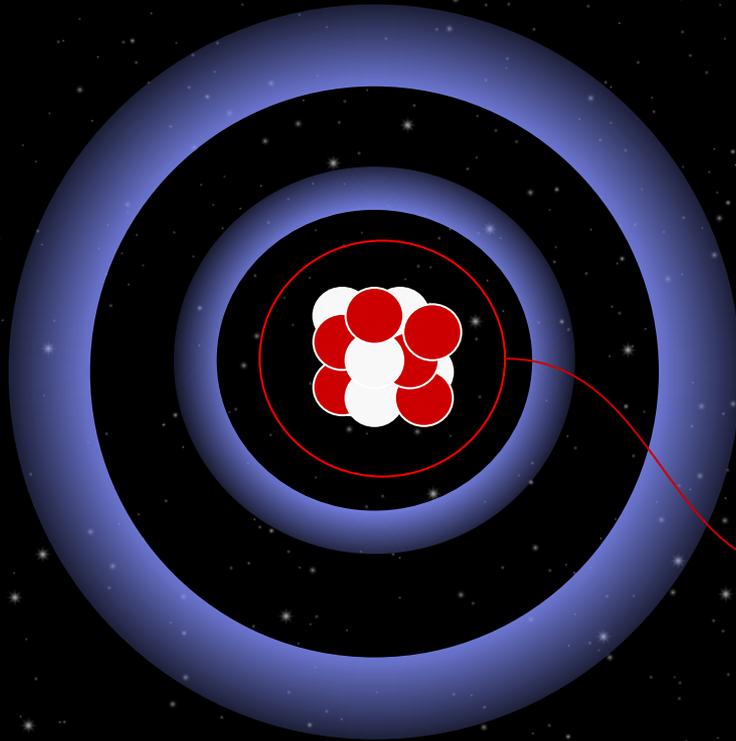


L'enrichissement chimique de l'Univers

Ou pourquoi trouve-t-on du fer dans le vide intergalactique ?

Qu'est-ce qu'un élément chimique ?

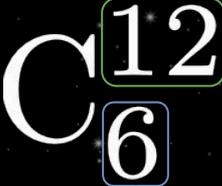


- Proton
- Neutron
- Électrons

Matière baryonique

99,99999999999996 % de vide !

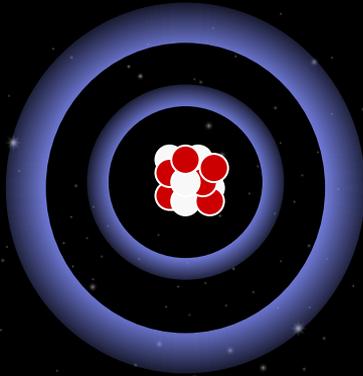
Nombre de protons + neutrons
=
Nombre de Nucléons



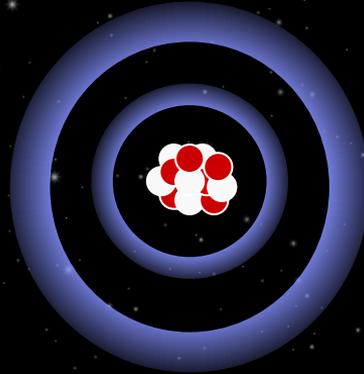
Nombre de protons

Isotopes

Carbone 12



Carbone 14

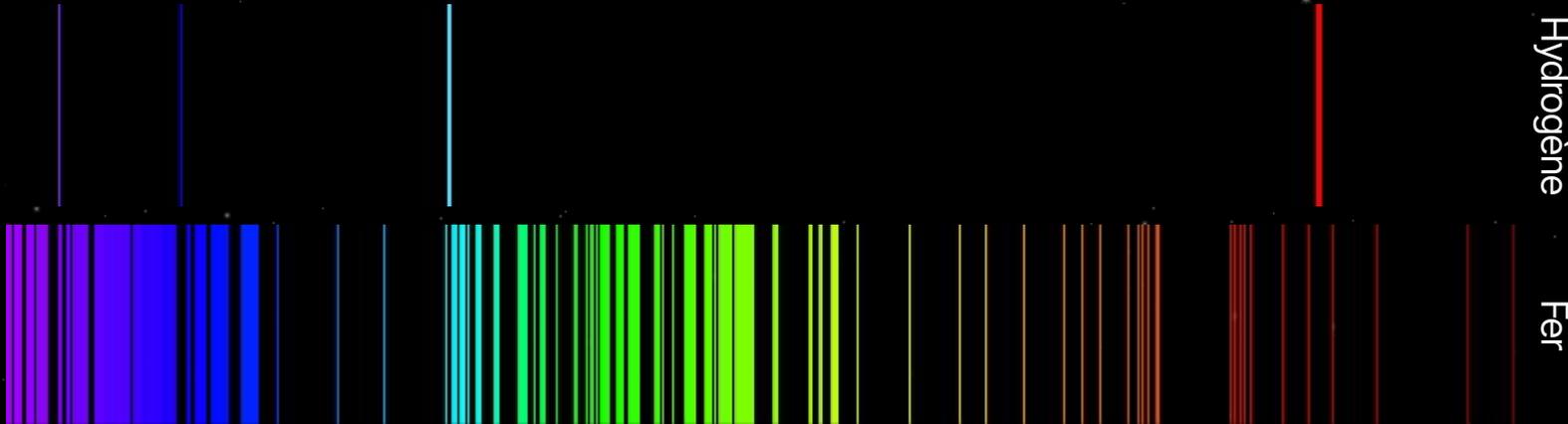
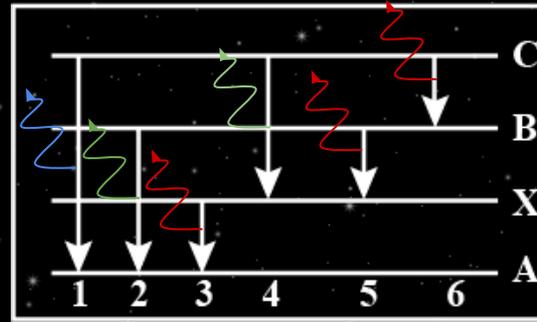


Même réactivité chimique
Durée de vie différente !



Comment sait-on quel élément on voit ?

Physique quantique \Rightarrow l'énergie est quantifiée entre différents niveaux



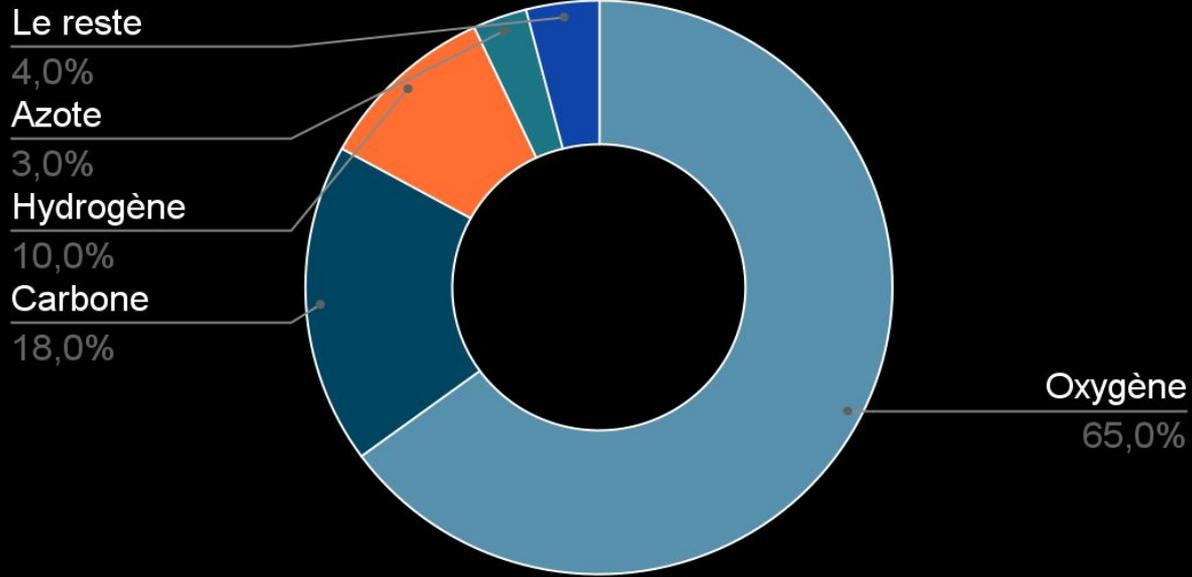
Periodic Table of the Elements

1 1IA 1A	Periodic Table of the Elements																18 VIIIA 8A
1 H Hydrogen 1.008											13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	2 He Helium 4.003	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 9	10 VIII 10	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.905	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine 208.980	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium 223.027	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)
Lanthanide Series			57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967
Actinide Series			89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.083	99 Es Einsteinium 252.083	100 Fm Fermium 257.103	101 Md Mendelevium 258.103	102 No Nobelium 259.103	103 Lr Lawrencium 260.103
			Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal	Basic Metal	Semimetal	Nonmetal	Halogen	Noble Gas	Lanthanide	Actinide					

Métaux

De quoi sommes-nous composés ?

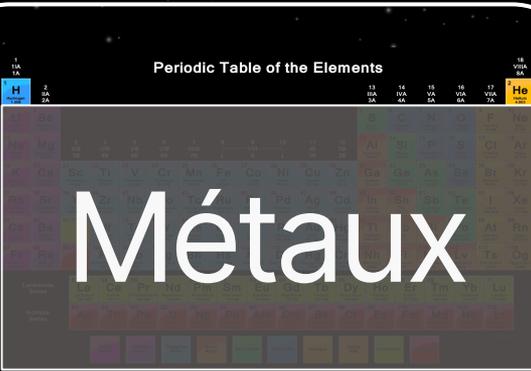
Composition du Corps Humain (en masse)



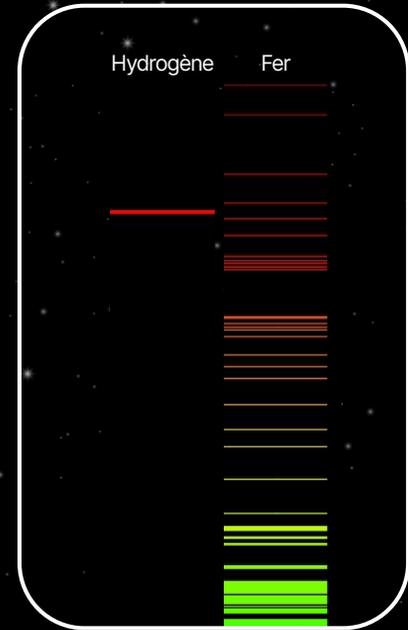
D'où proviennent les éléments qui composent la vie, les planètes, les étoiles et le reste ?



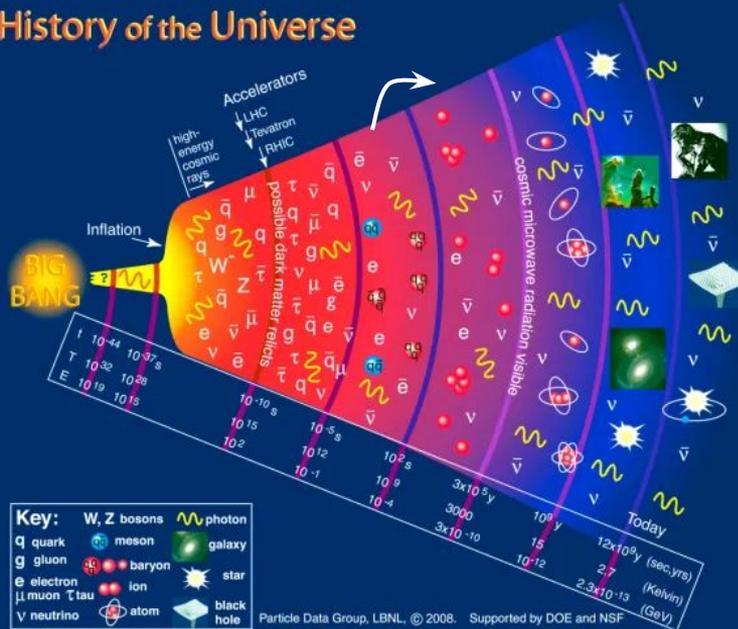
Periodic Table of the Elements



Métaux



History of the Universe



- L'Univers est une soupe de particule élémentaire
- Plus le temps passe, plus il se refroidit, les particules plus lourdes se forment
- Les premiers noyaux sont formés

Quelle est la composition des noyaux primordiaux ?

75 %

Hydrogène

24 %

Hélium

>1%

Lithium & autres

Les étoiles

Le moteur de l'enrichissement



La fusion nucléaire

Deutérium H_1^2



He_2^4

Hélium 4



Tritium H_1^3



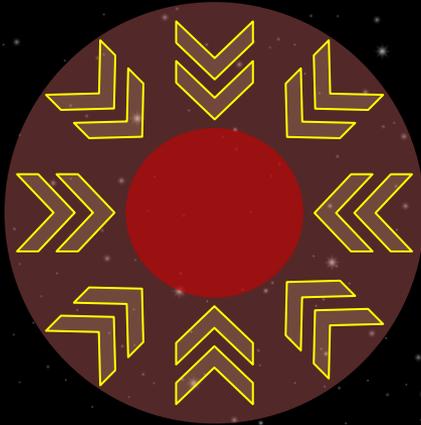
H_1^1

Hydrogène

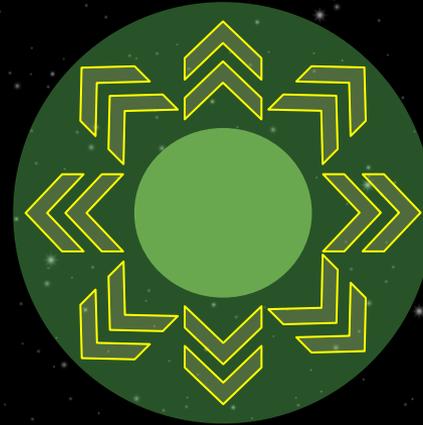


- Libère de l'énergie
- Nécessite température et densité élevée
- Principal mécanisme d'enrichissement

Gravité



Fusion



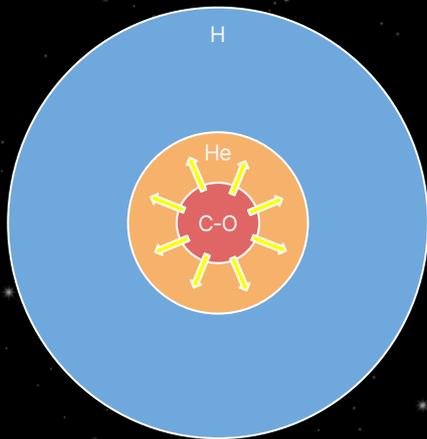
Une étoile est stable quand ces deux effets coexistent et s'équilibrent



La fin des étoiles

La fin douce (nébuleuse planétaire)

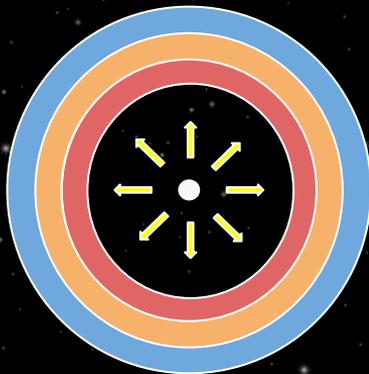




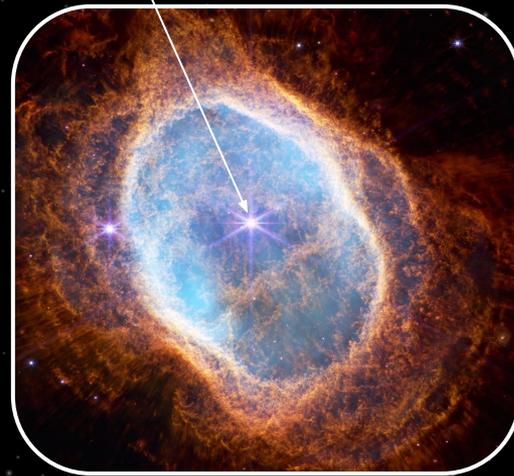
La fusion
repousse
les couches
extérieures



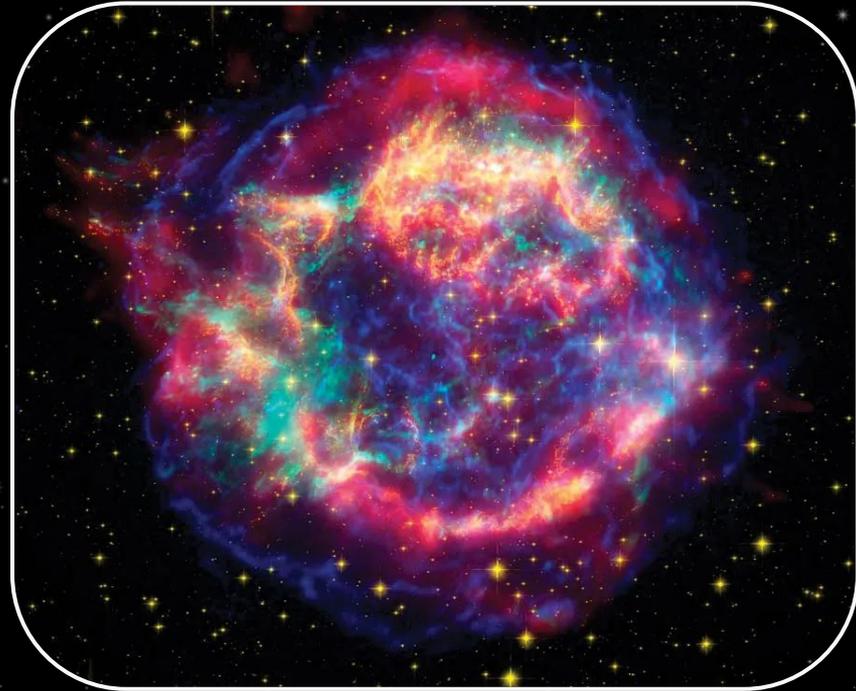
Éjection de
matière

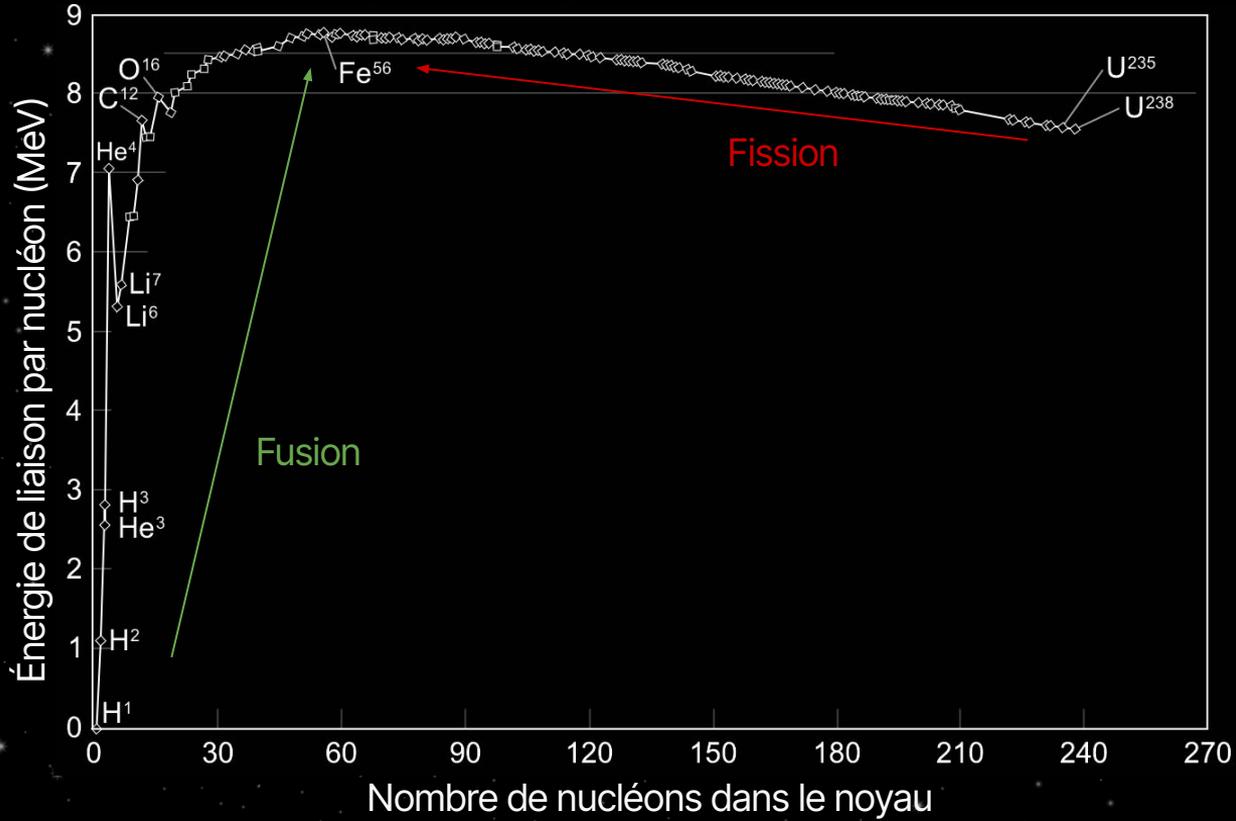


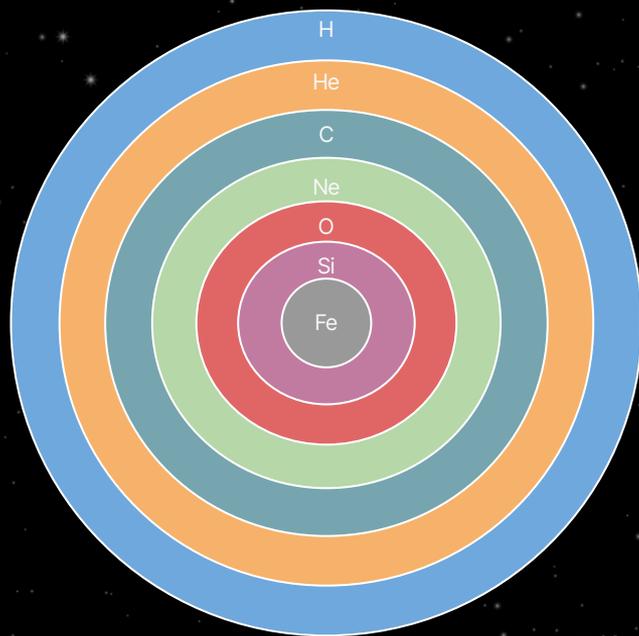
Naine blanche



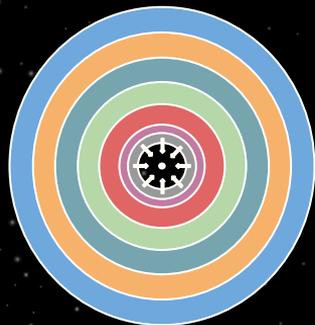
La fin moins douce (supernova)



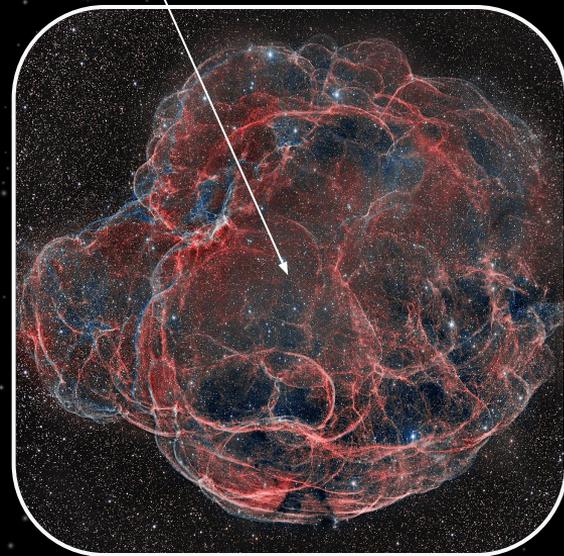




Effondrement du
coeur de l'étoile



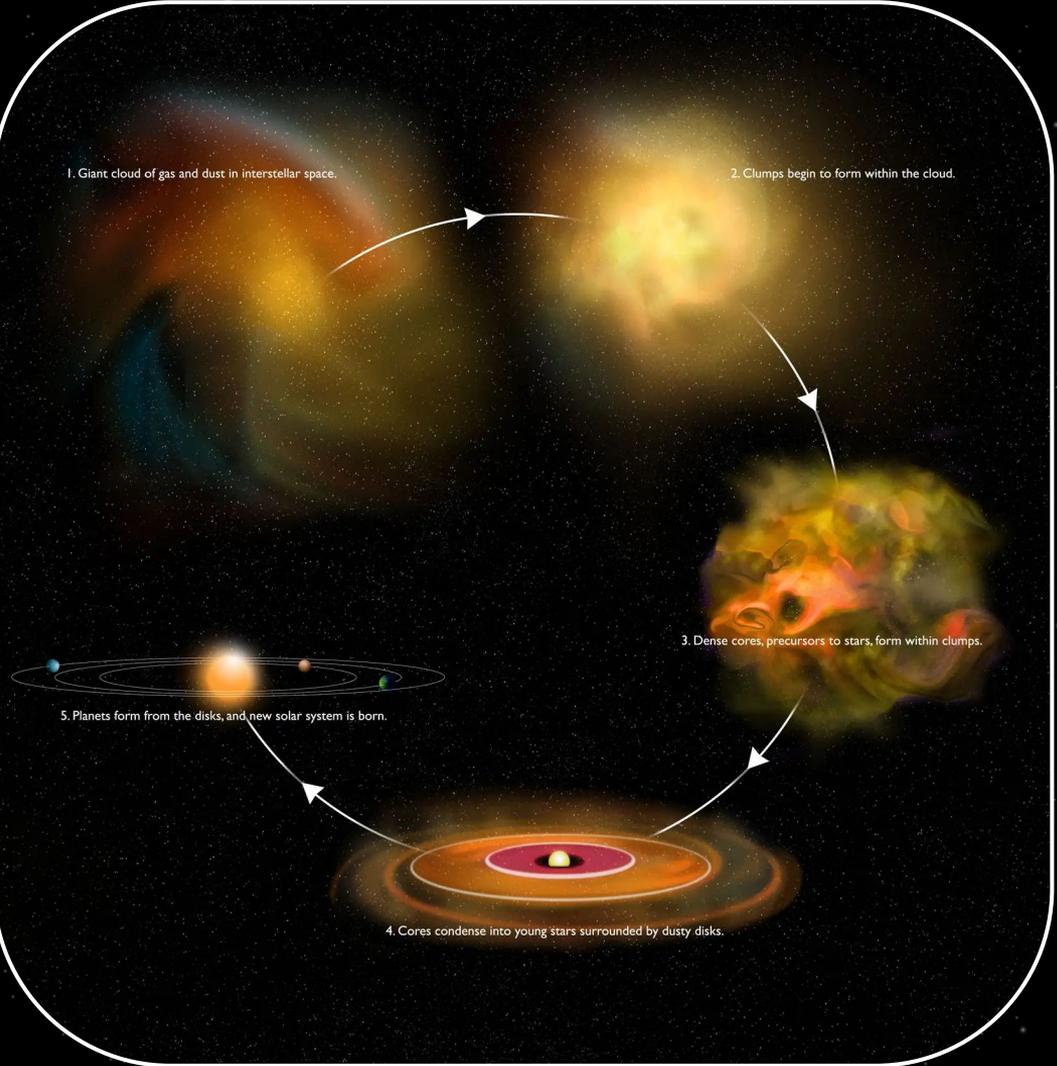
Étoile à neutrons



Rebond et
explosion

La fin violente (kilonova)





L'enrichissement chimique par les étoiles est un processus cyclique et générationnel.

Le gaz qui forme le Soleil a été enrichi par une ou plusieurs supernovæ avant de s'assembler.

Les amas de galaxies

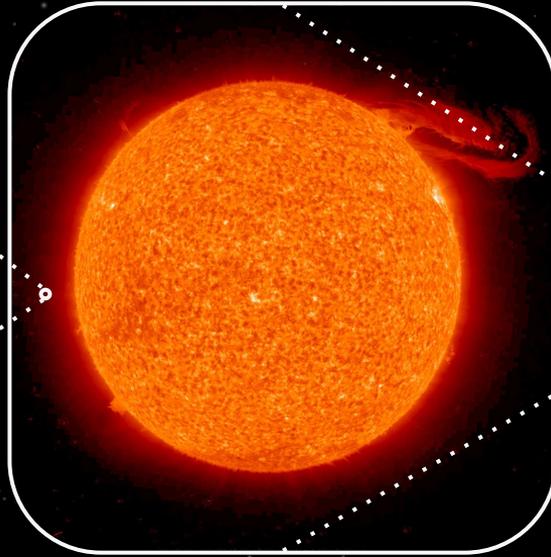


Saut vers les amas de galaxies



Planète

(Terre ~40 ms-lumière)



Étoile

(Soleil ~5 s-lumière)



Galaxie

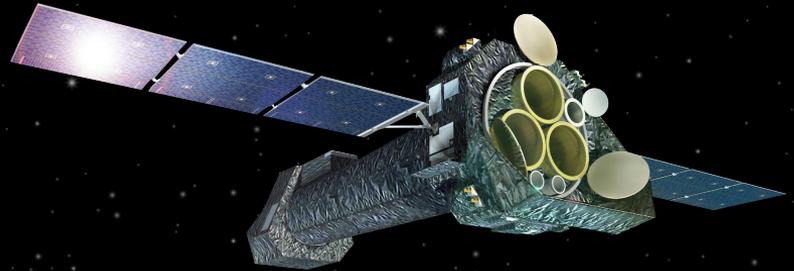
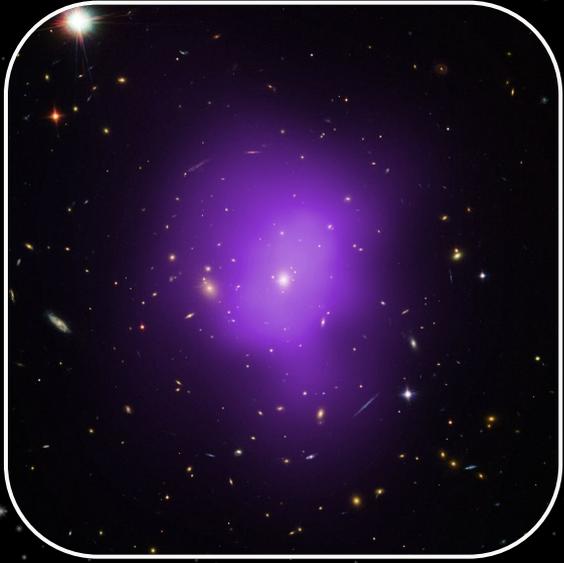
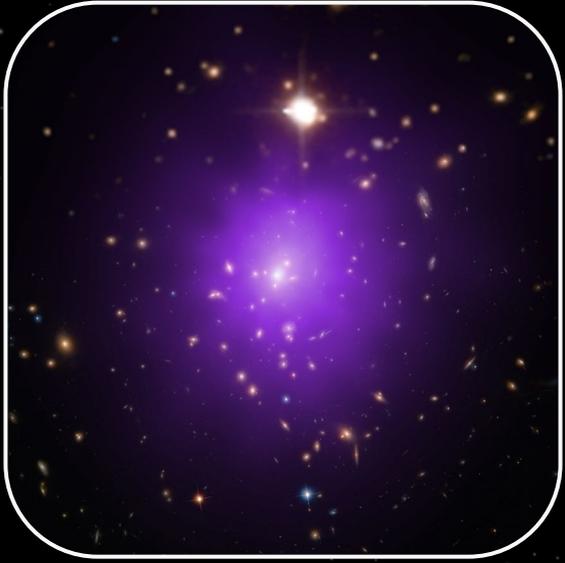
(M96 ~93000 années-lumière)

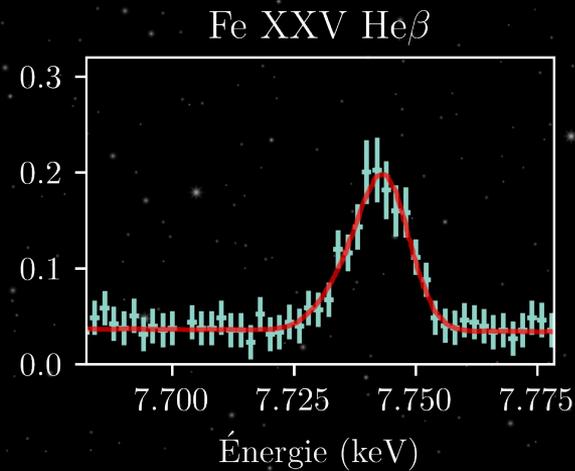
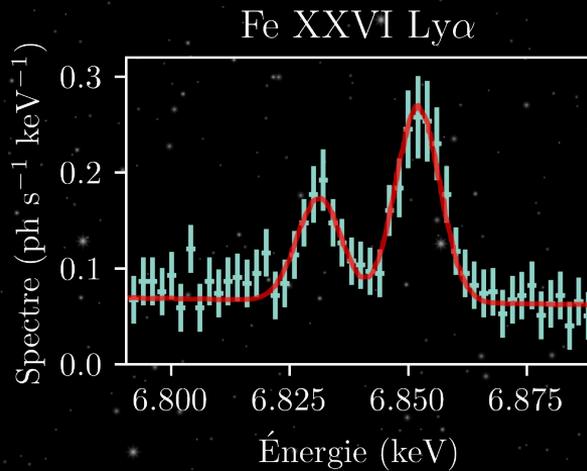
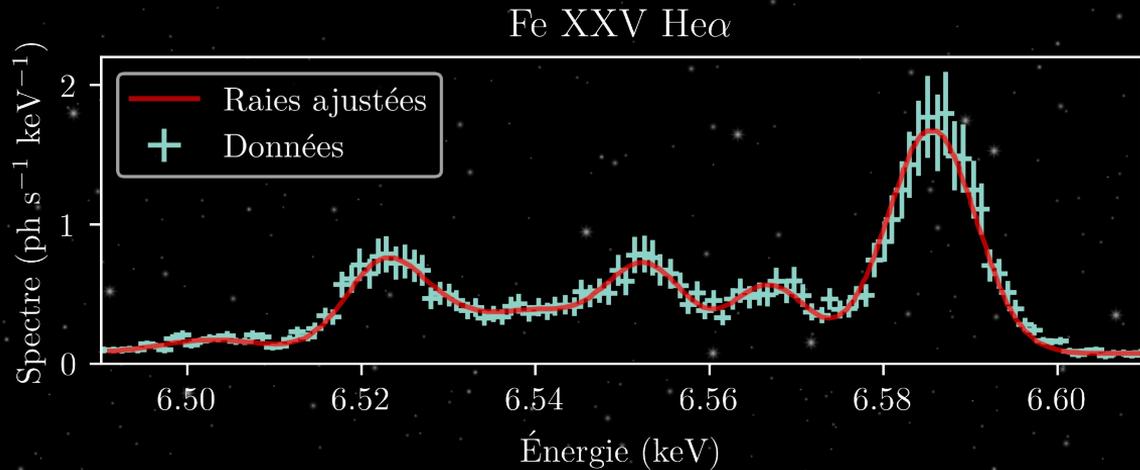


- Regroupement de ~1000 galaxies
- Situé à 4 milliards d'années-lumière
- Taille ~6 millions d'années-lumière

Les amas cachent ~ 85 % de matière noire et ~ 14 % de gaz chaud







Pourquoi y'a-t-il du fer entre les galaxies



"Vents galactiques"

Les supernovæ soufflent le matériel dans et en dehors des galaxies

Galaxies méduses

Le déplacement des galaxies dans le gaz invisible des amas va souffler leur gaz



Fusions de galaxies

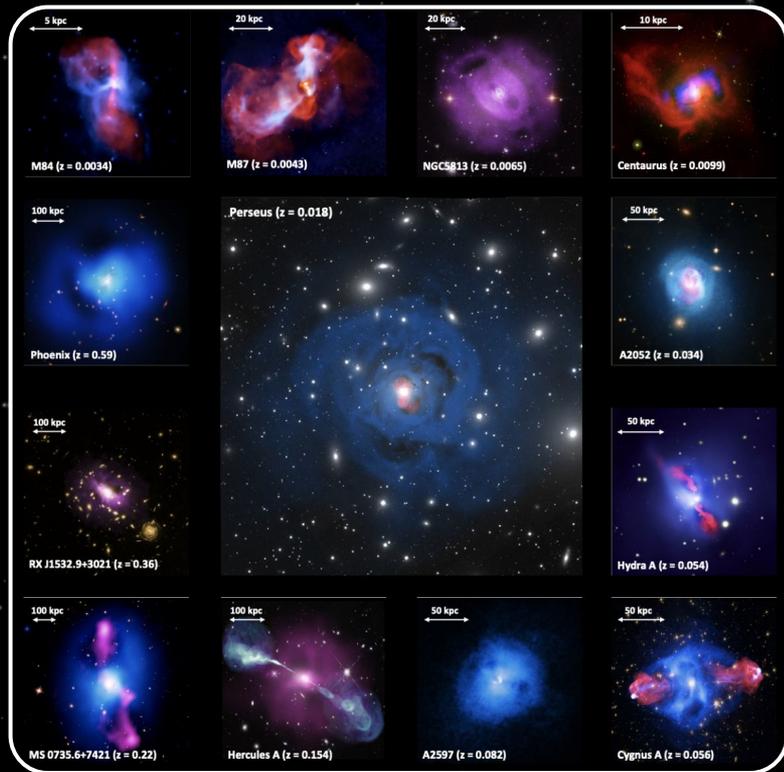
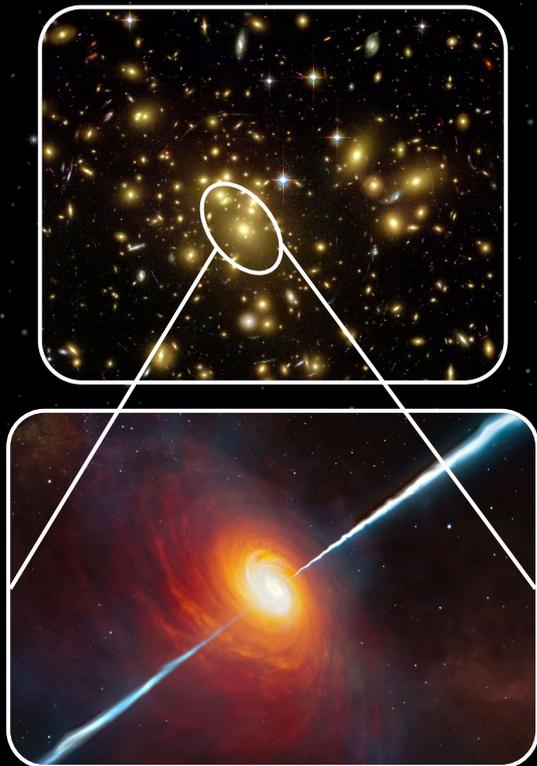
En fusionnant, du gaz provenant des galaxies va se disperser dans les alentours

Problème : le fer est très bien mélangé

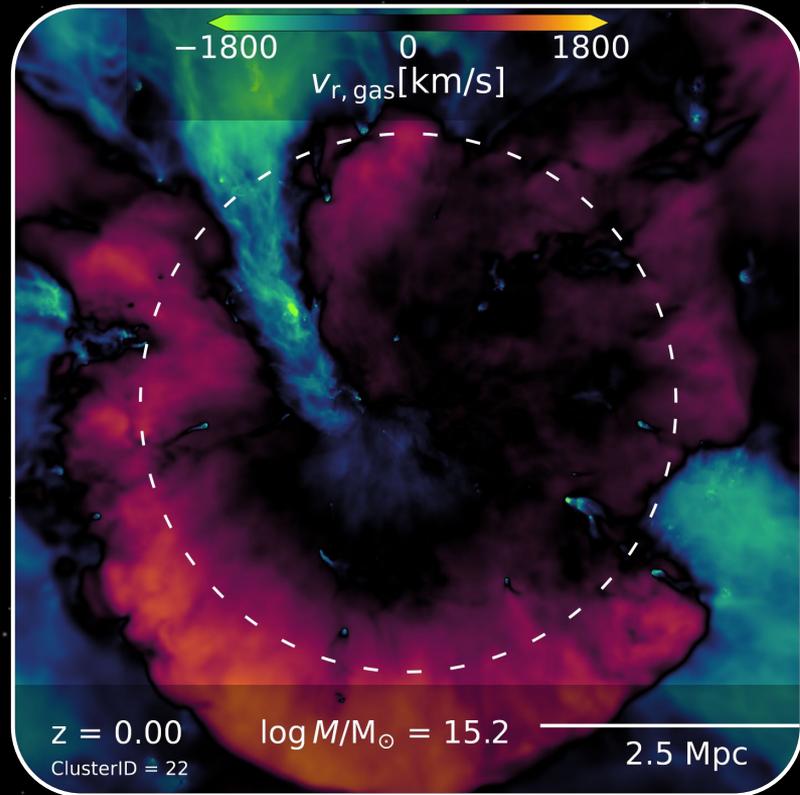


→ Le gaz entre les galaxies est probablement turbulent !

Rétroaction du trou noir de la galaxie centrale



Fusion d'amas





The big bang



Dying low-mass stars



White dwarf supernovae



Radioactive decay



Cosmic ray collisions



Dying high-mass stars



Merging neutron stars



Human-made

