GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN

Zuwendungsempfänger:	Universität Heidelberg
Projektleitung:	Prof. Dr. Stephanie Hansmann-Menzemer
E-Mail:	menzemer@physi.uni-heidelberg.de
Förderkennzeichen:	05A20VH2
Förderzeitraum:	01.07.2020 - 31.03.2024
Zuwendung:	489.208,80 €
Projektträger:	Projektträger DESY
Zusätzlicher Kontakt:	pachomowa@physi.uni-heidelberg.de
Zusätzlicher Name:	Ida Pachomowa

Genutzte Großgeräte:	**Labor**	**Gerät**	**Experiment**

Diplomarbeiten:	0
Dissertationen:	2
Habilitationen:	0
Referierte Publikationen:	6
Andere Veröffentlichungen:	19
Patente:	0
Bachelorarbeiten:	2
Masterarbeiten:	1
Staatsexamen:	0

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 10.11.2024 19:12 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Ruprecht-Karls Universität Heidelberg
Projektleitung:	Prof. Dr. Stephanie Hansmann-Menzemer Prof. Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon Prof. Dr. Peter Fischer
Verbund:	~~05A23VH5 - Direct Search for Dark Matter with CRESST, XENON and DARWIN~~
Thema:	~~Teilprojekt 5~~ Verbundprojekt 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN: Direkte Suche nach Dunkler Materie mit CRESST, XENON und DARWIN. Teilprojekt 2

Zusammenfassung

Das Projekt ist Teil des Forschungsverbundes “Direct Search for Dark Matter with CRESST, XENON and DARWIN”. Die Universität Heidelberg ist mit drei Arbeitsgruppen am DARWIN-Experiment beteiligt. Zwischen den drei Arbeitsgruppen, die in einem gemeinsamen BMBF-Projekt gefördert werden, besteht eine enge Zusammenarbeit.

DARWIN ist ein zukünftiges Projekt, zu dem an allen Standorten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt: Die Gruppen aus Freiburg, Karlsruhe und Mainz haben Arbeiten zu großen TPC Elektroden durchgeführt; dazu wurde die Inbetriebnahme der full-scale Detektortestplattform PANCAKE in Freiburg sowie der Aufbau zur optischen Inspektion von Elektroden in Mainz abgeschlossen, und Hochspannungstests in Karlsruhe vorbereitet. In Heidelberg wurde die Entwicklung von innovativen CMOS-basierten Photosensoren fortgeführt und ein Test in flüssigem Xenon vorbereitet (gemeinsam mit Freiburg, Karlsruhe). Die Gruppe Heidelberg hat das erste vollständige Simulationsframework für das DARWIN-Experiment aufgesetzt, das für eine eine Vielzahl von Sensitivitätstudien genutzt wurde. Die Simulationsstudium geben wertvollen Informationen über die Höhe des erlaubten Untergrundes, den Einfluss von Dark-Count-Raten der Photosensoren und ähnliches und tragen so zur Detektoroptimierung bei. In Münster wurden Entwicklungen von radonfreien Komponenten für die Xenon-Reinigung weitergeführt, insbesondere wurde das Konzept der magnetisch gekoppelten, hermetisch gekapselten Kolbenpumpe um einen elektromagnetischen Antrieb anstatt des bisher eingesetzten mechanischen erweitert. Von C. Weinheimer wurde 2022 ein ERC Advanced Grant für neue Entwicklungen im Bereich der Reinigung von radioaktiven Edelgasen und elektronegativen Verunreinigungen für DARWIN eingeworben.

1. Berichtsteil der Heidelberger Gruppen

1.1. Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Physikalische Institut der Universität Heidelberg ist mit der Arbeitsgruppe von Prof. S. Hansmann-Menzemer, das Kirchhoff-Institut ist mit der Arbeitsgruppe von Prof. H.-C. Schultz-Coulon und das Zentrum für Technische Informatik mit Prof. P. Fischer am DARWIN-Experiment beteiligt. Seit März 2023 ist Frau B. von Krosigk Professorin am Kirchhoff-Institut der Universität Heidelberg und unterstützt die DARWIN-Forschungsaktivitäten der Heidelberger Gruppen. Die DARWIN-Aktivitäten der Heidelberg Gruppen sind in dem gemeinsamen BMBF-Projekt 05A23VH5 zusammengefasst und werden gemeinsam gefördert. Im November 2024 waren insgesamt 11 MitarbeiterInnen der Heidel-

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

berger Gruppen am gemeinsamen DARWIN-Projekt beteiligt.
Der Arbeitsschwerpunkt der Heidelberg Gruppen waren:

I) Entwicklung neuartiger Photosensoren für den Nachweis einzelner Photonen (H.-C. Schultz-Coulon, P. Fischer)
II) Entwicklung einer Simulationsumgebung für Detektorperformanz und Sensitivitätsstudien (S. Hansmann-Menzemer)
III) Entwicklung eines Datenerfassungssystems (DAQ) für das DARWIN-Experiment (B. v. Krosigk)

Zwischen den drei Bereichen gibt es viele Synergien. Wir berichten hier nur über Bereich I) und II). da nur diese beiden im Ursprünglichen Antrag geplant waren.

1.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Universität Heidelberg ist seit 2018 Mitglieder der DARWIN-Kollaboration (urprünglich: S. Hansmann-Menzemer. H.-C. Schultz-Coulon, P. Fischer, inzwischen hat sich H.-C. Schultz-Coulon aus der DARWIN-Kollaboration zurückgezogen und B. v. Krosigk übernimmt die Leitung der DARWIN-Gruppe am Kirchhoff-Institut).
Seit November 2024 ist die Universität Heidelberg mit B. v. Krosigk und S. Hansmann-Menzemer auch Mitglied der XENONnt Kollaboration. Der DARWIN-Detektor baut auf dem Konzept der erfolgreichen Serie von XENON-Detektoren auf. Während XENONnt aktuell mit fünf Tonnen flüssigem Xenon betrieben wird ist vorgesehen DARWIN mit 50t zu betreiben. Um optimal vom dem geplanten wesentlich größeren aktivem Volumen zu profitieren muss entsprechend die Reinheit der verwendeten Materialien skaliert und Untergrundsignale effizient unterdrückt werden. Ein detaillierte Untergrundabschätztung, Sensitivitätsstudien und eine mögliche feinere Granularität der Photodetektion durch neuartige Photosensoren wurden hierfür in den Heidelberger Arbeitsgruppen untersucht.

2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Das Heidelberger Projekt ist Teil des deutschen XENON-DARWIN-CRESST-Verbunds. Im Sommer 2021 haben über 100 leitende Wissenschaftler*innen aus DARWIN und aus den zur Zeit laufenden Experimenten XENON und LZ ein Memorandum of Understanding unterzeichnet, mit der Absicht ein gemeinsames großes Xenon-basiertes Observatorium zu entwickeln, das neben der Suche nach Dunkler Materie noch viele weitere physikalische Ziele hat. Damit wird die DARWIN-Idee durch eine noch grßere Community getragen. Im Sommer 2022 wurde dann auf einem großen Treffen in Karlsruhe das XLZD Konsortium gegründet, das die Kollaborationen XENON, LZ und DARWIN zusammenbringt, um gemeinsam ein Xenon-basiertes Observatorium mit einem Multi-Tonnen Target zu realisieren. Das XLZD Steering Committee trifft sich regelmäßig, das DARWIN Executive Board ist dort komplett vertreten (4/9 deutsche PIs). Ein zweites Treffen des XLZD-Konsortium fand im April 2023 in Los Angelos als Satellitentreffen zu einer großen internationalen Dunklen Materie Konferenz UCLA Dark Matter 2023 statt.
Im Mai 2023 traff sich die DARWIN Kollaboration in Heidelberg zu ihrem jährlichen Kollaborations-Treffen.

2.4. Verwendung der Zuwendung

Die Personalmittel dienten der Finanzierung von wissenschaftlichem Personal für die Aufgaben im Rahmen des Forschungs-und Entwicklungsprojekte zu neuartigen Photosensoren und zum Aufbau einer Simulations- und Auswerteumgebung. Desweiteren waren Sachmittel für die Submission neuer Photosensorchips bewilligt worden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

2.5. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Teilprojekt I - Arbeitsgruppen H.-C Schultz Coulon und P. Fischer

Die Arbeitsgruppe von Prof. H.-C. Schultz-Coulon hat im Berichtszeitraum an der Entwicklung eines SiPM-Sensors mit einer 3D-angeordneten SPAD-Struktur gearbeitet; die daran beteiligten Wissenschaftler waren Dr. Wei Shen ([redacted] Dr. Vera Stankova, Dr. Konrad Briggl sowie die Doktorandin Sonam Sharma. Mittelfristiges Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines UV-sensitiven SiPM-Chips (SPADs) mit niedrigem Dunkelstrom. Die Arbeitsgruppe arbeitet hierfür gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Elektronische Mikrosysteme und Festkörper-Technologien (EMFT) an einem dafür geeigneten SiPM-Sensorprototypen.

Für den ersten, von EMFT bereits 2021 produzierten Prototypchip wurden anhand von Testmessungen und Monte-Carlo-Studien Hinweise auf Fehler in der Dopingstruktur gefunden. Eine Neuproduktion mit angepasstem Dopingprofil hat sich aufgrund der Corona-Pandemie und ihrer Nachwirkungen aber leider immer wieder verzögert. Um die Zusammenarbeit mit dem EMFT für den Prototypchip zu Ende bringen zu können wurde im Juni 2023 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt und bewilligt.

Im weiteren Verlauf der Förderperiode hat die Arbeitsgruppe am Kirchhoff-Institut in engem Austausch mit dem EMFT die Parameter für eine zweite Chip-Submission festgelegt. Dafür wurden am Kirchhoff-Institut intensive Simulationstudien durchgeführt, deren Ergebnisse mit Messungen und Simulationen des Frauenhofer-Instituts abgeglichen wurden. Im ersten Quartal 2024 wurden die Parameter final festgelegt und die Submission in Auftrag gegeben; die neu produzierten Chips wurden im zweiten Quartal 2024 als Wafer geliefert; erste Tests auf Wafer-Niveau wurden durchgeführt, lieferten bisher aber leider noch keine konklusiven Resultate. Die Arbeiten werden derzeit finanziert durch Eigenmitteln fortgesetzt.

Die Arbeitsgruppe von Prof. P. Fischer möchte evaluieren, ob CMOS SPADs als Photodetektoren für DARWIN geeignet sind. Dieser recht neue und unkonventionelle Ansatz erlaubt es, Avalanche Photodioden, die einzelne Photonen erkennen können, und CMOS Ausleseelektronik auf einem Chip zu kombinieren. Im Gegensatz zu klassischen PMTs oder den weit verbreiteten SiPMs ergeben sich einige Vorteile, wie z.B. niedrige intrinsische Radioaktivität, niedrige Leistungsaufnahme, wenige Kabel, kein Bedarf für ADCs, wesentlich geringere Datenraten und vermutlich niedrigere Kosten. Die Arbeiten wurden von den Postdocs Michael Keller und Michael Ritzert durchgeführt und von mehreren Masteranden unterstützt.

Ein zu Projektbeginn schon vorhandenes erstes Design eines Chips wurde signifikant verbessert, um einen möglichst hohen Füllfaktor (Anteil der photoempfindlichen Fläche) zu erreichen und gleichzeitig eine für DARWIN geeignete Auslesearchitektur implementiert, die einerseits eine kontinuierliche schwache Photonenrate verarbeiten kann ('S1' Signale), andererseits auch bei seltenen Bursts mit sehr vielen Photonen ('S2' Signal) wenige Treffer verliert. Parallel wurden mit einem hierfür optimierten optischen Aufbau Messungen an vorhandenen Prototyp-Chips gemacht, insbesondere zum Vergleich der tatsächlich photosensitiven Flächen mit dem Design. Der Chip hat ein vollständig digitales Interface mit nur 4 Signalen, so dass mehrere Chips zum Aufbau größerer Module einfach in Serie geschaltet werden können. Es wurde ein Modul konzipiert, das ein Silizium Substrat nutzt, so dass die intrinsische Radioaktivität gering bleibt. Durch den identischen Ausdehnungskoeffizienten von Chip und Substrat sollte die Abkühlung auf flüssig Xenon Temperatur unproblematisch sein. Um den Füllfaktor des Modules zu maximieren, sollen die Kontakte der Chips später durch TSVs auf die Rückseite verlegt werden, hierzu wurde eine geeignete Technologie ermittelt. Zur Verifikation des Betriebes der CMOS SPADs in flüssigem Xenon wurde in Kooperation mit Freiburg und KIT eine kleine PTFE Kammer entworfen und aufgebaut und im Freiburger Kryostaten erfolgreich in Betrieb

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

genommen. Um eine Verbesserung der UV Empfindlichkeit zu erreichen, wurde eine Kooperation mit der Universitat Politècnica de València (José F. Toledo Alarcón) initiiert, in der das Aufdampfen eines Wellenlängenschiebers erprobt werden soll. Hierzu wurde ein zusätzlicher, einfacher Chip entworfen. Da leider die zukünftige Verfügbarkeit der verwendeten SPAD/CMOS Technologie unsicher ist, soll mit dem Fraunhofer Institut IMS (Duisburg) eine verbesserte '3D' Technologie evaluiert werden, bei der ein SPAD Wafer mit einem kommerziellen CMOS Wafer verbunden wird. Hierzu wurden technologische Vorarbeiten geleistet und im Rahmen der DRD2 und DRD4 Aktivitäten am CERN nach weiteren Partner zur Organisation eines gemeinsamen Runs gesucht.

Die Submission und Herstellung der Chips am Fraunhofer Institut IMS (Duisburg) hat sich zunächst verzögert, dass das aggressive Design des Chips einige Regeln des Herstellers verletzt (es ist zu viel SPAD Fläche und zu wenig Metall vorhanden..), so dass hier Lösungen gefunden werden mussten. Da ein Teil der Fabrikation bei einer Firma (ELMOS) erfolgt, die zwischenzeitlich einen neuen Besitzer bekam, kam die Fabrikation zum Erliegen und die ersten Wafer sind nun erst für Ende 10/2024 angekündigt, so dass mit dem vorbereiteten Setup leider noch keine Messungen durchgeführt werden konnten.

Teilprojekt II - Arbeitsgruppe S. Hansmann-Menzemer

Die Arbeitsgruppe von S. Hansmann-Menzemer ist innerhalb der DARWIN Collaboration für die Entwicklung und Wartung der Simulations- und Rekonstruktionssoftware zuständig, die insbesondere für Sensitivitätsstudien benutzt wird. Die Studien tragen dazu bei zu verstehen, was die dominaten Untergrundquellen sind und in wieweit alternative Detektorkonzepte die Sensitivität des Experiments verbessern können. Dafür wurde zunächst das bestehende sehr monolytische Simulationsframework, das von XENON übernommen wurde, durch ein modulareres Framework ersetzt, das auf open-source Software basiert. Zusätzlich wurde eine einheitliche Systeminstallation eingeführt um die Reproduzierbarkeit der Software bei allen Nutzern zu garantieren. In Kooperation mit der DARWIN Gruppe am KIT wurde ein für alle Mitglieder der DARWIN Kollaboration nutzbares Rechencluster aufgesetzt (bereitgestellt am KIT, Wartung durch Mitarbeiter der Heidelberger Arbeitsgruppe), um sicherzustellen, dass die für Studien verwendeten Datensätze allen Mitgliedern der Kollaboration zugänglich sind und alle veröffentlichten Ergebnisse reproduzierbar sind.

Zu der Implementation des DARWIN-Simulationsframeworks gehörten unter anderem die Simulation des Szintillationsprozesses im flüssigen Xenon, die Beschreibung der Propatation und Reflektion der Photonen im Detektor und der Drift der Elektronen und deren Lawinenbildung in der Gasphase. Die Lichtausbeute für unterschiedliche Granularitäten der Photosensoren wurde studiert sowie Algorithmen zur Seperation von ER (electronic recoil) und NR (nuclear recoil) sowie von Einzelstreuung (WIMP Signale) und Mehrfachstreuung (Neutronen) wurden aufgesetzt. Alle im Detektor benutzten Materialien, deren Verunreinigung durch radioaktive Stoffe und die unterschiedliche Gewichtung und Lokalisation der einzelnen Beiträge im Experiment wurden untersucht, um eine realistische Beschreibung des zu erwartenden Untergrund zu erhalten. Damit konnten erste Sensitivitätsstudien für WIMP-Suchen durchgeführt werden. Viel Zeit wurde dabei für den Vergleich mit früheren Studien verwendet, da sich eine Reihe von Inkonsistenzen ergaben, die am Ende auf Fehler in den alten Studien zurückgeführt werden konnten.

In enger Zusammenarbeit mit den Gruppen von P. Fischer und H.-C. Schultz-Coulon wurde der Einfluss der unterschiedlichen Photodetektoren auf die Sensitivität einiger Beispielanalysen studiert (z.B. WIMP-Suchen, Doppelter-Neutrinoloser-Beta- Zerfall). Die Simulationen waren Teil der Vorbereitung auf den CDR (Conceptional Design Report) der DARWIN-Kollaboration in 2023. Wichtige Erkenntnisse aus den Simulationsstudien, die so nicht aus der Erfahrung des Betriebs des XENON-Experiments offensichtlich waren sind zum einen, dass es eine optimale Spannung für das Driftfeld der Elektronen von ca. 150kV gibt und eine höhere Spannung nicht die Sensitivität weiter verbessert. Zusätzlich

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

wurde herausgefunden, dass der Untergrund aus zwei zufällig gleichzeitig stattfindenden unkorrlierten Photon- und Elektron-Signalen bei der Größe des DARWIN-Experiments im Vergleich zum XENON-Experiment weniger dominant ist. Beides sind wichtige Informationen, die in die Planung und den TDR (Technical Design Report) des DARWIN-Experiments eingehen werden.
Andrii Terliuk, ein Post-Doc der Heidelberger Arbeitsgruppe war 2022-2023 Leiter der Arbeitsgruppe Simulation and Analysis innerhalb der DARWIN Kollaboration.

Durch den Zusammenschluss von DARWIN und LZ zur XLZD Kollaboration wird es ein weiter Überarbeitung der Softwarepakete geben, die auf den Erfahrungen aus beiden Kollaborationen aufbaut. Die Heidelberger Arbeitsgruppe ist maßgeblich an der Entwicklung dieses gemeinsamen Softwarepakets beteiligt.

2.9.2 Publikationen und Konferenzbeiträge

Publikationen

- F. Agostini et al. (DARWIN Collaboration), *Sensitivity of the DARWIN observatory to the neutrinoless double beta decay of 136 Xe*, Eur. Phys. J.C. 80 82020) 9, 808, arXiv:2003.13407
- J. Aalbers et al. (DARWIN Collaboration), *Solar neutrino detection senstivity in DARWIN via electorn scattering*, Eur. Phys. J.C. 80 (2020) 12, 1133, arXiv:2006.03114
- L. Altueser et al. (DARWIN Collaboration), *GPU-based optical simulation of hte DARWIN Detector*, JINST 17 (2022) P07ß18, arXiv:2203.14354
- J. Aalbers et al. (DARWIN Collaboration), *A Next-Generation Liquid Xenon Observatory for Dark Matter and Neutrino Physics*, Nucl. Part. Phys. 50 (2023), arXiv:2203.02309
- J. Aalberts et al. (DARWIN Collaboration), *Cosmogenic bckground simulation for the DARWIN observatory at different underground locations*, arXiv:2306.16340, Juni 2023
- J. Aalberts et al. (DARWIN Collaboration), *Erratum to Sensitivity of the DARWIN obervatory to the neutrinoless double beta decay of* ^{136}*Xe*, Eur. Phys. J. C 80, 808 (2020), Juni 2023

Konferenzvorträge

- A. Terliuk, *Potential of neutrino physics in DARWIN*, XI Internaional Workshop on Neutrino Telescopes 18.26 Feb. 2021
- A. Terliuk, *A Simulation Framwework for DARWIN*, DARWIN collaboraiton meeting, 8.3.2021
- A. Terliuk, *Threshold studies for DARWIN*, DARWIN simulation workshop, Freiburg 11.8.2021
- M. Dorenkamp, A. Chauvin, *S2 signal simulation in DARWIn*, DARWIN simulation workshop Freiburg, 11.8.2021
- M. Keller, *Latest Results on Digital SiPMs at Cold Temperatures*, DARWIN collaboration meeting
- M. Keller, *CMOS based SPAD Arrays for light detection in rare event search experiments*, LIDINE2021, 17.09.2021
- A. Chauvin, *Estimation of electronic rcoil leakage in nuclear recoil signal in DARWIN*, DPG Frühjahrstagung 2022, online
- M. Doerenkamp, *Background estimation through multiple-scattering sepeartion in DARWIN*, DPG Frühjahrstagung 2022, online
- A. Chauvin, *Dark Matter direct detection with DARWIN*, HighRR Seminar, April 2022
- M. Keller, *Ditital SiPMs for the DARWIN experiment*, HighRR Seminar, February 2021
- M. Keller, *SPAD Array Chips with Integrated Readout with High Fill Factor and Low Dark Count Rate at Low Temperature*, 15th Pisa Meeting on Advanced Detectors, 22-28.5.2022
- A. Terliuk, *The DARWIN obseratory: Physics potential for Darwk Matter and beyond*, LIDINE 2022, 21-23 Sept 2022, Warsaw, Poland
- A. Terliuk, *DARWIN WG1: path to WIMP sensitivity*, DARWIN collaboration meeting, 1-3 March 2023, Online

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

- M. Doerenkamp, *Neutron rejection through multi-scatter tagging for the DARWIN detectorr*, Invisibles 22 Summer School, Orsay
- A. Terliuk, *The first results ofthe XENONnT experiment and an outlook for the future DARWIN observatory*, DPG Frühjahrestagung, Dresden März 2023, eingeladener Vortrag
- M. Doerenkamp, *Properties of the radiogenic neutron background in DARWIN*, DPG Frühjahrstagung, Dresden, März 2023
- A. Chauvin, *Estimate of the electronic and nuclear recoil background in DARWIN*, DPG Frühjahrestagung, Dresden, März 2023
- M. Doerenkamp, *DARWIN simulation framework and first sensitivity stidoes*, DARWIN collaboration meeting Heidelberg, 15-17 May, 2023
- M. Doerenkamp, *DARWIN simulation and sensitivity*, XLZD spring meeting, April 2024

2.9.3 Abschlussarbeiten

- M. Gaudia, *Position Reconstruction Based on Prompt Scintillation Light in XENONnT Exploting Deep Learning*, Masterarbeit, September 2021
- M. Keller, *Design and low temperature characteristation of low noise single photon detector arrays for rare event search experiments with liquid nobel gases*, Doktorarbeit, 26.7.2022
- J. Kusch, *Position Reconstruction in DARWIn and impact on the neutron background*, Bachelorarbeit, April 2024
- Robert Zimmermann, *Spatially Resolved Characterisation of the Sensitivity and Crosstalk Probability of Digital Silicon Photo-Multipliers*, Masterarbeit, Dezember 2023
- Christopher Becker, *Simulation of event processing with SiPMs in DARWIN*, Bachelorarbeit, Juli 2024

Anhang

Name	Stelle	Beteiligung	Finazierung
S. Hansmann-Menzemer	Wissenschaftlerin	0.2	Land
B. v. Krosigk	Wissenschaftlerin	0.3	Land
P. Fischer	Wissenschaftler	0.1	Land
H-C. Schultz-Coulon	Wissenschaftler	0.1	Land
V. Stankova	Post-Doc	0.2	Land
K. Briggl	Post-Doc	0.2	Land
M. Keller	Post-Doc	1.0	Land
M. Ritzer	Post-Doc	1.0	BMBF
F. Toschi	Post-Doc	0.2	DFG
A. Chauvin	Doktorand	1.0	DFG
M. Doerenkamp	Doktorandin	1.0	BMBF/Land
S. Shama	Doktorandin	1.0	DPG

Tabelle A1: Mitarbeiter der Heidelberger DARWIN-Gruppen, Stand November 2024.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	Ruprecht-Karls Universität Heidelberg
Projektleitung:	Prof. Dr. Stephanie Hansmann-Menzemer Prof. Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon Prof. Dr. Peter Fischer
Verbund:	~~05A23VH5 - Direct Search for Dark Matter with CRESST, XENON and DARWIN~~ Verbundprojekt 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN: Direkte Suche nach Dunkler Materie mit CRESST, XENON und DARWIN. Teilprojekt 2
Thema:	~~Teilprojekt 5~~

Ziel des Verbundprojekts ist die Suche nach Dunkler Materie, die - wie aus astrophysikalischen Beobachtungen bekannt ist – den Großteil der Materie im Universum ausmacht. Hierzu arbeiten die am Verbund beteiligten deutschen Gruppen an den Projekten XENON und CRESST sowie dem Zukunftsprojekt DARWIN. Diese suchen nach Wechselwirkungen von hypothetischen Dunkle-Materie-Teilchen in Form von WIMPs in ihren Detektoren, können prinzipiell aber auch weitere interessante Fragestellungen untersuchen (z.B. Axionen, ALPs, dark photons, doppelte schwache Zerfälle mit/ohne Neutrinos, solare Neutrinos, ...). Da die erwartete Ereignisrate dabei sehr gering ist, werden immer größere und empfindlichere Detektoren benötigt. Aufgrund ihrer Empfindlichkeit in unterschiedlichen WIMP-Massenbereichen sind CRESST und XENON/DARWIN komplementär zueinander.

XENON1T/nT: Die flüssig-Xenon (LXe) TPC XENON1T war mit einer aktiven Masse von 2,0 t einer der bisher größten und empfindlichsten Detektoren seiner Art. In dieser Förderperiode wurden abschließende Ergebnisse von XENON1T für die Suche nach WIMPs mit geringen Massen (light dark matter) publiziert: Zum einen waren das verbesserte Analysen zum Senken der Energieschwelle, wie beispielsweise eine verbesserte charge-only Analyse oder eine Reduktion der Detektionsschwelle für Szintillationslicht. Zum anderen sind das Andere Analysen gingen weit über die WIMP-Suche hinaus, wie z.B. die Untersuchung von schweren Teilchen der Dunklen Materie bis zur Planck-Skala, die Suche nach Korrelationen mit Gravitationswellen-Signalen oder die Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall von ^{136}Xe und die Beobachtung des doppelten Elektroneneinfangs von ^{124}Xe jetzt auch im KL-Einfangskanal. Zudem gab es eine abschließende Publikationen zu der neuartigen Niederenergie-Kalibration mit ^{37}Ar.
Der Schwerpunkt in dieser Förderperiode war die Fertigstellung und erfolgreiche Inbetriebnahme, gefolgt von den ersten Datennahmen (Science Runs 0 und 1) sowie Analysen von XENONnT. Im Jahr 2022 wurde mit einer Analyse geblindeter Daten zur Suche nach neuer Physik im niederenergetischen Bereich von Elektronrückstößen das erste herausragende wissenschaftliche Ergebnis mit XENONnT veröffentlicht [Phys. Rev. Lett. 19, 161805 (2022)]. Das Untergrundniveau im Suchbereich (1, 30) keV ist das niedrigste, das jemals in einem Detektor für dunkle Materie erreicht wurde, und ist etwa fünfmal niedriger als das von XENON1T. Damit ist die Erklärung des “XENON1T-Excess” als ein Tritium-induzierter Untergrundeffekt wahrscheinlich. Die erste WIMP-Analyse von XENONnT wurde im Frühjahr 2023 präsentiert und publiziert (Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 041003). Sie liefert bei etwa gleicher Exposure wie bei XENON1T trotzdem eine etwa 1,7-fach bessere Ausschlusskurve aufgrund des niedrigeren Untergrunds.
Bei den Detektorsystemen wurde das neue Online-Radon-Abscheidesystem erfolgreich in Betrieb genommen.

Im Science Run 0 wurde die einzigartige Destillationskolonne zur kontinuierlichen Radonabscheidung nur im GXe-Exraktionsmodus betrieben: GXe wurde aus den Bereichen entnommen, in denen die größten Radonemissionen identifiziert wurden, wodurch die Radonkonzentration auf ein bisher unerreichtes Niveau von 1,7 μBq/kg gesenkt wurde. Für dem Science Run 1 wurde das System für den Betrieb im LXe+GXe-Extraktionsmodus aufgerüstet, bei dem Xenon zusätzlich direkt aus der Flüssigphase extrahiert wird, so dass die Radonkonzentration um einen Faktor 4 auf einen Wert von etwa 0,8 μBq/kg reduziert wurde. Dies entspricht der Rate der unabschirmbaren solaren Neutrinos im WIMP-Suchbereich von Rückstoßenergien kleiner als 10 keV. Gleichzeitig wurden große Fortschritte bei der Inbetriebnahme der Gd-Wasser-Reinigungsanlage gemacht, die - parallel zum regulären Detektorbetrieb - für die spätere Einbringung von Gd-Sulfat in das Wasser der Vetosysteme vorbereitet wurde (die Einbringung startete kurz nach Ende der Förderperiode), um die Effizienz des Neutronen-Taggings zu erhöhen. Weiterhin wurden TPC-Drahtelektroden mit alternativen oder verbesserten Designs entwickelt und gefertigt, um für eine mögliche Verbesserung der elektrischen Feldkonfiguration in XENONnT vorbereitet zu sein, da das Driftfeld aktuell auf geringe Werte limitiert ist. Wegen der nach wie vor guten Datenqualität wurde auf die Öffnung des XENONnT-Detektors zum Austausch der Elektroden in dieser Förderperiode verzichtet, um mit dem geringeren Feld weiterhin Daten bei niedrigstem Untergrund nehmen zu können.

DARWIN: Für dieses Zukunftsprojekt wurden an allen Standorten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt: Die Gruppen aus Freiburg, Karlsruhe und Mainz haben Arbeiten zu großen TPC Elektroden durchgeführt; dazu wurde die Inbetriebnahme der full-scale Detektortestplattform PANCAKE in Freiburg sowie der Aufbau zur optischen Inspektion von Elektroden in Mainz abgeschlossen, und Hochspannungstests in Karlsruhe vorbereitet. In Heidelberg wurde die Entwicklung von innovativen CMOS-basierten Photosensoren fortgeführt und ein Test in flüssigem Xenon vorbereitet (gemeinsam mit Freiburg, Karlsruhe). Das Simulationsframework wurde unter anderem dazu verwendet, die Light Collection Efficiency in DARWIN zu untersuchen und mit einem alternativen Simulationsmodell zu vergleichen.Â In Münster wurden Entwicklungen von radonfreien Komponenten für die Xenon-Reinigung weitergeführt, insbesondereÂ wurde das Konzept der magnetisch gekoppelten, hermetisch gekapselten Kolbenpumpe um einen elektromagnetischen Antrieb anstatt des bisher eingesetzten mechanischen erweitert. Von C. Weinheimer wurdeÂ 2022 ein ERC Advanced Grant für neue Entwicklungen im Bereich der Reinigung von radioaktiven Edelgasen und elektronegativen Verunreinigungen für DARWIN eingeworben.
Im Sommer 2021 haben über 100 leitende Wissenschaftler*innen aus DARWIN und aus den zur Zeit laufenden Experimenten XENON und LZ ein Memorandum of Understanding unterzeichnet, mit der Absicht ein gemeinsames großes Xenon-basiertes Observatorium zu entwickeln, das neben der Suche nach Dunkler Materie noch viele weitere physikalische Ziele hat. Damit wird die DARWIN-Idee durch eine noch grßere Community getragen. Im Sommer 2022 wurde dann auf einem großen Treffen in Karlsruhe das XLZD Konsortium gegründet, das die Kollaborationen XENON, LZ und DARWIN zusammenbringt, um gemeinsam ein Xenon-basiertes Observatorium mit einem Multi-Tonnen Target zu realisieren. Das XLZD Steering Committee trifft sich regelmäßig, das DARWIN Executive Board ist dort komplett vertreten (4/9 deutsche PIs). Ein zweites Treffen des XLZD-Konsortium fand im April 2023 in Los Angelos als Satellitentreffen zu einer großen internationalen Dunklen Materie Konferenz UCLA Dark Matter 2023 statt.