

Liebe Leserin, lieber Leser,

es gibt verstörende Neuigkeiten von der Gravitationswellenfront. Im Mai vorigen Jahres wurde ein Ereignis registriert, GW 190521, welches, glaubt man das Unglaubliche, von der Verschmelzung zweier schwarzer Löcher zu einem einzigen von 150 Sonnenmassen (M_{\odot}) kündigt. Das ist ein Rekord! Verstörend ist, dass das Hauptloch um die 85 M_{\odot} gewogen haben soll. Sternphysiker sind irritiert. Ihrer Meinung nach kann es keine schwarzen Löcher *stellare*n Ursprungs¹ dieser Größe geben. Nun wird spekuliert, zumindest das schwerere Loch sei selbst Produkt einer Fusion von kleineren (stellaren) schwarzen Löchern gewesen. Man spricht von hierarchischem Wachstum. Die Floskel meint Kannibalismus: die Großen wachsen auf Kosten der Kleinen. Auf diese Weise könnten auch die super-massereichen Schwarzkraftmonster in den Zentralgebieten von Galaxien und Quasaren entstanden sein, Gebilden, die bis zu einigen Dutzend Milliarden Sonnenmassen auf die Waage bringen.

Da der Schwarzschildradius eines schwarzen Lochs proportional seiner Masse ist – eine Sonnenmasse misst 2,9 km –, addieren sich beim Fusionieren die Radien. Die „Oberfläche“ des Ereignishorizonts hängt hingegen quadratisch vom Radius ab. Der Oberflächengewinn beim Einverleiben ist maximal, fusionieren gleichschwere Löcher miteinander. Diese Mathematik hat Bedeutung: Die Oberfläche eines schwarzen Lochs wird mit seiner Entropie identifiziert. Sie kann nur zunehmen. Befördert die Natur mit Ereignissen, wie dem vom 21. Mai 2019, maßgeblich die Entropieproduktion im Universum?

Vor 100 Jahren, am 31. Oktober 1920, entdeckte Walter Baade (1893–1960), damals noch an der Sternwarte Hamburg-Bergedorf, einen ungewöhnlichen Asteroiden. 944 Hidalgo², wie er später getauft wurde, hält sich nicht im klassischen Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter auf. Die Bahn ist stark gegen die Ekliptik geneigt und hoch-exzentrisch. Sein Sonnenabstand pendelt zwischen Mars- und Saturnentfernung. Erst 1977 wurde ein weiterer Geselle entdeckt, der das Reich der Riesenplaneten kreuzt: 2060 Chiron.

¹Ein *stellares* schwarzes Loch hat einmal groß angefangen: als (massereicher) Stern.

²Nach dem mexikanischen Nationalhelden und Freiheitskämpfer Miguel Hidalgo y Costilla (1753–1811) benannt, als Dank für die 1923 bei einer Sonnenfinsternisexpedition erwiesene Gastfreundschaft der Mexikaner.

Nach diesem, einem Fabelwesen³, halb Pferd, halb Mensch, werden die chaotischen Wanderer zwischen den Welten als Zentauren bezeichnet. Vermutlich stammen sie alle aus dem Edgeworth-Kuiper-Gürtel, jenem äußeren Asteroidengürtel jenseits des Neptun, und haben sich erst kürzlich hierher verirrt. Dafür spricht, dass (a) ihre Bahnen himmelsmechanisch nicht stabil sind und (b) einige⁴ dieser Asteroiden Ausgasung zeigen – wie Kometen! Sie sind Neulinge und haben sich noch einen eisigen Vorrat an flüchtigen Substanzen bewahrt. Letzteres spricht für eine Herkunft aus der erwähnten „Kühltruhe“ des Sonnensystems. Baades Hidalgo wäre demnach ein „abgehalfteter“ Komet der sog. Saturnfamilie, dessen Schicksal nun in des Jupiter Hand liegt.

Bei Interesse an einer Paarbildungs-Instabilität bitte weiterlesen!

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Oktober

In den frühen Morgenstunden des 3. Oktober zieht Venus am Regulus vorbei, dem Hauptstern des Löwen. Allerdings steht der Morgenstern bei uns erst nach dem Stelldichein auf, gegen 3 Uhr 30 MESZ. Trotzdem sollte man sich den Anblick der Trennung nicht entgehen lassen. Man beachte: Venus überstrahlt Regulus um zwei Größenordnungen! Ein Fernglas ist angebracht!

Mars steht am 14. Oktober der Sonne gegenüber – im Sternbild der Fische. Diesmal kommt er uns (am 6. Oktober) nur auf etwa 62 Millionen Kilometer nahe. Mit einem Fernrohr sollte zumindest die helle Südpolarkappe zu sehen sein. Mars übertrifft zum Zeitpunkt der Opposition Jupiter um eine halbe Größenklasse. Wer am 3. Oktober wegen des Venus-Regulus-Rendezvous früh aufsteht, sollte auch einen Blick auf den Mars werfen. Er findet ihn nördlich des Mondes, kein Grad von diesem entfernt.

Am Abendhimmel tummeln sich Jupiter und Saturn. Sie kommen scheinbar einander näher, steuern zu auf die „große Konjunktion“ am Jahresende im Schützen.

Monat und Mond haben etymologisch die gleiche Wurzel. Ein Kalendermonat misst in etwa die Zeitdauer eines Mondumlaufs, von Vollmond zu Vollmond. Dieser sog. synodische Monat dauert $29\frac{1}{2}$ Tage und eine $\frac{3}{4}$ Stunde. Zwei

³Chiron galt als fabelhafter Lehrer. Er unterrichtete u. a. Achilles.

⁴Darunter Chiron selbst. Als periodischer Komet trägt er die Bezeichnung 95P/Chiron.

Vollmonde in einem Monat sind mithin drin, z. B. im Oktober: Dem ersten Vollmond am 1. Oktober folgt ein zweiter am 31. – ein „blauer Mond“.

Die Sommerzeit endet am 25. Oktober, 3 Uhr MESZ bzw. 2 Uhr MEZ.

Nachzutragen wäre, dass der Apollo-Asteroid 2011 ES₄, von dem in der September-Ausgabe kurz die Rede war, am 2. September tatsächlich die Erde passiert hat, und zwar in gebührendem Abstand von 1 1/2 Millionen Kilometern. Er wurde erst nach dem Vorbeiflug aufgefunden und umgehend aus der Liste gefährlicher Flugobjekte entfernt.

Was geschah am 21. Mai 2019?

An jenem Tag, zwei Minuten nach 5 Uhr MESZ, vibrierte *m e s s b a r* zehntelsekundenlang die Raum-Zeit. Die Analyse⁵ des von drei Gravitationswellendetektoren (2 × LIGO, VIRGO) registrierten kurzen Chirp-Signals von nur wenigen Schwingungen ergab, dass allem Anschein nach vor einem halben Weltalter zwei schwarze Löcher, eines von $85^{+21}_{-14} M_{\odot}$ ⁶, das andere von $66^{+17}_{-18} M_{\odot}$, immer schneller, immer enger einander umkreisten und schließlich zu einem $142^{+28}_{-16} M_{\odot}$ -Loch verschmolzen. Die Erschütterung im Raum-Zeit-Gefüge, die so etwas mit sich bringt, breitet sich seitdem wellenförmig durchs All aus und erfasste just am 21. Mai 2019 die Erde.

Zum Einwärtsspiralen kommt's, weil das Kreisen von Massen mit dem Senden einer Gravitationswelle verbunden ist. Im Falle des Sonnensystems beläuft sich die Leistung auf wenige Kilowatt. Dreht es sich jedoch um enge Paare aus Neutronensternen oder schwarzen Löchern, erschüttert der Verlust das All: bis zu $3,7 \times 10^{49}$ W im Fall von GW 190521!

Das Problem ist nicht, dass hier ca. $9 M_{\odot}$ „verschwunden“ sind – sie wurden als Gravitationswelle abgestrahlt –, sondern, dass nach allem, was wir wissen über das Leben und Sterben massereicher Sterne, ein schwarzes Loch von $85 M_{\odot}$ nicht beim Hinscheiden eines solchen hat entstehen können. Die Schlussfolgerung, zumindest der $85 M_{\odot}$ -Koloss sei selbst bereits Ergebnis einer vorherigen Fusion gewesen, liegt, zumindest für den Sternphysiker, nahe.

⁵Deutungen setzen Annahmen voraus: dass Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie gilt, dass sich genau zwei schwarze Löcher mit unbekanntem Massen und Drehimpulsen auf nahezu kreisförmigen Bahnen umeinander bewegen, etc. etc.

⁶Die Schreibweise gibt den Median an und das 90%-Fehlerintervall. Mit 50% Wahrscheinlichkeit liegt die tatsächliche Masse über $85 M_{\odot}$ (also mit 50% darunter) und mit 90% zwischen 71 und $106 M_{\odot}$.

Paarbildungs-Instabilität-Supernovae

Wie Arthur S. Eddington (1882–1944) vor fast einem Jahrhundert herausfand, ist das Innere eines Sterns leicht berechenbar, vorausgesetzt, die Energie wird durch Strahlung transportiert und der Anteil des Strahlungsdrucks am Gesamtdruck (Gas- und Strahlungsdruck) ist an jeder Stelle im Innern des Sterns gleich.

Angewandt auf die Sonne, ergibt Eddingtons „Standardmodell“ nach Einsetzen von Sonnenmasse und -radius eine Zentraltemperatur von 12 Millionen Grad, was angesichts der Einfachheit des Modells nicht schlecht ist: Up-to-date-Sonnenmodelle liefern einen um lediglich 25 % höheren Wert.

Eddingtons Modellstern hat eine Macke: Bei vorgegebener Masse ist der Sternradius beliebig wählbar! Es gilt: Je kleiner der Radius, desto heißer das Sterninnere. Bildlich gesprochen, kann man die Gaskugel selbstähnlich zusammenschieben bzw. auseinander ziehen. Und das ohne irgendeine Anstrengung (sofern es langsam geschieht)! Wie groß der Eddington'sche Stern auch sei, stets sind die Grundgleichungen der Sternphysik erfüllt, insbesondere reicht der Druck immer gerade aus, das Gewicht der darüberliegenden Gasmassen zu tragen. Die „Macke“ ist verständlich: In diesem speziellen Fall ist die Gesamtenergie, also die Summe aus (negativer) potentieller Energie und innerer thermischer Energie, Null. Man muss beim Zusammendrücken keine Kompressionsarbeit leisten. Richtige Sterne funktionieren anders: Sie minimieren ihre Gesamtenergie, d. h., sie machen sie so negativ wie irgend möglich, indem sie den Radius adjustieren.

Nicht frei wählbar ist der Anteil des Strahlungsdrucks am Gesamtdruck. Er hängt von der Sternmasse ab. Je massereicher, desto wichtiger wird die Strahlung als Druckmittel. In schweren Sternen dominiert tatsächlich der Strahlungsdruck – was nichts Gutes verheißt!

Dass der Radius eines Sterns zur Disposition steht, sollte zu denken geben! Was passiert, wird Druck abgelassen? Dann beginnt der Stern zu schrumpfen! Er schwindet zu einem Punkt: selbstähnlich und in endlicher Zeit.

Zurück zur Realität. Zum Druckabfall kommt es, überschreiten γ -Quanten des Strahlungsfeldes die Energieschwelle von 2×511 keV. Nun können spontan Elektron-Positron-Paare entstehen⁷. Paarbildung setzt bereits ab ein, zwei Milliarden Grad ein. Die Elektronen (e^-) und Positronen (e^+ : positiv

⁷Aus Gründen der Impulserhaltung bedarf's dazu der Mitwirkung eines Atomkerns, welcher den Rückstoß aufnimmt.

geladene Elektronen) zerstrahlen (annihilieren) zwar sofort wieder, wobei jeweils zwei γ -Quanten entstehen, trotzdem sind nun immer eine gewisse Menge an $e^- - e^+$ -Paaren im Sterninnern präsent. Energie aber, die zu Ruhemasse gerinnt, ist quasi weg. Sie fehlt⁸ und der Stern gibt nach. Auf dieses „Weichwerden“ des Sternmaterials durch Paar-Bildung hat 1964 das Forscherpaar William Alfred Fowler (1911–1995) und Fred Hoyle (1915–2001) hingewiesen. Den Druckabfall zu kompensieren, kontrahiert der Stern. Umsonst! Er wird zwar heißer, aber ein immer beträchtlicherer Teil der Kompressionsarbeit geht in die Paar-Bildung. Je heißer, energiereicher, das Strahlungsfeld, desto schlimmer! Die Instabilität führt dennoch nicht zum Kollaps des Sternkerns, wie wir es von Typ-II-Supernovae (Kernkollaps-Supernovae) kennen, vielmehr zu starken Pulsationen. Einschneidende Masseverluste⁹ bewirken ein „Gesundshrumpfen“ – es sei denn, des Sterns Startmasse überschreite die kritische Marke von $140 M_{\odot}$ ¹⁰. In diesem Falle kommt es, ausgelöst durch gallopiertes Sauerstoff- und Silizium„brennen“, zu einer verheerenden thermonuklearen Explosion. Es zerrupft den Stern – vollständig!

Heutzutage, bei inzwischen gestiegenem „Metallgehalt“, sind Paarbildungs-Instabilitäts-Unfälle nicht mehr angesagt. Die schweren Elemente erschweren das Entweichen der Strahlung aus einem Stern. Sie machen die Sternmaterie undurchsichtiger. Strahlungsdruck und damit der Widerstand gegen die Schwerkraft wachsen. Vor sechs, sieben Milliarden Jahren war das noch anders.

Die durch die Paarbildungs-Instabilität geschlagene Bresche in der Masseverteilung stellarer schwarzer Löcher beginnt bei 40 bis $65 M_{\odot}$ und dürfte sich bis $130 M_{\odot}$ erstrecken. Schwerere stellare schwarze Löcher sind zwar theoretisch möglich, aber wenig wahrscheinlich. Der Vorgängerstern müsste eine Startmasse¹¹ von über $260 M_{\odot}$ haben.

Eine Mindestmasse für stellare schwarze Löcher gibt es auch. Sterne zwischen 10 und, sagen wir, $25 M_{\odot}$ enden als Neutronensterne. Diese wiegen bis zu $2,1 M_{\odot}$. (Für „kalte“ Neutronensterne existiert eine Massengrenze!) Ein heißer, schnell rotierender Neutronenstern größerer Masse mag vorkommen, doch er ist nicht von Dauer. Abgekühlt und abgebremst kann er seinem Schicksal nicht entgehen und muss von der Bildfläche verschwinden. Nur die Schwerkraft verrät, dass da etwas war.

⁸Ein 1022-keV- γ -Quant bildet, wenn überhaupt, ein „energieloses“ $e^- - e^+$ -Paar.

⁹Eta Carinae, einer der massereichsten Sterne der Galaxis, zeigt ein solches Verhalten.

¹⁰Alle Massenangaben sind lediglich Richtwerte! Genaues weiß man nicht.

¹¹Bei Einzelsternen in dieser Liga ist Skepsis angebracht. Sie haben sich bei genauer Inspektion meist als Doppel- und Mehrfachsterne entpuppt.