Nach: Hans-Ulrich Keller: Kosmos Himmelsjahr 2019
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart 2018

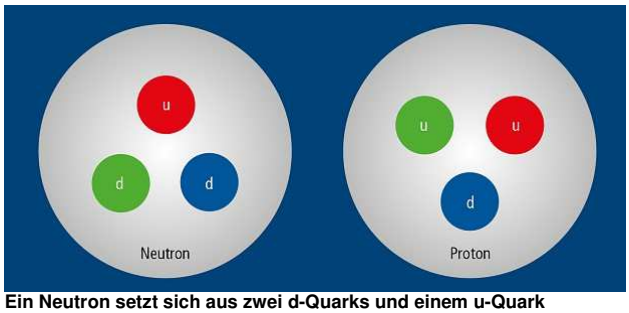
Monatsthema März 2019

Die bizarren Eigenschaften der Neutronensterne

Neutronensterne zählen zu den exotischsten Himmelskörpern. Erst drei Jahrzehnte nach ihrer theoretisch vorhergesagten Existenz wurde der erste Neutronenstern rein zufällig entdeckt, denn es gab keine Suche nach ihnen. Wie der Name vermuten lässt, bestehen diese außergewöhnlichen Bewohner des Kosmos aus einem hyperdichten Brei aus Neutronen.
Neutronen sind neben Protonen die Bausteine der Atomkerne, um die die Elektronen laufen. Die uns geläufigen Stoffe bestehen zum größten Teil aus leerem Raum, denn die Durchmesser der Atome sind im Mittel 100.000-mal größer als die Kerne. Würde man ein Proton, also den Kern eines Wasserstoffatoms, auf die Größe einer Kirsche bringen, so liefe das dazugehörige Elektron in einem Kilometer Entfernung um den kirschgroßen Kern.
Der Kernbaustein Neutron wurde von dem Physiker James Chadwick (1891-1974) nach langer systematischer Suche 1932 entdeckt. Da die Atome eines chemischen Elements zwar stets die gleiche elektrische Ladung besitzen aber in unterschiedlichen Atomgewichten (Massen) vorkommen, war offensichtlich, dass es elektrisch neutrale Bausteine geben muss. So kommt Wasserstoff in drei Isotopen vor: normaler Wasserstoff (Kern: 1 Proton), schwerer Wasserstoff (Deuterium; Kern: 1 Proton + 1 Neutron) und überschwerer Wasserstoff (Tritium; Kern: 1 Proton + 2 Neutronen). Ein Uranatomkern besitzt 92 Protonen. Es gibt Uranatomkerne mit 234, 235 und 238 Kernbausteinen. Die Uranatomkerne unterscheiden sich somit durch die Anzahl der Neutronen.

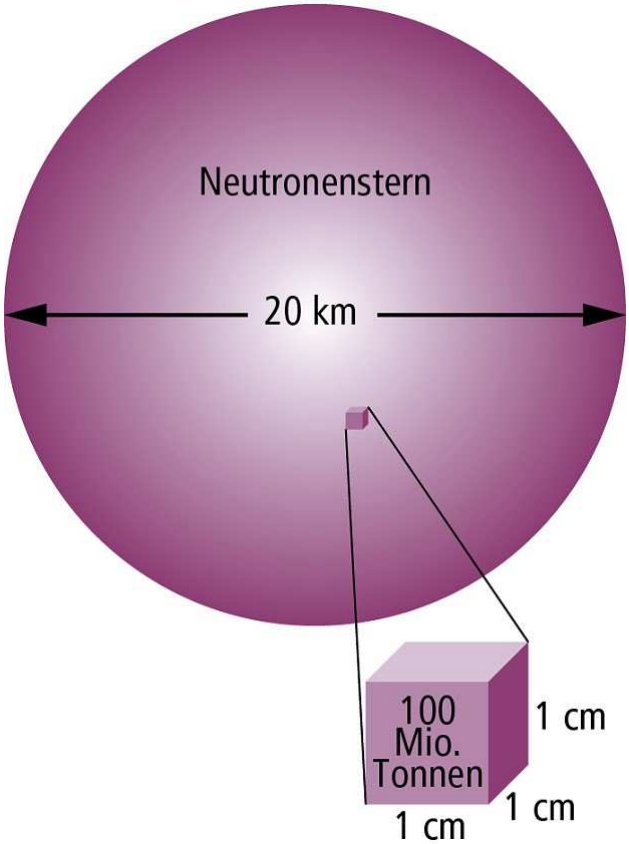
Der Nobelpreisträger für Physik James Chadwick (1891 – 1974) entdeckte den Kernbaustein Neutron im Jahre 1932. (Los Alamos National Laboratory / Wikipedia)

Die Masse eines Neutrons ist ein wenig größer als die eines Protons. Neutronen sind nur stabil, wenn sie in einem Atomkern gebunden sind. Freie Neutronen zerfallen mit einer Halbwertszeit von 15 Minuten zu einem Proton, einem Elektron und einem Antineutrino ($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$). Diesen Vorgang nennt man Betazerfall.
Ein Neutron setzt sich aus noch kleineren Bausteinen zusammen, nämlich aus einem u-Quark und zwei d-Quarks. Ein u-Quark hat +2/3 der elektrischen Elementarladung, ein d-Quark -1/3. Die Bilanz ergibt somit: 2/3-1/3-1/3 = 0. Neutronen sind somit nach außen hin elektrisch neutral. Sie werden nicht durch elektrische Felder abgelenkt oder beeinflusst. Für seine Entdeckung erhielt Chadwick 1935 den Nobelpreis für Physik.



Ein Neutron setzt sich aus zwei d-Quarks und einem u-Quark zusammen. Ein Proton besteht aus zwei u-Quarks und einem d-Quark.

Schon zwei Jahre nach der Entdeckung des Neutrons vermuteten Walter Baade (1893-1960) und Fritz Zwicky (1898-1974), dass bei einer Supernovadetonation vom Typ II, bei der der innerste Sternenkern kollabiert, eine dichte Kugel aus Neutronen übrigbleibt, während die äußere Sternenhülle ins Weltall geschleudert wird.
Neutronensterne sind winzig klein. Ihre Durchmesser liegen zwischen zehn und 30 Kilometer - vergleichbar mit kleinen Planetoiden. Ihre Massen hingegen schwanken zwischen eineinhalb und drei Sonnenmassen. Daraus folgt eine enorme Dichte. Ein würfelzuckergroßes Stückchen aus einem Neutronenstern enthält zwischen zehn Millionen bis zu einer Milliarde Tonnen Materie. Dies entspricht der Dichte eines Atomkerns und darüber hinaus. So gesehen sind Neutronensterne gigantische Atomkerne. Manche Astronomen nennen sie auch „gefrorene" Sterne, obwohl sie sehr heiß sind.



Ein Kubikzentimeter Neutronenbrei im Inneren eines Neutronensterns enthält eine Masse von 10^{14} Gramm, dies sind 100 Millionen Tonnen.

Bei einer Supernovadetonation erleidet das Sternenzentrum einen Gravitationskollaps. Die ungeheuer anwachsende Schwerkraft zerquetscht die Atome - vornehmlich Eisenatome. Die Elektronen werden in die Atomkerne hineingepresst. Die negativ geladenen Elektronen neutralisieren die positiv geladenen Protonen, ein Neutronenbrei ist das Ergebnis, dessen Dichte enorm ist. Bei

diesen Vorgängen handelt es sich um inverse Beta-Prozesse, wobei noch Antineutrinos eine Rolle spielen ($p + e + \bar{\nu} \rightarrow n$).

Freilich war man sich lange nicht sicher, ob dies bloße Spekulationen sind oder ob im Weltall tatsächlich solche Gebilde existieren. Die Suche nach Neutronensternen schien völlig aussichtslos. Sind doch Weiße Zwergsterne mit Planetengröße schon recht lichtschwach und nur in Sonnennachbarschaft zu finden. Angenommen, ein Neutronenstern würde die gleiche Menge Licht pro Flächeneinheit ausstrahlen wie ein Weißer Zwerg, so wäre er fast eine Million Mal lichtschwächer als dieser.

Neutronensterne als Pulsare entdeckt

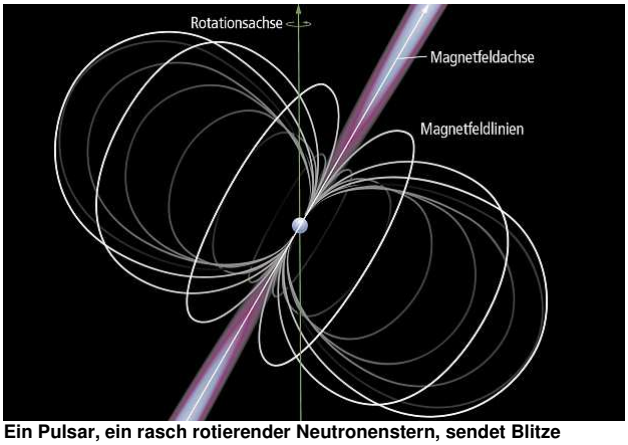
Wie häufig in der Wissenschaft, wurde der erste Neutronenstern rein zufällig entdeckt und nicht durch eine geplante Fahndung nach ihm. Im Juli 1967 beobachtete die Doktorandin Susan Jocelyn Bell mit dem neuen 470-m-Radiointerferometer des Mullard Radio Astronomy Observatory der Universität Cambridge (England) Radioszintillationen, die vom Sonnenwind verursacht werden. Diese Aufgabe hatte ihr der Observatoriumsdirektor Antony Hewish gestellt. Dabei entdeckte Ms. Bell (nach ihrer Heirat mit dem Regierungsbeamten Martin Burnell 1968 Ms. Bell-Burnell) im Sternbild Vulpecula (Füchschen) eine Radioquelle, die mit außerordentlicher Regelmäßigkeit alle 1,337001 Sekunden einen Radioimpuls aussendet. Zunächst dachte man an eine irdische Störquelle - eventuell Signale von Motorzündungen vorbeifahrender Autos. Da die Quelle aber jeweils vier Minuten früher als am Vortag den Meridian passierte, war klar, dass sie an der täglichen Himmelsdrehung teilnimmt und somit außerirdischen Ursprungs sein muss. Aber was oder wer sendet so außerordentlich präzise Radiosignale zur Erde? Stammen die mysteriösen Signale vielleicht von einer galaktischen Superzivilisation?

Die Cambridger Radioastronomen benannten die Quelle zunächst LGM-1, eine Abkürzung für „Little Green Men Number One". Doch kommen die Signale wirklich von kleinen grünen Männchen, Beherrscher einer Hochtechnologie? Man hielt diese Vermutung zunächst geheim, weniger aus Sorge über die Weltsensation der Entdeckung Außerirdischer, sondern weil man befürchtete, sich mit dieser Erklärung der rätselhaften Signale zu blamieren. So bezeichnete man die Quelle letztendlich schlicht als CP1919+21 (CP: „Cambridge Pulsed" plus Koordinaten). Heute ist sie als PSR B1919+21 katalogisiert.

Noch im gleichen Jahr fand man eine zweite, kurz darauf eine dritte und schließlich eine vierte punktförmige Radioquelle, die in ähnlich kurzen Sekundenabständen elektromagnetische Pulse aussendet. Vier Superzivilisationen in einem Jahr zu entdecken - das erschien dann doch allzu unwahrscheinlich.

Im Laufe der Zeit fand man einige Hundert solch blinkender Radiosterne. Man nennt sie inzwischen Pulsare (von engl.: pulsating radio stars). Pulsare, von denen man heute knapp 3000 kennt, senden in kurzen Abständen von wenigen Millisekunden bis einigen Sekunden Radioimpulse aus.

Doch Pulsare pulsieren nicht. Die regelmäßigen Blitze, die man inzwischen nicht nur im Meterwellenlängenbereich, sondern auch im sichtbaren Licht und sogar im Röntgenbereich beobachtet, beruhen auf einem Rotationseffekt. Pulsare entpuppten sich als rasend schnell rotierende Neutronensterne. Ähnlich wie der kreisende Lichtkegel eines Leuchtturmscheinwerfers senden sie Radio- und Lichtstrahlen ins Universum. Trifft ein solcher Strahlenkegel die Erde, so wird er als Puls registriert.



Ein Pulsar, ein rasch rotierender Neutronenstern, sendet Blitze elektromagnetischer Strahlung ins Weltall. Rotations- und Magnetfeldachse sind gegeneinander geneigt.

Für die Entdeckung der Neutronensterne als Pulsare erhielten Antony Hewish und Martin Ryle 1974 den Nobelpreis für Physik. Susan Jocelyn Bell-Burnell ging leer aus, was bis heute zu heftigen Diskussionen in Wissenschaftskreisen führt. Allerdings erhielt sie im Laufe der Jahre zwölf hochrangige Auszeichnungen. Unter anderem bekam sie die Herschel-Medaille, die Michelson-Medaille, den Jansky-Preis, die Ehrendoktorwürde der Harvard-Universität. Ferner wurde ihr der Order of the British Empire verliehen. Außerdem wurde sie als Vollmitglied in die Royal Society aufgenommen.

Susan Jocelyn Bell-Burnell (*1943) entdeckte 1967 den ersten Pulsar, einen rasch rotierenden Neutronenstern. (Roger W. Haworth / Wikipedia)

Neutronensterne sind die Überreste explodierender, massereicher Sterne, deren innerster Kern einen Gravitationskollaps erfahren hat. Da der Drehimpuls eines Sternes beim Kollaps erhalten bleibt, wächst die Winkelgeschwindigkeit gigantisch an, während das Trägheitsmoment zusammenschnurrt. Denn Drehimpuls ist bekanntlich das Produkt aus Trägheitsmoment mal Winkelgeschwindigkeit. Unsere Sonne rotiert in 25 Tagen einmal. Würde sie auf die Größe eines Neutronensterns schrumpfen, so würde sie sich in einer einzigen Sekunde 10.000-mal vollständig drehen. Der erste von Bell-Burnell entdeckte Pulsar in Vulpecula dreht sich beispielsweise 65.000-mal pro Tag.

Der Krabbennebel (M 1) im Sternbild Stier ist Überbleibsel einer Supernova, die am 4. Juli 1054 im Sternbild Stier aufleuchtete. In seinem Zentrum verbirgt sich ein rasch rotierender Neutronenstern, der bereits 1968 als Pulsar entdeckt wurde. (NASA/ESA/STScI)

Ein schönes Beispiel für die Entstehung eines Neutronensterns als Folge einer Supernovadetonation befindet sich im Sternbild Stier. Der berühmte Krabbennebel (crab nebula, M 1) ist der Überrest

einer Supernovaexplosion, die am 4. Juli 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet wurde. Der heute beobachtbare Nebelfleck dehnt sich mit einer Geschwindigkeit von rund 1000 Kilometer pro Sekunde aus. Im Jahr 1968 entdeckte man im Zentrum von M 1 einen der am schnellsten rotierenden Neutronensterne mit einer Pulsfrequenz von nur 33 Millisekunden.
Die Radioimpulse entsprechen einer Synchrotronstrahlung. Synchrotronstrahlen entstehen, wenn elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen mit hohen Geschwindigkeiten ein Magnetfeld durchfliegen und dabei abgebremst oder beschleunigt werden.
Beim Kollaps eines Sternes zu einem Neutronenstern wird das meist schwache Magnetfeld eines Sternes komprimiert. Dadurch entsteht ein ungeheuer starkes Magnetfeld von einer Million bis zu einer Milliarde Tesla. Das globale Erdmagnetfeld misst nur rund ein knappes Gauß, das entspricht 1/10.000 Tesla. Ein typischer Hufeisenmagnet hat 1/100 Tesla (= 100 Gauß). Spezielle Neutronensterne, sogenannte Magnetare, besitzen Magnetfelder bis zu 100 Milliarden (10^{11}) Tesla.
Rotationsachse und Magnetfeldachse eines Neutronensterns fallen nicht zusammen, sondern sind gegeneinander geneigt. Wie ein Quirl in einem Kochtopf rührt das gewaltige, mitrotierende Magnetfeld das in der umgebenden Magnetosphäre vorhandene Plasma um. Dieses Plasma besteht aus Wasserstoff, Helium und teils schwereren Elementen, die alle vollständig ionisiert sind. Dabei werden die elektrisch geladenen Partikel enorm beschleunigt, was die Synchrotronstrahlung hervorruft.
Das Leuchten eines Neutronensterns, vornehmlich aus seiner unmit-telbaren Umgebung, wird in der Nähe seiner Magnetpole hervorgerufen. Ein Neutronenstern verliert deshalb Rotationsenergie, was die Drehgeschwindigkeit verringert. Dies erfolgt häufig auch ruckweise.

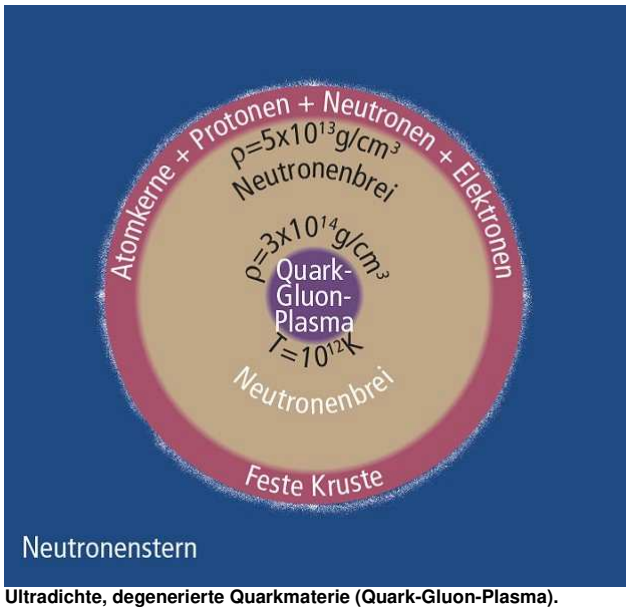
Eigenschaften eines Neutronensterns

Ein typischer Neutronenstern von 20 Kilometer Durchmesser und doppelter Sonnenmasse weist eine Oberflächenbeschleunigung auf, die 200 Milliarden Mal höher ist als die der Erde von 9,81 m/s^2. Bereits in der ersten Sekunde fällt ein Körper, der mit der Oberflächenschwerkraft eines Neutronensterns beschleunigt wird, rund eine Milliarde Kilometer. Dies folgt aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz. Allerdings ist diese Rechnung rein fiktiv, denn nach den Gesetzen der Natur kann kein materieller Körper Lichtgeschwindigkeit erreichen, erst recht nicht überschreiten. Relativistisch gerechnet ergibt sich eine Weglänge von 200.000 Kilometer für die Fallstrecke in der ersten Sekunde. Auch dies ist rein hypothetisch, denn eine solche Weglänge steht nicht zur Verfügung. In dieser Distanz ist das Gravitationspotential wesentlich geringer als auf der Oberfläche eines Neutronensterns. Ein aus 200.000 Kilometer Entfernung frei fallender Körper knallt allerdings bereits nach zwei Sekunden auf die Oberfläche des Neutronensterns. Infolge der hohen Schwerebeschleunigung auf einem Neutronenstern ist bereits ein Fall aus einem Meter Höhe absolut tödlich. Denn man trifft mit einer Geschwindigkeit von 1500 Kilometer pro Sekunde, das sind 5.400.000 Kilometer pro Stunde auf - das überlebt nichts und niemand. Die Flucht- oder Entweichgeschwindigkeit beträgt 230.000 Kilometer pro Sekunde, das sind drei Viertel der Lichtgeschwindigkeit. Im Vergleich dazu: Die Entweichgeschwindigkeit auf der Erde misst 11,2 km/s. Außer Photonen, Neutrinos und Gravitonen kann nichts einem Neutronenstern entfliehen.

Aufbau eines Neutronensterns

Eine nur Bruchteile von einem Millimeter dicke Atmosphäre aus Wasserstoff und Helium umspannt den Neutronenstern, wobei ihre Dichte bei zehn Millionen Gramm pro Kubikzentimeter (10^7 g/cm^3) liegt. Die äußere Kruste eines Neutronensterns ist etwa 300 Meter dick. In ihr steigt die Dichte bis zur Grenzschicht der inneren Kruste auf 4×10^{11} (400 Milliarden) g/cm^3 an. Ein See von Elektronen füllt die äußere Kruste, in dem die positiv geladenen Atomkerne von Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff bis hin zum Eisen schwimmen. Durch ihre elektrostatischen Abstoßungskräfte bilden sie ein stabiles Gitter, was die äußere Kruste zu einem festen Gebilde werden lässt. Die dicht gepackten Elektronen können sich dennoch frei bewegen - sie bilden eine supraleitende Flüssigkeit ohne jeden Reibungswiderstand.
Bei Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit passt sich das Rotationsellipsoid eines Neutronensterns immer mehr der Kugelform an. Dies geschieht nicht kontinuierlich, sondern in plötzlichen Sprüngen. Werden die Spannungen größer, so bricht die feste Kruste. Es ereignet sich ein Neutronensternbeben, das sich als sprunghafte Änderung der Frequenz eines Pulsars bemerkbar macht (Fachbegriff: Glitches - Sprünge).

Unterhalb der äußeren liegt die innere Kruste mit einer Dicke von 700 Meter. In ihr steigt die Dichte bis zur Kerngrenze auf 2×10^{13} (20 Billionen) g/cm^3 an. Durch Photodesintegration nimmt die Neutronenzahl gegenüber den positiv geladenen Atomkernen immer mehr zu. Die Konzentration der freien Neutronen, die ein suprafluides Medium bilden, steigt an, man spricht von einem degenerierten oder entarteten Neutronengas. Der eigentliche Kernbereich hat einen Radius von neun Kilometer. Die Dichte nimmt von 3×10^{14} (300 Billionen) auf 8×10^{15} (8 Billiarden) g/cm^3 im Zentrum zu. Im innersten Bereich von etwa einem Kilometer Radius ist der Druck so enorm groß (Zentrum: $1{,}6 \times 10^{35}$ Pa $\approx 1{,}6 \times 10^{30}$ atm), dass die Neutronen in ihre Bestandteile, nämlich je drei Quarks zerlegt werden. Quarks, die sonst nie frei werden und stets in Kernbausteinen oder Mesonen gefangen bleiben (engl.: confinement - Gefangenschaft), bilden eine Suppe aus ultradichter, degenerierter Quarkmaterie.



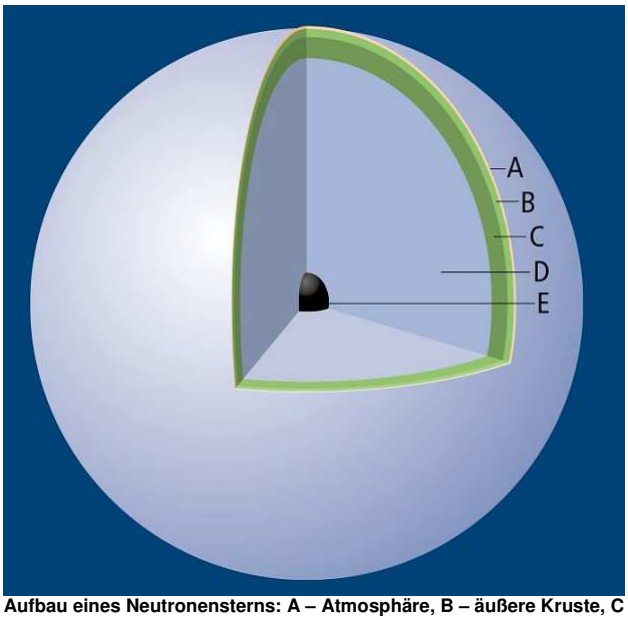
Ultradichte, degenerierte Quarkmaterie (Quark-Gluon-Plasma).

Werden Neutronen weit über die Dichte von Atomkernen komprimiert, dann wird es den Quarks möglich, ihrer Gefangenschaft zu entfliehen. Sie sind dann nicht mehr an einzelne Neutronen gebunden, können sich frei bewegen und bilden ein Quark-Gluon-Plasma. Gluonen sind die Botenteilchen, die die starke Wechselwirkung (Kernkraft) zwischen den Quarks ausüben. Ein Quark-Gluon-Plasma weist mehr Freiheitsgrade auf als ein dichter Neutronenbrei. Der Phasenübergang vom Confinement zum Deconfinement tritt erst ab Teilchenenergien von 200 MeV ein, was einer Temperatur von einer Billion (10^{12}) Kelvin entspricht. Eine solch extrem hohe Energiedichte herrschte im ersten Augenblick des Urknalls. Noch vor Ende der ersten Sekunde des Kosmos setzte die Hadronisierung ein, die Quarks wurden zu Protonen und Neutronen zusammengesperrt, die Freiheit der Quarks endete schnell in einer Gefangenschaft.
So ein Quark-Gluon-Plasma enthält nicht nur u- und d-Quarks, sondern auch s-Quarks (s steht für strange, engl.: seltsam). Ein solches Quark-Gluon-Plasma wird auch „seltsame Materie" genannt. Ein winziger Stecknadelkopf voll seltsamer Materie wöge auf der Erde etliche Millionen Tonnen.
Nimmt die Rotationsgeschwindigkeit eines Neutronensterns ab, so erhöht sich der innere Druck, was zu einer Vergrößerung des Bereichs an seltsamer Materie im Zentrum führt. Je mehr Masse ein Neutronenstern hat, desto kleiner ist sein Radius und umso höher seine Dichte.

Endstadien massereicher Sterne

Die meisten Sterne enden als Weiße Zwerge. Gegen Ende ihres Lebens blähen sich Sterne zu Roten Riesen auf und entledigen sich ihrer äußeren Hülle, indem sie diese abstoßen. Für kurze Zeit sind sie von einem Planetarischen Nebel umgeben, der in das Weltall diffundiert. Übrig bleibt ein extrem heißer, erdgroßer Sternenkern, der allmählich abkühlt - ein Prozess, der viele Milliarden Jahre dauert.
Hat jedoch der Sternenkern mehr als die eineinhalbfache Masse der Sonne, so kann das entartete Elektronengas der Schwerkraft nicht mehr Paroli bieten. Der Sternenkern endet als Neutronenstern, die Elektronen werden in die positiv geladenen Atomkerne gepresst, es entsteht ein Neutronenstern. Die Massenobergrenze

von 1,5 Sonnenmassen für einen Weißen Zwerg wird Chandrasekhar-Grenze oder kurz Chandra-Limit genannt nach dem Astrophysiker, der sie erstmals berechnet hat. Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) erhielt dafür 1983 den Nobelpreis für Physik.



Aufbau eines Neutronensterns: A – Atmosphäre, B – äußere Kruste, C – Innere Kruste, D – Kernbereich, E – Zentrum.

AUFBAU EINES NEUTRONENSTERNS

	Aufbau	Schichtdicke (km)	Dichte (g/cm³)	Zustand
A	Atmosphäre	$3–8 \times 10^{-9}$	10^7	Wasserstoff, Helium
B	Äußere Kruste	0,3	4×10^{11}	Freie Elektronen, Gitter von Atomkernen (H bis Fe)
C	Innere Kruste	0,7	2×10^{13}	Neutronengas, Photodesintegration
D	Kern	8	3×10^{14}	Entartetes Neutronengas
E	Zentrum	1	8×10^{15}	Degenerierte Quarkmaterie, Hyperonen, Bose-Einstein-Kondensat
Summe = Radius		10		

Quarksterne

Einer der kleinsten Neutronensterne mit nur elf Kilometer Durchmesser wurde 1992 mit dem Röntgensatellit ROSAT im Sternbild Südliche Krone aufgespürt. Er trägt die Katalogbezeichnung RX J1856-3754, ist nur 400 Lichtjahre entfernt und rotiert 15-mal pro Sekunde. Seine Dichte ist so enorm hoch, dass er fast nur noch aus einem Quark-Gluon-Plasma besteht, das von einer dünnen Kruste umgeben wird. Solch extrem kleine Neutronensterne werden daher auch als Quarksterne bezeichnet.
Quarksterne sind Neutronensterne an ihrer oberen Massengrenze. Die Massenobergrenze haben Richard C. Tolman, Robert J. Oppenheimer und Georg M. Volkoff berechnet (TOV-Limit). Sie liegt für nicht-rotierende Neutronensterne bei drei Sonnenmassen und erhöht sich bei schnell rotierenden Pulsaren entsprechend. Wird die TOV-Grenze überschritten, so gibt es kein Halten mehr: Der entartete Neutronenbrei kann der Schwerkraft nicht mehr widerstehen, es kommt zu einem Gravitationskollaps. Das Endprodukt ist ein Schwarzes Loch.

Millisekundenpulsare

Im Jahr 1982 wurde ein Pulsar mit einer ultrakurzen Periode von nur zehn Millisekunden für eine Umdrehung entdeckt. Der bisher am schnellsten rotierende Pulsar PSR J1748-2446ad rotiert 43.000-mal pro Minute oder einmal in 1,4 Millisekunden (Frequenz: 716/s) und wurde 2004 entdeckt. Die lineare Rotationsgeschwindigkeit am Äquator erreicht dabei fast ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit. Man nennt solch extrem schnell rotierende Neutronensterne „Millisekundenpulsare". Bisher sind rund 200 solcher Millisekundenpulsare bekannt. Man schätzt ihre Gesamtzahl in unserer Milchstraße auf 50.000. Ihre Entstehung war zunächst ein großes Rätsel, da die hohen Frequenzen nicht allein auf den ursprünglichen Drehimpuls des kollabierenden Sterns zurückzuführen sind. Millisekundenpulsare entstehen, wenn von einem Begleitstern, der sich zum Roten Riesen entwickelt, Materie auf den Pulsar stürzt und dabei seinen Drehimpuls enorm vergrößert.

Neutronensterne als Röntgenstrahler

Nicht alle Neutronensterne machen sich als Pulsare bemerkbar, denn nur bei entsprechender Orientierung der Rotationsachse überstreicht der Strahlenkegel auch die Erde. Manche Neutronensterne verraten sich durch eine intensive Röntgenstrahlung. Ein gutes Beispiel ist der veränderliche Stern HZ Herculis. Er ist auch als Röntgenquelle Her X1 bekannt. Von einem veränderlichen, blauen Begleitstern stürzt Materie auf den Neutronenstern. Da sie als heißes Plasma elektrisch leitend ist, wird sie vom extrem starken Magnetfeld des Neutronensterns entlang der Magnetfeldlinien auf die Magnetfeldpole des Neutronensterns gelenkt. Bedingt durch die hohe Schwerebeschleunigung knallt sie mit rund 40 Prozent der Lichtgeschwindigkeit auf die Pole. Die kinetische Energie wird augenblicklich in dissipative Energie umgewandelt. Dabei werden die Brennflecken an den Polen auf rund 100 Millionen Grad aufgeheizt, was gewissermaßen eine kosmische Röntgenröhre darstellt. Die Leuchtkraft entspricht dabei dem 10.000-Fachen der Sonnenleuchtkraft, das sind rund 1030 Watt.
Der Massentransfer erfolgt mit einer kaum vorstellbaren Rate von 100 Milliarden Tonnen (10^{11}) pro Sekunde! Die Magnetfeldstärke von Her X1 wurde zu $4{,}6 \times 10^8$ Tesla bestimmt. Inzwischen wurde von diesem Doppelsternsystem eine gepulste Gammastrahlung registriert.

Magnetare

Einige Neutronensterne haben noch tausendmal stärkere Magnetfelder als die ohnehin extrem starken Magnetfelder der übrigen Pulsare. Man nennt sie deshalb Magnetare (engl.: magnetic stars). Die Magnetfelder von Magnetaren weisen 100- bis 1000-mal höhere Feldstärken auf als die übrigen Neutronensterne. Ihre Feldstärken liegen bei 100 Milliarden (10^{11}) Tesla, das sind eine Billiarde (10^{15}) Gauß. Ein Magnetar entsteht nur unter ganz speziellen Bedingungen. Wenn kurz nach dem Kollaps eines massereichen Sterns infolge der extrem hohen Temperatur des Plasmas (um die 50 Milliarden Kelvin) eine heftige Konvektion einsetzt - heißes Gas schießt aus dem Zentrum nach außen, kühleres stürzt hinein - wird die kinetische Energie des Plasmas zum Teil auf das Magnetfeld übertragen. Wenn in kurzer Zeit - innerhalb weniger Sekunden - die Konvektion zum Erliegen kommt und der Neutronenstern eine stabile Konfiguration einnimmt, dann wird das verstärkte Magnetfeld gewissermaßen eingefroren. Es tritt ein Dynamoeffekt ein, der umso wirksamer ist, je näher die Dauer des Konvektionszyklus der Rotationszeit des Pulsars kommt. Gleicht sich der Konvektionszyklus der Rotationsfrequenz an, wird der maximale Effekt erzielt.
Nicht jede Supernovadetonation vom Typ II erzeugt einen Magnetar. Nur in den Fällen, in denen der Konvektionszyklus extrem kurz ist, entsteht ein Magnetar mit ultrastarkem Magnetfeld an der quantenelektrodynamischen Obergrenze. Magnetare verfügen über die stärksten Magnetfelder im Universum - wieder ein Superlativ der Neutronensterne. Der Dynamo-Effekt wirkt aber als Bremse ähnlich einer Wirbelstrombremse bei irdischen Schienenfahrzeugen. Im Inneren des Neutronensterns sind die Feldlinien zu magnetischen Schläuchen verdrillt. Das äußere Magnetfeld verfügt dagegen über glatt verlaufende Feldlinien. Der magnetische Druck der inneren, verdrillten Feldlinien führt zur Eruption hoch energetischer Teilchen, die in scharf gebündelten Strahlen ins Weltall gesandt werden. Überstreicht ein solcher „Leuchtfinger" unsere Erde, dann registrieren Raumsonden einen Gammastrahlenblitz (engl.: gamma-ray burst). Diese Gammastrahlung verfügt über die höchstenergetischen Photonen im gesamten Kosmos.

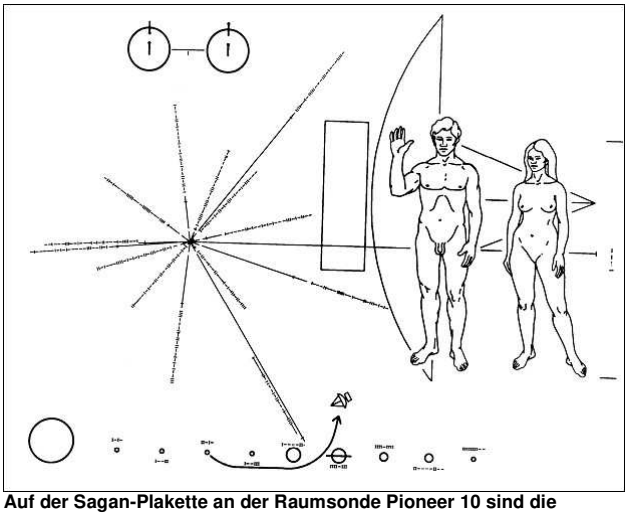
Neutronensterne als Präzisionsuhren

Da die Rotationsdauer von Pulsaren außerordentlich konstant ist und sich pro Jahr um weniger als eine Milliardstel Sekunde ändert, hat man schon überlegt, ob man sie als „Primäruhren" zur Zeitbestimmung verwenden könnte. Eine solche Uhr würde erst nach etwa 32 Jahren um eine Sekunde falsch gehen. Auch als Navigationshilfe könnte man sie in der Raumfahrt einsetzen. An der interplanetaren Raumsonde Pioneer 10, die bereits in den interstellaren Raum vorgedrungen ist, ist auf Vorschlag von Carl E. Sagan (1934-1996) eine Plakette angebracht mit Informationen über Erde und Menschheit. Auf ihr sind die Richtungen und Frequenzen von 15 Pulsaren eingraviert, damit unsere Brüder im All auch feststellen können, wo unser Sonnensystem zu lokalisieren ist. Ob Außerirdische die Plakette beziehungsweise die Raumsonde je aufspüren werden, bleibt ungewiss.

Neutronensterne und die Allgemeine Relativitätstheorie

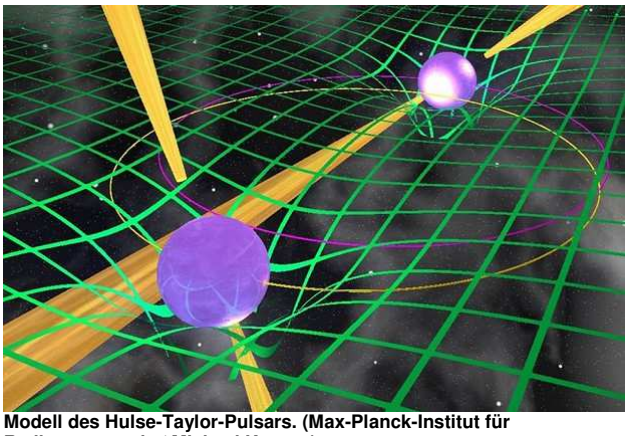
Berühmt geworden ist der Neutronendoppelstern PSR 1913+16 im Sternbild Adler. Die eine Komponente zeigt sich als Pulsar, von der anderen gelangen keine Radio- und Lichtblitze zur Erde. PSR 1913+16 ist das Lieblingsobjekt der Relativitätstheoretiker, denn etliche Effekte, die die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) voraussagt, konnten bei diesem Neutronendoppelstern beobachtet

werden. Mit 21.000 Lichtjahren ist er relativ weit von uns entfernt. Die eine Komponente mit 1,44 Sonnenmassen macht sich als Pulsar bemerkbar mit einer Rotationsdauer von 0,059 Sekunden. Er rotiert somit 17-mal pro Sekunde. Der Strahlenkegel seines Begleiters mit 1,39 Sonnenmassen überstreicht die Erde nicht.



Auf der Sagan-Plakette an der Raumsonde Pioneer 10 sind die Richtungen zu 15 Pulsaren eingraviert, um die Position unseres Sonnensystems im Weltall zu markieren. (NASA)

Beide Neutronensterne kreisen in einem Abstand von 750.000 Kilometer in 7h 45m umeinander. Ihre Umlaufzeit verringert sich dabei um 76,6 Millionstel Sekunden pro Umlauf. Gemäß der ART dreht sich die Apsidenlinie (große Achse der Bahnellipse) infolge der Raumkrümmung um 4,227° pro Jahr. Eine volle Umdrehung dauert somit nur 85 Jahre. Auch werden von diesem System Gravitationswellen ausgesandt. Dies führt zu einer Energieabnahme, was eine Verringerung ihres Abstandes voneinander um 3,5 m pro Jahr bewirkt. Nach 220 Millionen Jahren werden beide zu einem Schwarzen Loch verschmelzen. Auch die gravitative Rotverschiebung und der Shapiro-Effekt der ART konnten bei diesem Neutronensternpärchen beobachtet werden. Man nennt ihn auch Hulse-Taylor-Pulsar nach seinen Entdeckern. Die Astrophysiker Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor erhielten für ihre Entdeckung mit dem 300-m-Radioteleskop von Arecibo (Puerto Rico) im Jahre 1993 den Nobelpreis für Physik.

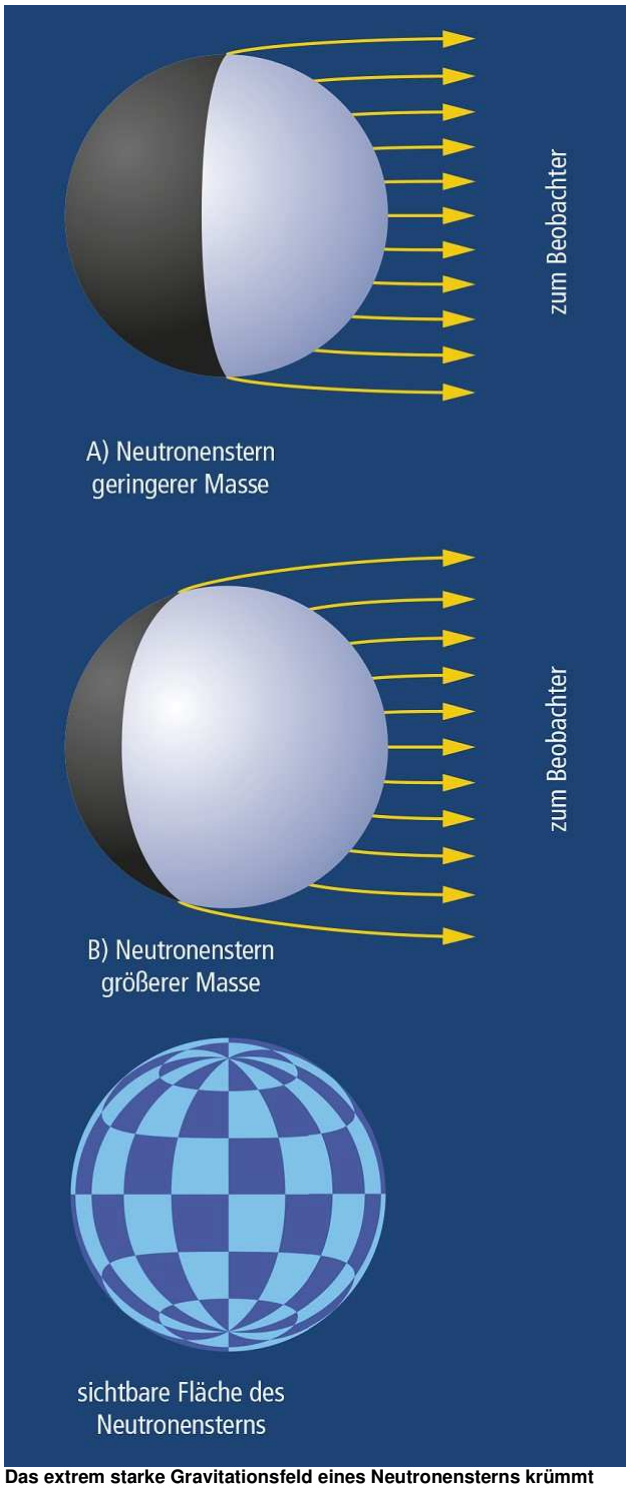


Modell des Hulse-Taylor-Pulsars. (Max-Planck-Institut für Radioastronomie / Michael Kramer)

Noch ein anderer Effekt der ART zeigt sich bei einem Neutronenstern: Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt. Würde man sich einem Neutronenstern so weit nähern, dass man ihn als Scheibe und nicht nur als Lichtpunkt sieht, so wäre nicht nur die vordere Halbkugel sichtbar, sondern mehr als 50 Prozent der Oberfläche. Im Extremfall könnte man von einer Seite die gesamte Oberfläche sehen, ohne den Neutronenstern zu umkreisen. Die Bedingung dafür lautet: $R \leq 3GM/c^2$ (R: Radius, G: Gravitationskonstante, M: Masse, c: Lichtgeschwindigkeit). Die von der Oberfläche kommenden Photonen beschreiben dann Kreisbahnen um den Neutronenstern.

Neutronensterne als Goldproduzenten

Einander umkreisende Neutronensterne senden Gravitationswellen aus. Sie verkürzen dabei durch Energieverlust ihre Umlaufzeiten und kommen einander immer näher, wobei die Energieabstrahlung immer stärker wird. Schließlich verschmelzen beide in einer gigantischen Supernovaexplosion, auch als Kilonova bezeichnet, da sie rund 1000-mal heller strahlt als gewöhnliche Supernovae.



Das extrem starke Gravitationsfeld eines Neutronensterns krümmt Lichtstrahlen. Von einer Seite betrachtet kann man somit mehr als 50 % der Oberfläche sehen – im Extremfall die gesamte Oberfläche ohne seinen Beobachtungsplatz zu verlassen.

Das Endprodukt dieses Verschmelzungsprozesses ist ein Schwarzes Loch. Doch nicht die gesamte Masse der beiden Neutronensterne stürzt in das Black Hole. Ein Teil wird als schnell expandierender Kokon in das All geschleudert. Durch raschen Einfang von Neutronen, die es in der expandierenden Hülle in hoher Konzentration aus der Materie der Neutronensterne gibt, entstehen Atomkerne mit hoher Neutronenzahl. Die Kernphysiker sprechen von r-Prozessen, wobei das r für schnell steht (engl.: rapid). Die hochradioaktiven Atomkerne zerfallen sukzessive in kurzer Zeit zu stabilen, aber schweren Atomkernen. Verschmelzende Neutronensterne sind eine Brutstätte für Elemente schwerer als Eisen, etwa Silber, Zinn, Wolfram, Iridium, Platin, Gold, Blei und Uran. Soweit die Theorie.

Die bisher entdeckten Neutronensternpaare verschmelzen erst in Dutzenden bis Hunderten von Millionen Jahren. Doch am 17. August 2017 gelang es erstmals, das Verschmelzen eines Paares von Neutronensternen direkt zu beobachten. Aufgefallen war dieses epochale Ereignis zunächst durch die Registrierung eines extrem kurzen und enorm starken Gammastrahlenausbruchs (GRB, Gamma Ray Burst) durch das Weltraumteleskop Fermi. Fast zeitgleich gelang es auch, mit den drei Gravitationswellendetektoren Virgo bei Pisa (Italien), LIGO in Livingstone (Louisiana) und LIGO in Hanford (US-Bundesstaat Washington) das Gravitationswellensignal, den „Chirp" (engl., Zirpen), zu erfassen. Die praktisch gleichzeitig eintreffenden Signale des GRB und der Gravitationswellen sind ein schöner Beweis für die Ausbreitung von Gravitationswellen mit Lichtgeschwindigkeit.
Das Gammastrahlensignal GRB 170817A und die Quelle der Gravitationswellen GW170817 deuteten darauf hin, dass das Ereignis in einem Gebiet im Sternbild Hydra (Wasserschlange) zu suchen ist. Zahlreiche Teleskope für sichtbares Licht und für Infrarotstrahlung suchten die Gegend ab und fanden den Ort des Geschehens in der Nähe von ψ Hydrae knapp neben der Galaxie NGC 4993, die 120 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Die Distanz des kollidierten Neutronensternpaares entspricht etwa der von NGC 4993. Die Massen der Komponenten wurden auf 1,4 und knapp zwei Sonnenmassen geschätzt. Die Masse der durch schnellen Neutroneneinfang erzeugten schwereren Elemente, die ins All geschleudert wurde und nicht im Schwarzen Loch ver-schwand, entspricht etwa fünf Prozent der Sonnenmasse, das sind 2×10^{27} Tonnen. Davon dürften 6×10^{22} Tonnen, das sind zehn Erdmassen, pures Gold erzeugt worden sein. Doch an dieses Gold kommt niemand heran.