

Astroteilchenphysik in Deutschland

Zustandsbeschreibung und Empfehlungen

Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)

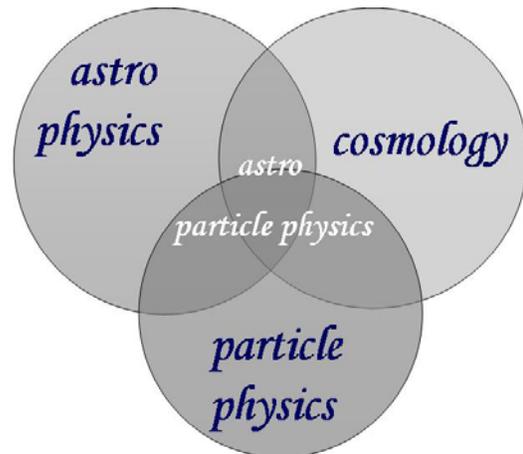
1. Juli 2010

Inhalt:

I. Einleitung	3
II. Die Astroteilchengemeinschaft in Deutschland	4
III. Der europäische Kontext: ApPEC und ASPERA	5
IV. Forschungsfelder und Empfehlungen	8
1. Direkte Suche nach dunkler Materie	9
2. Neutrinomasse	13
3. Proton-Zerfall und Neutrino-Astrophysik bei niedrigen Energien	16
4. Bodengebundene Gamma-Astrophysik	18
5. Geladene kosmische Strahlung bei höchsten Energien	20
6. Neutrino-Astronomie bei hohen Energien	23
7. Gravitationswellen	26
8. Nukleare Astrophysik	28
9. Koordinierung von Aktivitäten in der theoretischen Astroteilchenphysik	30
10. Andere Projekte und technische Entwicklungen	31
V. Zusammenfassung	33

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, die die Untersuchung dieser Fragen mit entscheidend gesteigerter Sensitivität erlauben. Der Nachweis von Neutrinos aus der Supernova 1987A setzte vor 23 Jahren 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 Hundert verbessert worden; eine weitere Größenordnung darf man für die nächsten 2 Jahre erwarten. Nochmals 2 Größenordnungen, also ein Faktor 1000 insgesamt, sind das Ziel für das nächste Jahrzehnt. 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, die 2014/15 in Betrieb gehen.

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 Bahn brechenden 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 (die zum Teil aus angrenzenden Gebieten wie der Teilchenphysik oder der Kernphysik stammen) eine entsprechende Anpassung der Fördermittel notwendig. So sind allein in den letzten drei Jahren sieben neue Professuren hinzugekommen, die ausschließlich diesem Gebiet gewidmet sind. Eine Ressourcenerhöhung würde also auch der beträchtlich gestiegenen Anzahl der beteiligten Wissenschaftler Rechnung tragen.

Das vorliegende Strategiepapier des Komitees für Astro-Teilchenphysik in Deutschland (KAT) beschreibt den Status der Teilgebiete, die Erwartungen für die nächsten Jahre und Deutschlands Rolle im internationalen Kontext. Daran schließen sich Empfehlungen zur Förderung in der nächsten Periode der Verbundforschung sowie auch für die weiter reichende Perspektive für das nächste Jahrzehnt an. Die langfristige Perspektive soll im Verlaufe des nächsten halben Jahres auch mit den Komitees für Elementarteilchenphysik (KET) und der Physik der Hadronen und Kerne (KHuK) abgestimmt werden, wobei ein wichtiger Meilenstein ein KET-Strategietreffen im Oktober 2010 ist. Wir erinnern in diesem Zusammenhang an das Treffen „Astroteilchenphysik in Deutschland“ im März 2010, auf dem sich das neugewählte KAT formierte und auf dem ebenfalls strategische Fragen erörtert wurden.

Das vorliegende Strategiepapier wurde von den gewählten Mitgliedern des KAT erarbeitet (Karsten Danzmann, Roland Diehl, Caren Hagner, Josef Jochum, Karl-Heinz Kampert, Christian Spiering, Christian Stegmann, Christian Weinheimer und Günter Sigl). Darüber hinaus wurden Vertreter größerer Institute und Experimente einbezogen.

II. 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 wurde¹. Astroteilchenphysik wird in Deutschland in fünf Bereichen betrieben bzw. gefördert:

- Die BMBF-Verbundforschung Astroteilchenphysik fördert im Zeitraum 2008-2011 26 Vorhaben, die in 7 Großprojekten an 18 Universitäten bearbeitet werden. Im Allgemeinen sind diese Großprojekte maßgeblich von der Helmholtz-Gemeinschaft oder von der Max Planck-Gesellschaft getragen.
- Die DFG fördert 5 Sonderforschungsbereiche (davon 3 SFB-Transregios) und 1 Cluster sowie 9 Graduiertenkollegs mit starkem Bezug zur Astroteilchenphysik.

¹ Korrigierter Nachdruck 2007; <http://web.mac.com/jbluemer/KAT/KAT-Material+Links.html>

- An 27 deutschen Universitäten arbeiten. etwa 90 Professoren und Professorinnen ganz oder teilweise in der Astroteilchenphysik. Allein in den letzten drei Jahren sind 11 Professuren hinzugekommen, die zu 100% der Astroteilchenphysik gewidmet sind (davon 7 durch Umwidmungen und 4 Neueinrichtungen).
- Das Helmholtz-Programm Astroteilchenphysik ist in den Helmholtz-Zentren DESY, GSI und KIT Karlsruhe angesiedelt und stellt ein langfristiges, sich dynamisch entwickelndes Programm dar. DESY ist gegenwärtig im Begriff, sein Astroteilchenprogramm erheblich zu erweitern. Die Forschungen werden in zwölf Arbeitsgruppen an vier Standorten durchgeführt. Die Helmholtz-Gemeinschaft entwickelt ihr Portfolio in einem dynamischen foresight-Prozess.
- An sechs Max Planck-Instituten werden Forschungsthemen der Astroteilchenphysik bearbeitet: im MPIK Heidelberg, MPI-P München, MPI AEI Hannover/Golm und MPE Garching, teilweise auch im MPIfR Bonn und im MPP Garching.
- 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). Die Zahl der beteiligten Institute ist in Deutschland am höchsten und belegt die breite Vernetzung gerade auch in der Hochschullandschaft.

III. 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 derzeit 22 Institutionen aus 17 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 zwei Schritten bewältigt. In der ersten Phase wurde Anfang 2007 eine Bestandsaufnahme des Forschungsfeldes vom Peer Review Committee (PRC) von ApPEC zusammengestellt, die den sogenannten ASPERA-Census umfasste. Im zweiten Schritt wurden Empfehlungen für die weitere Entwicklung des Feldes in Europa erarbeitet. Gegenwärtig wird dieser Prozess im Rahmen von ASPERA-II fortgeführt.

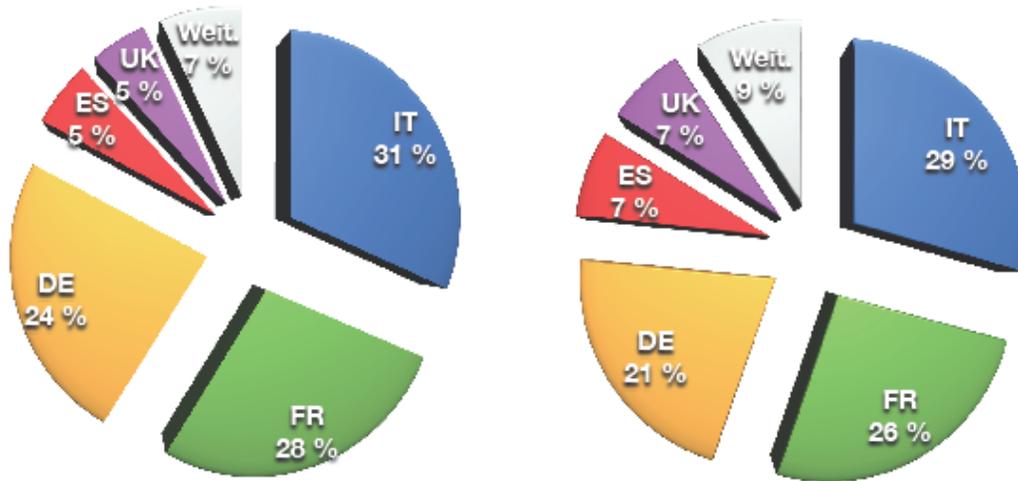
Der ASPERA-Census

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.

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

„Budgetanteil in ‰“ bedeutet den Anteil der Astroteilchenphysik an den nationalen Forschungsetats.

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 Laboratoriums. Alle drei Länder sind auf allen sieben Teilgebieten der Astroteilchenphysik engagiert, allerdings nur Frankreich auf allen sieben Gebieten wirklich stark. 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 aus keinem dieser Gebiete völlig „verabschieden“, denn alle sieben bergen ein großes Entdeckungspotential, und für alle existiert in Deutschland eine erhebliche Tradition und Expertise. Andererseits kann Deutschland vom Standpunkt der verfügbaren Ressourcen nicht auf allen Gebieten gleichzeitig eine Führungsposition anstreben.



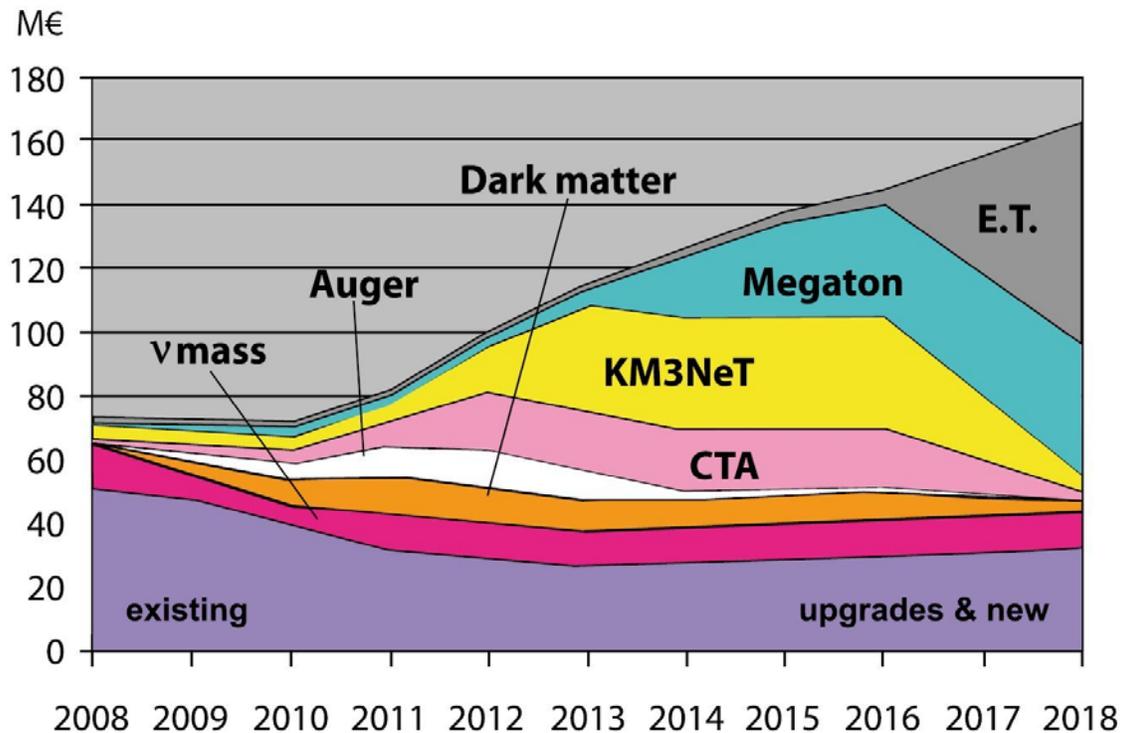
Anteilige Ausgaben (links) und Vollzeitäquivalente (rechts) der ASPERA Partner

Die ASPERA-Empfehlungen

Das Dokument „Status and Perspectives of Astroparticle Physics in Europe - Astroparticle Physics Roadmap Phase I“ wurde im Januar 2007 veröffentlicht. In der zweiten Phase wurde das PRC zu einem *Roadmap Committee* erweitert und aus der Bestandsaufnahme in einem interaktiven Prozess eine Bewertung erarbeitet. Dabei erfolgte auch eine Abstimmung mit dem ERA-NET der Astronomen (ASTRONET) und deren Strategiepapier von 2008. Das Dokument „Astroparticle Physics – the European Strategy“ wurde im September 2008 veröffentlicht und wird im Folgenden als ASPERA-Roadmap bezeichnet. Es definiert für die folgenden sieben Teilgebiete der Astroteilchenphysik Schwerpunktprojekte, die zusammen in griffiger Formulierung „Magnificent Seven“ getauft wurden:

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

Die folgende Grafik zeigt ein Szenario für Investitionsausgaben, das für die 2008er Roadmap entwickelt wurde und eine Verdoppelung der Investitionsausgaben innerhalb eines Jahrzehnts erfordert. Dabei stehen „Megaton“, Auger, CTA, KM3NeT und E.T. für die entsprechenden Großprojekte der Themen 3, 4, 5, 6 bzw. 7.



Zum Ende des laufenden Jahres soll die europäische Roadmap überarbeitet werden. Erhebungen dazu begannen im März und sollten in die Endversion der vorliegenden Überlegungen für eine deutsche Strategie mit einfließen.

Die Empfehlungen zu den oben genannten sieben Feldern werden im folgenden Kapitel wiedergegeben und aus deutscher Sicht kommentiert.

IV. Forschungsfelder und Empfehlungen

In den vorliegenden Empfehlungen, die zwischen November 2009 und Mai 2010 vom Komitee für Astroteilchenphysik erstellt wurden, knüpfen wir an die ASPERA-Empfehlungen an und bewerten sie aus deutscher Sicht.

Die nukleare Astrophysik wurde im ASPERA-Prozess ausgeklammert. Wir nehmen sie hier, entsprechend der thematischen Zusammensetzung des KAT, als achten Themenbereich mit auf. Als neuntes Thema schließen wir die theoretische Astroteilchenphysik ein. Unter Punkt 10 behandeln wir andere Projekte und technologische Entwicklungen. An den Einschluss in das vorliegende Strategiepapier sind jedoch nicht notwendig in jedem Fall Förderempfehlungen geknüpft.

Wir reproduzieren die Empfehlungen der ASPERA-Roadmap zu Beginn jedes der folgenden Abschnitte. Wir erläutern den Hintergrund und den gegenwärtigen Status, und schließen die Beschreibung der Situation in Deutschland und unsere Empfehlungen daran an.

1. Direkte Suche nach dunkler Materie

ASPERA Roadmap: *We recommend the construction and operation of one – possibly two complementary – detectors on the ton scale or beyond with low background, capable of reaching a 10^{-10} pb sensitivity, with a European lead role or shared equally with non-European partners. We recommend a stepwise approach via 100 kg detectors, as presently underway, and a prioritisation between different technologies around 2010/2011. We urge convergence of parallel worldwide efforts.*

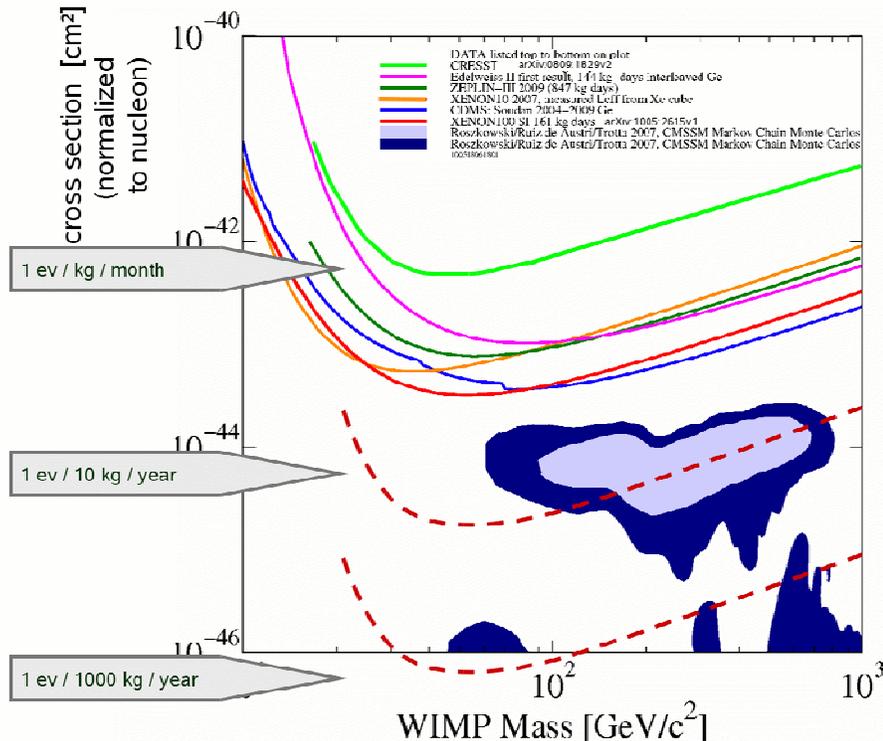
Die Frage nach der Natur der dunklen Materie und der dunklen Energie ist grundlegend für die Kosmologie und das gesamte physikalische Weltbild. Teilchenphysiker sind in beiden Gebieten stark engagiert. Die Klärung der Natur der dunklen Materie hat sich von der Astrophysik in das Gebiet von Astroteilchen- 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. Eine Klärung der Natur der dunklen Materie darf man wohl nur durch positive Befunden 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 fast drei Größenordnungen zu steigern, sodass auch Teilchen der dunklen Materie mit einem Wechselwirkungsquerschnitt von 10^{-10} pb oder darunter nachgewiesen werden können (gegenwärtig: einige 10^{-8} pb). Damit würde ein sehr großer Parameterbereich der sog. Constrained Minimal Supersymmetric Models abgedeckt. Vorausgesetzt dunkle Materie besteht aus Neutralino-WIMPs, gäbe es damit im nächsten Jahrzehnt eine sehr realistische Chance, die Teilchen der dunklen Materie nachzuweisen. 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 einen Faktor 100 verbessert. Wegen der Verfügbarkeit mehrerer Technologien mit viel versprechenden Sensitivitäten und dem Start 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 der zurzeit aktiven 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 viertel Jahr und kg. Der grau schattierte Bereich zeigt den Parameterbereich, der von supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells vorhergesagt wird. Die Experimente zur Suche nach Dunkler Materie grenzen dagegen den Wechselwirkungsquerschnitt immer weiter ein. 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, ZEPLIN) oder flüssigem Argon (WARP, LArDM) 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 Projekt, EURECA, gehen. Im Rahmen der Designstudie „DARWIN“ untersuchen ein großer Teil der europäischen, amerikanischen und chinesischen Flüssig-Xenon- und Flüssig-Argon-Gruppen gemeinsam die Technologie für ein Flüssig-Edelgas-Experiment mit mehreren Tonnen Masse. Nach den Rekordgrenzen, die kürzlich mit dem XENON100-Detektor innerhalb von nur 11 Tagen Messzeit erhalten wurden, hat die XENON-Kollaboration als nächsten Schritt ein Proposal für das 1-Tonnen-Experiment XENON1t an das Untergrundlabor LNGS eingereicht, mit dem Ziel einer 100fach höheren Empfindlichkeit als die der jetzigen Experimente.

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 (das schon Investitionen für XENON1t getätigt hat), ab Juli 2010 auch die Universität Mainz. Leitinstitution ist die Columbia University New York, weitere Teilnehmer kommen aus USA, China, Frankreich, Italien, Portugal und der Schweiz. XENON100 definiert zurzeit zusammen mit CDMSII (USA) die empfindlichsten Obergrenzen. 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.

Infrastruktur: Die beiden realistischen europäischen Kandidaten für einen Tonnen-Detektor sind das Gran Sasso Laboratorium LNGS 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 („ULYSSES“, 100m×25m) geplant, der im Zusammenhang mit dem Bau eines Sicherheitstunnels für den gegenwärtigen Autotunnel (2010/11) möglich wird. Mit dem Bau von ULYSSES könnte Ende 2011 begonnen werden, die Experimente könnten 2013 aufgebaut werden. Zu den vorgeschlagenen Experimenten gehören EURECA und XENON1t, das gleichzeitig ein Proposal für LNGS eingereicht hat. Frankreich erwägt, andere Länder an der Einrichtung des Labors zu beteiligen und dem Labor einen internationalen Charakter zu geben.

Empfehlung:

Wir empfehlen die Förderung beider Technologie-Linien, XENON1t und EURECA.

Ein direkter Nachweis der Teilchen der Dunklen Materie ist von fundamentaler Bedeutung für unser Weltbild. Er rechtfertigt die allergrößten Anstrengungen um hohe Sensitivität und um weitestgehende Reduktion von Störsignalen. Die zukünftigen Experimente, die den theoretisch erwarteten Bereich weitgehend abdecken, betreten bezüglich der Seltenheit von Ereignissen absolutes Neuland. Dabei sind nicht vorhergesehene Störsignale nie auszuschließen und systematische Unsicherheiten eventuell nur schwer zu kontrollieren. Im Falle eines positiven Nachweises kommt daher der Bestätigung der Signale durch ein unabhängiges Experiment besondere Bedeutung zu. Dies gilt auch im Falle, dass keine Signale gefunden werden. Daher wäre es verfehlt, sich in Zukunft auf nur eine Technologie zu verlassen. Unterschiedliche Targetkerne (Xenon, Argon, Germanium, Kalzium, Sauerstoff, Wolfram) liefern unterschiedliche Raten und Spektren bei Stößen indiziert von WIMPs bzw. Neutronen oder anderen Untergrundsquellen. Bei Beobachtung eines Signals, ist es a priori nie auszuschließen, dass sie durch kosmogen erzeugte Neutronen erzeugt wurden, weshalb eine Bestätigung durch unterschiedliche Targetkerne immer erforderlich sein wird. Nur durch den Vergleich der unterschiedlichen Rückstoßspektren, kann letztlich ein WIMP-Signal von Untergrundeignissen separiert werden. Ferner haben unterschiedliche Experimente spezifische Stärken bezüglich bestimmter Erklärungsmodelle für die dunkle Materie. Darum sollte man sich nicht zu sehr von bevorzugten Erwartungen leiten lassen und nur auf ein bestimmtes Modell und damit nur auf eine bestimmte

Technologie setzen. Wir weisen darauf hin, dass sich die USA aufgrund des fundamentalen Charakters der Frage auf vier Linien engagieren (Kryogenik, Flüssigargon, Flüssigxenon, Blasenkommer), Italien auf vier Linien (massiv auf der Szintillator-Technik und mit Flüssig-Argon, auf geringerem Niveau bei Flüssig-Xenon und der Bolometrie). Zweigleisig fahren auch Frankreich, Spanien, Japan und, bis 2009, auch Großbritannien

Die auf dem gesamten Gebiet engagierten deutschen Gruppen haben sich auf Initiative des KAT zu einer Strategiediskussion getroffen und in deren Ergebnis einen Arbeitskreis Dunkle Materie gegründet, Sie werden einen gemeinsamen Antrag für die nächste Förderperiode der Verbundforschung stellen. Ziel der Förderung soll sein, a) XENON beim Aufbau von XENON1t zu unterstützen, b) EURECA bei den vorbereitenden Arbeiten zu fördern. Die Förderung des eigentlichen Aufbaus von EURECA bliebe dann der nächsten Förderperiode vorbehalten.

2. Neutrinomasse

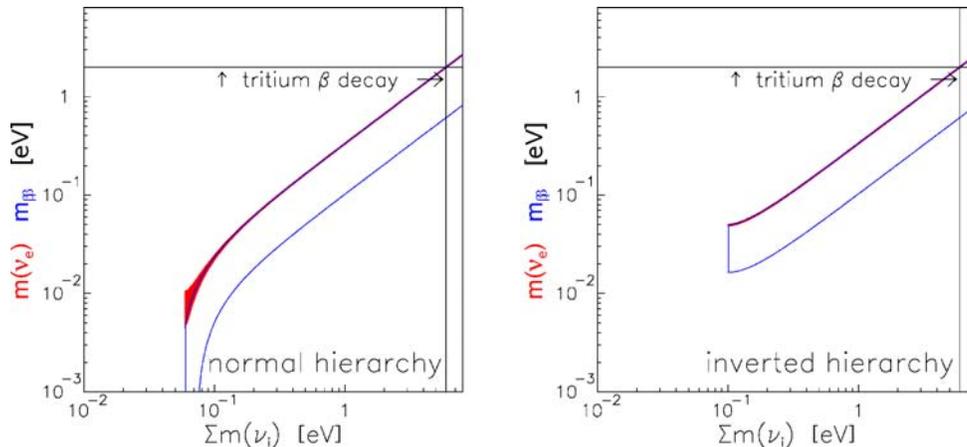
ASPERA-Roadmap: Die ASPERA-Roadmap hat ihre Empfehlungen auf ein Zukunftsprojekt zum neutrinolosen Doppelbeta-Zerfall fokussiert und berücksichtigt dabei, dass es zur Zeit als nicht aussichtsreich gilt, in der direkten Neutrinomassenbestimmung eine deutliche Verbesserung gegenüber dem 2012 anlaufenden KATRIN-Experiment zu erreichen:

Depending on the outcome of the present generation of double beta decay experiments being prepared, we recommend the eventual construction and operation of one or two double beta decay experiments on the ton-scale, capable of exploring the inverted-mass region, with a European lead role or shared equally with non-European partners. A decision on the construction could be taken around 2013.

Nachdem aus der Messung solarer und atmosphärischer Neutrinos gefolgert werden konnte, dass Neutrinos eine Masse besitzen, und nachdem so die Massen-Differenzen zwischen jeweils zweien der drei Zustände bestimmt wurden, 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 modell-unabhängigen – Bestimmung von Obergrenzen für die Summe aller drei Neutrinos, welche sich aus der Kosmologie ergeben, wird 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).

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 sich kurz vor dem Beginn der Datennahme befindliche Experiment GERDA.

Das KATRIN-Experiment will die Neutrinomasse aus dem Endpunktsbereich 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. Der Beginn der Datennahme ist für 2012 geplant.



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.

GERDA ist eine Weiterentwicklung des früheren Heidelberg-Moskau-Experiments mit Germanium-Detektoren, jedoch unter Anwendung neuartiger Methoden zu einer deutlichen Untergrundreduktion und mit weit größerer Masse. GERDA Phase I (15 kg angereichertes ^{76}Ge) wird 2010 mit der Datennahme beginnen. Die GERDA Phase II (35 kg angereichertes ^{76}Ge) ist ab 2012 geplant. Sie soll eine Empfindlichkeit von etwa 100 meV erreichen, um damit in den Bereich invertierter Neutrinomassenszenarien vorzustoßen. Die Federführung bei GERDA liegt bei den Max-Planck-Instituten für Kernphysik (Heidelberg) und für Physik (München). Neben deutschen Gruppen tragen Partner aus Belgien, Italien, Polen, Russland und der Schweiz bei.

Situation weltweit:

Das KATRIN-Experiment vereinigt die weltweite Expertise auf dem Gebiet der direkten Massenbestimmung mit dem Tritium-Betazerfall. Eine alternative Technologie (MARE: kalorimetrische Messung von Rhenium-Betazerfällen oder auch Elektroneinfangreaktionen an ^{163}Ho) mit kleiner deutscher Beteiligung 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 ist weltweit das erste der neuen Generation von Doppelbeta-Experimenten, die eine Empfindlichkeit von 100 meV oder darunter anstreben (vor CUORE und Super-NEMO in Europa, SNO+, EXO und MAJORANA in Nordamerika und XMASS in Japan). GERDA wird voraussichtlich vor den Konkurrenz-Projekten Resultate liefern können. 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 Untergrundverbesserungen erreicht werden können.

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.

Neben den beiden federführenden Max-Planck-Instituten sind bei GERDA-I und II aus Deutschland zurzeit die Universitäten Tübingen und Dresden beteiligt. Weiterhin gibt es mit

COBRA ein F&E Projekt unter deutscher Federführung, an dem die deutschen Universitäten Dresden, Dortmund, Erlangen und Hamburg Partner sind. Die Universität Dresden beteiligt sich zudem am kanadischen SNO+ Projekt.

Begleitende Untersuchungen zu Fragen im Umkreis von KATRIN und GERDA werden im Rahmen des SFB Transregio 27 durchgeführt.

Empfehlung:

Deutschland sollte seine führende Rolle bei Neutrinomassenexperimenten beibehalten und verteidigen. Das KATRIN-Experiment zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse sollte sein Empfindlichkeitspotential maximal ausschöpfen. Wenn die angestrebte Untergrundreduktion bei GERDA I und II erfolgreich ist, sollte der mögliche Ausbau auf eine Tonne Targetmaterial im Rahmen eines weltweiten Germaniumexperiments unterstützt werden. KATRIN und GERDA sollten wie bisher über die Verbundforschung gefördert werden. Die Unterstützung von F&E-Projekten (z.B. durch die DFG) wird als wichtige Investition in die Zukunft angesehen. Die Berechnung der Kernmatrixelemente zum doppelten Betazerfall – gegenwärtig hauptsächlich an der Universität Tübingen angesiedelt – ist zentral für die Interpretation der Messergebnisse und sollte unterstützt werden.

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

ASPERA-Roadmap: *We recommend supporting the work towards a large infrastructure for proton decay and low energy neutrino astrophysics, possibly also accelerator neutrinos in long baseline experiments, in a worldwide context. Results of a current FP7 design study (LAGUNA) are expected around 2010 and should be followed by work towards a technical design report. Depending on technology, site and worldwide cost sharing, construction could start between 2012 and 2015.*

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 Megatonnen 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 Neutrinoparametern. 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 Neutrinoflusses 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 und in Deutschland

Wasserdetektoren auf der Megatonnen-Skala werden in den USA (LBNE im DUSEL Laboratorium), in Japan (Hyper-Kamiokande) und in Europa im Rahmen der LAGUNA Design-Studie (s.u.) diskutiert. Die größten Chancen auf Umsetzung scheint gegenwärtig das LBNE-Projekt zu haben. In Europa wird die Wasseroption vor allem in Frankreich verfolgt. Die Szintillator-Variante 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. Auch in Frankreich wird dieser Technologievorsprung (sowie der Vorsprung der USA und Japans bei Wasserdetektoren) erkannt und mittlerweile die Szintillator-Version

energischer diskutiert. Keine deutsche Institution beteiligt sich an der Argon-Variante. Im Gegensatz zur Wasser- und Szintillator-Option ist gegenwärtig kein Argon-Experiment auf der Kilotonnen-Skala im Betrieb.

In Deutschland wird zurzeit die Szintillator-Version als F&E Projekt an der TU München unter dem Namen LENA („Low Energy Neutrino Astronomy“) im Sonderforschungsbereich SFB/TR27 gefördert. Weitere an LENA interessierte deutsche Gruppen gibt es an den Universitäten RWTH Aachen, Hamburg und Tübingen. International besteht eine enge Zusammenarbeit mit finnischen, französischen und russischen Gruppen.

LAGUNA ist eine FP7 Design-Studie, die sich mit den Infrastruktur-Aspekten eines Detektors mit 0.1-1 Megatonnen Masse beschäftigt. Die betrachteten Detektor-Optionen sind ein Wasserdetektor (MEMPHYS), ein Detektor auf der Basis von Flüssigszintillator (LENA) und ein Flüssig-Argon-Detektor (GLACIER). Die Studie untersucht die Eignung bestehender Laboratorien bzw. noch nicht für Forschungszwecke genutzter Minen für einen entsprechenden kapitalen Ausbau. Dazu zählen der Einfluss der Tiefe auf die Physik-Optionen, Konfiguration und Bau der Tanks in Abhängigkeit vom Standort, die Gesteinsfestigkeit, Transport- und Umweltfragen und der Kostenvergleich der unterschiedlichen Optionen einschließlich der Grabungsarbeiten. Der deutsche Anteil konzentriert sich auf die Koordination der Arbeitsgruppe, welche die technische Evaluierung des Projekts, die Konstruktion und die Kosten des Baus des Labors umfasst. Der endgültige LAGUNA-Report soll Ende 2010 vorliegen. Danach ist eine weiterführende europäische Studie zum Detektorentwurf geplant.

Empfehlung:

Die Physik mit einem „Megaton-scale“ Detektor stellt eine fruchtbare Mischung aus fundamentalen Fragen und Präzisionsmessungen bereits etablierter Effekte dar. Das Interesse an der Physik besteht weit über die eigentliche Astroteilchengemeinschaft hinaus. Deutschland sollte mittel- und langfristig auf diesem Gebiet präsent sein. Aus der Sicht des KAT liegt die weitere Konzentration auf die Szintillator-Option („LENA“) nahe, unter Nutzung des bestehenden Erfahrungsvorsprungs aus Borexino und Double Chooz. Eine Einbeziehung in die anstehende Runde der Verbundforschung erscheint ohne deren beträchtliche Erhöhung schwer vorstellbar. Umso mehr sollte aber dieses Feld auf dem langfristigen „Radarschirm“ auftauchen. Auch für Helmholtz-Institute stellt das Gebiet eine interessante strategische Option dar. Um in drei Jahren überhaupt eine Option für eine wichtige deutsche Rolle zu haben, ist eine Verbreiterung des F&E-Programms notwendig. Wegen der long-baseline-Option schlägt das KAT eine schnelle Einbeziehung der Teilchen-Community in die Diskussion vor.

4. Bodengebundene Gamma-Astrophysik

ASPERA-Roadmap: *The priority project for VHE gamma astrophysics is the Cherenkov Telescope Array, CTA. We recommend design and prototyping of CTA, the selection of sites, and proceeding rapidly towards start of deployment in 2012*

Die erdgebundene Gamma-Astronomie ist mit der Entdeckung von inzwischen etwa 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 sowie DESY/Zeuthen (MAGIC).

Sowohl das H.E.S.S. als auch das MAGIC-Experiment befinden sich in einer Ausbauphase. 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. Das H.E.S.S.-System wird zur Zeit um ein großes Einzelteleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 28m erweitert, mit dem Ziel einer deutlich verbesserten Sensitivität des Gesamtsystems im Bereich oberhalb von 100 GeV und einer Schwelle im Bereich von 20-30 GeV für das Einzelteleskop. Beide Ausbauten lassen für die Zukunft weitere Bahn brechende 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.

CTA ist als ein globales Observatorium mit zwei Standorten konzipiert, einem auf der Südhalbkugel und einem auf der Nordhalbkugel. Dabei wird das Südobservatorium die größere Ausdehnung haben (50-100 Teleskope über etwa 1 km²), da es auch auf die schwachen Flüsse bei hohen Energien empfindlich sein soll. Das Nordobservatorium wird vorwiegend

extragalaktische Quellen im Blickfeld haben, deren Gammastrahlen höchster Energie auf dem Weg zu uns stark gedämpft werden; es wird darum auf niedrige Energien (kleines Array mit großen Spiegelflächen) optimiert werden. Der geringe diffuse Photon-Vordergrund in nördlicher Blickrichtung führt dabei auch zu günstigen Bedingungen für die indirekte Suche nach Dunkler Materie.

Gegenwärtig befindet sich das Projekt im Design- und Prototyp-Stadium. Erste Prototypen für die Teleskope mittlerer und kleiner Größe sollen 2011/12 installiert werden, der eigentliche Bau wird voraussichtlich 2013 beginnen und sich bis 2018 erstrecken. Der Betrieb wird sich bis weit nach 2025 ausdehnen. Gegenwärtig noch offene Fragen betreffen u. a. die Standorte (Namibia vs. Argentinien oder Chile für das Süd-Array, kanarische Inseln vs. Nordamerika für das Nord-Array), die konkrete Konfiguration und die zeitliche Staffelung Norden vs. 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 Japan sowie weiteren Gruppen aus Indien, Südafrika und Südamerika. Auch die US-amerikanischen Gruppen des analogen USA-Projekts AGIS haben sich kürzlich CTA angeschlossen. 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 dem HAWC-Detektor verfolgt, den die USA und Mexiko in Mexiko errichten. Mit seinem weiten Gesichtsfeld aber geringerer Empfindlichkeit ist HAWC komplementär zu CTA.

Situation in Deutschland:

Deutschland hat mit der maßgeblichen Beteiligung bei H.E.S.S. und MAGIC eine klare Führungsrolle. CTA ist eine Initiative der H.E.S.S.- und MAGIC-Kollaborationen. Deutschland ist in CTA vertreten mit MPI-K 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 und HGF und aus Mitteln des ASPERA Common Call finanziert. Ab 2010 werden zusätzliche Mittel im Rahmen einer FP7 Preparatory Phase zur Verfügung stehen.

Empfehlung:

CTA ist ein internationales Projekt mit einer klaren deutschen Führungsposition und Kernbestandteil einer Multi-Messenger-Initiative. CTA sollte zusammen mit H.E.S.S. und MAGIC in die nächste Runde der Verbundforschung aufgenommen werden. Zur Gewährleistung der deutschen Führungsrolle sollte Deutschland insgesamt bereit sein, sich mit etwa einem Viertel der Kosten am Bau von CTA zu beteiligen. Daraus ergäbe sich eine Summe von etwa 45-50 M€ einschließlich der Beiträge der Max-Planck-Gesellschaft und des DESY. Dieser Beitrag würde Deutschlands historischer und aktuell-wissenschaftlicher Rolle in der Gamma-Astrophysik gerecht werden. Er würde die Führungsposition in einem internationalen Spitzenprojekt garantieren, das eine Fülle von astrophysikalischen Resultaten garantiert und darüber hinaus möglicherweise zur Lösung fundamentaler Fragen wie der nach der Natur der dunklen Materie beitragen kann.

5. Geladene kosmische Strahlung bei höchsten Energien

ASPERA Roadmap: *The priority project for high energy cosmic ray physics is the Pierre Auger Observatory. We encourage the agencies in different continents to work towards a common path for Auger-North. We recommend the construction of such a large array as soon as worldwide agreements allow.*

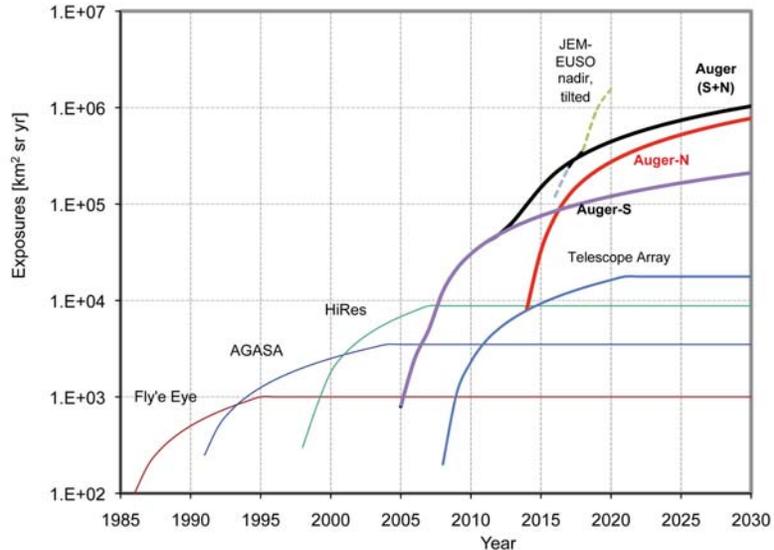
Die Beantwortung der Fragen nach der Art und dem Ursprung der kosmischen Strahlung bei höchsten Energien ist ein zentrales Thema der Astroteilchenphysik. Das Pierre Auger Süd-Observatorium in Argentinien nimmt zu diesem Zweck seit Januar 2004 kontinuierlich Daten und wurde in seiner Basisversion 2008 fertig gestellt. Die verwendete Kombination eines 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 ersten gewonnenen Resultate beinhalten bereits wichtige Aussagen zu den Schlüsselthemen des Forschungsgebietes.

Die scharfe Änderung des spektralen Index bei 3 EeV („Knöchel“) 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 beobachtet man erstmals 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 wachsenden 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 dies nur schwer mit den konventionellen Vorstellungen über die Ausbreitung der kosmischen Strahlung in Magnetfeldern in Einklang zu bringen.

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit teilchenphysikalischen Erklärungsversuchen der höchstenergetischen Strahlung, etwa dem Zerfall topologischer Defekte als Reliktteilchen aus der inflationären Phase des Urknalls, mit Eigenschaften der Wechselwirkung bei höchsten Energien wie auch mit den Tests fundamentaler Physik, etwa der Quantengravitation.

Um diese Fragen mit höherer Präzision und wesentlich größerer Statistik zu untersuchen, ist ein substantiell größeres Detektorfeld erforderlich. Hierzu werden insbesondere von deutscher Seite neue Nachweisttechnologien (Radionachweis) von Luftschauern entwickelt und am Süd-Observatorium erprobt. Das geplante Pierre Auger Nord-Observatorium (Auger-Nord), kann nach einer weltweiten Studie optimal in Südost-Colorado in den USA gebaut werden, wobei die Beobachtung der zweiten Himmelshälfte als astronomischer Bonus hinzukommt. Die Messfläche soll auf 20.000 km² ausgedehnt werden, siebenmal größer als in Argentinien (siehe Abb.). Auger-Nord erweitert dadurch die Suche nach Quellen kosmischer Strahlung, die Teilchenidentifizierung und das Studium der Wechselwirkungen bis über 10²⁰ eV. Es wird

erwartet, dass Auger-Nord die Spektren einzelner Quellen messen kann und damit den Schritt zu einer wirklichen Astronomie kosmischer Strahlen vollziehen kann.



Situation weltweit:

Kein anderes Projekt wird auf absehbare Zeit in der Lage sein, die mit wohletablierten Methoden genannten Ziele zu erreichen. Satellitenbasierte Missionen könnten bodengebundene Detektoren in Bezug auf die Messfläche übertreffen. Die für die ISS vorgesehene Mission JEM-EUSO (Start 2015) ist ein wichtiges Pilotprojekt, um die Machbarkeit eines solchen Detektors (SUPER-EUSO) zu demonstrieren. Die Zeitskala für SUPER-EUSO ist deutlich jenseits von 2017.

Die erdgebundene Beobachtung der energiereichsten kosmischen Strahlung mit einem weltweiten Auger-Observatorium ist konkurrenzlos. Drastische Einsparungen und der Verzicht auf die Messung niedriger Energien begrenzen die Kosten von Auger-Nord auf 130 M\$ nach US-Kostenrechnung (WBS). Vom Sitzland USA werden insgesamt 52 M\$ erwartet. Da der Bau von Auger-Nord von der existierenden Auger-Kollaboration aus 18 Ländern durchgeführt wird, sind keine neuen organisatorischen Strukturen erforderlich. Die PASAG-Kommission in den USA hat die Beteiligung am Bau von Auger-Nord empfohlen, falls das Wissenschaftsbudget von DOE und NSF um annähernd einen Faktor 2 innerhalb von 10 Jahren anwachsen wird – dann aber mit der vollen Summe. Parallel dazu werden neue Nachweisttechnologien zur Erweiterung des Süd-Observatoriums entwickelt und erprobt.

Situation in Deutschland:

Die deutschen Auger-Gruppen (KIT, Aachen, Siegen und Wuppertal) haben sich insbesondere mit dem know-how für die Fluoreszenzteleskope und der Entwicklung neuer Nachweisttechnologien Alleinstellungsmerkmale erarbeitet und sind federführend bei der Planung von Auger-Nord. Ein Antrag für eine Anschubfinanzierung von Auger-Nord in Höhe von 16.2 M€ wurde im Rahmen des Helmholtz-Ausbauinvestitionsprogramms gestellt. Diese Investition wurde im Rahmen der Programmevaluation von Helmholtz im Februar 2009 unterstützt und wird derzeit begutachtet. Aus technischer Sicht könnte mit dem Bau im Jahr 2012 begonnen werden. Den bisherigen deutschen EUSO-Gruppen (Universität Tübingen und

MPI München) wollen sich Gruppen aus Würzburg und Erlangen mit experimentellen Beiträgen anschließen.

Empfehlung:

Die Arbeiten am Pierre Auger-Observatorium sollten durch die BMBF-Verbundforschung gefördert werden, um den Universitäten zu erlauben, die bisherige erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem KIT und innerhalb der Kollaboration fortzusetzen. Dabei sollte Auger-Nord in die bisherige Förderung des Pierre Auger-Observatoriums eingebettet werden.

6. Neutrino-Astronomie bei hohen Energien

ASPERA Roadmap: *The priority project for high energy neutrino astrophysics is KM3NeT. Encouraged by the significant technical progress of recent years, the support for working towards KM3NeT is confirmed. Resources for a Mediterranean detector should be pooled into a single optimised design for a large research infrastructure, with installation starting in 2012. The sensitivity of KM3NeT must substantially exceed that of all existing neutrino detectors including IceCube.*

Hochenergetische Neutrinos können uns aus Regionen erreichen, die für alle anderen Arten von Strahlung (außer Gravitationswellen) undurchsichtig sind. Darüber hinaus können sie uns, im Gegensatz zu Gammastrahlen, den eindeutigen Beweis dafür liefern, dass in einem kosmischen Objekt Protonen bzw. Kerne und nicht etwa nur Elektronen beschleunigt werden. Auf der anderen Seite ist ihr Wechselwirkungsquerschnitt um viele Größenordnungen kleiner als der von geladenen kosmischen Strahlen und Gammastrahlen, was Detektoren auf der Kubikkilometer-Skala erforderlich macht. Während einerseits die Landkarte der TeV-Gammastrahlen schon hundert Objekte umfasst und andererseits für geladene kosmische Strahlen zumindest Anisotropien gemessen wurden, stellen sich die Neutrino-Himmelskarten von AMANDA, ANTARES und selbst IceCube bisher noch als isotrope Verteilungen von atmosphärischen Neutrinos dar. Außer nach den Quellen der kosmischen Strahlung suchen Neutrinoobservatorien nach dunkler Materie, nach Effekten der Quantengravitation und nach exotischen Teilchen. Sie untersuchen zudem teilchenphysikalische Aspekte von Neutrino-Wechselwirkungen bei höchsten Energien.

Situation weltweit:

Das größte und damit sensitivste Neutrinoobservatorium ist gegenwärtig das IceCube Neutrino-Observatorium am Südpol. Die Leitinstitution des IceCube-Projekts ist die University of Wisconsin in Madison/ USA. Aus Europa nehmen außer Deutschland als zweitstärkster Partnernation noch Belgien, Schweden und die Schweiz teil. Die geplante IceCube-Konfiguration mit 86 Trossen ist zu 90% installiert und wird im Januar 2011 fertig gestellt sein. Dazu gehört insbesondere der dicht bestückte Innenbereich DeepCore, der mit deutschen, schwedischen und belgischen Mitteln gebaut wurde. Eine Weiterverdichtung von DeepCore wird gegenwärtig diskutiert.

ANTARES, ein Detektor ähnlicher Größe wie das IceCube-Vorläuferprojekt AMANDA, wurde 2008 im Mittelmeer vor Toulon fertig gestellt. ANTARES ist das größte Neutrinoobservatorium auf der Nordhalbkugel, allerdings etwa 20mal weniger sensitiv als IceCube. Deutscher Teilnehmer ist die Universität Erlangen.

Um eine vollständige Himmelsabdeckung mit einer substantiell besseren Sensitivität als IceCube zu erreichen, wird gegenwärtig das KM3NeT-Projekt vorbereitet. KM3NeT wurde 2006 in die ESFRI-Liste aufgenommen. Teilnehmer-Länder sind die Mittelmeerländer Frankreich, Griechenland und Italien, außerdem Deutschland und die Niederlande. Kleinere Beiträge kommen aus Irland, Rumänien, Spanien, Großbritannien und Zypern. Eine substantielle Förderung für den Bau von KM3NeT hat es bisher in den Niederlanden gegeben, umfangreichere Förderankündigungen – teilweise unter entsprechenden Bedingungen an den Standort – gibt es aus Griechenland, Frankreich und Italien. Die Zeitplanung für KM3NeT sieht

wie folgt aus: nachdem im Herbst 2008 der Conceptual Design Report (CDR) fertig gestellt wurde, wird im Mai 2010 der Technical Design Report (TDR) vorgelegt. Beide Dokumente sind Ergebnisse der FP6-geförderten Design-Studie, die durch das Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) koordiniert wurde. Im März 2008 lief eine FP7-geförderte vierjährige Preparatory Phase an. Die Entscheidung über das endgültige Design und den Standort soll Ende 2011 getroffen werden, mit dem Bau von KM3NeT soll 2013 begonnen werden.

Das Ziel von KM3NeT ist es, IceCube in der Himmelsabdeckung zu ergänzen und eine substantiell bessere Sensitivität zu erreichen. „Substantiell besser“ bedeutet dabei den „kanonischen Faktor“ 6-10 (wie bei vielen anderen „next-generation“-Schritten, z.B. Auger-Nord/Auger-Süd, LBNE/Superkamiokande, sLHC/LHC). KM3NeT soll für 220 M€ (Investitionen und Installation) etwa die sechsfache Sensitivität von IceCube erreichen. Für den Fall, dass IceCube nur schwache Quellsignale (z.B. im Bereich von weniger als 4 Standardabweichungen) sieht, ist ein Schritt in dieser Größe in der Tat notwendig, um eine genügend große Aussicht auf Quellidentifikationen zu haben.

IceCube und KM3NeT arbeiten gegenwärtig schon auf einigen Gebieten zusammen. Entsprechend einem 2008 unterzeichneten Memorandum of Understanding nutzt z.B. KM3NeT schon jetzt IceCube-Software, die gemeinsam weiter entwickelt wird. Auch kombinierte Analysen in Himmelsregionen, die im Blickfeld beider Detektoren liegen, werden vorbereitet. Die Mittelmeer- und IceCube-Communities haben 2009 begonnen, einmal jährlich ein gemeinsames Arbeitstreffen abzuhalten. Diese Kontakte könnten zu einem Netzwerk oder sogar zu einem globalen Observatorium mit einem südlichen (IceCube) und einem nördlichen (KM3NeT) Standort ausgebaut werden.

Situation in Deutschland:

Eine besonders starke Rolle hat Deutschland im IceCube-Projekt. Das zentrale deutsche Institut ist DESY (Standort Zeuthen). Weitere deutsche Teilnehmer sind die Universitäten in Aachen, Berlin (Humboldt), Bochum, Bonn, Dortmund, Mainz, Wuppertal und das MPI-K Heidelberg (über eine Emmy-Noether-Gruppe). IceCube wird in Deutschland im Wesentlichen durch DESY und über die Verbundforschung gefördert. Deutsche Gruppen untersuchen derzeit zusammen mit anderen Kollaborationspartnern das Physikpotential eines noch weiter verdichteten Innenbereichs von IceCube.

Bisher einziger deutscher Teilnehmer in ANTARES ist das Erlangen Center of Astroparticle Physics (ECAP) der Universität Erlangen, der im Jahre 2002 mit einem durch die Verbundforschung erbrachten Investitionsbeitrag von 2.4 M€ die Teilnahme an ANTARES ermöglicht wurde. An KM3NeT ist das ECAP und in geringem Umfang auch die Universität Tübingen beteiligt. ECAP koordiniert die FP6 Design Studie für KM3NeT.

Empfehlung:

IceCube befindet sich gegenwärtig in der Phase größten Sensitivitätszuwachses und muss in dieser entscheidenden Periode die Anstrengungen auf die Analyse der Daten konzentrieren. Es sollte dafür, auch im Rahmen der Verbundforschung, ausreichende Förderung erhalten. Ein ähnliches Argument gilt für ANTARES.

Eine Entscheidung für eine deutsche Beteiligung an KM3NeT sollte unter anderem von den Ergebnissen von IceCube in den kommenden drei Jahren abhängen. Falls IceCube keinerlei

Quellhinweise sieht, müssten aus Sicht des KAT die wissenschaftliche Begründung für eine deutsche Teilnahme an KM3NeT neu diskutiert werden. Wichtig ist, die Teilnahme-Option bis dahin offen zu halten und eine vorläufige Teilnahme auf dem Design- und Prototyp-Niveau zu ermöglichen. Falls die Neutrino-Astronomie bei hohen Energien eine Zukunft hat, liegt angesichts der starken deutschen Tradition auf diesem Gebiet (DUMAND, Baikal, AMANDA, ANTARES, IceCube, KM3NeT) eine Weiterführung nahe. Dann würden sich auch andere deutsche Universitäten KM3NeT bzw. einem globalen Neutrino-Observatorium anschließen und damit die deutschen Aktivitäten bei IceCube und KM3NeT verschmelzen.

7. Gravitationswellen

ASPERA Roadmap: *The long-term priority of ground-based detectors is the Einstein Telescope, E.T., a large underground gravitational wave detector. We recommend support for R&D work towards E.T., with construction starting after first discoveries have been made with LIGO/Virgo/GEO, likely around 2016/17. The short term priority is the upgrade of the present generation of gravitational waves detectors, with a particular recommendation to support a fast upgrade of Virgo to “advanced Virgo”.*

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:

Gegenwärtig existieren 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. Seit Juli 2009 läuft eine neue Datenkampagne mit LIGO und Virgo. GEO600 wird während dieser Zeit zu höherer Empfindlichkeit umgebaut, um die Messperiode von 2011 bis 2015 abzudecken, wenn 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.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Empfindlichkeit der ersten Generation ausreicht, um erste Signale zu detektieren, ein Nachweis ist aber nicht sehr wahrscheinlich. Für die zweite Generation liegt dagegen die erwartete Ereignisrate bei einigen pro Monat bis zu vielen pro Tag. Eine Präzisions-Gravitationswellenastronomie bis zu Rotverschiebungen $z > 1$ wird danach mit der dritten Generation von Detektoren möglich werden. Die gesamte europäische Community beteiligt sich an der Design Studie zum Einstein Gravitational Wave Telescope (E.T.). Diese Studie wird seit 2008 im Rahmenprogramm FP7 der Europäischen Gemeinschaft als Design Study gefördert. ET könnte ab 2018 als europäisches Gemeinschaftsprojekt gebaut werden und das zentrale Observatorium für einige Jahrzehnte 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 sind die Daten aller GW-Observatorien in der Welt zur Analyse zugänglich. Die deutsche GW Community engagiert sich im Sonderforschungsbereich SFB TR7 Gravitational Wave Astronomy. Beteiligt sind die Universitäten und MPis in Jena, Tübingen, Garching, Hannover und Würzburg. 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 Fördermöglichkeiten 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 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. Ebenso gehören dazu die Beschreibung der Zustandsgleichung eines Neutronensterns, sowie die Kernreaktionen in Sternen und bei Supernova-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 erdnaheer 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 Umsetzung dieser kernphysikalischen Messungen auf Reaktionsraten unter kosmischen Bedingungen werden durch Kern- und Astro-Theorien bewirkt, in astronomischen Beobachtungen wird schließlich die resultierende Nukleosynthese-Ausbeute kosmischer Objekte auf ihre Gültigkeit überprüft.

Die extrem niedrigen Kernreaktions-Wirkungsquerschnitte in astrophysikalischen Plasmen unterhalb der picobarn-Skala stellen extreme Anforderungen, die meist nur in aufwendigen Koinzidenzapparaturen in Untergrund-Laboratorien realisierbar sind. Kernresonanzen spielen eine entscheidende Rolle, wegen der unvollkommen verstandenen Kernstrukturen aber auch präzise Bestimmung von Kerneigenschaften wie Masse, Zerfallszeit, Spaltprodukte und -Wahrscheinlichkeiten, denn viele kosmische Reaktionen laufen zwischen instabilen Atomkernen ab, die nur teilweise dem Experiment zugänglich sind. Unabdingbar bleibt die enge Verzahnung von Theorie mit den spezifischen Experimenten in Beschleunigeranlagen mit aufwändigen Isotopen-Separatoren und/oder Untergrund-Laboratorien (z.B. FAIR bei GSI, ISOLDE am CERN, oder LUNA im Gran Sasso-Laboratorium LNGS). Diese Aktivitäten werden vom BMBF auch im Rahmen der Verbundforschung gefördert (z.B. NUSTAR), wobei das KHuK eine führende Beratungsrolle einnimmt. Daneben haben kleinere Einrichtungen mit Ionen/Photonen/Neutronen-Strahlen eine wichtige komplementäre Funktion, und werden derzeit auf unterschiedliche Weisen gefördert. Im europäischen Maßstab erarbeitet die NuPECC Roadmap der Kernphysik hierzu derzeit aktualisierte Empfehlungen. Messungen kosmischer Kern-Strahlung sind mit Gammastrahlen-Teleskopen möglich; hier sind Gamma-Energien im MeV-Bereich relevant, die nur von Satelliten aus möglich sind (z.B. INTEGRAL/ESA), und in Deutschland vom DLR koordiniert werden. Die ERA-NET Roadmap von ASTRONET (Astronomie) behandelt in ihrem Kapitel 3/Panel A derartige Projekte.

Empfehlung:

Im Rahmen der Astroteilchen-Koordination wird Nukleare Astrophysik in ihren experimentellen, bodengebundenen Aspekten behandelt: Detektoren und Nachweismethoden sind der Natur nach "teilchen-orientiert". Das KAT empfiehlt die Unterstützung entsprechender terrestrischer Laborexperimente mit astrophysikalischer Relevanz. Für die Astroteilchen-Community ist neben

den kernphysikalischen Größen die Betrachtung der astrophysikalischen Aspekte entscheidend. Es ist zu überlegen, inwieweit im Themenbereich Nukleare Astrophysik die im europäischen Maßstab erarbeiteten Direktiven überlappender Forschungsrichtungen (NuPECC, ASPERA, ASTRONET), und europaweit koordinierte Programme (z.B. EuroCores-Programm EuroGenesis der ESF) besser verzahnt werden können.

9. Koordinierung von Aktivitäten in der theoretischen Astroteilchenphysik

ASPERA Roadmap: *We also support the formation of a European Centre for Astroparticle Theory.*

Die theoretische Astroteilchenphysik ist einerseits Quelle neuer Konzepte und von Motivation für Experimente, andererseits ein notwendiges Instrument, um experimentelle Ergebnisse korrekt zu interpretieren. Theoretische Untersuchungen begleiten experimentelle Projekte nicht nur unterstützend, sondern haben in vielen Fällen spezifische Experimente erst angestoßen. Auch die theoretische Astroteilchenphysik benötigt nachhaltige Unterstützung und Koordination. Noch mehr als bei der experimentellen Astroteilchenphysik sind in der Theorie die Gebiete Teilchenphysik, Kosmologie und Astrophysik verwoben. Theoretiker arbeiten oft auf mehreren Feldern gleichzeitig, wie zum Beispiel hochenergetische Teilchen, dunkle Materie und Physik des frühen Universums. Viele Theoretiker haben einen teilchenphysikalischen Hintergrund; gleichzeitig wird Expertenwissen aus der klassischen theoretischen Astrophysik immer wichtiger, zum Beispiel bei der Interpretation von Daten zur kosmischen Strahlung. Parallel zu den Plänen für die nächste Generation der Astroteilchen-Experimente in Deutschland erfordern daher die damit verbundenen theoretischen Tätigkeiten, abgesehen von projekt-spezifischen Analyse- und Simulations-Aktivitäten, eine stärkere Unterstützung und Koordination. Dazu gehört auch eine effizientere Vernetzung von traditionell noch eher getrennt agierenden Gemeinschaften, wie zum Beispiel jener der theoretischen Astrophysik und jener der theoretischen Teilchenphysik.

Als Beispiele für die Notwendigkeit kohärenter Maßnahmen erwähnen wir die Bewertung und Verringerung der Unsicherheit der nuklearen Matrixelemente für den Doppel-Beta-Zerfall, die Interpretation kosmologischer und astrophysikalischer Daten und ihre Relevanz für die dunkle Materie und dunkle Energie, sowie die Modellierung von astrophysikalischen Hochenergie-Prozessen.

Empfehlung:

Um die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Theoretikergemeinschaft zu erhöhen, sollten die besten und mobilsten jungen Forscher gefördert werden, die an den Schnittstellen der Astrophysik, der Teilchenphysik und der Kosmologie arbeiten. Dies könnte zum Beispiel durch spezielle Postdoktoranden- und Doktorandenprogramme geschehen, die die Zusammenarbeit und einen erleichterten Austausch zwischen Instituten mit den entsprechenden komplementären Expertisen fördern würden.

Das KAT empfiehlt, existierende europäische Strukturen (FP, ERA-NET, EuroCores) auf nationaler Ebene zu ergänzen. So unterstützte die Europäische Union in FP-6 das "European Network of Theoretical Astroparticle Physics" (ENTApP), ein Netzwerk im Rahmen der „Integrated Large Infrastructure for Astroparticle Science“ (ILIAS). ENTApP konzentrierte sich auf theoretische Studien im Zusammenhang mit den experimentellen ILIAS Aktivitäten, namentlich neutrinoloser Doppel-Beta-Zerfall, dunkle Materie und Gravitationswellen, und hatte eine starke deutsche Beteiligung. Die daraus hervor gegangenen deutschen Aktivitäten und Vernetzungen sollten verstetigt werden. Das KAT regt ein Treffen an, auf dem diskutiert werden soll, ob das beste dazu geeignete Instrument auf nationaler Ebene z.B. in einem nationalen Theorienetzwerk besteht und welche Rolle in diesem Zusammenhang das gegenwärtig diskutierte Astroteilchenzentrum am CERN spielen könnte.

10. Andere Projekte und technische Entwicklungen

ASPERA Roadmap: *We also support: Earth and space based missions to explore the phenomenon of “dark energy”; the concept of a cooperative network of deep underground laboratories; a common call for innovative technologies in the field of astroparticle physics; efforts to intensify the synergy with environmental sciences.*

Wir kommentieren die ASPERA-Empfehlung aus der Sicht des KAT.

- **Dunkle Energie:** Die großen Zukunftsprojekte mit europäischer Beteiligung sind DES (Dark Energy Survey, first light 2013, NSF/DOE), LSST (Large Synoptic Survey Telescope, first light 2016, NSF), beides erdgebunden, und auf Satelliten das deutsch dominierte Projekt eRosita (Start 2014) sowie das vorwiegend europäische Projekt EUCLID (2017?). Das US-Projekt LSST hat eine starke französische Beteiligung. Es gibt Interesse des AIP Potsdam und einiger deutscher Universitäten, noch bei LSST einzusteigen. Deutschland ist stark am Planck-Satelliten zur Präzisionsmessung der 2.7 Kelvin Strahlung beteiligt (MPIs in Garching, Universität Heidelberg). Alle diese Projekte finden auch aus der Perspektive der Astroteilchenphysik größtes Interesse, folgen aber traditionell gänzlich anderen Fördermodellen und werden darum hier nicht im Einzelnen diskutiert.
- **Hochenergie-Satellitenexperimente:** Deutschland ist an den Gammastrahl-Satellitenexperimenten INTEGRAL (SPI Spektrometer, MPI Garching und andere, mit einem Energiebereich keV-MeV) und Fermi (Large-Area Telekop und Gamma-Ray Burst Detektor, MPI Garching und andere, mit einem Energiebereich 0.1 MeV–300 GeV) beteiligt. Mit den COMPTEL und EGRET Instrumenten, die von 1991-2000 auf dem Gamma Ray Observatory (GRO) erfolgreich betrieben wurden, hat Deutschland hier eine lange und erfolgreiche Tradition. Der Energiebereich von Fermi überlappt zu hohen Energien hin mit jenem von CTA. Auf dem Gebiet der Satelliten-Experimente mit geladenen kosmischen Strahlen ist die Rolle der RWTH Aachen beim Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) hervorzuheben, das 2010 in den Orbit gehen und u.a. nach Antiteilchen aus Zerfällen dunkler Materie und nach Antikernen suchen soll. Es gibt auch eine Beteiligung an dem wesentlich kleineren Pamela-Detektor (Italien, Russland u.a.) über die Universität Siegen. Deutschland ist auch an JEM-EUSO beteiligt (MPI München und Universität Tübingen). JEM-EUSO soll 2013 in den Orbit gehen. Mit einer neuen Technologie (Luftschauermessungen aus dem Kosmos) ist es auf extrem hohe Energien sensitiv und könnte den Weg zur Luftschauerphysik jenseits des Pierre Auger-Observatoriums weisen. Die Datenanalyse von AMS und die Vorbereitungsarbeiten zu JEM-EUSO sollten über die bestehenden Förderwege unterstützt werden.
- **Untergrundlabore:** Deutschland beteiligt sich an mehreren Untergrundexperimenten im Gran Sasso Laboratorium (LNGS, Italien) mit BOREXINO, CRESST, XENON, GERDA, LUNA; und im Frejus-Tunnel (LSM, Frankreich) mit Edelweiss. Die TUM untersucht darüber hinaus im Rahmen der LAGUNA Design-Studie die Option, einen großen Szintillationsdetektor in Pyhäsalmi/Finland zu bauen (alternativ im LSM). Eine Beteiligung an Infrastrukturkosten könnte man sich aus gegenwärtiger Sicht am ehesten im Zusammenhang mit LSM (EURECA, XENON1t) oder – etwas langfristiger -- Pyhäsalmi (LENA) vorstellen. Im Kontext von EURECA/LSM gibt es entsprechende Vorstellungen von französischer Seite. Siehe dazu auch die Empfehlungen zu dunkler

Materie. In den Bereich der nuklearen Astrophysik fällt der geplante Aufbau eines Untergrundlabors geringer Tiefe in Dresden, einschließlich eines kleinen Beschleunigers zur Untersuchung von astrophysikalisch wichtigen Kernreaktionen. Hieran wird sich auch das Forschungszentrum Dresden beteiligen.

- **Neue Technologien:** 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 ist für eine weitere fruchtbare Entwicklung des Gebiets, für Kosteneinsparungen sowie für das Erschließen neuer Energie- und Sensitivitätsbereiche notwendig. Die folgende Liste versucht, einen Überblick über diesen besonders dynamischen Bereich zu geben.
 - Gamma-Astronomie: Spurdetektoren für satellitengestützte Experimente, Konzepte wie wide-field arrays (SCORE-Projekt) oder verteilte, kleine, billige Teleskope mit neuer Technologie (DWARF-Projekt), die auch in Entwicklungsländern bzw. von kleinen Gruppen betrieben werden können.
 - Geladene kosmische Strahlen: Radio-Nachweis: LOPES-Testanordnung in Karlsruhe, Radio-Testanordnung in Auger, eventuelle Erweiterung von IceTop durch Radio-Antennen, LOFAR.
 - Hochenergie-Neutrinos: Radionachweis (IceCube), akustischer Nachweis (z.B. AMADEUS im Mittelmeer und SPATS am Südpol).
 - Dark Matter, Neutrinomassen, Neutrino-Eigenschaften: Low-Background Technologien. Kryodetektor-Technologie, Szintillatortechnologien. Hier haben sich im Rahmen von ILIAS europaweit beträchtliche Synergien entfaltet.
 - Für fast alle Gebiete ist die Entwicklung verbesserter und neuartiger Photodetektoren von zentraler Bedeutung.
- **Synergien mit anderen Wissenschaftsfeldern:** In der ASPERA-Roadmap wird auf die Synergien mit Umweltwissenschaften verwiesen: Meereskunde und Biologie mit Unterwasser-Neutrino-Teleskopen, Atmosphärenphysik mit Luftschauerdetektoren, Glaziologie mit IceCube und seismische oder biologische Untersuchungen in Untergrund-Labors. Das KAT unterstreicht die gesellschaftspolitische Relevanz dieser interdisziplinären Forschung.

Empfehlung:

Bei aller Konzentration auf die laufenden Projekte muss Raum für neue Entwicklungen der genannten Art bleiben. Dafür sollten angemessene Ressourcen zur Verfügung stehen.

V. Zusammenfassung

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

Dunkle Materie

Wir empfehlen für die nächsten drei Jahre die gleichgewichtige Förderung beider Technologie-Linien, XENON und EURECA. Die auf dem gesamten Gebiet engagierten deutschen Gruppen haben sich auf Initiative des KAT zu einer Strategiediskussion getroffen und in deren Ergebnis einen Arbeitskreis Dunkle Materie gegründet. Sie werden einen gemeinsamen Antrag für die nächste Förderperiode der Verbundforschung stellen. Ziel der Förderung soll sein, XENON beim Aufbau von XENON1t zu unterstützen und EURECA bei den vorbereitenden Arbeiten zu fördern. Die Förderung des eigentlichen Aufbaus von EURECA bliebe dann der nächsten Förderperiode vorbehalten.

Neutrinomasse

Deutschland sollte seine führende Rolle bei Neutrinomassenexperimenten beibehalten und verteidigen. Das KATRIN-Experiment zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse sollte sein Empfindlichkeitspotential maximal ausschöpfen. Wenn die angestrebte Untergrundreduktion bei GERDA I und II erfolgreich ist, sollte der mögliche Ausbau auf eine Tonne Targetmaterial im Rahmen eines weltweiten Germaniumexperiments unterstützt werden. KATRIN und GERDA sollten wie bisher über die Verbundforschung gefördert werden. Die Unterstützung von F&E-Projekten (z.B. durch die DFG) wird als wichtige Investition in die Zukunft angesehen. Die Berechnung der Kernmatrixelemente zum doppelten Betazerfall ist zentral für die Interpretation der Messergebnisse und sollte unterstützt werden.

Niederenergie-Neutrinoastrophysik/Protonzerfall

Die Physik mit einem „Megaton-scale“ Detektor stellt eine fruchtbare Mischung aus fundamentalen Fragen und Präzisionsmessungen bereits etablierter Effekte dar. Deutschland sollte mittel- und langfristig auf diesem Gebiet präsent sein. Aus der Sicht des KAT liegt die weitere Konzentration auf die Szintillator-Option („LENA“) nahe, unter Nutzung des bestehenden Erfahrungsvorsprungs aus Borexino und Double Chooz. Eine Einbeziehung in die anstehende Runde der Verbundforschung erscheint ohne deren beträchtliche Erhöhung schwer vorstellbar. Umso mehr sollte aber dieses Feld auf dem langfristigen „Radarschirm“ auftauchen. Auch für Helmholtz-Institute stellt das Gebiet eine interessante strategische Option dar. Um in drei Jahren überhaupt eine Option für eine wichtige deutsche Rolle zu haben, ist eine Verbreiterung des F&E-Programms notwendig. Wegen der long-baseline-Option schlägt das KAT eine schnelle Einbeziehung der Teilchen-Community in die Diskussion vor.

Bodengebundene Gamma-Astronomie

CTA ist ein internationales Projekt mit einer klaren deutschen Führungsposition und Kernbestandteil einer Multi-Messenger-Initiative. CTA sollte zusammen mit H.E.S.S. und MAGIC in die nächste Runde der Verbundforschung aufgenommen werden. Zur Gewährleistung der deutschen Führungsrolle sollte Deutschland insgesamt bereit sein, sich mit etwa einem Viertel der Kosten am Bau von CTA zu beteiligen. Daraus ergäbe sich eine Summe von etwa 45-50 M€ einschließlich der Beiträge der Max-Planck-Gesellschaft und des DESY. Dieser Beitrag würde Deutschlands historischer und aktuell-wissenschaftlicher Rolle in der Gamma-Astrophysik

gerecht werden. Er würde die Führungsposition in einem internationalen Spitzenprojekt garantieren, das eine Fülle von astrophysikalischen Resultaten garantiert und darüber hinaus möglicherweise zur Lösung fundamentaler Fragen wie der nach der Natur der dunklen Materie beitragen kann.

Geladene kosmische Strahlen bei höchsten Energien

Auger ist das internationale Flaggschiffprojekt für höchstenergetische kosmische Strahlen. Nach den USA ist Deutschland der wichtigste Partner. Auch bei den Plänen zur Erweiterung des Observatoriums durch Auger-Nord hat Deutschland eine Führungsposition inne. Ein Antrag auf Helmholtz-Zusatzinvestitionen von 16 M€ wurde gestellt. Wir empfehlen, die Arbeiten am Pierre Auger-Observatorium durch die BMBF-Verbundforschung zu fördern, um den Universitäten zu erlauben, die bisherige erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem KIT und innerhalb der Kollaboration fortzusetzen. Dabei sollte Auger-Nord in die bisherige Förderung des Pierre Auger-Observatoriums eingebettet werden.

Neutrino-Teleskope

IceCube befindet sich gegenwärtig in der Phase größten Sensitivitätszuwachses und muss in dieser entscheidenden Periode die Anstrengungen auf die Analyse der Daten konzentrieren. Es sollte dafür, auch im Rahmen der Verbundforschung, ausreichende Förderung erhalten. Ein ähnliches Argument gilt für ANTARES.

Eine Entscheidung für eine deutsche Beteiligung an KM3NeT sollte unter anderem von den Ergebnissen von IceCube in den kommenden drei Jahren abhängen. Falls IceCube keinerlei Quellhinweise sieht, müssten aus Sicht des KAT die wissenschaftliche Begründung für eine deutsche Teilnahme an KM3NeT neu diskutiert werden. Wichtig ist, die Teilnahme-Option bis dahin offen zu halten und eine vorläufige Teilnahme auf dem Design- und Prototyp-Niveau zu ermöglichen. Falls die Neutrino-Astronomie bei hohen Energien eine Zukunft hat, läge angesichts der starken deutschen Tradition auf diesem Gebiet eine Weiterführung nahe. Dann würden sich auch andere deutsche Universitäten KM3NeT bzw. einem globalen Neutrino-Observatorium anschließen und damit die deutschen Aktivitäten bei IceCube und KM3NeT verschmelzen.

Gravitationswellen

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

Das KAT schlägt 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

Im Rahmen der Astroteilchen-Koordination wird Nukleare Astrophysik in ihren experimentellen, bodengebundenen Aspekten behandelt: Detektoren und Nachweismethoden sind der Natur nach "teilchen-orientiert". Das KAT empfiehlt die Unterstützung entsprechender terrestrischer Laborexperimente mit astrophysikalischer Relevanz. Für die Astroteilchen-Community ist neben den kernphysikalischen Größen die Betrachtung der astrophysikalischen Aspekte entscheidend. Es ist zu überlegen, inwieweit im Themenbereich Nukleare Astrophysik die im europäischen Maßstab erarbeiteten Direktiven überlappender Forschungsrichtungen (NuPECC, ASPERA,

ASTRONET), und europaweit koordinierte Programme (z.B. EuroCores-Programm EuroGenesis der ESF) besser verzahnt werden können.

Theoretische Astroteilchenphysik

Um die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Theoretikergemeinschaft zu erhöhen, sollten die besten und mobilsten jungen Forscher gefördert werden, die an den Schnittstellen der Astrophysik, der Teilchenphysik und der Kosmologie arbeiten. Dies könnte zum Beispiel durch spezielle Postdoktoranden- und Doktorandenprogramme geschehen, die die Zusammenarbeit und einen erleichterten Austausch zwischen Instituten mit den entsprechenden komplementären Expertisen fördern würden.

Das KAT empfiehlt, existierende europäische Strukturen auf nationaler Ebene zu ergänzen. So unterstützte die Europäische Union in FP-6 das "European Network of Theoretical Astroparticle Physics" (ENTApP). Die daraus hervor gegangenen deutschen Aktivitäten und Vernetzungen sollten verstetigt werden. Das KAT regt ein Treffen an, auf dem diskutiert werden soll, ob das beste dazu geeignete Instrument auf nationaler Ebene z.B. in einem nationalen Theorienetzwerk besteht und welche Rolle in diesem Zusammenhang das gegenwärtig diskutierte Astroteilchenzentrum am CERN spielen könnte.

Andere Projekte und neue Technologien

Bei aller Konzentration auf die laufenden Projekte muss Raum für neue Entwicklungen bleiben, z.B. in den Bereichen Technologieentwicklung bei Photo-, Kryo- und Spurdetektoren und für low-background-Technologien, darüber hinaus für gänzlich neue Nachweismethoden wie etwa den akustischen oder Radio-Nachweis von Teilchen. Dafür wie auch für kleine, neu auftauchende Projekte mit hohem Entdeckungspotential sollten angemessene Ressourcen zur Verfügung stehen.

Die Tabelle auf der folgenden Seite 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)	Bau – phase
<u>Dark Matter</u>							
XENON1t	50	9 (4/1/4)	10	3	MPI	12 (3)	2012-13
EURECA	55	29 (8/4/17))	35	10	HGF	15 (4)	2013-18
<u>Neutrinomasse</u>							
KATRIN	110	60 (33/4/23)	50	46***	HGF	15 (7)	2005-12
GERDA	100	29 (8/7/14)	14	8 ⁺	MPG	17 (4)	2005-11
LENA Personalzahlen einschl. Borexino	80	16 (4.5/1.5/10)	225*	N/A	TUM	10 (4)	2015-23
CTA (Personalzahlen einschliesslich HESS+MAGIC)	600	88 (21.5/27/ 40)	160-190	45-50	MPG, HGF	> 100 (12)	2013-18
KM3NeT Personalzahlen einschl. ANTARES	300	20 (5.8/3.1/11)	200-250	N/A	ECAP	etwa 40 (2)	2013-18
IceCube-86	250	54 (9.4/8.0/37)	100	8**	HGF	32 (9)	2005-11
Auger Personal für Gesamt-Auger	etwa 500	78 (27/13/39)	100	20	HGF	90 (8)	2012-16
Grav.-Wellen Personal einschl. GEO, LIGO, E.T. LISA	etwa 1000	195 (52/74/69)			MPG	90 (7)	
E.T.			250*	50			2017-23

* grobe Abschätzung ohne Grabungskosten + ein Teil der Investitionen für GERDA Phase-II getätigt

** alle Investitionen für 86 String-Konfiguration getätigt *** größter Teil der KATRIN-Investitionen getätigt