

4 Proton-Proton-Kette Das Diagramm zeigt die Entstehung von Neutrinos bei Kernreaktionen im Sonneninneren. Als Endergebnis dieser Kette ist, aus vier Protonen (orange) ein Heliumkern entstanden. Bei jedem Schritt wird Energie freigesetzt, beim ersten ein Teil davon in Form eines Neutrinos. Wenn dieses Neutrino auf der Erde eingefangen wird, stellt es einen direkten Beweis für eine solare Kernreaktion dar.

5 Raymond Davis Jr. beim Baden über dem in der Homestake Mine installierten Chemie-Tank (1971). Nahezu 1,5 Millionen Liter Wasser schirmten den Detektor gegen Hintergrundstrahlung ab. In der Bruthitze, die die Wissenschaftler in ihren 12-Stunden-Schichten im Bergwerk ertragen mussten, boten sie eine willkommene Abkühlung.

Sonne entweichenden Neutrinos ist enorm – pro Sekunde durchqueren etwa 10 Milliarden davon jeden Quadratmeter der Erde. Diese Fluten können 10 Billionen Kilometer (ein Lichtjahr) Materie durchdringen, ohne mit ihr zu interagieren. Da sie mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind, erreichen sie die Erde nach acht Minuten. Einige wenige dieser Sonnenneutrinos lassen sich trotz ihrer Geschwindigkeit und Unfassbarkeit mit Detektoren einfangen.

Der erste Neutrinodetektor wurde von Raymond Davis Jr. vom Brookhaven National Laboratory gebaut. Er stützte sich auf technische Vorschläge des berühmten, aus Italien stammenden Physikers Bruno Pontecorvo und des US-Physikers Luis Alvarez. Drei amerikanische Astrophysiker – William Fowler, Alastair Cameron und John Bahcall – hatten die Möglichkeit postuliert, Neutrinos einzufangen. Aufgrund der riesigen Menge musste es gelingen, wenigstens einiger davon habhaft zu werden. Abgeschirmt gegen die kosmische Strahlung installierte Davis in den Tiefen der Homestake-Goldmine in Lead, Süddakota, einen Tank mit 615 Tonnen Tetrachlormethan, einem sonst für Trockenreinigung verwendeten Lösungsmittel. Die Chloratome fingen einige solare Neutrinos ein, wodurch Argonatome entstanden. Diese wurden alle zwei Monate aus dem Tank ausgewaschen und gezählt.

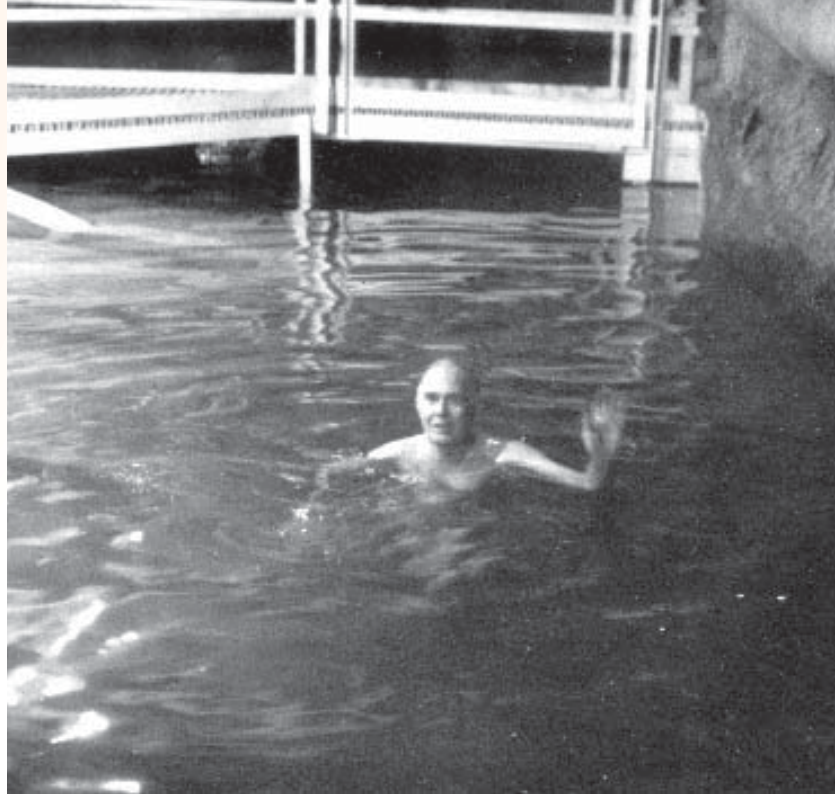
Schätzungen zufolge ging man von nicht mehr als 17 Argonatome pro Extraktio aus. Nach dem ersten, sechs Monate dauernden Versuch musste man 1968 feststellen, dass es sogar noch weniger waren. Als Davis das Experiment mit einer verbesserten Anlage wiederholte, kam die Frage nach den fehlenden Neutrinos auf, das so genannte »Sonneutrino-Rätsel«. 1989 bestätigte der japanische Astrophysiker Masatoshi Koshiba mittels seines selbstgebauten Neutrinodetektors *Kamiokande*, dass Davis solare Neutrinos entdeckt hatte. Anders als Davis' Tank in der Goldmine konnte *Kamiokande* erkennen, woher die Neutrinos stammten: Koshiba konnte nachweisen, dass die Neutrinos tatsächlich von der Sonne kamen und große Mengen davon fehlten.

Einige Physiker dachten zunächst, die Diskrepanz zwischen der Theorie und den von Davis erzielten Resultaten sei auf Fehler bei den Berechnungen der Astronomen über das Sonneninnere zurückzuführen. Sie beruhten auf ihrem Wissen über Dichte, Zusammensetzung und Temperatur des Sonneninneren – Parameter, die sie eben nicht genau kannten. Die Astronomen wiesen diese Erklärung zurück, unter anderem, weil sie eine Methode gefunden hatten, ins Sonneninnere zu blicken, ihre Theorien über seine Struktur zu

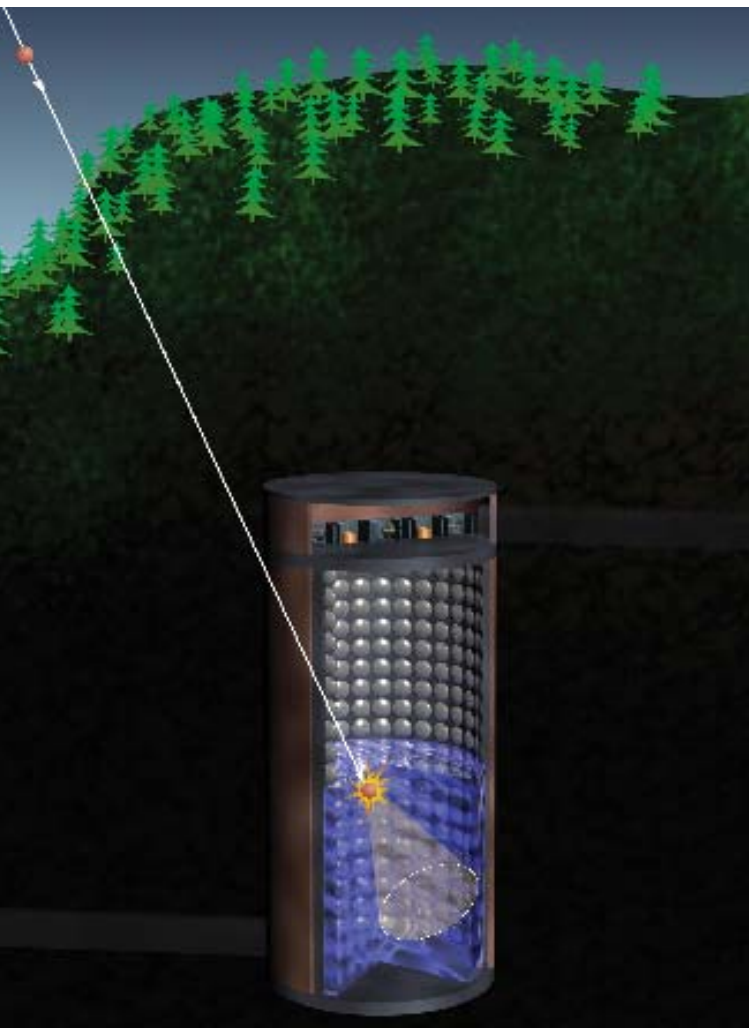
Das Innere der Sonne

überprüfen und das Rätsel der fehlenden Neutrinos zu lösen. Es war die »Helioseismologie«. Dieser Begriff kennzeichnet die Erforschung der Oszillationen des Sonnenkörpers, die an die von Seismologen untersuchten Erdbeben erinnern. Im Chaos der sich in ihrem Inneren bewegenden heißen Materie erzeugt die Sonne Schallwellen, die sich im Sonnenkörper ausbreiten und die Oberfläche vibrieren lassen. Die Sonne gleicht einer ruhig tönenden Glocke, die durch einen Sandkörnerregen zum Klingen gebracht wird.

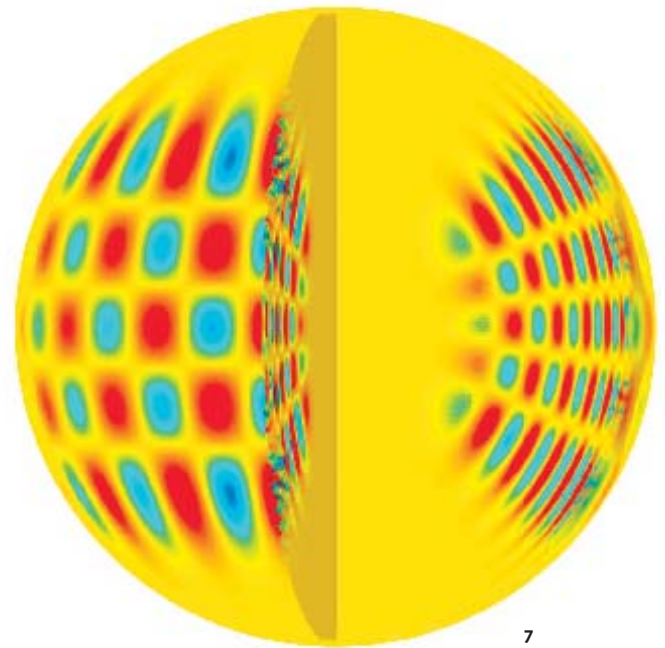
Die Oszillation der Sonnenoberfläche wurde 1960 von dem Physiker Robert Leighton entdeckt. Er bestimmte ihre Periode auf etwa fünf Minuten. In den 1970er-Jahren erklärte der Physiker Roger Ulrich von der Universität Kalifornien LA, dass Dauer, Frequenz und Klang dieser Oszillationen Schlüsse auf die Zusammensetzung des Sonneninneren ermöglichen. Ulrich wies darauf hin, dass die Frequenzen der Sonnentöne



5



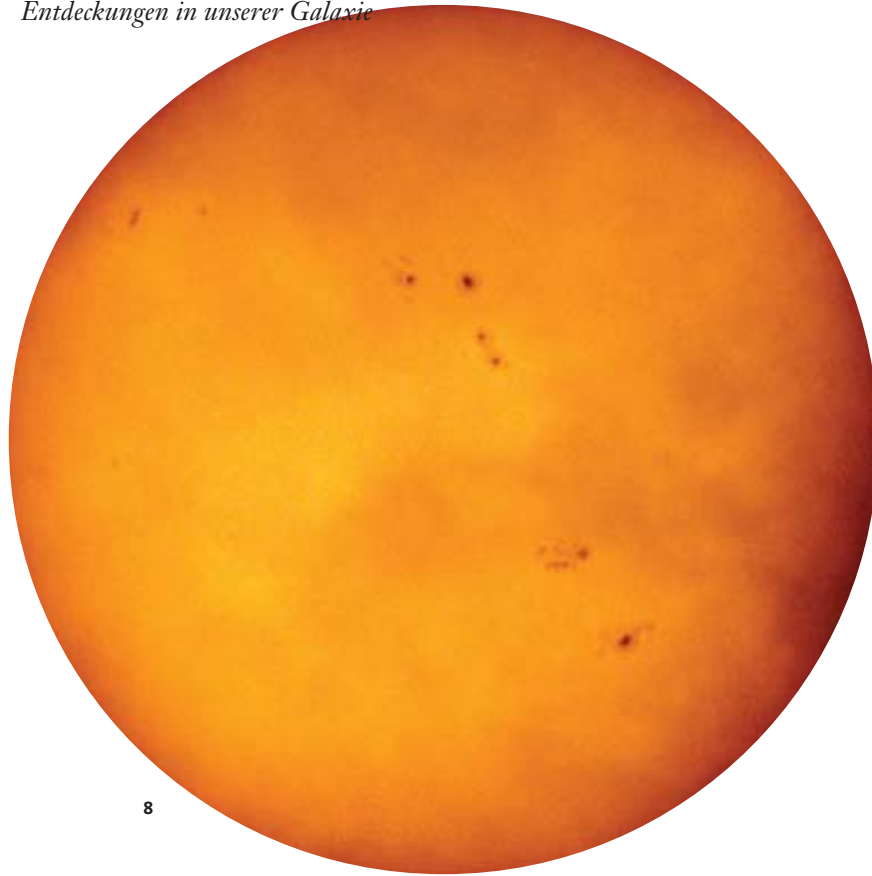
6



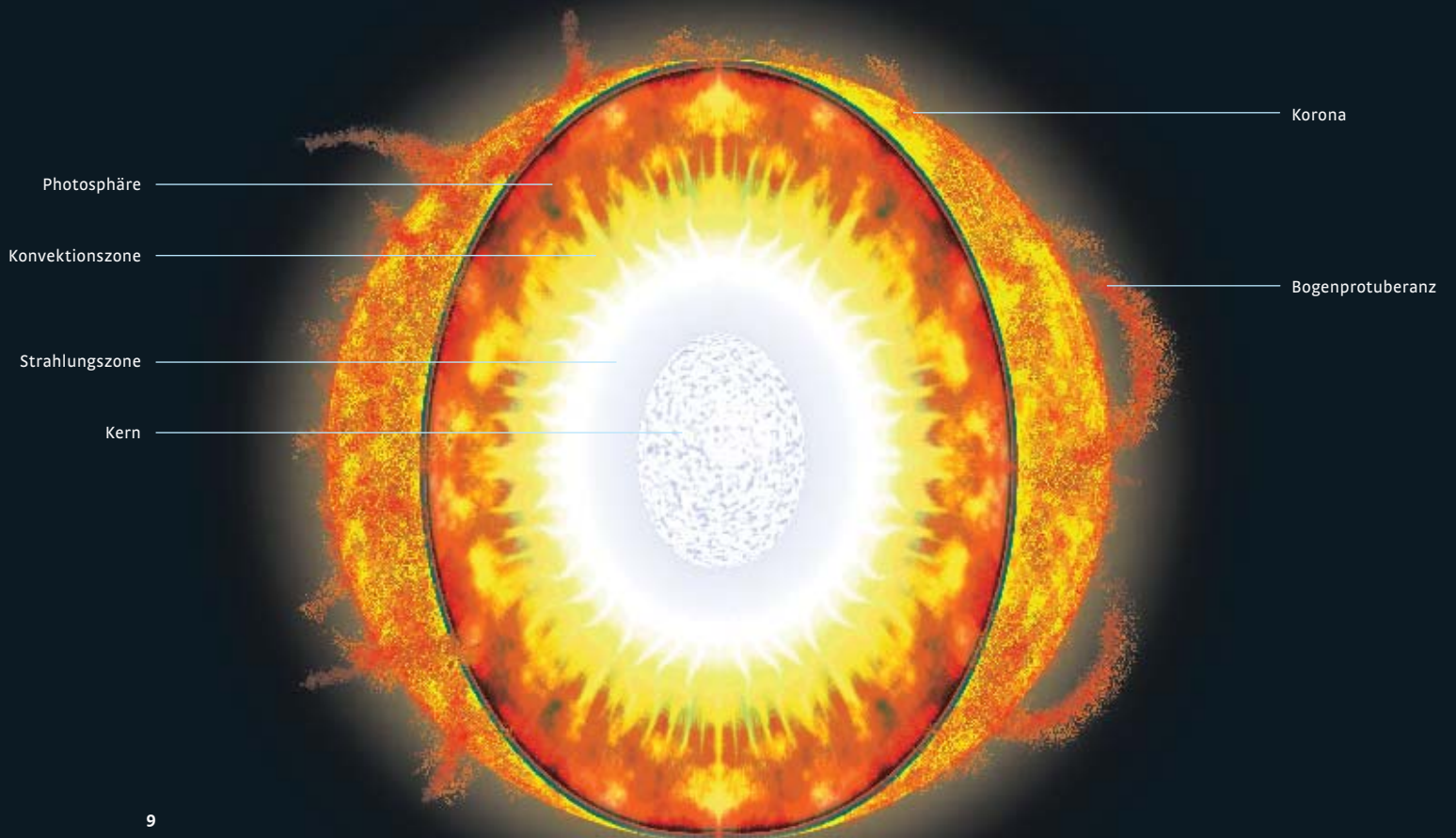
7

6 Sonnenneutrinos (außerhalb der Abbildung oben links) dringen in die Atmosphäre ein. Die meisten rasen durch die Erde hindurch in den Weltraum. Im Neutrino-detektor *KamioKande* interagieren einige mit Wasser und erzeugen ein »Tscherenkow-Licht«. Der Lichtblitz wird von einigen der 1000 Photovervielfacher an den Wänden des Wassertanks aufgezeichnet, sodass Energie und Richtung der eintreffenden Neutrinos gemessen werden.

7 Computergenerierte Darstellung der Sonne Sie zeigt eine sich im Sonneninneren ausbreitende Schallwelle. In den roten und blauen Zonen hebt und senkt sich die Sonnenoberfläche. Jede dieser Schwankungen dauert 340,613 Sekunden (etwas mehr als 5 Minuten). Sie ermöglicht eine erstaunlich genaue Messung der Geschwindigkeiten, mit der Schall die Sonne durchquert.



8

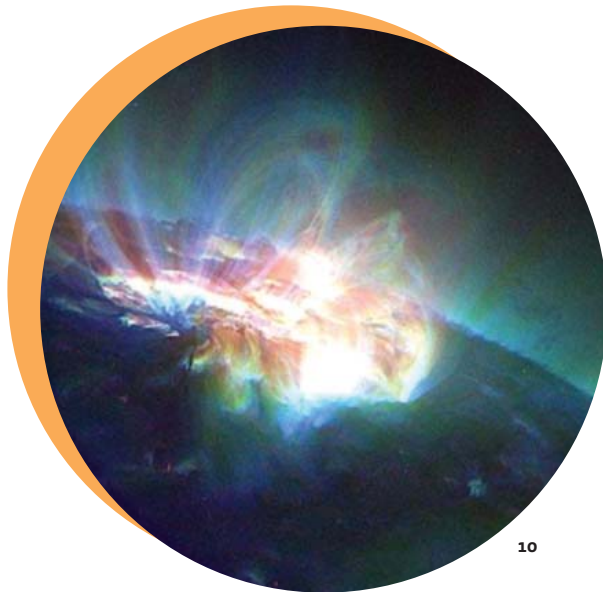


9

HELIOSEISMOLOGIE

Auch nicht der kleinste Kreis, den du da siehst,
Der nicht im Schwunge wie ein Engel singt.

William Shakespeare, Der Kaufmann von Venedig



von der Zeit abhängen, die der Schall braucht, um die Sonne zu durchqueren. Diese wiederum hängt von Zusammensetzung, Temperatur und Dichtestruktur des Sonneninneren ab. Die Schallwellen transportieren somit Informationen über das Sonneninnere zur Oberfläche, wo sie beobachtet werden können, so wie Bodenbewegungen bei Erdbeben Aufschluss über den Aufbau der Erde geben.

Erdgestützte Teleskope unterliegen einer wesentlichen Einschränkung: Nach ihrem abendlichen Untergang ist die Sonne für sie nicht mehr greifbar. Also vernetzte man die Sonnentelkope weltweit, um die Frequenzen der solaren Oszillationen genauer messen zu können. Aber selbst Teleskopnetze mit Namen wie GONG (Global Oscillation Network Group of the US National Solar Observatory), BiSON (Birmingham Solar Oscillations Network) oder HiDHN (High Degree Helioseismology Network) wurden bei ihren Beobachtungen durch Wolken gestört. Der Satellit SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), ein Gemeinschaftsprojekt von ESA und NASA, unterliegt hingegen keinerlei Beeinträchtigungen. Seit seinem Start 1995 hat er den Blick unablässig auf die Sonne gerichtet. Durch seine umfassenden Beobachtungen lieferte SOHO neue Daten über die Temperaturen im

- 8 Sonnenoberfläche** Die Außenschicht der Sonne ist opak, es gelang aber, die von ihr abgestrahlte Wärme in Relation zu ihrer Größe zu interpretieren und daraus Rückschlüsse auf ihr Innenleben zu ziehen.
- 9 Sonneninneres** Die Abbildung zeigt den Sonnenkern und die ihn umgebenden Schichten einschließlich der Oberfläche (Photosphäre) und der Atmosphäre (Korona).
- 10 Magnetsturm** Die durch die Reibung zwischen den inneren Schichten erzeugten Magnetfelder durchbrechen explosionsartig die Oberfläche, drängen die Gase zur Seite und transportieren Oberflächenmaterie in die Sonnenatmosphäre.

Sonneninneren und die differenzielle Rotation. Das Innere der Sonne rotiert langsamer als ihre äußere Hülle, wodurch eine heiße Schicht entsteht, die letztlich die Ursache der Flecken und Protuberanzen auf der Oberfläche ist. SOHO lieferte auch den Beweis dafür, dass die Berechnungen der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Tiefen des Sonnenkerns zu 99,9 % genau waren. Damit zeigte sich, dass Davis' fehlende Neutrinos nicht auf eine falsche Berechnung der im Sonneninneren gegebenen Bedingungen zurückgingen. In der Annahme, die Astrophysiker wüssten über das Sonneninnere Bescheid und die Kernphysiker wüssten, wie viele Neutrinos darin entstehen, begannen die Physiker zu vermuten, dass mit den Neutrinos nach ihrem Austritt aus der Sonne etwas geschieht. Manche schafften es offenbar nicht bis zur Erde. Diese Erklärung lieferte Pontecorvo 1969, ein Jahr nachdem durch Davis' Versuch das Sonnenneutrino-Rätsel entstanden war.

Sonnenneutrinos kommen in drei verschiedenen Arten vor. Auf ihrer achtminütigen Reise zur Erde kann es sein, dass sie die Art wechseln. Davis' Detektor war darauf ausgelegt, die ursprünglichen Neutrinos zu entdecken, so wie sie tief im Sonneninneren entstehen. Wenn sie die Erde erreichen, sind viele davon durch Oszillation zu Vertretern einer anderen Art geworden. Sie konnten von seinem Detektor nicht registriert werden. Terrestrische experimentelle Beweise für diese Erklärung wurden am Beginn des 21. Jahrhunderts erbracht, in erster Linie durch den japanischen *Kamiokande*-Detektor.

Die Astronomen waren stolz darauf, dass ihre sorgfältigen Arbeiten über die Sonnenaktivität zu einer neuen Entdeckung in der Teilchenphysik geführt hatten. Ihre Bedeutung wurde 2002 zu Recht mit der Verleihung des Nobelpreises an Masatoshi Koshiba und Raymond Davis gewürdigt – »für bahnbrechende Beiträge zur Astrophysik, insbesondere zur Detektion kosmischer Neutrinos«.