

Astrophysique

13 – La fin des étoiles

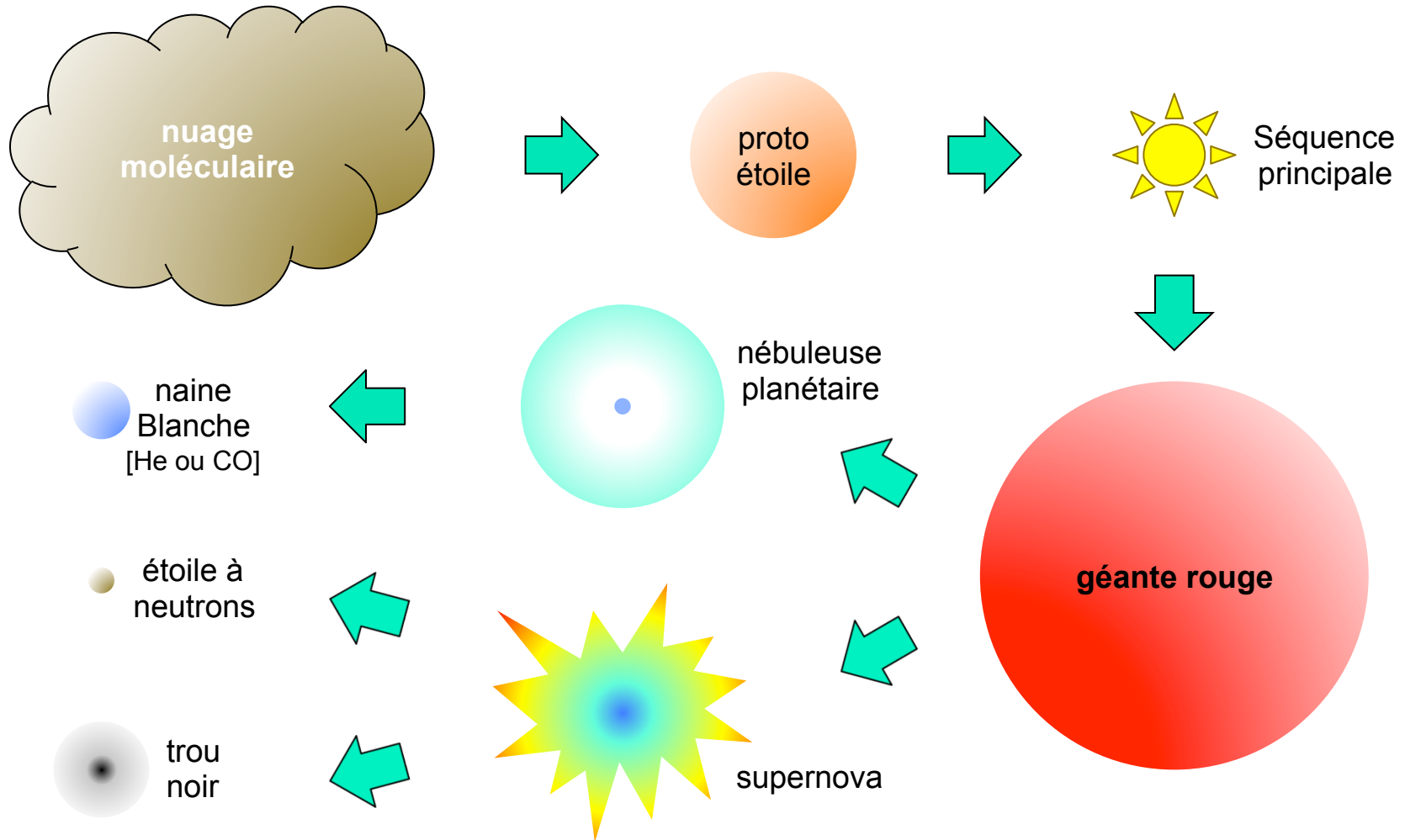


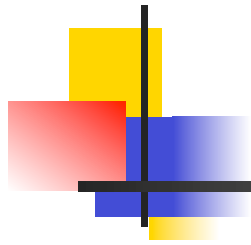
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

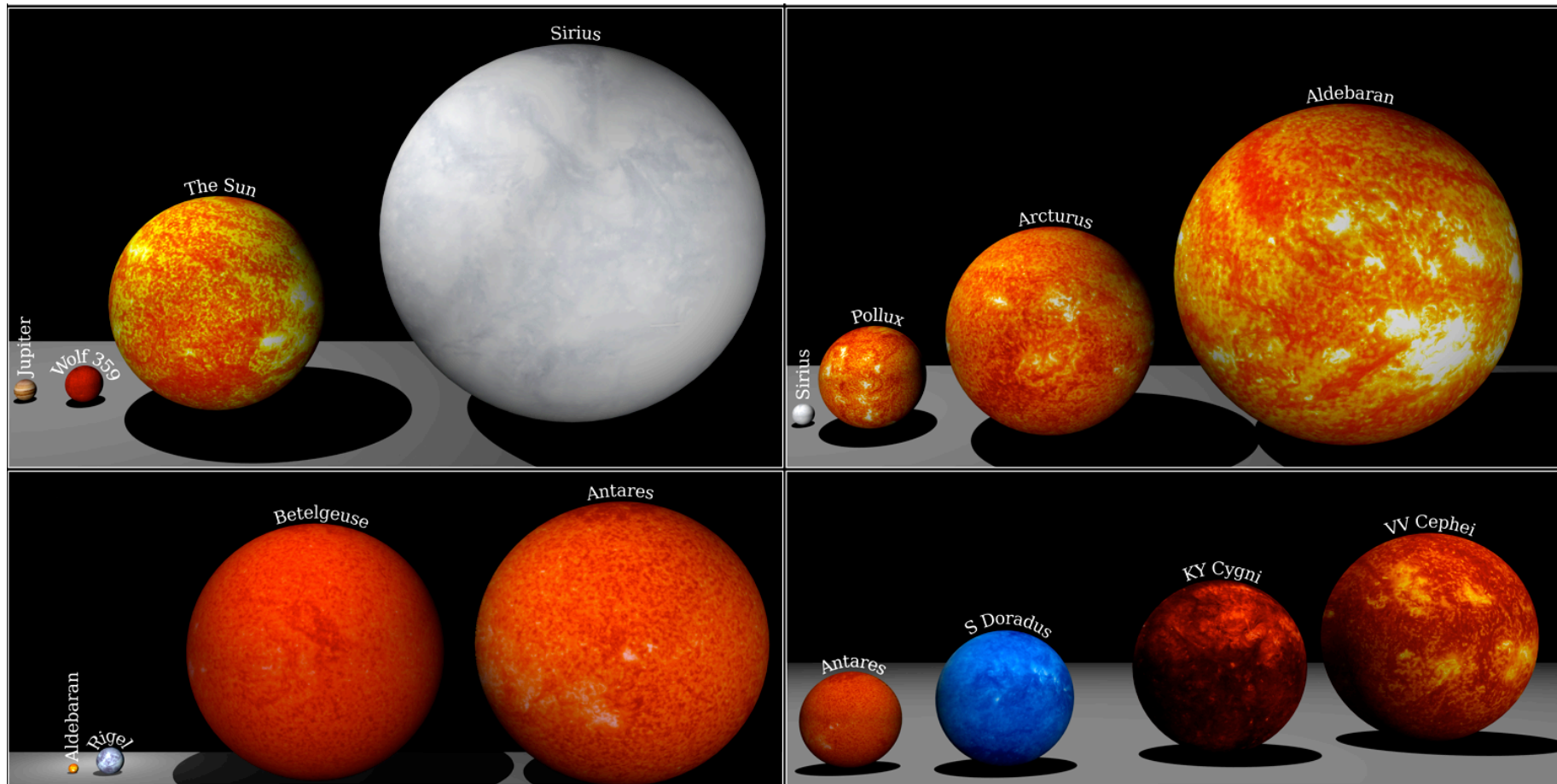
L'évolution des étoiles





LA FIN DES PETITES ÉTOILES

Les tailles des étoiles





Une question de masse

- Étoiles de masse $< 0,5 M_{\odot}$
 - l'étoile est entièrement convective (→ brassage)
 - la fusion de l'hydrogène prend des dizaines de milliards d'années → toujours SP
 - *la fusion de l'hélium n'est jamais possible*
- Étoiles de $0,5$ à $8 M_{\odot}$ (environ!)
 - fusion de l'hélium en carbone et oxygène dans le cœur
 - fusion du carbone impossible → cœur C-O et enveloppe He et H
 - restructuration → contraction du cœur C-O et soufflage de l'enveloppe
 - → **nébuleuse planétaire et naine blanche C-O**
- Étoiles de 8 à $10 M_{\odot}$
 - fusion du carbone en néon et magnésium possible → naine blanche Ne-Mg
 - mais stabilité du cœur marginale → **supernova** par effondrement du cœur (SN type II)
- Étoile $> 10 M_{\odot}$
 - fusion du néon en fer (via silicium, soufre, calcium...)
 - mais cœur instable → supernova par effondrement du cœur (SN type II)
- **Le stade de « naine blanche » est le stade ultime de 97% des étoiles !**

Nébuleuse « planétaire » puis naine blanche

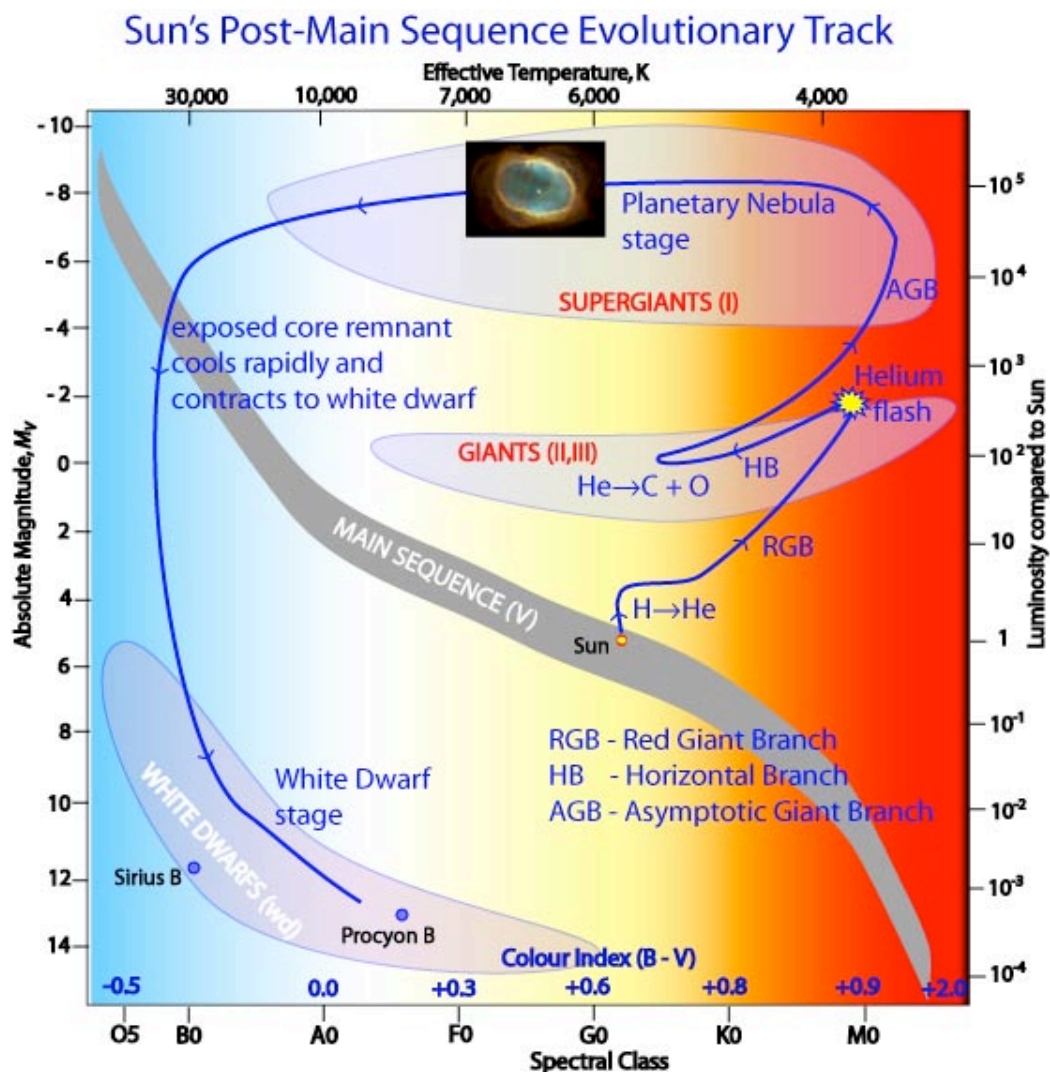
Nébuleuse planétaire
Couches externes éjectées
Cœur C-O apparaissant



Contraction du cœur
Luminosité décroissante



Stabilisation du cœur par
la pression de Fermi
Refroidissement progressif



Branche asymptotique
des géantes
Fusion He en couche
(+ *fusion H en couche*)



Branche horizontale
des géantes
Fusion He au cœur
(+ *fusion H en couche*)



Branche des géantes
Fusion H en couche



Séquence principale
Fusion H au cœur



Nébuleuse planétaire

- Géante rouge -> naine blanche
- → contraction très importante du cœur de $\sim 1 M_{\odot}$ (de $100 R_{\odot}$ à $1/100 R_{\odot}$)
- → échauffement très important
 - $T \sim 10$ MK dans toute l'épaisseur (conduction de chaleur par les électrons)
 - $T \sim 30\,000$ à $100\,000$ K en surface → émission **ultraviolette**
- L'enveloppe (plusieurs M_{\odot} parfois) est soufflée par la pression de rayonnement
 - vitesse d'éjection ~ 20 à 30 km/s
 - ionisée par les UV
 - → raies en émission
 - *Nébulium* en fait [OIII]

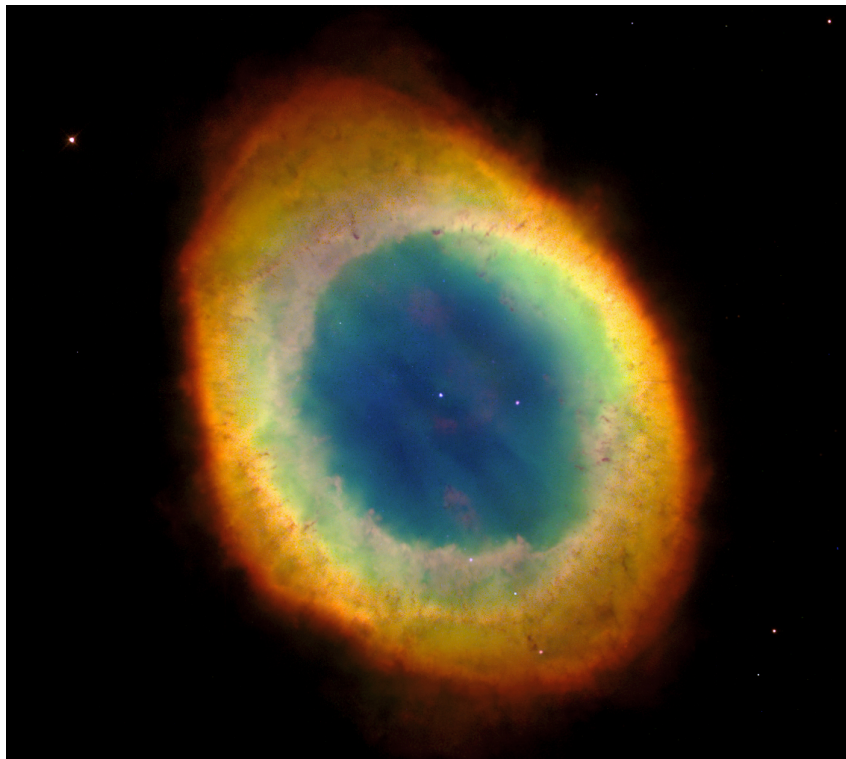
Nébuleuse planétaire de l'Hélice
(NGC 7293, à ~ 700 al de la Terre)



- Durée de vie courte ($\sim 10\,000$ ans) avant de se disperser dans le milieu interstellaire → seulement ~ 1500 connues

Nébuleuses planétaires

- La nébuleuse de l'Anneau (M57)



- L'œil du chat (NGC 6543)



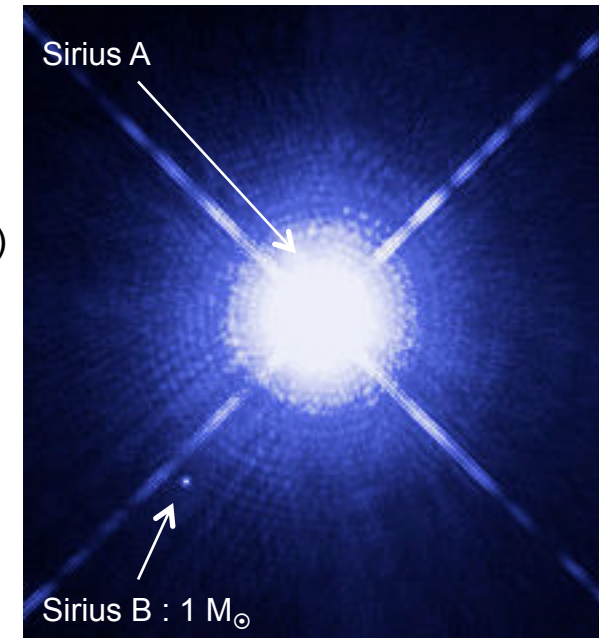
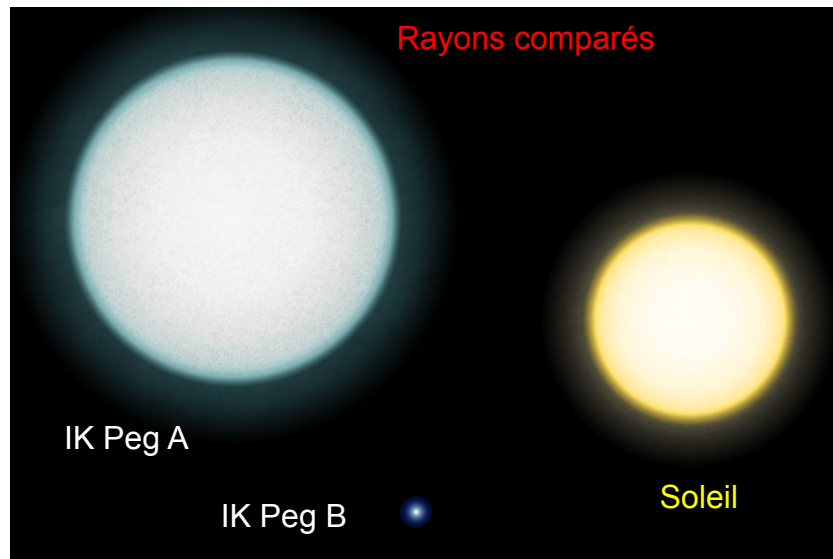


L'œil du chat

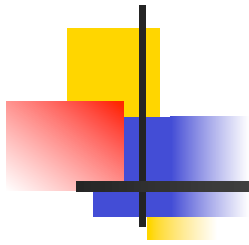


Naines blanches

- Premiers exemples connus : 40 Eri B et Sirius B
- Classe particulière d'étoiles (Russell, Pickering 1910)
 - Type spectral B ou F (couleur blanc-bleuté)
 - Luminosité très faible (1/100 à 1/10000 luminosité solaire)
- Émission thermique $L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \rightarrow$ rayon R
 \rightarrow TRÈS petit rayon (~ Terre)



- Masses de 0,2 à 1,3 M_⊙
 \rightarrow densités ~ 1 tonne / cm³



DES ÉLECTRONS *DÉGÉNÉRÉS*

Un brin de mécanique quantique

- Un électron – ou l'univers – est décrit par un **vecteur d'état** $|\psi\rangle$ (ou « fonction d'onde »)
(espace vectoriel = espace de Hilbert)
sur lequel agissent des opérateurs

$$O |\psi\rangle = |\psi'\rangle$$

- Quand l'opérateur redonne le même vecteur, c'est un **vecteur propre**

$$O |\psi\rangle = a |\psi\rangle$$

↑ valeur propre



Erwin Schrödinger (1887-1961)

- Exemples

- Opérateur position $X |\psi\rangle = x |\psi\rangle$
- Opérateur impulsion $P |\psi\rangle = p |\psi\rangle$
- Opérateur **hamiltonien** $H |\psi\rangle = E |\psi\rangle$

↑ énergie

- L'opérateur hamiltonien joue un rôle essentiel : il est responsable de l'évolution temporelle des états

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = H |\psi\rangle$$

- C'est l'**équation de Schrödinger**

Le chat de Schrödinger



- Et si un état $|\psi\rangle$ n'est pas un vecteur propre d'un opérateur O ?
- On peut toujours le décomposer en une somme (superposition) d'états propres

$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\psi_1\rangle + \alpha_2 |\psi_2\rangle + \dots$$

- Appliquer l'opérateur O donne

- L'état $|\psi_1\rangle$ avec la probabilité $|\alpha_1|^2$
- L'état $|\psi_2\rangle$ avec la probabilité $|\alpha_2|^2$
- ...

→ « réduction du paquet d'onde »

(et bien sûr $|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 + \dots = 1$)

Expérience de pensée de Schrödinger

- Un chat dans une boîte
- Un dispositif qui le tue ou le laisse vivre
- Qu'observe-t-on en ouvrant ?



Heisenberg, Pauli et les autres...



Werner Heisenberg
(1901-1976)

- Différents opérateurs peuvent avoir le même vecteur propre

$$O_1 |\psi\rangle = a |\psi\rangle$$

$$O_2 |\psi\rangle = b |\psi\rangle$$

- Dans ce cas, ils commutent

$$O_1 O_2 |\psi\rangle = O_2 O_1 |\psi\rangle = ab |\psi\rangle$$

- **MAIS CE N'EST PAS TOUJOURS LE CAS**

- Les opérateurs position X et impulsion P *ne commutent pas*

$$XP = PX + i\hbar I$$

Constante de Planck $\hbar/2\pi$

- → inégalité de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p > \hbar/2$$

- Permutations et statistiques quantiques

- Bose-Einstein $\psi(1,2) = \psi(2,1)$

- Fermi-Dirac $\psi(1,2) = -\psi(2,1)$

(ce sont les seules possibilités)

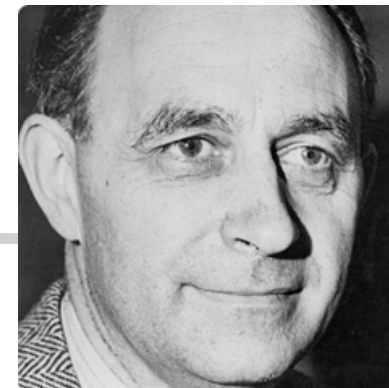
- → Principe de Pauli : 2 *fermions* ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique

- Théorème spin-statistique

- Spin entier $[0, 1, 2, \dots]$ → boson

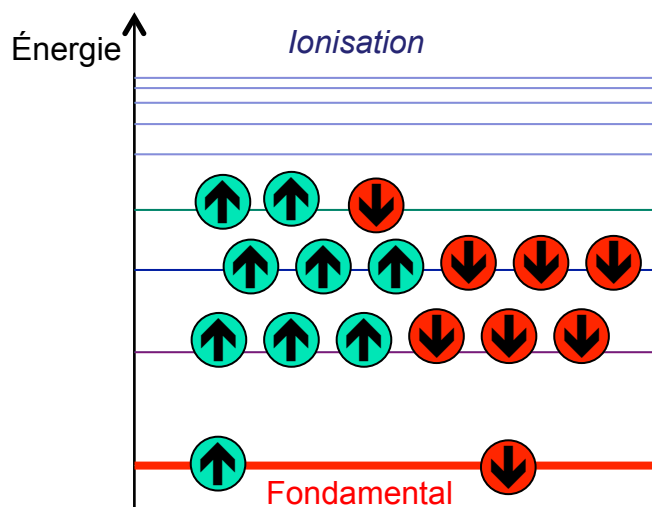
- Spin demi-entier $[1/2, \dots]$ → fermion

Conséquences

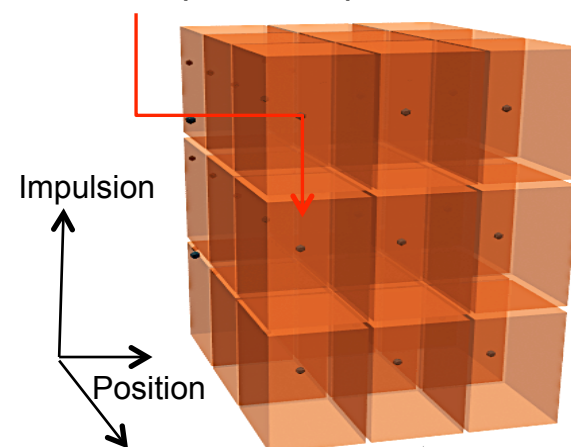


Enrico Fermi (1901-1954)

- → Explication de la **structure atomique**
 - les électrons ne peuvent pas tous être dans l'état d'énergie minimale
 - → ils occupent des états (« orbitales ») d'énergie de plus en plus haute
 - Le dernier niveau occupé détermine les propriétés chimiques

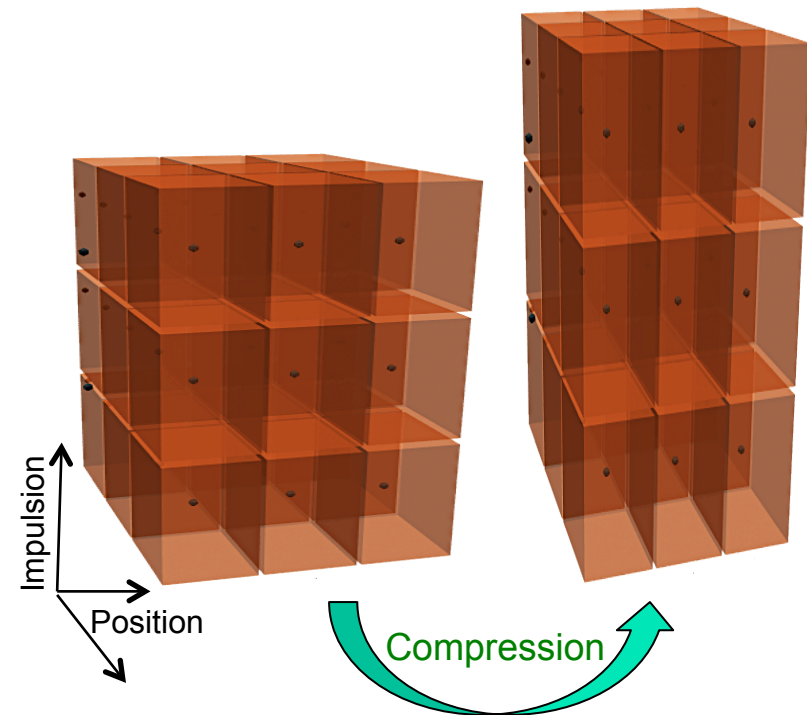


- **Gaz de fermions** (par exemple les électrons d'un plasma)
 - État quantique = {position, impulsion, **spin**}
 - Inégalité de Heisenberg
 - → position définie à Δx près
 - impulsion définie à Δp près
 - → cellules de **taille finie** ($\sim h$) dans l'espace des phases



Matière « dégénérée »

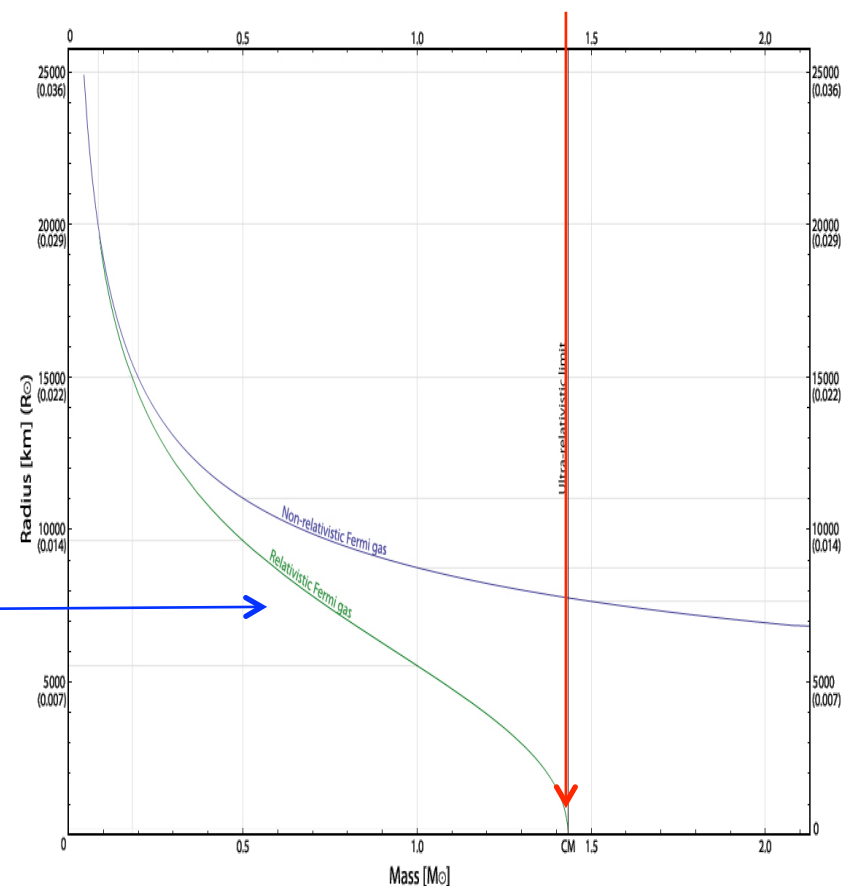
- « dégénéré » = manière de dire que les effets quantiques deviennent dominants
- Gaz de Fermi
 - Cellules de taille finie ($\sim h^3$) dans l'espace des phases (Heisenberg)
 - Deux électrons ne peuvent occuper la même cellule (Pauli)
- Beaucoup d'électrons dans un petit volume (forte densité)
 - → position relativement précise
 - → impulsion relativement imprécise
 - → énergie élevée
- Cela se manifeste par une pression (pression de Fermi ou pression de dégénérescence) **indépendante de la température**



Masse de Chandrasekhar

- La pression de Fermi est toujours présente
- Mais elle est négligeable pour la matière dans les conditions usuelles de densité et de température
 - $P_{\text{gaz parfait}} = n k T$
 - $P_{\text{Fermi}} = K n^\gamma$
 - $\gamma = 5/3$ (gaz non-relativiste)
 - $\gamma = 4/3$ (gaz relativiste)
- → la pression de Fermi devient dominante si la densité augmente suffisamment
- Ce qui est le cas des naines blanches
- Augmenter la masse diminue le rayon de l'étoile
 - la force de gravitation augmente
 - donc la pression, donc **plus vite encore** la densité

- → il existe une masse maximale, la masse de Chandrasekhar $\sim 1,4 M_\odot$

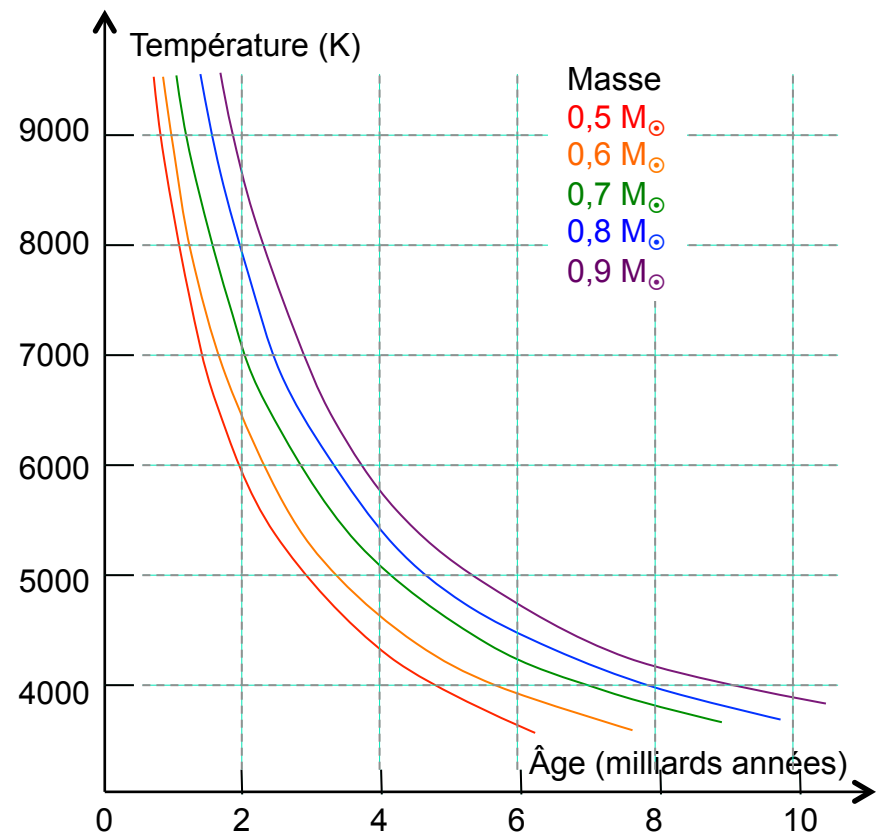


Refroidissement des naines blanches

- Spectroscopie → raies de l'hydrogène ou de l'hélium
 - Interprétation : atmosphère de l'étoile ne représentant que 1% de la masse (séparation gravitationnelle)
 - Le reste est un cœur de carbone et d'oxygène
- **Aucune fusion n'est plus possible**
 - la seule source éventuelle d'énergie est la contraction gravitationnelle
- Masse ~ Soleil et rayon ~ Terre → densité ~ 1 tonne / cm³
- → contraction bloquée par la *pression de Fermi* des électrons dégénérés
- l'étoile ne peut que se refroidir...

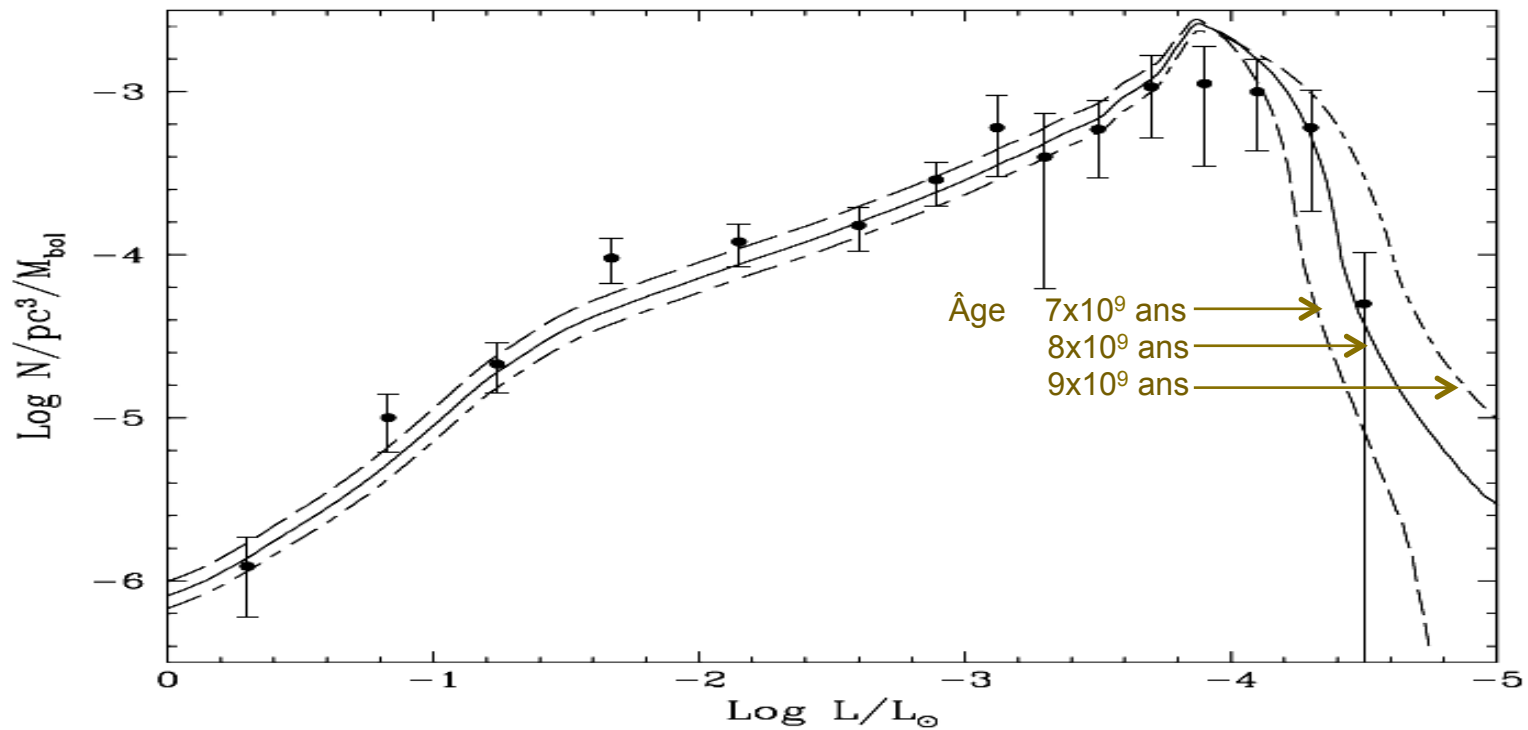
...lentement !

- Vitesse de refroidissement



Âge du disque de la Voie lactée

- Fonction de luminosité



- → Âge du disque galactique 8×10^9 ans (+ temps de formation de la naine blanche)

On ne se lasse pas du diagramme d'Herzsprung-Russell

