

Pulsars et étoiles à neutrons

Fabrice Mottez

Laboratoire Univers et Théorie, Observatoire de Paris-Meudon

Anciennement au CETP qui est en partie devenu le LPP.

Le grand vide de l'atome, l'extrême densité du noyau.

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

- * le noyau (constitué d'un seul proton) aurait une taille de 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 !



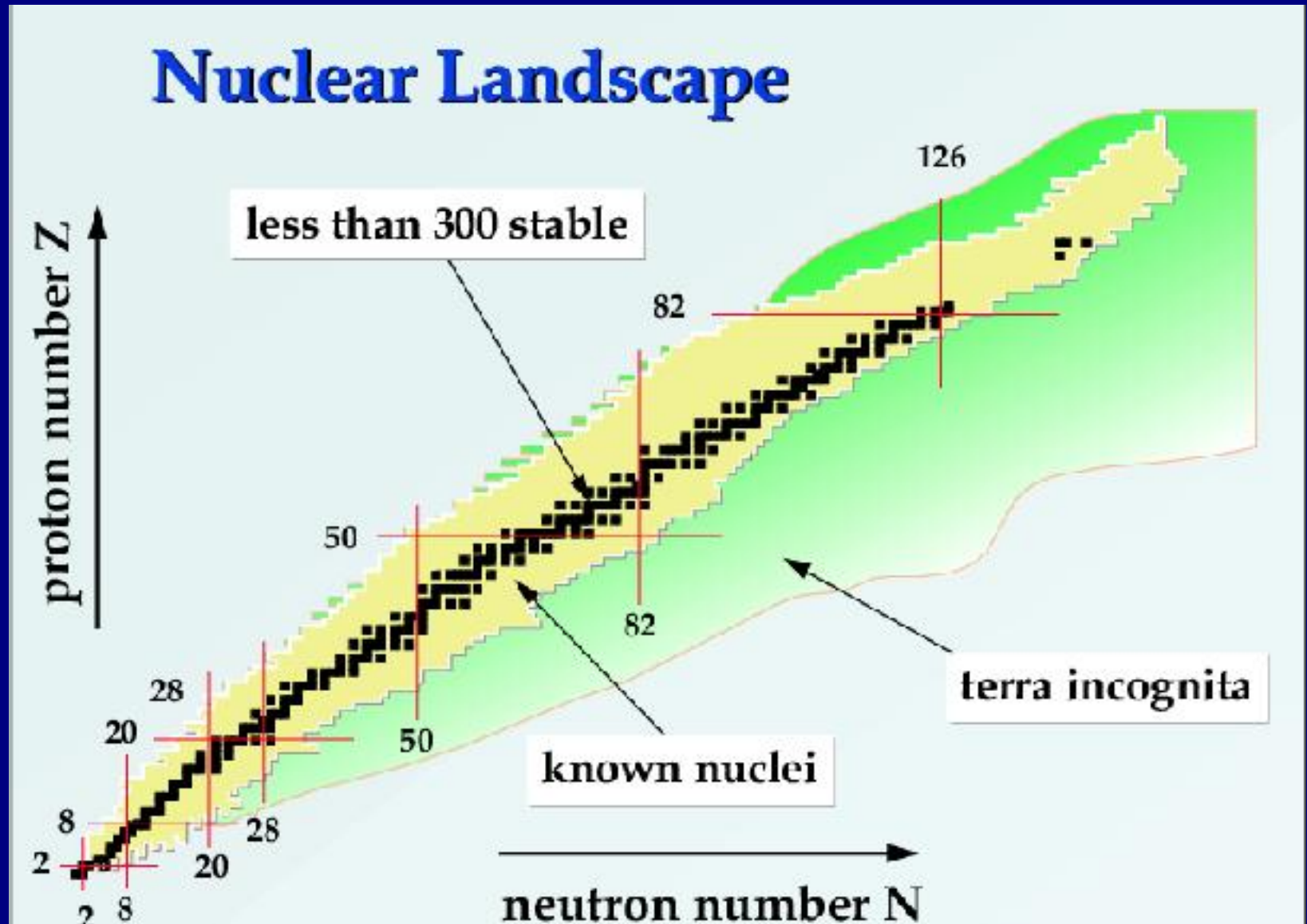
Si un atome avait la taille de la Tour Eiffel son noyau (ayant presque toute la masse) serait comme une coccinelle.

Deux questions posées par des astronomes et des physiciens après la découverte des noyaux atomiques (vers 1930) :

Plus d'un millions de tonnes dans un millimètre cube... le noyau atomique est-il le seul objet aussi dense dans l'univers ?

Existerait-il des étoiles aussi denses (ou plus denses) que les noyaux atomiques ?

Le neutron



Une conjecture prophétique.

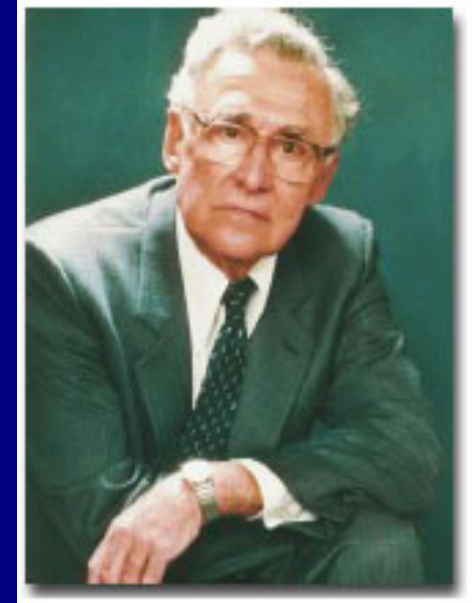
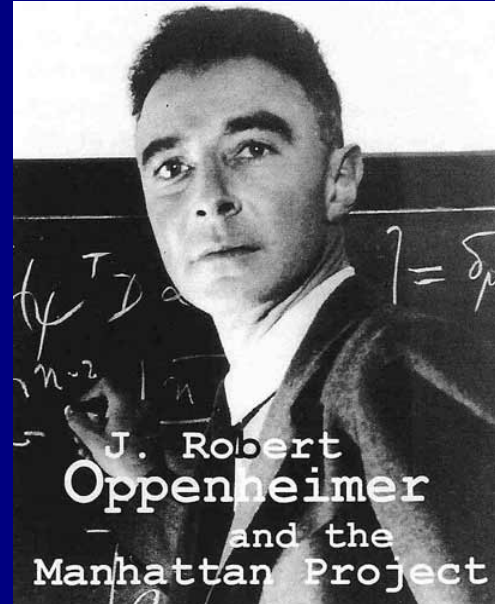
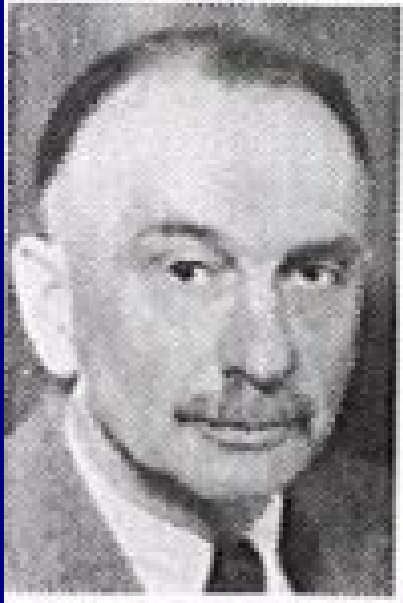
Landau 1932 (Phys. Z. Sowjetunion, 1, 285) :

- possibilité d'une masse maximale pour les naines blanches (indépendamment de Chandra). Environ 1.5 masse solaire.
- Landau 1932 : possibilité d'étoile dont le coeur aurait la densité des noyaux atomiques.

Baade et Zwicky (Proc Nat Acad Sci, 1934). :

- une nouvelle forme d'étoiles composées de neutrons, qui seraient la phase ultime de l'évolution stellaire...
- ...Les supernovae représenteraient la transition d'une étoile normale en étoile à neutrons.
- Les supernovae seraient à l'origine des rayons cosmiques.
- Le tout dans un article d'une page.

Les étoiles à neutron entre 1932 et 1967



1939, Richard Tolmann, Robert Oppenheimer et George Volkoff
calculent des modèles d'équilibre interne
des étoiles à neutrons.

Les étoiles à neutron entre 1932 et 1967

Les équations Tolman-Oppenheimer-Volkoff (1939).

$$\begin{aligned}\frac{dm}{dr} &= 4\pi r^2 \rho \\ \frac{d\varphi}{dr} &= \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right)^{-1} \left(\frac{Gm}{r^2} + 4\pi G \frac{p}{c^2} r\right) \\ \frac{dp}{dr} &= - \left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) \frac{d\varphi}{dr} .\end{aligned}$$

1.masse-densité

2.gravitation relativiste (Schwarschild interne, inclus pression)

3.equilibre entre forces de pression et de gravitation.

ressemblent à des équations Newtoniennes, mais sont issues de la RG.

Il reste à ajouter une relation entre pression et densité (eq. d'état).

Considèrent un gaz dégénéré de neutrons.

Théorie T.O.V.

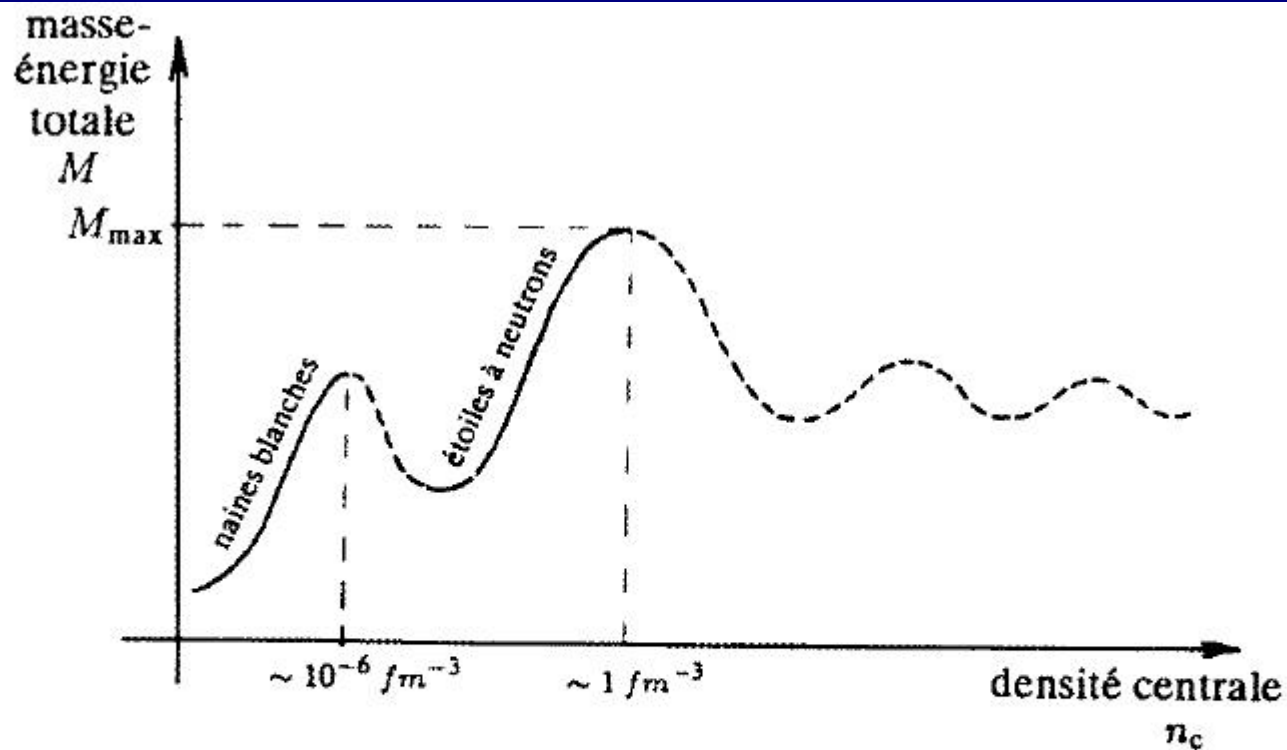
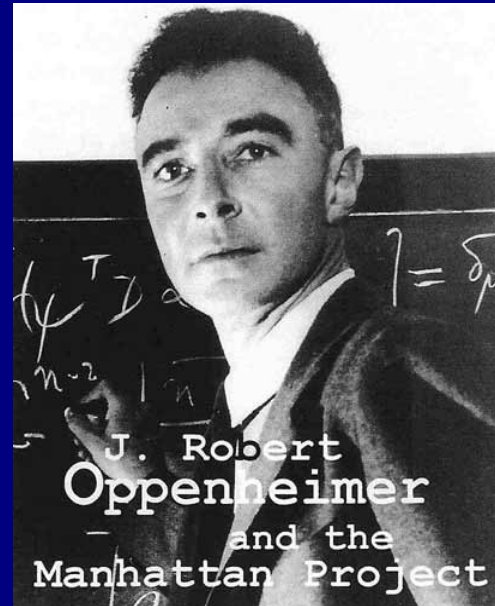


FIG. 4.6 – Masse-énergie totale M en fonction de la densité baryonique centrale n_c , pour une équation d'état donnée. Les branches en trait plein correspondent à des équilibres stables, celles en pointillés à des équilibres instables. Le premier maximum correspond aux naines blanches, le second aux étoiles à neutrons. Les maxima suivants sont purement théoriques puisque situés sur une partie instable de la courbe.

Prédissent une masse maximale de l'ordre de 3 masses solaires, au delà, effondrement (vers trou noir, un truc encore plus dingue).

Les étoiles à neutron entre 1932 et 1967

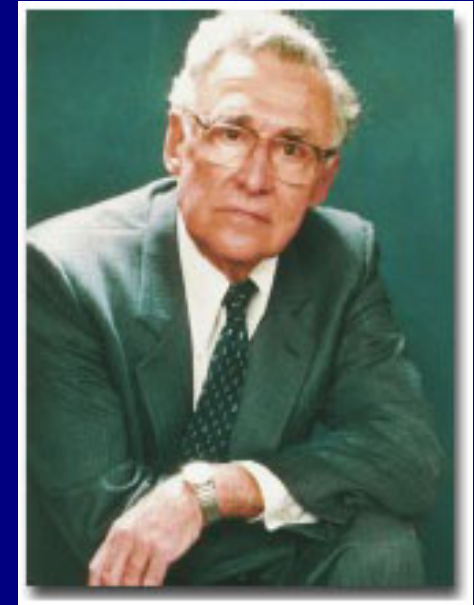
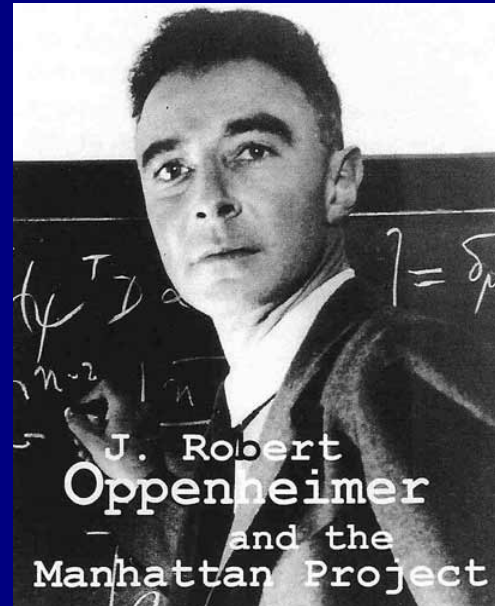
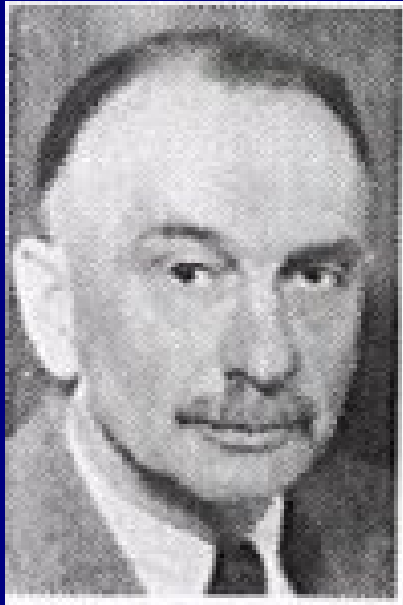


1939, Robert Oppenheimer et George Volkoff, et Richard Tolman calculent des modèles d'équilibre interne des étoiles à neutrons.

Ils trouvent que malgré une masse $>$ masse du Soleil, **le rayon est de l'ordre de 20 km.**

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

Les étoiles à neutron entre 1932 et 1967



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

Ne prédisent aucune observable pour les astronomes.

Donc pas pris au sérieux.

[...] en définitive l'expérience est le contrôle, le critère de l'exactitude du raisonnement dans la recherche des causes ou de la vérité



Claude Bernard (dixit 1856).

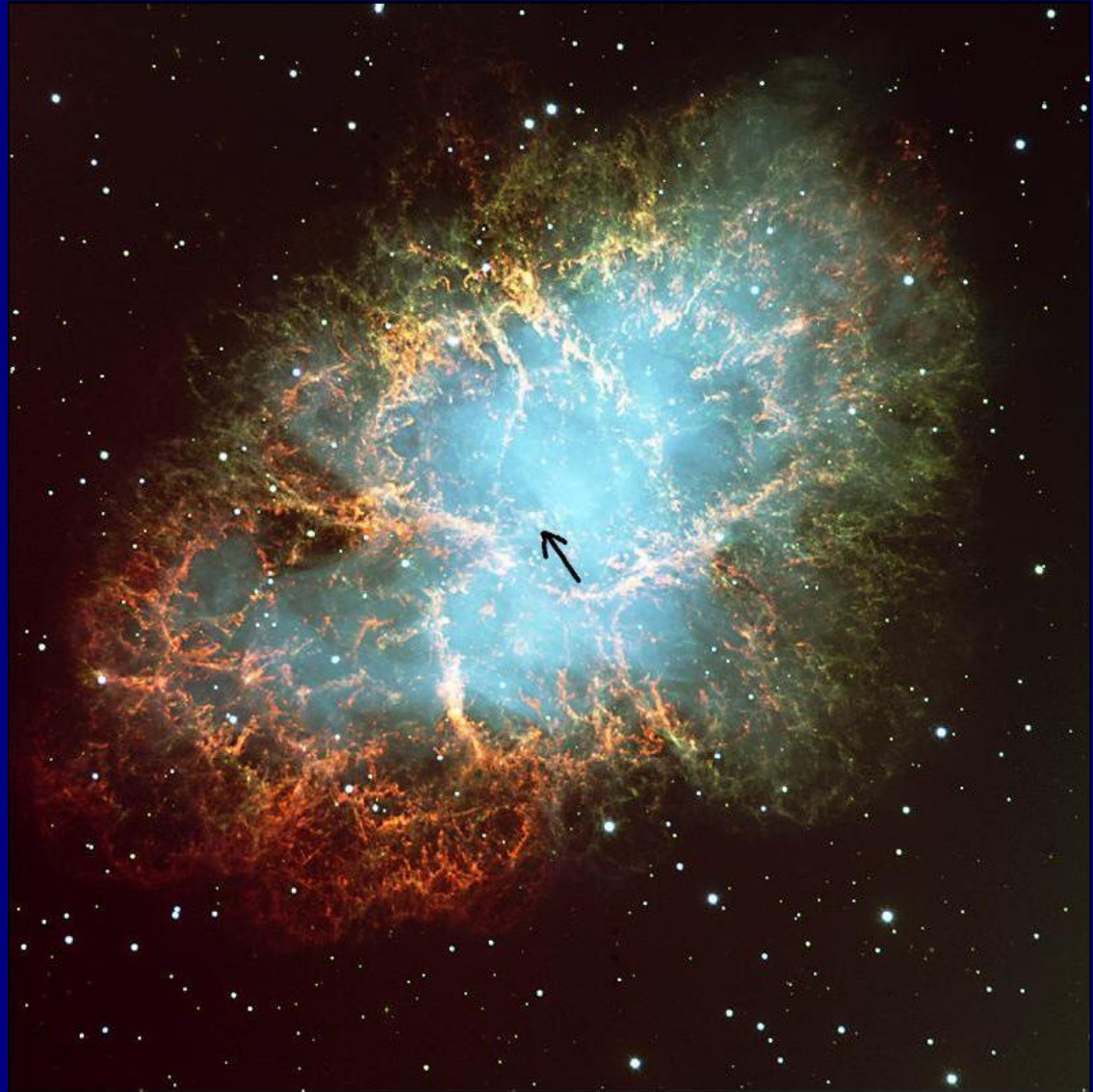
Eh ! Nous on s'en fiche des expériences.
On fait des théories invérifiables parce qu'on est
super forts !
(Et on vend plus de livres que Claude Bernard.)



1967, Retour sur la nébuleuse du Crabe.

Un post-doctorant à Cornell University propose qu'une étoile à neutron en rotation rapide, avec un fort champ magnétique, est la source d'énergie de la nébuleuse du Crabe.

C'est une spéculation fondée mais théorique. On ne dispose pas d'observation confortant cette hypothèse.



1967, du côté des radio astronomes.

Anthony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell étudient la scintillation du ciel en ondes radio. Pour cela, il faut observer le ciel sur de courtes échelles de temps, et pas intégrer/poser une image sur des heures. Construisent un RT à $l=3,7$ mètres. Dans le mois qui suit la mise en service du RT, J. Bell trouve une source oscillant à $T=1,37$ seconde.

La période des oscillation est d'une constance jamais vue

Etudie les artefacts, les élimine tous des causes du signal
Comment un signal si rapide et régulier peut-il provenir de l'espace ?

Signal de vie extra-terrestre ?

Little green men, et on attend 2 mois pour publier l'observation, dans Nature..



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

Little green men.

- On ne blague pas avec ça en 1967.

Plusieurs dizaines de témoignages par semaine.
Création de clubs d'observateur d'OVNIS.



Dessin témoignage OVNI à Cussac (France) en 1967.
[Joël Mesnard]



OVNI « vu » en 1967 à
Rhode Island [Harold Trudel]

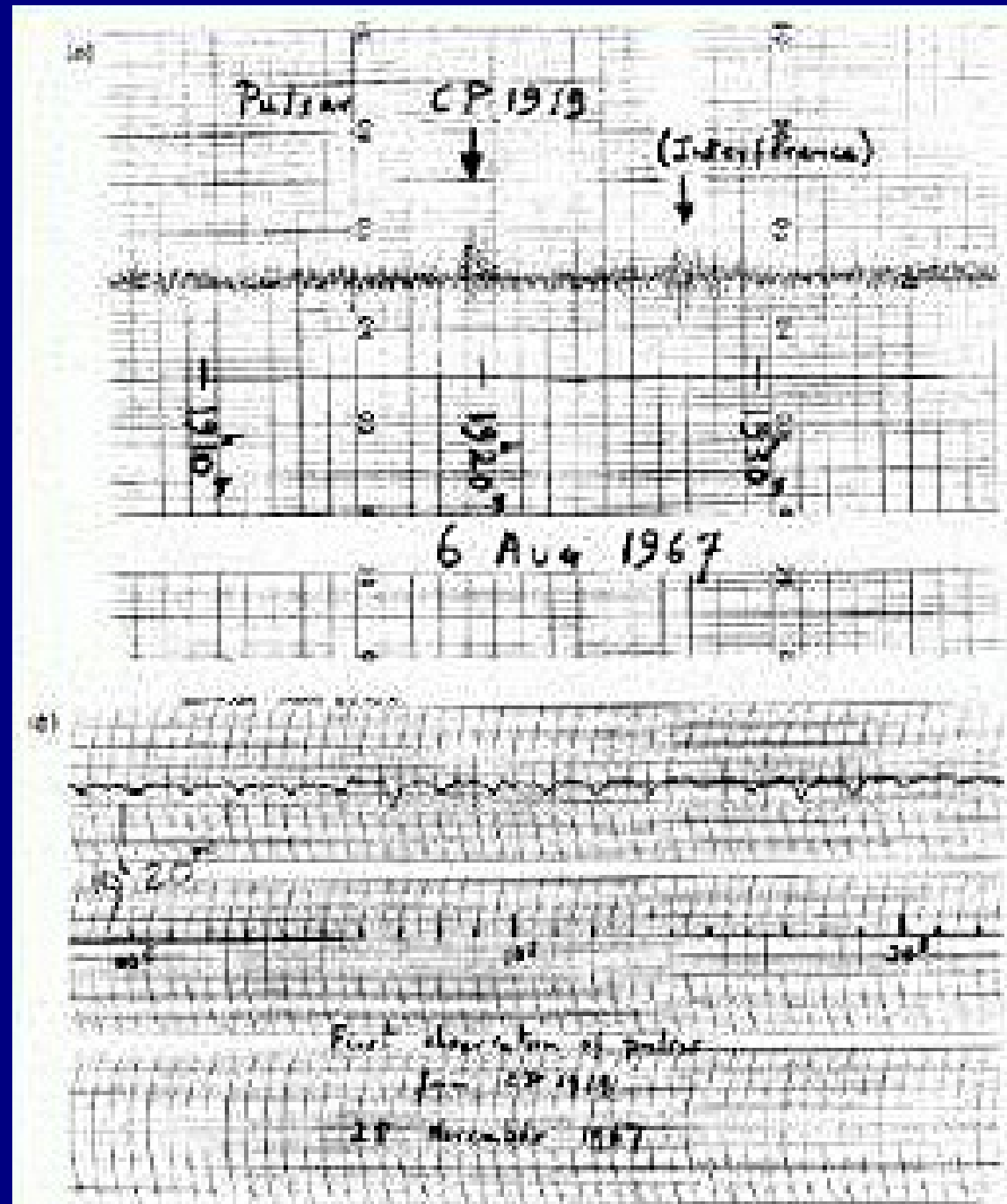
1967, du côté des radio astronomes.

L'article de Nature.
Remarquable analyse du signal.
Origine hors système solaire,
à une distance « stellaire ».

La régularité des pulsations joue en
faveur d'un mécanisme lié à la
rotation d'une étoile/d'un astre.

La rapidité des pulsations laisse
penser que la source des oscillations
est de petite dimension.
Peut-être une naine blanche, ou une
(hypothétique) étoile à neutrons.

En quelques mois on découvre
d'autres sources (depuis 8
observatoires différents).



Comment se répartissent les périodes ?

On peut mesurer la période de rotation avec une extrême précision, car en quelques heures, on a déjà un grand nombre de tours.
(Plus la fréquence est élevée, moins il faut de temps pour la mesurer.)

On trouve deux groupes.
Les pulsars « lents » dont le PSR1919 découvert en premier.
C'est le groupe le plus important.

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

Pulsar
period
distrib.

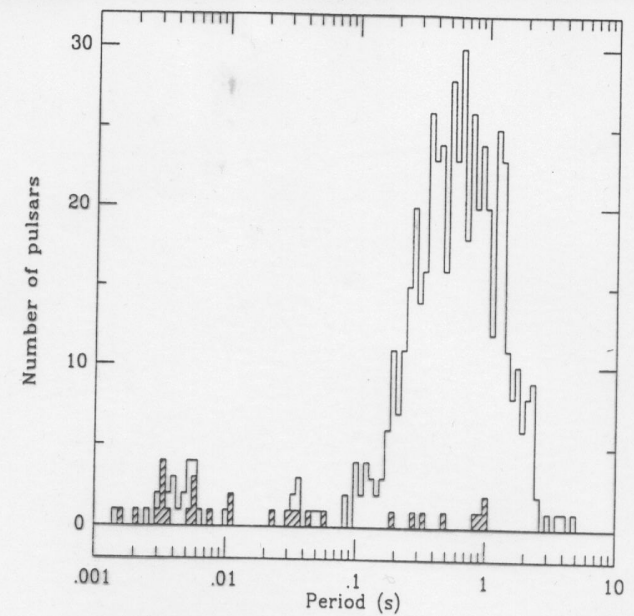


Figure 15.14 The distribution of periods for 558 pulsars. Binary pulsars are indicated by the shaded area, and the millisecond pulsars are on the left. The average period is about 0.8 s. (Figure from Taylor, Manchester, and Lyne, *Ap. J. Suppl.*, 88, 529, 1993.)

Vela
Pulsar
Glitch

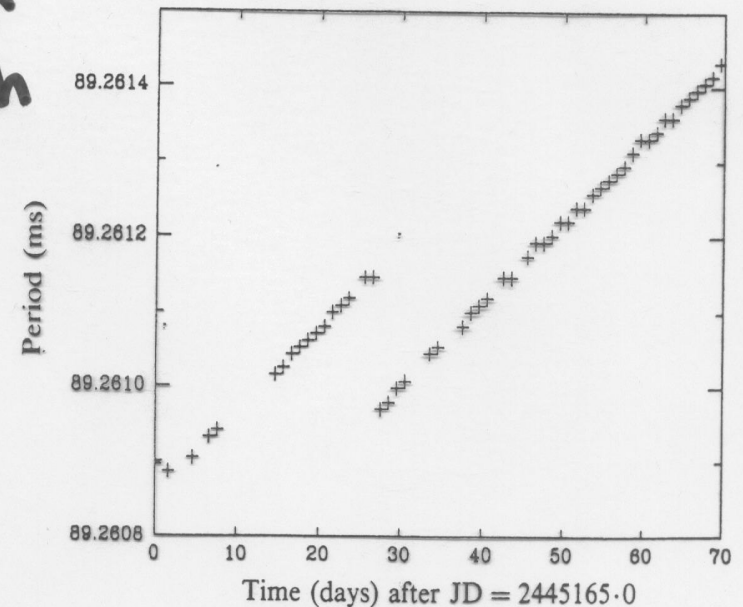


Figure 15.16 A glitch in the Vela pulsar. (Figure from McCulloch et al., *Aust. J. Phys.*, 40, 725, 1987.)

La vitesse de rotation est-elle si uniforme ?

On peut mesurer la période de rotation avec une extrême précision, car en quelques heures, on a déjà un grand nombre de tours.

(Plus la fréquence est élevée, moins il faut de temps pour la mesurer.)

On constate que :

- la vitesse de rotation des pulsars diminue peu mais très constamment. Autrement dit, la période P augmente.

- occasionnellement, la vitesse de rotation du pulsar augmente (durant quelques jours) : glitches. La période P diminue.

Pulsar
period
distrib.

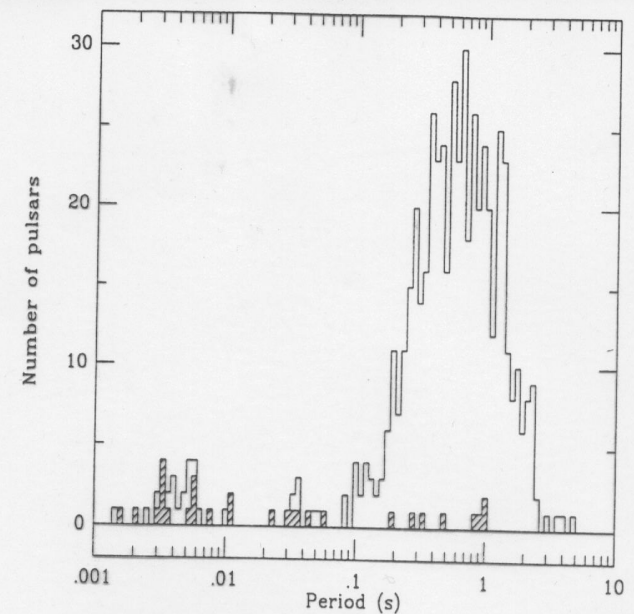


Figure 15.14 The distribution of periods for 558 pulsars. Binary pulsars are indicated by the shaded area, and the millisecond pulsars are on the left. The average period is about 0.8 s. (Figure from Taylor, Manchester, and Lyne, *Ap. J. Suppl.*, 88, 529, 1993.)

Vela
Pulsar
Glitch

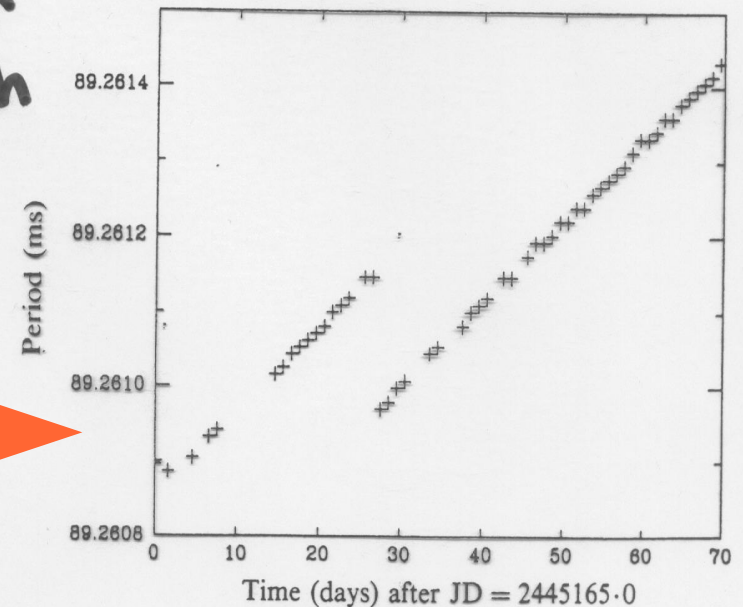


Figure 15.16 A glitch in the Vela pulsar. (Figure from McCulloch et al., *Aust. J. Phys.*, 40, 725, 1987.)

La vitesse de rotation est-elle si uniforme ?

L'âge des pulsars :
puisque'ils ralentissent, on peut estimer leur âge.

méthode 1 :

On suppose qu'au départ, ils tournaient en quelques millisecondes, et on compare à la période actuelle.

méthode 2 :

Une formule plus simple,

$$\text{âge} = P / (dP/dt)$$

Autrement dit, on considère que plus le pulsar est jeune, plus vite il ralentit.

On trouve que les pulsars rapides sont jeunes, et que les lents sont vieux. C'est compatible avec la méthode 1.

Cela est également compatible avec les restes de SNR historiques (P faible, dP/dt fort)

The $P-\dot{P}$ diagram

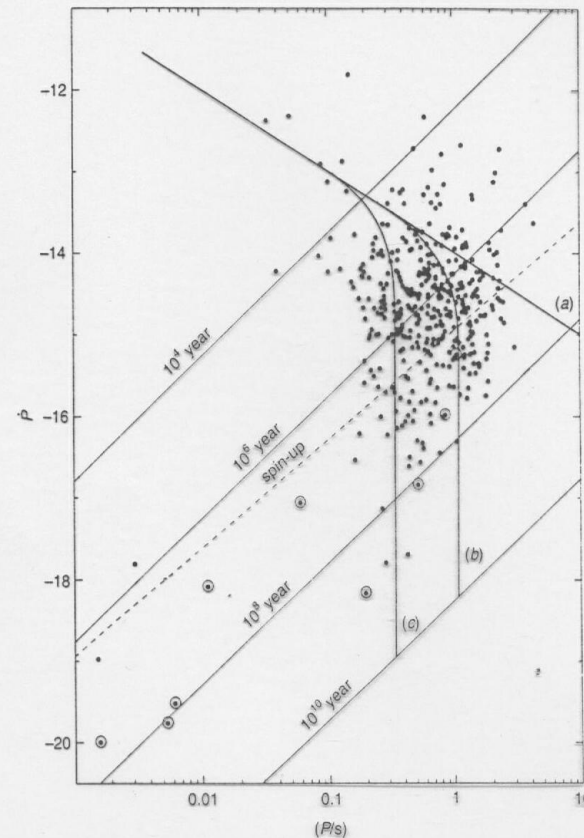


Figure 15.15. A plot of \dot{P} versus P for pulsars. The dots enclosed in circles represent pulsars which are members of binary systems. Lines of constant age according to the formula $\tau = P/2\dot{P}$ are shown. Schematic evolutionary tracks of pulsars on this diagram are shown assuming (a) that there is no decay in the strength of the magnetic field and that the timescale for decay of the magnetic fields is (b) 10^7 years and (c) 10^6 years. The upper limit to the spin-up periods for dead pulsars according to the models of van den Heuvel (1987) is also shown (see the discussion leading to expression (16.48)). (After A.G. Lyne and F. Graham-Smith (1990). *Pulsar astronomy*, p. 129. Cambridge: Cambridge University Press.)

Quelle est l'origine des pulsations ?

Oscillation d'une étoile ? (variable de très courte période).

On pourrait avoir des périodes de qq secondes avec des naines blanches.

Pour des millisecondes, il faudrait des étoiles à neutrons.

La période dépend de la masse, du rayon, de l'élasticité de l'étoile. Elle ne devrait pas changer : contradictoire avec les observations.

Rotation d'une étoile ?

Hypothèse de Hewitt et Bell.

Les travaux de Pacini et Gold (1968) vont trancher...

Pulsar
period
distrib.

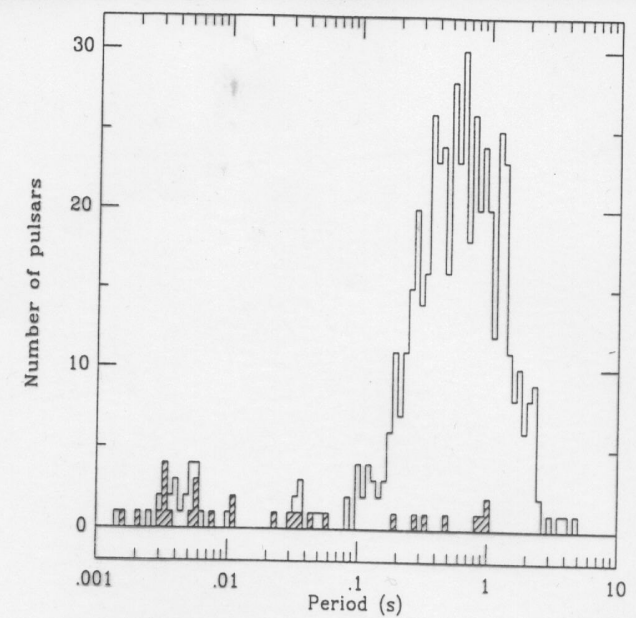


Figure 15.14 The distribution of periods for 558 pulsars. Binary pulsars are indicated by the shaded area, and the millisecond pulsars are on the left. The average period is about 0.8 s. (Figure from Taylor, Manchester, and Lyne, *Ap. J. Suppl.*, 88, 529, 1993.)

Vela
Pulsar
Glitch

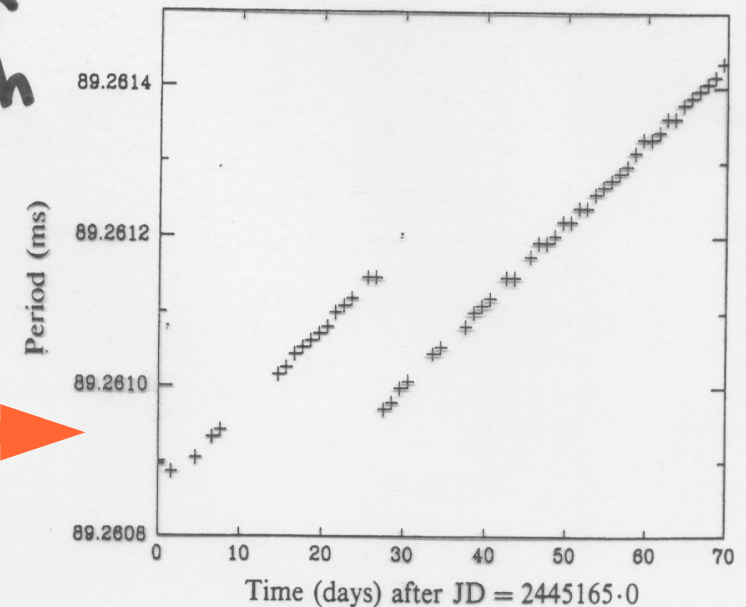
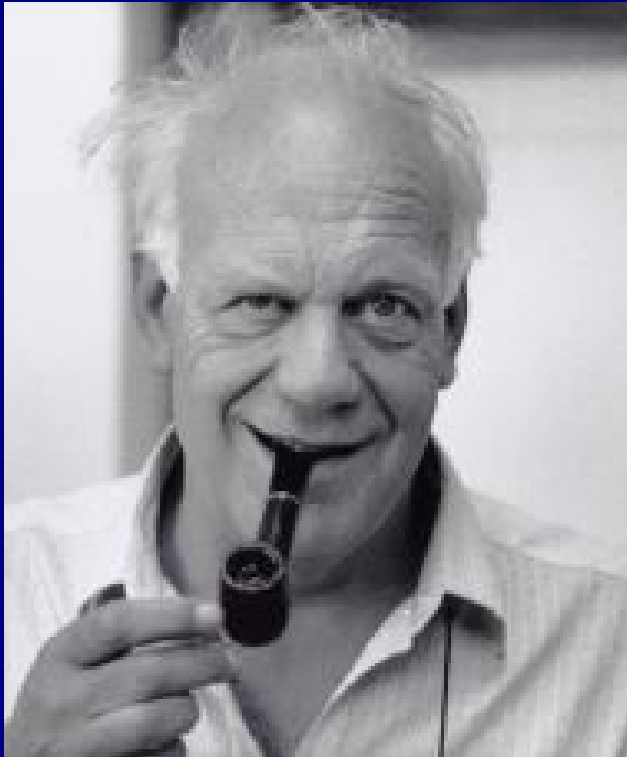


Figure 15.16 A glitch in the Vela pulsar. (Figure from McCulloch et al., *Aust. J. Phys.*, 40, 725, 1987.)

en coeur :

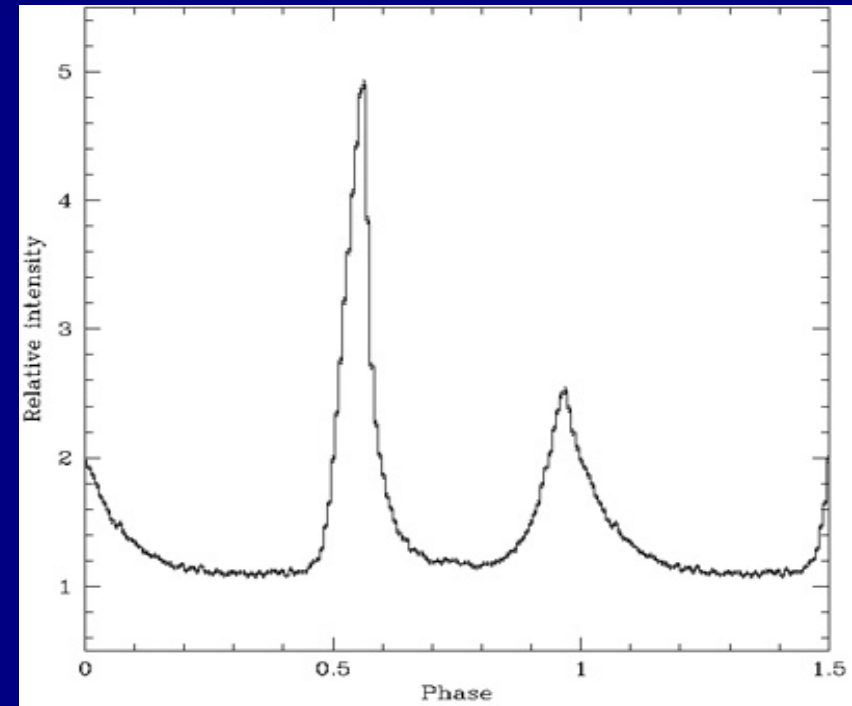
Ce ne peut être
qu'une étoile
à neutrons !



Franco Pacini



Thomas Gold

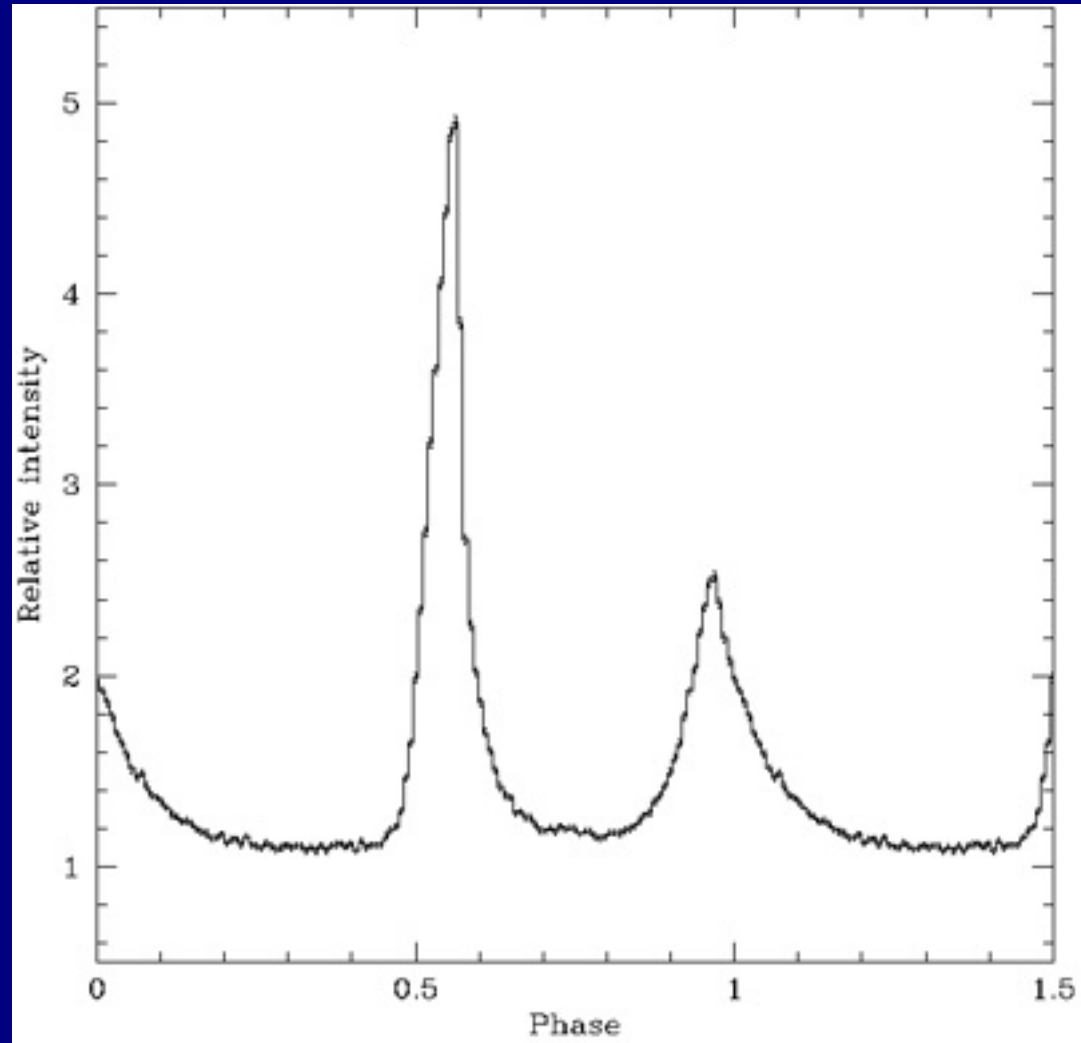


Pulsation radio de la nébuleuse du Crabe.
La période est de 0.033 seconde.

Naine blanche ou étoile à neutrons ?

Découverte des pulsars du
Crabe ($P= 33$ millisecondes)
et de Vela ($P=89$ milliseconde).

Compétition entre **gravité** et **forces
d'inertie** à la surface :
pour une naine blanche (1000 km),
la période de rotation maximale est
estimée à 1 seconde (ou 0.25s au pire).
Au delà, les forces d'inertie l'emportent
sur la gravité, et l'étoile perd sa cohésion.



Pulsation radio de la nébuleuse du Crabe.
La période est de 0.033 seconde.

Naine blanche ou étoile à neutrons ?

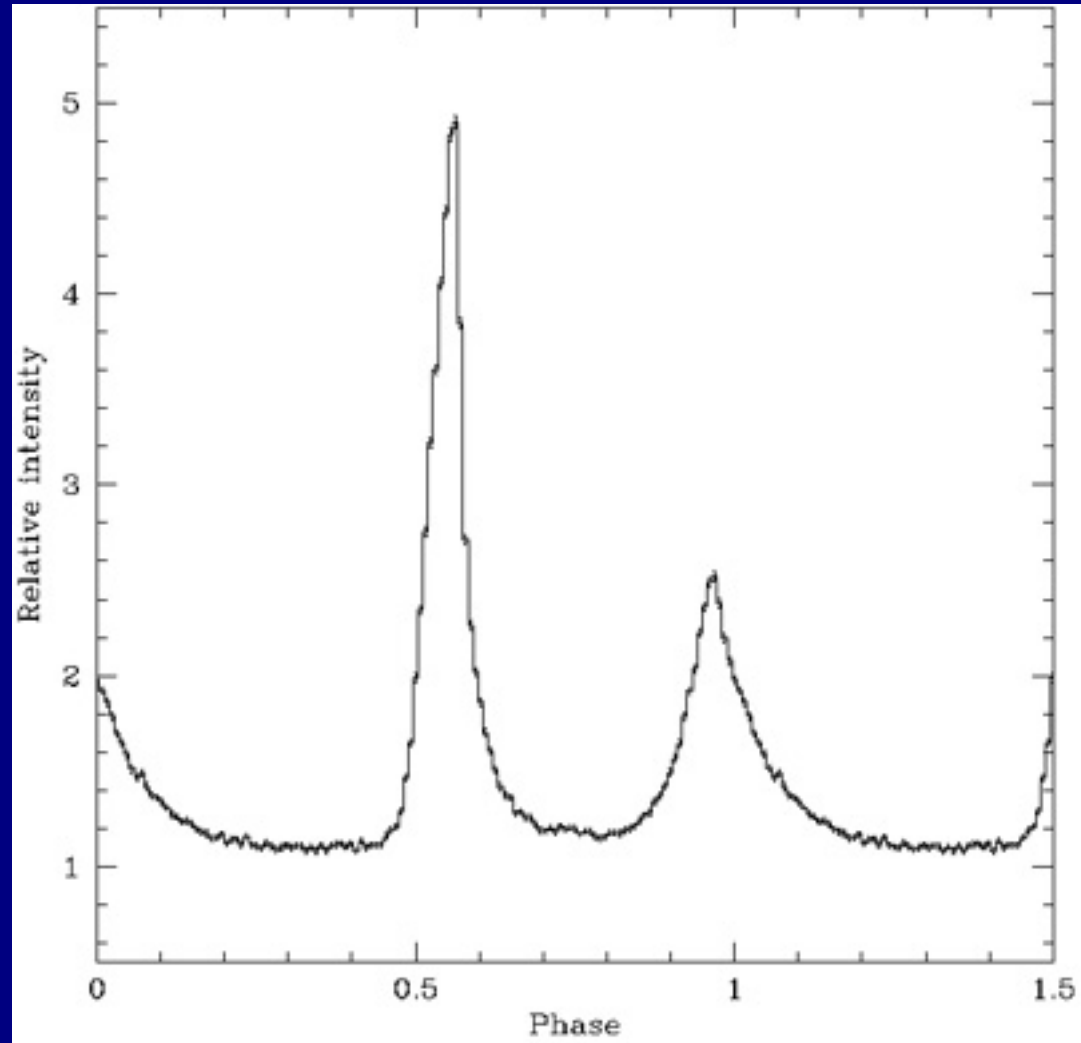
Découverte des pulsars du
Crabe (P= 33 millisecondes)
et de Vela (P=89 milliseconde).

Compétition entre **gravité** et **forces
d'inertie** à la surface :

Une étoile à neutrons : le rayon 10km
implique à la fois une gravité plus forte
et une moindre inertie.

Une période de quelques millisecondes
est possible.

**Première observation en faveur de
l'existence des étoiles à neutrons.**



Pulsation radio de la nébuleuse du Crabe.
La période est de 0.033 seconde.

Pourquoi les pulsars tournent-ils si vite ?

Facile :

Conservation du moment cinétique (angular momentum).

$J = \text{somme de (masse} \times (\text{distance à l'axe de rotation})^2 \times \text{vitesse angulaire)}$

Lors de la contraction extrême d'une étoile (ou de son cœur) se transformant en étoile à neutrons, la distance à l'axe de rotation diminue de plusieurs ordres de grandeur.

La vitesse angulaire doit donc s'accroître aussi de plusieurs ordres de grandeur.

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



Lysacek

Pourquoi les pulsars tournent-ils si vite ?

Comme rien n'est simple, il faut être conscient qu'avec une partie de matière éjectée au cours de l'évolution stellaire, la matière éjectée emporte une partie du moment cinétique.

Il faut tenir compte de cela dans les calculs plus précis.

Le calcul d'un ordre de grandeur est aisé, une estimation précise est difficile.



Lysacek

Pourquoi les pulsars ont-ils un fort champ magnétique ?

Facile :

Conservation du flux magnétique.

Le champ magnétique dans une région où il y a du plasma est (en général) transporté avec le plasma. Si le plasma se contracte (effondrement gravitationnel), le champ magnétique attaché au plasma suit le mouvement, ce qui provoque un accroissement de son intensité.

Pourquoi les pulsars ont-ils un fort champ magnétique ?

Les valeurs de B en surface : (1 Gauss= 0.0001 Tesla)

autour de la Terre : 0,5 Gauss.

autour du Soleil : 10-100 Gauss.

taches solaires : 1500-2500 Gauss.

champ en RMN : 10 000 Gauss.

champ fort en labo : 450 000 Gauss.

champ fort expérimenté qq nanosecondes (avant destruction du matériel) : 10 MG.

naine blanche : 1 000 000 Gauss est possible (20 ou 30 cas mesurés)

plus faible connu : 1000 G pour 40 Eri B ;

plus fort connu : 320 MG pour Grw+70 8247.

champ instantanément mortel : 10^9 Gauss.

étoile à neutrons de pulsar : de 10^{12} à 10^{13} Gauss.

on a découvert récemment des champs encore plus élevés que dans les pulsars...

Pourquoi la période des pulsars s'allonge ?

Les pulsars ont un champ magnétique fort. Il tourne mais n'est pas aligné avec l'étoile. Donc dans l'espace, on doit mesurer un champ magnétique variable, allant infiniment loin. C'est assimilable à une onde, qui propage donc de l'énergie au loin. Mais le champ magnétique diminue peu. L'énergie doit donc être prise ailleurs. Elle est prise dans la rotation. Perte d'énergie de rotation donc allongement de la période.

(C'est le modèle très/trop simple « pulsar dans le vide ».)

The $P-\dot{P}$ diagram

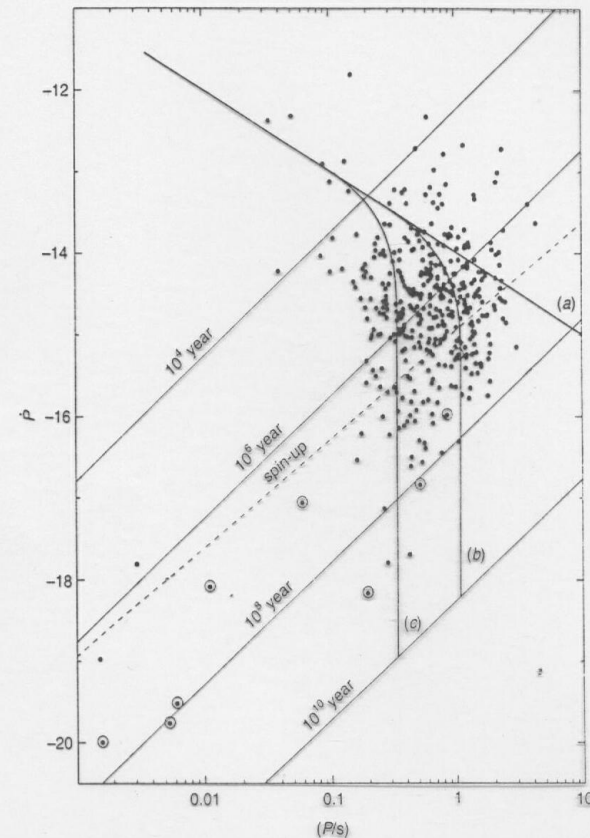


Figure 15.15. A plot of \dot{P} versus P for pulsars. The dots enclosed in circles represent pulsars which are members of binary systems. Lines of constant age according to the formula $\tau = P/2\dot{P}$ are shown. Schematic evolutionary tracks of pulsars on this diagram are shown assuming (a) that there is no decay in the strength of the magnetic field and that the timescale for decay of the magnetic fields is (b) 10^7 years and (c) 10^6 years. The upper limit to the spin-up periods for dead pulsars according to the models of van den Heuvel (1987) is also shown (see the discussion leading to expression (16.48)). (After A.G. Lyne and F. Graham-Smith (1990). *Pulsar astronomy*, p. 129. Cambridge: Cambridge University Press.)

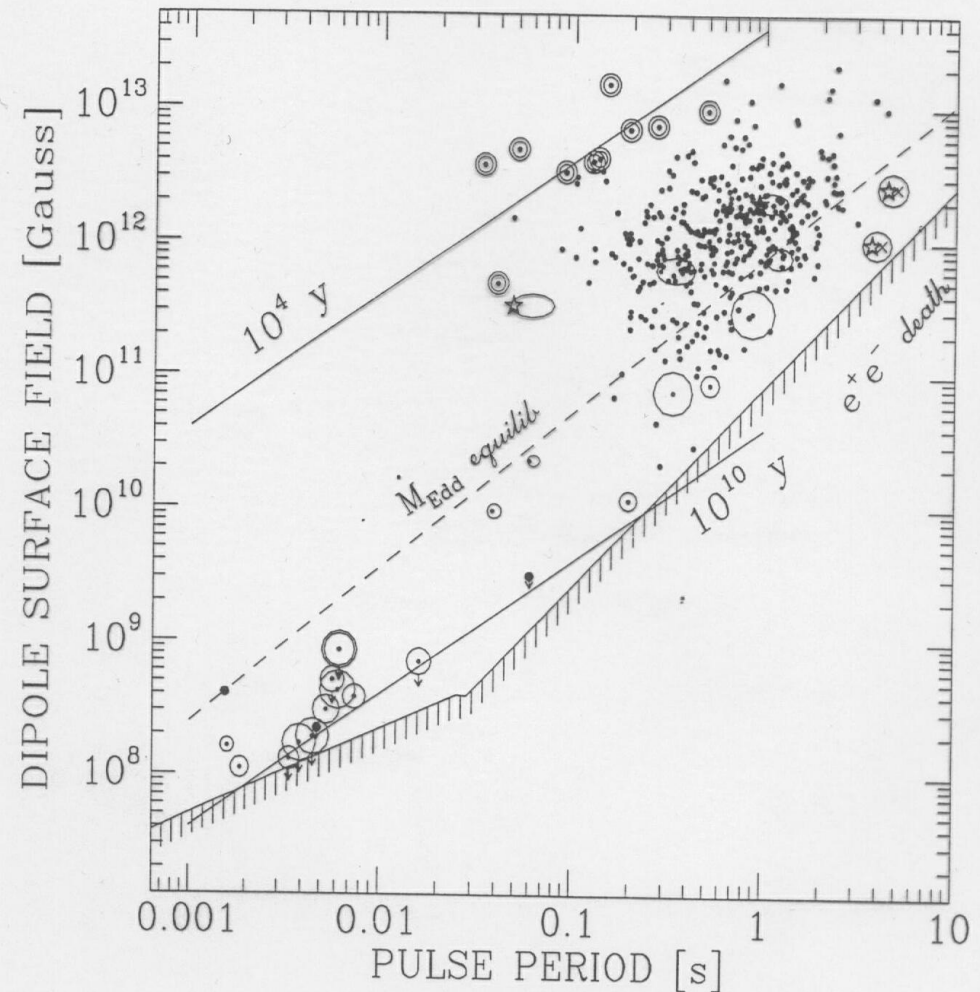
Pourquoi la période des pulsars s'allonge ?

Les pulsars ont un champ magnétique fort. Il tourne mais n'est pas aligné avec l'étoile. Donc dans l'espace, on doit mesurer un champ magnétique variable, allant infiniment loin. C'est assimilable à une onde, qui propage donc de l'énergie au loin. Mais le champ magnétique diminue peu. L'énergie doit donc être prise ailleurs. Elle est prise dans la rotation. Perte d'énergie de rotation donc allongement de la période.

(C'est le modèle très/trop simple « pulsar dans le vide ».)

Le diagramme ci-contre corrobore ce genre d'explication : plus le champ magnétique est fort, plus lent est le pulsar... sauf pour les pulsars doubles (ceux entourés d'un rond).

P - B_s Diagram



Pourquoi voit-on les pulsars clignoter.

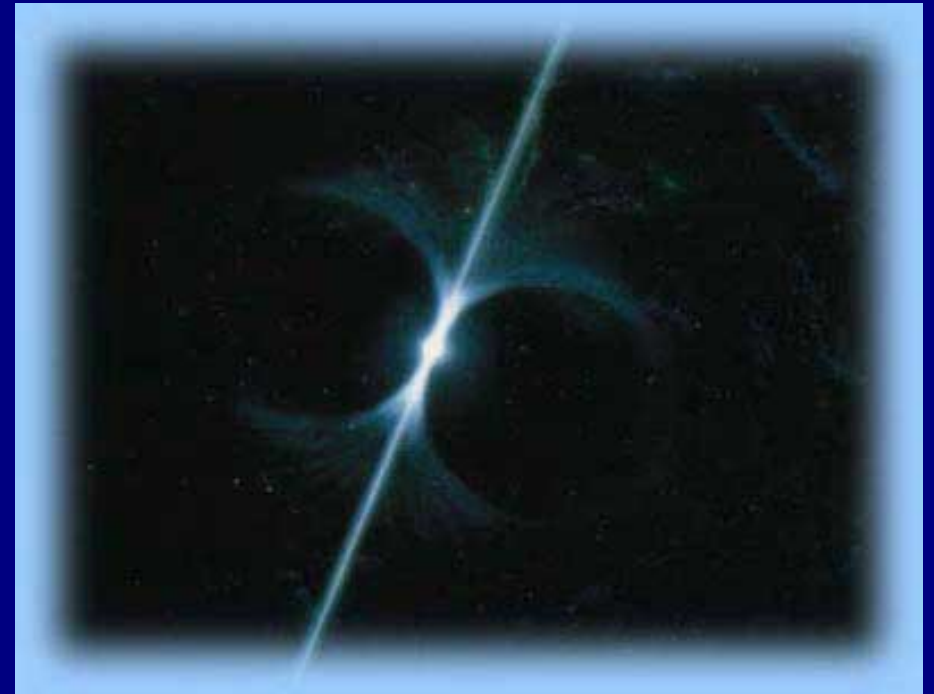
- Modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.
- Avec ce modèle, beaucoup de PSR nous échappent, si l'on n'est pas balayé par le faisceau.
- De quelle partie du PSR vient le faisceau ?



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.

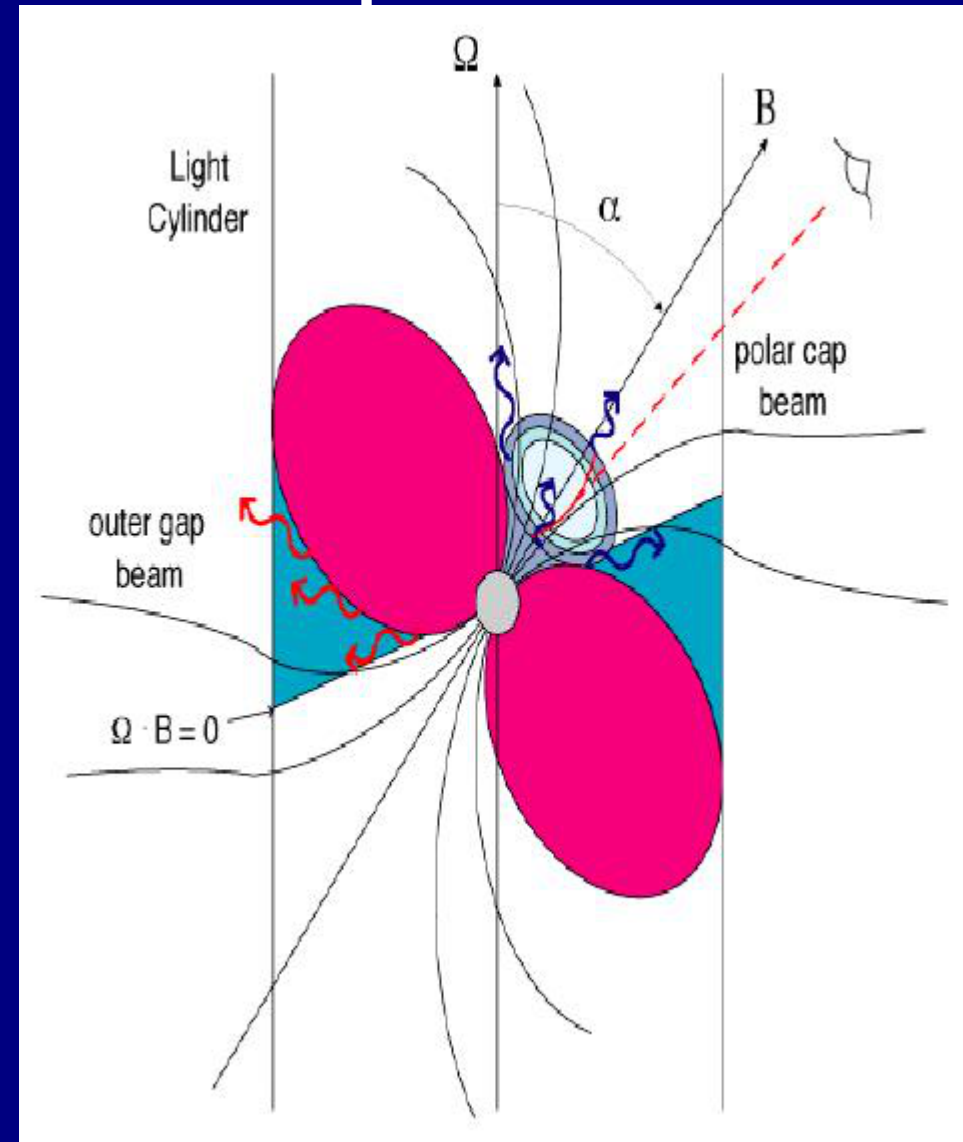
- Modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.
- Avec ce modèle, beaucoup de PSR nous échappent, si l'on n'est pas balayé par le faisceau.
- De quelle partie du PSR vient le faisceau ?



Un des modèles suppose que le faisceau d'ondes radio est émis depuis la calotte du pôle magnétique. Ce faisceau est très étroit, de l'ordre de 1 degré, ou moins.

La magnétosphère des pulsars.

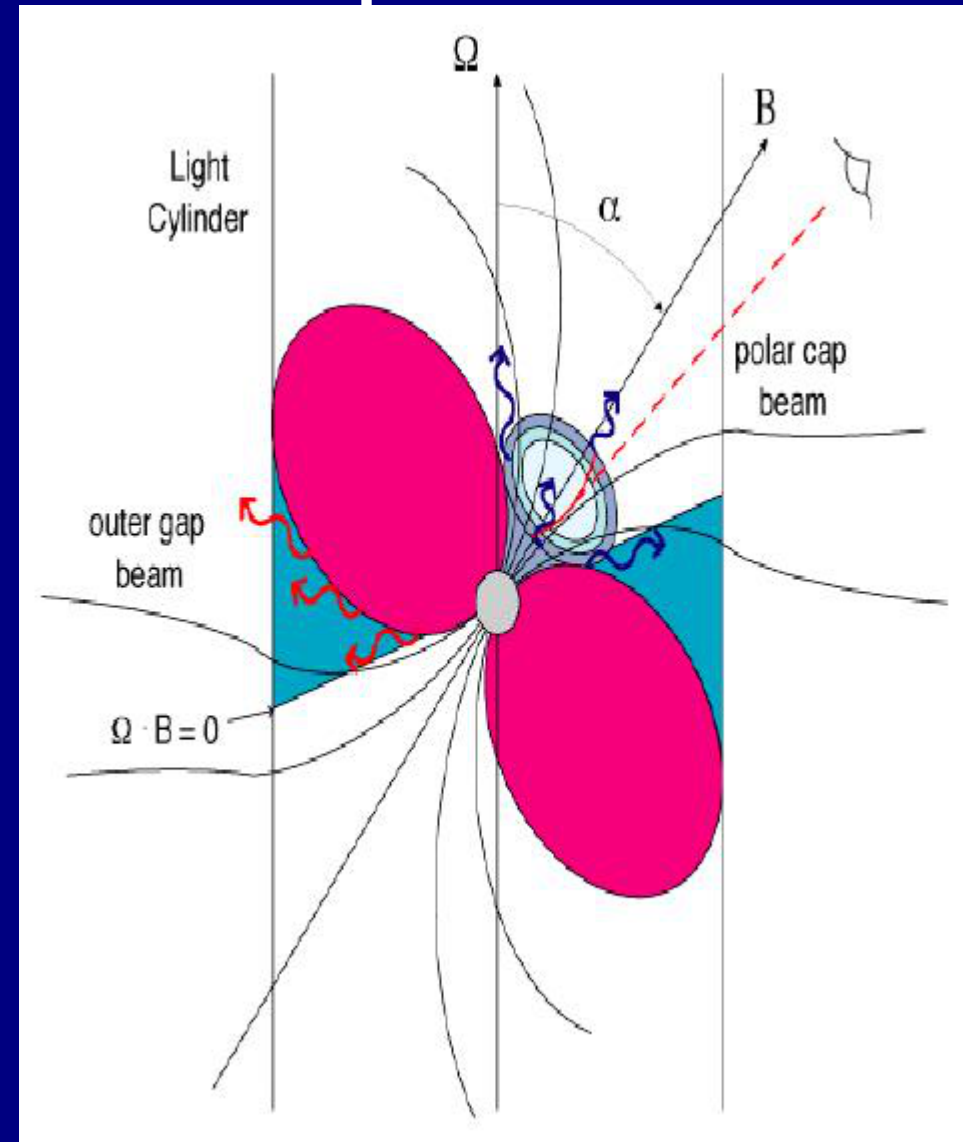
- De quelle partie du PSR vient le faisceau d'émissions radio ?
- Les particules (électrons, positrons) suivent les lignes de champ magnétique.
- Inner gap : très près du pôle magnétique.
- Outer gap : très près des lignes de champ qui, si elles tournaient solidairement avec le pulsar, atteindraient la vitesse de la lumière (cylindre de lumière).



Deux régions possibles d'émissions:
inner et outer gaps.. [Jean-François Olive, CESR]

La magnétosphère des pulsars.

- Rôle de la collimation : les particules ultra-relativistes de l'environnement d'un pulsar sous vraisemblablement les sources d'émission.
- Une source rapide n'émet que dans un cône dont l'axe est parallèle à sa vitesse, ici le long des lignes de champ.
- Si la particule est lente, le cône est très très ouvert (émission dans toutes les directions)
- Si la particule est rapide (relativité), le cône est étroit.
- Pour un pulsar : direction des ondes = direction des lignes de champ.



Deux régions possibles d'émissions: inner et outer gaps.. [Jean-François Olive, CESR]

Les pulsars n'émettent-ils qu'en radio ?

- La réponse est très variable.
- Le Crabe émet en tout : radio, optique, UV, X, gamma.
- Certains pulsars n'émettent qu'en radio.
- On a découvert des pulsars X ou gamma qui n'émettent pas en radio. C'est le cas de la plus puissante source gamma : Geminga.

Geminga est dans les gémeaux, mais geminga veut dire (en dialecte milanais) : « est nulle part ». En effet, on ne trouve pas de contre-partie UV, optique ou radio.

[telescope gamma EGRET, Shrekuma, NASA]

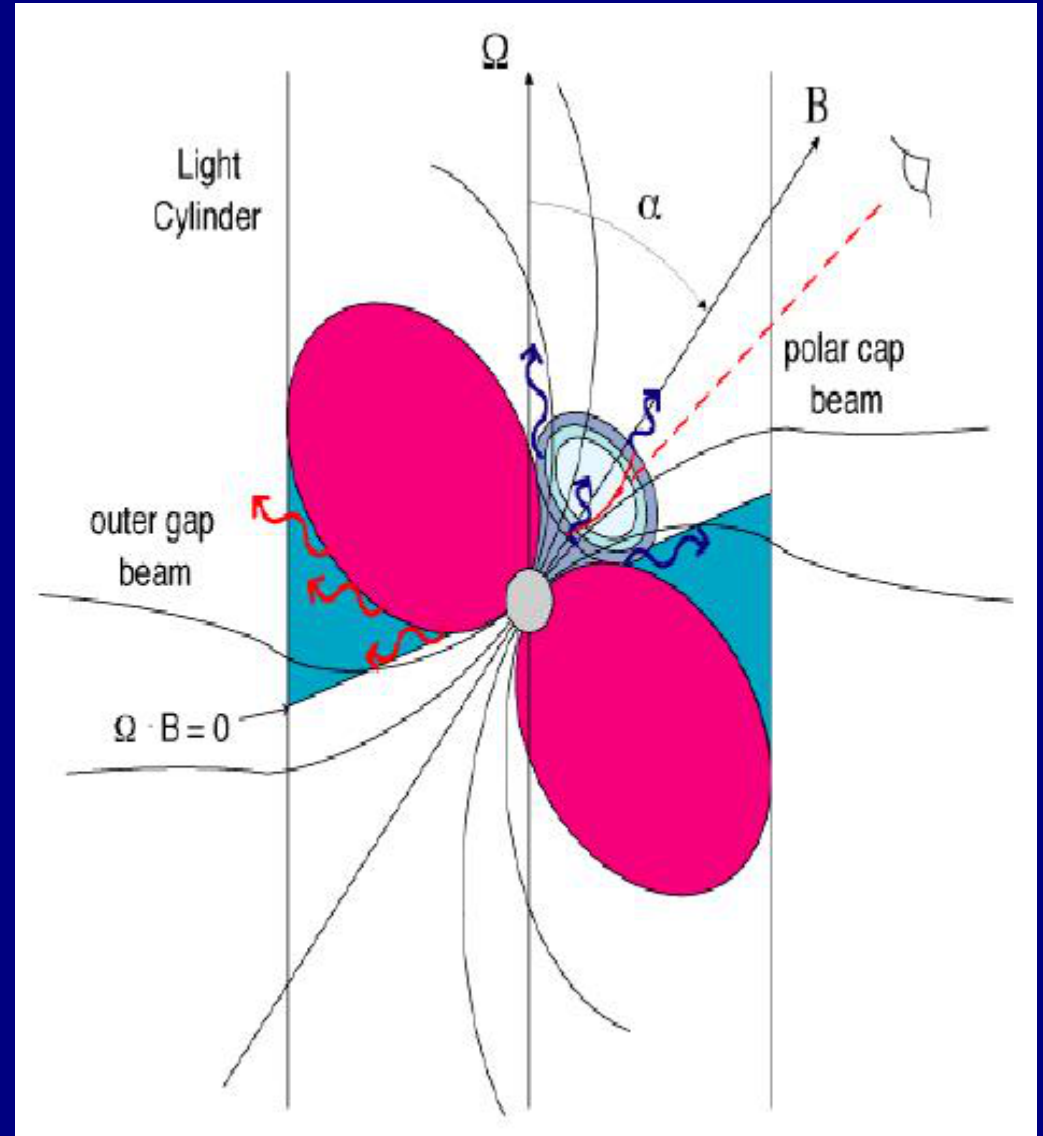
Les pulsars n'émettent-ils qu'en radio ?

- La réponse est très variable.
- D'où l'idée qu'il y aurait plusieurs lieux d'émission sur un pulsar.
- Nous ne serions pas nécessairement dans le cône d'émission de chaque source.
- La tendance actuelle : émissions radio depuis la calotte (inner gap), émissions X et gamma depuis le outer gap.

aurait plusieurs
lieux d'émission
sur un pulsar.

S
Is
?

- Nous ne serions pas nécessairement dans le cône d'émission de chaque source.
- La tendance actuelle : émissions radio depuis la calotte (inner gap), émissions X et gamma depuis le outer gap.
- Cela est corroboré par la forme différente des courbes d'émission suivant la fréquence.

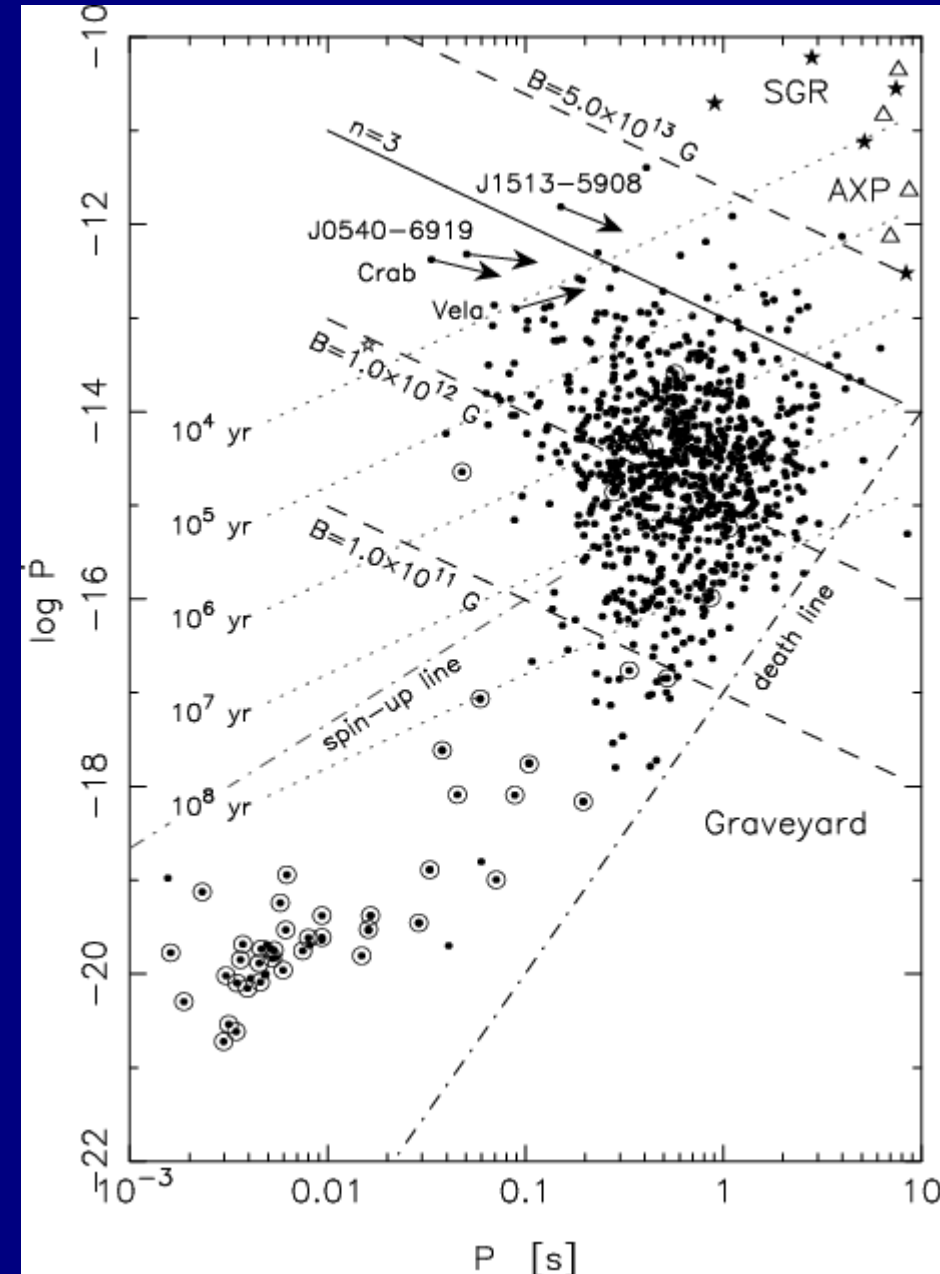


Combien de pulsars connus ?

- plus de 1300 pulsars connus.
- 73 appartiennent à un système binaire.
- 90 sont des pulsars milliseconde.
- Tous les PSr connus appartiennent à notre galaxie, sauf 7 dans les Nuages de Magellan.
- Le plus rapide est PSR B1937+21, découvert en 1982 avec $P=1.56$ ms. (le suivant est celui du Crabe)
- Le plus lent : $P=8,5$ s.
- La médiane des périodes est 0,6 s.
- PSR B0950+08 est le plus proche à 120 pc.

Les étoiles à neutron sont elles nécessairement des pulsars ?

- Quand le pulsar vieillit, sa rotation ralentit.
- Or on n'observe pas de pulsar lent.
- Ligne de mort des pulsars dans le diagramme P , dP/dt .
- En dessous de cette ligne : des étoiles à neutron, mais on ne les voit pas, car elles ne « pulsent » plus.



RX J 1856-37 : une étoile à neutron toute simple...

- n'émet pas comme un pulsar.
- rayonnement thermique d'un corps noir.
- rayonnement UV.
- En surface, $T=660\,000$ K.
- sa magnitude est 26 en optique.

La découverte des pulsars a relancé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

- On s'intéresse de nouveau aux équations T.O.V.
- On s'interroge sur les équations d'état.
- On bâti des modèles.
- On compare comme on peut avec la réalité.

Les équations T.O.V..

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

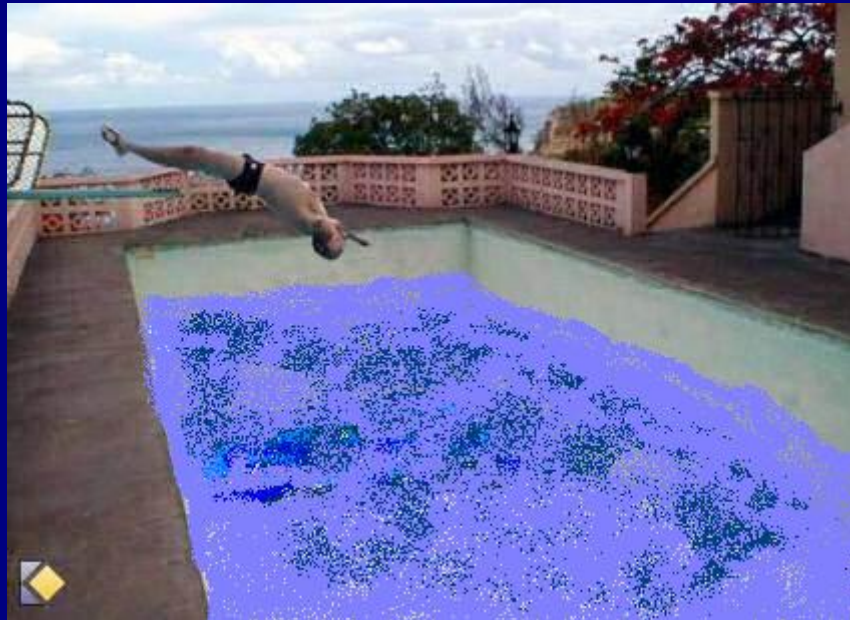
$$\frac{d\varphi}{dr} = \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right)^{-1} \left(\frac{Gm}{r^2} + 4\pi G \frac{p}{c^2} r\right)$$

$$\frac{dp}{dr} = - \left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) \frac{d\varphi}{dr} .$$

- On les reprend telles quelle T.O.V.
- Où bien on tient compte de la rotation (difficile). [Shapiro et al, 1983]
- Il faut prendre en compte des équations d'état différentes suivant la profondeur.

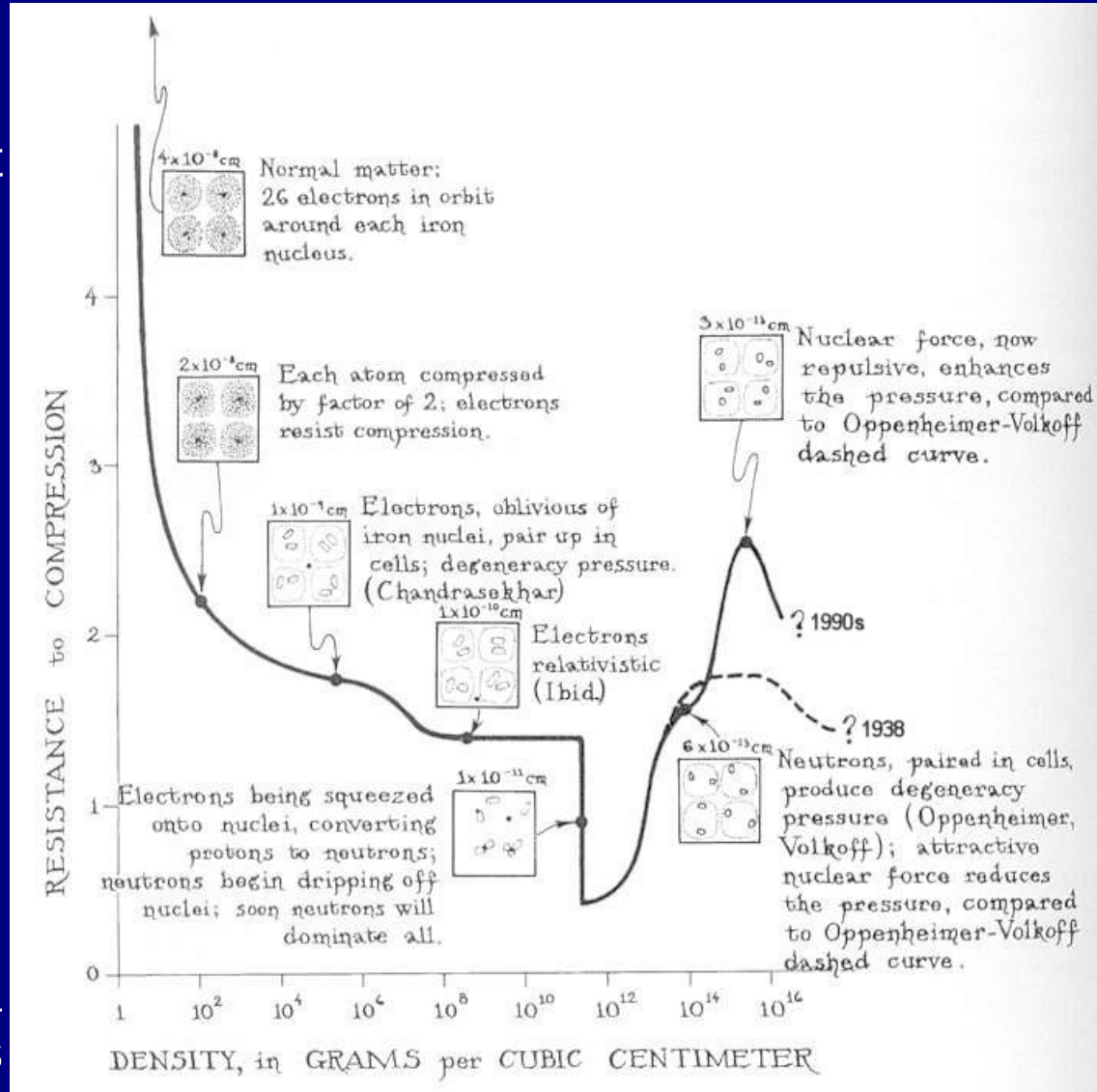
Les équations d'état.

On s'intéresse fortement à la relation entre la pression et le volume. (Comme le gaz est dégénéré, la température compte peu.)

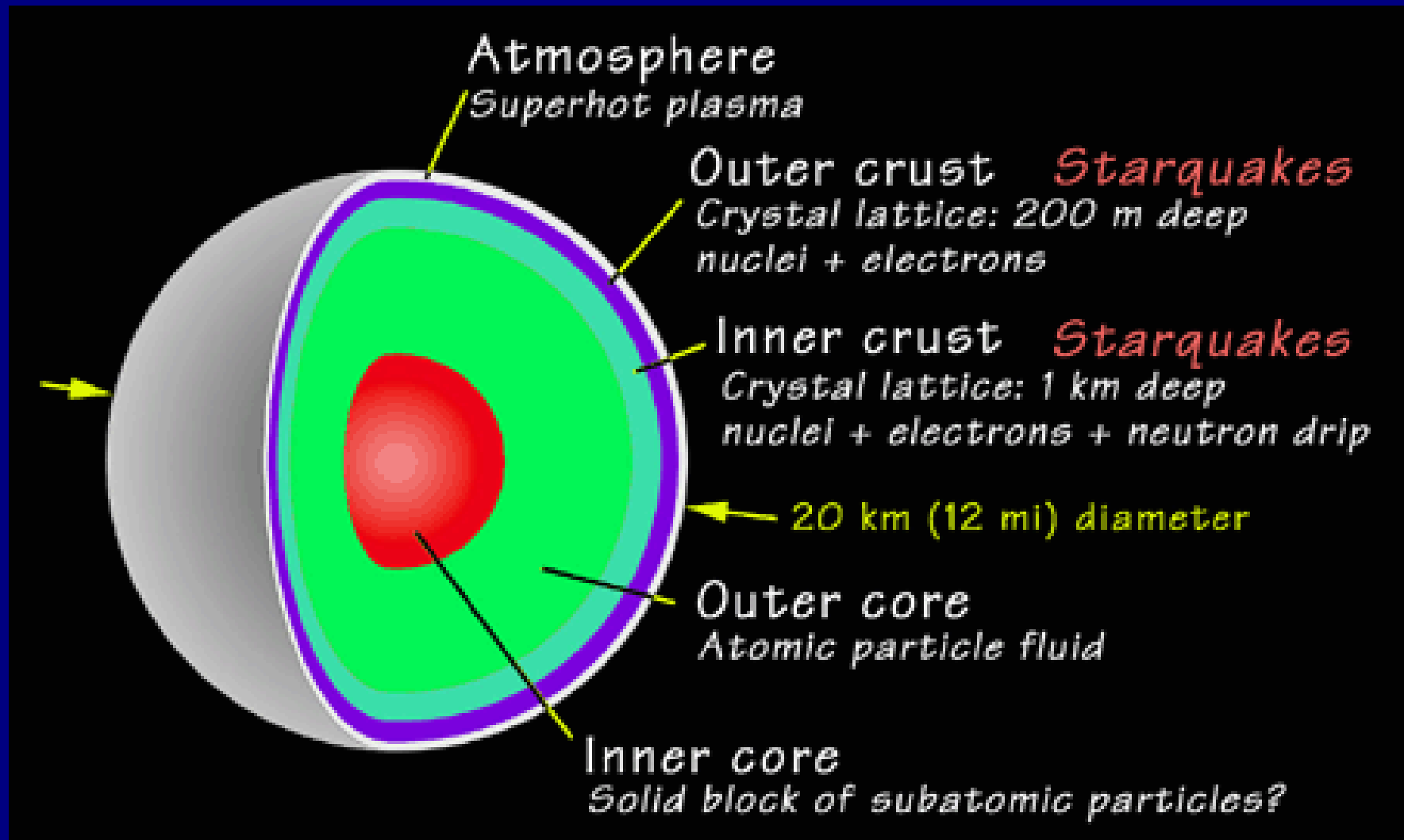


Les équations d'état.

- Les équations d'état dans une étoile à neutrons sont mal connues.
- La densité ρ est plus grande que tout ce qui est connu sur Terre...
- sauf lors de collisions obtenues dans les accélérateurs pour la physique des particules.
- Mais lors des collisions dans les accélérateurs, les particules vont vite relativement les unes aux autres (température élevée).
- Dans une étoile à neutrons, les particules sont plus lentes. Les EN sont plus froides.
- On considère même que le rôle de la température est négligeable dans les EN.

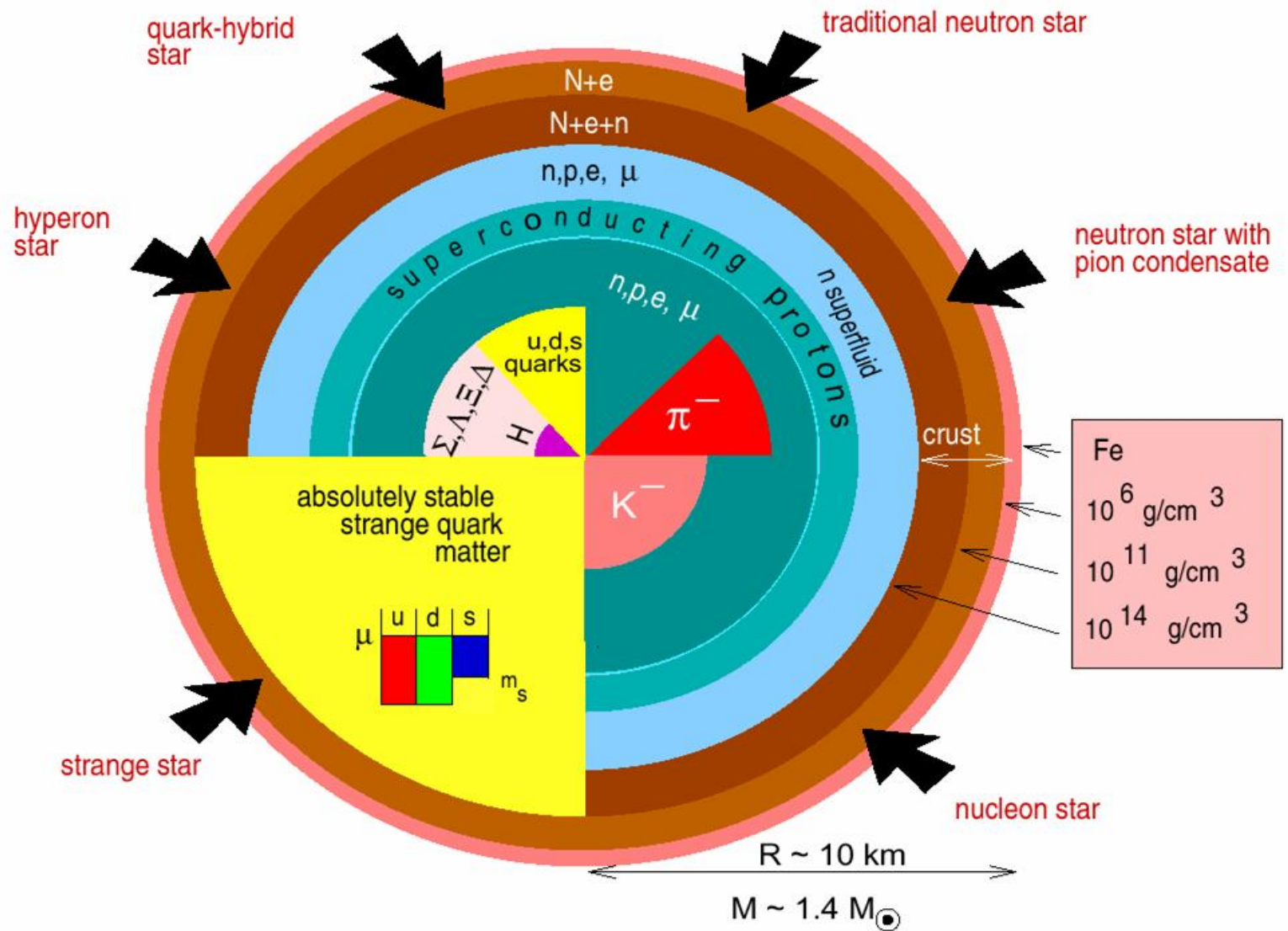


La structure de l'étoile.

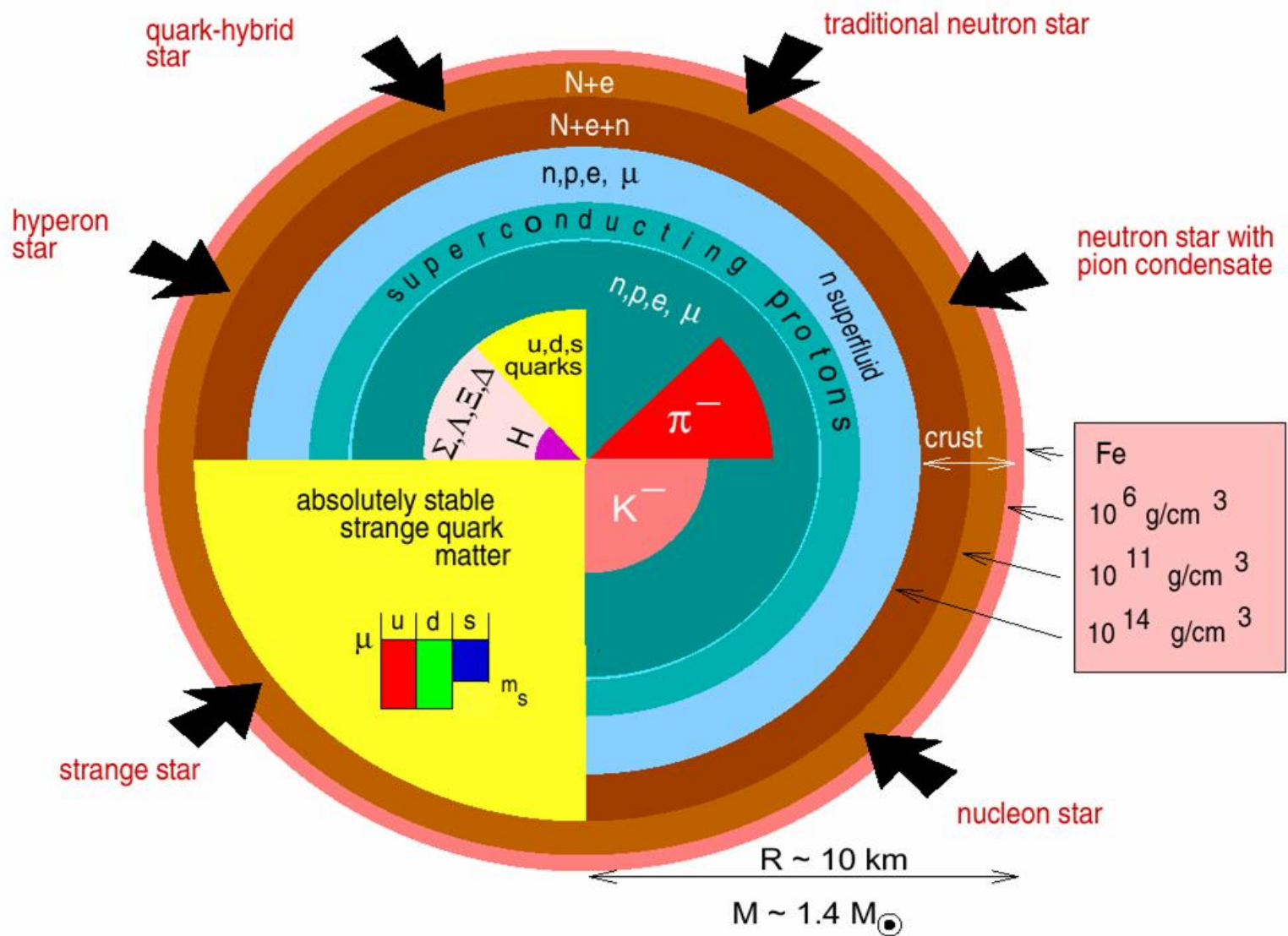


Spéculations théoriques sur la structure interne d'une étoile à neutrons.

Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons.



Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

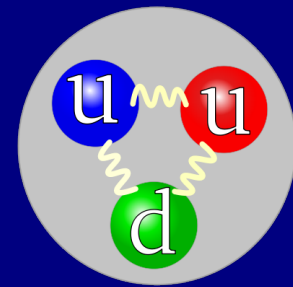


Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

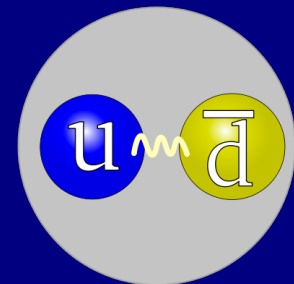
- D'après la/les théorie de l'interaction forte, les hadrons (particules soumises à cette interaction) seraient constituées de particules plus élémentaires, les quarks.
- Les quarks portent une masse, un nombre hadronique, un spin, et une couleur.
- Les nucléons seraient constitués de 3 quarks.
- D'autres particules (les mésons) de deux quarks.
- D'une façon générale, il est très difficile de dé-confiner des quarks. Ces petites bêtes sont très grégaires.

Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

- Il y a des quarks up, down, strange, beauty/charm.
- Les nucléons sont fait de up et down. Protons : uud, neutron : udd.
- Il existe des réactions permettant aux quark de changer de nature.
- On peut théoriquement fabriquer des plasmas de quarks dé-confinés, sous des conditions de densité extrêmes.
- Cela a du se produire peu après le big-bang.
- Cela pourrait être le cas dans des étoiles très denses, similaires aux étoiles à neutrons. Les quarks formant l'état le plus stable seraient des strange (s).



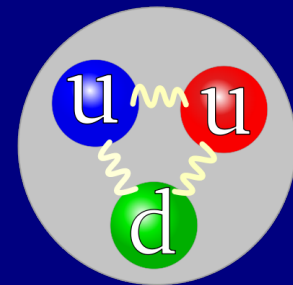
proton



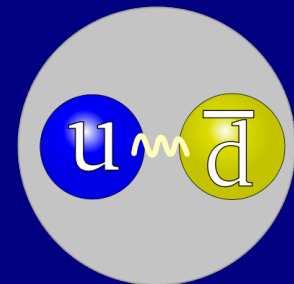
pion

Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

- C'est « l'hypothèse de la matière étrange » : l'état fondamental de la matière serait constitué de quarks dit étranges, déconfinés.
- L'état ordinaire de la matière (ou les quarks sont groupés par 2 ou 3 dans des hadrons) serait un état métastable.
- Pas de contradiction avec nos savoirs actuels sur la matière.



proton



pion

Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

- Faire des calculs précis est difficile. L'interaction forte ne se résume pas à une somme d'interactions binaires comme la gravitation ou les forces électromagnétiques.
- Il faut tenir compte du nombre total de quarks pour connaître l'état de chacun des quarks du plasma.
- Il y a du travail à faire.
- Néanmoins, des physiciens travaillent sur l'hypothèse des étoiles à quark.

Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

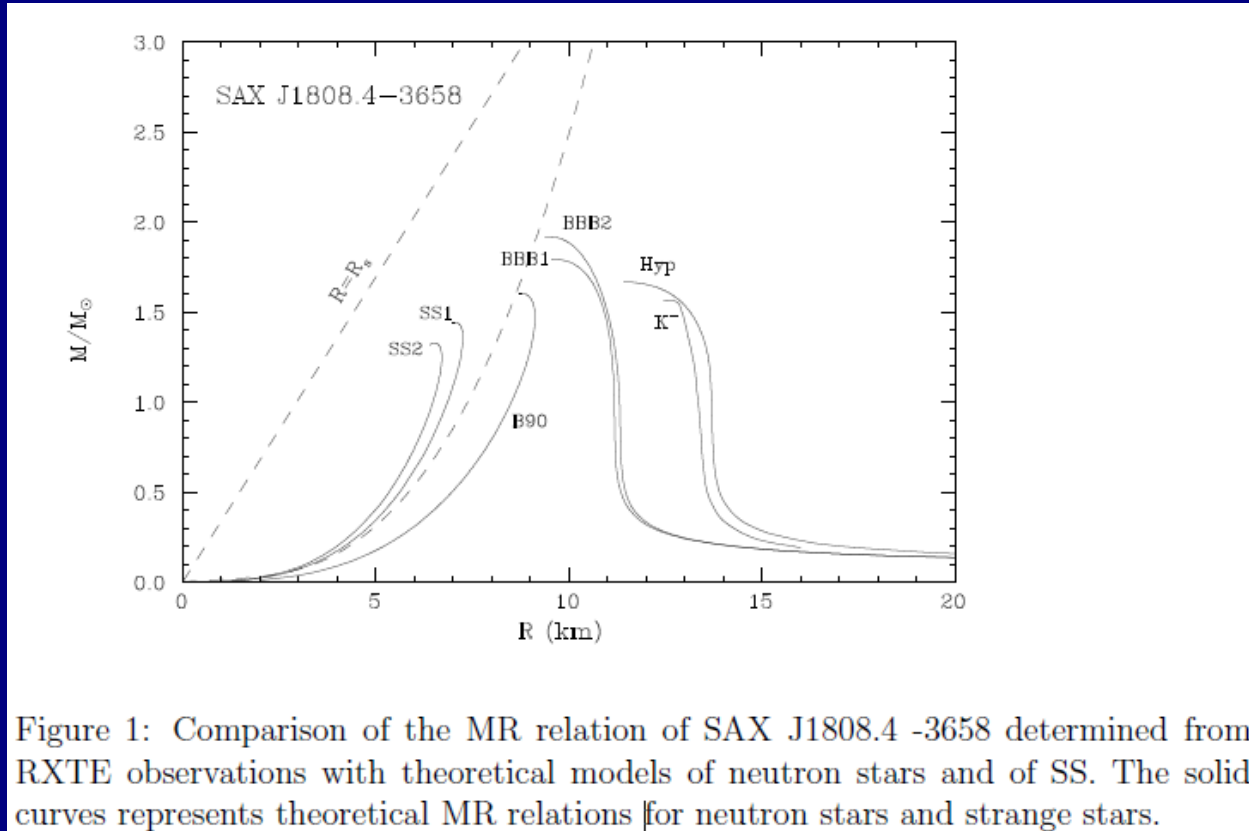


Un plasma de quarks serait plus compressible qu'un gaz de neutrons.
Donc une étoile à quarks serait plus petite.

Mais une étoile à neutrons est confinée par la gravitation.
Une étoile à quark serait bien plus fortement confinée par
les interactions entre quarks.

Tandis que le rayon d'une EN diminue si M augmente, pour une étoile étrange,
 M est proportionnel à R^3 .

RX J1808.4-3658 candidate pour l'étrangeté.



[Bombaci, 2002]

L'étude des échanges possibles de matière et le fait que ce n'est pas un trou noir impliquent que $3 \text{ km} < R < 10 \text{ km}$.

Les modèles d'EN ne collent pas, les (pauvres) modèle de matière étrange « fonctionnent mieux ».

Des candidates pour l'étrangeté.



RX J 1808.4-3658

4UX J 1728.4-34

RX J 1856-37

Her X-1

$M < 3-8 M_{\odot}$

$M < 0,1 M_{\odot}$

$M < 0,9 M_{\odot}$

$M < 1,1-1,8 M_{\odot}$

$R < 8 \text{ km}$

$R < 9 \text{ km}$

$R < 5-8 \text{ km}$

$R < 6-7,7 \text{ km}$

X transient, PSR, binaire

source X, binaire

étoile isolée

PSR X