

Comment nous parvenons à percer les secrets des étoiles

Jean-Paul Zahn
LUTH, Observatoire de Paris







Constellation d'Orion



Comment caractériser les étoiles : les fondamentaux

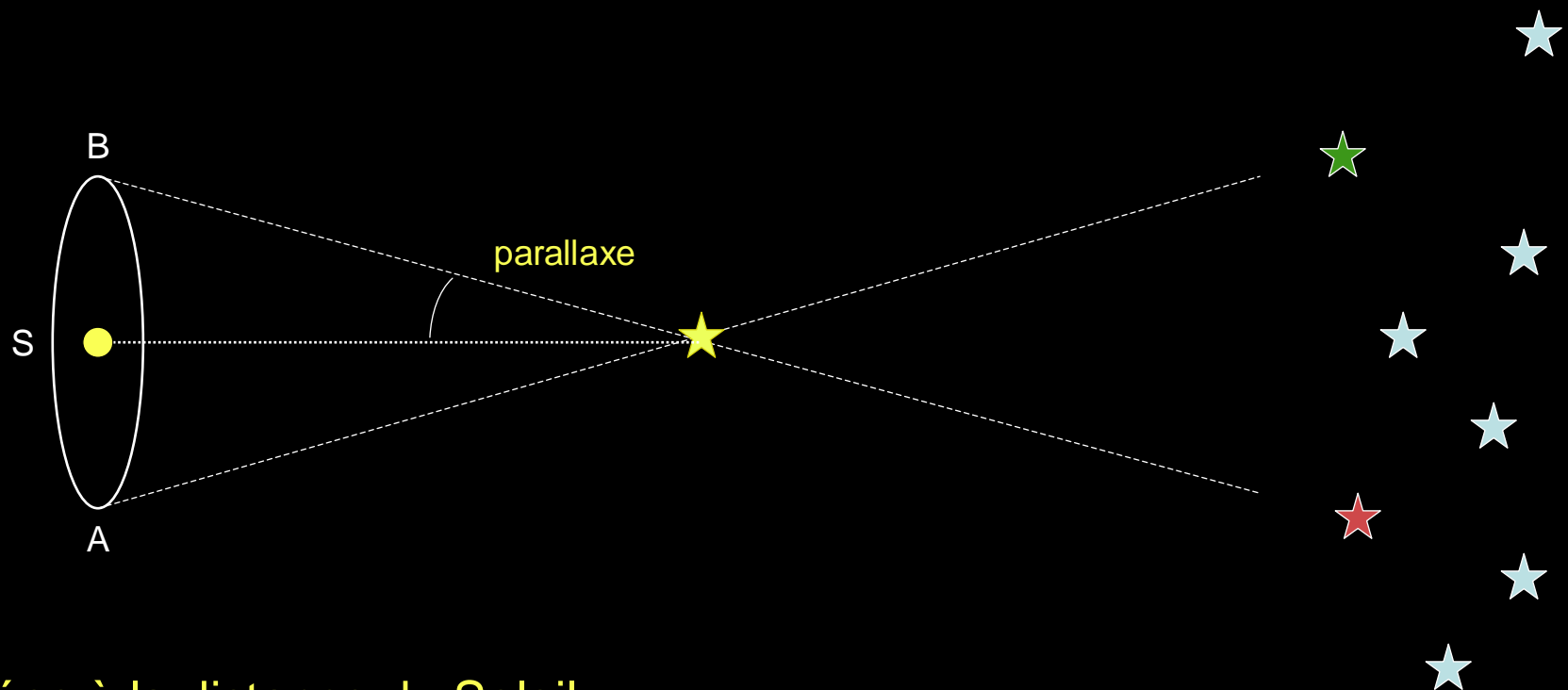
Distance (trigonométrie)

Mesurer la distance des étoiles

parallaxe de 61 Cyg

Bessel (1838) : 0,314"

Hipparcos (1989-93) : 0,28547"



Placées à la distance du Soleil,
les étoiles nous enverraient
(plus ou moins) autant
de lumière que lui

→ le Soleil est une étoile

Comment caractériser les étoiles : les fondamentaux

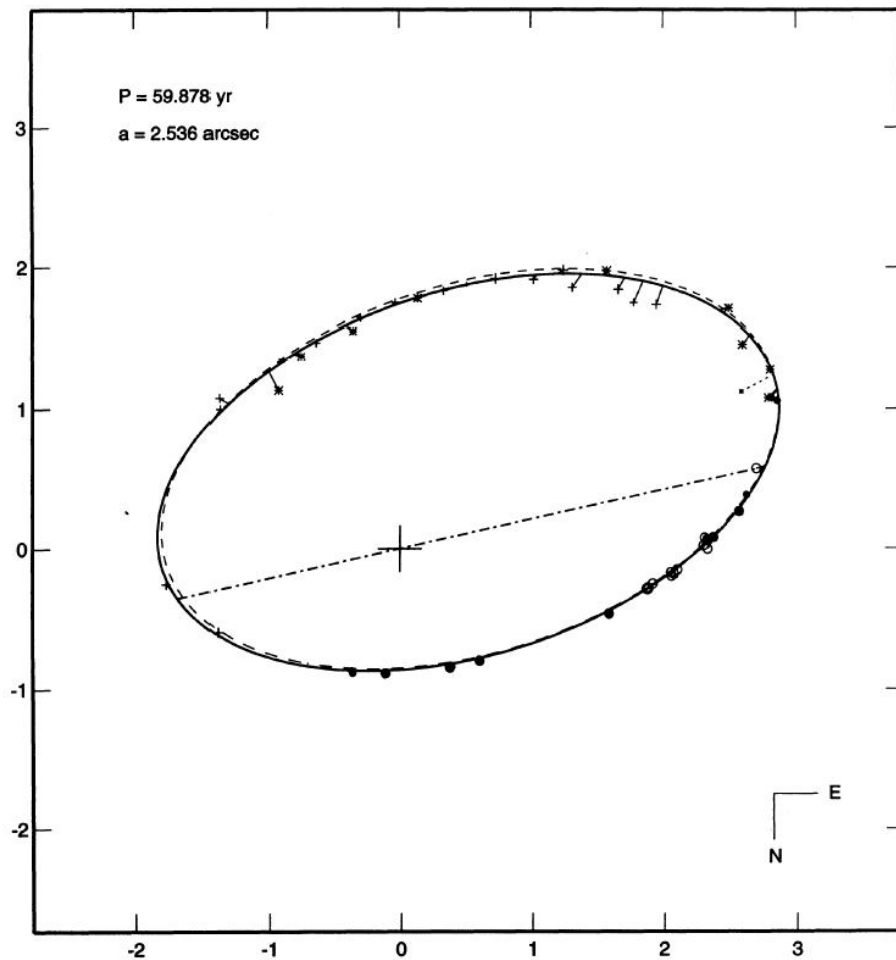
Distance (trigonométrie, astronomie)

Masse (étoiles doubles)

binaire visuelle ξ Ursae Majoris
un système quadruple

période : AB 59,878 ans

première orbite calculée : F. Savary (1828)



périodes

masses/Soleil

AB 59,878 ans

A 0,91

Aa 1,832 an

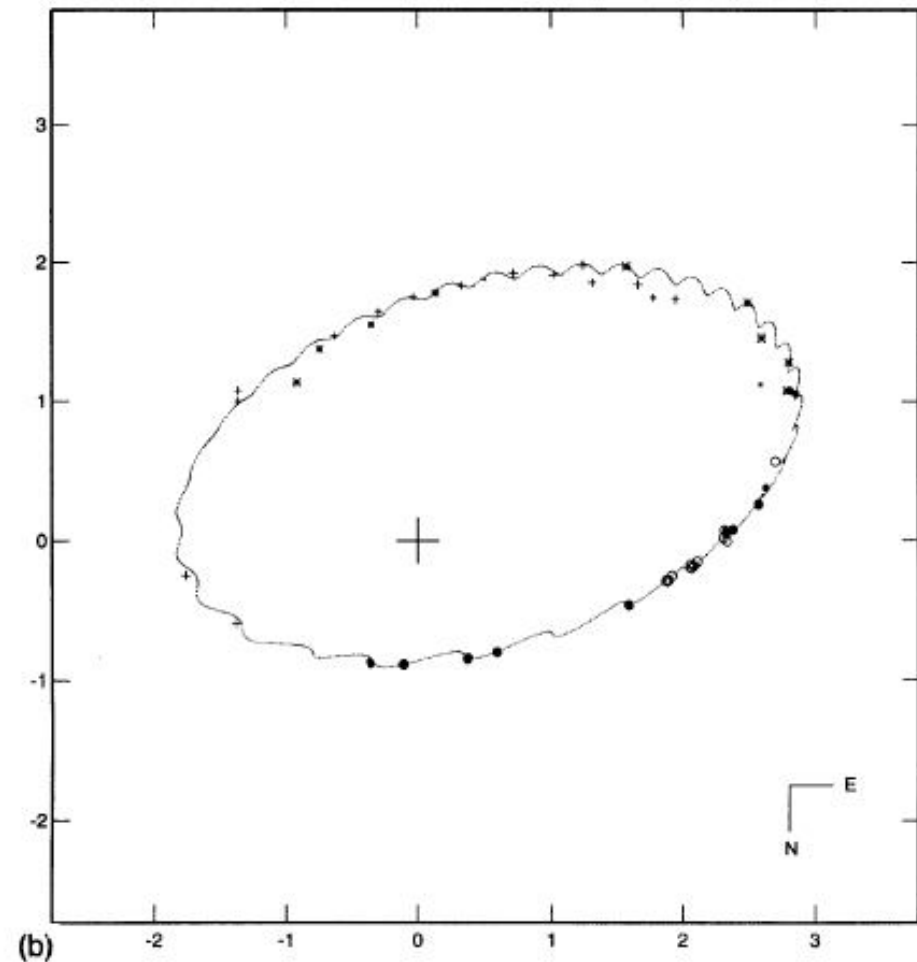
a 0,34

Bb 3,98 jours

B 0,85

b 0,16

analyse récente: Mason et al. 1995



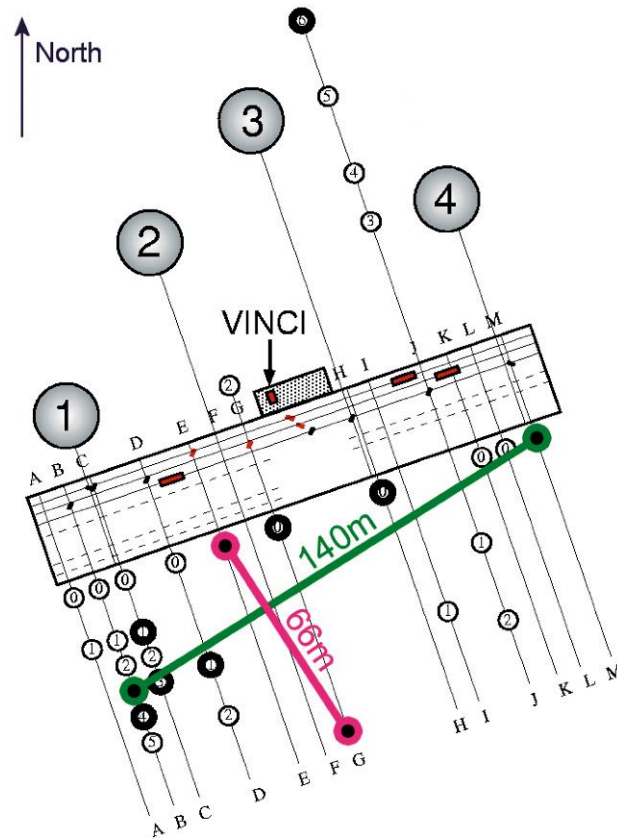
Comment caractériser les étoiles : les fondamentaux

Distance (trigonométrie, astrométrie)

Masse (étoiles doubles)

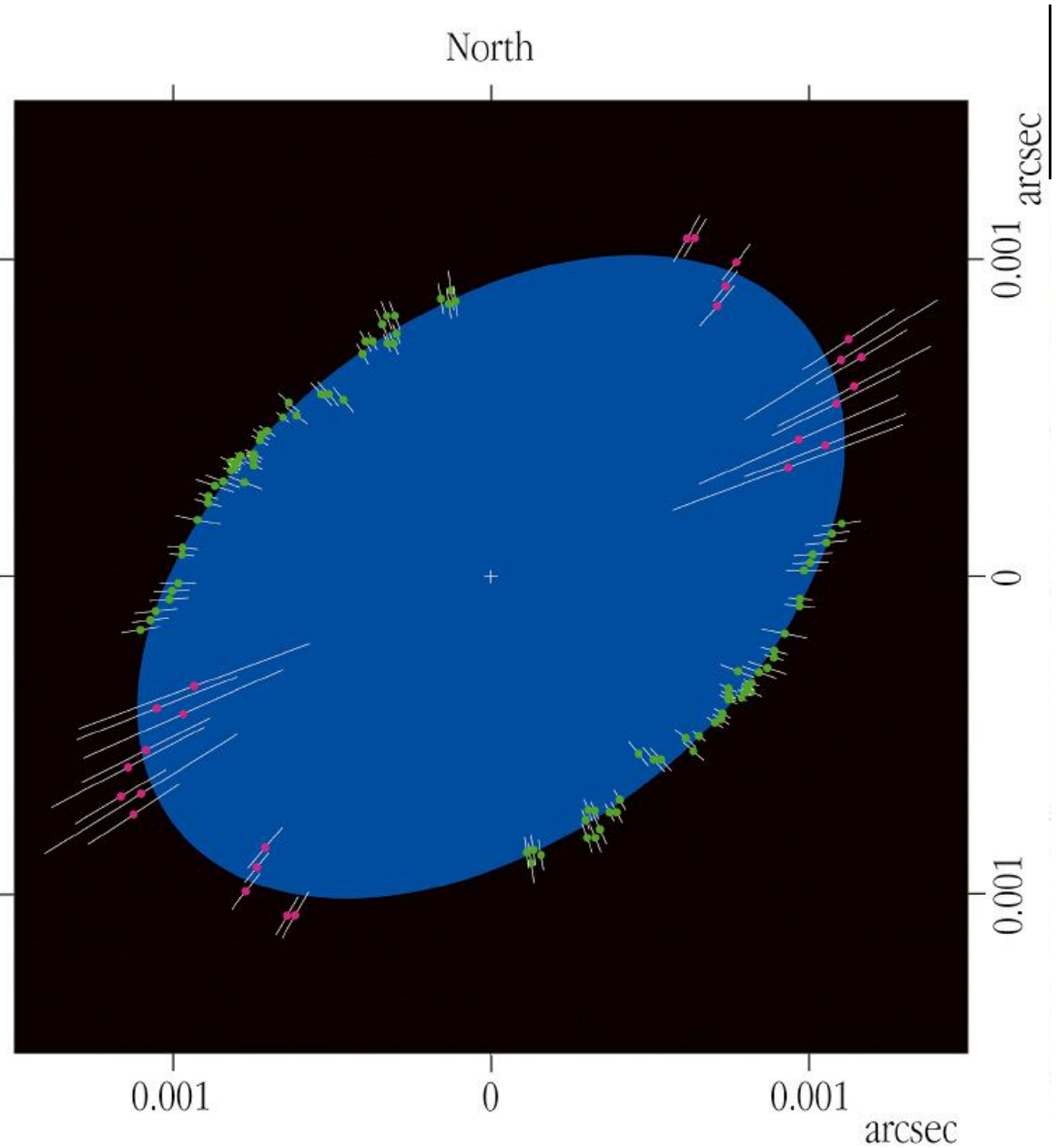
Rayon (doubles à éclipse, interférométrie)

Interférométrie au VLT



VLTI Configuration for Measurements of Achernar

East



The Shape of Achernar
(VLTI + VINCI)

ESO PR Photo 15a/03 (11 June 2003)

©European Southern Observ

Domiciano et al. 2003

ESO PR Photo 15b/03 (11 June 2003)

©European Southern Observatory



Comment caractériser les étoiles : les fondamentaux

Distance (trigonométrie, astrométrie)

Masse (étoiles doubles)

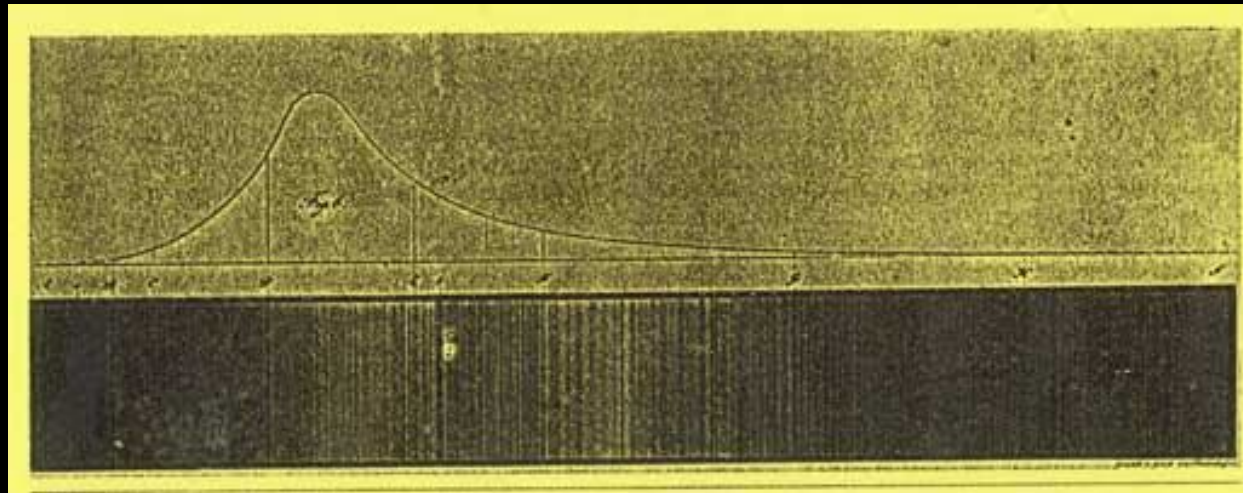
Rayon (doubles à éclipse, interférométrie)

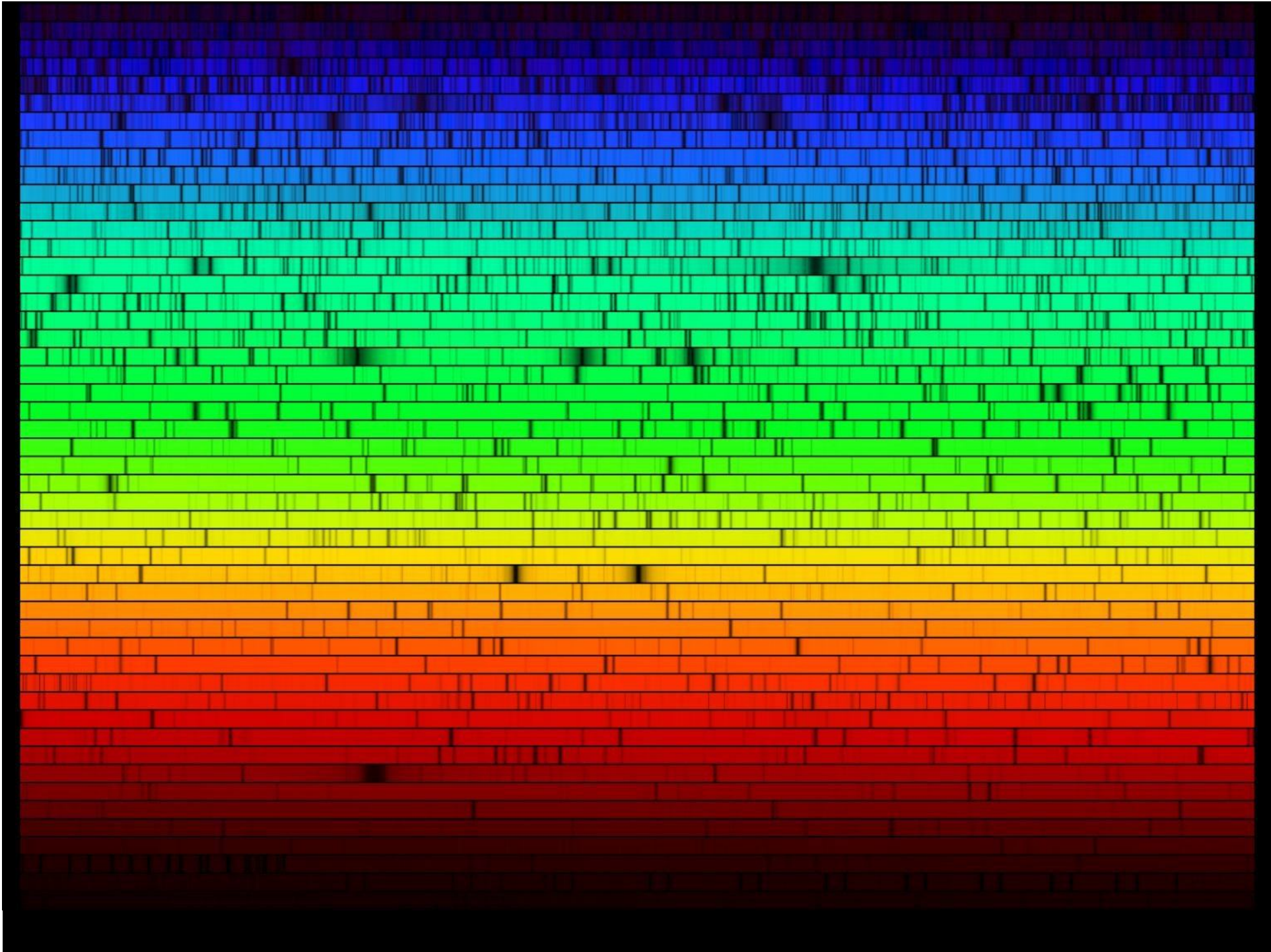
Luminosité (photométrie, astrométrie)

Température (analyse spectrale)

Composition chimique (analyse spectrale)

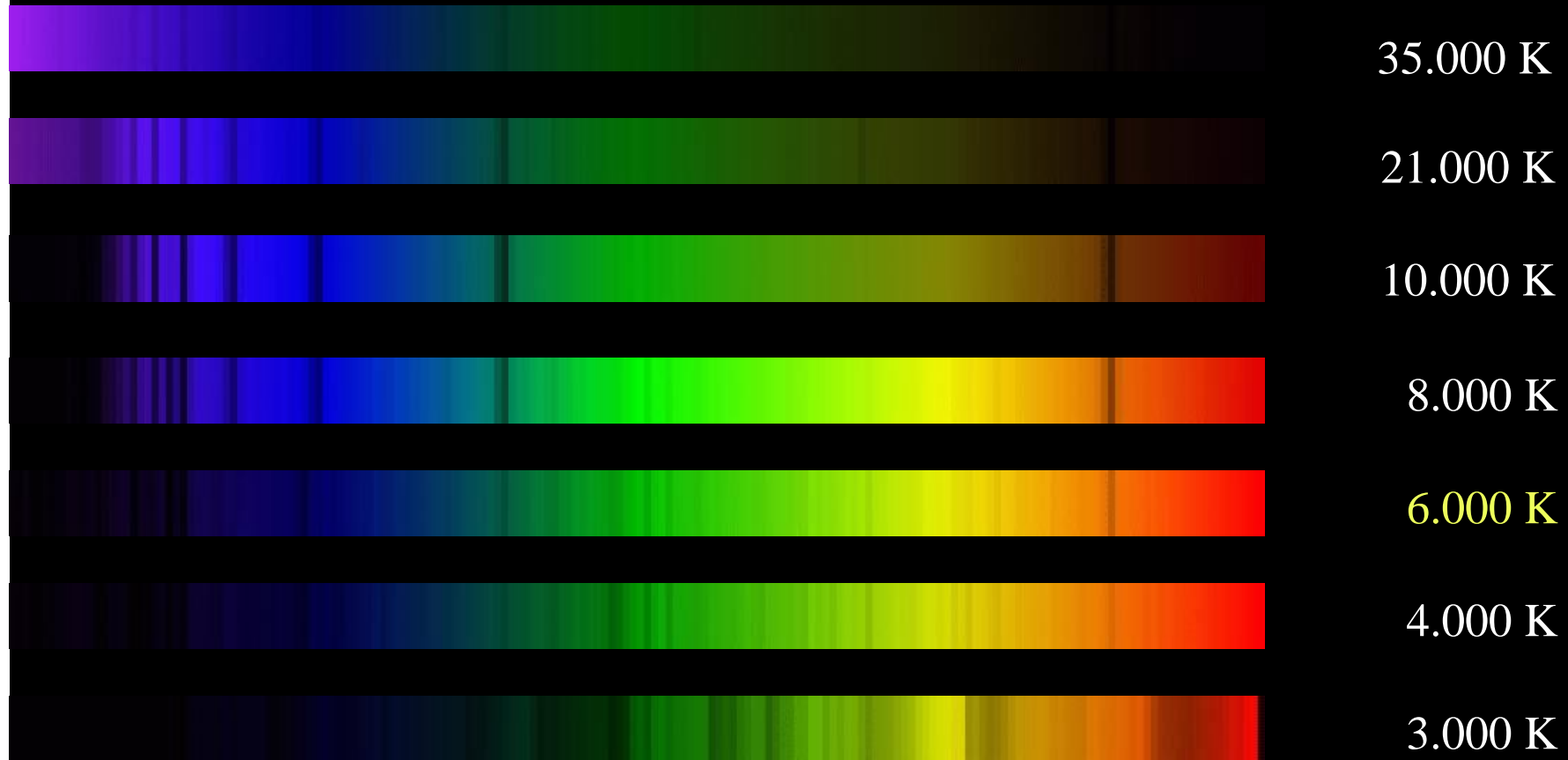
Le spectre solaire (Wollaston, Fraunhofer, Foucault, Kirchhoff, Bunsen)





Les étoiles ont des spectres semblables

→ le Soleil est une étoile



→ température effective

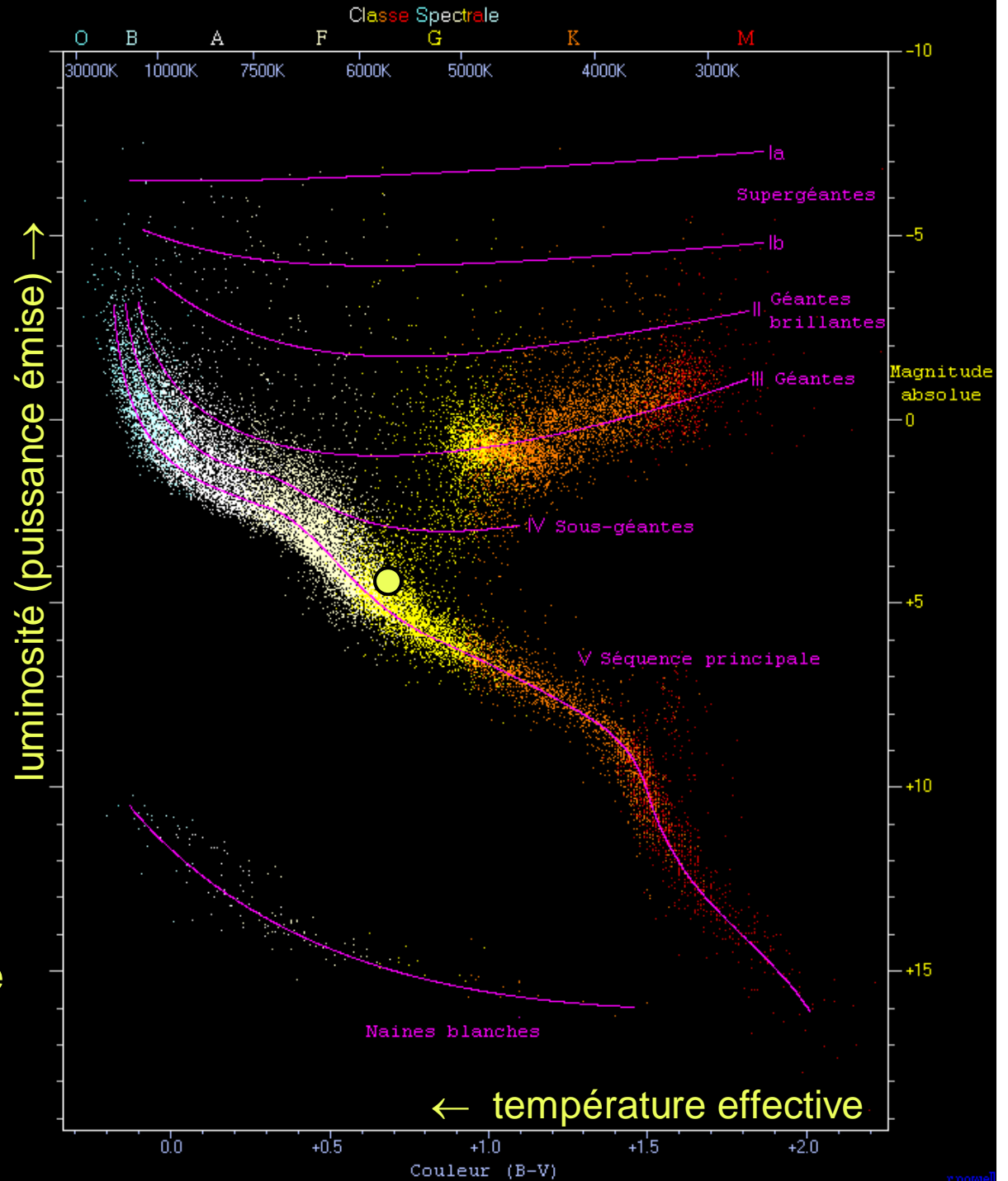
→ composition chimique

Diagramme Hertzprung-Russel



étoiles les plus proches du Soleil →
(satellite Hipparcos)

→ le Soleil n'est qu'une étoile parmi d'autres, assez banale



Composition chimique du Soleil

Les raies du spectre solaire correspondent à celles émises par des éléments connus :

Fe, Ti, Ca, Mn, Ni, H, O

En quelle quantité sont-ils dans le Soleil, et dans les étoiles?



Pour le savoir, il fallut attendre l'émergence de la physique statistique Boltzmann (1871), Saha (1923), appliquée par Payne-Gaposchkin (1925)



Composition superficielle

H 73,3%

He 24,9%

reste 1,8% (O, C, Fe, Ne, N, ...)



C. Payne-Gaposchkin

Ce que la physique nous apprend sur l'intérieur du Soleil

Il est en équilibre hydrostatique : pression = gravité

pression centrale $P_c \approx \rho_c G M/R$

c'est un gas parfait $P_c = R \rho_c T_c / \mu$

$\mu=1$ hydrogène atomique

$\mu=2$ hydrogène ionisé

$\mu=1,333$ helium ionisé

température centrale $\rightarrow T_c \approx (\mu/R) GM/R \approx 15 \text{ millions } ^\circ\text{K}$

Source d'énergie du Soleil ?

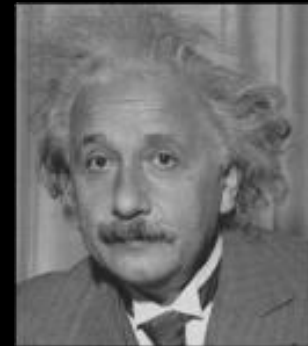
Age du soleil :

supérieur à qqs centaines de millions d'années (géologues)

réactions chimiques : insuffisant

contraction gravitationnelle : insuffisant

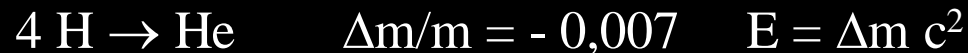
réactions nucléaires : amplement suffisant



A. Eddington



J. Perrin



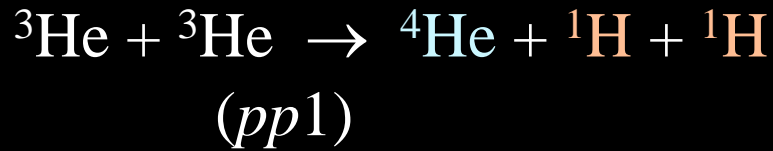
$$0,007 M(\text{cœur}) c^2 = L t(\text{vie}) \quad M(\text{cœur}) \sim 0,1 M_{\odot}$$

→ $t(\text{vie}) \approx 10$ milliards d'années



H. Bethe
C. Critchfield

Réactions nucléaires : cycle *pp*



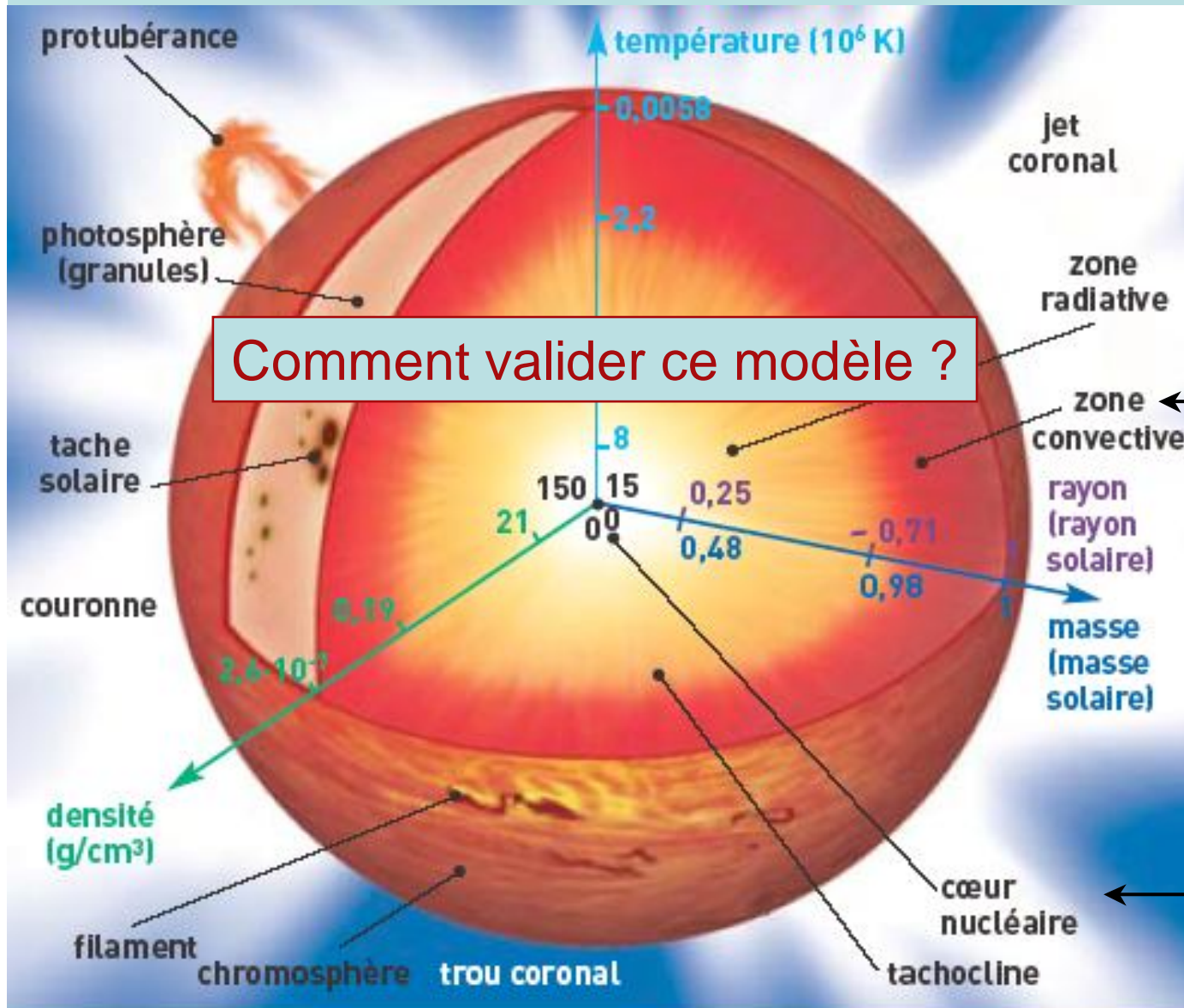
(*pp2*)



(*pp3*)



La structure du Soleil - prédite par les modèles



Comment valider ce modèle ?

où l'énergie est transportée par rayonnement

où l'énergie est transportée par convection

où l'énergie est libérée

Comment valider ce modèle solaire ?

Par les neutrinos émis au cœur du Soleil ?

→ Ils sont moins nombreux
que prévu par les modèles !

Pourquoi ?



R. Davis

Homestake (US)



L'expérience de Kamiokande

Confirme le déficit de neutrinos solaires

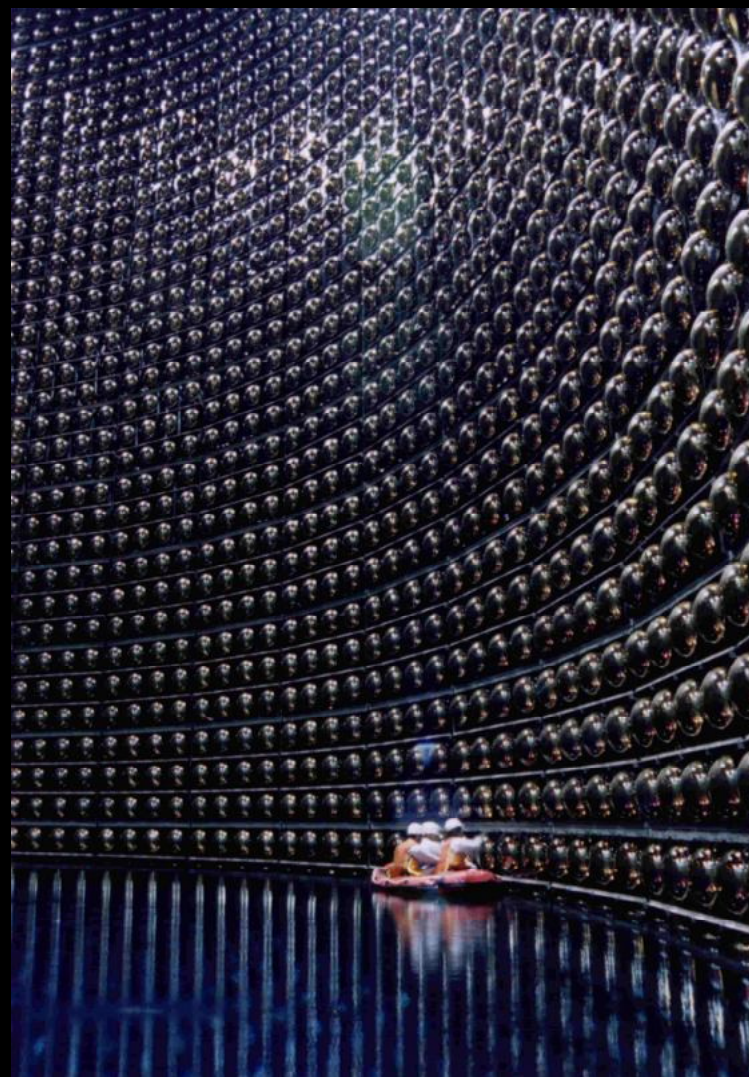
Les neutrinos ont une masse !

La théorie des particules
élémentaires est à revoir !



Koshiba

Superkamiokande (Japon)



Comment valider le modèle solaire ?

Par les ondes sonores
observées à la surface du Soleil

Comment valider le modèle solaire ?

Par les ondes sonores
observées à la surface du Soleil

réseau GONG

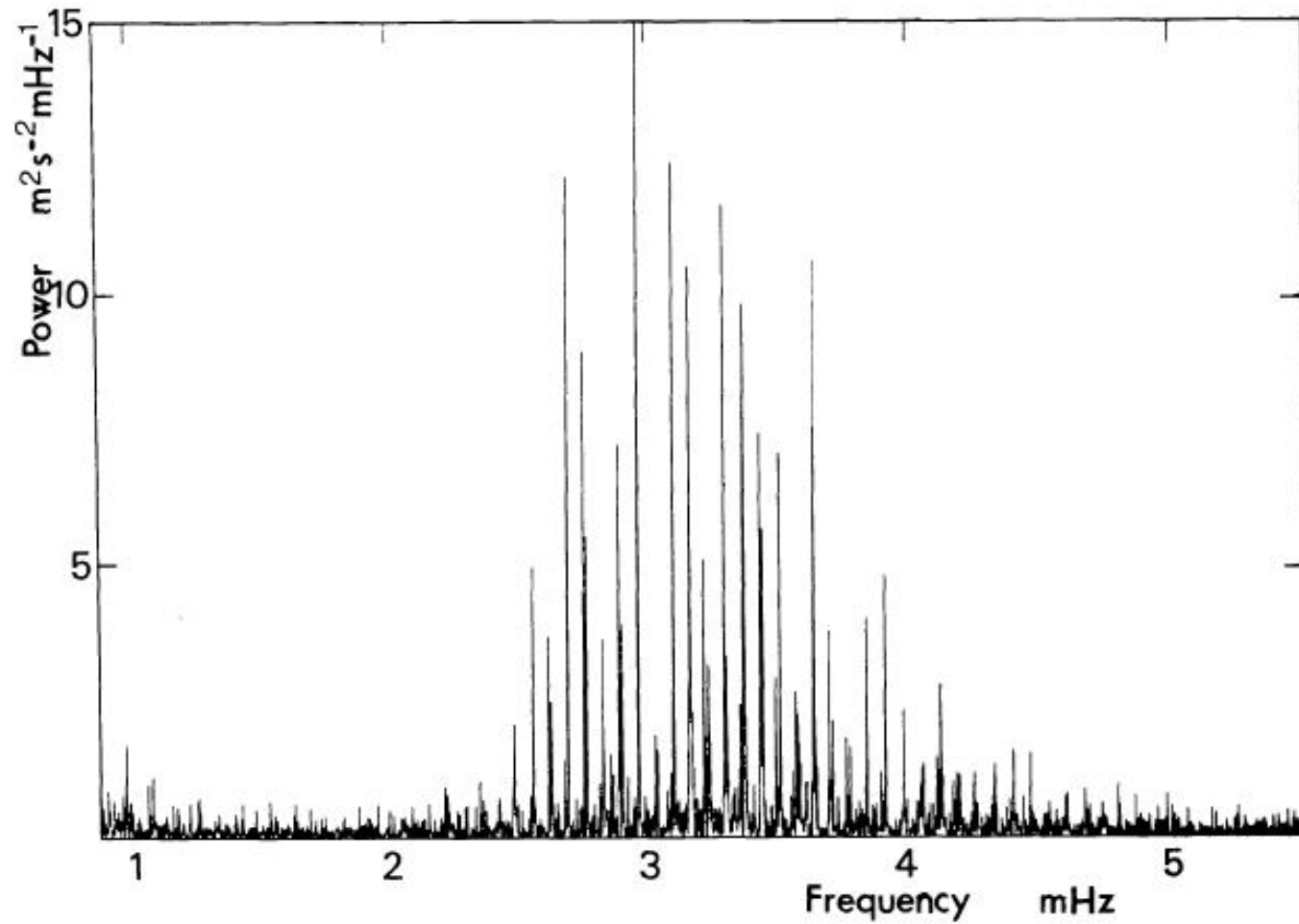
Observer le Soleil au pôle Sud

Fossat, Grec & Pomerantz début 1980

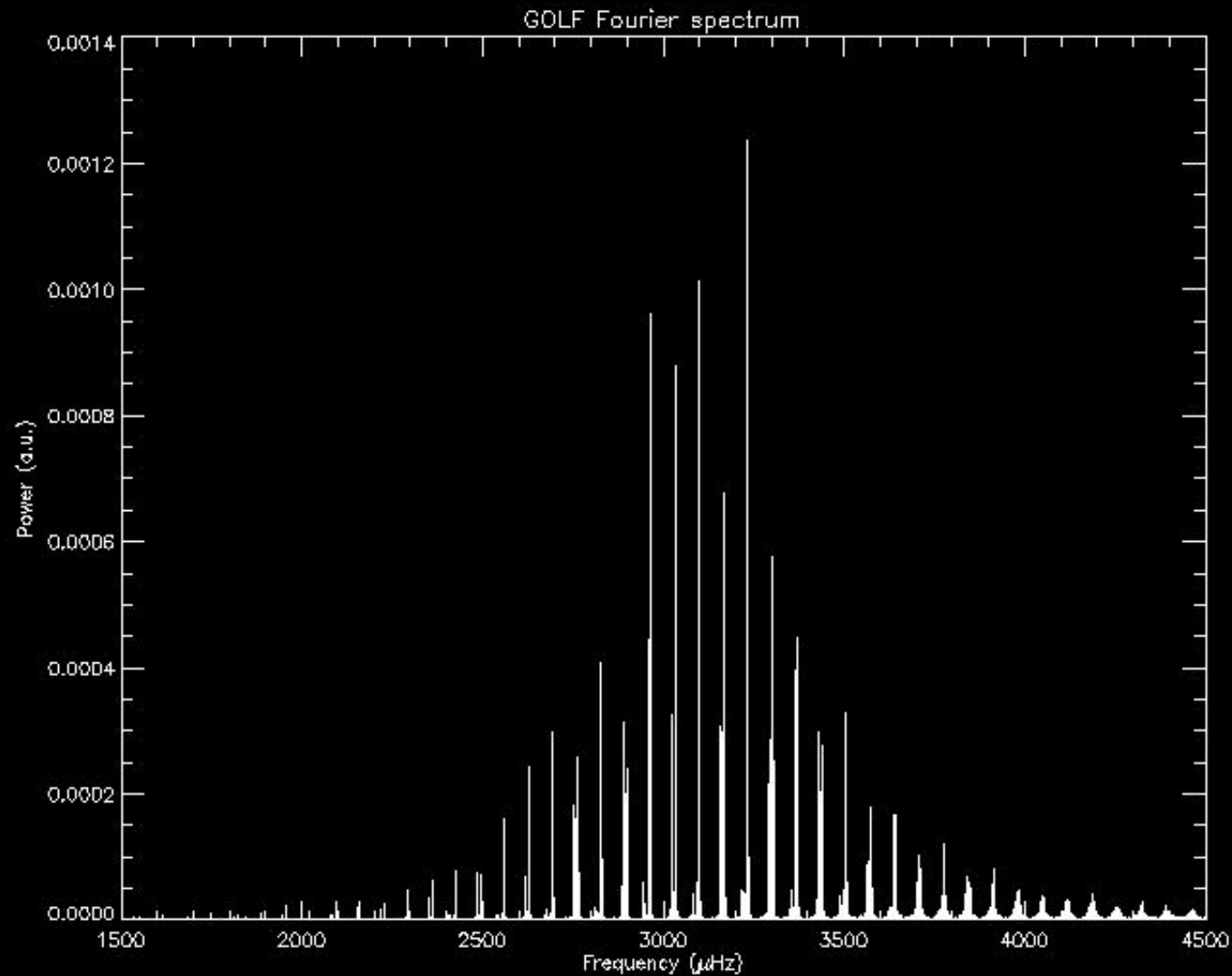


Résultats du pôle Sud

Grec, Fossat, Pomerantz 1983



Le « peigne » de fréquences obtenu par GOLF

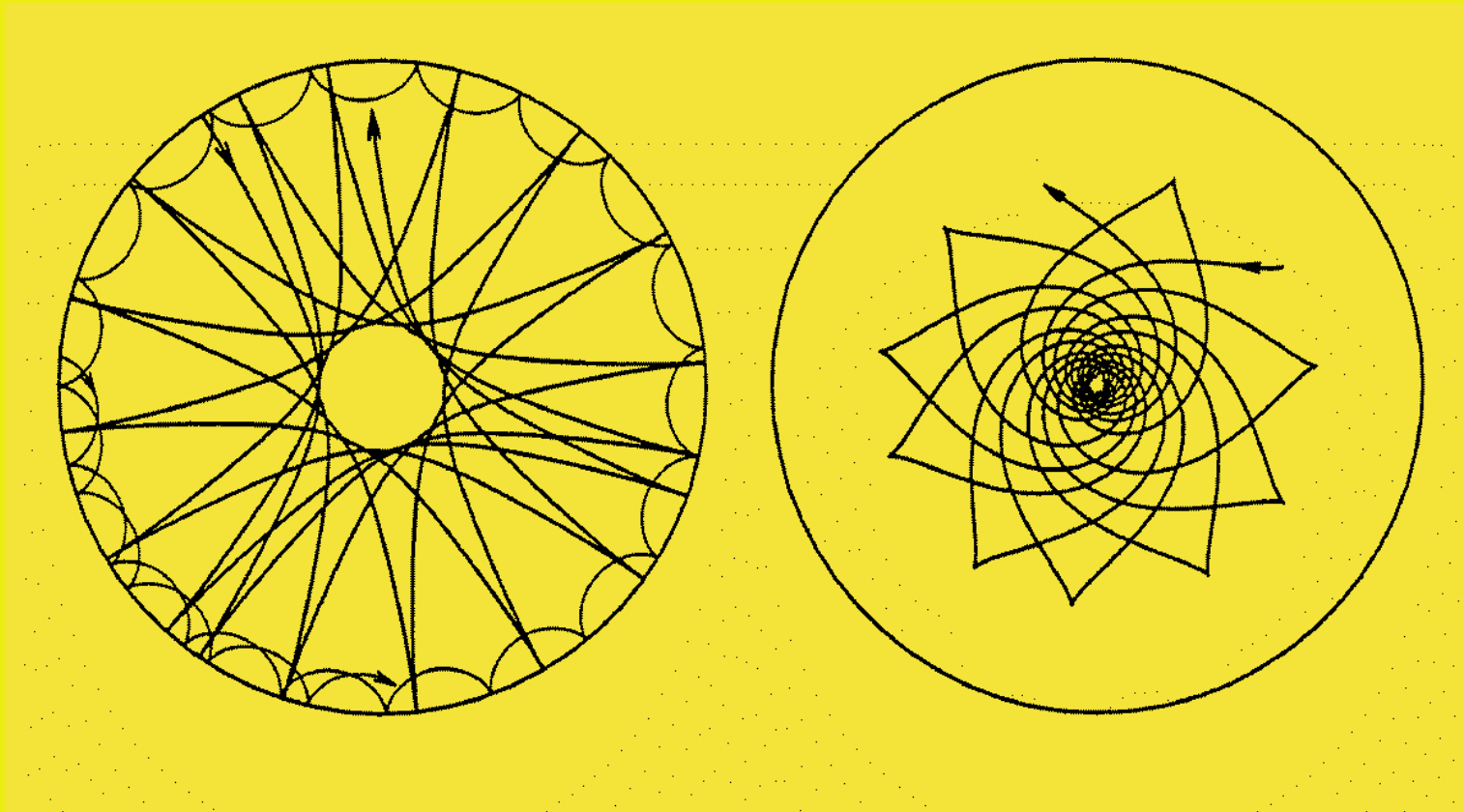


Dans le Soleil : ondes acoustiques, ondes de gravité ?

force de rappel :

compressibilité

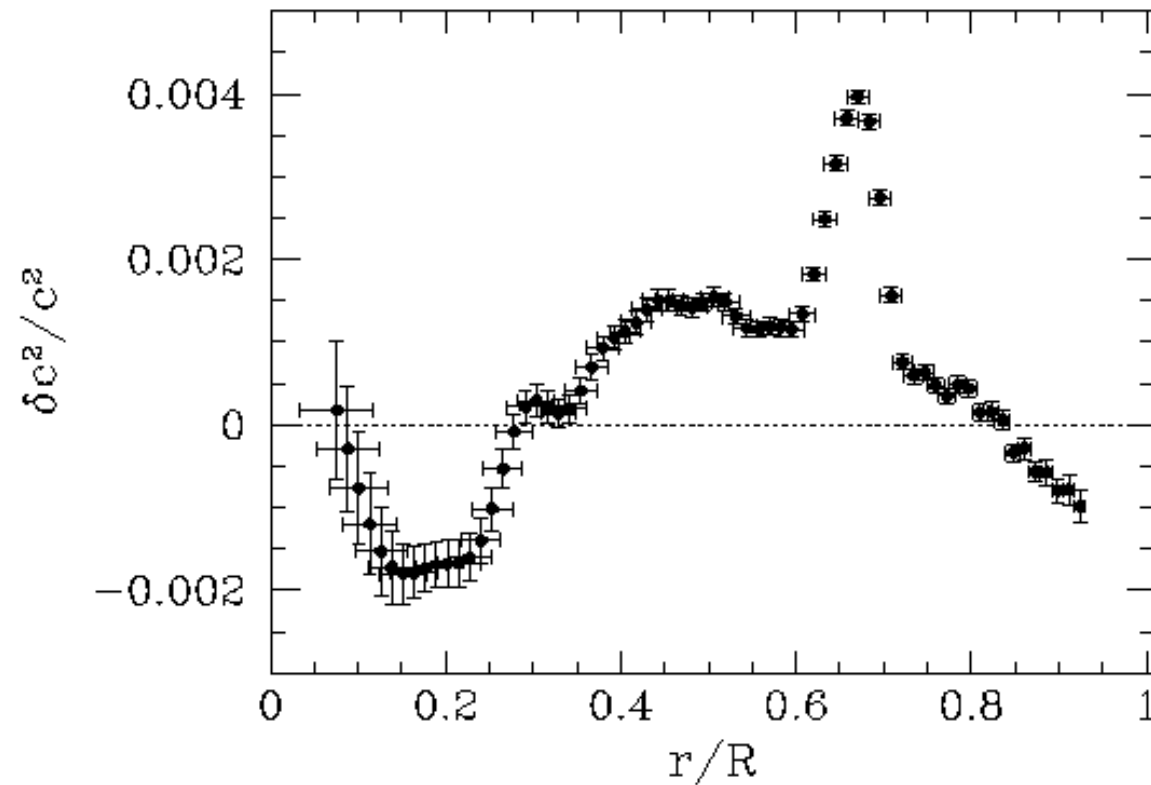
force d'Archimède



Validation des modèles par héliosismologie

vitesse du son
Soleil - modèle

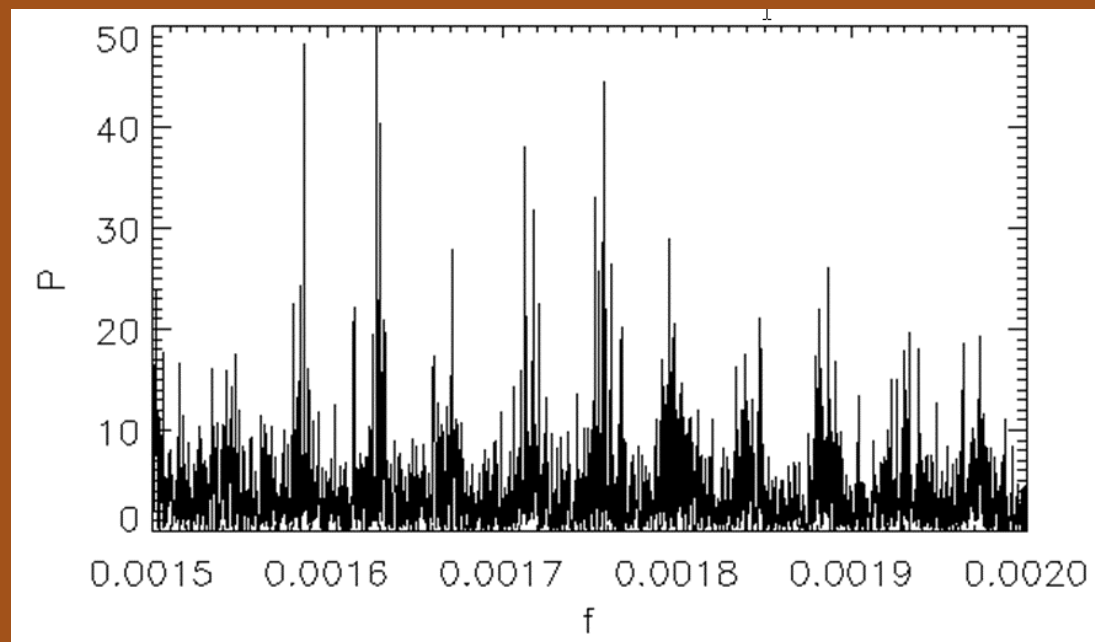
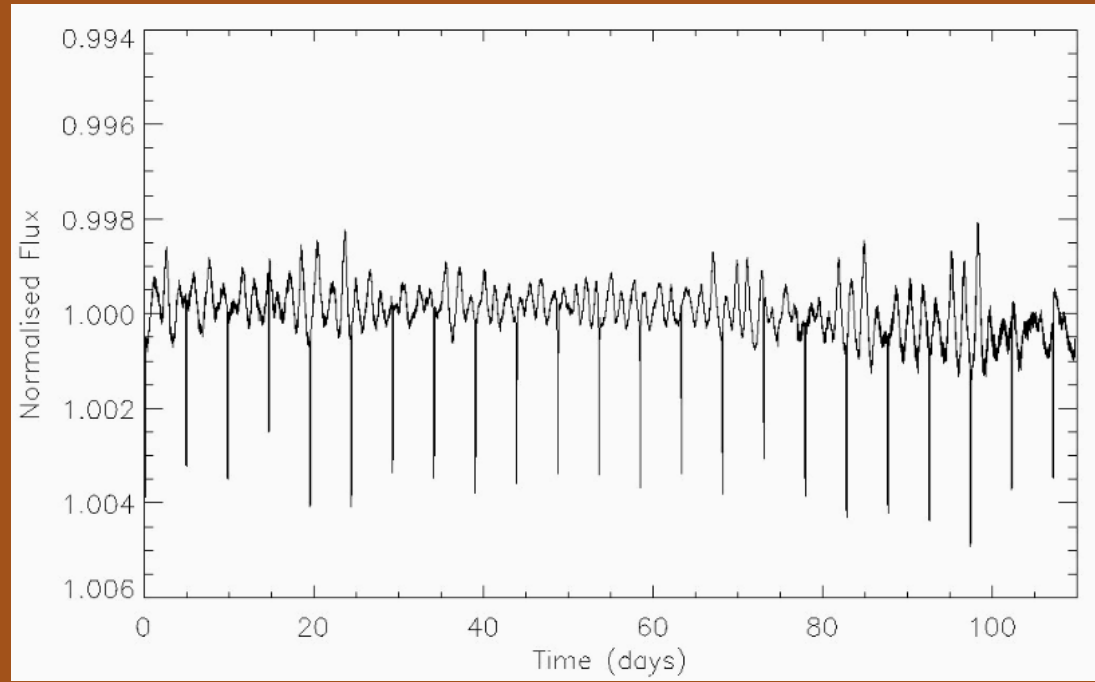
France : rôle pionnier
IRIS, SOHO/GOLF



Et à présent : l'astérosismologie spatiale

Lancement CoRoT 27/12/2006

Convection / Rotation / Transits



Que savons-nous sur l'évolution des étoiles ?

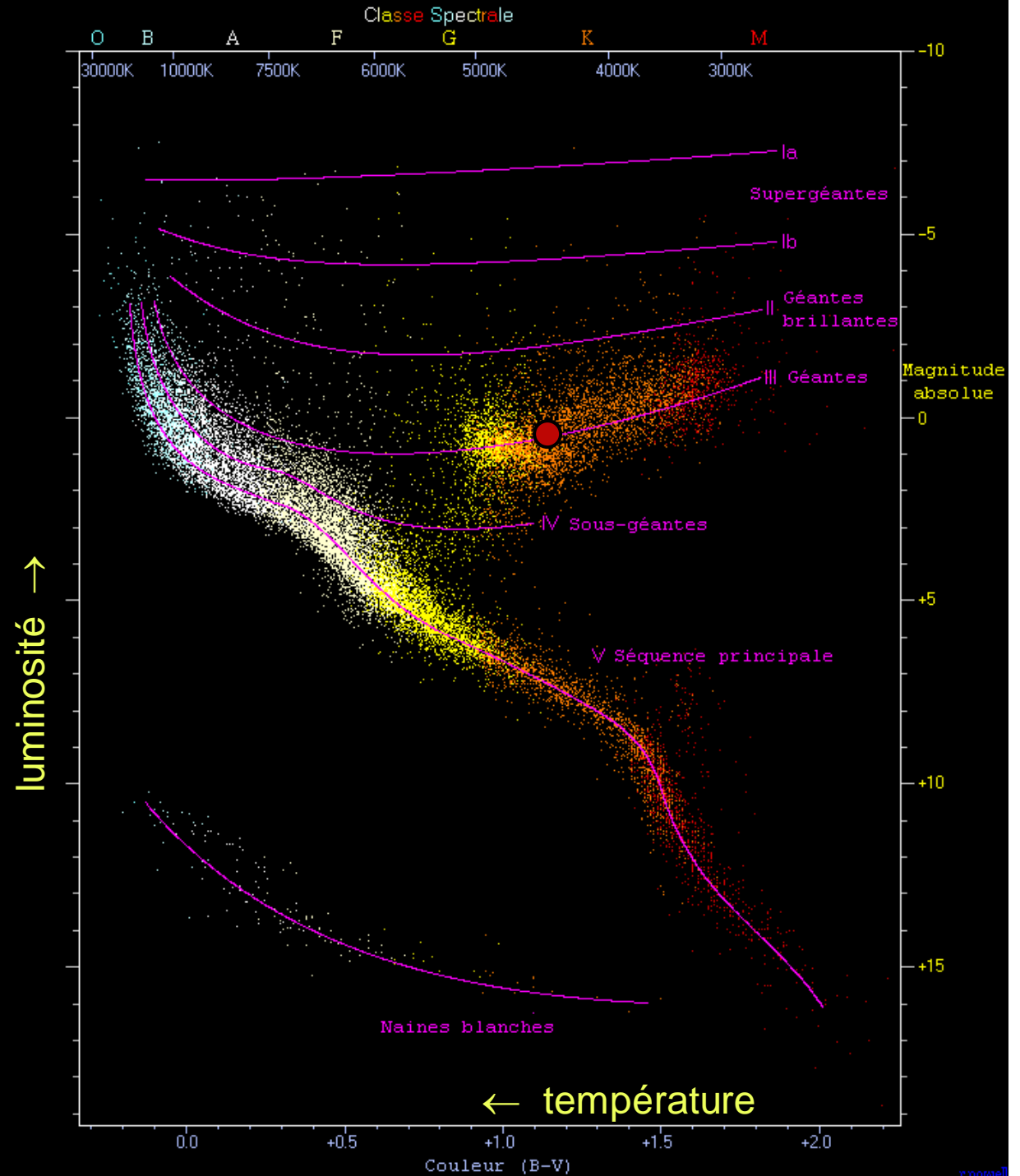
telle qu'elle est décrite par les modèles,

et confirmée par les observations

Exemple : le Soleil

Trajet évolutif dans le diagramme Hertzsprung-Russel

Naissance du Soleil, dans un nuage moléculaire





Orion : une
pouponnière
d'étoiles

HST



Orion : une
pouponnière
d'étoiles

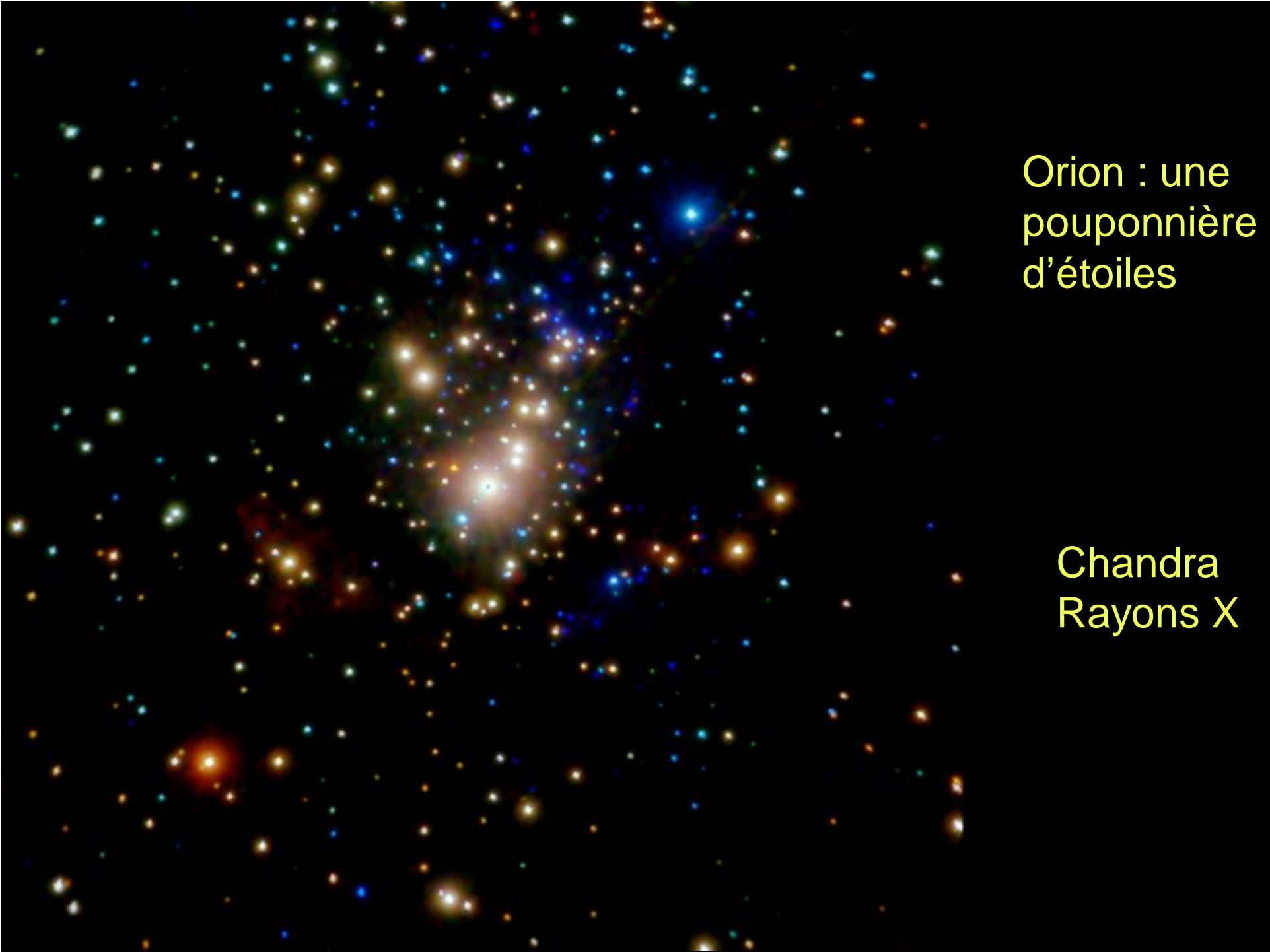
Spitzer
infrarouge



Orion : une
pouponnière
d'étoiles

Spitzer
infrarouge

+ HST
ultraviolet



Orion : une
pouponnière
d'étoiles

Chandra
Rayons X

Étoiles en formation

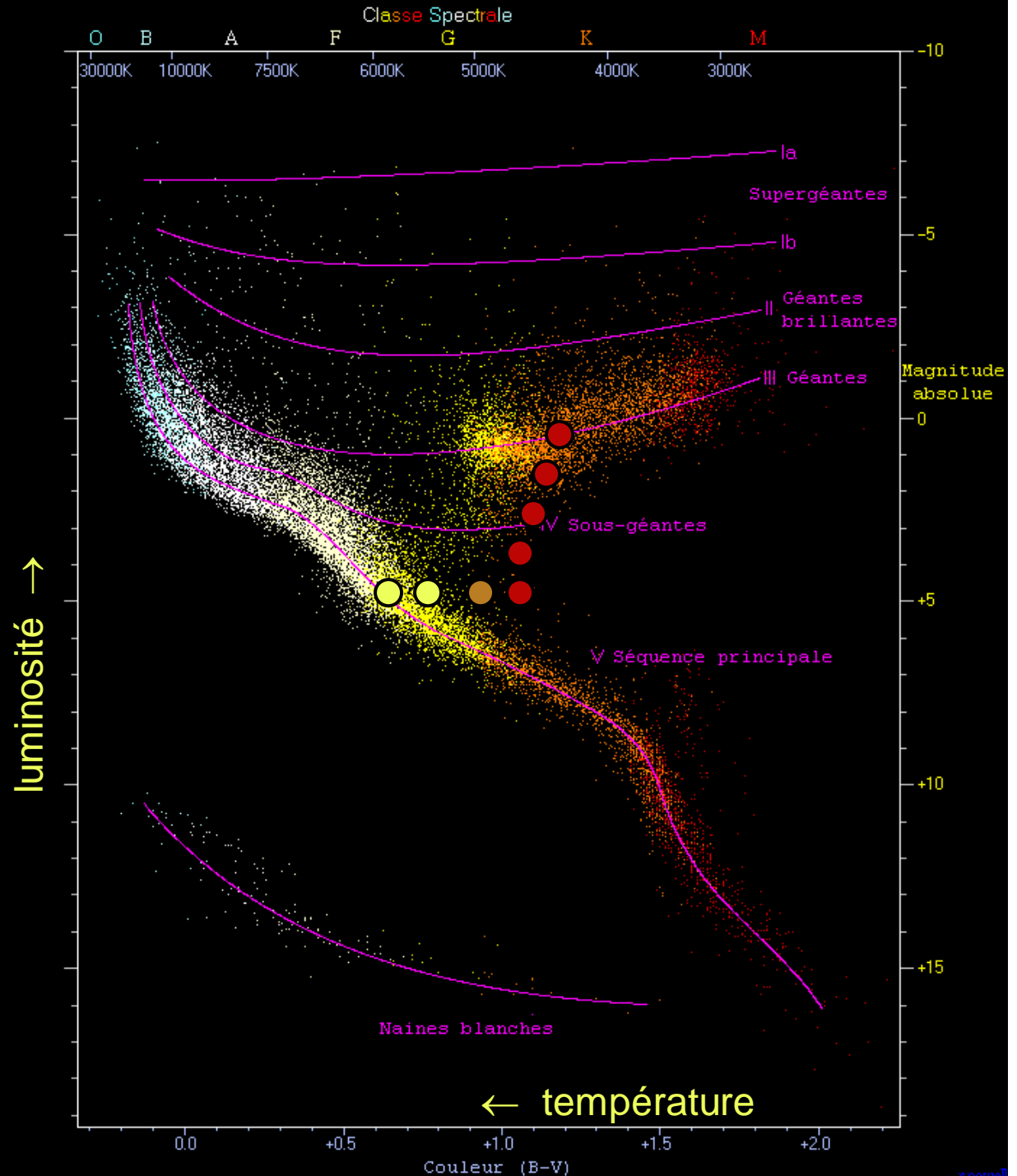


nébuleuse d'Orion (HST)

Trajet évolutif dans le diagramme Hertzsprung-Russel

$t = 30 \cdot 10^6$ années

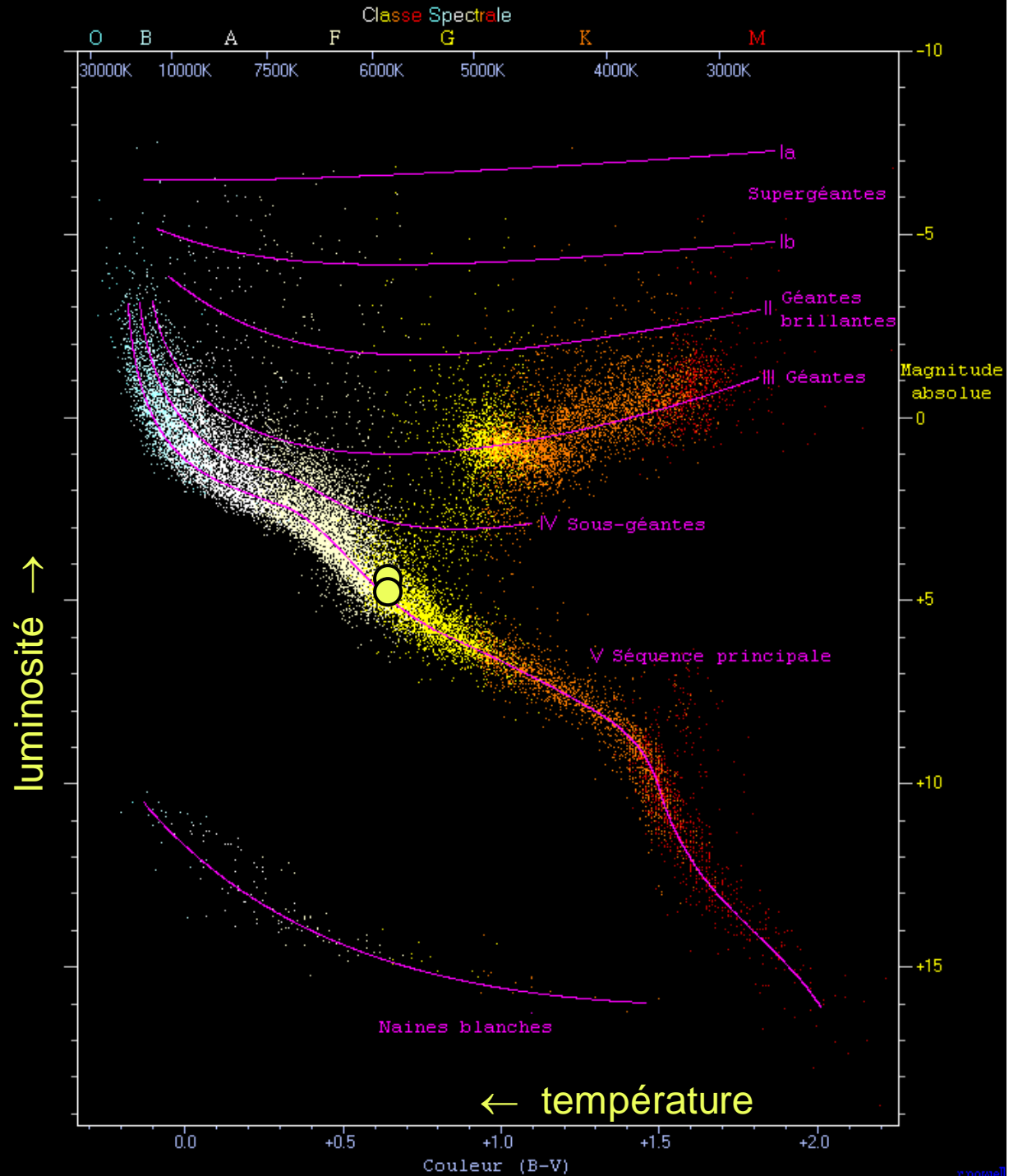
le Soleil s'est contracté,
sa température interne augmente,
la combustion de l'hydrogène commence



Trajet évolutif dans le diagramme Hertzsprung-Russel

$t = 4.56 \cdot 10^9$ années

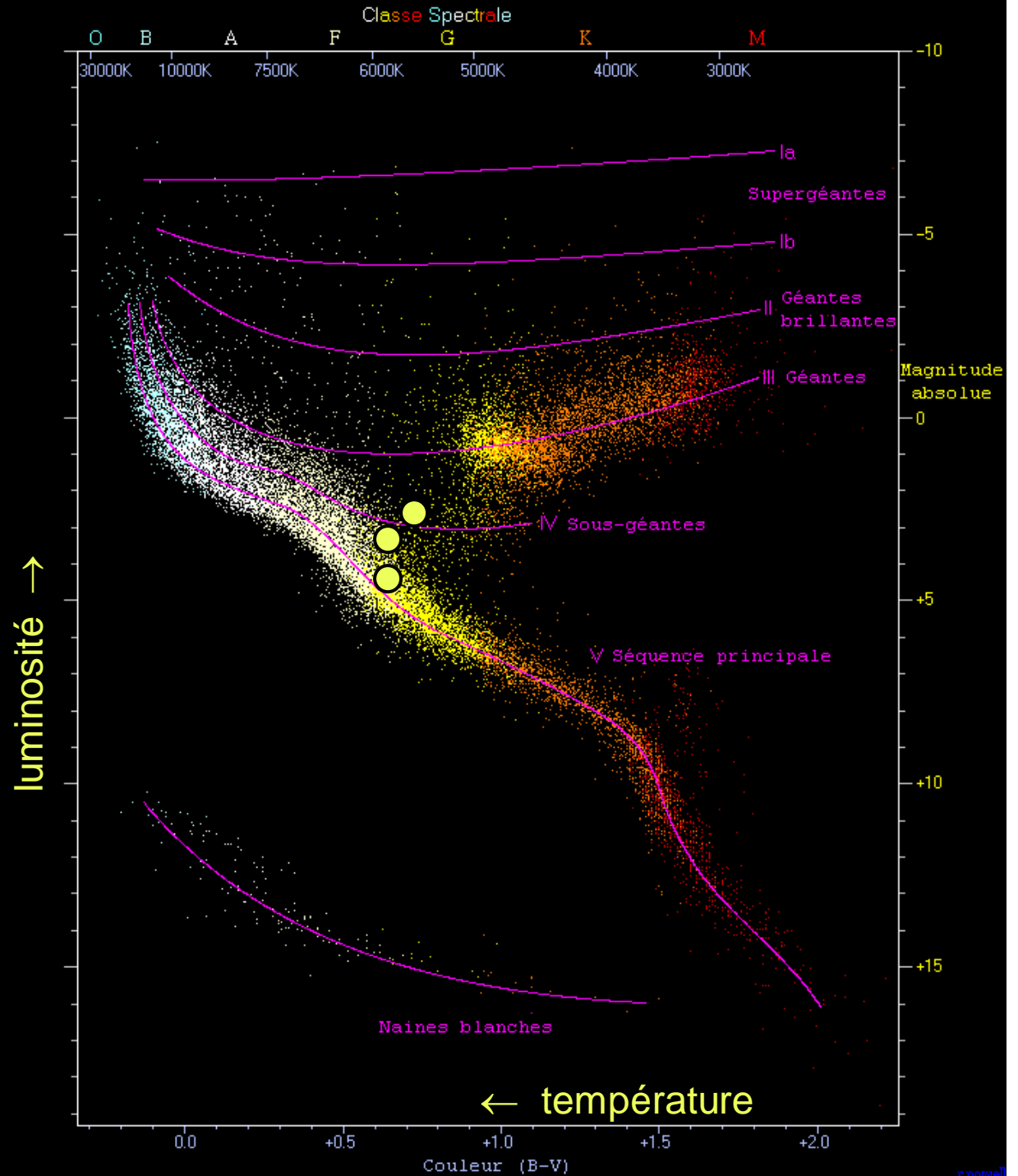
Soleil actuel,
combustion de
l'hydrogène



Trajet évolutif dans le diagramme Hertzsprung-Russel

$t \sim 9-10 \cdot 10^9$ années

l'hydrogène est épuisé au centre, le Soleil se dilate

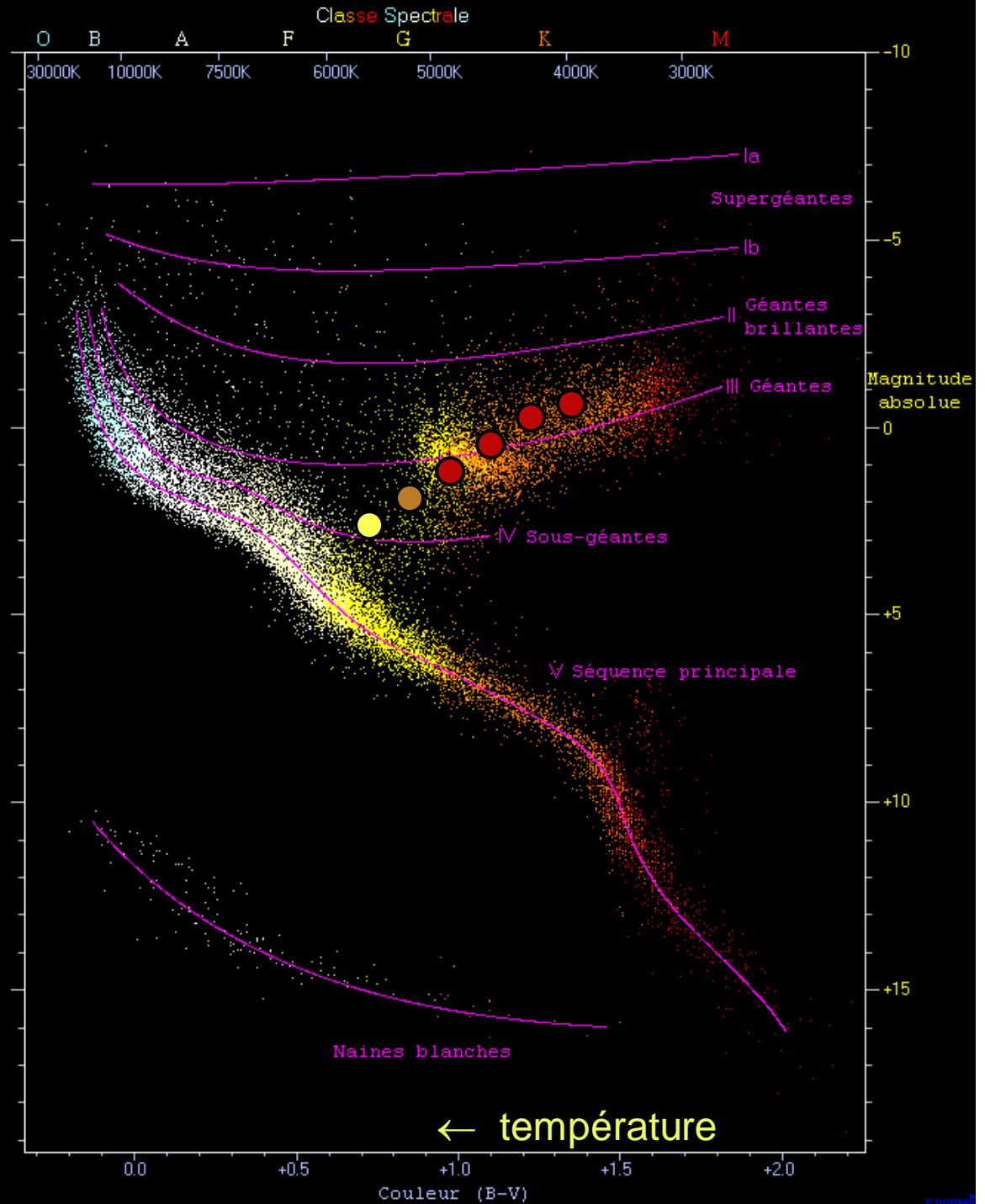


Trajet évolutif dans le diagramme Hertzsprung-Russel

environ 10^9 années après

le Soleil devient géante rouge, il perd de la matière, il brûle l'hélium

luminosité →



Combustion de l'hélium

la réaction triple alpha



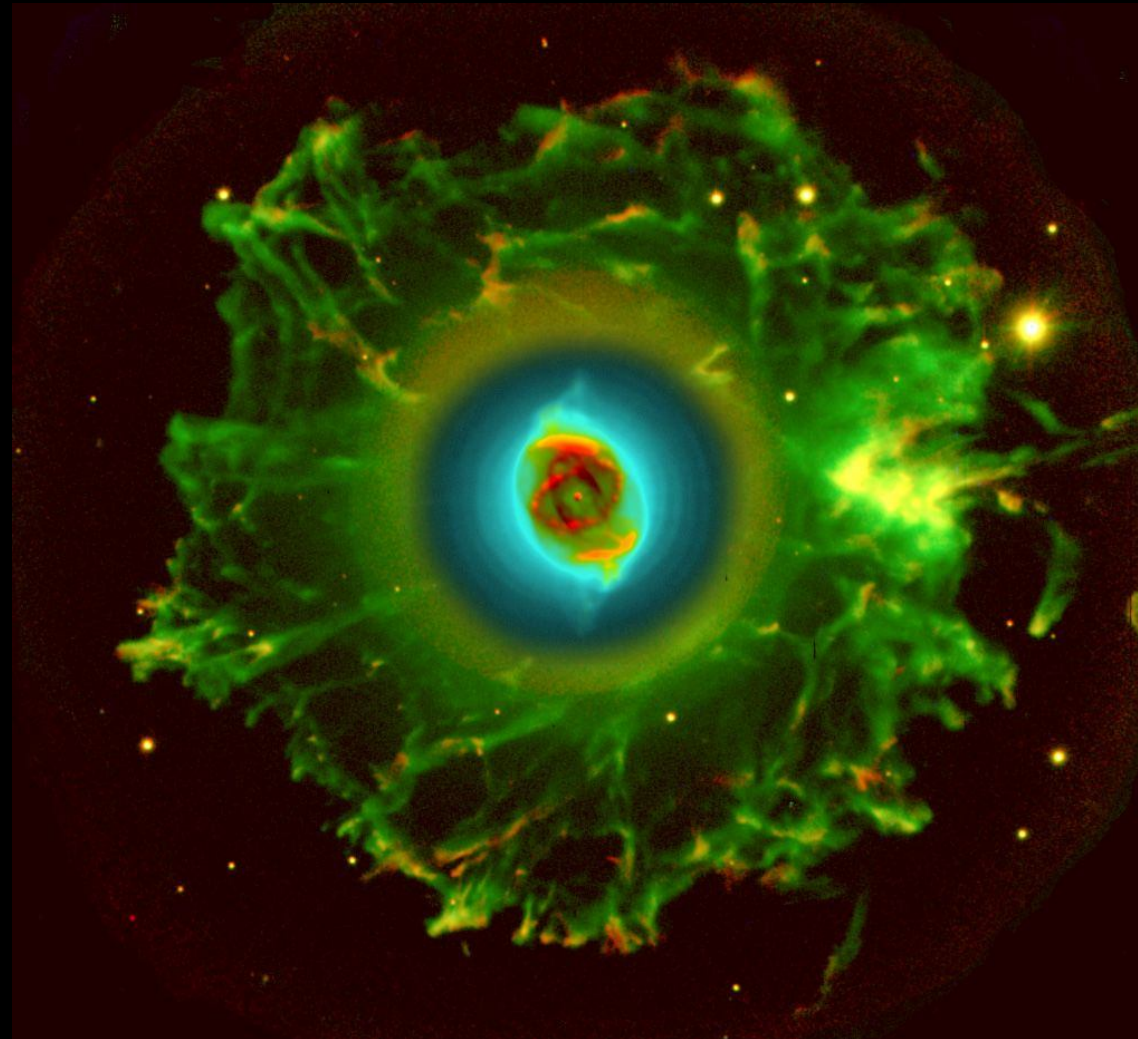
E. Salpeter

... sans laquelle nous n'existerions pas

car le Big Bang ne produit que H, D, He, Li



Perte de masse par vent stellaire :
les éjecta forment une nébuleuse planétaire



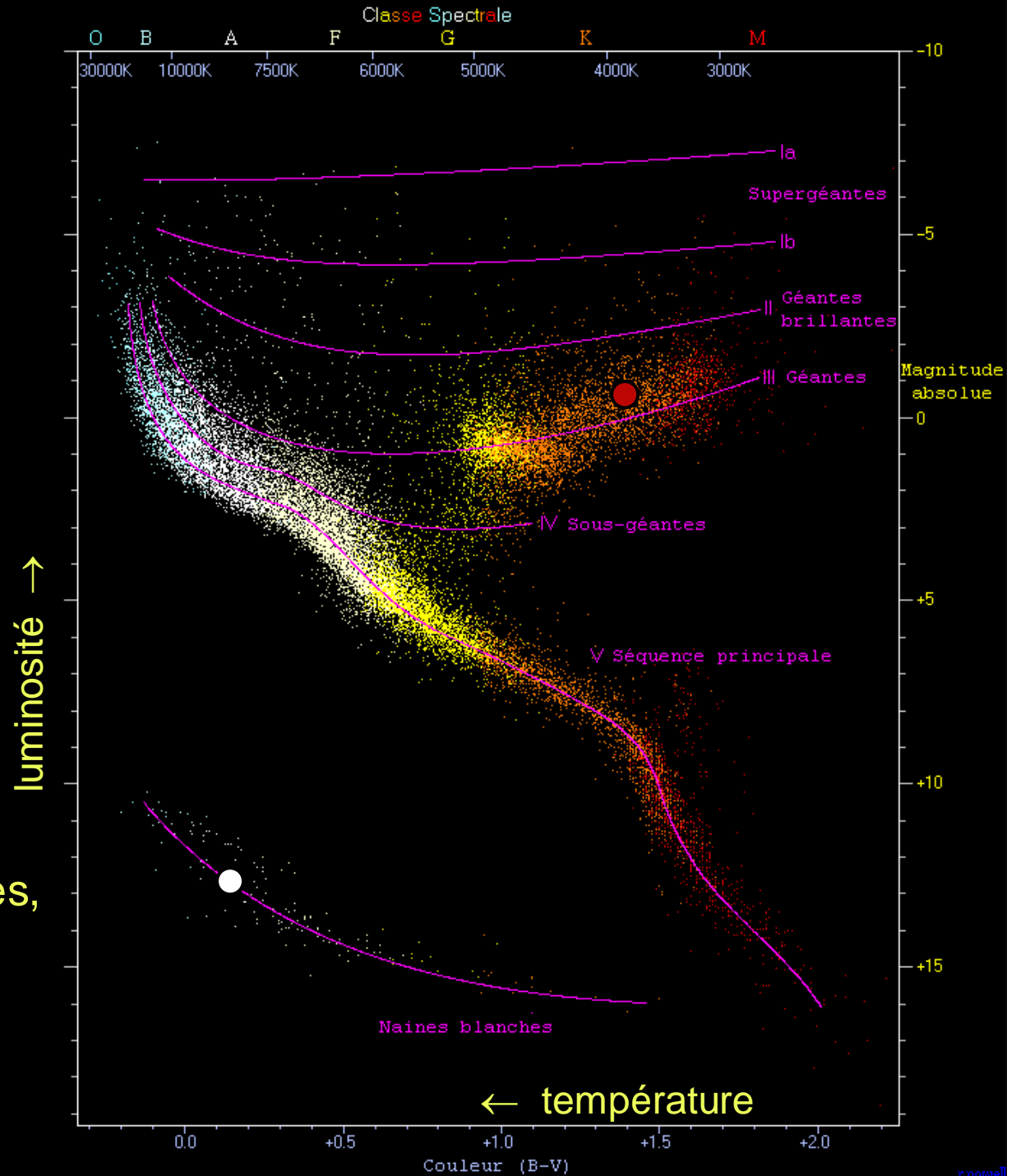
NGC 6543
oeil de chat

HST

Trajet évolutif dans le diagramme Hertzsprung-Russel

le Soleil a perdu son enveloppe,
les combustibles sont épuisés,
il ne subsiste que le cœur
(C,O)

→ naine blanche



le compagnon de Sirius est une naine blanche



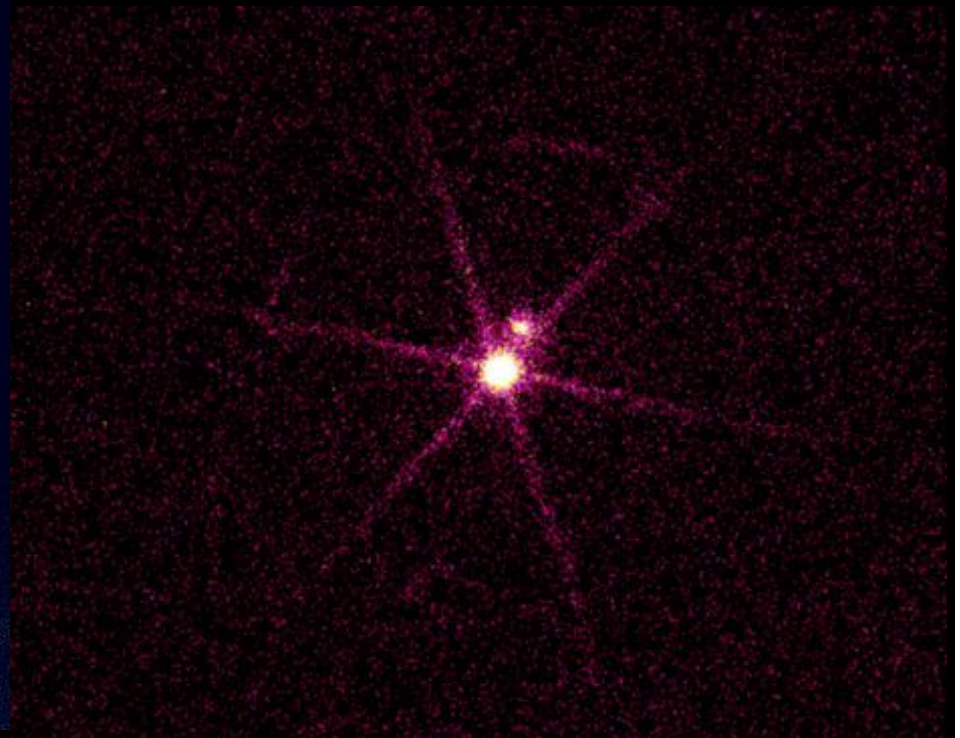
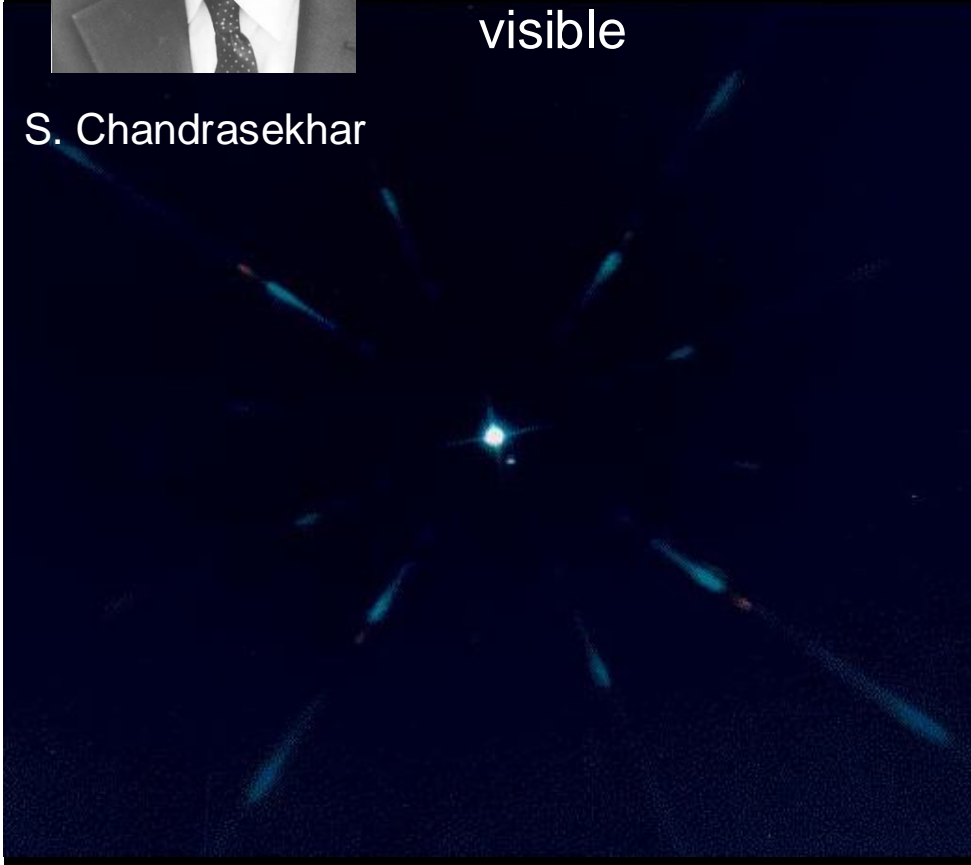
S. Chandrasekhar

densité : 1 million de fois celle du Soleil
composition : C et O

→ gaz d'électrons dégénérés

visible

X Chandra



Evolution d'une étoile massive

nettement plus rapide

étoile de $10 M_{\odot}$ comparée au Soleil

- 10 fois plus de combustible
- 10.000 fois plus lumineuse
- durée de vie 1.000 fois plus courte

fin beaucoup plus brutale

Evolution d'une étoile massive

Les réactions se poursuivent au-delà de C et O



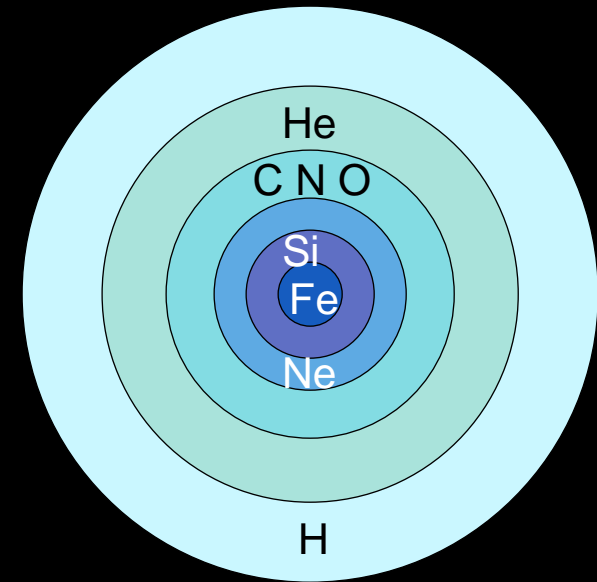
lorsque le combustible nucléaire est épuisé
le cœur implose, se neutronise



l'enveloppe explose → supernova

→ il reste une étoile à neutron (pulsar)

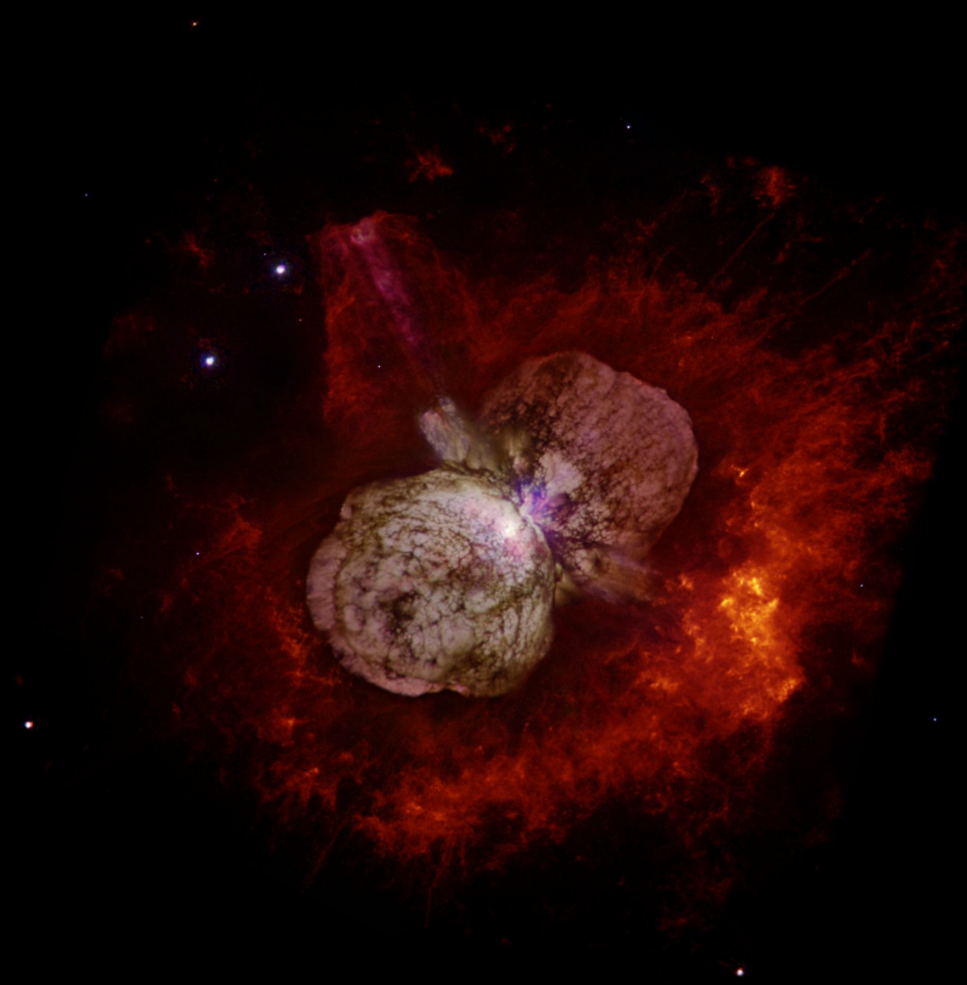
ou un trou noir



Une étoile massive prête à exploser

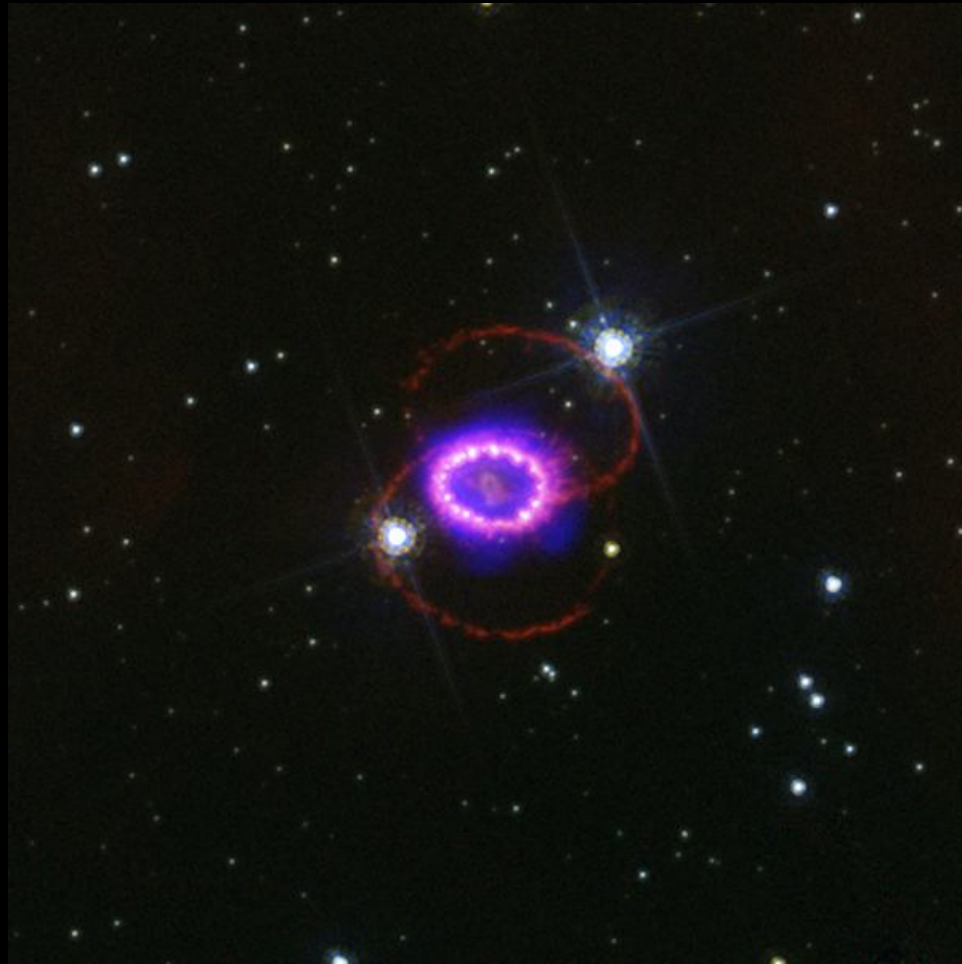
Eta Carinae
étoile double
~ 100 M_☉

HST



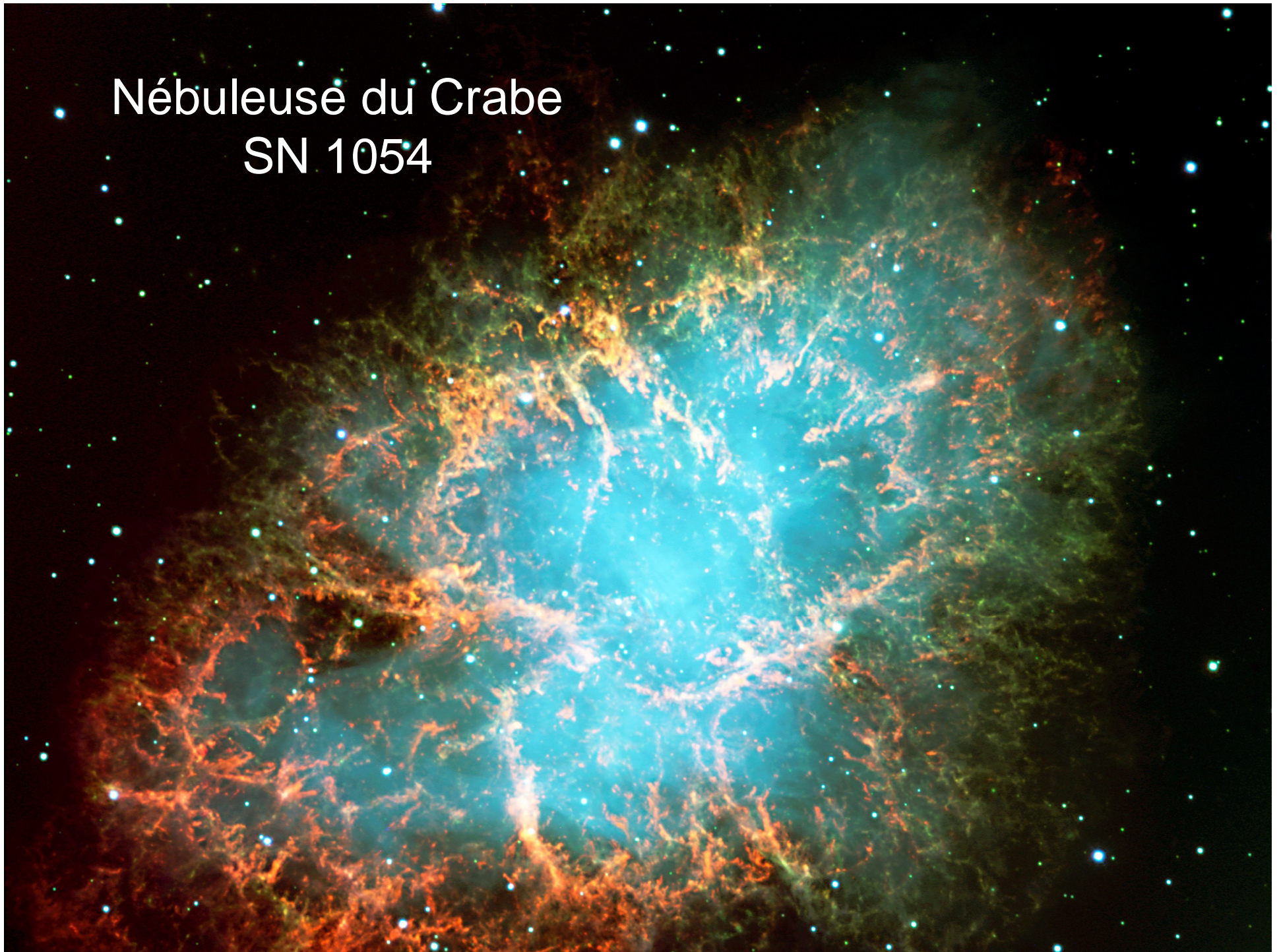
Restes de la supernova SN 1987A

dont quelques neutrinos ont été
captés par Kamiokande



HST +
Chandra

Nébuleuse du Crabe
SN 1054



Reste de supernova :
le pulsar du Crabe

X Chandra

HST

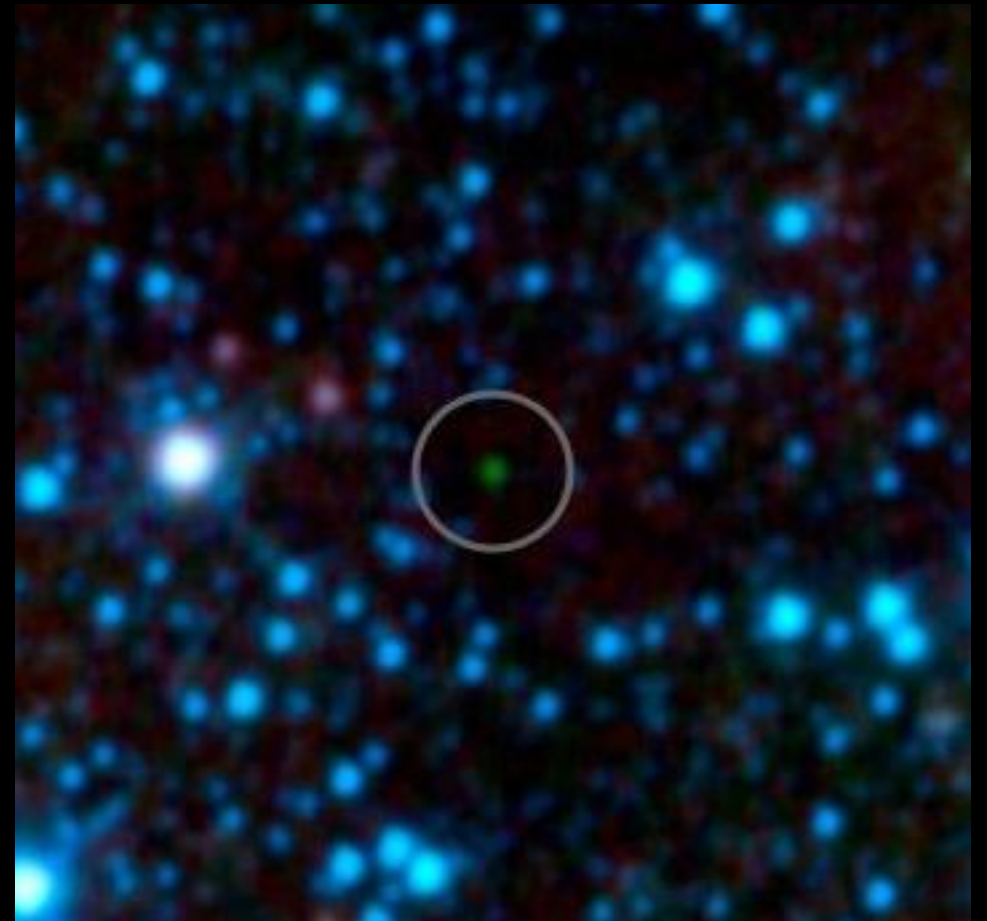
Le cas des étoiles de très faible masse

$$M < 0,08 M_{\odot}$$

La température centrale
reste trop faible
pour que s'amorce
la fusion de l'hydrogène

→ naine brune

Wise



Percées majeures du 20e siècle

- La multitude des galaxies
- Expansion de l'Univers
- Source d'énergie des étoiles et leur évolution
- Diversité des étoiles et diagramme HR
- Composition des étoiles
- Objets exotiques (quasars/AGN)
- Rayonnement cosmologique
- Matière noire
- Exoplanètes
- Sondage du Soleil par neutrinos / héliosismologie

La physique stellaire est le socle
sur lequel s'est bâtie l'astrophysique toute entière

L. Woltjer

