

Link

<http://borex.lngs.infn.it/>

Borexino wirkt wie eine Zauberkegel: Eine 8,5 Meter große, durchsichtige Blase aus Nylonfolie, die mit 300 Tonnen einer exotischen Flüssigkeit gefüllt ist und tief unter der Erde in einem Stollen unter den Abruzzen liegt. Hier wollen Forscher Neutrinos einfangen

Foto: Borexino Kollaboration



Überall – und kaum zu fassen

Forscher der TUM machen tief unter der Erde Jagd auf Neutrinos.
Die scheuen Teilchen sollen dabei helfen, die letzten Rätsel der Natur zu lösen



Eine Stahlkugel umgibt und schützt die Nylonblase (großes Bild). Und so sieht die Stahlsphäre von innen aus: 2 200 Messgeräte in Glas-
kugeln sind auf ihrer Innenseite montiert (rechts oben). Und so sehen die Anschlussstutzen für die Messgeräte aus (rechts Mitte). Beim
Einbau – hier die Montage der Glasfaserkabel, die zu den Messgeräten führen – sind extreme Sauberkeit und Präzision nötig (rechts unten)

Foto: LINGS-IFNF

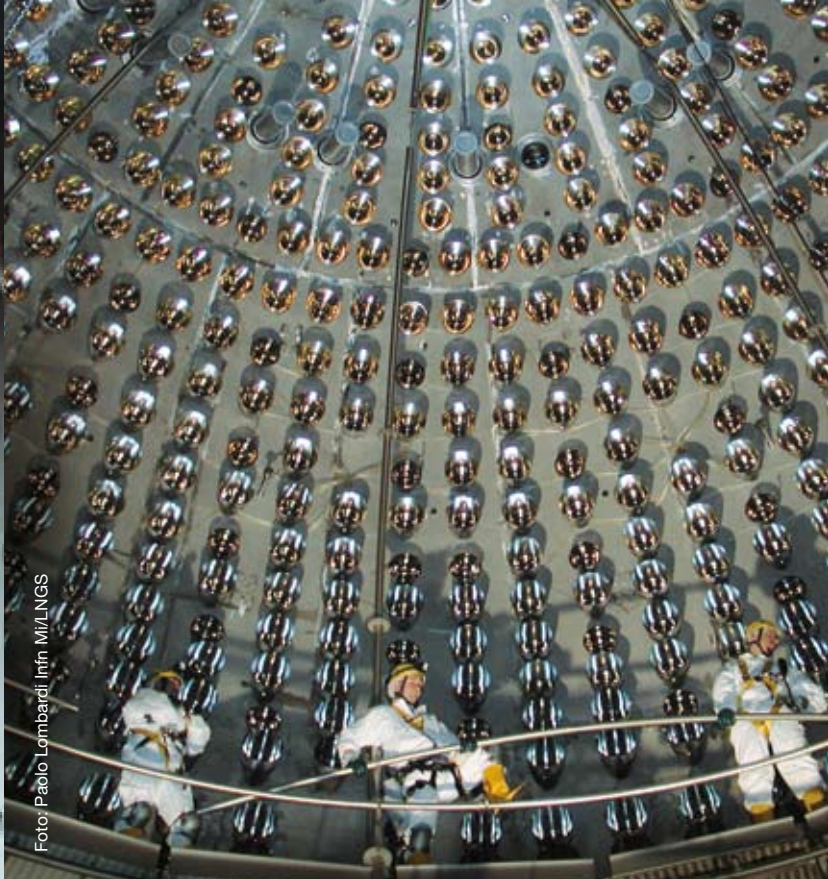


Foto: Paolo Lombardi / Infn Mi/LNGS



Foto: Boexino Kollaboration



Foto: INFN

Neutrino-Physik

Edelstahlkugel, \varnothing : 13,7 m

Radon Konvektionssperre

Nylonball, \varnothing : 8,5 m

2 240 8" Photomultiplier

Detektionsvolumen (100 Tonnen)

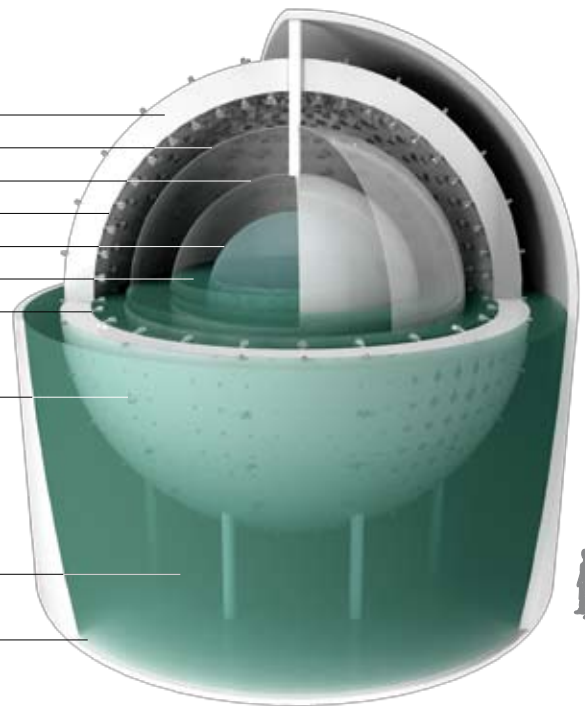
Szintillator (300 Tonnen)

Lichtsammler

208 PM's als Myon-Detektor

2 500 Tonnen hochreines, deionisiertes Wasser

Wassertank aus Edelstahl, \varnothing : 18 m



Gratik: edlundsepp

Früher blieb der Physiker in der Regel in seinem Labor und machte dort Experimente. Lediglich die Astronomen schauten mit ihren Teleskopen hinaus in den Nachthimmel. Heute hingegen suchen Forscher die ausgefallensten Stellen der Welt auf, um ungestört zu arbeiten. Nicht etwa, weil Paparazzi sie belästigen oder Kollegen spionieren, sondern weil sie bei ihren Messungen unbehelligt bleiben wollen von Strahlung und Teilchen.

Manche Wissenschaftler steigen auf die höchsten Berge, um dem Lichtsmog zu entkommen; oder sie schicken ihre Instrumente gar mit Satelliten auf eine Erdumlaufbahn. Andere wiederum flüchten in die Antarktis, um dort im sauberen Eis zu forschen, wieder andere verziehen sich unter die Erde, etwa in ehemalige Bergwerke, und bauen dort erstaunliche Gebilde auf.

Eines davon heißt Borexino. Es ist eine 8,5 Meter große, durchsichtige Kugel aus Nylonfolie, die mit 300 Tonnen einer exotischen Flüssigkeit gefüllt ist und tief unter der Erde in einem Stollen unter den Abruzzern liegt, im italienischen Gran-Sasso-Labor, 120 Kilometer nordöstlich von Rom. Hier unten wollen Forscher, so seltsam das klingen mag, herausfinden, wie die Sonne funktioniert. Dabei machen sie sich zunutze, dass unser Zentralgestirn nicht nur Licht und Wärme zur Erde schickt, sondern auch eine ununterbrochene Flut winzigster Elementarteilchen, so genannter Neutrinos. Sie sind extrem leicht, haben keine elektrische Ladung und fliegen fast

mit Lichtgeschwindigkeit. Aus diesen Gründen können sie auch Materie durchdringen und sind – obwohl allgegenwärtig – nur sehr schwer zu fassen. Alle Neutrino-Detektoren sind deshalb sehr groß. Denn je mehr Masse die winzigen Teilchen durchlaufen müssen, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass doch einmal eines von ihnen mit einem Molekül zusammenstößt.

Die TUM – vom Start an mit dabei

Borexino ist der jüngste der großen Neutrino-Detektoren auf der Welt und der modernste. Rund 80 Forscher aus Europa und den USA arbeiten dort, und Physiker der TUM sind von Anfang an dabei. Sie haben mittlerweile knapp fünf Millionen Euro plus Personalkosten dafür ausgegeben. Professor Lothar Oberauer und sein Kollege Franz von Feilitzsch befassen sich schon lange mit Astroteilchenphysik, diesem aufregenden Zweig der Physik, der das Allergrößte mit dem Allerkleinsten in einer Disziplin verbindet.

„Seit der Nobelpreisträger Rudolf Mößbauer Ende der siebziger Jahre mit Neutrino-Experimenten begonnen hat, führen wir diese Tradition weiter“, sagt Oberauer, „zumal sich dieses Gebiet zu einem der spannendsten in der modernen Physik entwickelt hat.“ Das Hauptengagement des Lehrstuhls gilt heute Borexino, das bereits bei seinen ersten Messungen von Mai bis August 2007 einen grandiosen Erfolg brachte. Zur Vorgeschichte: Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker ent-

deckten zwischen 1937 und 1939, dass die Sonne mittels Kernfusion unter unvorstellbar hohen Temperaturen und Drücken in einem komplizierten Zyklus ihre Energie erzeugt. Seitdem wissen wir, bei welchen Prozessen dort Neutrinos entstehen: zunächst bei der Verschmelzung von zwei Wasserstoffkernen zu schwerem Wasserstoff und in späteren Schritten beim radioaktiven Zerfall von Beryllium zu Bor und von Beryllium zu Lithium. Jedes dieser Neutrinos hat eine ganz charakteristische Energie, und damit lässt sich jeweils unterscheiden, wie es entstanden ist.

70 000 000 000 Neutrinos pro Sekunde pro cm²

Die Teilchen fliegen aus dem Sonneninneren in alle Richtungen des Weltraums. Selbst auf der 150 Millionen Kilometer entfernten Erde durchqueren noch fast 70 Milliarden Sonnenneutrinos pro Sekunde jeden Quadratzentimeter, und zwar unabhängig von der Tageszeit: Wegen ihres großen Durchdringungsvermögens erreichen sie uns sogar nachts, von unten durch die Erde. Raymond Davis jr. und John N. Bahcall gelang es 1968, erstmals experimentell nachzuweisen, dass tatsächlich Neutrinos von der Sonne kommen. „Heute geht es darum, die Details zu verstehen“, erklärt Professor Oberauer. „In der Sonne gibt es die verschiedenen Zyklen und Unterzyklen, und bei jedem entstehen Neutrinos mit einer anderen Energie.

Bisher konnte man diese nicht unterscheiden. Aber Borexino kann die Energie der Neutrinos messen, und so können wir auch quantitative Angaben über die Pro-

zesse im Sonneninneren machen.“ Vor allem Neutrinos, die eine besonders niedrige Energie haben, kann das Experiment herausfiltern.

1 300 Tonnen Pseudocumol für Neutronenblitz

Dazu ist die spektakuläre Nylonkugel nötig. Sie ist gefüllt mit der Substanz Pseudocumol – chemisch betrachtet bestehen ihre Moleküle aus einem Benzolring mit drei Methylgruppen. Es handelt sich dabei um ein giftiges Zwischenprodukt, das bei der Herstellung von Farben oder Waschmitteln anfällt. Diese chemische Verbindung hat die Eigenschaft, dass Neutrinos aus ihren Molekülen ein Elektron herausschlagen können. Dieses stößt dann mit jeweils rund 100 000 weiteren Molekülen in der näheren Nachbarschaft zusammen und regt sie zum Leuchten an. Man nennt dieses Phänomen Szintillation. Man kann es mit Messgeräten registrieren, und aus der Intensität der winzigen Lichtblitze zieht man Rückschlüsse auf die Energie des Neutrinos.

Damit man diese Lichtblitze, die innerhalb der Flüssigkeit entstehen, auch von außen sehen und registrieren kann, müssen sowohl das Medium als auch die Hülle transparent sein. Deshalb wählte man eine Nylonfolie, ein Zehntel Millimeter dünn. Da sie aber nicht 300 Tonnen Flüssigkeit halten kann, ohne zu platzen, haben die Forscher das Gebilde mit einer weiteren, 1 000 Tonnen schweren Flüssigkeitsschicht als Gegengewicht umgeben. Es handelt sich auch hier um Pseudocumol, diesmal aber versetzt mit einem Zusatz, der verhindert, dass dort außen ebenfalls Szintillationen entstehen, ▷

An der Princeton University wurden die Nylonkugeln vor ihrem Einsatz im Berg getestet (links). Die Borexinokugel aus rostfreiem Spezialstahl vor der Installation (rechts)



Fotos: INELV, Princeton University (links), Borexino Kollaboration (rechts)

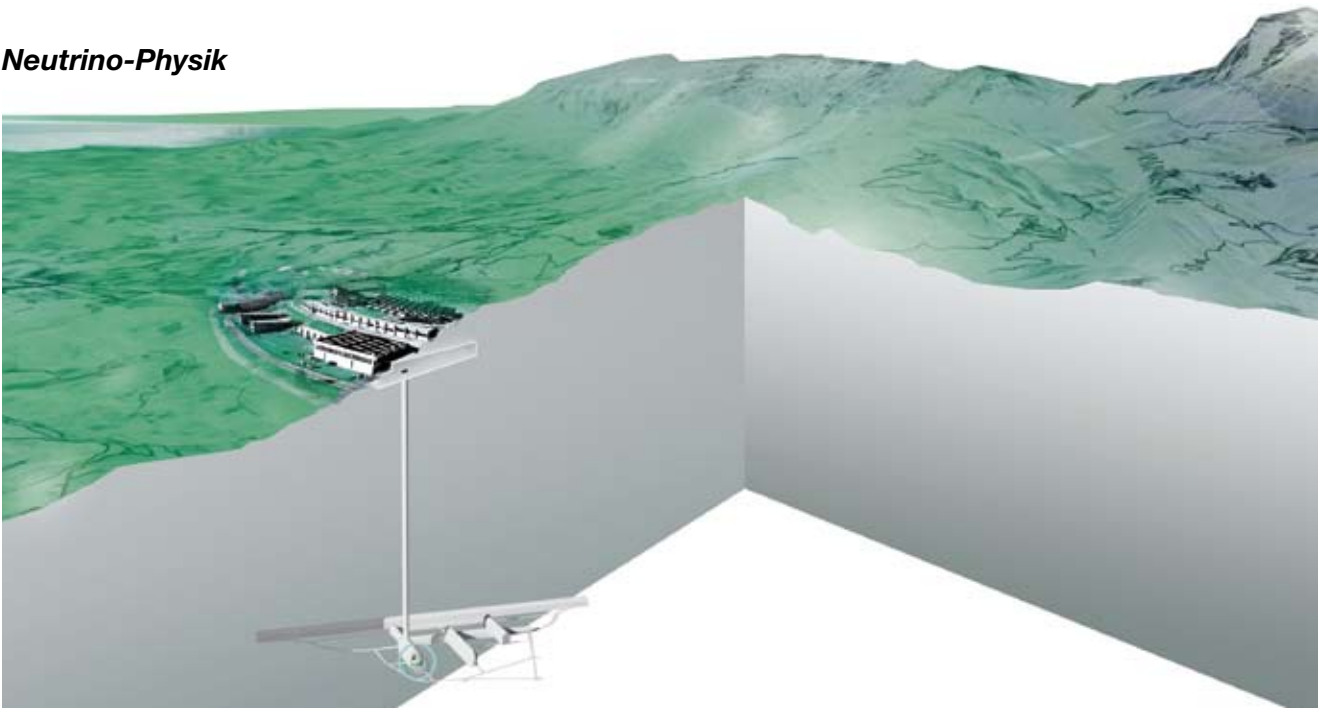


Abbildung: edlundsepp

Schemaplan des italienischen Gran-Sasso-Labors: Es liegt 120 Kilometer nordöstlich von Rom in den Abruzzen, ganz in der Nähe des höchsten Berges des Italienischen Stiefels, des Gran Sasso. Im Stollen des aufgelassenen Bergwerks ganz rechts befindet sich Borexino

Natürliche Neutrinoquellen

Der Urknall hat vor 13,7 Milliarden Jahren alle Arten von Neutrinos erzeugt; diese Urknallneutrinos konnten bisher noch nicht experimentell nachgewiesen werden.

Die Sonne und alle Sterne senden Elektron-Neutrinos aus; sie stammen aus den Fusionsreaktionen.

Supernova-Explosionen senden alle Arten und Antineutrinos aus: sie werden im wesentlichen thermisch erzeugt.

Die Erde sendet Elektron-Antineutrinos aus; sie kommen aus den Betazerfällen von Uran, Kalium und Thorium.

Atmosphäre: Elektron-Myonneutrinos und deren Antineutrinos; aus Reaktionen hochenergetischer Protonen der kosmischen Strahlung in den obersten Schichten unserer Atmosphäre.

Künstliche Neutrinoquellen

Beschleuniger: Heutzutage können dort alle Arten in Kollisionen von energetischen geladenen Teilchen produziert werden.

Kernreaktoren senden Elektron-Antineutrinos aus; sie kommen aus den Betazerfällen der Spaltprodukte.

Bis auf den Urknall sind alle Quellen experimentell verifiziert und werden heutzutage auch in der Neutrinforschung verwendet. Dazu kann man zum einen die Eigenschaften von Neutrinos messen – wichtig für die Teilchenphysik.

Oder man nützt die Neutrinos als Sonden: Damit können wir zum Beispiel die Fusionsreaktionen in der Sonne besser verstehen als bisher – wichtig für die Astrophysik.

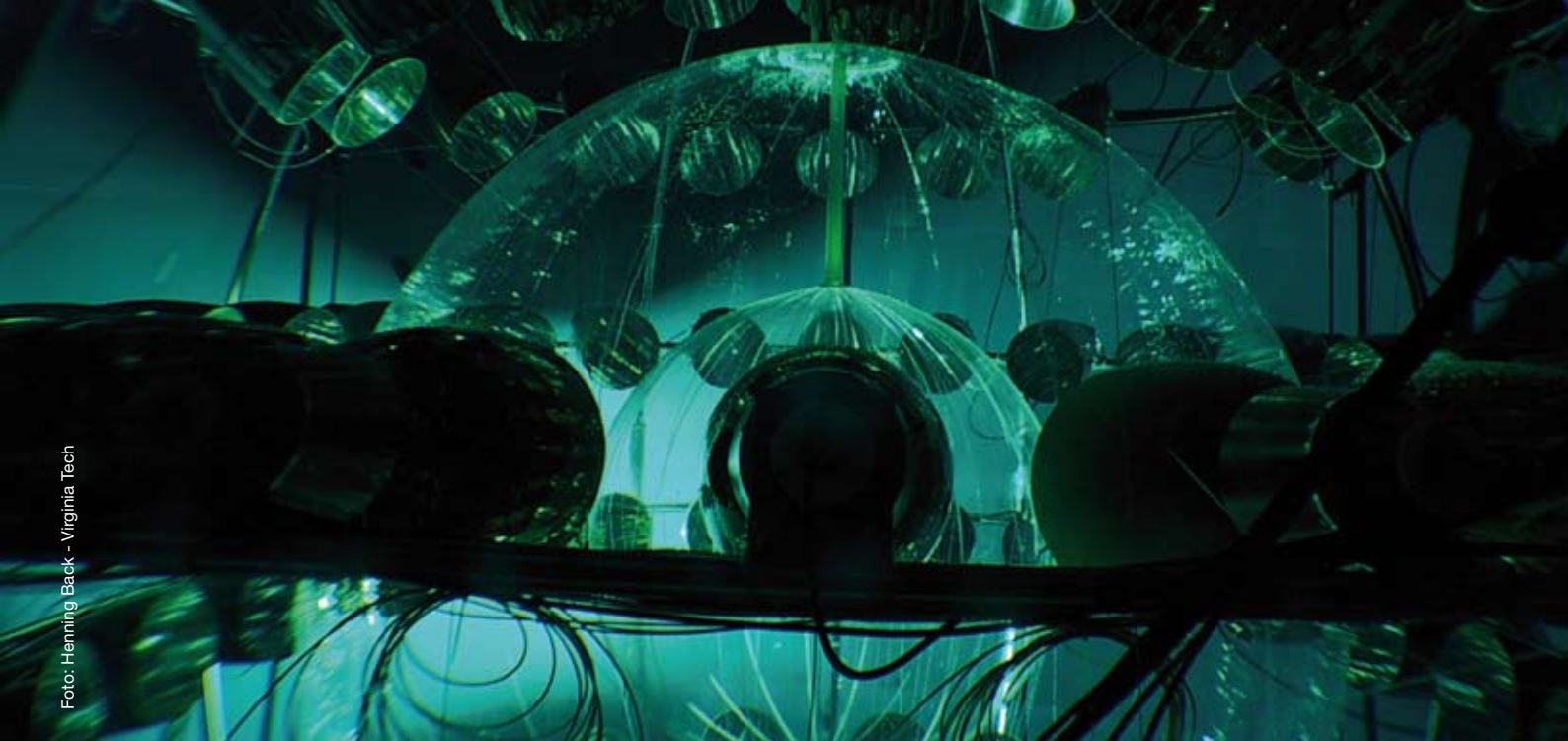
Erwartet werden daneben astrophysikalische Quellen, die sehr hochenergetische Neutrinos (aller Arten) abstrahlen: AGN (aktive galaktische Kerne), GRB (Gamma Ray Bursts), usw.

denn man will nur die Blitze aus dem Inneren messen. Außen ist das Experiment umgeben von einer großen Stahlkugel, an deren Innenseite die Messgeräte angebracht sind: 2 200 so genannte Photomultiplier, die auch den kleinsten Lichtblitz verstärken und registrieren. Sie sehen aus wie überdimensionale Glühbirnen, denn sie bestehen aus Glaskugeln, in denen die eigentliche Apparatur steckt. Rund um die Stahlsphäre befinden sich noch einmal 2 400 Tonnen Wasser, gehalten durch einen großen Stahldom mit 18 Metern Durchmesser, zur Abschirmung gegen äußere Strahlung.

Denn nicht nur Neutrinos erzeugen Photonen, sondern Strahlung kann aus vielen Quellen stammen: aus radioaktiven Zerfallsprozessen in Borexino selbst oder in seiner Hülle, aus der Radioaktivität der umgebenden Erde oder aus der kosmischen Strahlung. Das A und O für den Erfolg des Experiments liegt also darin, alle störenden Einflüsse auszuschalten, die das Messergebnis verfälschen könnten. Drei Strategien gibt es dafür: Störungen abschirmen, vermeiden oder sie registrieren und anschließend herausrechnen. In Borexino wurden alle drei kombiniert.

Im Berg geht's extra sauber zu

Zur Abschirmung von außen dient zunächst einmal das Gran-Sasso-Massiv selbst. Es schützt das unter ihm gelegene Labor vor dem Eindringen kosmischer Strahlung; sie bleibt im Berg größtenteils stecken. Alles, was dann noch durchkommt, dazu auch die Strahlung aus dem umgebenden Gestein, schirmt der erwähnte Puffer aus 2 400 Tonnen reinsten Wassers ab. Damit auch kein radioaktives Radongas von außen in den Detektor



Testlauf vor dem Ernstfall: Bevor der gesamte Versuchskomplex in Originalgröße unter Tage aufgebaut wurde, testeten die Wissenschaftler jede einzelne der Komponenten in eigenen Studien

eindringen kann, hat man obendrein noch eine weitere Nylonhaut zwischen der inneren Folie und den Photomultipliern eingezogen.

Noch schwieriger ist es, Störungen durch Radioaktivität von innen zu vermeiden. Dazu haben die Wissenschaftler und Ingenieure bei Borexino einen Riesenaufwand getrieben. Sie verwendeten keine normalen Werkstoffe, sondern jede Komponente musste aus hochreinem Material bestehen, je weiter innen, desto reiner. „Sie müssen sich vorstellen, jede Art von Radioaktivität, die ganz natürlich in jedem Material vorhanden ist, kann man zunächst einmal nicht von einem Neutrino-Ereignis unterscheiden“, erklärt Lothar Oberauer. „Das heißt aber, man muss sehr vorsichtig sein und eine unglaubliche Sauberkeit entwickeln. Man kann Materialien nicht so rein kaufen und transportieren, wie wir sie brauchen, sondern man muss selbst Maßnahmen entwickeln, um sie zu reinigen.“ Das hat das Münchner Team zusammen mit Kollegen der internationalen Kollaboration getan, mit großem Erfolg. In der Flüssigkeit im Inneren von Borexino, dem Szintillator, sind die Spurenelemente Uran und Thorium nur noch mit einem Gewichtsanteil von weniger als 10^{-17} vorhanden, das heißt, das Material ist in Bezug auf Uran und Thorium 100 Milliarden mal reiner als jedes natürliche Baumaterial.

Die dritte Maßnahme, um sich vor Störungen zu schützen, ist es, unerwünschte Ereignisse zu messen und anschließend vom Ergebnis abzuziehen. Dazu hat die Münchner Gruppe einen eigenen Detektor gebaut. Er besteht aus 208 nach außen gerichteten Photomultipliern, die bildlich gesprochen „ein Veto einlegen“, wenn ein Myon aus der kosmischen Strahlung trotz der Gesteins-

Was sind Neutrinos?

Neutrinos sind Elementarteilchen. Diese zerfallen in 2 Gruppen: **Quarks und Leptonen**.

Aus den **Quarks** werden die **Nukleonen (Protonen und Neutronen)** gebildet, die wiederum **Atomkerne** bilden.

Die **Leptonen** (griechisch für „leicht“) bestehen aus den geladenen **Leptonen** und den **Neutrinos**.

Geladene Leptonen: **Elektron, Myon** (findet man in der kosmischen Strahlung) und das **Tauon** (kann man am Beschleuniger erzeugen)

Neutrale Leptonen: **Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos**.

schichten des Gran-Sasso-Massivs noch eindringt. Sein Signal wird dann von der Elektronik automatisch ignoriert. Auch die Messgeräte, die nach innen schauen, können zum Teil unterscheiden, ob ein Lichtblitz aus dem Zentrum kommt oder vom Rand. Registriert werden dann nur die Photonen aus dem Zentrum. Nachdem der Bau der Anlage nach jahrelangen Vorarbeiten endlich abgeschlossen war, begannen am 16. Mai 2007 die Messungen. Und sie brachten schnell Erfolg: Schon im August veröffentlichte das Team die Neuigkeit, dass es zum ersten Mal auf der Welt die niederenergetischen Neutrinos in Echtzeit beobachtet hatte, die aus dem radioaktiven Zerfall von Beryllium im Sonnenkern stammen. Frühere Experimente hatten lediglich nachweisen können, dass derartige Neutrinos existieren, aber nicht, wann sie eintrafen. Damit konnte Borexino erstmals live beobachten, wie Energie im ▶

Eine kurze Geschichte der Neutrino-Physik in Daten	
1931	Der Physiker Wolfgang Pauli sagt ein sehr leichtes, neutrales Teilchen voraus, um das Energiespektrum des Beta-Zerfalls zu erklären.
1934	Enrico Fermi entwickelt die Theorie der schwachen Wechselwirkung und gibt dem Neutrino seinen Namen.
1956	gelingt es Frederick Reines und Clyde Cowan, am Savannah River Reaktor in den USA Anti-Neutrinos nachzuweisen. Reines erhält dafür im Jahr 1995 den Nobelpreis.
1962	Ziro Maki, Masami Nakagawa, Shoichi Sakata und Bruno Pontecorvo entwickeln eine Theorie der Neutrino-Oszillationen.
1962	Entdeckung eines weiteren Neutrinotyps durch Leon M. Lederman, Melvin Schwartz and Jack Steinberger. Sie erhalten dafür 1988 den Nobelpreis.
1965	Reines und seine Kollegen beobachten zum ersten Mal natürliche Neutrinos aus dem Weltall in einer Goldmine in Kolar, Indien.
1968	Erstes Experiment in der Homestake-Mine in North Dakota, USA, mit dem Sonnenneutrinos nachgewiesen werden
1978	Entdeckung eines dritten Neutrinotyps, des Tau-Neutrinos, durch Martin Perl und sein Team am Linearbeschleuniger in Stanford, Kalifornien, Entwicklung der Theorie dazu. Inzwischen wissen wir, dass es drei Neutrinosorten gibt: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino.
Anfang 80er:	Das IMB-Experiment wird in der Morton Salzmine bei Cleveland, Ohio, in Betrieb genommen, das Experiment Kamiokande in einer ehemaligen Zinkmine in Japan.
1987	Kamiokande und IMB weisen simultan Neutrinos aus einem Supernova-Ausbruch nach.
1989	Kamiokande ist das zweite Experiment, das Neutrinos von der Sonne nachweisen kann, und findet nur ein Drittel der erwarteten Anzahl.
1991	LEP-Experimente am Cern in Genf können beweisen, dass es nur drei leichte Neutrinos gibt.
1994	Erste Anzeichen für eine Oszillation der Neutrinos
1995	Auch das europäische GALLEX-Experiment in Gran Sasso (Italien) findet weniger solare Neutrinos als erwartet.
1996	Das Neutrino-Teleskop AMANDA am Südpol beginnt mit der Arbeit.
1998	Die internationale Kollaboration am Super-Kamiokande gibt bekannt, dass Neutrinos oszillieren und daher eine Masse besitzen müssen.
2002	Masatoshi Koshiha and Raymond Davis erhalten den Nobelpreis für die Messung von solaren und Supernova-Neutrinos.
2002	Im Januar beginnt KamLAND in Japan mit der Arbeit, im November meldet es erste Ergebnisse.
2004	Super-Kamiokande und KamLAND finden Hinweise, dass das Modell der Neutrino-Oszillation richtig ist.
2005	KamLAND misst den Neutrinofluss aus der Erde und macht erste Messungen zur geologischen Wärmebilanz.

Sonneninneren freigesetzt wird. Denn das Licht, das von der Sonne zur Erde strahlt, kann darüber keine Auskunft geben. Photonen, die im Inneren des Sterns entstehen, brauchen mindestens 100 000 Jahre, um vom Sonnenkern zur Oberfläche zu gelangen. Neutrinos hingegen flitzen fast ungehindert durch den Gasball. Die Messung von Sonnenneutrinos ist also ein Test zur Überprüfung der heutigen Sonnenmodelle.

Nach dem erfolgreichen Beginn haben die Forscher nun eine Menge Pläne: „Unser Ziel ist es unter anderem, die jahreszeitliche Schwankung der Neutrino-Rate zu

messen“, sagt Lothar Oberauer. „Die Erde läuft ja nicht auf einem Kreis um die Sonne, sondern beschreibt eine Ellipse. Das heißt, ihr Abstand ändert sich im Lauf des Jahres, und je näher sich Sonne und Erde sind, desto mehr Neutrinos müssten wir messen. Der Unterschied zwischen den Extrempunkten soll sieben Prozent ausmachen. Das wollen wir sehen.“

Borexino kann aber noch mehr, als nur Sonnen-Neutrinos messen: Es „sieht“ unter anderem auch Neutrinos, die von der Erde selbst stammen, die so genannten Geo-Neutrinos. „Die Erde ist noch schlechter verstanden als die Sonne“, erklärt Oberauer. „Wir wissen, dass aus ihr ein Wärmestrom von insgesamt 40 Terawatt kommt. Das ist etwa so viel wie die Gesamtleistung aller irdischen Atomreaktoren zusammengenommen. Und man weiß bis heute noch nicht genau, wo diese Wärme eigentlich herkommt.“

Ein Teil der Strahlungswärme stammt sicherlich aus der Radioaktivität. Und diesen Anteil könnten die Forscher über die Messung von Neutrinos experimentell bestimmen, nicht nur aus der Erdkruste, sondern auch aus dem Erdmantel oder gar ihrem Kern. Damit könnte Borexino nicht nur unser Wissen über die Sonne, sondern auch das über die Erde erweitern. *Brigitte Röthlein*

Andere Neutrino-Experimente weltweit
KamLAND in Japan: www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/index.html
SNO: Sudbury Neutrino Observatory in Ontario: www.sno.phy.queensu.ca
SuperKamiokande in Japan: www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html
IceCube am Südpol: www.icecube.wisc.edu/info