

# Naines blanches, pulsars et autres objets compacts

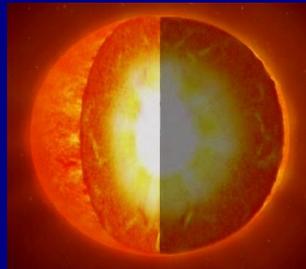
## 4. Les naines blanches.

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 ?

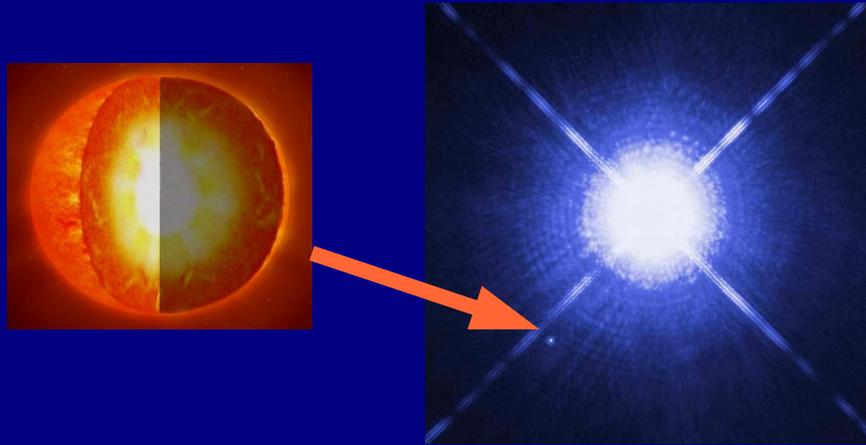


Est-ce possible ?

Oui, si les réactions nucléaires cessent :

- la température diminue fortement
- et la pression  $P=nkT$  diminue d'autant
- l'étoile s'effondre.

# Mais si l'étoile est très dense ?



We learn about the stars by receiving and interpreting the messages which their light brings to us. The message of the Companion of Sirius when it was decoded ran:

'I am composed of material 3,000 times denser than anything you have ever come across; a ton of my material would be a little nugget that you could put in a matchbox.'

What reply can one make to such a message?

The reply which most of us made in 1914 was—'Shut up. Don't talk nonsense.'

[Sir Arthur Eddington, 1927]

# Heinseberg à la rescousse : si l'étoile est petite et froide.

Chaque particule possède  
un aspect ondulatoire.

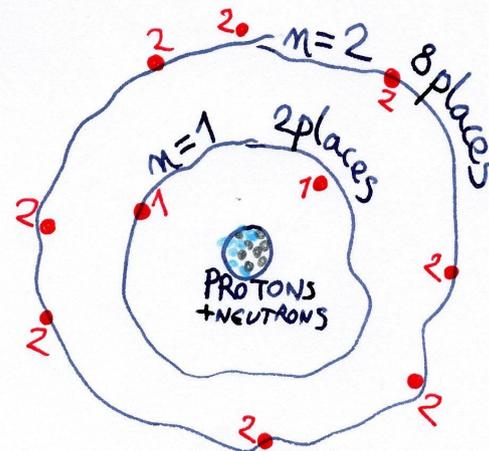
Dans une situation physique donnée,  
plusieurs types d'ondes peuvent exister

Certaines particules sont partageuses :  
plusieurs particules (autant qu'on veut)  
peuvent être définies par la même onde :  
les bosons : photons...

Certaines particules ne sont pas partageuse:  
un type d'onde ne peut être attribué qu'à une  
seule particules. Ces particules exigeantes  
sont les fermions : électrons, neutrons...

$$\Delta x \Delta(mv) \geq \hbar$$

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$



chaque place correspond  
à un état (énergie, moment  
cinétique, orientation)  
différent.

# Heinseberg à la rescousse : Petite assemblée de Fermions autour d'un proton

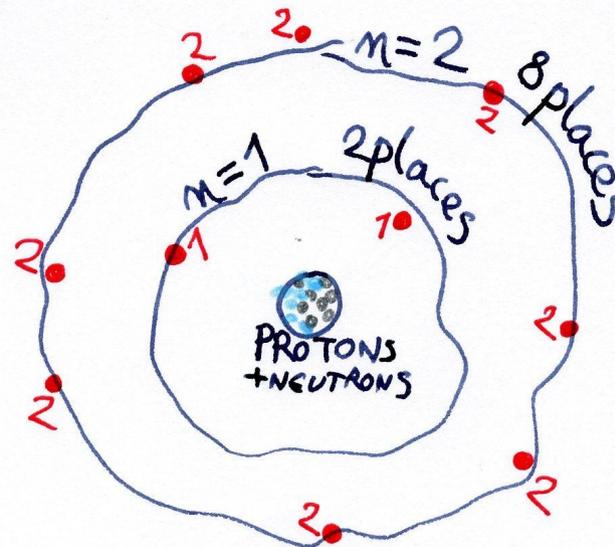
1925, Principe d'exclusion de Pauli

Les Fermions  
(particules de spin demi-entier)  
ne peuvent se trouver dans le  
même état quantique.

Application aux électrons d'un  
atome.

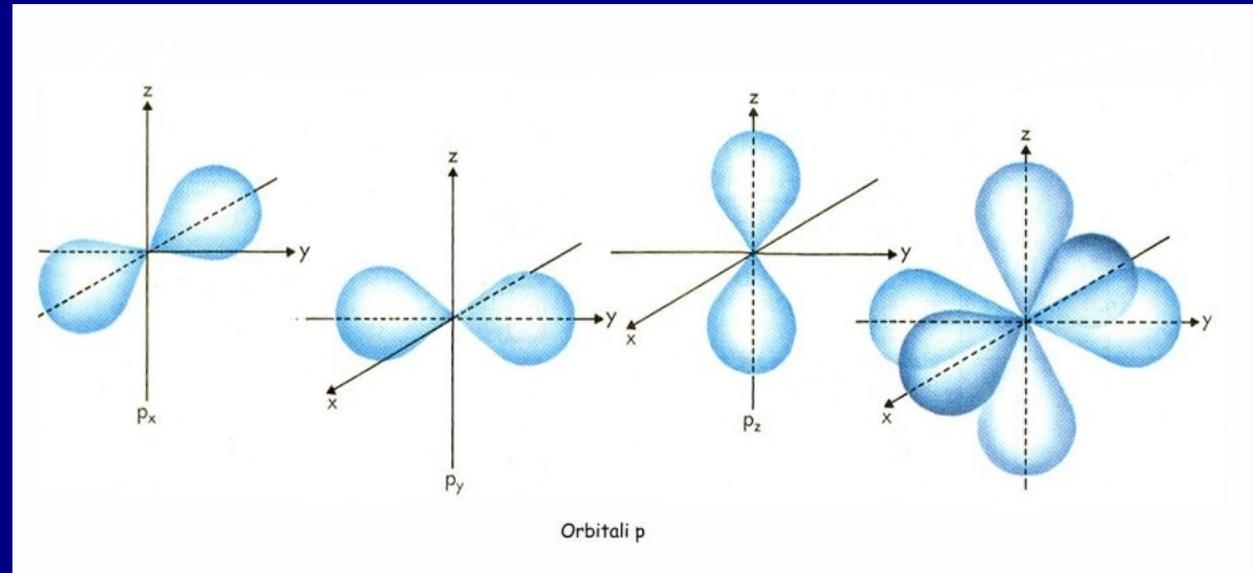
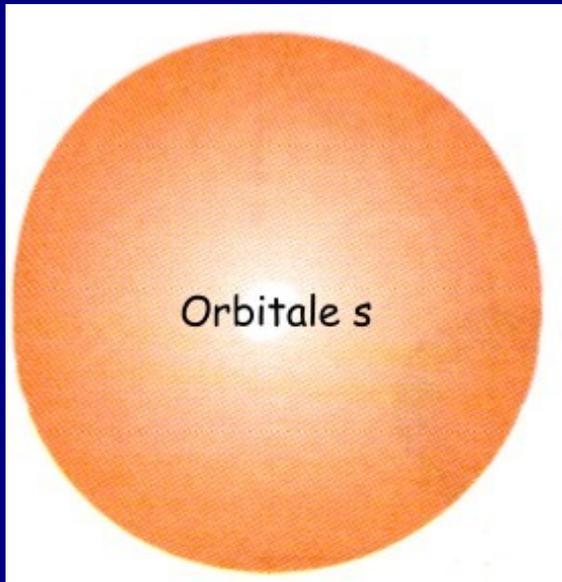
$$\Delta x \Delta(mv) \geq \hbar$$

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$



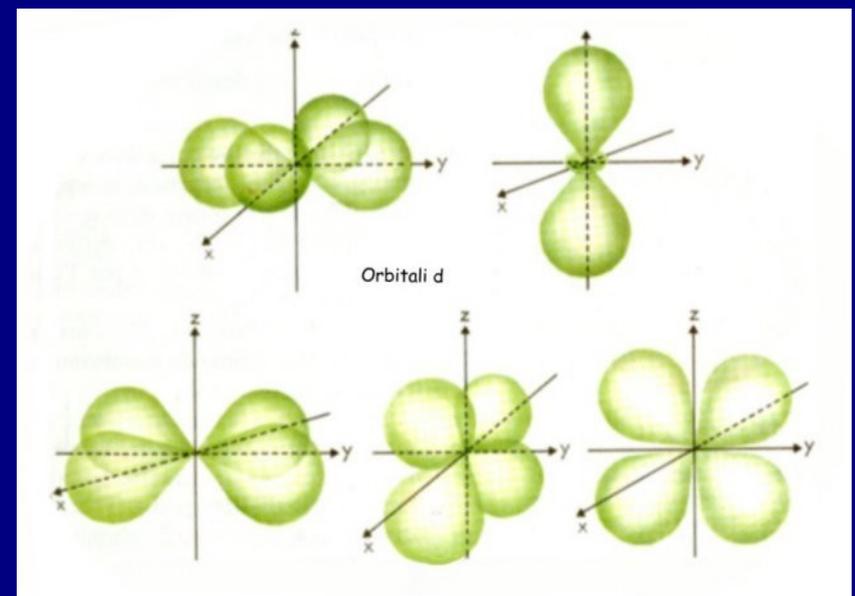
chaque place correspond  
à un état (énergie, moment  
cinétique, orientation)  
différent.

# Petite assemblée de Fermions autour d'un proton



Les positions des électrons sont décrit par une **fonction d'onde** définie partout. Le carré de cette fonction calculé en un lieu «  $r$  » donne la probabilité que l'électron soit effectivement en «  $r$  ».

Ici quelques fonctions d'onde d'un électron autour d'un proton (atome H).

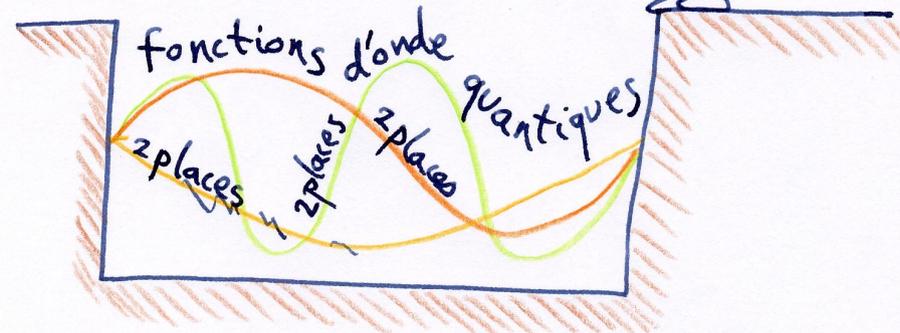


# Des électrons enfermés dans un trou

Application du principe de Pauli à un grand nombre d'électrons dans un gaz.

Enrico Fermi, 1926.  
Statistique de Fermi-Dirac.

Les fonctions d'ondes des électrons enfermés dans un trou



La longueur d'onde  $\propto 1/\text{qte de mouvement} = 1/p$   
L'électron "vert" a le plus de mouvement.  
Si on s'interdit des électrons rapides, alors, on ne peut pas en mettre autant qu'on veut.

- Electrons délocalisés,  $p$  défini le + précisément possible
- la longueur d'onde  $\propto \frac{1}{\sqrt{\text{Energie}}}$
- Deux  $e^-$  par une seule
- Deux place par fonction
- longueurs d'onde : nombre entier

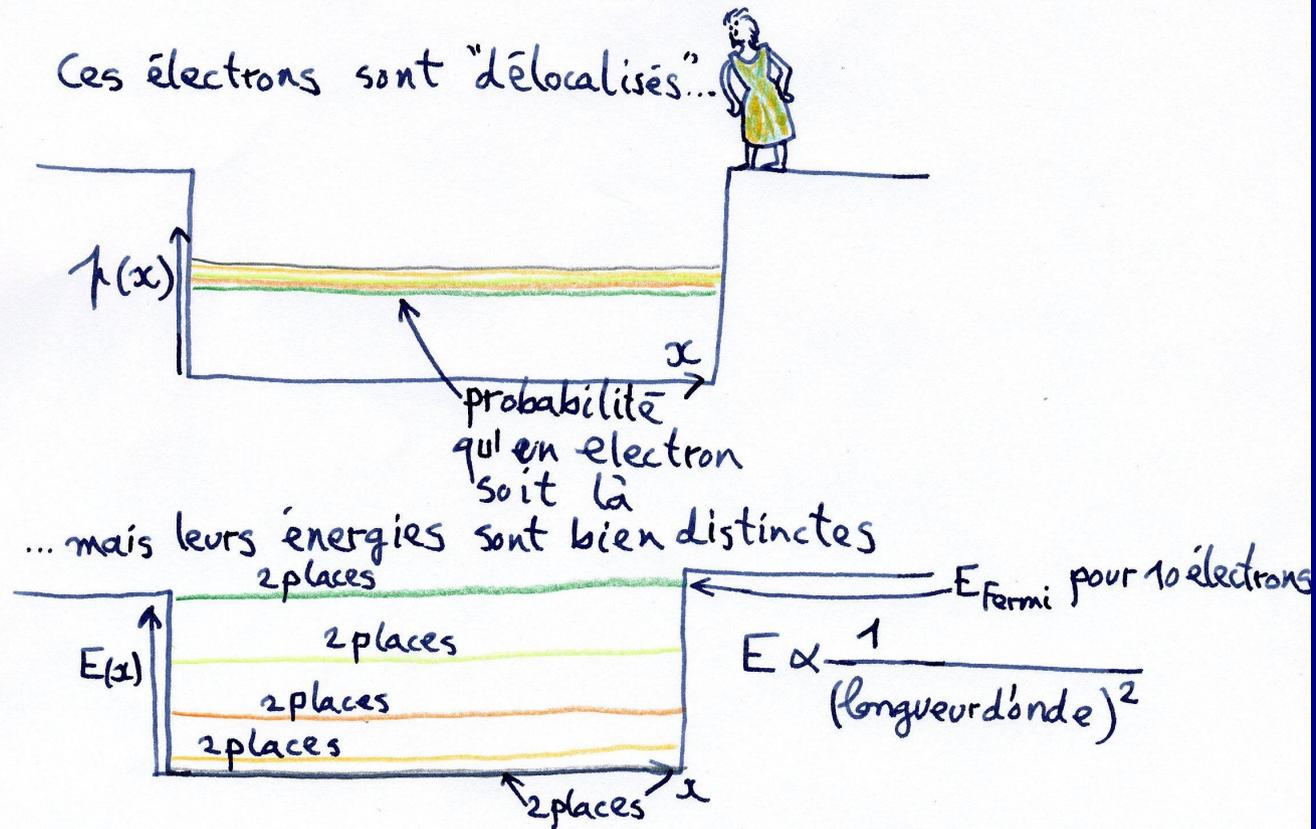
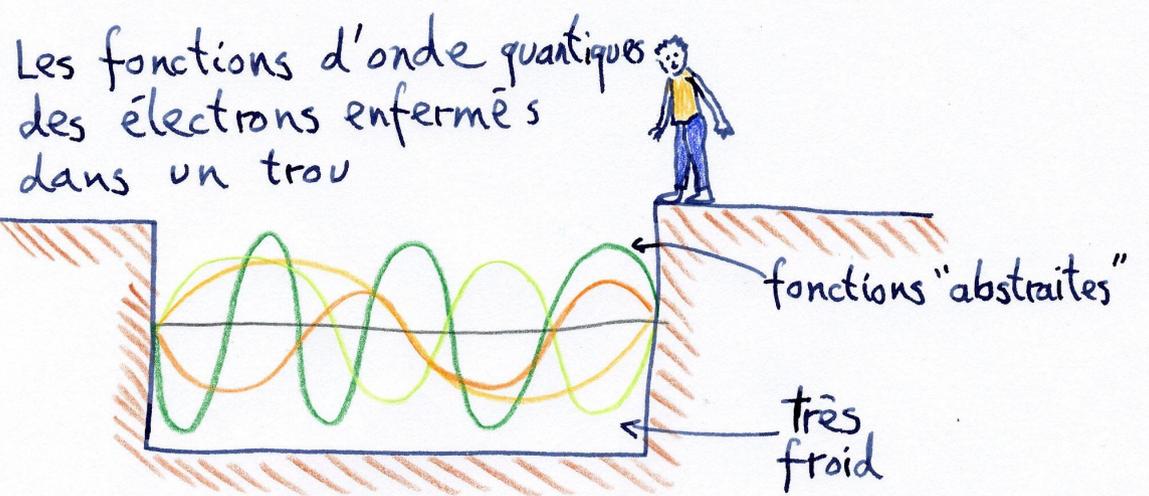
# Des électrons enfermés dans un trou

$P \propto \text{densité}^{5/3}$

gaz froid :  
pas de dépendance en T.

devient important aux très fortes densités.

(pour un gaz ordinaire, avec  $T \rightarrow 0$ ,  $p \rightarrow 0$ )



$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3}{\pi} \right)^{2/3} \left( \frac{N}{V} \right)^{2/3} \quad (\text{non relativiste})$$

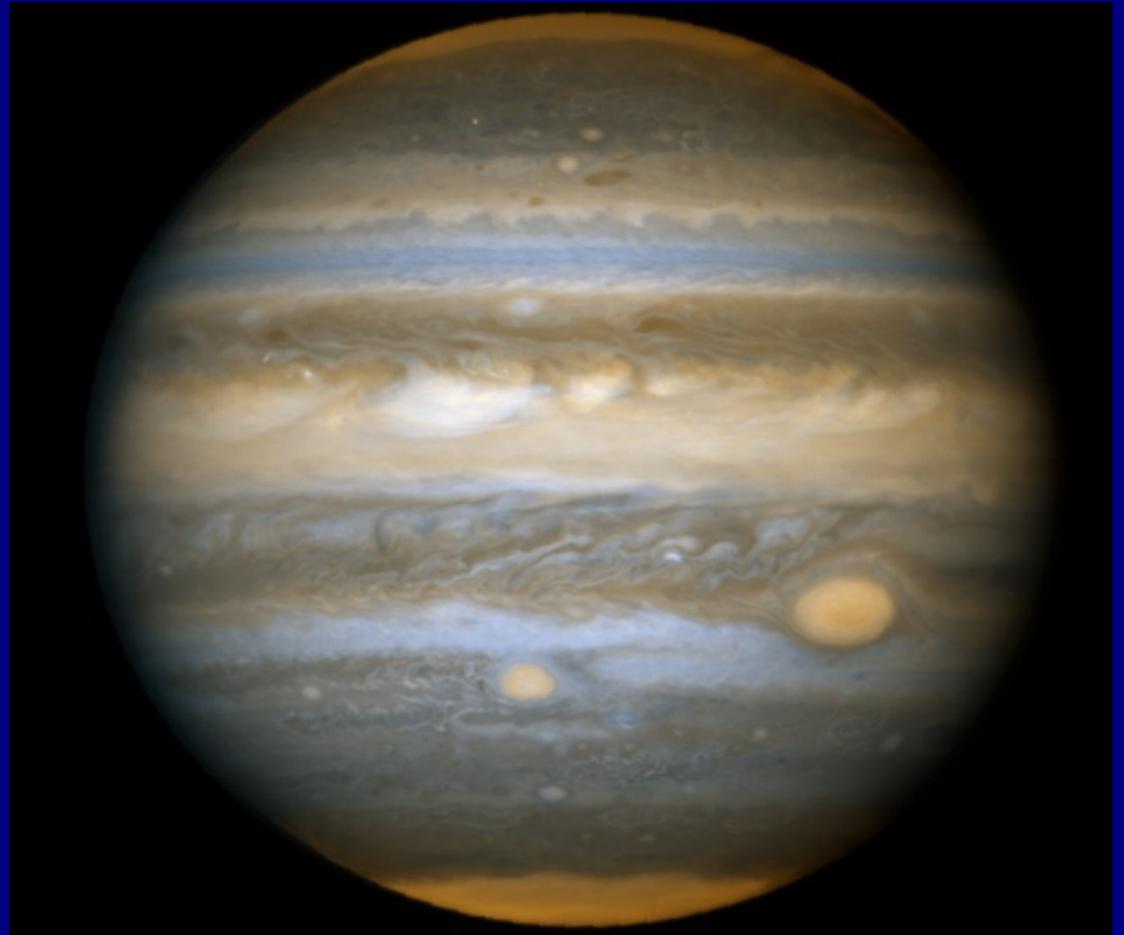
# Gaz d'électrons dégénéré

**$P \propto \text{densité}^{5/3}$**

gaz froid :  
pas de dépendance en  $T$ .

devient important aux très  
fortes densités.

(pour un gaz ordinaire,  
avec  $T \rightarrow 0$ ,  $p \rightarrow 0$ )



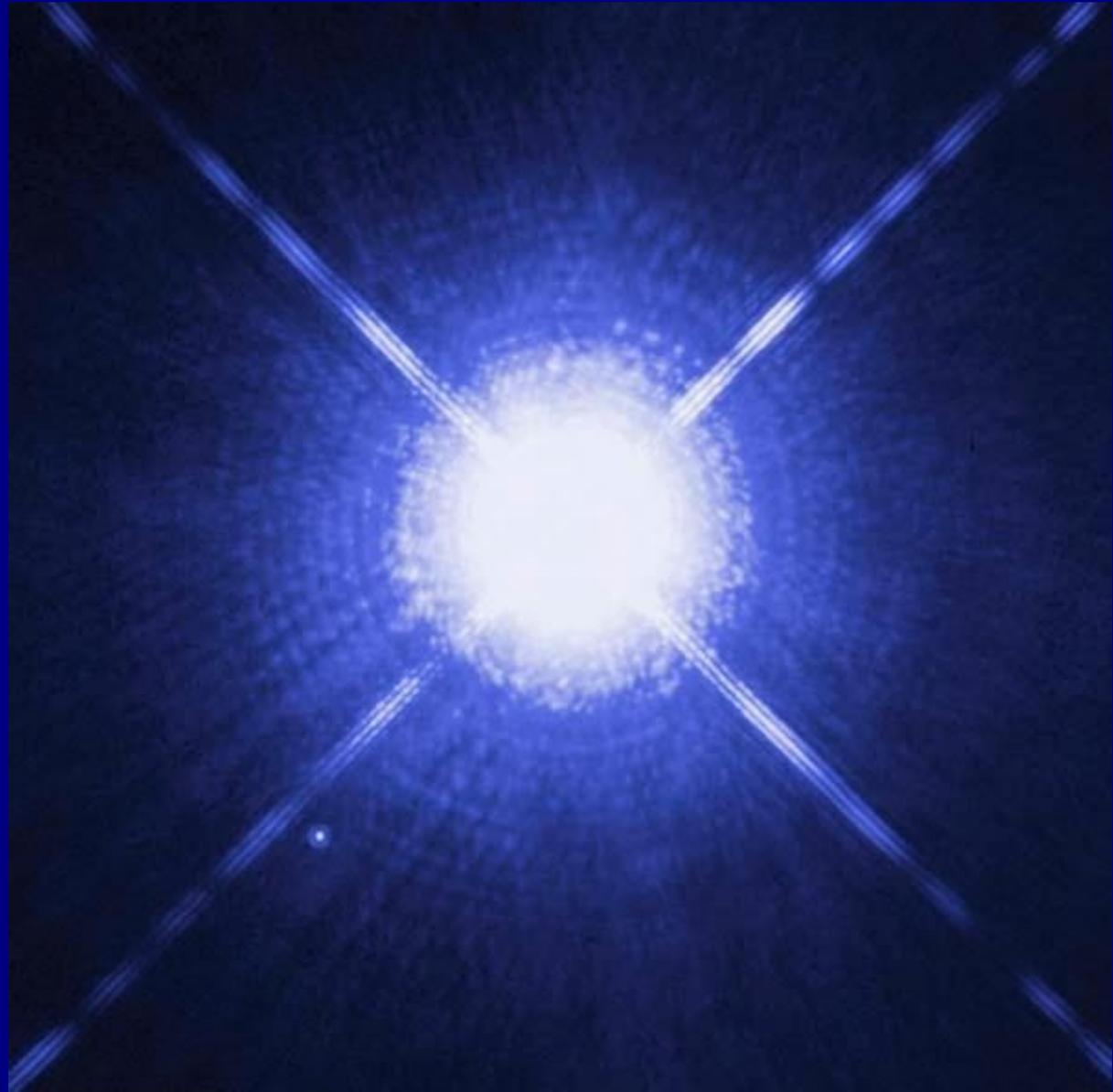
Dans le noyau de Jupiter, matière très dense et froide, on suspecte de l'hydrogène métallique, les électrons formant un gaz dégénéré.

# Retour sur le mystère des naines blanches.

**$P \propto \text{densité}^{5/3}$**

gaz chaud mais très dense ,  
effets de T négligeables.

Eddington.



Sirius A et B.

# Quelques naines blanches

La première découverte 40 Eridani B, 1783, Herschel.

Sirius B et Procyon.

6% des étoiles au voisinage du Soleil.

Une centaine découvertes en 1950 [Luyten et d'autres]

2000 naines blanches connues en 1999.

Sloan Digital Sky Survey : 9000 naines blanches recensées.



40 Eridani, triple :  
K orange, naine blanche, naine rouge.  
[RDP, Tulane]

# Quelques naines blanches

Notons que 40 Eri est aussi le système qui héberge la planète Vulcain, d'où vient Mr Spock, du vaisseau Enterprise.



40 Eridani, triple :  
K orange, naine blanche, naine rouge.  
[RDP, Tulane]

# La plus proche des naines blanches connues : Sirius B.

Etoile difficile à voir à cause de l'éclat de Sirius A, assez proche.

Le mieux : l'observer en UV. Sirius A, pas assez chaude émet peu en UV. Et Sirius B ? Elle émet principalement en UV ! (autour de 120 nm)

Température : 24 500-25 000 K

Gravitation  $g=GM/R^2=10^{8.5}$  mesuré avec le redshift gravitationnel, élargissement de raie spectrale...

Redshift gravitationnel :  $V=GM/R=89$  km/s

on en déduit

Rayon : 0.0084 rayon solaire = 5800 km (plus petit que la Terre)

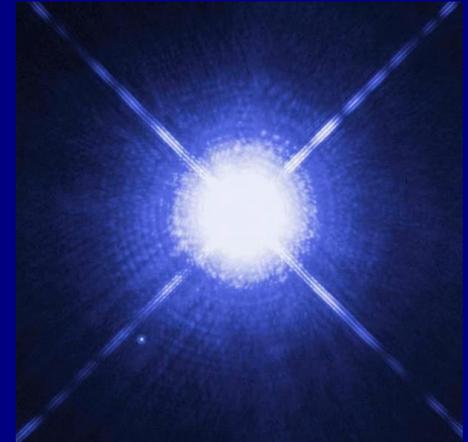
Masse : 1.034 masse solaire = 344 000 masses terrestres.

C'est une des NB les plus massives connues. En général  $\sim 0.6 M_s$

Vitesse de rotation :

Champ magnétique :

# Le progéniteur de Sirius A



La compagne Sirius A est une étoile de type A0, très brillante, sur la séquence principale.

Les étoiles de la séquence principale brillantes sont massives, et de courte durée de vie.

Comme Sirius B a eu le temps de devenir une naine blanche (dans la même durée), elle a du avoir une vie encore plus brève, et donc être encore plus massive.

On estime (pas sûr) que son progéniteur avait une masse de 6 ou 7  $M_{\odot}$ , c'est à dire la masse d'une étoile B5 (encore plus chaude et brillante que Sirius A).

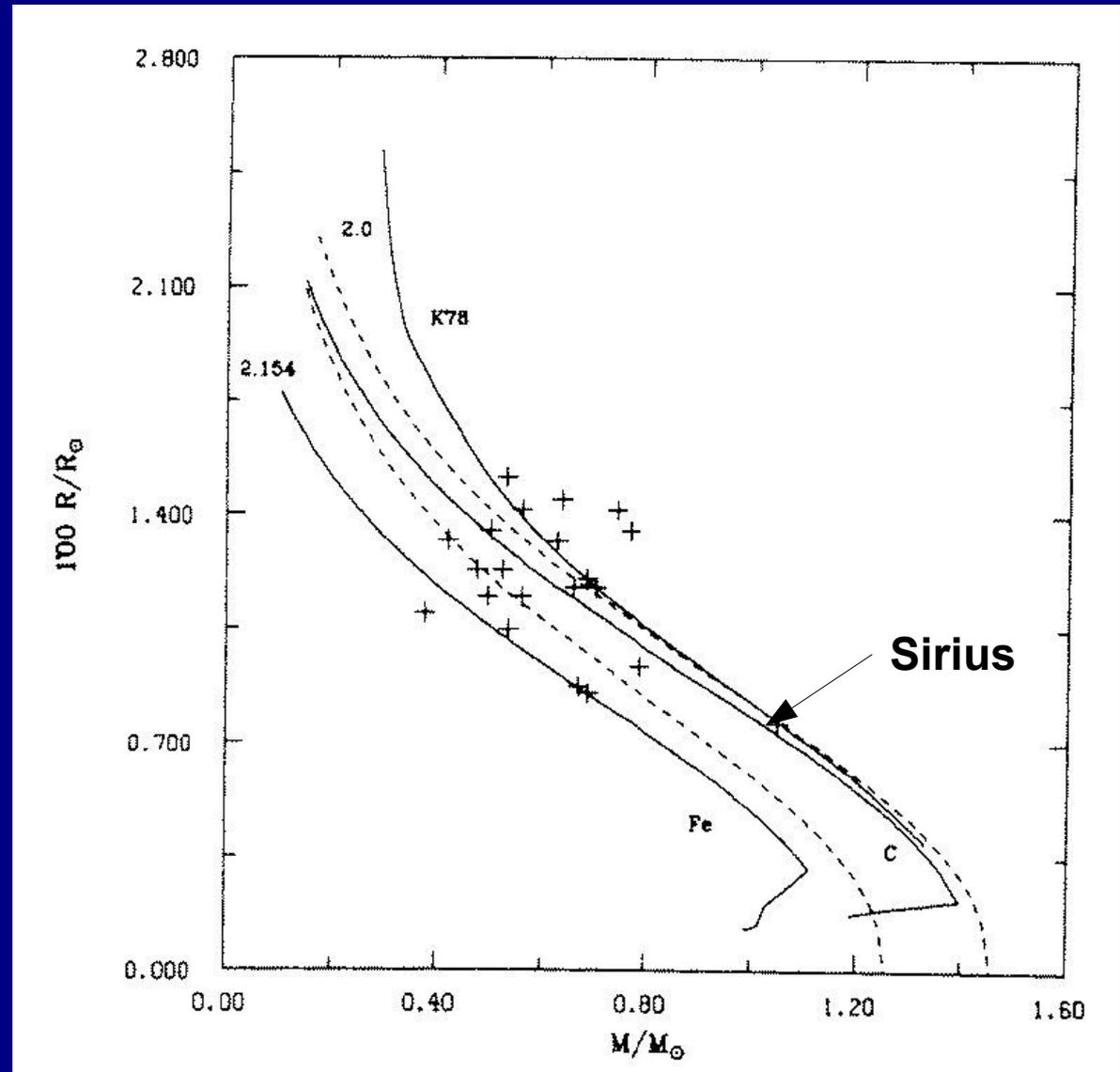
On ne retrouve pas de trace de gaz expulsés du progéniteur (pas de nébuleuse planétaire). La transformation n'a du être pas si récente que ça.

# La relation masse luminosité

Relations théoriques avec coeur en Fer pour, en Carbone pur, et différentes proportions d'électrons (dégénérés).  
Les points représentent des valeurs mesurées/estimées sur de « vraies » étoiles.

Plus l'étoile est massive, plus elle est petite.

Sirius B : on pense qu'elle a un coeur de carbone.

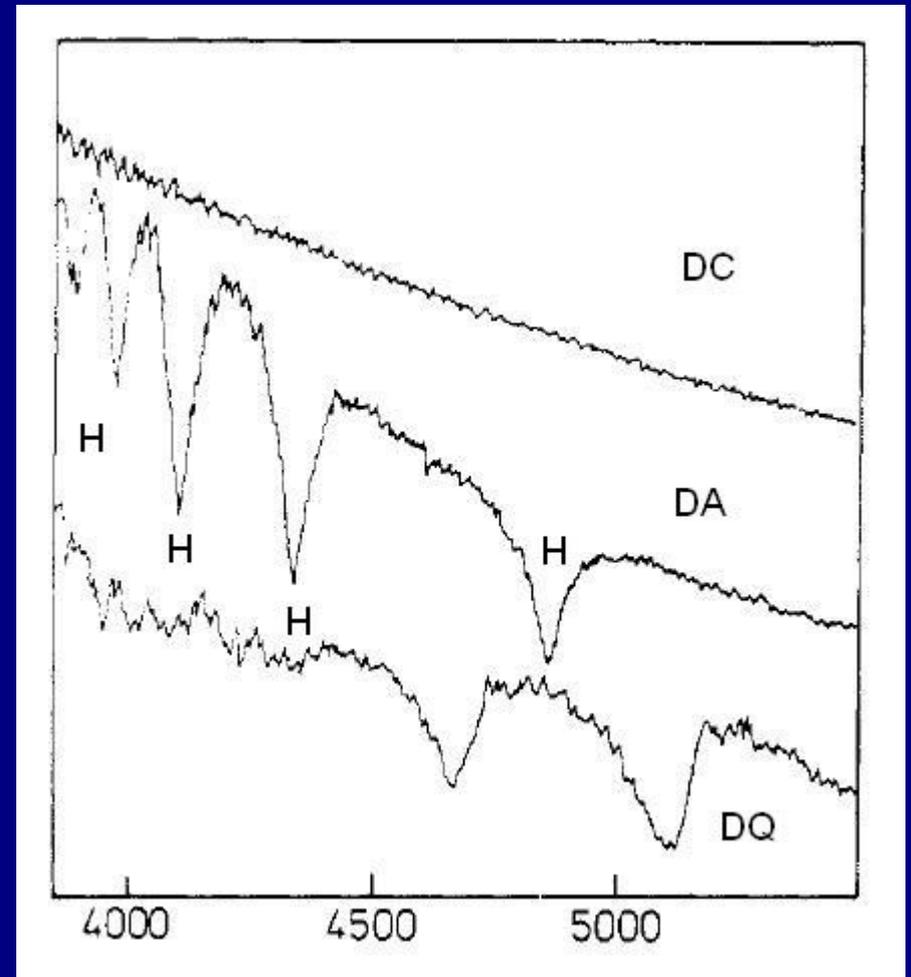


# Les spectres

Plusieurs familles suivant la composition chimique de la surface de l'étoile.

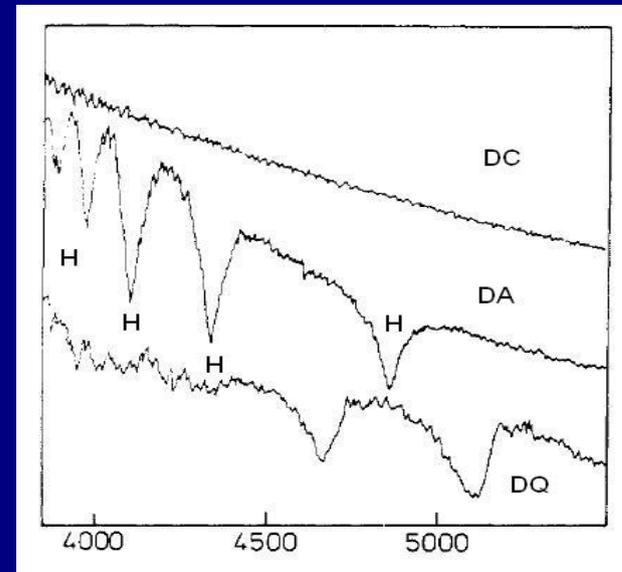
La classe la plus courante est DA, avec des raies d'hydrogène neutre, et quasiment rien d'autre.

Les autres classes n'ont pas d'hydrogène.



# Les spectres

Plusieurs familles suivant la composition chimique de la surface de l'étoile.



- DA : uniquement des raies de l'hydrogène neutre (séquence de Balmer), pas de raies He I, ni de "métal" (i.e. d'élément plus lourd que l'hélium),  $6000 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 70\,000 \text{ K}$  ;
- DB : raies He I, pas d'hydrogène ni de métal présent,  $12\,000 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 30\,000 \text{ K}$  ;
- DC : spectre continu, pas de raies,  $T_{\text{eff}} \leq 12\,000 \text{ K}$  ;
- DO : raies He II, faibles raies He I et H I,  $45\,000 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 100\,000 \text{ K}$  ;
- DZ : raies de "métaux" (Ca II, Mg, Fe, Si), pas d'hydrogène ;
- DQ : raies du carbone, à la fois sous forme atomique et moléculaire ( $\text{C}_2$ ).

# Quelle est la composition chimique ?

Le progéniteur a expulsé son enveloppe. Celle-ci contient un mélange riche en gaz légers. (Sans mélange, les gaz les plus légers dominent à haute altitude.)

Donc il doit rester des éléments plus lourds, et les résidus de fusion nucléaire (dorénavant éteintes) dans le noyau.

L'élément le plus commun dans l'univers est l'hydrogène.

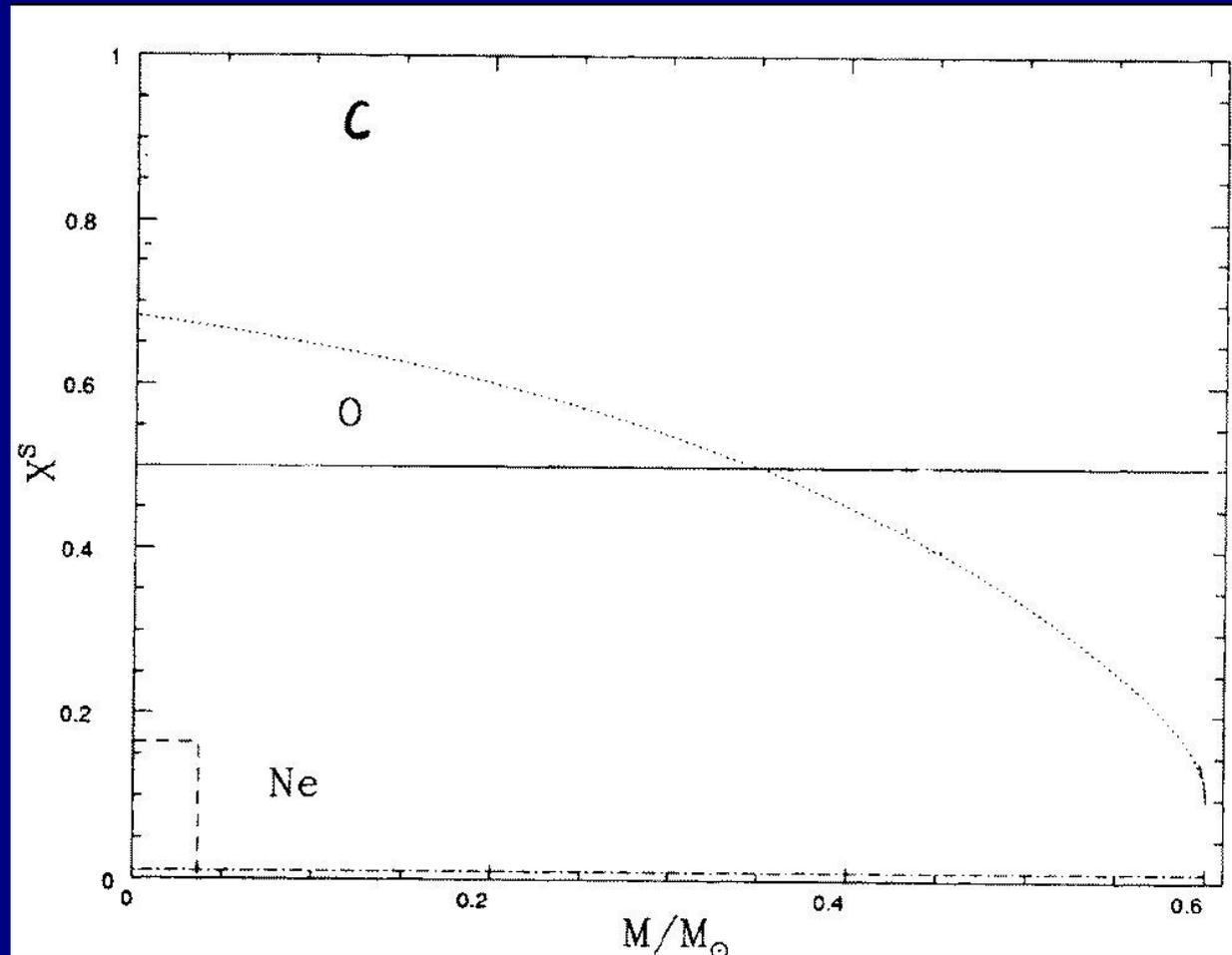
Si il en restait beaucoup dans les NB (suite à un effondrement vers le noyau), vu les conditions de température (100 millions de degrés au début) et de pression, la combustion repartirait...

l'étoile se rallumerait. Donc il n'y a très peu d'H dans les naines blanches.

On estime une proportion de 1 pour 10 000.

Résidus de combustion : dans le noyau des géantes, beaucoup de Carbone. Puis de l'oxygène. Dans le cas de progéniteurs plus massifs, du magnésium, des métaux, un peu de fer...

# Quelle est la composition chimique ?

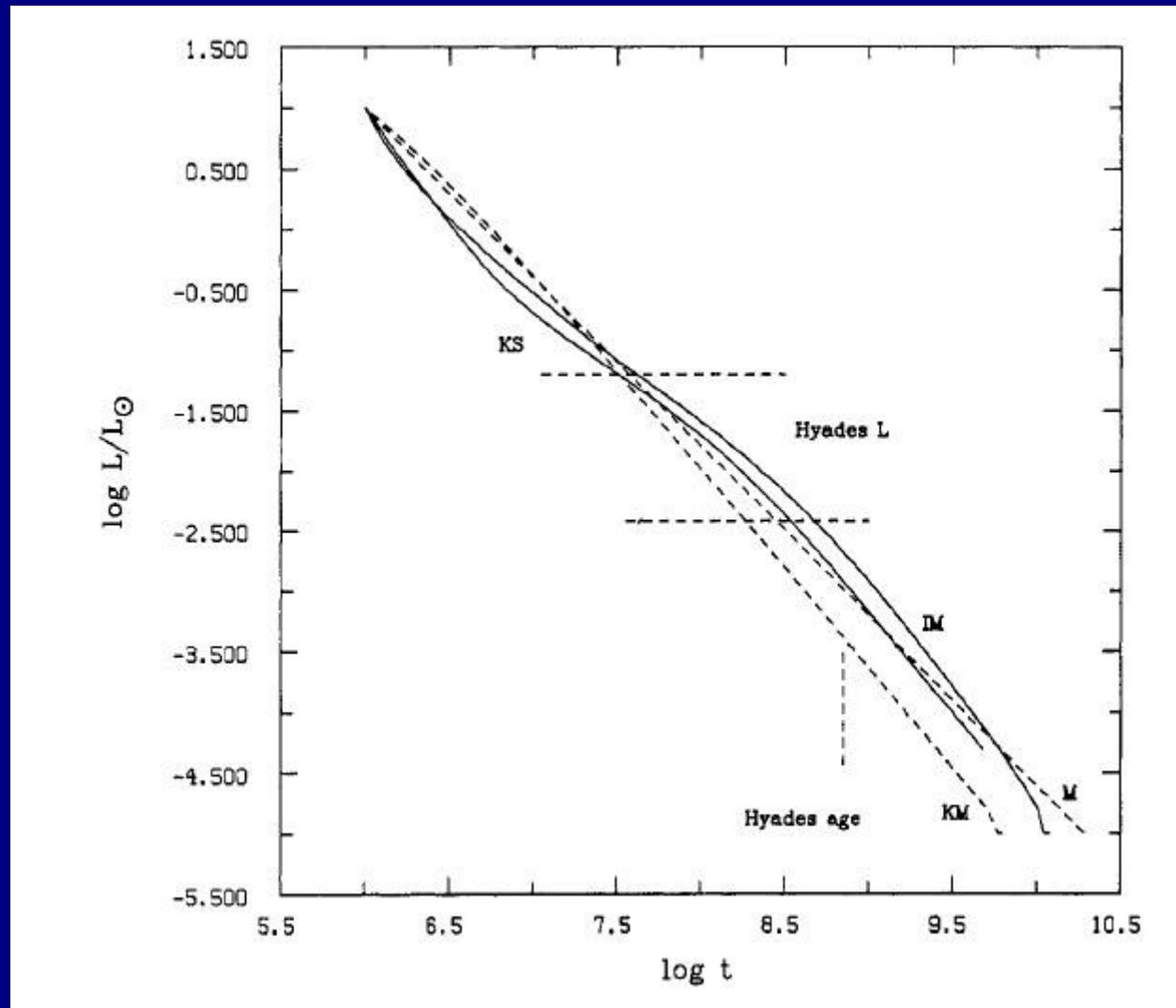


Modèle théorique de la répartition des éléments Carbone (48%) oxygène (48%) neon (1%) et fer (0.1%, un pic au centre de l'étoile, pas visible sur la figure) dans une naine blanche « typique » de 0.6 masse solaire. [Segretain et al. 1994]

# Comment évolue une naine blanche ?

- Elle refroidit. En fait, le coeur (dégénéré) conduit très bien la chaleur. Mais la partie superficielle, composée de gaz normaux, la conduit plus mal. C'est la surface qui ralentit le refroidissement.
- Sa composition se stratifie. Les éléments les plus lourds tombent au fond de l'étoile.

# Comment évolue une naine blanche ?



Le refroidissement correspond à une perte de luminosité.  
C'est très lent, se compte en milliards d'années.

# Comment évolue une naine blanche ?

Le refroidissement correspond à une perte de luminosité. Physiquement, à un certain âge, l'intérieur de la naine blanche cristallise.

# Cooling White Dwarfs

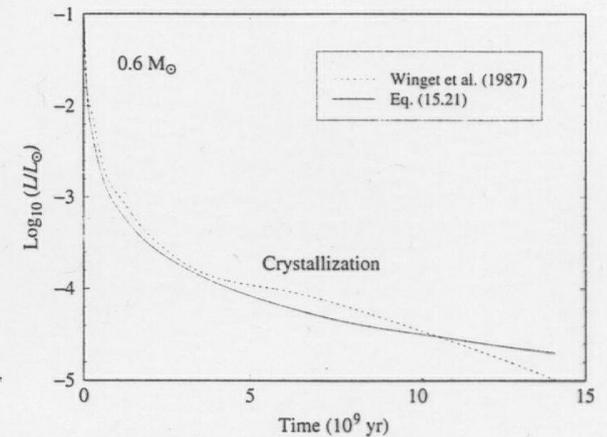


Figure 15.9 Theoretical cooling curves for  $0.6 M_{\odot}$  white-dwarf models. [The solid line is from Eq. (15.21), and the dashed line is from Winget et al., *Ap. J. Lett.*, 315, L77, 1987.]

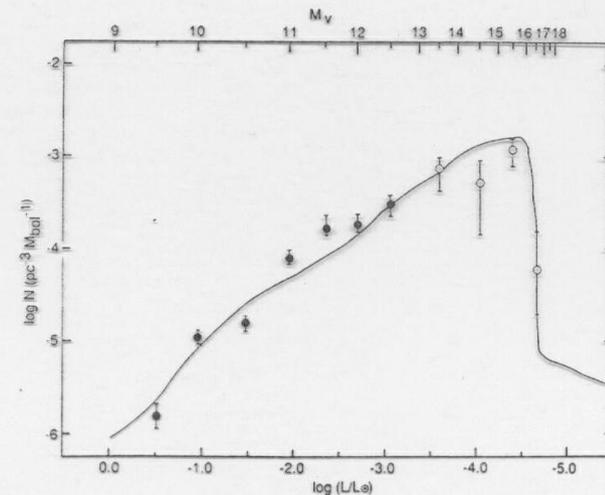
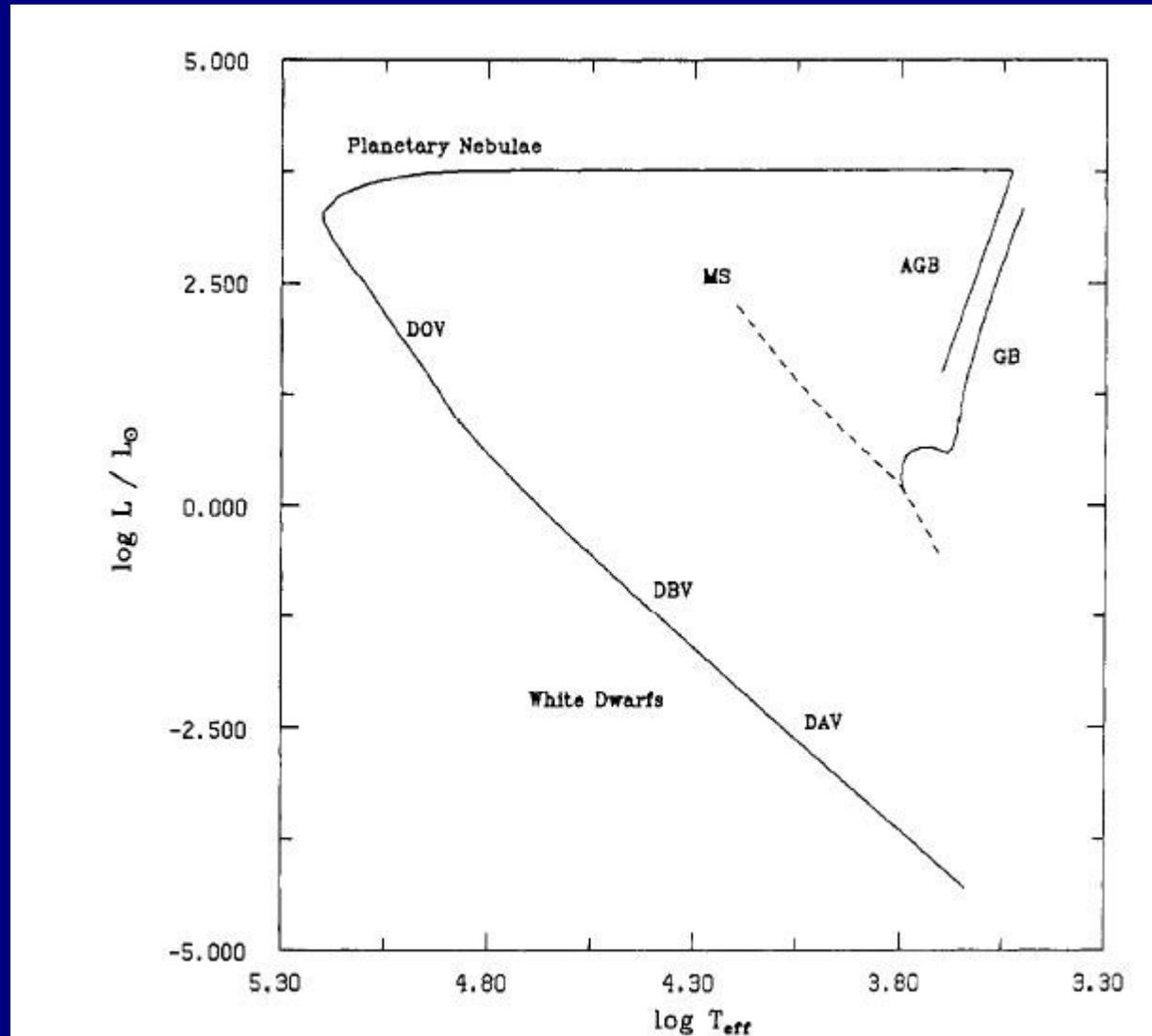


Figure 15.10 Observed and theoretical distribution of white dwarf luminosities. (Figure from Winget et al., *Ap. J. Lett.*, 315, L77, 1987.)

# Comment évolue une naine blanche ?



L'étoile se refroidissant devient moins brillante. Comme les éléments lourds tombent, le spectre tend à ne plus montrer que de l'hydrogène en surface (évolution vers la classe DA).

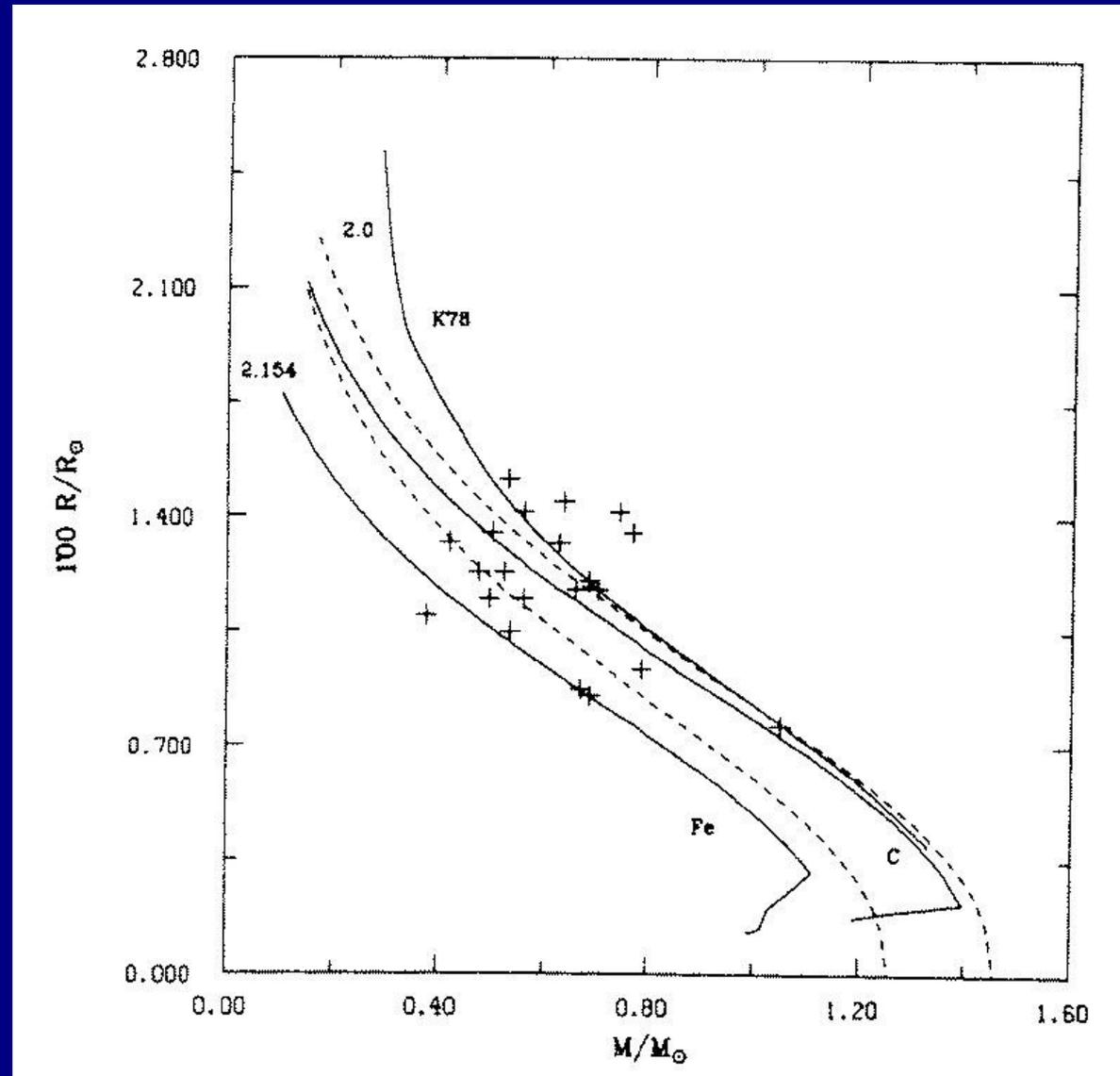
# Comment évolue une naine blanche ?

En conclusion, la vie d'une naine blanche est assez morne.

A moins qu'elle ait une compagne (à suivre).

# Pourquoi n'y a-t-il pas de naine blanche massive ?

Plus l'étoile est massive, plus elle est petite, donc dense.



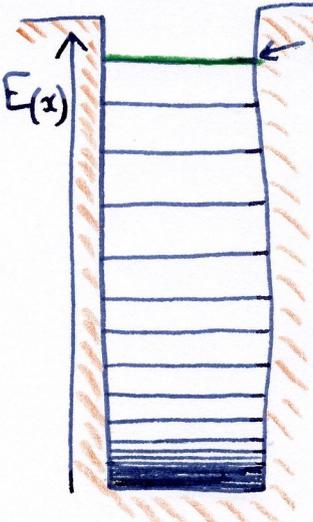
# Beaucoup d'électrons (froids) enfermés dans un trou

$$P \propto \text{densité}^{4/3}$$

gaz froid :  
pas de dépendance en T.

valable pour densités encore plus fortes où  $E_{\text{Fermi}}$  comparable à  $mc^2$ .

Beaucoup d'électrons froids dans un petit volume



Si  $E_{\text{Fermi}} > m_e c^2$   
gaz de Fermi relativiste.

$$E_{\text{Fermi}} = \sqrt{\hbar^2 (3\pi^2)^{2/3} c^2 \left(\frac{N}{V}\right)^{2/3} + m^2 c^4}$$

# rappel : L'équilibre des étoiles.

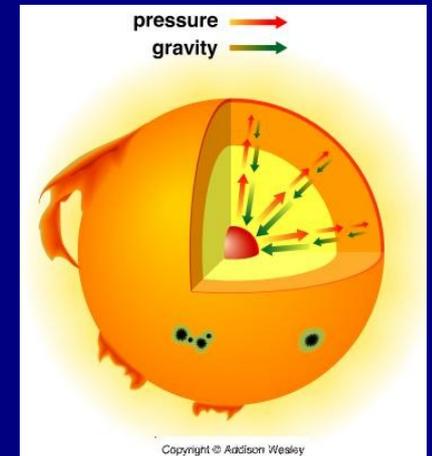
On peut mettre en équations l'équilibre d'une étoile soumise aux forces de gravitation et de pression.

Ces équations ont-elle une solution ? Autrement dit, une étoile peut-elle être en équilibre quelle que soit la matière qui la compose ?

En fait, cela dépend de la relation entre la pression et la densité. Dans les étoiles « ordinaires », la pression dépend de la densité et la température. Dans les étoiles très denses, cette relation est souvent de la forme

$$P = n^\gamma.$$

Tant que  $\gamma > 4/3$ , il existe une solution d'équilibre...



# Des étoiles impossibles.

Tant que  $\gamma > 4/3$ , il existe une solution d'équilibre.

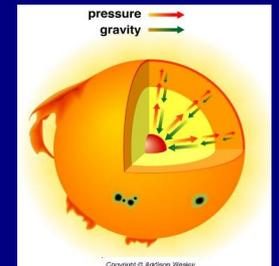
Le plasma devient relativiste si il est dense.  
Il devient dense si l'étoile est massive (d'autant plus que le rayon diminue quand la masse s'accroît).

Chandrasekhar a calculé la masse limite :

$M_C = 1,4$  masse solaire.

(masse de Chandrasekhar.)

On peut affiner le calcul, on tombe toujours sur une masse très voisine de celle-ci.

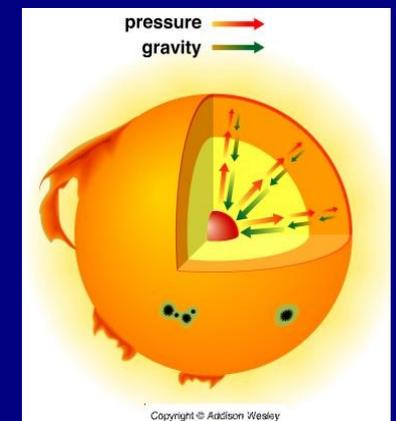


# Des étoiles impossibles.

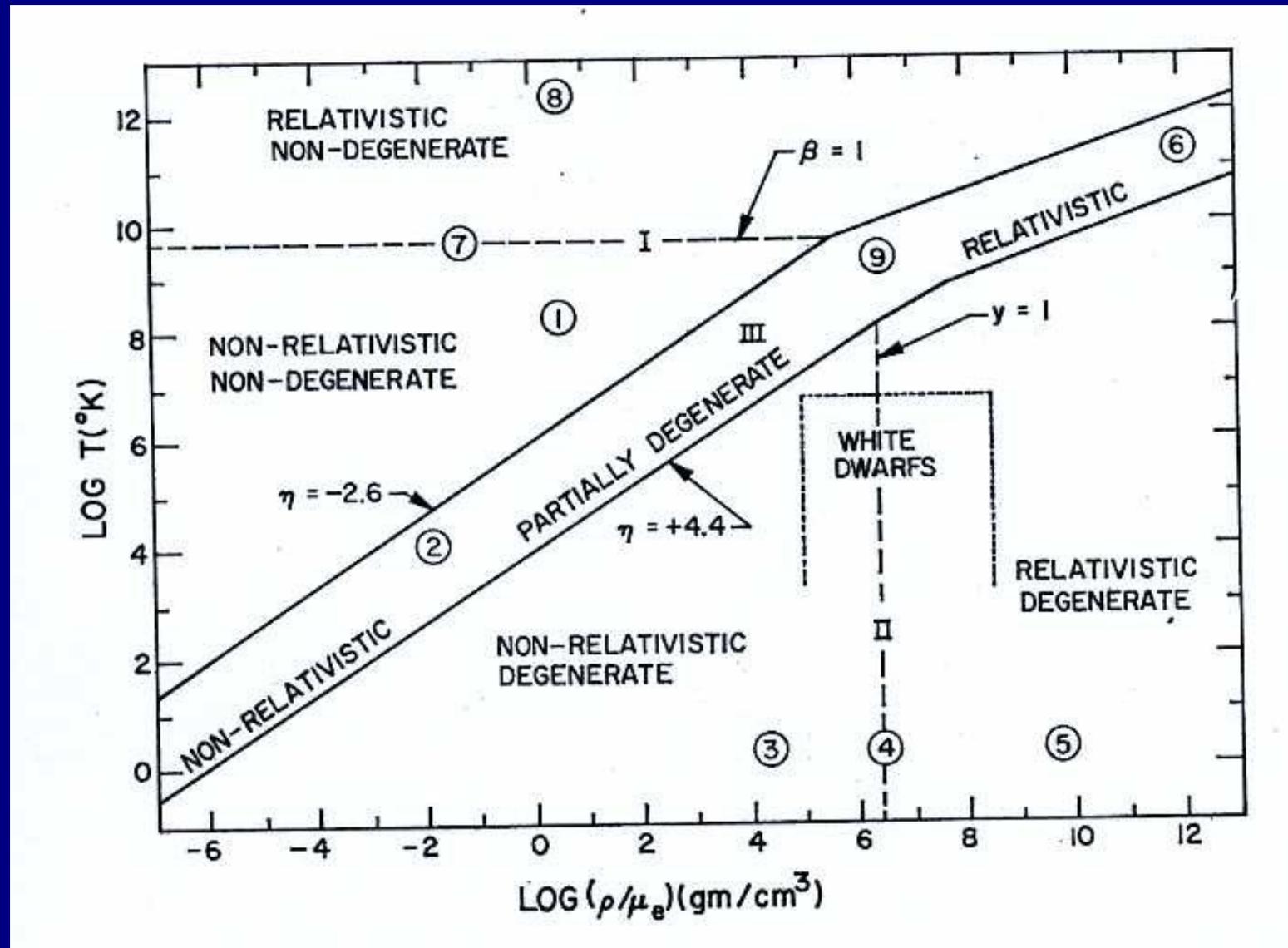
Tant que  $\gamma > 4/3$ , il existe une solution d'équilibre.  
Sinon... l'étoile s'effondre.

**ALERTE !**

Si la naine blanche atteint  $M=1,4 M_S$ , elle devient relativiste, elle s'effondre !



# Les régimes dégénéré/relativiste en fonction de la densité et la température



# Des étoiles impossibles. La controverse Chandrasekhar/Eddington.

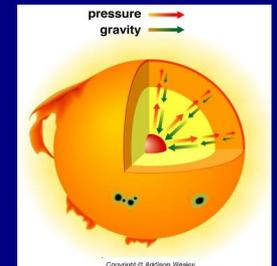
Eddington avait calculé l'équilibre des étoiles naines blanches.  
Mais il n'avait pas pris la relativité (restreinte) en compte.

Subrahmanyan Chandrasekhar (20 ans) pense à prendre en compte  
la relativité, trouve une pression en  $n^{4/3}$  et prédit la masse maximale.

Vexant pour Eddington, spécialiste mondial de la relativité,  
de ne pas y avoir pensé lui-même.

Eddington reconnaît les calculs de Chandra, mais  
refuse la conclusion. Refuse d'imaginer une autre forme  
d'étoile, trop exotique.

Controverse officielle, débat à la Roy. Soc. en 1935.



# Des étoiles impossibles. La controverse Chandrasekhar/Eddington.

Eddington en envisage les trous noirs (le mot sera inventé vers 1960), et rejette

« Je pense qu'il doit exister une loi de la nature qui empêche une étoile de se comporter de façon aussi absurde »[Eddington]

Ni Chandra ni Eddington ne mentionnent une autre hypothèse, formulée en 1932 par Zwicky, Landau, Baade, fondée sur les neutrons.

Chandra quitte l'Angleterre et s'installe à Chicago en 1937, avec un poste permanent.

