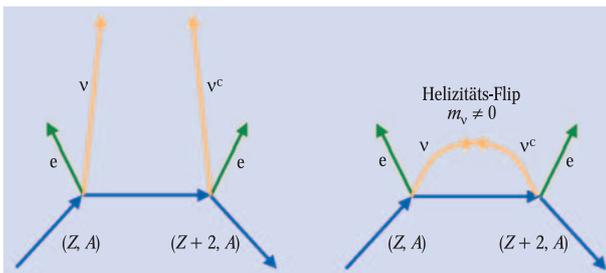


## Evidenz für den neutrino-losen Doppel-Betazerfall ?

*Das Experiment einer deutsch-russischen Forschergruppe sorgt für Aufregung. Reichen die Daten aus, um das Standardmodell der Teilchenphysik ins Wanken zu bringen? Kritiker bezweifeln dies.*

Die Frage, ob Neutrinos eine Masse haben, steht seit Jahrzehnten im Zentrum der Teilchenphysik – unter anderem auch wegen ihrer Bedeutung für die Dunkle Materie im Universum. In den letzten Jahren haben Experimente zu Neutrino-Oszillationen mit in der Sonne oder in der Atmosphäre erzeugten Neutrinos die Evidenz verstärkt, dass die Massen der drei Neutrino-Spezies nicht alle null sind. Nun rückt immer mehr die Frage nach den Werten der einzelnen Massen in den Mittelpunkt. Heidelberger und Moskauer Physiker haben kürzlich eine endliche Neutrinomasse publiziert, die sie bei der Suche nach dem so genannten neutrino-losen Doppel-Betazerfall erhalten haben [1]. Dieses Ergebnis hat in den letzten Wochen für große Aufregung gesorgt – Kritiker sind skeptisch, ob die Ergebnisse richtig gedeutet wurden.

Bereits 1935 hat Maria Goepfert-Mayer die Möglichkeit des doppelten Betazerfalls von be-



**Der Doppel-Betazerfall unter Emission zweier Neutrinos (links) ist ein Standardprozess der Kernphysik. Da sich die Energie zwischen Elektronen und Neutrinos aufteilt, erhält man ein breites Elek-**

**tronenspektrum. Der neutrino-lose Doppel-Betazerfall (rechts) liefert dagegen eine scharfe Linie und ist möglich, wenn das Neutrino eine Masse hat und sich so seine Helizität umkehren kann.**

stimmten Kernen mit gerader Protonen- und Neutronenzahl (gg-Kerne) unter Emission von zwei Elektron-Antineutrinos vorhergesagt [2]:  $(Z, A) \rightarrow (Z+2, A) + 2e^- + 2\nu_e^c$ . Dieser Zerfallsmodus erhält die Leptonenzahl und ist daher im Standardmodell der Teilchenphysik erlaubt. Eindeutig wurde er zuerst 1987 in den USA an  $^{82}\text{Se}$  nachgewiesen [3]. Da der doppelte Betazerfall ein Prozess zweiter Ordnung der schwachen Wechselwirkung ist,

sind die Lebensdauern sehr groß –  $1,1^{+0,8}_{-0,3} \times 10^{20}$  Jahre bei  $^{82}\text{Se}$  – und demzufolge schwierig zu messen. Im Laufe der Zeit gelang es mit besseren Experimenten, die Lebensdauern mehrerer gg-Kerne immer genauer zu bestimmen.

Im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik sind Neutrino und Antineutrino unterschiedliche Teilchen, die durch die sog. Dirac-Gleichung beschrieben werden. Um 1937 entwickelte Ettore Majorana eine Theorie, in der Neutrino und Antineutrino hingegen identische Teilchen sind ( $\nu^c = \nu$ ). Aus dieser Theorie folgt, dass auch ein neutrino-loser Doppel-Betazerfall möglich wäre, bei dem ein Majorana-Neutrino als Antiteilchen emittiert, aber als Teilchen absorbiert würde:  $(Z, A) \rightarrow (Z+2, A) + 2e^-$ . Da dieser Zerfall die Erhaltung der Leptonenzahl verletzt, ist er im Standardmodell verboten. Darüber hinaus ist er nur möglich, falls die Neutrinomasse endlich ist oder die schwache Wechselwirkung einen rechtshändigen Anteil besitzt (im Standardmodell koppelt die schwache Wechselwirkung nur an linkshändige Neutrinos oder an rechtshändige Antineutrinos). Der Grund liegt darin, dass ein rechtshändiges Antineutrino emittiert wird, dieses aber als linkshändiges Neutrino absorbiert werden soll. Die Wahrscheinlichkeit dieser Helizitätsverletzung ist umso höher, je größer die Majorana-Neutrinomasse ist. Die Suche nach dem doppelten Betazerfall ist daher ein empfindliches Instrument, um das Standardmodell zu überprüfen, die Natur des Neutrinos zu untersuchen (ist es vom Majorana- oder Dirac-Typ?) und seine Masse zu bestimmen.

Die weltweit empfindlichste Messung zum neutrino-losen Doppel-Betazerfall findet im Rahmen des Heidelberg-Moskau-Experimentes im Gran Sasso-Untergrundlabor in Italien statt. Unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg werden Germaniumdetektoren verwendet, die mit dem Isotop  $^{76}\text{Ge}$  hochangereichert sind, bei dem der Doppel-Betazerfall auftritt. Durch die konsequente Abschirmung vor störenden Einflüssen ist das Experiment sensitiv auf die geringsten Raten, die längsten Zerfallslebensdauern und damit auf die kleinsten Neutrinomassen.

Im Experiment wird nach dem Auftreten zweier Elektronen gesucht, deren gesamte kinetische En-

ergie der beim radioaktiven Zerfall insgesamt freigesetzten Energie entspricht und sich daher als eine Linie im Energiespektrum bei diesem Energiewert zeigen würde. Vor wenigen Wochen wurde von einigen Wissenschaftlern der Kollaboration, darunter dem Sprecher des Experiments Hans Volker Klapdor-Kleingrothaus, eine neue Analyse der Messdaten veröffentlicht und eine Evidenz für eben solch eine Linie im Energiespektrum und damit ein starker Hinweis für den neutrino-losen Doppel-Betazerfall gefunden [1]. Die Auswertung solcher Daten am Limit der Begrenzung durch Untergrund-Ereignisse ist nicht einfach. In den veröffentlichten Daten ist die Linie auch zunächst nicht so ohne weiteres zu sehen. Diese Tatsache und die immense Bedeutung, die solch eine Beobachtung für die Teilchenphysik und die Kosmologie hätte, haben weltweit eine Reihe von Wissenschaftlern zu sehr kritischen Kommentaren veranlasst [4, 5]. Sie gehen bis zur der Aussage, dass entweder diese außerordentliche Behauptung nicht ausreichend belegt sei, oder sogar eine zweifelhafte Analyse zu einer falschen Schlussfolgerung geführt habe.

Die Daten selbst werden einhellig als die besten ihrer Art anerkannt; die Kritik entzündet sich an dem verwendeten statistischen Verfahren zum Auffinden schwacher Linien im Spektrum. Eine dieser Linien liegt bei der freigesetzten Energie des Doppel-Betazerfalls von  $^{76}\text{Ge}$  und wird entsprechend als neutrino-loser Doppel-Betazerfall interpretiert. Für die Kritiker ist dies nicht zulässig, da es auch noch andere Linien gibt, deren Ursprung noch nicht geklärt ist.

Sollte sich die Evidenz bestätigen, so würde dies einer effektiven Masse des Elektron-Neutrinos von ca.  $(0,11-0,56) \text{ eV}/c^2$  entsprechen (die Flavour-Eigenzustände Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino sind Linearkombination der drei Massen-Eigenzustände). Um das Ergebnis zu untermauern, bedarf es besserer Datenstatistik und damit größerer Experimente. Weltweit gibt es einige Projekte, um in den Massebereich unterhalb von  $0,1 \text{ eV}/c^2$  vorzustoßen. So z. B. im Gran Sasso-Labor: GENIUS mit  $^{76}\text{Ge}$  in Germanium-Detektoren, CUORE mit  $^{130}\text{Te}$  in Tieftemperatur-Kalorimetern oder CAMEO mit  $^{116}\text{Cd}$  in Szintillations-Kristallen. Die Vielzahl unterschiedlicher Iso-

tope und unterschiedlicher experimenteller Techniken wird helfen, systematische Unsicherheiten zu begrenzen und die behauptete Evidenz zu bestätigen oder zu widerlegen. Es wird aber noch ein paar Jahre dauern, um genügend Daten entsprechender Qualität zu sammeln, weshalb uns die Diskussion um die nun gefundene Evidenz noch eine Weile erhalten bleiben wird.

JOSEF JOCHUM,  
LOTHAR OBERAUER

- [1] H. V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Mod. Phys. Lett. **16** Nr. 37, 2409 (2001), und hep-ph/0201231
- [2] M. Goepfert-Mayer, Phys. Rev. **48**, 512 (1935).
- [3] M. K. Moe, S. R. Elliot und A. A. Hahn, Phys. Rev. Lett. **59**, 2020 (1987).
- [4] F. Feruglio et al., hep-ph/0201291
- [5] C. E. Aalseth et al., hep-ex/0202018

## Erste Erfolge bei „sphärischen Tokamaks“

**Ein heißes Plasma einzufangen, ist die hohe Kunst der Fusionsforscher. Kugelförmige Reaktoren konnten nun erstmals lange Einschlusszeiten erreichen. Für einen Reaktor genügt das allerdings noch nicht.**

In der Fusionsforschung werden heiße Plasmen in toroidalen Anordnungen durch magnetische Felder eingeschlossen und – zum Zünden der Fusionsreaktionen – auf Temperaturen über 100 Millionen Kelvin erhitzt. In einem künftigen Fusionskraftwerk würden die Fusionsreaktionen mehr Leistung erzeugen, als zuvor für Aufbau und Einschluss des Plasmas aufgewandt werden musste. Gleich zwei Gruppen haben kürzlich über wichtige Entwicklungsschritte beim Plasmaeinschluss in so genannten „sphärischen Tokamaks“ berichtet [1, 2].

Derzeit werden hauptsächlich zwei Konzepte zum Plasmaeinschluss untersucht – der Tokamak und der Stellarator. Beim Stellarator wird das zum Plasmaeinschluss benötigte Magnetfeld ausschließlich durch äußere Magnetfeldspulen erzeugt, wodurch ein Stellarator prinzipiell für stationären Betrieb geeignet ist. Dagegen nutzen Tokamaks einen im Plasma fließenden Strom, um einen Teil des benötigten Magnetfeldes aufzubauen und zugleich das Plasma zu heizen. Der Plasmastrom wird durch Induktion erzeugt: Das Plasma ist also die Sekundärwindung eines Transformators, dessen Primärwindung – wie die Nabe eines Rades – als Magnetspule in der Achse des Plasmarings steht. Durch die Nutzung der Induktion ist ein Tokamak zunächst für stationären Betrieb nicht geeignet. Die intrinsische Heizung hat ihm aber zu einer sehr erfolgreichen Entwicklung verholfen, sodass der Tokamak das zurzeit am weitesten entwickelte Konzept darstellt. Auch ITER, der geplante internationale Experimentalreaktor, der erstmals Plasmen mit einer positiven Leistungsbilanz erzeugen soll [3], wird ein Tokamak sein.

Da solche Anlagen groß – und damit auch teuer – sein werden, untersucht man parallel dazu Alternativen, deren eine darauf beruht, den Plasmatorus kompakter zu gestalten. Sichtbar wird dies im so genannten Aspektverhältnis – dem

Verhältnis aus dem Radius  $R$  des Torus zum Radius  $a$  des Plasmaschlauches. Dieses Verhältnis liegt heute bei allen Tokamaks im Bereich von 3 bis 3,5. Ihre Form ähnelt damit einem LKW-Reifen oder einem Doughnut. Beim sphärischen Tokamak, wie er 1986 von Y. Peng und D. Strickler vorgeschlagen wurde, liegt dieses Verhältnis bei etwa 1,3, d. h. er ist kompakter. Die Form erinnert an einen Apfel mit ausgestochenem Kerngehäuse. Das Volumen, in dem das Magnetfeld erzeugt werden muss, ist viel kleiner als bei konventionellen Tokamaks, was die Kosten deutlich senkt. Auch ist diese Form magnetohydrodynamisch stabiler, da die Magnetfeldlinien, die sich um den Plasmatorus herumwinden, nun viel länger im Innenbereich des Torus – einem Bereich „günstiger“ Krümmung – herumlaufen.

Priv.-Doz. Josef Jochum, Physik Department E15, TU München, 85747 Garching;  
Dr. Lothar Oberauer, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien

## New Scientist findet Antimaterie

Zu den Bestsellern der Physik gehört die Antimaterie. Und so war es keine Überraschung, dass die Meldung vom New Scientist über Spiegel Online bis zum Bayerischen Rundfunk schnell die Runde machte: Forscher fangen erstmals Antiatome. Allein die Doktoranden am Europäischen Zentrum für Elementarteilchenphysik in Genf (Cern) wussten noch nichts von ihrem Glück.

Was war geschehen? Gerald Gabrielse (Foto), Sprecher der Atrap-Kollaboration am Cern, hatte auf einer Tagung die jüngsten Ergebnisse seiner Gruppe vorgestellt.

Beim Atrap-Experiment (Antihydrogen Trap Collaboration) werden Positronen und Antiprotonen in zwei übereinander liegenden Teilchenfallen zunächst getrennt voneinander gespeichert. Anschließend bringen die Cern-Forscher beide Wolken zum Überlapp. Dabei sollen Antiwasserstoffatome durch Dreikörperstöße entstehen. Um dies zu testen, wird kurzzeitig ein elektrisches Feld angelegt, das alle geladenen Teilchen herauskatapultiert. Was übrig bleibt, könnte neutraler An-

tiwasserstoff sein. Tatsächlich wiesen Gabrielse und Mitarbeiter einige Antiprotonen und Positronen nach, doch ebenso gut lassen sich die Resultate durch ein quasi-neutrales Antiproton-Positron-Plasma erklären, das vom elektrischen Feld ebenso wenig beeinflusst wird. „Möglicherweise haben wir Antiwasserstoff erzeugt,“ sagte Gabrielse auf der AAAS-Tagung in Boston und ver-

wies auf die alternativen Interpretationen. „Erstmals Antimaterie gespeichert“, schrieb der Reporter vom New Scientist in seiner Online-Meldung. Nachdem Ga-

brielse vergeblich und wiederholt um Korrektur gebeten hatte, warf er der Redaktion in einer Email bewusste Fehlinformation vor: „Warum machen Sie immer noch Aussagen, von denen Sie wissen, dass sie falsch sind?“ Mit Beginn der nächsten Strahlzeit im Mai wollen die Cern-Forscher herausfinden, ob sich tatsächlich Antiwasserstoff zwischen ihren Elektroden befindet. Hoffentlich gibt es dann keinen Prioritätenstreit mit der Presse. (MR/Foto: CERN)

