

Liebe Leserin, lieber Leser,

haben Sie sich schon einmal gefragt, woher Ihre Goldvorräte kommen? Keine Angst, es geht in diesem Newsletter weder um Onkel Dagobert, noch um Sparsamkeit oder gar um „Geiz ist Geil“. Es geht um eine Materialfrage: Wo zum Teufel ist in den Tiefen des Universums das Gold entstanden? Das dreiminütige thermonukleare Inferno, das gleich nach dem Urknall wütete, hat zwar eine beträchtliche Menge Helium hinterlassen – jedes zehnte Atom im Universum ist ein Heliumatom! – weiter aber nichts. (Was am Beryllium liegt. Aber das ist eine andere Geschichte.)

Machen wir uns also auf die Suche nach der Herkunft des Goldes (und anderer schwergewichtiger Elemente am Ende des Periodischen Systems). In der Hoffnung, fündig zu werden, grüßt Sie

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im September

Im Herbst ragt die Ekliptik des Morgens steil in den Osthimmel. Wenige Tage vor Herbstbeginn, am 19. September, erreicht Merkur seinen größten westlichen Winkelabstand zur Sonne. Leider nur 18° , aber immerhin. Er geht jedenfalls vor der Sonne im Osten auf. Eine gute Nachricht für Merkurfreunde: Seine Morgensichtbarkeit beginnt am 13. und endet am 28. des Monats.

Die Venus ist leider Abendstern. Da nützt es uns wenig, dass sie am 23. September im größten Glanz ($-4,6$ mag) erstrahlt. Sie bleibt nahe dem Horizont.

Am 21. September treten gleich zwei Planeten in Opposition zur Sonne: der Jupiter und nur sechs Stunden später der Uranus. Beide tummeln sich im Sternbild Fische. Jupiter ist zum Oppositionszeitpunkt etwa ein Grad südlich vom Uranus. Eine gute Gelegenheit, den Uranus am Himmel aufzufinden. (Mythologisch gesehen ist Uranus der weitaus ältere. Er ist noch nahe dem Ursprung. Jupiter und die Seinen mussten erst die alte Götterkohorte, der auch des Uranus Sohn, Saturn, angehörte, stürzen, wobei es dem Vernehmen nach keineswegs fein zugging. Das Schwermetall „Uran“ wurde acht Jahre nach

dem Uranus entdeckt und zu Ehren des Herschelschen Fundes nach diesem Planeten benannt.)

Der Herbstvollmond fällt sinnigerweise auf den Herbstbeginn (23. September, 4:09 MEZ). Leider hat er zwei Tage zuvor den größten Abstand zur Erde durchlaufen, so dass der Vollmond diesmal recht klein ausfällt. (Dafür ist der Mond maximal groß, wenn er nicht zu sehen ist. Neumond und Perigäum fallen auf den 8. September.

Gold

Atomkerne unterscheiden sich u. a. hinsichtlich der Stärke ihres inneren Zusammenhalts. Am festesten gebunden ist der Kern des Eisen-56. (Die „56“ bezeichnet die Anzahl der Nukleonen = Protonen + Neutronen.) Bei ihm ist die Bindungsenergie pro Nukleon maximal. Für die Energiefreisetzung ist dies von Bedeutung. Sterne strahlen, weil in ihnen leichte Atomkerne zu schweren verschmelzen. Dabei verschwindet Masse. Sie wird, so lehrt es uns das $E = m \cdot c^2$, als Bindungsenergie frei. Ein Beispiel, das uns angeht: In der Sonne werden in jeder Sekunde bei einem Dutzend Millionen Grad 400 Millionen Tonnen Wasserstoff in 397 Millionen Tonnen Helium fusioniert. Die Massendifferenz von 3 Millionen Tonnen wird als Licht abgestrahlt. Licht wiegt etwas, wie schon Einstein wusste, und die Sonne wird allein dadurch in jeder Sekunde um drei Millionen Tonnen leichter. Verglichen mit dem Masseverlust, der dem Sonnenwind geschuldet ist, fällt der Verlust durch Licht- und Wärmestrahlung kaum ins Gewicht.

Eines Tages, wenn der Vorrat an Wasserstoff im Sonnenkern erschöpft ist, wird die Sonne dem drohenden Energiemangel dadurch begegnen, dass sie sich zu einem roten Riesen aufbläht. Kurzzeitig wird sie dann zu einem Heliumbrenner – bei einer Zentraltemperatur von 100 Millionen Grad! Aus der „Asche“ des Wasserstoffbrennens, dem Helium, wird dann durch die Verschmelzung von jeweils drei bzw. vier Heliumatomkernen (α -Teilchen) Kohlenstoff bzw. Sauerstoff erzeugt. (Das Naheliegende, dass zwei Heliumatomkerne verschmelzen, geschieht nicht. Aber die Sache mit dem Beryllium ist, wie gesagt, eine Extrageschichte ...)

Während die Energieproduktion in der Sonne und anderen Sternen sich im Periodensystem, von den leichten Elementen kommend, auf das Eisen zubewegt, schlagen die Kernkraftwerke auf unserem Planeten den umgekehrten Weg ein. In ihnen werden vergleichsweise locker gebundene überschwe-

re Atomkerne wie Uran oder Plutonium, deren innerer Zusammenhalt so schwach ist, dass sie gelegentlich schon ohne Anlass auseinanderfallen, durch Kernspaltung in kompaktere Spaltprodukte überführt. Man nähert sich von der anderen Seite dem Eisen.

Nur mit dem Eisen selbst, dem Element mit der Ordnungszahl 26 (d. h. 26 Protonen), kann weder die Natur, noch der Mensch energetisch etwas anfangen.

Als vor rund 13,7 Milliarden Jahren das Universum entstand und die kosmologische Expansion ihren Lauf nahm, gab es nur Wasserstoff und (drei Minuten später) Helium. In Spuren entstanden damals auch Deuterium (schwerer Wasserstoff) und Lithium. Mehr war nicht drin, da das Universum schnell abkühlte und die Synthese von Elementen schwerer als Helium am Beryllium scheiterte. Durch Kernfusion können im Prinzip aus dieser Anfangsmischung im höllischheißen Innern der Sterne, alle chemischen Elemente bis hinauf zum Eisen thermonuklear erschaffen werden.

Das ist bemerkenswert. Für den Chemiker ist der primordiale Elementenmix unerquicklich. Helium ist ein Edelgas und viel zu nobel, als dass es irgendwelche Verbindungen einginge. Gott war offenbar eine Physiker. Erst die „Creation“ der Sterne führte aus der chemischen Sackgasse heraus! In einem stets und ständig kühler werdenden Universum – heutzutage ist die Temperatur der Hintergrundphotonen auf 2,7 Grad über den absoluten Nullpunkt gefallen – sollte es punktuell, in den Sternen, noch einmal richtig heiß werden, was die Elementsynthese bis hinauf zu den Elementen der Eisen-Gruppe ermöglichte. Dabei wird Bindungs-, sprich Kernenergie freigesetzt. (Das ist alles recht seltsam und wird erst im Rahmen einer Wärmelehre verständlich, die die Schwerkraft in ihre Überlegungen einbezieht: Sterne sind, schwerkraftbedingt, Körper mit einer *negativen* Wärmekapazität. Sie werden – selbst ohne Kernfusion! – durch Wärmeverlust heißer. Selbstaufheizung ist im übrigen nicht auf Sterne beschränkt, sie ist das Markenzeichen aller gravo-thermischen Systeme. Sie kann zum „Verdampfen“ ganzer Kugelsternhaufen führen.)

Die Schwermetalle, Gold mit der Ordnungszahl 79 eingeschlossen, befinden sich aber weit jenseits des Eisens! Sie können nur unter Energieaufwand aus dem Eisen erzeugt werden. Das erfordert besondere Umstände.

1957 erschien in den *Reviews of Modern Physics* die berühmte B²FH-Arbeit, so benannt nach den Initialen der Autorennamen: E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler und F. Hoyle. Seitdem ist auch geklärt, jedenfalls in

grobe Zügen, *wie* es zur Entstehung der chemischen Elemente jenseits des Eisens kommen konnte: durch Neutroneneinfang. Unklar ist bis heute bei einigen Elementen das *Wo*?

Warum man überhaupt so ein Aufhebens macht um ein paar Atome? Für die baryonische Massebilanz sind die schweren Elemente völlig unerheblich. 99 Prozent der Baryonen sind in Wasserstoff und Helium ereint. Nun, die schweren Elemente sind wie das Salz in der Suppe, sie geben dem Universum die Würze. Eine Welt ohne Kohlenstoff und Sauerstoff, sie wäre ärmer. Es gäbe kein Leben! Sogar die Sterne leuchteten anders.

Das Problem: Alle verfügbaren Neutronen sind in den ersten Minuten des Universums verbaut worden, in den Heliumatomkernen. Nur so konnten sie überhaupt überdauern. In Freiheit zerfällt ein Neutron binnen einer Viertelstunde! Es ist ja ein wenig schwerer als ein Proton. Beim Zerfall wird Energie frei. So etwas läuft von allein. (Ein Proton hingegen ist stabil. Es befindet sich auf der untersten Sprosse der Energieleiter. Tiefer geht's nach heutigem Wissen nimmer. Sein Mindesthaltbarkeitsdatum beläuft sich entsprechend auf 10-hoch-32 Jahre oder 10-hoch-22 Weltalter.)

Freie Neutronen gibt's erstmalig in gewissen Spätphasen der Sternentwicklung, in sterbenden Sternen, weil ein in einem Atomkern gebundenes Proton sich unter Energieaufwand und Abgabe eines positiv geladenen Elektrons (Positron) in ein Neutron verwandeln kann (inverser β -Zerfall).

Durch Einfang von Neutronen – da Neutronen elektrisch neutral sind, werden sie unschwer eingebunden – entsteht zunächst kein neues chemisches Element, vielmehr eine neutronenreichere Version des alten. Diese Isotope sind meist instabil und zerfallen unter Abgabe eines Elektrons und eines Antineutrinos in ein Element der nächsthöheren Ordnungszahl, da sich ja die Kernladungszahl um eins erhöht hat. Auf diese Weise können quasi beiläufig in Riesensternen die stabilen schweren Elemente bis hinauf zum Wismut aufgebaut werden. (Genau genommen ist auch Wismut nicht für die Ewigkeit gemacht. Seine Halbwertszeit – 19 Trillionen Jahren! – übersteigt das Weltalter milliardenfach!)

Ich weiß noch, wie überrascht ich war, als ich das erste Mal von Technetium auf Riesensternen hörte. Dieses (auf der Erde nur künstlich herstellbare) Schwermetall mit der Ordnungszahl 43 zerfällt binnen 210 000 Jahren! Es muss also im Stern produziert und an die Oberfläche verfrachtet worden sein.

Da diese Art der Elementsynthese sich langsam abspielt, in 100 000 Jahren,

und die durch Neutroneneinfang gebildeten Isotope genügend Zeit haben, sich durch β -Zerfall, sprich Entledigung eines Elektrons, in ein Element höherer Ordnungszahl umzuwandeln, heißt dieser Vorgang *s-Prozess* (von *slow* = langsam).

Kennt man alle Einfang- und Zerfallswahrscheinlichkeiten, kann man sich die Elementenhäufigkeitsverteilung ausrechnen, die sich beim s-Prozess einstellt. Spitzen in der kosmischen Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente werden recht gut wiedergegeben. Kurz und gut, etwa die Hälfte der chemischen Elemente jenseits des Eisens entsteht durch langsamen Neutroneneinfang in Riesensternen.

Und die anderen? Sie verdanken ihre Existenz dem *r-Prozess*. Das *r* steht hier für rapid, also schnell. Und schnell geht's zu beim r-Prozess. Bei einer intensiven Neutronenquelle können binnen Sekunden durch Neutroneneinfänge alle chemischen Elemente bis ins Gebiet der Transurane synthetisiert werden, wobei die Atomkerne gar nicht so schnell zerfallen können, wie sie neue Neutronen aufnehmen. Erst nach dem Bombardement bilden sich durch β -Zerfall die stabilen Atome.

Die Kenntnis des r-Prozesses leidet darunter, dass die Eigenschaften der neutronenreichen Zwischenstufen nur ungenau oder überhaupt nicht bekannt sind. Diese exotischen Kerne kommen auf der Erde eigentlich nicht vor und können nur in Beschleunigerexperimenten von Kernphysikern erzeugt und (kurzzeitig) studiert werden, beispielsweise am Schwerionenbeschleuniger in Darmstadt.

Eine ergiebige Neutronenquelle ist der Kollaps des Eisenkerns eines massereichen Sterns. Da sich, wie wir wissen, aus Eisen weder durch Fusion, noch durch Fission (Kernspaltung) auch nur ein Quentchen Energie entlocken lässt, steht ein solcher Stern am Ende seines Lebens vor dem ultimativen Aus. Sein eiserner Kern *implodiert*, sobald er eine kritische Masse von 1,4 Sonnenmassen erreicht hat, in Sekundenbruchteilen zu einem Neutronenstern.

Was wir sehen, ist allerdings das glatte Gegenteil: eine Stern*explosion*, eine sog. Kern-Kollaps-Supernova. Die bei der Implosion freigesetzte gravitative Energie verpufft im wesentlichen in Gestalt eines Neutrinostrahlungsblitzes. Ein wenig davon bleibt irgendwie im Stern stecken, was genügt, die äußeren Schichten abzusprengen. Der Stern entledigt sich gewaltsam aller Hüllen.

Woher die Neutrinos? Nun, bei der Implosion werden die Elektronen förmlich in die Atomkerne hineingequetscht. Die Protonen werden unter Aufwendung von Energie elektrisch neutralisiert und zu Neutronen. Bei der Verwandlung

fallen Neutrinos an. Ein Neutronenstern ist eigentlich ein riesiger Atomkern von 30 Kilometern Durchmesser. Deshalb zerfallen die Neutronen nicht. Sie sind nicht frei.

Eine Neutronenquelle für den r-Prozess gibt es also – den Kernkollaps eines ausgebrannten massereichen Sterns.

Supernovae allein erklären nicht die kosmischen Häufigkeiten der schwersten Elemente des Periodensystems. Hochenergie-Astrophysiker halten daher Ausschau nach noch extremeren Situationen für das Walten des r-Prozesses.

In der Diskussion: das Verschmelzen von Neutronensternen. Dass Neutronensterne enge Doppelsternsysteme bilden können, ist bekannt. Auch ist bekannt, dass sich die beiden Sterne im Laufe der Zeit einander nähern müssen. Nach den Gesetzen der Einsteinschen Gravitationstheorie, der Allgemeinen Relativitätstheorie, strahlen Doppelsterne Gravitationswellen ab. Die Umlaufbahnen müssen daher zwangsläufig schrumpfen. Je näher das Ende, desto schneller. In den letzten Sekunden wird eine gewaltige Gravitationswelle ausgesandt, die das Raum-Zeit-Gefüge des Universums auf eine charakteristische Weise – die Frequenz erhöht sich schrill ins Unermessliche – bis ins Mark erschüttert. Der krönende Abschluss ist das Verschmelzen beider Neutronensterne, bzw. dem, was von ihnen noch übriggeblieben ist, in Bruchteilen einer Sekunde zu einem schwarzen Loch. In dem von Gezeitenkräften losgerissenen neutronenreichen Material kommt's zum r-Prozess.

Man hofft, eines Tages Gravitationswellen, Schwankungen in der Krümmung der Raum-Zeit, die sich wellenförmig ausbreiten, mittels Gravitationswellendetektoren direkt nachzuweisen. Damit eröffnete sich ein völlig neues Fenster zum Hoch-Energie-Universum.

Aber vielleicht tragen Sie ja bereits den Beweis von Neutronensternkollisionen an ihrem Finger. Diese Ereignisse sind zwar selten – tausendmal seltener als Supernovaexplosionen –, aber vermutlich ergiebig, was die Bildung von Gold und anderen schweren Elementen anbelangt.