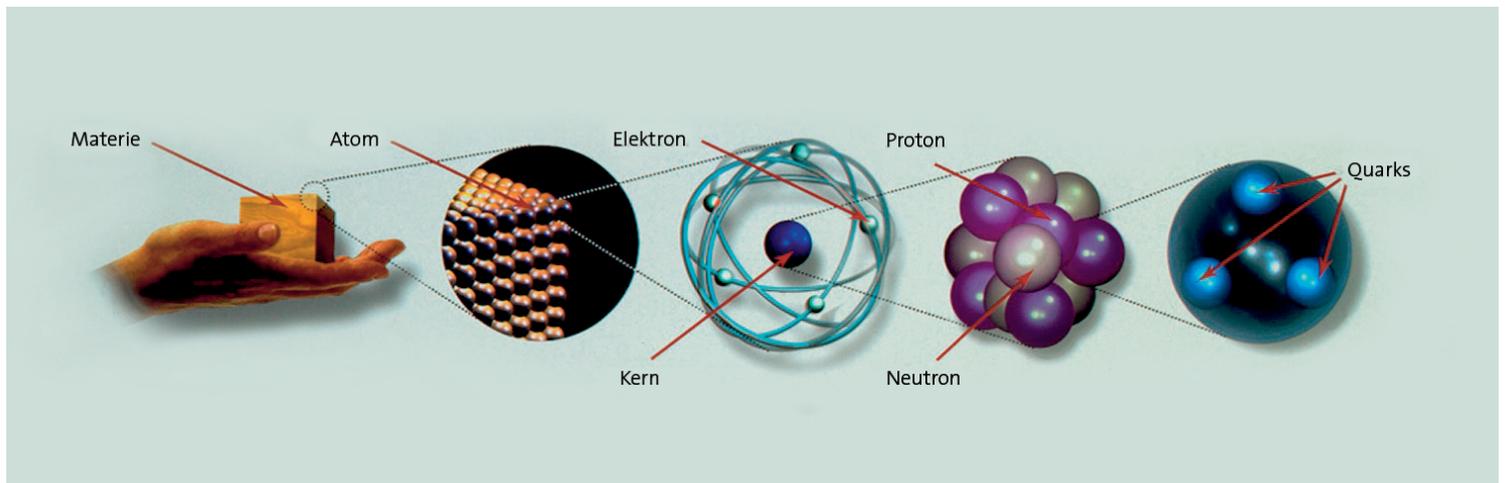


Abb. 13: Alle normale Materie ist aus Quarks und Elektronen aufgebaut. (Grafik: CERN)

Ein Neutrino entsteht beispielsweise, wenn ein Elektron seine Ladung an ein Proton abgibt, das dann zum Neutron wird. Das vormalige Elektron fliegt als Neutrino weiter. Solche Prozesse finden etwa in der Sonne statt, wenn vier Protonen unter Abgabe zweier Positronen zu einem Heliumkern (zwei Protonen, zwei Neutronen) verschmelzen. Bei diesen Fusionsreaktionen wird Energie frei, und es entstehen auch zwei Neutrinos. Auf diese Weise erzeugt die Sonne ihre Energie, und deshalb leuchtet sie auch im „Neutrinolicht“, das uns direkt aus ihrem Zentralbereich erreicht (Abb. 11a).

➔ Borexino/LENA S. 50

Es ist ein bisher unerklärtes Rätsel der Elementarteilchenphysik, dass es neben dieser vierköpfigen Teilchenfamilie noch zwei weitere Familien gibt. Deren Mitglieder haben größere Massen. Anders als ihre Verwandten aus der ersten Familie bilden sie aber keine stabile Materie. Man kann im Labor lediglich kurzlebige Materie herstellen, die teilweise aus Mitgliedern höherer Familien besteht (Abb. 14).

Das mittelschwere Pendant des Elektrons, das Myon, wurde zuerst in der kosmischen Strahlung nachgewiesen. Das Tauon oder Tau-Lepton wurde bei Experimenten in Teilchenbeschleunigern ent-

deckt; es ist fast doppelt so schwer wie ein Wasserstoffatom.

Jede dieser drei Familien besitzt auch ein Neutrino. Gibt etwa ein Myon seine Ladung an ein Proton ab, das dann zum Neutron wird, so fliegt es als Myon-Neutrino weiter. Allerdings, und das kennzeichnet Neutrinos, können sie unterwegs ihre Familienzugehörigkeit ändern. Bei der umgekehrten Reaktion kann das Neutrino als Elektron auferstehen, das seine Reise ursprünglich als Myon begonnen hatte. Neutrinos können periodisch ihre Familienzugehörigkeit wechseln, weshalb man von Neutrinooszillationen spricht.

Diese Eigenschaft löste das so genannte Sonnenneutrino-Rätsel. Es bestand darin, dass man wesentlich weniger Elektron-Neutrinos von der Sonne registrierte als es die Sonnenmodelle vorher sagten (Abb. 15). Der Grund besteht darin, dass die Neutrinos auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihre Familienzugehörigkeit wechseln, das heißt ein Teil der Elektron-Neutrinos wandelte sich in Myon- und Tau-Neutrinos um. Sie fehlten also nur scheinbar im erwarteten Fluss der Elektron-Neutrinos.

Heute sind diese Oszillationen in vielfältiger Weise nachgewiesen. So treten sie ganz deutlich bei Neutrinos auf, die als Sekundärprodukte bei Kollisionen der kosmischen Strahlungsteilchen mit Atomkernen in der Erdatmosphäre entstehen.

Neutrinooszillationen kann es aber nur geben, wenn diese Teilchen nicht verschwindende Ruhmassen besitzen. Erst der Nachweis von Oszillationen in den solaren und atmosphärischen Neutrinoströmen sowie mittlerweile in irdischen Experimenten bewies, dass Neutrinos nicht, wie früher gedacht, masselos sind, etwa wie Photonen. Ihre winzigen Massenwerte und starken Familienmischungen werfen aber neue Rätsel auf, weil sie in theoretischen Ansätzen zur Erklärung von Neutrinomassen nicht erwartet wurden. Die genauere Untersuchung der Oszillationen zwischen den drei Familien in neuen Experimenten und ein fundamentales theoretisches Verständnis des Ursprungs der Neutrinomassen ist ein Hauptanliegen der modernen Neutrino-physik.

➔ Theoretische Neutrino-physik S. 40

➔ Double Chooz S. 46

	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. 14: Die bekannten elementaren Grundbausteine der Materie bestehen aus drei Familien von Quarks, Elektronen und Neutrinos, deren elektrische Ladung in Einheiten der Elementarladung angegeben ist. Materie, die aus Quarks und Leptonen aufgebaut ist, kommt nicht für die kosmische Dunkle Materie in Betracht. Auch Neutrinos sind hierfür ausgeschlossen, so dass unser Standardmodell der Teilchenphysik unvollständig sein muss.



Abb. 15: Der amerikanische Physiker Ray Davis registrierte als Erster Neutrinos von der Sonne und stieß dabei auf das Sonnenneutrino-Rätsel. Sein Detektor bestand aus einem großen mit Tetrachloräthylen gefüllten Tank, in dem die Neutrinos bei Kernreaktionen wenige Argon-37-Isotope erzeugen, die mit einer hochsensitiven Methode nachgewiesen wurden. Davis erhielt hierfür 2002 den Nobelpreis für Physik.

Gewogen und zu leicht befunden

Könnten Neutrinos die Dunkle Materie des Universums sein? Die im Urknall des Universums entstandenen Neutrinos haben heute eine Dichte von 110 Neutrinos pro Kubikzentimeter für jede der drei Familien. Somit tragen Neutrinos in geringem Maße zur Dunklen Materie bei. Es ist daher von größter Wichtigkeit, die Absolutmassen der Neutrinos experimentell zu bestimmen – ein extrem schwieriges Unterfangen. Zudem messen alle bisherigen Experimente lediglich die Massendifferenzen zwischen jeweils zwei Neutrinoarten.

➔ KATRIN S. 42 ➔ GERDA S. 44

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. Aus diesem Grunde muss selbst ein kleiner Anteil von Neutrinos die kosmische Strukturbildung (Galaxien und Galaxienhaufen) sichtbar anders beeinflussen haben, als man es vom Hauptanteil der Kalten Dunklen Materie erwartet, deren Teilchen langsam waren. Aus der Beobachtung der Galaxienverteilung kann man demnach etwas über die

Massen der Neutrinos erfahren. Das Universum dient gewissermaßen als „Neutrinowaage“.

Warum gibt es Materie?

Entgegen anfänglicher Vermutungen stellen Neutrinos also nur einen sehr kleinen Teil der Dunklen Materie. Gleichwohl haben sie wahrscheinlich eine entscheidende Rolle bei der Entstehung der gewöhnlichen Materie im Urknall gespielt. Es ist nämlich ein großes Rätsel, warum sich im frühen Universum nicht gleich viel Materie und Antimaterie gebildet hat, wie man es unter perfekter Symmetrie erwarten würde. Wäre dies geschehen, so hätten sich beide Materiearten gegenseitig vernichtet, und es gäbe im heutigen Universum nur Strahlung. Es muss daher kurz nach dem Urknall einen kleinen Überschuss an Materie gegenüber Antimaterie gegeben haben. Warum?

Des Rätsels Lösung steckt möglicherweise in einer vermuteten Eigenschaft der Neutrinos: Diese sind möglicherweise – im Gegensatz zu den elektrisch geladenen Bausteinen der Materie – gleichzeitig ihre eigenen Antiteilchen. Diese Zwitterrolle ermöglicht den Mechanismus der so genannten Leptogenese, bei dem die kleinen Neutrino-

massen für die Existenz aller Materie und damit unserer eigenen Existenz verantwortlich sind. Es ist daher von größter Bedeutung herauszufinden, ob Neutrinos und Antineutrinos tatsächlich identisch sind.

➔ Theoretische Neutrinophysik S. 40

Derzeit lässt sich dies nur durch die Beobachtung extrem seltener radioaktiver Kernzerfälle (neutrinolose Doppel-Betazerfälle) klären. Weltweit haben sich Forschergruppen dem Ziel verschrieben, nach diesem Phänomen mit immer empfindlicheren Methoden zu suchen und so einerseits dem kosmischen Ursprung der Materie auf die Spur zu kommen und andererseits den teilchenphysikalischen Ursprung der Neutrinomassen zu klären.

➔ GERDA S. 44

Ein besseres Verständnis der Neutrinos gewährt uns gleichzeitig neue Einblicke in den Mikrokosmos der elementaren Quanten wie in den Ursprung des Universums im Großen.

3 | Kosmische Strahlung und die energiereichsten Himmelskörper

Astronomie und Kosmologie üben auf die Öffentlichkeit eine starke Faszination aus. Ein Grund hierfür sind die brillanten Himmelsaufnahmen der modernen Teleskope. Für jeden Spektralbereich, von den Radiowellen bis hin zu Röntgenstrahlen, gibt es heute leistungsfähige Instrumente. In der Öffentlichkeit vergleichsweise unbemerkt geblieben ist hingegen bislang der Schwarm hochenergetischer Teilchen, der unablässig die Atmosphäre bombardiert (Abb. 16). Auch wenn diese kosmische Strahlung nicht direkt sichtbar ist, so beeinflusst sie uns Menschen in vielerlei Hinsicht. Diese energiereichen Partikel können zum Beispiel DNS-Stränge des Erbguts aufbrechen und zu Mutationen führen. Neuerdings vermutet man, dass die kosmische Strahlung auch die Wolkenbil-

dung beeinflusst und damit für unser Klima mit verantwortlich ist.

Die Astroteilchenphysik hat seit kurzem den Bereich der hochenergetischen Strahlung erschlossen und wird damit faszinierende Einblicke in die energiereichsten Vorgänge im Universum bekommen.

Teilchenbeschuss aus dem All

Der österreichische Physiker Victor Hess entdeckte 1912 die kosmische Strahlung auf damals recht abenteuerliche Weise. Hess beschäftigte sich mit der Frage, worauf die elektrische Leitfähigkeit der Luft beruht. Es bestand bereits die Vermutung, dass energiereiche Teilchen aus dem Kosmos dies bewirken. Dann müsste, so folgerte Hess, die elektrische Leit-

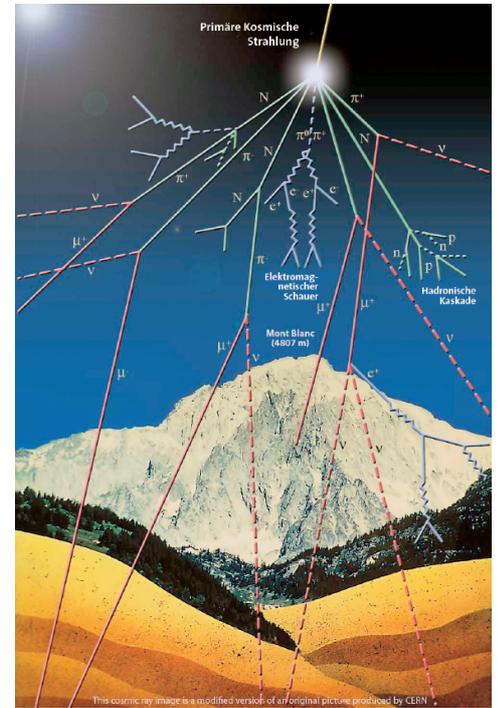


Abb. 16: Teilchen der kosmischen Strahlung lösen in der Hochatmosphäre eine Lawine von Sekundärteilchen aus. (Grafik: CERN)

fähigkeit in großer Höhe ansteigen. Zwischen 1911 und 1913 stieg der wagemutige Forscher mit Freiballonen in Höhen von über 5000 Meter auf und konnte den vorhergesagten Effekt tatsächlich nachweisen (Abb. 17). Damit lieferte er den Beweis, dass kosmische Strahlungsteilchen in die Atmosphäre eindringen und darin Atome ionisieren. Den Begriff kosmische Strahlung prägte 1924 der amerikanische Physiker Robert Millikan.

Heute ist bekannt, dass die kosmische Strahlung im Wesentlichen aus Atomkernen mit ganz unterschiedlichen Energien besteht. Diese sind mitunter um viele Zehnerpotenzen höher als in den größten Teilchenbeschleunigern auf der Erde (Abb. 18). Die energiereichsten Atomkerne, die man bislang registriert hat,

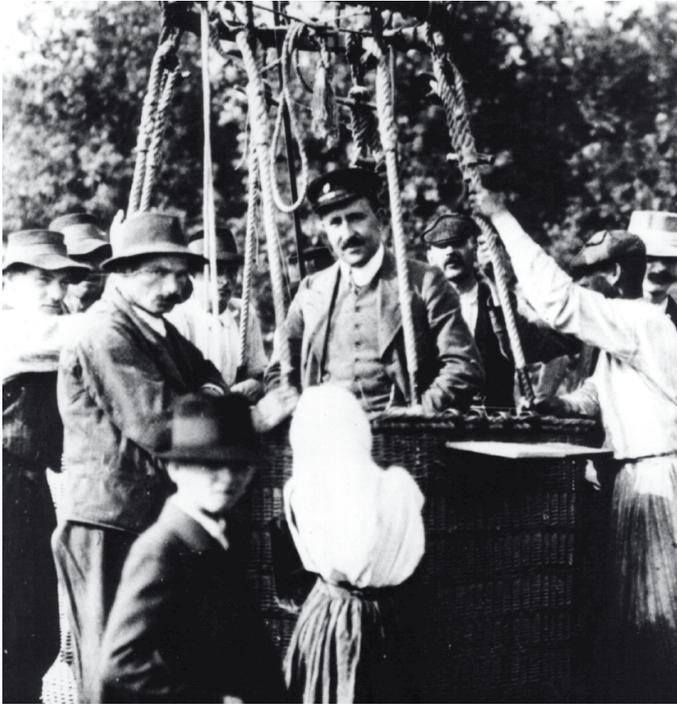


Abb. 17: Historisches Foto von Victor Hess kurz vor einem seiner Aufstiege im Forschungsballon.

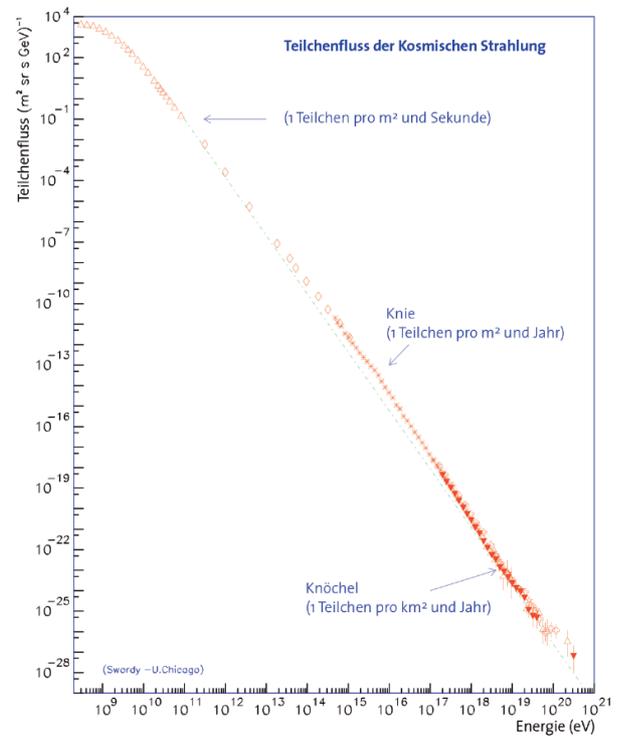


Abb. 18: Das Energiespektrum der Teilchen der kosmischen Strahlung erstreckt sich über 13 Zehnerpotenzen. Insbesondere die Herkunft der Teilchen mit höchsten Energien ist ungewiss.

besaßen fast soviel Bewegungsenergie wie ein stark geschlagener Tennisball.

Für die Entwicklung des Kosmos ist die kosmische Strahlung sicher bedeutsam. Hierfür spricht allein schon die Tatsache, dass in ihr ebensoviel Energie steckt wie im gesamten Sternenlicht oder in allen kosmischen Magnetfeldern des Universums zusammen.

Auf der Suche nach den kosmischen Beschleunigern

Bei all den Fortschritten der vergangenen Jahrzehnte ist immer noch weitgehend unbekannt, welche Himmelskörper die Teilchen beschleunigen und auf welche Weise dies geschieht. Eines ist aber klar: Die physikalischen Prozesse müssen sich fundamental von denen unterschei-

den, die beispielsweise für das sichtbare Licht der Sterne verantwortlich sind. Letztere nennt man „thermische Strahlung.“ Ihre Energie wächst mit der Temperatur des leuchtenden Himmelskörpers. Vom Urknall abgesehen, ist aber kein Objekt im Weltall bekannt, das auch nur annähernd so hohe Temperaturen aufweist, um als Quelle für Teilchen der kosmischen Strahlung in Frage zu kommen. Hierfür müssen andere Mechanismen verantwortlich sein, die man als nicht thermisch bezeichnet.

➔ [Kosmische Strahlung S. 58](#)

Das energiereichste Ereignis im Universum, der Urknall, scheidet als Herkunftsquelle aus. Aus dem Anteil radioaktiver Kerne mit „kurzen“ Zerfallszeiten in der kosmischen Strahlung kann man näm-

lich schließen, dass zwischen der Erzeugung der Partikel und ihrem Eintreffen in der Erdatmosphäre höchstens ein paar Millionen Jahre vergangen sein können. Damit ist auch klar, dass ein großer Teil der kosmischen Strahlung in unserer eigenen Galaxie erzeugt werden muss. Nur bei den allerhöchsten Energien spekuliert man auf einen Ursprung in fernen Galaxien.

Das Studium der kosmischen Strahlung ist auch fast hundert Jahre nach Hess' Ballonflügen immer noch ein schwieriges Unterfangen. Wenn ein hochenergetisches Teilchen in die Atmosphäre eindringt, so stößt es in 20 bis 30 km Höhe mit einem Atomkern zusammen. Die beiden Kerne zerplatzen, und neue Teilchen werden frei, die weiter in Richtung

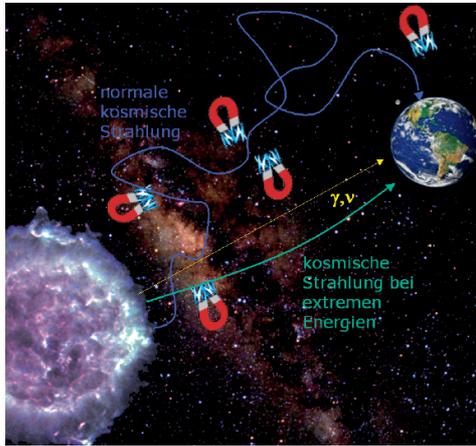


Abb. 19: Elektrisch geladene Teilchen werden in den interstellaren Magnetfeldern unseres Milchstraßensystems abgelenkt. Nur Teilchen mit den höchsten Energien sowie die neutralen Neutrinos, Photonen und Neutronen fliegen auf geradlinigen Bahnen.

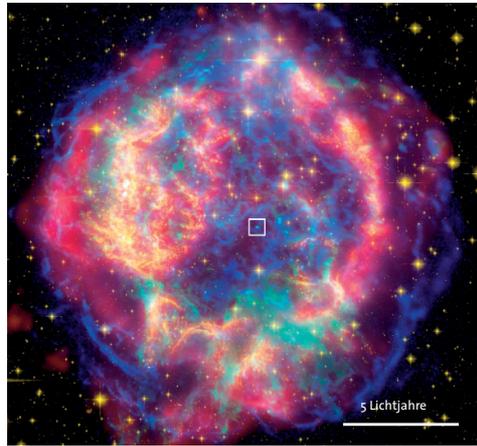


Abb. 20: In den Schockwellen von Supernova-Überresten, wie dem hier gezeigten Cassiopeia A, werden Teilchen beschleunigt. Diese Aufnahme ist eine Überlagerung von Bildern der Weltraumteleskope Chandra (Röntgen, blau und grün), Hubble (optisch, gelb) und Spitzer (mittleres Infrarot, rot). Das kompakte türkise Objekt (im Kästchen) ist der nur im Röntgenbereich sichtbare Neutronenstern. (Foto: NASA/JPL-CalTec/O.Krause)



Abb. 21: Auch Pulsare sind kosmische Teilchenbeschleuniger. Hier zu sehen ist die nahe Umgebung des Pulsars im Krebsnebel, aufgenommen mit den Weltraumteleskopen Chandra und Hubble. (Foto: NASA/ESA)

Erboden rasen. Diese treffen erneut auf Atomkerne und lösen weitere Teilchen aus. Erst wenn die Energie des Primärteilchens in dieser Kaskade aufgebraucht ist, kommt der Prozess zum Erliegen. Auf der Erde kommt ein so genannter Luftschauer an. Das bedeutet aber auch, dass die Primärteilchen selbst gar nicht auf der Erde ankommen. Wie lassen sie sich dann studieren?

Mit Weltraumexperimenten ist dies grundsätzlich möglich. Doch gerade die interessantesten Teilchen mit den ganz hohen Energien sind extrem selten. Bei relativ „bescheidenen“ Energien von einigen Milliarden Elektronenvolt wird ein Satellit noch von vielen Teilchen pro Sekunde getroffen. Für die kosmischen Beschleuniger in unserer Galaxis sind aber Energien bis zu 10^{15} Elektronenvolt charakteristisch. Von ihnen kommt am Oberrand der Atmosphäre gerade noch ein Teilchen pro Jahr und Quadratmeter an. Bei den allerhöchsten Energien oberhalb von 10^{20} eV erreicht uns etwa noch alle hundert Jahre ein Teilchen pro Quadratkilometer. Ein Satelliteninstrument mit einer etwa einen Quadratmeter großen Messfläche müsste hundert Millionen Jahre auf den ersten „Treffer“ warten.

Die einzige, heute gangbare Alternative zu Weltraumexperimenten besteht darin, am Boden Stationen aufzubauen, mit denen sich die Luftschauerteilchen nachweisen lassen. Aus ihren Eigenschaften lässt sich dann auf Art und Energie des Primärteilchens rückschließen. Doch diese Art der Beobachtung ermöglicht es nicht, die Quelle eines Primärteilchens zu ermitteln oder gar Bilder von Himmelskörpern herzustellen. Magnetfelder im interstellaren Raum lenken die elektrisch geladenen Teilchen von ihren Bahnen ab und verschleiern somit jegliche Richtungsinformation. Allenfalls bei den energiereichsten Teilchen besteht die Hoffnung, einzelne Quellen am Himmel lokalisieren zu können (Abb. 19).

Rätsel der höchsten Energien

Die Herkunft der energiereichsten Teilchen im Universum zählt mit zu den Schlüsselfragen der modernen Astrophysik. Die heißesten Kandidaten sind Supernovae (Abb. 20). Bei einem solchen Ereignis entfernt sich eine Explosions- oder Schockwelle mit einigen zehntausend Kilometern pro Sekunde vom Vorläuferstern. Atomkerne werden in den Magnetfeldern, die solche Wellen mit sich führen, gefangen und gewinnen im Lauf der Zeit enorme Energien, ähnlich wie ein Surfer auf einer hohen Welle.

Auch die Endstadien der explodierten Sterne, so genannte Pulsare, können Teilchen in ihren extrem starken Magnetfeldern beschleunigen (Abb. 21).

Die Beschleunigung in Supernova Schockwellen reicht aber nach heutigem Wissen nicht aus, um die allerhöchsten in der kosmischen Strahlung gemessenen Energien zu erklären. Größere und stärkere Schockwellen treten wahrscheinlich in Teilchenstrahlen aktiver Galaxien auf (Abb. 22). Diese so genannten Jets können mehrere hunderttausend Lichtjahre weit in den intergalaktischen Raum reichen. Sie sind derzeit Kandidaten für die kosmischen „Super-Teilchenbeschleuniger.“

Doch diese Hypothese wirft ein Problem auf: Die Teilchen stoßen auf ihrem Weg durch den intergalaktischen Raum mit der Mikrowellenstrahlung zusammen. Dadurch verlieren sie beständig Energie. Man vermutet, dass die Teilchen deshalb höchstens einige hundert Millionen Lichtjahre zurücklegen können. Innerhalb dieses Abstandsradius gibt es aber nur sehr wenige Galaxien um unser Milchstraßensystem herum, die als kosmische Beschleuniger überhaupt in Frage kommen.

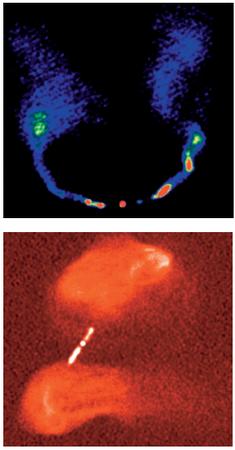


Abb. 22: Die mächtigsten Teilchenbeschleuniger sind vermutlich aktive Galaxien, in deren Zentrum ein riesiges Schwarzes Loch sitzt, das zwei Teilchenstrahlen (Jets) erzeugt. (Foto: NRAO)

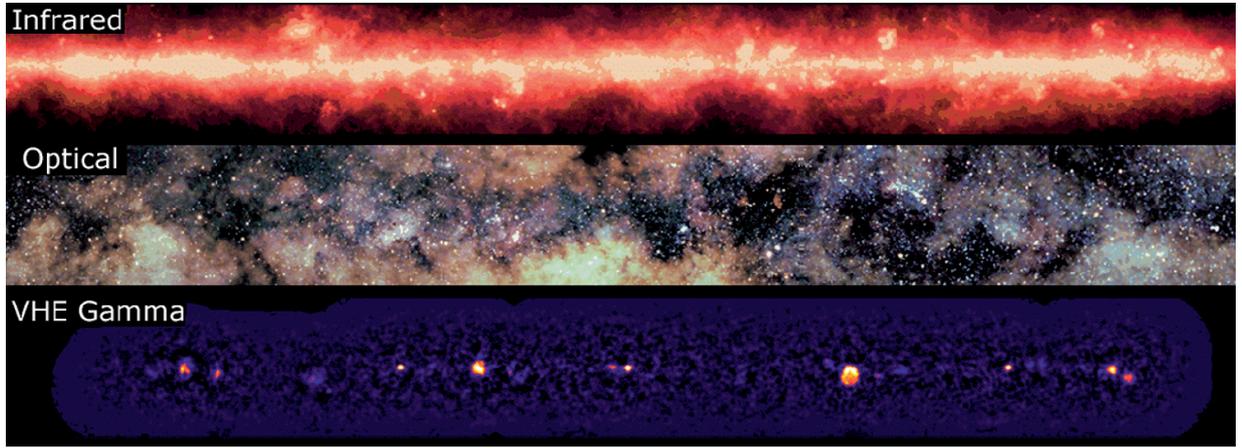


Abb. 23: Das Band der Milchstraße in drei verschiedenen Spektralbereichen: Im Infraroten (oben) sieht man interstellare Staubwolken, im Optischen dominiert das Sternlicht und in dem Bereich extrem hoher Gammaenergie sieht man die „kosmischen Beschleuniger“, vor allem Supernova-Überreste. (Fotos: Oben S. L. Wheelock et al., Mitte: A. Mellinger)

Eine erst kürzlich veröffentlichte Hypothese vermutet einen ganz anderen Ursprung für einen Teil der kosmischen Strahlung. Sie könnte vielleicht bei Zerfällen sehr schwerer und bisher unbekannter Elementarteilchen oder anderer Relikte aus dem Urknall entstehen.

Die neuen Instrumente

Mit einer neuen Generation von Messinstrumenten untersuchen Astroteilchenphysiker heute und in naher Zukunft diese rätselhaften Teilchen. In Argentinien entsteht derzeit das Pierre-Auger-Observatorium, eine riesige Anlage, bei der zahlreiche Detektorstationen auf einer Fläche von über 3000 km² verteilt werden. Mit ihm werden die Luftschauer registriert, um daraus die Energien, Einfallrichtungen und andere Eigenschaften der kosmischen Strahlungsteilchen bei allerhöchsten Energien genau zu vermessen. Hier kann man darauf hoffen, einige Quellen am Himmel zu finden.

➔ Auger S. 60 ➔ KASCADE-Grande S. 62
➔ LOPES S. 64 ➔ AMS S. 66

Bei niedrigeren Energien ist dies wegen der Ablenkung in den interstellaren Magnetfeldern nicht möglich. Hier kommen neue Gamma- und Neutrino-teleskope ins Spiel. Der Trick besteht darin, dass man nicht die Teilchen selbst beobachtet,

sondern deren Folgeprodukte, Neutrinos und Gammaquanten. Sie entstehen, wenn die Teilchen der kosmischen Strahlung noch im Umfeld ihres Entstehungsortes mit interstellarem Gas oder mit Strahlung in Wechselwirkung treten. Anders als die Teilchen selbst breiten sich die Gammaquanten und Neutrinos geradlinig aus. Sie erlauben es also, die Quellen zu identifizieren und sogar Himmelsaufnahmen anzufertigen.

➔ H.E.S.S. S. 68 ➔ MAGIC S. 70 ➔ GLAST S. 72
➔ Baikal/AMANDA/IceCube S. 74
➔ ANTARES S. 76

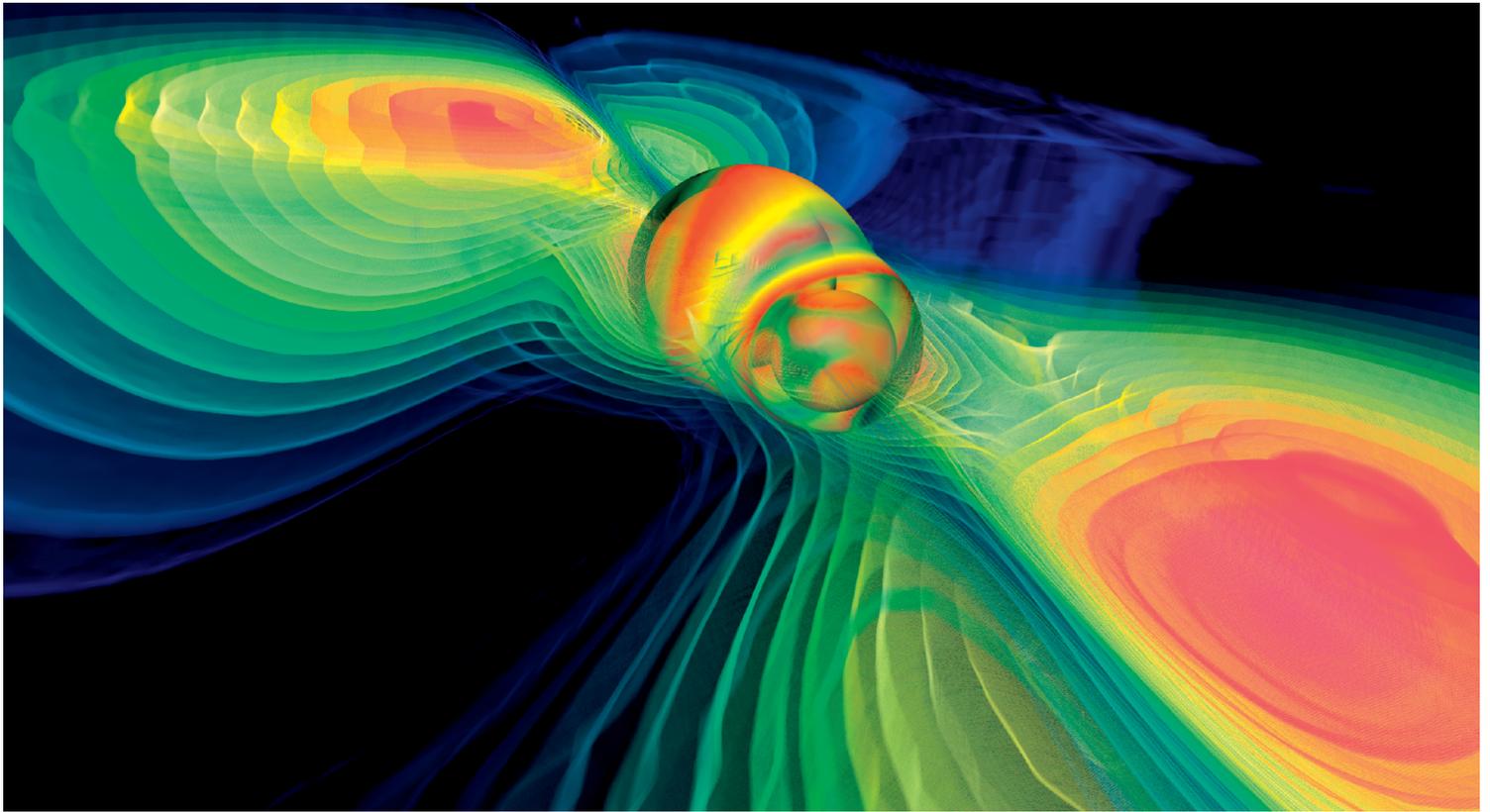
Hochenergetische Gammastrahlung wird mit modernen Anlagen beobachtet. Sie nutzen die Atmosphäre gewissermaßen als Leuchtschirm. Dringt ein Gammaquant in die Atmosphäre ein, so entstehen bei Kollisionen mit Atomkernen elektrisch geladene Sekundärteilchen. Diese senden für den Bruchteil einer Sekunde ein bläuliches Licht aus. Das ist, als würde in der Hochatmosphäre kurzzeitig eine Leuchtstoffröhre aufflammen. Diese sogenannte Tscherenkow-Strahlung lässt sich mit großen Spiegelteleskopen am Boden beobachten. Auf diese Weise ist es möglich, Bilder von Quellen hochenergetischer Gammastrahlung zu erstellen.

➔ H.E.S.S. S. 68 ➔ MAGIC S. 70

Diese Generation neuer Instrumente wird in den kommenden Jahren viele Rätsel der kosmischen Strahlung klären – und sehr wahrscheinlich wird sie neue Fragen aufwerfen. Interessant an diesem Forschungsgebiet sind auch die vielen Synergien mit anderen Bereichen der Astroteilchenphysik, Teilchenphysik und Astrophysik. Diese Art der Forschung offenbart uns eine bislang weitgehend unbekannt Facette des Universums (Abb. 23).

Die Energien kosmischer Teilchen

Teilchenphysiker geben die Energie in der Einheit Elektronenvolt (eV) an. Danach ist 1 eV die Energie, die ein elektrisch geladenes Teilchen aufnimmt, wenn es in einer Potentialdifferenz von 1 V beschleunigt wird. Die Quanten (Photonen) des sichtbaren Lichts haben ebenfalls Energien von rund 1 eV. In den größten irdischen Beschleunigern werden Energien bis zu 10¹² eV erreicht. Die energiereichsten Teilchen der kosmischen Strahlung erreichen fast 10²¹ eV.



4 | Gravitationswellen: am Puls des Universums

Unter den durchweg recht jungen Bereichen der Astroteilchenphysik ist die Gravitationswellenforschung am jüngsten. Ihre Wurzeln reichen jedoch weit zurück, bis ins Jahr 1915. Damals vollendete Einstein die Allgemeine Relativitätstheorie und schuf damit ein neues Weltbild. Die Schwerkraft (Gravitation) ist bei ihm keine Kraft mehr wie noch bei Newton, sondern eine Eigenschaft von Raum und Zeit. Massen verzerren die Raumzeit, und diese Verzerrung beeinflusst die Bewegung von Licht und Materie. Auch die Erde beispielsweise krümmt die umgebende Raumzeit. Eine vorbeifliegende Raumsonde wird hierin abgelenkt und auch die Bahn des Mondes ist eine Folge der Raumkrümmung.

Wenn Massen sich beschleunigt bewegen, erzeugen sie in der Raumzeitgeometrie Störungen, die wellenartige mit Lichtgeschwindigkeit den Raum durch-eilen. Das sind Gravitationswellen. Man kann sich dies ähnlich vorstellen, wie sich ausbreitende Wellen auf einem Teich, in den man einen Stein geworfen hat. Der Durchgang einer Gravitationswelle äußert sich durch rhythmische Stauungen und Dehnungen des Raums, das heißt die Abstände zwischen Objekten im Raum ändern sich.

➔ **Theorie Gravitationswellen** S. 82

Einstein selbst glaubte, der Effekt sei so klein, „dass man Gravitationswellen wohl nie beobachten wird“, wie er 1916 in seiner Arbeit schrieb. Heute gibt es weltweit mehrere Anlagen, um sie aufzuspüren, und Theoriegruppen beschäftigen sich zunehmend mit diesem Phänomen.

Große Ursache, kleine Wirkung

Einsteins Pessimismus war damals durchaus berechtigt, denn die Leistungen von Gravitationswellen sind überaus gering und die daraus resultierende „Kräuslung“ der Raumzeit extrem klein. So strahlt die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne Gravitationswellen mit einer Leistung von nur 200 Watt ab, Jupiter bringt es immerhin schon auf 5300 Watt. Das sind jedoch äußerst bescheidene Werte im Vergleich zu den wahren Größen im Universum. Zwei kompakte Neutronensterne beispielsweise, die sich im Abstand von hundert Kilometern mit einer Periode von einer Hundertstel Sekunde umkreisen, erzeugen eine Leistung von 10^{45} Watt. In dieser Größenordnung liegt auch die in Form von Gravitationswellen abgestrahlte Leistung bei einer Supernova. Ereignisse dieser Art wollen Gravitationsphysiker messen.

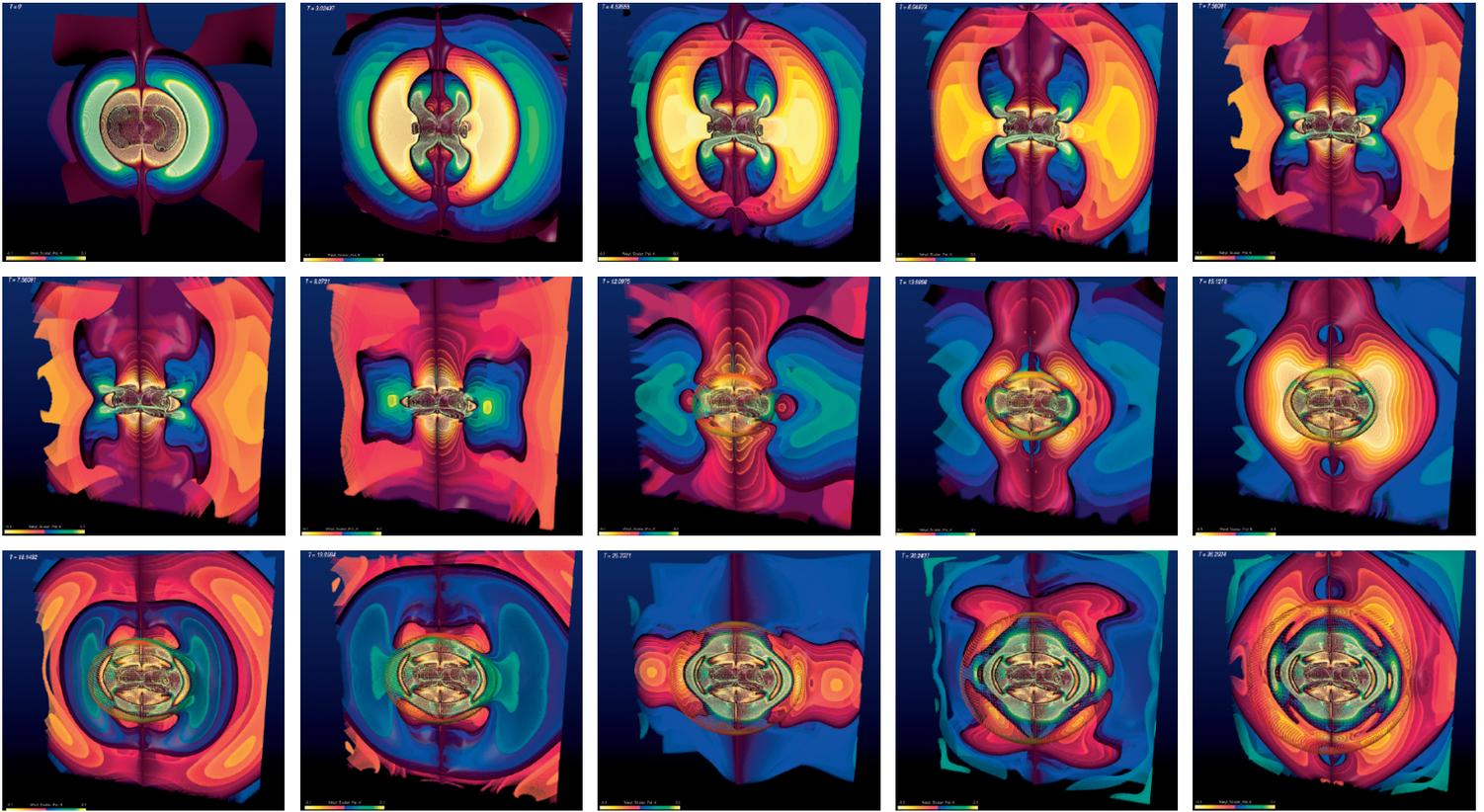


Abb. 24 und 25: In dieser Computersimulation bewegen sich die Gravitationswellen nach dem Zusammenprall zweier Schwarzer Löcher mit Lichtgeschwindigkeit durch das Universum. Die Wellen entstehen nahe dem Zentrum der Kollision, breiten sich schalenartig aus und verlassen letztendlich den Würfel, der die Computervisualisierung begrenzt. Die Wissenschaftler versuchen die Entstehung von Gravitationswellen zu ergründen, indem sie z.B. Kollisionen von Schwarzen Löchern und Neutronensternen auf Supercomputern simulieren. Diese Simulationen liefern Erkenntnisse über die mögliche Form der Signale, welche die Gravitationswellendetektoren GEO600 oder LISA beim Durchgang einer Gravitationswelle aufzeichnen würden. Erst dann kann in den Detektordaten gezielt nach Signalen gesucht werden.

Doch selbst bei einer im kosmischen Maßstab vergleichsweise nahen Supernova in einer Nachbargalaxie verändert die entstehende Gravitationswelle den Abstand zwischen Erde und Sonne nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms, und das auch nur für wenige tausendstel Sekunden. Für kürzere Messstrecken ist die Stauchung entsprechend kleiner: Der Abstand zwischen Testobjekten, die einen Kilometer voneinander entfernt sind, ändert sich nur um ein Tausendstel des Durchmessers eines Protons. Diese extrem geringe Längenänderung verdeutlicht die technischen Herausforderungen beim Bau eines Gravitationswellen-Detektors.

Gravitationswellen gehören zu den wenigen von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Phänomenen, die bislang nicht direkt nachgewie-

sen werden konnten. Die erste zweifelsfreie Messung wäre somit eine weitere glänzende Bestätigung von Einsteins Theorie. Gleichzeitig enthalten Gravitationswellen Informationen über Vorgänge im Kosmos, die man auf keine andere Art und Weise erhalten kann.

Indirekter und direkter Nachweis

Auf indirektem Wege ließen sich Gravitationswellen bereits nachweisen. Die beiden amerikanischen Radioastronomen Russell Hulse und Joseph Taylor entdeckten 1974 ein sehr seltenes Objekt: zwei sich eng umkreisende Pulsare. Da die Astronomen von beiden Körpern Radiopulse mit äußerst genauer Periode empfangen, eigneten sich die beiden Körper gewissermaßen als sehr genau gehende kosmische Uhren. Für ein solches System sagt die Allgemeine Relativitätstheorie einen merklichen Energie-

verlust durch die Abstrahlung von Gravitationswellen voraus. Als Folge davon müssten sich die beiden Sterne einander annähern und immer schneller einander umkreisen. Diese Abnahme der Umlaufdauer konnten Hulse und Taylor aus der jahrzehntelangen Beobachtung der Radiopulse nachweisen. Ihr Wert stimmt exakt mit der relativistischen Vorhersage überein.

Gravitationswellen-Astronomie wird jedoch erst möglich, indem man Anlagen baut, mit denen sich diese Wellen aus dem Weltraum nachweisen und die Quellen identifizieren lassen.

Die ersten Versuche unternahm Ende der 1960er-Jahre Joseph Weber in den USA. Er verwendete als Kernstück seines Detektors einen rund 1,5 Tonnen schweren Aluminiumzylinder. Ziel war es,



Abb. 26: Das Weltrauminterferometer LISA wird aus drei Satelliten bestehen, die ein Dreieck mit fünf Millionen Kilometer Kantenlänge aufspannen. Diese Computergrafik zeigt, wie die Satelliten aus der Trägerrakete austreten und ihren Formationsflug beginnen.

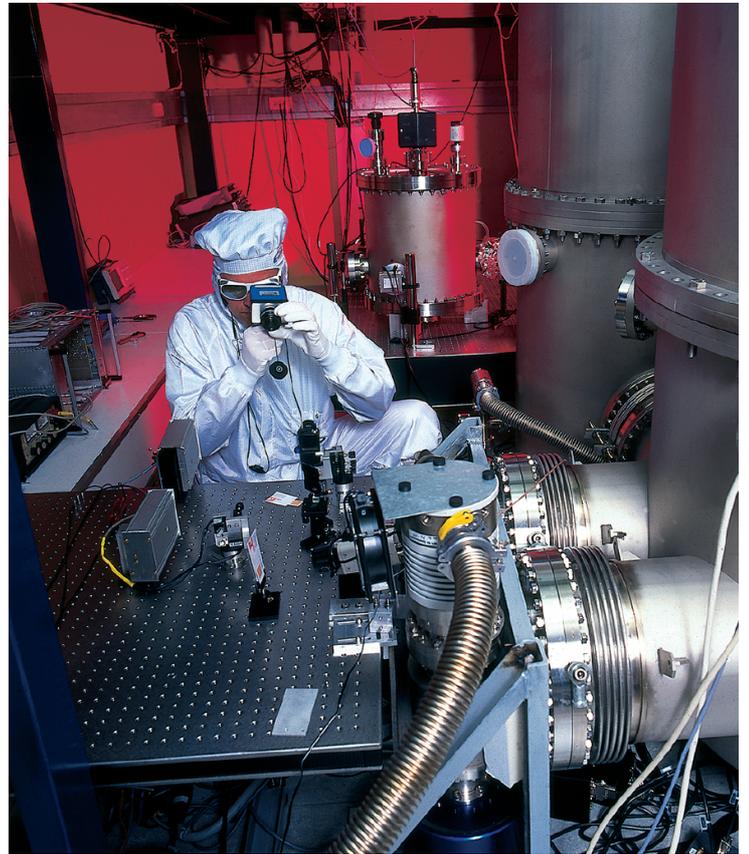


Abb. 27: Die optischen Komponenten des Gravitationswellen-Detektors GEO600 müssen exakt justiert werden. Nur so ist es möglich, die minimalen Raumverzerrungen zu messen, die eine Gravitationswelle hervorruft.

Gravitationswellen zu messen, die quer durch den Zylinder laufen und diesen dabei zu Vibrationen anregen. Die dadurch erzeugten Verformungen des Zylinders wollte Weber mit Hilfe hochempfindlicher Verstärker nachweisen. Ein eindeutiger Nachweis gelang ihm jedoch nicht.

Anfang der 1970er-Jahre erkannte man, dass ein Michelson-Interferometer ideal geeignet sein sollte, die von Gravitationswellen erzeugten Effekte nachzuweisen. Es misst die Phasenverschiebung zwischen zwei Lichtwellen, die jeweils einen von zwei Interferometerarmen durchlaufen. In der Praxis wird ein einfallender Laserstrahl geteilt. Beide Teilstrahlen durchlaufen dann senkrecht zueinander die Messstrecke, werden an Spiegeln reflektiert, von einem weiteren Spiegel wieder zusammengeführt und in einem gemeinsamen Punkt auf einem

Photodetektor überlagert. Hier entsteht ein Interferogramm. Läuft eine Gravitationswelle durch die Anlage hindurch, so verändern sich kurzzeitig die Längen der beiden Lichtwege. Dadurch sind die beiden Lichtwellen nicht mehr in Phase, was sich in einem Flimmern des Interferogramms äußert.

Weltweit gibt es derzeit vier Anlagen, die nach diesem Prinzip arbeiten. Dazu gehört das deutsch-britische Projekt GEO600. [➔ Geo600/LISA S.84](#)

Die große Anzahl der Antennen ermöglicht es, die Quellen von Gravitationswellen am Himmel zu lokalisieren. Aufgrund einer Vielzahl natürlicher Störquellen können diese Interferometer nur im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 000 Hz messen. Die einzige Chance, auch Gravitationswellen mit geringerer Frequenz erfassen zu können, besteht in der Mes-

sung im Weltraum. Dies soll mit LISA (Laser Interferometer Space Antenna), einem Gemeinschaftsprojekt von NASA und ESA, ab circa 2015 möglich sein. Bereits heute sind Testsatelliten im Bau, die voraussichtlich 2009 starten werden.

Genau so wichtig wie das Messgerät selbst ist eine ausgeklügelte Software, um in dem Datenmeer die Signale der gesuchten Gravitationswellen zu finden. Theoretiker arbeiten daher daran, die Entstehung und raumzeitliche Form von Gravitationswellen genau zu ergründen. Simulationen auf Supercomputern von kollidierenden Schwarzen Löchern und Neutronensternen oder schnell rotierenden Pulsaren liefern hierzu völlig neue Erkenntnisse. Diese dienen dazu, optimale Algorithmen und Suchstrategien zu entwickeln, um in den Detektordaten solche Signale zu finden.



Abb. 28: Das südlich von Hannover gelegene GEO600. Man erkennt die beiden senkrecht zueinander liegenden, 600 Meter langen Arme des Interferometers und das Zentralhaus, in dem sich Laser, Strahlteiler und Signalaufnahme befinden.

Die energiereichsten Vorgänge im Kosmos

Gravitationswellen werden zwar von allen beschleunigt bewegten Körpern ausgesandt, aber die Chance, sie nachzuweisen besteht nur bei den energiereichsten Vorgängen im Kosmos. Voraussichtlich lassen sich folgende Objekte beobachten. [➔ Theorie Gravitationswellen S.82](#)

Supernovae Typ II: Wenn ein massereicher Stern seinen Brennstoff verbraucht hat, bricht sein Kernbereich zu einem Neutronenstern zusammen, während er seine äußere Hülle mit großer Geschwindigkeit ins All abstößt. Hierbei werden auch Gravitationswellen abgestrahlt. Die Forscher hoffen, Ereignisse empfangen zu können, die bis zu etwa 70 Millionen Lichtjahre entfernt sind. Dann wäre auch der Virgo-Galaxienhaufen noch im „Blickfeld“, in dem sich mehrere Supernovae pro Jahr ereignen sollten.

Enge Doppelsysteme, bestehend aus Neutronensternen und/oder Schwarzen Löchern: Die von diesen Systemen abgestrahlten Gravitationswellen sollten Frequenzen zwischen etwa 10 und 100 Hz besitzen und ebenfalls nachweisbar sein. Besonders spektakulär müsste das Signal von zwei verschmelzenden kompakten Objekten sein. Deren Häufigkeit ist aber noch unsicher.

Schnell rotierende Neutronensterne: Auch diese Körper senden Gravitationswellen aus, sofern sie nicht vollkommen symmetrische Kugelform besitzen. Die typischen Frequenzen liegen hier zwischen 10 und 1000 Hz.

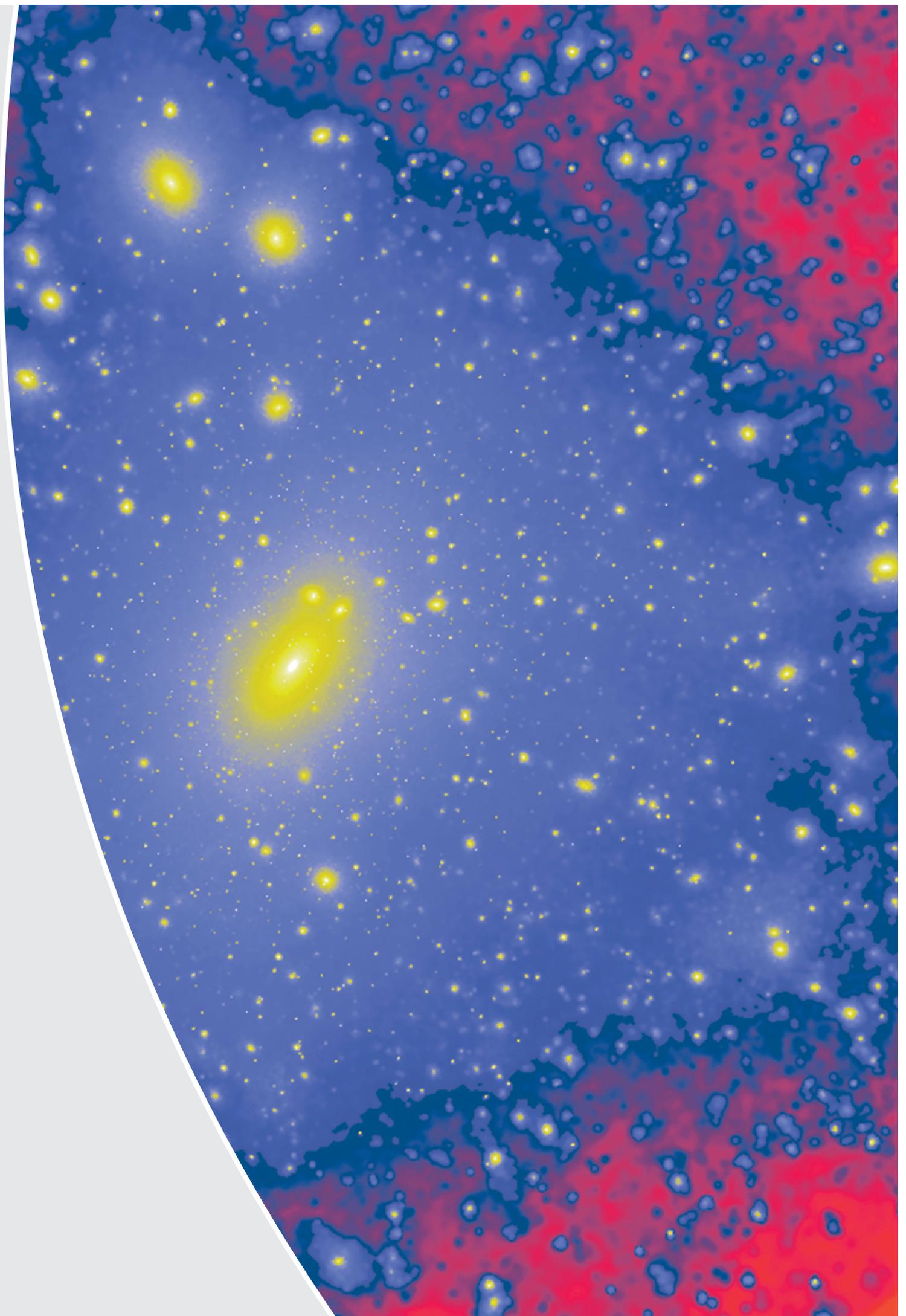
Der Urknall: Die Entstehung des Universums im Urknall war der heftigste Vorgang in der Geschichte des Kosmos. Nach heutigen Theorien sollten damals auch Gravitationswellen entstanden

sein, die heute das Universum als allgegenwärtiges Rauschen durchziehen. Die heutige Generation erdgebundener Empfänger kann dieses Signal nicht nachweisen. Vielleicht wird dies mit dem Weltraum-Interferometer LISA oder einer späteren Generation von Gravitationswellen-Observatorien möglich sein.

Mit der Messung von Gravitationswellen, energiereichen Gammastrahlen und Neutrinos öffnen Astrophysiker neue „Fenster zum All“, die ihnen Einblicke in bislang unerforschte Gebiete gewähren. Am Ende stehen Antworten auf die modernen Fragen nach der Natur der Dunklen Materie und Dunklen Energie, letztlich also nach der Entstehung und Entwicklung des Universums.

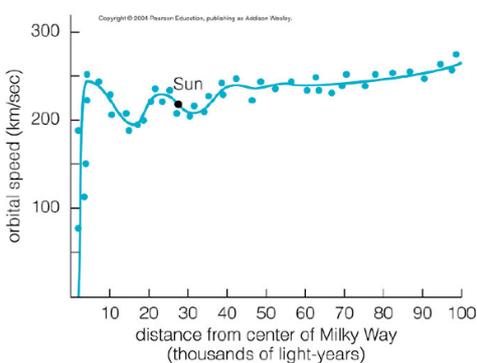
KOSMOLOGIE UND DUNKLE MATERIE

- ⇒ **Theoretische Teilchenkosmologie:**
vom Urknall bis heute
- ⇒ **Das Weltraumobservatorium Planck:**
Bilder des Mikrowellen-Himmels
- ⇒ **Virgo:**
Supercomputer simulieren
die kosmische Strukturentstehung
- ⇒ **CRESST:**
Jagd auf Teilchen der Dunklen Materie
- ⇒ **EDELWEISS:**
Dunkle-Materie-Teilchen im Kristall

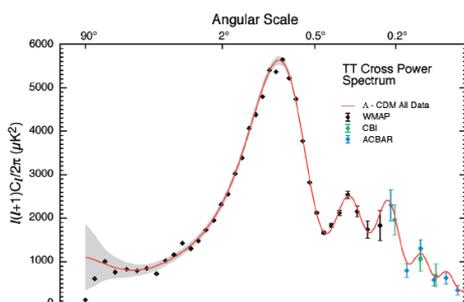


Eine überraschende Erkenntnis der modernen Kosmologie ist, dass die normale baryonische Materie – aus der alle Sterne, Planeten und auch der Mensch bestehen – nur etwa fünf Prozent der insgesamt im Universum vorhandenen Materie oder Energiedichte ausmacht. Zu 95 Prozent dominieren hier Dunkle Energie und Dunkle Materie. Deren physikalische Natur ist aber bislang völlig unklar. Letztlich wissen wir auch nicht, warum es heute überhaupt baryonische Materie gibt. Antworten auf diese Fragen werden wir nur finden, wenn wir die physikalischen Gesetze, die unmittelbar nach dem Urknall geherrscht haben, entschlüsseln.

Theoretische Teilchenkosmologie: vom Urknall bis heute



Umlaufgeschwindigkeit von Gas und Sternen um das Zentrum der Milchstraße. Wenn die Galaxie nur sichtbare Materie enthielte, würden die Geschwindigkeiten mit wachsendem Abstand vom Zentrum abnehmen. In Wirklichkeit bleiben sie aber nahezu konstant. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die Gravitationswirkung von Dunkler Materie.



Etwa 370 000 Jahre nach dem Urknall, als sich die ersten Atome bildeten, wurde das Universum „durchsichtig“ für die kosmische Hintergrundstrahlung. Am Himmel erscheint sie als Strahlungsfeld mit vielen Flecken. Diese Fluktuationen sind die Ursprünge der heutigen Galaxien und Galaxienhaufen. Dieses Diagramm (Leistungsspektrum) zeigt die Größenverteilung der Fluktuationen. Es birgt Informationen über die Dunkle Materie und Dunkle Energie (WMAP-Collaboration).

Die Dunkle Energie erfüllt das Universum und führt dazu, dass es heute beschleunigt expandiert. Die Dunkle Materie macht sich in vielen astrophysikalischen Beobachtungen aufgrund ihrer Schwerkraftwirkung bemerkbar, ist aber völlig unsichtbar. Diese beiden rätselhaften Phänomene lassen sich nur verstehen, wenn wir die Physik des Großen mit der des Kleinen zusammenführen. Hier sind die theoretischen Konzepte vereinheitlichter Theorien gefragt – Superstringtheorien, Theorien mit zusätzlichen Raumdimensionen oder auch ganz neue Ideen. Vielleicht wird die Dunkle Energie sogar zu einem zentralen Teil im großen Puzzle einer vereinheitlichten Beschreibung aller fundamentalen Naturkräfte.

Dunkle Energie – kosmologische Konstante oder Quintessenz?

Von der Dunklen Energie wissen wir bislang lediglich, dass sie homogen im Raum verteilt ist und das Universum beschleunigt expandieren lässt. Unklar ist aber, ob sie vom Urknall bis heute einen konstanten Wert hatte (Einsteins Kosmologische Konstante) oder ob sie sich zeitlich ändert. Eine solche dynamische Dunkle Energie nennt man Quintessenz. Erstaunlich ist in beiden denkbaren Fällen, dass ihr Wert sehr klein ist. Die zeitliche Variation der Dunklen Energie, beschrieben durch ein zeitlich veränderliches Kosmonfeld, hätte weitreichende Konsequenzen: Eine derartige „funda-

mentale Wechselwirkung“ mit kosmischer Reichweite könnte dazu führen, dass Naturkonstanten in Wirklichkeit nicht konstant sind, sondern sich im Laufe von Jahrmilliarden ändern. Auch eine winzige Verletzung des Äquivalenzprinzips, wonach alle Körper gleich schnell fallen, wäre dann möglich.

Die Herausforderungen an die theoretische Physik, den winzigen Wert einer Kosmologischen Konstante zu erklären oder den Ursprung des Kosmonfelds der Quintessenz zu begründen, ist gewaltig. Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen, dies im Rahmen der Superstringtheorie oder durch Effekte zusätzlicher Raumdimensionen zu lösen. Alternative Ideen innerhalb der Gravitationstheorie könnten zu einer effektiven Konstanten oder einem effektiven Skalarfeld führen. Die Einschränkung der Vielzahl der Modelle durch kosmologische Beobachtungen ist eine herausragende Aufgabe für die kommenden Jahre.

Dunkle Materie – Teilchen der Supersymmetrie?

Astrophysikalische Beobachtungen haben dazu geführt, dass sich das Bild der so genannten Kalten Dunklen Materie durchgesetzt hat. Hierunter versteht man Teilchen, die sich nichtrelativistisch, also vergleichsweise langsam, bewegen. Eine supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik

Kontakt: Prof. Dr. Christof Wetterich · Institut für Theoretische Physik · Universität Heidelberg · Philosophenweg 16 · 69120 Heidelberg · Tel. 06221/549-340
c.wetterich@thphys.uni-heidelberg.de

sagt in der Tat die Existenz eines stabilen, massiven Teilchens, oft WIMP genannt, vorher. Ein aus diesen Teilchen bestehendes Gas könnte die gesamte Menge der Dunklen Materie erklären. Auch eine Erweiterung der Quantenchromodynamik, welche die Kräfte zwischen den Quarks beschreibt, sagt die mögliche Existenz eines sehr leichten Teilchens voraus: das Axion, ein weiterer Kandidat für die Dunkle Materie. Es gibt zur Zeit zwei Möglichkeiten, Hinweise auf die Existenz dieser Teilchen zu bekommen: Entweder durch Experimente am zukünftigen Large Hadron Collider (LHC) des CERN oder durch den direkten Nachweis mit Hilfe neuartiger Detektoren wie CRESST, EDELWEISS oder CAST.

Interessant ist auch die Frage, ob es eine noch unbekannt Wechselwirkung zwischen der Dunklen Materie und der Dunklen Energie gibt. Sie könnte bei ausreichender Stärke die Entstehung der Galaxien und Galaxienhaufen beeinflusst haben. Für das detaillierte quantitative Verständnis dieser Strukturentstehung sind auch die Eigenschaften der Neutrinos wichtig – insbesondere ihre noch unbekannt Masse.

Baryonische Materie – Asymmetrie im Urknall

Kurz nach dem Urknall müssen Materie und Antimaterie in fast gleichen Anteilen existiert haben. Stoßen Teilchen dieser beiden Materiearten zusammen, so vernichten sie sich und gehen vollständig in Strahlung auf. Dass es heute den

noch Materie und damit auch uns Menschen gibt, verdanken wir einem winzigen Überschuss von Baryonen über Antibaryonen. Wie kam sie zustande? Dies ist eine der brennenden Fragen der theoretischen Teilchenkosmologie. Die Ursache hierfür könnten schwere Neutrinos oder andere superschwere, unentdeckte Teilchen gewesen sein, die unmittelbar nach dem Urknall zerfallen sind. Auch so genannte Phasenübergänge oder Teilchenproduktion in den Anfangsphasen des Universums werden heute diskutiert.

Das inflationäre Universum – von der Unordnung zur Ordnung

Nach derzeitigen Modellen setzte unmittelbar nach dem Urknall eine rasant, so genannte inflationäre Expansion des Raumes ein. Sie ist Gegenstand intensiver theoretischer Forschungen. Während der Inflation entstanden aus Quantenfluktuationen winzige Schwankungen in der Geometrie des Raums, die sich in der heute beobachtbaren kosmischen Hintergrundstrahlung widerspiegeln. Sie zu untersuchen ist die Aufgabe des Weltraumteleskops Planck.

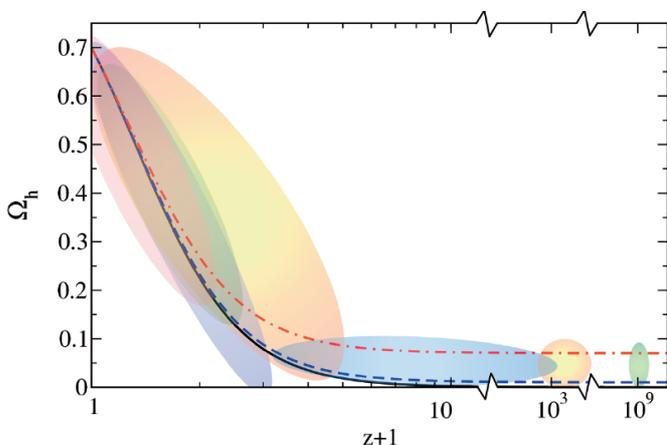
Das inflationäre Universum befand sich in einem extrem geordneten Zustand. Erst gegen Ende dieser Epoche entstand die Unordnung unseres Weltalls, indem plötzlich sehr viele Teilchen erzeugt wurden. Der Schlüssel zum Verständnis dieses Vorgangs liegt in der Entwicklung neuer theoretischer Methoden, genauer: in der Entwicklung der Quantenfeldtheorie außerhalb des Gleichgewichtes.

Unterstützt werden diese theoretischen Entwicklungen durch Experimente. Am zukünftigen LHC und am RHIC in Brookhaven werden schwere Atomkerne von Blei oder Gold mit extrem hohen Geschwindigkeiten aufeinander geschossen. Dabei entsteht ein Energieball, wie er Millionstel Sekunden nach dem Urknall existierte. Hierbei will man den vorhergesagten Phasenübergang vom Quark-Gluon-Plasma zu Hadronen, den „normalen Teilchen“ unserer Welt, beobachten.

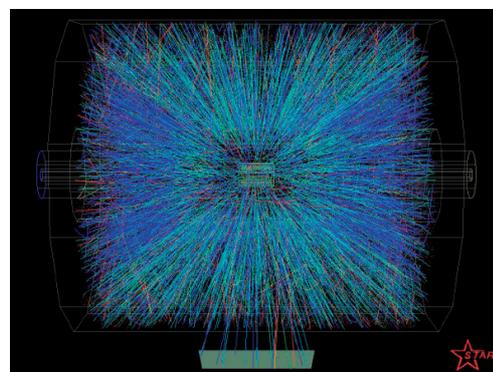
Ausblick

Fortschritte in der Theorie der Elementarteilchen und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte sind zentrale Aufgaben für ein kohärentes Bild unseres Universums. Eine Vielzahl von Initiativen in Deutschland geht diese Herausforderungen der theoretischen Teilchenkosmologie an. Ein virtuelles Institut (Virtual Institute for Particle Cosmology, VIPAC) der Helmholtz-Gemeinschaft wurde kürzlich gegründet. Mehrere Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Exzellenz-Cluster im Rahmen der bundesweiten Exzellenz-Initiative stehen zur Entscheidung an. Eine konzentrierte Anstrengung kann die international hoch angesehene Teilchenkosmologie in Deutschland in eine führende Position im weltweiten Wettbewerb bringen.

➔ **Aktivitäten der theoretischen Teilchenkosmologie:** DESY (Hamburg), Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik (Golm) und für Physik (München), Universitäten Bielefeld, Bonn, Heidelberg, Köln und München



Berechnete Zeitentwicklung des Anteils an Dunkler Energie, dargestellt als Funktion der Rotverschiebung. Je größer die Rotverschiebung, desto näher kommt man dem Urknall. Gezeigt sind die Entwicklung für die Einsteinsche Kosmologische Konstante (schwarz) sowie zwei Quintessenz-Modelle mit unterschiedlichen Anteilen früher Dunkler Energie (rot, blau). Zukünftige Beobachtungen sollen zwischen diesen Möglichkeiten unterscheiden.

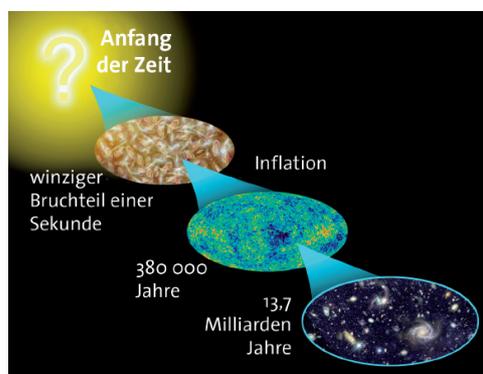


Bei der Kollision von zwei Gold-Atomkernen im RHIC-Beschleuniger entsteht eine Fülle neuer Teilchen. Mit solchen Experimenten simuliert man Bedingungen, wie sie Millionstel Sekunden nach dem Urknall existierten (Foto: BNL).

Der europäische Satellit Planck wird ab 2008 den gesamten Himmel im Bereich der Mikrowellenstrahlung mit bislang unerreichter Detailgenauigkeit und Empfindlichkeit abbilden. Plancks wichtigstes Ziel ist die genaue Bestimmung der Eigenschaften des Universums im Großen. Einige hundert Wissenschaftler aus den meisten Ländern Europas einschließlich Deutschlands sowie den USA und Kanada sind daran beteiligt.



Das Weltraumobservatorium Planck: Bilder des Mikrowellen-Himmels



Schematische Entwicklungsstufen des Universums. Nach dem Urknall entstand die kosmische Hintergrundstrahlung und aus den ersten Fluktuationen im Urgas bildeten sich die Galaxien. Wegen der endlichen Laufzeit des Lichts schauen wir beim Blick ins Universum in dessen Vergangenheit zurück (Grafik: WMAP).

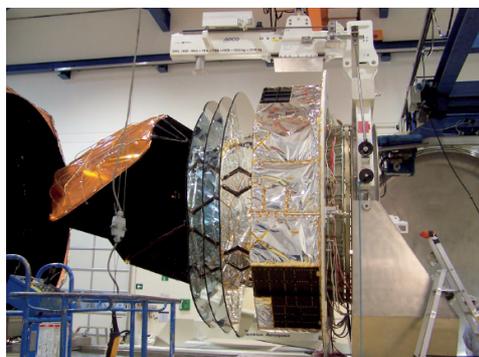
Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ist die älteste Kunde, die wir aus dem Universum empfangen. Winzige Temperaturschwankungen in dieser Reliktstrahlung bergen eine Fülle von Informationen über den Urzustand des Universums und seine Entwicklung. Diesem „kosmischen Fingerabdruck“ überlagert sind aber Signale aus späteren Epochen des Kosmos. Sie stammen vor allem von Galaxien, Galaxienhaufen und der Milchstraße. Planck wird es ermöglichen, die Hintergrundstrahlung mit bislang unerreichter Präzision zu studieren und unsere Erkenntnisse über das Universum erheblich zu erweitern.

Das Universum entstand aus einem sehr heißen, dichten Anfangszustand, dem Urknall. Anschließend dehnte es sich aus und kühlte dabei ab. Als seine Temperatur etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall bis auf circa 3 000 Kelvin gefallen war, entstanden die ersten Atome, und

damit wurde das Gas durchsichtig für die vorhandene Strahlung. Heute ist das Universum etwa um das Tausendfache größer als damals, und seine Temperatur ist um denselben Faktor gesunken. Die Strahlung, die damals frei wurde, kühlte ebenfalls ab, das heißt ihre Wellenlänge vergrößerte sich. Heute erscheint sie uns deswegen im Mikrowellenbereich.

Die heutigen kosmischen Strukturen, wie Galaxien und Galaxienhaufen, waren damals schon angelegt und erscheinen als winzige Temperaturschwankungen in dem Mikrowellenhintergrund. Ihre Abweichung von der mittleren Temperatur, die 2,7 Kelvin beträgt, liegt im Bereich von Millionstel Grad. Diese Fluktuationen wurden 1992 mit dem Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer) entdeckt und bilden eine der wichtigsten Informationsquellen über das Universum. Seit 2002 studiert das amerikanische Weltraumteleskop Wilkinson-MAP

Links: Test eines Prototypen von Planck; Rechts: Modell des Satelliten mit angedeutetem Strahlengang über die beiden Teleskopspiegel zur Fokalebene (Foto: ESA).



Kontakt: Dr. Torsten Enßlin · Max-Planck-Institut für Astrophysik
Karl-Schwarzschild-Straße 1 · 85741 Garching · Tel. 089-30000-2243
enssli@mpa-garching.mpg.de

diese Strahlung. Planck wird die Detailgenauigkeit dieses Satelliten um das Dreifache und die Empfindlichkeit etwa um das Zehnfache steigern. Außerdem wird der beobachtete Wellenlängenbereich um das Dreifache erweitert und neben der Temperatur auch die Polarisation des Mikrowellenhintergrunds gemessen.

Plancks Instrumente und Beobachtungsweise

Planck wird 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt stationiert. Von dort aus kann er – Erde und Sonne immer in seinem Rücken – die Mikrowellenstrahlung ungehindert beobachten. Er wird sich einmal pro Minute um sich selbst drehen, so dass das Teleskop in Kreisen den Himmel abtastet. Zwei Instrumente empfangen die Mikrowellenstrahlung: Das Niederfrequenz-Instrument (LFI) arbeitet zwischen einem Zentimeter und fünf Millimetern Wellenlänge, das Hochfrequenz-Instrument (HFI) zwischen drei und 0,3 Millimetern. Dabei werden verschiedene Detektoren verwendet. Das LFI setzt Transistoren ein, das HFI Bolometer, welche die Erwärmung durch die einfallende Strahlung messen. Eine der größten technischen Herausforderungen besteht darin, die Detektoren auf Temperaturen unterhalb von einem Zehntel Kelvin abzukühlen. Der langsame Verbrauch des Kühlmittels wird Plancks Lebensdauer auf etwa ein Jahr beschränken. In dieser Zeit wird er den gesamten Himmel zweimal vollständig abbilden.

Störende Vordergrunde

In der zeitlichen Entwicklung des Universums bildeten sich nach der Emission der Mikrowellenstrahlung die kosmischen Strukturen. Sie erscheinen uns heute als Vordergrundobjekte und sind dem Strahlungsfeld überlagert. Diese Strukturen müssen zunächst sorgfältig aus den Aufnahmen entfernt werden, bevor sich die reine Mikrowellenstrahlung analysieren lässt. Zu diesen Strukturen gehören weit entfernte Galaxien mit vielen jungen Sternen, deren Strahlung in den Mikrowellenbereich hinein verschoben erscheint. Außerdem durchquert die Mikrowellenstrahlung häufig Galaxienhaufen. Dabei werden ihre Photonen durch die heißen Elektronen des Galaxienhaufens zu kleineren Wellenlängen hin gestreut. Deshalb werfen Galaxienhaufen bei Wellenlängen von mehr als 1,4 mm einen Schatten, während sie bei kleineren Wellenlängen leuchten. Auch die Milchstraße emittiert Mikrowellenstrahlung durch verschiedene Mechanismen, zu denen die Synchrotronstrahlung schneller Elektronen und die Wärmestrahlung interstellarer Staubwolken gehört.

Diese Vordergrundobjekte lassen sich zuverlässig vom Mikrowellenhintergrund trennen, weil sie bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich hell strahlen. Während bei großen Wellenlängen die Synchrotronstrahlung überwiegt, dominiert bei kleinen Wellenlängen die Wärmestrahlung. Dazwischen liegt ein Fenster, in dem der Mikrowel-

lenhintergrund besonders hell ist. Deswegen ist der breite Wellenlängenbereich von Planck so wichtig: Er ermöglicht es, den Mikrowellenhintergrund präzise freizulegen.

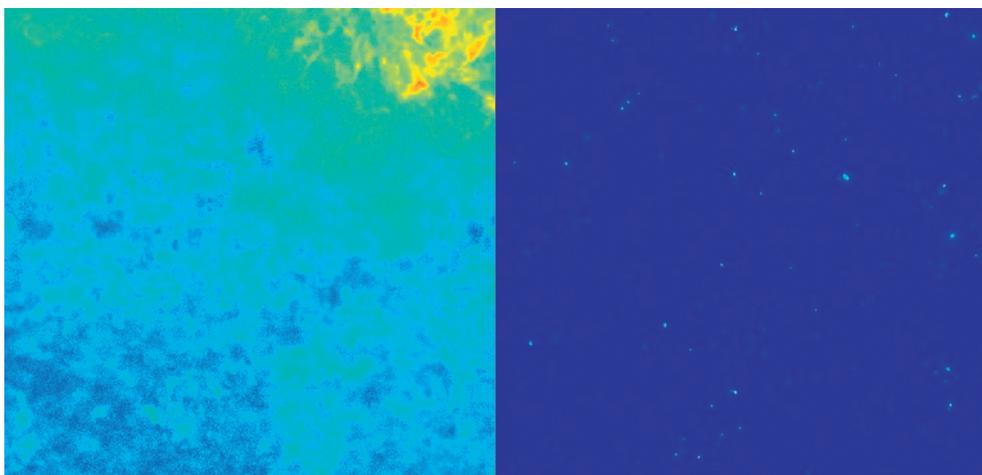
Was die genaue Bestimmung kosmologischer Parameter stört, ist gleichzeitig eine hoch willkommene Informationsquelle für die Astronomie. So wird Planck etwa 10 000 Galaxienhaufen finden, von denen ein großer Teil sehr weit entfernt sein wird. Anders gesagt: Planck sieht Objekte, die ihr heute empfangenes Licht in der Frühphase des Universums aussandten. Allein dadurch wird sich die Anzahl bekannter Galaxienhaufen etwa verdoppeln.

Simulation und Auswertung

Deutschland wird im Planck-Projekt durch das Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) in Garching vertreten. Die dortige Gruppe ist für die Simulation wissenschaftlicher Daten verantwortlich – ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Vorbereitung auf die Datenauswertung. Daneben wird am MPA die Steuerungssoftware für die gesamte Datenanalyse entwickelt. Die Kosmologiegruppe am MPA bereitet sich intensiv auf die wissenschaftliche Auswertung der Planck-Daten vor.

Die Daten, die Planck ab Anfang 2008 liefern soll, werden es erlauben, die Eigenschaften des Universums im Großen sehr genau festzulegen. Damit wird dieses Teleskop das kosmologische Standardmodell weiter präzisieren. Die Forscher erhoffen sich insbesondere mehr Informationen über die Rätsel der Dunklen Materie und der Dunklen Energie sowie über die Frühphase des Universums. Darüber hinaus wird Planck eine Fülle astronomisch höchst wertvoller Daten liefern. Deutschland trägt durch Simulation, Analyse und Interpretation der Daten wesentlich zu diesem zentralen kosmologischen Projekt bei.

➔ **Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für Astrophysik (Garching), Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg**

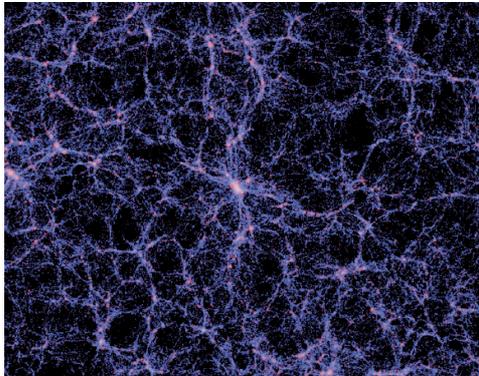
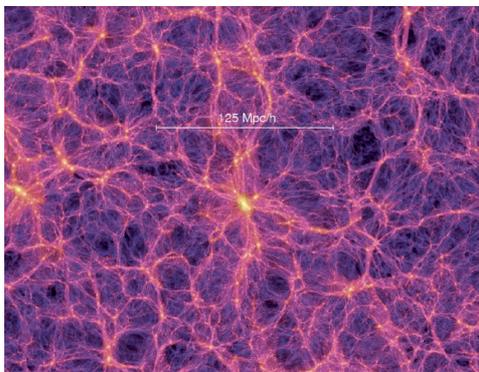


In den Mikrowellenhimmel eingebettet erscheinen Galaxienhaufen, deren charakteristische Signatur es erlaubt, sie aus den zahlreichen anderen Strahlungskomponenten mit speziellen Verfahren herauszufiltern. Links ein simulierter 10 mal 10 Quadratgrad großer Ausschnitt, rechts daneben die darin enthaltenen Galaxienhaufen. Die Entdeckungsrate ist trotz des intensiven Hintergrunds sehr hoch.

Die Ursuppe aus Materie und Strahlung des frühen Universums zeigte winzige Dichteschwankungen, die von der Gravitation verstärkt wurden, bis die heutigen Strukturen entstanden. Aufwändige numerische Simulationen untersuchen diese Prozesse. Das Virgo-Konsortium mit Wissenschaftlern aus Deutschland, England, Kanada, Japan und den USA spielt eine führende Rolle und hat die weltweit größten Simulationen des Universums durchgeführt.



Virgo – Supercomputer simulieren die kosmische Strukturentstehung



Die obere Abbildung visualisiert die heutige großräumige Struktur der Dunklen Materie. Die Millennium-Simulation zeigt eine vielfältige Population aus Halos aller Größen, die mit Filamenten aus Dunkler Materie verbunden sind, so dass sich insgesamt eine komplexe Struktur ergibt, die als „Cosmic Web“ bezeichnet wird. Die untere Abbildung zeigt die vorausgesagte Verteilung der leuchtenden Galaxien auf der gleichen Skala, wobei sich rote Galaxien bevorzugt in Gruppen und Haufen finden, während die noch sternbildenden blauen Galaxien die Filamente bevölkern.

Die winzigen Temperaturfluktuationen der kosmischen Mikrowellenstrahlung repräsentieren die Dichteschwankungen des Universums etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall. Mit numerischen Simulationen entwickelt man diesen einfachen Anfangszustand weiter und schlägt damit eine Brücke vom Urknall bis zum komplexen Zustand des heutigen Universums. Ein Vergleich mit der beobachteten Materieverteilung überprüft dann die zugrundeliegende Vorstellung über die Natur des Universums und die Entstehung der Galaxien. Dunkle Materie und Dunkle Energie spielen eine entscheidende Rolle.

Der größte Teil der Materie im Universum besteht offenbar aus bisher noch nicht identifizierten, schwach wechselwirkenden Elementarteilchen. Die Gravitation, die von diesen Teilchen ausgeübt wird und der sie selbst folgen, ist entscheidend für die Entstehung und den Zusammenhalt kosmischer Objekte. Die Dunkle Materie ist gleichsam der Kitt, ohne den Galaxien und Galaxienhaufen auseinanderdriften würden.

Auf dem Computer kann man die Dunkle Materie als stoßfreies N-Teilchen System modellieren. Man berechnet die Bahnen der Teilchen unter ihrer gegenseitigen Anziehung in einem expandierenden Universum und erhält so ein Modell der kosmischen Strukturentstehung. Man benötigt allerdings sehr effiziente Berechnungs-

verfahren, um die Gravitationskraft zwischen allen Teilchen genau zu bestimmen. Einfache Algorithmen skalieren mit dem Quadrat der Teilchenzahl und sind deshalb für große Simulationen unbrauchbar. Außerdem soll die Teilchenzahl möglichst groß sein, um die Treue des physikalischen Modells zu gewährleisten und auch kleine Galaxien aufzulösen.

Das Virgo-Konsortium hat deshalb neuartige Verfahren und Computerprogramme entwickelt, um die geballte Rechenleistung und den gesamten Speicher parallel vernetzter Supercomputer zu nutzen. Der Zusammenschluss vieler Computer ermöglicht, den dynamischen Bereich kosmischer Simulationen erheblich zu steigern, wenn auch um den Preis großer Komplexität der Berechnungsprogramme selbst, die auch die Kommunikation der Prozessoren und die Verteilung der Daten und der Rechenschritte steuern.

Die Millennium-Simulation

Im Jahr 2005 hat das Virgo-Konsortium die bisher größte Simulation der kosmischen Strukturbildung vorgestellt, mit mehr als 10 Milliarden Teilchen. Ein Superrechner der Max-Planck-Gesellschaft in Garching mit 512 Prozessoren benötigte dafür fast einen Monat, wobei der gesamte Hauptspeicher von 1 Terabyte gerade noch ausreichte. Diese „Millennium-Simulation“ liefert eine detaillierte Beschreibung kosmischer Strukturbildung

Kontakt: Dr. Volker Springel · Max-Planck-Institut für Astrophysik
Karl-Schwarzschild-Str. 1 · 85741 Garching · Tel. 089/30000-2238
volker@mpa-garching.mpg.de

über einen Zeitraum von fast 14 Milliarden Jahren, vom frühen Universum bis heute, in einem Raumgebiet, das mehr als 2,3 Milliarden Lichtjahre Kantenlänge umfasst. Dies entspricht dem Volumen der größten bisher durchgeführten systematischen Galaxienbeobachtungen, wie dem Sloan Digital Sky Survey oder dem 2dF Galaxy Redshift Survey. Ein Hauptziel der Simulation ist, die Entstehung von etwa 20 Millionen Galaxien auf dem Computer detailliert zu verfolgen und die berechneten Eigenschaften mit den Beobachtungen zu vergleichen. Auf diese Weise lassen sich die Vorstellungen zur „hierarchischen Galaxienentstehung“ prüfen und weiterentwickeln.

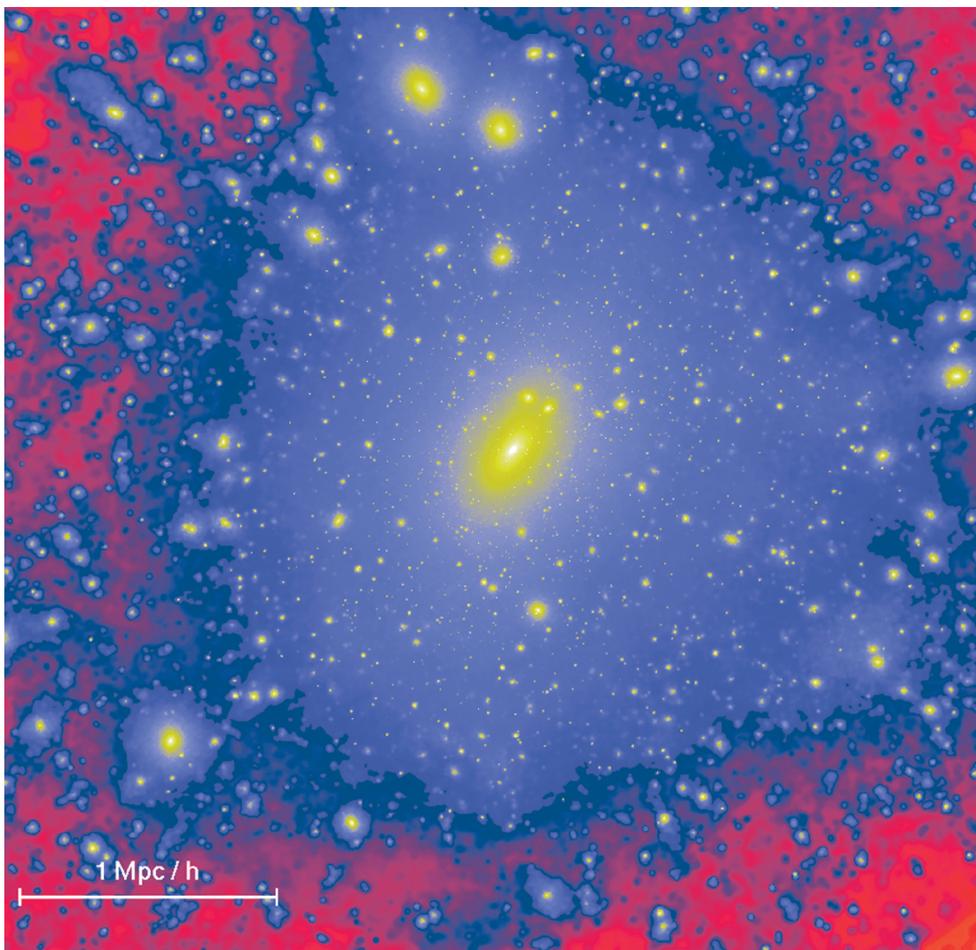
sum zu Massenfluktuationen auf großen Skalen führen. Ob diese charakteristischen Muster den Prozess der Strukturentstehung allerdings bis heute überlebt haben, lässt sich nur mit Rechnungen wie der Millennium-Simulation klären.

Numerische Simulationen liefern auch die genaue nichtlineare Massenverteilung, die sich aus der kosmischen Strukturentstehung mit Kalter Dunkler Materie ergibt. Dieser entscheidende Schritt erlaubt beispielsweise, die gravitative Lichtablenkung an Massenkonzentrationen wie Galaxienhaufen präzise zu berechnen. Ein Vergleich mit Beobachtungen dieser Gravitationslinseneffekte

nen, die dann etwa mit den vom H.E.S.S.- oder MAGIC-Gammateleskop gemessenen Strahlungsflüssen verglichen werden.

👁️ Ausblick

Die Weiterentwicklung der Simulationsprogramme und die raschen Fortschritte der Computertechnologie erlauben in Zukunft noch präzisere Modelle kosmischer Strukturentstehung. Insbesondere sollte es möglich werden, die komplexe Physik der Sternentstehung und des gleichzeitigen Wachstums superschwerer Schwarzer Löcher direkt in Computermodelle einzubeziehen. Schon heute sind die Simulationen unverzichtbarer

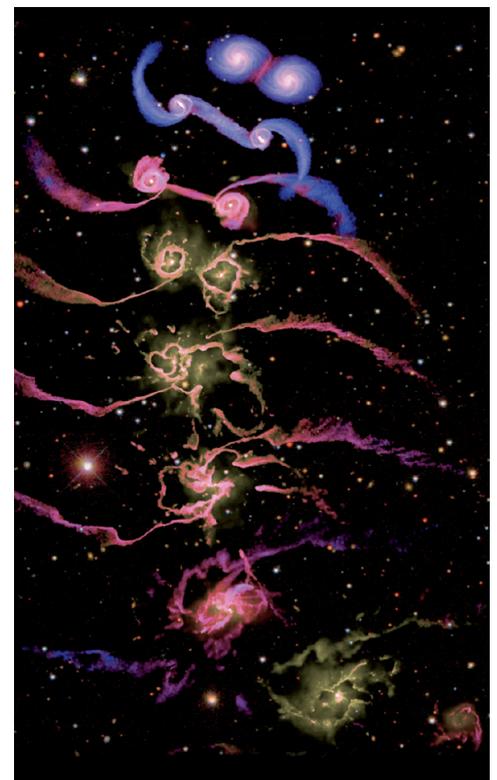


Hochauflöste Simulationen der Dunklen Materie in Galaxienhaufen zeugen von der reichen Substruktur in Halos und erlauben die Bestimmung der Dunklen Materiedichte in deren Zentren.

Die Simulation erlaubt die Entwicklung neuer kosmologischer Tests, mit denen man der mysteriösen Dunklen Energie auf die Spur kommen könnte, die zu einer beschleunigten Expansion des heutigen Universums führt. So sollten etwa die akustischen Schwingungen zwischen dem Baryon-Photon-Fluid und der Dunklen Materie im frühen Univer-

liefert eine neuerliche Überprüfung der kosmologischen Modelle.

Auch die Bestimmung der inneren Struktur galaktischer Halos beruht fast ausschließlich auf Simulationen. Mit konkreten teilchenphysikalischen Modellen der Dunklen Materie kann man dann die Annihilationsraten der Teilchen berech-



Simulationen von Galaxienkollisionen zeigen die Entstehung elliptischer Galaxien und das gleichzeitige Wachstum superschwerer schwarzer Löcher in ihren Zentren. Einströmendes Gas regt letztere während der Kollision zu Quasar-Aktivität an.

Bestandteil astrophysikalischer Theoriebildung. Diese Bedeutung wird noch steigen, gerade für die Galaxienentstehung mit ihrem besonders komplexen Zusammenspiel vielfältiger physikalischer Prozesse.

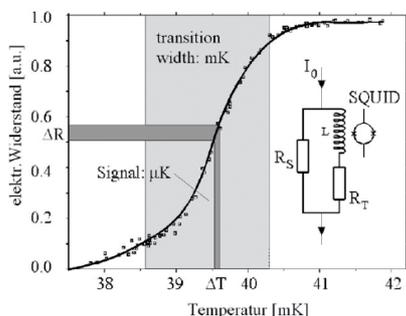
➔ Deutsche Gruppen, die Strukturbildung numerisch simulieren: Astrophysikalisches Institut Potsdam (AIP) und Max-Planck-Institut für Astrophysik (Garching)

Es gibt im Universum mindestens fünfmal mehr unsichtbare Dunkle Materie als normale baryonische Materie. Mit CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) sollen erstmals die hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie direkt nachgewiesen und deren Natur geklärt werden. Neuartige Messverfahren sind hierfür nötig, weil die Dunkle-Materie-Teilchen nur sehr selten mit normaler Materie wechselwirken. CRESST ist ein europäisches Gemeinschaftsprojekt, an dem drei deutsche Institute beteiligt sind.

CRESST – Jagd auf Teilchen der Dunklen Materie



Ein Tieftemperatur-Kalorimeter des CRESST-Experiments: ein Saphir-Kristall mit aufgebrachtem supra-leitendem Film aus Wolfram. Der Kristall hat eine Kantenlänge von 4 cm und wiegt etwa 250 g. Er wird bei etwa 0,01 Kelvin betrieben.



Unterhalb einer kritischen Temperatur verliert der supraleitende Film sehr schnell vollständig seinen elektrischen Widerstand. Wird der Film bei seiner kritischen Temperatur stabilisiert, führen kleine Temperaturschwankungen zu großen und damit messbaren Schwankungen im elektrischen Widerstand.

Woraus die Dunkle Materie besteht, ist bisher nicht geklärt. Eine Reihe von Beobachtungen hat aber zu der Erkenntnis geführt, dass sie wohl aus unbekanntem Elementarteilchen besteht. Diese Teilchen können nur sehr schwach mit normaler Materie in Wechselwirkung treten und sollten etwa die Masse eines schweren Atomkerns haben. Sie werden WIMPs genannt, für „Weakly Interacting Massive Particles.“ Auch Teilchenphysiker erwarten aus ganz anderen Gründen, dass es bisher unbekanntes Elementarteilchen geben sollte, deren Eigenschaften denen von WIMPs entsprechen. Daher ist die Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie sowohl für die Kosmologie als auch für die Teilchenphysik von größtem Interesse.

Messungen nahe am absoluten Nullpunkt

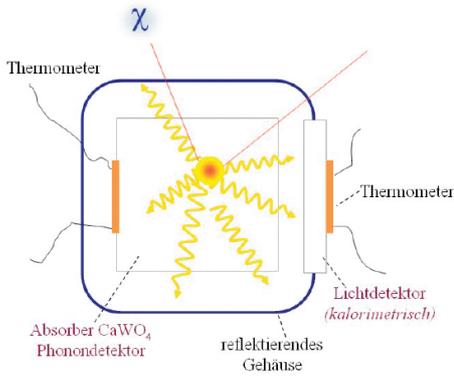
Eine Möglichkeit zum Nachweis der Dunklen Materie ergibt sich aus der Vermutung, dass die Teilchen an Atomkernen streuen und dabei einen messbaren Rückstoß auf den Kern übertragen. Allerdings passiert das höchst selten. Pro Kilogramm Detektormasse rechnet man mit höchstens einem Streueignis pro Monat, vielleicht sogar noch weniger. Gleichzeitig lösen radioaktiv zerfallende Teilchen im Detektor mehrere Signale pro Sekunde aus – millionenmal mehr als WIMPs. Es gilt also, die sprichwörtliche

Stecknadel im Heuhaufen zu finden. Darin liegt die große Herausforderung dieser Art von Experimenten und die Motivation zur Entwicklung neuartiger Detektoren.

Das Nachweisprinzip von CRESST basiert auf der Messung einer Temperaturerhöhung des Detektors, die eintritt, wenn ein WIMP darin mit einem Atomkern zusammenstößt. Allerdings ist der Effekt extrem klein. Einen messbaren Anstieg der Temperatur kann man deshalb nur bei sehr niedriger Temperatur erwarten, weshalb die Detektoren von CRESST nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben werden.

Ein solcher Detektor besteht aus Kristallen aus hochreinem Saphir (Al_2O_3) oder Kalziumwolframat (CaWO_4), auf die dünne Filme eines supraleitenden Materials aufgebracht werden. Unterhalb einer gewissen kritischen Temperatur verschwindet schlagartig der elektrische Widerstand dieser Supraleiter. Stabilisiert man die Temperatur des dünnen Filmes bei dieser kritischen Temperatur, so wird bei kleinen Temperaturschwankungen dessen Widerstand sehr stark schwanken. Auf diese Weise wirkt der supraleitende Film als höchst empfindliches Thermometer für Temperaturänderungen um einige Millionstel Grad.

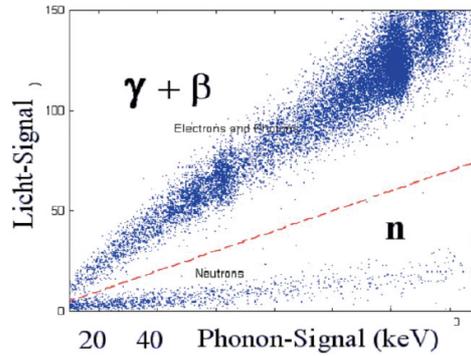
Kontakt: Dr. Wolfgang Seidel · Max-Planck-Institut für Physik · Föhringer Ring 6 80805 München · Tel. 089/32354-442 · seidel@mppmu.mpg.de · Prof. Dr. Josef Jochum · Physikalisches Institut, Universität Tübingen · Auf der Morgenstelle 14 72076 Tübingen · Tel. 07071/29-74453 · josef.jochum@uni-tuebingen.de



Das Nachweisprinzip der CRESST-Detektoren beruht auf zwei Effekten: Einer Temperaturerhöhung und gleichzeitig erzeugtem Szintillationslicht.



Die CRESST-Detektoren und der zu ihrer Kühlung notwendige Kryostat befinden sich in einem Kupfergefäß. Im Hintergrund ist ein Teil der Abschirmung gegen Umgebungsradioaktivität zu erkennen. Beim Einbau der Detektoren (rechts) darf keinerlei Staub in den Detektor gelangen, weil er natürliche radioaktive Stoffe enthält.



CRESST misst mit den CaWO_4 -Kristallen gleichzeitig auch Lichtblitze, die bei einem Zusammenstoß eines WIMPs mit einem Atomkern entstehen. Dieses Phänomen heißt Szintillation. Interessanterweise ist das Verhältnis von Licht zu Wärme abhängig davon, ob Alpha-, Beta-, Gammastrahlung (ausgelöst von radioaktiven Zerfällen oder kosmischer Strahlung) oder Kernrückstöße eines WIMPs das Ereignis auslösen. Auf diese Weise lassen sich WIMP-Streuungen vom überwiegenden Teil des Untergrundes unterscheiden. Das Szintillationslicht wird mit einem zweiten Tieftemperatur-Detektor gemessen. Damit steigt die Sensitivität für kleine Zählraten und kleine Wirkungsquerschnitte um viele Größenordnungen. Diese Art von Detektoren sind daher geeignet, um nach sehr kleinen Wirkungsquerschnitten zu suchen.

CRESST im Gran-Sasso-Untergrundlabor

CRESST befindet sich im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor. Bei ersten Messungen in den Jahren 2000 bis 2003 wurden zwei Kristalle mit je 320 g Masse verwendet. Mit einer gesamten effektiven Messzeit von 10 kg-Tagen konnte bisher kein WIMP-Signal nachgewiesen werden. Aus diesem Nullresultat ließen sich Obergrenzen der Wechselwirkungsstärke (Wirkungsquerschnitt) und mögliche WIMP-Massen ableiten. Bis Mitte 2006 wird das Experiment erweitert. Danach können bis zu 33 Detektoren und damit 10 kg Absorbermasse verwendet werden, wodurch die bisher erreichte Empfindlichkeit um weitere zwei Größenordnungen steigen wird. Damit werden weitere große Bereiche theoretischer Vorhersagen experimentell zugänglich.

Gleichzeitig werden weitere Maßnahmen getroffen, um die Detektoren gegen störende Strahlung abzuschirmen. Insbesondere Neutronen werden mit Hilfe eines halben Meter dicken Mantels aus Polyethylen vom Instrument ferngehalten. Auch Myonen aus der kosmischen Strahlung stören die Messung erheblich. Zwar verringert die 1,5 km dicke Gesteinsschicht der Abruzzen über dem Labor den Myonen-Fluss um das Millionenfache. Dennoch treffen pro Tag etwa hundert dieser Teilchen auf das CRESST-Experiment. Mit Hilfe eines sogenannten Veto-Detektors werden die Teilchen nachgewiesen und lassen sich so aus den Daten eliminieren.

👁️ Ausblick auf EURECA

Wenn sich die Detektoren in der jetzigen Ausbaustufe bewähren, werden die Wissenschaftler versuchen, die Experimente auf Absorbermassen von insgesamt bis zu einer Tonne auszubauen. Dies wird nur in einer größeren Kooperation möglich sein. Deshalb wurde aus den Projekten CRESST und EDELWEISS eine Initiative für ein gemeinsames Nachfolgeprojekt EURECA auf europäischer Ebene gestartet.

Ziel ist es, die Teilchen der Dunklen Materie direkt nachzuweisen. Wenn gleichzeitig an Beschleunigeranlagen neue Elementarteilchen gefunden werden, vor allem am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf, und man durch das Studium ihrer Eigenschaften feststellen würde, dass auch die beobachteten WIMPs zur Familie dieser neuen Teilchen gehören, wäre nicht nur das Rätsel der Dunklen Materie gelöst. Darüber hinaus hätte man einmal mehr eine Verbindung zwischen der Physik des Allerkleinsten und der Astrophysik und Kosmologie aufgezeigt. Bleiben aber die mutmaßlichen Teilchen der Dunklen Materie unauffindbar, so sind vermutlich ganz neue Erklärungsansätze erforderlich, die wir uns mit unserem heutigen Verständnis von Gravitation, dem Aufbau des Universums und der Materie noch nicht vorstellen können.

➔ **Deutsche Beteiligungen:** Max-Planck-Institut für Physik (München), Universität Tübingen, Technische Universität München

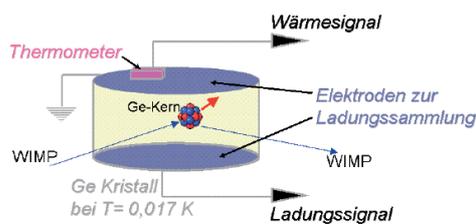
EDELWEISS ist ein französisch-deutsches Experiment zur direkten Suche nach Teilchen der Dunklen Materie. Das Nachweisprinzip besteht darin, dass ein solches Teilchen in einem Germanium-Kristall elastisch gestreut werden kann. Dabei entsteht Wärme, außerdem werden Atome ionisiert. EDELWEISS sucht nach solchen, sehr seltenen Signalen. Mit der neuen Experimentkonfiguration, wie sie im Jahre 2005 aufgebaut wurde, soll die bisherige Empfindlichkeit um das Hundertfache erhöht werden.



EDELWEISS: Dunkle-Materie-Teilchen im Kristall



Testmontage der inneren von insgesamt drei Kupferhüllen des neuen Kryostaten mit einem Fassungsvermögen von 100 Litern für bis zu 110 Bolometer-Detektoren.



Das Messprinzip. Bei einem Stoß eines WIMPs mit einem Germaniumkern im Detektor wird die deponierte Energie sowohl als Temperaturerhöhung an einem Wärmesensor wie auch als Ladungssignal an den Elektroden registriert.

Die Teilchen der Dunklen Materie gehen mit der bekannten Materie eine extrem geringe Wechselwirkung ein. Deswegen sind sie unsichtbar, also dunkel. Diese „Weakly Interacting Massive Particles“ (WIMPs) genannten Partikel erfüllen nach heutigem Wissen das Universum nicht homogen. Vielmehr haben sie riesige Wolken gebildet, in denen Galaxien wie unser Milchstraßensystem „schweben“. Demnach sollte sich die Erde in dieser Wolke bewegen und ein irdischer Detektor ständig von einer großen Zahl von WIMPs durchströmt werden. Wegen der verschwindend geringen Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung stößt dabei aber nur höchst selten ein WIMP mit einem Atomkern zusammen. Mit Experimenten wie EDELWEISS versuchen Astroteilchenphysiker, solche extrem seltenen Stoßprozesse nachzuweisen.

EDELWEISS im Fréjus-Tunnel

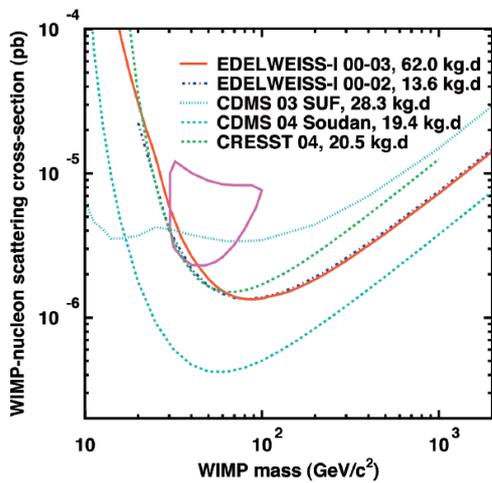
Das EDELWEISS-Experiment (Expérience pour détecter les WIMPs en Site Souterrain) befindet sich im Laboratoire Souterrain de Modane im französisch-italienischen Fréjus-Tunnel. Dort schirmt die 1780 Meter mächtige Gesteinsschicht der Alpen das Experiment gegen störende kosmische Strahlung ab. Als Detektoren dienen Germanium-Halbleiterkristalle mit einer Masse von je 320 g, die bis auf 0,017 Kelvin gekühlt sind. Stößt ein WIMP mit einem Germanium-Atomkern zusammen, so überträgt es auf den

Kern einen Rückstoß und deponiert dabei Energie. Dies führt zu zwei Effekten. Zum einen erhöht sich die Temperatur im Kristall geringfügig und zum anderen wird das Kristallmaterial in der Umgebung des Stoßprozesses ionisiert. Das heißt, einige Atome verlieren ihre Elektronen.

Das Temperatursignal wird über einen kleinen Spezi­alsensor, der auf den Detektor aufgeklebt ist, ausgelesen. Hierbei nutzt man aus, dass eine Temperaturerhöhung zu einem größeren elektrischen Widerstand in diesem Sensor führt. Das Ionisationssignal wird ebenfalls an den Kristalloberflächen ausgelesen. Hierzu dient eine nur 100 nm dünne Aluminium-Elektrode, an die eine Spannung von einigen Volt angelegt wird. Für jedes Ereignis nimmt man sowohl den Temperaturanstieg als auch das Ionisations- bzw. Ladungssignal gleichzeitig auf.

Eine Herausforderung besteht darin, Störeinflüsse wie radioaktive Zerfälle, bei denen Elektronen und Gammaquanten emittiert werden, herauszufiltern. Dies ist möglich, weil die Elektronen und Gammaquanten bei gleichem Energieeintrag stärker mit den Elektronen im Kristall wechselwirken als die WIMPs oder Neutronen. Dies führt dementsprechend zu deutlich mehr Ionisation als bei den WIMPs und Neutronen, die an den Kernen stoßen. Hingegen ist das Wärmesignal nur von der deponierten Gesamt-

Kontakt: Dr. Klaus Eitel · Forschungszentrum Karlsruhe · Institut für Kernphysik
Postfach 3640 · 76021 Karlsruhe · Tel. 07247/82-3701 · klaus.eitel@ik.fzk.de



Obwohl bislang noch kein WIMP nachgewiesen wurde, lassen sich bereits einige Bereiche der Wirkungsquerschnitte und Massen ausschließen. Offene Kurven beschreiben Bereiche ausgeschlossener Parameter (zu großen Wirkungsquerschnitten hin), der pink umrandete Bereich beschreibt mögliche Parameter aufgrund eines Hinweises auf ein Signal im DAMA-Experiment, das im Gran Sasso-Untergroundlabor durchgeführt wurde.

energie abhängig. Auf diese Weise lassen sich potenzielle WIMP-Kern-Stöße anhand des Verhältnisses von Ionisation zu Wärme sehr effizient aus dem „Meer“ von Untergrundeignissen extrahieren. Eine ähnliche Strategie verfolgen auch andere Experimente wie CRESST und CDMS (Cold Dark Matter Search).

In einem ersten Messzyklus in den Jahren 2000 bis 2003 mit drei Kristallen und einer gesamten effektiven Messzeit von 62 kg-Tagen wurde kein WIMP-Signal gefunden. Daraus ergeben sich Obergrenzen für die Wechselwirkungsstärke (Wirkungsquerschnitt) und mögliche WIMP-Massen.

In einer zweiten Experimentkonfiguration, deren Aufbau Ende 2005 abgeschlossen wurde, soll die bisherige Emp-

findlichkeit um etwa zwei Größenordnungen gesteigert werden. Damit gelangt man zu Wirkungsquerschnitten im Bereich von 10^{-8} Pikobarn ($1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$). Dann werden erstmals große Bereiche theoretischer Erwartungen experimentell zugänglich. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die effektive Messzeit gesteigert werden, was durch erheblich mehr Detektormaterial erreicht wird. EDELWEISS-2 soll bis zu 110 Germanium-Detektoren mit jeweils 320 g Masse enthalten, die in einem neu entwickelten 100-Liter-Kryostaten untergebracht werden.

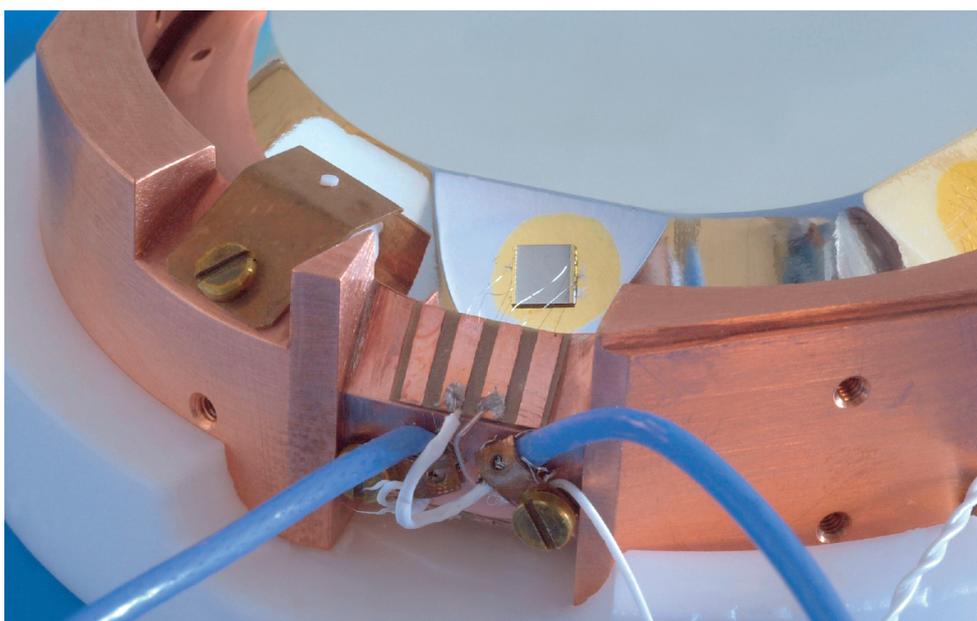
Aufgrund der enormen Empfindlichkeitssteigerung treten allerdings bisher vernachlässigbare Untergrundquellen ins Blickfeld. Wegen der guten Abschirmung durch das Gestein erreichen durchschnittlich zwar nur etwa vier kos-

mische Myonen pro Quadratmeter und Tag das Experiment (an der Erdoberfläche wären es 10 Millionen). Diese Myonen können aber beim Durchgang durch umgebendes Material hochenergetische Neutronen erzeugen, die im Detektor ebenfalls ein Störsignal auslösen, das tückischerweise einem WIMP sehr viel mehr ähnelt als radioaktiver Untergrund. Deshalb müssen die Detektoren von einem hermetischen Zähler umgeben werden, der alle Myonen in der Experimentumgebung nachweist. Aufgrund der massiven Abschirmung der Detektoren mit Kupfer, 20 cm dickem Blei und 50 cm dickem Polyethylen beträgt die zu überdeckende Fläche des von den deutschen Gruppen gebauten und betriebenen Myonzählers für das EDELWEISS-2 Experiment rund hundert Quadratmeter.

👁️ Ausblick

Mit der neuen Generation von Experimenten zur direkten Suche nach Dunkler Materie erzielen wir in den nächsten Jahren eine bisher unerreichte Empfindlichkeit und stoßen erstmalig in große Bereiche vor, in denen supersymmetrische Modelle WIMPs vorhersagen. Tief unter der Erde könnten wir damit einem der großen Rätsel der Kosmologie auf die Spur kommen und die Natur der Dunklen Materie aufdecken.

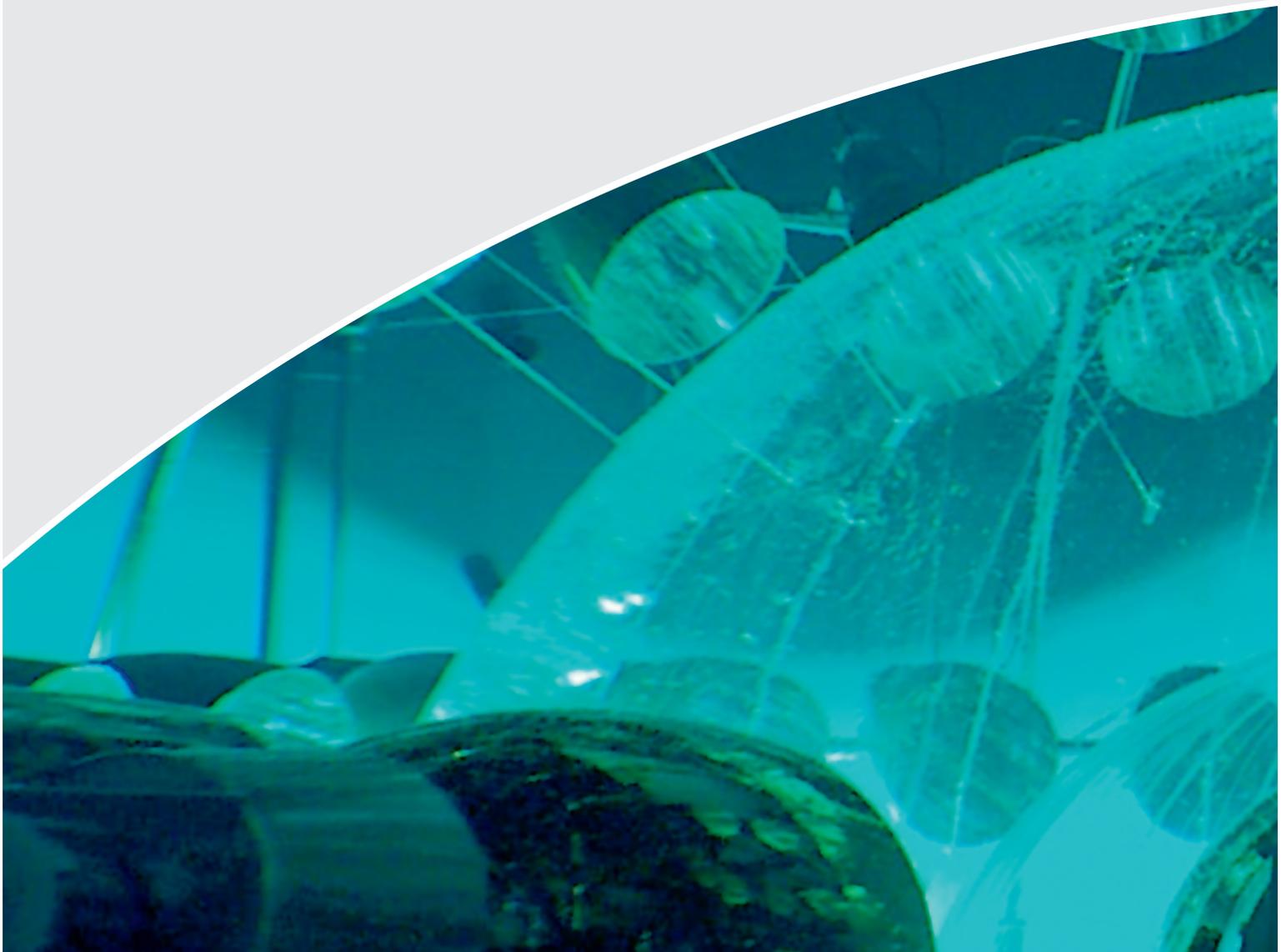
➡️ **Deutsche Beteiligungen:** Forschungszentrum Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH)



Detailansicht eines Germanium-Bolometers mit aufgeklebtem Wärmesensor. Deutlich erkennbar die Kupferhalterung des Detektors sowie die Signalkabel.

Astroteilchenphysik in Deutschland

NEUTRINOS, AXIONEN UND NUKLEARE ASTROPHYSIK



⇒ **Theoretische Neutrinophysik**

⇒ **KATRIN:**

eine Waage für Neutrinos

⇒ **GERDA:**

Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?

⇒ **Double-Chooz:**

Oszillationen von Reaktor-neutrinos

⇒ **Supernovae,**

Hypernovae und verschmelzende Sterne

⇒ **Borexino:**

Spektroskopie von Sonnenneutrinos mit Borexino und LENA

⇒ **CAST:**

Axionen aus dem Inneren der Sonne

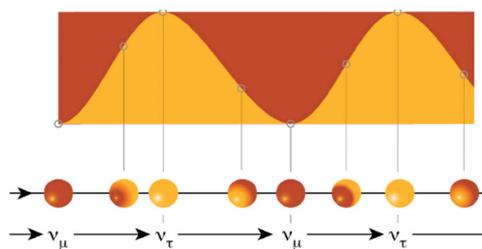
⇒ **Nukleare Astrophysik:**

Elementsynthese im Universum

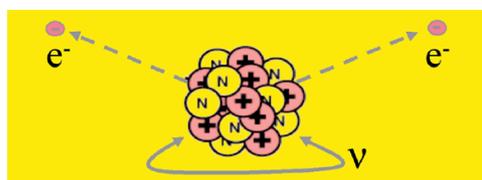


Die winzigen Massen der Neutrinos, ihre erst teilweise erforschten „Mischungen“ und die Vermutung, sie seien ihre eigenen Antiteilchen und verantworteten den kosmischen Überschuss von Materie über Antimaterie, sind fundamentale Fragen der Teilchenphysik und Kosmologie. Mehrere Gruppen in Deutschland widmen sich den theoretischen Grundlagen dieser Themen und fördern zugleich die Fortentwicklung der experimentellen Projekte.

Theoretische Neutrinophysik



Durch Massenmischungen kann ein Neutrino unterwegs seinen Flavor wechseln. In diesem Beispiel tritt das Teilchen abwechselnd als Myon- oder Tau-Neutrino auf.



Beim neutrinolosen Doppel-Betazerfall werden von bestimmten Kernen zwei Elektronen emittiert. Dieser extrem seltene Prozess ist nur möglich, wenn Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind.

Trotz des spektakulären Erfolgs der theoretischen Teilchenphysik, die Kräfte zwischen den Bausteinen der Materie im Rahmen des Standardmodells zu verstehen, bleiben wesentliche Fragen offen. Es gibt bisher nur Hypothesen für die Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie. Selbst die Frage, warum Elementarteilchen überhaupt Massen besitzen, ist nicht endgültig geklärt. Erstaunlich ist auch, dass Neutrinos viel geringere Massen besitzen als etwa die Elektronen. Darüber hinaus wird vermutet, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind, was überraschenderweise erklären könnte, warum es überhaupt Materie im Universum gibt. Die theoretische Neutrinophysik versucht, diese weitgespannten Fragen in einen größeren begrifflichen Rahmen einzuordnen, quantitativ zu fassen, experimentelle Überprüfungsmöglichkeiten aufzuzeigen und astrophysikalische oder kosmologische Konsequenzen zu erarbeiten.

Flavoroszillationen: Kleine Massen – große Wirkung

Quarks, Neutrinos und die geladene Leptonen treten in jeweils drei Varianten (Generationen bzw. Flavors) auf. Schon von den Quarks ist das Phänomen der „Teilchenmischung“ oder „Flavorverletzung“ bekannt. Im Falle der Neutrinos bedeutet dies, dass etwa das Elektron-Neutrino ν_e aus einer quantenmechanischen Überlagerung dreier Massenwerte m_1 , m_2 und m_3 besteht. Bei gleicher Energie hat dann jeder dieser Bestandteile

eine andere Geschwindigkeit. Dies führt zu Interferenzen, weil die Bewegung von Quanten als Wellenphänomen zu verstehen ist. Beispielsweise geht das ν_e nach einer gewissen Strecke in ein ν_μ über. Je kleiner die Massenunterschiede, desto größer diese „Oszillationslänge“, die im Falle von Neutrinos aus Kernreaktoren mehrere hundert Kilometer beträgt. Eine Reihe von Experimenten hat ergeben, dass sich die drei Neutrinomassenwerte um etwa 10 bzw. 50 meV voneinander unterscheiden, wobei 1 meV (Milli-Elektronenvolt) einem Billionstel (10^{-12}) der Protonenmasse entspricht. Für die absoluten Neutrinomassen existieren hingegen nur Obergrenzen in der Größenordnung von 1 eV.

Das Elektron-Neutrino ν_e hat zu rund zwei Dritteln den Massenwert m_1 und zu rund einem Drittel den Massenwert m_2 . Das Reaktor-Neutrinoexperiment Double Chooz, das derzeit vorbereitet wird, könnte zum ersten Mal auch einen kleinen Bestandteil an m_3 im ν_e entdecken. In diesem Fall treten völlig neue „Dreiflavor-Oszillationen“ auf.

Es gibt eine Vielzahl von komplexen Oszillationseffekten. So verändern sich die Oszillationslängen, wenn Neutrinos Materie durchqueren. Die theoretische Neutrinophysik hat den Formalismus geschaffen, die Vielfalt der Möglichkeiten zu ordnen und neue Strategien zu entwickeln, um die „Neutrino-Mischungsmatrix“ gänzlich aufzuklären.

Kontakt: Prof. Dr. Manfred Lindner · Max-Planck-Institut für Kernphysik
Saupfercheckweg 1 · 69117 Heidelberg · Tel. 06221/516-800 · lindner@mpi-hd.mpg.de

Obwohl Neutrinos vergleichsweise winzige Massen besitzen, tragen sie auf Grund ihrer hohen Anzahl (mit etwa 330 Neutrinos pro Kubikzentimeter sind sie nach den Photonen die zweithäufigsten Teilchen) signifikant zur Dunklen Materie bei. Wie hoch dieser Beitrag ist, lässt sich mit Oszillationsexperimenten nicht bestimmen, wohl aber mit Betazerfalls-Experimenten, wie dem im Bau befindlichen KATRIN.

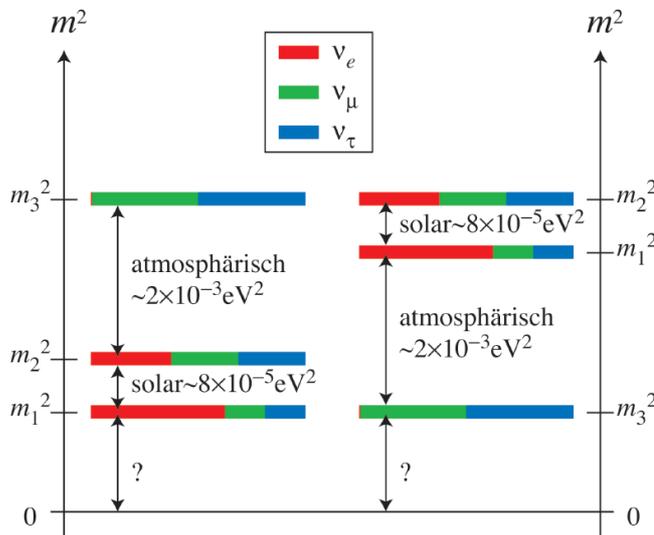
Neutrinos auf der Klipp-Klapp-Schaukel

Die Neutrinomischungen unterscheiden sich spektakulär von denen der Quarks, was zu völlig neuen Ansätzen für Massenmodelle z.B. mit Flavorsymmetrien geführt hat. Eine Frage müssen alle Modelle lösen: Warum ist die Masse

Sowohl unsere bekannten leichten Neutrinos wie auch die vermuteten schweren Partner müssten jeweils ihre eigenen Antiteilchen sein („Majorana-Neutrinos“). Als Folge müssten bestimmte Atomkerne den „neutrinolosen Doppel-Betazerfall“ aufweisen. Beim normalen Doppel-Betazerfall entstehen zugleich zwei Elektronen und zwei Neutrinos. Wenn jedoch gelegentlich das erste Antineutrino gewissermaßen als Neutrino absorbiert wird, verlassen nur zwei Elektronen den Kern. Dieser extrem seltene Zerfallsmodus wird weltweit fieberhaft gesucht, beispielsweise im GERDA-Projekt, denn in dem abgeschlossenen Heidelberg-Moskau-Experiment waren sogar Anzeichen dafür aufgetreten. Im Falle der Bestätigung würde dies sowohl

extremen Bedingungen des frühen Universums entstanden. Ihre unvermeidlichen Zerfälle führen später zwanglos zur Materie-Antimaterie-Asymmetrie, und das ironischerweise gerade deshalb, weil sie ihre eigenen Antiteilchen sind!

Dieser als Leptogenese bekannte Mechanismus ist eines der heißesten Themen der theoretischen Neutrinophysik. Die im frühen Universum relevanten Parameter stehen in konkreten Theorien der Neutrinomassen und -mischungen meist mit Parametern in Verbindung, die in Oszillationsexperimenten oder im neutrinolosen Doppel-Betazerfall gemessen werden können. Somit kann man verschiedene teilchenphysikalische Modelle daran messen, ob sie den kosmischen Materieüberschuss erfolgreich erklären.



Mögliche Neutrino-Massenschemata, wobei der experimentelle Mischungsanteil der Elektron-, Myon- und Tau-Flavors in rot, grün und blau angegeben ist. Bisher ist nicht bekannt, ob der m_3 Zustand einen ν_e -Anteil besitzt, ob das Massenschema „normal“ oder „invertiert“ ist, oder was der Absolutwert der Massen ist, denn Oszillationsexperimente zeigen nur Massenunterschiede.

selbst des schwersten Neutrinos um mindestens sechs Größenordnungen kleiner als die des Elektrons, das wiederum fünf Größenordnungen leichter als das Top-Quark ist? Eine elegante Erklärung ist der See-Saw- (Klipp-Klapp-) Mechanismus, der genau deswegen möglich ist, weil Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein können. Danach gibt es neben unseren „normalen“ Neutrinos noch extrem schwere Partner, die um eben so viele Größenordnungen „zu schwer“ sind wie unsere Neutrinos „zu leicht“. In dem zugehörigen Formalismus drückt das schwere Neutrino die Masse des leichten wie auf einer Wippe zu kleinen Werten.

die Majorana-Eigenschaft der Neutrinos als auch ihre Massen unabhängig von Oszillationsexperimenten nachweisen.

Ursprung der Materie im Universum

Der See-Saw-Mechanismus ist bei Theoretikern beliebt, weil er wie nebenbei ein fundamentales kosmologisches Problem löst, nämlich den Überschuss an Materie über Antimaterie. Ohne diese Asymmetrie hätten sich Materie und Antimaterie kurz nach dem Urknall vollständig annihiliert, und es gäbe heute nur Photonen und Neutrinos im Universum. Die schweren „Klipp-Klapp-Partner“ der leichten Neutrinos, die man wegen ihrer großen Masse im Labor nicht erzeugen kann, wären unter den

Ausblick

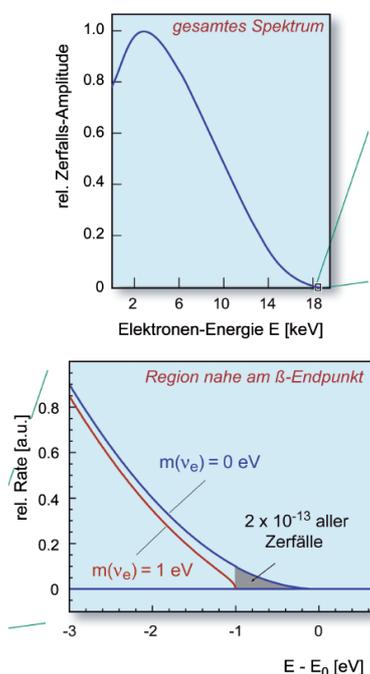
Eine wichtige Erweiterung des Standardmodells besteht in der „Supersymmetrie“, die ihrerseits ganz neue Teilchen vorhersagt. Typischerweise führt dies auch zur Flavorverletzung, beispielsweise in Myonzerfällen, deren Rate dann stark von Neutrinoparametern abhängen kann. Teilchenbeschleuniger wie der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf oder der zukünftige International Linear Collider werden weiterführende Erkenntnisse liefern. Präzisionsmessungen in der Neutrinophysik in Kombination mit den Quarkmassen und -mischungen versprechen langfristig wichtige Einblicke in die Struktur der zugrundeliegenden Massenmatrizen. Die beobachteten Regelmäßigkeiten legen fundamentale Zusammenhänge und neue Symmetrien nahe. Die speziellen Eigenschaften der Neutrinos testen aber auch spekulative Ideen etwa über zusätzliche Raumdimensionen oder Strings. Derartige Überlegungen führen dann auf die noch tiefer gehende Fragestellung, warum es überhaupt drei Teilchenfamilien gibt. Noch ist das Gesamtbild nicht absehbar, zu dem sich die neuen Erkenntnisse der Neutrinophysik und der Kosmologie und die erwarteten Entdeckungen an den neuen Teilchenbeschleunigern zusammenfügen werden.

➔ Deutsche Gruppen: DESY (Hamburg), Universitäten Dortmund, Würzburg und München, Technische Universität München, Max-Planck-Institute für Kernphysik (Heidelberg) und für Physik (München)

Seit einigen Jahren ist bekannt, dass Neutrinos eine Ruhemasse besitzen. Sie gelten deshalb als Teilchen der Heißen Dunklen Materie. Die meisten Neutrinoexperimente können lediglich die Massendifferenzen von zwei Neutrinoarten messen. Die einzige Möglichkeit der direkten Massenbestimmung bietet der Betazerfall. Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN wird erstmals in der Lage sein, die Masse des Elektron-Neutrinos unterhalb von einem Elektronenvolt zu messen. Das internationale Experiment, das derzeit am Forschungszentrum Karlsruhe von mehr als hundert Wissenschaftlern und Ingenieuren aus fünf Staaten aufgebaut wird, nutzt Tritium als Medium für den Betazerfall.



KATRIN – eine Waage für Neutrinos



Das Energiespektrum von Elektronen aus dem Tritium-Betazerfall zeigt nahe am kinematischen Endpunkt eine charakteristische Modifikation in Abhängigkeit von der Neutrinomasse.

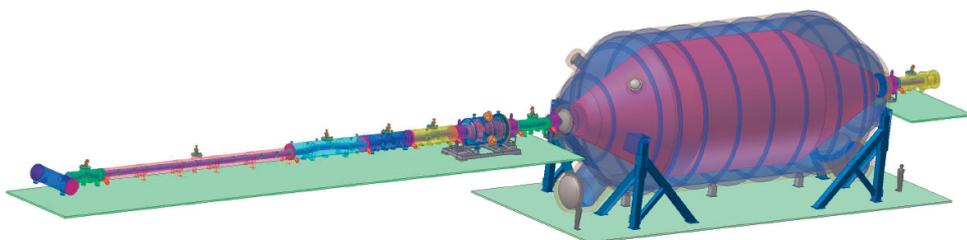
Das 75 m lange KATRIN-Experiment mit seinen Hauptkomponenten, bestehend aus einer fensterlosen gasförmigen Tritiumquelle, einer Elektronen-Transportstrecke mit aktiven und passiven Tritium-Pumpelementen, dem System aus zwei elektrostatischen Spektrometern und dem Detektor zum Nachweis der transmittierten Elektronen.

Die beim Urknall erzeugten Neutrinos sind vermutlich die häufigsten massebehafteten Teilchen im Universum: Jeder Kubikzentimeter im Kosmos enthält heute 330 Neutrinos. Als Teilchen der Heißen Dunklen Materie haben sie die Entstehung und Evolution großräumiger Strukturen im Universum mit beeinflusst. Die einzige Möglichkeit, die bislang ungeklärte Rolle von Neutrinos als Heiße Dunkle Materie im Universum in einer modellunabhängigen Weise zu bestimmen, ist die genaue Messung der Energieverteilung von Elektronen aus Betazerfällen. Hier manifestiert sich die Größe der Neutrinomasse in einer charakteristischen Modifikation des Spektrums nahe am Endpunkt.

Paulis „Geisterteilchen“ lebt wieder auf KATRIN nutzt den Effekt, aufgrund dessen der Physiker Wolfgang Pauli das Neutrino 1930 voraussagte. Beim Betazerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein (elektronisches Anti-) Neutrino um. Das entstehende Elektron

hat keine feste Energie, sondern schwankt von Null bis zu einer Maximalenergie, die praktisch der gesamten beim Zerfall frei werdenden Energie entspricht. Den verbleibenden Anteil übernimmt das Neutrino. Dessen Energie setzt sich wieder aus zwei Bestandteilen zusammen: seiner Ruhemasse und seiner Bewegungsenergie. Da sich die Neutrinos nur sehr schwer nachweisen lassen, misst man die Elektronen. Aus der genauen Beobachtung ihres Energiespektrums in der Nähe der Maximalenergie kann auf die Neutrinomasse geschlossen werden. Da das Neutrino eine Masse hat und damit, gemäß Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$, eine Mindestenergie mit sich trägt, wird das Energiespektrum in der Nähe der Maximalenergie des Betazerfalls modifiziert sein.

Am besten geeignet zur Suche nach Effekten der Neutrinomasse ist molekulares Tritium, das eine sehr kleine Übergangsenergie von nur 18,6 keV aufweist und gleichzeitig aufgrund seiner kurzen



Kontakt: Prof. Dr. Guido Drexlin · Forschungszentrum und Universität Karlsruhe
 Institut für Experimentelle Kernphysik · Postfach 3640 · 76021 Karlsruhe
 Tel. 07247/82-3534 · guido.drexlin@ik.fzk.de · Prof. Dr. Christian Weinheimer
 Universität Münster · Institut für Kernphysik · Wilhelm-Klemm-Straße 9
 48149 Münster · Tel. 0251/83-34970 · weinheimer@uni-muenster.de

Halbwertszeit von 12,3 Jahren über eine sehr hohe Zerfallsaktivität verfügt. Aus diesem Grund wurden in den letzten 25 Jahren weltweit zahlreiche Tritiumexperimente durchgeführt, zuletzt in Mainz. Sie führen derzeit zu einer Obergrenze für die Ruhemasse des Elektron-Neutrinos von 2,3 eV. Um in den kosmologisch interessanten Bereich unterhalb von 1 eV vorzustoßen, ist ein neues Experiment erforderlich, das über eine hundertmal intensivere Tritiumquelle und eine fünfmal bessere Energieauflösung als die bisherigen Experimente verfügen muss.

KATRIN ist als ultimates Tritium-Zerfallsexperiment ausgelegt, das eine Neutrinomasse bis herunter zu 0,2 eV feststellen soll. Bei dieser Methode werden die Elektronen aus dem Tritium-Betazerfall durch starke Magnetfelder von 3 bis 6 Tesla entlang der magnetischen Feldlinien von der Quelle bis zum Detektor geführt, ohne dass sie ihre Energie verändern. Ihre Energie bestimmt ein Spektrometer, das gegenüber der Quelle auf einem negativen Potential liegt. Mit dieser Methode lässt sich das Spektrum durch Variation der Gegenspannung messen.

Aufbau von KATRIN

Das insgesamt 75 m lange Experiment gliedert sich in vier große funktionale Einheiten: eine hochintensive molekulare Tritiumquelle, die 10^{11} Betazerfälle pro Sekunde liefert, eine Tritium-Pumpstrecke, in der die Moleküle aus der Strahlführung eliminiert werden, ein System aus zwei elektrostatischen Spektrometern zur Energieanalyse sowie einem Detektor zum Zählen der transmittierten Elektronen.



Das elektrostatische Vorspektrometer ist seit 2004 betriebsbereit und dient seither zum Test der Ultrahochvakuum-Techniken und der neuartigen elektromagnetischen Strahlführung.

Die Tritiumquelle besteht aus einem 10 m langen Stahlrohr, in das mittig gasförmiges, molekulares Tritium eingespeist wird. Wesentliche technologische Herausforderungen ergeben sich aus der erforderlichen Temperaturstabilität der Quelle: Bei einer mittleren Temperatur von 27 K dürfen Abweichungen von maximal 30 mK auftreten. Darüber hinaus ist eine Isotopenreinheit von etwa 95% gefordert. Die europaweit einzige Institution, welche die hohen Anforderungen an Tritiuminventar und Reinheit erfüllt, ist das Tritiumlabor Karlsruhe, an dem KATRIN aufgebaut wird.



Mit dem Testexperiment TILO (Test Inner Loop) werden seit Mitte 2005 die Eigenschaften des geschlossenen Tritiumkreislaufs untersucht.

Die aus der Quelle diffundierenden Tritiummoleküle werden zunächst mit Turbomolekularpumpen abgesaugt und in den geschlossenen Kreislauf zurückgeführt. Eine anschließende kryogene Kaltfallenstrecke mit einer Temperatur von 5 K garantiert, dass der nachfolgende Spektrometerbereich von KATRIN tritiumfrei bleibt.

Die Energieanalyse der Elektronen aus dem Betazerfall erfolgt bei KATRIN in zwei Schritten: Zunächst werden in einem kleineren Vorspektrometer alle Elektronen mit Energien unterhalb von 18,4 keV ausgesondert, da sie keine Information über die Neutrinomasse tragen. Das Vorspektrometer ist seit 2004 in Betrieb und hat die neuartigen Ansätze beim Messprinzip von KATRIN erfolgreich verifiziert.

In einem großen hochauflösenden Hauptspektrometer mit einem Durchmesser von 10 m und einer Länge von 24 m wird dann die Energie der Elektronen nahe am Endpunkt präzise bestimmt. Technisch anspruchsvoll ist die Forderung, dass beim Betrieb der Spektromer ein Ultrahochvakuum von besser als 10^{-11} mbar aufrecht erhalten bleibt und die geforderte Stabilität der Gegenspannung von 18,6 kV um weniger als ein Millionstel schwankt. Die durch das Spektrometer transmittierten Elektronen werden schließlich in einem segmentierten, untergrundarmen Silizium-Zähler nachgewiesen.

Ausblick

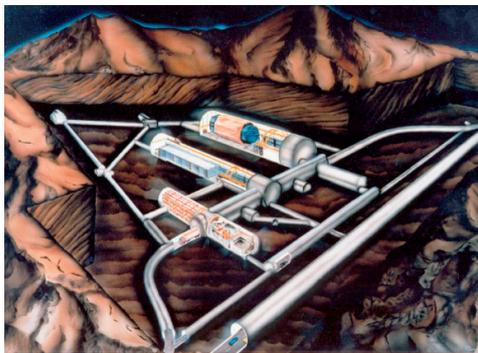
Der Aufbau von KATRIN wird 2009 abgeschlossen sein. Nach Inbetriebnahme der Gesamtanlage wird das Experiment mehrere Jahre das Spektrum von Tritium am Endpunkt abscannen, um die Designsensitivität von 0,2 eV zu erreichen. Im Falle einer sichtbaren spektralen Modifikation am Endpunkt kann KATRIN die Größe der Neutrinomasse mit hoher Präzision feststellen und so den Anteil der Heißen Dunklen Materie im Universum in einer modellunabhängigen Methode bestimmen. Von großem Interesse für die Astroteilchenphysik wird der Vergleich dieser Resultate mit den Ergebnissen von GERDA und den kosmologischen Studien sein. Hier kann die Zukunft große Überraschungen und interessante Erkenntnisse über die Rolle von Neutrinos im Universum bereithalten.

➔ **Deutsche Beteiligungen: Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, Universitäten Mainz, Münster und Bonn, Fachhochschule Fulda**

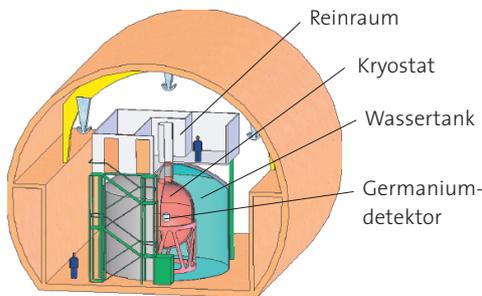
Neben Photonen sind Neutrinos die häufigsten Teilchen im Universum. Dennoch bemerken wir sie nicht, weil sie mit Materie nur schwach wechselwirken. Ihre merkwürdigste Eigenschaft ist jedoch bisher nur ein theoretisches Modell und harret der Entdeckung: Neutrinos könnten ihre eigenen Antiteilchen sein. Diese Eigenschaft würde eine Fülle neuartiger theoretischer Konzepte sinnvoll erscheinen lassen, die unser Verständnis vom Aufbau der Materie und von der Entwicklung des Universums beträchtlich erweitern würde. Mit Hilfe des GERDA-Experiments soll geklärt werden, ob Neutrinos tatsächlich ihre eigenen Antiteilchen sind und welche Ruhemasse sie haben.



GERDA – Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?



Das italienische Gran Sasso-Untergrundlabor mit den drei großen Experimentierhallen.



Schematischer Aufbau von GERDA. Die Germanium-detektoren werden über einen Reinraum in den Flüssigstickstofftank eingeführt. Ein vakuumisolierter Tank mit etwa vier Metern Durchmesser ist von einem Wassertank mit etwa zehn Metern Durchmesser eingeschlossen. Beide zusammen schirmen die Störstrahlung aus der Felswand ab. Der Wassertank und der darin befindliche Tscherenkow-Detektor dient darüber hinaus zum Nachweis von kosmischen Myonen, die Störsignale verursachen können.

Neutrinos verstecken ihre für uns so interessanten Eigenschaften sehr gut. Um dennoch herauszufinden, ob sie ihre eigenen Antiteilchen sind, wird zurzeit das GERDA-Experiment aufgebaut. 1300 Meter tief unter der Erde, gut abgeschirmt gegen störende Myonen aus der Kosmischen Strahlung, wird im italienischen Gran-Sasso-Labor ein seltener radioaktiver Zerfall untersucht, der so genannte **neutrinolose Doppel-Betazerfall**.

Manche radioaktive Atomkerne senden bei ihrem Zerfall ein Elektron und ein Neutrino aus. Dieser „einfache“ Betazerfall ist für ein spezielles Isotop des Germaniums (^{76}Ge) aus Gründen der Energieerhaltung verboten. ^{76}Ge kann jedoch radioaktiv zerfallen, indem es zwei Elektronen und zwei Neutrinos gleichzeitig emittiert – also zwei gleichzeitig stattfindende Betazerfälle. Dieser „doppelte“ Betazerfall ist im Gegensatz zum einfachen Betazerfall für ^{76}Ge energetisch möglich. Allerdings ist dies ein sehr seltener Prozess, so dass große experimentelle Anstrengungen unternommen werden müssen, um ihn zu beobachten. Doch was kann man aus dem Doppel-Betazerfall über die Eigenschaften der Neutrinos lernen?

Wenn das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist, kann der Doppel-Betazerfall auch ohne die Emission von Neutrinos ablaufen. Anschaulich lässt sich dieser Prozess folgendermaßen beschreiben:

Ein Neutrino, das in einem Betazerfall entsteht, wird im zeitgleich zweiten Betazerfall wieder absorbiert. Allerdings ist dies nur möglich, wenn es sein eigenes Antiteilchen ist und eine Masse besitzt. Emittiert werden folglich nur zwei Elektronen, deren Gesamtenergie der freiwerdenden Reaktionsenergie ($Q_{\beta\beta}=2039$ keV) entspricht. Dieser Prozess wird **neutrinoloser Doppel-Betazerfall** genannt. Misst man nun die Energie der beiden Elektronen mit hoher Genauigkeit, so lässt sich der neutrinolose vom neutrinobegleiteten Doppel-Betazerfall unterscheiden. Beobachtet man den neutrinolosen Doppel-Betazerfall, so muss das Neutrino sein eigenes Antiteilchen sein. Mehr noch: Über die Rate des neutrinolosen Doppel-Betazerfalls lässt sich auch eine effektive Neutrinomasse bestimmen.

Hochreines Germanium in doppelter Funktion

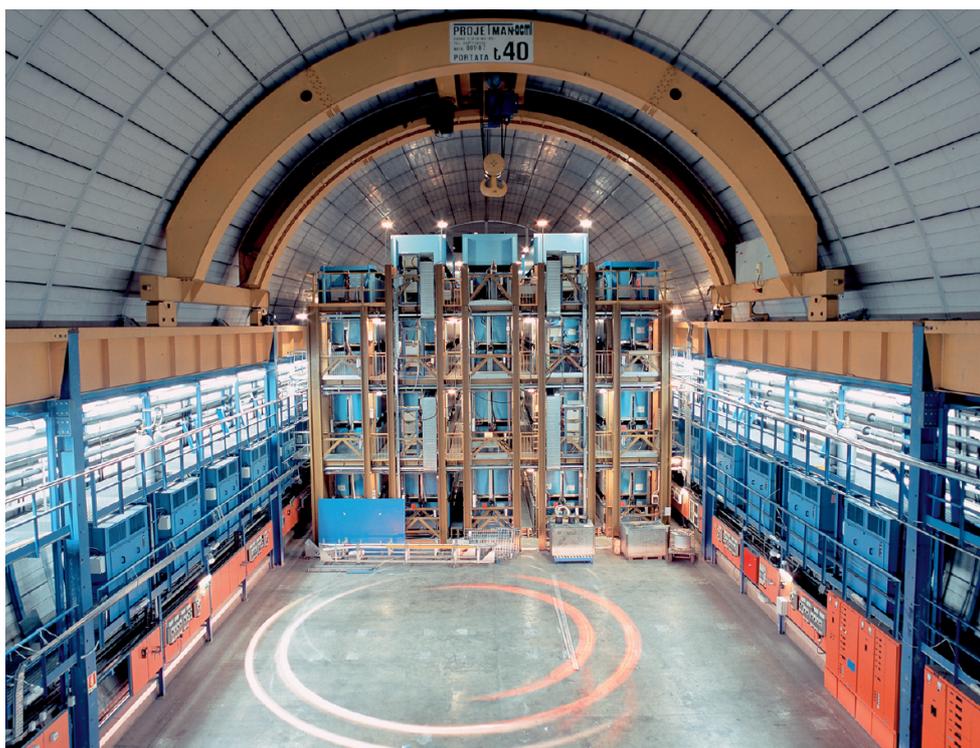
Für den Nachweis des neutrinolosen Doppel-Betazerfalls müssen in GERDA zwei wesentliche experimentelle Probleme gelöst werden: Die Energiemessung der Elektronen muss mit hoher Präzision erfolgen, und radioaktive Störstrahlung muss weitgehend unterdrückt werden. Ungefähr 30 bis 40 Kilogramm ^{76}Ge sind erforderlich, um Halbwertszeiten von einigen 10^{26} Jahren zu beobachten.

Kontakt: Dr. Stefan Schönert · Max-Planck-Institut für Kernphysik
Saupfercheckweg 1 · 69117 Heidelberg · Tel. 06221/516-476
stefan.schoenert@mpi-hd.mpg.de

Das Problem der präzisen Energiemessung lässt sich für ^{76}Ge elegant lösen: Aus Germanium lassen sich Halbleiterdetektoren herstellen, die eine sehr gute Energieauflösung haben. Für GERDA werden solche Detektoren aus angereicherter Germanium hergestellt. Die Halbleiterdetektoren bestehen zu 86% aus dem zu untersuchenden Isotop ^{76}Ge . Die Quelle des Doppel-Betazerfalls, nämlich das Isotop ^{76}Ge , ist somit wesentlicher Bestandteil des Halbleiterdetektors: Quelle und Detektor sind quasi identisch!

len muss. Hierfür werden verflüssigter Stickstoff und hochreines Wasser verwendet. Stickstoff ist eines der reinsten bekannten Materialien überhaupt. In verflüssigter Form ist seine Dichte ausreichend, um die Strahlung von außen abzuschirmen. Darüber hinaus übernimmt er gleichzeitig die notwendige Kühlung der Germaniumdetektoren bei 77 Kelvin. Wasser kann ebenfalls gut gereinigt werden, muss aber, da es weiter außen sitzt, weniger anspruchsvolle Reinheitsanforderungen erfüllen.

Falls keine neutrinolosen Doppel-Betazerfälle während einer Messzeit von etwa drei Jahren mit 30 kg ^{76}Ge (Phase II) beobachtet werden, wäre die Halbwertszeit für den neutrinolosen Doppel-Betazerfall von ^{76}Ge größer als $2 \cdot 10^{26}$ Jahre. Um die Empfindlichkeit des Experiments weiter zu steigern, würde dann eine weitere Phase von GERDA folgen, wobei die Masse der ^{76}Ge -Detektoren auf einige 100 kg vergrößert würde.

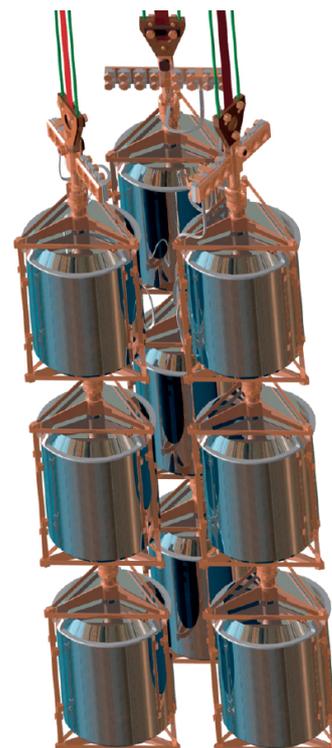


Der Platz in Halle A des Gran-Sasso-Labors an dem das GERDA-Experiment aufgebaut wird. Der Aufbau des Experiments beginnt im Jahr 2006. (Foto: V. Steger)

Die größte experimentelle Herausforderung liegt in der Unterdrückung von Störstrahlung der natürlichen Radioaktivität und der kosmischen Strahlung. Schon die Halterung, in der ein Germaniumdetektor normalerweise eingefasst ist, enthält zu viel Radioaktivität – selbst wenn er aus den reinsten bekannten Materialien hergestellt wird. In GERDA werden die Germaniumdetektoren daher „nackt“ betrieben: Das Material in der direkten Umgebung der Detektoren wird auf ein Minimum von wenigen Gramm reduziert. Diese Detektoren müssen auch gegen die Strahlung der Laborwände abgeschirmt werden, wobei diese Abschirmung ebenfalls allerhöchste Reinheitsanforderungen erfüllen

Ziel ist es, die Ereignisrate, die durch Störstrahlung im Energiebereich um $Q_{\beta\beta} = 2039$ keV verursacht wird, um einen Faktor hundert im Vergleich zu bisherigen Experimenten zu reduzieren. Dies entspräche einer Untergrundrate von 10^{-3} / (kg · keV · Jahr). Aufgrund dieses niedrigen Untergrunds würden schon wenige Ereignisse ausreichen, um den neutrinolosen Doppel-Betazerfall mit hoher Signifikanz nachzuweisen. Betrüge zum Beispiel die Halbwertszeit von ^{76}Ge für den neutrinolosen Doppel-Betazerfall $2,2 \cdot 10^{25}$ Jahre - wie in einem Vorgängerexperiment behauptet - so wären schon in Phase I von GERDA mit 15 kg ^{76}Ge und nur einem Jahr Messzeit ca. sechs Zerfälle untergrundfrei zu beobachten.

Anordnung aus neun „nackten“ Germaniumdetektoren für die erste Phase des Experiments.



👁️ Ausblick

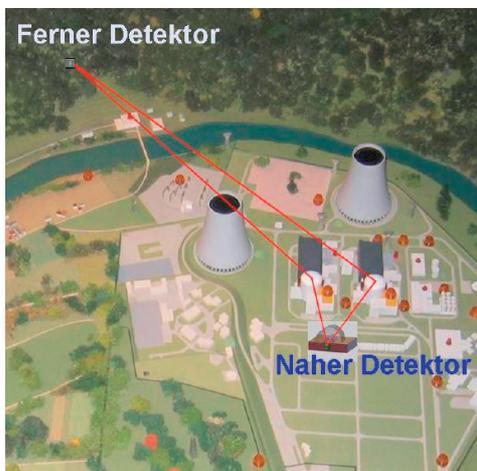
GERDA befindet sich zurzeit im Aufbau. Etwa 18 kg ^{76}Ge liegen bereits in Form von Detektoren vor. Weitere 38 kg existieren als Rohmaterial, das nun zu Detektoren verarbeitet werden muss. Der Kryo-tank für den Stickstoff und der Wassertank werden 2006 gebaut. Messbeginn soll im Jahr 2007 sein. Durch sukzessives Hinzufügen weiterer Germaniumdetektoren lässt sich die Empfindlichkeit Schritt für Schritt steigern.

➔ Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institute für Kernphysik (Heidelberg) und für Physik (München), Universität Tübingen

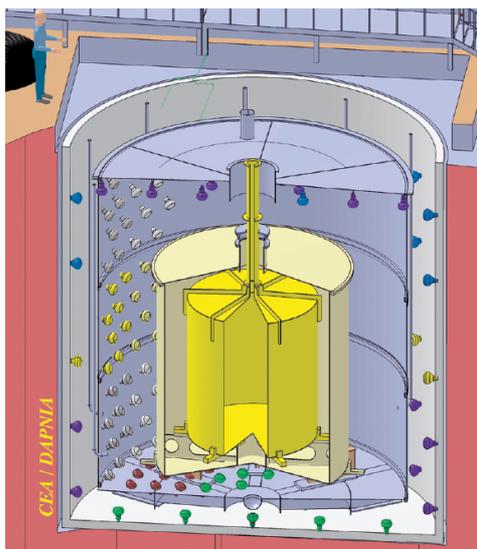
Mit dem Projekt Double Chooz in den französischen Ardennen bereiten Wissenschaftler aus Frankreich, Deutschland, Russland und den USA ein Experiment vor, das unser Wissen über Neutrinooszillationen und die fundamentalen Eigenschaften dieser Teilchen vervollständigen soll. Ein leistungsstarkes Kernkraftwerk dient als intensive Neutrinoquelle, die von zwei Detektoren mit unterschiedlichem Abstand zu den Reaktorblöcken beobachtet wird.



Double Chooz: Oszillationen von Reaktorneutrinos



Lage der beiden Double-Chooz-Detektoren relativ zu den Kernkraftwerken.



Grafik der wichtigsten Elemente eines Detektors von Double Chooz. Im Zentralteil (gelb) befindet sich der Acrylbehälter mit der Szintillatorflüssigkeit, den die Photomultiplier beobachten.

Neutrinoexperimente haben vor allem in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. So ist mittlerweile erwiesen, dass Neutrinos eine Ruhemasse besitzen. Außerdem wissen wir, dass es mindestens drei Neutrinoarten gibt. Besonders wichtig ist, dass diese Teilchen ihre Familienzugehörigkeit wechseln können. Man spricht von Neutrinooszillationen, weil sich die Familienzugehörigkeit bei der Ausbreitung eines Neutrinos periodisch ändert. Für diesen Prozess ist eine weitere Größe wichtig, der so genannte Mischungswinkel. Im Falle von drei Neutrinos gibt es drei Winkel, die den Übergang von einer Sorte zur anderen beschreiben, wobei der Mischungswinkel die maximale Wahrscheinlichkeit für einen solchen Übergang angibt. Double Chooz soll die Suche nach dem dritten, bisher unbekanntem Mischungswinkel fortsetzen und damit die komplette Beschreibung der Neutrinooszillationen zwischen den drei Familien erlauben.

Einfang von Neutrinos aus einem Kernkraftwerk

Für dieses Unterfangen benötigt man intensive Neutrinoquellen. Im Falle von Double Chooz wurde ein Kernkraftwerk mit zwei Reaktoren in Chooz (Frankreich) gewählt, in denen bei radioaktiven Zerfällen Antineutrinos freigesetzt werden. Ein typischer Leistungsreaktor emittiert mehr als 10^{20} Antineutrinos pro Sekunde. Aufgrund ihrer schwachen Wechselwirkung legen diese Teilchen zum Bei-

spiel in Wasser im Mittel etwa 30 Lichtjahre zurück, bis sie zum ersten Mal wechselwirken. Nur aufgrund der großen Anzahl an Neutrinos können diese Teilchen in empfindlichen Detektoren nachgewiesen werden. So erfolgte 1956 die Entdeckung des Neutrinos an einem Kernreaktor in den USA.

Die bisher an Reaktoren durchgeführten Neutrinoexperimente waren in ihrer Aussage begrenzt, weil die Quellstärke und damit der Fluss der emittierten Neutrinos nur mit relativ großer Unsicherheit bestimmt werden konnten. Gleiches galt für die Nachweiseffizienz der eingesetzten Detektoren. Das bisher genaueste Experiment wurde auch in Chooz durchgeführt. In einem Kilometer Abstand von den Reaktoren befand sich ein unterirdisches Labor, in dem von 1995 bis 1998 ein Neutrinodetektor betrieben wurde. Allerdings konnte der Neutrinofluss aus den Reaktoren lediglich aus deren thermischer Leistung bestimmt werden – und das mit deutlichen Unsicherheiten.

Das Konzept von Double Chooz sieht eine Relativmessung mit zwei weitgehend baugleichen Detektoren vor. Einer davon befindet sich in 150 bis 250 Meter Abstand von den beiden Reaktorblöcken des Kraftwerks. Er dient der genauen Vermessung des Antineutrino-Flusses ohne den Einfluss von Oszillationseffekten. Der zweite Detektor steht in etwa einem

Kontakt: Prof. Dr. Lothar Oberauer · Physik Department E 15 · Technische Universität München · James-Franck-Straße · 85748 Garching · Tel. 089/289-12509
lothar.oberauer@ph.tum.de

Kilometer Abstand von den Reaktoren. Dort werden, wenn der dritte Mischungswinkel groß genug ist, Oszillationen über einen bisher nicht beobachteten Oszillationskanal auftreten: die Umwandlung von Elektron-Antineutrinos in die beiden anderen Familien auf einem relativ kurzen Abstand.

Die Längenskala, auf der dieser Effekt auftritt, wird durch die Oszillationen der Neutrinos bestimmt. Diese erkennt man, indem man die Anzahl der nachgewiesenen Elektron-Antineutrinos in beiden Detektoren vergleicht. Zusammen mit den relativen Abständen der Detektoren zum Kraftwerk errechnet sich dann der noch unbekannt dritte Mischungswinkel. Falls innerhalb der Messgenauigkeit kein Effekt beobachtet werden sollte, kann eine verbesserte Obergrenze angegeben werden.

Nachweisprinzip

Für die Messungen macht man sich zunutze, dass Protonen einen äußerst kleinen, aber messbaren Anteil der Antineutrinos einfangen können. Dabei wird das Proton in ein Neutron umgewandelt und ein Positron, das Antiteilchen des Elektrons, freigesetzt. Weil diese Reaktion umgekehrt zum Betazerfall mit Neutrinoemission abläuft, spricht man auch vom inversen Betazerfall. Im Detektor werden dann Neutron und Positron als Signatur für den seltenen Neutrinofang gemessen.

Als Target dienen 10 Tonnen Flüssigszintillator pro Detektor in einem Tank aus durchsichtigem Acrylglas. Sowohl das Neutron als auch das Positron erzeugen einen kurzen Lichtblitz, den 500 Photosensoren registrieren. Hierbei macht man sich zunutze, dass der Blitz des Neutrons etwas später erfolgt als der des Positrons. Dies gilt als sicheres Indiz für einen Neutrinofang. Ein hocheffizienter Nachweis des Neutrons ist der entscheidende Punkt bei dieser Methode. Er basiert auf den Eigenschaften des Elements Gadolinium. Das ist im innersten Teil des Detektors in der Szintillatorflüssigkeit gelöst und fängt Neutronen sehr effizient ein. Bei jeder Absorption entsteht ein Gammastrahlungsblitz, der nachgewiesen wird. Das gemeinsame, aber verzögerte Auftreten von Positron und Neutron erlaubt es, das Neutrinosignal aus dem unerwünschten Untergrund herauszufiltern.

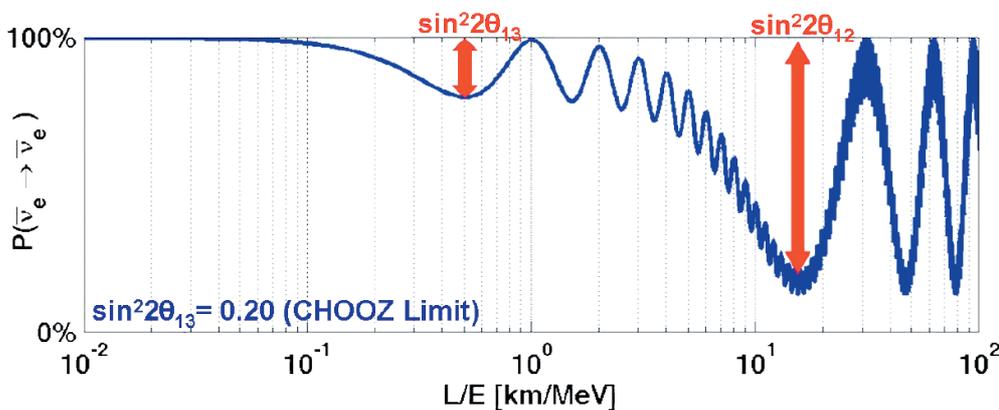
Beide Detektoren werden zudem unterirdisch aufgebaut, um sie gegen die kosmische Strahlung abzuschirmen. Für den fernen Detektor existiert bereits ein Labor, das von etwa 100 Meter Felsstein überdeckt ist. Labor und Abschirmung für den nahen Detektor müssen noch errichtet werden. Trotz der Abschirmung lassen sich aber gerade die besonders störenden Myonen der Höhenstrahlung nicht vollständig stoppen. Deshalb werden die Aufbauten von Veto-Detektoren umgeben. Sie ermöglichen es, von Myonen ausgelöste Signale von den interessierenden Neutrinoereignissen zu trennen.

Ausblick

Der Aufbau der Detektoren soll 2008 abgeschlossen sein. Dann wird Double Chooz mit bisher unerreichter Empfindlichkeit nach dem dritten Mischungswinkel der Neutrinos suchen. Das Potenzial zukünftiger Neutrinoexperimente mit Beschleunigern, welche die Oszillationen eines Neutrinostrahls über eine mehrere hundert Kilometer lange Strecke beobachten sollen, ist besonders von der Größe dieses Winkels abhängig.

Es besteht großes Interesse an der vollständigen Kenntnis des Mechanismus der Oszillationen zwischen allen drei Neutrinofamilien. Die vollständige Erforschung der fundamentalen Eigenschaften dieser Elementarteilchen ist hilfreich zur Beantwortung der Frage, ob Neutrinos für den Überschuss der Materie gegenüber Antimaterie im Universum verantwortlich sind.

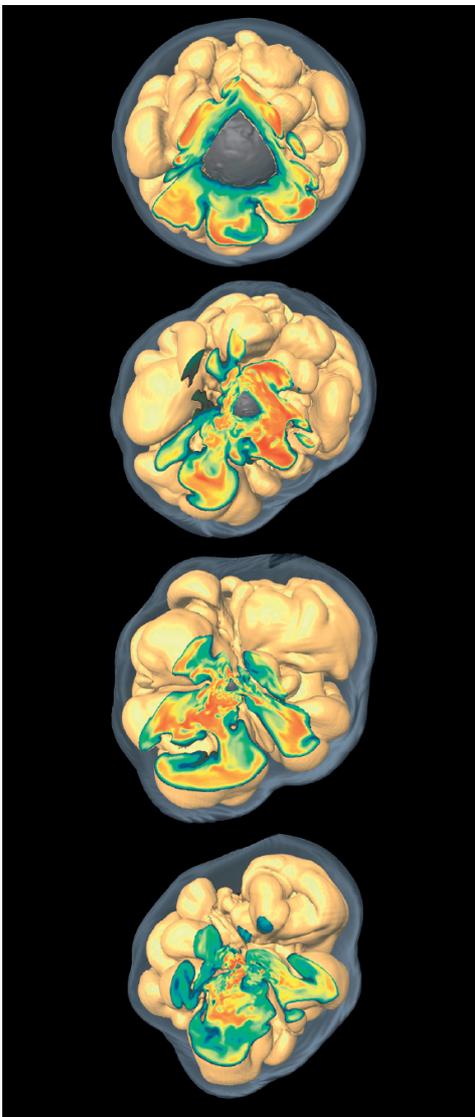
➔ **Deutsche Beteiligungen:** Technische Universität München, Universitäten Tübingen und Hamburg, RWTH Aachen, Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg)



Die Wahrscheinlichkeit, dass ein erzeugtes Elektron-Antineutrino wieder als Elektron-Antineutrino detektiert wird, hängt von der Energie E und dem Abstand L vom Erzeugungsort ab. Die Oszillationsamplituden werden durch die Mischungswinkel gegeben.

Gewaltige Sternexplosionen, so genannte Supernovae, setzen binnen Sekunden so viel Energie frei wie alle Sterne im Weltall zusammen im selben Zeitraum. Den weitaus größten Teil der Energie tragen hierbei Neutrinos und Gravitationswellen davon. Zukünftige Beobachtungen solcher „sterbenden Sterne“ und der mit ihnen verwandten Gamma-Ray Bursts versprechen ungeahnte Einblicke in den Zustand von Materie bei den extremsten Bedingungen seit dem Urknall. Noch sind die Wissenschaftler aber auf Computersimulationen angewiesen, um die Vorgänge im Zentrum von Sternexplosionen zu studieren und die dabei messbaren Signale vorherzusagen.

Supernovae, Hypernovae und verschmelzende Sterne



Dreidimensionale Computersimulation einer Supernova. Die Bilder zeigen die durch Neutrinos verursachte Konvektion um den entstehenden Neutronenstern. Wegen rechtechnischer Grenzen kann die Neutrinophysik in solchen Simulationen derzeit nur näherungsweise behandelt werden.

Supernovae zählen zu den gewaltigsten und hellsten Explosionen im Universum. Sie kündigen von der Geburt von Neutronensternen beim Kollaps von Sternen. Gammastrahlen-Blitze (Gamma-Ray-Bursts, GRBs) sind noch energiereicher. Sie entstehen vermutlich, wenn besonders massereiche Sterne am Ende ihres Lebens zu Schwarzen Löchern zusammenbrechen oder zwei Neutronensterne kollidieren. Neutrinos spielen bei all diesen Vorgängen eine entscheidende Rolle. Die numerische Berechnung von Supernovae und GRBs gehört zu den aufwändigsten Simulationen, die gegenwärtig auf Supercomputern gemacht werden. Sie ermöglichen es, astronomische Beobachtungen zu interpretieren und zukünftige Signale von den Gravitationswellen-Detektoren zu analysieren.

Neutrinoblitz von sterbenden Sternen

Zwei Dutzend Neutrinos, die am 23. Februar 1987 von drei Detektoren eingefangen wurden, kamen von einer Supernova in der Großen Magellanschen Wolke, einer 170 000 Lichtjahre entfernten Nachbargalaxie unserer Milchstraße. Stunden bevor die Stoßwelle der Explosion die auseinanderfliegenden Sterntrümmer hell aufleuchten ließ, war dort das Zentrum des sterbenden Riesensterns zu einem Neutronenstern kollabiert. Rund 10^{58} Neutrinos hatten die Bindungsenergie der Sternleiche mit nur 20 Kilometern Durchmesser und der Dichte von Atomkernmaterie abge-

strahlt. Energie und Dauer des gemessenen Neutrinopulses entsprach den Erwartungen, die Zahl der nachgewiesenen Teilchen war jedoch viel zu gering, um Genaueres über die Vorgänge im Sterninneren zu erfahren.

Die Prozesse, die zur Explosion eines massereichen Sterns führen, sind nach wie vor nicht gut verstanden. Computermodelle legen aber nahe, dass Neutrinos dabei die entscheidende Rolle spielen, denn wenige Prozent der Neutrinos, die der entstehende Neutronenstern in einem intensiven Blitz abstrahlt, werden in der Sternmaterie weiter außen wieder absorbiert. Dadurch verursacht der Neutrinostrom dort heftige Konvektion, bis schließlich eine Stoßwelle mit hoher Geschwindigkeit den Stern zersprengt.

Bislang funktioniert dieser „neutrinogetriebene Mechanismus“ in Computermodellen allerdings nur bei relativ kleinen Sternen, die durch ihre Gravitation relativ schwach gebunden sind. Oberhalb von etwa elfacher Sonnenmasse erscheint diese Neutrinoheizung zu schwach. Numerische Simulationen mit einer ausreichend genauen Beschreibung der Neutrinophysik können gegenwärtig jedoch nur unter vereinfachenden und einschränkenden Annahmen, beispielsweise mit axialer Symmetrie, durchgeführt werden. Dreidimensionale Modelle, die für eine zuverlässige Rekonstruktion notwendig wären, sind mit der Lei-

Kontakt: Dr. Hans-Thomas Janka · Max-Planck-Institut für Astrophysik
Karl-Schwarzschild-Str. 1 · 85741 Garching · Tel. 089/30000-2228
hjanka@mpa-garching.mpg.de

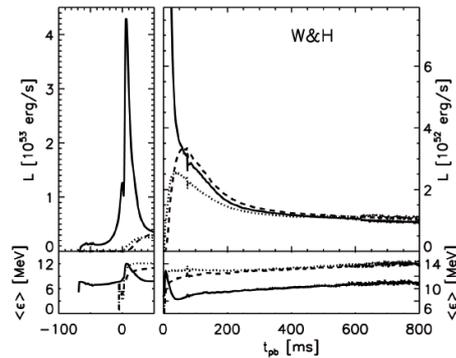
stungsfähigkeit heutiger Supercomputer nicht möglich. Insbesondere beim Neutrino-transport stößt die Modellierung an algorithmische wie rechentechnische Grenzen.

Ein spektral und zeitlich mit guter Auflösung aufgezeichnetes Neutrinosignal einer Supernova könnte der Theorie entscheidende Impulse verleihen. Denn aus den gemessenen Neutrinodaten lässt sich der vom Neutronenstern abgestrahlte Neutrinoblitz rekonstruieren. Dabei müssen Neutrinooszillationen, die auf dem Weg vom Innern der Supernova zum irdischen Detektor das Signal verändern, berücksichtigt werden. Charakteristische Eigenschaften der Neutrinomission würden wichtige Hinweise auf die dynamischen Vorgänge und thermodynamischen Bedingungen im Zentrum der Sternexplosion liefern. In Galaxien wie unserer Milchstraße ereignen sich schätzungsweise zwei bis drei Supernovae pro Jahrhundert.

Hypernovae – Ende im Schwarzen Loch

Sterne mit mehr als etwa 25 Sonnenmassen brechen vermutlich nicht zu einem Neutronenstern, sondern einem Schwarzen Loch zusammen. Auch dabei kann es zu einer gigantischen Explosion kommen. Wenn der Stern zum Zeitpunkt seines Todes schnell rotiert, verschlingt das entstehende Schwarze Loch innerhalb von Sekunden oder Minuten in einem riesigen Strudel mehrere Sonnenmassen stellaren Gases und setzt gewaltige Energien frei. Die dadurch ausgelöste Hypernova ist mehr als zehnmal stärker als eine gewöhnliche Supernova und stößt entlang der Rotationsachse eng

gebündelte Gasströme, so genannte Jets, mit mehr als 99,995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit aus. Beobachtungen liefern Hinweise, dass diese Jets die Quellen von GRBs sind. Hochenergetische Protonen, die in den Jets beschleunigt werden, erzeugen in einer Reihe von Teilchenreaktionen Neutrinos mit Energien im GeV- und TeV-Bereich.



Zeitlicher Verlauf der Leuchtkräfte (oben) und mittleren Energien der Neutrinoemission bei der Explosion eines Sterns mit der zehnfachen Masse der Sonne. Durchgezogene Linien: Elektron-Neutrinos, gestrichelt: zugehörige Antineutrinos, gepunktet: Myon- und Tau-Neutrinos. Beim Zeitpunkt null ist der Neutronenstern entstanden.

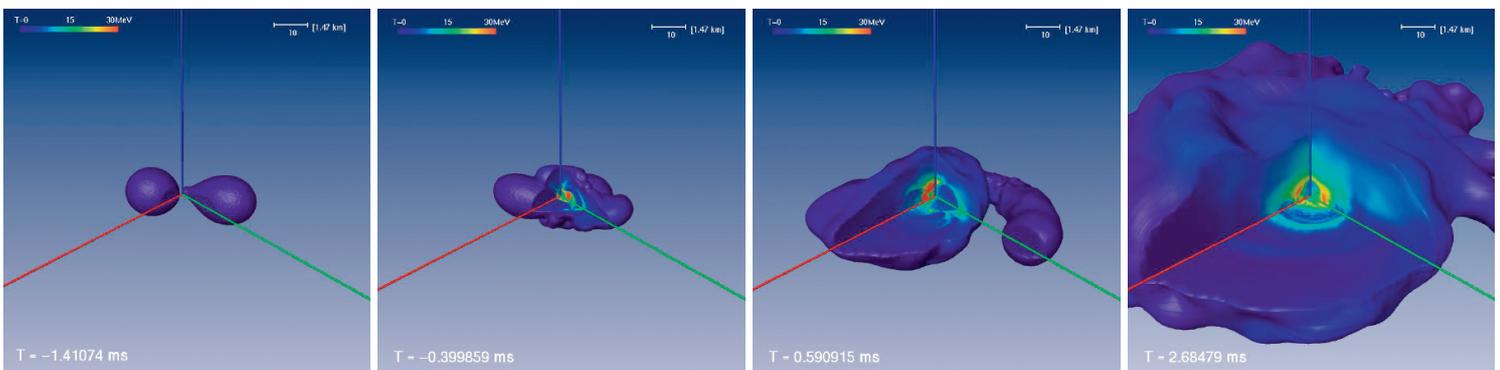
Schwarze Löcher entstehen auch, wenn zwei Neutronensterne oder ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch kollidieren. Die beiden umkreisen sich zuvor in einem engen Doppelsystem und strahlen Gravitationswellen ab. Dadurch verlieren sie Energie und näherten sich einander an, bis sie miteinander verschmolzen. Auch in diesem Fall kann das Schwarze Loch zwei ultrarelativistische Jets aussenden. Jüngst beobachtete kurze Gammablitze, die nicht einmal zwei Sekunden dauerten, besitzen Eigenschaften, wie sie Modelle vorhersagen.

Obwohl Kollisionen kompakter Doppelsterne sehr selten sind – sie ereignen sich ähnlich wie Hypernovae in unserer Milchstraße vermutlich alle hunderttausend Jahre nur einmal – zählen sie zu den interessantesten Quellen für Gravitationswellen. Sie erzeugen derart starke Störungen der Raumzeit, dass die nächste Generation von Detektoren sie bis in Hunderte von Millionen Lichtjahren Entfernung nachweisen wird.

Zusammenfassung und Ausblick

Neutrinos und Gravitationswellen aus explodierenden Sternen versprechen neue Einblicke in bislang verborgene Vorgänge bei der Geburt von Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Bis solche Messungen Realität werden, bleibt den Theoretikern wertvolle Zeit, ihre Modelle und Vorhersagen weiter zu verfeinern. Nicht nur die Beschreibung der Neutrinophysik in dreidimensionalen Computersimulationen muss verbessert werden. Gegenwärtig werden auch große Anstrengungen unternommen, die Effekte der Relativitätstheorie mit höherer Genauigkeit zu berücksichtigen. Ein weiteres Ziel wird sein, die Bedeutung von Magnetfeldern bei Sternexplosionen intensiver zu untersuchen.

➔ Deutsche Arbeitsgruppen, die sich mit Supernovae oder Gamma-Ray Bursts beschäftigen, sind an den Max-Planck-Instituten für Astrophysik (Garching), für Physik (München) und für Gravitationsphysik (Golm) sowie an der International University Bremen



Computersimulation von zwei verschmelzenden Neutronensternen über eine Zeitspanne von vier tausendstel Sekunden. Die Sternmaterie heizt sich bis zu 300 Milliarden Grad auf.

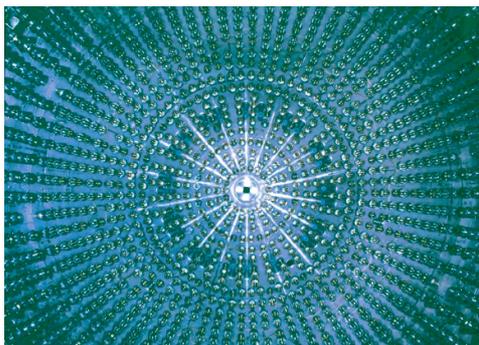
Neutrinos, die uns aus dem Innern der Sonne erreichen, gaben die ersten experimentellen Hinweise darauf, dass diese Teilchen eine Masse besitzen. Mit Borexino wird es erstmals möglich sein, niederenergetische Neutrinos von der Sonne energieaufgelöst und in Echtzeit zu untersuchen. Der Nachweis erfolgt in einer Flüssigkeit, in der die Neutrinos schwache Lichtblitze auslösen. An dem Projekt sind etwa hundert Wissenschaftler aus Deutschland, Italien, Frankreich, Polen, Russland, Ungarn und den USA beteiligt.



Spektroskopie von Sonnenneutrinos mit Borexino und LENA



Modell des Borexino-Experiments. Der Detektor ist in einem Stahltank mit etwa 18 m Durchmesser untergebracht. Der zwiebelartige Aufbau zur Abschirmung gegen externen Untergrund ist deutlich zu erkennen. In dem Gebäude daneben befinden sich die Elektronik zur Datenaufnahme und zur Steuerung des Detektors sowie Reinräume, die beim Aufbau des Detektors genutzt wurden.



Blick ins Innere der Stahlkugel, auf der die 2200 Photomultiplier montiert sind.

Im Zentralbereich der Sonne wird Energie durch das Verschmelzen von Wasserstoff zu Helium freigesetzt. Bei diesen Fusionsprozessen werden auch Elektron-Neutrinos emittiert. Da Neutrinos mit Materie nur sehr schwach wechselwirken, können sie die Sonnenmaterie ungehindert passieren. Auf der Erdoberfläche treffen etwa 60 Milliarden solare Neutrinos pro Quadratmeter und Sekunde auf, dennoch sind sehr große, gegen kosmische Strahlung abgeschirmte Detektoren nötig, um sie nachzuweisen. Typische Nachweisraten liegen bei einigen Ereignissen pro Tag in 100 bis 1000 Tonnen Detektormaterial. Durch das Studium solarer Neutrinos erfahren wir sowohl etwas über den Aufbau der Sonne als auch über die Eigenschaften dieser Teilchen.

Borexino weist Neutrinos mit Hilfe eines Flüssigszintillators nach. Dringen Neutrinos in die Flüssigkeit ein, so können sie in seltenen Fällen an Elektronen gestreut werden. Dabei entstehen Lichtblitze, die von Photosensoren registriert werden. Diese Nachweismethode hat zwei Vorteile: Sie funktioniert für alle Neutrinoarten (Flavors), und sie ist auch für Neutrinos mit geringer Energie empfindlich, da es keine Energieschwelle für die Neutrino-Elektron-Streuung gibt. Nachteilig daran ist, dass man ein Neutrinosignal von Untergründereignissen, die durch radioaktive Zerfälle hervorgerufen werden, nicht unterscheiden kann. Es ist

daher notwendig, den Detektor aus Materialien von höchster Reinheit aufzubauen und diesen sehr gut gegen radioaktive Strahlung von außen abzuschirmen.

Ziel von Borexino ist der erstmalige direkte und energieaufgelöste Nachweis von solaren Neutrinos mit Energien unterhalb von 1 MeV. Diese stammen zum Großteil aus einem Zweig des Fusionsnetzwerkes, an dem ${}^7\text{Be}$ beteiligt ist. Das Besondere an den hierbei entstehenden Neutrinos ist, dass sie monoenergetisch sind (Energie von 863 keV). Sie sind für Modelle des Sonneninneren sehr wichtig. Zur Zeit ist nur der hochenergetische Teil des solaren Neutrinospektrums oberhalb von 5 MeV für Spektroskopie zugänglich (Super-Kamiokande, SNO). Die niederenergetischen Neutrinos ließen sich bisher nur mit Hilfe radiochemischer Experimente (Chlor-Experiment, GALLEX, GNO, SAGE) nachweisen. Hierbei musste die Messung jedoch über mehrere Wochen integriert werden, und eine Energieauflösung war nicht möglich.

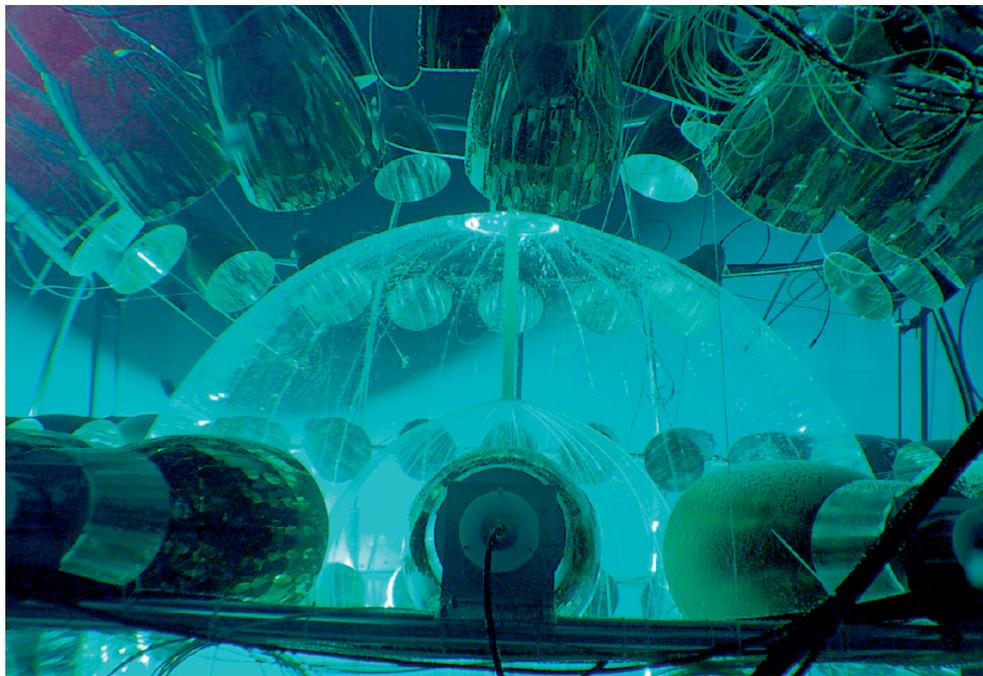
Detektoraufbau nach dem „Zwiebelschalenprinzip“

Das Borexino-Experiment entsteht im Gran-Sasso-Untergrundlabor in den italienischen Abruzzen. Dort verringert das darüber liegende Gebirge den Fluss an kosmischer Strahlung auf etwa ein Millionstel. Der Aufbau des Detektors erfolgt nach dem „Zwiebelschalenprinzip“: Von

Kontakt: Prof. Dr. Lothar Oberauer · Physik Department E 15 · Technische Universität München · James-Franck-Straße · 85748 Garching · Tel. 089/289-12509
lothar.oberauer@ph.tum.de

außen nach innen werden in konzentrischen Schichten immer reinere Materialien zur Abschirmung verwendet, um so im Zentrum des Detektors möglichst wenig störenden Untergrund zu haben.

Das aktive Detektorvolumen besteht aus 300 m³ hochreiner organischer Flüssigkeit (basierend auf einem Mineralölderivat) in einem Nylonballon von 8,5 m Durchmesser. Umgeben ist es von 1000 m³ organischer Abschirmflüssigkeit. Das Szintillationslicht registrieren 2200 Photomultiplier mit Lichtkonzentratoren, die auf der Innenseite einer Stahlkugel mit 14 m Durchmesser montiert sind. Der gesamte Aufbau befindet sich in einem Stahl-



Der Prototypdetektor CTF, bestehend aus vier Tonnen Szintillator in einem Nylonballon mit zwei Metern Durchmesser, umgeben von hundert Photosensoren, die das Szintillationslicht registrieren.

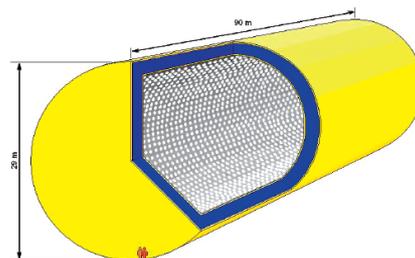
tank mit etwa 18 m Durchmesser, der 2000 m³ Reinstwasser zur Abschirmung gegen natürliche radioaktive Strahlung aus der Umgebung enthält. In diesem Tank sind 208 Photomultiplier angebracht. Sie registrieren Lichtblitze, die von Myonen im Wasser erzeugt werden. Auf diese Weise trennt man Myonen-Ereignisse von Neutrinoereignissen.

Eine große experimentelle Herausforderung besteht darin, die Konzentration an radioaktiven Verunreinigungen in dem Flüssigszintillator auf ein Niveau von etwa 10⁻¹⁶ g/g zu reduzieren. Hierfür werden verschiedene speziell entwickelte Reinigungsmethoden eingesetzt. Dazu gehören Wasserextraktion, Destillation,

Säulenchromatographie und Spülen mit hochreinem Stickstoff. Um die Reinheit der verwendeten Detektormaterialien und die Effizienz der Reinigungsmethoden zu testen, wurde ebenfalls im Gran-Sasso-Untergrundlabor ein Prototypdetektor (Counting Test Facility, CTF) mit etwa vier Tonnen Flüssigszintillator aufgebaut, der von 1000 Tonnen Wasser abgeschirmt wird.

Erste Tests der CTF mit kleinen Szintillatorproben übertrafen die Erwartungen an die Lichtausbeute sogar. Es ist vorgesehen, den Borexino-Detektor zuerst mit hochreinem Wasser zu füllen und verschiedene weitere Tests vorzunehmen.

Gleichzeitig werden Szintillatorproben in der CTF einem endgültigen Test unterworfen, bevor mit dem Austausch des Wassers durch den Szintillator begonnen wird. Bis Anfang 2007 soll die Datennahme beginnen.



Schematische Darstellung des geplanten LENA-Detektors.

👁️ Ausblick – auf Borexino folgt LENA

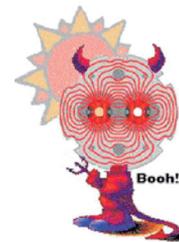
Für die Zukunft ist ein sehr viel größerer Detektor geplant, der nach dem gleichen Prinzip wie Borexino arbeiten soll. LENA (Low Energy Neutrino Astronomy) soll aus etwa 50 000 Tonnen Flüssigszintillator bestehen, der von etwa 12 000 Photosensoren umgeben ist. Mit einem solchen Detektor kann man sehr effektiv Neutrinos und Antineutrinos aus verschiedenen Quellen nachweisen. Mit LENA wird es möglich sein, das Spektrum der niederenergetischen solaren Neutrinos sehr präzise zu bestimmen und darüber hinaus Neutrinos von Supernovae in unserer Galaxis mit großer Teilchenstatistik zu registrieren. Auch Neutrinos sehr weit entfernter Supernovae (bis zu einer Rotverschiebung von etwa $z = 1$) könnten zum ersten Mal nachgewiesen werden. Sie würden Rückschlüsse auf die Phase der Sternentstehung im frühen Universum erlauben. Je nach Modell würde man etwa 50 Ereignisse dieser Art während einer Messperiode von zehn Jahren erwarten.

Mit LENA kann man auch nach dem Protonzerfall suchen, der von verschiedenen supersymmetrischen Theorien (SUSY) vorhergesagt wird. Entspricht die Zerfallsrate der heutigen Obergrenze für diesen Zerfall, so erwartet man in LENA etwa vier Ereignisse pro Jahr. Bei Nichtbeobachtung und einer Messzeit von zehn Jahren könnte man eine Mindestlebensdauer des Protons von $4 \cdot 10^{34}$ Jahren angeben, was in dem Bereich liegt, der von supersymmetrischen Modellen vorhergesagt wird.

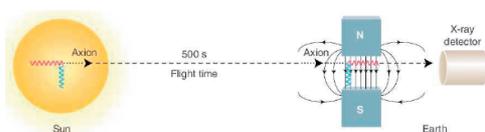
Möglich wäre auch der Nachweis von Neutrinos aus dem Zerfall von Uran und Thorium in der Erdkruste. Das würde Hinweise auf die Verteilung dieser Elemente im Erdinneren liefern und wäre ein wichtiger Test für geologische Modelle. Als mögliche Standorte für LENA werden ein Bergwerk in Finnland und eine Stelle in 4000 Meter Tiefe im Meer vor der griechischen Küste bei Pylos studiert.

➔ **Deutsche Beteiligungen: Technische Universität München, Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg)**

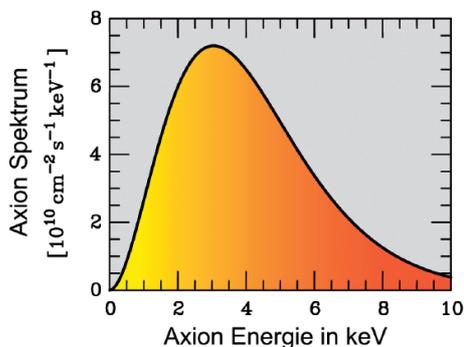
Seit rund 25 Jahren suchen Physiker nach einem hypothetischen Teilchen – dem Axion. Einerseits könnte es als Relikt des Urknalls einen Teil der bisher nicht identifizierten Dunklen Materie erklären, andererseits würde es ein fundamentales Problem des Standardmodells der Elementarteilchenphysik lösen. Das Experiment CAST am CERN sucht nach Axionen, die im Inneren der Sonne entstehen würden.



CAST – Axionen aus dem Inneren der Sonne



Axionen aus dem Inneren der Sonne erreichen die Erde nach etwa acht Minuten. Dort können sich die Teilchen in einem sehr starken Magnetfeld in Röntgenphotonen umwandeln und nachgewiesen werden.



Erwarteter Axionenfluss von der Sonne. Die Energie solarer Axionen entspricht der Energie der Photonen im Inneren der Sonne (einige keV), aus denen die Axionen entstanden sein müssten, wo Temperaturen von rund 15 Millionen Kelvin herrschen. Photonen mit Energien um einige keV werden als Röntgenstrahlung bezeichnet.

Die Idee des Axions geht auf ein grundlegendes Problem der Teilchenphysik zurück: die Erhaltung der „CP-Symmetrie“ in der Quantenchromodynamik (QCD). Diese Theorie beschreibt die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und lässt eigentlich den Bruch des fundamentalen CP-Symmetrieprinzips erwarten. Es besagt, dass die Naturgesetze unverändert bleiben, wenn in Experimenten eine Raumspiegelung (Paritätsoperation P) und eine Änderung der elektrischen Ladung („Charge Conjugation“ C, also die Überführung eines Teilchens in sein Antiteilchen) vorgenommen wird. Die Verletzung der CP-Symmetrie wurde zwar beobachtet, aber nicht im Zusammenhang mit der QCD. Dieser eklatante Widerspruch zwischen Theorie und Experiment ließe sich durch die Existenz eines neuen Elementarteilchens lösen, des Axions, das 1978 postuliert wurde.

Ähnlich den Neutrinos wären Axionen extrem schwach wechselwirkende, elektrisch neutrale Teilchen mit einer Lebensdauer von bis zu 10^{25} Sekunden. In Anbetracht des Alters des Universums von 13,7 Milliarden Jahren (entsprechend $4,3 \cdot 10^{17}$ Sekunden) wären Axionen damit quasi stabile Teilchen, die nicht zerfallen können. Diese Eigenschaften erschweren ihren experimentellen Nachweis.

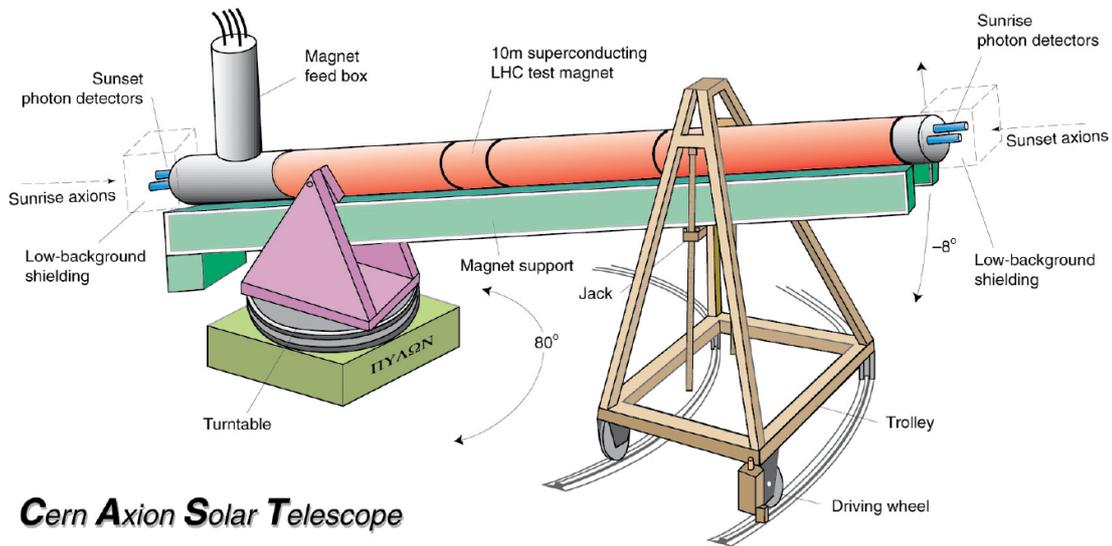
Es gab bereits viele Versuche, Axionen zu entdecken. Nullresultate zusammen mit kosmologischen und astrophysikalischen Beobachtungen schränken die möglichen Parameterbereiche ein. Heute ist bekannt, dass Axionen eine Masse von weniger als ein Elektronenvolt haben müssen – sofern sie überhaupt existieren.

Verwandlung des Axions in Röntgenstrahlung

Neue technische Entwicklungen haben es ermöglicht, die Empfindlichkeit zum Nachweis von Axionen so weit zu erhöhen, dass experimentell in bislang verschlossene Parameterbereiche vorgegriffen werden kann. Das CERN Axion Solar Telescope, kurz CAST, ist ein solches Experiment der neuesten Generation. CAST soll speziell nach Axionen suchen, die im Inneren der Sonne entstehen würden.

Axionen würden bei der Wechselwirkung von Photonen mit dem elektromagnetischen Feld geladener Teilchen im heißen Kern der Sonne entstehen. Anschließend würden diese Teilchen die Sonne ungehindert verlassen. Auf der Erde ließen sie sich dann mit einer trickreichen Anordnung auf folgende Weise nachweisen. Wenn ein Axion in ein starkes Magnetfeld gerät, kann es sich in ein Photon umwandeln. Die Energie bzw. Wellenlänge des neuen Photons hänge dabei von der Energie des ehemaligen Axions ab.

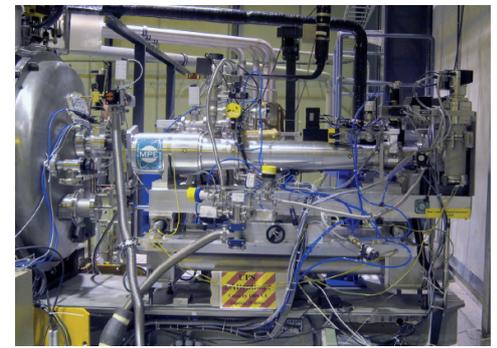
Kontakt: Dr. Markus Kuster · Technische Universität Darmstadt · Institut für Kernphysik · 64289 Darmstadt · Tel. 06151/16-2321 · markus.kuster@cern.ch



Cern Axion Solar Telescope



Oben: Der Aufbau des „Axionen-Sonnenteleskops“. Unten: Der supraleitende Magnet von CAST (blaue Röhre), in dem sich Axionen in Röntgenstrahlung umwandeln sollen. Rechts erkennbar das Helium-Kühlsystem, das den Magneten auf 2 Kelvin abkühlt.



Das Röntgenteleskop von CAST. Die Spiegeloptik befindet sich links in der konischen Röhre, an deren rechten Ende der CCD-Detektor angebaut ist.

Bei CAST wird davon ausgegangen, dass bei dieser Umwandlung ein Röntgenphoton entsteht. Die Empfindlichkeit des Experiments hängt im Wesentlichen von der Länge und der Stärke des verwendeten Magnetfeldes ab. Bei CAST nutzen die Physiker ein Bauelement, das als Prototyp für die Ablenkmagnete des Large Hadron Colliders (LHC) entwickelt wurde, dem bisher größten Teilchenbeschleuniger, der 2007 am CERN in Genf in Betrieb gehen soll. Der CAST-Magnet ist über 9 m lang, wobei eine supraleitende Spule ein sehr starkes Magnetfeld von 9 Tesla erzeugt. Der Magnet ist beweglich montiert, so dass er für drei Stunden am Tag wie ein Fernrohr der Sonne am Himmel folgen kann. Während der restlichen Zeit zeichnen die Nachweissysteme Hintergrunddaten auf. An seinen beiden Enden befinden sich hochempfindliche Detektoren. Sie sollen jene Röntgenstrahlung nachweisen, die bei der Umwandlung von Axionen entsteht.

Das CAST Detektorsystem mit der höchsten Sensitivität wurde in Deutschland entwickelt und ist ein Röntgenteleskop, bestehend aus einer Spiegeloptik und einem abbildenden pn-CCD zum Nachweis der Röntgenphotonen. Beide Komponenten wurden ursprünglich für Weltraum-Röntgenteleskope vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik und vom gemeinsamen Halbleiterlabor der Max-Planck-Institute für Physik und extraterrestrische Physik gebaut und anschließend für ihren Einsatz bei CAST optimiert.

👁 Erste Ergebnisse und Ausblick

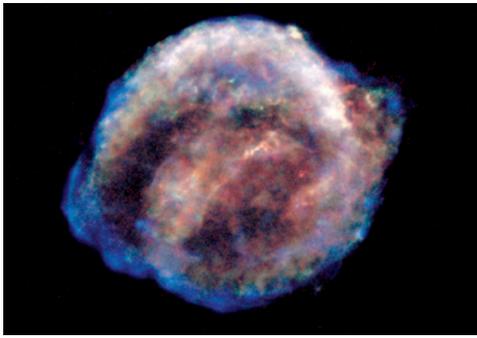
Das System ist seit drei Jahren in Betrieb und lieferte in einer ersten Messphase von 2002 bis 2004 hochwertige Daten. Ein Signal, das auf die Existenz von Axionen hindeutet, konnte bisher nicht gemessen werden. Allerdings ist es den Physikern von CAST bereits damit möglich, den Parameterbereich, in dem Axio-

nen existieren können, stärker als bisher einzuschränken. So konnte der Parameter, der die Stärke der Wechselwirkung von Axionen mit einer Masse von weniger als 0,02 eV mit gewöhnlicher Materie beschreibt, um einen Faktor 5 gegenüber früheren Experimenten verbessert werden. Die Datennahme mit einem verbesserten System hat begonnen. Ein Nachweis des Axions mit CAST wäre ein sensationeller Erfolg der theoretischen und experimentellen Teilchenphysik.

➔ **Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institute für extraterrestrische Physik (Garching) und für Physik (München), Technische Universität Darmstadt, Universitäten Frankfurt und Freiburg**

Im Urknall entstanden nur die leichten Elemente Wasserstoff und Helium sowie in geringen Mengen Lithium, Beryllium und Bor. Alle schwereren Stoffe wurden erst danach von Sternen produziert. Die nukleare Astrophysik befasst sich mit den hierfür verantwortlichen kernphysikalischen Prozessen. In Deutschland arbeiten mehrere experimentelle und theoretische Gruppen an diesen Fragestellungen.

Nukleare Astrophysik: Elementsynthese im Universum



Supernovae produzieren in großen Mengen schwere Elemente. Hier sieht man die Röntgenaufnahme des Überrestes einer solchen Sternexplosion, die nach Johannes Kepler benannt ist. Er sah die Supernova am 9. Oktober 1604 aufleuchten (Foto: NASA/Harvard Univ.).

Kernphysikalische Prozesse spielen eine entscheidende Rolle in der Evolution des Universums. So spiegeln sich Kernstruktureffekte und die Dynamik von Kernreaktionen direkt in den verschiedenen Entwicklungsstufen von Sternen, in dem Verlauf von Sternexplosionen und in der Häufigkeitsverteilung der Elemente im Universum wider. Die nukleare Astrophysik befasst sich heute mit einer Reihe von Schlüsselfragen. Dazu zählt die Entstehung der chemischen Elemente, die Physik stellarer Explosionen, die Kern- und Mischungsprozesse im Innern der Sterne und das Verständnis von kompakten Objekten wie Weißen Zwergen und Neutronensternen. Auch thermonukleare Explosionen auf den Oberflächen dieser Objekte, die sich als Novae oder Röntgenausbrüche bemerkbar machen, sind von zentraler Bedeutung für die moderne Astrophysik.

ren mit unterschiedlichen Methoden, Kernreaktions-Wirkungsquerschnitte für die relevanten Energien zu bestimmen. Darüber hinaus wurden mikroskopische Modelle für die Beschreibung der astrophysikalisch wichtigen Kernreaktionen entwickelt.

Massereiche Sterne durchlaufen nach dem Wasserstoff- und Heliumbrennen eine Sequenz von weiteren Brennphasen, in denen sie Kohlenstoff, Neon, Sauerstoff und schließlich Silizium verbrennen. Diese Fusion stoppt mit der Produktion von Eisen. Dann kollabiert das Sternzentrum, und es entsteht eine Supernova vom Typ II. Hierbei stößt der Stern seine äußere Hülle ab und schleudert die Nuklide, die während der verschiedenen hydrostatischen Brennphasen produziert worden sind, ins Weltall. Die Dynamik des Kollapses wird weitgehend durch die Elektroneneinfangrate an Kernen bestimmt. Ihre Messung und theoretische Bestimmung gehört heute zu den vorrangigen Aufgaben der nuklearen Astrophysik.

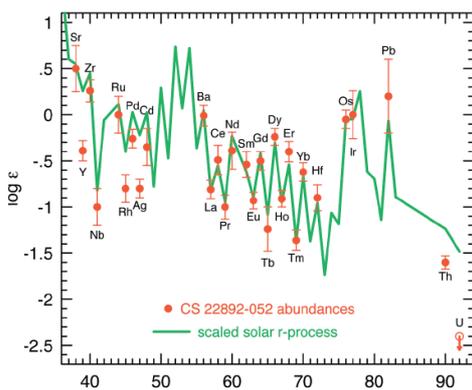
Sternentwicklung und Supernovae

Sterne wie unsere Sonne gewinnen Energie, indem sie Wasserstoff zu Helium fusionieren. In etwa sechs Milliarden Jahren wird sich unser Tagesgestirn zu einem Roten Riesen aufblähen und Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff verbrennen. Um die Entwicklung von Sternen in ihren verschiedenen Entwicklungsphasen zu modellieren, ist es notwendig, die Wirkungsquerschnitte der Kernreaktionen bei den im Sterninneren relevanten Energien zu kennen. Auf diesem Gebiet gelang es in den letzten Jah-

Nukleosynthese im s-, r- und p-Prozess

Alle Elemente, die schwerer als Eisen sind, entstehen durch den sukzessiven Einfang von Neutronen und anschließenden Betazerfällen. Hierbei unterscheidet man zwei Reaktionspfade: s- und r-Prozess. Der s-Prozess (Slow Neutron Capture Process) läuft in Umgebungen mit relativ geringen Neutronendichten ab, bei-

Neutron-Capture Abundances in CS 22892-052



Alte Sterne im Halo der Milchstraße zeigen eine Häufigkeitsverteilung der r-Prozess-Elemente zwischen Barium und Blei, die der solaren Verteilung (grün) weitgehend entspricht. Dies gilt allerdings nicht für die leichteren Elemente. Um diese Abweichung zu klären, müssen die Eigenschaften der Kerne auf dem r-Prozess-Pfad genauer untersucht werden.

Kontakt: Prof. Dr. Karlheinz Langanke · Gesellschaft für Schwerionenforschung
64291 Darmstadt · Tel. 06159/71-2747. k.langanke@gsi.de

spielsweise in Roten Riesen. Dort sind die Beta-Halbwertszeiten kürzer als die Neutroneneinfangzeiten. Im Prinzip lässt die Beobachtung der hierbei entstehenden relativen Elementhäufigkeiten Schlüsse auf die Eigenschaften der astrophysikalischen Umgebung (Temperatur, Neutronendichte, konvektives Mischen) zu. Solche Analysen scheitern aber oft an unzureichend bekannten experimentellen Wirkungsquerschnitten für den Neutroneneinfang oder an der Unkenntnis von Halbwertszeiten angeregter Kernzustände. Erst in jüngerer Vergangenheit gelang es, viele der wichtigen Neutroneneinfangraten mit ausreichender Genauigkeit zu messen.

Es gibt noch einen dritten Prozesspfad, den p-Prozess. In ihm entstehen die protonenreichen Kerne zwischen Selen und Quecksilber. Dieser Prozess ereignet sich in Supernovae Typ II, wenn energiereiche Gammaquanten schwere Kerne aus dem s- und r-Prozess aufbrechen. Das Prozessnetzwerk ist äußerst kompliziert und umfasst etwa 2000 Kerne und mehr als 20 000 Reaktionen. Wegen dieser großen Zahl müssen die notwendigen Reaktionsraten theoretisch, beispielsweise im Rahmen eines statischen Modells, abgeschätzt werden. Deshalb ist es von größter Bedeutung, diese Reaktionsraten durch experimentelle Daten von Schlüsselreaktionen auf eine solide Basis

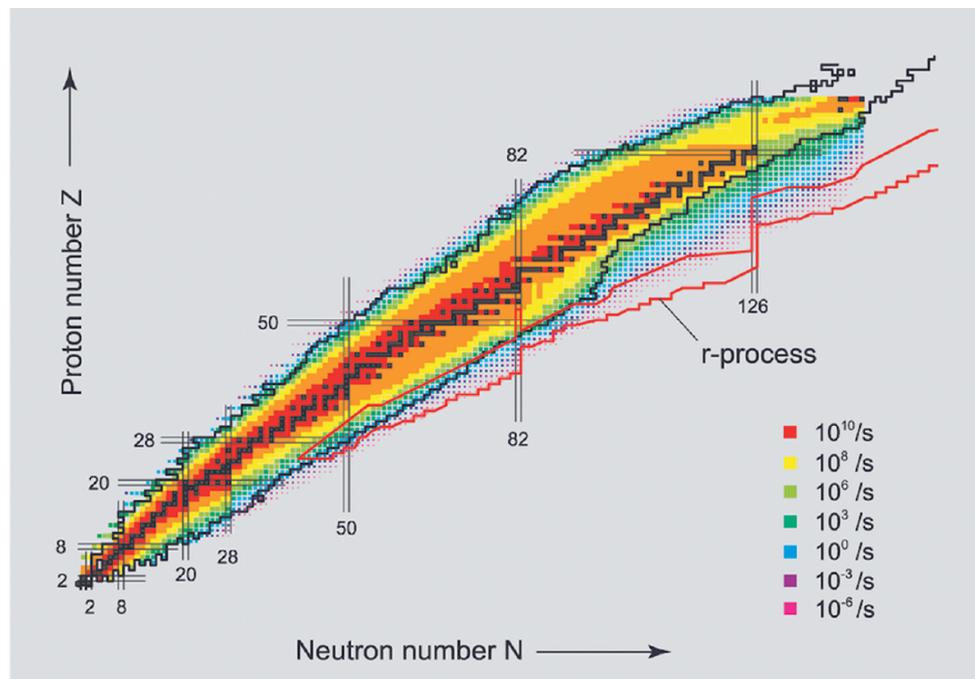
Arbeiten zu Neutronensternen und dichter Materie führen verschiedene Gruppen durch.

Ein weiteres aktuelles Gebiet ist das explosive Wasserstoffbrennen auf der Oberfläche von kompakten Objekten. Es wird ausgelöst durch den Massenfluss eines nahen Begleiters auf den kompakten Stern. Ist dies ein Weißer Zwerg, so stößt dieser wiederholt seine äußere Schale ab (Nova), bei einem Neutronenstern kommt es zu wiederholtem Röntgenausbruch (X Ray Burst). Die Dynamik dieser explosiven Ereignisse wird durch teilweise selbstverstärkende Kernreaktionen und Reaktionsketten (Thermonuclear Run Away) bestimmt. Um diese zu modellieren ist die Kenntnis von Massen, Halbwertszeiten und insbesondere von Reaktionswirkungsquerschnitten von protonenreichen Kernen bis an die Grenze der Stabilität notwendig.

👁️ Ausblick

Zukünftig wird es mit der Anlage FAIR an der GSI in Darmstadt möglich sein, mit vielen astrophysikalisch wichtigen, kurzlebigen Kernen zu experimentieren und deren Eigenschaften zu bestimmen. Diese weltweit einzigartigen Möglichkeiten werden auch helfen, Kernmodelle zu entwickeln und zu testen. Sie sind nötig, um vorherzusagen, wie Kernprozesse unter den in astrophysikalischen Objekten häufig anzutreffenden extremen Bedingungen ablaufen. Auch die Fortsetzung der erfolgreichen Arbeit an anderen Forschungseinrichtungen ist unabdingbar. So müssen Schlüsselreaktionen des hydrostatischen Brennens mit größerer Genauigkeit gemessen werden. Hierfür benötigt man Niederenergie-Beschleuniger mit hoher Strahlintensität und -güte. Hierzu können Präzisionsexperimente mit Elektronen und Photonen am SDalinac an der TU Darmstadt indirekt beitragen, die Reaktionen des p-Prozesses besser zu verstehen. Diese Entwicklungen müssen von theoretischen Arbeiten begleitet werden.

➔ **Deutsche Beteiligungen:** GSI Darmstadt, Forschungszentrum Rossendorf, Forschungszentrum Karlsruhe, Universitäten Bochum, Frankfurt, Gießen, Mainz, Rostock, TU Darmstadt.



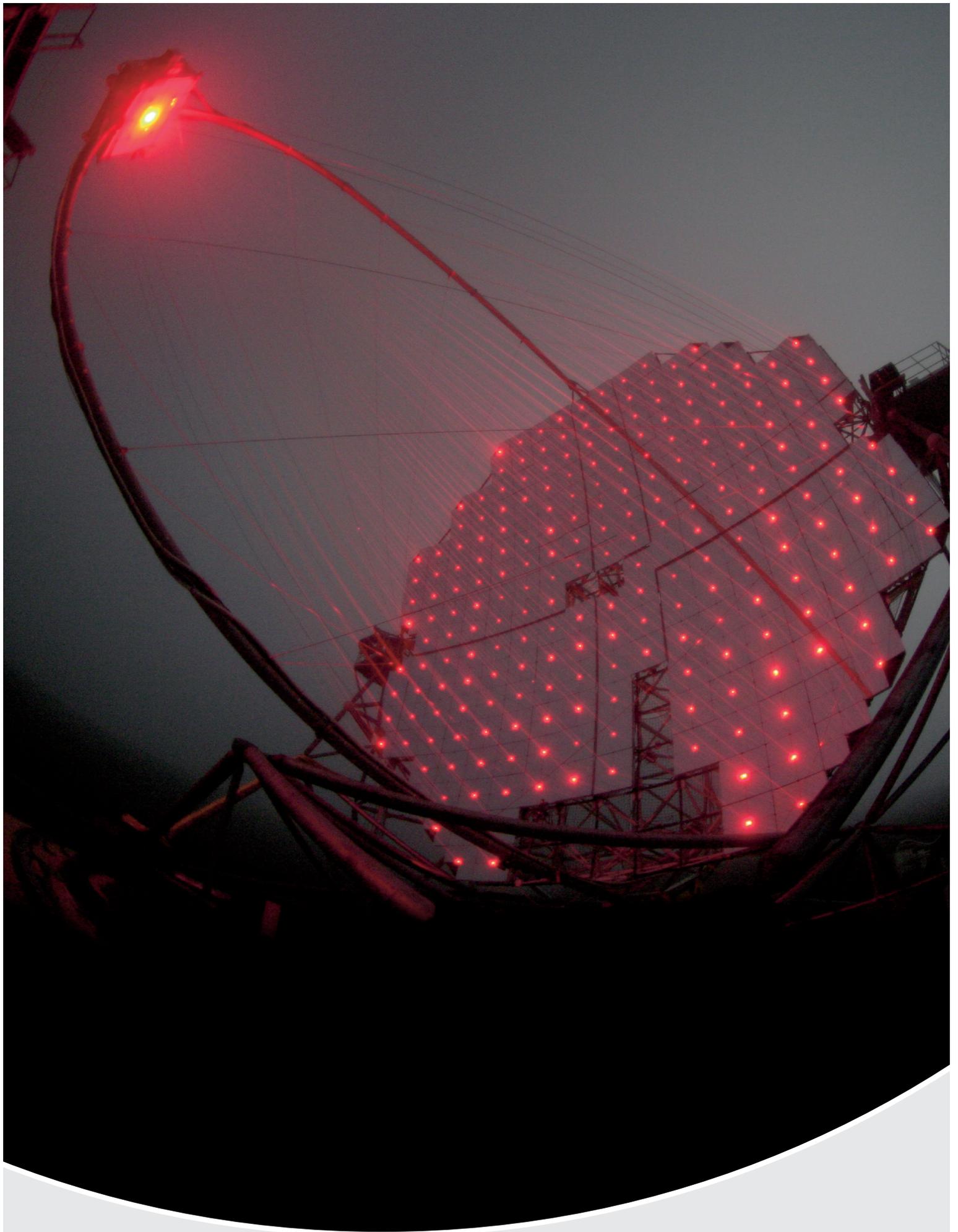
Nuklidkarte mit den vollständig stabilen Kernen (schwarze Symbole) und den magischen Nukleonenzahlen. Die schwarze Grenzlinie markiert diejenigen Kerne, deren Existenz experimentell nachgewiesen worden ist. Die Farbskala zeigt, welche Produktionsrate FAIR erreichen soll.

Der zweite Reaktionspfad, der r-Prozess (Rapid Neutron Capture Process), läuft in Bereichen mit extremer Neutronendichte, wie in Supernovae Typ II, ab. Der Reaktionspfad läuft hierbei durch sehr neutronenreiche Kerne, von denen viele kernphysikalische Eigenschaften experimentell nicht bekannt sind. In letzter Zeit ist es zumindest gelungen, die Halbwertszeit einiger wichtiger r-Prozesskerne in der Massengegend um 130 zu messen und die Massen relevanter Kerne erstmals zu bestimmen.

zu stellen. Mit Hilfe von Beschleunigern ist es bereits gelungen, wichtige Wirkungsquerschnitte und Eigenschaften von zumeist stabilen Kernen zu messen.

Neutronensterne und Weiße Zwerge

Die nukleare Astrophysik befasst sich auch mit dem Aufbau von Neutronensternen. Das sind kompakte Sternreste mit einem Radius von etwa 10 km, in dem rund eine Sonnenmasse vereint ist. Der Aufbau dieser exotischen Himmelskörper ist noch ziemlich unbekannt. Das betrifft insbesondere den Zentralbereich. Denkbar ist dort eine neuartige Form von Quarkmaterie. Theoretische

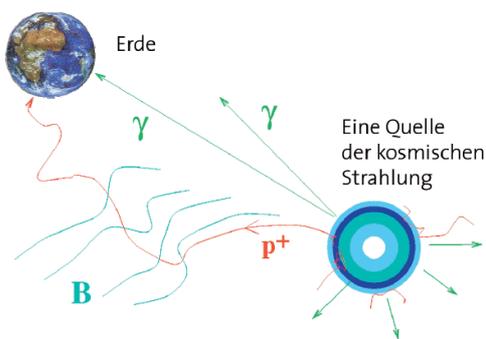


KOSMISCHE STRAHLUNG

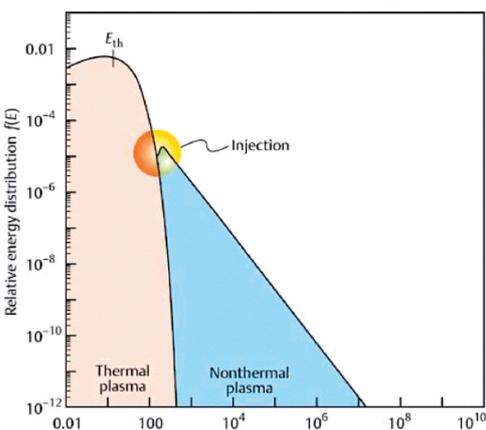
- ☞ **Kosmische Strahlung:**
Das nichtthermische Universum
- ☞ **Das Pierre-Auger-Observatorium:**
Teilchensuche in der argentinischen Pampa
- ☞ **KASCADE-Grande:**
Luftschauer über Karlsruhe
- ☞ **LOPES** „sieht“ Radioblitze
kosmischer Strahlungsteilchen
- ☞ **AMS** sucht Antimaterie und Dunkle Materie
- ☞ **Das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)**
zeigt die Galaxis in einem neuen Licht
- ☞ **MAGIC:** das Gammateleskop neuer Technologie
- ☞ **GLAST:** das Weltraumobservatorium
für die Gammaastronomie
- ☞ **Baikal-NT200, AMANDA und IceCube:**
Neutrinoastronomie in Wasser und Eis
- ☞ **ANTARES und KM₃NeT:**
Tiefsee-Neutrinoobservatorien im Mittelmeer
- ☞ **Akustische Neutrinosuche:**
Horchposten für hochenergetische Neutrinos

Der Hauptanteil der kosmischen Strahlung besteht aus geladenen, hochrelativistischen Teilchen. Es werden derzeit große Anstrengungen unternommen, die Beschleunigung in den Quellen und die anschließende Ausbreitung im interstellaren Medium theoretisch zu beschreiben. Wechselwirkungen mit dem ionisierten thermischen Gas und mit Magnetfeldern spielen hierbei eine entscheidende Rolle. An diesen Fragestellungen arbeiten Gruppen an mehreren deutschen Universitäten und Forschungsinstituten.

Kosmische Strahlung: Das nichtthermische Universum



Geladene Teilchen p^+ der kosmischen Strahlung folgen irregulären Bahnen im interstellaren Magnetfeld B , bevor sie die Erde erreichen. Deshalb zeigt ihre Ankunftsrichtung nicht zurück auf die Quelle.



Der Injektionsprozess. Zahl der Teilchen $f(E)$ mit der Energie E pro Energieintervall als Funktion dieser Energie in einem kosmischen Beschleuniger. Das nichtthermische Plasma (die kosmische Strahlung) wird bei Energien in die Stoßfront injiziert, die ein Mehrfaches größer sind als die mittlere thermische Energie E_{th} des thermischen Plasmas (dem Gas). Es wird dann zu höheren Energien beschleunigt, wobei die Verteilung einem Potenzgesetz folgt.

Ein entscheidendes Merkmal der kosmischen Strahlung ist ihre nichtthermische Natur. Was bedeutet das? Der größte Teil der Materie im Weltall befindet sich im thermischen Gleichgewicht. Das bedeutet, dass die Teilchen beispielsweise in einem Gas so häufig miteinander zusammenstoßen, dass sich ihre kinetischen Energien eng um eine mittlere Energie gruppieren, die der Temperatur dieses Systems entspricht. In einem stark verdünnten Gas können aber andere Einflüsse, wie die Wechselwirkung von elektrisch geladenen Ionen mit Magnetfeldern, die Energieverteilung des Gases dominieren. Ein Medium mit einer solchen nichtthermischen Energieverteilung enthält dann viel mehr energiereiche Teilchen als in der thermischen Verteilung. Die Physik nichtthermischer Wechselwirkungen auf die Teilchen der kosmischen Strahlung anzuwenden ist Voraussetzung, um deren Quellen und Ausbreitung zu verstehen.

Dass die kosmische Strahlung nichtthermischer Natur ist, zeigt sich an der Energieverteilung der Teilchen. Sie folgt einem Potenzgesetz der Form E^{-n} . Bis zu Energien von etwa 10^{15} eV beträgt der Exponent $n=2,7$; oberhalb davon liegt er etwa bei $n=3$. Den Übergangsbereich im Spektrum bezeichnet man als Knie.

Da diese Teilchen um die Magnetfeldlinien der Quellen auf schraubenartigen

Bahnen herumlaufen (gyrieren) und mit Atomen oder Lichtquanten zusammenstoßen, senden sie Radio-, Röntgen- und Gammastrahlung sowie hochenergetische Neutrinos aus. Beobachtungen in diesen Bereichen ermöglichen es daher, die Quellen der kosmischen Strahlung aufzufinden. Kosmische Strahlungsteilchen mit Energien unterhalb von etwa 10^{20} eV werden in den interstellaren Magnetfeldern stark abgelenkt, so dass ihr Ursprung nicht mehr erkennbar ist. Das ermöglicht eine vereinfachte Beschreibung, in der man den Teilchentransport mit der Hydrodynamik des ionisierten thermischen Gases und dem elektromagnetischen Feld koppelt. Die Theorie behandelt einerseits die Dynamik dieser relativistischen Teilchenkomponente, andererseits stellt sie die Verbindung zur nichtthermischen Radio- und Röntgenastronomie her. Sie bildet somit auch die Grundlage der Gamma- und Neutrinoastronomie. Hier zeigt sich eine starke Wechselbeziehung zwischen Experiment und Theorie.

Beschleunigung in Magnetfeldern

Für Teilchen mit Energien bis zu knapp 10^{20} eV ist ein entscheidendes Element der Theorie die Wechselwirkung der geladenen Teilchen mit irregulären Magnetfeldern. Dabei ändern sich die Richtungen der Bahnen und eventuell auch die Energien der Teilchen. Zugleich sind die Magnetfelder in Wolken aus ionisier-

Kontakt: Prof. Dr. Heinrich Völk · Max-Planck-Institut für Kernphysik
Saupfercheckweg 1 · 69117 Heidelberg · Tel. 06221/516-295
heinrich.voelk@mpi-hd.mpg.de

tem Gas (einem Plasma) „eingefroren“. Das heißt sie werden von dem Plasma, das sich unter Umständen sehr schnell bewegen kann, mitgezogen. In einfachster Form lassen sich solche Vorgänge mit Hilfe von Transportgleichungen behandeln, in denen man die kosmischen Teilchen wie ein Gas behandelt, das sich unter dem Einfluss von Diffusion, Konvektion und Kompression beziehungsweise Expansion bewegt.

Die meisten theoretischen Modelle gehen von solch einer Transportgleichung aus. Sie liegt auch der so genannten Theorie der diffusiven Teilchenbe-

injiziert und dann in den Magnetfeldern beschleunigt werden. Dieser komplexe Injektionsprozess ist für Ionen, wie Protonen oder allgemein nukleare Teilchen, im Prinzip gut verstanden. Für Elektronen ist er aber noch weitgehend ungeklärt und wird deshalb meist phänomenologisch behandelt.

Die beschleunigten Teilchen bleiben anfangs im Inneren des SNR zurück und können darin mit Gasteilchen oder Photonen zusammenstoßen. Dann leuchtet der SNR als Gamma- oder als Neutrinoquelle. Gleichzeitig emittieren die beschleunigten Elektronen Synchrotron-

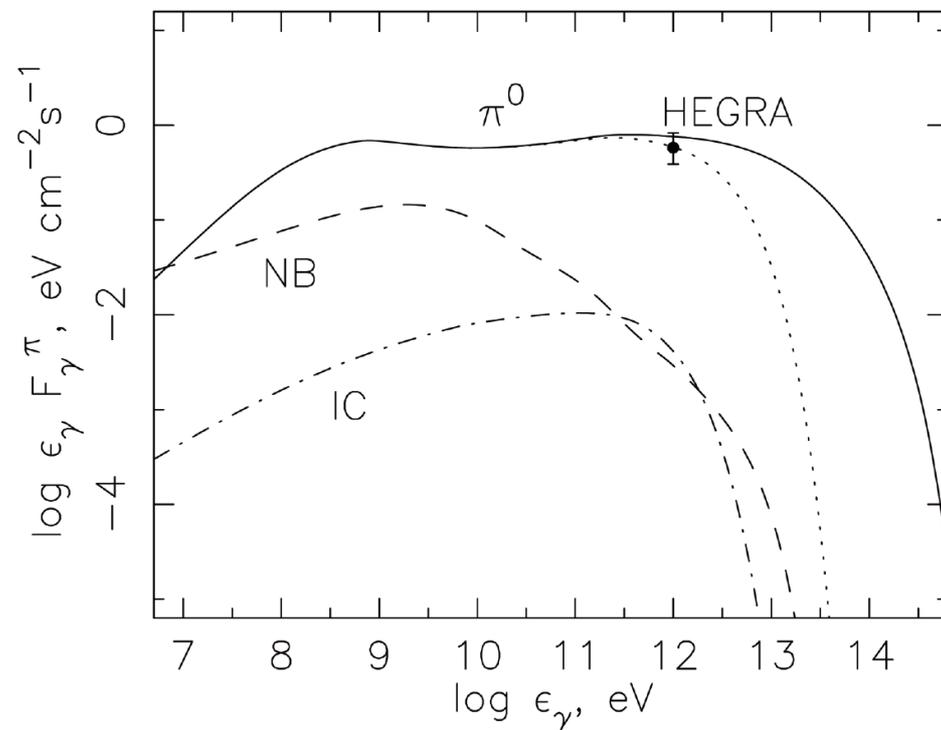
breitet. Solche Situationen liegen wahrscheinlich in den Jets von aktiven Galaxien vor, die man unter anderen als Quellen der kosmischen Strahlungsteilchen mit den allerhöchsten Energien vermutet. Ihre theoretische Behandlung ist ein aktives Spezialgebiet der Hochenergie-Astrophysik in Deutschland.

👁️ Ausblick

Die Beschleunigung der kosmischen Strahlung in Supernova-Überresten ist theoretisch weitgehend gut verstanden. Die verbleibende Herausforderung ist das Auffinden einer größeren Zahl von Objekten, deren Parameter experimentell so gut charakterisiert werden können, dass sich die Theorie ohne Zusatzannahmen damit vergleichen lässt. Die Gammateleskope H.E.S.S. und MAGIC sind derzeit mit dieser Aufgabe beschäftigt.

Die Theorie der Teilchenbeschleunigung oberhalb einiger 10^{15} eV steht noch in den Anfängen. Die theoretische Untersuchung von extragalaktischen Jet-Quellen ist eine schwierigere Aufgabe, weil der zugrundeliegende gasdynamische Vorgang so außerordentlich komplex und deshalb noch keineswegs voll verstanden ist. Die theoretische Behandlung dieser nichtthermischen Prozesse im Allgemeinen ist eine außerordentliche Herausforderung für die Theorie, deren Bedeutung für die Astrophysik, Kosmologie und Teilchenphysik gar nicht überschätzt werden kann.

➔ *Deutsche Arbeitsgruppen zur Theorie der kosmischen Strahlung: Universitäten Bochum, Erlangen, Hamburg, Wuppertal und Würzburg, Max-Planck-Institute für Astrophysik (Garching), für extraterrestrische Physik (Garching), für Kernphysik (Heidelberg) und für Radioastronomie (Bonn)*



Theoretische Berechnung der Teilchenbeschleunigung und Gammaemission des Supernova-Überrestes Cassiopeia A. Die Kurven zeigen die spektrale Energieverteilung der Inversen Compton-Strahlung (IC), der nichtthermischen Bremsstrahlung (NB) und der Gammastrahlung auf Grund des Zerfalls neutraler Pionen. Der mit HEGRA gemessene Fluss bei 1 TeV ist ebenso angegeben wie die obere Grenze, die das EGRET-Instrument auf dem Compton Gamma Ray Observatory angeben konnte.

schleunigung an Stoßwellen zugrunde, die allgemein als der wichtigste Prozess für die Erzeugung der kosmischen Strahlung angesehen wird. Dies betrifft insbesondere die Explosionswolken von Supernovae. Ein solcher so genannter Supernova-Überrest (Supernova Remnant, SNR) bildet an seiner Außenseite eine gewaltige Stoßwelle, die in das interstellare Medium hineinläuft. Dabei wird das Gas komprimiert und aufgeheizt, und es führt ein Magnetfeld mit sich. Teilchen aus dem heißen Gas hinter der Stoßwelle können in die Stoßfront

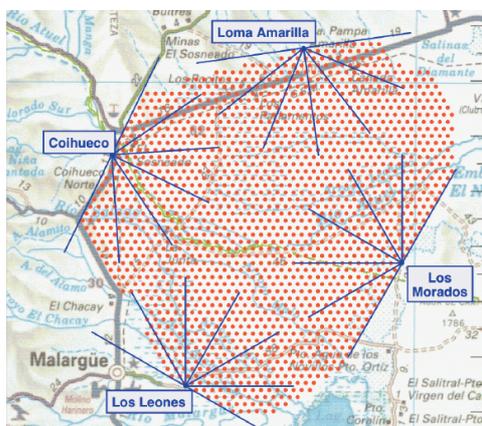
strahlung vor allem im Radio- und Röntgenbereich. Mit Hilfe dieser Theorie ließen sich mehrere SNRs berechnen. Dazu zählt die Supernova von 1572, die Tycho Brahe beobachtete, Cassiopeia A, die stärkste Radioquelle am Himmel, sowie die Supernova aus dem Jahr 1006 und das Objekt RX J1713.6-3946, das mit H.E.S.S. erstmals als ausgedehnte Gammaquelle beobachtet wurde.

Theoretisch erheblich schwieriger liegt der Fall, wenn sich eine Stoßwelle mit relativistischer Geschwindigkeit aus-

Das Pierre-Auger-Observatorium hat die Untersuchung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung zum Ziel. Das Observatorium wird aus je einer 3000 km² großen Detektoranlage auf der Nord- und Südhalbkugel bestehen. Die erste Anlage in der argentinischen Pampa wurde im November 2005 offiziell eingeweiht. Mehr als 250 Wissenschaftler aus 15 Ländern, darunter Deutschland, Italien, Frankreich, USA, Großbritannien und Argentinien, beteiligen sich am Bau und Betrieb des Observatoriums.



Das Pierre-Auger-Observatorium: Teilchensuche in der argentinischen Pampa



Lageplan der Detektoren des südlichen Pierre-Auger-Observatoriums in der Nähe der Stadt Malargüe in Argentinien. Rote Punkte markieren die Wassertanks, blaue Linien kennzeichnen das Gesichtsfeld der einzelnen Fluoreszenzteleskope.

In der kosmischen Strahlung existieren Teilchen mit ultrahohen Energien oberhalb von 10^{20} eV. Ihre Entdeckung war eine große Überraschung. Sowohl die Art der Teilchen als auch ihre Quellen sind bislang unverstanden. Extragalaktische Objekte wie aktive Galaxien werden ebenso diskutiert wie neue physikalische Erscheinungen. So genannte Top-Down-Szenarien gehen beispielsweise davon aus, dass die beobachteten Teilchen in der Umgebung der Milchstraße bereits mit hoher Energie beim Zerfall unbekannter Teilchen (möglicherweise der Dunklen Materie) entstehen. Der Nachweis der Teilchen ist sehr aufwändig, weil sie sehr selten sind: Bei diesen Energien erwartet man ungefähr ein Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert. Daher sind riesige Detektorflächen nötig, um ausreichend viele dieser Teilchen zu finden. Dies geschieht indirekt über die von ihnen in der Erdatmosphäre ausgelösten Kaskaden von Sekundärteilchen, den Luftschauern. Höchstenergetische Luftschauer enthalten viele Milliarden Sekundärteilchen, die am Erdboden eine Fläche von mehr als 50 km² überdecken können.

Schauerdetektoren und Fluoreszenzteleskope

Das Pierre-Auger-Observatorium ist die weltweit größte Anlage für die Messung von kosmischer Strahlung der höchsten Energien. Erstmals wird bei ihm auch eine Hybridtechnik angewandt: Oberflächendetektoren messen die Sekundärteilchen, und große Teleskope registrieren Fluoreszenzlicht, das die Sekundärteilchen in der Atmosphäre über dem Schauerfeld erzeugen. Diese simultane Nachweismethode reduziert erheblich die systematischen Unsicherheiten der Messung insbesondere in der Energiebestimmung der Primärteilchen. Das Pierre-Auger-Observatorium mit je einem Detektorfeld auf der Süd- und zukünftig auch auf der Nordhalbkugel wird die erste Anlage dieser Art sein, die den gesamten Himmel beobachtet.

Das südliche Auger-Observatorium in der Provinz Mendoza, Argentinien, wurde im November 2005 eingeweiht und wird bis Anfang 2007 voll ausgebaut sein. Es besteht aus insgesamt 1600 Wasser-Tscherenkov-Detektoren, die im

Füllen eines der 1600 Oberflächendetektoren des Auger-Observatoriums mit ultrareinem Wasser. Im Hintergrund ist ein Teleskopgebäude mit Kommunikationsmast und links davon eine Station zur Messung der Lichtabsorption in Luft (LIDAR) zu sehen.



Kontakt: Prof. Dr. Johannes Blümer · Universität und Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Kernphysik · 76021 Karlsruhe · Tel. 07247/82-3545 · johannes.bluemer@ik.fzk.de

Abstand von 1,5 km zueinander aufgestellt sind. Jeder Wassertank hat eine Grundfläche von 10 m² und ist mit 12 Tonnen ultrareinem Wasser gefüllt. Energetische Teilchen eines Luftschauers lösen im Wasser kurze Lichtblitze, so genanntes Tscherenkow-Licht, aus. Drei empfindliche Photomultiplier registrieren diese Emissionen in jedem Tank. Diese Detektortanks sind autonome Stationen mit solarer Energieversorgung, wobei die Kommunikation mit der Datenerfassungszentrale über Mikrowellen erfolgt. Luftschauer werden an der räumlich und zeitlich koinzidenten Messung von Teilchen in mehreren Tanks erkannt. Die Identifikation von Signalen verschiedener Detektoren, die zu einem Ereignis gehören, erfolgt über eine von GPS-Signalen gesteuerte Uhr an jedem Detektor. Die Schauerdetektoren decken eine Fläche von 3000 km² ab, was mehr als der Ausdehnung des Saarlandes entspricht. Sie sollen mehr als zehn Jahre lang Daten sammeln.

In vier Gebäuden am Rand des Detektorfelds beobachten jeweils sechs Fluoreszenzteleskope in klaren dunklen Nächten (entsprechend 10 bis 15 % der Messzeit) den Himmel über dem Detektorfeld. Diese Teleskope sind elektronische Schmidt-Kameras mit einer Öffnung von etwa 3 m², einer Korrekturlinse und einem 14 m² großen sphärischen Spiegel. Dieses Design erlaubt ein Gesichtsfeld von 30 mal 30 Quadratgrad pro Teleskop bei hinreichend guter optischer Abbildungsqualität. In der Fokalebene registrieren 440 Photomultiplier die Fluoreszenz-

Leuchtspur der Luftschauer mit einer Zeitauflösung von 100 ns. Das entspricht etwa der Aufgabe, eine 30 Kilometer entfernte 40-Watt-Glühbirne aufzunehmen, die fast mit Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre fliegt. Während die Tanks die Teilchenverteilung von Luftschauern auf der Erdoberfläche messen, lässt sich anhand der Leuchtspur die Entwicklung der Teilchenzahl entlang der Schauerbahn durch die Atmosphäre rekonstruieren. Die Ergebnisse der Fluoreszenzteleskope dienen unter anderem zur Energiekalibration des Experiments. Außerdem hängen die Form der Schauerentwicklung und die Höhe des Maximums in der Atmosphäre von der Masse des Primärteilchens ab. Von Eisenkernen induzierte Schauer beginnen in größerer Höhe als protoninduzierte Schauer.

Um aus der gemessenen Fluoreszenzemission die Energie des Schauers möglichst genau ermitteln zu können, ist es notwendig, die aktuelle meteorologische Situation zu kennen. Deshalb überwachen LIDAR-Systeme den Himmel, zudem lässt man ab und zu Wetterballons aufsteigen.

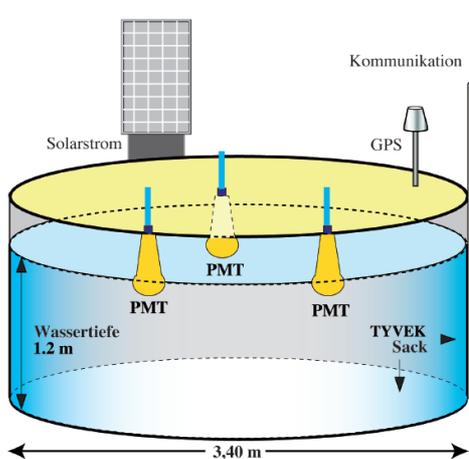
Bereits in der Aufbauphase des Observatoriums wurden kontinuierlich Daten genommen. Die Beobachtung von Schauern mit mehreren Teleskopen und die simultane Messung der Teilchen in den Wassertanks demonstrieren eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit des Auger-Observatoriums. Zu den ersten wissenschaftlichen Ergebnissen gehören ein Energiespektrum der beobachte-

ten Ereignisse, die Durchmusterung des Südhimmels nach Punktquellen und eine obere Grenze für den Anteil von Photonen in der ultra-hochenergetischen kosmischen Strahlung. Eine in verschiedenen Modellen vorhergesagte Punktquelle in der Nähe des galaktischen Zentrums konnte nicht bestätigt werden. Diese Daten beruhen jedoch bisher noch auf sehr wenig Beobachtungszeit, so dass die „integrierte Apertur“ nur etwa gleich groß ist wie bei den Experimenten der vorigen Generation.

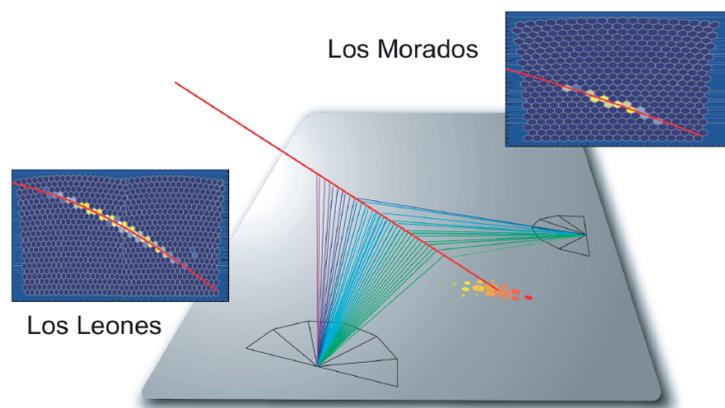
👁️ Ausblick

Bis Ende 2005 waren etwa 1050 Wassertanks und 18 Teleskope des südlichen Auger-Observatoriums aufgestellt. Bis Anfang des Jahres 2007 soll es fertig gestellt werden. Dann wird es eine etwa 30-mal größere Detektorfläche besitzen als das bislang größte Luftschauerexperiment AGASA in Japan. Anschließend ist der Aufbau des nördlichen Observatoriums geplant. Eine vollständige und möglichst gleichmäßige Abdeckung aller Himmelsrichtungen ist entscheidend für die Interpretation der Daten. Für das Nordexperiment wurde von der Auger-Kollaboration ein Areal bei Lamar, Colorado, in den USA ausgewählt.

➔ **Deutsche Beteiligungen:** Forschungszentrum und Universität Karlsruhe, RWTH Aachen, Universitäten Bonn, Siegen und Wuppertal, Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Bonn)



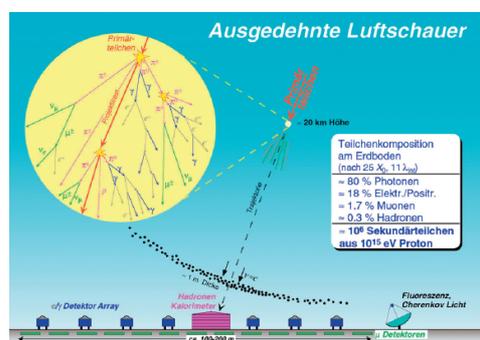
Innerer Aufbau eines Tscherenkow-Tanks mit den drei Photomultipliern, einer Solarzellenfläche sowie dem GPS-Empfänger und der Antenne.



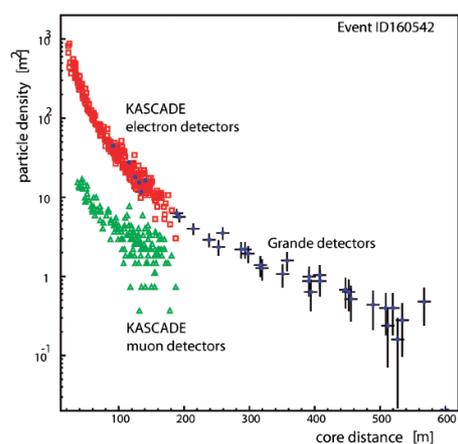
Darstellung eines Luftschauers, der von den Fluoreszenzteleskopen im Stereomodus beobachtet wurde und dessen Teilchen in 17 Tanks des Oberflächenfelds nachgewiesen wurden (Stereo-Hybrid-Ereignis). Die Schauerachse ist als rote Linie zusammen mit der entsprechenden Projektion auf die von den Teleskopkameras aufgenommenen Bilder dargestellt. Die rekonstruierte Energie des Schauers beträgt $2 \cdot 10^{19}$ eV.

KASCADE-Grande misst mit einem Multidetektorsystem ausgedehnte Luftschauer, die von hochenergetischen kosmischen Teilchen in der Atmosphäre ausgelöst werden. Ziel ist es, die Elementzusammensetzung der kosmischen Strahlung im Energiebereich des so genannten Knies zu rekonstruieren. An KASCADE-Grande sind acht Institute aus Deutschland, Italien, Polen und Rumänien beteiligt.

KASCADE-Grande: Luftschauer über Karlsruhe



Kosmische Teilchen erzeugen in der Atmosphäre eine Kaskade von Sekundärteilchen. Diese werden mit unterschiedlichen Detektortypen auf dem Erdboden nachgewiesen.



Teilchendichte eines einzelnen Schauers in Abhängigkeit vom Abstand zum Schauerzentrum, gemessen mit verschiedenen Detektorkomponenten von KASCADE-Grande.

Hochenergetische kosmische Strahlung lässt sich aufgrund des geringen Flusses nicht mehr direkt mit Ballon- oder Satellitenexperimenten messen. Bei nur einem Teilchen pro Quadratmeter und Tag ist man auf erdgebundene Messungen angewiesen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die aus dem Kosmos kommenden Primärteilchen in der Atmosphäre mit den Atomkernen der Luftmoleküle zusammenprallen und in einem fortlaufenden Prozess Sekundärteilchen erzeugen: Ein ausgedehnter Luftschauer bildet sich aus. KASCADE-Grande (Karlsruhe Shower Core and Array Detektor mit Grande Erweiterung) ist zum einen auf astrophysikalisch interessante Größen, wie Energiespektrum und Elementzusammensetzung der kosmischen Strahlung, empfindlich. Andererseits trägt es zum Verständnis von Wechselwirkungsmechanismen bei, die bei hohen Energien zwischen Hadronen (Elementarteilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen) stattfinden.

Das „Knie“ in der Energieverteilung der kosmischen Strahlung

Der Fluss der kosmischen Strahlung nimmt mit zunehmender Energie der Teilchen stark ab. Etwas oberhalb einer Energie von 10^{15} eV ändert sich jedoch die „Steilheit“ dieses Energiespektrums auf charakteristische Weise. Diesen Bereich nennt man das „Knie“ der kosmischen Strahlung. Die Ursache dieser Änderung ist bisher unbekannt, es existieren jedoch

verschiedene theoretische Ansätze zur Erklärung. So könnte die Energie im Bereich des Knies die nötige Minimalenergie zum Entweichen der Teilchen aus unserem Milchstraßensystem sein. Denkbar ist auch, dass es die maximal erreichbare Energie ist, welche die Teilchen mit möglichen Beschleunigungsmechanismen in unserer Galaxis erreichen können. Schließlich ist es auch möglich, dass es die Energieschwelle für neue Wechselwirkungseigenschaften der Teilchen in oder außerhalb unserer Atmosphäre ist. Dies hätte eine falsche Rekonstruktion der Teilchenenergie zur Folge.

Alle drei Theorien sagen eine Abhängigkeit der Position des Knies von der Art der Primärteilchen voraus. Sie lassen sich experimentell unterscheiden, indem man die Position des Knies für verschiedene Elementgruppen bestimmt, und zusätzlich die Isotropie der ankommenden Strahlung überprüft.

KASCADE-Grande misst geladene Teilchen der kosmischen Strahlung

KASCADE-Grande verfolgt das Ziel, Energie und Masse der Primärteilchen zu bestimmen und dabei auch die Wechselwirkungen in der Luftschauerentwicklung besser zu verstehen. Hierfür verfügt die Anlage über verschiedene Detektortypen, die alle geladenen Teilchen in den Schauern messen. Das sind Hadronen, Myonen und Elektronen. Die Detektoren messen die laterale Dichteverteilung.

Kontakt: Dr. Andreas Haungs · Forschungszentrum Karlsruhe · Postfach 3640
76021 Karlsruhe · Tel. 07247/82-3310 · andreas.haungs@ik.fzk.de

Daraus ergibt sich die Gesamtzahl der Sekundärteilchen am Boden, was Rückschlüsse auf Energie und Teilchenart des Primärteilchens zulässt.

Das ursprüngliche KASCADE-Experiment besteht aus einem 200 mal 200 m² großen Areal mit 252 Detektorstationen zum Nachweis der elektromagnetischen Komponente eines Luftschauers. Zusätzlich beinhalten 196 dieser Stationen Myon-Detektoren, die von einer 20 cm starken Abschirmung aus Blei und Eisen umgeben sind. Im Zentrum der Anlage befindet sich ein kompaktes 20 mal 16 m² großes Detektorsystem, bestehend aus einem 4000 t schweren Eisen-Kalorime-



ter mit neun Lagen aus empfindlichen Ionisationskammern, drei Ebenen aus Spurdetektoren sowie einer Triggerebene aus Szintillationszählern. Das komplexe Detektorsystem dient zur Vermessung der Hadronen und hochenergetischen Myonen des Luftschauers. Nördlich dieses Zentraldetektors werden in einem 50 m langen Tunnel die Spuren von Myonen in drei horizontalen und zwei vertikalen Ebenen aus Detektoren gemessen. KASCADE kann auf diese Weise kosmische

Teilchen zwischen 10¹⁴ eV und 10¹⁷ eV mit hoher Qualität nachweisen.

Nach acht Jahren Messzeit wurde KASCADE um 37 größere Detektorstationen erweitert und nimmt seitdem eine Fläche von 700 mal 700 m² ein. Mit dieser neuen Anlage, genannt KASCADE-Grande, können nun Primärteilchen mit Energien bis zu 10¹⁸ eV nachgewiesen werden.

Erstmals Energiespektren einzelner Primärteilchenarten

Über 40 Millionen mit KASCADE gemessene Luftschauer erbrachten wichtige Erkenntnisse. Zum einen konnte gezeigt werden, dass die kosmische Strahlung in

diesem Energiebereich nicht aus primären Photonen (Gammaquanten) oder Elektronen, sondern aus Atomkernen besteht. Außerdem ist die geladene kosmische Strahlung im Energiebereich von KASCADE absolut isotrop, das heißt, die Teilchen fallen aus allen Richtungen gleich häufig ein. Darüber hinaus ist KASCADE das bisher einzige Luftschauerexperiment weltweit, das aus den Daten nicht nur das Spektrum aller Teilchen rekonstruieren, sondern Energie-

spektren einzelner Primärteilchenarten (Wasserstoffkerne, Heliumkerne, Gruppe mittelschwerer Kerne usw.) extrahieren konnte. Hierbei wurde gezeigt, dass das „Knie“ nur durch leichte Primärteilchen verursacht wird. Außerdem verschiebt sich dessen Position mit der Masse und Ladung der Primärteilchenart zu höheren Energien. Die Ergebnisse weisen eindeutig auf eine astrophysikalische und nicht teilchenphysikalische Ursache des Knies hin.

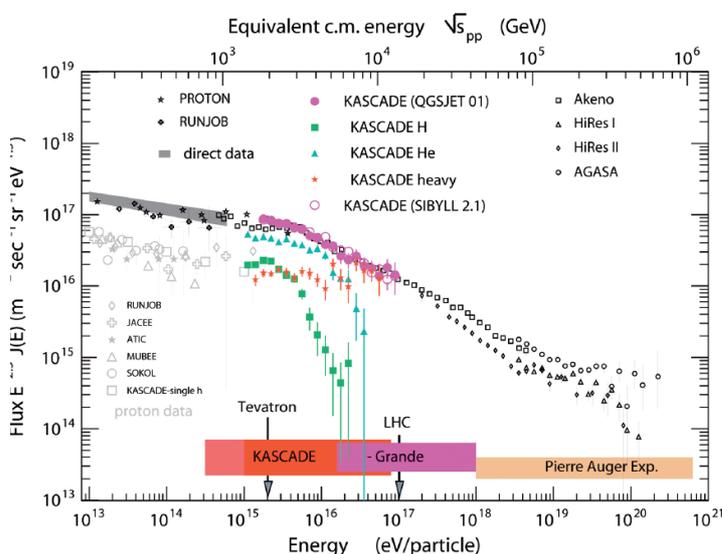
Für die Teilchenphysik ist dennoch interessant, dass mit KASCADE Wechselwirkungseigenschaften von Teilchen in einem Energiebereich untersucht werden konnten, der weit oberhalb aller bisherigen Beschleunigerexperimente liegt.

Ausblick – KASCADE-Grande gemeinsam mit LOPES

Aus den bisherigen Ergebnissen folgen weitergehende Fragestellungen bezüglich des Spektrums der kosmischen Strahlung. So sollte die Position des zu erwartenden Knies für Eisenkerne bei circa 10¹⁷ eV liegen. Das muss noch experimentell überprüft werden. Hier muss dann auch die galaktische Komponente der kosmischen Strahlung in eine extragalaktische für die höchsten Energien übergehen. Das heißt, Teilchen mit Energien von mehr als 10¹⁷ eV sollten mehrheitlich von entfernten Galaxien kommen. Damit sollte theoretisch eine Änderung der Elementzusammensetzung einhergehen. Beides ist mit der Erweiterung von KASCADE zu KASCADE-Grande experimentell zugänglich.

Parallel zu den Messungen mit den Sekundärteilchendetektoren wird KASCADE-Grande in Koinkidenz mit Radioantennen des LOPES-Experimentes betrieben. Ziel dieser Kooperation ist es, die Radioemission in Luftschauern zu messen. Dieser Anfang 2004 erstmals in Karlsruhe nachgewiesene Prozess wird voraussichtlich als neue Technik für die Messung von kosmischen Strahlungsteilchen höchster Energien zum Einsatz kommen.

➔ Deutsche Beteiligungen: Forschungszentrum und Universität Karlsruhe, Universitäten Siegen und Wuppertal

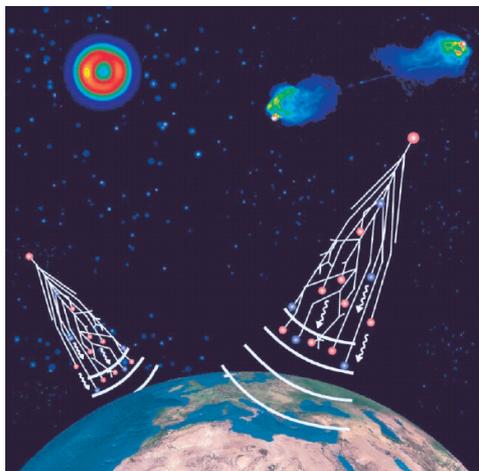


Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Farbig eingezeichnet die Ergebnisse von KASCADE mit den rekonstruierten Spektren einzelner Elemente. Deutlich zeigt sich, dass die leichten Elemente das Knie der kosmischen Strahlung verursachen. Das Gesamtspektrum ist für zwei Analyseergebnisse dargestellt, basierend auf unterschiedlichen theoretischen Modellen der Luftschauerentwicklung. Die Messbereiche einzelner Experimente sind unten dargestellt. H, He und heavy stehen für die Kerne von Wasserstoff, Helium und schweren Elementen.

Zu Beginn des Jahres 2004 gelang es weltweit zum ersten Mal, Radiosignale von Teilchen der kosmischen Strahlung zweifelsfrei Luftschauern zuzuordnen. Möglich wurde dies mit einem Feld aus digitalen Dipolantennen, genannt LOPES. Diese Methode könnte in großen Schauernanlagen wie dem Pierre-Auger-Observatorium zum Einsatz gelangen. LOPES ist ein europäisches Projekt, das in Koinkidenz mit KASCADE-Grande betrieben wird und an dem 13 Institute aus Deutschland, den Niederlanden, Italien, Polen und Rumänien beteiligt sind.



LOPES „sieht“ Radioblitze kosmischer Strahlungsteilchen



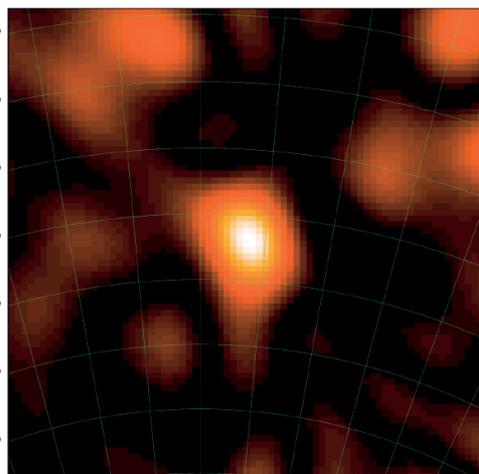
Kosmische Teilchen erzeugen in der Atmosphäre einen Luftschauer. Hierbei wird auch nachweisbare Strahlung im Radiofrequenzbereich emittiert.

Atomkerne der kosmischen Strahlung lösen beim Zusammenstoß mit der Erdatmosphäre große Schauer von Sekundärpartikeln aus, die in der Luft eine Leuchtspur erzeugen und als Teilchenteppich auf die Erdoberfläche vordringen. Detektorfelder wie das Pierre-Auger-Observatorium oder das kleinere KASCADE-Grande messen diese Ereignisse. Die Teilchenschauer emittieren in der Atmosphäre allerdings auch Strahlung im Radiobereich. Diese kurzen, sehr intensiven Radioblitze stellen dabei für wenige Nanosekunden die hellsten Radioquellen am Himmel dar. Sie konnten im Rahmen des LOPES-Experimentes durch Vergleich mit KASCADE-Grande-Messungen erstmals zweifelsfrei einzelnen Teilchen der hochenergetischen kosmischen Strahlung zugewiesen werden. Das ist ein Meilenstein bei der Entwicklung neuer Techniken zur Messung dieser Partikel aus dem Weltraum.

Bei diesem Vorgang werden positive und negative Sekundärteilchen des Luftschauers voneinander getrennt, was zur Emission von Synchrotronstrahlung führt. Sie liegt bei den typischen Energien dieser Sekundärteilchen im Radiofrequenzbereich und ist in Flugrichtung gebündelt. Physiker sprechen vom Geosynchrotron-Effekt. Dieses nur wenige Nanosekunden dauernde Phänomen konnte erst jetzt mit Hilfe eines modernen digitalen Radio-Interferometers vom allgegenwärtigen Untergrund an Radiostrahlung getrennt werden.

LOPES gemeinsam mit KASCADE-Grande

Das hierfür verwendete LOPES dient als Pilotprojekt für das zukünftig größte Radio-Array der Erde, genannt LOFAR (Low-Frequency Array). Es soll aus insgesamt hundert über Holland und Deutschland verteilten Antennenfeldern bestehen und Ende 2007 in Betrieb gehen. LOPES (LOFAR PrototypE Station) ist ein Array aus 30 Radioantennen. Diese bilden einen breitbandigen Empfänger, der eine Vielzahl unterschiedlicher Frequenzen gleichzeitig aufnehmen kann und die Signale in eine digitale Elektronik einspeist. Anders als bisherige Radioteleskope, die auf kleine Himmelsfelder ausgerichtet werden, haben die Antennen von LOPES den gesamten Himmel im Blickfeld. Die Daten werden digital gespeichert und können im nachhinein für jede Himmelsrichtung und zu jedem beliebigen Zeitintervall ausgelesen werden.



Mit LOPES rekonstruierte Radiokarte für einen einzelnen Luftschauer. Die Position des Spots zeigt die Richtung des einfallenden Schauers, die Intensität ist mit der Energie des Primärteilchens korreliert.

Die aus dem Universum einfallenden Atomkerne der kosmischen Strahlung lösen durch Zusammenstoß mit den Bestandteilen der Atmosphäre eine Lawine an neuen Partikeln aus. Diese erzeugt in der Hochatmosphäre eine Leuchtspur und kommt auf der Erdoberfläche als starker Schauer an. Seit 40 Jahren ist bekannt, dass zudem während der Luftschauererzeugung in der Atmosphäre durch die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Erdmagnetfeld auch Strahlung im Radiofrequenzbereich emittiert wird.

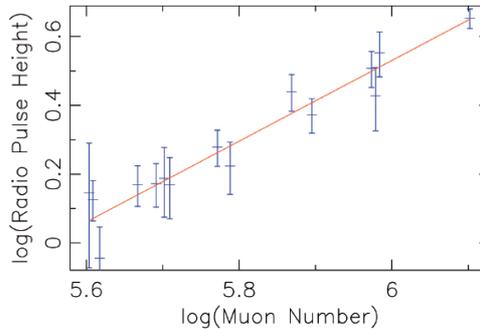
Kontakt: Dr. Andreas Haungs · Forschungszentrum Karlsruhe · Postfach 3640
76021 Karlsruhe · Tel. 07247/82-3310 · andreas.haungs@ik.fzk.de

Die LOPES-Antennen sind im KASCADE-Grande-Feld installiert und registrieren korreliert mit den Detektorstationen Daten im Frequenzbereich von 40 bis 80 MHz (entsprechend Wellenlängen etwa zwischen vier und acht Metern). Für die Suche nach der Radioemission der kosmischen Strahlung werden die Schauerereignisse von KASCADE-Grande analysiert und darin die Zeitpunkte von Teilchenschauern bestimmt. Dann werden die Radiodaten von LOPES in einem 0,8 ms langen Zeitfenster um diese Ereignisse herum ausgewertet. Hierfür befreit man die Daten mit digitalen Filtern von Rauschsignalen und sucht mit Hilfe von digitaler Interferometrie das Schuersignal.

Erste wissenschaftliche Erfolge

Auf diese Weise gelang es mit LOPES zum ersten Mal, zweifelsfrei Radiosignale aus der Schauerentwicklung nachzuweisen. Besonders vielversprechend für zukünftige Anwendungen war die Erkenntnis, dass es eine starke Korrelation zwischen der gemessenen Radiosignalstärke mit der von KASCADE-Grande gemessenen Myonenzahl des Schauers gibt. Letztere ist ein gutes Maß für die Energie des kosmischen Teilchens. Außerdem wurde eine Korrelation mit dem Winkel zwischen ankommendem Luftschauer und der Richtung des Erdmagnetfeldes gefunden. Diese Ergebnisse sind im guten

Einklang mit dem theoretischen Bild des Geosynchrotron-Effektes als Erzeugungsmechanismus der Radioblitz in der Atmosphäre. Mit den aus KASCADE-Grande bekannten Schauerobservablen ist es nun möglich, die Radioemission in Schauern zu kalibrieren. Das ebnet den Weg zu einer großflächigen Nutzung und Anwendung dieser Messtechnik für die höchstenergetischen Teilchen.



Korrelation des von LOPES gemessenen Radiopulses mit der Myonenzahl, die KASCADE-Grande gleichzeitig gemessen hat. Die Myonenzahl ist ein guter Parameter für die primäre Energie des kosmischen Teilchens.

👁️ Ausblick

Inzwischen wurde das LOPES-Antennenfeld von 10 auf 30 Antennen erweitert, um nun mit großer Statistik vor allen Dingen bei höheren Energien das Radiosignal im Detail auch auf Einzelschauer- und Einzelantennenbasis zu studieren. Besonderer Wert wird hier auf eine abso-

lute Eichung der Antennen gelegt, um das gemessene Signal einer Feldstärke in der Atmosphäre zuordnen zu können. Das ist unabdingbar für einen direkten Vergleich mit theoretischen Berechnungen des Emissionsmechanismus. Darüber hinaus werden neuartige Antennen bei LOPES getestet, die für eine Verwendung im Pierre-Auger-Observatorium optimiert sind. Dies betrifft insbesondere die Möglichkeit eines „Self-Triggerings“ der Antennen, also einer Signalsuche ohne externen Auslöser durch das Schauerarray.

LOPES soll sich als neue Messtechnik etablieren, die Emissionsmechanismen in der Atmosphäre theoretisch verstehen und den Weg zu einer verbesserten Messung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung ebnet. Dies könnte helfen, eines der großen Rätsel unseres Universums zu entschlüsseln.

➔ **Deutsche Beteiligungen: Forschungszentrum und Universität Karlsruhe, Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Bonn), Universitäten Bonn, Siegen und Wuppertal**

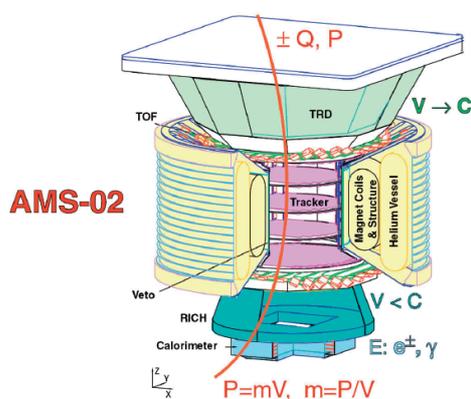


Drei LOPES-Radioantennen zwischen Schauerdetektoren von KASCADE-Grande auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe.

Das Experiment AMS-02 (Alpha Magnet Spectrometer) soll auf der Internationalen Raumstation ISS installiert werden und dort mindestens drei Jahre lang die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung mit bisher unerreichter Präzision vermessen. Von besonderem wissenschaftlichen Interesse ist dabei die Suche nach Antimaterie und Dunkler Materie. AMS-02 wird von einer internationalen Kollaboration aus 41 Forschungsinstituten aus 13 Ländern in enger Zusammenarbeit mit der NASA gebaut.



AMS sucht Antimaterie und Dunkle Materie



300 GeV	e ⁻	e ⁺	P	He	γ	γ
TRD	↓	↓			↓	
TOF	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Tracker	↘	↘	↘	↘	↘	↘
RICH	○	○	○	○	○	○
Calorimeter	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Oben: Querschnitt durch den etwa 3 m hohen AMS-02-Detektor. Unten: Symbolische Darstellung der mögliche Teilchenidentifikationssignale in den unterschiedlichen Subdetektoren.

Die meisten Theorien gehen heute davon aus, dass zumindest ein Teil der unsichtbaren Dunklen Materie aus schwach wechselwirkenden Teilchen, so genannten Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) besteht. Da solche Teilchen im Standardmodell nicht vorkommen, muss es sich um eine neue Form der Materie handeln. Wenn WIMPs im heißen frühen Universum entstanden sind, lässt sich die heutige geringe Anzahldichte nur so erklären, dass viele von ihnen durch Anihilation verschwunden sind, wobei u.a. Elektronen, Positronen, Protonen, Antiprotonen, Gammastrahlen und Neutrinos entstehen. Bei solchen Prozessen gehen die

Elektronen und Protonen heute in der gewaltigen Menge dieser Teilchen unter, die ohnehin in der Galaxie vorhanden sind. Aber die Antimaterieteilchen und Gammastrahlen sind womöglich nachweisbar. Sie sollten sich von dem allgemeinen Untergrund abheben, der durch Wechselwirkungen der kosmischen Strahlen mit dem Gas der Galaxie entsteht. AMS-02 soll diese kosmische Strahlung genau vermessen, insbesondere den Anteil der Antimaterie bestimmen und daraus Rückschlüsse auf die Anihilation von Dunkle-Materie-Teilchen erzielen. Da die Antimaterie in der Atmosphäre zerstrahlt, müssen die Messungen im Weltall stattfinden.



Computergeneriertes Modell der ISS mit dem AMS-02-Detektor vorne links.

Kontakt: Prof. Dr. Wim de Boer · Institut für Experimentelle Kernphysik Universität Karlsruhe · Postfach 6980 · 76128 Karlsruhe · Tel. 0721/608-3593 · wim.de.boer@cern.ch
 Prof. Dr. Stefan Schael · Physikalisches Institut Ib RWTH Aachen · Sommerfeldstraße 14
 52074 Aachen · Tel. 0241/80-27158 · schael@physik.rwth-aachen.de

Das von dem amerikanischen Physik-Nobelpreisträger Samuel Ting initiierte Experiment hatte bereits einen Vorläufer, AMS-01. Während eines zehntägigen Fluges mit der Raumfähre Discovery im Jahre 1998 wurde er erfolgreich getestet. Schon bei diesem kurzen Flug ließen sich die Spuren von über 100 Millionen geladener Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung vermessen. Die unerwartet reiche Ausbeute an erstklassigen wissenschaftlichen Ergebnissen hat die bisherigen Messungen über die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung deutlich verbessert. Hinweise auf Antimaterie wurden nicht gefunden, so dass die bisherigen experimentellen Grenzen für deren Häufigkeit deutlich verbessert werden konnten.

AMS-02 ist ein moderner Teilchendetektor mit ausgezeichneten Identifikationsmöglichkeiten. Er ist in viele Subdetektoren unterteilt. Die Impulse und Ladungsvorzeichen der Teilchen werden in einem Spektrometer, bestehend aus einem Silizium-Tracker in einer supraleitenden Spule, durch die Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld ($B=0,86\text{ T}$) bestimmt. Die Teilchenidentifizierung erfolgt durch die Messung der Geschwindigkeiten im Flugzeitdetektor (Time-of-Flight, TOF). Gleichzeitig misst man den Lorentz-Faktor in dem Übergangsstrahlungsdetektor (Transition-Radiation-Detektor, TRD), die Teilchengeschwindigkeiten in den Tscherenkov-Zählern (Ring-Imaging-Cherenkov-Counter, RICH) und die Teilchenenergien in dem elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL). Für Gammastrahlen gibt es zwei Nachweismöglichkeiten: entweder durch Paarkonversion im TRD, wobei das Elektron-Positron-Paar im Tracker nachgewiesen wird, oder als elektromagnetischer Schauer. Der Absolutbetrag der elektrischen Ladung wird durch die Ionisationsverluste im Silizium-Tracker und in den RICH-Zählern bestimmt.

Durch die vielen Teilchen-Identifikationsmethoden ist AMS-02 in der Lage, individuelle Elemente im Spektrum der kosmischen Strahlung bis zu einer Ladungszahl Z von 26 (also beispielsweise voll ionisiertes Eisen) aufzulösen. Der Übergangsstrahlungsdetektor wird von der RWTH Aachen gebaut, die raumfahrtqualifizierte Datenauslese dieser Detektorkomponente mit über 5000 auszulesenden Kanälen übernimmt die Universität Karlsruhe.

Der Betrieb im Weltall stellt harte Anforderungen an einen Detektor. Wegen der begrenzten Stromversorgung darf die Elektronik nur ein Zehntel der Leistung von konventioneller Elektronik verbrauchen. Die Elektronik muss zudem zwischen -20 °C und $+50\text{ °C}$ funktionieren

und Temperaturen zwischen -40 °C und $+80\text{ °C}$ dürfen sie nicht beschädigen. Diese Anforderungen sind schwer zu erfüllen, weil die Kühlung im Vakuum des Weltraums nicht über Konvektion erfolgen kann, sondern über Infrarotstrahlung ablaufen muss. Daher muss die Elektronik auf ihre Weltraumtauglichkeit in einer Thermovakuumkammer getestet werden.

Eine weitere technische Herausforderung bildet der supraleitende Magnet, der mit flüssigem Helium bis auf 1,8 Kelvin gekühlt wird. Und schließlich muss berücksichtigt werden, dass während des Shuttle-Starts starke Vibrationen auftreten und die Elektronik in der Erdumlaufbahn einer erheblichen Strahlenbelastung ausgesetzt ist. Zusätzlich muss der Detektor wartungsfrei mindestens drei Jahre im Weltall funktionieren, was eine Redundanz der gesamten Elektronik verlangt.

👁 Zusammenfassung und Ausblick

Der Flug des Prototypen AMS-01 mit dem Space Shuttle Discovery hat erstmals gezeigt, dass es möglich ist, moderne Detektoren der Teilchenphysik erfolgreich im Weltraum zu betreiben. Dabei gilt es eine Reihe von technischen Problemen zu lösen, die durch Start und Landung sowie den Betrieb im Weltraum auftreten. Mit dem AMS-02-Detektor sollen alle Komponenten der kosmischen Strahlung, inklusive einem möglichen Anteil von Antimaterie, genau vermessen und daraus Anzeichen für die Annihilation der Dunklen Materie gewonnen werden. Die Ausbildung junger Physikerinnen und Physiker in diesem anspruchsvollen internationalen Umfeld eröffnet attraktive Perspektiven für die berufliche Zukunft sowohl in der Forschung als auch in der Industrie.

👁 Zusammenfassung und Ausblick

Der Flug des Prototypen AMS-01 mit dem Space Shuttle Discovery hat erstmals gezeigt, dass es möglich ist, moderne Detektoren der Teilchenphysik erfolgreich im Weltraum zu betreiben. Dabei gilt es eine Reihe von technischen Problemen zu lösen, die durch Start und Landung sowie den Betrieb im Weltraum auftreten. Mit dem AMS-02-Detektor sollen alle Komponenten der kosmischen Strahlung, inklusive einem möglichen Anteil von Antimaterie, genau vermessen und daraus Anzeichen für die Annihilation der Dunklen Materie gewonnen werden. Die Ausbildung junger Physikerinnen und Physiker in diesem anspruchsvollen internationalen Umfeld eröffnet attraktive Perspektiven für die berufliche Zukunft sowohl in der Forschung als auch in der Industrie.

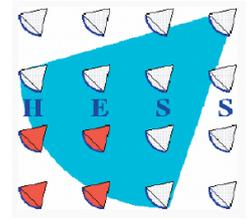
➔ Deutsche Beteiligungen:

Universität Karlsruhe (TH), RWTH Aachen

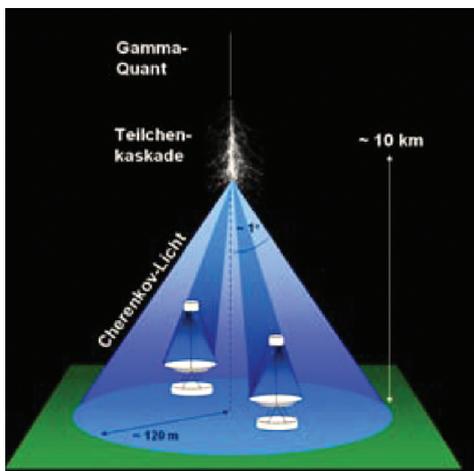


Test der AMS-Elektronik in einer Thermovakuumkammer des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik. Hier werden die großen Temperaturschwankungen und die fehlende Konvektionskühlung im Weltall nachgeahmt.

Mit dem H.E.S.S.-Observatorium im Khomas-Hochland von Namibia lässt sich Gammastrahlung mit Energien oberhalb von etwa 100 GeV nachweisen. Die Anlage besteht aus vier Teleskopen mit jeweils etwa 12 Metern Durchmesser. Jedes verfügt über hochsensitive und extrem schnelle Kameras, um schwache Lichtblitze kosmischer Strahlungsteilchen zu registrieren. Ziel ist es, Quellen hochenergetischer Gammastrahlen zu entdecken und eingehend zu studieren. Am Bau und Betrieb sind insgesamt etwa hundert Physiker aus Deutschland, Frankreich, England, Irland, Tschechien, Armenien, Südafrika und Namibia beteiligt.



Das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) zeigt die Galaxis in einem neuen Licht



Gammastrahlung erzeugt in großer Höhe eine Kaskade von Sekundärteilchen. Diese senden einen Lichtblitz aus, der mit den Spiegelteleskopen beobachtet wird.

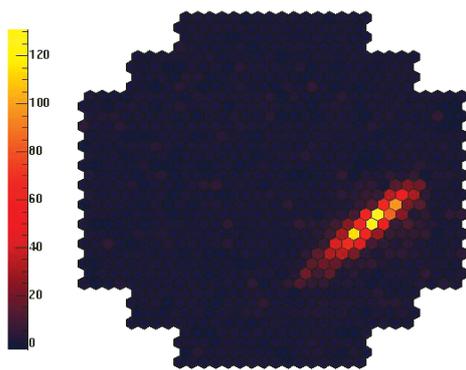


Bild eines Gammascchauers, wie er mit den H.E.S.S.-Teleskopen beobachtet wird.

Gammastrahlen mit sehr hohen Energien um 10^{12} eV zeugen von den energiereichsten Vorgängen im Universum. Sie werden in kosmischen Teilchenbeschleunigern erzeugt, die sich mit modernen Instrumenten wie H.E.S.S. mit bislang unerreichter Genauigkeit studieren lassen. Die Gammastrahlung wird von der Atmosphäre verschluckt, so dass man sie nicht direkt mit Teleskopen am Boden beobachten kann. Wenn die Strahlung in die Hochatmosphäre eindringt, erzeugt sie aber eine Lawine von Teilchen, die für den Bruchteil einer Sekunde einen schwachen Lichtblitz aussendet. Diese so genannte Tscherenkov-Strahlung hat entfernte Ähnlichkeit mit der Leuchtspur einer Sternschnuppe. Sie ist viel zu schwach, um sie mit bloßem Auge wahrzunehmen. Dies ist nur mit großen Spiegelteleskopen möglich. Mit dem H.E.S.S.-Observatorium lassen sich sogar Bilder der kosmischen Beschleuniger anfertigen.

H.E.S.S. repräsentiert die dritte Instrumentengeneration in diesem jungen Zweig der Astronomie. Es ist sehr viel empfindlicher als seine Vorgänger. Benötigte man 1989 noch 50 Stunden, um eine helle kosmische Gammaquelle wie den Krebsnebel zu erkennen, so reichen heute mit H.E.S.S. 30 Sekunden aus.

Jedes der vier H.E.S.S.-Teleskope besitzt einen Sammelspiegel mit 12 Metern Durchmesser, der aus 380 Segmenten zusam-

mengesetzt ist. Insgesamt verfügt ein Teleskop über eine Spiegelfläche von 107 m^2 , was eine Steigerung um mehr als das Zehnfache gegenüber dem Vorgänger HEGRA bedeutet. Alle Segmentspiegel werden mit Hilfe kleiner Motoren bis auf wenige Mikrometer genau justiert, um eine optimale Abbildung zu erzielen. Im Brennpunkt des Teleskops befindet sich eine Kamera, bestehend aus 960 Fotosensoren, die eine Fläche mit 1,40 Metern Durchmesser abdecken. Diese ungewöhnlich große Fokalfäche verleiht den Teleskopen ein weites Bildfeld mit fünf Grad Durchmesser. Damit wird die Untersuchung ausgedehnter Strukturen am Himmel möglich.

Bei H.E.S.S. zeichnen vier Teleskope die Spur der kosmischen Gammaquanten in der Atmosphäre gleichzeitig aus verschiedenen Winkeln auf. Dadurch erreicht man eine besonders hohe Messgenauigkeit und Empfindlichkeit. Außerdem lässt sich die Position von Himmelskörpern am Himmel genau lokalisieren.

Eine komplexe Elektronik dient dazu, die kurzen Tscherenkov-Lichtblitze vor dem Hintergrundlicht des Nachthimmels zu identifizieren und mit einer Belichtungszeit von einigen Milliardstel Sekunden aufzuzeichnen. In jeder Sekunde werden etliche hundert Lichtblitze registriert, von denen aber nur einige pro Minute von „interessanter“ Gammastrahlung stammen. Den Rest erzeugen Teilchen

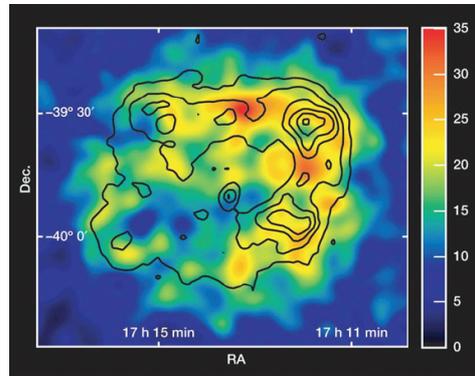
Kontakt: Prof. Dr. Werner Hofmann · Max-Planck-Institut für Kernphysik · Saupfercheckweg 1 · 69117 Heidelberg · Tel. 06221/516-330 oder 516-201 9 · hofmann@mpi-hd.mpg.de

der normalen Höhenstrahlung. Sie bilden einen unerwünschten Untergrund, den man mithilfe von Computern herausfiltern muss.

Erste wissenschaftliche Erfolge

Das Observatorium wurde 2004 eingeweiht. Bereits im ersten Jahr erzielten die Forscher eine Reihe brillanter Ergebnisse. So gelang die Entdeckung des Pulsar-Binärsystems PSR B1259-63 als erste variable galaktische Quelle. Ein weiteres Highlight war die detaillierte Untersuchung der Gammastrahlung aus dem Herzen unserer Milchstraße, der direkten Umgebung des dortigen superschweren Schwarzen Lochs. Die Leistungsfähigkeit der Teleskope zeigt sich aber am besten in einer Durchmusterung eines Teils der Milchstraße. Mit vielen hundert Beobachtungsstunden in den Jahren 2004 und 2005 wurde zum ersten Mal eine Himmelskarte unserer Galaxis im Gammalicht bei höchsten Energien erstellt. Wie Perlen an einer Schnur reihen sich neu entdeckte Strahlungsquellen entlang der Milchstraße auf. Erstaunlich war auch, dass sich ein Teil der neu entdeckten Quellen bislang in keinem anderen Spektralbereich nachweisen ließ. Möglicherweise sind die Forscher hier auf eine noch unbekannt Art von Himmelskörpern gestoßen, während andere Quellen mit früheren Supernova-Explosionen assoziiert sind.

Aufsehen erregte besonders das erste Bild einer Supernova-Explosionswelle. Die ringförmige Struktur bestätigt theoretische Spekulationen, dass solche Schockwellen in der Tat Teilchen auf hohe Energien beschleunigen können.



Das erste Bild einer Supernova im Licht der hochenergetischen Gammastrahlung um 10^{12} eV. Die Farbskala gibt die Gammaintensität an, während die Konturlinien die Intensität des Röntgenlichts nachzeichnen. Die Aufnahme demonstriert, dass die ringförmigen Schockwellen solcher Supernovae kosmische Teilchenbeschleuniger darstellen.

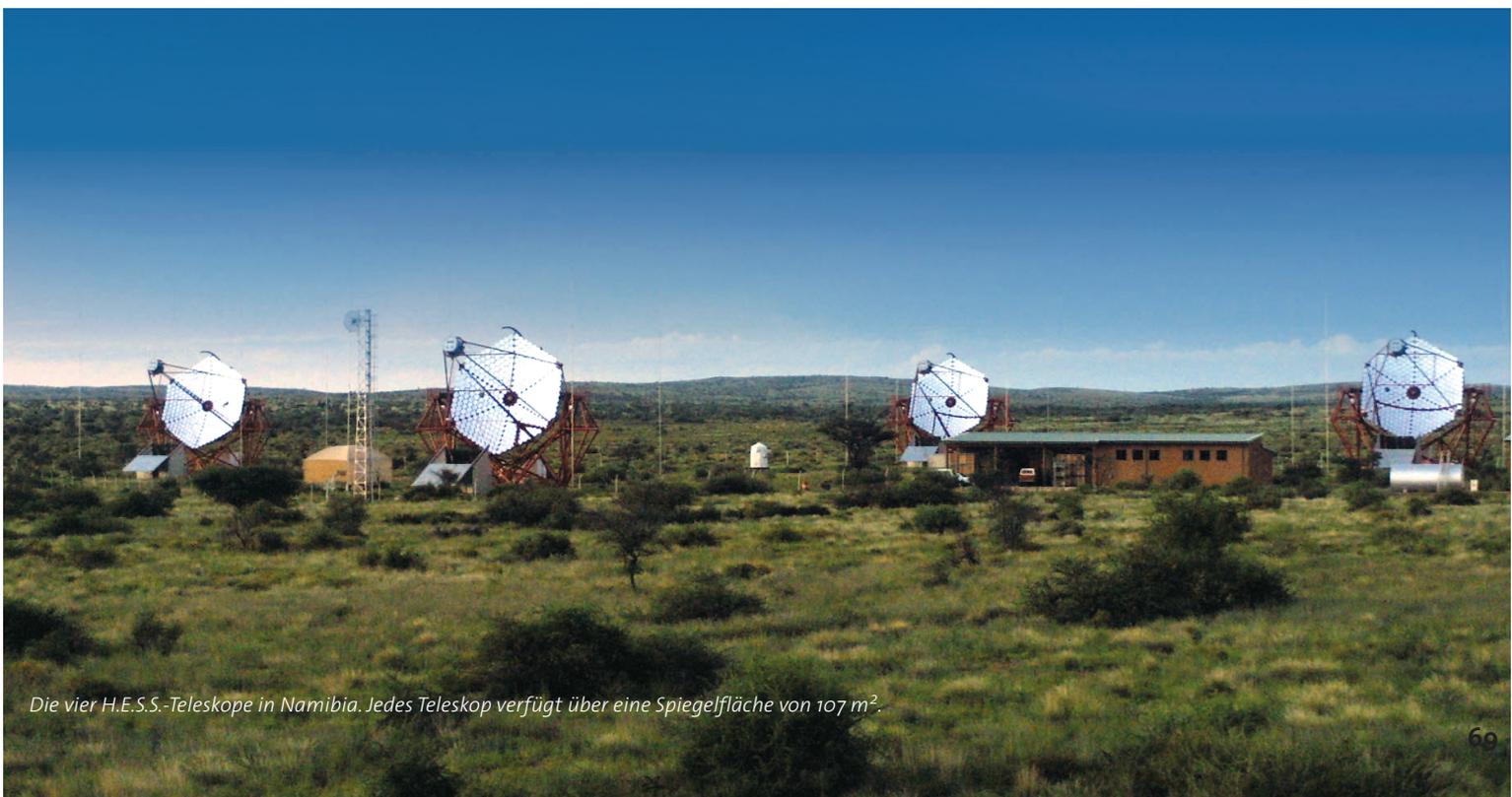
Häufig sieht man in den H.E.S.S.-Himmelskarten auch Gammastrahlung aus der Umgebung von Pulsaren. Dabei handelt es sich um schnell rotierende Neutronensterne, deren gigantische magnetische und elektrische Felder offenbar effiziente kosmische Teilchenbeschleuniger sind.

Mitte 2005 stieß man mit H.E.S.S. auf ein weiteres faszinierendes Objekt, den „Mikroquasar“ LS 5039, einer Art Miniaturausgabe eines Quasars, in dem ein Schwarzes Loch Materie von einem Begleitstern absaugt und einen Teil davon in Form von zwei entgegengesetzt gerichteten, gebündelten Materiestrahlen ins All stößt. Aus der Untersuchung dieser vergleichsweise nahen Gammaquelle erhofft man sich Rückschlüsse über die Prozesse in den ähnlichen, aber viel ausgedehnteren Materiejets weit entfernter Quasare.

Ausblick

Der Standort in Namibia kombiniert beste optische Beobachtungsbedingungen mit einer direkten Sicht auf den zentralen Bereich unserer Galaxis, wo sich besonders interessante Objekte befinden, wie das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, zahlreiche Supernova-Explosionswolken und Pulsare. Mittelfristig soll H.E.S.S. mit einem großen Zentralteleskop zu H.E.S.S. II ausgebaut werden, mit vergrößertem Energiebereich und weiter gesteigerter Empfindlichkeit.

➔ **Deutsche Beteiligungen:** Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg), Landessternwarte Heidelberg, Universitäten Bochum, Hamburg, Tübingen und Humboldt-Universität Berlin

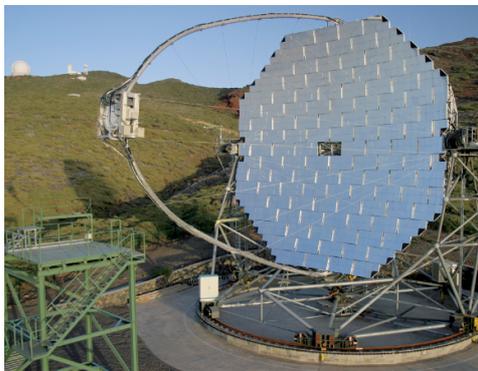


Die vier H.E.S.S.-Teleskope in Namibia. Jedes Teleskop verfügt über eine Spiegelfläche von 107 m^2 .

Auf der Kanareninsel La Palma läuft seit 2004 das weltweit größte Teleskop für den Gammabereich mit dem Namen MAGIC. Bei seinem Bau wurde besonders auf den erfassbaren Energiebereich und auf die Möglichkeit geachtet, die kurzlebigen Gamma-Blitze (so genannte Gamma Ray Bursts) messen zu können. In der MAGIC-Kollaboration arbeiten etwa 150 Physiker aus sechzehn Instituten zusammen, die meisten von ihnen kommen aus Deutschland, Italien und Spanien



MAGIC – das Gammateleskop neuer Technologie



Das MAGIC-Teleskop auf La Palma. Im Hintergrund optische Teleskope, mit denen MAGIC teilweise zusammenarbeitet.

Erdgebundene Gammateleskope können die hochenergetische Strahlung nur indirekt nachweisen. Das funktioniert nach folgendem Prinzip: Dringt ein Gammaquant in die Atmosphäre ein, so zerstrahlt es bei Wechselwirkung mit Atomkernen in 5 bis 20 km Höhe. Dabei entsteht in äußerst kurzer Zeit eine große Zahl von sekundären Elektronen, die in einem eng gebündelten Strahl in Richtung Erdboden weiterfliegen. Dieser so genannte elektromagnetische Schauer erzeugt einen kurzen Lichtblitz (Tscherenkow-Licht), den man vom Erdboden aus mit empfindlichen Teleskopen nachweist.

durchmesser. Freilich handelt es sich nicht um eine konventionelle Kamera. Äußerst empfindliche Photomultiplier im Fokus des Sammelspiegels registrieren die schwachen und extrem kurzen Lichtblitze (etwa 500 bis 5000 Gammaquanten innerhalb von ein bis zwei Milliardstel Sekunden). Der Ort der Tscherenkow-Blitze am Himmel wird zusammen mit der genauen Ankunftszeit aufgezeichnet. Aus diesen Informationen wird das Primärteilchen identifiziert. Der isotrope Lichthintergrund des Himmels ist dabei ein zusätzlicher Störfaktor. Eine maximale Lichtausbeute und eine schnelle Elektronik sind deshalb nötig und gehörten mit zu den größten technischen Herausforderungen dieses Projekts.

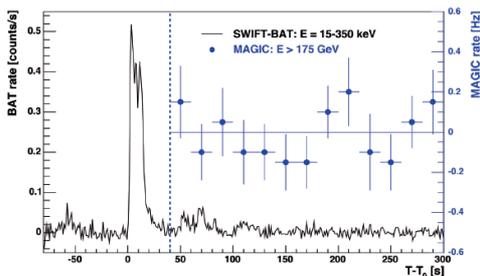
Das weltweit empfindlichste Auge für den Gammabereich

MAGIC hat einen beherzten Schritt zu größeren Dimensionen und zu einer besonders leichten Bauweise unternommen. Der aus über 900 Einzelfacetten zusammengesetzte Sammelspiegel bildet mit 234 Quadratmetern das bei weitem größte aller existierenden Gammateleskope. Der tragende Rahmen ist aus leichten Kohlefaserstäben aufgebaut. Die Einzelspiegel werden permanent programmgesteuert justiert, um die bei der Größe des Geräts unvermeidlichen Verformungen zu kompensieren.

Diese und weitere technologische Neuerungen haben für MAGIC ganz neue

Allerdings verursachen die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung, hauptsächlich Protonen und Heliumionen (Hadronen), tausendmal mehr Schauer als die Gammaquanten und damit auch Tscherenkow-Strahlung. Hadronische Schauer verhalten sich aber sowohl in ihrer Zeitstruktur als auch in ihrer räumlichen Verteilung anders als ihre elektromagnetischen Geschwister, wodurch sich diese beiden Phänomene unterscheiden lassen. Das MAGIC-Teleskop (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) arbeitet dabei nach den gleichen Prinzipien wie die derzeit laufenden Experimente CANGAROO, H.E.S.S. und VERITAS.

MAGIC verfügt über eine Kamera mit einem Öffnungswinkel von 3,5 Grad, entsprechend dem siebenfachen Vollmond-



Beobachtung des Gamma Ray Bursts GRB 050713A. Gezeigt ist die mit Swift im Röntgenbereich (schwarze Kurve) und mit MAGIC im Gammabereich (blaue Messpunkte) gemessene Intensität über eine Zeitdauer von 250 Sekunden.

Kontakt: Dr. Razmik Mirzoyan · Max-Planck-Institut für Physik · Föhringer Ring 6
80805 München · Tel. 089/32354-328 · razmik@mppmu.mpg.de

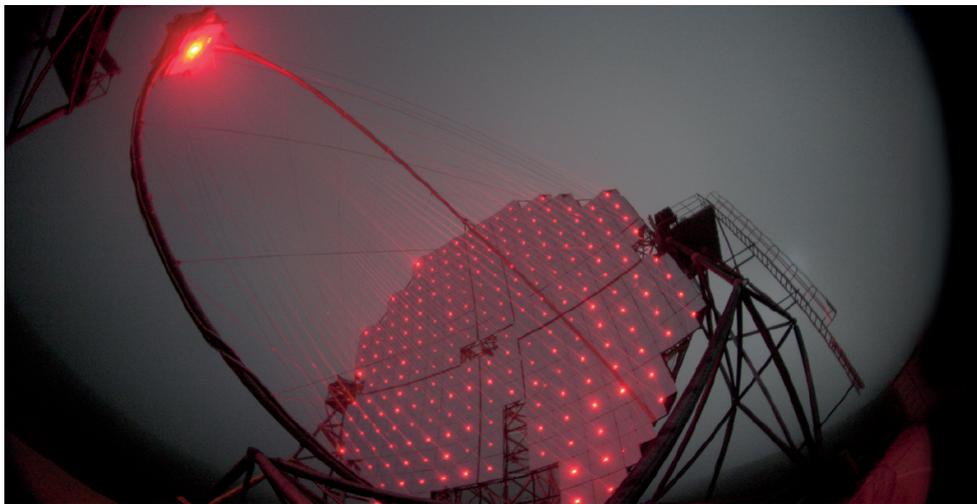
Beobachtungsmöglichkeiten eröffnet. Die große Spiegelfläche erlaubt es, auch noch die schwächeren Signale von Gammaquanten mit niedriger Energie zu identifizieren. Damit macht MAGIC einen bisher unerforschten Energiebereich deutlich unter 100 GeV zugänglich. Existierende Satellitenexperimente sind bei niedrigeren Energien bis zu wenigen GeV empfindlich. Geplant sind auch Weltraumexperimente, wie GLAST, die diese Lücke zu geringeren Energie überbrücken. Durch den Zugang zu niedriger Energie können mit MAGIC auch wesentlich weiter entfernte Himmelskörper nachgewiesen werden als bisher, was für

Weltraumteleskop wie Swift ein Ereignis zur Erde, kann MAGIC innerhalb von wenigen Sekunden an die betreffende Himmelsposition schwenken. Dies muss deshalb so schnell geschehen, weil GRBs typischerweise nur für eine Minute oder weniger aufblitzen.

Erste Erfolge mit MAGIC

Seit seiner Inbetriebnahme Ende 2004 hat MAGIC bereits einige wesentliche Beiträge zum Verständnis der hochenergetischen Gammastrahlung leisten können. Der Krebsnebel, eine konstant strahlende „Eichquelle“, wurde von MAGIC erstmals bei Energien unter 100

Ein großer Erfolg sind auch die Beobachtungen von aktiven galaktischen Kernen (AGN), außerhalb unserer Milchstraße. So gelang erstmals eine Beobachtung des AGN 1ES1959+650 bei weit niedrigeren Energien als bisher möglich. Auch hier werfen die Ergebnisse interessante neue Fragen über die Mechanismen der Erzeugung von Gammaquanten auf, die sich deutlich von bisherigen Modellen für andere AGN unterscheiden. Ebenfalls Aufsehen erregte die Vermessung des Energiespektrums des Blazars Mkn421 bis herunter zu 100 GeV, das erstmals Anzeichen eines messbaren Maximums im Gammabereich durch Compton-Prozesse zeigt, sowie der Nachweis sehr kurzzeitiger Intensitätsausbrüche in dem Blazar Mkn 501.



Mit Hilfe von Laserstrahlen werden die Spiegelsegmente von MAGIC automatisch justiert.

viele Fragen der heutigen Kosmologie von großer Bedeutung ist.

Eine wesentliche Neuerung besteht auch darin, dass sich das gesamte Teleskop wegen der Leichtbauweise schnell bewegen lässt. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die rätselhaften Gamma Ray Bursts (GRBs) in einem ganz neuen Spektralbereich zu beobachten. Das sind unerwartet und nur kurz am Himmel aufleuchtende Gammaquellen, die insbesondere in den letzten zehn Jahren zu einem der zentralen Forschungsthemen der Astrophysik geworden sind. Bis vor kurzem haben hauptsächlich Weltraumteleskope die weitgehend noch unerklärten Gammablitz im Röntgenbereich wahrgenommen. Vereinzelt lassen sie sich auch mit optischen Teleskopen aufspüren. MAGIC kann dieses Phänomen nun auch im hochenergetischen Gammabereich messen: Meldet ein speziell zur Entdeckung von GRBs gebautes

GeV vermessen. Zwei Quellen, die als Gammastrahler von H.E.S.S. erst 2004 in unserem Milchstraßensystem entdeckt wurden, konnten von MAGIC bestätigt und bei niedrigeren Energien verfolgt werden. Sie sind bezeichnet mit J1813 und J1834, und mit einiger Sicherheit identisch mit bekannten Supernovaquellen im Radiobereich. Im Fall von J1834, einer Quelle mit messbarer Ausdehnung, konnte MAGIC eine Molekularwolke identifizieren, die Anteil an der Erzeugung der beobachteten Gammaquanten durch einen Hadron-basierten Mechanismus haben könnte.

Erstmals überhaupt gelang MAGIC die Beobachtung eines Objekts in sehr großer Entfernung, mit einer Rotverschiebung von 0.182. Dabei handelt es sich um eine BL Lacertae Quelle, die im Röntgenbereich bekannt war, aber bisher nicht als Gammastrahler.

Die Ursachen dieser schnellen Variabilität erfordern neue Erklärungsansätze. Am 13. Juli 2005 gelang schließlich die erstmalige Beobachtung eines Gamma Ray Bursts (GRB050713A). Bereits 20 Sekunden nach der Meldung des Satelliten Swift war MAGIC in der Lage, hochenergetische Gammas von dieser Quelle aufzunehmen. Ein eindeutiges Signal für kurzlebige Strahlung im Energiebereich von MAGIC wurde allerdings nicht gemessen. Aber selbst eine obere Grenze für die Intensität der Strahlung wird in Zukunft dazu beitragen, diese rätselhaften Ausbrüche besser zu verstehen.

👁️ Ausblick – MAGIC verdoppeln

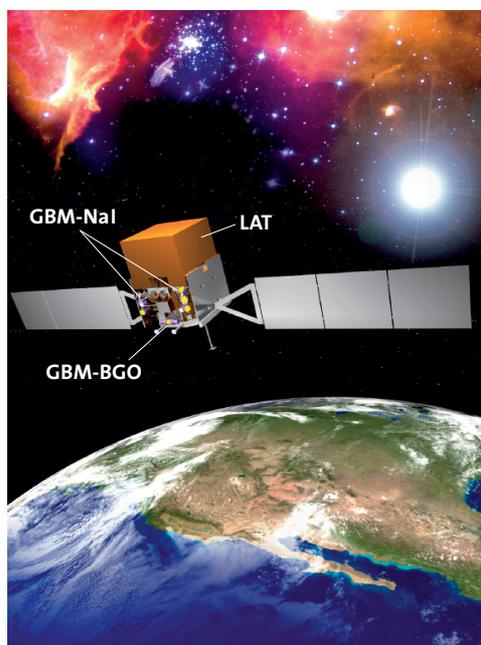
Die bisherigen Ergebnisse mit MAGIC versprechen für die nahe Zukunft weitere neue Entdeckungen. Wir erwarten Beiträge zur galaktischen und extragalaktischen Astrophysik, die mit keinem anderen Teleskop möglich sind. Die innovativen Bauelemente des Instruments haben sich sehr gut bewährt, so dass der Bau eines zweiten Teleskops gleicher Größe am selben Standort derzeit in Angriff genommen wurde. Dadurch werden die Möglichkeiten der Kollaboration ab 2007 sowohl in der Genauigkeit der Messungen wie in der Anzahl der messbaren Objekte noch erweitert.

➔ **Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für Physik (München), Humboldt-Universität Berlin, Universitäten Dortmund und Würzburg**

Im Herbst 2007 soll das Weltraumteleskop GLAST starten und mindestens fünf Jahre lang im Bereich der Gammastrahlung kosmische Phänomene beobachten. Das Studium von Gamma Ray Bursts bildet hierbei einen Schwerpunkt. Das Hauptinstrument an Bord, das Large-Area Telescope (LAT), wird von Forschungsgruppen aus den USA, Italien, Japan, Frankreich und Schweden gebaut. Das zweite Instrument, der GLAST-Burstmonitor (GBM), stammt von einer Projektgruppe aus den USA und einer Arbeitsgruppe des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Garching.



GLAST – das Weltraumobservatorium für die Gammaastronomie



Das GLAST-Observatorium, das die Erde in etwa 550 km Höhe umkreisen soll, mit dem Large-Area Telescope (orangefarbene Kiste) und den Detektoren des Burstmonitors (GBM) unterhalb davon.

Die Gammaastronomie ist ein junger Zweig der Astronomie, in dem einige deutsche Institute viel Erfahrung vorweisen können, insbesondere durch Beteiligung an Projekten wie COS-B, SMM, Compton GRO und INTEGRAL. GLAST soll diese Forschung weiterführen. In den 1990er-Jahren gelang es mit dem Weltraumobservatorium Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) zum ersten Mal so exotische Objekte wie Blazare, Pulsare, Kerne von aktiven Galaxien und Gammastrahlenblitze (Gamma Ray Bursts, GRBs) bei Energien zwischen einigen Millionen Elektronenvolt (MeV) und einigen zehn Milliarden Elektronenvolt (GeV) zu beobachten. In diesem Bereich lassen sich die energiereichsten Prozesse untersuchen, die in der Natur ablaufen. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Wechselwirkungen von hochenergetischen Teilchen (Elektronen, Positronen, Protonen usw.) und Photonen mit Materie und elektromagnetischen Strahlungsfeldern. Diese ereignen sich im Allgemeinen in der Nähe von kompakten Objekten wie Pulsaren und Schwarzen Löchern. Aber auch bei Wechselwirkungen von hochenergetischen Teilchen mit interstellarer Materie kann Gammastrahlung entstehen.

Jagd auf Gamma Ray Bursts ...

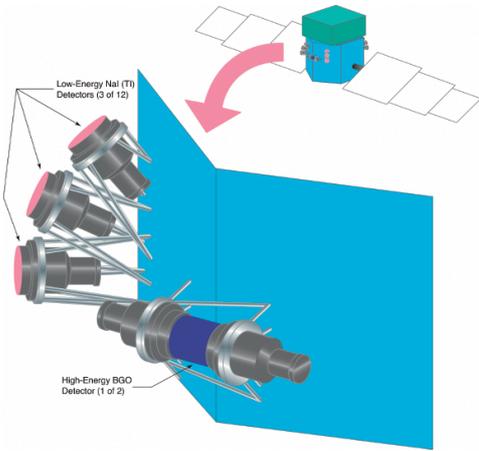
Einen Schwerpunkt der Untersuchungen mit GLAST (Gamma-Ray Large Area Space Telescope) werden die GRBs bilden. Die Natur dieser plötzlich am Himmel auf-

leuchtenden Gammablitz war jahrzehntlang unklar, bis es gelang, einige von ihnen zu identifizieren und ihre Entfernungen zu bestimmen. Seitdem weiß man, dass es sich um gigantische Ausbrüche in fernen Galaxien handelt. Heute vermutet man zwei Ursachen dahinter: Einerseits Zusammenbrüche und Explosionen von besonders massereichen Sternen am Ende ihres Lebens (Kollapsare, Hypernovae), die dann möglicherweise in einem Schwarzen Loch enden. Andererseits verschmelzende kompakte Himmelskörper wie zwei Neutronensterne.

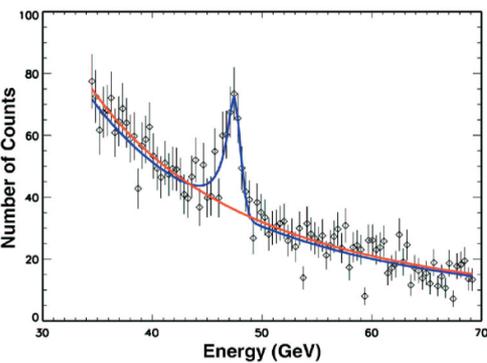
Bei diesen Vorgängen werden gewaltige Energiemengen frei, vor allem im harten Röntgenlicht. Beobachtungen mit EGRET auf dem Compton Gamma-Ray Observatory haben aber gezeigt, dass einige dieser Bursts auch im Gammabereich nachleuchten. Von diesen Beobachtungen ist bekannt, dass Teilchen bei diesen Vorgängen über einen Zeitraum von Stunden beschleunigt werden müssen und sie dabei die beobachtete Gammastrahlung aussenden. Das hat wichtige Konsequenzen für die Physik dieser Objekte und für den Erzeugungsmechanismus der Gammastrahlung. Sie steht möglicherweise im Zusammenhang mit der Entstehung eines Schwarzen Loches. Mit GLAST soll diese hochenergetische Strahlung gemessen und der Zusammenhang zur niederenergetischen Gammastrahlung hergestellt werden.

Kontakt: Dr. Giselher Lichti · Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik
Gießenbachstraße · 85748 Garching · Tel. 089/30000-3536 · grl@mpe.mpg.de

Hierfür verfügt das Observatorium über zwei Instrumente. Das Hauptinstrument LAT soll Gammastrahlung im Energiebereich von etwa 15 MeV bis 300 GeV messen, während das zweite Instrument GBM bei geringeren Energien zwischen etwa 10 keV und 30 MeV empfindlich ist.



Position des GBM im Satelliten (rechts oben) und Anordnung der NaI- und BGO-Detektoren. Die gegenüberliegenden NaI-Detektoren sind so um den Satelliten angeordnet, dass sie fast den gesamten Himmel abdecken und eine Positionsbestimmung der einfallenden Gammastrahlung erlauben.



Simulation der Annihilation der Dunkle-Materie-Teilchen vom galaktischen Zentrum, wie sie von GLAST nach fünf Jahren Himmeldurchmusterung gemessen werden könnte (Diagramm: NASA).



GBM-Detektoren (hinten links und rechts) bei Tests im Labor.

Das LAT besteht aus einer Anordnung von übereinander geschichteten Siliziumstreifendetektoren. In ihnen werden die Spuren von Elektronen und Positronen gemessen, die durch Gammaquanten beim Paarerzeugungsprozess erzeugt werden. Hierbei verwandelt sich die gesamte Energie des Gammaquants in ein Elektron-Positron-Paar. Damit ist es möglich, hochenergetische Gammaquellen am Himmel bis auf wenige Bogensekunden genau zu orten.

Der GBM besteht aus zwölf Detektoren aus NaI-Kristallen, mit denen sich GRBs im Energiebereich von 10 keV bis 1 MeV lokalisieren lassen. Dieser Detektor dient gewissermaßen als Alarm für den LAT, der sich nach einem registrierten Gammablitz auf dessen Position ausrichtet und nach dem hochenergetischen Nachleuchten Ausschau hält. Außerdem besitzt der GBM noch zwei Detektoren aus BGO-Kristallen, die Gammastrahlung im Übergangsbereich der beiden Instrumente zwischen etwa 150 keV und 30 MeV messen können. Auf diese Weise wird es mit den beiden GLAST-Instrumenten zum ersten Mal möglich sein, die Spektren von GRBs über sechs Energiedekaden hinweg zu vermessen.

Das Leuchtkraftmaximum liegt bei den meisten Gammabursts bei Energien um 250 keV, also weit unterhalb der Energieschwelle des LAT. Ohne den GBM wäre die Bestimmung dieses Leuchtkraftmaximums nicht möglich. Dieser Parameter hängt eng mit der relativen Bewegung von Beobachter und Quelle zusammen und gibt somit Aufschluss über die kosmologische Rotverschiebung und die relativistische Bewegung der emittierenden Teilchen. Für das Verständnis der

Energieerzeugung in GRBs ist die Messung dieser Energie von entscheidender Bedeutung.

Die Zusammenarbeit von LAT und GBM ermöglicht es zudem, eine weitere aktuelle Frage im Zusammenhang mit GRBs anzugehen. Zumindest bei einigen Bursts hat es den Anschein, als würde die Emission zuerst im niederenergetischen Bereich und anschließend bei höheren Energien erfolgen. Dieses Phänomen ist weitgehend ungeklärt, sollte aber wichtige Hinweise auf die Vorgänge während des Gammaausbruchs und beim Ausglühen des Feuerballs geben.

... und Neutralinos

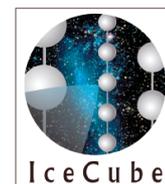
Neben diesen spannenden Untersuchungen der GRBs könnte GLAST auch zur Lösung des Rätsels der Dunklen Materie beitragen. Ein Kandidat für die Teilchen der Dunklen Materie ist das so genannte Neutralino, ein Beispiel für ein „Weakly Interacting Massive Particle“ (WIMP). Zwei zusammenstoßende Neutralinos können einander annihilieren und zur Emission von Gammaquanten mit Energien zwischen 30 GeV und 10 TeV führen. Diese Vernichtungsstrahlung könnte demnach für GLAST sichtbar sein. Simulationen belegen, dass die Dichte der Dunklen Materie zum Zentrum unseres Milchstraßensystems signifikant zunehmen müsste. GLAST müsste die von diesen Neutralinos erzeugte Annihilationslinie nachweisen können.

👁 Zusammenfassung und Ausblick

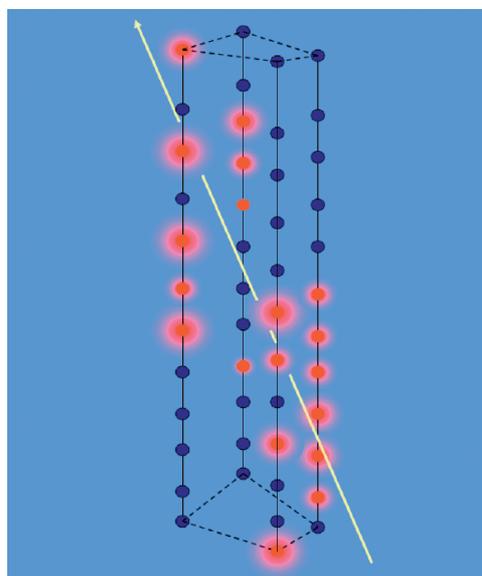
Mit der Teilnahme des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik am GLAST-Projekt soll die erfolgreiche Erforschung des Himmels im Gammalicht durch deutsche Forscher fortgeführt werden. Da dieser Wellenlängenbereich bisher noch relativ unerforscht ist, ergibt sich damit für die beteiligten Wissenschaftler die Möglichkeit, mit neuen Erkenntnissen zu einem besseren Verständnis relativistischer Teilchenbeschleunigung und ihrer verwandten Strahlungsprozesse in unserem Universum beizutragen. GLAST soll im Herbst 2007 starten und mindestens fünf Jahre lang messen.

➔ Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (Garching) und Universität Bochum

Mit den Neutrinoobservatorien NT200 im sibirischen Baikalsee und AMANDA im antarktischen Eis wurde erstmals die Idee verwirklicht, Neutrinoereaktionen in „offenen“ Medien wie Seewasser oder Eis nachzuweisen. Das Neutrinoobservatorium NT200 wird von einer russisch-deutschen, AMANDA von einer amerikanisch-europäischen Kollaboration betrieben. Das Nachfolgeprojekt von AMANDA heißt IceCube und wird gegenwärtig am Südpol installiert.



Baikal-NT200, AMANDA und IceCube: Neutrinoastronomie in Wasser und Eis



Ein Bilderbuch-Ereignis aus dem Jahr 1996: Eine Myon-Spur durchläuft den Baikaldetektor von unten nach oben und leuchtet 19 der 48 Sensorpaare aus.



Installation eines Photomultipliers im antarktischen Eis.

Bislang ist es nicht gelungen, einen Himmelskörper zu identifizieren, der Neutrinos mit hohen Energien emittiert. Gerade diese Teilchen würden aber wichtige Aufschlüsse über die ungeklärte Herkunft der höchstenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung liefern. Der Nachweis der wenigen Neutrinos, die aus den weit entfernten Quellen die Erde erreichen, erfordert wegen der geringen Reaktionswahrscheinlichkeit der Teilchen riesige Detektoren. Sie bestehen aus Lichtsensoren, die in tiefen Gewässern oder im Eis angeordnet werden. Neutrinos können im Wasser Myonen erzeugen, die ein schwaches bläuliches Leuchten aussenden. Registrieren die Sensoren dieses so genannte Tscherenkow-Licht, so lässt sich die Herkunftsrichtung der Neutrinos bestimmen.

Das erste Teleskop dieser Art heißt NT200 und ist in einer Kilometer Tiefe im sibirischen Baikalsee installiert. Hier unten sind die Sensoren großteils vor der von oben kommenden kosmischen Strahlung abgeschirmt, und man kann relativ ungestört die wenigen Teilchen herausfischen, die von unten in den Detektor eindringen. Das können nur Neutrinos sein, weil nur sie in der Lage sind, den gesamten Erdball zu durchqueren. Die Signatur „Myon-Spur von unten nach oben“ ist darum ein eindeutiger Hinweis auf eine Neutrinoereaktion.

NT200 besteht aus 192 Sensoren, die an Trossen befestigt und über ein Volumen von 70 m Höhe und 40 m Durchmesser angeordnet sind. Damit gelang 1996 der erste Nachweis solcher Spuren. Die Empfindlichkeit dieser Konfiguration wurde 2005 durch drei weit entfernte Trossen, jede mit zwölf Sensoren, auf ein Vielfaches erhöht. Die Komponenten des Baikaldetektors werden im späten Winter von der bis zu einem Meter dicken Eisdecke ins Wasser abgelassen – eine im Gegensatz zu Schiffen unbewegliche und darüber hinaus kostenlose Installationsplattform. Mit der Uferstation durch mehrere Kabel verbunden, liefert das Teleskop dann das ganze Jahr über Daten.

Mit einem halben Kilometer Höhe und 200 m Durchmesser übertrifft AMANDA (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array) NT200 beträchtlich. Dieses Neutrinoobservatorium am Südpol besteht aus 677 Lichtsensoren, die an 19 Trossen befestigt und in den drei Kilometer dicken Eispanzer der Antarktis eingefroren sind. Die zwei Kilometer tiefen Löcher für die Trossen werden mit 80 Grad heißem Wasser in das Eis geschmolzen. Die Installation geschieht bei Außentemperaturen von -30 bis -45 Grad Celsius. Da sie vor dem Rückfrieren des Loches beendet sein muss, stellt sie eine Herausforderung an Disziplin, Konzentration und physische Kondition dar. Der Erfolg von AMANDA beruht zum großen Teil auf der exzellen-

Kontakt: Dr. Christian Spiering · DESY · Platanenallee 6 · 15738 Zeuthen
Tel. 033762/77218 · christian.spiering@desy.de

ten Infrastruktur der amerikanischen Amundson-Scott-Station am Südpol.

Die Winkelauflösung von AMANDA für Myonspuren beträgt etwa zwei Grad. Weil man auch hier nur die von unten kommenden Spuren als klare Neutrino-Produkte einstuft, ist AMANDAs bevorzugtes Blickfeld der Nordhimmel. Detektoren im Baikalsee und im Mittelmeer (ANTARES) beobachten dagegen in erster Linie den Südhimmel.

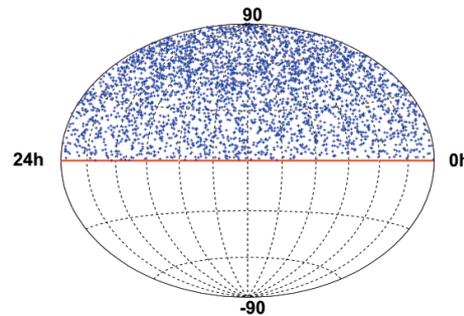
Wissenschaftliche Ergebnisse

Mit AMANDA wurden bisher mehrere tausend Neutrinoereaktionen registriert, bei NT200 sind es einige hundert. Fast alle diese Neutrinos scheinen jedoch nicht aus großer Ferne zu kommen. Sie stammen aus Reaktionen von geladenen kosmischen Strahlen in der Erdatmosphäre. Ihre Zahl und ihr Energiespektrum sind verträglich mit den Erwartungen für solche „atmosphärischen“ Neutrinos.

Ein augenscheinliches Indiz dafür liefert auch der Blick auf die Richtungsverteilung der Neutrinos, wie sie zwischen 2000 und 2003 für 3329 Neutrinos aufgezeichnet wurde. Eine starke extraterrestrische Quelle würde sich durch eine Punkthäufung in der entsprechenden Richtung zu erkennen geben. Die Verteilung der Neutrinos am nördlichen Himmel (AMANDAs Blickfeld) ist jedoch gleichmäßig. Etwaige Anhäufungen in

irgendeine Richtung sind mit statistischen Fluktuationen verträglich.

Für eine klare Entdeckung extraterrestrischer Quellen von hochenergetischen Neutrinos wird man darum wohl auf das Nachfolgeprojekt IceCube warten müssen. Während AMANDA etwa 30-mal geringere Neutrino-flüsse als die



Himmelskarte der von AMANDA registrierten Neutrinos.

bisherigen Neutrinodetektoren in Höhlen und Tunneln nachweisen kann, übertrifft IceCube AMANDA noch einmal um das Dreißigfache und stößt in einen Empfindlichkeitsbereich vor, in dem die Entdeckung einer extraterrestrischen Quelle nach gängigen astrophysikalischen Modellen fast unausweichlich erscheint.

Neutrinoteleskope sind Mehrzweckinstrumente. Neben der Beobachtung astrophysikalischer Objekte betreibt man mit NT200 und AMANDA auch die

Suche nach Zerfallsprodukten der Dunklen Materie und nach anderen exotischen Teilchen, wie magnetischen Monopolen, superschweren Teilchen, die das Analogon zu elektrischen Punktladungen darstellen. In beiden Fällen haben NT200 und AMANDA bisher Rekordausschlussgrenzen aufgestellt.

👁️ Ausblick

Bisher wurden neun Trossen des IceCube-Teleskops mit je 60 Sensoren zwischen 1400 und 2400 m Tiefe installiert. Das vollständige Neutrinoobservatorium wird aus 4800 Sensoren an 60 Trossen bestehen und ein Volumen von einem Kubikkilometer observieren. Eine zusätzliche Anordnung von Eistanks an der Oberfläche (ähnlich wie im Pierre-Auger-Observatorium) wird das Spektrum der physikalischen Möglichkeiten wesentlich erweitern. IceCube soll bis zum Jahr 2010 voll aufgebaut werden. Vielleicht lässt sich die Sensitivität dieser Anlage bei extrem hohen Energien noch einmal um einen Faktor hundert steigern, indem man akustische und Radiodetektoren in einem weitmaschigen Netz um IceCube anordnet. Entsprechende Voruntersuchungen laufen bereits.

➔ **Deutsche Beteiligungen: DESY (Zeuthen), Universitäten Dortmund, Mainz, Wuppertal und Humboldt-Universität Berlin, Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg)**

Blick auf die Amundsen-Scott-Station (rechts), das IceCube-Bohrcamp in der Mitte und die Datenzentren für IceCube und AMANDA. Links befinden sich zudem einige Radioteleskope.



Das Neutrino-Teleskop ANTARES wird zur Zeit von einer Kollaboration von etwa 200 Wissenschaftlern aus Europa und Russland vor der französischen Mittelmeerküste in einer Tiefe von 2500 Metern aufgebaut. ANTARES bietet eine zu den Südpol-Teleskopen AMANDA/IceCube komplementäre Himmelsabdeckung. Es bietet eine optimale Sicht auf das Zentralgebiet unserer Galaxis und die dort vermuteten starken Neutrinoquellen. Ein größeres Nachfolgeprojekt ist im Rahmen der europäischen KM₃NeT-Designstudie in Vorbereitung.



ANTARES und KM₃NeT: Tiefsee-Neutrino-Teleskope im Mittelmeer



Fertig montierte ANTARES-Stockwerke im Labor

Eines der großen Rätsel der Astrophysik ist die Herkunft der hochenergetischen kosmischen Strahlung, deren gemessenes Energiespektrum sich bis zu 10^{20} eV erstreckt. In den kosmischen Beschleunigern müssen bei zufälligen Wechselwirkungen der energiereichen Teilchen mit der umgebenden Materie unweigerlich instabile Teilchen wie Pionen entstehen. Wenn diese zerfallen, geben sie ein energiereiches Neutrino ab, das wegen seiner geringen Wechselwirkung die Quelle verlassen und weite Strecken im Universum zurücklegen kann. Der Nachweis dieser Neutrinos würde es ermöglichen, die Quellen der hochenergetischen kosmischen Strahlung zu identifizieren und Aufschlüsse über die Beschleunigungsmechanismen zu erlangen. Neutrino-Teleskope wie ANTARES und KM₃NeT öffnen somit ein neues Fenster zur Beobachtung der höchstenergetischen Prozesse im Kosmos.

Photosensoren in 2500 Meter Tiefe

Aus dem bekannten Fluss der kosmischen Strahlung lässt sich mit Hilfe von Modellen der erwartete Neutrinofluss abschätzen. Dabei wird deutlich, dass man Detektoren mit sehr großem Volumen in der Größenordnung von einem Kubikkilometer benötigt, um eine sinnvolle Zahl von Neutrinoereignissen zu registrieren. ANTARES ist ein Prototyp für einen solchen Detektor. Er nutzt das Wasser des Mittelmeeres als Nachweis-

medium nach folgendem Prinzip. Myon-Neutrinos erzeugen in Stößen an den Atomkernen des Wassers Myonen, die das Wasser durchlaufen und dabei Tscherenkow-Licht emittieren. Eine Reihe von optischen Sensoren, so genannte Photomultiplier, weisen diese kurzen Blitze nach.

Die Photomultiplier sind in dickwandigen Glaskugeln untergebracht, die dem Druck von 250 bar standhalten, der in einer Wassertiefe von 2500 m herrscht. Je drei Photomultiplier befinden sich auf einem „Stockwerk“ zusammen mit einem Titan-Zylinder, der die Auslese- und Steuerelektronik enthält. Insgesamt 25 Stockwerke im vertikalen Abstand von je 14,5 m bilden einen „String“, der mit einem Anker am Boden fixiert und über eine Boje am 450 m entfernten oberen Ende vertikal straff gehalten wird.

ANTARES enthält 12 von diesen Strings in einem gegenseitigen Abstand von etwa 70 m, die je über ein Bodenkabel mit der „Junction box“ verbunden sind. Sie versorgt die Instrumente mit Strom und leitet die Daten über eine Glasfaserleitung in die 40 km entfernte Station am Ufer.

Aus der zeitlichen Verteilung der Lichtsignale an den Photomultipliern lässt sich die Spur eines Myons durch das Wasser und damit auch die Einfallsrichtung des Neutrinos rekonstruieren. Hierfür muss

Kontakt: Prof. Dr. Gisela Anton · Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg · Erwin-Rommel-Str. 1 · 91058 Erlangen · Tel. 09131/852-7151 oder 7072
gisela.anton@physik.uni-erlangen.de

die Position jedes einzelnen Photomultipliiers bis auf etwa 10 cm genau bekannt sein. Deshalb befinden sich in jedem Stockwerk ein Neigungsmesser und ein Kompass, aus deren Messwerten die Orientierung (Verdrehung) des Stockwerks hervorgeht. Zudem werden über akustische und optische Laufzeitmessungen die Positionen der Stockwerke bestimmt. Im Rahmen des ANTARES-Experiments konnte gezeigt werden, dass diese Methoden zuverlässig funktionieren. Strings stellen somit eine geeignete Architektur für Neutrinooteleskope dieser Art dar, obwohl sich die Photomultiplier in der Wasserströmung bewegen.



Versenken eines ANTARES Strings im Mittelmeer

ANTARES befindet sich zur Zeit im Aufbau. Im Frühjahr 2005 wurde mit Hilfe eines Tauchroboters ein Teststring versenkt und mit der Junction Box verkabelt. Er enthält neben optischen Sensoren auch Überwachungsinstrumente wie z.B. ein Gerät zur Messung der optischen Absorptionslänge des Wassers. Der Teststring wird ein Jahr lang betrieben und sendet während dieser Zeit unablässig Daten an Land, die im Kontrollzentrum überwacht und in einer Datenbank in Lyon gespeichert werden. Der erste vollständige ANTARES-String ist Anfang 2006 in Betrieb gegangen, der Aufbau des gesamten Detektors, der ein Volumen von 10^7 Kubikmeter Wasser umfasst, soll 2007 abgeschlossen sein.

Die Abmessungen von ANTARES lassen nur unter optimistischen Modellannahmen erwarten, dass man außer „atmosphärischen“ Neutrinos (die in Wechselwirkungen der geladenen kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre entstehen) auch in großer Zahl Neutrinos von kosmischen Quellen nachweisen kann. Erst das zukünftige, einen Kubikkilometer große Neutrinooteleskop KM₃NeT wird es ermöglichen, bis zu einige hundert „extraterrestrische“ Neutrinos pro Jahr nachzuweisen. Dann steht auch zu erwarten, dass in größerem Umfang die gleichzeitige Beobachtung astrophysikalischer Objekte mit Gammastrahlung



Oben: Bemanntes U-Boot „Nautil“ kurz vor dem Einsatz; Unten: Verbinden eines der Strings mit der „Junction Box“.

und Neutrinos (Multi-Messenger-Methode) möglich wird, was eine völlig neue Qualität in der Interpretation der Daten eröffnet.

Das KM₃NeT-Projekt ist eine gemeinsame Initiative der Arbeitsgruppen in den derzeitigen Neutrinooteleskop-Projekten im Mittelmeer (ANTARES, NEMO und NESTOR) und bündelt damit die Erfahrung der Wegbereiter in der Tiefsee-Neutrinooteleskopie. Im Rahmen einer dreijährigen EU-finanzierten Designstudie wird ab Februar 2006 unter Koordination der Universität Erlangen der Technical Design Report für KM₃NeT erarbeitet, so dass ab 2009 dessen Aufbau erfolgen kann.

Die Daten dieses Neutrinoobservatoriums werden öffentlich verfügbar sein. Zudem ist vorgesehen, durch gezielte Anpassung der Online-Filteralgorithmen eine gesteigerte Sensitivität für bestimmte Beobachtungsrichtungen am Himmel zu erzielen. Dann kann man nach speziellen Kandidaten für Neutrinoquellen Ausschau halten. Entsprechende Beobachtungszeit mit KM₃NeT wird der gesamten wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung stehen. Dies und die Anbindung von Meeresforschungsaktivitäten macht KM₃NeT zu einer multidisziplinären Forschungs-Infrastruktur.

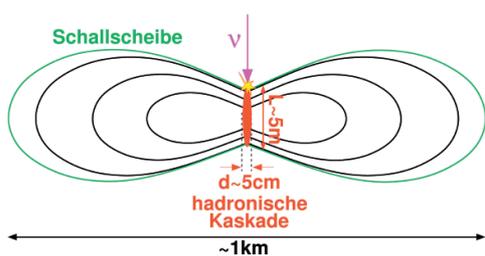
👁️ Ausblick

ANTARES und die anderen Neutrinooteleskop-Projekte im Mittelmeer haben eine langjährige Entwicklungsphase hinter sich, in der die Machbarkeit des Neutrino nachweises in Meerwasser erbracht wurde. Damit ist der Weg frei für das eigentliche Ziel, nämlich das Neutrinoobservatorium KM₃NeT mit einem Volumen von einem Kubikkilometer. Es könnte im kommenden Jahrzehnt IceCube ergänzen. Dann wäre erstmals Neutrinoastronomie an Nord- und Südhimmel möglich.

➔ **Deutsche Beteiligung:**
Universität Erlangen-Nürnberg

Hochenergetische Neutrinos werden in Neutrinooteleskopen wie Amanda und Antares auf optischem Wege beobachtet. Der akustische Teilchennachweis kann hierzu eine erfolgversprechende Ergänzung bilden. Bei diesem Verfahren misst man den Schallpuls, den ein Teilchenschauer – hervorgerufen durch Neutrinos – in Wasser oder Eis verursacht. Forscher aus Schweden, den USA und Deutschland testen dieses neue Verfahren.

Horchposten für hochenergetische Neutrinos



Ein Neutrino erzeugt nach einer Wechselwirkung in Wasser oder Eis einen Teilchenschauer, der senkrecht dazu Schall in Form einer Scheibe abstrahlt.



Akustische Testmessungen im Wassertank in Erlangen

Bislang sollen hochenergetische kosmische Neutrinos mit Neutrinooteleskopen nachgewiesen werden, die sich im Wasser oder im antarktischen Eis befinden. In diesen Medien erzeugen die Neutrinos indirekt über geladene Sekundärteilchen schwache Lichtblitze, die sich mit optischen Sensoren nachweisen lassen. In Deutschland untersuchen zwei Forschergruppen alternativ dazu den akustischen Nachweis von Neutrinos.

Schon 1957 wies der Physiker Gurgen Askariyan auf die Möglichkeit der akustischen Detektion von Teilchen hin. Durchfliegen geladene Teilchen ein Medium, so deponieren sie entlang ihrer Bahn Energie. Dadurch erwärmt sich das Material kurzzeitig und dehnt sich aus. Dies hat einen bipolaren Schallpuls zur Folge, der sich senkrecht zur Teilchenspurspur ausbreitet. Man spricht von einer Schallscheibe, die sich mit empfindlichen Druckmessgeräten nachweisen lässt.

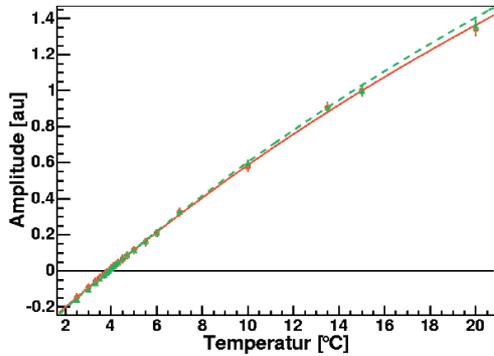
Der Vorteil dieses akustischen Nachweises gegenüber dem optischen besteht darin, dass Schall in Wasser oder Eis eine Reichweite von mehreren Kilometern besitzt, während Licht nach etwa 100 m bereits stark abgeschwächt ist. Daher kann man mit einem akustischen Detektor mit weniger Sensoren ein größeres Volumen überwachen – eine entscheidende Voraussetzung für den Nachweis energiereicher Neutrinos aus dem Universum.

Erste Tests mit Wasser und Eis

Askariyans thermoakustisches Modell wurde von zwei Gruppen in Erlangen und Zeuthen getestet. Die Erlanger Physiker simulierten den Schauer von Sekundärteilchen mit einem Beschleunigerstrahl und mit einem Laser. Die Messung der Schallpulse erfolgte mit einem Unterwassermikrophon (Hydrophon). Ein solches Gerät besteht im Wesentlichen aus einem Piezosensor, der in einer Kunststoffhülle eingegossen ist. Kommerzielle Hydrophone, die zum Fischfang (Echolot) und zu militärischen Zwecken eingesetzt werden, eignen sich nur bedingt zum Nachweis der zu erwartenden schwachen Signale. Ein typischer neutrinoinduzierter Teilchenschauer mit einer Energie von 10^{18} eV führt nämlich in einem Abstand von 400 m zum Schauer zu einer Druckamplitude von nur 5 mPa bei einem Umgebungsdruck in 2500 m Tiefe von 25 MPa, d.h. der Umgebungsdruck ist milliardenfach größer als die Schalldruckamplitude. Entwicklung und Bau von Hydrophonen, die optimal an die Bedürfnisse der akustischen Teilchendetektion angepasst sind, bilden daher eine besondere Herausforderung bei dieser neuen Messtechnik.

Neben Hydrophonen stellen so genannte akustische Module eine zweite Möglichkeit zur akustischen Detektion dar. Hierbei werden Glaskugeln mit Piezosensoren ausgestattet. Diese Technik hätte

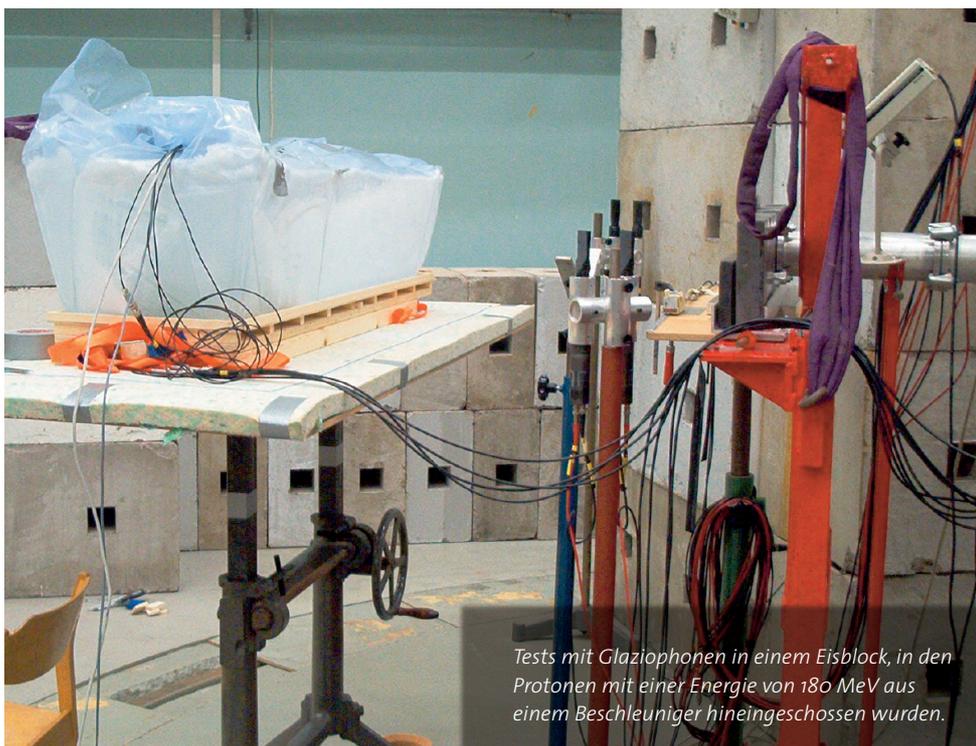
Kontakte: Prof. Dr. Gisela Anton · Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg · Erwin-Rommel-Str. 1 · 91058 Erlangen · Tel. 09131/852-7151 oder 7072 gisela.anton@physik.uni-erlangen.de · Dr. Rolf Nahnauer · DESY · Platanenallee 6 15738 Zeuthen · Tel. 033762/77346 · rolf.nahnauer@desy.de



Test des thermoakustischen Modells in Erlangen. Pulse eines Infrarotlasers werden in einen Wassertank mit variabler Temperatur geschossen und das resultierende Schallsignal (Amplitude) gemessen. Das Verschwinden des Signals bei 4 Grad Celsius und die Signalumkehr unterhalb von 4 Grad belegt, dass der Schallpuls aufgrund der Wärmeausdehnung des Wassers entsprechend dem thermoakustischen Modell entsteht. Unterhalb von 4 Grad Celsius zieht sich Wasser zusammen, wenn Wärme zugeführt wird.



Varianten von Glaziophonen



Tests mit Glaziophonen in einem Eisblock, in den Protonen mit einer Energie von 180 MeV aus einem Beschleuniger hineingeschossen wurden.

den Vorteil, dass man die Instrumente in die druckfesten Kugeln der optischen Sensoren von ANTARES integrieren könnte. Diese sind für den Einsatz in 2500 m Wassertiefe ausgelegt und benötigen keine aufwendigen Drucktests mehr. Bisherige Laborexperimente im Wassertank belegen, dass sich diese akustischen Module sowohl von der Empfindlichkeit als auch der getreuen Wiedergabe der Schallpulse her für den akustischen Neutrinonachweis eignen. Bei diesen Experimenten erzeugte ein kalibrierter Schallsender Signale, wie man sie von einem neutrinoinduzierten Schauer erwartet.

Bei DESY arbeitet man seit mehreren Jahren an einer Studie zum akustischen Neutrinonachweis im antarktischen Eis. Die Materialeigenschaften von Eis lassen erwarten, dass Neutrino-Wechselwirkungen darin etwa zehnmals stärkere Signale erzeugen als im Wasser. Gleichzeitig besteht die begründete Hoffnung, dass der akustische Untergrund (Wind an der Oberfläche, Wellenbewegung, thermische Bewegung der Moleküle) geringer ist. Simulationsrechnungen zeigen, dass ein etwa hundert Kubikkilometer großer Detektor aus akustischen und Radiosensoren, die IceCube umgeben, mehr als zehn GZK-Neutrinoereignisse pro Jahr mit beiden Techniken gleichzeitig messen könnte. Die Neutrinos stammen aus Wechselwirkungen von höchst-

energetischen kosmischen Protonen mit Photonen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung.

Da keine kommerziellen akustischen Sensoren für feste Materialien wie Eis existieren, hat die DESY-Gruppe solche „Glaziophone“ entwickelt und getestet. Dabei wurden in Beschleunigertests wesentliche Voraussagen des thermoakustischen Modells bestätigt. Kalibrationsmessungen in einem 12 mal 10 mal 5 m³ großen Tank demonstrierten, dass die Glaziophone ein bis zu 50-fach besseres Signal-zu-Untergrund-Verhältnis aufweisen als kommerzielle Hydrophone.

👁️ Ausblick

Bisherige Testmessungen in Wasser und Eis lassen den akustische Nachweis von höchstenergetischen Neutrinos als sinnvolle Ergänzung zum optischen Nachweis erscheinen. Mit dieser Technik könnte man große Detektorvolumina realisieren. Sie sind nötig, um die sehr geringen Neutrinoflüsse, die bei den höchsten Energien erwartet werden, nachweisen zu können.

Um in der nächsten Dekade einen akustischen Detektor mit hundert Kubikkilometer Volumen am Südpol installieren zu können, sind Messungen der Schall-Absorptionslänge und des Untergrund-Rauschens vor Ort geplant. Die Zeuthener Gruppe hat dafür, gemeinsam mit Partnern der Universitäten in Berkeley, Stockholm und Uppsala den „South Pole Acoustic Test Setup“ (SPATS) gebaut. Am Ausbau des Detektors beteiligen sich inzwischen auch Gruppen der Universitäten Aachen und Wuppertal. Er besteht aus drei Strings mit je sieben akustischen Stationen aus Sensoren und Transmittern, die in der Saison 2006/2007 in drei IceCube-Bohrlöchern bis in 400 m Tiefe versenkt werden sollen. Resultate der Messungen werden nach etwa einem Jahr verfügbar sein.

Ziel ist es, akustische Nachweissysteme in die Neutrinoteleskope Icecube und ANTARES zu integrieren. Sie könnten die Effizienz beider Observatorien stark erhöhen.

➡ Deutsche Beteiligungen: DESY (Zeuthen), Universität Erlangen-Nürnberg

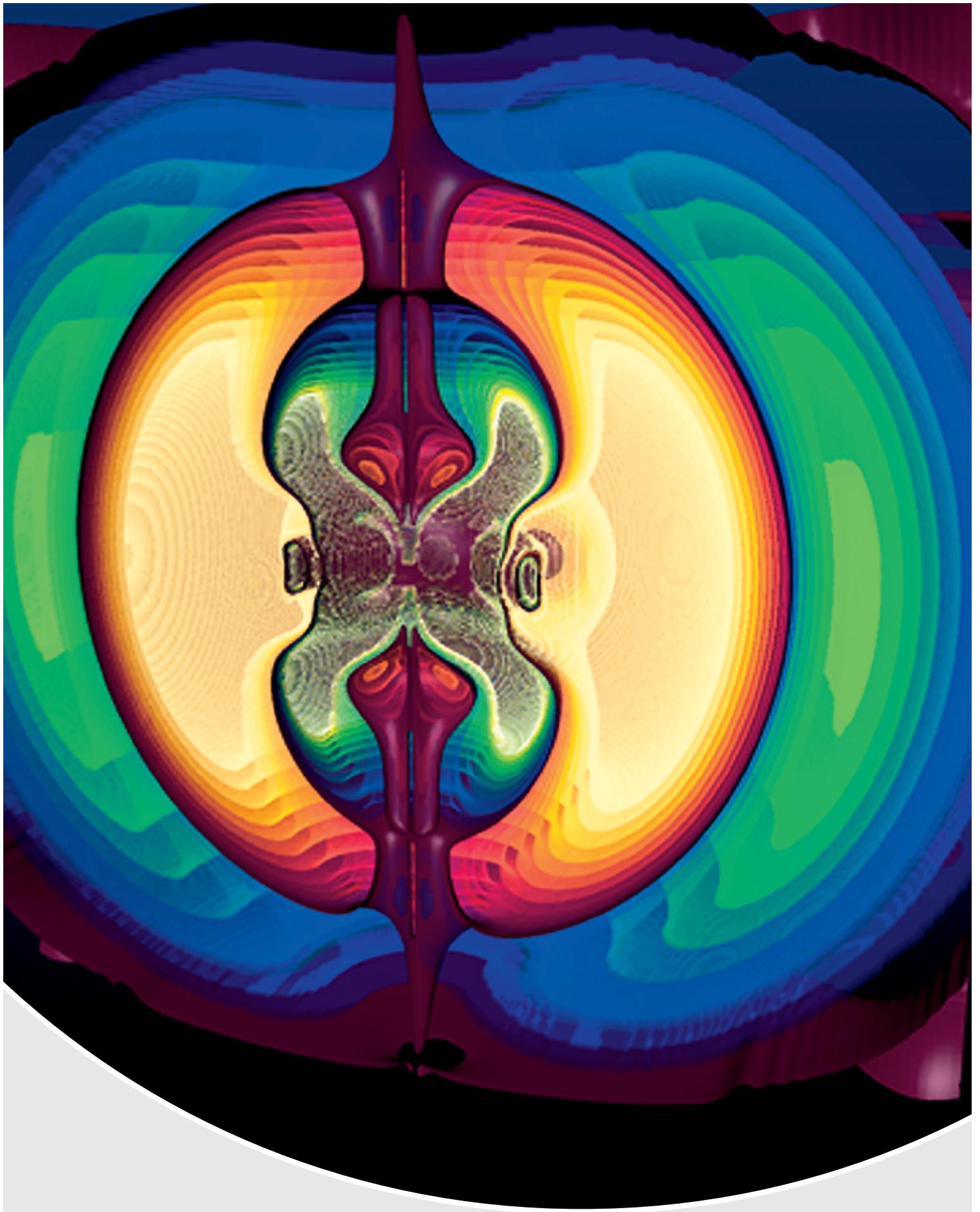
GRAVITATIONSWELLEN

⇒ **Gravitationswellen-Astronomie:**

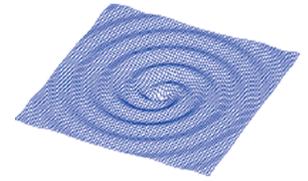
Theoretische Berechnung und
Astrophysikalische Quellen

⇒ **Geo600 und LISA:**

den Gravitationswellen auf der Spur

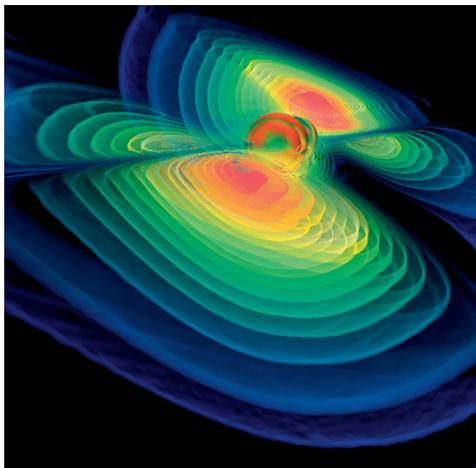


Gravitationswellen sind im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Verzerrungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Indirekt ließen sich Gravitationswellen bereits nachweisen, die direkte Messung steht aber noch aus. Wichtige Voraussetzung hierfür sind nicht nur extrem empfindliche Detektoren, sondern auch theoretische Vorhersagen der zu erwartenden Signale. Mehrere Gruppen in Deutschland arbeiten, koordiniert in einem Trans-regio-Sonderforschungsbereich der DFG, an diesem Problem.



SFB/TR 7

Gravitationswellen-Astronomie: Theoretische Berechnung und Astrophysikalische Quellen



Computersimulation von zwei miteinander verschmelzenden Schwarzen Löchern. Die farbigen zwiebelartigen Strukturen zeigen die sich entfernenden Gravitationswellen. Die schalenförmigen scheinbaren Horizonte der Schwarzen Löcher im Mittelpunkt der Grafik sind dunkelrot gekennzeichnet (MPI für Gravitationsphysik und ZIB, W. Benger mit Amira).

In Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wird die Gravitation oder Schwerkraft als Krümmung der Raumzeit beschrieben. Gravitationswellen entstehen immer dann, wenn sich Massen beschleunigt bewegen. Sie sind eine „Kräuselung“ der Raumzeit, die sich – ähnlich wie eine konzentrische Welle auf dem Wasser – im Raum ausbreitet. Enge Doppelsternsysteme, Supernovae und verschmelzende Doppelsternsysteme gehören zu den stärksten Quellen. Der Bau empfindlicher Detektoren wie GEO600 hat die Beschäftigung mit der Theorie der Gravitationsstrahlung zur vordringlichen Forschungsaufgabe auf diesem Gebiet werden lassen. Mit analytischen und numerischen Methoden löst man unter Einsatz von leistungsstarken Computern die Einsteinschen Feldgleichungen, um die Pulsformen von Gravitationswellen zu berechnen, wie man sie auf der Erde zu erwarten hat.

„Kräuselungen“ der Raumzeit

Gravitationswellen werden häufig als „Kräuselungen“ der Raumzeit bezeichnet. Obwohl sie sich noch nicht direkt nachweisen ließen, kann man theoretisch einige Eigenschaften vorhersagen. Dabei bieten sich Vergleiche mit der Elektrodynamik an, die auch Einstein schon bemühte.

Beschleunigte Massen erzeugen Gravitationswellen, die sich im Vakuum mit

Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Dieser Vorgang hat in der Elektrodynamik sein Pendant: Dort lösen beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen aus. Während es jedoch positive und negative elektrische Ladungen gibt, hat die Masse nur *ein* Vorzeichen, es existieren keine negativen Massen. Aus diesem Grund gibt es im Zusammenhang mit dem Schwerpunktsatz der Mechanik keine zeitlich veränderlichen Gravitationsdipole, sondern die Gravitationsstrahlung ist in niedrigster Ordnung eine Quadrupolstrahlung.

Ein weiterer Unterschied zwischen Gravitationswellen und elektromagnetischen Wellen besteht darin, dass sich in der Elektrodynamik die Wellen linear überlagern (Superpositionsprinzip). Wegen der Nichtlinearität der Einsteinschen Feldgleichungen ist dies bei Gravitationswellen im Allgemeinen nicht der Fall. Nur bei sehr schwachen Gravitationsfeldern gilt näherungsweise das Superpositionsprinzip. Dies erschwert die Berechnung der Wellenlösungen für beliebige physikalische Situationen ganz erheblich. In vielen Fällen lassen sich deshalb lediglich Näherungslösungen ermitteln.

In einer bislang nicht gelungenen quantenfeldtheoretischen Beschreibung der Gravitation wird die Gravitationswechselwirkung durch masselose Gravitonen vermittelt werden, das bedeutet Gravita-

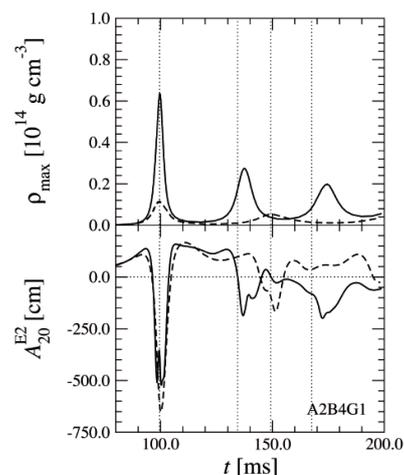
Kontakt: Prof. Dr. Gerhard Schäfer · Friedrich-Schiller-Universität Jena
Theoretisch-Physikalisches Institut · Max-Wien-Platz 1 · 07743 Jena
Tel. 03641/9-47114 · gos@tpi.uni-jena.de

tionswellen werden in quantisierten Einheiten emittiert oder absorbiert. Diese Eigenschaft entspricht der Funktion der Photonen in der Elektrodynamik. Während ein Photon Spin 1 besitzt, erwartet man für Gravitonen (Quadrupol) den Spin 2. Die zu messenden schwächsten Gravitationswellen werden aufgrund der niedrigen Frequenzen der Gravitationswellen von typisch einigen tausend Hertz und kleiner sehr viele Gravitonen beinhalten, so dass hier – im Gegensatz zu stärkeren Gravitationswellen – der Quantenaspekt experimentell keine Rolle spielt.

Gravitationswellen sind Transversalwellen, genauer gesagt: Sie sind transversal polarisiert mit zwei unabhängigen Freiheitsgraden. Durchquert eine solche Welle ein Raumgebiet, so wird darin eine kreisförmige Ansammlung freier Teilchen für das Zeitintervall des Durchgangs in der Polarisationssebene flächenerhaltend deformiert. Die beiden hierbei entstehenden Ellipsen sind dabei – zugehörig zu jeweils einem der unabhängigen linearen Polarisationsfreiheitsgrade – um 45 Grad gegeneinander gedreht. In der Elektrodynamik ist der entsprechende Winkel 90 Grad.

Auf der Suche nach den Quellen

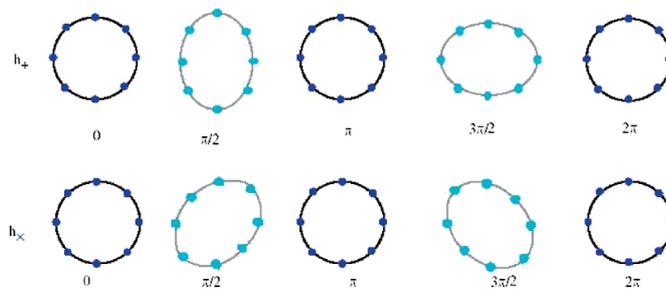
Die wohl wichtigsten Quellen von Gravitationswellen sind kompakte Doppelsysteme, in denen Neutronensterne und/oder Schwarze Löcher sich umkreisen und schließlich verschmelzen. Aber auch Supernovae tragen zu messbaren Gravitationswellen-Signalen bei.



Verlauf von Materiedichte und Gravitationswellenamplitude beim Gravitationskollaps eines rotierenden Sterns (gestrichelt: Newtonsche Beschreibung der Bewegung des Sterns, durchgezogen: allgemein-relativistische Beschreibung der Bewegung des Sterns) (MPA, Dimmelmeier).

Die Messung von Gravitationswellen wäre einerseits eine weitere brillante Bestätigung für die Allgemeine Relativitätstheorie. Darüber hinaus aber lassen sich aus den Gravitationswellen-Signalen verschiedenste Parameter der Quellen ableiten. Im Falle von Doppelsternsystemen könnte man die Massen und die Rotation der beiden Komponenten bestimmen, auch deren Bahnformen und Spinbewegungen sowie die Radien, Schwingungsmoden, Zustandsgleichungen und Gezeitendeformationen der Körper ließen sich ableiten. Gravitationswellen von Supernovae beinhalten Informationen über Rotationsverhalten sowie Masse und Zustandsgleichung des kollabierenden Objekts. Schließlich wäre die Signatur einer Gravitationswelle bei der Entstehung eines Schwarzen Loches so charakteristisch, dass man daran die Existenz dieser exotischen Himmelskörper klar erkennen würde.

Unter dem Dach des Transregio-Sonderforschungsbereiches SFB/TR7 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, betitelt „Gravitationswellenastronomie: Methoden – Quellen – Beobachtung“ (mit Leitung an der Universität Jena), befassen sich derzeit mehrere Theoriegruppen in Deutschland mit unterschiedlichen Aspekten der Gravitation. Hierzu gehört erstens die detaillierte Untersuchung der Feldgleichungen: Dies beinhaltet die Analyse asymptotisch flacher Raumzeiten, die numerische Berechnung von Gravitationswellen und die Entwicklung analytischer Näherungsverfahren. Zweitens Struktur und Dynamik kompakter Objekte: dazu zählen rotierende Neutronensterne und deren Übergang zu Schwarzen Löchern, Schwingungsmoden



Wirkung von Gravitationswellen auf einen Ring von Testmassen, der in transversaler Richtung zur Ausbreitungsrichtung der Gravitationswelle abwechselnd gestaucht und gestreckt wird. Der eine mögliche Polarisationszustand + führt zu einer Verformung in einer bestimmten Richtung, der andere x in der um 45 Grad gedrehten Richtung.

den rotierender Neutronensterne, der Gravitationskollaps kompakter astrophysikalischer Objekte sowie kollidierende Schwarze Löcher und Neutronensterne. Drittens der Nachweis von Gravitationswellen-Signalen: Hier ist die Interpretation von Gravitationswellen-Signalen ein bedeutender Aspekt.

Ausblick

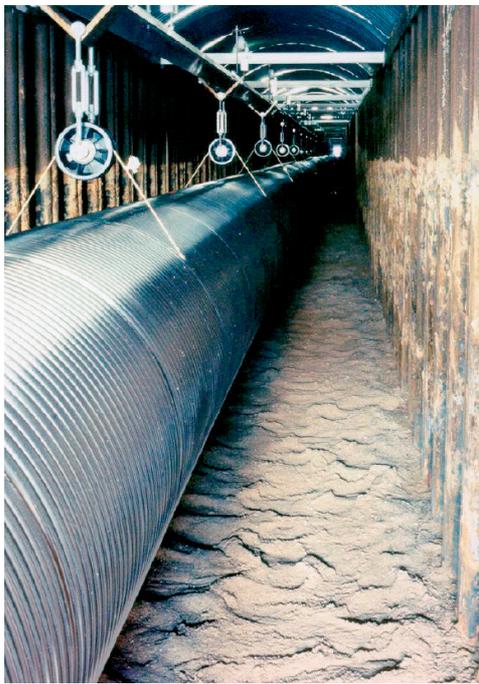
Die derzeit vordringlichste Aufgabe der theoretischen Gravitationswellenforschung besteht in der Berechnung hochgenauer Gravitationswellenformen (so genannter Templates) von zwei sich umkreisenden kompakten Himmelskörpern, die sich einander auf einer spiralförmigen Bahn nähern und schließlich kollidieren. Solche Doppelsternsysteme bestehen aus Neutronensternen und/oder Schwarzen Löchern. Hierbei kommt es entscheidend darauf an, aus den Wellenformen möglichst genau die Eigenschaften (Systemparameter) der Quellen herauszufinden. Entsprechendes gilt auch für den Gravitationskollaps zu Schwarzen Löchern. Mit dem ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen wird der Grundstein zur beobachtenden Gravitationswellenastronomie gelegt sein, mit deren Messdaten es dann zur reichhaltigsten Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie kommen wird. Sehr spannend kann es werden, wenn theoretisch noch nicht modellierte Messdaten empfangen werden. Sie könnten Hinweise auf eine fundamentalere physikalische Ebene enthalten.

➔ Standorte des SFB/TR7: Universitäten Hannover, Jena und Tübingen, Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik (Golm) und für Astrophysik (Garching)

Im Jahr 1916 sagte Einstein die Existenz von Gravitationswellen voraus. Bis heute ließen sich solche lichtschnell wandernden „Kräuselungen“ der Raumzeit nicht direkt nachweisen. Die zweifelsfreie Messung von Gravitationswellen wäre eine weitere glänzende Bestätigung von Einsteins Theorie. Gleichzeitig enthalten Gravitationswellen Informationen über Vorgänge im Kosmos, die man auf keine andere Art und Weise erhalten kann. Weltweit arbeiten derzeit vier Gravitationswellendetektoren – einer davon in der Nähe von Hannover.



Geo600 und LISA: Gravitationswellen auf der Spur



Der Laserstrahl von GEO600 läuft in evakuierten Röhren, die vibrationsfrei aufgehängt sind.

Wenn Massen sich beschleunigt bewegen, erzeugen sie wellenartige Störungen der Raumzeitgeometrie, so genannte Gravitationswellen. Durchquert eine Gravitationswelle ein Raumgebiet, so kommt es zu einer kurzfristigen, rhythmischen Stauchung und Dehnung des Raums: Die Abstände zwischen Objekten ändern sich. Einstein glaubte, der Effekt sei so klein, „dass man Gravitationswellen wohl nie beobachten wird“, wie er 1916 schrieb. Heute gibt es weltweit mehrere Anlagen, um sie aufzuspüren, eine davon, das deutsch-britische Projekt GEO600, befindet sich in Deutschland.

Der Nachweis von Gravitationswellen stößt auf ganz erhebliche technische Schwierigkeiten, weil ihre Wirkung sehr klein ist. Selbst bei einer im kosmischen Maßstab vergleichsweise nahen Sternexplosion in einer Nachbargalaxie würde die hierbei entstehende Gravitationswelle den Abstand zwischen Erde und Sonne für wenige tausendstel Sekunden um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms verändern. Auf kürzeren Distanzen ist der Effekt entsprechend kleiner: Der Abstand zwischen Testobjekten, die einen Kilometer voneinander entfernt sind, ändert sich nur um ein Tausendstel des Durchmessers eines Protons.

GEO600 – eines der empfindlichsten Interferometer der Erde

GEO600 basiert auf dem klassischen Prinzip eines Michelson-Interferome-

ters. Es misst die Phasenverschiebung zwischen zwei Lichtwellen, die jeweils einen von zwei Interferometerarmen durchlaufen. In der Praxis wird ein einfallender Laserstrahl geteilt. Beide Teilstrahlen durchqueren dann senkrecht zueinander die Messstrecke, werden an Spiegeln reflektiert, von einem weiteren Spiegel wieder zusammengeführt und in einem gemeinsamen Punkt auf einem Photodetektor überlagert. Hier entsteht ein Interferogramm. Läuft eine Gravitationswelle durch die Anlage hindurch, so verändern sich kurzzeitig die Längen der beiden Lichtwege. Dadurch sind die beiden Lichtwellen nicht mehr in Phase, was sich in einem Flimmern des Interferogramms äußert.

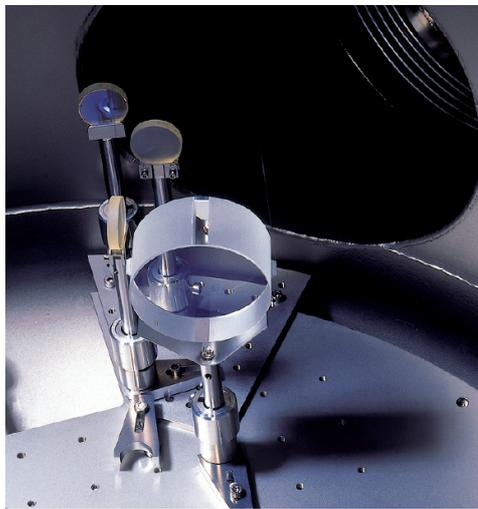
Weltweit gibt es derzeit vier Anlagen, die nach diesem Prinzip arbeiten. Dazu gehört das deutsch-britische Projekt GEO600 in der Nähe von Hannover. Die Vielzahl der Antennen ermöglicht es, die Quellen von Gravitationswellen am Himmel zu lokalisieren.

Bei der Realisierung von GEO600 wurde in vielen Bereichen technisches Neuland beschritten. So verfügen die optischen Bauteile über aktive und passive Dämpfungssysteme, und um die thermischen Fluktuationen der Luftdichte innerhalb der Anlage möglichst klein zu halten, ist das Interferometer in Röhren installiert, die bis auf 10^{-11} bar evakuiert sind.

Kontakt: Prof. Dr. Karsten Danzmann · Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) · Callinstraße 38 · 30167 Hannover · Tel. 0511/762-2229
office-hannover@aei.mpg.de

Power- und Signalrecycling

Eine besondere Herausforderung stellt auch die Entwicklung von geeigneten Lasern dar. Diese müssen nicht nur besonders leistungsstark sein, sondern auch extrem stabil bezüglich Frequenz, Amplitude und geometrischer Verteilung des Lichts. Für GEO600 wurde eigens ein Nd:YAG-Lasersystem mit einer Ausgangsleistung von fast 20 Watt entwickelt. Das ist zwar beachtlich für einen Dauerstrichlaser dieser Stabilität, aber bei weitem nicht ausreichend, denn die umlaufende Lichtleistung kann bei GEO600 bis zu 20 Kilowatt betragen.



Der deutsch-britische Gravitationswellendetektor ist gleichzeitig Ideenschmiede und Versuchslabor für die technologischen Verbesserungen, die für die nächste Generation von Detektoren benötigt werden. Die bisher verfügbaren Technologien wurden an ihre Grenzen getrieben und weiterentwickelt: Laserstabilisierung, absorptionsfreie Optik, Regelungstechnik, Schwingungsdämpfung und Datenverarbeitung.

Eine wesentliche Erhöhung der Laserleistung erreicht man durch ein Verfahren, das auf einer resonanten Verstärkung des Laserlichts beruht. Das funktioniert wie folgt: GEO600 arbeitet nach der so genannten Nullmethode. Hierbei wird der Ausgang des Interferometers mithilfe von Regelkreisen dunkel gehalten (destruktive Interferenz). Am Eingang befindet sich ein hochreflektierender Spiegel, der das zurückkommende und einfallende Licht phasenrichtig überlagert und ins Interferometer zurückschickt. Auf diese Weise lässt sich die Lichtintensität im Innern des Interferometers bis zu einem Faktor 2000 überhöhen.

Dieses „Power-Recycling“ nutzen alle laserinterferometrischen Gravitationswellendetektoren. GEO600 verwendet

es aber als einziger Detektor auf folgende Weise auch zur Signalverstärkung: Eine Gravitationswelle verursacht im Laserlicht eine Phasenmodulation. Dadurch werden Seitenbänder erzeugt, die gegenüber dem ursprünglichen Träger, der Laserfrequenz, um die Gravitationswellenfrequenz verschoben sind. Am Interferometerausgang erscheinen also die signalinduzierten Seitenbänder. Diese lassen sich ebenfalls resonant überhöhen, indem man einen weiteren hochreflektierenden Spiegel in den Ausgang stellt und auslaufendes und reflektiertes Signal phasenrichtig überlagert. Da es sich um ein Resonanzphänomen han-



delt, erhält man eine kleinere Bandbreite bei gleichzeitiger Überhöhung der Resonanzfrequenz. Durch dieses „Signal-Recycling“ lässt sich das Ausgangssignal um mehr als einen Faktor 100 verstärken. Außerdem kann man durch Wahl der Resonatorlänge, also durch die Lage des Spiegels, das Interferometer auf eine bestimmte Signalfrequenz abstimmen. Auf diese Weise ist es möglich, gezielt nach vermuteten Frequenzen – beispielsweise eines bekannten Doppeltsternsystems – zu suchen.

Im Jahr 2001 startete der erste erfolgreiche Testlauf mit GEO600, knapp ein Jahr darauf kam es zu einem Koinzidenzlauf mit dem amerikanischen Pendant LIGO. Seitdem wurde die Empfindlichkeit beständig gesteigert und hatte Ende 2005

fast die Designempfindlichkeit erreicht. Im Sommer 2006 geht GEO600 in den 24-Stunden-Dauerbetrieb über.

Genau so wichtig wie das Messgerät selbst ist eine ausgeklügelte Software, um in dem Datenmeer die Signale der gesuchten Gravitationswellen zu finden. Zur Auswertung der dabei anfallenden Datenmengen ist ein Vielfaches der Leistung heute verfügbarer Superrechner nötig. Aus diesem Grunde wurde das Projekt Einstein@home ins Leben gerufen. Nach Anmeldung kann jeder PC-Besitzer Datenpakete empfangen und auswerten.

👁️ Ausblick auf LISA

Mit GEO600 und den anderen bereits laufenden Gravitationswellen-Detektoren bestehen Chancen, bestimmte Himmelskörper zu finden. Das sind vor allem Supernovae vom Typ II, enge Doppelsysteme, bestehend aus Neutronensternen und/oder Schwarzen Löchern, sowie schnell rotierende Neutronensterne. Aufgrund einer Fülle natürlicher Störquellen, wie Vibrationen von Verkehr oder Mikrobeben, können diese Interferometer aber nur im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 000 Hz messen. Gravitationswellen mit geringerer Frequenz lassen sich nur im Weltraum nachweisen. Dies soll LISA (Laser Interferometer Space Antenna) ermöglichen. LISA besteht aus drei Satelliten, die an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit einer Armlänge von fünf Millionen km angeordnet sind und das Interferometer bilden. Der Mittelpunkt des Dreiecks folgt, um 20° versetzt, der Erde in ihrer Bahn um die Sonne. Die drei Satelliten enthalten Laser und frei fliegende Testmassen. Wegen der extrem großen Armlänge ist LISA im niederfrequenten Bereich von 10^{-4} Hz bis 1 Hz empfindlich. LISA ist ein Gemeinschaftsprojekt von NASA und ESA. Das Albert-Einstein-Institut entwickelt die benötigten interferometrischen Techniken und koordiniert die europäische Zusammenarbeit. LISA soll 2015 starten. Ein Testsatellit mit dem Namen LISA-Pathfinder ist bereits im Bau und wird voraussichtlich 2009 starten.

➔ **Deutsche Arbeitsgruppen: Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik (Golm und Hannover) und für Quantenoptik (Garching), Universität Hannover.**

Standorte und Internationale Beteiligung an Projekten der Astroteilchenphysik in Deutschland



1. Planck Satellit

(Weltraumstart 2007/2008 geplant)

Langrange-Punkt L2, 1,5 Millionen Kilometer außerhalb der Erdbahn auf der Sonne-Erde-Verbindungslinie

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für Astrophysik (Garching), Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg*
Und Institutionen aus fast allen europäischen Ländern, Kanada und den USA

2. CRESST

Gran Sasso Untergrund Labor, Italien

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für Physik (München), Universität Tübingen, Technische Universität München*
Und Institutionen aus Italien und Großbritannien

3. EDELWEISS

Fréjus Tunnel, Frankreich-Italien

➔ *Deutsche Beteiligungen: Universität und Forschungszentrum Karlsruhe*
Und Institutionen aus Frankreich

4. KATRIN (im Aufbau)

Forschungszentrum Karlsruhe

➔ *Deutsche Beteiligungen: Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, Universitäten Mainz, Münster und Bonn, Fachhochschule Fulda*
Und Institutionen aus Großbritannien, Russland, Tschechien und den USA

5. GERDA (im Aufbau)

Gran Sasso Untergrund Labor, Italien

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institute für Kernphysik (Heidelberg) und für Physik (München), Universität Tübingen*
Und Institutionen aus Italien, Polen und Russland

6. Double Chooz (im Aufbau)

Chooz, Ardennen-Region, Frankreich

➔ *Deutsche Beteiligungen: Technische Universität München, Universitäten Tübingen und Hamburg, RWTH Aachen, Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg)*
Und Institutionen aus Frankreich, Italien, Russland, Spanien und den USA

7. Borexino

Gran Sasso Untergrund Labor, Italien

➔ *Deutsche Beteiligungen: Technische Universität München, Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg)*
Und Institutionen aus Frankreich, Italien, Polen, Russland, Ungarn und den USA

8. CAST

CERN, Genf, Schweiz

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institute für extraterrestrische Physik (Garching) und für Physik (München), Technische Universität Darmstadt, Universitäten Frankfurt und Freiburg*
Und Institutionen aus Frankreich, Griechenland, Kanada, Kroatien, Russland, Schweiz, Spanien, Türkei und den USA

9. Pierre-Auger Observatorium

Provinz Mendoza, Argentinien

➔ *Deutsche Beteiligungen: Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, RWTH Aachen, Universitäten Bonn, Siegen und Wuppertal, Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Bonn)*
Und Institutionen aus Argentinien, Australien, Bolivien, Brasilien, Frankreich, Großbritannien, Italien, Mexiko, Niederlande, Polen, Slovenien, Spanien, Tschechien und den USA

10. KASCADE-Grande

Forschungszentrum Karlsruhe

➔ *Deutsche Beteiligungen: Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, Universitäten Siegen und Wuppertal*
Und Institutionen aus Italien, Polen und Rumänien

11. LOPES

Forschungszentrum Karlsruhe

➔ *Deutsche Beteiligungen: Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Bonn), Universitäten Bonn, Siegen und Wuppertal*
Und Institutionen aus Italien, Niederlande, Polen und Rumänien

12. AMS (im Bau)

International Space Station

➔ *Deutsche Beteiligungen: Universität Karlsruhe (TH), RWTH Aachen*
Und Institutionen aus China, Finnland, Frankreich, Italien, Portugal, Rumänien, Russland, Schweiz, Spanien, Süd Korea, Taiwan und den USA

13. H.E.S.S.

Namibia

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg), Landessternwarte Heidelberg, Universitäten Bochum, Hamburg, Tübingen und Humboldt-Universität Berlin*
Und Institutionen aus Armenien, Frankreich, Großbritannien, Irland, Namibia, Polen, Südafrika und Tschechien

14. MAGIC

La Palma, Kanarische Inseln, Spanien

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für Physik (München), Humboldt-Universität Berlin, Universitäten Dortmund und Würzburg*
Und Institutionen aus Armenien, Bulgarien, Finnland, Italien, Polen, Schweiz, Spanien und den USA

15. GLAST (Weltraumstart 2007 geplant)

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (Garching) und Universität Bochum*
NASA Projekt mit weiteren Beteiligungen aus Frankreich, Italien, Japan, Schweden und den USA

16. Baikal-NT200

Baikalsee, Russland

➔ *Deutsche Beteiligungen: DESY (Zeuthen),*
Und Institutionen aus Russland

17. AMANDA/IceCube

Südpol, Antarktis

➔ *Deutsche Beteiligungen: DESY (Zeuthen), Universitäten Dortmund, Mainz, Wuppertal und Humboldt-Universität Berlin, Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg)*
Und Institutionen aus Belgien, Großbritannien, Japan, Niederlande, Neuseeland, Schweden und den USA

18. ANTARES (im Aufbau)

Mittelmeer vor Toulon, Frankreich

➔ *Deutsche Beteiligung: Universität Erlangen-Nürnberg*
Und Institutionen aus Frankreich, Italien, Niederlande, Russland und Spanien

19. Geo600

Hannover, Deutschland

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik (Golm und Hannover) und für Quantenoptik (Garching), Universität Hannover*
Und Institutionen aus Großbritannien und Spanien

20. LISA (Weltraumstart 2015 geplant)

➔ *Deutsche Beteiligungen: Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik (Golm und Hannover) und für Quantenoptik (Garching), Universität Hannover*
ESA und NASA Projekt mit weiteren Beteiligungen aus verschiedenen europäischen Ländern und den USA

1 | Standorte, Forschungsgruppen und Kontaktadressen

Astroteilchenphysik in Deutschland ist ein Zweig der Grundlagenforschung, der sowohl an wissenschaftlichen Hochschulen wie an den außeruniversitären Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft, der Helmholtz-Gemeinschaft und der Leibniz-Gemeinschaft betrieben wird. Projekte der Astroteilchenphysik werden durch das Bundes-

ministerium für Forschung und Technologie (BMBF) und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Ferner finanzieren die DFG und die Alexander von Humboldt-Stiftung mehrere unabhängige wissenschaftliche Nachwuchsgruppen, die an wissenschaftlichen Hochschulen oder Forschungsinstituten angesiedelt sind.

Im Folgenden werden deutsche Universitätslehrstühle und Forschungsgruppen genannt, die an den in dieser Broschüre beschriebenen Projekten unmittelbar beteiligt sind oder an nahe verwandten Themen arbeiten (Stand Mai 2006).

■ **Forschungsinstitute in der Helmholtz-Gemeinschaft**

Astroteilchenphysik wird im gleichnamigen Programm der Helmholtz-Gemeinschaft von den Forschungszentren Karlsruhe und DESY im Forschungsbereich *Struktur der Materie* getragen. Nukleare Astrophysik ist an der Gesellschaft für Schwerionenforschung im Programm Hadronen und Kerne angesiedelt.
http://www.helmholtz.de/de/Forschung/Struktur_der_Materie/Astroteilchenphysik.html

Programmsprecher:
Prof. Dr. Johannes Blümer
Tel. 07247/82-3545
johannes.bluemer@ik.fzk.de

DESY (Hamburg)

Notkestraße 85
22607 Hamburg
<http://www.desy.de>

Theoretische Teilchenkosmologie <http://vipac.desy.de>

Prof. Dr. Wilfried Buchmüller
Tel. 040/8998-2424
wilfried.buchmueller@desy.de

Dr. Laura Covi
Tel. 040/8998-3693
laura.covi@desy.de

Theoretische Astroteilchenphysik

Dr. Andreas Ringwald
040/8998-2777
andreas.ringwald@desy.de
<http://www.desy.de/~ringwald>

DESY (Zeuthen)

Platanenallee 6
15738 Zeuthen
<http://www-zeuthen.desy.de>

Astronomie mit hochenergetischen Neutrinos (AMANDA/IceCube, IceTop, Baikal, Akustischer Nachweis)

<http://www-zeuthen.desy.de/nuastro>
Dr. Christian Spiering
Tel. 033762/7-7218
christian.spiering@desy.de

Multi-Messenger Astronomie, IceCube (Helmholtz Nachwuchsgruppe)

Dr. Elisa Bernardini
Tel. 033762/7-7483
elisa.bernardini@desy.de

Forschungszentrum Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
<http://www.fzk.de>

Pierre-Auger-Observatorium
(Beobachtung ultra-hochenergetischer kosmischer Strahlung)
<http://www.auger.de>

Prof. Dr. Johannes Blümer
Tel. 07247/82-3545
johannes.bluemmer@ik.fzk.de
<http://www-ik.fzk.de/~bluemmer>

Helmholtz Nachwuchsgruppe
Dr. Markus Roth
Tel. 07247/82-3870
Markus.Roth@ik.fzk.de
<http://www-ik.fzk.de/~roth>

KASCADE-Grande und LOPES
(Beobachtung kosmischer Strahlung)
<http://www-ik.fzk.de/KASCADE>
Dr. Andreas Haungs
Tel. 07247/82-3310
andreas.haungs@ik.fzk.de
<http://www-ik.fzk.de/~haungs>

KATRIN (Messung der Neutrinomasse im Betazerfall von Tritium)
<http://www-ik.fzk.de/~katrin>

Prof. Dr. Johannes Blümer
Tel. 07247/82-3545
johannes.bluemmer@ik.fzk.de
<http://www-ik.fzk.de/~bluemmer>

Prof. Dr. Guido Drexlin
Tel. 07247/82-3534
guido.drexlin@ik.fzk.de
<http://www-ik.fzk.de/~drexlin>

EDELWEISS (Direkte Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie)
Dr. Klaus Eitel
Tel. 07247/82-3701
klaus.eitel@ik.fzk.de
<http://www-ik.fzk.de/~klaus>

Nukleare Astrophysik
<http://nuclear-astrophysics.fzk.de>
Dr. Franz Käppeler
07247/82-3991
franz.kaeppler@ik.fzk.de

Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI)
Planckstraße 1
64291 Darmstadt
<http://www.gsi.de/>

Nukleare Astrophysik (Theorie)
<http://theory.gsi.de>
Prof. Dr. Karlheinz Langanke
Tel. 06159/71-2747
k.langanke@gsi.de
<http://theory.gsi.de/~langanke>

Nukleare Astrophysik (Experimente)
Dr. Michael Heil
Tel. 06159/71-2634
m.heil@gsi.de

■ Forschungsinstitute in der Leibniz-Gemeinschaft

Astrophysikalisches Institut Potsdam (AIP)
An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam
<http://www.aip.de>

**Numerische Simulationen für Struktur-
bildung und Galaxienbildung**
Prof. Dr. Matthias Steinmetz
Tel. 0331/7499-381
msteinmetz@aip.de
<http://www.aip.de/People/MSteinmetz>

Forschungszentrum Rossendorf
<http://www.fz-rossendorf.de>
Bautzner Landstraße 128
01328 Dresden (Rossendorf)

Nukleare Astrophysik
[http://www.fz-rossendorf.de/
pls/rois/Cms?pOid=11134&pNid=132](http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pOid=11134&pNid=132)
Dr. Andreas Wagner
Tel. 0351/260-3261
a.wagner@fz-rossendorf.de

■ Forschungsinstitute der Max-Planck-Gesellschaft

Max-Planck-Institut für Astrophysik
Karl-Schwarzschild-Str. 1
85741 Garching
<http://www.mpa-garching.mpg.de>

**Galaxienbildung und numerische
Simulationen großräumiger
Strukturen im Universum**
[http://www.mpa-garching.mpg.de/
galform](http://www.mpa-garching.mpg.de/galform)
Dr. Volker Springel
Tel. 089/30000-2238
volker@mpa-garching.mpg.de

**Planck-Satellit und Kosmische
Mikrowellenstrahlung**
<http://planck.mpa-garching.mpg.de>
Dr. Torsten Enßlin
Tel. 089/30000-2243
enssli@mpa-garching.mpg.de

**Numerische Hydrodynamik,
z.B. Supernova Simulationen,
und Gravitationswellen**
[http://www.mpa-
garching.mpg.de/hydro](http://www.mpa-garching.mpg.de/hydro)
Dr. Hans-Thomas Janka
Tel. 089/30000-2228
hjanka@mpa-garching.mpg.de

**Gravitationslinsen als
kosmologisches Werkzeug**
[http://www.mpa-
garching.mpg.de/g_lens](http://www.mpa-garching.mpg.de/g_lens)
Prof. Dr. Simon D. M. White
Tel. 089/30000-2211
swhite@mpa-garching.mpg.de

**Max-Planck-Institut für
extraterrestrische Physik**
Giessenbachstraße
85748 Garching
<http://www.mpe.mpg.de>

Zahlreiche Aktivitäten zur Röntgen- und Gammaastronomie, die meist jedoch nicht zur Astroteilchenphysik im engeren Sinn gerechnet werden. Hier wird nur der GLAST Gammasatellit genannt, da sich seine Ziele mit denjenigen der erdgebundenen Luft-Tscherenkow-Teleskope H.E.S.S. und MAGIC überschneiden.

GLAST (Satellit für Gammaastronomie)
Dr. Gisela Lichti
Tel. 089/30000-3536
gri@mpe.mpg.de
<http://www.mpe.mpg.de/gamma/GBM>

Max-Planck-Institut für Radioastronomie

<http://www.mpjfr-bonn.mpg.de>
Auf dem Hügel 69
53121 Bonn

*Kosmische Strahlung (Theorie),
Auger-Observatorium*

<http://www.mpjfr-bonn.mpg.de/div/theory>
Prof. Dr. Peter L. Biermann
Tel. 0228/525-279
plbiermann@mpjfr-bonn.mpg.de

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)

Am Mühlenberg 1
14476 Golm
<http://www.aei.mpg.de>

Gravitationswellen (Theoretische Modellierung der Quellen, Datenanalyse)

Prof. Dr. Bernard F. Schutz
Tel. 0331/567-7218
bernard.schutz@aei.mpg.de

Theoretische Gravitationswellen-Physik (Sofja Kovalevskaja Forschungsgruppe der Alexander von Humboldt Stiftung)

<http://www.aei.mpg.de/~yanbei>
Dr. Yanbei Chen
Tel. 0331/567-7317
yanbei@aei.mpg.de

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Teilinstitut Hannover)

Callinstraße 38
30167 Hannover
<http://www.aei-hannover.de>

Laser-Interferometrie und Gravitationswellen-Astronomie

<http://www.geo600.uni-hannover.de>
Prof. Dr. Karsten Danzmann
Tel. 0511/762-2356
karsten.danzmann@aei.mpg.de

Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut)

Föhringer Ring 6
80805 München
<http://www.mppmu.mpg.de>

CAST (Suche nach solaren Axionen)

<http://cast.mppmu.mpg.de>
Dr. Rainer Kotthaus
Tel. 089/32354-265
rik@mppmu.mpg.de

CRESST (Direkte Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie)

<http://www.vms.mppmu.mpg.de/cresst>
Dr. Wolfgang Seidel
Tel. 089/32354-442
seidel@mppmu.mpg.de

MAGIC (Luft-Tscherenkow-Teleskop für kosmische Gammastrahlung)

<http://www.magic.mppmu.mpg.de>
Dr. Razmik Mirzoyan
Tel. 089/32354-328
razmik@mppmu.mpg.de

GERDA (Neutrinoloser Doppel-Betazerfall)

<http://www.gerda.mppmu.mpg.de>
Dr. Iris Abt
Tel. 089/32354-295
isa@mppmu.mpg.de

Theoretische Astroteilchenphysik

<http://www.th.mppmu.mpg.de/web-docs/eng/app.html>
Dr. habil. Georg G. Raffelt
Tel. 089/32354-234
raffelt@mppmu.mpg.de

Theoretische Teilchenkosmologie und Leptogenese (Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe)

Dr. Michael Plümacher
089/32354-273
pluemi@mppmu.mpg.de

Max-Planck-Institut für Kernphysik

Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg
<http://www.mpi-hd.mpg.de>

H.E.S.S. (Luft-Tscherenkow-Teleskope für kosmische Gammastrahlung)

<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS>
Prof. Dr. Werner Hofmann
Tel. 06221/516-330 oder 516-2019
hofmann@mpi-hd.mpg.de

Experimentelle Neutrinophysik (GERDA, Double Chooz, Borexino)

<http://www.mpi-hd.mpg.de/nubis>
Dr. Stefan Schönert
Tel. 06221/516-476
stefan.schoenert@mpi-hd.mpg.de

Neutrinoastronomie mit IceCube (Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe)

http://www.mpi-hd.mpg.de/resconi/EN_page/index.html
Dr. Elisa Resconi
Tel. 06221/516-494
elisa.resconi@mpi-hd.mpg.de

Theoretische Astrophysik

<http://www.mpi-hd.mpg.de/theory>
Prof. Dr. John Kirk
Tel. 06221/516-482
john.kirk@mpi-hd.mpg.de

Theorie der kosmischen Strahlung

<http://www.mpi-hd.mpg.de/astrophysik/HEA>
Dr. Felix Aharonian
Tel. 06221/516-485
felix.aharonian@mpi-hd.mpg.de

Theoretische Teilchen- und Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Manfred Lindner
Tel. 06221/516-800
lindner@mpi-hd.mpg.de
<http://www.mpi-hd.mpg.de/lin>

■ Lehrstühle und Forschungsgruppen an deutschen Universitäten

RWTH Aachen

I. Physikalisches Institut
Sommerfeldstr.14, Turm 28
52074 Aachen
<http://www1b.physik.rwth-aachen.de>

AMS (Satellitenexperiment zur Suche nach Antimaterie)

<http://www1b.physik.rwth-aachen.de/~schael/ams>
Prof. Dr. Stefan Schael
Tel. 0241/80-27158
schael@physik.rwth-aachen.de
<http://www1b.physik.rwth-aachen.de/~schael>

Direkte Suche nach Dunkler Materie (XENON, CDMS)

Prof. Dr. Laura Baudis
Tel. 0241/80-27206
laura.baudis@rwth-aachen.de
<http://www.physik.rwth-aachen.de/~lbaudis/>

III. Physikalisches Institut

Physikzentrum RWTH Aachen
52056 Aachen
<http://www.physik.rwth-aachen.de/group/IIIphys>

Experimente zu Neutrinooszillationen (Double Chooz, T2K)

Prof. Dr. Achim Stahl
Tel. 0241/80-27301
achim.stahl@physik.rwth-aachen.de
<http://www.physik.rwth-aachen.de/~stahl>

Neutrinoastronomie (IceCube, aktustischer Nachweis) und Neutrinooszillationen (Double-Chooz)

Prof. Dr. Christopher Wiebusch
Tel. 0241/80-27300
christopher.wiebusch@physik.rwth-aachen.de
<http://www.physik.rwth-aachen.de/~wiebusch>

Pierre-Auger-Observatorium (Beobachtung ultra-hochenergetischer kosmischer Strahlung)

Prof. Dr. Thomas Hebbeker
Tel. 0241/80-27331
thomas.hebbeker@physik.rwth-aachen.de
<http://www.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker>

Humboldt-Universität Berlin Institut für Physik

Newtonstraße 15
12489 Berlin
<http://www.physik.hu-berlin.de>

H.E.S.S. (Luft-Tscherenkow-Teleskop für hochenergetische Gammastrahlung)

<http://www-hess.physik.hu-berlin.de>
Prof. Dr. Thomas Lohse
Tel. 030/2093-7820
lohse@ifh.de

MAGIC (Luft-Tscherenkow-Teleskop für hochenergetische Gammastrahlung)

<http://www-eep.physik.hu-berlin.de/~pavel/homepage/Magicbeschr.html>
Kommissarische Leitung:
Prof. Dr. Thomas Lohse
Tel. 030/2093-7820
lohse@ifh.de

Neutrinoastronomie mit IceCube (Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe)

Dr. Marek Kowalski
Tel. 030/2093-7842
mkowalsk@ifh.de

Universität Bielefeld

Fakultät für Physik
Postfach 100131
33501 Bielefeld

Theoretische Astroteilchenphysik und Kosmologie

<http://www.physik.uni-bielefeld.de/cosmology>

Prof. Dr. Dietrich Bödeker
Tel. 0521/106-6216
bodeker@physik.uni-bielefeld.de

Prof. Dr. Mikko Laine
Tel. 0521/106-6220
laine@physik.uni-bielefeld.de

Prof. Dr. Dominik Schwarz
Tel. 0521/106-6226
dschwarz@physik.uni-bielefeld.de

Universität Bochum

Fakultät für Physik und Astronomie
Universitätsstraße 150
44780 Bochum

Nukleare Astrophysik

Experimentalphysik III
<http://www.ep3.rub.de>
Prof. Dr. Claus Rolfs
Tel. 0234/32-23596
rolfs@ep3.rub.de

Kosmische Strahlung (Theorie), H.E.S.S., GLAST

Theoretische Physik IV
<http://www.alt.tp4.ruhr-uni-bochum.de>
Prof. Dr. Reinhard Schlickeiser
Tel. 0234/32-22032
rsch@tp4.rub.de
<http://www.tp4.rub.de>

Universität Bonn

Physikalisches Institut
Nussallee 12
53115 Bonn

Theoretische Teilchenkosmologie, Supersymmetrische Teilchen der Dunklen Materie

Prof. Dr. Manuel Drees
Tel. 0228/73-2224
drees@th.physik.uni-bonn.de
<http://www.th.physik.uni-bonn.de/th/groups/drees/members.html>

Prof. Dr. Herbert Dreiner
Tel. 0228-73-3822
dreiner@th.physik.uni-bonn.de
<http://www.th.physik.uni-bonn.de/th/People/dreiner>

Prof. Dr. Hans-Peter Nilles
Tel. 0228/73-9029
nilles@th.physik.uni-bonn.de
<http://www.th.physik.uni-bonn.de/nilles/startnilles.html>

Argelander-Institut für Astronomie
Auf dem Hügel 71
53121 Bonn

**Gravitationslinseneffekt,
Dunkle Materie und Energie**

Prof. Dr. Peter Schneider
Tel. 0228/73-3671
peter@astro.uni-bonn.de
<http://www.astro.uni-bonn.de/~peter>

International University Bremen

Campus Ring 1, 28759 Bremen
<http://www.iu-bremen.de>

**Kompakte Astrophysikalische Objekte,
Gamma-Ray Bursts, Numerische
Astrophysik**

Prof. Dr. Stephan Rosswog
Tel. 0421/200-3226
s.rosswog@iu-bremen.de
<http://www.faculty.iu-bremen.de/srosswog>

Technische Universität Darmstadt

Institut für Kernphysik
Schlossgartenstrasse 9
64289 Darmstadt

Nukleare Astrophysik

Prof. Dr. Achim Richter
Tel. 06151/16-2116
richter@ikp.tu-darmstadt.de
<http://www.ikp.physik.tu-darmstadt.de/richter>

Prof. Dr. Andreas Zilges
Tel. 06151/16-2925
zilges@ikp.tu-darmstadt.de
<http://www.ikp.physik.tu-darmstadt.de/zilges/forschung/forschung.html>

CAST (Suche nach solaren Axionen)
<http://astropp.physik.tu-darmstadt.de>

Prof. Dr. Dieter H. H. Hoffmann
Tel. 06151/16-5417
hoffmann@physik.tu-darmstadt.de
<http://www.gsi.de/forschung/pp/people/hoffmann>

Dr. Markus Kuster
Tel. 06151/16-2321
markus.kuster@cern.ch
<http://www.kus-net.de>

Universität Dortmund

Experimentelle Physik 5
Otto-Hahn-Straße 4
44227 Dortmund
<http://www.physik.uni-dortmund.de/E5>

**Kosmische Strahlung
(AMANDA/IceCube, MAGIC)**

<http://app.uni-dortmund.de>
Prof. Dr. Dr. Wolfgang Rhode
Tel. 0231/755-3550
rhode@physik.uni-dortmund.de

Universität Erlangen-Nürnberg

Physikalisches Institut
Erwin-Rommel-Straße 1
91058 Erlangen
<http://www.physik.uni-erlangen.de>

**Astronomie mit hochenergetischen
Neutrinos (ANTARES, KM3Net,
Akustischer Nachweis)**

<http://www.antares.physik.uni-erlangen.de>

Prof. Dr. Gisela Anton
Tel. 09131/85-27151
gisela.anton@physik.uni-erlangen.de

Prof. Dr. Uli Katz
Tel. 09131/85-27072
uli.katz@physik.uni-erlangen.de

**H.E.S.S. (Luftschauer-Tscherenkow-
Teleskop für hochenergetische
Gammastrahlung)**

<http://www.hess.physik.uni-erlangen.de>
Prof. Dr. Christian Stegmann
Tel. 09131/85-28964
christian.stegmann@physik.uni-erlangen.de

Universität Frankfurt

Institut für Angewandte Physik
Max-von-Laue-Str. 1
60438 Frankfurt am Main
<http://www.uni-frankfurt.de/fb/fb13/iap>

CAST (Suche nach solaren Axionen)

Prof. Dr. Joachim Jacoby
Tel. 069/798-47427
jacoby@physik.uni-frankfurt.de

Institut für Kernphysik
Max-von-Laue-Str. 1
60438 Frankfurt am Main

Nukleare Astrophysik

Prof. Dr. Joachim Stroth
Tel. 069/798-47083
stroth@ikf.uni-frankfurt.de
<http://www-linux.gsi.de/~stroth>

Universität Freiburg

Physikalisches Institut
Hermann-Herder-Straße 3
79104 Freiburg i.Br.
<http://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik>

CAST (Suche nach solaren Axionen)

<http://hpfroz.physik.uni-freiburg.de>
Prof. Dr. Kay Königsmann
Tel. 0761/203-5817
kay.konigsmann@cern.ch

Fachhochschule Fulda

Fachbereich Elektrotechnik und
Informationstechnik
Marquardstr. 35
36039 Fulda
<http://www2.fh-fulda.de/fb/et>

**KATRIN (Messung der Neutrinomasse
im Betazerfall von Tritium)**

Prof. Dr. Alexander Osipowicz
Tel. 0661/9640-556
alexander.osipowicz@et.fh-fulda.de

Universität Hamburg

Institut für Experimentalphysik
Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg
<http://www.physnet.uni-hamburg.de/ex>

**Experimentelle Neutrinophysik
(OPERA, Double Chooz)**

Prof. Dr. Caren Hagner
Tel. 040/8998-2297
caren.hagner@desy.de

H.E.S.S. (Luft-Tscherenkow-Teleskop für kosmische Gammastrahlung)

<http://www.hess.desy.de>

Prof. Dr. Goetz Heinzelmann

Tel. 040/8998-2214

goetz.heinzelmann@desy.de

II. Institut für Theoretische Physik

Luruper Chaussee 149

22761 Hamburg

Hawking-Strahlung Schwarzer Löcher (Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe)

Dr. Bernd Kuckert

Tel. 040/8998-2029

bernd.kuckert@desy.de

Universität Hannover

Institut für Gravitationsphysik

Callinstrasse 38

D-30167 Hannover

<http://www.amps.uni-hannover.de>

Gravitationswellenastronomie

(Geo600, LISA)

Prof. Dr. Karsten Danzmann

Tel. 0511/762-2356

karsten.danzmann@aei.mpg.de

Prof. Dr. Roman Schnabel

Tel. 0511/762-19169

roman.schnabel@aei.mpg.de

[http://www.geo600.uni-](http://www.geo600.uni-hannover.de/~schnabel)

[hannover.de/~schnabel](http://www.geo600.uni-hannover.de/~schnabel)

Universität Heidelberg

Institut für Theoretische Physik

Philosophenweg 19

69120 Heidelberg

<http://www.thphys.uni-heidelberg.de>

Theoretische Teilchenkosmologie

Prof. Dr. Arthur Hebecker

Tel. 06221/549-440

a.hebecker@thphys.uni-heidelberg.de

[http://www.thphys.uni-](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~hebecker)

[heidelberg.de/~hebecker](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~hebecker)

Prof. Dr. Christof Wetterich

Tel. 06221/549-340

c.wetterich@thphys.uni-heidelberg.de

[http://www.thphys.uni-](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~wetteric)

[heidelberg.de/~wetteric](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~wetteric)

Institut für Theoretische Astrophysik

Zentrum für Astronomie

Albert-Ueberle-Straße 2

69120 Heidelberg

<http://www.ita.uni-heidelberg.de>

Strukturbildung im Universum,

Dunkle Materie und Energie,

kosmische Mikrowellenstrahlung,

Gravitationslinseneffekt

Prof. Dr. Matthias Bartelmann

Tel. 06221/54-4817

mbartelmann@ita.uni-heidelberg.de

<http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb>

Landessternwarte Heidelberg

Zentrum für Astronomie

Königstuhl, 69117 Heidelberg

<http://www.lsw.uni-heidelberg.de>

H.E.S.S. (Luft-Tscherenkow-Teleskop für kosmische Gammastrahlung)

[http://www.lsw.uni-heidelberg.de/](http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/hess)

[projects/hess](http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/hess)

Prof. Dr. Stefan Wagner

Tel. 06221/54-1712

s.wagner@lsw.uni-heidelberg.de

Universität Jena

Theoretisch-Physikalisches Institut

Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

<http://www.tpi.uni-jena.de>

Gravitationswellen

(Theorie und Quellen)

Prof. Dr. Bernd Brügmann

Tel. 03641/9-47120

b.bruegmann@tpi.uni-jena.de

Prof. Dr. Gerhard Schäfer

Tel. 03641/9-47114

g.schaefer@tpi.uni-jena.de

[http://www.personal.uni-](http://www.personal.uni-jena.de/~p9scge)

[jena.de/~p9scge](http://www.personal.uni-jena.de/~p9scge)

Universität Karlsruhe (TH)

Wolfgang-Gaede-Str. 1

Gebäude 30.23, 76131 Karlsruhe

Institut für Experimentelle Kernphysik

<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de>

AMS (Satellitenexperiment zur Suche nach Antimaterie)

[http://www-ekp.physik.uni-](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~amswww)

[karlsruhe.de/~amswww](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~amswww)

Prof. Dr. Wim de Boer

Tel. 0721/608-3593

wim.de.boer@cern.ch

[http://www-ekp.physik.uni-](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer)

[karlsruhe.de/~deboer](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer)

Pierre-Auger-Observatorium

(Beobachtung ultra-hochenergetischer kosmischer Strahlung)

<http://www.auger.de/>

Prof. Dr. Johannes Blümer

Tel. 07247/82-3545

johannes.blumer@ik.fzk.de

<http://www-ik.fzk.de/~blumer>

KATRIN (Messung der Neutrinomasse im Betazerfall von Tritium)

<http://www-ik.fzk.de/~katrin>

Prof. Dr. Guido Drexlin

Tel. 07247/82-3534

guido.drexlin@ik.fzk.de

<http://www-ik.fzk.de/~drexlin>

EDELWEISS (Direkte Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie)

<http://edelweiss.in2p3.fr>

Prof. Dr. Johannes Blümer

Tel. 07247/82-3545

johannes.blumer@ik.fzk.de

<http://www-ik.fzk.de/~blumer>

Institut für Theoretische Physik

<http://www-itp.physik.uni-karlsruhe.de>

Teilchenkosmologie und theoretische Neutrinophysik

[http://www-itp.physik.uni-karlsruhe.de/](http://www-itp.physik.uni-karlsruhe.de/research_klinkhamer.de.shtml)

[research_klinkhamer.de.shtml](http://www-itp.physik.uni-karlsruhe.de/research_klinkhamer.de.shtml)

Prof. Dr. Frans R. Klinkhamer

Tel. 0721/608-2083

[frans.klinkhamer@physik.uni-](mailto:frans.klinkhamer@physik.uni-karlsruhe.de)

[karlsruhe.de](mailto:frans.klinkhamer@physik.uni-karlsruhe.de)

Universität Köln

Institut für Theoretische Physik
Zülpicher Straße 77, 50937 Köln
<http://www.thp.uni-koeln.de>

Quantengravitation und Quantenkosmologie

[http://www.thp.uni-koeln.de/
gravitation](http://www.thp.uni-koeln.de/gravitation)

Prof. Dr. Claus Kiefer
Tel. 0221/470-4301
kiefer@thp.uni-koeln.de

Universität Mainz

Institut für Physik
Staudingerweg 7
55128 Mainz
<http://www.physik.uni-mainz.de/etap>

Astronomie mit hochenergetischen Neutrinos (Amanda, IceCube)

Prof. Dr. Lutz Köpke
Tel. 06131/39-22894
lutz.koepke@uni-mainz.de

Prof. Dr. Heinz-Georg Sander
Tel. 06131/392-3667
hsander@uni-mainz.de

KATRIN (Messung der Neutrinomasse im Betazerfall von Tritium)

[http://www.physik.uni-
mainz.de/exakt/neutrino](http://www.physik.uni-mainz.de/exakt/neutrino)

Dr. Jochen Bonn
Tel. 06131/39-22876
jochen.bonn@uni-mainz.de

Institut für Kernchemie
Fritz-Strassmann-Weg 2, 55128 Mainz
<http://www.kernchemie.uni-mainz.de>

Nukleare Astrophysik

Prof. Dr. Karl-Ludwig Kratz
Tel. 06131/39-25892
kl.kratz@uni-mainz.de
[http://dkcmzc.chemie.uni-
mainz.de/~klkratz/inhalt.html](http://dkcmzc.chemie.uni-mainz.de/~klkratz/inhalt.html)

Universität München

Arnold Sommerfeld Center for
Theoretical Physics
Theresienstr. 37
80333 München
[http://www.theorie.physik.uni-
muenchen.de/asc](http://www.theorie.physik.uni-muenchen.de/asc)

Theoretische Teilchenkosmologie

[http://www.theorie.physik.uni-
muenchen.de/cosmology](http://www.theorie.physik.uni-muenchen.de/cosmology)
Prof. Dr. Viatcheslav F. Mukhanov
Tel. 089/2180-4543
mukhanov@theorie.physik.uni-
muenchen.de

Stringkosmologie

Prof. Dr. Ivo Sachs
Tel. 089/2180-4541
ivo@theorie.physik.uni-muenchen.de
[http://www.theorie.physik.uni-
muenchen.de/~ivo](http://www.theorie.physik.uni-muenchen.de/~ivo)

Technische Universität München

Physikdepartment
James-Franck-Straße
85748 Garching
<http://www.physik.tu-muenchen.de>

Experimentelle Neutrinophysik und Suche nach Dunkler Materie (Borexino, LENA, Double Chooz, CRESST)

E15 Lehrstuhl für Experimentalphysik
und Astroteilchenphysik
<http://www.e15.physik.tu-muenchen.de>

Prof. Dr. Franz von Feilitzsch
Tel. 089/289-12511
franz.vfeilitzsch@ph.tum.de
[http://www.e15.physik.tu-
muenchen.de/professors/feilitzsch](http://www.e15.physik.tu-muenchen.de/professors/feilitzsch)

Prof. Dr. Lothar Oberauer
Tel. 089/289-12509
lothar.oberauer@ph.tum.de
[http://www.e15.physik.tu-
muenchen.de/professors/oberauer](http://www.e15.physik.tu-muenchen.de/professors/oberauer)

Theoretische Astroteilchenphysik

<http://www.ph.tum.de/lehrstuehle/T3oe>
Prof. Dr. Michael Ratz
Tel. 089/289-12355
mratz@ph.tum.de

Universität Münster

Institut für Kernphysik
Wilhelm-Klemm-Str. 9, 48149 Münster
<http://www.uni-muenster.de/Physik.KP>

KATRIN (Messung der Neutrinomasse im Betazerfall von Tritium)

[http://www.uni-muenster.de/
Physik.KP/AGWeinheimer](http://www.uni-muenster.de/Physik.KP/AGWeinheimer)

Prof. Dr. Christian Weinheimer
Tel. 0251-83-34971
weinheimer@uni-muenster.de

Universität Siegen

Fachbereich Physik
Emmy-Noether-Campus
Walter-Flex-Str. 3, 57068 Siegen
<http://www.physik.uni-siegen.de>

Kosmische Strahlung (Auger, KASCADE-Grande, LOPES, CosmoALEPH)

<http://www.hep.physik.uni-siegen.de>

Prof. Dr. Peter Buchholz
Tel. 0271/740-3718
buchholz@hep.physik.uni-siegen.de

Prof. Dr. Ivor Fleck
Tel. 0271/740-3628
fleck@hep.physik.uni-siegen.de

Prof. Dr. Claus Grupen
Tel. 0271/740-3795
claus.grupen@cern.ch
[http://www.hep.physik.uni-
siegen.de/~grupen](http://www.hep.physik.uni-siegen.de/~grupen)

Kosmische Strahlung (Pamela)

<http://pamela.physik.uni-siegen.de>
Prof. Dr. Manfred Simon (emeritus)
Tel. 0271/740-3770
simon@ida1.physik.uni-siegen.de

Universität Tübingen
Kepler Center for Astro and
Particle Physics

Physikalisches Institut

Auf der Morgenstelle 14
72076 Tübingen

<http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de>

Experimentelle Neutrinophysik (GERDA)
Suche nach Dunkler Materie (CRESST)

<http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/jochum>

Prof. Dr. Josef Jochum

Tel. 07071/29-74453

jochum@pit.physik.uni-tuebingen.de

Double Chooz (Neutrinooszillationen
am Chooz Kernreaktor)

<http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/jochum/theta13.html>

Dr. Tobias Lachenmaier

Tel. 07071/29-73286

lachenma@pit.physik.uni-tuebingen.de

Institut für Theoretische Physik

Auf der Morgenstelle 14
72076 Tübingen

<http://www.tphys.physik.uni-tuebingen.de>

Theoretische Neutrinophysik,
Nukleare Astrophysik (Theorie)

<http://www.tphys.physik.uni-tuebingen.de/faessler>

Prof. Dr. Amand Fäßler

Tel. 07071/29-76370

amand.faessler@uni-tuebingen.de

Institut für Astronomie und Astrophysik

Abteilung Theoretische Astrophysik und
Numerische Physik

Auf der Morgenstelle 10
72076 Tübingen

<http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de>

Gravitationswellenastronomie
(Theorie und Quellen)

<http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de>

Prof. Dr. Wilhelm Kley

Tel. 07071/ 29-77681

wilhelm.kley@uni-tuebingen.de

<http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kley>

Prof. Dr. Konstantinos Kokkotas

Tel. 07071/29-75468

kostas.kokkotas@uni-tuebingen.de

Institut für Astronomie und Astrophysik

Abteilung Astronomie

Sand 1, 72076 Tübingen

<http://astro.uni-tuebingen.de>

H.E.S.S. (Luft-Tscherenkow-Teleskop
für kosmische Gammastrahlung)

<http://astro.uni-tuebingen.de/groups/hess>

Prof. Dr. Andrea Santangelo

Tel. 07071/29-76128

santangelo@astro.uni-tuebingen.de

Universität Wuppertal

Fachbereich Physik

Gaußstraße 20

42097 Wuppertal

<http://www.physik.uni-wuppertal.de>

Kosmische Strahlung (Auger, KASCADE-
Grande, LOPES, AMANDA/IceCube)

<http://astro.uni-wuppertal.de>

Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert

Tel. 0202/439-2856

kampert@uni-wuppertal.de

Prof. Dr. Klaus Helbing

Tel. 0202/439-2829

helbing@uni-wuppertal.de

Theoretische Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Zoltan Fodor

Tel. 0202/439-2614

fodor@physik.uni-wuppertal.de

Universität Würzburg

Lehrstuhl für Astronomie

Am Hubland

97074 Würzburg

<http://www.astro.uni-wuerzburg.de>

Hochenergie-Astrophysik (Theorie),
MAGIC (Luft-Tscherenkow-Teleskop für
kosmische Gammastrahlung)

<http://www.astro.uni-wuerzburg.de/mannheim>

Prof. Dr. Karl Mannheim

Tel. 0931/888-5031

mannheim@astro.uni-wuerzburg.de

Physik des frühen Universums

Prof. Dr. Jens C. Niemeyer

Tel. 0931/888-5033

niemeyer@astro.uni-wuerzburg.de

<http://www.astro.uni-wuerzburg.de/~niemeyer>

2 | Forschungsförderung und wissenschaftliche Vernetzung

Die experimentellen Projekte der Astroteilchenphysik übersteigen oft nicht nur die Möglichkeiten einzelner Hochschulgruppen oder wissenschaftlicher Forschungseinrichtungen, sondern bedürfen auch inhaltlich der internationalen Vernetzung, so dass die in dieser Broschüre beschriebenen Projekte fast ausschließlich international breit angelegt sind. Über die unmittelbare Zusammenarbeit der an einem gemeinsamen Projekt beteiligten Gruppen hinaus nimmt die Vernetzung der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler immer stärker zu, um Synergien in Forschung und Lehre in

dem gemeinsamen Forschungsgebiet zu nutzen. Hierzu zählen regelmäßige nationale und internationale Schulen zur Nachwuchsförderung, Sonderforschungsbereiche und Graduiertenkollegs der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie die Virtuellen Institute der Helmholtz-Gemeinschaft, die in den letzten drei Jahren stark zur Bildung der Community beigetragen haben. Ein entscheidender Pfeiler der Astroteilchenphysik in Deutschland ist die Verbundforschung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie. Die Einbeziehung der Astroteilchenphysik als eigenständigen

Forschungszweig in diese Förderstruktur hat die Vernetzung der deutschen Astroteilchenphysikerinnen und Astroteilchenphysiker in besonderer Weise verstärkt. Diese Broschüre ist ein Resultat dieser Zusammenarbeit sowie der organisierten Interessensvertretung durch das Komitee für Astroteilchenphysik.

Im Folgenden werden verschiedene Ebenen der Vernetzung der deutschen Astroteilchenphysik in Forschung und Lehre ebenso genannt wie institutsübergreifende Förderstrukturen.

■ Treffen der deutschen Astroteilchenphysiker im zweijährigen Rhythmus „Astroteilchenphysik in Deutschland“

1999
DESY, Zeuthen, 7.-8. Oktober

2001
DESY, Zeuthen, 19.-21. Juni

2003
Universität Karlsruhe, 16.-18. September
<http://www-ik.fzk.de/workshop/atw>

2005
DESY, Zeuthen, 4.-5. Oktober
<http://www-zeuthen.desy.de/astro-workshop>

■ Regelmäßige Nationale und Internationale Schulen zur Astroteilchenphysik

Schule für Astroteilchenphysik der Universität Erlangen-Nürnberg
Obertrubach-Bärfels in der fränkischen Schweiz, seit 2004 jährlich Mitte Oktober
<http://www.astroteilchenschule.physik.uni-erlangen.de>

Diese deutschsprachige Schule möchte Nachwuchswissenschaftlern sowohl breites fundiertes Basiswissen in den für die Astroteilchenphysik grundlegenden Teilgebieten der Physik (Astrophysik, Teilchenphysik und Kosmologie) vermitteln wie auch aktuelle Themen der Astroteilchenphysik vertieft darstellen. Zudem ist es Ziel der Schule, Kontakte der Teilnehmer untereinander und zu den Dozenten zu fördern und so Kooperation und Synergieeffekte in der Gemeinschaft der Astroteilchenphysiker zu stärken und langfristig zu verankern.

International School for Astroparticle Physics (ISAPP) – European Doctorate School

<http://www.mi.infn.it/ISAPP>

Das ISAPP Konsortium besteht derzeit aus 25 Europäischen Universitäten und Forschungsinstituten, die jährlich an verschiedenen Orten ein- bis zweiwöchige Blockvorlesungen vor allem für Doktoranden der Astroteilchenphysik veranstalten. Diese sind als offizieller Bestandteil der jeweiligen Doktorandenausbildung anerkannt.

International CORSIKA School

<http://www-ik.fzk.de/corsika/corsika-school>

Viele astrophysikalische Untersuchungen unterschiedlichster Art erfordern das Verständnis und die Simulation der Wechselwirkung von kosmischen Strahlen mit der Atmosphäre der Erde. Die alle zwei Jahre stattfindende CORSIKA-Schule hat das Ziel, Doktoranden und junge Nachwuchswissenschaftler mit Experten zusammenzubringen und ihnen einen schnellen Einstieg in dieses komplexe Forschungsfeld zu ermöglichen.

■ Internationales Doktorat in der Astroteilchenphysik (IDAPP)

<http://www.fe.infn.it/idapp>

Das internationale Doktorat für Astroteilchenphysik (International Doctorate on Astroparticle Physics, IDAPP) wurde vom Italienischen Ministerium für Universitäten und Forschung (MIUR) im Rahmen seiner Maßnahmen zur Internationalisierung der Universitäten gebilligt. Bisher sind daran 10 italienische und französische Universitäten beteiligt sowie die Forschungsinstitute LNGS (Italien), APC (Frankreich) und das Forschungszentrum Karlsruhe (Deutschland).

■ Graduiertenkollegs der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Graduiertenkolleg 570 „Eichtheorien – experimentelle Tests und theoretische Grundlagen“

Universität Mainz

<http://www.phmi.uni-mainz.de/927.php>

Graduiertenkolleg 665 „Interferenz und Quanteneffekte und deren Anwendungen“

Universität Hannover, University of Glasgow, CNRS Orsay

<http://www.egc-hannover.org>

Graduiertenkolleg 683 „Hadronen im Vakuum, in Kernen und Sternen“

Universitäten Basel, Graz und Tübingen

<http://eurograd.physik.uni-tuebingen.de>

Graduiertenkolleg 729 „Elementarteilchenphysik an der TeV-Skala“

RWTH Aachen

<http://www.tb.physik.rwth-aachen.de/~kolleg>

Graduiertenkolleg 742 „Hochenergiephysik und Teilchenastrophysik“

Universität Karlsruhe, Institut für Experimentelle Kernphysik, Institut für Theoretische Teilchenphysik und Institut für Theoretische Teilchenphysik

<http://www-ttp.physik.uni-karlsruhe.de/GK>

Graduiertenkolleg 841 „Physik der Elementarteilchen an Beschleunigern und im Universum“

Universitäten Bochum und Dortmund

<http://www.physik.uni-dortmund.de/gk-elementarteilchen>

Graduiertenkolleg 881 „Quantenfelder und stark wechselwirkende Materie“

Universität Bielefeld,

Université Paris-Sud XI

<http://www.physik.uni-bielefeld.de/igs>

Graduiertenkolleg 1054 „Particle Physics at the Energy Frontier of New Phenomena“

Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) und Technische Universität München (TUM)

<http://www.physik.uni-muenchen.de/~biebel/GRK>

Graduiertenkolleg 1147 „Theoretische Astrophysik und Teilchenphysik“

Universität Würzburg

<http://www.astro.uni-wuerzburg.de>

■ International Max Planck Research Schools (IMPRS)

The International Max Planck Research School for Astronomy and Cosmic Physics at the University of Heidelberg

Max-Planck-Institute für Astronomie und für Kernphysik (Heidelberg), Universität Heidelberg

<http://www.mpia-hd.mpg.de/imprs-hd>

The International Max Planck Research School on Astrophysics at the Ludwig Maximilians University Munich – A Marie Curie Early Stage Training Site of the European Commission

Max-Planck-Institute für Astrophysik und für extraterrestrische Physik (Garching), Ludwig-Maximilians-Universität München und European Southern Observatory (Garching)

<http://www.imprs-astro.mpg.de>

International Max Planck Research School on Elementary Particle Physics in Munich

Max-Planck-Institut für Physik (München), Technische Universität München, Ludwig-Maximilians-Universität München

<http://www.mppmu.mpg.de/imprs>

International Max Planck Research School on Gravitational Wave Astronomy

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Golm und Hannover), Universität Hannover, Laserzentrum Hannover e.V.

<http://imprs-gw.aei.mpg.de>

■ Sonderforschungsbereiche und Exzellenzcluster der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Sonderforschungsbereich/Transregio „Gravitationswellenastronomie“ (SFB/TR 7)

Universitäten Jena, Hannover und Tübingen, Max-Planck-Institute für Gravitationsphysik (Golm und Hannover) und für Astrophysik (Garching)

<http://www.tpi.uni-jena.de/SFB>

Sonderforschungsbereich „Kernstruktur, nukleare Astrophysik und fundamentale Experimente bei kleinen Impulsüberträgen am supraleitenden Darmstädter Elektronenbeschleuniger S-DALINAC“ (SFB 634)

Technische Universität Darmstadt

<http://www.sfb634.de>

Sonderforschungsbereich „Teilchen, Strings und frühes Universum: Struktur von Materie und Raum-Zeit“ (SFB 676)

Universität Hamburg, DESY (Hamburg und Zeuthen)

<http://www.physik.uni-hamburg.de/sfb676>

Sonderforschungsbereich/Transregio „Das Dunkle Universum“ (SFB/TR 33)

Universitäten Heidelberg und Bonn, Ludwig-Maximilians-Universität München, Max-Planck-Institute für Astrophysik und für extraterrestrische Physik, European Southern Observatory (ESO)

<http://www.darkuniverse.uni-hd.de>

Sonderforschungsbereich/Transregio "Neutrinos and Beyond: Weakly Interacting Particles in Physics, Astrophysics and Cosmology" (SFB/TR 27)

Technische Universität München, Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, Universität Tübingen, Max-Planck-Institute für Physik (München), Kernphysik (Heidelberg) und Astrophysik (Garching).

<http://transregio.e15.physik.tu-muenchen.de>



The Cluster of Excellence for Fundamental Physics “Origin and Structure of the Universe”

Ludwig-Maximilians-Universität und Technische Universität München, Max-Planck-Institute für Physik (München) und Astrophysik (Garching), Europäische Südsternwarte (ESO)

<http://www.universe-cluster.de>

■ Vernetzungen an verschiedenen Forschungsstandorten

Centrum für Elementarteilchenphysik und Astroteilchenphysik (CETA)

<http://www.ceta.uni-karlsruhe.de>

Universität Karlsruhe (TH)

Wolfgang-Gaede-Str. 1

Gebäude 30.23

76131 Karlsruhe

Arnold Sommerfeld Center for Theoretical Physics (ASC)

<http://www.asc.physik.lmu.de/asc>

Universität München

Theresienstr. 37

80333 München

■ Verbundforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert verschiedene Experimente der Astroteilchenphysik (derzeit Auger, ANTARES, IceCube, H.E.S.S., MAGIC, KATRIN und GERDA) im Rahmen seiner *Verbundforschung zur Förderung der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung an Großgeräten der Physik*.

Nähere Informationen beim Projektträger DESY

<http://pt.desy.de>

■ Virtuelle Institute der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF)

Der Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) fördert die Zusammenarbeit zwischen Arbeitsgruppen an verschiedenen Universitäten mit Instituten der HGF. Verschiedene Max-Planck-Institute sind assoziiert.

Virtuelles Institut der Struktur der Kerne und nuklearer Astrophysik (VISTARS)

Universitäten Frankfurt und Mainz, Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI, Darmstadt)

<http://www.vistars.de>

Virtual Institute for Particle Cosmology (VIPAC)

DESY (Hamburg), Universitäten Bonn, Heidelberg und München

<http://vipac.desy.de>



■ Europäische und Internationale Vernetzung

The Joint Institute for Nuclear Astrophysics (JINA)

Zahlreiche internationale Universitäten und Forschungseinrichtungen. Aus Deutschland: Universität Mainz, Forschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Schwerionenforschung GSI (Darmstadt)

<http://www.jinaweb.org>

Integrated Large Infrastructures for Astroparticle Science (ILIAS)

Ein großes Netzwerk Europäischer Forschungseinrichtungen und Universitäten mit Themenschwerpunkten *Physik in tiefen Untergrundlaboratorien, Nachweis von Gravitationswellen und Theoretische Astroteilchenphysik*, gefördert von der Europäischen Kommission.

<http://ilias.in2p3.fr>

ApPEC (Astroparticle Physics European Coordination)

ApPEC wurde im Jahr 2001 als Interessengruppe nationaler Forschungsförderer gegründet, die sich zum Ziel gesetzt hat, Initiativen in der Astroteilchenphysik auf europäischer Ebene zu koordinieren und voranzutreiben. Von ursprünglich sechs Gründungsmitgliedern ist ApPEC mittlerweile auf 13 Forschungsförderer aus 10 europäischen Ländern gewachsen. ApPEC besteht im wesentlichen aus zwei Gremien, dem Steering Committee (SC) und Peer Review Committee (PRC), das dem SC wissenschaftlich beratend zur Seite steht. Von ApPEC wurden unter anderem die von der EU geförderten Projekte ILIAS, KM3NeT und Aspera erfolgreich auf den Weg gebracht.

<https://ptweb.desy.de/appec>

Aspera (Astroparticle Physics ERA-NET)

Zur Ausgestaltung des Europäischen Forschungsraums (European Research Area, ERA) fördert die EU Kommission Initiativen zur Vernetzung nationaler Forschungsförderer in einem bestimmten Wissenschaftsgebiet. Von ApPEC initiiert, konnte ein solches ERA-NET für die Astroteilchenphysik – genannt Aspera – erfolgreich beantragt werden. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und sein Projektträger PT-DESY sind als deutsche Partner in Aspera engagiert. Die wesentlichen Ziele von Aspera sind die Erarbeitung des derzeitigen Status der Förderung der Astroteilchenphysik in Europa, die Koordination einer Europäischen Roadmap für die Astroteilchenphysik, die strategische Planung für eine zukünftig verstärkte Zusammenarbeit bei der Förderung der Astroteilchenphysik, die Entwicklung einer Informationsplattform und die europaweite Ausdehnung dieses Netzwerks. Der Beginn des ERA-NET Aspera ist im Juli 2006 geplant. Nähere Informationen beim Projektträger PT-DESY

<http://pt.desy.de>

Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)

<http://www.astroteilchenphysik.de>

Auf ihrem Workshop „Astroteilchenphysik in Deutschland“ (16.-18.9.2003 in Karlsruhe) haben die deutschen Astroteilchenphysikerinnen und Astroteilchenphysiker einhellig beschlossen, ein Komitee zur Organisation und Vertretung der gemeinsamen Belange und als Ansprechpartner für politische und wissenschaftliche Organisationen, Forschungseinrichtungen und die Öffentlichkeit einzusetzen. In diesem Komitee für Astroteilchenphysik (KAT) wird angestrebt, der Themenvielfalt der Astroteilchenphysik Rechnung zu tragen, indem für jeden größeren Themenkreis ein Vertreter gewählt wird. Eine Wahlperiode dauert 3 Jahre. In jeder Wahlperiode erfolgt eine Revision der Einteilung in Themenkreise. Wahlberechtigt sind alle promovierten Astroteilchenphysikerinnen und Astroteilchenphysiker, die an einer wissenschaftlichen Einrichtung in Deutschland tätig sind.

Die gewählten Mitglieder des KAT für die Wahlperiode Januar 2007 – Januar 2010 sind:

- **Prof. Dr. J. Blümer**
Vorsitz, Geladene kosmische Strahlung
- **Prof. Dr. K. Danzmann**
Gravitationswellen
- **Prof. Dr. G. Drexlin**
Neutrinoeigenschaften
- **Prof. Dr. C. Hagner**
Niederenergie-Neutrinoastrophysik
- **Prof. Dr. W. Hofmann**
Gamma-Astronomie
- **Prof. Dr. J. Jochum**
Dunkle Materie
- **Prof. Dr. K. Langanke**
Nukleare Astrophysik
- **Dr. habil. G. Raffelt**
Theoretische Astroteilchenphysik
- **Dr. Ch. Spiering**
Hochenergie-Neutrinoastrophysik

Zusätzlich sind folgende Ex-Officio Mitglieder im Komitee vertreten:

- **Prof. Dr. M. Bartelmann**
Rat deutscher Sternwarten
- **Dr. T. Berghöfer und C. Rülle**
ASPERA
- **Prof. Dr. J. Blümer**
ApPEC Steering Committee
- **Dr. Ch. Spiering**
ApPEC Peer Review Committee
- **Dr. S. Eching und Dr. P. Nickel**
Max-Planck-Gesellschaft
- **Dr. M. Hempel**
Projektträger Astroteilchenphysik
- **Dr. S. Krückeberg und Dr. K. Zach**
Deutsche Forschungsgemeinschaft
- **Dr. R. Koepke und Dr. J. Richter**
Bundesministerium für Bildung und Forschung
- **Dr. S. Schmidt und Dr. R. Opitz**
Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren
- **Dr. A. Ringwald**
KET – Komitee für Elementarteilchenphysik
- **Prof. Dr. C. Weinheimer**
KHuK – Komitee für Hadronen und Kerne

Impressum

Herausgegeben vom Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)
1. Auflage 2006; Korrigierter Nachdruck 2007

Redaktionskomitee:

Prof. Dr. Matthias Bartelmann,
Prof. Dr. Werner Hofmann,
Prof. Dr. Josef Jochum,
Dr. habil. Georg Raffelt (Vorsitz)
raffelt@mppmu.mpg.de

Textbearbeitung:

Dr. Thomas Bührke,
Wiesenblättchen 12
68723 Schwetzingen
Tel. 06202/5779749
thomas.buehrke@t-online.de

Konzeption:

Milde Marketing Wissenschaftskommunikation
milde@mildemarketing.de
<http://www.milde-marketing.de>

Textvorlagen:

Prof. Dr. Gisela Anton, Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Dr. Rudolf Bock, Prof. Dr. Wim de Boer, Prof. Dr. Karsten Danzmann, Dr. Klaus Eitel, Dr. Ralph Engel, Prof. Dr. Guido Drexlin, Dr. Marianne Göger-Neff, Dr. Andreas Haungs, Dr. Jürgen Hößl, Prof. Dr. Werner Hofmann, Dr. habil. Hans-Thomas Janka, Prof. Dr. Josef Jochum, Dr. Markus Kuster, Dr. Tobias Lachenmaier, Prof. Dr. Karlheinz Langanke, Dr. Giselher Lichte, Prof. Dr. Manfred Lindner, Dr. habil. Georg Raffelt, Prof. Dr. Gerhard Schäfer, Dr. Stefan Schönert, Dr. Christian Spiering, Dr. Volker Springel, Prof. Dr. Heinrich Völk, Prof. Dr. Christof Wetterich

Graphische Gestaltung:

Milde Marketing Wissenschaftskommunikation
Merkurstr. 12, 14482 Potsdam
Tel. 0331/583 93 54, Fax 0331/583 93 57
milde@mildemarketing.de
<http://www.milde-marketing.de>
in Kooperation mit Stefan Pigur
<http://www.pigurdesign.de>

Bild S. 98:

Courtesy of FH Osnabrück

Bezugsquelle:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Stabsabteilung Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe
Tel. 07247/82-2861, info@oea.fzk.de

Elektronische Version:

<http://www.astroteilchenphysik.de>

