

Nucléosynthèse stellaire

François Mernier

Quelques “rappels”...

Le tableau périodique des éléments

Tableau périodique des éléments

The periodic table is a tabular arrangement of chemical elements, ordered by atomic number (Z). It consists of 18 groups (vertical columns) and 7 periods (horizontal rows). The table uses color coding to categorize elements:

- Métal**: Elements in Groups 1, 2, and 13-18.
- Métal de transition**: Elements in Groups 3-12.
- Non métal**: Elements in Groups 13-17.
- Gazole et halogène**: Elements in Group 18.

Numéro atomique: 6

Principaux nombres d'oxydation
(les plus fréquents sont en gras)

Symbol de l'élément

Masses atomiques
(approximatives)

Nom: C

Electrons valentielles
(des trois premiers d'électrons)

13 14 15 16 17 18

13	14	15	16	17	18
IA	IIA	VA	VIA	VIIA	VIIA
B	C	N	O	F	He
Al	Si	P	S	Cl	Ne
Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
Cu	Ge	As	Se	I	Kr
Ni	In	Cd	Tl	Te	Xe
Fe	Ru	Pd	Pt	Pb	At
Cr	Mo	Rh	Au	Bi	Rn
Mn	Ta	Re	Hg	Po	
Ti	W	Os	Tl		
Sc	Ir	Ir	Pb		
K	Pt	Pt			
Ca					
Rb					
Sr					
Y					
Cs					
Ba					
La					
Fr					
Ra					
Ac					

... • • •

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
140.1	141.0	144.2	144.9	144.9	151.9	157.3	158.3	159.3	164.9	167.3	169.9	173.0	174.9
Terre	Présentation	Terre	Présentation	Terre	Terre	Terre	Terre	Terre	Terre	Terre	Terre	Terre	Terre
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Au	Cm	Bk	Cf	Bf	Cf	Mf	Nf	Lf
232.0	231.0	234.0	237.0	239.0	243.0	247.0	247.0	247.0	247.0	247.0	249.0	250.0	252.0
Thorium	Présentation	Uranium	Présentation	Plutonium	Américium	Curium	Berkélium	Caldémium	Berkélium	Caldémium	Méridium	Neptunium	Lanthanide

* Pour les éléments radioactifs (instables)

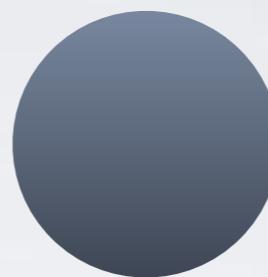
Particules et atomes



Proton

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

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



Neutron

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

0 C
 $= \text{charge "0"}$

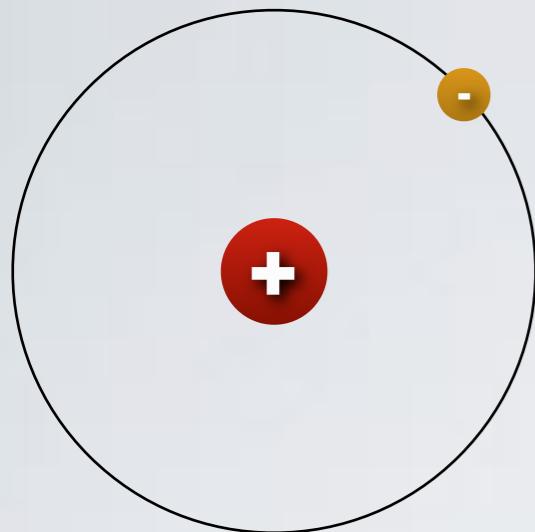


Électron

$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
 $= 0,0005 \text{ u}$

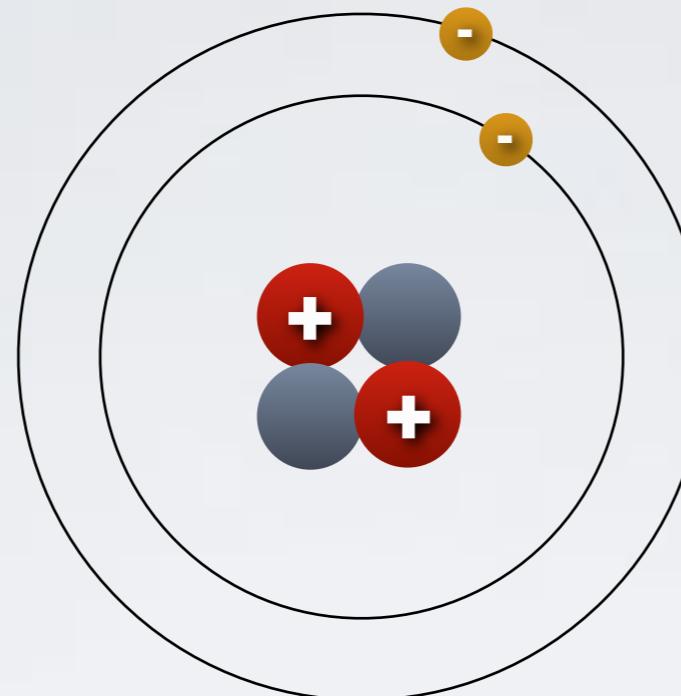
$-1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
 $= \text{charge "-1"}$

Particules et atomes



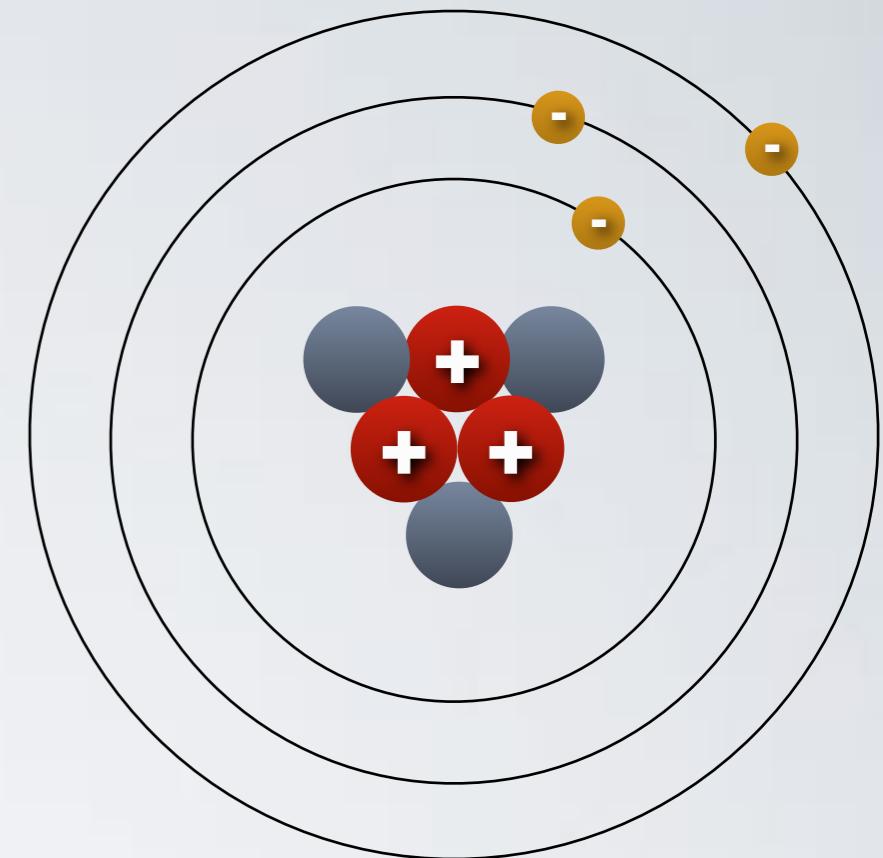
Hydrogène

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...

0,000000000
00000000000
00000000000
000000000001

1

1. La gravitation



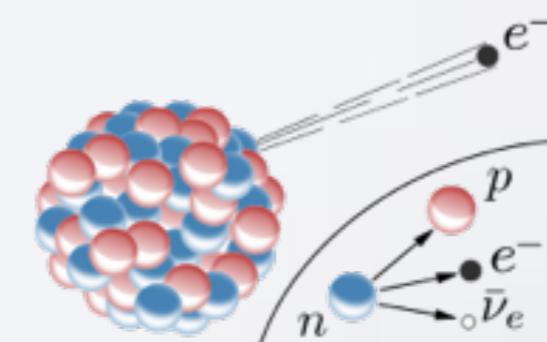
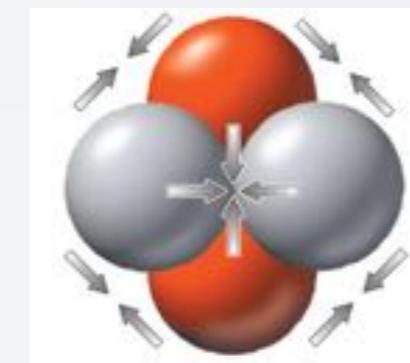
60

2. La force électromagnétique

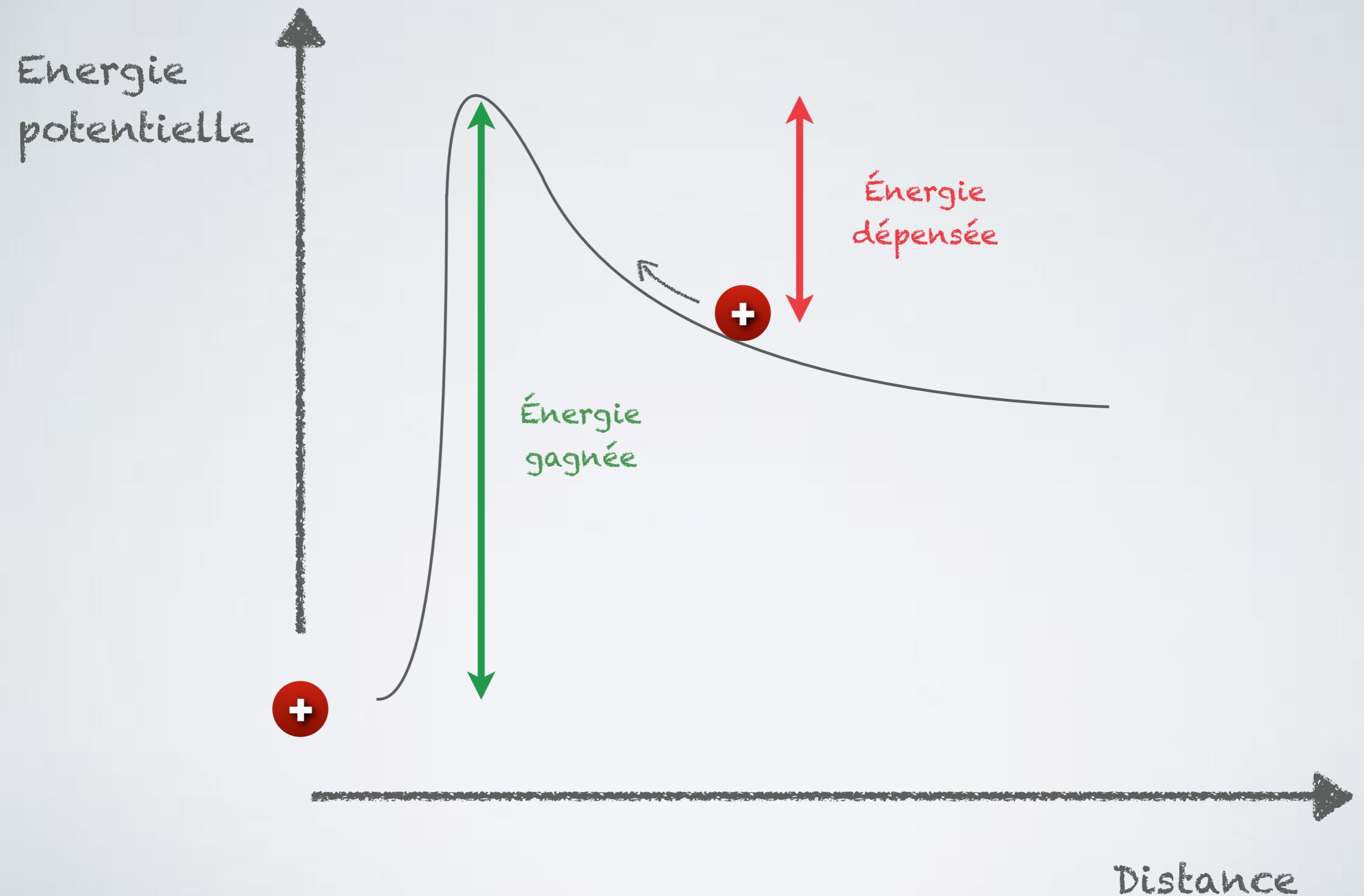


0,0001

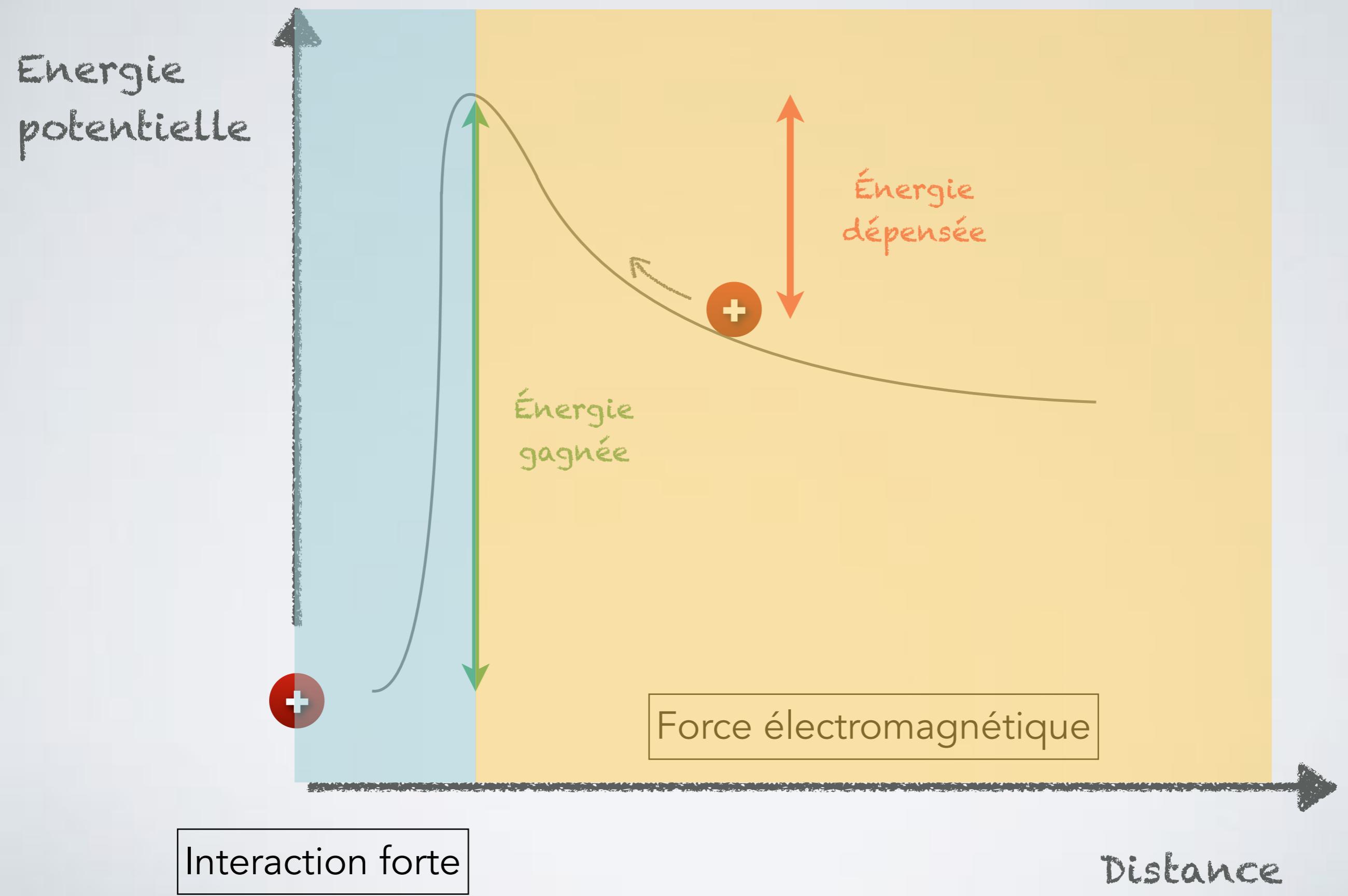
3. L'interaction forte



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**...

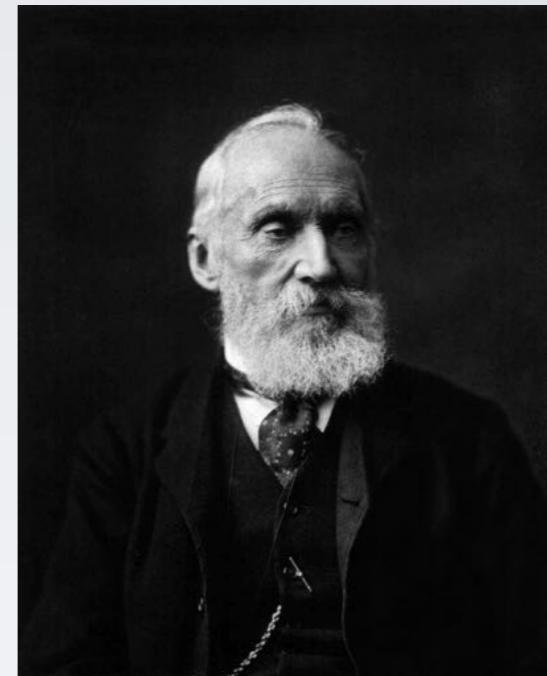
D'où les étoiles tirent-elles leur énergie?

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!

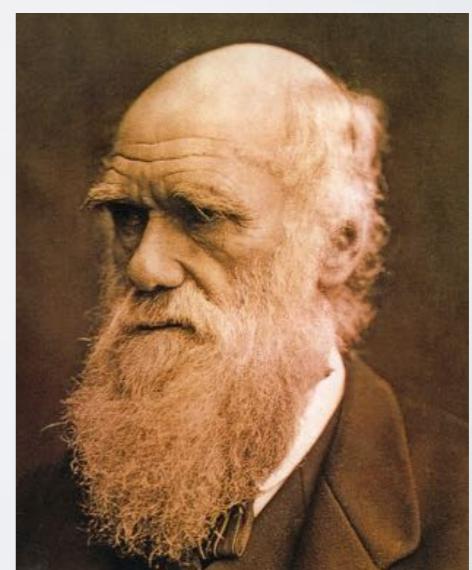


- Contraction gravifique?

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

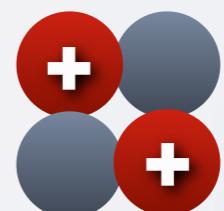
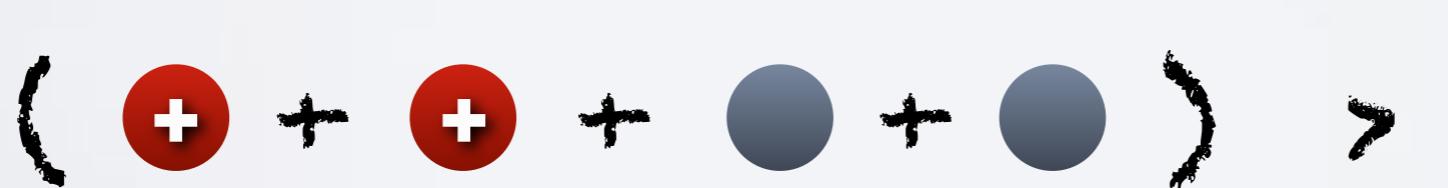
- Fin du XIXe siècle: les géologues estiment l'âge de la Terre

→ 700 millions d'années



Source d'énergie des étoiles?

- Masse d'1 atome d'hydrogène = $1,67 \times 10^{-27}$ kg
→ Masse de 4 atomes d'hydrogène = ?
- Masse d'1 atome d'hélium = $6,65 \times 10^{-27}$ kg
→ Déficit de masse (pour 1 atome d'hélium) = ?
- Vitesse de la lumière = 299 792 458 m/s
→ Gain d'énergie (pour 1 atome d'hélium) = ?
- Masse du Soleil = 2×10^{30} kg
→ Nombre d'atomes d'hydrogène dans le Soleil = ?
- Supposons qu'au cours de la vie du Soleil, 10% de ces atomes se transforment en hélium...
→ Énergie totale du Soleil = ?
- Puissance lumineuse du Soleil = 4×10^{26} W
→ Combien d'années le Soleil pourrait-il briller?



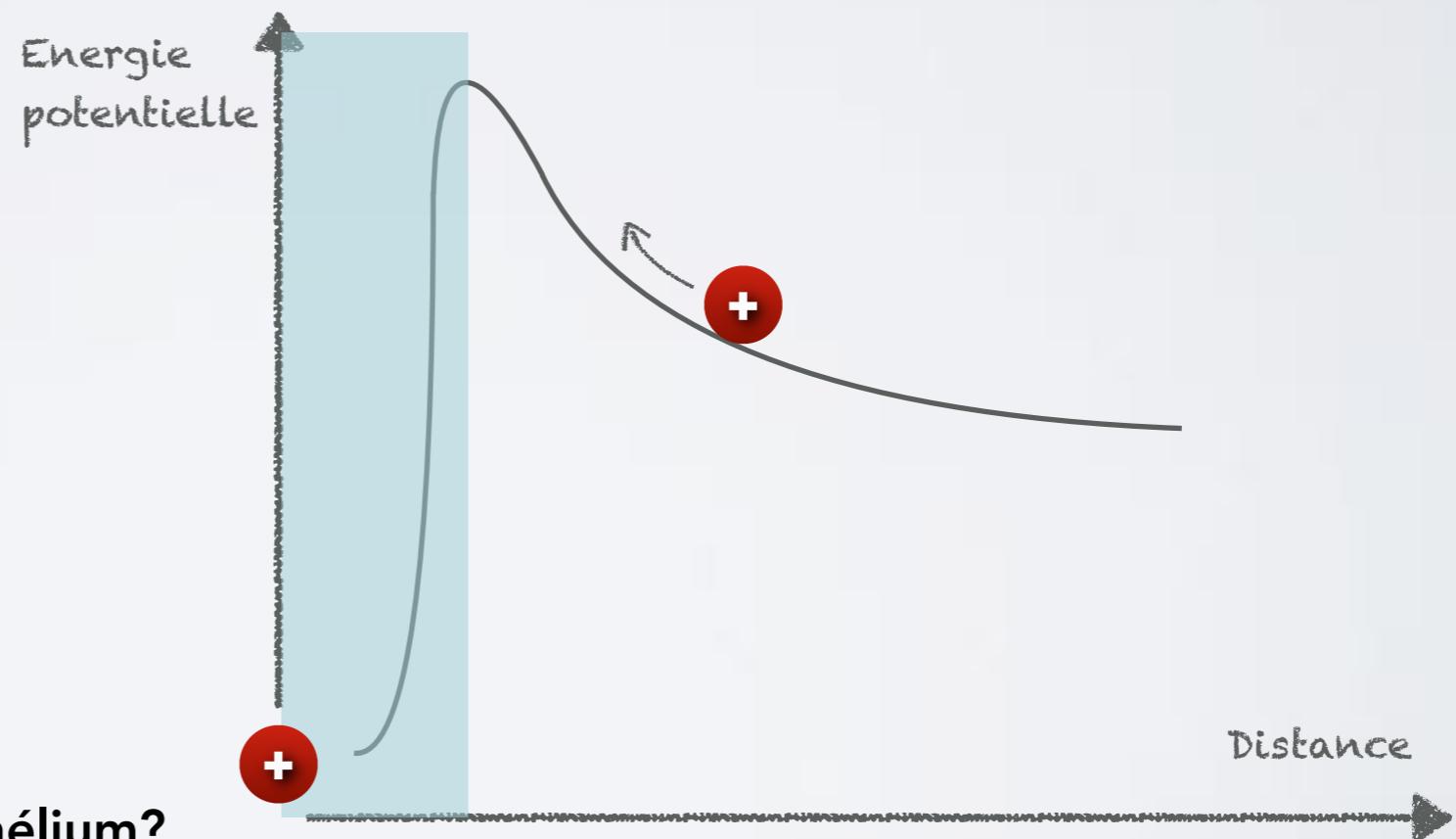
4 u

3,971 u

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



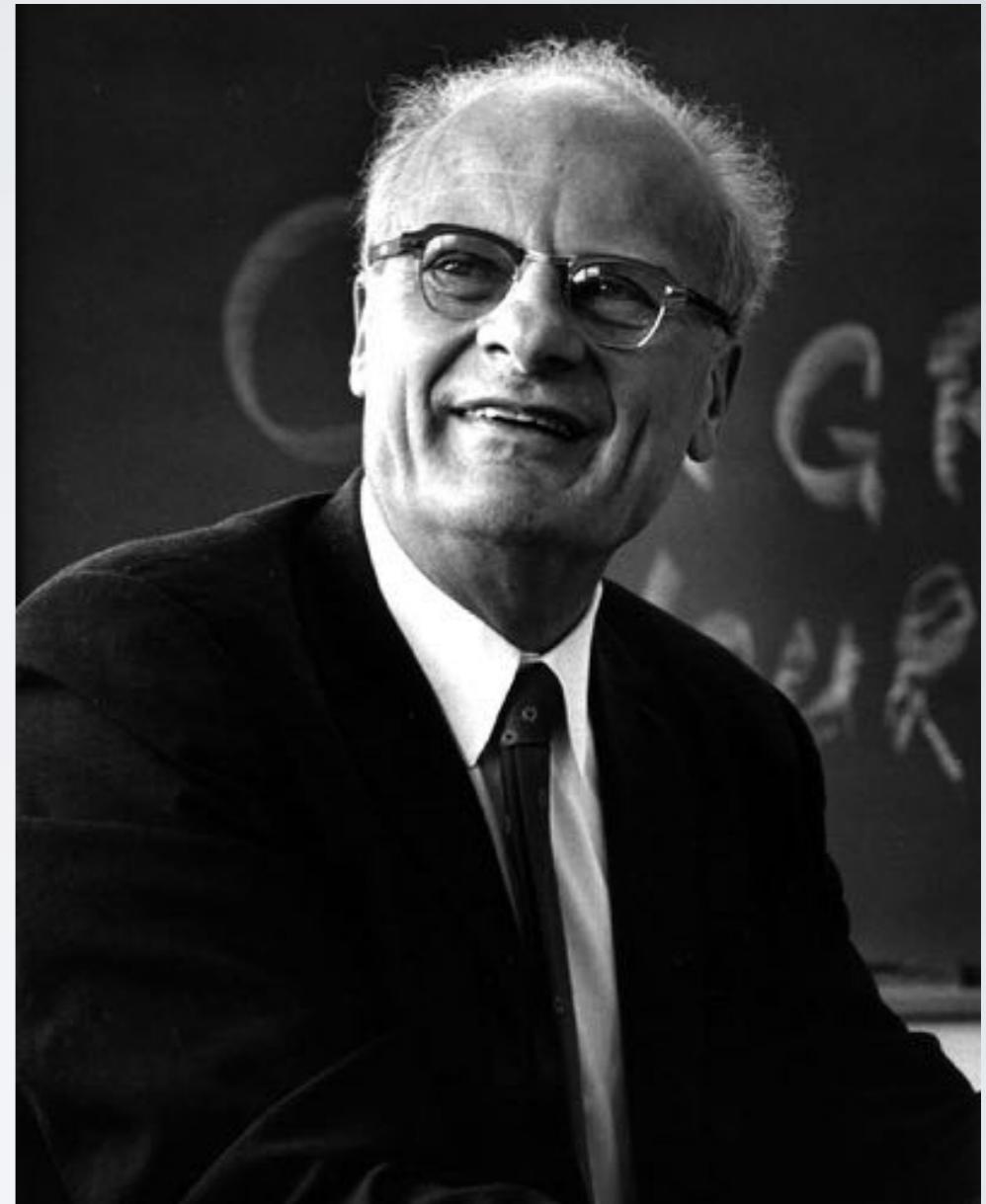
- Deux petits problèmes...
- 1) D'où viennent les neutrons de l'hélium?
- 2) Comment faire rencontrer 4 particules (2 protons + 2 neutrons)?

Source d'énergie des étoiles?

- 1939: Hans Bethe
 - Deux manières de transformer de l'hydrogène en hélium:

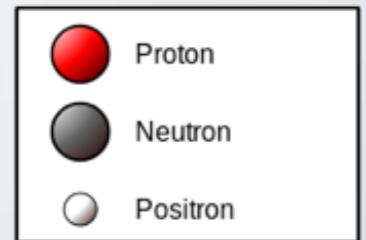
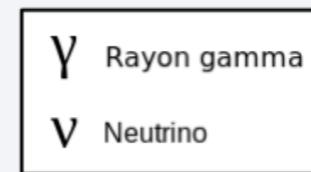
1. La chaîne proton-proton

2. Le cycle carbone-azote-oxygène (CNO)



La chaîne proton-proton

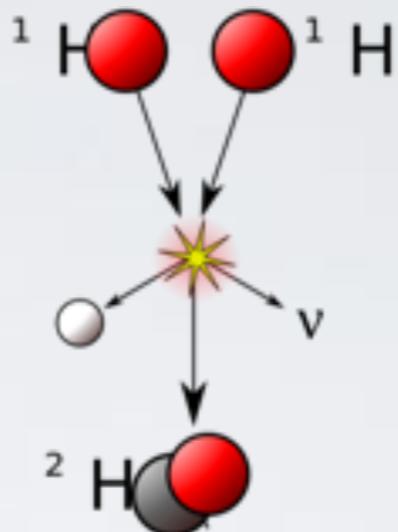
Étoiles peu massives



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)



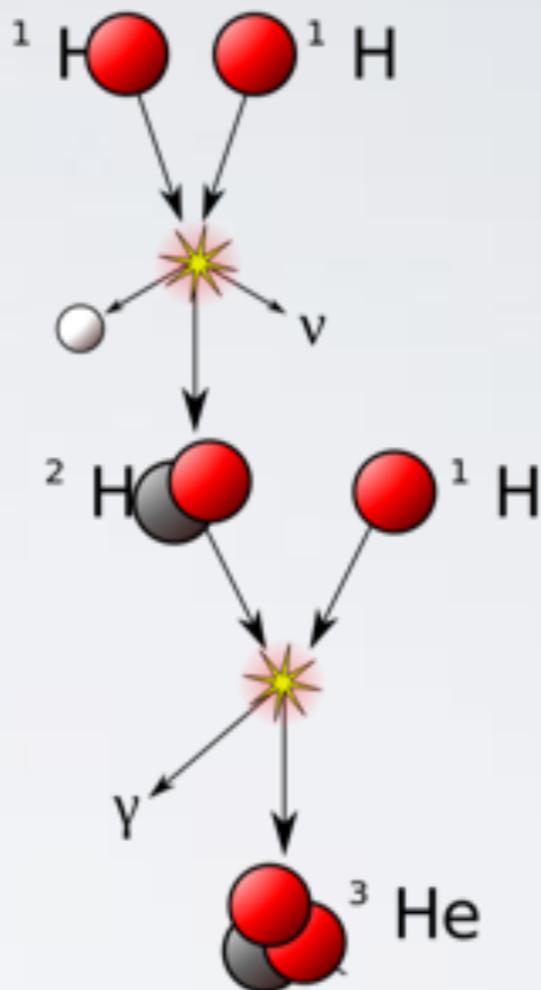
γ Rayon gamma
 ν Neutrino

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")



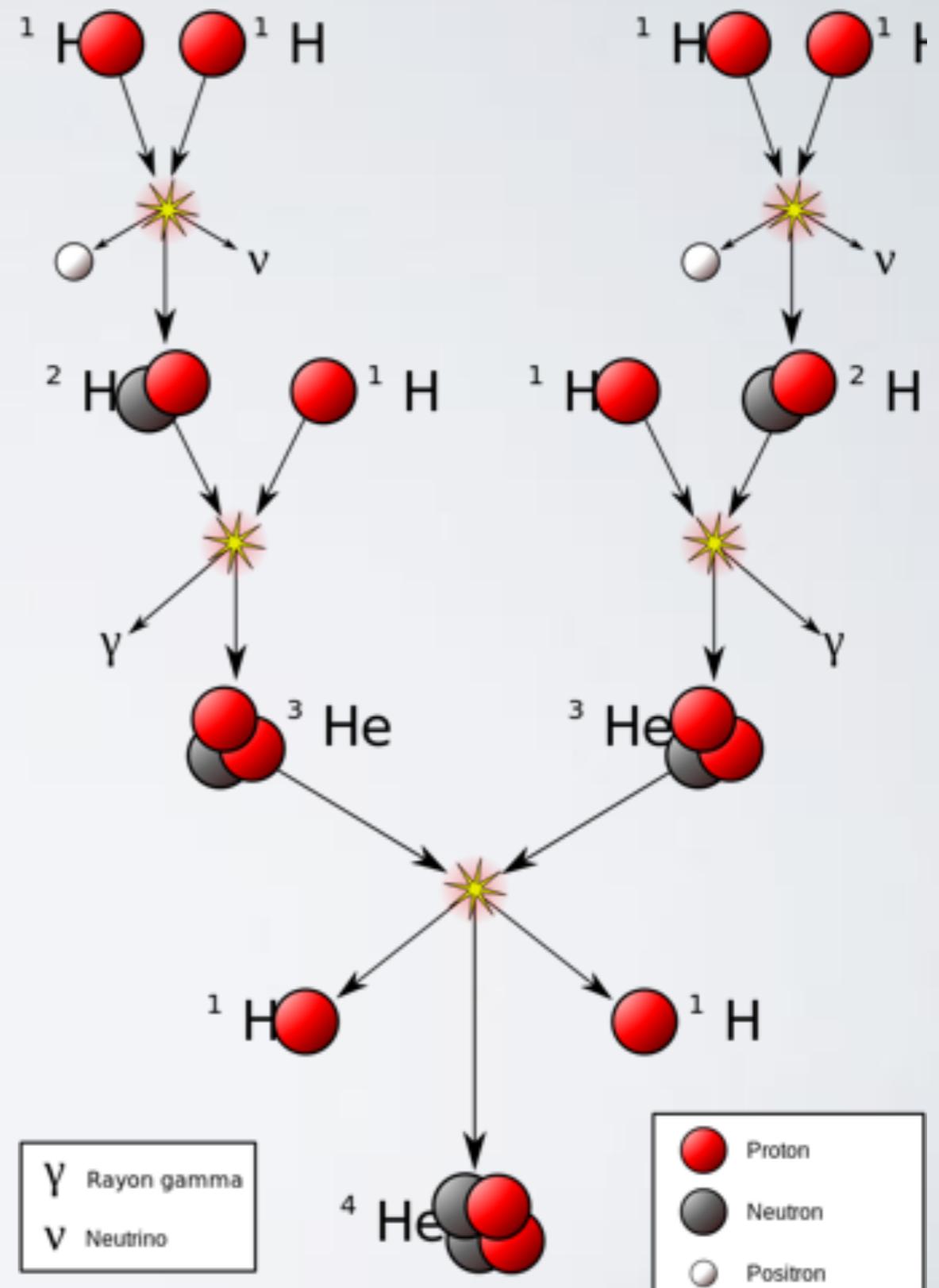
γ Rayon gamma
 ν Neutrino

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")
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

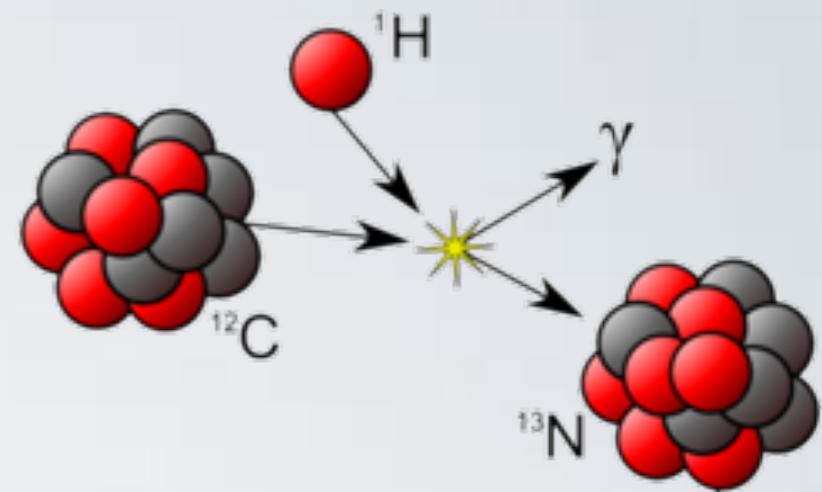
	Proton	γ	Rayon Gamma
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

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

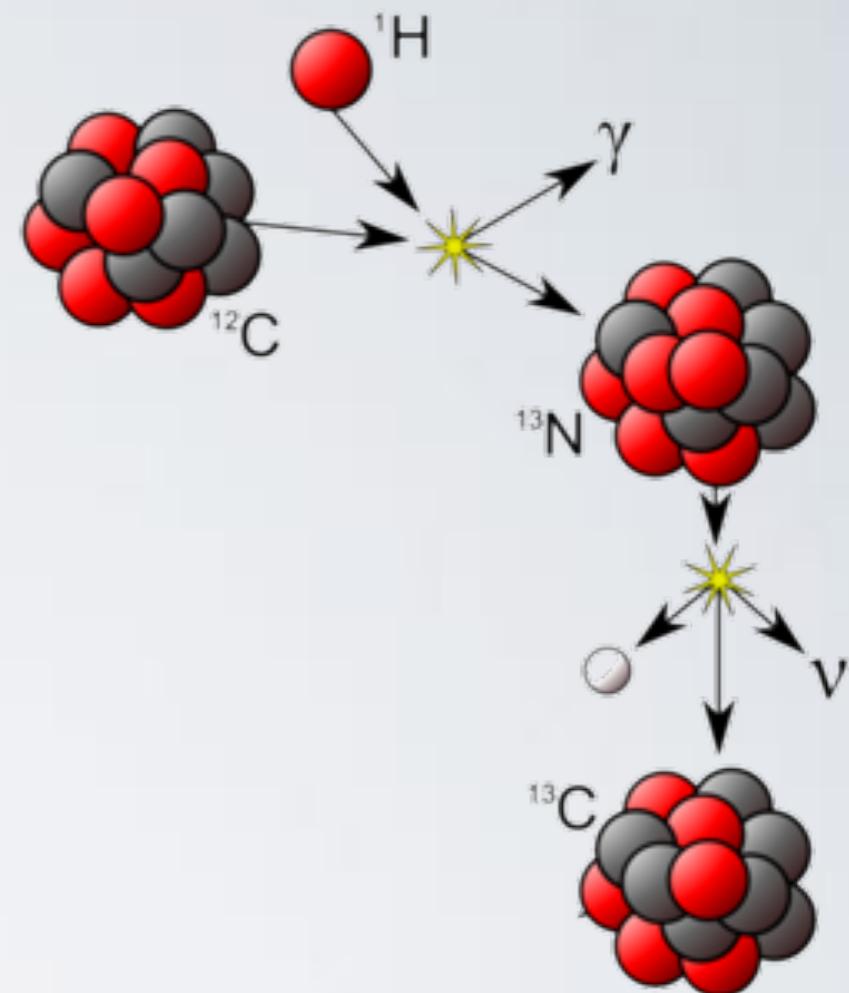
Étoiles massives

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

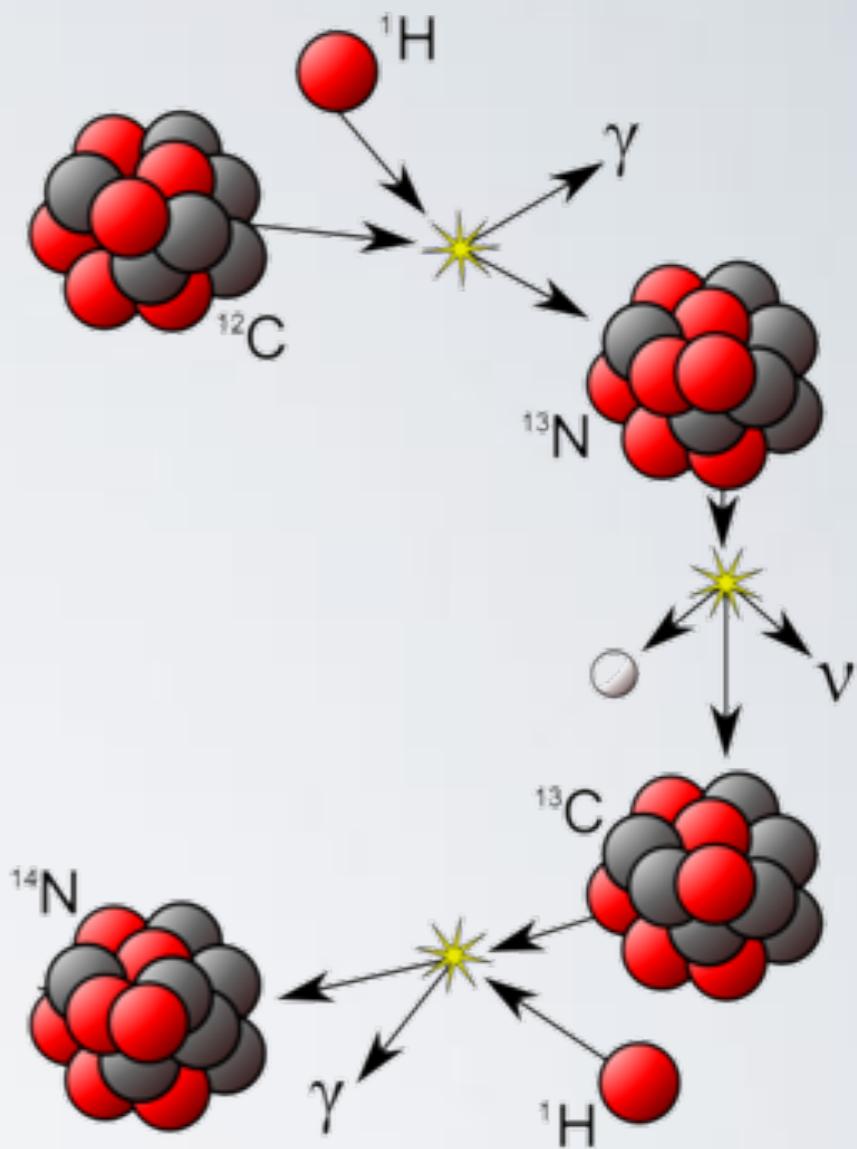
✓ Azote 13 (instable! 😰)

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

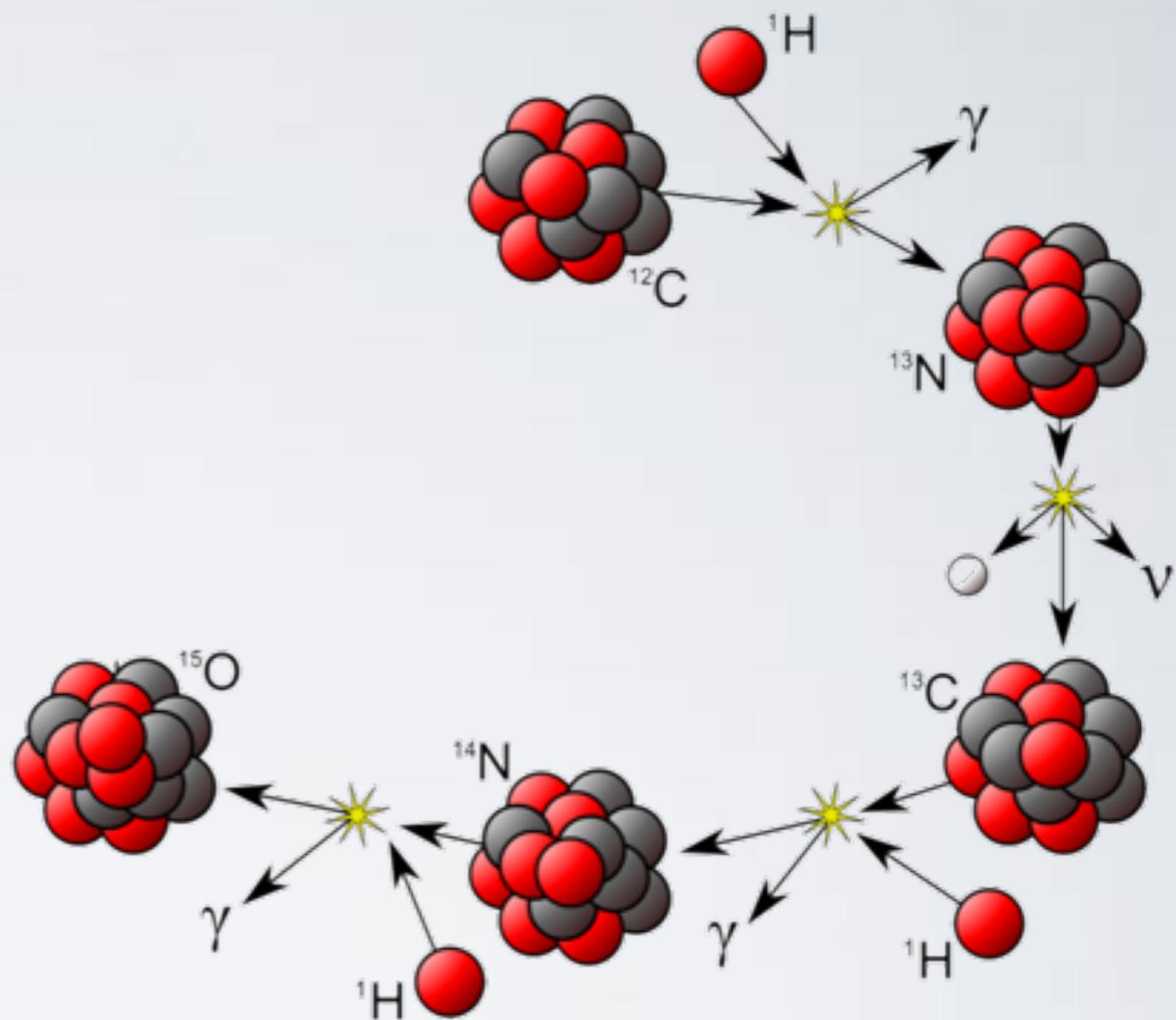
✓ Carbone 13 (instable... mais pas trop)

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

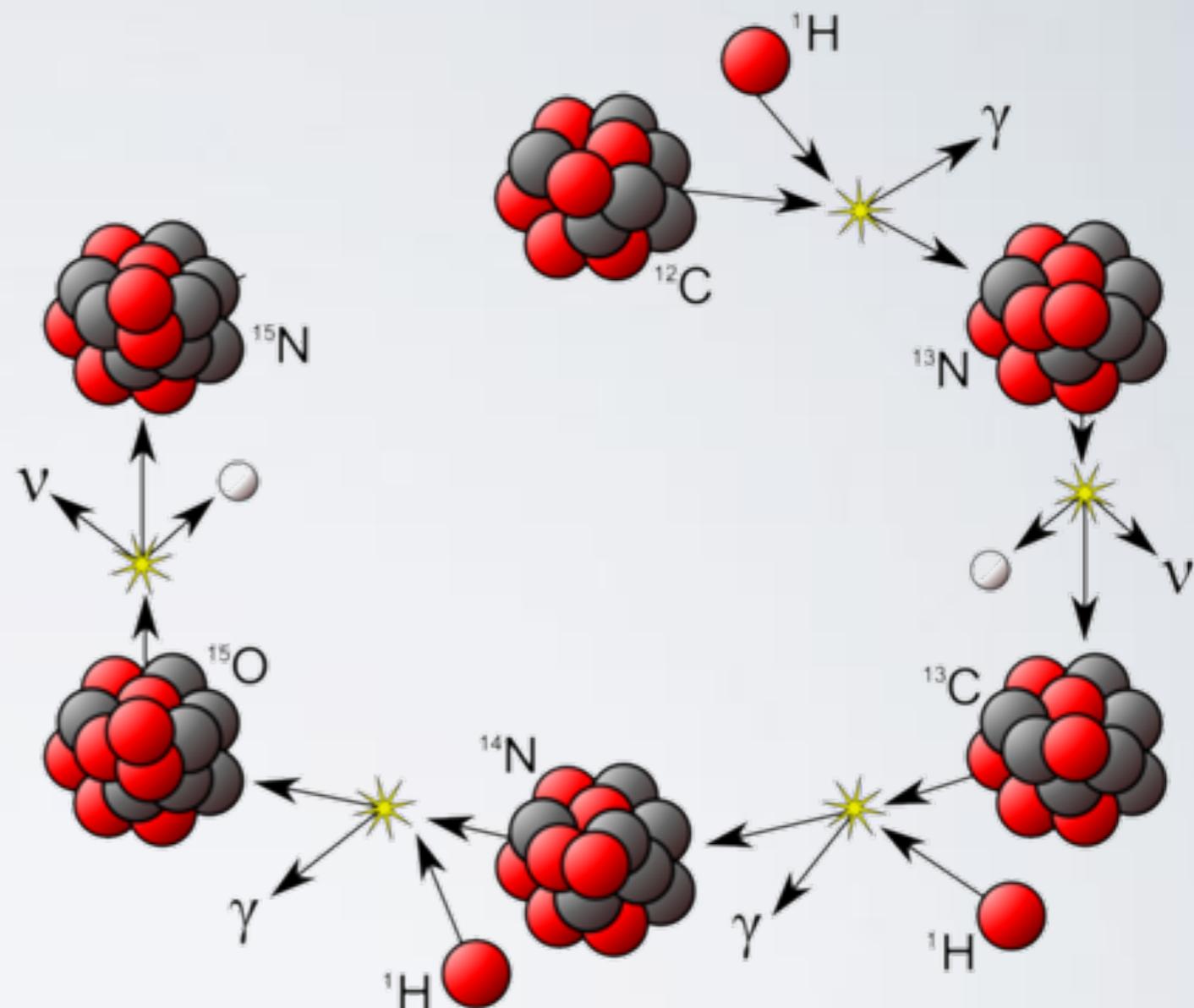
✓ Azote 14 (stable 😎)

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

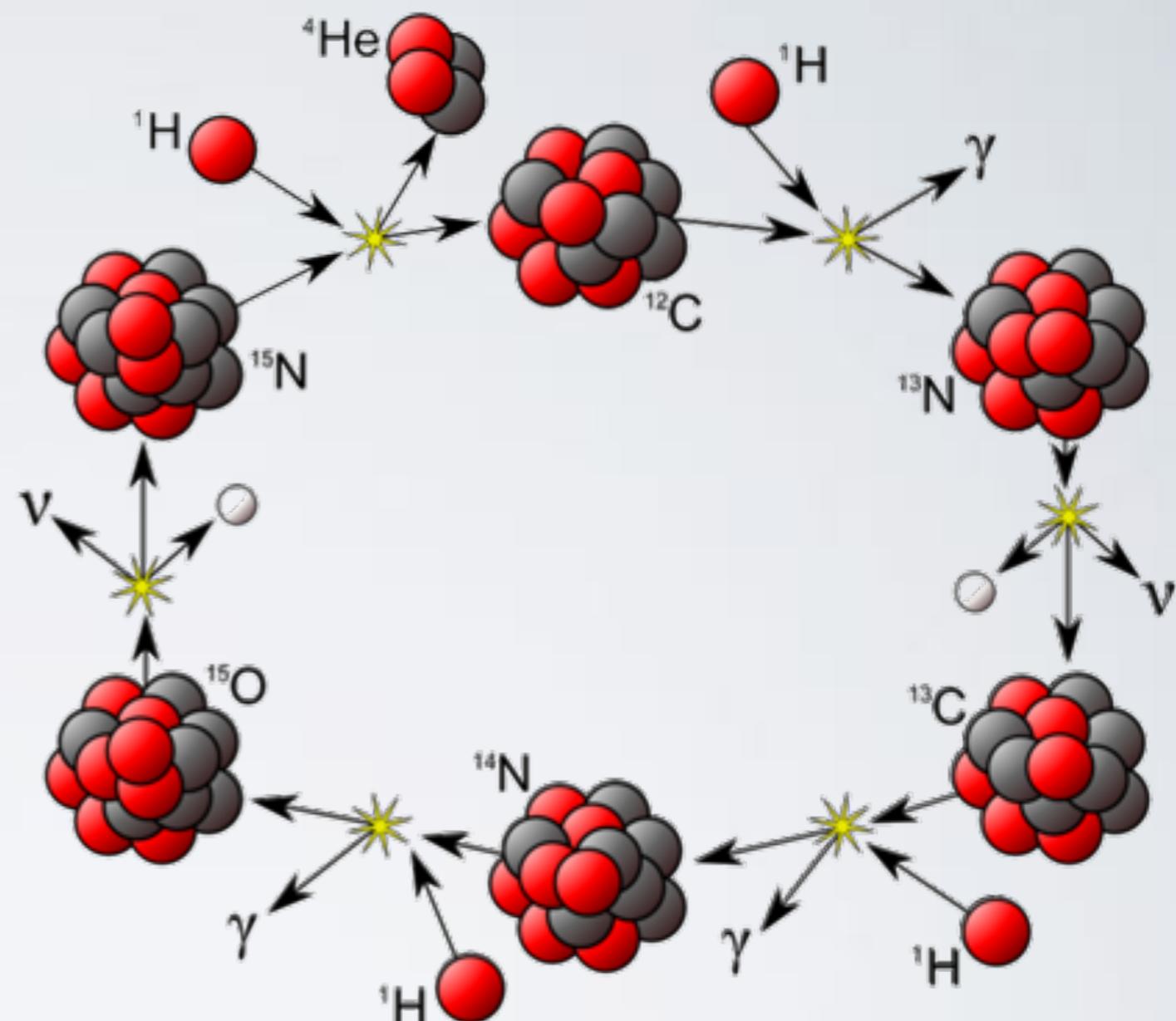
✓ Oxygène 15 (instable! 😞)

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! 😰)

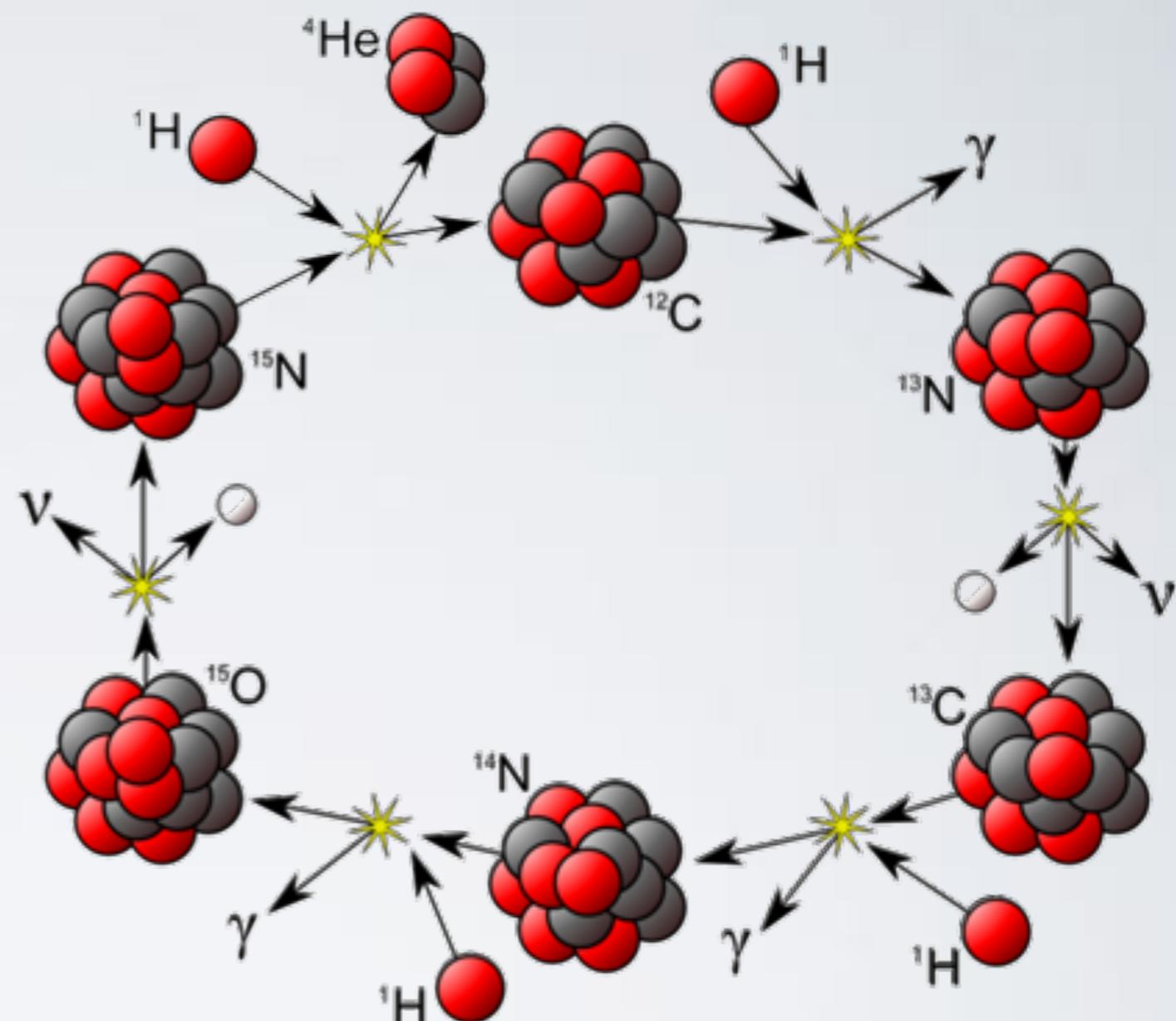
5. Désintégration de l'oxygène 15

✓ 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?

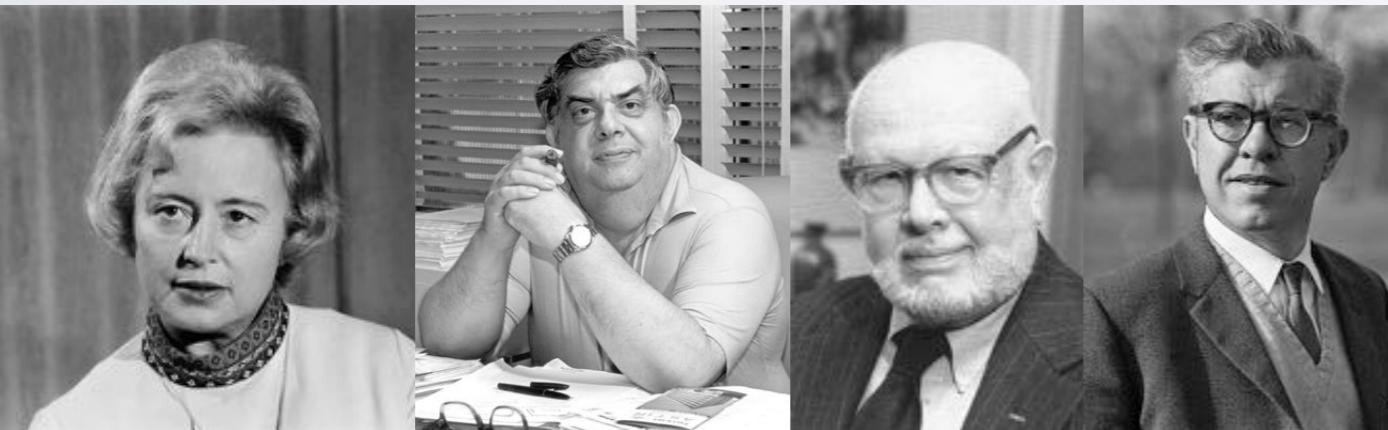
La **nucléosynthèse stellaire**, c'est la transformation
d'éléments en autres éléments (plus lourds)...
par les étoiles!



"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

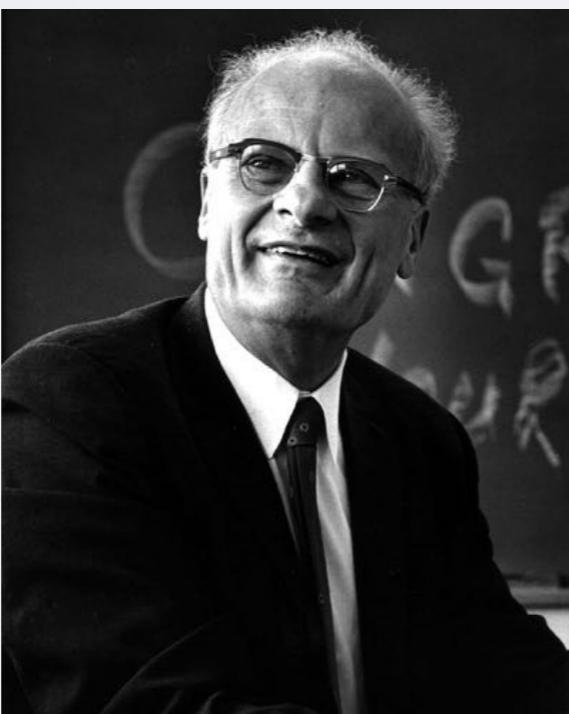
"The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,"
(Julius Caesar, Act I, Scene 2)

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**



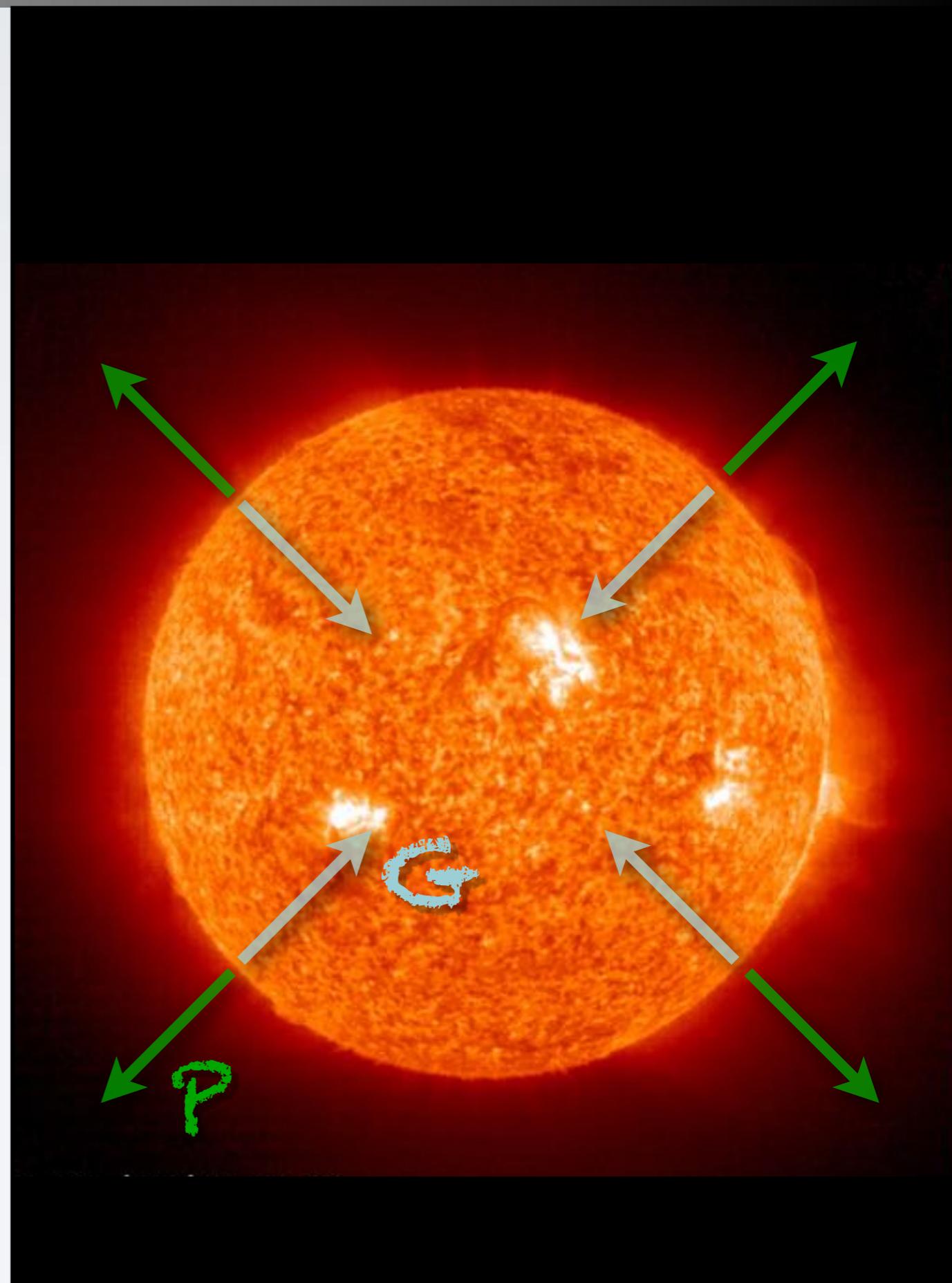
...**MAIS** (rappel)

Une (petite) partie de l'**hélium**
est forgé **au cœur des étoiles!**
(nucléosynthèse stellaire)

C'est la nucléosynthèse primordiale (\neq nucléosynthèse stellaire!)

Vieillissement des étoiles

- Équilibre hydrostatique
 - Pression interne de l'étoile = sa propre gravité
 - L'hélium s'accumule au cœur et gêne la fusion de l'hydrogène
 - Pression interne diminue
 - Le cœur se contracte
 - Température du cœur augmente
 - Le taux de réactions $H \rightarrow He$ augmente
 - etc...
-
- $T > 100\ 000\ 000\ ^\circ C$
 - Suffisant pour transformer de l'hélium en carbone!

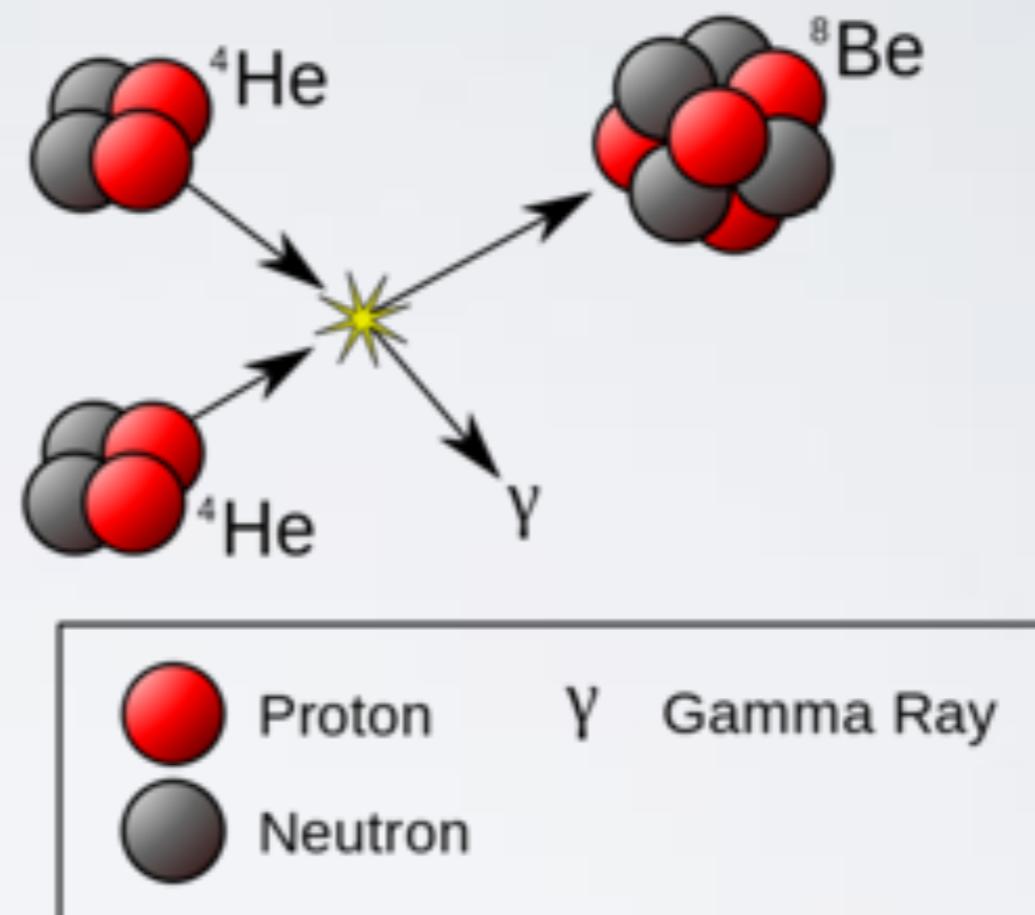


La réaction triple-alpha

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

1. Deux atomes d'hélium collisionnent

✓ Béryllium 8 (très instable! 😞)

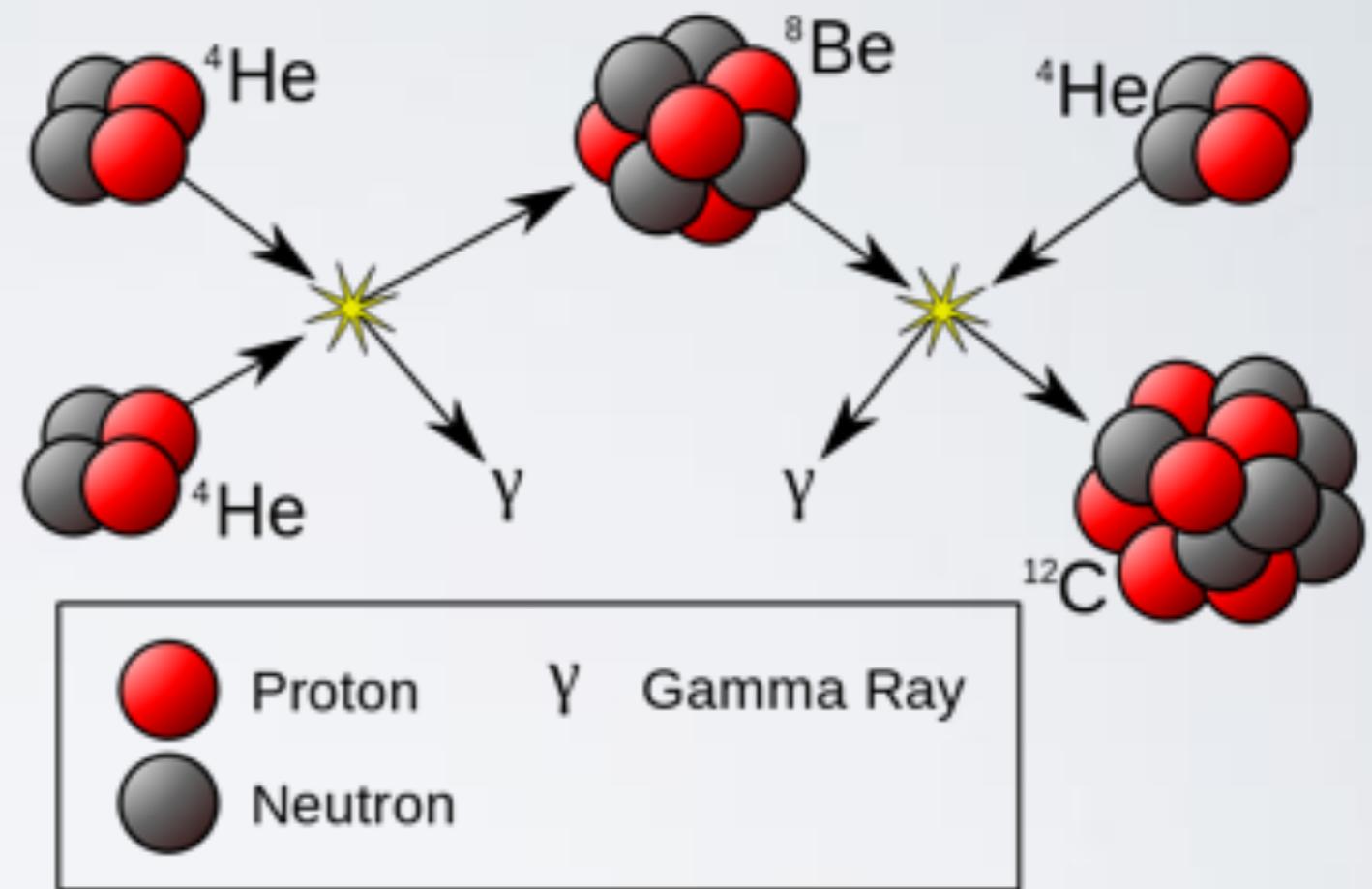


La réaction triple-alpha

- 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 😎) 🎉

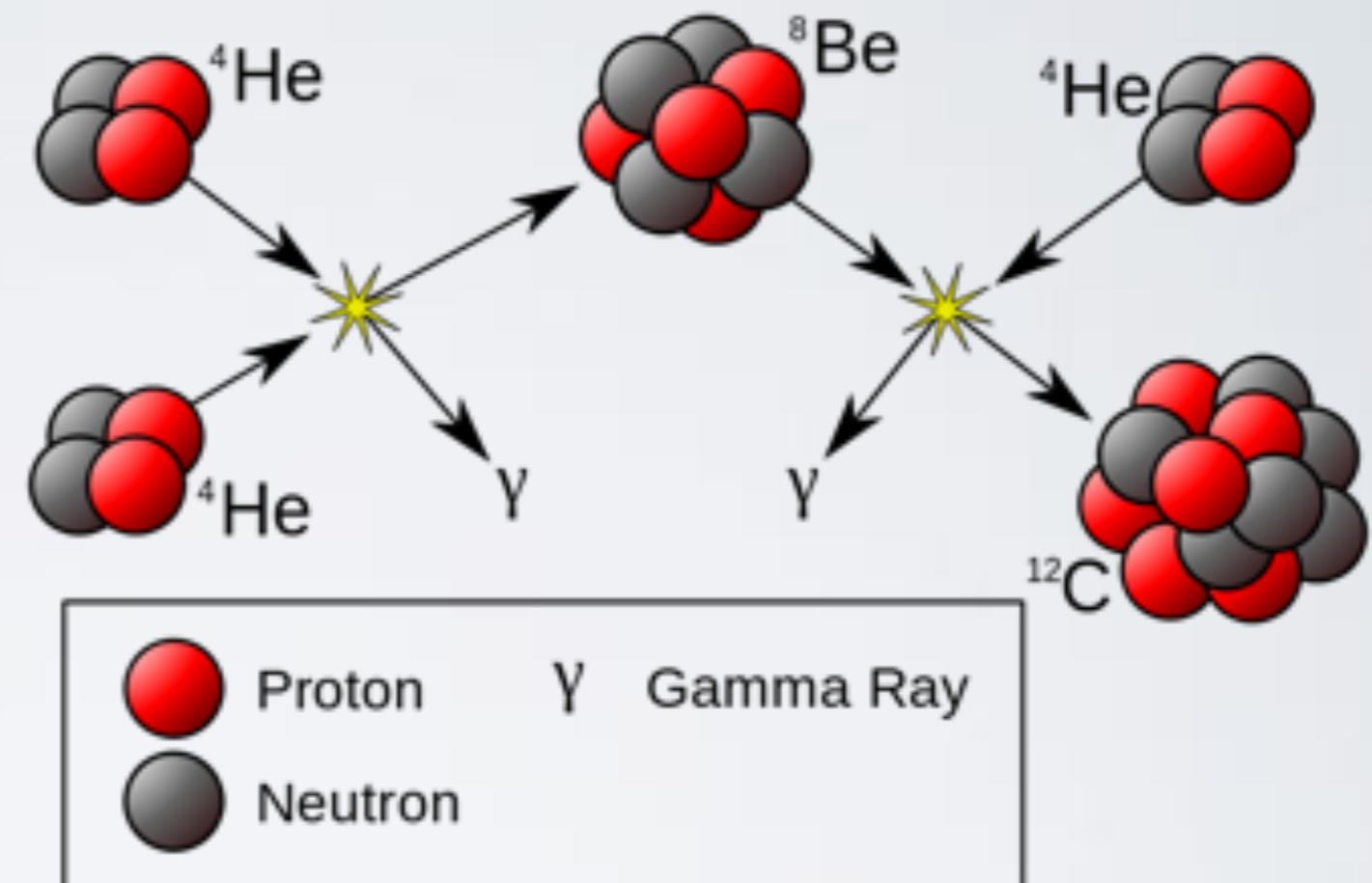


La réaction triple-alpha

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

1. Deux atomes d'hélium collisionnent
 - ✓ Béryllium 8 (très instable! 😞)

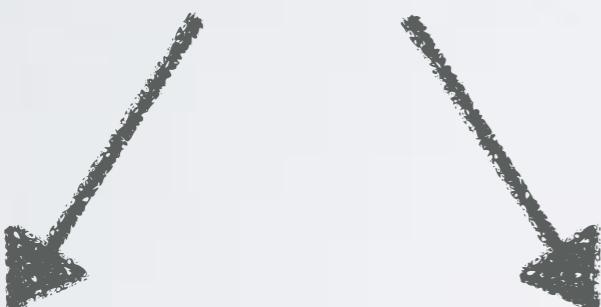
2. Heureusement, un troisième atome d'hélium collisionne
 - ✓ Carbone 12 (stable 😎) 🎉



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

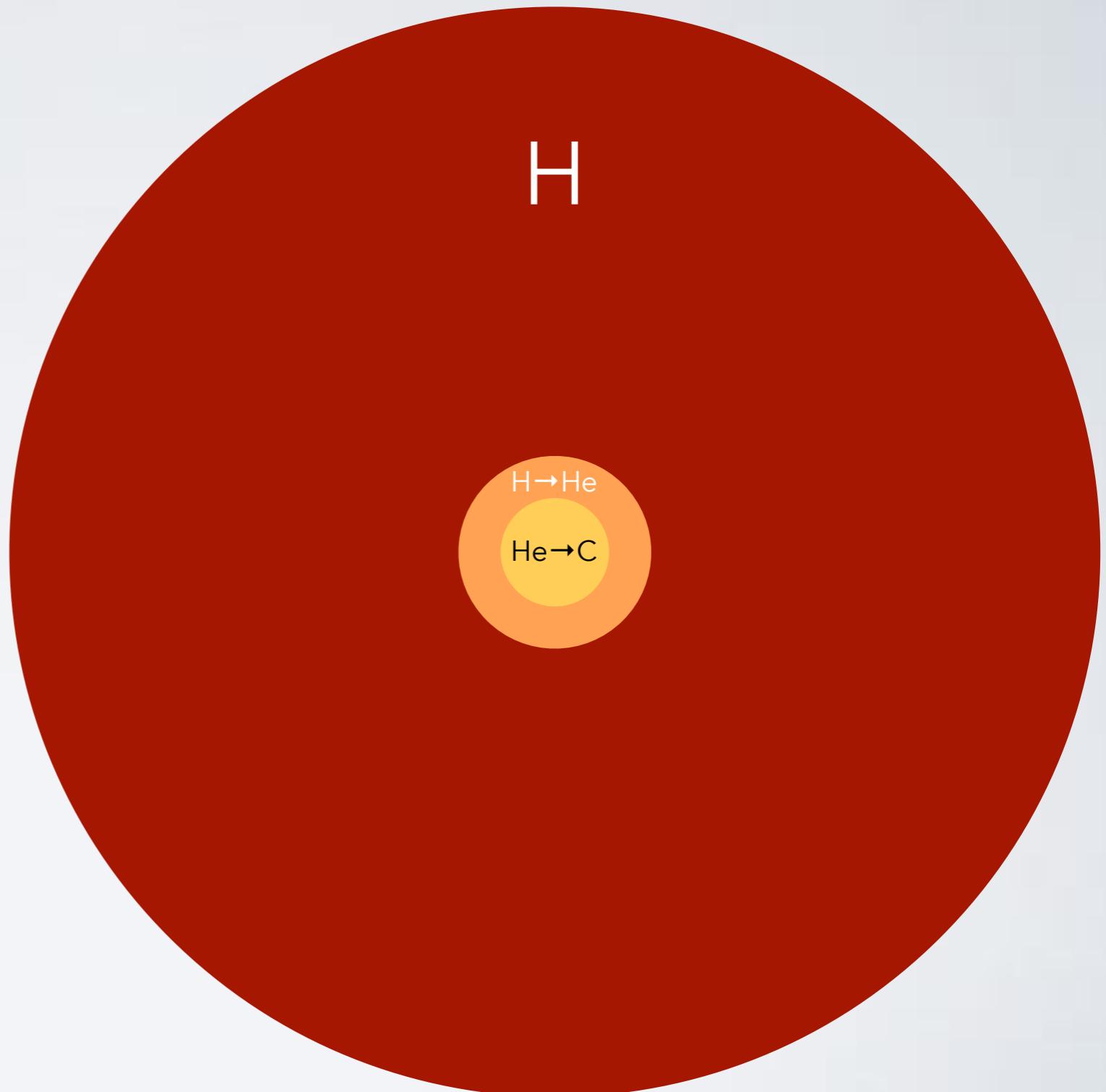
Hydrogène, hélium, carbone... et après?

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

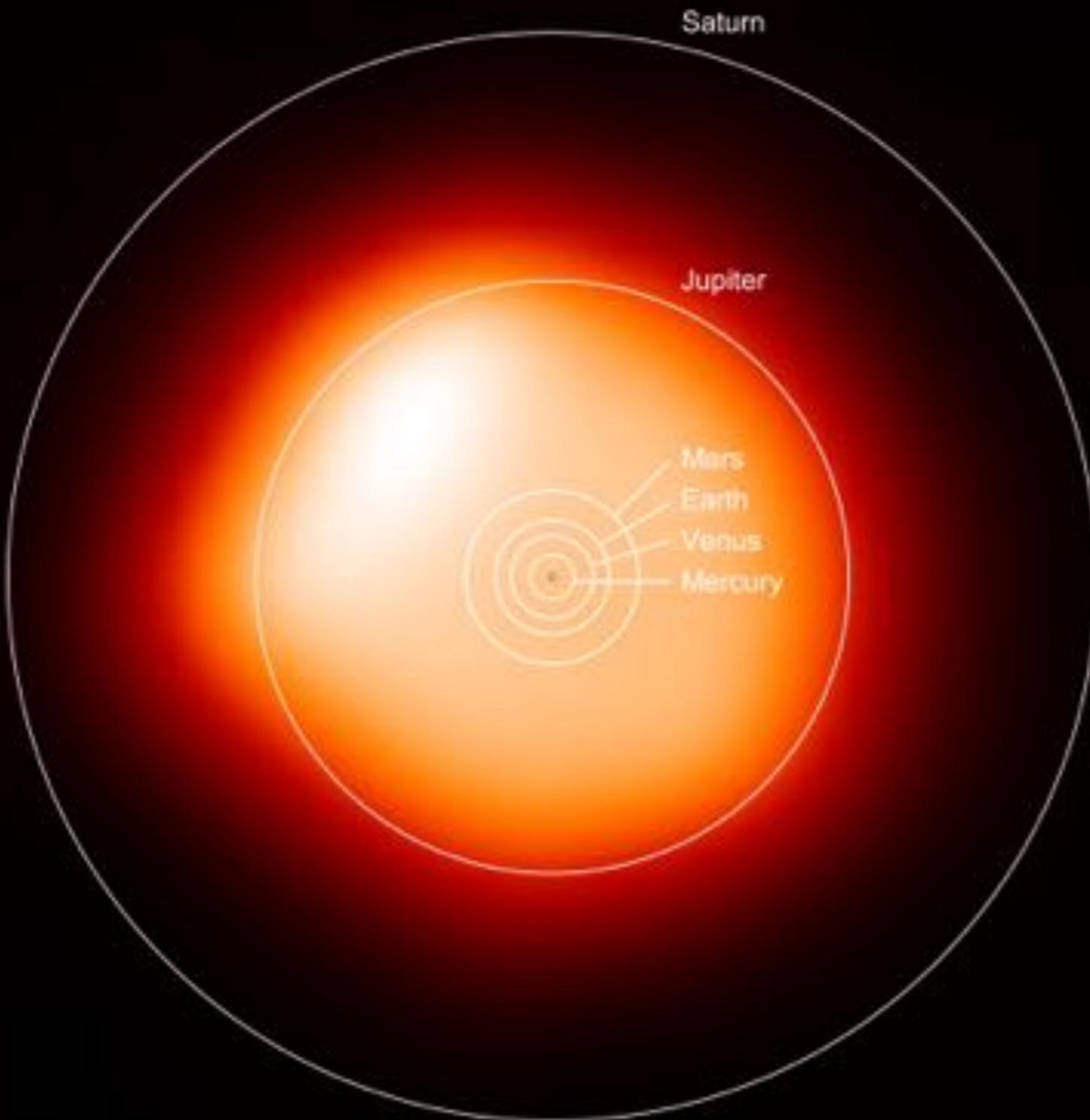


$< 10 M_{\odot}$

$> 10 M_{\odot}$

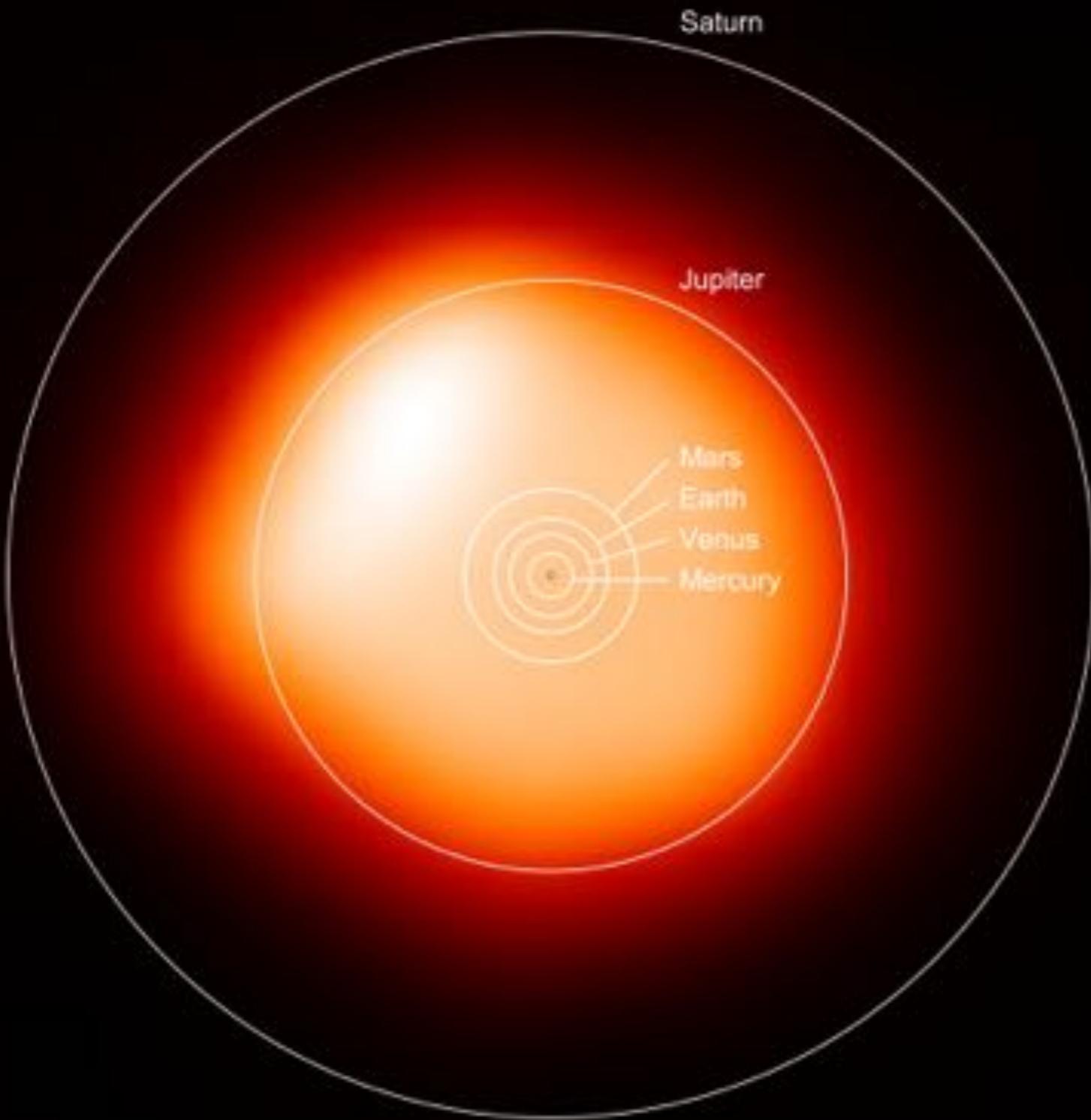


Mort des étoiles de faible masse



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

Mort des étoiles de faible masse

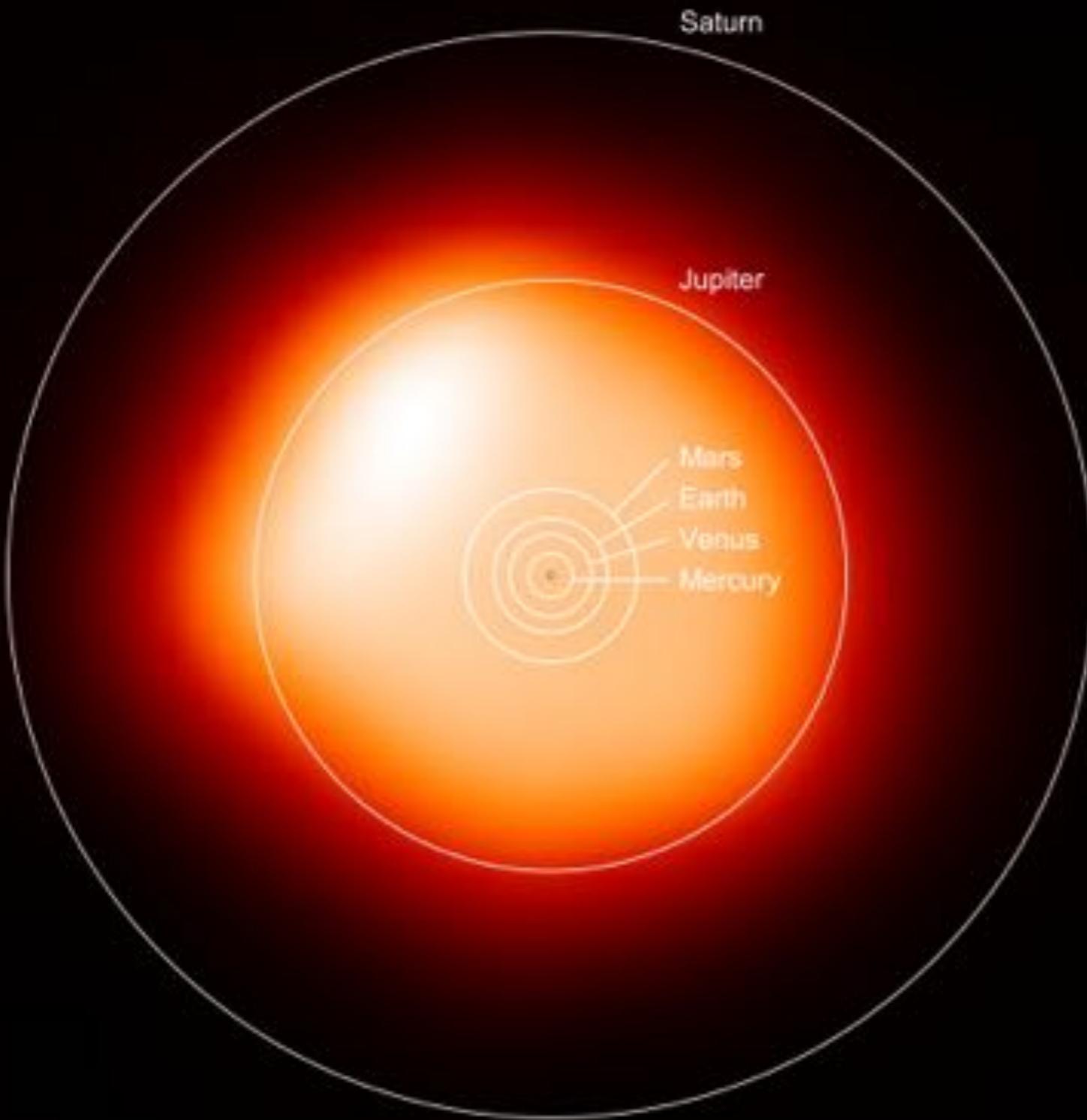


- Carbone reste au cœur de l'étoile et gène la fusion de l'hydrogène et de l'hélium
 - Pression interne diminue
 - Le cœur se contracte encore plus
 - Température du cœur augmente et "chauffe" les couches externes de l'étoile
 - L'étoile se dilate, devient irrégulière

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

0.015°

Mort des étoiles de faible masse



- Carbone reste au cœur de l'étoile et gène la fusion de l'hydrogène et de l'hélium
 - Pression interne diminue
 - Le cœur se contracte encore plus
 - Température du cœur 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 $> 4 M_{\odot}$)

Nébuleuse planétaire



Nébuleuse de l'hélice

Nébuleuse planétaire



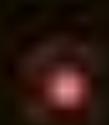
Nébuleuse de l'oeil du chat

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 cœur 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

The periodic table is color-coded by group:

- Group 1 (Alkali metals):** Purple
- Groups 2 (Alkaline earth metals):** Light blue
- Groups 13-18 (Pnictogens, Chalcogens, Halogens, Noble gases):** Yellow
- Transition metals:** Red
- Metalloids:** Orange
- Metals:** Green
- Non-metals:** Blue

Legend:

- Numéro atomique:** 6
- Principaux nombres d'oxydation (le plus fréquent est en gras)**
- Symbole de l'élément:** C
- Masses atomiques (approximatives)**
- Nom:** Carbon
- Electrons valentielles (des trois premiers d'électrons)**
- Électrons perdus (deux derniers électrons)**

Groups circled in green:

- Group 1 (H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr):** Alkali metals
- Group 2 (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra):** Alkaline earth metals
- Group 18 (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn):** Noble gases

Et les éléments plus lourds?

Tableau périodique des éléments

The image shows a detailed periodic table of elements. At the top left, the first two elements, Hydrogen (H) and Helium (He), are circled in green. In the center, there is a detailed inset for Carbon (C) with the following information:

- Numéro atomique: 6
- Principaux nombres d'oxydation (les plus fréquents sont en gras): -2, +2, +4
- Symbole de l'élément: C
- Masse atomique (environ): 12.01
- Nom: Carbone
- Nombre d'électrons orbitaux (des trois premiers électrons): 2, 2, 2

Below the inset, the periodic table is divided into groups by color:

- Group 1: Alkali metals (Lanthanides)
- Group 2: Alkaline earth metals (Actinides)
- Groups 3-12: Transition metals
- Group 13: Boron group (Lanthanides)
- Group 14: Carbon group (Actinides)
- Groups 15-18: Non-metals (Noble gases)

A large black rectangular box covers the middle section of the table, containing the following text:

Comment créer les éléments au delà du carbone?
(oxygène, calcium, fer,...)

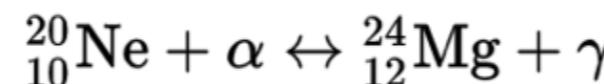
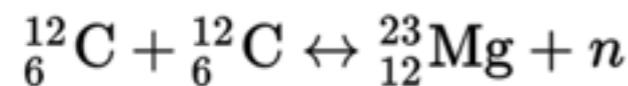
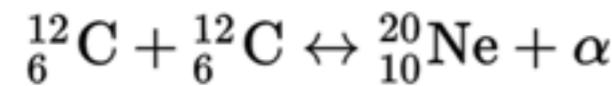
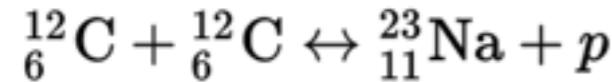
At the bottom left, there is a legend with four colored squares and their corresponding labels:

- Métal (Grey)
- Métalloïde (Blue)
- Non-métal (Red)
- Gaz noble (Yellow)

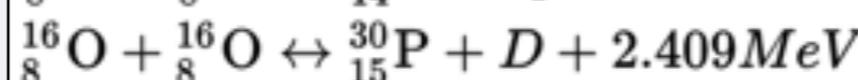
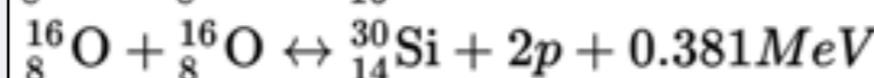
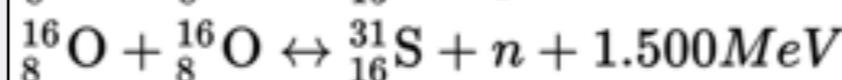
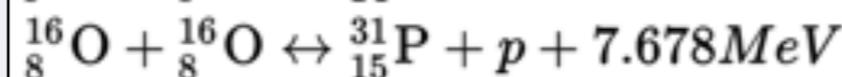
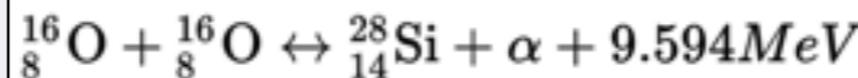
At the very bottom left, there is a note: "Pas d'élément radioactif (radioactif)".

Mort des étoiles massives

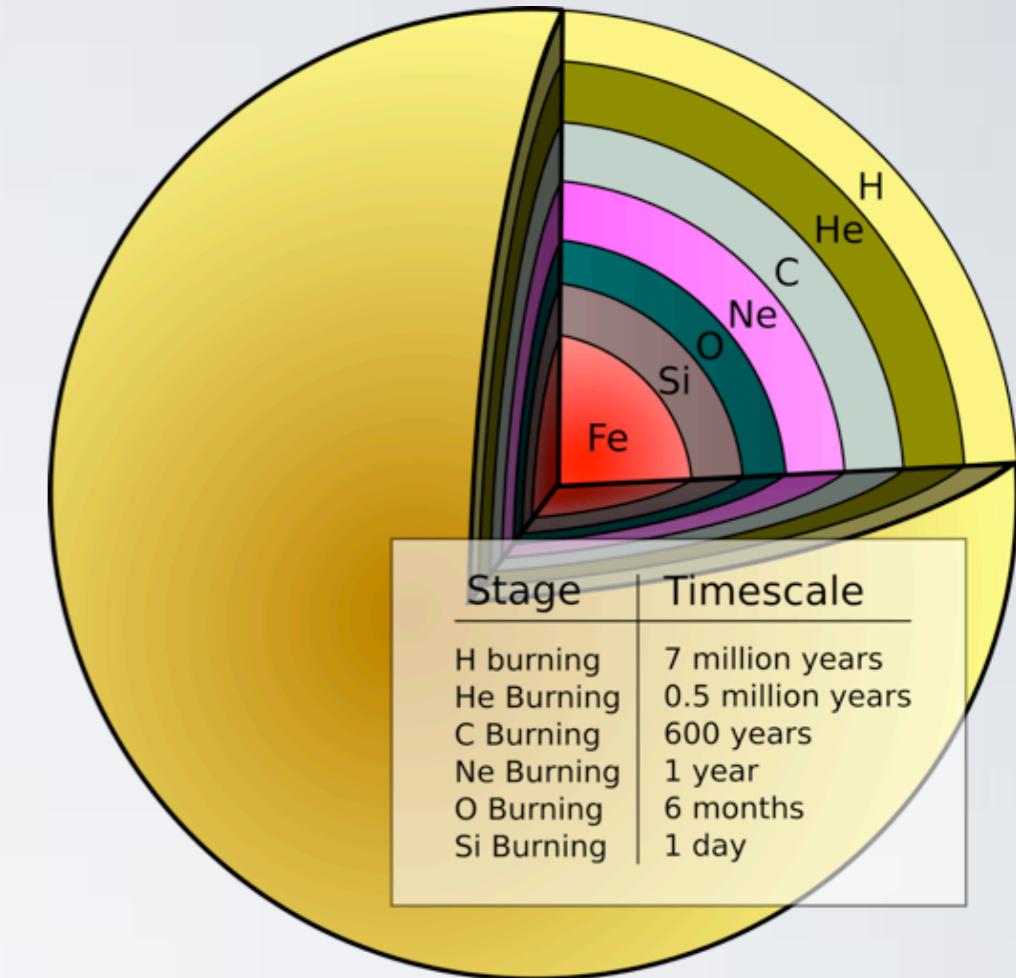
- Si l'étoile est $> 8 M_{\odot}$, la température au cœur atteint 1 milliard de K!
- À son tour, le **carbone** peut alors fusionner...



- Puis le **néon**...



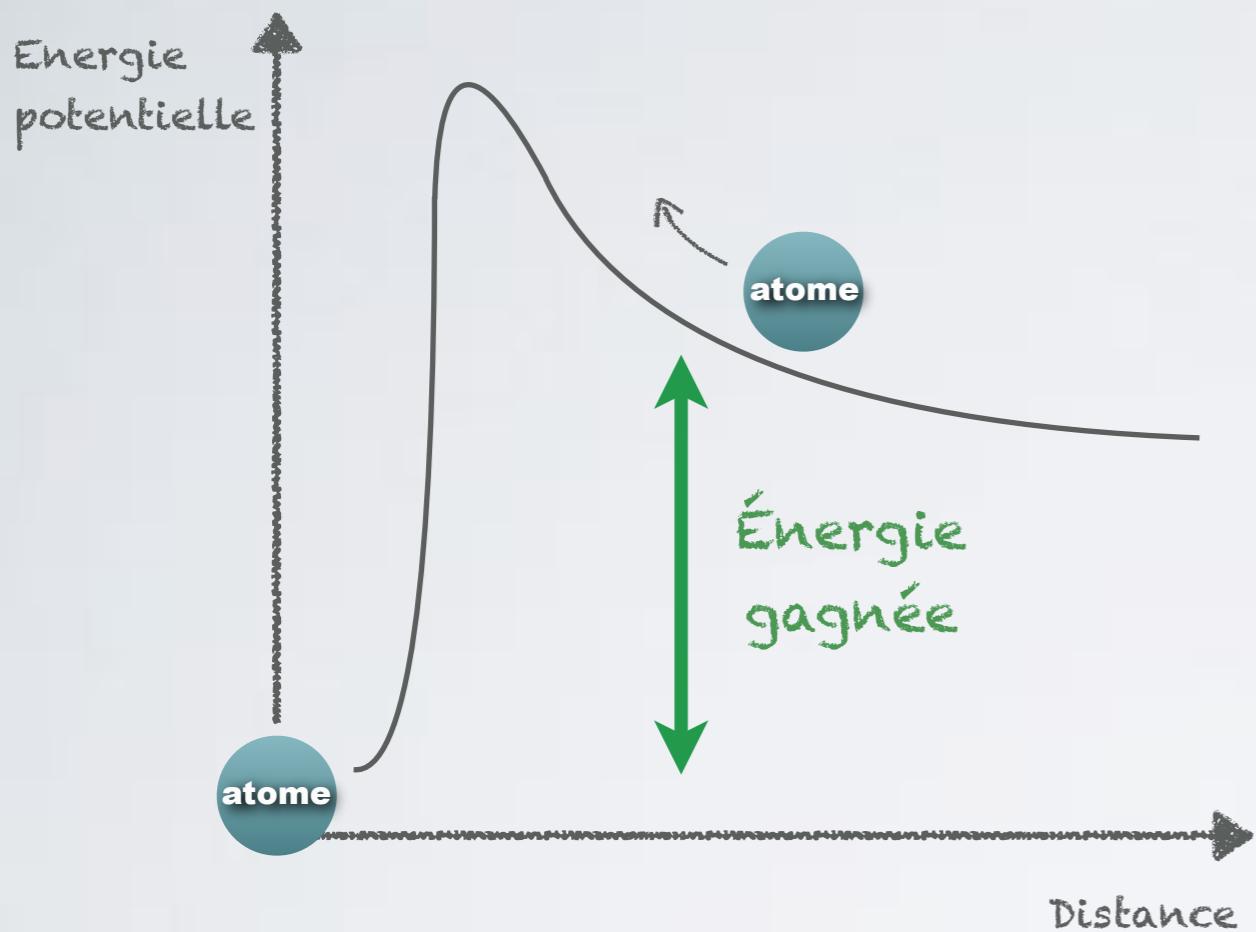
- Puis l'**oxygène**...



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

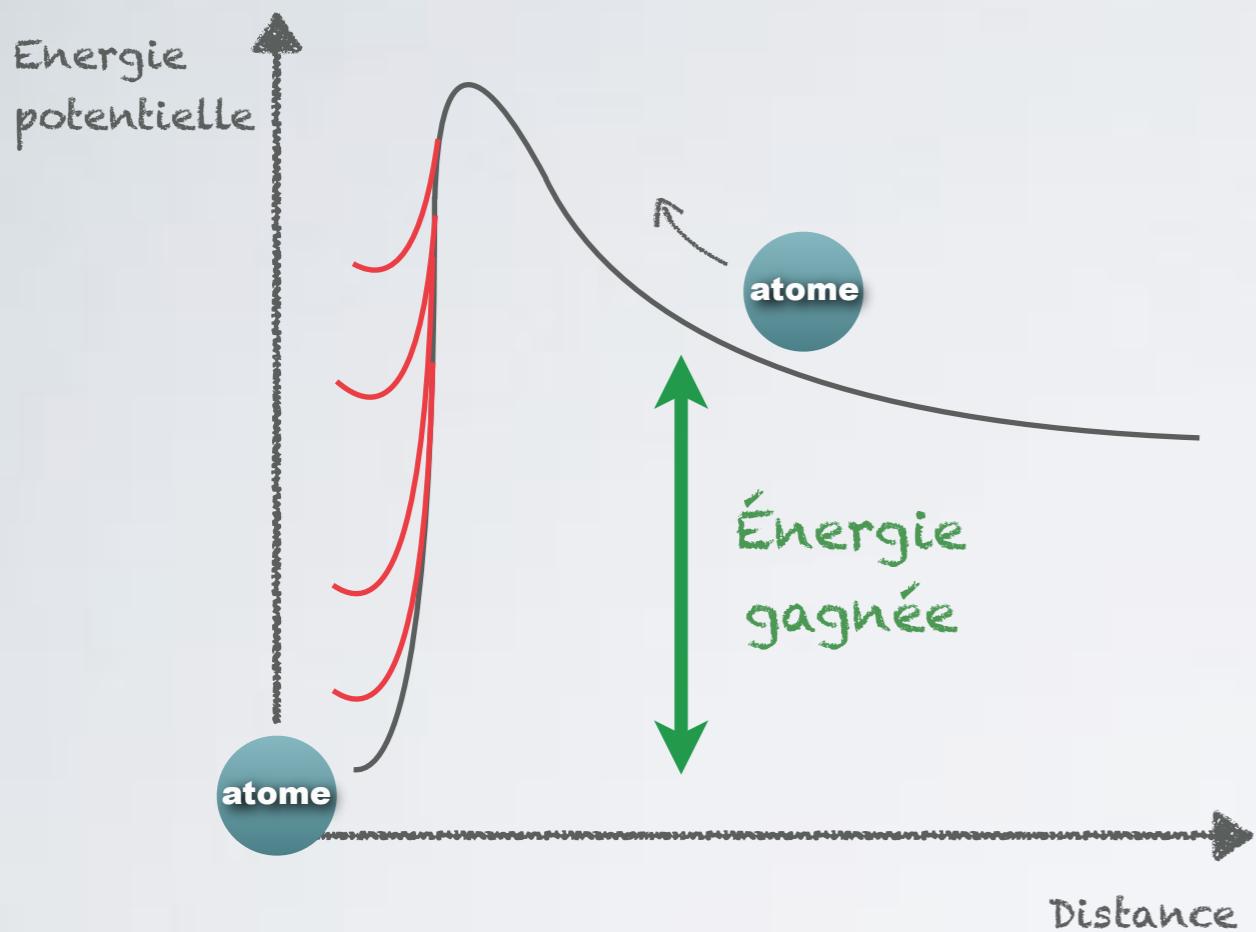
Mort des étoiles massives

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



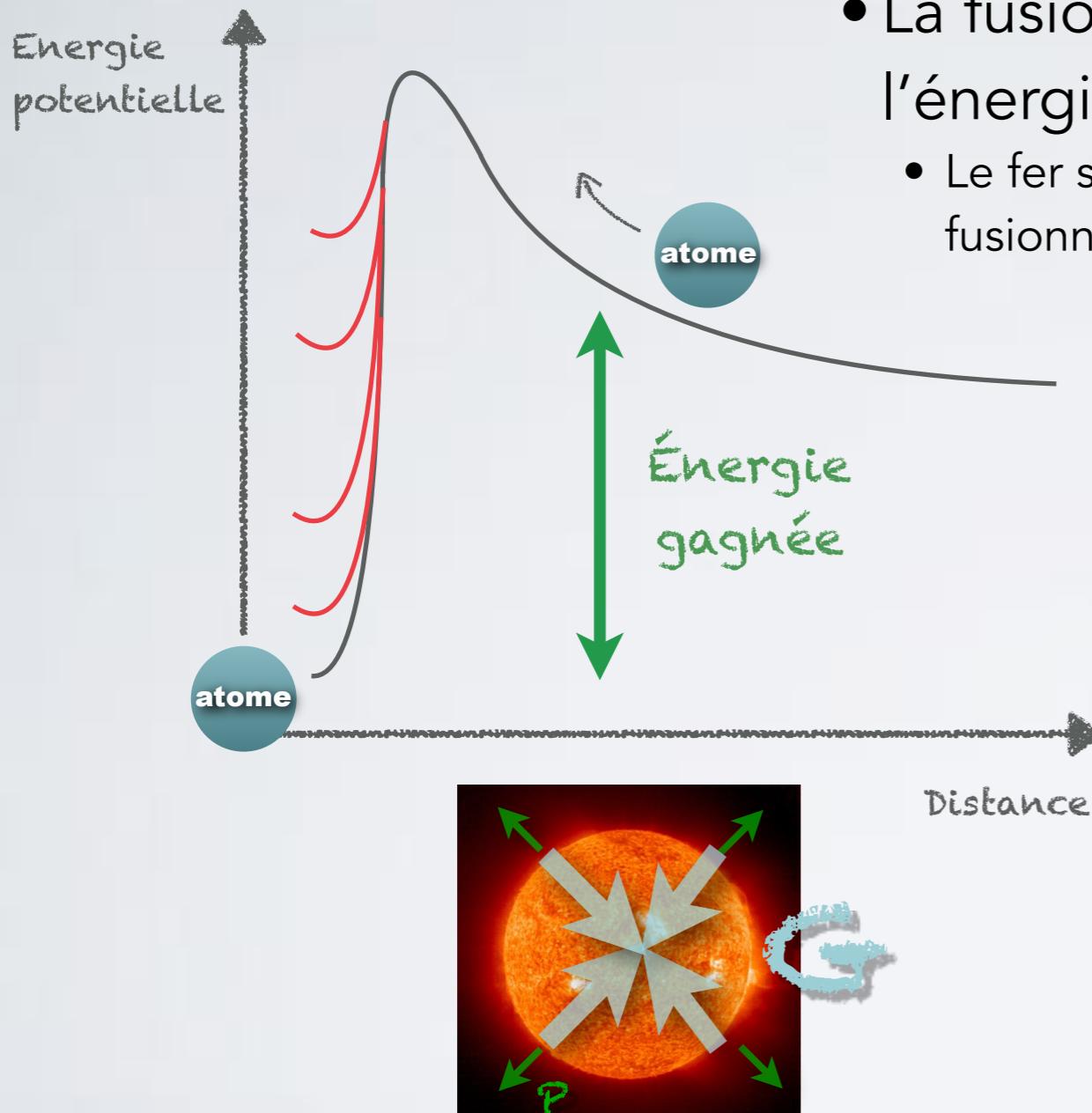
Mort des étoiles massives

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

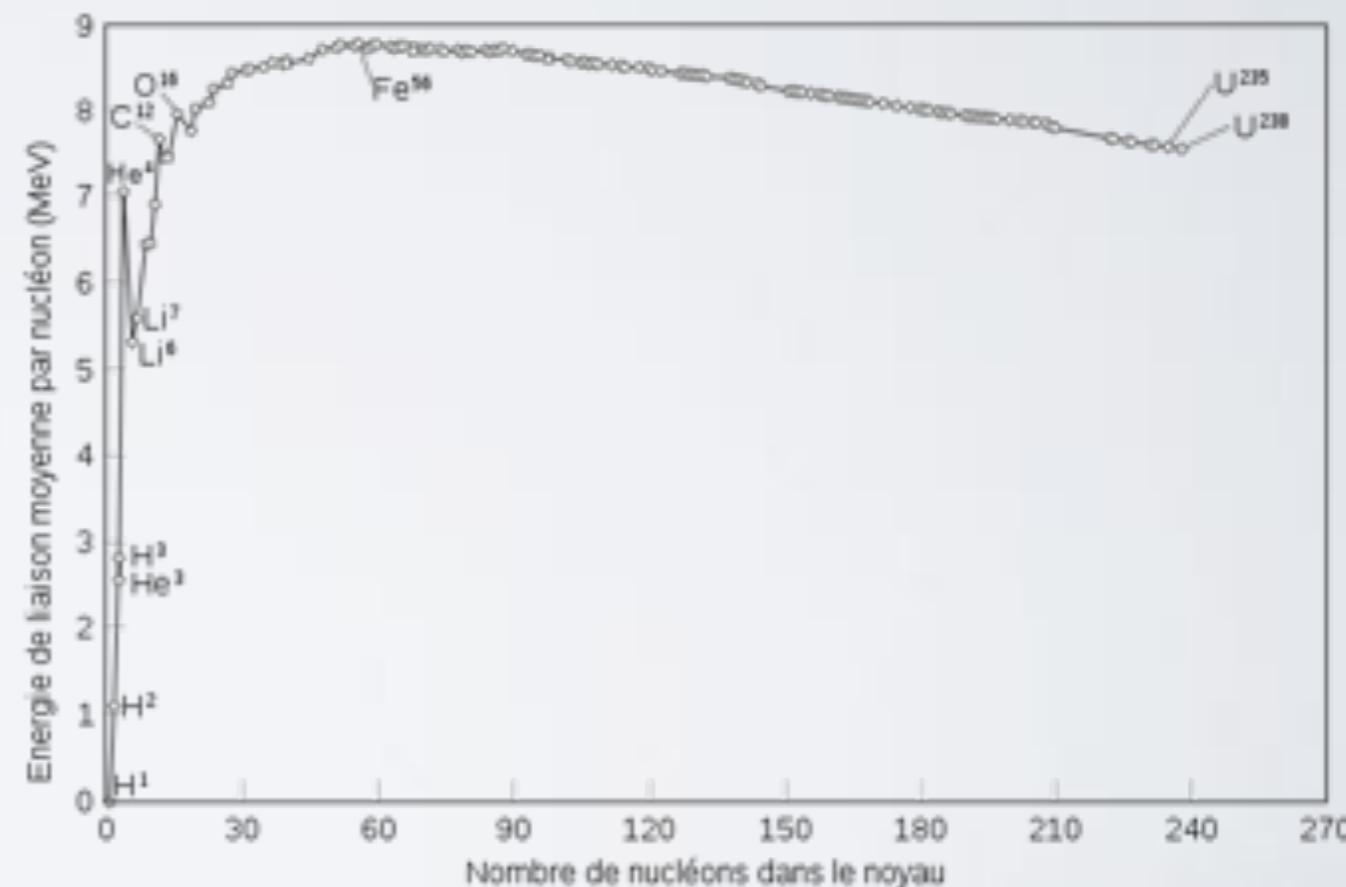


Mort des étoiles massives

- 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 cœur de l'étoile, mais ne pourra **PAS** fusionner!

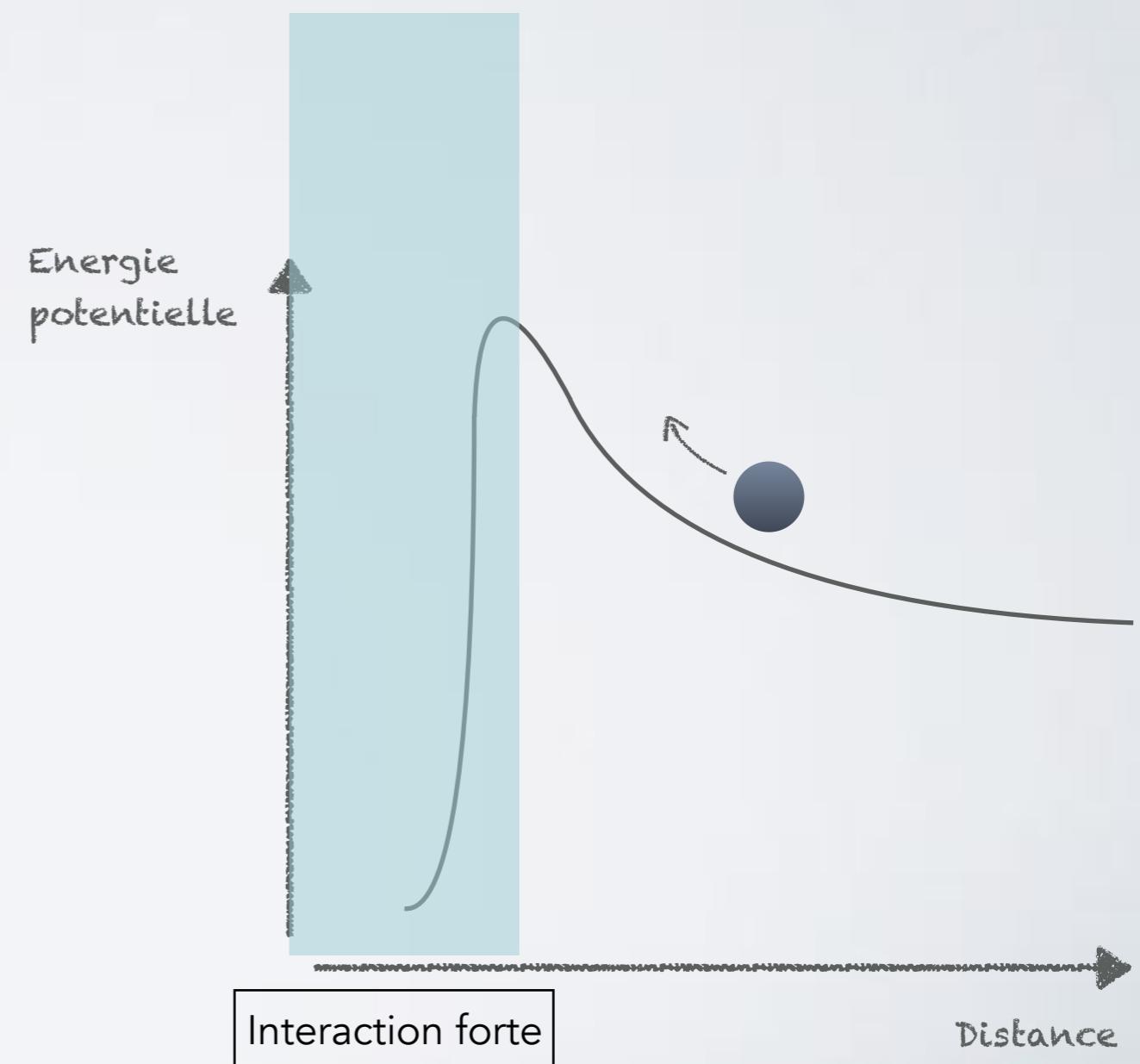


- Soudain: pression interne* << gravité
- L'étoile s'effondre sur elle-même! 😱

*pression de dégénérescence

Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:

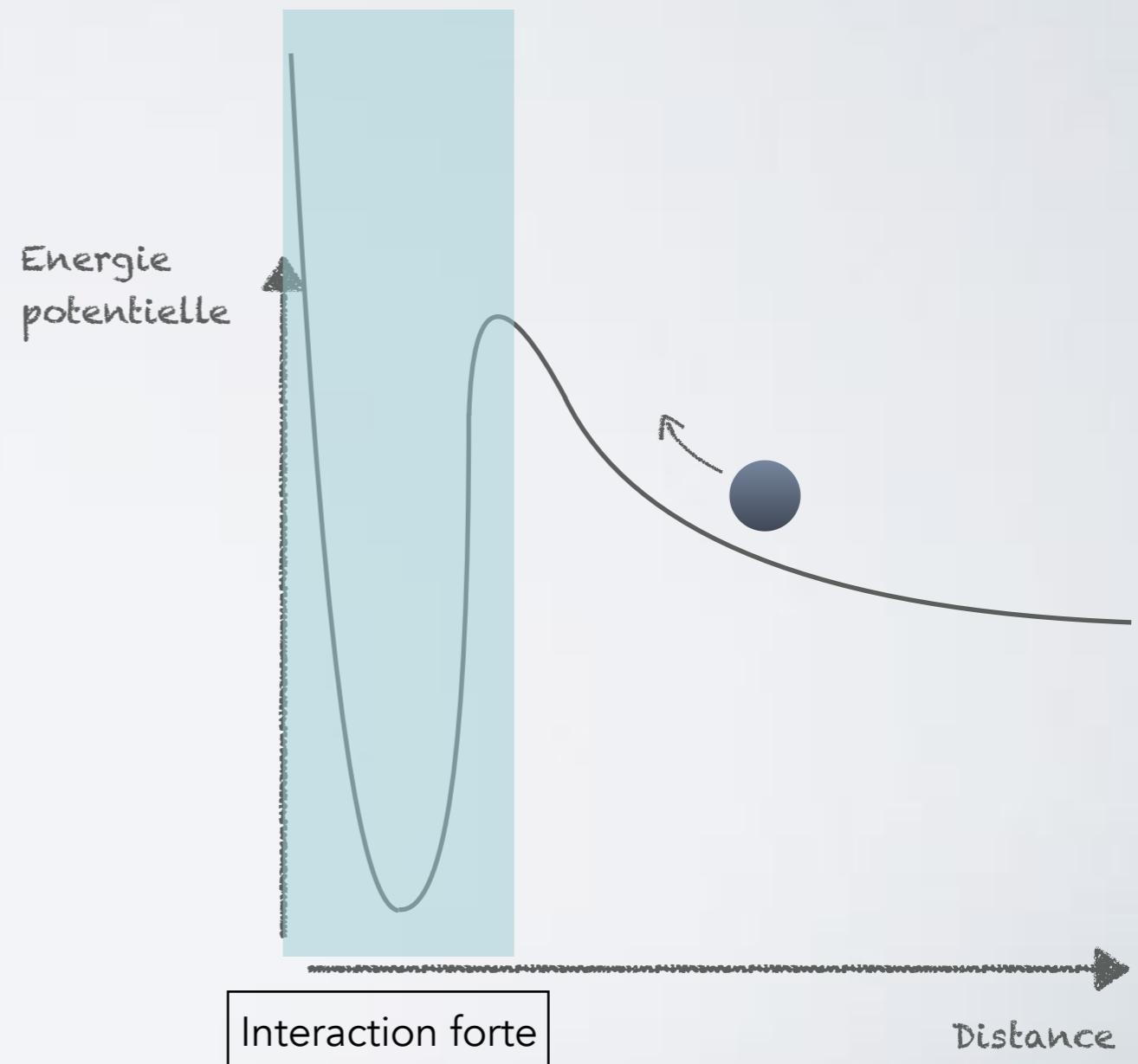


Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:



- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!

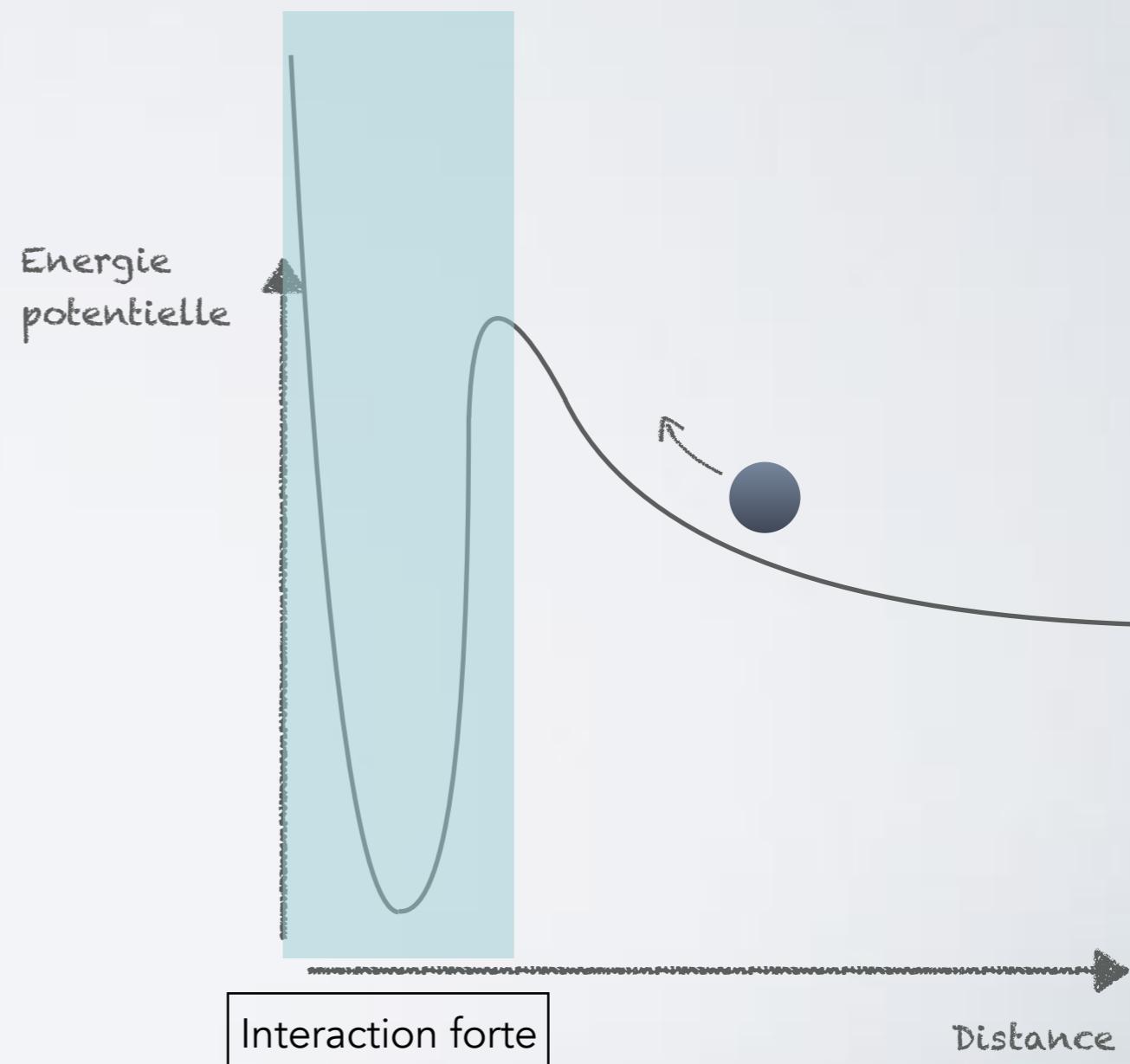


Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:



- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!
- La matière "rebondit" sur le cœur de neutrons

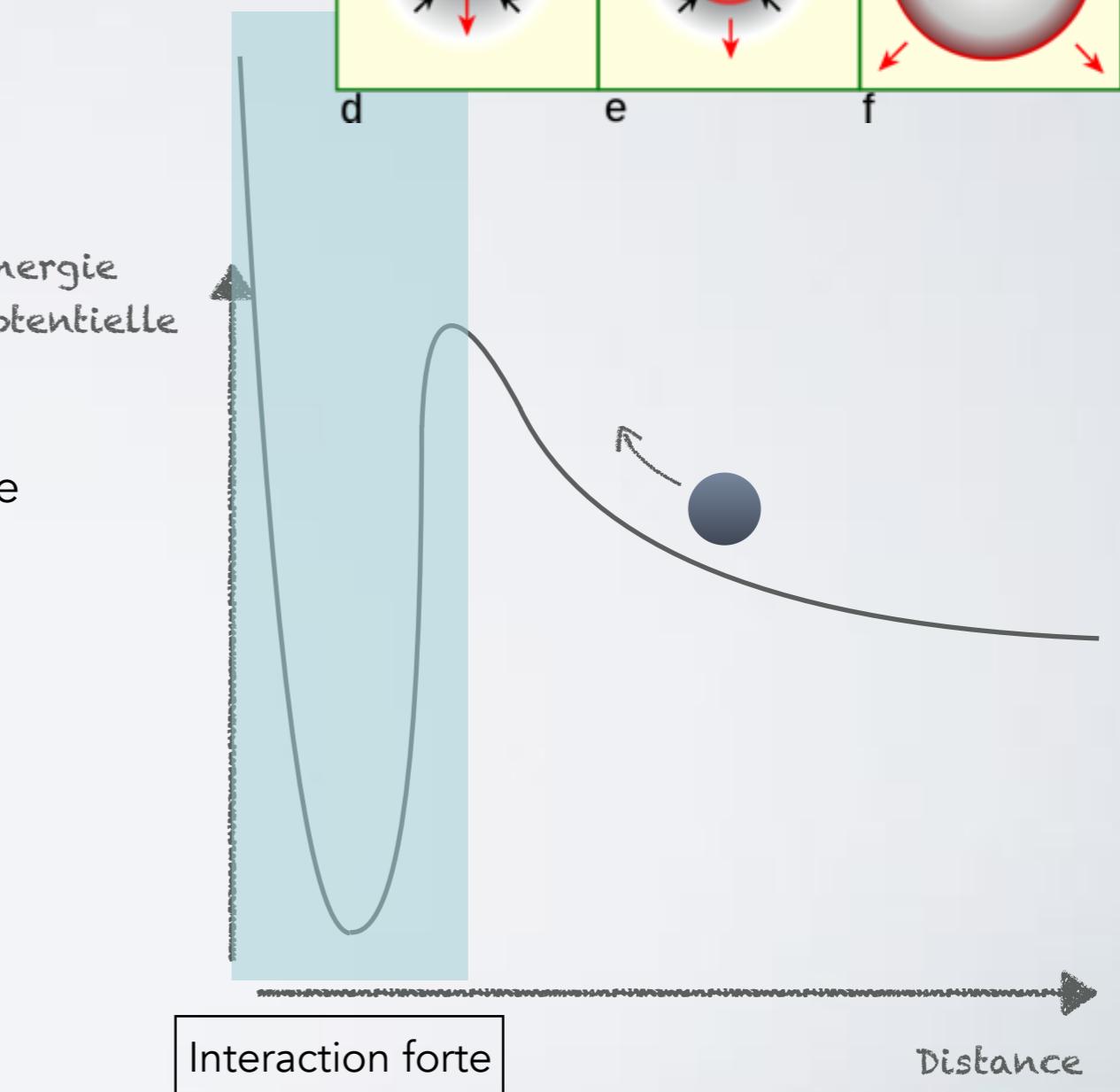
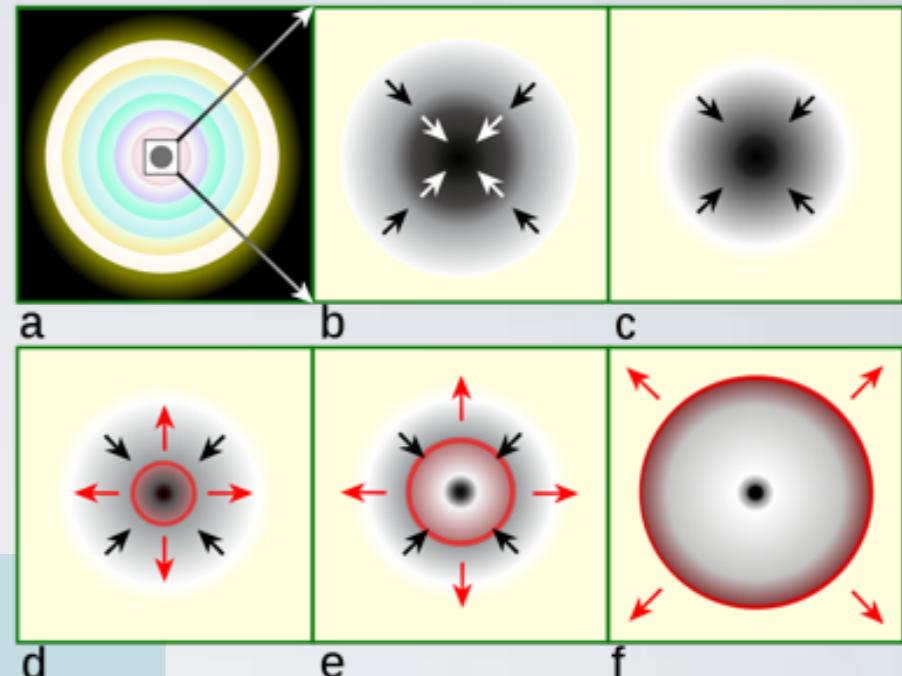


Mort des étoiles massives

- Durant l'effondrement:



- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!
- La matière "rebondit" sur le cœur 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 cœur de neutrons)



Mort des étoiles massives

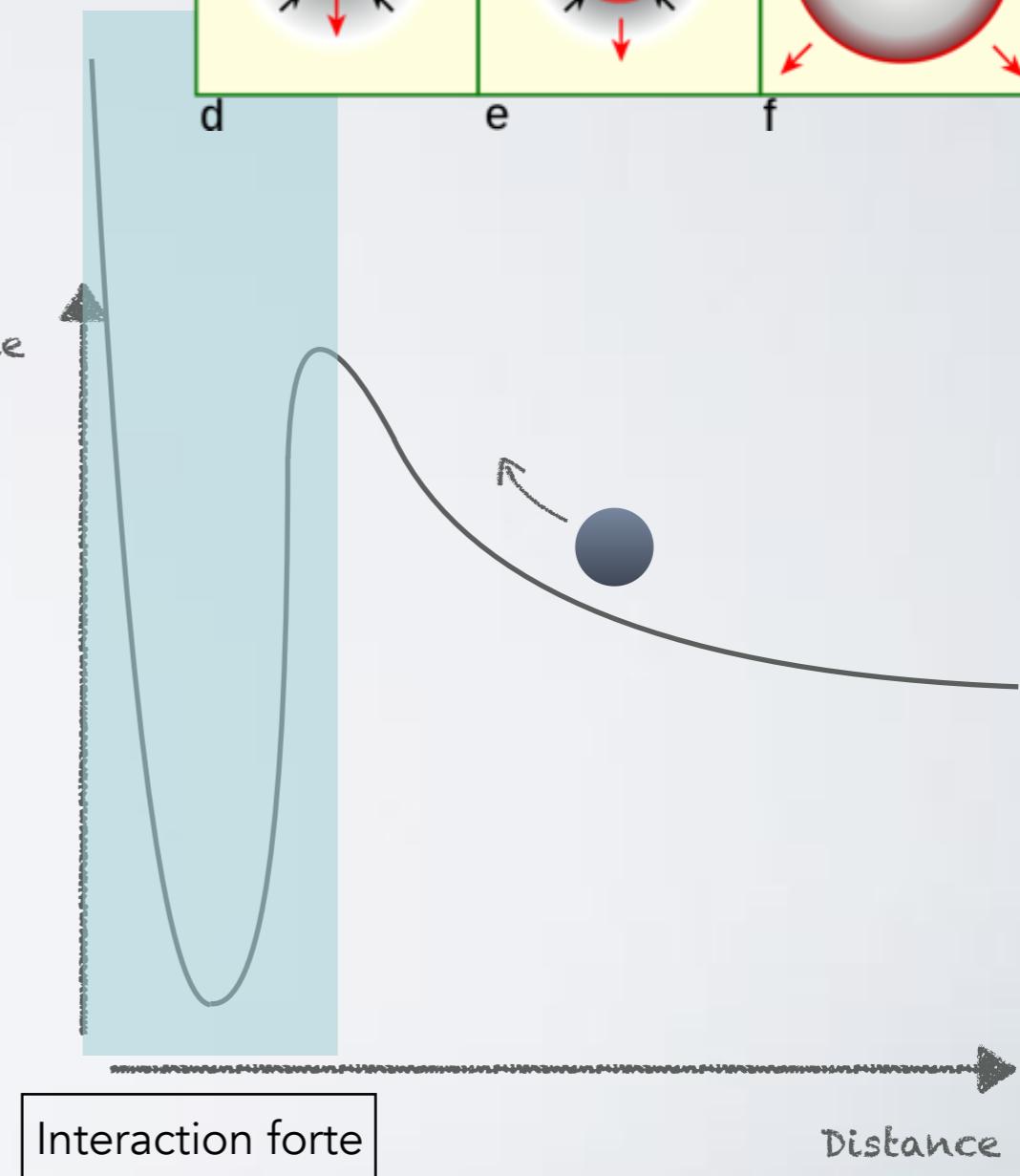
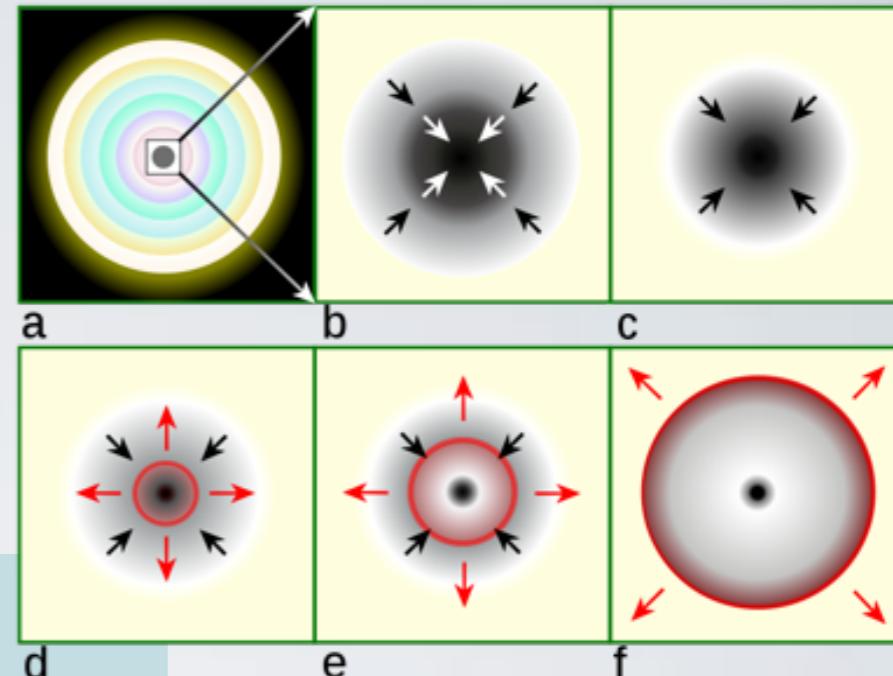
- Durant l'effondrement:



- ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!
- La matière "rebondit" sur le cœur 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 cœur de neutrons)

O Ne Mg Si S

Supernova
à effondrement de cœur

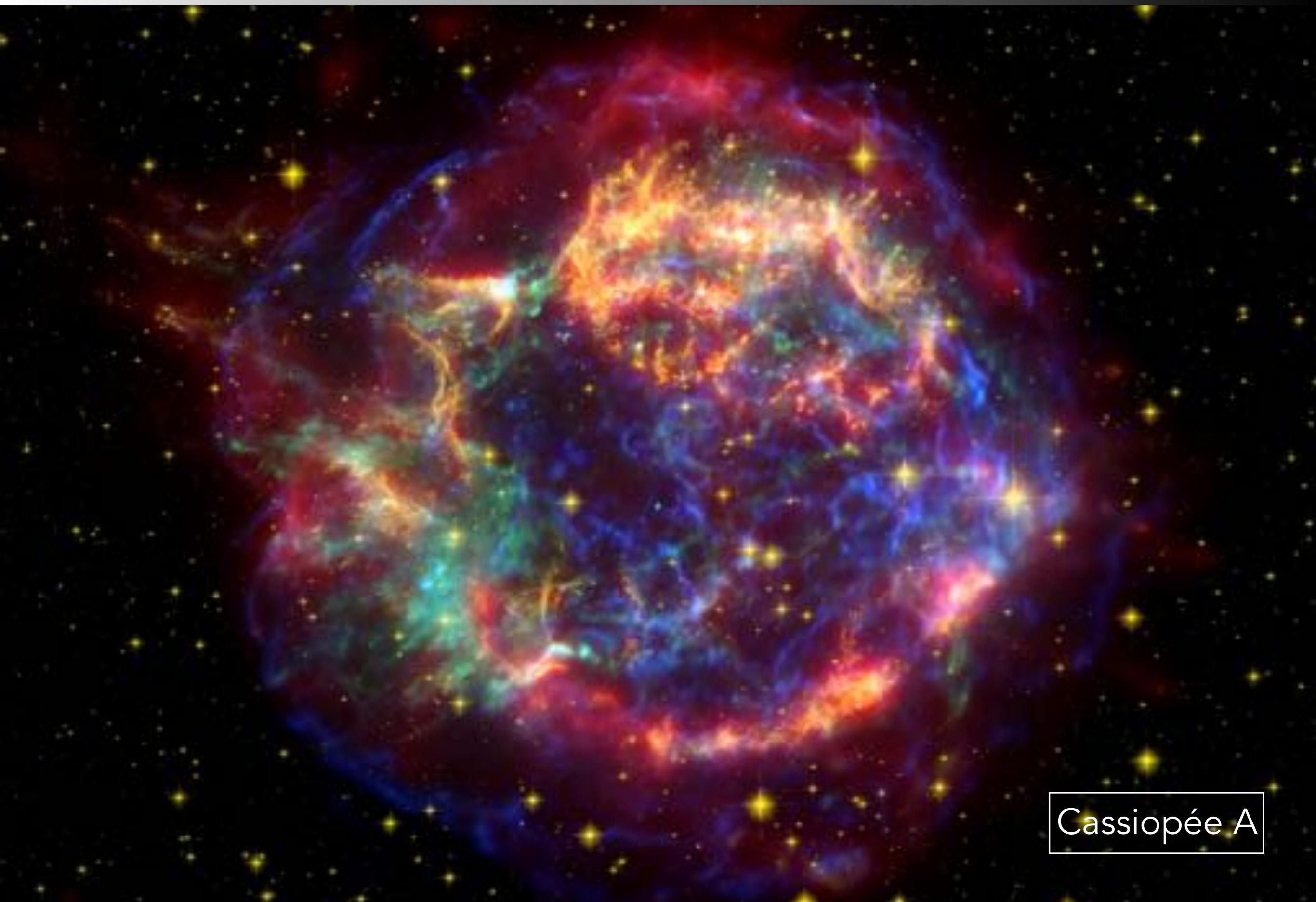


Supernovae à effondrement de cœur



SN 1054
(Nébuleuse du Crabe)

Supernovae à effondrement de cœur



Cassiopée A

Supernovae à effondrement de cœur

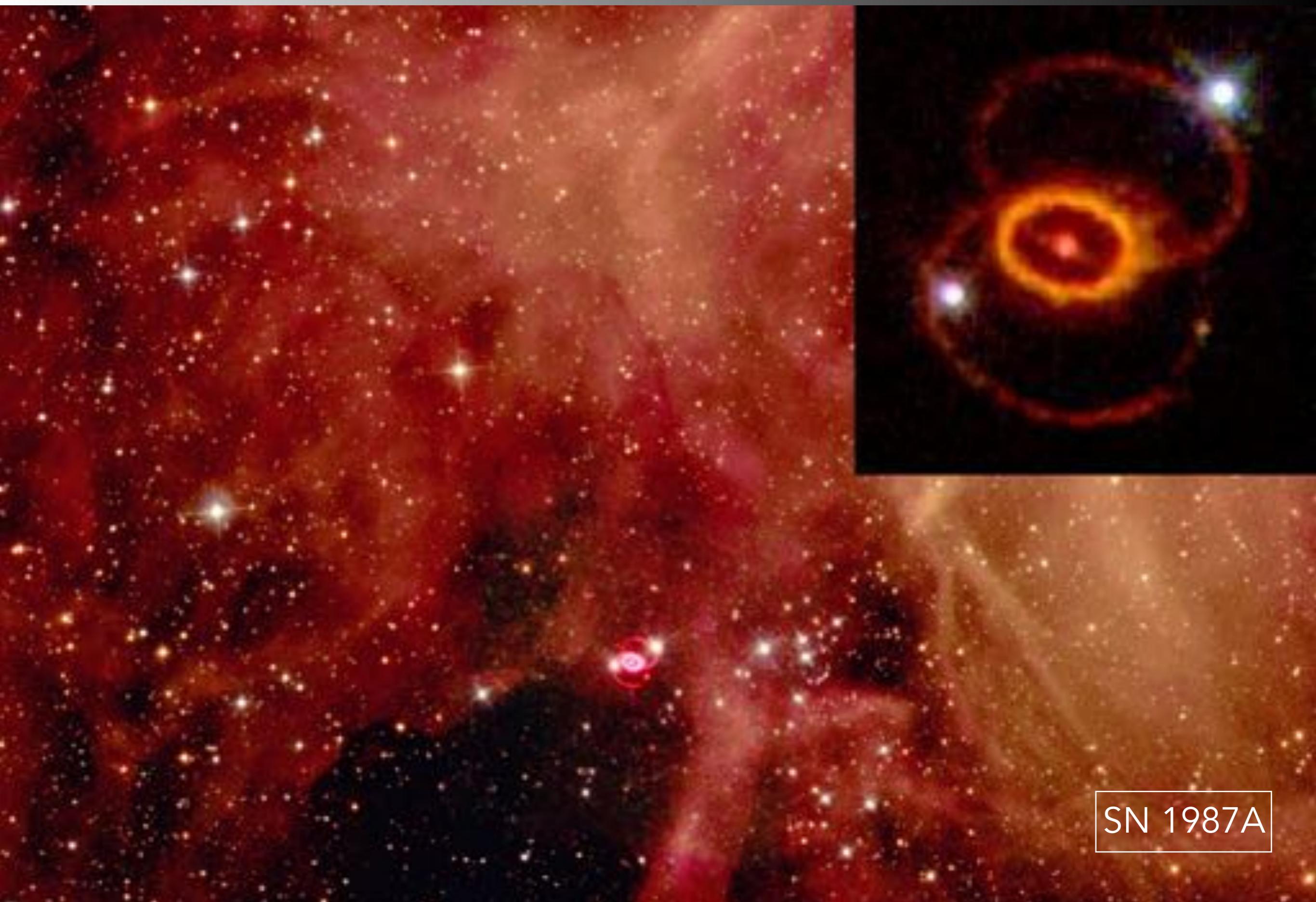


Supernovae à effondrement de cœur



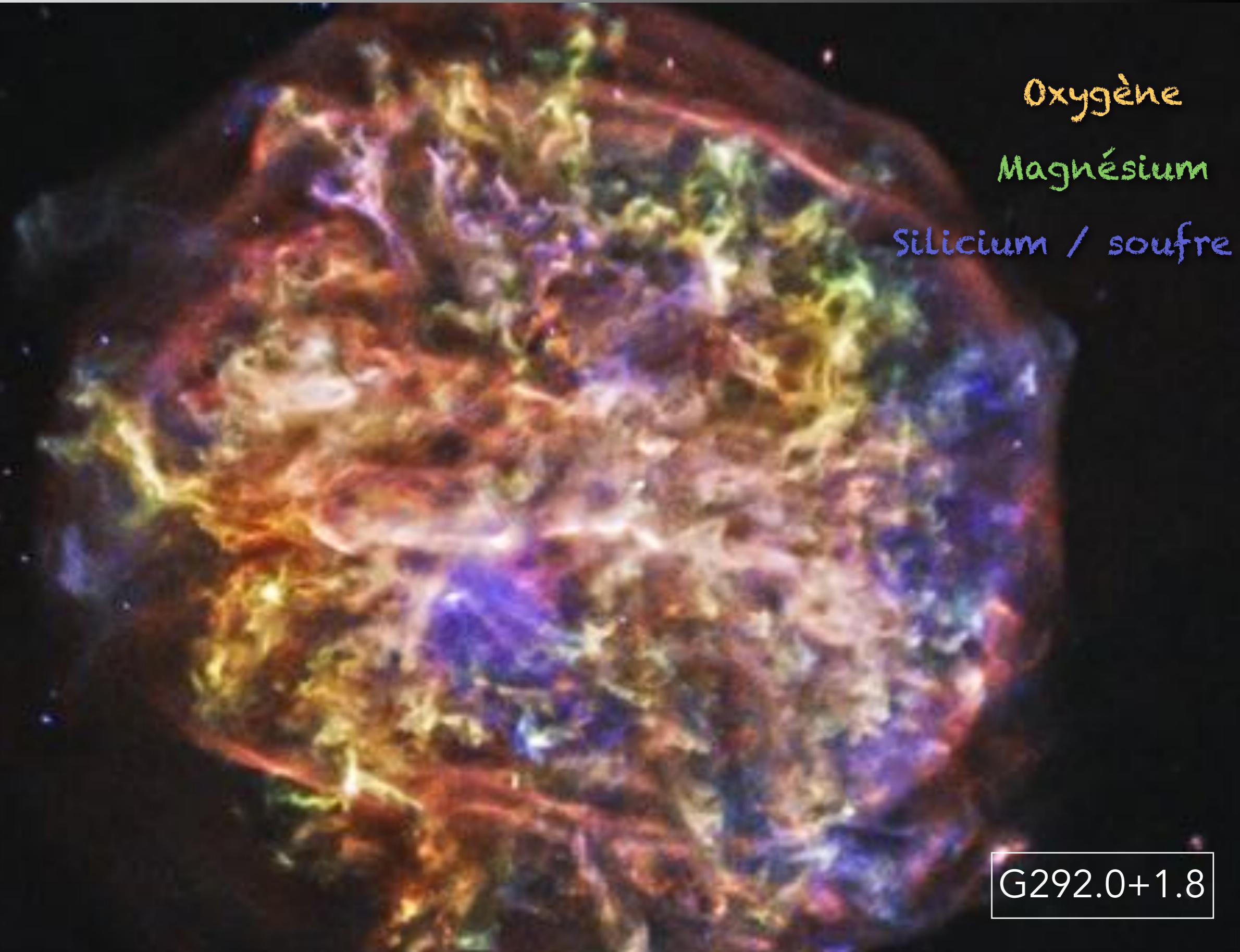
W49B

Supernovae à effondrement de cœur

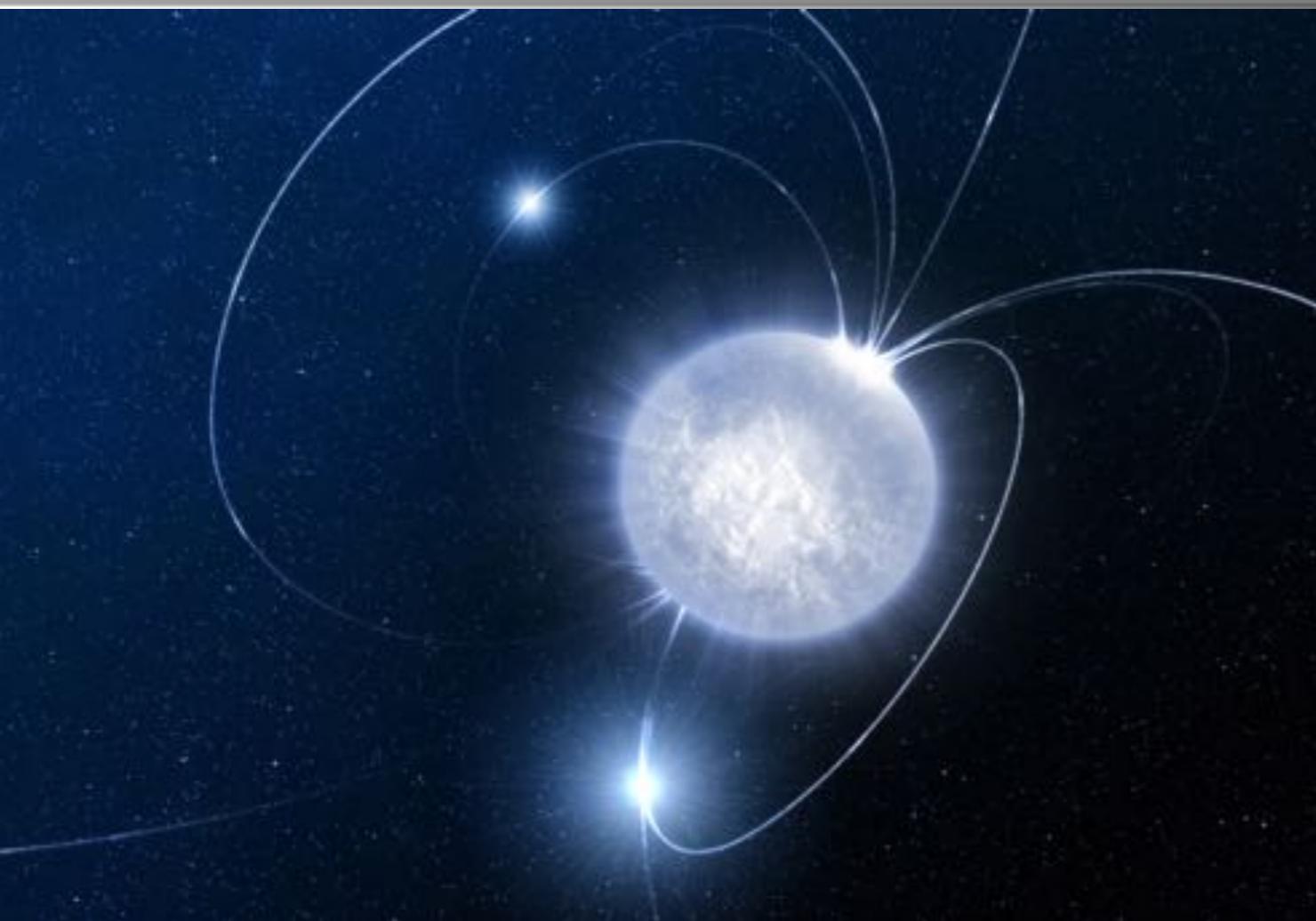


SN 1987A

Supernovae à effondrement de cœur

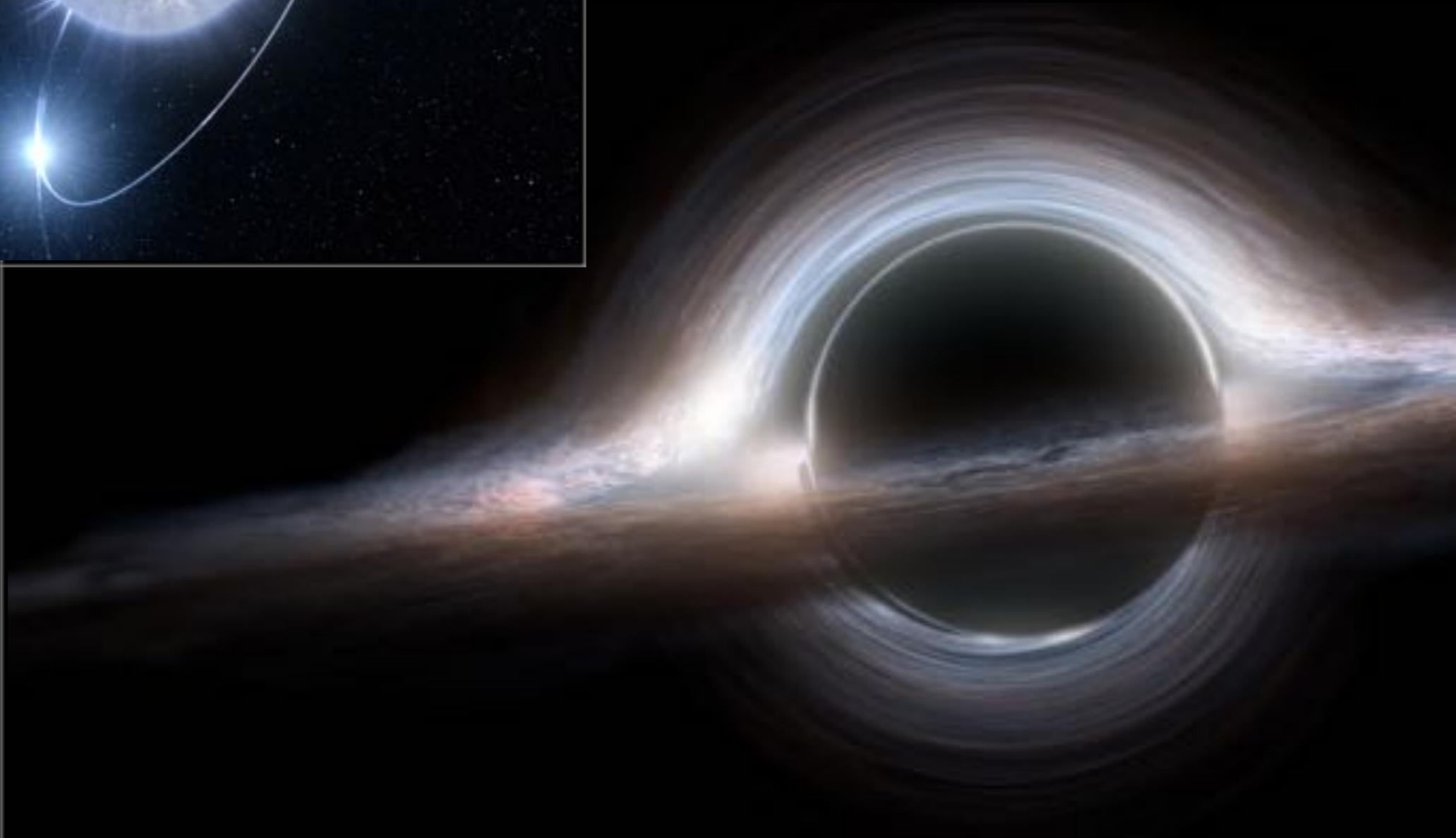


Cadavres stellaires



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

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

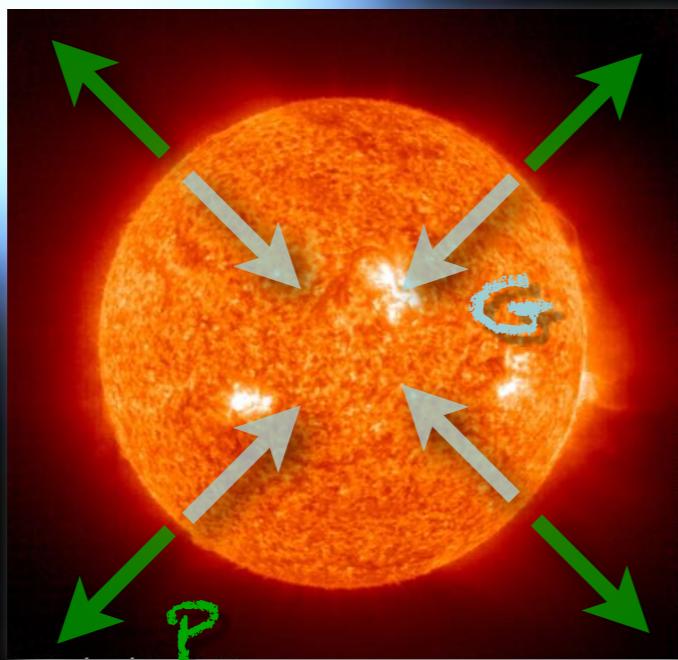


Naine blanche... et après?

- Résidu du cœur 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?

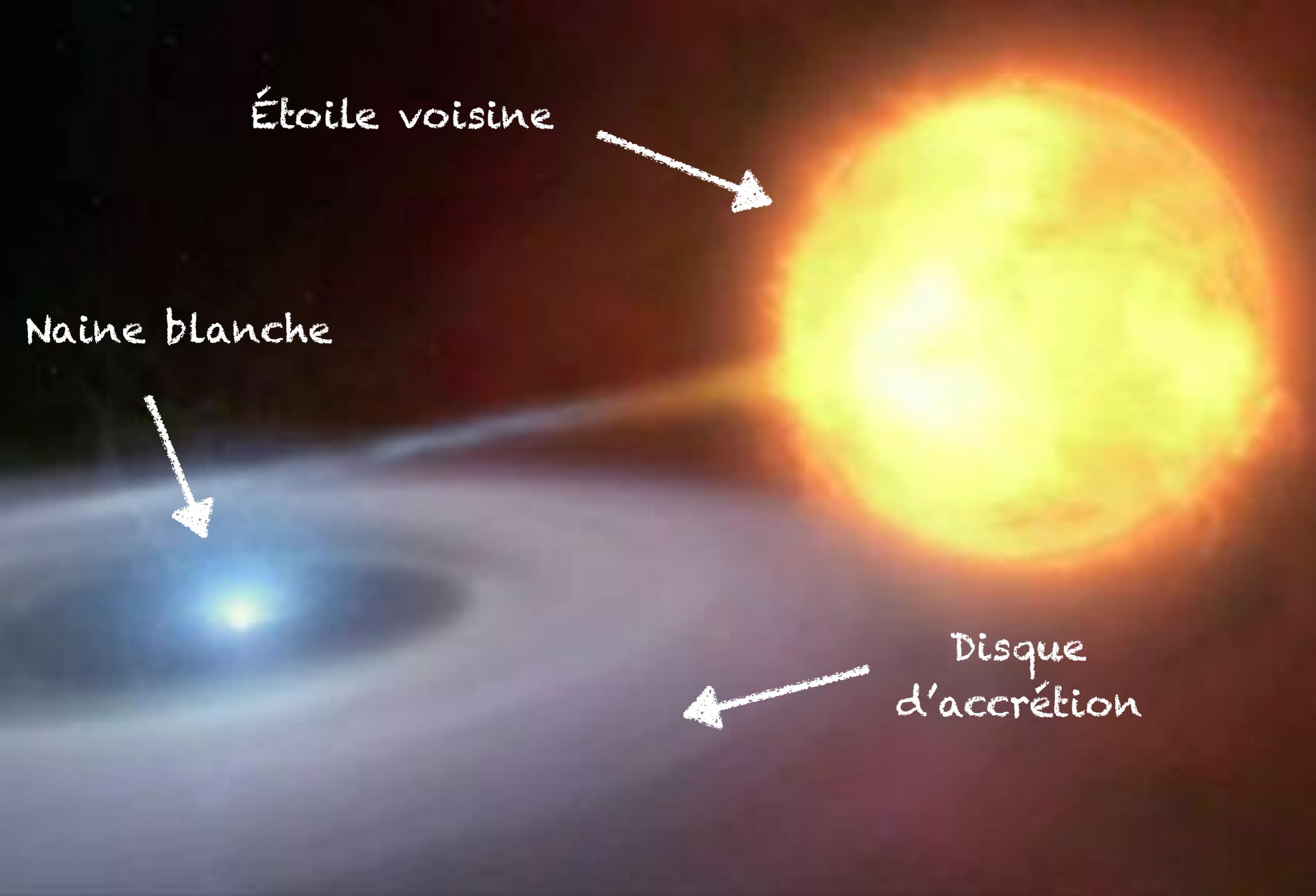
- Résidu du cœur de l'étoile (de faible masse)
- À peu près la taille de la Terre
- Riche en carbone (et oxygène)
- Extrêmement dense!
 - (1 tonne/cm³)
- Pas de réactions nucléaires...
 - ➡ ...sauf si accompagnée!



≠



Naine blanche... et après?

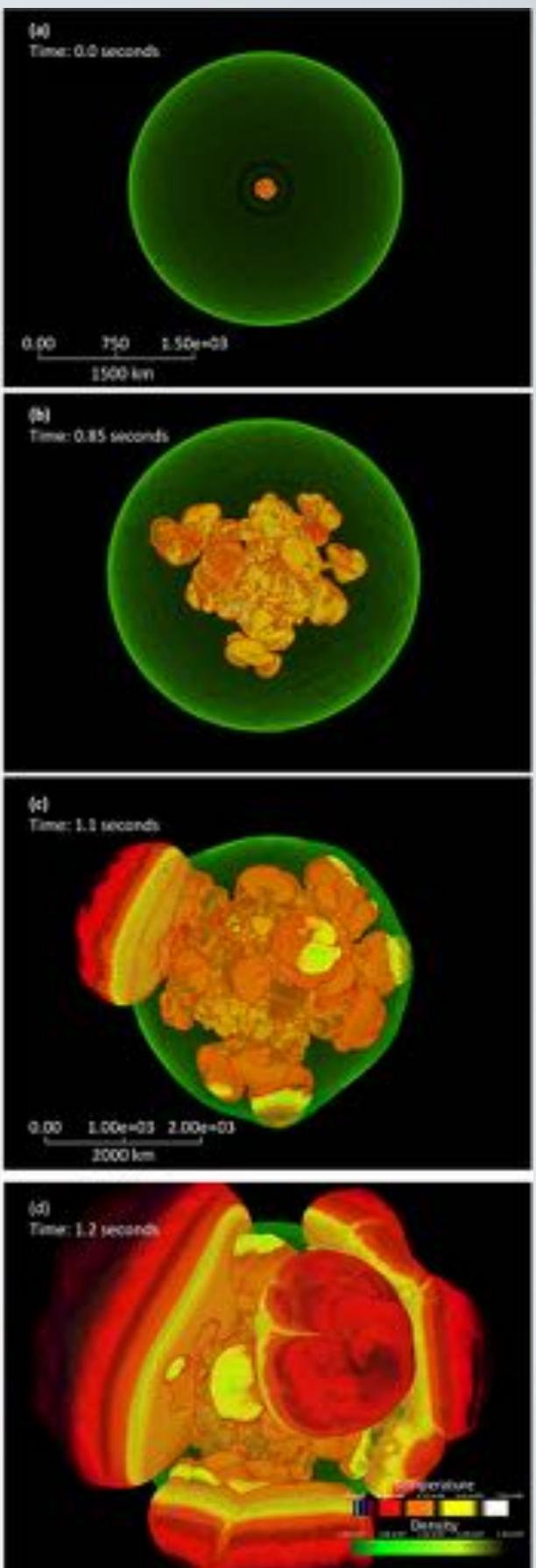


Naine blanche... et après?

- 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



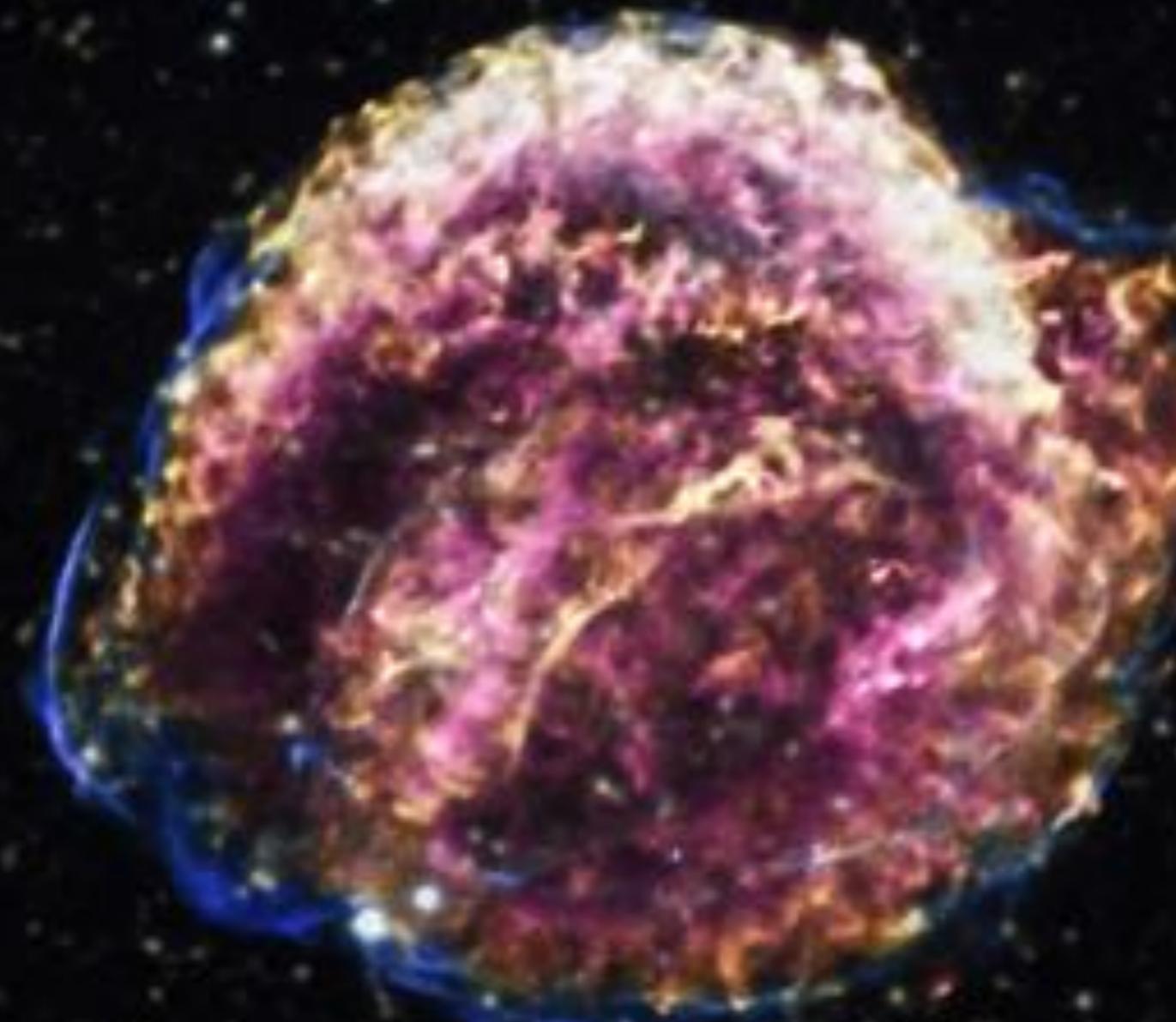
SN 1752
(Supernova de Tycho)

Supernovae de Type Ia



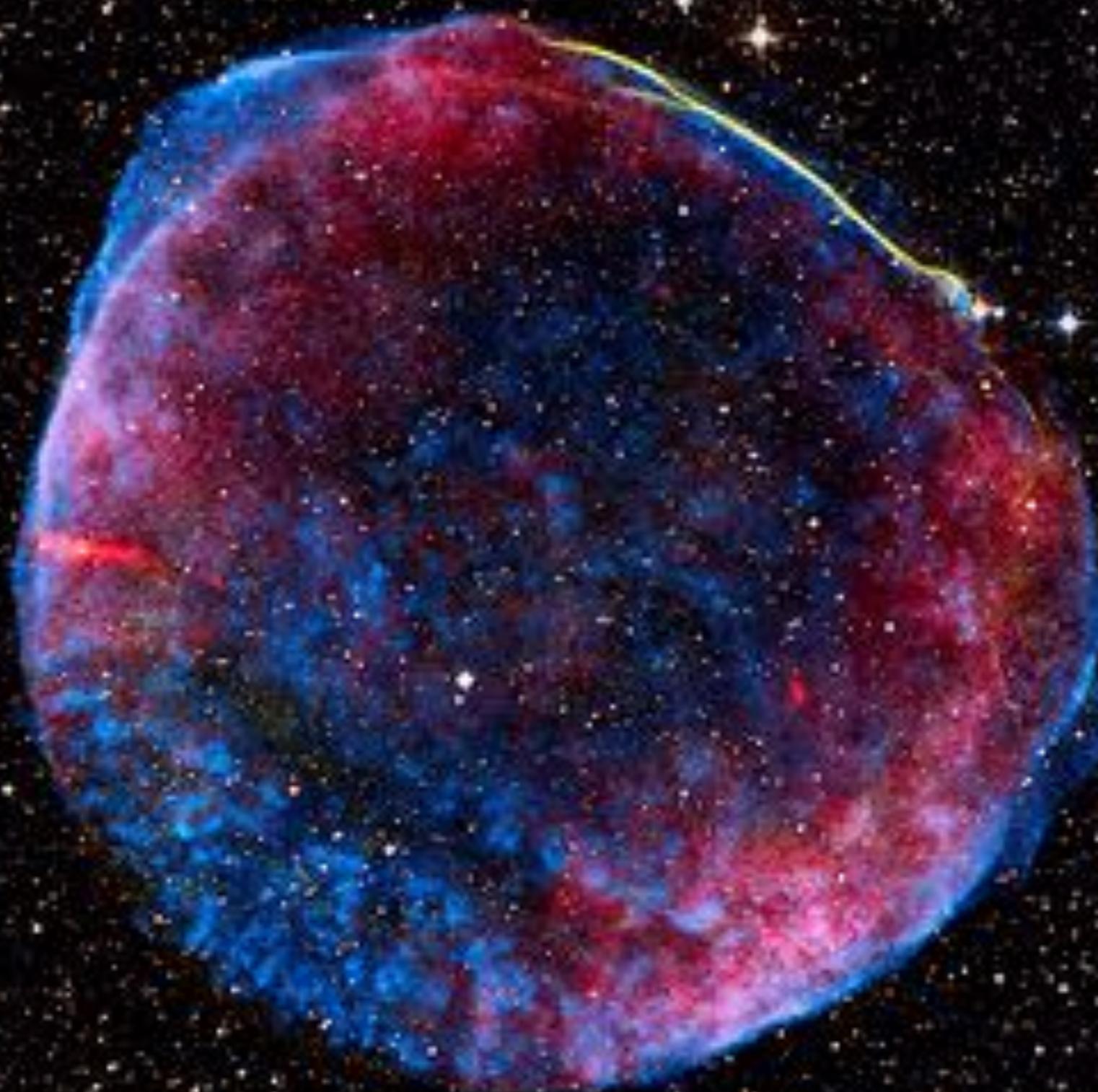
G299.2-2.9

Supernovae de Type Ia



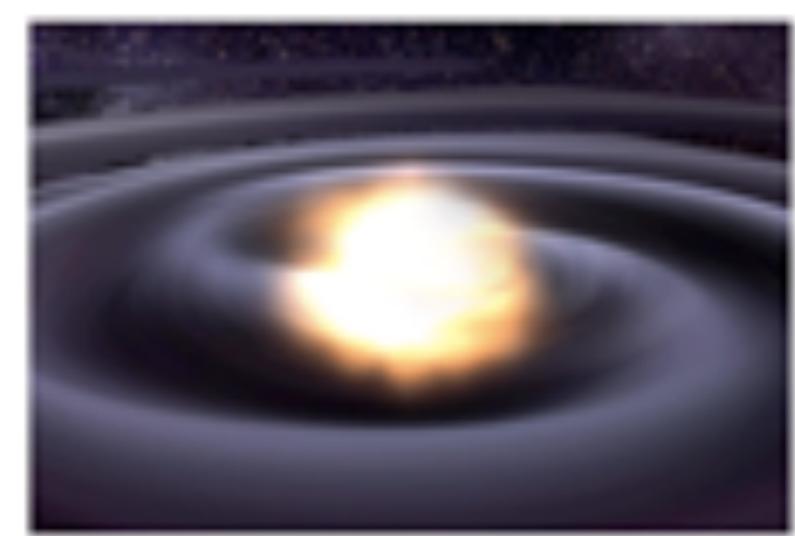
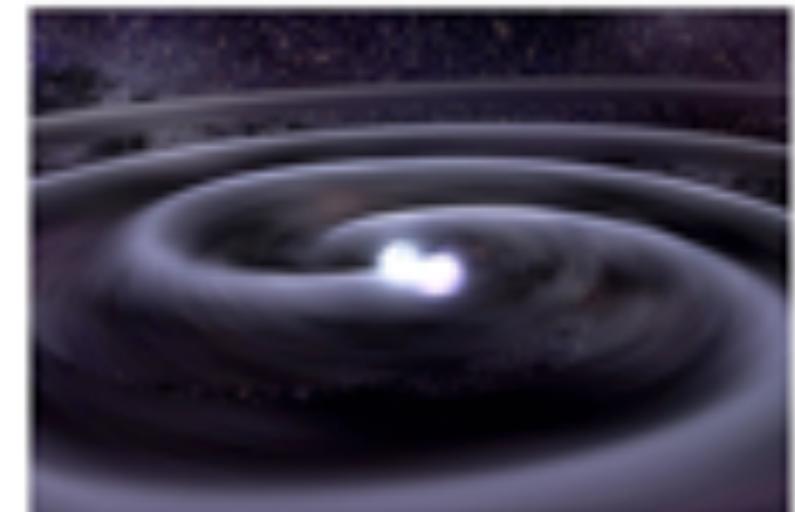
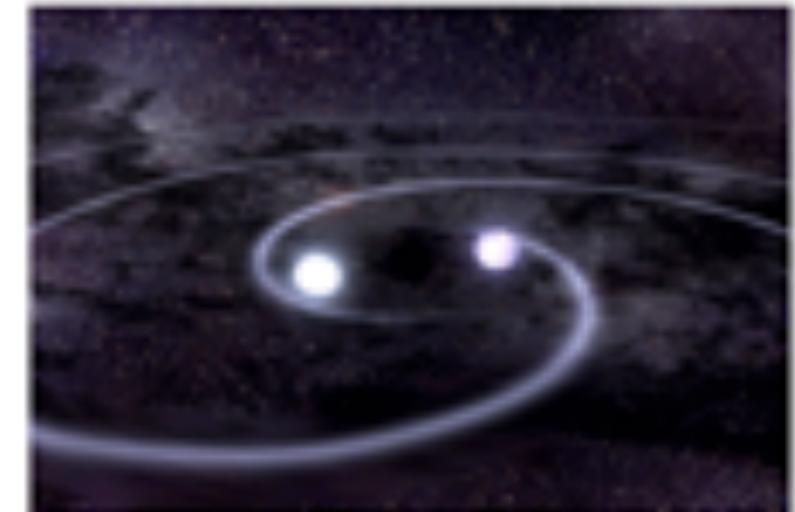
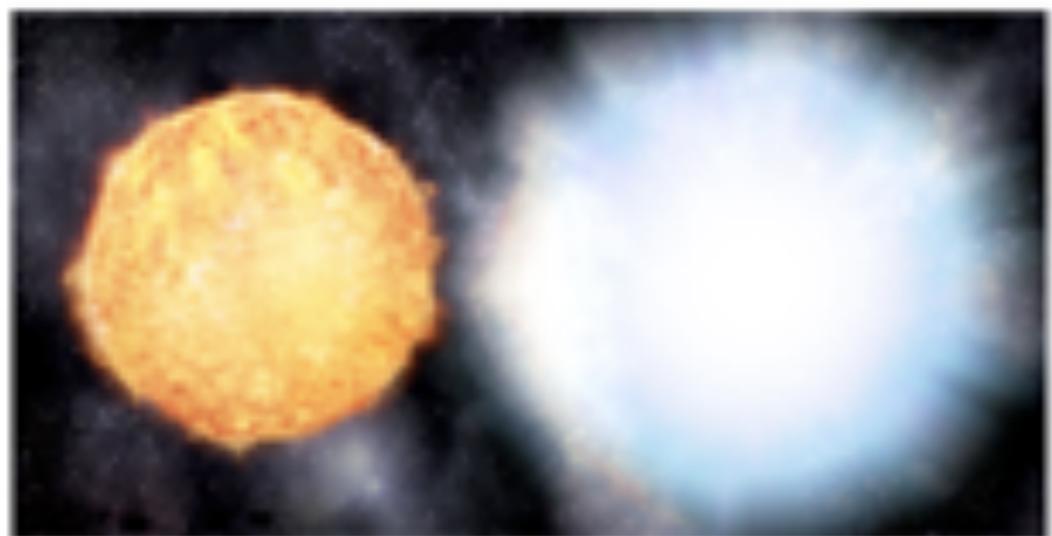
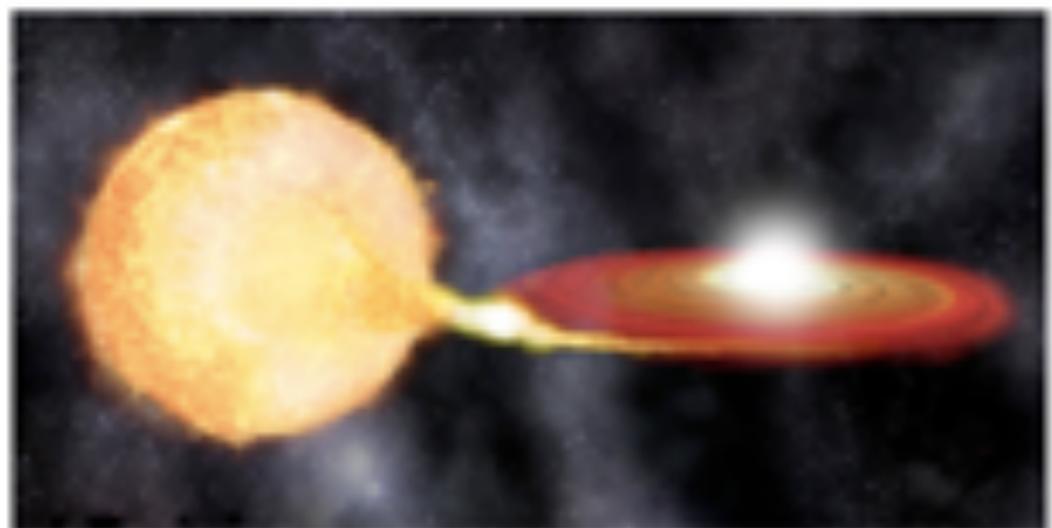
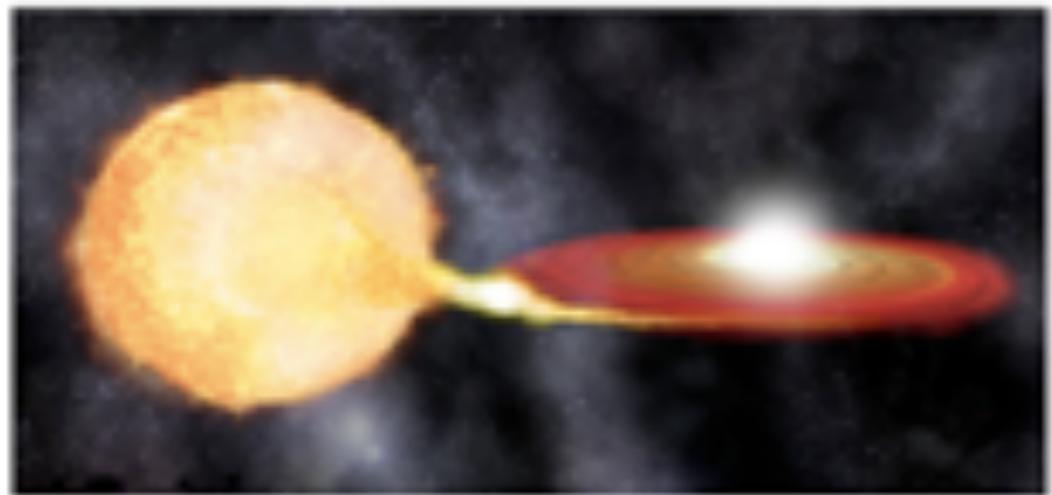
SN 1604
(Supernova de Kepler)

Supernovae de Type Ia



SN 1006

Supernovae de Type Ia: quelle origine?

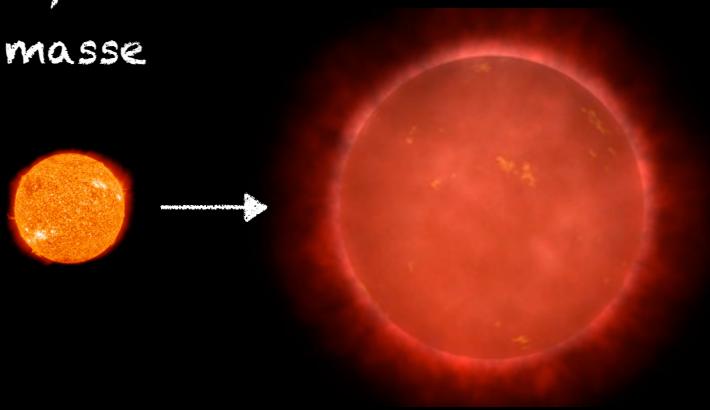


Accrétion de matière d'une étoile voisine...?

...ou collision de 2 naines blanches?

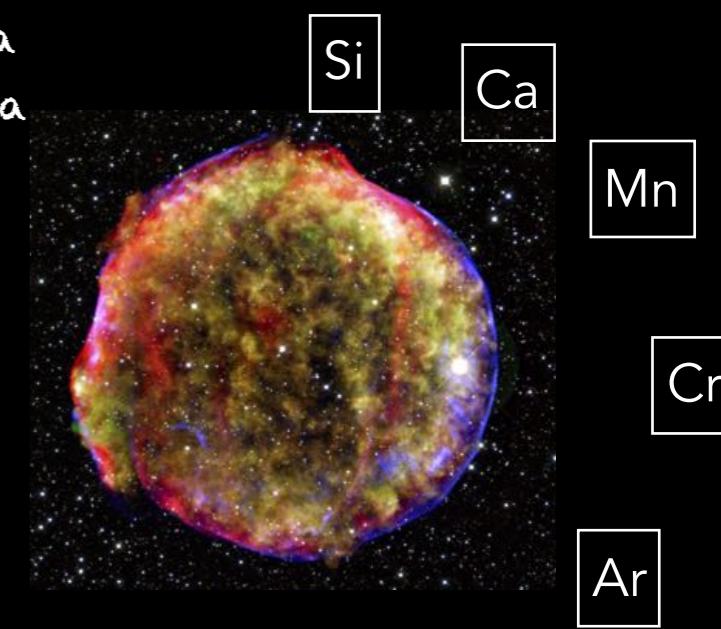
Résumé jusqu'ici...

Étoile
de faible
masse



Nébuleuse planétaire

Supernova
de Type Ia



Géante rouge



Étoile
massive



Supergéante
rouge

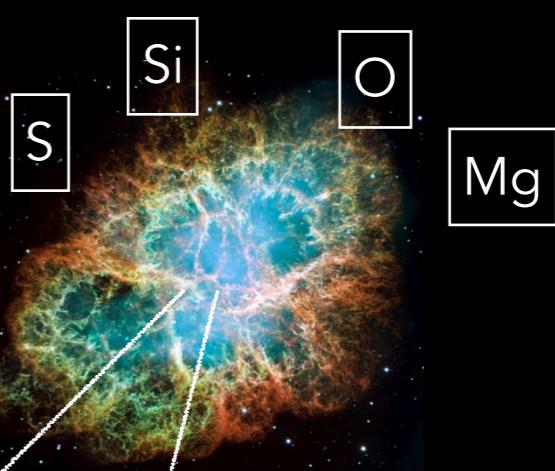


Supernova
à effondrement
de cœur

Trou
noir



Étoile à
neutrons



Si
O
Mg

S

Si

O

Mg

Ne



Nous sommes tous des
poussières d'étoiles!



Et les éléments très lourds?

Tableau périodique des éléments

The image shows a detailed periodic table of elements. A green oval highlights the first two columns (Groups 1 and 2), which consist of the alkali metals (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) and the alkaline earth metals (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra). Another green oval highlights the third through eighth columns (Groups 13-18), which include boron (B), aluminum (Al), silicon (Si), phosphorus (P), sulfur (S), chlorine (Cl), and the noble gases (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn). A third green oval highlights the transition metals, which are located in the central part of the table, spanning from group 3 to group 12. A legend at the bottom left defines the colors: purple for metals, teal for metalloids, red for non-metals, and yellow for noble gases.

	1 IA	2 IIA	3	4 IIIB	5 VIB	6 VIB	7 VIB	8 VIB	9 VIB	10 VIB	11 VIB	12 VIB	13 IIIA	14 IIIA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIA
1	H Hydrogène	Be Béryllium		Ti Titanium	V Vanadium	Cr Chromium	Mn Manganèse	Fe Fer	Co Cobalt	Ni Nickle	Cu Cupronickel	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Gérasme	As Antimoine	Se Sélénium	Br Bromure	Kr Krypton
2	Li Lithium	Mg Magnésium	Sc Scandium	Ta Tantalum	W Tungstène	Re Rhenium	Os Osmium	Ir Iridium	Pt Ptatium	Au Or	Hg Hémercure	Tl Thallium	Pb Plomb	Bi Bismuth	Po Polonium	At Astatine	Xe Xénon	
3	Na Natrium	Mg Magnésium		Cr Chromium	Mn Manganèse	Fe Fer	Co Cobalt	Ni Nickle	Cu Cupronickel	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Gérasme	As Antimoine	Se Sélénium	Br Bromure	Kr Krypton		
4	K Potassium	Ca Calcium	Sc Scandium	Ti Titanium	V Vanadium	Cr Chromium	Mn Manganèse	Fe Fer	Co Cobalt	Ni Nickle	Cu Cupronickel	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Gérasme	As Antimoine	Se Sélénium	Br Bromure	Kr Krypton
5	Rb Rubidium	Sr Strontium	Y Yttrium	Zr Zirconium	Nb Nobium	Mo Molibdène	Ru Ruthénium	Rh Rhodium	Pd Palladium	Ag Argent	Cd Cadmium	In Indium	Sn Stannum	Sb Antimoine	Te Tellure	I Iode	Xe Xénon	
6	Cs Csium	Ba Baryum	La Lanthanide	Hf Hafnium	Ta Tantale	W Tungstène	Re Rhenium	Os Osmium	Ir Iridium	Pt Ptatium	Au Or	Hg Hémercure	Tl Thallium	Pb Plomb	Bi Bismuth	Po Polonium	At Astatine	Rn Rétin
7	Fr Francium	Ra Rétin	Ac Actinide	Rf Rutherfordium	Rb Rutherfordium	Sg Saskatchewani	Rf Rutherfordium	Rb Rutherfordium	Rf Rutherfordium									
	Ce Césum	Pr Présidentium	Nd Néodyme	Pm Protactinium	Sm Samarium	Eu Europium	Gd Gadolinite	Tb Thulium	Dy Dysprosium	Ho Holmium	Er Erbium	Tm Thulium	Yb Yttrium	Lu Lanthanide				
	Th Thorium	Pa Protactinium	U Uranium	Np Neptunium	Pu Plutonium	Am Americium	Cm Curium	Bk Berkélium	Cf Californium	Ba Bardium	Fm Fermium	Md Mendelevium						

Et les éléments très lourds?

Tableau périodique des éléments

The image shows a detailed periodic table of elements. A large green oval highlights the first two groups (Groups 1 and 2) in the first period, which are the hydrogen and helium isotopes. Another green oval highlights the second-period elements from boron to zinc. A third green oval highlights the lanthanide series (Ce-Lu) and the actinide series (Th-Lu). Overlaid on the table is a dark gray rectangular box containing the text:

Comment créer les éléments au delà du zinc?
(or, argent, platine,...)

Below the table, there is a legend with four colored squares: purple (Métal), teal (Métalloïde), red (Non métalloïde), and yellow (Gaz noble).

Numéro atomique: 6
Principaux nombres d'oxydation (les plus fréquents en gras)
Nom: C
Symbole de l'élément
Masses atomiques (approximatives)
12.01 Neutre électronique (des trois parties d'électrons)

18.02 He (non métalloïde)
10.00 Ne (gaz noble)
18.00 Ar (gaz noble)

1.00 H (gaz noble)
2.00 Be (gaz noble)

3.00 Li (gaz noble)
4.00 Be (gaz noble)

11.00 Na (gaz noble)
12.00 Mg (gaz noble)

19.00 K (gaz noble)
20.00 Ca (gaz noble)
21.00 Sc (gaz noble)

22.00 Ti (gaz noble)
23.00 V (gaz noble)
24.00 Cr (gaz noble)
25.00 Mn (gaz noble)
26.00 Fe (gaz noble)
27.00 Co (gaz noble)
28.00 Ni (gaz noble)
29.00 Cu (gaz noble)
30.00 Zn (gaz noble)

31.00 Ga (gaz noble)
32.00 Ge (gaz noble)
33.00 As (gaz noble)
34.00 Se (gaz noble)
35.00 Br (gaz noble)

36.00 Kr (gaz noble)
54.00 Xe (gaz noble)

55.00 Cs (gaz noble)
56.00 Ba (gaz noble)
57.00 La (gaz noble)

72.00 Hf (gaz noble)
73.00 Ta (gaz noble)
74.00 W (gaz noble)

104.00 Rf (gaz noble)
105.00 Db (gaz noble)
106.00 Sg (gaz noble)
107.00 Bh (gaz noble)
108.00 Hs (gaz noble)
109.00 Ts (gaz noble)
110.00 Og (gaz noble)
111.00 Rg (gaz noble)

58.00 Ce (gaz noble)
59.00 Pr (gaz noble)
60.00 Nd (gaz noble)
61.00 Pm (gaz noble)
62.00 Sm (gaz noble)
63.00 Eu (gaz noble)
64.00 Gd (gaz noble)
65.00 Tb (gaz noble)
66.00 Dy (gaz noble)
67.00 Ho (gaz noble)
68.00 Er (gaz noble)
69.00 Tm (gaz noble)
70.00 Yb (gaz noble)
71.00 Lu (gaz noble)

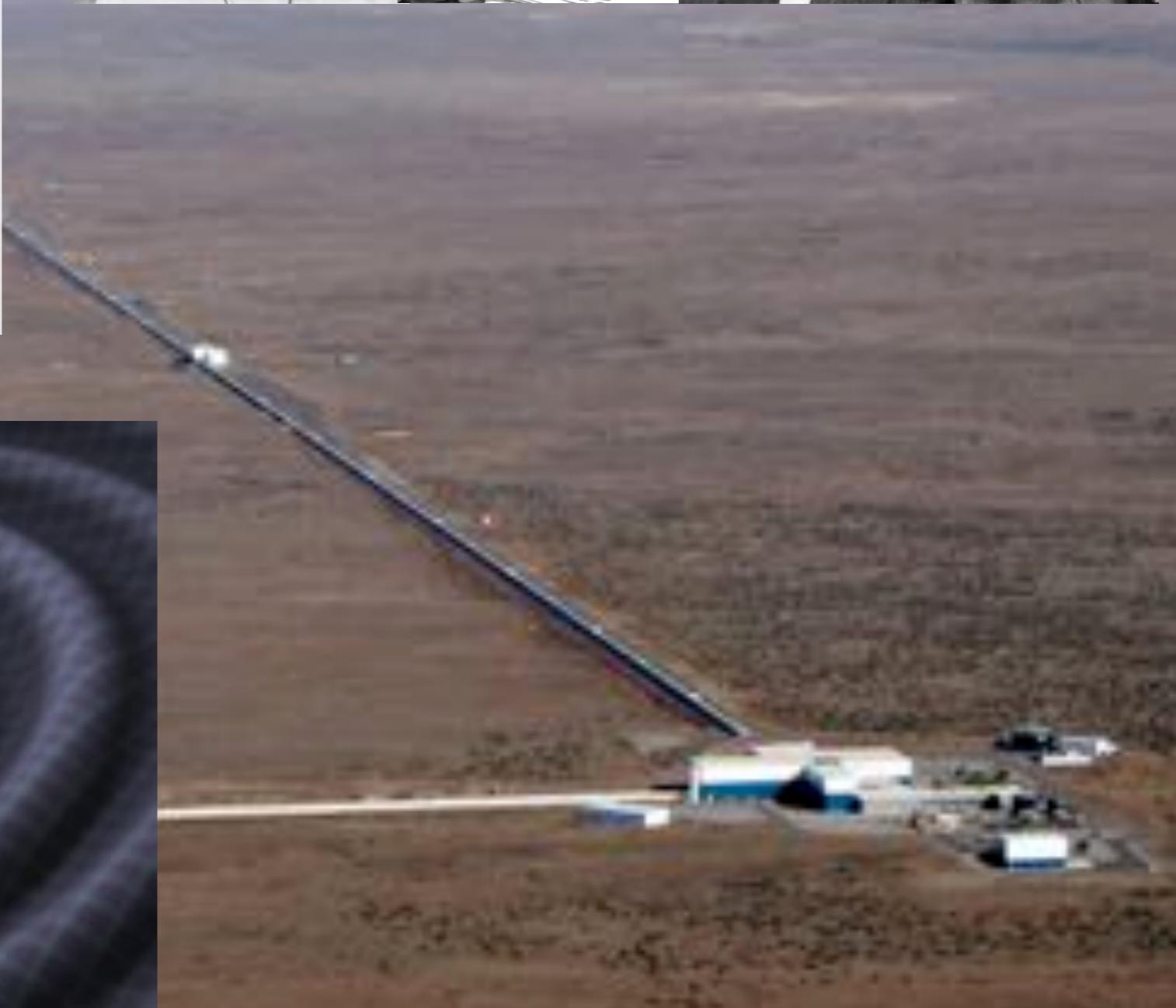
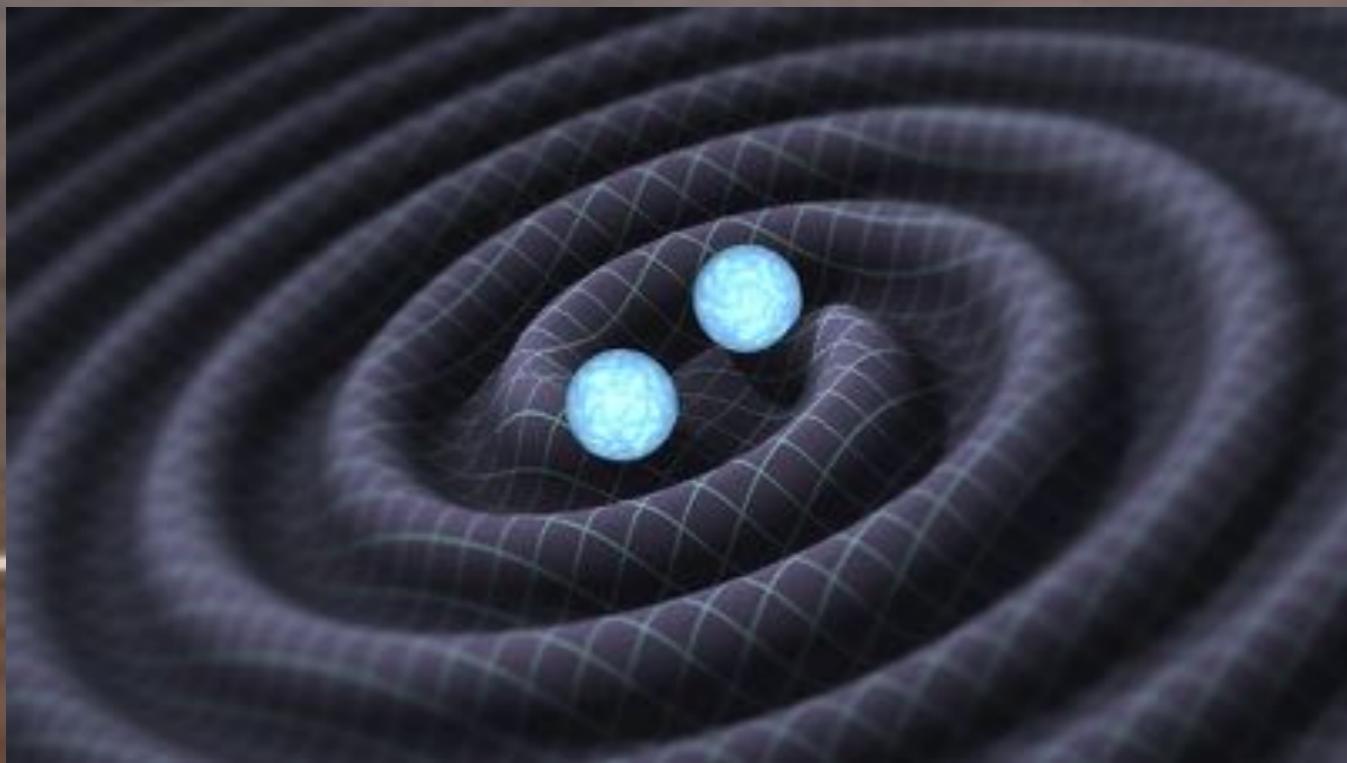
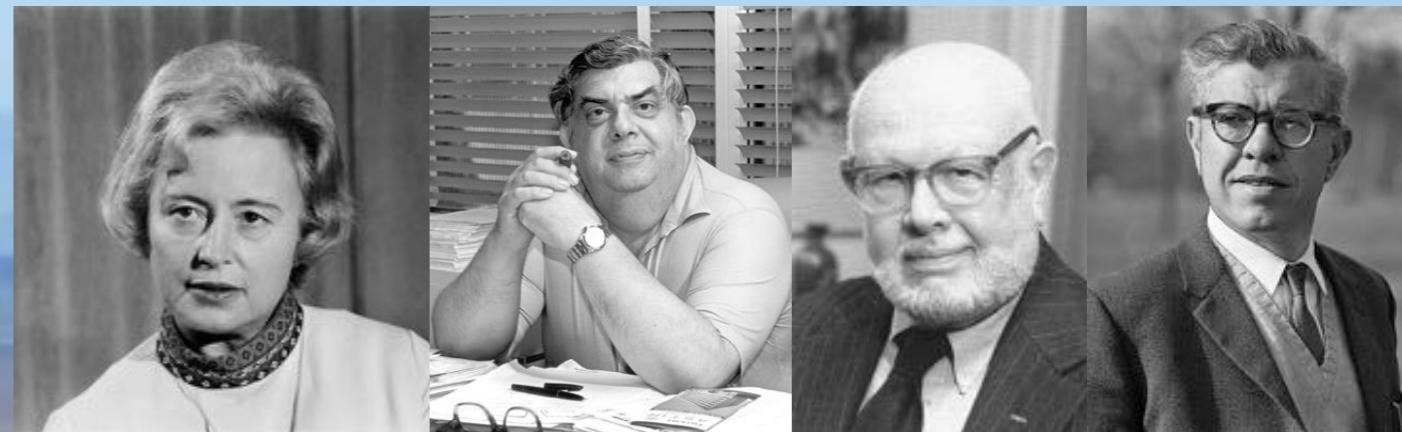
90.00 Th (gaz noble)
91.00 Pa (gaz noble)
92.00 U (gaz noble)
93.00 Np (gaz noble)
94.00 Pu (gaz noble)
95.00 Am (gaz noble)
96.00 Cm (gaz noble)
97.00 Bk (gaz noble)
98.00 Cf (gaz noble)
99.00 Es (gaz noble)
100.00 Fm (gaz noble)
101.00 Md (gaz noble)
102.00 No (gaz noble)
103.00 Lr (gaz noble)

Métal
Métalloïde
Non métalloïde
Gaz noble

* Pour les éléments radioactifs (radioactifs)

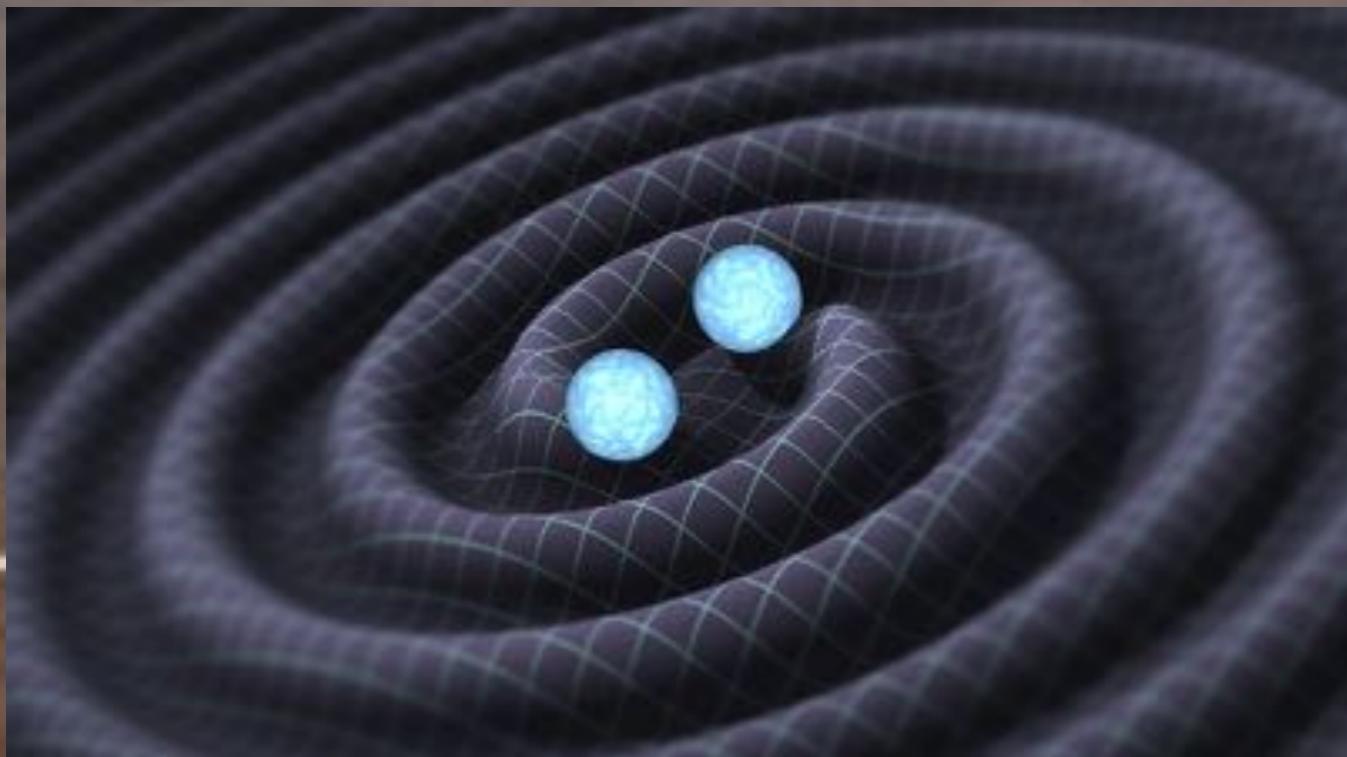
Et les éléments très lourds?

- 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!



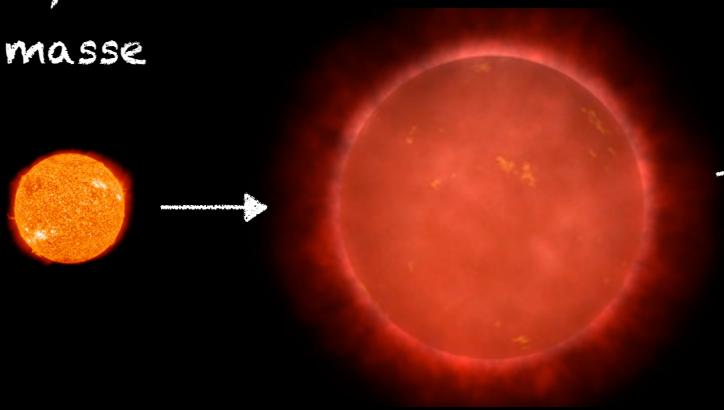
Et les éléments très lourds?

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



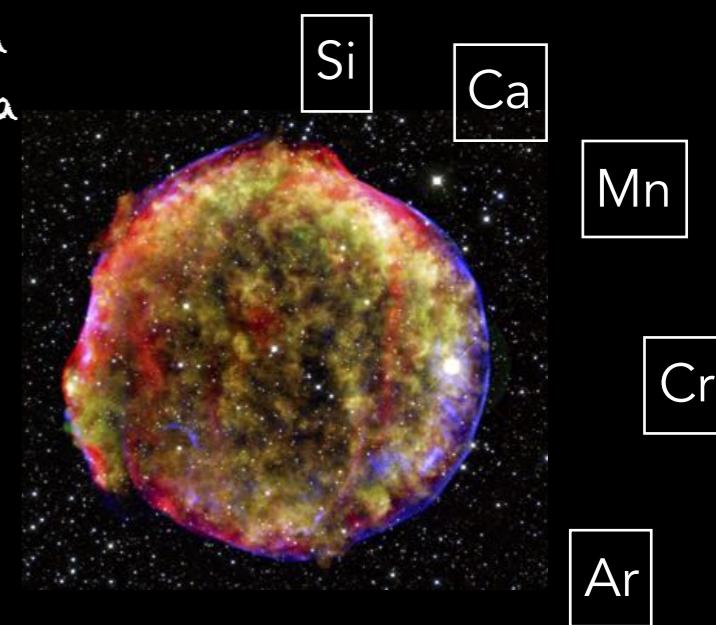
Résumé complet

Étoile de faible masse



Nébuleuse planétaire

Supernova de Type Ia



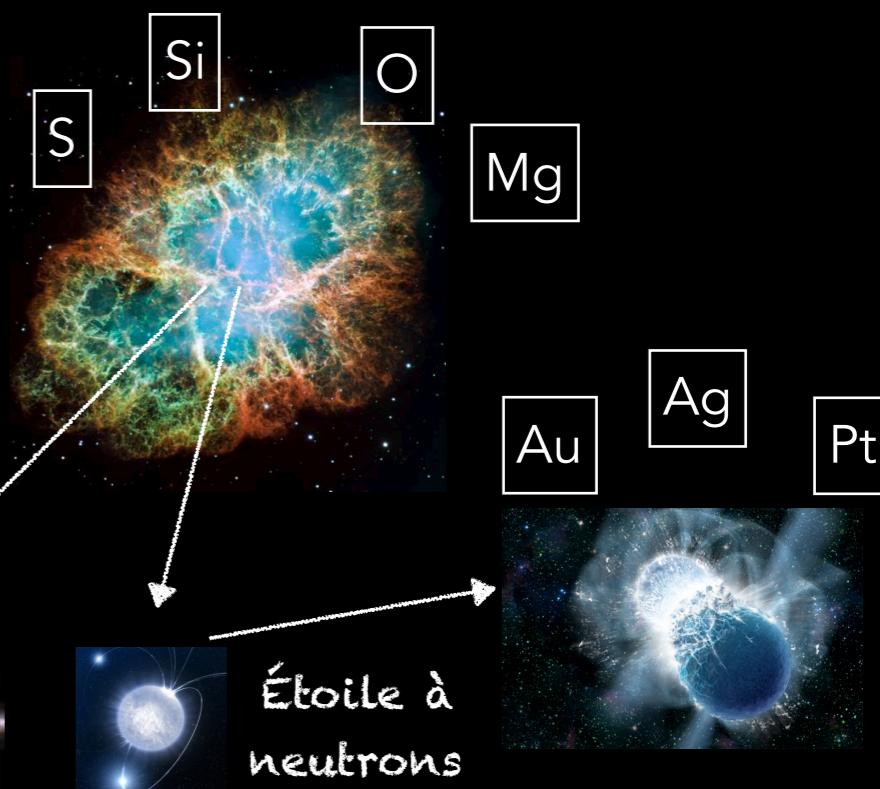
Étoile massive



Supergéante rouge

Supernova à effondrement de cœur

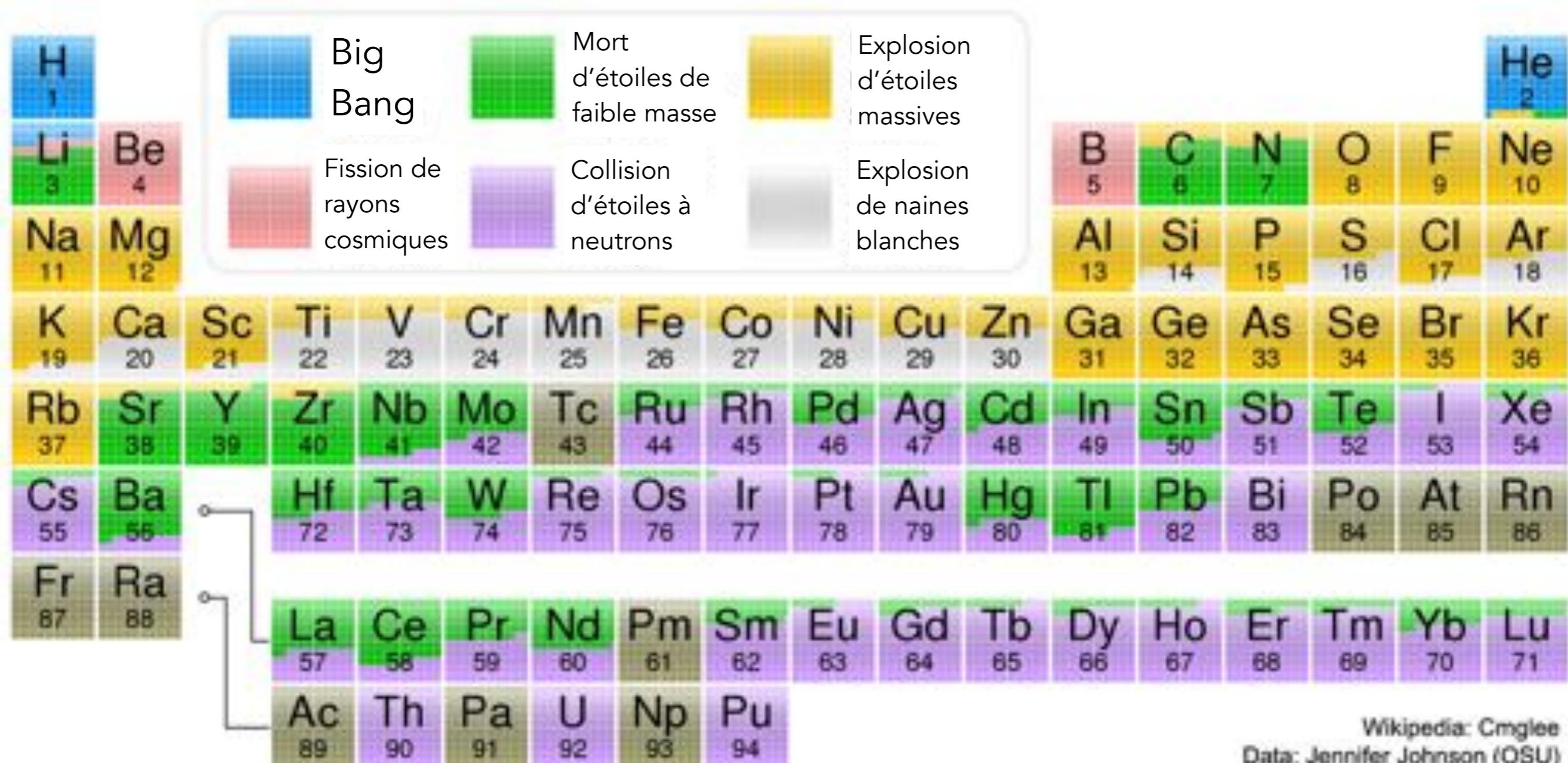
Ne



Trou noir

Étoile à neutrons

Résumé complet



Nous sommes des produits d'étoiles
et de supernovae!

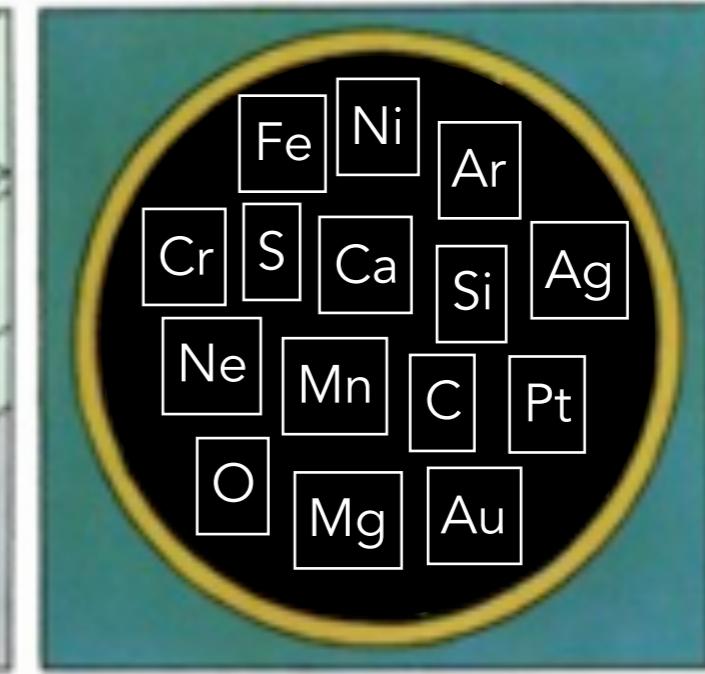
L'enrichissement chimique de l'Univers

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



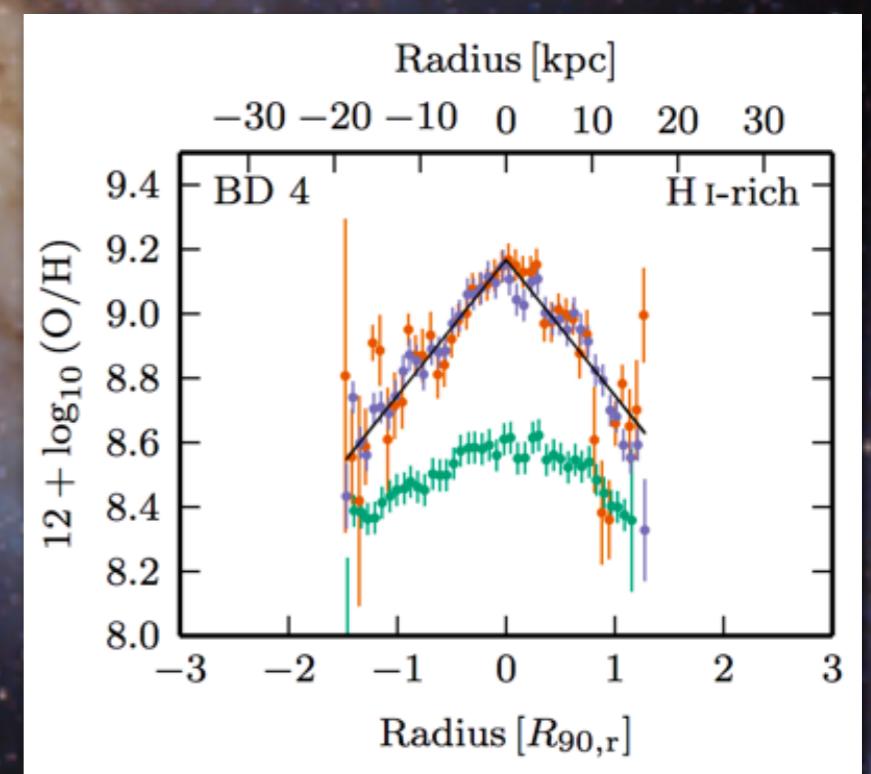
Où trouve-t-on des “métaux”?

2) Dans le gaz interstellaire



Où trouve-t-on des “métaux”?

3) Dans les galaxies proches (étoiles + gaz)



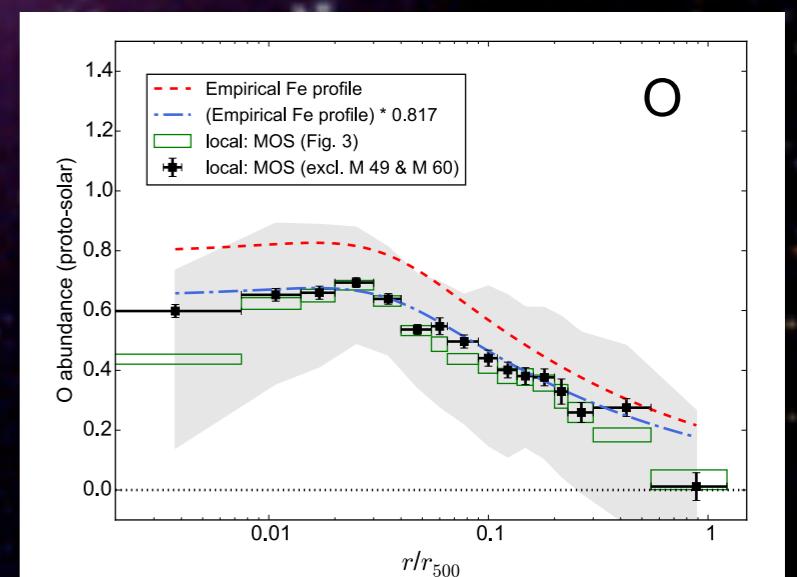
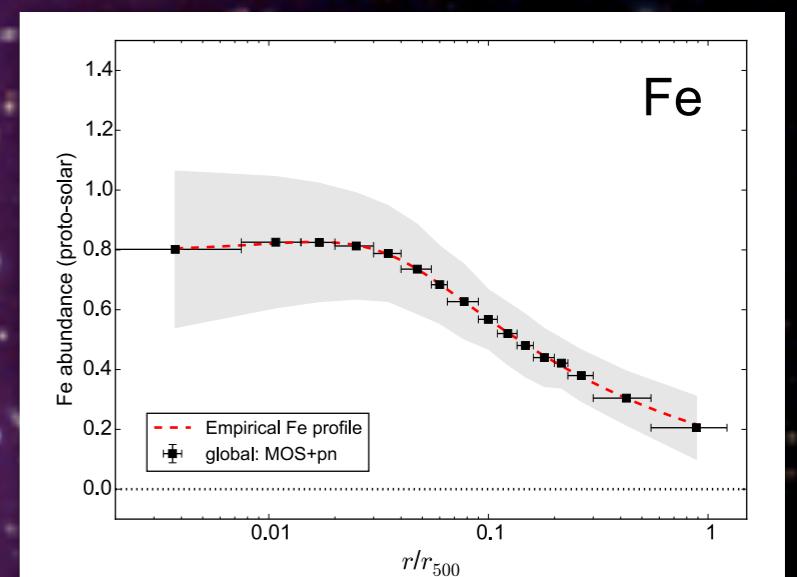
Où trouve-t-on des "métaux"?

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

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