

Naines blanches, pulsars et autres objets compacts.

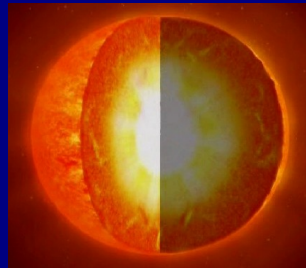
5. Les étoiles à neutrons

Fabrice Mottez

LUTH, Observatoire de Paris, CNRS, et Univ. Paris Diderot

Festival d'Astronomie de Haute Maurienne, août 2007.

Mais si l'étoile est très dense ?



Le coin des petits.

- Chadwick, physicien anglais, travaille à Cambridge sous la direction de Rutherford.
- Rutherford a découvert le proton (1919). Atome : noyau avec protons + électrons autour.
- La masse du noyau excède (de beaucoup) celle des protons. Que manque-t-il ?
- Ex : He : masse 4 mais 2 électrons.
- Renoncer à la conservation de la charge (4 protons et 2 électrons), 2 protons en plus annihilant leur charge.
- Supposer une/des particules neutres dans le noyau. Chadwick les appelle les **neutrons**.
- Restait à les découvrir, les caractériser.

Le coin des petits objets (mais des grands physiciens).

- Rayons cosmiques sur éléments légers émettent rayonnements « ultra pénétrant ». [Bothe, Backer, 1930]. Activent des réactions nucléaires. Quelle est leur nature ?
- Les Curie (1931) font une théorie supposant des rayons gamma de 50 MeV.
- 1932, Chadwick reprend l'expérience, et aussi



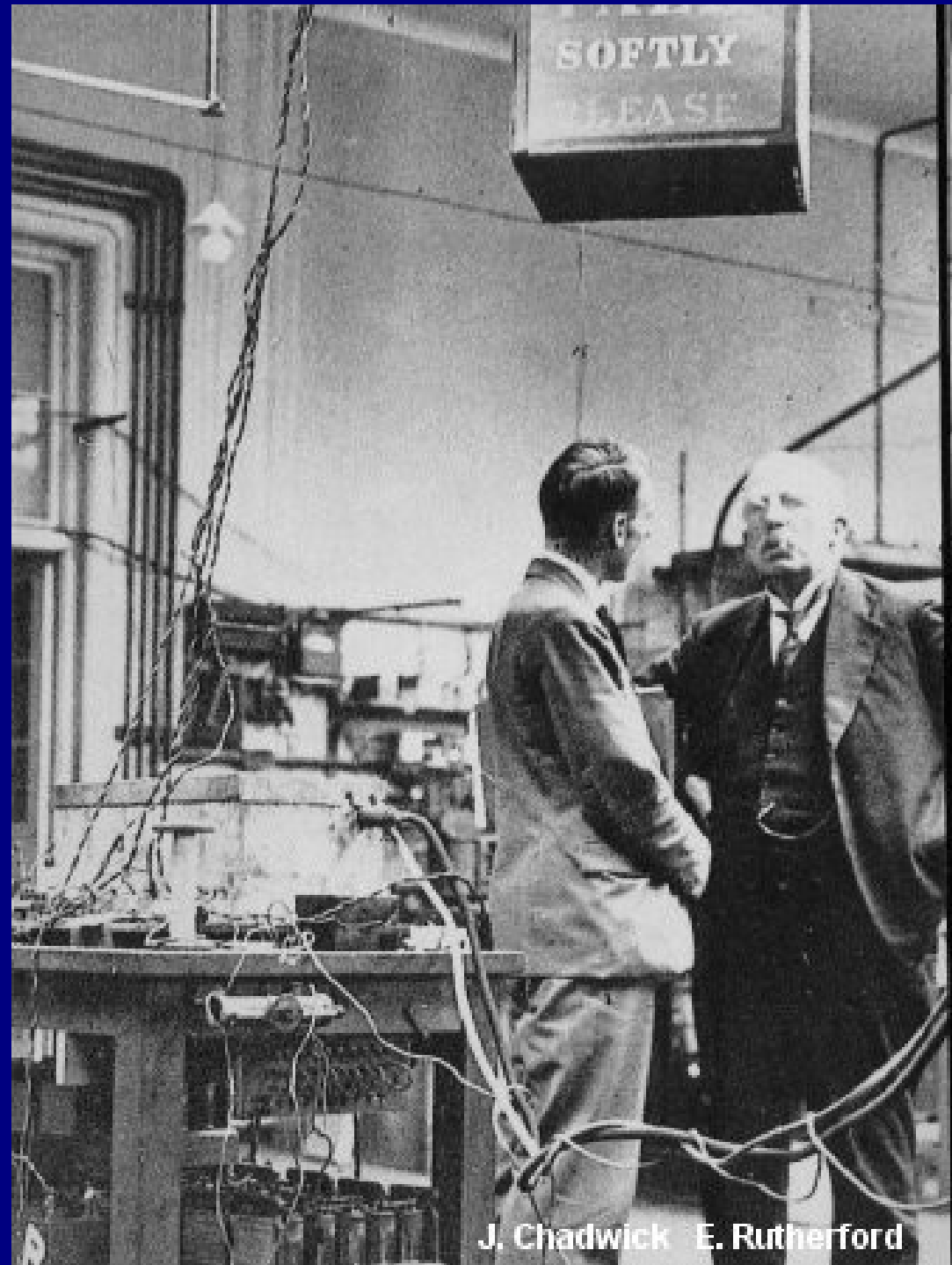
et conclut que ce sont des particules neutres (le n), avec une masse proche de 1.

- 1935 : masse des neutrons: 1.001. publié dans « Possible Existence of Neutron ».
- Prix Nobel en 1935.

Chadwick

- *“Pour le neutron, c’est Chadwick tout seul. Les Joliot-Curie sont tellement brillants qu’ils le mériteront vite pour quelque chose d’autre !”*

[Rutherford, d'après Emilio Segré]



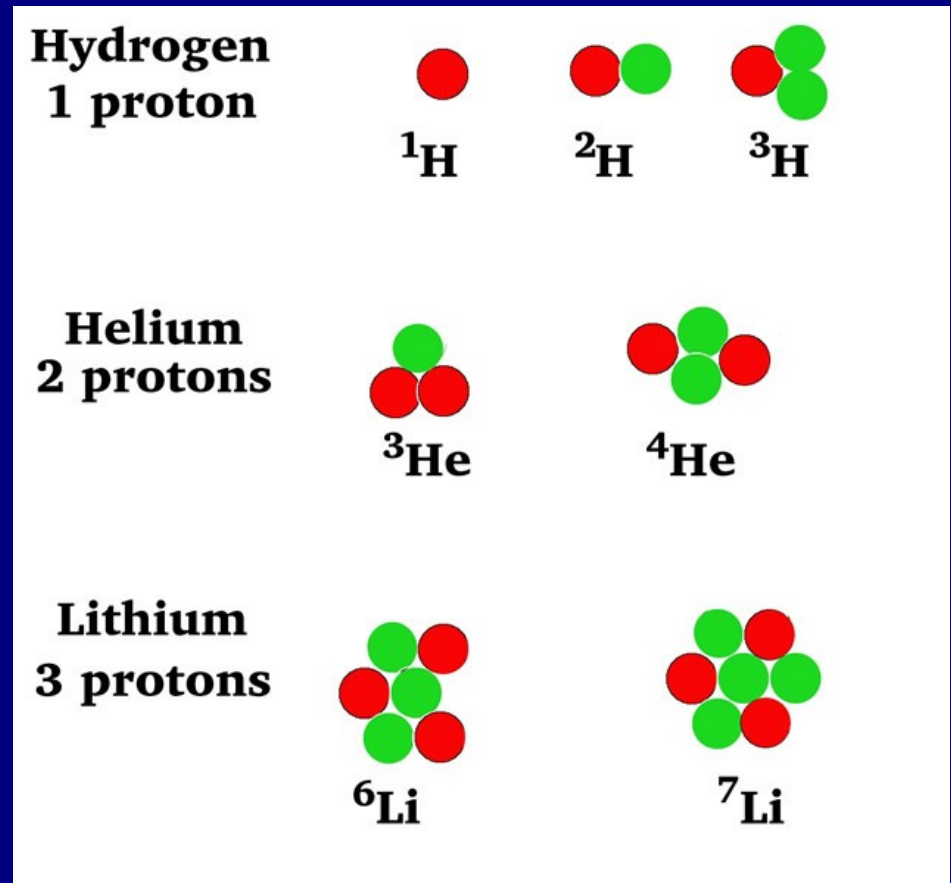
J. Chadwick E. Rutherford

Le neutron

- Particule neutre, de masse légèrement supérieure à celle du proton.
- On montre que ce n'est pas la réunion proton+électron, mais bien une particule en soi.
- C'est un Fermion... on doit pouvoir en faire un gaz dégénéré.
- Isolé, il est instable. Se désintègre $n \Rightarrow p + e^-$ en typiquement en 15 minutes.
- Sujet à l'interaction forte (active dans les noyaux).

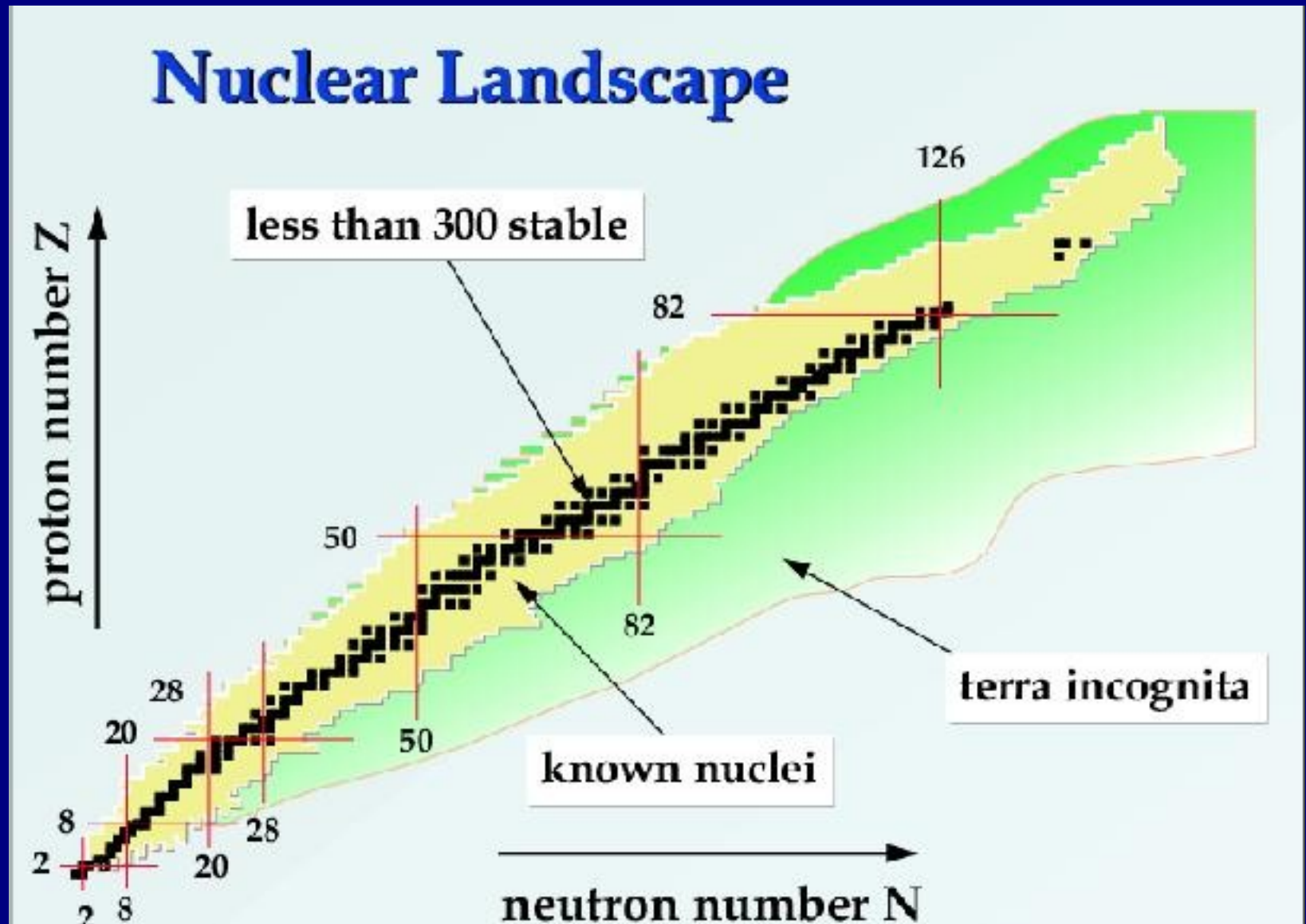
Le neutron

- Stable dans des noyaux atomiques. Les atomes sont caractérisés par le nombre de protons. Le nombre de neutrons peut varier. Des atomes avec un nombre de neutrons différent sont des isotopes.
- Plus le noyau a de nucléons, plus la proportion de neutrons est élevée (du moins pour les noyaux stables).



Isotopes des éléments légers.
Les protons sont en rouge.
Les neutrons sont en vert.

Le neutron



Le neutron

- D'où l'intuition : plus il y a de neutrons, plus les neutrons sont stables.
- La réaction



est en faveur de la création des neutrons dans le cas de la matière très dense.

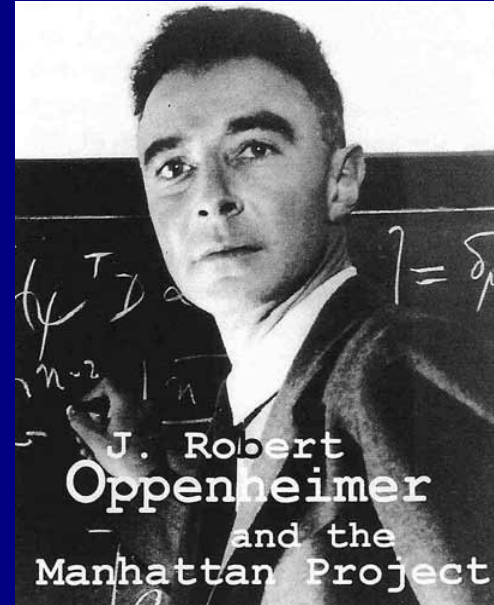
Une conjecture prophétique.

- 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 ayant la densité des noyaux atomiques, formées de neutrons.
- 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...
 - ♦ ...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

- Landau spéculait qu'on n'en verrait pas (trop petites, donc peu lumineuses).

Les étoiles à neutron entre 1932 et 1967



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

rappel : Solution relativiste pour une étoile

Solution valable à
l'**extérieur** de l'étoile
(dans le vide alentour)

Pour une étoile qui ne
tourne pas
(ou pas très vite).

**Maintenant, il faut voir
la solution à
l'intérieur de l'étoile.**

métrique

$$ds^2 = -(\text{distance})^2 + c^2(\Delta \text{temps})^2$$

Newton, espace "plat"

$$ds^2 = - \underset{\substack{\uparrow \\ \text{déplacement} \\ \text{radial}}}{dr^2} - r^2 \underbrace{(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)}_{\substack{\uparrow \\ \text{déplacement angulaire}}} + c^2 dt^2$$

Schwarzschild, masse centrale M

$$ds^2 = - \frac{dr^2}{1 + \frac{a}{r}} - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) + \left(1 + \frac{a}{r}\right)c^2 dt^2$$

$$\text{avec } a = -2 \frac{GM}{c^2}$$

Les équations d'Einstein

Dans la famille des équations très compliquées et difficile à résoudre. En résumé :

$$\text{Tenseur géométrique}(g) = 8 \pi G c^{-4} \text{Tenseur d'énergie}$$

Le tenseur d'énergie contient les informations sur toutes les sources d'énergie existant : masse et vitesse, chaleur, pression, forces électromagnétiques etc.

Le tenseur géométrique dépend de six nombres « g » définis en chaque point et à chaque instant, qui servent à calculer les distances et les intervalles de temps.

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.

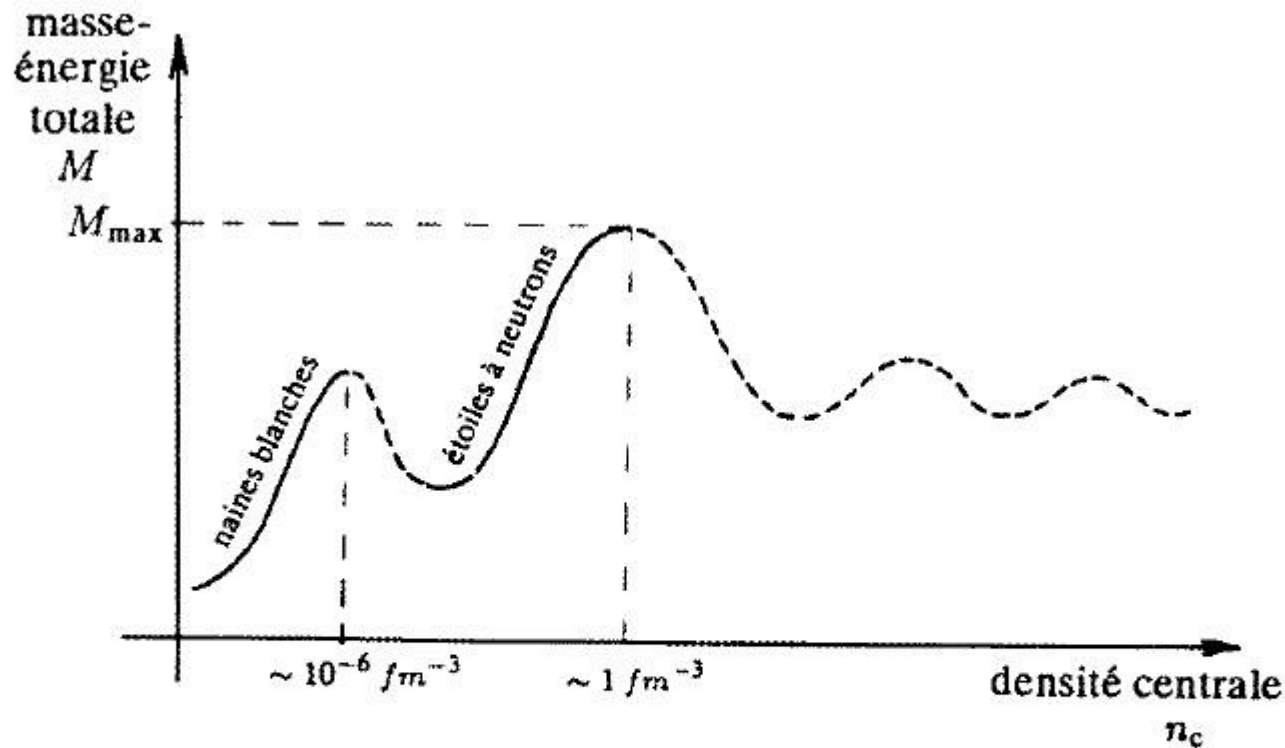
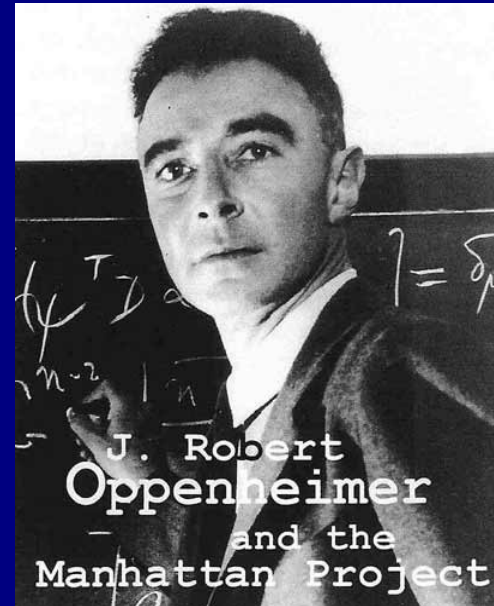


FIG. 4.6 – Masse-énergie totale M en fonction de la densité baryonique centrale n_c , pour une équation d'état donnée. Les branches en trait plein correspondent à des équilibres stables, celles en pointillés à des équilibres instables. Le premier maximum correspond aux naines blanches, le second aux 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).

Les étoiles à neutron entre 1932 et 1967

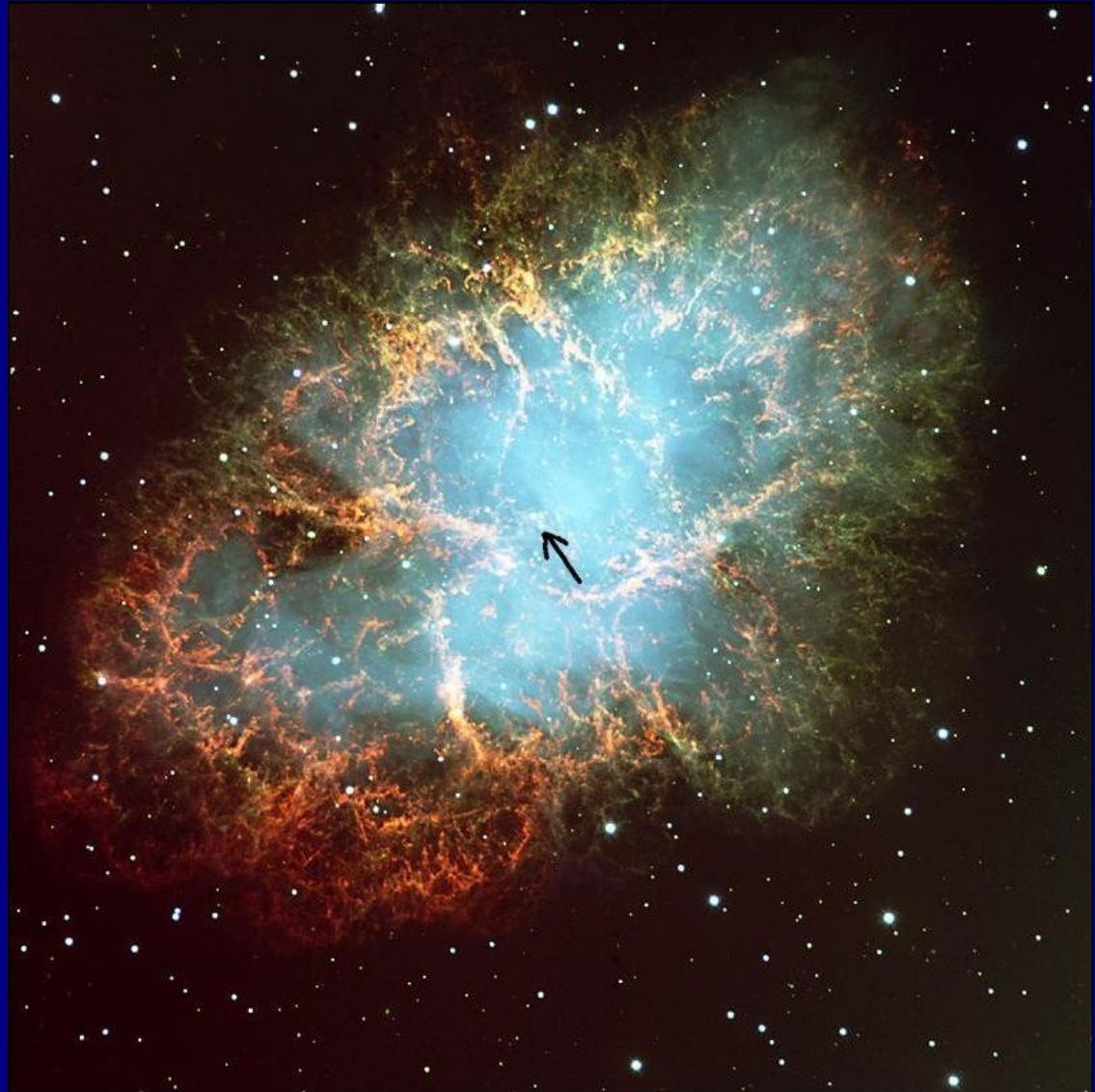


Prédissent une masse maximale de l'ordre de 3 masses solaires, au delà, effondrement (vers trou noir).
Ne prédissent aucune observable pour les astronomes.
Donc pas pris au sérieux.

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]

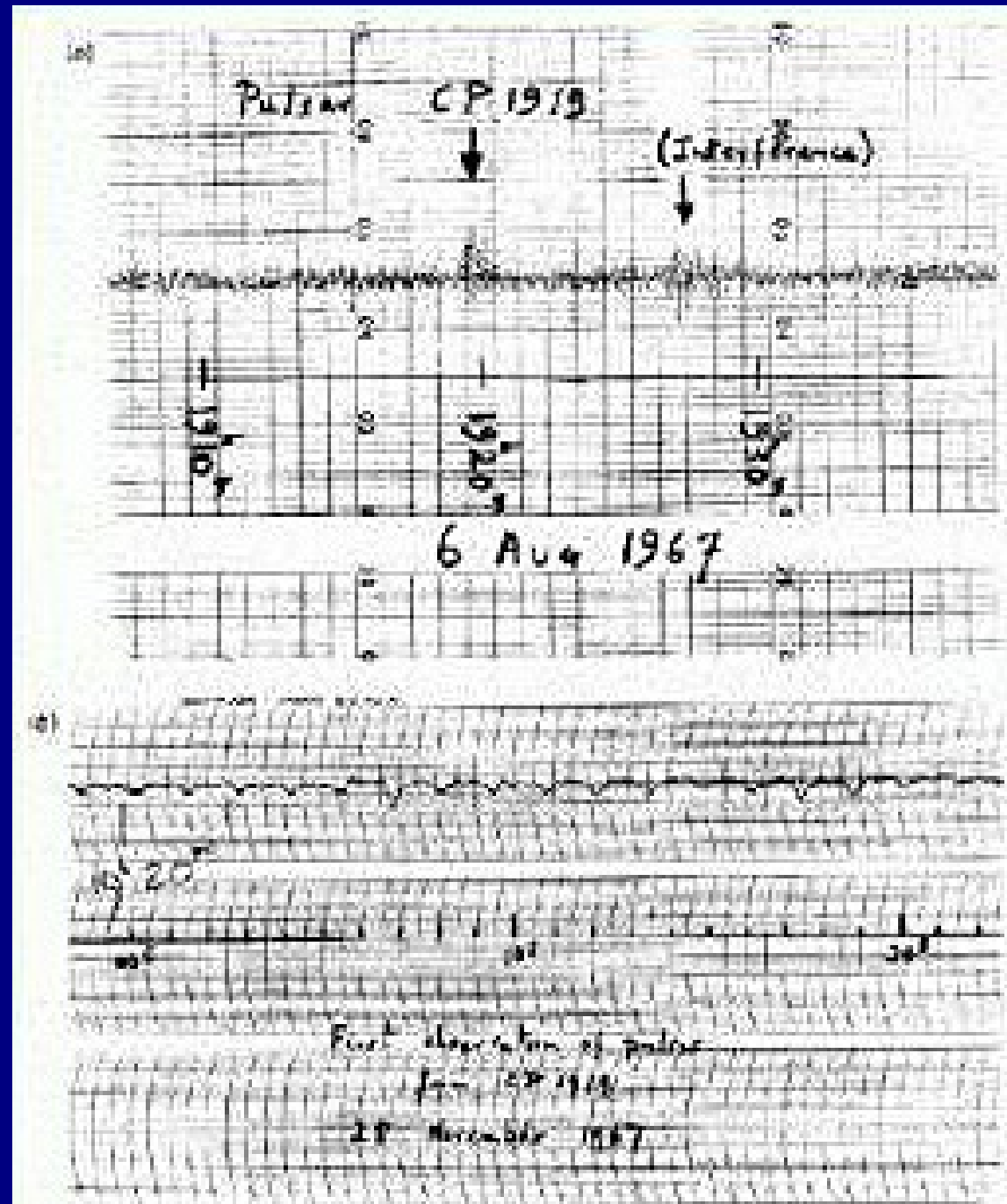
1967, du côté des radio astronomes.

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 découvrit
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.

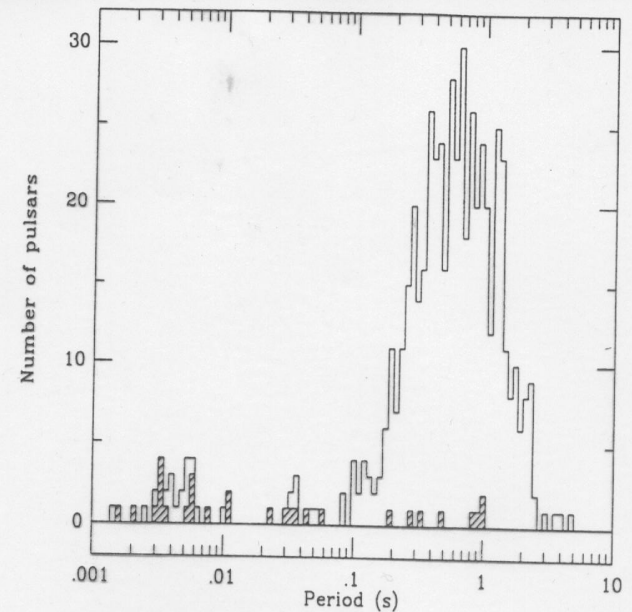
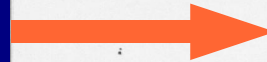


Figure 15.14 The distribution of periods for 558 pulsars. Binary pulsars are indicated by the shaded area, and the millisecond pulsars are on the left. The average period is about 0.8 s. (Figure from Taylor, Manchester, and Lyne, *Ap. J. Suppl.*, 88, 529, 1993.)

Vela
Pulsar
Glitch

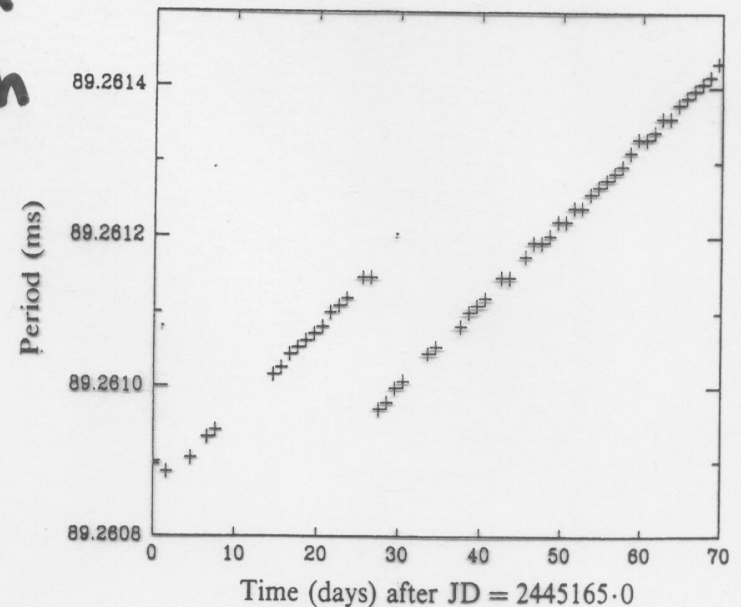


Figure 15.16 A glitch in the Vela pulsar. (Figure from McCulloch et al., *Aust. J. Phys.*, 40, 725, 1987.)

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.

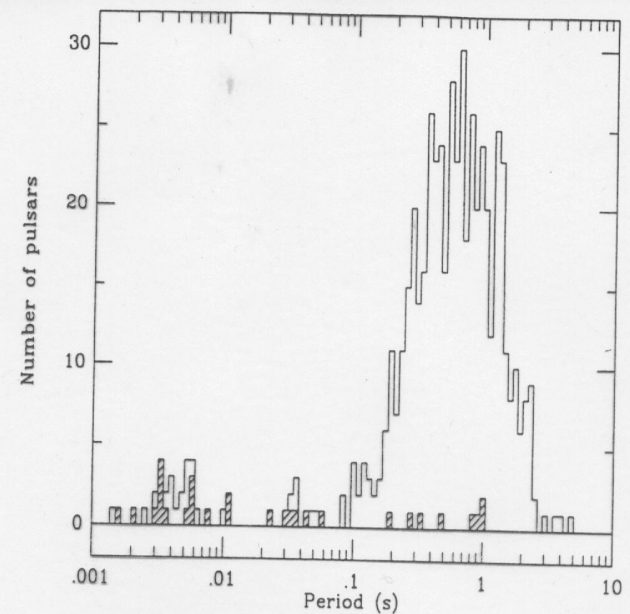


Figure 15.14 The distribution of periods for 558 pulsars. Binary pulsars are indicated by the shaded area, and the millisecond pulsars are on the left. The average period is about 0.8 s. (Figure from Taylor, Manchester, and Lyne, *Ap. J. Suppl.*, 88, 529, 1993.)

Vela
Pulsar
Glitch

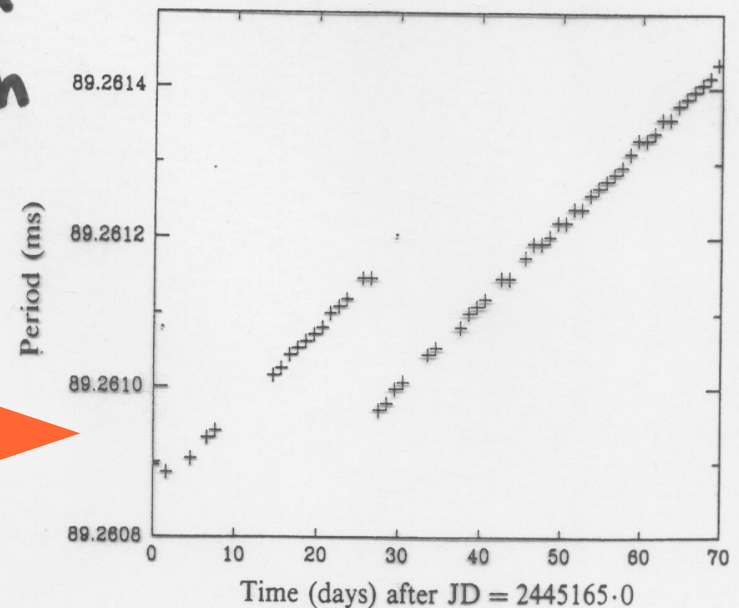


Figure 15.16 A glitch in the Vela pulsar. (Figure from McCulloch et al., *Aust. J. Phys.*, 40, 725, 1987.)

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

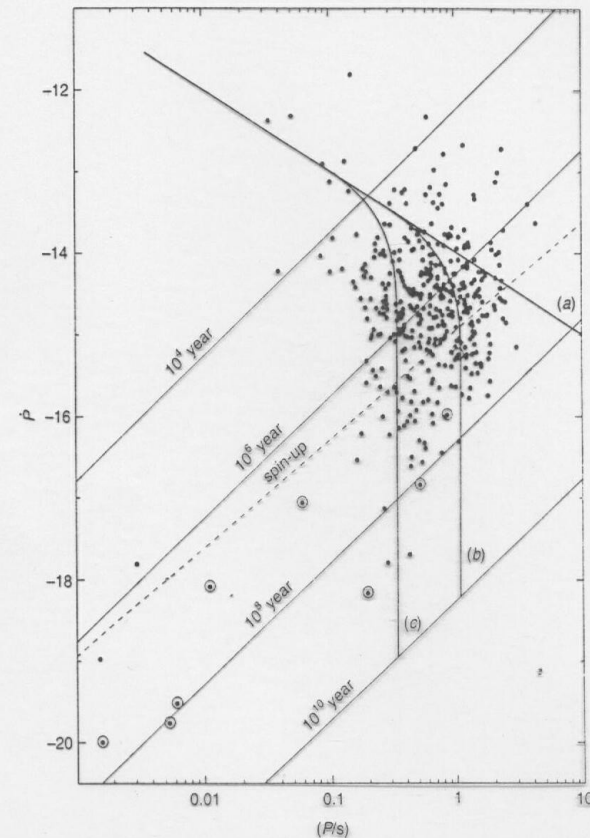


Figure 15.15. A plot of $\dot{P}$ versus P for pulsars. The dots enclosed in circles represent pulsars which are members of binary systems. Lines of constant age according to the formula $\tau = P/2\dot{P}$ are shown. Schematic evolutionary tracks of pulsars on this diagram are shown assuming (a) that 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) 10^8 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.

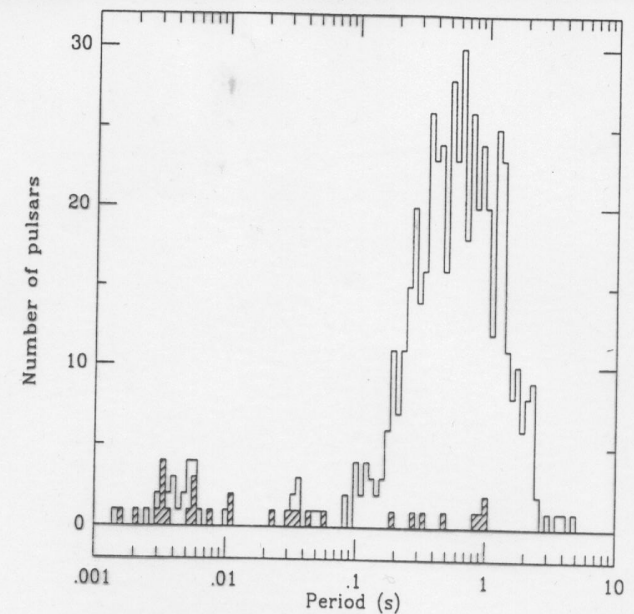


Figure 15.14 The distribution of periods for 558 pulsars. Binary pulsars are indicated by the shaded area, and the millisecond pulsars are on the left. The average period is about 0.8 s. (Figure from Taylor, Manchester, and Lyne, *Ap. J. Suppl.*, 88, 529, 1993.)

Vela
Pulsar
Glitch

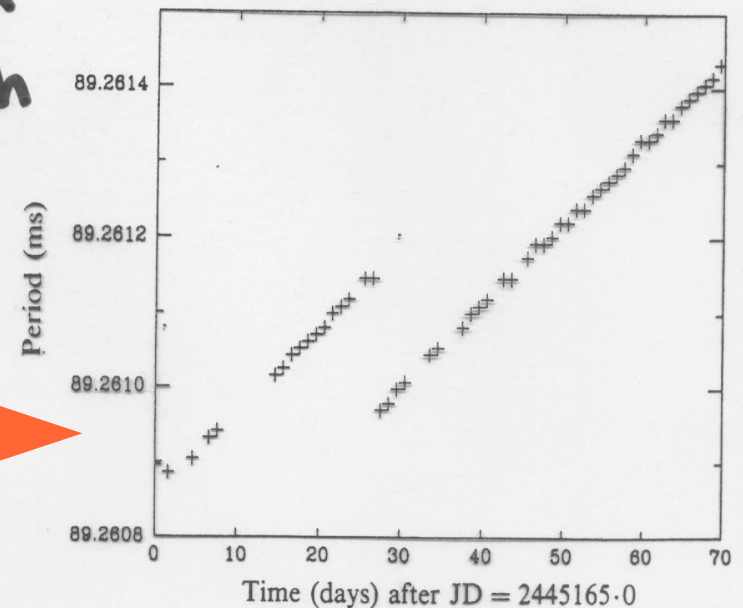
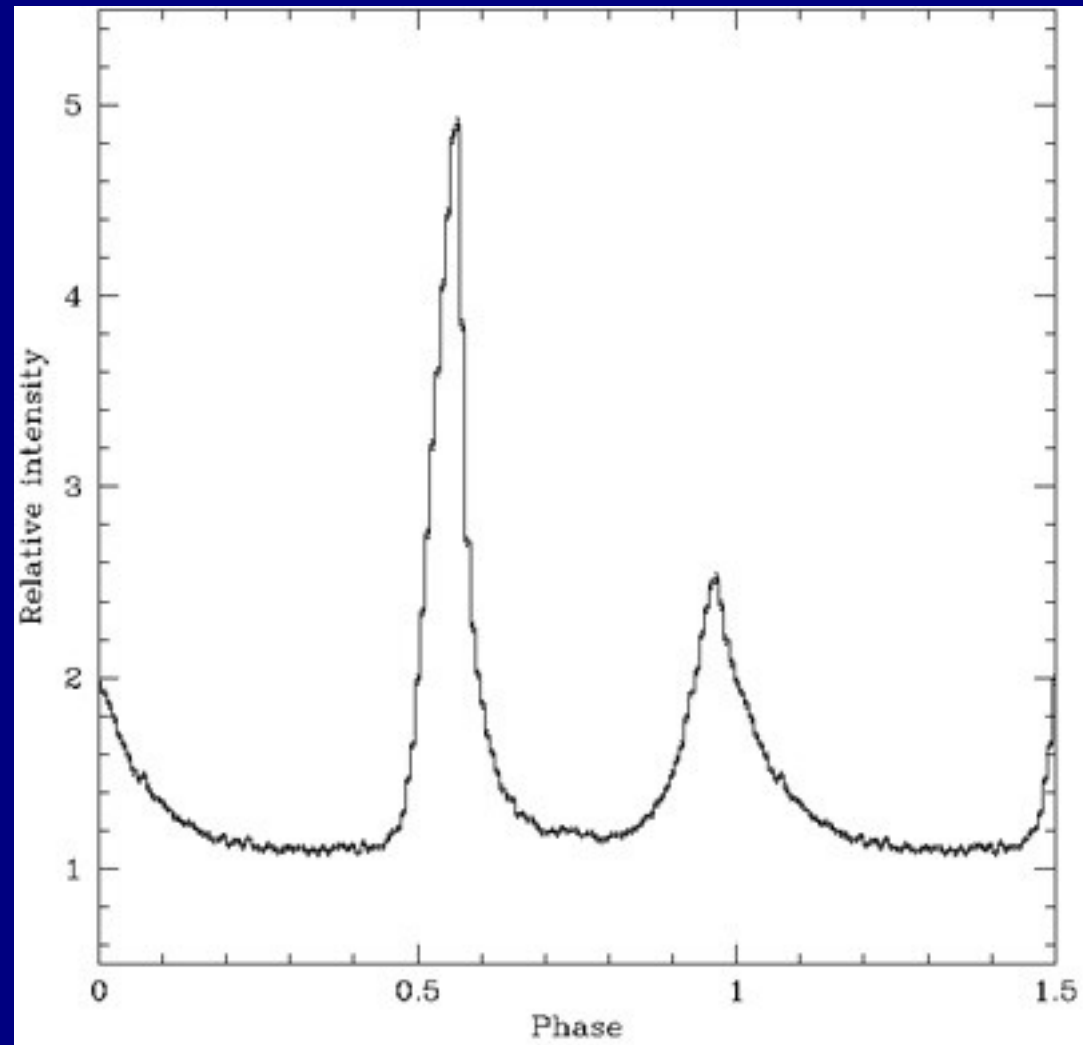


Figure 15.16 A glitch in the Vela pulsar. (Figure from McCulloch et al., *Aust. J. Phys.*, 40, 725, 1987.)

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 ?

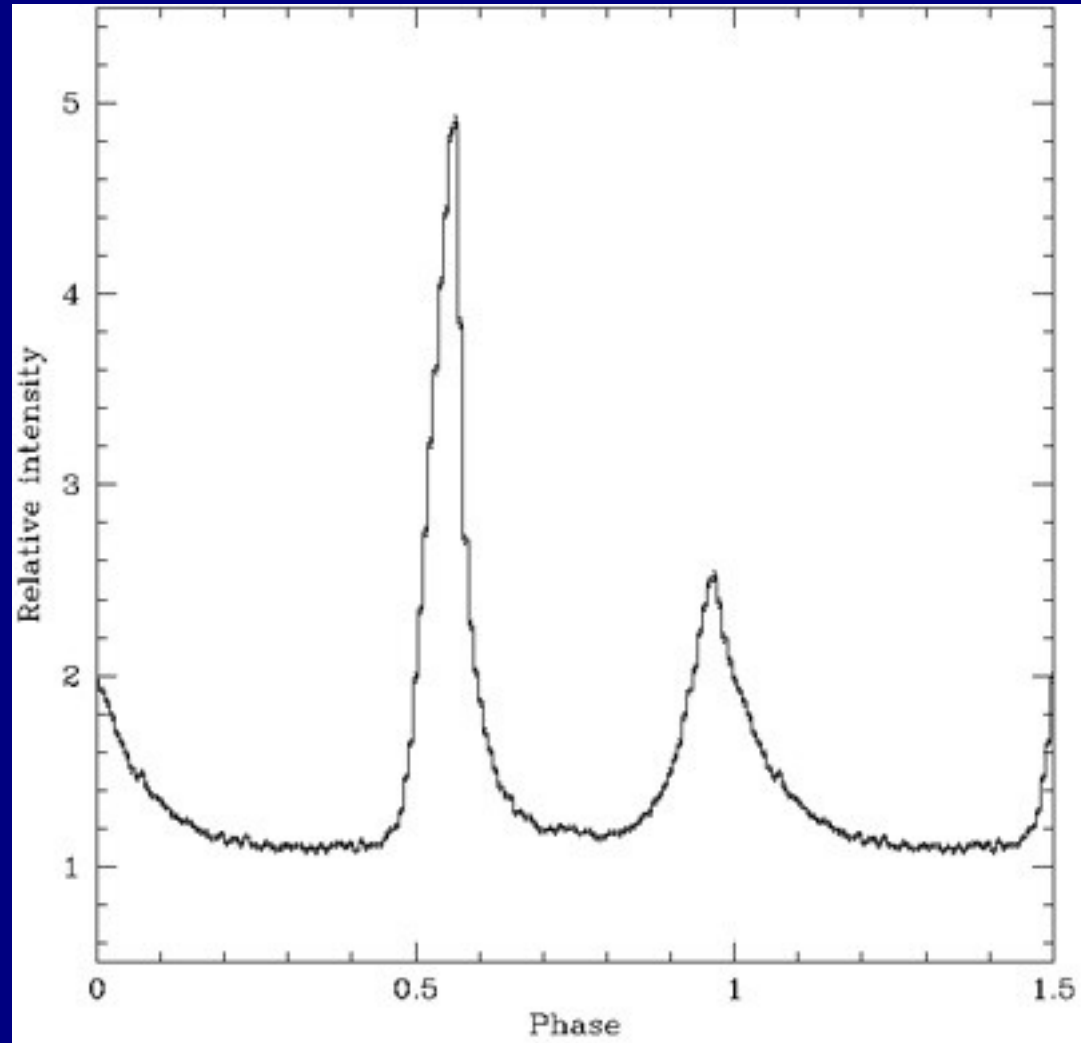
Découverte des pulsars du
Crabe ($P = 33$ millisecondes)
et de Vela ($P = 89$ milliseconde).

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 ?

Question facile pour un physicien :

Conservation du moment cinétique (angular momentum).
C'est une sorte de mesure de la quantité de rotation.

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

Lors de la contraction extrême d'une étoile (ou de son coeur)
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 ?

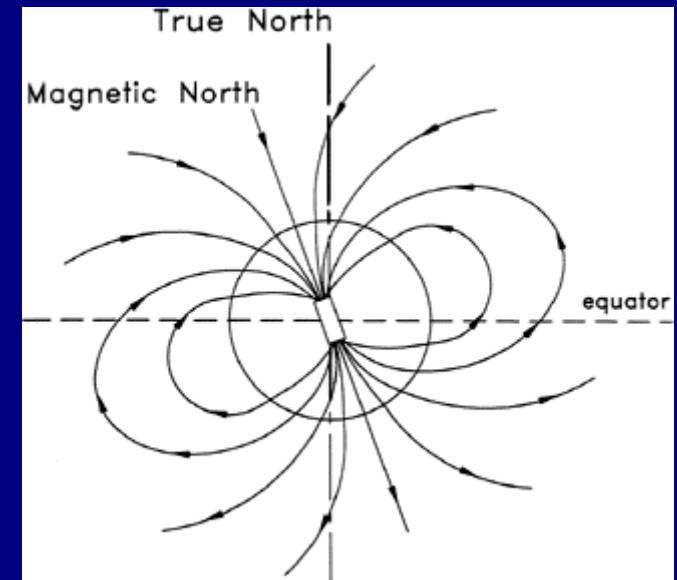
Question facile pour un physicien :

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.

On peut aussi exprimer cela par la conservation du moment magnétique.

(Dans le vide, c'est différent.)



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 : 1000 Gauss.

taches solaires : 1500-4000 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

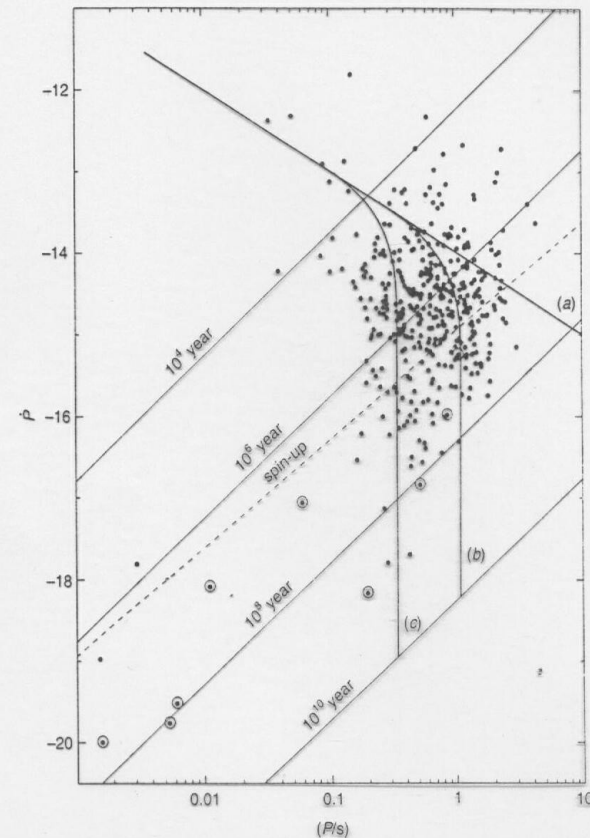


Figure 15.15. A plot of $\dot{P}$ versus P for pulsars. The dots enclosed in circles represent pulsars which are members of binary systems. Lines of constant age according to the formula $\tau = P/2\dot{P}$ are shown. Schematic evolutionary tracks of pulsars on this diagram are shown assuming (a) that 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) 10^8 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.)

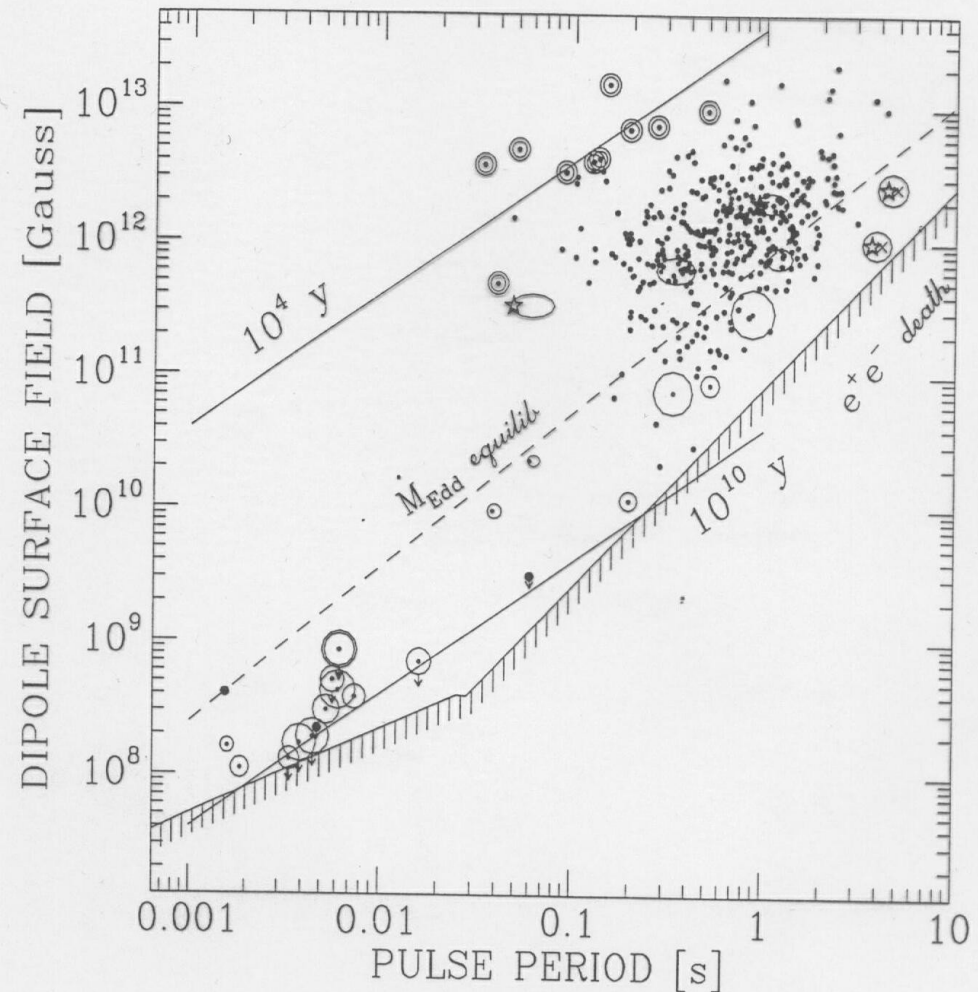
Pourquoi la période des pulsars s'allonge ?

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 ».)

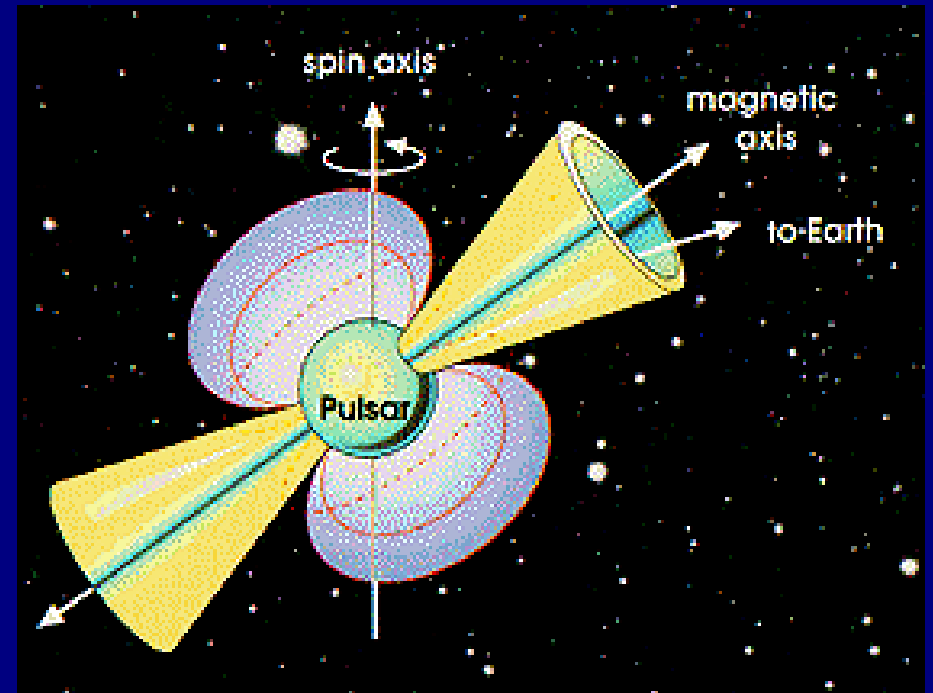
Le diagramme ci-contre corrobore ce genre d'explication : plus le champ magnétique est fort, plus lent est le pulsar... sauf pour les pulsars doubles (ceux entourés d'un rond).

P - B_s Diagram



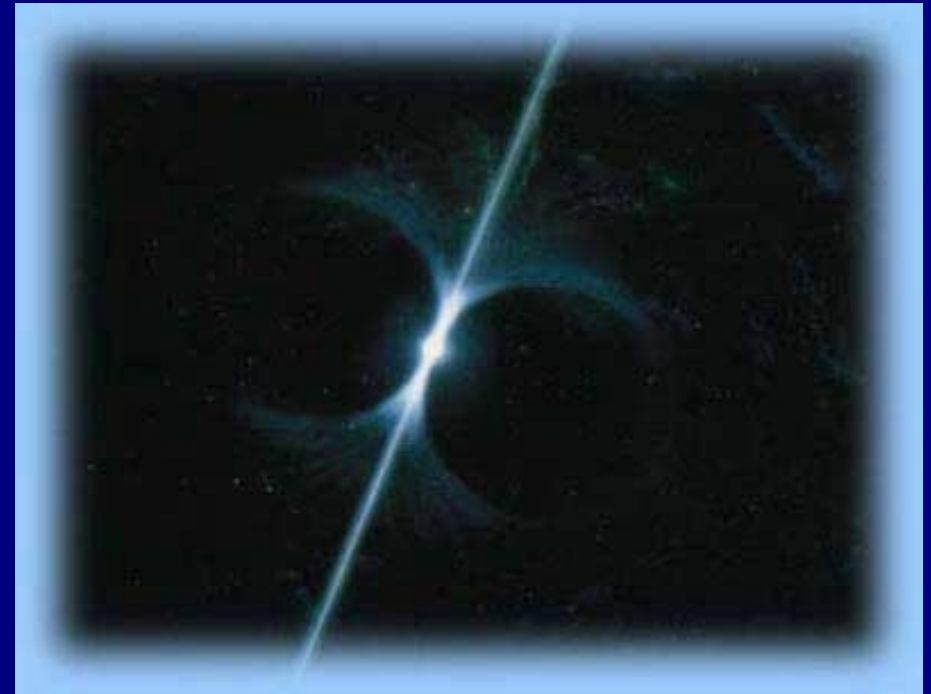
Pourquoi voit-on les pulsars clignoter.

- 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 ?



Pourquoi voit-on les pulsars clignoter.

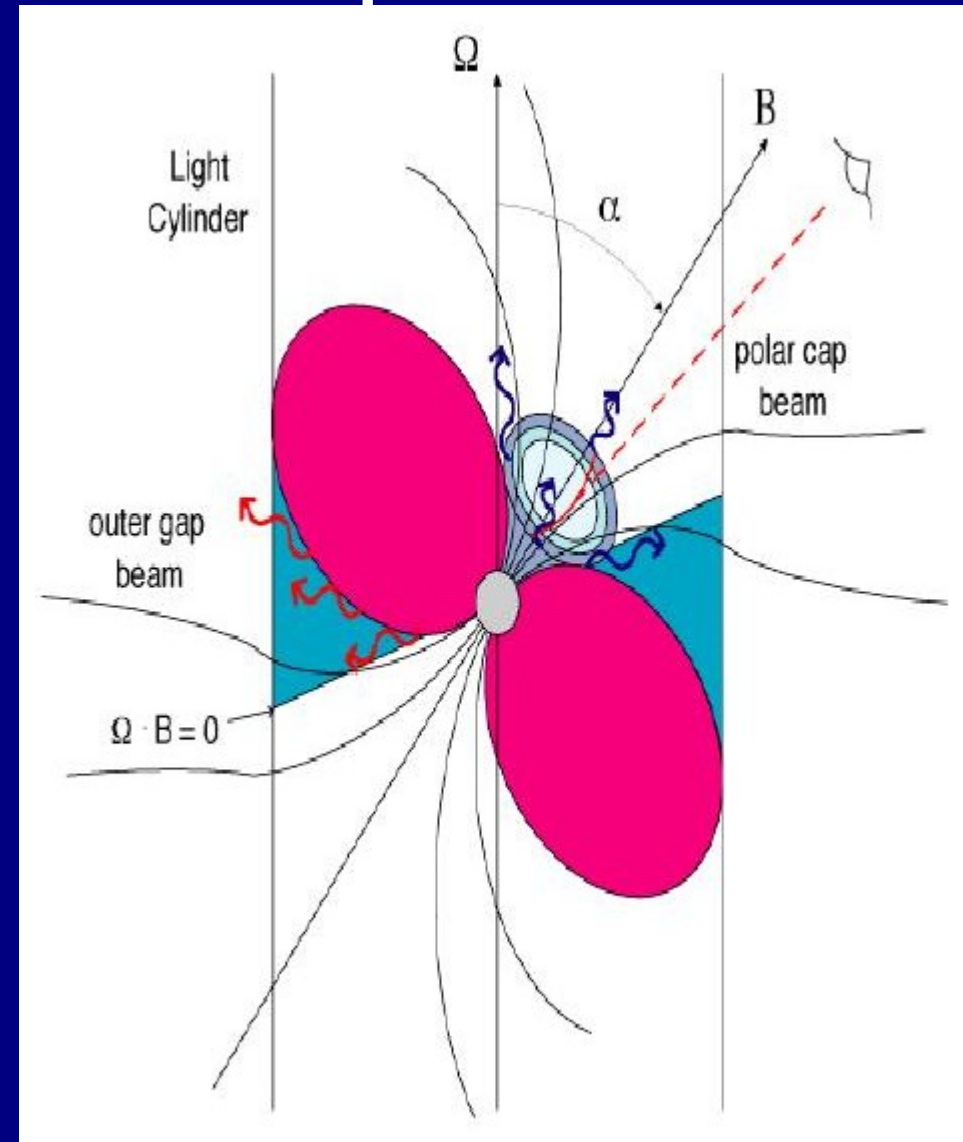
- Modèle du phare, lié à l'environnement magnétique du pulsar.
- Avec ce modèle, beaucoup de PSR nous échappent, si l'on n'est pas balayé par le faisceau.
- De quelle partie du PSR vient le faisceau ?



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.

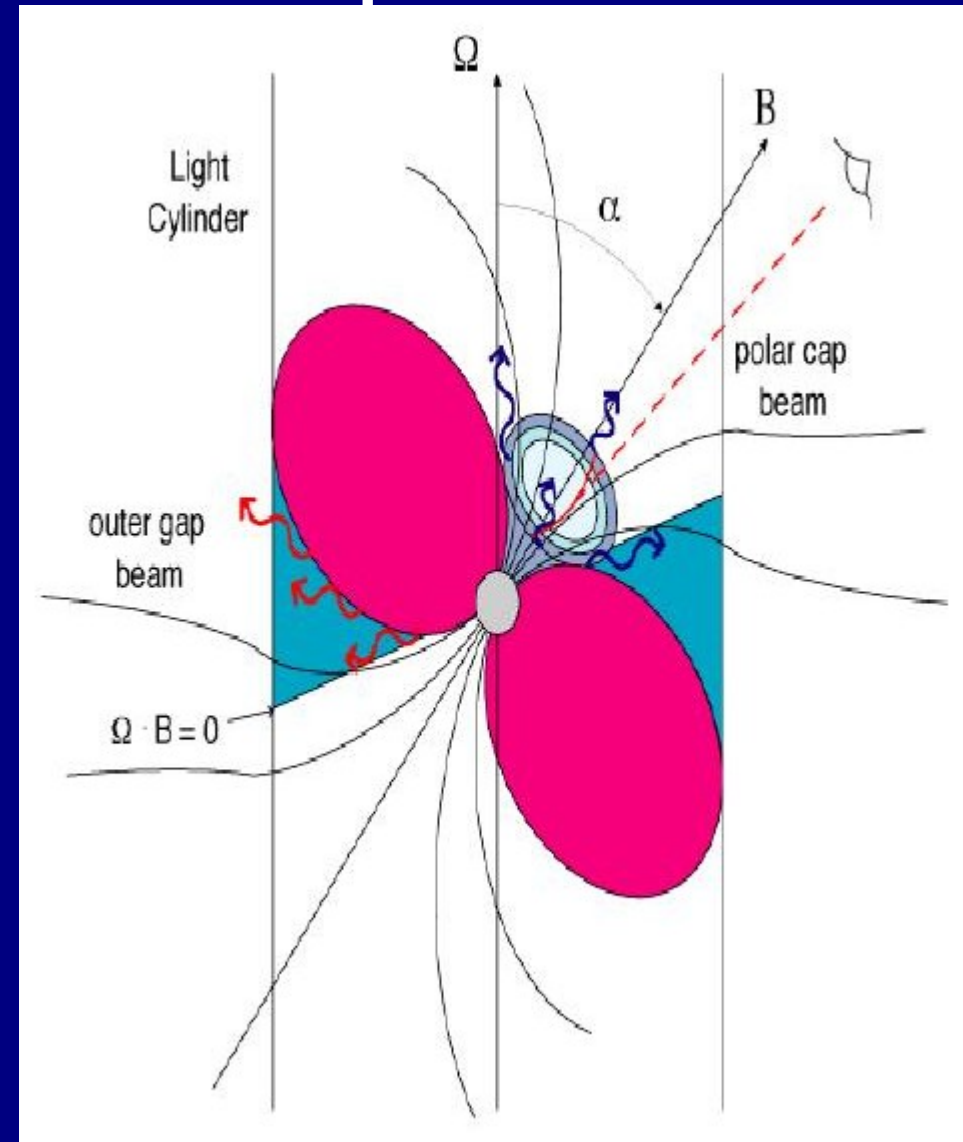
- De quelle partie du PSR vient le faisceau d'émissions radio ?
- Les particules (électrons, positrons) suivent les lignes de champ magnétique.
- **Inner gap** : très près du pôle magnétique.
- **Outer gap** : très près des lignes de champ qui, si elles tournaient solidairement avec le pulsar, atteindraient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

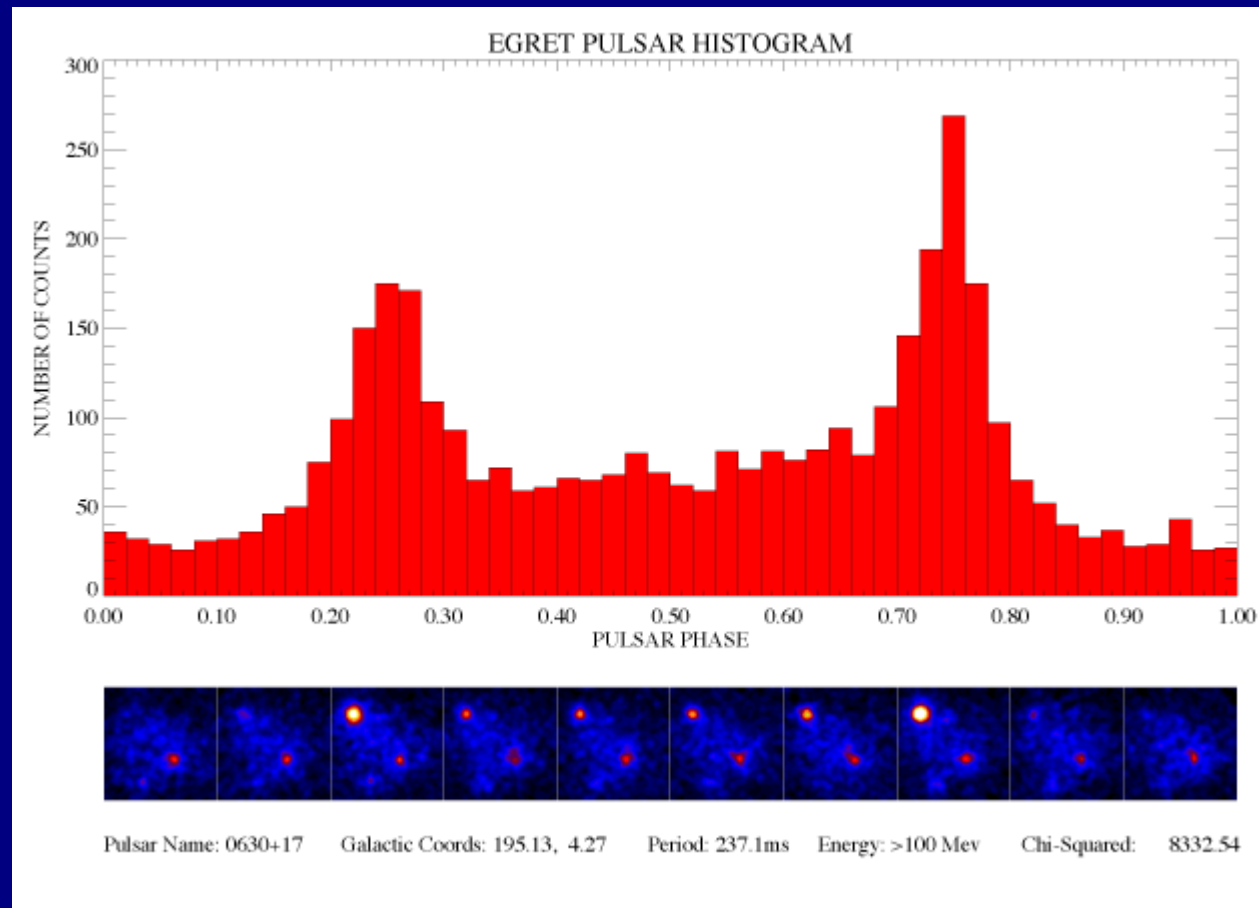
- **Rôle de la collimation** : les particules ultra-relativistes de l'environnement d'un pulsar sous vraisemblablement les sources d'émission.
- Une source rapide n'émet que dans un cône dont l'axe est parallèle à sa vitesse, ici le long des lignes de champ.
- Si la particule est lente, le cône est très 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.

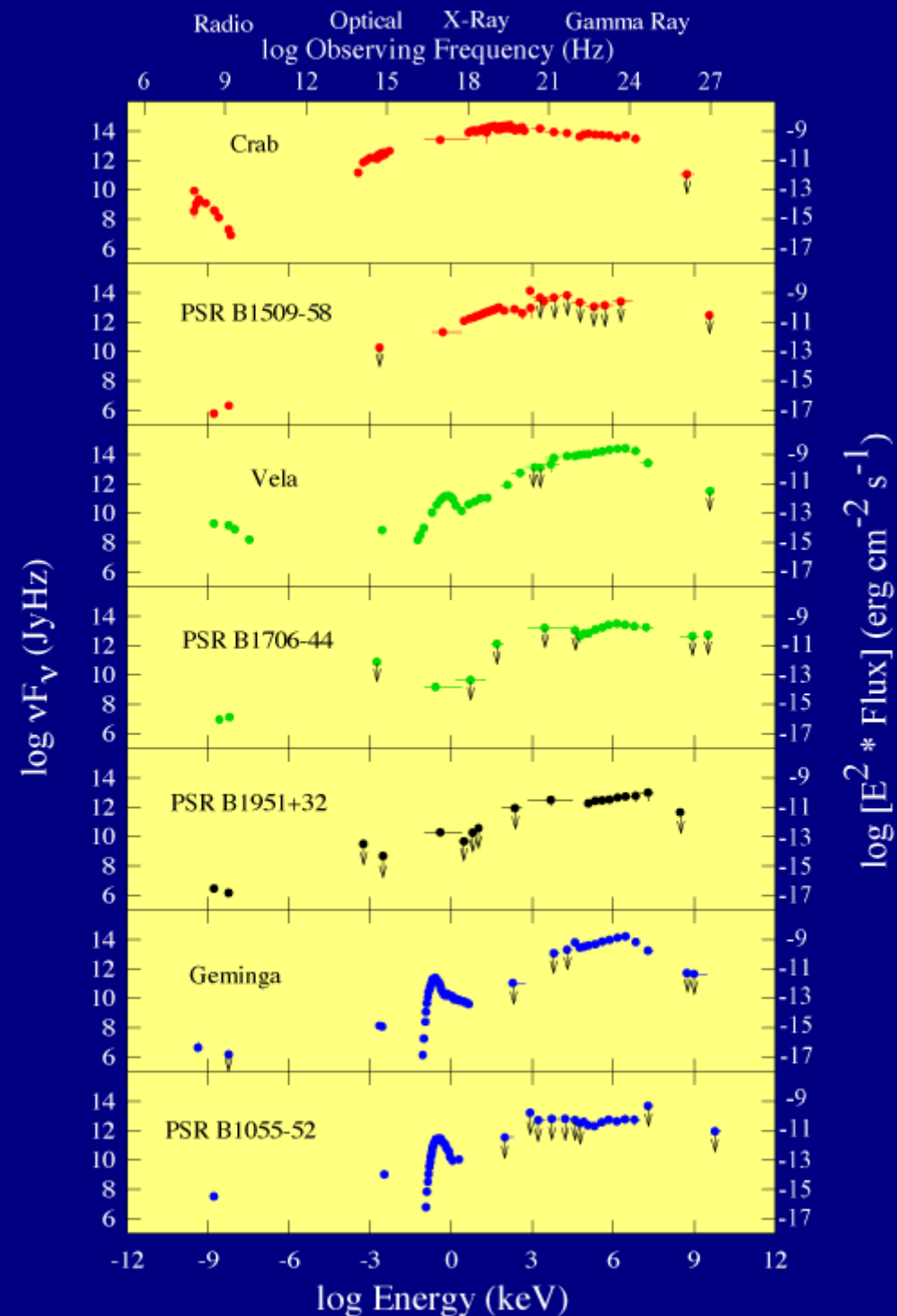


Geminga est dans les gémeaux, mais geminga veut dire (en dialecte milanais) : « est nulle part ». En effet, on ne trouve pas de contre-partie UV, optique ou radio.

[telescope gamma EGRET, Shrekuma, NASA]

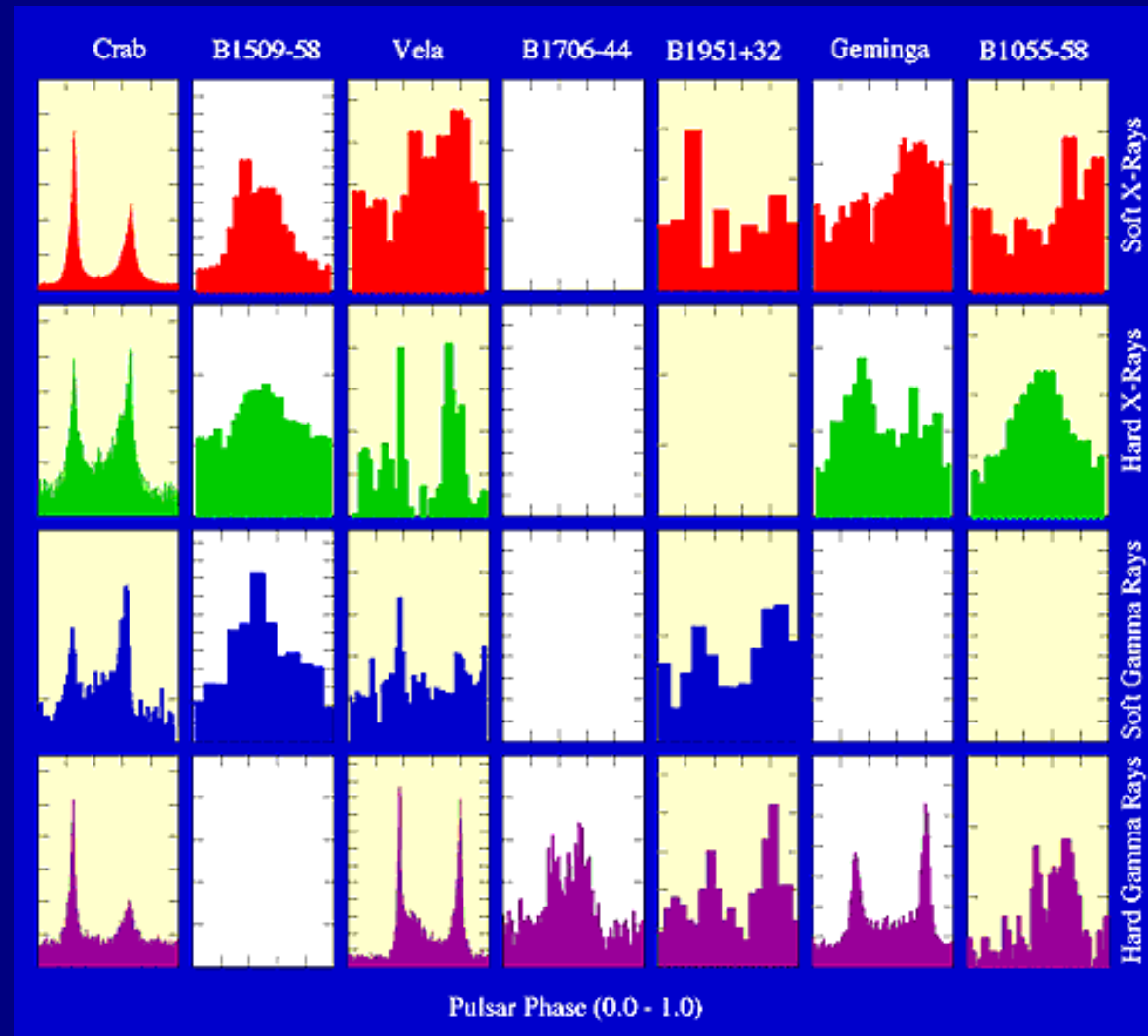
Les pulsars n'émettent-ils qu'en radio ?

- 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.



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

- 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.
- Cela est corroboré par la forme différente des courbes d'émission suivant la fréquence.

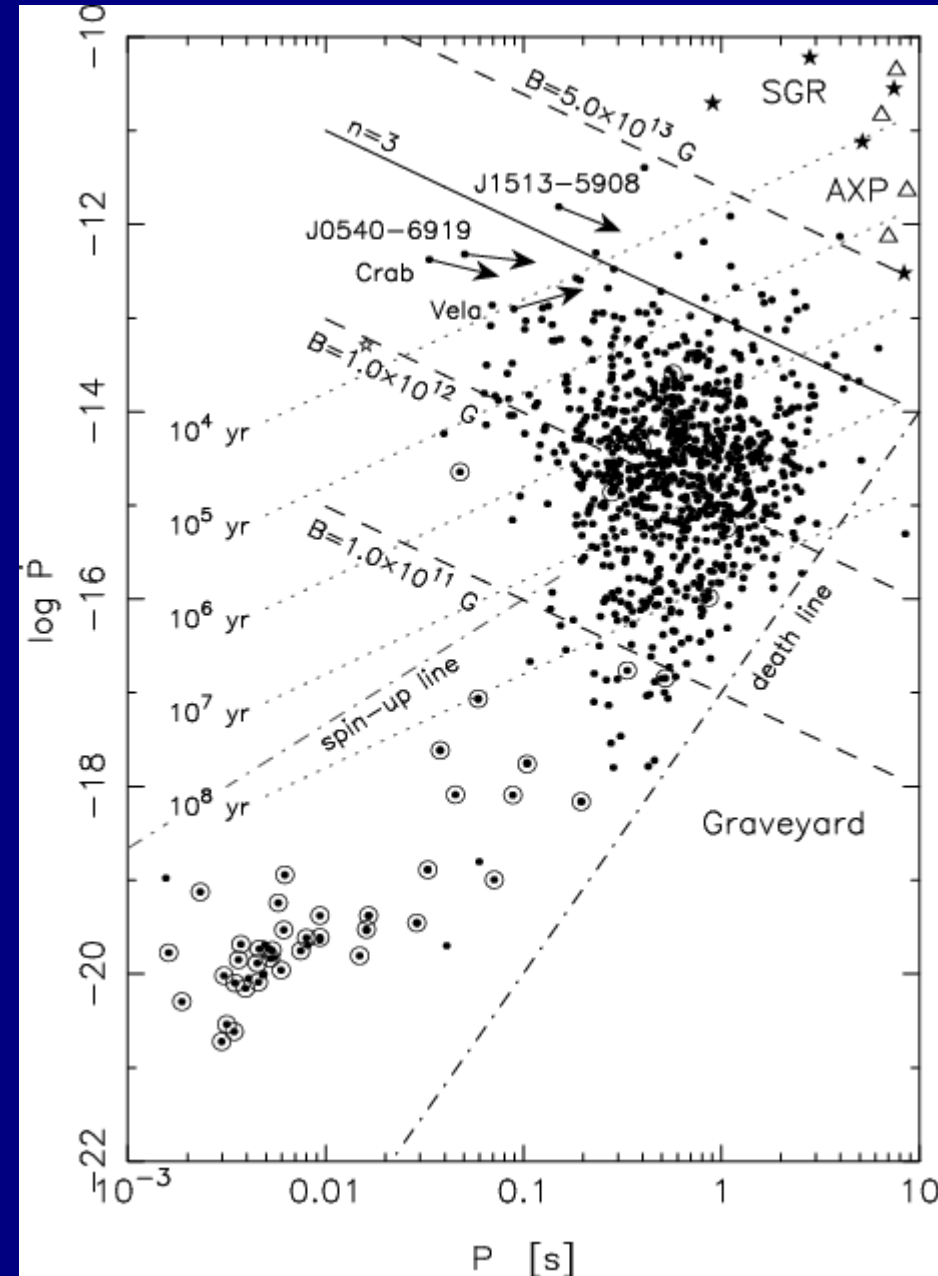


Combien de pulsars connus ?

- 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.

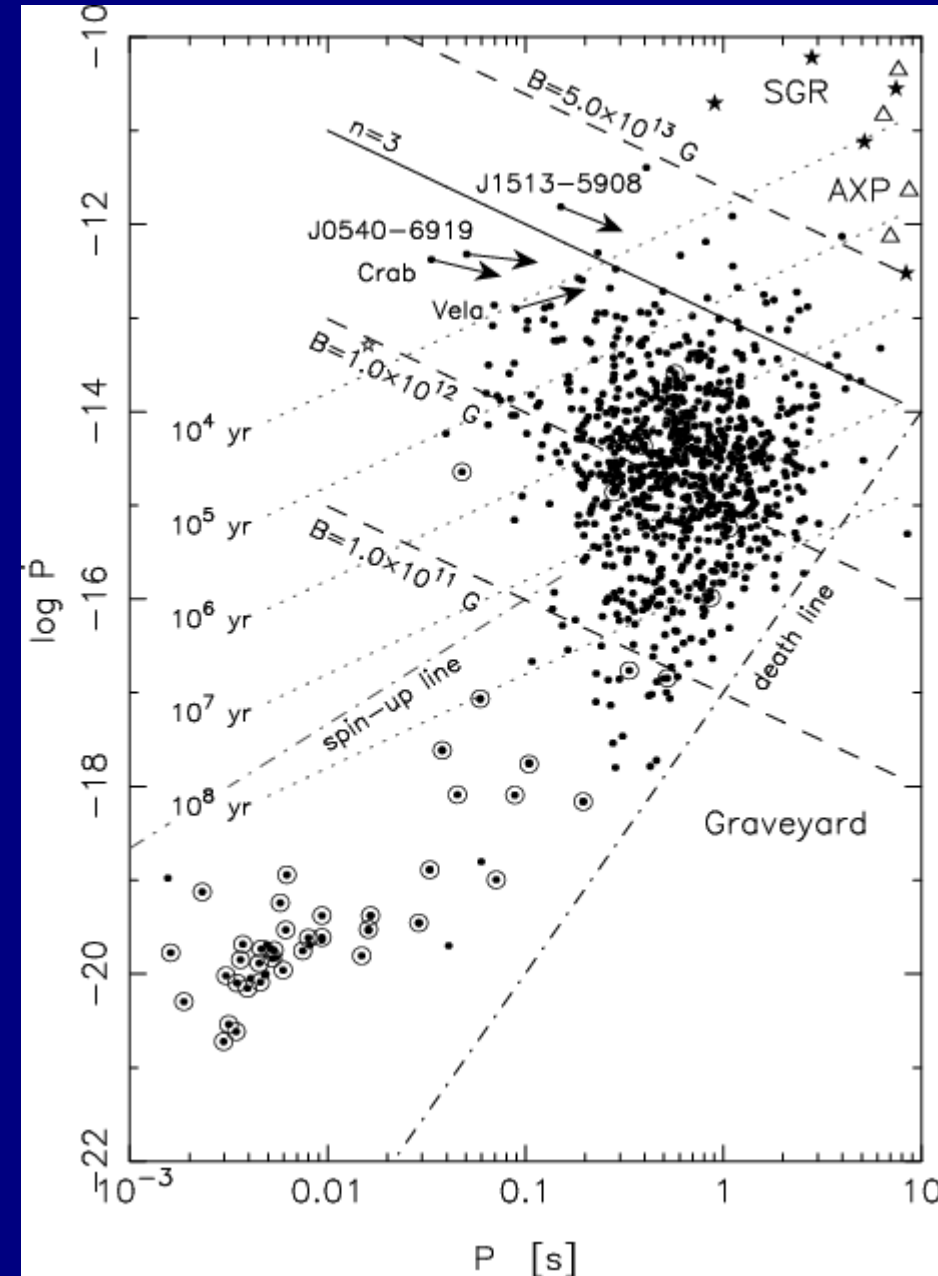
Les étoiles à neutron sont elles nécessairement des pulsars ?

- Quand le pulsar vieillit, sa rotation ralenti.
- 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.



Les étoiles à neutron sont elles nécessairement des pulsars ?

- Les étoiles à neutrons qui ne pulsent pas ne sont pas nécessairement d'anciens pulsars.
- Les étoiles à neutrons dont le champ magnétique est aligné avec l'axe de rotation ne devraient pas pulser.
- Peut-être des étoiles à neutrons n'émettent pas les rayonnements intenses et très focalisés des pulsars.



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

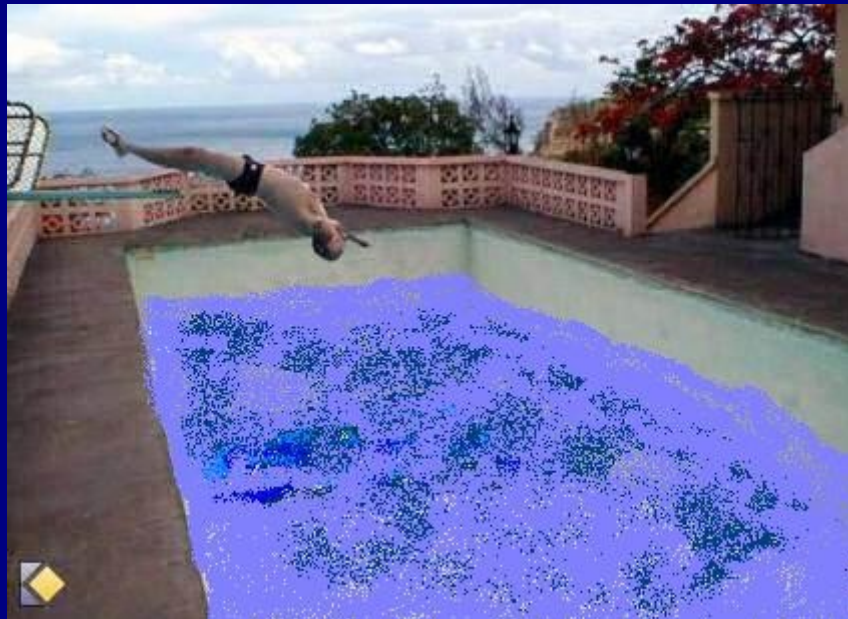
Les équations T.O.V..

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

- 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.

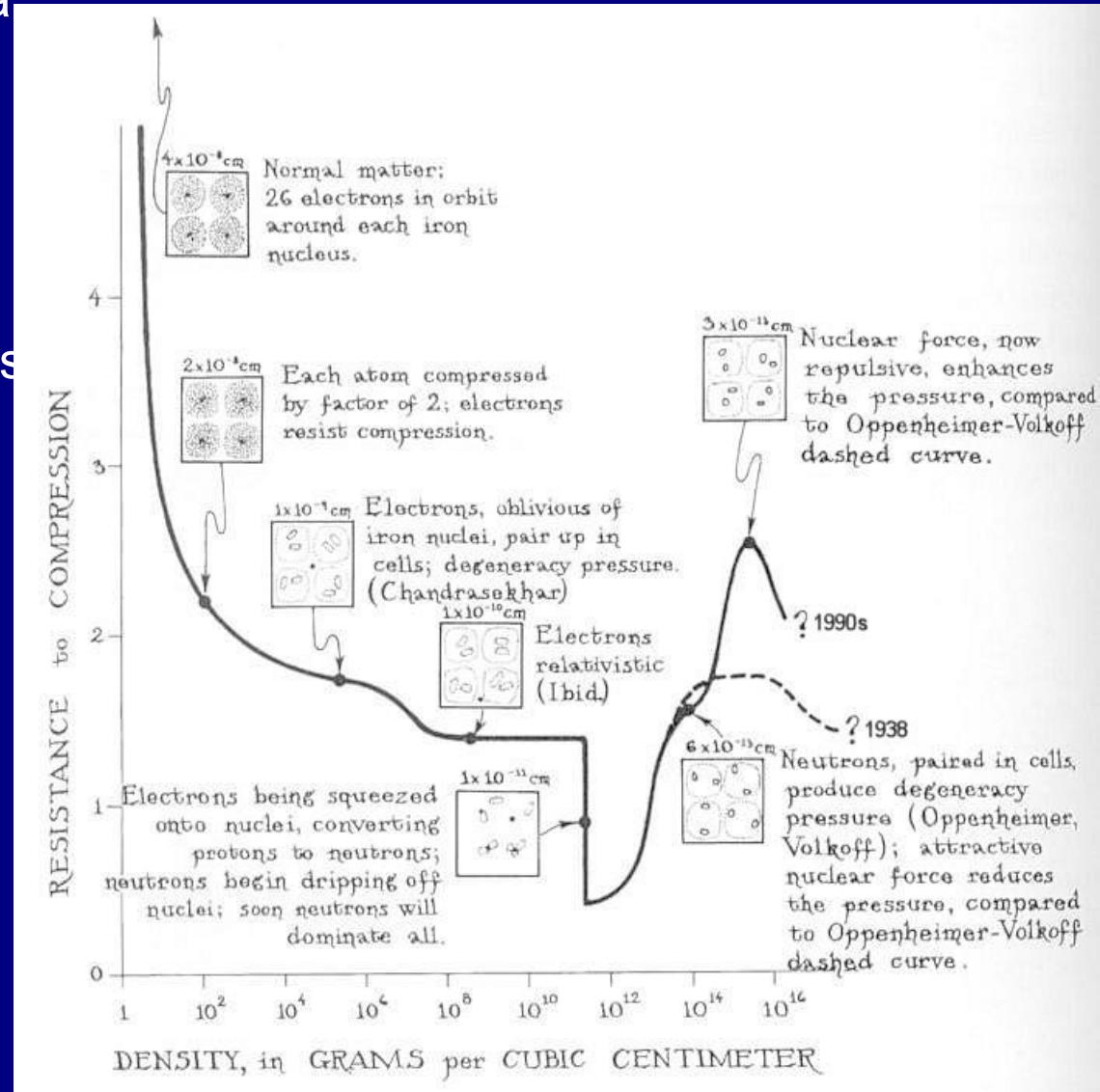
Les équations d'état.

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

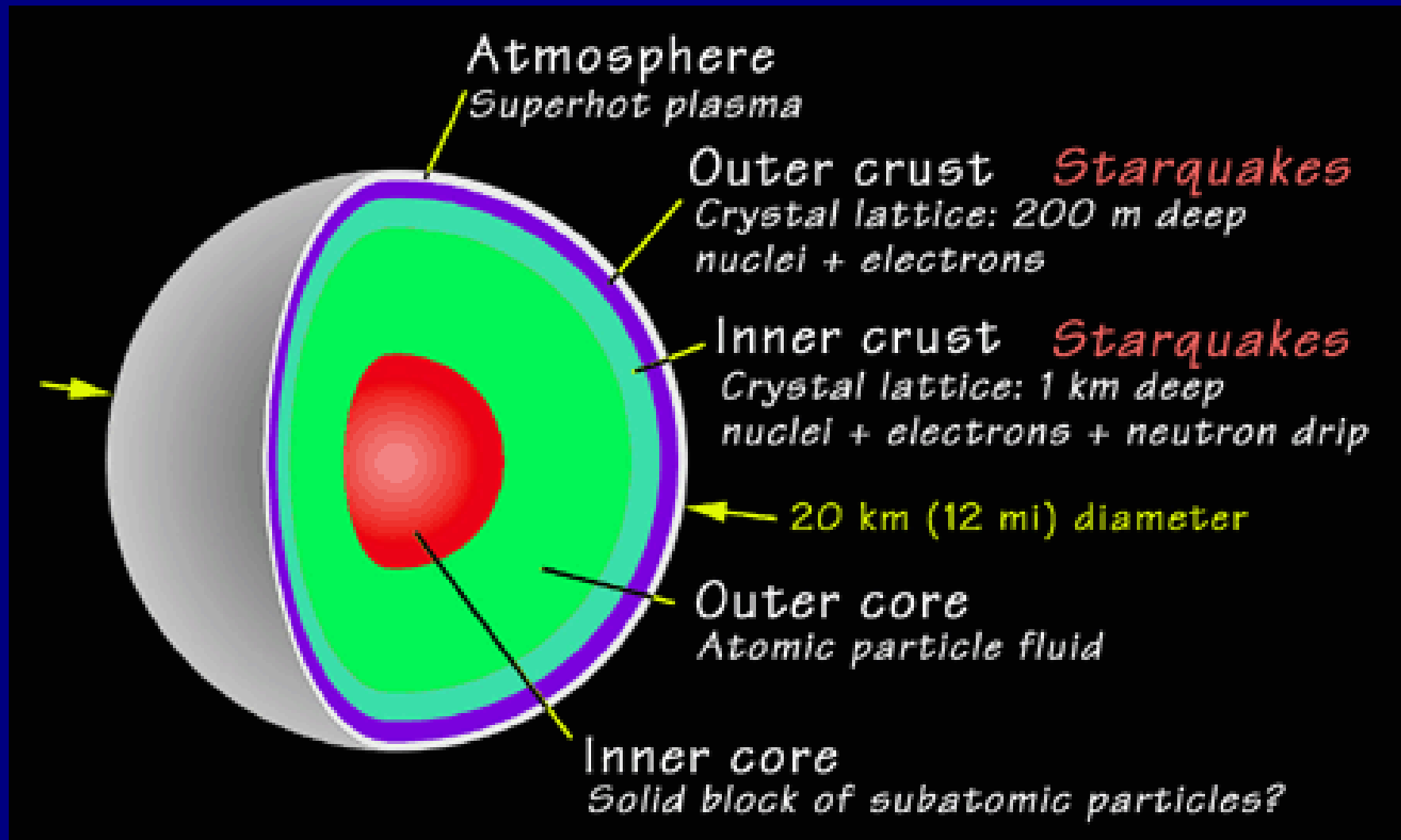


Les équations d'état.

- 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.



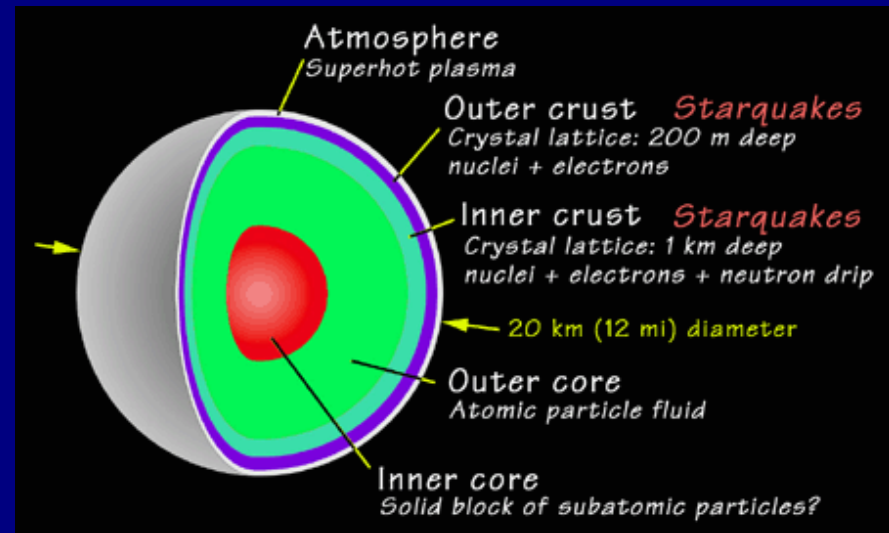
Spéculations théoriques sur la structure interne d'une étoile à neutrons.

La surface de l'étoile.

- A la surface de l'étoile, la densité est voisine de la densité nucléaire.
- Le paramètre relativiste est de l'ordre de 0.5 (1 pour un trou noir, 0.0001 pour une naine blanche).
- On fait appel aux spécialistes de physique nucléaire.
- La surface doit être un cristal (donc solide !) extrêmement dense, composé de noyaux atomiques plus lourds que le fer, avec beaucoup de neutrons.
- Entre les noyaux, se promènent des électrons formant un gaz de Fermi (dégénéré).
- La température de surface d'une jeune étoile est de qq MK. (intérieur du Soleil : 15 MK). Les conditions sont telles que des éléments légers (H, He) engendreraient de la fusion nucléaire. Mais il n'y a que des éléments très lourds.

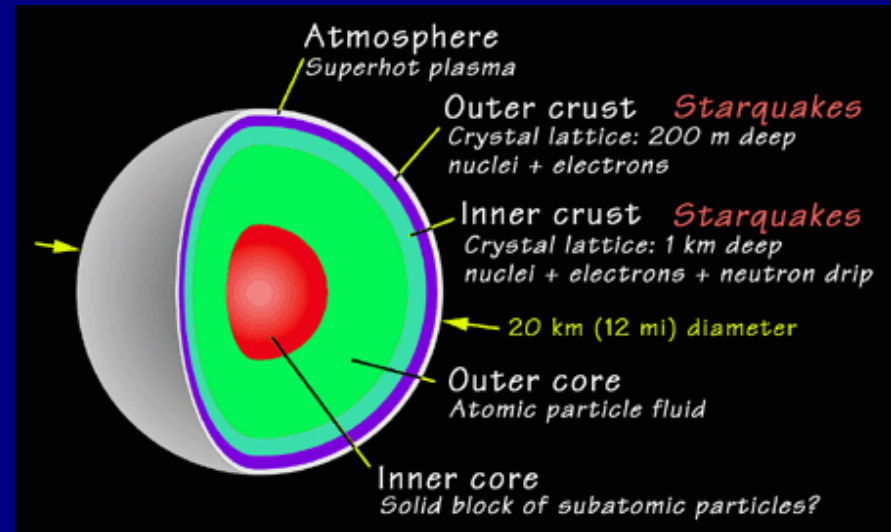
L'atmosphère.

- Une atmosphère très dense, très chaude d'un plasma constitué d'électrons et de positrons.
- Facteur de Lorentz : de 1000 à 1000 000. Les interactions entre les photons (gamma) et le champ magnétique engendrent les paires d'électron-positron qui peuplent l'atmosphère.
- L'épaisseur de l'atmosphère, dans sa partie dense, est de l'ordre de 1 centimètre. (Mais l'étoile ne fait que 10 km !)
- Peut trembler (serait à l'origine des glitches).



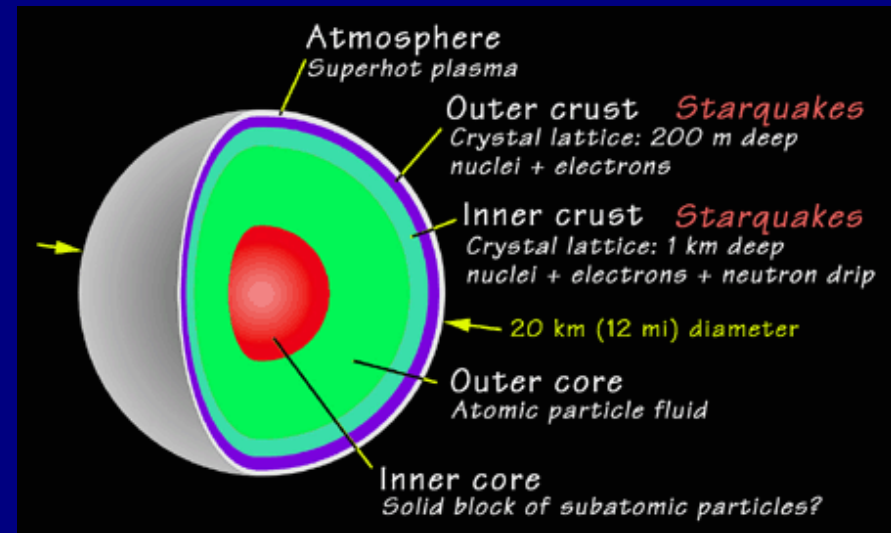
La croûte externe.

- 200 mètres d'épaisseur
- Réseau cristallin de noyaux atomiques très lourds et riches en neutrons
- Des électrons libres (dégénérés relativistes)
- Pas encore de neutrons libres, ils sont tous dans des noyaux.



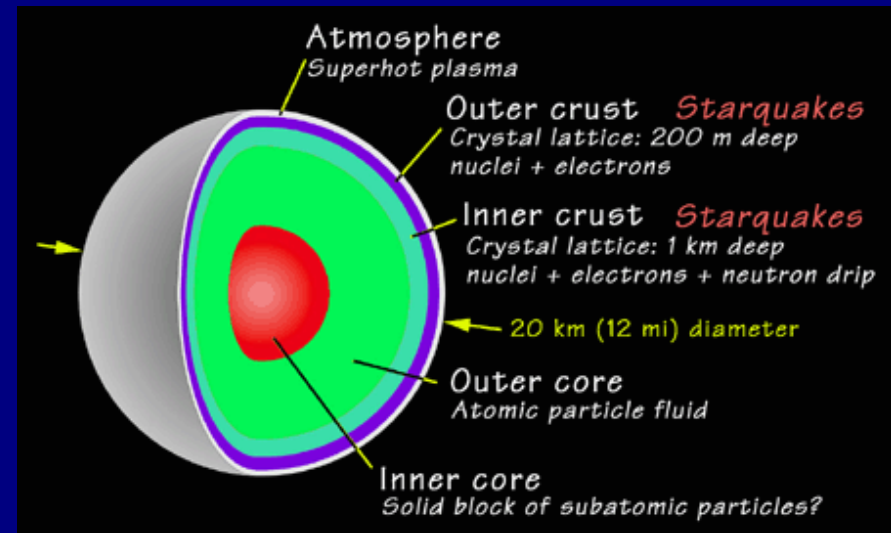
La croûte interne.

- 1 kilomètre d'épaisseur
- Réseau cristallin de noyaux atomiques très lourds et riches en neutrons
- Des électrons libres (dégénérés relativistes), éventuellement des muons (leptons, comme les électrons, mais plus lourds).
- Des neutrons libres, dégénérés et superfluides.
- Peut trembler (serait à l'origine des glitches).



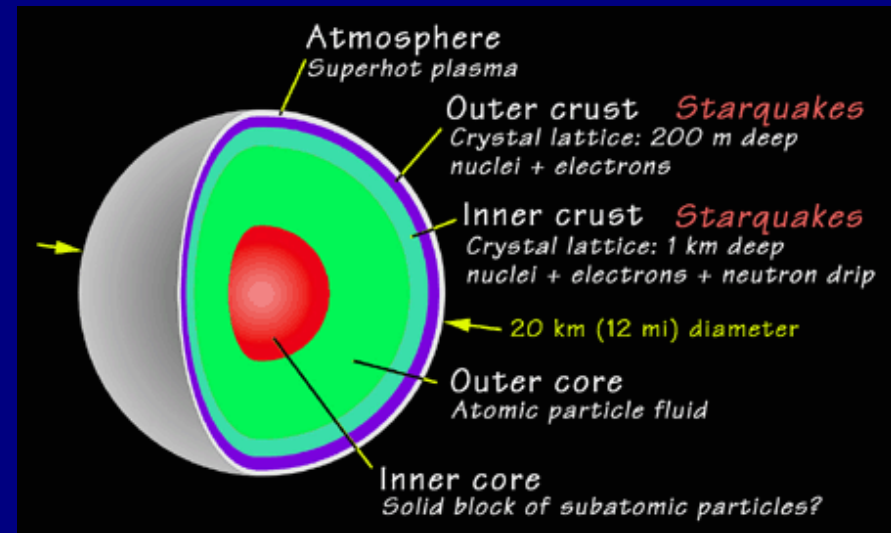
Le noyau externe.

- Plusieurs kilomètres d'épaisseur
- Un fluide formé essentiellement de neutrons, mais aussi de quelques protons et électrons.
- Les protons sont supraconducteurs.
- Les neutrons forment un gaz dégénéré de Fermi.
- Les neutrons ont des interactions nucléaires fortes qui participent à leur pression. Ces forces sont tantôt attractives, tantôt répulsives.
- L'équation d'état (pression en fonction de la densité) est mal connue.
- La matière est plus dense que dans un noyau atomique.

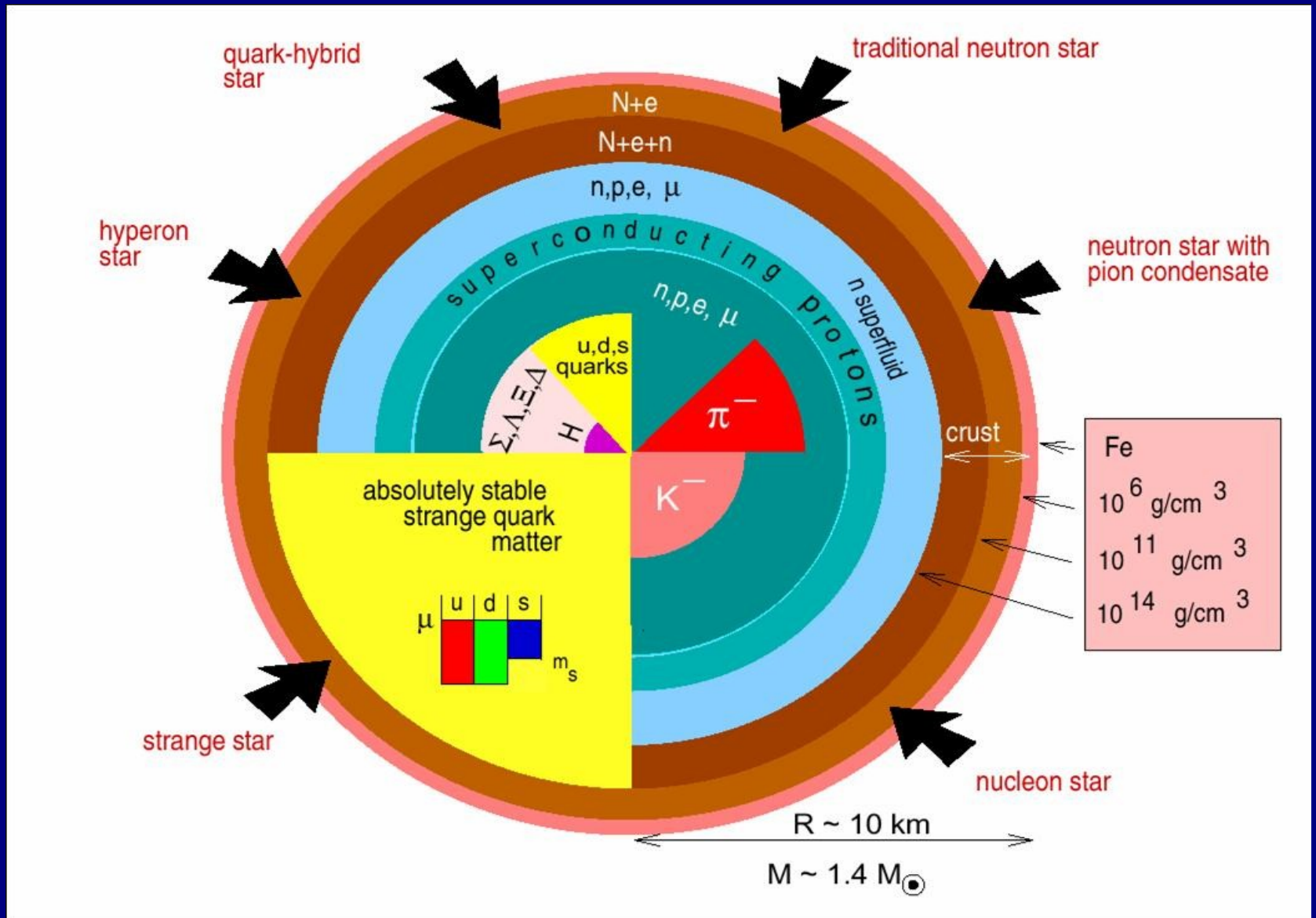


L'hypothétique noyau interne.

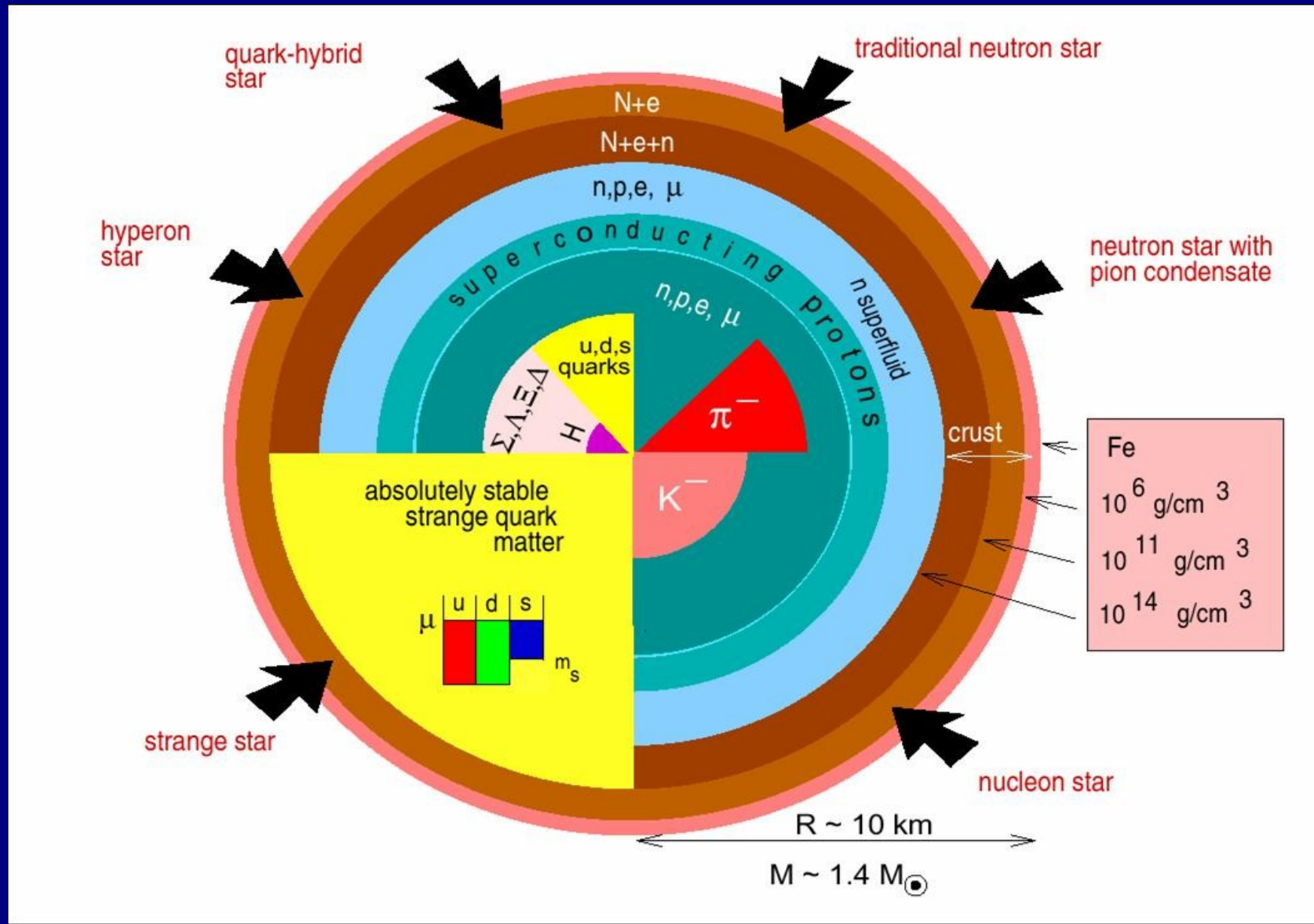
- On n'est pas certain de son existence, il peut n'y avoir qu'un noyau.
- Certains modèles envisagent un noyau solide.
- D'autres considèrent un noyau contenant, outre des neutrons, d'autres hadrons (instables dans les conditions « habituelles »)
- par exemple étoiles à hypérons
- ou étoiles à condensats de pions
- ou les quarks constituant les neutrons sont déconfinés. Le noyau est alors un plasma de quarks. Ces quarks se transforment alors en quarks « s » (étranges). Etoiles étranges.



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



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

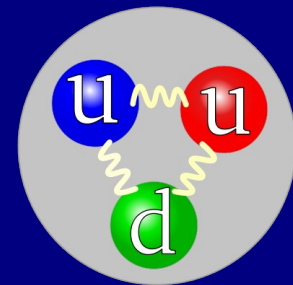


Les équations d'état, plusieurs modèles d'étoiles à neutrons... ou à quarks.

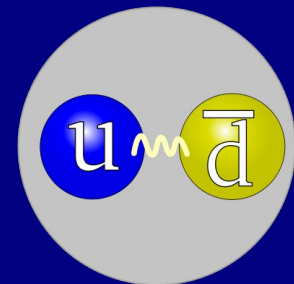
- D'après la/les théorie de l'interaction forte, les hadrons (particules soumises à cette interaction) seraient constituées de particules plus élémentaires, les quarks.
- Les quarks portent une masse, un nombre hadronique, un spin, et une couleur.
- Les nucléons seraient constitués de 3 quarks.
- D'autres 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).



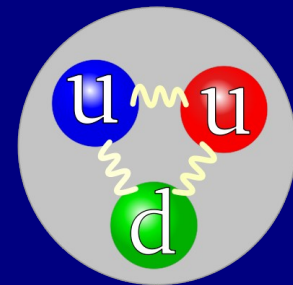
proton



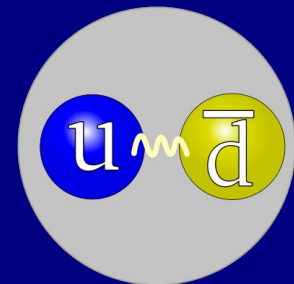
pion

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 .

[image Sky and Telescope]

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

RX J 1808.4-3658 a été découvert
grâce à deux éruptions en X
de moins de 30s (septembre 1996).

Depuis, on a vu que c'est un PSR radio et X.
Période $P=2,49$ millisecondes.

Elle est dans un système binaire :

- 1) compagne visible,
- 2) modulation des retards des impulsions du PSR,

Période orbitale : 2 heures.

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

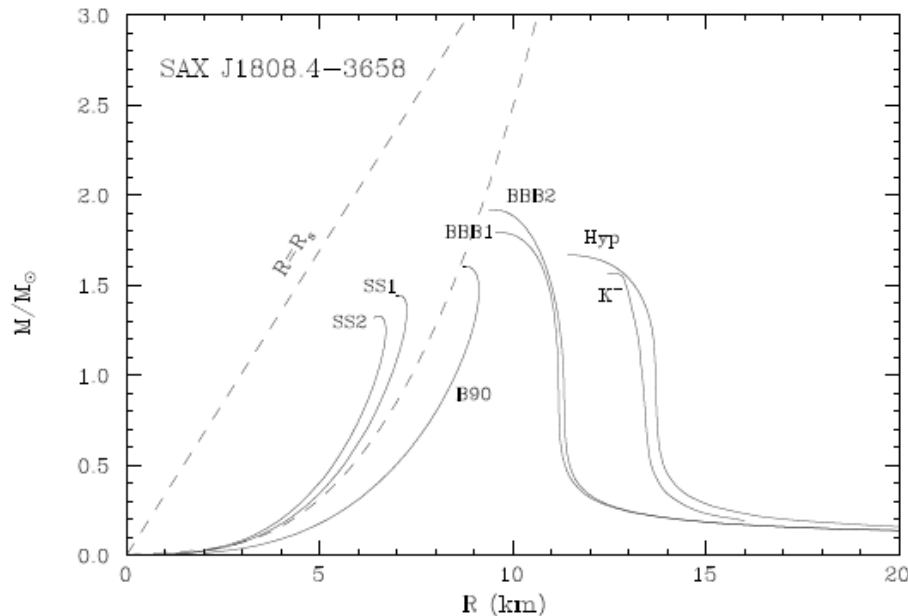


Figure 1: Comparison of the MR relation of SAX J1808.4 -3658 determined from RXTE observations with theoretical models of neutron stars and of SS. The solid curves represents theoretical MR relations for neutron stars and strange stars.

[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

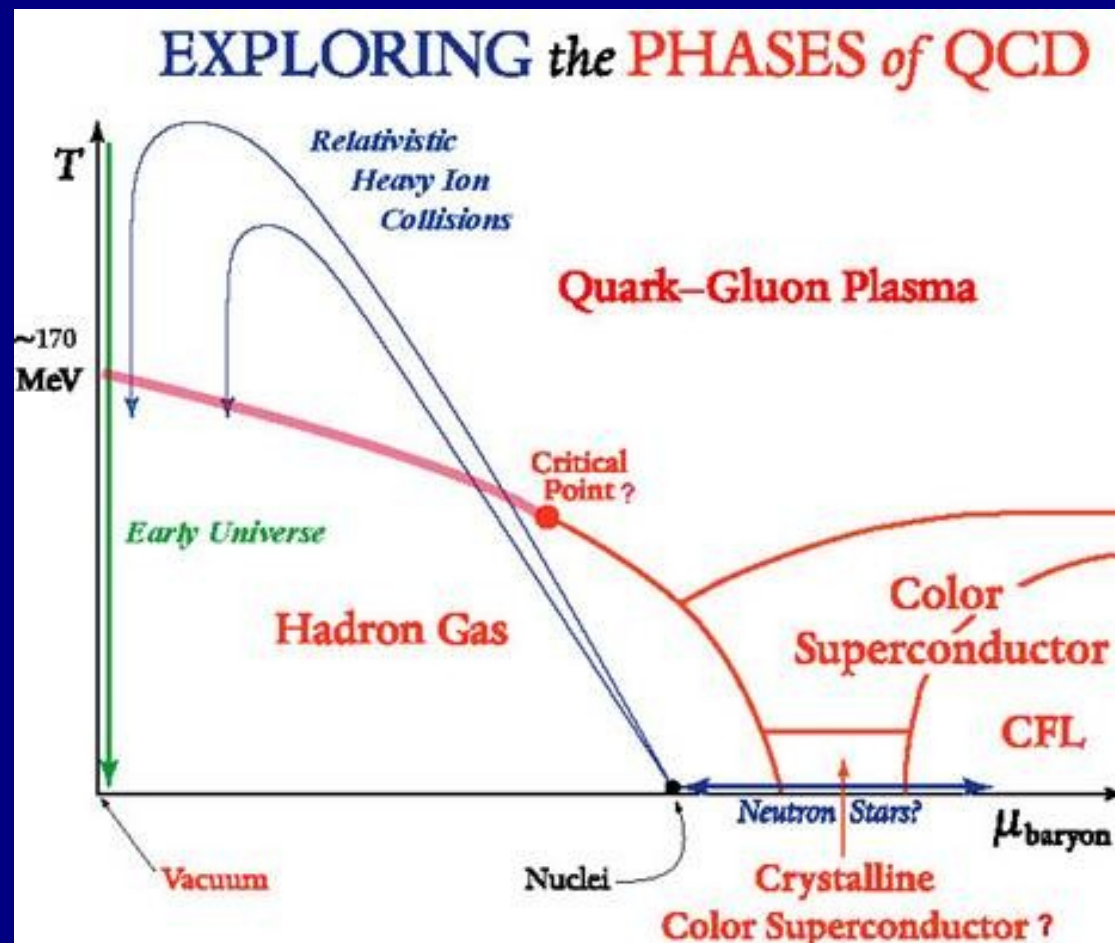
source X, binaire

étoile isolée

PSR X

[Bombaci, astro-ph 2002]

Les équations d'état. Une piste pour l'exploration des conditions extrêmes dans l'univers.



Autre singularité : les magnétars

- Soft Gamma Repeaters. (6 connus ?)
- Interpretation actuelle :
 - Des étoiles à neutron avec un fort champ magnétique.
 - les champs magnétiques les plus forts connus dans l'univers. 10^{16} Gauss. (désaimante une carte de crédit à 150 000 000 kilomètres).
 - associés à des étoiles en rotation plutôt lente (plusieurs secondes).
 - on considère (contrairement aux pulsars) que l'énergie des radiations (qui en permettent l'observation) n'est pas due à la rotation de l'étoile, mais à son champ magnétique.

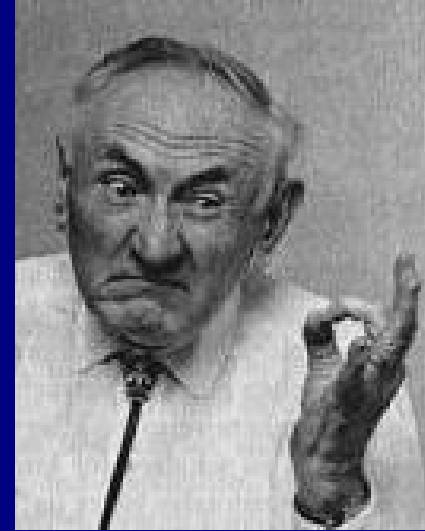
Autre singularité : les magnétars

Soft Gamma Repeaters. (6 connus ?)

quelques numéros de téléphone :

- SGR 1900+14, 2 sursauts gamma détectés en 2 semaines, sur plusieurs années : tremblements de la croûte de l'étoile sous l'effet de fluctuations du champ magnétique interne.
- 1E 1048-59 : des événements en X (pas en gamma), considérés comme pouvant émaner d'un magnétar [Gavriil et al 2002].

Comment une étoile massive se transforme-t-elle en étoile à neutrons ?



- Retour sur l'idée de Baade et de Zwicky : les étoiles à neutrons sont issues de l'effondrement du cœur des étoiles, causant les supernovae.
- Hoyle, 1946 : effondrement des étoiles massives, typiquement 10 masses solaires.
- Modèles de Hoyle et Fowler, années 1960.

Une étoile massive avant l'effondrement.

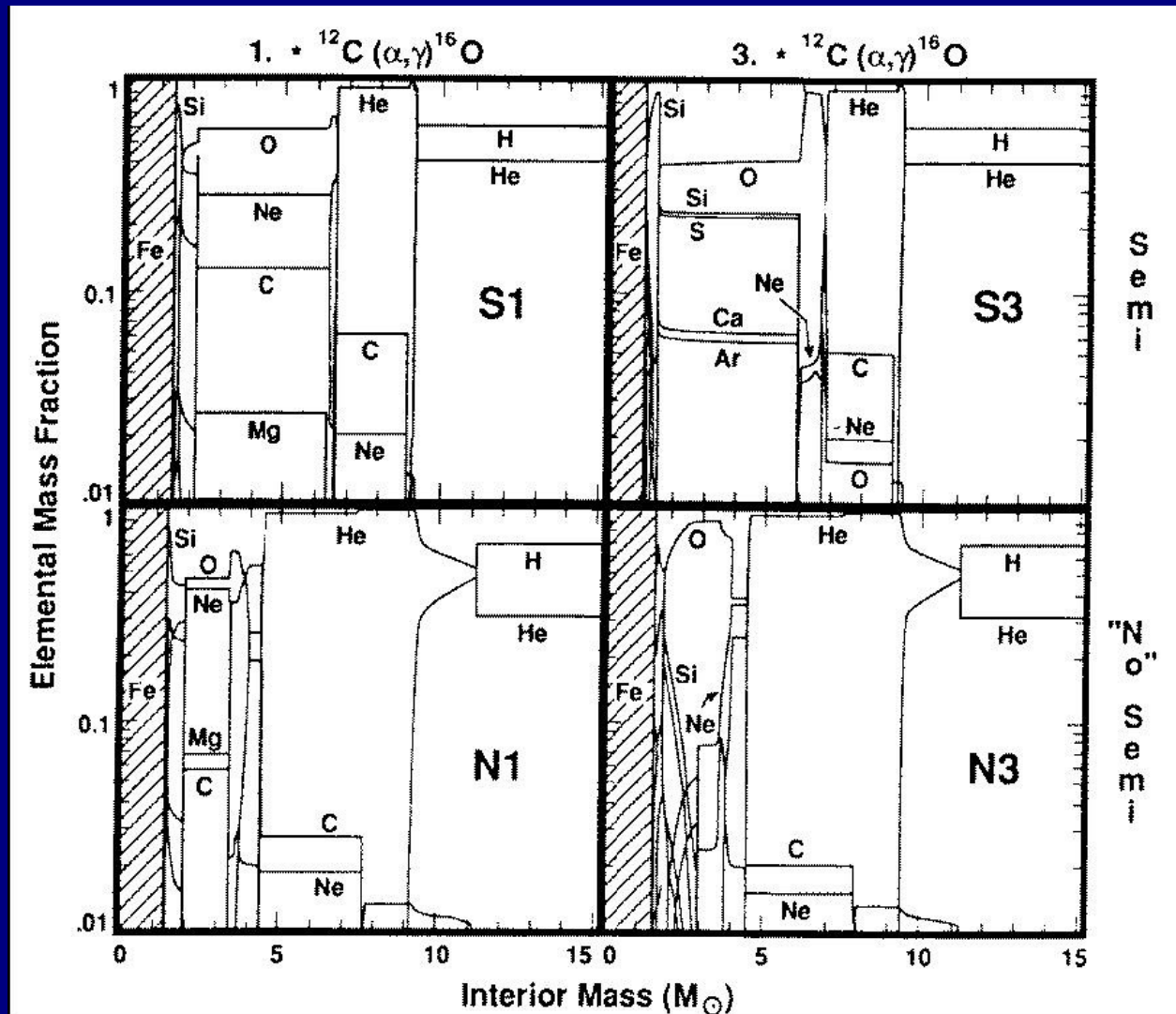
- Modèle en couche.
- Ici pour une étoile de 25 MS.
- 4 modèles, à cause des incertitude sur le taux de la réaction nucléaire



=>



et la prise en compte (en haut) de la convection.



Une étoile massive avant l'effondrement.

- Une étoile massive : fabrique des éléments plus lourds que C et O. Même du fer (Fe), l'élément le plus stable.
- Le fer (lourd) tombe et se concentre dans le coeur. **Les électrons libres forment un gaz dégénéré** (comme dans une naine blanche).
- En périphérie du coeur, le silicium (Si) se transforme en fer. Le fer ainsi produit tombe dans le noyau...

Une étoile massive juste avant l'effondrement.

- En périphérie du coeur, le silicium (Si) se transforme en fer. Le fer ainsi produit tombe dans le noyau...
- ... jusqu'à ce que le noyau atteigne la masse de Chandrasekhar.
- Alors, le noyau subit un effondrement gravitationnel.



Quelques éléments de physique pour comprendre le déferlement de violence qui va suivre.

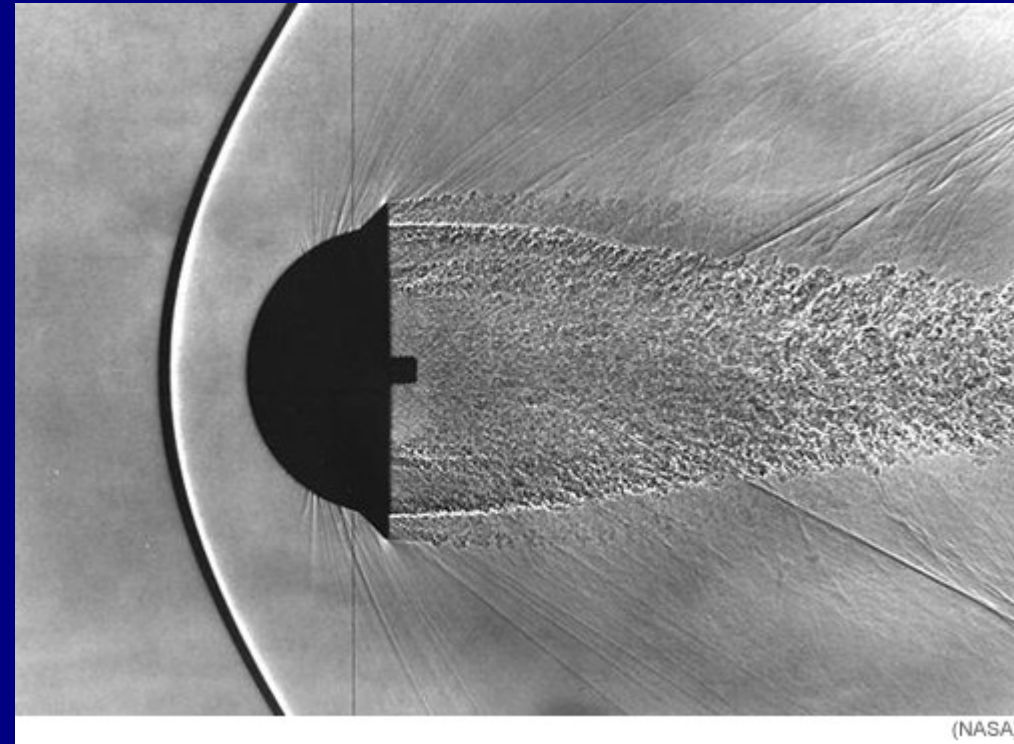
- Le rôle du son dans la propagation des informations sur un fluide.
- Quand le fluide va plus vite que le son.
- La photo-dissociation du fer.
- Les réaction bêta inverses
- Les neutrinos, leurs interactions infimes avec la matière.

Qu'est ce qu'un onde sonore ?

- C'est la propagation d'une modification de la pression. Dans un milieu continu, cette propagation d'une modification de pression a lieu à une vitesse voisine de l'agitation thermique des particules. Elle peut être de très grande amplitude.

Qu'est ce qu'un onde de choc ?

- Lors d'un écoulement ou d'une explosion, un fluide peut aller plus vite que la vitesse du son.
- Le fluide au repos ne sais pas que le flot rapide va arriver, car les ondes sonores ne l'en informent pas (elle sont derrière le front du fluide rapide).
- Il se crée en amont du flot une couche « discontinue » où l'information sur la pression peut se propager plus vite. C'est l'onde de choc.
- Comme cette couche est fine, le gaz en amont passe très brutalement en aval du choc.



Ecoulement supersonique autour d'un obstacle en soufflerie [NASA]

Qu'est ce qu'un onde de choc ?

- Lors d'un écoulement ou d'une explosion, un fluide peut aller plus vite que la vitesse du son.
- Le fluide au repos ne sais pas que le flot rapide va arriver, car les ondes sonores ne l'en informent pas (elle sont derrière le front du fluide rapide).
- Il se crée en amont du flot une couche « discontinue » où l'information sur la pression peut se propager plus vite. C'est l'onde de choc.
- Comme cette couche est fine, le gaz en amont passe très brutalement en aval du choc.



Thrust Super Sonic Car,
l'onde de choc soulève le sable.

La photo-dissociation du fer

- Le fer (^{56}Fe) est l'élément le plus stable.
- Fabriquer des éléments plus lourds ou plus légers implique une absorption d'énergie.
- Lors d'un effondrement gravitationnel, on dispose de beaucoup d'énergie.
- La réaction



peut se produire avec une grande rapidité.

- Cette réaction absorbe de l'énergie, donc accélère l'effondrement.
- elle libère quatre neutrons (mais n'en produit pas de nouveaux).

La capture d'électron par un proton

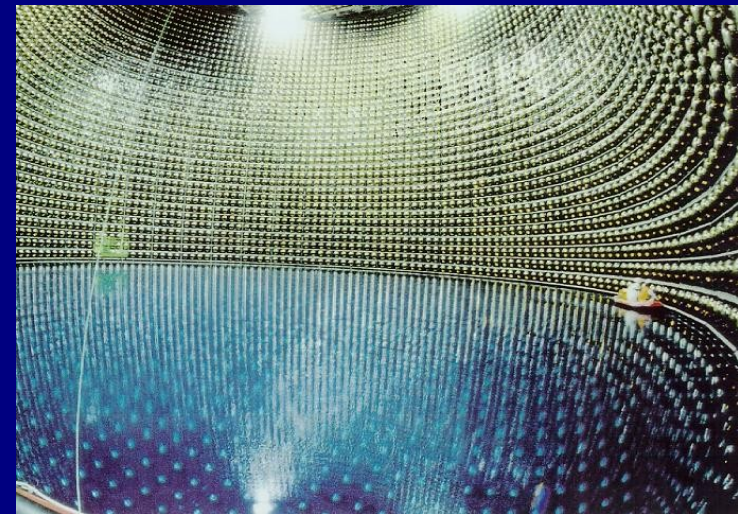
- Un neutron isolé se désintègre spontanément (demi-vie 15 minutes) en un proton et un électron.
- Des protons et des électrons très fortement comprimés peuvent donner la réaction inverse, de capture d'électron :



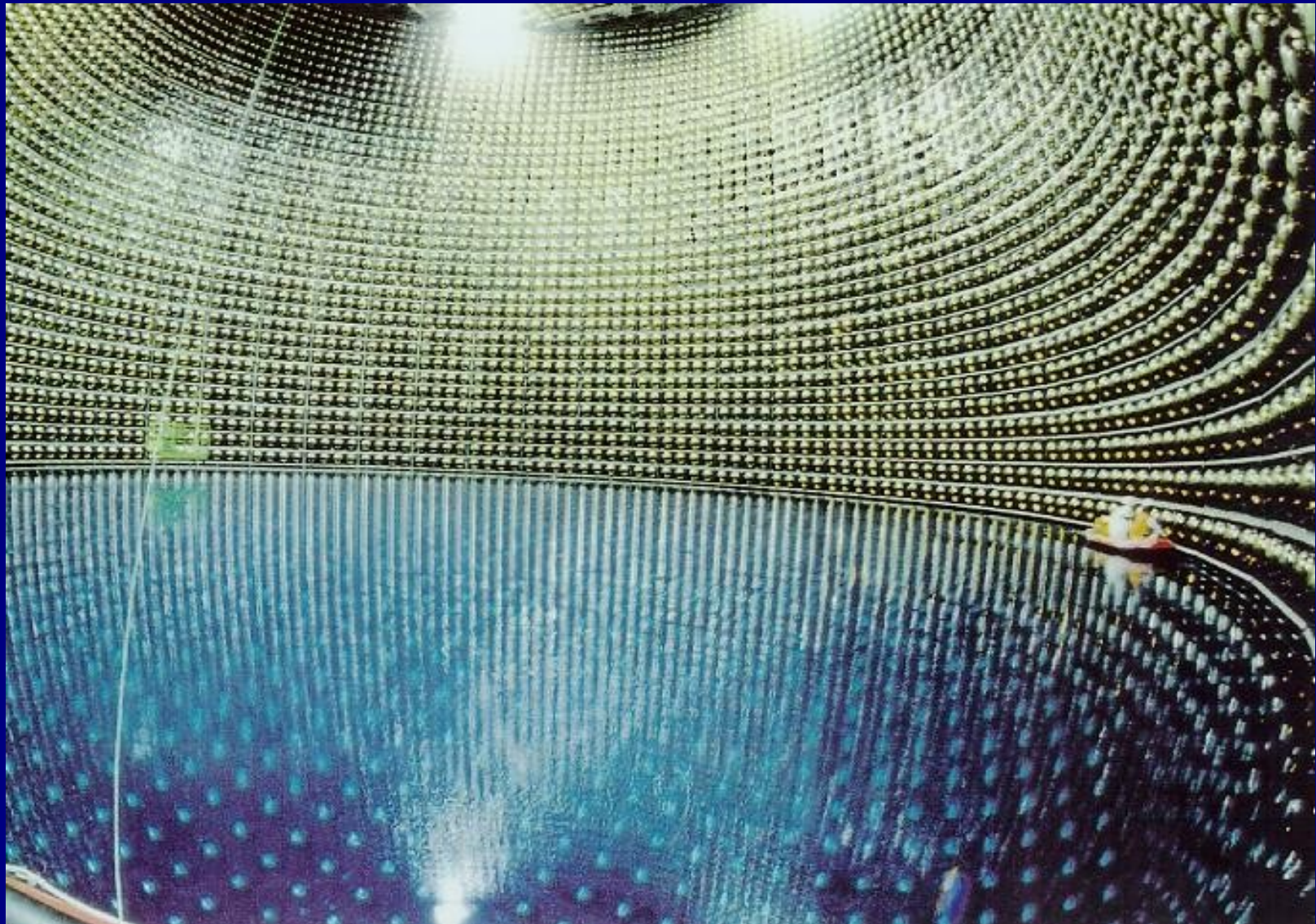
- Cette relation (fondée sur l'interaction faible) est plus lente que l'effondrement d'une étoile.
- Cette réaction produit un neutrino.
- Pour chaque proton converti en neutron, un neutrino sera produit.
- Il y a au moins 10^{57} protons dans le coeur d'une (super)géante rouge.
- La plupart des neutrinos sortent de l'étoile, emportant leur énergie (plusieurs MeV par neutrino, bien plus que des photons gamma). Le processus est donc irréversible.
- La pression des neutrinos (minoritaires) capturés compte dans la dynamique de l'explosion.

Les neutrinos

- particules élémentaires.
- On a une masse infime (>16 eV), pas de charge électrique, pas de nombre hadronique.
- Comme toutes les particules (presque) sans masse, se déplacent (presque) à la vitesse de la lumière.
- Ils n'interagissent que par l'interaction faible.
- Dans la plupart des circonstances, ces particules, une fois produites, jouent les fantômes, passant à travers tout.
- Traversent généralement la Terre sans aucune interaction.
- On en a détecté directement seulement quelques centaines.
- Jusqu'en 1987, tous les neutrinos détectés venaient du cœur du Soleil (issus des réactions de nucléosynthèse p-p).



Les neutrinos

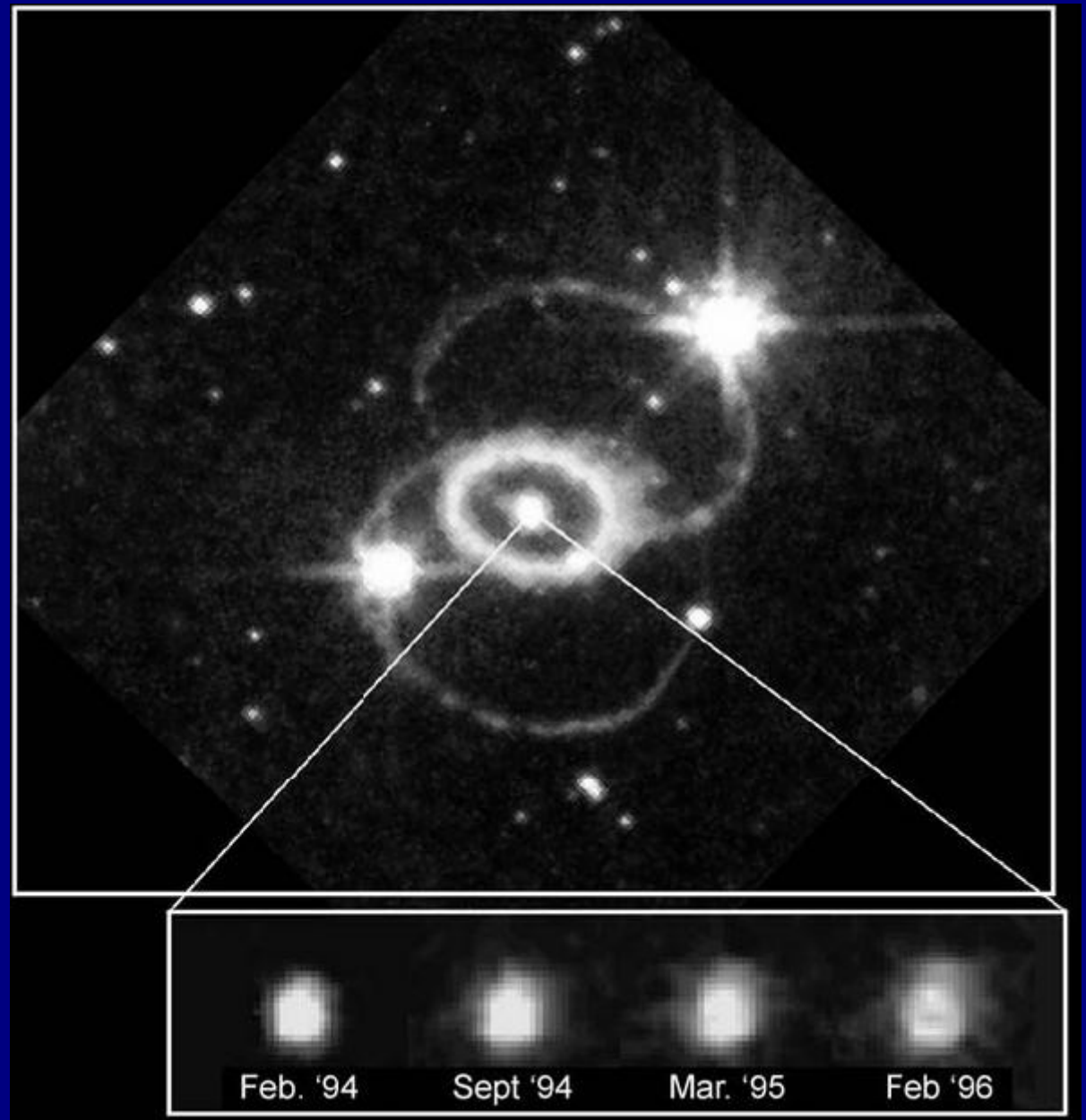


Le détecteur de neutrinos Super-Kamiokande.
Jusqu'en 1987, il n'avait détecté que des neutrinos d'origine solaire.

La SN 1987 A

Le 23 février 1987, une étoile (Sanduleack 89O 202) dans le Grand Nuage de Magellan, de masse 15-18 masses solaires, explose en Super nova.

C'est une SN gravitationnelle, c'est à dire l'effondrement d'un coeur d'étoile ayant dépassé la masse de Chandrasekhar.



La SN 1987 A

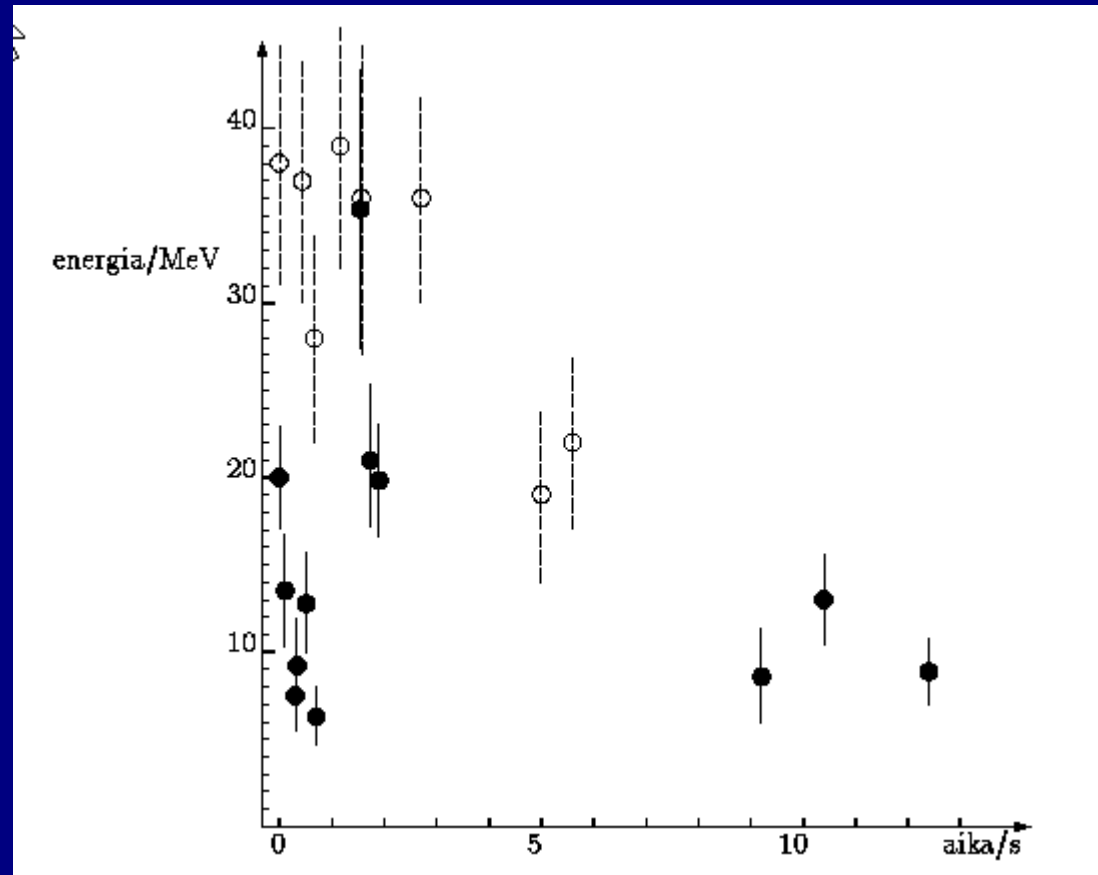
Le 23 février 1987, une étoile (Sandulaeck 89O 202) dans le Grand Nuage de Magellan, de masse 15-18 masses solaires, explose en Super nova.

C'est une SN gravitationnelle, c'est à dire l'effondrement d'un coeur d'étoile ayant dépassé la masse de Chandrasekhar.

Elle est à environ 75 000 années lumière.

Les détecteur Kamiokande et IMB détectent un afflux (jamais vu) de neutrinos (11 et 8), sur un intervalle de 13 secondes.

On estime que 10^{58} neutrinos ont été produits.



Le scénario d'un effondrement d'étoile massive.

- le coeur, $M > M_{\text{Chandra}}$, s'effondre. Densité initiale $\sim 10^{13} \text{ kg/m}^3$.
- La densité s'accroît, et favorise la photodissociation du Fer. L'énergie absorbée par ces réactions ne favorise pas l'augmentation de la pression.
- Dans un premier temps, les captures électroniques commencent, mais lentement par rapport à la durée de l'effondrement de la matière. Cela dit, le nombre d'électrons diminue, ce qui réduit la pression de Fermi des électrons.
- La pression de Fermi des neutrons s'accroît, mais elle est bien plus faible que celle des électrons.
- Donc la matière résiste de moins en moins à l'effondrement.

Le scénario d'un effondrement d'étoile massive. I

- Les captures électroniques sont néanmoins très nombreuses, et produisent des neutrinos.
- Lorsque la densité atteint $4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$, la matière devient opaque pour les neutrinos, qui y sont piégés. L'opacité n'est pas totale, on ne peut simplement plus considérer que tous les neutrinos s'échappent. Ceux-ci contribuent alors aux forces de pression.
- La réaction de capture des électrons se met alors à l'équilibre, l'effondrement se poursuit. La densité nucléaire est atteinte 10 milliseconde après le début de l'effondrement.
- Les noyaux sont alors complètement dissociés, la matière est constituée principalement de neutrons.
- L'interaction forte entre les neutrons s'oppose à l'effondrement (le milieu devient moins compressible).
- Ce durcissement de la pression crée une onde de choc se propageant vers l'extérieur du cœur.
- Si l'onde de choc est assez forte, elle chasse les couches externes de l'étoile, induisant des rayonnement électromagnétiques. C'est une supernova.

Le scénario d'un effondrement d'étoile massive. II

- L'onde de choc se propage vers l'extérieur.
- En amont du choc, le gaz continue de tomber « comme si de rien n'était » (pas informé du saut de pression qui arrive). La vitesse (chute libre) maximale est de l'ordre de $c/3$ (!)
- Mais la photodissociation du fer a consommé beaucoup d'énergie, rendant le choc moins fort.
- Le choc pourrait être absorbé par les couches extérieures avant d'avoir eu le temps de les expulser. La supernova tombe alors en panne.
- Le coeur atteint 100 GK, ce qui correspond à une énergie de 10 MeV par nucléon. Ceux-ci émettent des neutrinos.
- Depuis la SN1987, on a pris la mesure du nombre gigantesque de neutrinos produits.
- Ces neutrinos se déposent en amont du choc et facilitent sa progression.
- Entre la proto-étoile à neutrons et le choc, la matière est chauffée par des neutrinos et de la convection se développe, permettant un transport efficace de l'énergie jusqu'au choc.

ENTROPY Time = 50 ms Width = 750 km

Gaz en chute libre

Gaz en expansion
après avoir rebondi
sur le coeur

Onde de choc



Simulation numérique d'une explosion de SN
Le progéniteur a 11 masses solaires. [Adam Burrow et al. 2005]

ENTROPY Time = 150 ms Width = 750 km

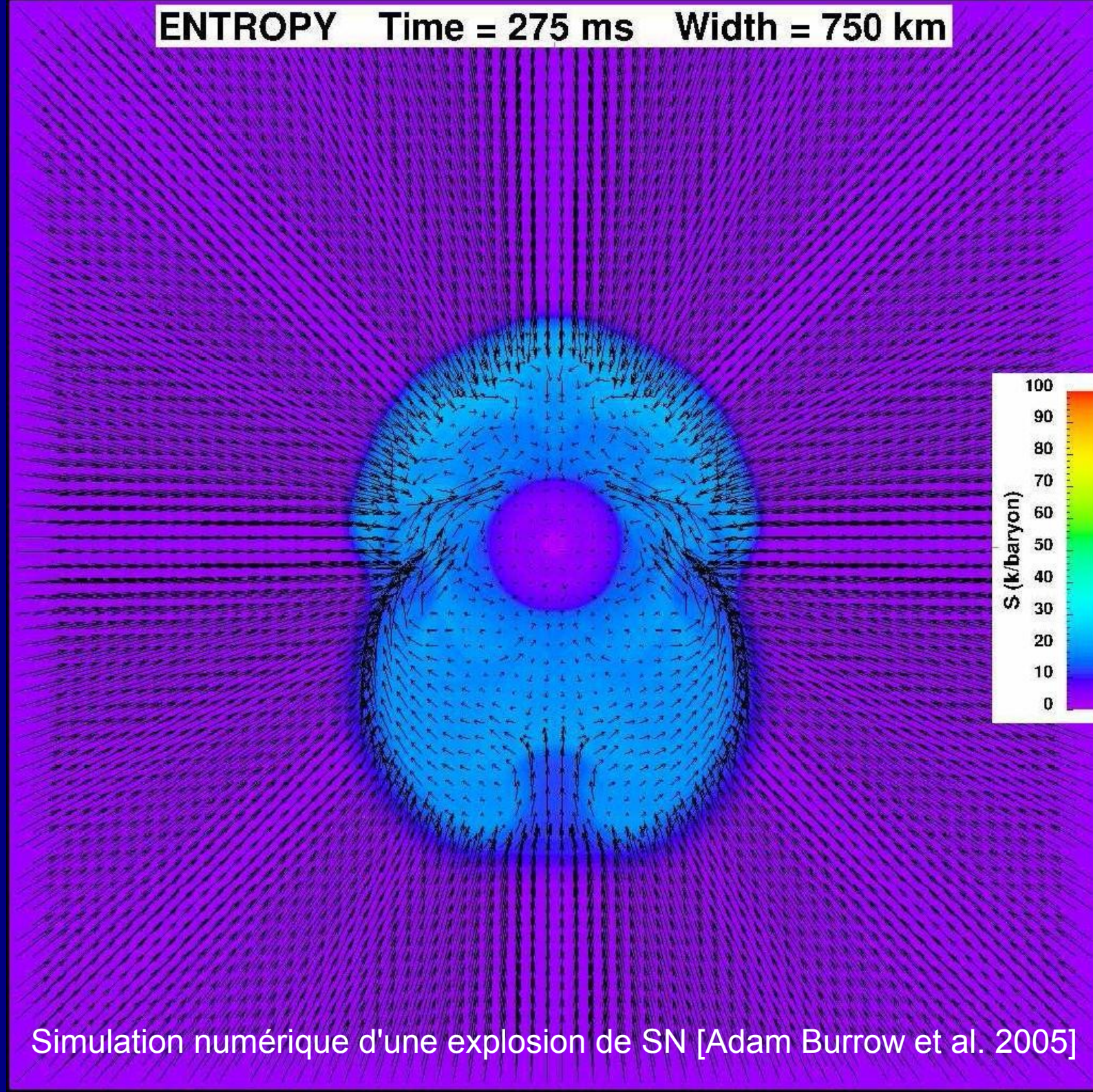
Gaz en chute libre

Entre le coeur et le
choc, s'instaurent des
mouvements
de convection.



Simulation numérique d'une explosion de SN [Adam Burrow et al. 2005]

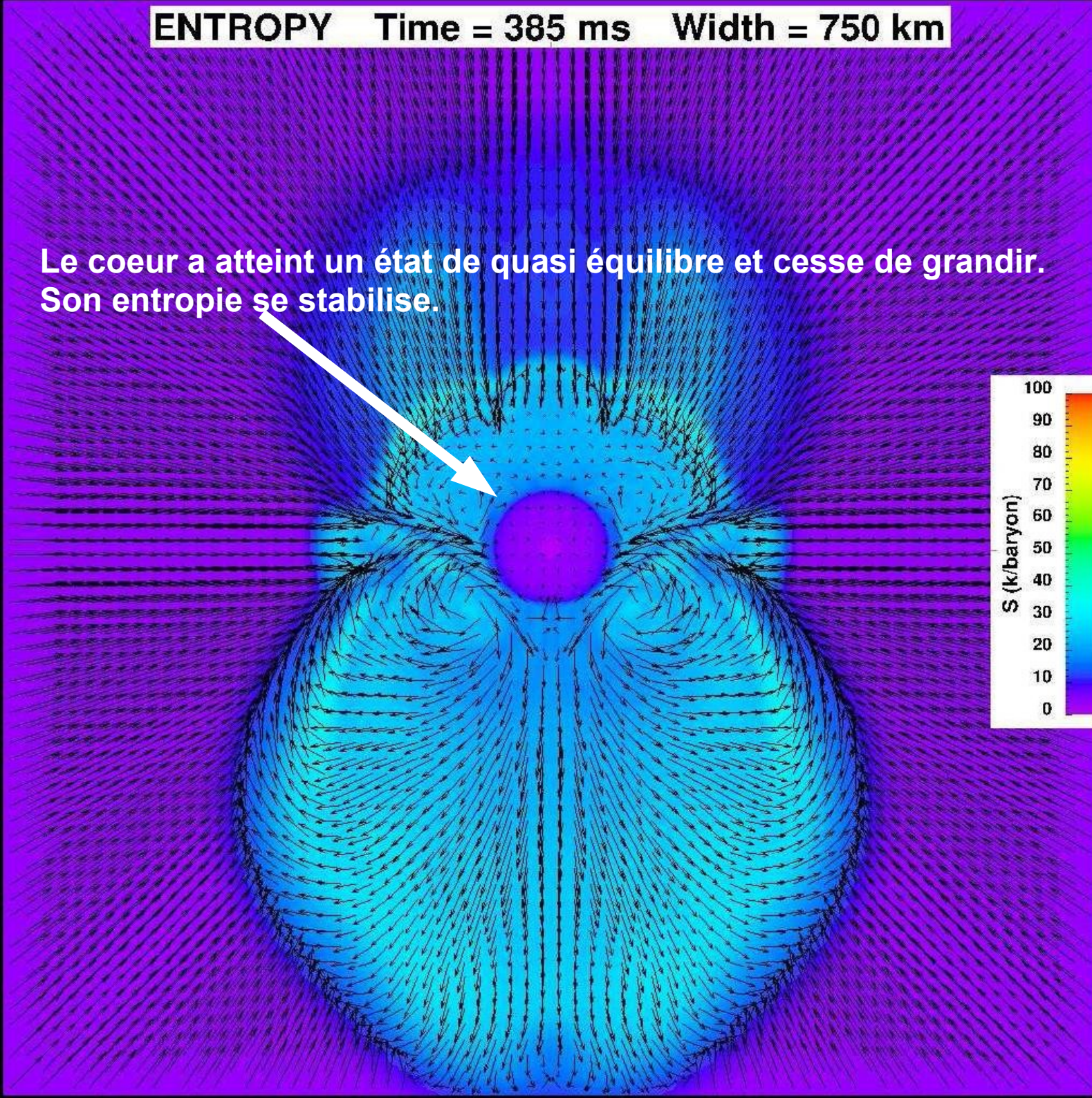
ENTROPY Time = 275 ms Width = 750 km



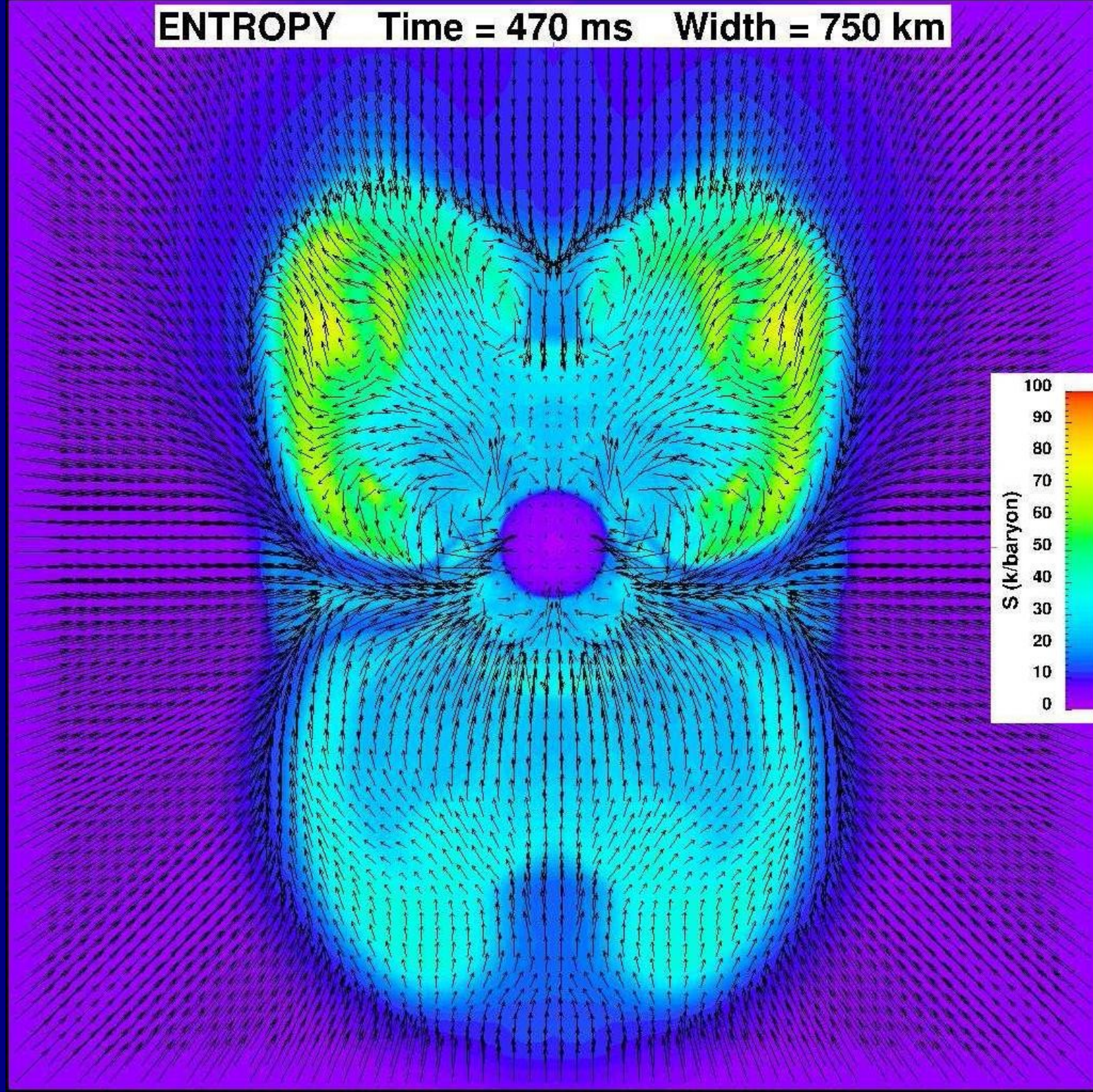
Simulation numérique d'une explosion de SN [Adam Burrow et al. 2005]

ENTROPY Time = 385 ms Width = 750 km

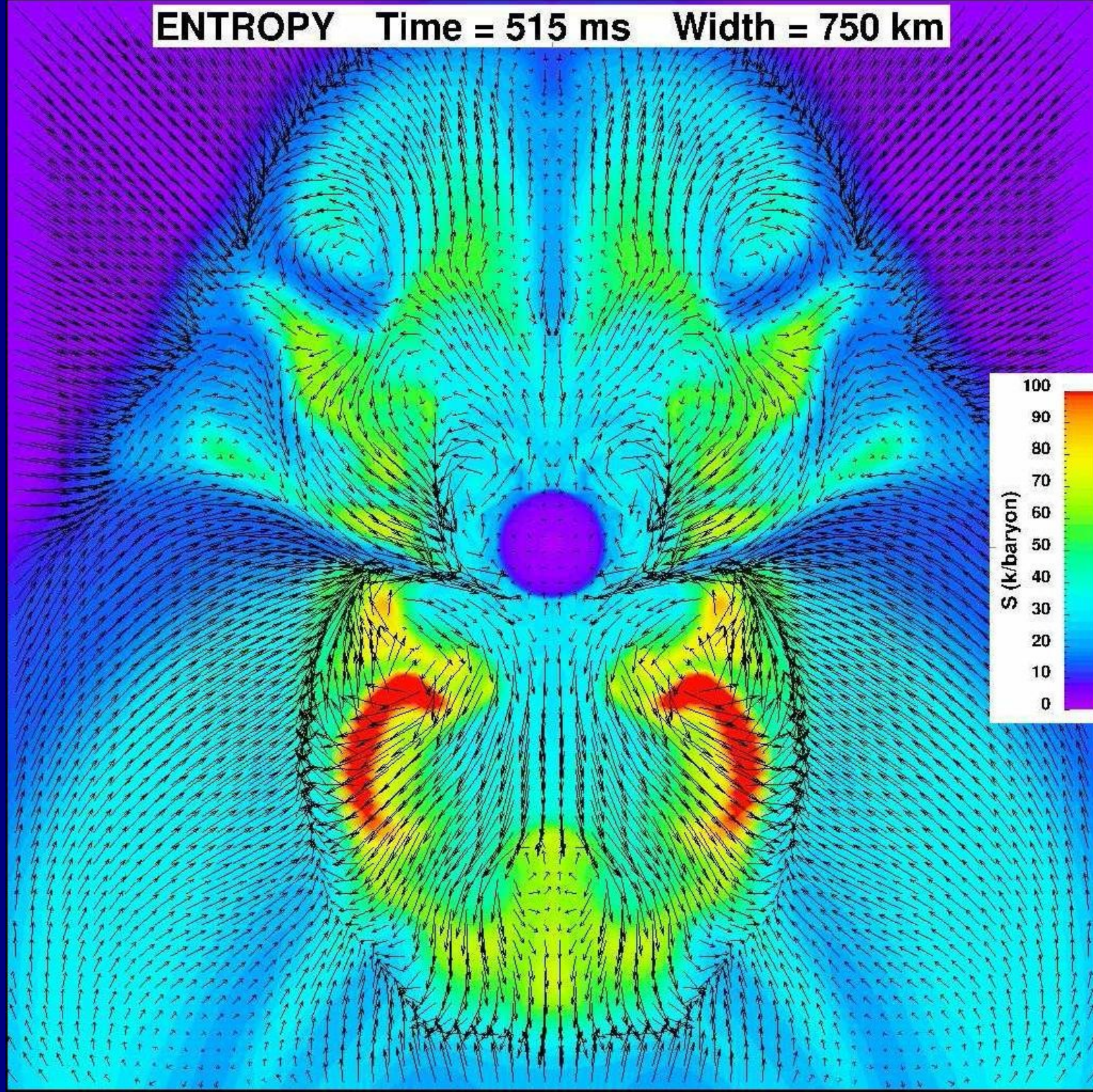
Le coeur a atteint un état de quasi équilibre et cesse de grandir.
Son entropie se stabilise.



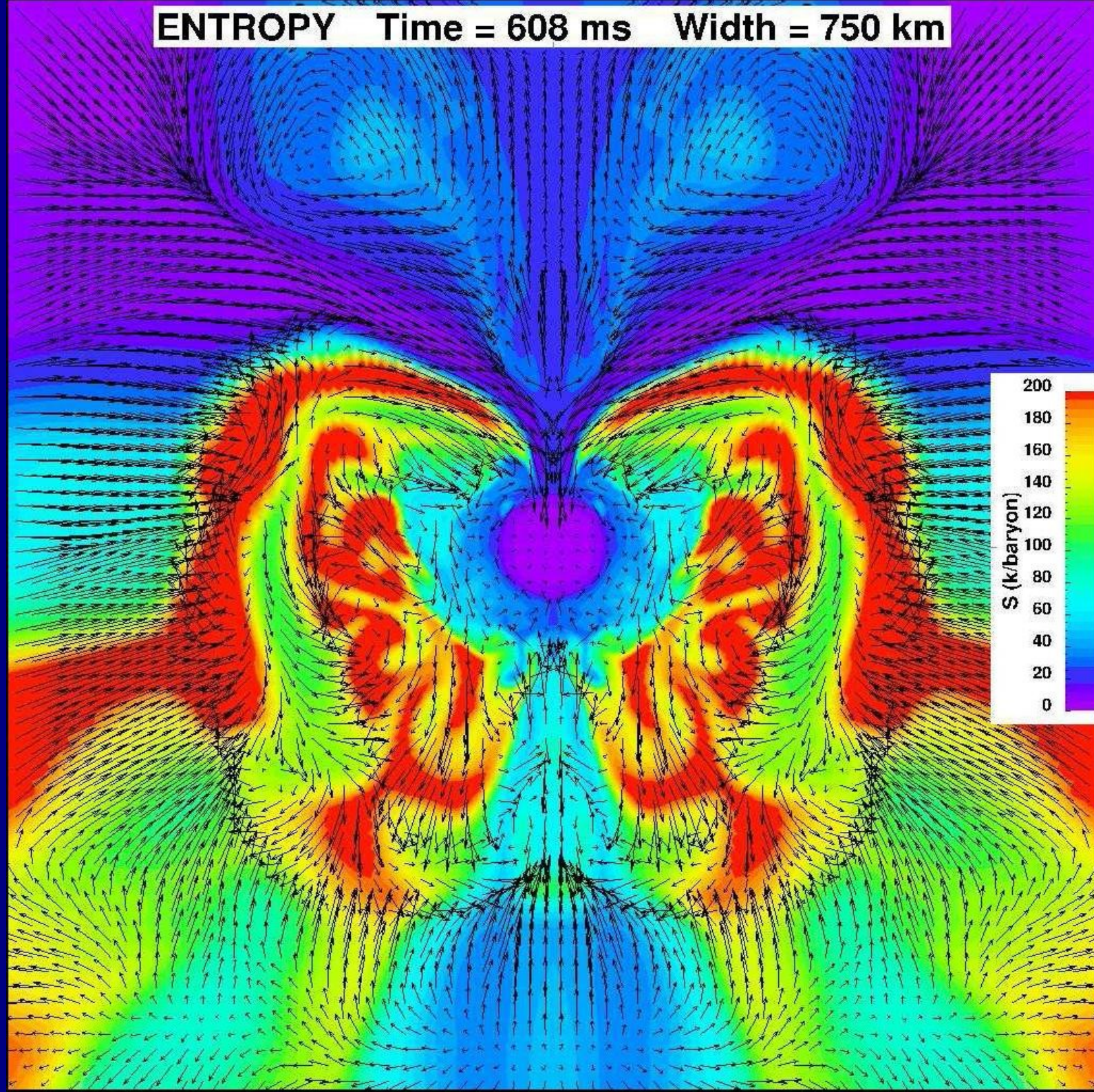
ENTROPY Time = 470 ms Width = 750 km

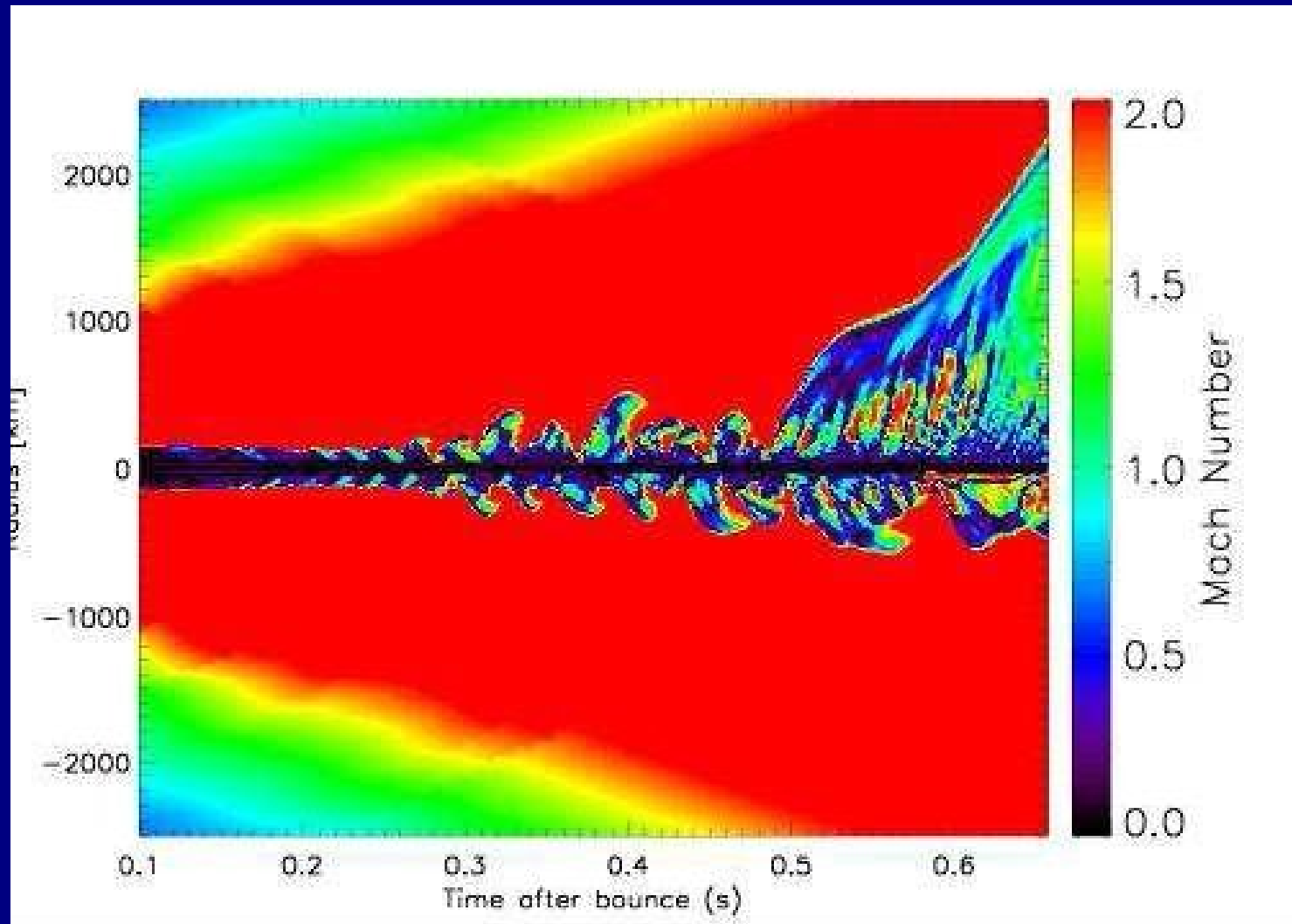


ENTROPY Time = 515 ms Width = 750 km



ENTROPY Time = 608 ms Width = 750 km



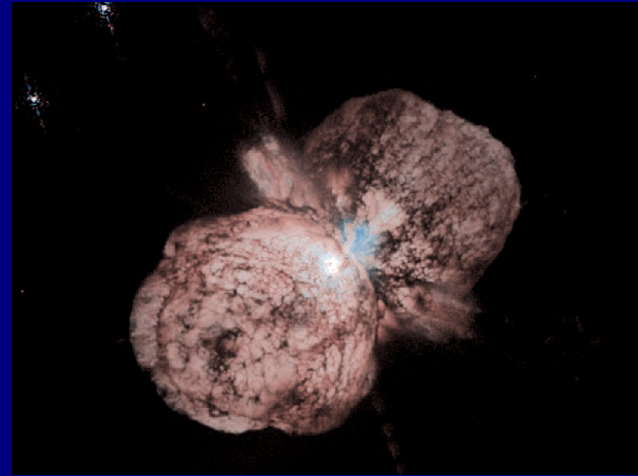


Simulation numérique d'une explosion de SN.
Nombre de Mach en fonction de la distance au centre, et du temps.
Il ne dépasse pas 2.
On note l'apparition de chocs secondaires en amont du choc principal.
[Adam Burrow et al. 2005]

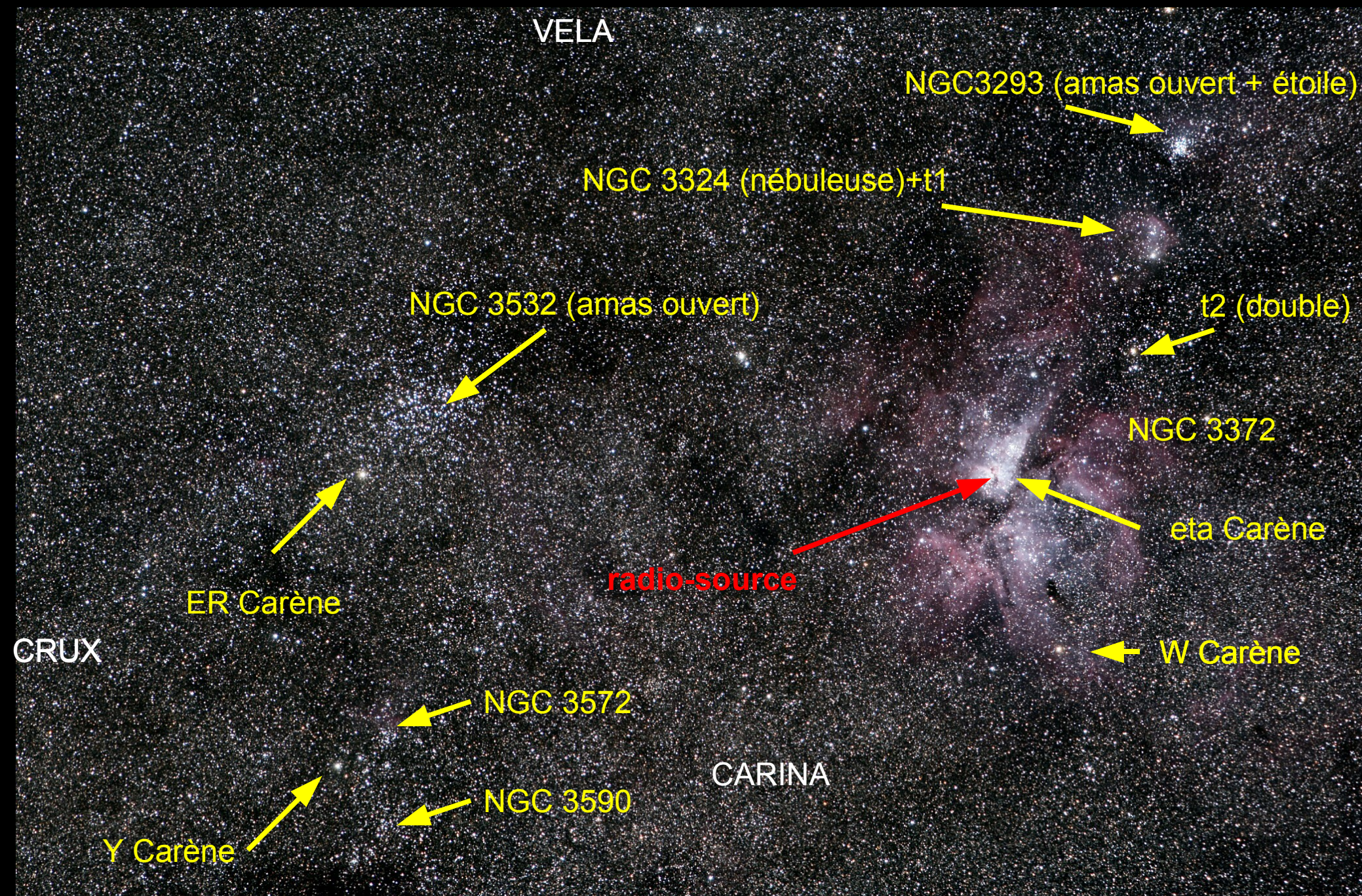
Est-ce le seul chemin vers les étoiles à neutron ?

- Oui, en ce qui concerne les étoiles isolées.
L'effondrement gravitationnel peut aboutir soit :
- à une étoile à neutron
- Pas d'étoile résiduelle (le coeur est dispersé dans l'explosion)
- Un trou noir (pour une masse initiale du noyau du progéniteur supérieure à 10 masses solaires)

Quel est le type spectral de la SN ?



- Si le progéniteur a une enveloppe d'hydrogène, la SN est de type II.
- Sinon, c'est une SN Ib ou Ic.



[Eta carène photographiée par Thierry Legault]



Eta Carina

Eta Carina est une étoile très massive, de luminosité très variable (peu lumineuse en ce moment), de 3,5 millions d'années, en train d'éjecter son enveloppe superficielle de gaz légers (dernière explosion en 1843 où elle fût la seconde étoile la plus brillante du ciel).

La partie lumineuse est composée d'azote et d'hydrogène. Les zones noires sont dues à de l'absorption par du carbone et des éléments plus lourds.



[NASA HST]

Eta Carina, une future SN gravitationnelle.

Elle explosera « bientôt », donnant vraisemblablement une SN de type Ib ou Ic.

Eta Carina est à 8000 années lumière. C'est peu pour une SN. Sera le spectacle stellaire le plus époustouflant de l'humanité. On la verra sans doute en plein jour, mais ses rayonnements (X etc) ne devraient pas être dangereux sur Terre (en principe).



[NASA HST]

