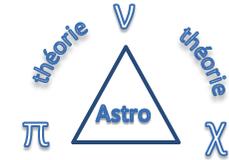
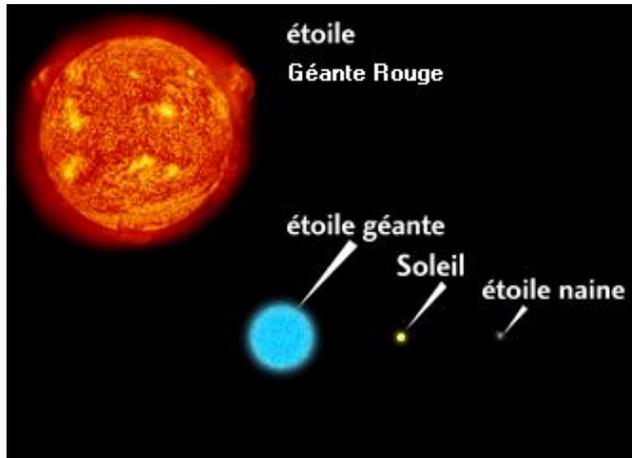


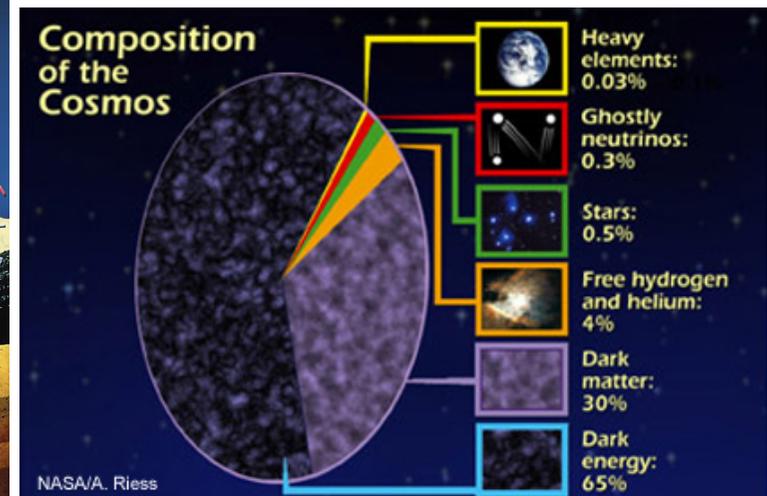
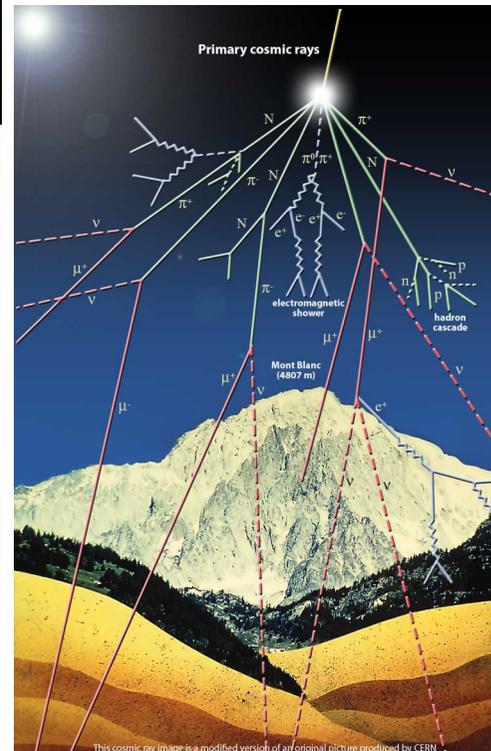
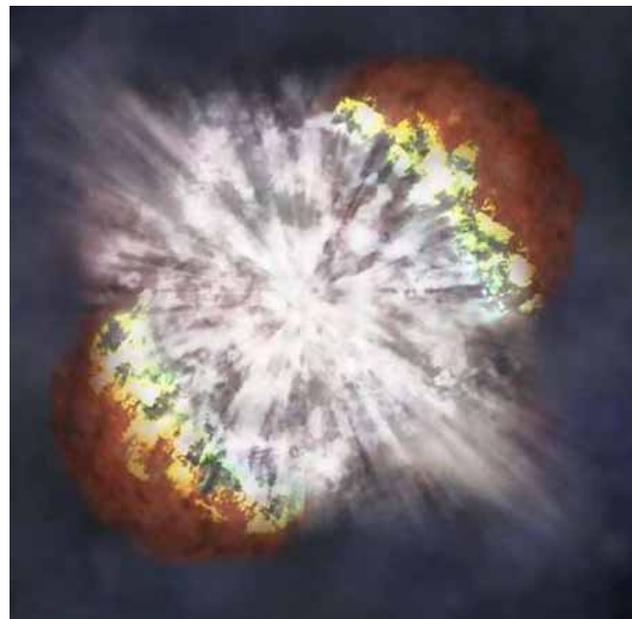
# Des particules au cosmos



*Pierre Brun (CEA-IRFU Saclay) & Jérôme Margueron (CNRS-IPN Orsay)*



**Cours 1 : Astrophysique nucléaire**  
**Cours 2 : Rayons cosmiques**  
**Cours 3 : Matière noire**



Jérôme Margueron (CNRS-IPN Orsay)

jerome.margueron@ipno.in2p3.fr

## Une histoire d'astrophysique nucléaire en 3 dates :

1957

- Geoffrey Burbridge, Margaret Burbridge, William Fowler, Fred Hoyle (B<sup>2</sup>FH)
- La source d'énergie des étoiles
- Hans Bethe Prix Nobel 1967



20/07/11

1967

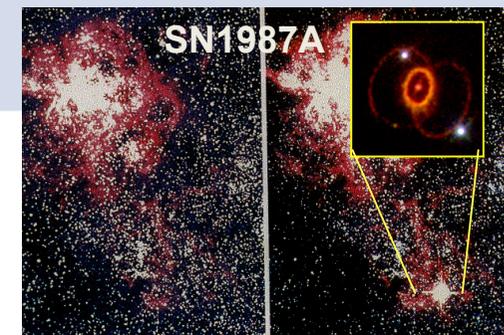
- Jocelyne Bell & Anthony Hewish
- La découverte des pulsars
- Prix Nobel 1974



Des particules au cosmos

1987

- SN 1987 A
- Observation de neutrinos à Kamiokande, Japon
- Prix Nobel 2002



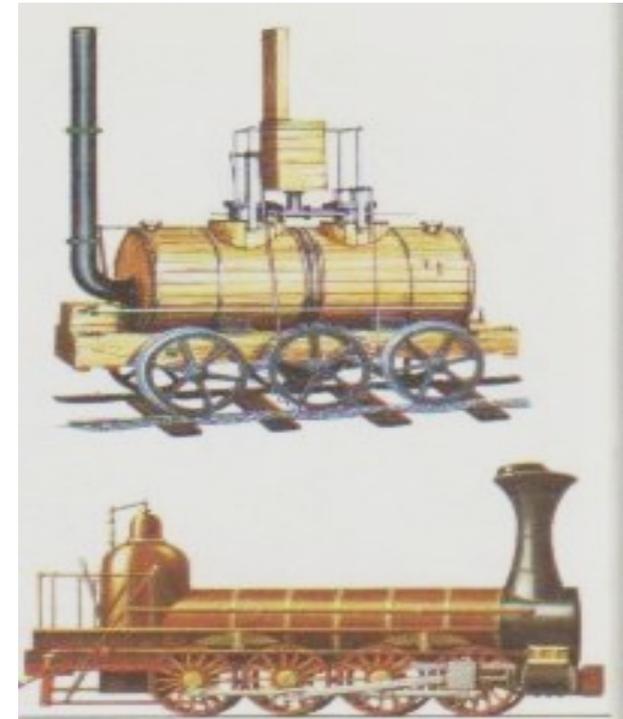
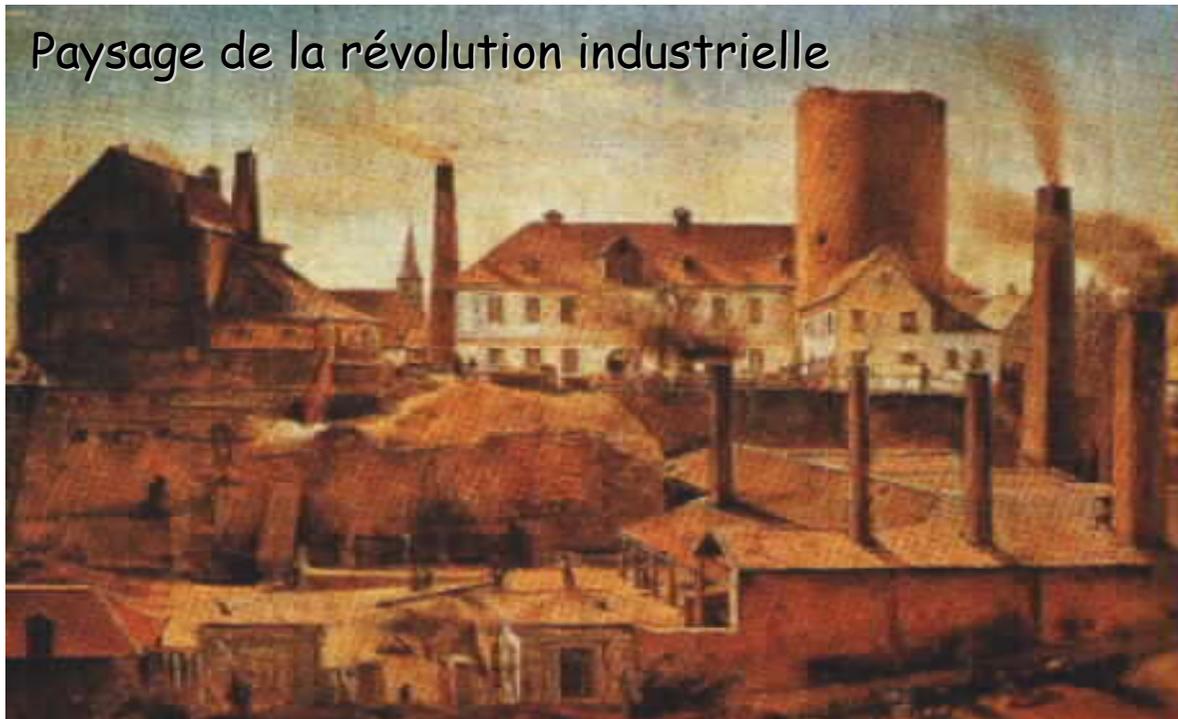
2

# 1957 : La source d'énergie des étoiles

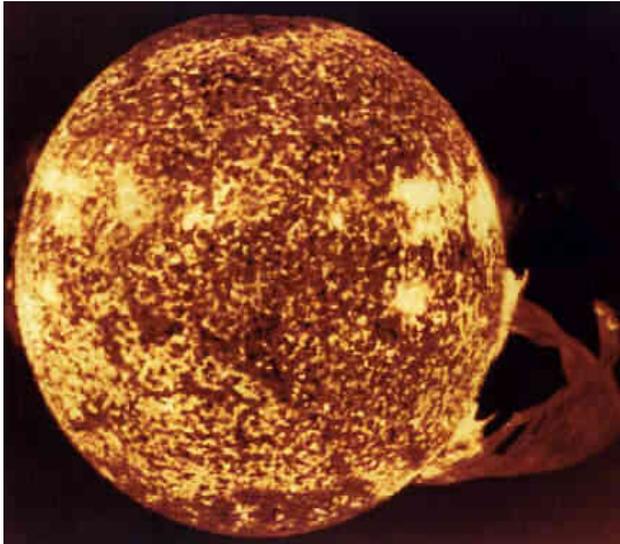
# Avant la découverte du noyau de l'atome



Comment produit-on de l'énergie jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle ?



Savait-on comment le soleil brillait ?



Camille Flammarion à propos du soleil (Astronomie populaire, 1880) :

Il n'est pas impossible d'exprimer cette merveilleuse puissance, mais on peut avouer sans honte qu'il est **impossible de la comprendre**.  
La chaleur émise par le soleil à **chaque seconde** est égale à celle qui résulterait de la combustion de  **$10^{24}$  tonnes de charbon** de terre brûlant ensemble.

Masse du soleil = environ  $10^{27}$  tonnes.

S'il était constitué de charbon, le soleil se consumerait en 15 minutes !!

# Réactions nucléaires dans le Soleil



**1919:** Jean Perrin puis Arthur Eddington suggèrent que les étoiles produisent leur énergie par fusion d'H et He.

**1928:** George Gamow montre que la mécanique quantique permet des réactions sous la barrière Coulombienne, ce qui facilite la fusion.

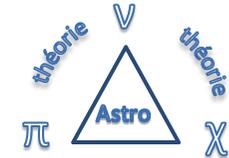
**1939:** Hans Bethe et Carl von Weizsäcker analysent deux sources possibles d'énergie pour les étoiles : chaîne proton-proton et cycle CNO.

Hans Bethe à Rose Ewald, sa future femme (1937) devant un coucher de soleil Californien : ...

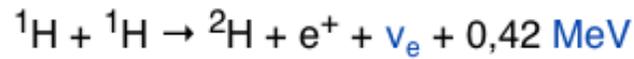
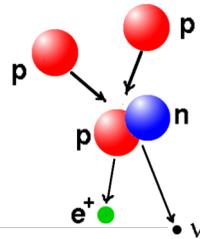


# Chaîne proton-proton

Bethe, Phys. Rev. 55 (1939)



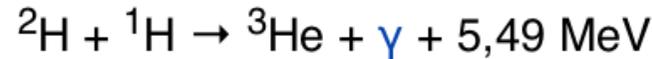
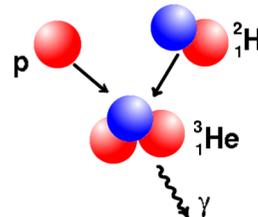
## Etape 1 : deuteron



Répulsion électrostatique  
Interaction faible  
→  $10^{10}$  années



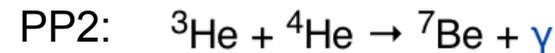
## Etape 2 : ${}^3\text{He}$



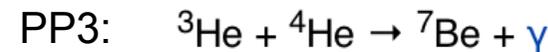
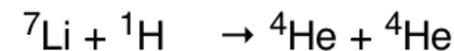
## Etape 3 : ${}^4\text{He}$



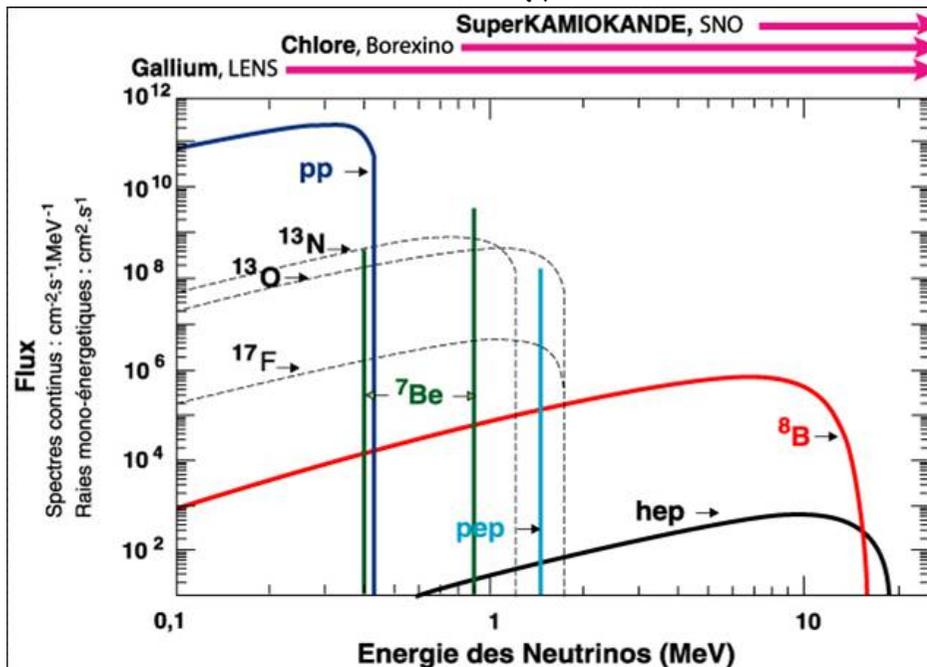
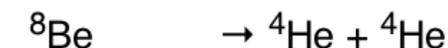
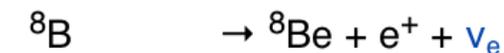
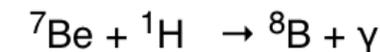
*10-14 million K*



*14-23 million K*



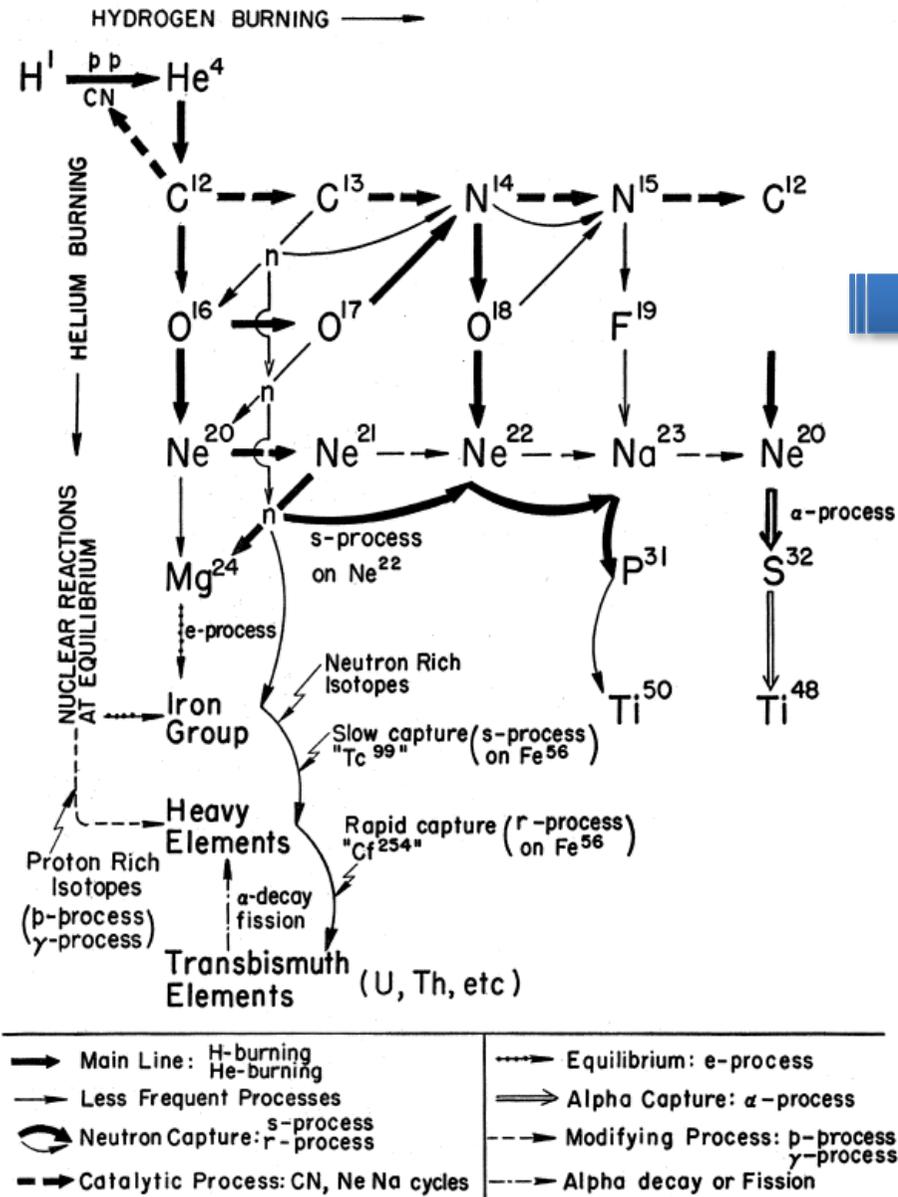
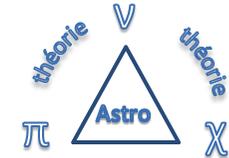
*>23 million K*



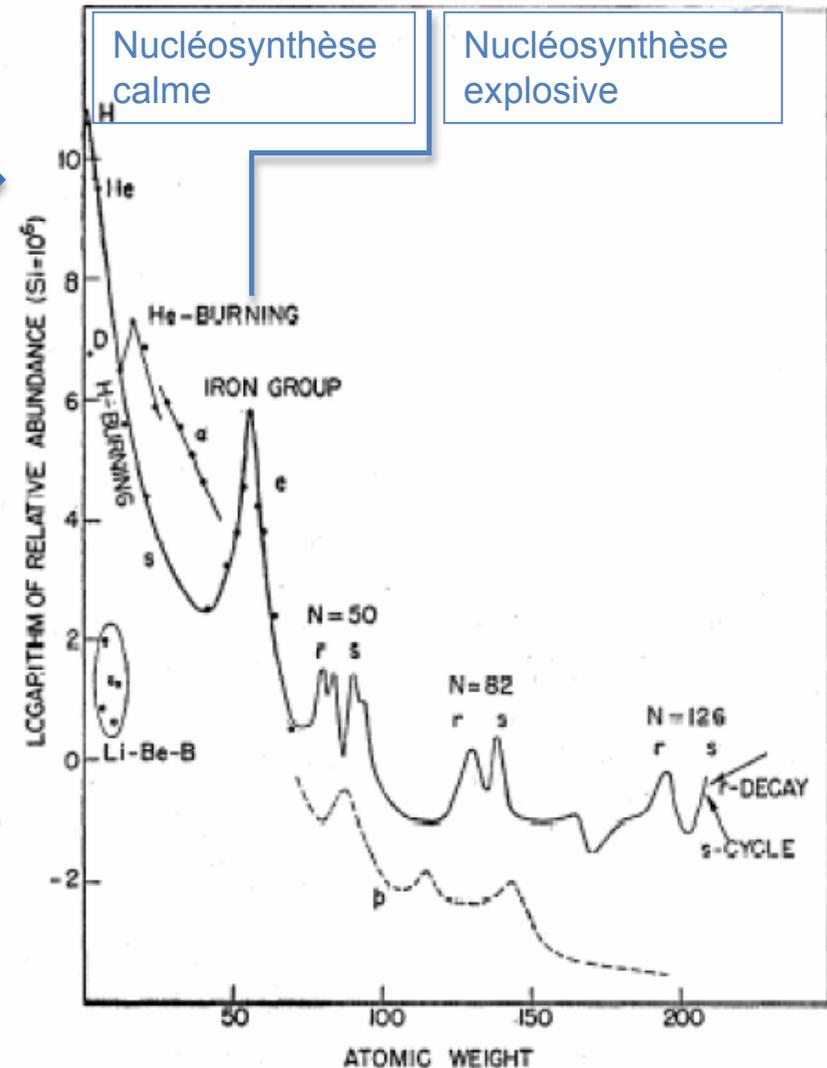


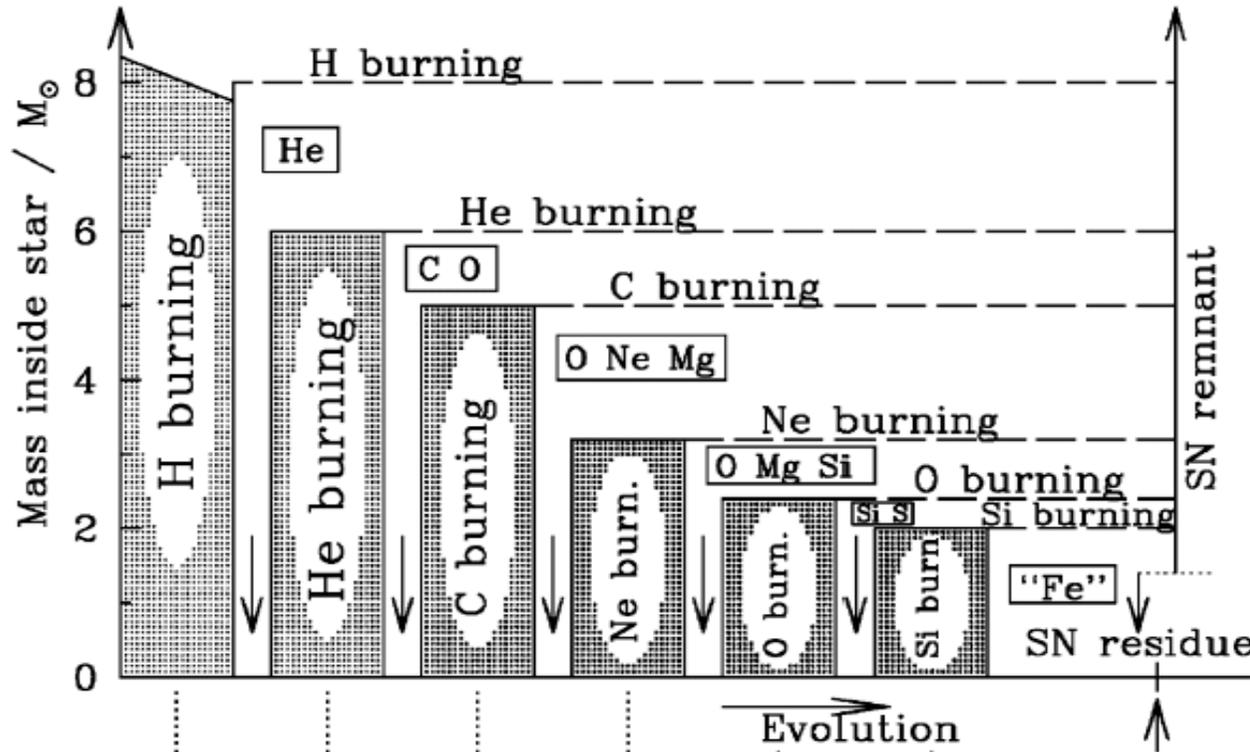
# 1957 : la percée théorique

B<sup>2</sup>FH, Review of Modern Physics (1957)



## Abondance des éléments

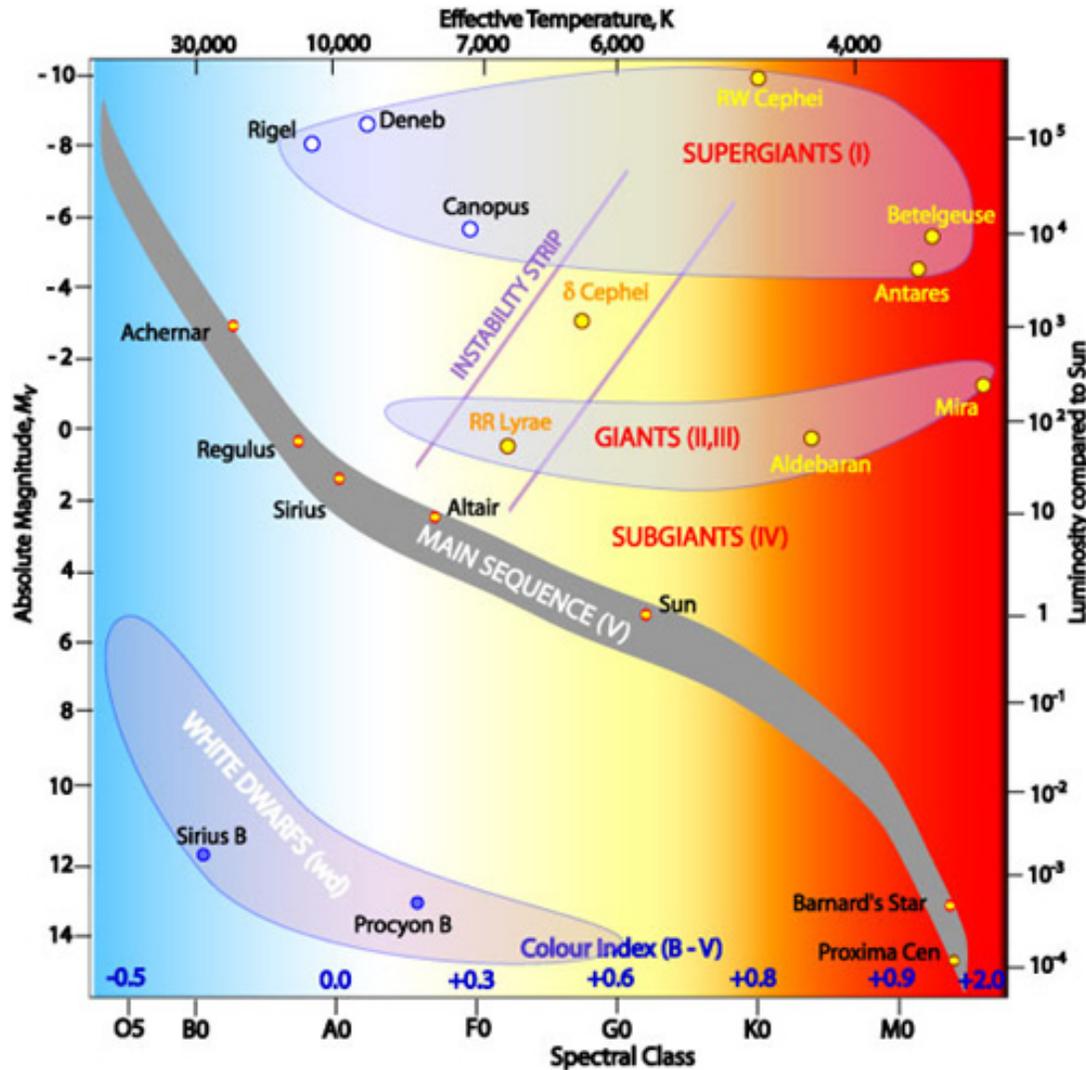




$T_c$ (K)	$4 \times 10^7$	$2 \times 10^8$	$8 \times 10^8$	$1.6 \times 10^9$	$2.1 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	4	760	$10^5$	$3.9 \times 10^6$	$3.6 \times 10^6$	$3 \times 10^7$
Time-scale	$7 \times 10^6$ y	$8 \times 10^5$ y	500 y	0.9 y	0.4 y	1 d



# Diagramme de Hertzsprung-Russel (1911)



**Main-sequence** : H burning stars.

It operates at core temperature  $\sim 10^7$  K

Most of the stars are at the main-sequence.

## H burning time scales with the mass

$1 M_{\odot} \rightarrow 10$  Gyr

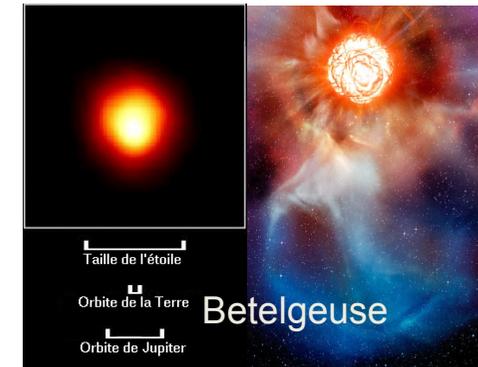
$5 M_{\odot} \rightarrow 80$  Myr

$15 M_{\odot} \rightarrow 7$  Myr

**Red Giants**: He burning stars.



**Supergiants**:  
CNO burning stars.



# 1967 : La découverte des pulsars

# 1967 : La découverte des pulsars



## *Un bel exemple de découverte scientifique !*

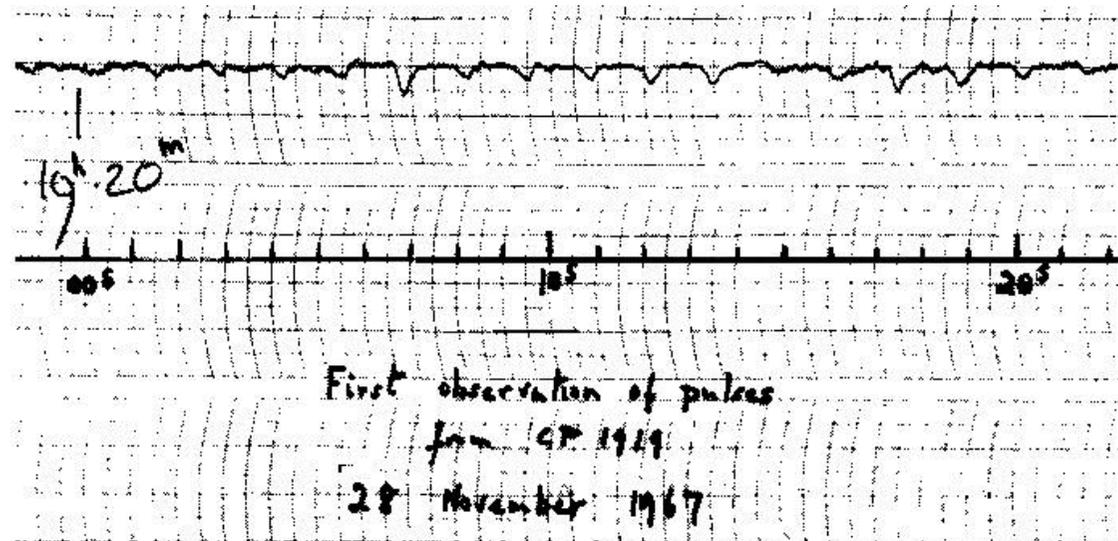
J. Bell étudiait la scintillation du signal radio extragalactique à la traversée du plasma interstellaire (sujet de thèse). De nombreuses interférences étaient usuellement supprimées par une moyenne temporelle des données. Pour étudier la scintillation, elle a donc analysé les données brutes.

Jocelyne Bell avait remarqué qu'un signal pulsé revenait chaque jour solaire avec 4 minutes de décalage, donc revenait chaque jour sidéral, donc provenait d'une source extrasolaire. Le pulse ne provenait donc pas d'interférences terrestres.

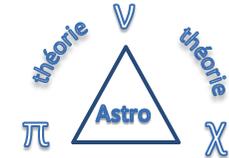
La découverte de J. Bell résulte donc d'une observation **fortuite** dans l'analyse détaillée des données et surtout de son interprétation **intelligente**.



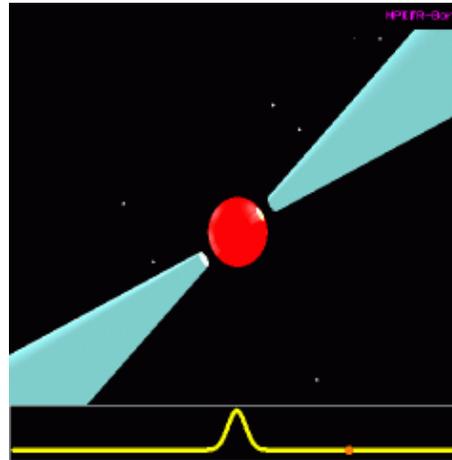
Jocelyne Bell & Anthony Hewish



# Pourquoi ces étoiles pulsent ?

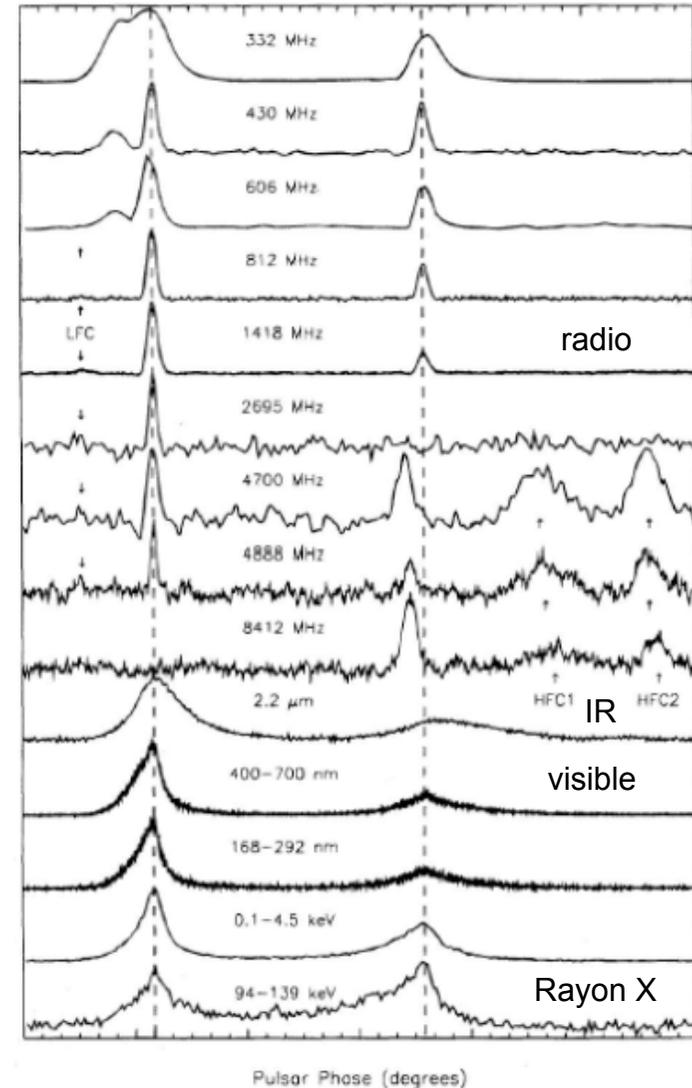
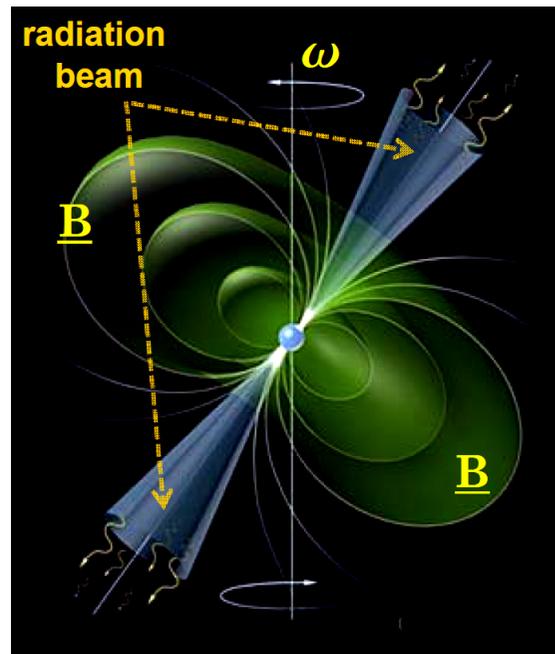


Elles émettent un signal radio focalisé qui est observé chaque fois qu'il est dirigé vers la Terre.

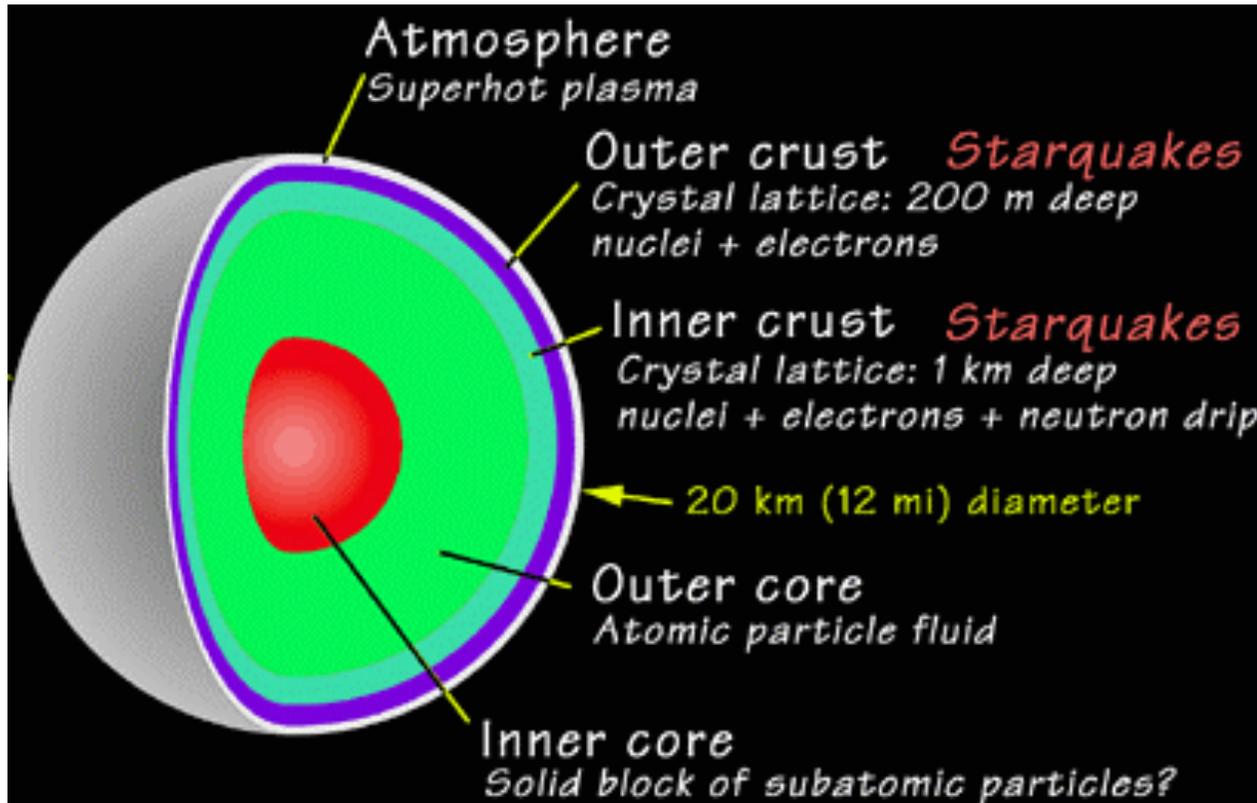
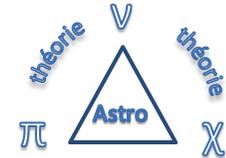


Le pulse est observé sur une large gamme de fréquences EM.

Le signal radio est généré par des lignes de champ magnétique très intenses :  
 $B \sim 10^{12}$  G.



# La structure des étoiles à neutrons



masse  $\sim 1.5$  masse solaire.

rayon  $\sim 10-15$  km.

une journée  $\sim 1$  ms à 10 s.

Température  $\sim 10^8$  K

Champ magnétique  
 $\sim 10^{12}-10^{15}$  G

## Les étoiles à neutrons : un laboratoire pour la physique moderne !!

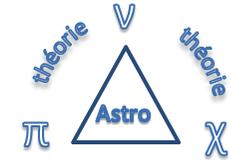
Physique statistique quantique  
Relativité restreinte et générale  
Ondes gravitationnelles

Condensation de paires  
(superfluidité, supraconductivité,  
crossover BEC-BCS)

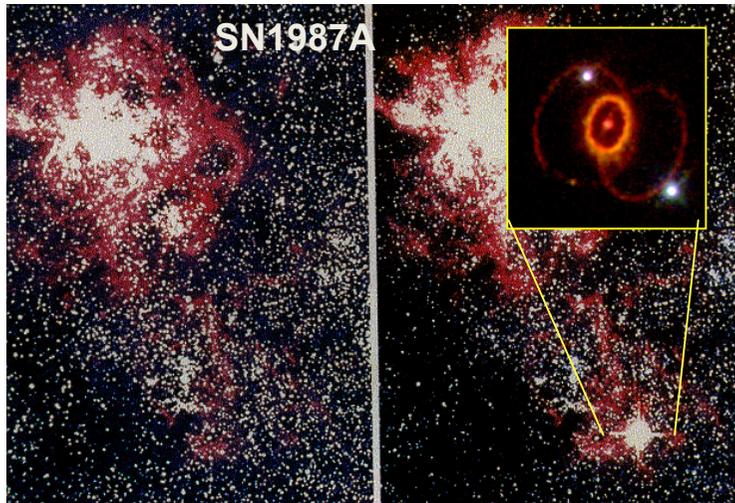
Physique hadronique  
Déconfinement des quarks  
...

# 1987 : Supernova SN1987a et observation de neutrinos

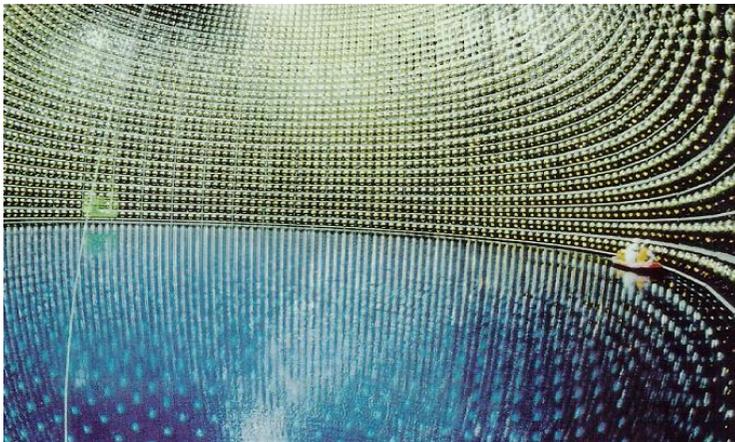
# 1987 : Supernova et observation de $\nu$



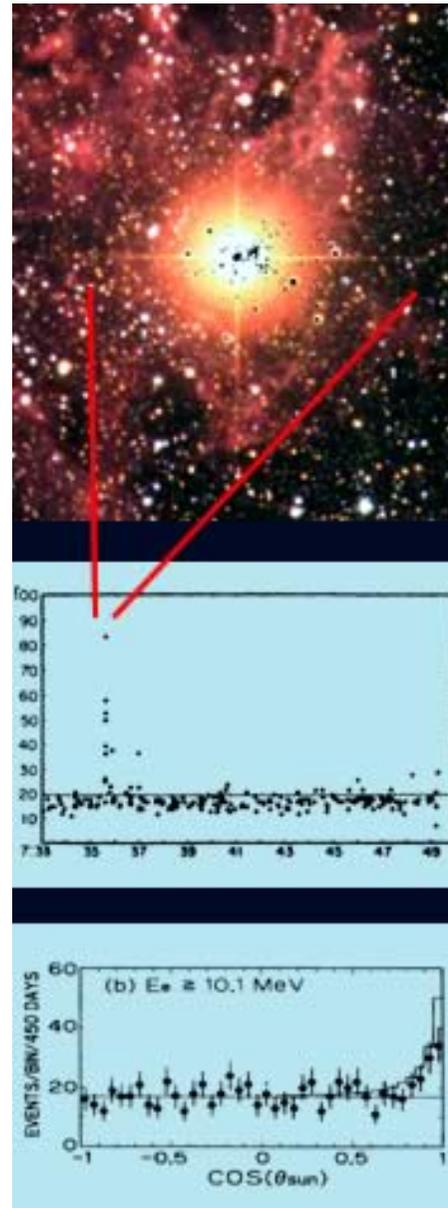
23 février 1987 : une nouvelle étoile est apparue quelques mois.



Les 11 000 photodétecteurs de Super-Kamiokande baignés dans 50 000 tonnes d'eau.



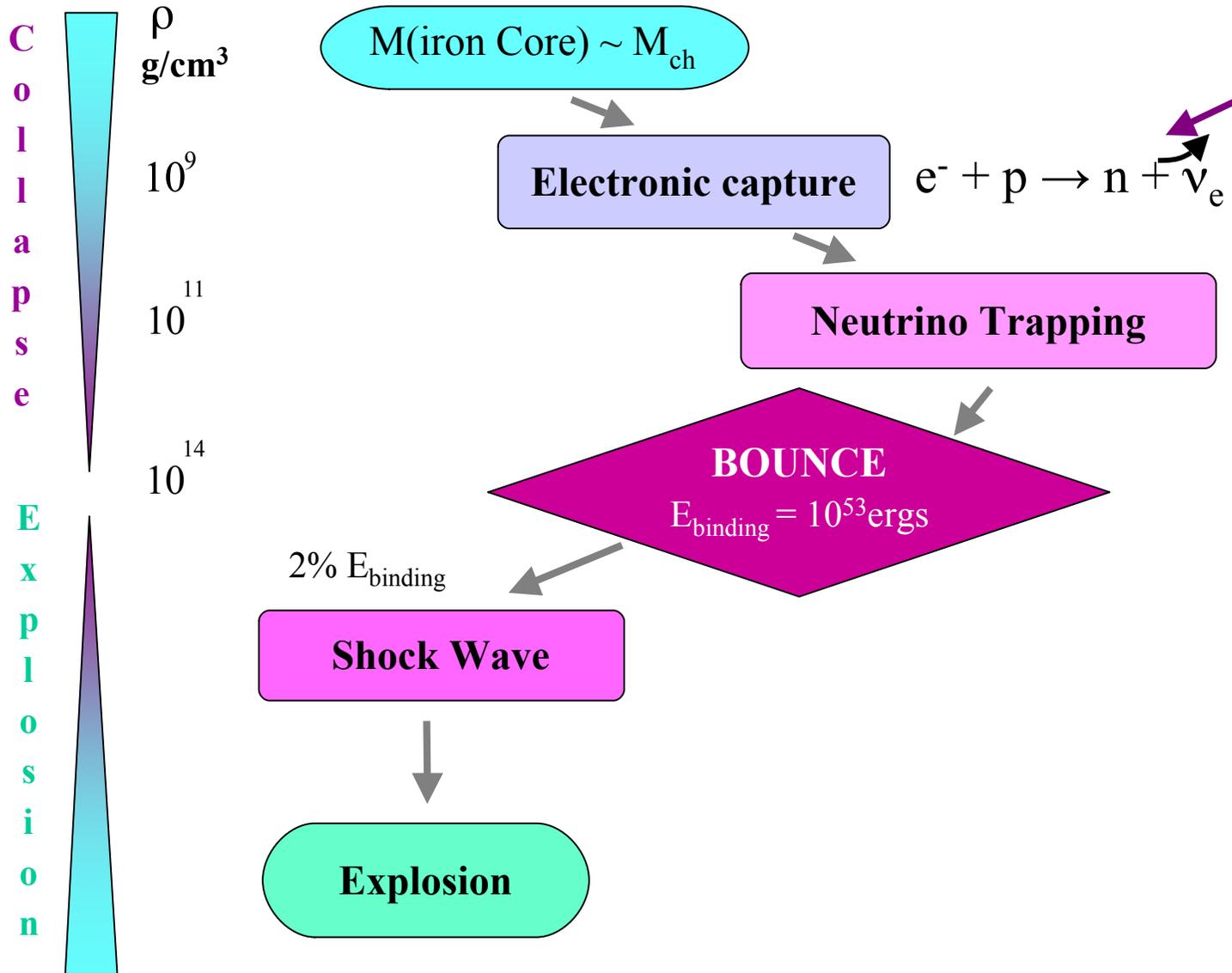
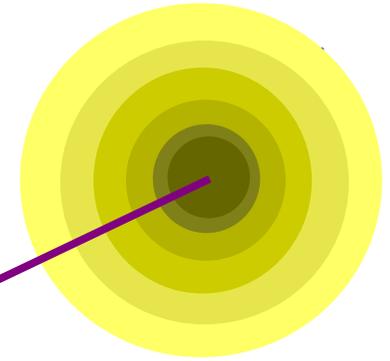
20/07/11



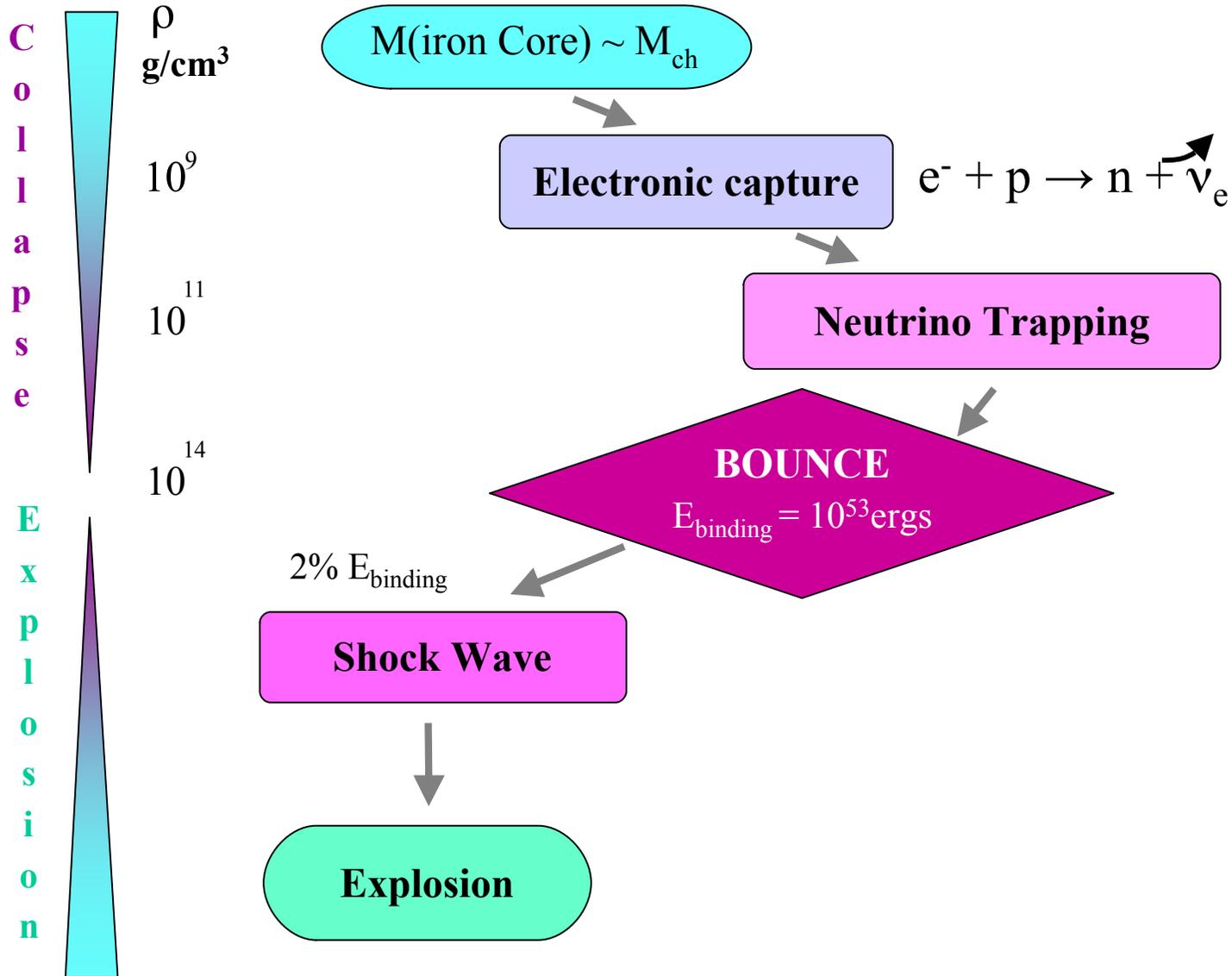
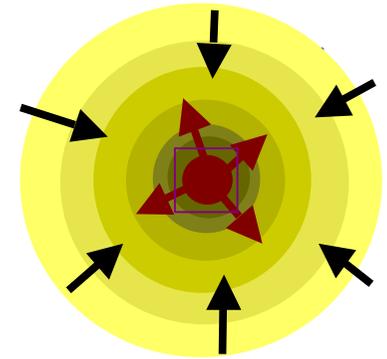
une vingtaine de neutrinos ( $\nu$ ) sur les  $10^{58}$  émis par la SN ont été détectés sur Terre !

Cette observation a confirmée le modèle d'effondrement gravitationnel retardé (versus direct) et a apporté quelques informations supplémentaires.

# Mécanisme direct



# Mécanisme direct



# Mécanisme retardé

C  
o  
l  
l  
a  
p  
s  
e  
  
E  
x  
p  
l  
o  
s  
i  
o  
n



$\rho$   
g/cm<sup>3</sup>

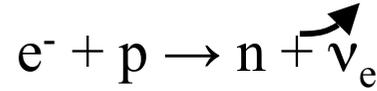
10<sup>9</sup>

10<sup>11</sup>

10<sup>14</sup>

M(iron Core) ~ M<sub>ch</sub>

Electronic capture



Neutrino Trapping

**BOUNCE**  
E<sub>binding</sub> = 10<sup>53</sup>ergs

2% E<sub>binding</sub>  
Shock Wave

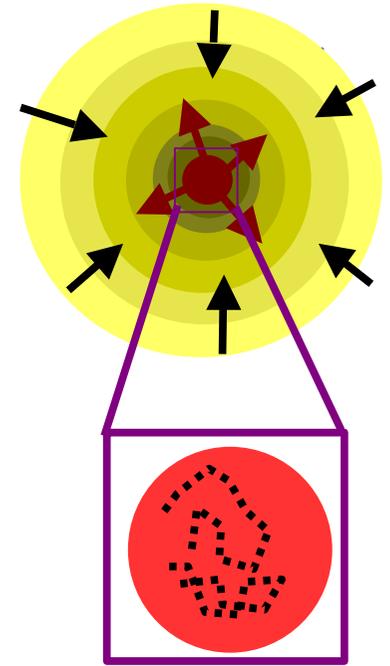
Explosion

98% E<sub>binding</sub>  
Proto-neutron Star

n  $\bar{\nu}$  emission?  
Cooling

Neutron Star

Heating



Neutrino diffusion

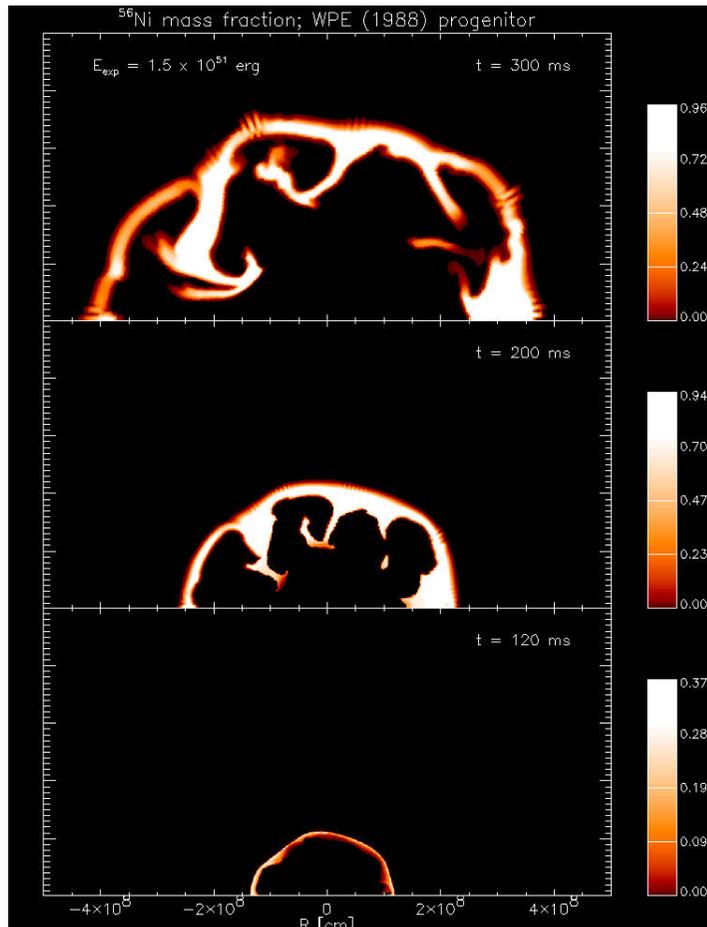
First seconds  $\nu$  emission records the collapse + bounce + explosion

# Observation de raies de $^{56}\text{Ni}$



-> Forte convection et mélange de couches pendant l'explosion.

Simulations de Th. Janka et al., MPA Garching



Rôle important d'instabilités (SASI) entre l'onde de choc et la proto-étoile à neutrons.

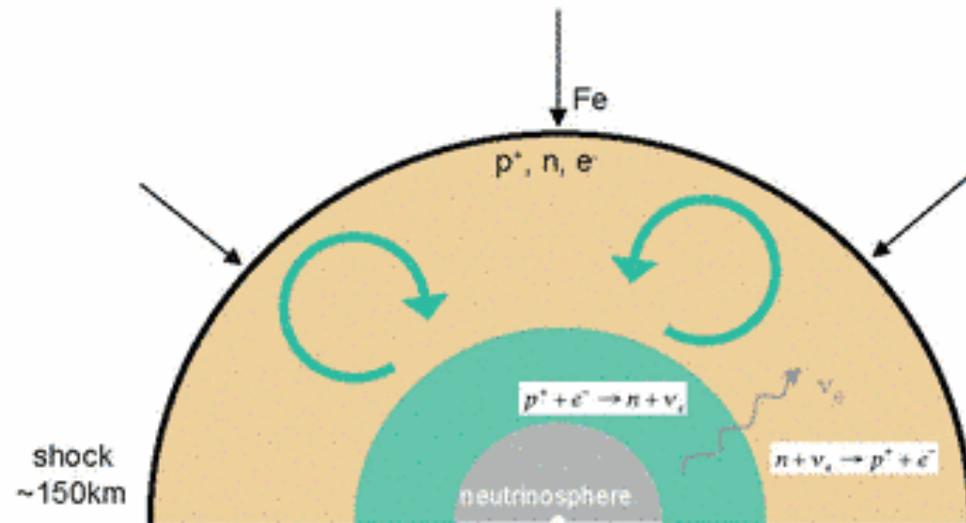
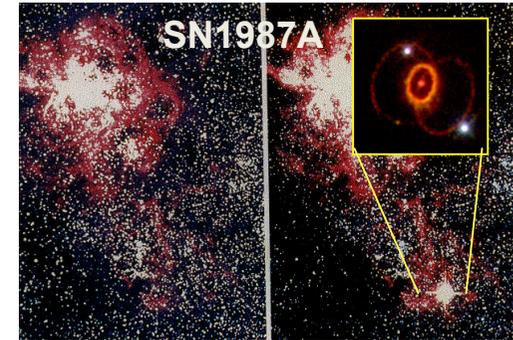
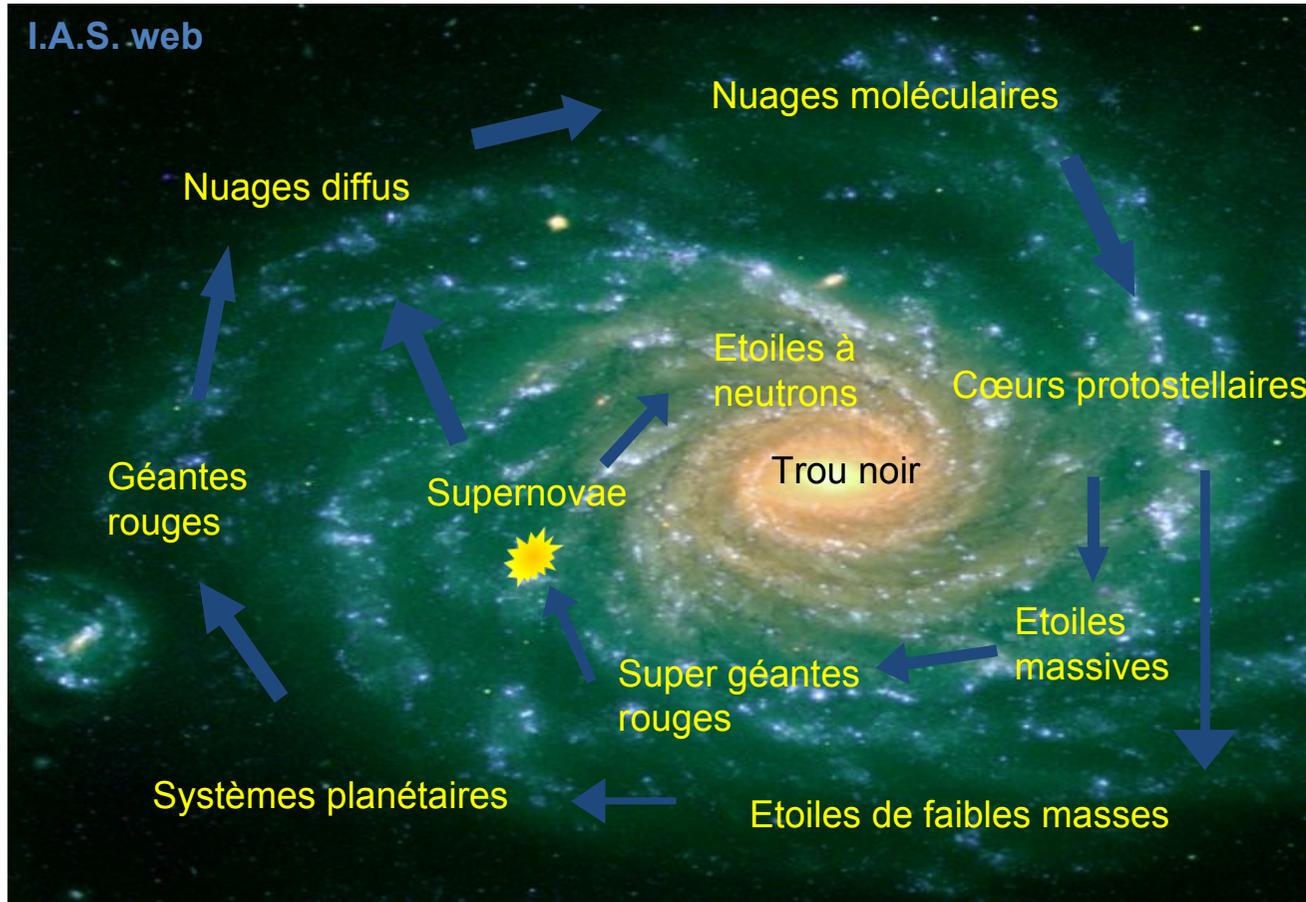


Figure Th. Foglizzo, CEA-SAp

Premiers signes d'explosion réussis dans une simulation de Marek & Janka (2009).



Des sites très variés où ont lieu des réactions nucléaires :

- Nuages,
- Étoiles,
- Novae,
- Supernovae,
- Résidu de SN,
- Étoiles à neutrons,
- Trou noirs,
- Noyaux actifs de galaxies.

Toutes ces sources émettent dans des longueurs d'onde très variées !

En plus d'ondes électromagnétique, elles émettent aussi des particules (**rayons cosmiques**), des neutrinos, des noyaux, ... mais voit t-on toute la **matière** ??

*Suite au prochain épisode « des particules au cosmos » !*

Le GANIL, Caen, Projet SPIRAL2



Le GSI, Darmstadt, Projet FAIR

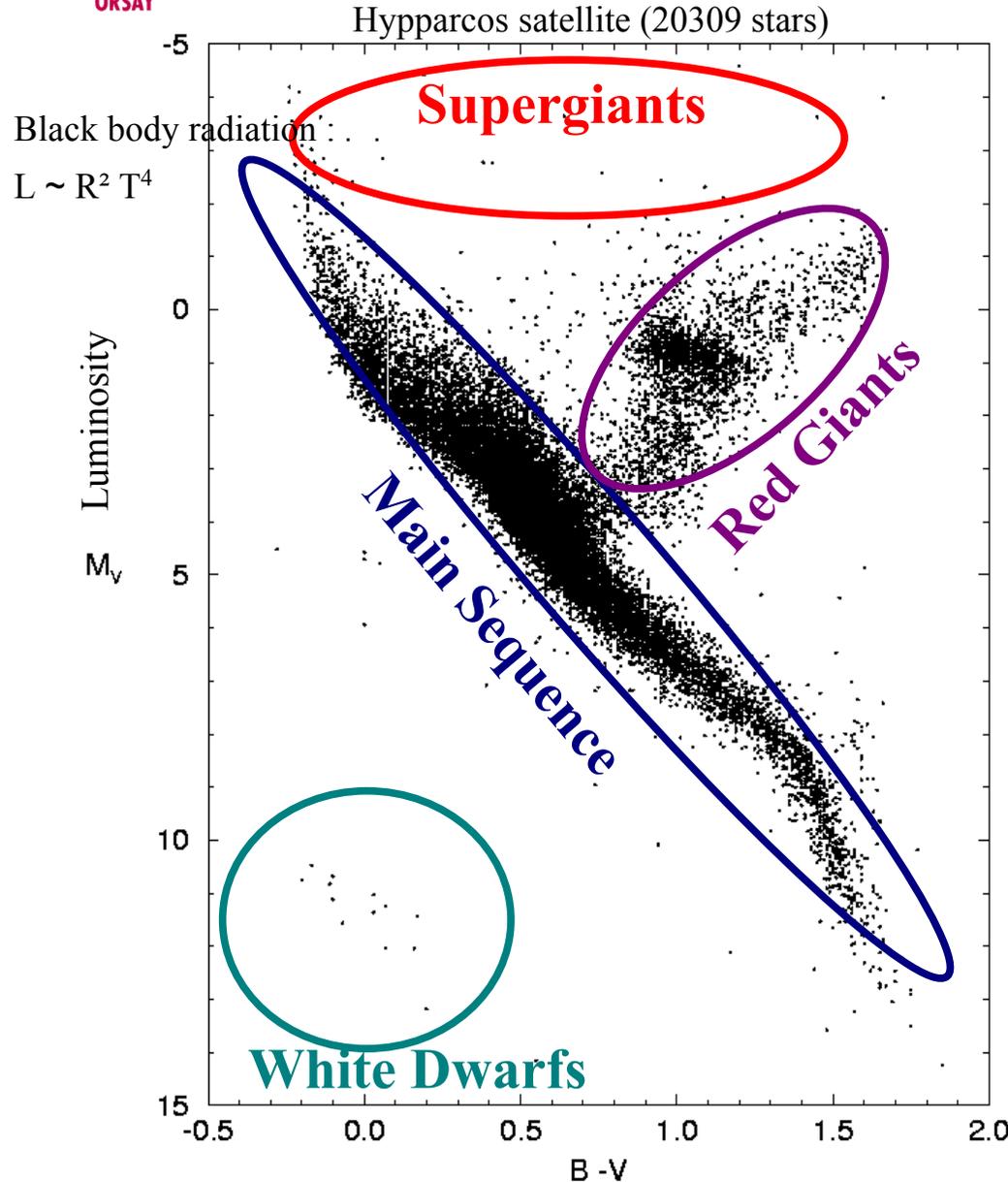
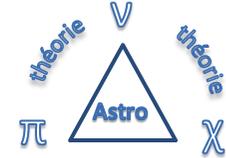


Et de nombreux autres accélérateurs de part le monde (RIKEN Japon, MSU USA, ...) !!

## Ce dont je n'ai pas parlé

- **Nucléosynthèse primordiale** :  
Formation des éléments légers aux premiers instant de l'Univers
- **Nucléosynthèse rapide-proton** :  
Important pour les novae
- **Autres nucléosynthèses** : induite par les neutrinos, spallation, interaction avec le fond diffus cosmologique, ...
- Description de la **matière dense** dans les supernovae et les étoiles à neutrons.
- Interactions électro-faibles et diffusion des neutrinos dans les supernovae.

# Diagramme de Hertzsprung-Russel (1911)



**Main-sequence** : H burning stars.

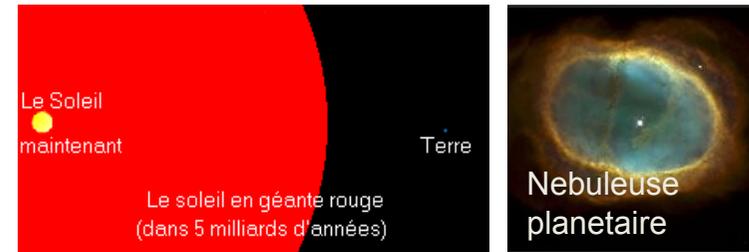
It operates at core temperature  $\sim 10^7$  K

Most of the stars are at the main-sequence.

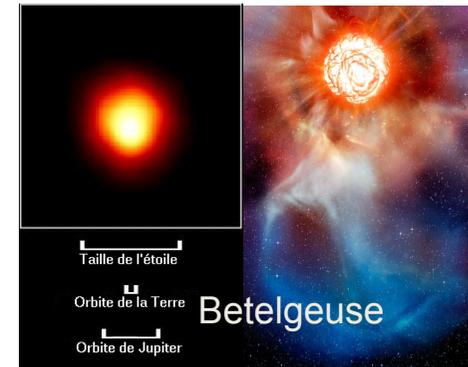
## H burning time scales with the mass

$1 M_{\odot}$	$\rightarrow$	10 Gyr
$5 M_{\odot}$	$\rightarrow$	80 Myr
$15 M_{\odot}$	$\rightarrow$	7 Myr

**Red Giants**: He burning stars.

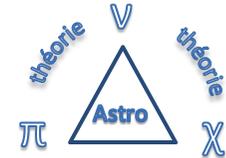


**Supergiants**:  
CNO burning stars.

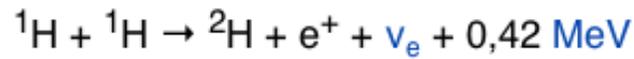
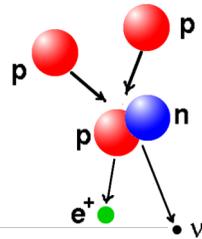


# Chaîne proton-proton

Bethe, Phys. Rev. 55 (1939)



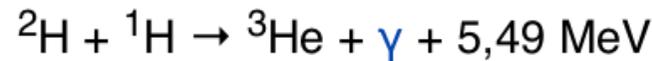
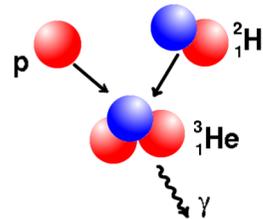
## Etape 1 : deuteron



Répulsion électrostatique  
Interaction faible  
→ 10<sup>10</sup> années



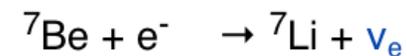
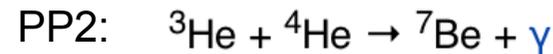
## Etape 2 : <sup>3</sup>He



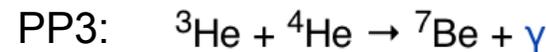
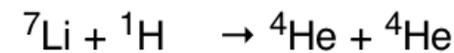
## Etape 3 : <sup>4</sup>He



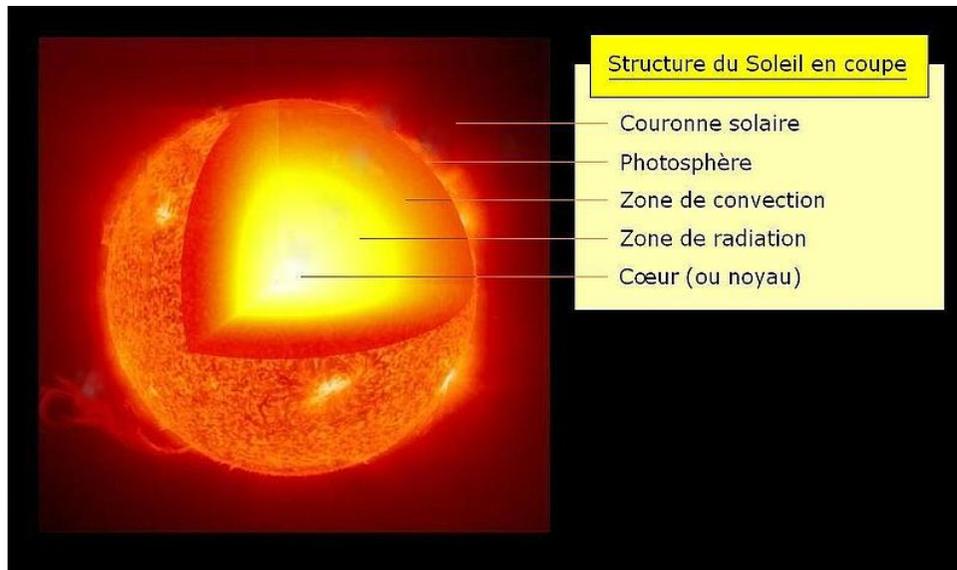
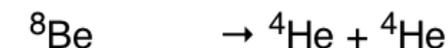
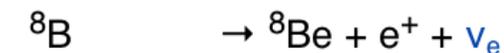
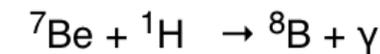
10-14 million K



14-23 million K



>23 million K



# En résumé

