

O Universo no meu bolso



Estrelas de nêutrons



Paweł Haensel
Leszek J. Zdunik
Michał Bejger
CAMK, Polônia

A Nebulosa do Caranguejo com um pulsar no centro (vermelho – dados no óptico obtidos pelo Hubble, azul – imagens de raios X obtidas pelo Chandra).

Imagens de remanescentes de supernova com uma estrela de nêutrons no centro. A Nebulosa do Caranguejo tem um tamanho de cerca de cem trilhões de quilômetros. A estrela de nêutrons tem um diâmetro de apenas 20 km.

NIRCam

SN 1987A

MIRI MRS Argon II

NIRSpec IFU Argon VI

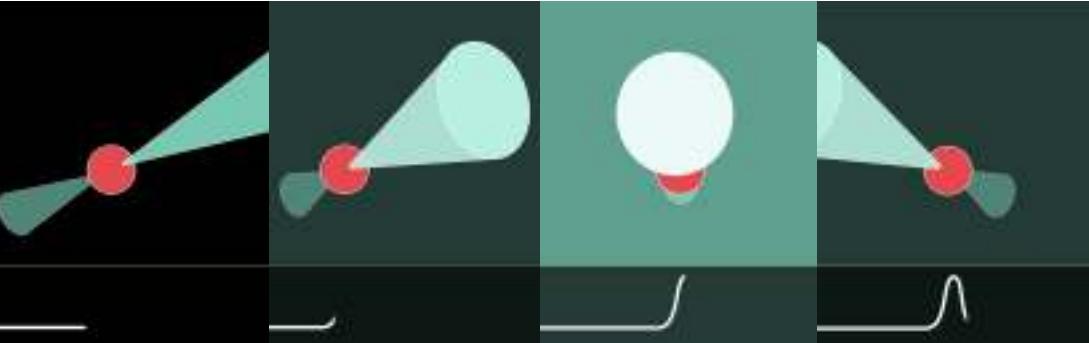
Remanescente de supernova observada pelo Telescópio Espacial James Webb.

O que são estrelas de nêutrons?

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 teóricas por muito tempo, as estrelas de nêutrons foram descobertas em 1967.



A maioria das estrelas de nêutrons conhecidas são pulsares de rádio que 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.



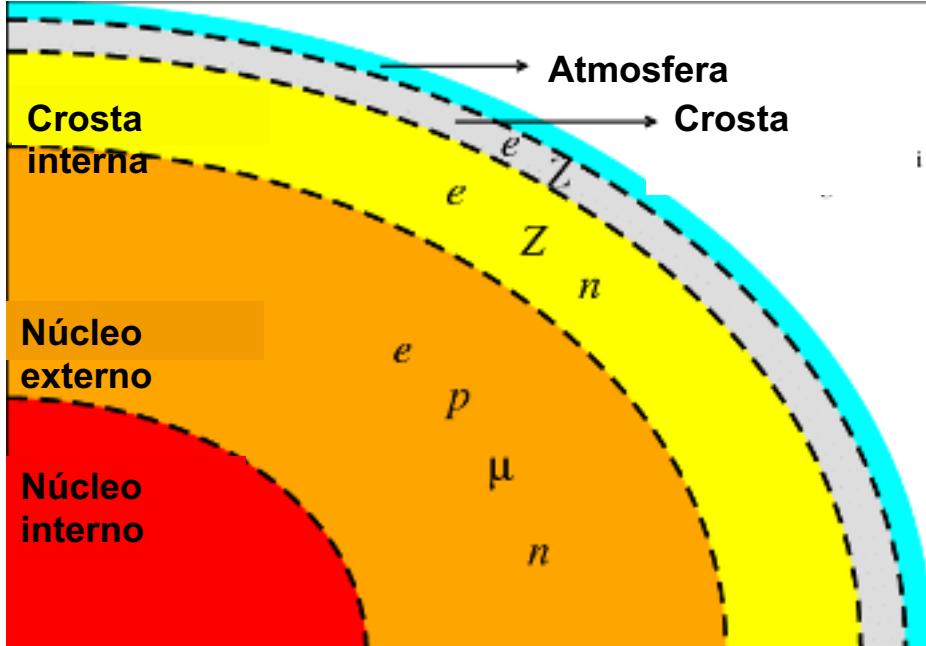
Jocelyn Bell, aluna de Antony Hewish em Cambridge (Inglaterra), descobriu esses objetos em 1967. Essa descoberta foi inicialmente entendida como consequência de pulsações de estrelas compactas. Em 1974, o Prêmio Nobel foi concedido a Hewish por essa descoberta.

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 10^{15} 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, apresentavam as propriedades capazes de justificar tais observações.



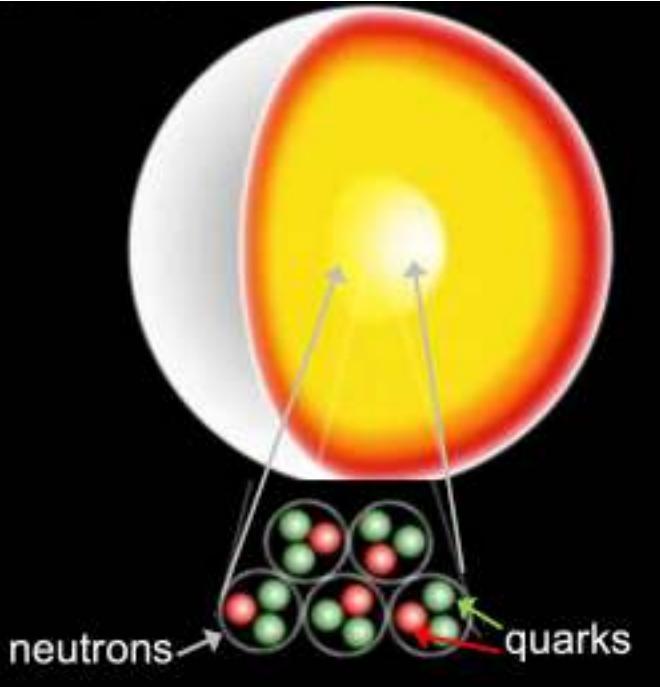
A estrutura de uma estrela de nêutrons com 1,4 massas solares, adaptada de Jorge Piekarewicz. Ele é composta por:

- **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 muôns. O **núcleo interno**, com cerca de **4 km** de raio, permanece um mistério e pode conter partículas exóticas.

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.

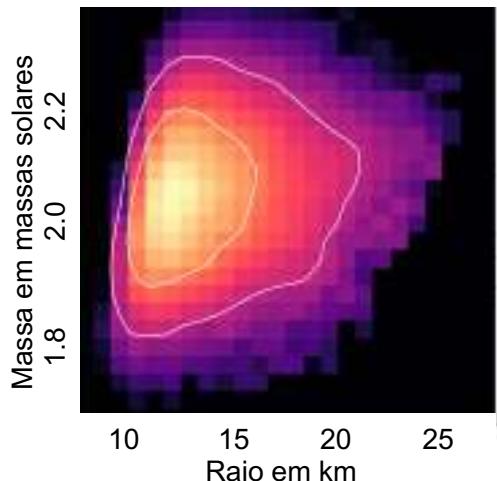


As propriedades da matéria densa estão codificadas na equação de estado que pode ser determinada pelo estudo da relação massa-raio das estrelas de nêutrons.
(Figura após CXC/M. Weiss).

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.

Pulsar Time

12:34:58,985

Esta é a tela do primeiro relógio pulsar do mundo, que foi instalado Museu do Relógio da Torre em Gdańsk, Polônia, 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.



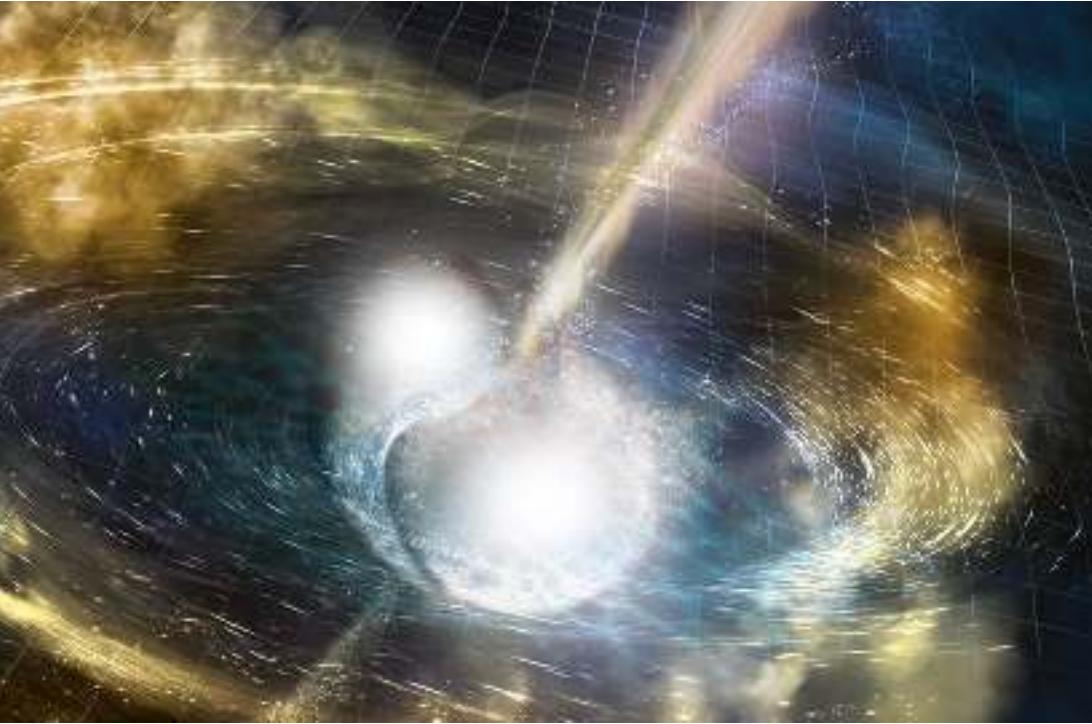
Estrelas de nêutrons como relógios

Os pulsos das estrelas de nêutrons ocorrem em uma ampla faixa de períodos: de 1,4 milissegundos a cerca de 1 minuto.

O que é surpreendente é a notável regularidade desses pulsos: um relógio pulsar típico desacelera em um segundo a cada milhão de anos.

Como os pulsares são relógios extremamente precisos, eles permitem medir até pequenas variações em relação à teoria aceita que descreve o movimento das estrelas em um campo gravitacional. Isso nos possibilita testar a teoria da gravidade.

Acontece que a Teoria Geral da Relatividade, formulada por Einstein em 1915, passa nesse teste com perfeição!



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.

Créditos:

Imagen: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

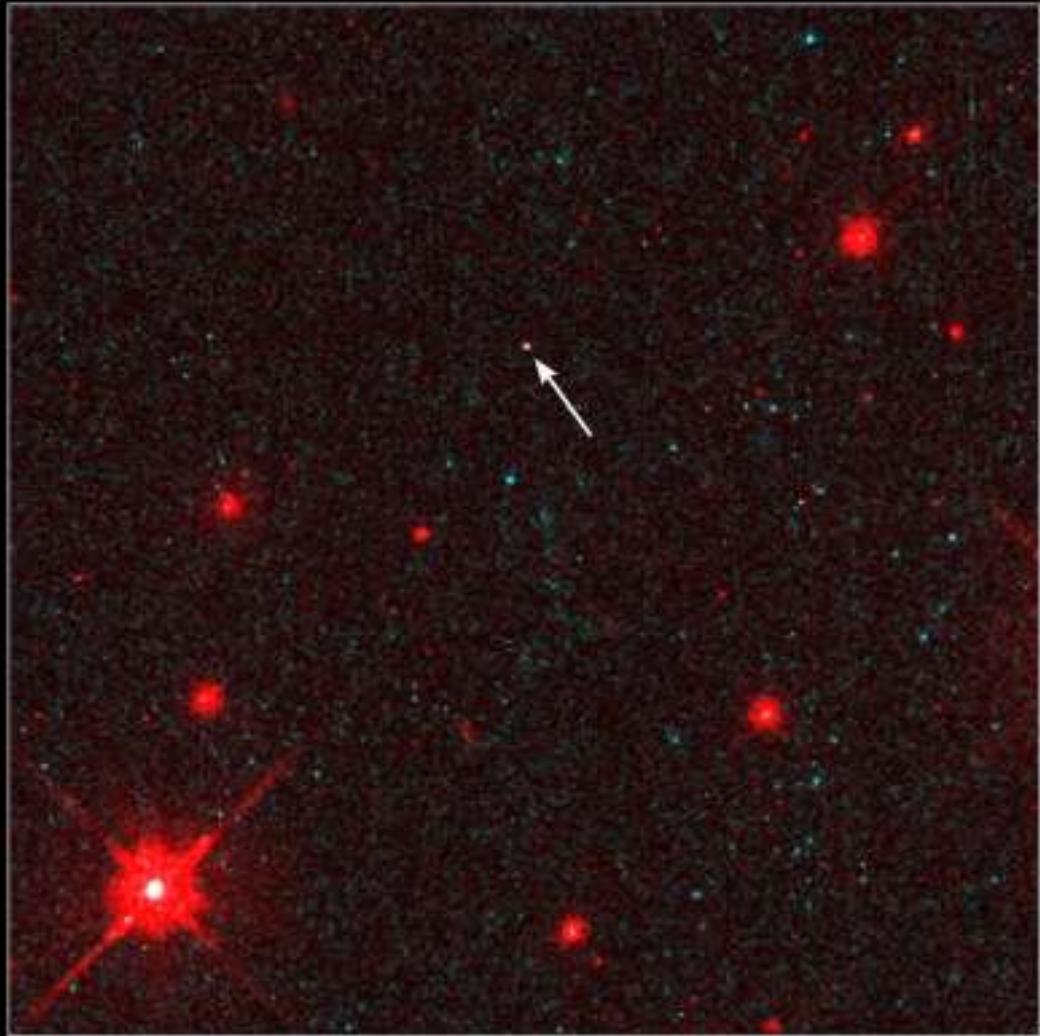
Ondas gravitacionais e explosões de raios gama

As estrelas de nêutrons também podem ser fontes de ondas gravitacionais - distorções do espaço-tempo que viajam à velocidade da luz (veja o TUIMP 18).

Em 17 de agosto de 2017, ondas emitidas por duas estrelas de nêutrons em colisão foram registradas pelos detectores de ondas gravitacionais LIGO e Virgo.

Além disso, a luz intensa emitida durante a colisão foi observada por vários telescópios.

Os cientistas conseguiram determinar as massas das duas estrelas e mostrar que esse tipo de evento pode ser a origem de poderosas explosões curtas de raios gama.



Isolated Neutron Star RX J185635-3754
Hubble Space Telescope • WFPC2

PRC97-32 • ST Scl OPO • September 24, 1997
F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

Esta imagem mostra como aparece uma estrela de nêutrons próxima quando vista da Terra, na luz visível.

Quiz

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

Respostas: a c a b

O Universo no meu bolso nº 31

Este livrinho foi escrito em 2024 por Paweł Haensel, Leszek J. Zdunik do Nicolaus Copernicus Astronomical Center (Polônia) e Michał Bejger do INFN Ferrara (Itália) e do Nicolaus Copernicus Astronomical Center (Polônia). 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.



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