

LES ÉTOILES À NEUTRONS

LA MATIÈRE TRÈS DENSE, DE L'INFINIMENT PETIT AUX
ÉTOILES

Micaela Oertel

micaela.oertel@obspm.fr

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

12 mars 2010



DE L'INFINIMENT PETIT AUX ÉTOILES...

- 1 QU'EST-CE QU'UNE ÉTOILE À NEUTRONS ?
 - La matière extrêmement comprimée.....
 - L'infiniment petit : les constituants élémentaires de la matière

DE L'INFINIMENT PETIT AUX ÉTOILES...

1 QU'EST-CE QU'UNE ÉTOILE À NEUTRONS ?

- La matière extrêmement comprimée.....
- L'infiniment petit : les constituants élémentaires de la matière

2 COMMENT SONT ELLES FORMÉES ?

- Qu'est-ce qui rend les étoiles stables ?
- La fin de vie d'une étoile massive : les supernovæ

DE L'INFINIMENT PETIT AUX ÉTOILES...

1 QU'EST-CE QU'UNE ÉTOILE À NEUTRONS ?

- La matière extrêmement comprimée.....
- L'infiniment petit : les constituants élémentaires de la matière

2 COMMENT SONT ELLES FORMÉES ?

- Qu'est-ce qui rend les étoiles stables ?
- La fin de vie d'une étoile massive : les supernovæ

3 COMMENT LES OBSERVE-T-ON ?

- Des étoiles qui clignotent ...

DE L'INFINIMENT PETIT AUX ÉTOILES...

1 QU'EST-CE QU'UNE ÉTOILE À NEUTRONS ?

- La matière extrêmement comprimée.....
- L'infiniment petit : les constituants élémentaires de la matière

2 COMMENT SONT ELLES FORMÉES ?

- Qu'est-ce qui rend les étoiles stables ?
- La fin de vie d'une étoile massive : les supernovæ

3 COMMENT LES OBSERVE-T-ON ?

- Des étoiles qui clignotent ...

4 DES PARTICULES ENCORE PLUS ÉLÉMENTAIRES

Qu'est-ce qu'une étoile à neutrons ?

LA MATIÈRE EXTRÊMEMENT COMPRIMÉE....

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



LA MATIÈRE EXTRÊMEMENT COMPRIMÉE....

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 ÉTONNANTE

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

UNE DENSITÉ ÉTONNANTE

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 ÉTONNANTE

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 ÉTONNANTE

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....

LES CONSTITUANTS ÉLÉMENTAIRES DE LA MATIÈRE

En physique la matière n'est pas composée des quatre éléments eau, terre, feu et air

LES CONSTITUANTS ÉLÉMENTAIRES DE LA MATIÈRE

En physique la matière n'est pas composée des quatre éléments eau, terre, feu et air mais de briques qu'on appelle des **atomes**

LES CONSTITUANTS ÉLÉMENTAIRES DE LA MATIÈRE

En physique la matière n'est pas composée des quatre éléments eau, terre, feu et air mais de briques qu'on appelle des **atomes**

“*Atomos*”, Demokrit, 450 av.J.C. :
L'indivisible

L'eau est composée d'hydrogène et
oxygène :

dans un litre d'eau il y a environ 10^{25} (un
chiffre avec 25 zéros) molécules de H_2O



LES CONSTITUANTS ÉLÉMENTAIRES DE LA MATIÈRE

En physique la matière n'est pas composée des quatre éléments eau, terre, feu et air mais de briques qu'on appelle des **atomes**

"*Atomos*", Demokrit, 450 av.J.C. :
L'indivisible

L'eau est composée d'hydrogène et
oxygène :

dans un litre d'eau il y a environ 10^{25} (un
chiffre avec 25 zéros) molécules de H_2O



Est-ce que les atomes sont vraiment indivisibles ?

LES ATOMES

Non, les atomes ne sont pas
indivisibles :

LES ATOMES

Non, les atomes ne sont pas
indivisibles :

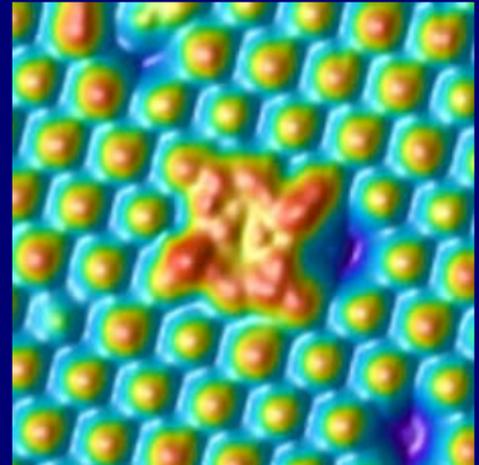
On connaît aujourd'hui une
centaine d'atomes, tous formés de
briques (particules) encore plus
élémentaires, découvertes entre
1897 et 1932.

LES ATOMES

Non, les atomes ne sont pas indivisibles :

On connaît aujourd'hui une centaine d'atomes, tous formés de briques (particules) encore plus élémentaires, découvertes entre 1897 et 1932.

UNE MOLÉCULE DÉPOSÉE SUR UN RÉSEAU CRISTALLIN D'ATOMES. PHOTOGRAPHIE AU MICROSCOPE À EFFET TUNNEL. LES FAUSSES COULEURS REPRÉSENTENT LA HAUTEUR. [LAB. DE PHOTO-PHYSIQUE MOLÉCULAIRE, UNIVERSITÉ D'ORSAY.]

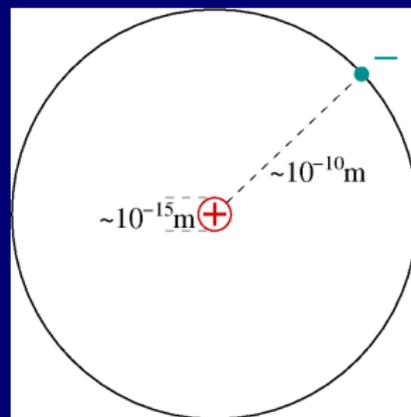


LES ÉLÉMENTS DU PUZZLE ATOMIQUE

- Les **électrons** sont autour du noyau.

$$\text{distance} \sim \frac{1}{10\,000\,000} \text{mm.}$$

RÉPRÉSENTATION SCHEMATIQUE D'UN ATOME D'HYDROGÈNE. UN NUAGE D'ÉLECTRON AUTOUR D'UN NOYAU (UN PROTON)



LES ÉLÉMENTS DU PUZZLE ATOMIQUE

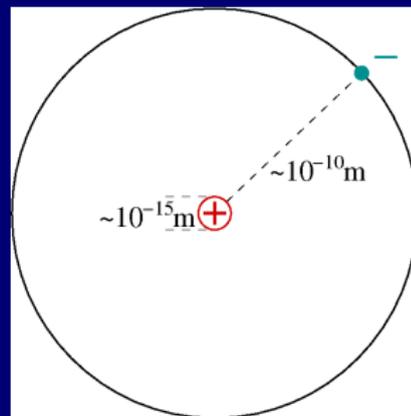
- Les **électrons** sont autour du noyau.

distance $\sim \frac{1}{10\,000\,000}$ mm.

- Le noyau, très petit, est formé de **protons** et de **neutrons**. Cohésion : interactions nucléaires.

dimensions $\sim \frac{r_{\text{atome}}}{100\,000}$

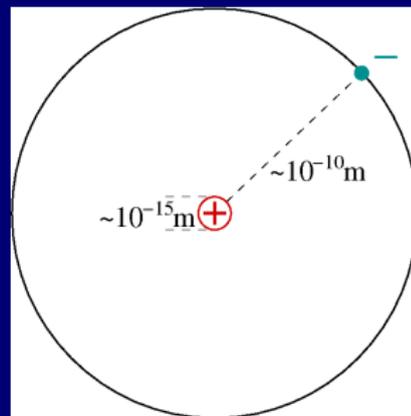
RÉPRÉSENTATION SCHEMATIQUE D'UN ATOME D'HYDROGÈNE. UN NUAGE D'ÉLECTRON AUTOUR D'UN NOYAU (UN PROTON)



LES ÉLÉMENTS DU PUZZLE ATOMIQUE

- Les **électrons** sont autour du noyau.
distance $\sim \frac{1}{10\,000\,000}$ mm.
- Le noyau, très petit, est formé de **protons** et de **neutrons**. Cohésion : interactions nucléaires.
dimensions $\sim \frac{r_{\text{atome}}}{100\,000}$
- Masse neutron \sim masse proton \sim 2000 masse électron

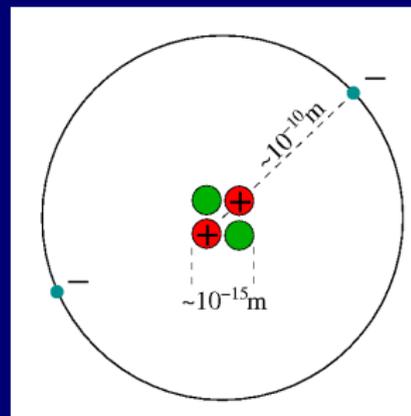
RÉPRÉSENTATION SCHEMATIQUE D'UN ATOME D'HYDROGÈNE. UN NUAGE D'ÉLECTRON AUTOUR D'UN NOYAU (UN PROTON)



LES ÉLÉMENTS DU PUZZLE ATOMIQUE

- Les **électrons** sont autour du noyau.
distance $\sim \frac{1}{10\,000\,000}$ mm.
- Le noyau, très petit, est formé de **protons** et de **neutrons**. Cohésion : interactions nucléaires.
dimensions $\sim \frac{r_{\text{atome}}}{100\,000}$
- Masse neutron \sim masse proton \sim 2000 masse électron

RÉPRÉSENTATION SCHEMATIQUE D'UN ATOME D'HÉLIUM. UN NUAGE D'ÉLECTRONS AUTOUR D'UN NOYAU (DEUX PROTONS, DEUX NEUTRONS)



LE GRAND VIDE DE L'ATOME, L'EXTRÊME DENSITÉ DU NOYAU

Si l'on grossissait mille milliards de fois un atome d'hydrogène :

LE GRAND VIDE DE L'ATOME, L'EXTRÊME DENSITÉ DU NOYAU

Si l'on grossissait mille milliards de fois un atome d'hydrogène :

- le noyau (constitué d'un seul proton) aurait une taille d'un millimètre et aurait une masse de 1,7 millions de tonnes !

LE GRAND VIDE DE L'ATOME, L'EXTRÊME DENSITÉ DU NOYAU

Si l'on grossissait mille milliards de fois un atome d'hydrogène :

- le noyau (constitué d'un seul proton) aurait une taille d'un millimètre et aurait une masse de 1,7 millions de tonnes !
- l'unique électron aurait une taille inférieure à un micron (un millième de millimètre) et aurait une masse de 900 tonnes !

LE GRAND VIDE DE L'ATOME, L'EXTRÊME DENSITÉ DU NOYAU

Si l'on grossissait mille milliards de fois un atome d'hydrogène :

- le noyau (constitué d'un seul proton) aurait une taille d'un millimètre et aurait une masse de 1,7 millions de tonnes !
- l'unique électron aurait une taille inférieure à un micron (un millième de millimètre) et aurait une masse de 900 tonnes !
- cet électron "tournerait" autour du noyau dans un volume d'environ 100m de diamètre : ce serait la taille de cet atome d'hydrogène, tout le reste étant vide !

LE GRAND VIDE DE L'ATOME, L'EXTRÊME DENSITÉ DU NOYAU

Si l'on grossissait mille milliards de fois un atome d'hydrogène :

- le noyau (constitué d'un seul proton) aurait une taille d'un millimètre et aurait une masse de 1,7 millions de tonnes !
- l'unique électron aurait une taille inférieure à un micron (un millième de millimètre) et aurait une masse de 900 tonnes !
- cet électron "tournerait" autour du noyau dans un volume d'environ 100m de diamètre : ce serait la taille de cet atome d'hydrogène, tout le reste étant vide !



Si un atome avait la taille de la Tour Eiffel son noyau (ayant presque toute la masse) serait comme une coccinelle.



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...

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...

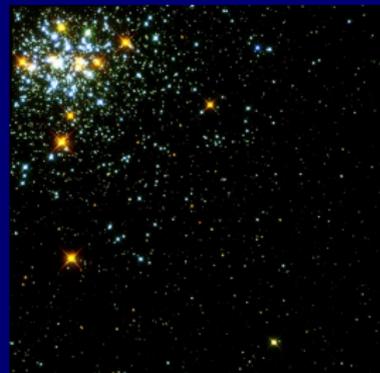
Comment est-elle formée ?

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).

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



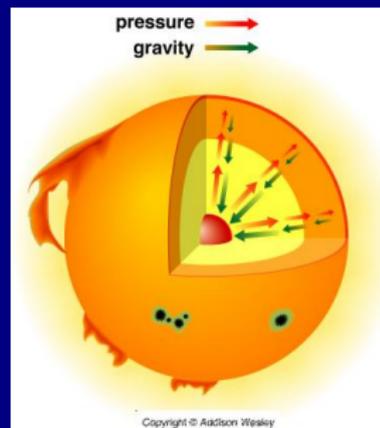
Quels sont les facteurs déterminant la stabilité d'une étoile ?

LE COMBAT DE LA GRAVITATION ET DE LA PRESSION

À cause de leur masse, la matière des étoiles tend à tomber vers leur centre (gravitation).

Mais si tout tombait au milieu, l'étoile serait infiniment comprimée. Ce serait la victoire ultime de la gravitation.

Des forces de pression s'y opposent.



LA PRESSION

Si un objet résiste à l'écrasement, c'est à cause de la pression.



Pour un gaz dans une boîte, c'est l'agitation (liée à la température) des molécules qui les fait cogner contre les parois. La somme de tous ces "chocs", agit comme une force.

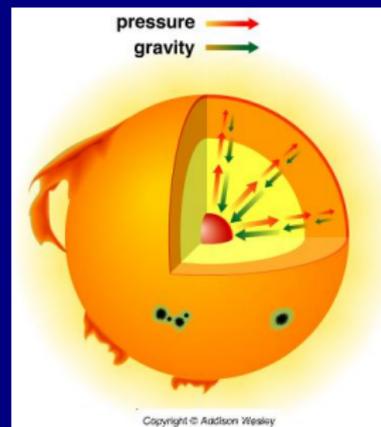
En général, elle augmente avec la température.

LE COMBAT DE LA GRAVITATION ET DE LA PRESSION

Plus la matière ordinaire est chaude, plus la pression y est forte, mieux elle résiste à la compression.

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

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

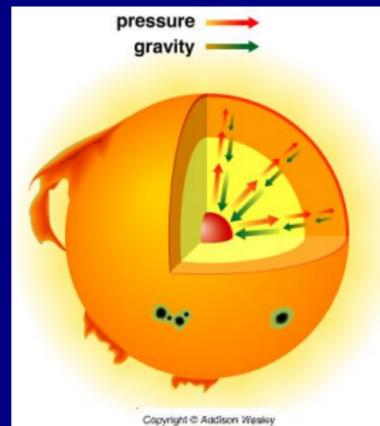


LE COMBAT DE LA GRAVITATION ET DE LA PRESSION

Plus la matière ordinaire est chaude, plus la pression y est forte, mieux elle résiste à la compression.

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

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



Mais qu'est-ce qui chauffe l'intérieur des étoiles ?

UNE PREMIÈRE IDÉE TRÈS SIMPLE :

Quand la matière est comprimée, elle chauffe. (Essayez avec de l'air dans une pompe à vélo.)

La chute due à l'effondrement d'une étoile (gravitation) peut chauffer une étoile pendant quelques millions d'années...

UNE PREMIÈRE IDÉE TRÈS SIMPLE :

Quand la matière est comprimée, elle chauffe. (Essayez avec de l'air dans une pompe à vélo.)

La chute due à l'effondrement d'une étoile (gravitation) peut chauffer une étoile pendant quelques millions d'années...

...mais la Terre qui tourne autour du Soleil a 4,5 milliards d'années.

UNE PREMIÈRE IDÉE TRÈS SIMPLE :

Quand la matière est comprimée, elle chauffe. (Essayez avec de l'air dans une pompe à vélo.)

La chute due à l'effondrement d'une étoile (gravitation) peut chauffer une étoile pendant quelques millions d'années...

...mais la Terre qui tourne autour du Soleil a 4,5 milliards d'années.

Mais qu'est-ce qui chauffe alors l'intérieur des étoiles ?

LA FOURNAISE NUCLÉAIRE

Dans les années 1930, avec la découverte des réactions nucléaires, on comprend que les étoiles en leur cœur transforment des noyaux atomiques.

Dans le Soleil, conversion de l'hydrogène en hélium. Dans des étoiles massives, d'autres réactions créent du carbone, de l'oxygène, de l'azote etc... jusqu'au fer.

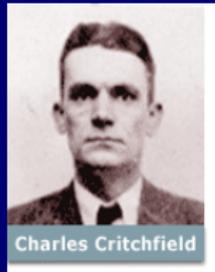
HANS BETHE



CARL FRIEDRICH VON
WEIZSÄCKER



CHARLES CRITCHFIELD



GEORGE GAMOW



LA FOURNAISE NUCLÉAIRE

Dans les années 1930, avec la découverte des réactions nucléaires, on comprend que les étoiles en leur cœur transforment des noyaux atomiques.

Dans le Soleil, conversion de l'hydrogène en hélium. Dans des étoiles massives, d'autres réactions créent du carbone, de l'oxygène, de l'azote etc... jusqu'au fer.

Ces réactions dégagent de l'énergie : c'est la source de chaleur donc de pression.

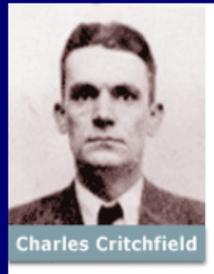
HANS BETHE



CARL FRIEDRICH VON
WEIZSÄCKER



CHARLES CRITCHFIELD



GEORGE GAMOW



LA FOURNAISE NUCLÉAIRE

Dans les années 1930, avec la découverte des réactions nucléaires, on comprend que les étoiles en leur cœur transforment des noyaux atomiques.

Dans le Soleil, conversion de l'hydrogène en hélium. Dans des étoiles massives, d'autres réactions créent du carbone, de l'oxygène, de l'azote etc... jusqu'au fer.

Ces réactions dégagent de l'énergie : c'est la source de chaleur donc de pression.



Sur terre on cherche depuis longtemps à utiliser la fusion nucléaire comme source d'énergie

Voici l'intérieur du réacteur JET
(Joint European Torus) près d'Oxford



MAIS QUE SE PASSE-T-IL QUAND LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES N'ONT PLUS RIEN À TRANSFORMER ?

Dans ce cas, le cœur de l'étoile refroidit, donc la pression baisse.

L'étoile s'effondre : la matière de l'étoile tombe vers le centre de l'astre.

MAIS QUE SE PASSE-T-IL QUAND LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES N'ONT PLUS RIEN À TRANSFORMER ?

Dans ce cas, le cœur de l'étoile refroidit, donc la pression baisse.

L'étoile s'effondre : la matière de l'étoile tombe vers le centre de l'astre.

Quand cette chute s'arrête-t-elle ?

QUAND CETTE CHUTE S'ARRÊTE-T-ELLE ?

Quand d'autres termes de pression prennent le relai de la chaleur.

Quand on a atteint la densité des noyaux atomiques, les neutrons et protons commencent à se toucher → répulsion due à la force nucléaire.

QUAND CETTE CHUTE S'ARRÊTE-T-ELLE ?

Quand d'autres termes de pression prennent le relai de la chaleur.

Quand on a atteint la densité des noyaux atomiques, les neutrons et protons commencent à se toucher → répulsion due à la force nucléaire.

La matière rebondit, une partie repart vers l'espace. Elle se disperse, comme dans une explosion. C'est une **supernova**.

QUAND CETTE CHUTE S'ARRÊTE-T-ELLE ?

Quand d'autres termes de pression prennent le relai de la chaleur.

Quand on a atteint la densité des noyaux atomiques, les neutrons et protons commencent à se toucher → répulsion due à la force nucléaire.

La matière rebondit, une partie repart vers l'espace. Elle se disperse, comme dans une explosion. C'est une **supernova**.

Une étoile à neutrons est créée à partir du cœur de l'étoile d'origine.

QUELQUES SUPERNOVÆ HISTORIQUES

1006, 1054, 1181 : observées par des astronomes chinois

1572 : Tycho Brahe

1604 : Johannes Kepler

Elles étaient visibles à l'œil nu !

Supernova de 1054 : « redécouverte » par John Bevis en 1731

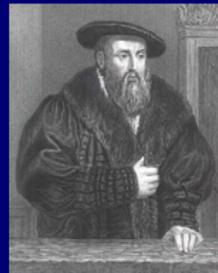
Elle s'appelle nébuleuse du crabe suite aux représentations de Lord Rosse.

Elle se situe à une distance de ~ 6500 années lumières

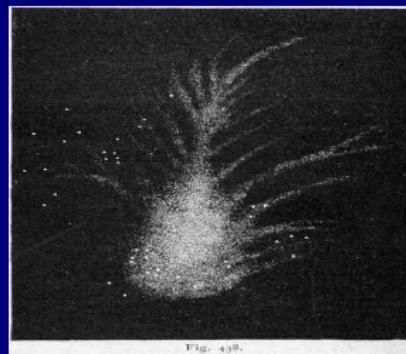
TYCHO BRAHE



JOHANNES KEPLER



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**, c'est à
dire d'étoiles qui ont explosé
lors de leur effondrement.

À la fin de l'explosion, il reste
de la matière qui se disperse
(on la voit pendant 10 000
ans environ) et ...

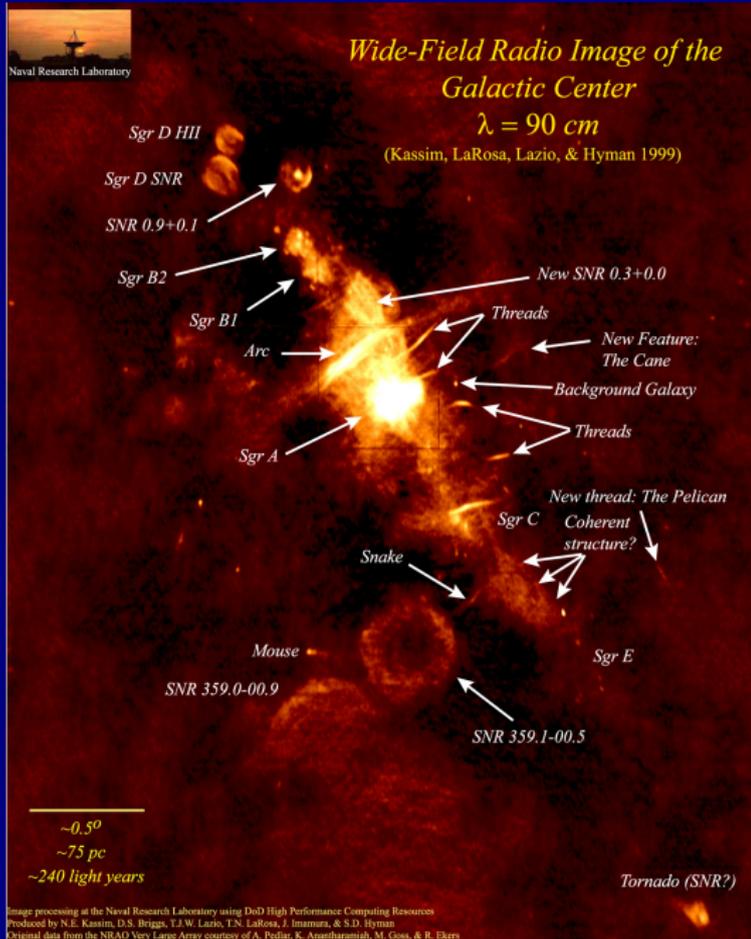
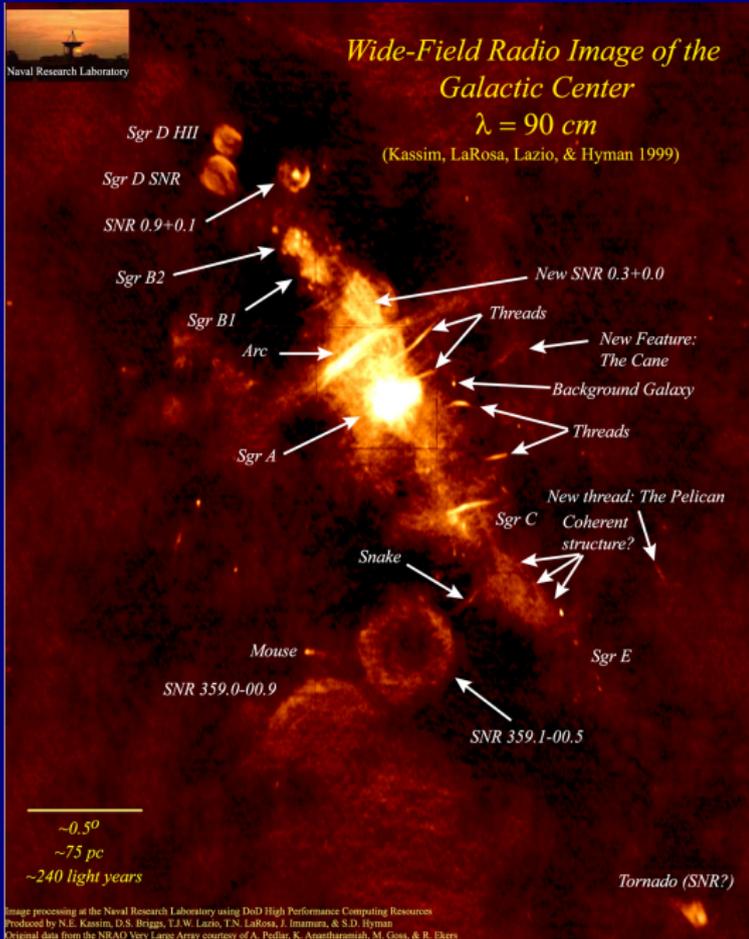


Image en ondes radio
(longueur d'onde 1 m) du
centre de notre galaxie.

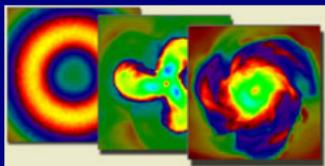
Restes de **supernovæ**, c'est à
dire d'étoiles qui ont explosé
lors de leur effondrement.

À la fin de l'explosion, il reste
de la matière qui se disperse
(on la voit pendant 10 000
ans environ) et ...

au centre souvent une étoile
à neutrons.



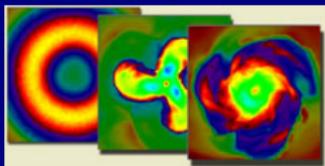
UNE VISION DE SUPERNOVA...



Une simulation numérique

(Crédit : Blondin, Mezzacappa, De Marino, 2002)

UNE VISION DE SUPERNOVA...

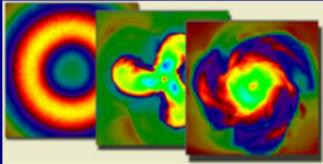


Une simulation numérique

(Crédit : Blondin, Mezzacappa, De Marino, 2002)

Un sujet de recherche très actif, mais sans explosion pour le moment !

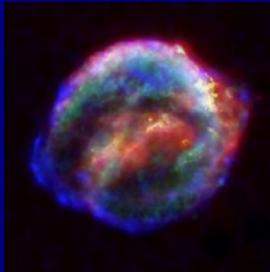
UNE VISION DE SUPERNOVA...



Une simulation numérique

(Crédit : Blondin, Mezzacappa, De Marino, 2002)

Un sujet de recherche très actif, mais sans explosion pour le moment !



Une vue d'artiste

EST-CE QUE TOUTES LES ÉTOILES DEVIENNENT DES ÉTOILES À NEUTRONS ?

EST-CE QUE TOUTES LES ÉTOILES DEVIENNENT DES ÉTOILES À NEUTRONS ?

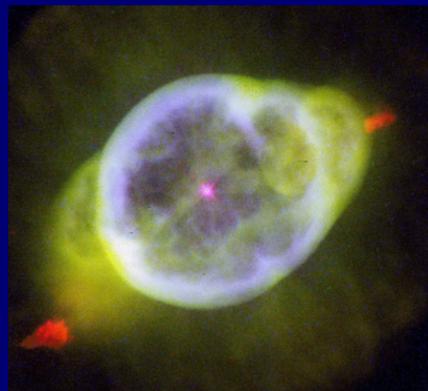
Non, une étoile brûle son combustible nucléaire pendant des millions, voire des milliards d'années, puis s'effondre :

EST-CE QUE TOUTES LES ÉTOILES DEVIENNENT DES ÉTOILES À NEUTRONS ?

Non, une étoile brûle son combustible nucléaire pendant des millions, voire des milliards d'années, puis s'effondre :

FAIBLE MASSE

⇒ NAINE BLANCHE



Nébuleuse planétaire NGC3242

EST-CE QUE TOUTES LES ÉTOILES DEVIENNENT DES ÉTOILES À NEUTRONS ?

Non, une étoile brûle son combustible nucléaire pendant des millions, voire des milliards d'années, puis s'effondre :

FAIBLE MASSE

⇒ NAIN BLANCHE



Nébuleuse planétaire NGC3242

MASSE MOYENNE

⇒ ÉTOILE À NEUTRONS



Nébuleuse du Crabe

POURQUOI APPELLE-T-ON CES ÉTOILES « ÉTOILES À NEUTRONS » ?

Dans le cas de la matière très dense, la réaction



est en faveur de la création des neutrons. Cette réaction cause la disparition de la plupart des électrons et des protons.



Les neutrinos traversent la matière facilement et peuvent être détectés sur Terre.

Voici le détecteur Super-Kamiokande (Japon) qui a observé des neutrinos de la supernova de 1987.

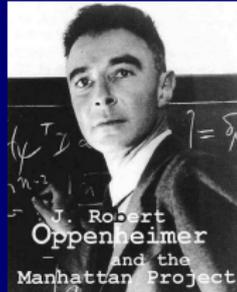
Comment les observe-t-on ?

ÉTOILES À NEUTRONS ENTRE 1932 ET 1967

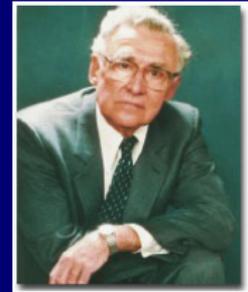
RICHARD TOLMAN



ROBERT OPPENHEIMER



GEORGE VOLKOFF



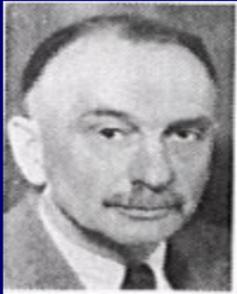
1939, Robert Oppenheimer, George Volkoff, et Richard Tolman calculent des caractéristiques des étoiles à neutrons.

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

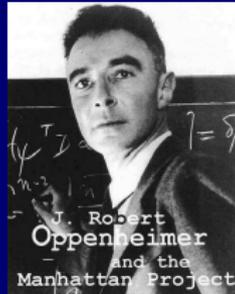
Comme l'avaient suspecté Landau, Baade, Zwicky : la densité est comparable à celle du noyau atomique.

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.

Comment un signal si rapide et régulier peut-il provenir de l'espace? Signal de vie extra-terrestre? « Little green men »

On attend deux mois pour publier l'observation



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.

Comment un signal si rapide et régulier peut-il provenir de l'espace? Signal de vie extra-terrestre? « **Little green men** »

On attend deux mois pour publier l'observation

Pulsar = pulsations régulières



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

COMMENT SONT LES PÉRIODES ?

On peut mesurer la période des pulses avec une extrême précision.

On trouve deux groupes :

Les pulsars « lents » ($P > 1s$) dont le PSR1919 découvert en premier. C'est le groupe le plus important.

Les pulsars millisecondes, dont le Crabe, Vela...

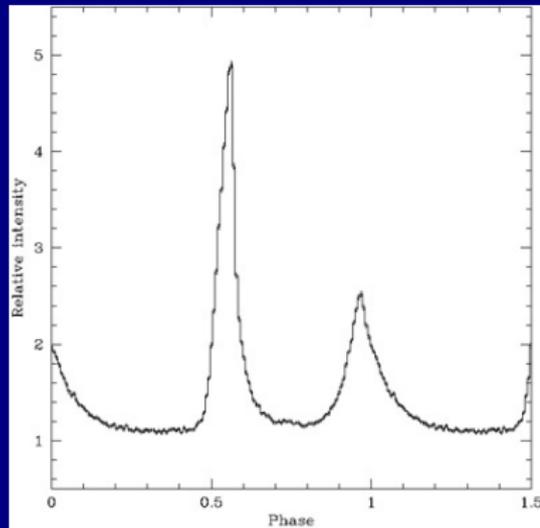
La période des pulses augmente très peu, mais très régulièrement.



La nébuleuse du Crabe héberge un pulsar dont la période est 0,033 s. Il est visible en optique.

QUELLE EST L'ORIGINE DES PULSATIONS ?

Est-ce que c'est la vibration ou la rotation d'une étoile ?



Pulsation radio de la nébuleuse du Crabe. La

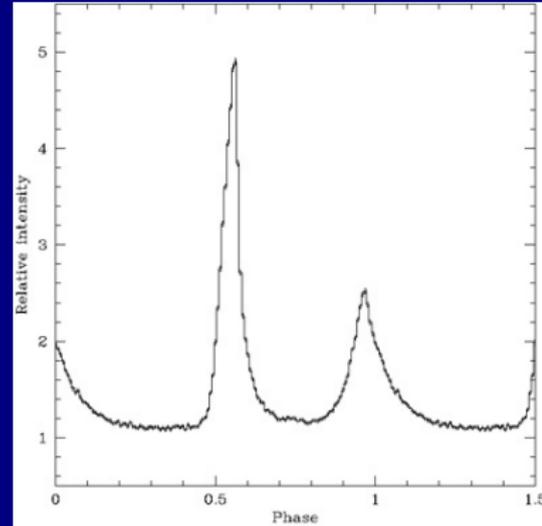
période est de 0,033 s.

QUELLE EST L'ORIGINE DES PULSATIONS ?

Est-ce que c'est la vibration ou la rotation d'une étoile ?

Vibrations d'une étoile ?

Hypothèse de Hewish et Bell.
Périodes de quelques millisecondes possibles avec des étoiles à neutrons, mais on ne sait pas expliquer la grande variation des périodes d'une étoile à l'autre.



Pulsation radio de la nébuleuse du Crabe. La période est de 0,033 s.

QUELLE EST L'ORIGINE DES PULSATIONS ?

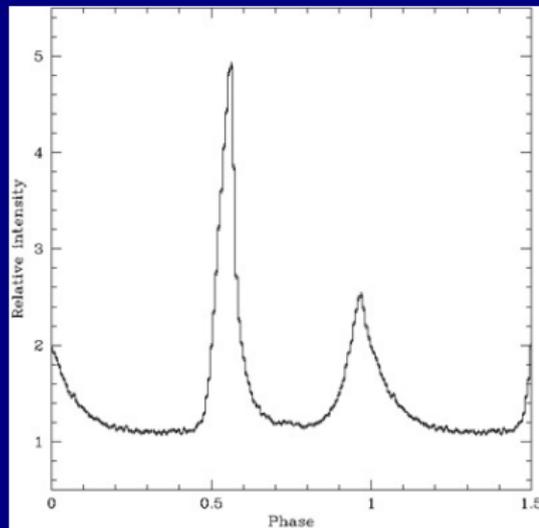
Est-ce que c'est la vibration ou la rotation d'une étoile ?

Vibrations d'une étoile ?

Hypothèse de Hewish et Bell.
Périodes de quelques millisecondes possibles avec des étoiles à neutrons, mais on ne sait pas expliquer la grande variation des périodes d'une étoile à l'autre.

C'est la rotation d'une étoile à neutrons !

(Pacini & Gold, 1968)



Pulsation radio de la nébuleuse du Crabe. La période est de 0,033 s.

POURQUOI LES PULSARS TOURNENT-ILS SI VITE ?

Question facile pour un physicien :

C'est la conservation du moment cinétique, une sorte de mesure de la quantité de rotation.



Evan Lysacek

POURQUOI LES PULSARS TOURNENT-ILS SI VITE ?

Question facile pour un physicien :

C'est la conservation du moment cinétique, une sorte de mesure de la quantité de rotation.

Pour les étoiles à neutrons :

contraction extrême \Rightarrow accélération extrême de la rotation !

On passe d'une rotation en quelques semaines à une rotation en quelques secondes, voire millisecondes.



Evan Lysacek

POURQUOI VOIT-ON LES PULSARS CLIGNOTER ?

POURQUOI VOIT-ON LES PULSARS CLIGNOTER ?

On peut l'expliquer avec le modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.

On ne reçoit les ondes que lorsqu'on est dans l'axe du faisceau.



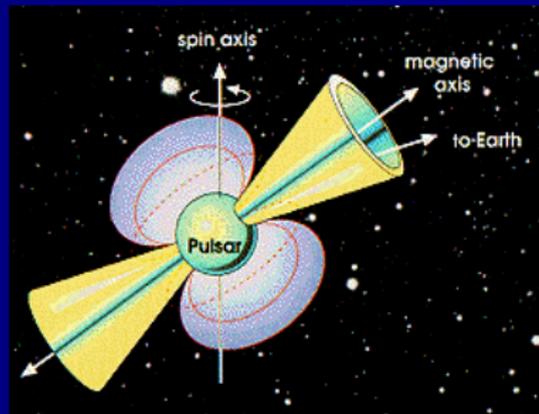
Tour Eiffel (crédit Paris de Photigule) S'il n'y avait pas de brume, on ne verrait le faisceau qu'en étant dans son axe.

POURQUOI VOIT-ON LES PULSARS CLIGNOTER ?

On peut l'expliquer avec le modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.

On ne reçoit les ondes que lorsqu'on est dans l'axe du faisceau.

Avec ce modèle, beaucoup de pulsars nous échappent, si l'on n'est pas balayé par le faisceau.



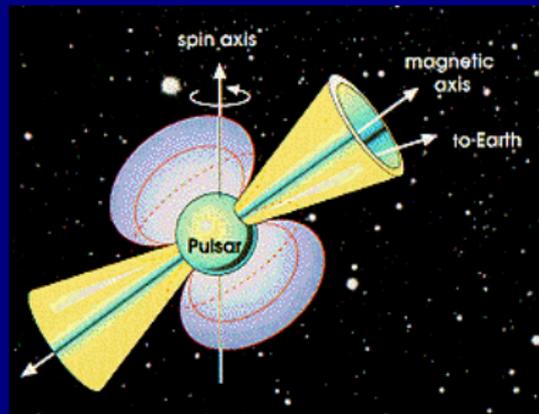
POURQUOI VOIT-ON LES PULSARS CLIGNOTER ?

On peut l'expliquer avec le modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.

On ne reçoit les ondes que lorsqu'on est dans l'axe du faisceau.

Avec ce modèle, beaucoup de pulsars nous échappent, si l'on n'est pas balayé par le faisceau.

De quelle partie du pulsar vient le faisceau ?



POURQUOI VOIT-ON LES PULSARS CLIGNOTER ?

On peut l'expliquer avec le modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.

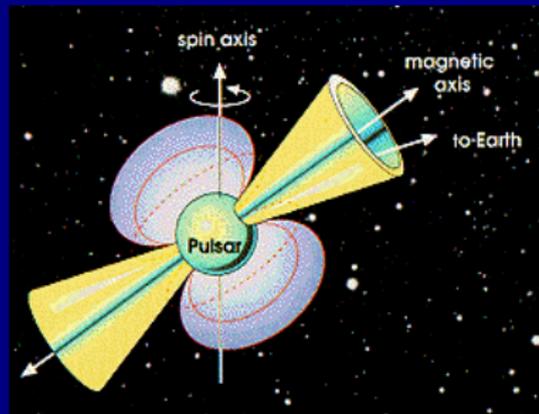
On ne reçoit les ondes que lorsqu'on est dans l'axe du faisceau.

Avec ce modèle, beaucoup de pulsars nous échappent, si l'on n'est pas balayé par le faisceau.

De quelle partie du pulsar vient le faisceau ?

Quel est le mécanisme d'émission des ondes radio ?

Problèmes ouverts.....



LES ÉTOILES À NEUTRONS SONT ELLES TOUTES DES PULSARS ?

RX J 1856-37



L'étoile à neutrons connue la plus proche de
la terre avec une distance de 500 années
lumière.



LES ÉTOILES À NEUTRONS SONT ELLES TOUTES DES PULSARS ?

RX J 1856-37 : une étoile à neutrons qui
n'émet pas comme un pulsar.

RX J 1856-37



L'étoile à neutrons connue la plus proche de
la terre avec une distance de 500 années
lumière.



LES ÉTOILES À NEUTRONS SONT ELLES TOUTES DES PULSARS ?

RX J 1856-37 : une étoile à neutrons qui
n'émet pas comme un pulsar.

Le rayonnement est causé par sa
température élevée :

$T = 660\,000\text{ K}$ en surface.

C'est comme une ampoule électrique.

RX J 1856-37



L'étoile à neutrons connue la plus proche de
la terre avec une distance de 500 années
lumière.



LES ÉTOILES À NEUTRONS SONT ELLES TOUTES DES PULSARS ?

RX J 1856-37 : une étoile à neutrons qui n'émet pas comme un pulsar.

Le rayonnement est causé par sa température élevée :

$T = 660\,000\text{ K}$ en surface.

C'est comme une ampoule électrique.

On en connaît sept "*the magnificent seven*" qui ne pulsent pas.

RX J 1856-37



L'étoile à neutrons connue la plus proche de la terre avec une distance de 500 années lumière.



LES ÉTOILES À NEUTRONS SONT ELLES TOUTES DES PULSARS ?

RX J 1856-37 : une étoile à neutrons qui n'émet pas comme un pulsar.

Le rayonnement est causé par sa température élevée :

$T = 660\,000\text{ K}$ en surface.

C'est comme une ampoule électrique.

On en connaît sept "*the magnificent seven*" qui ne pulsent pas.

C'est à la limite des grands télescopes d'aujourd'hui.

RX J 1856-37



L'étoile à neutrons connue la plus proche de la terre avec une distance de 500 années lumière.

Des particules encore plus élémentaires...

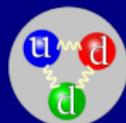
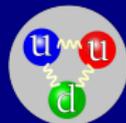
QUEL EST L'ÉTAT DE LA MATIÈRE AU CŒUR DE L'ÉTOILE ?

La densité du cœur est supérieure à celle du noyau atomique !

QUEL EST L'ÉTAT DE LA MATIÈRE AU CŒUR DE L'ÉTOILE ?

La densité du cœur est supérieure à celle du noyau atomique !

Les neutrons et les protons sont très proches. Que se passe-t-il s'ils commencent à se toucher ?

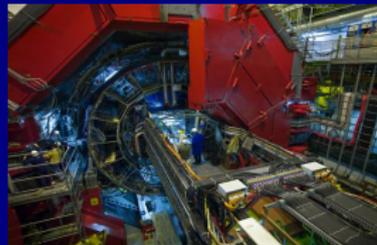
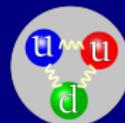


QUEL EST L'ÉTAT DE LA MATIÈRE AU CŒUR DE L'ÉTOILE ?

La densité du cœur est supérieure à celle du noyau atomique !

Les neutrons et les protons sont très proches. Que se passe-t-il s'ils commencent à se toucher ?

Un nouvel état de la matière peut éventuellement apparaître qui est composé de **quarks** et de **gluons**. Cet état de la matière est étudié au CERN (Genève) et pourrait aussi avoir existé dans les fractions de secondes qui ont suivi le big-bang.

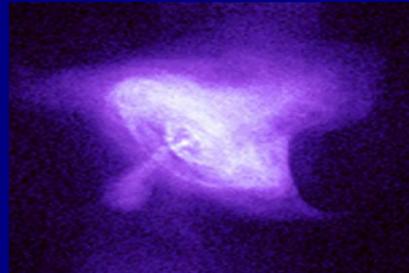


DES ÉTOILES AUSSI DENSES QUE LES NOYAUX ATOMIQUES ?

Oui c'est possible : à la fin de la vie de certaines étoiles, la matière est comprimée par la gravitation, et repoussée par les forces nucléaires...

C'est le dernier équilibre possible avant l'effondrement total (trou noir).

On en connaît ~ 2000 sous la forme de pulsars et sept qui ne pulsent pas.



MERCI DE VOTRE ATTENTION !



Vela : Restes de l'étoile qui a explosé, et dont le cœur s'est condensé en pulsar. (image Greg Bradley)