
Neutrinos sind besonders klein
Und lass'n sich nicht mit andern ein.

John Updike (1932–2009)

Liebe Leserin, lieber Leser,

warum leuchten Sonne und Sterne – und das schon so lange? Nun, vor 100 Jahren, am 2. September 1920, erschien in Nature ein Aufsatz des Visionärs Arthur S. Eddington (1882–1944), der darüber lang und breit spekulierte. Es handelte sich um die Eröffnungsrede eines Kongresses der Naturwissenschaftler in Cardiff. Wie man wusste, hat die Erde und mithin die Sonne mehr als zwei Milliarden Jahre auf dem Buckel. Doch es gab weder eine gravitative noch chemische Energiequelle, welche die Sonne über einen derart langen Zeitraum hätte leuchten machen können. Eddington meinte, es müsse sich um die Energie der Atomkerne handeln, speziell um die Energie, die frei wird, verschmelzen vier Wasserstoffatomkerne (${}^1\text{H}$), Protonen, zu einem Heliumatomkern (${}^4\text{He}$). Die Massendifferenz – ein ${}^4\text{He}$ (α -Teilchen) ist 0,7 % leichter als vier einzelne Protonen – muss gemäß $E = m \cdot c^2$ als Energie freigesetzt werden. Dass es im Innern der Sonne nach klassischer Vorstellung für eine Fusion zu kalt ist, wischte er mit dem Hinweis vom Tisch, was in Cambridge's Cavendish Laboratorium möglich sei, die Kernumwandlung, sollte der Sonne nicht allzu schwer fallen. Er spielte an auf die kürzlich unter Sir Ernest Rutherford¹(1871–1937) erfolgte erste künstliche Kernumwandlung. Und er sollte damit recht behalten.

Zu Zeiten Eddingtons gab es nur eine Möglichkeit, ins Innere der Sonne vorzudringen: die „analytische Bohrmaschine“. Obwohl die mittlere Dichte der Sonne mit $1,4 \text{ g/cm}^3$ die des Wassers übertrifft, verhält sich das Sonnenplasma wegen der hohen Temperaturen selbst noch im Sonnenzentrum – bei 150 g/cm^3 – (sofern man nicht zu penibel ist) wie ein ideales Gas. Die Physik idealer Gase ist simpel und das mittlere Molekulargewicht in der

¹Rutherford prägte 1919 den Namen Proton für den Kern des Wasserstoffatoms. Das Neutron, 1921 von Rutherford vorhergesagt, wurde 1932 von James Chadwick (1891–1974) aufgefunden.

Sonne kein großes Geheimnis. Als weitere Ingredienz benötigt der analytische Sonnenphysiker noch die Opazität der Sonnenmaterie, d. h. das Absorptionsvermögen für Röntgenstrahlung. Das sich zu beschaffen war kein Problem für Eddington, zumal es ihm für eine grobe Schätzung der Verhältnisse auf Genauigkeit nicht ankam. Wie Eddington seinen Zuhörern klar machte, ist es einfacher, etwas über das Innere der Sterne zu erfahren, als über die Verhältnisse im Erdinneren, wenige Kilometer unter unseren Füßen. Geophysik ist Festkörperphysik und komplizierter als Sternphysik.

Inzwischen verfügen wir über ausgefeilte numerische Sonnenmodelle, können Helioseismologie betreiben und sogar die momentane Energieproduktion in der Zentralregion anhand der Neutrinoemission messen. Die Theorie ist überprüfbar! Bislang konnte man allerdings nur Neutrinos nachweisen, die bei der sog. Proton-Proton-Reaktion anfallen. Wie auf einer (virtuellen) Neutrino-Konferenz, die im Juni dieses Jahres stattfand, bekannt gegeben wurde, sind nun auch die Neutrinos des Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus (CNO-Zyklus) den Borexino-Forschern ins Netz gegangen. Die Anzahl von Neutrinoereignissen mit entsprechenden Energien steht im Einklang mit theoretischen Erwartungen.

Der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus, 1938 von Hans Bethe (1906–2005) und Carl Friedrich Frh. von Weizsäcker (1912–2007) unabhängig voneinander entdeckt und beschrieben, trägt zwar kaum zur Energieproduktion der Sonne bei, gibt aber wegen seiner enormen Temperaturempfindlichkeit ein gutes „Thermometer“ ab.

Interesse geweckt? Dann lesen sie weiter, was Untergrund-Sonnenforscher uns über das Sonnenfeuer zu sagen haben.

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im September

Venus ist Morgenstern. Sie durchwandert das Sternbild Krebs, dabei am 13. September die Praesepe südlich passierend. (Der Sternhaufen M 44 wird auch als „Bienenstock“ bezeichnet.) Am Morgen des 14. gesellt sich der alte Mond hinzu.

Für den Mars beginnt mit dem Stillstand am 9. September seine diesjährige Oppositionsphase. Über zwei Monate wird er sich nun rückläufig bewegen. Bis zur Opposition Mitte Oktober, die in den Fischen stattfindet, wird er an

Helligkeit zulegen und bereits am Monatsende den Jupiter diesbezüglich in den Schatten stellen.

Die Riesenplaneten Jupiter und Saturn beenden Mitte bzw. Ende des Monats ihre Oppositionsphase. Jupiter wird am 13. stationär, Saturn am 29. Danach bewegen sie sich wieder rechtläufig bezüglich der Sterne des Tierkreises. Beide illuminieren die erste Nachthälfte.

Am 22. September verabschiedet sich das hellere Halbjahr von uns. Um 15:31 MESZ passiert die Sonne den Himmelsäquator und schenkt ihre Gunst fortan vornehmlich südlichen Gefilden – bis zum 20. März 2021.

Am 27. September nähert sich die Parker-Sonde der NASA bei ihrer 6. Stippvisite der Sonnenoberfläche auf 20 Sonnenradien.

Ende August/Anfang September kommt der Apollo Asteroid 2011 ES₄ der Erde in die Quere. Er zieht in vielleicht 1/3 der Mondentfernung mit gut 8 km/s an uns vorbei. Das Projektil dürfte um die 25 m groß sein.

Sonnenenergie

Der Nobelpreis für Chemie ging 1922 an Francis William Aston (1877–1945). Aston hatte 1919 den Massenspektrographen erfunden gehabt, ein Gerät, mit dem er hochgenau die Massen von Atomkernen bestimmen konnte. Dem Sonnen- und Sternphysiker verraten die Kernmassen etwas Wesentliches: die **B i n d u n g s e n e r g i e**. Ein Kern wiegt weniger als die Summe seiner Bestandteile! Beispiel: Helium. Ein ⁴He-Atomkern (α -Teilchen) wiegt 4,001506 Masseneinheiten, ein Proton, das leichteste Nukleon, 1,007276. Gelänge es, vier Protonen zu einem Helium-Atomkern zu vereinen, würde die Massendifferenz von $4 \times 1,007276 - 4,001506 = 0,0276$ in Form von Energie freigesetzt werden. 0,0276 atomare Masseneinheiten entsprechen 25,7 MeV oder 4,12 pWs (Pikowattsekunden). Man muss schon sehr genau messen, um die Herkunft der Energie von Sonne und Sternen heraus zu finden! Weniger als ein Prozent der Masse „verschwindet“ als Energie. (Die moderne Physik kennt nur einen Erhaltungssatz für Energie-Impuls, keinen für Masse.)

Natürlich gibt es jede Menge Schwierigkeiten (wie die Erbauer von Fusionsreaktoren wissen) bei der Umsetzung. Man muss beispielsweise mit Dutzenden Millionen von Hitzegraden, sprich thermischer Geschwindigkeit, die elektrische Abstoßung zwischen den Reaktionspartnern, den Protonen, überwinden helfen. Außerdem muss sich jedes zweite Proton einer Metamorphose

unterziehen: Es muss zu einem Neutron mutieren! Ein Heliumatomkern (α -Teilchen) enthält zwei Neutronen².

Summarisch gilt $4p^+ \rightarrow \alpha + 2e^+ + 2\nu_e$. Die beiden Positronen (e^+) tragen die Ladung hinweg, die bei der Verwandlung von zwei der Protonen (p^+) in Neutronen übrigbleiben. (Sie annihilieren mit zwei Elektronen (e^-)). Die beiden Elektronen-Neutrinos (ν_e) erinnern daran, dass es sich bei der Protonen-Transformation um einen Vorgang aus dem Reich der schwachen Wechselwirkung handelt, dem der Radioaktivität. Das erweist sich als Manko: Damit sich zwei Protonen zu einem Deuteron (${}^2\text{H}$) vereinen, dem ersten Schritt zur Heliumsynthese, müssen sich die beiden nicht nur recht nahe kommen (damit die starke Kernkraft zum Tragen kommt), eines von beiden muss zufällig zu einem Neutron werden³. Das geschieht fast nie⁴ und wird deshalb von Fusionstechnikern übersprungen. Sie beginnen mit Deuterium (bzw. Tritium), d. h., die Neutronen sind bei technischen Fusionsexperimenten von Anfang an dabei. Insofern ist es nicht gerechtfertigt, vom „Sonnenfeuer auf Erden“ oder ähnlichem zu schwärmen.

Die summarische Schreibweise der thermonuklearen Reaktion sagt nichts darüber aus, wie es konkret zur Bildung des ${}^4\text{He}$ -Atomkerns kommt. Allein die Proton-Proton-Reaktion, die über 99% der Sonnenenergie liefert, kann auf drei verschiedenen Wegen (mit unterschiedlichen, temperaturabhängigen Wahrscheinlichkeiten) ablaufen, wobei Atomkerne von ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{Be}$ und ${}^8\text{B}$ kommen und gehen.

Eingangs wurde der CNO-Zyklus erwähnt, der Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und Fluor (F) quasi als Katalysatoren benutzt. Als Zwischenprodukte fungieren ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ sowie ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$ und ${}^{17}\text{F}$, da der CNO-Zyklus verschachtelt abläuft. Es handelt sich um ein Reaktionsnetzwerk. Im Gleichgewichtsfall halten Produktion und Zerstörung von Zwischenkernen einander die Waage. Es stellt sich eine für dieses Netzwerk charakteristische Isotopenhäufigkeitsverteilung ein.

Das Spektrum der Sonnenneutrinos enthält sowohl kontinuierliche Anteile

²Je schwerer ein chemisches Element, desto höher ist im Allgemeinen der Anteil der Neutronen. Diese Überschussneutronen waren einst Protonen! Sie verdanken ihre Existenz dem β^+ -Zerfall.

³Gelegentlich hilft auch der inverse β -Prozess: $p^+ + e^- + p^+ \rightarrow d + \nu_e$, wobei d für den Deuterium-Atomkern (${}^2\text{H}^+$) steht, das Deuteron. Die sog. pep-Neutrinos sind hochenergetisch (1,442 MeV) und ließen sich schon mit den radiochemischen Neutrinodetektoren der ersten Generation nachweisen.

⁴Ansonsten explodierte die Sonne!

wie auch Neutrinolinien. Die Stärke der einzelnen Komponenten hängt von den physikalischen Bedingungen in der „Brennzone“ ab. Die Energieproduktion wächst im Falle der pp-Reaktionen mit der 4. bis 5. Potenz der Temperatur. (Auf die Leuchtkraft der Sonne hat das keinen Einfluss⁵! Die Sonne ist ein sich selbst regulierender Fusionsreaktor. Es wird gerade soviel an Energie nachgeliefert, wie zur Deckung des Verlustes durch Abstrahlung vonnöten ist.)

Weniger als 1 % der solaren Energieproduktion entfällt auf den CNO-Zyklus. Wegen der starken Temperaturabhängigkeit – die Energieproduktion geht (bei „niedrigen“ Temperaturen) mit der ≈ 20 . Potenz der Temperatur – dominiert der CNO-Zyklus erst in Zwergsternen mit mehr als $1\frac{1}{3}$ Sonnenmassen über die pp-Kette.

Auch wenn der Sonnenreaktor (wegen der Flaschenhals-Reaktion $p^+ + p^+ \rightarrow d + e^+ + \nu_e$) auf „Sparflamme“ läuft – ein Komposthaufen von der Größe der Sonne gäbe mehr Wärme ab! –, die Anzahl von emittierten Sonnenneutrinos kann sich hier, eine Astronomische Einheit vom Sonnenkern entfernt, sehen lassen: 65 Milliarden Sonnenneutrinos pro Quadratcentimeter und Sekunde bei Tag wie bei Nacht! Der Neutrino bedingte Energieverlust der Sonne macht gut zwei Prozent der Sonnenleuchtkraft aus.

Doch wie die solaren Geisterteilchen nachweisen⁶? Zwar ist der Wirkungsquerschnitt eines Neutrinos mit 10^{-46} cm² extrem klein, aber bei der riesigen Anzahl von Neutrinos, welche die Sonne ausspuckt, kommt es dennoch zu einigen nachweisbaren Zusammenstößen mit Target-Elektronen pro Tag – sofern der Szintillator nur groß genug ist. Die weggekickten Elektronen machen sich durch Lichtblitze bemerkbar.

Der Borexino Neutrinodetektor des Gran-Sasso-Nationallaboratoriums befindet sich, bedeckt von 1,4 km Gestein des Gran-Sasso-Massivs (um die kosmische Strahlung abzuwehren), unter dem Apennin, nahe der Ortschaft L’Aquila. Es handelt sich um ein kugelförmiges Gefäß aus Edelstahl, darin, in einer hochreinen Flüssigkeit schwebend, ein durchsichtiger 8,5-m-Nylonballon, befüllt mit 278 Tonnen eines aromatischen Kohlenwasserstoffs. Der Neutrinonachweis beruht auf der elastischen ν_e - e^- -Streuung im Flüssigszintillator. Das Ganze befindet sich in einem zylindrischen Kessel. Der Freiraum zwischen

⁵Man kann ein im Wesentlichen korrektes Sonnenmodell erstellen, ohne zu wissen, wodurch der Energieverlust durch Abstrahlung gedeckt wird. Die Zentraltemperatur muss lediglich die Zündtemperatur für das thermonukleare Wasserstoff„brennen“ erreichen.

⁶1935 glaubte Hans Bethe beweisen zu können, dass Neutrinos unbeobachtbar sind!

äußerer Hülle und Edelstahlkugel ist mit ultrareinem Wasser gefüllt, das Störstrahlungen absorbieren soll. Von außen sieht man nur die Verpackung, die der Wärmeisolierung dient.

Der Borexino-Detektor ist derzeit die einzige Anlage, die für alle Arten von Sonnenneutrinos empfänglich ist, also auch für niederenergetische aus der pp-Reaktion. Diese konnten mit dem ersten radiochemischen Neutrinodetektor in der Homestake-Mine zu Beginn der 70er Jahre wegen des hohen Schwellenwertes der Chlor-Reaktion, $^{37}\text{Cl}(\nu_e, e^-)^{37}\text{Ar}^+$, noch gar nicht registriert werden.

2007 gelang die Zählung monoenergetischer (0,862 MeV) ^7Be -Neutrinos. Ein weiterer Erfolg war 2011 der Nachweis der hochenergetischen (1,442 MeV) pep-Neutrinos, die bei seltenen Dreierstößen entstehen: $p^+ + e^- + p^+ \rightarrow d + \nu_e$. 2014 endlich wurden der Neutrinofluss vom erwähnten Flaschenhalsprozess in Echtzeit⁷ gemessen. Das geht inzwischen auf wenige Prozent genau.

2001 konnte das leidige Sonnenneutrino-Problem *ad acta* gelegt werden. Wie man mit einem anderen Nachweisverfahren herausfand, emittiert die Sonne mehr Neutrinos, als man bisher hatte nachweisen können. Offenbar wechselt, wie von Bruno Pontecorvo (1913–1993) Ende der 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts vermutet, so ein Sonnenneutrino auf dem Weg zu uns die Teilchen-Familie: Aus elektronischen Neutrinos (ν_e) werden myonische (ν_μ) und tauonische (ν_τ). Für nicht-elektronische Neutrinos sind radiochemische Neutrinodetektoren blind. Kein Wunder also, dass weniger Neutrinos registriert wurden waren, als von Sonnentheoretikern vorhergesagt. Dass es nicht an „seinem“ Sonnenmodell lag, dürfte der Altvater der Neutrinoastronomie, John Norris Bahcall (1934–2005), mit Erleichterung zur Kenntnis genommen haben. Eine Weile kursierte sogar das Gerücht, der Fusionsreaktor im Innern der Sonne sei zeitweilig außer Betrieb! So etwas machte sich beim Neutrinofluss sofort bemerkbar. Im sichtbaren Licht fielen solche kurzzeitigen „Aussetzer“ hingegen nicht auf, weil Photonen einige Zehntausend Jahre brauchen, sich durch den undurchsichtigen Sonnenball auf verschlungenen Zick-Zack-Wegen nach draußen durchzukämpfen.

CNO-Zyklus-Neutrinos

Um auch der Sonnenneutrinos aus dem Stickstoff-, Sauerstoff- und Fluor-Zerfall habhaft zu werden, musste das Hintergrundrauschen des Detektors um Größenordnungen verringert werden. Elektronen, die Lichtblitze auslösen, gibt es zuhauf. Die Nachweisflüssigkeit muss radiochemisch extrem rein⁸ sein.

⁷Zuvor hatte man diese Sonnenneutrinos radiochemisch registriert, durch die Akkumulation von instabilem ^{71}Ge (Germanium) in einem Gallium-Detektor: $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}^+$.

⁸Der Borexino-Detektorkern dürfte mittlerweile der Raum auf Erden sein mit der geringsten natürlichen Radioaktivität, wie einer der Untertage-Neutrino-Sonnenforscher zum

Ein Problem sei ^{210}Bi gewesen, heißt es, radioaktives Wismut⁹, das langsam aus dem Nylon des 125 μm dünnen Ballons, der den Detektorkern umhüllt, in den zentralen Messbereich des Detektors diffundiert und mit einer Halbwertszeit von fünf Tagen in ^{210}Po (Polonium¹⁰) zerfällt. Es geht um wenige Dutzend ^{210}Bi -Zerfälle pro Tag. Um ein schnelles Eindringen des β -Strahlers in den Messbereich des Detektors durch Konvektion zu verhindern, musste die gesamte Anlage aktiv thermisch stabilisiert werden! Das Neutrinosignal, welches vom Wirken des CNO-Zyklus in der Sonne kündigt, kam erst zum Vorschein, nachdem man alle Macken des Neutrinospektroskops und deren mathematische Modellierung voll im Griff hatte. Das hatte Jahre gedauert.

Mit den Neutrinos aus dem CNO-Zyklus ist das Puzzle vollständig. Nach einhundert Jahren herrscht Gewissheit ob der Quellen des Sonnenlichts. In Zukunft geht es um Feinheiten, Fragen, die Sonnenphysikern auf den Nägeln brennen. Wie hoch ist genau der „Metallgehalt“ der Sonne? (Als „Metalle“ bezeichnen Astrophysiker alles, was im Periodensystem auf das Helium folgt.) Vor zwei Jahrzehnten ist darüber unter Sonnenphysikern ein Streit entbrannt. Man stößt in der Literatur inzwischen auf Sonnenmodelle mit niedrigerem Metallgehalt als in den Lehrbüchern angegeben.

Besten gab: Die Zerfallsrate im Trinkwasser sei Milliardenfach höher!

⁹Madam Curie's „Radium E“ hatte eine entscheidende Rolle bei der „Erfindung“ des Neutrinos durch Wolfgang Pauli (1900–1958) gespielt. Pauli, der als das personifizierte „Gewissen der Physik“ galt und am Energieerhaltungssatz eisern festhielt, gab seinen „Ausweg“ aus der misslichen Lage, in einem offenen „Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen“ vom 4. Dezember 1930 kund: „Liebe Radioaktive Damen und Herren, [...] Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände [...]“. (Gemeint ist das Neutrino! Das Neutron, eine Art neutrales Proton, wurde kurz darauf, 1932, entdeckt.)

¹⁰Um das Eindringen des ^{210}Bi in den Detektor zu kartieren bedient man sich des leichter erfassbaren α -Zerfalls des ^{210}Po . Das Poloniumisotop hat eine Halbwertszeit von 138,3 Tagen und ist (was Geheimdienste wissen) hochgiftig.