

QUAND DEUX ÉTOILES À NEUTRONS SE RENCONTRENT ...

LA DÉTECTION EN ONDES GRAVITATIONNELLES

Micaela Oertel

micaela.oertel@obspm.fr

Laboratoire Univers et Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris/ Université Paris Diderot

16 décembre 2019



① LES ONDES GRAVITATIONNELLES ET LEUR DÉTECTION

1 LES ONDES GRAVITATIONNELLES ET LEUR DÉTECTION

2 DES ÉTOILES AUX ÉTOILES À NEUTRONS

- 1 LES ONDES GRAVITATIONNELLES ET LEUR DÉTECTION
- 2 DES ÉTOILES AUX ÉTOILES À NEUTRONS
- 3 LA COALESCENCE DE DEUX ÉTOILES À NEUTRONS

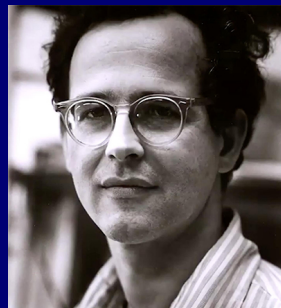
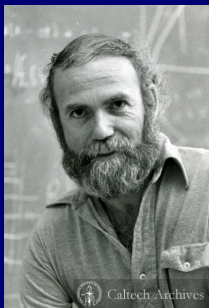
- 1 LES ONDES GRAVITATIONNELLES ET LEUR DÉTECTION
- 2 DES ÉTOILES AUX ÉTOILES À NEUTRONS
- 3 LA COALESCENCE DE DEUX ÉTOILES À NEUTRONS
- 4 LE MÉTIER DE (ENSEIGNANT-)CHERCHEUR

Les ondes gravitationnelles, des messagers de l'espace-temps !

PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2017

BARRY C. BARISH KIP S. THORNE

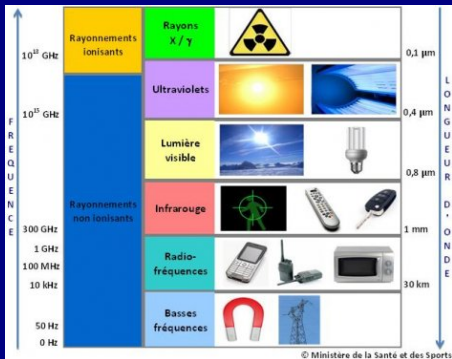
RAINER WEISS



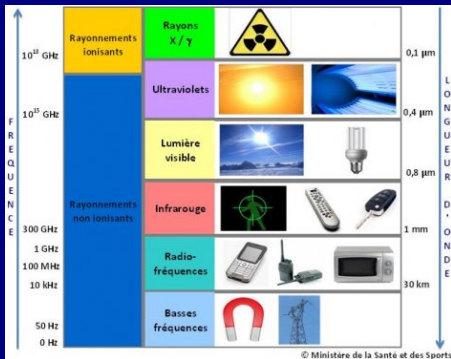
« ...pour leurs contributions décisives au détecteur LIGO et à l'observation des ondes gravitationnelles. »

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Elles sont produites par accélération d'une charge électrique.



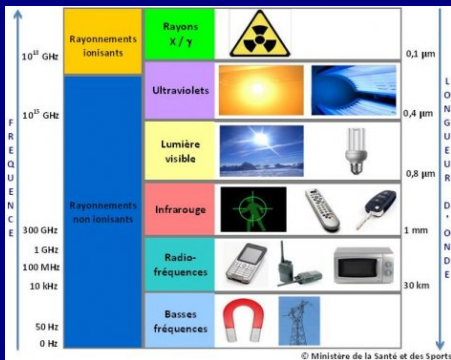
LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES



Elles sont produites par accélération d'une charge électrique.

Elles sont la manifestation de la **propagation** de la force électromagnétique.

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES



Elles sont produites par accélération d'une charge électrique.

Elles sont la manifestation de la **propagation** de la force électromagnétique.

Elles se propagent à la vitesse de la lumière dans le vide c .

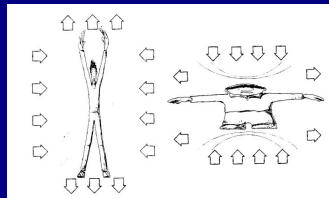
ONDES GRAVITATIONNELLES

- Masses \rightarrow courbure de l'espace-temps.
- Masses accélérées \rightarrow propagation de la courbure (vagues à la surface de l'eau) : **ondes gravitationnelles**.

ONDES GRAVITATIONNELLES

- Masses \rightarrow courbure de l'espace-temps.
- Masses accélérées \rightarrow propagation de la courbure (vagues à la surface de l'eau) : **ondes gravitationnelles**.

Passage d'une onde :
l'espace-temps est légèrement
modifié, les **distances** changent
pendant un bref moment



Les amplitudes sont **énormément** grossies...

Après le passage de l'onde, tout redevient « comme avant », comme au passage d'une vague unique au milieu de l'eau.

ONDES GRAVITATIONNELLES

ORDRES DE GRANDEURS

Les variations relatives de distance sont mesurées par l'amplitude de l'onde $h = \Delta\ell/\ell$. La luminosité gravitationnelle :

$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

s : facteur de
« non-sphéricité »

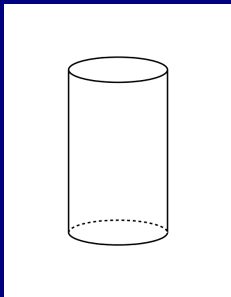
ONDES GRAVITATIONNELLES

ORDRES DE GRANDEURS

Les variations relatives de distance sont mesurées par l'amplitude de l'onde $h = \Delta l/l$. La luminosité gravitationnelle :

$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

s : facteur de
« non-sphéricité »



Soit un cylindre d'acier

- d'un mètre de diamètre et de vingt mètres de long (pèse 490 tonnes),
- qui peut tourner à plus de 260 tours/mn (rupture de l'acier),

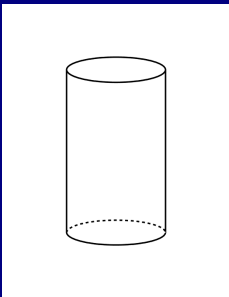
ONDES GRAVITATIONNELLES

ORDRES DE GRANDEURS

Les variations relatives de distance sont mesurées par l'amplitude de l'onde $h = \Delta l/l$. La luminosité gravitationnelle :

$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

s : facteur de
« non-sphéricité »



Soit un cylindre d'acier

- d'un mètre de diamètre et de vingt mètres de long (pèse 490 tonnes),
- qui peut tourner à plus de 260 tours/mn (rupture de l'acier),

→ $L \approx 10^{-28} W$ **aucun** espoir de détection (trop faible).

DES ASTRES BIEN COMPACTS

On parle d'**astres compacts** si la taille est très petite devant la masse

Le champ gravitationnel y est extrêmement intense

Rapport énergie gravitationnelle / énergie de masse à la surface

$$\sim \Xi = \frac{GM}{Rc^2}$$

→ Description de la gravitation en **relativité générale**

Objet		Compacité Ξ
Terre		10^{-10}
Soleil		10^{-6}
Naine blanche		$10^{-4}-10^{-3}$
Étoile à neutrons		~ 0.2
Trou noir		1

[Crédit image trou noir : Alain Riazuelo, IAP, CNRS/UPMC]

ASTRES COMPACTS : DES BONNES SOURCES !

Raison des faibles amplitudes calculées : $G/c^5 \sim 10^{-53} \text{s}^3/\text{kg m}^2$

En introduisant le **paramètre de compacité** Ξ , et en écrivant $\omega = \frac{v}{R}$ on obtient :

$$L \sim \frac{c^5}{G} s^2 \left(\frac{\Xi}{2} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6$$

→ Objets **compacts** en mouvement relativiste et non sphériques

Sources astrophysiques relativistes (étoiles à neutrons, trous noirs) en binaires $\Rightarrow h \sim 10^{-21}$!

...soit la taille d'un atome sur la distance Terre-Soleil...

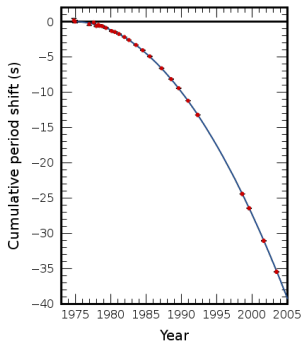
FUSION D'ÉTOILES À NEUTRONS



DES BINAIRES D'ÉTOILES À NEUTRONS



PSR 1913+16



Systèmes extrêmement relativistes !

Observations précises du système permettent de tester la relativité générale

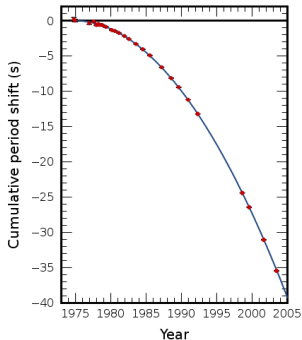
Changement de l'orbite par émission d'ondes gravitationnelles : première évidence (indirect) des ondes gravitationnelles !

→ Prix nobel pour Hulse et Taylor en 1993.

DES BINAIRES D'ÉTOILES À NEUTRONS



PSR 1913+16



Systèmes extrêmement relativistes !

Observations précises du système permettent de tester la relativité générale

Changement de l'orbite par émission d'ondes gravitationnelles : première évidence (**indirect**) des ondes gravitationnelles !

→ Prix nobel pour Hulse et Taylor en 1993.

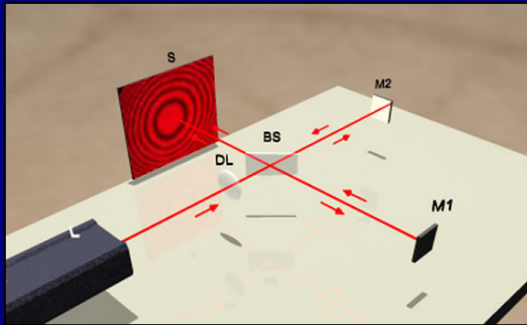
Le 14 septembre 2015, à 10h50min (et 45s) heure française, première détection **directe**



DÉTECTION

PRINCIPE

Le principe est celui d'un *interféromètre de Michelson*



- mesure par LASER des déplacements des deux miroirs, grâce au déplacement des franges d'interférence.
- ...mais les bras font ici entre 300 m et 4 km !
- + problèmes liés aux vibrations de l'écorce terrestre.

DÉTECTEURS

VIRGO ET LIGO

Laser Interferometer
Gravitational-Wave

Observatory :

instrument américain
(USA), dont la première
version a été construite
en 2002.

LIGO : USA, LOUISIANA



LIGO : USA, WASHINGTON



VIRGO : FRANCE/ITALY (PISA)

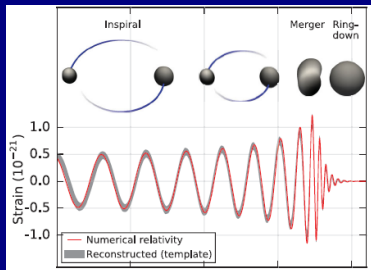


Les bras sont longs de 3 km (VIRGO) et 4 km (LIGO) . . . avec un vide presque parfait.
Virgo : instrument européen (France, Italie, Pays-Bas, Hongrie et Pologne), première version en 2004.

Contrairement aux télescopes optiques,
il ne suffit pas de « regarder pour voir »
→ énorme travail d'analyse des données

PREMIÈRE DÉTECTION : GW150914

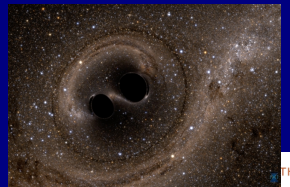
Les détecteurs d'ondes gravitationnelles ont observé les 8 derniers cycles d'une binaire de trous noirs (masses 36 ± 4 et $29 \pm 4 M_{\odot}$, à une distance de plus de 1,2 milliards d'années lumière).



Correspondance onde gravitationnelle, mouvement de la binaire :

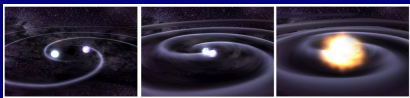
- les deux masses spiralent
- elles fusionnent
- le trou noir se stabilise

Images simulées pour un observateur
« proche » de l'événement...



Nombreux autres signaux confirmés depuis

ET LES ÉTOILES À NEUTRONS ?

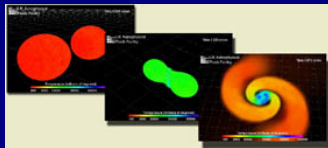


(Credit : NASA/CXC/GSFC/T.Strohmayer)

Binaires EN-TN et EN-EN
presque aussi bonnes sources
d'ondes gravitationnelles !

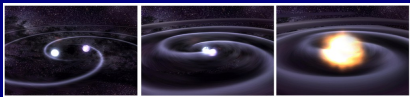
Scénario similaire

- elles spiralent
- elles fusionnent
- elles forment un objet très massif en forte rotation
- effondrement en trou noir



(Credit : S. Rosswog et ESO)

ET LES ÉTOILES À NEUTRONS ?

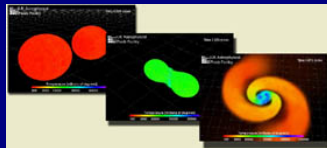


(Credit : NASA/CXC/GSFC/T.Strohmayer)

Binaires EN-TN et EN-EN
presque aussi bonnes sources
d'ondes gravitationnelles !

Scénario similaire

- elles spiralent
- elles fusionnent
- elles forment un objet très massif en forte rotation
- effondrement en trou noir



(Credit : S. Rosswog et ESO)

Première détection : évènement GW170817 + contrepartie électromagnétique (sursaut gamma court et kilonova)

Des astres bien particuliers...

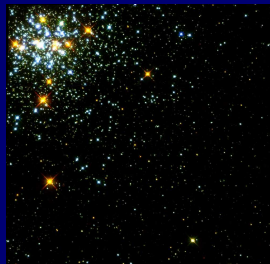
DES ÉTOILES “NORMALES”

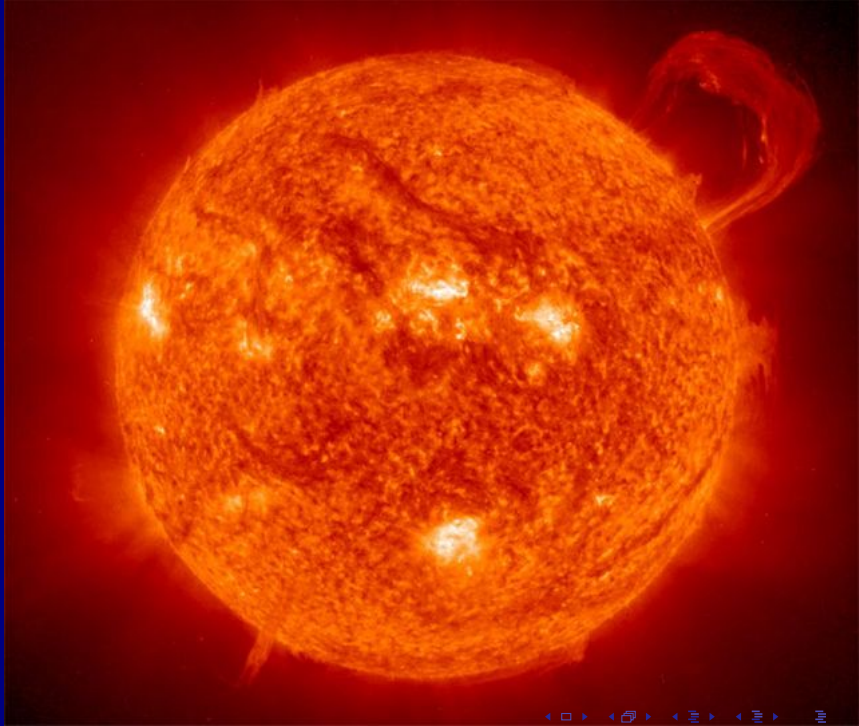
Dans notre galaxie (voie lactée), il y a \sim 200 milliards d'étoiles.

Masses stellaires : $0.2M_s < M < 100M_s$
(masse solaire : $M_s = 300\,000$ masses terrestres).

Rayons stellaires $1/10R_s < R < 10R_s$
(rayon du soleil 700 000 km)

AMAS OUVERT D'ÉTOILES NGC 1818 DANS LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN





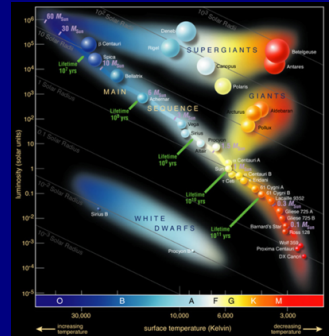
QU'OBSERVE-T-ON ?

Le rayonnement est causé par la température élevée :
C'est comme une ampoule électrique.

L'intérieur et la surface des étoiles est très chaud. Par exemple le soleil

- surface : 5800 Kelvin
- centre : 16 millions de Kelvin

La pression thermique (l'agitation des particules du gaz) permet aussi de s'opposer à la gravitation pour stabiliser l'étoile.



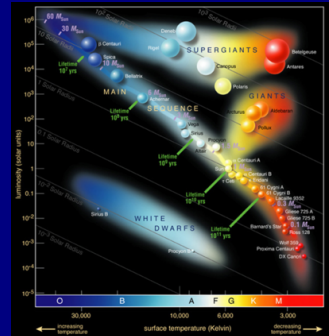
QU'OBSERVE-T-ON ?

Le rayonnement est causé par la température élevée :
C'est comme une ampoule électrique.

L'intérieur et la surface des étoiles est très chaud. Par exemple le soleil

- surface : 5800 Kelvin
- centre : 16 millions de Kelvin

La pression thermique (l'agitation des particules du gaz) permet aussi de s'opposer à la gravitation pour stabiliser l'étoile.



Peut-on observer d'autres objets ?

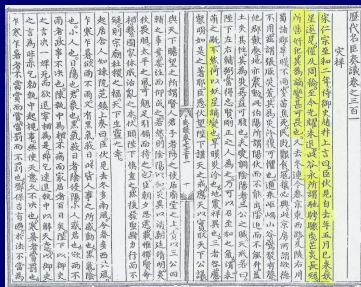
DES ÉTOILES INVITÉES

Plusieurs témoignages d'observation d'**étoile invitée** par des astronomes chinois, visible à l'oeil nu pendant environ une année.

« Ère Zhihe du règne, première année, cinquième mois lunaire, jour jichou. Une étoile invitée est apparue au sud-est de Tianguan, peut-être à plusieurs pouces de distance. Après plus d'une année, elle s'est dispersée et a disparu. »

Donc pas une « étoile normale »...

MENTION DE LA SN1054

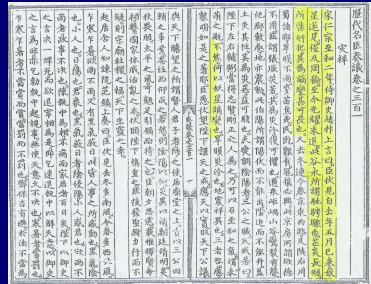


DES ÉTOILES INVITÉES

Plusieurs témoignages d'observation d'**étoile invitée** par des astronomes chinois, visible à l'oeil nu pendant environ une année.

« Ère Zhihe du règne, première année, cinquième mois lunaire, jour jichou. Une étoile invitée est apparue au sud-est de Tianguan, peut-être à plusieurs pouces de distance. Après plus d'une année, elle s'est dispersée et a disparu. »
Donc pas une « étoile normale »...

MENTION DE LA SN1054



Observations similaires par des astronomes arabes, quelques récits ailleurs

Associés à des évènements très énergétiques : des **supernovæ**



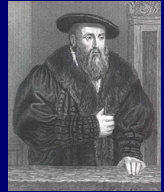
QUELQUES SUPERNOVÆ HISTORIQUES

Premier récit en 185,
d'autres exemples 1006, 1054, 1181
par des astronomes chinois
1572 : Tycho Brahe
1604 : Johannes Kepler
Elles étaient visibles à l'œil nu !

TYCHO BRAHE



JOHANNES KEPLER



Restes de la SN1054 : « redécouverte » par John Bevis en 1731

Elle s'appelle nébuleuse du crabe suite
aux représentations de Lord Rosse.

Elle se situe à une distance de ~ 6500
années lumières

UN DESSIN DE LORD ROSSE, 1844



CE QUE LES AMATEURS PEUVENT VOIR



Une pose de 60 mn, sur film argentique hyper sensibilisé, avec un télescope de 40 cm. (Crédit : Middleton)

ET AVEC UN TÉLESCOPE DE 3,60 M



(Crédit : Télescope Canada-France-Hawaï, J-C Cuillandre)



La nébuleuse du Crabe est la matière éjectée lors de l'explosion de la supernova de 1054. En son centre reside l'étoile à neutrons créée à partir du cœur de l'étoile d'origine.

Image en ondes radio
(longueur d'onde 1 m) du
centre de notre galaxie.

Restes de *supernovæ*, que
l'on voit pendant 10 000 ans
environ et

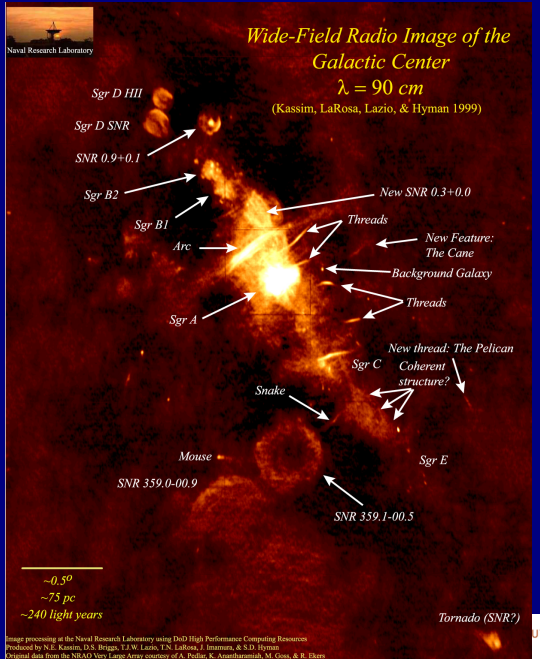
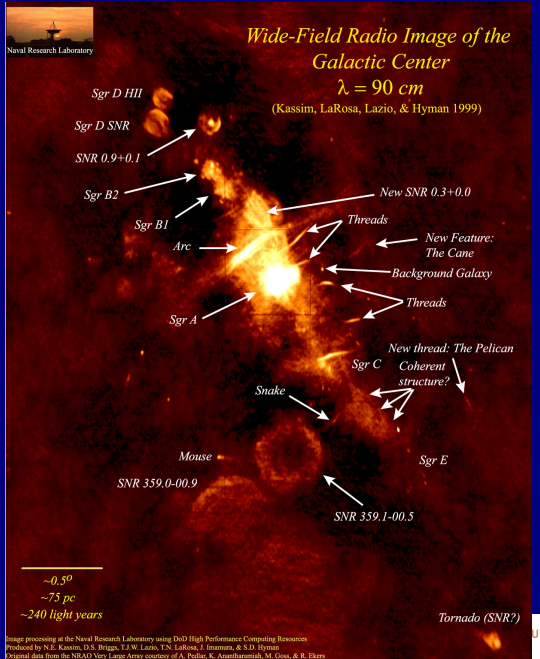


Image en ondes radio
(longueur d'onde 1 m)
du centre de notre galaxie.

Restes de *supernovæ*,
que l'on voit pendant 10 000 ans
environ et

au centre souvent une étoile
à neutrons.



UNE ÉTOILE À NEUTRONS : UN GIGANTESQUE NOYAU ATOMIQUE...

- 1932, Landau (Phys. Z. Sowjetunion, 1, 285) : Possibilité d'étoiles dont le cœur a la densité des noyaux atomiques
- 1934, Baade et Zwicky (Phys. Rev. 45, 138) : une nouvelle forme d'étoiles composées de neutrons, qui seraient la phase ultime de l'évolution stellaire, relique d'une supernova ...

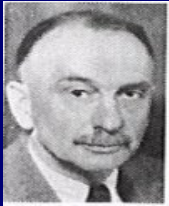
UNE ÉTOILE À NEUTRONS : UN GIGANTESQUE NOYAU ATOMIQUE...

- 1932, Landau (Phys. Z. Sowjetunion, 1, 285) : Possibilité d'étoiles dont le cœur a la densité des noyaux atomiques
- 1934, Baade et Zwicky (Phys. Rev. 45, 138) : une nouvelle forme d'étoiles composées de neutrons, qui seraient la phase ultime de l'évolution stellaire, relique d'une supernova ...

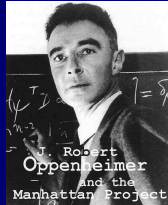
Comment peut on les observer ?

ÉTOILES À NEUTRONS ENTRE 1932 ET 1967

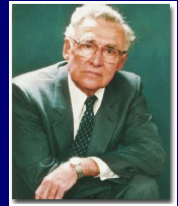
RICHARD TOLMAN



ROBERT OPPENHEIMER



GEORGE VOLKOFF



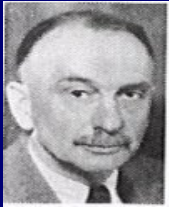
1939, Robert Oppenheimer, George Volkoff, et Richard Tolman calculent des caractéristiques des étoiles à neutrons.

Ils trouvent que malgré une masse \sim masse du Soleil, le rayon est de l'ordre de 20 km (Soleil : 700000 km).

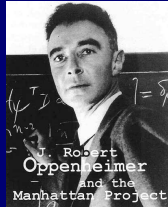
Comme l'avaient suspecté Landau, Baade, Zwicky : la densité est comparable à celle du noyau atomique.

ÉTOILES À NEUTRONS ENTRE 1932 ET 1967

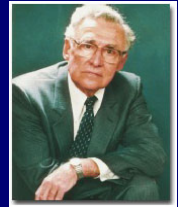
RICHARD TOLMAN



ROBERT OPPENHEIMER



GEORGE VOLKOFF



On pense que de telles étoiles seraient trop peu lumineuses pour être vues de loin.

Ne prédisent aucune observable.

Donc pas recherchées par les astronomes .

1967, DU CÔTÉ DES RADIOASTRONOMES

Anthony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell étudient la scintillation du ciel en ondes radio. J. Bell trouve une source oscillant à $T=1,37$ seconde.

La période des oscillations est d'une constance jamais vue.



Jocelyn Bell n'a pas eu le prix Nobel, mais A. Hewish l'a eu en 1974.

1967, DU CÔTÉ DES RADIOASTRONOMES

Anthony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell étudient la scintillation du ciel en ondes radio. J. Bell trouve une source oscillant à $T=1,37$ seconde.

La période des oscillations est d'une constance jamais vue.

Pulsar = pulsations régulières



Jocelyn Bell n'a pas eu le prix Nobel, mais A. Hewish l'a eu en 1974.

1967, DU CÔTÉ DES RADIOASTRONOMES

Anthony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell étudient la scintillation du ciel en ondes radio. J. Bell trouve une source oscillant à $T=1,37$ seconde.

La période des oscillations est d'une constance jamais vue.

Pulsar = pulsations régulières

C'est la rotation d'une étoile à neutrons !
Aujourd'hui on connaît environ 3000 pulsars dont quelques systèmes binaires



Jocelyn Bell n'a pas eu le prix Nobel, mais A. Hewish l'a eu en 1974.

DES PROPRIÉTÉS ÉTONNANTES

Étoile très petite (rayon $R \sim 10$ km)
mais avec une masse comparable à celle
du Soleil (soit 300 000 fois la masse de la
Terre)

RX J 1856-37



DES PROPRIÉTÉS ÉTONNANTES

Étoile très petite (rayon $R \sim 10$ km)
mais avec une masse comparable à celle
du Soleil (soit 300 000 fois la masse de la
Terre)

⇒ densité (rapport masse/volume)
 $100\,000\,000 \text{ t/cm}^3$:
la masse de toute l'humanité dans une
cuillère à café!

RX J 1856-37



UNE DENSITÉ EXTRÊME

Si l'on regarde différents objets qu'on connaît :

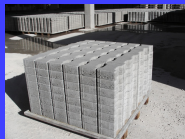
UNE DENSITÉ EXTRÊME

Si l'on regarde différents objets qu'on connaît :



Polystyrène

0.1 g/cm^3



Béton

3 g/cm^3



Plomb

11 g/cm^3



Or

19 g/cm^3

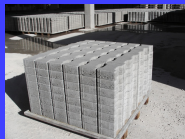
UNE DENSITÉ EXTRÊME

Si l'on regarde différents objets qu'on connaît :



Polystyrène

0.1 g/cm^3



Béton

3 g/cm^3



Plomb

11 g/cm^3



Or

19 g/cm^3

Dans une étoile à neutrons, c'est $100\,000\,000 \text{ t/cm}^3$!

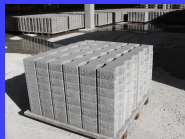
UNE DENSITÉ EXTRÊME

Si l'on regarde différents objets qu'on connaît :



Polystyrène

0.1 g/cm^3



Béton

3 g/cm^3



Plomb

11 g/cm^3



Or

19 g/cm^3

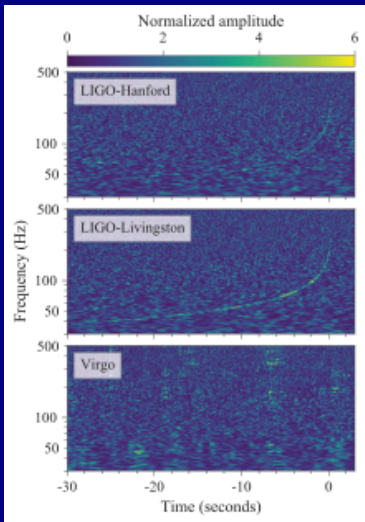
Dans une étoile à neutrons, c'est $100\,000\,000 \text{ t/cm}^3$!

C'est la densité du noyau atomique....

Comment produit on de l'or ?

L'ÉVÈNEMENT GW170817

DEUX ÉTOILES À NEUTRONS FUSIONNENT ...



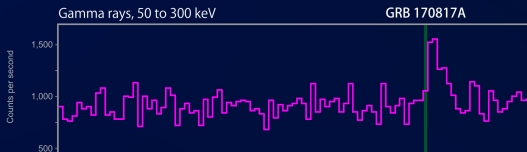
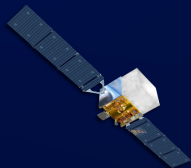
Le 17 août 2017, les trois détecteurs ont mesuré des ondes gravitationnelles en provenance de deux étoiles à neutrons qui fusionnent !

- masse totale de $2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$
- distance ~ 130 millions d'années lumière
- localisation dans la galaxie NGC4993
- manque un système étoile à neutrons - trou noir (O3?)

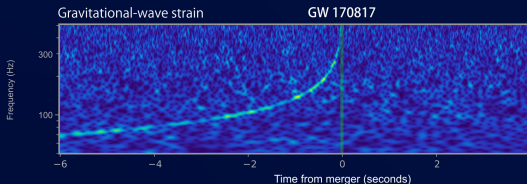
L'ÉVÈNEMENT GRB170817A

UN SURSAUT EN RAYONS γ

Fermi



LIGO



Produit par des particules accélérées en forme de jet lors de l'effondrement final en trou noir de l'étoile hypermassive formée par la fusion des deux étoiles à neutrons.

ET PENDANT LES JOURS SUIVANTS

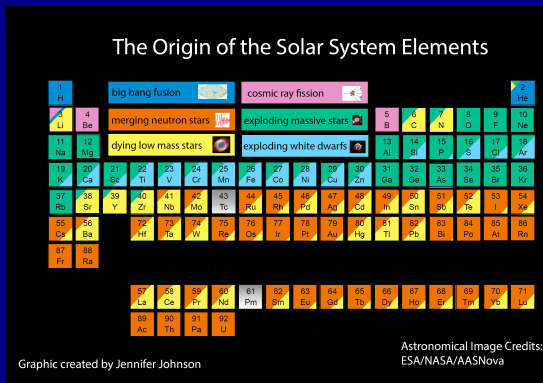
UN OBJET QUI RAYONNE DANS NGC4993

Observation (électromagnétique)
de la source par plusieurs
télescopes en différentes longueurs
d'onde (γ , rayons X , UV, visible,
infrarouge et radio)

Le rayonnement devient moins
intense et moins énergétique
(changement de longueurs d'onde)
avec le temps

D'OÙ VIENNENT LES NOYAUX LOURDS ?

Ce rayonnement, la « kilonova », provient de la désintégration de noyaux lourds et instables (radioactifs) produits dans la matière éjectée par la fusion des deux étoiles à neutrons :



Pas d'or sans les étoiles à neutrons qui fusionnent !

Un sujet de recherche fascinant, mais comment y arriver ?

(ENSEIGNANT-)CHERCHEUR COMME MÉTIER

- Comment y arriver ?
 - ▶ Conditions : Bac+5 (Master2), ensuite un doctorat et en générale quelques années de « post-doctorat », pas de voie royale, des parcours très variables point commun : il faut une passion pour son domaine !
 - ▶ Métier très international : bon niveau d'anglais requis
- Et au quotidien ?
 - ▶ Travail en équipe, souvent avec des collaborateurs à l'étranger
 - ▶ Présentation de son travail aux autres importante (équipe, atelier de travail, grande conférence internationale, publications ...)
 - ▶ Animation (organisation de rencontres à tous niveaux, organisation des équipes de recherche)
 - ▶ Transmettre le savoir (enseignement et encadrement de jeunes stagiaires et doctorants)

MERCI DE VOTRE ATTENTION !

