



DUNKLE MATERIE

Abgeschirmt im Untergrund

Um Teilchen der Dunklen Materie direkt nachzuweisen, müssen die Detektoren bestmöglich vor störenden Signalen geschützt sein.

Teresa Marrodán Undagoitia, Uwe Oberlack und Marc Schumann

XENON Collaboration

Einige Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik sagen neue Elementarteilchen voraus, die als Dunkle Materie bisher nicht verstandene kosmologische und astronomische Beobachtungen erklären könnten. Bevorzugte Kandidaten sind die Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs). Höchstempfindliche, teilweise haushohe Teilchendetektoren in Untergrundlaboren ermöglichen die direkte Suche nach ihnen.

Als Teilchen der Dunklen Materie sollten WIMPs nur extrem schwach mit normaler Materie wechselwirken, aber nicht unbedingt mittels der schwachen Wechselwirkung. Ihre Masse wird in einem Bereich von 1 bis 10^4 GeV/ c^2 vermutet. Seit sich im Universum die ersten Strukturen bildeten, sollten sich WIMPs mit nicht-relativistischer Geschwindigkeit bewegt haben. Sie sollten die Bildung von Galaxien angestoßen haben und noch heute eng mit ihnen verwoben sein. Weil WIMPs elektrisch neutrale Teilchen sind, streuen sie bevorzugt elastisch an den schweren Atomkernen eines Detektors. Der Impulsübertrag auf den Kern führt zu einem Rückstoß, dessen Energie exponentiell abfällt (Abb. 1). Diese Energie kann das Detektormedium anregen, ionisieren oder erwärmen.

Durch die Anregung werden Photonen emittiert. Szintillationsdetektoren in fester oder flüssiger Form ermöglichen den Nachweis dieses Lichts. Die Ionisation von Atomkernen erzeugt freie Elektronen. Hier eignen sich Halbleiterdetektoren aus Germanium oder Silizium durch ihre geringe Bandlücke sehr gut für einen Nachweis mit hoher Energieauflösung. Die Wärme regt in Kristallen quantisierte Gitterschwingungen (Phononen) an. Bei Kernrückstößen mit Energien von einigen keV ist mit einem Temperaturanstieg in der Größenordnung von μK zu rechnen. Darum lässt sich der Wärmeeintrag in Kristallen durch Phononen nur messen, wenn die Detektoren bei Temperaturen von 10 bis 50 mK betrieben werden. Der Nachweis erfolgt beispielsweise mithilfe eines Widerstandsthermometers, das nahe der Sprungtemperatur eines Supraleiters arbeitet (Transition Edge Sensor, TES).

Besonders interessant sind Detektoren, die gleichzeitig zwei der Observablen messen können, weil sich so experimentelle Störsignale unterdrücken lassen. WIMPs wechselwirken mit den Atomen des Detektormediums anders als die störende Beta- oder Gammastrahlung. Das Verhältnis der Observablen unterscheidet sich, je nachdem, ob ein Kernrückstoß (von WIMPs erzeugt) oder ein Elektronen-

- ◀ Um die Auslöser unerwünschter Signale abzuschirmen, befinden sich die Detektoren zur Suche nach Dunkler Materie in Untergrundlaboren und sind massiv abgeschirmt. Beispielsweise schützt den Detektor XENONIT eine fast zehn Meter dicke Wässerschicht, die mit Lichtsensoren und -reflektoren ausgestattet ist (Vetosystem).

rückstoß (von Beta- und Gammastrahlung erzeugt) Ursache des Ereignisses war, weil sich der spezifische Energieverlust dE/dx verschieden zusammensetzt (**Infokasten**). Beispiele für Detektoren, mit denen mindestens zwei Observablen zugänglich sind, sind kryogene Detektoren auf Basis von Germanium- oder Szintillatorkristallen oder Instrumente mit den flüssigen Edelgasen Argon (Siedepunkt bei etwa -186 °C) und Xenon (-108 °C) als Detektormedium.

Störsignale minimieren

Da WIMPs äußerst selten mit dem Detektormedium wechselwirken – ihre mittlere freie Weglänge dürfte mehrere Lichtjahre betragen –, muss der experimentelle Untergrund möglichst niedrig sein, um ein Signal zu beobachten. Den Untergrund zu minimieren, ist eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Detektoren zur direkten Suche nach Dunkler Materie [1]. Zunächst gilt es, die kosmische Strahlung abzuschirmen. Deshalb befinden sich die Experimente in unterirdischen Laboren. Einige Kilometer Gestein verringern den Fluss kosmischer Myonen im Vergleich zur Erdoberfläche um mehr als sechs Größenordnungen. Zudem stört auch die überall vorhandene, natürliche Radioaktivität. Sie sorgt für einen Fluss von Gammastrahlung und Neutronen, auch in den Untergrundlaboren. Diese betragen beispielsweise im italienischen Gran Sasso-Labor (LNGS) $0,3\text{ }\gamma\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ und etwa $10^{-6}\text{ n cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Das sind sehr niedrige Werte – selbst im menschlichen Körper finden pro Sekunde mehrere Tausend Zerfälle von ^{40}K statt, bei denen hochenergetische Gammastrahlung den Körper verlässt. Weil Neutronen und Gammastrahlung viel wahrscheinlicher im Detektormedium wechselwirken als WIMPs, ist es dennoch nötig, den Detektor gegen die natürliche Radioaktivität abzuschirmen.

Einzelne oder mehrere Schichten von Absorbermaterialien sorgen dafür, dass Neutronen und Gammastrahlung das Detektormedium nicht erreichen oder sich durch ein Signal verraten (Vetosystem). Positionsempfindliche Detektoren, in denen sich der Ort der Wechselwirkung bestimmen lässt, nutzen zusätzlich den Effekt der Selbstabschirmung. Nur wenn das Signal aus dem innersten Bereich des Detektors stammt, wo der radioaktive Untergrund am geringsten ist, geht es in die Analyse ein. Zeitlich aufgelöste Daten erlauben es, genau die Ereignisse zu analysieren, bei denen exakt eine Wechselwirkung im Detektor auftritt: Aufgrund seiner großen mittleren freien Weglänge ist die Wahrscheinlichkeit faktisch Null, dass ein WIMP im Detektor zweimal streut.

Um eine möglichst hohe Empfindlichkeit eines Detektors bei der Suche nach WIMPs zu erreichen, kommt es

einerseits auf die Größe des gemessenen Datensatzes an, also auf das Produkt aus der verwendeten Detektormasse und der Messdauer. Andererseits spielt aufgrund der exponentiell abfallenden Rückstoßenergie auch die Energieabhängigkeit der Nachweeffizienz eine wichtige Rolle. Insbesondere sehr leichte Teilchen der Dunklen Materie schaffen es nicht, bei der elastischen Streuung eine hohe Rückstoßenergie im Detektormedium zu induzieren. Dadurch erzeugen eventuell zu wenige Ereignisse ein Signal, das oberhalb der Detektorschwelle liegt.

Modulationen suchen

Alle Galaxien, auch die Milchstraße, sollen in eine kugelsymmetrische Wolke aus Dunkler Materie eingebettet sein, den sogenannten Halo. Die Dichte der Dunklen Materie nimmt vom galaktischen Zentrum aus betrachtet quadratisch mit dem Abstand ab. An der Position der Sonne beträgt sie etwa $0,3\text{ (GeV}/c^2)\text{ cm}^{-3}$. Während sich die Sonne mit ihrem Planetensystem mit einer Geschwindigkeit von 230 km/s um das Zentrum der Milchstraße bewegt, passiert sie den Halo aus Dunkler Materie, der keine kollektive Rotationsbewegung zeigt. Daher sollten WIMPs aufgrund ihrer Geschwindigkeitsverteilung einen Detektor auf der Erde mit einer mittleren Geschwindigkeit von 230 km/s durchdringen und nur sehr selten mit den Atomen der Materie zusammenstoßen. Dieser effektive „Wind“ aus Dunkler Materie ist entgegen der Bewegungsrichtung der Sonne um das galaktische Zentrum ausgerichtet. Im Sommer bewegt sich die Erde bezogen auf das galaktische Zentrum in die gleiche Richtung wie die Sonne. Dadurch steigt die relative

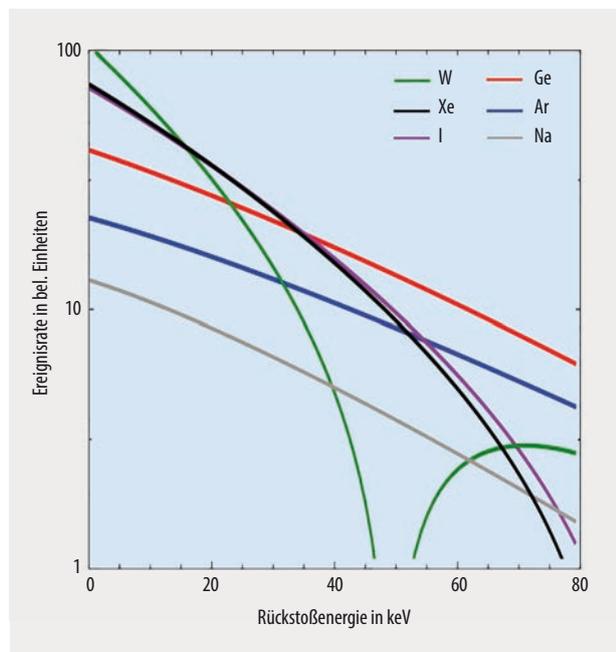


Abb. 1 Aus der kohärenten Streuung von WIMPs (hier mit Masse $m = 100\text{ GeV}/c^2$) an den A Nucleonen eines Atomkerns ergibt sich eine Ereignisrate, die mit A^2 anwächst. Für die schwersten Kerne (I, Xe und W) und für große Energieüberträge sorgt die Verteilung der Nucleonen für ein abweichendes Verhalten (Formfaktor-induzierte Unterdrückung).

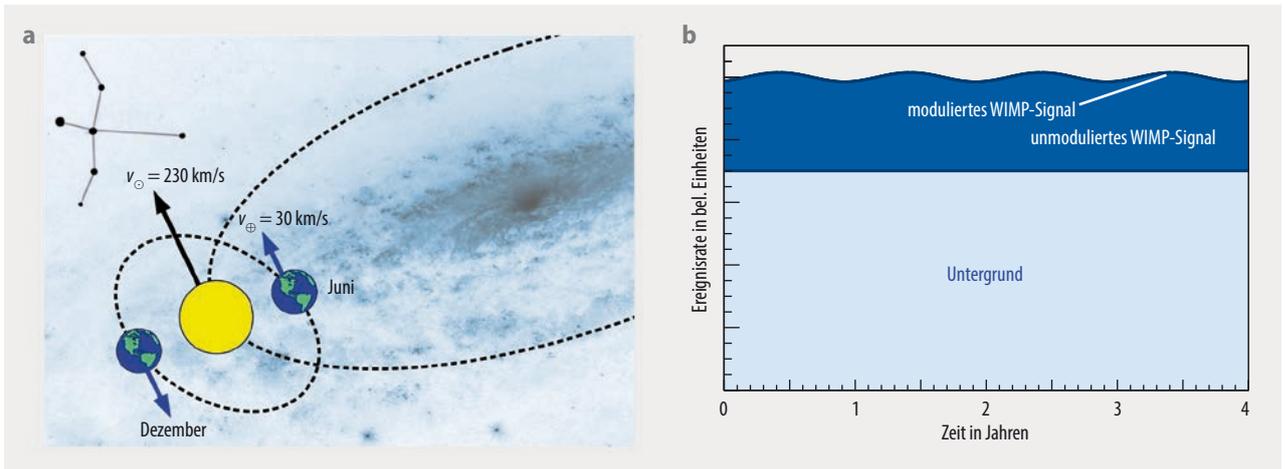


Abb. 2 Die Bewegung der Erde um die Sonne führt im Jahresverlauf dazu, dass die relative Geschwindigkeit der Teilchen der Dunklen Materie variiert (a). Weil je nach Geschwindigkeit mehr oder weniger WIMPs Signale oberhalb der Detektorschwelle hinterlassen, sollte die Ereignisrate sinusförmig verlaufen (b). Allerdings betrifft dies nur einen kleinen Teil des erwarteten Signals (dunkelblau), das sich nicht vom Untergrund (hellblau) unterscheidet.

Geschwindigkeit der Dunklen Materie leicht an, sodass die Teilchen im Detektor Kernrückstöße mit etwas mehr Energie induzieren. Bleibt die Detektorschwelle gleich, sollte sich die Signalrate erhöhen. Im Winter reduziert der entgegengesetzte Effekt die Signalrate (**Abb. 2**): Man erwartet eine von der Jahreszeit abhängige Modulation des Signals mit einem Maximum am 2. Juni.

Diese Signatur kann helfen, auf statistischer Basis die Signale von Dunkler Materie und von Untergrundereignissen zu unterscheiden. Der Detektor der DAMA-Kollaboration im LNGS besteht aus NaI(Tl)-Szintillatoren mit einer Gesamtmasse von etwa 250 Kilogramm. Nur an diesem

Experiment wird seit nunmehr 20 Jahren eine derartige Modulation beobachtet [2]. Das steht im Widerspruch zu den Ergebnissen anderer, wesentlich empfindlicherer Detektoren (**Abb. 3**) und insbesondere auch zum Experiment COSINE-100, das ebenfalls NaI(Tl)-Szintillatoren nutzt [3]. Bei COSINE-100 befindet sich das Detektormedium allerdings in einem Tank mit Flüssigszintillator, um natürlichen Untergrund abzuschirmen.

Tiefgekühlt zu kleinsten Massen

Experimente, die direkt nach Dunkler Materie suchen, könnten WIMPs mit Massen von weniger als einem GeV/c^2 bis zu mehreren TeV/c^2 nachweisen [4]. Die meisten Detektoren verlieren aber durch die Energieschwelle an Empfindlichkeit unterhalb von $5 \text{ GeV}/c^2$. Kryogene Bolometer erlaubten es in den letzten Jahren, die Empfindlichkeit in den Bereich unterhalb $1 \text{ GeV}/c^2$ zu erweitern. Kristalline Detektoren aus Germanium oder Szintillatoren wie Kalzium-Wolframat (CaWO_4) arbeiten hier bei Temperaturen von einigen Millikelvin, um die Phononen aus dem Kernrückstoß und eine weitere Observable nachzuweisen (**Abb. 4**).

Am Experiment CRESST sind Gruppen des Max-Planck-Instituts für Physik in München, der TU München und der Universität Tübingen beteiligt. Der Detektor aus CaWO_4 -Kristallen befindet sich im LNGS. Die drei unterschiedlich schweren Elemente des Detektormediums eignen sich als Streupartners für WIMPs verschiedener Massen. CRESST hält zurzeit den Rekord für die Suche nach Kernrückstößen von sehr leichter Dunkler Materie [5], was aufgrund einer extrem niedrigen Energieschwelle von etwa 30 eV erreicht werden konnte. Die aktive Detektormasse betrug allerdings nur 24 Gramm, was die Empfindlichkeit der Messung einschränkt. Ehemals störende Ereignisse an der Detektoroberfläche ließen sich in der aktuellen Detektorgeneration durch Design-Optimierungen reduzieren.

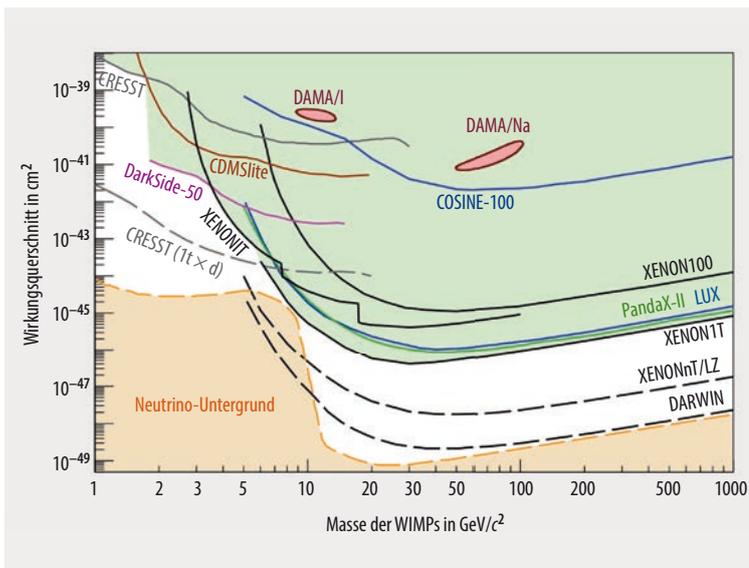


Abb. 3 Trägt man den Wirkungsquerschnitt von WIMPs mit Nukleonen gegen die Masse der WIMPs auf, zeigt sich, welche Bereiche dieses Parameterraums bereits durch experimentelle Ergebnisse ausgeschlossen sind (grün, 90 %-Konfidenzniveau). Nicht alle bisher durchgeführten Experimente sind gezeigt. Geplante Projekte (gestrichelte Linien) verschieben die Sensitivitätsgrenze bis zum Neutrino-Untergrund (orange). Hier lassen sich Signale von Neutrinos und WIMPs nur unterscheiden, wenn die Richtung des Kernrückstoßes gemessen wird.

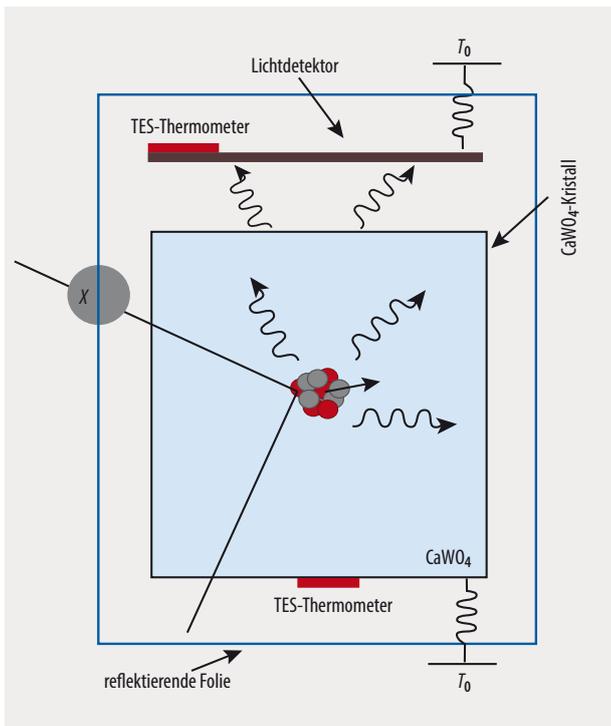


Abb. 4 Die bei CRESST eingesetzten kryogenen, szintillierenden Bolometer arbeiten bei mK-Temperaturen und messen den minimalen Temperaturanstieg (Phononen) sowie das Szintillationslicht nach einer Teilchenwechselwirkung.

Flüssiges Xenon ...

Oberhalb einer Masse von einigen GeV/c^2 stellen mit flüssigem Xenon gefüllte Zwei-Phasen-TPCs (Time Projection Chamber) aktuell die empfindlichste Technologie dar, weil sich dabei eine sehr große Detektormasse mit einer äußerst niedrigen Untergrundrate kombinieren lässt. Flüssiges Xenon schirmt mit seiner hohen Dichte von fast $3 \text{ g}/\text{cm}^3$ externe Strahlung sehr gut ab. Außerdem besitzt Xenon nur zwei langlebige radioaktive Isotope. Das Isotop ^{136}Xe , ein Kandidat für den neutrinolosen doppelten Betazerfall, besitzt eine Halbwertszeit von $2,2 \cdot 10^{21}$ Jahren und trägt daher nicht signifikant zum Untergrund bei. Die Halbwertszeit von ^{124}Xe beträgt sogar $1,8 \cdot 10^{22}$ Jahre; es handelt sich hier um den seltensten bisher direkt gemessenen Zerfall [6]. Radioaktive Verunreinigungen, beispielsweise durch ^{85}Kr , lassen sich mittels kryogener Destillation aus dem Xenon entfernen, sodass einzig Radon als intrinsischer Untergrund verbleibt. Das Isotop ^{222}Rn entsteht ständig aus der Zerfallskette von Uran und wird von allen Oberflächen abgegeben. Mit einer Halbwertszeit von etwa vier Tagen gelangt ^{222}Rn leicht bis ins Zentrum des aktiven Detektorvolumens, störend ist der Zerfall des Tochterisotops ^{214}Pb . Daher müssen Materialien mit minimaler Radon-Abgabe zum Einsatz kommen, deren Oberflächen besonders behandelt werden. Kryogene Destillation hilft, bereits eingebrachtes Radon aus dem flüssigen Xenon zu entfernen [7].

In einer Zwei-Phasen-TPC führt die Wechselwirkung eines Teilchens im flüssigen Xenon zur prompten Abstrahlung von Szintillationslicht und zur Ionisation der Flüssigkeit (**Abb. 5**). Dabei entstehen Elektronen, die sich entlang eines elektrischen Feldes zur Oberfläche der Flüssigkeit bewegen, wo ein weiteres elektrisches Feld sie in die Xenon-Gasphase extrahiert. In dieser führen Stöße mit den Gasatomen zu einem zweiten, zur Anzahl der Elektronen proportionalen Lichtsignal. Aus dem zeitlichen Abstand der beiden Lichtsignale leitet sich die z -Koordinate des Ortes der Wechselwirkung ab, aus der Verteilung des proportionalen Lichtsignals auf den Lichtsensoren die x - und y -Koordinaten. Eine Zwei-Phasen-TPC nutzt also die Selbstabschirmung. Außerdem hängt das Verhältnis der beiden Signale von der Art des Rückstoßes ab, was den Untergrund durch die Selektion von Kernrückstößen weiter reduziert. Grundsätzlich funktioniert dieses Detektionsprinzip auch mit flüssigem Argon. Allerdings besitzen solche Detektoren derzeit weit höhere Energieschwellen, und auch die Untergrundraten sind höher als bei Xenon. Um solche Detektoren auf Basis von Edelgasen auch für sehr leichte WIMPs empfindlich zu machen, wird nur das Signal aus der Gasphase verwendet. Dadurch steigt aber der Untergrund stark an.

... tonnenweise

Am LNGS betreibt die internationale XENON-Kollaboration mit Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik und den Universitäten Freiburg, Mainz, Münster und Karlsruhe (KIT) seit einigen Jahren immer größere und immer empfindlichere Xenon-gefüllte Zwei-Phasen-TPCs. Der Detektor XENONIT bestand aus einem etwa einen Meter großen Zylinder mit einer aktiven Masse von zwei Tonnen Xenon und hat die bislang besten Ergebnisse bei der Suche nach WIMPs mit Massen oberhalb von $6 \text{ GeV}/c^2$ geliefert. In einem Datensatz von einer Tonne mal Jahr fanden sich keine Hinweise auf Signale von Dunkler Materie. Das schließt Wirkungsquerschnitte größer als $4,1 \cdot 10^{-47} \text{ cm}^2$ für die Wechselwirkung von Nukleonen und WIMPs mit Massen um $30 \text{ GeV}/c^2$ aus [8]. In diesem Massenbereich sind Xenon-Detektoren am empfindlichsten (**Abb. 3**). XENONIT hat mit nur 85 Untergrundereignissen pro keV, Tonne und Jahr ein noch nie dagewesenes Niveau

... tonnenweise

Teilchenidentifikation

Kollisionen mit den Atomen des Detektormaterials bremsen geladene Teilchen ab, wodurch es zu einem spezifischen **Energieverlust pro Wegstrecke** dE/dx kommt, der sich aus mehreren Beiträgen zusammensetzt:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Atom}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Wärme}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Anregung}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ionisation}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Wärme}}.$$

Streut ein WIMP an einem Atomkern, versetzt es diesen in Bewegung. Den Großteil dieser Energie gibt der Kern als **Wärme** ab, d. h. er regt die Bewegung anderer Atome an. In Festkörpern entstehen dabei Phononen. Die restliche Energie kann das Atom anregen oder ionisieren.

Im Unterschied dazu wechselwirkt Beta- und Gamma-Strahlung mit den Elektronen des Detektormaterials. Elektron-Rückstöße geben weniger Energie als Wärme ab, und die elektronischen Verluste durch **Anregung** und **Ionisation** treten in einem anderen Verhältnis auf als bei Kernrückstößen. Die unterschiedlichen relativen Stärken der einzelnen Signale ermöglichen es, jedem einzelnen Ereignis eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen, ob es von einem WIMP oder von Beta- und Gamma-Strahlung stammt.

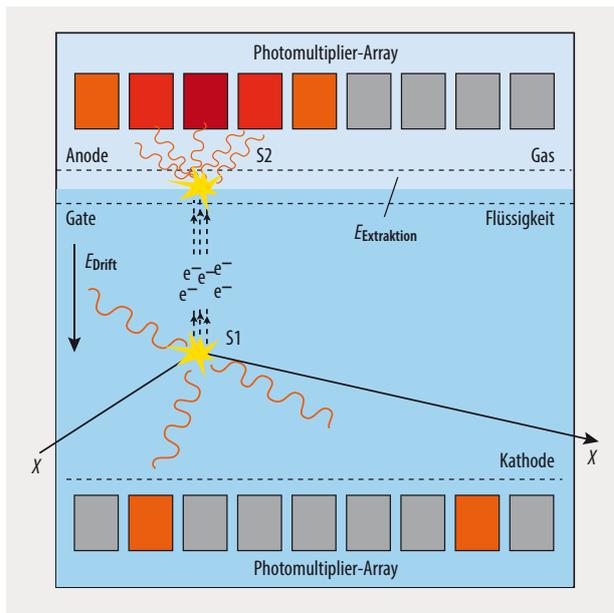


Abb. 5 Eine Zwei-Phasen-TPC wie XENON1T registriert sowohl Lichtsignale (S1) als auch Ladungssignale (S2). Daraus lässt sich der Ort einer Teilchenwechselwirkung bestimmen, sodass Ereignisse, die nicht im innersten Bereich des Detektors stattfinden, nicht in die Analyse eingehen müssen.

erreicht. Für die Suche nach WIMPs ergeben sich sogar noch weniger Störsignale, weil bei der Analyse die meisten Ereignisse aufgrund ihrer Elektron-Rückstoß-Signatur verworfen wurden. Eine auf das Ladungssignal beschränkte Analyse ergab die besten Ausschlussgrenzen oberhalb von $3,5 \text{ GeV}/c^2$, lediglich die Argon-gefüllte TPC von DarkSide-50 ist oberhalb von $2 \text{ GeV}/c^2$ empfindlicher.

Im März 2019 wurde XENON1T abgebaut, um durch den Nachfolger XENONnT ersetzt zu werden. Der Umbau auf den Detektor mit einer viermal größeren Masse und weiter reduziertem Untergrund läuft noch. Etwa zehnmals empfindlichere Messungen könnten Ende dieses Jahres beginnen. Auch das amerikanische Projekt LZ im Sanford Laboratory, eine Xenon-gefüllte Zwei-Phasen-TPC ähnlicher Masse, verfolgt einen vergleichbaren Zeitplan. Beide Detektoren erreichen erstmals einen Bereich im Parameterraum aus Wechselwirkungsquerschnitt und WIMP-Masse, in dem ein Untergrundsignal dem erwarteten Signal eines WIMPs gleicht. Wenn Neutrinos kohärent an Atomkernen streuen, erzeugen sie ebenfalls einen einzelnen Kernrückstoß. Dieser lässt sich nur durch seine Richtungsabhängigkeit von WIMPs unterscheiden, die aber schwer zu messen ist. Bei geringen Rückstoßenergien, die niedrigen WIMP-Massen entsprechen, stammen die Neutrinos aus dem Wasserstoffbrennen der Sonne. Oberhalb von etwa $10 \text{ GeV}/c^2$ dominieren atmosphärische Neutrinos, für die XENONnT und LZ noch nicht empfindlich genug sind. Die DARWIN-Kollaboration will bis Mitte der 2020er-Jahre den „ultimativen“ Detektor bauen, um auch diesen Parameterbereich abzudecken. Dafür ist eine Zwei-Phasen-TPC mit einer aktiven Masse von 40 Tonnen flüssigem Xenon in Planung [9]. Damit Untergrundsignale die Messungen nicht stören, muss bei optimiertem Detektordesign und Vetosystemen auch das Xenon extrem rein sein.

In den kommenden Jahren stoßen die Xenon-Detektoren bei der direkten Suche nach WIMPs also an eine natürliche Grenze. Auch die CRESST-Kollaboration hat bereits erste Pläne vorgestellt, um diese Grenze bei den kleinsten WIMP-Massen zu erreichen. Bis dahin bleibt noch ein großer unerforschter Parameterbereich zu erkunden, mit einer realistischen Chance, in den Daten Spuren der Dunklen Materie zu finden. Sollte dies nicht gelingen, muss man akzeptieren, dass die WIMP-Signale auf diese Art nicht aus dem Meer der Untergrundsignale herauszufischen sind. Gleichzeitig wird der Untergrund selbst zu einer interessanten Teilchenquelle: Die vielfältigen Detektorkonzepte für die WIMP-Suche bieten einzigartige Voraussetzungen, um auch nach den seltensten Ereignissen in der Astroteilchen- und Neutrino-Physik zu suchen.

Literatur

- [1] T. Marrodán Undagoitia und L. Rauch, *J. Phys. G* **43**, 013001 (2016)
- [2] R. Bernabei et al. (DAMA), *Universe* **4**, 116 (2018)
- [3] G. Adhikari et al. (COSINE-100), *Nature* **564**, 83 (2018)
- [4] M. Schumann, *J. Phys. G* **46**, 103003 (2019)
- [5] A. H. Abdelhameed et al. (CRESST), arXiv:1904.00498
- [6] E. Aprile et al. (XENON), *Nature* **568**, 532 (2019)
- [7] E. Aprile et al. (XENON), *Eur. Phys. J. C* **77**, 358 (2017)
- [8] E. Aprile et al. (XENON), *Phys. Rev. Lett.* **121**, 111302 (2018)
- [9] J. Aalbers et al. (DARWIN), *JCAP* **11**, 017 (2016)

Die Autoren



Teresa Marrodán Undagoitia (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der Universidad Complutense de Madrid und promovierte an der TU München. Als Feodor Lynen-Stipendiatin an der U Zürich beschäftigte sie sich mit der Suche nach Dunkler Materie. Seit 2012 arbeitet sie am MPI für Kernphysik in

Heidelberg und hat 2014 an der U Heidelberg habilitiert.

Uwe Oberlack (FV Teilchenphysik und FV Extraterrestrische Physik) studierte Physik an der TU München, wo er mit einer am MPI für Extraterrestrische Physik durchgeführten Arbeit promovierte. Als PostDoc und Assistenzprofessor arbeitete er zehn Jahre in den USA, bevor er 2010 als Professor an die U Mainz berufen wurde. Er ist ein Gründungsmitglied der XENON-Kollaboration.



Jürgen Gocke



Marc Schumann (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der U Heidelberg und der Queen's University Kingston, Kanada. Nach der Promotion suchte er als PostDoc an der Rice University Houston, USA, mit dem XENON-Projekt nach Dunkler Materie. Nach Stationen an den Universitäten Zürich und Bern ist er seit drei Jahren Professor an der U Freiburg und seit 2018 Co-Sprecher der DARWIN-Kollaboration.

Priv.-Doz. Dr. Teresa Marrodán Undagoitia, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg, **Prof. Dr. Uwe Oberlack**, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudingerweg 7, 55128 Mainz und **Prof. Dr. Marc Schumann**, Physikalisches Institut, Universität Freiburg, Hermann-Herder-Str. 3, 79104 Freiburg