

Nucléosynthèse stellaire

François Mernier

Quelques "rappels" ...

Le tableau périodique des éléments

Tableau périodique des éléments

1																		18						
IA																		VIIIA						
1	1 H 1.008 Hydrogène																	2	2 He 4.003 Hélium					
2	3 Li 6.941 Lithium	4 Be 9.012 Béryllium																	5 B 10.811 Bore	6 C 12.011 Carbone	7 N 14.007 Azote	8 O 15.999 Oxygène	9 F 18.998 Fluor	10 Ne 20.180 Neon
3	11 Na 22.990 Sodium	12 Mg 24.305 Magnésium	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26.982 Aluminium	14 Si 28.086 Silicium	15 P 30.974 Phosphore	16 S 32.065 Soufre	17 Cl 35.453 Chlore	18 Ar 39.948 Argon						
4	19 K 39.098 Potassium	20 Ca 40.078 Calcium	21 Sc 44.956 Scandium	IVB	VB	VIB	VIB	VIIIB				IB	2B	31 Ga 69.723 Gallium	32 Ge 72.640 Germanium	33 As 74.922 Arsenic	34 Se 78.960 Sélénium	35 Br 79.904 Brome	36 Kr 83.801 Krypton					
5	37 Rb 85.468 Rubidium	38 Sr 87.62 Strontium	39 Y 88.906 Yttrium	40 Zr 91.224 Zirconium	41 Nb 92.906 Niobium	42 Mo 95.94 Molybdène	43 Tc 98 Technetium	44 Ru 101.07 Ruthénium	45 Rh 102.91 Rhodium	46 Pd 106.42 Paladium	47 Ag 107.87 Argent	48 Cd 112.41 Cadmium	49 In 114.82 Indium	50 Sn 118.71 Étain	51 Sb 121.76 Antimoine	52 Te 127.60 Tellure	53 I 126.91 Iode	54 Xe 131.29 Xénon						
6	55 Cs 132.91 Césium	56 Ba 137.33 Baryum	57 La 138.91 Lanthane	72 Hf 178.49 Hafnium	73 Ta 180.95 Tantale	74 W 183.84 Tungstène	75 Re 186.21 Rhenium	76 Os 190.23 Osmium	77 Ir 192.22 Iridium	78 Pt 195.08 Platine	79 Au 196.97 Or	80 Hg 200.59 Mercure	81 Tl 204.38 Thallium	82 Pb 207.2 Plomb	83 Bi 208.98 Bismuth	84 Po 209 Polonium	85 At 210 Astatine	86 Rn 222 Radon						
7	87 Fr 223 Francium	88 Ra 226 Radium	89 Ac 227 Actinium	104 Rf 261 Rutherfordium	105 Db 262 Dubnium	106 Sg 266 Seaborgium	107 Bh 264 Bohrium	108 Hs 277 Hassium	109 Mt 268 Meitnerium	110 Ds 285 Darmstadtium	111 Rg 272 Roentgenium	...												
				58 Ce 140.12 Cérum	59 Pr 140.91 Praseodyme	60 Nd 144.24 Néodyme	61 Pm 145 Prométhium	62 Sm 150.36 Samarium	63 Eu 151.96 Europium	64 Gd 157.25 Gadolinium	65 Tb 158.93 Terbium	66 Dy 162.50 Dysprosium	67 Ho 164.93 Holmium	68 Er 167.26 Érène	69 Tm 168.93 Thulium	70 Yb 173.05 Ytterbium	71 Lu 174.97 Lutétium							
				90 Th 232.04 Thorium	91 Pa 231.04 Protactinium	92 U 238.03 Uranium	93 Np 237 Neptunium	94 Pu 244 Plutonium	95 Am 243 Americium	96 Cm 247 Curium	97 Bk 247 Berkélium	98 Cf 251 Californium	99 Es 252 Einsteinium	100 Fm 257 Fermium	101 Md 258 Mendelevium	102 No 259 Nébulium	103 Lr 262 Lawrencium							

Numéro atomique: 6
 Principaux nombres d'oxydation (le plus fréquent est en gras)
 Nom: Carbone
 Symbole de l'élément: C
 Masse atomique: 12.011
 Électronégativité: 2.55
 (2) Deux électrons valentaux
 (2) Deux paires d'électrons

Métaux	Métaux de transition	Non-métaux	Gaz rares et hélium
--------	----------------------	------------	---------------------

* Signifie élément radioactif (instable)

Particules et atomes



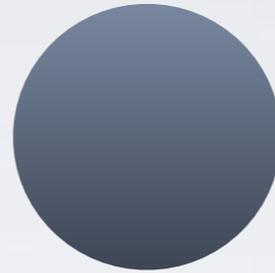
Proton

$$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

= 1 u

$$+1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

= charge "+1"



Neutron

$$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

= 1 u

$$0 \text{ C}$$

= charge "0"



Électron

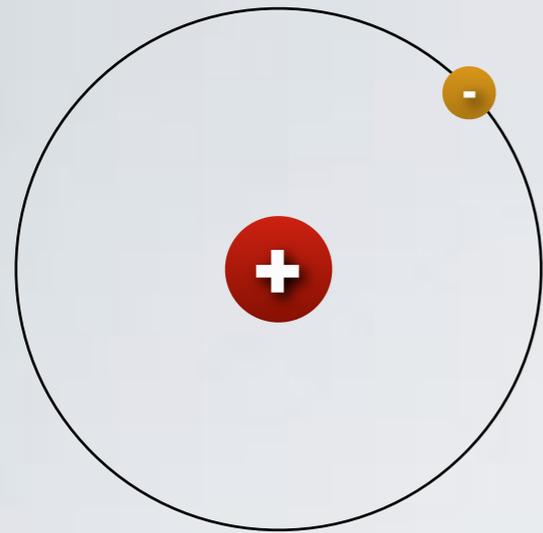
$$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

= 0,0005 u

$$-1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

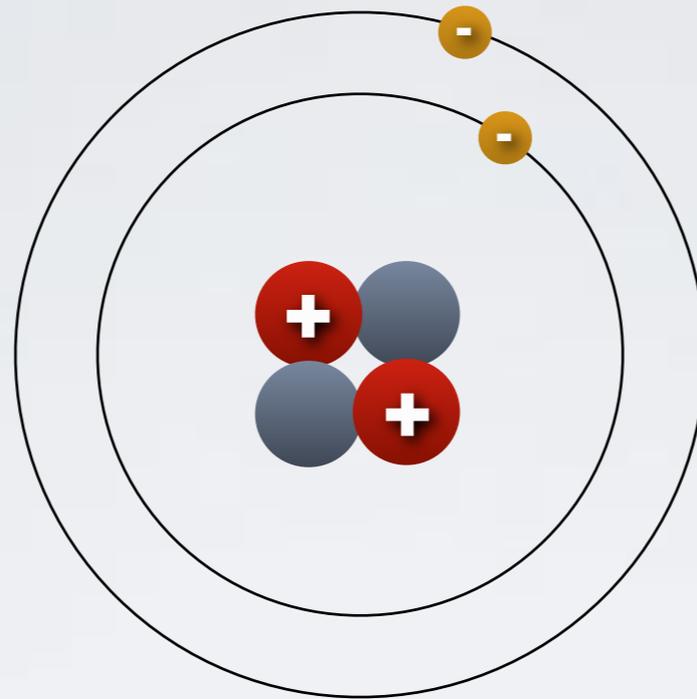
= charge "-1"

Particules et atomes



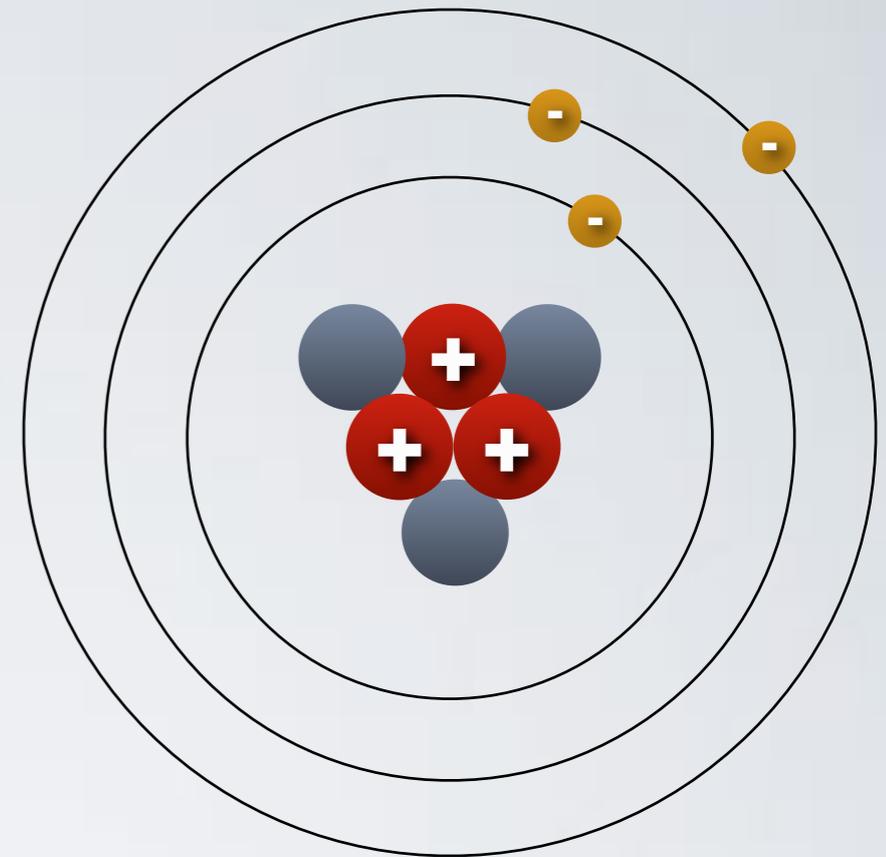
Hydrogène

1 proton
(souvent 0 neutron)
(souvent 1 électron)



Hélium

2 protons
(souvent 2 neutrons)
(souvent 2 électrons)



Lithium

3 protons
(souvent 3 neutrons)
(souvent 3 électrons)

...Oxygène...

8 protons
(souvent 8 neutrons)
(souvent 8 électrons)

...Fer...

26 protons
(souvent 30 neutrons)
(souvent 26 électrons)

Les 4 forces fondamentales dans l'Univers

Intensité relative...

0,0000000000
0000000000
0000000000
00000000001

1

1. La gravitation



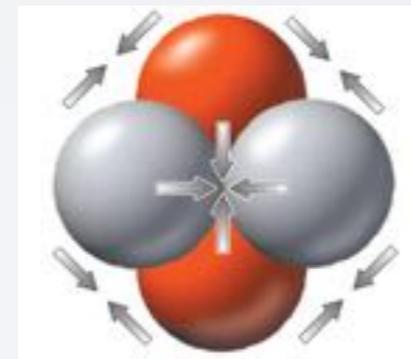
60

2. La force électromagnétique



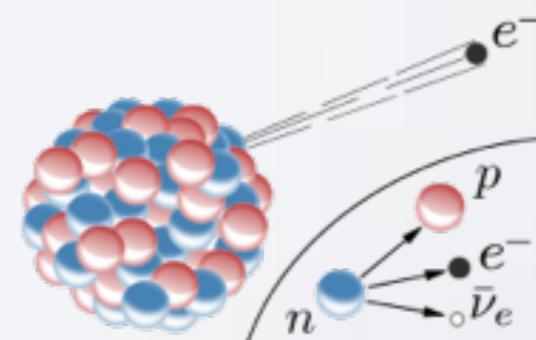
60

3. L'interaction forte

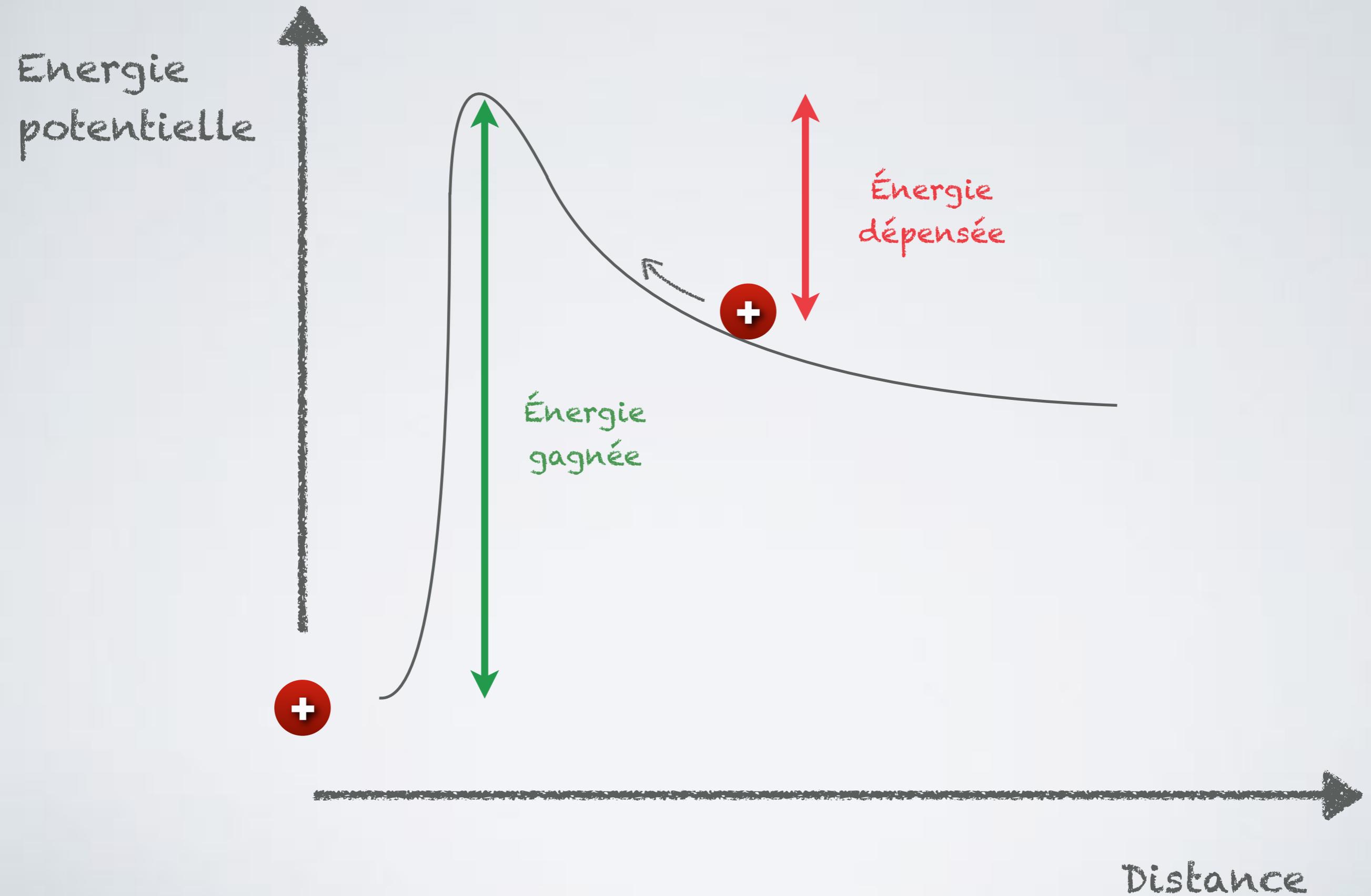


0,0001

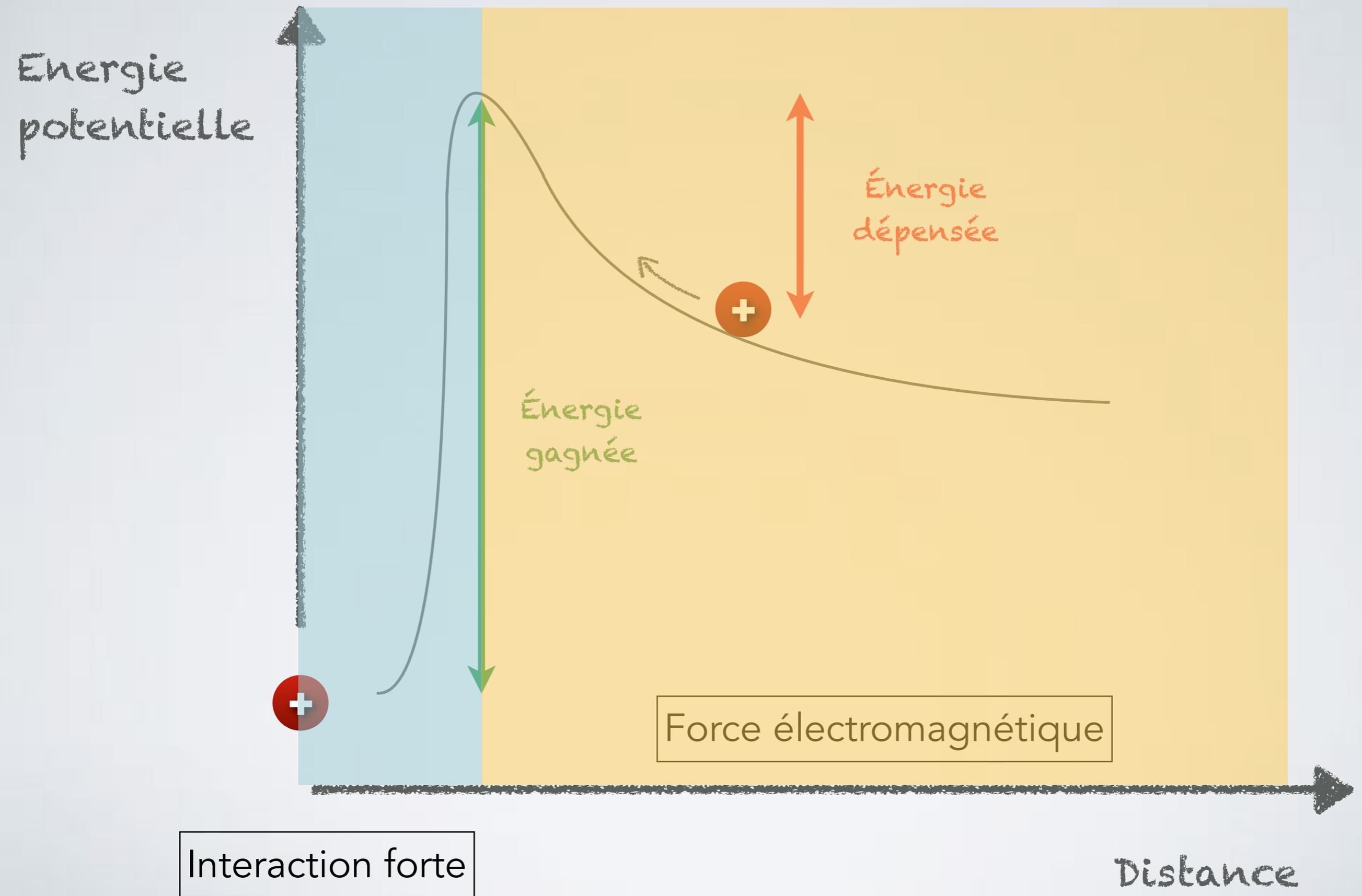
4. L'interaction faible



L'interaction proton-proton



L'interaction proton-proton



Un peu d'histoire...

Pourquoi brillent les étoiles?

Pour briller (c'est à dire émettre de la lumière), un objet doit utiliser de l'**énergie**...



Pourquoi brillent les étoiles?

Pour briller (c'est à dire émettre de la lumière), un objet doit utiliser de l'**énergie**...

D'où les étoiles tirent-elles leur énergie?

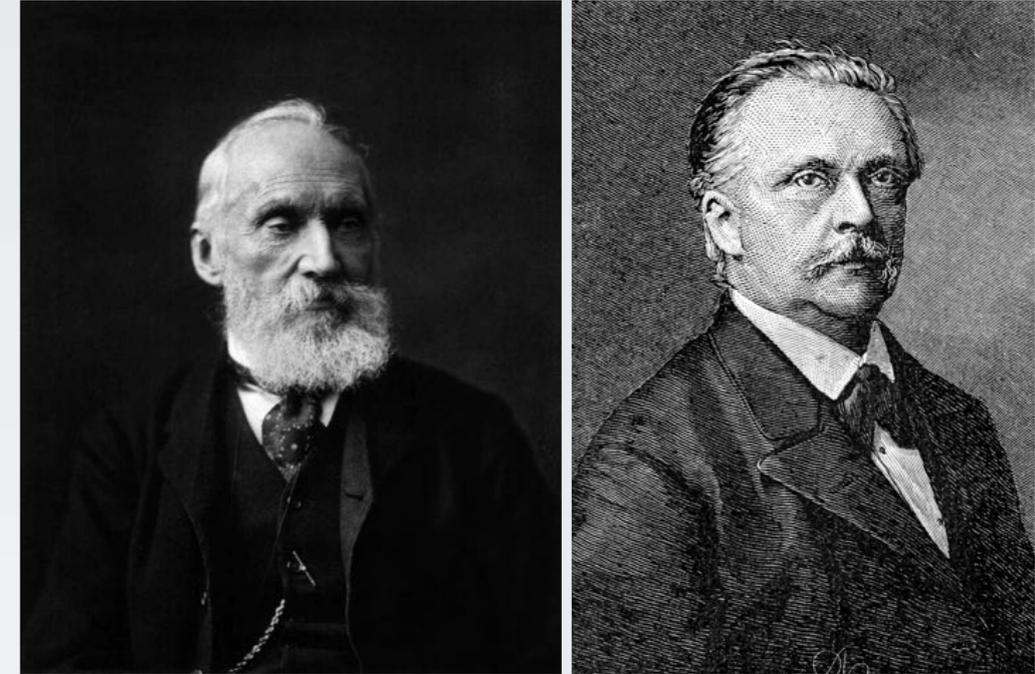


Source d'énergie des étoiles?

- XIXe siècle: William Thomson (Lord Kelvin) et Hermann von Helmholtz

- Charbon?

- Âge du Soleil: 5000 ans
- Compatible avec la Bible (Genèse: ~4000 ans av JC)
- ...mais Darwin: âge de la Terre est de centaines de millions d'années!

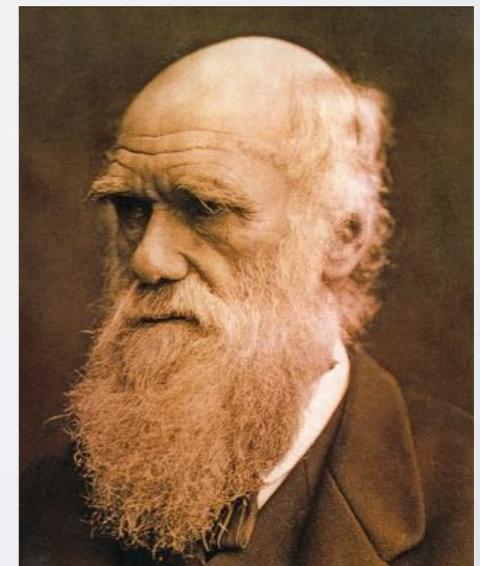


- Contraction gravifique?

- Taille initiale limite: orbite de Mercure
- Âge possible: 30 millions d'années
- Aussi incompatible avec la théorie de l'évolution des espèces!

- Fin du XIXe siècle: les géologues estiment l'âge de la Terre

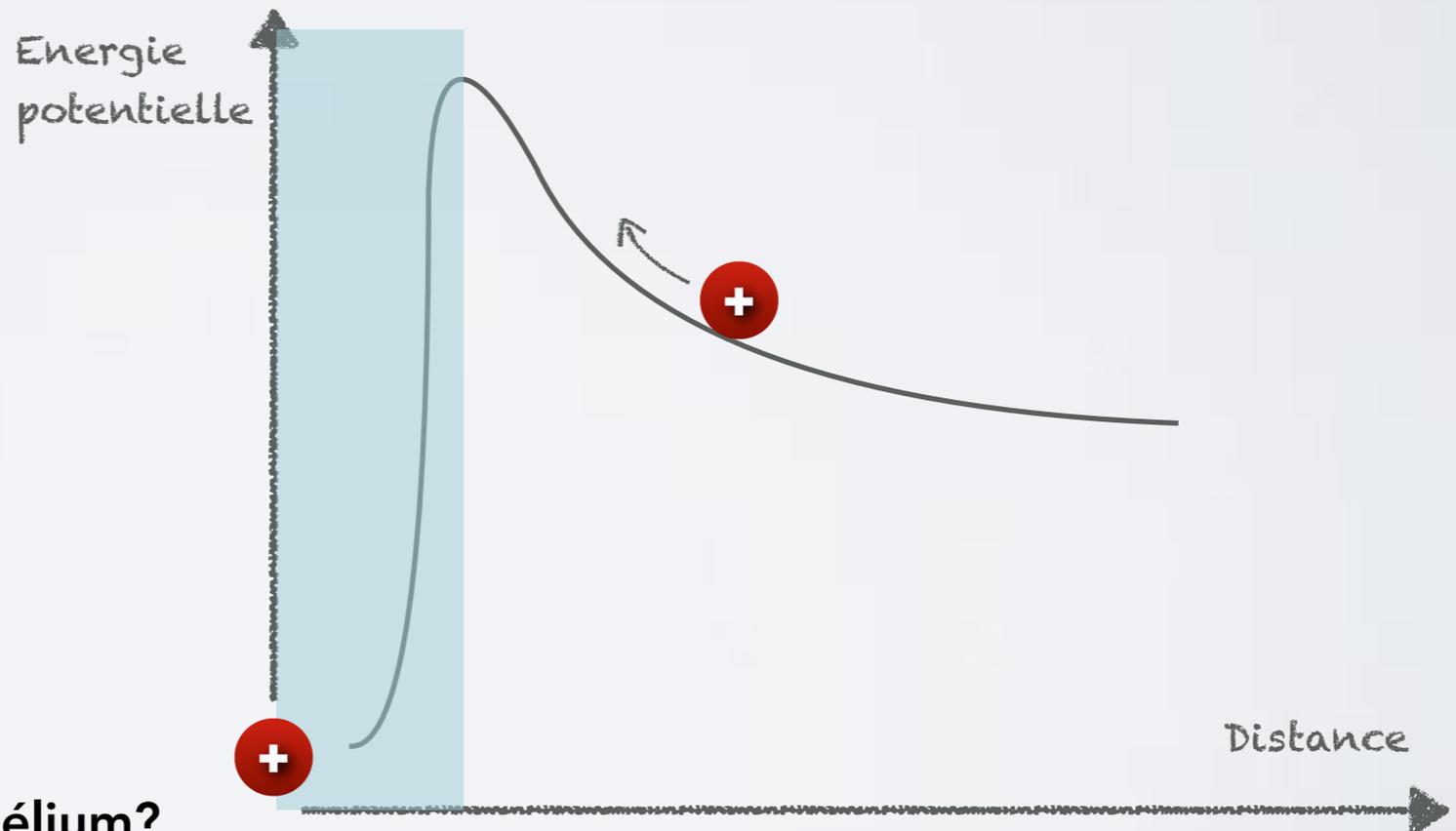
➔ 700 millions d'années



Source d'énergie des étoiles?



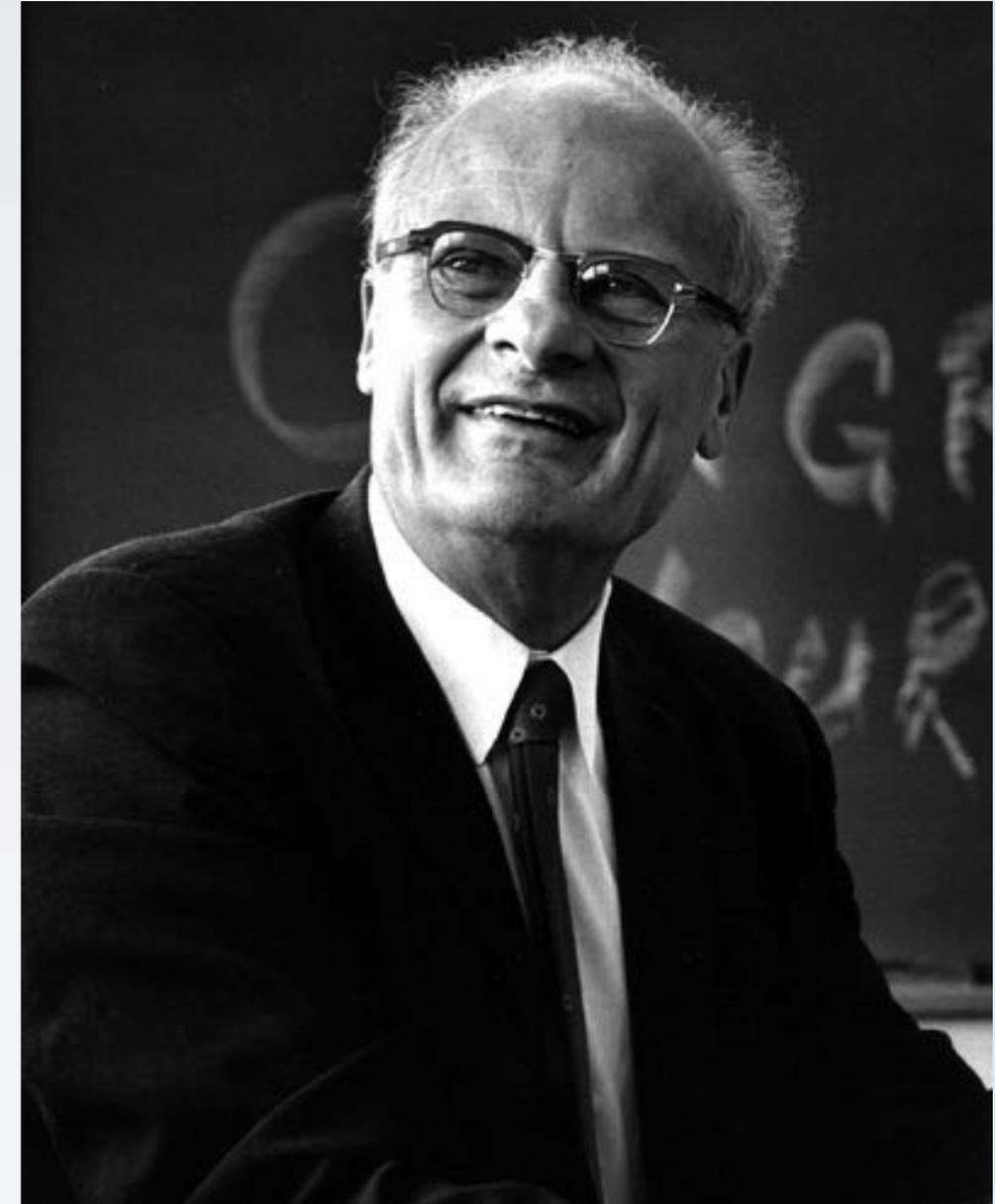
- Mais comment "assembler" de l'hydrogène en hélium?
- 1928: George Gamow
 - Si 2 protons collisionnent avec suffisamment d'énergie, ils pourront s'assembler



- Deux petits problèmes...
- 1) D'où viennent les neutrons de l'hélium?
- 2) Comment faire rencontrer 4 particules (2 protons + 2 neutrons)?

Source d'énergie des étoiles?

- 1939: Hans Bethe
 - Deux manières de transformer de l'hydrogène en hélium:
 1. La chaîne proton-proton
 2. Le cycle carbone-azote-oxygène (CNO)



La chaîne proton-proton

Étoiles peu massives

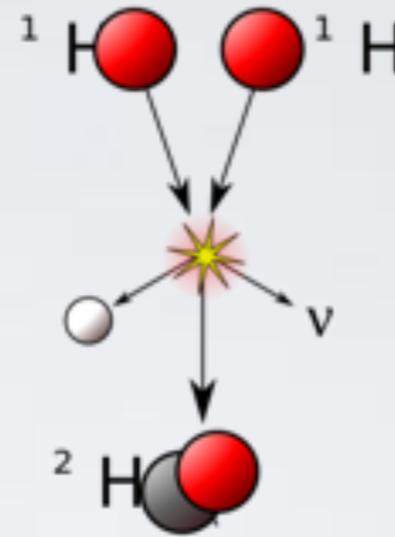
γ Rayon gamma
 ν Neutrino

 Proton
 Neutron
 Positron

La chaîne proton-proton

Étoiles peu massives

1. Deux protons collisionnent, l'un d'entre eux se désintègre en 1 neutron + 1 positron (+ 1 neutrino)
✓ noyau de **deutérium** (1 proton + 1 neutron)



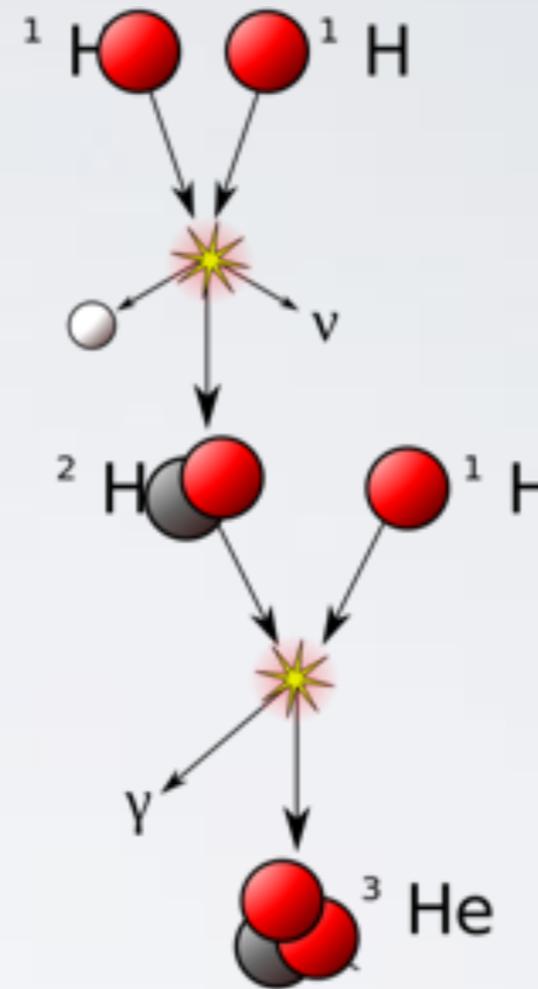
γ Rayon gamma
 ν Neutrino

 Proton
 Neutron
 Positron

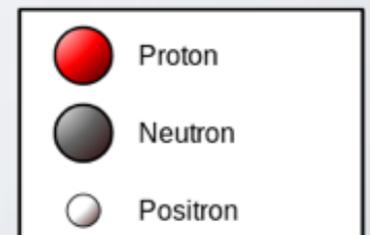
La chaîne proton-proton

Étoiles peu massives

1. Deux protons collisionnent, l'un d'entre eux se désintègre en 1 neutron + 1 positron (+ 1 neutrino)
✓ noyau de **deutérium** (1 proton + 1 neutron)
2. Ce deutérium collisionne avec un autre proton
✓ noyau d'**hélium**... mais avec un seul neutron! ("hélium 3")



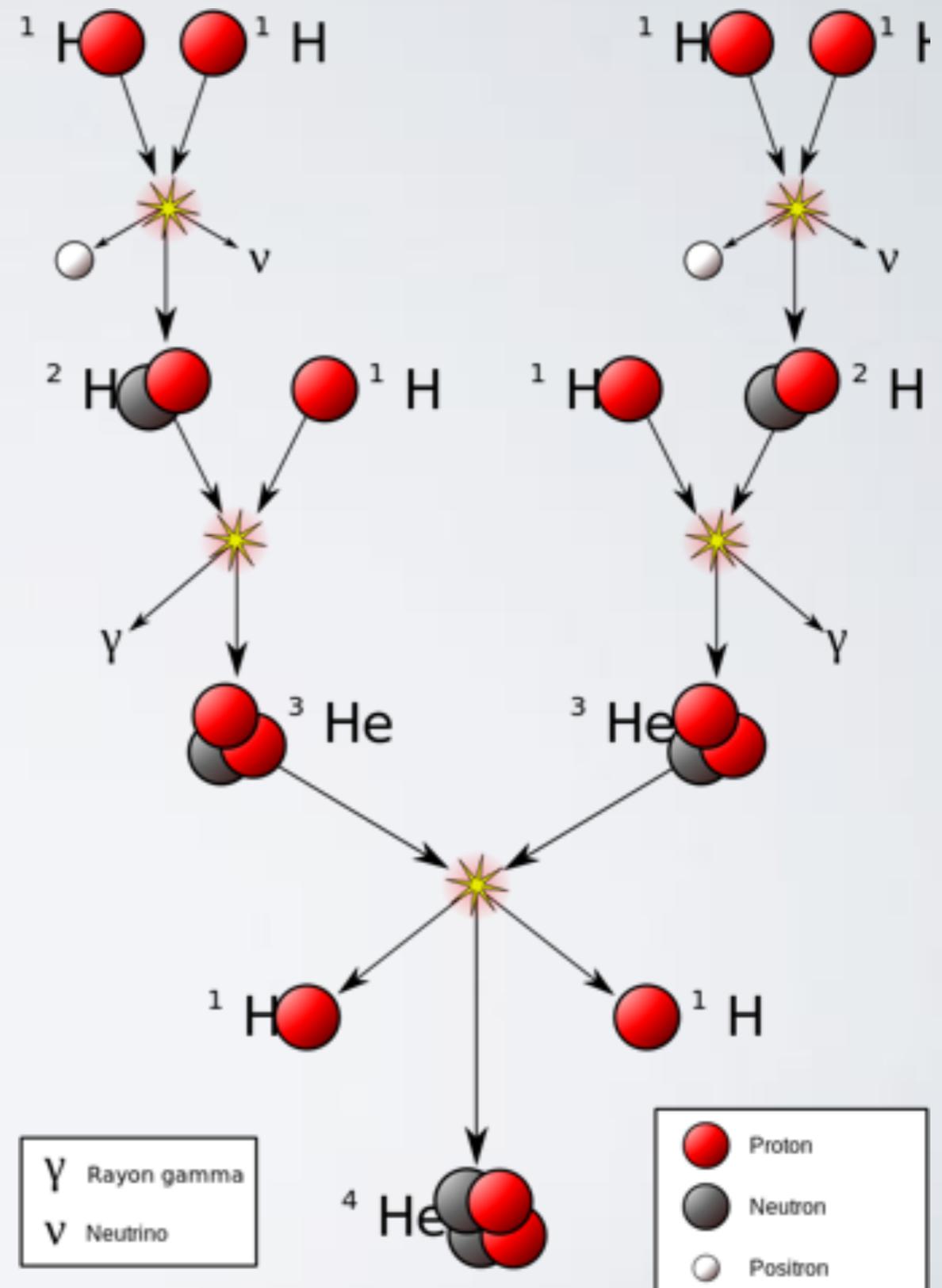
γ Rayon gamma
 ν Neutrino



La chaîne proton-proton

Étoiles peu massives

1. Deux protons collisionnent, l'un d'entre eux se désintègre en 1 neutron + 1 positron (+ 1 neutrino)
✓ noyau de **deutérium** (1 proton + 1 neutron)
2. Ce deutérium collisionne avec un autre proton
✓ noyau d'**hélium**... mais avec un seul neutron! ("hélium 3")
3. Deux noyaux d'hélium 3 collisionnent
✓ noyau d'**hélium**... avec 2 neutrons 🎉
✓ + **2 protons**, disponibles pour de nouvelles réactions



La chaîne proton-proton

Étoiles massives

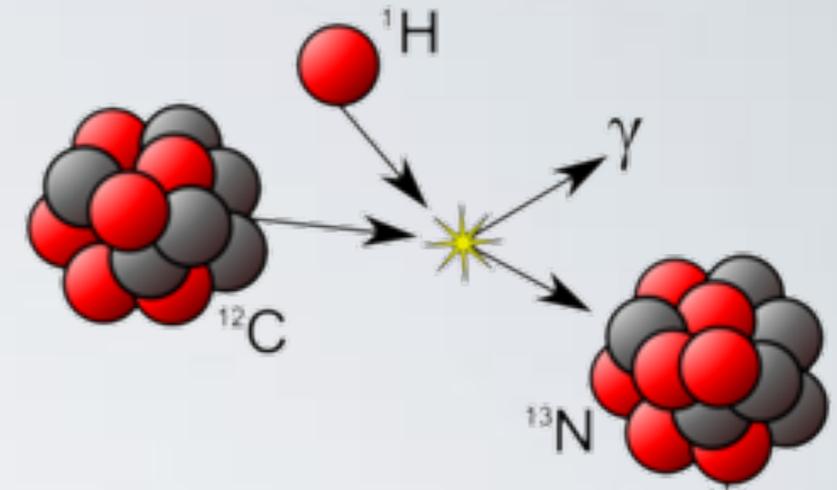
	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

Étoiles massives

1. Proton + carbone 12

✓ Azote 13 (instable! 😞)



	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

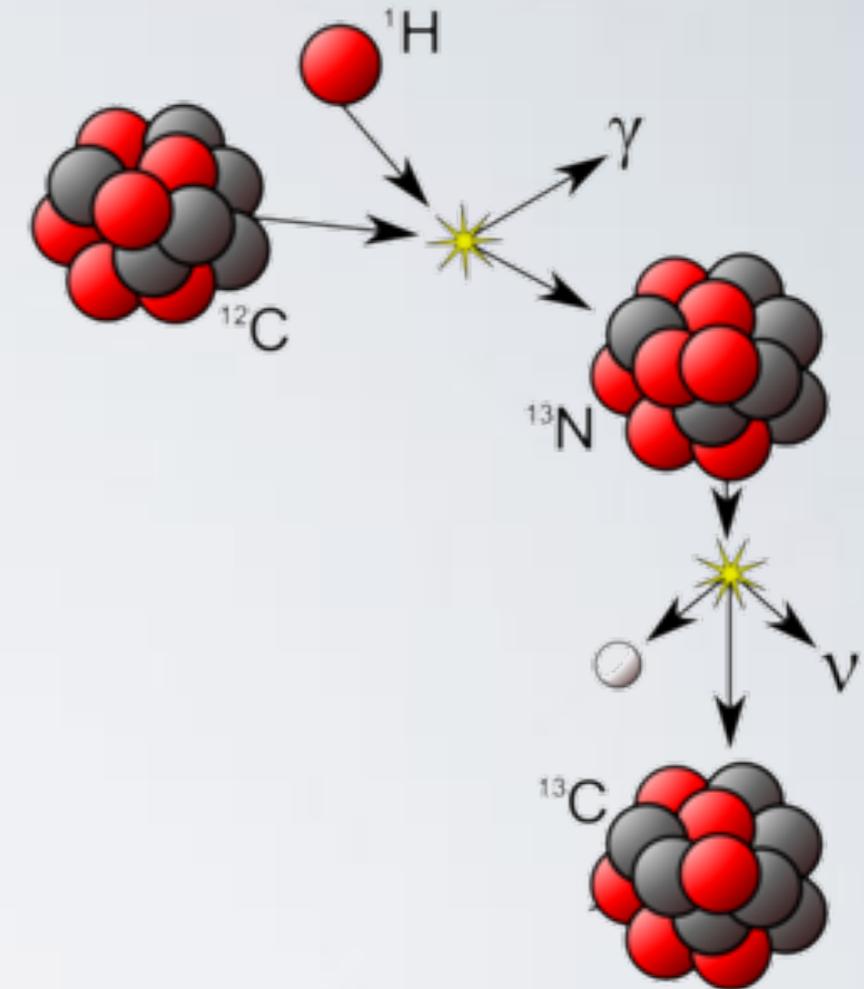
Étoiles massives

1. Proton + carbone 12

✓ Azote 13 (instable! 😞)

2. Désintégration de l'azote 13

✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)



	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

Étoiles massives

1. Proton + carbone 12

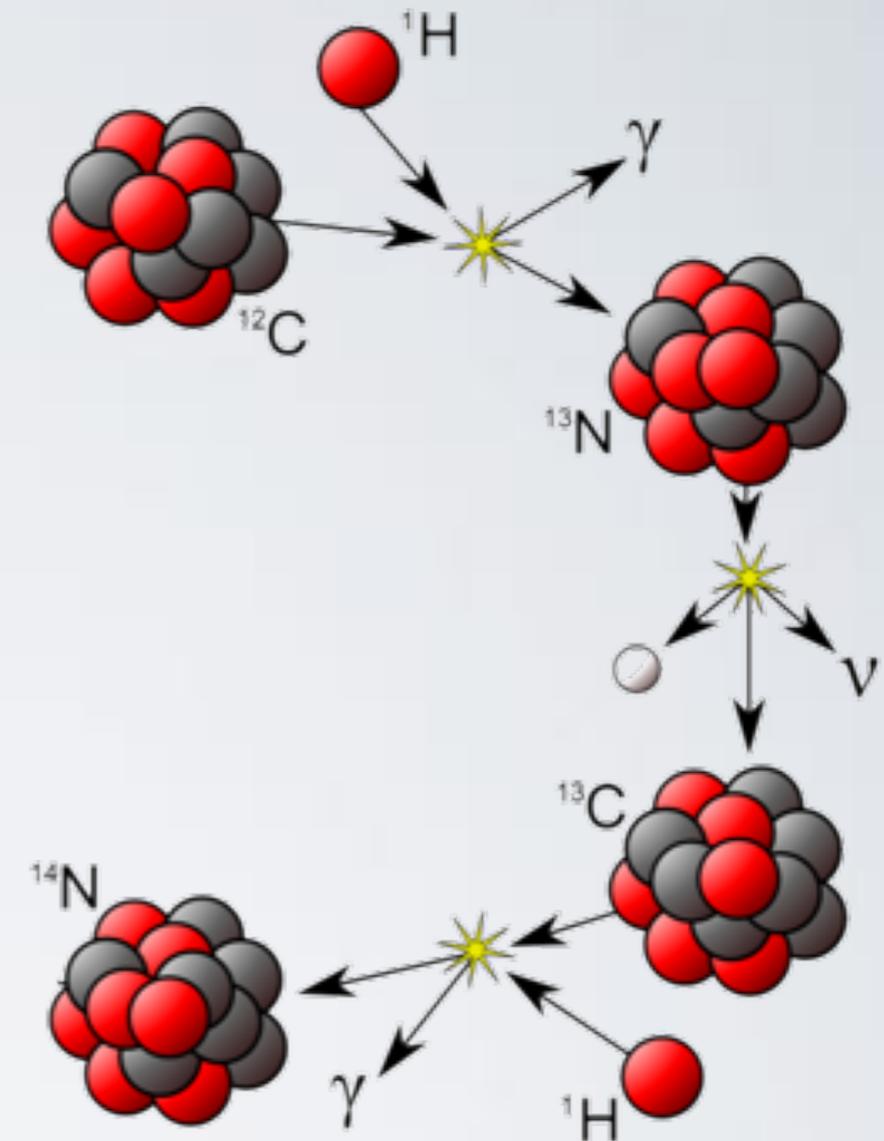
✓ Azote 13 (instable! 😞)

2. Désintégration de l'azote 13

✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)

3. Proton + carbone 13

✓ Azote 14 (stable 😎)



	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

Étoiles massives

1. Proton + carbone 12

✓ Azote 13 (instable! 😞)

2. Désintégration de l'azote 13

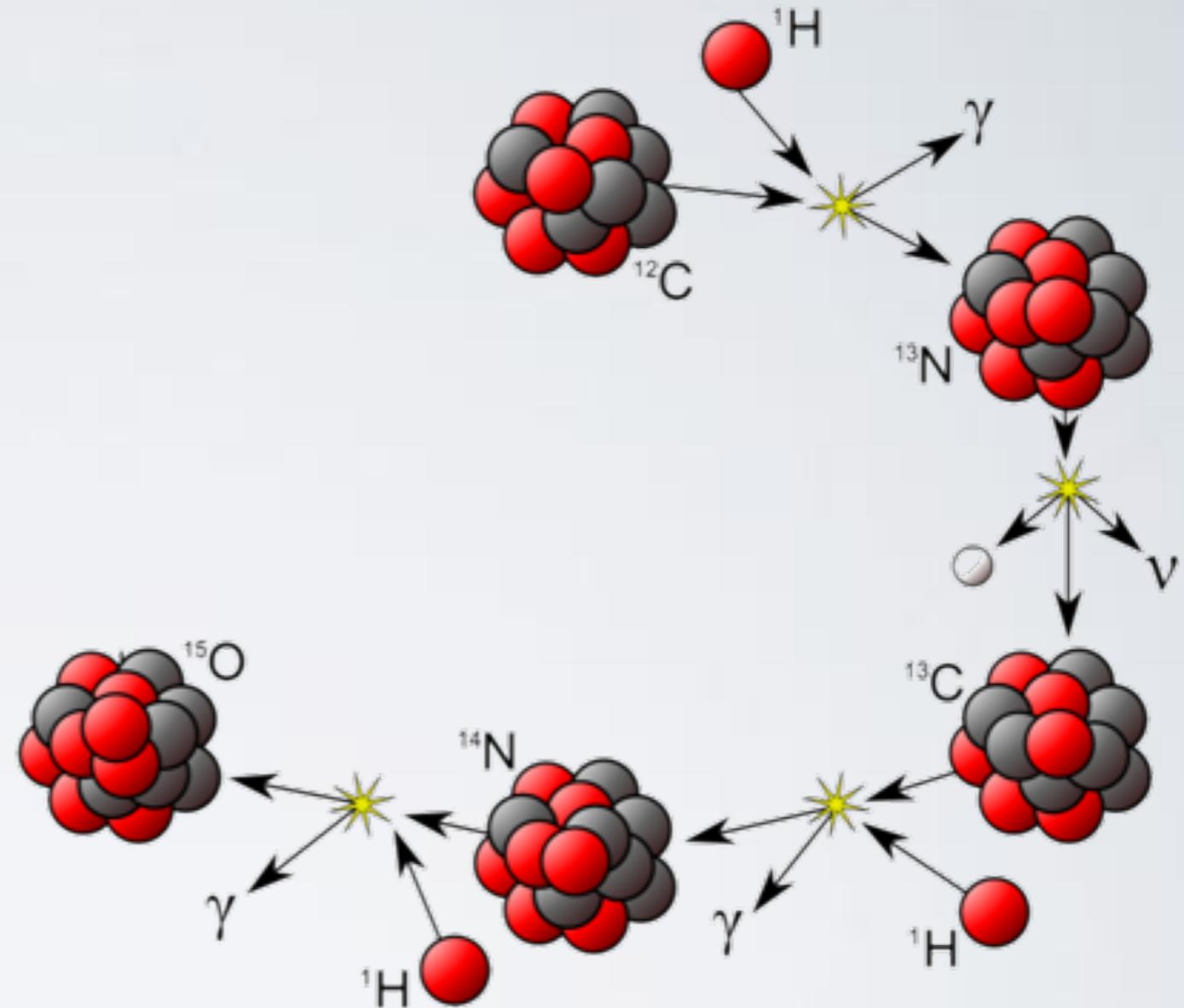
✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)

3. Proton + carbone 13

✓ Azote 14 (stable 😎)

4. Proton + Azote 14

✓ Oxygène 15 (instable! 😞)

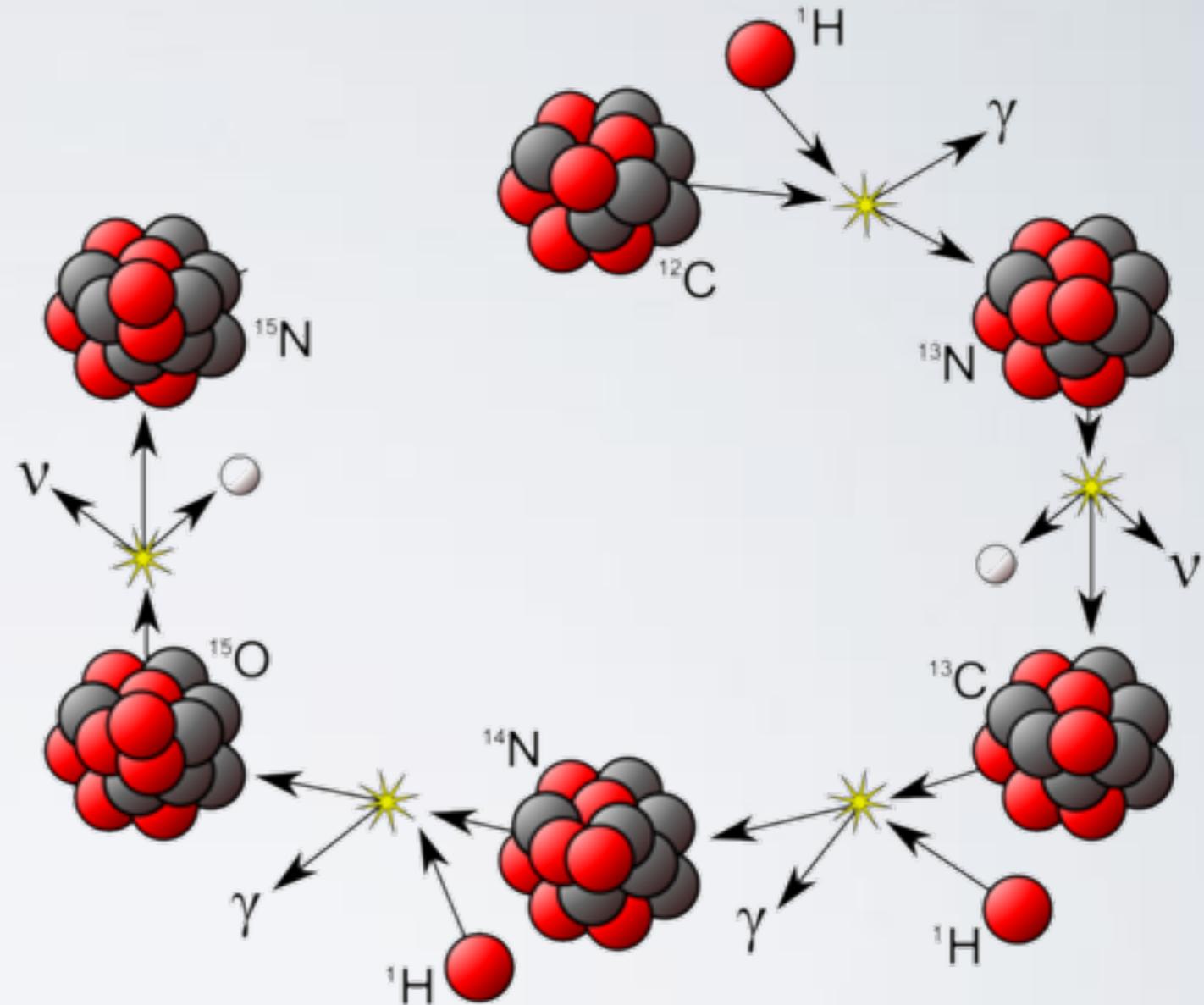


	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

Étoiles massives

1. **Proton + carbone 12**
✓ Azote 13 (instable! 😞)
2. Désintégration de l'azote 13
✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)
3. Proton + carbone 13
✓ Azote 14 (stable 😎)
4. Proton + Azote 14
✓ Oxygène 15 (instable! 😞)
5. Désintégration de l'oxygène 15
✓ Azote 15 (instable... mais pas trop)

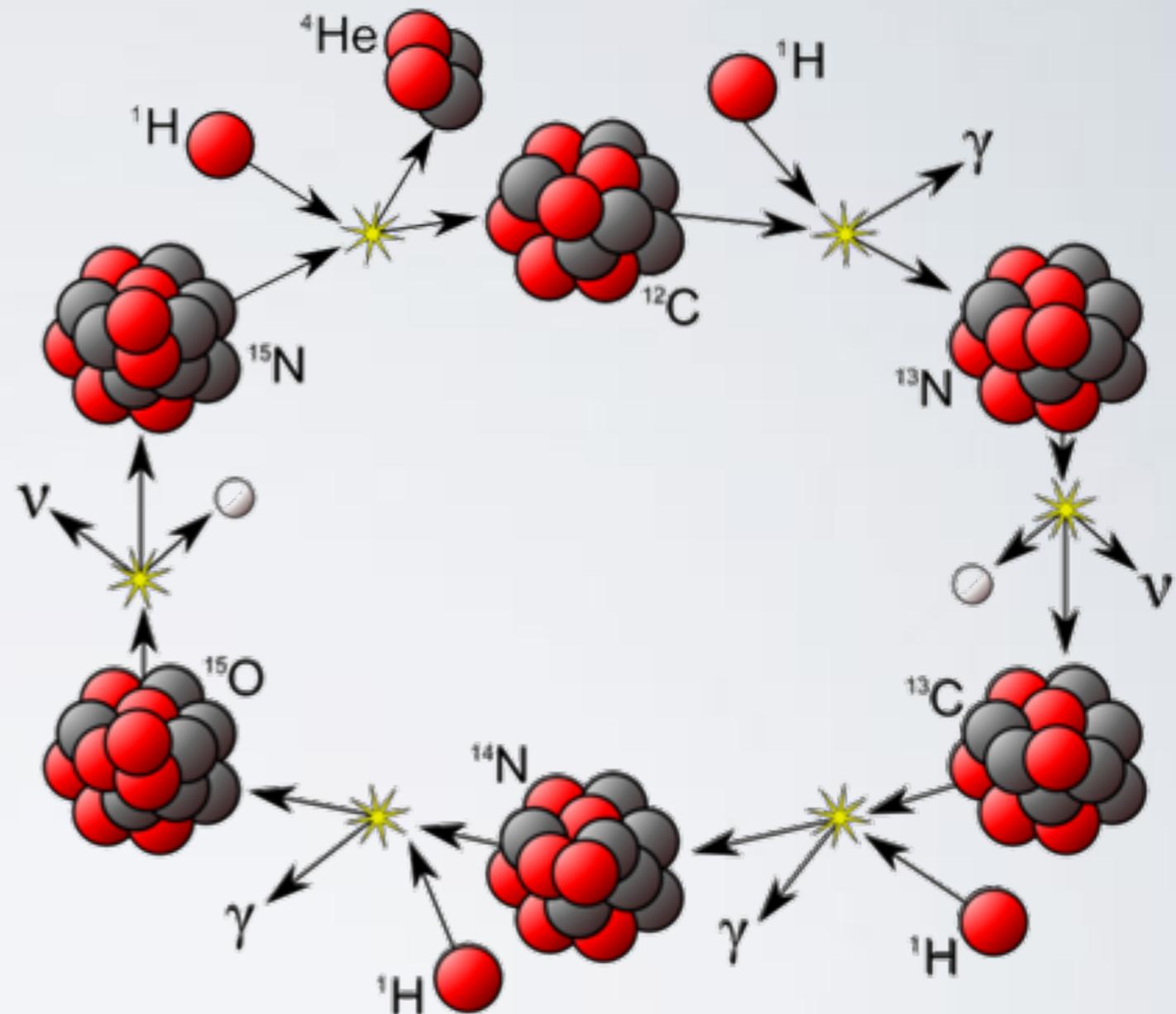


	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

Étoiles massives

1. **Proton + carbone 12**
✓ Azote 13 (instable! 😞)
2. Désintégration de l'azote 13
✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)
3. Proton + carbone 13
✓ Azote 14 (stable 😎)
4. Proton + Azote 14
✓ Oxygène 15 (instable! 😞)
5. Désintégration de l'oxygène 15
✓ Azote 15 (instable... mais pas trop)
6. Proton + azote 15
✓ Carbone 12 (stable 😎) + **hélium** 🎉

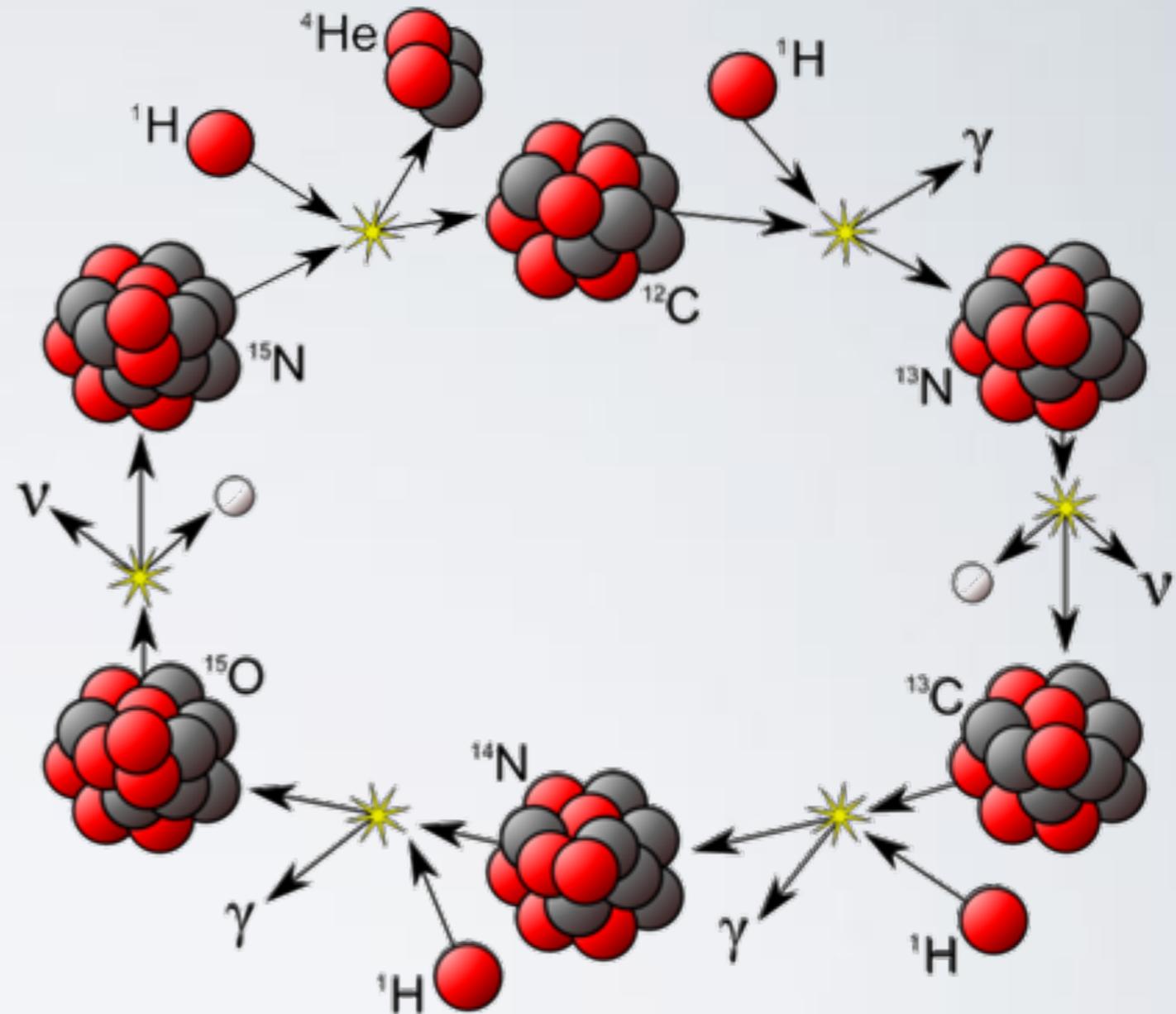


	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La chaîne proton-proton

Étoiles massives

1. **Proton + carbone 12**
✓ Azote 13 (instable! 😞)
2. Désintégration de l'azote 13
✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)
3. Proton + carbone 13
✓ Azote 14 (stable 😎)
4. Proton + Azote 14
✓ Oxygène 15 (instable! 😞)
5. Désintégration de l'oxygène 15
✓ Azote 15 (instable... mais pas trop)
6. Proton + azote 15
✓ Carbone 12 (stable 😎) + **hélium** 🎉
7. Proton + carbone 12, etc....



	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

La nucléosynthèse stellaire,
c'est quoi?

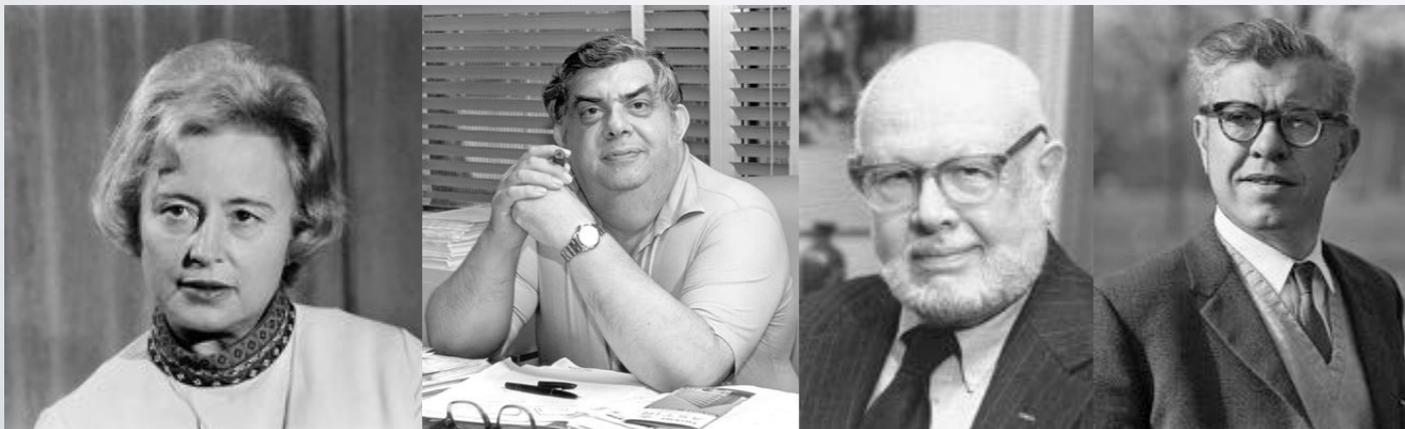
La *nucléosynthèse stellaire*, c'est la transformation d'éléments en autres éléments (plus lourds)...
par les étoiles!



"L'Alchimiste", David Teniers le Jeune

Nucléosynthèse stellaire

- 1946: Fred Hoyle
 - Et si les autres éléments étaient aussi créés dans les étoiles?
- 1952: Paul Willard Merrill détecte du technétium dans plusieurs étoiles
 - Le technétium est un élément instable, donc il **doit** avoir été créé dans l'étoile elle-même!
- 1957: Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler et Fred Hoyle
 - Article fondateur de nucléosynthèse stellaire
 - La création de pratiquement tous les éléments peut être expliquée!



REVIEWS OF
MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4 OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*
E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE
*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

"It is the stars, The stars above us, govern our conditions";
(King Lear, Act IV, Scene 3)

but perhaps

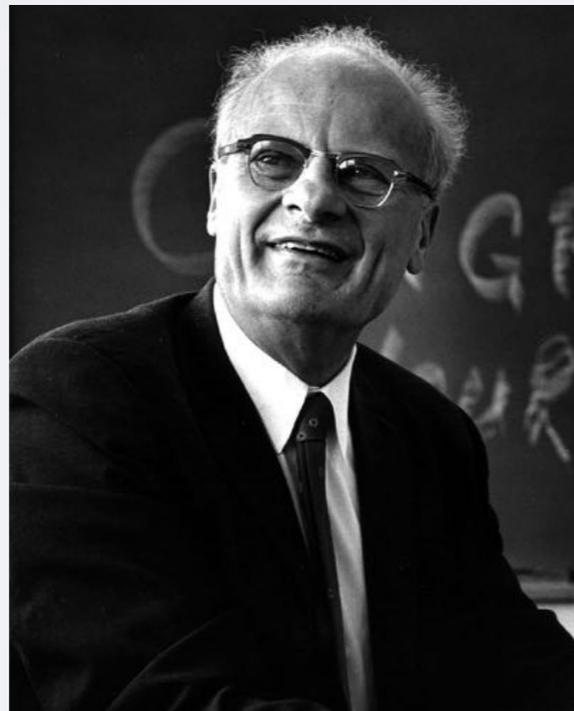
"The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,"
(Julius Caesar, Act I, Scene 2)

TABLE OF CONTENTS

	Page
I. Introduction.....	548
A. Element Abundances and Nuclear Structure.....	548
B. Four Theories of the Origin of the Elements.....	550
C. General Features of Stellar Synthesis.....	550

La nucléosynthèse primordiale

- 1948: Ralph Alpher, (Hans Bethe) et George Gamow
 - Tout l'**hydrogène** et la grande majorité de l'**hélium** et du **lithium** ont été produits quelques minutes après le **Big Bang**



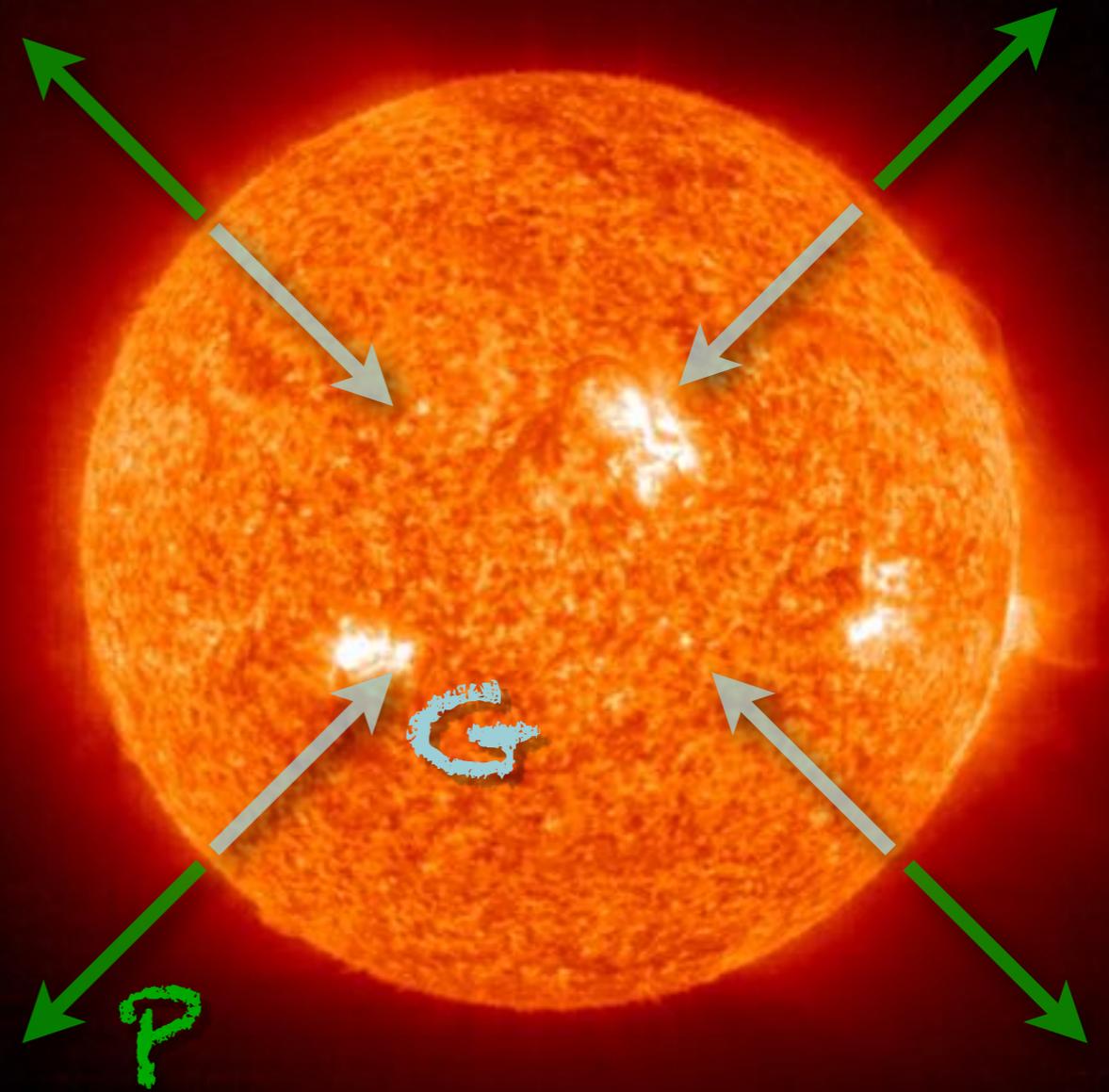
...**MAIS** (rappel)
Une (petite) partie de l'**hélium**
est forgé **au coeur des étoiles!**
(nucléosynthèse stellaire)

C'est la nucléosynthèse primordiale (≠ nucléosynthèse stellaire!)

Vieillessement des étoiles

- Équilibre hydrostatique
 - Pression interne de l'étoile = sa propre gravité
- L'hélium s'accumule au coeur et gêne la fusion de l'hydrogène
- Pression interne diminue
- Le coeur se contracte
- Température du coeur augmente
- Le taux de réactions $H \rightarrow He$ augmente
- etc...

- $T > 100\,000\,000\text{ °C}$
 - Suffisant pour transformer de l'hélium en carbone!

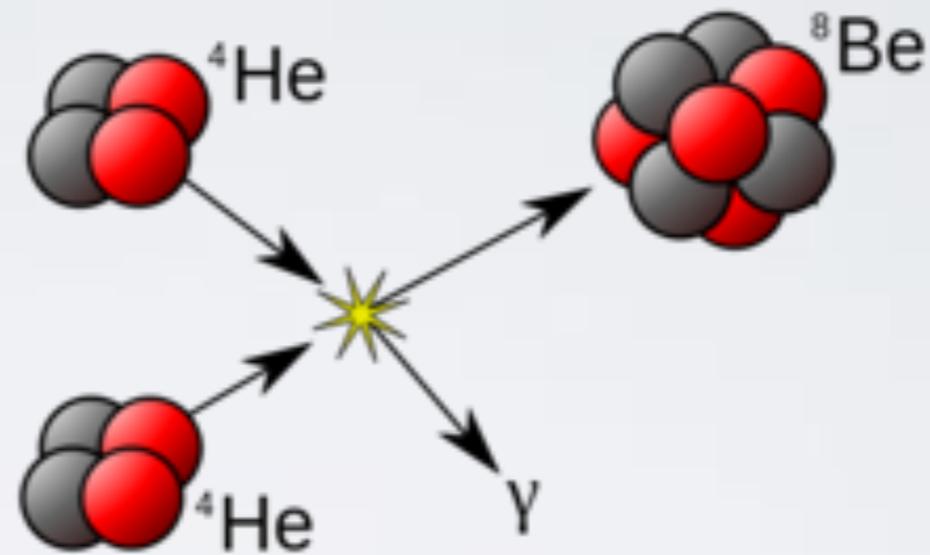


La réaction triple-alpha

- Carbone = 6 protons
 - Trois atomes d'hélium doivent se rencontrer en même temps
 - Improbable!

1. Deux atomes d'hélium collisionnent

✓ Béryllium 8 (très instable! 😞)



La réaction triple-alpha

- Carbone = 6 protons

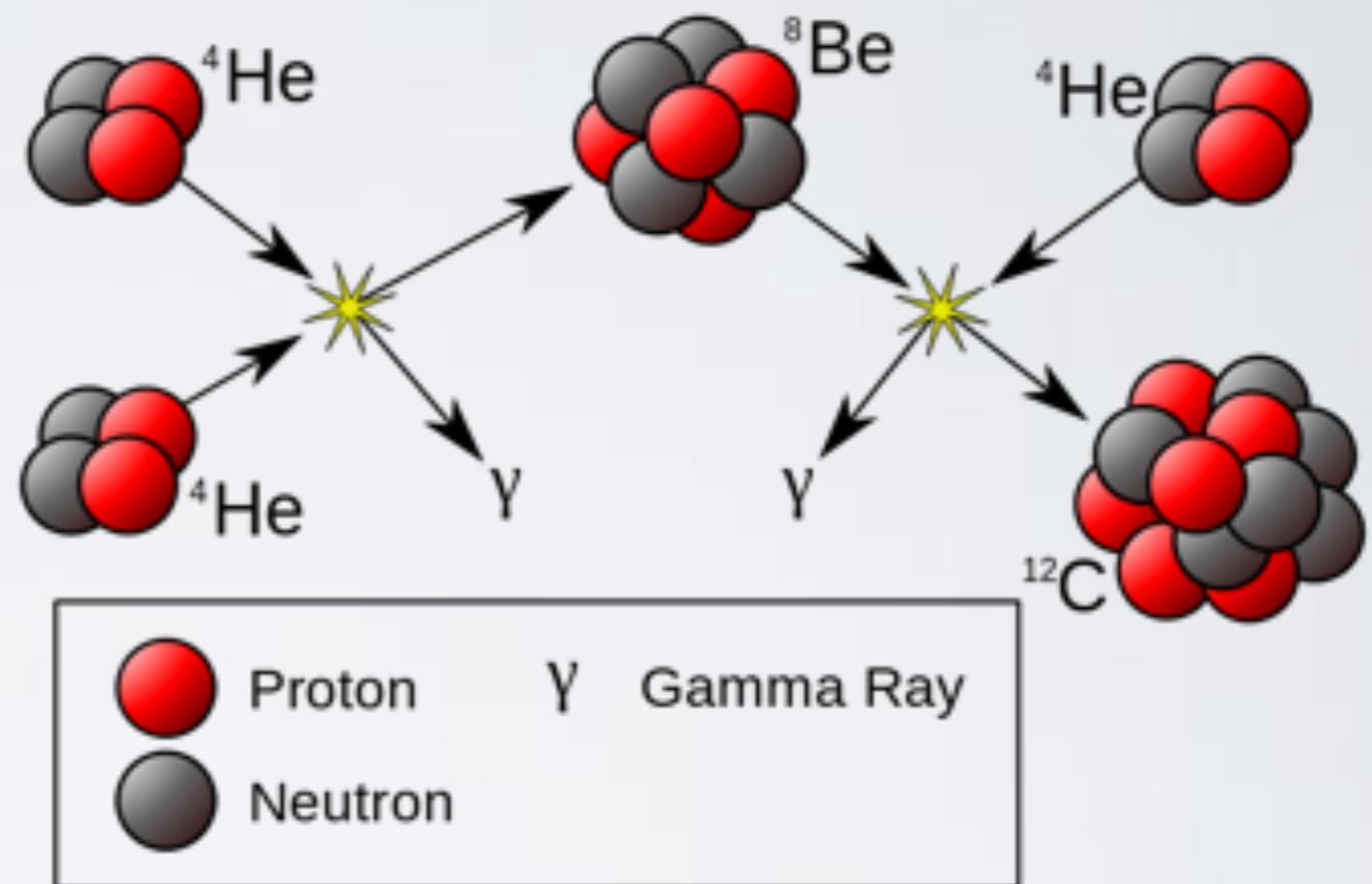
- Trois atomes d'hélium doivent se rencontrer en même temps
- Improbable!

1. Deux atomes d'hélium collisionnent

✓ Béryllium 8 (très instable! 😞)

2. Heureusement, un troisième atome d'hélium collisionne

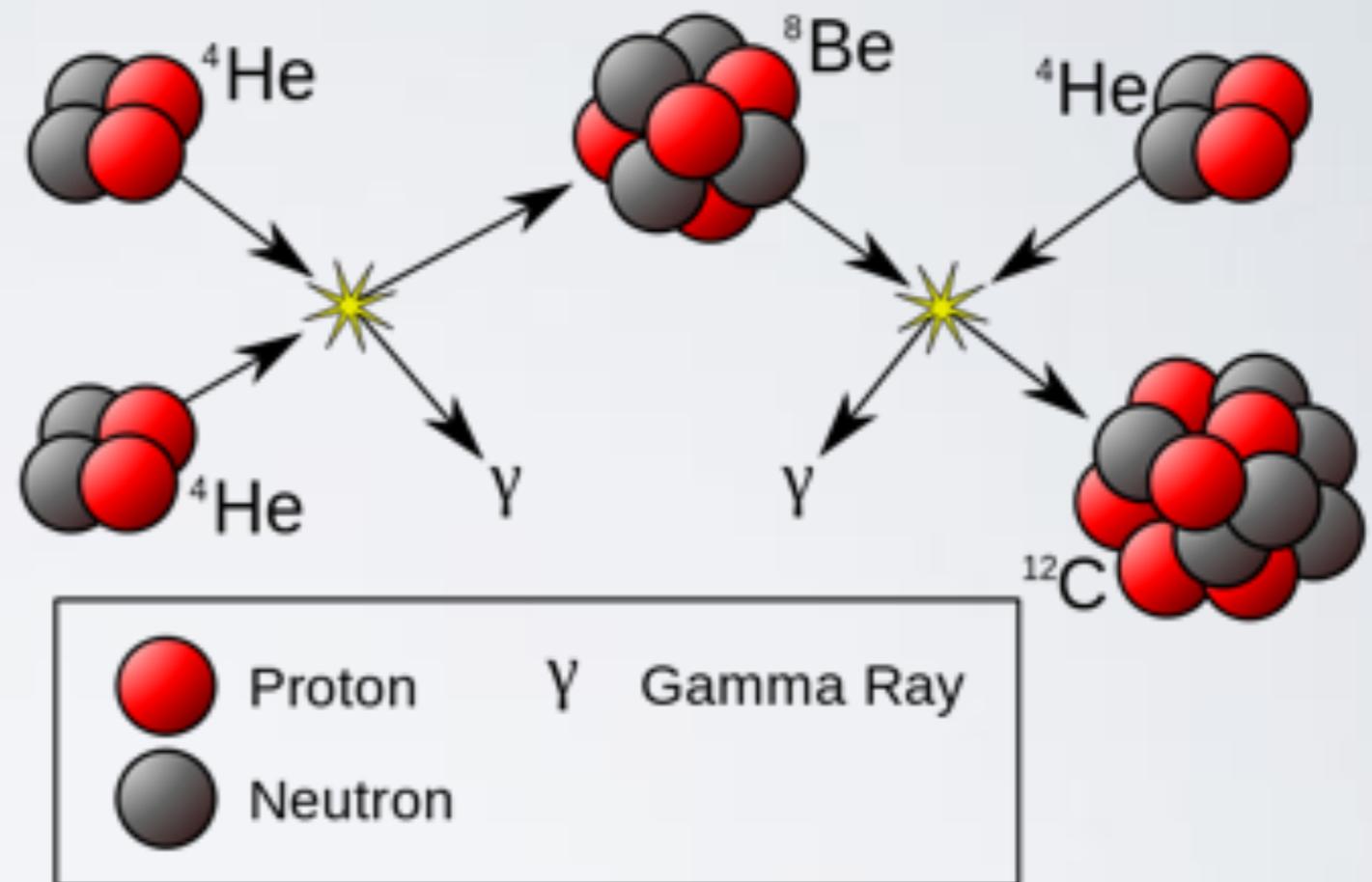
✓ Carbone 12 (stable 😎) 🎉



La réaction triple-alpha

- Carbone = 6 protons
 - Trois atomes d'hélium doivent se rencontrer en même temps
 - Improbable!

1. Deux atomes d'hélium collisionnent
 - ✓ Béryllium 8 (très instable! 😞)
2. Heureusement, un troisième atome d'hélium collisionne
 - ✓ Carbone 12 (stable 😎) 🎉



La vie sur Terre a été possible grâce au béryllium 8!

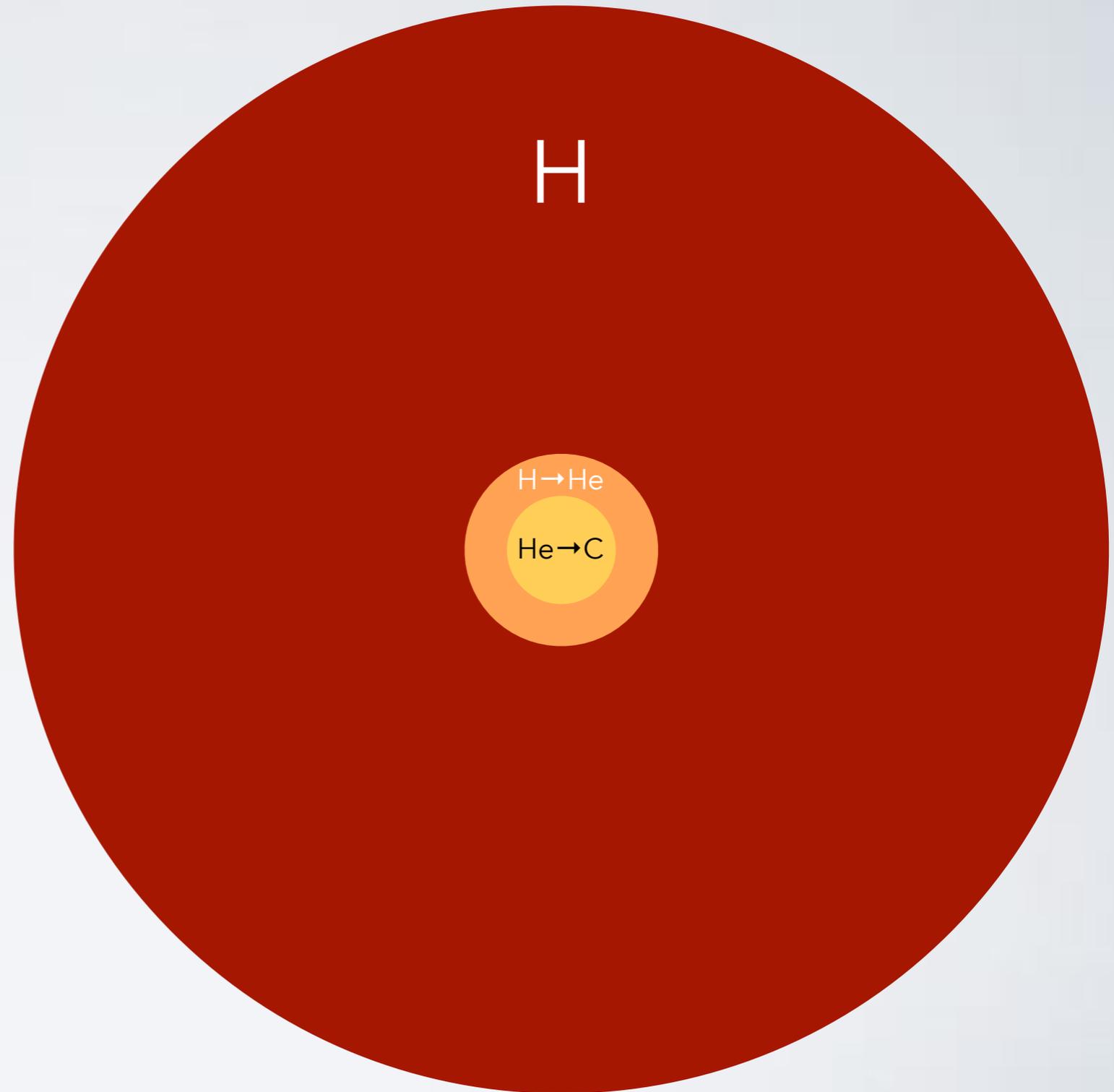
Hydrogène, hélium, carbone... et après?

- Après l'hélium, le carbone fusionne-t-il à son tour?
- Tout dépend de la **masse** de l'étoile!

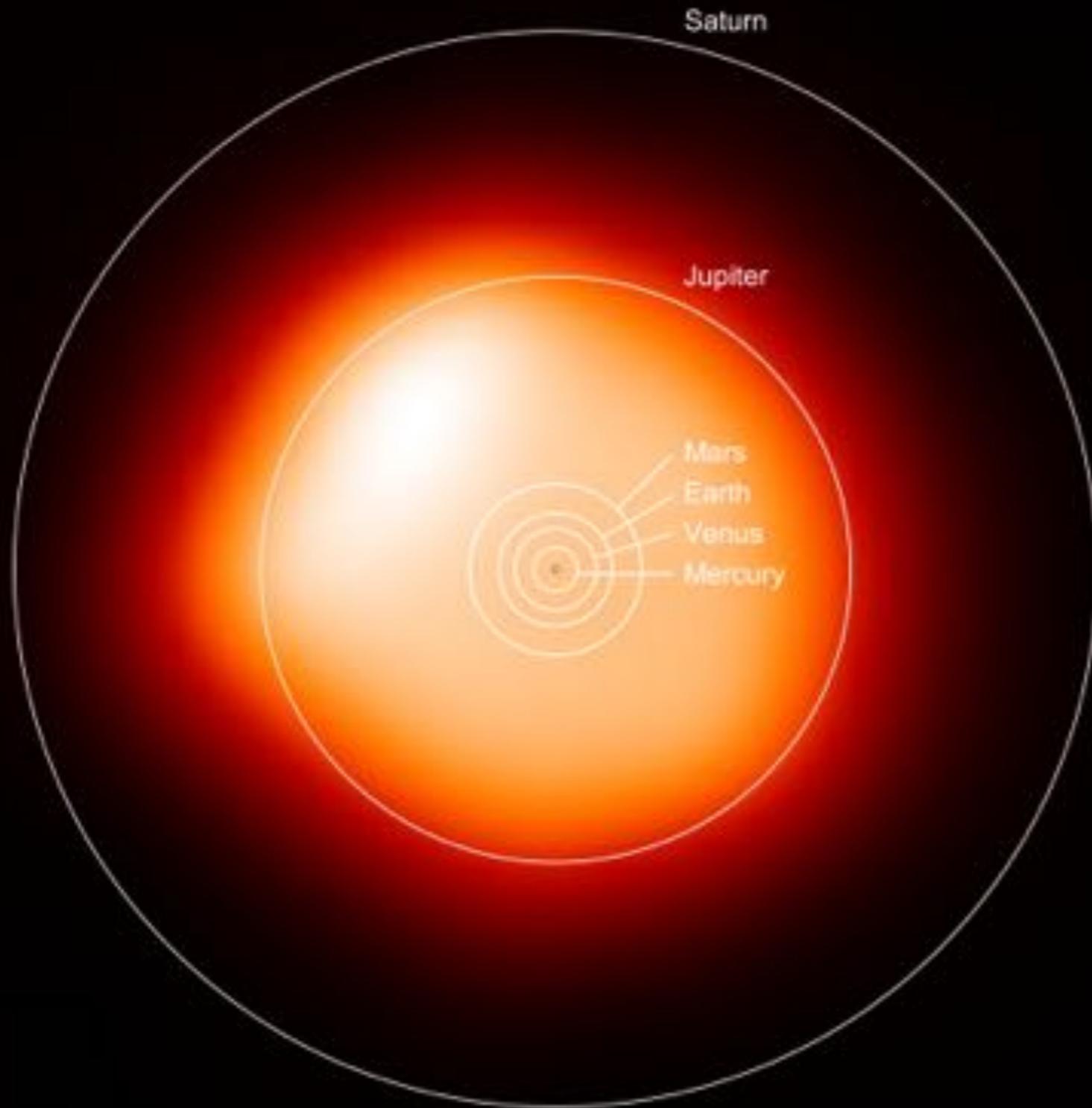


$< 10 M_{\odot}$

$> 10 M_{\odot}$

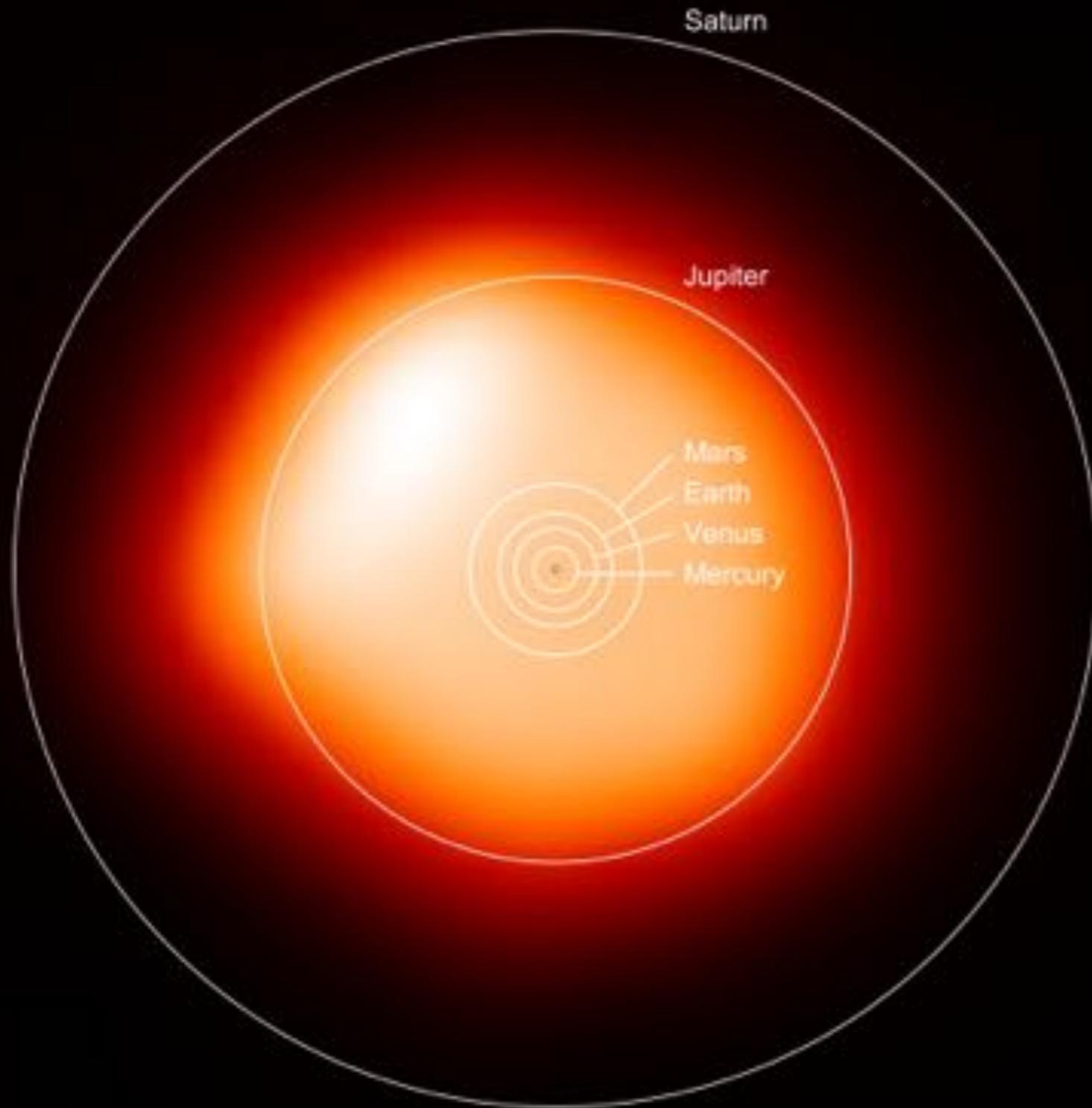


Mort des étoiles de faible masse



- Carbone reste au coeur de l'étoile et gène la fusion de l'hydrogène et de l'hélium
 - Pression interne diminue
 - Le coeur se contracte encore plus
 - Température du coeur augmente et "chauffe" les couches externes de l'étoile
 - L'étoile se dilate, devient irrégulière

Mort des étoiles de faible masse

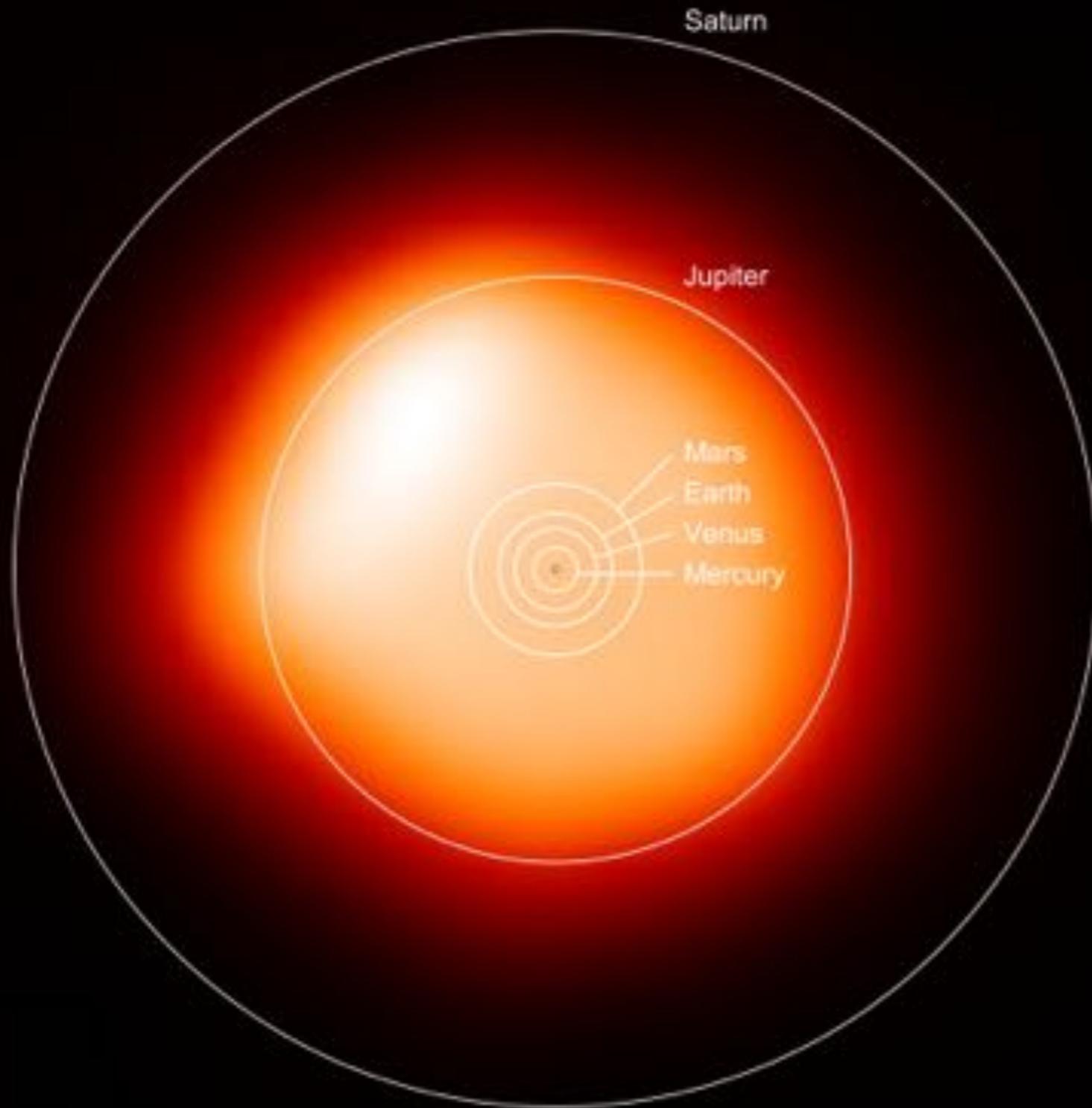


- Carbone reste au coeur de l'étoile et gène la fusion de l'hydrogène et de l'hélium
 - Pression interne diminue
 - Le coeur se contracte encore plus
 - Température du coeur augmente et "chauffe" les couches externes de l'étoile
 - L'étoile se dilate, devient irrégulière

- C'est une géante rouge (ou étoile AGB)

0.015"

Mort des étoiles de faible masse



- Carbone reste au coeur de l'étoile et gène la fusion de l'hydrogène et de l'hélium
 - Pression interne diminue
 - Le coeur se contracte encore plus
 - Température du coeur augmente et "chauffe" les couches externes de l'étoile
 - L'étoile se dilate, devient irrégulière

- C'est une géante rouge (ou étoile AGB)
- Beaucoup d'azote (N) est créé durant cette phase (si $> 4 M_{\odot}$)

0.015"

Nébuleuse planétaire



Nébuleuse de l'hélice

Nébuleuse planétaire



Nébuleuse de l'œil du chat

Nébuleuse planétaire



Nébuleuse de la lyre

Nébuleuse planétaire



NGC 7027

Nébuleuse planétaire



NGC 6326

Nébuleuse planétaire



Nébuleuse du sablier

Nébuleuse planétaire



Nébuleuse de l'esquimo

Nébuleuse planétaire



NGC 3132

Naine blanche



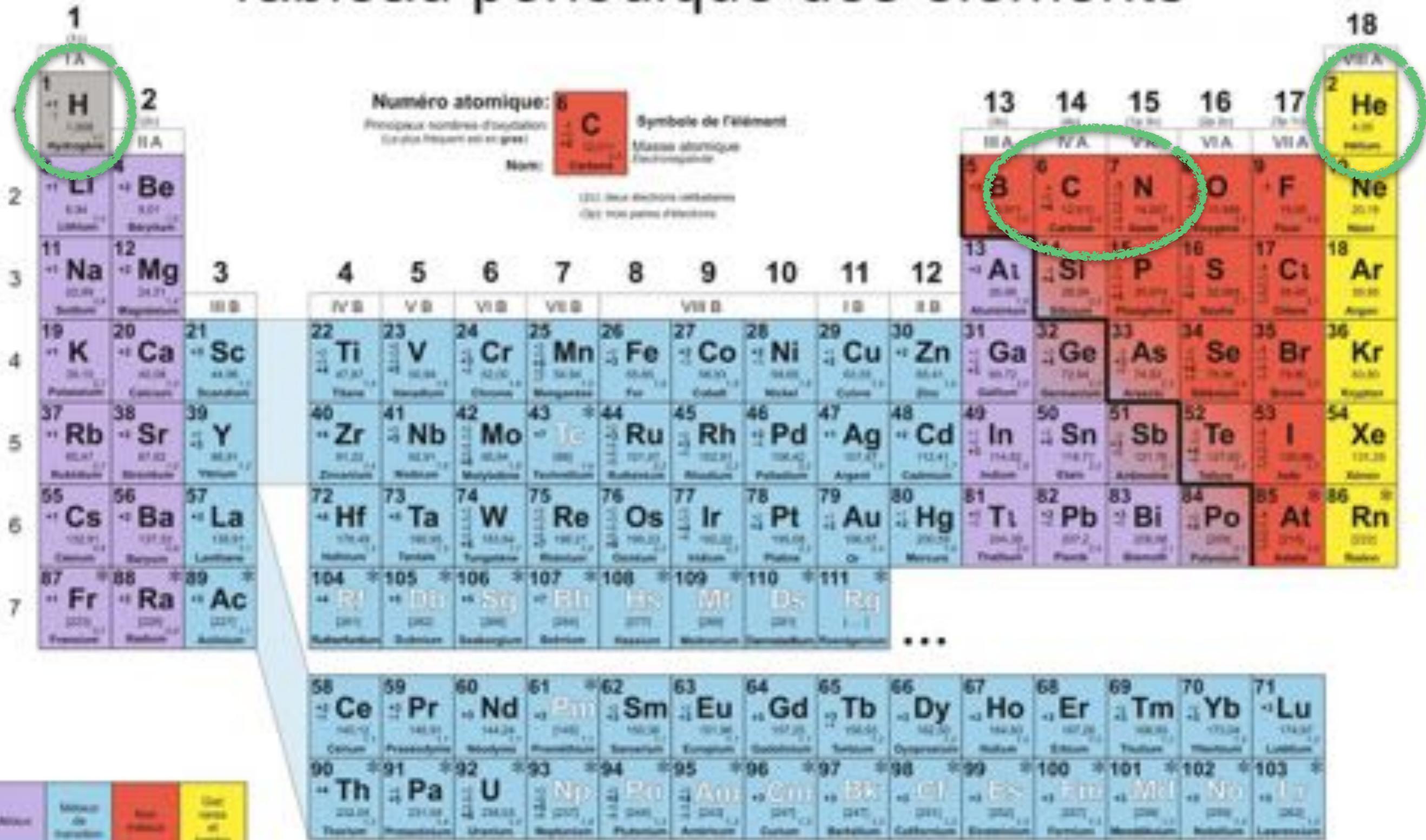
Naine blanche

- Résidu du coeur de l'étoile (de faible masse)
- À peu près la taille de la Terre
- Riche en carbone (et oxygène)
- Extrêmement dense!
 - (1 tonne/cm³)
- Pas de réactions nucléaires
 - ➔ Refroidit lentement...



Et les éléments plus lourds?

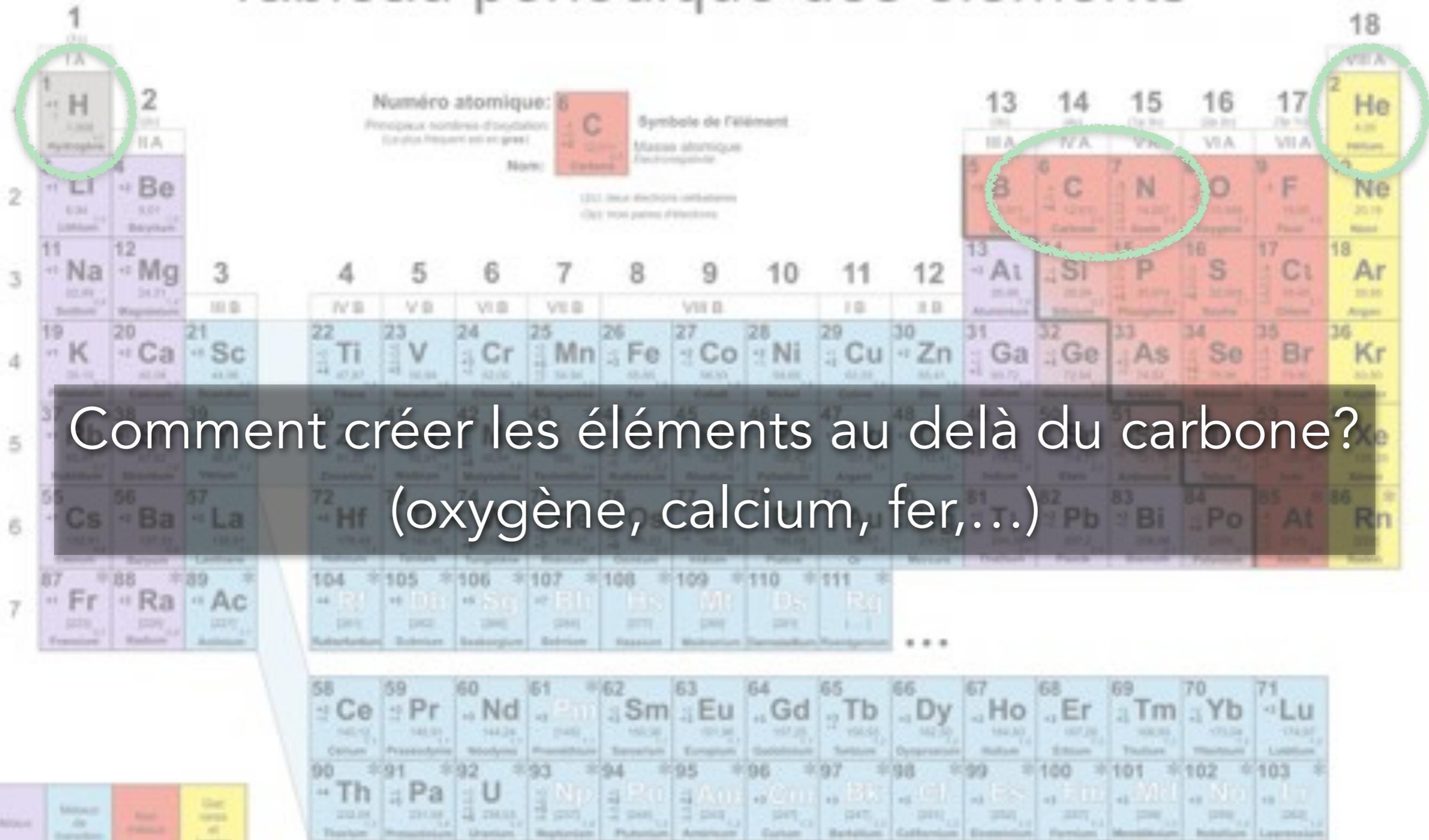
Tableau périodique des éléments



* Signifie élément radioactif (instable)

Et les éléments plus lourds?

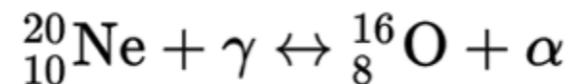
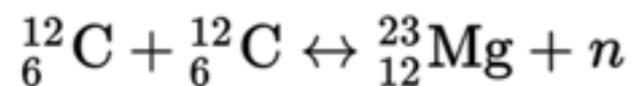
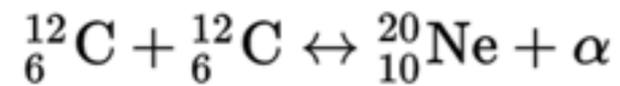
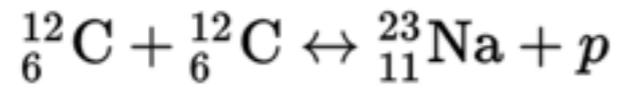
Tableau périodique des éléments



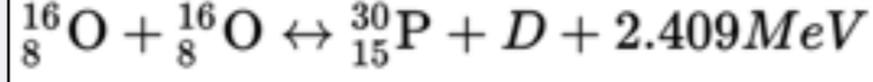
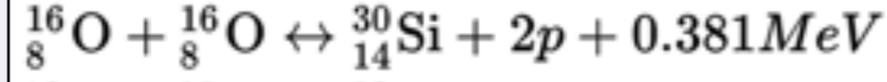
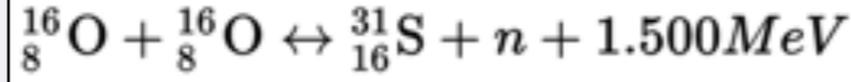
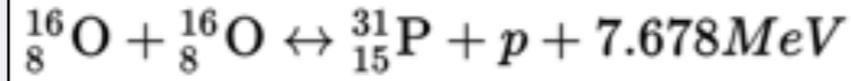
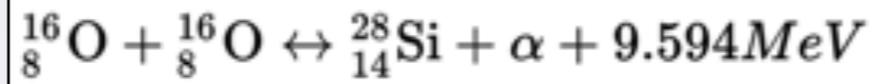
* Signifie élément radioactif (instable)

Mort des étoiles massives

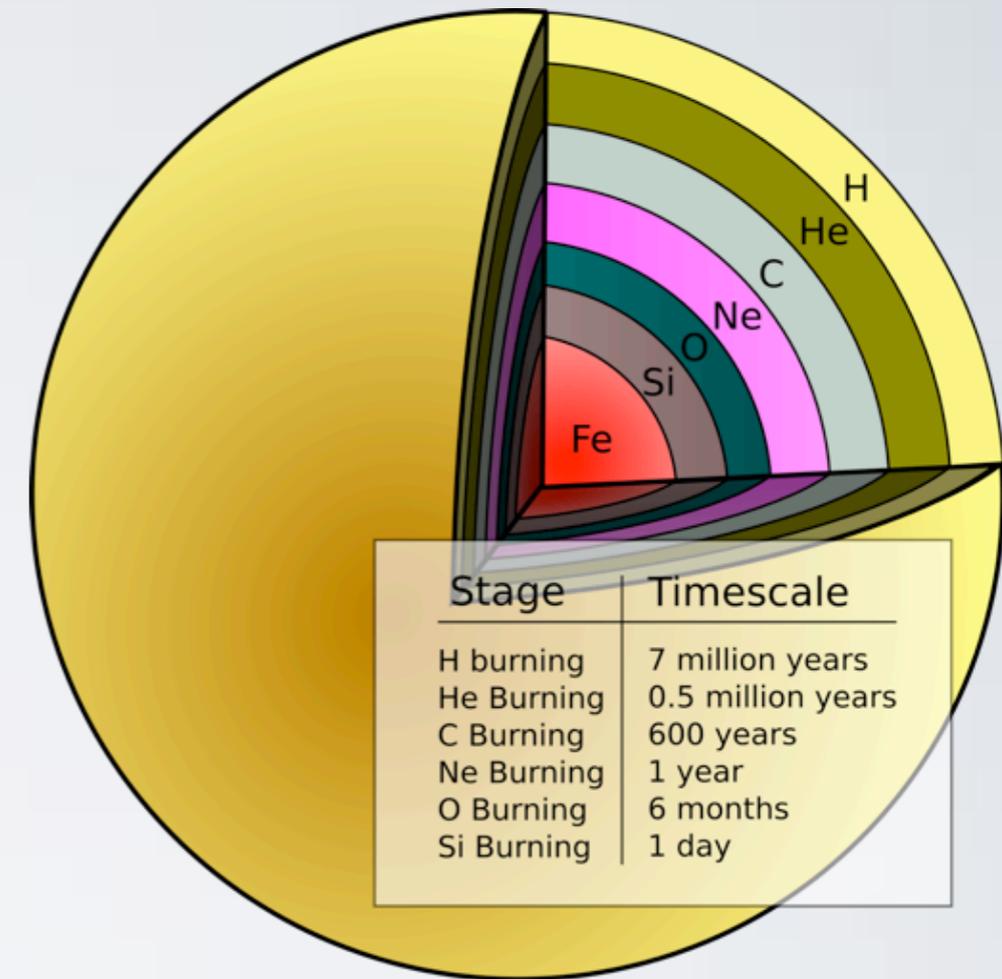
- Si l'étoile est $> 8 M_{\odot}$, la température au cœur atteint 1 milliard de K!
- À son tour, le **carbone** peut alors fusionner...



- Puis le **néon**...



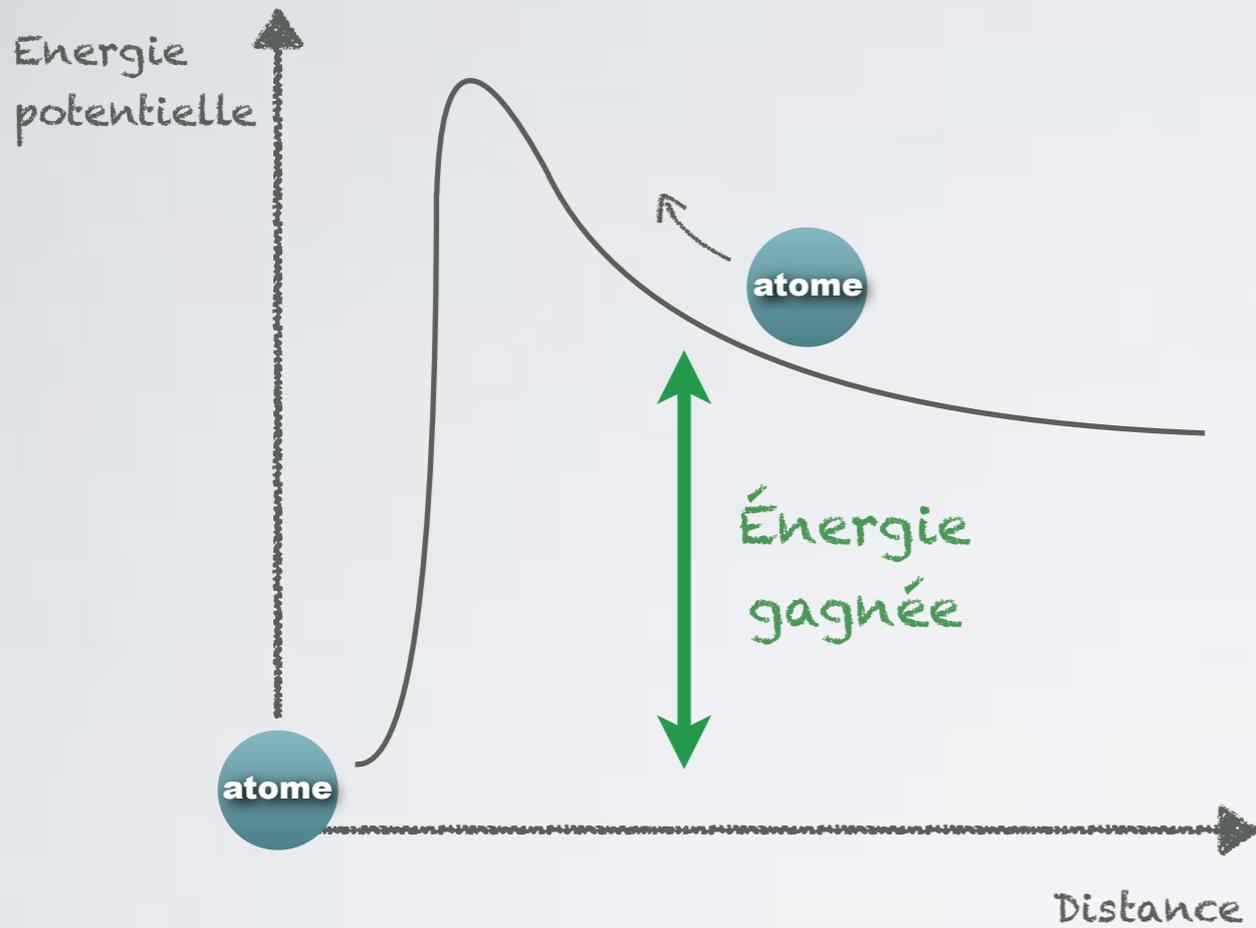
- Puis l'**oxygène**...



	Température	Étoile de 0,3 masse solaire	Étoile de 1 masse solaire	Étoile de 25 masses solaires
Fusion de l'hydrogène	4×10^6 K ; 15×10^6 K ; 40×10^6 K	~800 milliards d'années	10-12 milliards d'années	7 millions d'années
Fusion de l'hélium	1×10^8 K	S'arrête avant d'atteindre ce stade	~200 millions d'années	500 000 ans
Fusion du carbone	1×10^9 K		S'arrête avant d'atteindre ce stade	200 ans
Fusion du néon	$1,2 \times 10^9$ K			1 an
Fusion de l'oxygène	2×10^9 K			5 mois
Fusion du silicium	3×10^9 K			~1 jour

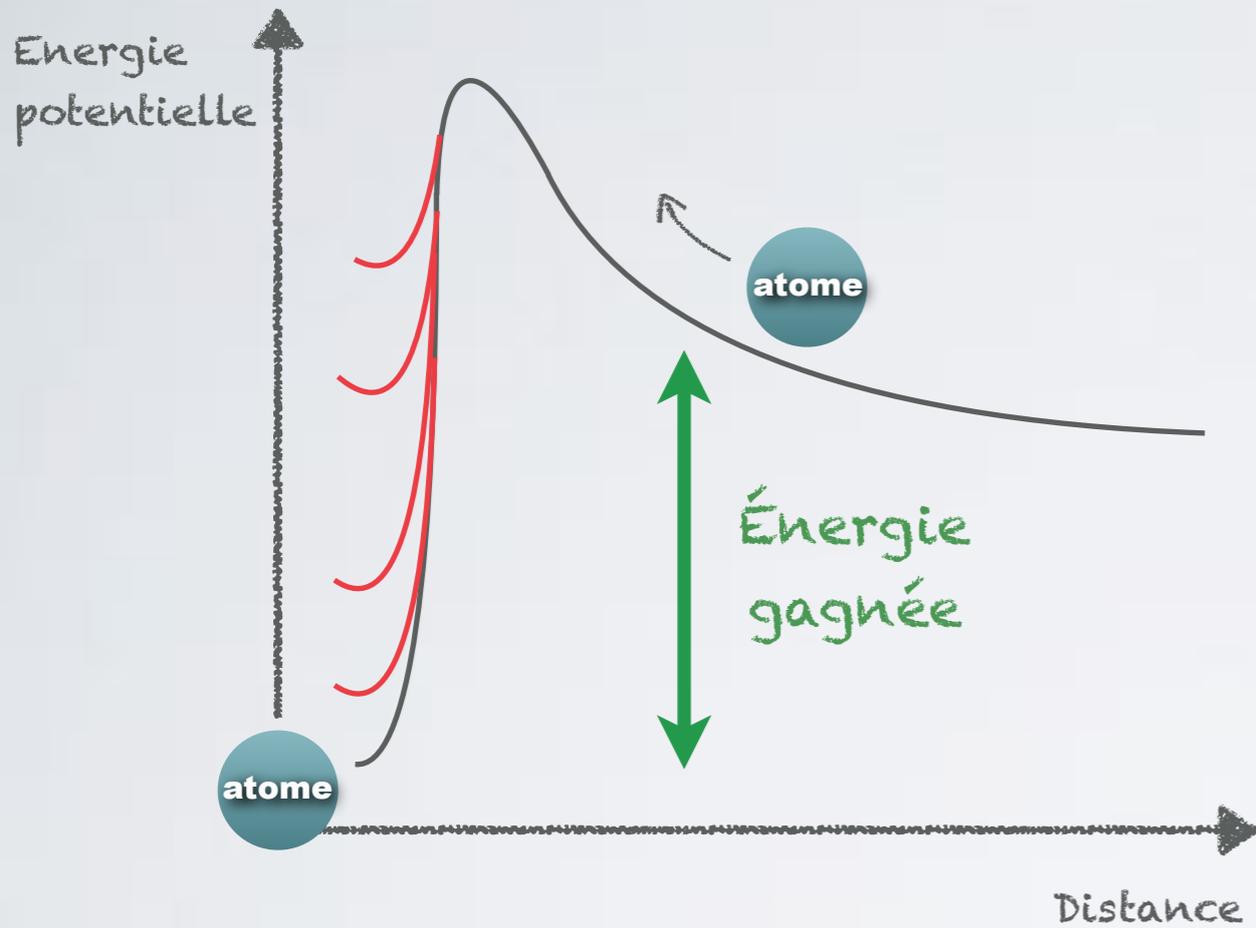
Mort des étoiles massives

- Au delà du fer, on a un **gros** problème...



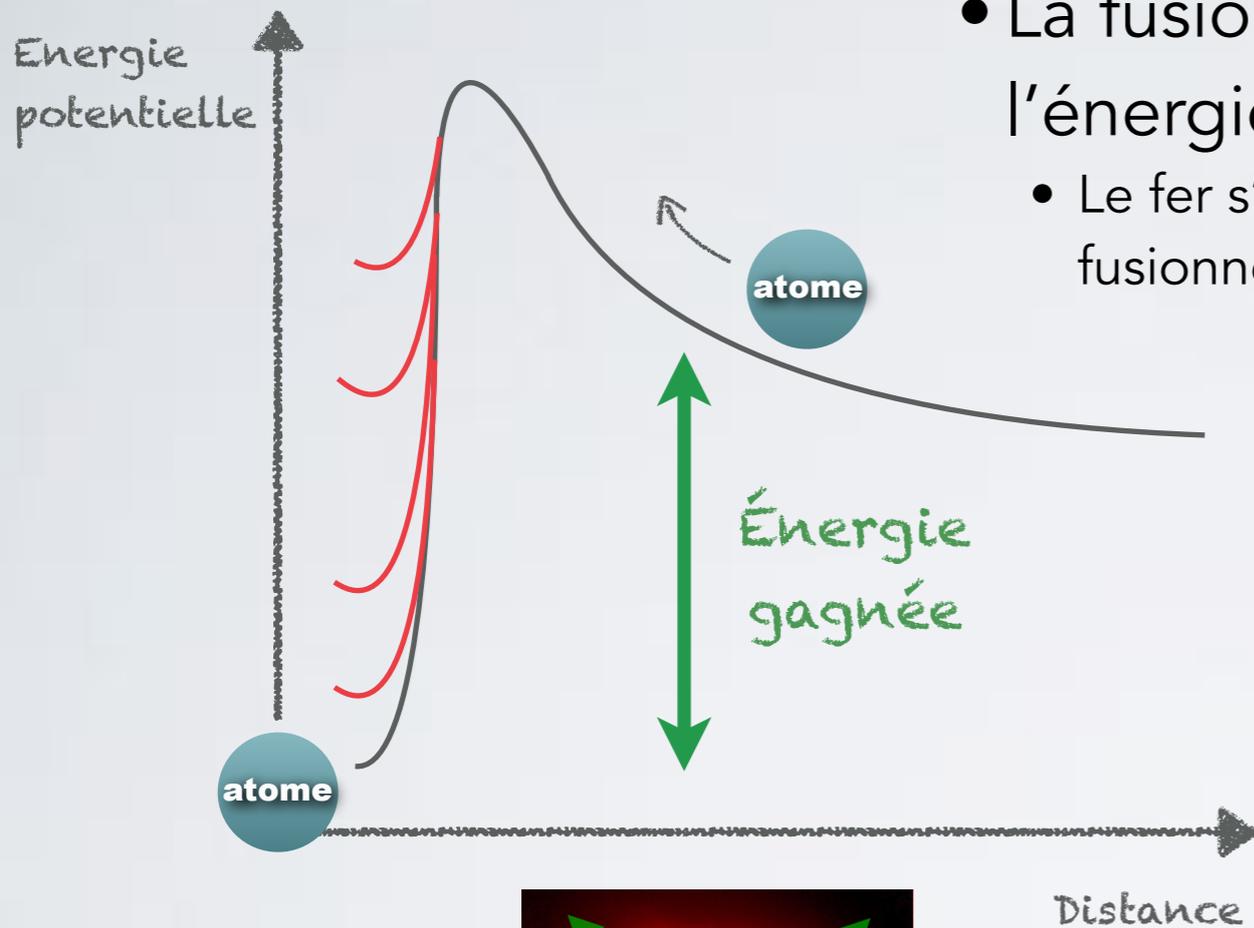
Mort des étoiles massives

- Au delà du fer, on a un **gros** problème...

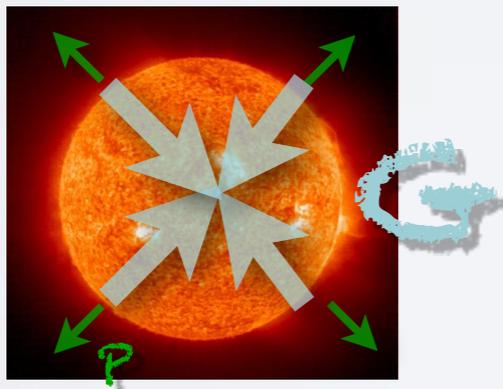
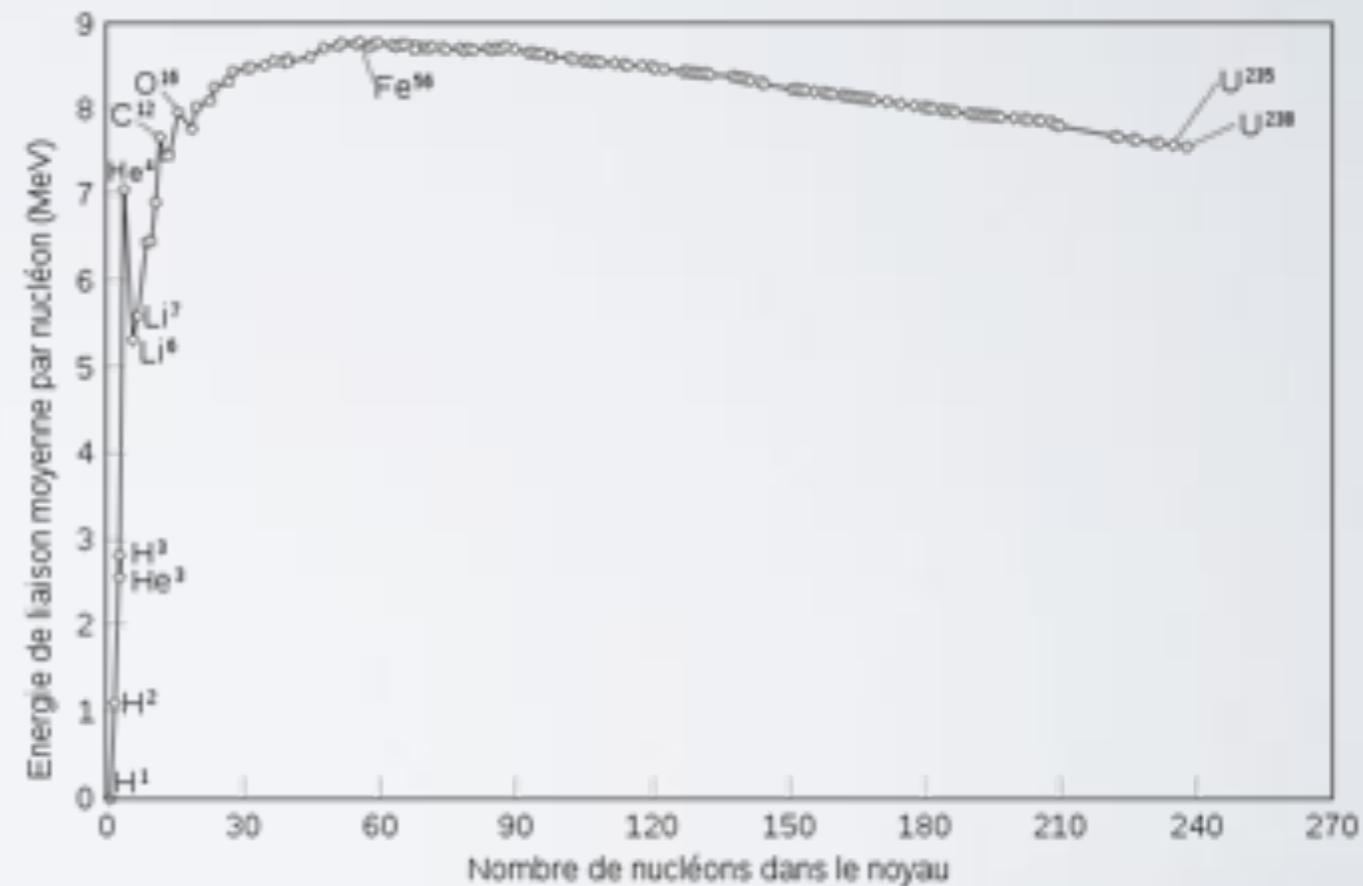


Mort des étoiles massives

- Au delà du fer, on a un **gros** problème...



- La fusion du fer ne permet pas de gagner de l'énergie (elle en demande)!
- Le fer s'accumule au coeur de l'étoile, mais ne pourra **PAS** fusionner!

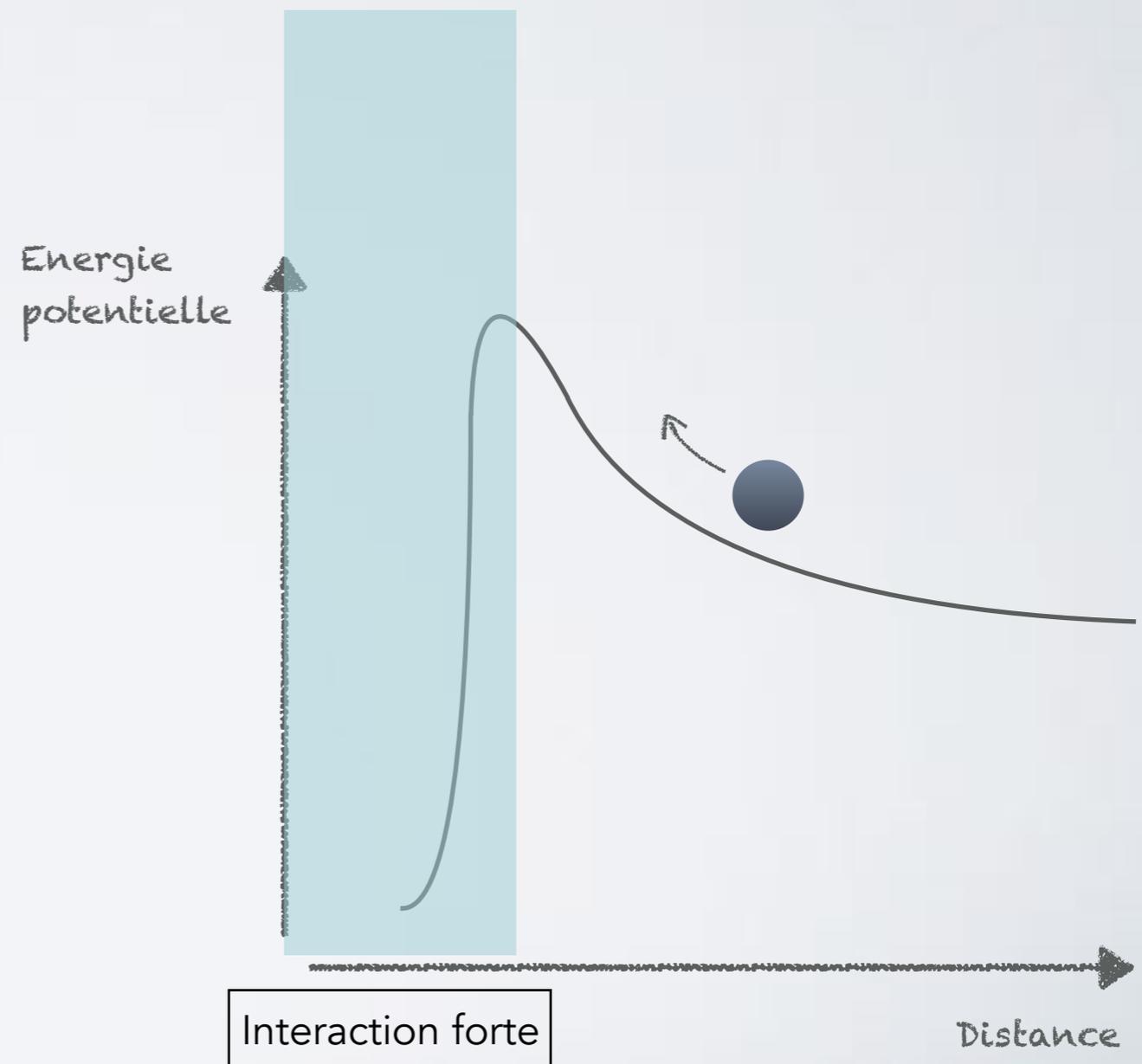


- Soudain: pression interne* \ll gravité
- L'étoile s'effondre sur elle-même! 😱

*pression de dégénérescence

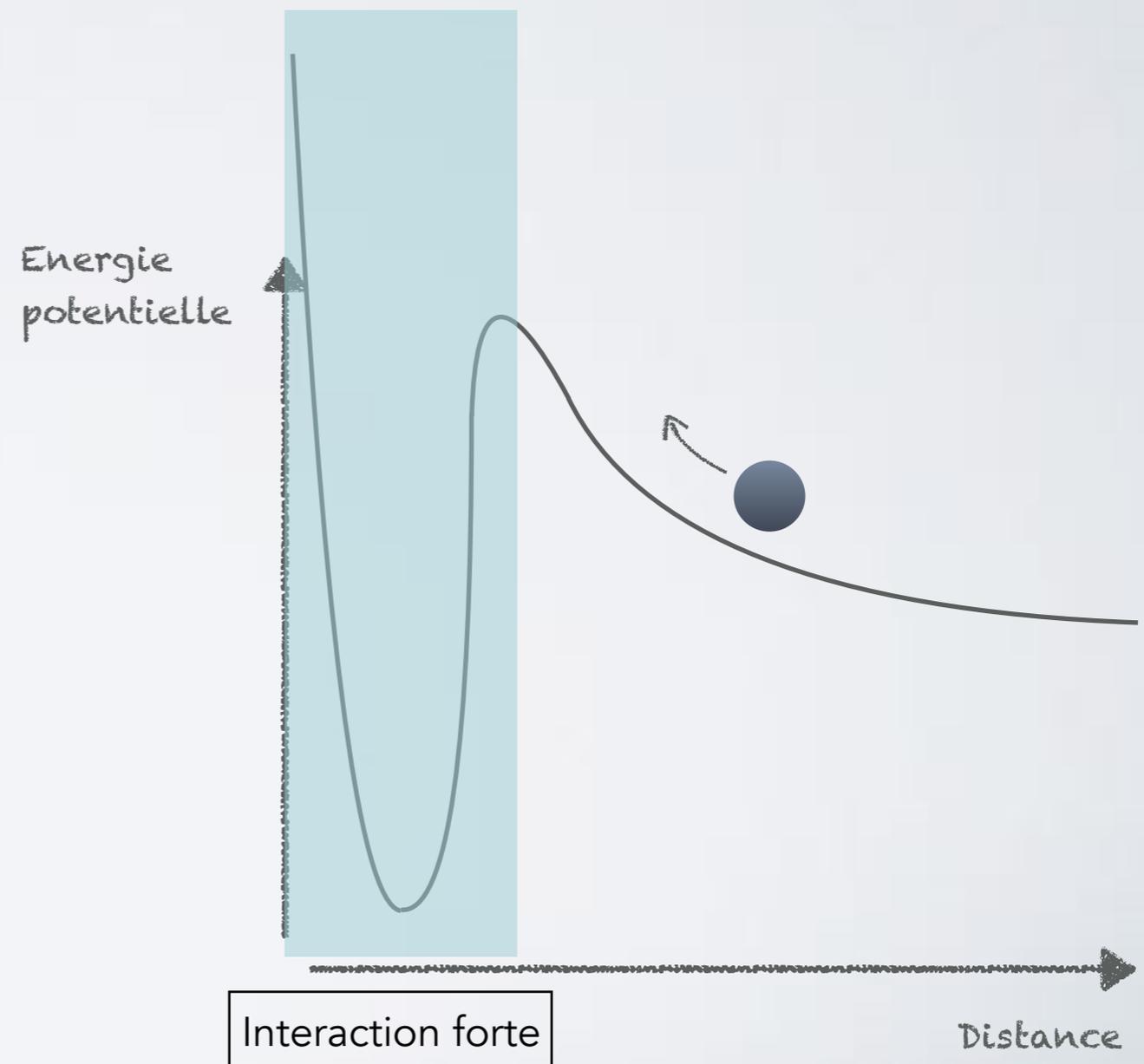
Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:



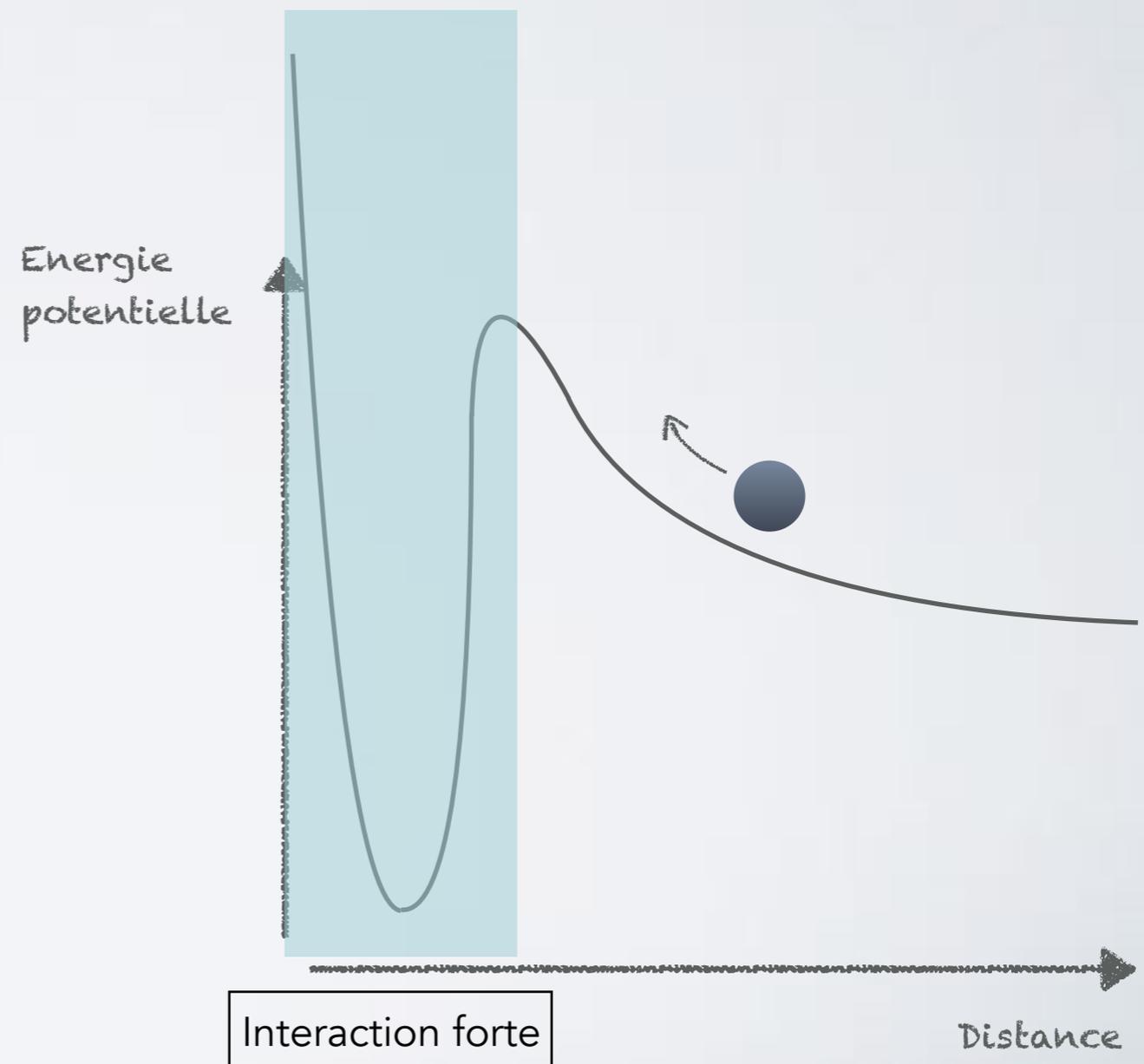
Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:  +  → 
- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!



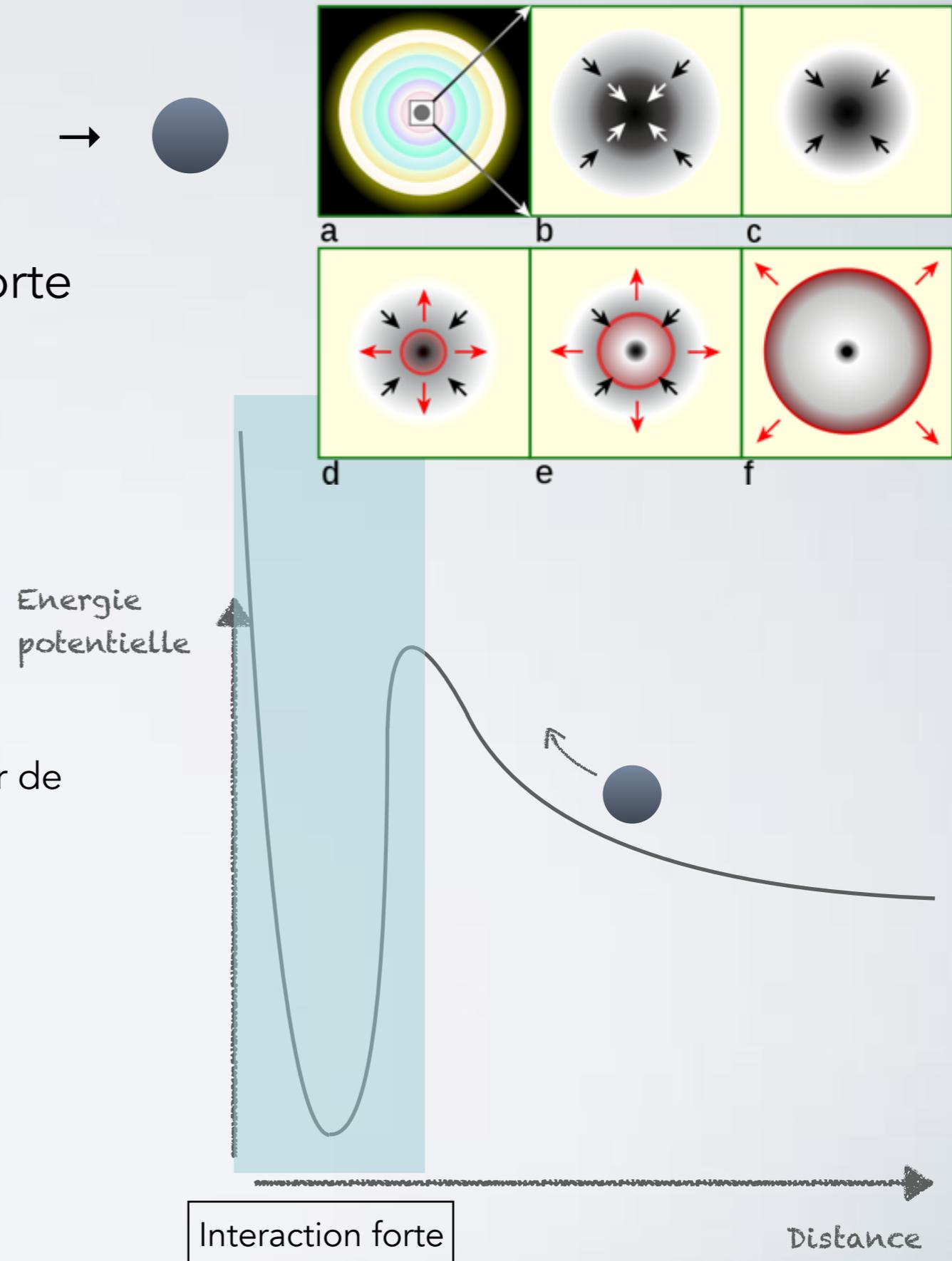
Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:  +  → 
- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!
- La matière "rebondit" sur le coeur de neutrons



Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement: 
- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!
- La matière "rebondit" sur le coeur de neutrons
- Choc vers l'extérieur de l'étoile
 - Réanime la fusion de certains éléments
 - Vitesse de plus en plus grande...
 - ...jusqu'à 0,5 c !!
 - Expulse toute la matière de l'étoile (sauf le coeur de neutrons)

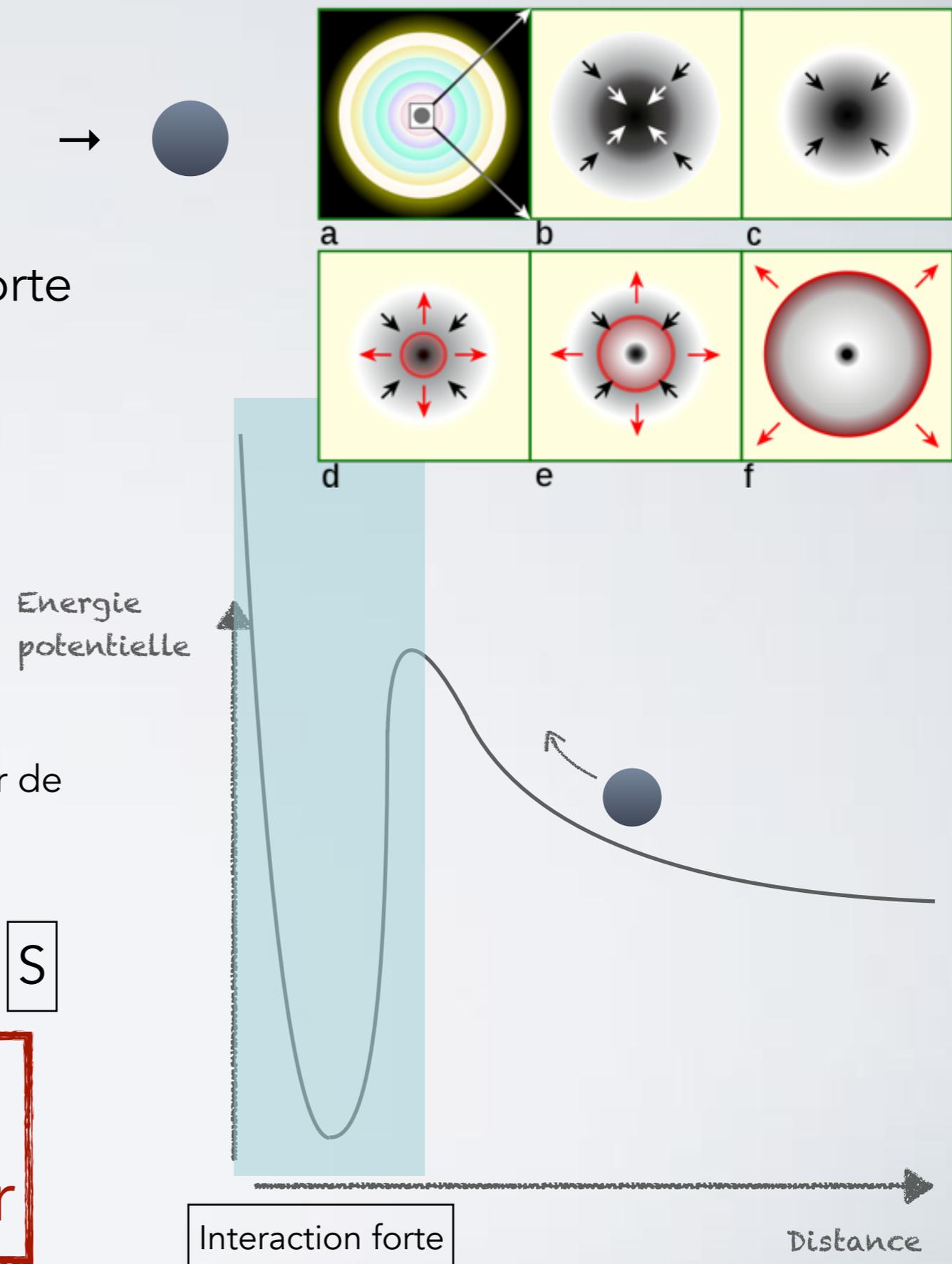


Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement: 
- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!
- La matière "rebondit" sur le coeur de neutrons
- Choc vers l'extérieur de l'étoile
 - Réanime la fusion de certains éléments
 - Vitesse de plus en plus grande...
 - ...jusqu'à 0,5 c !!
 - Expulse toute la matière de l'étoile (sauf le coeur de neutrons)

O Ne Mg Si S

Supernova
à effondrement de coeur

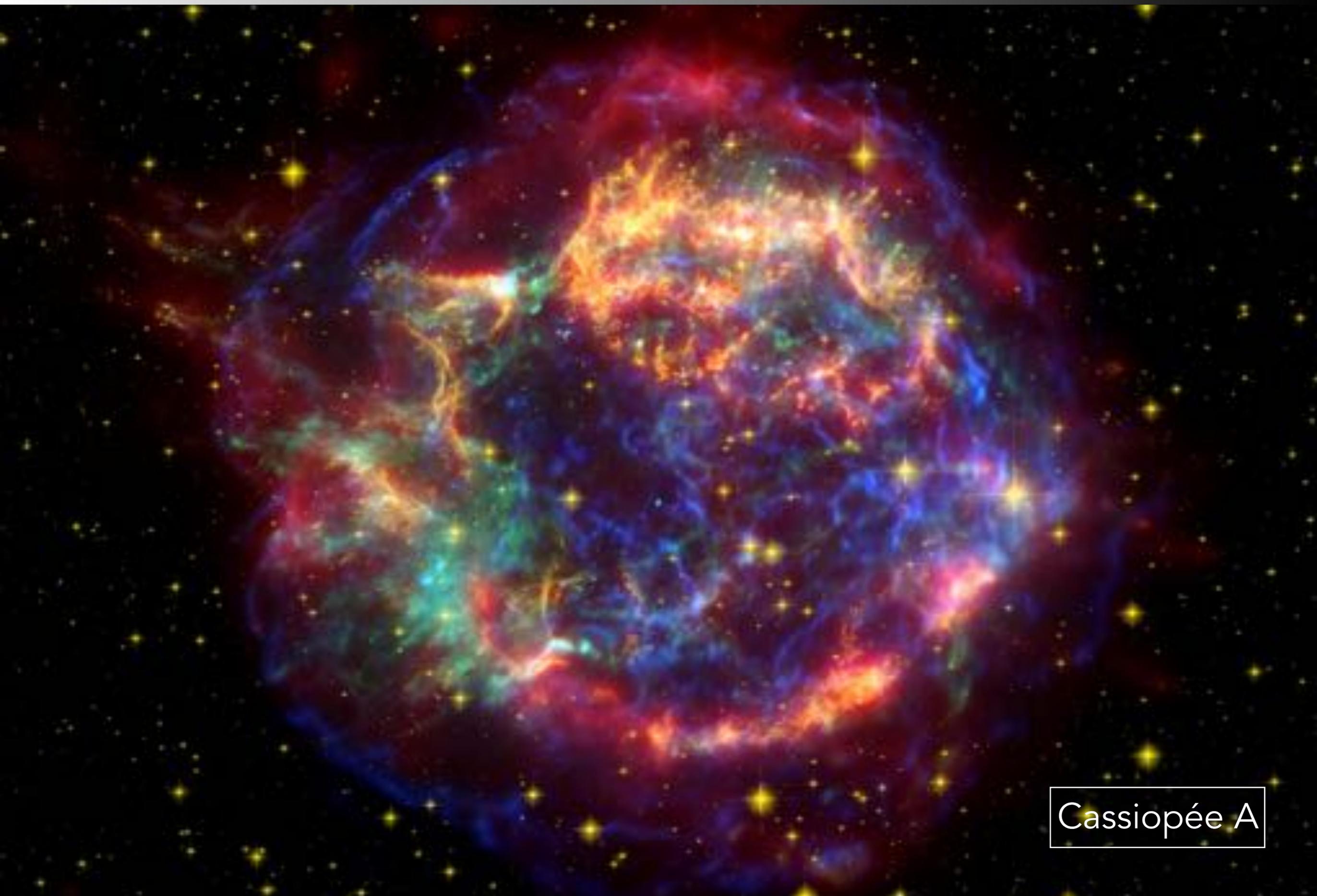


Supernovae à effondrement de coeur



SN 1054
(Nébuleuse du Crabe)

Supernovae à effondrement de coeur



Cassiopee A

Supernovae à effondrement de coeur



Supernovae à effondrement de coeur



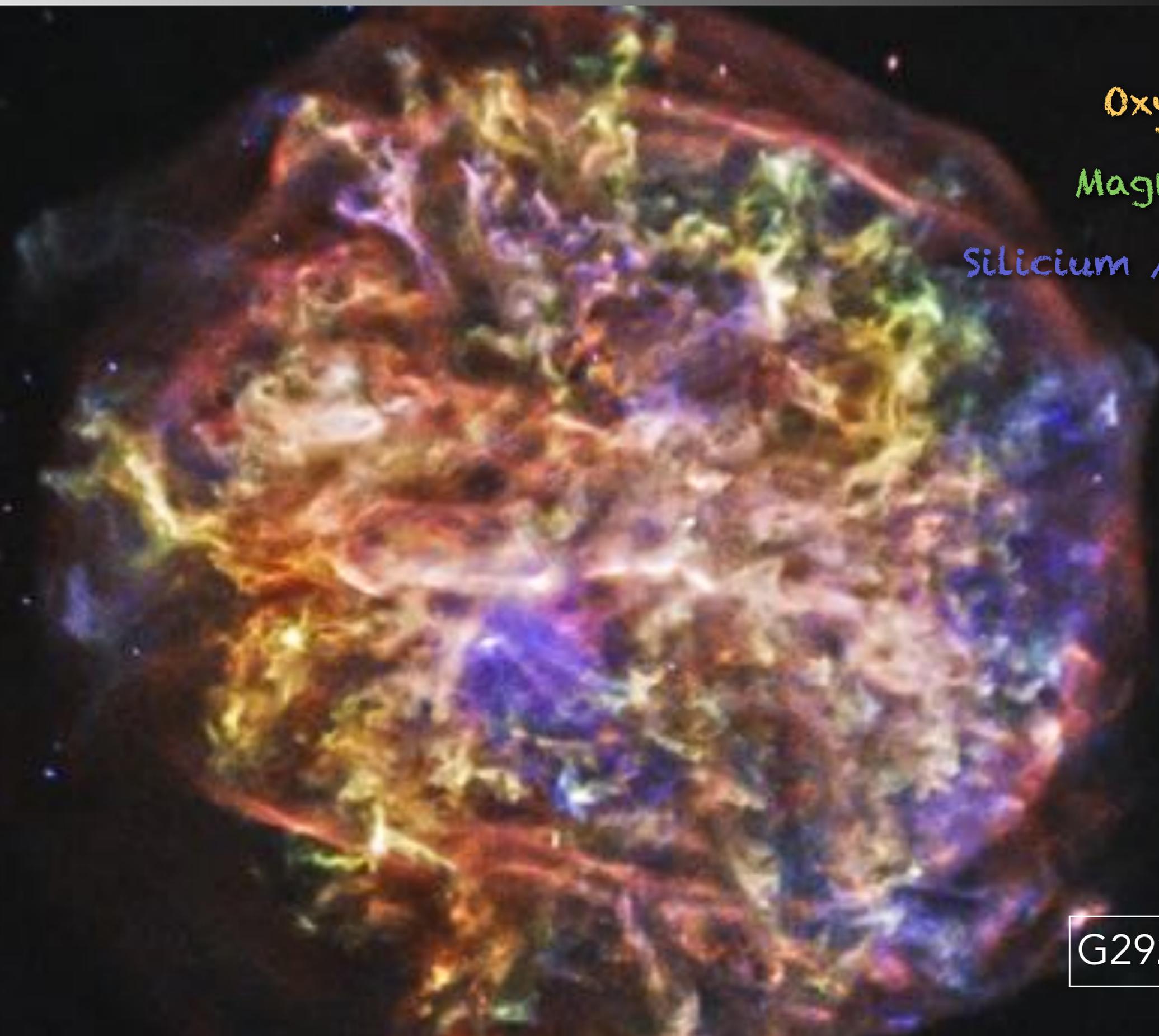
W49B

Supernovae à effondrement de coeur



SN 1987A

Supernovae à effondrement de coeur



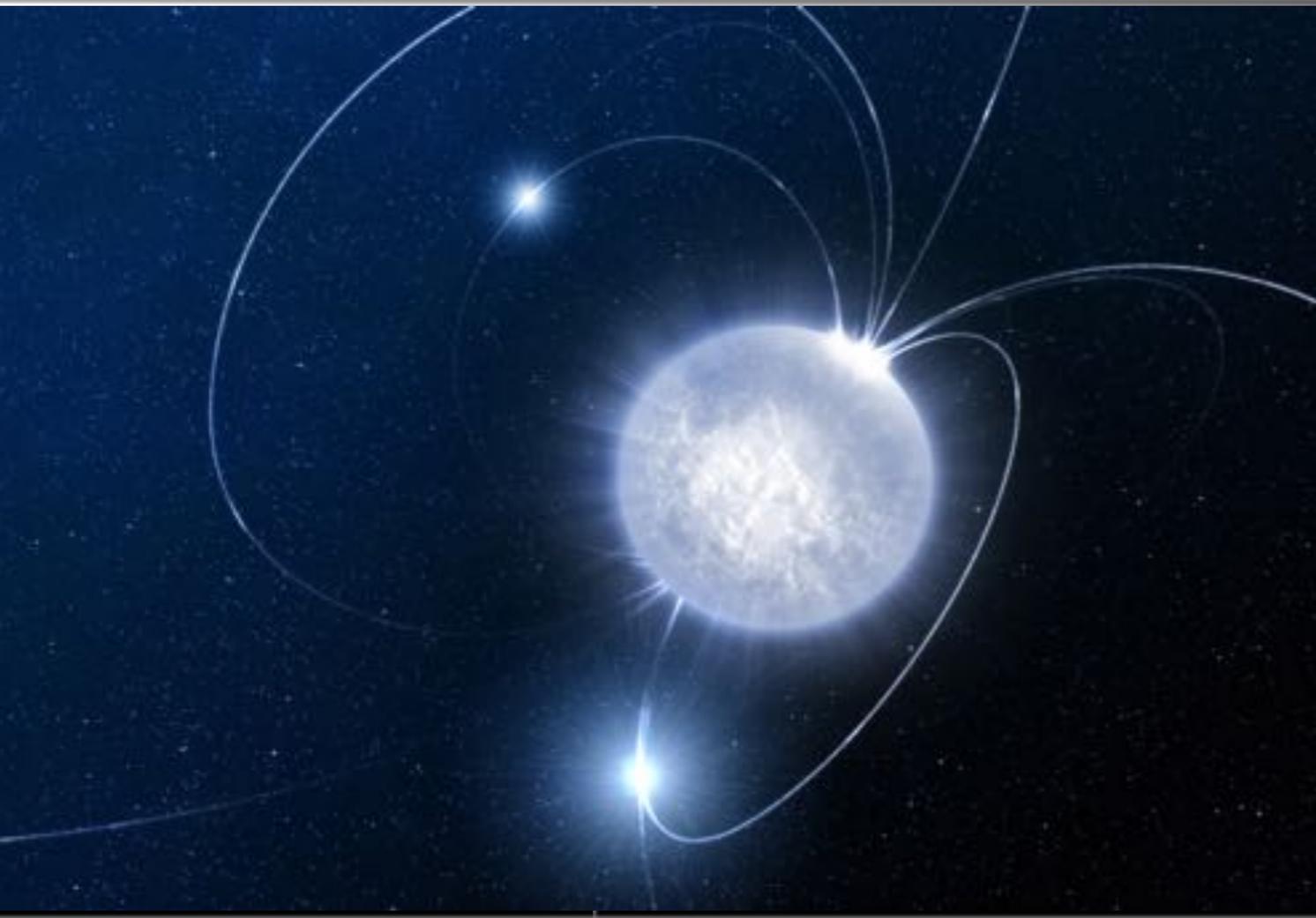
Oxygène

Magnésium

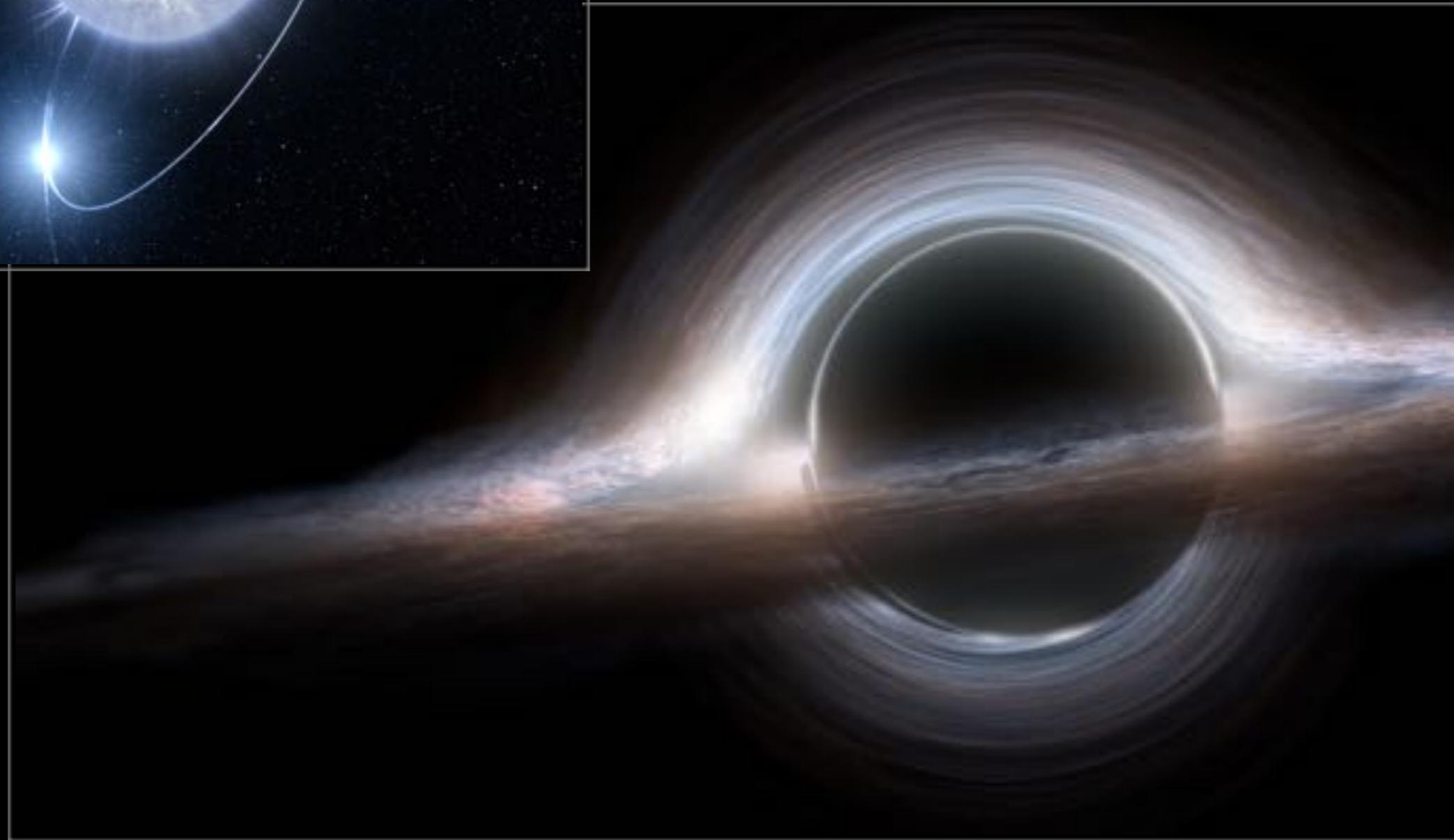
Silicium / soufre

G292.0+1.8

Cadavres stellaires



Étoile à neutrons
(si $< 30 M_{\odot}$)



Trou noir
(si $> 30 M_{\odot}$)

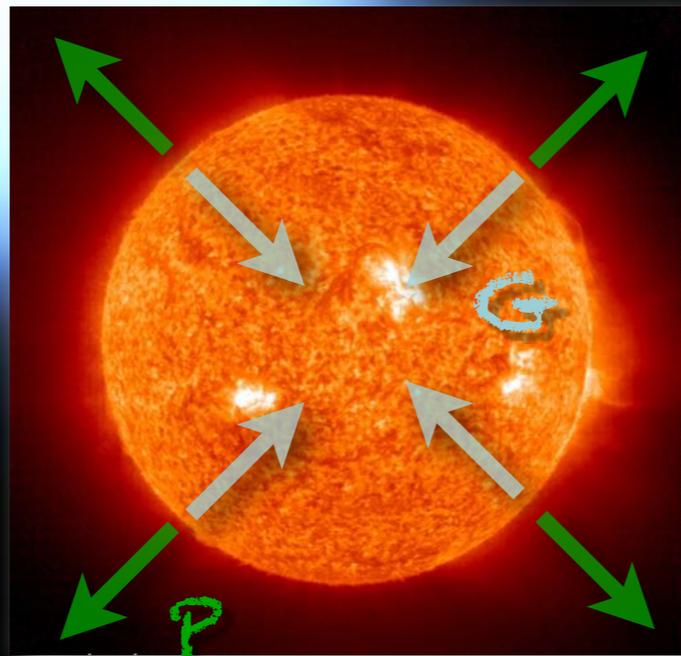
Naine blanche... et après?

- Résidu du coeur de l'étoile (de faible masse)
- À peu près la taille de la Terre
- Riche en carbone (et oxygène)
- Extrêmement dense!
 - (1 tonne/cm³)
- Pas de réactions nucléaires...
 - ➔ ...sauf si accompagnée!



Naine blanche... et après?

- Résidu du coeur de l'étoile (de faible masse)
- À peu près la taille de la Terre
- Riche en carbone (et oxygène)
- Extrêmement dense!
 - (1 tonne/cm³)
- Pas de réactions nucléaires...
 - ➔ ...sauf si accompagnée!



≠

Pression ne
dépend PAS
de température
!!!

Naine blanche... et après?

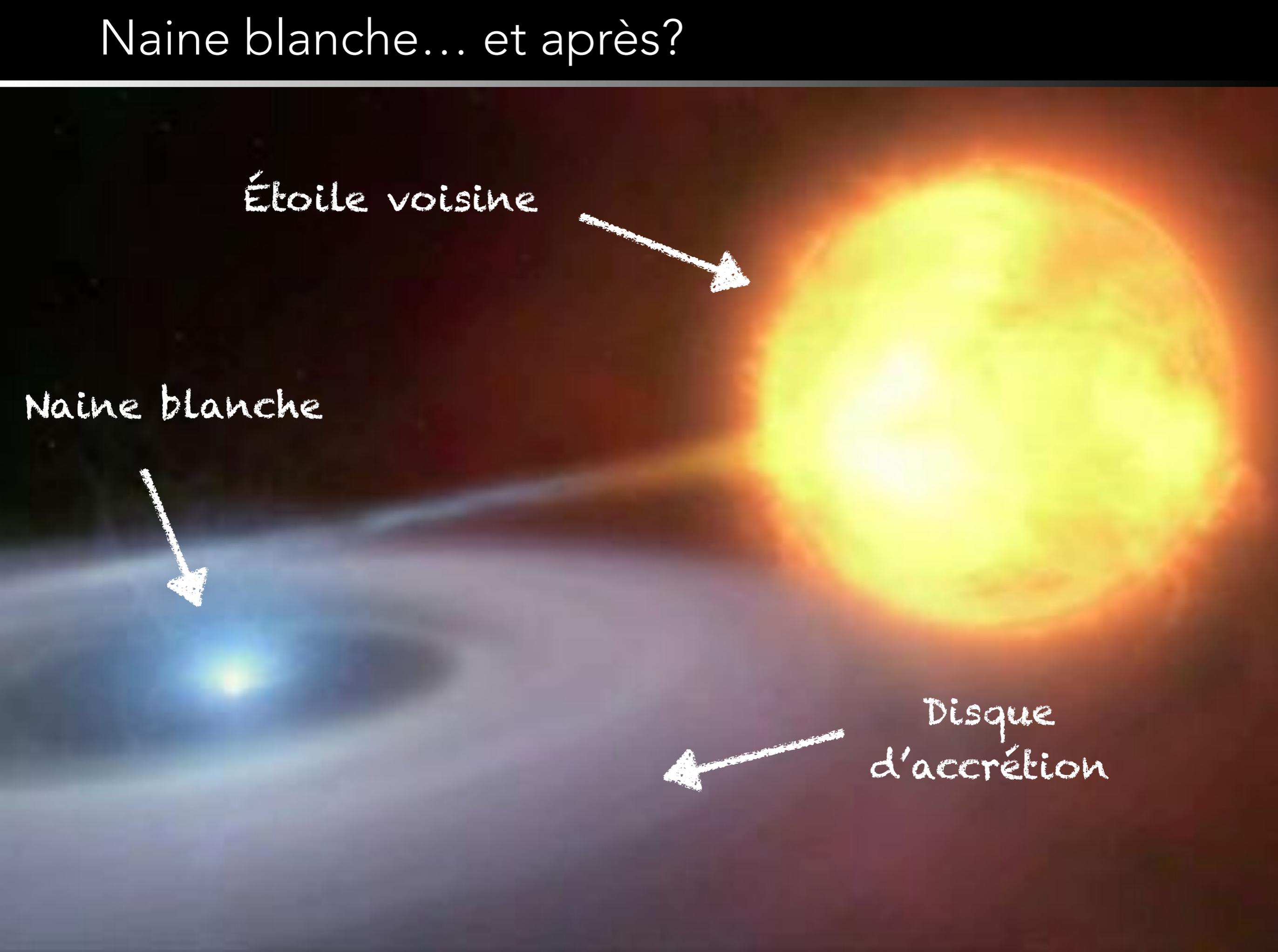
Étoile voisine



Naine blanche



Disque
d'accrétion

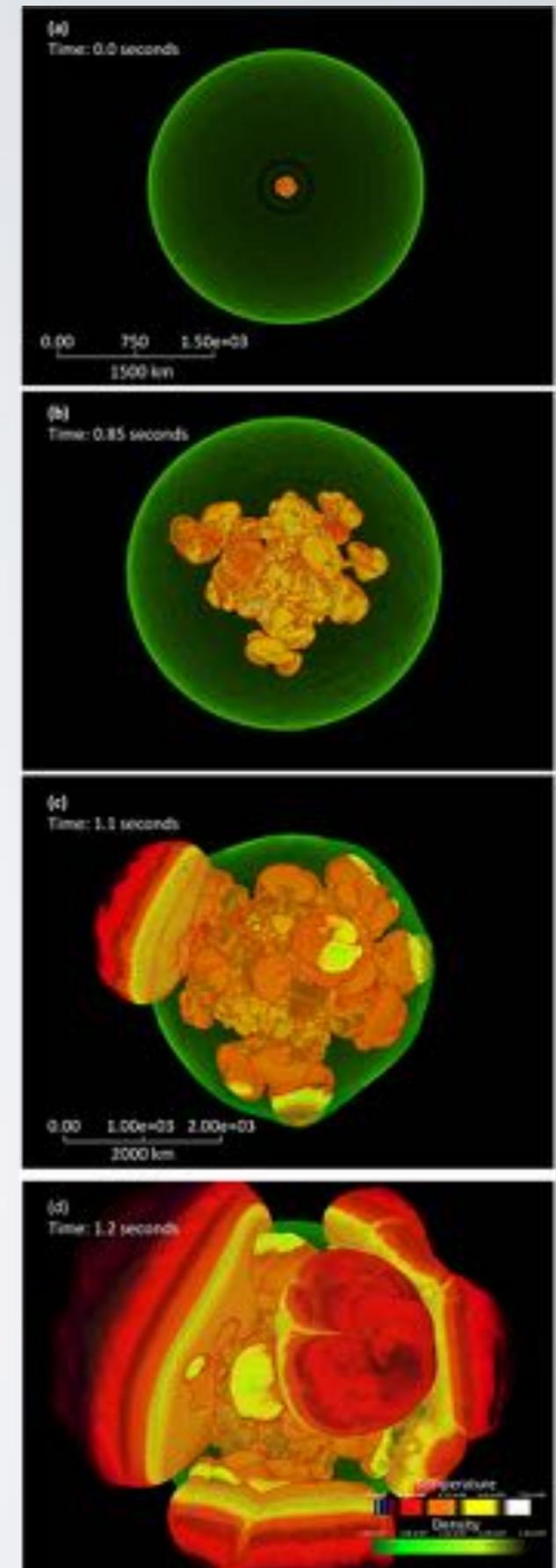


Naine blanche... et après?

- Lorsque la naine blanche atteint $1,4 M_{\odot}$, sa température est trop élevée, le carbone fusionne...
- ...mais de manière explosive!
- Idem pour pleins d'autres éléments (même au delà du fer!)
- La naine blanche explose et se désintègre complètement
 - Pas d'étoile à neutrons ou de trou noir

Si S Ar Ca Cr Mn Fe Ni

Supernova
de Type Ia



Supernovae de Type Ia



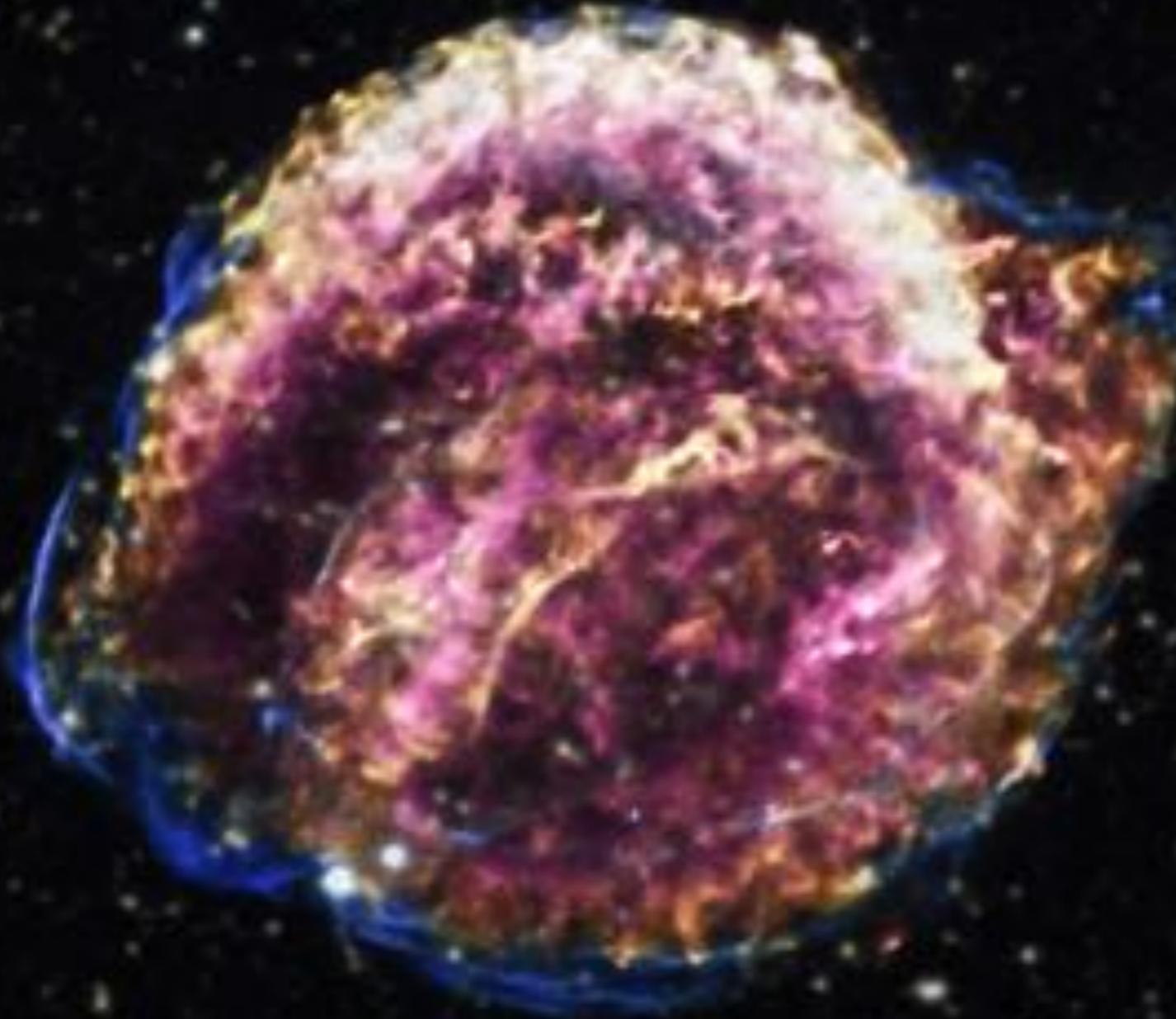
SN 1752
(Supernova de Tycho)

Supernovae de Type Ia



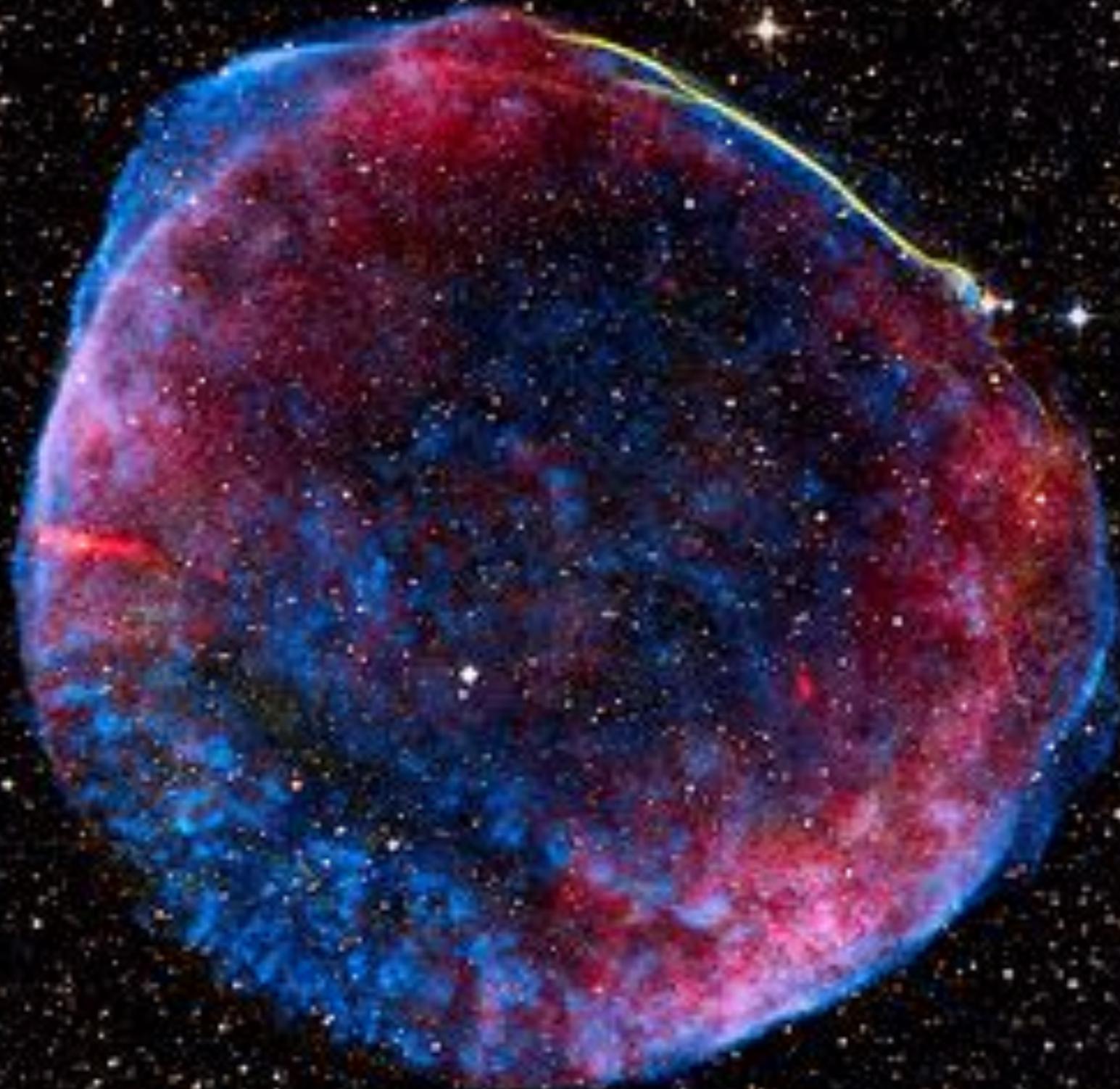
G299.2-2.9

Supernovae de Type Ia



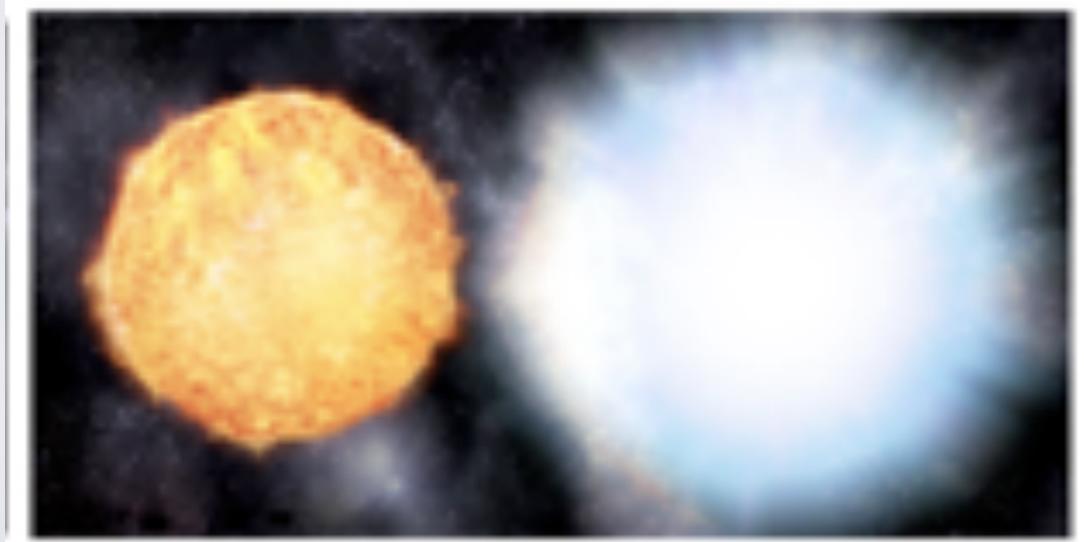
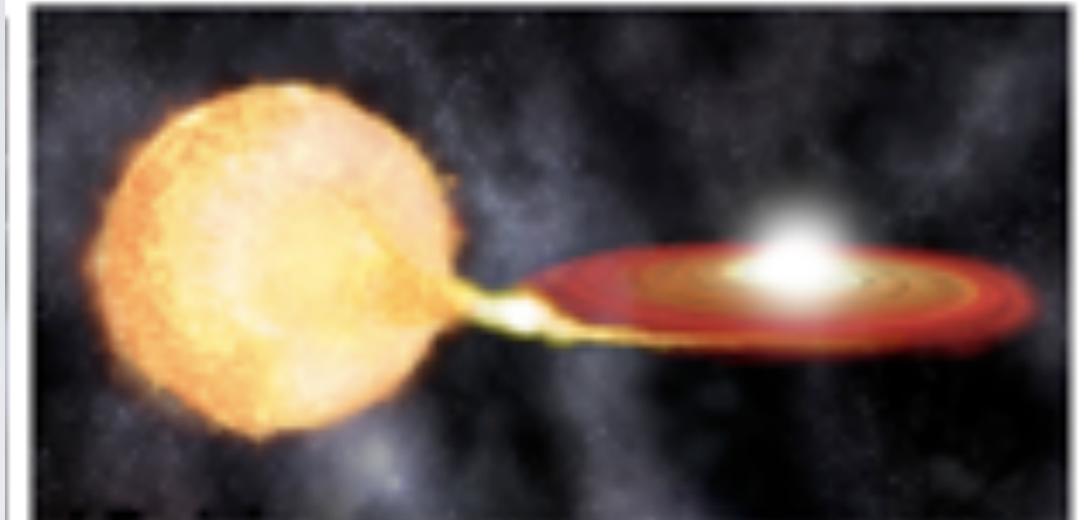
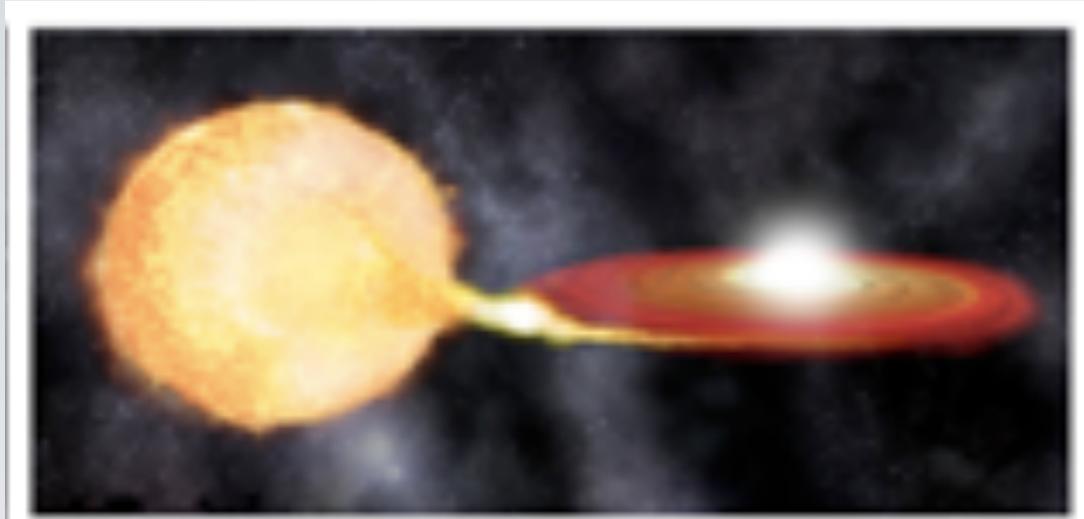
SN 1604
(Supernova de Kepler)

Supernovae de Type Ia

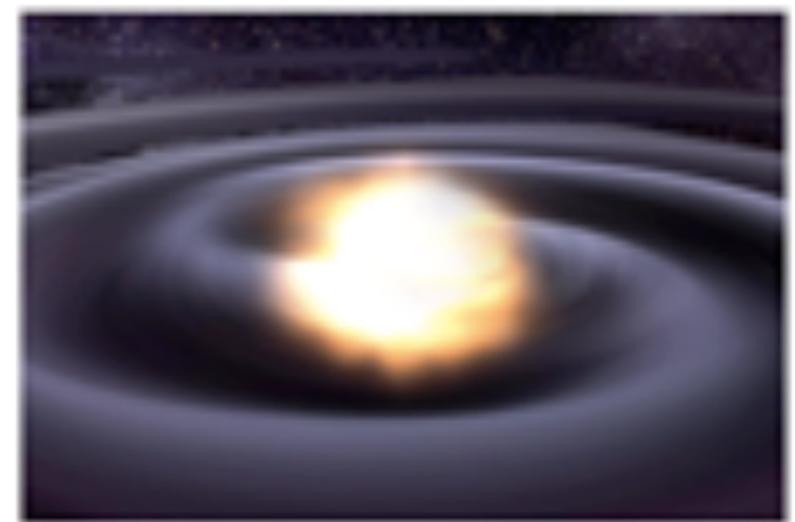
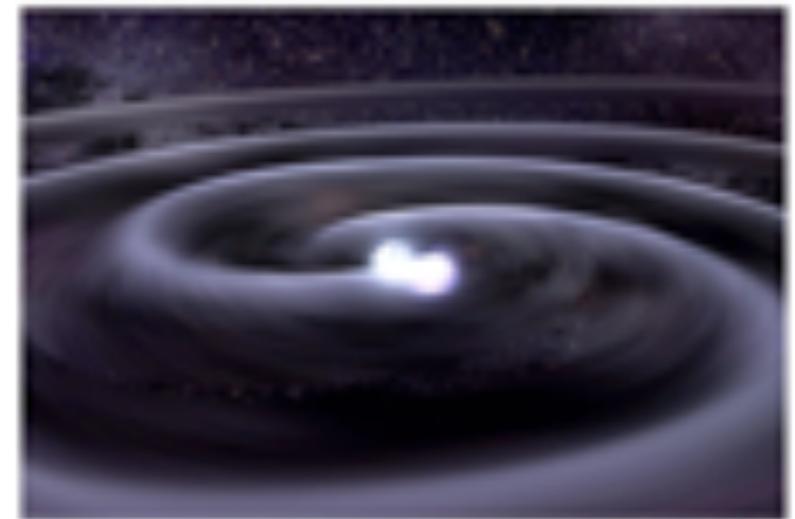
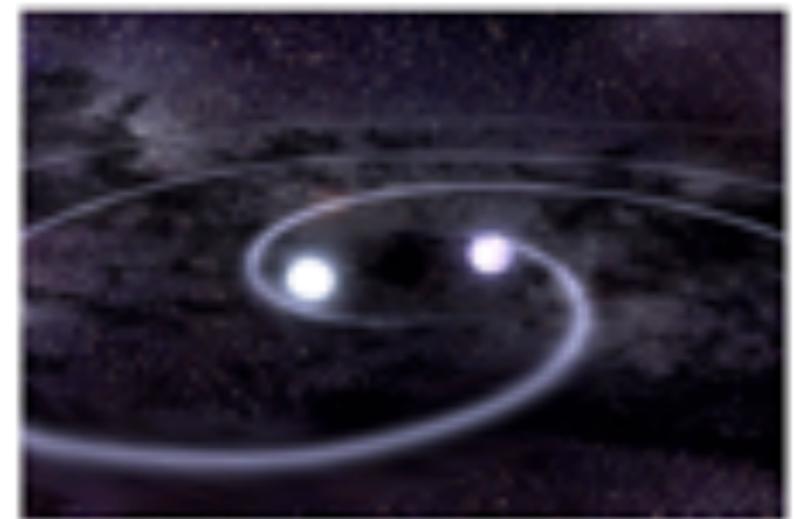


SN 1006

Supernovae de Type Ia: quelle origine?

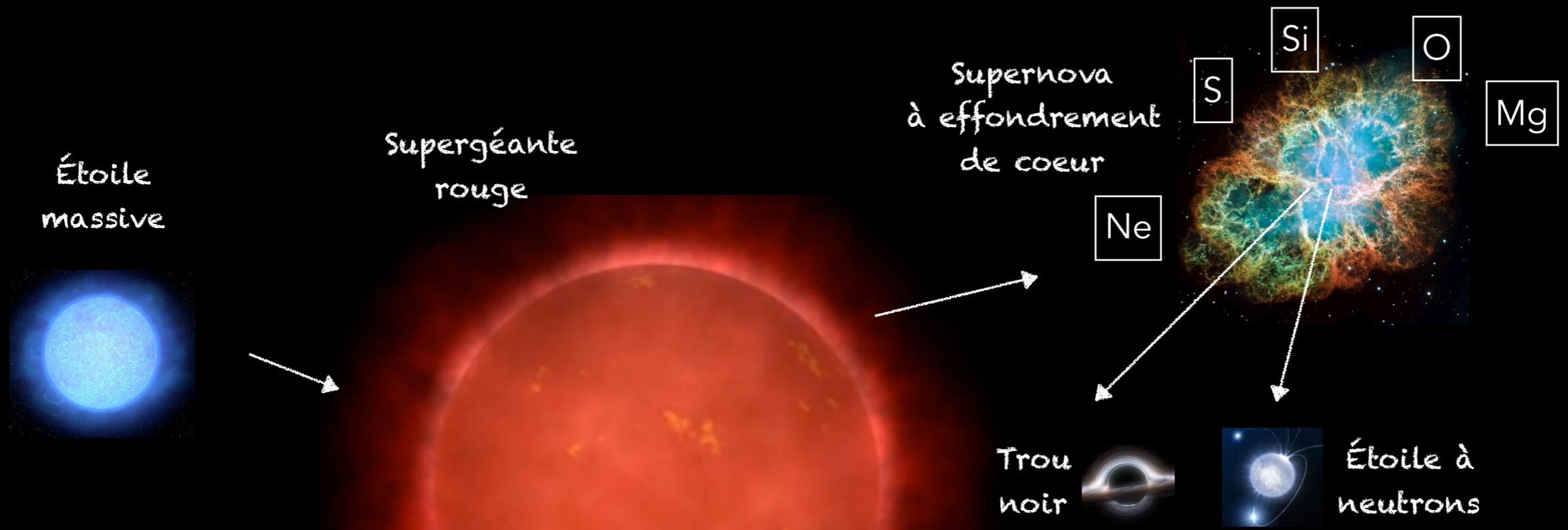
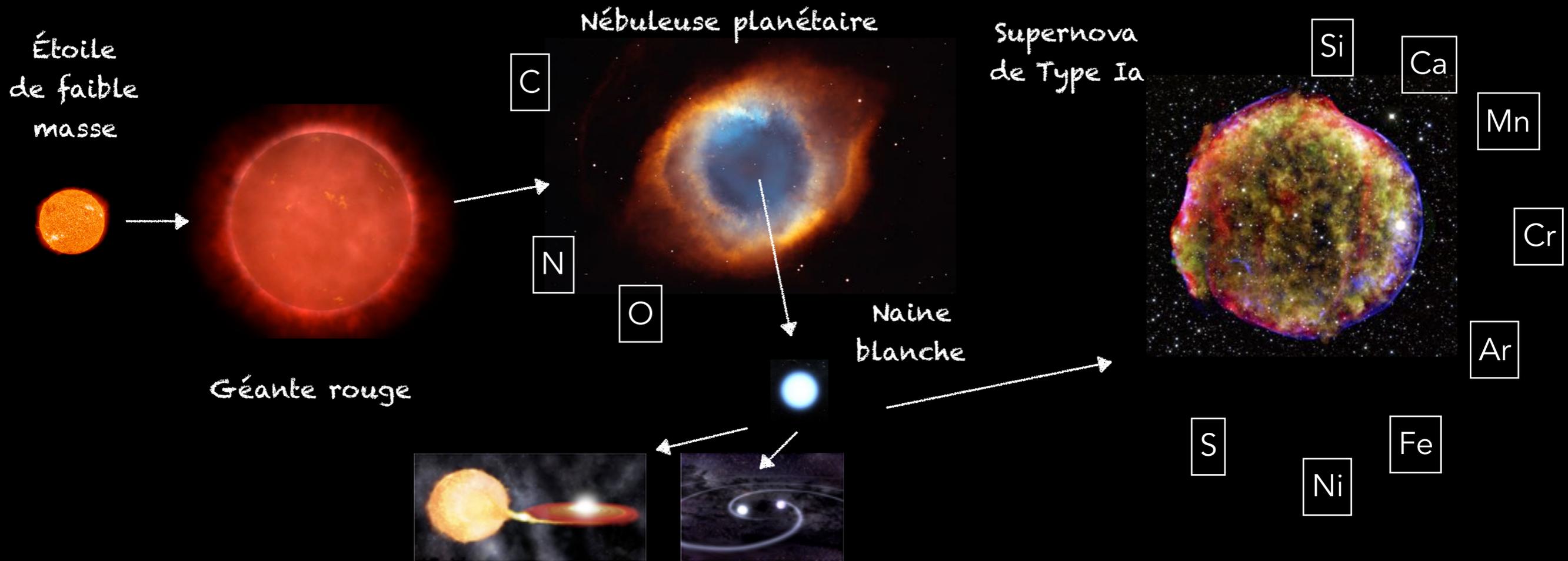


Accrétion de matière d'une étoile voisine...?



...ou collision de 2 naines blanches?

Résumé jusqu'ici...



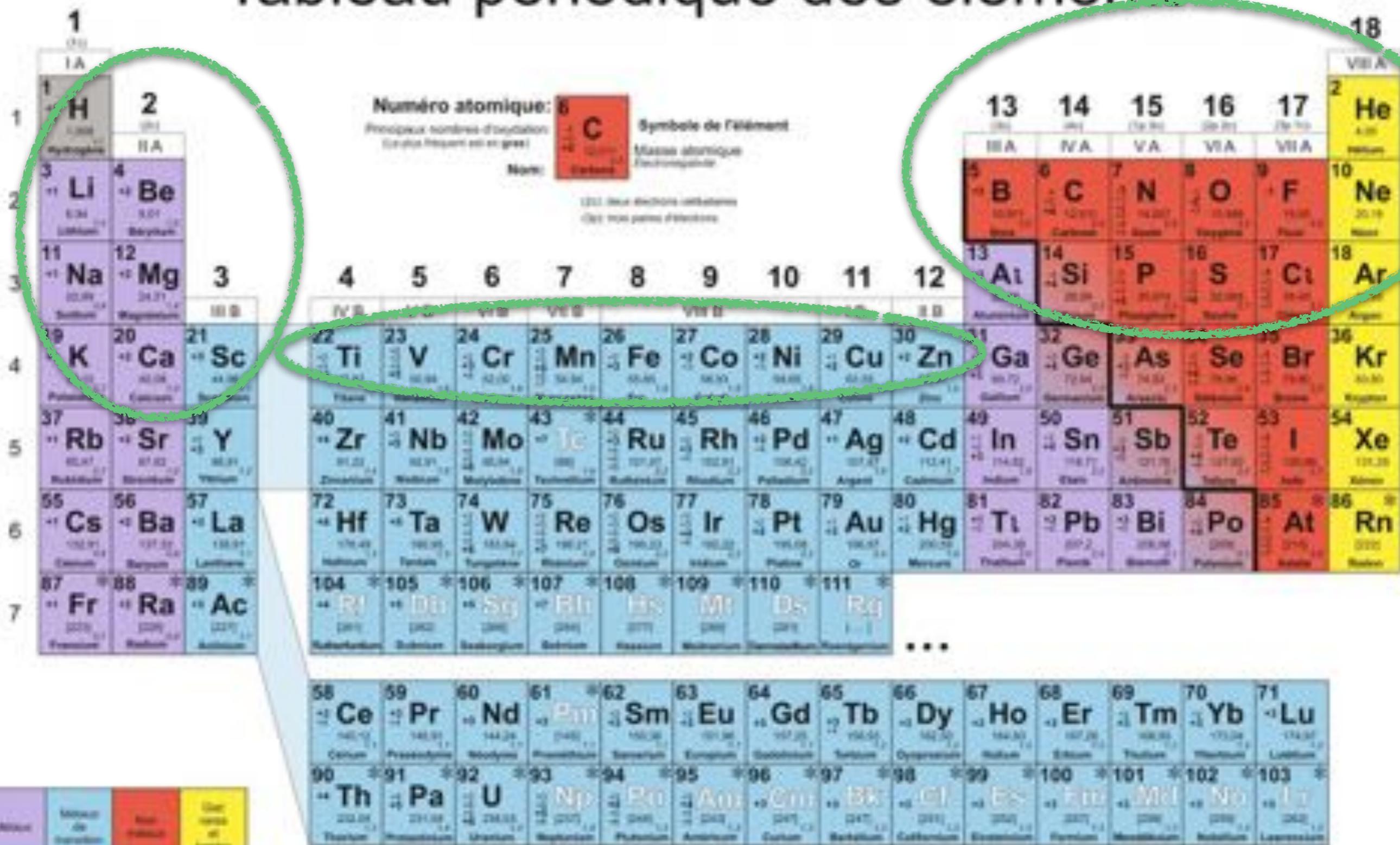


Nous sommes tous des poussières d'étoiles!



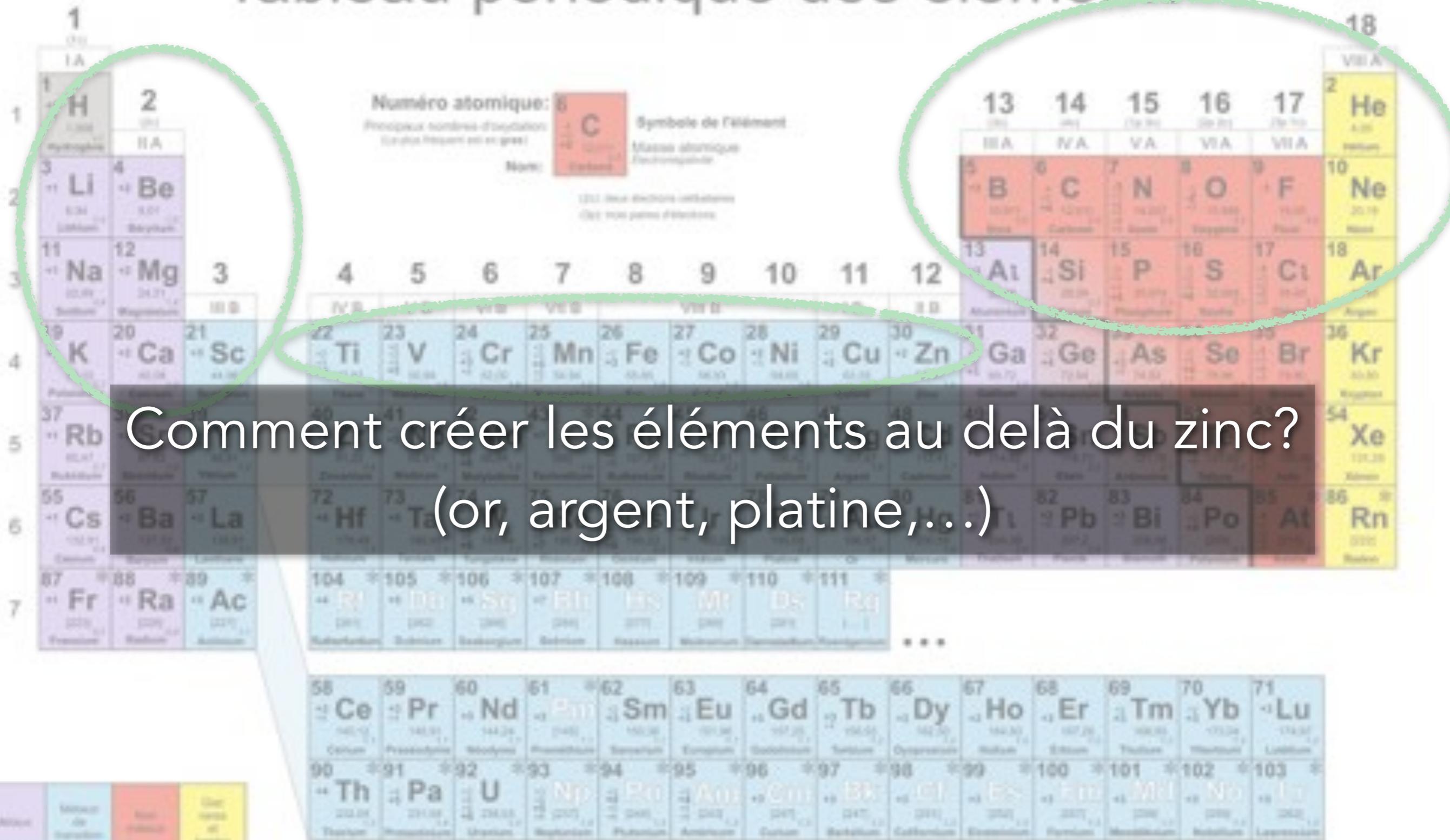
Et les éléments très lourds?

Tableau périodique des éléments



Et les éléments très lourds?

Tableau périodique des éléments



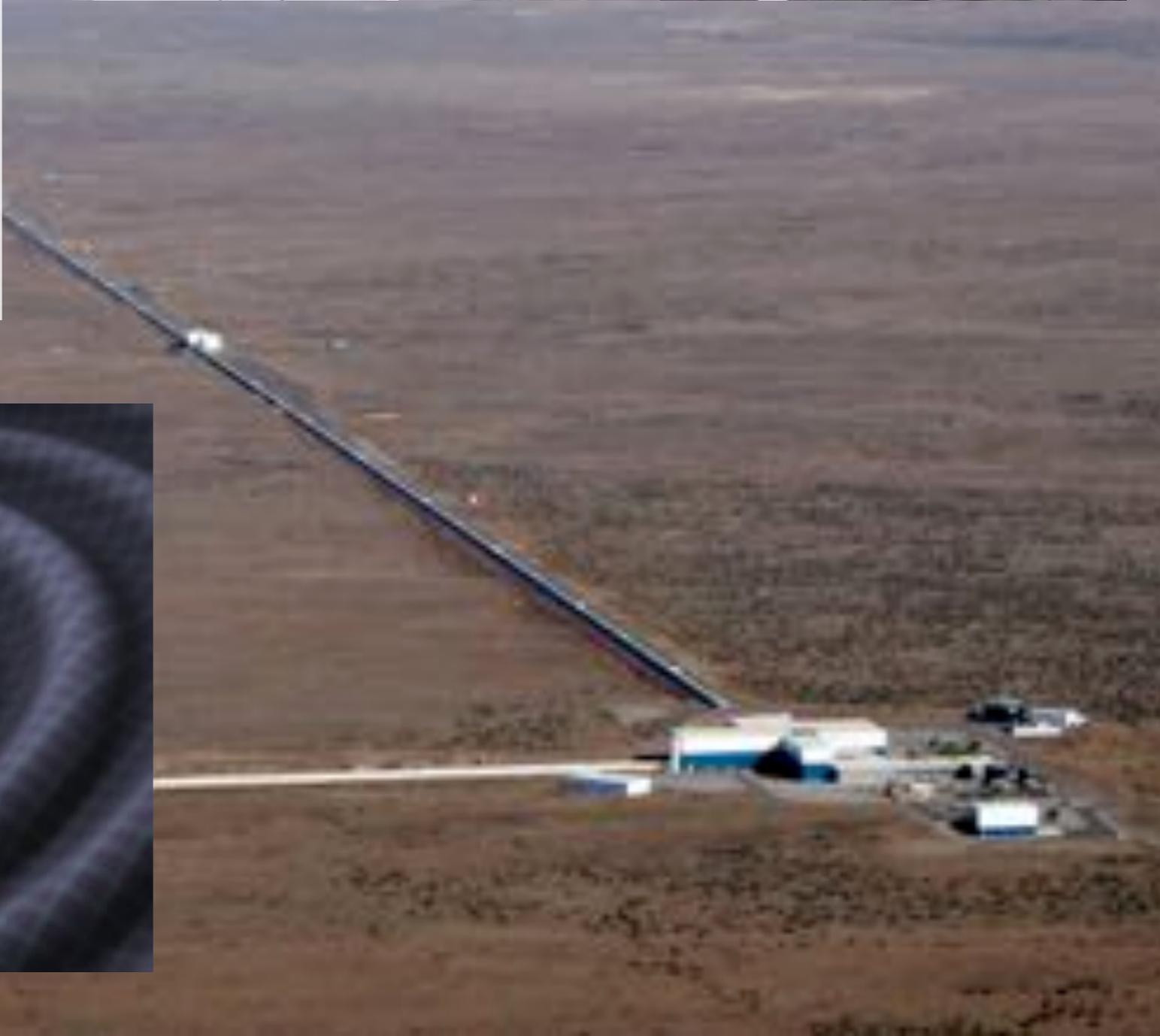
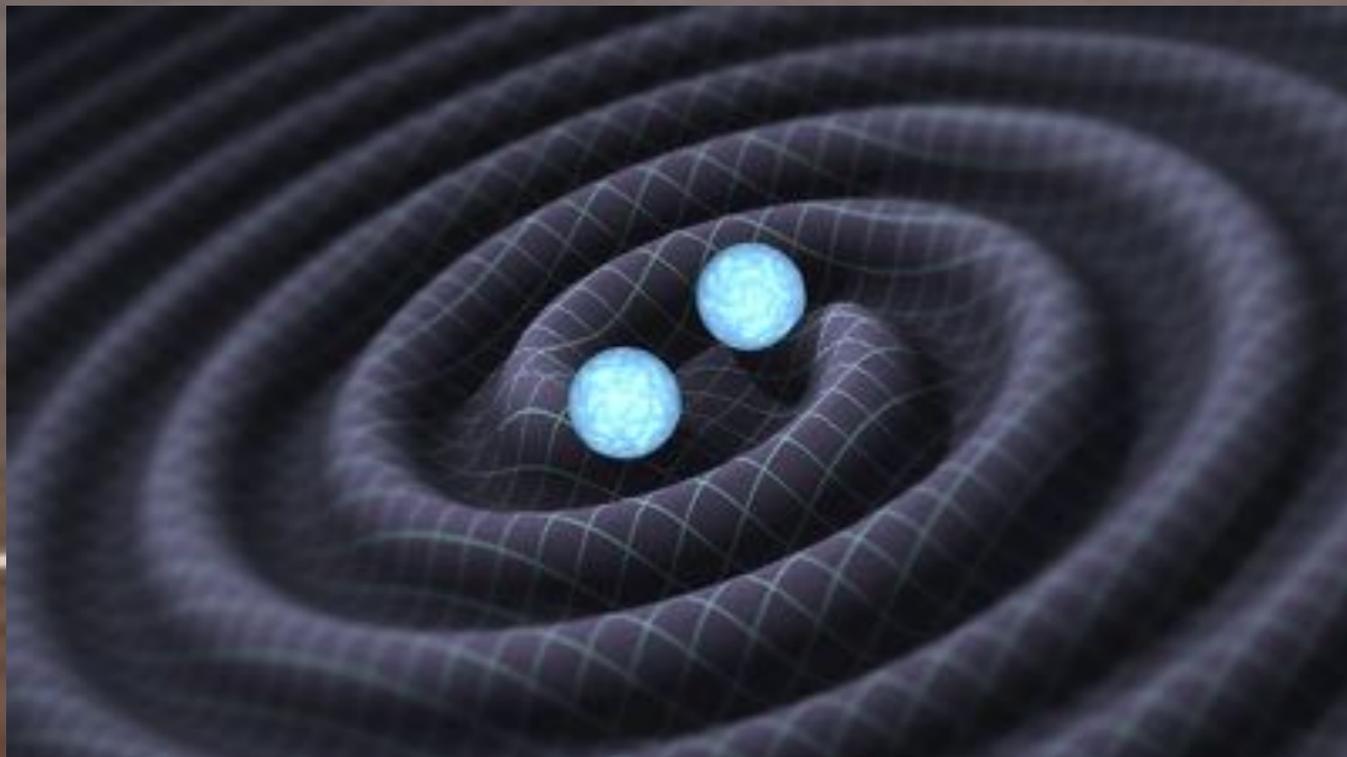
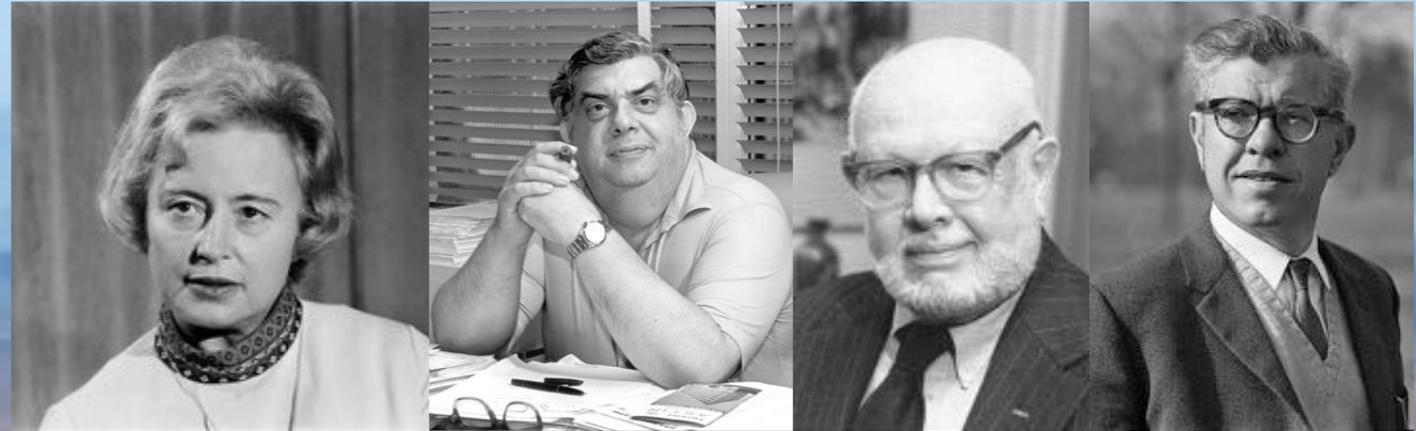
Legend for element categories:

- Métal (purple)
- Métal de transition (blue)
- Non-métal (red)
- Gaz noble et hélium (yellow)

* Signifie élément radioactif (instable)

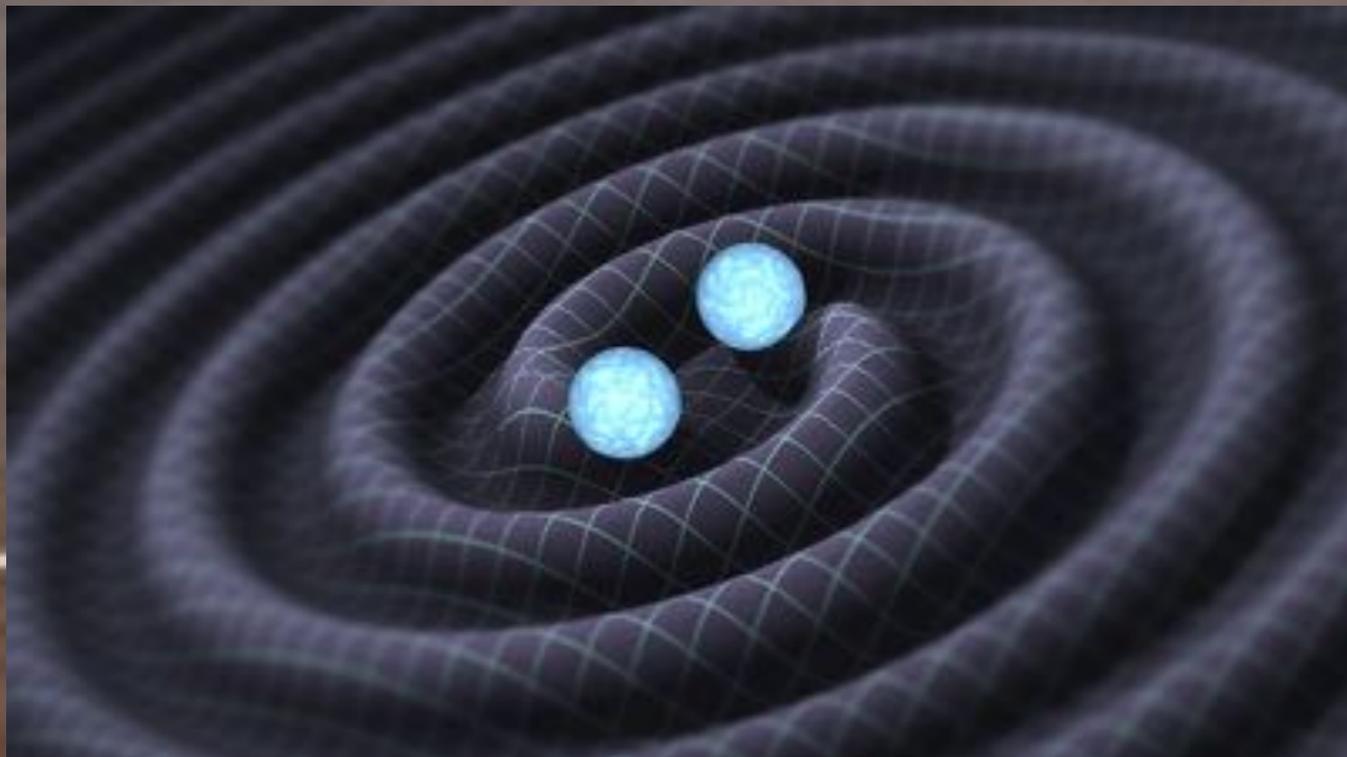
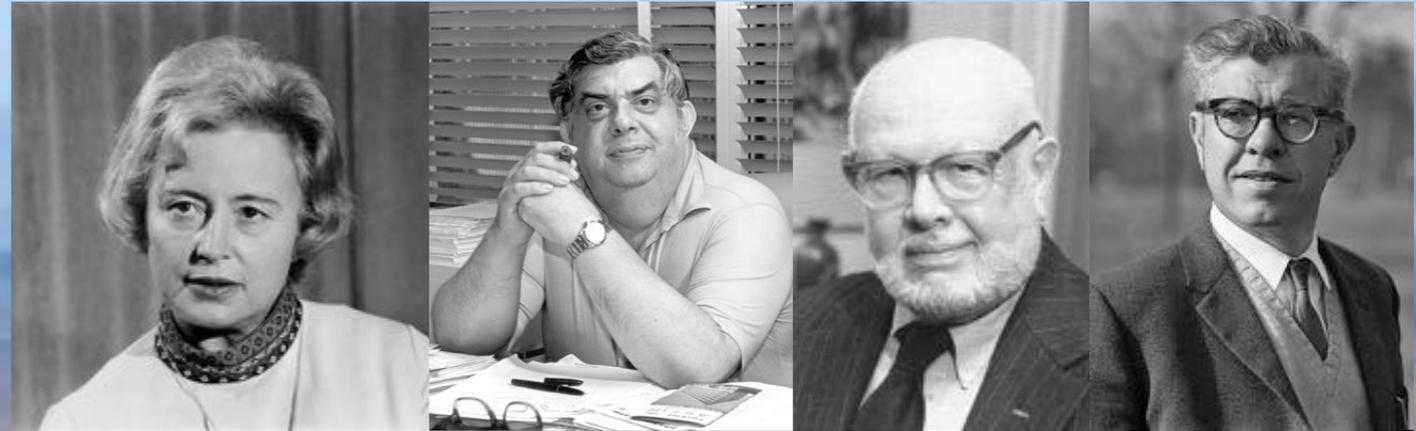
Et les éléments très lourds?

- Doivent être forgés par des événements encore plus énergétiques que les supernovae...
- Collision de deux étoiles à neutrons?
- 2017: LIGO
 - Des atomes d'or ont été formellement détectés!



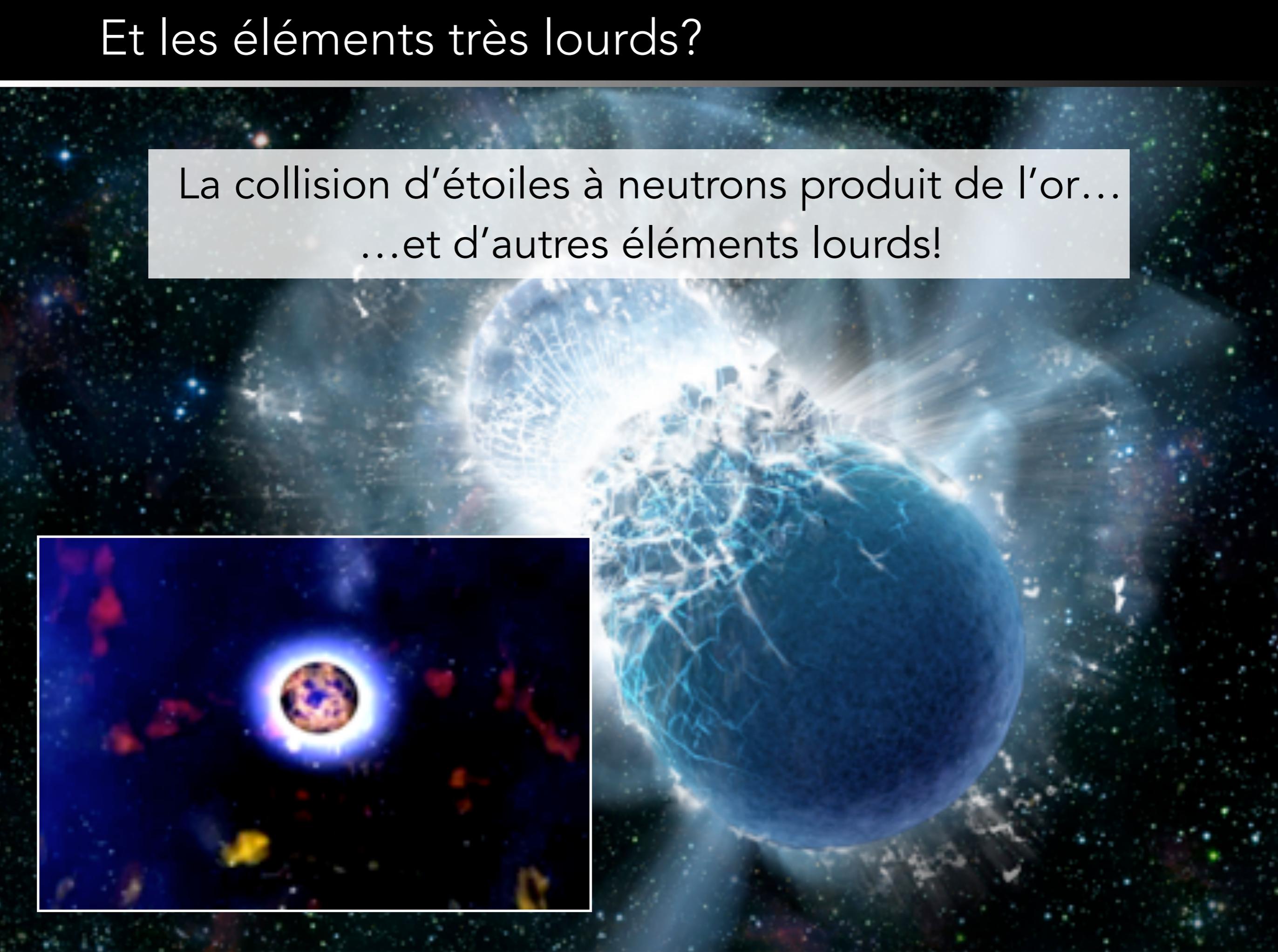
Et les éléments très lourds?

- Doivent être forgés par des événements encore plus énergétiques que les supernovae...
- Collision de deux étoiles à neutrons?
- 2017: LIGO
 - Des atomes d'or ont été formellement détectés!



Et les éléments très lourds?

La collision d'étoiles à neutrons produit de l'or...
...et d'autres éléments lourds!

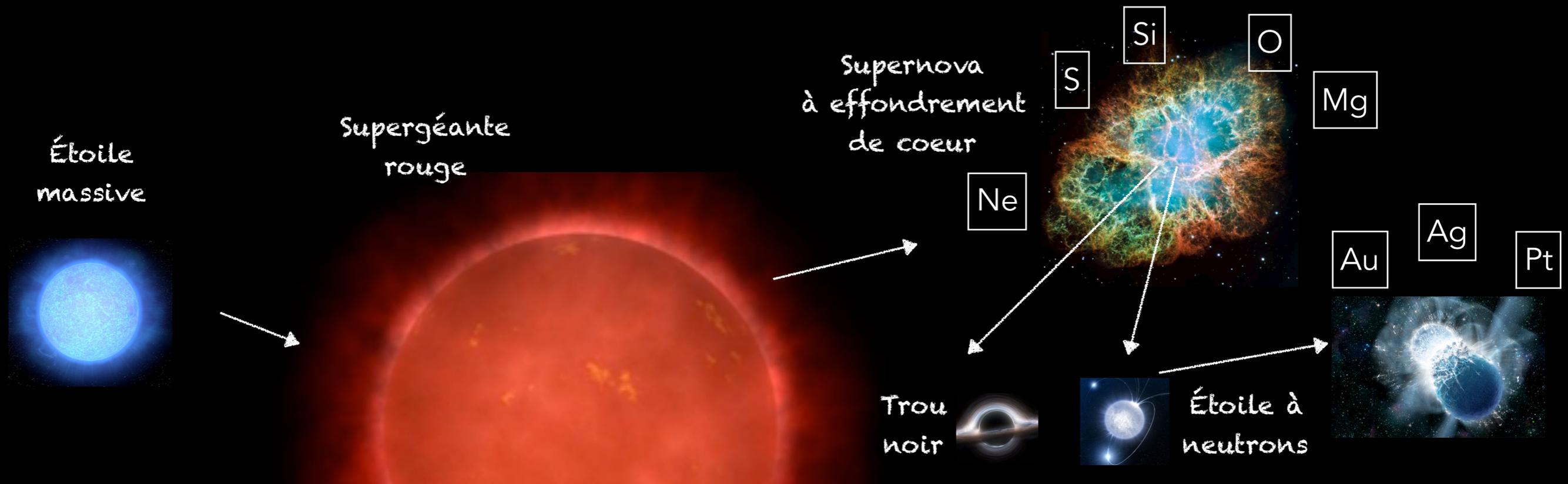
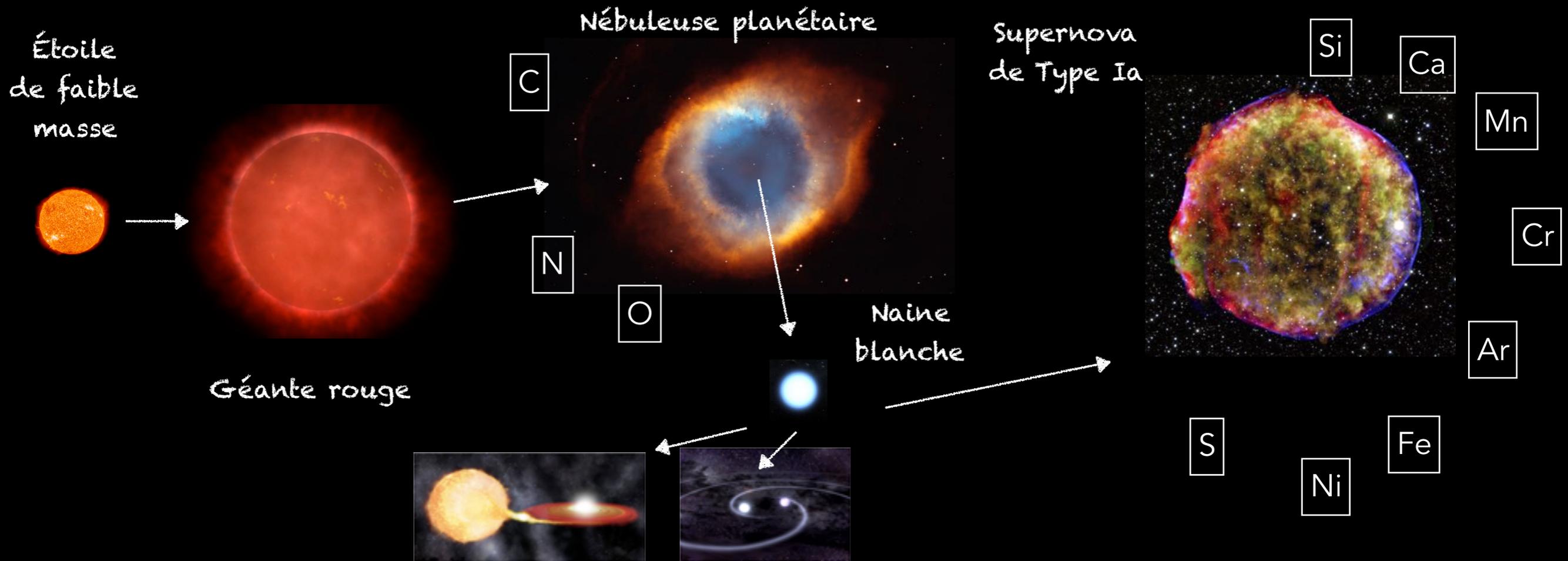


Et les éléments très lourds?

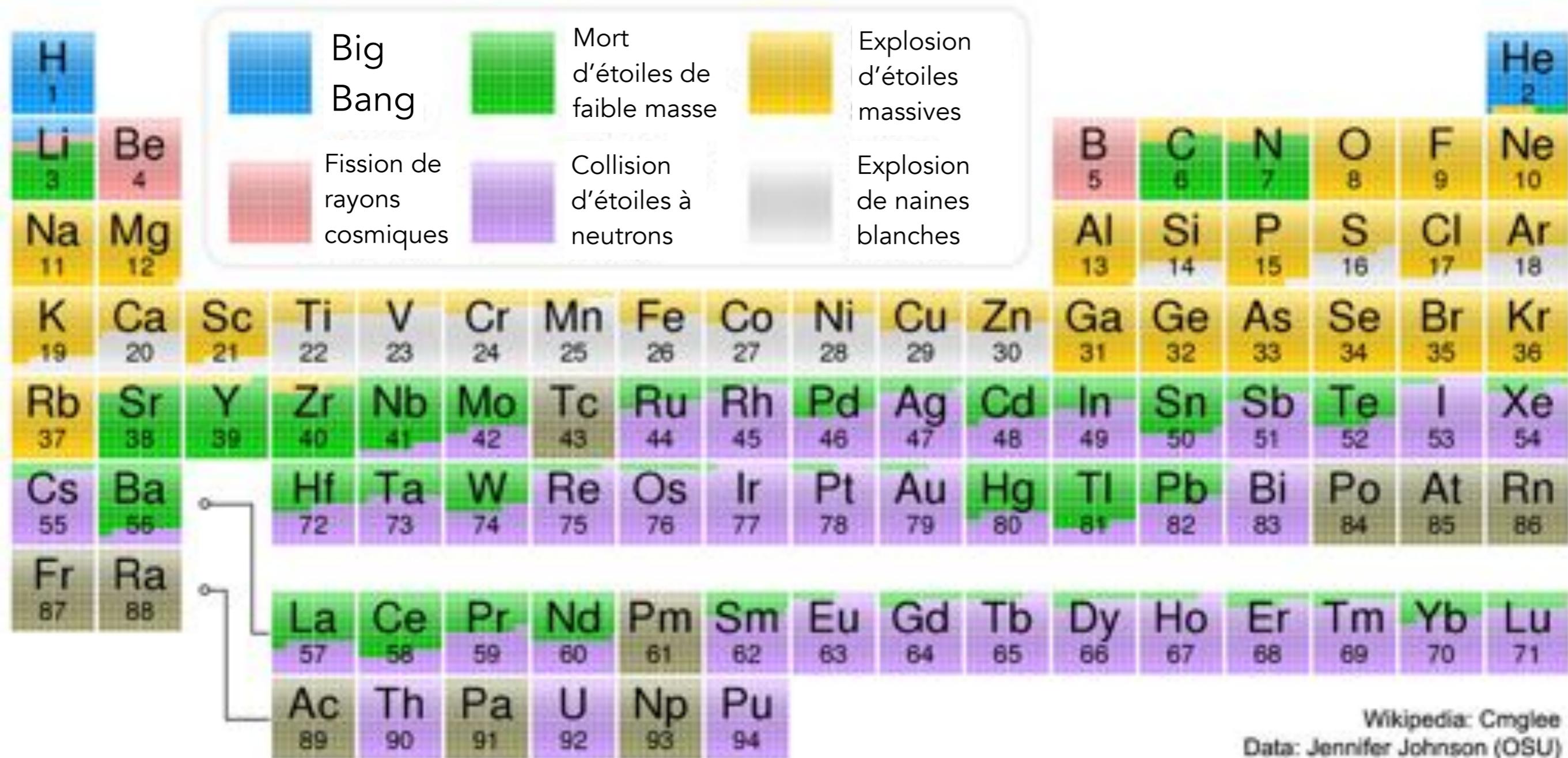
La collision d'étoiles à neutrons produit de l'or...
...et d'autres éléments lourds!



Résumé complet



Résumé complet



Nous sommes des produits d'étoiles
et de supernovae!

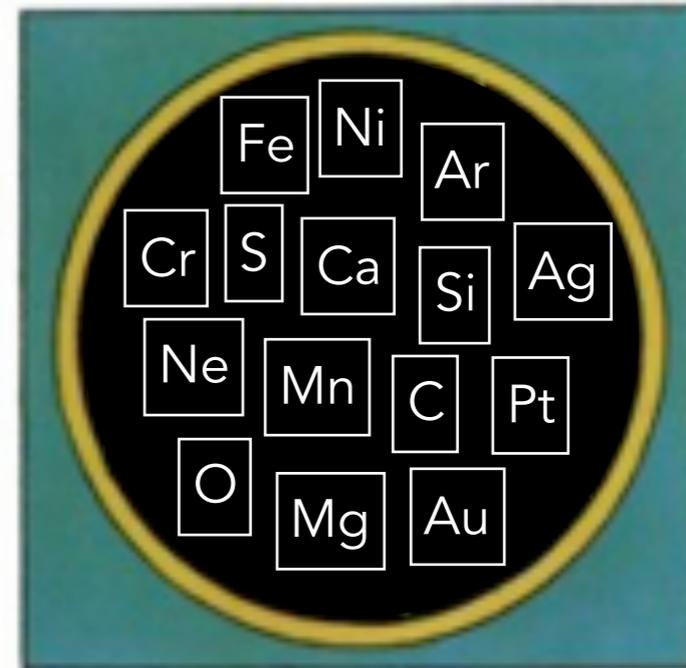
L'enrichissement chimique de l'Univers

L'enrichissement chimique de l'Univers



L'enrichissement chimique de l'Univers

Où (dans l'Univers) trouve-t-on des éléments chimiques plus lourds que l'hélium?



Où trouve-t-on des "métaux"?

1) Dans les étoiles



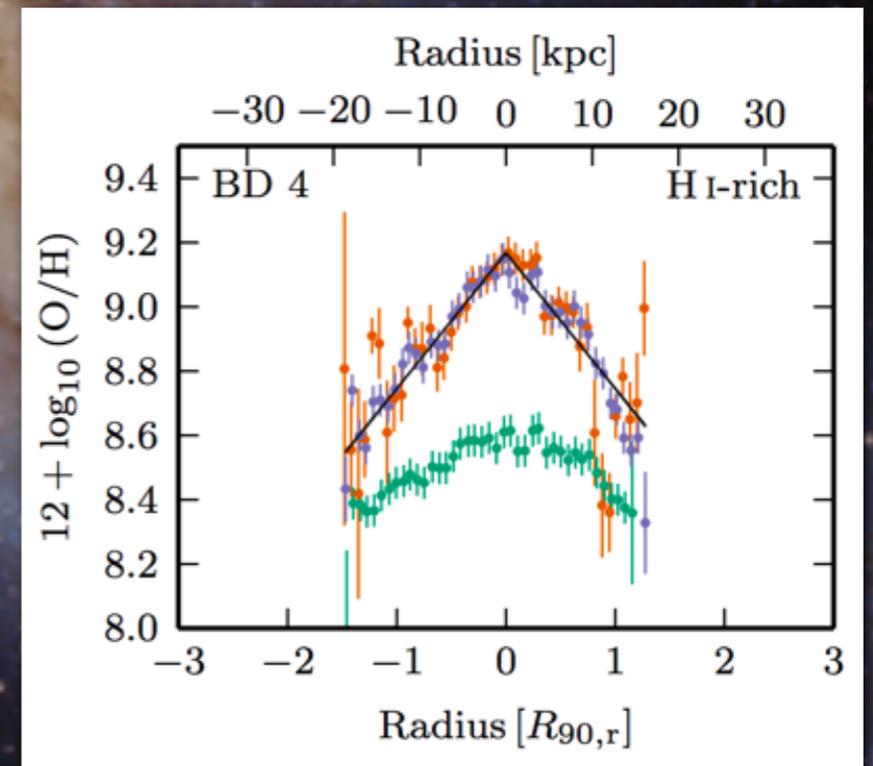
Où trouve-t-on des "métaux"?

2) Dans le gaz interstellaire



Où trouve-t-on des "métaux"?

3) Dans les galaxies proches (étoiles + gaz)



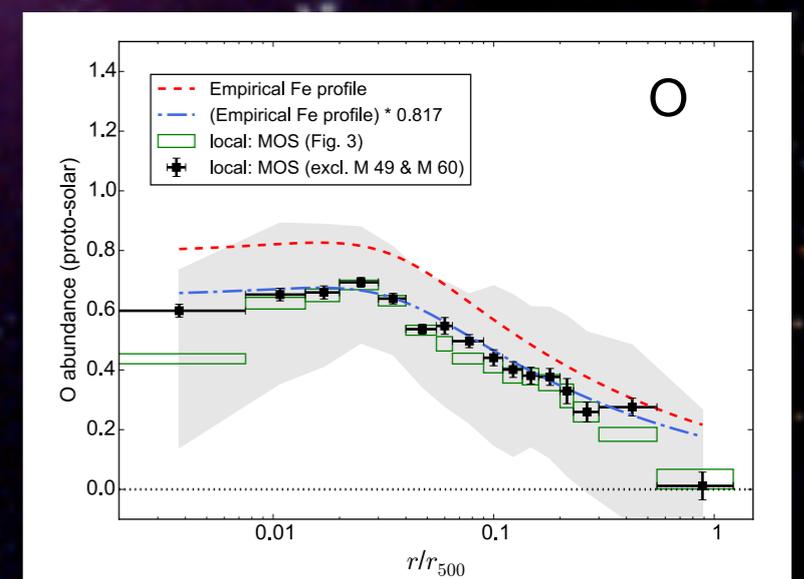
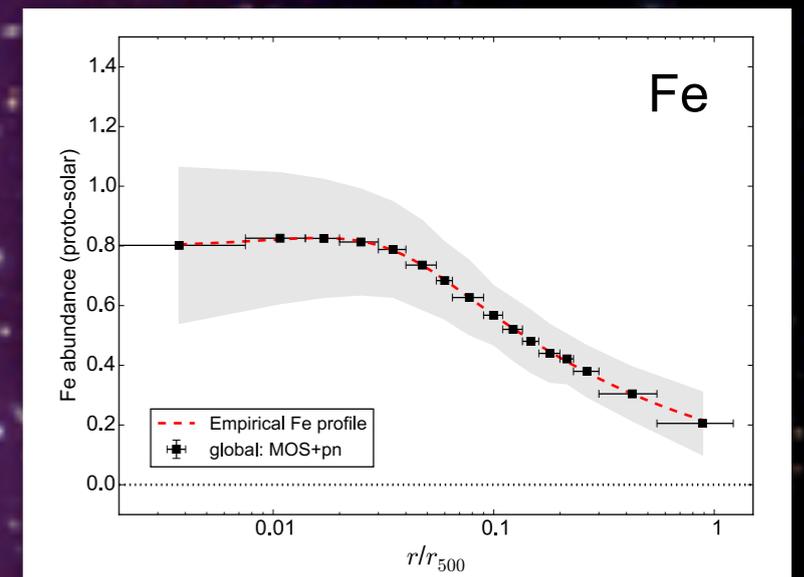
Où trouve-t-on des "métaux"?

4) Dans les galaxies très lointaines (surprenant!)



Où trouve-t-on des "métaux"?

4) Dans le gaz intergalactique et les amas de galaxies (surprenant!)



Conclusions

- 📌 Les éléments chimiques se retrouvent partout dans l'Univers
- 📌 L'hydrogène (et la plupart de l'hélium) a été créé juste après le Big Bang
- 📌 Tous les autres éléments sont créés:
 - 📌 Soit dans les **étoiles en fin de vie**,
 - 📌 Soit dans les explosions d'étoiles massives (**supernovae à effondrement de coeur**)
 - 📌 Soit dans les explosions de naines blanches (**supernovae de Type Ia**)
 - 📌 Soit dans les **collisions d'étoiles à neutrons**
- 📌 Sans les étoiles et supernovae, la vie sur Terre ne serait jamais apparue!
- 📌 Nous sommes tous des poussières d'étoiles...
- 📌 Restons humbles...