

# Physik im Untergrund

Im Gran-Sasso-Labor in den italienischen Abruzzen versuchen Physiker, einige der großen Fragen der Teilchenphysik zu beantworten.

Stefan Jorda

Mitten in dem zehn Kilometer langen Autobahntunnel der italienischen A24, zwischen Teramo und L'Aquila und rund hundert Kilometer von Rom entfernt, leuchten plötzlich orangefarbene Warnleuchten auf, die den fließenden Verkehr darauf vorbereiten sollen, dass unser Kleinbus abbremst. Dem Schild „INFN solo autorizzati“ folgend, biegen wir rechts in einen Seitenstollen ein und passieren eine Schranke sowie ein großes Stahltor. Als der Wagen an einer Kabine mit Sicherheitspersonal anhält, schließt sich das Tor wieder. Schlagartig verschwindet das Rauschen des Straßenverkehrs, Stille kehrt ein. Gemeinsam mit Technikern und Physikern, die der Kleinbus an ihren Arbeitsplatz gebracht hat, befinde ich mich im größten Untergrundlabor der Welt, dem vor 30 Jahren gegründeten Laboratori Nazionali del Gran Sasso des italienischen Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Hier unten, abgeschirmt von der kosmischen Strahlung durch 1400 Meter dickes Gestein der fast 3000 Meter hohen Abruzzen, jagen internationale Kollaborationen von Physikern äußerst flüchtige Teilchen wie Neutrinos oder versuchen, extrem seltene Reaktionen nachzuweisen. Damit tasten sie sich in die Terra incognita jenseits des Standardmodells vor. Ihr Ziel: einige der großen Fragen der Teilchenphysik zu beantworten. Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen? Welche anderen Eigenschaften haben die drei bekannten Neutrinoarten? Gibt es Dunkle Materie und wenn ja, woraus besteht sie?

Nach einer Ausweiskontrolle und mit dem obligatorischen Helm ausgestattet, geht es nun zu Fuß durch einen befahrbaren einspurigen Tunnel weiter. An den Wänden rinnt Wasser, Moose



Von der Autobahn führen die Verbindungstunnel des Gran-Sasso-Labors

weg. Der rechte Tunnel ist der Zugang zu den drei großen Hallen.

scheinen sich hier wohl zu fühlen. Das ganze Jahr über liegt die Temperatur bei 6 bis 7 Grad Celsius, die Luftfeuchtigkeit ist hoch. „Früher plätscherte das Wasser links und rechts der Fahrbahn“, erinnert sich Matthias Junker, einer der 80 festen Mitarbeiter des Labors. Aber nachdem Mitte 2002 fünfzig Liter einer giftigen und stark riechenden Flüssigkeit aus dem Labor in einen Gebirgsbach gelangt waren, wurde der Boden versiegelt und das gesamte Labor erhielt eine Drainage. Nach wenigen Gehminuten öffnet Junker eine Tür, und wir stehen in einer riesigen Experimentierhalle, die so lang ist wie ein Fußballfeld und so hoch wie ein mehrstöckiges Haus. Hier ist es warm und trocken, durch dicke Rohre entlang des Tunnels rauscht Frischluft von draußen herein. Auf diese und zwei weitere, gleich große Hallen sowie die Verbindungstunnel dazwischen verteilen sich rund ein Dutzend Experimente, einige bereits seit Jahren in Betrieb, andere noch im Aufbau.

Eines davon ist das erst im vergangenen November offiziell eingeweihte GERDA-Experiment, das der Frage nachgeht, ob Neutrinos

ihre eigenen Antiteilchen sind. Falls dies der Fall ist, sollte in einigen ausgewählten Isotopen ein seltener radioaktiver Zerfall auftreten, der neutrinolose doppelte Betazerfall. GERDA sucht danach in Germanium-76, das in ein Selen-Isotop übergehen würde.<sup>1)</sup> Gleichzeitig würden zwei Elektronen emittiert, deren Energie – da keine Neutrinos entstehen – exakt festgelegt ist. Nach einem solchen Elektronenpaar gilt es also zu suchen. Der große Haken daran ist, dass dieser Zerfall äußerst unwahrscheinlich ist: Bisherige Experimente und Rechnungen deuten darauf hin, dass die Halbwertszeit dafür größer ist als eine Milliarde mal eine Million mal das Alter des Universums, unvorstellbare  $10^{25}$  Jahre. Das bedeutet, dass in einem Kilogramm Germanium nur alle 20 Jahre mit einem Zerfall zu rechnen ist.

Was motiviert dennoch seit Jahrzehnten Physiker, nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall zu suchen? „Würde man solch ein extrem seltenes Ereignis nachweisen, hätte dies eine sehr hohe Aussagekraft und enorme Implikationen“, begründet Man-

1) Der einfache Betazerfall zu Arsen ist für dieses Isotop wegen der Energieerhaltung verboten.



LNGS-INFN

nur eine unspektakuläre, mehrere Meter hohe graue Tonne zu sehen. Dieser wassergefüllte Tank von zehn Metern Durchmesser schirmt Gammaquanten ab; die wenigen Myonen verraten sich darin durch ihr Cherenkov-Licht. In dem Tank befindet sich ein zehn Kubikmeter fassender Kryostat mit flüssigem Argon, das Germaniumkristalle von der Größe einer Getränkedose auf fast 200 Grad unter null abkühlt und abschirmt.

Eine blaue Stahltreppe führt auf den Tank zu einem weißen Container. Matthias Junker verteilt Kittel, Überschuhe und Kopfhäuben, bevor er mich durch eine Luftschleuse in diesen Reinraum lässt. Hier werden die mit Germanium-76 angereicherten Einkristalle zu einer Art Mobile montiert und in den Kryostaten abgelassen. Jedes Staubpartikel, das daran haftet, wäre ebenso eine Quelle für Störsignale wie der Schweiß eines Fingerabdrucks. Auch alle Materialien für den Detektor sind sorgfältig ausgewählt. So ist Stahl immer in geringem Maße durch Uran und Thorium verunreinigt. Hinzu kommt eine künstliche Kontamination durch Kobalt-60, das als Marker in der Stahlerzeugung anzeigt, wenn die Schamottschicht in einem Hochofen erneuert werden muss. „Für den Kryostaten haben wir daher Proben von einzelnen Stahlchar-

gen genommen“, erläutert Junker, „und dann dem Hersteller genau gesagt, aus welcher Charge er welche Komponente bauen soll, damit das Material, das dem Germanium am nächsten kommt, die geringste Kontamination aufweist.“

Findet in einem der Germanium-Kristalle tatsächlich der gesuchte Zerfall statt, lösen die beiden Elektronen einen Ladungsimpuls aus, der sich elektronisch erfassen lässt. Sollte GERDA innerhalb von einem Jahr keinen Zerfall nachweisen, dann müsste die Halbwertszeit so groß sein, dass eine fast zehn Jahre alte Kontroverse vom Tisch wäre: Damals hatten Physiker eines Vorgängerexperiments behauptet, den neutrinolosen doppelten Betazerfall bereits gesehen zu haben. Aber auch bei einem Nachweis werden erst weitere unabhängige Experimente alle Zweifler überzeugen. „Man braucht auf jeden Fall zwei verschiedene Isotope“, ist Lindner überzeugt und ergänzt: „Außerdem hilft der sportliche Wettbewerb. Wenn man Konkurrenten hat, strengen sich alle mehr an.“

Einer der Konkurrenten begibt sich quasi um die Ecke in die Startlöcher. Eine Sirene ertönt und ein gelbes Warnlicht leuchtet auf, als sich der Kran an der Hallendecke in Bewegung setzt, um einen Laster zu entladen. Im Lärm eines Presslufthammers gehen einige

Unter den fast 3000 Meter hohen Gipfeln der Abruzzen befinden sich 1400 Meter tief im Fels die drei Hallen und die Verbindungstunnel des Gran-Sasso-Labors.

fred Lindner, Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und deutsches Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats am Gran Sasso. Diese Reaktion würde eine bislang grundlegende Symmetrie verletzen – die Erhaltung der Leptonenzahl<sup>2)</sup> –, und damit das Standardmodell der Teilchenphysik erschüttern. Gleichzeitig würde dies theoretische Szenarien nahe legen, die das Vorherrschen der Materie gegenüber der Antimaterie im Universum erklären könnten.

## Eine Kakophonie der Störsignale

Doch wie könnte sich solch ein seltener Zerfall überhaupt zweifelsfrei nachweisen lassen? „Bei allen Experimenten ist es ganz, ganz wichtig, Hintergrundsignale zu verstehen und auszuschließen“, sagt Manfred Lindner, der neben GERDA auch Mitglied weiterer Kollaborationen ist. So schirmt das Abruzzen-Gestein zwar die kosmische Strahlung ab, von einer Million Myonen an der Erdoberfläche dringt aber eines bis in das Labor vor. Auch radioaktive Zerfälle im Gestein selbst tragen zur Kakophonie der Störsignale bei, die den „reinen Ton“ des gesuchten Zerfalls überdecken. Daher ist von GERDA zunächst



Markus Knapp

Die Germanium-Kristalle, mit denen GERDA den neutrinolosen doppelten Betazerfall nachweisen soll, befinden sich im Zentrum des Kryostaten in der

mittleren Säule. Der gesamte Raum ist inzwischen mit Wasser gefüllt, das der Abschirmung sowie dem Nachweis von Störstrahlung dient.

2) Zu den Leptonen gehören u. a. Elektronen und Neutrinos. Elektronen tragen die Leptonenzahl +1, Antineutrinos die Zahl -1.

## Experimente im Gran-Sasso-Labor mit deutscher Beteiligung

Name	Untersuchungsgegenstand	Institutionen
Borexino	Sonnenneutrinos	MPI für Kernphysik, Heidelberg TU München
COBRA	Neutrinoloser doppelter Beta-zerfall mit Cadmium-116	TU Dresden, TU Dortmund, Uni Freiburg, Uni Hamburg, Uni Erlangen-Nürnberg
CRESST	Dunkle Materie	MPI für Physik, München TU München Uni Tübingen
GERDA	Neutrinoloser doppelter Beta-zerfall mit Germanium-76	MPI für Kernphysik, Heidelberg MPI für Physik, München Uni Tübingen TU Dresden, TU München
LUNA	Nukleare Astrophysik	Ruhr-Uni Bochum Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
OPERA	Neutrinooszillationen	Uni Hamburg Uni Münster Uni Rostock
XENON	Dunkle Materie	MPI für Kernphysik, Heidelberg Uni Mainz Uni Münster

Erläuterungen unter. Hier entsteht mit CUORE ein Detektor, der den doppelten Betazerfall in Tellur-130 nachweisen soll.<sup>3)</sup> Das Material für die Abschirmung verdankt diese Kollaboration zum Teil den „alten Römern“: Dank guter Verbindungen des INFN zum Nationalen Archäologischen Museum in Sardinien hat sie kürzlich über hundert antike Bleibarren erhalten, die vor 2000 Jahren mit einem römischen Schiff vor Sardinien versanken. Da die ohnehin geringe natürliche Radioaktivität von Blei-210 unter Wasser inzwischen um einen Faktor 100 000 abgeklungen ist, gibt es weltweit kein strahlungsärmeres Blei.

Neben der grundlegenden Frage nach der Erhaltung der Leptonenzahl erlauben die Experimente zum doppelten Betazerfall auch, die Masse des Neutrinos zu bestimmen – denn der neutrinolose Zerfall setzt eine endliche Masse voraus. Diese hängt eng mit den Neutrinooszillationen zusammen,<sup>4)</sup> die inzwischen zweifelsfrei nachgewiesen sind. Viele der damit zusammenhängenden Parameter sind aber noch weitgehend unbekannt und daher Ziel von Experimenten weltweit. Im Gran Sasso-Labor gehören dazu unter anderem OPERA und Borexino. Um zu diesen Detektoren zu gelangen, verlassen wir Halle A und gehen durch einen Verbindungstunnel zu Halle C. Nichts deutet darauf hin, dass wir uns so tief unter der Erde befinden. Für die Wissenschaftler, darunter

auch viele Doktoranden, ist das Labor ein ganz normaler Arbeitsplatz, auch wenn sie aus Sicherheitsgründen immer nur zu zweit am Detektor arbeiten. Sind die Detektoren in Betrieb, stehen vor Ort u. a. Kalibrationsmessungen oder Wartungsarbeiten an. Die eigentlichen Messdaten werden in die Labor- und Bürogebäude am westlichen Tunnelausgang übertragen, von wo aus sie über das Internet weltweit zugänglich sind.

730 Kilometer vom OPERA-Detektor entfernt erzeugt das CERN in Genf seit Mitte 2008 einen intensiven Strahl von Myon-Neutrinos, der auf das Untergrundlabor gerichtet ist. Auf ihrem knapp drei Millisekunden langen Flug können sich Myon-Neutrinos aufgrund der Oszillationen in Tau-Neutrinos umwandeln, die der zwanzig Meter lange Detektor nachweisen soll. Im Gegensatz zu den meisten anderen Experimenten im Gran Sasso benötigt OPERA keine äußere Abschirmung, sodass sein schichtweiser Aufbau aus fast 60 schwarzen „Wänden“ mit Zwischenlagen aus elektronischen Teilchendetektoren direkt sichtbar ist. Diese Wände bestehen aus insgesamt 150 000 „Backsteinen“. Matthias Junker gibt mir einen davon in die Hand. Er ist etwa halb so groß wie ein Milchkarton, wiegt aber acht Kilogramm. Kein Wunder, denn jeder Stein ist ein Sandwich aus fast 60 Bleiplatten mit dazwischen liegenden Filmen. „Nur klassische Filmemulsionen sind in der Lage, eine Ortsauflö-

sung von einem Mikrometer zu erreichen“, erklärt Junker diese „altmodisch“ erscheinende Technik. Die Auflösung ist notwendig, denn falls ein Tau-Neutrino ein Bleiatom trifft, kann der schwere Bruder des Elektrons entstehen, ein Tau-Lepton, das unmittelbar darauf wieder zerfällt und charakteristische Teilchenspuren hinterlässt. Mithilfe der elektronischen Detektoren lässt sich berechnen, welcher „Backstein“ das Neutrino gestoppt hat. Dann surrt ein Roboter los, der ähnlich wie in einem Hochregallager den Stein aus der betreffenden Wand holt. Die Analyse der Filmemulsionen geschieht mithilfe von automatisierten Mikroskopen in einem Laborgebäude draußen. Seit dem Beginn der Messungen haben die Physiker insgesamt 1000 Ereignisse aufgezeichnet, pro Tag 20 bis 30, die jedoch fast alle auf Wechselwirkungen mit Myon-Neutrinos zurückgingen. Ein einziges ließ sich bislang zweifelsfrei einem Tau-Neutrino zuordnen.

Bei OPERA kennen die Physiker die Eigenschaften der Neutrinoquelle genau. Einige ihrer Kollegen weisen hingegen Neutrinos nach,

3) Neben dem neutrino-losen doppelten Betazerfall gibt es auch den Zerfall durch neutrino-losen doppelten Elektroneneinfang. Kürzlich hat eine deutsch-russische Kollaboration gezeigt, dass hierfür Gadolinium-152 das bisher aussichtsreichste Isotop ist: S. Eliseev et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 052504 (2011)

4) Darunter versteht man die Umwandlung einer Neutrinospezies in eine andere, also z. B. eines Elektron- in ein Myon-Neutrino.



Manfred Lindner, Matthias Junker und Stefan Jorda (von rechts) im Reinraum des GERDA-Experiments.



Der OPERA-Detektor enthält 150 000 „Backsteine“ aus Bleifolien und Filmemulsionen, um Tau-Neutrinos nach-

zuweisen. Die Steine lassen sich mit dem Roboter an den beiden orangenen, senkrechten Stahlträgern entnehmen.

um mehr über deren Quellen zu lernen. Sie betreiben damit Astronomie im Untergrund und sind dabei ungleich erfolgreicher als „die Verrückten, die in Minen gehen, um die Sterne zu beobachten“. So hatte der griechische Philosoph Plinius der Zweite in der Antike Astronomen genannt, die vom Boden tiefer Schächte aus auch tagsüber Sterne und Planeten beobachten wollten. In den Tiefen des Gran-Sasso-Labors wartet der über 2000 Tonnen schwere Detektor LVD unter anderem auf Neutrinos aus einer Supernova-Explosion – einer „zweiten“ SN1987A –, während Borexino seit 2007 Neutrinos aus der Sonne nachweist, um die Fusionsreaktionen in der Sonne besser zu verstehen. In ihr entstehen ausschließlich Elektron-Neutrinos, die sich jedoch auf ihrem achtmütigen Flug zur Erde in andere Spezies umwandeln können und damit dem Nachweis entgehen. Von außen sieht Borexino ähnlich unspektakulär aus wie GERDA, an einer Posterwand erklärt Manfred Lindner den Aufbau: Wie bei den russischen Matroschkas schirmt zunächst eine äußere Schale aus

über 2000 Kubikmeter ultrareinem Wasser eine mittlere Schale ab, die wiederum das Herz des Detektors mit 300 Tonnen hochreinem Flüssigszintillator umgibt. Überträgt nun ein Neutrino durch elastische Streuung Energie auf ein Elektron des Szintillators, so entsteht ein schwacher Lichtblitz, den einige der über 2000 Photomultiplier registrieren. Auch bei diesem Detektor liegt die Herausforderung darin, mit sehr reinen Materialien zu arbeiten und den Untergrund zu reduzieren. „Dabei ist es hilfreich, dass Italien keine Kernkraftwerke hat“, sagt Lindner, „wenn ein atomgetriebener Flugzeugträger die Adria herauf käme, würde Borexino ihn bemerken.“ Im Gegensatz zu früheren Experimenten kann Borexino erstmals Neutrinos geringer Energie in Echtzeit nachweisen, die in der Sonne entstehen, wenn Beryllium-7 ein Elektron einfängt und sich in Lithium-7 umwandelt. Derzeit weist der Detektor etwa 150 Be-Neutrinos pro Tag nach; diese gilt es aus 30 Ereignissen pro Sekunde herauszufischen.

## Dunkel und scheu

Der zweite Forschungsschwerpunkt des Gran-Sasso-Labors liegt auf der Suche nach Dunkler Materie. Die populärsten Kandidaten für diese rätselhafte Materieform sind massereiche, schwach wechselwirkende Teilchen, sog. WIMPs. Besonders attraktiv daran ist, dass man unter recht allgemeinen Annahmen die passende Größenordnung an Dunkler Materie erhält, um heutige Beobachtungen zu erklären. „Diese Rechnung liefert wirklich ein Aha-Erlebnis“, erklärt Lindner begeistert. Im Gegensatz zu diesem „WIMP miracle“ würden Theorien mit anderen Dunkle-Materie-Kandidaten eine Feinabstimmung von Parametern auf viele Dezimalstellen genau erfordern. Ähnlich wie Neutrinos sind aber auch WIMPs, falls sie existieren, ausgesprochen scheue Teilchen, die sich ausschließlich über die schwache Wechselwirkung nachweisen lassen. Daher gilt bei allen Detektoren: Größer ist besser. Der CRESST-Detektor füllt ein dreigeschossiges Gebäude, das hinter tonnenschweren Abschirmungen aus Blei, Kupfer und Polyethylen würfelförmige Kalziumwolframat-Kristalle enthält, die auf 10 mK gekühlt werden. Falls ein WIMP mit einem Atomkern zusammenstößt, überträgt es Energie und erwärmt den Kristall um wenige Mikrokkelvin. Als Thermometer dienen Streifen aus Wolfram, das sich bei 10 mK genau am Phasenübergang zwischen Supraleitung und Normalleitung befindet und daher sehr empfindlich auf kleinste Temperaturänderungen reagiert. Darüber hinaus wird auch Szintillationslicht in den Kristallen nachgewiesen. Seit Mitte 2009 laufen die Messungen bei CRESST. „Wir sehen etwas“, verrät Wolfgang Seidel vom Max-Planck-Institut für Physik in München, „claimen aber

noch nicht, dass das wirklich ein Signal ist.“

Seidels italienische Kollegen von der DAMA-Kollaboration, deren Detektor nur durch ein Tor und wenige Meter von CRESST getrennt ist, sind sich ihrer Sache hingegen sicher: Sie behaupten bereits seit zehn Jahren, WIMPs nachgewiesen zu haben. Weltweit gibt es aber weitere Experimente, die bei den entsprechenden Parametern nichts sehen oder behaupten, Signale bei anderen Parametern detektiert zu haben. „Die Situation ist derzeit sehr spannend“, fasst Manfred Lindner zusammen, „denn einerseits gibt es Zweifel, ob jedes Experiment wirklich den Hintergrund versteht, während man sich andererseits mit den wenigen Daten Theorien ausdenken kann, die genau diese widersprüchlichen Daten erklären.“ Daher werden nur weitere, unabhängige Experimente Klarheit schaffen können.

Große Hoffnungen liegen dabei auf XENON, einem Detektor, der WIMPs in ultrareinem flüssigem Xenon nachweisen soll. Im Gegensatz zu den riesigen Detektoren in den großen Hallen hat XENON bislang nur die Abmessungen eines Baucontainers und steht etwas verloren in einem Verbindungstunnel. Demnächst sollen die Daten von hundert Tagen Messzeit veröffentlicht werden. WIMPs hat der Detektor bislang keine gesehen – dies aber besser als alle anderen Experimente zuvor: Dank äußerst radio-purer Materialien erreicht der Detektor den geringsten Hintergrund aller Dunkle-Materie-Detektoren, ein Faktor 1000 besser als DAMA.

Aufgrund der guten bisherigen Erfahrungen mit XENON plant die Kollaboration nun, den Detektor um einen Faktor 15 zu vergrößern. In der mittleren der drei Hallen ist Platz für den dann ebenfalls haushohen Detektor, genannt XENONIT wegen der einen Tonne flüssigen Xenons. Er wird voraussichtlich ab 2014 in der Lage sein, den größten Teil des erwarteten Parameterbereichs von Masse und Wirkungsquerschnitt der WIMPs abzugrasen, der im Rahmen der sog. minimalen supersymme-

trischen Erweiterung des Standardmodells möglich ist. Angesichts dieses und anderer Detektoren und aufgrund der Querverbindungen zu Messungen am Large Hadron Collider und anderen astrophysikalischen Experimenten ist Manfred Lindner sehr zuversichtlich, dass es innerhalb dieses Jahrzehnts gelingen wird, Dunkle Materie in Form von WIMPs zweifelsfrei nachzuweisen. Doch bis XENONIT dazu beitragen kann, müssen noch viele LKWs tonnenweise Baumaterial

und Detektorteile durch den Tunnel anliefern, durch den wir zurück zum Eingang gehen. Dort wartet bereits der Shuttle-Bus, mit dem einige Techniker und Arbeiter in die Mittagspause fahren. An der Ausfahrt öffnet der Sicherheitsmann das Tor, unser Bus fädelt sich in den fließenden Verkehr ein. Kaum einer der Vorbeifahrenden dürfte ahnen, dass wenige Meter jenseits der Tunnelröhre Physikerinnen und Physiker versuchen, einige der größten Rätsel der Physik zu lösen.