

... nur ganz zuletzt, da scheint's schnell zu gehen und schnell gegangen zu sein, – aber das ist so lange hin ...

aus „Doktor Faustus“ von Thomas Mann (1875–1955)

Liebe Leserin, lieber Leser,

gerade war vom „wilden“ Zufall die Rede gewesen, und das in Zusammenhang mit Katastrophen. Es gibt aber auch den „glücklichen“ Zufall. Von einem solchen, der die große, die astronomische Welt buchstäblich erschütterte, soll die Rede sein. Am Nachmittag des 17. August traf die Kunde von der Kollision zweier Neutronensterne in einer 130 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie im Sternbild Hydra¹ ein. Die Ereignisse überschlugen sich. Als erstes sprachen die zwei aLIGO-Detektoren auf eine Gravitationswelle (GW) mit verräterischer Signatur („Chirp-Signal“) an. Aus den um Millisekunden differierenden Ankunftszeiten konnte auf die ungefähre Lage² des Senders am Himmel geschlossen werden. Keine zwei Sekunden danach wurde von Überwachungssatelliten ein Gamma-Strahlen-Blitz (GRB) in der betreffenden Gegend des Weltalls registriert. Die Koinzidenz kann kein Zufall sein! Elf Stunden später hatte man Quelle und Heimatgalaxie optisch identifiziert. Das Nachleuchten konnte noch über Tage und Wochen von diversen Teleskopen verfolgt werden. Die Informationen, über unabhängige Kanäle eintreffend, ergänzen einander in vorteilhafter Weise. Was für Astronomen ein Glücksfall, dürfte für Kreaturen, sofern vorhanden, in NGC 4993, die keinen gehörigen Sicherheitsabstand zum Ereignis haben wahren können, auf lange Sicht das Aus bedeuten. Hochenergetische Strahlung schädigt die Atmosphäre eines Planeten.

Auch ohne diesen kosmischen Kataklysmus wären Neutronensterne Novemberthema. Vor 50 Jahren, am 28. November 1967, wurde nämlich von Radioastronomen ein erstes Exemplar dingfest gemacht, der Cambridge-Pulsar CP 1919³. Dass es Neutronensterne geben muss, war Röntgenastronomen

¹Die weibliche Wasserschlange ist das längste Sternbild am Himmel.

²Dabei spielte eine Rolle, dass ein dritter GW-Detektor, Virgo nahe Pisa, nichts bemerkt hatte.

³Wegen der Fülle an Pulsaren, die danach entdeckt wurden, fallen die Bezeichnungen in neueren Katalogen länger aus: CP 1919 heißt jetzt PSR B1919+21 bzw. PSR J1921+2153.

zu dem Zeitpunkt völlig klar. Vom Röntgendoppelstern Scorpius X-1, 1962 zufällig bei einem Raketenanstieg am Röntgenhimmel entdeckt, gingen Strahlungsausbrüche aus, deren Kurzzeitflackern nur mit der Winzigkeit der Quelle zu erklären war. Nur ein Neutronenstern hat die in Frage kommende Statur. Über Neutronensterne wird seit 1934 spekuliert. Kaum ward in Cambridge von James Chadwick (1891–1974) das Neutron entdeckt, tauchte in Astronomenhirnen auch schon der Neutronenstern, eine Art überdimensionaler Atomkern, als Möglichkeit auf.

Der vorgesehene Hauptbeitrag, die abenteuerliche Geburt der neueren Geophysik, wird auf später verschoben. Geschichte kann warten. Die jungen Geophysiker von damals konnten es nicht. Erwartung lag in der Luft: Die Mär von der Meeresbodenspreizung, dem *sea-floor spreading*, erregte die Gemüter. Geomagnetische Messungen am Meeresboden belegten und belebten, wenn auch anders als von Alfred Wegener (1880–1930) einst propagiert, die Idee von der Kontinentalverschiebung. Für den Plattentektoniker fügten sich plötzlich Tatsachen⁴, vermeintlich zusammenhanglose, zu einem sinnvollen Ganzen. Das neue Bild von der Erde veränderte selbst die Sicht auf Venus und Mars! Für die Geophysik war das Aha-Erlebnis von 1967 nicht weniger bedeutsam als die Darwin'sche Evolutionstheorie für die Biologie ein Jahrhundert zuvor.

Wie man sieht, hat es der November durchaus in sich. Von Tristesse wissenschaftlicherseits keine Spur!

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im November

Der November gehört dem Frühaufsteher. Venus, Mars und Jupiter, sie alle tummeln sich am Morgenhimmel. Allein Saturn gibt seine Abschiedsvorstellung am südwestlichen Abendhimmel. Am 13. des Monats kommt's zu einer Begegnung von Venus und Jupiter. Beide Planeten gehen kurz nach sechs Uhr auf, anderthalb Stunden vor der Sonne. Mit von der Partie: der Mars, nördlich der Spica⁵, und, drei Tage später, am 16., die Sichel des alten Mondes.

⁴Hierzu sei angemerkt: Tatsachen oder Fakten *per se* gibt es nicht. Es bedarf immer eines gedanklichen Rahmens, kurz, einer Theorie, sie zu ordnen und zu etwas Sinnvollem zu verknüpfen. Hören und Sehen bilden da keine Ausnahme.

⁵Die Neutronensternkollision fand etwa eine Handbreit unterhalb von Spica statt!

GW 170817 + GRB 170817A

Entartete Sterne

Wo ein Körper ist, kann kein zweiter sein! Wieso eigentlich? Nun, Atome sind zwar größtenteils leer, aber ihre Elektronenhüllen lassen sich kaum zusammenpressen. Grund ist die Heisenberg'sche Unschärferelation. Man sperre ein Elektron in ein (sehr kleines) Kästchen. In dem Maße, in dem man den Spielraum des Elektrons einengt, man seinen Ort also festlegt, vergrößert sich die Unbestimmtheit seines Impulses, der Wucht (Momentum), mit der das Elektron in seinem Gefängnis gegen die Wände anrennt. Dieses „Anrennen“ aber macht Druck und das sogar am absoluten Nullpunkt der Temperatur. Gedankenexperiment Sonne: Ließe man den thermischen Druck, ihre innere Hitze, aus ihr raus, sie könnte trotz ihres enormen Eigengewichts nicht zu einem Punkt, einem schwarzen Loch, zusammenschnurren. Der *E n t a r t u n g s - d r u c k* des Elektronen„gases“ verhinderte dies. Eine kalte Sonne wäre zwar 100-mal kleiner, aber immer noch etwa erdgroß und also 2000-mal größer als ein massegleiches schwarzes Loch. Der Siriusbegleiter ist ein solcher Weißer Zwerg. Der quantenphysikalische Entartungsdruck der Elektronen vermag Himmelskörper bis zu 1,4 Sonnenmassen zu tragen. Wie wir wissen, gibt es Sterne, welche schwerer sind als diese sog. Chandrasekhar-Masse.

Die Antwort der Natur auf die Unmöglichkeit von weißen Zwergen mit mehr als 1,4 Sonnenmassen ist der Neutronenstern. Nicht nur Elektronen machen aus Angst vor geschlossenen Räumen Druck. Der Entartungsdruck ist allen Fermionen⁶ eigen, d. h. allen Teilchen mit halbzahligen Eigendrehimpuls (Spin). Dazu gehören Protonen und Neutronen. Was für atomare Elektronenhüllen gilt, trifft auf Kernmaterie, jenem Brei aus Protonen und Neutronen, ebenfalls zu: Sie lässt sich kaum zusammenpressen – wegen des Entartungsdrucks der Nukleonen, der Kernbestandteile. Deren elektrische Ladung spielt dabei keine Rolle. Neutronensterne bestehen aus Kernmaterie, hauptsächlich Neutronen. Sie sind Überbleibsel von Supernovaexplosionen, wie 1934 Walter Baade (1893–1960) und Fritz Zwicky (1898–1974) zu Recht vermuteten.

Auch für Neutronenkugeln – Gebilden von bis zu zwei, drei Sonnenmassen und dabei nicht größer als Berlin – gibt's eine Obergrenze, was die Masse

⁶Nur Bosonen, Teilchen mit ganzzahligen Spin, lassen sich bei ultratiefer Temperatur zu einem sog. Bose-Einstein-Kondensat zusammenquetschen.

anbelangt. Das ist verständlich, bedenkt man, dass der Druck, der ein solches Gebilde gegen die übermächtige Schwerkraft feien soll, selbst Quelle von Schwere ist. Je höher der Druck, desto stärker sein Beitrag zum Gewicht. Nach Albert Einstein ist Energie nämlich auch bloß Masse, allerdings mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit multiplizierte. Druck ist von der Maßeinheit her eine Energiedichte, mithin Massendichte und also schwerkraft-erzeugend. Das kann unangenehm werden: Wer schwerer ist als, sagen wir, drei Sonnenmassen, dem ist – zumindest im kalten Zustand – nicht zu helfen. Der freie Fall zu einem Punkt⁷, zu einem schwarzen Loch, ist unvermeidlich.

Gravitationswellen

Sterne, insbesondere die massereichen Vorgänger von Neutronensternen, sind keine Einzelgänger. Sie bilden Doppel- oder gar Mehrfachsterne. Eine Supernovaexplosion in einem solchen System stellt zwar – wegen der Masseverluste – den Zusammenhalt des Systems ernstlich in Frage, dennoch kommen Pärchen aus Neutronensternen oder schwarzen Löchern in der Natur vor.

Für die Untersuchung des von ihnen 1974 im Sternbild Adler entdeckten ersten Neutronensternpaares PSR B1913+16⁸ erhielten Joseph Hooton Taylor Jr. (geb. 1941) und Russell Alan Hulse (geb. 1950) einst den Physiknobelpreis. Das war 1993. Einer der beiden Neutronensterne ist ein 59-ms-Pulsar. Der Stern dreht sich pro Sekunde 17 mal um seine Achse! Da Pulsare zu den genauesten Uhren der Welt zählen, gelang es, an diesem Doppel-Neutronenstern diverse Effekte nachzuweisen, die von der Einstein'schen Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt wurden, u. a. wurden erstmals Gravitationswellen nachgewiesen – *i n d i r e k t*.

Beschleunigte elektrische Ladungen senden elektromagnetische Wellen aus. Darauf beruhen nicht nur Funk und Fernsehen, sondern die gesamte *b i s h e r i g e* Astronomie! Beschleunigte Gravitationsladungen, also auch Massen, die einander umkreisen, senden Gravitationswellen (GW) aus. Der Effekt ist schwach – es gibt, anders als bei der elektrischen Ladung, nur eine Art von Gravitationsladung –, der Energieverlust⁹ durch das Abstrahlen von GW

⁷Die „nackte“ Singularität, wo die Dichte unendlich ist und die Physik aussetzt, bekommt man nie zu Gesicht. Sie ist durch den Vorhang des Ereignishorizonts unseren Blicken gnädig entzogen. Man muss nicht alles verstehen wollen.

⁸alias PSR J1915+1606

⁹Der Vergleich elektromagnetischer Wellen mit GW hinkt. Mit den Vibrationen der Raum-Zeit, etwas rein Geometrischem, geht lokal nichts Materielles einher. Lange war

aber führt unweigerlich zum Schrumpfen des Abstands zwischen den beiden Neutronensternen. Die Umlaufzeit verkürzt sich messbar, woraus folgt, dass der Taylor-Hulse-Doppelneutronenstern nur noch wenige 100 Millionen Jahre zu leben hat. Was harmlos beginnt, nimmt kurz vor dem Ende dramatische Züge an. Die beiden Neutronensterne spiralen immer geschwinder umeinander und aufeinander zu. Es ist ein Teufelskreis: je geschwinder, desto höher die Verluste, umso geschwinder die Annäherung. Die GW-Sendeleistung wächst ins Unermessliche (Sonnenmassen pro Sekunde!). Im Falle von GW 170817 reichte sie jedenfalls aus, GW-Detektoren in 130 Millionen Lichtjahren Entfernung anzusprechen zu lassen. Sie zeichneten die letzten 90 Sekunden eines ereignisreichen Sternenlebens auf! Mit dem rapiden Bahnzerfall einher geht eine charakteristische Erhöhung der GW-Frequenz. Diese¹⁰ lässt nur einen Schluss zu: Hier müssen Neutronensterne zu Tode gekommen sein. Insgesamt gingen bei dem Vorkommnis Bruchteile einer Sonnenmasse verloren, womit letztlich das Universum geheizt wird. Unklar bleibt, was nach dem Kataklysmus übrig blieb, ein schwerer Neutronenstern oder ein schwarzes Loch? – vielleicht auch ein übergewichtiger Neutronenstern, der, nachdem er sich abgekühlt hat, mit Verspätung zu einem schwarzen Loch kollabierte. aLIGO hat leider von den Vorgängen nach der Verschmelzung wegen „Schwerhörigkeit“ oberhalb von einem Kilohertz nichts mitbekommen.

γ -Strahlen-Blitz und Nachleuchten

Anders als bei dem GW 150914-Ereignis vom 14. September 2015, dem Geburtstag der GW-Astronomie, wo ein schwarzes Doppelloch sang- und klanglos, d. h. ohne elektromagnetisches Signal, zu e i n e m schwarzen Loch verschmolz¹¹, ist der entsprechende Vorgang mit Neutronensternen ein Spektakel sondergleichen, mit Gamma-Strahlen-Blitz und lang anhaltendem Nachleuchten. Der GRB 170817A-Blitz wurde sowohl vom Fermi-Satelliten der NASA als auch von ESAs INTEGRAL registriert. Er dauerte zwei Sekunden

durchaus unklar, ob GW überhaupt etwas bewirken.

¹⁰Aus dem Verlauf des Schrillerwerdens folgt sofort die sog. Chirp-Masse von $1,188_{-0,002}^{+0,004}$ Sonnenmassen. Das ist so etwas wie die mittlere Masse der Beteiligten. Bei gleichschweren Partnern wären das 87 % der Masse *einer* Komponente. Weiße Zwerge sind als Verursacher ausgeschlossen, da die Umlaufbahn unmittelbar vor dem Grand Finale, viel zu klein war: Sie hätte bequem i n einen weißen Zwerg gepasst.

¹¹Gut drei Monate danach folgte mit GW 151226 das zweite Ereignis dieser Art.

und war ungewöhnlich schwach. Die Vermutung, die kurzen¹² γ -Strahlungsstöße hätten mit der Kollision von Neutronensternen zu tun, konnte, wie gesagt, erstmals bestätigt werden. Das Nachleuchten kennt man von Supernovaexplosionen. Es speist sich energetisch vom radioaktiven Zerfall frisch synthetisierten schwerer Elemente¹³ jenseits des Eisens im Periodensystem. Die Farbe der Explosionswolke wandelte sich binnen Tagen von blau in rot. Das Verschmelzen von Neutronensternen mit Innenleben und fester Oberfläche ist zwar ungleich komplizierter als das Verschmelzen zweier Löcher ohne Eigenschaften, hat aber den unschätzbaren Vorteil, dass man etwas sieht: (i) den Ort im All, woraus die Entfernung folgt, (ii) den Ort in der Galaxie, ob in einem Sternentstehungsgebiet oder weit außerhalb, was auf den Vorgängerdoppelstern hinweist, (iii) die Farbe und (iv) das Spektrum des Nachleuchtens . . . Das alles sind Indizien, welche das Geschehen rekonstruieren helfen.

Die Modellierung der Details des Feuerballs hat es in sich. Wie kam es zu der Verzögerung von 1,7 Sekunden bis es blitzte? Sind GW schneller als das Licht – was nach Einstein nicht sein kann –, hielt sich ein heißer Neutronenstern noch eine Weile, bevor er, erkaltet, endgültig zu einem schwarzen Loch zusammenstürzte, oder brauchten die Materiestrahlen (Jets), die senkrecht zur ursprünglichen Bahnebene aus dem Tohuwabohu lichtschnell hervorschießen so lange, bis sie frei kamen? Es ist nicht einfach, die Maschinerie kosmischer Schlangeneier aus der Ferne zu erschließen.

¹²Es gibt auch länger dauernde γ -Strahlungs-Ausbrüche. Sie finden statt in Galaxien, wo massereiche Sterne *en masse* produziert werden. Sie werden deshalb mit Kern-Kollaps-Supernovae in Verbindung gebracht.

¹³Zerplatzt ein Neutronenstern, hindert nichts mehr die Neutronen daran, zu Protonen zu zerfallen. Dabei bilden sich jede Menge schwerer und meist instabiler Atomkerne.