

Liebe Leserin, lieber Leser,

im Februar wird es richtig „magnetisch“. Vor einem halben Jahrhundert wurden die Pulsare, magnetische Neutronensterne, aufgefunden – durch Radioastronomen im englischen Cambridge. Jocelyn Bell Burnell (geb. 1943), einer Aspirantin von Antony Hewish (geb. 1924), waren regelmäßige Radiostrahlungsausbrüche im Rhythmus von 1,337 Sekunden aufgefallen. Sie kamen aus dem Sternbild Fuchsch. Damit hatte niemand gerechnet. Die Entdeckung war „nicht geplant“ gewesen! Man hatte nach dem „Funkeln von Radiosterne“ Ausschau gehalten, nicht nach Neutronensternen. Diese waren etwas für Theoretiker und – vielleicht – Röntgenastronomen. Die Publikation zu CP 1919¹, dem ersten Cambridge Pulsar (CP), und zu zwei weiteren Pulsaren erschien am 24. Februar 1968. Übrigens: Die stärksten Magnete des Universums – sog. Magnetare – sind Neutronensterne!

Die Idee vom „unheimlichen Stern“, so nannte der sowjetische Physiker Lev Landau (1908–1968) den Neutronenstern, ist Jahrzehnte älter. Kaum ward 1932 nach zwölfjähriger Suche das Neutron als Bestandteil des Atomkerns von James Chadwick (1891–1974) erkannt, beschrieben 1934 Walter Baade (1893–1960) und Fritz Zwicky (1898²–1974) den Neutronenstern als hartes Überbleibsel einer Supernova-Explosion. Den innovativen Astronomen ging es um die Energie, die bei einer Supernova freigesetzt wird. Nur Gravitationsenergie kam infrage. Lässt man im Rahmen der Newtonschen Gravitationstheorie einen x-beliebigen Körper unter der Wirkung seiner Eigenschwere zu einem Punkt zusammenbrechen, wird formal unendlich³ viel Energie frei. Um die Energetik einer Supernova zu verstehen reicht ein „Punkt“ von wenigen Dutzend Kilometern Größe. Und darin muss eine ganze Sternenmasse Platz finden. Nichts einfacher als das! Dazu muss man „nur“ den ungeheuren Leerraum, der in der Materie steckt, herausnehmen – Atome sind so gut wie

¹„1919“ bezeichnet die Rektaszension: 19^h 19^m. Die heutigen Katalogbezeichnungen sind umfänglicher. Es gibt zu viele Pulsare im Milchstraßensystem. CP 1919 heißt jetzt PSR B1919+21. Worauf die „+21“ hindeuten? Richtig, auf die Deklination!

²Fritz Zwickys Geburtstag jährt sich am Valentinstag zum 120. Male.

³Dem Unfug mit dem „Unendlich“ hat erst Einstein in seiner Gravitationstheorie den Garaus gemacht: Die Allgemeine Relativitätstheorie kennt einen kleinsten Radius. Newtons $1/r^2$ -Gesetz für Punktmassen endet sozusagen am Schwarzschildradius.

leer! –, so dass die Atomkerne dicht an dicht liegen. Mehr steckte kaum hinter der Baade-Zwicky-Idee. Erst ab 1938 begannen sich Physiker in West und Ost, Robert Oppenheimer (1904–1967) in den USA und Lev Landau in der Sowjetunion, ernstlich für Neutronensterne zu interessieren.

Übrigens: junge Pulsare, wie der Krebsnebelpulsar PSR B0531+21, halten sich noch in ihrem Supernovaüberrest oder in dessen Nähe auf!

Heutzutage sind Neutronensterne wieder im Gespräch – als Quelle von Gravitationswellen.

Der Neutronenstern ist „unheimlicher“ denn je! Eine vergnügliche Lektüre wünscht

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Februar

Von den beiden inneren Planeten zeigt sich lediglich Venus gegen Monatsende in der Abenddämmerung. Die äußeren Planeten Mars, Jupiter und Saturn ziehen noch immer den Morgenhimmel vor. Zwischen dem 8. und dem 11. Februar gesellt sich der abnehmende Mond hinzu. Am 10. Februar wandert der rötliche Mars (Ares) nördlich am Antares vorbei, dem rötlichen Hauptstern des Skorpions. Westlich des Mars erstrahlt Jupiter. Dieser überquert am Monatsende bereits kurz nach Mitternacht den Horizont, gefolgt mit rund $3\frac{1}{2}$ Stunden Verspätung vom Saturn.

Am 15. Februar kommt es zu einer partiellen Sonnenfinsternis. Am besten, Sie begeben sich dazu in die Antarktis. Am 23. Februar bedeckt der Mond für eine Stunde den Aldebaran im Sternbild Stier. Dazu muss man nicht verreisen. Aldebaran steht nicht alleine. In himmlischer Nähe tummeln sich die Hyaden, was ein reizvoller Anblick ist. (Nur ein Projektionseffekt! Aldebaran steht vor dem „Regengestirn“!)

Neutronensterne

Schaut man das Herz der Sterne an und lässt sich nicht von Äußerlichkeiten blenden, so werden mit zunehmendem Alter deren Zentralgebiete immer dichter, mögen sich die Außenbereiche auch aufblähen. Die Sonne beispielsweise wird am Ende ihrer Tage, nachdem sie sich ihrer Riesensternhülle farbenprächtig als planetarischer Nebel entledigt haben wird, als Weißer Zwerg

dahindämmern. Sie veräußert dann nur noch, über Jahrmilliarden gestreckt, die Restwärme in ihrem Inneren. Ein Weißer Zwerg ist etwa so groß wie die Erde. Unsere Sonne ist gut 100-mal größer als die Erde. Presste man sie auf die Größe der Erdkugel zusammen, näme die mittlere Dichte zwangsläufig um das $100 \times 100 \times 100$ Fache zu. Aus $1,4 \text{ g/cm}^3$, der mittleren Dichte der Sonne, würden $1,4 \text{ t/cm}^3$. Die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche wächst „nur“ quadratisch mit der Radienverkleinerung. Sie kletterte auf 280 000 „g“ ($1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$). Dass ein derart kompaktes Gebilde nicht unter seinem Eigengewicht zusammenbricht, ist allein dem sog. Entartungsdruck⁴ des Elektronengases geschuldet – einem Effekt der Quantenphysik!

Ein Neutronenstern ist 1000-mal⁵ kleiner noch als ein Weißer Zwerg. Bei vergleichbarer Masse übertrifft seine mittlere Dichte die eines Weißen Zwergs um das Milliardenfache. Das ist in etwa die Dichte von Atomkernmaterie. Eine Streichholzsachtel davon enthält Milliarden Tonnen. Die Kernbestandteile, Protonen und Neutronen – sie werden als Nukleonen bezeichnet –, haben etwas gemeinsam mit den Elektronen. Auch sie sind Fermionen. In der Tat ist es der Entartungsdruck der Nukleonen, der einen Neutronenstern hauptsächlich stabilisiert. Anders als Bosonen⁶ weigern sich Fermionen, dem fermionischen Nachbarn bliebig nahe auf die Pelle zu rücken. Je größer die Nähe, desto stärker der Hang zur Flucht. So will es die Heisenberg'sche Unschärferelation. Den Entartungsdruck der Fermionen gibt es noch am absoluten Nullpunkt (-273 C). Er herrscht unabhängig von der Temperatur.

Ein Neutronenstern ist, wie gesagt, nicht nur 100-mal kleiner als eine Sonne, sondern (100×1000) -mal kleiner. Seine strahlende Oberfläche ist mithin 10^{10} -mal kleiner als die Sonnenoberfläche. Entsprechend gering ist seine Ausstrahlung. Bei gleicher Oberflächentemperatur wäre er 25 Größenklassen lichtschwächer als eine gewöhnliche Sonne! Nun hängt die Strahlungsleistung nicht nur von der Oberfläche ab, sie wächst auch mit der vierten Potenz der Oberflächentemperatur (in Kelvin) an. Neutronensterne entstehen heiß. Man

⁴Der Entartungsdruck ist allgegenwärtig. Ihm ist zu danken, dass Atome nicht kollabieren! Ohne ihn gäbe es keine festen Gegenstände oder Flüssigkeiten.

⁵Darin drückt sich größenordnungsmäßig das Masseverhältnis Nukleon/Elektron aus.

⁶Bosonen sind Teilchen mit ganzzahligem Spin. Tun sich zwei Fermionen zu einem Paar zusammen, so trägt das Duo nicht zum Entartungsdruck bei! Es verhält sich vielmehr wie ein Boson. Man kennt Paarbildung von der Supraleitung, wo Elektronen als sog. Cooper-Paare agieren. Auch das Innere eines Neutronensterns ist supraleitend – und suprafluid! Das ist Tiefkühlphysik! Tatsächlich sind, energetisch gesehen, Neutronensterne „kalt“, egal, wie heiß sie, in Kelvingraden, auch sein mögen.

rechnet mit bis zu 10^9 Grad. Heiße Körper strahlen im Röntgenbereich. Also setzte man alle Hoffnung⁷ auf die Röntgenastronomie. Entdeckt aber wurden die ersten Neutronensterne von Radioastronomen – wegen ihres immensen Magnetfelds!

In leitfähigem Plasma sind Magnetfelder quasi „eingefroren“. Bei Verkleinerung des Radius wächst das Magnetfeld mit dem Kehrwert des Sternquerschnitts. Bildlich gesprochen: Die Feldlinien, deren Anzahl konstant ist – der magnetische Fluss bleibt erhalten –, müssen durch den kleineren Querschnitt hindurch. Die Feldliniendichte ist ein Maß für die Stärke eines Magnetfelds. Der Querschnitt eines Neutronensterns ist 10^{10} -mal kleiner als der des Vorgängersterns. Um den gleichen Faktor wächst das Magnetfeld an. Aus wenigen Gauß⁸ werden ohne weiteres Hinzutun, rein *p a s s i v*, 10^{10} Gauß! Was die Rotationsperiode anbelangt, gilt das gleiche. Aus Drehimpulserhaltungsgründen verkürzt sie sich um den gleichen Faktor! Man kennt dieses Schnellerwerden durch Schrumpfung von den Pirouetten der Eiskunstläufer! Diese legen die Arme an den Körper, wodurch sie geschwinder noch um ihre Achse wirbeln. Neutronensterne beginnen mit Umdrehungszeiten im Millisekundenbereich. Man stelle sich vor: ein Gebilde von der Masse der Sonne, das sich Hundertmal pro Sekunde um sich selbst dreht! Durch Abstrahlung, u. a. von Gravitationswellen, kommt es zu einer Verlangsamung⁹ der Rotation.

In den ersten Sekunden im Leben eines Neutronensterns dürfte die Voraussetzung für einen Siemens'schen Dynamo erfüllt sein. Dieser verstärkt *a k t i v* das Magnetfeld. Magnetare bringen es deshalb auf Feldstärken von 10^{15} Gauß! Zum Vergleich: An der Erdoberfläche werden etwa $1/2$ Gauß gemessen. Vermutlich ist der magnetische Dipol, wie bei Erde und Sonne, gegen die Rotationsachse geneigt. Im Falle eines „schiefen Rotators“ kommt es an den magnetischen Polen irgendwie zur Aussendung von gebündelter Radiostrahlung. Überstreicht der Strahlungskegel die Antenne auf der Erde, wird ein Signal registriert. Ein Pulsar „pulsiert“ nicht! Er gleicht einem Leuchtturm: Der Scheinwerfer strahlt ohne Unterbrechung, aber er dreht sich. Sein Strahl überstreicht den Himmel, und das eventuell mehrmals pro Sekunde!

⁷Leider kühlen neugeborene Neutronensterne durch Neutrinostrahlung binnen Wochen stark ab, so dass die Chance, sie heiß zu erwischen, gering ist.

⁸Die gesetzliche Einheit der magnetischen Flussdichte ist das Tesla ($1 \text{ T} = 10^4$ Gauss).

⁹Die säkulare Zunahme der Periodenlänge wird zuweilen von einer sprunghaften Periodenverkürzung unterbrochen. Ursache seien Neutronensternbeben. Aufgestaute Spannungen entluden sich, liest man. Auf jeden Fall erfährt man dadurch etwas über das Innere eines Neutronensterns. Erdbeben sind ja auch ein Zugang zum Erdinnern.

Für den „Fundamentalisten“, den physikalischen, ist der Neutronenstern ein Geschenk des Himmels: ein Gratis-Laboratorium.

Ein Elektron ist ein Punkt¹⁰. Nicht so das Neutron! Weil es im Ggs. zum Elektron eine Welt für sich ist, ist ein Neutronenstern mehr als ein Weißer Zwerg *en miniature!*

Als Baryon besteht das Neutron aus jeweils drei (elementaren?) Quarks und ist nicht für die Ewigkeit gemacht. Denn gelegentlich verwandelt sich ein sog. d- in ein u-Quark: Aus dem Neutron wird ein Proton. Das geschieht spontan, ohne äußeren Anlass. Des Neutrons Lebenserwartung beträgt im Mittel eine Viertelstunde – also fast eine Ewigkeit, gemessen an den in der Kernphysik üblichen Zeiträumen. Bei diesem β -Zerfall fallen ein Elektron und ein Antineutrino an. (Quarks sind elektrisch geladen. Das d-Quark beispielsweise trägt $-1/3$, das u-Quark $+2/3$ Elementarladungen.) Ein Proton hingegen ist gegen den spontanen Zerfall gefeit, da es etwas leichter ist als ein Neutron. Einem Neutron, das leben will, bleibt nur: einem Atomkern angehören – oder einem Neutronenstern. Letzterer wird deshalb gerne mit einem überdimensionalen¹¹ Atomkern verglichen. Eingebunden in ein Kollektiv erhöht sich die Lebenserwartung, weil energetisch kein Platz für das abzugebende Elektron ist. Es bedarf also stets eines gewissen Anteils an (entarteten) Elektronen. Reine Neutronensterne, d. h. bar aller Protonen, kann es nicht geben.

Umwandlungen zwischen nicht-elementaren Elementarteilchen sind die Regel. Tief im Inneren eines Neutronensterns vermutet man einen See aus schweren Baryonen, sog. Hyperonen. Da niemand so recht darüber Bescheid weiß, ist unklar, wie groß ein Neutronenstern gegebener Masse¹² genau ist und wie schwer er sein darf, ohne in Gefahr zu sein, als schwarzes Loch zu enden. Auf dem Weg dorthin sind für den phantasiebegabten Physiker übrigens noch kompaktere „Kreationen“ vorstellbar. Quarks könnten ihre zwanghafte Neigung zur Dreierheit¹³ aufgeben. Ein freies Quark wäre keinem individuellen Nukleon mehr zuordenbar. Das wäre eine Sensation. Freie Quarks (mit gebrochener elektrischer Elementarladung) wurden nämlich noch nie gesichtet, als ob die

¹⁰Das ist wörtlich zu nehmen: Ein ausgedehntes Etwas kann nicht elementar sein!

¹¹Die starke Kernkraft vermag nur Atomkerne bis hinauf zum Uran einigermaßen zusammenzuhalten. Schwerere Kerne sind instabil. Das liegt an der kurzen Reichweite der Kernkraft. Die Schwerkraft ist zwar eine schwache Kraft, aber dafür reicht sie weit, sogar bis ins Unendliche. Sie erlaubt „Atomkerne“ von Planetoidengröße!

¹²Gemeint ist die von außen wahrnehmbare Masse, also die Summe der Teilchenmassen abzüglich der $|$ Bindungsenergie $|/c^2$.

¹³Festgefügte „Zweiheiten“, Quark plus Antiquark, gibt es auch: Mesonen.

Natur einen Horror davor hätte. Die hypothetischen **Q u a r k s t e r n e** jedenfalls bestünden aus einem Quark-Gluon-Brei. So etwas mag kurz nach dem Urknall sogar gang und gäbe gewesen sein, bevor Protonen und Neutronen beim Unterschreiten von 10^{12} Grad auskondensiert sind. (Gluonen sind, wie der Name sagt, der „Kleber“, der als Träger der starken Wechselwirkung Atomkerne und ihre Bestandteile zusammenhält.)

Hyperonen unterscheiden sich von gewöhnlichen Baryonen, wie dem Proton oder Neutron, durch ihre „Fremdheit“ (*strangeness*). Diese Eigenheit verhindert ihren schnellen Zerfall¹⁴. Träger von Fremdheit sind spezielle Quarks einer (eigentlich überflüssigen) Quarkfamilie. Ein Stern, der aus derartigen Quarks bestünde, wäre ein *strange star*. *Strange* kann man auch mit *selt-sam* übersetzen, womit wir wieder bei Lev Landau und seinen „seltsamen¹⁵ Sternen“ wären. Quarkmaterie hatte aber damals noch niemand im Blick. Dass sich mit seinen Quarks Ordnung ins Reich der Elementarteilchen bringen lässt, hatte der Physiker Gell-Mann (geb. 1929) 1964 herausgefunden gehabt.

Nun sind die Röntgen-Astronomen am Zug. Jede Messung von Masse *und* Radius¹⁶ eines Neutronensterns ist hochwillkommen, um des Elementarteilchenphysikers ausufernde Phantasie in die Schranken zu weisen. Am Ende winkt ein wirkliches Verständnis exotischer Zustände.

¹⁴Hyperonen entstehen paarweise, wobei sich die *Strangeness* insgesamt aufhebt. Das vereinzelte Hyperon hat dann das Problem, seine *Strangeness* über die schwache Wechselwirkung, sprich den radioaktiven Zerfall, wieder loszuwerden.

¹⁵Sowjetische Physiker publizierten damals gerne auf Deutsch, um sich international Gehör zu verschaffen.

¹⁶Der Radius ergibt sich aus gemessener Röntgenhelligkeit, -flächenhelligkeit und Distanz. Die Flächenhelligkeit ist – als Oberflächentemperatur – röntgenspektroskopisch direkt messbar.