

gung weiterer Beobachtungen wie der Lyman-alpha-Strahlung oder energiereicher Neutralatome [2] erscheint die kometenartige Heliosphäre am wahrscheinlichsten.

Die Messungen der beiden Voyager-Sonden lassen sich zwar nur eingeschränkt interpretieren. Dennoch ist der Erkenntnisgewinn, den sie erbracht haben, nicht zu überschätzen. Erstmals haben zwei Raumsonden den Bereich des von der Sonne dominierten Plasmas verlassen und sind in das interstellare Medium vorgedrungen. Damit sind sie die ersten Sonden, die außerhalb der Heliosphäre *in situ* gemessen haben.

Über das Interesse am interstellaren Medium hinaus ist bereits die Erforschung der durchflogenen Übergangsregion von solarem zu interstellarem Plasma auch für andere Bereiche von Bedeutung: Die Heliosphäre ist die am besten untersuchte Vertreterin der Klasse von Astrosphären sonnenähnlicher Sterne. Die Ergebnisse der Voyager-Mission verdeutlichen, dass die Heliosphäre – und damit auch die Astrosphären anderer Sterne – ein Schutzschild gegen kosmische Strahlung sind [7]. Diese Eigenschaft ist zum einen potenziell bedeutsam für die Entwicklung von Lebensformen

auf Planeten in diesen Astrosphären. Zum anderen beeinflusst die Intensität der kosmischen Strahlung die Nachweisbarkeit von Biosignaturen in den Atmosphären von Exoplaneten: Die kosmische Strahlung tendiert nämlich dazu, die Anzahl der lebensanzeigenden Moleküle zu verändern. So dienen beispielsweise Ozon oder Methan als Indikatoren für Leben. Doch die Höhenstrahlung kann beide Moleküle aufspalten [8]. Um also die kosmische Strahlungsumgebung von Exoplaneten zu verstehen, ist es unverzichtbar, die Struktur von Astrosphären zu kennen.

Eine Nachfolgemission

Helio- und astrophysikalische Forschung hängen stark zusammen, so dass eine Nachfolgemission logisch erscheint. Das Konzept einer solchen Interstellar-Probe wird derzeit entwickelt. Während die Voyager-Sonden primär darauf ausgelegt waren, die Planeten unseres Sonnensystems zu erkunden, soll die neue Sonde mit Instrumenten ausgerüstet sein, um speziell die heliosphärische Grenzregion und das interstellare Medium zu erforschen. Allerdings ist Geduld gefragt: Angesichts der logistischen

Herausforderungen wird eine solche Mission kaum vor Mitte dieses Jahrhunderts das interstellare Medium erreichen. Somit haben vorläufig die Voyager-Sonden das letzte Wort: Ihre Energieversorgung wird noch bis etwa 2025 ausreichen. Ihre Daten werden in den nächsten Jahren also weitere Erkenntnisse über die Physik des interstellaren Mediums ermöglichen.

- [1] H. Fichtner und H.-J. Fahr, *Physik Journal*, August/September 2008, S. 22
- [2] H. Fichtner und F. Effenberger, *Physik Journal*, Juli 2012, S. 20
- [3] S. M. Krimigis et al., *Nat. Astron.* **3**, 997 (2019) und E. C. Stone et al., *Nat. Astron.* **3**, 1013 (2019)
- [4] L. F. Burlaga et al., *Nat. Astron.* **3**, 1007 (2019)
- [5] D. A. Gurnett und W. S. Kurth, *Nat. Astron.* **3**, 1024 (2019)
- [6] J. D. Richardson et al., *Nat. Astron.* **3**, 1019 (2019)
- [7] K. Scherer und H. Fichtner, *Physik Journal*, März 2007, S. 59
- [8] M. Scheucher et al., *Astrophys. J.* **863**, 6 (2018)

Autoren

Priv.-Doz. Dr. Horst Fichtner und **Dr. Klaus Scherer**, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Physik und Astronomie, 44780 Bochum

Der Neutrinomasse direkt auf der Spur

Das KATRIN-Experiment verbesserte die Obergrenze der Neutrinomasse um einen Faktor 2.

Werner Rodejohann

Neutrinos besitzen eine nicht-verschwindende Ruhemasse – entgegen der Vorhersage des ansonsten so erfolgreichen Standardmodells der Elementarteilchenphysik. Die Frage, wie groß diese Masse ist, beschäftigt Teilchenphysikerinnen und -physiker schon lange, auch die KATRIN-Kollaboration, die kürzlich ihr erstes Ergebnis veröffentlicht hat [1].

Im Standardmodell kommen drei Neutrinos vor, die entsprechend ihres „Flavors“ Elektron-, Muon- und Tau-Neutrino (ν_e , ν_μ und ν_τ) heißen. Fla-

vor ist keine Erhaltungsgröße der Natur. Neutrinooszillationen, bei denen sich z. B. Elektron-Neutrinos periodisch in Muon-Neutrinos und zurück umwandeln, haben dies zweifelsfrei belegt. Dies ist Physik jenseits des Standardmodells, denn nur massive Neutrinos sind zu diesem Verwandlungstrick in der Lage [2]. In diesem Fall besitzen Flavorzustände keine wohldefinierte Masse, sondern sind Linearkombinationen von Massenzuständen $\nu_{1,2,3}$, welche die Masse $m_{1,2,3}$ besitzen. So gilt etwa

$\nu_e = U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3$, wobei $U_{e1,2,3}$ die Elemente der sogenannten Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Mischungsmatrix sind. Diese lassen sich aus den beobachteten Amplituden in Oszillationsexperimenten extrahieren. Allerdings hängen Neutrinooszillationen nur von den Differenzen der quadrierten Neutrinomassen ab, nicht von den Massen selbst. Diese bleiben daher unbekannt. Aus diesem Grund sind andere Methoden erforderlich, um die Neutrinomasse zu bestimmen.

Drei Methoden kommen dafür infrage. Die Masse $m_{1,2,3}$ ist nicht direkt zu messen. Daher ist es notwendig, sie aus experimentell zugänglichen Parameterkombinationen zusammen mit anderen Messungen zu extrahieren. Die Summe $m_1 + m_2 + m_3$ lässt sich bestimmen, indem der kosmische Mikrowellenhintergrund und die großräumige Verteilung der Galaxien analysiert werden. Doch hierbei hängt das Ergebnis stark vom angenommenen kosmologischen Modell ab. Typische Obergrenzen für die Summe der Neutrinomassen im Standardszenario entsprechen Werten unterhalb $0,5 \text{ eV}$.¹⁾

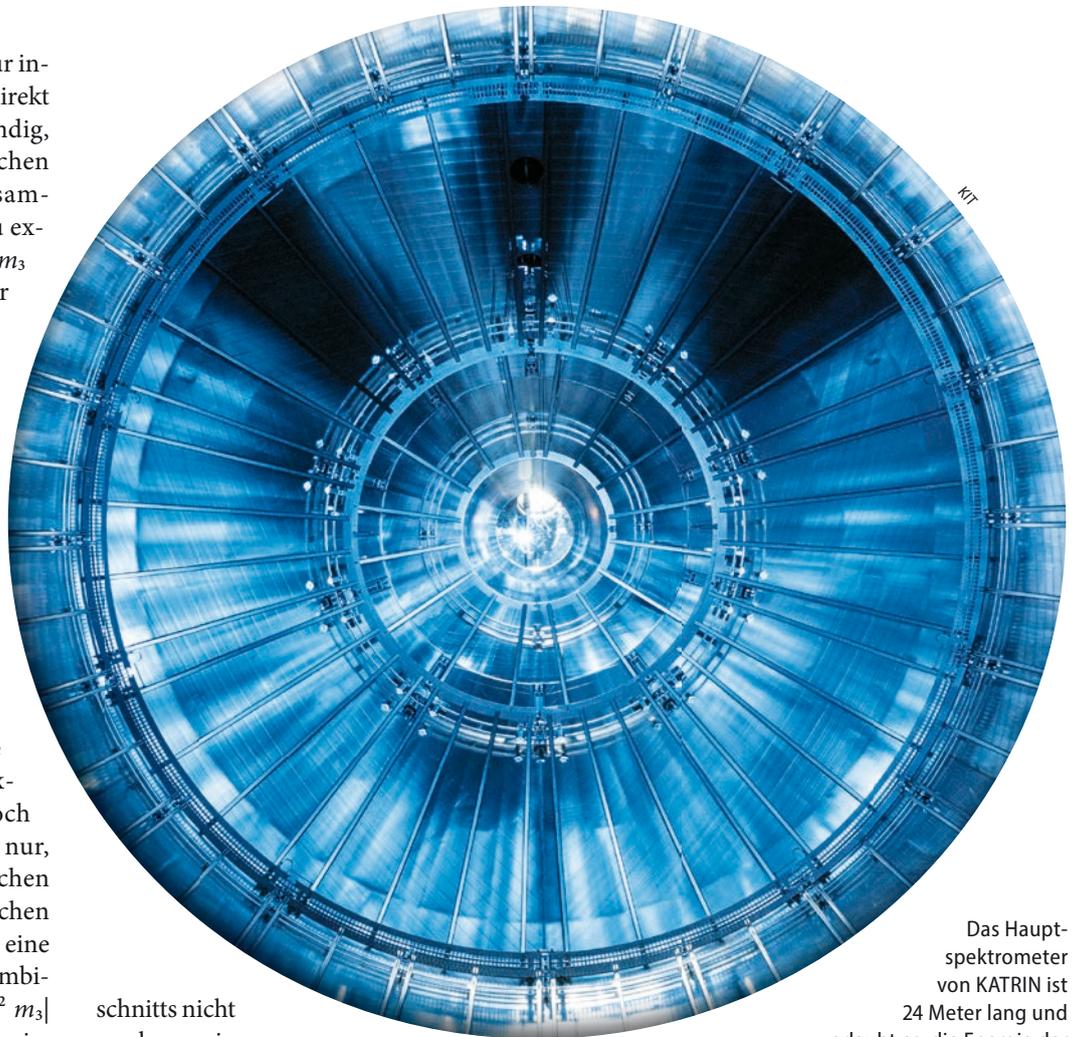
Eine alternative Messung ermöglicht der neutrinolose doppelte Betazerfall. Dieser extrem seltene Prozess wurde noch nicht beobachtet und existiert nur, wenn Neutrinos Majorana-Teilchen und damit ihre eigenen Antiteilchen sind [3]. In diesem Fall lässt sich eine Obergrenze für die Parameterkombination $|U_{e1}|^2 m_1 + |U_{e2}|^2 m_2 + |U_{e3}|^2 m_3|$ von etwa $0,2 \text{ eV}$ ermitteln. Viele existierende Modelle jenseits des Standardmodells können die Obergrenzen aus kosmologischen Messungen oder dem doppelten Betazerfall abschwächen oder komplett verschwinden lassen. Beide Methoden liefern daher modellabhängige Ergebnisse.

Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN) setzt auf die dritte Methode, nämlich die direkte Suche im Betazerfall. Dabei zerfällt innerhalb eines Atomkerns ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino $\bar{\nu}_e$. Diese Methode ist rein kinematisch und hängt daher nicht vom zugrundeliegenden Modell ab: Jede Obergrenze für die Neutrinomasse (oder eine Messung) gilt im Gegensatz zur Kosmologie und dem doppeltem Betazerfall in jedem denkbaren Szenario. Das Messprinzip geht auf Enrico Fermi zurück. Das Antineutrino ist aufgrund seines verschwindend geringen Wirkungsquer-

schnitts nicht nachzuweisen.

Daher gilt es, das Energiespektrum der Elektronen präzise zu vermessen. Im Fall verschwindender Neutrinomasse endet das Spektrum beim Endpunkt E_0 , der aus den Massen des Mutter- und Tochterkerns folgt. Ist die Neutrinomasse von Null verschieden, so kann das Elektron maximal eine entsprechend kleinere Energie besitzen. Das Spektrum ist dann charakteristisch verformt und proportional zu $\sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2}$, wobei E die kinetische Energie der Elektronen bezeichnet. Für die effektive Neutrinomasse gilt hier $m_\nu^2 = |U_{e1}|^2 m_1^2 + |U_{e2}|^2 m_2^2 + |U_{e3}|^2 m_3^2$.

Alle drei Methoden schränken demnach verschiedene Parameterkombinationen ein. Ein Vergleich der drei Ansätze ermöglicht es somit nicht nur, unsere Vorstellungen der Neutrinophysik zu bestätigen, sondern auch fundamentale Tests durchzuführen. Ohne quantitativ zu werden, lassen sich schnell Beispiele dafür geben: Tritt ein Signal in direkter Neutrinomassenbestimmung auf, aber nicht im doppelten Betazerfall,



Das Hauptspektrometer von KATRIN ist 24 Meter lang und erlaubt es, die Energie der Elektronen, die beim Betazerfall von Tritium entstehen, präzise zu vermessen.

könnte dies implizieren, dass Neutrinos keine Majorana-Teilchen sind. Findet das KATRIN-Experiment einen Hinweis auf eine Neutrinomasse, die Kosmologie jedoch nicht, könnte das Änderungen unseres kosmologischen Weltmodells erfordern. Die Komplementarität der drei Methoden macht experimentelle Anstrengungen in allen Bereichen notwendig.

Das 70 Meter lange KATRIN-Experiment auf dem Campus Nord des Karlsruher Instituts für Technologie untersucht den Betazerfall ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$. Tritium ist unter anderem aufgrund seines sehr niedrigen Endpunkts von $18,6 \text{ keV}$ ein attraktiver Kandidat, um die Neutrinomasse aufzuspüren. Die Ergebnisse der ersten Messphase demonstrieren eindrucksvoll die Funktionsfähigkeit des Experiments und zeigen, dass es gelungen ist, die vielen technischen Herausforderungen

1) Wir verwenden hier die in der Hochenergiephysik üblichen „natürlichen Einheiten“. Ein Elektronenvolt (eV) entspricht dabei $1,6 \cdot 10^{-26} \text{ J}$ oder $1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$.

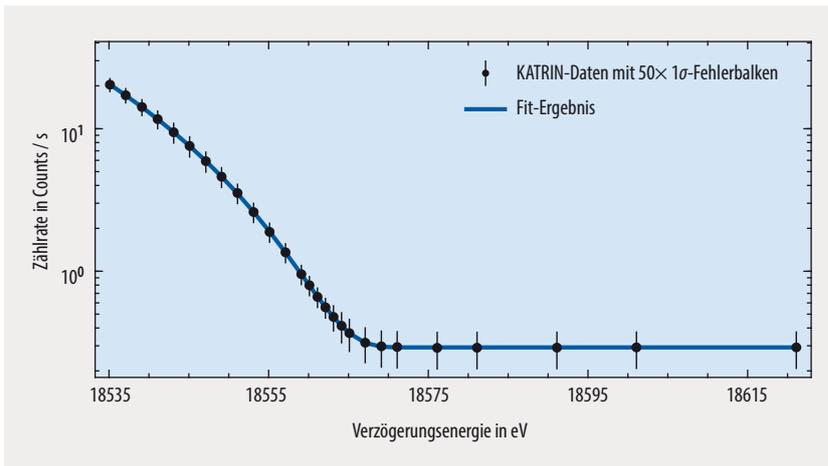


Abb. 1 Das beobachtete Elektronenspektrum im KATRIN-Experiment basiert bislang auf etwa zwei Millionen Elektronen und stimmt hervorragend mit dem Fit überein. Der 1 σ -Fehlerbalken ist 50-fach erhöht. Aufgetragen ist die Zählrate pro Sekunde in der Region kurz vor und nach dem Endpunkt 18,5737 keV. Messungen nach dem Endpunkt helfen, Untergrundprozesse zu verstehen. Da die Form des Spektrums nicht signifikant von der erwarteten Form abweicht, lässt sich eine Obergrenze für die Neutrinomasse angeben.

beim Aufbau zu überwinden (**Abb. 1**) [4]. Beispielsweise ist es erforderlich, die Quelle mit ihrem molekularen Tritium-Gas, das eine Aktivität von 100 GBq besitzt, auf einer im Promillebereich konstanten Temperatur von 30 K zu halten. Ein hochkomplexes Pumpensystem reduziert die Tritiumkonzentration zwischen Quelle und Detektor um einen Faktor 10^{14} . Eine Gegenspannung von 18,6 kV im Spektrometer gilt es, auf ppm-Niveau konstant zu halten. Das Spektrometer ist mit seinen zehn Metern Durchmesser der größte Ultrahochvakuum-Rezipient der Welt, dessen Restgasdruck nur 10^{-11} mbar

betragen darf. Das Spektrometer ist in der Lage, die Energie der Elektronen im eV-Bereich aufzulösen. Die Liste an technischen Herausforderungen ließe sich weiter fortsetzen. Aus der Analyse der qualitativ hochwertigen Daten ergab sich eine Neutrinomasse von $m_\nu < 1,1$ eV, mit 90 % Konfidenzniveau. Dieses Resultat verbessert die bisherige Obergrenze aus direkten Suchen – ebenfalls mit Tritium durchgeführt [5, 6] – um einen Faktor 2. Die Obergrenzen aus der Kosmologie und dem doppelten Betazerfall sind zwar stärker, wenn die Unterschiede in den Parameterkombinationen in Betracht gezogen werden. Allerdings sind

hier deren Modellabhängigkeit und die oben erwähnten fundamentalen Konsistenztests durch Vergleich der Messmethoden zu beachten. Zudem liefert die direkte Suche robusten laborbasierten Input, beispielsweise für kosmologische Simulationen.

Der bisherige Datensatz von KATRIN entspricht nur 0,5 Prozent der geplanten Exposition. Das künftige Physikprogramm beinhaltet auch die Suche nach exotischen sterilen Neutrinos oder neuen Wechselwirkungen. Das Hauptziel des Experiments besteht darin, die Grenze der Neutrinomasse bis 2024 auf 0,2 eV zu senken bzw. eine Masse größer als 0,35 eV zweifelsfrei zu messen. Der Weg dorthin ist frei – auch zu weiteren Tests unseres Neutrinobildes und dafür, den Mechanismus hinter der Neutrinomasse zu identifizieren.

- [1] M. Aker et al. [KATRIN Collaboration], Phys. Rev. Lett. **123**, 221802 (2019)
- [2] M. Lindner und C. Weinheimer, Physik Journal, Juli 2011, S. 31
- [3] J. Jochum und P. Grabmayr, Physik Journal, April 2019, S. 35
- [4] E. W. Otten und C. Weinheimer, Rep. Prog. Phys. **71**, 086201 (2008)
- [5] C. Kraus et al., Eur. Phys. J. C **40**, 447 (2005)
- [6] V. N. Aseev et al. [Troitsk Collaboration], Phys. Rev. D **84**, 112003 (2011)

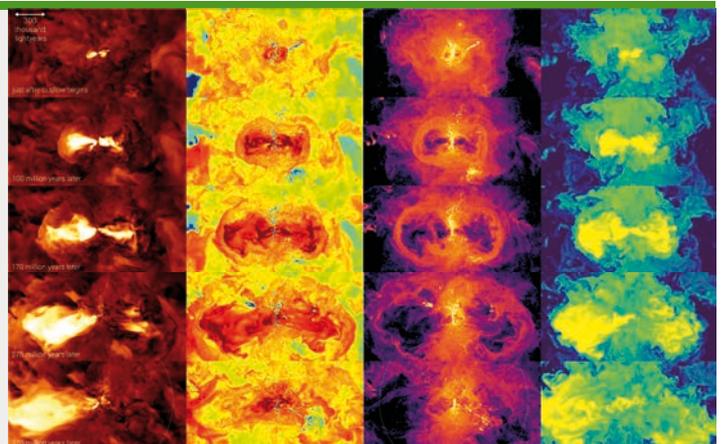
Autor

Dr. Werner Rodejohann, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg

Wie strömendes Gas Galaxien formt

Ein deutsch-amerikanisches Team hat die ersten Ergebnisse der bisher umfangreichsten Simulation zur Evolution von Galaxien vorgestellt. TNG50 verfolgt in einem würfelförmigen Ausschnitt mit 230 Millionen Lichtjahren Kantenlänge die Entwicklung tausender Galaxien während 13,8 Milliarden Jahren kosmischer Geschichte. Die Daten erlauben es, dies auch für einzelne Galaxien nachzuvollziehen. Dabei zeigte sich, wie aus hoch turbulenten Gaswolken schnell rotierende Scheibengalaxien mit geordneten Sternbewegungen entstehen. Außerdem ließ sich beobachten, wie Supernova-Explosionen und aktive galaktische Kerne dafür sorgen, dass Gas und Teilchenwinde mit hoher Geschwindigkeit aus Galaxien ausströmen und – beeinflusst vom Halo der Dunklen Materie – wieder auf die Galaxie zurückfallen, sodass sich eine dünne Scheibe entwickelt.

D. Nelson et al., MNRAS **490**, 3234 (2019) und A. Pillepich et al., MNRAS **490**, 3196 (2019)



Von links nach rechts: Geschwindigkeit, Temperatur und Dichte des ausströmenden Gases zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Häufigkeit schwerer Elemente