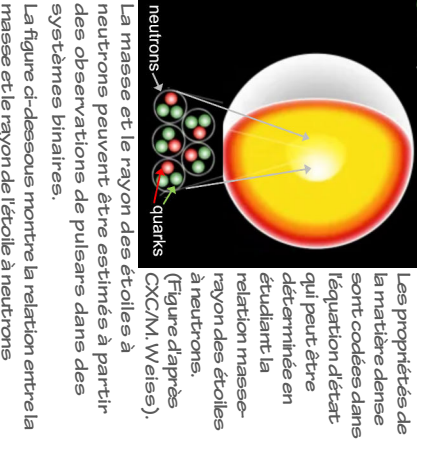


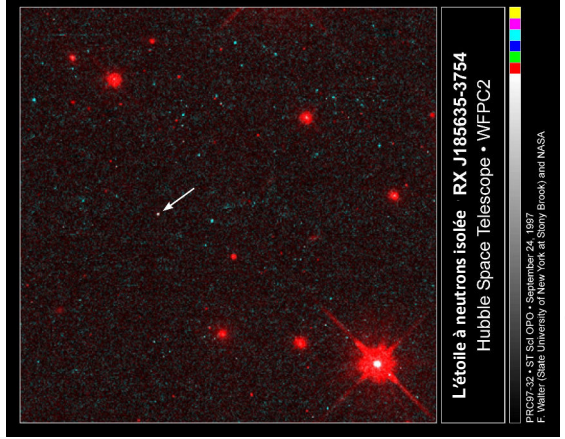
La figure ci-dessous montre la relation entre la masse et le rayon de l'étoile à neutrons obtenue à partir des observations. La zone la plus claire correspond aux valeurs les plus probables : 2,08 masses solaires et 12,35 km. (Miller et al. 2021)



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 dévolant ainsi les propriétés de l'état le plus extrême de la matière connu à ce jour.

L'équation d'état



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

L'Univers dans ma poche

Les étoiles à neutrons

TUIMP
N° 51
THE UNIVERSE IN MY POCKET

Pawel Haensel
Leszek J. Zdunik
Michal Bejger
CAMK, Pologne

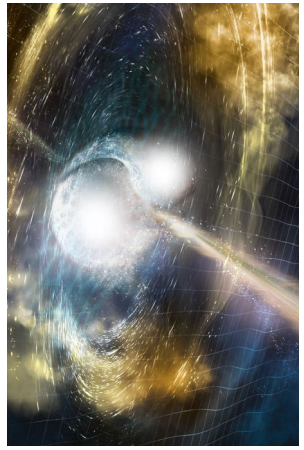
Ondes gravitationnelles et sursauts gamma

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.



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.

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

Comment on les observe

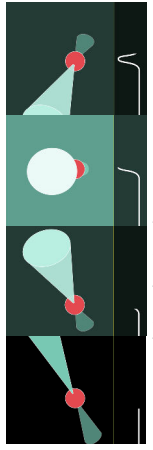
Si on considère le nombre d'étoiles qui explosent en supernovae, il devrait y avoir environ un milliard d'étoiles à neutrons dans la Voie lactée. Or les astronomes n'en observent directement qu'environ 3000.

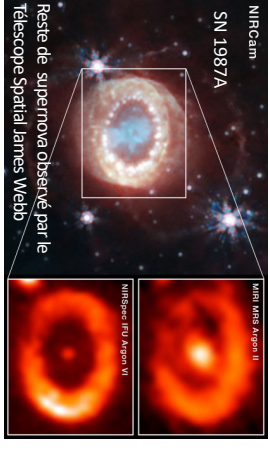
Dans la plupart des étoiles à neutrons, un faisceau d'émission radio est créé par un champ magnétique aux pôles. C'est un champ magnétique extrême : 10¹⁵ fois plus puissant que le champ magnétique terrestre. Lorsque l'étoile à neutrons tourne sur elle-même, un signal radio peut être détecté lorsque le faisceau est dirigé vers la Terre, imitant ainsi des pulsations.

Pu 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.



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.





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 supernovae 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.

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

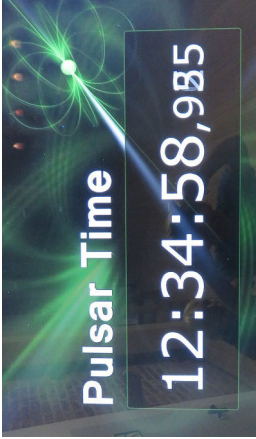
à c a r : sespondés

Quiz

L'intérieur d'une étoile à neutrons

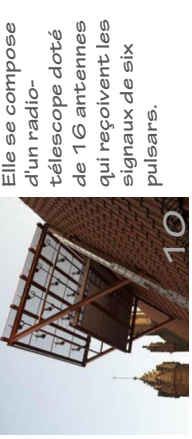
La structure interne d'une étoile à neutrons ressemble à celle d'un oignon. La croûte solide ne contient que 1 % de la masse de l'étoile, tandis que les 99 % restantes sont contenus dans le noyau liquide et le très mystérieux noyau interne. La densité augmente avec la profondeur, depuis 10 g/cm³ dans l'atmosphère gazeuse (dont la température est de 1 à 2 millions de degrés) jusqu'à cent milliards de kilos/cm³ 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 peserait 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.



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.



Traduction: Grażyna Staśińska
TUIMP Creative Commons

Pour en savoir plus sur cette série et sur les sujets présentés dans ce livret, tu peux consulter le site <http://www.tuimp.org>.

L'univers dans ma poche n° 31

Ce mini-livre a été écrit en 2024 par Paweł Haenseł, Leszek J. Zdunik du Centre astronomique Nicolaus Copernicus (Pologne) et Michal 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 Staśińska (Observatoire de Paris).

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

Etoiles à neutrons et horloges

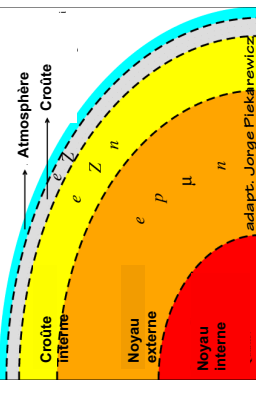
Les pulsations des étoiles à neutrons se produisent dans une large gamme de périodes : de 1,4 à 1,4 millisecondes à environ 1 minute. Ce qui est surprenant, c'est la remarquable régularité de ces pulsations : une « horloge » de pulsar typique ralentit d'une seconde tous les millions d'années.

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 !

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. A 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 compacté (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.



Structure d'une étoile à neutrons de 1,4 masse solaire. 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.