

Die Sterne sind großartige Laboratorien, ungeheure Tiegel, wie sie sich kein Chemiker träumen könnte. Es herrschen dort Temperaturen, die wir unmöglich erreichen können; ihr einziger Fehler ist, daß sie etwas weit weg sind; aber das Teleskop wird sie uns näher bringen, und dann werden wir sehen, wie sich die Materie dort verhält. Welches Glück für den Physiker und den Chemiker!

Henri Poincaré (1854–1912)

Liebe Leserin, lieber Leser,

am 1. April 1997, vor einem Vierteljahrhundert, rauschte mit 44 km/s Hale-Bopp (C/1995 O1) in 0,914 AE Abstand an der Sonne vorbei. „Uns“ kam er bereits am 22. März 1997 bis auf 1,315 AE nahe. Mit einem Staubschweif von 40° und mehr an Länge war Hale-Bopp die Kometenerscheinung des 20. Jh. Der „Große Komet von 1997“ war am 23. Juli 1995 unabhängig voneinander von Alan Hale (geb. 1958) und Thomas J. Bopp (1949–2018) zwischen Jupiter und Saturn aufgefunden worden. Verglichen mit ihm dürfte der Halley'sche Komet ein Zwerg sein. Mit seinem nächsten Erscheinen wird für 4385 gerechnet, plus-minus zwei Jahre. (Schade, dass man das nicht nachprüfen wird.) Möglicherweise war Hale-Bopp bereits um das Jahr 2215 v. Chr. gesichtet worden, zur Regierungszeit von Pharao Pepi II. Eine Inschrift erwähnt einen „langhaarigen Stern“.

Das Elektron wird 125! Am 30. April 1897 gab in einem Vortrag der Physikprofessor aus Cambridge, Joseph John Thomson (1856–1940), die Entdeckung des Elektrons als Träger der Elektrizität bekannt. 1906 gab's dann für die Kathodenstrahlexperimente mit Gasentladungsröhren den Nobelpreis. Sein Sohn, George Paget Thomson (1892–1975), erhielt ebenfalls den Nobelpreis für Physik (1937) – zusammen mit dem US-Amerikaner Clinton Joseph Davisson (1881–1958). Allerdings hatte er sich nicht wie sein Vater für das Elektron als Teilchen interessiert. Ihn und Davisson hatte es die Beugung von Elektronen an Kristallen angetan gehabt – das Elektron als Materiewelle!

Apropos Kristall, den 8. April 1982 wird der aus Tel Aviv stammende Materialkundler Dan Shechtman (geb. 1941) nicht vergessen. Er stieß an jenem Tag vor 40 Jahren in den USA bei der kristallographischen Analyse einer sich schnell abkühlenden Aluminium-Mangan-Legierung auf eine fünf-zählige Symmetrie. (Andere hatten das zuvor auch gesehen, aber nicht weiter

verfolgt gehabt – weil zu umstürzlerisch.) Da es so etwas nach den gängigen Vorstellungen von einem Kristall¹ nicht geben kann, sprach man vom *Quasikristall*. Koryphäen verspotteten Shechtman hierauf. Linus Pauling (1901–1994), zweifacher Nobelpreisträger, soll Shechtman gar als „Quasiwissenschaftler“ verunglimpft haben. Doch dieser ließ sich nicht unterkriegen. 2011 war die Zeit reif für den Nobelpreis (in Chemie).

Mathematiker waren bereits zuvor auf aperiodische reguläre Strukturen gestoßen. Berühmtheit erlangte im Zweidimensionalen das sog. Penrose-Parkett, benannt nach Roger Penrose (geb. 1931).

Quasikristalle gibt es sogar in der Natur. 2010 wurde das Mineral Ikosadrit ($\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{13}$) als quasikristallin von den Mineralogen anerkannt. An der langjährigen Suche nach solch einem Mineral war sogar ein Mathematiker und Kosmologe beteiligt gewesen: Paul Joseph Steinhardt (geb. 1952). Der war hinter einer dreidimensionalen Version des Penrose-Musters her. Im ostsibirischen Korjakengebirge wurde man fündig. Nach der exotischen Isotopenzusammensetzung zu schließen, handelt es sich bei dem Gestein um extraterrestrisches Material!

Erfreulich ist die Mitteilung vom JWST-Team, alle 18 hexagonalen Segmente des 6,5-m-Hauptspiegels seien inzwischen feinjustiert. Es gibt nur noch einen gemeinsamen Brennpunkt für den Teststern **2MASS J17554042+6551277**. Die Auflösung des Infrarotteleskops und Hubble-Nachfolgers übertreffe noch die Erwartung. Die sechs „Strahlen“ sind ein Artefakt, geschuldet der Nicht-Rotationssymmetrie des Spiegelsystems (inkl. der Aufhängung). Bei strenger Rotationssymmetrie entstehen Beugungsringe, ein sog. Airy-Scheibchen.

Für Überraschung sorgte die Meldung, das No-Hair-Theorem für schwarze Löcher sei passee, womit sich das leidige Informationsparadoxon erledigt habe. Das wäre allerdings ein bemerkenswerter Schritt in Sachen Versöhnung zwischen Einsteins relativistischer Mechanik und der Quantenmechanik, von dem ggf. zu reden sein wird.

Diesmal geht es, wie letztlich angekündigt, um die Kontaminierung des Planeten durch nahe Supernovae. Wir tauchen ab in die geologisch jüngere Vergangenheit. Darauf freut sich

Ihr Hans-Erich Fröhlich

¹Danach sollte ein Kristall translationssymmetrisch sein: Durch gewisse räumliche Verschiebungen kann ein Kristall mit sich selbst zur Deckung gebracht werden.

Der Himmel im April

Merkur ist im letzten Monatsdrittel eine Stunde nach Sonnenuntergang im WNW sichtbar. Am 29. April erreicht er mit $20\frac{1}{2}$ Grad seine größte östliche Elongation.

Westlich der Sonne und also dem Morgenhimmel vorbehalten, erwartet uns Venus. Ende April gesellt sich der Jupiter hinzu. Mars und Saturn sind bereits da. Am 30. April begegnen Venus und Jupiter einander. Die „Tochter“ zieht südlich am „Göttervater“ vorüber. Weniger spektakulär dürfte die Begegnung zwischen Mars und Saturn in den Morgenstunden des 5. April verlaufen.

Zu einer partiellen Sonnenfinsternis kommt es in der Walpurgisnacht. Sie ist an der Südspitze Südamerikas zu beobachten, dort bei Sonnenuntergang.

Auswirkungen einer nahen Supernova

Die Tatsache, dass wir uns momentan in einer interstellaren Blase heißen Gases befinden, legt ein „Feuerwerk“ relativ naher Typ-II-Supernovae in den vergangenen Dutzend Millionen Jahren nahe. Es handelt sich bei den Vorgängersternen um seltene, weil massereiche Sterne. Die Leuchtkraft eines solchen Sterns von wenigstens acht Sonnenmassen zeugt von maßloser „Energieverschwendung“. Bereits nach wenigen Jahrillionen ist der Energievorrat erschöpft, und der Stern steht vor dem Aus.

Verschmelzen thermonuklear zwei leichte Atomkerne zu einem schwereren, kompakteren, wird Bindungsenergie frei. Besonders effektiv ist die Fusion von Wasserstoff (Protonen) zu Helium (α -Teilchen). Sie findet bei einem Dutzend Millionen Grad statt. Bei rund hundert Millionen Grad verschmelzen drei bzw. vier Heliumkerne zu Kohlenstoff bzw. Sauerstoff. Bei Milliarden von Grad können sogar Siliziumkerne (^{28}Si) fusionieren². Es bildet sich dabei Eisen (^{56}Fe). Was der Stern nicht weiß, Eisen³ ist das Element mit dem kompaktesten Atomkern überhaupt. Die Bindungsenergie wird mit 8,79 MeV pro Nukleon maximal. Atomkerne dieseits und jenseits des Eisens haben eine geringere Bindungsenergie. (Die schwersten chemischen Elemente, wie Uran, zerfallen bereits von selbst.) Kurz: Eisen ist kein „Brennstoff“! Weder durch Fusion noch durch Fission lässt sich auch nur ein Quentchen

²Die Details des Siliziumbrennens sollen hier nicht interessieren.

³Dass ^{56}Fe den kompaktesten Kern habe, ist astronomische Folklore. Diese Ehre gebührt dem ^{62}Ni -Kern mit einer Bindungsenergie pro Nukleon von 8,794553 MeV.

Energie gewinnen. Angesichts der ultimativen Energiekrise muss der Eisenkern eines solchen Sterns bei Druckabfall zu einem winzigen Etwas kollabieren, zu einem Neutronenstern, oder gar im Bodenlosen verschwinden, einem schwarzen Loch. Im Gefolge des Kernkollapses zu einem Neutronenstern wird beim Zurückschnellen des unter seine Gleichgewichtslage zusammengepressten Neutronensterns die äußere Wasserstoffhülle des Unglückssterns abgesprengt. Aus der Ferne sieht sich das nach einer Typ-II-Supernova an.

So eine Kern-Kollaps-Supernova erreicht optisch eine Absoluthelligkeit von -17^M . Bei einer Standardentfernung von 10 pc (32,6 Lj) leuchtete die Supernova im Visuellen 60-mal heller als der mittlere Vollmond (-12^m55). Zehnmal weiter, über eine Distanz von 326 Lj, würde nicht einmal die Vollmondhelligkeit erreicht. Der unmittelbare Schaden durch extrem kurze elektromagnetische Wellen, d. h. im γ - und Röntgenbereich, dürfte sich in Grenzen halten. Und die Neutrinoemission⁴, sie geht sowieso durch alles hindurch.

Wenn die Supernova längst vergessen ist, erreicht die Erde die kosmische Strahlung, welche vom Supernovaüberrest ausgeht. Während die Belastung durch kurzweilige elektromagnetische Strahlung wenige Wochen nur anhält, zieht sich das anschließende Bombardement mit nahezu lichtschnellen Protonen, α -Teilchen und diversen Atomkernen – darunter radioaktives Eisen-60 (^{60}Fe) – noch über Jahrtausende hin.

Die kosmische Korpuskularstrahlung besteht aus geladenen Partikeln. Diese ionisieren die Lufthülle. Das verändert durchaus die Atmosphärenchemie. So bilden sich reaktive Stickoxide⁵, sog. NO_x , welche die Ozonschicht (O_3) angreifen. Die vermehrte UV-Belastung infolge der Schwächung dieses Schutzfilters erhöht die Mutationsrate bei Landlebewesen. Der gleichfalls vermehrte Stickstoffeintrag düngt den Boden. Prosperierendes Pflanzenwachstum ist die Folge. Wie stets, wenn das Pflanzenreich die Oberhand gewinnen und CO_2 aus der Atmosphäre saugt, wäre eine Abkühlung des Planeten die Folge, bis hin zu Kaltzeiten. Die Ionisierung der Atmosphäre entlang der Bahn von einschlagenden geladenen Teilchen hoher Energie spurt elektrische Entladungen, Blitze, welche wiederum Waldbrände auslösen können ... Hinzu kommt die Strahlenbelastung biologischen Gewebes durch kurzlebige Myonen, „schwere Elektronen“, die sekundär beim kosmischen Bombardement

⁴Nahezu die gesamte Bindungsenergie bei der Bildung des quasi „punktförmigen“ Neutronensterns verlässt den Ort des Geschehens als Neutrinoimpuls.

⁵Die Reaktionsketten sind nach dem Astrophysiker Jakow Borissowitsch Seldowitsch (1914–1987) benannt. So rührt die rot-bräunliche Färbung eines Atompilzes von NO_2 her.

der Lufthülle anfallen. Zusammengefasst: Eine Supernova in 100 Lj Entfernung dürfte durchaus mittelfristige Auswirkungen auf die Biosphäre und das Erdklima haben, aber kaum katastrophale.

Wir kommen zurück auf Eisen-60 (^{60}Fe). Dieses Eisenisotop ist ein β -Strahler mit einer Halbwertszeit von 2,61 Millionen Jahren. Es verwandelt sich spontan in ebenfalls radioaktives⁶ Kobalt-60 (^{60}Co). Eisen-60 ist ein Spurenelement. Bei einer Halbwertszeit deutlich unter dem Erdalter und keiner irdischen Quelle muss es extraterrestrischen Ursprungs sein – Sternenstaub!

Im Sommer 2019 wurde publik, Astropartikel-Wissenschaftler aus München hätten im antarktischen Schnee massenspektroskopisch fünf ^{60}Fe -Kerne nachgewiesen – in einer halben Tonne Schnee. Beteiligt an dieser Suchaktion waren auch Forscher aus Dresden-Rossendorf und dem Alfred-Wegener-Institut. Vermutlich wurden die Atome als interstellarer Staub beim Flug des Sonnensystems durch eine kleine Wolke von der Erde binnen 20 Jahren eingefangen. (Älter war der Schnee nicht.) Seit etwa 40 000 Jahre befinden wir uns in dieser Lokalen interstellaren Wolke⁷.

Zum Nachweis bedient man sich der sog. (Beschleuniger)Massenspektrometrie, d. h. man zählt die in einer Materialprobe (wenige mg) enthaltenen Atomkerne direkt und nicht deren radioaktiven Zerfälle. (Darauf müsste man viel zu lange warten.) Sortiert werden die unterschiedlichen Atomsorten nach dem Ladungs-Masse-Verhältniss ihrer Ionen. Auf diese Weise können Spurenelemente selbst dann noch nachgewiesen werden, befinden sich nur wenige Atome davon in der Probe. Den Münchener Forschern gelang sogar die Trennung von Eisen-60 und Nickel-60, Nuklide, die sich massenmäßig nur um 0,005% unterscheiden.

Zwanzig Jahre zuvor war die Münchener „Experimentelle Astroteilchenphysik“ um Gunther Korschinek mit ihrem kolossalen Massenspektrometer schon einmal fündig geworden: bei der Untersuchung von Metallausfällungen (Ferromangankrusten) am Meeresboden. Insgesamt gingen den Forschern damals 23 ^{60}Fe -Atome ins Netz. Andere Forschergruppen analysierten Proben von anderen Teilen des Planeten und sogar vom Mond. Danach wäre es vor 2,5 und 6,3 Millionen Jahren zu einem plötzlichen Eintrag von extraterrestrischem ^{60}Fe gekommen. Tatsächlich war das Sonnensystem vor 2 1/2 Millionen Jahren Teilen der Scorpius-Centaurus-OB-Sternassoziation (Sco-OB2), einer recht lockeren Ansammlung massereicher junger Sterne, ziemlich nahe – rund 300 Lj –, wie der Berliner TU-Astronom Dieter Breitschwerdt anhand astro-

⁶Kobalt-60 (^{60}Co) zerfällt mit einer Halbwertszeit von gut fünf Jahren zu stabilem Nickel ^{60}Ni , dem zweithäufigsten der natürlich vorkommenden Nickel-Isotope.

⁷Dieses Wölkchen verdient kaum den Namen. Mit 0,3 Atomen pro Kubizentimeter ist die Dichte aber deutlich höher als in der Lokalen Blase: $0,05\text{ cm}^{-3}$.

metrischer Daten rekonstruierte. Heute gibt's dort noch 79 prominente, d. h. massereiche und leuchtkräftige Mitglieder⁸. Die Anzahl der Sterne, die in den vergangenen 13 Jahrmillionen bereits als Kern-Kollaps-Supernovae „hochgegangen“ sind, wird auf ein Dutzend geschätzt. Sie alle dürften „Eisen-60-Schleudern“ gewesen sein.

Vor 2,588 Millionen Jahren begann für den Geologen das Pleistozän. Umgangssprachlich spricht man von der Eiszeit, korrekter vom Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. (Zuvor war die Nordhalbkugel eisfrei gewesen.) Seit 11 700 Jahren schreiben wir das Holozän, die Nacheiszeit. Beide, Pleistozän und Holozän, werden zum Quartär zusammengefasst, der geologisch jüngsten Formation.

Rätsel geben 181 Plutonium-244-Atome vom Grunde des Pazifiks auf. Die Halbwertszeit dieses Plutoniumisotops beläuft sich auf 80,6 Millionen Jahre. Wie Gold, Platin und Uran könnte auch ²⁴⁴Pu, das in der (irdischen) Natur nicht vorkommt, beim Verschmelzen zweier Neutronensterne entstanden sein. Eine solche Kilonova ist ein rares Ereignis, seltener als eine Supernova.

Wie in der Novemberausgabe 2017 ausführlich berichtet, schlugen am 17. August 2017 nahezu zeitgleich drei Gravitationswellendektoren Alarm, zwei Gamma-Strahlen-Teleskope registrierten 1,7 Sekunden später einen kurzen Gammablitz (GRB 170817A) und bereits elf Stunden später stieß man im südlich gelegenen Sternbild Hydra auf eine untypische Supernova. Alle Astronomenaugen richteten sich auf die S0-Galaxie **NGC 4993**. Was sich dort für ein Drama abgespielt hatte? Nun, zwei Neutronensterne, die einander seit Jahrmilliarden umkreisten, waren im Laufe der Zeit durch Abstrahlen von Gravitationsenergie einander auf die Pelle gerückt. Die letzten 100 Sekunden waren so welterschütternd, dass die Störung im Raum-Zeit-Gefüge sich über 130 Millionen Lichtjahre hinweg den Gravitationswellendektoren in den USA und Italien mitteilte. Die beiden Neutronensterne stürzten, einander immer schneller umkreisend, aufeinander zu, bevor sie schließlich miteinander **verschmolzen**. In dem neutronenreichen Milieu des Feuerballs wurden durch schnellen Neutroneneinfang, dem sog. r-Prozess, binnen kurzem alle chemischen Elemente jenseits des Eisens zusammen„geschmiedet“ – vermutlich sogar solche, die wir gar nicht kennen. Das Leuchten der Kilonova kündete vom radioaktiven Zerfall neutronenlastiger Atomkerne. Wie man beiläufig erfährt, sei bei dieser Aktion der Weltenraum mit zehn Erdmassen an Gold und Platin „verunreinigt“ worden. Andere Quellen befürchten ein Vielfaches, sprechen gar von 200 Erdmassen an Gold und 500 Erdmassen an Platin.

⁸Antares, α Scorpii, ist ein roter Überriese und zählt mit seinen 15 Sonnenmassen dazu.