



# Die Jagd nach dem Unsichtbaren

Sollten die Kosmologen recht haben, dann gibt es im All eine Form von Materie, die sechsmal häufiger vorkommt als die uns bekannte. Sie ist unsichtbar und heißt daher Dunkle Materie. Vor 80 Jahren erstmals postuliert, steht ihr direkter Nachweis bis heute aus. Forscher am **Max-Planck-Institut für Physik** in München und am **Max-Planck-Institut für Kernphysik** in Heidelberg wollen das kosmische Rätsel in den kommenden Jahren lösen.

Dunkle Materie in Blau: Eigentlich ist sie ja nicht zu sehen, aber hier haben Astronomen das Unsichtbare sichtbar gemacht. Das Foto zeigt den Zusammenstoß zweier Galaxienhaufen. Während sich das „normale“ Gas (rot) im Zentrum ballt, bleibt die Dunkle Materie (blau) von der Kollision unbehelligt. Die Farben wurden willkürlich gewählt, die Verteilung der Dunklen Materie haben die Forscher aus dem Schwerkraftprofil erschlossen und zur Verdeutlichung visualisiert.

TEXT THOMAS BÜHRKE

**Ü**ber kaum ein anderes astrophysikalisches Thema diskutieren die Wissenschaftler derzeit so heftig wie über die Dunkle Materie. Besonders deutlich zeigte sich das im Herbst 2011, als in München Physiker aus aller Welt zusammenkamen, um sich über die neuesten Resultate auszutauschen. Drei Forschergruppen legten Messergebnisse vor, die mit dem Nachweis der mysteriösen Dunkle-Materie-Teilchen verträglich waren – aber sich gegenseitig widersprachen. Zudem hatten zwei andere Gruppen nichts gefunden und schlossen die positiven Ergebnisse explizit aus.

„Es könnte aber sein, dass die Teilchen ungewöhnliche Eigenschaften besitzen, sodass sie sich in einigen Detektoren bemerkbar machen, in anderen nicht“, sagt Franz Pröbst, der am Münchener Max-Planck-Institut für Physik das Experiment CRESST (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers*) leitet. Es gehört zu jenen Detektoren, die Dunkle Materie nachgewiesen haben könnten.

Manfred Lindner stimmt dem im Prinzip zu, doch hält er es für plausibler, dass CRESST irgendeinen neuartigen Störeffekt sieht. Das internationale Experiment XENON100, dessen Beitrag Lindner am Max-Planck-Institut für Kernphysik leitet, hat nämlich mit deutlich höherer Sensitivität keine Ergebnisse von möglichen Dunkle-Materie-Partikeln gefunden.

Die heiße Diskussion um „verschmutzte“ Instrumente, Empfindlichkeitsgrenzen und Störeffekte spielt sich auf allerhöchstem Niveau ab. CRESST und XENON100 zählen zu den emp-

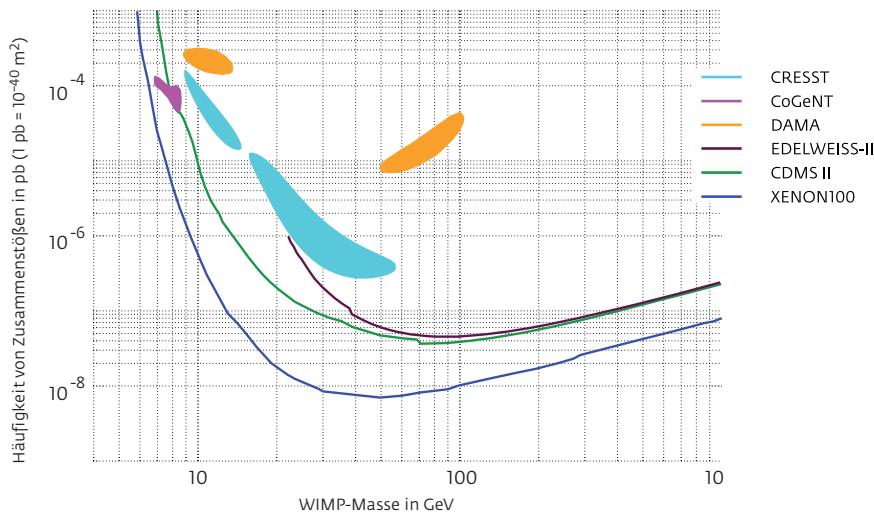
findlichsten und reinsten Experimenten der Erde. „Unser Detektor ist vermutlich der sauberste Ort im Universum“, sagt Max-Planck-Direktor Lindner. Um die Anforderungen an die Technik zu verstehen, ist ein kurzer Rückblick in die Geschichte nötig.

Im Jahr 1933 beobachtete der in die USA emigrierte Schweizer Astronom Fritz Zwicky mehrere Galaxienhaufen. Dabei stellte er fest, dass die einzelnen Milchstraßensysteme sich so schnell darin bewegen, dass ihre gemeinsame Schwerkraft nicht ausreichen würde, um die Haufen zusammenzuhalten. Er schloss daraus, es müsse eine große Menge unsichtbarer Materie geben, die sich nur über ihre Schwerkraft äußert. Zwicky kreierte den Begriff Dunkle Materie.

#### UNBEKANNTES TEILCHEN BALLEN SICH ZU WOLKEN

Die Beobachtungen des Forschers gerieten jedoch in Vergessenheit und wurden erst in den 1970er-Jahren wiederbelebt. Damals fanden Astronomen heraus, dass Spiralgalaxien wie unsere Milchstraße so schnell rotieren, dass sie von der Fliehkräfte zerrissen würden, gäbe es nicht die zusätzliche Schwerkraft der Dunklen Materie.

Heute sind die meisten Astroteilchenphysiker davon überzeugt, dass die unsichtbare Substanz aus einer unbekannten Sorte von Elementarteilchen besteht. Diese sollen sich zu riesigen Wolken zusammengeballt haben, die Galaxien umgeben und großräumig in den Galaxienhaufen verteilt sein. Es gibt eine Reihe weiterer astrophysikalischer Indizien für ihre Existenz, etwa die Bilder von Gravitationslinsen. Dar-



Dilemma: Sollte das Experiment CRESST tatsächlich Teilchen der Dunklen Materie gefunden haben, dann befinden sich diese in einer der beiden hellblauen Regionen. XENON100 schließt jedoch den Bereich oberhalb der blauen Kurve aus.

über hinaus, so die verbreitete Auffassung, sorgen die Dunkle-Materie-Teilchen dafür, dass sich die normale Materie nach dem Urknall relativ schnell zu Sternen und Galaxien verdichten konnte. Alle Indizien zeigen konsistent in dieselbe Richtung – und ohne diesen mysteriösen Wirk- und Klebstoff gäbe es uns überhaupt nicht.

Aus den bisherigen Beobachtungen und theoretischen Argumenten lassen sich einige Eigenschaften der unsichtbaren Partikel ableiten. Demnach besitzen die plausibelsten Kandidaten eine Masse, die etwa derjenigen von Atomen entspricht. Sie sind elektrisch neutral und gehen mit normaler Materie so gut wie keine Wechselwirkung ein. Anders gesagt: Sie durchqueren alle Körper im Universum nahezu ungehindert. Wegen



Tunnel der Erkenntnis: Das Experimentalmodul CRESST befindet sich im Gran-Sasso-Untergrundlabor, wo es 1400 Meter Fels der Abruzzen vor der kosmischen Strahlung schützen. Zusätzlich müssen die Forscher ihre empfindliche Apparatur noch vor weiteren Störeinwirkungen bewahren. Insbesondere radioaktive Spurenelemente im Fels verursachen unerwünschte Signale. Die gefährlichste Störquelle ist Radon-222, das bei dem natürlichen Zerfall von Uran und Thorium entsteht.



dieser Eigenschaften haben sie den Namen *Weakly Interacting Massive Particles* erhalten. Bezeichnenderweise bedeutet das Akronym WIMP im Englischen so viel wie Schwächling.

### UNSERE KÖRPER WERDEN VON WIMPS DURCHQUERT

Fasst man alles zusammen, was man heute zu wissen meint, dann rasen auf der Erde in jeder Sekunde rund 100 000 dieser Partikel durch eine Fläche von der Größe eines Daumennagels hindurch – auch durch unsere Körper, ohne dass wir das Geringste davon spüren. Das klingt fantastisch, ist aber gar nicht einmal so ungewöhnlich. So durchdringen in derselben Zeit etwa 65 Milliarden Neutrinos, die im Innern der

Sonne entstehen, dieselbe Fläche; und diese Geisterteilchen kann man bereits durch seltene Stöße mit Materie sichtbar machen.

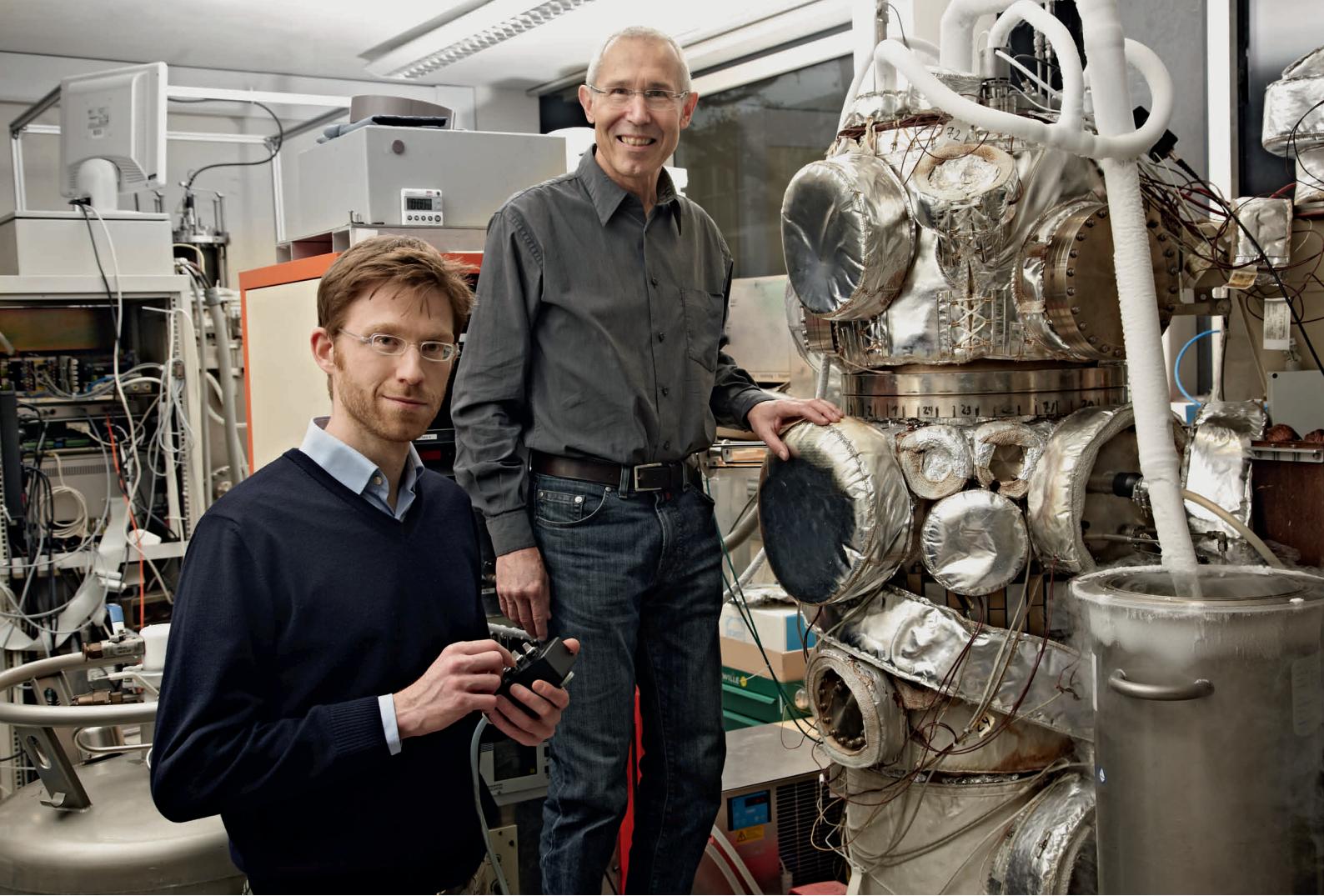
Alle derzeit arbeitenden Experimente gehen davon aus, dass auch die Dunkle-Materie-Teilchen durchaus mit normalen Atomen zusammenstoßen können, allerdings mit extrem geringer Rate. Das aber sollte sie verraten. Die zweifelsfreie Entdeckung von WIMPs wäre eine sensationelle Bestätigung des neuen Weltbilds und würde wahrscheinlich mit einem Nobelpreis belohnt werden.

Das Rezept ist bei allen Messapparaturen ähnlich: Man nehme ein geeignetes Detektormaterial und warte auf den sehr seltenen Fall, dass ein WIMP darin mit einem Atomkern zusammenstößt –

und einen kurzen Lichtblitz erzeugt. Außerdem werden Elektronen frei, weil das angestoßene Atom mit anderen Atomen kollidiert und sich die äußeren Elektronen vom Atom lösen können.

Ist das Material ein Kristall, dann überträgt sich die Stoßenergie auf das Kristallgitter, und der Detektor erwärmt sich. Es gibt also die drei Messgrößen Licht, freie Ladungen und Temperatur. Keiner der derzeitigen Detektoren kann jedoch alle drei Größen gleichzeitig messen, sondern immer nur zwei. Das hat Auswirkungen auf die aktuelle Diskussion der Ergebnisse.

Franz Pröbst arbeitet seit 15 Jahren am Experiment CRESST, an dem Physiker der TU München sowie aus Tübingen und Oxford mitwirken. Das Herz der Anlage bilden Kristalle aus Calcium-



Auf dem Prüfstand: Projektleiter Franz Pröbst (rechts) und sein Mitarbeiter Michael Kiefer testen im Labor des Max-Planck-Instituts für Physik Detektoren, die im CRESST-Experiment zum Einsatz kommen. Reinheit ist hierbei das oberste Gebot. Außerdem müssen die Detektoren bis auf etwa ein hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden.

wolframat mit jeweils vier Zentimeter Höhe und Durchmesser. Obwohl in jeder Sekunde mehrere Millionen WIMPs einen dieser Detektoren durchqueren sollten, erwartet Pröbst nicht mehr als einen Zusammenstoß pro Monat. Bei einem solchen Ereignis wird ein sehr schwacher Lichtblitz frei, und der Kristall erwärmt sich um wenige millions-tel Grad. Wie soll man das messen?

#### EMPFINDLICHE EXPERIMENTE AM ABSOLUTEN NULLPUNKT

„Als wir damals mit dem Experiment anfingen, gab es hierfür überhaupt keine Messtechnik“, erinnert sich Pröbst. Zusammen mit Wolfgang Seidel und Leo Stodolsky entwickelte der Physiker die heute verwendeten Kryodetektoren. Sie erhielten diesen Namen, weil sie bei einer extrem tiefen Temperatur von etwa einem hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt (minus 273,15 Grad

Celsius) arbeiten. Auf eine Seite des Kristalls wird ein dünner Wolframfilm aufgebracht, der als sensitives Thermometer dient. Die Temperatur wird nämlich genau so eingeregelt, dass sich der Film in einem Übergangszustand zwischen Normal- und Supraleitung befindet. Schon bei der geringsten Erwärmung erhöht sich der elektrische Widerstand so stark, dass er sich messen lässt.

Man kann das mit einer empfindlichen Wippe veranschaulichen, die sich gerade im Gleichgewicht befindet. Schon das kleinste Gewicht kann die eine Seite nach unten sinken lassen. Die Temperaturstabilisierung bis auf ein millionstel Grad genau zu halten ist eine extreme Herausforderung. Jeder Wolframfilm hat seine eigene Sprungtemperatur, die individuell eingestellt werden muss. „Die Eichung des Experiments kostet uns Monate“, berichtet Pröbsts Mitarbeiter Michael Kiefer aus eigener leidvoller Erfahrung.

Mit CRESST können die Physiker auch den Lichtblitz aufspüren, den ein WIMP beim Zusammenstoß mit einem Atom im Kristall erzeugen soll. Dafür wird das Licht mit Spiegeln, die den Kristall vollständig umgeben, auf einen weiteren Tieftemperatursensor gelenkt. Der erwärmt sich, woraus die Forscher schließlich die Lichtenergie ableiten.

Jahrelange Arbeit war nötig, um diese Detektoren zum Laufen zu bringen. Doch es gibt ein weiteres Problem: Die Natur hält viele andere Quellen parat, die in den Kristallen ähnliche Signale erzeugen wie die WIMPs. Ein erster Schritt war der Aufbau von CRESST im Gran-Sasso-Untergrundlabor. Unter 1400 Meter Fels der Abruzzen ist das Experiment weitgehend vor Teilchen der kosmischen Strahlung geschützt, die unablässig aus dem All in die Erdatmosphäre prasseln.

Der größte Feind aber ist natürliche Radioaktivität in Form von kleinsten Spuren instabiler Isotope. Störend wir-

ken sich unter anderem radioaktive Radon-Isotope aus, die infolge des Zerfalls von Uran überall vorkommen – übrigens auch in der Raumluft eines Wohnhauses. Die bei radioaktiven Zerfällen freigesetzten Atomkerne, Elektronen, Neutronen und Gammastrahlen können in den Detektor eindringen und darin ein ähnliches Signal hervorrufen wie ein WIMP.

#### 44 TONNEN SCHWERER MANTEL REDUZIERT DIE STÖREFFEKTE

Um die Kristalldetektoren vor radioaktiver Störstrahlung zu schützen, fertigt man sie aus hochreinen Materialien. Und sie werden von mehreren, insgesamt 44 Tonnen schweren Mänteln aus Polyethylen, Blei und Kupfer umgeben. Dennoch bleibt ein kleiner Schmutzeffekt übrig. „Wir messen jetzt nur noch etwa alle hundert Sekunden ein Ereignis“, sagt Kiefer. Diese Ereignisse sind der störende Untergrund.

Dennoch ist die Lage nicht hoffnungslos. Aus der Analyse der Lichtenergie und der Erwärmung des Kristalls lassen sich nämlich die Störeffekte von den erwarteten WIMP-Signalen unterscheiden. Das derzeit noch aktuelle Ergebnis einer Messreihe von Mai 2009 bis April 2011 stellte die CRESST-Gruppe Ende 2011 in München vor. Insgesamt hatten die Forscher 67 Ereignisse registriert, von denen sie nur 46 mit bekannten Störeffekten erklären konnten. Stammen also die restlichen 21 von WIMPs?

Falls dem so ist, dann besitzen die Teilchen eine Masse, die etwa derjenigen eines Kohlenstoffatoms entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um eine zufällige, statistische Schwankung handelt, liegt bei 1 zu 100 000. „Es könnte aber noch ein unbekannter Störuntergrund sein“, sagt Pröbst. Ziel ist es derzeit, diesen Untergrund durch weitere Abschirmmaßnahmen auf ein Zehntel zu reduzieren. Außerdem verdoppeln die Forscher die Anzahl der Kristalle auf 18.

Das Experiment wird gerade im Gran-Sasso-Labor aufgebaut und soll Anfang 2013 wieder anlaufen. Falls die Schutzmaßnahmen wirken, sollte nach weiteren zwei Jahren Datennahme klar sein, ob CRESST wirklich WIMPs nachgewiesen hat oder nicht. Das Wettrennen um die Entdeckung der Dunklen Materie, an dem weltweit rund ein Dutzend

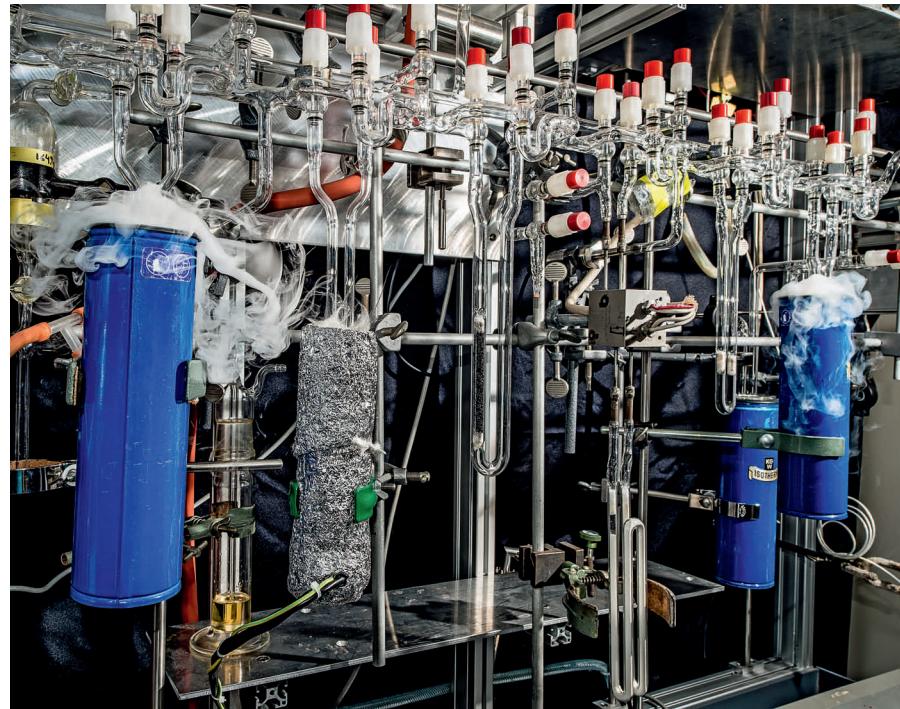
Gruppen teilnehmen, ist also in vollem Gange. Eine Lösung des Rätsels scheint erstmals zum Greifen nahe. Doch momentan sind die Ergebnisse noch widersprüchlich.

Zwei Gruppen in den USA und in Italien haben ebenfalls ein positives Resultat verkündet – allerdings in einem anderen Massenbereich als CRESST. Ih-



Im Reinraum: Bis zu 33 Detektoren müssen die Wissenschaftler im Gran-Sasso-Labor in ein CRESST-Modul einbauen. Ein Detektor wiederum besteht aus einem Calciumwolframat-Kristall, der sich im Innern eines hochreinen Kupfergehäuses befindet. Bei Eindringen eines Teilchens in den Kristall erwärmt sich dieser geringfügig, und es entsteht ein kurzer Lichtblitz. Beides wird als Signal gemessen.

Besprechung im kleinen Kreis: XENON100-Projektleiter Manfred Lindner (Mitte) diskutiert mit seinen beiden Mitarbeitern Teresa Marrodán Undagoitia und Hardy Simgen über den Aufbau eines Teststands für neu entwickelte, empfindliche Lichtsensoren (Photomultiplier). Diese müssen extrem rein sein und dürfen keine natürliche Radioaktivität enthalten, welche die Messung empfindlich stören würde. Am Max-Planck-Institut für Kernphysik steht die derzeit wohl weltweit empfindlichste Anlage zur Gasanalytik. Hier werden alle Bauteile auf Verunreinigungen geprüft, die bei dem XENON-Experiment zum Einsatz kommen.



nen allen widersprechen das ebenfalls im Gran-Sasso-Labor arbeitende Experiment XENON100 sowie ein amerikanischer Versuch. Bei XENON100 dienen 162 Kilogramm flüssiges Xenon als Detektormaterial. Wenn ein WIMP darin mit einem Atom zusammenstößt, erzeugt es einen Lichtblitz, den empfindliche Photodetektoren registrieren. Außerdem werden Elektronen frei, die über ein außen angelegtes elektrisches Feld an die Oberfläche gezogen und dort gemessen werden.

## EIN KRYPTONATOM UNTER EINER BILLION XENONATOMEN

Auch in diesem Experiment ist radioaktive Störstrahlung, insbesondere von Radon und Krypton, der größte Feind. Die Forscher beziehen ihr Xenon möglichst rein von weltweit wenigen Produzenten. Mit extremem Aufwand wird die Substanz dann weiter gereinigt. „Die Flüssigkeit enthält so wenige Verunreinigungen wie ein Kubikkilometer reines Wasser, in das man einmal hineinhustet“, veranschaulicht Manfred Lindner.

Das Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik bringt in diese Kooperation seine jahrzehntelange Erfahrung aus der Neutrino-Forschung ein. In dem Sonnenneutrino-Experiment GALLEX ging es einst darum, in einer großen Menge Gallium einige wenige, durch Neutrinos erzeugte Germaniumatome nachzuweisen. „Heute können wir ein Kryptonatom unter mehr als einer Billion Xenonatomen aufspüren“, sagt Hardy Simgen, der diese wohl weltweit empfindlichste Anlage zur Gasanalytik in- und auswendig kennt. „Im menschlichen Körper finden pro Sekunde durchschnittlich 8500 radioaktive Zerfälle statt. Wir

weisen in 100 Kilogramm Material weniger Zerfälle pro Jahr nach.“

Alle Materialien, die für das Experiment verwendet werden, gehen vorher durch diese Anlage. Jüngst gab es ein Problem mit neuen Lichtsensoren für das Nachfolgeprojekt mit einer Tonne Xenon. Sie waren, gemessen an den enormen Reinheitsanforderungen, zu radioaktiv, womit sie die Messung vollständig zerstören würden. Jetzt haben die Physiker in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma reinere Materialien ausgesucht, um die Anforderungen zu erfüllen.

Das Xenon befindet sich in einem ständigen Reinigungskreislauf – einer Art Dialyse, die immer wieder aufs Neue eindringendes Radon entfernt. In diesem Bereich bringen die Heidelberger Forscher große Erfahrung aus dem Sonnenneutrino-Experiment ein. Mit einer mobilen Radon-Extraktionsanlage testen sie die Reinigungseffizienz unter realistischen Bedingungen.

Und mit einem Trick ist es den Wissenschaftlern gelungen, XENON100 zu dem derzeit mit Abstand empfindlichsten aller WIMP-Experimente zu machen: Weil die Verunreinigungen von den Außenwänden in das Xenon eindringen, wählen die Physiker nur Ereignisse aus, die sich im inneren Bereich des Detektors ereignen. So verwenden sie für die WIMP-Suche nur das zentrale, besonders saubere Drittel des gesamten Volumens.

Auf diese Weise ließ sich die Anzahl der Störereignisse auf ein Minimum reduzieren. Deshalb erscheint ihr Ergebnis – nämlich kein signifikantes WIMP-Ereignis – sehr überzeugend. Wenn CRESST wirklich Dunkle-Materie-Teilchen nachgewiesen hätte, hätte XENON100 mehr als hundert Ereignisse messen müssen.

Manfred Lindner zieht aus der derzeitigen Situation die Schlussfolgerung: Eine Lösung wäre, dass zwei der drei Experimente einen unverstandenen Untergrund messen, während das andere tatsächlich WIMPs sieht. Diese müssten dann allerdings sehr ungewöhnliche Eigenschaften besitzen, sodass sie für

XENON100 unsichtbar bleiben. Ganz ausschließen lässt sich das nicht, weil etwa CRESST den Lichtblitz und die Wärmeentwicklung misst, die ein WIMP bei Kollision mit einem Atom im Detektor erzeugt. XENON100 hingegen misst den Lichtblitz und die erzeugte Ionisierungsrate. „Die andere Lösung mit weniger speziellen Annahmen ist, dass keines der bisher gesehenen Signale von WIMPs stammt“, sagt Lindner.

## ZWEIFEL AN DER GÜLTIGKEIT DES GRAVITATIONSGESETZES?

Beim XENON-Experiment geht die Entwicklung weiter. In Vorbereitung ist eine Erweiterung auf eine Tonne Xenon. Je größer der Detektor, desto mehr WIMP-Ereignisse können darin stattfinden. Allerdings wächst auch das Problem der Verschmutzung über die größere Oberfläche – und dadurch steigen die Anforderungen an die Reinheit der De-

tektrormaterialien und des Xenons. Hier können die Heidelberger Saubermann also ihr ganzes Know-how ausspielen. Ende 2014 soll die Anlage mit einer um einen weiteren Faktor 100 gesteigerten Sensitivität anlaufen und 2016 ein erstes Ergebnis liefern.

Bleiben die dunklen Teilchen unauflindbar, wird es für die plausibelste Erklärung der Dunklen Materie in Form von WIMPs eng. Man müsste dann ernsthafter über andere Partikel nachdenken. Falls die Dunkle Materie doch nicht existiert, könnte man an der Gültigkeit der Gravitationsgesetze zweifeln. Alternative Erklärungen gibt es seit Langem, aber sie können nicht alle astrophysikalischen Phänomene, für die man die Dunkle Materie postuliert, einheitlich konsistent erklären. Außerdem müsste man dann Einsteins Gravitationstheorie in einer Weise abändern, die, vorsichtig formuliert, sehr wenig motiviert erscheint. ▲

## AUF DEN PUNKT GEbracht

- Etwa 23 Prozent der insgesamt im Universum vorhandenen Materie bleiben astronomischen Instrumenten verborgen.
- Schon in den 1930er-Jahren schloss Fritz Zwicky aus Beobachtungen an Galaxienhaufen auf die Existenz der Dunklen Materie.
- Heute suchen Physiker in aller Welt mit speziellen Detektoren nach diesem rätselhaften Stoff, der sich in sogenannten WIMPs zeigen sollte.
- Weil die WIMPs mit Teilchen der normalen Materie kaum wechselwirken, ist ihr Nachweis überaus schwierig. Die bisherigen Messergebnisse widersprechen sich zum Teil und werden heiß diskutiert.

## GLOSSAR

**Galaxienhaufen:** Ansammlungen von bis zu mehreren Tausend Milchstraßensystemen (Galaxien), die durch die Schwerkraft aneinander gebunden sind.

**Gran-Sasso-Labor:** Der Gran-Sasso-Tunnel durchquert das Massiv des Gran Sasso d’Italia in den italienischen Abruzzen. Er ist nicht nur der längste zweiröhrlige Autobahntunnel Europas, sondern beherbergt in Nebenanlagen die Laboratori Nazionali del Gran Sasso, die weltweit größten unterirdischen Versuchslabors für Elementarteilchenphysik.

**Gravitationslinse:** Das von Albert Einstein vorausgesagte Phänomen, wonach Licht durch das Gravitationsfeld einer Masse abgelenkt wird wie durch eine optische Linse. Hinter diesem Effekt steckt im Weltall meist eine Galaxie oder ein Galaxienhaufen.

**Neutrinos:** Elektrisch neutrale Partikel mit winziger Masse. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik existieren drei Arten: das Elektron-Neutrino, das Myon-Neutrino und das Tau-Neutrino. Neutrinos wechselwirken kaum mit Materie, daher durchdringen sie nahezu ungehindert selbst große Schichtdicken – etwa die ganze Erde.