

23.05.2013

Astroteilchenphysik in Deutschland

Zustandsbeschreibung und Empfehlungen

Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)

Mai 2013

Inhalt:

I. Zusammenfassung	3
II. Einleitung	6
III. Die Astroteilchengemeinschaft in Deutschland	7
IV. Der europäische Kontext: ApPEC und ASPERA	8
V. Forschungsfelder und Empfehlungen	10
1. Direkte Suche nach dunkler Materie	
2. Neutrinomasse	
3. Proton-Zerfall und Neutrino-Astrophysik bei niedrigen Energien	
4. Bodengebundene Gamma-Astrophysik	
5. Geladene kosmische Strahlung bei höchsten Energien	
6. Neutrino-Astronomie bei hohen Energien	
7. Gravitationswellen	
8. Nukleare Astrophysik	
9. Koordinierung von Aktivitäten in der theoretischen Astroteilchenphysik	
VI. Neue Technologien und Anwendungen	37

I. Zusammenfassung

Im Folgenden sind die Empfehlungen des KAT zu den einzelnen Themenbereichen zusammengefasst.

Dunkle Materie

Wir empfehlen die Förderung beider Technologie-Linien, XENON und EURECA, und daher für die anstehende Förderperiode:

XENON bei der Fertigstellung von XENON1T und den folgenden Messungen zu unterstützen

EURECA bei den vorbereitenden Arbeiten und dem Bau erster Komponenten zu fördern. Wir unterstützen die sich anbahnende Zusammenarbeit zwischen EURECA und dem amerikanischen Projekt Super CDMS

Die Grenzen der Technologien scheinen noch nicht erreicht zu sein, weshalb wir in moderatem Umfang R&D Aktivitäten empfehlen.

Neutrinomasse

Wir empfehlen die weitere Förderung von GERDA und KATRIN über die Verbundforschung. Das KATRIN-Experiment zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse soll zur Fertigstellung des Experiments und zum maximalen Ausschöpfen seines Empfindlichkeitspotenzials unterstützt werden. Die angestrebte Untergrundreduktion und Sensitivität von GERDA Phase I ist erreicht worden und Phase II ist in Vorbereitung. Wenn die für Phase II vorgesehene weitere Untergrundreduktion erfolgreich ist, sollte der mögliche Ausbau auf eine Tonne Targetmaterial im Rahmen eines weltweiten Germanium-Experiments unterstützt werden.

Die Unterstützung von F&E-Projekten (z.B. auch durch die DFG) wird als wichtige Investition in die Zukunft angesehen.

Niederenergie-Neutrinoastrophysik/Protonzerfall

Daya-Bay-2 stellt aller Wahrscheinlichkeit nach eine großartige Chance dar, viele der wissenschaftlichen Ziele von LENA zeitnah und relativ kostengünstig zu erreichen. Das KAT empfiehlt daher die Förderung von Studien deutscher Gruppen zum wissenschaftlichen Potenzial von Daya-Bay-2 in der Astroteilchenphysik und die Förderung der Weiterentwicklung der Technologien auf dem Gebiet der Niederenergie-Neutrinoastrophysik.

Bodengebundene Gamma-Astronomie

Die laufenden Experimente H.E.S.S. und MAGIC sind für die nächsten Jahre die sensitivsten Instrumente ihrer Art. H.E.S.S. Phase II erschließt durch den neuen Hybrid-Betrieb unterschiedlicher Teleskopgrößen eine für CTA wegweisende Technologie. Die Optimierung dieser Technologie bei den laufenden Instrumenten soll unterstützt werden. CTA ist ein internationales Projekt mit einer klaren deutschen Führungsposition und Kernbestandteil einer Multi-Messenger-Initiative. Entsprechend der vom KAT begrüßten Priorisierung der wissenschaftlichen Infrastrukturen soll CTA in der nächsten Runde der Verbundforschung gefördert werden.

Geladene kosmische Strahlen bei höchsten Energien

Das Pierre Auger-Observatorium wird auch für die nächsten Jahre das weltweit führende Experiment zur Messung der kosmischen Strahlung sein und sollte weiterhin durch die Verbundforschung gefördert werden. Insbesondere sollten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für neue Techniken und zukünftige Experimente unterstützt werden. Im Falle einer erfolgreichen internationalen Begutachtung sollten den deutschen Gruppen Verbundforschungsmittel in angemessener Höhe zur Beteiligung am Upgrade des Auger Observatoriums zur Verfügung gestellt werden.

Neutrino-Teleskope

Wir empfehlen die weitere Förderung der Neutrinoastronomie und die Unterstützung der auf Messungen bei niedrigeren Energien gerichteten Aktivitäten. Dies beinhaltet:

Die Beteiligung der deutschen Universitätsgruppen an IceCube und ANTARES sollte weiter gefördert werden, auch um mit der Entwicklung neuer Methoden das Potential der Experimente voll auszuschöpfen.

PINGU ist eine sehr interessante Option, die Empfindlichkeiten bis herunter zu GeV Neutrinos sowohl für astrophysikalische als auch für teilchenphysikalische Fragestellungen eröffnet. Vorbereitende Arbeiten hierzu sollten unterstützt werden.

Da die notwendige Fokussierung der deutschen Aktivitäten in der Hochenergie-Neutrinoastronomie derzeit noch nicht entscheidungsreif ist, sollte aus strategischen Gründen im Rahmen der ANTARES-Förderung eine Fortführung der deutschen Aktivitäten in KM3NeT Phase-1 ermöglicht werden.

Gravitationswellen

Deutschland sollte sich an der GWIC Roadmap orientieren und eine Führungsrolle überall übernehmen, wo es möglich ist.

Das KAT schlägt zeitnah ein gesondertes Treffen von Vertretern der Gravitationswellen-Gemeinschaft und des BMBF sowie anderer Förderorganisationen vor. Auf diesem Treffen sollte eine Abstimmung diskutiert und ein Fördermodell gefunden werden, das der Bedeutung des Gebietes und der gewachsenen Anzahl von interessierten (aber wegen der unklaren Fördersituation noch nicht aktiven) Universitätsgruppen gerecht wird.

Nukleare Astrophysik

Nukleare Astrophysik beinhaltet die Aspekte von kernphysikalischer Materiebeschreibung, Messmethoden kosmischer Nuklide, und Experimente zu Kernreaktionen in nachempfundenen kosmischen Bedingungen. Im Themenbereich Nukleare Astrophysik laufen die im europäischen Maßstab erarbeiteten Direktiven überlappender Forschungsrichtungen (NuPECC, ASPERA, ASTRONET) und europaweite Netzwerke (z.B. EuroCores-Programm EuroGenesis der früheren ESF) Gefahr, als vergleichsweise kleinere Programme ohne ausreichende Verzahnung mit nationalen Projekten Effektivitätseinbußen zu erleiden. Zur Klärung optimaler Projektstrategien in der nuklearen Astrophysik und ihrer Verzahnung und Förderwege empfiehlt das KAT einen baldigen disziplinsübergreifenden Workshop unter Beteiligung der unterschiedlichen Förderorganisationen und Forschungsgruppen. Im Rahmen der Astroteilchen-Koordination wird vorwiegend der experimentelle, bodengebundene Aspekt behandelt: Detektoren und Nachweismethoden sind der Natur nach "teilchen-orientiert". Das KAT empfiehlt die Unterstützung terrestrischer Laborexperimente mit astrophysikalischer Relevanz, d.h. jenseits der rein kernphysikalischen und über die Hadronen- und Kernphysik geförderten Fragen.

Theoretische Astroteilchenphysik

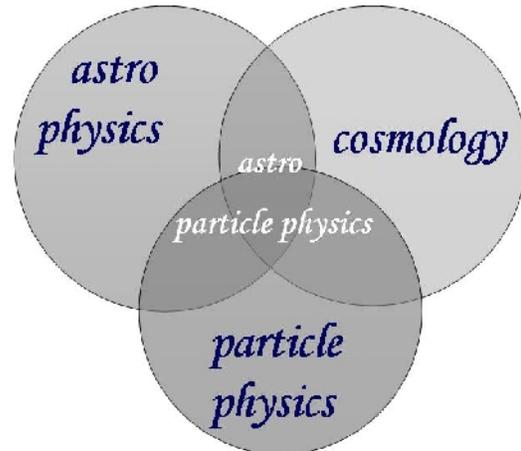
Das KAT empfiehlt eine moderate strategisch motivierte Unterstützung theoretischer Arbeiten, um aus den Projekten der Verbundforschung die bestmöglichen Physikergebnisse zu erzielen, und um so die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Theorie- und auch Experimentalphysik-Gruppen in diesem Bereich zu erhöhen. Dies könnte z.B. eine gezielte Zusatzförderung für Gruppen sein, die helfen diese Problematik zu lösen. Darüber hinaus sollten generell die besten und mobilsten jungen Forscher gefördert werden, die an den Schnittstellen der Astrophysik, der Teilchenphysik und der Kosmologie arbeiten.

Weiterhin regt das KAT ein Treffen an, auf dem diskutiert werden soll, ob über die Vernetzung der deutschen Astroteilchenphysiktheoretiker innerhalb der Helmholtz-Allianz HAP ein weiteres Instrument auf nationaler Ebene benötigt wird und wie sich die deutsche Community in diesem Zusammenhang gegenüber dem gegenwärtig auf europäischer Ebene diskutierten Particle Astrophysics and Cosmology Theory (PACT) Programm positionieren sollte.

I. Einleitung:

Astroteilchenphysik ist das Forschungsfeld im Grenzbereich von Astrophysik, Teilchenphysik und Kosmologie. Es hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine stürmische Entwicklung genommen und eine eigenständige Bedeutung erlangt. Die Astroteilchenphysik erweitert Astrophysik hin zu den höchsten Energien des „nicht-thermischen“ Universums und erschließt andererseits der Hochenergie-Teilchen-Physik Felder jenseits oder parallel zu den Möglichkeiten von irdischen Teilchenbeschleunigern. Der Themenbereich umfasst Fragen wie

die nach der Natur der dunklen Materie; nach der Stabilität der uns bekannten Materieformen („Protonzerfall“); nach der Physik des Urknalls; nach der Rolle, die Neutrinos im kosmischen Geschehen spielen, und nach den Informationen, die sie uns aus dem Innern kompakter Objekte liefern können; nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung und der Landkarte des Kosmos bei höchsten Energien ("relativistisches" Universum); und schließlich auch nach extremen Prozessen kollabierender oder umeinander rotierender Sterne (bzw. Prozessen im frühen Universum), die mit Gravitationswellen erfassbar sein werden.



Die letzten zwei Jahrzehnte haben zur Entwicklung von Technologien geführt, welche die Untersuchung dieser Fragen mit entscheidend gesteigerter Sensitivität erlauben. Der Nachweis von Neutrinos aus der Supernova 1987A setzte vor einem Vierteljahrhundert das erste Glanzlicht (Hierfür und für den Nachweis solarer Neutrinos wurde der Physik-Nobelpreis 2002 vergeben). Die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen und das Erschließen der bis 1989 völlig weißen Landkarte höchstenergetischer kosmischer Gammastrahlen (mit mittlerweile über hundert klar identifizierten Quellen im TeV-Bereich) sind weitere, vor 20 Jahren noch nicht für möglich gehaltene Erfolgsgeschichten. Auf anderen Gebieten könnte der Durchbruch in den nächsten Jahren gelingen. Z.B. ist im letzten Jahrzehnt die Sensitivität auf Teilchen dunkler Materie um etwa einen Faktor Tausend verbessert worden; zwei weitere Größenordnungen darf man für die nächsten 5-10 Jahren erwarten. Im Zusammenspiel mit der Suche nach Teilchen der dunklen Materie am LHC wird der größte Teil des möglichen Parameterraumes für diese Teilchen abgedeckt, vorausgesetzt es handelt sich um den bevorzugten Kandidaten für dunkle Materie, das Neutralino. Ein signifikanter Schritt in der Sensitivität wird auch bei der Bestimmung der Neutrinomassen gemacht werden. Fast als sicher gilt die Entdeckung von Gravitationswellen mit der nächsten Generation von Detektoren,.

Es gibt aus Sicht der Komitees für Astroteilchenphysik überzeugende wissenschaftliche und strategische Gründe, dieses viel versprechende Gebiet verstärkt zu fördern. Das BMBF hat frühzeitig eine strategische Entscheidung getroffen, Astroteilchenphysik eigenständig zu fördern, zum Beispiel durch die Einrichtung eines Verbundforschungsbereichs. Dadurch wurde die Grundlage dafür gelegt, dass die deutsche Astroteilchenphysik ihre Pionierarbeiten der achtziger und neunziger Jahre in wissenschaftlich sehr erfolgreiche bzw. aussichtsreiche internationale Großprojekte umsetzen konnte. Deutschland hat so seine Führungsposition ausgebaut und ist einer der zentralen Akteure der internationalen Astroteilchenphysik. Vergleichbar sind weltweit und unter Betrachtung aller Teilgebiete nur die USA, Frankreich und Italien. Japan hat mit seinen Neutrinoexperimenten großartige Erfolge erzielt, ist aber nicht so breit wie die anderen genannten Nationen aufgestellt.

An der Schwelle zu bahnbrechenden Erkenntnissen will die deutsche Astroteilchenphysik diese Position verteidigen und, wenn möglich, ausbauen. Neben den reinen Physikargumenten macht auch die gewachsene Anzahl der auf dem Gebiet tätigen Wissenschaftler (z.B. drei neue Professuren im Bereich Astroteilchenphysik in Deutschland, die zum Teil aus angrenzenden Gebieten wie der Teilchenphysik oder der Kernphysik stammen) eine entsprechende Kontinuität bzw. moderate Erhöhung der Fördermittel notwendig.

Das vorliegende Strategiepapier des Komitees für Astroteilchenphysik in Deutschland (KAT) beginnt mit seinen Empfehlungen, die weiter hinten näher begründet werden, es beschreibt den Rolle der Astroteilchenphysik in Deutschland und im europäischen Kontext. Die einzelnen Teilgebiete werden in Kapitel V detailliert beschrieben und die weiter reichende Perspektiven für das nächste Jahrzehnt angegeben. Zum Schluss wird anhand der technologischen Entwicklungen gezeigt, dass die Astroteilchenphysik auch über ihr Gebiet hinaus wissenschaftliche, gesellschaftliche und wirtschaftliche Relevanz besitzt. Diese Strategie wird regelmäßig innerhalb der deutschen Astroteilchenphysikergemeinde auf den im zweijährigen Turnus stattfindenden Konferenzen: „Astroteilchenphysik in Deutschland – Status und Perspektiven“ diskutiert, wie zuletzt im Oktober 2012 am DESY-Zeuthen. Die langfristige Perspektive wird auch mit den Komitees für Elementarteilchenphysik (KET) und der Physik der Hadronen und Kerne (KHuK) abgestimmt.

Das vorliegende Strategiepapier wurde von den gewählten Mitgliedern (Karsten Danzmann, Roland Diehl, Dieter Horns, Josef Jochum, Karl-Heinz Kampert, Lothar Oberauer, Elisa Resconi, Günter Sigl und Christian Weinheimer), deren Stellvertreter und den institutionellen Vertretern aus HGF und MPG erarbeitet. Darüber hinaus wurde die ganze deutsche Astroteilchenphysikergemeinde mit einbezogen.

III. Die Astroteilchengemeinschaft in Deutschland

Die vielfältigen und international sichtbaren Aktivitäten der deutschen Astroteilchenphysiker sind in der Broschüre *Kosmische Spurensuche* dargestellt, die vom Komitee für Astroteilchenphysik KAT heraus gegeben wurde. Astroteilchenphysik wird in Deutschland wie folgt gefördert:

- Die BMBF-Verbundforschung Astroteilchenphysik fördert im Zeitraum 2011-2014 45 Vorhaben, die in 9 Großprojekten an 19 Universitäten bearbeitet werden. Im Allgemeinen sind diese Großprojekte maßgeblich von der Helmholtz-Gemeinschaft oder von der Max Planck-Gesellschaft getragen.
- Die DFG fördert 4 Sonderforschungsbereiche (davon 1 SFB-Transregio) und 1 Cluster sowie 5 Graduiertenkollegs mit starkem Bezug zur Astroteilchenphysik.
- An 27 deutschen Universitäten arbeiten etwa 90 Professorinnen und Professoren ganz oder teilweise in der Astroteilchenphysik. In den letzten drei Jahren sind weitere 3 Professuren hinzugekommen, die zu 100% der Astroteilchenphysik gewidmet sind.
- Das Helmholtz-Programm Astroteilchenphysik ist in den Helmholtz-Zentren DESY, KIT und GSI angesiedelt und stellt ein langfristiges, sich dynamisch entwickelndes Programm dar. Die Forschungen werden in 12 Arbeitsgruppen an 4 Standorten durchgeführt. Die Helmholtz-Gemeinschaft entwickelt ihr Portfolio in einem dynamischen foresight-Prozess.
- Die 2011 bewilligte Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik HAP umfasst praktisch die ganze deutsche Astroteilchenphysikergemeinde mit 15 Universitäten und den beiden

Helmholtz-Zentren KIT und DESY-Zeuthen. Max-Planck-Institute sind assoziierte Partner. HAP bietet neben Arbeitspaketen zu verschiedenen Themen der Astroteilchenphysik auch zentrale Mittel („Backbone“) zur Förderung weiterer internationaler Zusammenarbeiten, zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, für Gastwissenschaftler und für aktuelle strategische Unternehmungen.

- An 6 Max Planck-Instituten werden Forschungsthemen der Astroteilchenphysik bearbeitet.
- Die Anzahl von Nachwuchsgruppen in der Astroteilchenphysik ist überproportional groß und spiegelt die dynamische Entwicklung des Feldes wider.

Sowohl die Helmholtz- wie auch Max Planck-Institute nehmen eine wichtige backbone-Funktion für alle Partner wahr.

Nach dem ASPERA-Census von 2006 (siehe unten) stellt Deutschland in der europäischen Astroteilchenphysik nach Italien und Frankreich die drittgrößte Forschergruppe mit ca. 500 Full Time Equivalents (FTE). Inzwischen ist diese Zahl weiter gewachsen (s. Tabelle auf Seite 35). Die Zahl der beteiligten Institute ist in Deutschland am höchsten und belegt die breite Vernetzung gerade auch in der Hochschullandschaft.

IV. Der europäische Kontext: ApPEC und ASPERA

ApPEC (Astroparticle Physics European Coordination) wurde im Jahr 2001 als Interessensgruppe von europäischen Förderinstitutionen in der Astroteilchenphysik gegründet; ApPEC initiierte die Einrichtung des europaweiten Koordinations-Projekts (European Research Area Network ERA-NET) ASPERA, mit zuletzt 24 Institutionen aus 19 europäischen Ländern, das seine Arbeit im Juli 2006 begann. Eine der Aufgaben von ASPERA war die Erstellung einer Roadmap zur Entwicklung der Astroteilchenphysik in Europa. Dies wurde in mehreren Schritten durchgeführt. Die letzte Roadmap von ASPERA wurde gemeinsam mit ApPEC erstellt und stammt vom November 2011. In ihr wurden Empfehlungen für die weitere Entwicklung des Feldes in Europa erarbeitet. Das KAT hat eng mit ApPEC und ASPERA zusammengearbeitet und die Empfehlungen der großen Forschungsrichtungen und Experimente sind gut abgestimmt. Die Astroteilchenphysik in Deutschland ist in allen der sieben großen Gebiete der europäischen Astroteilchenphysik

1. Dunkle Materie
2. Neutrinomassen
3. Neutrino-Astrophysik bei niedrigen Energien
4. Kosmische Strahlung
5. Bodengebundene Gamma-Astronomie
6. Neutrino-Astronomie bei hohen Energien
7. Gravitationswellen

fast immer in sehr stark, wenn nicht in führender Position vertreten (s. Kap. V.1 bis V.7) sowie in der übergreifenden Astroteilchenphysik-Theorie (s. Kap. V.9). Lediglich die nukleare Astrophysik, die aus deutscher Sicht in die Astroteilchenphysik hineinreicht (s. Kap. V.8), wird von ApPEC und ASPERA nicht berücksichtigt.

Ende 2012 wurde ASPERA beendet und die Arbeit wird im Rahmen des neu gegründeten

Astroparticle Physics European Consortium APPEC (nicht gleich mit ApPEC) fortgeführt.

Der ASPERA Census ist zwar 5 Jahre alt, erlaubt aber, die Bedeutung der deutschen Astroteilchenphysik in den europäischen Kontext besser einzuordnen.

Der ASPERA-Census

Eine Erhebung zu Personal, Budget und den Institutionen in der Astroteilchenphysik wurde im August 2008 in 11 ASPERA-Mitgliedsländern durchgeführt (Belgien, Deutschland, Grossbritannien, Frankreich, Italien, Niederlande, Portugal, Spanien, Schweden, Schweiz, Tschechische Republik). Insgesamt forschten im Jahr 2006 2.325 Vollzeitäquivalente (FTE) mit einem Budget von 186 M€/Jahr in 161 Einrichtungen dieser 11 Länder; das Budget bestand etwa zur Hälfte aus Personalmitteln. Die in der Tabelle aufgeführten Budgets umfassen Kosten für Entwicklung, Investitionen, Betrieb der Anlagen und Personalmittel. Die Gesamtsumme für Investitionen in Europa beträgt etwa 70 M€, d.h. etwa 40% der Gesamtkosten. Dabei ist anzumerken, dass 2006 nach Aspera-Schätzung kein besonders investitionslastiges Jahr war. „Budgetanteil in %“ bedeutet den Anteil der Astroteilchenphysik an den nationalen Forschungsetats.

Land	FTE	Budget (M€)	Budget- anteil (%)	Institute
BE	17	0.7	0.3	4
CH	52	3.6	1.7	7
CZ	20	0.4	0.8	5
DE	494	44	2.6	38
ES	168	10	1.3	13
FR	608	51.5	3.2	28
IT	679	58.6	5.7	30
NL	55	6.1	1.7	9
PT	40	0.5	0.4	5
SE	34	2	0.8	3
UK	158	9	0.7	19
Total	2325	186.4		161

Europäische Spitzenreiter sind mit Abstand Italien, Frankreich und Deutschland. Das liegt nicht nur an der Größe dieser Länder, denn auch im relativen Anteil der Ausgaben für Astroteilchenphysik bezogen auf das staatliche Forschungsbudget liegen sie vorn. Gründe dafür sind die lange Tradition, die alle drei Länder auf dem Gebiet der Astroteilchenphysik haben, die Existenz von weitgehend geeigneten Förderinstrumenten bzw. von starken Trägerinstitutionen (wie etwa in Deutschland), oder, wie im Falle von Italien, die Existenz einer zentralen Infrastruktur wie des Gran Sasso Untergrundlaboratoriums. Alle drei Länder sind auf allen sieben Teilgebieten der Astroteilchenphysik engagiert. Einige kleinere Länder konzentrieren ihre Anstrengungen auf ein einziges Projekt (z.B. Belgien auf IceCube) oder auf einige wenige, da aber teilweise sehr sichtbar (z.B. Niederlande für KM3NeT, Schweden für IceCube). Deutschland sollte sich auch in Zukunft in allen dieser Gebiete engagieren, denn alle sieben bergen ein großes Entdeckungspotential, und für alle existiert in Deutschland eine erhebliche Tradition und Expertise, oft verbunden mit einer Führungsposition.

V. Forschungsfelder und Empfehlungen

Im folgenden stellen wir die 9 Themenfelder der Astroteilchenphysik in Deutschland vor und geben Empfehlungen ab, die zwischen März und Mai 2013 vom Komitee für Astroteilchenphysik erstellt wurden:

1. Direkte Suche nach dunkler Materie

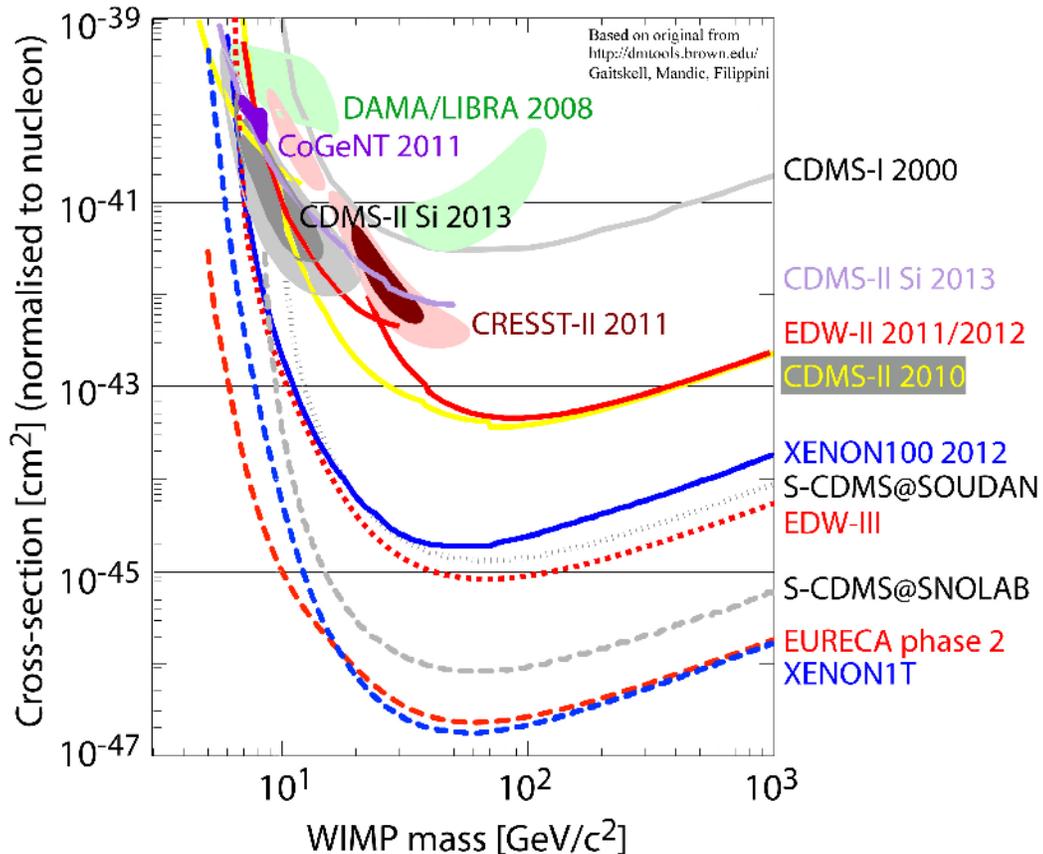
Die Fragen nach der Natur der dunklen Materie und der dunklen Energie sind grundlegend für die Kosmologie und das gesamte physikalische Weltbild. Teilchenphysiker sind in beiden Gebieten stark engagiert. Die Klärung der Natur der dunklen Materie hat sich von der Astrophysik in das Gebiet von Astroteilchen- und Teilchenphysik verlagert, da die dunkle Materie nicht aus normaler Materie bestehen kann und andererseits die Teilchenphysik eine Reihe von Kandidaten zur Erklärung der dunklen Materie bereitstellt. Ähnliches ist für die dunkle Energie noch nicht der Fall: es existiert bisher kein klarer Erklärungsansatz aus der Teilchenphysik, und das Instrumentarium zur weiteren Erforschung dieses Phänomens ist das der Astronomen.

Die Liste der „gängigen“ Kandidaten für dunkle Materie reicht von extrem leichten (10^{-15} GeV) bis zu extrem schweren Teilchen. Auch die entsprechenden Wechselwirkungs-Querschnitte variieren über etwa 30 Größenordnungen. Die bevorzugten Kandidaten sind einerseits Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs), und dabei besonders das von supersymmetrischen Theorien vorhergesagte Neutralino, und andererseits Axionen.

WIMPs, mit erwarteten Massen im GeV-TeV-Bereich, können mit direkten Methoden (über ihre Stoßprozesse) und mit indirekten Methoden (über ihre Annihilations- oder Zerfallsprodukte) nachgewiesen werden, außerdem könnten sie am LHC erzeugt werden. Die bisherigen Messungen mit direkten Suchen und am LHC haben den für die Supersymmetrie möglichen Parameterbereich insbesondere sog. Constrained Minimal Supersymmetric Models (CMSSM) signifikant und in komplementärer Weise eingeschränkt. Ein großer Teil des Parameterbereichs für supersymmetrische dunkle Materie ist aber noch nicht erschlossen. Für andere Erweiterungen des Standardmodells gibt es für dunkle Materie (WIMPs) noch erheblich mehr Spielraum, darunter würden auch WIMPs mit kleiner Masse fallen, für die es bei den direkten Suchen nach dunkler Materie in den letzten Jahren mögliche Hinweise gab. Eine Klärung der Natur der dunklen Materie darf man wohl nur durch positive Befunde aus mehr als einer der erwähnten drei Nachweismethoden erwarten. Der indirekte Nachweis wird mit Detektoren angegangen, die im Allgemeinen primär für andere Fragestellungen gebaut werden (z.B. Gamma- und Neutrinooteleskope). Die Empfehlungen in diesem Kapitel konzentrieren sich darum auf den direkten Nachweis.

Bei den direkten Nachweismethoden geht es darum, die Empfindlichkeit der gegenwärtigen Untergrunddetektoren um weitere zwei Größenordnungen zu steigern, sodass auch Teilchen der dunklen Materie mit einem Wechselwirkungsquerschnitt im Bereich 10^{-47} - 10^{-46} cm² nachgewiesen werden können (gegenwärtig: einige 10^{-45} cm²). Damit würde der wesentliche verbleibende Parameterbereich des CMSSM abgedeckt und – wichtiger noch – wesentliche Bereiche des WIMP-Parameterbereichs überdeckt, in denen allgemeinere SUSY-Modelle ohne unnatürliche Feineinstellung der Parameter auskommen. Vorausgesetzt, dunkle Materie besteht aus Neutralino-WIMPs, gäbe es damit im nächsten Jahrzehnt eine sehr realistische Chance, die Teilchen der dunklen Materie nachzuweisen. Auch jenseits von SUSY können Experimente der 1-Tonnen-Skala relevante Tests nach generischen WIMPs durchführen. Beim direkten Nachweis spielen zwei Parameter eine Rolle: a) die Target-Masse des Detektors und b) die Fähigkeit, Untergrundsignale zu erkennen und auszusondern. Dabei werden sich die Detektoren schrittweise dem Bereich von einer Tonne Target-Material annähern, wobei auf jeder Stufe zu beweisen ist, dass die Anzahl der Untergrundsignale aus dem Detektor kleiner als ~ 1 pro Jahr gehalten werden kann. Erst nachdem dies gezeigt worden ist, ist es sinnvoll, die nächst-massivere Stufe zu bauen. Technologisch gab es in den letzten zehn Jahren bei der direkten

Suche nach Teilchenkandidaten der dunklen Materie beeindruckende Fortschritte. Gegenüber dem Jahre 2000 hat sich bis heute die Sensitivität um mehr als einen Faktor 1000 verbessert. Wegen der Verfügbarkeit mehrerer Technologien mit viel versprechenden Sensitivitäten und dem erfolgreichen Betrieb des LHC und damit der Suche nach Supersymmetrie sind in den nächsten Jahren große Fortschritte bei der Klärung nach der Natur der dunklen Materie im Universum zu erwarten.



Der WIMP-Nukleon-Streuquerschnitt als Funktion der Masse des WIMP-Teilchens. Die durchgezogenen Linien zeigen die Sensitivitätslimits früherer und zurzeit aktiver Experimente. Die Bereiche oberhalb der Linien sind experimentell ausgeschlossen. Je kleiner der WIMP-Nukleon Streuquerschnitt, desto geringer die nachweisbare Rate an Ereignissen in einem Detektor. Die momentane Sensitivität bewegt sich im Bereich von einem Ereignis pro Jahr und kg. Die eingefärbten Bereiche repräsentieren die von verschiedenen Experimenten beobachteten Hinweise auf mögliche Teilchen der dunklen Materie. Die gestrichelten Linien zeigen projizierte Sensitivitätsgrenzen geplanter Experimente. Um in Zukunft den gesamten super-symmetrischen Parameterbereich zugänglich zu machen, sind Detektormassen von einer Tonne oder mehr und einem Untergrund von wenigen Ereignissen pro Jahr erforderlich.

Projekte: In Europa werden gegenwärtig zwei Technologien mit Priorität verfolgt: Bei kryogenen Detektoren wird die Wechselwirkung aus einer Kombination von Wärme und Ionisation (EDELWEISS) oder Wärme und Licht (CRESST) nachgewiesen, bei Edelgas-Detektoren werden Licht- und Ionisationssignale in flüssigem Xenon (XENON) oder flüssigem Argon (DarkSide, ArDM) nachgewiesen.

Die Kollaborationen CRESST und EDELWEISS werden den Weg zu einem 100-kg und später 1-Tonnen-Detektor durch Ausbaustufen der gegenwärtigen Experimente (CRESST III, EDELWEISS III) und im Rahmen eines gemeinsamen Projekts, EURECA, gehen. Im Rahmen der Designstudie „DARWIN“ untersuchen ein großer Teil der europäischen und amerikanischen Flüssig-Xenon- und Flüssig-Argon-Gruppen gemeinsam die Technologie für ein Flüssig-Edelgas-Experiment mit Massen an der 10-Tonnen-Skala.

Die XENON-Kollaboration hat im Jahre 2012 die Ergebnisse einer 13-monatigen Messzeit mit dem XENON100-Experiment publiziert. Die dabei erzielten Sensitivitätsgrenzen bezüglich dem WIMP-Nukleon Streuquerschnitt mit einem Minimum von $2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ bei einer WIMP-Masse von 55 GeV sind zurzeit die besten weltweit. Zur Zeit baut die Kollaboration das Nachfolgeexperiment XENON1T auf. Ebenfalls zu den besten weltweit gehört die Sensitivität des EDELWEISS-Experimentes. Die Kollaboration hat im Jahre 2012 eine spezielle Analyse des niedrigen Massebereiches und damit bei niedrigen Signalenergien veröffentlicht, was das Potenzial der Tieftemperatur-Detektortechnologie von EDELWEISS gerade bei niedriger Energieschwelle und damit kleinen WIMP-Massen belegt. Die CRESST-Kollaboration hat die Daten einer zweijährigen Messkampagne veröffentlicht. Dabei zeigt sich ein Überschuss über den bekannten durch Alpha-Zerfälle erzeugten Untergrund. Worum es sich dabei handelt soll eine zurzeit laufende Messung zeigen.

Deutsche Beteiligung: Das Leitinstitut für CRESST ist das MPI für Physik München, weitere Teilnehmer sind die TU München, die Universität Tübingen und das Gran Sasso Laboratorium LNGS, wo das Experiment auch aufgebaut ist. Das EDELWEISS-Experiment nimmt im Frejus-Untergrund-Laboratorium LSM Daten, Deutschland ist über das KIT beteiligt, die anderen Teilnehmer kommen vorwiegend aus Frankreich. Seit 2009 gibt es eine deutsche Beteiligung am XENON100-Experiment im LNGS durch die Universität Münster und das MPIK Heidelberg, seit Juli 2010 auch durch die Universität Mainz. Leitinstitution ist die Columbia University New York, weitere Teilnehmer kommen aus USA, Frankreich, Italien, Portugal, Schweiz und Israel. XENON100 definiert für WIMP-Massen oberhalb von 8 GeV die empfindlichsten Obergrenzen. Der Bau eines Experiments der nächsten Generation XENON1T wurde bereits unter starker deutscher Beteiligung begonnen. Deutsche Gruppen arbeiten damit an führenden Projekten und tragen mit essenzieller Expertise dazu bei. Deutschland gehört zu den führenden Nationen bei der Entwicklung von Kryodetektoren. Die im Rahmen des CRESST-Experimentes in Deutschland entwickelten szintillierenden Kalorimeter sind gegenwärtig die einzige Möglichkeit, unterschiedliche Targetkerne im gleichen Experiment einzusetzen. Bei den Flüssig-Xenon-Detektoren ist die in den solaren Neutrinoexperimenten Gallex und Borexino in Deutschland gewonnene Expertise der Reinigung kalter Gase von zentraler Bedeutung. Neue Kalibrationsmethoden und Reinheitsexpertise aus der Ultrahochvakuumtechnologie stammen aus der KATRIN-Technologie. Ein Gründungsmitglied des XENON-Projekts bringt langjährige Erfahrung in der Entwicklung, Betrieb und Analyse von Flüssig-Xenon-Detektoren ein.

Darüber hinaus gibt es in Deutschland zahlreiche Gruppen die an relevanten theoretischen Fragestellungen arbeiten, so z.B. in der Theorie der WIMP-Kern-Wechselwirkung, an der gegenseitigen Bedeutung von direkte Suchen und Messungen am LHC und an möglichen anderen Kandidaten als WIMPs für die dunkle Materie. Ein mögliche andere Erklärung für die dunkle Materie sind Axionen, die aus Gründen der Theorie der starken Wechselwirkung erwartet werden. Zur Suche von Axionen als dunkle Materie gibt es Laborexperimente, die sich je nach den weiteren Ergebnissen zu größeren internationalen Projekten entwickeln könnten.

Infrastruktur: Die beiden realistischen europäischen Kandidaten für einen Tonnen-Detektor sind das Gran Sasso Laboratorium LNGS, wo XENON1T aufgebaut wird und das Frejus-Laboratorium LSM. Das LSM ist das tiefste europäische Laboratorium und hat damit den niedrigsten Untergrund. Für LSM ist der Bau einer neuen Halle („DOMUS“, 50m x 18m)

beschlossen, der im Zusammenhang mit dem Bau eines Sicherheitstunnels für den gegenwärtigen Autotunnel möglich wird. Mit dem Bau von DOMUS könnte Ende 2015 begonnen werden, die Experimente könnten 2017 aufgebaut werden.

Empfehlung:

Wir empfehlen die Förderung beider Technologie-Linien, XENON und EURECA, und daher für die anstehende Förderperiode:

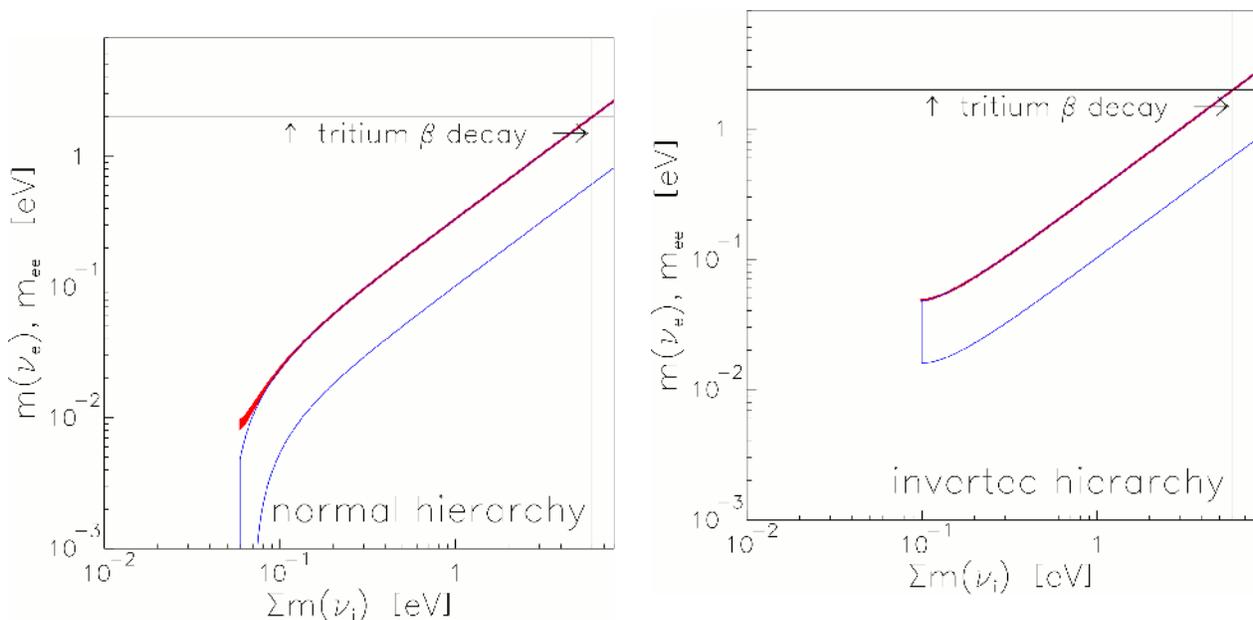
XENON bei der Fertigstellung von XENON1T und den folgenden Messungen zu unterstützen

EURECA bei den vorbereitenden Arbeiten und dem Bau erster Komponenten zu fördern. Wir unterstützen die sich anbahnende Zusammenarbeit zwischen EURECA und dem amerikanischen Projekt Super CDMS

Die Grenzen der Technologien scheinen noch nicht erreicht zu sein, weshalb wir in moderatem Umfang R&D Aktivitäten empfehlen.

2. Neutrinomasse

Mit solaren, atmosphärischen, Reaktor- und Beschleunigerneutrinos wurde klar die Existenz von Neutrinooszillationen bewiesen und damit, dass Neutrinos eine Masse besitzen. Mit diesen Experimenten konnten auch die Massenquadrats-*Differenzen* zwischen jeweils zweien der drei Neutrinozustände, nicht aber die Massenwerte selbst, bestimmt werden. Damit gilt die Bestimmung der *absoluten* Neutrinomasse(n) als eine der wichtigsten Fragestellungen sowohl der Astrophysik und Kosmologie (Evolution des Universums und Strukturbildung) als auch der Kern- und Teilchenphysik (Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik). Neben der – nicht völlig modellunabhängigen – Bestimmung von Obergrenzen für die Summe aller drei Neutrinos, welche sich aus der Kosmologie ergeben, wird mit ähnlicher Sensitivität mit Laborexperimenten über zwei unterschiedliche Methoden nach der Neutrinomasse gesucht: Erstens „direkt“, d.h. über die Vermessung von Betazerfällen im kinematischen Endpunktsbereich, und zweitens über die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall. Letzterer Prozess erfordert, dass das Neutrino sein eigenes Antiteilchen („Majorana-Neutrino“) ist. Sein Auftreten kann auch eine andere Ursache als Neutrinomassen (z.B. Supersymmetrie) haben. Die Beobachtung des neutrinolosen doppelten Betazerfalls würde auch die Entdeckung der Leptonenzahlverletzung bedeuten, die in Modellen jenseits des Standardmodells erwartet wird und grundlegende Konsequenzen für die Physik des frühen Universums hat. Alle drei Verfahren (kosmologische Bestimmung, direkte Messung und neutrinoloser doppelter Betazerfall) sind auf unterschiedliche Kombinationen der drei Neutrinomassen und der Neutrinomischungswinkel (inkl. der Majorana-Phasen) empfindlich und somit komplementär (s. Abbildung auf der nächsten Seite).



Komplementarität der Neutrinomassenbestimmungen mit direkter Massenbestimmung $m(\nu_e)$ (rot) und aus dem neutrinolosen doppelten Betazerfall $m_{\beta\beta}$ (blaues Band) als Funktion der kosmologisch relevanten Neutrinomasse $\Sigma m(\nu_i)$ für normale (links) und invertierte (rechts) Neutrinomassenhierarchie.

Bei den Experimenten zur Neutrinomasse nimmt Deutschland weltweit die führende Rolle ein. Das gilt sowohl für die direkte Massenbestimmung durch das frühere Experiment in Mainz (Obergrenze auf die Neutrinomasse 2,3 eV) und das im Bau befindliche KATRIN-Experiment (angestrebte Sensitivität 200 meV), als auch für die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall durch das frühere Heidelberg-Moskau-Experiment (beste Obergrenze, und ein umstrittener Hinweis auf die Entdeckung der Neutrinomasse bei etwa 300 meV) und das GERDA Experiment, dass seit 2011 Daten nimmt.

Das KATRIN-Experiment will die Neutrinomasse aus dem Endpunktbereich des Tritium-Betaspektrums direkt bestimmen, dabei eine zehnmal bessere Sensitivität als bisherige direkte Neutrinomassenexperimente erreichen und den gesamten kosmologisch relevanten Neutrinomassenbereich abdecken. KATRIN wird am Karlsruhe Institut für Technologie, KIT, von einer internationalen Kollaboration (Deutschland, Großbritannien, Russland, Tschechien, USA) aufgebaut. Aufgrund verschiedener technischer Schwierigkeiten, insbesondere auch bei Firmen, die große Komponenten für KATRIN bauen, hat sich der Starttermin für die Datennahme auf 2015 verschoben. Im Juni 2013 beginnt die Inbetriebnahme des KATRIN-Hauptspektrometers und Detektors mit dedizierten Messungen.

GERDA ist eine Weiterentwicklung des früheren Heidelberg-Moskau-Experiments mit Germanium-Detektoren, jedoch mit weit größerer Masse und unter Anwendung neuartiger Methoden zur Untergrundreduktion. GERDA Phase I (15 kg des im Isotop ^{76}Ge angereicherten Germaniums) hat 2011 mit der Datennahme begonnen und erreichte im Frühjahr 2013 die Zielsetzungen der ersten Phase. Der Umbau zur Phase II (ca. 35 kg angereichertes Germanium) startet im Sommer 2013 und Beginn der Datennahme ist für das Ende des Jahres vorgesehen. Phase II wird nach einer Exposition von 100 kg Jahren eine Empfindlichkeit von etwa 100 meV erreichen und den Bereich von quasi-degenerierten Neutrino-Massenszenarien testen. Die Federführung bei GERDA liegt bei den Max-Planck-Instituten für Kernphysik (Heidelberg) und für Physik (München) gemeinsam mit den Universitätsgruppen aus Dresden, München und Tübingen. Neben deutschen Gruppen tragen Partner aus Belgien, Italien, Polen, Russland und der Schweiz bei.

Bei den Experimenten zur Neutrinomasse nimmt Deutschland weltweit die führende Rolle ein. Das gilt sowohl für die direkte Massenbestimmung durch das frühere Experiment in Mainz (Obergrenze auf die Neutrinomasse 2.3 eV) und das im Bau befindliche KATRIN-Experiment (angestrebte Sensitivität 0.2 eV), als auch für die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall durch das frühere Heidelberg-Moskau-Experiment (beste Obergrenze, und ein umstrittener Hinweis auf die Entdeckung der Neutrinomasse bei etwa 0.3 eV) und das GERDA Experiment, dass seit 2011 Daten nimmt.

Situation weltweit:

Das KATRIN-Experiment vereinigt die weltweite Expertise auf dem Gebiet der direkten Massenbestimmung mittels Tritium-Betazerfall. Eine alternative Technologie (MARE: kalorimetrische Messung von Rhenium-Betazerfällen sowie MARE und ECHO: Elektroneinfangreaktionen an ^{163}Ho) befindet sich momentan im F&E-Stadium. In Amerika gibt es ein F&E-Projekt (Project 8), bei dem untersucht wird, ob man entgegen bisherigen Einschätzungen auch mit einer spektrometrischen Technologie (also ähnlich wie KATRIN) in fernerer Zukunft nochmals empfindlicher als KATRIN werden kann.

Das GERDA-Experiment gehört weltweit gemeinsam mit dem amerikanischen EXO und dem japanischen KamLAND-Zen-Experiment zur neuen Generation von Doppelbeta-Experimenten, die eine Empfindlichkeit von 100 meV oder darunter anstreben. Das CUORE-Experiment in Italien und das SNO+ Experiment in Kanada planen 2014 mit der Datennahme zu beginnen. In Europa wird des Weiteren ein Super-NEMO-Protoyp entwickelt und in den USA der Majorana-Demonstrator vorbereitet. Weitere R&D Projekte mit szintillierenden Tieftemperatur-Bolometer sind das italienische Lucifer- das französische Lumineu-Projekt sowie das koreanische AMORE-Projekt. Eine Option jenseits von GERDA-II besteht darin, zusammen mit dem amerikanischen MAJORANA-Projekt ein Experiment der nächsten Generation mit einer Targetmasse von einer Tonne angereichertem ^{76}Ge durchzuführen. Eine wichtige Voraussetzung ist hierbei, dass mit GERDA bzw. MAJORANA die angestrebten Untergrundreduktionen erreicht werden.

Situation in Deutschland:

An KATRIN sind neben KIT (Federführung des Experiments) in Deutschland noch die Universitäten Bonn, Mainz, Münster, die Hochschule Fulda sowie das Max-Planck-Institut für Kernphysik beteiligt. Neu hinzugekommen ist die Universität Wuppertal im Jahr 2012. Neben den beiden federführenden Max-Planck-Instituten sind bei GERDA aus Deutschland die Universitäten Tübingen, Dresden und München beteiligt. Weiterhin gibt es mit COBRA und ECHO zwei F&E Projekte unter deutscher Federführung. An COBRA sind die deutschen Universitäten Dresden, Dortmund, Erlangen und Hamburg als Partner beteiligt, an ECHO die Universitäten Heidelberg, Mainz und Tübingen, sowie das Max-Planck-Institut für Kernphysik. Des Weiteren gibt es kleinere Beteiligungen einer Gruppe aus München am EXO Experiment in den USA und einer Heidelberger Gruppe am Doppelbetaexperiment AMORE in Korea. Deutsche Theoriegruppen spielen weltweit, u.a. mit neuen Entwicklungen basierend auf moderner Kernstrukturphysik und effektiver Feldtheorie, eine wichtige Rolle in der Berechnung von Kernmatrixelementen. Auch bei unterstützenden Messungen für die Bestimmung von Kernmatrixelementen sind deutsche Experimentalgruppen in führender Rolle.

Empfehlung:

Wir empfehlen die weitere Förderung von GERDA und KATRIN über die Verbundforschung. Das KATRIN-Experiment zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse soll zur Fertigstellung des Experiments und zum maximalen Ausschöpfen seines Empfindlichkeitspotenzials unterstützt werden. Die angestrebte Untergrundreduktion und Sensitivität von GERDA Phase I ist erreicht worden und Phase II ist in Vorbereitung. Wenn die für Phase II vorgesehene weitere Untergrundreduktion erfolgreich ist, sollte der mögliche Ausbau auf eine Tonne Targetmaterial im Rahmen eines weltweiten Germanium-Experiments unterstützt werden.

Die Unterstützung von F&E-Projekten (z.B. auch durch die DFG) wird als wichtige Investition in die Zukunft angesehen.

3. Proton-Zerfall und Neutrino-Astrophysik bei niedrigen Energien

Die nächste Generation großvolumiger Niederenergie-Neutrinoexperimente soll die bisherige Erfolgsgeschichte dieses Gebietes, die u.a mit einem Nobelpreis im Jahre 2002 gewürdigt wurde, fortschreiben. Weltweit werden ein bis drei Detektoren einer Größe von 0.1 bis 1.0 Mega-Tonnen diskutiert („Detector on the Megaton scale“). Im Falle von Wasser-Cherenkovdetektoren bedeutet das einen Größenzuwachs um einen Faktor 10 bis 20. Interessante Alternativen bilden die konkurrierenden Technologien, die auf Flüssigszintillator bzw. flüssigem Argon basieren. Aufgrund geringerer Energieschwellen und einer überlegenen Untergrundseparation sind für einen Großteil der Aufgaben Szintillators- und Argon-Detektoren von 50-100 Kilotonnen ähnlich sensitiv wie ein 1000 Kilotonnen-Wasserdetektor.

Ein Detektor der nächsten Generation wird dank der größeren Empfindlichkeit für den Protonzerfall weitere Klassen von Theorien jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik testen können. Im Falle einer Supernova in unserer Galaxis werden einige zehntausend bis hunderttausend Neutrinoereignisse erwartet. Dies erlaubt ein detailliertes Studium des Gravitationskollapses und möglicherweise auch Zugang zu bisher unbestimmten Neutrino Parametern. Szintillationsdetektoren werden - wahrscheinlich als einzige - den über Milliarden Jahre akkumulierten kosmischen Hintergrund von Supernovaneutrinos nachweisen können. Ferner wird die mit hoher Statistik gemessene solare Neutrinorate die Untersuchung möglicher zeitlicher Variationen des Neutrino flusses auf Prozentniveau erlauben. Szintillationsdetektoren sind außerdem die einzige Option zum Nachweis von Geoneutrinos aus Erdkruste, Erdmantel und Erdkern. Wasser- und Argondetektoren sind als Optionen für Long-Baseline-Experimente im Zusammenspiel mit Neutrinostrahlen von Beschleunigern etabliert, während das Potential eines Szintillationsdetektors auf diesem Gebiet gegenwärtig untersucht wird.

Situation weltweit

Wasserdetektoren auf der Megatonnen-Skala werden in Japan (Hyper-Kamiokande) und in Europa im Rahmen der LAGUNA-LBNO Design Study (s.u.) diskutiert. Die Flüssig-Argon-Technologie wird in Amerika (LBNE) sowie in Europa ebenfalls in der LAGUNA-LBNO-Studie (GLACIER) verfolgt. Hier liegt der Schwerpunkt weniger in der Astroteilchenphysik sondern eher in Longbaseline Neutrinooszillationsexperimenten der Teilchenphysik. Die Szintillator-Variante, ebenfalls Bestandteil der LAGUNA-LBNO-Studie (LENA) stützt sich auf die Erfahrung, die in Japan mit dem KAMLAND-Detektor und in Europa mit BOREXINO gesammelt wurden. BOREXINO misst seit 2007 im LNGS mit hervorragender Qualität solare und Geoneutrinos. Die BOREXINO-Kollaboration umfasst Institute aus Italien, Deutschland, den USA, Frankreich, Russland und Polen. In Deutschland nehmen die TU München, das MPI-K Heidelberg und die Universität Hamburg teil. Basierend auf BOREXINO haben Gruppen dieser Institutionen auf dem Gebiet der Szintillatorreinigung eine große Expertise entwickelt. Diese Erfahrung fand auch Eingang in das Double Chooz-Experiment. In Deutschland gibt es an LENA interessierte Gruppen an den Universitäten Aachen, Erlangen, Hamburg, Tübingen und München.

Situation in Deutschland

Trotz der weltweit anerkannten hochstehenden wissenschaftlichen Ziele ist es zur Zeit absehbar, dass ein Beginn des Aufbaus von LENA in Europa in den nächsten drei Jahren aus finanziellen Gründen unwahrscheinlich ist. Allerdings existiert in China mit Daya-Bay-2, dem Nachfolgeexperiment des erfolgreichen Reaktorneutrinoexperiments Daya-Bay, seit einem Jahr ein Projekt, das in seiner Technologie und seinen wissenschaftlichen Zielen dem LENA Projekt sehr nahe kommt. Es handelt sich hierbei um einen 25kt großen Flüssigszintillator-Detektor. Daya-Bay-2 steht in der Hierarchie aller zukünftigen wissenschaftlichen Grossprojekte auf Platz zwei des zuständigen chinesischen Ministeriums, so dass eine Verwirklichung dieses Experiments als sehr wahrscheinlich erscheint. Die verantwortlichen chinesischen Kollegen zeigen ein sehr großes Interesse an einer deutschen Mitarbeit an Daya-Bay-2, da das in Deutschland vorhandene Fachwissen für dieses Projekt von großer Bedeutung sein könnte. Besonderes Interesse besteht an Technologien zur Erreichung extrem eines niedrigen Niveaus an Radioaktivität in Detektormaterialien, wie sie von deutscher Seite in den Experimenten BOREXINO und DOUBLE-CHOOZ erzielt worden ist. Erste Treffen zwischen chinesischen und deutschen Physikern fanden bereits im Winter und im Frühjahr 2013 in Peking und München statt, in denen von beiden Seiten der Wunsch für eine Kooperation geäußert wurde. Ein weiteres Treffen ist für Mitte Juli in China geplant.

Empfehlung:

Daya-Bay-2 stellt aller Wahrscheinlichkeit nach eine großartige Chance dar, viele der wissenschaftlichen Ziele von LENA zeitnah und relativ kostengünstig zu erreichen. Das KAT empfiehlt daher die Förderung von Studien deutscher Gruppen zum wissenschaftlichen Potenzial von Daya-Bay-2 in der Astroteilchenphysik und die Förderung der Weiterentwicklung der Technologien auf dem Gebiet der Niederenergie-Neutrinoophysik.

4. Bodengebundene Gamma-Astrophysik

Die erdgebundene Gamma-Astronomie ist mit der Entdeckung von inzwischen mehr als einhundert Quellen und aufgrund der hervorragenden Datenqualität ein etablierter Teil der Astronomie geworden. Damit erschließt die Gamma-Astronomie Energiebereiche weit jenseits jener der satellitengebundenen Projekte, die Astrophysik bei hohen/relativistischen Energien etabliert hatten (SAS-2 Mission 1972-73, COS-B 1975-81; derzeitige Missionen INTEGRAL, Fermi). Den größten Anteil an dieser Entwicklung hatten und haben die Gamma-Teleskope H.E.S.S. und MAGIC, unter Leitung des MPI-K Heidelberg (H.E.S.S.) und des MPI für Physik in München (MAGIC) und mit maßgeblicher Beteiligung der Universitäten Bochum, Hamburg, HU Berlin, Heidelberg, Erlangen, Tübingen (H.E.S.S.) und Dortmund, Würzburg (MAGIC) sowie DESY/Zeuthen (MAGIC, H.E.S.S.).

Sowohl das H.E.S.S. als auch das MAGIC-Experiment sind erfolgreich ausgebaut worden: Das MAGIC-System wurde in den letzten Jahren um ein weiteres Teleskop erweitert und erreicht jetzt im stereoskopischen Betrieb mit zwei Teleskopen besonders im Energiebereich unterhalb von 100 GeV eine deutlich verbesserte Sensitivität. In unmittelbarer Nachbarschaft der MAGIC-Teleskope kommt an dem deutlich kleineren FACT-Teleskop (Deutschland/Schweiz) erstmals eine Cherenkov-Kamera mit Silikon-PMTs zum Einsatz. Die beteiligten Institute (Dortmund und Würzburg) bereiten den robotischen Betrieb vor. Das H.E.S.S.-System ist um ein großes Einzelteleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 28m erweitert worden, das erfolgreich seinen Betrieb aufgenommen hat. Der erstmalige Betrieb eines hybriden Systems mit Teleskopen unterschiedlicher Größe verbessert die Sensitivität des Gesamtsystems im Bereich oberhalb von 100 GeV und erschließt den Energiebereich bis hinab zu 20-30 GeV für das Einzelteleskop. Beide Ausbauten lassen für die Zukunft weitere bahnbrechende Erkenntnisse erwarten und sind darüber hinaus wesentliche Schritte für die Entwicklung und den Bau eines Observatoriums der nächsten Generation. Mit den Ausbauten werden H.E.S.S. und MAGIC auch in den nächsten Jahren die sensitivsten Instrumente in ihren jeweiligen Energiebereichen sein.

Die Breite der bereits erzielten astrophysikalischen Resultate ist beeindruckend und bietet die Garantie dafür, dass das Observatorium der nächsten Generation, das Cherenkov Telescope Array CTA, eine Fülle neuer Erkenntnisse liefern wird. CTA erweitert den instrumentell zugänglichen Energiebereich zu hohen wie zu niedrigen Energien, um bei niedrigen Energien die Lücke zum Satelliten-Experiment Fermi zu schließen und bei hohen Energien den Abbruch der Energiespektren vor allem der galaktischen Gammastrahlungsquellen genau zu vermessen. CTA wird die Sensitivität im gegenwärtig zugänglichen Energiebereich um eine Größenordnung steigern und es so erlauben, tief in unser Universum bei TeV-Energien zu blicken und beispielsweise alle Supernova-Überreste in unserer Milchstraße im Licht der Gammastrahlung zu entdecken. Das große Gesichtsfeld der CTA-Teleskope wird Durchmusterungen erleichtern und die gute Winkelauflösung wird eine klare Quellzuordnung ermöglichen. CTA verbindet ein großes Physik-Potenzial im Bereich der Quellen und Ausbreitung hochenergetischer Teilchen mit einem großen Entdeckungspotenzial, das von der Entdeckung der Gammastrahlung aus der Vernichtung dunkler Materie bis hin zur Entdeckung von Effekten der Quantengravitation reicht, und wird klärende Beiträge zu unserem Verständnis des Universums bei hohen Energien liefern.

Gegenwärtig befindet sich das Projekt im Design- und Prototyp-Stadium. Das Design des Systems wird bis Anfang 2014 festgeschrieben, so dass der eigentliche Aufbau anschließend beginnen und sich bis 2018 erstrecken wird. Der Betrieb wird sich bis weit nach 2025

ausdehnen. Gegenwärtig noch offene Fragen betreffen u. a. die Standorte (Namibia, Argentinien oder Chile für das Süd-Array, kanarische Inseln, Nordamerika oder Mexiko für das Nord-Array) sowie die konkrete Konfiguration und die zeitliche Staffelung Norden bzw. Süden.

Situation weltweit:

Die Experimente H.E.S.S. und MAGIC sind zusammen mit dem amerikanischen System VERITAS weltweit führend im Feld der bodengebundenen Gamma-Astronomie. Mit den Ausbauten der H.E.S.S. und MAGIC-Systeme ist diese Position auch in Zukunft sichergestellt.

Die CTA-Kollaboration besteht vorwiegend aus europäischen Instituten, mit starken Beiträgen aus den USA, Japan sowie weiteren Gruppen aus Indien, Südafrika und Südamerika. In 2012 haben 13 Länder (einschließlich Deutschland) eine *Declaration of Interest* gezeichnet. CTA steht auf der ESFRI-Liste (European Strategy Forum on Research Infrastructure) und wird von europäischen Astrophysikern in der ASTRONET-Roadmap empfohlen. Es gibt weltweit kein vergleichbares konkurrierendes Projekt. Kleinere Mehrspiegelteleskope sind in Indien und China geplant. Ein auf eine höhere Energie optimierter Ansatz wird mit nicht-abbildenden Detektoren wie z.B. dem HAWC (USA/Mexiko), LHAASO (China) und dem HiSCORE (Deutschland/Russland) Experimenten verfolgt. Mit den jeweils weiteren Gesichtfeldern und höheren Energiebereichen sind diese Ansätze komplementär zu CTA.

Situation in Deutschland:

Deutschland hat mit der maßgeblichen Beteiligung bei H.E.S.S. und MAGIC eine klare Führungsrolle. Die laufenden und geplanten technischen Weiterentwicklungen und Verbesserungen sowohl von H.E.S.S. als auch von MAGIC stellen sicher, dass die Experimente weiterhin erfolgreich ihre Spitzenposition halten können. Die am DESY durchgeführte und größtenteils finanzierte Erneuerung der H.E.S.S.-Kameraelektronik ist hierbei sicherlich die umfangreichste Maßnahme für die kommende Förderperiode. CTA ist eine Initiative der H.E.S.S.- und MAGIC-Kollaborationen. Deutschland ist in CTA vertreten mit dem MPI für Kernphysik Heidelberg, MPI für Physik München, DESY (Standort Zeuthen) und den Universitäten Berlin, Bochum, Dortmund, Erlangen, Hamburg, Potsdam, Tübingen, Würzburg sowie der Landessternwarte Heidelberg. Die Vorbereitung von CTA wird aus Mitteln der MPG, DESY und aus Mitteln des ASPERA Common Call finanziert. Zusätzliche Mittel aus dem FP7 Preparatory Phase call stehen bis Anfang 2014 zur Verfügung. In der laufenden BMBF-Förderperiode wird die CTA-Entwicklung an den Universitäten aus Mitteln der Großgeräteforschung finanziert. CTA gehört zu den drei priorisierten Forschungsinfrastrukturen, die vom BMBF und vom Wissenschaftsrat nach einer Bewertungsphase aus insgesamt neun Infrastrukturen ausgewählt wurden. Die Auswahl orientierte sich an dem wissenschaftlichen Potenzial, der Bedeutung für den Wissenschaftsstandort Deutschland, Umsetzbarkeit, wissenschaftliche Nutzungsmöglichkeit, finanzielle Machbarkeit und gesellschaftliche Bedeutung der Infrastrukturen.

Empfehlung:

Die laufenden Experimente H.E.S.S. und MAGIC sind für die nächsten Jahre die sensitivsten Instrumente ihrer Art. H.E.S.S. Phase II erschließt durch den neuen Hybrid-Betrieb unterschiedlicher Teleskopgrößen eine für CTA wegweisende Technologie. Die Optimierung dieser Technologie bei den laufenden Instrumenten soll unterstützt werden. CTA ist ein internationales Projekt mit einer klaren deutschen Führungsposition und Kernbestandteil einer Multi-Messenger-Initiative. Entsprechend der vom KAT begrüßten Priorisierung der wissenschaftlichen Infrastrukturen soll CTA in der nächsten Runde der Verbundforschung gefördert werden.

5. Geladene kosmische Strahlung bei höchsten Energien

Die Beantwortung der Fragen nach der Art und dem Ursprung der kosmischen Strahlung bei höchsten Energien ist ein zentrales Thema der Astroteilchenphysik. Das Pierre Auger-Observatorium in Argentinien nimmt zu diesem Zweck seit Januar 2004 kontinuierlich Daten und wurde in seiner Basisversion 2008 fertig gestellt. Die verwendete Kombination eines 3.000 km² großen Detektorfeldes und optischer Fluoreszenzteleskope stellt einen entscheidenden technologischen Durchbruch hinsichtlich der Energieeichung, Identifizierung der Primärteilchen und der Luftschauerphysik dar, so dass Daten von bisher unerreichter Qualität erzielt werden. Die gewonnenen Resultate beinhalten wichtige Aussagen zu den Schlüsselthemen des Forschungsgebietes. Auger wird von mehr als 500 Kollaborationspartnern aus 19 Ländern mit starker europäischer und insbesondere deutscher Beteiligung (ca. 20% der Kollaboration) betrieben.

Die scharfe Änderung des spektralen Index bei 3 EeV („Knöchel“, 1 EeV = 10¹⁸ eV) wird allgemein als Übergang von der galaktischen zur extragalaktischen kosmischen Strahlung interpretiert. Die erstmals zweifelsfreie Beobachtung der Flussunterdrückung bei Energien oberhalb 50 EeV kann einerseits durch die 1964 vorhergesagte Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit dem Mikrowellen-Hintergrundstrahlungsfeld verursacht sein (GZK-Effekt), oder aber die Maximalenergie der extragalaktischen Beschleuniger darstellen. Bei der Überschreitung dieser Schwellenenergie gibt es erstmals Hinweise auf einen Übergang von einer isotropen zu einer anisotropen Richtungsverteilung der kosmischen Strahlung. Die Richtungsverteilung der höchstenergetischen Teilchen folgt hierbei der Materieverteilung unserer unmittelbaren extragalaktischen Nachbarschaft, mit Hinweisen auf einen Teilchenüberschuss aus Richtung der nahen Radiogalaxie Centaurus-A. Die Massenverteilung scheint sich überraschender Weise zwischen 3 und 40 EeV zu schwereren Primärteilchen zu verschieben. Die gegenwärtige Statistik erlaubt leider noch keine Ausdehnung der Primärmassebestimmung in den GZK-Bereich. Sollte sich die Dominanz schwerer Primärteilchen bis in die GZK-Region ausdehnen, wäre die Flussunterdrückung bei höchsten Energien nur schwer mit der konventionellen Vorstellung des GZK-Effektes in Einklang zu bringen und würde vielmehr die Beobachtung der Maximalenergien extragalaktischer Quellen – möglicherweise innerhalb des GZK-Horizontes – nahelegen.

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit teilchenphysikalischen Erklärungsversuchen der höchstenergetischen Strahlung, etwa dem Zerfall topologischer Defekte als Reliktteilchen aus der inflationären Phase des Urknalls. Anhand der von Auger gewonnen Obergrenzen der EeV Neutrino- und Photonenflüsse konnten schon nahezu alle teilchenphysikalischen Modelle ausgeschlossen werden. Weiterhin konnten Eigenschaften der Wechselwirkung, wie der Proton-Proton Wirkungsquerschnitt, bei Schwerpunktenenergien bis zu einem Faktor 10 über der Energie des LHC bestimmt werden, wie auch stringente Tests fundamentaler Physik, etwa der Lorentz-Invarianz und Quantengravitation durchgeführt werden. Gerade im Bereich der teilchenphysikalischen Fragestellungen wurden in den letzten drei Jahren erhebliche Synergien zur Physik am LHC entwickelt.

Um die Frage nach dem Ursprung der Flussunterdrückung bei höchsten Energien zu beantworten, sind Messungen der Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung bis in den GZK-Bereich erforderlich. Kurzfristig lässt sich dies nur durch eine Verbesserung des

Myonen-Nachweises im Pierre Auger-Oberflächendetektor erreichen, da dieser anders als die Fluoreszenzdetektoren kontinuierlich Daten aufzeichnet. Ein entsprechendes Proposal wird derzeit ausgearbeitet und im Herbst 2013 einem internationalen Gutachterkommittee vorgelegt.

Langfristig sind Daten mit weit höherer Statistik durch ein substantiell größeres Detektorfeld erforderlich. Hierzu werden insbesondere von deutscher Seite neue Nachweistechnologien von Luftschauern entwickelt und am Auger-Observatorium erprobt. Auf weltweiter Skala wird an der Ausarbeitung eines Konzeptes für ein "Next Generation Ground-based Cosmic Ray Observatory" gearbeitet. Auf europäischer Seite geschieht dies u.a. im Rahmen des Aspera-II calls und auf deutscher Seite auch mit Mitteln der Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik HAP. Eine Messfläche von mindestens 20.000 km² ist erforderlich, um die Spektren einzelner Massengruppen und einzelner Quellen messen zu können und damit den Schritt zu einer wirklichen Astronomie kosmischer Strahlen zu vollziehen. Damit ließen sich auch teilchenphysikalische Prozesse bei 100-facher LHC Schwerpunktenergie untersuchen.

Ein alternativer Versuch, hohe Nachweisraten zu erreichen, ist die Fluoreszenzmessung aus dem Weltall (JEM-EUSO). Hier gibt es erhöhte Aktivitäten und bereits erste Prototypkameras, die am Erdboden getestet werden (am Telescope Array und Pläne, diese auch innerhalb des Pierre-Auger-Observatoriums koinzident einzusetzen).

Situation weltweit:

Kein anderes Projekt als Auger wird auf absehbare Zeit in der Lage sein, die genannten Ziele mit etablierten Methoden zu erreichen. Satellitenbasierte Missionen könnten bodengebundene Detektoren in Bezug auf die Messfläche übertreffen. Die für die ISS vorgesehene Mission JEM-EUSO (Start geplant in 2017) ist der Versuch, die höchstenergetische kosmische Strahlung mittels Fluoreszenzdetektion vom Weltall aus zu beobachten. Weltweit hat sich mittlerweile eine Kollaboration von 280 Wissenschaftlern aus 13 Nationen gefunden, die die Machbarkeit mit Prototypdetektoren auf dem Erdboden demonstrieren. Für die ferne Zukunft sind auch freifliegende Satelliten vorgesehen (SUPER-EUSO), wobei die Zeitskala für SUPER-EUSO deutlich jenseits von 2020 liegt.

Das Auger-Observatorium nimmt weiterhin Daten hervorragender Qualität und soll nach erfolgreicher Begutachtung in den kommenden Jahren einen Upgrade zur Ermöglichung der Massenbestimmung auf Einzelereignisbasis bis in den GZK-Bereich erfahren und damit bis ca. 2023 betrieben werden. Das US-Japanische Telescope Array Projekt in Utah strebt auf gleicher Zeitskala eine Vergrößerung des Bodenarrays von 850 km² auf ca. 2.800 km² an, so dass eine weitgehend symmetrische Himmelsabdeckung erreicht wird. Beide Kollaborationen haben mit der Entwicklung eines Konzeptes für ein mindestens 20.000 km² großes erdgebundenes Observatorium begonnen. Die zur Beantwortung des Ursprungs der höchstenergetischen kosmischen Strahlung erforderliche Präzision der Primärmassebestimmung bzw. die zur Untersuchung teilchenphysikalischer Fragestellungen bei $E_{C.M.S.} \sim 100 \times E_{LHC}$ erforderliche Präzision lässt sich nur durch bodengebundene Messungen erreichen. Drastische Vereinfachungen und Einsparungen – etwa durch Anwendung neuer und/oder wesentlich verbesserter existierender Technologien – sind hierbei aus Kostengründen unabdingbar.

Situation in Deutschland:

Die deutschen Auger-Gruppen (KIT, Aachen, Bonn (MPI), Hamburg, Siegen und Wuppertal) haben sich insbesondere mit dem know-how für die Fluoreszenzteleskope und der Entwicklung neuer Nachweistechnologien Alleinstellungsmerkmale erarbeitet und sind neben hochrangigen Managementpositionen in der Kollaboration federführend an Planungen des Auger-Upgrades als auch an der wissenschaftlichen Ernte von Auger beteiligt. Die Geamtinvestitionen des Upgrades werden zu ca. 10 M€ abgeschätzt.

Die deutschen JEM-EUSO-Gruppen (Universitäten Tübingen, Erlangen, Würzburg, LMU München und das KIT) sind maßgeblich am Design und Simulationsstudien von JEM-EUSO und dem Bau und Betrieb der Prototypexperimente, insbesondere bezüglich Entwicklungen der Ausleseelektronik und des atmosphärischen Monitoring beteiligt.

Empfehlung:

Das Pierre Auger-Observatorium wird auch für die nächsten Jahre das weltweit führende Experiment des Feldes sein und sollte weiterhin durch die Verbundforschung gefördert werden, um das wissenschaftliche Potential voll auszuschöpfen. Insbesondere sollten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für neue Techniken und zukünftige Experimente unterstützt werden. Im Falle einer erfolgreichen internationalen Begutachtung sollten den deutschen Gruppen Verbundforschungsmittel in angemessener Höhe zur Beteiligung am Upgrade des Auger-Observatoriums zur Verfügung gestellt werden.

6. Neutrino-Astronomie bei hohen Energien

Hochenergetische Neutrinos können uns aus Regionen und über Distanzen erreichen, die für alle anderen Arten von Strahlung (außer Gravitationswellen) undurchsichtig bzw. unüberwindbar sind. Ihre Messung kann daher einzigartige Informationen über astrophysikalische Prozesse liefern, insbesondere auch darüber, ob in bestimmten kosmischen Objekten Protonen bzw. schwerere Kerne beschleunigt werden.

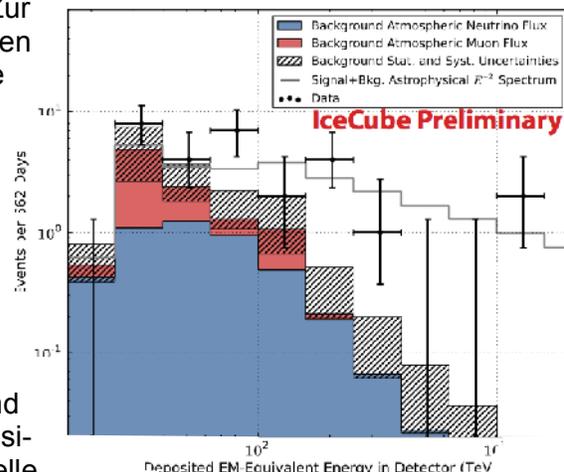
In den letzten Jahren wurde immer deutlicher, dass Neutrinoobservatorien außer zur Suche nach astrophysikalischen Neutrinos auch Zugang zu einer Vielzahl teilchenphysikalischer Fragen ermöglichen. Dazu gehören die Oszillationen atmosphärischer Neutrinos, die Suche nach sterilen Neutrinos und die indirekte Suche nach dunkler Materie. Diese Untersuchungen erfordern niedrigere Energieschwellen und daher dichter instrumentierte Targetvolumina.

Situation weltweit:

Das mit einem instrumentierten Volumen von einer Gigatonne größte und damit sensitivste Neutrinoobservatorium ist gegenwärtig das IceCube-Neutrino-Observatorium am Südpol, das im Dezember 2010 vollständig in Betrieb gegangen ist. Am IceCube-Projekt sind 41 Institutionen aus 10 Ländern beteiligt. Federführend ist die University of Wisconsin in Madison/USA. Aus Europa nehmen außer Deutschland als zweitstärkster Partnernation auch Belgien, Schweden, Großbritannien und die Schweiz teil. Deutsche Partner stellen ungefähr 1/3 der Autoren. Zur derzeitigen IceCube-Konfiguration mit 86 Trossen gehört insbesondere der dicht bestückte Innenbereich, genannt DeepCore, der mit deutschen, schwedischen und belgischen Mitteln gebaut wurde. Der Oberflächendetektor IceTop dient der Vermessung von Luftschauern und bildet zusammen mit IceCube ein leistungsfähiges Instrument zur Untersuchung des Spektrums, der Zusammensetzung und der Anisotropie der kosmischen Strahlung.

IceCube nimmt Daten mit beispielloser Qualität und hat in den vergangenen Jahren einen Sensitivitätsbereich erschlossen, der theoretische Modelle der Neutrinoproduktion in astrophysikalischen Quellen signifikant einschränkt. Die aktuellen Ergebnisse von IceCube deuten nunmehr zum ersten Mal in der Geschichte der Neutrinoastronomie auf ein hochenergetisches kosmisches Neutrinosignal hin (Signifikanz mehr als 4σ , Veröffentlichung in Vorbereitung, siehe Abbildung rechts).

Auch die ersten Ergebnisse von DeepCore liegen vor und zeigen, dass das Konzept eines dicht instrumentierten Teilvolumens tatsächlich zu niedrigeren Energieschwellen und vorher nicht erreichbaren Physikergebnissen führt. Insbesondere konnten Oszillationen atmosphärischer Neutrinos mit einer Genauigkeit vermessen werden, die zukünftig eine Präzision erwarten lassen, die mit dedizierten Oszillationsexperimenten konkurrenzfähig ist.



Vorläufiges Ergebnis von IceCube (IPA 2013)

ANTARES – ein Neutrinooteleskop mit einem instrumentierten Volumen von ca. 0.01 Gigatonnen – wurde 2008 im Mittelmeer vor Toulon fertig gestellt. Die Datennahme ist bis 2016 vorgesehen, anschließend erfolgt der Abbau. ANTARES hat die Machbarkeit eines Neutrinooteleskops in der Tiefsee demonstriert und ist aufgrund seines Sichtfeldes das derzeit weltweit empfindlichste Instrument für die vorhergesagten Neutrinoflüsse der meisten galaktischen Quellkandidaten. Deutscher Teilnehmer ist die Universität Erlangen. Deutschland stellt etwa 1/6 der Autoren in der ANTARES-Kollaboration. ANTARES nimmt kontinuierlich Daten, hat aber bisher keine Anzeichen extraterrestrischer Neutrinos beobachtet. Auch ANTARES hat kürzlich eine Messung der Oszillation atmosphärischer Neutrinos vorgestellt und damit Sensitivität bei vergleichsweise kleinen Neutrinoenergien demonstriert.

Als drittes laufendes Projekt ist das Baikal-Experiment im gleichnamigen See in Sibirien zu nennen. An Baikal sind nach dem Ausscheiden von DESY derzeit keine deutschen Gruppen mehr beteiligt.

IceCube, ANTARES und KM3NeT arbeiten bereits auf einigen Gebieten zusammen. Seit 2009 findet jährlich ein gemeinsames Kollaborationstreffen statt, bei dem es zu einem Austausch über wissenschaftliche Fragen und experimentelle Methoden kommt. ANTARES und KM3NeT nutzen Teile der IceCube-Software und entwickeln diese zusammen mit IceCube weiter. Derzeit ist ein Memorandum of Understanding für ein Konsortium der Kollaborationen IceCube, ANTARES, KM3NeT und Baikal in Vorbereitung (Global Neutrino Observatory, GNO), das eine Plattform für Kooperation und strategische Abstimmung bieten wird und zukünftig zu einem Netzwerk oder sogar zu einem globalen Observatorium mit einem südlichen (IceCube) und einem nördlichen (KM3NeT) Standort ausgebaut werden könnte.

Zukunftsoptionen:

Um eine vollständige Himmelsabdeckung mit einer substantiell besseren Sensitivität als die des IceCube-Detektors zu erreichen, wird gegenwärtig das KM3NeT-Projekt mit insgesamt 4-5 Gigatonnen instrumentiertem Volumen an 3 Standorten im Mittelmeer vorbereitet. KM3NeT ist Teil der ESFRI-, ASPERA- und ASTRONET-Roadmaps und wurde in der Vergangenheit über EU-Projekte gefördert (Designstudie 2006-09, Preparatory Phase 2008-12). Teilnehmer-Länder sind die Standortländer Frankreich, Griechenland und Italien, außerdem Deutschland, Irland, die Niederlande, Rumänien, Spanien und Zypern. Der Finanzbedarf für die Konstruktion beträgt insgesamt ca. 220 M€, davon sind ca. 40M€ verfügbar (Italien, Frankreich, Niederlande, teilweise aus ERDF). Die erste Konstruktionsphase (KM3NeT Phase-1)¹ läuft 2013-2015. Eine Entscheidung über die Fortführung in Phase-2 und deren Finanzierung wird bis 2016/17 erwartet.

PINGU ist ein geplanter, stark verdichteter Teildetektor in IceCube/DeepCore. Hauptziel ist die Messung der Neutrino-Massenhierarchie mit Hilfe atmosphärischer Neutrinos, die – aufbauend auf den Erfahrungen mit DeepCore – möglich erscheint. Derzeit sind intensive Studien dazu im Gang, an der alle deutschen Gruppen beteiligt sind und die auch im Rahmen des 3. ASPERA-Calls unterstützt werden. PINGU könnte unter optimistischen Annahmen in einem Zeitraum von etwa 5 Jahren aufgebaut werden. Der Finanzbedarf wird auf 30-50 M€ geschätzt; Vorgespräche mit der NSF finden demnächst statt.

Eine weitere Option ist die Erweiterung von IceCube auf mehrere Gigatonnen mit großen Sensorabständen, d.h. mit Empfindlichkeit auf Ereignisse bei sehr hohen Energien. Ein solcher IceCube-Ausbau wird derzeit intern diskutiert. Bei weiterer Verfestigung der oben erwähnten

¹ KM3NeT Phase-1 beinhaltet unter dem Namen ORCA auch eine Machbarkeitsstudie zur Anwendung der KM3NeT-Technologie für eine verdichtete Detektorkonfiguration mit ähnlichen Physikzielen wie PINGU.

Anzeichen astrophysikalischer Neutrinos könnte sich der Stellenwert dieser Erweiterung von IceCube in den nächsten 1-2 Jahren erheblich erhöhen.

Situation in Deutschland:

Deutschland hat seit Beginn des Baus von Neutrinoobservatorien Beiträge geleistet, die insgesamt sowohl von der finanziellen Beteiligung wie auch vom wissenschaftlichen Beitrag her substanziellen bis führenden Charakter haben.

Eine besonders starke Rolle hat Deutschland im IceCube-Projekt. Diese wird getragen von DESY- Zeuthen und den Universitäten in Aachen, Berlin (Humboldt), Bochum, Bonn, Dortmund, Mainz, München (TU) und Wuppertal. IceCube wird in Deutschland im Wesentlichen durch DESY und über die Verbundforschung gefördert und in geringerem Umfang auch durch die Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik (HAP), die DFG und die EU. Deutsche Gruppen sind federführend in zahlreichen Analysen und übernehmen eine Vielzahl von Koordinationsaufgaben. Unter den wissenschaftlichen Schwerpunkten spielen die Suche nach hochenergetischen Neutrinos, die Suche nach galaktischen Supernovae sowie die Physik des zentralen DeepCore-Detektors und dessen zukünftige Erweiterung PINGU eine besondere Rolle.

Bisher einziger deutscher Teilnehmer in ANTARES ist das Erlangen Center of Astroparticle Physics (ECAP) der Universität Erlangen. Der Einstieg in ANTARES erfolgte im Jahr 2002 mit einem durch die Verbundforschung erbrachten Investitionsbeitrag von 2.4 M€. Deutsche Wissenschaftler übernehmen eine Vielzahl von Koordinationsaufgaben und sind federführend bei Installation, Betrieb und Datenauswertung von akustischen Sensoren für eine Machbarkeitsstudie zu akustischer Neutrinoerkennung.

An KM3NeT sind das ECAP und in geringem Umfang auch die Universitäten Tübingen und Würzburg beteiligt. ECAP koordinierte die FP6 Designstudie für KM3NeT. Derzeit stellen deutsche Wissenschaftler 8% der KM3NeT-Autoren und sind hochrangig in Management und Steering Committee vertreten.

Es ist offensichtlich, dass die Entscheidungen über die Zukunftsprojekte der Neutrinoastronomie in den kommenden Jahren auf einer globalen Skala gefällt werden und dass in allen Fällen substantielle Unterstützung durch die Standortländer (d.h. die USA für die Südpol-Experimente) unabdingbar sein wird.

Die deutsche Community ist sich bewusst, dass sie sich für ein, angesichts der Erweiterung der Physikziele zu teilchenphysikalischen Fragen bei niedrigeren Energien ggf. auch für zwei Projekte, entscheiden muss. Gegenwärtig liegen die Kriterien für eine Priorisierung der Zukunftsoptionen allerdings weder inhaltlich noch politisch vor. Die deutschen Gruppen sind kollaborationsübergreifend in ständigem Dialog und arbeiten im Rahmen von PINGU eng zusammen. Sie streben eine gemeinsame Zukunft im Feld der Neutrinoastronomie an, die aufgrund politischer und/oder wissenschaftlicher Randbedingungen „im Eis“ oder „im Wasser“ liegen kann. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es wichtig, beide Zukunftsoptionen offen zu halten.

Empfehlung:

Wir empfehlen die weitere Förderung der Neutrinoastronomie und die Unterstützung der auf Messungen bei niedrigeren Energien gerichteten Aktivitäten. Dies beinhaltet:

Die Beteiligung der deutschen Universitätsgruppen an IceCube und ANTARES sollte weiter gefördert werden, auch um mit der Entwicklung neuer Methoden das Potential der Experimente voll auszuschöpfen.

PINGU ist eine sehr interessante Option, die Empfindlichkeiten bis herunter zu GeV-Neutrinos sowohl für astrophysikalische als auch für teilchenphysikalische Fragestellungen eröffnet. Vorbereitende Arbeiten hierzu sollten unterstützt werden.

Da die notwendige Fokussierung der deutschen Aktivitäten in der Hochenergie-Neutrinoastronomie derzeit noch nicht entscheidungsreif ist, sollte aus strategischen Gründen im Rahmen der ANTARES-Förderung eine Fortführung der deutschen Aktivitäten in KM3NeT Phase-1 ermöglicht werden.

7. Gravitationswellen

Gravitationswellen werden im Universum überall dort emittiert, wo sich große Massen schnell beschleunigt und asymmetrisch bewegen. Wegen ihrer geringen Wechselwirkung mit dem Rest der Welt breiten sich Gravitationswellen praktisch ungeschwächt und ungestört aus. Das Universum ist seit dem Urknall transparent für Gravitationswellen gewesen. Ihre Beobachtung ermöglicht uns Einblicke, die wir auf keinem anderen Wege erlangen können. Für Schwarze Löcher sind Gravitationswellen sogar die einzige Art von Strahlung, die von diesen selbst emittiert werden und nicht aus der Umgebung.

Situation weltweit:

Im letzten Jahrzehnt existierten auf der Welt große laser-interferometrische Gravitationswellendetektoren an fünf Standorten: In Ruthe bei Hannover (GEO600, 600m Armlänge), in Hanford/Washington und Livingston/Louisiana (LIGO, 4 km Armlänge), in Cascina bei Pisa (Virgo, 3 km Armlänge) und in Tokio (TAMA, 300 m Armlänge). Alle Projekte arbeiten eng zusammen und die Daten werden gemeinsam ausgewertet. Die weltweite Gravitationswellen-Community hat sich im Gravitational Wave International Committee (GWIC) ein Forum zur internationalen Koordination geschaffen und sich auf eine Roadmap für die die Entwicklung der Gravitationswellen-Astronomie im Zeitraum 2010 – 2040 geeinigt.

Während der Jahre 2006 und 2007 fand die letzte große Datenaufnahmekampagne, genannt S5, mit der ersten Interferometer-Generation von LIGO, GEO600 und Virgo statt. Danach gingen LIGO und Virgo für erste Upgrades vom Netz und GEO600 setzte die Beobachtung fort. Von Juli 2009 bis Oktober 2010 lief eine weitere Datenkampagne, genannt S6/VSR2, mit der ersten Ausbaustufe der LIGO und Virgo Detektoren, „enhanced LIGO“ und „Virgo+“. GEO600 wurde während dieses Datenlaufes und in der darauffolgenden Zeit schrittweise zu höherer Empfindlichkeit umgebaut. Zu 80% der Zeit jedoch nimmt GEO 600 Messdaten im sogenannten Astrowatch Programm auf, um den Zeitraum zwischen S6/VSR2 und 2015 abzudecken, in dem enhanced LIGO und Virgo+ zu Advanced LIGO bzw. Advanced Virgo umgebaut werden. Diese beiden Projekte werden dann als Observatorien der zweiten Generation mit zehnfacher Amplitudenempfindlichkeit Daten nehmen. In Japan befindet sich derzeit ein weiterer Detektor im Bau (KAGRA), der mit fortschrittlichen Technologien eine ähnliche Empfindlichkeit anstrebt wie die anderen Detektoren der zweiten Generation.

Mit der ersten Generation von Gravitationswellendetektoren wurden bisher keine Signale detektiert. Wenngleich die vollständige Analyse der bisher aufgezeichneten Daten noch nicht abgeschlossen ist, so ist bei der erwarteten Signalstärke hinreichend häufiger Signale ein Nachweis in diesen Daten auch nicht zu erwarten. Für die zweite Generation dagegen liegt die erwartete Ereignisrate bei einigen Dutzend pro Jahr, kann jedoch wegen der ungenauen Kenntnis der Ereignisraten von einem Ereignis alle paar Jahre bis hin zu täglichen Ereignissen reichen. Eine Präzisions-Gravitationswellenastronomie mit Reichweiten bis zu Rotverschiebungen von $z > 10$ wird danach mit der dritten Generation von Detektoren möglich werden. Die gesamte europäische Gravitationswellen-Community beteiligt sich an der Planung des Einstein Gravitational Wave Telescope (E.T.). Im 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union wurde dazu von 2008 bis 2011 eine Design Study gefördert. ET könnte in der nächsten Dekade als europäisches Gemeinschaftsprojekt gebaut werden und für mehrere

Jahrzehnte das zentrale europäische Observatorium darstellen.

Die bodengebundene Gravitationswellenastronomie soll in Zukunft durch das satellitengestützte Interferometer LISA zu wesentlich niedrigeren Frequenzen hin erweitert werden. Dabei rücken supermassive schwarze Löcher und kosmologische Fragen in das Blickfeld.

Situation in Deutschland:

Deutsche Wissenschaftler gehörten zu den Mitbegründern des Feldes und haben von Anfang an eine entscheidende Rolle in der Gravitationswellenforschung in der Welt gespielt. Die meisten der fortgeschrittenen Interferometer-Konzepte gehen auf deutsche Entwicklungen zurück. Das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) beteiligt sich mit instrumentellen Beiträgen an Advanced LIGO und erhält dafür volle Management-Rechte. Durch die Mitgliedschaft in der LIGO Science Collaboration (LSC) sind die Daten aller GW-Observatorien in der Welt zur Analyse zugänglich. Ein wesentlicher Teil der Datenanalyse der LSC wird auf dem Rechencluster des Albert Einstein Instituts durchgeführt. Die deutsche GW Community engagiert sich im jetzt auslaufenden Sonderforschungsbereich SFB TR7 Gravitational Wave Astronomy. Beteiligt sind die Universitäten und MPis in Jena, Tübingen, Garching und Hannover. Die Vorarbeiten zu weltraumgestützten GW Observatorien, insbesondere LISA werden als LISA Germany vom DLR unterstützt. Beteiligt sind die Universitäten Jena, Tübingen, Heidelberg, Bremen, Hannover, Berlin.

Deutschland ist auf diesem Gebiet hervorragend positioniert. Deutsche Wissenschaftler üben Leitungsfunktionen aus bei GEO600, der LIGO Datenanalyse für kontinuierliche Signale, der LIGO Laser-Arbeitsgruppe, der ET Design Study, bei der LISA Formulation Study der ESA und bei der Technologie-Vorläufermission LISA Pathfinder. In Zukunft, und insbesondere nach dem ersten Nachweis von Gravitationswellen, dürften sich noch viele andere Universitäten in diesem Gebiet engagieren. In der Vergangenheit war die Abstimmung der Förderungsmöglichkeiten durch die verschiedenen Förderorganisationen DFG, BMBF, DLR, MPG, VW-Stiftung schwierig (wer bezahlt wofür, und wofür nicht und warum?). Hier besteht Abstimmungsbedarf für die Zukunft.

Empfehlung:

Deutschland sollte sich an der GWIC Roadmap orientieren und eine Führungsrolle überall übernehmen, wo es möglich ist.

Das KAT schlägt zeitnah ein gesondertes Treffen von Vertretern der Gravitationswellen-Gemeinschaft und des BMBF sowie anderer Förderorganisationen vor. Auf diesem Treffen sollte eine Abstimmung diskutiert und ein Fördermodell gefunden werden, das der Bedeutung des Gebietes und der gewachsenen Anzahl von interessierten (aber wegen der unklaren Fördersituation noch nicht aktiven) Universitätsgruppen gerecht wird.

8. Nukleare Astrophysik

Die Nukleare Astrophysik befasst sich mit der Thematik kernphysikalischer Vorgänge in kosmischen Objekten. Dazu zählt die Entstehung der leichtesten Atomkerne in den ersten drei Minuten nach dem Urknall, ein präzises Verständnis des Wasserstoffbrennens in der Sonne (siehe Niederenergie-Neutrinos Kap. V.3), und Kernreaktionen zur Synthese schwererer Elemente in Sternen, Novae, und Supernova-Explosionen. Ebenso gehören dazu die Beschreibung der Zustandsgleichung von neutronenreicher Kernmaterie im Gravitationskollaps massereicher Sterne und den dabei entstehenden Neutronensternen, sowie die Kernreaktionen in Sternen und ihren Explosionen, bei denen die Vielfalt chemischer Elemente erzeugt wird. Schließlich werden mit satellitengestützten Teleskopen kosmische Kernprozesse über Gammastrahlung im MeV-Bereich studiert, die anders nicht zugänglich sind.

Nukleare Astrophysik berührt weite Bereiche astrophysikalischer Forschung, durch zentrale Beiträge ebenso wie durch Beiträge, welche die Randbedingungen des Feldes markieren. Im Gegensatz zu astronomischen Disziplinen, die von der Physik thermischer Quellen und Vorgängen in der Elektronenhülle von Atomen und Molekülen geprägt sind, ist Nukleare Astrophysik gekennzeichnet durch die Physik der Atomkerne. Sie ist interdisziplinär mit den Bereichen der Kernphysik, der Astrophysik, und der Technologie erdnahe Satellitenmissionen verknüpft und steht dabei zwischen klassischer und Teilchen-Astrophysik. Kernphysikalische Experimente und zugehörige Theorien zielen auf die Kenntnis der in kosmischen Objekten maßgeblichen Kernreaktionsraten. Die theoretische Kernphysik liefert u.a. die Matrixelemente zum Doppel-Beta-Zerfall, für die Strukturfaktoren der WIMP-Kern-Streuung, und für die Zustandsgleichung von Kernmaterie zur Vorhersage von Gravitationswellen, wendet ihre Methoden aber auch zur Extrapolation und Vorhersage der Reaktionseigenschaften nicht messbarer Nuklide an. Die Umsetzung dieser kernphysikalischen Kenntnisse aus Theorie und astrophysikalisch ausgerichteten Laborexperimenten auf Reaktionsraten unter kosmischen Bedingungen werden durch Kern- und Astro-Theorien bewirkt, in astronomischen Beobachtungen sowie Labormessungen an Sternenstaub wird schließlich die resultierende Nukleosynthese-Ausbeute kosmischer Objekte auf ihre Gültigkeit überprüft.

In astrophysikalischen Plasmen laufen Kernreaktionen bei extrem niedrigen Energien sowie oft zwischen instabilen Nukliden ab. Extrem niedrige Reaktions-Wirkungsquerschnitte (oft unterhalb der picobarn-Skala) erfordern aufwendige Koinzidenzapparaturen in Untergrund-Laboratorien oder den Aufbau radioaktiver Teilchenstrahlen. Kernresonanzen werden auch heute noch experimentell genauer bestimmt als durch Theorie und numerische Verfahren, wegen der unvollkommen verstandenen Kernstrukturen. Die präzise Bestimmung von Kerneigenschaften wie Masse, Zerfallszeit, Spaltprodukte und -wahrscheinlichkeiten liefert wichtige Vorgaben für die Theorie, denn viele kosmische Reaktionen laufen zwischen oft experimentell unzugänglichen instabilen Atomkernen ab. Enge Verzahnung von Theorie mit den spezifischen Experimenten zur nuklearen Astrophysik bei FAIR/GSI, ISOLDE/CERN, RIKEN/Japan, NSCL/USA, GANIL/Frankreich, S-DALINAC der TU Darmstadt, FRANZ der Uni Frankfurt, oder LUNA im Gran Sasso-Untergrundlaboratorium LNGS und dem Dresdner Felsenkeller-Labor. Die Aktivitäten am CERN und der GSI werden vom BMBF auch im Rahmen der Verbundforschung Hadronen- und Kernphysik gefördert (z.B. NUSTAR). Kleinere Einrichtungen mit astrophysikalischer Spezialisierung haben eine wichtige komplementäre Funktion. Sie werden derzeit auf sehr unterschiedliche Weisen gefördert. Im europäischen Maßstab gibt die NuPECC

Roadmap der Kernphysik 2010 eine spezifische Empfehlung zum Auf- und Ausbau von Untergrund-Laboratorien. Untersuchungen an kosmischem Sternen-Staub sind präziseste Informationsquellen kosmischer Nukleosynthese, derzeit oft nur indirekt gefördert in Projekten der Festkörperforschung oder Erdsystemforschung. Direkte Messungen kosmischer Kern-Strahlung sind mit satellitengetragenen Gammastrahlen-Teleskopen im MeV-Bereich möglich (z.B. derzeit INTEGRAL/ESA). Diese werden in Deutschland vom DLR koordiniert (siehe auch ERA-NET Roadmap von ASTRONET (Astronomie) Kapitel 3/Panel A). Forschungsprojekte zur Erschliessung der Technologie einer nächsten Teleskop-Generation müssen angesichts der bei DLR und Forschungsorganisationen laufenden Gross-Projekte im Verbund hinreichend unterstützt werden.

Empfehlung:

Nukleare Astrophysik beinhaltet die Aspekte von kernphysikalischer Materiebeschreibung, Messmethoden kosmischer Nuklide, und Experimente zu Kernreaktionen in nachempfundenen kosmischen Bedingungen. Im Themenbereich Nukleare Astrophysik laufen die im europäischen Maßstab erarbeiteten Direktiven überlappender Forschungsrichtungen (NuPECC, ASPERA, ASTRONET) und europaweite Netzwerke (z.B. EuroCores-Programm EuroGenesis der früheren ESF) Gefahr, als vergleichsweise kleinere Programme ohne ausreichende Verzahnung mit nationalen Projekten Effektivitätseinbußen zu erleiden. Zur Klärung optimaler Projektstrategien in der nuklearen Astrophysik und ihrer Verzahnung und Förderwege empfiehlt das KAT einen baldigen disziplinsübergreifenden Workshop unter Beteiligung der unterschiedlichen Förderorganisationen und Forschungsgruppen. Im Rahmen der Astroteilchen-Koordination wird vorwiegend der experimentelle, bodengebundene Aspekt behandelt: Detektoren und Nachweismethoden sind der Natur nach "teilchen-orientiert". Das KAT empfiehlt die Unterstützung terrestrischer Laborexperimente mit astrophysikalischer Relevanz, d.h. jenseits der rein kernphysikalischen und über die Hadronen- und Kernphysik geförderten Fragen.

9. Koordinierung von Aktivitäten in der theoretischen Astroteilchenphysik

Die theoretische Astroteilchenphysik ist einerseits Quelle neuer Konzepte und bildet häufig die Grundlage und Motivation für Experimente, liefert aber andererseits auch den notwendigen Rahmen, um experimentelle Ergebnisse korrekt interpretieren zu können. Theoretische Untersuchungen begleiten experimentelle Projekte nicht nur unterstützend, sondern haben in vielen Fällen spezifische Experimente erst angestoßen. Neben den Experimenten benötigt daher auch die theoretische Astroteilchenphysik nachhaltige Unterstützung und Koordination. Noch mehr als bei der experimentellen Astroteilchenphysik sind in der Theorie die Gebiete Teilchenphysik, Kosmologie und Astrophysik oft untrennbar miteinander verbunden. Dies zeigt sich auch daran, dass Theoretiker oft auf mehreren Teilgebieten gleichzeitig arbeiten, wie zum Beispiel der möglichen Erzeugung hochenergetischer Teilchen in der Paarvernichtung dunkler Materie und ihrer anschließenden Ausbreitung im intra- und intergalaktischen Medium. Dabei ist für die Erzeugung dieser hochenergetischen Strahlung und der Verteilung der dunklen Materie die Teilchenphysik und die Physik des frühen Universums relevant, während die Ausbreitung im wesentlichen ein Problem der Plasma-Astrophysik darstellt. Expertenwissen aus der klassischen theoretischen Astrophysik wird daher zum Beispiel bei der Interpretation von Daten zur kosmischen Strahlung immer wichtiger, während viele Theoretiker einen eher teilchenphysikalischen Hintergrund haben. Parallel zu den Plänen für die nächste Generation der Astroteilchen-Experimente in Deutschland erfordern die damit verbundenen theoretischen Tätigkeiten deshalb über projektspezifische Analyse- und Simulations-Aktivitäten hinausgehend eine starke Unterstützung und Koordination. Dazu gehört auch eine effizientere Vernetzung von traditionell eher getrennt agierenden Forschungsgemeinden, wie zum Beispiel jener der theoretischen Astrophysik und jener der theoretischen Teilchenphysik. Dies trägt auch der gewachsenen Zahl von Theorie-Professuren Rechnung, die direkt oder indirekt mit der Astroteilchenphysik zu tun haben.

Als Beispiele für die Notwendigkeit kohärenter Maßnahmen erwähnen wir die Bewertung und Verringerung der Unsicherheit der nuklearen Matrixelemente für den Doppel-Beta-Zerfall, die Entstehung, Wechselwirkung mit Materie und die Annihilation von Dunkle Materie Teilchen, die Interpretation kosmologischer und astrophysikalischer Daten und ihre Relevanz für Einschränkungen oder Signaturen für die Natur der dunklen Materie und der dunklen Energie, sowie die Modellierung von astrophysikalischen Hochenergie-Prozessen.

Empfehlung:

Das KAT empfiehlt eine moderate strategisch motivierte Unterstützung theoretischer Arbeiten, um aus den Projekten der Verbundforschung die bestmöglichen Physikergebnisse zu erzielen, und um so die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Theorie- und auch Experimentalphysik-Gruppen in diesem Bereich zu erhöhen. Dies könnte z.B. eine gezielte Zusatzförderung für Gruppen sein, die helfen diese Problematik zu lösen. Darüber hinaus sollten generell die besten und mobilsten jungen Forscher gefördert werden, die an den Schnittstellen der Astrophysik, der Teilchenphysik und der Kosmologie arbeiten.

Weiterhin regt das KAT ein Treffen an, auf dem diskutiert werden soll, ob über die Vernetzung der deutschen Astroteilchenphysiktheoretiker innerhalb der Helmholtz-Allianz HAP ein weiteres Instrument auf nationaler Ebene benötigt wird und wie sich die deutsche Community in diesem Zusammenhang gegenüber dem gegenwärtig auf europäischer Ebene diskutierten Particle Astrophysics and Cosmology Theory (PACT) Programm positionieren sollte.

Die Tabelle gibt einen Überblick über die Beteiligung deutscher Gruppen und die benötigten Ressourcen für die zentralen Astroteilchen-Projekte der nächsten Generation. Nicht erfasst sind hier in der Astroteilchenphysik arbeitenden Theoretiker (soweit sie nicht Mitglieder großer Kollaborationen sind), sowie die auf dem Gebiet der nuklearen Astrophysik tätigen Wissenschaftler.

	Teilnehmer weltweit („Köpfe“, inklusive Doktoranden)	FTE in Deutschland (seniors/ Postdocs/ Doktoranden)	Gesamt-Invest (M€)	Davon Deutschland (M€)	Leit-Institution in Deutschland	# Institute (in Deutschland)	Bauphase
XENON1t	98	18,3 (7/5,5/16)	13	5	MPG (Kernphysik)	16 (3)	2012-15
EURECA	100	28,5 (7/5,5/16)	30	10	HGF (KIT)	20 (4)	2015-19
KATRIN	110	60 (34/3/23)	60	56	HGF (KIT)	15 (7)	2005-15
GERDA	112	36 (11/9/16)	14	8	MPG (Kernphysik, Physik)	17 (5)	2005-10 (GERDA-I) 2011-15 (GERDA-II)
CTA (Personalzahlen einschliesslich HESS+MAGIC)	1140	163 (41/71/ 53)	192	51	MPG (Kernphysik), HGF (DESY-Zeuthen)	177 (12)	2014-18
Auger	513	90 (30/12/48)	100	20	HGF (KIT)	95 (8)	fertig-gestellt
JEM-EUSO	257	8 (2/2/4)			HGF (KIT)	75 (5)	2015-17
IceCube	250	88 (13/12/63)	220	20	HGF (DESY-Zeuthen)	41 (9)	fertig-gestellt
ANTARES	140	18 (1/3/14)	20	2,8	Uni Erlangen	37 (1)	fertig-gestellt
KMeNeT	210	15 (2/4/9)	220	?	?	39 (3)	2014-
PINGU	?	7 (0/0/7)	35	?	HGF (DESY-Zeuthen)	9+1	
Grav.-Wellen Personal einschl. GEO, LIGO, E.T. LISA	etwa 1000	195 (52/74/69)			MPG (Albert-Einstein-Institut)	90 (7)	
Einstein Grav. Wave Telesc.			1000	200			2017-

VI. Neue Technologien und Anwendungen

Am Beginn des Prozesses, der das Gebiet zu seinen gegenwärtigen Erfolgen bzw. zu einem immensen Zuwachs an Sensitivität und Entdeckungspotential geführt hat, standen sehr häufig neue Technologien, die sich erst über einen langen, mit Kinderkrankheiten gepflasterten Weg zu den gegenwärtigen ausgereiften Methoden und Geräten entwickelt haben. Auch heute gibt es Ansätze, die teils innerhalb existierender Projekte, teils als eigenständige Entwicklungen, Pionierarbeit leisten. Die Unterstützung solcher F&E-Arbeiten befördert durch die Erschließung neuer Energie- und Sensitivitätsbereiche die Entwicklung des Arbeitsgebiets und/oder sorgt für Kosteneinsparungen bei den Projekten. Die Techniken und Methoden finden zudem sehr oft auch Anwendungen in anderen Wissenschaftsbereichen wie der Medizin, Atmosphären- und Klimaforschung, der Kommunikation als auch in Anwendungen außerhalb der Wissenschaft. Einen umfassenden Überblick zu den Synergien insbesondere mit den Umweltwissenschaften gibt das Dokument „From the Geosphere to the Cosmos – Synergies with Astroparticle Physics“, welches im Rahmen der Aspera Initiative im Jahr 2012 erstellt wurde. Andere Beispiele sind die ASPERA-Workshops unter dem Motto „ASPERA Technologie Forum – Industry meets Academia“, die z.B. zu den Themen Photosensoren, Vakuum- und Kryotechnik in den Jahren stattfanden.

Das KAT unterstreicht die gesellschaftspolitische und auch wirtschaftliche Relevanz dieser interdisziplinären Forschung. Astroteilchenphysik in Deutschland ist neben hervorragender Grundlagenforschung, der exzellenten Ausbildung und Förderung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern auch ein wichtiger Technologietreiber, wie im Folgenden an einigen Beispielen skizziert werden soll:

Photosensoren finden ihren Einsatz in nahezu allen Experimenten und Observatorien, als auch in unzähligen Anwendungen des täglichen Lebens. Zur Vorbereitung auf CTA und Luftschauerobservatorien nach Auger wurden Kooperationen mit der Industrie begonnen, die bereits deutlich sichtbare Früchte tragen. So konnte nicht nur die Quanteneffizienz von Photomultipliern gerade in den letzten Jahren und sogar Monaten nochmals maßgeblich gesteigert werden, sondern auch andere wichtige Qualitätsparameter wie Dunkelströme reduziert und störende Nachpulse nahezu vollständig eliminiert werden. Um nicht allein von der japanischen Industrie abhängig zu sein (Hamamatsu besitzt inzwischen nahezu ein weltweites Monopol), wurde auch die Kooperation mit der europäischen Industrie verstärkt (Electron Tubes, UK). Auch im Bereich der Halbleiter-Photosensoren wurde erfolgreich Neuland betreten und bereits erste Teleskope mit Silizium Photomultiplier (SiPM) ausgerüstet. Die Anforderungen und Erfahrungen im Betrieb fließen unmittelbar zurück in die weitere Entwicklung und Produktion der Sensoren. Ebenfalls auch im Bereich Astroteilchenphysik finden Entwicklungen im Bereich bildgebender Halbleiterdetektoren (MediPix, TimePix) statt.

Der Radionachweis von Teilchenschauern in der Luft oder in Medien wie Eis hat zu einer signifikanten Weiterentwicklung der Radio- und Mikrowellen-Detektion und deren Ausleseelektronik und Analysetechniken geführt. Wie auch bei flächenausgedehnten Observatorien spielt nicht nur die Entwicklung von energieeffizienten Ausleseelektroniken eine wichtige Rolle, sondern auch die Entwicklung effizienter Online-Signalfilter- und Triggerelektroniken. Es ist leicht vorstellbar, dass sich zumindest Teile dieser Entwicklungen zukünftig z.B. in der kommerziellen Kommunikationselektronik wiederfinden werden.

Die Entwicklung des akustischen Nachweises von Neutrinos in Wasser und Eis führt ebenso zur Entwicklung effizienter Signalfilter und hat auch bereits Anwendungen gefunden. So sollen z.B. mit Hilfe von Akustiksensoren und unter Mitarbeit von Astroteilchenphysikern Kartographierungen

von Eisgletschern auf dem Saturn-Mond Enceladus durchgeführt werden und die Frage nach Leben auf Enceladus beantwortet werden.

Der Einfluss der kosmischen Strahlung auf das Klima wird seit langem diskutiert und wird u.a. unter kontrollierten Bedingungen mit dem Experiment CLOUD am CERN untersucht und direkt an Luftschauerobservatorien wie KASCADE-Grande und Auger untersucht. Auch die Entstehung von Blitzen in Gewittern ist bis heute nicht verstanden und es wird vermutet, dass Luftschauer ein Auslöser für Blitze sein können. Dies ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Schließlich sei erwähnt das atmosphärische Phänomen von Elfen durch Fluoreszenzteleskope am Auger Observatorium (als Serendipity-Beobachtung) erstmals zeitaufgelöst untersucht werden kann und das Verständnis dieses Phänomens maßgeblich verbessern, wenn nicht lösen wird.

Die Experimente zur Suche nach Dunkler Materie und nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall sowie die Niederenergieneutrindetektoren besitzen die weltweit reinsten Detektormaterialien mit dem niedrigsten radioaktiven Untergrund (Reinheiten von 10^{-18} g pro g). Dadurch werden nicht nur Suchen nach Geoneutrinos aus dem Erdinnern sondern auch neuartige Spurenanalysen möglich (Radon- und Kryptonisotope). Weiterhin bieten extrem untergrundarme Szintillationsdetektoren auch die Möglichkeit die Entnahme spaltfähigen Materials aus Kernreaktoren von außen zu kontrollieren (z.B. Nucifer-Projekt), um im Rahmen der Proliferation Staaten an der Abweichung von der friedlichen Nutzen der Kernenergie zu hindern. Neue Spur- und Ortsrekonstruktionsmethoden dieser Detektoren werden auch in die Medizintechnik übertragen. Eine Zusammenarbeit im Bereich der Reinigung kryogener Gase besteht auch zwischen einem Projekt der Fusionsforschung und der Reinigung des Xenongases für das XENON1T-Projekt, wo neuartige Diagnosemethoden entwickelt werden.

Die Entwicklung des KATRIN-Experiments erfordert die Verschiebung der Grenze des technisch Machbaren in gleich mehreren Bereichen. Dies ermöglicht naturgemäß viele Anwendungen, z.B. die Ultrahochvakuumtechnologie im 10^{-11} mbar-Bereich reicht von der Grundlagenforschung bis zu normaler technischer Anwendung in der Wirtschaft. Bei KATRIN wird die Tritium-(Fusionstechnologie) und Magnetfeldtauglichkeit von Turbomolekularpumpen (breite Anwendung) untersucht und eine neuartige Ultrahochvakuumumpenanordnung (Turbomolekularpumpen kombiniert mit vorgeschalteter Getterpumpe) entwickelt. Die beiden einzigartigen, transportablen Präzisionshochspannungsteiler mit ppm-Präzision und -Stabilität, die KATRIN zusammen mit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig entwickelt hat, wurden nicht nur zur Kalibration der ISOLDE-Analge am CERN eingesetzt sondern waren auch Vorlage für Präzisionshochspannungsteiler für die Entwicklung der elektrischen Gleichspannungsübertragung für europäischen Netzverbund. Die schnelle Online-Analyse von Tritiumverunreinigungen im sub-promille Bereich mit Laser-Raman-Spektroskopie von KATRIN ist ebenfalls für die Fusionstechnologie interessant.

Neben der Geräteentwicklung spielt auch die Softwareentwicklung eine wichtige Rolle. Das Simulationsprogramm CORSIKA ist schon seit über einem Jahrzehnt der Standard für ausgedehnte Luftschauer. Inzwischen werden die darin enthaltenen Wechselwirkungsmodelle auch zur Modellierung von LHC Detektoren eingesetzt. Zusammen mit den Simulationen ergänzt der beim Auger-Observatorium bestimmte Proton-Proton-Wirkungsquerschnitt die LHC-Daten um eine Größenordnung nach oben. Darüberhinaus wird KA für die Berechnung von Strahlenbelastungen in Flugzeugen, von Planetenatmosphären, dem Einfluss kosmischer Strahlung auf das Klima sowie von Abschirm-Effekten von Gebäuden oder Laboren gegen kosmische Strahlung eingesetzt. Weiterhin entwickelt die KATRIN-Kollaboration das elektromagnetische Feldberechnungs- und Teilchenbahnsimulationsprogramm KASSEIOPEIA, das der Community Standard werden soll. Schon jetzt wird es bei einem halben Dutzend von Experimenten der Grundlagenforschung eingesetzt.