

<b>Zeitschrift:</b>	Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Astronomische Gesellschaft
<b>Band:</b>	34 (1976)
<b>Heft:</b>	152
<b>Artikel:</b>	Solare Neutrinos
<b>Autor:</b>	Gerber, P.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-899506">https://doi.org/10.5169/seals-899506</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Solare Neutrinos

von P. GERBER, Biel

Mit dem vorliegenden Bericht möchte der Verfasser auf ein aktuelles und ungelöstes Problem der Sonnenphysik aufmerksam machen. Der vorgegebene Rahmen erlaubt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es wird deshalb im Bericht keine Literatur zitiert. Interessierte Leser finden im Anhang ein nach Sachgebieten geordnetes Literaturverzeichnis.

Das wohl eigenwilligste und ehrgeizigste aller je erdachten astronomischen Beobachtungsexperimente wird zur Zeit von Prof. RAYMOND DAVIS (Brookhaven National Laboratory) in einer verlassenen Goldmine in Süd-Dakota, USA, 1500 m unter der Erdoberfläche durchgeführt. Eigenwillig ist dieses Experiment deshalb, weil als «Teleskop» ein riesenhafter Tank mit 390000 l  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  (ein flüssiges Putzmittel) verwendet wird, und ehrgeizig ist es, weil erstmals direkt in das Innere unserer Sonne «geblickt» werden soll. In welchem Zusammenhang steht nun dieser 390000 l Tank mit dem Sonnenzentrum? Nun, nach unseren konventionellen Vorstellungen über die Energie-Erzeugung in den Zentren der Hauptreihensterne strahlt unsere Sonne deshalb, weil in ihrem Zentrum eine Fusion von Protonen (Wasserstoff-Kernen) in Alpha-Teilchen (Helium-Kerne) stattfindet. Dabei entstehen zusätzlich positiv geladene Elektronen und Neutrinos. Wegen diesen letztgenannten Neutrinos, die nur 3% der gesamten von unserer Sonne in den Weltraum abgestrahlten Energie wegtragen, hat Prof. DAVIS vor etwas mehr als 10 Jahren sein Experiment begonnen. Mit dem Chlor-kohlenstoff im 390000 l Tank gelingt es, die im Zentrum der Sonne erzeugten Neutrinos zu zählen. In den letzten drei Jahren wurden erste schlüssige, wenn auch recht überraschende Resultate über die solaren Neutrinos publiziert. Im vorliegenden Bericht wird diesen Resultaten eine kurze Zusammenstellung über die Eigenschaften und die Entstehung der solaren Neutrinos vorangestellt.

## Eigenschaften der Neutrinos

Der zentralste Satz in der ganzen Physik ist wohl der Satz von der Erhaltung der Energie. Er sagt aus, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, sie lässt sich höchstens von einer Form in eine andere überführen. Dem uneingeschränkten Glauben an diesen Satz ist es zu verdanken, dass das Neutrino überhaupt entdeckt wurde.

Zu Beginn unseres Jahrhunderts ergaben kalorimetrische Untersuchungen, dass beim Zerfall von radioaktiven Elementen – entgegen den Forderungen des Energiesatzes – Energie verloren geht. 1930 schlug dann WOLFGANG PAULI einen Ausweg aus der

für die Physiker unvorstellbaren Situation vor: er postulierte das Neutrino. Dieses neue Elementarteilchen soll die beim radioaktiven Beta-Zerfall vermisste Energie forttragen. Dieses Neutrino blieb 23 Jahre lang ein «theoretisches» Teilchen. Erst 1956 gelang es REINES und COWAN, einen direkten experimentellen Nachweis für das Neutrino zu erbringen. Der Grund für diese lange Suche nach dem Neutrino liegt in seinen Eigenschaften. Von allen Elementarteilchen ist das Neutrino das am wenigsten greifbare. Einmal besitzt es keine Masse. Experimente zeigen, dass sie zumindest kleiner als  $10^{-31}$  Gramm sein muss. Es besitzt auch keine elektrische Ladung und bewegt sich außerdem mit Lichtgeschwindigkeit. Mit diesen Eigenschaften ist das Neutrino dem Lichtquant oder Photon sehr ähnlich. Im Gegensatz zum Photon besitzt aber das Neutrino nur eine verschwindend kleine Wechselwirkung mit Materie. Ein Neutrino müsste im Durchschnitt einen Weg von 10000 Lichtjahren in Sonnenmaterie zurücklegen, bis es von dieser absorbiert würde. Die Sonne und auch die Erde sind also im höchsten Maße durchsichtig für diese Elementarteilchen. Von den im Sonneninnern erzeugten Neutrinos wird nicht einmal jedes milliardste irgendwo in der Sonne absorbiert, alle andern entweichen ungehindert in den Weltraum. Und von denjenigen, die auf unsere Erde fallen, wird nur knapp jedes hundert-milliardste eingefangen.

## Erzeugung der Sonnen-Neutrinos

Bekanntlich kann man die lange Strahlungsdauer der Sonne (ca. 10 Milliarden Jahre) nur erklären, wenn man eine Energie-Erzeugung im Sonneninnern durch Kernfusionsreaktionen annimmt. Die dabei entstehenden Photonen – als Energieträger – diffundieren nur langsam von ihrem Erzeugungsort im Zentrum der Sonne zur Sonnenoberfläche, um dann von der Photosphäre in den Weltraum abgestrahlt zu werden. Die Diffusionszeit der Photonen ist von der Größenordnung der HELMHOLTZ-KELVIN-ZEIT, also ungefähr 30 Milliarden Jahre. Unter der Annahme, dass die Energie innerhalb der Sonne vorwiegend durch Strahlung transportiert wird, kann sich eine Änderung der Energieproduktion im Sonnenkern erst nach dieser HELMHOLTZ-KELVIN-ZEIT als veränderte Strahlungsleistung der Photosphäre bemerkbar machen. Durch Messung der Sonnenstrahlung kann also kein experimenteller Beweis für die im Sonneninnern ablaufenden Fusionsprozesse erbracht werden. Einzig die Neutrinos können uns unmittelbar (nach 8,3 Minuten) Kunde von diesen Prozessen übermitteln.

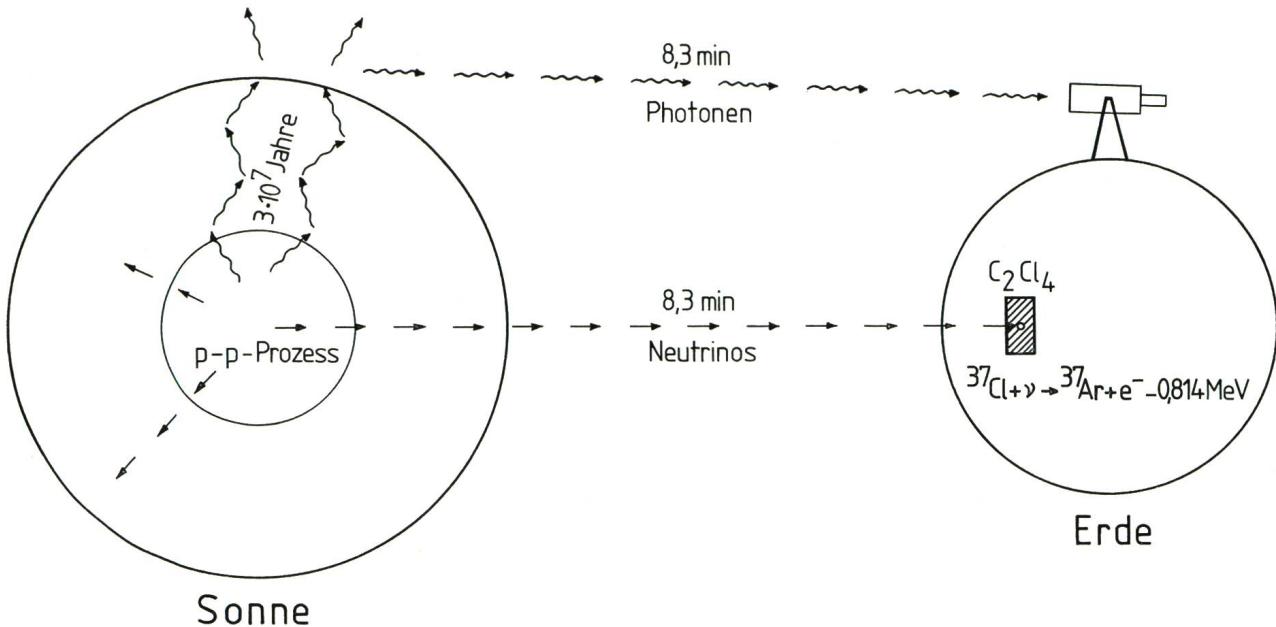


Fig. 1: Schematische Darstellung der Erzeugung von Photonen und Neutrinos in der Sonne und deren Detektion auf der Erde.

Eine Hauptaufgabe besteht nun darin, nach den gängigen Vorstellungen von der Sonne den zu erwartenden Neutrinostrahl möglichst genau zu bestimmen. Dazu müssen Temperatur, Dichte und chemische Zusammensetzung im Sonneninnern bekannt sein. Die Ansätze für die Berechnung eines Sonnenmodells sind relativ einfache Beziehungen. Sie sollen hier – zum besseren Verständnis des Folgenden – zusammengestellt werden:

- Die Sonne ist *sphärisch-symmetrisch*. Diese Annahme wäre schlecht für eine rasch rotierende Sonne oder bei Anwesenheit von starken Magnetfeldern.
- Die Sonne befindet sich im *hydrostatischen Gleichgewicht*. Gravitationskraft und Druck halten sich in jedem Punkt der Sonne das Gleichgewicht.
- Die Sonne befindet sich im *thermischen Gleichgewicht*. Die an irgend einem Ort der Sonne umgesetzte Kernenergie wird als Strahlung abgegeben.
- Die Sonne befindet sich im *Strahlungsgleichgewicht*. Die Differenz zwischen der von einem Teilvolumen der Sonne gemäß dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz abgestrahlten Energie und der ihm zugestrahlten Energie muss gleich der in diesem Teilvolumen absorbierten Energie sein.
- Die Sonnenmaterie kann durch eine *thermodynamische Zustandsgleichung* beschrieben werden.
- Für jeden Ort innerhalb der Sonne kann das *Absorptionsvermögen* bezüglich Strahlung und die *Energie-Erzeugungsrate* durch die dort herrschende

Temperatur, Dichte und chemische Zusammensetzung beschrieben werden.

In mathematischer Form stellen diese Annahmen Differentialgleichungen dar, die bei Vorgabe von Randbedingungen im günstigsten Fall eindeutige Lösungen ergeben. Leider reicht die Anzahl der vorgegebenen Gleichungen nicht aus, um die chemische Zusammensetzung im Sonneninnern eindeutig zu bestimmen. Solche Sonnenmodelle müssen daher auch in ihrer zeitlichen Entwicklung durchgerechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die Sonne anfänglich eine homogene chemische Zusammensetzung besaß, wie wir sie heute (also nach 5 Milliarden Jahren) noch auf ihrer Oberfläche vorfinden. BAHCAL und Mitarbeiter geben folgende Werte an:

X	Y	Z	Ort
0,74	0,24	0,02	Sonnenrand
0,415	0,570	0,015	Sonnenzentrum

Dabei bedeuten: X: Wasserstoffanteil  
Y: Heliumanteil  
Z: Anteil der schweren Elemente.

Mit diesen Angaben kann entschieden werden, welche speziellen Kernprozesse zur Energie-Erzeugung beitragen. Für unsere Sonne sind zwei Reaktionsreihen für die Fusion von Wasserstoff in Helium unter Abgabe von Energie und Neutrinos von Bedeutung:

- a) Der in Fig. 2 schematisch dargestellte *p-p-Prozess* und  
b) der nur etwa 5% zur Energie-Erzeugung beitragende *BETHE-WEIZSÄCKER-Zyklus* (CNO-Zyklus).

Der Proton-Proton-Prozess (*p-p-Prozess*) stellt eine Folge von nuklearen Prozessen für die Fusion von Wasserstoff in Helium dar. In 99,75% aller Fälle fusionieren zwei Protonen zu einem Deuteriumkern, der ein Positron und ein Neutrino mit der maximalen Energie von 0,42 MeV emittiert (1a). Sehr selten (0,25%) fusionieren zwei Protonen und ein Elektron zu einem Deuteriumkern und einem Neutrino mit der Energie von 1,44 MeV (1b). Der eben erzeugte Deuteriumkern fusioniert im nächsten Schritt mit einem Proton zu einem leichten Heliumkern (2). Nun bieten sich wieder zwei Möglichkeiten an. In 86% der Fälle vereinigen sich zwei leichte Heliumkerne unter Abgabe von zwei Protonen zu einem normalen Heliumkern (3). Bei der alternativen Möglichkeit fusioniert der leichte Heliumkern mit einem normalen Heliumkern unter Abgabe eines Photons zu einem

Berylliumkern (4). Dieser Berylliumkern kann wieder zwei verschiedene Reaktionen eingehen. In 90% der Fälle absorbiert er ein Elektron und verwandelt sich unter Abgabe eines Neutrinos der Energie von 0,86 MeV in einen Lithiumkern (5). Der Lithiumkern fusioniert mit einem Proton und spaltet sich in zwei normale Heliumkerne auf (6). In 10% der Fälle vereinigt sich der Berylliumkern mit einem Proton und bildet einen Borkern und ein Photon (7). Dieser instabile Borkern zerfällt wieder in einen Berylliumkern, ein Positron und in ein für unsere Betrachtungen äußerst wichtiges Neutrino mit der maximalen Energie von 14,06 MeV (8). Schliesslich zerfällt der ebenfalls instabile Berylliumkern in zwei Heliumkerne (9).

Die Solarkonstante und die Häufigkeiten der einzelnen Kernreaktionen bestimmen nun die Anzahl der von der Sonne in jeder Sekunde emittierten Neutrinos. Man erwartet, dass im Mittel auf jeden Quadratzentimeter der Erde pro Sekunde 10 Milliarden Sonnenneutrinos auftreffen.

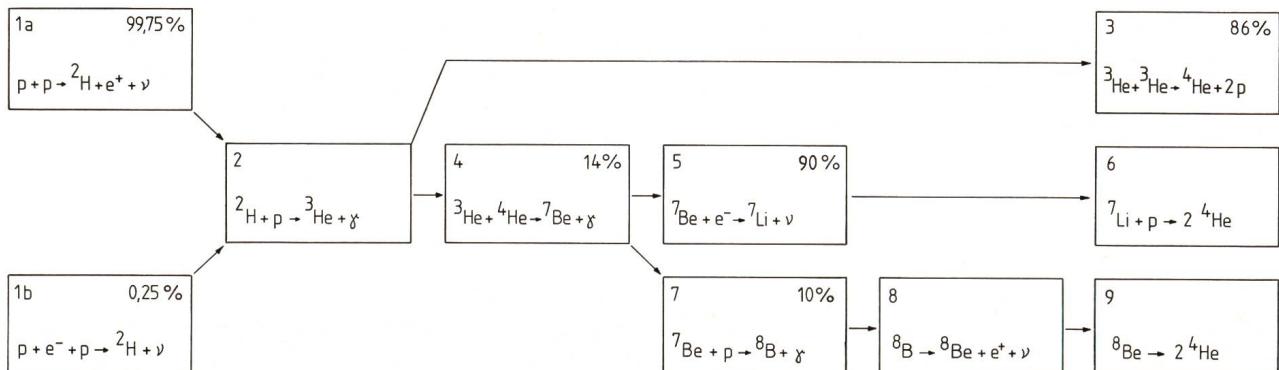


Fig. 2: Der Proton-Proton-Prozess.

### *Das Experiment von DAVIS*

Trotz dieses enormen Teilchenflusses ist eine Detektion der Sonnenneutrinos wegen ihrer geringen Wechselwirkung mit Materie ausserordentlich schwierig. Als Auffangtarget verwendet deshalb Prof. Davis die riesenhafte Menge von 390 000 l Chlorkohlenstoff. Trifft nun ein Neutrino auf eines dieser Chloratome, so kann folgende Reaktion ablaufen:



Diese Reaktion ist also nur durch Neutrinos auszulösen, deren Energie grösser als 0,814 MeV ist. Das radioaktive Argon zerfällt mit einer Halbwertszeit von 35 Tagen wieder in ein angeregtes Chloratom, das seine Anregungsenergie hauptsächlich durch Auger-Elektronen abgibt. Die Zählrate der Auger-Elektronen bestimmt die Einfangrate der Neutrinos

im Chlorkohlenstoff und dadurch auch die Neutrino-Produktionsrate im Sonneninnern. Durch Vergleich zwischen diesem experimentellen Wert und den aus den Sonnenmodellen berechneten Neutrino-Produktionsraten können die Modellvorstellungen unserer Sonne getestet werden. Die theoretisch erwarteten Neutrinozählraten im DAVIS-Experiment lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Zählrate	Bedeutung
35 SNU	Die Sonnenenergie wird ausschliesslich durch den CNO-Prozess erzeugt.
$9 \pm 3$ SNU	Energie-Erzeugung gemäss Standard-Sonnenmodell.
$1,7 \pm 0,3$ SNU	Mit dem Standard-Sonnenmodell verträgliche unterste Grenze.

$1 \text{ SNU} = 10^{-36}$  Neutrinoeinfänge pro Sekunde und pro Cl-Atom. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die kleinste erwartete Rate von 1,7 SNU nur unter zwei extremen Hypothesen möglich ist:

- a) Der in Fig. 2 diskutierte Kernprozess (8) tritt aus unbekannten Gründen nicht auf. Er liefert wegen der hohen Neutrinoenergie den Hauptbeitrag zur erwarteten Neutrinoeinfangrate.
- b) Die Häufigkeit der schweren Elemente ist im Sonnenzentrum mindestens 10 mal kleiner als auf der Sonnenoberfläche.

Im Gegensatz zu diesen theoretischen Neutrinozählraten weisen die neuesten Ergebnisse von Prof. DAVIS eine experimentelle Zählrate auf, die *kleiner als 1 SNU* ist.

Die aus dem Standard-Sonnenmodell vorausgesagte Neutrinoerate ist gegenüber dem heutigen experimentellen Wert etwa 10 mal zu gross. Selbst die unter den beiden extremen Bedingungen berechneten 1,7 SNU weichen noch um den Faktor 2 vom experimentellen Wert ab.

Die Sonnenphysik steht im Augenblick vor einem völlig ungelösten Problem. An allen möglichen Ansatzstellen werden nun Versuche unternommen, um diese Diskrepanz zu erklären. Es sollen hier nur die zur Zeit am häufigsten diskutierten Vorschläge erwähnt werden:

1. Für die Astrophysik am einschneidendsten ist die Verwerfung des Standard-Sonnenmodells. Es werden andere Entwicklungen der Sonne vorgeschlagen, die auf andere Temperaturen und andere chemischen Zusammensetzungen im Sonneninnern führen. Weiter wird auch die Möglichkeit des Energietransportes im Sonneninnern durch Konvektion diskutiert.

2. Die Unstimmigkeit der Resultate wird auch in der Kernphysik gesucht. Die Wirkungsquerschnitte der einzelnen Kernreaktionen könnten durch Resonanzeffekte verändert werden, was auch auf veränderte Neutrinoströme führen würde.
3. Endlich wird auch an den fundamentalen Eigenschaften des Neutrinos und der schwachen Wechselwirkung gezweifelt. Ein Neutrino mit einer endlichen Masse könnte zum Beispiel auf dem Weg von der Sonne zur Erde in ein anderes, unbekanntes Teilchen zerfallen und sich dadurch der Detektion entziehen.

Der Verfasser dieses Berichtes hofft, dass er in nicht zu ferner Zukunft an dieser Stelle von einer Lösung des Sonnenneutrino-Problems berichten kann.

#### *Literaturverzeichnis:*

##### *Sternmodelle und ihre Entwicklung:*

M. SCHWARZSCHILD, Structure and Evolution of the Stars, Dover Publications, NY 1958.

J. N. BAHCALL, R. K. ULRICH, *Astrophys. J.* 170, 593 (1971). *Kernreaktionen, Neutrinos:*

H. REEVES, Stellar Energy Sources, NASA preprint.

H.-Y. CHIU, Neutrino Astrophysics, Gordon and Breach, NY 1965.

H.-Y. CHIU, Cosmic Neutrino Sources, Columbia University preprint.

##### *Experiment von DAVIS:*

R. DAVIS, *Bull. Am. Phys. Soc.* 17, 527 (1972).

B. KUCHOWICZ, The Missing Solar Neutrinos, Nucl. En. Inf. Center, Warschau 1973.

#### *Adresse des Verfassers:*

Dr. P. GERBER, Jurav vorstadt 57, CH-2502 Biel.

## Neues aus der Astronomischen Forschung

von P. JAKOBER

### *Wasser in der Jupiter-Atmosphäre*

Wasser als eine der einfachsten stabilen chemischen Verbindungen konnte bis anhin im Weltall im interstellaren Gas, in der Atmosphäre von kühlen Sternen, auf Venus und Mars sowie einigen Monden von Jupiter und Saturn und in dessen Ring festgestellt werden. Theoretische Überlegungen liessen den Schluss zu, dass Wasser auch in den Atmosphären der grossen Planeten in grösserer Menge vorkommt. Die äussersten Atmosphärenschichten dieser Planeten sind indessen zu kalt, als dass darin flüssiges Wasser vorhanden sein könnte. Es konnten anstelle der auf der Erde bekannten Wasserwolken solche aus flüssigem

Ammoniak, Methan und photochemischer Smog beobachtet werden. In den letzten Jahren gelang es durch Beobachtung im infraroten Gebiet des Wellenspektrums bei einer Wellenlänge von  $5 \mu\text{m}$  Löcher in der Ammoniak- und Methanwolkenschicht festzustellen. Die gelegentlich auftretenden Löcher gestatteten Blicke auf heiße Flecken – hot spots – tieferer Atmosphärenschichten: die Temperaturen stiegen dort auf Werte von über 0 Grad Celsius an. H. P. LARSON, U. FINK, R. TREFFERS und T. N. GAUTIER III von der Universität Arizona konnten nun die theoretisch vorausgesagten wasserreichen Zonen unterhalb der visu-