

L'Univers dans ma poche



Les étoiles à neutrons



Paweł Haensel
Leszek J. Zdunik
Michał Bejger
CAMK, Pologne

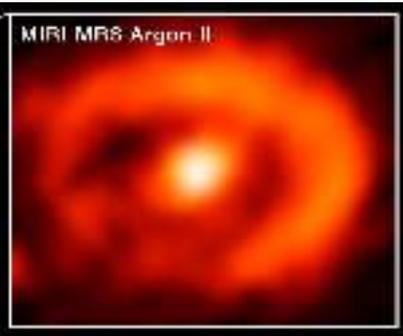
La nébuleuse du Crabe avec un pulsar en son centre (en rouge : données optiques de Hubble ; en bleu : Image en rayons X de Chandra)



Images de restes de supernova ayant une étoile à neutrons en leur centre.

La nébuleuse du Crabe a un diamètre d'environ cent mille milliards de km. Le diamètre de l'étoile à neutrons n'est que de 20 km environ.

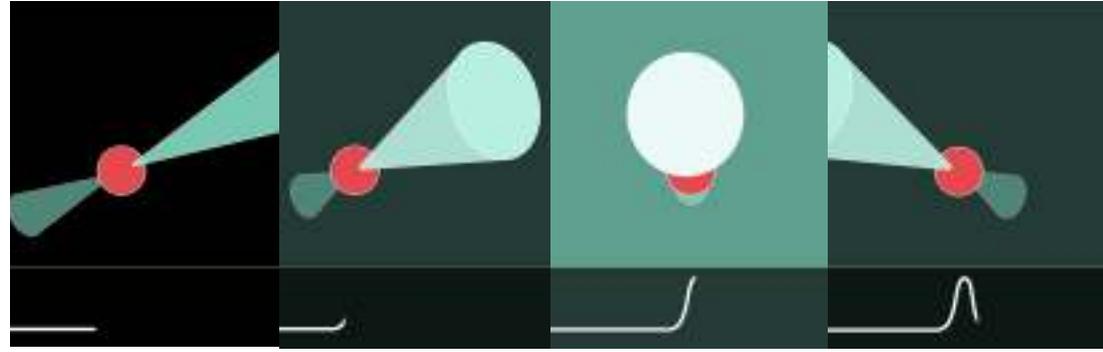
NIRCam
SN 1987A



Reste de supernova observé par le
Télescope Spatial James Webb

Que sont les étoiles à neutrons ?

Une étoile à neutrons est un vestige stellaire : la fin d'une étoile massive dont la masse à la naissance était de 8 à 25 masses solaires. À la fin de sa vie, une étoile massive explose en supernova et la matière restante s'effondre puisqu'il n'y a plus de production d'énergie. Le noyau de l'étoile est alors comprimé à des densités supérieures à celles des noyaux atomiques. Les étoiles à neutrons sont les deuxièmes objets les plus denses actuellement connus. Leur compacité (le rapport entre la masse et le rayon) n'est surpassée que par les trous noirs. Les étoiles à neutrons ont un rayon d'environ 10 kilomètres et une masse entre 1 et 2 masses solaires. À titre de comparaison, un trou noir de 1 masse solaire a un rayon d'environ 3 km. Ces objets n'étaient que des concepts théoriques jusqu'à leur découverte en 1967.



La majorité des étoiles à neutrons connues sont des pulsars radio qui tournent autour de leur axe. Le faisceau qu'ils émettent est détecté par les antennes radio lorsque le faisceau est dirigé vers la Terre.



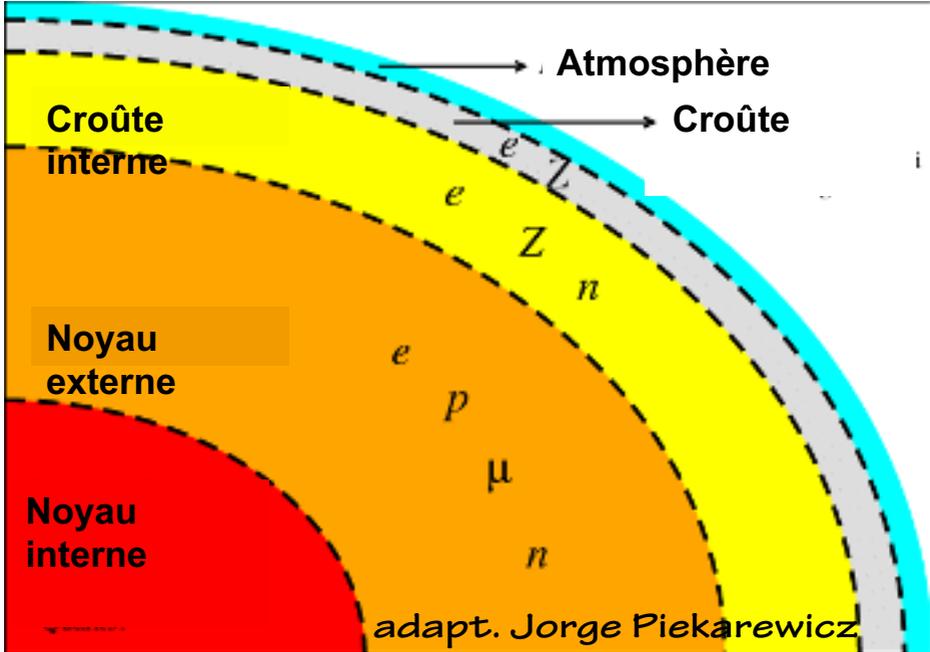
Jocelyn Bell, une étudiante d'Antony Hewish à Cambridge (Angleterre) a découvert ces objets en 1967. Cette découverte a d'abord été comprise comme étant due à des pulsations d'étoiles compactes. En 1974, le prix Nobel fut décerné à Hewish pour cette découverte.

Comment on les observe

Si on considère le nombre d'étoiles qui explosent en supernovae, il devrait y avoir environ un milliard d'étoiles à neutrons dans la Voie lactée. Or les astronomes n'en observent directement qu'environ 3000.

Dans la plupart des étoiles à neutrons, un faisceau d'émission radio est créé par un champ magnétique aux pôles. C'est un champ magnétique extrême : 10^{15} fois plus puissant que le champ magnétique terrestre. Lorsque l'étoile à neutrons tourne sur elle-même, un signal radio peut être détecté lorsque le faisceau est dirigé vers la Terre, imitant ainsi des pulsations.

Peu après leur découverte, les propriétés de ces objets (nommés pulsars) furent expliquées par cet effet de phare. Seules les étoiles à neutrons, qui n'étaient alors qu'un concept, présentaient des propriétés pouvant expliquer ces observations. 5



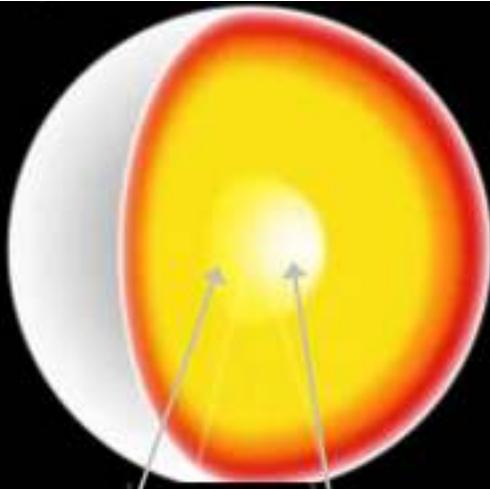
Structure d'une étoile à neutrons de 1,4 masse solaires. Les composantes sont :

- L'**atmosphère gazeuse** (épaisseur 2-3 cm).
- L'**océan liquide** (10 m de profondeur).
- La **croûte solide** (1 km d'épaisseur) qui se compose d'une croûte externe (noyaux formant un cristal noyé dans un gaz d'électrons) et d'une croûte interne (cristal nucléaire noyé dans un gaz d'électrons et de neutrons).
- Le **noyau liquide** dont l'**enveloppe extérieure** (d'une épaisseur d'environ 7 km) est constituée de neutrons, de protons, d'électrons et de muons. Le **noyau interne** d'environ 4 km de rayon est un mystère et pourrait contenir des particules exotiques.

L'intérieur d'une étoile à neutrons

La structure interne d'une étoile à neutrons ressemble à celle d'un oignon. La croûte solide ne contient que 1 % de la masse de l'étoile, tandis que les 99 % restants sont contenus dans le noyau liquide et le très mystérieux noyau interne. La densité augmente avec la profondeur, depuis 10 g/cm^3 dans l'atmosphère gazeuse (dont la température est de 1 à 2 millions de degrés) jusqu'à cent milliards de kilos $/\text{cm}^3$ en son centre, soit 4 à 6 fois plus qu'un noyau atomique. Une cuillère à café de matière d'étoile à neutrons sur Terre pèserait autant que l'ensemble de la population humaine !

L'intérieur des étoiles à neutrons est non seulement chaud et dense, mais aussi très magnétisé, superfluide et supraconducteur. En étudiant ces objets on peut les utiliser comme des laboratoires cosmiques de l'extrême.



neutrons

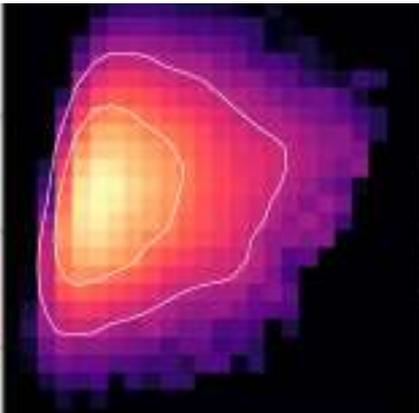
quarks

Les propriétés de la matière dense sont codées dans l'équation d'état qui peut être déterminée en étudiant la relation masse-rayon des étoiles à neutrons.
(Figure d'après CXC/M. Weiss).

La masse et le rayon des étoiles à neutrons peuvent être estimés à partir des observations de pulsars dans des systèmes binaires.

La figure ci-dessous montre la relation entre la masse et le rayon de l'étoile à neutrons

Masse en masses solaires
1.8 2.0 2.2



10 15 20 25
Rayon en km

PSR J0740+6620 obtenue à partir des observations. La zone la plus claire correspond aux valeurs les plus probables : 2,08 masses solaires et 12,35 km.

(Miller et al. 2021)

L'équation d'état

Seule la partie la plus externe d'une étoile à neutrons (correspondant à un dix-millième de sa masse) peut être décrite à l'aide d'expériences réalisées sur Terre. La plupart des noyaux présents dans la croûte et le noyau de l'étoile à neutrons ne peuvent être étudiés que grâce à la théorie.

Au sein d'une étoile à neutrons, la pression doit augmenter suffisamment vite avec la densité pour supporter la masse de l'étoile. C'est ainsi que les physiciens estiment la relation entre la densité et la pression. Cette « équation d'état » leur permet de déduire la relation entre la masse et le rayon d'une étoile à neutrons et de la comparer aux observations. Par approximations successives, ils peuvent déterminer l'équation d'état réelle de la matière dense, dévoilant ainsi les propriétés de l'état le plus extrême de la matière connu à ce jour.



Pulsar Time

12:34:58,985

Voici l'écran de la première horloge de pulsar au monde, qui a été installée en 2011 dans le musée de l'horloge à Gdańsk, en Pologne.

Cette horloge particulière utilise les impulsions des pulsars comme base pour mesurer le temps.



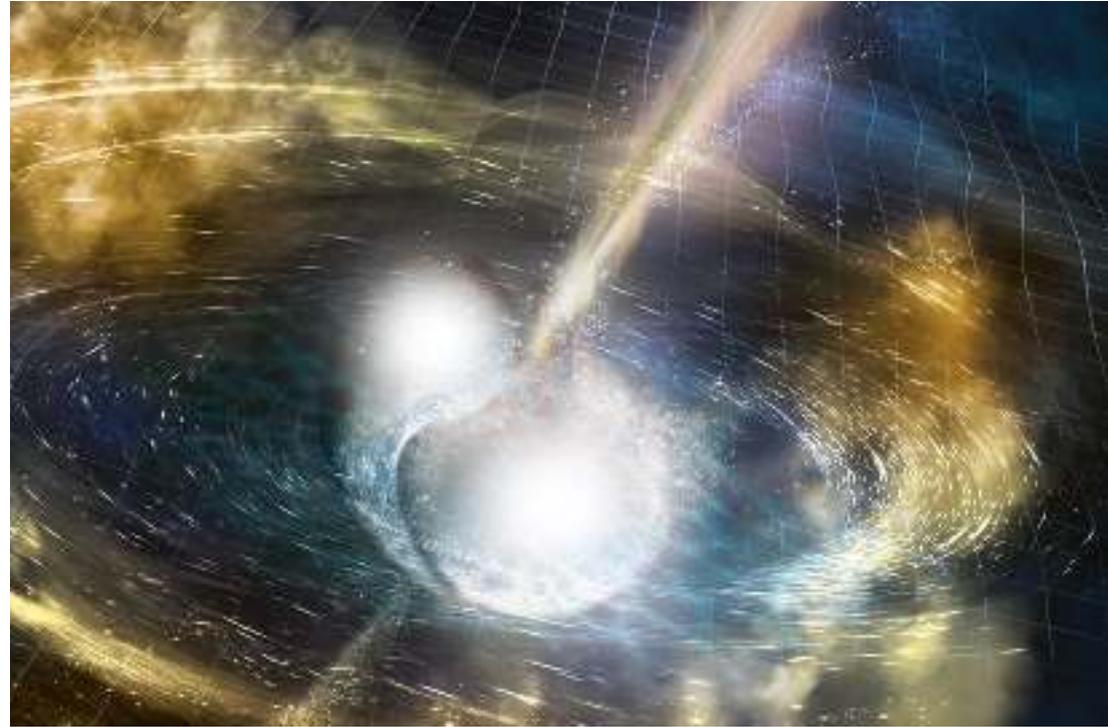
Elle se compose d'un radio-télescope doté de 16 antennes qui reçoivent les signaux de six pulsars.

Les pulsations des étoiles à neutrons se produisent dans une large gamme de périodes : de 1,4 millisecondes à environ 1 minute.

Ce qui est surprenant, c'est la remarquable régularité de ces pulsations : une « horloge » de pulsar typique ralentit d'une seconde tous les millions d'années.

Les pulsars étant des horloges très précises ils permettent de mesurer de tout petits écarts par rapport à la théorie décrivant le mouvement des étoiles dans un champ gravitationnel.

On peut ainsi tester la théorie de la gravitation. Il s'avère que la théorie de la relativité générale, formulée par Einstein en 1915, passe ce test parfaitement !



Représentation artistique de deux étoiles à neutrons en train de fusionner. Les faisceaux étroits sont les sursauts de rayons gamma. Les nuages tourbillonnants de matière éjectée par les étoiles qui fusionnent sont également représentés. Ces nuages émettent de la lumière visible ainsi qu'à d'autres longueurs d'onde.

Crédits :

Image : Fondation nationale des sciences/LIGO/Université d'État de Sonoma/A. Simonnet

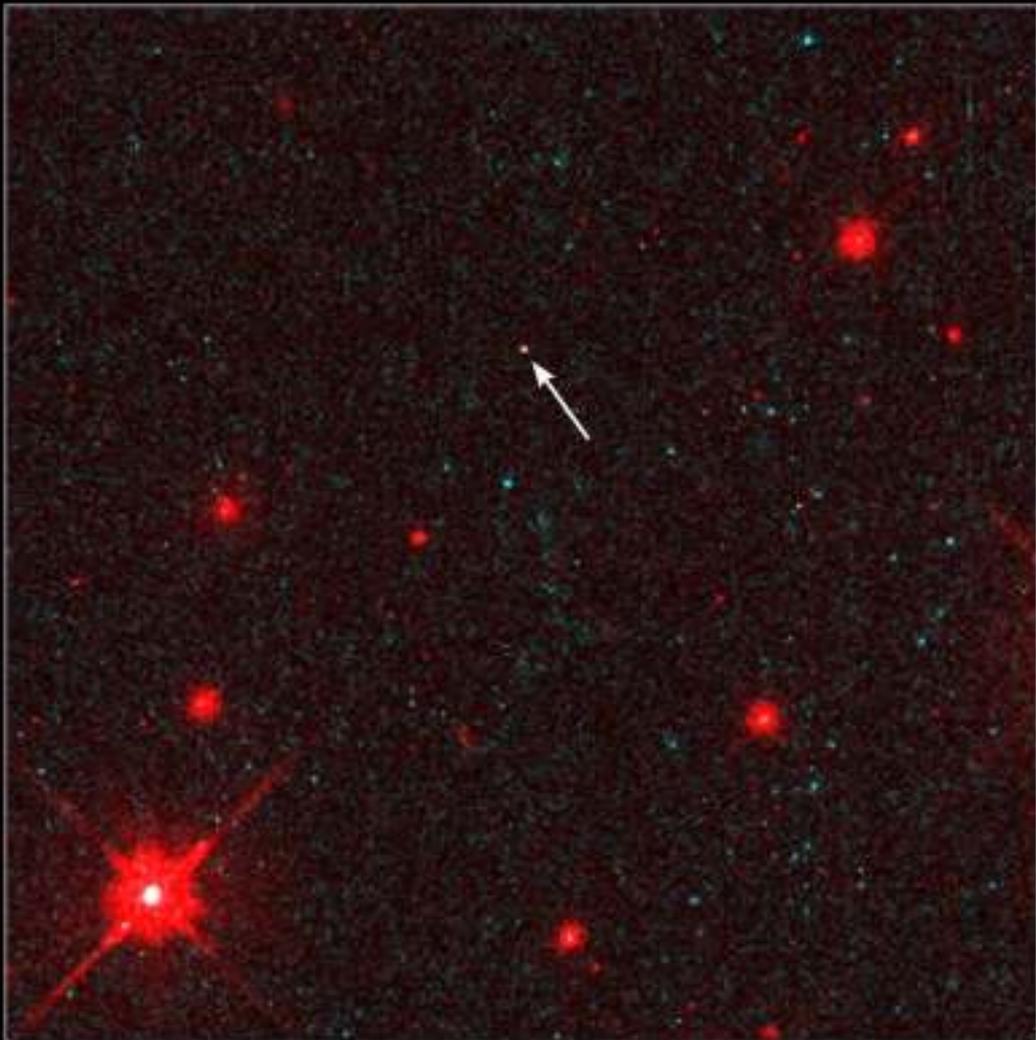
Ondes gravitationnelles et sursauts gamma

Les étoiles à neutrons peuvent également être sources d'ondes gravitationnelles - des distorsions de l'espace-temps qui se déplacent à la vitesse de la lumière (voir TUIMP 18).

Le 17 août 2017, des ondes émises par deux étoiles à neutrons en collision ont été enregistrées par les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et Virgo.

En outre, une lumière intense émise lors de la collision a été observée par divers télescopes.

Les scientifiques ont pu déterminer les masses des deux étoiles et montrer que ce type d'événement pourrait être à l'origine de puissants sursauts gamma courts.



L'étoile à neutrons isolée RX J185635-3754
Hubble Space Telescope • WFPC2

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

*Cette image montre
une étoile à neutrons vue
depuis la Terre en lumière visible.*

Quiz

1. Les étoiles à neutrons sont :
 - a. des noyaux effondrés d'étoiles massives
 - b. une sorte de trou noir
 - c. des restes de galaxies
2. Quelle est la masse typique d'une étoile à neutrons ?
 - a. entre 8 et 25 masses solaires
 - b. plus de 100 millions de masses solaires
 - c. entre 1 et 2 masses solaires
3. Les étoiles à neutrons sont observées
 - a. dans toutes les longueurs d'onde électromagnétiques
 - b. seulement dans les rayons X et la lumière visible
 - c. uniquement dans les rayons gamma
 - d. seulement en radio
4. La température de surface des étoiles à neutrons est généralement
 - a. plus de 100 millions de degrés
 - b. quelques millions de degrés
 - c. similaire à celle du Soleil

Réponses : a c a b

L'Univers dans ma poche n° 31

Ce mini-livre a été écrit en 2024 par Paweł Haensel, Leszek J. Zdunik du Centre astronomique Nicolaus Copernicus (Pologne) et Michał Bejger de l'INFN de Ferrare (Italie) et du Centre astronomique Nicolaus Copernicus (Pologne). Il a été révisé par Stan Kurtz (UNAM, Mexique) et Grażyna Stasińska (Observatoire de Paris).

Image de couverture : Vue d'artiste d'une étoile à neutrons. Crédit : Casey Reed, Université de l'État de Pennsylvanie.



Pour en savoir plus sur cette série et sur les sujets présentés dans ce livret, tu peux consulter le site

<http://www.tuimp.org>.

Traduction : Grażyna Stasińska
TUIMP Creative Commons

