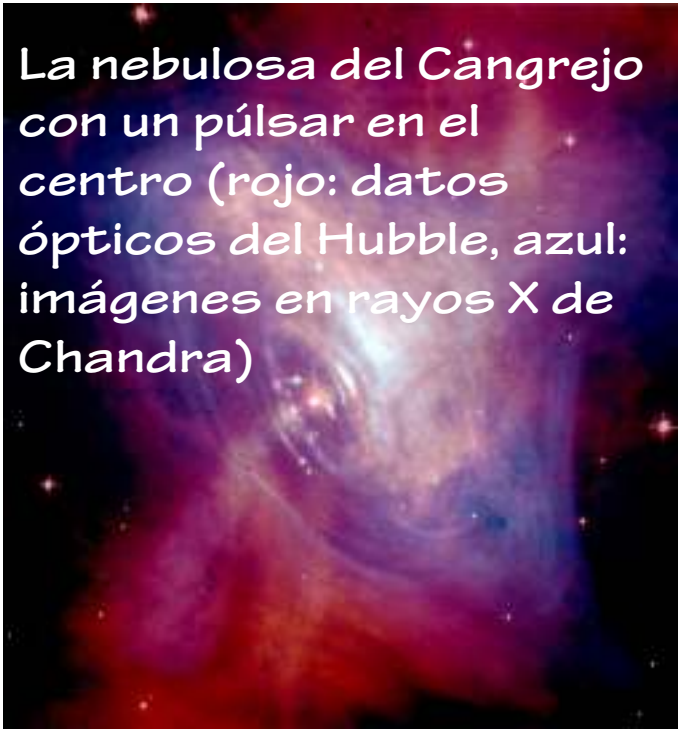
El Universo en mi bolsillo

Estrellas de neutrones

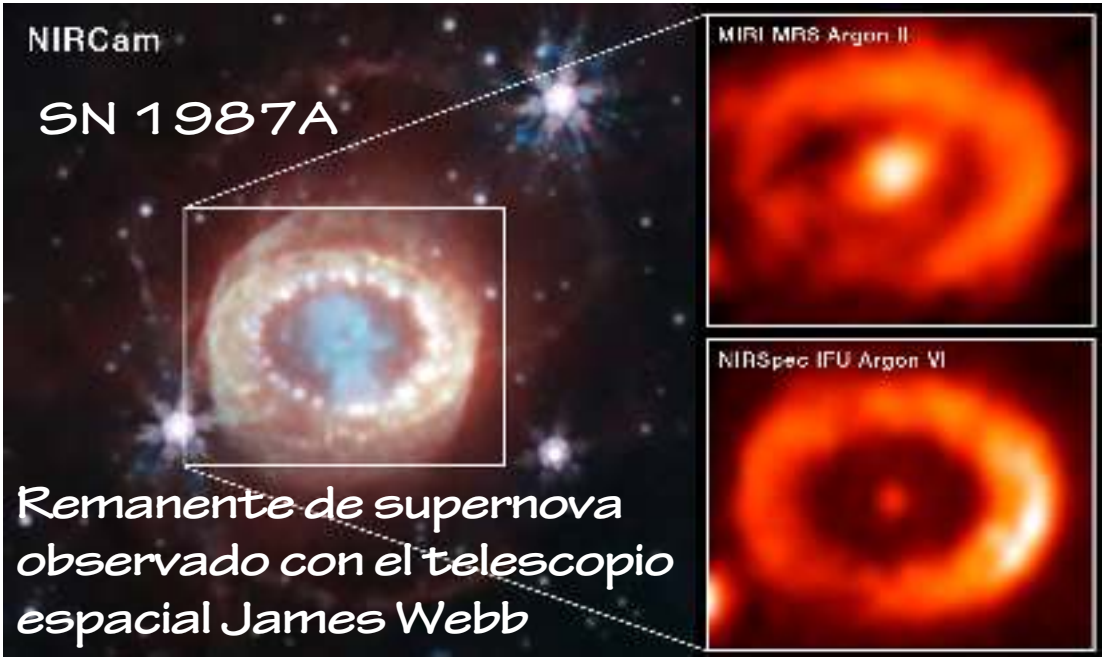
TUIMP
Nº 31
THE UNIVERSE IN MY POCKET

Paweł Haensel
Leszek J. Zdunik
Michał Bejger
CAMK, Polonia



La nebulosa del Cangrejo con un púlsar en el centro (rojo: datos ópticos del Hubble, azul: imágenes en rayos X de Chandra)

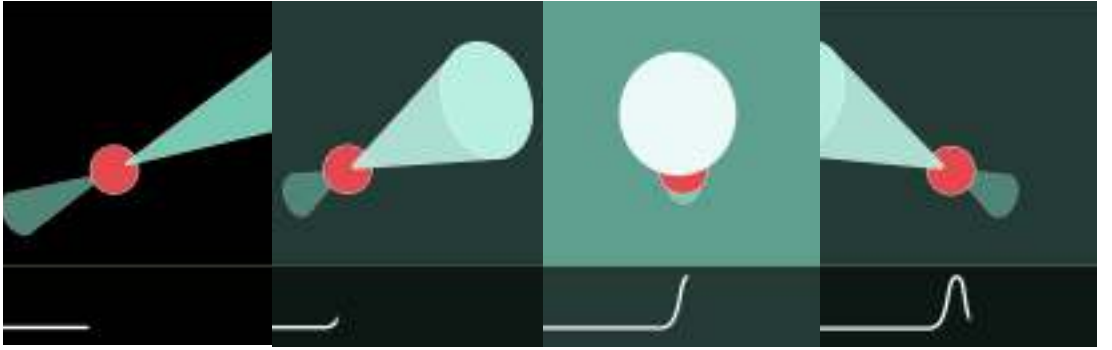
Imágenes de remanentes de supernova con estrellas de neutrones en el centro. La nebulosa del Cangrejo abarca cien billones de km. La estrella de neutrones tiene un diámetro de tan solo 20 km.



Remanente de supernova observado con el telescopio espacial James Webb

¿Qué es una estrella de neutrones?

Una estrella de neutrones es un remanente estelar: el final de una estrella masiva que, al principio de su vida, tenía una masa superior a unas 8 masas solares e inferior a 25 masas solares. Al final de su vida, una estrella masiva explota como supernova, pero su parte interna colapsa tras dejar de producir energía. Como resultado, el núcleo de la estrella se comprime hasta alcanzar densidades superiores a la de los núcleos atómicos. Las estrellas de neutrones son los segundos objetos más densos que conocemos, tan compactos que la relación entre su masa M y su radio R sólo es superada por los agujeros negros. Las estrellas de neutrones tienen un radio de unos 10 km y una masa entre 1 y 2 masas solares. En comparación, un agujero negro de 1 masa solar tiene un radio de unos 3 km. Sólo eran un concepto teórico hasta su descubrimiento en 1967.



La mayoría de las estrellas de neutrones conocidas son púlsares de radio que giran alrededor de sus ejes. El haz que emiten puede detectarse con antenas de radio cuando apunta hacia la Tierra.

Jocelyn Bell en 1968

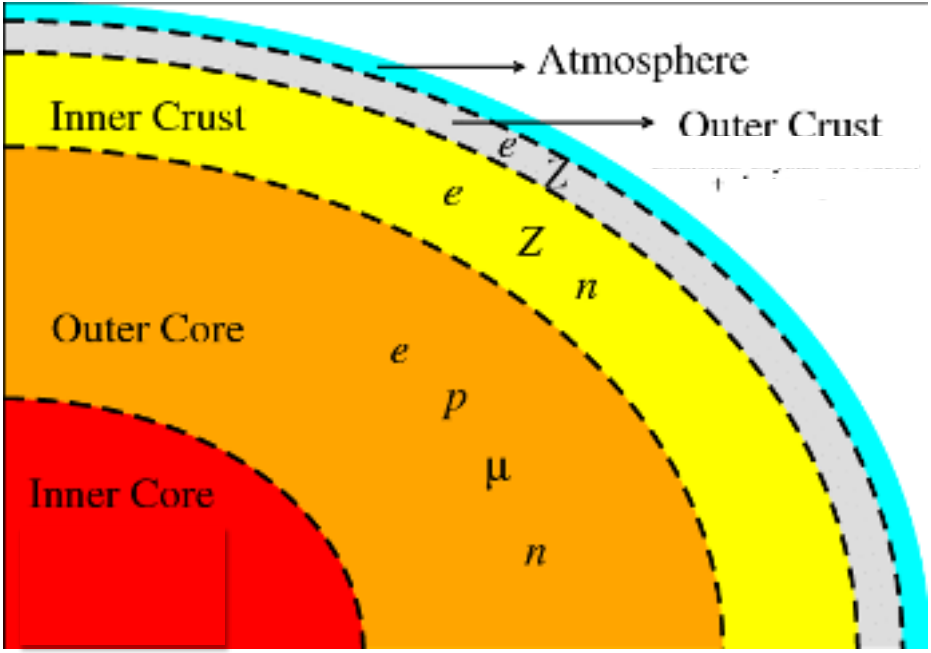
Jocelyn Bell, alumna de Antony Hewish en Cambridge (Inglaterra), descubrió estos objetos en 1967. En un principio se pensó que la emisión se debía a pulsaciones en estrellas compactas. En 1974, Hewish recibió el Premio Nobel por este descubrimiento.

¿Cómo pueden observarse?

Teniendo en cuenta el número de estrellas que explotan como supernovas, debería haber unos mil millones de estrellas de neutrones en la Vía Láctea. Sin embargo, los astrónomos sólo observan directamente unas 3000 en nuestra galaxia.

En la mayoría de las estrellas de neutrones, el campo magnético de sus polos crea un haz de emisión de radio. Este campo magnético es extremo: 10^{15} veces más intenso que el de la Tierra. Cuando la estrella de neutrones gira, detectamos señales de radio en forma de pulsos si el haz llega a apuntar en nuestra dirección.

Poco después de su descubrimiento, las propiedades de estos objetos (denominados púlsares) se explicaron por este efecto faro. Sólo las estrellas de neutrones -entonces un mero concepto teórico- presentaban propiedades capaces de explicar las observaciones.

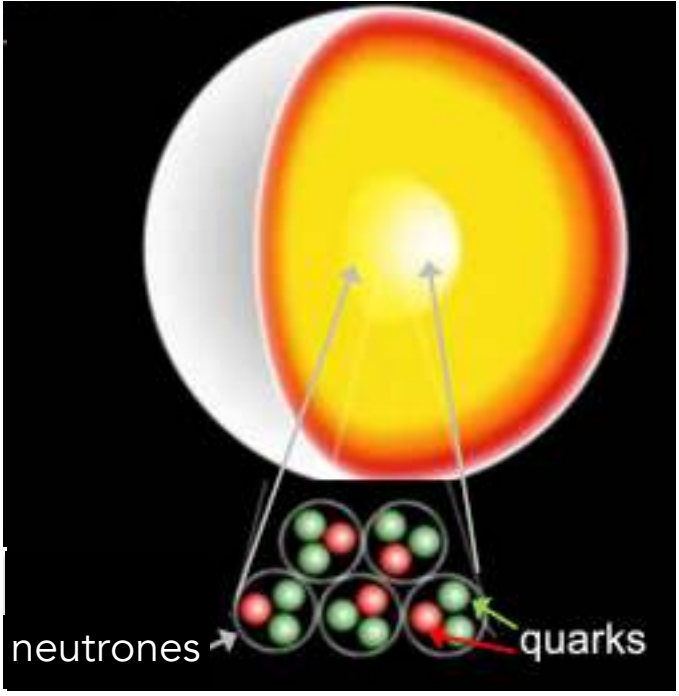


Supuesta estructura de una estrella de neutrones de 1,4 masas solares, adaptada de Jorge Piekarewicz. Los distintos componentes son:

- La atmósfera gaseosa (de unos pocos cm de espesor).
- El "océano" líquido (10 m de profundidad).
- La corteza sólida (1 km de espesor) está formada por una corteza externa (núcleos que forman un cristal inmerso en un gas de electrones) y una corteza interna (cristal nuclear inmerso en un gas de electrones y neutrones).
- El núcleo líquido. Su capa externa (de unos 7 km de espesor) está formada por neutrones, protones, electrones y muones.
- El núcleo interno, de unos 4 km de radio, es un misterio y puede contener partículas exóticas.

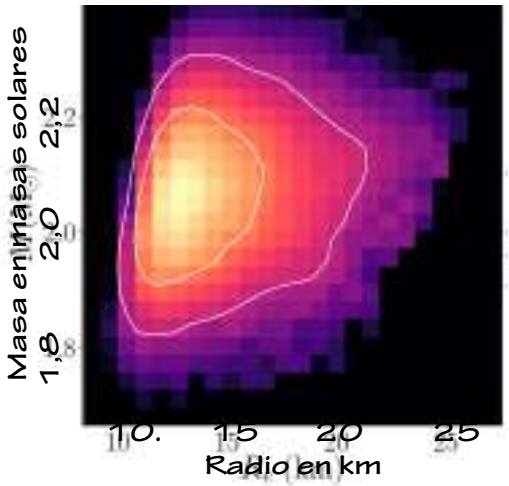
La estructura interna de una estrella de neutrones tiene capas como una cebolla. La corteza sólida contiene sólo el 1% de la masa de la estrella, mientras que alrededor del 99% de la masa se encuentra en el núcleo líquido y en el muy misterioso núcleo interno. La densidad aumenta con la profundidad, desde 10 g/cm^3 en la atmósfera gaseosa (con una temperatura típica de 1-2 millones de K) hasta más de 100 000 000 000 kg/cm^3 en su centro, unas 4-6 veces más denso que los núcleos atómicos. En la Tierra, una cucharadita de material de estrella de neutrones ¡pesaría tanto como toda la humanidad!

Sus interiores no sólo son calientes y densos, sino también muy magnetizados, superfluidos y superconductores. Observándolas, podemos conocer sus características internas, y así utilizarlas como laboratorios cósmicos extremos.



Las propiedades de la materia densa están codificadas en la ecuación de estado que se determina con la relación masa a radio de estas estrellas. (Figura de CXC/M. Weiss).

La masa y el radio de las estrellas de neutrones pueden estimarse observando púlsares en sistemas binarios.
La figura de abajo muestra la relación entre la masa y el radio de la estrella de neutrones PSR J0740+6620 obtenida con observaciones. La zona más clara corresponde a los valores más probables: 2,08 masas solares y 12,35 km (Miller et al. 2021).



La ecuación de estado

Sólo la parte más externa de una estrella de neutrones (correspondiente al 0,01 por ciento de su masa) puede estudiarse usando experimentos con núcleos atómicos en la Tierra. La mayoría de los núcleos presentes en la corteza y en el interior de la estrella de neutrones sólo pueden estudiarse teóricamente.

Dentro de las estrellas de neutrones, la presión debe aumentar lo suficientemente rápido con la densidad para soportar la masa de la estrella de neutrones. Partiendo de esta condición, los físicos teóricos estiman la relación entre la densidad y la presión. Con esta ecuación de estado, pueden deducir la relación entre la masa y el radio de una estrella de neutrones y compararla con las observaciones. Mediante aproximaciones sucesivas pueden determinar la ecuación de estado real de la materia densa, desvelando así las propiedades del estado más extremo de la materia conocido hoy en día.

Esta es la pantalla del primer reloj púlsar del mundo, que se instaló en el Museo de Relojes de Torre de Gdańsk (Polonia) en 2011.

Este reloj único utiliza los pulsos de los púlsares como base para medir el tiempo.

Consiste en un radiotelescopio con 16 antenas que reciben señales de seis púlsares.

Los pulsos de las estrellas de neutrones se producen en una amplia gama de periodos: desde 1,4 milisegundos hasta cerca de 1 minuto.

Lo sorprendente es la notable regularidad de estos pulsos: el reloj de un púlsar típico se ralentiza un segundo cada millón de años.

Como los púlsares son relojes muy precisos, permiten medir incluso desviaciones muy pequeñas de la teoría aceptada que describe el movimiento de las estrellas en un campo gravitatorio. Esto permite poner a prueba la teoría de la gravedad. Resulta que la Teoría General de la Relatividad, formulada por Einstein en 1915, ¡supera perfectamente esta prueba!

Representación artística de la fusión de dos estrellas de neutrones. Los haces estrechos son los estallidos de rayos gamma. También se muestran las nubes arremolinadas del material expulsado por las estrellas en fusión. Estas nubes emiten en luz visible además de en otras longitudes de onda.

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

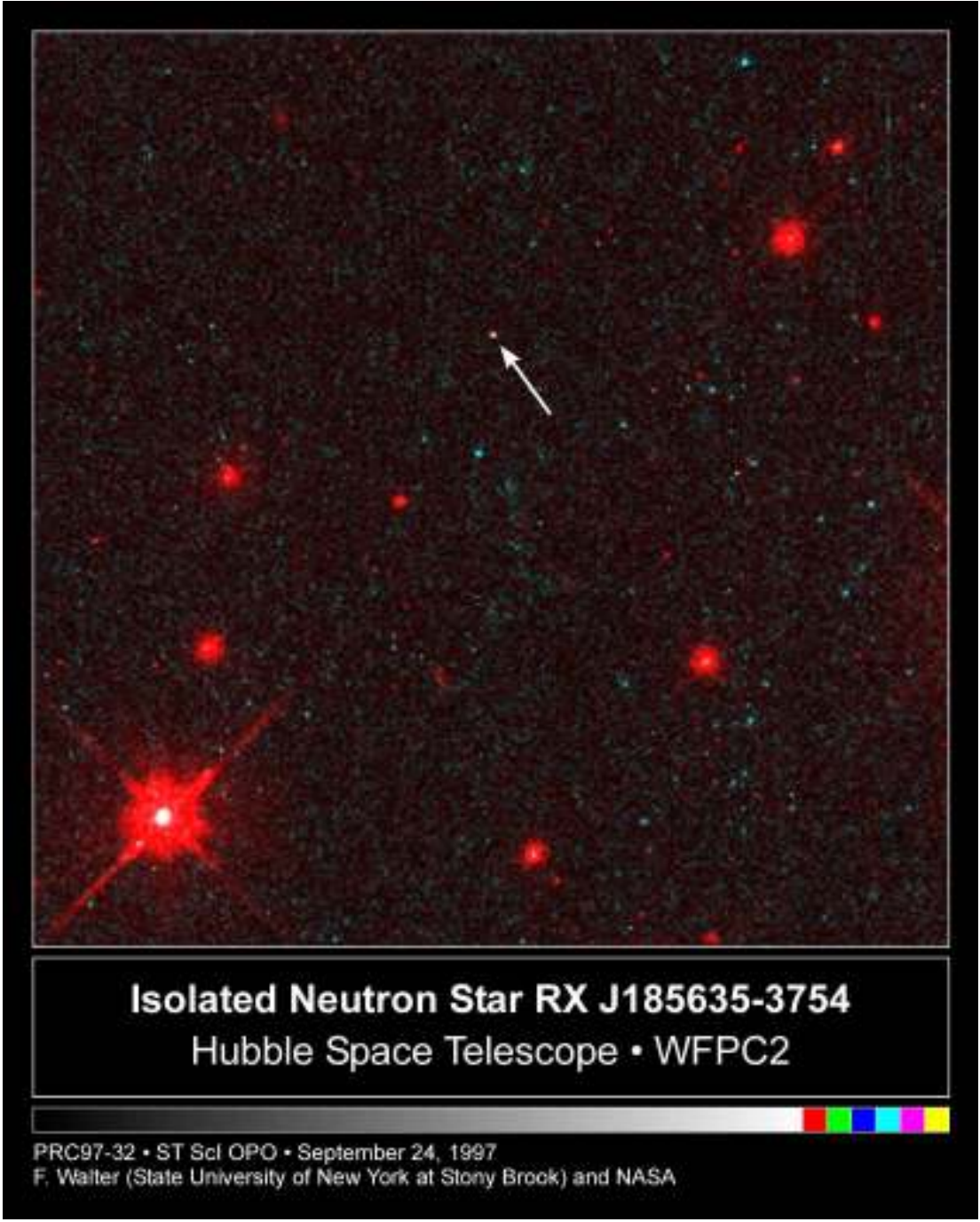
Ondas gravitacionales y estallidos de rayos gamma

Las estrellas de neutrones también pueden ser fuentes de ondas gravitacionales, distorsiones del espacio-tiempo que viajan a la velocidad de la luz (véase TUIMP 18).

El 17 de agosto de 2017, las ondas emitidas por dos estrellas de neutrones en colisión fueron registradas por los detectores de ondas gravitacionales LIGO y Virgo.

Además, varios telescopios observaron la intensa luz emitida durante la colisión.

Los científicos pudieron determinar las masas de las dos estrellas y demostrar que este tipo de evento podría ser el origen de potentes estallidos cortos de rayos gamma.



Esta imagen muestra cómo se ve en luz visible una estrella de neutrones cercana a la Tierra.

Cuestionario

1. Las estrellas de neutrones son:
   a. núcleos colapsados de estrellas masivas
   b. un tipo de agujeros negros
   c. remanentes de galaxias

2. ¿Cuál es la masa típica de una estrella de neutrones?
   a. entre 8 y 25 masas solares
   b. más de 100 millones de masas solares
   c. entre 1 y 2 masas solares

3. Se observan estrellas de neutrones
   a. en todas las longitudes de onda electromagnéticas
   b. sólo en rayos X y luz visible
   c. sólo en rayos gamma
   d. sólo en radio

4. La temperatura superficial de las estrellas de neutrones es típicamente
   a. superior a 100 millones de grados
   b. algunos millones de grados
   c. similar a la del Sol

Respuestas: a c a b

El Universo en mi bolsillo nº 31

Este librito fue escrito en 2024 por Paweł Haensel y Leszek J. Zdunik, del Centro Astronómico Nicolás Copérnico (Polonia), y Michał Bejger del INFN Ferrara (Italia) y del Centro Astronómico Nicolás Copérnico (Polonia). Fue revisado por Stan Kurtz (UNAM, México) y Grażyna Stasińska (Observatorio de París).

Imagen de portada: Visión artística de una estrella de neutrones. Crédito: Casey Reed, Universidad Estatal de Pensilvania.

Para obtener más información sobre esta serie y sobre los temas presentados en este folleto, visite http://www.tuimp.org.

Traducción: Mónica Rodríguez

TUIMP Creative Commons

CC BY NC SA