

As propriedades da matéria densa estão codificadas na equação de estado que pode ser determinada pelo estudo da relação massa-raio das estrelas de nêutrons. (Figura após CXC/M. Weiss).

A massa e o raio das estrelas de nêutrons podem ser estimados a partir de observações de pulsares em sistemas binários.

A figura abaixo mostra a relação entre a massa e o raio da estrela de nêutrons PSR J0740+6620 como os obtidos a partir de observações.

A zona mais leve corresponde aos valores mais prováveis: 2,08 massas solares e 12,35 km (Miller et al. 2021).

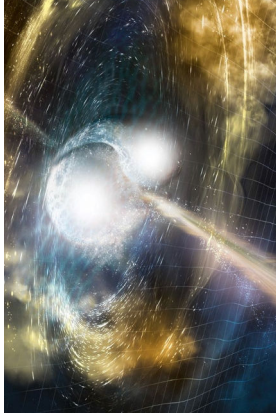
A Equação de Estado

Apenas a camada mais externa de uma estrela de nêutrons (cerca de 0,01% da massa) pode ser estudada com experimentos em núcleos atômicos na Terra. A maioria dos núcleos da crosta e do núcleo só pode ser investigada teoricamente.

Nas estrelas de nêutrons, a pressão precisa crescer rapidamente com a densidade para sustentar a massa da estrela. A partir dessa condição, os físicos teóricos estimam a relação entre densidade e pressão — a chamada Equação de Estado. Com ela, é possível derivar a relação massa-raio e confrontá-la com observações. Por meio de aproximações sucessivas, os cientistas podem determinar a Equação de Estado real da matéria densa, revelando as propriedades do estado mais extremo da matéria conhecido.

Créditos:
Imagem: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simomet

Representação artística de duas estrelas de nêutrons em fusão. Os feixes estreitos são as explosões de raios gama. Também são mostradas nuvens rodopiantes de material ejetado das estrelas em fusão. Essas nuvens emitem luz visível, bem como em outros comprimentos de onda.

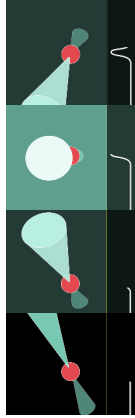


Como elas podem ser observadas?

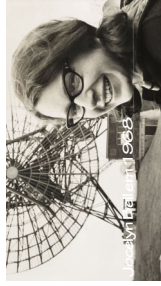
Estima-se que existam cerca de um bilhão de estrelas de nêutrons na Via Láctea, embora apenas cerca de 3.000 tenham sido observadas diretamente.

A maioria emite feixes de rádio gerados por seus campos magnéticos extremamente intensos — até 10¹⁵ vezes mais fortes que o da Terra. À medida que a estrela gira, o feixe atravessa nossa linha de visão, produzindo pulsos regulares.

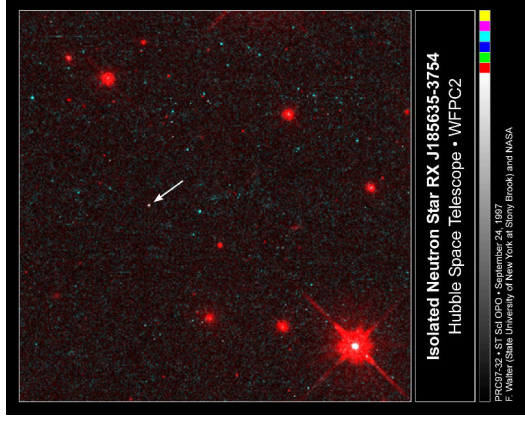
Logo após sua descoberta, esses objetos, chamados pulsares, foram explicados por esse efeito de "farol". Somente as estrelas de nêutrons, antes apenas teóricas, capazes de justificar tais observações.



A maioria das estrelas de nêutrons giram em torno de seus próprios eixos. O feixe de luz que elas emitem é detectado por antenas de rádio quando ele é direcionado para a Terra.



Jocelyn Bell, aluna de Antony Hewish em Cambridge (Inglaterra), descobriu esses objetos em 1967. Essa descoberta foi inicialmente entendida como consequência de pulsações de estrelas compactas. Em 1974, o Prêmio Nobel foi concedido a Hewish por essa descoberta.



Isolated Neutron Star RX J185635-3754
Hubble Space Telescope • WPC2
PRC07.39 • ST ScI DPO • September 24, 1997
F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

Estrelas de nêutrons

Paweł Haensel
Leszek J. Zdunik
Michał Bejger
CAMK, Polônia

THE UNIVERSE IN MY POCKET
Nº 31

O Universo no meu bolso

Uma estrela de nêutrons é o remanescente do colapso de uma estrela massiva, cuja massa inicial situa-se entre cerca de 8 e 25 vezes a do Sol. No fim de sua vida, a estrela explode como supernova, e o núcleo restante colapsa sob sua própria gravidade, atingindo densidades superiores às dos núcleos atômicos.

Esses objetos são os segundos mais densos conhecidos, logo após os buracos negros. Uma estrela de nêutrons possui um raio de cerca de 10 km e uma massa entre 1 e 2 massas solares. Em comparação, um buraco negro de 1 massa solar teria raio de apenas 3 km.

Consideradas apenas técnicas por muito tempo, as estrelas de nêutrons foram descobertas em 1967.



Tradução Maria Eduarda Ramos
TUIMP Creative Commons



Para saber mais sobre essa série e sobre os tópicos apresentados neste livrinho, acesse <http://www.tuimp.org>

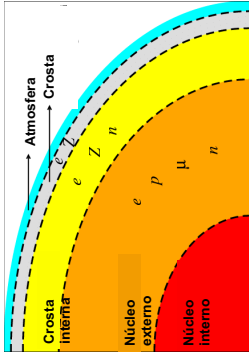
O Universo no meu bolso nº 31

Imagem da capa. Visão artística de uma estrela de nêutrons. Crédito: Casey Reed, Penn State University.

Este livrinho foi escrito em 2024 por Paweł Haensel, Leszek J. Zdziunik do Nicolaus Copernicus Astronomical Center (Polónia) e Michał Bejger do INFN Ferrara (Itália) e do Nicolaus Copernicus Astronomical Center (Polónia). Ele foi revisado por Stan Kurtz (UNAM, México) e Grażyna Stasińska (Observatório de Paris).

Imagem da capa. Visão artística de uma estrela de nêutrons. Crédito: Casey Reed, Penn State University.

O Universo no meu bolso nº 31



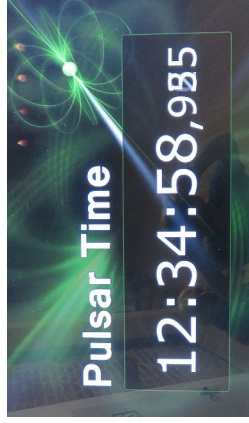
A estrutura de uma estrela de nêutrons com 1,4 massas solares, adaptada de Jonge Plekiewicz. Ele é composta por:

- **Atmosfera** gasosa, com poucos centímetros de espessura;
- “**Oceano**” **líquido**, com cerca de **10 m de profundidade**;
- **Crosta sólida**, de aproximadamente **1 km**, dividida em crosta externa (núcleos cristalinos imersos em gás de elétrons) e crosta interna (cristal nuclear imerso em gás de elétrons e nêutrons);
- **Núcleo líquido**, cuja **camada externa** (cerca de **7 km**) contém nêutrons, prótons, elétrons e múons. O **núcleo interno**, com cerca de **4 km** de raio, permanece um mistério e pode conter partículas exóticas.

Respostas: a c a b

1. As estrelas de nêutrons são:
 - a. núcleos colapsados de estrelas massivas
 - b. um tipo de buraco negro
 - c. remanescentes de galáxias
2. Qual é a massa típica de uma estrela de nêutrons?
 - a. entre 8 e 25 massas solares
 - b. mais de 100 milhões de massas solares
 - c. entre 1 e 2 massas solares
3. Estrelas de nêutrons são observadas:
 - a. em todos os comprimentos de onda eletromagnéticos
 - b. somente em raios X e luz visível
 - c. somente em raios gama
 - d. somente no rádio
4. A temperatura da superfície das estrelas de nêutrons é tipicamente:
 - a. superior a 100 milhões de graus
 - b. alguns milhões de graus
 - c. semelhante à temperatura do Sol

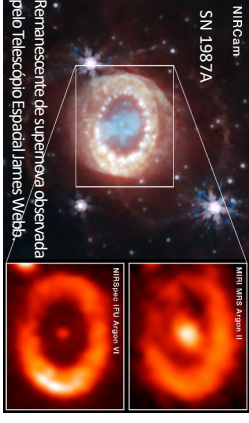
Quiz



Esta é a tela do primeiro relógio pulso do mundo, que foi instalado Museu do Relógio da Torre em Gdańsk, Polónia, em 2011.

Esse relógio exclusivo usa os impulsos dos pulsares como base para manter o tempo.

Ele consiste em um radiotelescópio com 16 antenas que recebem sinais de seis pulsares.



A **Nebulosa do Caranguejo** com um pulsar no centro (vermelho – fatos no óptico obtidos pelo Hubble; azul – imagens de raios X obtidas pelo Chandra).
Nebulosa do Caranguejo tem um tamanho de cerca de cem trilhões de quilômetros. A estrela de nêutrons tem um diâmetro de apenas 20 km.

Imagens de

remanescentes de supernova com uma estrela de nêutrons no centro. A

O que tem dentro?

A estrutura interna de uma estrela de nêutrons é composta por camadas semelhantes às de uma cebola. A crosta sólida representa apenas 1% da massa total, enquanto cerca de 99% está concentrada no núcleo líquido e no misterioso núcleo interno. A densidade cresce com a profundidade — de cerca de 10 g/cm^3 na atmosfera gasosa (a 1–2 milhões de K) até mais de $100000000000 \text{ kg/cm}^3$ no centro, ou seja, 4 a 6 vezes mais denso que um núcleo atômico. Uma simples colher de chá desse material na Terra pesaria tanto quanto toda a população humana. Os interiores dessas estrelas não são apenas quentes e densos, mas também muito magnetizados, superfluidos e supercondutores. Estudá-los nos permite compreender melhor suas propriedades e utilizá-los como laboratórios cósmicos extremos.