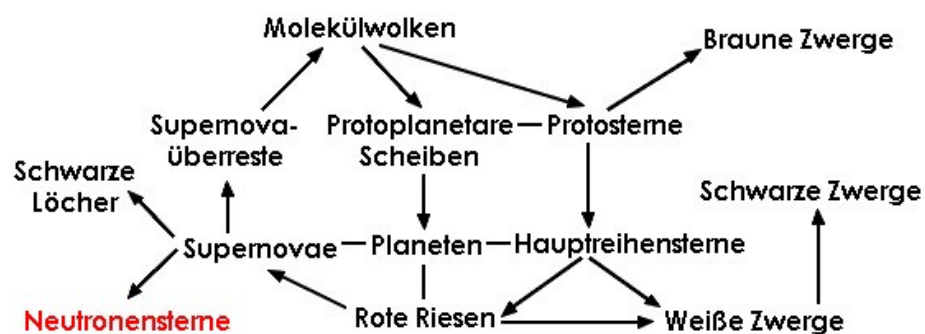


Materiekreislauf

Neutronensterne

Grundlagen aus dem ersten Semester:

08-Sternarten und Sternentwicklung (Seite 16 - 17)



Wenn ein roter Riese sein gesamtes Material zu Eisen fusioniert hat, implodiert er in einer Supernova vom Typ II. Wenn er mehr als die Chandrasekhar-Grenzmasse ($1,44M_{\odot}$) aber weniger als die Masse um ein schwarzes Loch zu erzeugen $3M_{\odot}$ besitzt, bezeichnet man das so entstandene Objekt als Neutronenstern.

Bei einem Neutronenstern ist die Gravitation so stark, dass sie selbst die starke Kernkraft überwindet, die Elektron und Atomkern auseinanderhält. Infolgedessen kleben Elektronen und Atomkerne ohne Abstand aufeinander und der Neutronenstern ist genauso dicht wie ein Atomkern.

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie dicht das ist, stellen wir uns vor der Atomkern hätte einen Radius von einem Meter und befindet sich in der Sternwarte. In diesem Maßstab wäre der Rand des Atoms durch die starke Kernkraft normalerweise erst in Erdberg. In einem Neutronenstern wird die starke Kernkraft jedoch überwunden, sodass der Abstand zwischen der Sternwarte und Erdberg auf 0 schrumpft.

So kommt es zustande, dass nur $1mm^3$ eines Neutronensterns 1 Milliarde Tonnen wiegt. Der gesamte Neutronenstern hat folglich einen Radius von nur 20km und hätte somit locker in Wien platz.

1 Aufbau

Ein Neutronenstern ist von innen nach außen in folgende Zonen untergliedert:

Name	Dicke	Bestandteile
Innerer Kern	0 - 3km	Quark-Gluonen-Plasma
Äußerer Kern	9km	Neutron-Proton-Fermiflüssigkeit
Innere Kruste	1-2 km	Elektronen, Neutronen, Kerne
Äußere Kruste	300-500m	Ionen, Elektronen
Atmosphäre	10cm	Superheißes Plasma

Im Inneren Kern des Neutronensterns vermutet man Quark-Gluonen-Plasma. Dieses Material ist so dicht, dass sich nicht einmal Protonen und Neutronen bilden können, sondern die elementaren Masseteilchen (Quarks) und die elementaren Energieaustauschteilchen (Gluonen) festsitzen. Es gehört nicht nur zu den dichtesten sondern auch zu den am schnellsten rotierenden Materialien im Universum.

Nach außen hin nimmt der Druck ab, so dass sich immer mehr Strukturen bilden können. Im äußeren Kern können sich bereits Protonen und Neutronen bilden, die Elektronen machen nur einen geringen Prozentsatz aus. Die Verschmelzung von Protonen und Neutronen zu einem Atomkern ist allerdings erst in der inneren Kruste möglich. Hier bilden sich bereits mehr Elektronen. In der Äußeren Kruste können sich positiv geladene Ionen bilden, die allerdings keine Bindung mit den Elektronen eingehen können. Richtige Atome können sich nur in den äußersten 10cm, der Atmosphäre, bilden. Diese kommen in plastischer Form vor.

2 Pulsare

Neutronensterne sind normalerweise an den magnetischen Polen viel heller als an den anderen Stellen. Gleichzeitig rotieren sie um eine Rotationsachse, die im Vergleich zur Magnetfeldachse geneigt ist, sodass wir manchmal die helleren Pole und manchmal den dunkleren Rest sehen.

Das Objekt schaut für uns daher so aus, als würde es seine Helligkeit in regelmäßigen Abständen ändern. Diese Helligkeitsschwankungen sind in allen Wellenlängen beobachtbar. Der Effekt ist analog zu einem sich drehenden Leuchtturm, der dem Schiff abwechselnd die helle und die dunkle Seite zeigt. Deshalb wird dieser Effekt auch als Leuchtturmeffekt bezeichnet.

1967 wurden von Jocelyn Bell und Antony Hewish erstmals die Helligkeitsschwankungen eines Pulsars gemessen. Sie beobachteten den Pulsar B1919+21 im Radiobereich und stellten eine Periodendauer von 1,337 Sekunden fest. Thomas Gold entwickelte in den Jahren 1968 und 1969 die richtige Interpretation dieser Entdeckung.

Wie sich später herausstellen sollte, zählte B1919+21 sogar zu den langsameren Pulsaren. Schnelle Neutronensterne können in nur wenigen Millisekunden um die eigene Achse rotieren. Normalerweise wird die Periodendauer in jeder Sekunde um 10^{-15} Sekunden langsamer, weil der Neutronenstern durch sein Magnetfeld gebremst wird und Drehimpuls ins umliegende interstellare Medium überträgt.

Diese Verlangsamung bleibt nicht ohne Auswirkungen: Erstens geht die Rotationsabplattung zurück. Teile des Neutronensterns werden daher vom Äquator zu den Polen gedrückt und der Neutronenstern wird runder.

Zweitens wird die Oberfläche am meisten gebremst, während sich das Innere des Neutronensterns meist noch schneller bewegt. Es kommt zu gigantischen Reibungskräften zwischen der Oberfläche und dem Sterninneren.

Drittens führt die Fliehkraft dazu, dass der Neutronenstern nicht ganz so eng ist. Ähnlich wie bei Planeten sind nämlich auch bei der Oberfläche von Neutronensternen die Gravitation und die Fliehkraft im Gleichgewicht. Wenn die Fliehkraft abnimmt, wird folglich die Oberfläche immer enger und das Innere des Neutronensterns noch enger zusammengedrückt.

Irgendwann hält das Innere des Neutronensterns diese Kräfte nicht mehr aus und es kommt zu einem sogenannten „Sternbeben“. Dabei bricht die Oberfläche auf und Teile des Inneren des Neutronensterns können sich entfernen. Für das Trägheitsmoment gilt die Formel

$$I = \int_M r^2 \quad (2.1)$$

Durch die Abnahme der Masse nimmt das Trägheitsmoment folglich zu. Für die Rotationsenergie gilt

$$E_{rot} = \frac{I\omega^2}{2} \quad (2.2)$$

Da das Trägheitsmoment abnimmt und die Energie erhalten bleibt, muss die Rotationsgeschwindigkeit zunehmen. Auf der Erde beobachtet man eine Zunahme der Periode, dieses Ereignis nennt man auch „Periodensprung“

Der genaue Zusammenhang zwischen der Rotationsgeschwindigkeit eines Pulsars und dem Auftreten von Sternbeben ist noch nicht bekannt.

3 Magnetare

Neutronensterne, die zu Beginn eine Rotationsperiode von weniger als 10 Millisekunden besitzen, bezeichnet man als Magnetare, weil sie ein besonders starkes Magnetfeld von $10^{11} T$ aufweisen. Ein derart starkes Magnetfeld besitzt kein anderes Objekt im Universum. Zum Vergleich: Das höchste Magnetfeld das man erzeugen kann, ohne dass die Kuperspule kaputt geht beträgt 100 Tesla. Ein handelsüblicher Hufeisenmagnet hat lediglich 0,1 Tesla.

Neutronensterne haben schon normalerweise ein extrem starkes Magnetfeld von $10^8 T$. Das liegt daran, dass sich das gesamte Magnetfeld des roten Riesen auf den extrem kleinen Raum um den Neutronenstern verdichtet. Durch die hohe Rotation kommt es zusätzlich noch zu einem besonders starken Dynamoeffekt, der das Magnetfeld besonders stark macht.

Der Dynamoefekt ist die Entstehung eines Magnetfeldes durch Bewegung. Normalerweise ziehen sich ungleichnamige Ladungen an, sodass sie sich gegenseitig ausgleichen und elektrisch neutral sind. Bei einer schnellen Bewegung sind die Ladungen jedoch zu träge und es kommt zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Ladungen - ein Magnetfeld entsteht.

Auch bei anderen rotierenden Objekten wie unserer Erde ist auf diese Art das Magnetfeld entstanden. Je schneller die Bewegung ist, desto stärker ist dieser Effekt, bei den besonders schnell rotierenden Magnetaren ist er daher besonders stark.

Die Stärke des Magnetfeldes ist sogar so stark, dass es Teile des Neutronensterns dazu bringen kann, die Gravitation zu überwinden und aus dem Neutronenstern auszubrechen. Diese fallen zwar nach wenigen zehntel Sekunden in den Neutronenstern zurück, aber es wird eine große Menge von Strahlungsenergie im Gammabereich frei, anhand derer man einen Magnetar entdecken kann.

Insgesamt sind derzeit ungefähr 20 Magnetare bekannt. Zusätzlich kommt es im Universum zu Röntgenemission (AXP) und Gammaemission (SGR) bei denen man ebenfalls vermutet, dass sie durch Magnetare entstanden sein könnten.

4 Krebspulsar

Der Krebspulsar ist der einzige Pulsar, bei dem Menschen die Entstehung eines Pulsars beobachten konnten. (vom 4. bis zum 27. Juli 1054 in China) Somit eignet sich dieser Pulsar am besten dazu um etwas über die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Supernovaexplosion und den Eigenschaften des so entstehenden Neutronensterns herauszufinden.

Heute hat der Pulsar eine Periodendauer von einer dreißigstel Sekunde und eine maximale Helligkeit von 30 Magnituden. Er erzeugt Pulsarwinde, das sind relativistische Elektronen die frei werden und mit dem umgebenden Magnetfeld wechselwirken. Dabei wird der Pulsar in jeder Sekunde um $4,2 \times 10^{-13} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ abgebremst.

Die abgegebene Rotationsenergie wird in gepulste Synchrotronstrahlung umgewandelt und sorgt so für einen Nebenpuls. Diese Pulse sind vom Radio- bis in den Gammabereich durchgehend sichtbar und teilweise sogar heller als der Hauptpuls. Die maximale Bestrahlungsstärke erreichen sie im Bereich zwischen 2 und 10keV. Dort beträgt diese $2,4 \times 10^{-11} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Der Krebsnebel ist ein Gebiet, das derzeit mit 8,2mag leuchtet und aus den Supernovaüberresten entstanden ist. Er dehnt sich nach wie vor mit einer Geschwindigkeit von 1800km/s aus.

5 Taylor-Hulse-Pulsar

Der Taylor-Hulse-Pulsar (PSR 1913+16) ist ein Doppelsternsystem bestehend aus zwei Pulsaren, die beide ungefähr $1,4 M_{\odot}$ schwer sind und sich in etwas mehr als 7

Stunden gegenseitig umkreisen. Ihre Exzentrizität beträgt 0,6. Die Periodendauer des Systems wird durch seine Gravitationswellen gebremst

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{96G^3M^2\mu f(e)}{5c^5} \sqrt{\frac{64\pi^8}{G^4M^4P^5}} \quad (5.1)$$

In dieser Formel steht P für die Periodendauer des Systems, M für die Gesamtmasse der beiden Pulsare, μ die reduzierte Masse und $f(e)$ die Funktion der Exzentrizität nach der Zeit. Insgesamt rücken die beiden Pulsare nach jeder Periode ungefähr 3mm näher zusammen