

Marie Curie une scientifique pour notre temps

et quelques mots sur les noyaux et les étoiles

Marco Zito

LPNHE (IN2P3/CNRS, Sorbonne Université, UPC)
et DPhP/IRFU (CEA Saclay)

Société astronomique de Montgeron

23 mai 2026



Marie Sklodowska Curie (1867-1934)



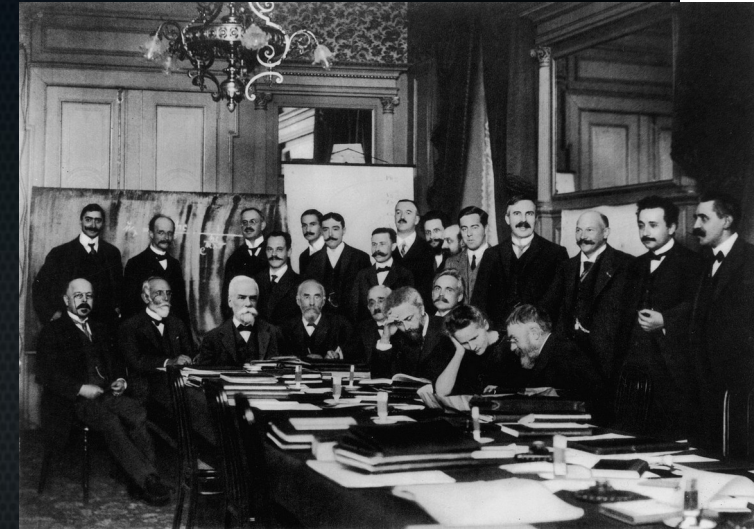
1886 Source Wikipedia

Marie Curie (à gauche) et sa sœur Bronisława

1891 : une jeune polonaise arrive à Paris pour ses études

1903 : Marie Curie reçoit le Prix Nobel de Physique pour ses découvertes sur la radioactivité

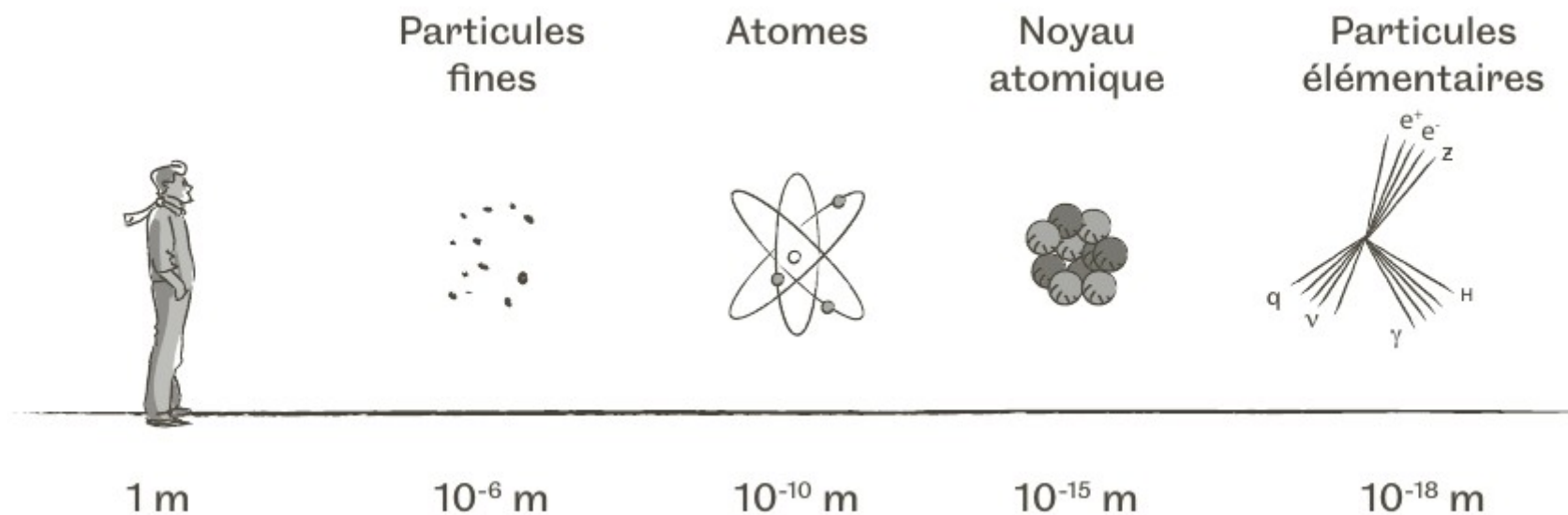
1911 : La seule femme invitée à la Conférence Solvay



Premier principe : ne se laisser abattre ni par les êtres ni par les événements

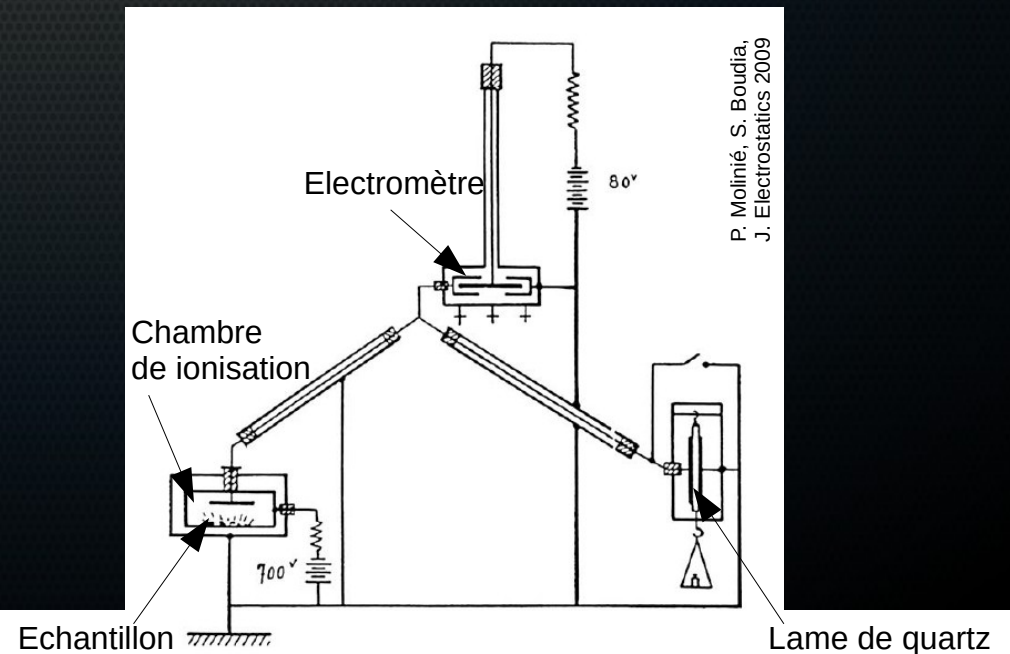
La longue marche de l'atomisme

- L'atomisme naît d'une idée très profonde de quelques philosophes grecs de l'Antiquité : expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple
- 1789-1805 Antoine Lavoisier et John Dalton introduisent les concepts des éléments chimiques et de l'atomisme dans la chimie
- Fin du 19ème siècle : le tableau périodique de Mendeleïeff commence à être reconnu, mais controversé autour du concept d'atome parmi les philosophes et les physiciens
- Ernst Mach en 1897 : « Avez-vous jamais vu un atome ? »



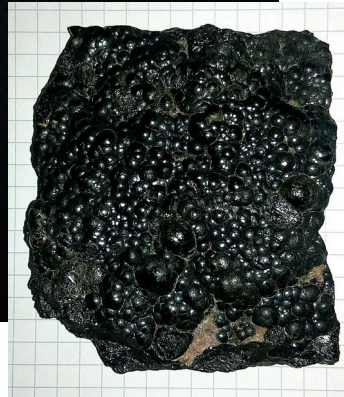
Des découvertes rapprochées

- 1895 : Wilhelm Röntgen découvre les rayons X
- 1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité de l'uranium
- 1898 : Marie Curie étudie les propriétés radioactives de plusieurs minerais avec l'électromètre de Pierre Curie
- Un instrument très sensible, des mesures rapides et fiables



De la radioactivité à la radiochimie

- Marie Curie analyse avec l'électromètre un grand nombre d'échantillons de minerais
- Elle découvre rapidement que le thorium émet aussi de la radioactivité, comme l'uranium
- En analysant un minerais d'uranium, la pechblende, elle observe que des préparations chimiques obtenues à partir de la pechblende sont bien plus radioactives que l'uranium
- Elle découvre ainsi le polonium
- Elle continue la traque et découvre le radium (présent dans la pechblende en raison d'une fraction de gramme par tonne!)
- Ces travaux ont marqué le début de la radiochimie



Quatre grandes découvertes

- Dans sa thèse de doctorat (1903) Marie Curie présente quatre grandes découvertes :
 - La radioactivité du thorium
 - Un nouvel élément chimique : le polonium
 - Un nouvel élément chimique : le radium
 - La radioactivité est une propriété atomique



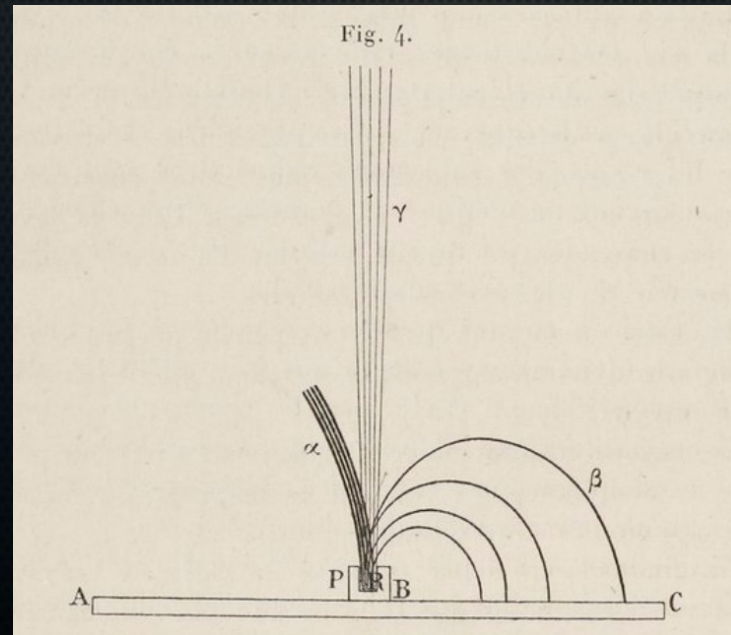
- D'où est-ce que l'atome puise une énergie un million de fois supérieure à celle produite dans une réaction chimique ?
- Pierre Curie discours lors de la remise du prix Nobel : « On peut concevoir encore que dans des mains criminelles le radium puisse devenir très dangereux, et ici on peut se demander si l'humanité a avantage à connaître les secrets de la nature, si elle est mûre pour en profiter ou si cette connaissance ne lui sera pas nuisible. L'exemple des découvertes de Nobel est caractéristique, les explosifs puissants ont permis aux hommes de faire des travaux admirables. Ils sont aussi un moyen terrible de destruction entre les mains de grands criminels qui entraînent les peuples vers la guerre. Je suis de ceux qui pensent, avec Nobel, que l'humanité tirera plus de bien que de mal des découvertes nouvelles. »

La radioactivité : une propriété nouvelle du noyau atomique

- La radioactivité est une propriété de certains noyaux instables qui spontanément se transforment, avec émission de particules (radiations) ionisantes
- Propriété atomique : ne dépend de la température, de la liaison chimique etc. Seul le nombre d'atomes en question détermine l'activité de l'échantillon
- Marie Curie dans sa thèse : « Nos recherches sur les substances radioactives nouvelles ont donné lieu à un mouvement scientifique. »

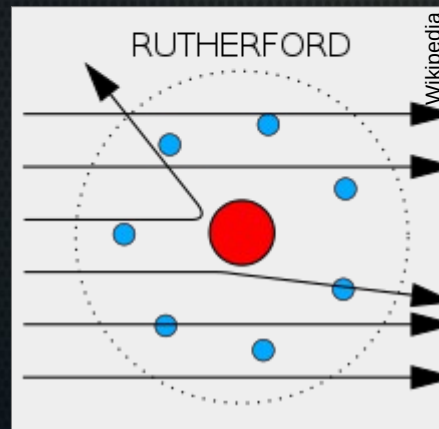
La nature des radiations

- Rayons alpha : des noyaux d'hélium (deux protons et deux neutrons)
- Rayons bêta : des électrons
- Rayons gamma : des photons (radiation électromagnétique) de très petite longueur d'onde



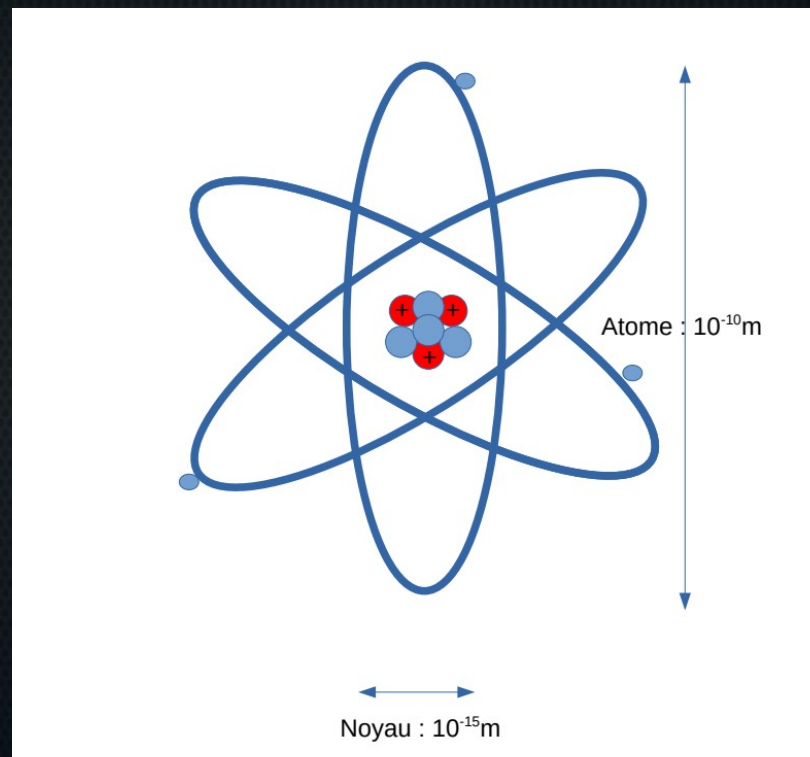
De l'atome à la physique quantique

- 1911 : Ernest Rutherford découvre le noyau atomique en bombardant des atomes avec des particules alpha. Le noyau est 10^{-5} fois plus petit que l'atome !



- Découverte du noyau atomique → modèle d'atome de Rutherford → Niels Bohr publie son modèle de l'atome un jalon majeur de la physique quantique

Les deux échelles de longueur de l'atome



Réactions chimiques : énergie typique 1 eV

Réactions nucléaires : énergie typique 1 MeV (un million de eV)

Quelles forces sont responsables de la stabilité de l'atome ? Et de ces énergies gigantesques ?

Tableau périodique des éléments chimiques

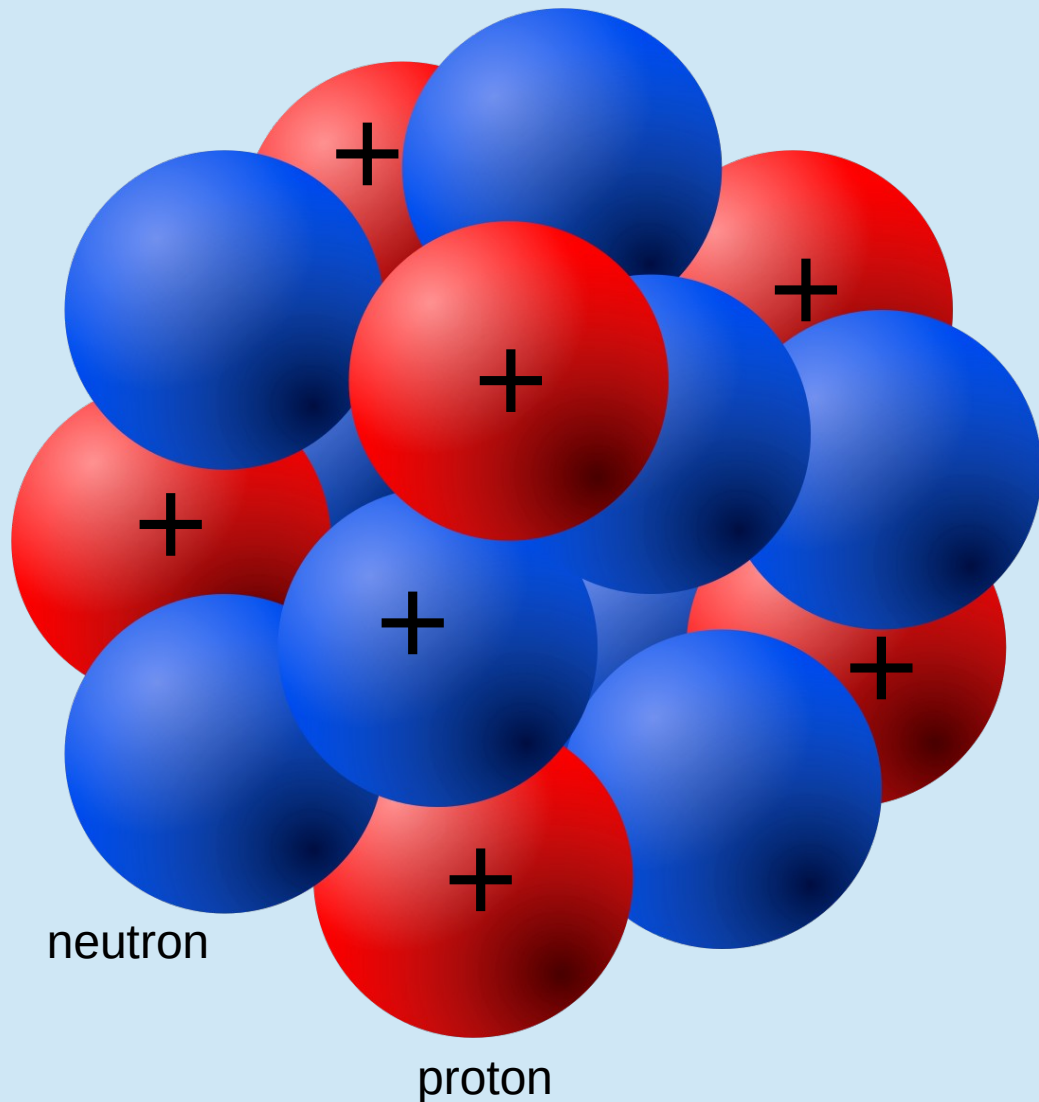
Groupe → I A
Période ↓ 1

nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
numéro atomique
symbole chimique
masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable] [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

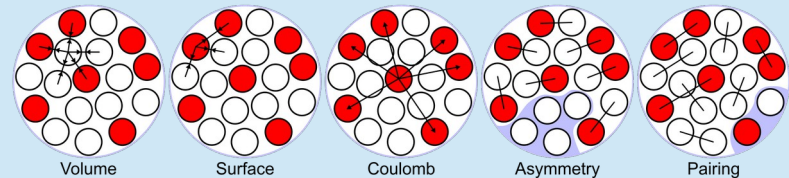
1	II A 2											III B 13	IV B 14	V B 15	VI B 16	VII B 17	VIII A 18	
1	Hydrogène 1 H 1,007975											Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Néon 10 Ne 20,1797 (6)	
2	Lithium 3 Li 6,9395	Béryllium 4 Be 9,0121831											Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085 (1)	Phosphore 15 P 30,97376200	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,4515	Argon 18 Ar 39,948 (1)
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,3055	III A 3	IV A 4	V A 5	VIA 6	VII A 7	VIII 8 9 10			I B 11	II B 12	Gallium 31 Ga 69,723 (1)	Germanium 32 Ge 72,630 (8)	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,971 (8)	Brome 35 Br 79,904	Krypton 36 Kr 83,798 (2)
4	Potassium 19 K 39,0983 (1)	Calcium 20 Ca 40,078 (4)	Scandium 21 Sc 44,955908 (5)	Titane 22 Ti 47,867 (1)	Vanadium 23 V 50,9415 (1)	Chrome 24 Cr 51,9961 (6)	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845 (2)	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934 (4)	Cuivre 29 Cu 63,546 (3)	Zinc 30 Zn 65,38 (2)	Indium 49 In 114,818 (1)	Étain 50 Sn 118,710 (7)	Antimoine 51 Sb 121,760 (1)	Tellure 52 Te 127,60 (3)	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,293 (6)
5	Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)	Strontium 38 Sr 87,62 (1)	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224 (2)	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,95 (1)	Technétium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07 (2)	Rhodium 45 Rh 102,90550	Palladium 46 Pd 106,42 (1)	Argent 47 Ag 107,8682 (2)	Cadmium 48 Cd 112,414 (4)	Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2 (1)	Bismuth 83 Bi 208,98040	Polonium 84 Po [209]	Astate 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]
6	Césium 55 Cs 132,905452	Baryum 56 Ba 137,327 (7)	Lanthanides 57-71	Hafnium 72 Hf 178,49 (2)	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84 (1)	Rhénium 75 Re 186,207 (1)	Osmium 76 Os 190,23 (3)	Iridium 77 Ir 192,217 (3)	Platine 78 Pt 195,084 (9)	Or 79 Au 196,966569	Mercure 80 Hg 200,592 (3)	Nihonium 113 Nh [286]	Flerovium 114 Fl [289]	Moscovium 115 Mc [289]	Livermorium 116 Lv [293]	Tennessee 117 Ts [294]	Oganesson 118 Og [294]
7	Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103	Rutherfordium 104 Rf [267]	Dubnium 105 Db [268]	Seaborgium 106 Sg [269]	Bohrium 107 Bh [270]	Hassium 108 Hs [277]	Meitnérium 109 Mt [278]	Darmstadtium 110 Ds [281]	Roentgenium 111 Rg [282]	Copernicium 112 Cn [285]	Nihonium 113 Nh [286]	Flerovium 114 Fl [289]	Moscovium 115 Mc [289]	Livermorium 116 Lv [293]	Tennessee 117 Ts [294]	Oganesson 118 Og [294]
			Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116 (1)	Praséodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242 (3)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36 (2)	Europium 63 Eu 151,964 (1)	Gadolinium 64 Gd 157,25 (3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500 (1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259 (3)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668	
			Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03588	Uranium 92 U 238,0289	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Américium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendélévium 101 Md [258]	Nobélium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [266]	

Métaux							Non métaux						
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique

L'instabilité des noyaux lourds



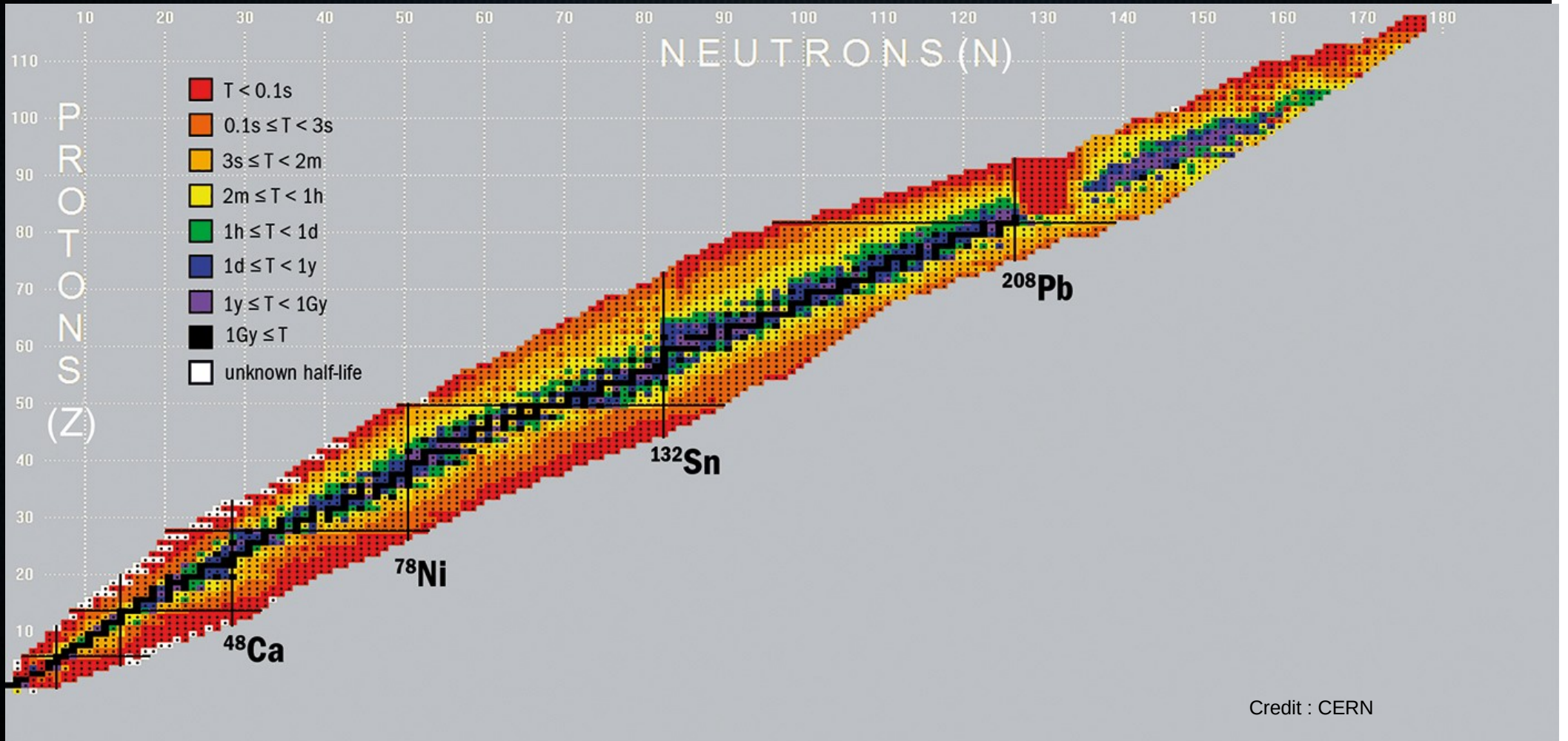
Le no



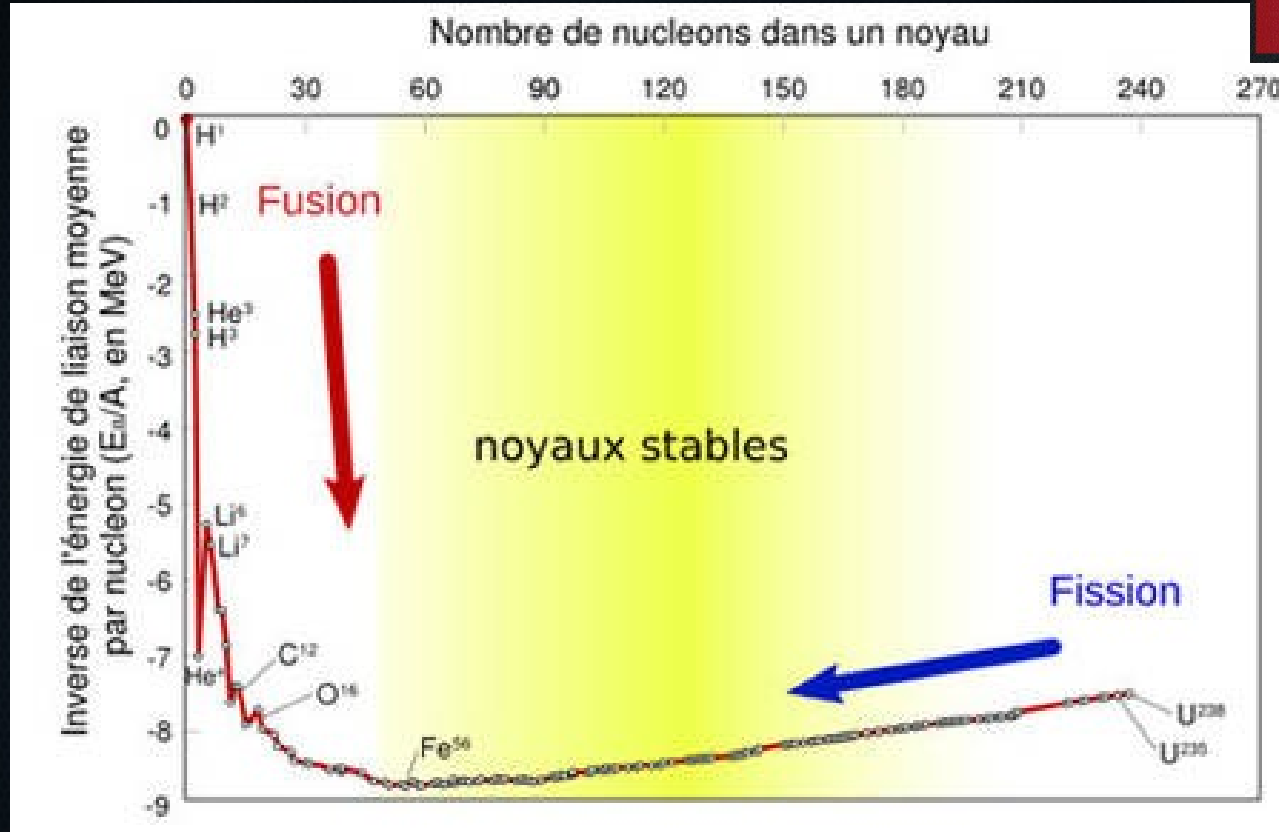
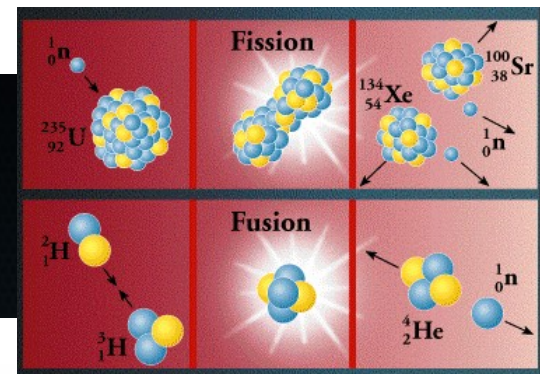
Le noyau est rendu stable par les forces nucléaires attractives. Elles sont de courte portée. Au sein du noyau s'exercent aussi les forces coulombiennes répulsives entre les protons. Les noyaux lourds sont rendus instables par les forces coulombiennes.

Pour cette même raison, il y a un nombre limité d'atomes différents.

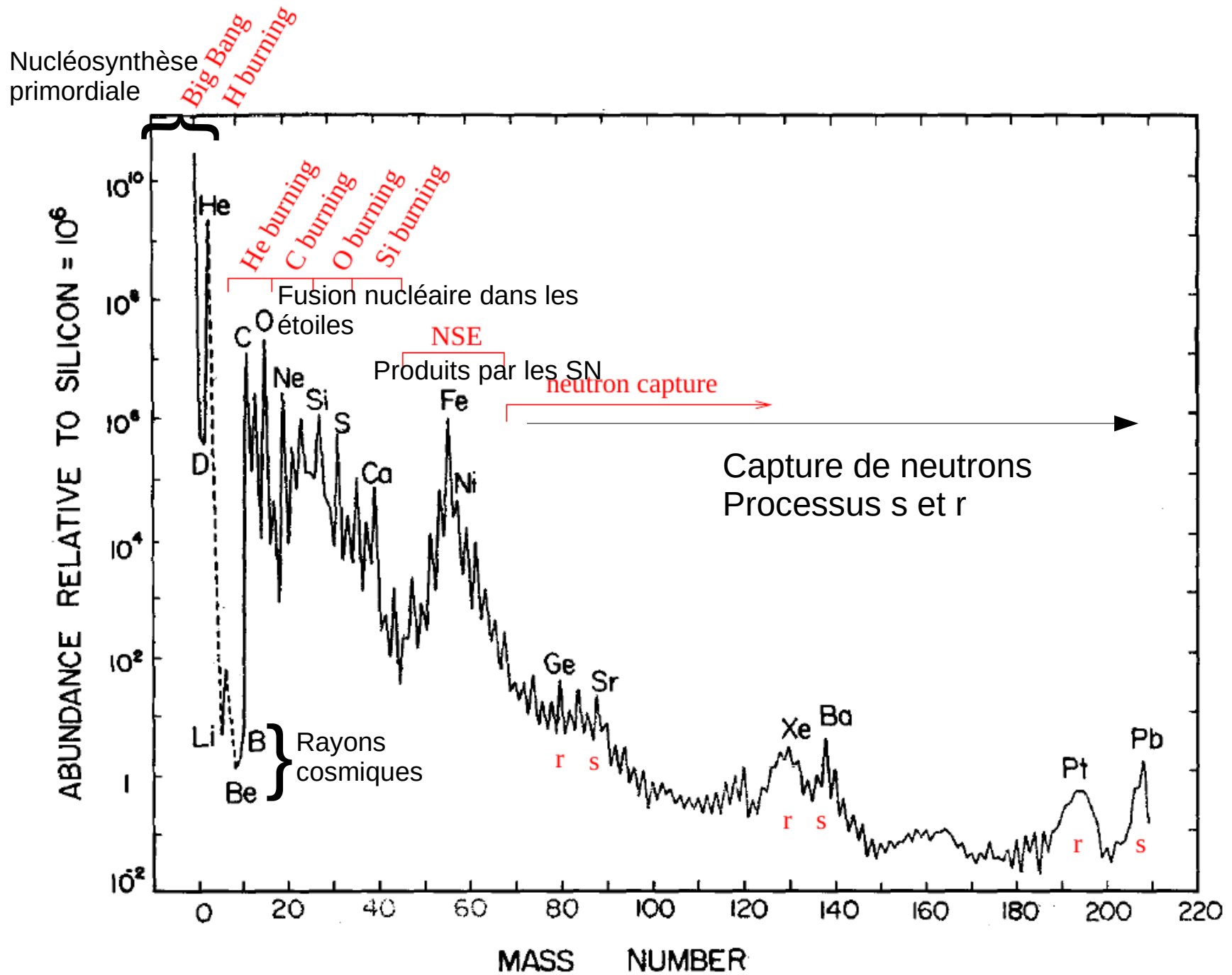
Les noyaux atomiques



Énergie nucléaire



Futura-sciences.com



Abondances des éléments chimiques dans le Système Solaire

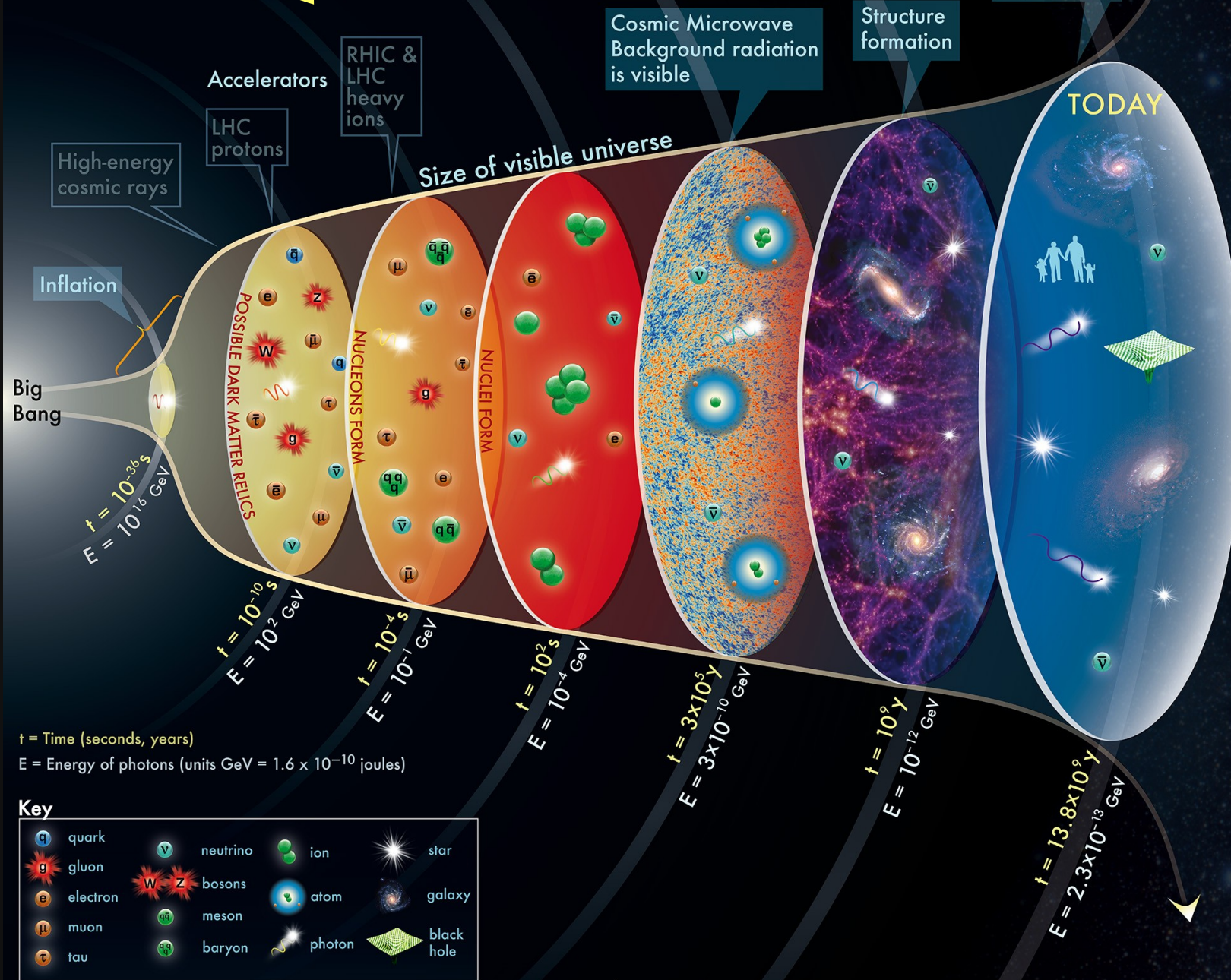
La production des noyaux atomiques dans l'Univers : la nucléosynthèse stellaire

- 1) Le Big Bang ne produit pas de noyaux lourds !
- 2) Les étoiles « brûlent » de l'hydrogène pour produire les noyaux jusqu'au fer
- 3) Les supernovas libèrent les noyaux
- 4) D'autres explosions stellaires produisent les éléments très lourds (uranium, or, terres rares, ...)

HISTORY OF THE UNIVERSE

Nos connaissances actuelles

Dark energy accelerated expansion



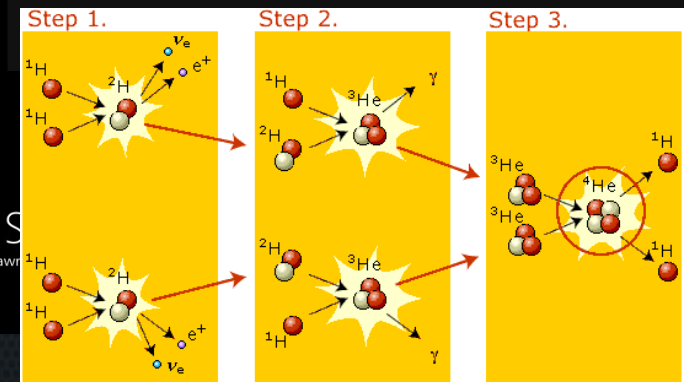
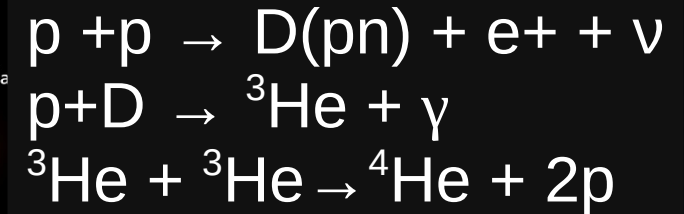
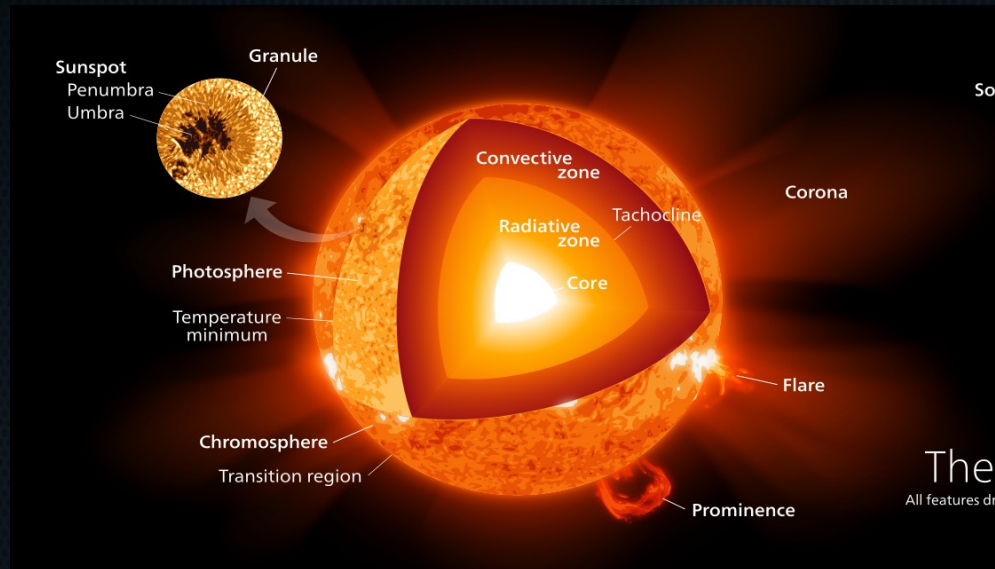
t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Nucléosynthèse primordiale

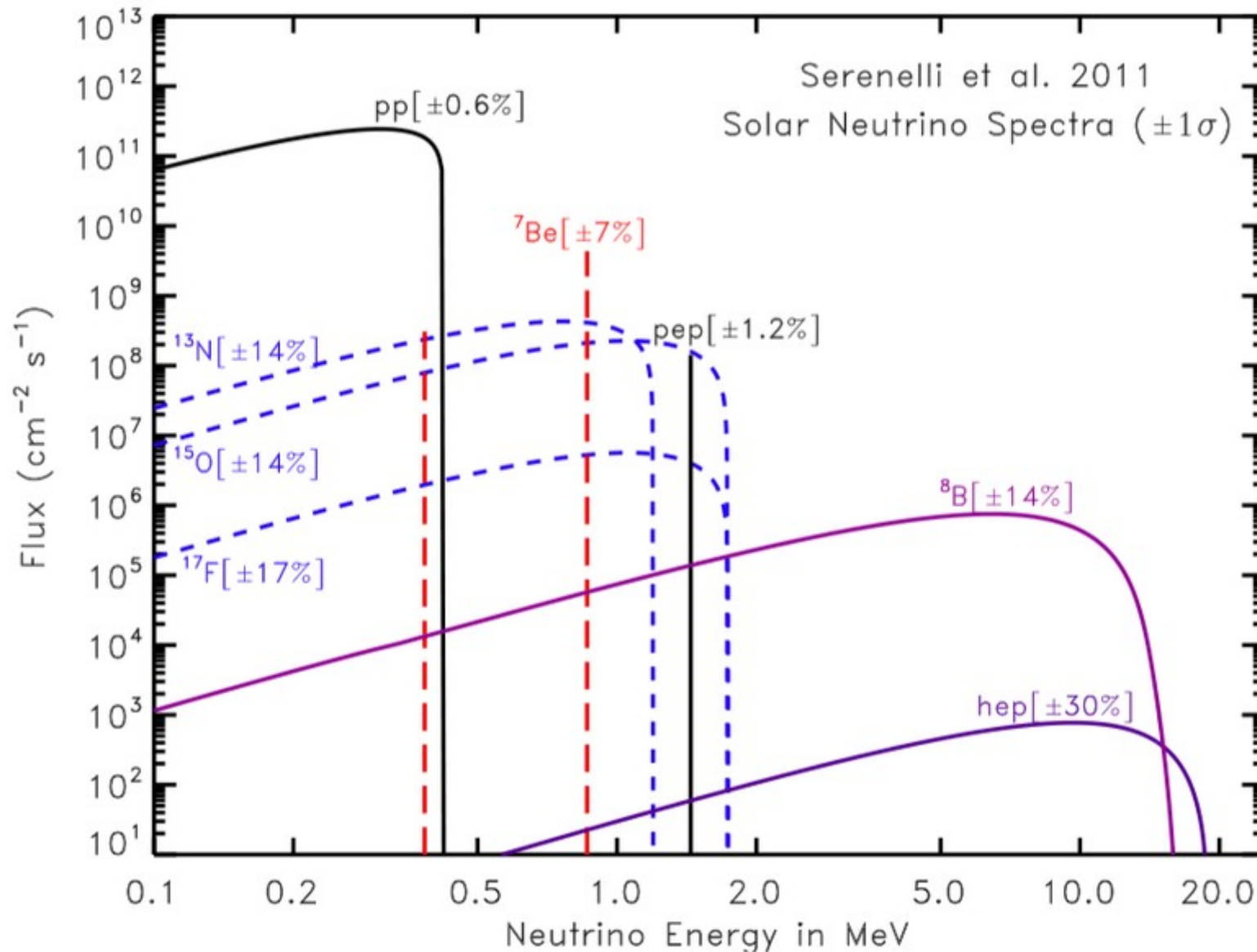
- Les premiers secondes de l'Univers : protons, neutrons, et beaucoup de photons
- Il faut attendre que la température baisse suffisamment pour commencer à former des noyaux
- $p + n \rightarrow D + \gamma$ (=gamma= photon)
- Pas de noyaux stables avec $A=5$ ou $A=8$ (une échelle à laquelle manquent deux échelons)
- On forme essentiellement de l'hélium, 25 %
- Ensuite la densité baisse (expansion de l'univers) après trois minutes la composition est figée

Le Soleil : une petite étoile



- $T(\text{coeur}) = 14 \cdot 10^6 \text{ K}$ $T(\text{surface}) \sim 6000 \text{ K}$
- $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ $L = 3.8 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$
- Soleil : source de neutrinos $7 \cdot 10^{10} \text{ } \nu/\text{s} / \text{cm}^2$ (sur Terre)
- Ils sont produits dans les processus de fusion nucléaire et nous renseignent sur l'intérieur du Soleil : $T = 14 \cdot 10^6$ degrés !
- La longévité du Soleil (~ 10 milliards d'années) est une conséquence de la faiblesse de ν l'interaction faible !

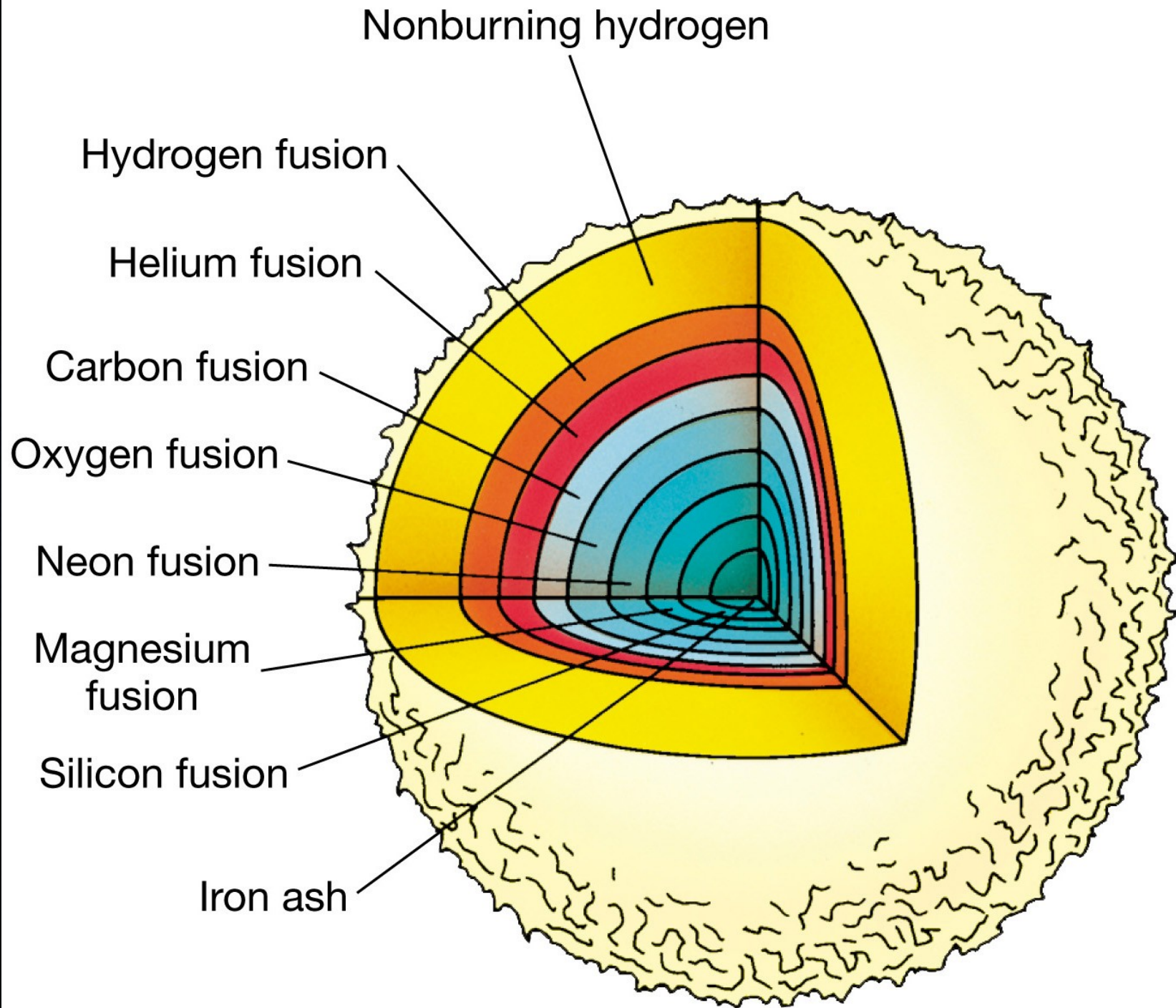
Solar Neutrino Energy Spectra

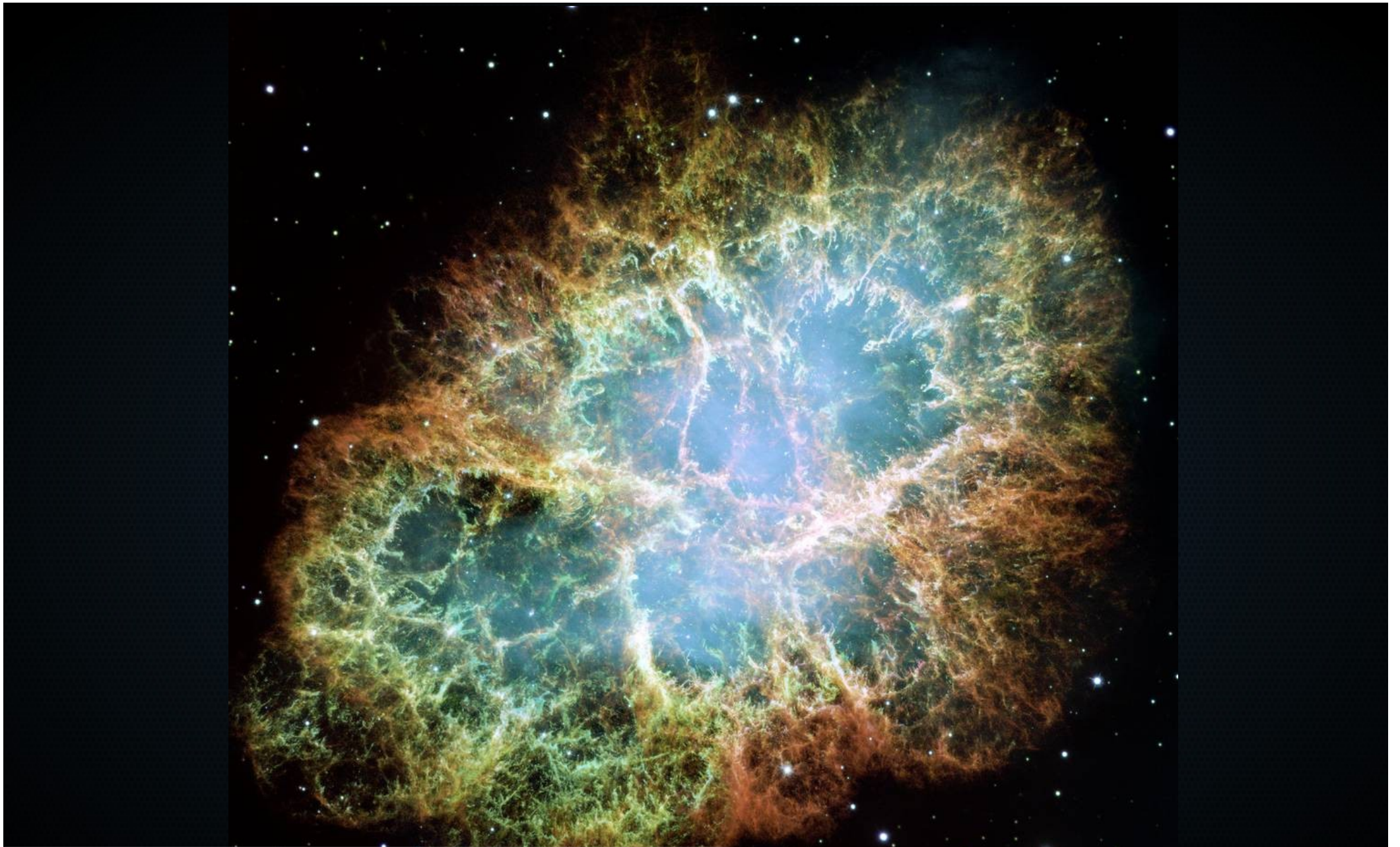


Réactions nucléaires dans une étoile massive

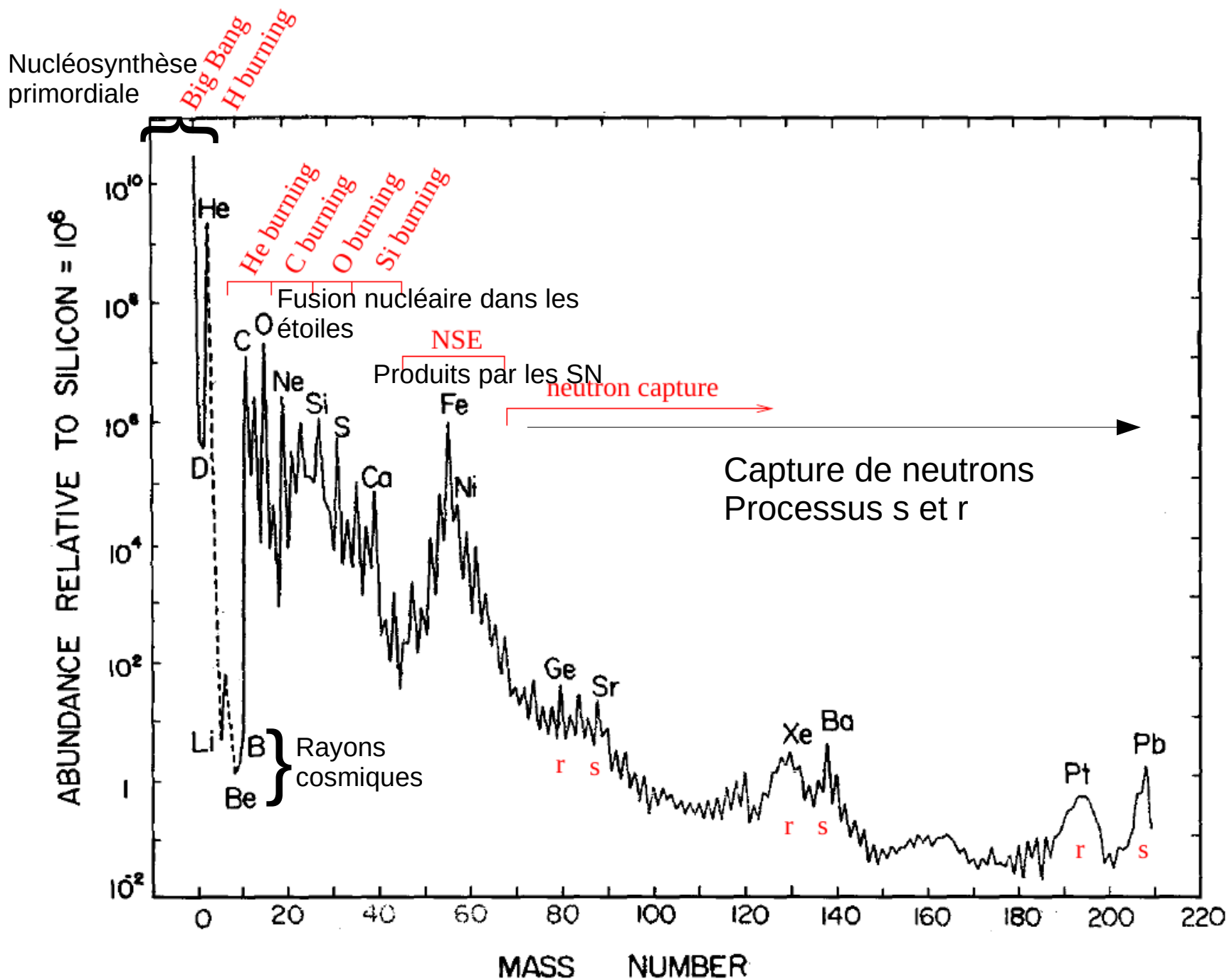
Fusion de	Réaction	T (keV)	Densité (g/cm ³)	L (10 ⁴ L _☉)	Durée (années)
Hydrogène	H → He	3	5.9	2.1	1.2 10 ⁷
Hélium	He → C, O	14	1.3 10 ³	6	1.3 10 ⁶
Carbone	C → Ne, Mg	53	1.7 10 ⁵	8.6	6.3 10 ³
Néon	Ne → O, Mg	110	1.6 10 ⁷	9.6	7
Oxygène	O → Si	160	9.7 10 ⁷	9.6	1.7
Silicium	Si → Fe, Ni	270	2.3 10 ⁸	9.6	6 jours

M=15 M_☉





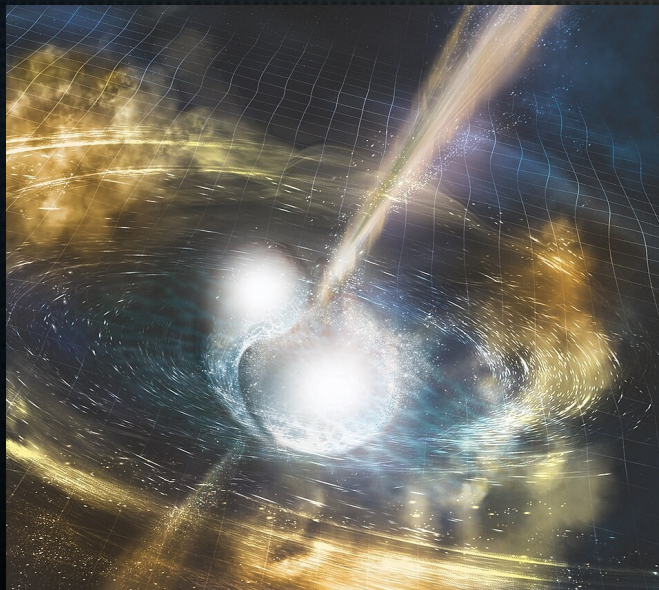
La nébuleuse du Crabe (par le télescope Hubble) : du gaz très chaud (hydrogène, oxygène, soufre, $T \sim 10^6 \text{K}$) en expansion : ce qui reste des couches externe de l'étoile !



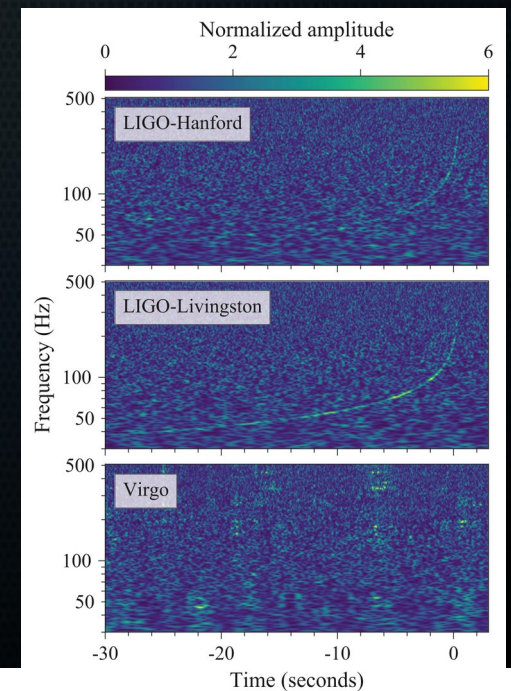
Abondances des éléments chimiques dans le Système Solaire

Une découverte récente GW170817

- En 2017, les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et VIRGO ont détecté GW170817 la fusion de deux étoiles à neutrons, événement observé aussi par plusieurs télescopes au sol et le Fermi Gamma Ray Telescope
- Cela a permis d'expliquer une partie des « sursauts gamma » et aussi expliquer où sont produits les éléments lourds (processus r). Une quantité d'éléments lourds de 16000 fois la masse de la Terre aurait été produite (dont des « terres rares »)



Vue d'artiste (NSF/LIGO)



1914-1918 : la radiologie au front



1921 : le Marie Curie Radium Fund





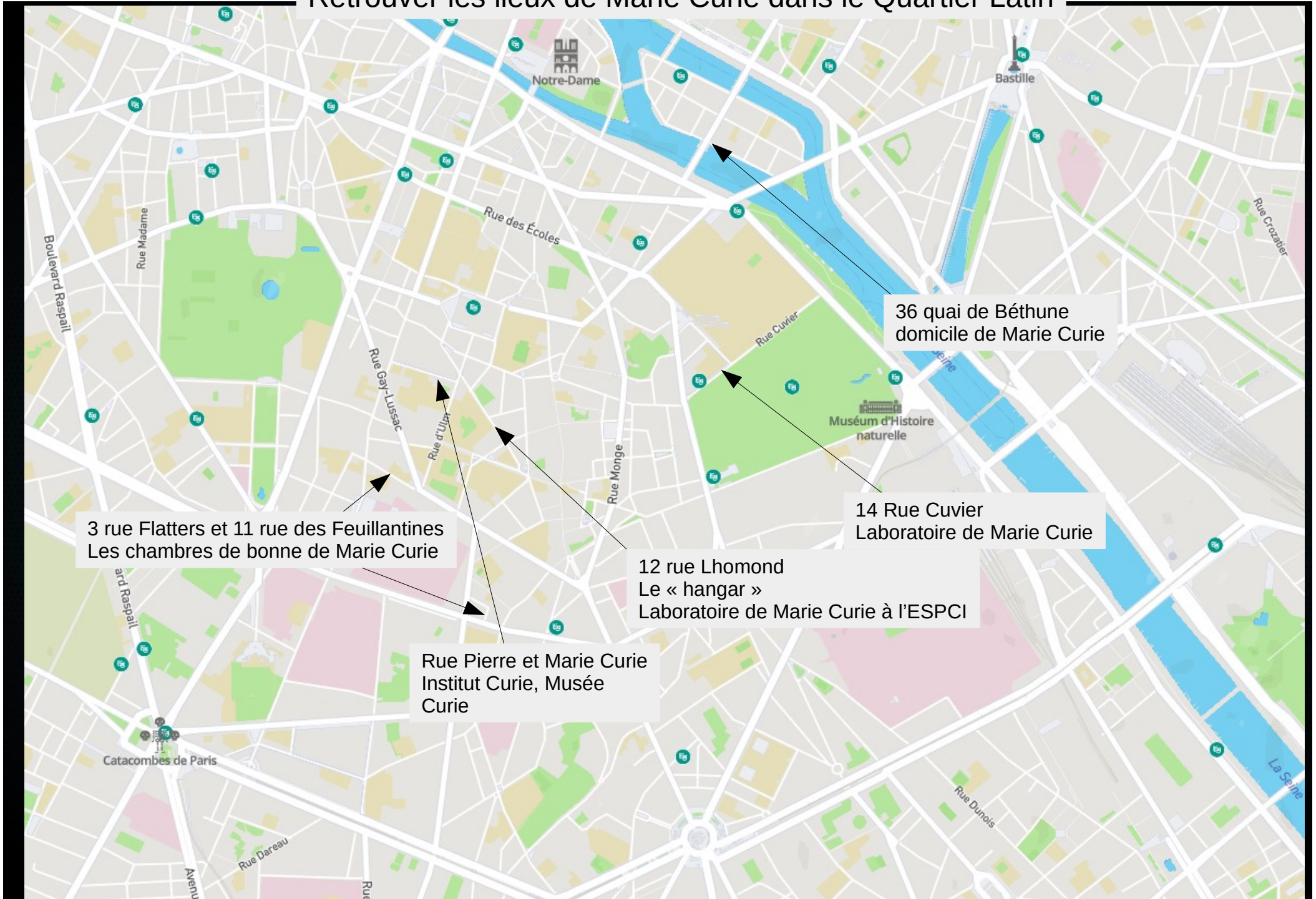
Source Musée Curie

Irène Curie en 1936 : sous-secrétaire d'État à la Recherche Scientifique (première femme dans un gouvernement français)

Marie Curie (1867-1934)

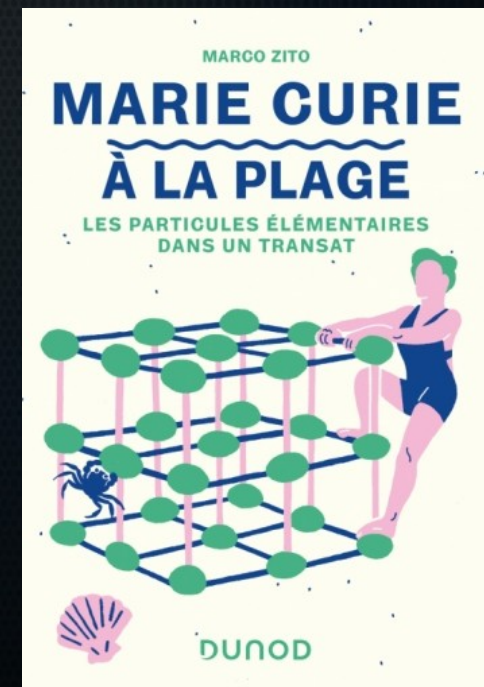
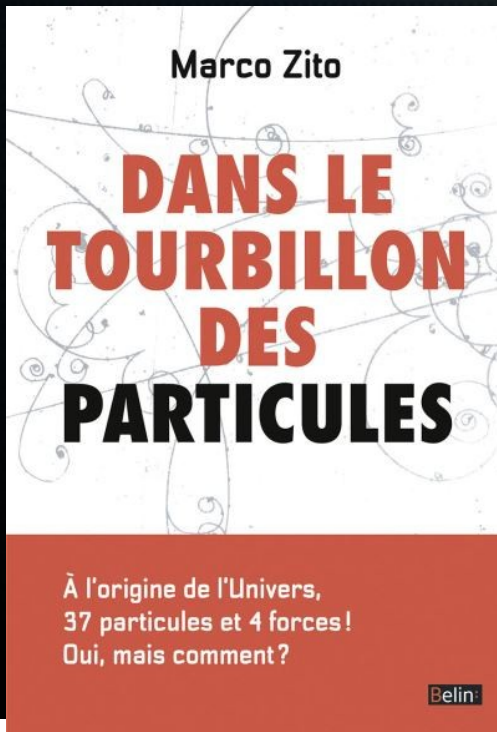
« [Pierre Curie] un homme qui, attaché inflexiblement au service de son idéal, a honoré l'humanité par une existence de travail vécue dans le silence, dans la simple grandeur de son génie et de son caractère. Il avait la foi de ceux qui ouvrent des voies nouvelles. [...] Ne croyant qu'à la puissance pacifique de la science et de la raison, il vécut pour la recherche de la vérité. »

Retrouver les lieux de Marie Curie dans le Quartier Latin



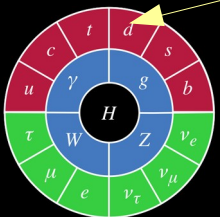
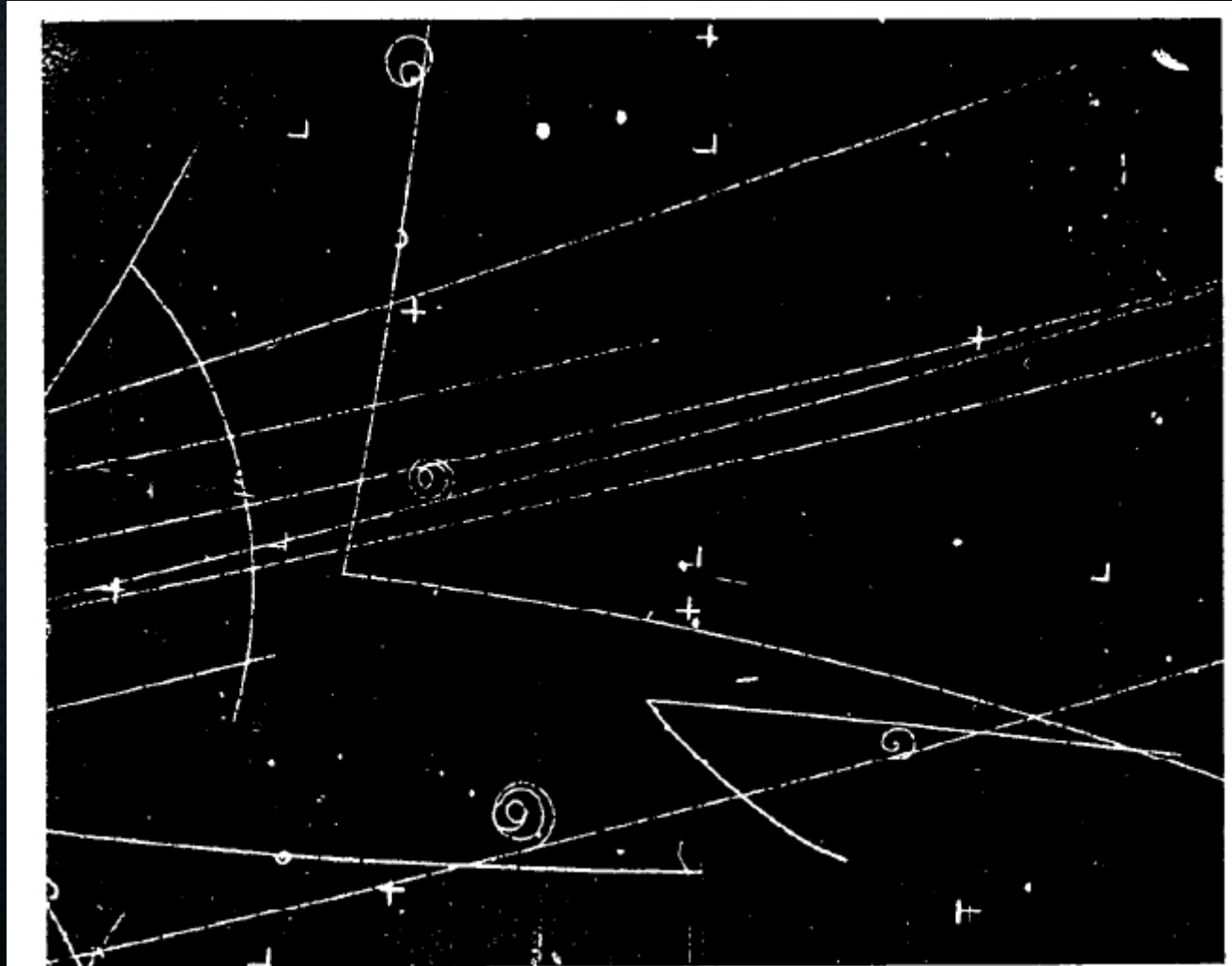
Pour aller un peu plus loin

- M. Zito Dans le tourbillon des particules Belin 2015
- M. Zito Supernova Belin 2018
- M. Zito Marie Curie à la plage Dunod 2023



Voir les particules : les détecteurs

- Un cliché d'un événement (interaction de particules) dans une chambre à bulle
- $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$
- $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
- $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$
- p (uud), π^- ($\bar{u}d$)
- K^0 ($d\bar{s}$), Λ (uds)

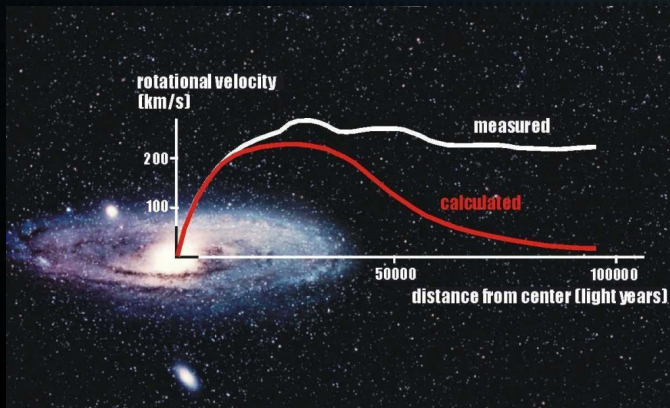


Des matières inconnues dans l'Univers

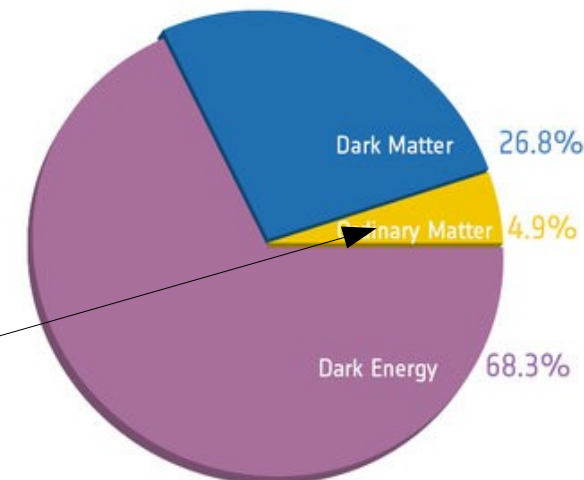
- L'observation des courbes de rotations dans les galaxies et des amas de galaxies indique l'existence d'une nouvelle composante, « vue » par ses effets gravitationnels, dite matière noire
- Il est possible que nous ne connaissions pas les lois de la physique
- Ou alors nous ne savons rien de 95 % de ce qui existe dans l'Univers actuel !



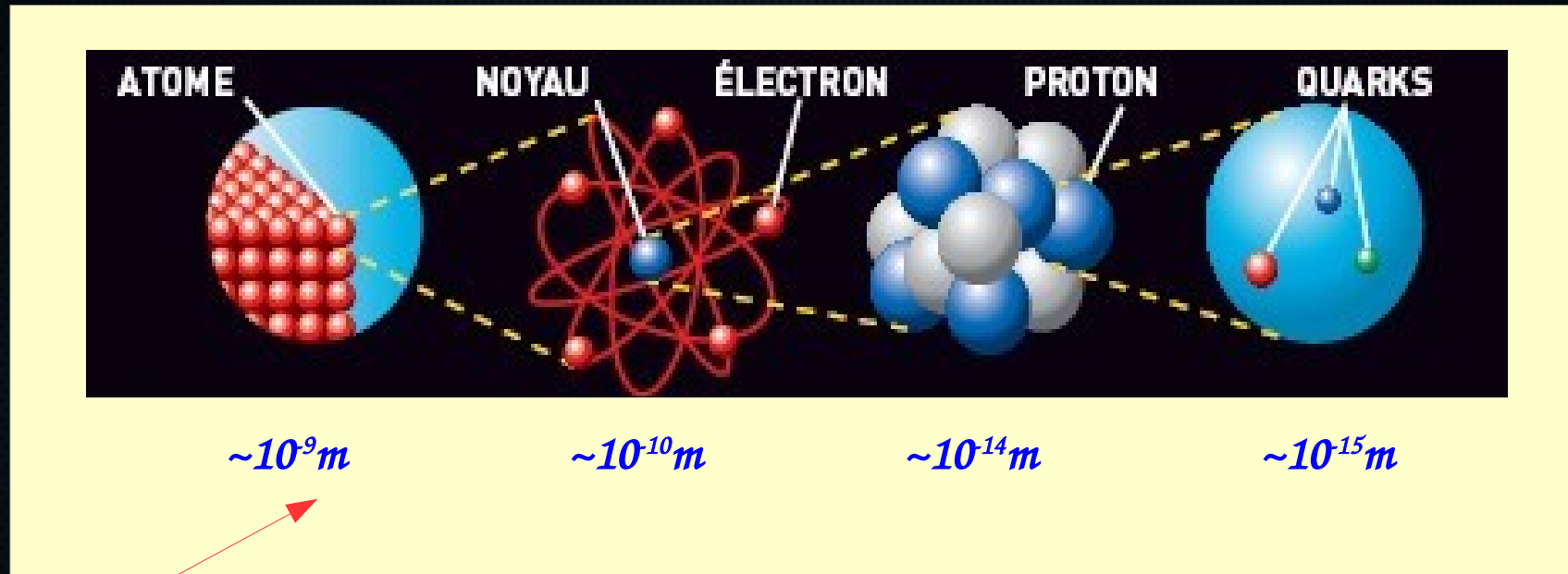
Coma Cluster



Matière connue



De l'atome aux particules élémentaires

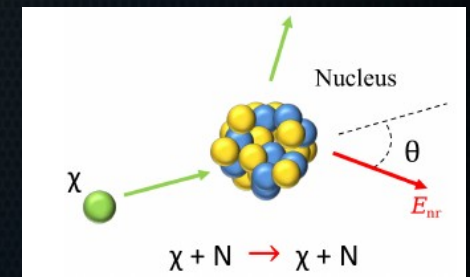
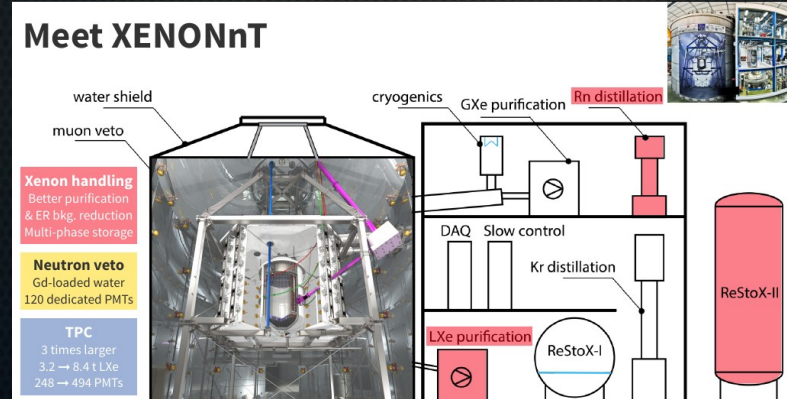
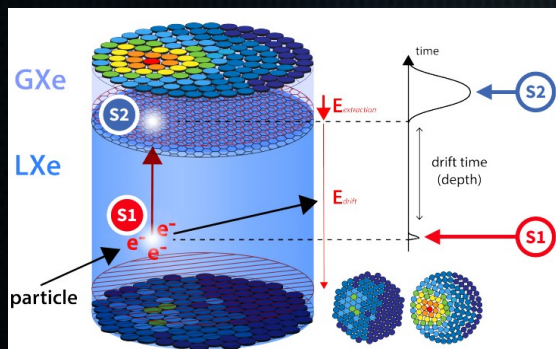


Un milliardième de mètre !

Les particules élémentaires n'ont pas de structure observée jusqu'à une échelle de $10^{-18} m$

A la recherche de la matière noire

- Plusieurs expériences recherchent la matière noire dans des laboratoires souterrains avec des détecteurs très sensibles



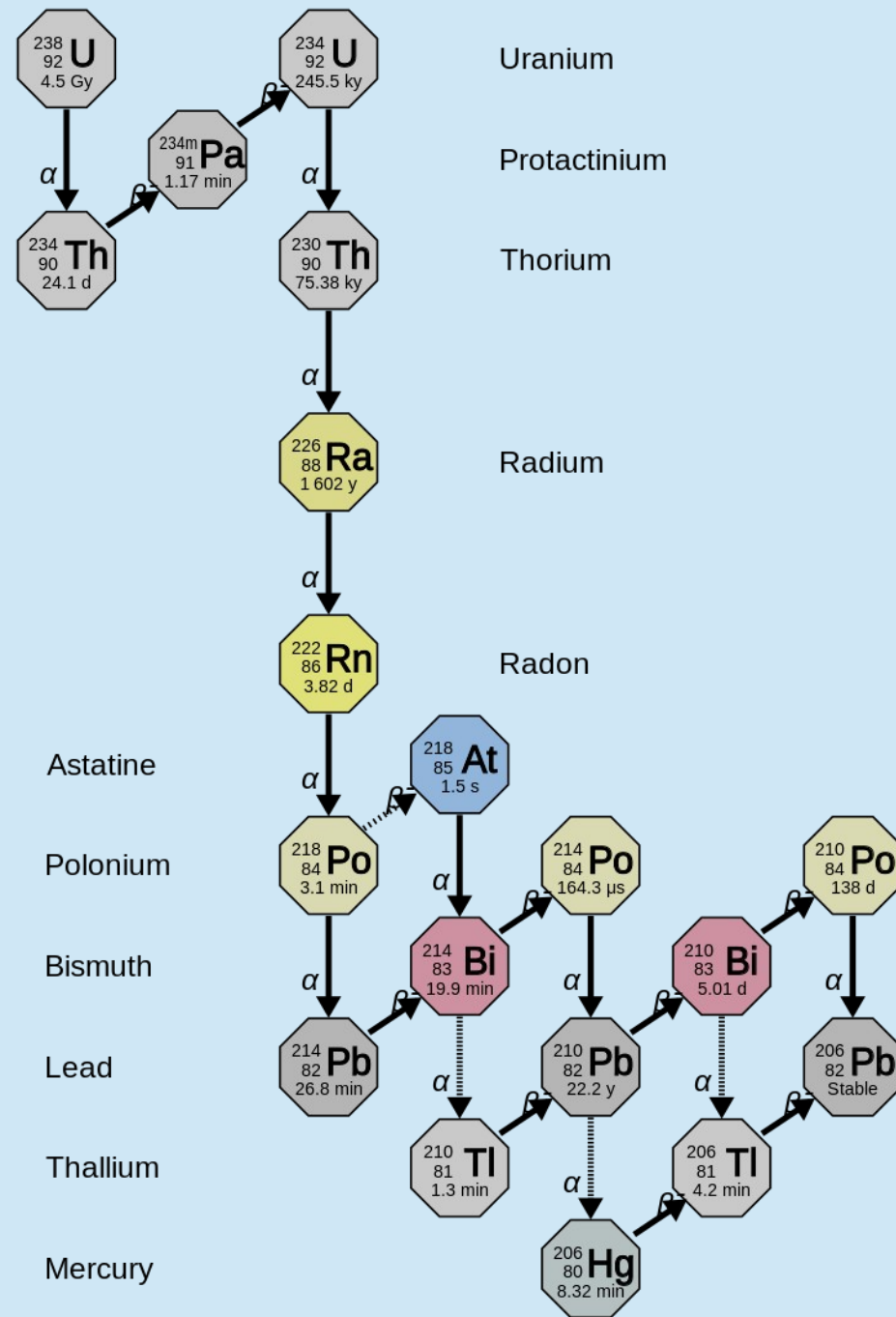
Détecteur dans un
laboratoire souterrain

WIMP

36

Recul nucléaire

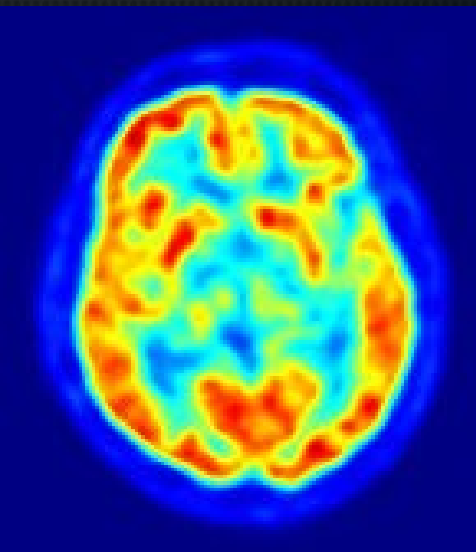
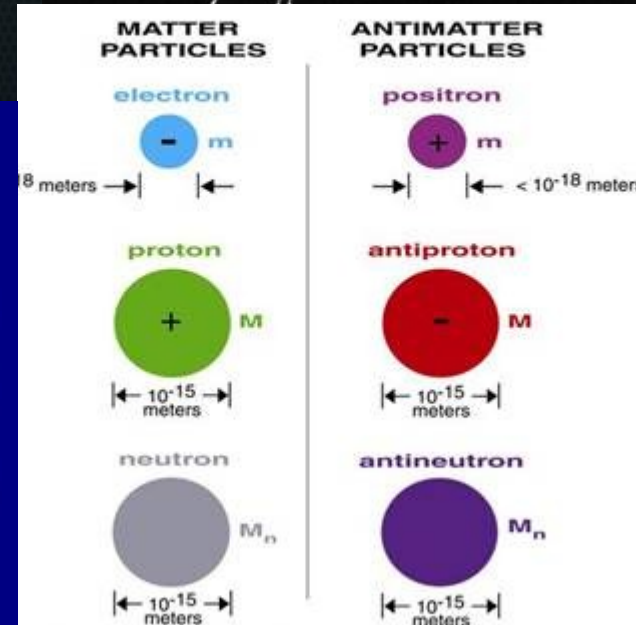
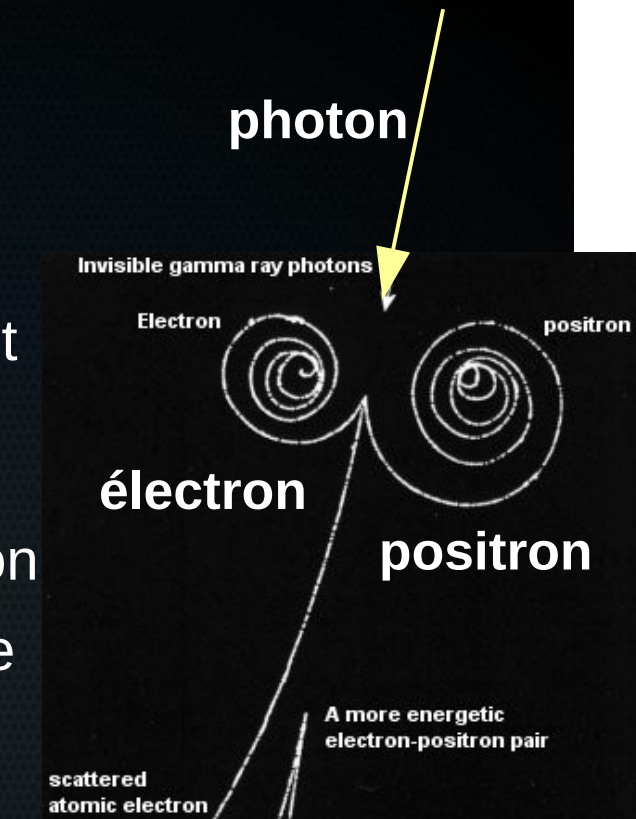
Réserve



Chaîne de désintégration de l'uranium

L'antimatière

- En 1928, Paul Dirac imagine une nouvelle équation qui décrit les électrons. Elle a quatre solutions, deux décrivent un électron dans deux états de spin et les autres ?
- De l'autre côté de l'Atlantique, on découvre une particule de charge positive, et de masse égale à celle de l'électron
- Le positron e^+ est né. A chaque particule, correspond une anti-particule (observée!).
- On peut produire et étudier de l'anti-matière. L'anti-matière est utilisée quotidiennement dans les analyses médicales de type TEP
- Annihilation : $e^+ + e^- \rightarrow 2 \text{ photons}$



1127.
189
189

Cours de la Courant

THÈSES

18/395

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M^{me} SKLODOWSKA CURIE.



1^{re} THÈSE. — RECHERCHES SUR LES SUBSTANCES RADIO-
ACTIVES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le juin 1903, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, *Président*.

BOUTY,

MOISSAN,

Examinateurs.

PARIS,

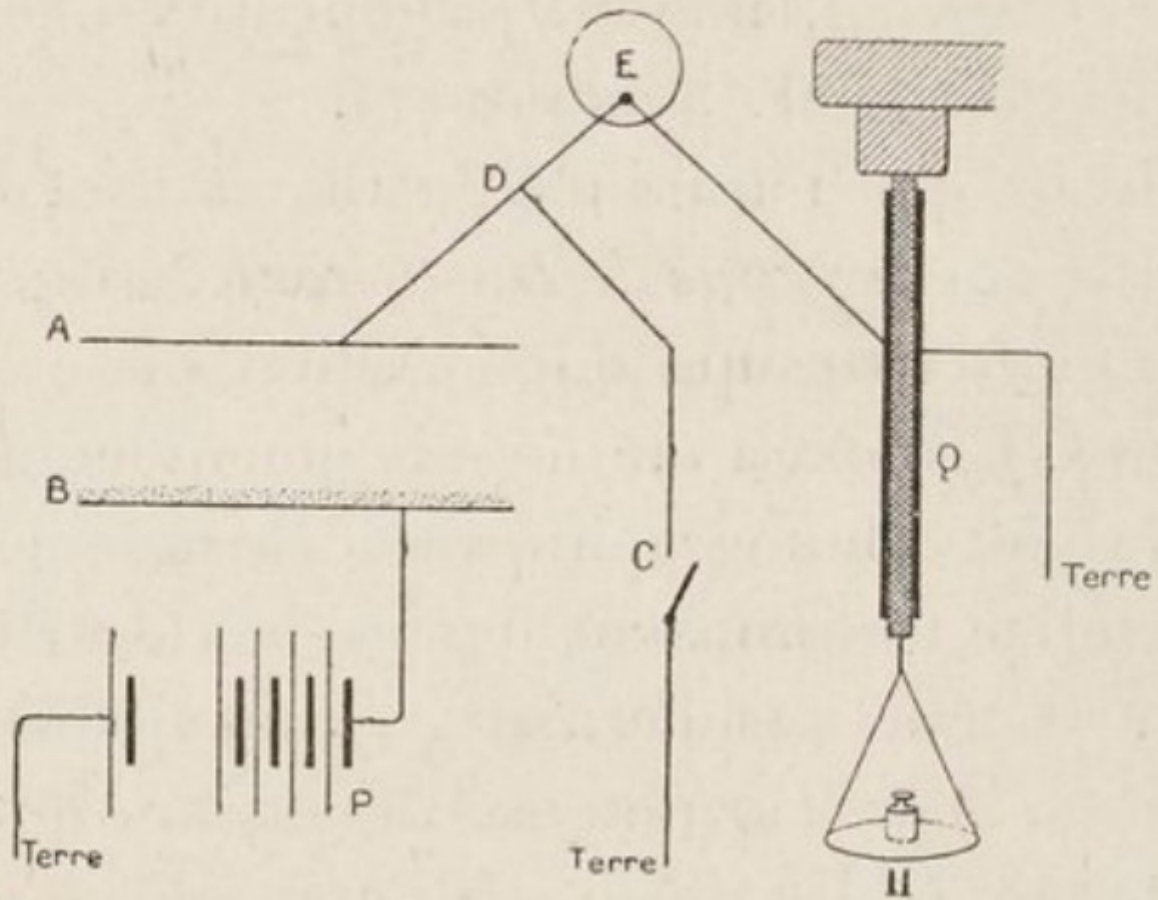
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1903

Fig. 1.



Chambre de ionisation

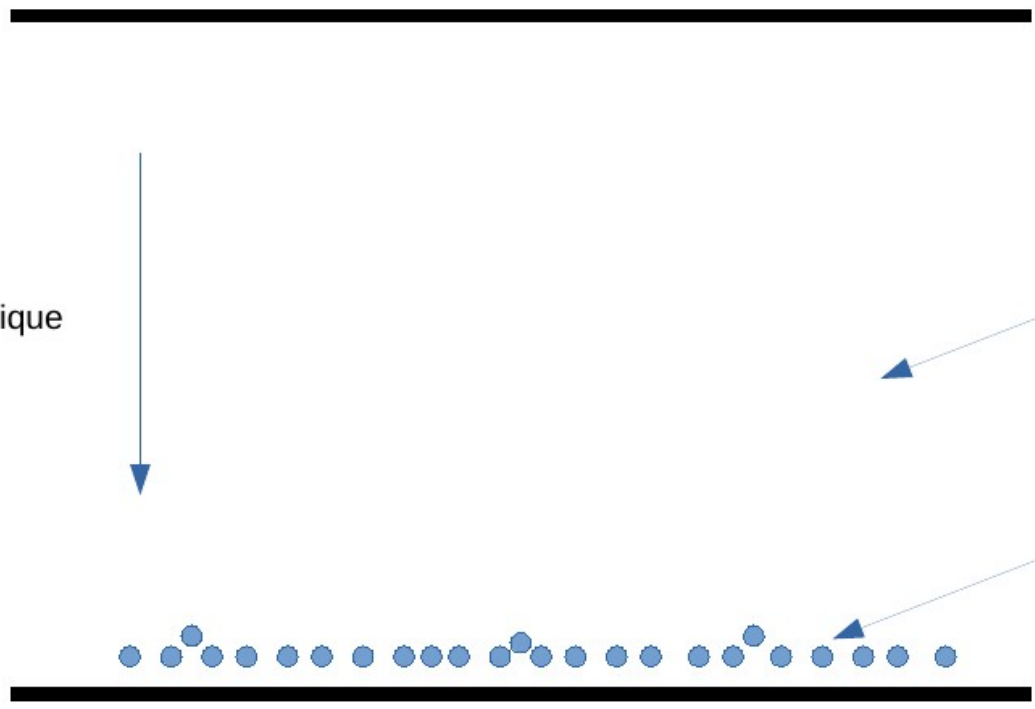
Électrode

Champs électrique

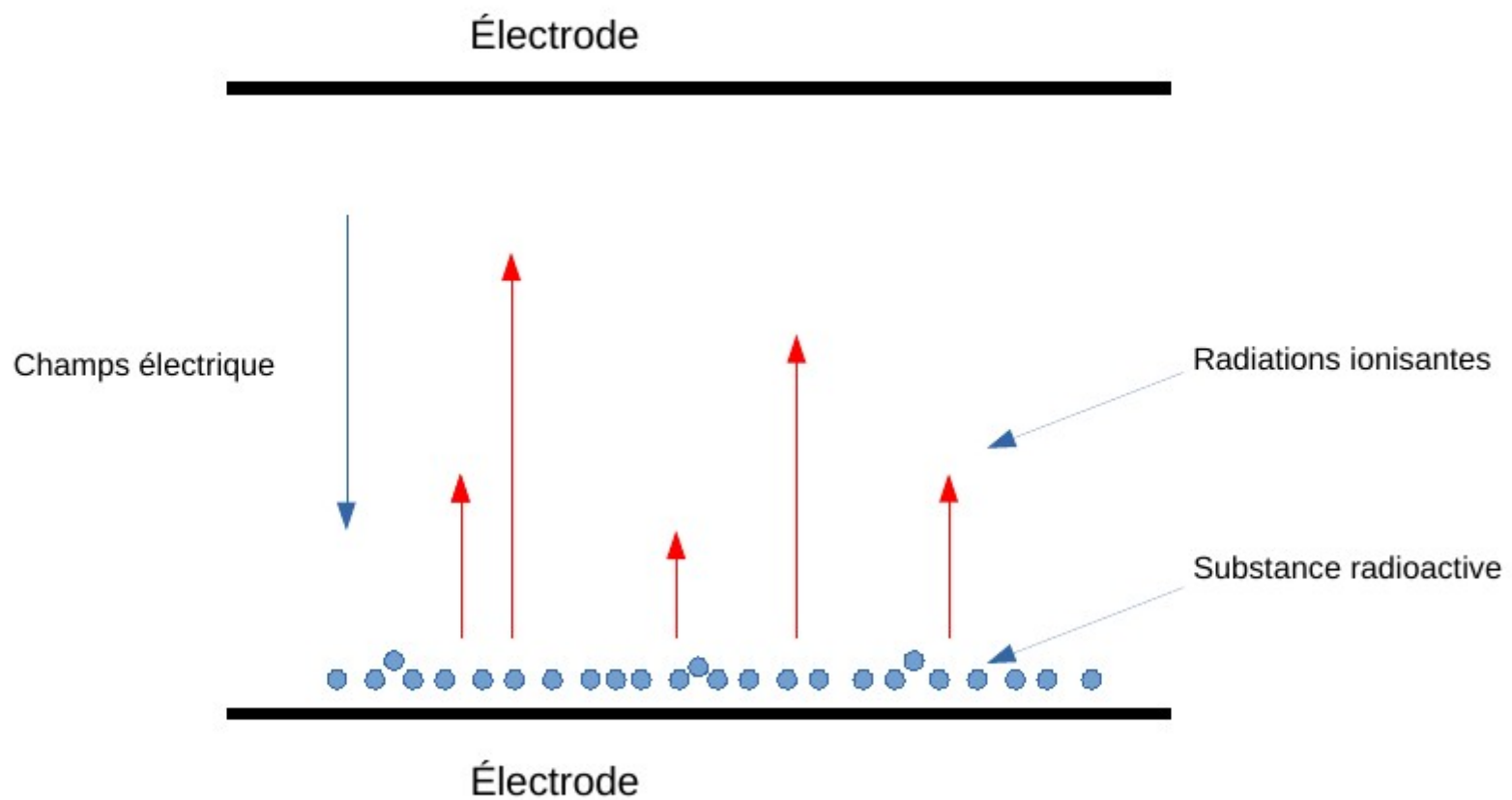
Air

Substance radioactive

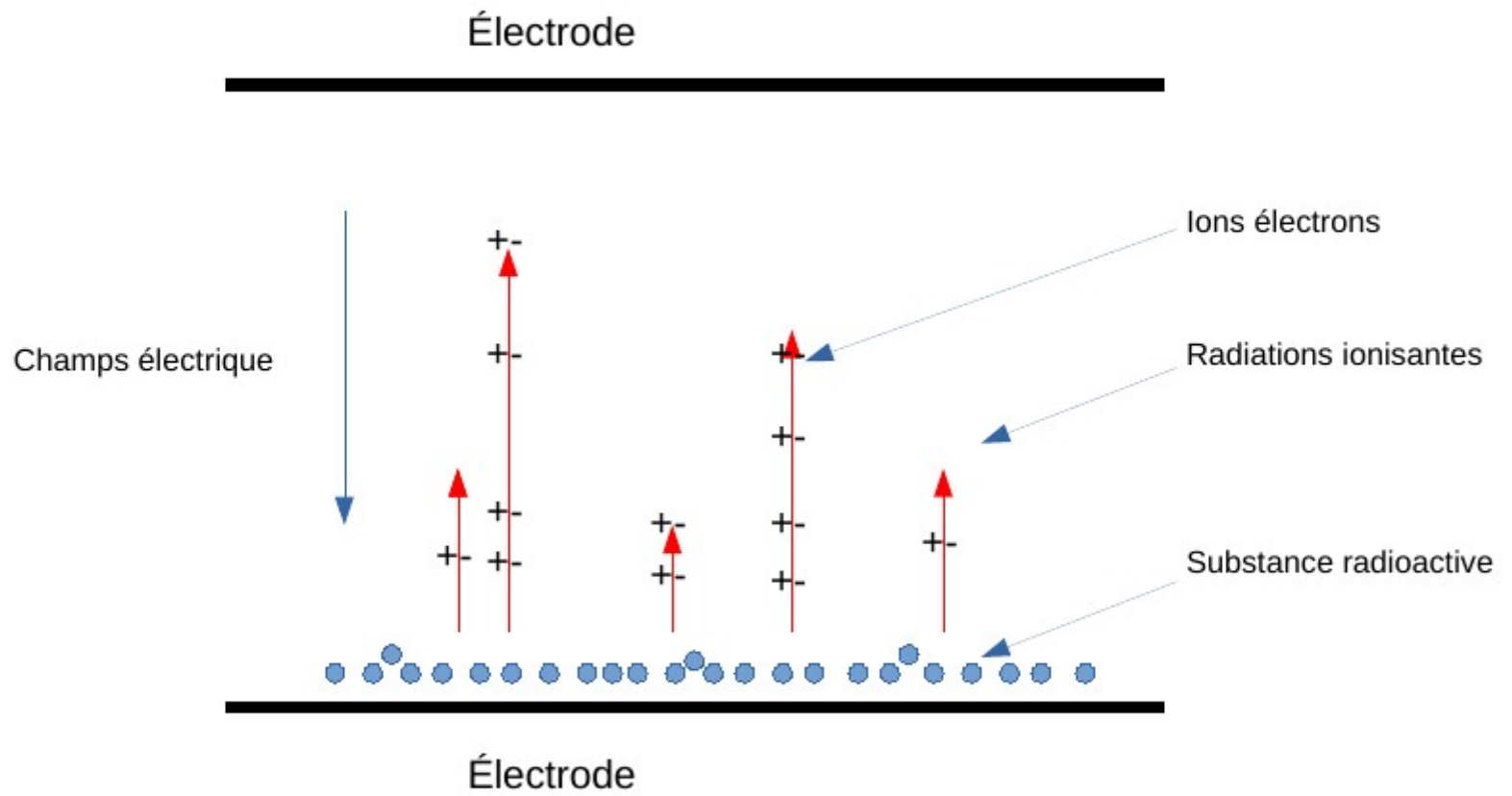
Électrode



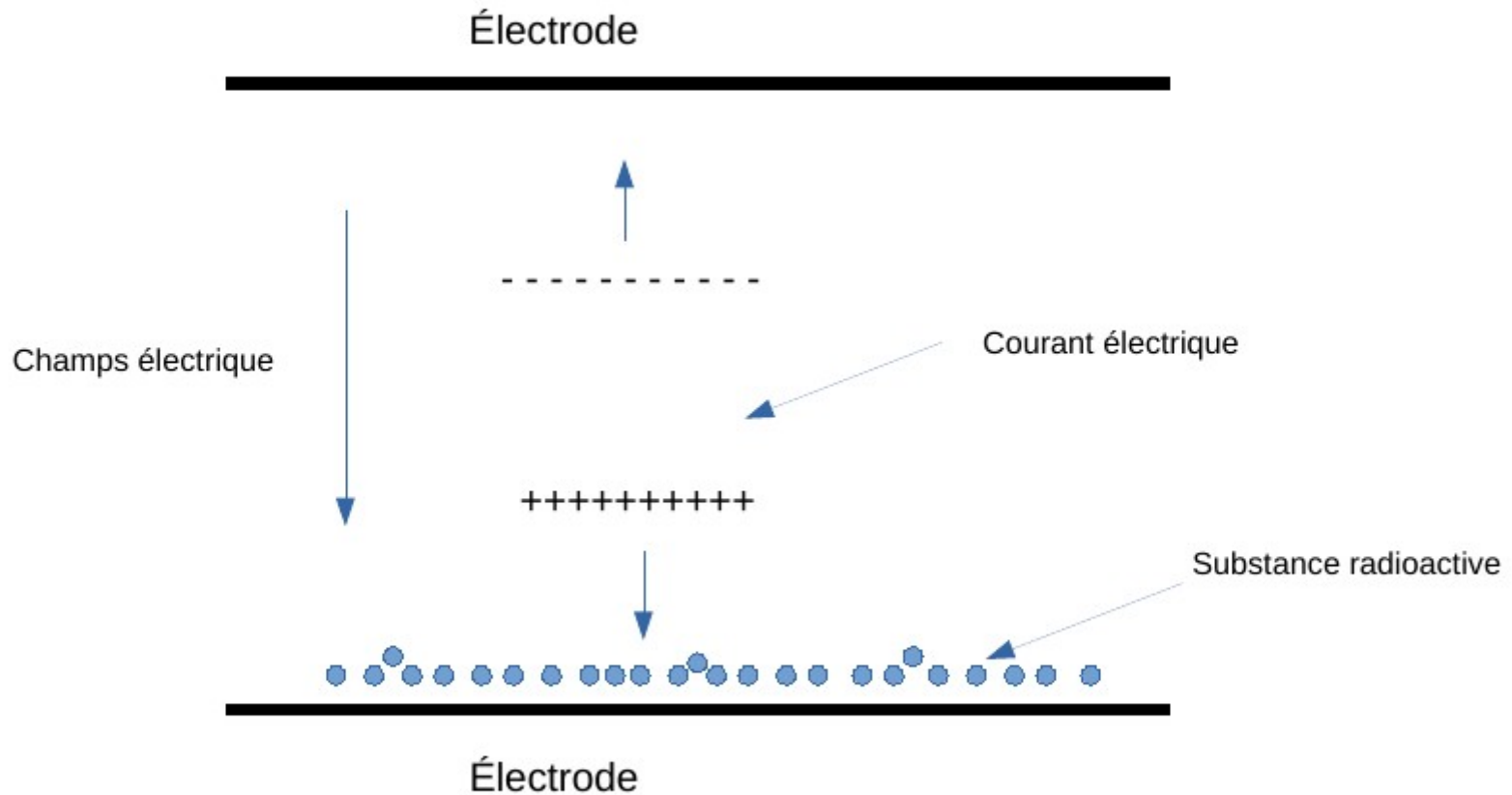
Chambre de ionisation



Chambre de ionisation



Chambre de ionisation



Une méthode rapide, quantitative, fiable, et de grande sensibilité, préfiguration des instruments de mesure de la radioactivité et des détecteurs de la physique des particules

j'ai fait un grand nombre de mesures de leur activité dans diverses conditions. Il résulte de l'ensemble de ces mesures que la radioactivité de ces substances est bien effectivement une propriété atomique. Elle semble ici liée à la présence des atomes des deux éléments considérés et n'est détruite ni par les changements d'état physique ni par les transformations chimiques. Les combinaisons chimiques et les mélanges contenant de l'uranium ou du thorium sont d'autant plus actifs qu'ils contiennent une plus forte proportion de ces métaux, toute matière inactive agissant à la fois comme matière inerte et matière absorbant le rayonnement.

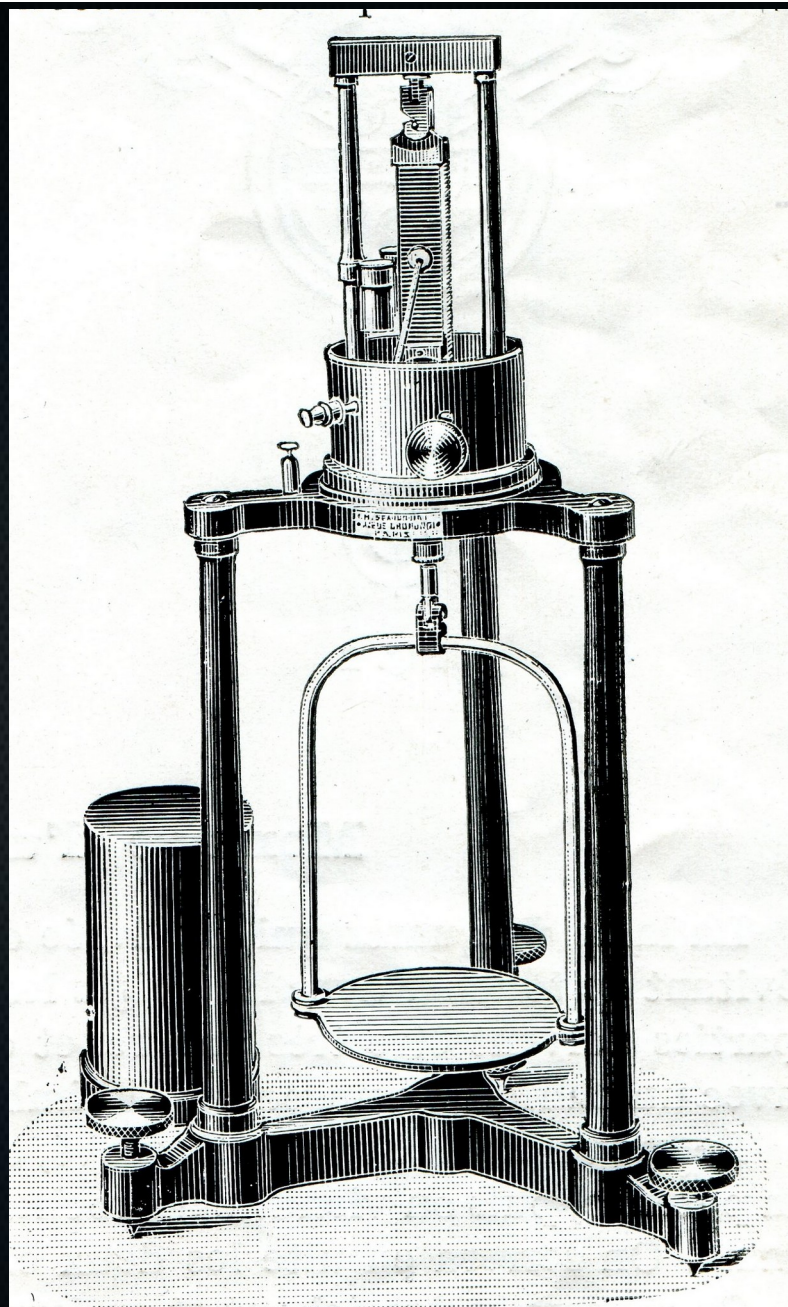


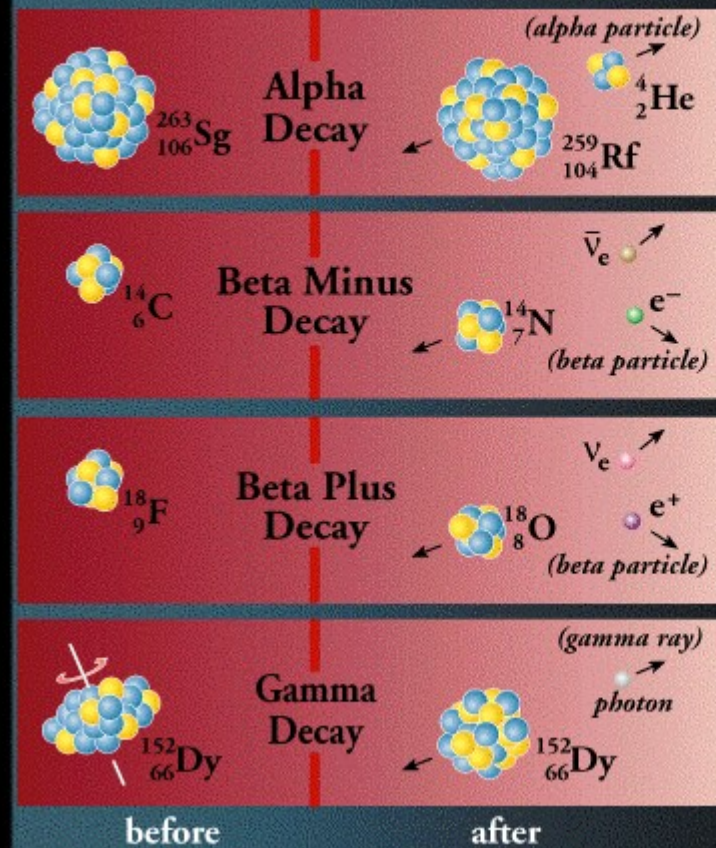
Fig. 1. — Quartz piezo-électrique.
Echelle 1 /6.



Marie Curie en quelques dates

- 1867 naissance à Varsovie
- 1891 arrivée à Paris pour ses études à Sorbonne
- 1898 grandes découvertes
- 1903 prix Nobel de Physique
- 1911 prix Nobel de chimie
- 1914 radiologie au front
- 1921 tournée aux Etats-Unis (Marie Curie Radium Fund)
- 1934 mort de léucémie

Radioactivity

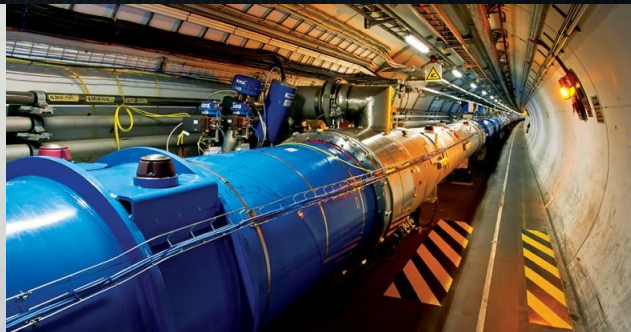
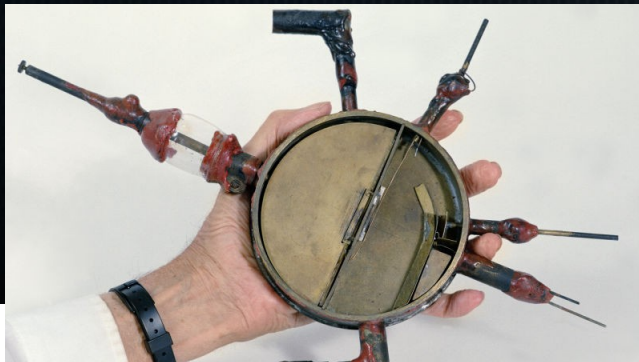
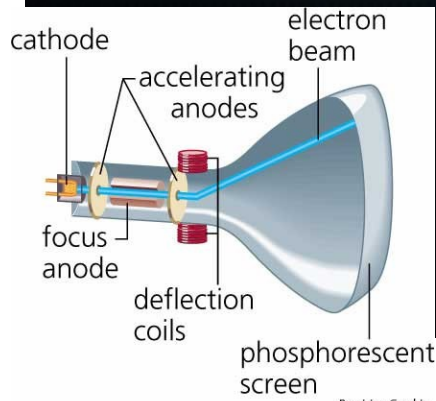


Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In **alpha** decay, the nucleus releases a ^4_2He nucleus—an alpha particle. In **beta** decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (or a positron and neutrino) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antimatter is composed of antiparticles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In **gamma** decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.



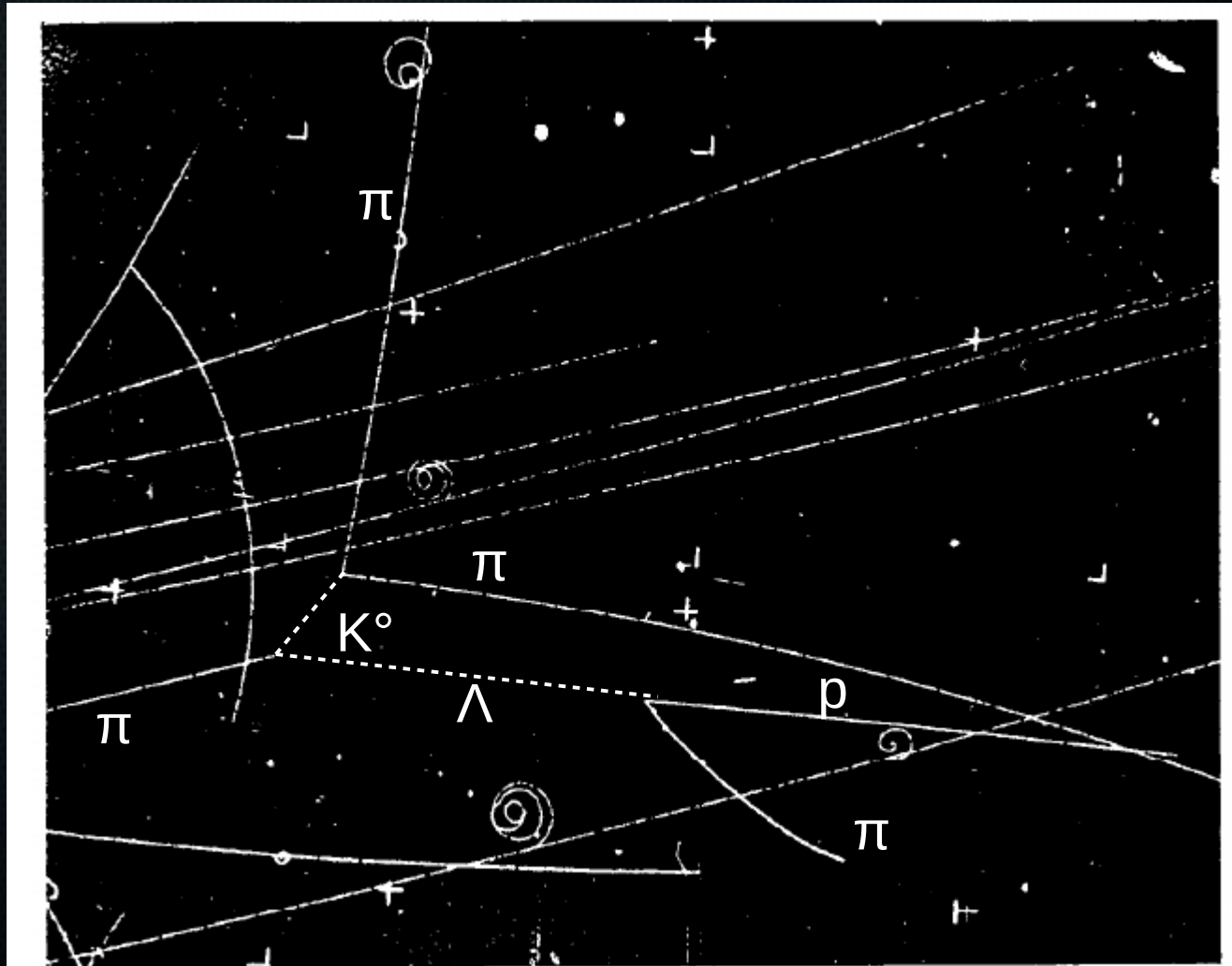
Manipuler les particules : les accélérateurs

- Un accélérateur de particules : le tube cathodique (téléviseur) !
- Développés à partir des années 1920-1930, les accélérateurs de particules permettent de fournir de grandes quantités d'énergie à des faisceaux (électrons, protons)
- Système de cavités accélératrices (champs électriques) et aimants pour le garder sur des trajectoires
- Grande énergie : petite longueur d'onde (détails de l'intérieur d'un système). Création de nouvelles particules de grande masse



Voir les particules : les détecteurs

- Un cliché d'un événement (interaction de particules) dans une chambre à bulle
- $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$
- $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
- $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$
- p (uud), π^- ($\bar{u}d$)
- K^0 ($d\bar{s}$), Λ (uds)



Les particules élémentaires selon le Modèle Standard

