GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN

Zuwendungsempfänger:	Technische Universität München
Projektleitung:	Prof. Dr. Stefan Schönert
E-Mail:	schoenert@ph.tum.de

Förderkennzeichen:	05A20WO1
Förderzeitraum:	01.07.2020 - 31.12.2023
Zuwendung:	750.669,60 €
Projektträger:	Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:	p.mucciarelli@tum.de
Zusätzlicher Name:	Paola Mucciarelli

Genutzte Großgeräte:

Labor	Gerät	Experiment
LNGS		CRESST-XENON-
DARWIN		
andere	Europa	
Astroteilchenphysik		

Diplomarbeiten:	0
Dissertationen:	5
Habilitationen:	0
Referierte Publikationen:	17
Andere Veröffentlichungen:	10
Patente:	0
Bachelorarbeiten:	4
Masterarbeiten:	1
Staatsexamen:	0

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 23.07.2024 13:45 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: TU München

Projektleitung: Prof. Dr. Stefan Schönert

Verbund: 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN

Thema: Verbundprojekt 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN: Direkte Suche nach Dunkler Materie mit CRESST, XENON und DARWIN. Teilprojekt 4

Zusammenfassung

Ziel des Verbundprojekts ist die Suche nach Dunkler Materie, die den Großteil der Materie im Universum ausmacht. Hierzu arbeiten die am Verbund beteiligten deutschen Gruppen an den Projekten CRESST und XENON, 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. andere Dunkle Materie Kandidaten, Neutrinophysik, ...). In Anbetracht der niedrigen zu erwartenden Ereignisrate ist die Verwendung immer größerer beziehungsweise empfindlicherer Detektoren erforderlich. Aufgrund ihrer Empfindlichkeit in unterschiedlichen WIMP - Massenbereichen sind CRESST und XENON/DARWIN komplementär zueinander. Hier wird über die Beiträge der Arbeitsgruppe der Technischen Universität München (TUM) zum CRESST - Experiment berichtet.

CRESST nimmt seit dem Jahr 2022 durchgehend Daten auf. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung des "Low Energy Excess" (LEE), einer bislang unerklärten Häufung von Ereignissen bei niedrigen Energien (< 200 eV), die die Sensitivität für Dunkle Materie einschränken. Das zeitliche Verhalten der Rate des LEE wurde untersucht, die auf einer Zeitskala von 100-200 Tagen exponentiell abklingt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass ein zwischenzeitliches Aufwärmen der Detektoren von ihrer Betriebstemperatur von 15 mK auf etwa 60 K und anschließendes Abkühlen einen spontanen Anstieg der LEE-Rate hervorruft. Die Rate klingt im Anschluss aber recht schnell (ca. 14-20 Tage) wieder auf das vorherige Niveau ab. Weitere Tests zeigten, dass bei geringeren Temperaturerhöhungen (z.B. auf 200 mK oder 3,5 K) keine Erhöhung der Rate beobachtet werden konnte, während bei 30 K bzw. 11 K die LEE-Rate erneut anstieg. Zwischenergebnisse wurden im Rahmen der Internationalen Dark Matter Konferenz (IDM), sowie der TAUP-Konferenzen veröffentlicht. Bis Anfang 2024 wird ein weiterer Aufwärmtest auf ca. 130 K durchgeführt.

V_3.1.6.1.03_Schlussbericht
11/2021

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.

Trotz des LEE konnten aufgrund der niedrigen Energieschwellen (~10 eV) neue Grenzen für den Wirkungsquerschnitt der WIMP-Nukleon-Streuung publiziert werden. Die bisherigen Erkenntnisse zum LEE legen nahe, dass die Ursache entweder in der Grenzfläche zwischen Targetkristall und TES-Sensor oder im Kontakt zwischen Halterung und Targetkristall zu suchen ist. Für die nächste Messkampagne wurden daher neue Detektorgeometrien sowie Absorber mit zwei TES-Sensoren entwickelt, um diese Hypothesen gezielt testen zu können. Diese Detektoren wurden bereits erfolgreich getestet und werden nun für den Einsatz in CRESST vorbereitet. Ein weiterer Weg, die Empfindlichkeit für niedrige WIMP-Massen zu steigern, ist neben der Erniedrigung der Energieschwelle der Einsatz von möglichst leichten Elementen im Targetmaterial der Detektoren und die Optimierung der digitalen Signalverarbeitung.

Die Schwerpunkte der Arbeiten an der TUM lagen auf der Herstellung hochreiner Kristalle, deren Weiterverarbeitung zu Kryodetektoren und deren Charakterisierung und Betrieb im CRESST Experiment, als auch die Analyse der Ergebnisse. Aufgrund der räumlichen Nähe mit dem Max-Planck-Institut für Physik in München besteht eine intensive Zusammenarbeit in der Detektorherstellung. Des Weiteren wurde die Entwicklung eines Detektormoduls (‚Bechermodul') vorangetrieben, um die Natur der sogenannten Überschussereignisse (low-energy excess events, LEE) oberhalb der Schwellenenergie von wenigen 10 eV zu untersuchen. Ebenso wurde die Entwicklung einer Magnetfeldkompensation für CRESST weiter vorangetrieben.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die für CRESST entwickelten Kryodetektoren sind mit Übergangsphasen-Thermometern bestückte Einkristalle, die bei Temperaturen unterhalb von 20 mK betrieben werden. Aufgrund ihrer sehr niedrigen Energieschwellen von unter 100 eV eignen sich diese Detektoren in besonderem Maße für die Suche nach Teilchen der dunklen Materie bei Massen unterhalb eines GeV/c2. Allerdings zeigt sich unterhalb von etwa 200 eV bis zur Energieschwelle eine signifikante Zunahme der Ereignisrate (low-energy excess, LEE), wodurch die experimentelle Empfindlichkeit bei der Suche nach dunkler Materie derzeit begrenzt ist. Das Hauptziel der im Sommer 2020 gestarteten Messkampagne bestand folglich darin, den Ursprung des LEE zu ergründen.

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.

Um die möglichen Ursprünge verschiedener Hypothesen zu untersuchen, wurden die bisherigen Detektoren mit unterschiedlichen Haltevorrichtungen modifiziert sowie Detektoren mit neuen Targetmaterialien, als auch unterschiedlichen TES Konfigurationen entwickelt und an den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) im CRESST Experiment betrieben. Die Energieschwellen der meisten Detektoren liegen zum Teil deutlich unterhalb von 100 eV, sodass eine Erfassung der erwarteten Ereignispopulation möglich war. Das Ziel der Messungen bestand darin die Rate und Energieverteilung des LEE der verschiedenen Detektorkonfigurationen zu vergleichen.

Die Arbeitsgruppe an der TUM fokussiert sich primär auf die Züchtung und Analyse von hochreinen, verspannungsarmen CaWO4 - Targetkristallen, deren Bearbeitung im TUM-Kristalllabor und deren Charakterisierung in Test-Kryostaten in München und am LNGS. Ein weiteres zentrales Thema der Arbeitsgruppe stellt die Identifizierung und Reduktion des Low-Energy Excess (LEE) dar. Hierfür wurden neuartige, aktive Detektorhalter an der TUM entwickelt und validiert. Nach erfolgreicher Testphase erfolgt die Integration der neuen Halter am LNGS. Dies wird durch eine umfassende Analyse der CRESST-Daten ergänzt. Darüber hinaus werden der LEE in den CRESST-Daten mit denen von internationalen Konkurrenz-Experimenten verglichen, welche einen ähnlichen bzw. deutlich höheren LEE beobachten. Zu diesem Zweck hat die TUM Gruppe gemeinsam mit Kollegen der TU Wien eine Serie von Workshops (EXCESS-Workshop) initiiert, in deren Rahmen Ergebnisse und Methoden erörtert und weiterentwickelt werden. Diese Ansätze zielen darauf ab, den Ursprung des LEE besser zu verstehen und Strategien zu seiner Reduktion zu entwickeln, um die Empfindlichkeit der Detektoren zu optimieren.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Forschungsgruppe an der TUM verfügt über besondere Infrastrukturen, die für dieses Projekt von großer Bedeutung sind:

- **Kryostat-Labore**: Mehrere Labore für den Betrieb von Kryostaten bei mK-Temperaturen, darunter zwei basierend auf der Pulse-Tube-Technologie, die ohne kryogene Flüssigkeiten auskommen. Reinräume stehen für die Detektormontage und die Synthese von Kristall-Rohmaterialien zur Verfügung.
- **TES-Produktion**: Anlagen zur Produktion von Übergangsphasen-Thermometern (TES) in Zusammenarbeit mit Kollegen und Kolleginnen am MPP.
- **CaWO4-Kristallproduktion**: Die TUM hat ein weltweit einzigartiges Labor für die CaWO4-Kristallproduktion etabliert. Mit einem Kristallofen nach dem Czochralski-Verfahren werden hochreine Kristalle mit Alpha-Kontaminationen im Bereich

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.

von O(100) µBq/kg produziert. Das Kristalllabor verfügt über einzigartige Erfahrung in der Bearbeitung von CaWO4-Kristallen.

- **Entwicklung von Detektorhalterungen**: Die TUM Gruppe hat langjährige Erfahrung in der Entwicklung von aktiven Detektorhalterungen. Haltestrukturen wie beispielsweise Kristallstäbe (sogenannte iSticks) werden ebenfalls mit TES-Sensoren ausgestattet und aktiv ausgelesen. Dadurch können Energiepositionen durch Stress-Relaxationen in diesen Materialien von echten Teilchenereignissen in den Targetkristallen unterschieden werden.
- **Bechermodule der 1. Generation**: Es besteht Erfahrung in Betrieb, Montage und Analyse der Bechermodule der ersten Generation, die im CRESST-II-Setup betrieben wurden. Dabei wurden Energieschwellen oberhalb der LEE-Region erreicht (>~1 keV). Die erfolgreiche Demonstration des Detektorkonzepts bildet die Grundlage für die hier entwickelten Bechermodule, die einen wichtigen Beitrag zur Identifizierung und Reduktion des LEE leisten werden.

Diese umfassenden Infrastrukturen und die langjährige Erfahrung der Forschungsgruppe sind entscheidend für den Erfolg des Projekts und tragen wesentlich zur Weiterentwicklung der Detektortechnologien bei.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Entwicklung und Betrieb von hochreiner und Spannungsarmer CaWO4 Kristalle in CRESST

An der TUM wurden spannungsarme CaWO4-Kristalle aus chemisch gereinigten Rohmaterialien hergestellt und zu Kryodetektoren verarbeitet. Diese Detektoren wurden im CRESST-Experiment zur Suche nach dunkler Materie eingesetzt und dienten dazu, sowohl die erzielte intrinsische Reinheit der Kristalle als auch die Ereignisrate bei niedrigen Energien nahe der Schwelle zu ermitteln. Die intrinsische Reinheit wurde über die Aktivitäten der Progenitor-Isotope bestimmt. Aufgrund der hohen Energiedeposition (5-7 MeV) der Alphazerfälle sind die Signale im TES-Phononen-Kanal jedoch gesättigt, sodass nur eine ungenaue Energieinformation ermittelt werden kann.

Durch die Analyse der mit TES instrumentierten iSticks, welche die CaWO4-Kristalle mechanisch halten, aber selbst nur schwach an das Phonon-System der CaWO4-Kristalle gekoppelt sind, konnten die Alpha-Signale in diesem System analysiert werden. Im Rahmen der Dissertation von Angelina Kinast konnte eine Reduktion der Alpha-Aktivität um einen Faktor von etwa 8 nachgewiesen werden. Die Rate der sogenannten Überschussereignisse war jedoch

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.

vergleichbar mit der von CaWO4-Kristallen aus früheren Kristallzüchtungen, die im Gegensatz dazu starke intrinsische Verspannungen aufwiesen. Somit konnte eine mögliche Ursache der Überschussereignisse, nämlich langsame Relaxationsprozesse intrinsischer Kristallspannungen, ausgeschlossen werden.

Des Weiteren wurden neue Techniken zur Herstellung von hochreinen CaWO4-Kristallen durch Doppelrekristallisation untersucht. Ausgehend von zuvor gezüchteten Kristallen mit kontrollierter Reinheit wurden neue Kristalle gezüchtet. Diese Kristalle sollen weitgehend unbearbeitet als massive Kryodetektoren betrieben werden, um ihre intrinsische Reinheit mittels Alphaspektrometrie zu bestimmen.

Darüber hinaus wurden weitere Kristalle im Hinblick auf das CRESST-Upgrade produziert. In den letzten beiden Jahren der BMBF-Förderung wurden sieben Rohkristalle mit jeweils 800-1000 g gezogen, die zur Weiterverarbeitung zu CRESST-II-Detektoren von etwa 20 g vorgesehen sind.

Eine weitergehende Optimierung des Kristallzucht-Prozesses wurde im Hinblick auf die Massenproduktion von Kristallen erreicht. Zudem wurden Methoden etabliert, um die Temperaturgradienten für eine spannungsarme Kristallzucht zu optimieren, einschließlich der Modifikation des Kristallofens mit Strukturen aus Rhodium.

Entwicklung eines neuartigen Detektor zur Untersuchung niederenergetischer Ereignisse

Das Ziel des CRESST Bechermoduls ist die Untersuchung niederenergetischer (<100 eV) Teilchenuntergründe im CRESST-Experiment am LNGS Untergundlabor. Insbesondere soll ein Ursprung solcher Teilchenuntergründe in der Halterung des Targetkristalls ausgeschlossen werden. Dazu wird der Targetkristall von einem Silizium-Becher umschlossen, der selbst ein Kryodetektor mit niedriger Schwelle ist. Gehalten wird der Targetkristall über Klebepunkte durch einen ringförmigen Deckel, ebenfalls als Kryodetektor instrumentiert.

Eine bisherige Schwäche dieses Designs war die unabhängige Optimierung der Arbeitstemperatur von Target und Ring wegen des gegenseitigen Wärmekontakts. Im neuen Bechermodul soll dies durch ein neuartiges Heizerdesign, welches nur die Sensoren, nicht die Kristalle heizt, überwunden werden. Des Weiteren wird durch eine Anpassung der Kristall- und Sensorgeometrie eine Verringerung der Energieschwellen unter 100 eV angestrebt.

Im Jahr 2021 wurden im Rahmen des Projekts eine Bachelorarbeit, von Herrn Leon Renn, sowie eine Masterarbeit, von Frau Fiona Hamilton, angefertigt. Fiona Hamilton arbeitete am gesamten Design des Moduls, entwarf die Bauteile des Kupferhalters und legte die

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.

Kristallgeometrien fest. Passende Kristalle für das Bechermodul wurden in Auftrag gegeben. Leon Renn arbeitete am Sensor-Design der Wolfram-Transition Edge Sensors. Er implementierte das neue Heizerkonzept und passte das Sensor-Design an die neuen Kristallgeometrien an. Ende 2021 wurde der erste Sensor auf einem Saphir-Targetkristall gefertigt und für die Messung der Übergangstemperatur im Entmischerkryostaten vorbereitet.

Johannes Rothe (PD) hat das Projekt der Bechermodule erfolgreich weitergeführt und die Montage dieser Module abgeschlossen. Die Bechermodule wurden in den Test-Kryostaten der TUM charakterisiert, wobei die Performance, insbesondere die Energieschwelle und die Diskriminierung von Stress-Relaxations-Ereignissen aus der Detektorhalterung, validiert wurde. In Testmessungen wurden Energieschwellen im Bereich von 50 eV erreicht, und eine Diskriminierung ist bis in den Bereich des LEE (ca. 100-200 eV) möglich. Dadurch kann geklärt werden, ob Stress-Relaxations-Ereignisse als Ursache für den LEE in Frage kommen. Zudem kann eine Reduktion des LEE durch Messungen von Koinzidenzsignalen im Target-Kristall und im ringförmigen Deckel erreicht werden.

Die Vorbereitung für den Transport und den Einbau der Bechermodule in das CRESST-III-Setup am LNGS wurde abgeschlossen, und der Einbau erfolgte im Frühjahr 2024.

Entwicklung einer Magnetfeldkompensation für CRESST

Die supraleitenden TES Wolframsensoren sind empfindlich gegenüber Schwankungen des äußeren Magnetfeldes. Dies wurde in der Doktorarbeit von Johannes Rothe eingehend untersucht. Derzeit wird das Magnetfeld am CRESST-Aufbau von drei Spulen aktiv kontrolliert. Ein Fluxgate-Sensor, der zur Messung des Magnetfelds verwendet wird, befindet sich notwendigerweise außerhalb des Kryostaten, was eine räumliche Extrapolation erfordert, die mit Unsicherheiten behaftet ist. Zusätzlich ist die Trennung des Hintergrundfelds von dem durch die Kompensationsspulen erzeugten Magnetfeld schwierig.

Zur Verbesserung dieses Systems wurden 2021 Magnetometer identifiziert und beschafft, die sich mit der nötigen Empfindlichkeit als Array betreiben lassen. In Gran Sasso wird dieses Netzwerk aus Sensoren in verschiedenen Abständen zum Experiment helfen, räumliche Magnetfeldschwankungen zu vermessen und mit hoher Genauigkeit auszugleichen. An der TUM wurde ein Aufbau zur Kalibrierung und Charakterisierung der Fluxgates entwickelt und erfolgreich an der TUM charakterisiert und validiert. Das System wurde anschließend zur Installation im CRESST-Kryostaten am LNGS vorbereitet. Aufgrund unserer Messergebnisse erwarten wir eine verbesserte Energieauflösung sowie eine höhere Stabilität in künftigen Messkampagnen.

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.

EXCESS Workshop Serie

Die TUM-Gruppe hat eine zentrale Rolle bei der Initiierung in 2021, der Vorbereitung und Durchführung der jährlichen EXCESS-Workshops übernommen. Der Schwerpunkt dieser Workshops liegt auf der vergleichenden Diskussion von Niedrigenergie-Exzess-Signalen in kryogenen Experimenten. Vertreter von mehr als zehn Experimenten haben an diesen Workshops teilgenommen und ihre Beobachtungen geteilt.

Der Ursprung des LEE wurde auf Festkörpereffekte eingegrenzt. Konkret wurden das Sensor(TES)-Interface und externer Stress von der Detektorhalterung als Ursachen identifiziert. Die Strategie zur Entwicklung neuartiger Detektoren hat von den Erkenntnissen der jährlichen EXCESS-Workshops profitiert.

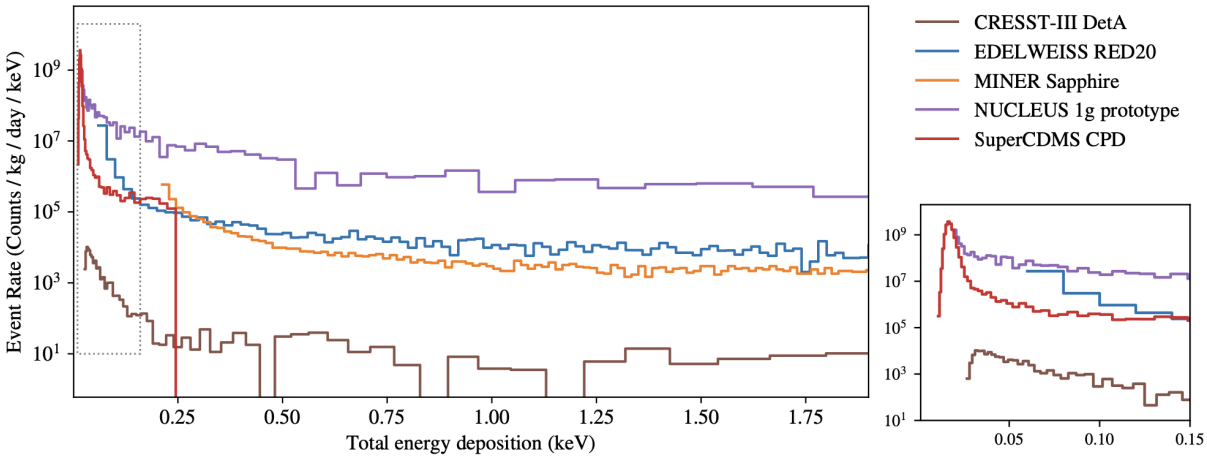

Figure 1: Low-energy spectra of different experiments in units of total energy deposition. The brown line shows a measurement of CRESST-III, corresponding to the lowest LEE in the field of Dark Matter experiments [SciPost Phys.Proc. 9 (2022) 001].

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

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.

Der größte Teil der bewilligten Mittel diente zur Finanzierung der Personalmittel anteilsmäßig für einen Postdoktoranden, sowie für zwei Promovenden/in. Des Weiteren wurden vier wissenschaftliche Hilfskräfte aus den Mitteln finanziert. Investitionsmittel flossen in die Präzisions-Magnetometer für die Entwicklung der Magnetfeldkompensation. Weitere Mittel wurden für Reisen zu Kollaborationstreffen und Konferenzen eingesetzt. Aufgrund von COVID-Beschränkungen waren Reisen bis zur zweiten Jahreshälfte 2021 nicht erlaubt. Dennoch hat unsere Arbeitsgruppe ihre Ergebnisse auf virtuellen Konferenzen wie dem 19th International Workshop on Low Temperature Detectors. Teil der Mittel wurden für den Betrieb von CRESST und den Kauf von Verbrauchsmaterialien benötigt. Die wichtigsten Verbrauchsmaterialien betrafen Rohstoffe zur Herstellung von hochreinen Einkristalle, deren Bearbeitung, spezielle Kristallmaterialen und Substrate, sowie Sputter-Targets zur Detektorherstellung.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Die in CRESST eingesetzten Kryodetektoren sind aufgrund ihrer sehr niedrigen Energieschwellen von unter 100 eV besonders gut für die Suche nach WIMPs mit niedrigen Massen geeignet. Die Sensitivität wird momentan durch den Low-Energy Excess (LEE) begrenzt, der unterhalb von etwa 200 eV beginnt und dessen Rate zur Energieschwelle hin stark ansteigt. Den Ursprung des LEE aufzuklären, ist das Hauptziel der im Sommer 2020 gestarteten Messkampagne.

Um verschiedene Hypothesen untersuchen zu können, wurden die bisher verwendeten Detektoren unterschiedlich modifiziert und Detektoren mit neuen Targetmaterialien eingebaut. Die Energieschwellen der meisten Detektoren liegen (zum Teil deutlich) unterhalb von 100 eV, sodass die angesprochene Ereignis-Population beobachtbar ist. Das nächste Ziel ist es nun, die Rate sowie die Energieverteilung dieser Ereignisse in allen Detektoren zu vergleichen und nach Korrelationen mit bestimmten Modifikationen zu suchen.

Zusätzlich zu den im Antrag genannten Zielen muss die Quelle der niederenergetischen Untergrundereignisse identifiziert werden. Die Reduktion dieser Ereignisse ist entscheidend für die Steigerung der Sensitivität bei niedrigen WIMP-Massen. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse bei der Untersuchung des LEE wurde entschieden, die laufende Datennahme zu verlängern. Dadurch wird sich zwar das geplante Upgrade von CRESST verzögern, jedoch steht diesem Nachteil der Erkenntnisgewinn zur Reduktion des LEE gegenüber. Daher wird das Upgrade erst im Laufe des Jahres 2025 durchgeführt werden können. Die Rohmaterialien für Kristallproduktion für den CRESST upgrade wurde bezogen und deren Reinheiten charakterisiert. Hochreines CaWO4 Material wurde synthetisiert und sieben Rohkristalle mit jeweils 800-1000 g gezogen, die zur Weiterverarbeitung zu CRESST-II Detektoren von etwa 20

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.

g vorgesehen sind. Daher entstehen auf Grund des verzögerten upgrades keine zusätzlichen Kosten.

Parallel dazu wurde ein Bechermodul zur Untersuchung des LEE entwickelt und die Vorbereitung für die Montage im CRESST-Kryostaten am LNGS getroffen. Zahlreiche Publikationen (siehe unten) belegen die Sensitivität dieser Module auf eine Reihe von Modellen zur Dunklen Materie, auch in Gegenwart des LEE.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Suche nach Dunkler Materie mit CRESST, XENON und DARWIN ist von höchster Relevanz für die (Astro-)Teilchenphysik und hat weltweite Auswirkungen. Alle wissenschaftlichen Ergebnisse, einschließlich F&E und Methoden, werden durch Veröffentlichungen und auf Konferenzen bekannt gemacht. Seit vielen Jahren werden unsere Ergebnisse im Rahmen der Open-Access-Politik veröffentlicht, im Einklang mit Ziel 4 der Agenda 2030. Viele Ergebnisse sind auch für benachbarte Gebiete von Interesse, z.B. die Suche nach seltenen Kernzerfall, Spurenelementanalyse oder Fusionstechnologie (z.B. magnetisch gekoppelte Kolbenpumpe). Die Entwicklung neuer Methoden und Technologien spielt auch eine wesentliche Rolle in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses eine wesentliche Rolle und leistet damit auch einen Beitrag zu Ziel 4 der Agenda 2030. Viele unserer Entwicklungen sind innovativ und fördern das Ziel 9 der Agenda 2030.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse und Daten von CRESST werden durch peer-reviewed Veröffentlichungen und Bereitstellung auf Datenplattformen der Öffentlichkeit und allen Wissenschaftlern zur Verfügung gestellt. Dies erlaubt insbesondere die Verwendung der Daten in zukünftigen Projekten und in globalen Analysen.

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

CRESST gehört nach wie vor zu den Experimenten mit der weltweit besten Sensitivität für leichte WIMPs mit Massen von 1 GeV/c2 und darunter. Im Berichtszeitraum wurden im Rahmen dieses Verbundes auch mit Flüssig-Xenon-Detektoren vergleichbare Sensitivitäten erreicht. Diese werden mithilfe des Migdaleffektes ermittelt und sind daher modellabhängig.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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.

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

1. CRESST Collaboration *"Observation of a low energy nuclear recoil peak in the neutron calibration data of the CRESST-III experiment"*. Phys.Rev.D 108 (2023) 2, 022005 - physics.ins-det/2303.15315
2. CRESST Collaboration *"Results on sub-GeV Dark Matter from a 10 eV Threshold CRESST-III Silicon Detector".* Phys.Rev.D 107 (2023) 12, 122003 - astro-ph/2212.12513
3. CRESST Collaboration *"Towards an automated data cleaning with deep learning in CRESST".* Eur. Phys.J.Plus 138 (2023) 1, 100 - physics.ins-det /2211.00564
4. CRESST Collaboration *"Secular Equilibrium Assessment in a CaWO4 Target Crystal from the Dark Matter Experiment CRESST using Bayesian Likelihood Normalisation". Appl.Radiat.Isot. 194 (2023) 110670 - physics.ins-det/2209.00461*
5. CRESST Collaboration *"Latest observations on the low energy excess in CRESST-III".* SciPost Phys.Proc. 12 (2023) 013 - astro-ph/2207.09375
6. CRESST Collaboration *"Testing spin-dependent dark matter interactions with lithium aluminate targets in CRESST-III".* Phys.Rev.D 106 (2022) 9, 092008 - astro-ph/2207.07640
7. CRESST Collaboration *"Improving the Quality of CaWO4 Target Crystals for CRESST".* J.Low Temp. Phys. 209 (2022) 5-6, 1128-1134
8. P. Adari et. al. *"EXCESS workshop: Descriptions of rising low-energy spectra"*. *SciPost Phys.Proc.* 9 (2022) 001 - astro-ph/2202.05097
9. CRESST Collaboration *"Probing spin-dependent dark matter interactions with 6Li".* Eur.Phys.J.C Vol. 82, Num. 207 - physics.ins-det/2201.03863
10. Ch. Thorpe-Morgan et. al. *"Annihilating dark matter search with 12 yr of Fermi LAT data in nearby galaxy clusters".* MNRAS 502 (3), pp. 4039-4047 (2021)
11. CRESST Collaboration *"Cosmic activation of Cresst's CaWO4 crystals"*. J.Phys.Conf.Ser. 2156 (2021) 012227
12. CRESST Collaboration *„Cryogenic characterization of a LiAlO2 crystal and new results on spin-dependent dark matter interactions with ordinary matter"*. Eur.Phys.J.C 80.9 (2020)
13. CRESST Collaboration *„Lithium-Containing Crystals for Light Dark Matter Search Experiments".* J.Low Temp.Phys. 199 (2019) 1-2, 510–518.
14. CRESST Collaboration *„Searches for Light Dark Matter with the CRESST-III Experiment".* J.Low Temp.Phys. 199 (2020) 1-2, 547–555.
15. CRESST Collaboration *„Latest results of CRESST-III's search for sub-GeV/c2 dark matter"*. .Low Temp.Phys.Conf.Ser. 1468 (2020) 1, 012038.
16. Ch.Borschensky et al. *"Direct detection of dark matter: Precision predictions in a simplified model framework"* Eur.Phys.J.C 81 (2021) 1, 44
17. Ch.Thorpe-Morgan et al. *"THESEUS insights into axionlike particles, dark photon, and sterile neutrino dark matter"* Phys.Rev.D 102 (2020) 12, 123003.

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.

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

Margarita Kaznacheeva, “Exploring the sub-keV energy region with the CRESST and NUCLEUS experiments” Dissertation, TU München bis Ende 2024

Tobias Ortmann, “Development of Novel Tungsten Thermal Sensor” (Entwicklung neuartiger Thermischer Sensoren aus Wolfram)
Dissertation, TU München bis Ende 2024

Angelina Kinast , “Enhancing the Dark Matter Sensitivity of CRESST: Purification, Stress Reduction and 17O Enrichment of CaWO4 Target Crystals” (Erhöhung der Dunkle-Materie Empfindlichkeit von CRESST: Reinigung, Stressreduktion und 17O Anreicherung von CaWO4-Kristallen)
Dissertation, TU München 2023

Alexander Langenkämper, ”Characterisation of the Muon-Induced Neutron Background with a LiF Cryogenic Detector” (Charakterisierung des Myon-induzierten Neutronenhintergrunds mit einem LiF-Kryodetektor)
Dissertation, TU München 2023

A. H. Abdelhameed, “Aspects of TES Novel Reproducibility for Cryogenic Detectors Dedicated to Dark Matter Search”, Masterarbeit, TU München 2022

Fiona Hamilton, “Development and Design of a Low Threshold Beaker Module for CRESST” (Entwicklung einer neuen Generation von Bechermodulen für CRESST, Optimiert auf Niedrige Energien),
Dissertation,TU München 2022

Leon Renn, “Transition Edge Sensor Design for a CRESST Detector Module with an ActiveSurface Veto Operating at Low Energy Threshold” (Transition Edge Sensor Design für ein CRESST Detektor Modul mit aktiven Oberflächenveto bei niedrigen Energien), Bachelorarbeit, TU München 2021

Andreas Gieb, “Study of the sub-keV background in cryogenic detectors”,
Bachelorarbeit, TU München 2021

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.

Katharina von Mierbach. “Background studies of CaWO4 crystals for the CRESST Direct Dark Matter Search”, Bachelorarbeit, TU München 2020

Felix Mang, “Study of aluminium phonon collectors for CRESST transition edge sensors” (Untersuchung von Aluminium-Phononkollektoren für Phasenübergangssensoren des CRESST Experiments), Bachelorarbeit, TU München 2020

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: TU München

Projektleitung: Prof. Dr. Stefan Schönert

Verbund: 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN

Thema: Verbundprojekt 05A2020 - CRESST-XENON-DARWIN: Direkte Suche nach Dunkler Materie mit CRESST, XENON und DARWIN. Teilprojekt 4

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Ziel des Verbundprojekts ist die Suche nach Dunkler Materie, die den Großteil der Materie im Universum ausmacht. Die Natur der Dunklen Materie ist bisher ungeklärt. Sie muss aus bisher unbekannten Elementarteilchen bestehen. Die Frage nach der Natur der Dunklen Materie ist eine der relevantesten Fragen der aktuellen Teilchenphysik und der Kosmologie. In diesem Verbund wird versucht, die Teilchen der Dunklen Materie (sogenannte WIMPs) mit unterschiedlichen, neu entwickelten Methoden direkt nachzuweisen. Hierzu arbeiten die am Verbund beteiligten deutschen Gruppen an den Projekten CRESST und XENON, 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. andere Dunkle-Materie-Kandidaten, Neutrinophysik, ...). 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.

Im Folgenden wird über die Beiträge der Arbeitsgruppe der TU München zum CRESST-Experiment berichtet. Die Ziele der Arbeitsgruppe waren:

- Produktion von CaWO4 Kristallen für den Nachweis von massearmer Dunkler Materie mit CRESST-III
- Entwicklung von innovativen Detektormodulen für CRESST-III
- Weiterentwicklung der Magnetfeldkompensation für den CRESST-III Kryostaten
- Untersuchung und Reduktion des Low-Energy-Excess (LEE) Untergrundes

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Die für CRESST entwickelten Kryodetektoren, bestückt mit Übergangsphasen- Thermometern, werden bei Temperaturen unter 20 mK betrieben. Mit Energieschwellen unter 100 eV sind sie ideal für die Suche nach dunkler Materie bei Massen unter einem GeV/c². Allerdings begrenzt

eine signifikante Zunahme der Ereignisrate unter 200 eV (low-energy excess, LEE) die Empfindlichkeit der Experimente. Das Hauptziel der im Sommer 2020 gestarteten Messkampagne bestand folglich darin, den Ursprung des LEE zu ergründen.

Um verschiedene Hypothesen zu testen, wurden die Detektoren mit unterschiedlichen Haltevorrichtungen und neuen Targetmaterialien modifiziert sowie unterschiedliche TES-Konfigurationen entwickelt. Diese wurden im CRESST-Experiment an den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) betrieben. Die meisten Detektoren hatten Energieschwellen unter 100 eV, was die Erfassung der erwarteten Ereignispopulation ermöglichte. Ziel war es, die Rate und Energieverteilung des LEE der verschiedenen Detektorkonfigurationen zu vergleichen. Die Arbeitsgruppe an der TU München verfolgte ihre oben genannten Ziele auch im Hinblick auf die Bewältigung dieser Herausforderung.

Entwicklung und Betrieb von hochreinen und spannungsarmen CaWO4-Kristallen in CRESST

An der TU München wurden spannungsarme CaWO4-Kristalle aus gereinigten Rohmaterialien gezüchtet und daraus sogenannte Kryodetektoren hergestellt. Diese wurden im CRESST-Experiment zur Suche nach dunkler Materie genutzt. Die intrinsische Reinheit der Kristalle wurde über Progenitor-Isotope bestimmt. Eine Reduktion der Alpha-Aktivität um den Faktor 8 konnte nachgewiesen werden, die Rate der Überschussereignisse blieb jedoch unverändert. Neue Techniken zur Herstellung hochreiner CaWO4-Kristalle durch doppelte Rekristallisation wurden untersucht. Kristalle wurden als massive Kryodetektoren betrieben, um ihre Reinheit mittels Alphaspektrometrie zu bestimmen. Für das CRESST-Upgrade wurden sieben Rohkristalle à 800-1000 g produziert, die zu Detektoren von etwa 20 g weiterverarbeitet werden. Eine Optimierung des Kristallzuchtprozesses für die Massenproduktion wurde erreicht, einschließlich der Modifikation des Kristallofens mit Rhodiumstrukturen.

Entwicklung eines neuartigen Detektors zur Untersuchung niederenergetischer Ereignisse

Das CRESST-Bechermodul zielt darauf ab, niederenergetische (<100 eV) Teilchenuntergründe zu untersuchen. Der Targetkristall wird von einem Silizium-Becher umschlossen, der selbst ein Kryodetektor ist. Das neue Heizerdesign behebt bisherige Schwächen durch gezieltes Heizen der Sensoren. 2021 wurden Bachelor- und Masterarbeiten zur Optimierung des Moduldesigns und der Sensoren durchgeführt. Der erste Sensor wurde auf einem Saphir-Targetkristall gefertigt und für Messungen vorbereitet. Die Module wurde anschließend in Test-Kryostaten in München charakterisiert und validiert. Energieschwellen von 50 eV wurden erreicht, und eine Diskriminierung von Stress-Relaxations-Ereignissen im Energiebereich des LEE ist möglich. Die Bechermodule wurden im Frühjahr 2024 ins CRESST-III-Setup eingebaut.

Entwicklung einer Magnetfeldkompensation für CRESST

Die TES Wolframsensoren sind empfindlich gegenüber Magnetfeldschwankungen. Ein neues System zur Magnetfeldkompensation mit Fluxgate-Sensoren wurde an der TUM entwickelt und zur Installation am LNGS vorbereitet, was zu einer besseren Energieauflösung und Stabilität führen wird.

EXCESS Workshop Serie

Die Wissenschaftler der TUM Gruppe waren massgeblich an der Initiierung und Organisation der seit 2021 jährlich stattfindenden EXCESS-Workshops beteiligt, welche sich mit Niedrigenergie-Exzess-Signalen in kryogenen Experimenten beschäftigen. Ursachen wurden auf das Sensor(TES)-Interface und externen Stress zurückgeführt. Die Workshops haben wesentlich zur Weiterentwicklung neuartiger Detektoren beigetragen.

3. Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Suche nach Dunkler Materie mit CRESST, XENON und DARWIN ist eine Zusammenarbeit von ca. 50 Instituten weltweit. In Deutschland arbeiten Gruppen der Universitäten Freiburg, Heidelberg, Mainz, Münster, Tübingen, TU Dresden, TU München, dem KIT sowie der MPIs für Physik in München und für Kernphysik in Heidelberg gemeinsam an den Projekten.

Die Suche nach Dunkler Materie ist von höchster Relevanz für die (Astro-)Teilchenphysik und hat weltweite Auswirkungen. Alle wissenschaftlichen Ergebnisse, einschließlich F&E und Methoden, werden durch Veröffentlichungen und auf Konferenzen bekannt gemacht. Seit vielen Jahren werden unsere Ergebnisse im Rahmen der Open-Access-Politik veröffentlicht, im Einklang mit Ziel 4 der Agenda 2030. Viele Ergebnisse sind auch für benachbarte Gebiete von Interesse, z.B. die Suche nach seltenen Kernzerfall, Spurenelementanalyse oder Fusionstechnologie (z.B. magnetisch gekoppelte Kolbenpumpe). Die Entwicklung neuer Methoden und Technologien spielt auch eine wesentliche Rolle in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses eine wesentliche Rolle und leistet damit auch einen Beitrag zu Ziel 4 der Agenda 2030. Viele unserer Entwicklungen sind innovativ und fördern das Ziel 9 der Agenda 2030. Die Ergebnisse und Daten werden durch Veröffentlichungen und Bereitstellung auf Datenplattformen der Öffentlichkeit und allen Wissenschaftlern zur Verfügung gestellt. Dies erlaubt insbesondere die Verwendung der Daten in zukünftigen Projekten und in globalen Analysen.