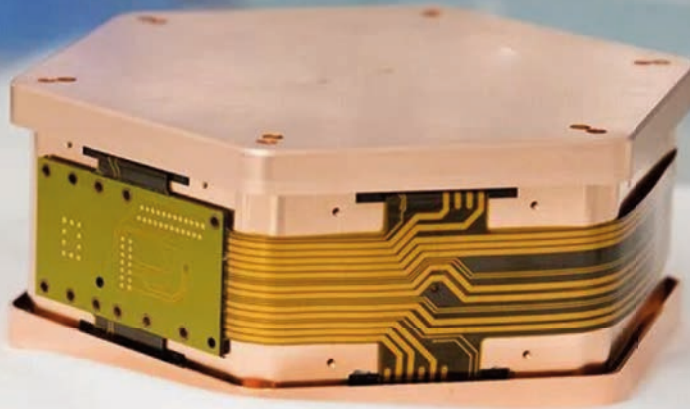


Jeder Detektor für das SuperCDMS-Experiment (hier ein Prototyp) hat einen Durchmesser von zehn Zentimetern und wiegt rund ein Kilogramm. Er besteht entweder aus Silizium oder Germanium in einem Kupfergehäuse. Insgesamt 24 dieser Detektoren werden gleichzeitig in einem großen Kryostaten im SNOLAB-Untergrundlabor betrieben.



HERTHA-SPONER-PREIS

Den Dunklen Sektor im Visier

Die direkte Suche nach Dunkler Materie lässt sich dank neuer theoretischer Ansätze ausweiten.

Belina von Krosigk

Die ungeklärte Identität der Dunklen Materie ist eines der größten Rätsel der modernen Physik. Weltweit suchen Experimente unter anderem nach direkten Wechselwirkungen zwischen potenziellen Teilchen der Dunklen Materie und einem Detektormaterial. Im Fokus dieser direkten Suchen stehen seit rund vierzig Jahren Weakly Interacting Massive Particles: Diese WIMPs konnten in ihrer ursprünglichen Definition die gesamte Dunkle Materie im Universum beschreiben. Die Tatsache, dass sich solche Teilchen bisher nicht finden ließen, führte in den vergangenen Jahren zu einem Paradigmenwechsel durch die Einführung des sogenannten Dunklen Sektors.

Dunkle Materie (DM) ist eine unsichtbare Substanz, die den Großteil der Materie im Universum ausmacht. Im Gegensatz zu der uns vertrauten sichtbaren Materie, zu der alles von kleinsten Teilchen wie Elektronen bis hin zu Planeten und Sternen gehört, absorbiert, reflektiert oder emittiert die Dunkle Materie kein Licht – daher ihr Name. Jede Sekunde sollten unzählige Teilchen Dunkler Materie durch unseren Körper strömen, ohne dass wir sie wahrnehmen. Ihre Existenz zeigt sich bislang ausschließlich durch gravitative Effekte, für die es

bereits im späten 19. Jahrhundert erste Indizien gab. Wegweisende Belege lieferten im 20. Jahrhundert unter anderem die von Vera Rubin in den 1970er-Jahren gemessenen Rotationsgeschwindigkeiten einzelner Spiralgalaxien [1]. Entgegen der Erwartung aus dem zweiten Keplerschen Gesetz nehmen die Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne mit der Entfernung vom galaktischen Zentrum nicht ab, sondern bleiben nahezu konstant. Diese Beobachtung lässt sich damit erklären, dass die Galaxien in einer Wolke aus Dunkler Materie eingebettet sind. Dann schließen die Umlaufbahnen mehr Masse ein, als sichtbar ist. Im Laufe der Jahre haben weitere Beweise die Existenz der Dunklen Materie bestätigt. Eine präzise Vermessung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung durch den Planck-Satelliten legt den Anteil der kalten (also nichtrelativistischen) Dunklen Materie auf etwa 85 Prozent aller Materie im Universum fest [2].

Trotz der Fülle an Dunkler Materie im Universum ist es bisher nicht gelungen, die Teilchen zu identifizieren, aus denen sie aufgebaut ist. Zu den hypothetischen Elementarteilchen, nach denen seit den 1980er-Jahren in Experimenten weltweit vornehmlich gesucht wird, gehören WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, deutsch: schwach wechselwirkende massive Teilchen) und Axi-

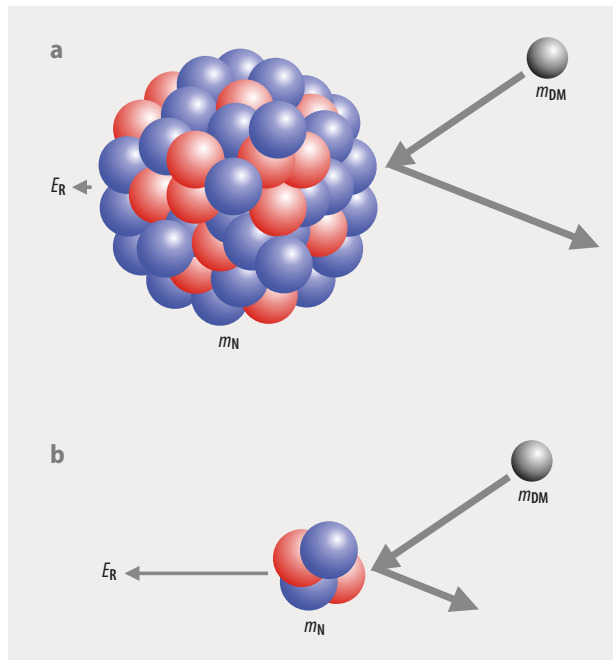


Abb. 1 Bei der elastischen Streuung eines Teilchens der Dunklen Materie mit Masse m_{DM} an einem schweren Kern (a) bzw. einem Heliumkern mit Masse m_N (b) fällt die resultierende, zu messende Rückstoßenergie E_R umso größer aus, je kleiner m_N ist.

onen. Die ausgebliebene Entdeckung hat dazu motiviert, das ursprüngliche Bild, in dem die Dunkle Materie aus nur einem einzigen, stabilen Elementarteilchen besteht, zu erweitern. Stattdessen liegt es nahe, dass die Dunkle Materie wie die sichtbare aus mehreren Elementarteilchen besteht, inklusive sogenannter Austauschteilchen, welche die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilchen vermitteln. Dieses erweiterte Bild wird als „Dunkler Sektor“ bezeichnet.

Traditionell sind WIMPs vorwiegend Fermionen und koppeln an die bereits bekannten Z- und Higgs-Bosonen. Die jeweiligen Kopplungen, zusammen mit der angenom-

menen WIMP-Masse, bestimmen die erwartete Dichte Dunkler Materie im heutigen Universum. Um mit den Beobachtungen des Planck-Satelliten im Einklang zu stehen, müssen diese WIMPs eine Masse von mindestens einigen GeV haben. Im Vergleich dazu hat ein Proton eine Masse von knapp einem GeV. Alternative WIMP-Modelle, die es erlauben, diese Massengrenze zu senken, ohne neue Kräfte unterhalb der elektroschwachen Skala einzuführen, sind durch Beschleunigerexperimente weitestgehend ausgeschlossen. Leichtere WIMP-artige Teilchenkandidaten, oft auch als „Leichte Dunkle Materie“ (LDM) bezeichnet, erfordern daher immer ein neues Austauschteilchen, wie das sogenannte Dunkle Photon.

Direkte Suchen

Aus den Messungen von Vera Rubin lässt sich weiterhin schließen, dass auch die Milchstraße von Dunkler Materie umgeben ist. Diesen Umstand machen sich internationale Kollaborationen aus der Teilchenphysik zunutze, um nach WIMPs in direkten Wechselwirkungen mit dem Detektormaterial zu suchen. Hierbei ergeben sich insbesondere zwei experimentelle Herausforderungen: Zum einen finden diese potenziellen Wechselwirkungen nur extrem selten statt, was einen äußerst niedrigen Ereignishintergrund erfordert. Zum anderen ist ein großer Messbereich wünschenswert, um einen möglichst großen Bereich an Energien und damit an möglichen Teilchenmassen abdecken zu können.

Um den Ereignishintergrund zu reduzieren, befinden sich die Detektoren in der Regel in unterirdischen Laboren. Dies minimiert den Einfluss der kosmischen Höhenstrahlung. Zusätzlich kommen äußerst reine Materialien für den Aufbau des Experiments zum Einsatz. Zusammen mit einem strahlungsarmen Standort lässt sich so der Einfluss von Radioaktivität verringern, die intrinsisch aus dem Detektor oder aus der direkten Umgebung stammt.

Einige der gängigsten Detektortypen sind Szintillationsdetektoren, Halbleiterdetektoren, Bolometer und Flüssig-Edelgas-Spuredriftkammern. Bolometer messen die durch eine Teilchenwechselwirkung verursachte Temperaturerhöhung im Targetmaterial. Für die höchste Empfindlichkeit darf sich die Temperatur des Targetmaterials nur einen Bruchteil eines Grades über dem absoluten Nullpunkt befinden, typischerweise in der Größenordnung von 10 mK. Bolometer, Szintillations- und Halbleiterdetektoren ermöglichen aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen Energieschwellen vor allem Suchen nach DM-Kandidaten, die leichter als 10 GeV sind. Spuredriftkammern hingegen haben meist eine höhere Energieschwelle, lassen sich dafür aber insgesamt größer bauen. Das erhöht wiederum die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung von Dunkler Materie mit dem Detektormaterial. Spuredriftkammern dominieren damit

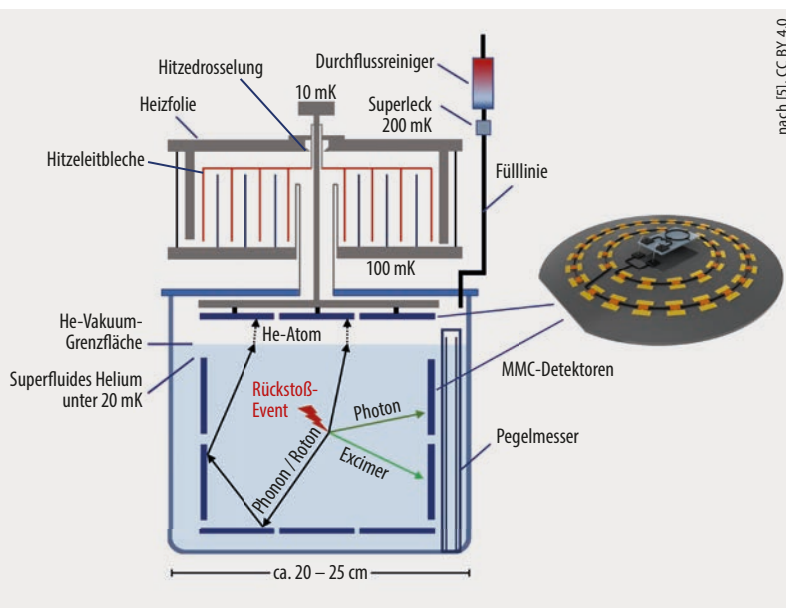


Abb. 2 Bei der 10-Liter-DELIGHT-Heliumzelle besteht das Subdetektorsystem (dunkelblau) aus großflächigen magnetischen Mikrokalorimetern (MMCs). Zusätzlich sind die wichtigsten Signalkanäle im suprafluiden Helium dargestellt.

die Suchen nach DM-Teilchen mit Massen oberhalb von ca. 10 GeV bis hinauf zu Massen im TeV-Bereich.

Mit meinem Team beteilige ich mich an den Experimenten SuperCDMS [3] und DARWIN [4] und leite das DELight-Experiment [5]. SuperCDMS besteht aus Silizium- und Germanium-basierten Bolometern (**Abb.** auf S. 61), die neben der Temperaturerhöhung auch die durch eine Wechselwirkung im Kristall erzeugten Elektron-Loch-Paare messen. Die Kombination aus beiden Signalen – Wärme und Ladung – erlaubt die Unterscheidung zwischen Interaktionen, die zu einer hohen oder einer niedrigen Ladungsdichte führen. Dies ist fundamental wichtig für die Selektion von potenziellen DM-Ereignissen, die mit einer geringen erzeugten Ladungsdichte einhergehen. Die letzte Generation des Experiments befand sich im Sudan-Untergrundlabor in den USA. Momentan installiert die SuperCDMS-Kollaboration das neue SuperCDMS-Experiment im tiefsten Reinraum der Welt, im zwei Kilometer tief gelegenen SNOLAB im kanadischen Sudbury. Auch DELight besteht aus einem Bolometer, basiert jedoch auf suprafluidem Helium, was im Folgenden genauer diskutiert wird. DARWIN ist als Spurendriftkammer unter Verwendung von 40 Tonnen flüssigem Xenon als aktive Targetmasse geplant und ist der Nachfolger des derzeit im Gran-Sasso-Untergrundlabor betriebenen XENONnT-Experiments.

Dunkle Materie-Kernstreuung

Wenn WIMPs oder LDM-Teilchen das Detektormaterial passieren, können sie unterwegs an einem Atomkern streuen, was zu einem Kernrückstoß führt (**Abb. 1**). Dieser Rückstoß ist messbar, wenn die übertragene Energie oberhalb der Energieschwelle des Detektors liegt. Die zugrundeliegende Wechselwirkung ist die spinunabhängige, elastische DM-Kernstreuung. Der zugehörige Wirkungsquerschnitt ist der spinunabhängige DM-Nukleon-Streuquerschnitt σ_{SI} .

Typischerweise kommen für das Interaktionstarget schwere Elemente wie Silizium, Germanium, Argon und Xenon zum Einsatz, da die Kopplungsstärke mit dem Gesamtspin und damit der Größe des Kerns skaliert. Je größer der Kern, desto größer die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung im Detektortarget. Gleichzeitig fällt der maximal mögliche Kernrückstoß geringer aus, je leichter das streuende DM-Teilchen gegenüber der Masse des Kerns ist, bis das resultierende Signal schließlich unterhalb der Detektionsschwelle liegt. LDM-Teilchen sind daher mit den bestehenden Detektoren nur schwer bis gar nicht nachweisbar. Ein neuer Ansatz ist daher notwendig, um auch im Dunklen Sektor direkte Suchen nach DM-Kernstreuungen mit großer Sensitivität durchführen zu können. Ein naheliegender und vielversprechender Ansatz ist die Verwendung möglichst leichter Elemente, insbesondere von Helium (**Abb. 1b**), wie wir es für das deutsche DELight-Experiment vorschlagen.

Das DELight-Experiment

Das „Direct search Experiment for Light dark matter“ (DELight) ist ein neues Experiment, das in Kooperation

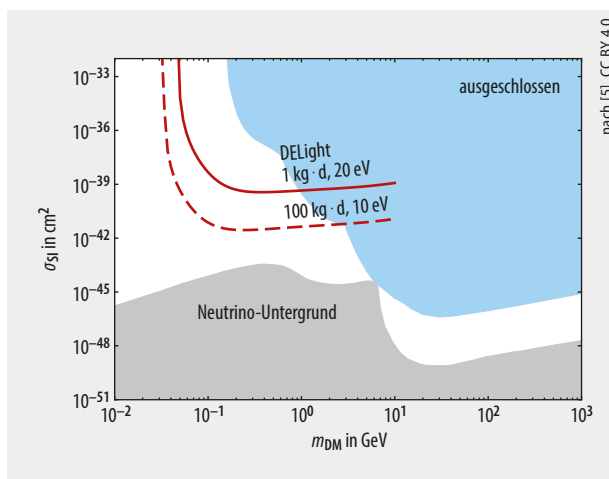


Abb. 3 Unter der Annahme eines Null-Hintergrunds und der minimalen DELight-Ziele für Phase I (rot durchgezogen) und längerfristig (rot gestrichelt) lassen sich die Projektionen von spinunabhängigen DM-Nukleon-Streuungsgrenzen (90 % Konfidenzniveau) abschätzen. Ebenfalls dargestellt ist der Signalbereich von solaren, atmosphärischen und Supernova-Neutrinos in Helium (grau) und der von anderen Experimenten ausgeschlossene Parameterraum (blau).

der Universitäten Heidelberg und Freiburg sowie des Karlsruher Instituts für Technologie geplant und konzipiert wird (**Abb. 2**). Als aktives Target dient das Edelgas ^4He in seiner suprafluiden Phase. Dabei ist dessen geringe Kernmasse nur eine von vielen vorteilhaften Eigenschaften. Helium ist zudem extrem strahlungsarm, da es keine langlebigen Radioisotope besitzt und andere Atomsorten bei suprafluiden Temperaturen ausfrieren. Der verbleibende Hintergrund lässt sich zudem während der Datenanalyse reduzieren. Maßgebend ist hierbei, dass drei unterscheidbare Signalkanäle vorhanden sind: Die deponierte Energie wird auf Phononen und Rotonen, auf Photonen sowie auf Helium-Excimere verteilt (**Abb. 2**). Phononen und Rotonen sind kollektive Anregungen der gesamten Flüssigkeit, wobei sich beide Arten von Quasiteilchen durch ihre Dispersionsrelation unterscheiden. Bei einem Kernrückstoß wird ein deutlich größerer Energieanteil auf Phononen und Rotonen übertragen als bei einem Elektronenrückstoß. Das erlaubt es, zwischen beiden Signaturen zu unterscheiden und damit den Hintergrund zu unterdrücken, den hauptsächlich die Elektronenstreuung verursacht.

Ein weiterer Schwerpunkt im Detektorkonzept ist die Verwendung von ultrasensitiven Energiedetektoren, sogenannten magnetischen Mikrokalorimetern (MMCs), die in Heidelberg und Karlsruhe für verschiedenste Anwendungen entwickelt wurden und weiterentwickelt werden [6]. In Phase I des Experiments streben wir damit eine Energieschwelle von etwa 20 eV mit einem Helium-Volumen von 10 Litern an. Das ermöglicht eine beispiellose Empfindlichkeit auf den im vorigen Abschnitt beschriebenen Wirkungsquerschnitt σ_{SI} bei Teilchenmassen unterhalb von etwa 1 GeV. Prinzipiell reicht dafür eine Datenmenge aus, die sich bei einer Targetmasse von einem Kilogramm an einem Tag sammeln lässt (**Abb. 3**). Mit 10 Litern Helium ($\approx 1,25$ kg) ist diese Datenmenge innerhalb eines Tages

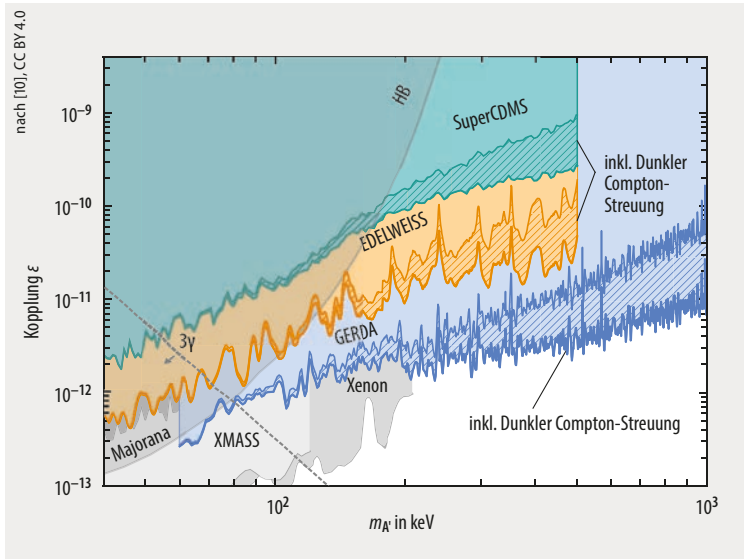


Abb. 4 Die Ausschlussgrenzen für die Kopplung ϵ von Dunklen Photonen an normale Photonen (90 % Konfidenzniveau) in Abhängigkeit der Masse $m_{A'}$ des Dunklen Photons wurden neu berechnet – einschließlich Dunkler Compton-Streuung (schraffiert). Sie werden mit den ursprünglichen Grenzen verglichen, die nur Dunkle Absorption berücksichtigen (nicht schraffiert).

erreicht. Unter Ausschluss potenzieller Phasen schlechter Datenqualität bedarf es also nur weniger Tage, um „1 kg · Tag“-Daten hoher Qualität zu sammeln und um nach LDM-Teilchen in einem Bereich zu suchen, in dem bisher weltweit noch kein Experiment suchen konnte.

Die Vielfalt der direkten Suchen

Die Tatsache, dass der Fokus nicht mehr ausschließlich auf WIMPs liegt, bedeutet nicht nur die Entwicklung neuer Detektorkonzepte, sondern auch vielfältigere Suchen mit bestehenden Detektoren. Zum einen wird neben der elastischen DM-Kernstreuung in zusätzlichen Interaktionskanälen gesucht. Zum anderen kommen DM-Kandidaten in Betracht, die im Gegensatz zu WIMPs und LDM nicht in thermischem Kontakt mit dem frühen Universum waren. Beide Ansätze sind Kern der Forschung meiner Arbeitsgruppe im Rahmen des SuperCDMS-Experiments [7–9].

Obwohl sich direkte Suchen seit jeher auf thermische Kandidaten, insbesondere auf WIMPs spezialisiert haben, weisen sie zusätzlich eine hohe Sensitivität auf bosonische Teilchen wie das Dunkle Photon auf, die nicht nur als Austauschteilchen fungieren können, sondern auch als stabiles DM-Teilchen. Diese hypothetischen massiven Dunklen Photonen kann das Detektormaterial – analog zum normalen, masselosen Photon – in einem dem photoelektrischen Effekt ähnlichen Prozess absorbieren. Die Energie des dabei emittierten Elektrons erlaubt die Messung der Masse des einlaufenden DM-Teilchens. In Abwesenheit eines Signals konnten wir mit SuperCDMS Ausschlussgrenzen in einem Massenbereich über knapp sechs Größenordnungen von etwa 1 eV bis etwa 1 MeV bestimmen [7, 8] und so die Relevanz dieser Suchen demonstrieren. Allerdings wird der erwartete Absorptionswirkungsquerschnitt wie im Fall des normalen Photons mit zunehmender

Energie des einlaufenden Bosons exponentiell schwächer. Gleichzeitig gewinnt die Compton-Streuung zunehmend an Bedeutung – ein Aspekt, den wir uns bei den Suchen nach Dunklen Bosonen zunutze gemacht haben. Unter Berücksichtigung „Dunkler Compton-Streuung“, also der Streuung eines Dunklen Bosons an einem Elektron, lassen sich bestehende Ausschlussgrenzen erweitern (**Abb. 4**) und das Entdeckungspotenzial zukünftiger Suchen signifikant erhöhen [10].

Die Vielfalt der direkten Suchen nach Dunkler Materie und die hohe Sensitivität der entsprechenden Detektoren machen dieses Forschungsgebiet so reizvoll und vielversprechend, um eine der treibenden Fragen der modernen Physik zu beantworten: Woraus besteht die Dunkle Materie?

*

Ich danke meinem Team und meinen Kolleginnen und Kollegen von SuperCDMS, DARWIN und DELight für unsere produktive und inspirierende Zusammenarbeit sowie der DFG für die finanzielle Förderung meiner Projekte.

Literatur

- [1] V. C. Rubin, W. K. Ford, Jr. und N. Thonnard, *ApJL* **225**, 107 (1978)
- [2] *Planck Collaboration*, *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020) [err. *Astron. Astrophys.* **652**, C4 (2021)]
- [3] *SuperCDMS Collaboration*, *Phys. Rev. D* **95**, 082002 (2017)
- [4] *DARWIN Collaboration*, *JCAP* **11**, 017 (2016)
- [5] B. von Krosigk et al., *SciPost Phys. Proc.* **12**, 016 (2023)
- [6] A. Fleischmann, L. Gastaldo, S. Kempf und C. Enss, *Physik Journal*, Mai 2016, S. 27
- [7] *SuperCDMS Collaboration*, *Phys. Rev. D* **101**, 052008 (2020), [err. *Phys. Rev. D* **103**, 039901 (2021)]
- [8] *SuperCDMS Collaboration*, *Phys. Rev. D* **102**, 091101 (2020)
- [9] B. v. Krosigk et al., *Phys. Rev. D* **104**, 063002 (2021)
- [10] Y. Hochberg, B. v. Krosigk, E. Kuflik und T. C. Yu, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 191801, (2022)

Die Autorin



Belina von Krosigk hat an der U Hamburg Physik studiert, wo sie schon früh ihre Leidenschaft für Teilchenphysik entdeckte. Sie promovierte mit einer Arbeit zur Neutrinophysik an der TU Dresden und fing als Postdoc an der kanadischen University of British Columbia an, nach Dunkler Materie zu suchen. Seit 2019 hat sie ihre

Forschung als durch die DFG geförderte Emmy-Noether-Nachwuchsgruppenleiterin in Deutschland fortgeführt und erweitert, zunächst an der U Hamburg und später am Karlsruher Institut für Technologie. Ihr Team konzentriert sich auf direkte Suchen von Dunkler Materie jenseits des traditionellen WIMPs und auf neue Echtzeit-Trigger-Methoden. Seit Anfang 2023 ist sie Professorin für Experimentalphysik an der U Heidelberg.

Prof. Dr. Belina von Krosigk, Universität Heidelberg, Kirchhoff-Institut für Physik, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg