

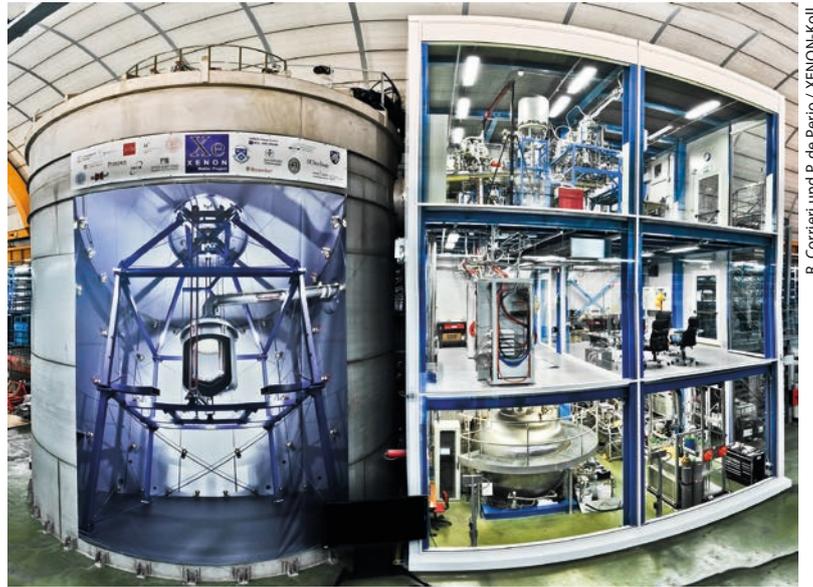
■ Schwächelt die Dunkle Materie?

Experimente zur Suche nach schwach wechselwirkenden Dunkle Materie-Teilchen haben trotz immer höherer Sensitivität noch keinen Hinweis auf WIMPs gefunden.

Hinweise auf die Existenz von Dunkler Materie, die weder Licht abstrahlt noch absorbiert, finden sich in vielen astrophysikalischen Beobachtungen – von galaktischen Rotationskurven bis hin zu Gravitationslinseneffekten in Galaxienhaufen. Vor allem aber ist Dunkle Materie unverzichtbar, um verschiedene Phänomene im frühen Universum korrekt zu beschreiben, z. B. die Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung. Auch wenn bisher nur die gravitativen Effekte von Dunkler Materie beobachtet wurden, liegt die Vermutung nahe, dass sie genauso wie sichtbare Materie aus elementaren Teilchen besteht. Kein bekanntes Teilchen hat jedoch die richtigen Eigenschaften – Dunkle Materie-Teilchen müssen im frühen Universum nicht-relativistisch sein und dürfen nicht zu stark miteinander wechselwirken. Die Natur der Dunklen Materie gehört zu den großen Rätseln der modernen Physik.

Eine Idee hat von theoretischer und experimenteller Seite viel Aufmerksamkeit bekommen: Möglicherweise kommunizieren Dunkle und sichtbare Materie über die schwache Wechselwirkung. Solche Dunkle Materie-Teilchen sind als WIMPs^{§)} bekannt – Weakly Interacting Massive Particles. Sie tauchen in vielen fundamentalen Theorien wie der Supersymmetrie auf, in denen man die Produktion von Dunkler Materie im frühen Universum berechnen kann – in überraschend guter Übereinstimmung mit unseren Messungen. WIMP-Modelle machen viele konkrete Vorhersagen, anhand derer sie sich experimentell überprüfen und voneinander unterscheiden lassen.

Besonders vielversprechend sind Experimente zum direkten Nachweis von WIMPs. Dabei handelt es sich um Detektoren aus extrem sauberen Materialien, die vor kosmischer Strahlung geschützt in unterirdischen Labors stehen. Häufig sind die Detektoren mit



In einer der unterirdischen Hallen des Gran-Sasso-Labors steht der über zehn Meter hohe Tank mit dem XENONIT-Experiment.

flüssigem und gasförmigem Xenon gefüllt. Wenn ein Dunkle Materie-Teilchen aus dem All den Detektor durchquert, kann es mit einem Atomkern wechselwirken. Die Wahrscheinlichkeit dafür berechnet sich aus dem Streuquerschnitt von WIMPs, welcher sich nicht aus den bekannten Eigenschaften Dunkler Materie vorhersagen lässt und in verschiedenen theoretischen Modellen um Größenordnungen variiert. Das Resultat einer Streuung wäre ein winziger Energieübertrag (im Bereich weniger keV), der sich beispielsweise durch das resultierende Szintillationslicht zeigt.

Im letzten Jahr haben sich drei Experimente einen Wetlauf um die Entdeckung Dunkler Materie geliefert. Anfang 2017 erreichte das LUX-Experiment am Sanford-Untergrundlabor in den USA die bis dahin größte Sensitivität für den Streuquerschnitt von Dunkler Materie an Atomkernen [1]. Wenige Monate später übernahm XENONIT im Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien die Führung [2], nur um bald darauf von PandaX-II am chinesischen Jinping-Untergrundlabor abgelöst zu werden [3]. 2018 dürfte XENONIT aufgrund der überlegenen Detek-

torgöße wieder an die Spitze gelangen und erst einmal dort bleiben.

Keines der drei Experimente fand bislang Hinweise für die Wechselwirkung von Dunkler Materie. Die obere Schranke an den Streuquerschnitt verbesserte sich um einen Faktor drei auf etwa $9 \cdot 10^{-47} \text{ cm}^2$ für eine WIMP-Masse von $40 \text{ GeV}/c^2$ (Abb. 1). Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommen Messungen an Teilchenbeschleunigern, die bisher noch keine Dunkle Materie-Teilchen in Kollisionen bekannter Teilchen erzeugen konnten. Auch astrophysikalische Suchen nach deren Signaturen liefern, abgesehen von einigen noch ungeklärten Anomalien, vor allem Nullresultate. Insgesamt bringen diese Ergebnisse die Idee von WIMPs als Hauptbestandteil der Dunklen Materie zunehmend in Bedrängnis.

Um WIMP-Modelle abzuschreiben, ist es aber noch viel zu früh. Zu diesem Schluss kommt eine Studie der GAMBIT-Kollaboration nach der Auswertung aller experimentellen Ergebnisse für ein konkretes WIMP-Modell [4]. In diesem sog. Higgs-Portal-Modell koppeln WIMPs ausschließlich an das Higgs-Boson. Die Eigenschaften des WIMP-Teilchens, das in diesem

§) Die Bezeichnung WIMP spielt auch auf die englische Bedeutung des Wortes – Schwächling – an.

Fall Spin 0 und positive Parität besitzt, hängen somit nur von seiner Masse und der Kopplungsstärke an das Higgs-Boson ab. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass große Bereiche des Parameterraums nach wie vor mit allen experimentellen Daten kompatibel sind.

Schon in naher Zukunft wird XENONIT genügend Daten gesammelt haben, um die experimentelle Sensitivität für WIMP-Modelle auf Streuquerschnitte von bis zu 10^{-47} cm^2 zu verbessern. Im Laufe der nächsten Jahre werden Experimente wie XENONnT oder LZ mit der Datennahme beginnen und eine Sensitivität von 10^{-48} cm^2 anstreben. Wie eine aktuelle Studie von Forschern aus Heidelberg, Paris und Kalifornien zeigt, würde diese Sensitivität ausreichen, um fast den gesamten Parameterbereich zu überprüfen, in dem Higgs-Portal-Modelle die Dunkle Materie im Universum erklären können [5]. Ähnliche Schlussfolgerungen gelten auch für WIMPs mit anderen Quantenzahlen sowie für solche, die direkt an Z-Bosonen koppeln.

Was aber, wenn auch diese Experimente keine Indizien für die Existenz von WIMPs liefern? Selbstverständlich gibt es viele andere mögliche Kandidaten wie Axionen oder sterile Neutrinos. Doch auch für diese Modelle war ein erfolgreicher Nachweis trotz intensiver experimenteller Aktivitäten bislang nicht erfolgreich.

Eine mögliche Schlussfolgerung mag sein, dass wir uns auf die falschen Modelle für Dunkle Materie konzentriert haben. Angesichts der Komplexität der uns bekannten Materie scheint die Erwartung, dass alle Dunkle Materie im Universum aus einer einzigen Teilchensorte besteht, geradezu naiv. Falls es beispielsweise eine neue Wechselwirkung zwischen Dunkle Materie-Teilchen gibt, könnten diese vielfältige gebundene Zustände eingehen. Solche Teilchen werden häufig als SIMPs bezeichnet (Strongly Interacting Massive Particles). Im Gegensatz zu WIMPs, deren Masse vergleichbar mit der Masse von Atomkernen ist, können sie deutlich leichter sein. Der Energieübertrag bei der Streuung an Atomkernen ist dann so gering, dass herkömmliche Detektoren kein Signal nachweisen können. Um diese Modelle zu erforschen, sind Experimente nötig, die den winzigen Energieübertrag bei der Streuung von Dunkler Materie an Elektronen detektieren können. Hier scheint die Entwicklung neuartiger CCD-Sensoren vielversprechend [6].

Eine spannende Alternative ist die Idee, dass Dunkle Materie gar nicht aus neuartigen Elementarteilchen besteht, sondern aus primordialen Schwarzen Löchern, die unmittelbar nach dem Urknall erzeugt wurden. Diese Idee lässt sich potenziell testen, wie der erfolgreiche Nachweis von Gravitations-

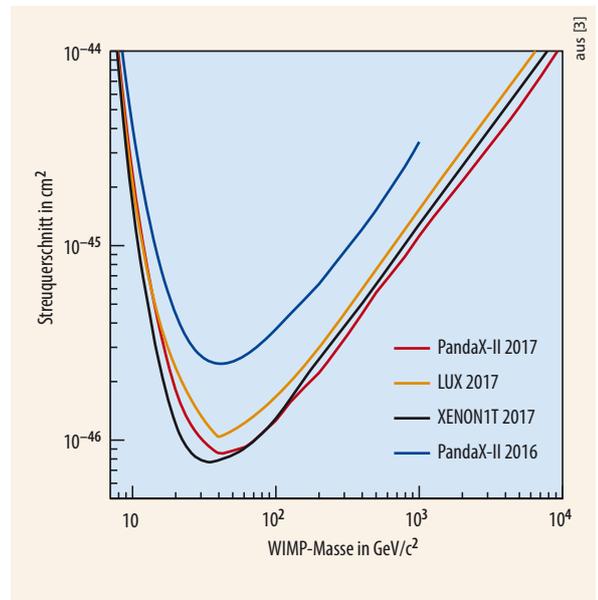


Abb. 1 XENONIT und PandaX-II liefern derzeit die größte Sensitivität bei der Suche nach WIMPs, wie sich an dem immer niedrigeren Streuquerschnitt zwischen WIMP und Atomkernen zeigt.

wellen bewiesen hat. Noch ist aber ungewiss, ob die von den LIGO-Detektoren beobachteten Schwarzen Löcher als Hauptbestandteil der Dunklen Materie infrage kommen.

Eine Sache ist klar: Unser momentanes Verständnis der fundamentalen Bausteine des Universums und ihrer Wechselwirkungen reicht nicht aus, um alle astrophysikalischen und kosmologischen Beobachtungen zu erklären. Ob wir mit unseren Vorstellungen von Dunkler Materie auf dem richtigen Weg sind und nur mehr Geduld und bessere Experimente benötigen, wissen wir noch nicht. Aber solange es uns gelingt, Theorien zu entwickeln, die konkrete Vorhersagen machen, und Experimente zu bauen, mit denen wir diese Vorhersagen überprüfen können, kommen wir der Lösung des Rätsels immer näher.

Felix Kahlhöfer

KURZGEFASST

■ Magnonen als Informationsträger

Physiker der TU Kaiserslautern haben simuliert, wie sich mithilfe von Spinwellen in magnetischen Materialien integrierte Schaltkreise aufbauen lassen. Die zugehörigen Quantenteilchen, sog. Magnonen, verbrauchen dabei weniger Energie und tragen mehr Information als es Elektronen in handelsüblichen Chips heute tun. In ihrem Modell berechneten die Physiker einen magnonischen Schaltkreis mit einer zweidimensionalen flachen Verdrahtung. In diesem direktionalen Koppler wird die Energie der Spinwellen von einem auf den anderen Leiter übertragen. Das könnte schnellere und leistungsfähigere Rechner ermöglichen. Q. Wang et al., *Science Advances* **4**, e1701517 (2018)

■ Oganesson ohne Schalen

Das schwerste bekannte Element Oganesson gehört mit seiner Ladungszahl 118 im Periodensystem zu den Edelgasen. Weder in der Elektronenhülle noch im Atomkern scheint es eine Schalenstruktur zu besitzen – im Gegensatz zu den leichteren Edelgasen Radon ($Z = 86$) und Xenon ($Z = 54$). Nach neuesten Berechnungen sind die Elektronen gleichmäßig verteilt wie bei einem Gas nicht-wechselwirkender Teilchen. Im Kern spielen relativistische Effekte aufgrund der Coulomb-Abstoßung der Protonen und der hohen Dichte eine wichtige Rolle. Sie sorgen dafür, dass auch hier die Schalenstruktur ausschmiert. P. Jerabek et al., *Phys. Rev. Lett.* **120**, 053001 (2018)

- [1] D. S. Akerib et al. [LUX Coll.], *Phys. Rev. Lett.* **118**, 021303 (2017)
- [2] E. Aprile et al. [XENON Coll.], *Phys. Rev. Lett.* **119**, 181301 (2017)
- [3] X. Cui et al. [PandaX-II Coll.], *Phys. Rev. Lett.* **119**, 181302 (2017)
- [4] P. Athron et al. [GAMBIT Coll.], *Eur. Phys. J. C* **77**, 8, 568 (2017)
- [5] G. Arcadi et al., arXiv:1703.07364
- [6] J. Tiffenberg et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 131802 (2017)

Dr. Felix Kahlhöfer, Institut für Theoretische Teilchenphysik und Kosmologie, RWTH Aachen, Otto-Blumenthal-Str., 52074 Aachen