

Existenz weiterhin fraglich

Die neuesten Ergebnisse der Experimente STEREO und BEST führen zu widersprüchlichen Aussagen bezüglich der Frage, ob es sterile Neutrinos gibt.

Thomas Schwetz-Mangold

Sterile Neutrinos gehören wie die drei Neutrinos des Standardmodells der Teilchenphysik zu den elektrisch ungeladenen Fermionen. Anders als normale Neutrinos nehmen diese hypothetischen Elementarteilchen aber nicht an der schwachen Wechselwirkung teil: Sie sind „steril“ und wechselwirken mit Materie nur über eine kleine Beimischung mittels quantenmechanischer Superposition zu den normalen Neutrinos. Deren Stärke beschreibt der Mischungswinkel θ . Die theoretische Physik bietet eine wichtige Motivation für die Existenz steriler Neutrinos, da diese als einfache und natürliche Erweiterung des Standardmodells die Massen der normalen Neutrinos erklären können. Allerdings gibt es nur sehr wenige Anhaltspunkte zur erwarteten Masse der sterilen Neutrinos, die sich über 16 Größenordnungen erstrecken kann. Aus experimenteller Sicht ist ein interessanter Massenbereich für sterile Neutrinos die Elektronenvolt-Skala, also rund einen Faktor hundert bis tausend mehr als die typischen Massen normaler Neutrinos: Dann verraten sich sterile Neutrinos durch Neutrinooszillationen.

Neutrinooszillationen basieren auf einem quantenmechanischen Effekt, bei dem sich Neutrinos unterschiedlicher Sorten ineinander umwandeln.

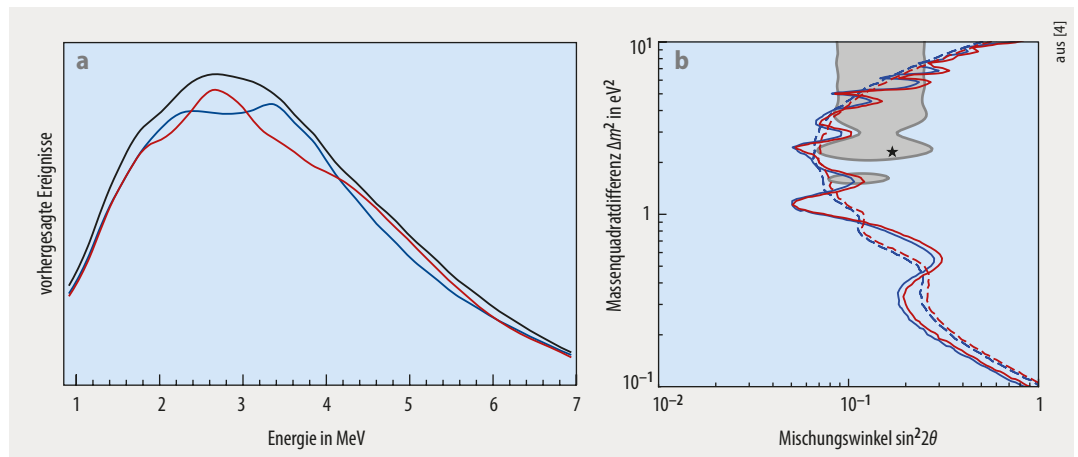
Die Übergangswahrscheinlichkeit oszilliert als Funktion des Verhältnisses L/E_ν aus der Entfernung zwischen Neutrinoquelle und Detektor L und der Neutrinoenergie E_ν . Die Differenz der Neutrinomassenquadrate bestimmt die Frequenz der Oszillationen, ein Mischungswinkel deren Amplitude. Dass die drei bekannten Neutrinosorten oszillieren, wurde vielfach experimentell bestätigt [1]; die Differenzen der Massenquadrate und der Mischungswinkel sind gut bestimmt.

Falls sterile Neutrinos mit einer Masse von einigen eV existieren, sollten sie sich in Experimenten zur Neutrinooszillation manifestieren, wenn der Mischungswinkel θ groß genug ist: abhängig von der Neutrinoenergie bei Entfernungen L von etwas weniger als einem Meter bis zu einigen hundert Metern. Hier treten Oszillationen der bekannten Neutrinos nicht auf: Ihre kleinen Massenquadratdifferenzen machen Oszillationen bei den relevanten Energien erst ab $L \gtrsim 1$ bis 100 km möglich. Treten also Oszillationen in geringem Abstand auf, beweist dies die Existenz einer neuen Neutrinosorte – der sterilen Neutrinos. Tatsächlich lieferten in den letzten zwei Jahrzehnten einige „Short-baseline“-Experimente kon-

troverse Resultate, die auf die Existenz steriler Neutrinos hindeuten [2, 3]. Nun liegen Ergebnisse von Experimenten mit Elektron-Neutrinos bzw. -Antineutrinos vor, die nach sterilen Neutrinos auf der eV-Skala suchen.

Eine deutsch-französische Kollaboration unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg hat das STEREO-Experiment am Forschungsreaktor des Instituts Laue-Langevin (ILL) in Grenoble durchgeführt. Der Detektor weist Antineutrinos nach: Er besteht aus sechs identischen Zellen mit Flüssigszintillator und befindet sich neun bis elf Meter vom Reaktorkern entfernt. Der Forschungsreaktor wird mit hoch angereichertem ^{235}U betrieben und brachte während der Datennahme eine durchschnittliche Leistung von etwa 53 MW. Beim β -Zerfall der Spaltprodukte von ^{235}U entstehen Elektron-Antineutrinos, die der STEREO-Detektor nachweisen kann. Seine Segmentierung erlaubt es, den Neutrinofluss in Abhängigkeit des Abstands zu bestimmen. Als charakteristische Signatur steriler Neutrinos gilt ein oszillatorisches Muster im Neutrinofluss, das vom Abstand zur Neutrinoquelle und von der Neutrinoenergie abhängt (Abb. 1a). Die neuesten experimentellen Daten [4]

Abb. 1 Sterile Neutrinos sollten laut Vorhersagen beim STEREO-Experiment in Abhängigkeit vom betrachteten Detektorsegment unterschiedliche Oszillationen im Spektrum hervorrufen (a, blau und rot), die sich signifikant von der Situation ohne sterile Neutrinos (schwarz) unterscheiden. Die Messergebnisse von STEREO (b, blau und rot) schließen fast den gesamten Parameterbereich aus, der die Anomalie erklären könnte (grau) inklusive dem besten Fit (Stern).



belegen einen etwas kleineren Gesamtfluss von Antineutrinos, als ihn Modellrechnungen vorhersagen. Damit bestätigt STEREO die sogenannte Reaktor-Antineutrino-Anomalie, die sich durch die Umwandlung der Elektron-Antineutrinos in sterile Neutrinos erklären lässt [5]. Innerhalb der Messgenauigkeit zeigen sich aber keine Oszillationen im Neutrinofluss, sodass sich für einen großen Parameterbereich von Mischungswinkel und Massenquadratdifferenzen sterile Neutrinos ausschließen lassen (**Abb. 1b**). Die beobachtete Anomalie muss andere Ursachen haben, etwa die Modellierung des Antineutrino-flusses bei der Kernspaltung von ^{235}U [6].

Das Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) verwendet eine radioaktive ^{51}Cr -Quelle mit einer Aktivität von $3,4 \cdot 10^6$ Curie als Neutrinoquelle. Sie befindet sich im Zentrum zweier getrennter Detektorvolumina mit insgesamt rund 47 Tonnen metallischem Gallium. Der Außenzylinder ist 2,345 Meter hoch und hat einen Durchmesser von 2,18 Metern. In der Reaktion $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$ werden ein Neutrino und ein Galliumatom in ein Elektron und ein Germaniumatom umgewandelt. Die Zahl der nachgewiesenen Neutrinos ergibt sich aus der radiochemischen Extraktion einzelner ^{71}Ge -Atome aus dem Detektormaterial. Diese Methode ist gut etabliert und getestet:

Sie kommt seit Jahrzehnten beim Nachweis von Sonnenneutrinos zum Einsatz, zum Beispiel bei SAGE, GALLEX und GNO. Der Neutrinofluss, den die ^{51}Cr -Quelle emittiert, lässt sich sehr genau aus der Wärme vorhersagen, welche die Quelle abgibt. Das BEST-Experiment beobachtet in beiden Detektorvolumina rund 20 bis 24 Prozent weniger Neutrino-induzierte Ereignisse als erwartet mit einer Signifikanz zwischen 5 und 6σ [7]. Damit bestätigt es die sogenannte Gallium-Anomalie ähnlicher Messungen von SAGE [8] und GALLEX [9], deren Signifikanz mit 2 bis 3σ allerdings geringer ist. Oszillationen mit sterilen Neutrinos könnten die kombinierten Ergebnisse der Gallium-Messungen erklären, wenn sich ein Teil der emittierten Elektronneutrinos nach wenigen Zentimetern in sterile Neutrinos umwandelt. Dazu ist aber ein relativ großer Mischungswinkel von $\sin^2 2\theta \approx 0,2 - 0,4$ nötig (**Abb. 2**). Außerdem schließen Schranken von Reaktorexperimenten den Parameterbereich teilweise aus, der das Ergebnis von BEST erklären kann; dazu gehört auch das STEREO-Experiment. Solch große Mischungswinkel steriler Neutrinos stehen auch in Konflikt mit Beobachtungen solarer Neutrinos [10].

Das Ergebnis von BEST macht die Gallium-Anomalie zu einem hochsignifikanten Effekt, für den es derzeit keine plausible Erklärung gibt. Unsi-

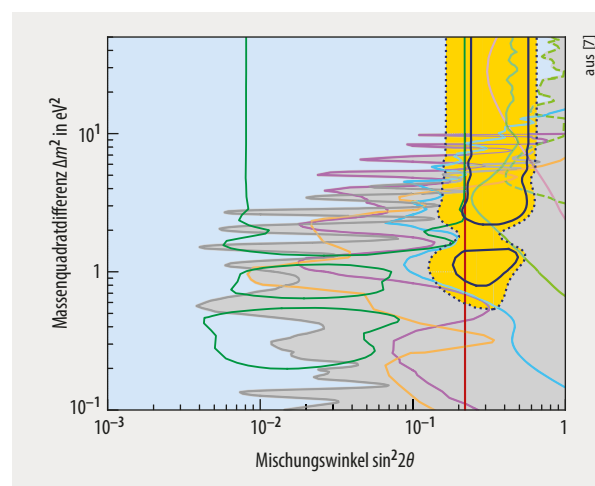


Abb. 2 Um das Ereignisdefizit beim BEST-Experiment zu erklären, braucht es bestimmte Parameterkombinationen von Massenquadratdifferenz und Mischungswinkel (gelb), die sich deutlich vom erlaubten Bereich für die Reaktor-Anomalie (dunkelgrün) unterscheiden und im Widerspruch zu Beobachtungen solarer Neutrinos (rot) und teilweise auch des KATRIN-Experiments (rosa) stehen. „Short-baseline“-Experimente, wie DANSS (orange), STEREO (lila), Prospect (hellblau) und MicroBooNE (hellgrün) schließen in Kombination (grau) weitere Wertebereiche aus.

cherheiten im Detektionswirkungsquerschnitt reichen vermutlich nicht aus, um ihn zu erklären [10, 11]; Oszillationen steriler Neutrinos bleiben aus oben genannten Gründen fraglich. In naher Zukunft dringt das KATRIN-Experiment weiter in den relevanten Parameterbereich vor und kann diese Hypothese überprüfen [12].

- [1] G. Drexlin et al., Physik Journal, Dezember 2015, S. 24
- [2] S. Böser et al., Prog. Part. Nucl. Phys. **111**, 103736 (2020)
- [3] M. Dentler et al., JHEP **08**, 010 (2018)
- [4] STEREO Coll., Nature **613**, 257 (2023)
- [5] G. Mention et al., Phys. Rev. D **83**, 073006 (2011)
- [6] C. Giunti et al., Phys. Lett. B **829**, 137054 (2022)
- [7] V. V. Barinov et al., Phys. Rev. Lett. **128**, 23232501 (2022)
- [8] D. N. Abdurashitov et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 4708 (1996)
- [9] F. Kaether et al., Phys. Lett. B **685**, 47 (2010)
- [10] J. M. Berryman et al., JHEP **02**, 055 (2022)
- [11] C. Giunti et al., arXiv:2212.09722 (2022)
- [12] KATRIN Coll., Phys. Rev. D **105**, 072004 (2022)

Der Autor

Prof. Dr. Thomas Schwetz-Mangold, Institut für Astroteilchenphysik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76021 Karlsruhe

Kurzgefasst

Ein sehr heller, uralter Quasar

Das Röntgenteleskop eROSITA hat einen Quasar bei einer Rotverschiebung von $z = 6,56$ beobachtet, der sehr viel heller als erwartet strahlt. Quasare sind aktive Galaxienkerne, die als supermassereiche Schwarze Löcher Materie akkretieren. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen leichten Vertreter mit „nur“ 250 Mio. Sonnenmassen, der mit extrem hoher Rate Masse aufnimmt. Das analysierte Signal wurde etwa 800 Mio. Jahre nach dem Urknall emittiert und ermöglicht, das Wachstum von Schwarzen Löchern im frühen Universum zu untersuchen. Die Himmelsdurchmusterung mit eROSITA könnte Hunderte solcher Quasare erfasst haben und evolutionäre Modelle auf die Probe stellen.

J. Wolf et al., A&A **669**, A127 (2023)

Spontan im Schwarm

Forschende an der U Leipzig haben laserbetriebene synthetische Mikroschwärme benutzt, um eine vermeintliche Schwarmintelligenz zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass schon einfache physikalische Mechanismen im Zusammenspiel mit Brownscher Bewegung dazu führen können, dass sich die Schwärme spontan organisieren. Im konkreten Fall sorgte eine programmierte Zeitverzögerung beim Wahrnehmen der Umgebung dafür, dass sich beim Anstreben eines festen Raumpunkts kein dichter Pulk ergibt, sondern eine gemeinsame spiralförmige Bewegung. Bei zahlenmäßig größeren Schwärmen sind Wechselwirkungen untereinander nötig, um die Umlaufbahnen zu stabilisieren.

X. Wang et al., Nat. Commun. **14**, 56 (2023)