

Die Information aus zweiter Hand nimmt sich immer gut aus, im Unterschied zu jener lückenhaften und ungesicherten, die dem Wissenschaftler zu Gebote steht.

Stanisław Lem (1921–2006)

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 60 Jahren erschien „Solaris“, eine Erzählung des polnischen Autors Stanisław Lem. Die Geschichte des Psychologen Dr. Kelvin, der die rätselhaften Geschehnisse im Zusammenhang mit einem Ozean-Planeten aufklären soll und grandios scheitert, ist mehrfach verfilmt worden. Die 1972er Fassung von Andrei Tarkowski (1932–1986) gilt Cineasten als Meisterwerk.

Es geht um die Crew einer Raumstation. Als Antwort des mysteriösen Ozeans auf ein provokatives Experiment tauchen ungebetene „Gäste“ auf, unzerstörbare. Sie sind aus einem besonderen Stoff – Neutrinos. Der Faszination des Neutrinos war nicht nur Lem erlegen. Das Teilchen aus einer verquerten Welt, der der schwachen Wechselwirkung, beschäftigt Physiker und Astronomen gleichermaßen. Eine Zeitlang sah es so aus, als bestünde das Universum hauptsächlich aus Neutrinos. Diese Hypothese hat sich erledigt, aber das Neutrino gibt es tatsächlich. Zweifelsfrei nachgewiesen wurde es vor 65 Jahren. Dass es existiert, stand außer Zweifel. Doch wie einer Sache habhaft werden, die mühelos eine Mauer aus Blei, lichtjahrestark, lichtschnell durchheilt?

Das Neutrino ist unter den unverzichtbaren Elementarteilchen das sicherlich seltsamste. Gute Unterhaltung wünscht wie immer

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Juli

Venus ist etwas für lange Abende. Am Monatsende geht sie kurz nach 22 Uhr MESZ unter. Am 12. kommt ihr der junge Mond nahe.

Mars entzieht sich dem unbewaffneten Auge. Er geht um den 10. Juli zeitgleich mit seiner Schwester im Mythos unter.

Um die Monatsmitte lugt Jupiter über den Osthorizont, wenn Venus uns im Westen verlässt. Saturn erscheint eine 3/4-Stunde vor seinem Nachfolger.

Maximale Sonnenferne ist am 5. Juli, um die MESZ-Mitternacht. Die Erde ist dann 152,1 Millionen Kilometer von ihr entfernt. Man achte auf das Kleingedruckte: „Erde“ steht für das Baryzentrum des Erde-Mond-Systems, und das Schwerezentrum des Sonnensystems fällt auch nicht mit dem Sonnenzentrum zusammen.

β -Radioaktivität

Die Radioaktivität, 1896 von Antoine Henri Becquerel (1852–1908) zufällig entdeckt, ist eine Eigenheit instabiler Atomkerne. Das trifft auch auf die β -Strahlung zu, wie 1913 der Däne Niels Bohr (1885–1962) erkannt hatte. Man hatte anfänglich geglaubt, die Elektronen – bei der β -Strahlung handelt es sich um schnelle Elektronen – entstammten der Elektronenhülle von Atomen. Nachdem Quantenphysiker sich mit dem Gedanken angefreundet hatten, in der atomaren und sub-atomaren Welt gäbe es nur diskrete Energieniveaus, fragte sich 1922 Lise Meitner (1878–1968) verwundert, wieso dann die emittierten Elektronen ein breites Energiespektrum¹ abdeckten (mit einer von der Atomsorte abhängigen scharfen Obergrenze). Bei der γ -Strahlung beispielsweise entspricht die Energie des γ -Quants exakt der Energiedifferenz zwischen Ausgangs- und Endkern. Die γ -Linie ist scharf. (Man kann sie zur Identifizierung des Ausgangskerns benutzen.) Bei der β -Emission ist das anders. Nur die erwähnte Obergrenze, die ist „scharf“. Die Ausrede, ein Elektron aus beispielsweise einem Wismutatomkern („Radium E“) verlasse diesen zwar stets mit der gleichen Energie, verlöre aber Energie in der Elektronenhülle und auf dem Weg zum Nachweisgerät, verfing nicht. Wie Frau Meitner (kalorimetrisch) zeigte, verschwindet auf wundersame Weise beim β -Zerfall Energie, mal mehr, mal weniger. Das war nicht alles. Auch Impuls- und Drehimpulserhaltung standen zur Disposition. Wolfgang Pauli (1900–1958), ein schweizerisch-US-amerikanischer Physiker österreichischer Herkunft, der nicht gewillt war, diese Grundpfeiler der Physik mir nichts, dir nichts zu opfern² – Erhaltungssätze sind so etwas wie die „heiligen Kühe“ der Physik –, postulierte statt dessen ein hypothetisches Teilchen (mit Eigendrehimpuls $1/2$). Dessen einzige Aufgabe: Das Wegschaffen von Energie, Impuls

¹Dass es sich in der Tat um ein breit gefächertes Energiespektrum handelt, fand 1914 James Chadwick (1891–1974) heraus, der spätere Entdecker des Neutrons (1932).

²Es gab Physiker, darunter N. Bohr, die Energieerhaltung nur noch in einem statistischen Sinne gewahrt sehen wollten.

und Drehimpuls, und zwar klamm heimlich am Physiker vorbei, obwohl dieser wie ein Schießhund aufpasst. Die Unbeobachtbarkeit bereitete nicht nur Pauli Bauchschmerzen. Die Idee vom Neutrino³, dem „kleinen Neutralen“, im Dezember 1930 in die Welt gesetzt, machte die Runde. Der Name klingt italienisch und geht zurück auf Enrico Fermi (1901–1954), einem Italiener, der von Paulis Kreation angetan war. Fermi schuf 1934 die Theorie des β -Übergangs. Danach verwandelt sich spontan ein Neutron des instabilen Atomkerns in ein Proton, wodurch sich die Kernladungszahl um eins erhöht. So wird aus Wismut-210 ($^{210}_{83}\text{Bi}$) Polonium-210 ($^{210}_{84}\text{Po}$, historisch „Radium F“). An der Massenzahl ändert sich nichts. Aus Gründen der Ladungserhaltung wird ein negatives Elektron geboren⁴, und, damit auch alles sonst seine Richtigkeit hat, ein ladungs- und (so gut wie) masseloses (Anti-)Neutrino. Wie die Energie auf Elektron und Neutrino aufgeteilt wird, ist dem Zufall überlassen. Für das Neutrino bleibt kaum Ruhemasseenergie übrig. Der Einfachheit halber ging man von einer Ruhemasse Null aus. Die Schwäche dieser *s c h w a c h e n* *W e c h s e l w i r k u n g* offenbart sich in der Seltenheit, mit der sie in Erscheinung tritt. Nehmen Sie ein Neutron. Es überlebt in freier Wildbahn, also ungebunden, im Schnitt eine Viertelstunde, bevor es in ein Proton, ein Elektron und ein (Anti-)Neutrino zerfällt. Eine Viertelstunde, das ist in der subatomaren Welt eine Ewigkeit!

Fermis gefeierte Theorie der schwachen Wechselwirkung war nur ein Anfang, und das Neutrino beschäftigt uns bis heute. Zunächst einmal aber galt es, des aus einer konservativen Haltung heraus postulierten hypothetischen Teilchens habhaft zu werden. Gut ein Vierteljahrhundert lang war seine Existenz eine rein geistige. Dass der Rückstoß bei der Emission des Neutrinos gemessen werden konnte, war immerhin ein starkes Indiz für dessen Existenz.

Wirklich nachgewiesen wurde das (Anti-)Neutrino vor 65 Jahren von den US-amerikanischen Kernphysikern Frederick Reines (1918–1998) und Clyde L. Cowan Jr. (1919–1974). Als Neutrinoquelle diente ein Kernreaktor. Bei einer Kernspaltung entstehen Spaltprodukte, bei denen das Anzahlverhältnis aus Neutronen und Protonen ausgewogener ist als beim neutronenlastigen Ausgangskern. (Beim Uranisotop ^{235}U entfallen auf die obligaten 92 Protonen 143 Neutronen.) Überzählige Neutronen werden unter Abgabe von

³Pauli selbst sprach vom „Neutron“, doch dieses wurde 1932 entdeckt und ist ein klein wenig schwerer als das Proton (weshalb es spontan zerfallen kann).

⁴Es war, wie das Neutrino, vorher nicht im Kern vorhanden! Ein Photon entsteht auch erst, nimmt ein Hüllenelektron einen niedrigeren Energiezustand ein.

Elektronen und (Anti-)Neutrinos zu Protonen. Zum Nachweis diente Reines und Cowan der umgekehrte Vorgang in (mit Cadmium versetztem) Wasser: Ein energiereiches (Anti-)Neutrino macht – aus heutiger Sicht – aus einem Up-Quark des Protons ein Down-Quark, wodurch aus dem Proton ein Neutron wird. Die positive elektrische Ladung wird von einem Elektron, einem positiven (Positron), weggetragen. Letzteres tut sich mit einem negativen Elektron zusammen, wobei beide in zwei γ -Quanten zerstrahlen, und auch beim Einfang des inzwischen durch Stöße langsam gewordenen Neutrons durch einen Cadmium-Atomkern entsteht Gammastrahlung. Der Wirkungsquerschnitt für eine Neutrino-reaktion ist äußerst klein: trillionenfach kleiner als der Querschnitt eines Protons! Damit es mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zur Absorption eines Neutrinos durch ein Proton kommt, müsste etwa eine Wasserschicht von 200 Lichtjahren durchmessen werden. Cowan und Reines gelang der Nachweis mit einem Detektor, gefüllt mit 400 Litern Wasser, das mit Cadmiumchlorid versetzt war. Voraussetzung war ein ausreichend starker Neutrino-fluss von einer Billion Neutrinos pro Quadratmeter und Sekunde, weshalb man gar eine Atombombe als Neutrinoquelle in Erwägung gezogen hatte. Der Erfolgstrick bestand darin, sowohl die Paarvernichtung des Elektron-Positron Paares als auch die um Mikrosekunden verzögerte Emission von γ -Quanten zu messen, die vom Neutroneneinfang durch Cadmium künden. Hilfreich war auch, dass die beiden 511-keV-Paarvernichtungs-Quanten in entgegengesetzte Richtungen emittiert werden. Die Elektronik, sie machte damals eine LKW-Ladung aus, filterte aus dem Wust von γ -Blitzen die passenden Koinzidenzen unter Beachtung der richtigen Reihenfolge aus – drei Ereignisse pro Stunde. Das Problem bei allen Neutrinoexperimenten ist störende Hintergrundstrahlung, weshalb Neutrino-Forscher zum Experimentieren gerne in den Untergrund gehen. Als weiterer Test kann der Reaktor abgeschaltet werden (was bei Sonnenneutrinos nicht geht). Am 20. Juli 1956 jedenfalls erfuhr die interessierte Welt vom Auffinden des Neutrinos aus den Medien. Pauli, der einen Nachweis des „Poltergeistes“ (Reines) für unmöglich gehalten hatte, dürfte sich ungeachtet seines Irrtums gefreut haben. 1995 gab's dann dafür den halben Nobelpreis, der leider nur noch an Frederick Reines ging. Clyde L. Cowan erlebte diesen späten Triumph nicht mehr.

Frederick Reines widmete sich fürderhin der Erforschung des Neutrinos. Sein Traum, der Nachweis von Supernova-Neutrinos, ging am 23. Februar 1987 in Erfüllung. In mindestens drei Untergrundlaboratorien wurde der „Neutri-

noblitz“, der von SN 1987 A, einer Typ-II-Supernova in der Großen Magellanschen Wolke, ausging, registriert, drei Stunden bevor die Supernova hochging: Insgesamt gingen den Neutrino-Astronomen binnen einer Viertelminute 19 Neutrinos in die Falle. Die Explosion des blauen Überriesen mit Namen Sanduleak -69°202 war die erste mit bloßem Auge sichtbare Supernova seit 1604. Wir konstatieren: Ohne Neutrinos gäbe es weder chemische Elemente mit neutronenreichen Atomkernen noch sog. Kern-Kollaps-Supernovae. Mit Kern-Kollaps ist der gravitative Zusammenbruch eines 1000-km-Sternenkerns aus Eisen gemeint, jenem Element, dessen Atomkern die höchste Bindungsenergie pro Nukleon aufweist.

Den Energieerhaltungssatz hatte man retten können. Dafür blieb etwas anderes auf der Strecke. Energieerhaltung ist Ausdruck einer zeitlichen Symmetrie: Der Zeitpunkt eines Experiments ist für dessen Ausgang unerheblich. (Naturgesetze ignorieren den Wochentag!). Bis 1957 ging man stillschweigend davon aus, das Spiegelbild⁵ eines Experiments führe, in die Realität versetzt, zum gleichen Ergebnis. Das stimmt – solange das Neutrino nicht mit von der Partie ist! Das Universum ist wegen der schwachen Wechselwirkung nicht mit seiner Widerspiegelung identisch, und rechts und Links sind keine reinen Konventionen! Diese sog. Paritätsverletzung unterstreicht die Sonderbarkeit, welche durch das Neutrino in die Welt gekommen ist.

Neutrino-Oszillationen

An dem Reaktor, wo Reines und Cowan der Nachweis des Anti-Neutrinos gelang, war auch Raymond Davis Jr. (1914–2006) tätig. Der Radiochemiker setzte auf eine 1946 von Bruno Pontecorvo (1913–1993), einem Fermi-Schüler und -Landsmann, vorgeschlagene Nachweismethode, die Verwandlung von Chlor (^{37}Cl) in radioaktives Argon (^{37}Ar) beim Einfang eines Neutrinos. Was man damals nicht wusste: Das funktioniert nur mit Neutrinos, nicht mit Anti-Neutrinos! So gesehen darf Davis' Misserfolg im Nachhinein als Erfolg verbucht werden, beweist es doch, dass die Natur sehr wohl zwischen Neutrinos und Anti-Neutrinos unterscheidet.

Dass Davis 2002 dennoch zu einem Nobelpreis⁶ kam, verdankt er einem natürlichen Neutrinoquell – der Sonne⁷ Im heißen Innern der Sonne ver-

⁵Das heißt, eine Formel ist gefeit gegen die Inversion $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$, mit \vec{r} als Ortsvektor.

⁶Zusammen mit Masatoshi Koshiba (1926–2020), einem japanischen Neutrino-Forscher. Der Experte für solare Neutrinos, John Norris Bahcall (1934–2005), ging leer aus.

⁷Die Sonne liefert Neutrinos! Bei der Fission entstehen Anti-Neutrinos, bei der Fusion Neutrinos. Der solare Neutrinostrom beläuft sich auf 65 Milliarden Neutrinos pro Sekunde

schmelzen (fusionieren) jeweils vier Wasserstoffkernen (Protonen) zu einem Heliumkern. Dazu müssen zwei der beteiligten Protonen zu Neutronen mutieren. Dank der schwachen Wechselwirkung geschieht dies hin und wieder, wobei ein Positron nebst Neutrino anfallen. Diese Reaktion, der β^+ -Zerfall eines Protons just in dem Moment, wo es sich mit einem Partner einlässt, ist der Flaschenhals bei der solaren Energieerzeugung⁸.

Davis konnte mit seiner in 1 1/2 km Tiefe gelegenen Apparatur⁹ nur hochenergetische ($> 0,8 \text{ MeV}$) Sonnenneutrinos aus dem CNO-Zyklus nachweisen, welcher als Energielieferant nur eine untergeordnete Rolle spielt. Aber auch diese Neutrinos fallen wie jene aus der Wasserstofffusion bei der Verwandlung von Protonen in Neutronen an, sind also Neutrinos und keine Anti-Neutrinos.

Davis begann mit dem Zählen von ^{37}Ar -Zerfällen Ende der 60er Jahre. Nach einem Vierteljahrhundert und mehreren Messkampagnen musste man feststellen, die Messungen der Neutrinoleuchtkraft der Sonne ergaben weniger als ein Drittel des von Sonnenphysikern vorhergesagten Wertes. Die „fehlenden Neutrinos“ erregten die Gemüter¹⁰. Die Sonnenforscher um John Norris Bahcall (1934–2005) taten ihr bestes, die Zentraltemperatur der Sonne abzusenken. Der CNO-Zyklus, auch Bethe-Weizsäcker-Zyklus genannt, ist extrem temperaturabhängig. Eine geringfügig verringerte Zentraltemperatur reduzierte den Neutrinofluss merklich. Doch es lag nicht am Sonnenmodell.

Es lag am Neutrino. Bruno Pontecorvo sollte recht behalten. Dieser italienisch-US-amerikanische Physiker, der sich 1950 aus unerfindlichen Gründen in die Sowjetunion abgesetzt hatte, brachte die Idee von der Neutrino-Oszillation auf. Um zu verstehen, was es damit auf sich hat, müssen wir etwas ausholen: Es ist nicht nachvollziehbar, weshalb die Natur es nicht bei einem „Baustein“ hat bewenden lassen: Elektron (e^-), Elektron-Neutrino (ν_e) sowie Up- (u) und Down-Quark¹¹ (d). Aus jeweils drei Quarks kann sie die üblichen Hadronen zaubern, die Nukleonen Proton (uud) und Neutron (ddu). Dazu

und Quadratzentimeter. Er macht 2,3% der Sonnenleuchtkraft aus.

⁸Da Fusionstechniker nicht so lange warten können, verwenden sie von vornherein schweren Wasserstoff als „Brennmaterial“. Deuterium enthält das Neutron bereits seit Urknallzeiten. Dass ITER & Co. das „Sonnenfeuer“ auf die Erde holten, ist zwar werbewirksam, verschweigt aber den Beitrag der schwachen Wechselwirkung.

⁹Sein Neutrinodetektor enthielt 600 Tonnen Perchlorethylen (C_2Cl_4), einer Reinigungsflüssigkeit. Wer die Sonne auch nachts sehen will, muss sie unter Tage studieren!

¹⁰Sogar der Kosmos-Bote berichtete darüber – vor 50 Jahren, in einer Schülerzeitschrift.

¹¹Vom Neutrino glaubte man, es sei nicht beobachtbar, das Quark darf nicht beobachtbar sein! Es existiert lediglich im Verbund mit einem oder zwei weiteren Quarks. Dass nur Hadronen (Mesonen und Nukleonen) in der Natur beobachtet werden, aber keine Quarks,

kommen die entsprechenden Anti-Teilchen. Mehr an Inventar scheint nicht vonnöten. Sie aber fand Gefallen an anderen, schwereren Familien mit seltenen Teilchen, als da sind das schwere Elektron, Myon (μ), das dazugehörige Myon-Neutrino (ν_μ), sowie Hadronen, welche aus Charm- (c) und Strange-Quarks (s) aufgebaut sind. Sogar eine überschwere¹² Familie zeigt sich bei Beschleunigerexperimenten, von der hier nur das Tauon-Neutrino (ν_τ) von Interesse ist. Eventuell gibt's noch eine vierte¹³ Familie.

Wozu diese Diversität gut sein soll, weiß niemand? Aber sie löst das Problem der „fehlenden“ Sonnenneutrinos. Wie Pontecorvo Ende der 60er Jahre vermutete, pendelt das Neutrino zwischen den Familien. Man muss es sich als Überlagerung aller drei Möglichkeiten vorstellen. Aus dem Elektron-Neutrino, welches bei der Mutation eines Protons zu einem Neutron anfällt, wird in den achteinhalb Minuten bis zu uns zwischenzeitlich ein Myon- und eventuell sogar ein Tauon-Neutrino. Als was es bei uns ankommt, diktiert der (theoretisch kalkulierbare) Zufall. Unsere Neutrinoempfänger aber erkennen in der Regel nur Elektron-Neutrinos. Sie sind blind für μ -s und τ -s. Damit ward vor nunmehr 30 Jahren das Neutrino-Problem *ad acta* gelegt.

Japanische Forscher haben 2003 dieses Verhalten auch auf Erden gefunden. Eine Neutrinomesstelle nahe Tokyo registriert Anti-Neutrinos von 22 japanischen und koreanischen Kernreaktoren. KKW, welche nicht weiter als ein paar Dutzend Kilometer entfernt sind, tragen an Elektron-Neutrinos die erwartete Anzahl bei. Was weit entfernte Anlagen anbelangt, so fällt die Anzahl nachgewiesener Elektron-Neutrinos von diesen Reaktoren unter die Erwartung – es sei denn, man stellt den Familienwechsel in Rechnung.

Damit es zu Neutrino-Oszillationen kommen kann, müssen mindestens zwei der drei Neutrinoarten eine von Null verschiedene Ruhemasse haben. Vom Elektron-Neutrino weiß man inzwischen, dass es (mit 90 % Wahrscheinlichkeit) höchstens zwei Millionstel Elektronenmassen wiegt. Die Wägung des Neutrinos ist von prinzipieller Bedeutung: Im sog. Standardmodell ist für eine Neutrinoruhemasse kein Platz.

Wir schwimmen in einem Ozean aus Neutrinos. Sie sind mit $340/\text{cm}^3$ fast so häufig wie die Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Materie ist dünn gesät. Auf vier Kubikmeter Kosmos entfallen im Mittel ein Proton

ist eine Eigenheit der starken Wechselwirkung. Die Quarks-Idee erleichtert enorm die Buchhaltung, was ihre prinzipielle Nichtbeobachtbarkeit verschmerzen macht!

¹²Das überschwere Elektron, das Tauon, wiegt soviel wie $3\frac{1}{2}$ Tausend Alltagslektronen, mehr als ein Alltagsbaryon!

¹³Weitere Clans wären allerdings nicht mehr vereinbar mit der primordialen Synthese von Deuterium im heißen Urknall.

bzw. Neutron. Trotzdem spielt das Neutrino in der Massebilanz des Universums keine Rolle. Vor 40 Jahren sah man das anders. Das Neutrino galt als ein vielversprechender Kandidat für die dunkle Materie. Die zelluläre Struktur des Universums erinnert an Seifenschaum mit seinen Trennflächen. Flache Strukturen, die „Wände“, entstehen beim Gravitationskollaps zufälliger großräumiger ellipsoidischer Verdichtungen im expandierenden Universum. Diese fallen bevorzugt entlang der kurzen Achse eines Ellipsoids zusammen. Dabei entsteht ein scheibenförmiges Gebilde. (Die selteneren „Zigarren“ kollabieren zu eher ein-dimensionalen Strukturen.) Da das mit normaler Materie nicht funktioniert, dachte man an das Neutrino als kosmischen Strukturbildner. Geistiger Vater dieser Pancake-Theorie war Yakov Zeldovich (1914–1987). Inzwischen wird das Neutrino als zu leicht¹⁴ befunden, als dass es dazu in der Lage wäre. Nun sucht man nach einer schwach-wechselwirkenden Alternative. Bisläng erfolglos.

Zur Zeit erheischen extragalaktische PeV¹⁵-Neutrinos Aufmerksamkeit. Diese stammen wahrscheinlich indirekt (über Pionenzerfall) aus den „Beschleunigermaschinen“ in den Zentren aktiver Galaxien, welche kosmische Strahlung höchster Energien erzeugen. Zum Vergleich: Sonnenneutrinos bringen es maximal auf 20 MeV ($2 \cdot 10^7$ eV). Der Welt größter¹⁶ Neutrinodetektor, IceCube, befindet sich in der Antarktis. Dort werden etwa eine Milliarde Tonnen klaren Eises auf Lichtblitze hin überwacht, die von Neutrinokollisionen herrühren. Die Neutrinoquellen lassen sich dank IceCube auf 20°, 30° genau am Himmel lokalisieren. Um sie zu identifizieren und auf allen zur Verfügung stehenden Kanälen zu belauschen wird weltweit eine Armada von Teleskopen aufgebaut, die, von den γ -Strahlen bis hin zu Gravitationswellen, Multi-Messenger-Astronomie betreiben.

¹⁴Die leichten Neutrinos sind schlicht zu schnell. Den dunklen Halo einer Zwerggalaxie zu bilden, bedarf es langsamer, sprich schwerer Teilchen.

¹⁵Peta-Elektronenvolt: $1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$

¹⁶Ein vergleichbarer Gt-Detektor wird im Baikalsee betrieben und ausgebaut.