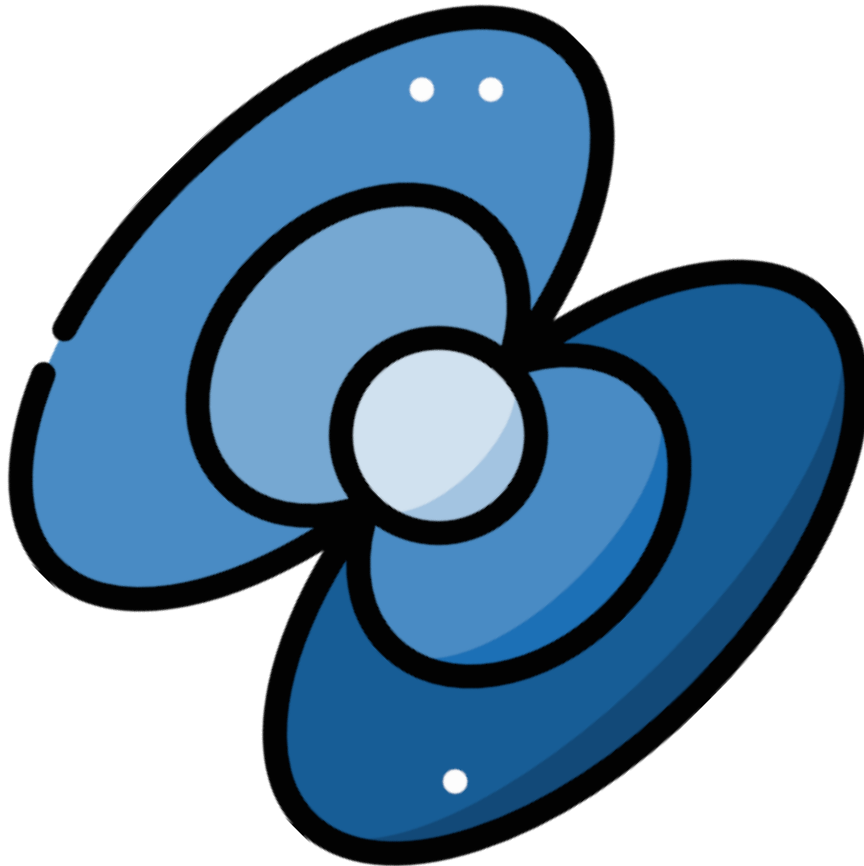


Neutronensterne



Von Diar Youssef

Facharbeit zum Seminarfach Astronomie

Fachlehrer: Florian Riemer

Greselius Gymnasium Bramsche

Jahrgang 12

Abgabe am 16.03.2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Allgemeine Infos	3
3. Entstehung von Neutronensternen	5
4. Aufbau	8
4.1. Oberfläche	8
4.2. Innere Kruste	9
4.3. Äußerer Kern	10
4.4. Innerer Kern	10
4.4.1. Quark-Gluon-Plasma	11
4.4.2. Seltsame Materie	11
4.4.3. Weitere Neutron-Proton Flüssigkeit	11
5. Erscheinungsformen	12
5.1. Pulsare	12
5.2. Magnetare	13
6. Kilonovae	14
7. Nutzen von Neutronensternen	15
7.1. Forschungsmittel	15
7.2. Galaktisches Positionierungssystem (GPS)	15
8. Glossar	16
9. Weiteres Anschauungsmaterial	17
10. Quellenverzeichnis	18
10.1. Literaturquellen	18
10.2. Internetquellen	18
10.3. Bildquellen	19
11. Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit	20
12. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung	20

1. Einleitung

Unsere moderne Welt basiert auf komplexen Technologien , welche wiederum zu großen Teilen auf schweren Elementen wie z.B Gold, Platin, Bismut und Uran aufbauen. Lange Zeit wurde angenommen, dass diese Elemente bei dem Sterben von extrem massereichen Sternen entstanden wären, sogenannten Supernovae. Als jedoch am 17. August 2017 die Kollision von zwei Neutronensternen, eine sogenannte Kilonova, beobachtet wurde und später die chemische Komposition der Rückstände von der Kollision analysiert wurde, stellte man fest, dass diese Aufeinandertreffen von Neutronensternen wahrscheinlich die meisten der schweren Elemente im Universum produziert haben.

In dieser Facharbeit soll ein Überblick über Neutronensterne verschaffen werden und die Vorgänge in ihnen näher erläutert werden.

Zunächst werden einige allgemeine Informationen über Neutronensterne dargelegt, wobei auch die abstrakten Größenordnungen dieser Himmelskörper veranschaulicht werden sollen, damit man diese als Mensch überhaupt begreifen kann. Danach wird die Entstehung von Neutronensternen innerhalb von Supernovae erläutert, um dann an den erdähnlichen Aufbau anzuknüpfen, wobei auf die einzelnen Schichten des Neutronensterns näher eingegangen wird.

Anschließend werden die Erscheinungsformen von Neutronensternen und ihre jeweiligen Besonderheiten aufgezeigt und danach die vorher erwähnten Kilonovae näher erläutert. Abschließend wird über den eventuellen Nutzen von Neutronensternen spekuliert.

Begriffe, welche mit einer tiefgestellten eingeklammerten Zahl versehen sind, werden im Glossar näher erläutert (Beispiel_(x)).

2. Allgemeine Infos

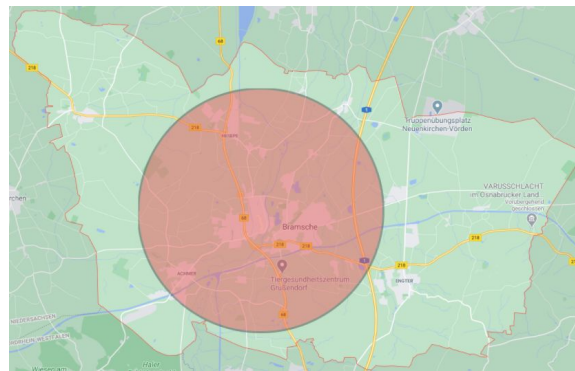
Bereits nach einem Jahr nach der Entdeckung des Neutrons trafen die Astronomen Walter Baade und Fritz Zwicky Vorhersagen über die Existenz von Neutronensternen. Die Theorie wurde einige Jahrzehnte später durch Observationen von einer Studentin namens Jocelyn Bell bestätigt.¹

Bei einem Neutronenstern handelt es sich um den zurückgebliebenen Kern von einem roten oder blauen Überriesen nachdem dieser eine Typ-II-Supernova durchlaufen ist. Wie der Name schon teilweise verrät, bestehen Neutronensterne größtenteils aus Neutronen, welche extrem stark aneinander gepresst sind.

Ihre Masse liegt zwischen 1,2 und 2 Sonnenmassen, wobei ihr Durchmesser in der Regel nur bei 11 km liegt. Ihre Dichte liegt daher bei bis zu $10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Die größte Dichte die auf der Erde vorkommt liegt zum

Vergleich nur bei $10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.²



* Der Querschnitt eines Neutronensterns im Vergleich zur niedersächsischen Kleinstadt Bramsche

Neutronensterne sind somit die dichtesten bekannten Himmelskörper, welche keinen Ereignishorizont₍₁₎ haben. Die Dichte eines Neutronensterns ist so groß, dass ein "Neutronenstern-Würfel" mit dem Volumen von 1 cm^3 100.000.000 Tonnen auf der Erde wiegen würde³. Dies entspricht der Masse aller Menschen auf der Erde bzw. die Masse des Mount Everest Bergs komprimiert auf die Größe eines Zuckerwürfels⁴.

Die Gravitation von Neutronensternen ist so groß, dass Licht um sie gekrümmt wird, sodass man beim betrachten Teile ihrer Rückseite sehen würde⁵.

¹https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/gsfsc/spacesci/pictures/2003/0702pulsarspeed/0702ssu_primer.html

² <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/N/Neutron+Star>

³ <https://www.nationalgeographic.com/science/article/neutron-stars>

⁴ <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100230567>

⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutronenstern#Magnetfeld>

Die Temperatur an der Oberfläche von einem Neutronenstern kann bei bis zu 600.000° C liegen, also rund das Hundertfache der Oberflächentemperatur unserer Sonne⁶.

Zudem haben Neutronensterne aufgrund ihrer in Kapitel 3. näher beschriebenen Entstehungsbedingungen Rotationsgeschwindigkeiten von 100 bis zu 700 Umdrehungen pro Sekunde. Die Rotorblätter eines Helikopters erreichen zur Anschauung in der Regel nur 11 Umdrehungen pro Sekunde⁷. Aufgrund von diesen extremen Rotationsgeschwindigkeiten haben Neutronensterne Magnetfelder welche mit $100.000.000$ Tesla um ein vielfaches stärker sind als die 30μ Tesla der Erde.

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubschrauber>

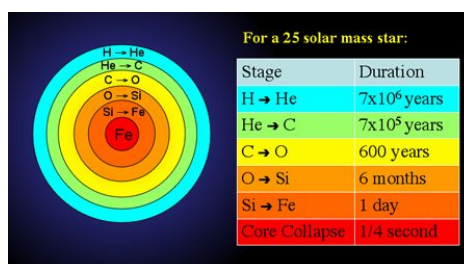
3. Entstehung von Neutronensternen

Neutronensterne können entstehen wenn sehr massereiche Sterne eine Supernova unterlaufen⁸. Diese kommt zustande sobald ein massereicher Stern nicht mehr genug nuklearen Brennstoff hat um der Gravitationskraft, welche von außen ständig versucht den riesigen Stern zusammenzudrücken, durch die Energie der inneren Kernfusion entgegenzuwirken⁹. Die ursprünglichen Wasserstoffatome des Sterns fusionieren zunächst recht langsam zu



Helium. Sobald ein Großteil des Wasserstoffs zu Helium fusioniert wurde, nimmt die der Gravitationskraft entgegenwirkenden Kernfusionsenergie kurzzeitig ab, weshalb der Stern weiter von der Gravitation zusammengepresst wird, wodurch sich der Druck und die Hitze im Kern vom Stern weiter erhöhen, was wiederum dazu führt, dass dort Helium zu Kohlenstoff fusioniert werden kann und die Gravitationskraft von der nun wieder ausreichenden Kernfusionsenergie nochmals vom weiteren zusammenpressen des Sterns abgehalten wird¹⁰.

Dieser Prozess wiederholt sich einige Male, wird dabei auch immer schneller und führt dazu, dass sich im Stern mehrere Schichten mit verschiedenen Kernfusionsphasen bilden¹¹.



Fusionsphasen und Schichtenbildung in massereichen Sternen (<https://astronomy.swin.edu.au>)

Da Eisen zur Fusion mehr Energie benötigt als es freigibt, stoppt die Fusionsreihe nach der Fusion von Silizium zu Eisen, welches sich im Kern des Sterns ablagert. Eisen kann daher auch bei Kernfusionen als nukleare "Asche" gesehen werden¹². Sobald der eiserne Kern des Sterns die sogenannte Chandrasekhar-Grenze von ungefähr 1.4 solaren Massen überschreitet, kann der Gravitationskraft nicht länger genügend

⁸ <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/research/fundamental/neutronstars>

⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>

¹⁰ https://en.m.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova

¹¹ https://en.m.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova

¹² https://en.m.wikipedia.org/wiki/Iron_peak

entgegengewirkt werden, was dazu führt, dass der Stern innerhalb von weniger als einer Sekunde nach dem überschreiten der Grenze drastisch komprimiert wird¹³. Dabei erreicht der äußere Bereich des Sterns beim Kollaps eine Fallgeschwindigkeit von $70.000 \frac{m}{s}$, was 23% der Lichtgeschwindigkeit entspricht¹⁴. Der daraus resultierende Druck im inneren ist so groß, dass die Elektronen und Protonen innerhalb des Eisenkerns sich verschmelzen und Neutronen und Neutrinos₍₂₎ bilden, wobei die Neutronen weiter so nah wie möglich aneinander gepresst werden¹⁵. Der weiteren Komprimierung des Kerns wirken nun jedoch abrupt die hinaus strömenden Neutrinos und die "Neutron degeneracy Pressure" bzw. der Entartungsdruck₍₃₎ der Neutronen entgegen¹⁶. Der kollabierende Rest des Sterns schlägt dann auf den Eisenkern auf und prallt dann aufgrund seiner deutlich größeren Härte sofort wieder an ihm ab, wobei eine Schockwelle entsteht, welche so energiereich ist, dass sie den Rest des Sterns zerfetzt und hinaus schleudert¹⁷. Die Bedingungen werden dabei so extrem dass auch kurzzeitig schwerere Elemente als Eisen fusioniert werden können. In der Mitte des entstandenen Nebels befindet sich dann, sofern der Kern während der Supernova nicht größer als 3 Sonnenmassen geworden ist, ein Neutronenstern, welcher aufgrund seiner geringen Größe nur sehr schwer mit visuellen Beobachtungsmethoden untersucht werden kann¹⁸. Ist der Kern während der Supernova schwerer als 3 Sonnenmassen geworden, übertrifft die Gravitationskraft den Gegendruck der Neutronen, was dazu führt, dass der Kern zu einem schwarzen Loch kollabiert¹⁹.

¹³ https://en.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova

¹⁴ Katia Moskvitch, Neutron Stars - The Quest to Understand the Zombies of the Cosmos, S.88

¹⁵ Ebd.

¹⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

¹⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

¹⁸ https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron_stars1.html

¹⁹ https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron_stars1.html

Während der Supernova schrumpft der Stern von einer Größe von ungefähr 700 aneinandergereihten Sonnen auf die Größe einer Stadt. Die enorme Verkleinerung des Radiuses hat große Auswirkungen auf die Rotationsgeschwindigkeit des Körpers

Laut des Drehimpulserhaltungssatz bleibt in einem geschlossenen System der Drehimpuls konstant²⁰.

Für den Drehimpuls L gilt folgende Formel: $L = J * \omega$ ²¹

J steht für den Trägheitsmoment des Körper und ω für die Winkelgeschwindigkeit bzw. für die Rotationsgeschwindigkeit im Falle eines Neutronensterns

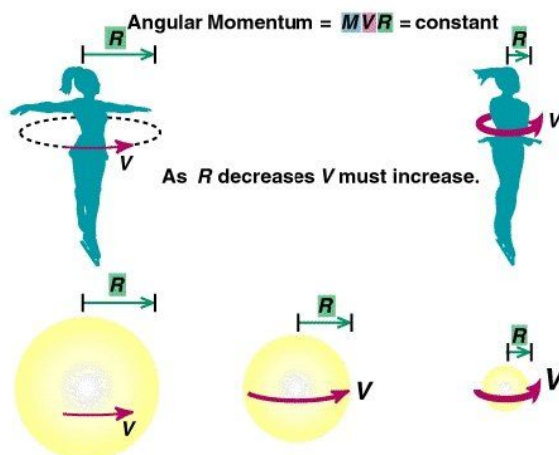
Für den Trägheitsmoment J gilt in diesem Fall die Formel: $J = \frac{2}{5}m * r^2$ ²²

Für den Drehimpuls gilt hier also auch: $L = \frac{2}{5}m * r^2 * \omega$

Der Formel ist nun zu entnehmen, dass sich die Rotationsgeschwindigkeit des Neutronensterns bei einer verkleinerung des Radiuses vergrößern muss, um den Drehimpuls konstant zu halten.

Neutronensterne drehen sich daher innerhalb einer Sekunde mehrere hundertmal um sich selbst.

Conservation of Angular Momentum



In dem Bild wird die Wirkung des Drehimpulssatzes visuell anhand einer Schlittschuhläuferin, die ihre Arme einzieht, und der Entstehung eines Neutronensterns dargestellt. (<https://present5.com/chapter-13-the-bizarre-stellar-graveyard-white/>)

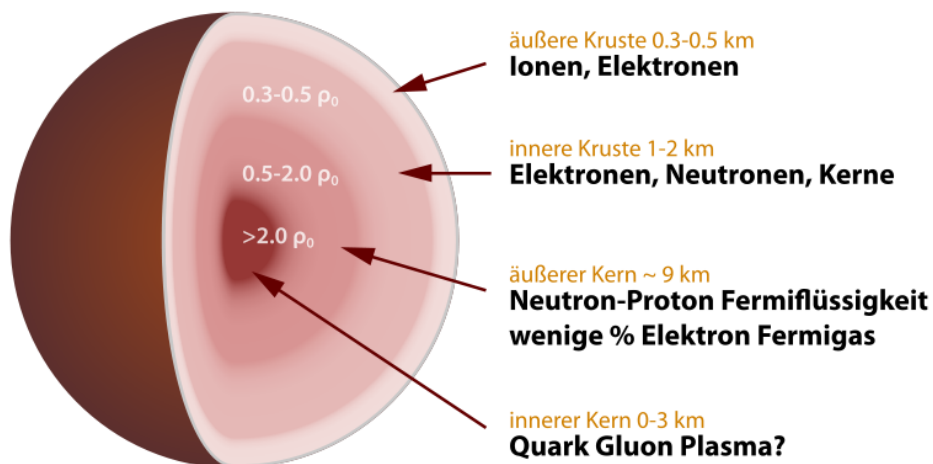
²⁰<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/drehimpulserhaltungssatz>

²¹<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/drehimpulserhaltungssatz>

²²<https://itp.uni-frankfurt.de/~luedde/Lecture/Mechanik/Intranet/Skript/Kap7/node5.html>

4. Aufbau

Nach modernen Modellen ähnelt der Aufbau von Neutronensternen dem Aufbau von Planeten wie z.B der Erde. Ein Neutronenstern hat einen inneren und einen flüssigen äußeren Kernbereich , eine innere und eine äußere Kruste und eine dünne Atmosphäre. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bereiche näher beschrieben.



Das Bild zeigt den Aufbau eines Neutronensterns und die Dichte in den jeweiligen Schichten in der Maßeinheit ρ_0 , wobei $1\rho_0$ die Dichte ist bei der Nukleonen anfangen sich zu berühren (<https://de.wikipedia.org>). Eine Weitere Grafik zur Dichte in der Maßeinheit $\frac{Kg}{m^3}$ befindet sich im Anhang.

4.1. Oberfläche

Die Atmosphäre eines Neutronensterns ist höchstens einen Meter breit und besteht größtenteils aus eher leichten Elementen wie z.B Wasserstoff, Helium und Kohlenstoff in einem gasförmigen Zustand^{23 24}. Die Bewegungen in der Atmosphäre werden in erster Linie durch das Magnetfeld des Neutronensterns verursacht²⁵.

²³ <https://arxiv.org/pdf/1203.5807.pdf>

²⁴ Katia Moskvitch, Neutron Stars, S.138

²⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

Unter der Atmosphäre befindet sich eine äußere extrem harte Kruste, welche aus den Atomkernen von Eisen-56-Isotopen und frei herumschwirrenden Elektronen besteht^{26 27}.

Die Elektronen bewegen sich frei zwischen den verschiedenen Atomkernen, da sie genug Energie aufweisen um ihr Ursprungsatom zu verlassen, jedoch nicht genug Energie haben, um sich mit den Protonen in den Kernen zu Neutronen zu verbinden²⁸. In den tieferen Bereichen der äußeren Kruste bekommen die Elektronen durch den größer werdenden Druck jedoch allmählich genug Energie um sich mit den Protonen zu verschmelzen, wodurch sich Kerne bilden, welche immer mehr Neutronen enthalten²⁹. Die Kerne haben am Ende der äußeren Kruste so viele Neutronen, dass diese anfangen aus ihnen zu entweichen, was dazu führt dass sich eine Superfluid₍₄₎ aus Neutronen bildet, welche in der inneren Kruste und dem äußeren Kern einen immer größer werdenden Anteil ausmacht³⁰.

Da die Gravitation von einem durchschnittlichen Neutronenstern bei $2.0 \times 10^{12} \frac{m}{s^2}$ liegt, ist seine Oberfläche nur mit Bergen von höchstens 5mm versehen und ist damit recht glatt³¹.

4.2. Innere Kruste

Die innere Kruste eines Neutronensterns ist ein bis zwei Kilometer breit und beginnt etwa 300 Meter unter der Oberfläche.

Die innere Kruste besteht größtenteils aus neutronenreichen Kernen, einigen Elektronen und der Superfluid aus Neutronen.

Kurz vor dem Erreichen des Kerns vom Neutronenstern bildet sich am Rand der Kruste noch eine Schicht aus Neutronen und Protonen, welche riesige Linien- und Scheibenförmige Körper anstelle von Atomkernen bilden. Diese Materie wird aufgrund seiner Form als "nukleare Pasta" bezeichnet und ist wahrscheinlich das stärkste Material im Universum, sofern es überhaupt existiert³².

²⁶ <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2008-10>

²⁷ Katia Moskvitch, Neutron Stars, S.138

²⁸ Ebd.

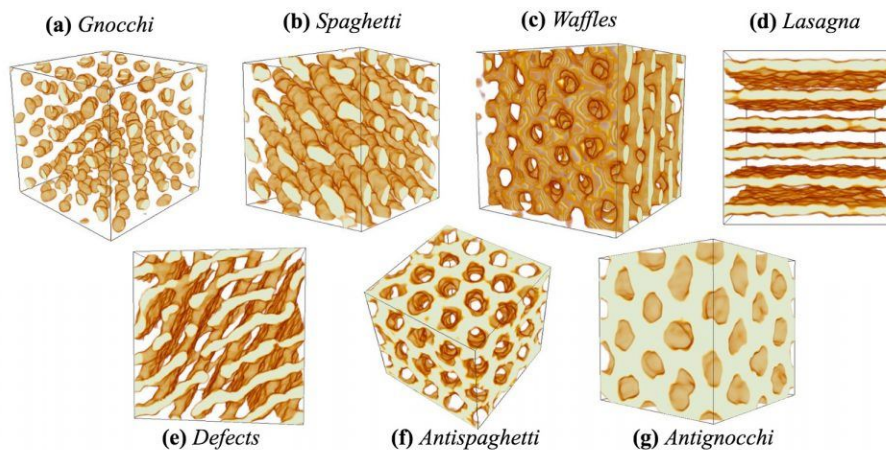
²⁹ Ebd.

³⁰ <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2008-10>

³¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

³² https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_pasta

Die Schicht wird in mehrere Phasen unterteilt, welche, ihren Formen entsprechend, nach verschiedenen Nudelsorten benannt sind³³.



Das Bild zeigt der Reihenfolge nach (a=höchste, g=tiefste) die verschiedenen Phasen von der nuklearen Pasta. Bei den Bezeichnungen an den Bildern handelt es sich um die offiziellen Fachbegriffe. (<https://astrobites.org>)

4.3. Äußerer Kern

Der äußere Kern ist 9 Kilometer breit und macht fast die ganze Gesamtmasse des Neutronensterns aus³⁴. Die Dichte im äußeren Kern ist so groß, dass vereinzelte Atomkerne nicht länger vorkommen können. Die zerfallenen Atomkerne bilden eine Superfluid aus Neutronen, Protonen, übriggebliebenen Elektronen und Myonen₍₅₎.

4.4. Innerer Kern

Der Innere Kern eines Neutronensterns kann einen radius von bis zu 5 Km haben³⁵

Die Dichte im inneren Kern von Neutronensternen ist so groß, dass unser jetziges physikalisches Wissen noch nicht ausreicht um zu bestimmen wie sich Materie genau verhält wenn sie so extrem komprimiert wird.

Es gibt jedoch einige Hypothesen über den inneren Kern, welche wiederum die Basis für Theorien zur Existenz von seltsamen Sternen und

³³ https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_pasta

³⁴ <https://www.tat.physik.uni-tuebingen.de>

³⁵ <https://www.tat.physik.uni-tuebingen.de>

Quarksternen bilden. Im folgenden werden einige der Hypothesen näher beschrieben.

4.4.1. Quark-Gluon-Plasma

Nach dieser Theorie sollten die Verhältnisse in den tiefsten Bereichen von Neutronensternen so extrem sein, dass sie den Bedingungen unseres Universums kurz nach dem Urknall entsprechen³⁶. Die Nukleonen würden dementsprechend aufgrund der hohen Temperaturen im Kern in ihre Up-Quarks₍₆₎, Down-Quarks und Gluonen₍₇₎ zerfallen und innerhalb des Kerns ein Gemisch bilden, welches als Quark-Gluon-Plasma bezeichnet wird³⁷.

Neutronensterne die massereich genug wären um diesen hypothetischen Kern aus Quark-Gluon-Plasma aufzuweisen würde man als Quarksterne bezeichnen³⁸. Quarksterne wären sogar noch kleiner als gewöhnliche Neutronensterne und würden sich daher auch schneller rotieren³⁹

4.4.2. Seltsame Materie

Diese Theorie baut auf der vorherigen auf.

Laut ihr könnten durch einen noch extremeren Druck im Kern aus einigen der Quarks zu "Strange-Quarks" werden⁴⁰. Diese Strange-Quarks könnten aufgrund ihrer großen Stabilität, Materie welche von ihr berührt wird in weitere Strange-Quarks umwandeln⁴¹.

Während einer Kilonova könnte die seltsame Materie dann aus dem Neutronenstern bzw. seltsamen Stern als Klumpen oder "Stranglets" austreten und astronomische Objekte im Weltall "infizieren"⁴²

4.4.3. Weitere Neutron-Proton Flüssigkeit

Laut dieser Theorie würden die Neutronen und Protonen nicht in ihre Quarks zerfallen, sondern weiter eine Superfluid wie im äußeren Kern bilden. Der innere Kern würde sich vom äußeren Kern also nur in seinem Dichtegrad unterscheiden⁴³.

³⁶ <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/09/0.html>

³⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

³⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Quark_star

³⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutronensterne>

⁴⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Strange_matter

⁴¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Strange_matter

⁴² <https://phys.org/news/2014-02-chances-particle-collider-strangelets-earth.html>

⁴³ https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

5. Erscheinungsformen

Neutronensterne können als Pulsare oder Magnetare auftreten. Diese verschiedenen Typen haben ihre eigenen Besonderheiten.

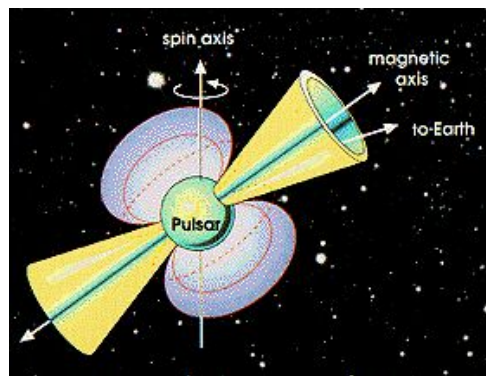
Neutronensterne können sowohl Pulsare als auch Magnetare sein. Im folgenden werden die beiden Typen näher beschrieben.

5.1. Pulsare

Die meisten Neutronensterne, die bis jetzt entdeckt wurden, sind Pulsare.

Neutronensterne schießen aus ihren Magnetpolen Strahlungskegel ins All⁴⁴.

Da die Rotationsachse eines Neutronensterns oft nicht mit der Magnetachse übereinstimmt, bewegt sich der Strahlungskegel mit der Rotation des Neutronensterns, sodass die Strahlungskegel ähnlich wie bei einem Leuchtturm herumgeschwenkt werden⁴⁵.



Darstellung der Kegel und Achsen eines Pulsars
(imagine.gsfc.nasa.gov)

Wenn die Strahlung über die Erde läuft, wird sie hier als rasant pulsierendes Licht-, Radio- oder Röntgen-Signal gemessen. Ein Neutronenstern wird folglich als Pulsar bezeichnet, wenn seine Kegel über die Erde laufen⁴⁶.

Pulsare lassen sich je nachdem, wie sie die Energie aufbringen um die Kegel zu erzeugen, in weitere Unterkategorien einordnen.

⁴⁴ <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/pulsars1.html.old>

⁴⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar>

⁴⁶ <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/pulsars1.html.old>

5.2. Magnetare

Bis jetzt wurden nur 31 Magnetare gefunden. Unter ihnen befinden sich auch 6, welche sowohl Magnetar als auch Pulsar sind⁴⁷.

Ihre Entstehung könnte durch das Verschmelzen von zwei Neutronensternen erfolgen⁴⁸

Magnetare haben Magnetfelder mit einer Stärke zwischen 10^{11} und 10^{12} Tesla, was der tausendfachen Magnetfeldstärke eines normalen Neutronensterns entspricht⁴⁹. Sie rotieren sich langsamer als andere Neutronensterne, da ihre Rotation von ihrem Magnetfeld gebremst wird⁵⁰. Das einzige uns bekannte Objekt, welches ein stärkeres Magnetfeld aufweisen kann als ein Magnetar, ist der RHIC Teilchenbeschleuniger in den USA mit 10^{14} Tesla⁵¹.

Magnetare sind nur relativ kurzzeitig aktiv. Bereits nach 10.000 Jahren werden aus ihnen besondere Pulsare, welche nach 100.000 weiteren verdunkeln und zu toten Magnetaren werden⁵²

⁴⁷ <https://www.universetoday.com>

⁴⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetar>

⁴⁹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetar>

⁵⁰ <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/magnetar/286>

⁵¹ [https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_\(magnetic_field\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_(magnetic_field))

⁵² <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/magnetar/286>

6. Kilonovae

Am 17. August 2017 wurde erstmals eine Kilonova, beobachtet⁵³.

Anhand der Beobachtung konnten Schlüsse über den Ursprung von schwereren Elementen wie z.B Gold gemacht werden⁵⁴.

Da während der Beobachtung der Kilonova alle Bereiche der beobachtenden Astronomie ausgenutzt wurden, zählt sie als eine der intensivsten Observationen in der Geschichte⁵⁵

Kilonovae entstehen beim Zusammenstoß von zwei Neutronensternen oder dem Aufeinandertreffen von einem Neutronenstern und einem schwarzen Loch⁵⁶.

Die beiden kompakten Objekte kreisen zunächst aufeinander zu und emittieren dabei Gravitationswellen. Wenn sie dann aufeinandertreffen wird der Neutronenstern mit der kleineren Masse von dem anderen Neutronenstern bzw. schwarzen Loch abrupt zerrissen. Die darauffolgende Explosion emittiert weitere Gravitationswellen.⁵⁷



Observation der Gravitationswellen der Kilonova vom Hubble Space Teleskop (<https://hubblesite.org>)

Die Atomkerne in den Krusten der Neutronensterne werden dann schlagartig von den Neutronen, die sich vorher in den Kernen der Neutronensterne befanden, bombardiert, was zur Folge hat, dass sich schwere instabile Isotope bilden. Die Neutronen in den Isotopen zerfallen durch β -Zerfall zu Protonen, sodass sich stabile oder zumindest nicht so schnell zerfallende Stoffe wie Gold und Uran bilden. Dies wird auch als Rapid-Neutron-Capture-Process oder r-Prozess. bezeichnet.⁵⁸

Nach der Kilonova bleibt dann ein Nebel, welcher schwere Elemente enthält und in den meisten Fällen ein schwarzes Loch über⁵⁹.

⁵³ <https://www.n-tv.de/wissen/>

⁵⁴ <https://www.mpa-garching.mpg.de/482823/news20171016>

⁵⁵ <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20171016>

⁵⁶ <https://en.wikipedia.org/wiki/Kilonova>

⁵⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Kilonova>

⁵⁸ <https://en.wikipedia.org/wiki/R-process>

⁵⁹ <https://phys.org/news/2016-04-neutron-star-collapse-black-hole.html>

7. Nutzen von Neutronensternen

Die besonderen Eigenschaften von Neutronensternen verleihen ihnen potenzielle Anwendungen als wissenschaftliche Werkzeuge oder in der Zukunft evtl. als Basis für ein galaktisches Navigationssystem.

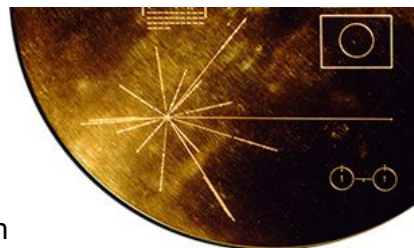
7.1. Forschungsmittel

Da die Kerne von Neutronensternen Bedingungen aufweisen, welche denen unseres Universums kurz nach dem Urknall ähneln, könnte man anhand von ihnen vieles über die Entstehung des Universums entdecken. Außerdem können Doppelpulsare wegen ihrer großen Gravitationswellen als Werkzeuge zum Prüfen der Relativitätstheorie genutzt werden⁶⁰. Doppelpulsare werden von Astronomen bereits genutzt um die Hubble-Konstante näher zu bestimmen⁶¹.

7.2. Galaktisches Positionierungssystem (GPS)

Da die Pulse von Neutronensternen überall konstant und teilweise präziser als Atomuhren sind, könnten sie in der Zukunft als GPS-System für Satelliten und andere Raumfahrt-Geräte genutzt werden⁶².

Das Prinzip Neutronensterne als Navigationsmittel zu nutzen wurde bereits angewandt um eine Pulsar-Karte auf der Schallplatte der Voyager-Sonde abzubilden: Leider hat sich seitdem deutlich mehr Pulsare entdeckt wurden herausgestellt, dass diese Karte wahrscheinlich zu ungenau ist um die Position der Erde zu finden⁶³.



Die Pulsar-Karte auf dem Cover der beiden Golden Records der Voyager 1 und 2 Sonden. (<https://voyager.jpl.nasa.gov>)

⁶⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Binary_pulsar

⁶¹ <https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Hubble/>

⁶² Katia Moskvitch, Neutron Stars, S.198

⁶³ <https://www.forbes.com>

8. Glossar

(1) Ereignishorizont:

Bei einem Ereignishorizont handelt es sich um die Grenze, ab der Informationen wie z.B Licht nicht für Beobachter erreichbar sind. Sie kommen normalerweise bei schwarzen Löchern vor.

(2) Neutrinos:

Neutrinos sind masse-arme neutrale Elementarteilchen

(3) Entartungsdruck:

Bei dem Entartungsdruck handelt es sich um den Druck der zwischen stark komprimierten Teilchen entsteht, um zu verhindern dass zwei Elementarteilchen (genauer Fermionen) den gleichen Quantenzustand einnehmen.

(4) Superfluid:

Eine Superfluid ist eine Flüssigkeit, die keine innere Reibung aufweist.

(5) Myonen

Myonen sind Elementarteilchen, die bis auf ihre Masse Identisch zu Elektronen sind. Myonen sind ungefähr 200-mal schwerer als Elektronen

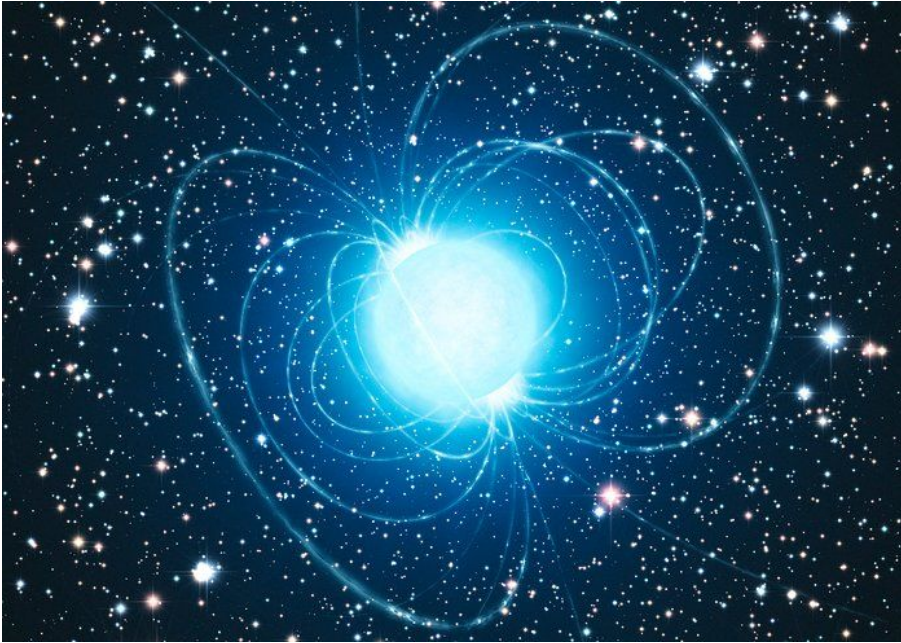
(6) Quarks:

Quarks sind Elementarteilchen aus denen Protonen und Neutronen bestehen.

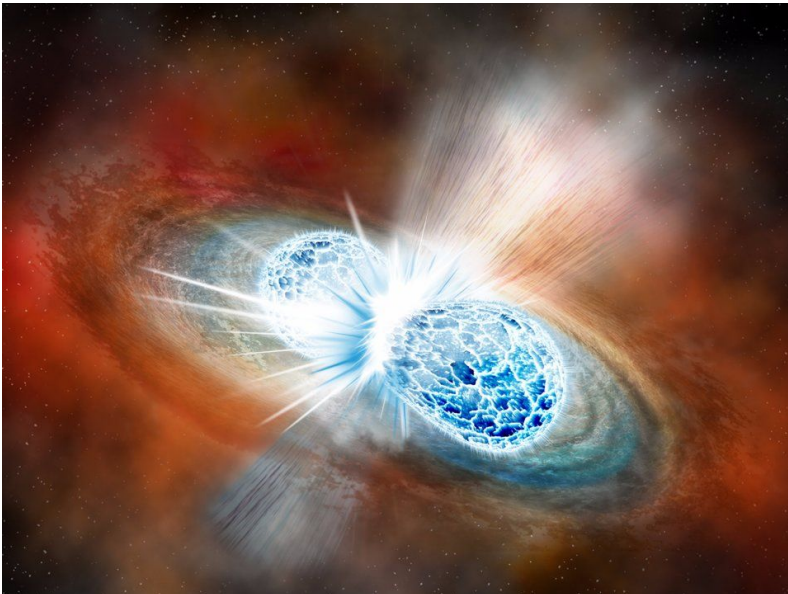
(7) Gluonen:

Gluonen sind Elementarteilchen, welche die Quarks in den Protonen und Neutronen zusammenhalten.

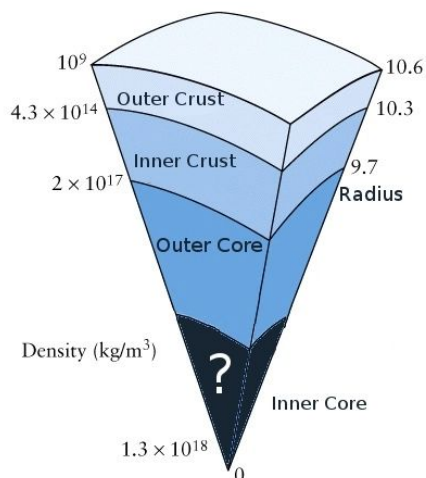
9. Weiteres Anschauungsmaterial



Künstlerische Darstellung eines Magnetars (<https://www.eso.org/public/images/eso1034a/>)



*Künstlerische Darstellung einer Kilonova
(<https://physicsworld.com/a/gw170817-kilonova-what-happened-next/>)*



Dichte in den Schichten eines Neutronensterns
(<https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>)

10. Quellenverzeichnis

10.1. Literaturquellen

- Moskvitch, Katia: Neutron Stars. The Quest to Understand the Zombies of the Cosmos. 2020 (Harvard University Press)

10.2. Internetquellen

S.3

- https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/gsfsc/spacesci/pictures/2003/0702pulsarspeed/0702ssu_primer.html
- <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/N/Neutron+Star>
- <https://www.nationalgeographic.com/science/article/neutron-stars>
- <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100230567>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutronenstern#Magnetfeld>

S.4

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubschrauber>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

S.5

- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/research/fundamental/neutronstars>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>
- https://en.m.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova
- https://en.m.wikipedia.org/wiki/Iron_peak

S.6

- https://en.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova
- https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star
- https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/neutron_stars1.html

S.7

- <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/drehimpulserhaltungssatz>
- <https://itp.uni-frankfurt.de/~luedde/Lecture/Mechanik/Intranet/Skript/Kap7/node5.html>

S.8

- <https://arxiv.org/pdf/1203.5807.pdf>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star

- S.9
- <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2008-10>
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_pasta
- S.10
- https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_pasta
 - https://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kokkotat/Teaching/Relativistic_Astrophysics_&_Experimental_Gravitation_files/EOS_lecture_SAM.pdf
- S.11
- <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/09/0.html>
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Quark_star
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutronenstern>
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Strange_matter
 - <https://phys.org/news/2014-02-chances-particle-collider-strangelets-earth.html>
- S.12
- <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/pulsars1.html.old>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar>
- S.13
- <https://www.universetoday.com/149748/only-31-magnetars-have-ever-been-discovered-this-one-is-extra-strange-its-also-a-pulsar/>
 - <https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetar>
 - <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/magnetar/286>
 - [https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_\(magnetic_field\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_(magnetic_field))
- S.14
- <https://www.n-tv.de/wissen/Erstmals-gelingt-Beobachtung-einer-Kilonova-article20085888.html>
 - <https://www.mpa-garching.mpg.de/482823/news20171016>
 - <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20171016>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Kilonova>
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/R-process>
 - <https://phys.org/news/2016-04-neutron-star-collapse-black-hole.html>
- S.15
- https://en.wikipedia.org/wiki/Binary_pulsar
 - <https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Hubble/>
 - <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2017/08/17/voyagers-cosmic-map-of-earths-location-is-hopelessly-wrong/?sh=46b3581769d5>

Die Aktualität aller Internetquellen wurde am 15.03.2021 überprüft

10.3. Bildquellen

Deckblatt

- <https://icons-for-free.com/lineal+with+color+neutron+star-1320109759378932731/>
 - <https://www.greselius.de/>
- S.1
- Das Bild wurde vom Verfasser dieser Facharbeit erstellt
- S.3
- <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/olson1/>
 - <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/c/core-collapse>
- S.7
- <https://present5.com/chapter-13-the-bizarre-stellar-graveyard-white/>
- S.8
- https://de.wikipedia.org/wiki/Neutronenstern#/media/Datei:Neutron_star_cross_section_de.svg
- S.10
- <https://astrobites.org/2017/10/05/nuclear-pasta-in-neutron-stars/>
- S.12
- https://www.researchgate.net/figure/A-pulsar-showing-its-rotation-axis-and-its-magnetic-axis-The-cone-represents-the_fig3_266098353
- S.14
- <https://hubblesite.org/contents/news-releases/2017/news-2017-41.html>

S.15

- <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/golden-record-cover/>

S.17

- <https://www.eso.org/public/images/eso1034a/>
- <https://physicsworld.com/a/gw170817-kilonova-what-happened-next/>

S.18

- <https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>

11. Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

12. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers