

# Quarkstern

Ein **Quarkstern**, auch **Seltsamer** genannt, ist ein theoretisch möglicher Endzustand der Sternentwicklung vor einem Schwarzen Loch.

Mit dem Verbrauch seines nuklearen Brennmaterials (Kernfusion) wird die Materie eines Sterns durch die Gravitation sehr stark zusammengepresst. Je nach Masse des Sterns entsteht dabei ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern, ein (hypothetischer) Quarkstern oder ein Schwarzes Loch, teilweise begleitet von einer Supernova oder Hypernova.

Bislang gibt es keine Beobachtungen, dass die theoretisch mögliche Verdichtung der Neutronenmaterie eines Neutronensterns zu einem Quarkstern im Universum stattfindet. Im Quarkstern wäre die Materie so dicht gepackt, dass Neutronen ihre Identität verlieren und Quarks direkt miteinander wechselwirken. Der Nachweis eines Quarksterns gilt als schwierig, da seine von Ferne beobachtbaren Eigenschaften denen eines Neutronensterns ähneln.

Möglicherweise haben aber viele Neutronensterne zumindest in ihrem Inneren ein solches Quark-Gluon-Plasma.

Für Neutronensterne gibt es eine Massen-Obergrenze (Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze), deren Wert nach gegenwärtigen Abschätzungen zwischen 1,5 und 3 Sonnenmassen liegt. Überschreitet ein Neutronenstern diese Grenze, kollabiert er und ein Schwarzes Loch entsteht. Je weiter sich ein Neutronenstern der Massengrenze nähert, desto größer ist der Quark-Gluonen-Plasmaball in seinem Inneren.

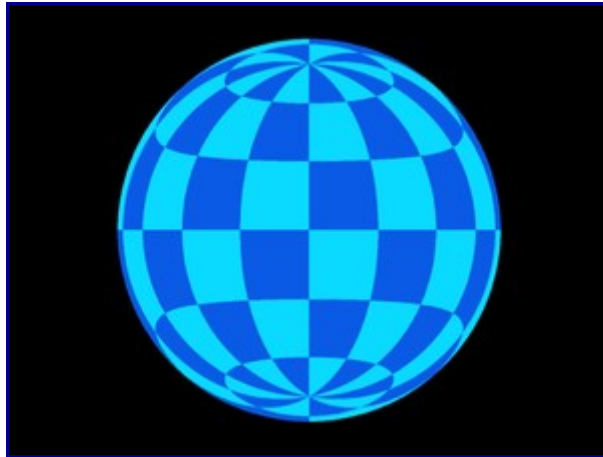
Es wurden bis jetzt zwei mögliche Quark-Sterne entdeckt.

Der eine, RX J1856-3754, wurde 1992 vom Röntgensatelliten ROSAT entdeckt, aber erst 1996 war es wegen seiner Entfernung (zwischen 180 und 420 Lichtjahren) mit dem Hubble-Weltraumteleskop möglich, den Pulsar auch optisch abzulichten. Aufgrund der Gesamtstrahlung wurde ein Durchmesser von nur 11 km berechnet, was selbst für einen Neutronenstern ein zu niedriger Wert ist. Spätere Messungen ergaben aber, dass bei diesem Stern nur die Polarkappen strahlen. RX J1856-3754 hat also einen wesentlich größeren Durchmesser als 11 km und ist somit kein Kandidat mehr für einen Quarkstern.

Der andere, der Pulsar J0205+6449 im Supernovaüberrest 3C58, wird einer Supernova zugeordnet, die 1181 von japanischen und chinesischen Astronomen beobachtet wurde. Wegen seiner großen Distanz von etwa 10.000 Lichtjahren zur Erde konnte man seinen Durchmesser noch nicht berechnen, seine Leuchtkraft ist aber 16-fach geringer als die vergleichbar junger Pulsare. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass es sich um einen Quarkstern handelt.

Quarksterne werden umgangssprachlich auch *Seltsame* (engl. *Strangelets*) genannt, da das Plasma auch so genannte „Seltsam-Quarks“ enthalten würde.

## Eigenschaften eines Neutronensterns



Neutronenstern. Durch die gravitative Lichtablenkung ist mehr als die Hälfte der Oberfläche sichtbar (Karus:  $30^\circ \times 30^\circ$ ). Der Umfang des hier dargestellten Neutronensterns ist doppelt so groß wie das  $2\pi$ -fache seines Schwarzschild-Radius. Bei einer typischen Neutronensternmasse von 1,4 Sonnenmassen entspricht das einem Sternumfang von  $2\pi \times 8,4$  km.

Das Gravitationsfeld an der Oberfläche eines typischen Neutronensterns ist etwa  $2 \cdot 10^{11}$ -mal stärker als das der Erde. Die Fluchtgeschwindigkeit, auf die ein Objekt beschleunigt werden muss, damit es den Neutronenstern verlassen kann, ist von der Größenordnung 100.000 km/s, was etwa einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Das starke Gravitationsfeld wirkt als Gravitationslinse und lenkt vom Neutronenstern emittiertes Licht dergestalt ab, dass Teile der normalerweise nicht sichtbaren Rückseite des Sterns ins Blickfeld gelangen.

Die gravitative Bindungsenergie eines Neutronensterns der doppelten Sonnenmasse ist nach dem Gesetz über die Äquivalenz von Masse und Energie,  $E=mc^2$ , äquivalent zu einer Sonnenmasse. Das ist die Energie, die bei der Supernovaexplosion freigesetzt wird.

Die Temperatur im Inneren eines Neutronensterns beträgt anfangs 100 Milliarden Kelvin. Die Abstrahlung von Neutrinos entzieht jedoch so viel thermische Energie, dass sie innerhalb eines Jahres auf 1 Milliarde Kelvin sinkt.

Beim Kollaps der Kernzone des Vorläufersterns verringert sich sein Durchmesser auf einen Bruchteil des vorherigen Wertes. Aufgrund des damit verbundenen Pirouetteneffekts rotiert der Neutronenstern in der Regel mit mehreren Umdrehungen pro Sekunde. Die höchste bislang gemessene Rotationsfrequenz beträgt 716 Hz (Pulsar PSR J1748-2446ad). Sie liegt nicht allzu fern unterhalb der durch die Zentrifugalkraft bedingten Stabilitätsgrenze eines reinen Neutronensterns von etwa 1 kHz.

Verschiedene Effekte können die Rotationsfrequenz eines Neutronensterns im Laufe der Zeit verändern. Liegt ein Doppelsternsystem vor, bei dem ein Materialfluss von einem Hauptreihenstern zum Neutronenstern stattfindet, so wird ein Drehimpuls übertragen, der die Rotation des Neutronensterns beschleunigt. Dabei können sich Werte im Bereich von 1kHz einstellen. Bremsende Effekte können die Rotationsperiode auf mehrere Sekunden oder gar Minuten ansteigen lassen. Ursache ist das Magnetfeld des Neutronensterns.

Die Zustandsgleichung für einen Neutronenstern ist noch immer unbekannt. Man geht davon aus, dass sie sich signifikant von der eines Weißen Zwerges unterscheidet. Die Zustandsgleichung eines Weißen Zwerges ist die eines entarteten Gases, das in guter Näherung mit der speziellen Relativitätstheorie beschrieben werden kann. Bei einem Neutronenstern sind jedoch die Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr vernachlässigbar. Daraus resultieren auch insbesondere die beobachteten Abweichungen von den vorhergesagten Grenzen der Massen für einen Neutronenstern.

## Das Magnetfeld von Neutronensternen

Neutronensterne haben ein extrem starkes Magnetfeld, das sowohl für ihre weitere Entwicklung als auch für die astronomische Beobachtung von Bedeutung ist. Als Folge der Gesetze der Elektrodynamik bleibt das Produkt aus Sternquerschnitt und Magnetfeld beim Kollaps des Vorläufersterns konstant. Für einen typischen Neutronenstern ergibt sich daraus eine Zunahme des Magnetfeldes um den Faktor  $10^{10}$  auf Werte im Bereich von  $10^8$  Tesla ( $10^{12}$  Gauß). Die Massendichte, die einem derartigen Magnetfeld über seine Energiedichte in Kombination mit der Äquivalenz von Masse und Energie gemäß  $E=mc^2$  zugeordnet werden kann, liegt im Bereich einiger Dutzend  $\text{g/cm}^3$ . Diese Magnetfelder sind so stark, dass Atome in ihrem Einflussbereich eine längliche Zigarrenform annehmen würden, da die Wechselwirkung der Elektronen mit dem Magnetfeld über jene mit dem Kern dominiert. Aufgrund der Rotation des Neutronensterns stellt sich zwischen Zentrum und Äquator eine Hall-Spannung der Größenordnung  $10^{18}$  V ein. Das entspricht einer elektrischen Feldstärke von einigen 1.000 V pro Atomdurchmesser.