

Überschuss im Untergrund

Die XENON1T-Kollaboration hat ein überraschendes Signal gefunden, für das verschiedene theoretische Erklärungen jenseits bekannter Physik vorgeschlagen wurden.

Joachim Kopp



XENON Collaboration

Der Xenon1T-Detektor wurde mit speziellen Methoden unter Reinraumbedingungen gebaut, um radioaktive Verunreinigungen minimal zu halten.

Experimente zur direkten Suche nach Dunkler Materie machen rasante Fortschritte: Innerhalb des vergangenen Jahrzehnts hat sich die Sensitivität dieser Detektoren, die nach der Streuung Dunkler Materie an Atomkernen oder Elektronen suchen, um einen Faktor 1000 verbessert. Im Juni 2020 hat die XENON1T-Kollaboration hierbei ein unerwartetes Signal beobachtet, nämlich einen Überschuss an Elektron-Rückstoß-Ereignissen [1].

Der XENON1T-Detektor, der im Gran Sasso-Untergrundlabor in den italienischen Abruzzen installiert war, arbeitet mithilfe einer „Zwei-Phasen Time Projection Chamber“ (TPC). Er besteht aus einem zylindrischen Tank, der mit 3,3 Tonnen flüssigen Xenons gefüllt ist. Die Temperatur des Gases ist so nahe dem Siedepunkt eingestellt, dass sich oberhalb der Flüssigkeit eine Schicht gasförmigen Xenons befindet. Wenn ein hochenergetisches Teilchen,

beispielsweise ein durch Streuung Dunkler Materie freigesetztes Rückstoßelektron, den Detektor durchfliegt, werden Xenon-Atome entlang seiner Flugbahn angeregt und teilweise ionisiert. Dabei entsteht Szintillationslicht, das die Photomultiplier oben und unten am Detektor registrieren. Ein elektrisches Feld lenkt die durch Ionisation freigesetzten Elektronen nach oben in die Gasphase ab, wo ein zweites, wesentlich stärkeres elektrisches Feld sie beschleunigt, sodass sie weitere Gasanregungen hervorrufen. Photomultiplier registrieren das entstehende Licht. Die Kombination aus Szintillationslicht und Ionisationssignal macht XENON1T besonders sensitiv und hilft, Untergrundprozesse zu unterdrücken.

Die beobachteten Elektron-Rückstoß-Ereignisse stellen bei der Suche nach klassischer Dunkler Materie in Form schwach wechselwirkender

schwerer Teilchen (WIMPs) eigentlich einen Untergrund dar. Denn dort sucht man nach Kernrückstößen, deren Kinematik im Fall schwerer Dunkler Materie einen größeren Energieübertrag erlaubt. In alternativen Modellen Dunkler Materie, auf die XENON1T ebenfalls sensitiv ist, sind Elektron-Rückstöße dagegen die dominante Signatur neuer Physik.

Zunächst müssen aber alle konventionellen Quellen von Elektron-Rückstößen verstanden sein. Insbesondere β -Zerfälle natürlich vorkommender Radioisotope spielen hier die entscheidende Rolle. Das Design und die Konstruktion des XENON1T-Detektors zielen darauf ab, radioaktive Verunreinigungen zu minimieren. Alle verwendeten Materialien wurden sorgfältig ausgewählt, getestet und gereinigt. Der Bau fand unter Reinraumbedingungen statt. Eine aufwändige Abschirmung verhindert zudem, dass Radioaktivität von außen eindringt.

Der verbleibende radioaktive Untergrund ist sehr gut verstanden, vor allem im Energiebereich einiger keV, in den der beobachtete Ereignisüberschuss fällt. Zum einen hinterlassen die meisten Radioisotope, die in diesem Bereich zum Untergrund beitragen, wesentlich stärkere Signale bei höheren Energien. Aus diesen lässt sich somit der Grad radioaktiver Verunreinigungen ableiten. Zum anderen zirkuliert das verwendete Xenon-Gas ständig durch ein aufwändiges Reinigungssystem. Die Effizienz dieses Systems zeigte sich bereits, als zum Beispiel zu Kalibrationszwecken eine geringe Menge radioaktiver Isotope in den Detektor injiziert und deren Verschwinden nach kurzer Zeit beobachtet wurde. Durch derartige Argumente und Kontrollmessungen kommt die XENON1T-Kollaboration zu dem Schluss, dass der beobachtete Ereignisüberschuss durch bekannte Prozesse nicht zu erklären ist.

Daher ist es sinnvoll, auch jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik nach Erklärungen zu suchen. In der Tat hat das XENON1T-Resultat eine Flut an wissenschaftlichen Arbeiten initiiert, welche die unterschiedlichsten Lösungsansätze verfolgen. Ein zunächst vielversprechender Kandidat sind Axionen. Diese hypothetischen Teilchen wurden postuliert, um zu erklären, warum die starke Wechselwirkung die CP-Symmetrie respektiert, obwohl keine der fundamentalen Symmetrien des Standardmodells dies vorschreibt. Axionen sind ein ausgezeichnete Kandidat für Dunkle Materie. Durch ihre Kopplung an Elektronen und Photonen sollten sie in großer Menge in der Sonne entstehen und werden dann im Detektor von Elektronen absorbiert. Die experimentelle Signatur besteht somit in einzelnen Rückstoß-Elektronen, genau wie von XENON1T beobachtet. Allerdings müsste in dem Parameterbereich, in dem das Signal zu erklären wäre, der solare Axionenfluss so hoch sein, dass er zu einem signifikanten Energieverlust in der Sonne und in anderen Sternen führen würde. Insbesondere die Dynamik roter Riesensterne würde dann nicht mehr mit den Beobachtungen übereinstimmen. Somit ist dieses Szenario als Erklärung für das XENON1T-Signal weitgehend ausgeschlossen [1, 2].

Auch solare Neutrinos könnten das Signal verursachen. Dazu wäre es aber nötig, dass der Streuquerschnitt dieser Neutrinos bei niedrigen Energien größer ist als im Standardmodell vorhergesagt. Dies wäre möglich, wenn magnetische Übergangsmomente existieren, durch die sich die Neutrinos des Standardmodells in neue, schwerere Teilchen umwandeln ließen. Dies ist theoretisch einfach zu realisieren, allerdings gibt es auch hier Probleme: Die schweren Partner der Neutrinos würden durch ihre Zerfälle im frühen Universum mit kosmologischen Beobachtungen in Konflikt geraten, insbesondere mit Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der primordialen Nukleosynthese [3].

Die dritte und vielleicht vielversprechendste Erklärung basiert auf der Hypothese eines „Dunklen Photons“. Dabei handelt es sich um ein

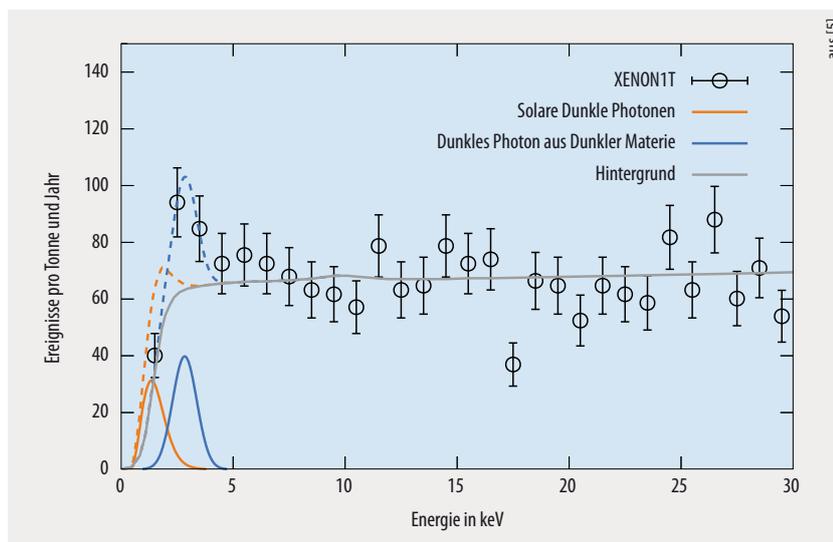


Abb. 1 Das von XENON1T beobachtete Signal (schwarz) hebt sich im Bereich weniger keV deutlich vom Untergrund (grau) ab und ist hier mit dem vorhergesagten Signal in zwei Modellen des Dunklen Photons (blau und orange) zu sehen.

Eichboson, das beispielsweise eine Kraft zwischen Teilchen der Dunklen Materie vermittelt, analog zu der durch Photonen vermittelten elektromagnetischen Kraft des Standardmodells. Da das Dunkle Photon in der Regel nicht masselos ist, hat diese Kraft allerdings nur eine mikroskopisch kurze Reichweite. Eine besondere Eigenschaft Dunkler Photonen ist, dass sie mit dem Photon des Standardmodells mischen können. Bei Prozessen, die im Standardmodell zur Produktion eines Photons führen, könnte dann mit geringer, aber nicht verschwindender Wahrscheinlichkeit ein Dunkles Photon entstehen. Damit wäre wiederum die Sonne eine effiziente Quelle Dunkler Photonen. Die Absorption dieser solaren Dunklen Photonen durch Elektronen im XENON1T-Detektor könnte das beobachtete Signal erklären (**Abb. 1**), ohne mit anderen experimentellen Resultaten in Konflikt zu geraten [4, 5].

Trotz der zahlreichen vielversprechenden theoretischen Ansätze, von denen hier nur ein Bruchteil vorgestellt wurde, ist es noch zu früh, das XENON1T-Signal als etwas anderes als eine interessante Anomalie zu betrachten. Zum einen ist die statistische Signifikanz mit 3σ für teilchenphysikalische Standards noch sehr gering. Zum anderen steht bislang eine unabhängige Bestätigung aus. Diese

könnten jedoch schon bald der Detektor XENONnT, der in diesen Tagen in Betrieb geht, sowie das in den Startlöchern stehende LUX-ZEPLIN-Experiment in den USA erbringen.

Zudem lehrt uns die Erfahrung, dass derartige Anomalien von Zeit zu Zeit auftreten und aus den unterschiedlichsten Gründen auch wieder verschwinden, ohne dass Korrekturen am Standardmodell der Teilchenphysik nötig wären. Dennoch macht es Sinn, die Anomalien ernst zu nehmen, weil die Suche nach Erklärungen unverstandener Beobachtungen das Herz jeder Naturwissenschaft ist und weil die meisten großen Entdeckungen einmal als kleine Anomalien angefangen haben.

- [1] E. Aprile et al. (XENON Coll.), Phys. Rev. D **102**, 072004 (2020)
- [2] L. Di Luzio et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 131804 (2020)
- [3] V. Brdar, A. Greljo, J. Kopp und T. Opferkuch, arXiv:2007.15563 (2020)
- [4] G. Alonso-Álvarez et al., JCAP **11**, 029 (2020)
- [5] H. An et al., arXiv:2006.13929 (2020)

Der Autor

Prof. Dr. Joachim Kopp, Institut für Physik, Theoretische Hochenergiephysik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudinger Weg 7, 55128 Mainz und Theoretical Physics Department, CERN, CH-1211 Geneve 23, Schweiz