



Neue Ergebnisse des XENON100 Experiments engen erlaubten Bereich für Dunkle Materie ein

Wissenschaftler der XENON-Kollaboration berichten über neue Ergebnisse ihrer Suche nach Dunkler Materie. Die mit dem XENON100-Detektor im italienischen Gran-Sasso-Untergroundlabor aus 100 Tagen Messdauer mit bisher unerreichter Empfindlichkeit gewonnenen Daten liefern keine Hinweise für die Existenz von sogenannten WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), den führenden Kandidaten für Dunkle Materie. Zwar wurden drei Ereignisse registriert, dies ist aber bei zwei erwarteten Hintergrundereignissen statistisch nicht signifikant. Aus den neuen Daten folgen die bislang besten Grenzen in der Suche nach Dunkler Materie und die stärksten Einschränkungen für Modelle der Teilchenphysik hierzu.

Kosmologische Beobachtungen zeichnen in konsistenter Weise ein Bild unseres Universums, in dem die gewöhnliche uns bekannte Materie nur etwa 17% ausmacht, während die übrigen 83% aller Materie, in einer neuen, bislang unbeobachteten Form – der so genannten Dunklen Materie – vorliegt. Dies entspricht sehr gut den Erwartungen aus der Physik der allerkleinsten Bereiche des Mikrokosmos, wonach notwendige Erweiterungen des Standardmodells der Elementarteilchen die Existenz neuer exotischer Teilchen vorhersagen, welche perfekte Kandidaten für Dunkle Materie sind: WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), also schwere Teilchen, die nur schwach wechselwirken und somit sowohl durch Kosmologie als auch Teilchenphysik motiviert sind.

Ein weiterer Hinweis rührt aus der Tatsache, dass die berechnete Häufigkeit solcher aus dem Urknall stammenden Teilchen der geforderten Menge Dunkler Materie entspricht. Eine Suche nach WIMPs ist daher sehr gut begründet und ein direkter Nachweis solcher Teilchen würde dieses neue Weltbild bestätigen.

Die Natur und die Eigenschaften Dunkler Materie werden mit einer Reihe von Zugängen und Methoden untersucht, welche indirekte Hinweise darauf geben, wonach konkret zu suchen ist. Man erwartet, dass WIMPs eine mit Atomkernen vergleichbare Masse haben und nur sehr schwach mit normaler Materie wechselwirken. Um die sichtbare Scheibe unserer Galaxis sollten sie eine enorme Wolke bilden, durch welche sich die Erde gemeinsam mit der Sonne auf ihrem Weg durch die Galaxie bewegt. Der daraus resultierende „WIMP-Wind“ kann gelegentlich an einem Atomkern in einem erdgebundenen Detektor streuen und so einen winzigen Energiebetrag freisetzen, der mittels äußerst empfindlicher Instrumente nachgewiesen werden kann.

Das XENON100-Experiment nutzt als WIMP-Target 62 kg des Edelgases Xenon in flüssiger Form, das sich bei einer Temperatur um -90°C in einem Edelstahl-Kryostat befindet. Dieser ist mit einer Kältemaschine ausgestattet, welche die Betriebsbedingungen äußerst stabil hält. Untergebracht ist das Experiment im italienischen Gran-Sasso-Untergroundlabor (LNGS), wo 1400 m Fels die störende kosmische Strahlung abschirmen. Der weiteren Abschirmung radioaktiver Strahlung aus dem Detektor selbst und seiner Umgebung dienen Schichten aktiver und passiver um das Target herum angeordneter Absorber. Diese beinhalten 100 kg aktiven Xenon-Flüssigszintillator, 2,1 t ultrareines Kupfer, 1,6 t Polyethylen und 34 t Blei und Wasser. Für die Detektorkomponenten wurden nur radiochemisch hochreine Materialien verwendet, um eine äußerst strahlungsarme Umgebung zu gewährleisten.

Teilchen, die innerhalb des aktiven Flüssigkeitsvolumens streuen, regen Xenon-Atome an und ionisieren sie. Dies führt einerseits zur prompten Emission von ultraviolettem Szintillationslicht. Zu einer weiteren, verzögerten, Emission von Szintillationslicht kommt es durch die bei der Ionisation freigesetzten Elektronen. Diese driften durch die Flüssigkeit bis zu deren Oberfläche, um anschließend in dem darüber liegenden, mit Xenon-Gas gefüllten Volumen beschleunigt zu werden. Dabei kommt es im Gas zu Lumineszenz mit der gleichen Wellenlänge von 178 nm wie die des prompten Signals. Die beiden Szintillations-Lichtsignale (primär und sekundär) werden mit zwei Anordnungen von Lichtsensoren nachgewiesen, von denen sich die eine am Boden in der Flüssigkeit, die andere darüber im gasgefüllten Volumen befindet (Abb. 1). Die gleichzeitige Messung dieser beiden Lichtsignale erlaubt die Bestimmung sowohl der Energie als auch der räumlichen Position des Ereignisses, was Informationen über dessen Natur liefert. Das Verhältnis der beiden Lichtsignale und die präzise Ortsbestimmung ergeben eine spezifische Signatur der gesuchten WIMP-Ereignisse und stellen gleichzeitig eine exzellente Methode zur Unterscheidung von Hintergrundereignissen dar.

Die im XENON100-Experiment verwendete Technologien und Methoden beruhen auf den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten innerhalb des XENON-Programms zur Suche nach Dunkler Materie, welches 2006 zum XENON10-Prototyp führte. Die zehnfach vergrößerte Targetmasse kombiniert mit einem 100fach verringerten Strahlungsuntergrund ergab eine substantielle Verbesserung der Empfindlichkeit für die Streuung von WIMPs an Atomkernen. Ein umfangreiches Kalibrierungsprogramm mit verschiedenen Gamma- und Neutronenquellen demonstrierte, dass die Ziele von XENON100 hinsichtlich Empfindlichkeit und niedrigem Strahlungsuntergrund erreicht werden konnten.

Eine erste Auswertung von 11,2 Tagen Datennahme während der Inbetriebnahme des Experiments im Oktober und November 2009 ergab bereits neue Obergrenzen für die Wechselwirkungsrate von WIMPs – die weltweit beste für WIMP-Massen unterhalb von ca. 80 Protonenmassen (siehe Physical Review Letters 105 (2010) 131302).

Die nächste Messreihe zur Suche nach Dunkler Materie startete im Januar 2010 und 100 Tage Datennahme aus dieser Reihe wurden nun analysiert. Insgesamt drei Kandidaten wurden im vordefinierten Parameterbereich, in dem ein WIMP-Signal erwartet würde, gefunden. Auch wenn diese Ereignisse von tatsächlichen Streuereignissen im Detektor kommen, ist dies in statistischer Übereinstimmung mit dem radioaktiven Untergrund, von dem zwei Ereignisse erwartet werden. Ein Signal für Dunkle Materie liegt somit nicht vor und es ergibt sich eine Obergrenze an die Wechselwirkungsstärke mit normaler Materie. Dieses Ergebnis ist die bisher weltbeste Grenze. Dadurch werden Modelle, die Dunkle Materie vorhersagen, merklich eingeschränkt.

XENON100 hat unter allen Experimenten zur Suche nach Dunkler Materie den niedrigsten Untergrund erreicht (siehe Physical Review D (2011), arXiv:1101.3866). Während die hier vorgestellten Daten genommen wurden, konnte der intrinsische Untergrund von im Xenon in Spuren enthaltenem radioaktiven Krypton auf ein vorher nie erreichtes Maß reduziert werden. Während nun mit verbesserter Detektor-Charakteristik weitere Daten genommen werden bereitet die Kollaboration das Experiment der nächsten Generation vor. Dieser neue Detektor soll 1000 kg flüssiges Xenon als Targetmasse haben. Mit weiteren Reduktionen beim radioaktiven Untergrund wird dieser XENON1T-Detektor am Ende hundertmal sensitiver sein als XENON100. Die kommenden Jahre sind daher sehr spannend und es gibt berechtigte Hoffnung, eines der fundamentalsten Rätsel der Physik lösen zu können.

„XENON100 hat die Sensitivität für Dunkle Materie um einen Faktor 5 verbessert. Damit können wir theoretische Modelle von WIMPs deutlich einschränken. Mittlerweile haben wir den Untergrund in unserem Experiment weiter verbessert und neue Messungen begonnen, mit denen wir in der Zukunft noch weiter den Bereich möglicher WIMPs erforschen werden“, sagt Univ.-Prof. Dr. Uwe Oberlack von der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU). Uwe Oberlack ist eines der Gründungsmitglieder des XENON-Programms zur Suche nach Dunkler Materie. Vor seinem Wechsel an die JGU hat er mit seiner Arbeitsgruppe an der Rice University zum Aufbau von XENON100 beigetragen. Seine Mainzer Gruppe beschäftigt sich nun vor allem mit der Analyse der Daten, der Vorbereitung von XENON1T, dem Aufbau eines Flüssig-Xenon-Labors sowie Entwicklungsarbeiten für zukünftige Dunkle-Materie-Detektoren. Uwe Oberlacks Forschung ist auch Bestandteil der Exzellenzinitiative PRISMA („Precision Physics, Fundamental Interactions and Structure of Matter“) an der JGU Mainz, die kürzlich den wichtigen Schritt in die abschließende Auswahlrunde geschafft hat (<http://www.prima.uni-mainz.de/>).

An der XENON-Kollaboration sind 60 Wissenschaftler und 14 Institutionen aus den USA (Columbia University New York, University of California Los Angeles, Rice University Houston), China (Jiao Tong University Shanghai), Frankreich (Subatech Nantes), Deutschland (Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Westfälische Willhelms-Universität Münster), Israel (Weizmann Institute of Science), Italien (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, INFN e Università di Bologna), Niederlande (Nikhef Amsterdam), Portugal (Universidade de Coimbra) und der Schweiz (Universität Zürich) beteiligt.

Unterstützt wird XENON100 neben den beteiligten Institutionen von der National Science Foundation und dem Department of Energy (USA), dem Schweizerischen Nationalfonds, dem l'Institut national de physique des particules et de physique nucléaire und La Région des Pays de la Loire (Frankreich), der Max-Planck-Gesellschaft und der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der deutsch-israelischen Minerva-Gesellschaft und GIF (Israel), FOM (Niederlande), Fundação para a Ciência e Tecnologia (Portugal), INFN (Italien) und STCSM (China).

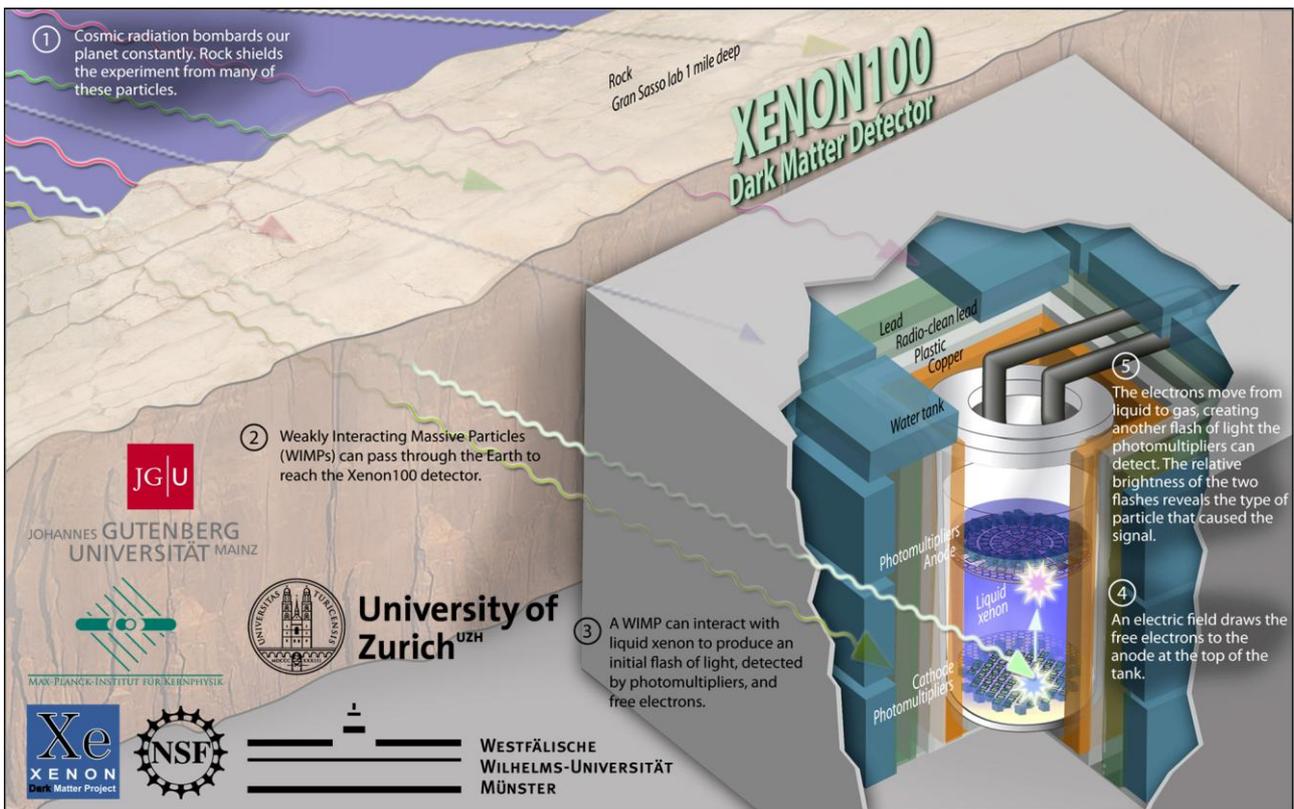


Abbildung 1. WIMP-Nachweisprinzip des XENON100 Experiments: (1) Zum Schutz vor einem Großteil der kosmischen Strahlung befindet sich der Detektor unter 1400 m Fels im Gran-Sasso-Untergrundlabor. (2) WIMPs können die Erde durchdringen und erreichen den Detektor, der durch mehrere Schichten aus Wasser, Blei, Plastik und Kupfer gegenüber Radioaktivität aus dem Gestein abgeschirmt ist. (3) Bei der Reaktion eines WIMP im flüssigen Xenon werden freie Elektronen und ein erster Lichtblitz erzeugt, der von Lichtsensoren nachgewiesen wird. (4) Ein elektrisches Feld zieht die Elektronen zur Anode an der Oberseite des Tanks. (5) Im Xenon-Gas oberhalb des Flüssigkeitsspiegels erzeugen die Elektronen einen zweiten Lichtblitz, den die Lichtsensoren aufnehmen. Aus dem Verhältnis der Helligkeit beider Blitze kann die Art Teilchens, das die Reaktion auslöste, identifiziert werden.

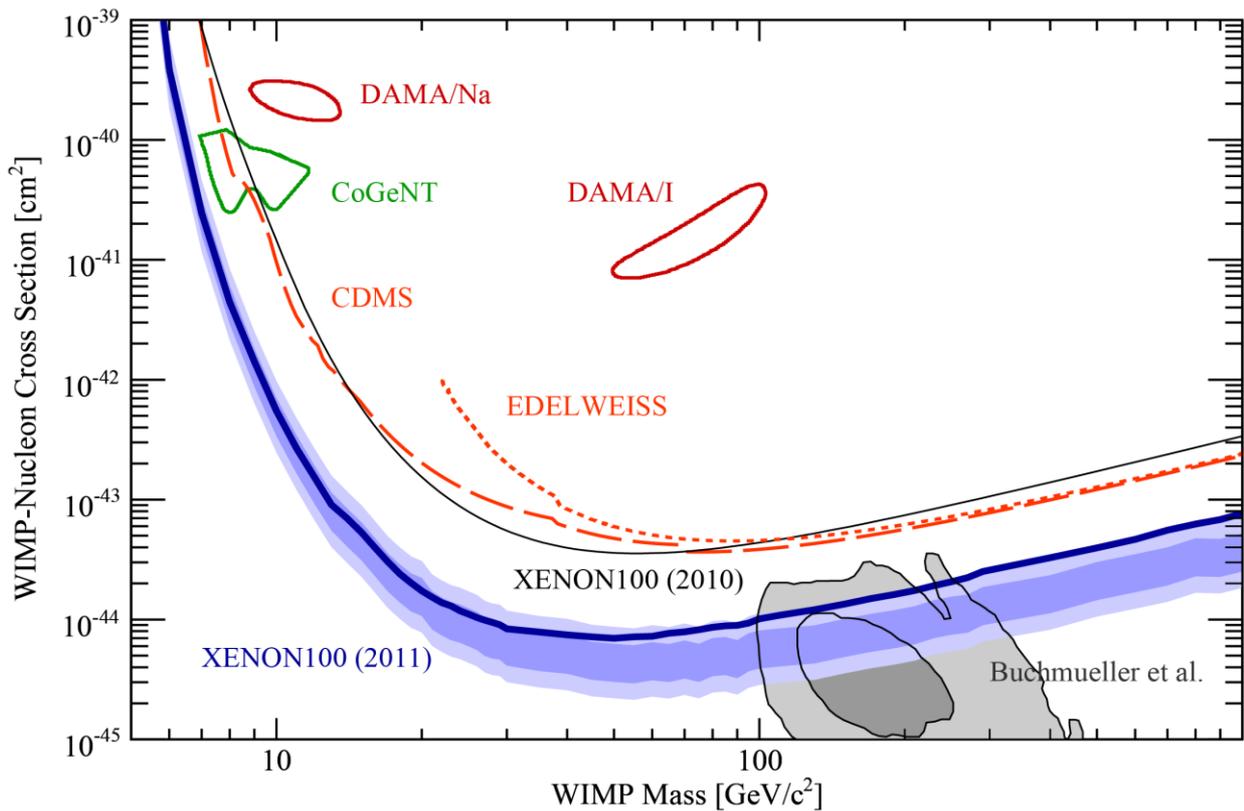


Abbildung 2. Die neuen Ausschlussgrenzen für WIMPs: Das Diagramm zeigt die Wahrscheinlichkeit für die Wechselwirkung eines WIMP mit normaler Materie (vertikale Achse) gegenüber seiner Masse (horizontale Achse). Der Bereich oberhalb der blauen Kurve ist durch die neuen XENON100-Daten ausgeschlossen. Die grau schattierten Bereiche sind Vorhersagen supersymmetrischer Theorien unter Einbeziehung jüngster Einschränkungen vom LHC. Ebenfalls gezeigt sind Ausschlussgrenzen weiterer Experimente zu Dunkler Materie wie CDMS (USA) und EDELWEISS (Frankreich) sowie zwei Bereiche, in denen die Experimente CoGeNT (USA) und DAMA (Italien) Signale Dunkler Materie gesehen haben wollen.

Kontakt (deutschsprachiger Raum):

Prof. Dr. Laura Baudis
Physik-Institut
Universität Zurich
Tel.: +41 44 635 5777
Fax: +41 44 635 5704
E-Mail: lbaudis (at) physik.uzh.ch

Prof. Dr. Manfred Lindner
Max-Planck-Institut für Kernphysik,
Heidelberg
Tel.: +49 6221 516 800
Fax.: +49 6221 516 802
E-Mail: lindner (at) mpi-hd.mpg.de

Prof. Dr. Uwe Gerd Oberlack
Institut für Physik
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
Tel.: +49 6131 39 25167
Fax: +49 6131 39 25169
E-Mail: oberlack (at) uni-mainz.de

Prof. Dr. Christian Weinheimer
Institut für Kernphysik
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Tel.: +49 251 83 34970
Fax: +49 251 83 34962
E-Mail: weinheim (at) uni-muenster.de

(international):

Prof. Elena Aprile
(XENON100 Spokesperson)
Department of Physics
Columbia University, New York, USA
Tel.: +1 212 854 3258
Fax: +1 212 854 8121
E-Mail age (at) astro.columbia.edu

Weblinks:

<http://www.physik.uzh.ch/groups/groupbaudis/xenon>
XENON-Gruppe von Laura Baudis an der Universität Zürich

<http://www.mpi-hd.mpg.de/lin/index.de.html>
Abteilung von Manfred Lindner am MPI für Kernphysik, Heidelberg

<http://xenon.physik.uni-mainz.de>
XENON-Gruppe von Uwe Gerd Oberlack an der Universität Mainz

<http://www.uni-muenster.de/Physik.KP/AGWeinheimer>
Arbeitsgruppe von Christian Weinheimer an der Universität Münster

<http://xenon.astro.columbia.edu/>
XENON-Homepage der Columbia University, USA

<http://www.lngs.infn.it>
Webseite des Gran-Sasso-Untergrundlabors (LNGS), Italien

<http://www.astro.columbia.edu/~edo/Xe100.avi>
Film zum Messprinzip von XENON100 (Columbia University, USA)

<http://www.spektrum.de/videos/xenon100>
Film zu den neuen XENON100-Ergebnissen (Spektrum der Wissenschaft)