

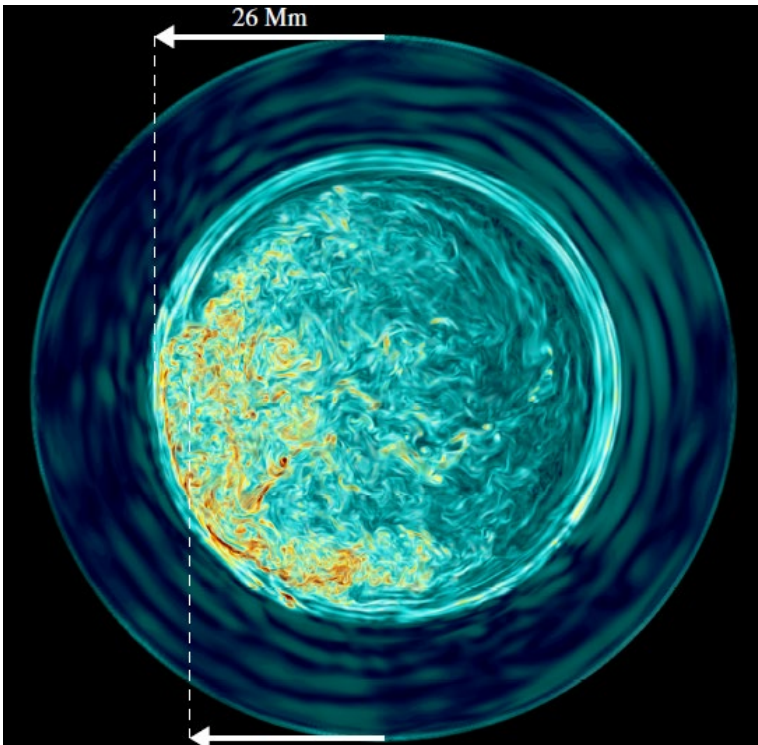


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

ETOILES et TROUS NOIRS

Cœur He \rightarrow C/O



Synthèse des métaux

Françoise Combes



Blouin et al 2023

Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Plan de l'exposé

1- Abondances des éléments

Energie de liaison, stabilité

Formation primordiale

2- Fusion dans les étoiles

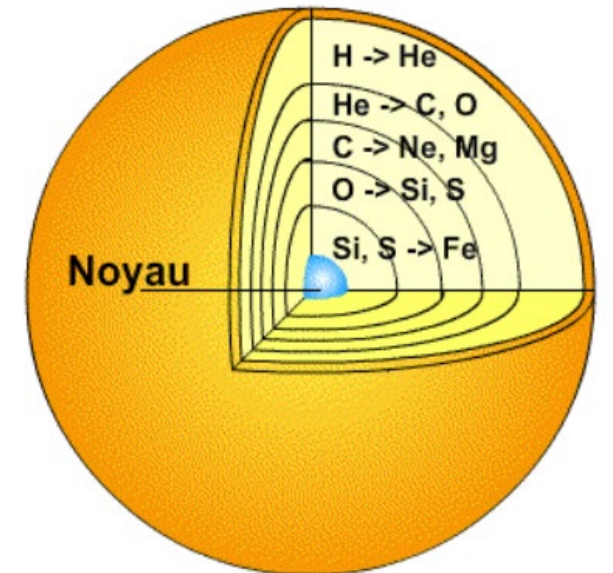
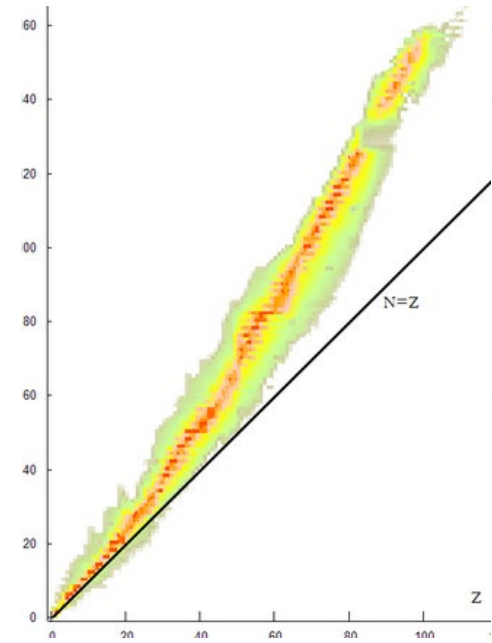
Cycles pp, CNO, en pelures d'oignon

Capture de neutrons, processus s, r

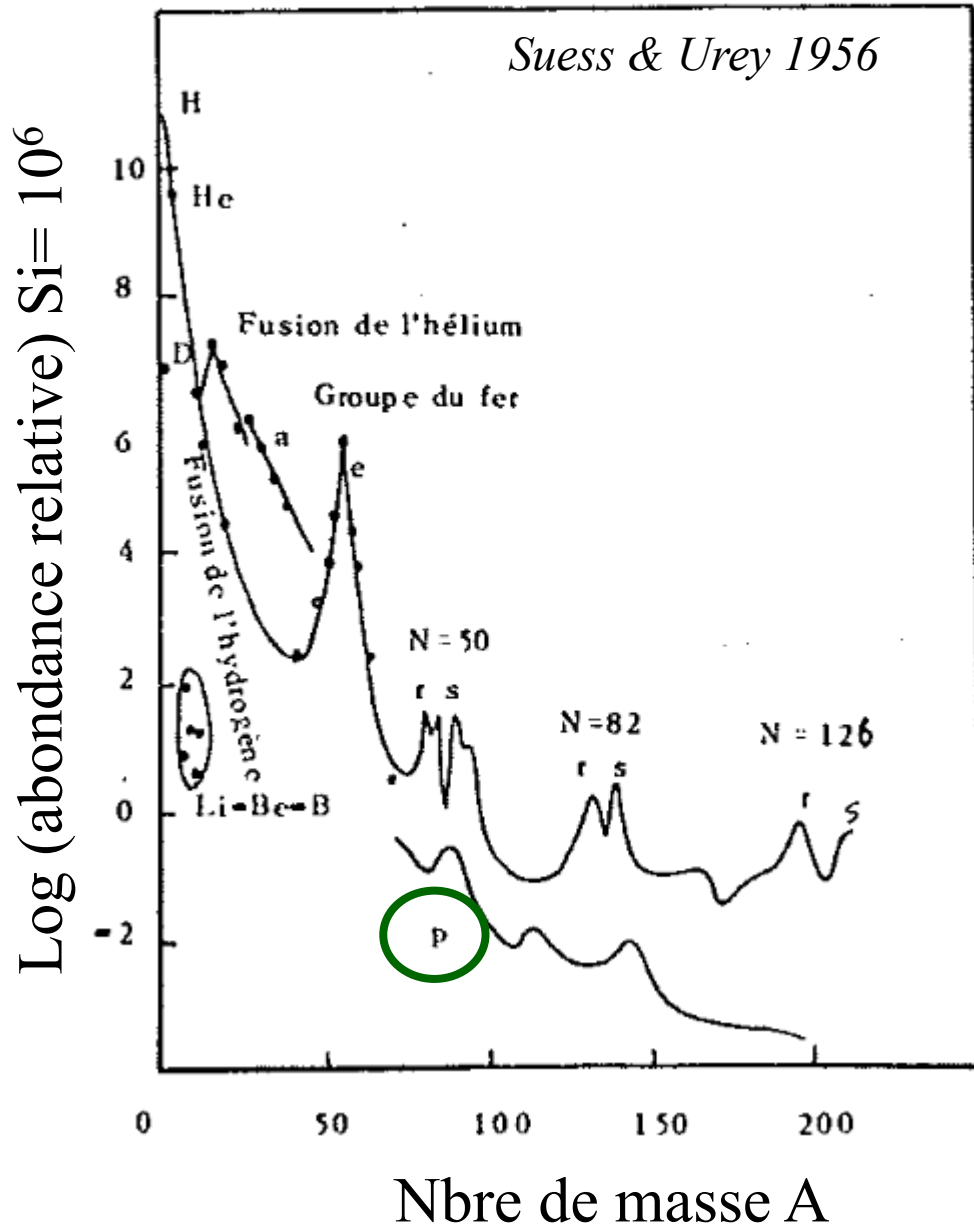
3- Application aux galaxies

Population II vieille, disque épais, halo

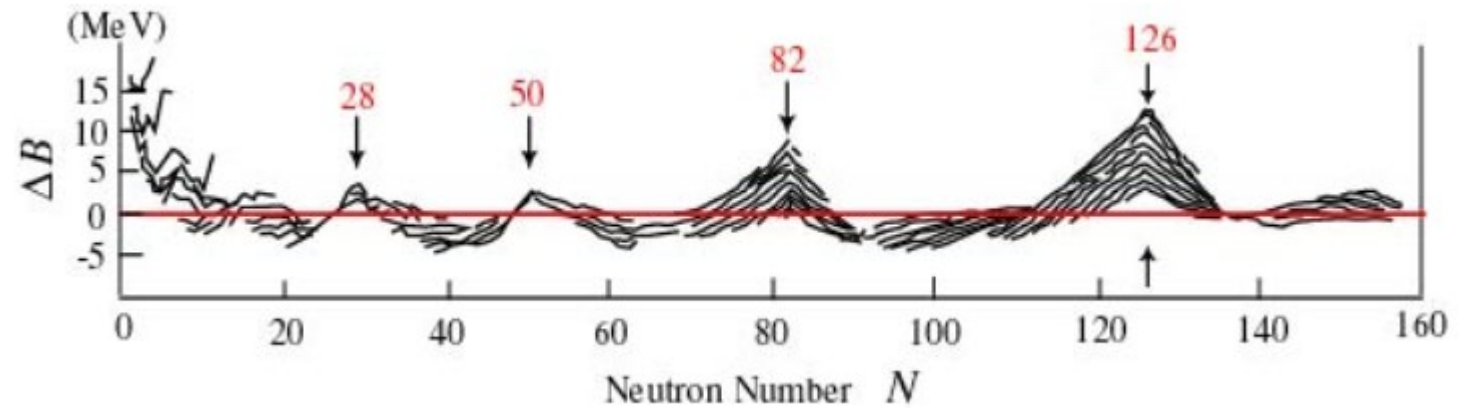
Population I jeune, disque mince



Abondances des éléments dans le système solaire

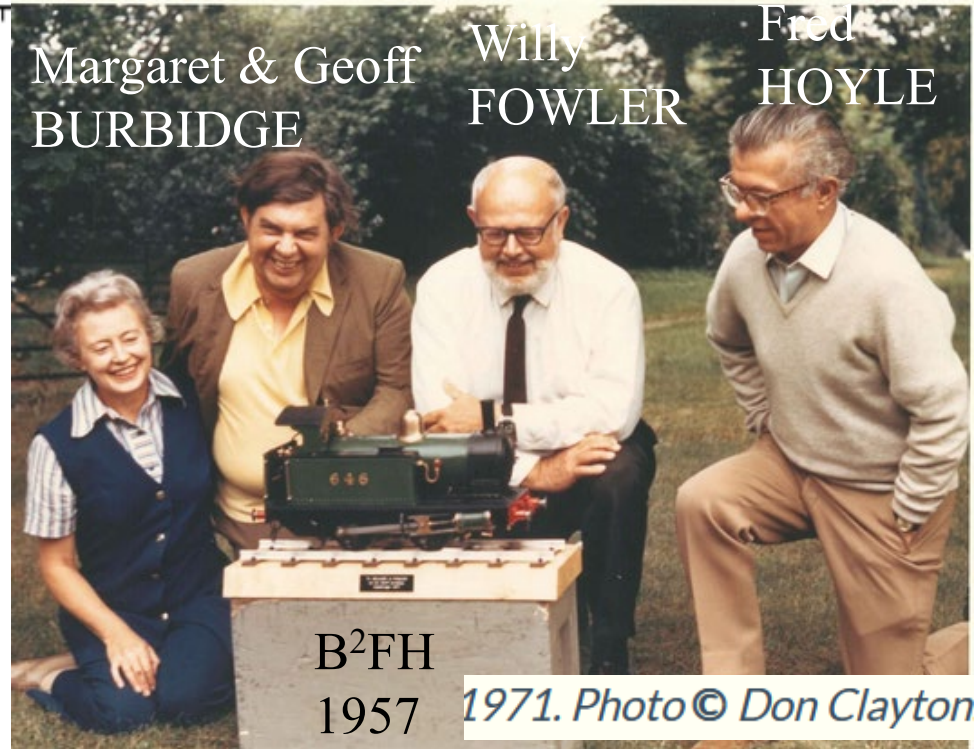
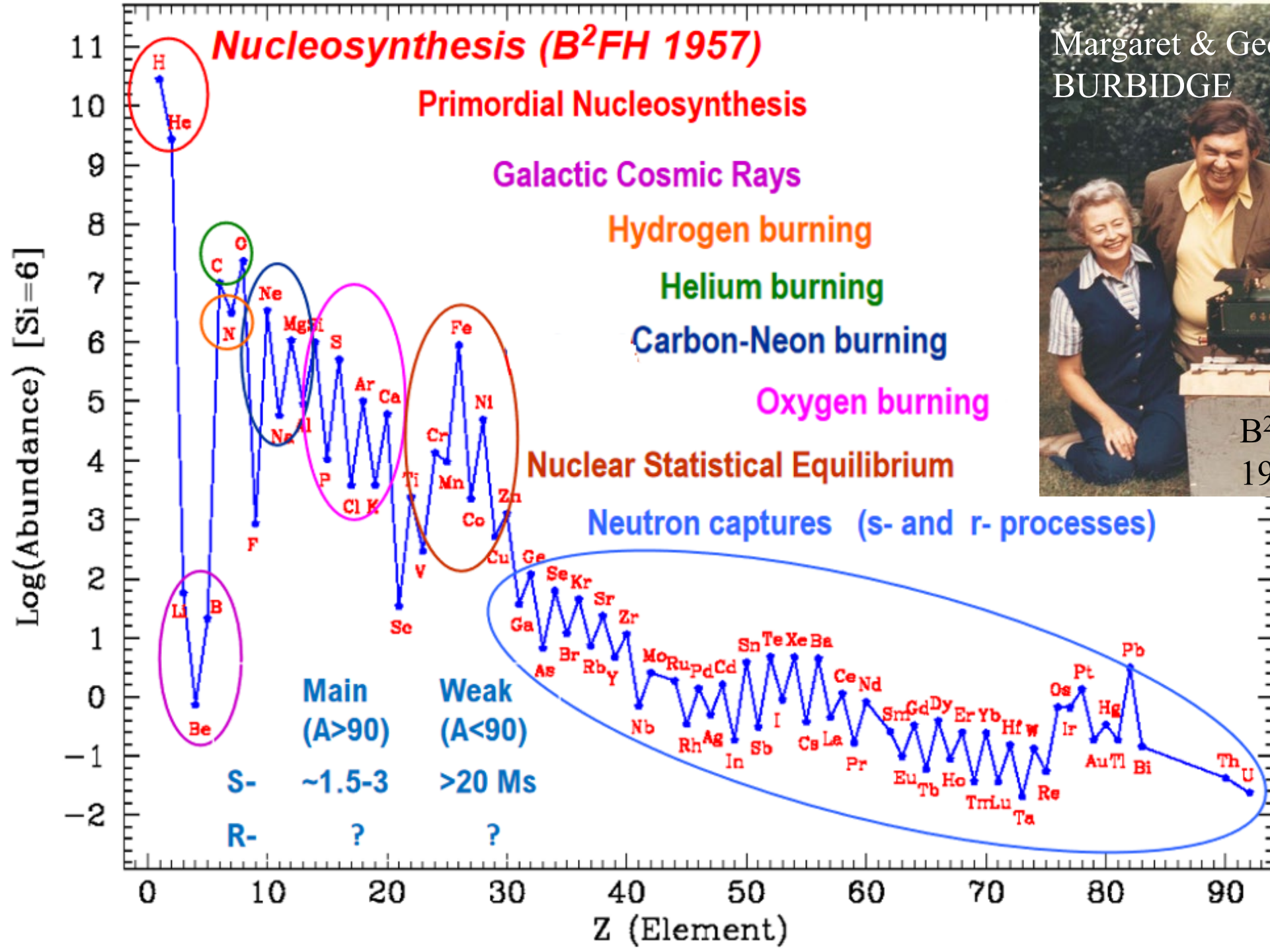


A partir des raies d'absorption dans le Soleil, et les abondances dans les chondrites carbonées (météorites)



Les noyaux les plus stables correspondent aux nombres magiques $A=28, 50, 82, 126$ soit au remplissage des couches (Fe,Zr,Ba,Pb)

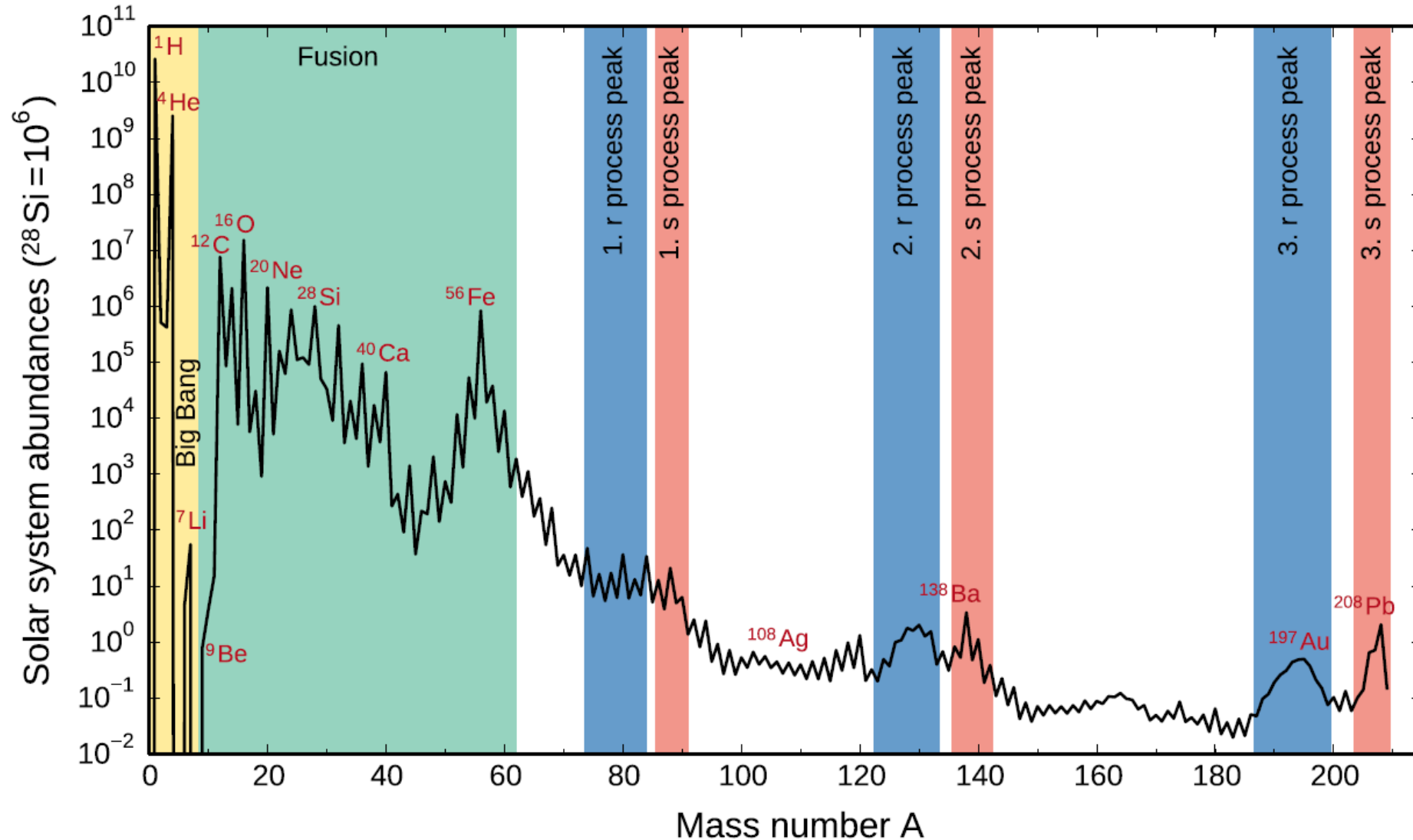
+ éléments p: déficients en neutrons



Fe, Zr, Ba, Pb

Abondances et processus de formation

En fonction du nbre de masse $A = Z + N$ (Z protons, N neutrons)

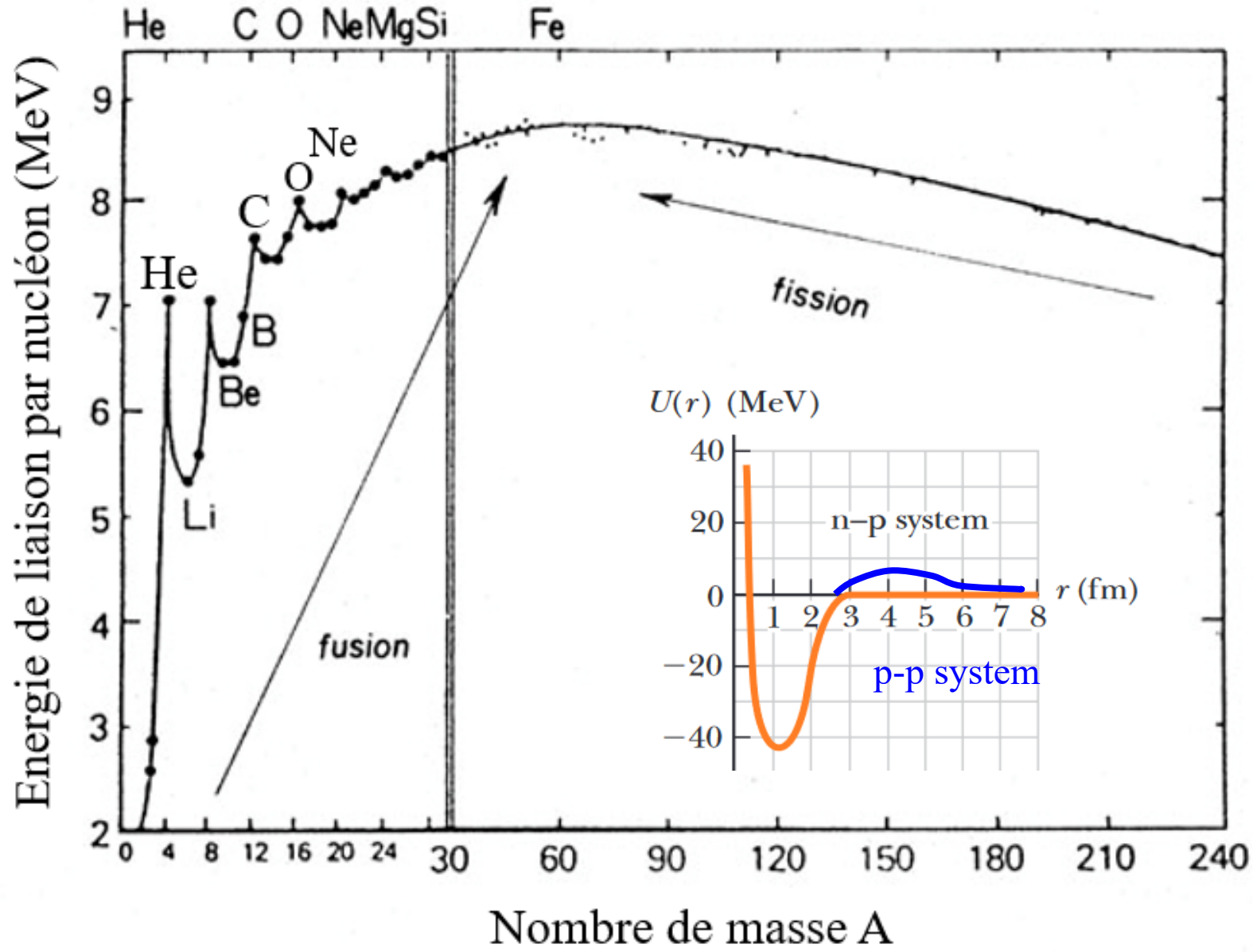


Stabilité=
Couches pleines

Fe,
Se, Kr, Zr,
Te, Xe, Ba
Pt, Au, Pb
Rapid, slow
wrt β decay
(1-5yrs)

Energie de liaison des noyaux

$$1 \text{ Fermi} = 10^{-5} \text{ \AA} = 10^{-15} \text{ m}$$



$$\text{Energie} = (Nm_n + Zm_p - M_{\text{nuc}})c^2/A$$

$$A = N + Z$$

Avant Fe, force attractive à courte portée domine, croît avec A

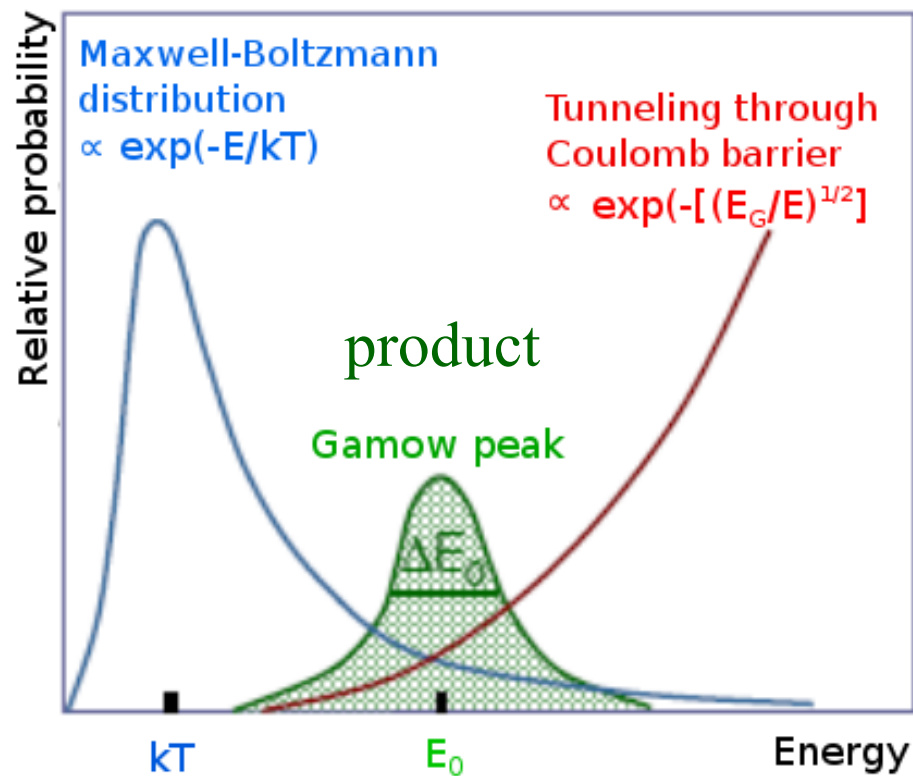
Puis force coulombienne à longue portée, répulsive, croît avec A

$$E_{\text{Coul}} = Z_1 Z_2 e^2 / r$$

Effet tunnel quantique

$$1\text{eV} \sim 10^4 \text{ K}$$

$E_{\text{Coul}} = Z_1 Z_2 e^2 / r$ aux distances nucléaires $r_0 = A^{1/3} 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ Angstrom} \sim 10^{-15} \text{ m}$
 $E_{\text{Coul}} \sim Z_1 Z_2 \text{ MeV}$ L'énergie thermique pour $T = 10$ millions de K, qui enclenche les premières réactions nucléaires n'est que de $kT = 1 \text{ keV}$



$E_{\text{th}} \ll E_{\text{coul}}$ on est sauvé par l'effet tunnel

La courbe de la barrière coulombienne (taille r)

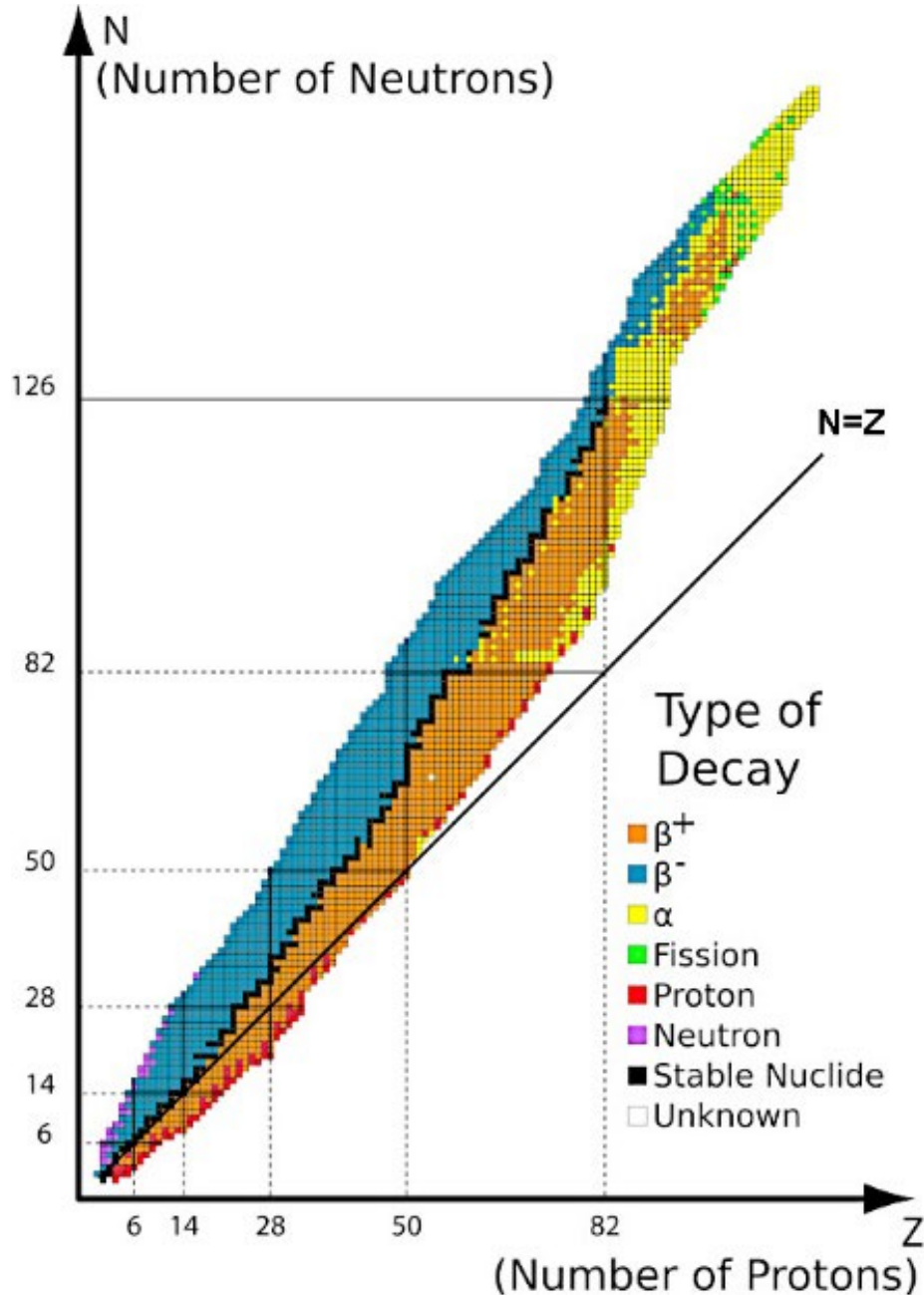
Probabilité de traverser: $\exp(-kr)$ $k=1/\lambda$

$$\lambda = h/mv_r \quad \frac{1}{2} mv_r^2 = E = Z_1 Z_2 e^2 / r$$

$$k = \sqrt{2mE} / h \quad r = Z_1 Z_2 e^2 / E \quad \rightarrow \quad kr = \sqrt{(E_G/E)}$$

$$\text{Proba} = \exp[-(E_G/E)^{1/2}]$$

Stabilité des noyaux



Au début, équilibre $N=Z$

Mais avec le nombre de protons augmentant la répulsion coulombienne domine, il faut ajouter des neutrons pour assurer la stabilité

Jusqu'à $Z=82$ (Ba), $N=126$, $A = 208$ → le plomb

^{208}Pb a 38 isotopes connus

Le bismuth ^{209}Bi $Z=83$

Au-delà, les noyaux ne sont plus stables, mais peuvent être fabriqués artificiellement

Formation primordiale, D, ^3He , ^4He

Premières minutes après le Big-Bang Température $\gg 10^7\text{K}$

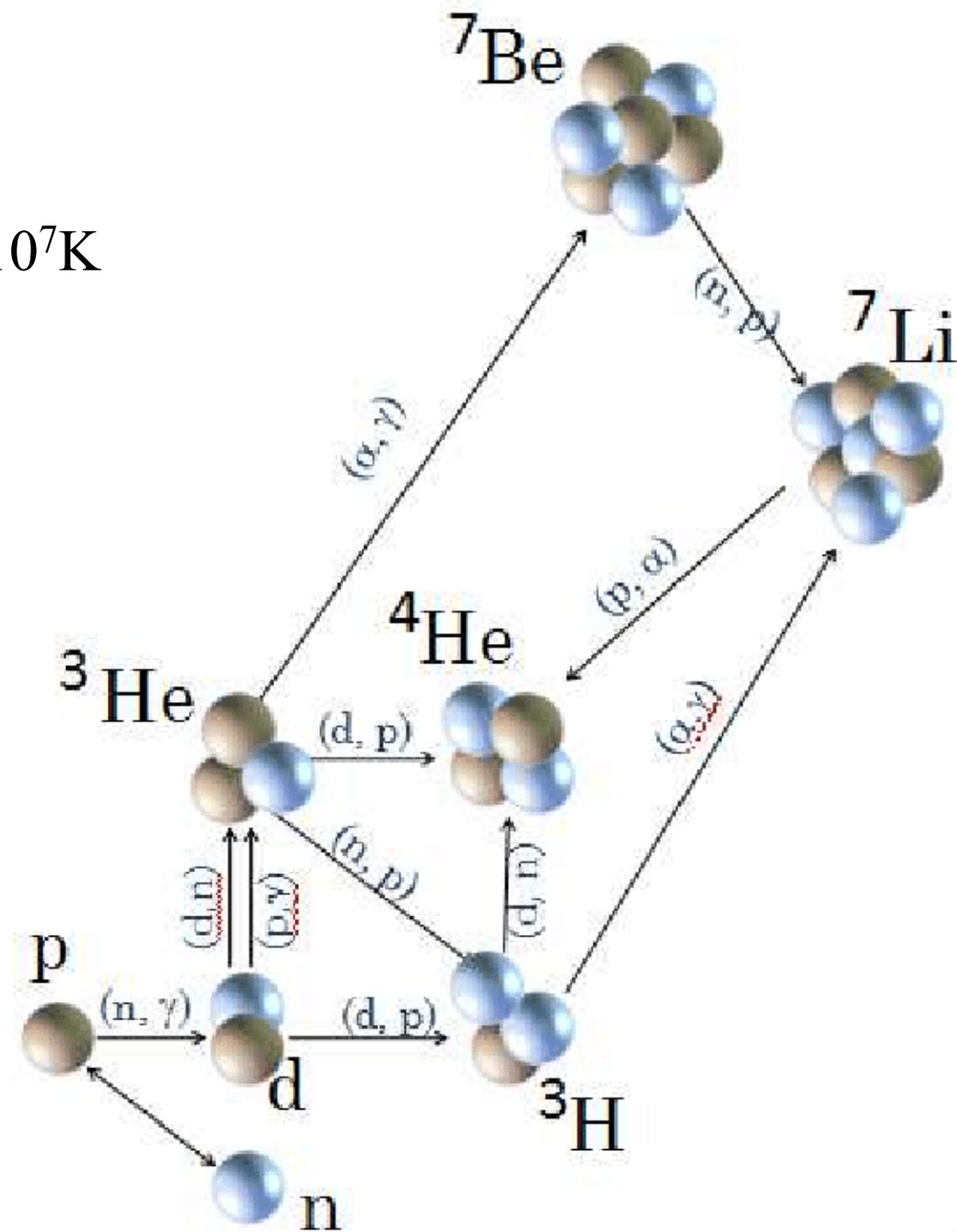
L'essentiel de l'hélium est fourni par le Big-Bang

La production dans les étoiles est négligeable, car
-- pour les faibles masses $< 8 M_{\odot}$, le cœur reste piégé dans les naines blanches

-- pour les étoiles massives, l'hélium brûle en C-O, puis Mg-Si, Fe avant explosion en supernova

→ Très peu d'He est rejeté

D et Li sont fragiles et détruits dans les étoiles

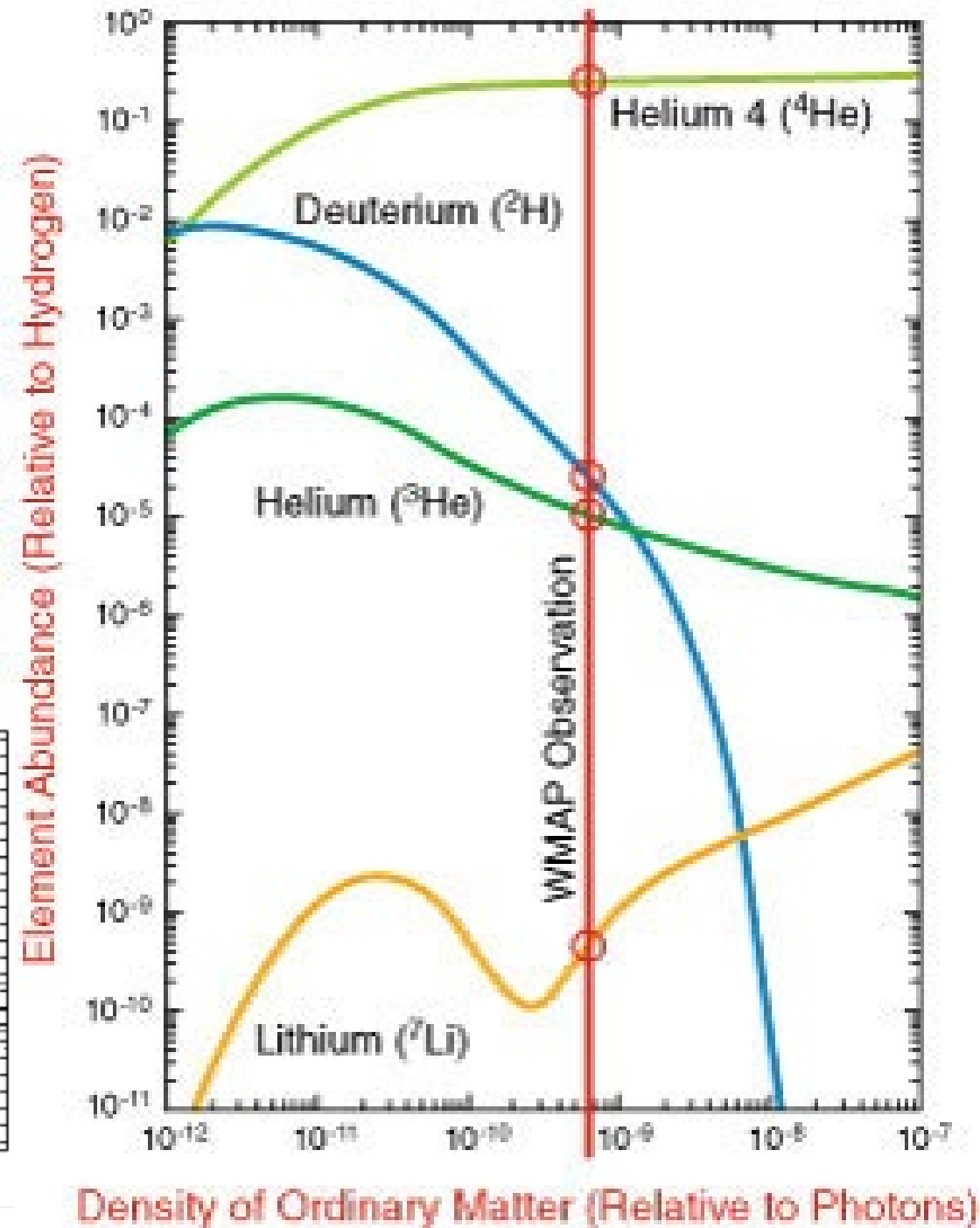
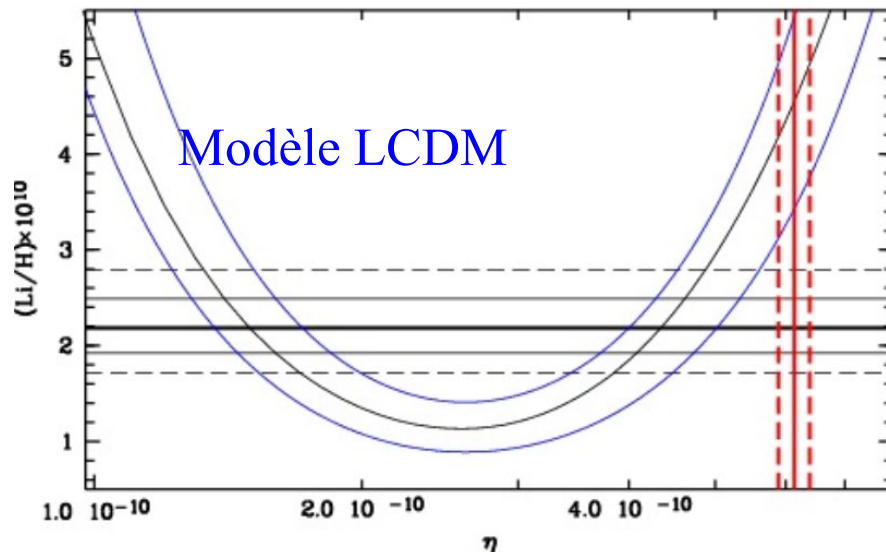


Comparaison avec les abondances observées

Le ${}^7\text{Li}$ observé à la surface des étoiles vieilles est un test du modèle du Big-Bang

Le plateau des Spite (ou plateau du lithium) a longtemps été un mystère: abondance constante pour les PopII, quelle que soit $[\text{Fe}/\text{H}]$, ou T_s
Le problème est complexe,

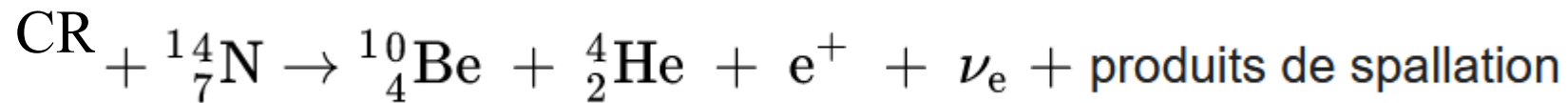
il y a convection et mélange dans les étoiles, aussi ces étoiles de PopII ne sont pas les premières (\rightarrow PopIII)



Formation par spallation

Li, Be, B sont détruits dans les étoiles

Pour expliquer leur abondance: → reformation par destruction de C, N, O, par CR



Le même mécanisme (CR du Soleil) détruit ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$ dans l'atmosphère

→ ${}^{14}\text{C}$, ${}^{10}\text{Be}$, qui permettent de **dater les organismes** (${}^{14}\text{C}$ 5730ans → ${}^{12}\text{C}$)

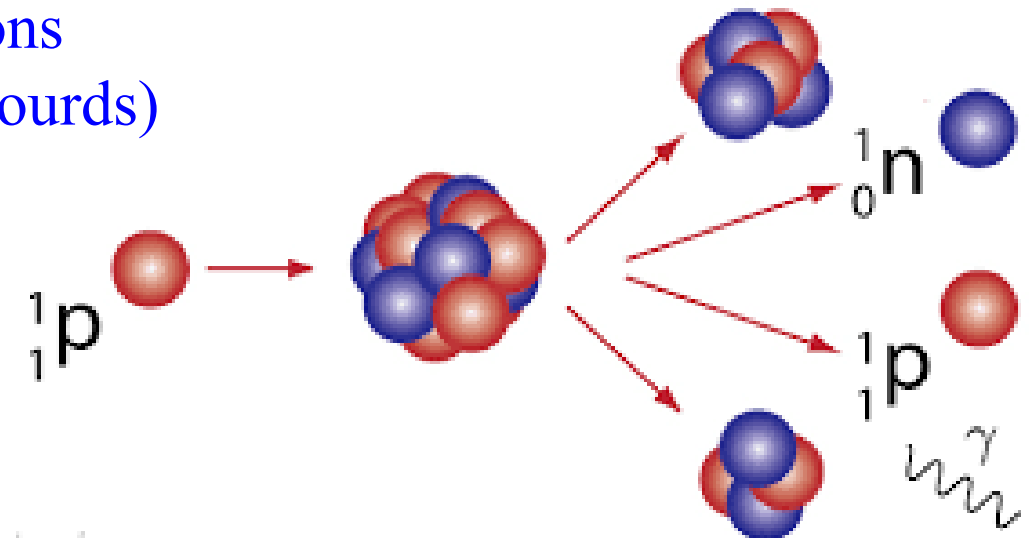
Les rayons cosmiques sont essentiellement des protons

La réaction est endothermique (casser les atomes + lourds)

Cette énergie de 10 MeV vient des CR

Qui peuvent aller jusqu'à 10^{14} MeV

$\text{N}(\text{Li, Be, B})/\text{N}(\text{C,N,O}) \times 4 \cdot 10^4$ dans les CR



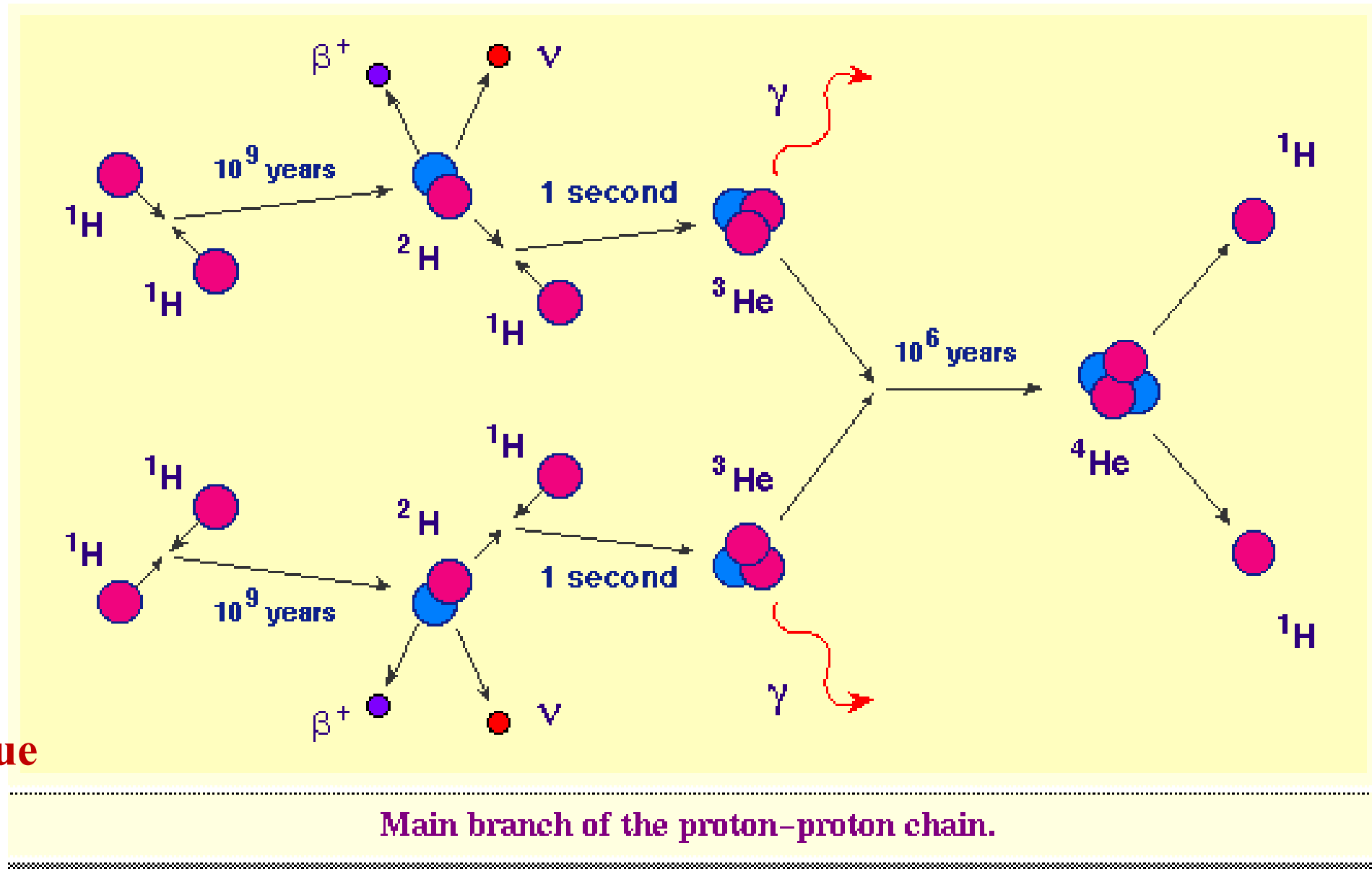
Réactions nucléaires $H \rightarrow He$

Au début les réactions commencent $T=10^7\text{K}$ par la chaîne p+p

Étoiles de $1 M_{\odot}$

La température croît comme la masse

$T \propto M$



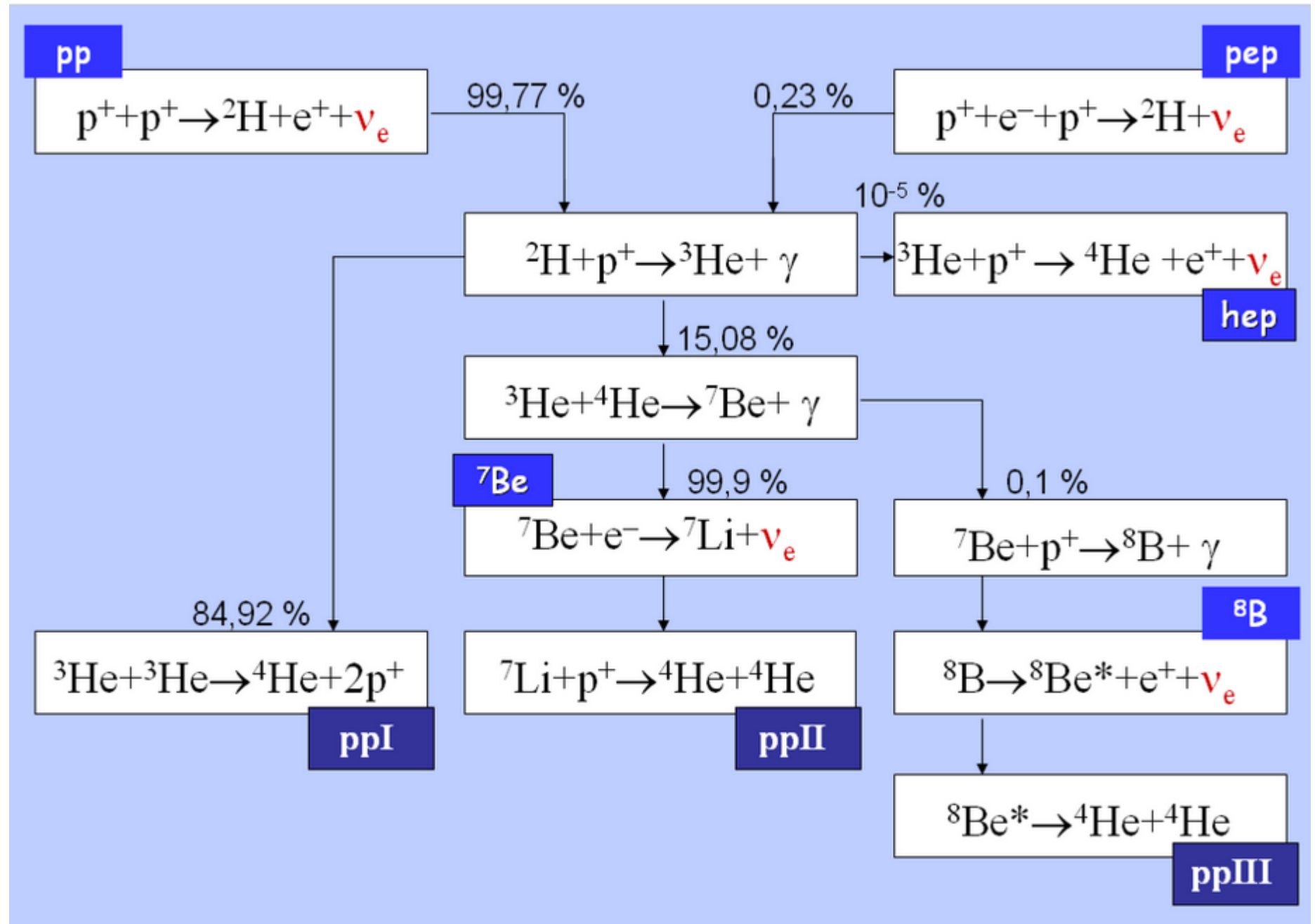
**Temps caractéristique
1-10 milliards ans!**

Chaîne PP1, PP2 et PP3

Une fois ${}^4\text{He}$ formé il peut catalyser les autres réactions

Le temps caractéristique tombe à 1-10Myr

PP2 et PP3 se font à des températures plus élevées



Températures et masses

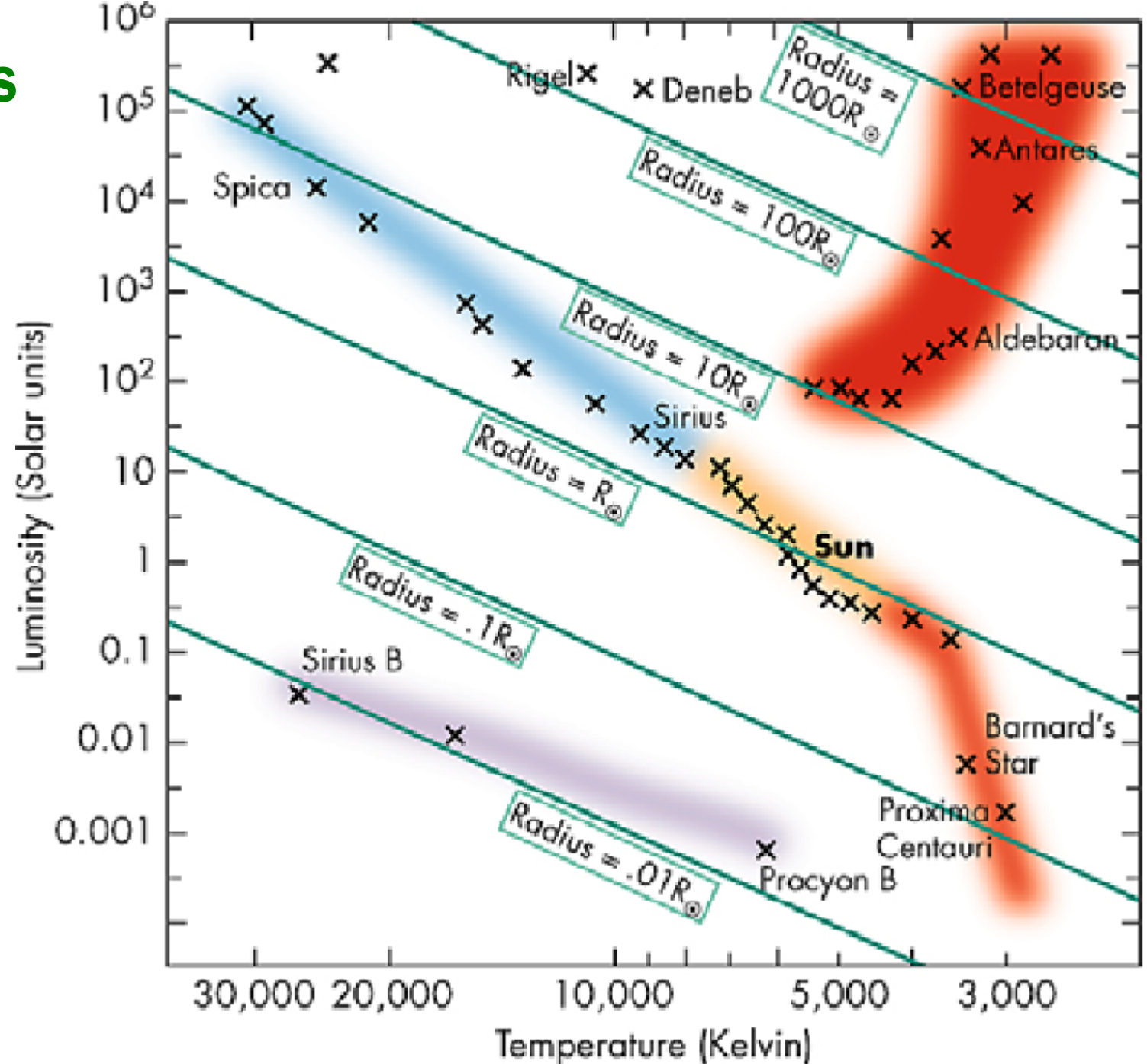
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Sur la séquence principale

$$L \propto M^4$$

Et pratiquement $R \sim \text{cste}$
(facteur 2-3)

Dans cette partie $T \propto M$

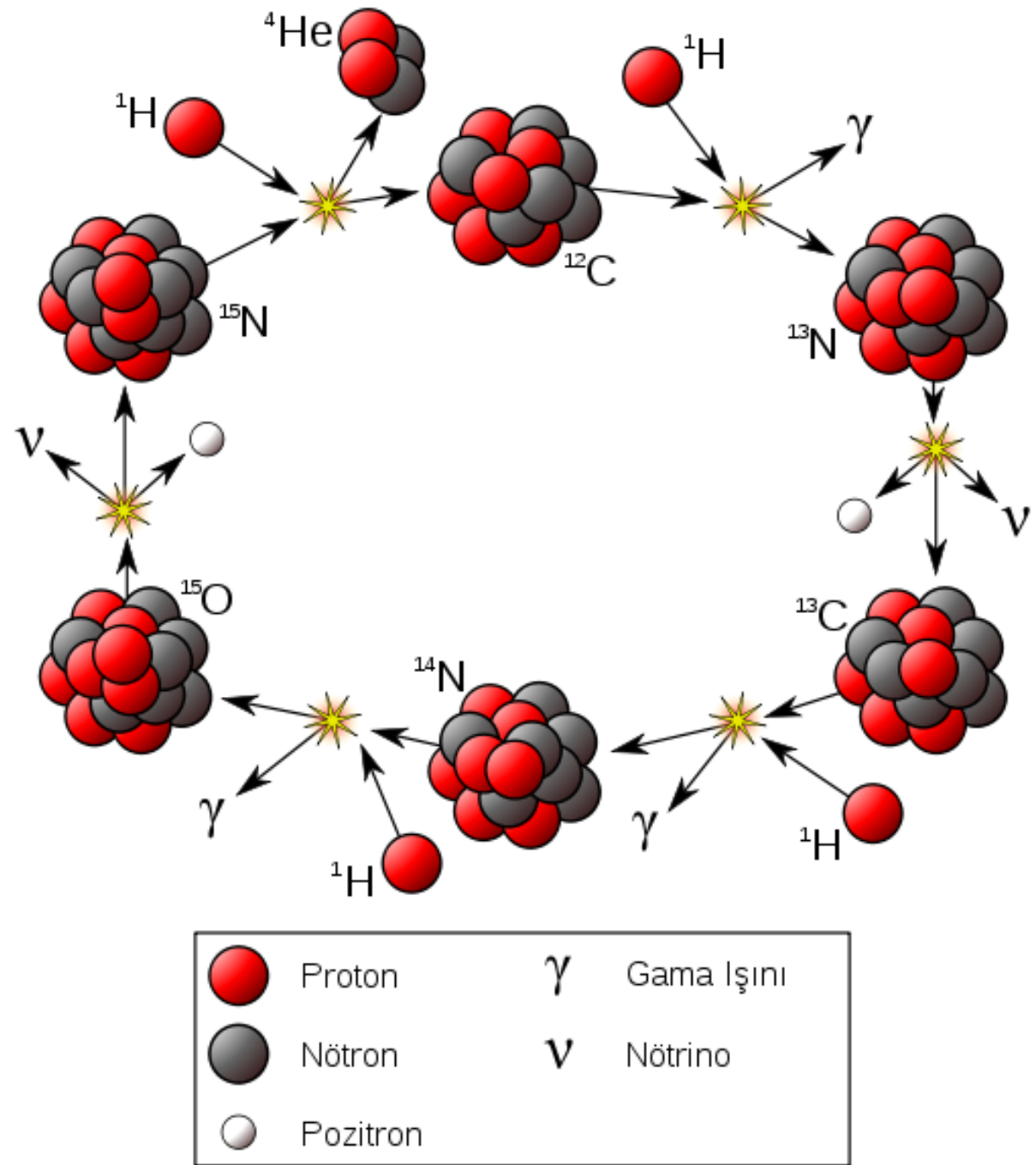
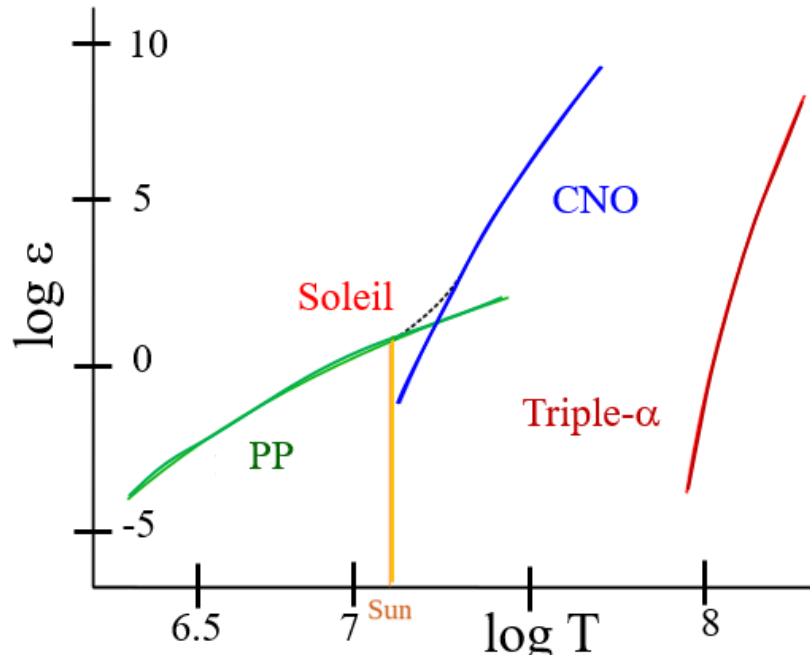


Cycle CNO

Réactions nucléaires permettant de transformer H en He

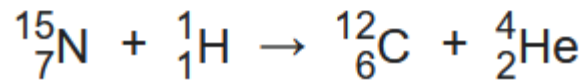
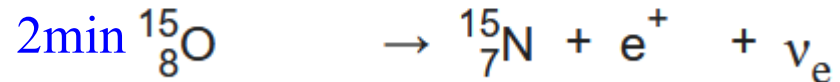
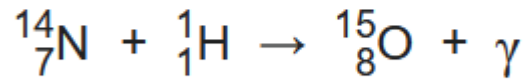
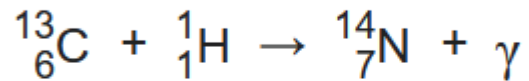
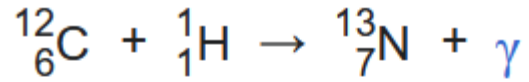
Carbone-Azote-Oxygène, ou cycle de Bethe
Les atomes C, N, O jouent le **rôle de catalyseurs**

Ces réactions demandent une température supérieure à p+p

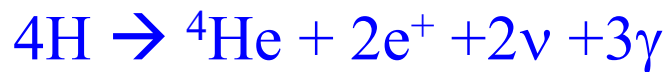


3 Cycles CNO + 3 cycles H-CNO

Cycle I



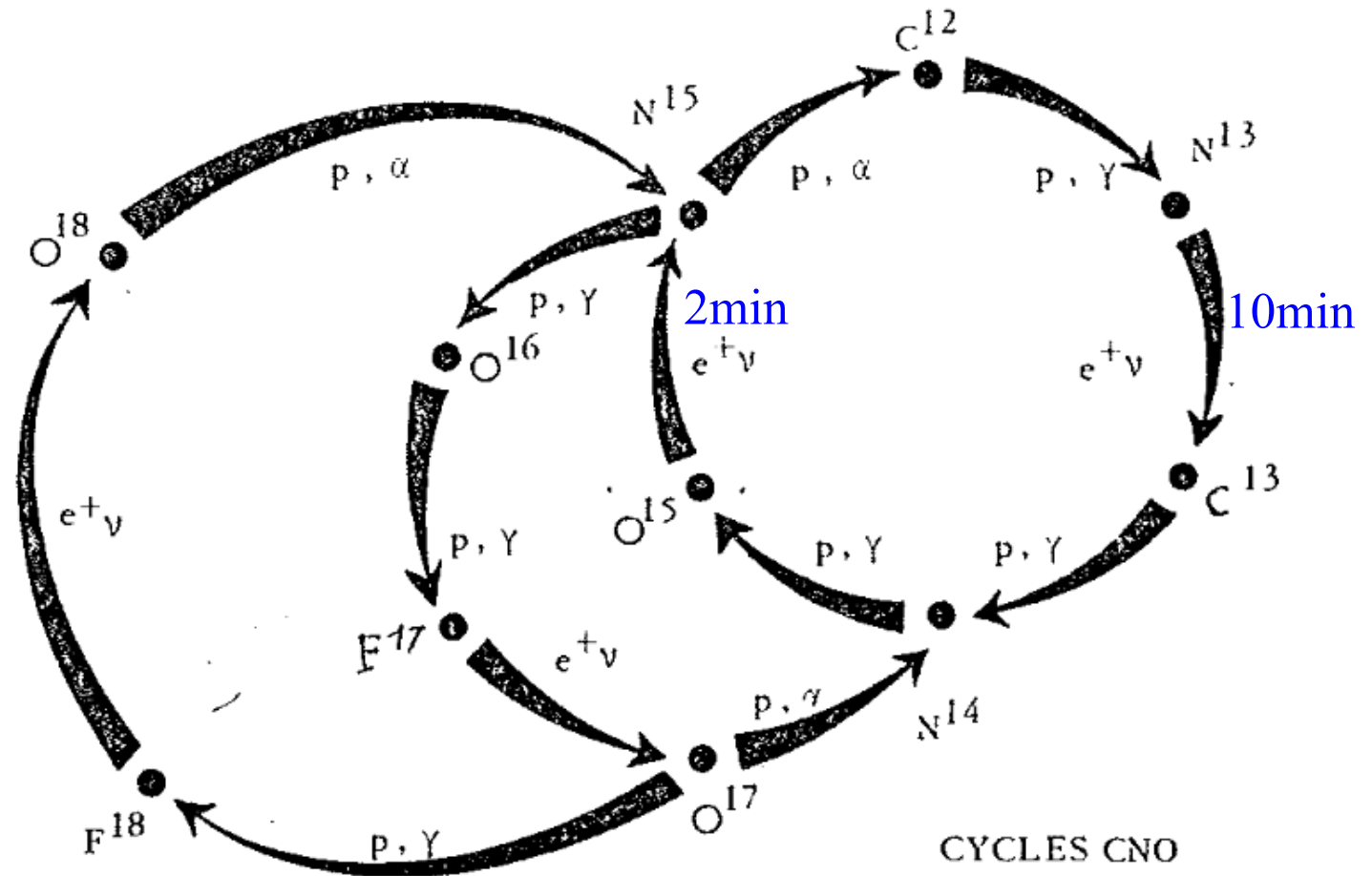
Bilan:



Et gain de 25 MeV

Le défaut de masse est 26.7 MeV

Mais on perd par les ν

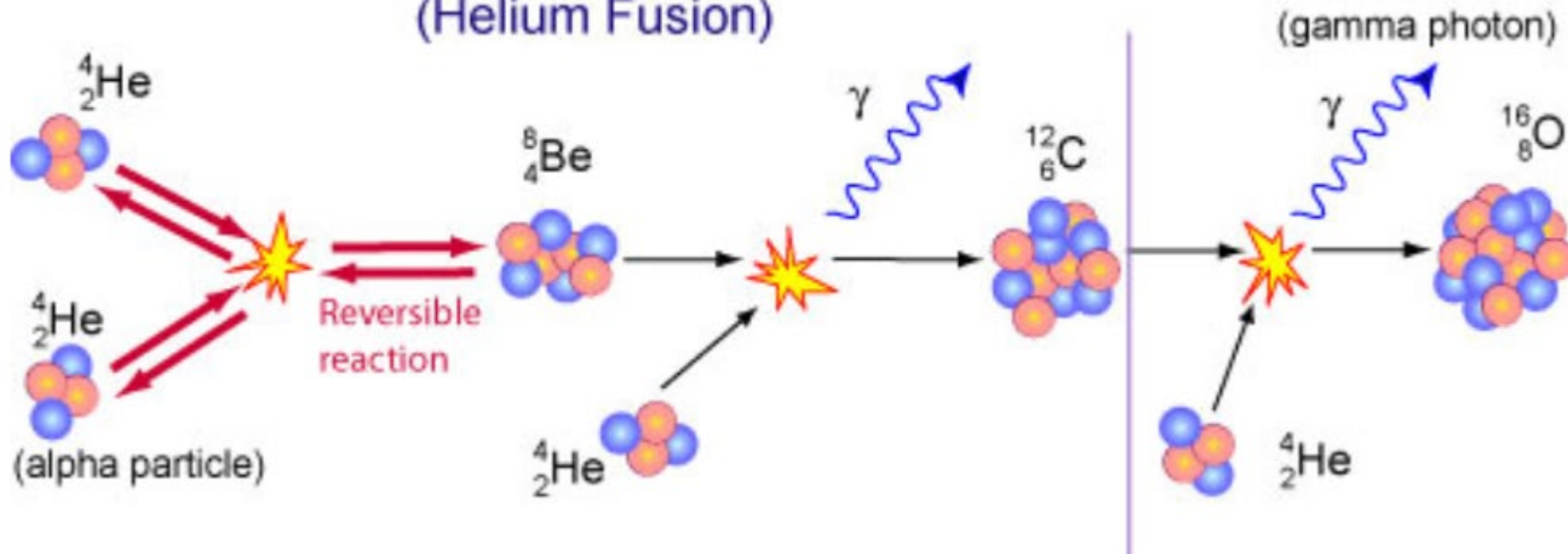


Temps caractéristique 10 Myr

La fusion de l'hélium commence à 10^8K , 10^3g/cm^3

A la sortie de la séquence principale

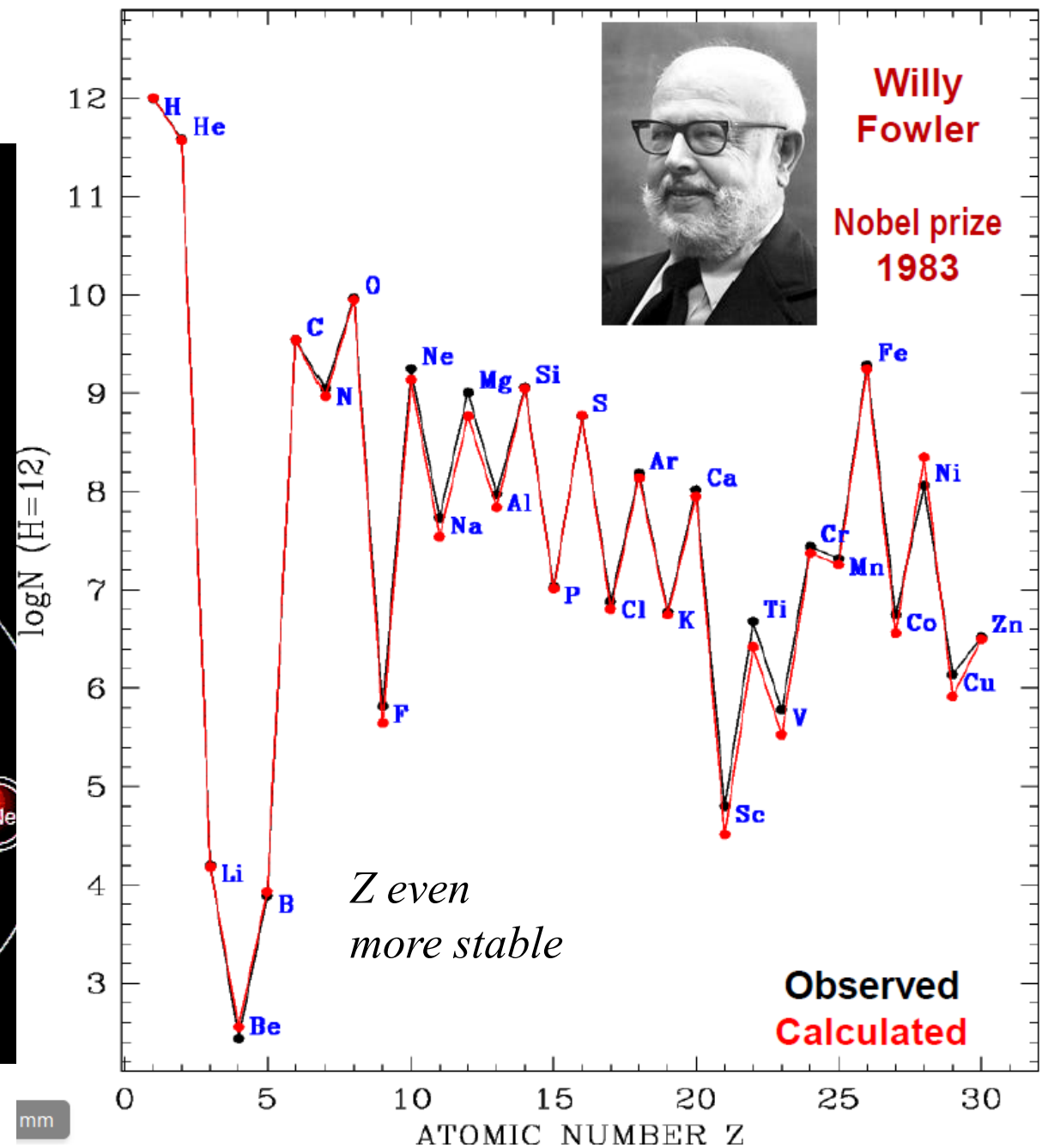
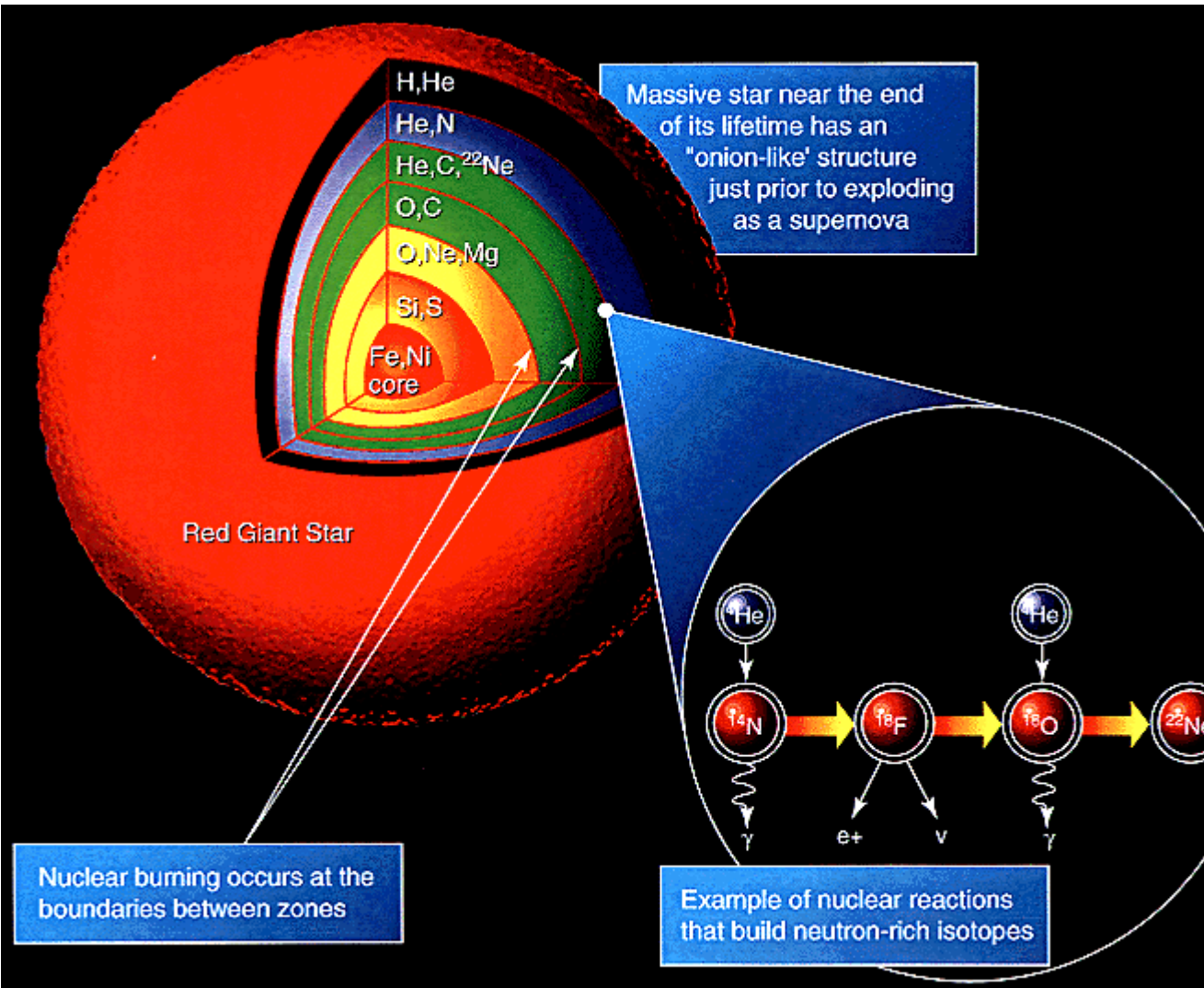
The Triple Alpha Process (Helium Fusion)



${}^8\text{Be}$ très instable
Reforme ${}^4\text{He}$
en moins d'une
seconde
Mais ${}^4\text{He}$ abondant
et bascule vers C
en $t < 1\text{s}$
Puis O
Seul ${}^9\text{Be}$ est stable

Selon la masse de l'étoile, instabilités,
cœur dégénéré pour les petites masses (He flash)
ou non, temps caractéristique de qq Myr à 100Myr selon la masse (et T)

Pour les étoiles massives, modèle de l'oignon

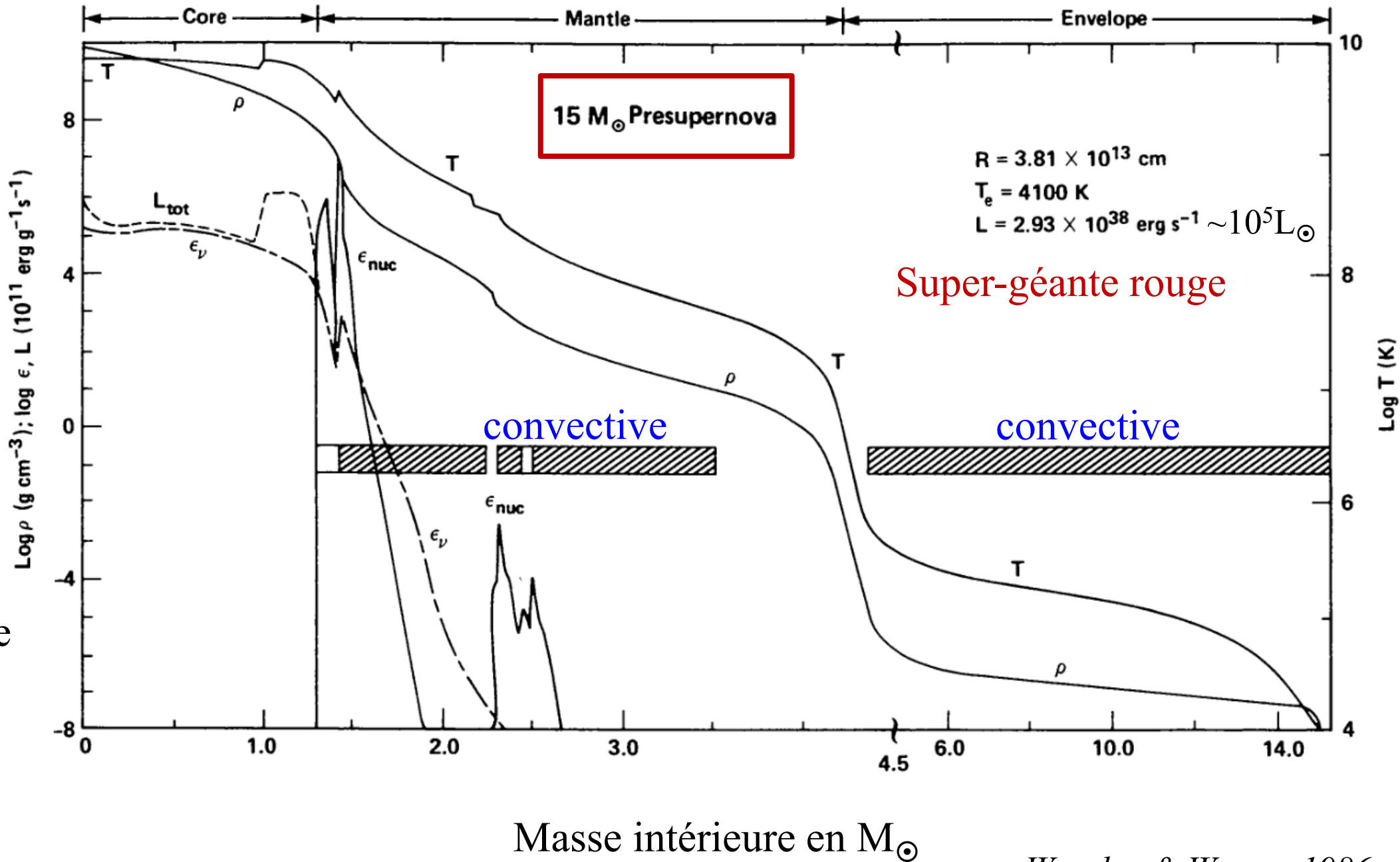


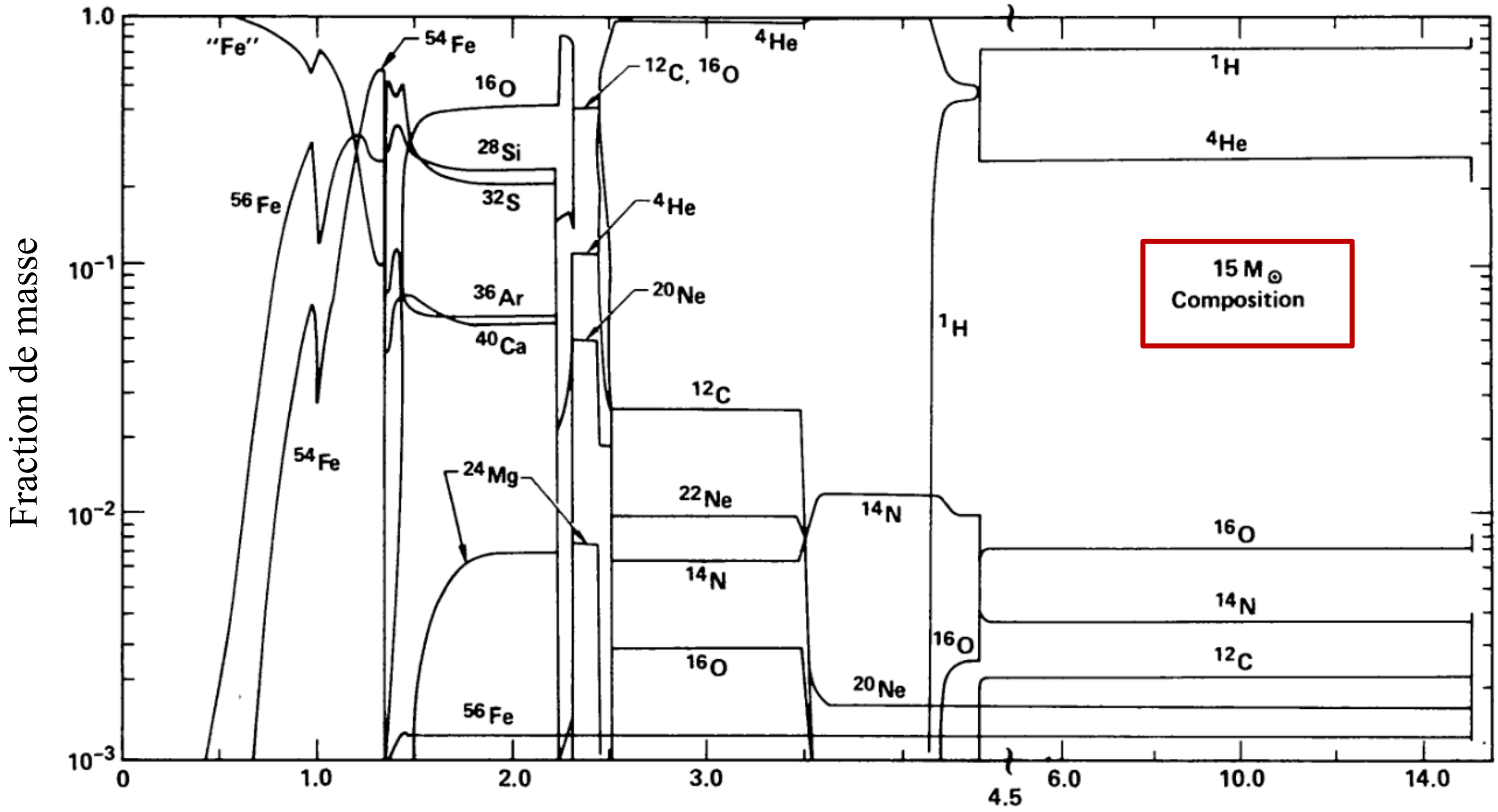
Calcul des taux de réactions (T), $\langle\sigma v\rangle$
des énergies, des abondances, Δm

Le cœur est en effondrement à 1000km/s
 $e^- + p \rightarrow n + \nu$
 → Neutron core

$T = 7.6 \times 10^9 \text{ K}$
 $\rho = 10^{10} \text{ g/cm}^3$

Pic de $\epsilon_{\text{nuc}} =$
 Fusion nucléaire
 en couche





Masse intérieure en M_{\odot}

Woosley & Weaver 1986

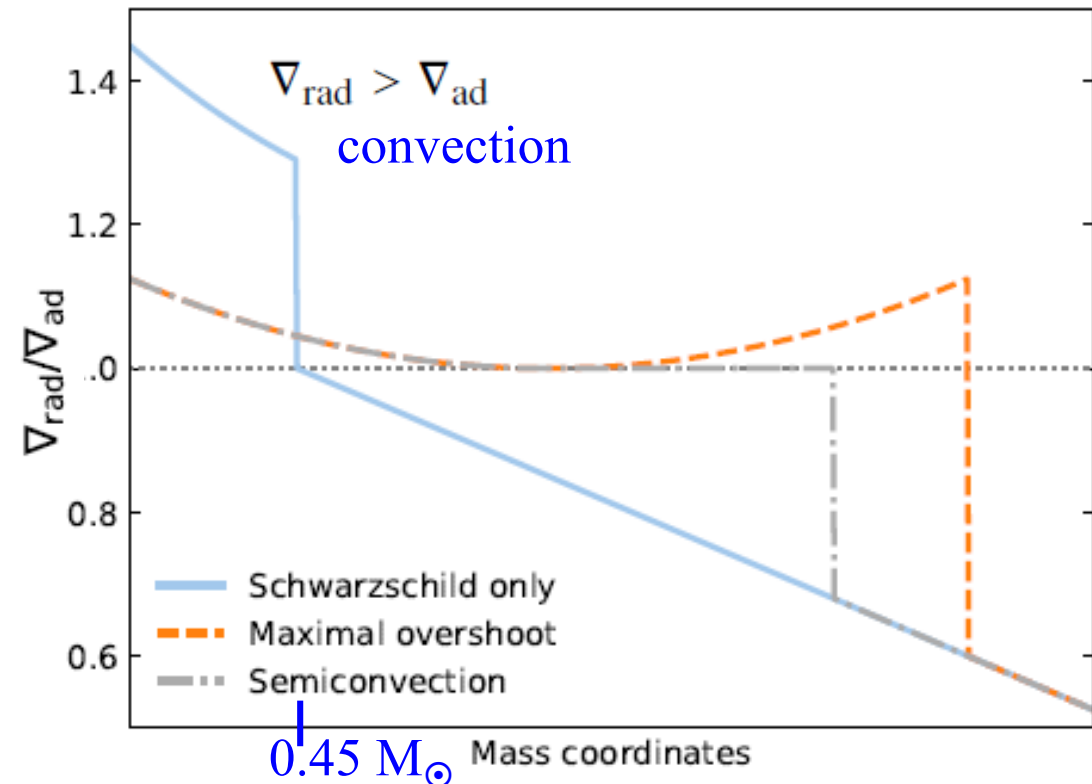
Simulations 3D de cœur brûlant He

Quel est l'état de la convection, dans le cœur ou à la limite, près de la coquille de $H \rightarrow He$, pour une **masse de $3 M_{\odot}$**
Hydro simulations de la partie interne de $0.45 M_{\odot}$

→ Convection dans le cœur et semi-convection autour
→ Souvent l'overshooting, fait dépasser la convection du cœur, Effectuant un certain mélange

Etoiles sur la branche géantes rouges,
Red clump sur la HB
Convection, semi-convection ou non?

→ Contraintes de l'Astérosismologie

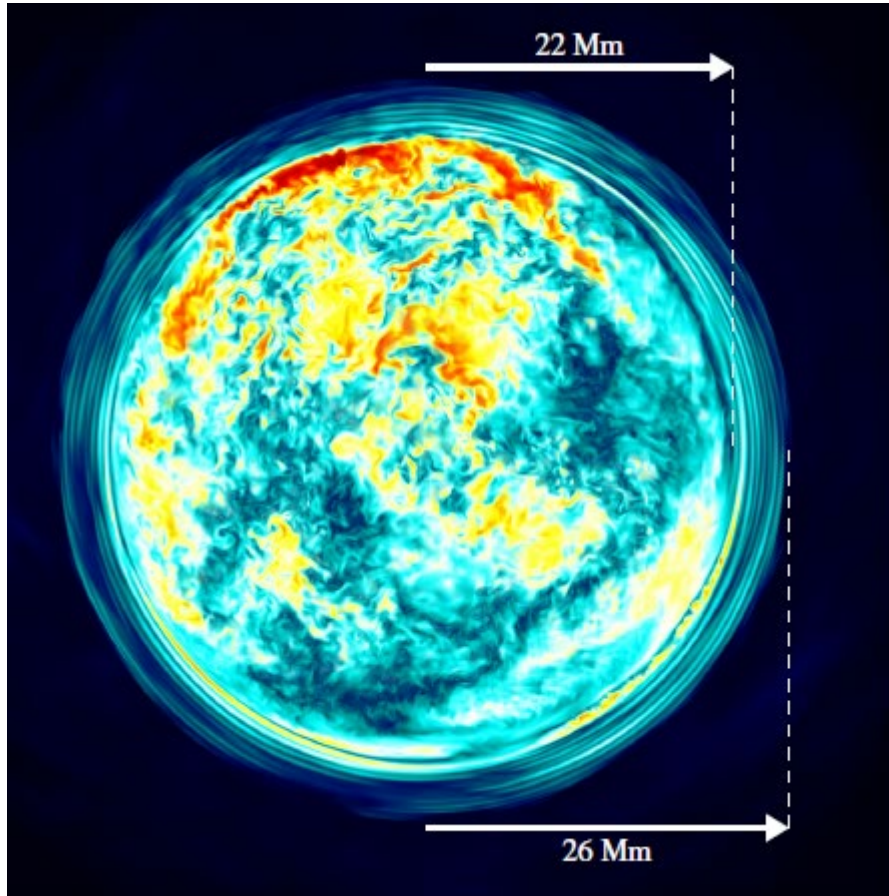


Simulations des vitesses du cœur

Over-shooting produit du mélange
→ Supprime la semiconvection

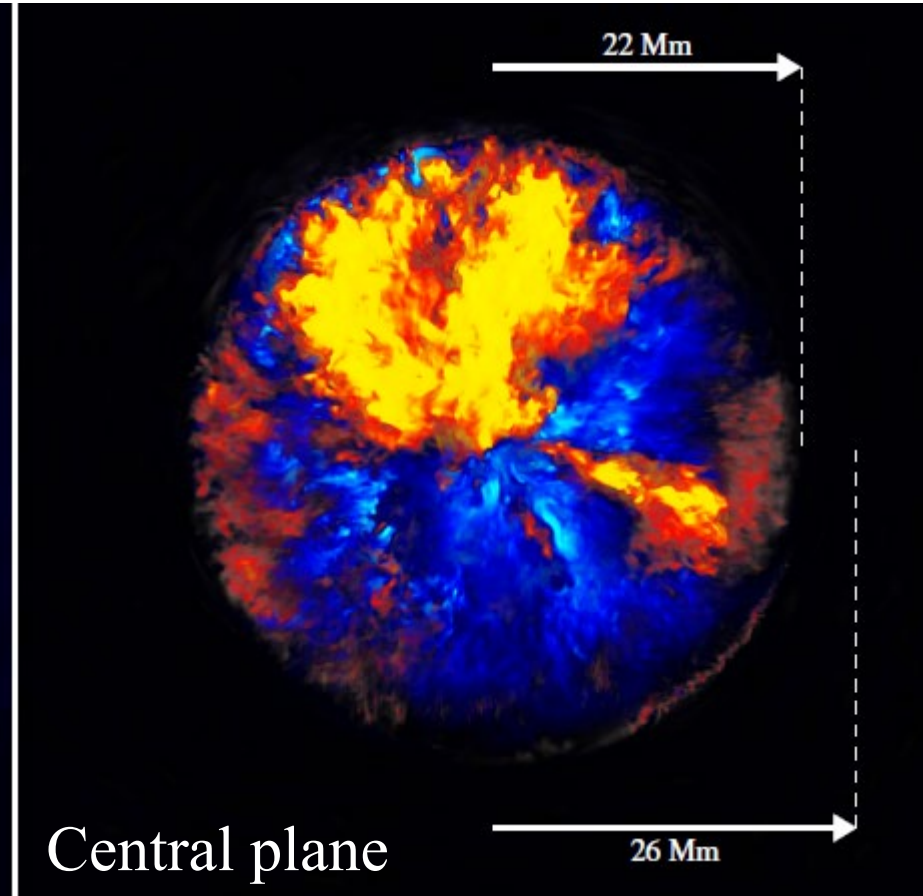
$R_{\odot} = 700 \text{ Mm}$

Rayons
en Mega m



Ondes de
gravité internes
à la frontière

V_{tan}



Central plane

V_{rad} , bleu inflow, rouge outflow

Convection dipolaire

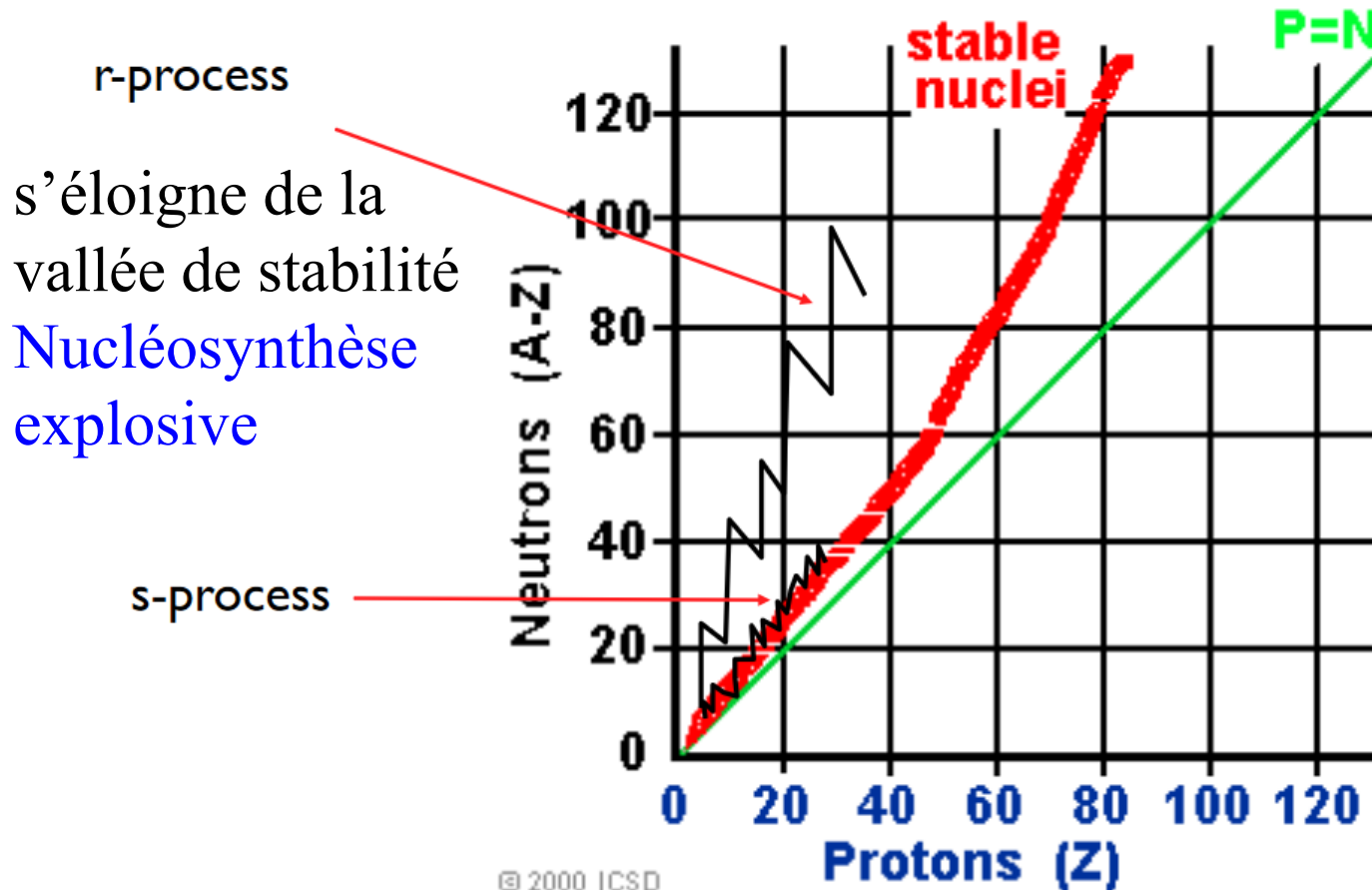
Blouin et al 2023

**Animation de
la turbulence
à l'intérieur du
coeur**



Capture de neutrons

Deux processus: r: rapide, s (slow) lent, par rapport à la réaction de β -decay
i.e. ou un neutron perd un e- pour devenir un proton (1-5 ans)



Les neutrons permettent de réduire la répulsion des protons entre temps, due à leur charge

Les noyaux à nombre pairs (soit Z, soit A) sont plus stables

Pour déduire la vallée de stabilité, Il faut calculer l'énergie de liaison

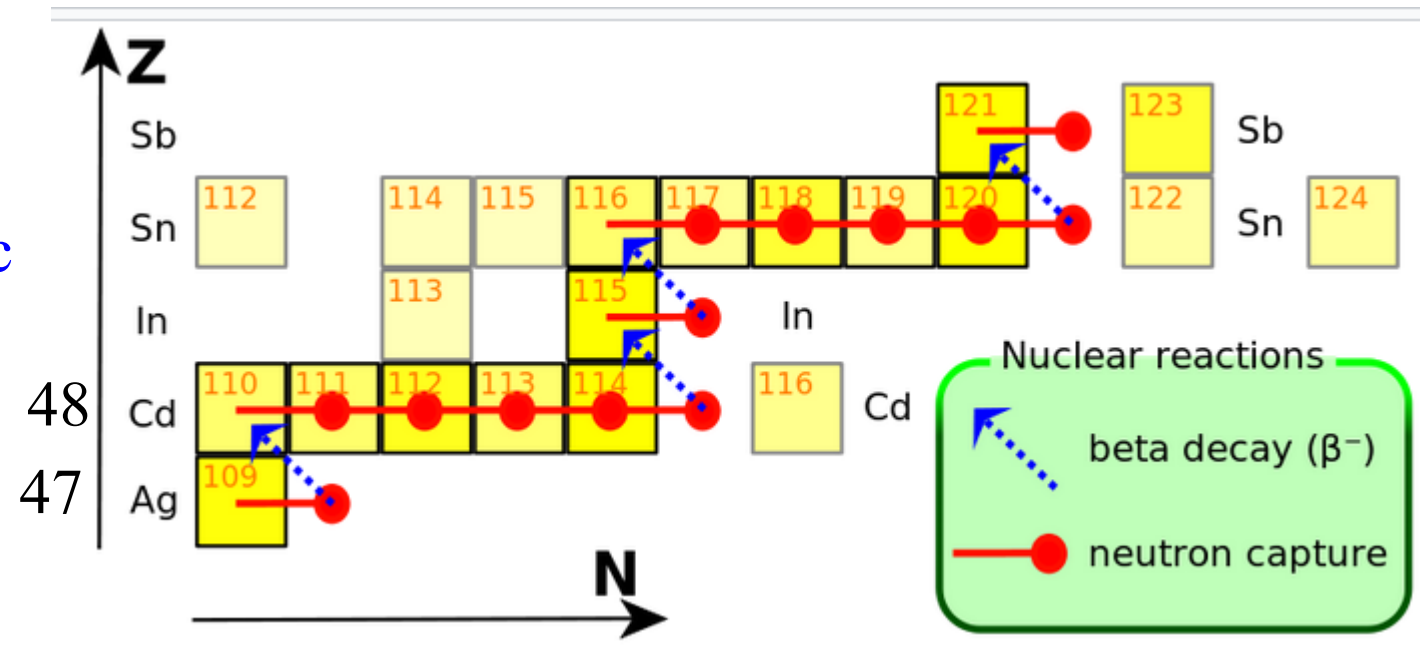
Plus loin que le Fer: capture de neutrons

Les réactions sont de plus en plus difficiles, à grand nombre de protons, à cause de la répulsion de Coulomb, et demande des températures énormes
→ Les neutrons peuvent procéder sans avoir ces problèmes

A partir du Fe, l'énergie de liaison baisse à nouveau, la réaction devient endothermique

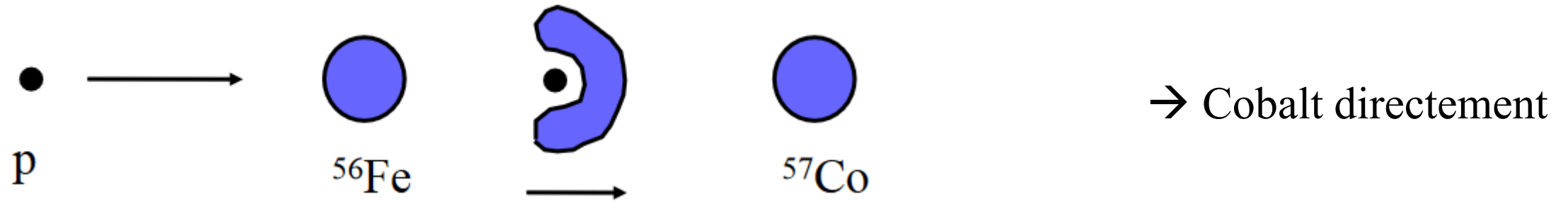
→ mais les neutrons arrivent avec une grande énergie, bombardent les noyaux et peuvent provoquer la réaction endothermique

Les noyaux capturent les neutrons avec des sections efficaces variées

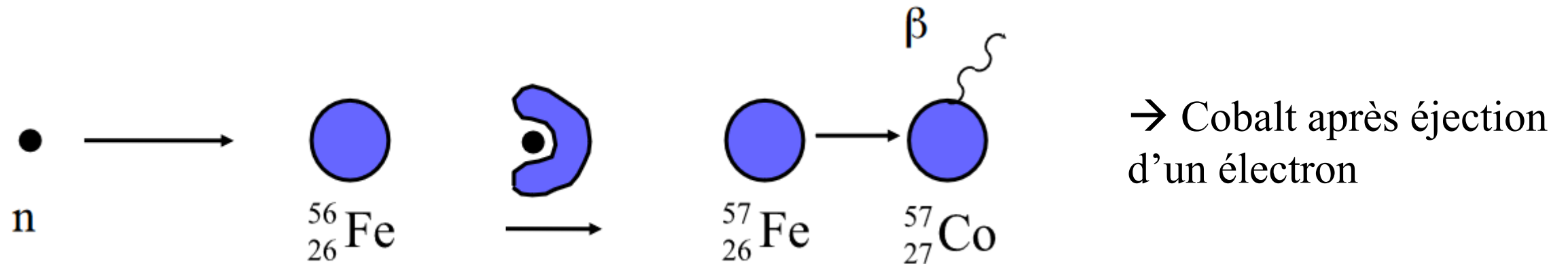


Capture de protons et neutrons

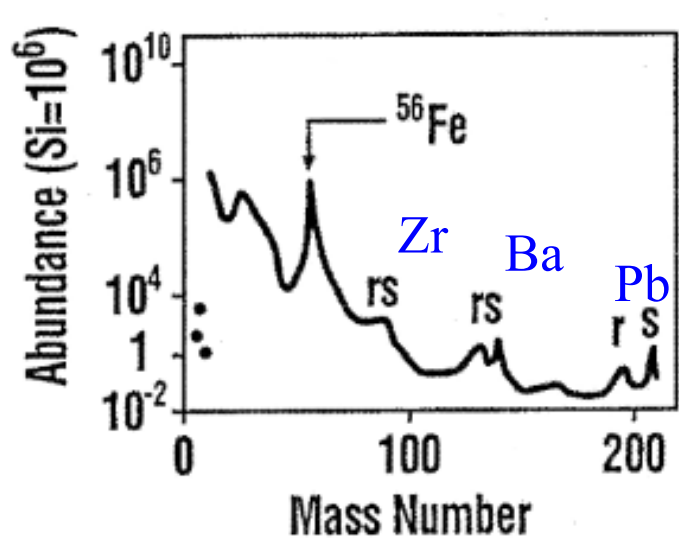
Processus: P capture d'un proton, explosion, ondes de choc, endothermique



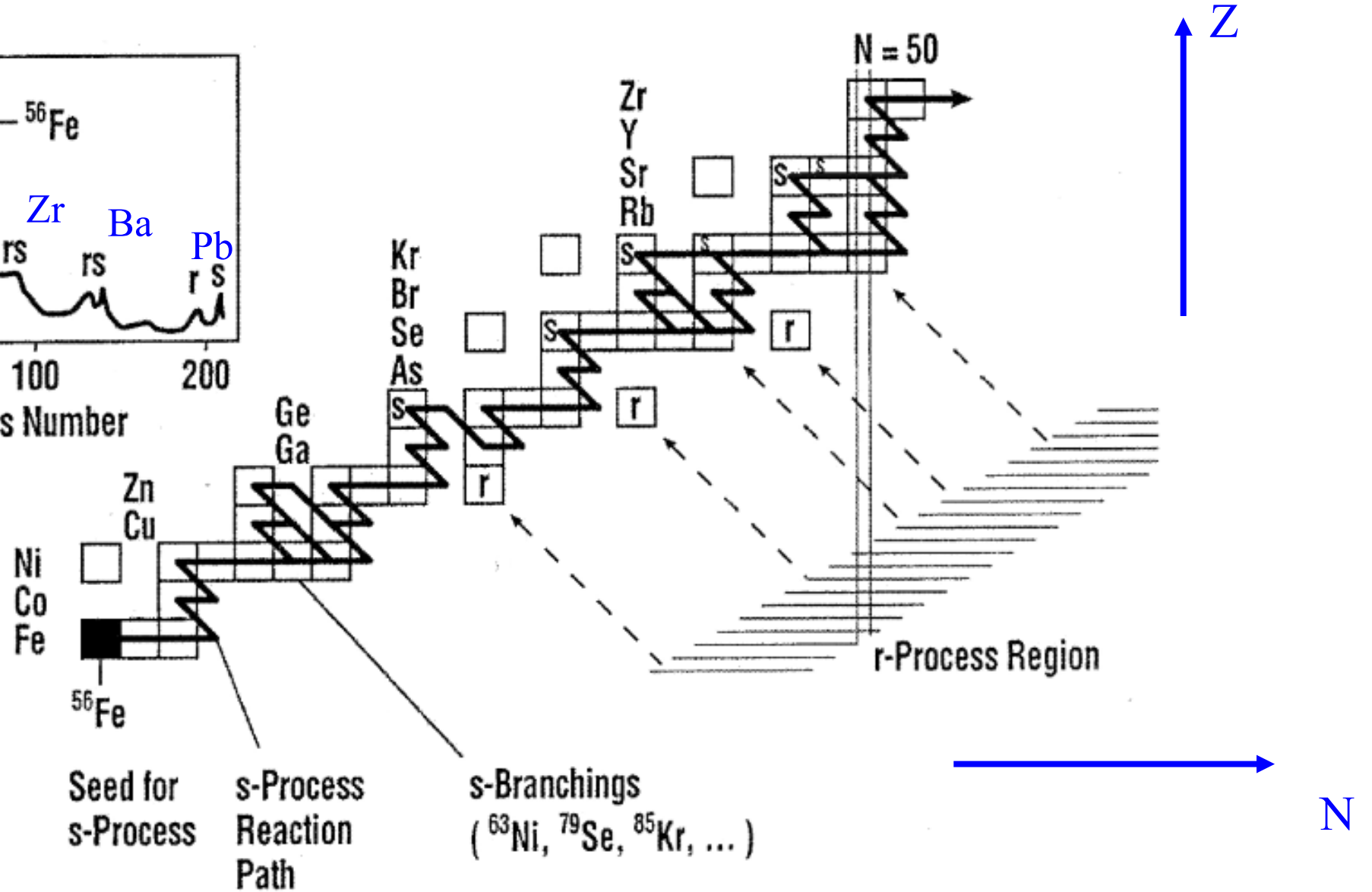
Processus: S capture d'un neutron, lentement, à l'intérieur des étoiles



Rôle du processus S

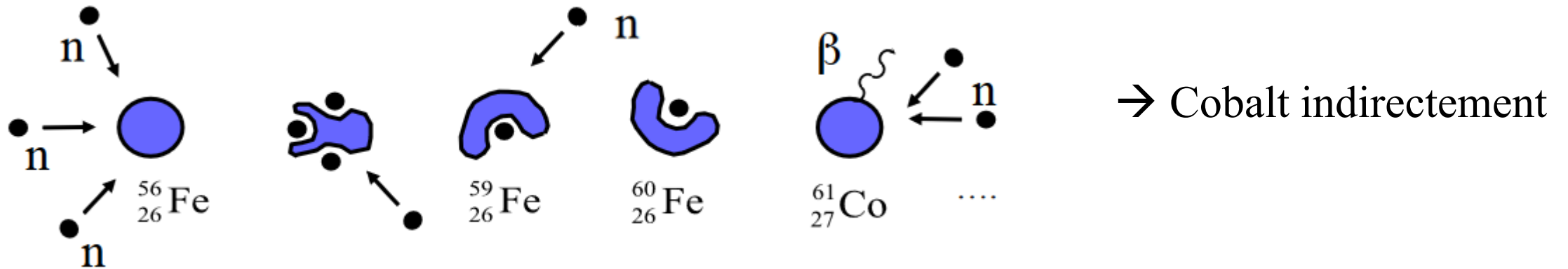


S lent devant β -decay
 a le temps de revenir
 sur la zone de stabilité



Capture rapide de neutrons

Processus: R explosion de supernovae, merger d'étoiles à neutrons



Un grand nombre de neutrons arrivent en même temps, et sont très rapides
Un grand nombre d'éléments ne se forment que comme cela (lanthanides, actinides)

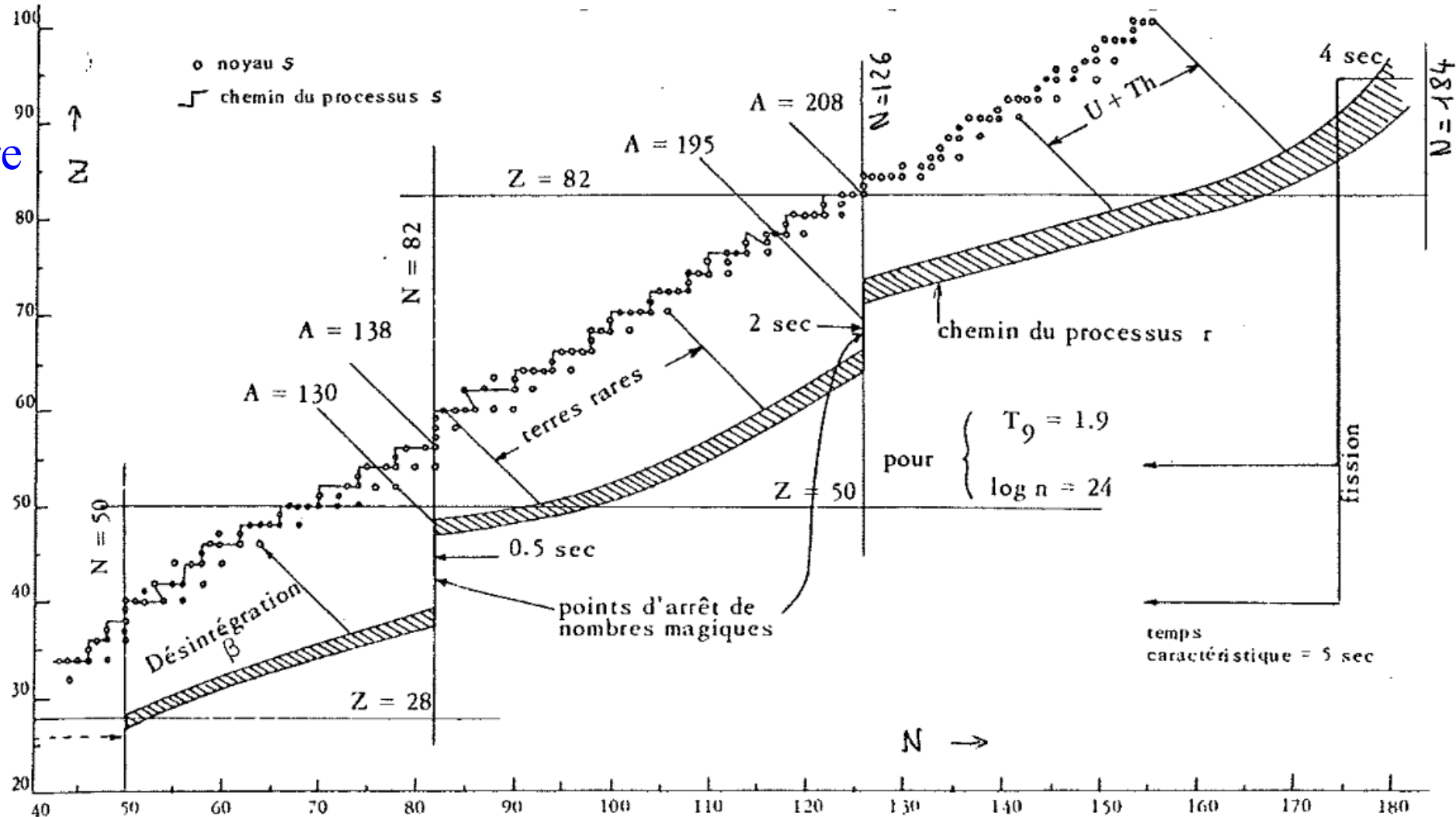
Dans les étoiles massives $> 8M_{\odot}$, surtout processus P et S, jusqu'au ^{209}Bi
Neutrons venant de $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$, et aussi $^{17}\text{O}(\alpha, n)^{20}\text{Ne}$ et $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$
Les processus R se font dans les supernovae et la fusion d'étoiles à neutrons

Rôle du Processus-r

C'est grâce à ce processus que l'on peut expliquer les pics aux nombre magiques, 50 (Se,Kr), 82 (Te,Xe), 126 (Pt,Au)

Quand on atteint une couche complète, la probabilité de capture devient plus lente que la probabilité d'éjecter un neutron

Il faut attendre désintégration β
 $Z \rightarrow Z+1$



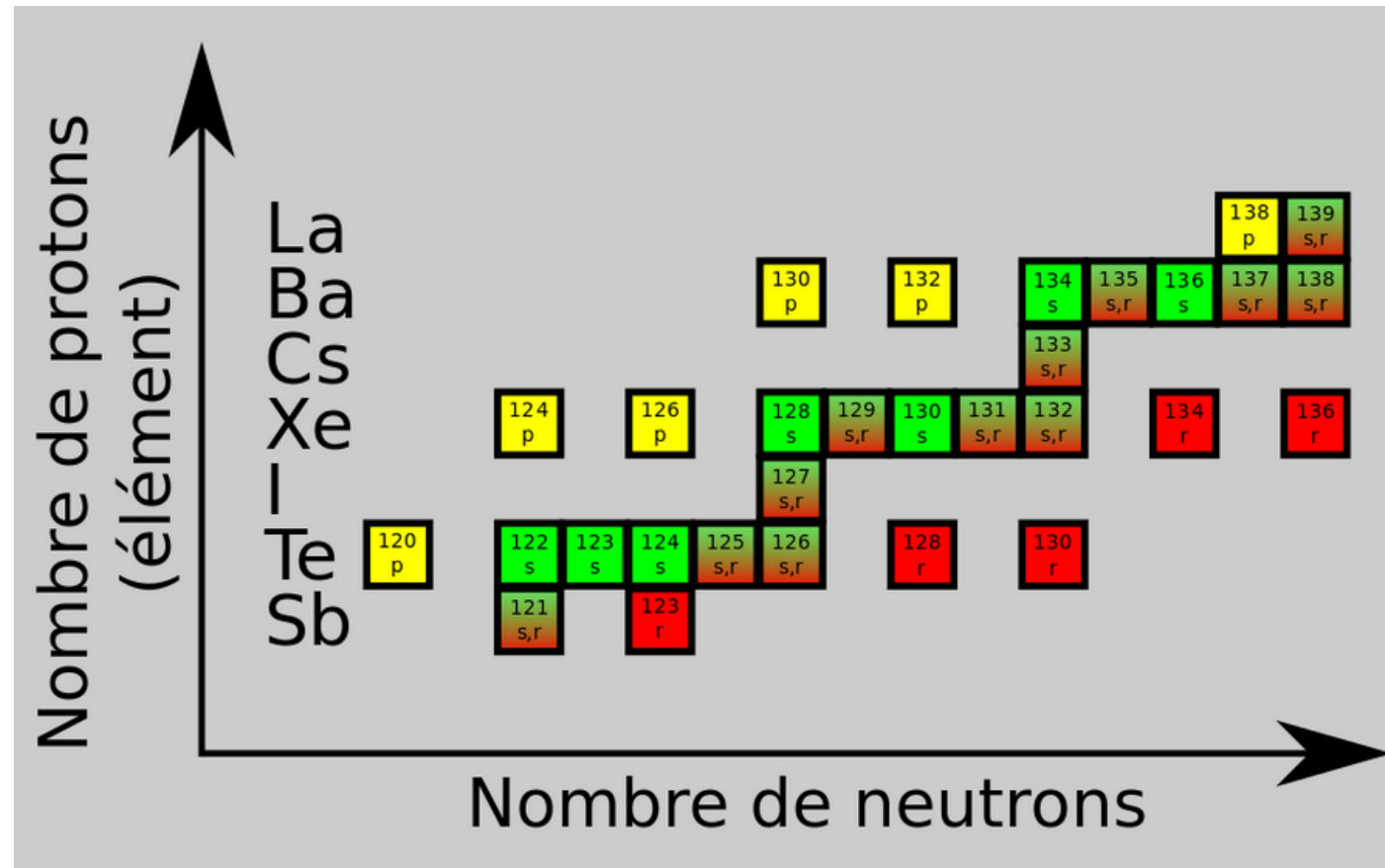
Les éléments p, déficients en neutrons

Ce sont des éléments rares, observés dans le système solaire
Ils pourraient être formés par le processus p

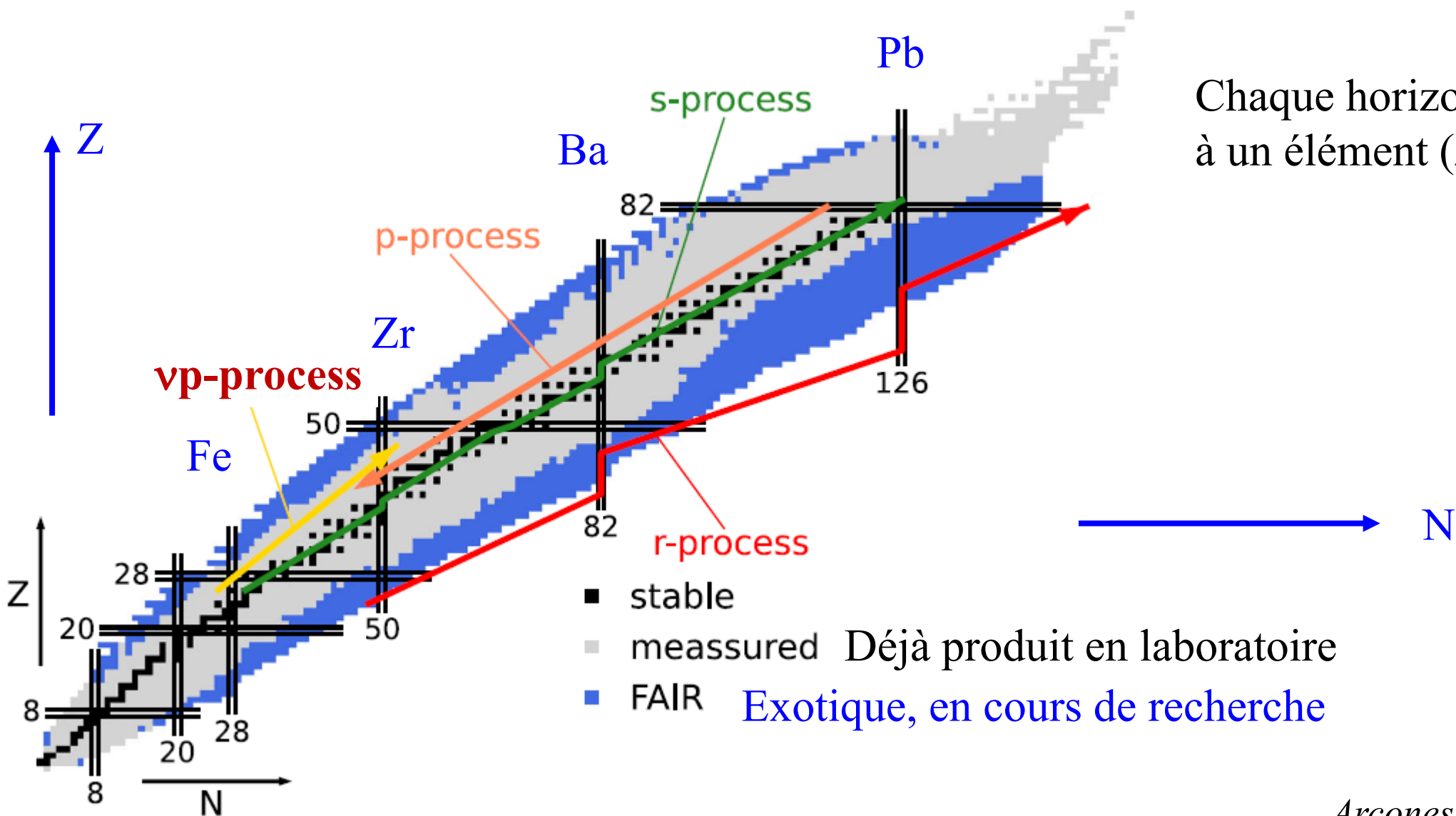
Lors de phénomènes explosifs
Et ondes de choc

quelques noyaux stables produits
lors des processus s (vert), r (rouge)
et **p (jaune)**

57
56
55
54
53
52
51



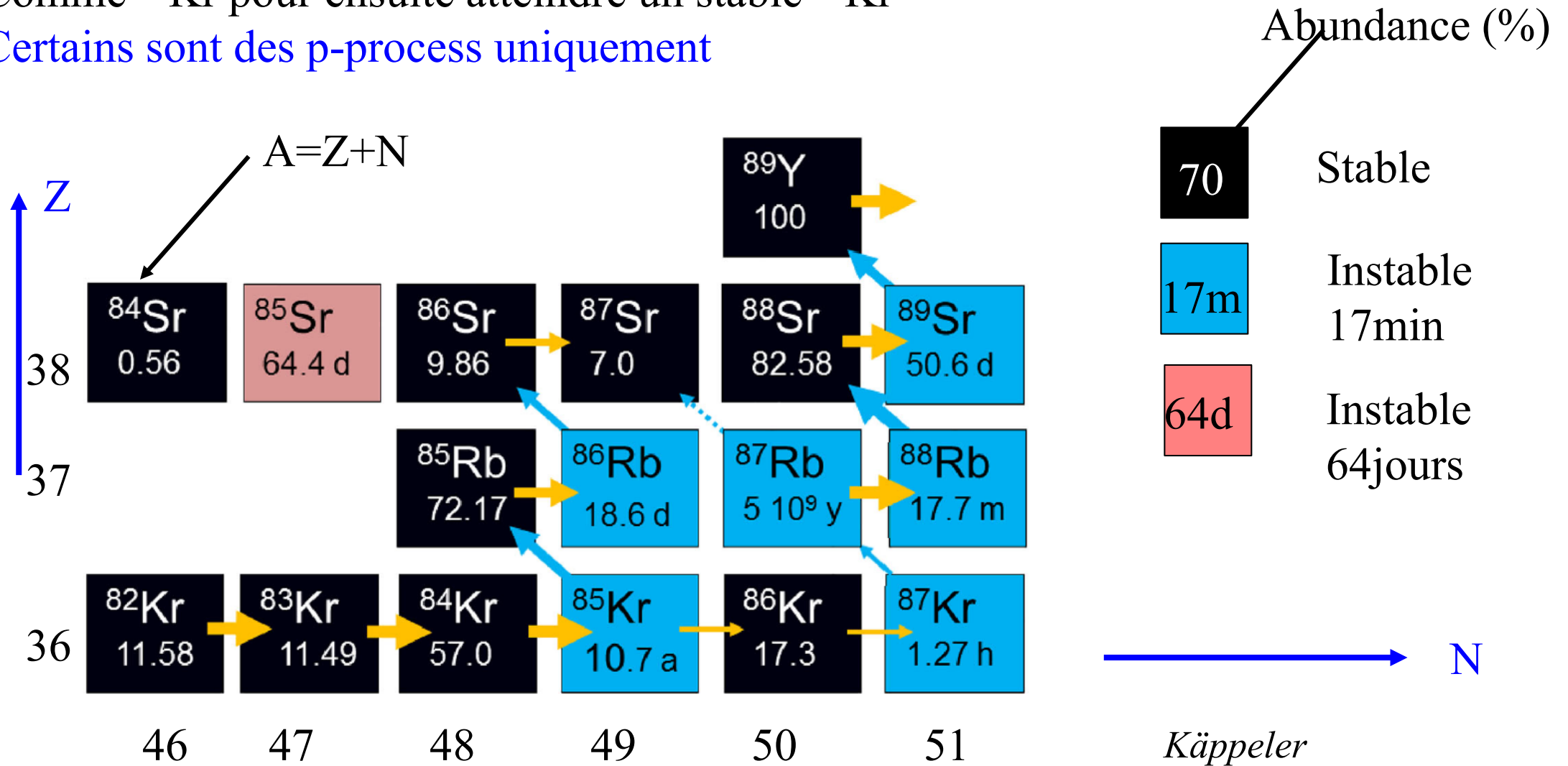
Distribution des noyaux stables et déjà mesurés



Chaque horizontale correspond à un élément (Z)

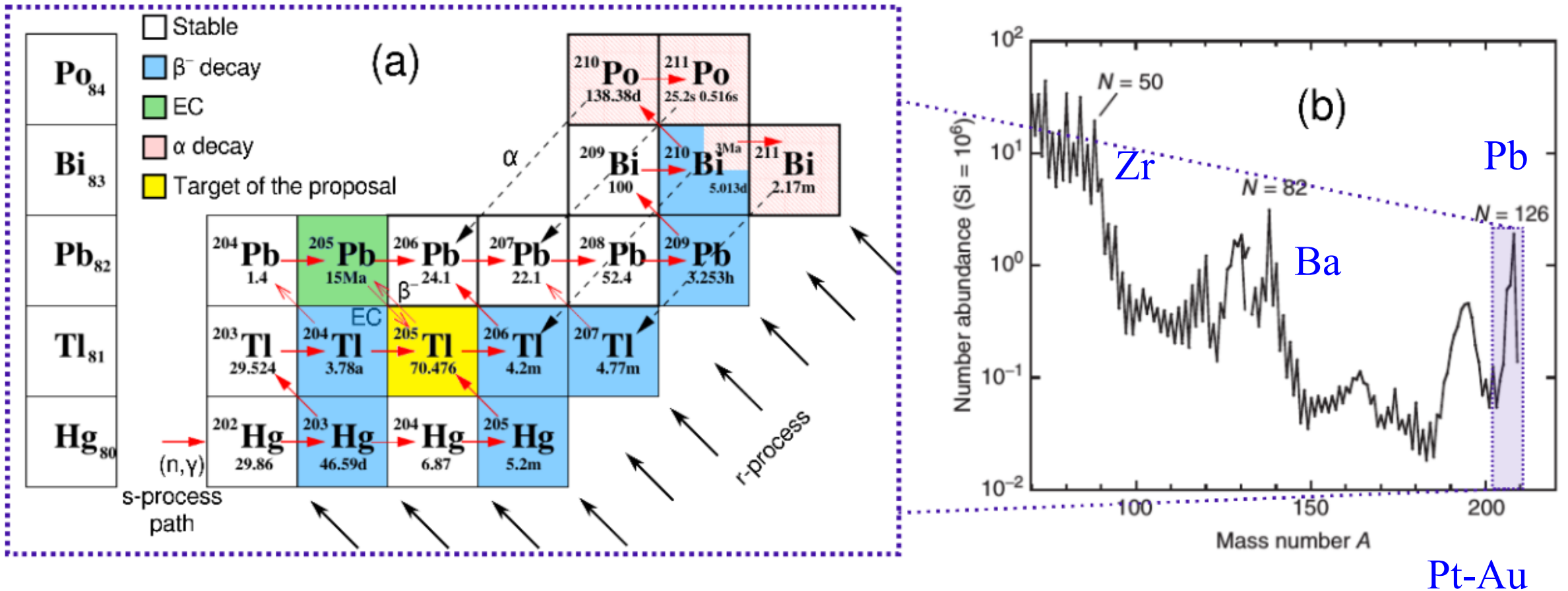
Compétition entre processus

Processus-r peut aussi passer au-dessus d'un élément instable
 Comme ^{85}Kr pour ensuite atteindre un stable ^{86}Kr
 Certains sont des p-process uniquement

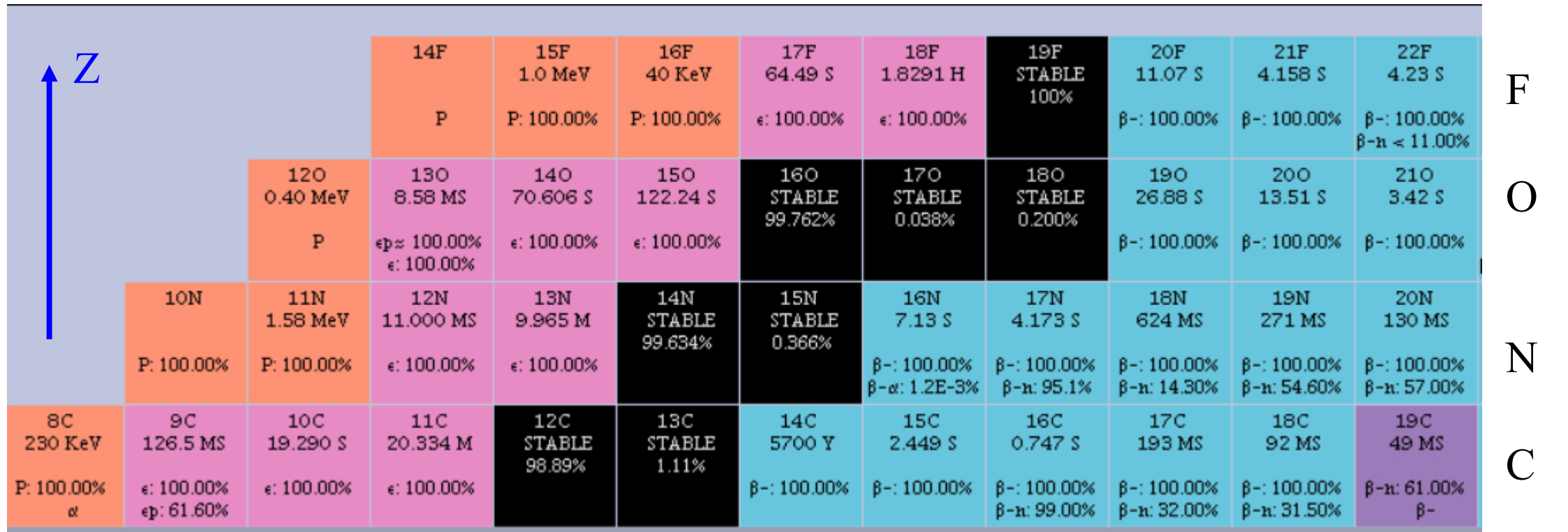


Vers la fin de la stabilité

E.C. Electron Capture (inverse de β -decay) $^{205}\text{Pb} \rightarrow ^{205}\text{Tl}$ en 15 Myr
 α -decay $Z-2, N-2 (A-4)$



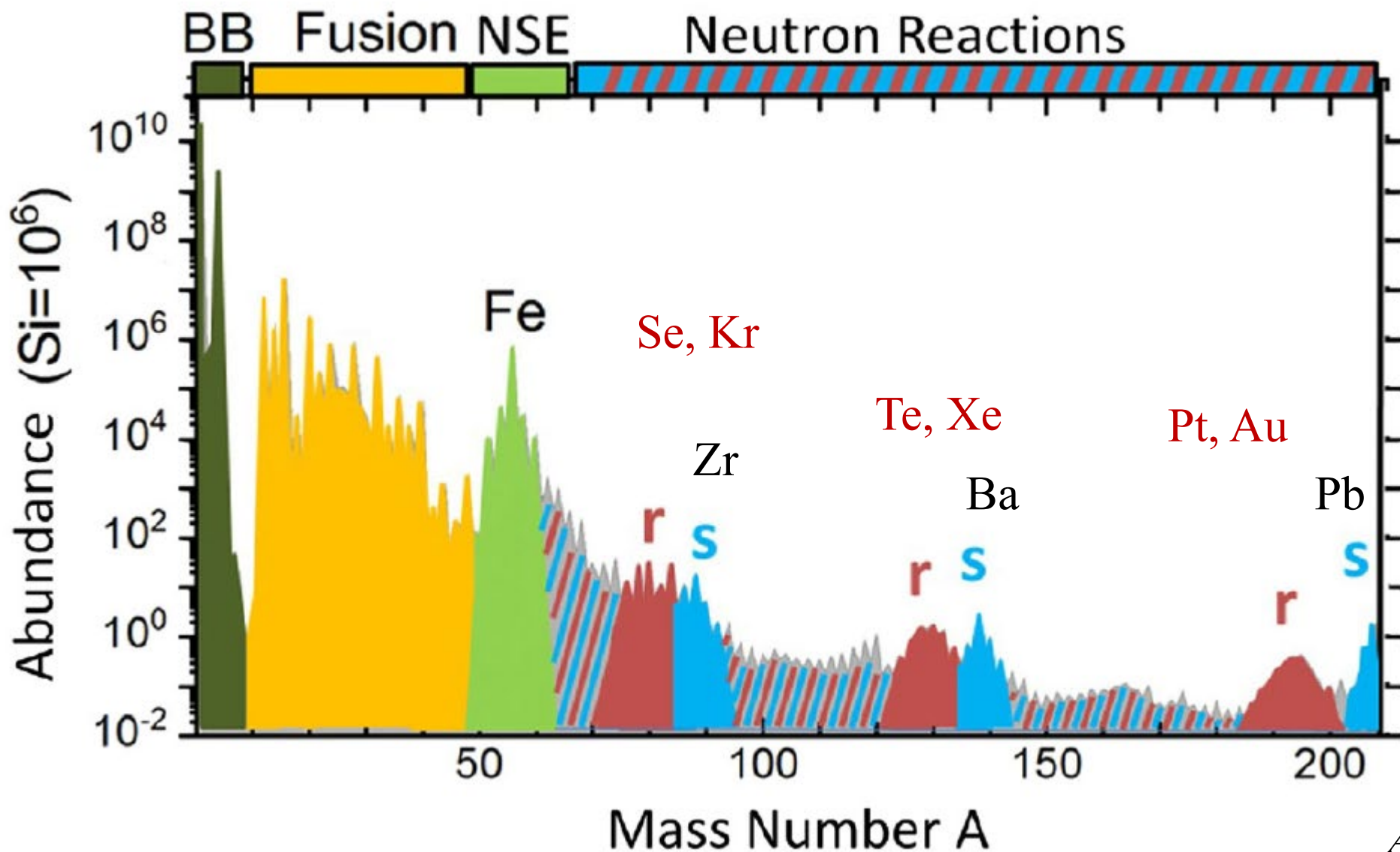
Stabilité et « drip line »



- proton emission
- positron emission or electron capture
- stable isotope
- beta decay
- neutron emission

Soit un proton s'enfuit à gauche
« proton drip line »
Soit un neutron à droite
(neutron drip line)

Provenance des éléments



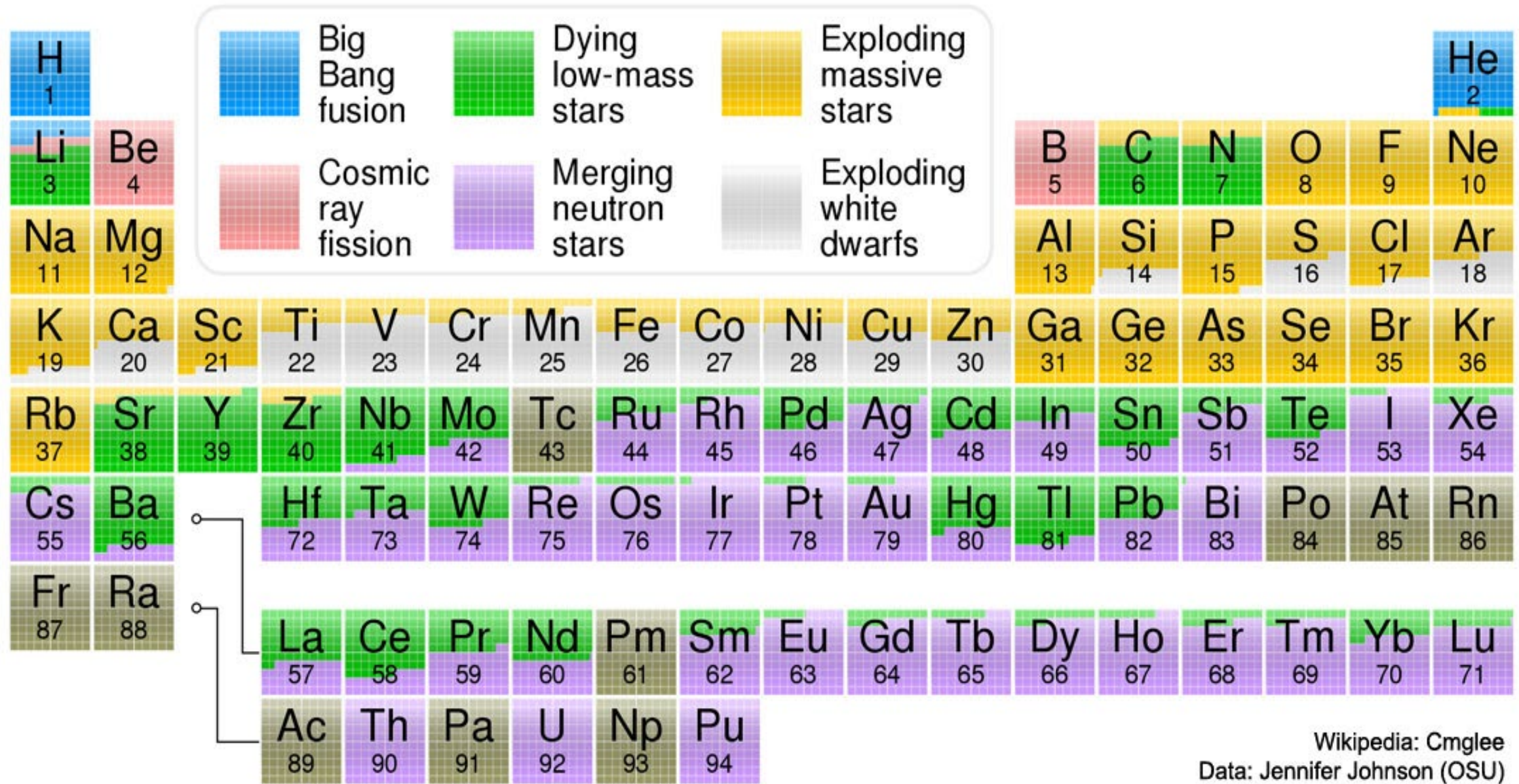
NSE
Nuclear Statistical
Equilibrium

Après la fusion de Si
 QSE quasi equilibrium
 mais pas global

Abondance_i (T, ρ, B_i)
 et compétition entre
 Réactions

→ Favorise Fe

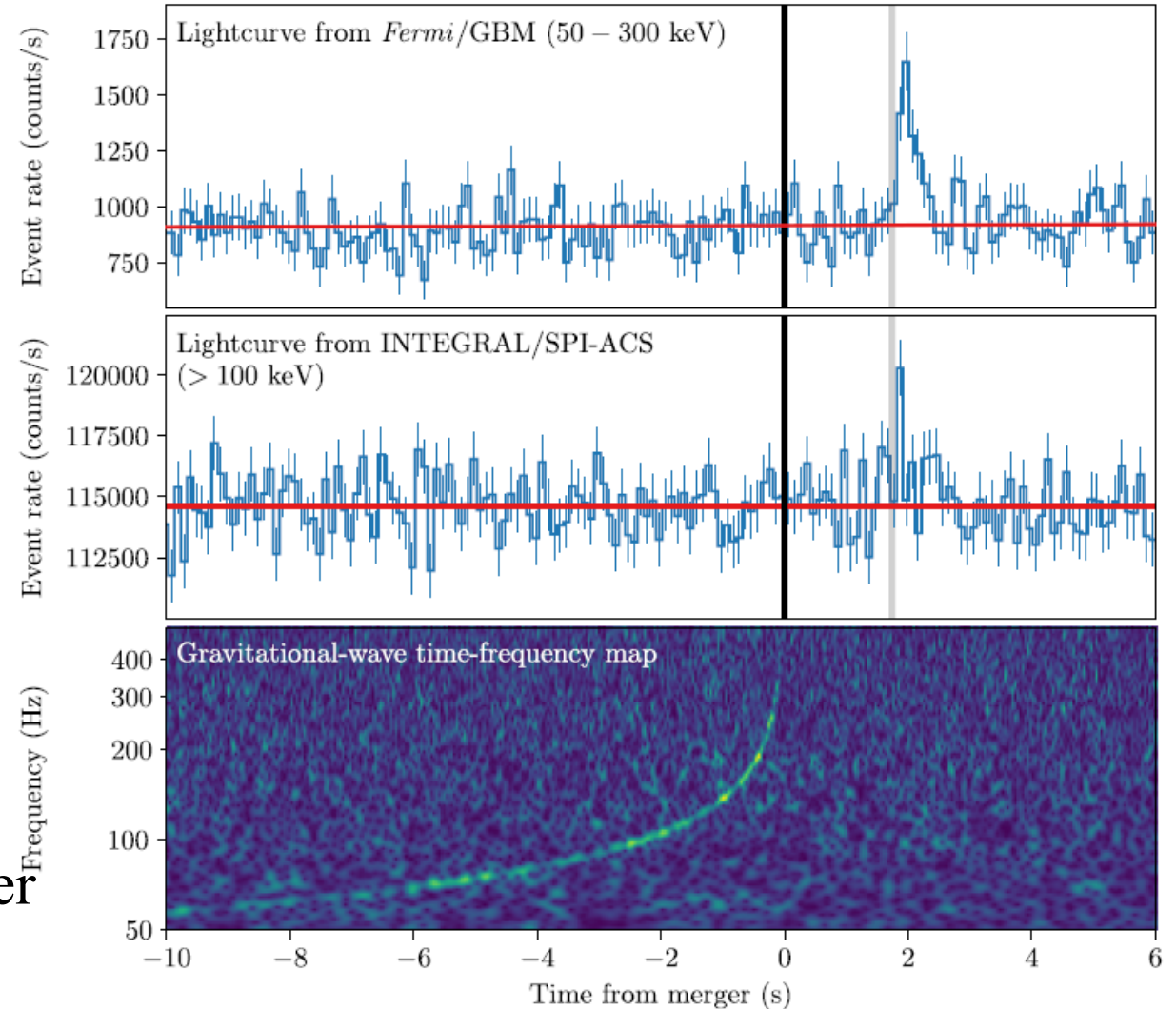
Eléments formés dans les fusions d'étoiles à neutron



Wikipedia: Cmglee
Data: Jennifer Johnson (OSU)

Prototype fusion d'étoiles à neutron: GW170817

Sursaut Gamma



NGC 4993 (MUSE)

Lyman et al 2017

D=38.9 Mpc

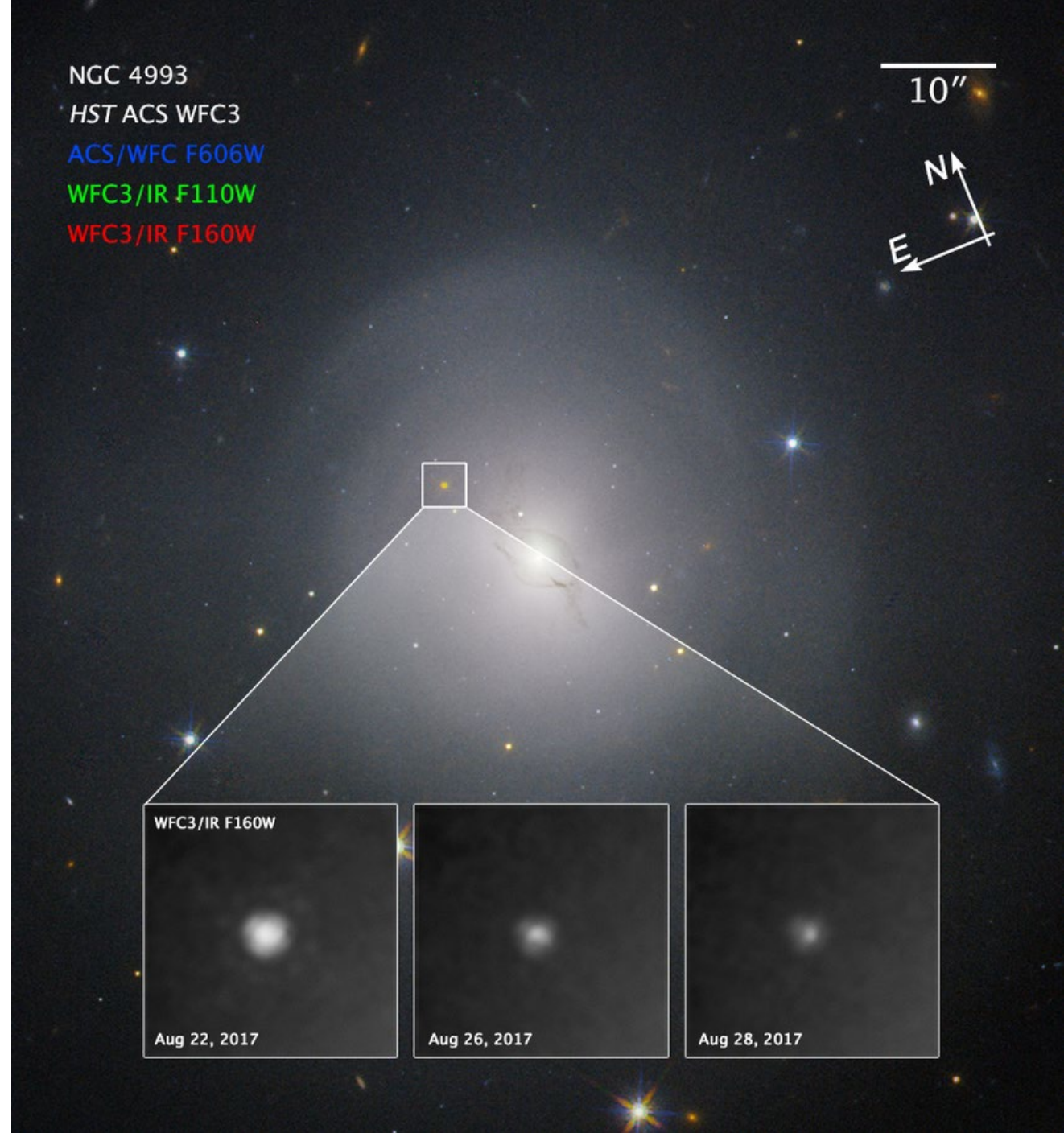
GRB + BNS merger

Abbott et al 2017

Le rayonnement rémanent



*Rayons gamma
Tanvir et al 2017*



Prédictions d'une kilonova

Li & Paczynski 1998 (LP98) Metzger et al 2010

Après le sursaut- γ \rightarrow accréation de matière dans
tore en rotation+ faisceau dirigé vers l'observateur

Emission plus isotrope, due à la radioactivité
des éjecta, comme dans une SNIa (^{56}Ni)

La capture de neutrons ne dure que qqes sec,
mais la radioactivité peut être bcp plus longue

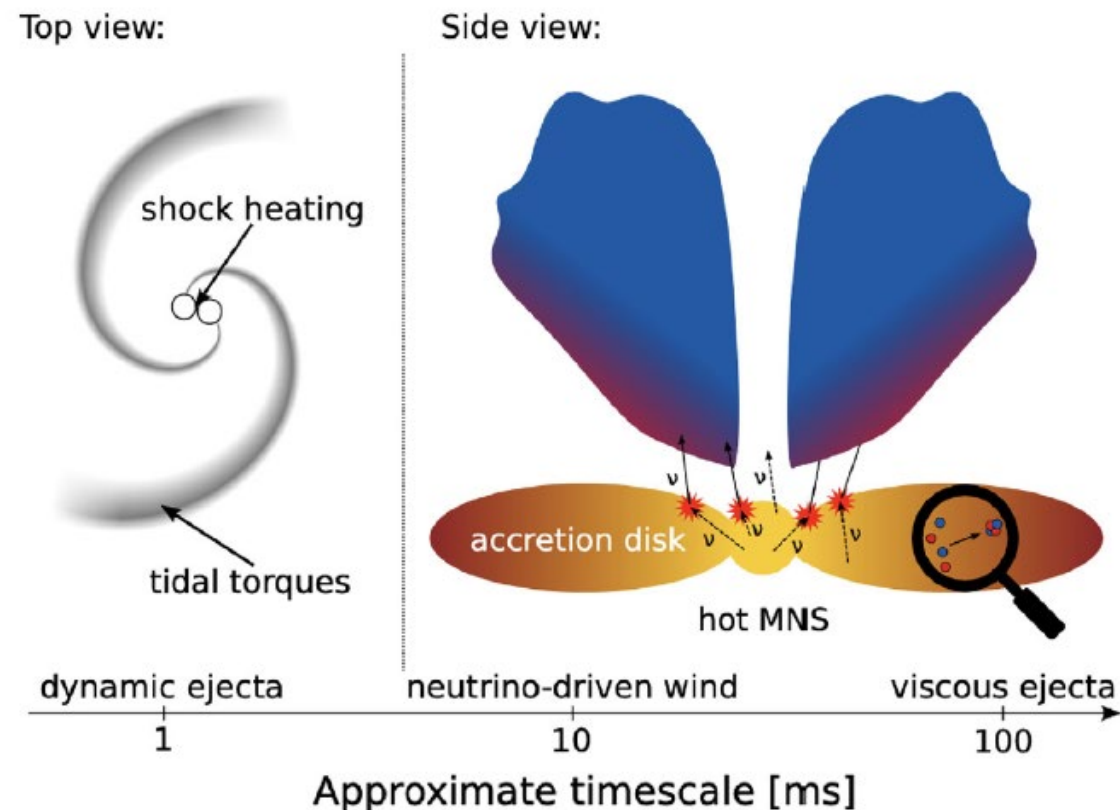
Modèles

$\rightarrow 10^{41}$ erg/s, ou $10^3 L(\text{Eddington})$ pour $1M_{\odot}$

\rightarrow Kilonova, car une nova $\sim L(\text{Eddington})$

Ejecta dynamiques, forces de marée durant la fusion

Puis éjecta séculaires, provenant du disque d'accréation du remnant

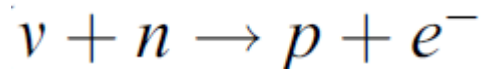


$$Y_e \text{ fraction d'électron} = \frac{\sum_i Z_i Y_i}{\sum_i A_i Y_i}$$

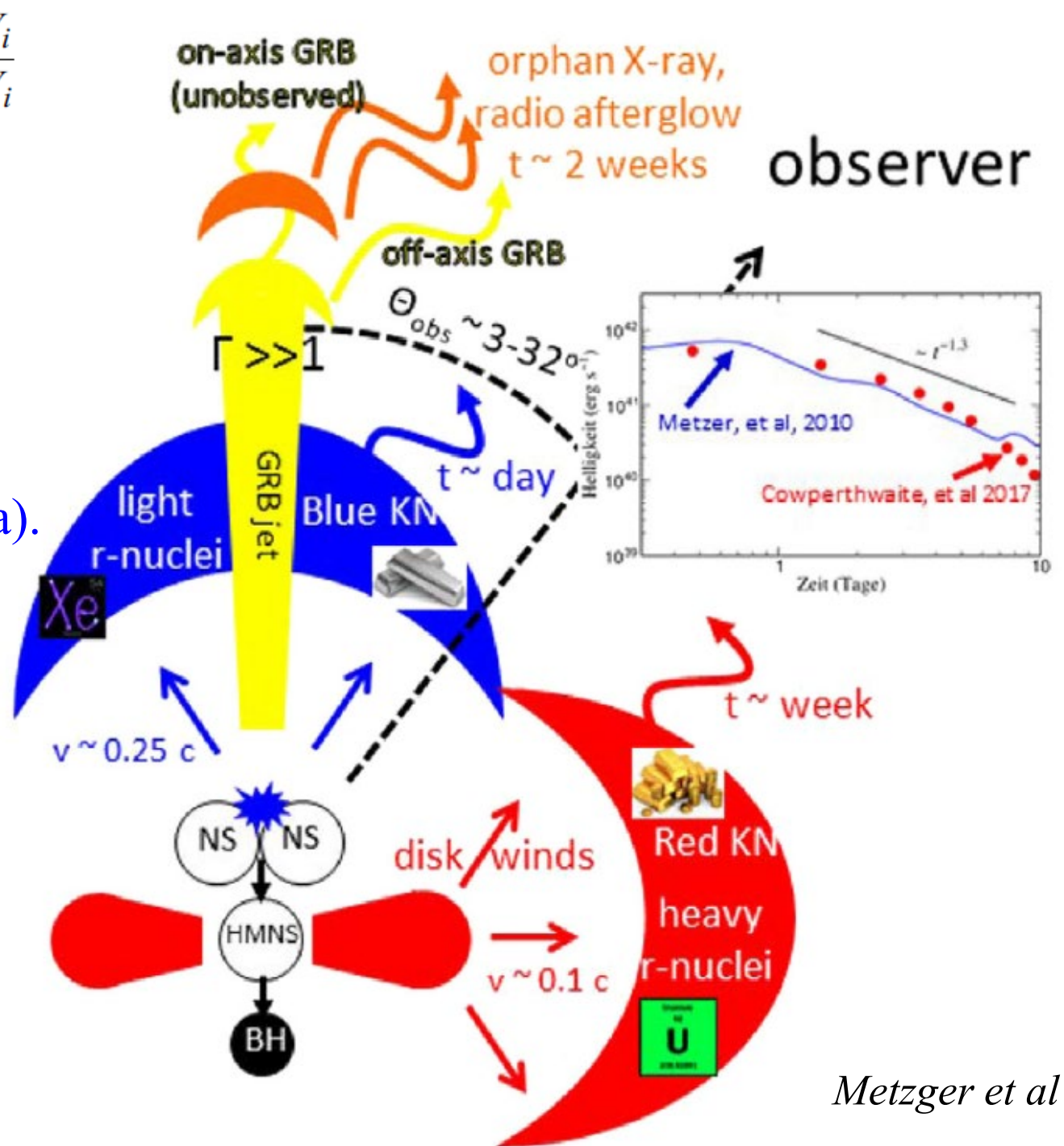
L'objet central fusionné soutenu par l'énergie thermique et rotationnelle forme une étoile à neutrons hypermassive, puis un trou noir.

Un disque d'accrétion se forme qui conduit à des jets axiaux (+sursaut gamma).

Le vent alimenté par des neutrinos augmente $Y_e < 0.1$ jusqu'à 0.3 via des captures de neutrinos sur des neutrons



En raison de la densité plus élevée des états électroniques dans les éléments lanthanides et actinides → aspect rouge
Les autres → aspect bleu



Enrichissement du milieu interstellaire

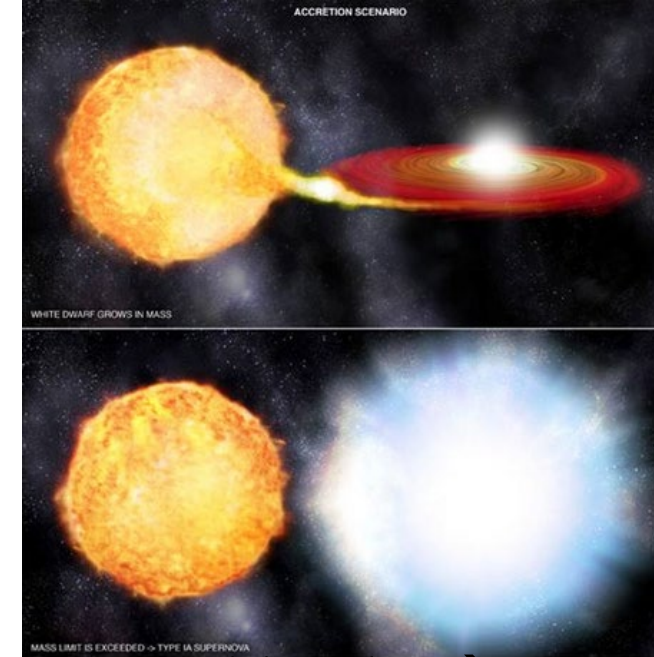
Les faibles masses $< 8M_{\odot}$, bien que plus nombreuses \rightarrow faible rôle

Elles rejettent leurs enveloppes en phase PN

Et aussi bien plus tard, dans la phase naine blanche, en cas de binaire avec une étoile massive \rightarrow SNIa

Les étoiles plus massives, de 8 à $25 M_{\odot}$ vont exploser en SNII (comme le Crabe)

Pour $M > 25 M_{\odot}$, alors on passe par des WR, puis SN-Ib si enveloppe H perdue, ou SN-Ic si enveloppe He perdue

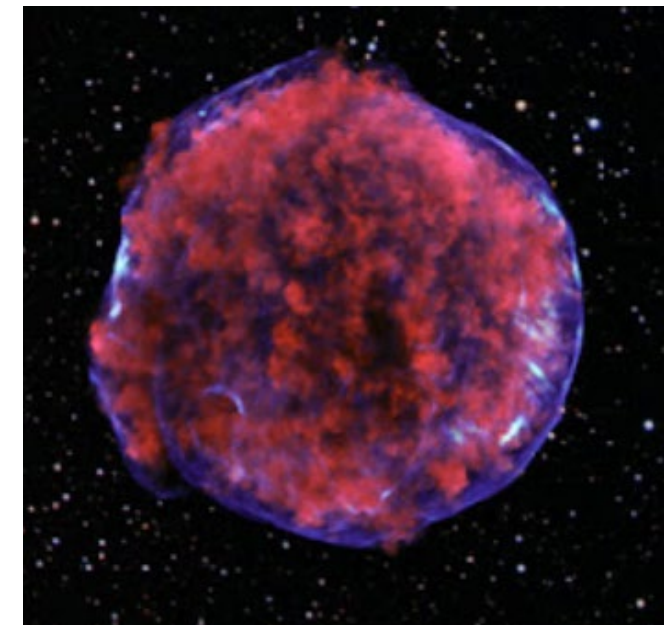


Naine blanche \rightarrow SNIa



Crabe en X-- 1054

Encore plus massives ($> 80M_{\odot}$), les PISN
« Pair instability »SN, pour une métallicité
Faible-- pratiquement PopIII

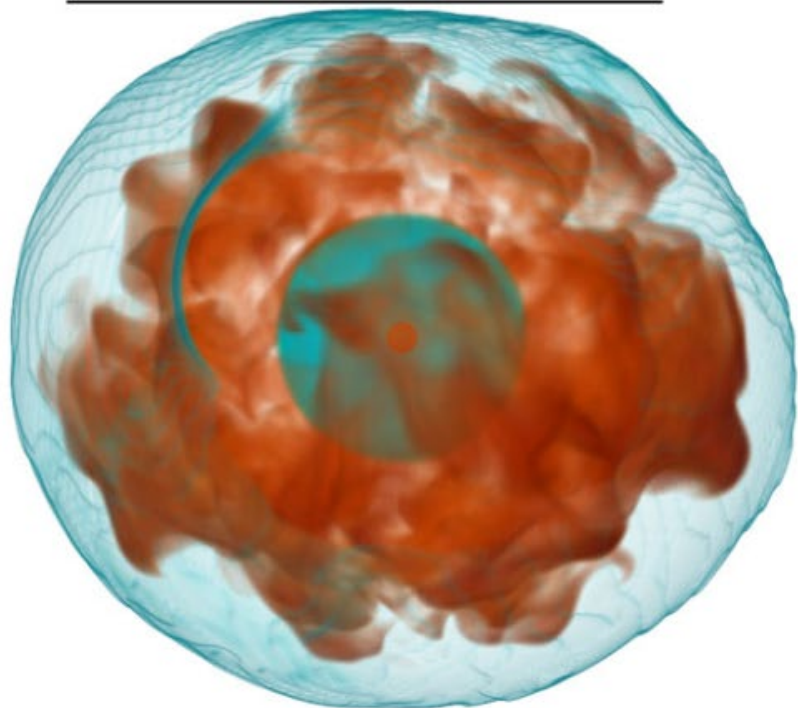


Tycho en X-- 1572

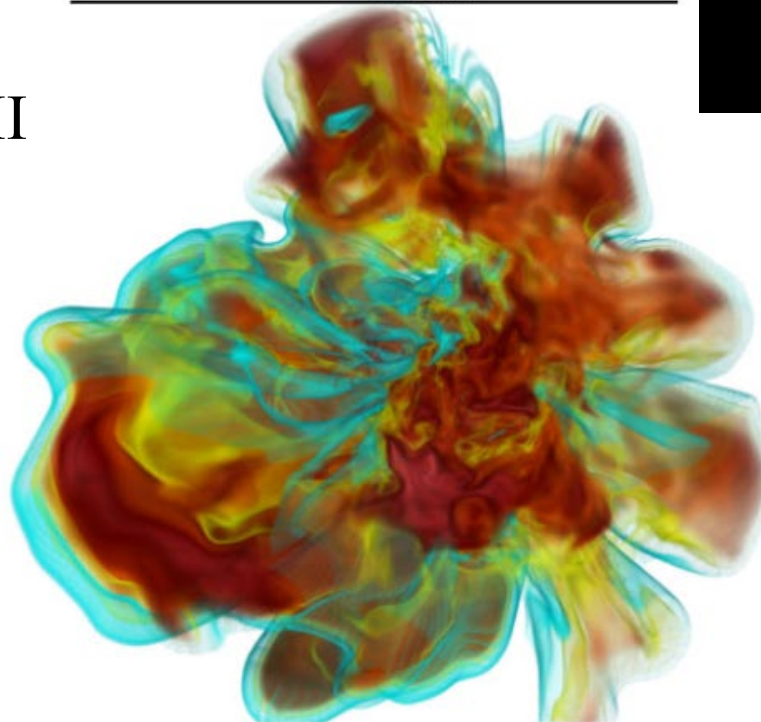
Supernovae sur ordinateur

Pendant longtemps, les étoiles n'explosaient pas dans les ordinateurs Physique insuffisante?
1D seulement, 3D nécessaire → très complexe

$t = 0.107$ s 200 km M12.5-3D3D

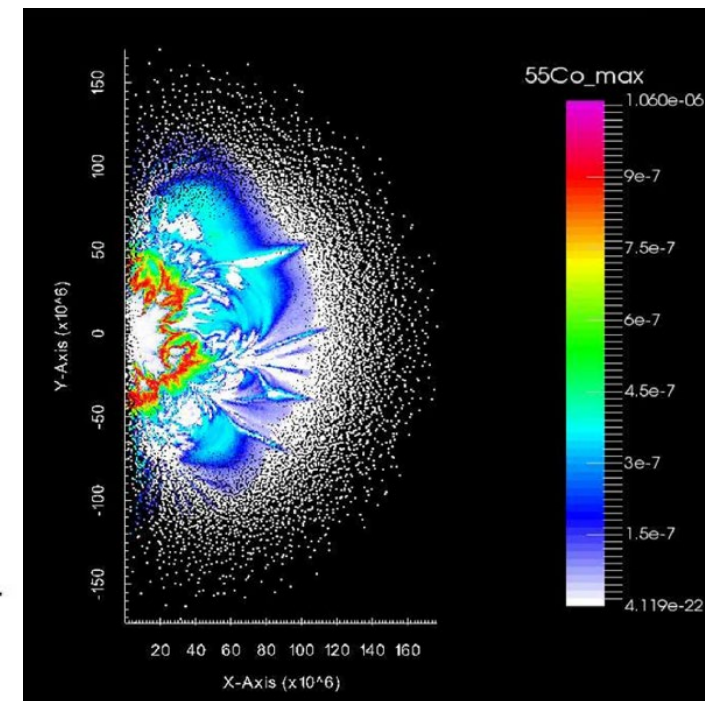


$t = 0.497$ s 3000 km



SN-II

Vartanyan + 2022



SN-Ia
Enrichissement
en ^{55}Co (17h)
radioactif

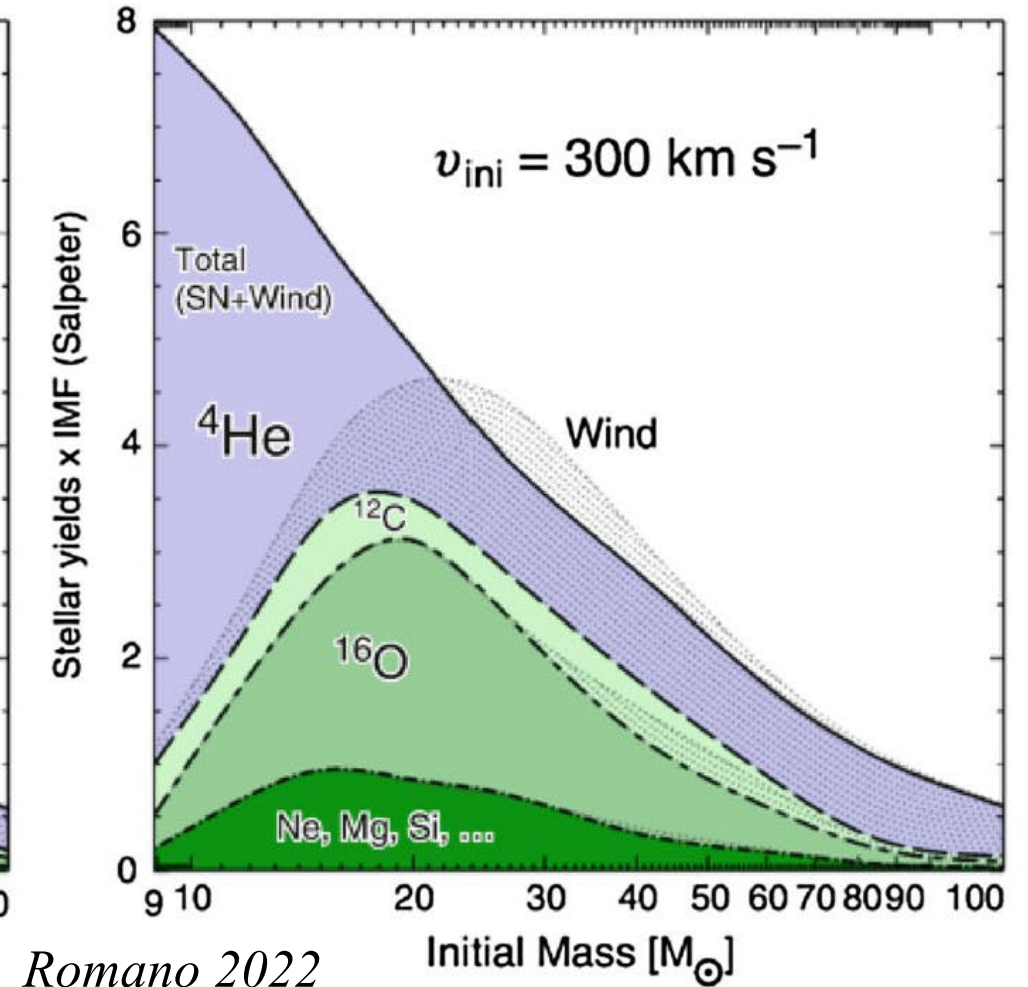
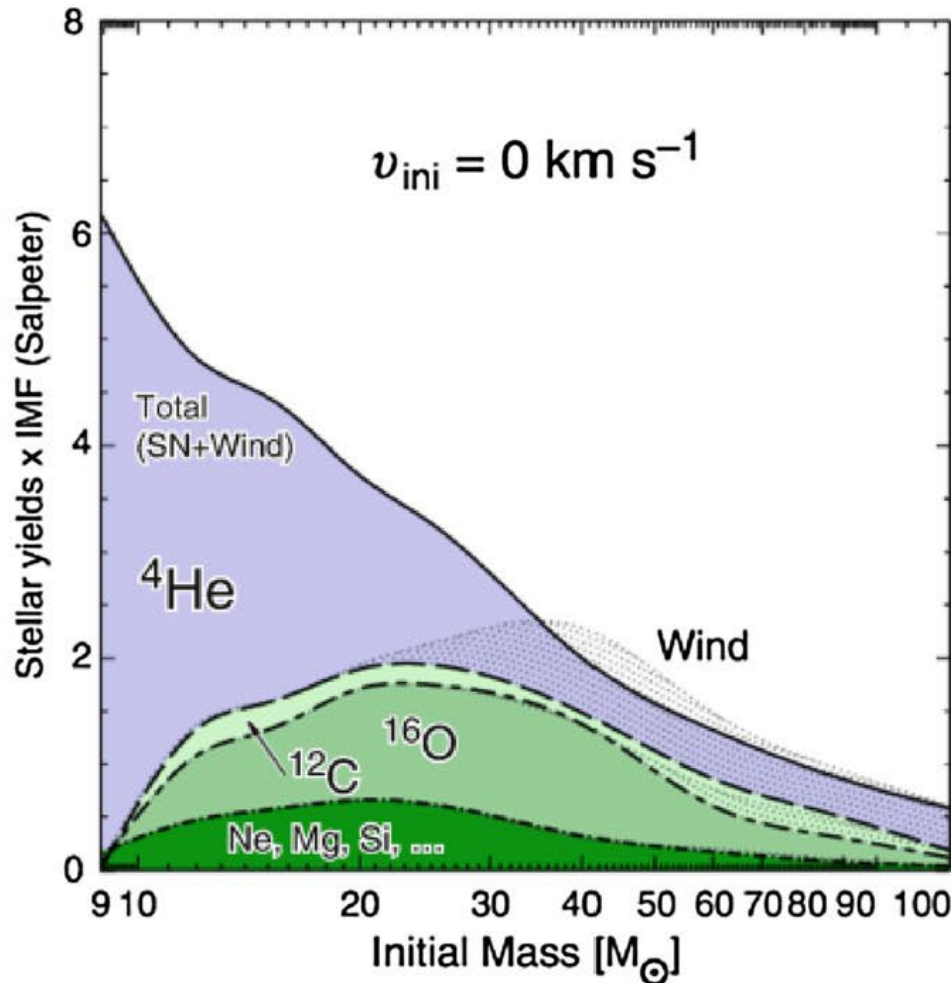
Travaglio

Apport des différentes étoiles

Dans quel pourcentage les étoiles enrichissent le milieu en éléments lourds (Yield)
Vents stellaires, et surtout explosion de supernova, → dépend de leur rotation

Pondérant par
leur présence
dans l'IMF

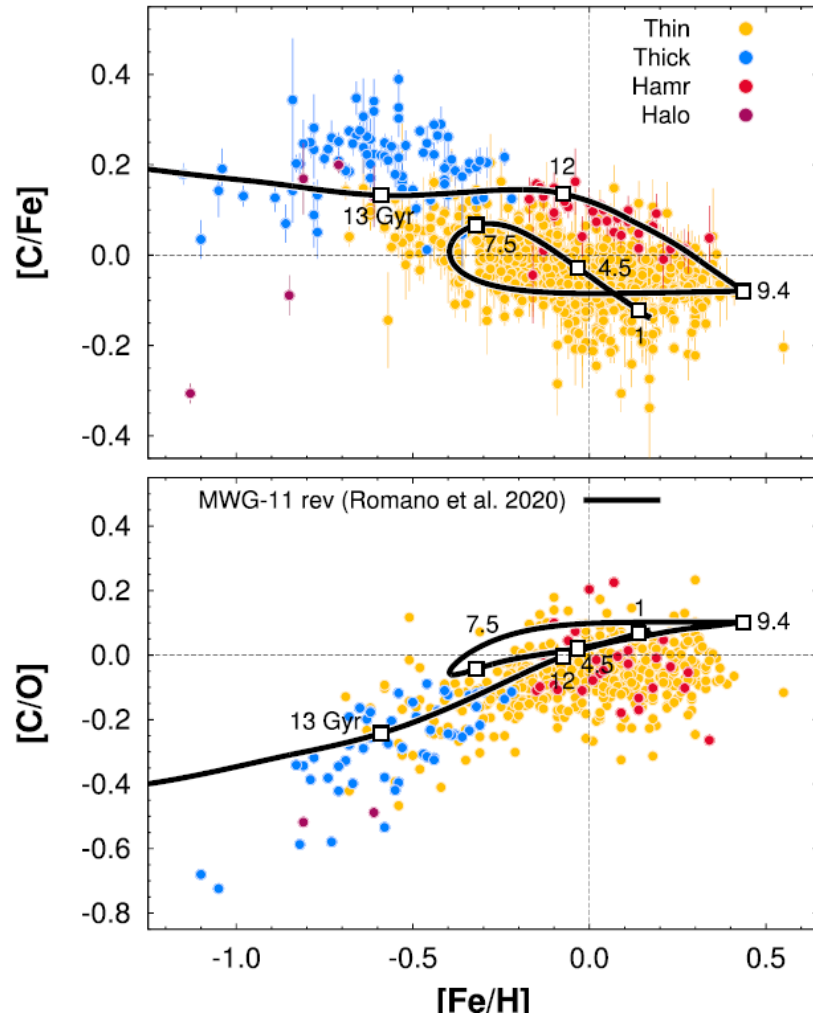
Avec ou sans
rotation



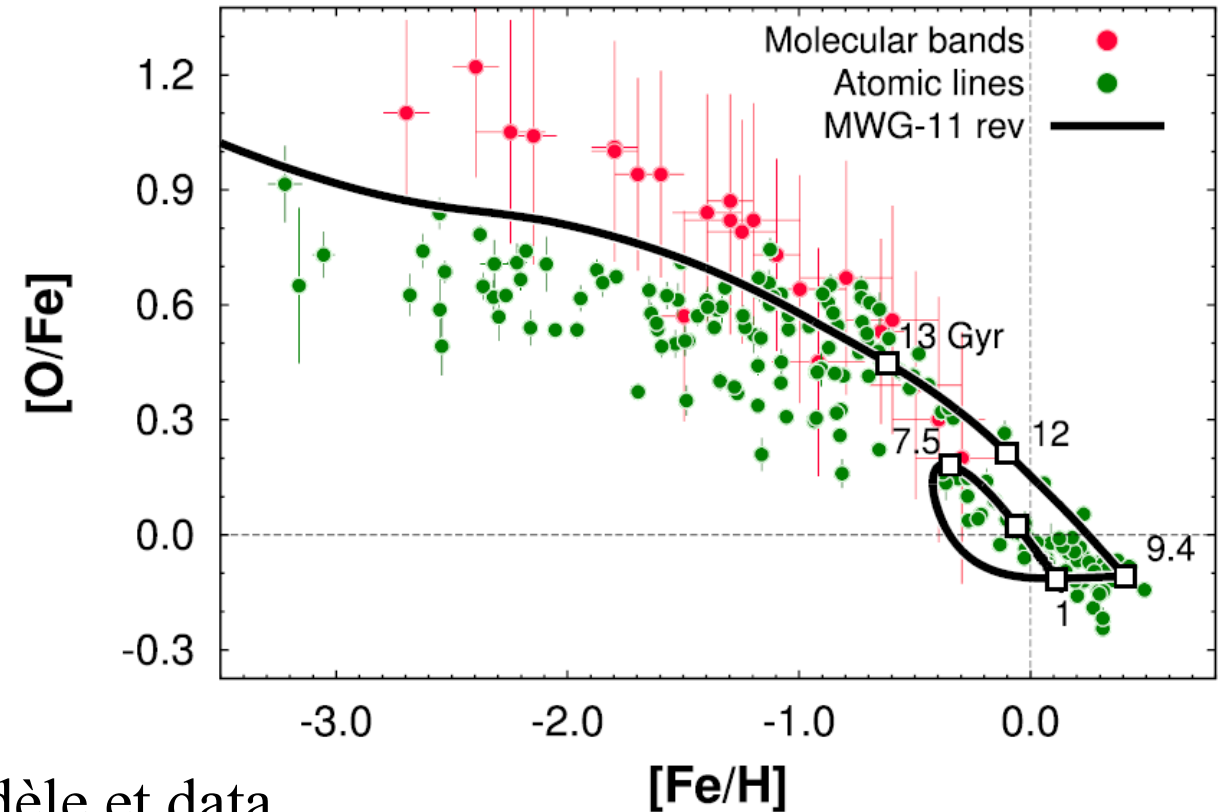
Métallicité et α/Fe

Modèle avec 2 accrétions de gaz à 4.3Gyr
→ Explique les Hamr

Les éléments α sont O, Ne, Mg, Si → éjectés par les SNII, ou Ibc, donc **étoiles massives en 10Myr**. Fe par contre, doit attendre qq Gyr, éjecté par SNIa, étoiles peu massives



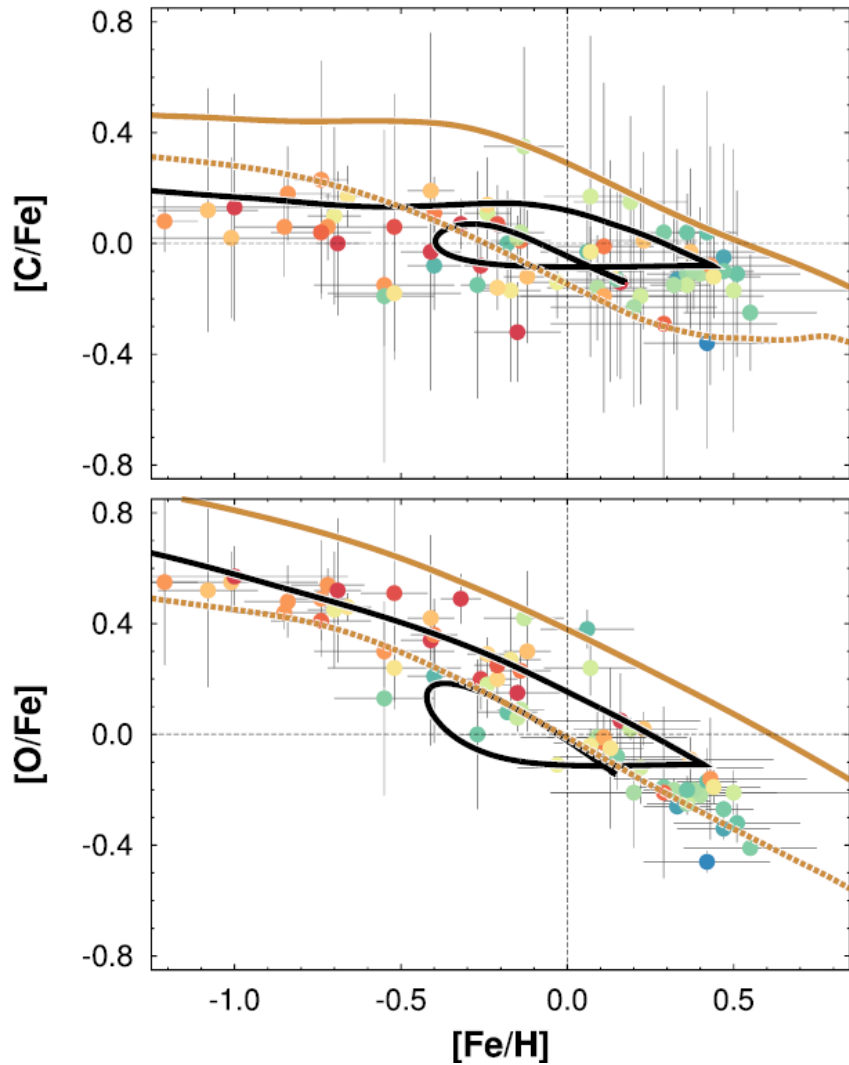
Hamr = high- α metal-rich



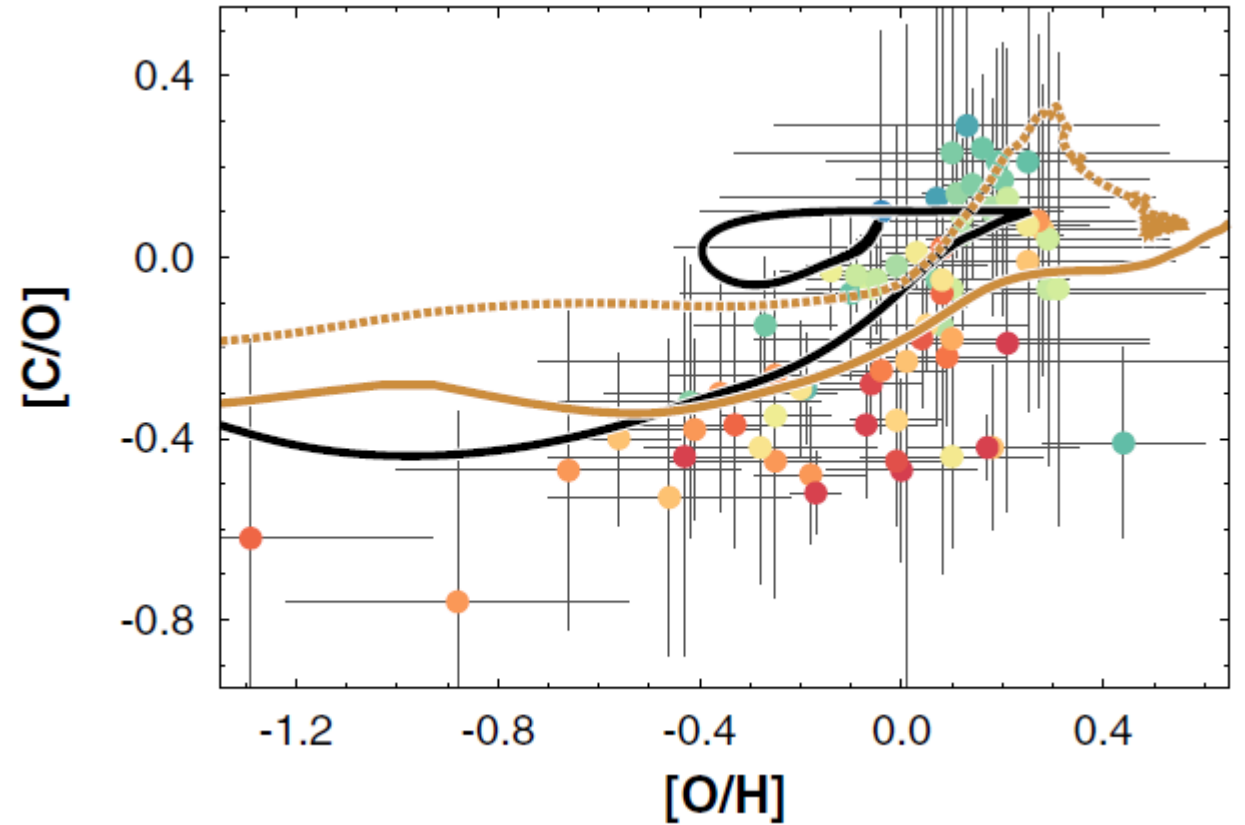
Modèle et data
Voisinage solaire

Romano 2022

Comparaison modèle-observations

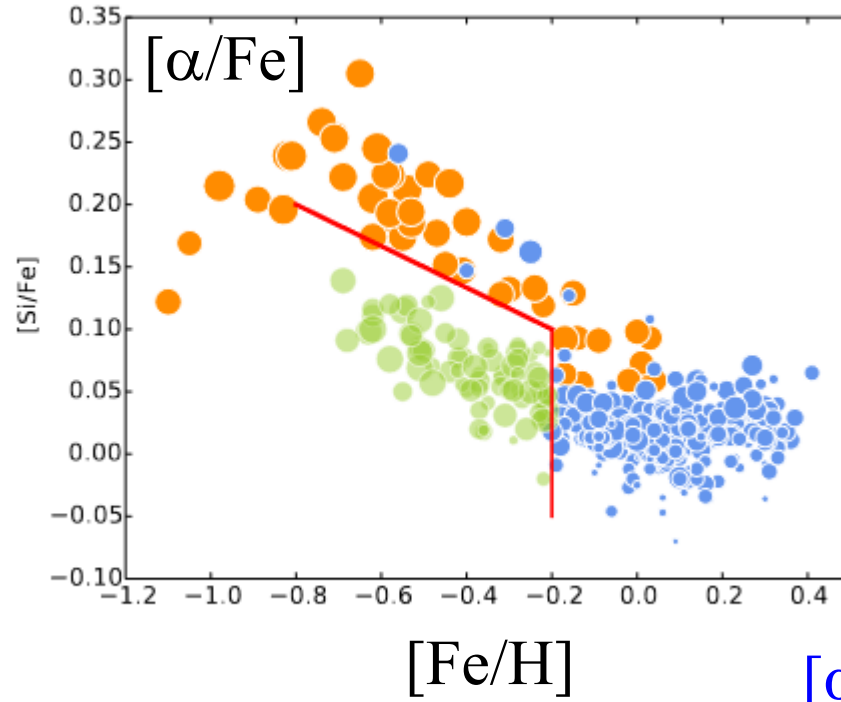
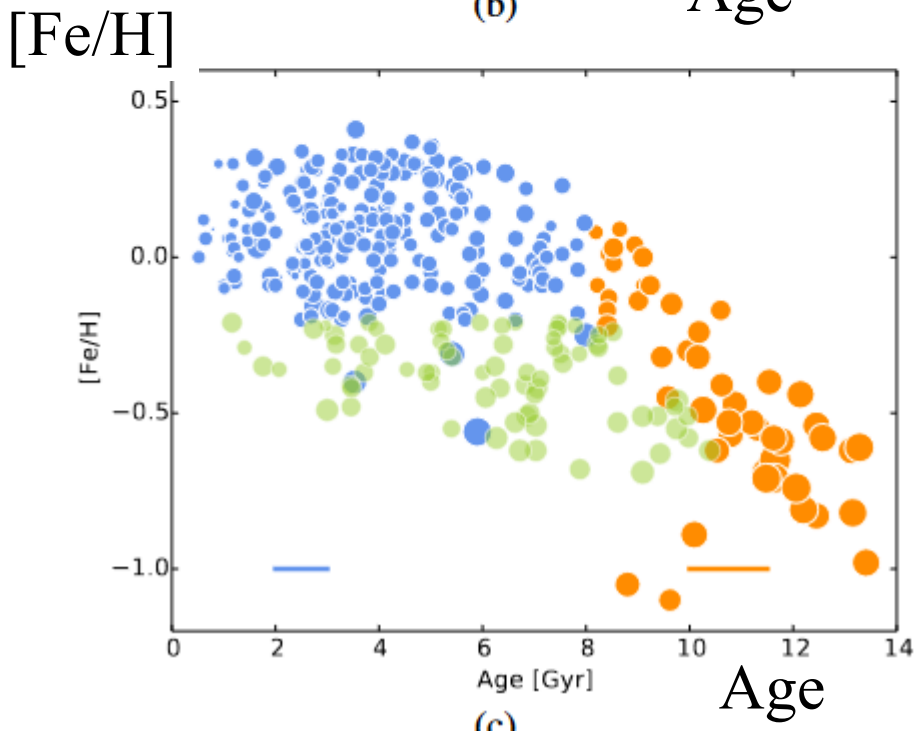
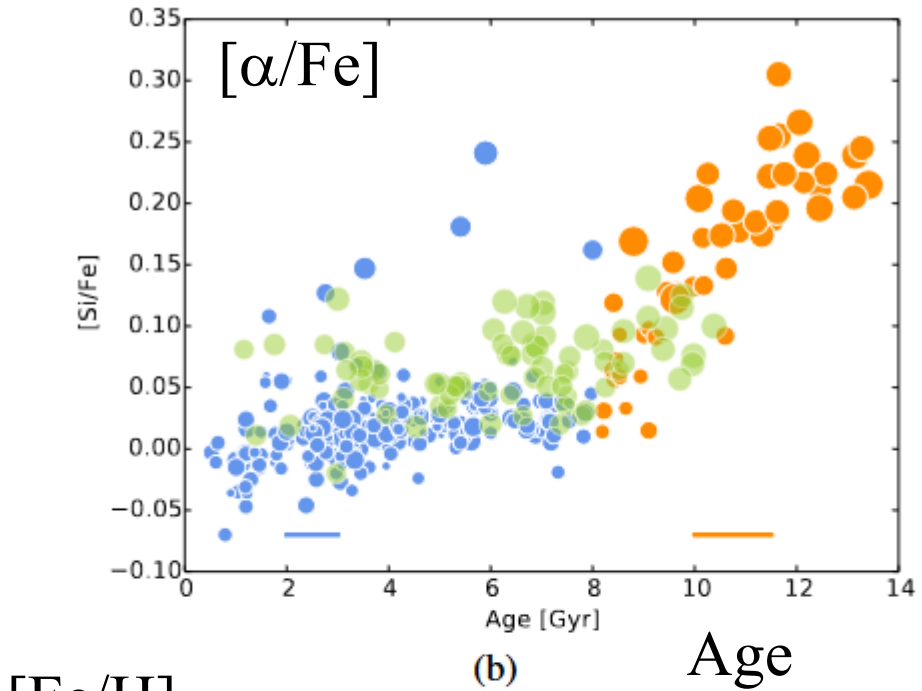


Courbe noire: voisinage solaire
Orange: bulbe: pointillés sans rotation



Les points sont les étoiles
du bulbe de la Voie lactée
La couleur indique l'âge des étoiles
(rouge plus âgée, bleu plus jeune)

Populations dans la Voie lactée



Taille des points

- a) Age
- b) $[\text{Fe}/\text{H}]$
- c) $[\text{Si}/\text{Fe}]$

- Disque épais
- Disque mince interne
- Disque mince externe

$[\alpha/\text{Fe}]$ est augmenté pour le disque épais qui s'est formé tôt et rapidement

Utilisation des populations stellaires dans M33

M33 nous apparait comme une spirale flocculente, avec 2 bras dominants

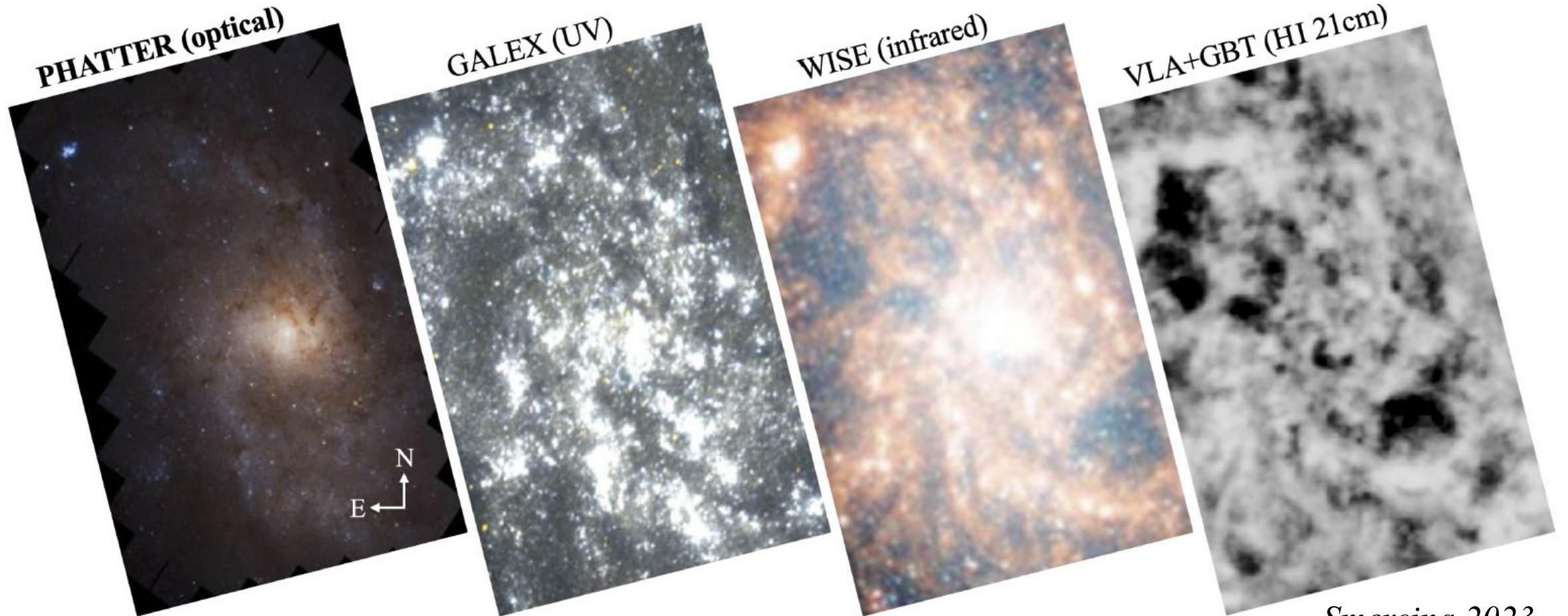
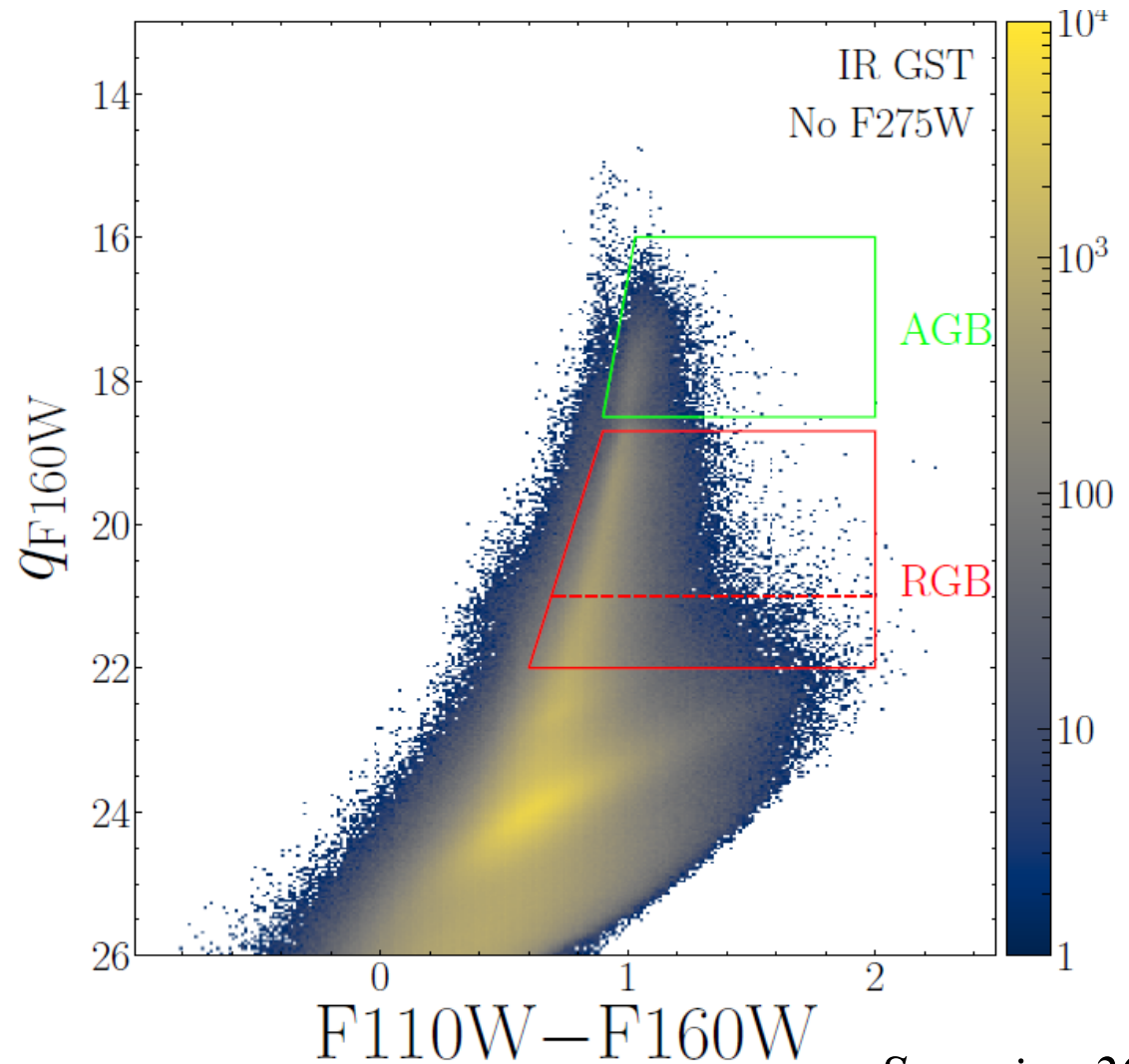
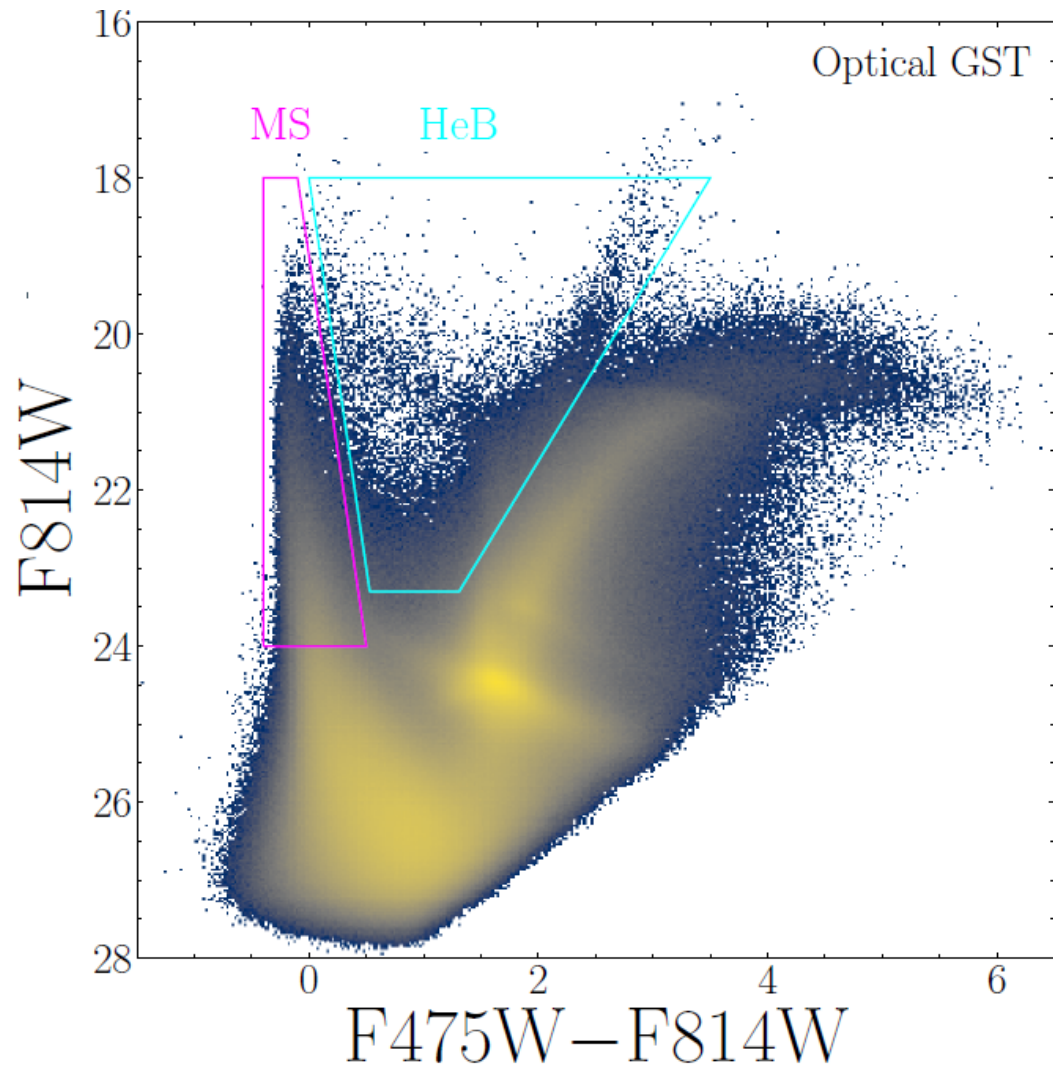


Diagramme CMD (HR) dans M33

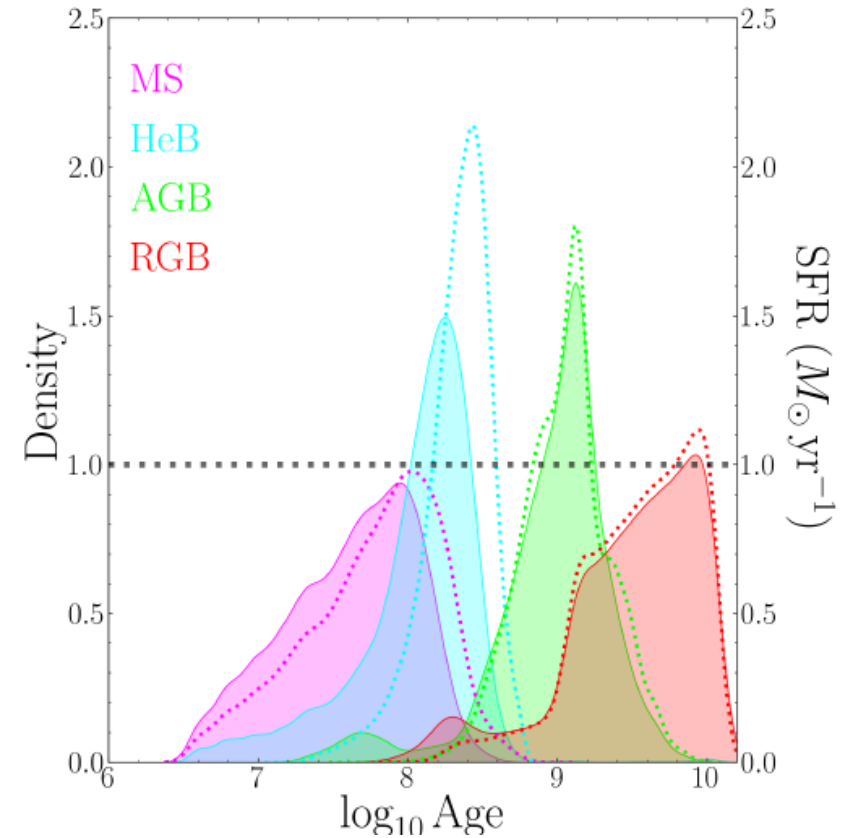
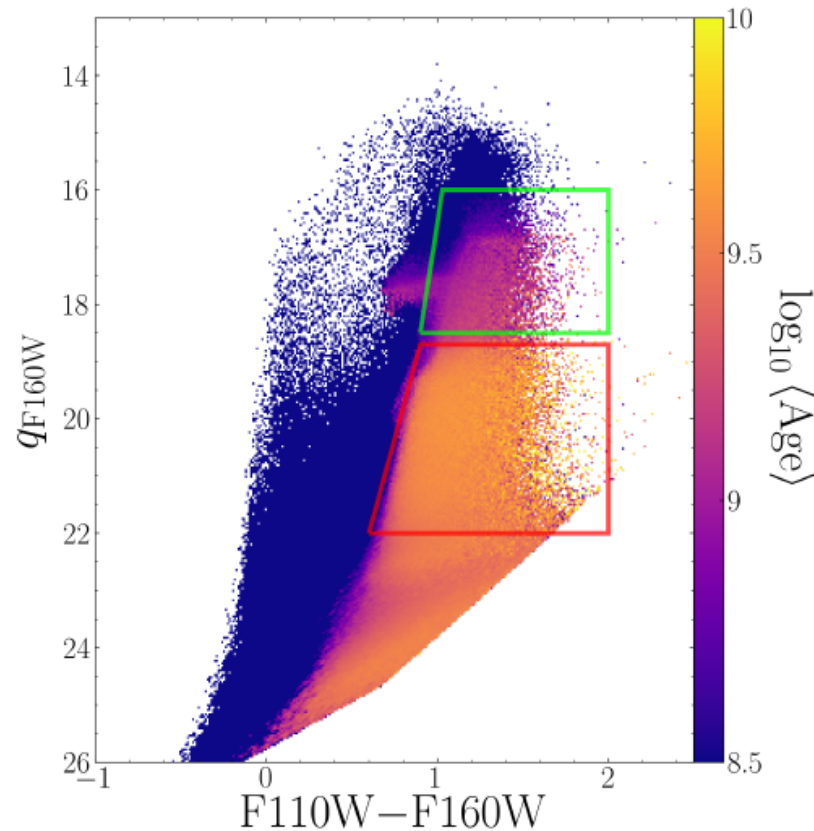
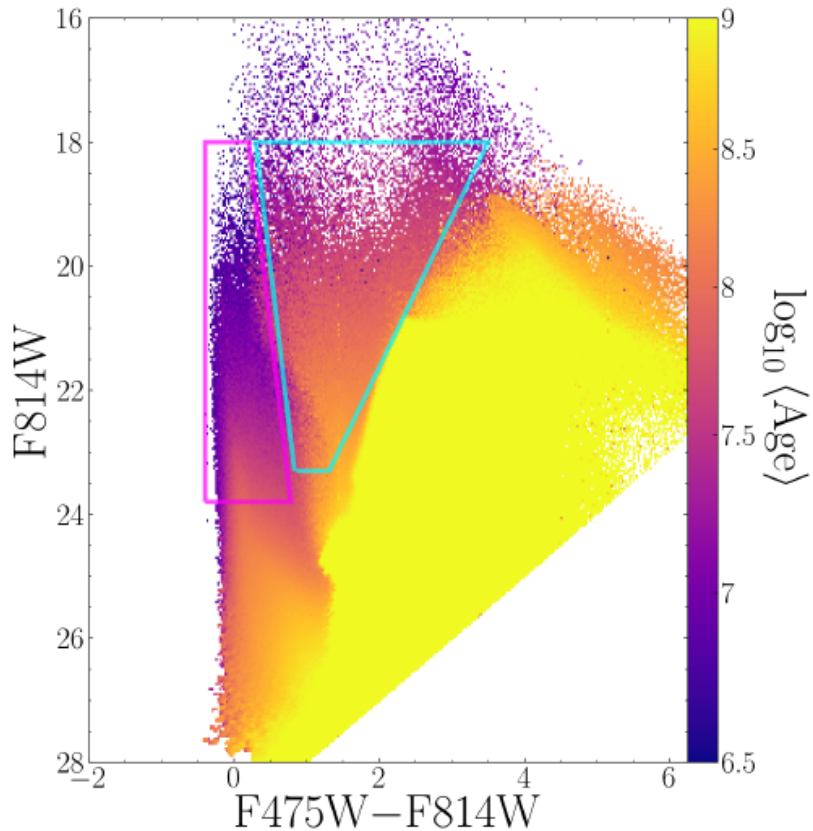
Les étoiles sont résolues une par une avec HST ($0.1''=0.36\text{pc}$) vu la proximité



Sélection des populations les plus âgées

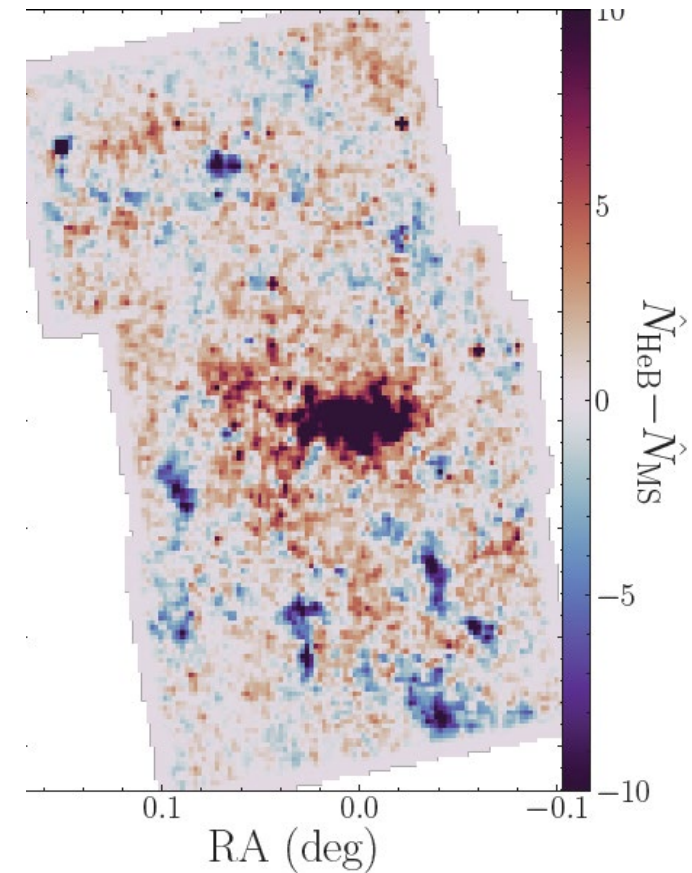
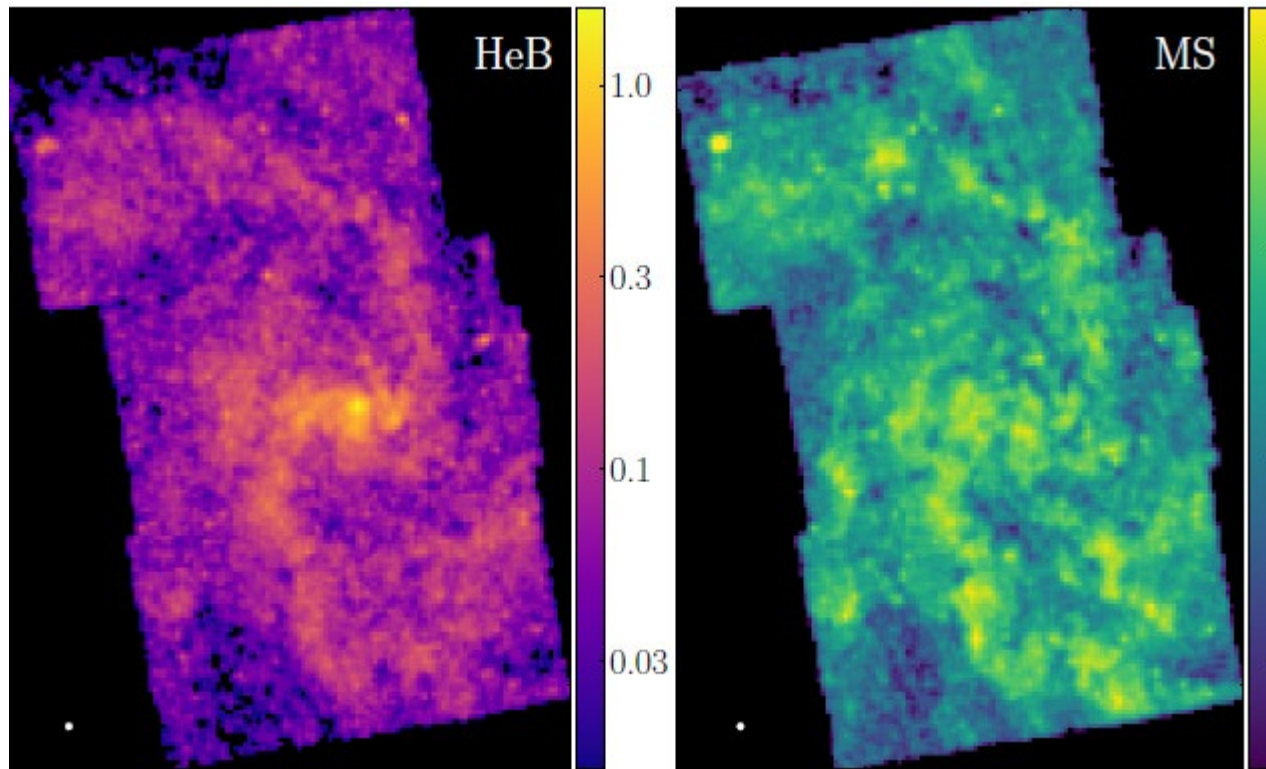
Les étoiles fusionnant l'Helium, de même les AGB sont très évoluées, plus âgées que sur la séquence principale

On obtient l'histoire du SFR, il est possible d'éliminer les jeunes étoiles



Structure de barre dans M33

Finalement, il existe une barre dans les vieilles étoiles
qui affecte la formation d'étoiles
Rassemble les vieilles étoiles



M33 a de plus un environnement dans le groupe Local en interaction avec M31

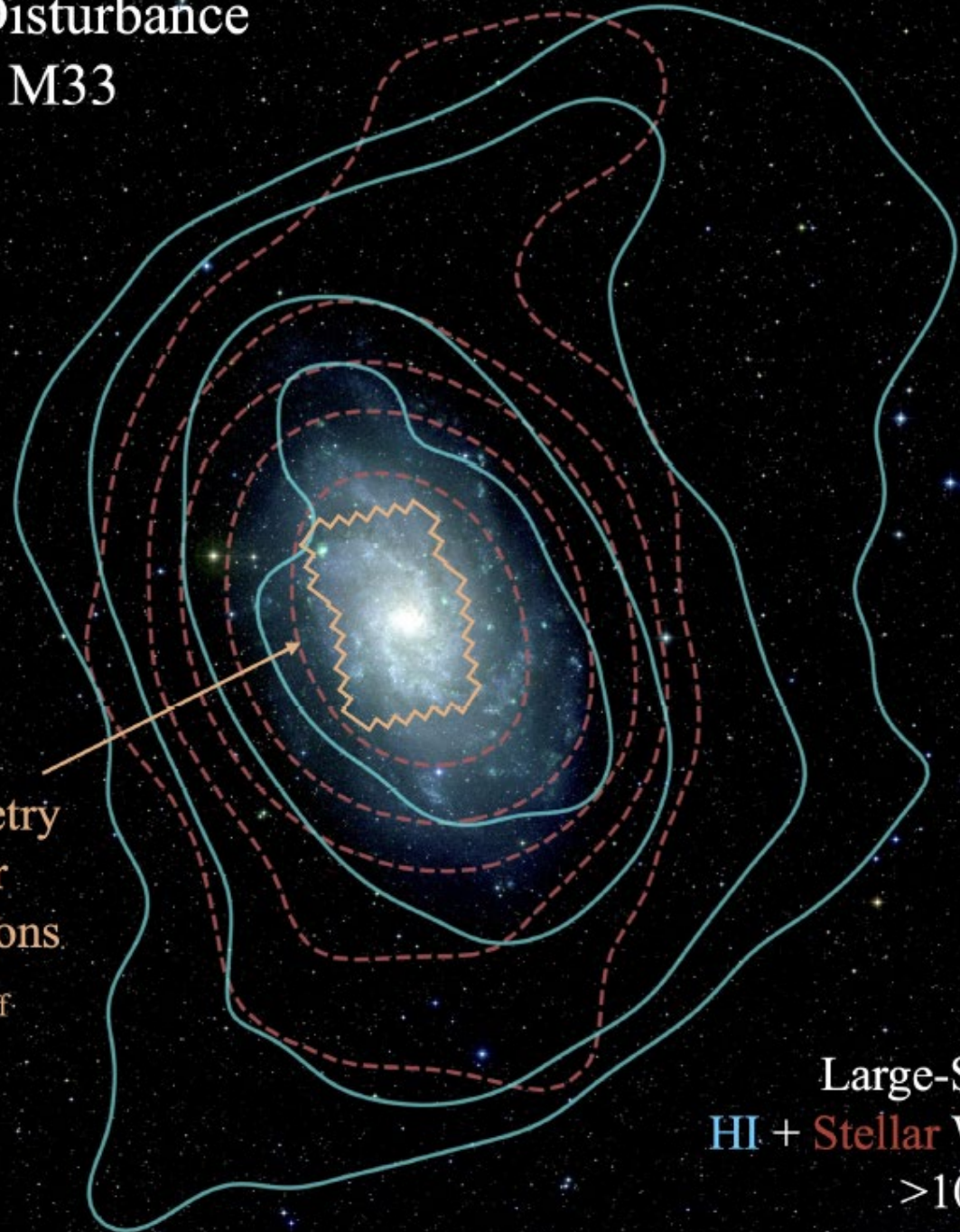
→ Warp du disque d'étoiles et de gaz atomique

Qui explique l'asymétrie des populations stellaires

Tidal Disturbance Across M33

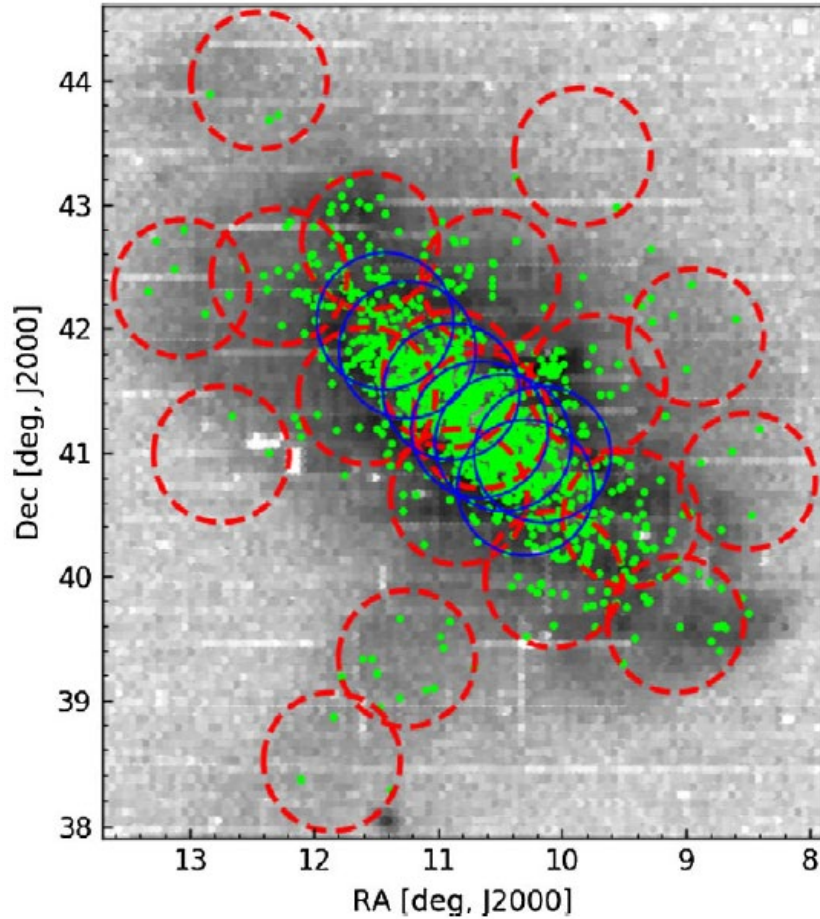
Asymmetry in Stellar Populations
 $\sim 1-2 R_{\text{eff}}$

Large-Scale
HI + Stellar Warp
 $>10 R_{\text{eff}}$



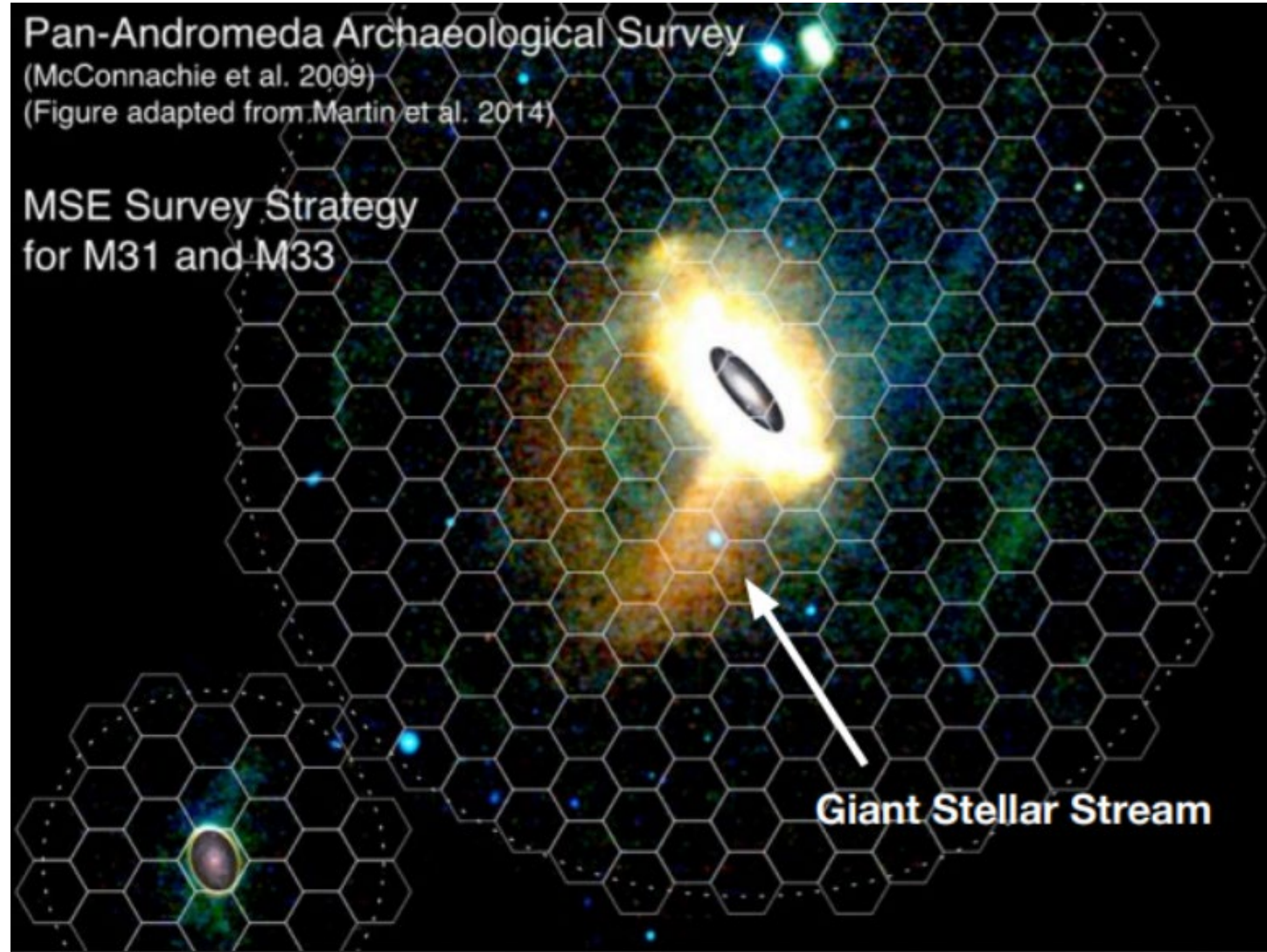
Gradients dans Andromède (M31)

Contrairement à la Voie lactée, dernière fusion il y a 8Gyr → gradients
M31 est toujours en interaction, a subi des fusions récentes

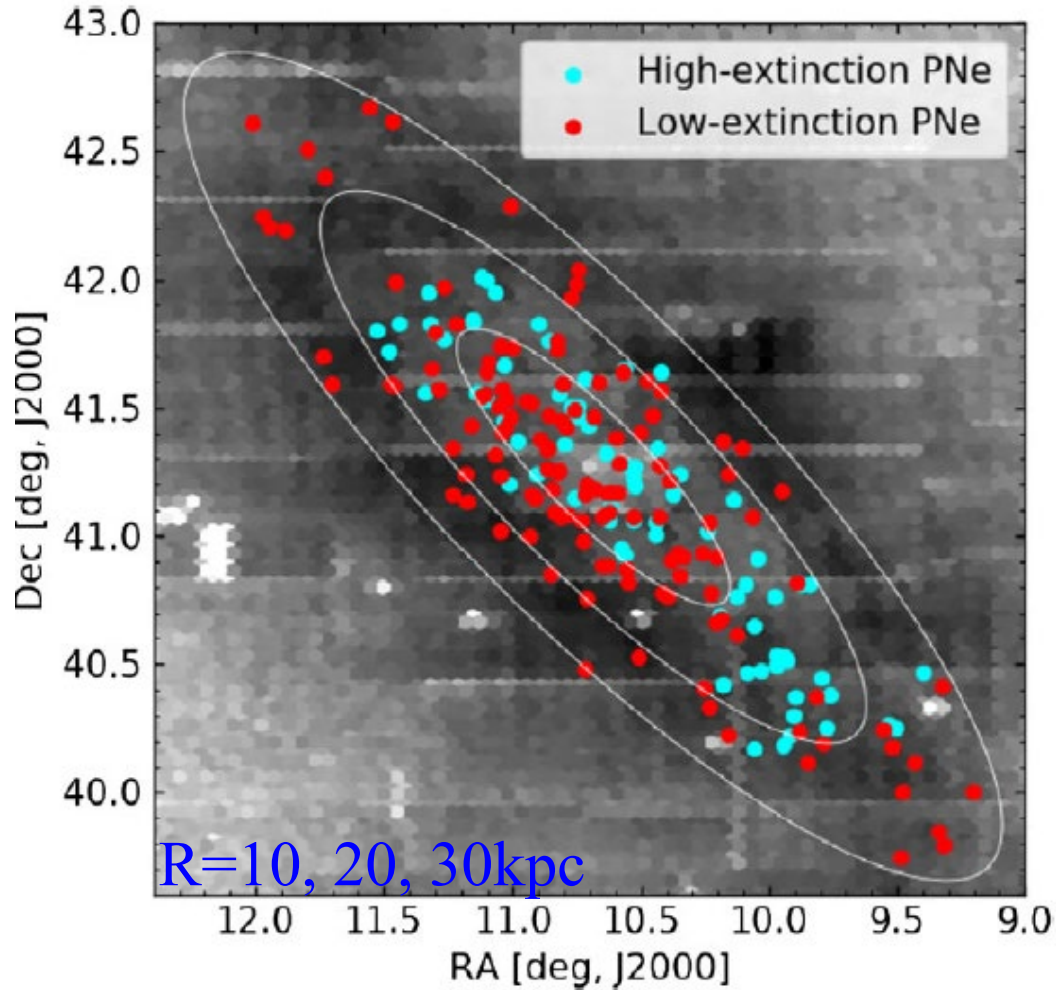


PNe avec V mesurée par [OIII]

Bhattacharya et al 2022

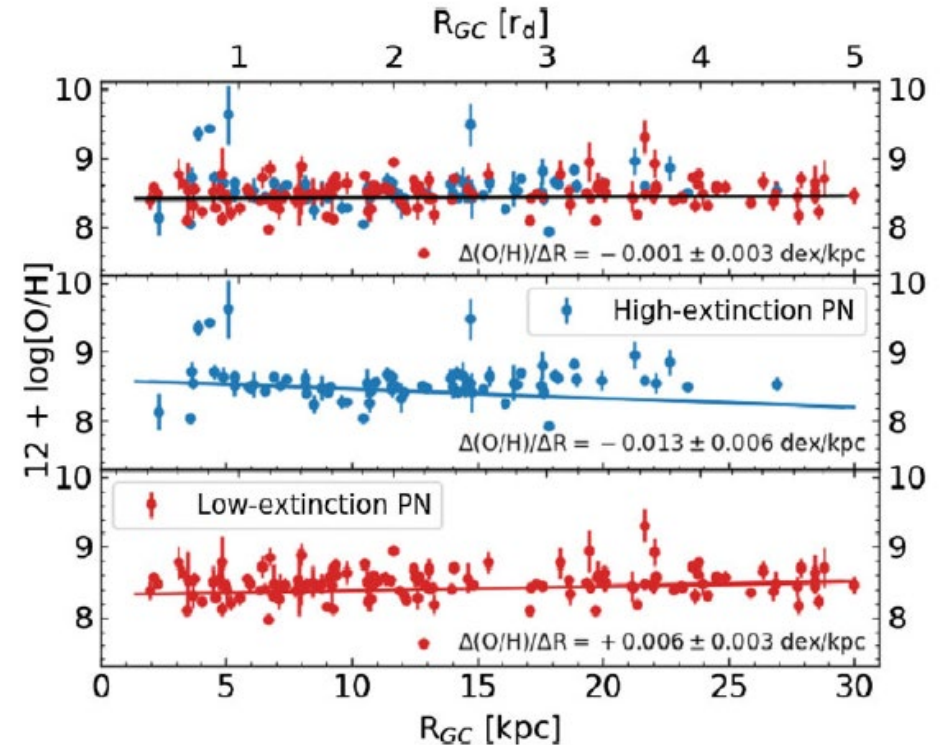
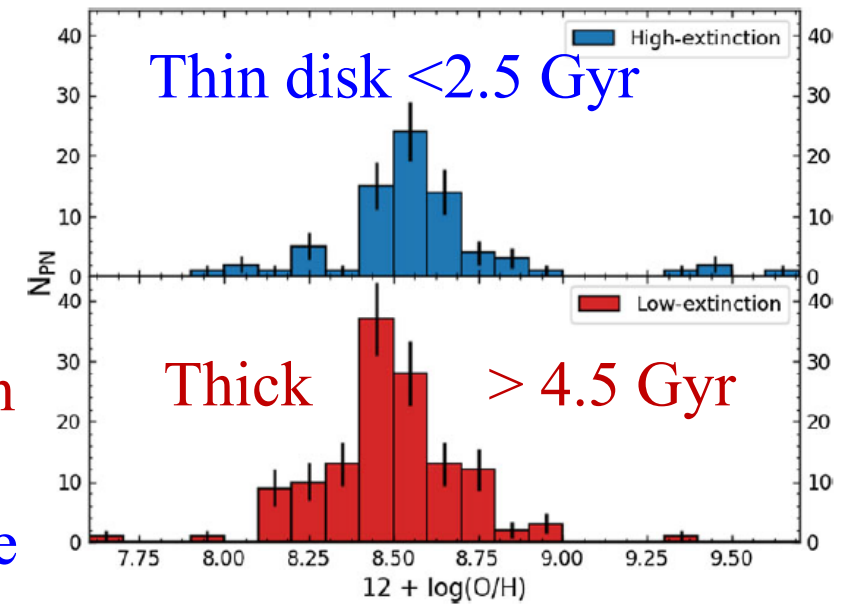


Abondances dans M31



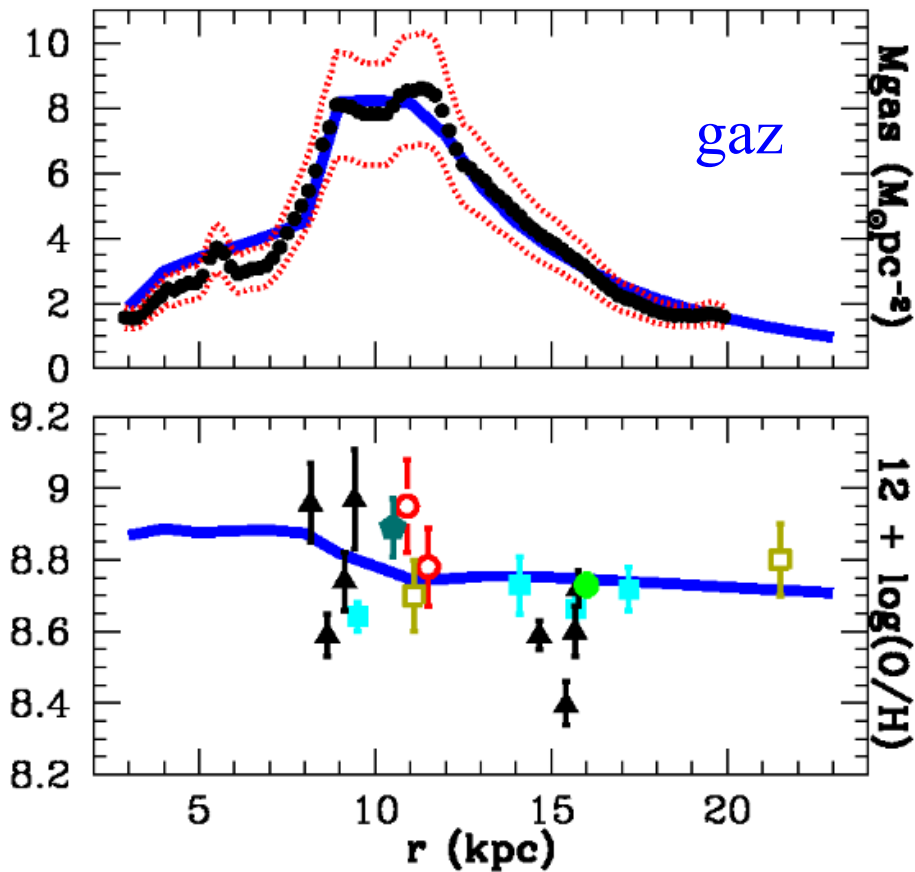
Gradient plat pour le disque épais
→ détruit par fusion

Léger pour le disque Mince

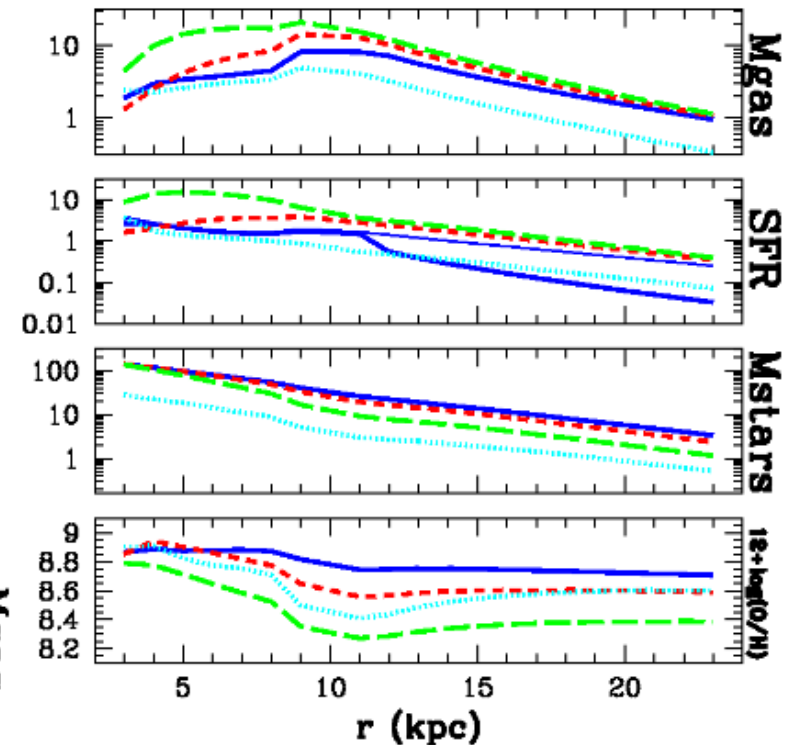
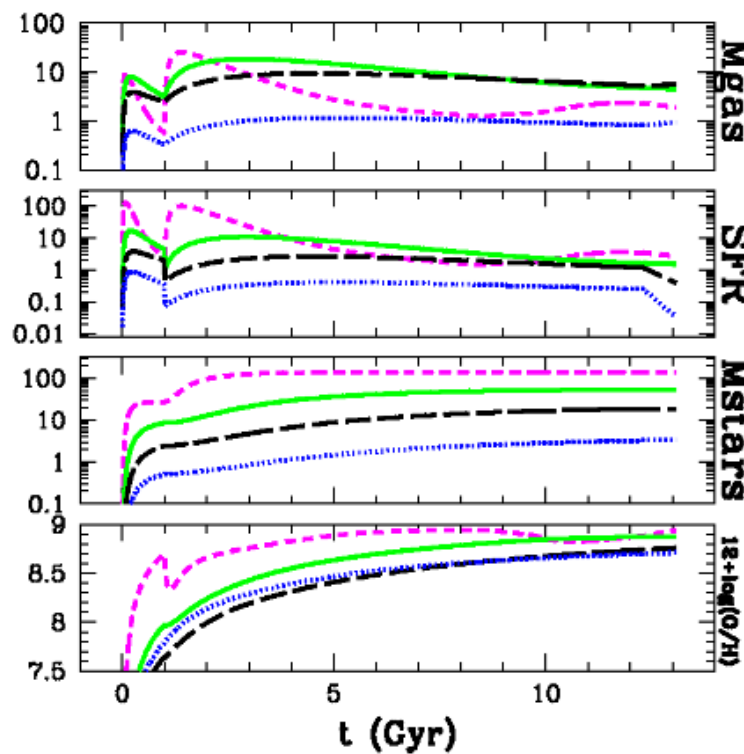


Simulations des abondances dans M31

Reproduire les gradients d'abondance,
la distribution de gaz et SFR



SFE varie avec rayon
mais constant pour
 $t < 12.8$ Gyr



$T=1, 4, 8$ et 13 Gyr

$r=3, 8, 13$ et 23 kpc

Résumé

1- Abondances des éléments

Les pics d'abondance représentent bien la stabilité (nbr magiques), la décroissance avec A la répulsion coulombienne

2- Fusion dans les étoiles

Les divers processus et modèles de fusion en pelures d'oignon représentent bien les observations, de même capture de neutrons, slow, rapid (s,r) → SN

3- Application aux galaxies

L'éjection des supernovae et des vents stellaires qui enrichissent le milieu, permettent de retracer les épisodes de formation stellaire, en distinguant disque épais, halo disque mince

