

Das Bemühen, das Universum zu verstehen, ist eines der ganz wenigen Dinge, die das menschliche Leben ein wenig über die Stufe einer Farce erheben, und gibt ihm etwas von der Anmut der Tragödie.

Steven Weinberg

Der Kosmos-Bote

April 2011

Liebe Leserin, lieber Leser,

die vergangenen Wochen hatten es in sich: Japan. Das Erschreckende: Es war weniger das Unfassbare, Tausende Erdbeben- und Tsunamiopfer, das uns bewegt hat, wir alle starrten gebannt auf ein defektes Kernkraftwerk und lauschten den Meldungen von Strahlenbelastung und den Dementies der Gesundheitsexperten.

Zugegeben, Unsicherheit und Angst, die sich in der Magengegend einstellen, kommt die Rede auf Radioaktivität, lassen sich nicht wegreden, aber man darf dem Affekt niemals die Herrschaft einräumen über die Ratio! Der Kosmos-Bote jedenfalls wittert hier eine dankbare und leichte Aufgabe. Dem Astronomen fällt es nämlich nicht schwer, der Radioaktivität – wir beschränken uns hier vornehmlich auf den sog. β -Zerfall – etwas Positives abzugewinnen. Wo dieser seine gestalterische Kraft entfaltet, kommt der Mensch ohnehin nicht hin. Das Reden über kosmische Radioaktivität ist vielleicht eine Ansatzpunkt, der Radioaktivität generell die Aura des Unheimlichen zu nehmen. Die 1896 von Antoine Henri Becquerel (1852–1908) bei Experimenten mit Uransalzen entdeckte Strahlung kommt unmittelbar aus dem Atomkern. Sie hat eingeleitet, was man als „Wirklichkeitszertrümmerung“ bezeichnen könnte: das Denken in Wahrscheinlichkeiten. Unserem Streben nach Gewissheit und Sicherheit ist dies abhold.

Sich ihr auf Erden gleichsam „spielerisch“ zu nähern, gibt es kaum Gelegenheit. Die Experimente, die beispielsweise dazu im Berliner „spectrum“ aufgebaut waren, kann der Kosmos-Bote nicht mehr finden. Sie sind vermutlich in

den Orkus verbannt worden. Das ist bedauerlich. Eine Chance wurde vertan. Die Botschaft ist leider eindeutig: Wenn selbst *die* schon darauf verzichten, muss es wirklich gefährlich sein.

Astronomisch gesehen, also von einer zugegebenermaßen hohen Warte aus, gingen ohne Radioaktivität die Lichter aus im Kosmos, gäbe es weder eine Erde noch Leben auf ihr. In Hunderten von Millionen Jahren „erstirbt“ die Mantelkonvektion und mit ihr die geologische Umgestaltung der Erdkruste – wegen Abklingens der Radioaktivität.

Erdnahe Raumfahrt ist eigentlich kein Thema für den Kosmosboten, aber diesmal sei eine Ausnahme gemacht. Vor einem halben Jahrhundert, am 12. April 1961, umkreiste als erster Mensch Juri Gagarin (1934–1968) in 108 Minuten unseren Planeten und eröffnete das Zeitalter der bemannten Raumfahrt.

Die Verwaltung beweglicher Fest- und Feiertage hat zwar nur noch am Rande mit Astronomie zu tun, bewegt aber die Gemüter. Der Ostersonntag fällt diesmal auf den 24. April, also fast auf den spätesten Termin. Es liegt am Mond. Der Frühlingsvollmond, der erste nach Frühlingsanfang (21. März), ereignet sich am 18. April. Sonntag darauf feiern Christen das Osterfest. So wurde es auf dem ersten Konzil in Nicäa im Jahre 325 beschlossen. Nicäa ist das heutige Iznik und liegt unweit von Konstantinopel (Istanbul). Die „Weltherrschaft“ hatte Kaiser Konstantin I. inne. Und der war damals gerade im Umzug begriffen: von Rom nach Konstantinopel. Noch vor dem Konzil, am 7. März 321, hat Konstantin uns per Dekret ein bleibendes Geschenk gemacht: den Sonntag als gesetzlichen Feiertag.

Sicherlich wollen Sie nun wissen, wann Ostern zum letztmöglichen Termin sein wird: 25. April 2038.

Vielleicht bewirkt ja das Erdbeben auf der anderen Seite des Globus, dessen Folgen in einem erschreckenden Maße *wirklich* sind, dass hierzulande in Jahrzehnten verfestigte Wirklichkeiten auf ihre Zukunftsfähigkeit hinterfragt werden. Ostern bietet eine gute Gelegenheit zum Innehalten meint

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im April

Am Morgen des 4. April ist es so weit: Saturn ist in Opposition zur Sonne. Für eine Weile ist er noch die ganze Nacht über im Sternbild der Jungfrau

zu finden. Die Ringebene ist wieder hinreichend geneigt, so dass sogar die Cassini-Teilung mit einem geeigneten Gerät sichtbar sein sollte.

Sein mythologischer Nachfolger und Gegenspieler, Jupiter, ist auf die entgegengesetzte Seite des Himmels geflüchtet. Er macht mit der Sonne gemeinsame Sache, sprich befindet sich in Konjunktion (6. April), und ist wegen zu großer Sonnennähe unsichtbar.

Drei Tage danach ist Konjunktion beim Merkur. Während beim Jupiter klar ist, dass dieser hinter der Sonne steht, muss beim Merkur dazu gesagt werden, dass er, sich zwischen uns und der Sonne an dieser vorbeischiebend, seine sog. „untere“ Konjunktion begeht. Neumerkur also am 9. April. Warum so viel Aufhebens um ein Ereignis, das nicht zu sehen ist? Nun, weil es Gelegenheit gibt, nachzutragen, dass Merkur seit dem 18. März über einen Kunstmond verfügt: die Messenger-Sonde der NASA. Erste Nahaufnahmen aus der Umlaufbahn und in Farbe gibt es zu bestaunen.

Frühlingsvollmond ist, wie gesagt, am 18. April. Er ist in diesem Jahr von beeindruckender Größe, was nicht wundert, hat der Mond doch erst tags zuvor seinen erdnächsten Bahnpunkt durchlaufen.

Schwache Kraft mit starker Wirkung

Es gibt einen astronomischen Bestseller, „Die ersten drei Minuten“. Sein Autor, Steven Weinberg, beschreibt darin minutiös die Ereignisse der Schöpfungsfrühe. Der Titel muss einen stutzen machen. Wieso kann eine so maßlose Angelegenheit wie das Universum ein menschliches Maß haben? Drei Minuten, das läßt an ein Frühstücksei denken. Mit allem hätte man gerechnet, Gigajahre, ja, oder Femtosekunden, warum nicht, geht es doch um Kern- also Kurzzeitphysik, aber Minuten?

Und schon sind wir mittendrin im Mysterium der schwachen Kernkraft. Ihr Opfer ist das Neutron, das, sofern ungebunden, mit einer Halbwertszeit von einer Viertel Stunde zerfällt: in ein Proton, ein Elektron, ein Neutrino.

Man musste sich beeilen, wollte man die soeben aus der Strahlung geborenen Neutronen für die Nachwelt retten. Also wurden flugs alle verfügbaren Neutronen bei einer Milliarde Grad in stabile Heliumatomkerne verbaut. In der Tat ist jedes zehnte Atom im Kosmos ein Heliumatom. Es ging wirklich um Minuten!

Das verstehe, wer will: Für ein Neutron von 10-hoch-minus 13 Zentimetern muss eine Viertel Stunde eine Ewigkeit sein! Ein Lichtquant brauchte, um von einer Seite des Neutrons zur gegenüberliegenden zu wechseln, 10-hoch-minus 24 Sekunden! Man sollte meinen, es stirbt entweder sofort, oder es ist, wie das Proton, für die Ewigkeit gemacht. Statt dessen existiert es nur *fast* ewig. Die Kraft, die hier vollendete Ewigkeit verhindert, kann nur eine schwache sein.

Vielleicht ahnen Sie nun, welche Faszination von der Radioaktivität, genauer: dem β -Zerfall, für einen Physiker wie Steven Weinberg ausgehen muss. Zusammen mit anderen wurde er 1979 für seine Theorie der elektro-schwachen Wechselwirkung mit dem Physiknobelpreis geehrt. Die Vereinigung der elektromagnetischen mit der schwachen Kraft ist ein erster Schritt, um aus den diversen Baustellen der Physik irgendwann einmal *ein* Gebäude zu errichten. Die Neutronen waren vorerst gerettet. Was aber kann man mit dem Urmix aus Wasserstoff und Helium anfangen? Chemisch gesehen, rein gar nichts. Helium ist ein Edelgas und viel zu edel, als dass es sich mit irgendwem einließe. Gott-sei-dank war Gott ein Physiker und kein Chemiker. Ein Kernphysiker vermag aus *drei* Heliumatomkernen immerhin Kohlenstoff zu erschaffen und aus *viere*n Sauerstoff.

Dazu bedarf es aber sehr hoher Temperaturen. Dummerweise war der Kosmos nach der Heliumsynthese bereits mächtig abgekühlt. Der Aufbau schwererer Elemente als Helium war schlicht am Beryllium gescheitert. Das Beryllium, das bei der Montage von *zwei* Heliumatomkernen anfällt, Beryllium-8, ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 0,07 Femtosekunden wieder in zwei Heliumkerne. Eine Femtosekunde ist der Milliardste Teil einer Millionstel Sekunde. Schade, Beryllium-9 wäre stabil gewesen. Aber dazu hätte es eines zusätzlichen Neutrons bedurft . . .

Um gar neutronenreiche Elemente wie Uran zu erschaffen – der Uran-238-Kern besteht aus 92 Protonen und 146 (!) Neutronen –, müssen auf jeden Fall Protonen in Neutronen verwandelt werden.

Doch zurück zum Baustoff Helium. Damit es weitergehen konnte mit der Elementsynthese musste es – punktuell – wieder höllisch heiß werden in einem generell abkühlenden Kosmos. Das passiert in den Sternen. Inzwischen waren nämlich Teilbereiche des explodierenden Universums längst wieder gravitativ in sich zusammengestürzt und hatten u. a. Sterne gebildet. Ein Stern, eine gravitativ zusammengehaltene Gaskugel, hat eine bemerkenswerte Eigenschaft: Er wird heißer, verliert er Energie! Einfach so – ohne jegliche

Kernfusion. Auf Erden geschieht dergleichen nicht. Jeder normale Körper kühlt bei Wärmeverlust aus.

Was heißt „höllisch heiß“? Damit das oben erwähnte Helium-„Brennen“ in Gang kommt, wobei Kohlenstoff, Sauerstoff und Neon entstehen, sind Temperaturen um 100 Millionen Grad vonnöten. Bei nur 13,6 Millionen Grad (wie im Zentrum der Sonne) zünden aber Fusionsreaktionen, die aus Wasserstoff erneut Helium fabrizieren. Dieser Vorgang – von dem im übrigen unser aller Wohl abhängt: ohne Sonne kein Leben! – hat es in sich. Zunächst einmal: Es dürfte ihn gar nicht geben, jedenfalls nicht nach den Regeln der Schulphysik. Damit zwei Protonen ihre elektrische Abneigung überwinden und durch anziehende Kernkraft aneinanderklatschen können, bedürfte es theoretisch Temperaturen von Milliarden Grad! Kernphysikalisch betrachtet ist das Sonneninnere *kalt*. Temperatur ist halt relativ. Trotzdem überschwemmt uns die Sonne verschwenderisch mit Licht und Wärme.

Der Schlüssel liegt in der Quantenphysik, dem Gamowschen Tunneleffekt¹, wonach hin und wieder Hürden, die als unüberwindlich gelten, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dennoch genommen werden. Es hat den Anschein, die energetische Barriere, Gamow-Berg genannt, werde einfach „durchtunnelt“. Und noch etwas muss mit von der Partie sein – Freund β -Zerfall.

Halten wir es mit letzterem. Damit aus vier Protonen über Zwischenschritte ein Heliumatomkern (zwei Protonen + zwei Neutronen) entstehen kann, müssen sich zwei der beteiligten Protonen in Neutronen verwandeln. Das Umgekehrte geschieht, wie wir sahen, spontan. Ein freies Neutron wird zu einem Proton, da es ein wenig schwerer ist als dieses. Der umgekehrte Vorgang ist aufwendig, er erfordert Energie, und ist deshalb so gut wie verboten. Nur jedem zehnten Proton in der Sonne wird es gelingen, mit einem anderen zu Deuterium (sog. schwerer Wasserstoff: ein Proton + ein Neutron) zu fusionieren. Ein Proton muss im Mittel 10^{22} mal mit einem anderen kollidieren, bevor es „funkelt“, sprich zur Verschmelzung kommt. Und diesem unwahrscheinlichen Zufall verdankt das irdische Leben die äußeren Voraussetzungen seiner Existenz!

Falls Sie nun vermuten, die Sonne strahlte heller, würde das Fusionieren erleichtert, irrt. Ein prominenter deutscher Astrophysiker, der dieser Frage

¹Der Tunneleffekt war 1926/27 von Friedrich Hund (1896–1997) in Göttingen gefunden und 1928 von George Gamow (1904–1968) in Göttingen, wo er mehrere Monate als Student weilte, erklärt worden. Ein Jahr darauf war allen Beteiligten klar, warum Sterne leuchten. Die Details wurden dann in wenigen Jahren geklärt.

nachgegangen ist, der Göttinger Rudolf Kippenhahn, kommt zu einem gegenteiligen Schluss. Die Leuchtkraft ginge sogar zurück! Warum nicht? Die Sterne leuchteten ja sogar ohne thermonukleare Energieerzeugung, wie schon der gebürtige Potsdamer Hermann von Helmholtz (1821–1894) 1884 wusste – bloß dann eben nicht so lange.

Bei der Bildung von Helium „verschwinden“ 0,7% der Masse der Stoßpartner, wie 1920 durch präzise Wägungen an Atomkernen festgestellt wurde. Dieser Massedefekt ist die Quelle der Sonnenenergie. Die Masse ist nicht verschwunden, sie verlässt als Strahlung die Sonne. Damit der Vorgang passiert, müssen zwei Käfte zusammenspielen: die *starke* Kernkraft stellt die Energie zur Verfügung, die *schwache* den Mechanismus, um an diese Energie heranzukommen.

Was geschieht eigentlich mit der positiven Ladung des Protons, das zu einem Neutron wird? Sie wird als positiv geladenes Elektron (Positron) veräußert. Außerdem entsteht ein (Anti)Neutrino. Neutrinos sind das Markenzeichen der schwachen Kraft. Ein mit der starken Kernkraft befasster Kernphysiker unterscheidet kaum, sagt man, zwischen Proton und Neutron. Für ihn sind es Gebilde aus jeweils drei Quarks. Man tauscht lediglich ein Quark aus, und schon ist aus dem Neutron ein Proton geworden. Proton wie Neutron sind nur noch Anregungsstufen eines Teilchens, des Nukleons. Der energetische Grundzustand hat einen Namen: Proton. Da es energetisch am Boden ist, kann ein Proton nicht tiefer fallen. Es ist stabil! Seine Lebensdauer übersteigt $10^{\text{hoch-22}}$ Weltalter, ansonsten müsste alles um uns herum schwach strahlen, wir eingeschlossen, denn alles enthält Protonen.

Das Verschmelzen von Deuterium zu Helium ist dann ein Kinderspiel. (Die Kernfusionstechniker an ihren Tokamaks und Stellaratoren mögen mir diese lapidare Verkürzung verzeihen. Sie kämpfen seit Jahrzehnten genau um die Verwirklichung dieses zweiten Schritts. Sie verwenden allerdings von vornherein Wassertoffisotope. Deuterium gibt es in den Weltmeeren genug, als D_2O : *schweres* Wasser. Man muss es nicht, wie im Falle der Sonne, erst herstellen.)

Damit Sie sich keine übertriebene Vorstellung vom Fusionsreaktor Sonne machen: Dessen Leistungsdichte ist gering, gerade einmal 2 mW/kg. Das ist in etwa die Wärmeproduktion eines Komposthaufens, wie jemand herausfand. Bei einem Komposthaufen von der Größe der Sonne kommt eben einiges zusammen.

Fazit ist: ohne (β -)Radioaktivität keine Sonnenenergie!

Massereiche Sterne von vielen Sonnenmassen leben nur kurz, weil sie ver-

schwenderisch mit ihrem Vorrat an Kernergie umgehen. Dafür erzeugen sie in ihrem heißen Innern durch Kernfusion alle chemischen Elemente des Periodensystems bis hinauf zum Eisen. Da der Eisenatomkern (26 Protonen + 30 Neutronen) der kompakteste² Atomkern überhaupt ist – bezogen auf ein Nukleon hat er die niedrigste Masse –, lässt sich aus ihm keine Energie gewinnen, weder durch Fusion noch Fission (Kernspaltung). Die ultimative Energiekrise führt schließlich zum gravitativen Kollaps des Sternkerns zu einem Neutronenstern. Die gesamte Sternenhülle wird dabei abgesprengt (Supernovaexplosion). Die Zwangsneutronisierung des Sternmaterials ist wem geschuldet? – der β -Radioaktivität. Die freien Elektronen aus den längst zerstörten Elektronenhüllen werden in die Protonen gequetscht, wobei Neutronen entstehen und Neutrinos, welche fast die gesamte beim Einsturz gewonnene gravitative Energie wegschaffen. Ohne Neutrinoabkühlung gäbe es keine Neutronensterne. Die Wärme muss 'raus.

Und woher stammen all die neutronenreichen Elemente jenseits des Eisens im Periodensystem? Auch sie sind der schwachen Kernkraft geschuldet. In neutronenreicher Umgebung kommt es durch Neutroneneinfang mit anschließendem β -Zerfall überzähliger Neutronen in Protonen zur Bildung aller restlichen Elemente des Periodensystems. So etwas findet bei Supernovaexplosionen statt, aber auch, weniger spektakulär, in Roten Riesen. Schlagender Beweis war 1952 der spektroskopische Nachweis von Technetium auf gewissen Riesensternen. Technetium ist, wie der Name verrät, das erste von Menschenhand hergestellte chemische Element. Das war 1937. (Bekannt ist die Verwendung von Tc-99(m) zu Diagnosezwecken [Szintigrafie] in der Nuklearmedizin.) Das haltbarste Isotop hat eine Halbwertszeit von etwas über vier Millionen Jahren. Die Riesensterne sind am Ende ihres Lebens und sehr viel älter. Ihr Technetium kann nur vor Ort entstanden und an die Sternoberfläche gespült worden sein.

Fortsetzung folgt!

²Genaugenommen soll Nickel-62, bestehend aus 28 Protonen und 34 Neutronen, noch ein wenig kompakter sein.