

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: TU Dresden

Projektleitung: Prof. Dr. Kai Zuber

Verbund: Projekt 05A2020, Teilprojekt 4 05A200D1

Thema: GERDA: Suche nach dem neutrinolosen doppelten Beta-Zerfall in ^{76}Ge mit GERDA und LEGEND

Zusammenfassung

Das LEGEND-Experiment verfolgt das Ziel, den neutrinolosen doppelten Betazerfall ($0\nu\beta\beta$ -Zerfall) zu untersuchen, um den möglichen Majorana-Charakter von Neutrinos zu erforschen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden grundlegende Erkenntnisse zur Entstehung der Materie im Universum sowie zur Erzeugung der Neutrinomasse liefern. Die Suche nach dem $0\nu\beta\beta$ -Zerfall stellt zudem eine Untersuchung neuer Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik dar.

Das Vorgängerexperiment GERDA erreichte als weltweit erstes Experiment eine Empfindlichkeit für die Halbwertszeit des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls von über 10^{26} Jahren. LEGEND baut auf diesen Ergebnissen auf und vereint die Expertise des US-amerikanischen Majorana-Experiments, des europäischen GERDA-Experiments sowie neuer Forschungsgruppen.

In Deutschland wird das Projekt durch Arbeitsgruppen der Technischen Universität München, der Technischen Universität Dresden, der Universität Tübingen, des Max-Planck-Instituts für Kernphysik (Heidelberg), des Max-Planck-Instituts für Physik (München), des Leibniz-Instituts für Kristallzüchtung (Berlin) und des Leibniz-Instituts für Polymerforschung (Dresden) unterstützt. Alle deutschen Gruppen tragen zur Datennahme im Gran Sasso Underground Laboratory (LNGS), zur Entwicklung neuer Analysemethoden sowie zur Charakterisierung hochreiner Germaniumdetektoren (HPGe) bei.

Im Frühjahr 2023 wurde die Datennahme mit 140 kg angereicherten Germaniumdetektoren in LEGEND-200 erfolgreich begonnen. Erste Ergebnisse zur Untergrundrate und zur Detektorleistung wurden im August 2023 auf der internationalen TAUP-Konferenz in Wien vorgestellt. Im Jahr 2024 wurde das experimentelle Setup umfangreich optimiert, um den radioaktiven Untergrund weiter zu reduzieren. Wie geplant, wird die Detektormasse im Jahr 2025 auf die finale Masse von 200 kg erhöht.

Die TU Dresden beteiligt sich an LEGEND unter anderem mit zwei spezifischen Teilprojekten. Im Teilprojekt 4.2.C1 wird die Suche nach potenziellen Untergrundlinien in der Signalregion vorangetrieben, um Störsignale zu verstehen und die Sensitivität der nächsten Ausbaustufe, LEGEND-1000, zu optimieren. Im Teilprojekt 4.2.C2 wird der Elektroneneinfang an ^{76}As gemessen, um ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden Kernphysik zu gewinnen.

Das LEGEND-Experiment leistet einen entscheidenden Beitrag zur Beantwortung fundamentaler physikalischer Fragen und wird unsere theoretischen Grundlagen zur Natur der Neutrinos und zur Entstehung der Materie im Universum erheblich erweitern.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben befasst sich mit dem doppelten Betazerfall, der in zwei Varianten auftritt: dem zweineutrino-DBD ($2\nu\beta\beta$ -Zerfall) und dem neutrinolosen DBD ($0\nu\beta\beta$ -Zerfall). Während der $2\nu\beta\beta$ -Zerfall experimentell nachgewiesen wurde und die bisher längsten Halbwertszeiten aller beobachteten Zerfälle zeigt, konnte der $0\nu\beta\beta$ -Zerfall bislang nicht beobachtet werden. Ein Nachweis des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls würde fundamentale Konsequenzen für unser Verständnis der Neutrinophysik haben, da er zeigen würde, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. Dieser Zerfall ist im Standardmodell der Teilchenphysik verboten, da er die Leptonzahlerhaltung verletzt, und wäre somit ein klarer Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells.

Majorana-Neutrinos, die eine solche Eigenschaft besitzen könnten, bieten eine mögliche Erklärung dafür, warum das heutige Universum Materie-dominiert ist und warum Neutrinos um mehrere Größenordnungen kleinere Massen besitzen als die geladenen Fermionen des Standardmodells. Experimentell äußert sich der $0\nu\beta\beta$ -Zerfall durch einen scharfen Peak bei der Q-Wert-Energie des Zerfalls. Germanium-basierte Experimente sind hierfür besonders gut geeignet aufgrund ihrer außergewöhnlich hohen Energieauflösung und hervorragenden Untergrundunterdrückung. Diese Eigenschaften wurden in früheren Experimenten erfolgreich demonstriert und bilden die Grundlage für die Untersuchungen im LEGEND-Experiment.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der wissenschaftliche und technische Stand, an den das LEGEND-Experiment anknüpft, wurde maßgeblich durch die Erfolge des GERDA-Experiments definiert. GERDA hat entscheidende wissenschaftliche Grundlagen für die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall gelegt. Die endgültigen Ergebnisse, bekannt als die GERDA Legacy-Daten, wurden 2020 auf der internationalen Neutrino-Konferenz präsentiert und anschließend veröffentlicht. Dabei erreichte GERDA als erstes Experiment weltweit eine Sensitivität für die Halbwertszeit des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls von über 10^{26} Jahren. Dieses Ergebnis markiert einen Meilenstein in der Neutrinophysik und demonstriert die Machbarkeit hochpräziser Messungen in diesem Bereich.

Ein besonders bemerkenswerter Erfolg von GERDA war die Reduktion des Untergrunds auf ein Niveau, das den Betrieb im „quasi-untergrundfreien Regime“ erlaubte. Dank extrem strahlungsarmer Materialien, aktiver und passiver Abschirmung sowie umfassender technischer Optimierungen wurde der erwartete Untergrund in der Signalregion auf weniger als 0,7 Ereignisse im gesamten Datensatz reduziert. Dieser niedrige Untergrund stellt eine exzellente Grundlage für das LEGEND-Experiment dar, das ebenfalls im quasi-untergrundfreien Regime operieren soll. In diesem Betriebsmodus skaliert die Sensitivität nahezu linear mit der Exposition, wodurch LEGEND darauf abzielt, die Ergebnisse von GERDA erheblich zu erweitern und neue Maßstäbe in der Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall zu setzen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Teilprojekt 4.2.C1 Suche nach potenziellen Gamma-Linien in der Signalregion

LEGEND hat als Nachfolgeexperiment von GERDA und MAJORANA neue Maßstäbe in der Sensitivität zur Erforschung des neutrinolosen Doppelbetazerfalls gesetzt. Um eine derart hohe Empfindlichkeit zu erreichen, ist eine exakte Kenntnis aller Untergrundkomponenten entscheidend, insbesondere im Energiebereich um 2039 keV, wo das Signal des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls in ^{76}Ge erwartet wird.

Trotz der in LEGEND implementierten fortschrittlichen aktiven Veto-Systeme und passiven Abschirmungen können kosmische Myonen dennoch unbemerkt in das Detektorsystem eindringen. Diese Myonen können dabei Neutronen mit verschiedenen Energien erzeugen, die anschließend mit dem Germanium im Detektor wechselwirken können [1]. Da die LEGEND-Detektoren überwiegend aus ^{74}Ge (~12,4 % in GERDA und ~8,65 % in MAJORANA) und ^{76}Ge (~87,4 % in GERDA und ~91,4 % in MAJORANA) bestehen [2], entstehen potenzielle Untergrundereignisse vor allem durch Reaktionen dieser Isotope mit Myonen-induzierten Neutronen [3].

Frühere Studien zur Neutronenaktivierung von angereichertem Germanium zeigten, dass dabei γ -Strahlen mit Energien auftreten können, die nahe oder sogar innerhalb der Signalregion des ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls liegen und dessen Signal nachahmen könnten. Zwei Gruppen beobachteten beispielsweise eine γ -Linie bei 2036,20 keV, die durch den Zerfall von ^{74}Ga in angeregte Kernzustände von ^{74}Ge entsteht. Dieses ^{74}Ga wurde in den Experimenten durch die Reaktion $^{74}\text{Ge}(n,p)^{74}\text{Ga}$ erzeugt [4][5]. Eine weitere Studie aus dem Jahr 1971 deutete darauf hin, dass bei der gleichen Reaktion an ^{76}Ge ($^{76}\text{Ge}(n,p)^{76}\text{Ga}$) eine γ -Linie bei 2040,70 keV entstehen könnte [6]. Seit dieser Messung versuchten zahlreiche unabhängige Gruppen, diese Beobachtung zu bestätigen, ohne bisher verlässliche Ergebnisse zu erzielen [7-13]. Einige Studien berichteten stattdessen von anderen ^{76}Ge -Kernübergängen mit vergleichbaren Energien, was die komplexe Natur der Untergrundsituation in diesem Energiebereich unterstreicht. Eine genaue Kenntnis der Levelschemen ist aber wichtig, da nur dann diese Art Untergrundereignisse aus den Daten bereinigt werden können.

Aufgrund der unklaren und teilweise widersprüchlichen Ergebnisse früherer Experimente hat die Dresdner Gruppe die Neutronenaktivierung an angereichertem Germanium erneut untersucht, um Klarheit vor allem in das Kernniveauschema von ^{76}Ge und ^{74}Ge zu bringen. Hierzu wurde eine angereicherte Germaniumprobe, deren Isotopenzusammensetzung jener der LEGEND-Detektoren entspricht, mithilfe eines pneumatischen Rohrpostsystems mit 14-MeV-Neutronen bestrahlt. Diese Neutronen wurden durch den DT-Generator des Lehrstuhls für Kernphysik an der TU Dresden erzeugt (Abbildung 1).



Abbildung 1: Links: Bestrahlungsposition der Probe am DT-Generator innerhalb des Rohrpostendstücks, direkt vor dem Tritium-Target. Mitte: Die angereicherte Germaniumprobe im Transportcontainer. Rechts: Messaufbau mit zwei HPGe-Detektoren, ergänzt durch einen BGO-Detektor, der den waagrecht ausgerichteten HPGe-Detektor umgibt. Die Detektoren sind auf die Probe ausgerichtet, die sich hinter dünnen Abschirmungen aus Blei und Aluminium innerhalb des Rohrpostendstücks befindet.

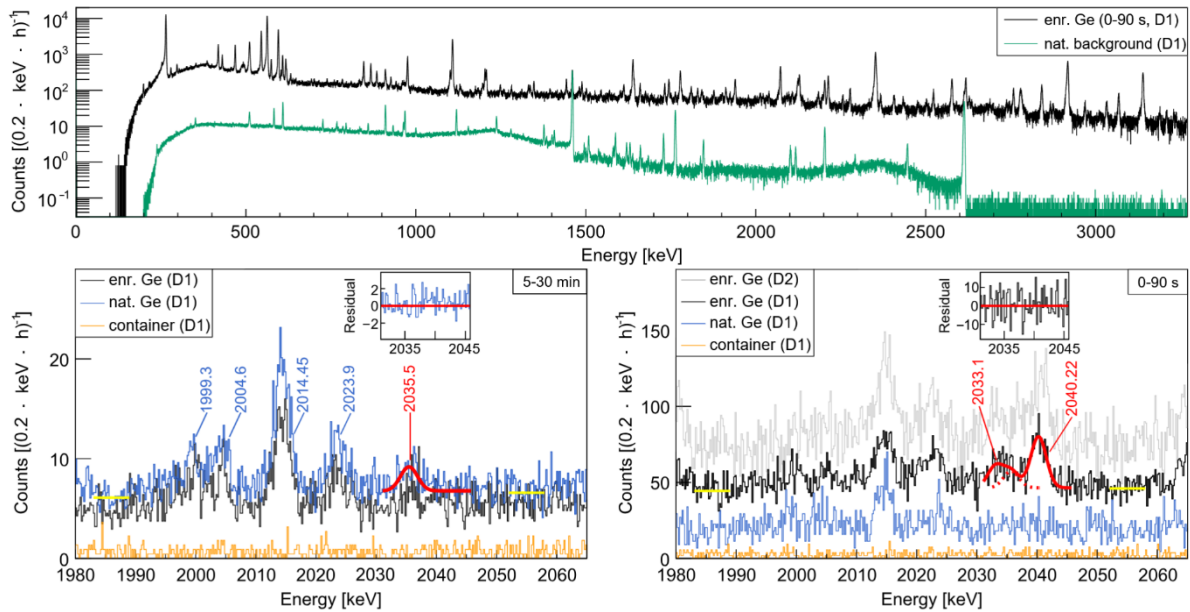


Abbildung 2: Oben: Zählrate des Laboruntergrundes (grün) im Vergleich zur Zählrate der angereicherten Ge-Probe (schwarz) innerhalb eines Messzeitfensters von 0–90 Sekunden. Unten links: Zählrate der angereicherten Ge-Probe (schwarz) nahe der Signalregion, verglichen mit dem Spektrum der natürlichen Ge-Probe (blau) und des aktivierten leeren Transportcontainers (orange) innerhalb eines Messzeitfensters von 5–30 Minuten. Der γ -Peak bei 2036 keV im Spektrum der natürlichen Ge-Probe wird mit einer Gaußfunktion (rot) approximiert. Sichtbare Peaks von ^{74}Ga sind blau markiert. Unten rechts: Spektren der gleichen Proben für 0–90 Sekunden, ergänzt um das Spektrum der angereicherten Ge-Probe, das mit dem zweiten HPGe-Detektor D2 aufgenommen wurde (grau). Die γ -Peaks bei 2033 keV, 2036 keV und 2040 keV im Spektrum der angereicherten Ge-Probe werden mit einer Gaußfunktion (rot) approximiert. Für beide Gauß-Approximationen werden die Residuen dargestellt.

Die emittierte Gammastrahlung wurde anschließend mit einem optimierten Aufbau gemessen, der aus zwei hocheffizienten HPGe-Detektoren (mit relativen Effizienzen von 100% und 110%) und einem BGO-Detektor besteht. Im Fokus der Untersuchungen standen die Reaktionskanäle $^{76}\text{Ge}(n,p)^{76}\text{Ga}$ und $^{74}\text{Ge}(n,p)^{74}\text{Ga}$, da diese Übergänge aufgrund der möglicherweise existierenden Gammalinien nahe 2039 keV für die Interpretation potenzieller Untergrundereignisse in LEGEND besonders relevant sind. Als Referenz wurden zusätzlich eine Germaniumprobe mit natürlicher Isotopenhäufigkeit sowie der leere Probencontainer, in dem die Probe bestrahlt und innerhalb der Rohrpost transportiert wurde, separat bestrahlt und auf die gleiche Weise analysiert, um eine Vergleichsbasis für die angereicherte Probe zu schaffen.

Nach insgesamt 50 Bestrahlungszyklen der angereicherten Ge-Probe wurden drei signifikante Vollenergiepeaks in oder nahe der Signalregion des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls gemessen: bei $2035,5 \pm 0,4$ keV aus dem Zerfall von ^{74}Ga , was den Literaturwerten entspricht, sowie bei $2033,1 \pm 0,5$ keV und $2040,22 \pm 0,26$ keV aus dem Zerfall von ^{76}Ga (siehe Abbildung 2). Es wurden verschiedene Zeitfenster ausgewählt (0–90 s und 5–30 min), in denen die Gammasppektren der Proben nach der Bestrahlung analysiert wurden. Dies diente dazu, anhand der unterschiedlichen Halbwertszeiten von ^{74}Ga ($T_{1/2} = 487 \pm 7$ s) und ^{76}Ga ($T_{1/2} = 30,5 \pm 0,6$ s) den Ursprung der Peaks eindeutig zu bestimmen und um Strahlung parasitär erzeugter Radionuklide zu unterdrücken.

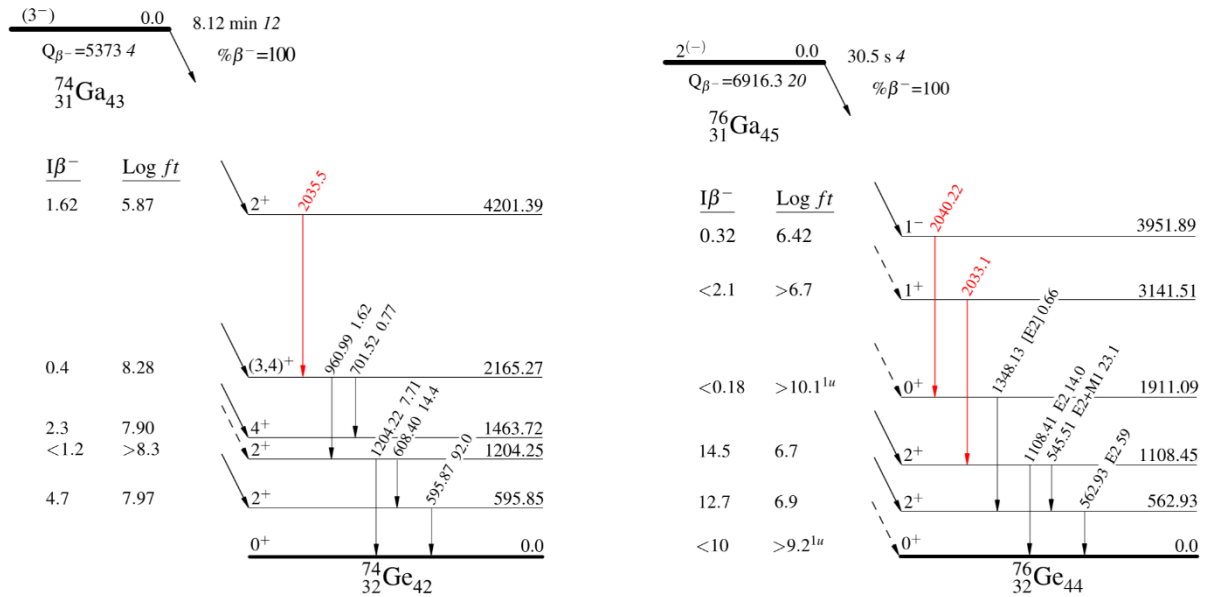


Abbildung 3: Der vermutete Ursprung der drei in diesem Experiment nachgewiesenen γ -Strahlen (rot) mit Energien nahe 2039 keV wird im Zerfallsschema von ^{74}Ga und ^{76}Ga dargestellt.

Der 2040,22 keV Übergang resultiert unserer Vermutung nach aus dem Kernübergang zwischen den Energieniveaus 3951,89 keV und 1911,09 keV in ^{76}Ge und bestätigt das über 50 Jahre zuvor durchgeführte Experiment von Camp und Foster innerhalb eines 2σ -Fehlerbereichs. Der Kernübergang von 2033,1 keV hingegen wurde in diesem Experiment erstmalig beobachtet und eindeutig dem Zerfall von ^{76}Ga zugeordnet. Dieser könnte durch die Abregung des Kernniveaus bei $3141,51 \pm 0,07$ keV (wird mit <2,1 % durch β -Zerfall bevölkert) in den tieferliegenden Zustand bei $1108,45 \pm 0,04$ keV induziert werden (siehe Abbildung 3).

Damit wurde gezeigt, dass Neutroneneinfangprozesse potenziellen Untergrund für den $0\nu\beta\beta$ -Zerfall an Germanium generieren können. Die Ergebnisse wurden in einer umfassenden Publikation zusammengefasst, die sich derzeit im Peer-Review-Verfahren befindet. In dieser Arbeit werden detaillierte Informationen zur Optimierung des Experiments sowie eine vollständige Analyse der Messergebnisse präsentiert.

Teilprojekt 4.2.C2 Messung des Elektroneneinfangs an ^{76}As

Um das theoretische Verständnis des neutrinolosen Doppelbetazerfalls von ^{76}Ge in ^{76}Se und damit die Vorhersagen bezüglich seiner Eigenschaften zu verbessern, ist die Bestimmung des nuklearen Matrixelements von wesentlicher Bedeutung. Dieses Matrixelement wird bestimmt durch Untersuchungen der Zerfälle des radioaktiven Isotops ^{76}As [14] mit der Halbwertszeit 26,254 h und deren Eigenschaften. Der Betazerfall von ^{76}As zu ^{76}Se tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,98 % auf und wurde bereits ausreichend genau gemessen. Im Gegensatz dazu wurde der Elektroneneinfang von ^{76}As zu ^{76}Ge erstmalig im Jahr 2018 von A. Domula und K. Zuber an der TU Dresden nachgewiesen und tritt nur in 0,02 % der Zerfälle auf [15]. Zusätzlich besteht eine starke Konkurrenz zwischen der 562,9 keV γ -Linie des Elektroneneinfangs (aus der Bevölkung des ersten angeregten Tochterkernzustandes von ^{76}Ge) und der 563,2 keV γ -Linie des Betazerfalls in ^{76}Se , wodurch der Elektroneneinfang nur schwer direkt mittels Gammaspektrometrie gemessen werden kann. Besonders interessant für das Kernmatrixelement ist der Elektroneneinfang in den Grundzustand von ^{76}Ge , bei dem die einzigen nachweisbaren emittierten Teilchen Röntgenphotonen sind [9]. Diese haben im Vergleich zu γ -

Quanten eine geringe Reichweite in Materie in der Größenordnung von 1 mm. Das schränkt die Wahl der Probengeometrie und zu verwendenden Detektoren ein.

Verschiedene Optionen der Herstellung des Nuklids ^{76}As wurden untersucht. Prinzipiell bieten sich zur Erzeugung radioaktiver Proben die Bestrahlung mit Protonen, Neutronen oder α -Teilchen an. Die Bestrahlung von Germanium mit Protonen wurde ausgeschlossen, da Röntgenfluoreszenz in einer Germanium-Probe das gesuchte Signal imitieren könnte und so einen unerwünschten Untergrund darstellen würde. Die Erzeugung von ^{76}As durch Bestrahlung von Brom mit α -Teilchen wird stark erschwert, da Brom flüssig ist. Es wurde festgestellt, dass die Bestrahlung von Arsen mit thermischen Neutronen die beste Option darstellt. Arsen hat nur ein stabiles Nuklid, der thermische Wirkungsquerschnitt ist sehr groß und hohe Flussdichten thermischer Neutronen sind durch Kernreaktoren verfügbar. Da Arsen giftig ist, musste die Arsen-Probe umschlossen sein. Durch die geringe Reichweite der Röntgenphotonen sollten Probe und Umhüllung möglichst dünn sein.

Zunächst wurde die Messung des Elektroneneinfangs in den ersten angeregten Zustand von ^{76}Ge reproduziert und ausgeweitet. Dabei wird ein γ -Quant der Energie 562,9 keV ausgesandt und ein ^{76}Ge -Kern mit angeregter Hülle bleibt zurück. Dieser kann sich durch Aussenden charakteristischer Röntgenstrahlung abregen. Die intensivste Röntgenlinie ist die K_{α} -Linie bei 9,9 keV. Der Elektroneneinfang in den ersten angeregten Zustand kann durch koinzidente Messung von γ - und Röntgen-Photon nachgewiesen werden.

In einer ersten Testmessung wurde 2023 eine Messung koinzidenter Gammas und X-rays durchgeführt. Eine Arsen-Probe wurde für drei Tage am AKR-II an der TU Dresden aktiviert. Die Messung wurde im Untertagelabor Felsenkeller Dresden durchgeführt. Ein HPGe (TU4) diente zum Nachweis der Abregungs-Gammas und ein SDD (TU5) zum Nachweis der X-rays. Da nur umschlossene radioaktive Proben vom AKR freigegeben werden dürfen, wurde ein Probenbehälter entworfen, der die Anforderungen für die Transmission der X-rays erfüllt und gleichzeitig nicht zerstörungsfrei zu öffnen ist. Die verwendete Probe wurde As01 genannt und besteht aus 195 mg As_2O_3 -Pulver mit einer Flächendichte von 60 mg/cm² und ist umgeben von 1 mm Polycarbonat ($\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$). Die zu messenden Ge-X-rays treten zu 30% aus der Probe aus.

Die Daten wurden ereignisweise mit der jeweiligen Energie und Zeit abgespeichert. Daraus lassen sich in der Auswertung Koinzidenzen konstruieren. Aus dem Zeitdifferenzspektrum wurde das Zeitintervall abgelesen, in dem echte Koinzidenzen stattfinden. Aus den jeweiligen nicht-koinzidenten Spektren wurden Intervalle festgelegt, die jeweils 90% der Linie von Interesse enthalten. Im Röntgenspektrum der mit der 562,9 keV-Linie koinzidenten Ereignisse wurde eine Gauß-Funktion bei der Energie der Germanium- K_{α} -Linie an die Daten gefittet.

Der Peak-Inhalt und damit das gemessene Verzweigungsverhältnis ist mit 0 kompatibel. Eine höhere Sensitivität ist erforderlich. Ein wesentlicher Unterschied zur Messung 2018 war die Nachweiseffizienz für X-rays.

Im nächsten Schritt wurde der HPGe ersetzt durch einen HPGe (TU7), dessen Eintrittsfenster ausreichend dünn ist, sodass auch Germanium-Röntgenphotonen durchgelassen werden. Damit sollte untersucht werden, ob der besagte Detektor durch zusätzlichen Nachweis von Röntgenphotonen die Sensitivität erhöhen kann. Das war nicht der Fall. Dafür verantwortlich ist die gewachsene Totschicht des schon älteren Detektors und eine unerklärte Schwingung auf dem Vorverstärkersignal.

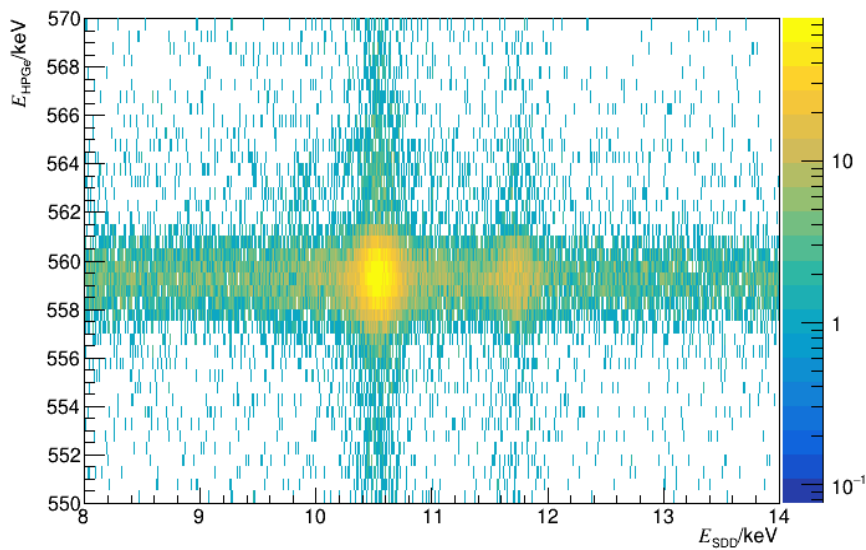


Abbildung 4: Koinsidente Ereignisse zwischen SDD und HPGe bei der Messkampagne am TRIGA Mainz mit der Koinsidenzbedingung $0 < t_{HPGe} - t_{SDD} < 4 \mu s$. Aus diesen Daten wird bei $E_{SDD} = 9,9 keV$ und $E_{HPGe} = 562,9 keV$ die Zahl koinsidenter EC*-Signale extrahiert.

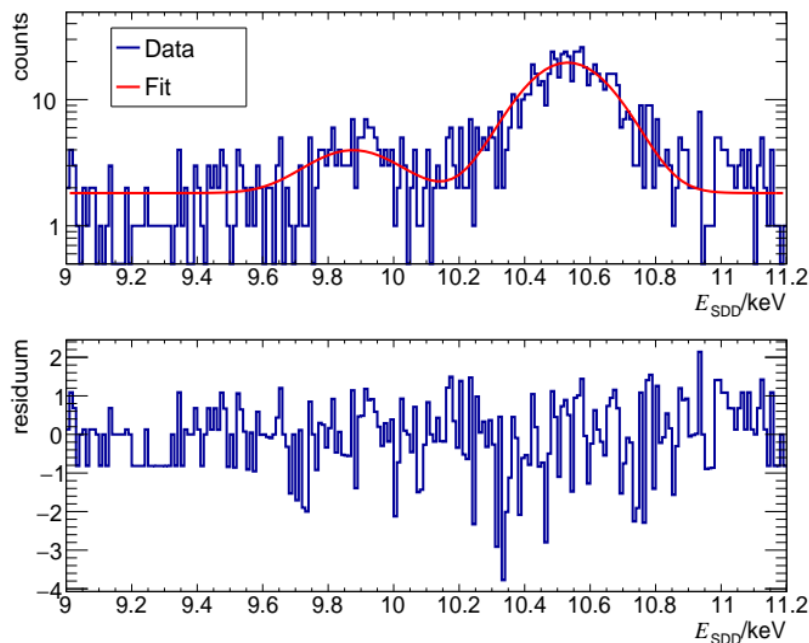


Abbildung 5: Doppel-Gauß-Fit am SDD-Spektrum koinsident mit dem 90%-Intervall der 562,93keV-Linie $561,23 keV < E_{HPGe} < 564,63 keV$. Der Peak bei 9,9keV enthält die gesuchten Signale des Elektroneneinfangs in den angeregten Zustand von ^{76}Ge , der Peak bei 10,5keV stammt von Röntgenfluoreszenz an Arsen.

In einem weiteren Schritt wurde die Sensitivität durch eine größere Probenaktivität erhöht. Die flüchtige, umschlossene Arsenprobe As01 wurde 2024 am TRIGA-Kernreaktor in Mainz aktiviert. Der Mainzer Reaktor ist ein leichtwassergekühlter, zirkonhydrid-moderierter Reaktor mit Graphitreflektor. Die Probe wurde im sogenannten Karussell des Reaktors aktiviert. Durch den deutlich höheren Neutronenfluss im Vergleich zum AKR-II in Dresden konnten in 160 s Bestrahlung 220 kBq an ^{76}As -Aktivität erzeugt werden. Die Messung wurde anschließend im Labor in Mainz durchgeführt. Ein dort verfügbarer Germanium-Detektor, genannt RED, wurde kombiniert mit dem Röntgendetektor TU5. Der HPGe wurde mit einem radioaktiven Standard effizienzkalibriert. Die Koinsidenz-Auswertung erfolgte analog zu den vorangegangenen Kampagnen. In den Koinsidenz-Daten wurden 70 ± 13 koinsidente

Ereignisse gefunden. Die Aktivität des ^{76}As wurde anhand charakteristischer Linien aus dem Beta-Zweig und der kalibrierten Effizienz berechnet. Daraus ergibt sich ein neu gemessenes Verzweigungsverhältnis von 0,00276%. Eine Publikation wird vorbereitet.

Referenzen:

- [1] D.-M. Mei and A. Hime, Phys. Rev. D 73, 053004 (2006).
- [2] K.-H. Ackermann et al. (GERDA Collaboration), Europ. Phys. J. C 73, 2330 (2013).
- [3] N. Abgrall et al. (LEGEND Collaboration), arXiv:2107.11462 (2021).
- [4] D. C. Camp, D. R. Fielder, and B. P. Foster, Nucl. Phys. A 163, 145 (1971).
- [5] H. W. Taylor, R. L. Schulte, P. J. Tivin, and H. Ing, Can. J. Phys. 53, 107 (1975).
- [6] D. C. Camp and B. P. Foster, Nucl. Phys. A 177, 401 (1971).
- [7] C. Rouki, A. R. Domula, J. C. Drohé, A. J. Koning, A. J. M. Plompen, and K. Zuber, Phys. Rev. C 88, 054613 (2013).
- [8] A. R. Domula et al., Nucl. Data Sheets 120, 44-47 (2014).
- [9] A. R. Domula, PhD thesis, (2013).
- [10] B. P. Crider, E. E. Peters, J. M. Allmond, M. T. McEllistrem, F. M. Prados-Estévez, T. J. Ross, J. R. Vanhoy, and S. W. Yates, Phys. Rev. C 92, 034310 (2015).
- [11] S. Mukhopadhyay, B. P. Crider, B. A. Brown, S. F. Ashley, A. Chakraborty, A. Kumar, M. T. McEllistrem, E. E. Peters, F. M. Prados-Estévez, and S. W. Yates, Phys. Rev. C 95, 014327 (2017).
- [12] W. Tornow, M. Bhike, B. Fallin, and Krishichayan Phys. Rev. C 93, 014614 (2016).
- [13] R. Schwengner et al., Phys. Rev. C 105, 024303 (2022)
- [14] F.E. Bertrand and R.L. Auble, Nucl. Data Sheets 19, 4, 507-555 (1976)
- [15] A. R. Domula and K. Zuber, arXiv:1804.06178v1

4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)

Die wichtigsten Positionen der Mittelverwendung an der TU-Dresden waren:

- Personal 230 k€, hauptsächlich zwei Doktoranden und studentische Hilfskräfte
- Investitionen 40 k€, hauptsächlich Detektor und Datenauswertesystem
- Dienstreisen 22 k€, Konferenzen und halbjährliche Kollaborationstreffen
- Sonstige Kosten 6 k€, hauptsächlich Beitrag zum Common Fund GERDA / LEGEND

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Teilprojekt 4.2.B1 Aktivierung mit hochenergetischen Neutronen

Die ursprünglich geplanten Experimente am iThemba Lab (Südafrika) konnten bisher nicht durchgeführt werden. Dies lag einerseits daran, dass während der Corona-Pandemie keine Reisen möglich waren, was die Durchführung der Vorhaben erheblich verzögerte. Darüber hinaus wurde die Umsetzung zusätzlich durch strukturelle und personelle Wechsel am iThemba Lab erschwert, die dazu führten, dass die bestehende Forschungskoooperation unterbrochen wurde.

Um jedoch für eine mögliche zukünftige Kollaboration mit dem iThemba Lab vorbereitet zu sein, wurden die ultra-low background HPGe-Messsysteme im Dresdener Felsenkeller-Untertagelabor weiter ausgebaut, um bestrahlte Proben mit einer hohen Sensitivität analysieren zu können. Zu den ausgebauten Systemen gehört unter anderem ein koaxialer p-type HPGe-Detektor mit einer relativen Effizienz von 163%. Dieser Detektor gilt als der sensitivste seiner Art in Deutschland und wurde im Rahmen einer Doktorarbeit [S. Turkat (2023)] umfassend charakterisiert.

Teilprojekt 4.2.C1 Suche nach potenziellen Gamma-Linien in der Signalregion

Das Hauptziel dieses Teilprojekts war die Untersuchung des Niveauschemas der in angereichertem Germanium in hohen Konzentrationen vorkommenden Isotope ^{74}Ge und ^{76}Ge . Ziel war es, endgültig zu klären, ob diese Isotope durch Neutronenanregung Gamma-Linien in der Nähe der Signalregion erzeugen können. Hierzu wurde eine angereicherte Germaniumprobe mithilfe schneller Neutronen aus dem DT-Generator der TU Dresden aktiviert und anschließend gemessen. Das Experiment verlief erfolgreich, und es konnten drei Linien aus den Niveauschemata von ^{74}Ge und ^{76}Ge identifiziert werden.

Teilprojekt 4.2.C2 Messung des Elektroneneinfangs an ^{76}As

Die Ziele konnten größtenteils erreicht werden. Die Messung des Elektroneneinfangs an ^{76}As in den ersten angeregten Zustand von ^{76}Ge konnte mit der verfügbaren Ausstattung reproduziert werden. Es wurden die Röntgen-Photonen aus der Abregung der Hülle in Koinzidenz mit den Abregungs-Gammas gemessen. In einer ersten Kampagne war das Verzweigungsverhältnis mit Null kompatibel. In einer weiteren Kampagne wurde eine höhere ^{76}As -Aktivität erzeugt und der Nachweis des Übergangs in den angeregten Zustand reproduziert. Es wurde herausgefunden, dass für die Analyse des Übergangs in den Grundzustand die Nachweiseffizienz für insbesondere Gammas auf nahe 100% erhöht werden muss.

Teilprojekt 4.2.C3 Suche nach Doppelbetazerfall in angeregte Zustände von ^{76}Se

Bei der Suche nach dem Doppelbetazerfall von ^{76}Ge wird in der Regel vor allem der Zerfall in den Grundzustand betrachtet. Allerdings ist vor allem für den $2\nu\beta\beta$ Zerfall, der unter der Aussendung zweier Neutrinos erfolgt, der Zerfall in das erste angeregte Energieniveau des Tochterkerns von großem Interesse, da dessen Untersuchungen zusätzliche Informationen zu den Kernstrukturmodellen liefern könnte, sowie weitere experimentelle Einschränkungen für das nukleare Matrixelement.

Die ursprüngliche Suche nach diesen Zerfällen wurde von der Dresdner Gruppe durchgeführt ($3,7 \cdot 10^{23}$ Jahre mit 22 kg·yr Daten) [GERDA Collaboration, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 115201 (2015)]. Eine spätere Messung mit dem Majorana-Demonstrator (MJD) ergab bessere Ergebnisse ($7,5 \cdot 10^{23}$ Jahre mit 42 kg·yr Daten) [Majorana Collaboration, Phys. Rev. C 103, 015501 (2021)]. Bei dieser Suche besteht der Hauptunterschied zwischen MJD und GERDA im Betrieb der Detektoren im Vakuum im Vergleich zu LAr. Obwohl der LAr-Ansatz von GERDA ein niedrigeres Backgroundniveau erreichte und als Designkonzept für LEGEND verwendet wird, wird ein Teil der Gammastrahlen zwischen den Detektoren abgeschirmt, die für die Koinzidenzanalysen bei der Suche nach angeregten Zuständen notwendig sind. Dies reduziert die Nachweiswirksamkeit von Koinzidenzereignissen in GERDA im Vergleich zu MJD und ermöglicht es nicht, die bereits publizierten Ergebnisse von MJD für

diese Zerfälle zu übertreffen. Die Suche nach $2\nu\beta\beta$ -Zerfällen in angeregte Zustände wird erst wieder mit erheblich mehr Daten des LEGEND-200 Experiments sinnvoll.

6 **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall ($0\nu\beta\beta$ -Zerfall), wie sie in GERDA und LEGEND durchgeführt wird, zielt darauf ab, die fundamentale Natur des Neutrinos zu entschlüsseln. Neutrinos sind die häufigsten Materieteilchen im Universum und die ältesten frei strömenden Teilchen nach dem Urknall. Sie beeinflussen die Entstehung großskaliger Strukturen im Universum und tragen entscheidend zu dessen Entwicklung bei. Dennoch sind ihre Masse und ihre Natur bis heute unbekannt. Als neutrale und fundamentale Teilchen könnten Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein, was sie von allen anderen bekannten Teilchen grundlegend unterscheidet. Die Entdeckung ihrer Natur und Masse ist daher von zentraler Bedeutung, um die Ursprünge und die Evolution des Universums besser zu verstehen und die Grenzen des Standardmodells der Teilchenphysik zu erweitern.

Neben ihrer Bedeutung für die Grundlagenforschung hat die Arbeit an Experimenten wie LEGEND auch technologische Spin-offs. Die Entwicklung und Herstellung extrem niedrig radioaktiver Materialien, die für solche Präzisionsexperimente essenziell sind, findet Anwendung in sensiblen Technologien, etwa in der Entwicklung von Quantencomputern oder in hochempfindlichen Detektorsystemen für andere wissenschaftliche und industrielle Zwecke. Durch diese Synergie zwischen Grundlagenforschung und technischer Innovation eröffnet die geleistete Arbeit auch Perspektiven für die praktische Nutzung hochentwickelter Materialien und Technologien.

7 **Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Resultate von LEGEND-200 werden genutzt, um den Weg für das Nachfolgeprojekt LEGEND-1000 zu ebnet. Dieses Vorhaben wird in enger Kooperation mit Max-Planck-Instituten sowie internationalen Partnern, darunter führende US-amerikanische Universitäten und nationale Forschungseinrichtungen, entwickelt. Ein erfolgreicher Abschluss von LEGEND-200 könnte dabei wesentliche Finanzierungsbeiträge aus den USA ermöglichen.

Die Arbeiten der TU Dresden tragen entscheidend zur Verwertbarkeit der Ergebnisse bei. Insbesondere klären sie das Vorhandensein von neutroneninduzierten Gamma-Linien in der Signalregion auf. Derzeit deutet alles darauf hin, dass diese Linien keine Gefahr für die Sensitivität von LEGEND-1000 darstellen. Dennoch ist eine präzisere, quantitative Messung erforderlich, um diese Einschätzung zu bestätigen. Darüber hinaus wird die Beobachtung des Elektroneneinfangs (EC) von ^{76}Ar der Theorie-Community ermöglichen, die nuklearen Matrixelemente genauer zu berechnen. Dies wird die Verbindung zwischen experimentell bestimmten Halbwertszeiten und den zugrunde liegenden leptonzahlverletzenden Mechanismen deutlich verbessern und so die physikalische Interpretation der Ergebnisse weiter stärken.

8 **Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Keine

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

- GERDA Collaboration, "Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double-beta Decay", PRL 125, 252502 (2020).
- GERDA Collaboration, "First Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Particles with Masses up to 1 MeV/c² with GERDA", PRL 125, 011801 (2020).
- GERDA Collaboration, "Calibration of the GERDA experiment", EPJC 81(8) 682 (2021).
- GERDA Collaboration, "Characterization of inverted coaxial Ge-76 detectors in GERDA for future double-beta decay experiments", EPJC 81(6) 505 (2021).
- GERDA Collaboration, "Search for exotic physics in double- β decays with GERDA Phase II", JCAP 12, 12 (2022).
- GERDA Collaboration, "Liquid argon light collection and veto modeling in GERDA Phase II", EPJC 83(4) (2023).
- GERDA Collaboration, "Final Results of GERDA on the Two-Neutrino Double-Beta Decay Half-Life of Ge-76", PRL 131, 142501, (2023).
- GERDA Collaboration, "Search for tri-nucleon decays of ⁷⁶Ge in GERDA", EPJC 83(778) (2023).
- GERDA Collaboration, "An improved limit on the neutrinoless double-electron capture of ³⁶Ar with GERDA", EPJC 84(34) (2024).

9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Eine Liste mit Beiträgen ist online unter <https://legend-exp.org/science/conference-presence> zu finden.

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

- Dissertation Birgit Zatschler: "Attenuation of the scintillation light in liquid argon and investigation of the double beta decay of ⁷⁶Se in the GERDA experiment", TU Dresden (2020).
- Masterarbeit Marie Pichotta: "Investigating the background of the GERDA experiment by ⁷⁶Ge(n,p)⁷⁶Ga reaction studies", TU Dresden (2021).
- Bachelorarbeit Christoph Seibt: "Operation of the X-Ray Detector at Felsenkeller Dresden and First Measurements", TU Dresden (2022).
- Bachelorarbeit Marielle Wolf: "Study on the emission probability of gamma-rays from ⁷⁴Ge and ⁷⁶Ge in the ROI of GERDA/LEGEND", TU Dresden (2022).
- Bachelorarbeit Beatrice Vergoossen: "X-ray Spectrometrie: Attenuation of the background components in a silicon drift detector", TU Dresden (2022).