

Energiespektrum der registrierten Signale (Counts, rot). Die grüne Linie zeigt das Niveau der Hintergrundsignale im interessanten Bereich um $Q_{\beta\beta}$. Die blaue Linie entspricht der Intensität eines hypothetischen Signals mit einer Halbwertszeit von $1,8 \times 10^{26}$ Jahren. Graue Fläche: Energieverteilung des $2\nu\beta\beta$ -Zerfalls; schattierte Balken: Energiefenster von Linien bekannter radioaktiver Zerfälle.

reicher Präzision messen: sie beträgt 2×10^{21} Jahre. Den neutrinolosen Doppelbetazerfall hat es allerdings nicht gefunden, jedoch die untere Grenze für dessen Halbwertszeit auf $1,8 \times 10^{26}$ Jahre verbessert – das ist um 16 Größenordnungen länger als das Alter des Universums! Mit LEGEND-1000 sollen letztendlich Halbwertszeiten in der Größenordnung von 10^{28} Jahren messbar sein.

Beiträge des MPIK

GERDA wurde 2004 vom MPIK initiiert und von 15 europäischen Instituten gemeinsam betrieben. Bei LEGEND sind weitere europäische sowie amerikanische und chinesische Institute dazugekommen. Wesentliche MPIK-Beiträge zu GERDA umfassen die Konstruktion des riesigen, mit flüssigem Argon gefüllten Isoliergefäßes, die Aufarbeitung der angereicherten Dioden früherer Experimente, die filigrane Detektoraufhängung und das Datenaufnahmesystem mit Software. Nicht zuletzt waren die MPIK-Forscher führend bei Auswahl und Überprüfung der Reinheit der Materialien für den Bau. Hier war die langjährige Erfahrung mit Low-Level-Techniken, also dem Aufspüren geringster Mengen an Radioaktivität, entscheidend. Außerdem lieferte das MPIK einen Detektorteststand und entwickelte Teile des Flüssig-Argon-Vetos, das ab der zweiten Messphase zum Einsatz kam. Beim Umbau von GERDA zu LEGEND-200 spielt das MPIK die zentrale Rolle und ist für die Produktion weiterer Detektoren, den mechanischen Aufbau und das Datenerfassungssystem zuständig.

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Schwingenheuer
Tel.: 06221 516614
E-Mail: b.schwingenheuer@mpi-hd.mpg.de

Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Lindner
Tel.: 06221 516800
E-Mail: manfred.lindner@mpi-hd.mpg.de

Prof. Dr. Jim Hinton
Tel.: 06221 516140
E-Mail: jim.hinton@mpi-hd.mpg.de



Sind Neutrinos Majorana-Teilchen?

GERDA/LEGEND-200



Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg

www.mpi-hd.mpg.de



Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eines von 86 Instituten und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft. Das MPIK betreibt experimentelle und theoretische Grundlagenforschung auf den Gebieten der Astroteilchenphysik und der Quantendynamik.



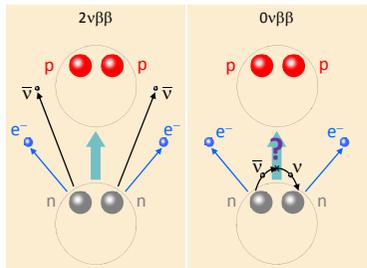
Sind Neutrinos Majorana-Teilchen?

GERDA/LEGEND-200

Neutrinos sind neben Photonen die häufigsten Teilchen im Universum. Dennoch bemerken wir sie nicht, weil sie mit Materie nur schwach wechselwirken. Eine mögliche, ganz außerordentliche Eigenschaft hat Ettore Majorana in den 1930er Jahren vorgeschlagen: Im Gegensatz zu allen anderen Teilchen, aus denen die uns umgebende Materie besteht, könnten Neutrinos mit ihren Antiteilchen identisch sein. Dies würde zahlreiche neuartige theoretische Konzepte untermauern, die unser Verständnis vom Aufbau der Materie und der Entwicklung des Universums beträchtlich erweitern würden.

Der Doppelbetazerfall und das Neutrino

Beim einfachen Betazerfall zerfällt ein Neutron in einem Kern in ein Proton, ein Elektron (β -Teilchen) und ein Antineutrino. Einigen Isotopen, darunter das Germanium-Isotop ^{76}Ge , ist dieser einfache Betazerfall aus Energieerhaltungs-Gründen nicht erlaubt, wohl aber ist die gleichzeitige Umwandlung von zwei Neutronen unter Emission zweier Antineutrinos ($2\nu\beta\beta$)



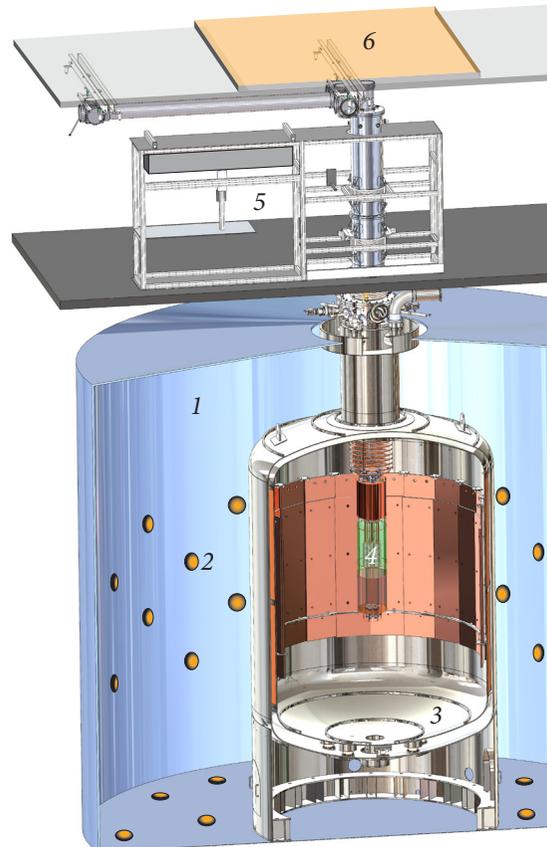
Fall wird das Antineutrino des einen Betazerfalls vom zweiten beta-zerfallenden Neutron absorbiert, was nur möglich ist, wenn Neutrino und Antineutrino identisch sind.

Die Suche nach dem neutrinolosen Doppelbetazerfall ($0\nu\beta\beta$) geschieht durch Messung der Energie der beiden emittierten Elektronen. Ist die Summe der Energien gleich der Gesamtenergie des Zerfalls ($Q_{\beta\beta} = 2039 \text{ keV}$ bei ^{76}Ge), so hat ein $0\nu\beta\beta$ -Zerfall stattgefunden. Einen neutrino-behafteten Doppelbetazerfall ($2\nu\beta\beta$) erkennt man daran, dass die Gesamtenergie der Elektronen kleiner ist, weil ein Teil der Energie an die Antineutrinos abgegeben wird.

GERDA und LEGEND

Bei GERDA (germanium detector array) und seinem Nachfolgeexperiment LEGEND-200 (large enriched germanium experiment for neutrinoless $\beta\beta$ decay) dient ^{76}Ge als Quelle und zugleich als Detektor des Doppelbetazerfalls. Aus Germanium lassen sich Halbleiterdetektoren (Dioden) herstellen, welche eine sehr gute Energieauflösung haben. Die Experimente nutzen speziell von natürlichen 8% auf ca. 88% ^{76}Ge angereichertes Germanium.

GERDA startete im Herbst 2011 mit Germaniumdioden mit einer Masse von insgesamt 15 kg und erreichte im Endausbau gut 40 kg ^{76}Ge . Die Messungen liefen bis Ende 2019. Mit dem Umbau zu LEGEND-200 wird die Masse schrittweise auf 200 kg erhöht. Ein späterer neuer Aufbau mit bis zu 1 Tonne Germanium ist bereits in Planung (LEGEND-1000).



Aufbau von GERDA und LEGEND-200: Wassertank (1) mit Lichtsensoren (2), darin Flüssigargon-Kryostat (3) mit Ge-Detektoren (4), darüber Reinraum (5) und Plastik-Szintillatorplatten (6).

Die Germaniumdioden hängen in einem Tank mit flüssigem Argon, der wiederum in einem riesigen Tank mit hochreinem Wasser steht, und das Ganze befindet sich im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor. Doch wozu der ganze Aufwand?

Unterdrückung von radioaktiver und kosmischer Strahlung

Die sprichwörtliche Suche nach einer Nadel im Heuhaufen ist eine Kleinigkeit gegenüber dem Nachweis des Doppelbetazerfalls, weil die natürliche Radioaktivität der Umgebung milliardenfach stärker ist. Der Zerfall vieler verschiedener radioaktiver Isotope sowie die kosmische Strahlung können im Detektor den $0\nu\beta\beta$ -Zerfall überlagern und damit verdecken. Daher ist es äußerst wichtig, diese radioaktiven Strahlungen vom Detektor fernzuhalten.

Die Detektoren und die sie umgebenden Teile wurden daher sehr sorgfältig ausgewählt und verarbeitet. Die Beobachtung des äußerst seltenen Prozesses erfordert außerdem ausgefeilte Techniken, um den Untergrund kosmischer Teilchen, natürlicher Radioaktivität der Umgebung und sogar des experimentellen Aufbaus selbst weiter zu unterdrücken.

Die filigranen Halterungen der Germaniumdioden bestehen aus hochreinem Kupfer. Auch Argon lässt sich sehr sauber aufbereiten, und es absorbiert radioaktive Strahlung aus den umgebenden Bauteilen. Das dabei entstehende Licht wird registriert und dient als „Veto“. Das -186°C kalte flüssige Argon kühlt auch die Germanium-Kristalle, was deren Energieauflösung zugutekommt. Diese sind in Strängen zusammengefasst (s. Titelbild) und von einer abschirmenden Hülle umgeben. Im äußeren Wassertank und von darüber angeordneten Plastik-Szintillatorplatten wird durchgehende kosmische Strahlung nachgewiesen. Erst die Kombination all dieser innovativen Techniken ermöglichte es, die Störsignale auf das weltweit niedrigste Niveau zu senken.

Ergebnisse von GERDA

GERDA hat alle angepeilten Ziele erreicht und in mehreren Messperioden insgesamt 127 kg·Jahre an Daten gesammelt. Um eine möglichst objektive Auswertung zu gewährleisten, war der Signalebereich solange ausgeblendet, bis alle Eichungen und Filter festgelegt und alle Analyseschritte optimiert waren. Bereits in seiner ersten Messphase konnte GERDA die Halbwertszeit des $2\nu\beta\beta$ -Zerfalls mit bis dahin uner-