

Astroteilchenphysik in Deutschland –

PERSPEKTIVEN und EMPFEHLUNGEN

Strategiepapier für ErUM-Pro (2020-2023)
Komitee für Astroteilchenphysik

9. Mai 2019

Astro

Impressum

Das vorliegende Dokument wurde vom Vorsitzenden und stellvertretenden Vorsitzenden des KAT in enger Abstimmung mit den gewählten KAT-Mitgliedern und deren Stellvertreterinnen und Stellvertretern sowie den ex-officio Mitgliedern aus dem Wissenschaftsbereich erarbeitet und editiert. Es berücksichtigt Kommentare und Änderungsvorschläge der Astroteilchenphysik-Gruppenleiterinnen und -leiter.

Herausgeber

Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)
c/o Prof. Dr. Uli Katz
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Erwin-Rommel-Str. 1
91058 Erlangen
uli.katz@physik.uni-erlangen.de

Druck

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Design und Layout

Beatrix von Puttkamer

© KAT Mai 2019

Inhalt

1	Astroteilchenphysik: Stand des Feldes.....	5
2	Strategieprozess in der deutschen Astroteilchenphysik.....	7
3	Zusammenfassung der Empfehlungen	9
	3.1 Empfehlung des KAT für ErUM-Pro (2020-2023).....	9
	3.2 Weitere Forschungsempfehlungen des KAT.....	9
4	Zentrale Fragen und Methoden der Astroteilchenphysik	11
5	Detaillierte Empfehlungen.....	17
6	Gesellschaftliche Relevanz und Anwendungen.....	23
Anhang 1	Astroteilchenphysik-Experimente in ErUM-Pro.....	25
Anhang 2	Gruppenleiterinnen und Gruppenleiter und die Entwicklung der Astroteilchenphysik in Deutschland	26
Anhang 3	Innovative Technologien aus der Astroteilchenphysik.....	28
Anhang 4	Das Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)	30

1 Astroteilchenphysik: Stand des Feldes

Astroteilchenphysik ist ein dynamisches, national und international schnell wachsendes und höchst erfolgreiches Forschungsfeld, das sich in den letzten Jahrzehnten interdisziplinär im Grenzbereich von Astro-, Teilchen- und Kernphysik entwickelt hat und grundlegende physikalische Fragestellungen untersucht, die diese Felder der Physik – d.h. Vorgänge auf den kleinsten und größten uns bekannten Längenskalen – in Beziehung setzt.

Die Methode, verschiedene Signaltypen zu kombinieren – die Multi-Messenger-Astronomie – hat 2017 mit der Evidenz für eine erste astrophysikalischen Quelle hochenergetischer Neutrinos sowie mit der Beobachtung der Verschmelzung zweier Neutronensterne mit Gravitationswellen und elektromagnetischer Strahlung entscheidende Durchbrüche gefeiert. Die Einbeziehung von Gravitationswellen in diese Forschung hat sich als extrem fruchtbar erwiesen; schon kurz nach ihrer Entdeckung (Nobelpreis 2017) haben Gravitationswellen-Messungen und insbesondere auch simultane Beobachtungen von Gravitationswellen- und elektromagnetischen Signalen im Frequenzbereich von Radio- bis Gammastrahlung zu völlig neuen astrophysikalischen Erkenntnissen geführt – im Fall des genannten Neutronenstern-Ereignisses z.B. zum Ablauf des Verschmelzungs Vorgangs, zur Natur von Kilonovae und zur Nukleosynthese in Folge solcher Prozesse. Im Bereich der kosmischen Strahlung hat das Auger-Experiment mit der erstmaligen Beobachtung einer Anisotropie bei höchsten Energien einen Durchbruch erzielt.

Im Bereich der Niederenergie-Astroteilchenphysik wurden bei der Untersuchung der Neutrinoeigenschaften und der Suche nach Dunkler Materie große Fortschritte erzielt. So wurden bei der Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall neue Rekord-Ausschlussgrenzen erreicht, die Messung des gesamten Spektrums der solaren Neutrinos aus der pp-Kette in Echtzeit erfolgt jetzt mit einem einzigen Experiment, und die Messung der Neutrinomasse mit um eine Größenordnung erhöhter Empfindlichkeit hat gerade begonnen. Die Parameter der mit atmosphärischen und solaren Neutrinos entdeckten Neutrinooszillationen (Nobelpreis 2015) werden immer präziser vermessen. Die Sensitivitäten bei der Suche nach Dunkler Materie verzehnfachen sich weiterhin etwa alle 3 Jahre. Kürzlich wurde zudem das erste Mal der neutrinobehaftete doppelte Elektroneneinfang am Isotop Xe-124 nachgewiesen und die längste je direkt gemessene Halbwertszeit veröffentlicht.

Die meisten Experimente und Observatorien der Astroteilchenphysik werden von internationalen Kon-

sortien geplant, gebaut und betrieben. Bei vielen der maßgeblichen Experimente sind deutsche Forschergruppen signifikant und vielfach in führenden Rollen beteiligt. Diese Spitzenstellung wurde durch die konstruktive Zusammenarbeit zwischen Helmholtz- und Max-Planck-Instituten und den Universitäten möglich, wobei die Förderung von Universitätsgruppen durch ErUM-Pro ein essenzielles Element ist. Das KAT sieht diese Grundlage der Forschungsförderung in der Astroteilchenphysik als unabdingbar an und hofft, dass sie unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Erfolge und der wachsenden Community weiter gestärkt wird. Das KAT erachtet es weiterhin als sehr wichtig, dass die Balance zwischen Großprojekten und kleineren Experimenten mit kürzeren Zeitskalen, z.B. zur Etablierung neuer Methoden und Detektorkonzepte, aufrechterhalten wird.

Die Gravitationswellenforschung ist thematisch eng mit den anderen Forschungsthemen der Astroteilchenphysik – insbesondere der Multi-Messenger-Astronomie – verzahnt und ist eines der Themenbereiche des KAT. Neu sind nunmehr der Übergang von der reinen Detektorentwicklung zu vielfachen Gravitationswellenbeobachtungen und der astrophysikalischen Auswertung der Ergebnisse, sowie Vorbereitungen für ein Experiment der nächsten Generation. Das KAT sieht es als essenziell an, den Universitäten in dieser Phase Zugang zu diesem Feld zu ermöglichen und regt deshalb an, die Gravitationswellen in die Forschungsförderung in ErUM-Pro neu aufzunehmen, mit einem resultierenden Aufwuchs der geförderten Gruppen und Standorte, der sich auch im Umfang der Förderung widerspiegeln sollte.

Die jüngsten Erfolge der Astroteilchenphysik wurden durch neue experimentelle Methoden und immer empfindlichere Instrumente möglich, die rasant wachsende Datenraten liefern. Es ist zu erwarten, dass sich diese Tendenz beschleunigt fortsetzt. Zunehmende Aufmerksamkeit gilt deshalb dem Themenbereich Daten und Computing, wobei Rechen- und Speicherkapazität der entsprechenden Rechner-Infrastrukturen, schneller Datentransfer zwischen Rechanlagen und Nutzern, der Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens sowie die Umsetzung von *Open Data Access* im Mittelpunkt stehen. Die deutsche Astroteilchenphysik-Community ist an entsprechenden übergreifenden Initiativen (ErUM-Data, NFDI, EOSC) intensiv beteiligt. Das KAT gibt zu bedenken, dass die Nutzung künftiger Lösungen innerhalb dieser Großinitiativen Vorarbeiten auf Experimentebene erfordert, deren Förderung als Methodenentwicklung im Rahmen von ErUM-Pro von hoher Bedeutung sein wird.

Die Astroteilchenphysik ist wissenschaftlich eng verzahnt mit der Teilchen-, Kern- und Hadronenphysik, repräsentiert durch die Komitees KET und KHuK (Physik der kleinsten Teilchen in ErUM-Pro). Ausgelöst durch den Strategieprozess der europäischen Teilchenphysik (*European Particle Physics Strategy Update*) gab es 2017/2018 eine Reihe gemeinsamer Workshops, bei denen übergreifende Strategien für bestimmte Forschungsfelder – wie etwa die Neutrinophysik – diskutiert und beschlossen wurden. Diese Schlussfolgerungen fließen in das vorliegende Papier ein. Das KAT sieht die Verzahnung der Komitees sehr positiv und ist bestrebt, diese insbesondere auf den Rat Deutscher Sternwarten (RDS) zu erweitern und synergetisch zu nutzen, u.a. auch für Querschnittsaufgaben in Bereichen wie Computing und Outreach.

Die gesellschaftliche Relevanz der Forschung auf dem Gebiet der Astroteilchenphysik und den angrenzenden Gebieten wie Astronomie und Teilchenphysik reicht weit über die eigentlichen wissenschaftlichen Fragestellungen hinaus. Sie beinhaltet den zentralen kulturellen Aspekt der Frage nach dem Ursprung des Weltalls, der Materie und des Lebens, der als Triebfeder von Erkenntnisstreben und damit des Fortschritts von enormer gesellschaftlicher Bedeutung ist. Weiter-

hin beflügelt die Forschung in der Astroteilchenphysik hochtechnologische Entwicklungen und deren Anwendung auf teilweise völlig anderen Gebieten, wie z.B. in der Bildverarbeitung oder der Medizintechnik. Die grundlegenden Fragestellungen und die extrem anspruchsvollen technischen Herausforderungen begeistern insbesondere junge Menschen, sich intensiv mit Forschung, Entwicklung und neuen Technologien zu beschäftigen. Viele junge Menschen entscheiden sich gerade deswegen für ein Studium im MINT-Bereich. Das KAT sieht es als essenziell an, dass die Wissenschaftler proaktiv auf die Gesellschaft zugehen, um ihre Forschung zu vermitteln und Begeisterung dafür zu wecken.

Dieses Papier fasst die wissenschaftlichen und förderpolitischen Prioritäten der deutschen Astroteilchenphysik-Community für die nächste Förderperiode von ErUM-Pro (2020-23) zusammen. Es konzentriert sich daher auf die großen Projekte in diesem Feld, deren deutsche Beteiligung Gegenstand dieser Förderung ist und/oder werden soll. Um jedoch ein vollständiges und unverzerrtes Bild des Forschungsfeldes darzustellen, werden zusätzlich auch Empfehlungen formuliert, die nicht direkt auf ErUM-Pro zielen.

2 Strategieprozess in der deutschen Astroteilchenphysik

Das KAT organisiert seit 2015 jeweils gegen Jahresende Strategietreffen im Physikzentrum der DPG in Bad Honnef, zu denen die Gruppenleiterinnen und Gruppenleiter der Astroteilchenphysik in Deutschland sowie Vertreter von den angrenzenden Komitees, BMBF, DFG und Projektträger eingeladen sind. Bei diesen Treffen werden neue Entwicklungen diskutiert und ein Meinungsbild zu strategischen Entscheidungen gebildet. Im September 2018 fand in Mainz zudem das Treffen der deutschen Astroteilchenphysik-Community mit fast 200 Teilnehmern statt.

Seit dem letzten Strategiegespräch mit dem BMBF im April 2016 haben KAT, KET und KHuK eine Reihe von Workshops organisiert, die Zukunftsperspektiven für die Forschung im Bereich der Elementarteilchen-, Astroteilchen-, Hadronen- und Kernphysik und insbesondere die deutsche Position im Hinblick auf den *European Particle Physics Strategy Upgrade (EPPSU)* Prozess zum Thema hatten. Aus einem Abschluss-Workshop im Mai 2018 ging eine gemeinsame Stellungnahme hervor und das KAT hat die Astroteilchenphysik-Aspekte in einem Dokument zusammengefasst, das an EPPSU submittiert wurde.

Im Mai 2018 fand in Hannover ein gut besuchtes Treffen der deutschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler statt, die an der Gravitationswellenforschung interessiert sind. Der *Letter of Intent* für das Einstein-Teleskop wurde u.a. von Teilnehmern aus 15 deutschen Universitäten gezeichnet. Die sehr unterstützende Haltung und das breite Interesse an einer Beteiligung an diesem Feld wurden auch beim KAT-Strategietreffen im November 2018 deutlich.

Die Schlussfolgerungen der genannten Treffen, Workshops und Dokumente bilden die Grundlage für das vorliegende Papier.

Angesichts der großen wissenschaftlichen und finanziellen Herausforderungen der kommenden Jahre hat sich das KAT zum Ziel gesetzt, klare Empfehlungen und Priorisierungen für die deutsche Astroteilchenphysik zu erarbeiten. Sie sollen aufzeigen, wie die wissenschaft-

lichen Fragestellungen der wachsenden deutschen Astroteilchenphysik-Gemeinschaft im Rahmen realistischer finanzieller Mittel und Ressourcen auch in Zukunft erfolgreich bearbeitet werden können. Der Strategieprozess findet in enger Abstimmung zwischen den Forschern an deutschen Universitäten, Helmholtz-Zentren und Max-Planck-Instituten statt und erfolgt in Diskussion mit dem BMBF. Der europäische Strategieprozess, der im Rahmen des APPEC durchgeführt wurde, und sich jetzt in der Phase der Umsetzung befindet, findet hierbei ebenso Berücksichtigung wie die globalen internationalen Entwicklungen und nationale Interessen.

Die Empfehlungen beinhalten Fortführungen und Weiterentwicklungen von erfolgreichen Projekten, die Inbetriebnahme von kurz vor dem Start befindlichen Experimenten und eine Selektion von exzellenten neuen Experimenten. Insbesondere durch die außerordentlich erfolgreiche Positionierung der deutschen Astroteilchenphysik in den letzten Jahren werden auch in den nächsten Jahren wesentliche Fortschritte und weitere Durchbrüche bei der Beantwortung der vier identifizierten Grundfragen – Eigenschaften von Neutrinos, Natur der Dunklen Materie, Verständnis des nicht-thermischen Universums und Ursprung der kosmischen Strahlung, Entwicklung des Universums – erwartet. Dies setzt natürlich voraus, dass die entsprechenden Rahmenbedingungen für die hierzu erforderlichen innovativen, hochtechnologischen und methodischen Entwicklungen zumindest vorhanden bleiben, wenn nicht ausgebaut werden. Der Bau der hierzu erforderlichen Großgeräte und darüber hinaus gehende F&E-Arbeiten ermöglichen es nicht nur, wissenschaftliches Neuland zu betreten und fundamentale Fragen zu beantworten, sondern sie schaffen auch einen hohen Mehrwert für Industrie und Gesellschaft. Die Astroteilchenphysikerinnen und -physiker in Deutschland sehen sich gut gerüstet, diesen Weg konsequent weiterzugehen. Eine starke Vernetzung innerhalb der Astroteilchenphysik und mit benachbarten Wissenschaftsfeldern spielt dabei auf nationaler wie internationaler Ebene eine zunehmend bedeutsame Rolle.



3 Zusammenfassung der Empfehlungen

Die hier vorgeschlagenen Forschungsschwerpunkte und Empfehlungen für zukünftige Themen gründen auf einer sorgfältigen Abwägung des wissenschaftlichen Potenzials, des fundamentalen Charakters der wissenschaftlichen Fragen, der Stärken der deutschen Gruppen in den jeweiligen Feldern, sowie auf der Berücksichtigung einer realistischen Finanzierung.

Im Folgenden werden stichpunktartig die vom KAT empfohlenen Schlüsselexperimente und -aktivitäten zu den zentralen Fragen der Astroteilchenphysik aufgeführt. Aufgrund der besonderen Förderungslandschaft in Deutschland gehen wir dabei zuerst auf spezielle Empfehlungen für die ErUM-Pro Förderperiode 2020-2023 ein.

3.1 Empfehlung des KAT für ErUM-Pro (2020-2023)

Eigenschaften von Neutrinos:

- Vollständige Ausschöpfung des Empfindlichkeitspotenzials des KATRIN-Experiments für die Messung der Neutrinomasse und die Suche nach sterilen Neutrinos.
- Unterstützung der Doppelbetazerfall-Suche mit dem GERDA-Nachfolgeexperiment LEGEND-200 und Vorbereitung von LEGEND-1000.

Natur der Dunklen Materie:

- Unterstützung der direkten Suche nach Dunkler Materie mit XENONnT.
- Beteiligung an der Vorbereitung von DARWIN und CRESST-III.

Nicht-thermisches Universum:

- Aufbau und Inbetriebnahme des Gamma-Observatoriums CTA und Unterstützung der beiden Vorgängerexperimente H.E.S.S. und MAGIC bis zum Start von CTA.
- Fertigstellung und Inbetriebnahme von AugerPrime und Ausnutzung seiner vollen Empfindlichkeit.
- Ausnutzung der vollen Empfindlichkeit von IceCube, Vorbereitung und Aufbau von IceCube-Gen2 Phase 1, sowie F&E für IceCube-Gen2.

Entwicklung des Universums:

- F&E und experimentnahe Entwicklungsarbeiten für einen Gravitationswellendetektor der nächsten Generation (Einstein-Teleskop).

Theorie:

- Förderung experimentnaher theoretischer Arbeiten.

Querschnittsthemen:

- Unterstützung von Methodenentwicklung im Bereich der Digitalisierung des Forschungsfeldes, komplementär zu ErUM-Data und NFDI.
- Wissenschaftskommunikation und Outreach: Transfer von Ergebnissen in andere Fachbereiche und in die Gesellschaft.
- Maßnahmen zur Vernetzung und zur Strukturbildung der Astroteilchenphysik auf nationaler und internationaler Ebene.

3.2 Weitere Forschungsempfehlungen des KAT

Eigenschaften von Neutrinos:

- F&E zur Entwicklung und Fortentwicklung neuartiger Technologien zur Neutrino-Massenbestimmung, z.B. ECHO.
- Durchführung von Flüssigszintillator-Experimenten zur Massenhierarchie (JUNO) und zur Suche nach sterilen eV-Neutrinos (STEREO).
- Ausschöpfung des astrophysikalischen Potenzials von JUNO.
- Ausschöpfung des neutrinophysikalischen Potenzials von IceCube-Gen2 Phase 1.
- Durchführung von mindestens einem der Experimente ORCA und PINGU zur Bestimmung der Massenhierarchie mit atmosphärischen Neutrinos, falls dies früher realisiert werden kann als die beschleunigerbasierten Neutrinoexperimente Hyper-Kamiokande und DUNE.
- Untersuchung der kohärenten Neutrinostreuung mit CONUS und F&E zur Entwicklung von CONUS100 zur Ausschöpfung des Physikpotenzials.

Natur der Dunklen Materie:

- Suche nach Axionen und axionartigen Teilchen in Koordination mit der Teilchenphysik.

Nicht-thermisches Universum und Entwicklung des Universums:

- Intensivierung von Multimessenger-Messungen (Gammas, kosmische Strahlung, Neutrinos, Gravitationswellen) und Sicherstellung des Betriebs und der Weiterentwicklung der Observatorien.
- Aufrechterhaltung der deutschen Expertise bei Unterwasserteleskopen (KM3NeT) und langfristige Hinarbeit auf volle Himmelsabdeckung in der Neutrinoastronomie mit IceCube und KM3NeT.
- Weiterentwicklung der Radiodetektionstechnik für den Nachweis von kosmischer Strahlung und ultrahochenergetischen Neutrinos in großskaligen Observatorien.
- F&E für die Entwicklung von Gamma-Teleskopen mit großem Gesichtsfeld (z.B. HAWC South).
- Volle Nutzung des wissenschaftlichen Potenzials der Gravitationswellenastronomie.

Astroteilchenphysik-Theorie:

- Beibehaltung und Weiterentwicklung der experimentunabhängigen theoretischen Forschung in der Astroteilchenphysik.
- Experimentübergreifende und Multimessenger-Analysen, sowie die Unterstützung der Observatorien in Planung, Bewertung, Design, Beobachtungsprogramm und Auswertung.
- Fortführung von Arbeiten zu Modellierung astrophysikalischer Prozesse, insbesondere des nicht-thermischen Universums.

Nukleare Astrophysik:

- Terrestrische Laborexperimente mit astrophysikalischer Relevanz, z.B. mit dem kurz vor der Inbetriebnahme stehenden Beschleuniger im Dresdener Felsenkeller und dem im Aufbau befindlichen LUNA-MV-Beschleuniger im italienischen Untergrundlabor LNGS.
- Interdisziplinäre Netzwerke zur Erforschung der kernphysikalischen Aspekte von Stern- und Supernova-Physik, extremer Materieformen wie Neutronensternen und schwarzer Löcher sowie deren Akkretions- und Verschmelzungsprozessen.

Übergeordnete Themen:

- Weiterentwicklung von Infrastrukturen, Anpassung der Personalstrukturen, Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses durch gezielte Qualifikationsangebote.

4 Zentrale Fragen und Methoden der Astroteilchenphysik

Die Astroteilchenphysik kombiniert unser Wissen über die größten Strukturen des Universums mit dem über die kleinsten Bausteine der Materie und die Kräfte zwischen ihnen. Es ist ein faszinierendes Wissenschaftsgebiet, das an den Schnittstellen von Astronomie, Astrophysik, Kosmologie, Elementarteilchenphysik, Kernphysik und Informationstechnologie lebt.

Die Astroteilchenphysik hat zu Schlüsselentdeckungen geführt (z.B. Neutrinooszillationen, Gravitationswellen, erste Evidenz für eine Quelle hochenergetischer kosmischer Neutrinos, ...), die unser Verständnis der fundamentalen Gesetze der Teilchenphysik und der Kosmologie, sowie der Prozesse in unserem Universum und wie es mit dem Urknall begann, wesentlich erweitert haben. Die Astroteilchenphysik beschäftigt sich mit grundlegenden und bislang ungelösten Fragen, wie etwa der Natur der Dunklen Materie und der Objekte und Prozesse, in denen ultrahochenergetische kosmische Strahlung auf das Millionenfache der LHC-Strahlenergie beschleunigt werden. Europa und insbesondere Deutschland spielen eine führende Rolle in vielen Teilgebieten der Astroteilchenphysik und die Astroteilchenphysik-Forschungsgruppen aus Deutschland genießen weltweit höchstes Ansehen. Als führende Partner in zahlreichen Feldern der Astroteilchenphysik sind sie hervorragend positioniert, Antworten auf zentrale Fragen zu finden und moderne Methoden für das Forschungsfeld zu entwickeln.

Das Verständnis, ob eine bestimmte wissenschaftliche Frage primär zur Astroteilchenphysik oder zu einem anderen Forschungsfeld gehört, ist aufgrund ihrer Überschneidung mit verschiedenen Nachbargebieten und aus historischen (und forschungspolitischen) Gründen von Land zu Land unterschiedlich. Daher möchten wir die Forschungsschwerpunkte der deutschen Gemeinschaft der Astroteilchenphysik klären:

- Studium kosmisch relevanter Elementarteilchen jenseits der Möglichkeiten terrestrischer Teilchenbeschleuniger zum Verständnis ihrer Eigenschaften und ihrer Rolle bei astrophysikalischen und kosmologischen Prozessen;
- Astrophysik mit Boten aus dem Universum jenseits der elektromagnetischen Strahlung im Radio- bis Röntgenbereich.

Die wichtigsten Forschungsthemen sind:

- Eigenschaften der Neutrinos;
- Natur der Dunklen Materie;
- Verständnis des nicht-thermischen Universums und Ursprung der kosmischen Strahlung;
- Entwicklung des Universums.

Bei der Erforschung der Natur der Neutrinos und der Dunklen Materie liefert die Astroteilchenphysik zur beschleunigerbasierten Teilchenphysik komplementäre Informationen, die meist nur mit den Methoden der Astroteilchenphysik gewonnen werden können. Die Suche nach Axionen und axionartigen Teilchen ist nicht beschleunigerbasiert, wird aber auch im Bereich der Teilchenphysik betrieben. Die Erforschung des nicht-thermischen Universums und des Ursprungs der kosmischen Strahlung hat wichtige Verbindungen mit den Zielen der (bodengebundenen) Astrophysik in Deutschland. In beiden Fällen sind allerdings die Methoden und Instrumente spezifisch für die Astroteilchenphysik ausgelegt. Die Entwicklung des Universums zwischen Urknall, Gegenwart und Zukunft ist ein zentrales Thema von Kosmologie und Astrophysik und hat enge Anbindung an die Gravitationsphysik und – z.B. über die Dunkle Materie – an die Teilchenphysik. Auch hier liefern die Instrumente und Methoden der Astroteilchenphysik Erkenntnisse, die das Feld entscheidend voranbringen.

Die Astroteilchenphysik untersucht hochenergetische kosmische Teilchen-, Gamma- und Neutrino-Strahlung sowie Gravitationswellen als Boten aus dem Universum mit neuartigen, äußerst empfindlichen Nachweismethoden, die oft an entlegenen Standorten betrieben werden müssen. Laborexperimente vermessen die Masse der Neutrinos oder suchen nach extrem seltenen Ereignissen wie dem neutrinolosen doppelten Betazerfall oder Reaktionen von Teilchen der Dunklen Materie. Für solche Experimente müssen experimentelle Untergrundsignale, wie z.B. durch die kosmische Strahlung oder radioaktive Kontaminationen, um viele Größenordnungen unterdrückt werden.

Astroteilchenphysik-Experimente der heutigen Generation sind aus diesen und weiteren Gründen extrem anspruchsvoll. Zur Durchführung sind besondere Infrastrukturen notwendig, die gemeinsam mit internationalen Partnern betrieben werden. Zur direkten Messung der Neutrinomasse im KATRIN-Experiment etwa

wird das Tritiumlabor des KIT in Karlsruhe benötigt. Zur Suche nach Dunkler Materie und zur Erforschung der intrinsischen Eigenschaften von Neutrinos sind die Abschirmungseigenschaften (Faktor eine Million) von Untergrundlaboren, wie z.B. dem LNGS im Gran-Sasso-Massiv in Italien erforderlich. Die Beobachtung von extraterrestrischen Hochenergie-Neutrinos wird an Orten wie im antarktischen Tiefeneis bzw. in Meeren oder tiefen Seen vorangetrieben. Für eine erfolgreiche Hochenergie-Gamma-Astronomie und zur Beobachtung der kosmischen Strahlung werden streulichtarme Verhältnisse und große unbewohnte Flächen benötigt, wie sie nur an wenigen Orten weltweit – etwa in Namibia, La Palma, Chile oder Argentinien – zu finden sind.

Sowohl die experimentellen als auch die theoretischen Arbeiten in den genannten Schwerpunkten sind eng miteinander verknüpft, und die wissenschaftlichen Fragestellungen können nur im Rahmen der bestehenden engen Koordination innerhalb der Astroteilchenphysik und ihrer angrenzenden Forschungsfelder beantwortet werden. Ein Beispiel ist der *Multi-Messenger-Ansatz*, der die Messungen von hochenergetischen Photonen, Neutrinos und Atomkernen sowie von Gravitationswellen verbindet, um die höchstenergetischen Prozesse in unserem Universum verstehen zu lernen. Diese Forschung nutzt ein Portfolio aus anspruchsvollen Experimenten, modernen Methoden aus der Informationstechnologie sowie Infrastrukturen, die i.d.R. nur gemeinsam mit internationalen Partnern betrieben werden können. Die Flexibilität und Diversität der Methodik ist eine grundlegende Eigenschaft des Forschungsfeldes und ist für die wissenschaftlichen Erfolge maßgeblich.

Die Beiträge der deutschen Gruppen zu den Erfolgen der letzten Jahre wären ohne die Finanzierung durch die Verbundforschung Astroteilchenphysik des BMBF, die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Europäische Union, sowie die Helmholtz-Gemeinschaft, die Max-Planck-Gesellschaft und die Universitäten nicht möglich gewesen. Diese Erfolge haben zu einem stetigen Wachstum der nationalen und internationalen Gemeinschaft der Astroteilchenphysikerinnen und -physiker geführt. Wir sind bereit, uns weiteren Herausforderungen zu stellen und die nächsten Entdeckungsphasen in Angriff zu nehmen.

Eigenschaften von Neutrinos

Neutrinos sind neben Photonen die häufigsten Elementarteilchen im Universum. Sie sind etwa eine Milliarde Mal zahlreicher als Atomkerne oder Elektronen, extrem leicht und bilden einen kleinen Teil der Dunklen Materie. Die Neutrino-Physik ist ein dynamisches, Community-übergreifendes Forschungsfeld mit gro-

ßem Potenzial, das ein einzigartiges Fenster zur Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik bietet und mit der Entdeckung der Neutrinooszillationen (Nobelpreis 2015) dieses auch bereits geöffnet hat. Zu den wichtigsten wissenschaftlichen Fragen gehören die Bestimmung der absoluten Masse der Neutrinos, die Anordnung der Neutrinomassen, ob Neutrinos identisch mit ihren Antiteilchen sind (Majorana-Teilchen), eine mögliche CP-Verletzung im Neutrinosektor, die Präzisionsbestimmung der Mischungswinkel und die mögliche Existenz steriler Neutrinos. Die Messungen von Massenhierarchie, Oszillationsparametern und der CP-Verletzung im Neutrinosektor erfordern Experimente mit Reaktor-, Beschleuniger- sowie atmosphärischen Neutrinos.

Die Untersuchung des Betaspektrums aus dem Tritium-Zerfall ermöglicht den Zugang zur absoluten Massenskala von Neutrinos mit Sub-eV-Empfindlichkeit sowie zu sterilen Neutrinos im eV- und keV-Bereich mit hoher Empfindlichkeit. Das KATRIN-Experiment (CERN Recognised) ist weltweit einzigartig und hat gerade mit der Datennahme begonnen. Seine Empfindlichkeit kann durch ein neues Detektorsystem zum Elektronnachweis (TRISTAN) und die Entwicklung geeigneter differenzieller Methoden (z.B. Flugzeitspektroskopie) signifikant gesteigert werden, insbesondere auch für sterile keV-Neutrinos. Ein längerfristiges Ziel ist die Entwicklung einer quasi-atomaren Tritium-Quelle zur weiteren Verringerung systematischer Unsicherheiten. Die Entwicklung neuer komplementärer Techniken, wie z.B. der Zyklotronstrahlungs-Emissionsspektroskopie mit Projekt 8 und der Vermessung des Elektroneneinfangs von Ho-163 mit Kryobolometern bei ECHO, wird vorangetrieben, um den Bereich der invertierten Massenskala über die KATRIN-Sensitivität hinaus abzudecken.

Die Massenhierarchie der Neutrinos stellt eine der noch unbeantworteten fundamentalen Fragen der Neutrino-physik dar, deren Beantwortung u.a. auch von großer Bedeutung für die Untersuchung von CP-Verletzung im Neutrinosektor ist. Die Neutrino-Massenhierarchie kann mit den Methoden der Astroteilchenphysik untersucht werden, komplementär zu Experimenten an Beschleunigerstrahlen (Hyper-Kamiokande und DUNE): Mit zukünftigen dicht instrumentierten Neutrinoteleskopen (PINGU als Teil von IceCube Gen2 oder KM3NeT/ORCA, unter Auswertung der Richtungs- und Energieverteilung atmosphärischer Neutrinos) oder durch die Untersuchung der Oszillationen von Reaktorneutrinos (JUNO). Die Kombination der Messungen mit atmosphärischen und Reaktorneutrinos steigert die Empfindlichkeit synergetisch. Ein wichtiger Beitrag in diesem Feld ist die starke deutsche Beteiligung an dem CERN Recognised Experiment JUNO und an den Untersuchungen zu Oszillationen atmosphärischer Neu-

trinos, bei denen die Durchführung von mindestens einem der beiden Experimente ORCA/KM3NeT und PINGU/IceCube sehr wünschenswert ist.

Wenn Neutrinos identisch mit ihren Antiteilchen sind, dann tritt – äußerst selten – der neutrinolose doppelte Betazerfall auf. Aus der Halbwertszeit dieses Prozesses kann auf die Neutrinomasse geschlossen werden. Viele Theorien jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik sagen die Existenz dieses Zerfalls voraus und lassen sich dadurch testen. Die Entdeckung des neutrinolosen Doppelbetazerfalls hätte weitreichende Konsequenzen für unser Verständnis, warum das Universum aus Materie und nicht aus Antimaterie aufgebaut ist. Bei der Suche nach diesem sehr seltenen Zerfall hat das von Gruppen aus Deutschland initiierte GERDA-Experiment (Ge-76) als erstes Experiment weltweit eine Sensitivität für die Halbwertszeit jenseits von 10^{26} Jahren erreicht. Als Zusammenschluss der GERDA-Kollaboration, der US-amerikanischen MAJORANA-Kollaboration und weiterer Gruppen wurde die LEGEND-Kollaboration gegründet. In einer ersten Phase wird die GERDA-Infrastruktur am LNGS für das LEGEND-200-Experiment umgebaut; der Beginn der Datennahme ist für das Jahr 2021 geplant. Parallel hierzu laufen die Vorarbeiten zu LEGEND-1000 in intensiver Zusammenarbeit mit Partnern aus den USA, wo das DOE einen down-select-Prozess zur Auswahl des Doppelbeta-Experiments der nächsten Generation initiiert hat. Des Weiteren ist eine deutsche Gruppe am geplanten nEXO-Experiment beteiligt, das im Isotop Xe-136 angereichertes Xenon verwendet. Die DARWIN-Kollaboration mit starker deutscher Beteiligung beabsichtigt, mit natürlichem Xenon neben der Suche nach WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) auch nach dem neutrinolosen Doppelbetazerfall von Xe-136 zu suchen.

Die kohärente, elastische Streuung von Neutrinos an Atomkernen ist ein im Rahmen des Standardmodells erwarteter Prozess, der sich aber lange der experimentellen Beobachtung entzogen hat und erst vor kurzem das erste Mal nachgewiesen wurde. Er ist interessant, weil er zum einen die gleiche experimentelle Signatur erzeugt wie die Streuung von Teilchen der Dunklen Materie an Atomkernen und somit einen irreduziblen Untergrund für entsprechende Suchen darstellt. Zum anderen hat der Prozess astrophysikalische Relevanz und kann zur Suche nach neuer Physik verwendet werden. Er wird u.a. mit dem von deutschen Gruppen betriebenen CONUS-Experiment untersucht.

Natur der Dunklen Materie

Die bekannte Materie, die aus Atomen aufgebaut ist, macht nur etwa ein Sechstel der Materie im Universum aus. Der überwiegende Anteil ist eine uns noch

unbekannte Materieform, die wir Dunkle Materie nennen. Diese Dunkle Materie bildet "Halos" um Galaxien wie die Milchstraße. In der Astroteilchenphysik wird versucht, Dunkle-Materie-Teilchen direkt mit technologisch neuartigen Detektoren nachzuweisen, die sich in Untergrundlaboratorien unter mehr als einem Kilometer Abschirmung aus Felsgestein befinden. Derzeit führen die Experimente CRESST-III (niedrige WIMP-Massen) und XENON1T (mittlere und große Massen) mit deutscher Beteiligung die direkte WIMP-Suche an. Mit der Erweiterung von CRESST-III auf 100 Detektoren und dem Umbau von XENON1T auf XENONnT wird diese Suche wesentlich sensitiver. In der kommenden Förderperiode sollen die Arbeiten am DARWIN-Projekt beginnen, für das deutsche Gruppen im XENON-Programm führende Expertise gewonnen und entscheidende Vorarbeiten geleistet haben. Die deutlich erhöhte Empfindlichkeit von DARWIN für WIMPs soll darüber hinaus durch ein breites Programm zur Neutrinophysik (neutrinoloser Doppelbetazerfall, Messung von solaren und Supernova-Neutrinos) ergänzt werden.

Mit Neutrino- oder Gamma-Teleskopen wie IceCube oder CTA oder mit dem AMS II-Experiment auf der ISS wird komplementär zur direkten Suche indirekt nach Teilchen gesucht, die bei der Paarvernichtung oder dem Zerfall von Teilchen der Dunklen Materie entstehen. Diese beiden Methoden sind auch komplementär zur Suche nach Dunkler Materie am LHC. Bei einer Entdeckung von Kandidatenteilchen am LHC müssten weitere Messungen der Astroteilchenphysik klären, ob sie hinreichend langlebig sind und im frühen Universum in hinreichender Anzahl gebildet werden konnten.

Ein weiterer Kandidat für die Dunkle Materie sind Axionen. Die Suche wird sich hier auf das Solar-Axion-Experiment IAXO (erste Phase Baby-IAXO) und das Experiment MADMAX zur Suche nach Axionen der Dunklen Materie konzentrieren, die beide bei DESY angesiedelt werden sollen.

Weitere Möglichkeiten für Dunkle Materie, wie z.B. primordiale schwarze Löcher, Wolken aus ultraleichten Bosonen, aber auch andere gravitativ wechselwirkende Dunkle Materie, können mit Hilfe von zukünftigen Gravitationswellendetektoren wie dem Einstein-Teleskop untersucht werden.

Verständnis des nicht-thermischen Universums und Ursprung der kosmischen Strahlung

Aus dem Universum treffen Teilchen mit bis zu millionenfach höherer Energie auf die Erde, als sie ein irdischer Beschleuniger wie der LHC erzeugen kann. Diese kosmischen Boten treten in Form von geladener kosmischer Strahlung, hochenergetischer Gammastrahlung und Neutrinos auf. Sie demonstrieren – wie auch Röntgen- und Gammastrahlung jenseits der Strahlung

heißester kosmischer Gase im keV-Bereich sowie Radiostrahlung mit eindeutig nicht-thermischen Spektren – die Omnipräsenz und überragende Bedeutung hochenergetischer Prozesse in der Astrophysik. Kern- und Hochenergie-Physik mit relativistischen Teilchen ist Grundlage der Prozesse in kosmischen Extremen wie Sternexplosionen, Sternkollisionen, Neutronensternen, und Materie-Energie-Umwandlungen am Rand Schwarzer Löcher mit der Bildung hochenergetischer Jets. Die Gesamtheit solcher Prozesse wird als *nicht-thermisches Universum* bezeichnet. Wir wollen verstehen, wo diese Teilchen herkommen, wie kosmische Beschleuniger bei den höchsten Energien funktionieren und welche astrophysikalische Rolle nicht-thermische Prozesse spielen. Durch die gleichzeitige Beobachtung von mehr als einem Botentyp aus derselben Quelle oder demselben Quellentyp potenzieren wir unser Verständnis.

Mit dem Pierre-Auger-Observatorium (Auger) werden die höchstenergetischen kosmischen Teilchen gemessen, ihre Zusammensetzung bestimmt und ihre Quellen gesucht; kürzlich wurden erste Hinweise auf Querkandidaten gefunden. Mit Auger konnte 2017 erstmals eine Anisotropie der höchstenergetischen kosmischen Strahlung nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis wurde von *physics world* als einer der *Top 10 breakthroughs of 2017* gerankt. Mit dem Neutrinoobservatorium IceCube wurde im Jahre 2013 entdeckt, dass auch sehr hochenergetische Neutrinos aus dem Universum auf die Erde treffen. Ein weiterer Durchbruch gelang 2017 mit der Assoziierung eines hochenergetischen Neutrino-Ereignisses zu einer astrophysikalischen Quelle (einem Blazar) durch Multimessenger-Beobachtungen von IceCube, MAGIC und dem Fermi-Satelliten und der nachfolgenden Identifikation mehrerer weiterer Neutrinoereignisse aus der gleichen Richtung in den archivierten IceCube-Daten. Mit Cherenkov-Teleskopen wie H.E.S.S. und MAGIC werden hochenergetische Gammaquanten gemessen; deutsche Gruppen leisten darüber hinaus substantielle Beiträge zum FACT-Teleskop und zum Wasser-Cherenkov-Detektor HAWC. H.E.S.S. und MAGIC haben zusammen mit dem US-amerikanischen VERITAS-Projekt die Hochenergie-Gammastrahlungs-Astronomie etabliert. Mit dem Nachfolgeprojekt, dem Cherenkov Telescope Array CTA, wird diese neue astronomische Disziplin mit den Methoden der Astroteilchenphysik Routine werden.

Für kosmische Strahlung ist AugerPrime als das Upgrade des Pierre-Auger-Observatoriums das weltweit wichtigste Projekt. Darüber hinaus ist als Zukunftsprojekt ein globales Observatorium zur Messung der höchstenergetischsten Teilchen des Universums angedacht. Für hochenergetische Gammastrahlen sind Aufbau und Betrieb des Cherenkov Telescope Array (CTA) das zentrale Ziel. Um die gerade für die Multimessenger-Astronomie und für den Erhalt der Expertise in Betrieb und

Datenanalyse essenzielle Kontinuität zu gewährleisten, sollen H.E.S.S. und MAGIC bis zum Start von CTA weiterbetrieben werden. Für Hochenergie-Neutrinos sind die wichtigsten Projekte auf globaler Ebene IceCube mit seinen zukünftigen Erweiterungen IceCube-Gen2, das Mittelmeer-Experiment KM3NeT und GVD im Baikalsee in Russland. Die deutsche Community engagiert sich vor allem im Bereich IceCube-Gen2, aber auch in KM3NeT. Alle diese Experimente haben außerdem ein einzigartiges Programm zur Teilchenphysik, das die Untersuchung teilchenphysikalischer Wechselwirkungsmodelle jenseits von LHC wie auch die Suche nach Urknallrelikten und indirekten Signalen der Dunklen Materie beinhaltet. Auger, CTA, IceCube, KM3NeT und MAGIC sind als CERN Recognised Experiments anerkannt.

Entwicklung des Universums

Obwohl viele Aspekte der Entwicklung des Universums zwischen Urknall und Gegenwart (wie z.B. der kosmische Mikrowellen-Hintergrund, die Strukturbildung und die Expansion des Weltalls) im Rahmen des Standardmodells der Kosmologie zumindest prinzipiell verstanden sind, bleiben Fragen offen, deren Beantwortung zu neuen Erkenntnissen und sogar Paradigmenwechseln führen kann. Dazu gehören unter anderem die Häufigkeit, Massenverteilung, Genese und Entwicklung der schwarzen Löcher sowie die Synthese der schweren Atomkerne.

Schon die ersten Messungen von Gravitationswellen mit LIGO (Nobelpreis 2017) und Virgo haben das Potenzial dieses neuen Beobachtungsfensters für astrophysikalische Erkenntnisse gezeigt. So konnten mehrfach Prozesse beobachtet werden, bei denen zwei schwarze Löcher zu einem schwereren schwarzen Loch verschmolzen sind. Aus den Signalen konnten u.a. die Entfernung dieser Vorgänge und die Massen der schwarzen Löcher im Anfangs- und Endzustand ermittelt werden. Die breite Relevanz der Gravitationswellenforschung zeigt sich auch daran, dass LIGO, Virgo und das weltraumbasierte LISA-Projekt als CERN Recognised Experiments anerkannt sind.

2017 wurde erstmals ein Gravitationswellensignal von der Verschmelzung von zwei Neutronensternen beobachtet und durch Multi-Messenger-Beobachtungen mit elektromagnetischer Emission vom Radio- bis hin zum Gamma-Bereich korreliert. Auch dieses Ergebnis wurde von *physics world* als einer der *Top 10 breakthroughs of 2017* gerankt. Es stellt sich heraus, dass bei diesem Ereignis auch kernphysikalische Prozesse abgelaufen sind, die im Mittelpunkt des Interesses der nuklearen Astrophysik stehen – einem weiteren Kernbereich der Astroteilchenphysik. Diese Prozesse sind eng verknüpft

mit der chemischen Entwicklung von Sternen und Galaxien und beinhalten Aspekte der Kern-, Neutrino- und Atomphysik sowie der Astronomie. Kürzlich konnte z.B. mit Hilfe hochaufgelöster Spektroskopie gezeigt werden, dass ein einziger Verschmelzungsprozess zweier Neutronensterne die Häufigkeit schwerer Atomkerne in allen alten Sternen der Zwerggalaxie Reticulum II signifikant angereichert hat.

Mit ihren jüngsten Ergebnissen haben die bodengebundenen Gravitationswellen-Interferometer dieses weitere Beobachtungsfenster zum Universum geöffnet. Schon für die gerade angelaufene neue Beobachtungsmission O3 wurden die Empfindlichkeit und somit die erwartete Rate von Beobachtungen erneut massiv gesteigert. Die Instrumente der nächsten Generation (Einstein-Teleskop und LISA) werden unsere kosmologischen Modelle noch präziser testen, die Verteilung von Materie und Dunkler Materie kartieren und empfindlich auf Effekte neuer Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik und jenseits der Standard-Kosmologie sein. Gravitationswellen können Informationen aus der frühen Entwicklung des Universums liefern – also aus der Epoche vor dem kosmischen Mikrowellen-Hintergrund, aus der Inflationsphase und zu möglichen frühen Phasenübergängen erster Ordnung. Ein wachsender Anteil der deutschen Astroteilchenphysik-Gemeinschaft ist entschlossen, sich nach Möglichkeit intensiv – auch im Sinne der Multi-Messenger-Astronomie – an der Entwicklung dieser Experimente der dritten Generation zu beteiligen und an deren wissenschaftlichem Ertrag zu partizipieren.

Übergreifende Themen

Alle oben genannten Projekte werden wichtige, manchmal sogar entscheidende Impulse für die Weiterentwicklung der fundamentalen theoretischen Grundlagen der Physik liefern. Die physikalische Interpretation der experimentellen Daten basiert auf einem immer tiefer werdenden theoretischen Verständnis und erfordert an vielen Stellen die detaillierte Modellierung astrophysikalischer Prozesse unter Einbeziehung eines breiten Spektrums theoretischer Methoden. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Experiment und **Theorie** ist daher Voraussetzung für die Weiterentwicklung des Forschungsgebietes. Die Theorie stellt auch die Verbindungen zwischen den verschiedenen Themen her und identifiziert frühzeitig Möglichkeiten für zukünftige Experimente.

Beispiellose Datenraten und -mengen der nächsten Experiment-Generation erfordern die Nutzung modernster Methoden aus den Bereichen **Computing- und Datenmodelle, Algorithmik und Software**, um adäquate Computerkonzepte und innovative Prozesse

für Datenzugriff, -verarbeitung, -rekonstruktion und -analyse zu entwickeln. Wichtige Stichworte sind hier Deep Learning und offener Datenzugriff. Das gesamte Forschungsfeld wird in eine neue Ära des Forschungsdatenmanagements eintreten und eine nachhaltige und interdisziplinäre offene Wissenschaftskultur entwickeln, wie sie auch für eine optimal effiziente Multimessenger-Forschung unerlässlich ist. Die Astroteilchenphysik-Community beteiligt sich proaktiv an entsprechenden nationalen (NFDI, ErUM-Data) und internationalen (EOSC) Prozessen.

Viele der diskutierten Themen und Projekte erfordern auch erhebliche **technologische Entwicklungen** in den Bereichen Detektoren, Auslese, Kalibration und Synchronisation. Beispiele aus dem Detektorbereich sind kostengünstige Einzelphotonen-Detektoren mit hoher Granularität oder die Herstellung hochreiner Materialien hinsichtlich radioaktiver Verunreinigungen. Aufgrund der sehr langen Zeiträume vieler der derzeit vorgeschlagenen Projekte wird es unerlässlich sein, das technologische Know-how in der Gemeinschaft zu erhalten und weiterzuentwickeln.

Eine herausragende europäische Forschungslandschaft in der Astroteilchenphysik ist die Grundlage für den wissenschaftlichen Fortschritt und die Attraktivität des Feldes. Um die Kontinuität und Entwicklung der unverzichtbaren Expertise in der Forschung und der kollaborativen Forschungsinfrastruktur (Computer, Software und Detektoren) zu gewährleisten, müssen die Personalstrukturen an die langfristige Dauer der Experimente angepasst werden, die die Laufzeit der Bewilligungszeiträume weit übersteigt. **Junge Wissenschaftler** sind oft die Quelle neuer Ideen und verfügen in vielen Bereichen über Spitzenkompetenz. Sie sind darauf angewiesen, dass ihre wissenschaftlichen und technischen Beiträge hohe Sichtbarkeit erhalten, und sie brauchen Förderung und realistische Karriereperspektiven.

Im Zuge von **Outreach und Wissenschaftskommunikation** teilen Wissenschaftler ihre Begeisterung für die Forschung und deren Ergebnisse mit der weltweiten Öffentlichkeit, um diese für den gesellschaftlichen Nutzen der Grundlagenforschung zu sensibilisieren und um ihre Unterstützung zu werben. Outreach-Programme schaffen auch Möglichkeiten für junge Menschen, Vorbilder zu treffen und Einblicke in den Forschungsprozess zu gewinnen. Der offene Online-Zugang zu Daten oder Masterclass-Programmen ermöglicht die Beteiligung der Öffentlichkeit an der wissenschaftlichen Forschung.

5 Detaillierte Empfehlungen

Neutrinoeigenschaften

Wie groß ist die Neutrinomasse? Das weltweit führende Experiment zur direkten Neutrinomassen-Messung ist das KATRIN-Experiment am KIT unter deutscher Führung. KATRIN vermisst das Betaspektrum des Tritium-Zerfalls und hat 2019 mit der Datennahme begonnen. KATRIN wird während der kommenden Förderperiode die entscheidenden Daten nehmen. Parallel läuft die Entwicklung neuer Methoden zur Steigerung der Empfindlichkeit und des Physikpotenzials von KATRIN.

Zudem werden in Deutschland im Rahmen weiterer Projekte innovative und zur Messung des Tritium-Betaspektrums komplementäre Technologien entwickelt, z.B. mit dem unter deutscher Leitung stehenden ECHO-Experiment, um die Empfindlichkeit von Experimenten auf international führendem Niveau in Zukunft nochmals signifikant steigern zu können. Das langfristige Ziel ist eine Sensitivität, die es erlaubt, auch solche Modelle zu testen, denen zufolge die Neutrinomassen sogar noch unterhalb der Empfindlichkeitsgrenzen der jetzt anlaufenden Experimente liegen könnten.

Sind Neutrinos identisch mit ihren Antiteilchen? Komplementär zur direkten Neutrinomassen-Messung und verbunden mit der Überprüfung, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind, ist die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall. Die Expertise der Gruppen aus Deutschland ist im GERDA-Experiment gebündelt und die Gruppen haben sich eine weltweite Sichtbarkeit und Anerkennung in diesem kompetitiven Feld erarbeitet. Die Vorbereitung des Nachfolgeexperiments LEGEND-200 schreitet entsprechend der Planung voran und der Beginn der Datennahme ist für 2021 geplant. Vorarbeiten für einen neuen Detektor LEGEND-1000 haben begonnen. Die DARWIN-Kollaboration untersucht derzeit die Empfindlichkeit des geplanten multi-purpose-Experiments bezüglich des neutrinolosen doppelten Betazerfalls von Xe-136.

Ist die Massenhierarchie der Neutrinos so wie bei den anderen Elementarteilchen und gibt es weitere, sterile Neutrinos? In der letzten Dekade wurde das Phänomen der Neutrinooszillationen in mehreren Experimenten weltweit eindrucksvoll bestätigt. Oszillationsparameter konnten mit immer höherer Präzision vermessen werden, insbesondere auch der Mischungswinkel θ_{13} , dessen Größe für die Planung künftiger Experimente von entscheidender Wichtigkeit ist. Beiträge deutscher Gruppen wurden hier besonders in den Experimenten Borexino, Double Chooz, OPERA und T2K sichtbar. Die von deutschen Gruppen vorangetriebenen Entwicklungen der Technologie ultrasensitiver Flüssigszintillatoren bei niedrigsten radioaktiven Verunreinigungen in Bo-

rexino und Double-Chooz wird in dem neuen Großexperiment JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) in China Verwendung finden, das im Jahre 2021 mit der Datennahme beginnen soll. Mit JUNO wird die Massenhierarchie mit Hilfe von Reaktor-neutrinos und damit komplementär zu Beschleunigerexperimenten und zu atmosphärischen Neutrinos untersucht. JUNO lässt darüber hinaus weitere Beiträge zur Erforschung astrophysikalischer Neutrinoquellen erwarten, wie etwa eine erste Messung der solaren CNO-Neutrinos oder als Observatorien für Supernova-Neutrinos. Dieses Potenzial kann durch Entwicklungsarbeiten zu richtungsauflösenden Szintillatoren und ultraschnellen Lichtsensoren für zukünftige Neutrinodetektoren noch weiter gesteigert werden.

Ein anderer, vielversprechender Ansatz zur Messung der Neutrino-Massenhierarchie ist die Untersuchung von Oszillationen atmosphärischer Neutrinos auf ihrem Weg durch die Erde mit dicht instrumentierten Neutrinoteleskopen. Sowohl IceCube wie auch KM3NeT haben *Letters of Intent* für entsprechende Detektoren (PINGU bzw. ORCA) vorgelegt, wobei deutsche Gruppen in beiden Fällen maßgebliche Beiträge geleistet haben. Insbesondere ORCA hat ein hohes Potenzial, da es deutlich vor den beschleunigerbasierten Experimenten Hyper-Kamiokande und DUNE in Betrieb gehen kann. Auch der kürzlich genehmigte Ausbau von IceCube (Gen2 Phase 1) eröffnet die Möglichkeit neuer Erkenntnisse in der Neutrinophysik, insbesondere durch die Messung von Tau-Neutrinos, sowie durch Kombination mit den JUNO-Daten auch in der Neutrino-Massenhierarchie.

Eine Steigerung der Empfindlichkeit von KATRIN wird die Suche nach sterilen Neutrinos im keV-Massenbereich ermöglichen. Weiterhin wird deutsche Szintillator-Technologie im Experiment STEREO am Forschungsreaktor ILL in Frankreich verwendet, um bei sehr kurzen Baselines nach Oszillationen steriler Neutrinos zu suchen.

Was lernen wir von kohärenter Neutrinostreuung? Die kohärente, elastische Streuung von Neutrinos an Atomkernen ist sowohl als Untergrundprozess für die direkte WIMP-Suche als auch für Teilchen- und Astrophysik relevant. Sie wird in Deutschland mit dem CO-NUS-Experiment untersucht.

Eine substantielle deutsche Beteiligung am kommenden Doppelbetazerfall-Experiment LEGEND und starke Anstrengungen zur Erhöhung der direkten Neutrino-Massenempfindlichkeit von Laborexperimenten werden empfohlen. Das KAT

empfiehlt weiterhin, KATRIN und LEGEND die notwendigen Mittel zur Verfügung zu stellen, um ihr Empfindlichkeitspotenzial vollständig auszuschöpfen sowie die Weiterentwicklung von KATRIN und LEGEND zu unterstützen. F&E-Arbeiten bezüglich der Empfindlichkeit von DARWIN auf Neutrinoeigenschaften sollen gefördert werden. Das KAT empfiehlt die Beteiligung an JUNO und an mindestens einem der Experimente (ORCA, PINGU) zur Bestimmung der Neutrino-Massenhierarchie mit atmosphärischen Neutrinos, falls dieses deutlich eher realisiert werden kann als die beschleunigerbasierten Neutrinoexperimente Hyper-Kamiokande und DUNE. Das KAT empfiehlt, die Vorbereitung und den Aufbau von IceCube-Gen2 Phase 1 zu unterstützen. Das KAT unterstützt ebenfalls die Bestrebungen zur Suche nach sterilen Neutrinos (KATRIN, STEREO) sowie die Fortentwicklung neuartiger Technologien zur Neutrino-Massenbestimmung, z.B. Kryobolometer bei ECHO, sowie atomare oder quasi-atomare Tritiumquellen bei Project 8 und KATRIN. Die Ausschöpfung des Physikpotenzials von CONUS zur Untersuchung kohärenter Neutrinostreuung sowie die Weiterentwicklung zu CONUS100 werden befürwortet.

Dunkle Materie

Was ist die Dunkle Materie? Da die Masse der Teilchen Dunkler Materie unbekannt ist, empfiehlt das KAT die folgenden komplementären Wege, die es der deutschen Astroteilchenphysik-Gemeinde erlauben wird, weiterhin führend bei der Suche und der erhofften Entdeckung der Dunklen Materie mitzuwirken:

Bei der direkten Suche im Bereich sehr leichter WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) besitzt das CRESST-Experiment mit einer speziellen, in Deutschland entwickelten Kryobolometer-Technologie die beste Empfindlichkeit. Im Bereich mittelschwerer und schwerer WIMPs hat XENON1T die weltweit beste Empfindlichkeit, die ab Winter 2019/2020 mit dem XENONnT-Detektor um eine weitere Größenordnung gesteigert werden wird. Hierzu steuern deutsche Gruppen u.a. bei der entscheidenden weiteren Reduktion von Störsignalen wesentliche innovative Technologien bei, die für das DARWIN-Projekt eine entscheidende Rolle spielen werden. Die deutlich erhöhte Empfindlichkeit auf WIMPs wird bei DARWIN ergänzt durch ein breites Programm zur Neutrinophysik.

Die weiter unten genannten Experimente zum Hochenergie-Universum (CTA und IceCube) verfolgen einen anderen Zugang: Sie suchen nach sekundären Teilchen

aus der Paarvernichtung oder dem Zerfall von Teilchen der Dunklen Materie (indirekte Suche). Sie sind besonders auf Dunkle-Materie-Teilchen mit hohen Massen empfindlich und damit im Phasenraum komplementär zu den Experimenten der direkten Suche.

Dunkle Materie wurde bisher nicht entdeckt und die WIMP-Hypothese auch nicht durch Entdeckung neuer Physik z.B. am LHC gesichert. Es ist daher notwendig, die Suche auch auf Teilchen jenseits von WIMPs auszuweiten. Die vielversprechendsten Alternativen sind Axionen und axionartige Teilchen sowie sterile keV-Neutrinos. Die Suche nach solchen Teilchen kann nur zum Teil mit den oben genannten Detektoren durchgeführt werden und erfordert neue, spezialisierte Experimente. Andere Alternativen, wie z.B. primordiale schwarze Löcher, können mit Gravitationswellen untersucht werden.

Das KAT empfiehlt, sowohl CRESST wie auch XENONnT zu unterstützen, so dass sie ihr Potenzial voll ausschöpfen können. Darüber hinaus sollten für den Upgrade von CRESST-III und für DARWIN als erstklassig positionierte Projekte mit führender deutscher Beteiligung die notwendigen Mittel bereitgestellt werden. Weiterhin empfiehlt das KAT in Koordination mit den Axion-Gruppen der Teilchenphysik die Suche nach Axionen und axionartigen Teilchen zu intensivieren, insbesondere mit den Experimenten MADMAX (am DESY angesiedelt) und IAXO.

Nicht-Thermisches Universum und Ursprung der kosmischen Strahlung

Wo befinden sich die Teilchenbeschleuniger im Universum und wie funktionieren sie, welche Rolle spielt die kosmische Strahlung in der Entwicklung unserer Milchstraße und des Universums? Zur Untersuchung des Hochenergie-Universums werden alle drei Arten von Botenteilchen, d.h. geladene kosmische Strahlung, Gamma-Strahlung und Neutrinos, sowie die Gravitationswellen genutzt.

Die Aktivitäten der Gamma-Astronomie konzentrieren sich auf den Bau und die Inbetriebnahme von CTA, das als Großgerät des BMBF betrieben werden wird. Die Tatsache, dass die derzeit laufenden Gammastrahlungs-Teleskope – H.E.S.S. und MAGIC – an vielen Multimessenger-Beobachtungen und insbesondere auch an Multimessenger-Entdeckungen der vergangenen Jahre beteiligt waren, demonstriert das Potenzial der Gamma-Astronomie auch in diesem Bereich.

Im Rahmen der Erforschung der kosmischen Strahlung ist das Pierre-Auger-Observatorium das führende Expe-

riment bei den höchsten Energien, mit Deutschland als stärkster Einzelnation. Auger hat 2017 das erste Mal eine Anisotropie der höchstenergetischen kosmischen Strahlung gemessen, die eng mit der Frage nach den kosmischen Teilchenbeschleunigern verknüpft ist. Zudem ist Auger auch auf höchstenergetische Neutrinos empfindlich und deshalb ein wichtiges Element der Multimessenger-Beobachtungen. Der Ausbau zu AugerPrime schreitet voran und wird bis 2021 abgeschlossen sein. Dadurch werden die Voraussetzungen geschaffen, die Frage nach dem Ursprung der höchstenergetischen Teilchen zu klären, ihre Quellen durch die Methode der Protonenastronomie zu identifizieren, ihre chemische Zusammensetzung zu klären sowie spezifische teilchenphysikalische Fragestellungen bei mehr als zwanzigfacher LHC Schwerpunktenenergie zu untersuchen. Weiterhin notwendig sind F&E-Arbeiten für zukünftige Projekte und Methoden (insbesondere die Weiterentwicklung der Radio-Detektionstechnik) in diesem für die Multi-Messenger-Astronomie wichtigen Teilforschungsfeld.

IceCube ist nach der Entdeckung hochenergetischer kosmischer Neutrinos nun zum ersten Mal gelungen, Evidenz für eine Quelle der hochenergetischen kosmischen Neutrinos zu finden. Die Ergebnisse von IceCube motivieren ein deutlich größeres Neutrinoobservatorium, IceCube-Gen2 am Südpol, welches eine Vielzahl weiterer kosmischer Quellen nachweisen und untersuchen soll. Über dieses Projekt wird in den USA und in Europa voraussichtlich vor 2024 entschieden werden. Ein wesentlicher erster Schritt ist die bereits erfolgte Bewilligung von IceCube-Gen2 Phase 1, was mit wesentlicher Beteiligung aus Deutschland bis 2023 implementiert werden wird. Parallel wird im Mittelmeer das Neutrinoobservatorium KM3NeT vorangetrieben. IceCube und KM3NeT arbeiten im Rahmen des Global Neutrino Network bei technologischen Entwicklungen und wissenschaftlichen Fragestellungen eng zusammen.

Das IceTop Array auf dem Eis über dem IceCube(-Gen2)-Detektor ermöglicht die Untersuchung der kosmischen Strahlung beim Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen komplementär zum Pierre-Auger-Observatorium und wird unter deutscher Leitung ebenfalls bis 2023 ein Upgrade erfahren.

Das KAT empfiehlt den Aufbau des Hochenergie-Gamma-Observatoriums CTA sowie die Weiterführung der Aktivitäten bei H.E.S.S. und MAGIC als Vorbereitung auf den wissenschaftlichen Betrieb von CTA. Weiterhin befürwortet das KAT die Fertigstellung und Ausnutzung der vollen Empfindlichkeit von AugerPrime. Das KAT empfiehlt, die deutsche Beteiligung an Phase 1 von IceCube-Gen2 sowie die Vorbereitungen für IceCube-Gen2 aufgrund des hohen wissenschaftli-

chen Potenzials, der vorhandenen Expertise und des breiten deutschen Engagements in IceCube prioritär und nachhaltig zu unterstützen. Das KAT empfiehlt die Förderung innovativer Arbeiten zur Erweiterung des Potenzials des Nachweises von Neutrinos und kosmischer Strahlung, wie synergetische F&E Aktivitäten in Rahmen der Radio-Technologie. Das KAT empfiehlt perspektivisch, langfristig eine volle Himmelsabdeckung der Neutrinoastronomie durch IceCube und KM3NeT anzustreben. Als unabdingbar sieht das KAT eine führende Rolle in der Multimessenger-Astronomie mit Gammastrahlung im Bereich jenseits 10 keV bis zu PeV-Energien, kosmischer Strahlung und Neutrinos unter Einbeziehung von Gravitationswellen an.

Gravitationswellen

Zum Verständnis der Entwicklung unseres Universums haben Gravitationswellen bereits ihr Potenzial als neues Beobachtungsfenster gezeigt. Deutschland hat innerhalb der Astroteilchenphysik eine sehr aktive Gravitationswellen-Community um das MPI in Hannover mit dem Großgerät GEO600 und der Beteiligung an internationalen Gravitationswellendetektoren mit führenden Technologie-Beiträgen. Die deutschen Universitätsgruppen auf diesem Gebiet haben sich bisher eher auf Theorie und Datenanalyse spezialisiert. Durch die prägende Technologieentwicklung der deutschen Gruppen konnte die Empfindlichkeit von Gravitationswellendetektoren soweit gesteigert werden, dass Gravitationswellen kürzlich genau 100 Jahre nach deren Vorhersage entdeckt worden sind. Mit ihren jüngsten Ergebnissen haben die bodengebundenen Gravitationswellen-Interferometer ein weiteres Beobachtungsfenster zum Universum eröffnet. Die nächste Generation von Instrumenten wird die Empfindlichkeit von Gravitationswellenbeobachtungen nochmals massiv steigern und damit zu einzigartigen Erkenntnissen in Astrophysik, Kosmologie, Gravitationsforschung und auch Teilchenphysik führen. Ein wachsender Anteil der deutsche Astroteilchenphysik-Gemeinschaft – gleichermaßen in Universitäten und Forschungszentren – hat hohes Interesse, an dieser Entwicklung zu partizipieren und untersucht Möglichkeiten, sich an der Vorbereitung der nächsten Detektorgeneration, insbesondere am Europäischen Großprojekt Einstein-Teleskop, signifikant zu beteiligen.

Das KAT empfiehlt, Entwicklungen zu Themen aus Wissenschaft, Infrastruktur und Technologie im Zusammenhang mit den Gravitationswellenobservatorien der nächsten Generation strategisch zu fördern und dieses Forschungsfeld den Universi-

täten zugänglich zu machen. Das KAT bittet deshalb um die Aufnahme der Gravitationswellenforschung in die kommende Ausschreibung von ErUM-Pro. Weiterhin empfehlen wir, eine zukünftige intensivere Einbeziehung der Gravitationswellenphysik in der Multimessenger-Astronomie zu unterstützen.

Theorie der Astroteilchenphysik

Das KAT erachtet eine starke theoretische Astroteilchenphysik als unverzichtbar für die Maximierung des wissenschaftlichen Ertrags der deutschen Investitionen in Forschungsinfrastrukturen und Experimentprogramme. Eine aktive und lebendige Theorieszene ist richtungweisend für die Experimente und sehr wichtig, um die Hochenergiesignale in kosmischer Strahlung, hochenergetischer Gamma-Strahlung und Neutrinos zu interpretieren. Ebenso notwendig ist die stark mit der Teilchen- und Kernphysik verknüpfte Theorie im Bereich von Dunkler Materie und Neutrinos. Theoriegruppen verbinden die Ergebnisse der Astroteilchenphysik auf verschiedene Weise mit denen der Teilchenphysik und Kosmologie, wodurch alle experimentellen Daten gemeinsam interpretiert werden. Wichtige thematische Querverbindungen zur LHC-Physik und anderen Teilchenphysikexperimenten, Kosmologie und Astrophysik tragen so zu einem optimalen Erkenntnisgewinn bei. Die Einbeziehung all dieser theoretischen Querverbindungen ist auch strategisch bedeutsam, um experimentelle Suchen zu optimieren und um die Erfolgsaussichten von neuen Projekten der Astroteilchenphysik bestmöglich einschätzen zu können, mit und ohne direkten Experimentbezug. Ohne experimentunabhängige theoretische Forschung hätten die wissenschaftlichen Erfolge der letzten Dekade nicht erreicht werden können.

Das KAT empfiehlt die Förderung der experimentnahen theoretischen Arbeiten. Das KAT erachtet die experimentübergreifenden und Multimessenger-Analysen, sowie die Unterstützung der Experimente in Planung, Bewertung, Design, Beobachtungsprogramm und Auswertung als sehr wichtig. Weiterhin unterstützt das KAT die Fortführung und Weiterentwicklung experimentunabhängiger theoretischer Arbeiten in der Astroteilchenphysik.

Nukleare Astrophysik

Nukleare Astrophysik beinhaltet die Aspekte von kernphysikalischer Materiebeschreibung, astronomische

Messmethoden kosmischer Nuklide von weltraumbasierten Gammastrahlen-Teleskopen bis zu Meteoritenstaub-Spektroskopie und Tiefseepollen-Analysen, sowie Experimente zu Kernreaktionen unter nachempfundenen kosmischen Bedingungen. Gerade mit dem kurz vor Inbetriebnahme stehenden Beschleuniger im Felsenkeller in Dresden und dem im Aufbau befindlichen LUNA-MV Beschleuniger im italienischen Untergrundlabor LNGS bieten sich hierzu neue Möglichkeiten mit sichtbarer deutscher Beteiligung.

Das KAT empfiehlt die Unterstützung terrestrischer Laborexperimente mit astrophysikalischer Relevanz wie z.B. die Untersuchung der für die Sonnenneutrinos bestimmenden Kernreaktionen im Labor, d.h. jenseits der rein kernphysikalischen und über die Hadronen- und Kernphysik geförderter Fragen. Weiterhin unterstützt das KAT die der kosmischen Kern- und Teilchenphysik dienenden Satelliten-Astronomie-Projekte im Energiebereich MeV-GeV sowie interdisziplinäre Netzwerke zur Erforschung der kernphysikalischen Aspekte von Stern- und Supernova-Physik, extremer Materieformen wie Neutronensternen und schwarzer Löcher sowie deren Akkretions- und Verschmelzungsprozessen.

Technologische Fortschritte

Viele der diskutierten Themen und Projekte erfordern erhebliche technologische Entwicklungen in den Bereichen Detektorentwicklung, Computing und Software. Beispiele für detektornahen Entwicklungen sind kostengünstige Einzelphotonendetektoren mit hoher Granularität oder hochreine Materialien hinsichtlich Radioaktivität. Viele der technologischen Entwicklung in der Astroteilchenphysik finden Anwendung in anderen Wissenschaftsfeldern, in der Medizin und in der Industrie.

Beispiellose Datenraten und -volumen werden die Nutzung modernster Informatikmethoden zur Entwicklung geeigneter Computerkonzepte und innovativer Algorithmen für die Datenverarbeitung, -rekonstruktion und -analyse erfordern. Die Multi-Messenger-Astroteilchenphysik mit ihrer Notwendigkeit, Daten aus unabhängigen, global verteilten Observatorien zu kombinieren, erfordert hierbei neue Konzepte und besondere Maßnahmen im Datenmanagement und in den Bereichen *Big Data Analytics* und *Open Data*. Bei dieser „Digitalisierung des Forschungsfeldes“ sind Synergien mit anderen Zweigen der Wissenschaft erforderlich. Hier werden insbesondere die BMBF-Initiative des

Prisma-Trialogs ErUM-Data sowie die Entwicklungen der nationalen Forschungsdateninfrastruktur NFDI die notwendigen Akzente setzen.

Das KAT empfiehlt, Forschung und Entwicklung in den Bereichen Detektortechnologien sowie Computing und Software als notwendige Voraussetzung für die derzeitigen und zukünftigen Projekte als Querschnittsthema zu unterstützen und zu fördern. Das KAT schlägt vor zu prüfen, ob die Astroteilchenphysik ein dediziertes Projekt für ErUM-Data etablieren kann. Das KAT betont die Bedeutung des Technologietransfers in andere Wissenschaftsbereiche und für medizinische und industrielle Anwendungen.

Forschungsinfrastrukturen

Für die Astroteilchenphysik gibt es keine zentrale Infrastruktur wie das CERN für die Teilchenphysik. Vielmehr sind dedizierte Forschungsinfrastrukturen an den für diese Zwecke bestgeeigneten Orten unerlässlich. Die Astroteilchenphysik in Deutschland nutzt Infrastrukturen, die an nationalen und internationalen Laboren und hochspezialisierten Observatorien angesiedelt sind. Neben den internationalen Observatorien wie CTA, IceCube oder dem Pierre-Auger-Observatorium ist auch das italienische Untergrundlabor LNGS für die Astroteilchenphysik in Deutschland von besonderer Bedeutung. Die Weiterentwicklung des LNGS, z.B. durch weitere passive und aktive Abschirmtechnologien, ist eine Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der Spitzenforschung in Europa. Die Neutrino-Plattform am CERN und die Grenztechnologien, die dort entwickelt wurden, versprechen für kommende Projekte der Astroteilchenphysik – besonders in der Neutrinophysik und bei der Suche nach Dunkler Materie – von hoher Bedeutung zu sein.

Eine starke und institutionalisierte Vernetzung der Astroteilchenphysik innerhalb Deutschlands und auf internationaler Ebene, unter Einbeziehung der großen Forschungsinfrastrukturen und benachbarter Forschungsfelder, wird für die strategische Planung, einen effizienten Forschungsbetrieb und die nationale und internationale Koordination des Feldes von zunehmender Bedeutung sein.

Das KAT empfiehlt die Unterstützung und die kontinuierliche und enge Zusammenarbeit mit den internationalen Laboratorien und Infrastrukturen und Maßnahmen für eine institutionalisierte Vernetzung.

Wissenschaftskommunikation

Outreach und Wissenschaftskommunikation zielen darauf ab, aktuelle Forschungsfragen und ihre Ergebnisse zu kommunizieren, um die Öffentlichkeit für den gesellschaftlichen Nutzen der Grundlagenforschung zu sensibilisieren. Die Inspiration der jungen Generation durch Outreach-Aktivitäten ist eine unverzichtbare Aufgabe.

Das KAT empfiehlt, aktiv das Engagement von Wissenschaftlern für Aktivitäten zu fördern, die die Ziele, Experimente und Ergebnisse der Astroteilchenphysik in der Öffentlichkeit präsentieren.

Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Eine herausragende deutsche und europäische Forschungslandschaft in der Astroteilchenphysik ist die Grundlage für den wissenschaftlichen Fortschritt und die Attraktivität des Feldes. Junge Wissenschaftler sind oft die Quelle neuer Ideen und verfügen in vielen Bereichen über Spitzenkompetenz.

Die Forschungsbedingungen müssen die Aufrechterhaltung und Weiterentwicklungen der Expertisen während der langen Projektlaufzeit gewährleisten. Das KAT empfiehlt, den Aufbau und die Förderung einer nachhaltigen Personalstruktur aktiv voranzutreiben, die dem langfristigen Betrieb der Experimente Rechnung trägt und jungen Wissenschaftlern eine attraktive und verlässliche Karriereplanung ermöglicht.

6 Gesellschaftliche Relevanz und Anwendungen

Die Astroteilchenphysik ist ein Paradebeispiel eines Feldes der Grundlagenforschung mit hoher gesellschaftlicher Relevanz und einem reichhaltigen Spektrum von Technologieentwicklungen, die weit über das eigentliche Forschungsfeld hinaus bedeutsam sind. Sie greift zudem wissenschaftliche Fragen von grundlegender Bedeutung für unser Verständnis von Entstehung, „Funktionieren“ und Gesetzmäßigkeiten des Universums auf und ist somit unverzichtbarer Teil des kulturellen Strebens nach Einsicht in unseren Ursprung.

Dank ihrer faszinierenden Fragestellungen und Methoden begeistert die Astroteilchenphysik viele Bürgerinnen und Bürger für Wissenschaft und Forschung und trägt dazu bei, leistungs- und begeisterungsfähige Studierende für die Physik oder benachbarte MINT-Fächer zu gewinnen. Im Studium, während der Promotion und in der Postdoktorandenzeit erwerben diese jungen Forscherinnen und Forscher das Rüstzeug, den Wissenschafts- und Technologiestandort Deutschland nachhaltig zu stärken.

Technologieentwicklung

Die wissenschaftlichen Herausforderungen der Astroteilchenphysik treiben fortwährende Entwicklungen von Schlüsseltechnologien an, die weit über das eigentliche Forschungsfeld hinaus bedeutsam sind.

Für viele Experimente ist die Fortentwicklung von Photosensoren zum Einzelphotonennachweis essenziell. Die zukünftigen Gamma- und Neutrino-Observatorien benötigen jeweils mehrere 100.000 Photosensoren, die einen großen Anteil der Baukosten ausmachen. In Zusammenarbeit mit der Industrie erzielte Vereinfachungen bei Fertigung und Verbesserungen der Empfindlichkeit verringern diese Kosten und erlauben es der Industrie, neue Generationen von medizinischen Diagnosegeräten auf den Markt zu bringen, die mit immer geringerer Strahlendosis auskommen und somit helfen, die Strahlenbelastung von Patienten zu minimieren.

Die Entwicklungsarbeiten zum Einsatz von Silizium-Photomultipliern (SiPM) in Experimenten der Astroteilchenphysik und in der Medizintechnik lassen erwarten, dass man mit Hilfe dieser Technologie in Zukunft Positronen-Emissions-Tomographie-Scanner (PET) in Kernspin-Topographen integrieren und somit Funktion und Morphologie des Körpers in vivo simultan studieren kann. Das ist essenziell für z.B. die Krebsforschung, Alzheimer-Studien und die Erprobung von neuen Medikamenten.

Extrem schnelle, energieeffiziente und dennoch preiswerte Ausleseelektronik, Methoden zur präzisen Synchronisation riesiger Detektor-Arrays, schnelle Verarbeitung riesiger Datenmengen, komplexe und sehr aufwändige Simulationen, die fast vollständige Eliminierung radioaktiver Signale in Untergrundexperimenten und die Herstellung chemisch höchst reiner Substanzen sind Entwicklungen aus der Astroteilchenphysik, die industriell Anwendungen gefunden haben. Einige Beispiele innovativer Entwicklungen, die industriell und in anderen Forschungsbereichen Anwendungen finden, sind in Anhang 3 aufgeführt.

Synergien mit anderen Wissenschaftsfeldern

Zwischen Astroteilchenphysik und Wissenschaftsfeldern, die relevant für Klima und Umwelt sind, existieren eine Vielzahl von Synergien bei Nachweismethoden und gemeinsamer Nutzung von Daten, die beim Betrieb von Astroteilchenphysik-Experimenten anfallen. So können z.B. Vulkanologen mit Hilfe der kosmischen Strahlung und Myon-Detektoren das Innere von Vulkanen bzw. Archäologen das Innere von Pyramiden erforschen. Neutronen aus der Höhenstrahlung werden für die Untersuchung des Wassergehalts von Böden genutzt, und Gamma-Spektroskopie in untergrundarmen Laboren wird für die Untersuchung von Meteoriten eingesetzt.

Der Einsatz von Lidar-Systemen zur Beobachtung der Atmosphäre über Astroteilchenphysik-Observatorien liefert Daten, die für meteorologische Nutzung oder z.B. für die Untersuchung der Aerosole in der Atmosphäre relevant sind.

Die Daten von Gravitationswellen-Interferometer beinhalten seismischen Informationen, die für Geowissenschaftler von unübertroffener Qualität sind und in Zukunft helfen könnten, das Verständnis von Erdbeben und anderen Naturkatastrophen zu verbessern.

Als weiteres Beispiel sei noch angeführt, dass bei Unterwasser-Neutrino-Observatorien eine Vielzahl von meeresbiologisch relevanten Daten anfällt. So konnte mit den akustischen Positionssensoren des ANTA-RES-Experiments vor der französischen Mittelmeerküste eine Walart ausfindig gemacht werden, die als ausgestorben galt. Die mit den optischen Sensoren aufgezeichneten Variationen in der Biolumineszenz

und der gemessenen Meeresströmung haben zu völlig neuen ozeanographischen Erkenntnissen geführt und konnten zudem mit dem Fischaufkommen vor der spanischen Küste in Zusammenhang gebracht werden. In ähnlicher Weise sind die IceCube-Daten für die Glaziologie von hoher Bedeutung.

Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Die Astroteilchenphysik bietet dem wissenschaftlichen Nachwuchs mit ihrer Vielzahl von aktuellen wissenschaftlichen Fragestellungen, die weit in die angrenzenden Bereiche der Teilchen-, Kern-, Astrophysik und Kosmologie hineinreichen, ein höchst spannendes Betätigungsfeld. Während des Studiums und den folgenden Karriereschritten erlernen Astroteilchenphysikerinnen und -physiker den Umgang mit modernsten Messmethoden, Detektortechnologien und Auswerteverfahren, die sie weit über die Astroteilchenphysik hinaus qualifizieren. Für Studierende und Promovierende richtet die Universität Erlangen jährlich eine zehntägige Herbstschule in der fränkischen Schweiz aus, die für internationale Teilnahme geöffnet ist und vom BMBF kofinanziert wird. Weitere solche Schulen werden im internationalen Kontext angeboten. Die in Studium, Promotion und Postdoktorandenzeit erlangten Fähigkeiten sind für eine zunehmend informations- und

technikgeprägte Gesellschaft von außerordentlicher Relevanz und notwendig, um Deutschland als innovativen Wissenschafts- und Technologiestandort nachhaltig zu gestalten.

Internationale Kooperation

Die Experimente der Astroteilchenphysik werden weit überwiegend in internationalen Konsortien geplant, gebaut und betrieben, was zur internationalen Zusammenarbeit in der Forschung und der Mobilität der Forscherinnen und Forscher beiträgt sowie die kulturelle und Gender-Vielfalt fördert.

Forschungsdaten als kulturelles Erbe

Die Experimente der Astroteilchenphysik liefern Daten, die über lange Zeit relevant bleiben und ein Vermächtnis an nachfolgende Generationen von Forscherinnen und Forschern darstellen. Die Astroteilchenphysik in Deutschland hat in der internationalen Astroteilchenphysik-Community eine Vorreiterrolle darin, diese Daten zu konservieren und für den offenen Zugriff jedermann dauerhaft zur Verfügung zu stellen. Der wissenschaftliche und kulturelle Wert dieser Daten bleibt somit erhalten. Auch damit sind Entwicklungen und Expertise verbunden, die mittel- und langfristig in unserer Gesellschaft von hoher Relevanz sein werden.

Anhang 1 Astroteilchenphysik-Experimente in ErUM-Pro

Experiment	Teilnehmer weltweit inkl. Doktoranden	Teilnehmer in D (Autoren)	Gesamtinvest in M€	Invest aus D in M€	Institutionen in D (Leitinstitutione in fett)	Aufgaben deutscher Gruppen	Besondere Verantwortlichkeiten deutscher Gruppen	Zeitplan
AUGER	390	80	55	12	KIT , RWTH Aachen, U Hamburg, U Siegen, U Wuppertal.	Fluoreszenzteleskope, Ausleseelektronik für Bodenstationen und Teleskope, Remote Control, vollständige Szintillator-Detektorstationen, Radionachweis, Atmosphären Monitoring	Sprecher der Kollaboration, Projektbüro und Projektmanagement, Science Koordinator, viele Analyse und Detektor	Datennahme bis 2030, Aufbau von AugerPrime 2019 bis 2021
CRESST	50	25	12	10	MPP , TU München, U Tübingen.	Entwicklung & Aufbau der Detektoren; Betrieb von Kryostat, DAQ, Myonveto; Datenproduktion u. -analyse	Sprecher der Kollaboration, Vorsitz Speakers Bureau, Vorsitz Editorial Board	Betrieb seit 2016, Ausbau auf 100 Detektoren 2020
CTA	1400	200	300	46	MPIK, MPP, DESY , HU Berlin, U Bochum, TU Dortmund, U Erlangen, U Hamburg, U Heidelberg, U Potsdam, U Tübingen, U Würzburg.	MSTs, LSTs, MST- und SST-Kameras, Software (Steuerung und Simulation) und Timing, Science Data Management Centre,	Sprecher, stellv. Vorsitz Board, Projektmanager, Teilbereichsleiter	2018 Baubeginn, 2019 erste Daten, ERIC voraussichtlich 2021
GERDA LEGEND	120 250	30 35	14 15	10 4	MPIK, MPP , IKZ Berlin, TU Dresden, U Dortmund, TU München, U Tübingen.	Ge-76 Detektorentwicklung und -produktion, LAr-Instrumentier., Lock-System & Reinram, DAQ, Myonveto, Kryostat / kryogene Infrastrukturen, Einrichtungen für Materialabschirmung, Detektorzusammenbau.	Sprecher, stellv. Sprecher, Project Director, Vorsitz Editorial Board, Vorsitz Speaker's Bureau, Technischer Koordinator	GERDA II Datennahme 2015-2019, Umbau zu LEGEND-200 2020/21, erste Daten 2022
H.E.S.S.	250	90	28	16	MPIK, DESY , HU Berlin, U Bochum, U Erlangen, U Hamburg, U Heidelberg, U Potsdam U Tübingen.	Aufbau und Betrieb der meisten Experimentkomponenten	Sprecher (2004-2015), stellvertr. Sprecher, OC, Technischer Koordinator, Run Koordinator, mehrere Teilprojektleiter	2004-2013 (HESS I), seit 2014 (HESS II)
IceCube	360	90	250	20	DESY, KIT , RWTH Aachen, HU Berlin, U Bochum, U Dortmund, U Erlangen, U Mainz, TU München, U Münster, U Wuppertal.	Entwicklung und Aufbau der Digital-Optical-Modules inklusive Elektronik, Entwicklung von akustischen und Radio-Detektoren, Betrieb und Entwicklung neuer Sensoren, Entwicklung von Oberflächendetektoren	Vorsitz Speaker Committee, Vorsitz Gen2-Arbeitsgruppe, Analysekoordinator, Vorsitz Publication Committee, mehrere Taskleiter	IceCube ist im Betrieb und finanziert bis mindestens 2030, Aufbau Gen2 Phase 1 bis 2023, Gen2-Vorbereitung bis 2025
KATRIN	150	100	70	65	KIT, MPIK, MPP , HU Berlin, U Bonn, FH Fulda, U Mainz, TU München, U Münster, U Wuppertal.	Aufbau und Betrieb der meisten Experimentkomponenten, Gastgeberlabor	Beide Sprecher, Vorsitz des Collaboration Board, Technischer Koordinator, Run-Koordinator, Analysekoordinator, Mehrheit der Taskleiter	Start Datennahme 2019
MAGIC	200	60	16	8	MPP, DESY , U Dortmund, U Würzburg.	Aufbau und Betrieb der meisten Experimentkomponenten	Sprecher (mehrfach), Vorsitz Publ. Board, Physik-Koordinator	Seit 2005, 2. Teleskop seit 2009
XENON1T XENONnT	170	35	15 15	4 6	MPIK , U Freiburg, U Mainz, U Münster.	Xenon-Target, Low-Background PMT-Entwicklung und -Tests, Myonveto, Gasreinigung und -analyse, γ - und Radon-Materialscreening & Auswahl, Time-Projection Chamber (Detektor), Datenakquisition	Stellv. Sprecher, Analysekoordinator, verantwortlich u.a. für Ed. Board, PR Board,	Datennahme XENON1T bis 2018, Umbau und Start der Datennahme XENONnT ab 2019/20

Die Tabelle gibt einen Überblick über die Beteiligung deutscher Gruppen an zentralen Astroteilchen-Projekten von ErUM-Pro (2017-2020). Nicht erfasst sind in der Astroteilchenphysik arbeitende Theoretikerinnen und Theoretiker (soweit sie nicht Mitglieder großer Kollaborationen sind).

Anhang 2 Gruppenleiterinnen und Gruppenleiter und die Entwicklung der Astroteilchenphysik in Deutschland

Aachen	Bretz	Prof.		Klinkhamer	Prof.
	Erdmann	Prof.		Roth	Gruppenleiter
	Hebbeker	Prof.		Schröder	Prof.
	Kahlhöfer	Prof.		Schwetz-Mangold	Prof.
	Krämer	Prof.		Ulrich	Gruppenleiter
	Lesgourges	Prof.		Unger	Gruppenleiter
	Mertsch	Prof.		Valerius	Nachwuchsgruppe
	Schael	Prof.	Mainz	Böser	Prof.
	Schmidt	Prof.		Köpke	Prof.
	Stahl	Prof.		Kopp	Prof.
	Wiebusch	Prof.		Oberlack	Prof.
Berlin	Lohse	Prof.		Wurm	Prof.
	Kowalski	Prof.	München	Bishop	Prof.
Bochum	Fichtner	Gruppenleiter		Caldwell	Prof.
	Tjus	Prof.		Diehl	Prof.
Darmstadt	Heil	Gruppenleiter		Enßlin	Gruppenleiter
Dortmund	Rhode	Prof.		Garbrecht	Prof.
Dresden	Bemmerer	Gruppenleiter		Greiner	Gruppenleiter
	Zuber	Prof.		Ibarra	Prof.
Erlangen	Anton	Prof.		Ivlev	Gruppenleiter
	Eberl	Gruppenleiter		Janka	Prof.
	Funk	Prof.		Jenko	Prof.
	Jung-Richardt	Gruppenleiterin		Majorovits	Gruppenleiter
	Katz	Prof.		Mirzoyan	Gruppenleiter
	Lahmann	Gruppenleiter		Oberauer	Prof.
	Michel	Gruppenleiter		Petricca	Gruppenleiterin
	van Eldik	Prof.		Raffelt	Prof.
	Wilms	Prof.		Resconi	Prof.
Freiburg	Fischer	Gruppenleiter		Schönert	Prof.
	Schumann	Prof.		Strauß	Gruppenleiter
Fulda	Osipowicz	Prof.		Teshima	Prof.
Hamburg	Hagner	Prof.	Münster	Kappes	Prof.
	Horns	Prof.		Klasen	Prof.
	Lindner	Gruppenleiter		Weinheimer	Prof.
	Ringwald	Gruppenleiter	Potsdam	Egberts	Nachwuchsgruppe
	Servant	Prof.		Pohl	Prof.
	Sigl	Prof.		Yan	Prof.
Hannover	Danzmann	Prof.	Siegen	Buchholz	Prof.
	Lück	Gruppenleiter		Risse	Prof.
Heidelberg	Aharonian	Prof.	Tübingen	Jochum	Prof.
	Gastaldo	Prof.		Kokkotas	Prof.
	Görtz	Nachwuchsgruppe		Lachenmaier	Prof.
	Hansmann-Menzemer	Prof.		Santangelo	Prof.
	Hansen	Gruppenleiterin	Wuppertal	Helbing	Prof.
	Hinton	Prof.		Kampert	Prof.
	Hofmann	Prof.	Würzburg	Buson	Prof.
	Jaeckel	Prof.		Kadler	Prof.
	Lindner	Prof.		Mannheim	Prof.
	Marrodan	Gruppenleiterin	Zeuthen	Ackermann	Gruppenleiter
	Reville	Nachwuchsgruppe		Berge	Prof.
	Rodejohann	Gruppenleiter		Bühler	Gruppenleiter
	Schwingenheuer	Gruppenleiter		Franckowiak	Nachwuchsgruppe
	Wagner	Prof.		Maier	Gruppenleiter
Jülich	Ludhova	Prof.		Nelles	Prof.
Karlsruhe	Bornschein	Gruppenleiterin		Ohm	Gruppenleiter
	Drexlin	Prof.		Porto	Gruppenleiter
	Engel	Prof.		Püschel	Nachwuchsgruppe
	Eitel	Gruppenleiter		Winter	Gruppenleiter
	Haungs	Gruppenleiter		Wischniewski	Gruppenleiter
	Huege	Gruppenleiter			

Kriterien: Leitet eigenständige Gruppe, arbeitet in einem der KAT-Wahlkreisgebiete an deutschem Astroteilchen-Standort, Drittmittel-Einwerbung und Doktorandinnen/Doktoranden-Betreuung falls möglich.

Die nachfolgende Grafik zeigt die zahlenmäßige Entwicklung der Astroteilchenphysik in Deutschland von 2012 bis zur Gegenwart. Aufgetragen sind die Zahlen unabhängiger Forschungsgruppen in Deutschland.

Entwicklung der Astroteilchenphysik in Deutschland

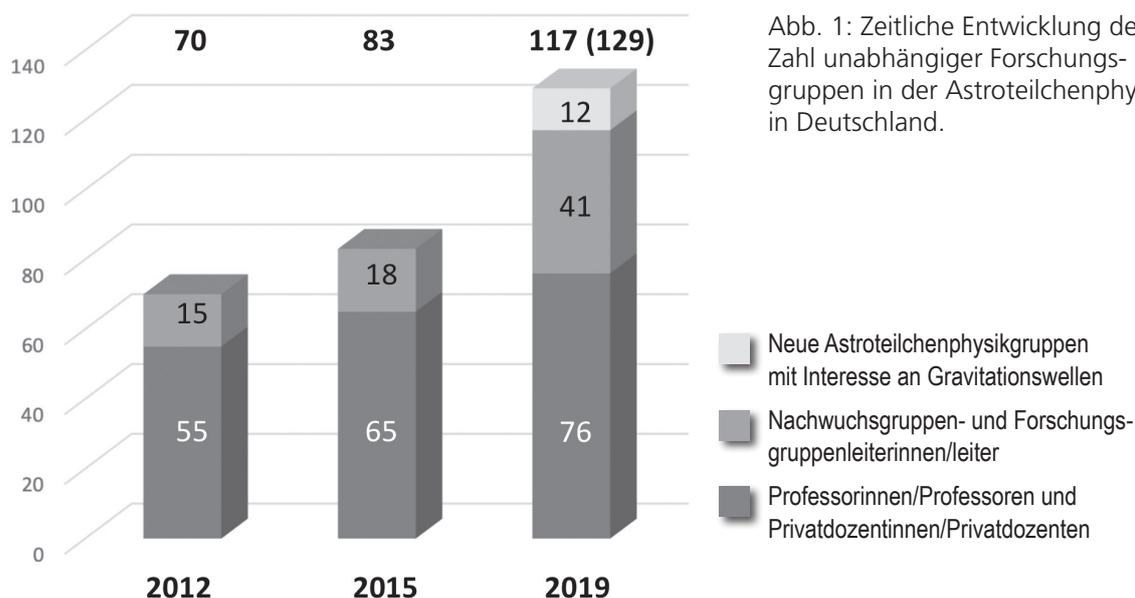


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der Zahl unabhängiger Forschungsgruppen in der Astroteilchenphysik in Deutschland.

Die Darstellung in den drei Kategorien legt folgende Überlegungen nahe:

1. Die Gruppen von Professorinnen/Professoren und Privatdozentinnen/Privatdozenten sind in der Regel langfristig an Universitäten und Forschungszentren etabliert. Veränderungen erfolgen durch Neuausrichtung bei Wiederbesetzungen und bei Wechsel bzw. Erweiterung des Arbeitsgebiets. Der Aufwuchs von ca. 5% pro Jahr belegt ein stetig wachsendes Interesse an der Astroteilchenphysik.
2. Das stark zunehmende Wachstum bei Gruppen von Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern (Nachwuchsgruppen und Forschungsgruppenleiterinnen/leitern) demonstriert die Attraktivität des Feldes für jüngere Wissenschaftlerinnen/Wissenschaftler, aber auch bei den für die Einrichtung solcher Gruppen verantwortlichen Standorten.
3. Die Astroteilchenphysik-Gruppen mit Interesse an der Gravitationswellenforschung wurden anhand der Unterzeichner des *Letter of Intent* für das Einstein-Teleskop ermittelt. Sie beinhalten nicht die Gruppen, die schon in der Astroteilchenphysik verankert sind und ihre Aktivität erweitern wollen; ebenfalls nicht eingeschlossen sind Gruppen, deren Forschungsschwerpunkte weit außerhalb der Astroteilchenphysik liegen. Die genannten 12 Gruppen stellen somit den durch die Erweiterung der ErUM-Pro-Förderung auf die Gravitationswellen zu erwartenden Aufwuchs dar. Die Leiterinnen/Leiter dieser Gruppen sind mit zwei Ausnahmen in der Liste der Gruppenleiterinnen/leiter noch nicht enthalten.

Anhang 3 Innovative Technologien aus der Astroteilchenphysik

Beispiele von Entwicklungen in der Astroteilchenphysik mit Anwendungen in anderen Gebieten:

Einzelphoton-Detektoren (u.a. für Anwendungen in der Medizintechnik)

- PMT Quanteneffizienz (Dortmund, München, Wuppertal)
- SiPM-Datenerfassung (Dortmund, KIT)
- SiPM-Vorverstärker und stabilisierte Spannungsversorgung (Anwendung z.B. im CERN-Experiment SHiP), SiPM-basierte Kameras (Aachen)
- Hybrid-Photon-Kamera für Quantenoptik (Erlangen)
- IR-, XUV-Einzelphotonendetektoren (APD, Sekundärelektronen-MCPs) für Atom- und Kernphysik (Erlangen, Münster)
- Spektroskopische Einzelphoton-Detektion im Röntgenbereich, z.B. zur Charakterisierung von Röntgenröhren und für Dosimetrie in gepulsten Strahlungsfeldern (Erlangen)

Detektorentwicklung für Medizintechnik und andere Felder

- Medipix/Timepix: Pixelierte Halbleiterdetektoren für Strahlungs- und Teilchennachweis (Erlangen)
- Halbleiterbasierte Dosimeter (Erlangen)
- Röntgen-Phasenkontrast- und -Dunkelfeldbildung für medizinische Anwendungen und zerstörungsfreie Materialtests (Erlangen)
- Ultraschall-Mammographie (KIT)
- Kryobolometer für Anwendungen in der beobachtenden Kosmologie (Heidelberg, München, Tübingen)
- Extremreinigung von Xenon, radonfreie Pumpen, Teilchentransportmodell, interessant für neue Detektoren in medizinischer Bildgebung, PET und Fusion (Münster)
- Datenerfassungssystem für CTA-FlashCam: Anwendung in der Nuklearmedizin, am EMBL und in der Atomphysik (Heidelberg)
- SPECT-Kameraentwicklung für Nuklearmedizin (Dortmund)

- Kryodetektoren für hochauflösende Röntgenanalyse, z.B. zur Oberflächenuntersuchung von Silizium-Wafern (München)
- Schnelle Lichtquellen, Anwendungen in der Teilchenphysik und für *Time-Correlated Photon Counting*, z.B. in der Quantenkryptographie (Aachen)
- Großflächige, UV-sensitive, preisgünstige Photosensoren (WOM), Anwendungen in der Teilchenphysik (DESY, Mainz)

Optische Technologie im Rahmen der Gravitationswellenforschung

- Spiegelbeschichtungen mit niedrigem optischen Rauschen, z.B. für optische Uhren (Hannover)
- Lasertechnologie und Laserstabilisierung für vielfältige Anwendungen (Hannover)
- Phasenmeter für hochpräzise optische Entfernungsmessung (Hannover)
- Squeezed light für Laserstabilisierung, z.B. für Quantenkryptographie (Hannover)

Spurenanalyse, Atmosphärenforschung und Geologie

- ^{133}Xe -Messung in Europa nach Fukushima für Umweltforschung (Heidelberg)
- Isotopenbestimmung durch Laser-Raman-Spektroskopie für Fusion (KIT)
- Atmosphärenanalyse durch Auger und H.E.S.S./MAGIC, CTA
- Untersuchung von Gewitterblitzen mit Radioteleskopen (DESY-Zeuthen, KIT)
- Low-background Gamma-Spektrometrie zur Altersdatierung von Meteoriten/Geologie (Freiburg)
- Seismische Isolationssysteme und Sensoren, vielfältige Anwendungen für erschütterungsempfindliche Aufbauten und Geräte (Hannover)

Hochspannung (→ Anwendungen auch bei HVDC)

- Präzisions-HV-Teiler für CERN/ISOLDE und CRYRING, Absolutkalibration (Münster)

Vakuumtechnologie

- Ultrahochvakuum (KIT, KATRIN-Gruppen)

IT-Technologie

- Großflächige funkbasierte Datenkommunikation (Auger, KIT)
- Modularisierte Datenerfassungssysteme (Aachen, KIT, Wuppertal)
- Nutzung von GPUs in der Datenanalyse (viele Standorte)
- Digitizer-Firmware (DPP-DAW) für eine triggerlose Auslese einer Vielzahl von unabhängigen Kanälen; inzwischen als kommerzielles Produkt im Handel (Freiburg)

Software und Algorithmen

- Algorithmenentwicklung (Datenstromanalyse, Signalerkennung, Inverse Probleme) und deren Anwendung für Informatik, Statistik, Medizin, Medizintechnik, Biologie, Verkehr, Logistik, Maschinenbau, Kommunikationsnetze in der Elektro- und Kommunikationstechnik (Dortmund)
- Maschinelles Lernen für Anwendungen in Informatik und Industrie (Dortmund)
- Simulationen für Luftschauerentwicklung (CORSIKA), z.B. für kommerzielle Myon-Tomographie (KIT)

Anhang 4 Das Komitee für Astroteilchenphysik (KAT)

Das Komitee für Astroteilchenphysik (KAT) wird von den promovierten Mitgliedern der deutschen Astroteilchen-Gemeinschaft gewählt und vertritt diese Gemeinschaft gegenüber Geldgebern, anderen Forschungsfeldern und im internationalen Kontext. Die Wahl erfolgt in neun thematisch orientierten Wahlkreisen (siehe unten). In jedem Wahlkreis werden ein/e Vertreterin/Vertreter und ein/e Stellvertreterin/Stellvertreter gewählt; die Stellvertreterinnen/Stellvertreter werden in alle Verhandlungen des KAT eingebunden, sind aber nicht stimmberechtigt. Neben den gewählten (Stell-)Vertreterinnen/Vertretern gehören dem KAT Repräsentanten

von BMBF, Projektträger und DFG, der Forschungszentren, des wissenschaftlichen Nachwuchses (yHEP), von APPEC, der Komitees KET, KHuK und RDS sowie der Vorsitzende des Gutachterausschusses kraft Amtes als beratende Mitglieder an.

Die letzte KAT-Wahl fand Anfang 2019 statt. Bei der konstituierenden Sitzung des neu gewählten KAT am 28.3.2019 in Aachen wurden der Vorsitzende und der stellvertretende Vorsitzende gewählt.

Mitglieder des KAT sind:

Gewählte Mitglieder zu den Themenkreisen (Vertreter in Klammern)

Dunkle Materie:

Manfred Lindner (Federica Petricca)

Neutrinoeigenschaften:

Kathrin Valerius (Stefan Schönert)

Niederenergie-Neutrinoastrophysik:

Achim Stahl (Michael Wurm)

Kosmische Strahlung:

Andreas Haungs [Stellvertr. Vorsitz]
(Martin Erdmann)

Gamma-Astronomie:

Stefan Funk (Jim Hinton)

Hochenergie-Neutrinoastrophysik:

Uli Katz [Vorsitz]
(Elisa Resconi)

Gravitationswellen:

Karsten Danzmann (Harald Lück)

Nukleare Astrophysik:

Roland Diehl (Camilla Hansen)

Theorie:

Thomas Schwetz-Mangold
(Martin Pohl)

Ex-officio-Mitglieder, institutionelle Vertreter, KAT-Gäste

BMBF:

Andrea Fischer (Jürgen Kroseberg)

PT-DESY:

Marc Hempel (Jacek Swiebodzinski)

Gutachterausschuss-Vorsitzender:

Christian Stegmann

APPEC:

Thomas Berghöfer (Francesca Moglia)

DFG:

Stefan Krückeberg (Andreas Deschner)

Max-Planck-Institute:

Manfred Lindner

KIT:

Ralph Engel

DESY-Zeuthen:

Christian Stegmann

KET und Fachverband Teilchenphysik:

Thomas Hebbeker

KHuK:

Yuri Litvinov

RDS:

Matthias Bartelmann

yHEP:

Anna Pollmann (Michael Schimp)

