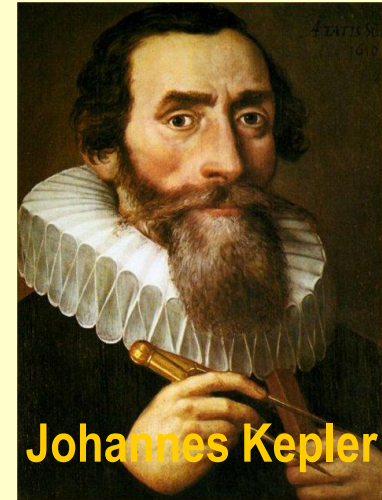
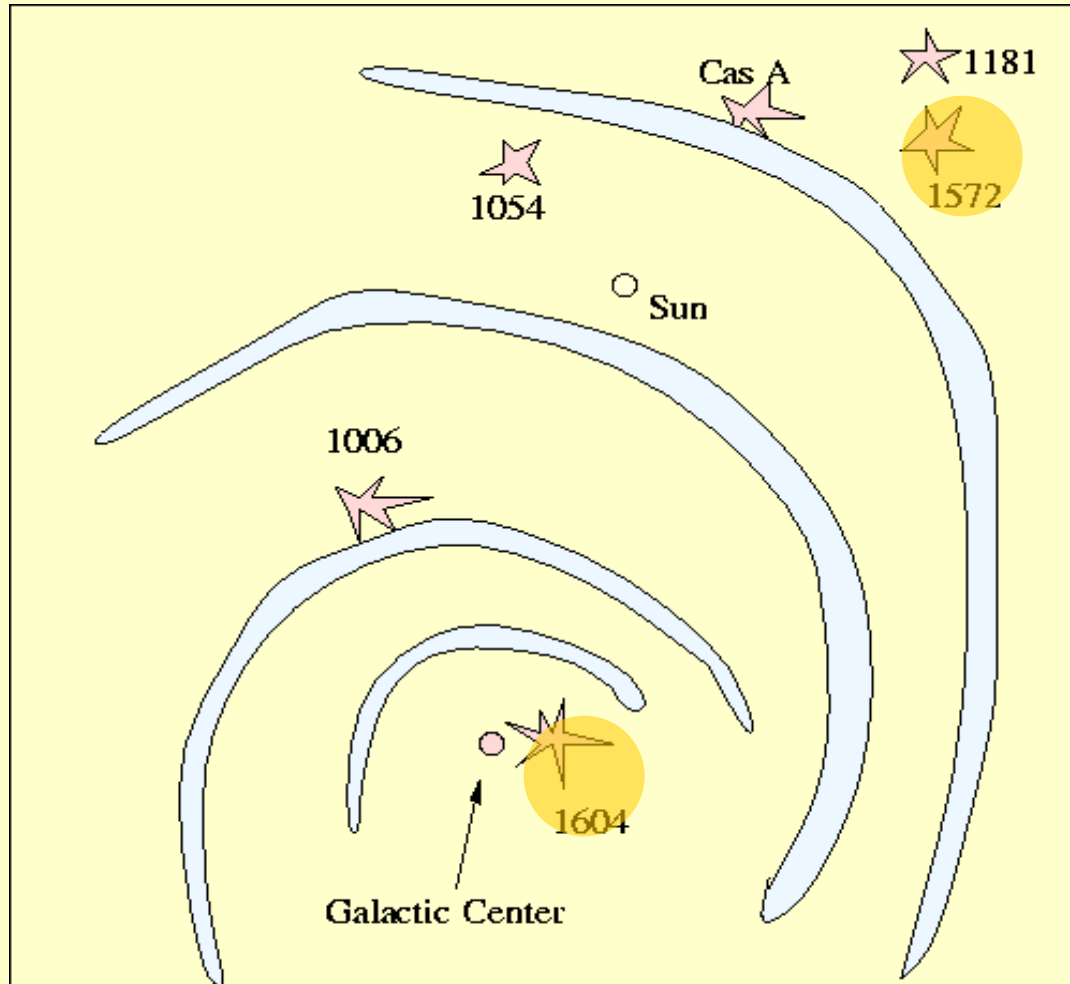


SUPERNOVAE :
La mort explosive
des étoiles

N. PRANTZOS
Institut d'Astrophysique de Paris

Supernovae “historiques”

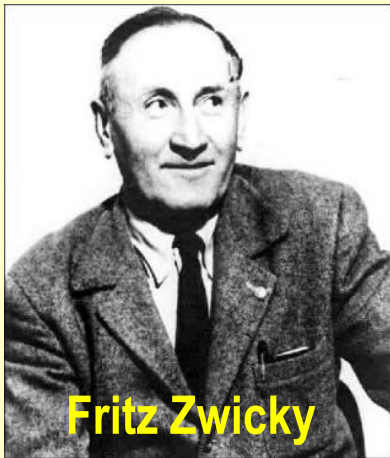


**Aucune supernova visible dans la Voie Lactée depuis 4 siècles
(pourtant, on estime leur fréquence dans la Galaxie à 2 par siècle...)**

L'énergie des supernovae

Luminosité maximale : 10^{42} erg/s
(~1 milliard de Soleils,
autant qu'une petite galaxie)

Energie lumineuse totale : $\sim 10^{49}$ erg
(autant que le Soleil
en 100 millions d'années)

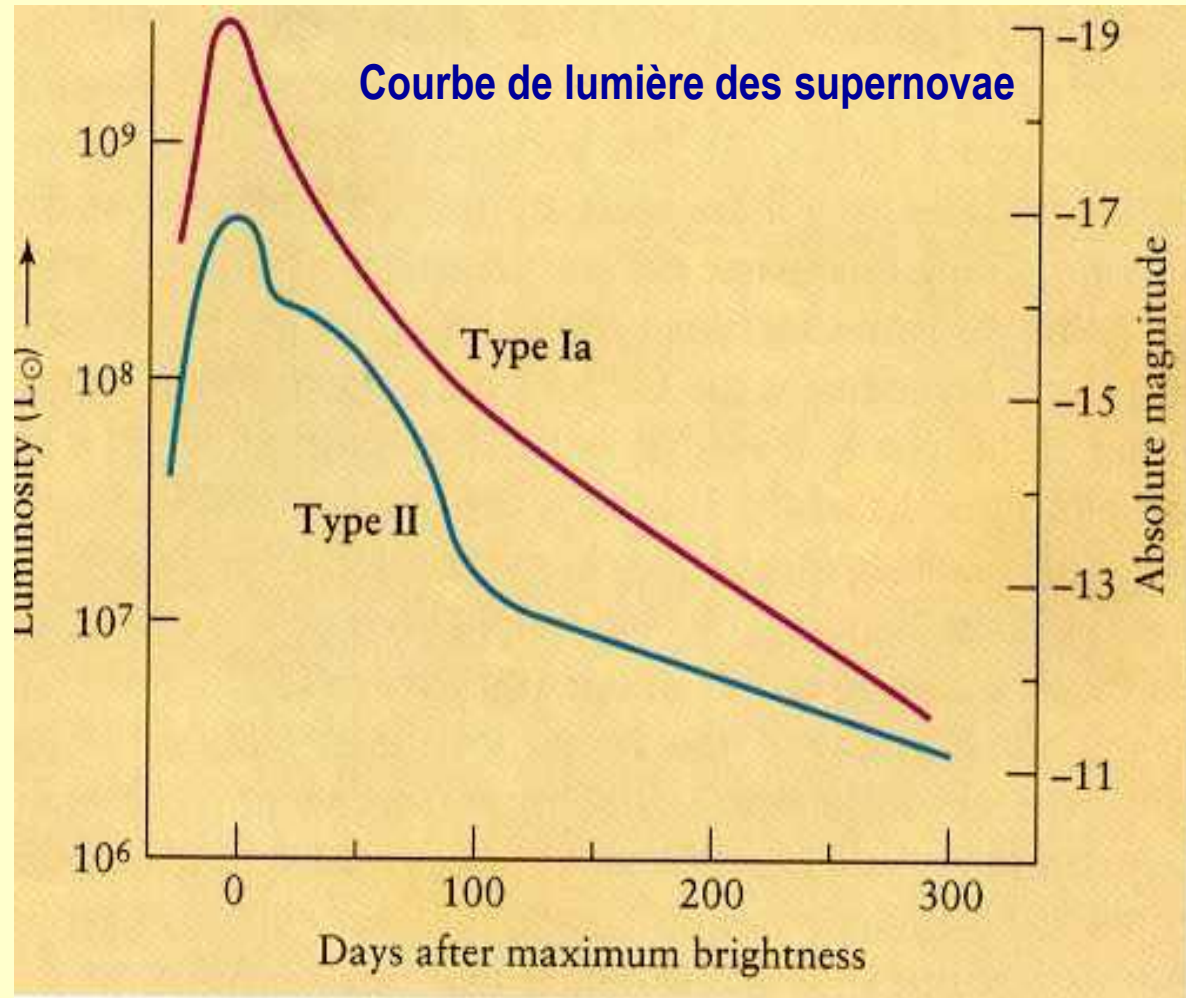


Source de cette énergie ?

Fritz Zwicky (1932): Effondrement gravitationnel jusqu'à une étoile à neutrons

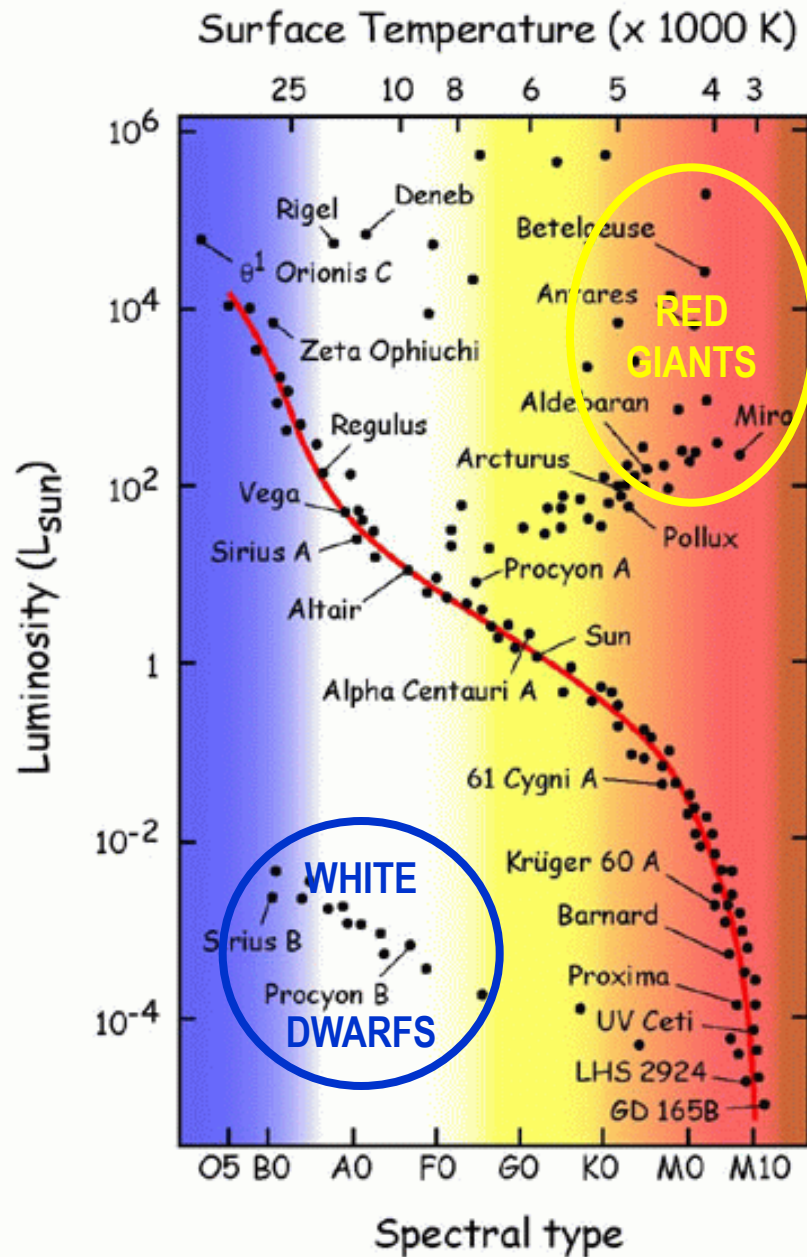
Fowler et Hoyle (1964): Explosion thermonucléaire d'une étoile

Note: L'énergie cinétique de la supernova est 100 fois plus grande que l'énergie lumineuse

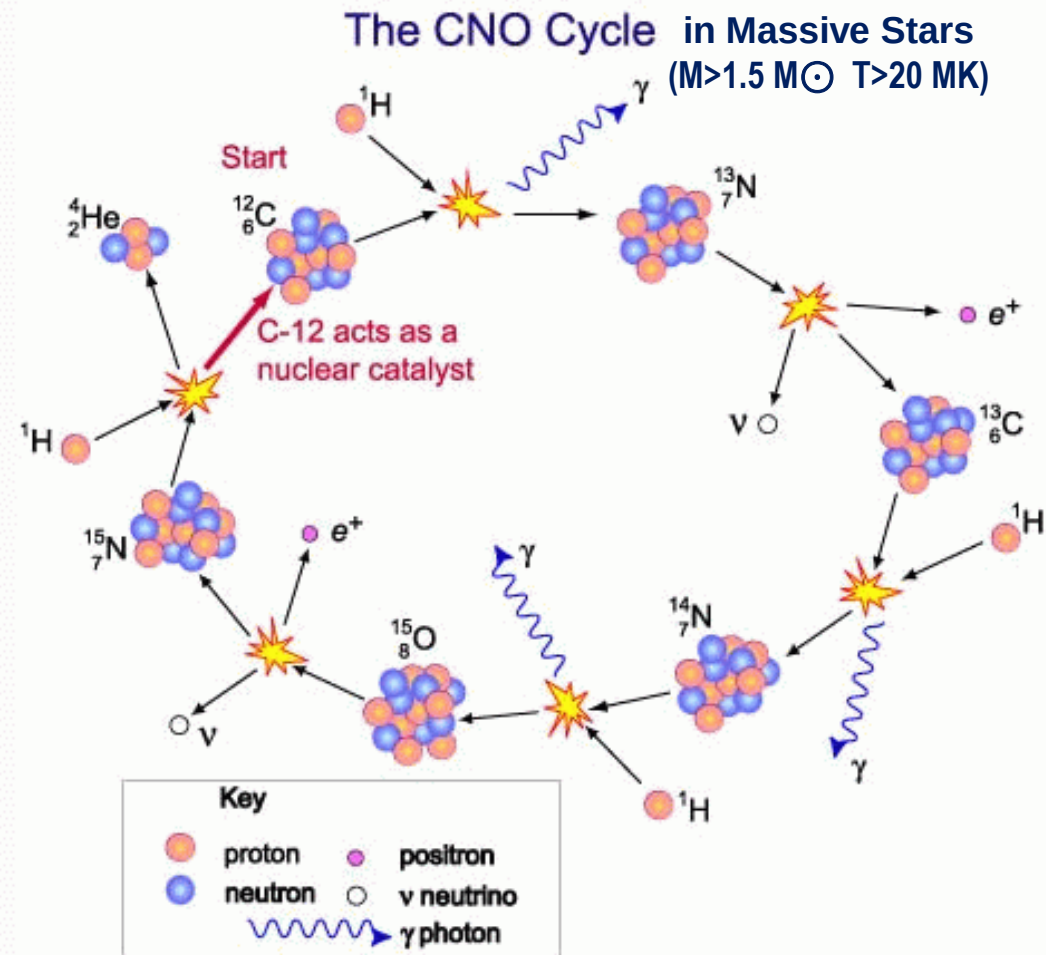
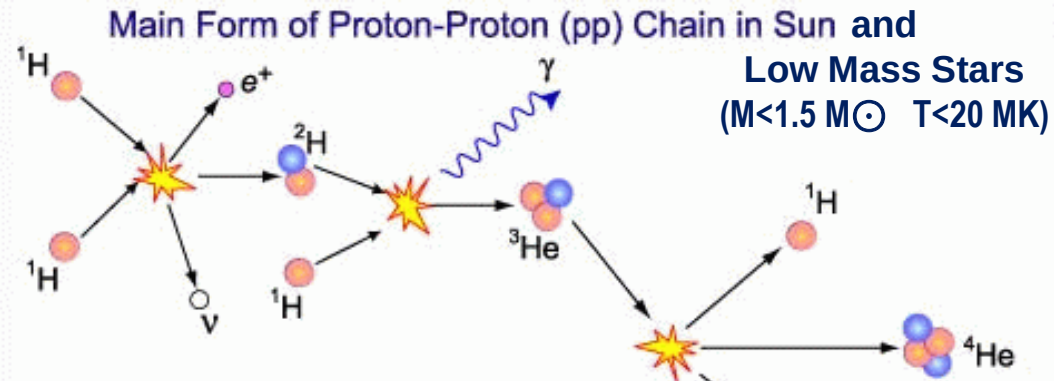


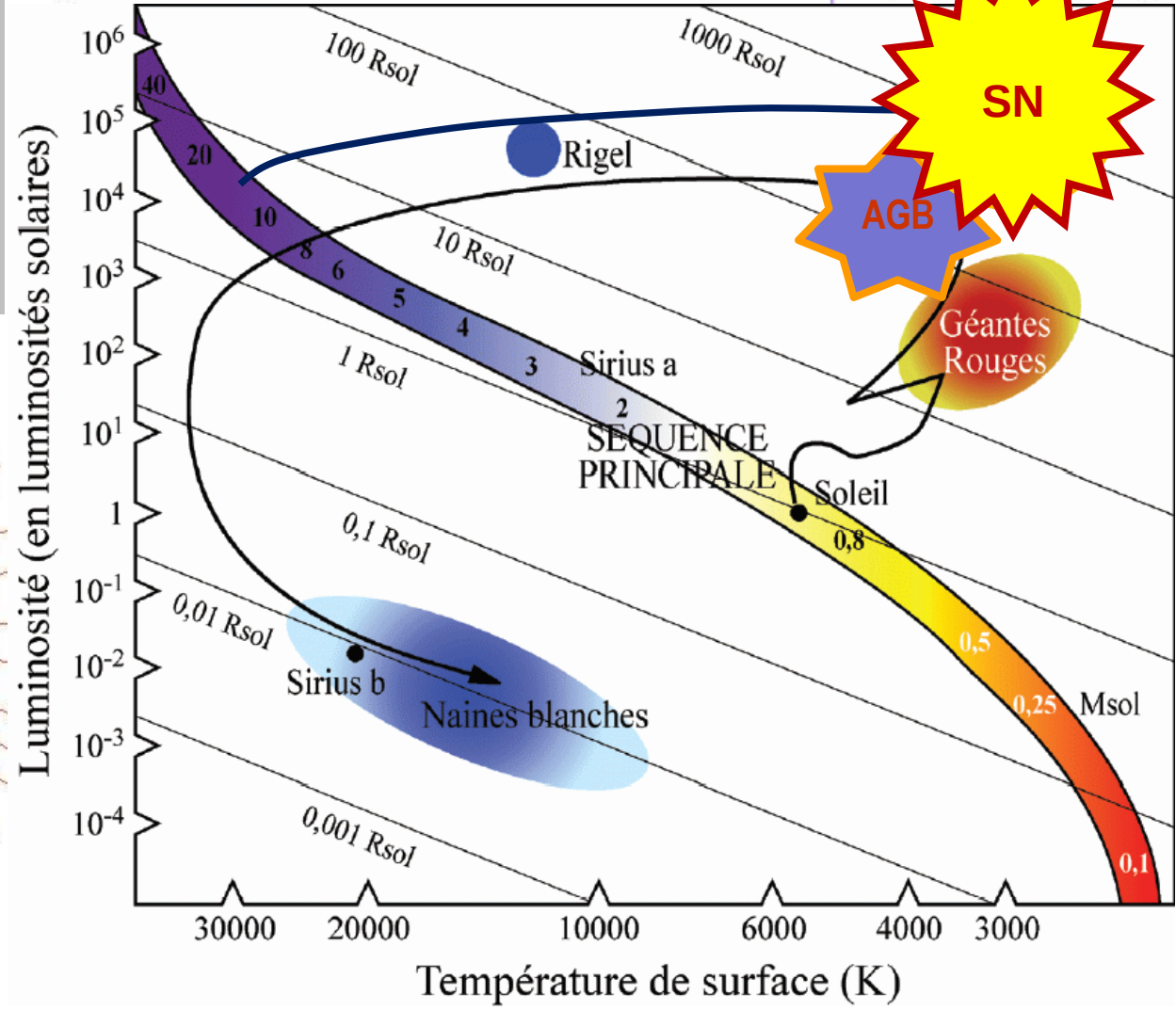
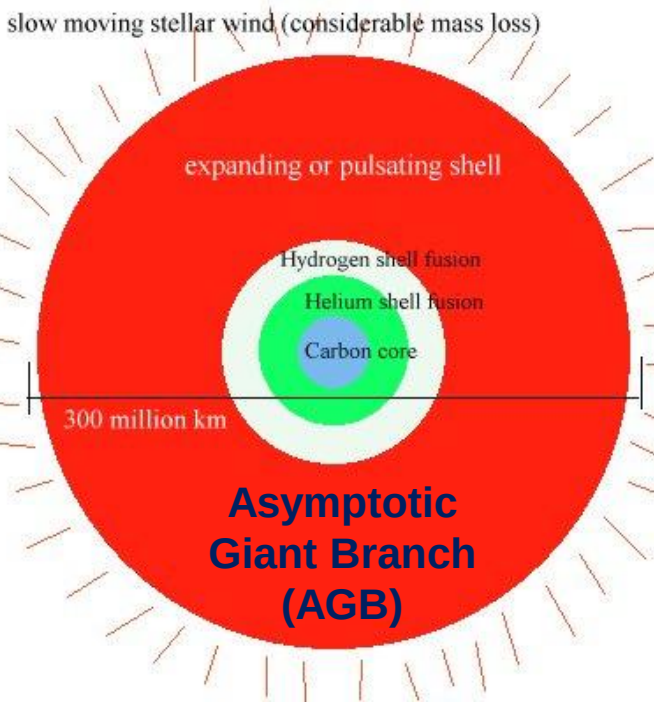
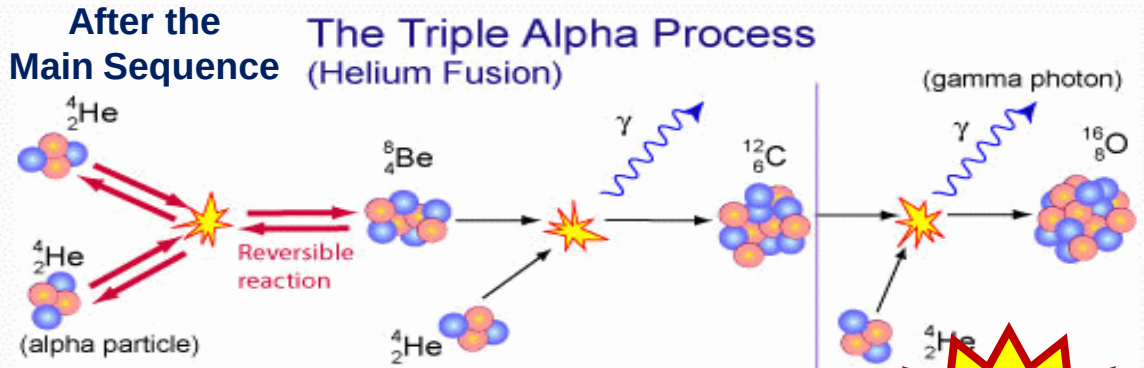
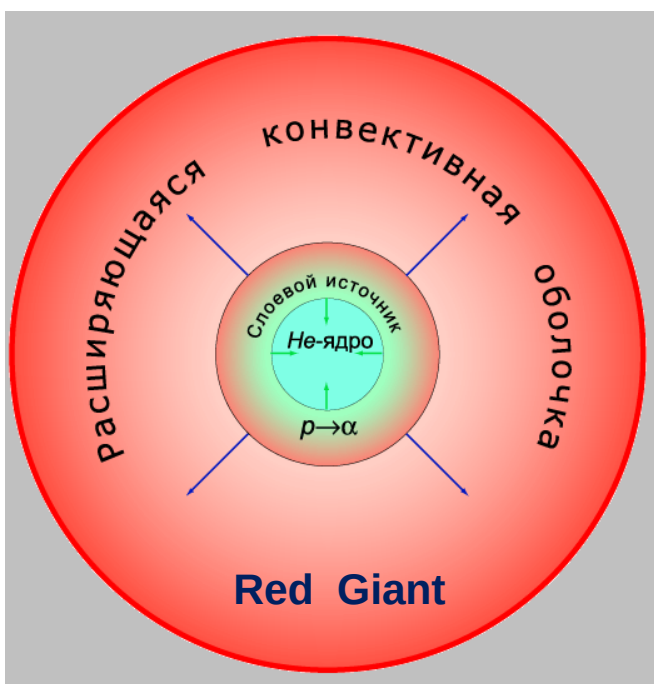
STARS: Luminosity vs Effective Temperature (Magnitude vs Colour)

Hertzsprung - Russel Diagram (HRD)



Main Sequence: Hydrogen burning





Hydrogen envelope

Rayon:
700 000 000 km
(1000 R_{SOLEIL})

helium

carbon & oxygen

neon &
magnesium

oxygen &
magnesium

silicon &
sulfur

3 000 km

iron

L'énergie dégagée
par la combustion
nucléaire chauffe
le coeur de l'étoile
et lui permet de
résister à sa
propre gravitation

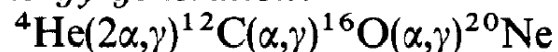
Le fer-56 est le noyau le plus stable de la nature
et ses réactions ne dégagent pas de l'énergie.
Le coeur de fer s'effondre et l'étoile meurt

Advanced burning stages in massive stars

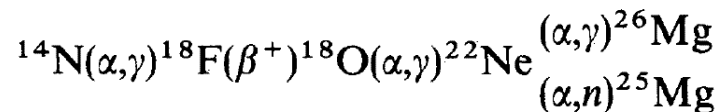
$T \sim 200$ million K

IMPORTANT REACTIONS IN HELIUM BURNING

Energy generation:



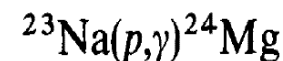
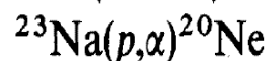
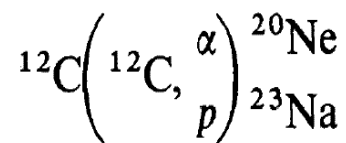
Neutron source:



$T \sim 900$ million K

IMPORTANT REACTIONS IN CARBON BURNING

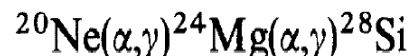
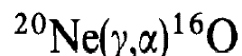
Basic:



$T \sim 1500$ million K

NEON BURNING

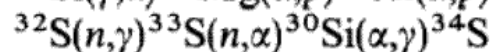
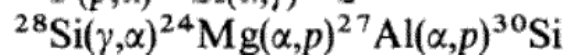
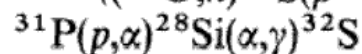
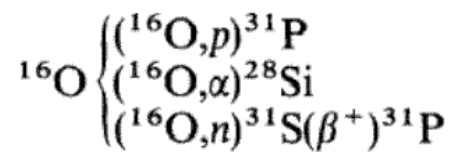
Basic reactions:



$T \sim 2000$ million K

OXYGEN BURNING

Basic reactions:



Si – “Melting” ($T \geq 3 \cdot 10^9$ K)

At high temperatures **photodesintegrations** $[(\gamma, \alpha) (\gamma, p)(\gamma, n)]$ become very rapid

Ejected particles (**n, p, α**) are captured by nuclei to form nuclei with larger binding energies



$$\text{Reaction: } 1 + 2 \longrightarrow 3 + 4 \text{ (+ S)}$$

$$\begin{aligned} \text{Reaction energy: } S &= (m_1 + m_2 - m_3 - m_4) c^2 \\ &= Q_3 + Q_4 - Q_1 - Q_2 \end{aligned}$$

[Nucleus Binding Energy:

$$Q = (Z m_P - N m_N - m) c^2]$$

$$\text{Cross section: } \langle \sigma v \rangle_{34} \propto \langle \sigma v \rangle_{12} e^{-S/kT}$$

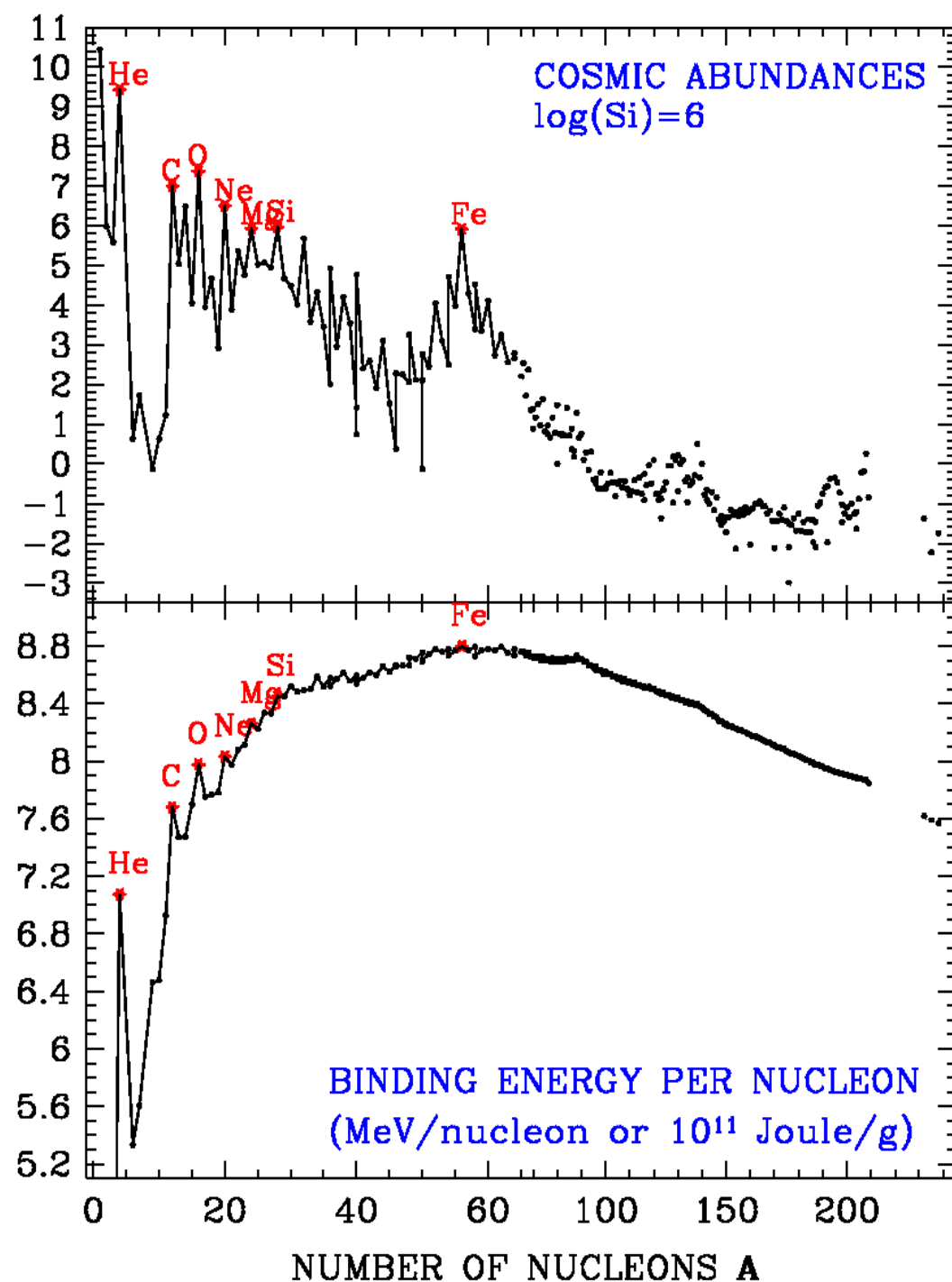
$$\text{High } T \longrightarrow \text{Equilibrium: Rate}_{12} = \text{Rate}_{34}$$

$$N_1 N_2 \langle \sigma v \rangle_{12} = N_3 N_4 \langle \sigma v \rangle_{34}$$

$$\frac{N_3 N_4}{N_1 N_2} \propto e^{S/kT}$$

Matter composition shifts to Fe-peak nuclei (largest binding energies)

Energy produced: $E/m \sim 1.9 \cdot 10^{17}$ erg/gr ~ 0.2 MeV/nucleon



Cosmic abundances of
nuclides are roughly
correlated with
nuclear stability

(alpha-nuclei, Fe peak nuclei or
nuclei with even nucleon number
are more abundant
than their neighbors)

Nuclear processes
have shaped the
cosmic abundances
of the chemical elements

NUCLEAR STATISTICAL EQUILIBRIUM (NSE)

When all **strong nuclear reactions** are equilibrated, the **abundance** of a nucleus depends on its **binding energy**, the ambient **temperature** and **density** and the **neutron excess** $\eta=(N-Z)/(N+Z)$

Weak interactions (mostly electron captures)
never reach equilibrium (because neutrinos escape),
and slowly increase η (**neutronisation**)

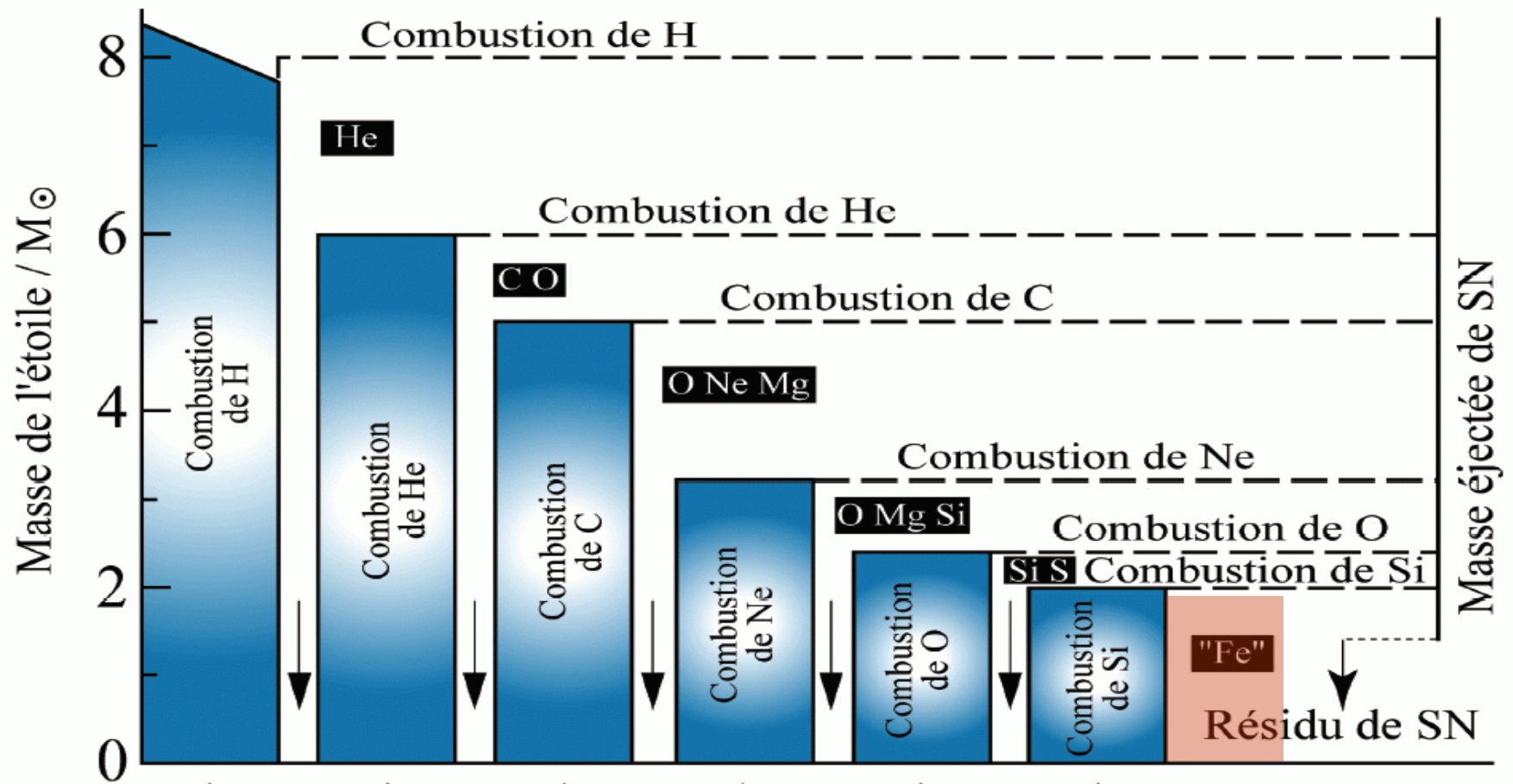
$$Y_i(A, Z) = (\rho N_A)^{A_i-1} \frac{\omega(A_i, Z_i)}{2^{A_i}} A_i^{3/2} \times \left(\frac{2\pi\hbar^2}{m_H kT} \right)^{3/2(A_i-1)} e^{-Q(A_i, Z_i)/kT} Y_p^Z Y_n^N, \quad i = 1, N-2 \quad (8)$$

$$\sum_i \frac{\partial Y_i}{\partial t} = \sum_{j,k} (Z_k - Z_j) \lambda_j Y_j, \quad (9)$$

$$\sum_i Y_i A_i = 1, \quad (10)$$

where $\omega(A_i, Z_i)$ is the partition function and $Q(A_i, Z_i)$ is the binding energy of the species i . The first $N-2$ equations give the NSE distribution of all of the nuclear species, but for the neutrons and protons, equation (9) describes the neutronization due to the weak interactions and equation (10) represents the conservation of mass.

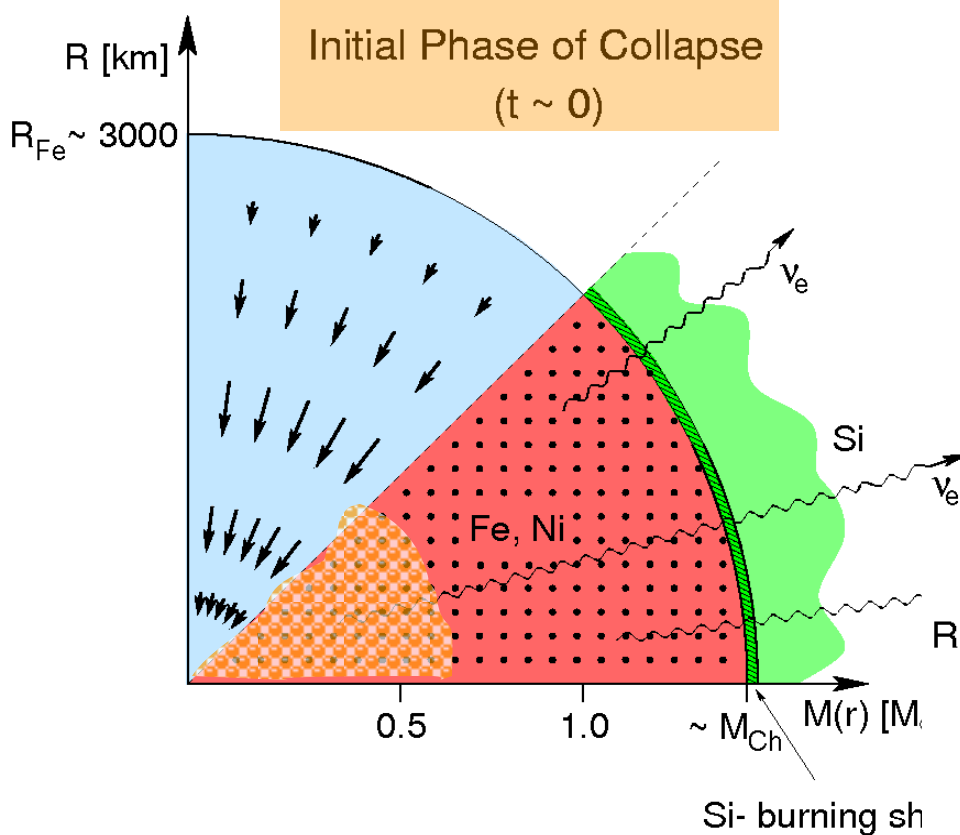
Evolution de l'intérieur d'une étoile massive



Evolution

Explosion de Supernova (SN)

T_c (K)	6×10^7	2×10^8	9×10^8	$1,7 \times 10^9$	$2,3 \times 10^9$	4×10^9
ρ_c (g.cm ⁻³)	5	700	2×10^5	4×10^6	10^7	3×10^7
Echelle de temps	7×10^6 ans	5×10^5 ans	600 ans	0,5 ans	6 jours	1 jour



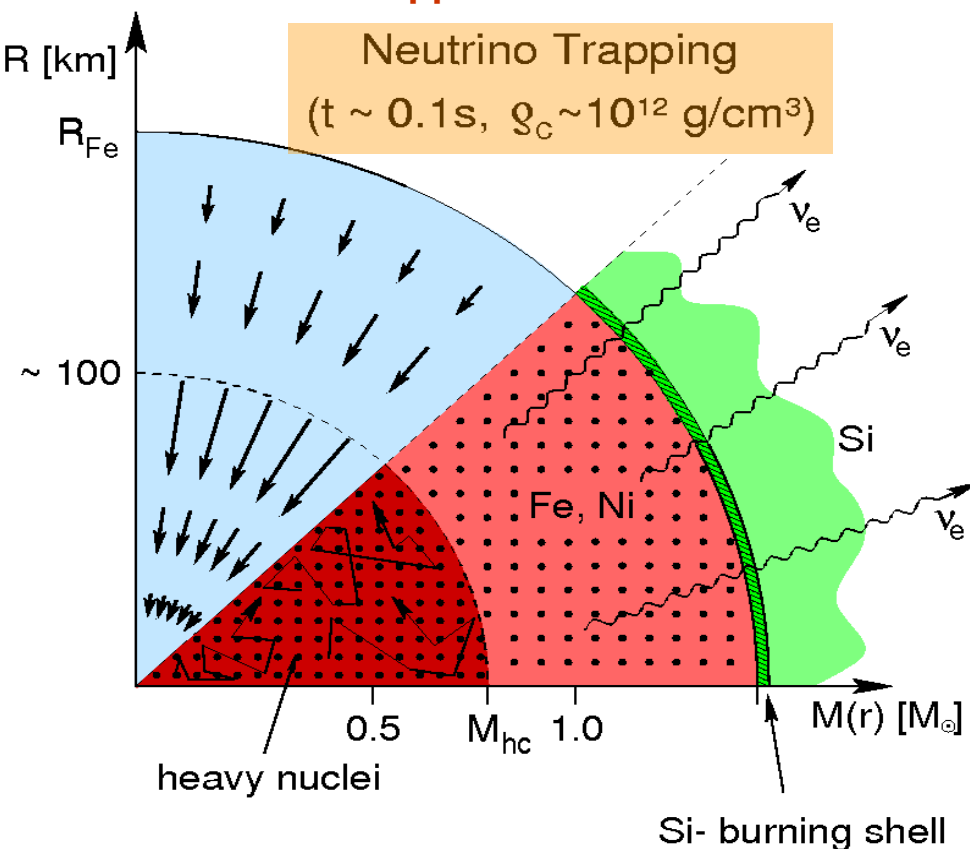
Le coeur de Fer interne commence à s'effondrer plus vite que le coeur externe

Sa densité augmente:
 $electron + proton \rightarrow neutron + neutrino$
 Neutronisation du coeur interne

Les neutrinos peuvent encore s'échapper facilement

Densité plus grande que
 1 million de tonnes par cm^3
 Les neutrinos sont piégés dans
 le coeur interne,
 qui est toujours en effondrement

Le coeur externe s'effondre aussi
 (un peu plus lentement)



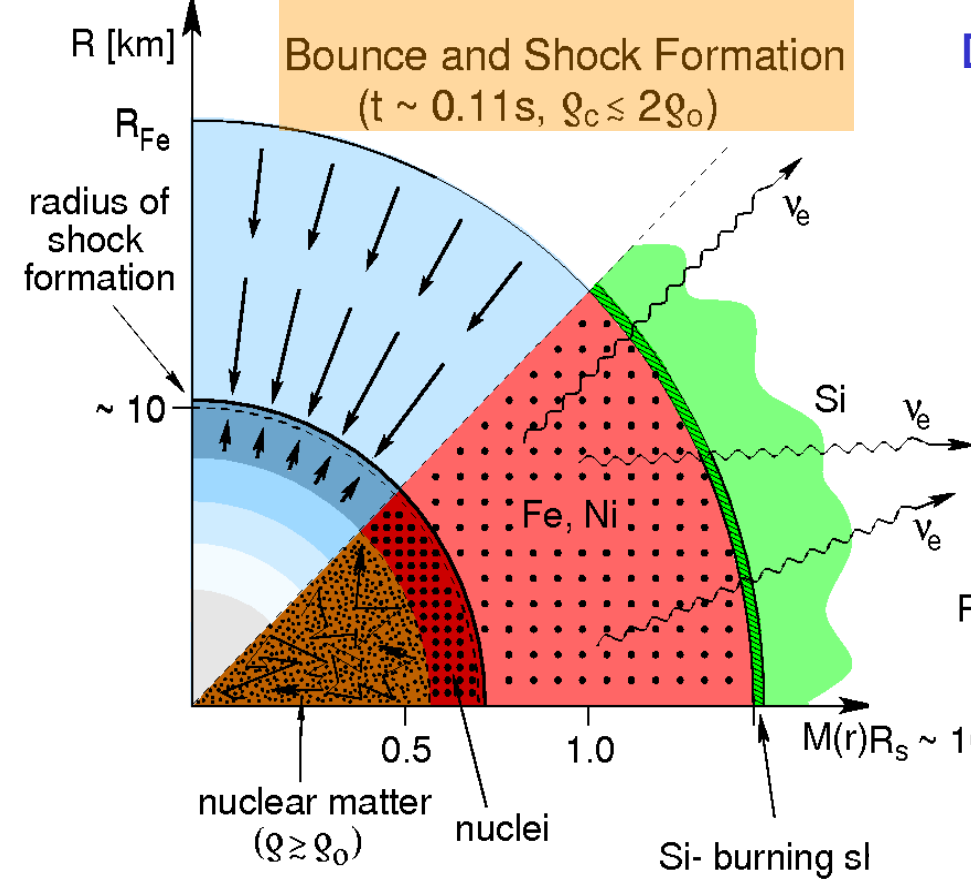
Bounce and Shock Formation
($t \sim 0.11\text{s}$, $\rho_c \lesssim 2\rho_0$)

Densité centrale : 100 millions de tonnes par cm^3

**Les noyaux se touchent ;
*matière nucléaire incompressible***

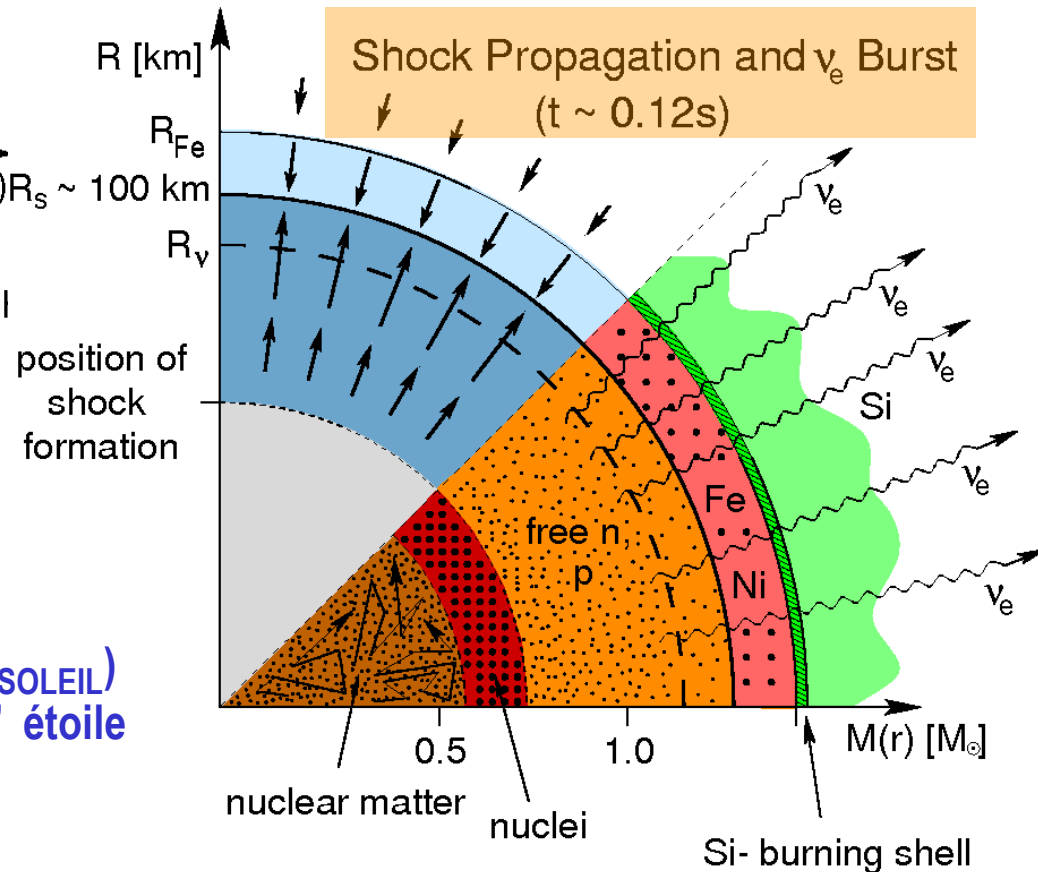
**Le coeur interne rebondit ;
Une onde de choc se forme à son bord
et se propage vers l'extérieur**

**Le coeur externe de Fer continue à tomber
à 70 000 km/s**



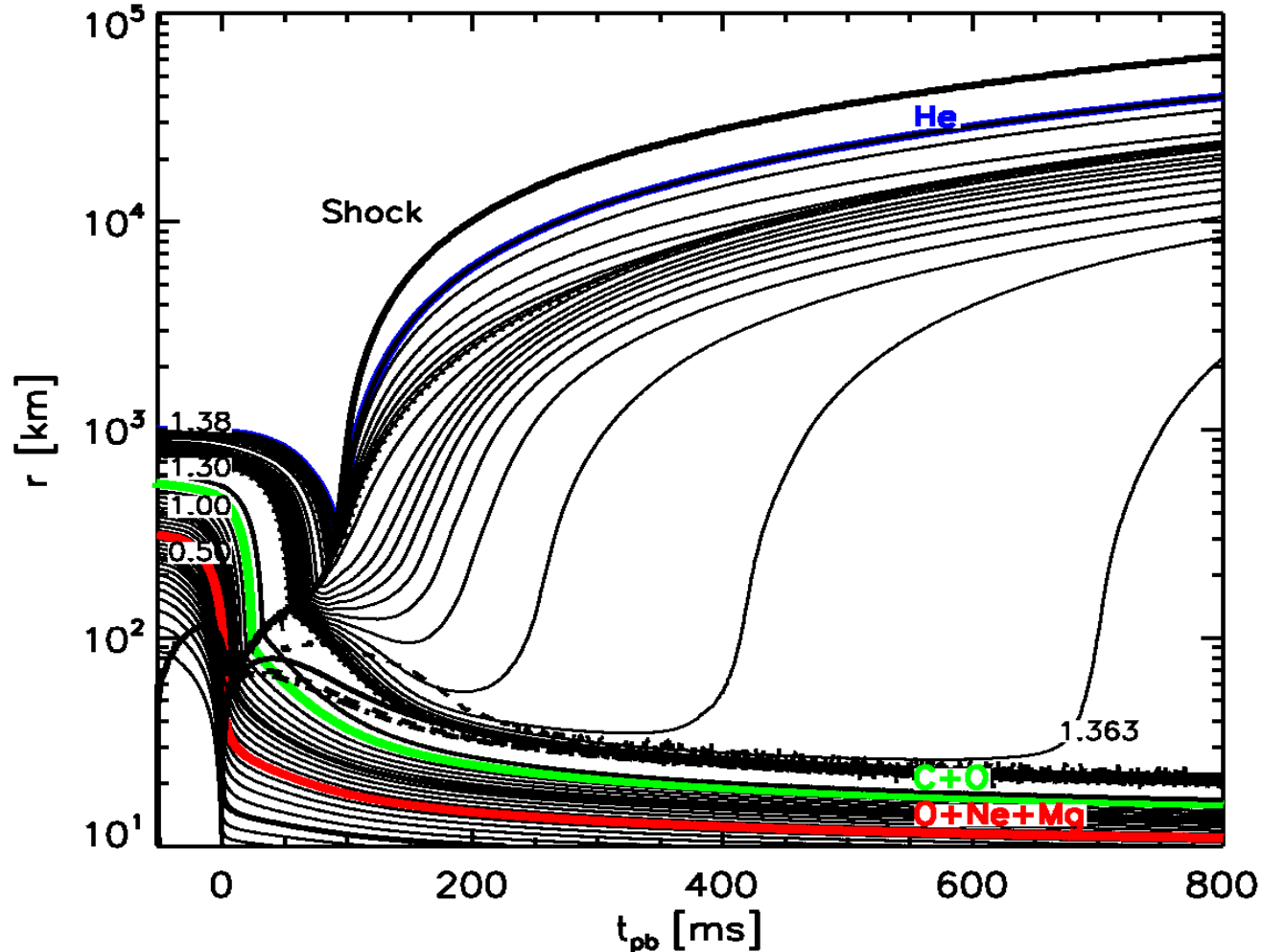
**L'onde de choc perd de l'énergie
en cassant les noyaux de Fer
sur son chemin. Elle s'épuise...**

**Si le coeur stellaire est assez petit
(i.e. une étoile de masse initiale $10\text{-}11 M_{\text{SOLEIL}}$)
l'onde de choc parvient à faire exploser l'étoile
(*Explosion rapide*)**



Shock Propagation and v_e Burst
($t \sim 0.12\text{s}$)

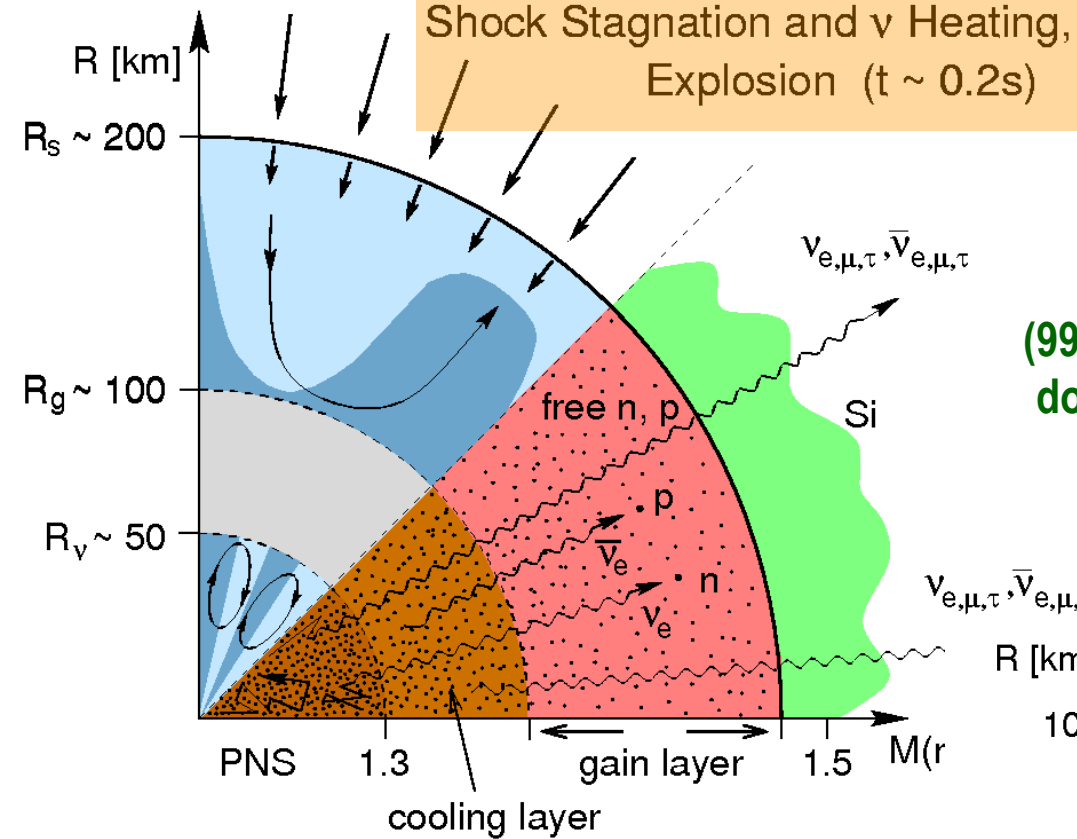
Si le coeur stellaire est assez petit (i.e. une étoile de masse initiale $10-11 M_{\text{SOLEIL}}$)
l'onde de choc parvient à faire exploser l' étoile (*Explosion rapide*)



L'enveloppe est expulsée et un résidu compact (*étoile à neutrons*) reste au centre

Mais cela concerne très peu d'étoiles massives.

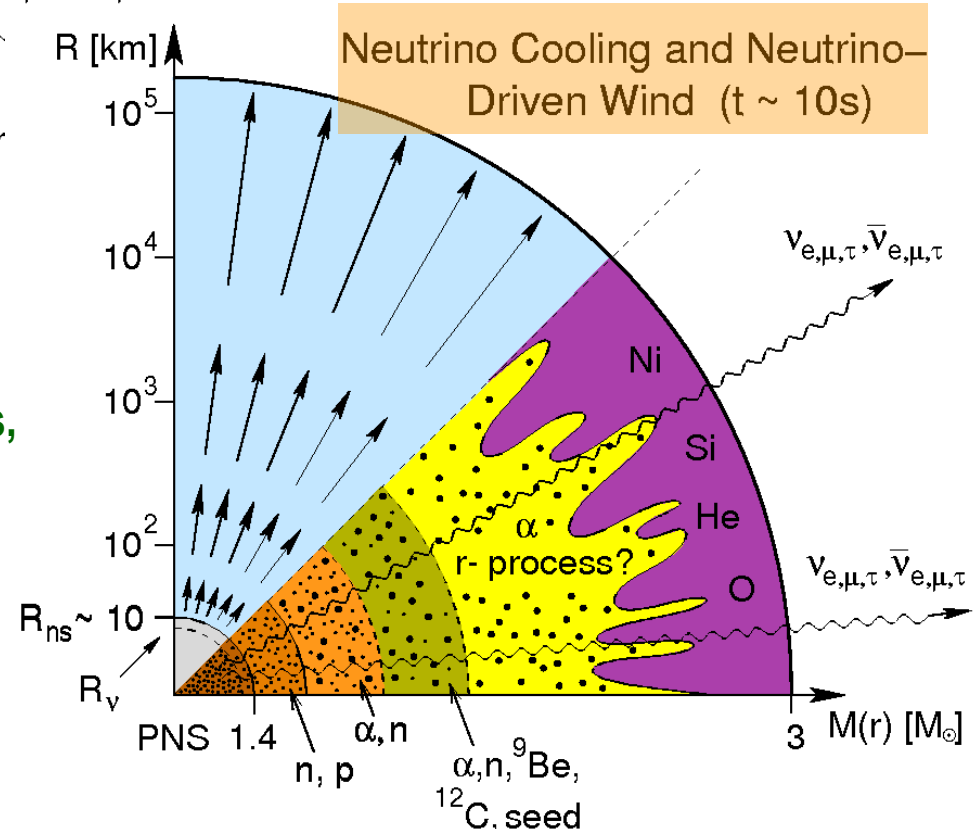
Comment font les autres ? TROUS NOIRS ? NON !



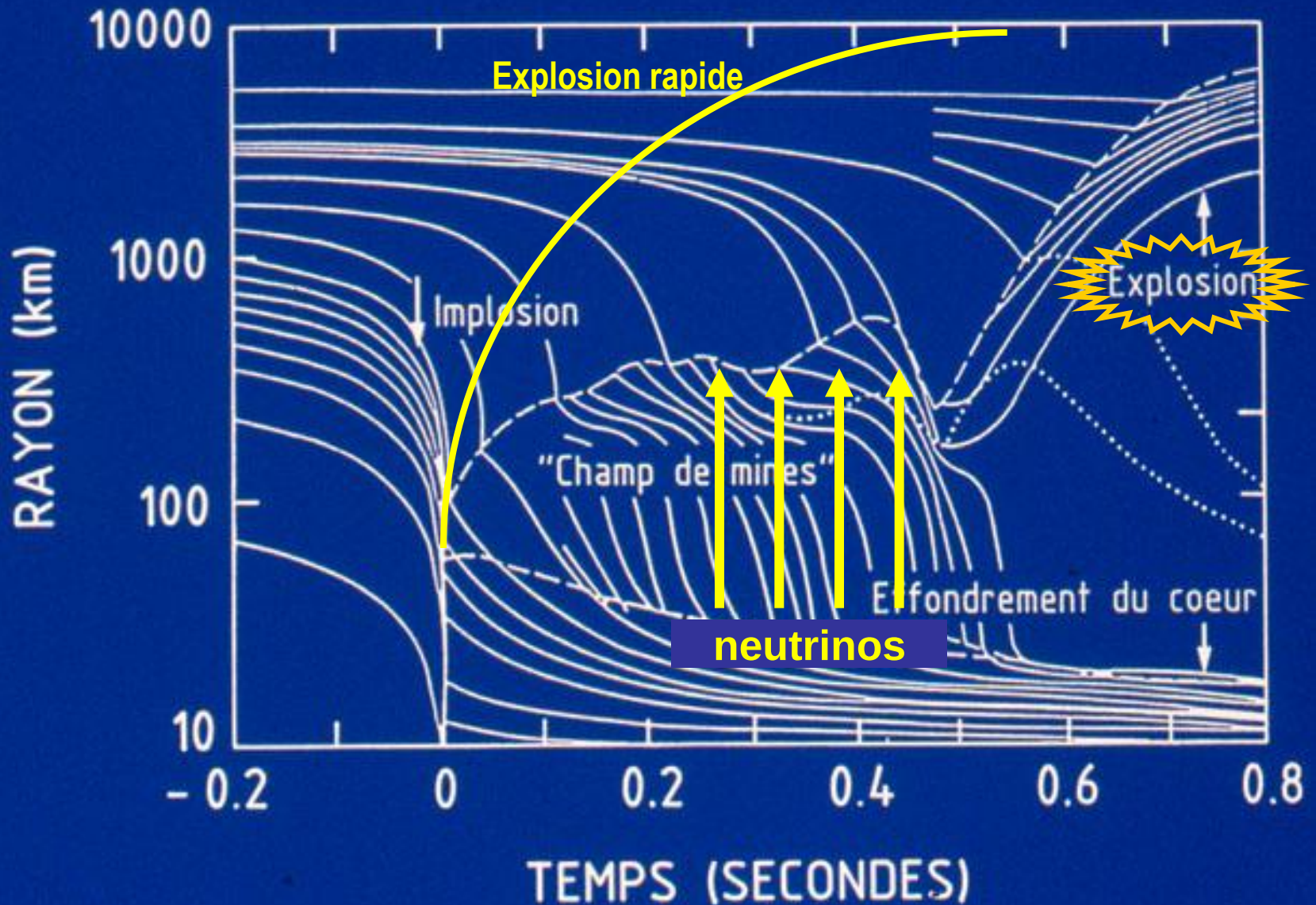
Les neutrinos piégés dans le coeur commencent à s'y échapper au bout de quelques dixièmes de seconde

Ils transportent beaucoup d'énergie (99 % de l'énergie de l'effondrement du coeur) dont une fraction est déposée dans la région (le "champ de mines") ou l'onde de choc "lutte" encore...

Grâce à ce renfort de neutrinos, l'onde de choc ranimée parvient à surmonter le "courant" de Fer qui lui tombe encore dessus, déferle à la base de l'enveloppe stellaire et la propulse dans l'espace (*Explosion retardée*)



L'explosion retardée des supernovae



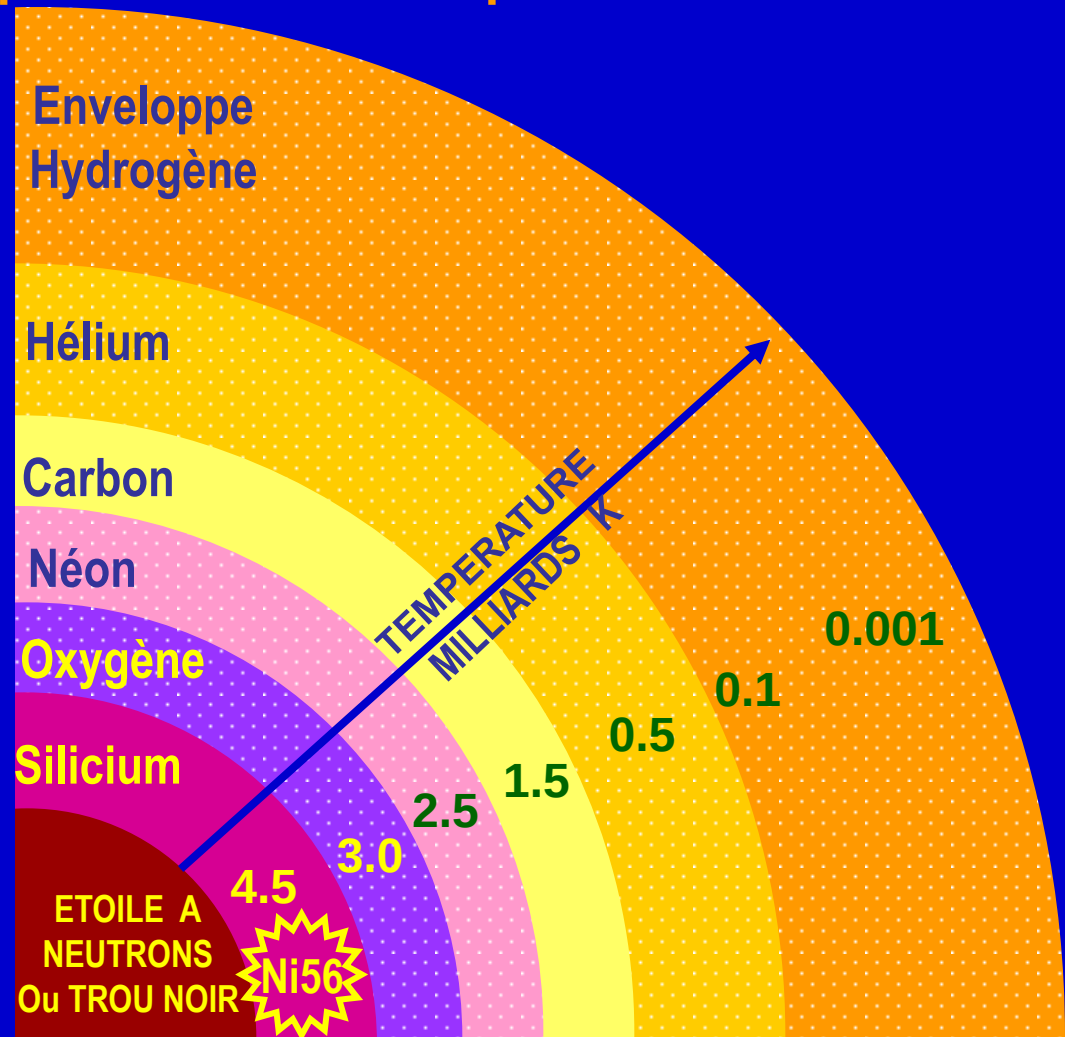
Ca ne semble pas marcher non plus...

La nucléosynthèse explosive dans les supernovae

Si l'explosion réussit,
l'onde de choc se propage
dans l'enveloppe stellaire
et chauffe les diverses
couches à de températures
de **combustion
nucléaire explosive**

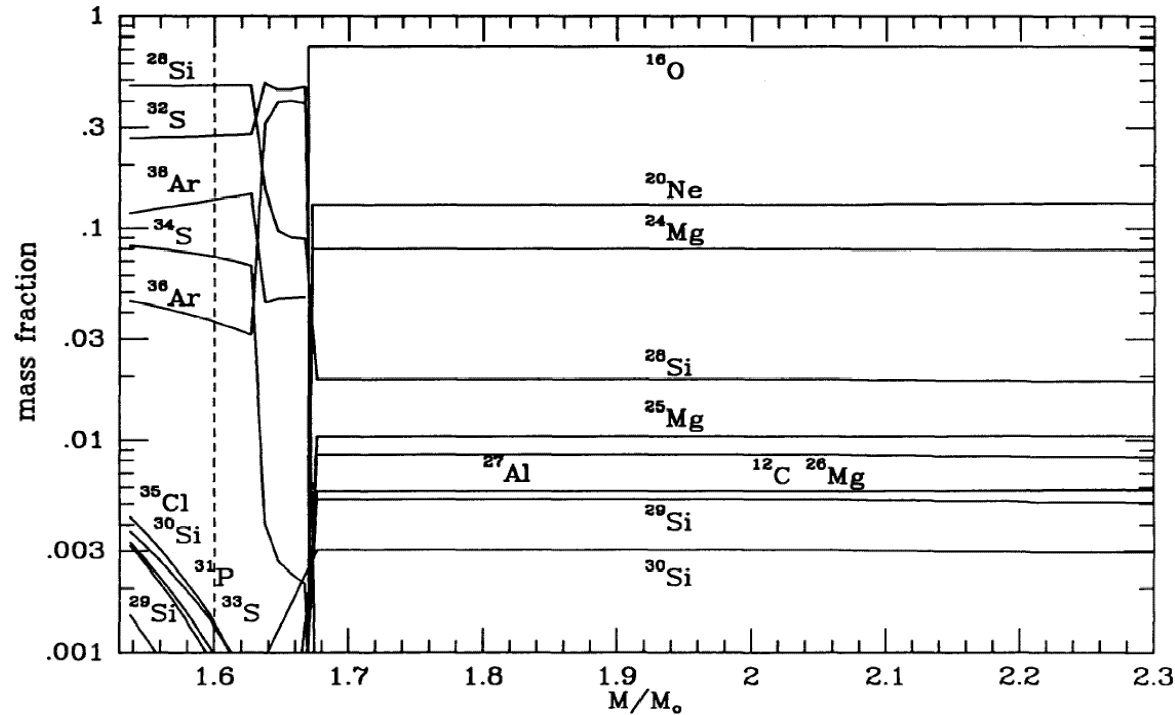
Les produits de nucléosynthèse
calme et explosive
sont éjectés dans
le milieu interstellaire

Les supernovae sont
les chefs-alchimistes
(les principaux sites
de nucléosynthèse)
dans l'Univers

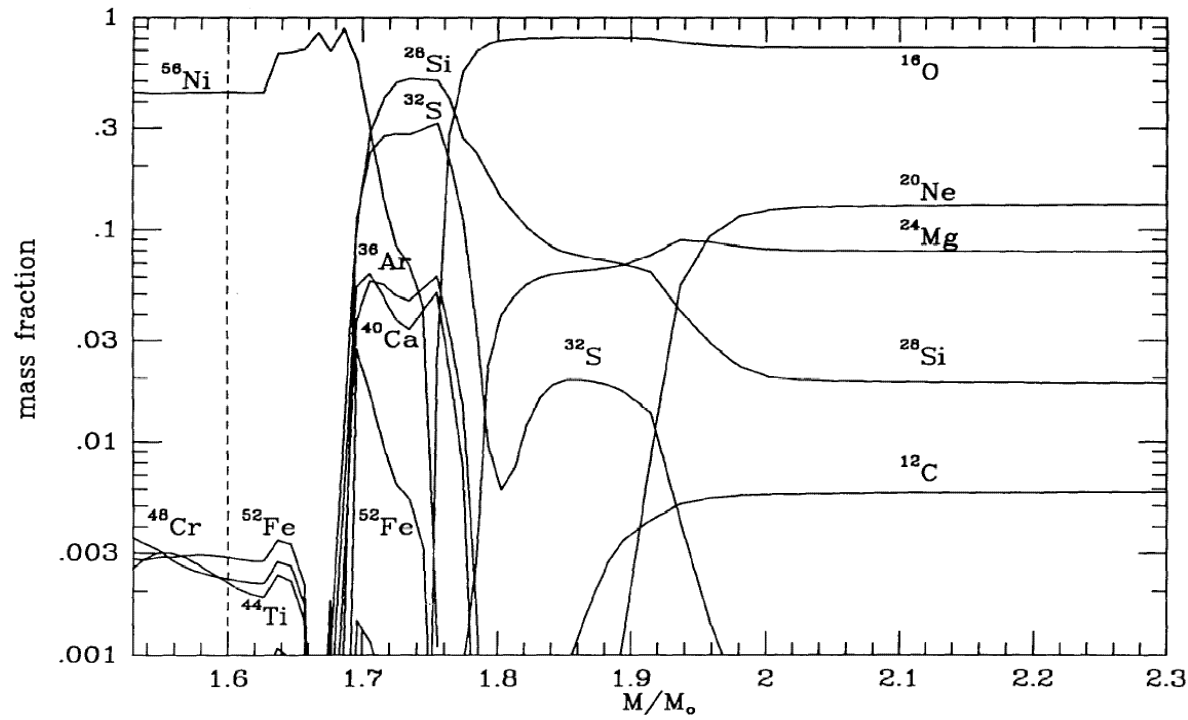


Le noyau stable Fe-56 est produit sous la forme
instable (radioactive) de Ni-56 :
 $\text{Ni-56} \rightarrow \text{Co-56} \rightarrow \text{Fe-56}$

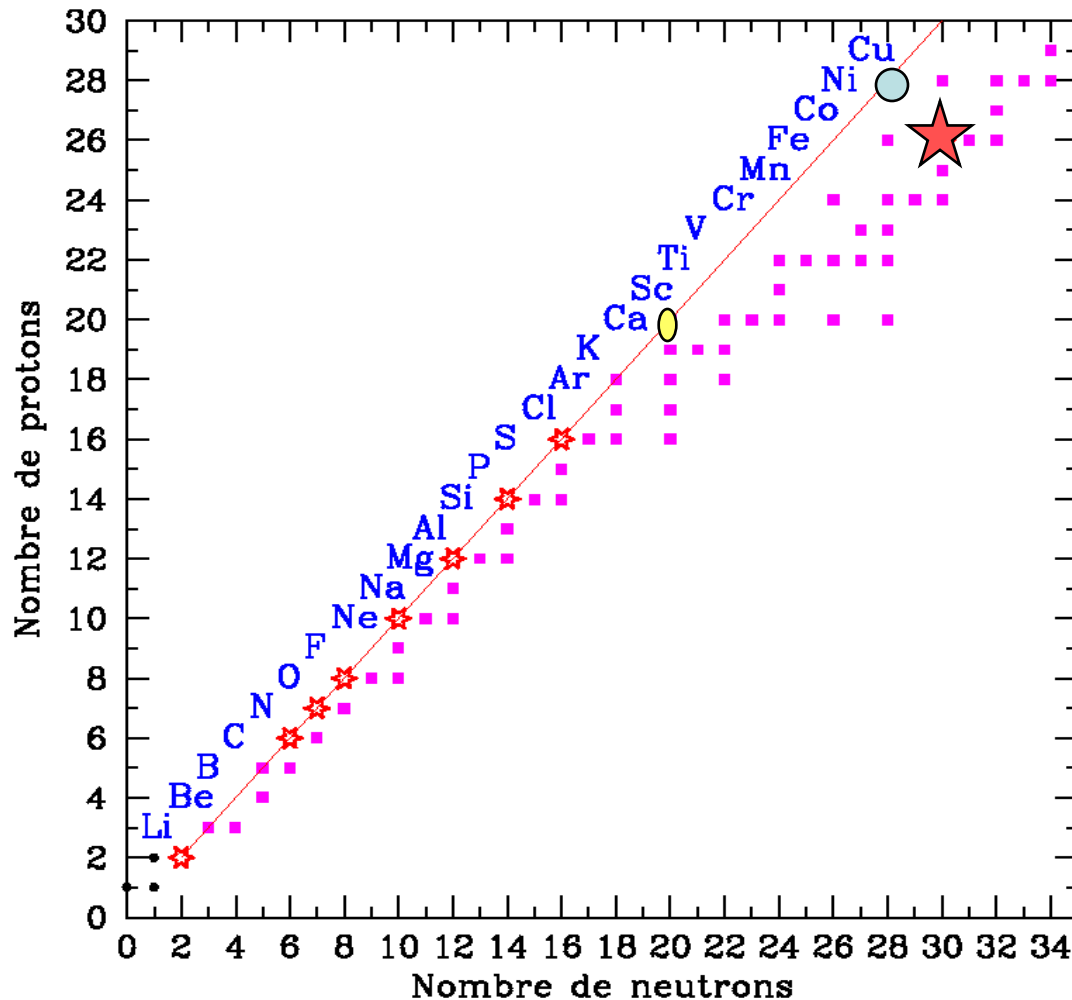
20 $M_{\odot}$ star:
Pre-explosive composition
of inner layers



20 $M_{\odot}$ star:
Post-explosive composition
of inner layers



THE WAY TOWARDS NSE (Nuclear Statistical Equilibrium)

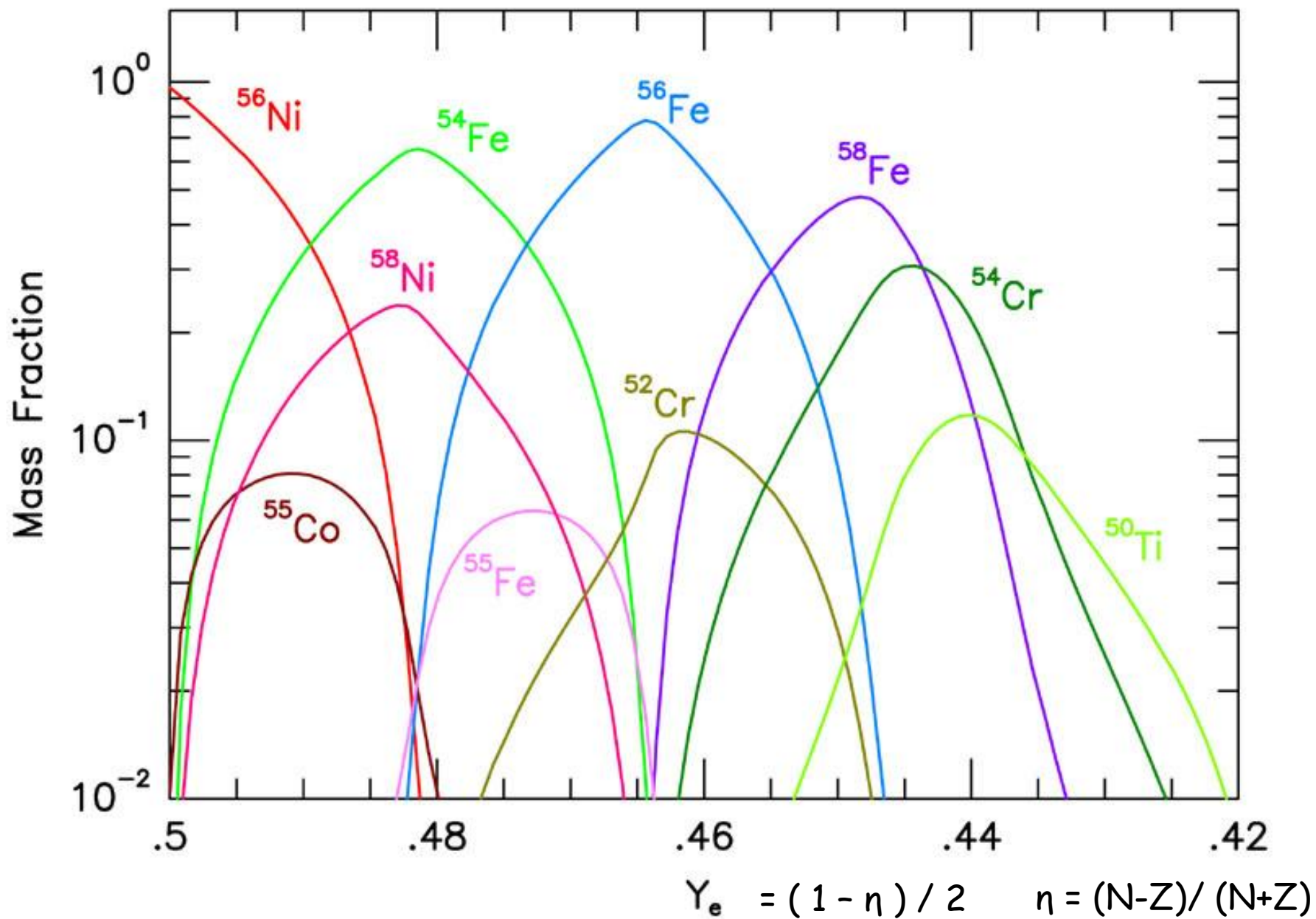


Ca40 is the last stable nucleus with $N=Z$ on the way of Si-melting towards NSE

In the stellar core weak interactions shift the neutron excess towards $\eta \sim 0.05 - 0.10$ and Fe56 dominates the NSE composition

Note : in explosive nucleosynthesis, weak interactions have no time to operate and η remains close to 0. Ni56 dominates the NSE composition

NSE Distributions at $T=3.5e9$ K $\rho=1e7$ g cm $^{-3}$



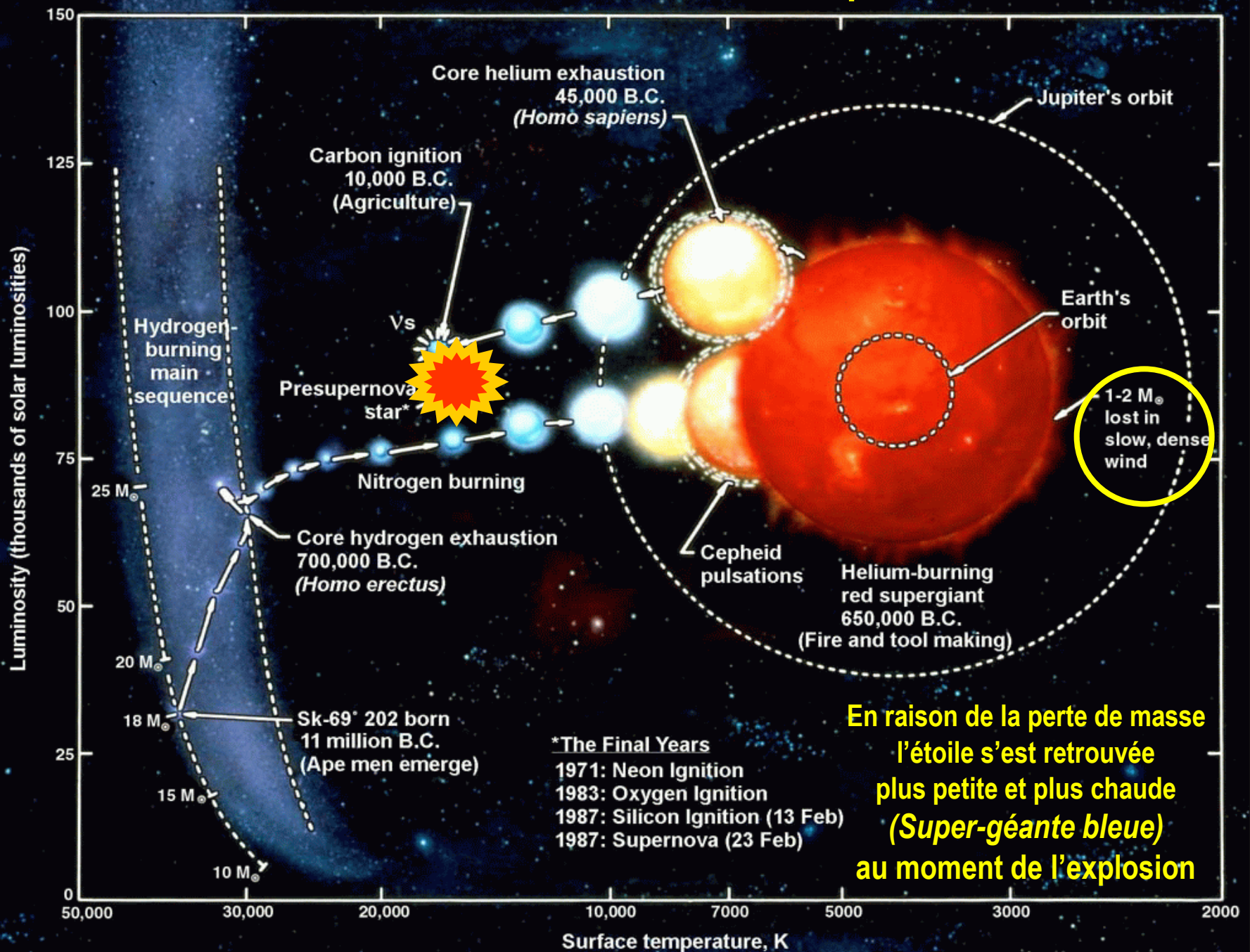
**R136 dans le
Grand Nuage de Magellan
(160 000 années-lumière de la Terre)**



Première supernova
visible à l'oeil nu
depuis 4 siècles

**L'étoile parent était une Super-géante bleue (rayon : ~40 Rayon sol.)
et non pas une Super-géante rouge (rayon: ~1000 Rayon sol.). POURQUOI ?**

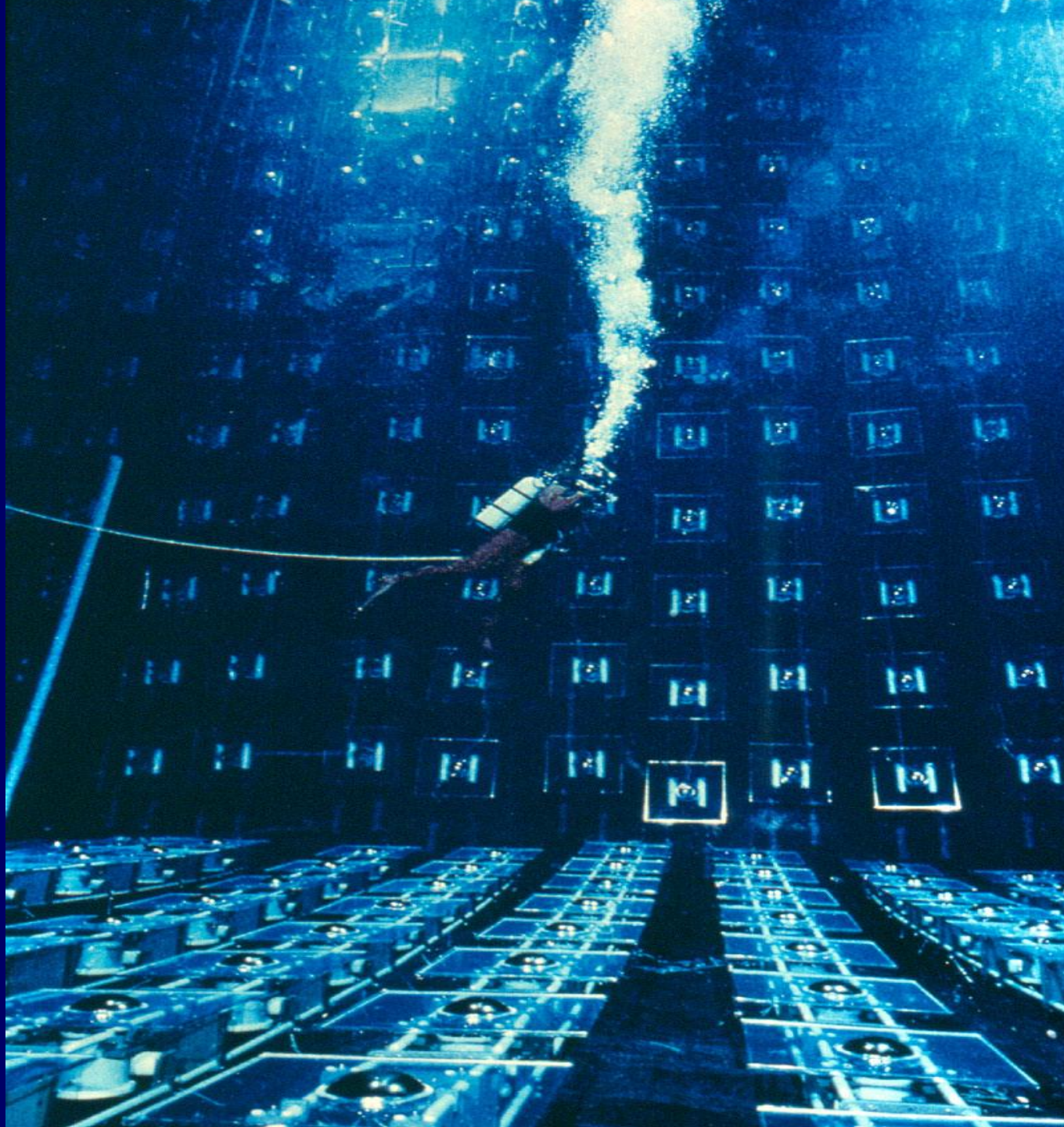
SN1987A : évolution de l'étoile-parent

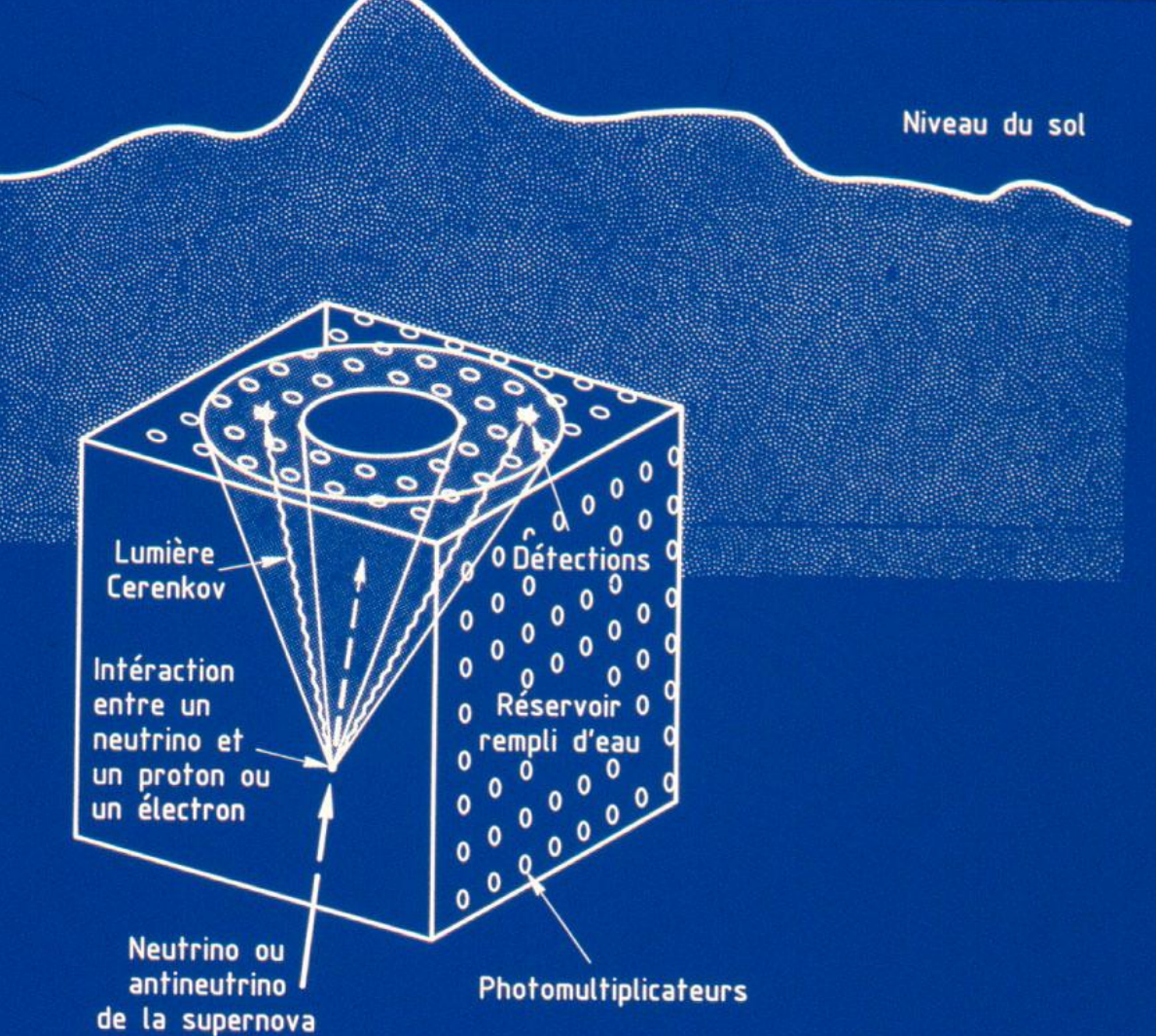


**Détecteur de Neutrinos
Kamiokande (Japon)
2000 tonnes d'eau**

**Il a détecté une poignée
de neutrinos
2h20 avant
l'apparition de
la supernova**

***C'est le temps
que l'onde de choc
a mis pour
atteindre la surface
de la supergéante bleue
(à 3000 km/s)***





Parmi les trillions de neutrinos
qui ont traversé la Terre
du Sud au Nord
le 23 Février 1987,
une vingtaine ont été captés
par deux détecteurs dans
l'hémisphère Nord
(IMB aux USA et Kamioka au Japon)
pendant $\Delta t \sim 10$ secondes

Energie totale de neutrinos
de SN1987A :

$$E_v = 3 \cdot 10^{53} \text{ ergs}$$

*10 000 fois supérieure
à l'énergie lumineuse*

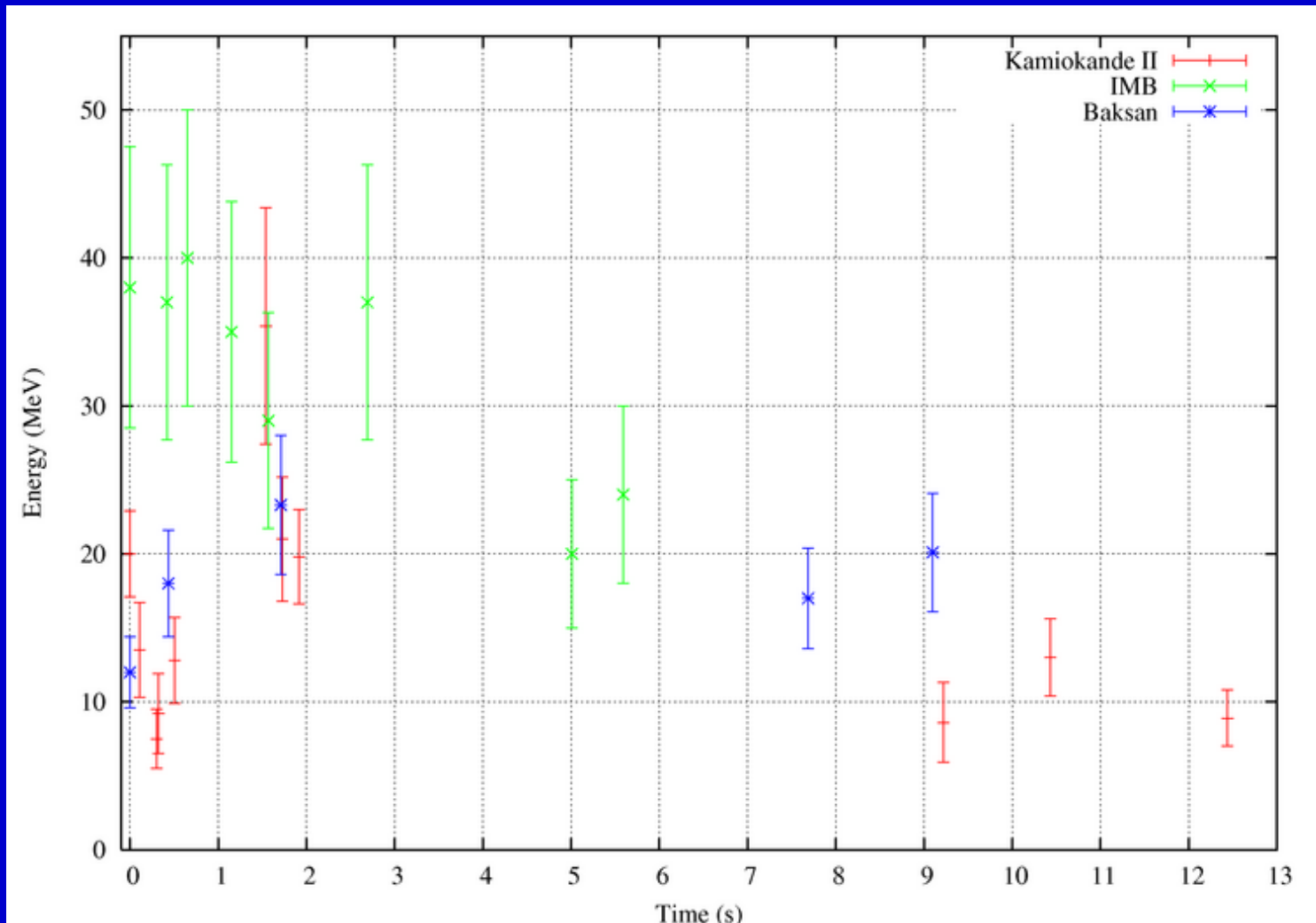
Cette énergie est égale à l'énergie $E_{\text{GRAV}} \sim G M^2/R$ libérée quand une masse $M = M_{\text{SOLEIL}}$
s'effondre jusqu'à un rayon $R=10$ km (étoile à neutrons)

Confirmation éclatante de l'intuition de Zwicky

Luminosité neutrinique : $L_v = E_v / \Delta t = 3 \cdot 10^{52} \text{ erg/s}$ ($L_{\text{SOLEIL}} = 4 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$)

Autant que toutes les étoiles dans l'Univers observable

Neutrinos de SN1987A: une vingtaine de neutrinos ont été détectés en ~10 s

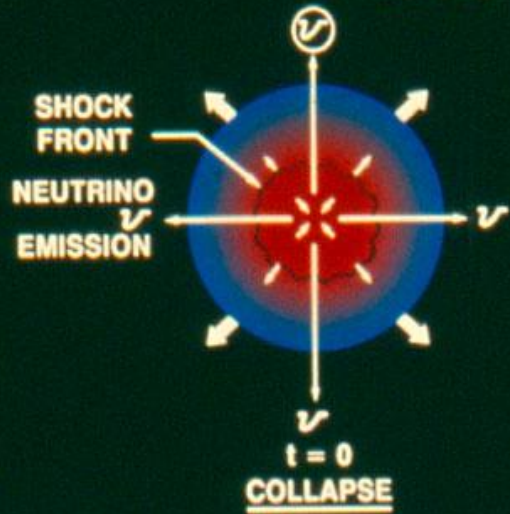


Durée de l'émission: *pas de trou noir formé*

Température de “neutrinosphère” de la supernova : *100 milliards de degrés*

Mais pas d'information sur le rôle de neutrinos dans l'explosion

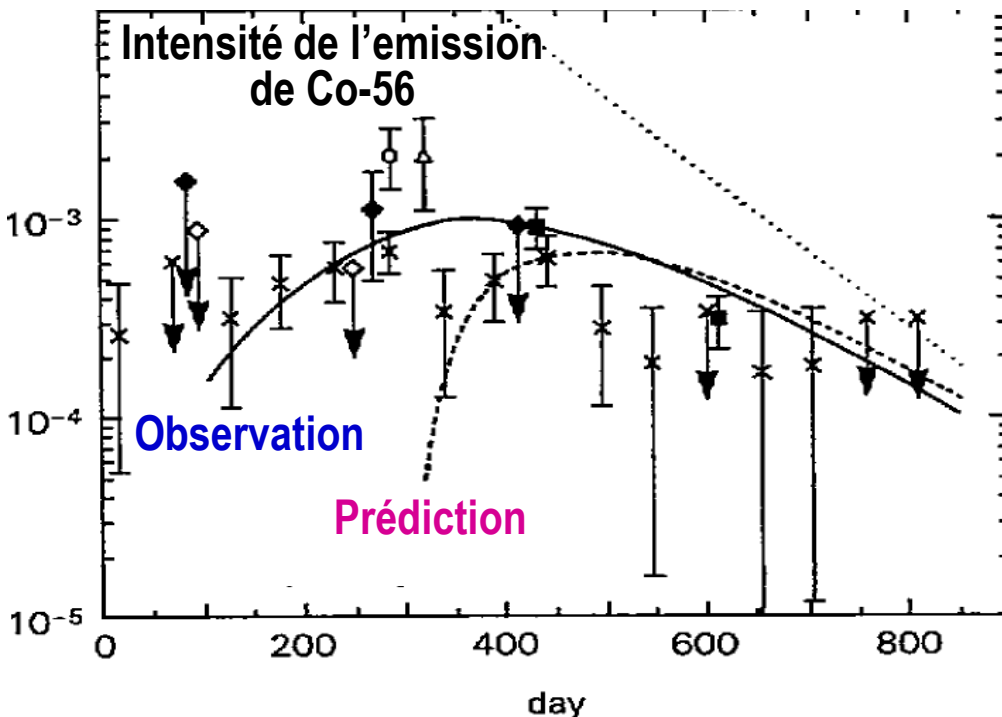
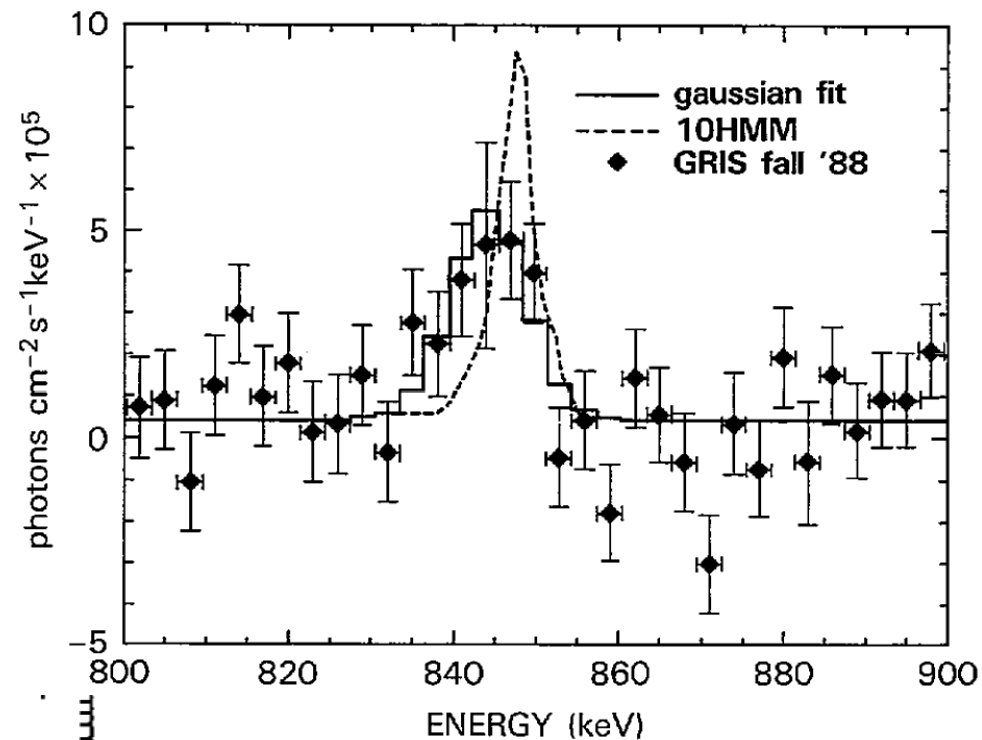
TYPE II SUPERNOVA ENVELOPE EVOLUTION



La raie gamma du Cobalt-56
a été vue dans SN1987A
(une première !)

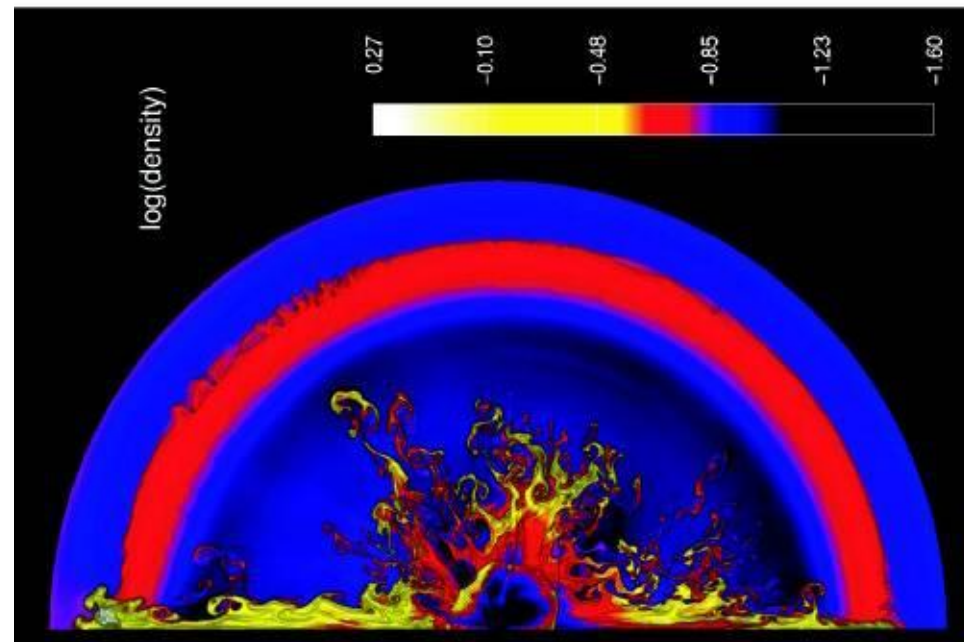
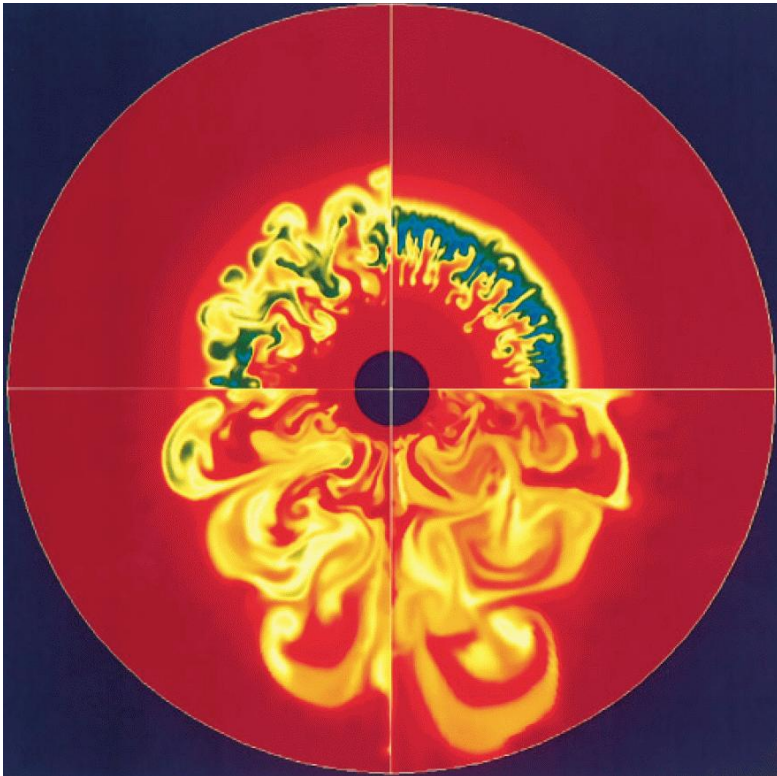
Confirmation de la
nucléosynthèse explosive

Ni-56 → Co-56 → Fe-56
8.8 jours 113 jours



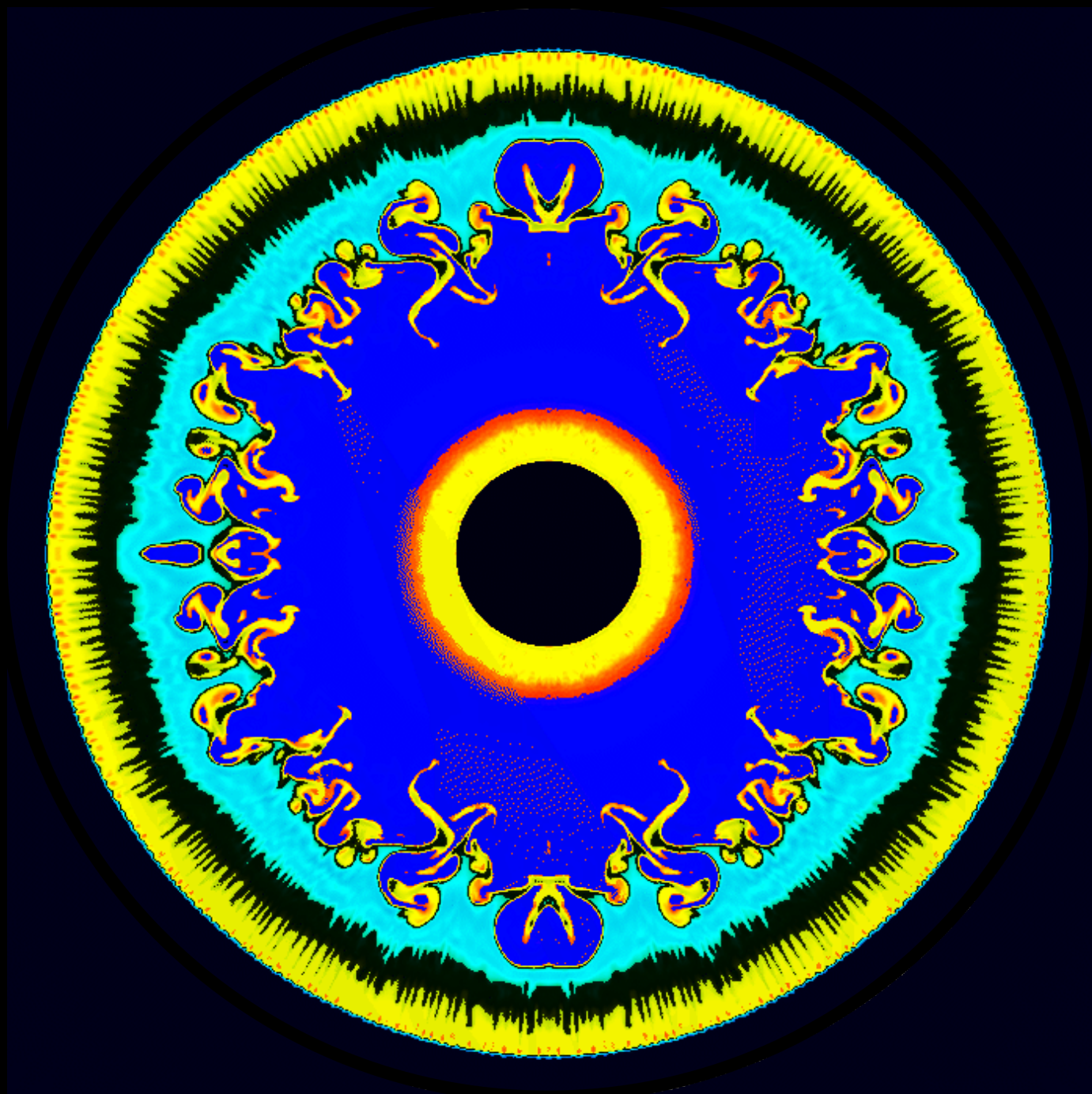
Mais... elle a été vue
Six mois plus tôt que prévu
par les modèles !

Lors de l'explosion,
d'importantes
instabilités hydrodynamiques
se produisent au sein de
la supernova



Ces instabilités *mélagent l'intérieur*,
et de noyaux atomiques lourds,
produits près du coeur (e.g. Nickel-56)
se trouvent *près de la surface*.

Les photons gamma de leur radioactivité
peuvent ainsi *sortir plus facilement*
de l'intérieur de la supernova



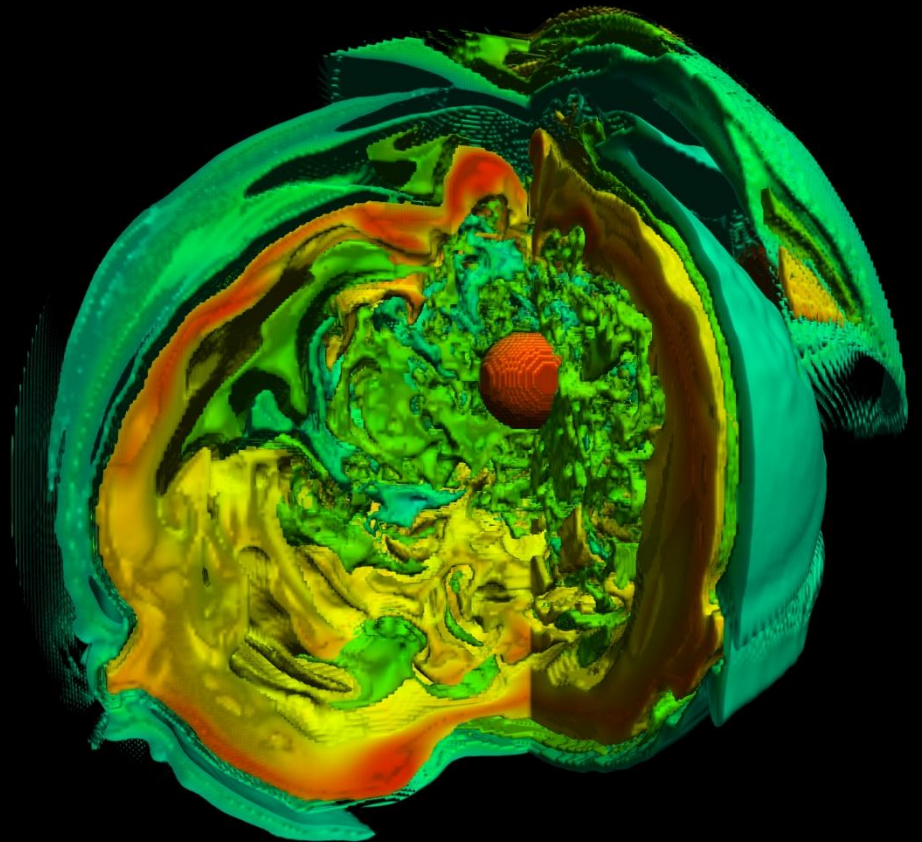
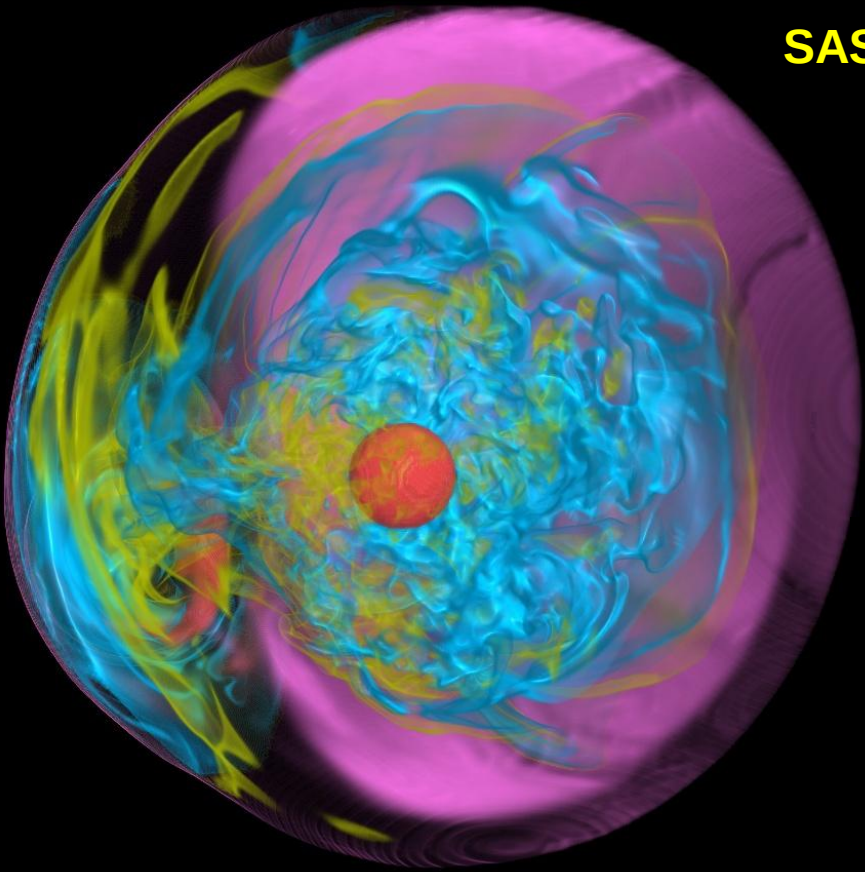
Explosion du coeur d'une étoile massive (K. Kifonidis, Max Planck Institut, Munchen)

1 sec

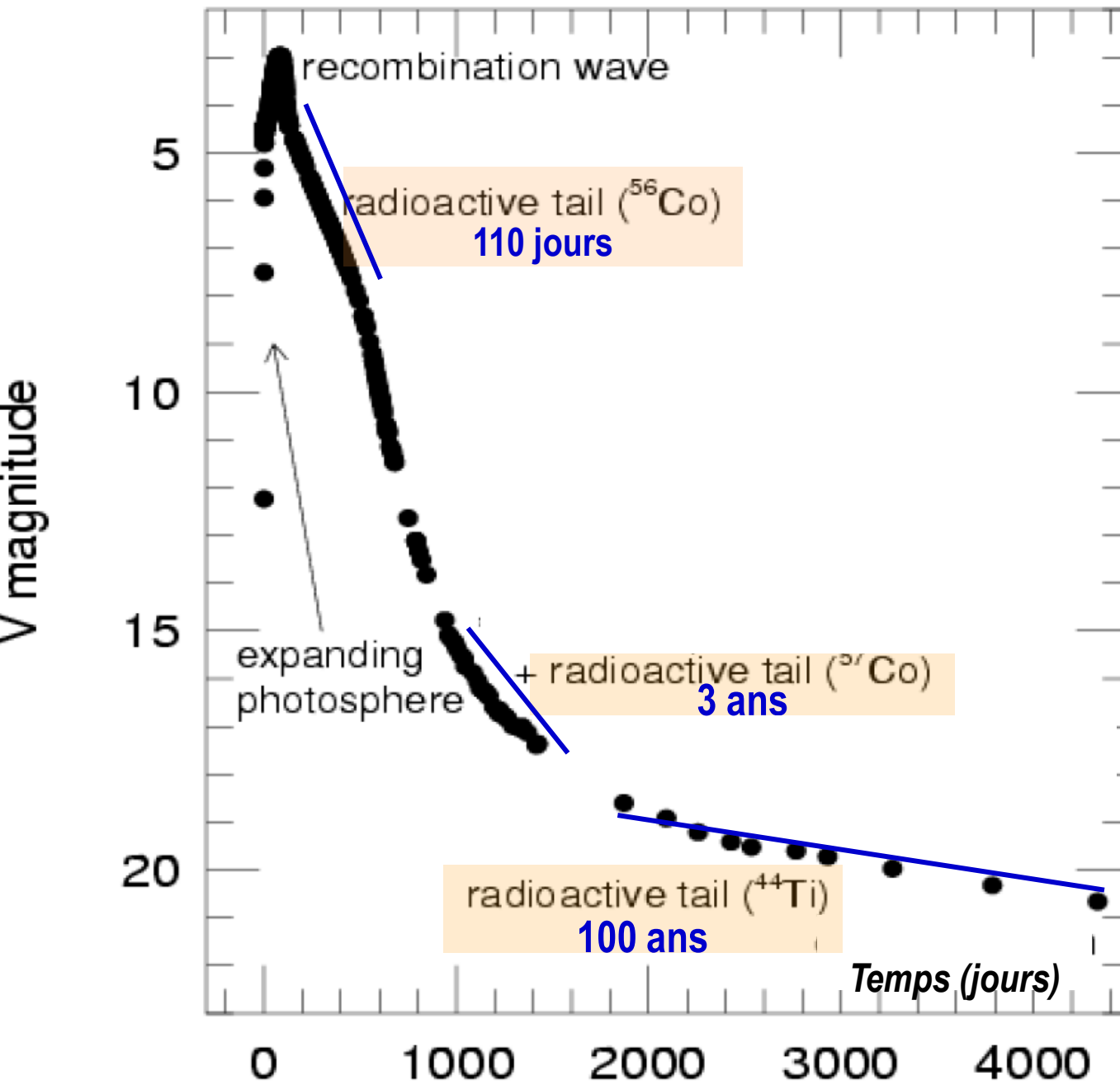


SASI (Standing Accretion Shock Instability)

Joue peut-etre un role important
dans les explosions des SN



SN1987A : Les feux d'artifice

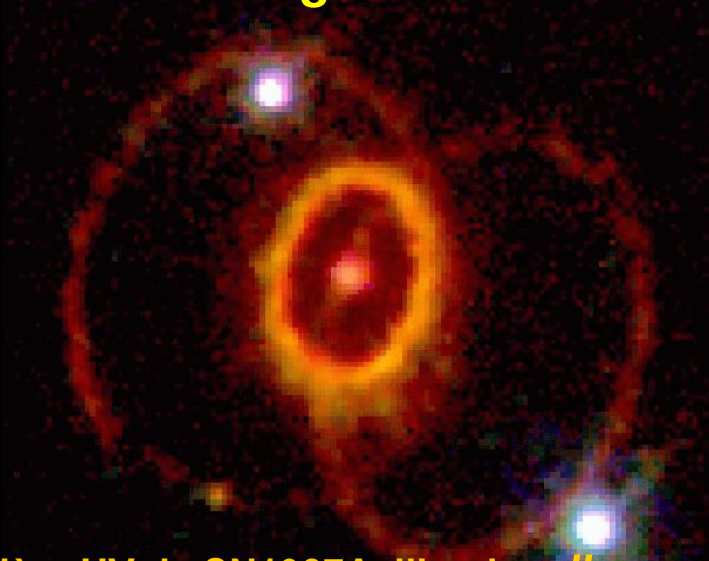


Lumière radioactive :

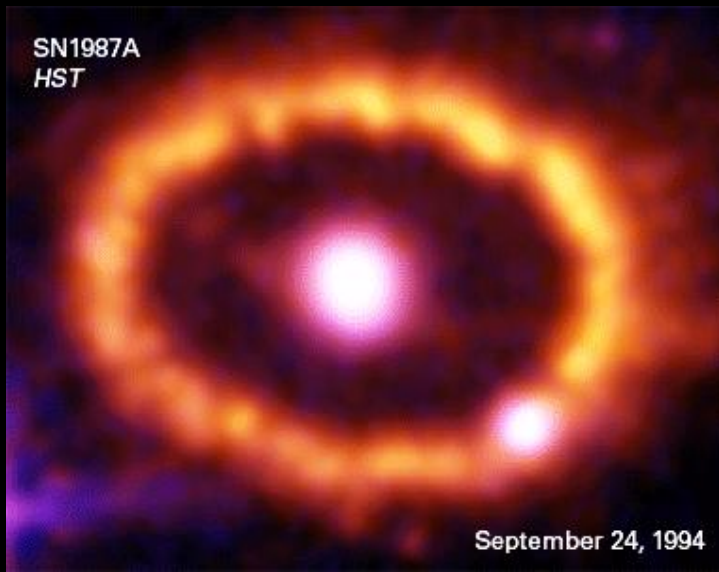
La luminosité de SN1987A
était alimentée
successivement par la
radioactivité de:
Cobalt-56,
Cobalt-57,
et *Titan-44*

en très bon accord avec
les prédictions de la
Nucléosynthèse explosive

SN1987A : le seigneur des anneaux



La lumière UV de SN1987A illumine *l'anneau*
et les lobes de matière perdue par l'étoile
par vents stellaires (ou système binaire ?)
environ 20 000 ans avant l'explosion

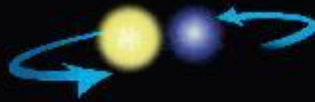


Quelques années plus tard
les couches externes de SN1987A
projetées à 30 000 km/s,
frappent aussi l'anneau,
qui se met à rayonner



A binary system for the progenitor of SN1987A ?

1



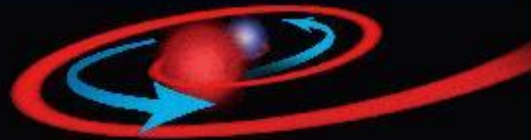
A binary stellar system. The more massive (primary) star evolves first.

5



The primary star explodes as a supernova, causing the inner edge of the ring to glow.

2



As the primary star becomes a giant, it engulfs its companion. The core of the primary and the companion are in a "common envelope."

6



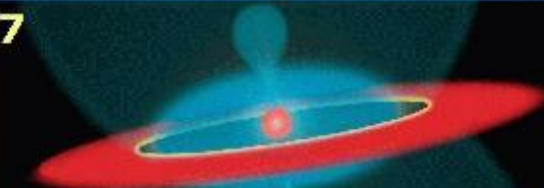
Ejecta from the explosion start to move outward.

3



As the companion spirals in, it ejects the envelope, mostly in the orbital plane. The companion merges with the core.

7



The bubble of ejecta grows, approaching the inner edge of the disk.

4

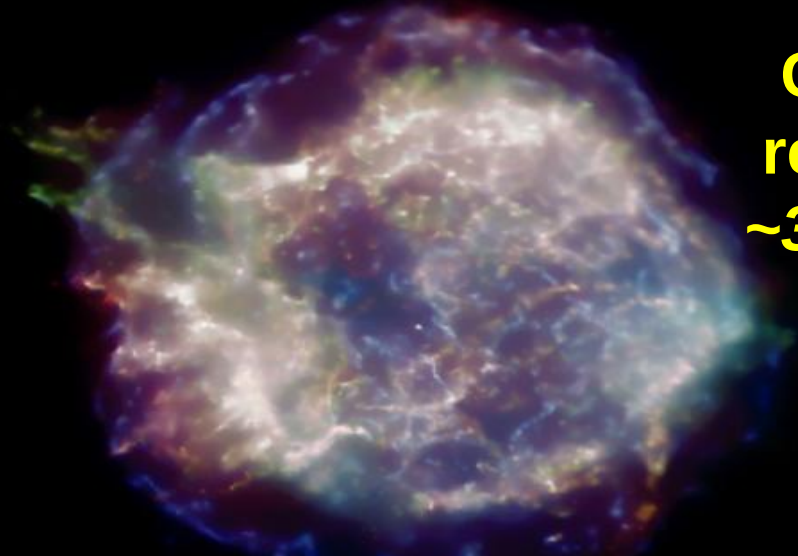


A fast wind from the core interacts with the torus around it, forming a ring of denser material.

8



The ejecta strike and shock the inner ring at an increasing number of spots, which light up on impact.



**Cas- A
remnant
~300 ans**



**Crab
nebula
~1000 ans**



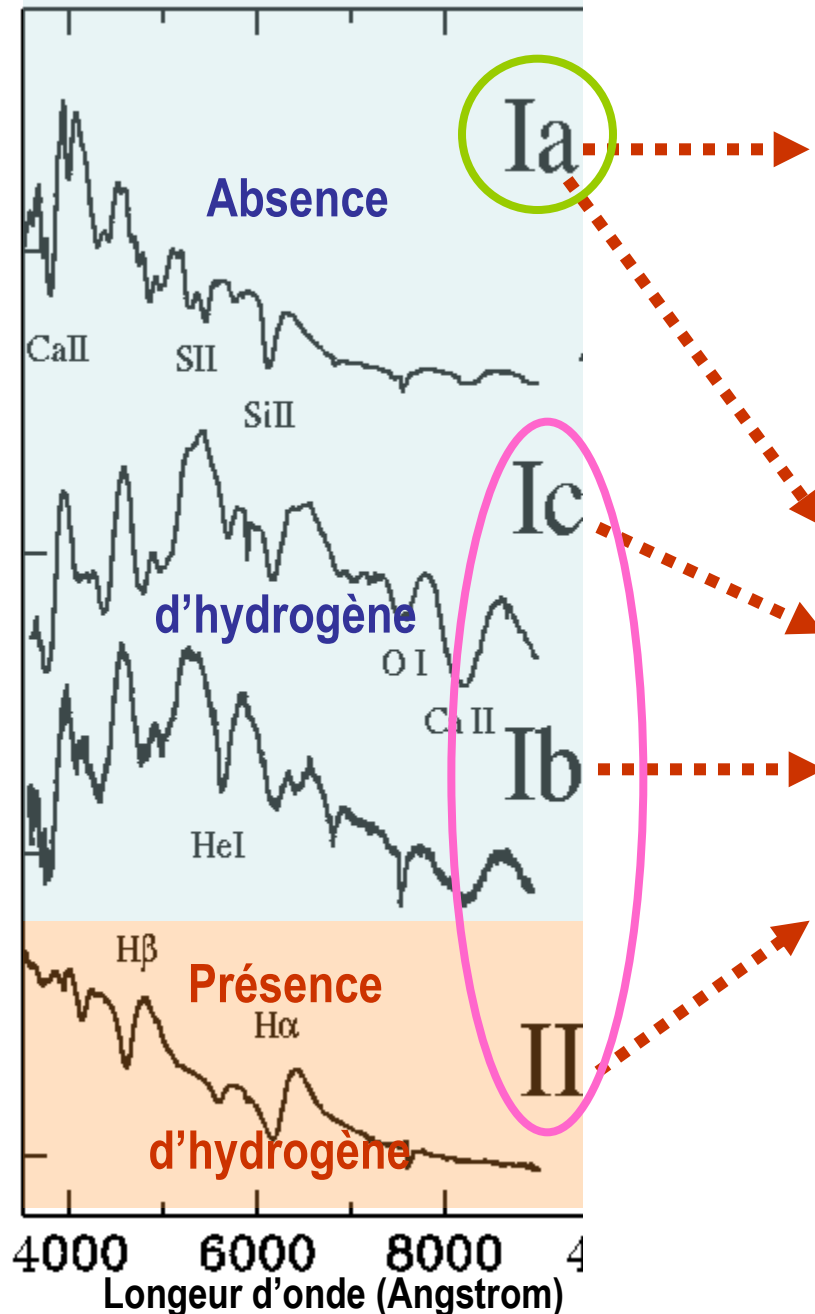
**Vela
remnant
~11 000 ans**

**La matière de SN1987A
sera dispersée
dans le milieu interstellaire,
à partir duquel
des nouvelles
générations stellaires
seront formées**

Supernova spectra

Galaxie - hôte

Mécanisme d'explosion



ELLIPTIQUES

Etoiles petites et
vieilles seulement

SN Ia :

*Explosion
thérmonucléaire
d'une
Naine Blanche*

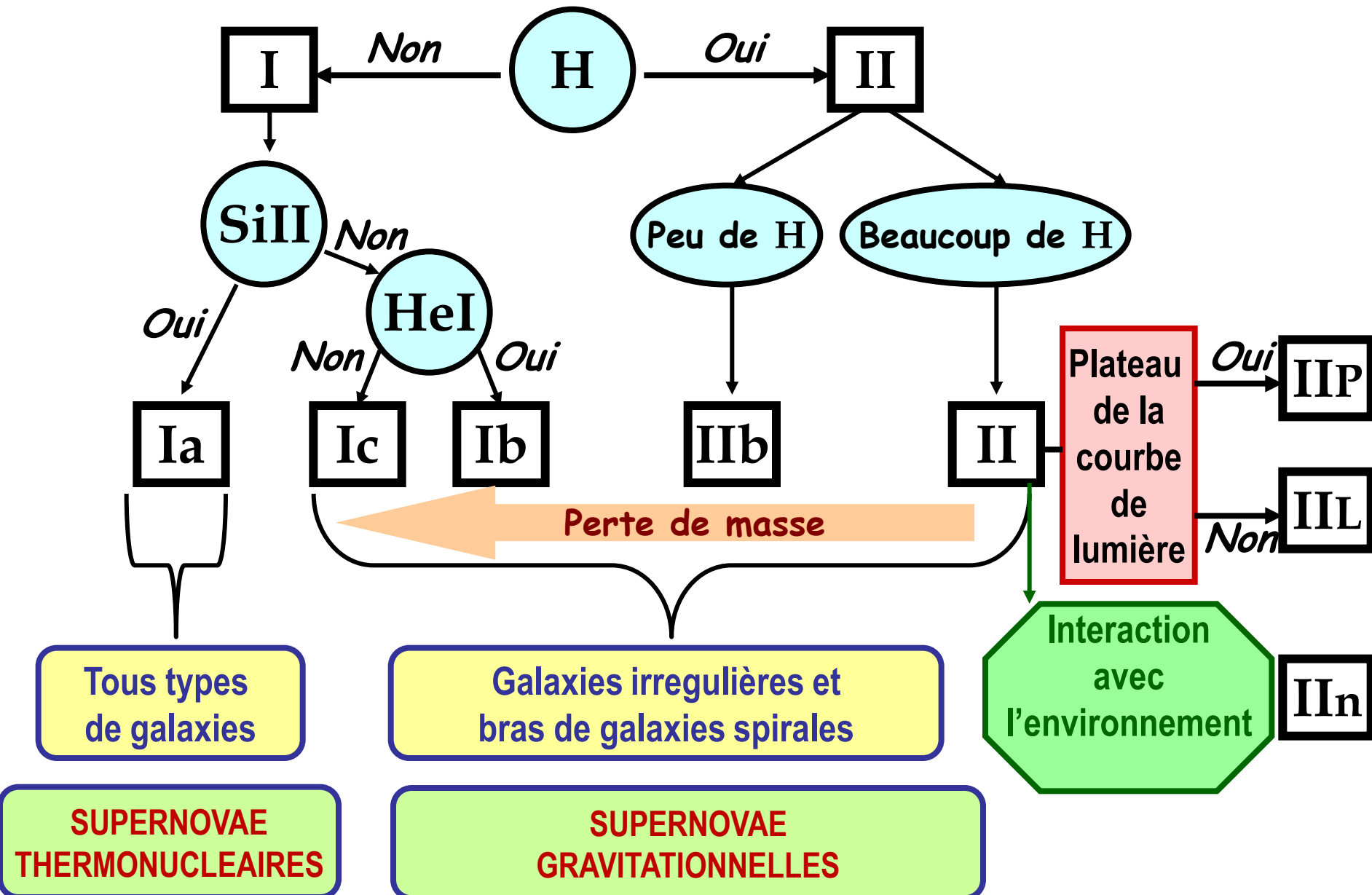
SPIRALES-IRREGULIERES

Etoiles vieilles, mais aussi
jeunes et massives

SN II, SN Ib,c :

*Explosion par
effondrement
gravitationnel
du coeur d'une
étoile massive
avec (SN II)
ou sans (SN Ib,c)
enveloppe d'hydrogène*

Classification des supernovae



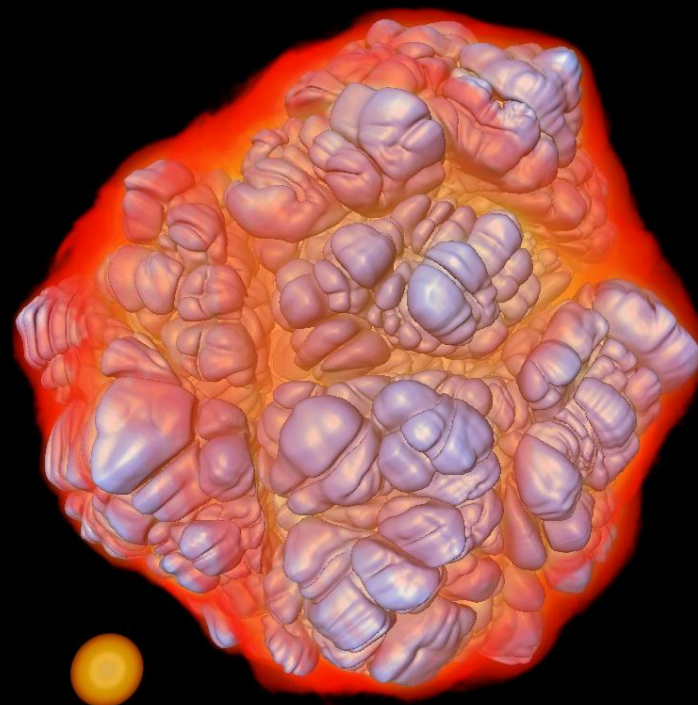
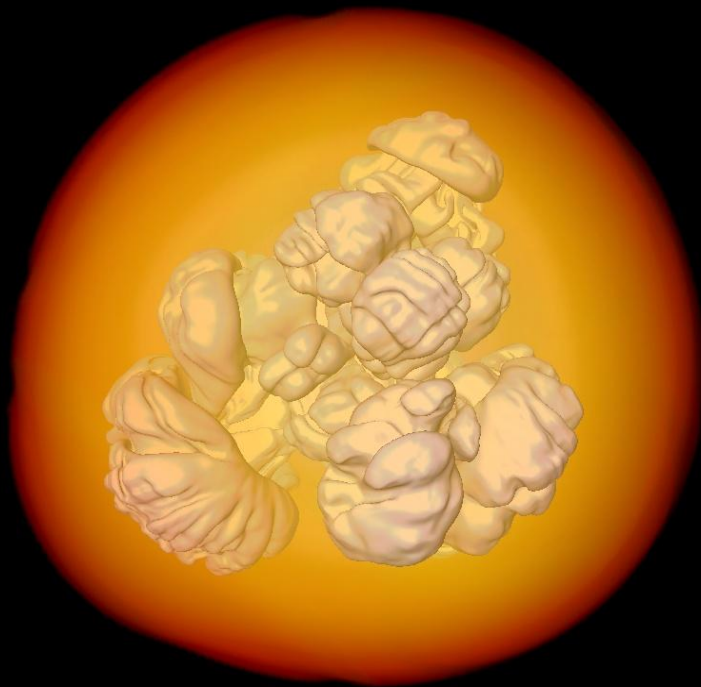
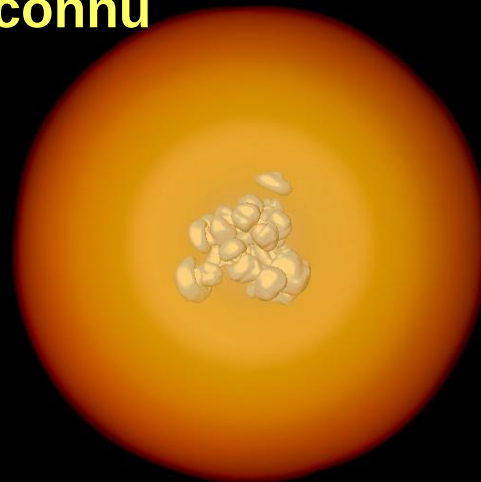
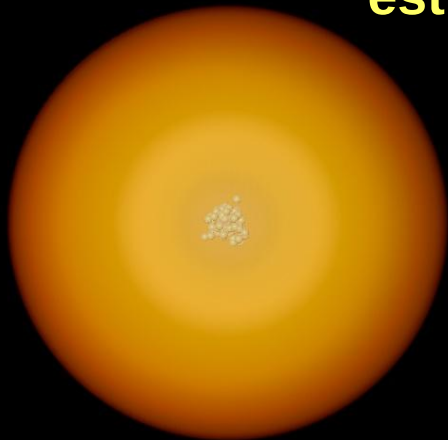
SUPERNOVAE THERMONUCLEAIRES

La masse de la Naine Blanche
(composée de Carbone et Oxygène)
augmente par *accretion de matière*
de l'étoile-compagnon

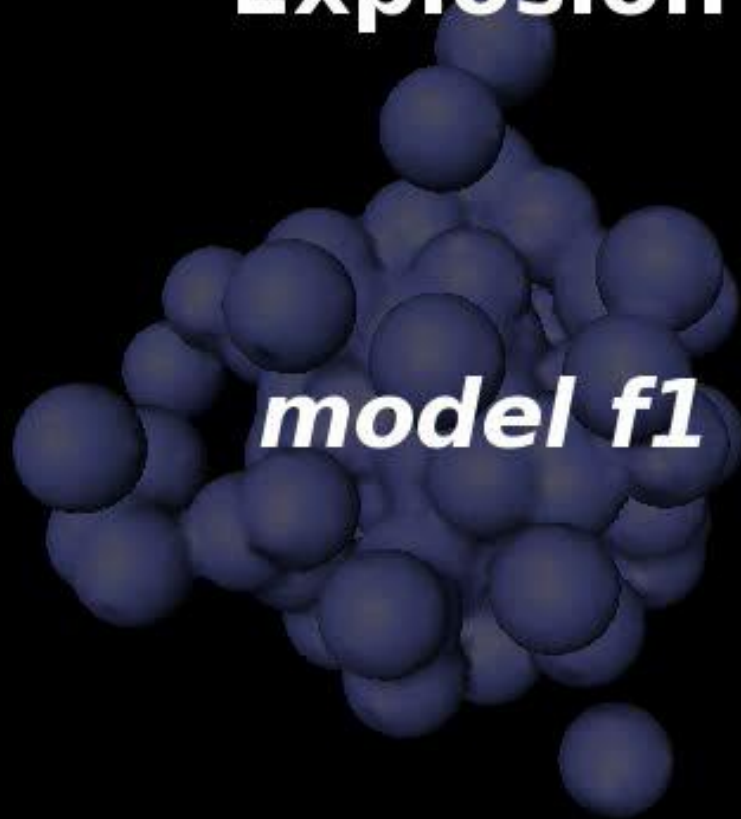
Quand elle dépasse la masse-limite
de Chandrasekhar ($1.4 M_{\text{SOLEIL}}$)
la naine blanche s'effondre,
sa température monte et
les réactions thermonucléaires
s'emballent dans les régions centrales

La flamme thermonucléaire se propage rapidement vers l'extérieur
et en quelques secondes *incinère la quasi-totalité de la naine blanche*
et propulse sa matière dans l'espace (pas de résidu)

**Le mode de propagation de la flamme thermonucléaire
est encore assez mal connu
(déflagration
vs détonation)**

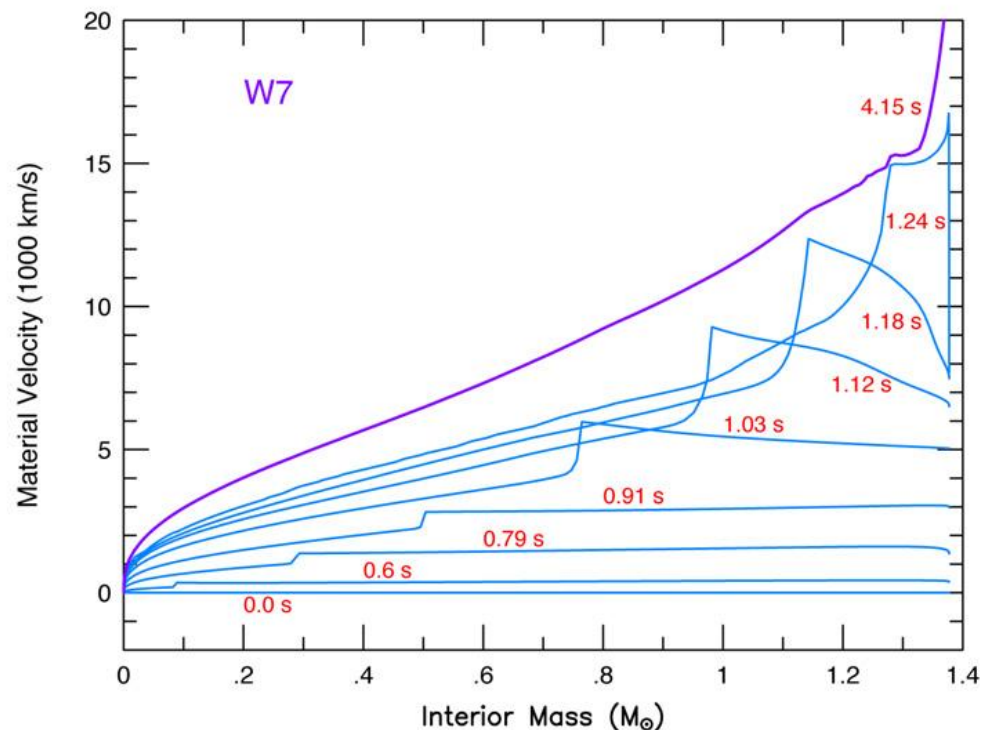
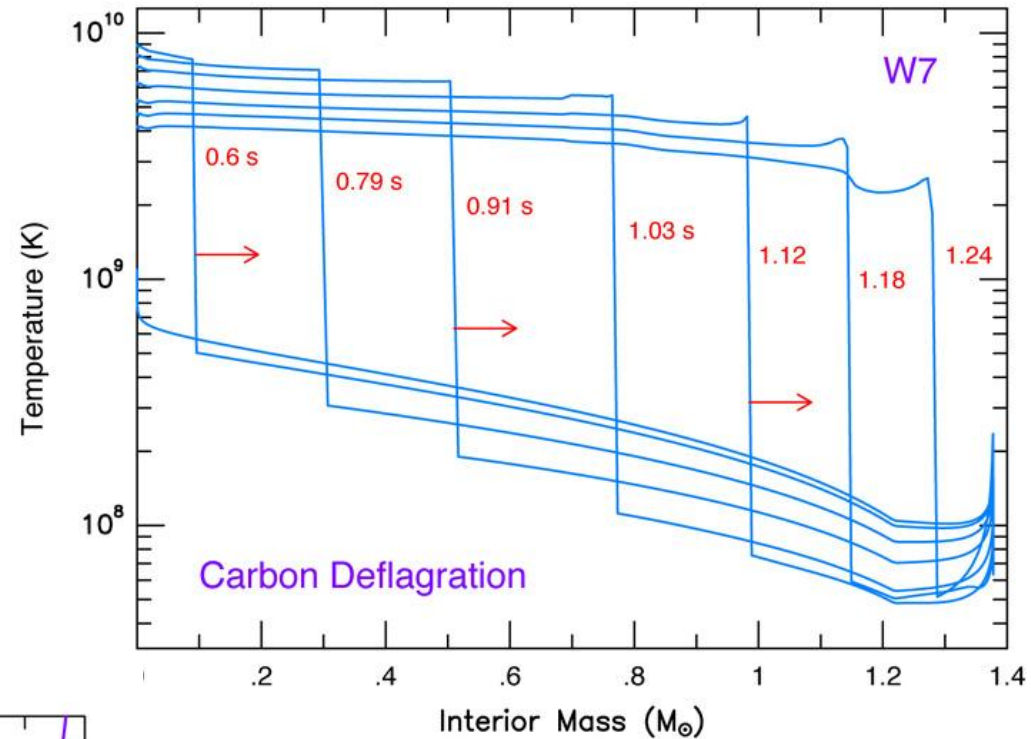


Thermonuclear Supernova Explosion



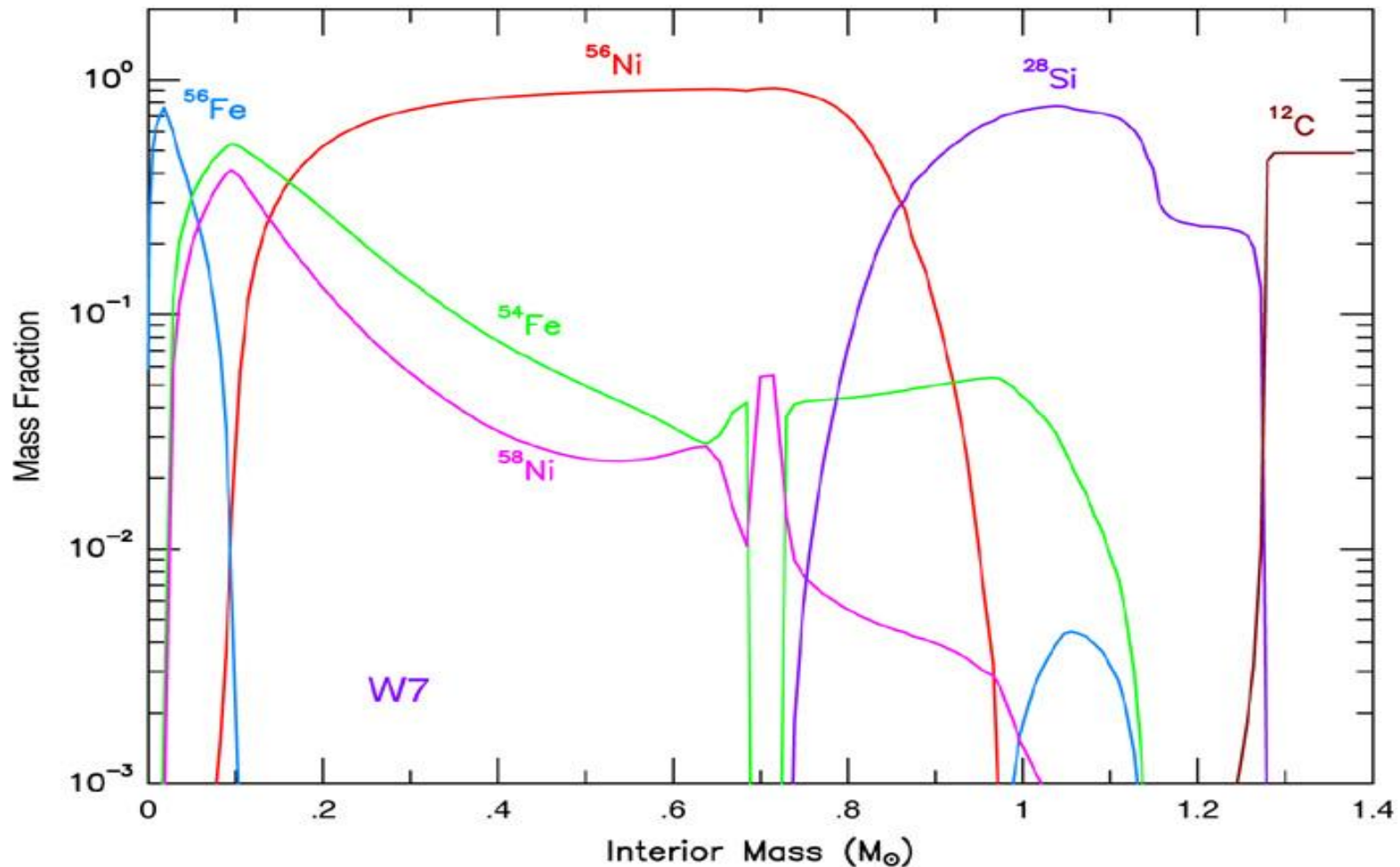
(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

Evolution du profil de température



et de la vitesse
d'une SNIa

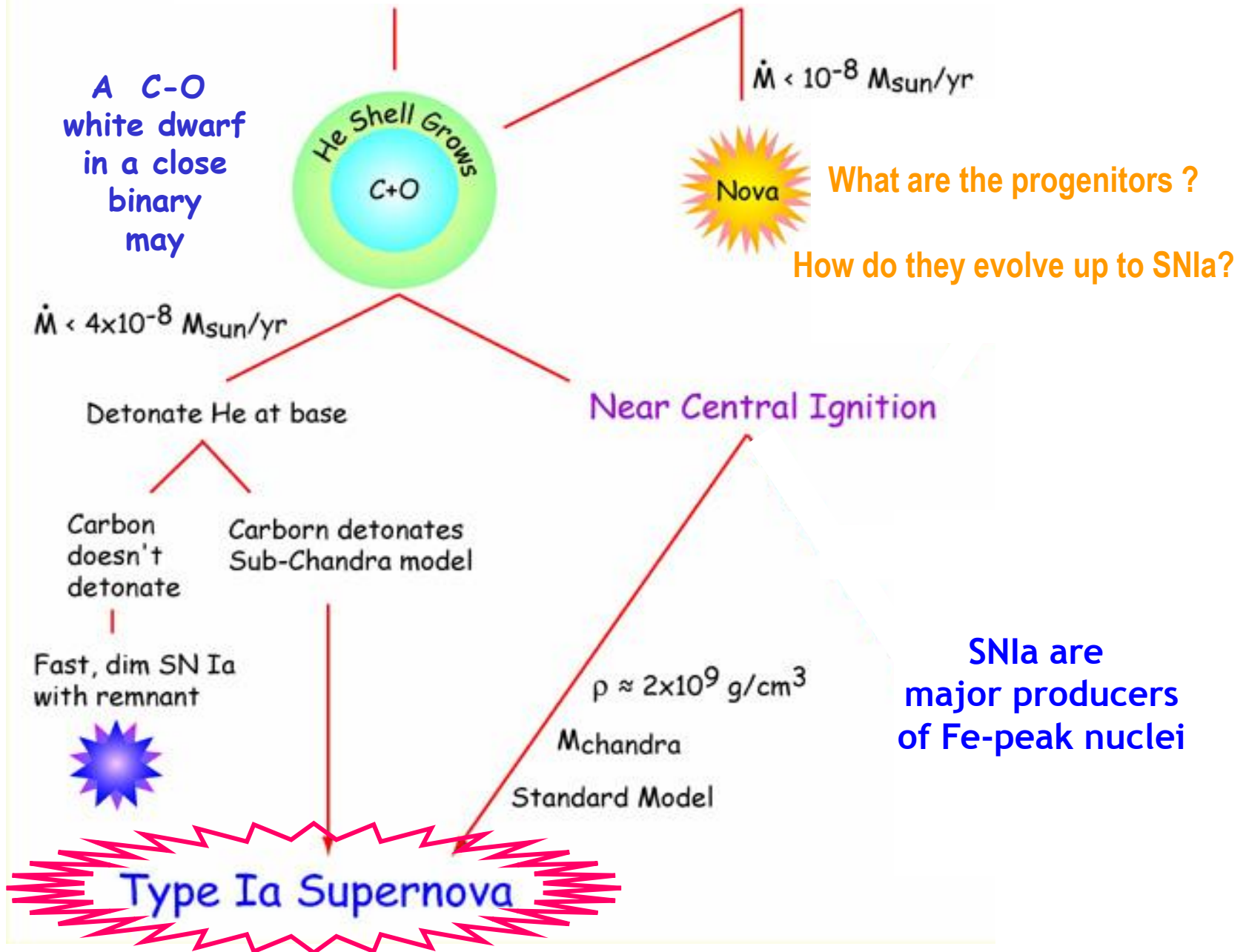
La nucléosynthèse des SNIa



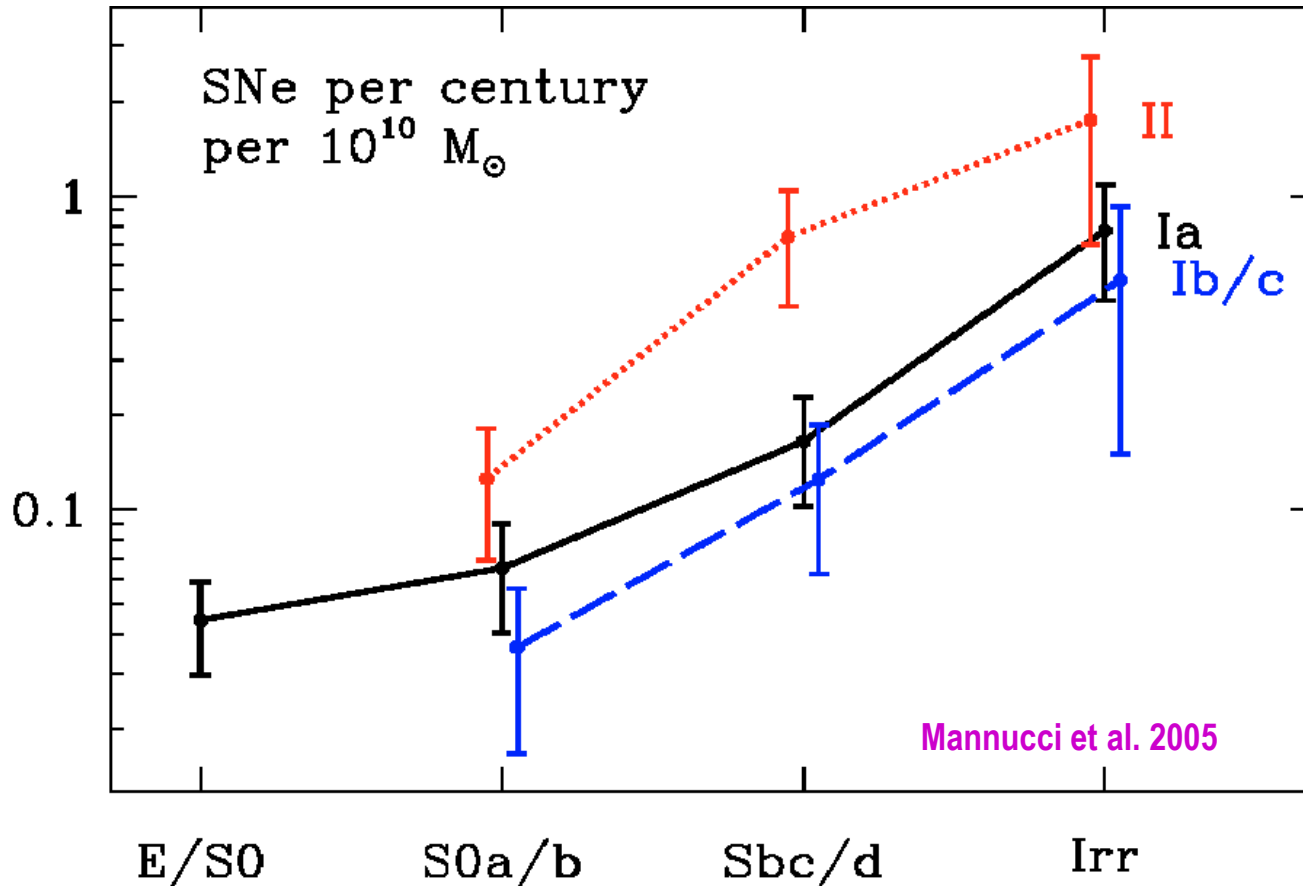
Environ la moitié de la masse de la Naine blanche se transforme en Ni-56 dont la radioactivité ($\text{Ni-56} \rightarrow \text{Co-56} \rightarrow \text{Fe-56}$) alimente l'émission lumineuse de la supernova

Energie dégagée: $E_{\text{NUCL}} = \Delta E \times 0.5 M_{\text{CH}} \times N_A \sim 10^{51} \text{ erg}$
 $\Delta E = 0.8 \text{ MeV/Nucleon}$ $M_{\text{CH}} = 1,44 M_{\odot}$ $N_A = 6,023 \times 10^{23}$

Stellar explosions in binary systems



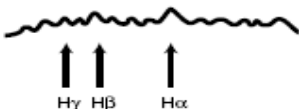
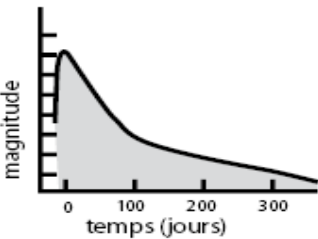
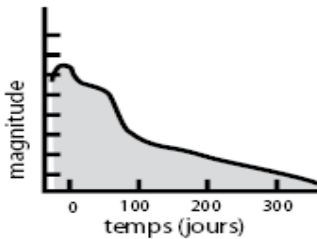
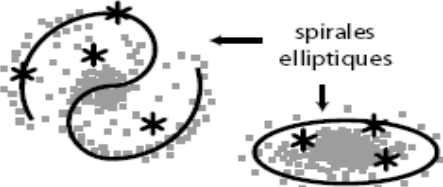
Fréquences et rôle de SNIa en Evolution Chimique Galactique



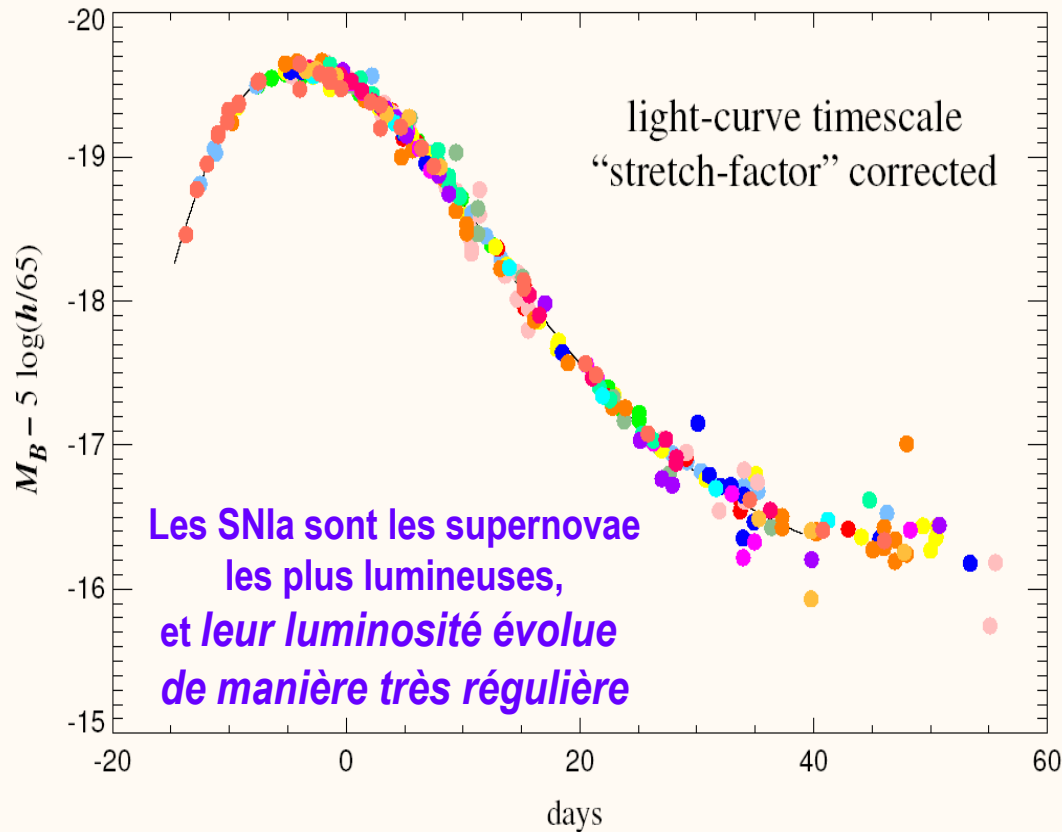
Les SNIa sont ~5 fois moins fréquentes que les SN gravitationnelles (SNI+SNII) dans une galaxie Sbc, comme la Voie Lactée

mais chaque SNIa produit ~10 fois plus de Fe qu'une SN_{GRAV}

Les SNIa produisent ~50-65 % du Fer Galactique

TYPE	SN I	SN II
SPECTRE	SN1972e  absence d'hydrogène	SN1970g  présence d'hydrogène
TYPE «STANDARD»	SN Ia	SN II-P
COURBE DE LUMIÈRE		
GALAXIE MÈRE		
MODÈLE STANDARD	 explosion thermonucléaire d'une naine blanche	 effondrement du cœur d'une étoile massive
ÉNERGIE	10^{44} joules 0% neutrinos 99% cinétique 1% lumière	10^{46} joules 99% neutrinos 1% cinétique 0,01% lumière
RÉSIDU	RIEN	ÉTOILE À NEUTRONS OU TROU NOIR

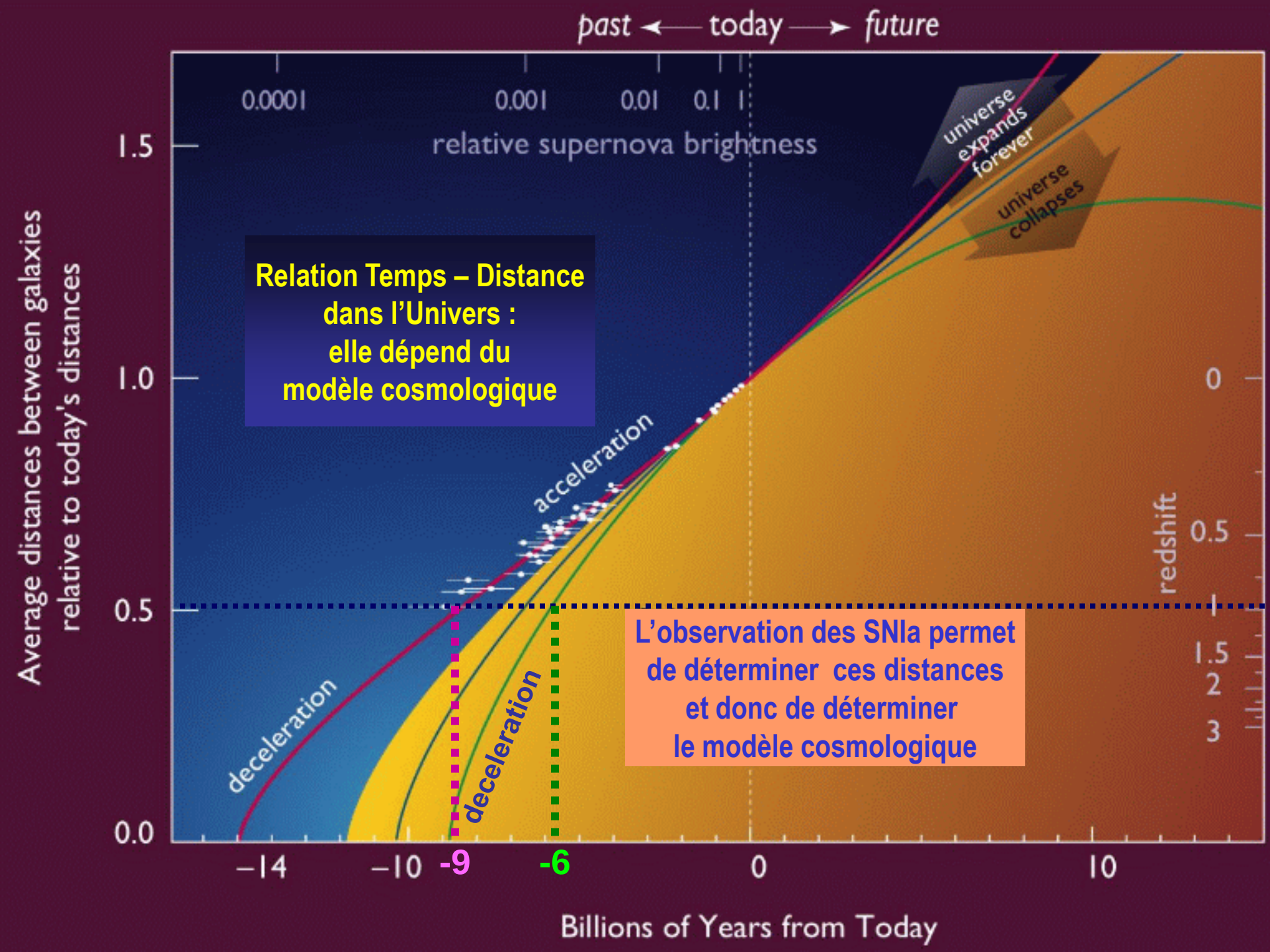
SN Ia : les phares du bout de l'Univers

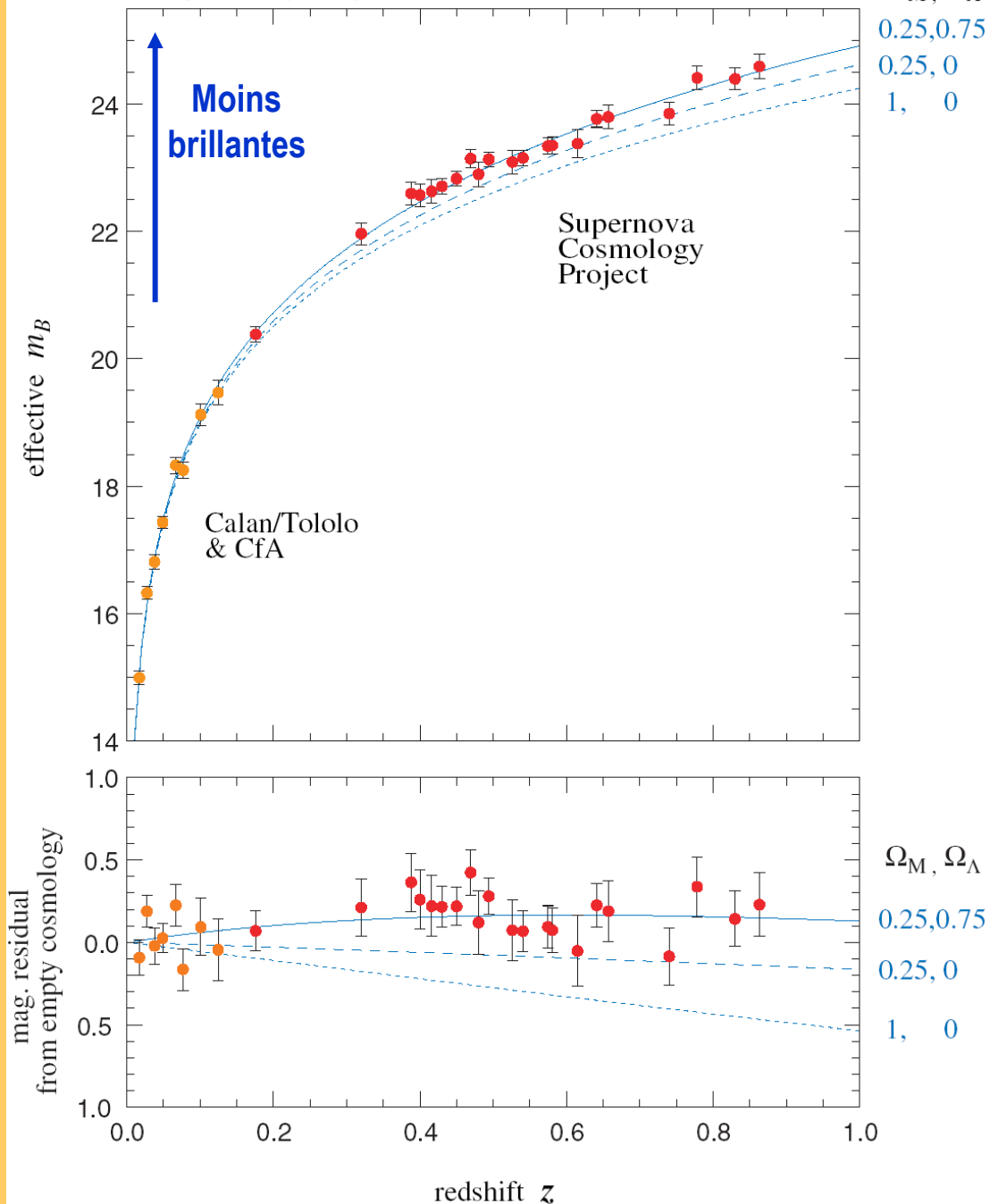


Elles sont utilisées comme
"*chandelles standard*"
en Cosmologie,
pour la *détermination de distances*:

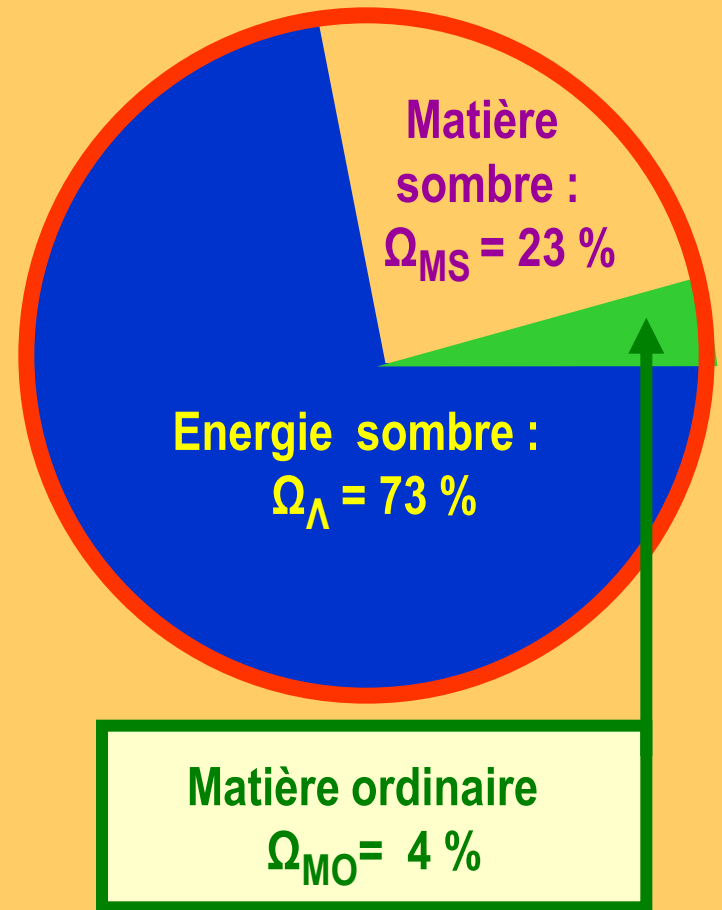
$$\text{Flux sur Terre} = \frac{\text{Luminosité}}{4 \pi (\text{Distance})^2}$$

Cela a permis la découverte en 1998 de l'*accélération de l'expansion de l'Univers*
attribuée à une (toujours mystérieuse) *Energie sombre*





L'Univers est plat
(densité totale $\Omega_{\text{TOTAL}} = 1$)
et dominé par l'énergie sombre

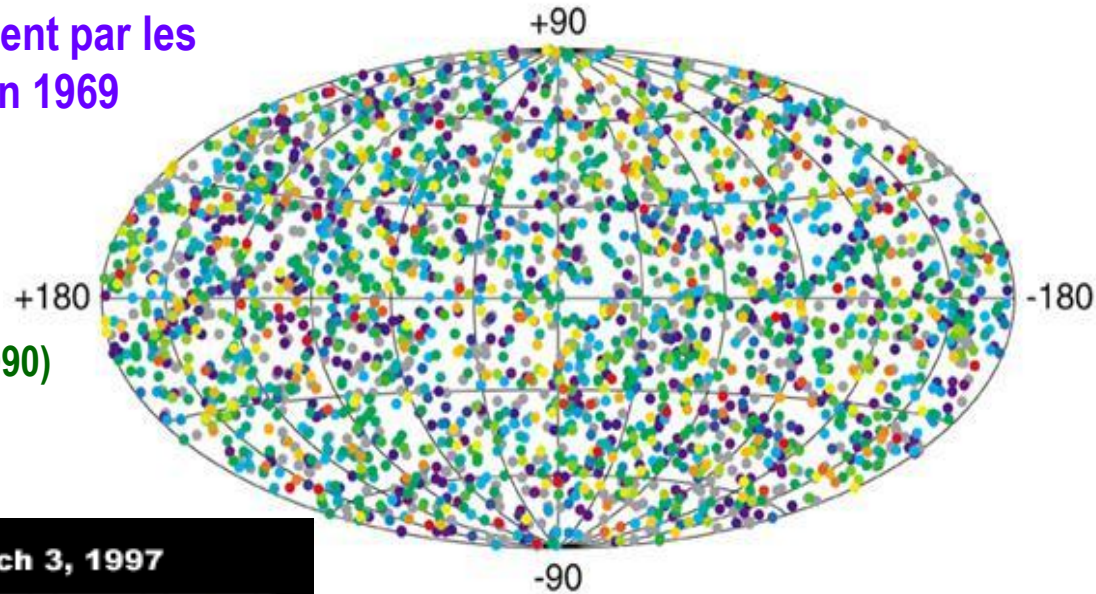


Les sursauts gamma

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

“Flashes” gamma découverts accidentellement par les satellites militaires américains VELA en 1969

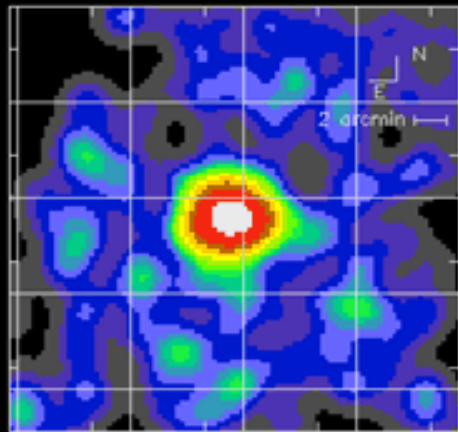
Distribution spatiale isotrope
(BATSE/Gamma-Ray Observatory, années 1990)
Distances cosmologiques ?



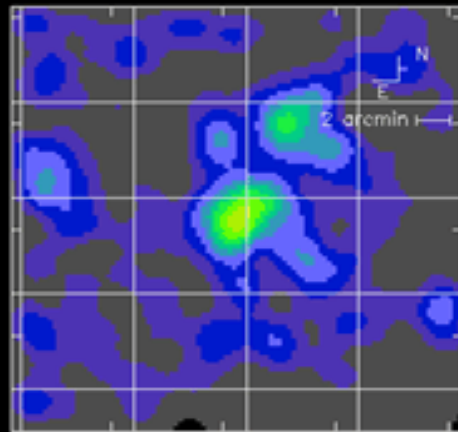
Premières détections/localisations
en rayons X et optique
(“*afterglows*”) en 1997
Les galaxies hôtes sont souvent
très lointaines

Ils sont cosmologiques !
Leur énergie (émise surtout en gamma)
est énorme...

February 28, 1997



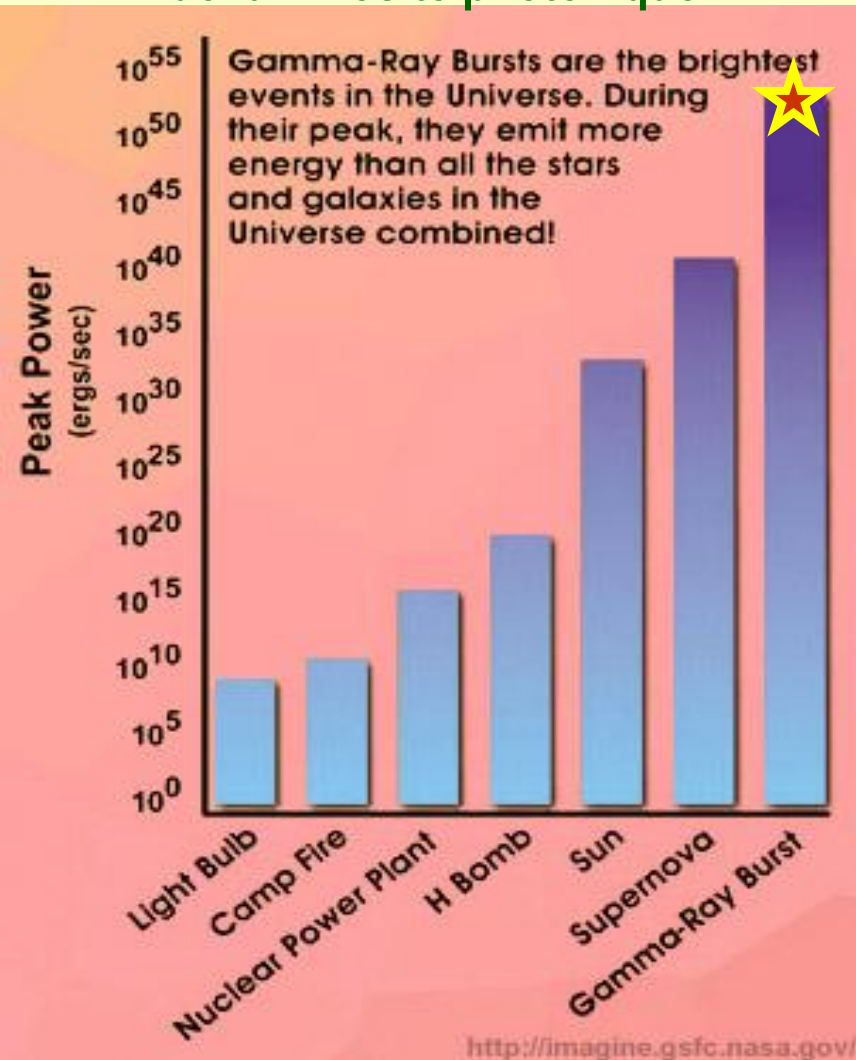
March 3, 1997



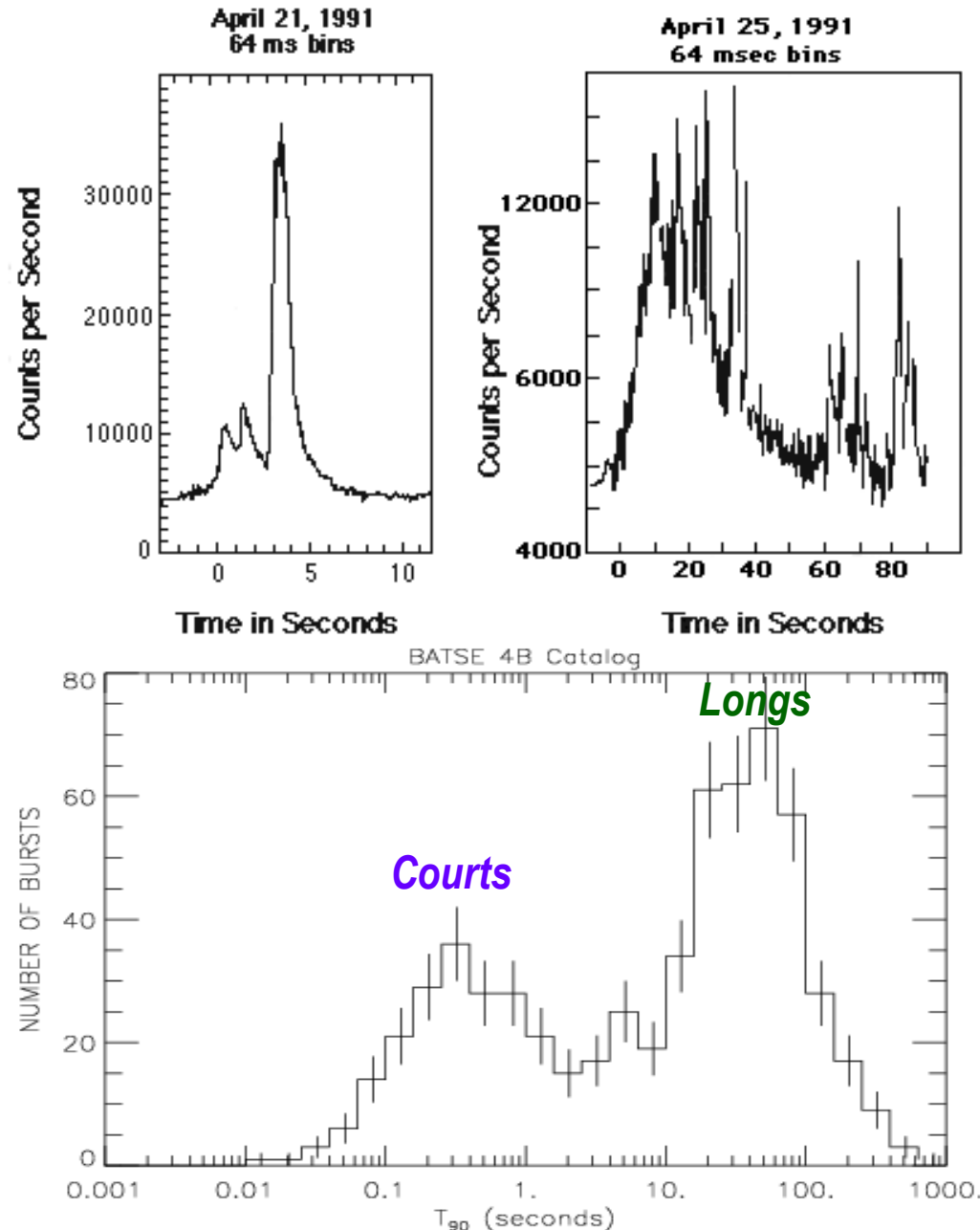
GRB 970228 X-ray afterglow
at 8 hours (left) and 3 days (right) after the Gamma-ray burst.

Champions toutes catégories de luminosité photonique

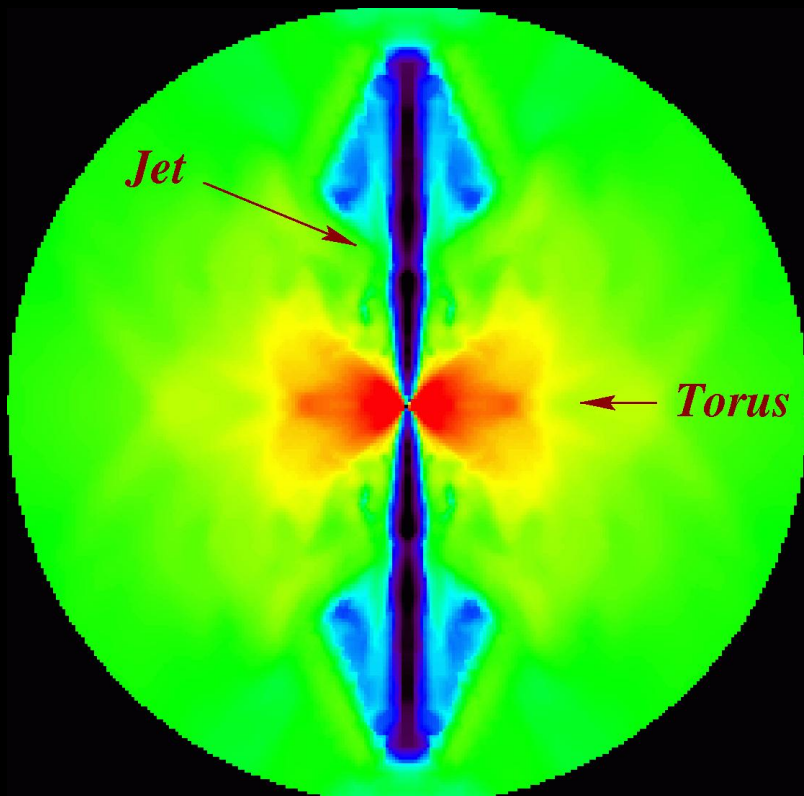
Une grande variété de courbes de lumière en gamma



Presque 10^{54} erg/s pour émission isotrope
 Qq. 10^{52} erg/s pour émission en faisceau
 Essentiellement en photons gamma !
 (supernovae classiques: en neutrinos)

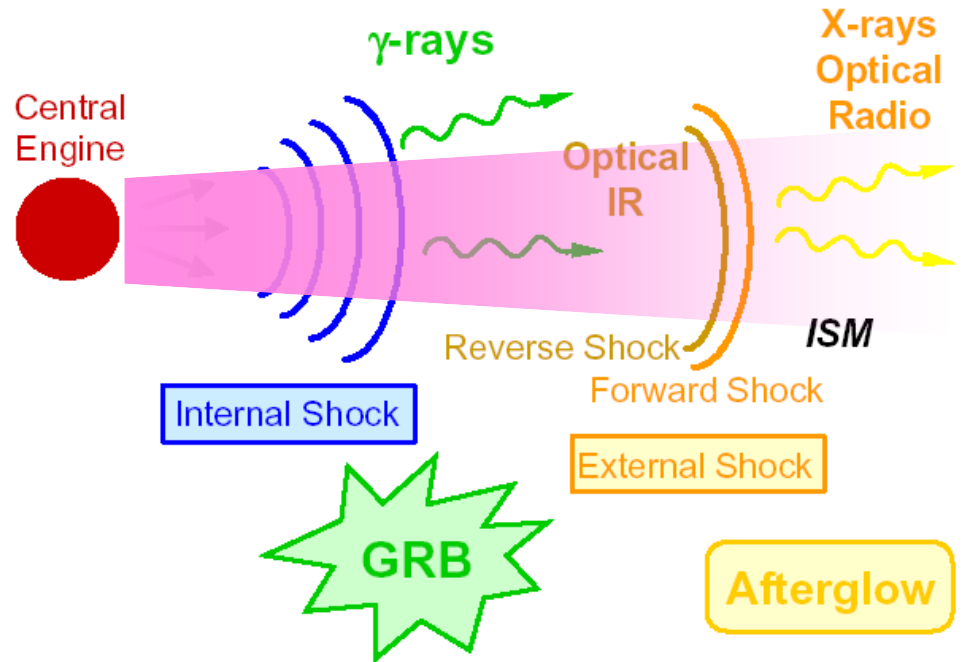


Le moteur central
(sursauts longs) :
“collapsar”



Effondrement du coeur d'une étoile massive
en rotation ;
formation d'un *disque d'accrétion*
et de *deux jets*
le long de l'axe de rotation
(alimentés par l'énergie gravitationnelle
de l'accrétion sur l'objet central)

Fireball Shock Scenario



L'émission gamma se fait par les *chocs internes*
de différentes couches ultra-relativistes des jets

Les émissions aux autres longueurs d'onde
("afterglows") se fait par les *chocs externes* des jets
avec le milieu interstellaire

***Collapsar* : accrétion, jets, sursaut gamma**



Supernovae : Perspectives



SN par Effondrement Gravitationnel:

Détecter une dans la Voie Lactée,
ses *neutrinos* et ses
ondes gravitationnelles;
Comprendre le mécanisme
de l'explosion

SN Théronucléaires :

Comprendre la *propagation*
de la flamme, (détection
des raies gamma du Co-56)
Comprendre le(s)
Système(s) progéniteur(s)

Sursauts gamma :

Comprendre le rôle de la rotation
et du champ magnétique,
et le mécanisme d'émission ;
les utiliser en cosmologie

Premières supernovae :

Etoiles supermassives ?
Rôle dans la formation
et l'évolution des galaxies

Thierry Montmerle · Nicolas Prantzos

SOLEILS ÉCLATÉS

LES SUPERNOVAE

Préface de
Jean-Claude
Pecker



PRESSES
DU CNRS