



Christian Hambröck

TEILCHENPHYSIK

# Auf dem Weg zu neuen Ufern

Sterile Neutrinos könnten Fragen aus Teilchenphysik und Kosmologie klären.

Marco Drewes





Das Standardmodell, hier als Festung dargestellt, hält bisher allen experimentellen Tests stand. In den kommenden Jahren werden Experimente in zwei Richtungen nach sterilen Neutrinos suchen: An der „Energy Frontier“ wird nach schweren Neutrinos mit größerer Masse  $M$  gesucht, an der „Intensity Frontier“ nach solchen mit kleinerem Mischungswinkel  $\theta$ .

Neutrinos sind die einzigen Elementarteilchen, die im Standardmodell der Teilchenphysik nur als linkshändige Variante vorkommen und masselos sein sollten. Experimente zeigen allerdings, dass sie kleine Massen besitzen. Sollte es „sterile“ rechtshändige Neutrinos geben, könnten diese nicht nur die Neutrinomassen erklären, sondern auch einige der großen Fragen der Kosmologie lösen.

**M**it dem Higgs-Boson wurde 2012 der letzte Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik entdeckt. Zusammen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreibt das Modell nahezu alle Phänomene in der Natur auf mikroskopischer Ebene. Zwar gibt es von theoretischer Seite einige Fragen, beispielsweise was die Werte der Naturkonstanten bestimmt, ob sich alle Kräfte vereinheitlichen lassen und warum das Higgs-Boson leichter ist als vielfach vorhergesagt.

Experimentelle Tests haben das Standardmodell aber immer wieder bestätigt. Tatsächlich gibt es bisher nur ein einziges im Labor nachgewiesenes Phänomen, das ohne Zweifel eine Erweiterung des Standardmodells erfordert: die Neutrinooszillationen. Darunter versteht man, dass sich die Neutrinos verschiedener Generationen –  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  – ohne äußere Einflüsse ineinander umwandeln können (**Infokasten**).

Neutrinos sind diejenigen Elementarteilchen, über die wir bisher am wenigsten wissen, vor allem weil sie sich nur sehr schwer nachweisen lassen. Sie tragen weder eine elektrische Ladung noch eine Farbladung der starken Kernkraft. Abgesehen von der Schwerkraft, die für Elementarteilchen vernachlässigbar ist, spüren sie nur die schwache Kernkraft. Diese führt aber wegen ihrer sehr geringen Reichweite von weniger als einem Femtometer nur selten zu einer Wechselwirkung mit normaler Materie. Obwohl pro Sekunde mehr als 60 Milliarden Neutrinos von der Sonne durch jeden Quadratzentimeter unseres Körpers fliegen, reagiert in einem Jahr nur eine Handvoll davon mit unserem Körper.

Diese geringe Wechselwirkung ist nicht nur für die Teilchenphysik interessant, sondern auch in der Quantenmechanik: Neutrinos können aufgrund ihrer seltenen Wechselwirkung über astronomische Distanzen kohärente Quantenzustände bilden.

Doch nicht nur diese Eigenschaften machen Neutrinos zu sehr speziellen Teilchen. Beispielsweise sind sie die einzigen Fermionen, die ihre eigenen Antiteilchen sein könnten (Majorana-Fermionen). Um dies zu klären, untersuchen unter anderem mehrere Experimente den neutrinolosen doppelten  $\beta$ -Zerfall. Dabei annihilieren die beiden Neutrinos aus aufeinanderfolgenden Zerfällen,

wenn das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist. Außerdem kommen Neutrinos nur als linkshändige Teilchen im Standardmodell vor – alle anderen Teilchen existieren auch als rechtshändige Version. Die Händigkeit bezieht sich hier auf die Chiralität, eine abstrakte mathematische Eigenschaft der Wellenfunktion in der relativistischen Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie. Für Neutrinos, die sich in Experimenten fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, lässt sich dies anschaulich mit der Helizität verknüpfen. Die Helizität beschreibt die Orientierung der Projektion des Eigendrehimpulses (Spin) auf die Bewegungsrichtung. Bei den bekannten linkshändigen Neutrinos zeigt diese Projektion immer entgegen der Bewegungsrichtung, bei Antineutrinos immer entlang der Bewegungsrichtung. Rechtshändige Neutrinos sollten sich genau umgekehrt verhalten.

Darüber hinaus sind Neutrinos mindestens ein paar Millionen mal leichter als das nächstleichtere Elementarteilchen, das Elektron. Im Standardmodell sollten sie sogar masselos sein. Die Neutrinooszillationen belegen aber, dass sie zumindest eine kleine Masse besitzen. Oszillationen sind nur möglich, wenn die Teilchen  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  keine wohldefinierten Massen haben, sondern kohärente Überlagerungen von Eigenzuständen  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  und  $\nu_3$  mit wohldefinierter Energie und Masse sind. Wenn die Massen  $m_i$  unterschiedlich sind, besitzen die Wellenfunktionen verschiedener  $\nu_i$  mit gleichem Impuls  $\mathbf{p}$  unterschiedliche Frequenzen  $\omega_{p,i} = \sqrt{(c\mathbf{p})^2 + (m_i c^2)^2}$ . Konstruktive und destruktive Interferenz zwischen den Komponenten  $\nu_i$  führt zu Schwebungen

in den Wellenfunktionen von  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$ . Diese manifestieren sich beispielsweise, wenn ein  $\nu_e$  sich auf dem Weg von der Sonne zu uns in ein  $\nu_\mu$  umwandelt und wieder zurück. Viele Experimente belegen diese Neutrinooszillationen und damit auch, dass die  $\nu_i$  unterschiedliche Massen besitzen – also für mindestens zwei davon  $m_i \neq 0$  gilt.

### Auf die Wippe, bitte!

Damit stellt sich die Frage, wie die Neutrinos zu ihren Massen kommen. Bei allen anderen Elementarteilchen ist dafür der Higgs-Mechanismus verantwortlich – sie koppeln an das allgegenwärtige Higgs-Feld. Dadurch ändert sich ihre Masse, sehr stark vereinfacht betrachtet in ähnlicher Weise wie das gefühlte Gewicht von Objekten im Wasser und in der Luft. Dabei koppeln die links- und rechtshändigen Partner stets gemeinsam über eine so genannte Yukawa-Kopplung an das Higgs-Feld. Letztlich ist das eine Folge der Relativitätstheorie, da die Wellenfunktion linkshändiger Fermionen nicht invariant unter Lorentz-Transformationen ist, sondern erst in Kombination mit dem rechtshändigen Partner. Wenn der Higgs-Mechanismus für Neutrinos genauso funktionieren soll wie für andere Fermionen, dann wäre das Standardmodell um rechtshändige Neutrinos zu ergänzen – dem widerspricht nichts.

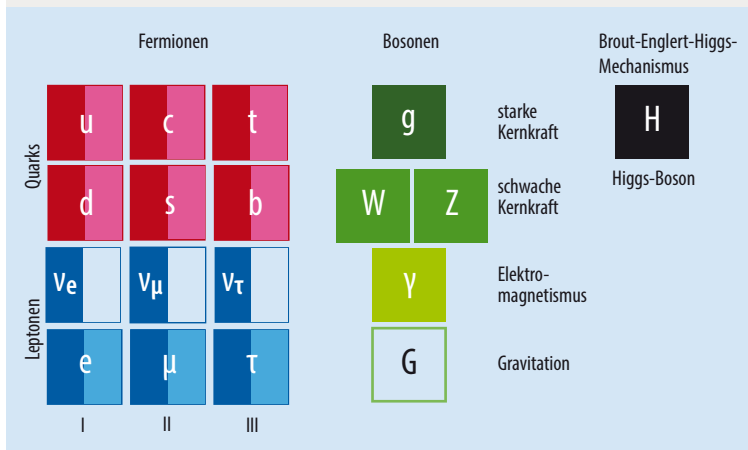
Allerdings gibt es eine Besonderheit für Neutrinos. Bei allen anderen Elementarteilchen legt die mathematische Struktur des Standardmodells fest, dass linkshändige und rechtshändige Versionen exakt die gleiche Masse haben müssen. Ursache ist die Eichinvarianz der Wechselwirkungen, eines der fundamentalen Symmetrieprinzipien des Standardmodells, mit dem auch die Ladungserhaltung zusammenhängt. Rechtshändige Neutrinos unterliegen diesem Prinzip aber nicht, weil sie weder elektrische noch Farbladungen tragen und die schwache Kernkraft ausschließlich an linkshändige Teilchen koppelt. Daraus ergeben sich zwei wichtige Konsequenzen. Zum einen spüren rechtshändige Neutrinos mit Ausnahme der vernachlässigbaren Gravitation keine der bekannten Naturkräfte, weshalb sie als sterile Neutrinos bekannt sind. Zum anderen müssen rechtshändige Neutrinos nicht notwendigerweise die gleiche Masse haben wie ihre linkshändigen Pendanten. Zusätzlich zu der vom Higgs-Mechanismus erzeugten Masse dürfen sie eine Majorana-Masse besitzen, die auch dafür sorgen würde, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind.

Daraus ergibt sich das als „Seesaw-Mechanismus“ (Wippmechanismus) bekannte Szenario [1]. Die linkshändigen Neutrinos  $\nu_L$  sind zunächst wie vom Standardmodell vorhergesagt masselos. Dabei steht  $\nu_L$  repräsentativ für eines der drei bekannten linkshändigen Neutrinos  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$ . Die rechtshändigen Neutrinos  $\nu_R$  haben dagegen eine unbekannte Majorana-Masse  $M$ . Beide müssen laut Relativitätstheorie an das Higgs-Feld koppeln und kommen so miteinander in Verbindung: Ihre Quantenzustände lassen sich durch kohärente Überlagerung mischen. Als physikalische Teilchen treten in der Regel die so genannten Massenzustände auf, also jene Überlagerungen der Quantenzustände mit wohldefinierter Masse und Energie. Die Massenzustände  $\nu$  und  $N$  nach dem Mischen entsprechen

## Periodensystem der Elementarteilchen

Zu den **Fermionen** gehören die Quarks (rot) und die Leptonen (blau). Sie sind mit einem Eigendrehimpuls von 1/2 die Bausteine der Materie. Die **Eichbosonen** (grün) besitzen einen Spin von 1 und sind für die Kräfte zwischen den Elementarteilchen verantwortlich: das Photon ( $\gamma$ ) für den Elektromagnetismus, die W- und Z-Bosonen für die schwache Kernkraft und die Gluonen (g) für die starke Kernkraft. Das **Higgs-Boson** (schwarz, Spin 0) ist das Quantum des Higgs-Feldes, welches den anderen Teilchen ihre Masse verleiht. Atome bestehen lediglich aus Elek-

tronen (e) in der Hülle sowie up- und down-Quarks als Konstituenten von Protonen (uud) und Neutronen (udd). Es ist unklar, warum es dazu jeweils zwei weitere Kopien („Generationen“) schwerer, instabiler Teilchen gibt. Zu jeder Generation gehört auch ein Neutrino, dessen Bezeichnung sich aus den geladenen Partnern in der jeweiligen Generation ableitet: Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ), Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ) und Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ ). Im Standardmodell fehlen die rechtshändigen Neutrinos – sie lassen sich mit Hilfe des Seesaw-Mechanismus ergänzen.



nicht exakt den rechts- und linkshändigen Zuständen  $\nu_R$  und  $\nu_L$ , sondern sind um einen kleinen Mischungswinkel  $\theta \ll 1$  dazu rotiert. Dabei gilt  $\nu = \cos\theta \nu_L - \sin\theta \nu_R \approx \nu_L - \theta \nu_R$  sowie  $N = \cos\theta \nu_R + \sin\theta \nu_L \approx \nu_R + \theta \nu_L$ . Anschaulich betrachtet besitzen die sterilen  $\nu_R$  eine Masse, wechselwirken aber nicht mit anderen Teilchen. Dagegen sind die Neutrinos  $\nu_L$  masselos, spüren aber die schwache Kernkraft. Bei der Mischung kommt es zu einem Austausch der Eigenschaften: Die resultierenden schweren Neutrinos  $N$  sind nicht mehr ganz steril und erhalten einen kleinen Anteil an der schwachen Kernkraft. Im Gegenzug besitzen die leichten Neutrinos  $\nu$  eine kleine Masse  $m \approx \theta^2 M$ . Da  $\theta \ll 1$  erklärt dies nicht nur, wie die gewöhnlichen Neutrinos zu ihrer Masse kommen, sondern auch, warum diese so gering ist. Gleichzeitig wird klar, warum die schweren Neutrinos noch nicht gefunden wurden: Entweder ist ihre Masse  $M$  zu groß oder der Mischungswinkel  $\theta$  zu klein (Abb. auf S. 28/29). Da sie die schwache Kernkraft nur zu einem kleinen Anteil spüren, ist ihre Wechselwirkung mit normaler Materie um den Faktor  $\theta^2$  gegenüber den bekannten Neutrinos reduziert. Abgesehen von einigen umstrittenen Anomalien kann der Seesaw-Mechanismus die Daten aller Neutrinoexperimente erklären und sagt gleichzeitig die Existenz der schweren, fast sterilen Neutrinos  $N$  vorher.

### Einfluss auf Teilchenphysik und Kosmologie

Die Masse  $M$  der schweren Neutrinos bestimmt, welche Konsequenzen die Existenz dieser Teilchen hat und wie eine geeignete Nachweismethode aussehen könnte (Abb. 1) [2]. Experimente mit den bekannten Neutrinos  $\nu$  helfen dabei, die Eigenschaften der schweren Neutrinos einzuschränken. Die Seesaw-Relation  $m \approx \theta^2 M$  beschreibt den Zusammenhang von Massen und Mischungswinkeln. Leider erlaubt sie es nicht, die Masse der schweren Neutrinos zu bestimmen, da sowohl  $M$  als auch  $\theta$  unbekannt sind. Theoretische Überlegungen motivieren bestimmte Werte für  $M$ . Theorien der Großen Vereinheitlichung (Grand Unified Theory), für die sich alle Naturkräfte bei sehr hohen Energien durch eine einzige Symmetrie beschreiben lassen, sagen meist billionenfach größere Werte als die Protonenmasse voraus. Diese Modelle funktionieren in der Theorie sehr gut, sie entziehen sich aber einer direkten experimentellen Überprüfung, da die Energie von Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider am CERN bei weitem nicht ausreicht, um solch schwere Teilchen zu erzeugen. Lediglich indirekte Hinweise sind zu erwarten, etwa der Einfluss virtueller  $N$  auf sehr seltene Prozesse wie den neutrinolosen doppelten  $\beta$ -Zerfall. Die Ideen zur Großen Vereinheitlichung, die eine sehr große Masse  $M$  nahe legen, sind allerdings nicht alternativlos. Manche Modelle bringen  $M$  mit den Massen des Higgs-Bosons sowie der  $W$ - und  $Z$ -Bosonen in Verbindung. In diesem Fall ließen sich die schweren Neutrinos am Large Hadron Collider finden. Aus theoretischer Sicht gibt es für beide Varianten gute Argumente. Die Wahl hängt von theoretischen oder ästhetischen Präferenzen ab, die sich zu einem gewissen Grad mit dem Zeitgeist wandeln.

Alternativ zu solchen Top-down-Überlegungen gibt es Bottom-up-Ansätze, die den Wert von  $M$  als freien Para-

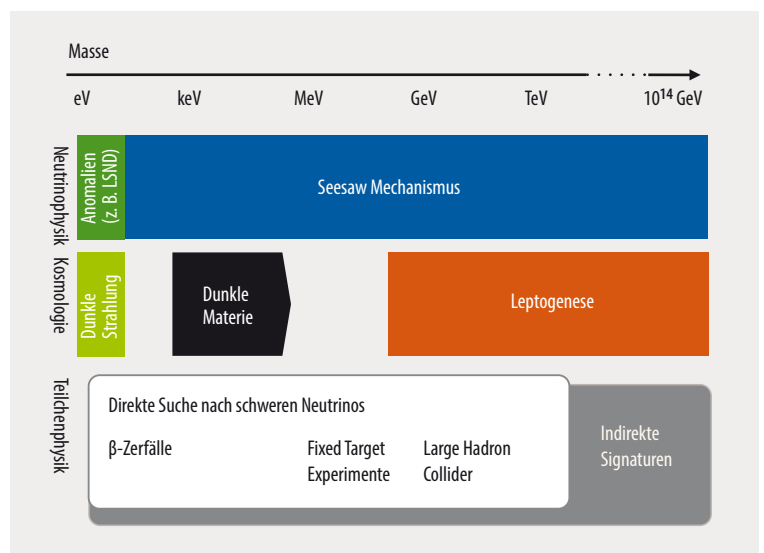


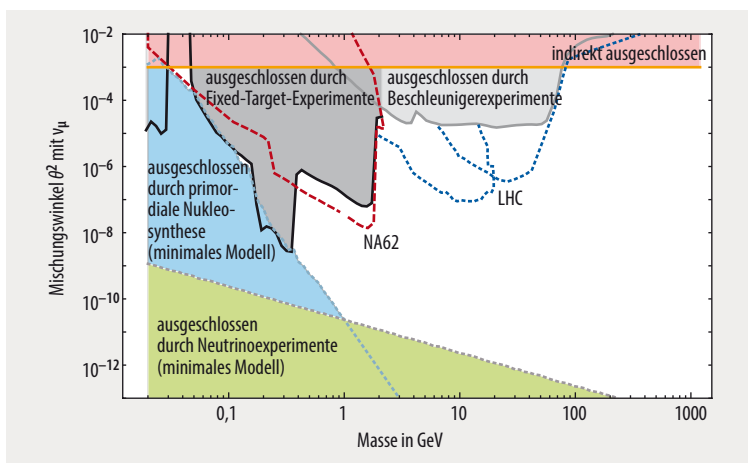
Abb. 1 Abhängig von ihrer Masse  $M$  wirken sich sterile Neutrinos verschieden auf Neutrino-Physik, Kosmologie und Teilchen-Physik aus.

meter betrachten. Dann stellt sich die Frage, mit welchen Massen die schweren Neutrinos neben den Neutrinooszillationen noch andere Probleme lösen könnten. Zwar sind Neutrinooszillationen das einzige im Labor nachgewiesene Phänomen, das zwingend eine Erweiterung des Standardmodells erfordert. Allerdings ergeben sich aus astronomischen Beobachtungen eine Reihe kosmologischer Probleme, die sich ebenfalls nicht im Standardmodell erklären lassen. Schwere Neutrinos könnten mindestens zwei davon lösen: Woher kommt die Materie im Universum? Was ist die Dunkle Materie?

### Leptogenese und der Ursprung der Materie

Im heißen Plasma kurz nach dem Urknall war die Energiedichte hoch genug, um aus Photonen Paare von Teilchen und Antiteilchen zu erzeugen. Diese Paarproduktion und die gegenseitige Vernichtung in Photonen hielten sich anfangs die Waage. Das Universum war gefüllt mit einer bunten Mischung von Teilchen, Antiteilchen und Photonen. Während der Expansion sank die Temperatur des Universums, sodass die Energie der Photonen irgendwann nicht mehr ausreichte, um Teilchenpaare zu erzeugen. Hätten Materie und Antimaterie damals in exakt gleicher Menge existiert, hätten sich alle Teilchen gegenseitig vernichten müssen. Dann wäre keine Materie mehr vorhanden gewesen, um Galaxien, Sterne und Planeten zu bilden. Wir verdanken unsere Existenz demnach einem kleinen Übergewicht an Materie, das die Vernichtung überstand. Da die Endprodukte gegenseitiger Annihilation überwiegend aus Photonen und Neutrinos bestehen, lässt sich der Überschuss aus dem Verhältnis der Dichten von Protonen und Neutronen zur Dichte von Photonen bestimmen. Unabhängige Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und der Häufigkeiten leichter Elemente im intergalaktischen Medium ergeben konsistent, dass auf zehn Milliarden Antiteilchen etwa zehn Milliarden und ein Teilchen kamen. Woher diese winzige Materie-Antimaterie-Asymmetrie kam, kann das Standardmodell nicht erklären.





**Abb. 2** Laborexperimente und kosmologische Schranken schließen einige Kombinationen von Masse  $M$  und Mischungswinkel  $\theta^2$  aus (farbig). Die CERN-Experimente NA62 am Super Proton Synchrotron sowie die Experimente am Large Hadron Collider können diese schon jetzt erweitern. Teilchenbeschleuniger mit noch höheren Kollisionsenergien könnten in Zukunft erlauben, Neutrinos mit noch größeren Massen und kleineren Mischungswinkeln zu finden.

Eine Möglichkeit besteht darin, dass schwere instabile Teilchen im frühen Universum entstanden, die vorzugsweise in Materie zerfallen. Solche Phänomene sind grundsätzlich bekannt. Während elektromagnetische Wechselwirkung und Schwerkraft nicht zwischen Materie und Antimaterie unterscheiden, verletzt die schwache Kernkraft die CP-Symmetrie. Das zeigt sich beispielsweise beim Zerfall von Mesonen. Experimente zu Neutrinooszillationen weisen darauf hin, dass eine solche CP-Verletzung auch für Neutrinos existiert. Diese Hinweise sollen das DUNE-Experiment am Fermilab in den USA und das Experiment Hyper-Kamiokande in Japan in den kommenden Jahren verifizieren. Falls die bekannten Neutrinos  $\nu$  tatsächlich unterschiedlich mit Materie und Antimaterie wechselwirken, liegt es nahe, dass dies auch für ihre schweren Partner  $N$  gilt. Tatsächlich haben theoretische Studien ergeben, dass die schweren Neutrinos aus dem Seesaw-Mechanismus genau die richtigen Eigenschaften hätten, um die Materie-Antimaterie-Asymmetrie zu erklären [3].

Dieser Vorgang heißt Leptogenese. Mit einigen Unterschieden in den technischen Details funktioniert er sowohl für die schweren Neutrinos mit sehr großen Massen  $M$ , die innerhalb von Theorien zur Großen Vereinheitlichung auftreten, als auch in Szenarien mit leichteren Teilchen. Die Sensitivität einiger Experimente ist heute schon so hoch, um letztere zu finden (**Abb. 2**). Sollte dies tatsächlich in den kommenden Jahren gelingen, könnte ein genaues Vermessen der Eigenschaften dieser Teilchen die Frage nach dem Ursprung der Materie im Universum beantworten [4].

### Sterile Neutrinos als Dunkle Materie

Ein weiteres wichtiges Problem der Kosmologie ist die Zusammensetzung und Herkunft der Dunklen Materie. Viele Beobachtungen deuten darauf hin, dass etwa 80 Prozent der Masse im Universum nicht aus bekannten Elementarteilchen besteht. Zum einen lässt darauf die Bewegung von Himmelskörpern schließen, die sich nicht mit der Allge-

meinen Relativitätstheorie aus der beobachteten Verteilung sichtbarer Materie ergibt. Das betrifft Objekte aller Größen, von einzelnen Sternen in unserer Galaxie bis hin zu den größten Galaxienhaufen. Keine bekannte Modifikation der Gravitationsgesetze vermag es, alle existierenden Daten gleichzeitig zu erklären. Demnach sollten große Mengen Dunkler Materie im Universum existieren, deren Schwerkraft die Himmelsmechanik beeinflusst. Bestimmt man die Materieverteilung im Universum mit Hilfe von Microlensing – also über den Effekt, den die Schwerkraft auf das Licht hat, das uns von fernen Galaxien erreicht – ergibt sich die gleiche Schlussfolgerung. Zum anderen reichen die im kosmischen Mikrowellenhintergrund beobachteten Dichtefluktuationen im frühen Universum nicht aus, um durch den Gravitationskollaps der normalen Materie in diesen Strukturen Galaxienhaufen und Galaxien zu bilden. Dies erfordert nicht nur zusätzliche Materie, sondern insbesondere Materie, die nicht aus bekannten Elementarteilchen besteht. Denn geladene Teilchen wären im frühen Universum elektromagnetisch mit den Photonen in Wechselwirkung getreten, und der daraus resultierende Strahlungsdruck hätte sie an einem frühen Kollaps gehindert. Im Standardmodell könnten einzig die linkshändigen Neutrinos dieses Problem umgehen. Sie sind aber zu leicht: Wenn sie die Dunkle Materie bildeten, würden sie wegen ihrer hohen thermischen Geschwindigkeiten im frühen Universum die Strukturen auswaschen, aus denen sich Galaxien gebildet haben, und das Universum sähe anders aus.

Als einfachste Erklärung all dieser Phänomene bietet sich an, mindestens ein zusätzliches massives und elektrisch neutrales Elementarteilchen zu postulieren. Dieses muss entweder stabil sein oder eine Halbwertszeit besitzen, die deutlich über dem Alter des Universums von 14 Milliarden Jahren liegt. Da die uns bekannten Neutrinos bis auf ihre Masse all diese Eigenschaften besitzen, drängen sich die schweren Neutrinos als minimaler Ausweg geradezu auf [5]. Allerdings gilt es, einige wichtige Faktoren gut aufeinander abzustimmen. Sterile Neutrinos sind instabil mit einer Lebensdauer, die proportional zu  $1/(\theta^2 M^5)$  ist. Damit sie mehr als 14 Milliarden Jahre lang existieren können, dürfen sie weder zu schwer sein noch zu stark mit den normalen Neutrinos mischen. Noch strengere Obergrenzen an  $\theta$  und  $M$  lassen sich aus dem Zerfall der sterilen Neutrinos ableiten, bei dem monochromatische Photonen entstehen sollten. In allen Galaxien müsste demnach eine monochromatische Emissionslinie beobachtbar sein, deren Intensität proportional zur Dichte der Dunklen Materie ist. Tatsächlich ist 2014 im Röntgenbereich eine solche Linie gefunden worden [6], allerdings ist umstritten, ob sie tatsächlich aus dem Zerfall schwerer Neutrinos stammt. Das japanische Röntgenteleskop XARM und die europäische ATHENA-Mission sollen zentral dazu beitragen, diese Frage zu klären. Ihre sehr gute spektrale Auflösung erleichtert es, das Signal von möglichen Hintergrundlinien zu unterscheiden.

Als Kandidaten für die Dunkle Materie müssen die schweren Neutrinos jedoch nicht nur alle aktuellen Beobachtungen erklären, sondern auch irgendwie entstanden sein. Als vermutlich einfachster Mechanismus kommen Teilchenkollisionen mit normalen Neutrinos in dem hei-

ßen Plasma infrage, als das Universum auf etwa eine Billion Grad abgekühlt war. Damit über ihre Mischung  $\theta$  genug Dunkle Materie entsteht, darf der Winkel aber nicht zu klein sein. Damit liegt für  $\theta$  sowohl eine obere als auch eine untere Grenze bei gegebener Masse  $M$  vor. Darüber hinaus führt dieser Mechanismus zu einer nicht-thermischen Impulsverteilung der schweren Neutrinos. Ihre Bewegungen im frühen Universum sollten eine charakteristische Signatur in der Materieverteilung im Universum hinterlassen, die sich beispielsweise in der heutigen Verteilung galaktischer Sub-Halos zeigt. Daraus lässt sich eine Untergrenze für  $M$  ableiten. Allerdings ist die theoretische Vorhersage dieses nichtlinearen Effekts ebenso schwierig wie seine astronomische Beobachtung, denn es gilt, vergleichsweise kleine Strukturen über kosmische Distanzen zu ermitteln. Derzeit ist die Untergrenze noch mit erheblichen systematischen Unsicherheiten belastet. Dennoch ergeben sich aus verschiedenen kosmologischen Überlegungen und astronomischen Beobachtungen wichtige Schranken (**Abb. 3**).

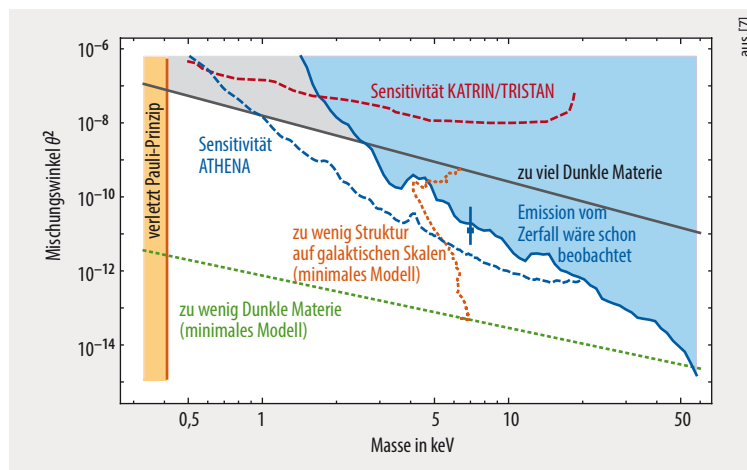
Die experimentelle Suche nach solchen schweren Neutrinos im Labor gestaltet sich schwierig, weil sie aufgrund ihres extrem kleinen Mischungswinkels nur sehr selten mit Materie wechselwirken. Ein vielversprechendes Experiment für die Suche nach schweren und gleichzeitig selten wechselwirkenden Neutrinos als Kandidaten für die Dunkle Materie wird derzeit am Max-Planck-Institut für Physik in München geplant. TRISTAN soll am Karlsruher Institut für Technologie als Upgrade des KATRIN-Experiments den Effekt solcher schwerer Neutrinos auf das Spektrum der Elektronen messen, die beim  $\beta$ -Zerfall von Tritium entstehen.

### Eins, zwei oder drei?

Dunkle Materie, Leptogenese und die geringe Masse der linkshändigen Neutrinos lassen sich nicht mit denselben schweren Neutrinos erklären (**Abb. 2** und **3**). Das ist allerdings kein grundsätzliches Problem. Einerseits wäre es bereits ein großer Erfolg, auch nur eines dieser Mysterien zu erklären. Andererseits gibt es auch von den bekannten Neutrinos drei Generationen  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$ . Wenn jedes davon einen schweren Partner hat, könnte einer davon die Dunkle Materie bilden, während die beiden anderen gemeinsam erklären, wie die Neutrinooszillationen und die Materie-Antimaterie-Asymmetrie zustande kommen [8].

Auch für andere bisher unverstandene Beobachtungen kommen sterile Neutrinos als Lösung infrage. Besitzen sie beispielsweise ähnliche Massen wie die gewöhnlichen Neutrinos, könnten sie einige Anomalien in Neutrinoexperimenten an Kernreaktoren oder Teilchenbeschleunigern erklären. Die Eigenschaften solcher leichten sterilen Neutrinos würden sich allerdings deutlich von den hier diskutierten Szenarien unterscheiden [9]. Zudem ließ sich bisher keine dieser Anomalien so untermauern, dass sie das Standardmodell vom Thron stoßen könnte.

Aus theoretischer Sicht gibt es sehr gute Gründe für die Existenz schwerer steriler Neutrinos. Experimentell suchen die LHC-Experimente an der „Energy Frontier“. In Zukunft könnten der Future Circular Collider am CERN, CEPC und SPPC in China sowie der International Linear



**Abb. 3** Auch in Bezug auf ihre Rolle bezüglich der Dunklen Materie ergeben sich für Masse und Mischungswinkel der schweren Neutrinos Einschränkungen. Der erlaubte Parameterbereich (weiß) überlappt nicht vollständig mit den Werten, die sich aus Neutrinooszillationen und Leptogenese ergeben.

Collider in Japan höhere Sensitivitäten erreichen. Dagegen treiben Fixed-target-Experimente die „Intensity Frontier“ voran. Über NA62 hinaus könnte am CERN zukünftig das SHiP-Experiment eine zentrale Rolle spielen. Experimente mit den Protonenstrahlen von T2K in Japan und LBNF am Fermilab, USA, sind ebenfalls denkbar. Detektoren wie MATHUSLA würden dies auch am High-Luminosity LHC ermöglichen.

### Literatur

- [1] P. Minkowski, Phys. Lett. B **67**, 421 (1977); M. Gell-Mann, P. Ramond und R. Slansky, Conf. Proc. C **790927**, 315 (1979); R. N. Mohapatra und G. Senjanovic, Phys. Rev. Lett. **44**, 912 (1980); T. Yanagida, Prog. Theo. Phys. **64**, 1103 (1980); J. Schechter und J. W. F. Valle, Phys. Rev. D **22**, 2227 (1980)
- [2] M. Drewes, Int. J. Mod. Phys. E **22**, 1330019 (2013)
- [3] M. Fukugita und T. Yanagida, Phys. Lett. B **174**, 45 (1986)
- [4] B. Garbrecht et al., Int. J. Mod. Phys. A **33**, Ausgabe 05n06, (2018)
- [5] S. Dodelson und L. M. Widrow, Phys. Rev. Lett. **72**, 17 (1994)
- [6] E. Bulbul et al., ApJ **789**, 13 (2014); A. Boyarsky et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 251301 (2014)
- [7] A. Boyarsky et al., Prog. Part. Nucl. Phys. **104**, 1 (2019)
- [8] T. Asaka, S. Blanchet und M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B **631**, 151 (2005); T. Asaka und M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B **620**, 17 (2005)
- [9] K. N. Abazajian et al., arXiv:1204.5379 [hep-ph]

### Der Autor



**Marco Drewes** hat Physik in Hamburg und Sydney studiert und am DESY in theoretischer Teilchenphysik promoviert. Stationen als wissenschaftlicher Mitarbeiter führten ihn an die EPF Lausanne, die RWTH Aachen und die TU München. Seit 2017 ist er Dozent an der Université catholique de Louvain in Belgien. Er forscht im Grenzbereich zwischen Teilchenphysik und Kosmologie. In seiner Freizeit bereist er die Welt mit dem Rucksack, in jüngerer Zeit mit der ganzen Familie.

**Prof. Dr. Marco Drewes** Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve B-1348, Belgium