

# Teilchenjagd im Untergrund

Neutrinos sind Partikel mit scheinbar magischen Kräften: Die verschiedenen Typen haben die Fähigkeit, sich ineinander zu verwandeln, und besitzen daher eine Masse. Diese Entdeckung bescherte zwei Wissenschaftlern den Nobelpreis für Physik 2015. Vor einem Vierteljahrhundert beschäftigten solche Geisterteilchen erstmals auch Forscher des Heidelberger **Max-Planck-Instituts für Kernphysik**. Auf der Jagd nach ihnen blickten sie mit dem Experiment Gallex tief in den Ofen der Sonne.

TEXT **HELMUT HORNING**

Man kann sie nicht sehen, man kann sie nicht fühlen, und doch sind sie überall. Sie durchdringen alles – Sterne und Planeten, Lichtjahre dicke Bleiwände oder unsere Körper. Mehr als 66 Milliarden von ihnen schießen in jeder Sekunde durch den Nagel eines Zeigefingers. Im Universum kommen Neutrinos nach Photonen, also Lichtteilchen, am häufigsten vor. Trotzdem ist ihre Forschungsgeschichte relativ jung.

In einem Brief vom 4. Dezember 1930 erwähnt Wolfgang Pauli ein solches Teilchen unter dem Namen Neutron zum ersten Mal. Der österreichische Physiker postuliert das Partikel, um die Energieverhältnisse beim radioaktiven Betazerfall eines Atomkerns zu erklären. Der Italiener Enrico Fermi beschäftigt sich ausführlich damit und tauft den theoretischen Winzling Neutrino. Im Jahr 1956 schließlich gelingt Clyde L. Cowan und Frederick Reines am amerikanischen Los Alamos National Laboratory der Nachweis dieses „Neutrönchens“. Das Suchprojekt trägt eine passende Bezeichnung: *poltergeist*.

Wegen seiner extrem geringen Wechselwirkung mit Materie hatte sich das flüchtige Phantom nur schwer fassen lassen. Doch das spornte die Physiker in den folgenden Jahren umso mehr an, es genauer zu untersuchen. Die Jagd ging weiter. Und im Frühsommer 1990 stellten europäische Wissenschaftler den Geisterteilchen aus dem Innern der Sonne eine besondere Falle. Dazu gingen sie in den Untergrund.

In der Öffentlichkeit: Das Interesse der Medien an den Ergebnissen der Neutrinojäger war in den 1990er-Jahren groß. Hier Gallex-Sprecher Till Kirsten vom Max-Planck-Institut für Kernphysik auf einer Pressekonferenz.

Der gut zehn Kilometer lange Gran-Sasso-Tunnel verbindet über die Autostrada A24 die Orte Teramo und L'Aquila und führt mitten durch die italienischen Abruzzen. Bei Kilometer 6,3 zweigt die Zufahrt zu einem Labor ab. Über dessen Hallen liegen 1400 Meter Fels, der einen natürlichen Schutz gegen kosmische Strahlung bietet und so den „Dreckeffekt“ in den Messungen minimiert. Diese waren mehr als diffizil.

Die Falle bestand im Wesentlichen aus 30,3 Tonnen Gallium, der Hälfte der damaligen Weltjahresproduktion. Angeliefert wurde das Gallium in Sechserpacks, in Behältern mit jeweils 1200 Litern Galliumchloridlösung. In einer 20-stündigen Prozedur musste die Flüssigkeit von Störstoffen befreit werden, die durch die natürliche Höhenstrahlung entstanden waren. Erst danach kam das Galliumchlorid in einen der beiden 30 Kubikmeter fassenden Tanks und wurde in Salzsäure gelöst.

Die Behälter bestanden aus korrosionsfreiem Material, glasfaserverstärktem Polyester-Kunststoff und einer Innenbeschichtung aus Polyvinylidenfluorid. Der Gehalt des Materials an natürlichen radioaktiven Substanzen wie Radium, Thorium oder Uran war extrem niedrig. Gemessen wurde jeweils nur mit einem Tank, der andere blieb zur Sicherheit in Reserve.

Wie lief die Neutrinojagd ab? Einer der beteiligten Forscher bezeichnete sie seinerzeit als „besondere Herausforderung für die Chemie“. Eine leichte Untertreibung, weshalb die Medien immer wieder schrieben, das Ganze sei schwieriger als die sprichwörtliche Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen.

In der Tat muss man sich die Zahlen einmal vergegenwärtigen: In einem Gallextank tummelten sich ungefähr eine Quintillion ( $10^{30}$ ) Atome. Die Wissenschaftler setzten eine Messperiode zu 20 Tagen an. Während dieser Zeit der Bestrahlung sollten die Sonnenneutrinos durchschnittlich zehn Treffer landen, das heißt: mit zehn (!) Galliumatomen kollidieren und diese in Germanium verwandeln. Kurz: In dem flüssigen Galliumchlorid entstand ein Hauch von radioaktivem, gasförmigem und damit leicht flüchtigem Germaniumchlorid.

Diese minimalen Spuren von Germaniumchlorid wurden am Ende einer Messperiode mithilfe von flüssigem Stickstoff aus dem Tank herausgetrieben und nach einem komplexen Aufbereitungsprozess anhand ihrer Radioaktivität detektiert. Aus der Anzahl



In der Tiefe: Aus dem unter 1400 Meter Fels liegenden Gran-Sasso-Untergundlabor blickten Forscher ins Herz der Sonne. Das Experiment Gallex registrierte Neutrinos, die der stellare Fusionsreaktor erzeugt.

der auf diese Weise nachgewiesenen Germaniumatome schlossen die Wissenschaftler dann auf den Neutrinofluss von der Sonne.

Der ungewöhnliche Ort des Gallex-Experiments im Fels zahlte sich aus. Den Forschern gelang es, die natürliche kosmische Hintergrundstrahlung auf lediglich zwei Prozent zu reduzieren. Außerdem war auch noch der Zählraum von einem Faradayschen Käfig umgeben, der die von außen kommende elektrische Störstrahlung fernhielt.

Die Neutrinos, die sich im Tank verhedderten, stammten aus dem Zentrum der Sonne. Dort arbeitet ein gigantischer Fusionsreaktor. Bei einer Temperatur von gut 15 Millionen Grad Celsius und einem Druck von 200 Milliarden bar verwandelt er Wasserstoff zu Helium. Während dieser Proton-Proton-Reaktion genannten Prozesses verschmelzen zunächst zwei Wasserstoffkerne (Protonen) zu einem Deuteriumkern, wobei ein Positron (positiv geladenes Elektron) und ein Elektroneneutrino frei werden. In einem zweiten Schritt fusioniert der Deuteriumkern mit einem weiteren Proton zu einem Heliumkern ( $^3\text{He}$ ) unter gleichzeitiger Abgabe eines Gammaquants. Schließlich verschmelzen zwei  $^3\text{He}$ -Kerne zu  $^4\text{He}$  und setzen zwei Protonen frei.

**BILD DER WISSENSCHAFT, Ausgabe 12/1992**



**Mit ihrer raffinierten Falle für die flüchtigen Teilchen – einem Tank mit dreißig Tonnen flüssigem Gallium – haben die Wissenschaftler in den italienischen Bergen eindeutige Neutrinosignale empfangen.»**

Bei der Proton-Proton-Reaktion produziert die Sonne aus Wasserstoff nicht nur beträchtliche Mengen an Helium, sondern auch eine unvorstellbare Anzahl sogenannter p-p-Neutrinos. Diese Zeugen des Sternenfeuers verlassen ungehindert das Sonneninnere und erreichen gut acht Minuten später die Erde. Sie machen ungefähr 90 Prozent aller Sonnenneutrinos aus und besitzen mit maximal 420 Kiloelektronenvolt eine recht niedrige Energie. Gallex jedoch war für diese Art von Neutrinos empfindlich. Gespannt warteten die Wissenschaftler auf das Ergebnis. Denn in den Jahren vor dem Experiment im Gran Sasso waren die Physiker in ein Dilemma geschlittert. Sie zerbrachen sich die Köpfe über das Neutrinorätsel.

In den frühen 1970er-Jahren hatte Raymond Davis mit einem Tank voller Perchlorthylen in der Homestake-Goldmine im US-Bundesstaat South Dakota erstmals Sonnenneutrinos aufgefangen. Das Problem: Es waren nur ein Drittel so viele, wie sie das solare Standardmodell vorhersagte. Der japanische Kamiokande-Detektor fand diese Diskrepanz ebenfalls. Allerdings waren die beiden Detektoren für die Beryllium-7- und Bor-8-Neutrinos empfindlich, die einer Nebenkette der Kernfusion entspringen sollten. War also das theoretische Szenario im Herzen unseres Sterns falsch?

In dieser Diskussion kam Gallex gerade recht, denn das Experiment sollte erstmals die oben beschriebenen, deutlich energieärmeren p-p-Neutrinos einfangen. Das Ergebnis wurde etwa ein



Jahr nach Inbetriebnahme veröffentlicht: „Erster Blick in den Ofen der Sonne“, war eine Pressemitteilung der Max-Planck-Gesellschaft vom 2. Juni 1992 überschrieben. Danach habe Gallex „Neutrinos in vorhergesagtem Ausmaß“ aufgespürt. „Die Grundfesten unserer Naturerklärung verhalten sich so solide normal, dass einige sensationsgierige Beobachter jetzt vielleicht enttäuscht sind“, sagte Till Kirsten vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik, das die europäische Gallex-Kooperation federführend leitete.

Doch ganz so viel Optimismus war nicht angebracht: Sofern Gallex sie überhaupt sehen konnte, registrierten die Forscher auch mit ihrem Detektor einen deutlich geringeren Fluss an Beryllium- und Bor-Neutrinos. Mehr noch: Über den gesamten Messzeitraum von 1991 bis 1997 zeigte sich eine Rate von 77,5 Solar Neutrino Units (SNU); dabei entspricht eine SNU dem sekundlichen Einfang eines Neutrinos durch eines von  $10^{36}$  Atomen. Das solare Standardmodell sagt Werte zwischen 115 und 140 SNU vorher – also deutlich mehr als gemessen. Daran ließ sich nicht rütteln, zumal die Gallexforscher ihr Experiment mithilfe einer künstlichen Neutrinoquelle geeicht und dabei keinen systematischen Fehler gefunden hatten.

Die Wissenschaftler haderten mit dem Gedanken, ihr Sonnenmodell aufzugeben. So gab es nur eine mögliche Erklärung, die auch mancher Gallexforscher in Betracht zog: Die Neutrinos mussten sich ineinander verwandeln. Denn damals wusste man bereits, dass sie als Familie mit drei Mitgliedern auftreten: als Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Nur Erstere waren von den Teilchenphysikern gejagt worden.

Und tatsächlich: Im Jahr 2001 veröffentlichten Forscher um den kanadischen Physiker Arthur B. McDonald ihre Messergebnisse, die das Team des Japaners Takaaki Kajita bestätigte. Die Elektroneneutrinos schlüpfen auf ihrem 150 Millionen Kilometer langen Weg von der Sonne zur Erde in die Rolle ihrer Verwandten und werden kurzerhand zu Tau- und Myoneneutrinos, für die Fallen wie Gallex blind waren. Damit das passieren kann, müssen sie – wenn auch extrem geringe – Massen besitzen. So haben die beiden Wissenschaftler die Geisterteilchen doch noch zu fassen gekriegt. Und den Physikernobelpreis 2015 eingeheimst.

In den italienischen Abruzzen geht die Arbeit weiter. Unter anderem fahndet dort ein Experiment namens Borexino seit ein paar Jahren ebenfalls nach solaren Neutrinos. Daneben stehen Fallen, welche Teilchen der geheimnisvollen Dunklen Materie einfangen sollen, die ein Viertel des Weltalls ausmacht und deren Natur bisher völlig unbekannt ist. Die Forscher im Untergrund haben sich offenbar auf die Lösung der schwierigsten Rätsel im Universum spezialisiert.