

1 H Hydrogène 1,01																	2 He Hélium 4,00	
3 Li Lithium 6,94	4 Be Béryllium 9,01																	10 Ne Néon 20,18
11 Na Sodium 22,99	12 Mg Magnésium 24,31																	18 Ar Argon 39,95
19 K Potassium 39,10	20 Ca Calcium 40,08	21 Sc Scandium 44,96	22 Ti Titane 47,87	23 V Vanadium 50,94	24 Cr Chrome 52,00	25 Mn Manganèse 54,94	26 Fe Fer 55,85	27 Co Cobalt 58,93	28 Ni Nickel 58,69	29 Cu Cuivre 63,55	30 Zn Zinc 65,41	31 Ga Gallium 69,72	32 Ge Germanium 72,64	33 As Arsenic 74,92	34 Se Sélénium 78,96	35 Br Brome 79,90	36 Kr Krypton 83,79	
37 Rb Rubidium 85,47	38 Sr Strontium 87,62	39 Y Yttrium 88,91	40 Zr Zirconium 91,22	41 Nb Niobium 92,91	42 Mo Molybdène 95,94	43 Tc Technétium (98)	44 Ru Ruthénium 101,07	45 Rh Rhodium 102,91	46 Pd Palladium 106,42	47 Ag Argent 107,87	48 Cd Cadmium 112,41	49 In Indium 114,82	50 Sn Étain 118,71	51 Sb Antimoine 121,76	52 Te Tellure 127,60	53 I Iode 126,90	54 Xe Xénon 131,29	
55 Cs Césium 132,90	56 Ba Baryum 137,34	57-71	72 Hf Hafnium 178,49	73 Ta Tantale 180,95	74 W Tungstène 180,95	75 Re Rhenium 186,21	76 Os Osmium 190,23	77 Ir Iridium 192,22	78 Pt Platine 195,09	79 Au Or 196,97	80 Hg Mercure 200,59	81 Tl Thallium 204,38	82 Pb Plomb 207,19	83 Bi Bismuth 208,98	84 Po Polonium (209)	85 At Astate (210)	86 Rn Radon (222)	
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (266)	106 Sg Seaborgium (271)	107 Bh Bohrium (272)	108 Hs Hassium (270)	109 Mt Meitnium (276)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (280)	112 Cn Copernicium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uuo Ununoctium (294)	

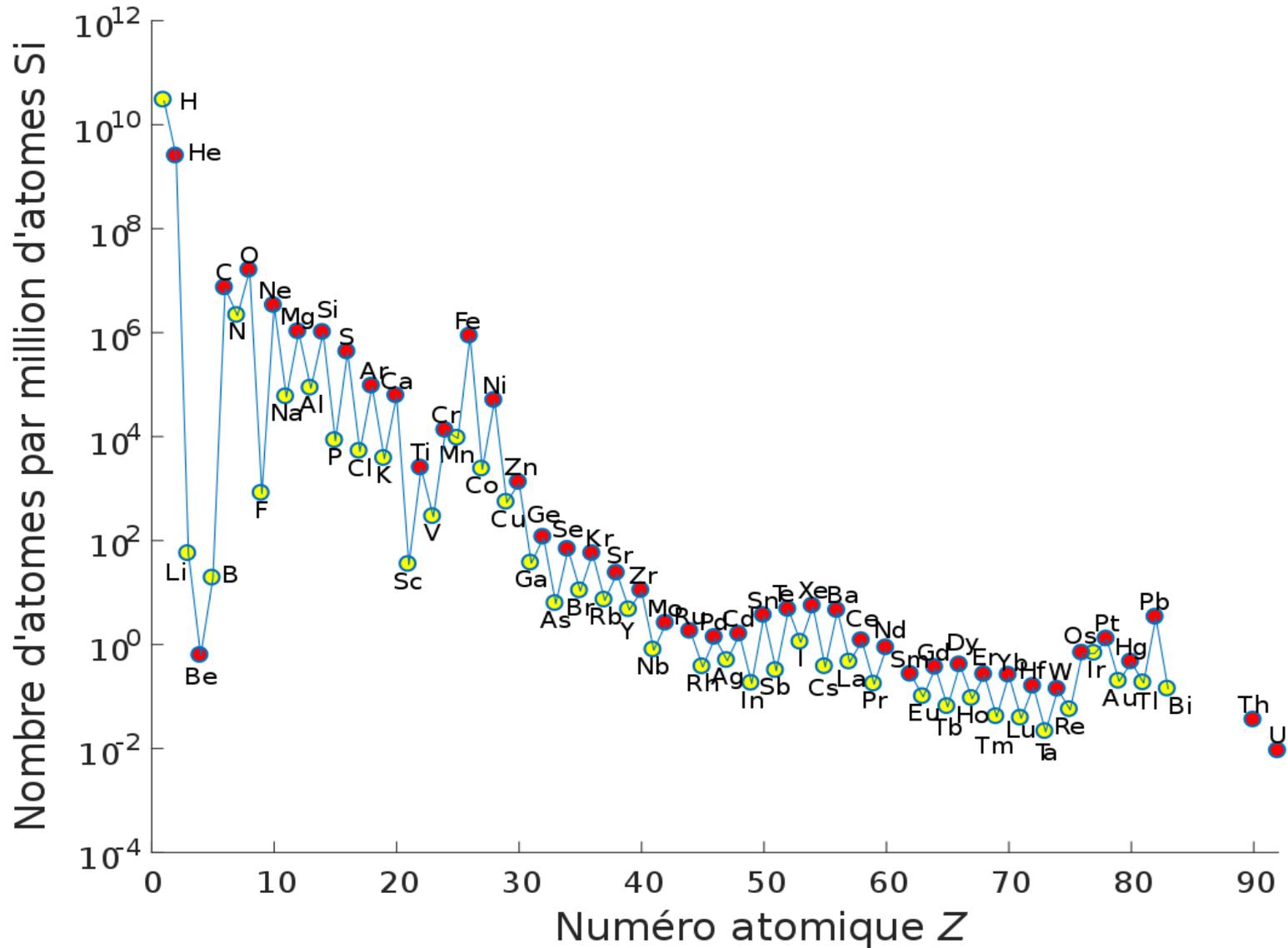
e^- n^0
Sym
 Nom
 Masse atomique
 Solide
 Liquide
 Gazeux
 Inconnu

- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Métaux pauvres
- Lanthanides
- Actinides
- Métalloïdes
- Non-métaux
- Halogènes
- Gaz rares



57 La Lanthane 138,91	58 Ce Cérium 140,12	59 Pr Praseodyme 140,91	60 Nd Néodyme 144,24	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Europium 151,96	64 Gd Gadolinium 157,25	65 Tb Terbium 158,92	66 Dy Dysprosium 162,50	67 Ho Holmium 164,93	68 Er Erbium 167,26	69 Tm Thulium 168,93	70 Yb Ytterbium 173,04	71 Lu Lutécium 174,97
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232,04	91 Pa Protactinium 231,04	92 U Uranium 238,03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium 244,06	95 Am Américium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkélium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendélévium (258)	102 No Nobélium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Abondance des éléments dans l'Univers (visible)



Qu'est-ce qu'un élément ?

Nombre de masse

=

Nombre de
nucléons
(protons +
neutrons)



Nombre
atomique
=
Nombre de
protons

Isotopes

Variante du même
élément chimique
ayant le même
nombre atomique
(Z) mais un nombre
de protons différent.



deutérium



tritium

BACK
to
BASIS

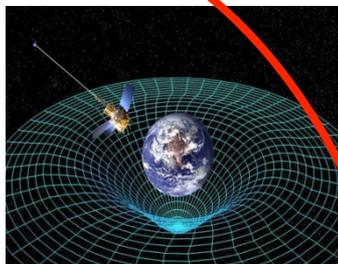
... et les électrons?...

... pas concernés pour la nucléosynthèse!

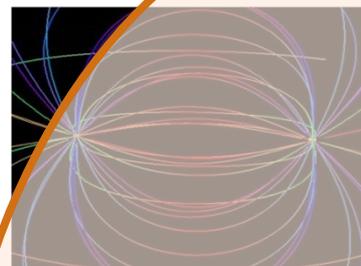
4

interactions dans la nature

Interaction Gravitationnelle



Interaction Electromagnétique

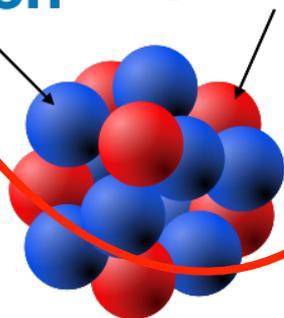


Les électrons ne sont pas sensibles à l'interaction forte!

neutron

proton

Interaction Forte



Neutron

Electron



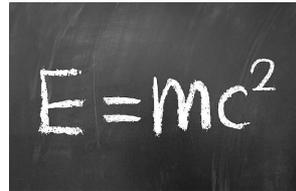
Proton

InterAction faible

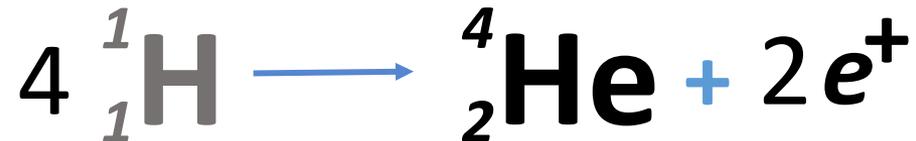


Antineutrino

Fusion nucléaire: comment créer des éléments plus lourds à partir d'éléments plus légers?

A black rectangular box containing the equation $E=mc^2$ written in white chalk on a dark background.

Un exemple:



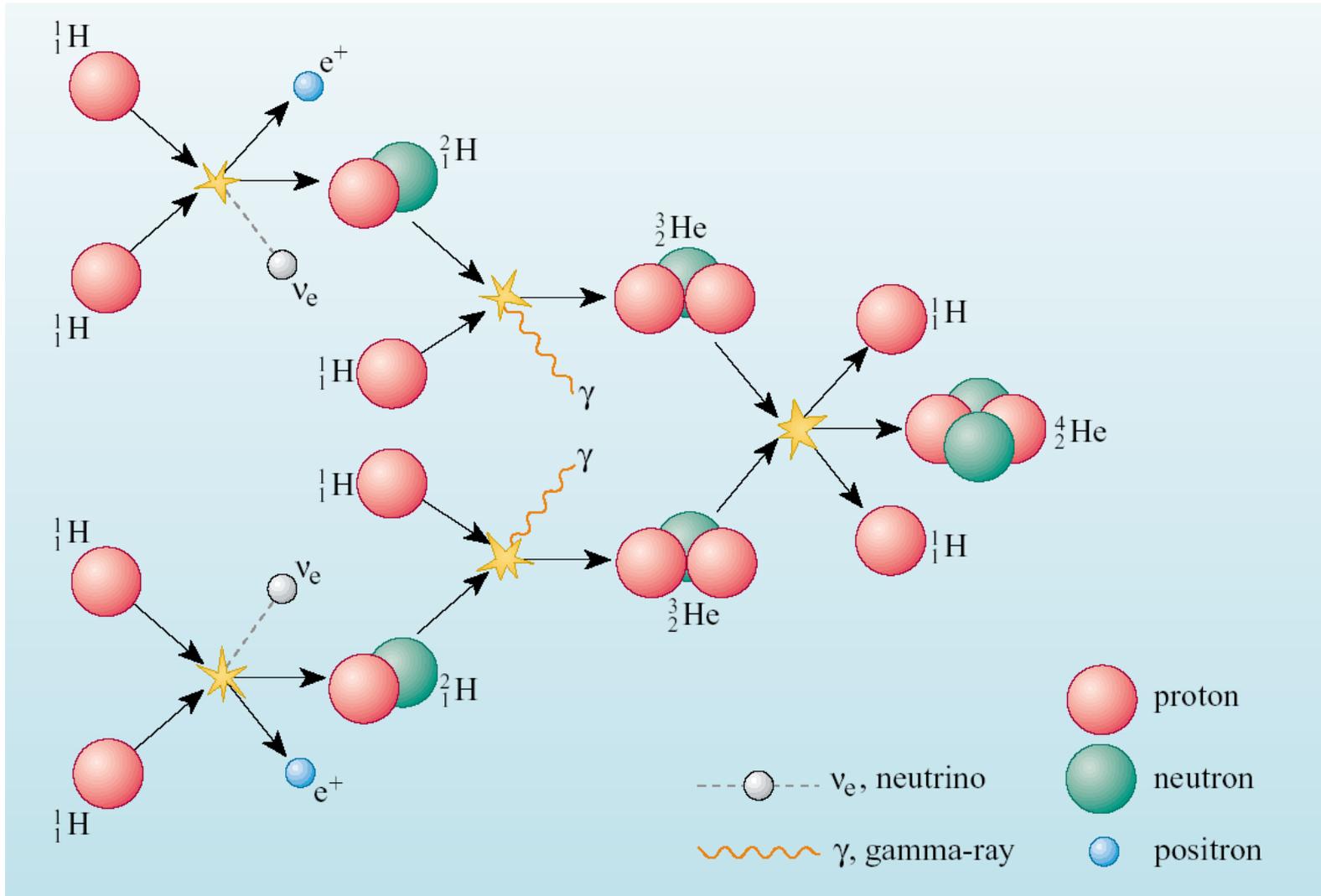
Se produit à haute énergie: $\Delta E = (4m_H - m_{He} - 2m_e)c^2 = 2.410^9 \text{ kJ / mole}$

Comment?

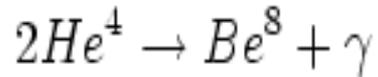
Dans un laboratoire: « bombarder » des atomes d'hydrogène entre eux.

Dans la nature: trouver des sources de chaleur suffisante pour provoquer la fusion par agitation thermique.

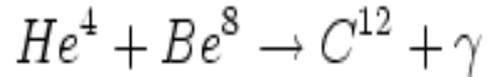
Mécanisme de la fusion de l'hydrogène



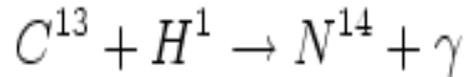
Au delà de l'Hélium



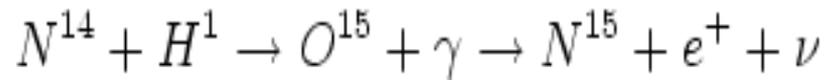
Synthèse du béryllium



Synthèse du carbone



Synthèse de l'azote



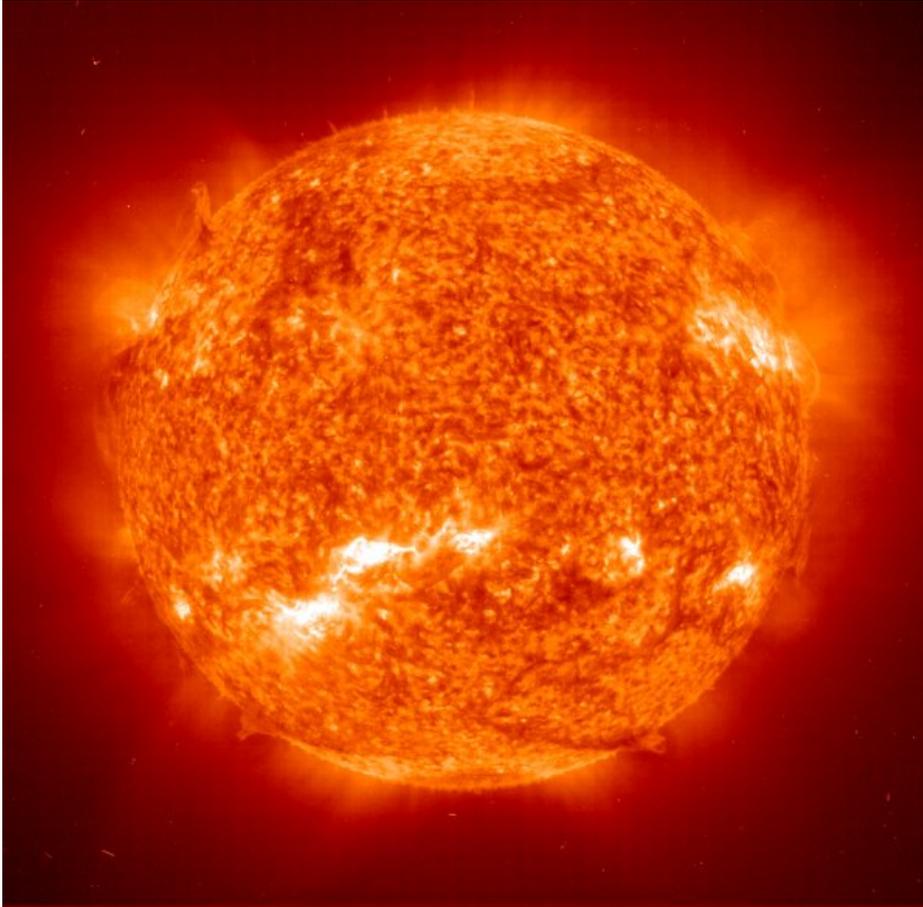
Synthèse de l'oxygène

.....

... ainsi de suite pour des éléments plus lourds... avec des énergies plus élevées...

Q: où trouver de telles conditions dans la nature?

Ça se passe dans les étoiles!



« Notre » Soleil: l'étoile de référence

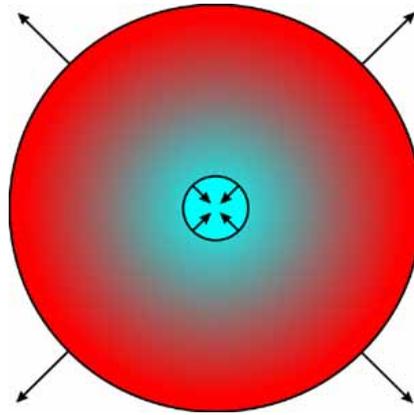
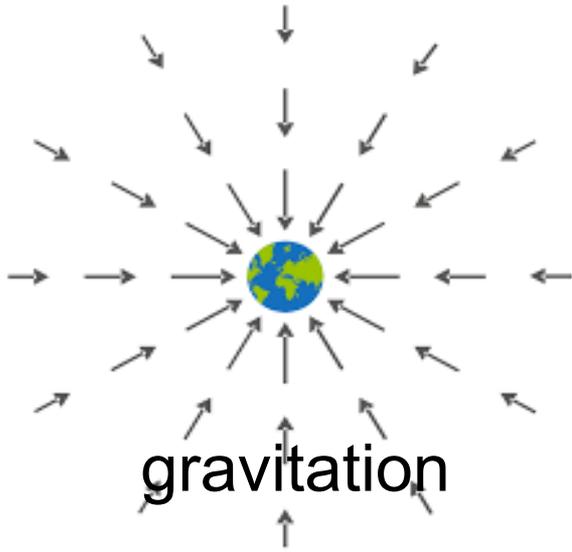
- ◆ Rayon = 1 392 000 km
- ◆ Masse = $2 \cdot 10^{30}$ kg (98 % de la masse totale du système solaire)
- ◆ A sa surface, sa température est d'environ 5 700 K
- ◆ En son cœur: $15 \cdot 10^6$ K

Composition: 90 % d'hydrogène, 9 % d'hélium, 1 % autres éléments lourds (jusqu'au Fer)

!! Aux hautes températures, l'énergie α T.

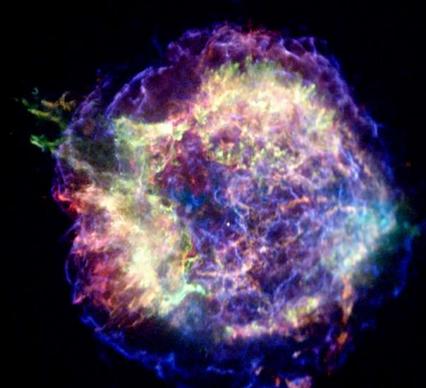
... réactions thermonucléaires ...

Une histoire de compétition ...

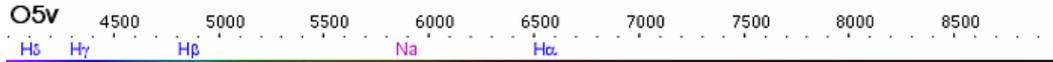


Réactions nucléaires

... et de probabilités



Les étoiles vues par leurs spectres



O **Bleue**



B **Bleue-Blanche**



A **Blanche**



F **Jaune-Blanche**



G **Jaune (Soleil)**



K **Jaune-Orange**



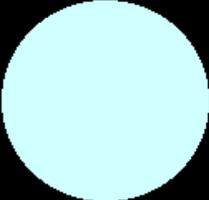
M **Rouge**



L'analyse spectrale indique la composition de l'étoile

O	60 000 - 30 000 K	Bleue	N, C, He et O
B	30 000 - 10 000 K	Bleue-Blanche	He et H
A	10 000 - 7 500 K	Blanche	H
F	7 500 - 6 000 K	Jaune-Blanche	Métaux : Fe, Ti, Ca, et Mg
G	6 000 - 5 000 K	Jaune (Soleil)	Ca, He, H et métaux
K	5 000 - 3 500 K	Jaune-Orange	Métaux et oxyde de titane
M	3 500 - 2 000 K	Rouge	Métaux et oxyde de titane

En relation avec d'autres caractéristiques « fondamentales »

	Main Sequence Stars						
							
Spectral Type:	O	B	A	F	G	K	M
Temperature:	40 000K	20 000K	8500K	6500K	5700K	4500K	3200K
Radius (Sun=1):	10	5	1.7	1.3	1.0	0.8	0.3
Mass (Sun=1):	50	10	2.0	1.5	1.0	0.7	0.2
Luminosity (Sun=1):	100 000	1000	20	4	1.0	0.2	0.01
Lifetime (million yrs):	10	100	1000	5000	10 000	50 000	100 000
Abundance:	0.00001%	0.05%	0.3%	1.5%	4%	9%	80%

Si la Masse ↗, alors :

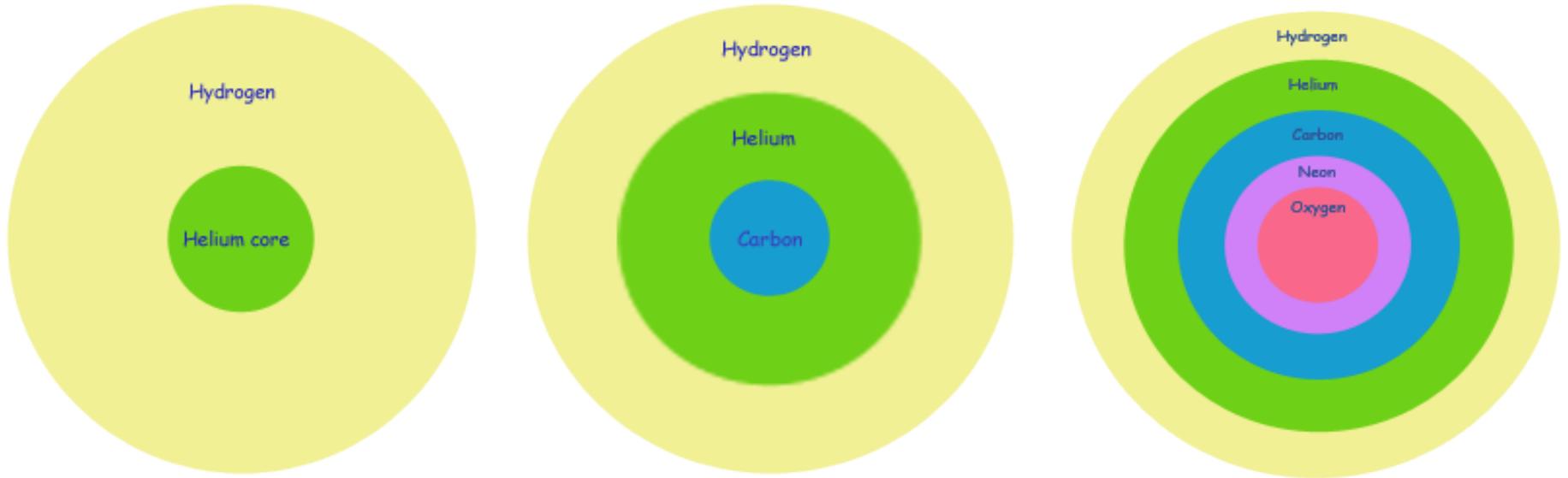
Température ↗

Rayon ↗

Luminosité ↗

Temps de vie ↘

Plus on pénètre au cœur d'une étoile plus la température augmente...



... plus il sera possible de produire des éléments plus lourds...

... jusqu'au Fer, pas plus!!!

C'est la phase de nucléosynthèse « calme »

Au cours de l'évolution, des éléments lourds sont créés dans le cœur des étoiles par des processus de fusion *progressivement* dans les enveloppes autour du cœur: H, He, C, O, N , Mg....Fe.

Au delà du Fer

L'énergie correspondante à la synthèse d'atomes plus lourd que le Fer, correspond à une masse qui feraient « exploser » l'étoile!

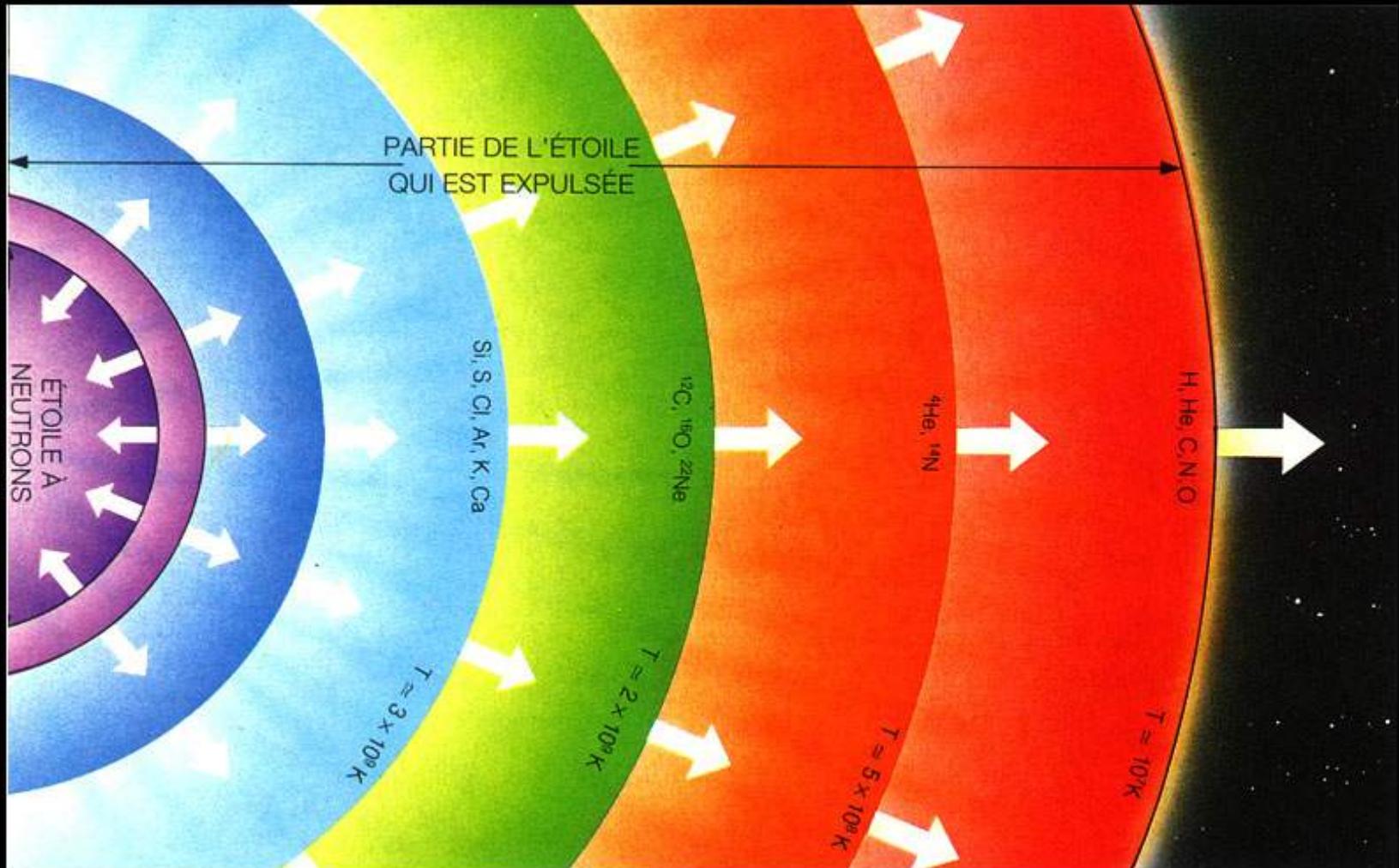


Limite de Chandrasekhar (RG): Si la masse du cœur dépasse **1.44 masses solaires** alors l'étoile explose.
elle devient une supernovæ

Des éléments plus lourds peuvent alors être produits dans les jets de matière expulsés.
(la température de ces jets est d'autant plus grande que la vitesse d'expulsion est grande – plusieurs milliers de km/s mesurée par effet Doppler)

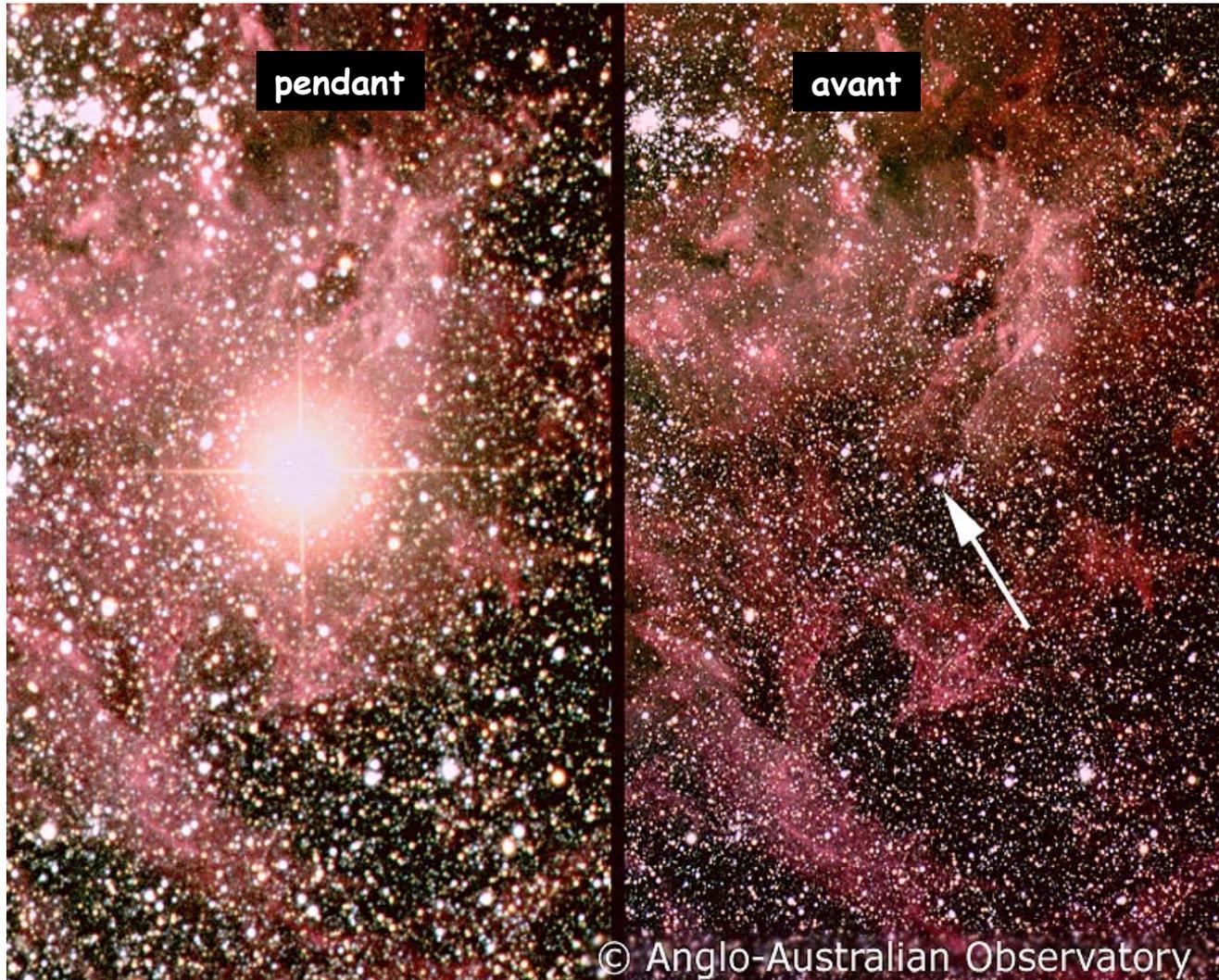
C'est la phase de nucléosynthèse « explosive »

En se transformant en supernova, les étoiles supermassive synthétisent les éléments les plus lourds que le Fer qui ensemencent l'Univers



Supernovæ

Exemple de la supernovae 1987A située dans le grand nuage de Magellan



Une question fondamentale

Si tous les éléments peuvent être produits à partir d'étoiles elles mêmes composées d'hydrogène et d'hélium (Nucléosynthèse stellaire)

ALORS

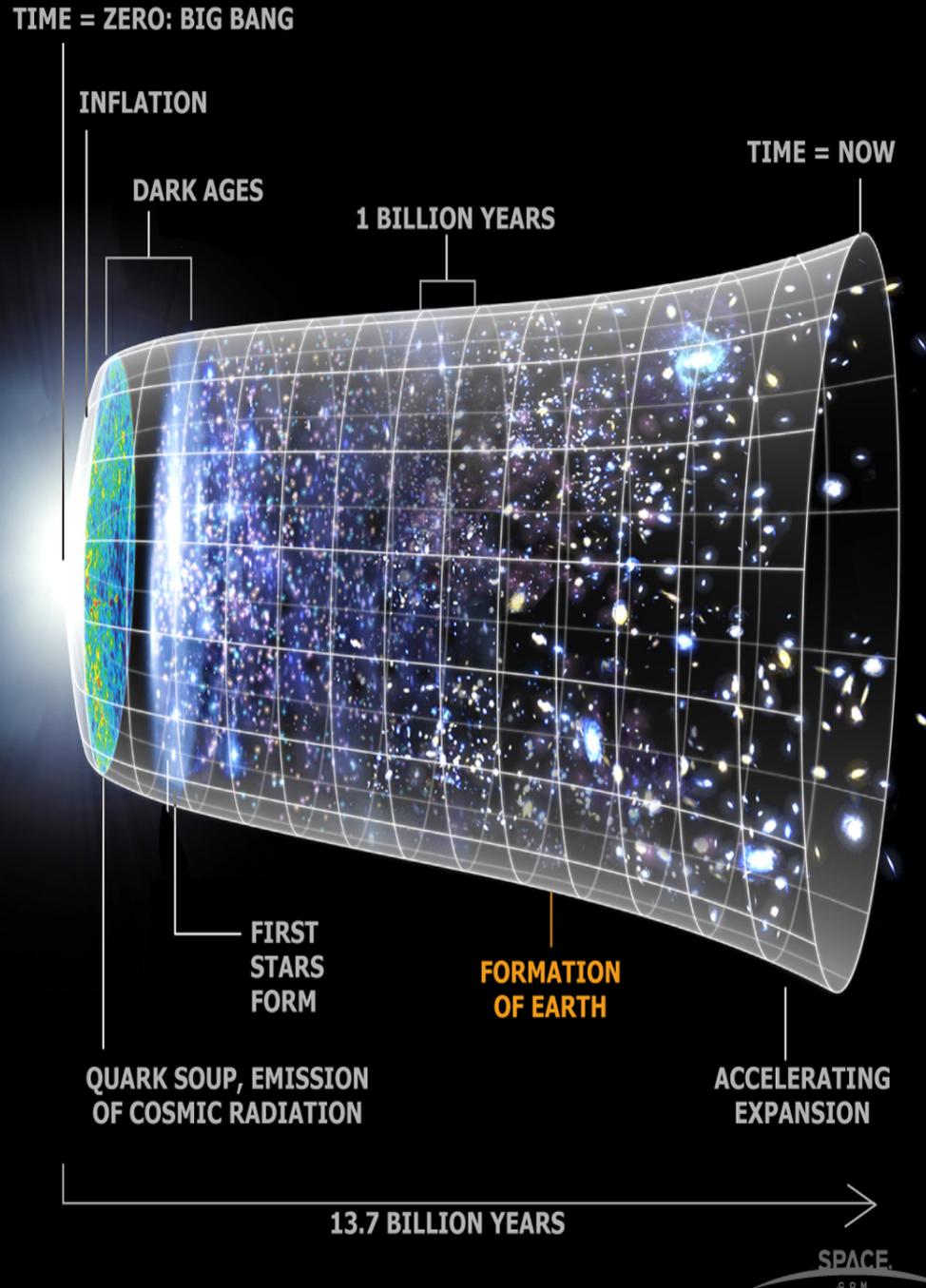
**D'où viennent les atomes
d'hydrogène et d'hélium?!**



Réponse: des débuts de notre Univers

C'est la Nucléosynthèse
Primordiale

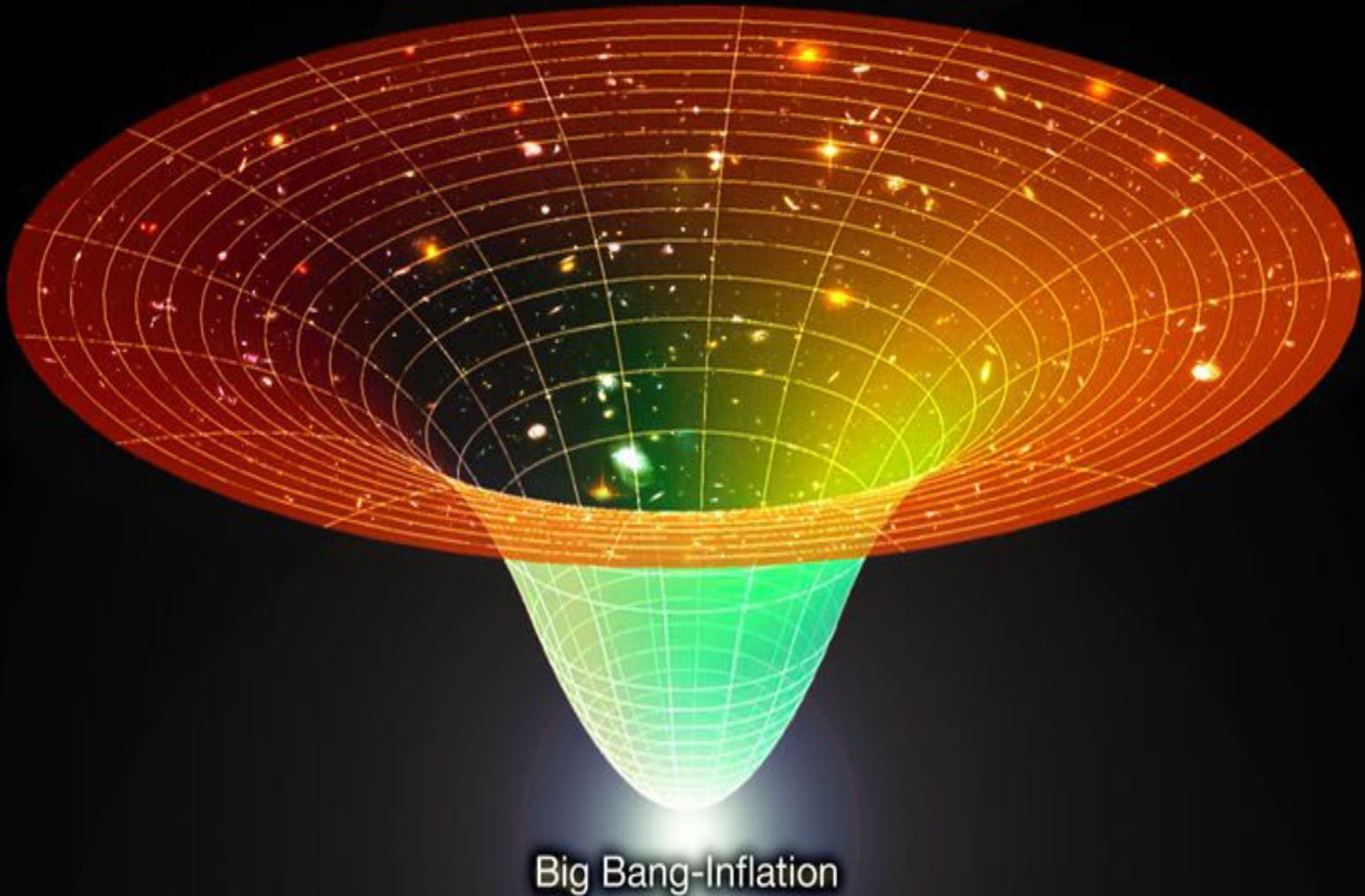
Le modèle est celui du
Big Bang (RG + inflation)



10^{-43} seconde (temps de Planck) :
le point de départ du modèle du Big Bang.
A ce moment, la taille de l'Univers était
d'environ 10^{-28} m.

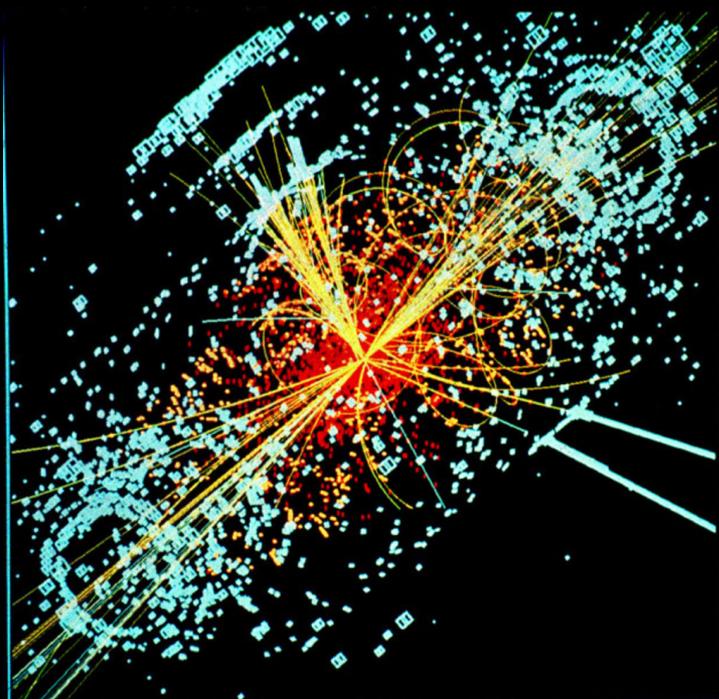
Que c'est-il passé avant ? La question n'a pas de sens dans
le contexte des connaissances actuelles

Entre 10^{-33} et 10^{-35} seconde : inflation cosmique.
Notre Univers s'étend brusquement, passant de
 10^{-28} m à un 1 km.



Entre 10^{-33} et 10^{-12} seconde : Une multitude de particules (quarks, électrons, neutrinos) et d'antiparticules se forment et disparaissent aussitôt.

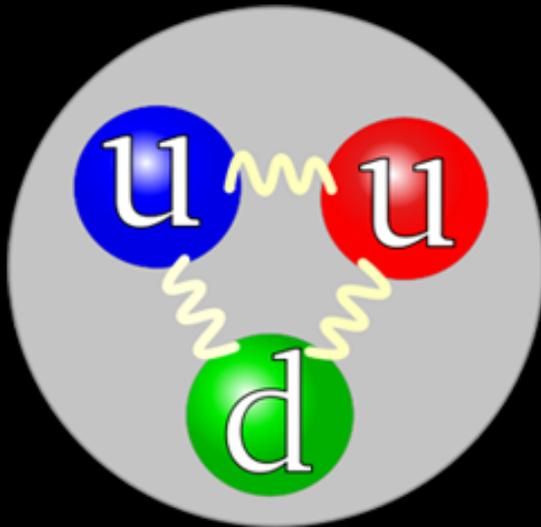
A 10^{-12} seconde, notre Univers mesure moins d'un millions de kilomètres et contient déjà les particules élémentaires de notre monde actuel.



	Fermions			Bosons		
Q u a r k s	Masse $\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$ Charge $2/3$ Spin $1/2$ 	Masse $\approx 1275 \text{ MeV}/c^2$ Charge $2/3$ Spin $1/2$ 	Masse $\approx 173210 \text{ MeV}/c^2$ Charge $2/3$ Spin $1/2$ 	0 0 1 	$\approx 126000 \text{ MeV}/c^2$ 0 0 	
	up	charm	top	gluon	boson Higgs	
	Masse $\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$ Charge $-1/3$ Spin $1/2$ 	Masse $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ Charge $-1/3$ Spin $1/2$ 	Masse $\approx 4180 \text{ MeV}/c^2$ Charge $-1/3$ Spin $1/2$ 	0 0 1 		
	down	strange	bottom	photon	graviton	
	L e p t o n s	Masse $0,511 \text{ MeV}/c^2$ Charge -1 Spin $1/2$ 	Masse $105 \text{ MeV}/c^2$ Charge -1 Spin $1/2$ 	Masse $\approx 1777 \text{ MeV}/c^2$ Charge -1 Spin $1/2$ 	91200 MeV/c^2 0 1 	B o s o n s d e J a u g e
		électron	muon	tauon	boson Z	
Masse $< 0,0000022 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin $1/2$ 		Masse $< 0,17 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin $1/2$ 	Masse $< 15,5 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin $1/2$ 	80400 MeV/c^2 ± 1 1 		
neutrino élect.		neutrino muon.	neutrino tauique	boson W		
	1ère	2ème	3ème	← générations		

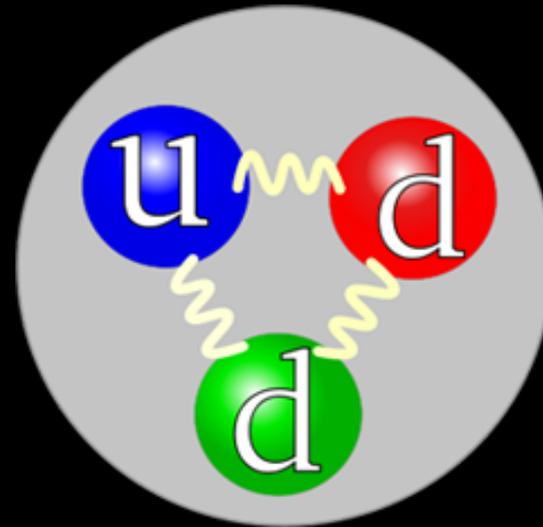
Entre 10^{-6} et 10^{-4} seconde, la température n'est plus que de 10^{12} K.
Les quarks peuvent se lier entre eux et donner naissance aux
premiers protons et neutrons

Proton



**2 quarks up
1 quark down**

Neutron



**1 quark up
2 quarks down**

Une seconde après le Big Bang, la température chute à 10^{10} K et permet
l'apparition de l'hydrogène (ionisé en permanence à cette température).

T = 3 minutes ; la taille de notre Univers atteint quelques centaines d'années-lumière et sa température est de 10^9 K.

La nucléosynthèse primordiale s'établit et crée les éléments suivants : deutérium et hélium. Elle s'arrête probablement au bout de 20 minutes, car avec l'expansion, les rencontres entre protons et neutrons se font de plus en plus rares.

Mais à cette température les électrons sont toujours libres.

Les photons sont toujours échangés entre charges libres.

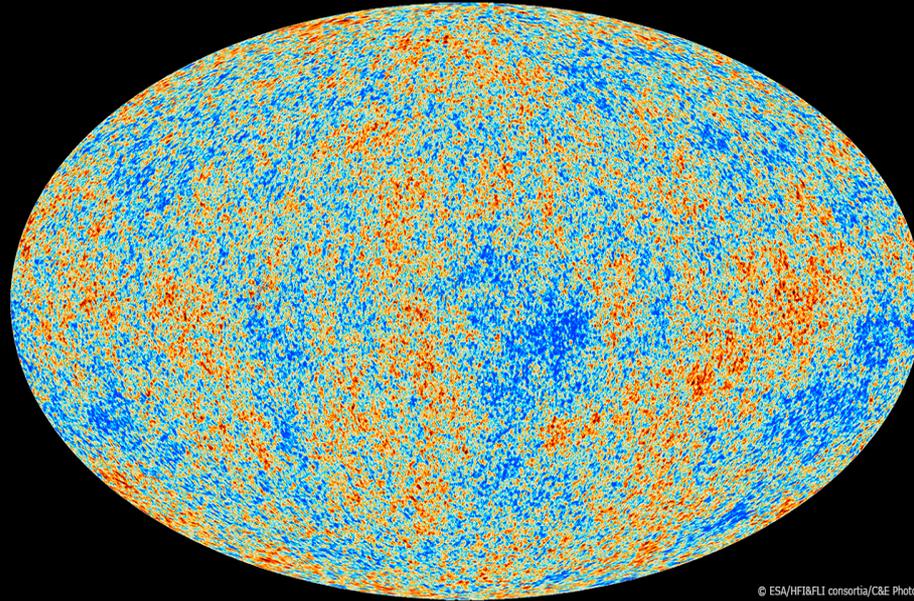
L'Univers est toujours sombre...

... mais on dispose déjà des composants fondamentaux des étoiles!

Entre 20 minutes et 380000 ans, l'Univers poursuit son expansion et son refroidissement. Les photons sont présents, mais constamment absorbés par les électrons.

L'univers est toujours opaque.

T= 380 000 ans : l'expansion se poursuit. Avec le refroidissement, les électrons sont capturés par les noyaux, ce qui permet aux photons de pouvoir se déplacer librement: L'Univers devient visible !



Le rayonnement fossile « s'installe ». C'est l'image la plus ancienne de notre Univers.

La gravitation entre en jeu, les filaments de matière donnant naissance aux futures protogalaxies et protoamas de galaxies sont là

... mais ceci est une autre histoire ...



Merci pour
votre attention

Des questions?