

Seit dreißig Jahren verrichtet das Mainzer Mikrotron (MAMI) seinen Dienst. Das Foto zeigt die Vakuumkammer der letzten Ausbaustufe MAMI-C zusammen mit der Strahl Diagnoseeinheit (links) und den Spulen eines Dipolmagneten (rechts).

Thomas Hartmann / JGU

EXZELLENZSTRATEGIE

Präziser Blick ins Innere der Materie

Das Mainzer Exzellenzcluster PRISMA⁺ sucht nach Physik jenseits des Standardmodells.

Matthias Neubert und Hartmut Wittig

Mit Präzisionsexperimenten und theoretischen Arbeiten leistet das Exzellenzcluster PRISMA⁺ in Mainz wichtige Beiträge, um offene Fragen zur Validität des Standardmodells der Teilchenphysik zu beantworten. Zu den Hauptzielen zählen der Bau und Betrieb eines supraleitenden Beschleunigers für niederenergetische Präzisionsexperimente, um damit unter anderem Botenteilchen der Dunklen Materie nachzuweisen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die elementaren Bausteine der Materie sowie die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Mit der Entdeckung des Higgs-Bosons am CERN wurde 2012 das letzte vom Standardmodell postulierte Elementarteilchen experimentell nachgewiesen. Nach Abschluss dieser Ära geht

es nun darum, nach einer Erklärung von Phänomenen zu suchen, die sich nicht im Rahmen des Standardmodells beschreiben lassen: Woraus besteht Dunkle Materie? Warum gibt es im Universum mehr Materie als Antimaterie? Wie erklärt sich die Dunkle Energie, die für die beschleunigte Expansion des Kosmos verantwortlich ist?

Die Suche nach „neuer Physik“, die diese und andere Fragen beantworten kann, ist das wesentliche Ziel des Exzellenzclusters PRISMA⁺ (Precision Physics, Fundamental Interactions and Structure of Matter) an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Dabei stellt sich mehr und mehr heraus, dass die traditionelle Suche nach direkten Hinweisen auf die Existenz neuer, meist sehr schwerer Elementarteilchen mithilfe großer Teilchenbeschleuniger durch weitere Strategien zu ergänzen ist (Abb. 1). Denn es

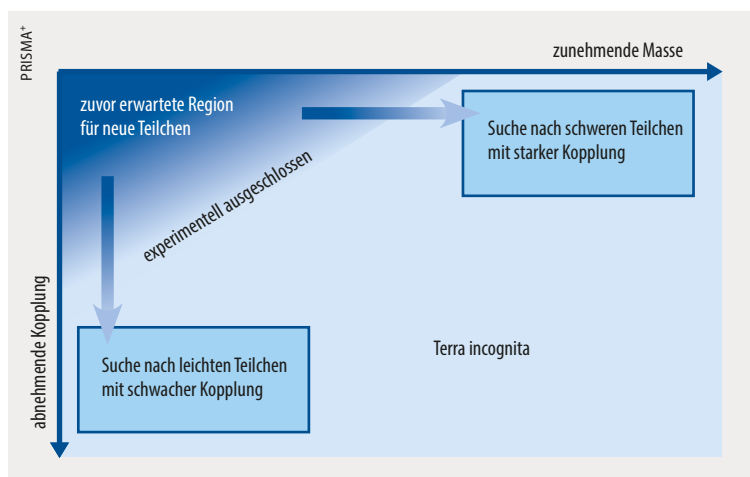


Abb. 1 Es wird immer klarer, dass neue Teilchen entweder deutlich schwerer sind oder weitaus schwächer mit den Teilchen des Standardmodells wechselwirken als erwartet. Beide Möglichkeiten gilt es, bei der Suche nach „neuer Physik“ zu verfolgen und deren Grenzen mit Experimenten und Berechnungen auszuloten.

könnte sein, dass Teilchen, die im Standardmodell nicht vorkommen, deutlich schwächer als erwartet mit der bekannten Materie wechselwirken. Für ihren Nachweis sind Präzisionsexperimente bei höchsten Wechselwirkungsraten erforderlich. Die Physik jenseits des Standardmodells könnte sich zudem in sehr subtilen Effekten verstecken, etwa in Abweichungen zwischen präzise gemessenen Observablen und ihren theoretischen Vorhersagen. In diesem Fall besteht die Herausforderung darin, die nötige Präzision in Experiment und Theorie zu erreichen. Diese Arbeiten sind Aushängeschild und Leitmotiv von PRISMA⁺ und dem Vorgängercluster PRISMA.

Präzision und Komplementarität

Schon seit Jahrzehnten erlauben der Elektronenbeschleuniger MAMI (Mainzer Mikrotron) und der Forschungsreaktor TRIGA-Mainz Präzisionsmessungen in der Atom-, Hadronen- und Kernphysik. Im Energiebereich von MAMI lassen sich insbesondere Fragen auf Ebene der Hadronen und Kerne untersuchen, während Hochenergiebeschleuniger wie der LHC die Elementarteilchen als grundlegende Bausteine der Materie in den Fokus nehmen. Zusammen ergibt sich ein vollständiges Bild der fundamentalen Wechselwirkungen.

In Mainz ist es gelungen, die Expertise in der Teilchen-, Hadronen- und Atomphysik sowie im Bau und Betrieb von Elektronenbeschleunigern zu einem breiten Forschungsansatz zusammenzuführen – Ergebnis war 2012 die Einrichtung des Exzellenzclusters PRISMA. Die Exzellenzinitiative erlaubte es, die lokale Forschungsinfrastruktur um weitere Großprojekte und Strukturmaßnahmen zu erweitern. Hierzu zählen der Bau des supraleitenden Elektronenbeschleunigers MESA (Mainz Energy-Recovering Superconducting Accelerator, **Abb. 2**) für verschiedene Präzisionsexperimente, die Etablierung des Mainz Institute for Theoretical Physics als internationales Zentrum für theoretische Physik, der Aufbau eines zentralen Detektorlabors und eine

durch gezielte Neuberufungen gesteuerte Erweiterung und Neuausrichtung der Forschungsaktivitäten.

PRISMA vereint die „klassischen“ Themen der Hochenergie- und Teilchenphysik, etwa die Erforschung des Higgs-Sektors des Standardmodells oder die Suche nach neuen Teilchen, mit der systematischen Erforschung von Präzisionsobservablen bei niedrigen Energien, die Hinweise auf Abweichungen vom Standardmodell geben können, wie der Radius des Protons oder das anomale magnetische Moment des Myons. In der zweiten Förderperiode seit 2019 ist als neuer Schwerpunkt das „schwach wechselwirkende Universum“ hinzugekommen, mit Aktivitäten in der Neutrino- und der Suche nach Dunkler Materie. Ein Theorieteam unterstützt die experimentellen Aktivitäten mit analytischen und numerischen Methoden und erforscht die mathematischen Grundlagen. So kann das Mainzer Cluster in einem Feld, in dem meist internationale Großprojekte eine entscheidende Rolle spielen, mit Niederenergie-Präzisionsexperimenten vor Ort in Mainz punkten. Kennzeichnend ist weiterhin die Untersuchung gleicher Fragestellungen mit komplementären Methoden, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Das Standardmodell auf dem Prüfstand

Eine wichtige Strategie beim Aufspüren neuer Physik ist die Suche nach Diskrepanzen zwischen Messwert und theoretischer Vorhersage für eine Observable. Ein prominentes Beispiel dafür ist das anomale magnetische Moment des Myons a_μ . Diese Größe bezeichnet die durch Quantenkorrekturen hervorgerufene Abweichung zwischen dem beobachteten Wert des gyromagnetischen Faktors des Myons und dem aus der Dirac-Theorie folgenden Wert $g = 2$. Im Experiment wurde a_μ mit einer Genauigkeit von 0,54 ppm gemessen, im Rahmen des Standardmodells lässt es sich mit ähnlicher Genauigkeit berechnen. Der seit langem beobachtete Unterschied von 3,7 Standardabweichungen zwischen Messung und Theorie ist einer der vielversprechendsten Hinweise auf neue Physik. Um dies zu erhärten, ist eine höhere Präzision in Experiment und Theorie nötig. Die Forschenden bei PRISMA⁺ sind an allen Aspekten dieses Präzisionstests beteiligt.

Effekte der starken Wechselwirkung dominieren die Unsicherheit der theoretischen Vorhersage. Die wichtigsten sind die hadronische Vakuumpolarisation und die hadronische Licht-Licht-Streuung. Doch diese Quantenkorrekturen sind bei niedrigen Energien einer störungstheoretischen Behandlung nicht zugänglich. Der Beitrag der hadronischen Vakuumpolarisation wird daher meist unter Verwendung experimenteller Daten für den hadronischen Wirkungsquerschnitt berechnet. Dieser wurde im Rahmen von PRISMA am BESIII-Experiment in Beijing präzise gemessen. Seit ein paar Jahren kommt der Gitter-Quantenchromodynamik eine besondere Bedeutung für die Berechnung der hadronischen Beiträge zu. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von PRISMA haben konzeptionelle und methodische Beiträge geleistet, um die Genauigkeit der ab-initio-Rechnungen zu verbessern. Erst kürzlich wurde ein neuer, aktueller Wert der theoretischen Vorhersage publiziert [1].

Eine wichtige Größe für die Entwicklungsgeschichte des Universums ist die Lebensdauer des freien Neutrons, die das Verhältnis von Protonen zu Neutronen zu Beginn der Nukleosynthese festlegt. Aktuell ergeben Experimente, bei denen der Zeitverlauf der Anzahl von Neutronen in einem Speichergefäß bestimmt wird, eine Lebensdauer von $\tau_n = (879 \pm 0,6)$ s. Dieses Resultat ist systematisch um etwa acht Sekunden kleiner als der experimentell mit Neutronenstrahlen bestimmte Wert von $\tau_n = (887,7 \pm 2,2)$ s [2]. Die beiden Messwerte sind also im Rahmen der experimentellen Fehler nicht vereinbar. Daher betreibt PRISMA⁺ am Reaktor TRIGA-Mainz das neue Lebensdauerexperiment τ SPECT, das ultrakalte Neutronen vollmagnetisch speichern kann. Einen wichtigen Fortschritt stellt die mehr als verdreifachte Neutronenausbeute dar [3]. Die Datennahme soll 2021 starten und die systematische Unsicherheit erheblich reduzieren. Die Diskrepanz zwischen den bisherigen Messwerten stimuliert die Entwicklung theoretischer Szenarien, welche die Abweichung durch neue Physik zu erklären versuchen, zum Beispiel durch Zerfälle des Neutrons in Dunkle Materie. Das τ SPECT-Experiment wird diese Hypothesen überprüfen und helfen zu entscheiden, ob sich hinter der beobachteten Diskrepanz ein Hinweis auf neue Physik verbirgt oder nur ein systematischer Effekt unterschiedlicher Messmethoden.

Ein Experiment zur Bestimmung des Protonenradius mithilfe der Messung der Lamb-Verschiebung in myonischem Wasserstoff lieferte 2010 ein um fünf Standard-

abweichungen kleineres Ergebnis verglichen mit atomphysikalischen Messungen an konventionellem (elektronischem) Wasserstoff und mit Elektron-Proton-Streuxperimenten [4]. Sollte sich der Unterschied zwischen myonischen und elektronischen Atomen bestätigen, wäre auch das ein möglicher Hinweis auf neue Physik. Denn das Standardmodell unterscheidet nicht zwischen den Wechselwirkungen, denen Elektronen und Myonen unterworfen sind. In diesem Fall wäre die „Lepton-Universalität“ verletzt.

Die am Cluster beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind in der Lage, die Unsicherheiten in der experimentellen Bestimmung des Protonenradius zu reduzieren. Randolph Pohl, der an der Messung von 2010 zentral beteiligt war, ist inzwischen Mitglied bei PRISMA⁺. Mit seiner Gruppe hat er die Messung der Radien einer Reihe leichter Kerne mittels Laserspektroskopie vorangetrieben, um zu überprüfen, ob die Diskrepanz eine Besonderheit des Protons ist. Auch für myonisches Deuterium fällt der Radius kleiner aus als im elektronischen Fall [5].

Die komplementäre Bestimmung des Protonenradius aus Elektron-Proton-Streuxperimenten beruht auf der Messung der elektromagnetischen Formfaktoren, welche die Verteilung von elektrischer Ladung und Magnetisierung innerhalb des Protons beschreiben. Das A1-Experiment am MAMI-Beschleuniger lieferte die Referenzdaten für die elektromagnetischen Formfaktoren. Das derzeit im Aufbau befindliche MAGIX-Spektrometer am MESA-Beschleuniger – der Nachfolger von A1 – wird

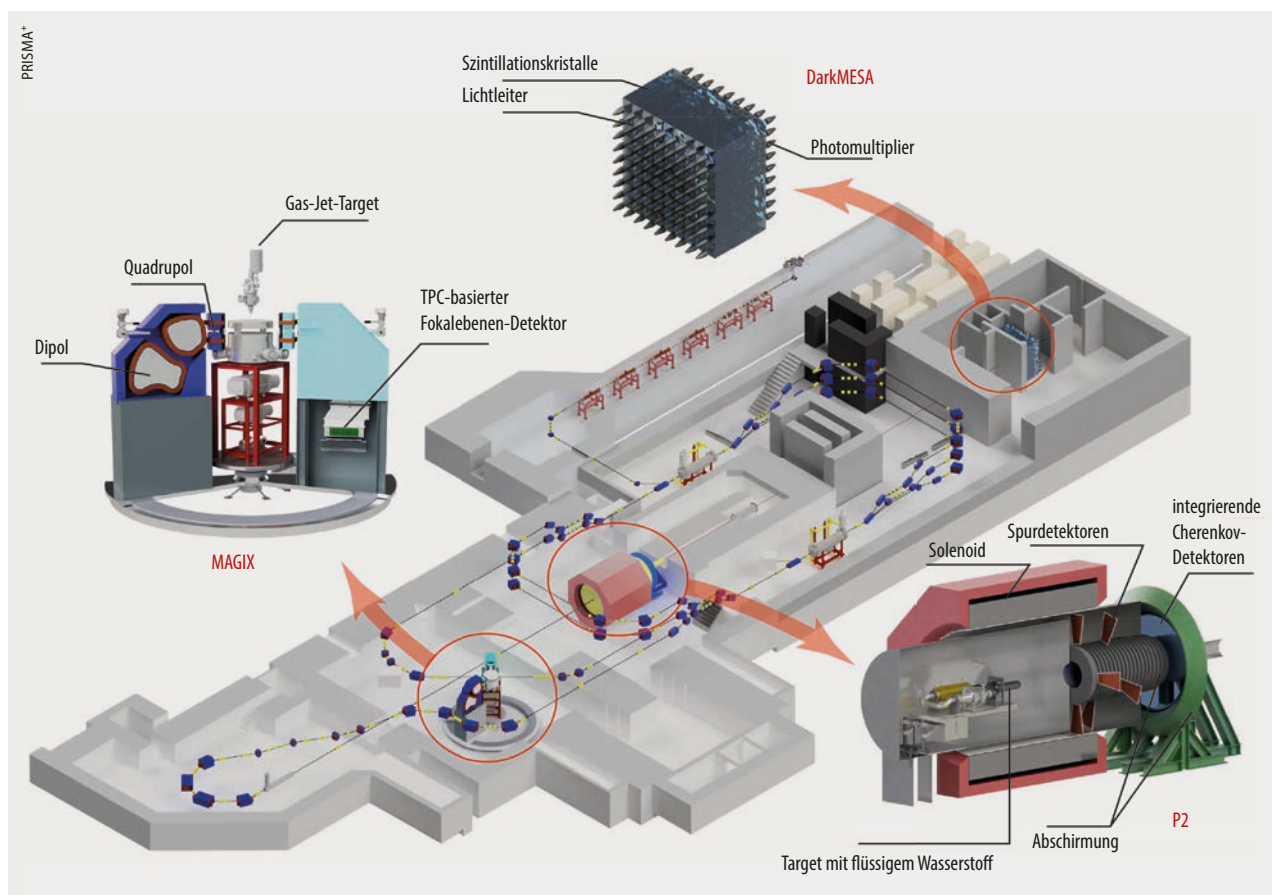


Abb. 2 In der MESA-Experimentierhalle sind der Beschleuniger und die drei Experimente MAGIX, P2 und DarkMESA untergebracht.

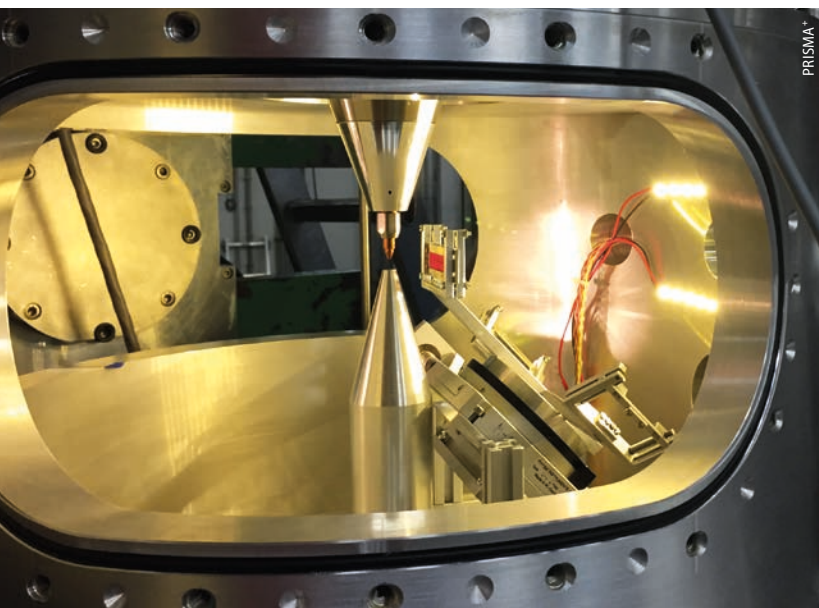


Abb. 3 Das interne Gastarget für das MAGIX-Experiment wird im A1-Spektrometer des Beschleunigers MAMI getestet. Aus der Düse gelangt Wasserstoff mit Überschallgeschwindigkeit in den Pfad des Elektronenstrahls aus dem Beschleuniger.

in der Lage sein, den Protonenradius aus Streudaten viel genauer zu bestimmen. Die erwarteten Ergebnisse ermöglichen einen wichtigen Konsistenztest der verschiedenen Messmethoden.

Neue Perspektiven für die Präzisionsphysik

Der Bau des MESA-Beschleunigers und der zugehörigen Experimente ist das aufwändigste Strukturziel des Clusters – unter anderem aufgrund der supraleitenden Beschleunigerkomponenten. Zudem wird MESA die Energierückgewinnung nutzen (Energy-Recovery Linac, ERL), die bislang nur an wenigen Standorten weltweit erprobt worden ist und bei MESA erstmals in großem Stil für die physikalische Grundlagenforschung zum Einsatz kommen soll [6].

Herzstück von MESA sind zwei supraleitende Beschleunigermodule. Im ERL-Modus geben die Elektronen nach zwei Umläufen ihre Energie an das Modul zurück. Im „Extracted Beam-Modus“ (EB-Modus) wird der Strahl nach einem weiteren Umlauf ausgelenkt und einem Experiment zugeführt. Verglichen mit anderen Elektronenbeschleunigern fällt die Strahlenergie von MESA mit maximal 155 MeV im EB-Modus zwar recht niedrig aus, eignet sich jedoch ideal für Präzisionsexperimente in der Hadronen- und Kernphysik. Einzigartig ist die extrem hohe Strahlintensität, die einer Strahlstromstärke von 1 mA entspricht. Je nach Wahl des Targets sind dadurch Luminositäten von 10^{35} bis $10^{39} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ möglich.

In den kommenden Jahren sollen zuerst folgende Experimente ihren Betrieb aufnehmen: Das MAGIX-Spektrometer wird im ERL-Modus Präzisionsmessungen in der Elektron-Proton-Streuung mit extrem niedrigem Untergrund erlauben. Entscheidend dafür ist das interne Wasserstoffgastarget, das während der ersten Förderperiode fertiggestellt und am MAMI-Beschleuniger getestet wurde

(Abb. 3). Im EB-Modus wird der spinpolarisierte Strahl mit einer Energie von 155 MeV ausgekoppelt und zum flüssigen Wasserstofftarget des P2-Experiments geleitet. Dort lässt sich durch Messung der paritätsverletzenden Asymmetrie in der Streuung polarisierter Elektronen an unpolarisierten Protonen die schwache Ladung des Protons ermitteln, also die Stärke, mit der das Proton an die schwache Wechselwirkung koppelt. Aus dieser Größe leitet sich der elektroschwache Mischungswinkel ab – ein Maß für die relative Stärke von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung. Bei den niedrigen Energien im P2-Experiment könnten Effekte neuer Physik den Mischungswinkel stark modifizieren, sodass der Vergleich zwischen Präzisionsmessung und Vorhersage des Standardmodells Hinweise auf neue Physik liefern könnte. Kombiniert mit komplementären Untersuchungen am LHC fällt der Test noch präziser aus.

Schließlich zielen die MESA-Experimente auf Fragen der nuklearen Astrophysik ab. In schweren Kernen mit hohem Neutronenüberschuss lagern diese sich an der Kernoberfläche an. Die Vermessung dieser sogenannten Neutronenhaut an P2 soll Aussagen über die Zustandsgleichung von Kernmaterie liefern. Dies ist für das Verständnis der Eigenschaften von Neutronensternen von großer Bedeutung.

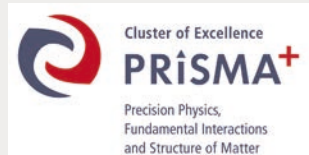
Mysteriöse Geisterteilchen

Neutrinos sind die am schwächsten wechselwirkenden Elementarteilchen. Etliche ihrer Eigenschaften wie das Massenspektrum und der Ursprung der Neutrinooszillationen sind nach wie vor unverstanden. Die drei Neutrinozustände (Flavours), die mit geladenen Leptonen wie dem Elektron

Exzellenzcluster PRISMA⁺

Beteiligte Institutionen:

- Universität Mainz: Institute für Physik und Kernphysik, Department Chemie; Helmholtz-Institut Mainz



Koordinatoren:

Prof. Dr. Matthias Neubert und Prof. Dr. Hartmut Wittig

Forschungsgebiete:

- Suche nach Physik jenseits des Standardmodells
- Aufbau des energierückgewinnenden Elektronenbeschleunigers MESA und der Experimente MAGIX, P2 und DarkMESA am Institut für Kernphysik
- Präzisionsmessungen des Protonenradius, der Neutronenlebensdauer, des elektroschwachen Mischungswinkels und des anomalen magnetischen Moments des Myons
- Erforschung der Eigenschaften von Neutrinos mit IceCube, Borexino, JUNO, Project 8 und DUNE; Suche nach WIMPs mit XENONnT; Suche nach Axionen und axionartigen Teilchen mit GNOME, CASPER und DMradio
- Eigenschaften des Higgs-Bosons und Suche nach neuen Teilchen mit dem ATLAS-Detektor am LHC
- Theorie und Phänomenologie fundamentaler Wechselwirkungen

wechselwirken, sind Superpositionen von Zuständen mit definierter Masse. Im Fokus der aktuellen Forschung stehen die Hierarchie der Neutrinomassen sowie die Elemente der Neutrinomischungsmatrix, welche die Eigenzustände der Massen mit denen der Flavours in Beziehung setzt. Im Rahmen von PRISMA⁺ wird die erfolgreiche Mainzer Tradition in der Neutrinophysik, angefangen mit den bahnbrechenden Experimenten des kürzlich verstorbenen Ernst Otten, fortgesetzt.

Dabei verlangen aktuelle Untersuchungen ein breit aufgestelltes Forschungsprogramm in der experimentellen und theoretischen Neutrinophysik. Drei neue Professuren zielen genau hierauf ab. So zeigten Forschende von PRISMA, wie sich mittels der Kombination zweier zukünftiger Experimente – dem Reaktor-neutrino-Experiment JUNO in Südchina und dem IceCube-Upgrade am Südpol – die Hierarchie der Neutrinomassen hochpräzise bestimmen lässt [7]. Durch die unterschiedlichen Messmethoden ergibt sich eine signifikant höhere Sensitivität, wie bereits von anderen Gruppen vorhergesagt [8].

Die IceCube-Kollaboration unter Mainzer Beteiligung hat kosmische Neutrinos im Blick, die Informationen über hochenergetische Quellen in den Tiefen des Kosmos liefern, und weist diese über das Cherenkov-Licht nach, das sie bei Reaktionen im antarktischen Eisschild erzeugen. 2018 gelang es durch Identifizierung eines Quasars als Quelle hochenergetischer Neutrinos, die Frage nach dem Ursprung kosmischer Strahlen zu beantworten [9, 10].

Die längerfristige Zukunft der Neutrinophysik bei PRISMA⁺ konzentriert sich auf zwei Ziele: Im geplanten Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) am Fermilab geht es darum, die CP-verletzende Phase der Neutrinomischungsmatrix mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, um der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum auf die Spur zu kommen. Das Project 8-Experiment soll mittels der „Cyclotron Radiation Emission

Spectroscopy“ erstmals eine nicht verschwindende Neutrinomasse beobachten. Hier schließt sich der Kreis zu frühen Neutrinoexperimenten in Mainz (Abb. 4).

Das dunkle Universum enträtseln

Astrophysikalische und kosmologische Untersuchungen haben gezeigt, dass es etwa fünfmal mehr Dunkle als gewöhnliche Materie im Universum gibt – die Natur der Dunklen Materie ist jedoch noch unbekannt [11]. Ein viel diskutierter Kandidat sind Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs). Im italienischen Gran-Sasso-Untergroundlabor 1400 Meter unter dem Bergmassiv steht der weltweit empfindlichste Detektor für die direkte Suche nach WIMPs. Zentrale Beiträge hierzu kommen aus Mainz. Die Analyse existierender Daten des Experiments XENONIT erlaubte es, die Kopplungsstärke für WIMPs und damit den Parameterbereich, in dem sie existieren könnten, sehr weit einzuschränken [12]. Auch gelang es, die längste jemals direkt in einem Detektor beobachtete Halbwertszeit zu messen und den Zerfall von ¹²⁴Xe zu beobachten. Dies belegt eindrucksvoll das Potenzial der Messmethode – auch für Signale, die nicht von Dunkler Materie herrühren. Kürzlich vermeldete die XENON-Kollaboration einen überraschenden Signalüberschuss in ihren Daten, dessen Quelle noch nicht vollständig verstanden ist [13]. Dieser könnte von einer winzigen Menge Tritium stammen, aber auch ein Hinweis auf die Existenz neuer Teilchen, beispielsweise auf solare Axionen, oder auf eine bisher unbekannte Eigenschaft von Neutrinos sein. Derzeit befindet sich das Nachfolgeexperiment XENONnT im Aufbau, das durch neue Verfahren zur Unterdrückung des Untergrunds und eine größere Xenon-Masse eine viel höhere Empfindlichkeit bieten wird.

Allerdings könnte die Dunkle Materie auch aus viel leichteren Teilchen als WIMPs bestehen. Daher gilt es, mit verschiedenen experimentellen Ansätzen nach Dunkler

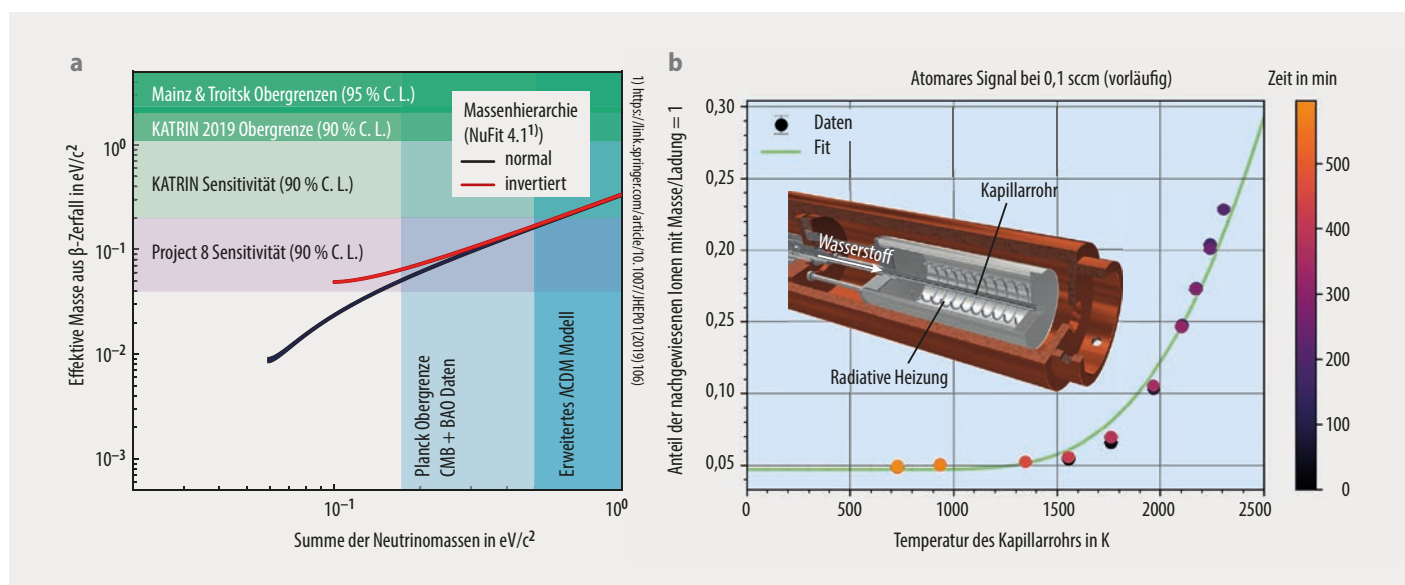


Abb. 4 Die Grenzwerte für die effektive Neutrinomasse werden in Tritium-Endpoint-Experimenten abhängig von der Summe der Neutrinomassen bestimmt (a). Gezeigt sind aktuelle und projizierte Grenzwerte. Das Experiment Project 8 nutzt eine atomare Quelle (3D-Zeichnung im Inset), in der die (Tritium-)Wasserstoff-Moleküle bei hohen Temperaturen aufgespalten werden können (Messdaten, b).



Abb. 5 Die Reihe „Physik im Theater“ füllt regelmäßig den Zuschauersaal im Staatstheater Mainz. Bekannte Referentinnen und Referenten, wie hier Rolf-Dieter Heuer, berichten dabei über moderne Physik.

Materie zu suchen. Das MESA-Experiment MAGIX wird nach „Dunklen Photonen“ suchen – hypothetischen Teilchen, die eine Kraft zwischen gewöhnlicher und Dunkler Materie vermitteln. Dabei wird es den Suchbereich bisheriger Experimente erweitern. Die extrem hohe Strahlintensität des MESA-Beschleunigers kann auch bei der direkten Suche nach Dunkler Materie helfen. Nach Durchlaufen des P2-Spektrometers werden die Elektronen in einen Strahlfänger geleitet. Die pro Jahr mehr als 10^{22} Elektronen könnten einen kollimierten Strahl von leichten Dunkle-Materie-Teilchen erzeugen, die sich im Detektor DarkMESA (**Abb. 2**) nachweisen lassen. Erste Prototypen des Experiments stehen kurz vor der Fertigstellung und werden am MAMI-Beschleuniger getestet.

Auch nach weiteren extrem leichten und schwach wechselwirkenden Teilchen als Dunkle-Materie-Kandidaten wird weltweit gesucht, den Axionen bzw. axionähnlichen Teilchen. Physikerinnen und Physiker aus Mainz entwickeln mehrere Experimente dafür. Sie setzen darauf, dass die Erde ständig einem Strom von Axionen ausgesetzt ist, der auf sehr subtile Weise die Eigenschaften der gewöhnlichen Materie beeinflusst. Nachweisbar wären solche Einflüsse mithilfe der Atomspektroskopie von Cäsium-Dampf, spezieller Techniken der kernmagnetischen Resonanz (NMR) [14] oder mittels Antimaterie. Bisher gibt es keinen Nachweis für Teilchen der Dunklen Materie. Da jedes Experiment jedoch einen spezifischen neuen Frequenzbereich zugänglich gemacht hat, ist es gelungen, Einschränkungen in Bezug auf ihre Eigenschaften zu formulieren und den offenen Suchbereich einzugrenzen. Begleitet werden die Messungen durch theoretische Untersuchungen der Produktions- und Zerfallseigenschaften axionartiger Teilchen [15].

Investitionen in die Zukunft

Ein großer Teil der Fördermittel des Exzellenzclusters PRISMA floss in drei Strukturmaßnahmen, welche die



Abb. 6 Blick in die Mainzer Baugrube – hier entsteht die neue Experimentierhalle für MESA. Der große Betonklotz ist der Strahlfänger des Beschleunigers MAMI. Dort wird künftig auch der Elektronenstrahl des MESA-Beschleunigers enden.

internationale Sichtbarkeit der Mainzer Physik erheblich gestärkt haben. Neben dem Bau der MESA-Facility zählen dazu die Gründung des Mainz Institute for Theoretical Physics (MITP) und des zentralen Detektorlabors.

Das MITP zielt darauf ab, in der theoretischen Physik alle wichtigen Entwicklungen zu verfolgen. Führende Physikerinnen und Physiker aus aller Welt veranstalten dazu mehrwöchige Programme oder kürzere Workshops. Das MITP stellt die räumliche Infrastruktur zur Verfügung und kommt für die Aufenthaltskosten und einen Teil der Reisekosten auf. Pro Jahr kommen etwa 600 Gäste aus bisher mehr als 40 Ländern. Die erfolgreiche Reihe „Physik im Theater“ bringt viermal pro Jahr aktuelle Themen aus der Physik der breiten Öffentlichkeit nahe (**Abb. 5**).

Der Erfolg des breiten Forschungsprogramms von PRISMA und PRISMA⁺ ist auf innovative experimentelle Hardware angewiesen. Detektoren in der Teilchen- und Hadronenphysik sind meist Unikate, die in Eigenregie entwickelt, gebaut und getestet werden. Daher ist seit 2012 ein zentrales Detektorlabor entstanden, das die technischen, logistischen und personellen Voraussetzungen für die „In-house“-Entwicklung wesentlicher Detektorkomponenten schafft. Aufgrund der Beteiligung an Großexperimenten wie dem ATLAS-Spektrometer am CERN besteht die Notwendigkeit, große Detektorteile zu montieren und Komponenten in Massenfertigung herzustellen. Um den wissenschaftlichen Nachwuchs in diesem Bereich zu fördern, ermöglicht es das „Detector Innovation Fellowship“, eigene Detektorkonzepte zu realisieren.

Den baulichen Rahmen für etliche Projekte bildet das neue Centrum für Fundamentale Physik. Dieser Forschungsbau wird MESA und die zugehörigen Experimente sowie Speziallabore für die Detektorentwicklung inklusive einer Montagehalle für große Detektorkomponenten beherbergen. Die Bauarbeiten sind seit 2019 in vollem Gange (**Abb. 6**). Die unterirdische Experimentierhalle für MESA

soll 2022 fertiggestellt werden, sodass 2023 die ersten Experimente starten könnten.

In der ersten Förderperiode des Mainzer Clusters gelang es, herausragende wissenschaftliche Ergebnisse zu erzielen und eine exzellente Forschungsinfrastruktur zu etablieren. Deren Aufbau bedingt notwendigerweise einen längeren Zeithorizont, doch nach Fertigstellung wichtiger Großprojekte in der laufenden Förderperiode ist eine reichhaltige „Ernte“ zu erwarten.

Literatur

- [1] T. Aoyama et al., Phys. Rept. **887**, 1-166 (2020)
- [2] P. A. Zyla et al. [Particle Data Group], Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 083C01 (2020)
- [3] J. Kahlenberg et al., Eur. Phys. J. A **53**, 226 (2017)
- [4] R. Pohl et al., Nature **466**, 213 (2010)
- [5] R. Pohl et al. [CREMA Coll.], Science **353**, 669 (2016)
- [6] K. Aulenbacher, Physik Journal, Mai 2019, S. 36
- [7] M. G. Aartsen et al. [IceCube-Gen2 Coll., JUNO Coll. Members], Phys. Rev. D **101**, 032006 (2020)
- [8] M. Blennow und T. Schwetz, JHEP **09**, 089 (2013)
- [9] M. G. Aartsen et al., Science **361**, 146 (2018)
- [10] M. G. Aartsen et al. [IceCube Coll.], Science **361**, 147 (2018)
- [11] Physik Journal, November 2019, ab S.32
- [12] E. Aprile et al. [Xenon Coll.], Phys. Rev. Lett. **121**, 111302 (2018)
- [13] E. Aprile et al. [Xenon Coll.], arXiv:2006.09721 (2020) und J. Kopp, Physik Journal, Januar 2021, S. 21
- [14] A. Garcon et al., Sci. Adv. **5**, eaax4539 (2019)
- [15] M. Bauer, M. Neubert und A. Thamm, JHEP **12**, 044 (2017)

Die Autoren



Werner Feldmann / JGU

Matthias Neubert (FV Teilchenphysik, rechts) studierte Physik in Siegen und Heidelberg, wo er 1990 promovierte. 1999 erhielt er einen Ruf an die Cornell University (USA), wo er noch heute als Adjunct Professor tätig ist. Seit 2006 ist er Professor für Theoretische Elementarteilchenphysik an der U Mainz, seit 2012 Sprecher des Exzellenzclusters PRISMA und Direktor des Mainz Institute for Theoretical Physics (MITP).

Hartmut Wittig (FV Hadronen und Kerne, links) studierte Physik in Mainz und Oxford und promovierte 1992 in Hamburg. Seit 2005 ist er Professor für Theoretische Physik an der U Mainz, seit 2012 Sprecher des Exzellenzclusters PRISMA. In seiner Freizeit beschäftigt er sich mit Literatur und Fotografie.

Prof. Dr. Matthias Neubert, Institut für Physik, Universität Mainz, Staudingerweg 7, 55128 Mainz; **Prof. Dr. Hartmut Wittig**, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, Johann-Joachim-Becher-Weg 45, 55128 Mainz



Vakuumlösungen aus einer Hand

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuumlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service. Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment:

- Pumpen zur Vakuumherzeugung von Grobvakuum bis UHV
- Vakuummess- und Analysegeräte
- Lecksucher und Dichtheitsprüfgeräte
- Vakuumkammern und Komponenten
- Pumpstände und kundenspezifische Lösungen

Sie suchen eine perfekte Vakuumlösung? Sprechen Sie uns an:
Pfeiffer Vacuum GmbH · Germany · T +49 6441 802-0 · www.pfeiffer-vacuum.com