

Particules et noyaux

Cours : 1h45 par semaine

Bruno Espagnon (IPNO) espagnon@ipno.in2p3.fr

TD : 1h45 par semaine

groupes 1 (9H45) - **Carole Gaulard (CSNSM)** gaulard@csnsm.in2p3.fr

groupes 2 (9h45) – **Xavier Garrido (LAL)** garrido@lal.in2p3.fr

groupes 3 (13h45) – **Jonathan Biteau (IPNO)** biteau@ipno.in2p3.fr

groupes 4 (13h45) et cumulatifs – Bruno Espagnon

TP : 4 journées de TP consécutives par étudiant fin mars (dosimètre)

Responsable : Carole Gaulard

Documents sur dokeos.

Visites IPNO et LAL le 6 décembre

Plan du cours

1. Introduction à la physique subatomique
2. Sonder la matière
3. Section Efficace

Particules

1. Particules et Symétries
2. Classification des particules
3. Particules et Interactions
4. Particules et lois de conservation
5. Les neutrinos
6. Phénoménologie des hadrons
7. Modèle des quarks
8. Le Modèle Standard et Au-delà

Noyaux

1. Forces nucléaires
2. Modèles nucléaires
3. Applications
4. Le noyau

-  Notions que vous devriez déjà connaître...
-  Notions à connaître.
-  Notions pour aller plus loin.

Introduction historiques Terminologie

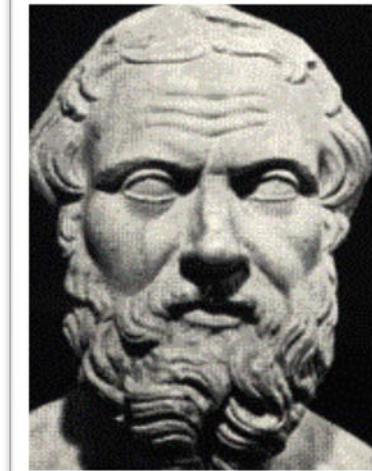
L'atome, une idée très ancienne !

Démocrite (-500 av. JC):

Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : **atomos**

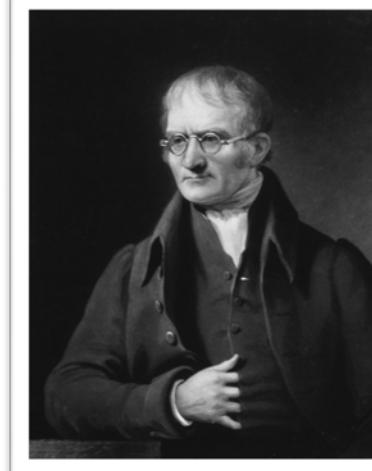


2300 ans plus tard...

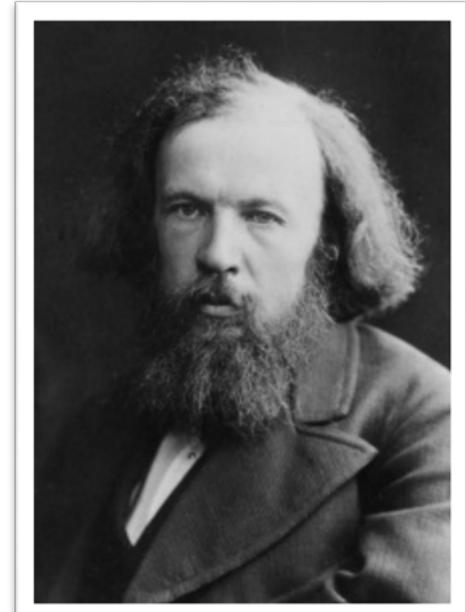
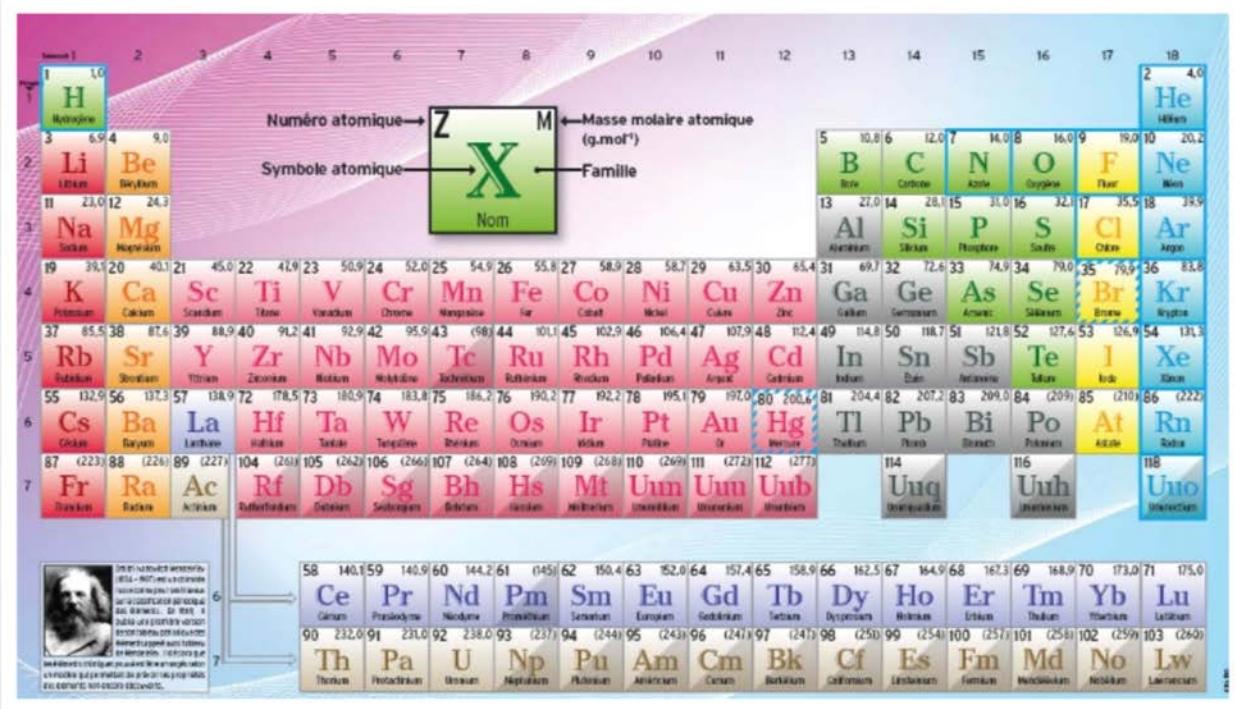


John Dalton (1808):

1 g de dihydrogène réagit avec 8 g de dioxygène pour former 9 g d'eau. Selon Dalton, ces résultats s'expliquent si l'on suppose que la matière est constituée d'atomes.



L'atome, une idée très ancienne !



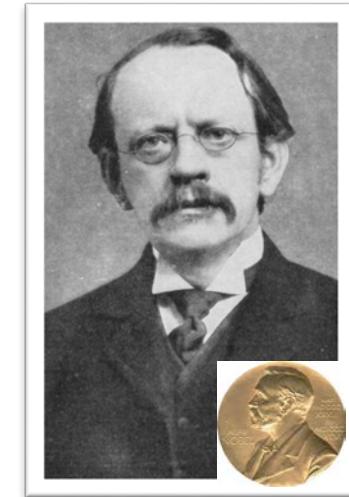
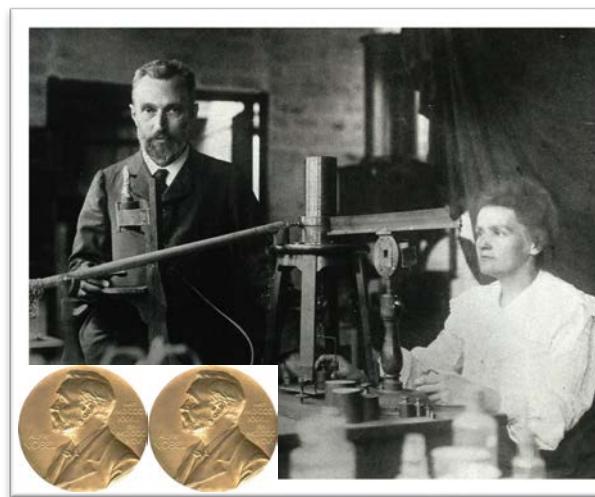
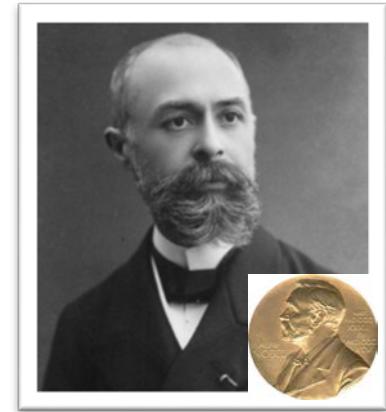
Mendeleiev (1870):
Relations entre les propriétés et
les masses atomiques des éléments

Naissance de la physique nucléaire

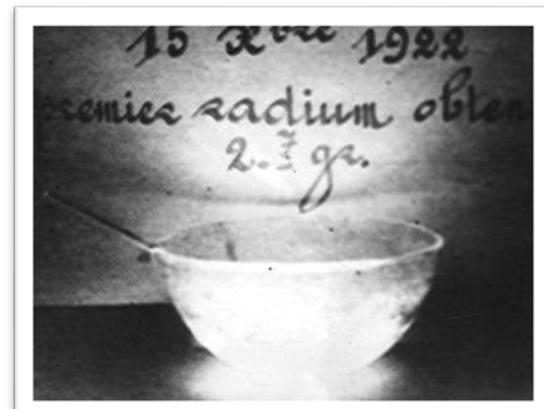
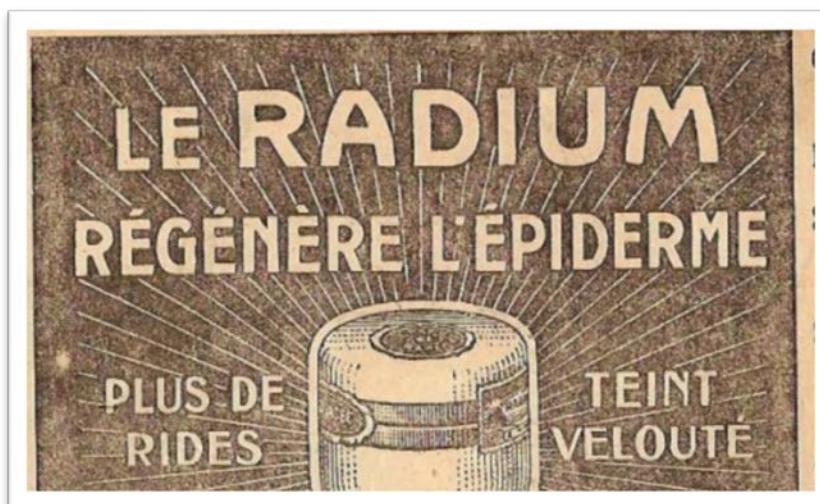
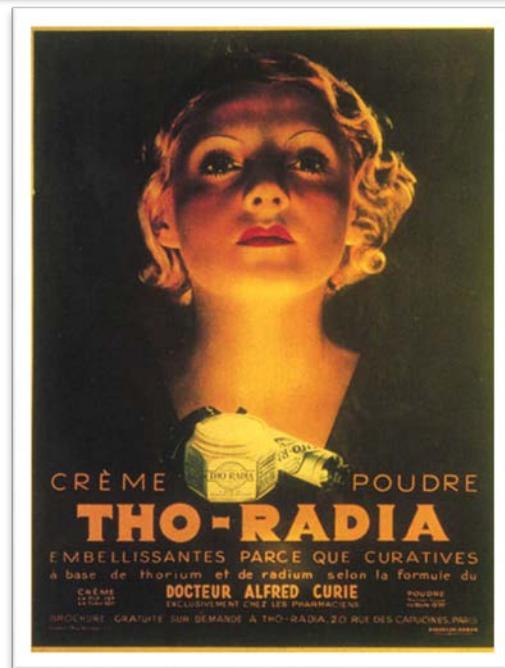
Il faut attendre la fin du 19ème et le début du 20ème siècle pour voir apparaître les grandes découvertes qui vont donner naissance à la physique nucléaire.

1896/98 : Découverte de la radioactivité par Henri Becquerel (rayonnement uranique), puis Pierre et Marie Curie (polonium, radium)

1897 : J.J. Thomson découvre la première particule subatomique : l'électron.

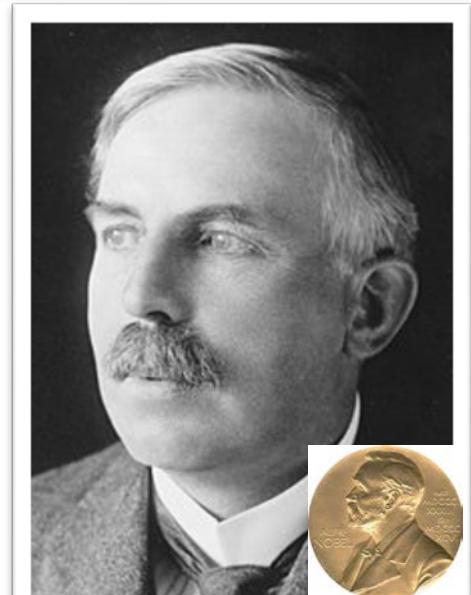


Naissance de la physique nucléaire

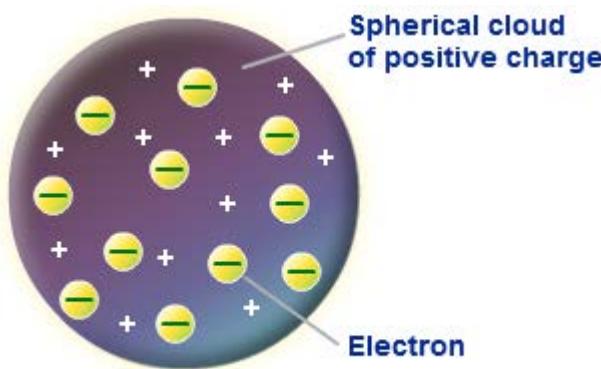


Naissance de la physique nucléaire

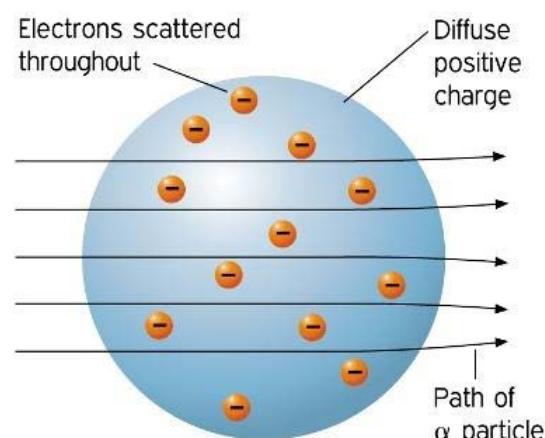
1903 : Rutherford explique la radioactivité par la transmutation d'atomes. Il montre que les particules alpha sont des noyaux d'hélium.



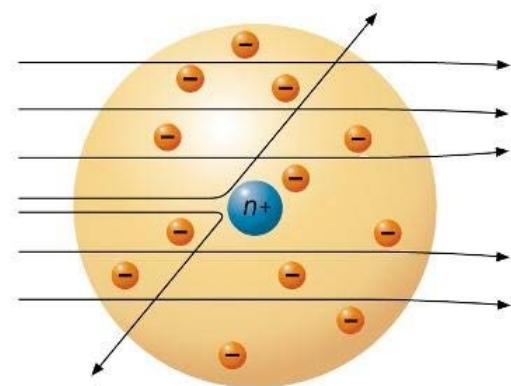
1911 : Rutherford, Geiger et Marsden découvrent le **noyau atomique**.



Thomson's Plum pudding model



(a) Expected Results



(b) Actual Results

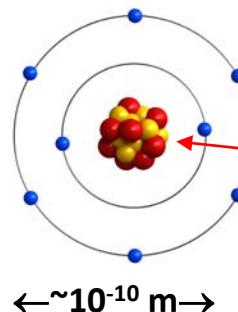
Modèle atomique planétaire, par Rutherford, en 1911

- ✓ L'atome est essentiellement fait de vides !
- ✓ Le centre de l'atome, qu'il nomme noyau, est minuscule ($R \sim 10^{-14} \text{ m}$) et dense. Il est massif (+ de 99% de la masse de l'atome) et chargé positivement.
- ✓ Les électrons négatifs circulent autour du noyau à très grande vitesse et se déplacent jusqu'à des distances très éloignées du noyau (si on suppose que le proton dans l'atome d'hydrogène a une taille de 1 mm alors l'électron tournerait dans un volume de 100 m de diamètre !).
- ✓ Les électrons sont retenus vers le noyau par des forces électriques.
- ✓ La somme des charges des électrons est égale à la charge du noyau, l'atome est électriquement neutre.

Notions de base

électrons en
orbite
($Q/e = -Ze$)

noyau positif chargé ($Q/e = +Ze$)
($\sim 10^{-14} \text{ m}$ de diamètre)



Le noyau en
grappe de
Rutherford



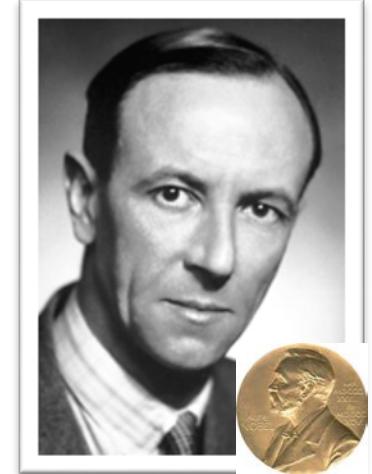
Naissance de la physique nucléaire

1919 : Première réaction de transmutation par Rutherford.

Pour former la réaction nucléaire : ${}_2^4He + {}_{7}^{14}N \rightarrow {}_8^{18}F \rightarrow {}_8^{17}O + {}_1^1p$ il envoie des particules alpha sur une cible d'azote, et provoque la première désintégration artificielle de l'atome. Il montre que le noyau d'hydrogène joue un rôle spécifique, et le nomme **proton** (protos = premier) : c'est la particule de charge positive du noyau.

1932 : Postulé en 1920 par Rutherford, le **neutron** est découvert par James Chadwick. Une fois isolé, ce neutron n'est pas stable et décroît comme :
 $n \rightarrow p + e^- (+\bar{\nu}_e)$

A cette époque, **proton**, **neutron** et **électron** forment le jeu de « particules élémentaires » le plus simple jamais décrit, et sont considérés comme les constituants élémentaires de tous les atomes et de tous les éléments de l'Univers.



Cette révolution de la découverte de l'infiniment petit va de paire avec la révolution de la relativité et de la mécanique quantique.

17 des 29 participants à la conférence de Solvay sont ou seront prix Nobel...



SOLVAY CONFERENCE 1927

colourized by pastincolour.com

A. PICARD E. HENRIOT P. EHRENFEST Ed. HERSEN Th. DE DONDER E. SCHRÖDINGER E. VERSCHAFFELT W. PAULI W. HEISENBERG R.H. FOWLER L. BRILLOUIN

P. DEBYE M. KNUDSEN W.L. BRAGG H.A. KRAMERS P.A.M. DIRAC A.H. COMPTON L. de BROGLIE M. BORN N. BOHR

I. LANGMUIR M. PLANCK Mme CURIE H.A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN Ch.E. GUYE C.T.R. WILSON O.W. RICHARDSON

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL

A la recherche des briques élémentaires

Au **début des années 30**, proton, neutron et électron forment le “jeu des particules élémentaires connues”.

On les distingue déjà :

LEPTON (leptos = léger) : e^-

et

BARYON (baryos = lourd) : p , n

A ce petit nombre de particules connues correspond aussi un petit nombre **d'interactions élémentaires**

- interaction gravitationnelle (négligeable à l'échelle subatomique)
- interaction **électromagnétique**
- interaction **forte** (pour expliquer le maintien des nucléons dans un volume aussi petit que le noyau, et pourquoi les protons ne se repoussent pas par répulsion coulombienne)
- interaction **faible** (pour expliquer la désintégration radioactive de type β).

Dès le milieu des années 30, ce modèle simple à 3 « particules élémentaires » pose des problèmes du fait de l'existence d'autres particules.

Les **pions** ou **mésons π** sont des particules postulées en premier lieu par Yukawa (1935) pour expliquer la force liant les noyaux entre eux. De masses intermédiaires, elles ont été appelées :

MESONS (pour mesos = milieu).

Les **neutrinos** ont été postulés en 1930 pour expliquer la conservation de l'énergie dans les désintégrations de type β

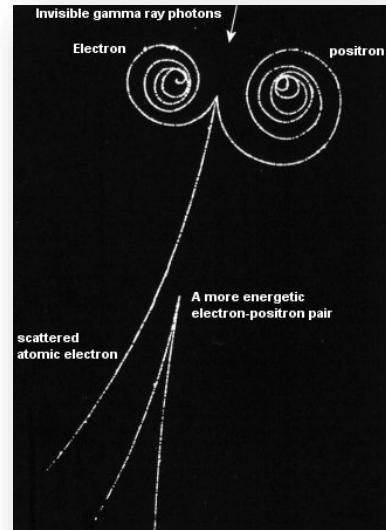
A la recherche des briques élémentaires

Découverte des antiparticules : L'existence du positron (ou positon, pour anti-electron) avait été postulée par Dirac en 1927.

Cette particule est découverte par Anderson (1932), en étudiant les rayonnements cosmiques.

Bien d'autres particules ont ensuite été découvertes dans les rayonnements cosmiques comme les muons.

L'antiproton est découvert par Segrè et Chamberlain auprès de l'accélérateur « Bevatron » du LBL (1955), par la production de paires proton-antiproton, et c'est ensuite la mise en évidence de l'antineutron toujours au Bevatron.

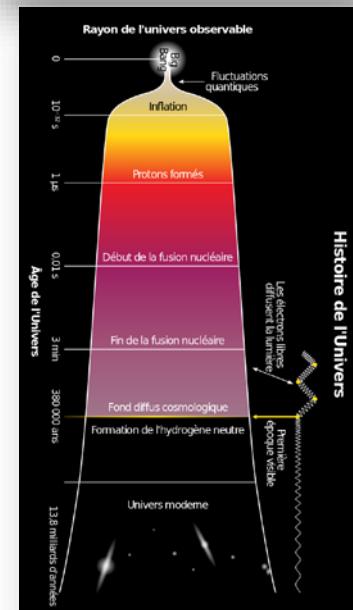


Selon le modèle standard des particules élémentaires, *à chaque type de particule correspond une antiparticule de charge(s) opposée(s), mais par ailleurs identique (même masse, même spin, même temps de vie).*

Quand une particule et son antiparticule se rencontrent, les deux s'annihilent en produisant des photons.

À l'origine, l'univers comportait autant de matière que d'antimatière et le tout aurait dû se convertir complètement en photons ...

Mais il existe un infime déséquilibre dans la façon dont matière et antimatière interagissent, ce qui expliquerait le surplus de matière sur l'antimatière qui s'est développé dans les premiers instants après le Big-Bang et auquel nous sommes redevables de notre existence (**baryogénèse**).



A la recherche des briques élémentaires

Dans le rayonnement cosmique a été découvert :

- 1937 : découverte du **muon μ** . C'est un lepton qui se comporte comme un électron lourd
- Le muon se désintègre par décroissance β : $\mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
- 1947 : découverte des **pions** (ou mésons π). Ils correspondent à la particule médiatrice de l'interaction nucléaire forte postulée précédemment par Yukawa. Découverte des **kaons**

Dans les années 50, l'avènement des accélérateurs permet la découverte de nombreuses nouvelles particules. Certaines de ces particules, aussi observées dans les rayonnements cosmiques, sont appelées "particules étranges" du fait qu'elles sont produites par interaction forte et se désintègrent par interaction faible.

Pourquoi la réaction $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$ est-elle possible, alors que $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ est impossible ?

1953 : Gell-Mann et Nishijima formulent une idée simple et élégante : ils assignent une « étrangeté » (S pour "strangeness") à chaque particule, et postulent que l'étrangeté totale doit être conservée dans une réaction (mais pas lors d'une désintégration).

Il existe alors 3 lois de conservation pour les réactions, en plus de l'énergie et de l'impulsion :

La charge électrique

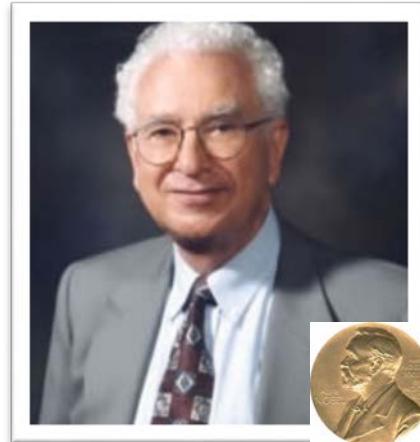
Le nombre baryonique (les protons sont des baryons)

L'étrangeté

A la recherche des briques élémentaires

Ensuite, des douzaines de particules considérées comme « élémentaires » (au sens de 1960) sont découvertes, du même type que le pion (méson) ou le proton (baryon). Mésons et baryons sont des **HADRONs**. Mésons et baryons peuvent être étranges ou non.

En dehors du proton, toutes les autres particules ont une durée de vie brève (quelques minutes, quelques μs , et même jusqu'à 10^{-24} s)



ν_e découvert en 1956 (Cowan et Reines)

ν_μ découvert en 1961 (Lederman, Schwartz et Steinberger)

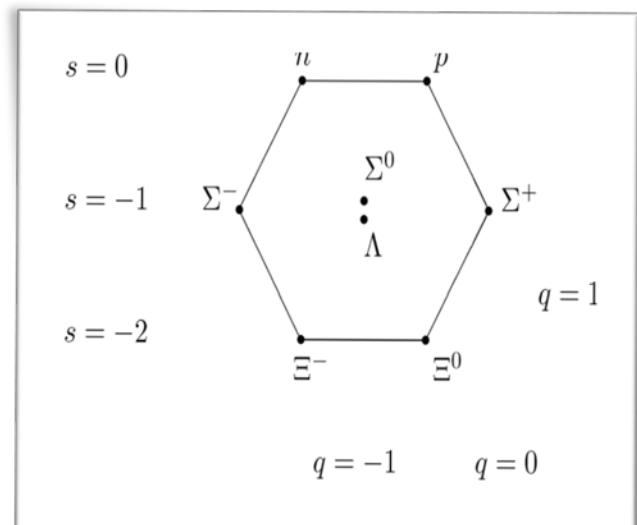
⇒ déjà 2 familles de leptons (e , ν_e) et (m , ν_μ) !

1961 : un important besoin de simplification s'impose...

C'est Gell-Mann qui réalise cette unification.

Sa table périodique (comme celle de Mendeleïev) est connue sous le nom de “**“eightfold way”** la voie octuple !

Elle consiste à ranger les particules connues en multiplets de 8 baryons ou de 8 mésons.



8 baryons

A la recherche des briques élémentaires

Le modèle des quarks :

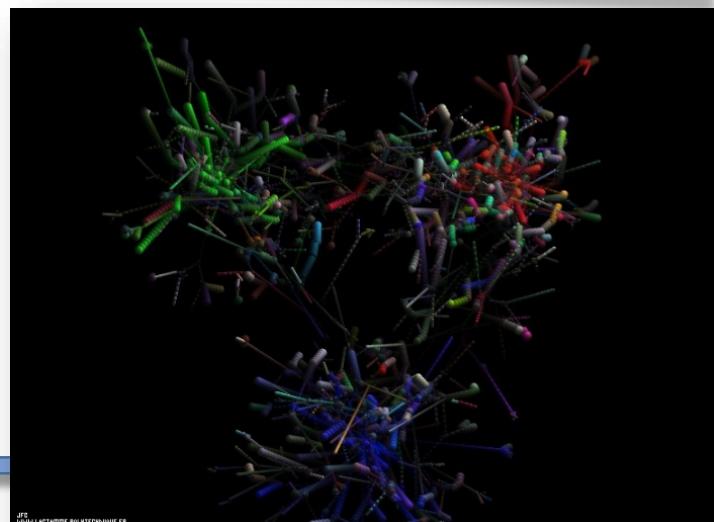
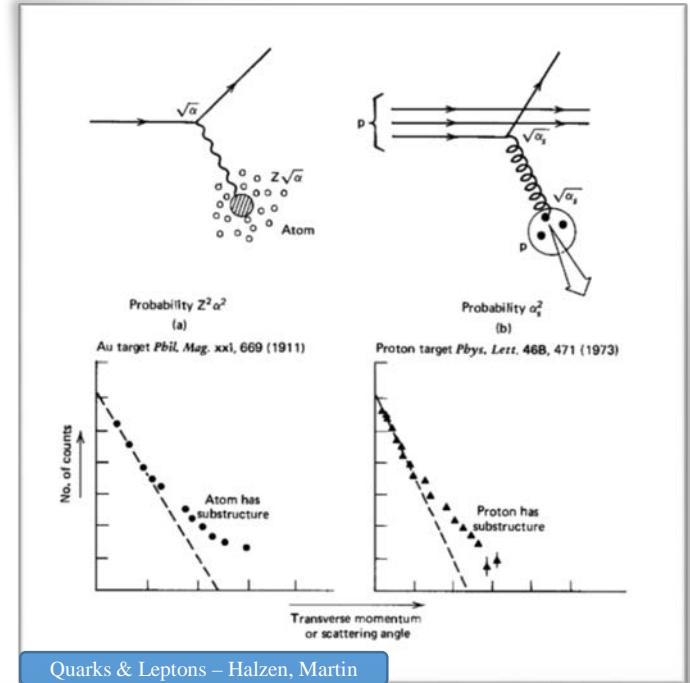
Les mésons sont des états liés quark-antiquark : π^+ est un état $|u\bar{d}\rangle$

Les baryons sont des états liés de trois quarks : p est un état $|uud\rangle$.

Le modèle des quarks a été confirmé expérimentalement en 1964 par la découverte du Ω^- (état lié $|sss\rangle$), qui est un baryon d'étrangeté (strangeness) $S=-3$ prédit par le modèle des quarks.

L'existence des quarks en tant que particules a par ailleurs été confirmée au SLAC en 1968, par une expérience “à la Rutherford” (Friedman, Kendall, Taylor).

Les quarks sont aujourd’hui considérés comme des particules « élémentaires », au même titre que les leptons et les bosons d’interaction.



A la recherche des briques élémentaires

La dynamique des quarks a été comprise plus tard et a conduit à postuler l'existence de 8 particules médiatrices (comme le photon) pour l'interaction forte : les **gluons**.

Révolution en 1974 avec la découverte d'un nouveau quark (**c** pour "charm") postulé après la découverte du méson **J/ψ** (état lié **cc**).

2 générations de quarks (u,d) et (c,s)

En 1975, découverte du lepton tau **τ**

3 générations de leptons e, m et t

En 1977, découverte du méson **Υ** (état lié **bb**) et introduction du quark **bottom** (aussi appelé quark "beau")

3 générations de quarks → recherche du quark top

En 1983, découverte au CERN des bosons médiateurs de l'interaction faible : **W⁺, W⁻ et Z⁰**

La symétrie des six quarks et six leptons sera finalement complétée en 1995 plus de 20 ans après, par la découverte du **quark top** puis du **neutrino v_t** en 2000...

Découverte au CERN du boson de Higgs en 2012 qui vient apporter la dernière pierre du modèle standard.

A la recherche des briques élémentaires

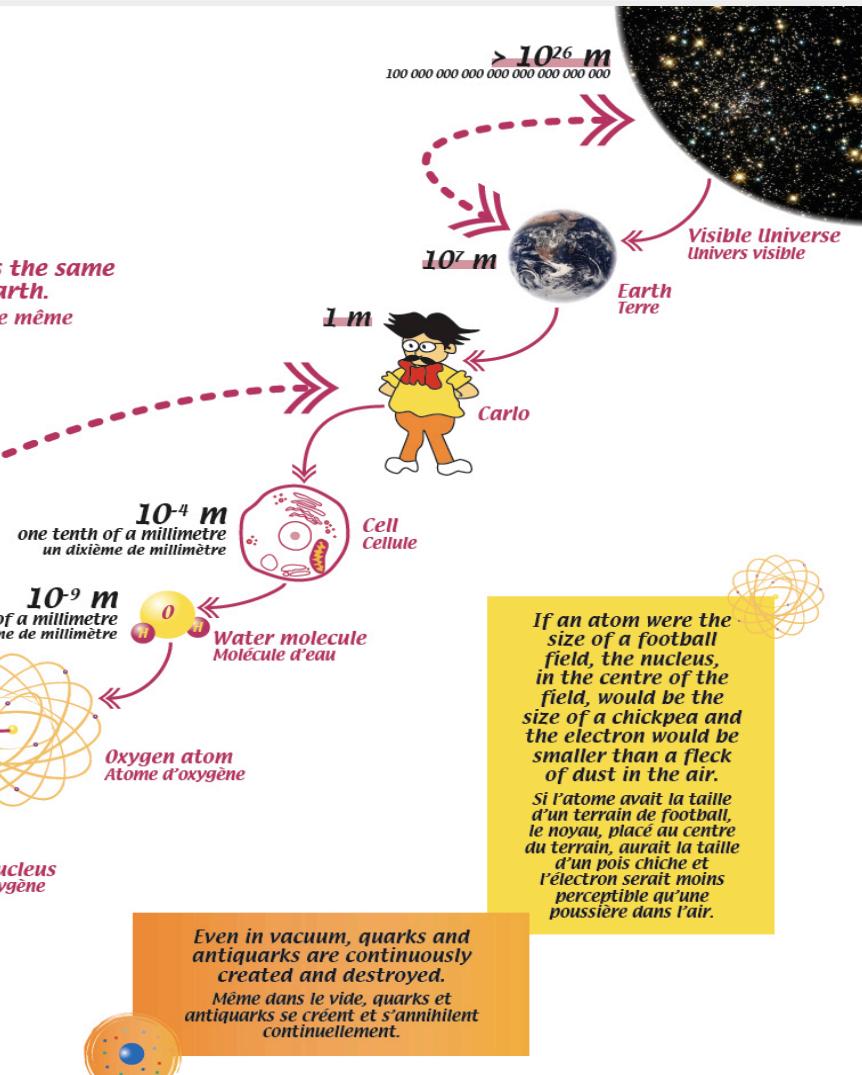
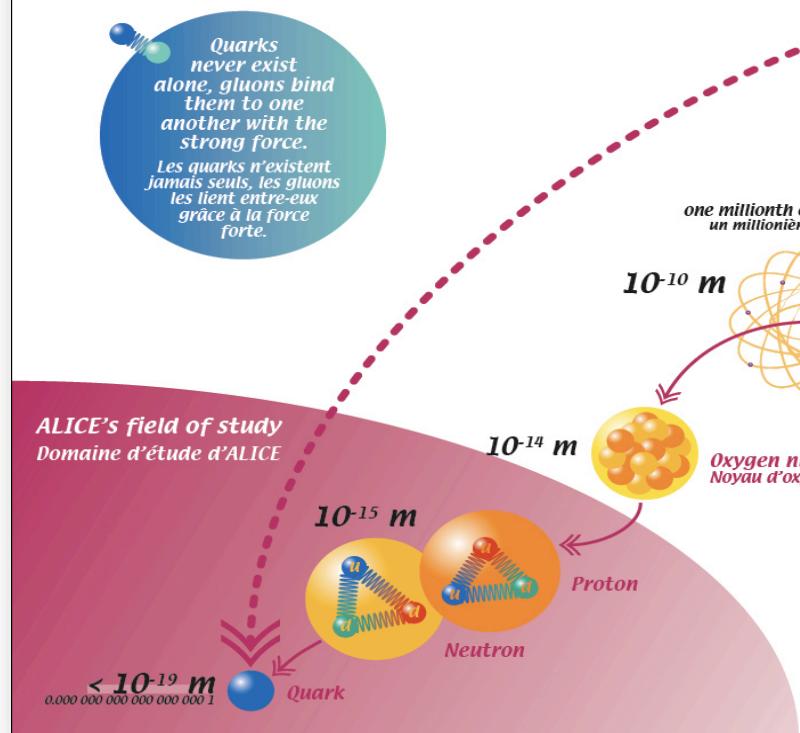
QUARKS	masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$	masse → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$	masse → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$	masse → 0 charge → 0 spin → 0	masse → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ électron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 boson Z^0	BOSONS DE JAUGE
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e neutrino électronique	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ neutrino muonique	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ neutrino tauique	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm boson W^\pm	



*Modèle Standard
Weinberg, Glashow, Salam*



Composition of matter Structure de la matière



Puissances de 10 !

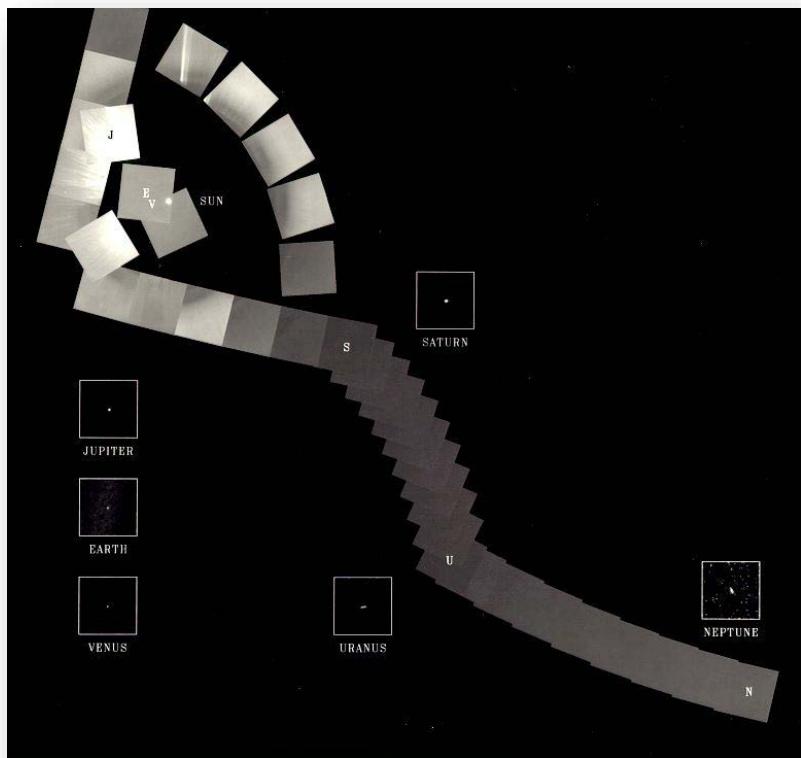
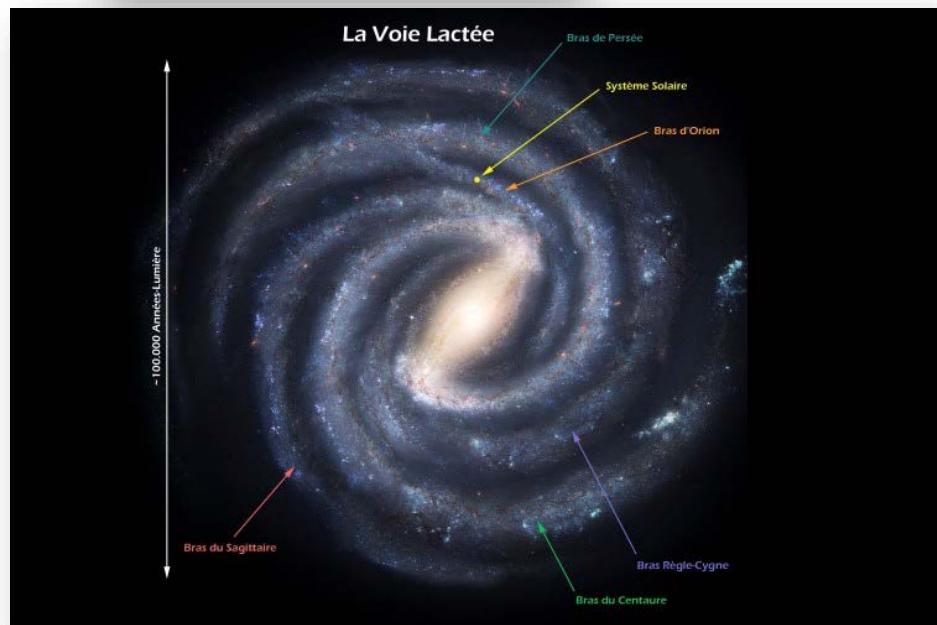
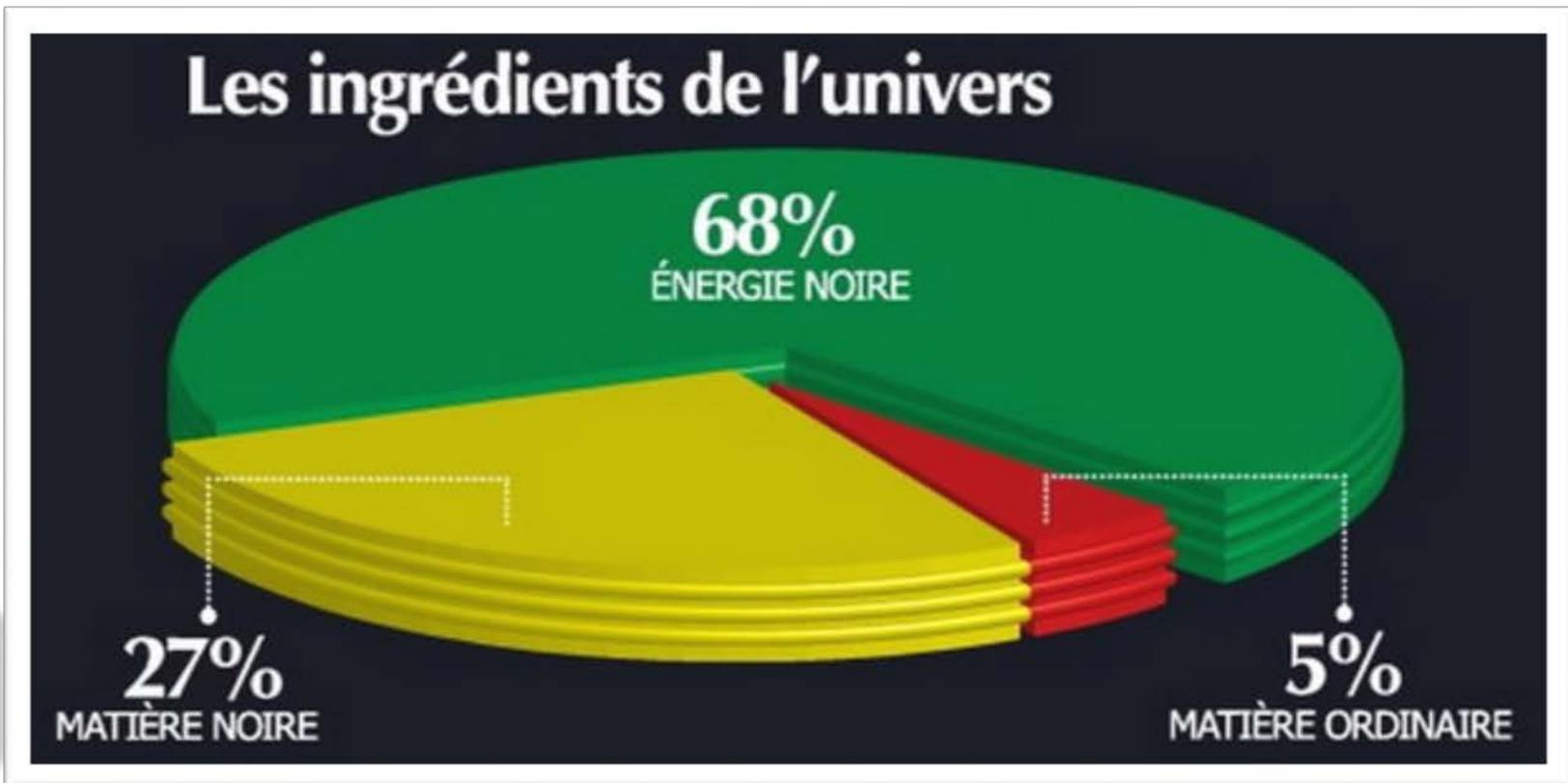


Image du système solaire prise par Voyager 1 en 1990 à ~6 milliards de km (actuellement à 21 milliards de km du soleil)

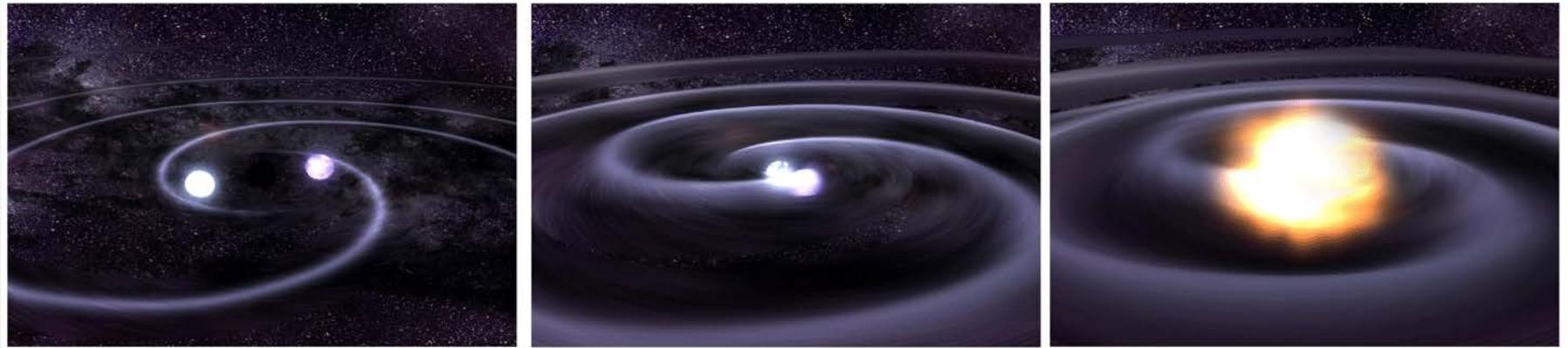


On ne connaît que 5% de notre Univers !

Matière noire et énergie noire !



Nucléosynthèse



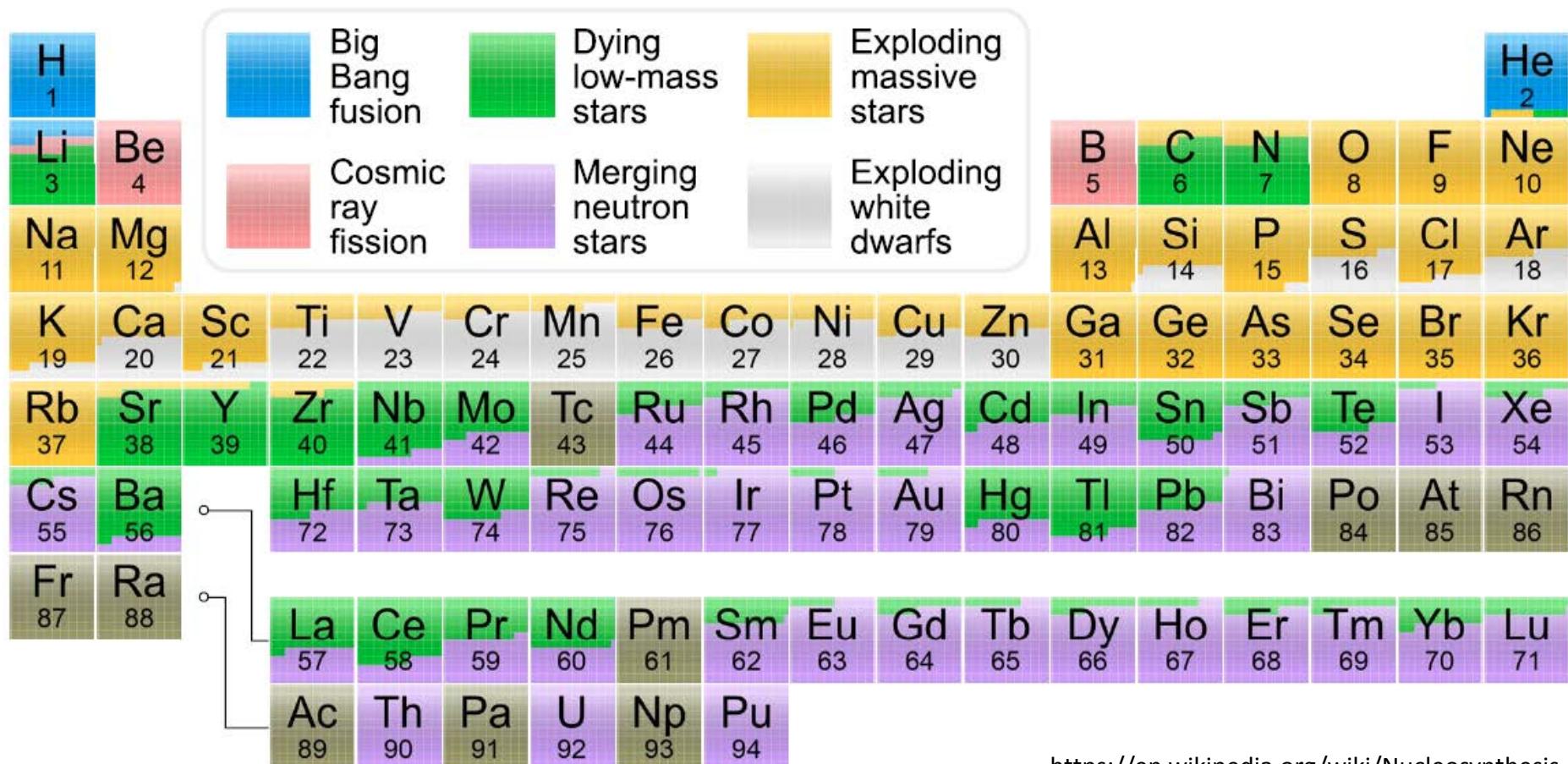
Coalescence de deux étoiles à neutrons

17 août 2017 à 14 heures 41 minutes (heure de Paris) → première observation de la coalescence de deux étoiles à neutrons dans la constellation de l'Hydre de l'hémisphère austral par les expériences VIRGO et LIGO.

Selon les modèles, la matière éjectée par la fusion de deux étoiles à neutrons est le siège de réactions nucléaires aboutissant à la formation de noyaux atomiques plus lourds que le fer (comme l'or, le plomb, etc.), grâce à l'abondance de neutrons.

Prix Nobel de physique 2017 sur les ondes gravitationnelles.

Nucléosynthèse



Origine de la formation des atomes.

Un peu de terminologie à connaître



En **physique nucléaire**, proton et neutron sont deux particules de la même famille : les **nucléons**.

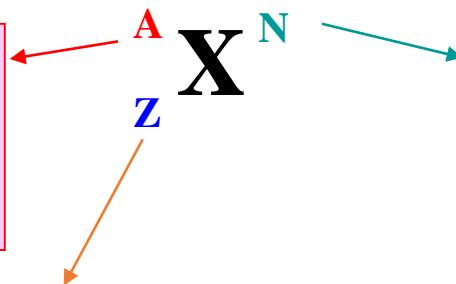
Ils ont une masse voisine, ~ 2000 fois celle de l'électron, mais leurs charges électriques sont différentes :

$$Q/e (p) = + 1 \text{ et } Q/e (n) = 0$$

Le noyau est un assemblage de Z protons et de N neutrons, de nombre de masse $A = Z + N$

On l'écrit, pour un élément X par exemple :

Nombre de masse A = nombre total de nucléons, dans le noyau. Le nombre A est un entier. A représente aussi la masse molaire, en g/mol.



$N = A - Z$ = nombre total de neutrons dans le noyau. Le nombre N est aussi un entier.

Numéro atomique Z = nombre de protons présents dans le noyau d'un élément.

Z caractérise cet élément, puisqu'à chaque élément chimique correspond une valeur de Z. La charge électrique associée pour le noyau est $Q/e (X) = + Z$.

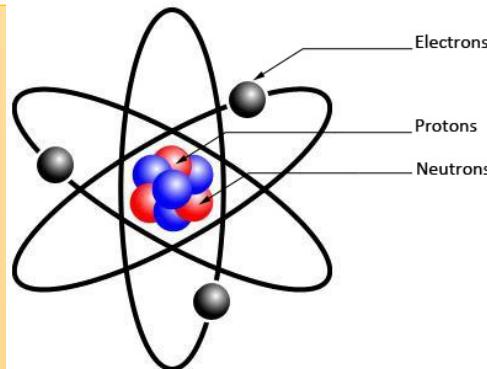
Le noyau est entouré de Z électrons de charge $Q/e = -1$ chacun, ce qui donne sa neutralité électrique à l'atome.

Un peu de terminologie à connaître

Les **nucléons** sont les constituants du noyau de l'atome. Ce sont les **protons** et les **neutrons**.

Les **nucléons** sont liés entre eux par **l'interaction forte**, force la plus puissante de l'univers, mais qui ne s'exerce que sur quelques millièmes de milliardième de millimètre.

La radioactivité β est expliquée par **l'interaction faible**.



Un élément est défini par son nombre de protons Z. Le carbone possède un noyau ayant 6 protons, l'azote un noyau ayant 7 protons, etc.

Les noyaux exotiques n'existent pas naturellement sur Terre, et se caractérisent pas un fort déséquilibre entre nombres de protons et de neutrons.

La **physique nucléaire** est l'étude de la structure et des propriétés dynamiques des noyaux atomiques, ainsi que l'étude de l'équation d'état de la matière nucléaire.

Les isotopes sont les atomes d'un même élément, donc caractérisés par des noyaux ayant même Z et un nombre de neutrons N différent. Par exemple, les principaux isotopes du carbone naturel possèdent 6 protons mais 6 ou 8 neutrons ($^{12}_6C$ et $^{14}_6C$).

De même des noyaux **isotope** ont un nombre de neutrons identiques (ex : $^{13}_6C$ et $^{14}_7N$)

Des noyaux **isobare** ont un nombre identique de nucléons (ex : $^{14}_6C$ et $^{14}_7N$ ou $^{64}_{28}Ni$ et $^{64}_{29}Cu$)

On appelle **nواux miroirs** deux noyaux isobares X et Y tels que $Z(X)=N(Y)$ et $N(X)=Z(Y)$ (ex : $^{17}_9F$ et $^{17}_8O$)



Boîte à outils !



Les unités.

Pour les distances : le mètre n'est pas adapté

1 angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)

1 femtomètre ou fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

Ordres de grandeurs :

Rayon d'un noyau ~ quelques fm

Rayon d'un proton ~ 1 fm

Modèle de la goutte liquide : en assimilant le noyau à une sphère uniformément chargée en volume et contenant A nucléons, on

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \propto A$$

d'où le rayon d'un noyau :

$$R = r_0 A^{1/3} \text{ avec } r_0 \sim 1,25 \text{ fm}$$

Les unités.

L'unité d'énergie adaptée est l'**électron-Volt** et ses multiples (pas le Joule)

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

On utilisera en général :

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

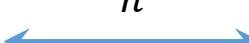
$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

Une autre constante utile dans ces unités est $\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot fm$

ATTENTION : dans les calculs, on est souvent obligé de revenir au système international et de repasser aux Joules !

Attention aux unités naturelles...

Les constantes \hbar et c interviennent souvent dans les formules. Elles relient entre elles des grandeurs de dimensions différentes :

Energie : E $\uparrow \downarrow c$ $E = pc$	\hbar 	Pulsation : $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ $\uparrow \downarrow c$ $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}$
Impulsion : p $\uparrow \downarrow \hbar$ $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$		longueur d'onde : λ

Certains ouvrages ou certaines publications utilisent le système d'unités naturelles qui consiste à poser $\hbar = c = 1$ sans dimension. Ex : $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \rightarrow E^2 = p^2 + m^2$

A partir d'une analyse dimensionnelle on montre que :

$$[\hbar] = E \cdot T = 1 \Rightarrow [t] = E^{-1}$$

$$[c] = L \cdot T^{-1} = 1 \Rightarrow [l] = T = E^{-1}$$

En unité naturelle, toutes les dimensions s'expriment comme la puissance d'une énergie.



Rappels de relativité restreinte.

Quelques formules utiles aux énergies relativistes

Rappelons la transformation de Lorentz :

$$\begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \\ \beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix}$$

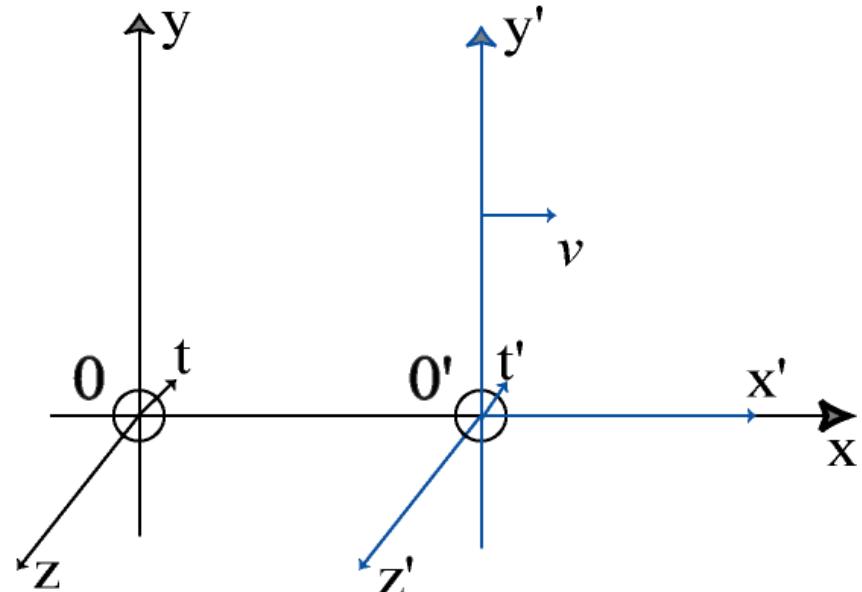
Avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

Autres quadrivecteurs importants :

$$\begin{pmatrix} E \\ c \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \omega \\ c \end{pmatrix}$$

Propriété très importante : le carré scalaire d'un quadrivecteur est un invariant relativiste. On a en particulier : $ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2dt'^2$ par exemple pour un objet au repos dans R'.

De même on aura $E^2 - p^2c^2 = E'^2 - p'^2c^2 = m_0^2c^4$



Rappels de relativité restreinte.

Quelques formules utiles aux énergies relativistes

Equivalence masse-énergie (Einstein 1905) → Energie de masse au repos : $E = m_0 c^2$

Energie totale : $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$ où $p c$ est l'impulsion exprimée en unité d'énergie

Energie cinétique : $T \rightarrow$ Energie totale : $E = T + m_0 c^2 = \gamma m_0 c^2$

d'où $p^2 c^2 = T(T + 2m_0 c^2)$ et $T = m_0 c^2(\gamma - 1)$

On a aussi (avec la transformation de Lorentz) $p = \gamma m_0 v$ et on peut facilement avoir β avec $\beta = \frac{p c}{E}$

On obtiendra donc une autre relation utile (voir tableau page suivante) qui donne la vitesse du Centre de Masse (CMS) dans le référentiel du Laboratoire (Lab) et le facteur de Lorentz : $\beta_{CMS} = \frac{P_{Lab} c}{E_{Lab}}$ et $\gamma_{CMS} = \frac{E_{Lab}}{E_{CMS}^*} = \frac{E_{Lab}}{\sqrt{s}}$

Rappels de relativité restreinte.

Quelques formules utiles aux énergies relativistes

	Référentiel du laboratoire		Référentiel du Centre de masse	
	Faisceau	Cible	"faisceau"	"cible"
Masses	M_1	M_2	M_1	M_2
Impulsion	\vec{P}_1	\vec{P}_2	\vec{P}^*	$-\vec{P}^*$
Energie	$E_1 = \sqrt{P_1^2 c^2 + M_1^2 c^4}$	$E_2 = \sqrt{P_2^2 c^2 + M_2^2 c^4}$	$E_1^* = \sqrt{P^{*2} c^2 + M_1^2 c^4}$	$E_2^* = \sqrt{P^{*2} c^2 + M_2^2 c^4}$
Quadivecteur Impulsion-Energie	$\underline{P}_1 = \left(\frac{E_1}{c}, \vec{P}_1 \right)$	$\underline{P}_2 = \left(\frac{E_2}{c}, \vec{P}_2 \right)$	$\underline{P}_1^* = \left(\frac{E_1^*}{c}, \vec{P}^* \right)$	$\underline{P}_2^* = \left(\frac{E_2^*}{c}, -\vec{P}^* \right)$
Impulsion totale	$\overrightarrow{P_{Lab}} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$		$\overrightarrow{P_{CMS}} = \vec{0}$	
Energie totale	$E_{Lab} = E_1 + E_2$		$E_{CMS} = E_1^* + E_2^* = \sqrt{s}$	
Quadivecteur Impulsion-Energie total	$\underline{P}_{Lab} = \left(\frac{E_{Lab}}{c}, \overrightarrow{P_{Lab}} \right)$		$\underline{P}_{CMS} = \left(\frac{E_{CMS}}{c}, \vec{0} \right)$	

Avec $s = (\underline{P}_1 + \underline{P}_2)^2$

Quelques formules utiles aux énergies relativistes

Par la suite, il sera donc commode d'employer la dimension d'une « énergie » non seulement pour l'énergie cinétique T et l'énergie totale E , mais aussi pour l'impulsion pc et la masse mc^2

On rappelle que dans le cas d'un système isolé du monde extérieur, ce qui sera le cas des exercices traités en cinématique relativiste, on conservera l'énergie totale et l'impulsion \vec{p} entre l'état initial et l'état final, donc les quadrivecteurs impulsion énergie totale entre l'état initial et l'état final.

En combinant à l'invariance du carré scalaire d'un quadrivecteur, on arrive à une relation qui peut se révéler très utile...

$$\underline{P_i^2} = \underline{P_f^2} = \underline{P_i^{*2}} = \underline{P_f^{*2}}$$

Masses...

La masse (au repos) m_0 d'une particule ou d'un noyau est très souvent exprimée en MeV (ou GeV), ce qui correspond à l'énergie de masse au repos m_0c^2

Voici quelques masses dans ces unités:

Photon (γ)	$m_\gamma c^2 = 0$
Electron (e^\pm)	$m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$
Pions	
(π^0)	$m_{\pi^0} c^2 = 135,0 \text{ MeV}$
(π^\pm)	$m_{\pi^\pm} c^2 = 139,6 \text{ MeV}$

Neutrino (ν_e, ν_μ, ν_τ)	$m_\nu c^2 \sim 0$
Muon (μ^\pm)	$m_\mu c^2 = 105,7 \text{ MeV}$
Nucléons	
Proton (p)	$m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$
Neutron (n)	$m_n c^2 = 939,6 \text{ MeV}$

Une autre unité importante est l'**unité de masse atomique** (notée u ou $u.m.a.$).

Par définition, elle est telle que la masse de l'atome neutre de carbone 12 soit $M_{at}(^{12}C) = 12 \text{ } u.m.a.$

La valeur est :

$$1 \text{ } u = 1 \text{ } u.m.a. = 931,5 \text{ MeV/c}^2$$

L'**excès de masse atomique** est $\Delta M_{at} = M_{at} - A$, où M_{at} est la masse de l'atome neutre considéré (exprimée en $u.m.a.$) et A est le nombre de masse du noyau de cet atome (nombre de nucléons). Cet excès de masse peut être exprimé en MeV. On néglige ici le défaut de masse dû aux électrons.

Avec la relation $1 \text{ } u.m.a = 931,5 \text{ MeV/c}^2$, on obtient :

$$\Delta M_{at}c^2 (\text{MeV}) = M_{at}c^2 - 931.5 \times A (\text{MeV})$$

Et par définition, on a donc $\Delta M_{at}(^{12}C) = 0$

Cinématique relativiste : quelques notions beaucoup plus poussées.

On peut définir de nombreuses variables cinématiques et on retrouvera très souvent dans les expériences de physique des particules, les variables cinématiques suivantes :
(On prendra $c=1$ pour alléger l'écriture)

$$p_T = p_T^* = p \sin \theta = p^* \sin \theta^* \text{ l'impulsion transverse}$$

$$p_L = p_z = \gamma_{CMS} (\beta_{CMS} E^* + p_L^*) = \gamma_{CMS} (\beta_{CMS} E^* + p^* \cos \theta^*) \text{ l'impulsion longitudinale.}$$

- la rapidité : $y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E+p_L}{E-p_L} \right)$ avec la propriété que $y = y^* + y_{CMS}$ par transformation de Lorentz
- La pseudorapidité (plus facile à définir) : $\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p+p_z}{p-p_z} \right)$ avec θ l'angle entre le vecteur impulsion de la particule et l'axe du faisceau suivant Oz. Aux très grandes énergie $E \approx p$ on a $\eta \approx y$

On définit aussi le "x de Bjorken". Sous certaines hypothèses, dans le modèle des partons (quark ou gluon), x correspond à la fraction d'impulsion (comprise entre 0 et 1) du nucléon, portée par le parton qui interagit.



Bibliographie

Liste non exhaustive :

- Noyaux et particules (vol. 1), Le monde subatomique (vol. 2), Luc Valentin, Editeur : Hermann
- Physique nucléaire : des quarks aux applications, Claude Le Sech, Christian Ngô : Dunod
- Introductory Nuclear Physics, Samuel Wong, Editeur : Wiley VCH
- **Introductory Nuclear Physics, Kenneth Krane, Editeur : John Wiley & Sons**
- **Modern Particle Physics, Mark Thomson, Cambridge University Press**
- **Introduction to Elementary Particles, David Griffiths, Editeur : Wiley VCH**
- **Introduction à la physique subatomique, André Rougé, Editeur : Ellipses Marketing**
- Quarks and leptons Francis Halzen, Alan D. Martin, Editeur : John Wiley & Sons
- **Relativité restreinte : Bases et applications, Claude Semay, Bernard Silvestre-Brac, Editeur : Dunod**
- **Relativité restreinte et structure atomique de la matière, Christian Grossetête, Editeur : Ellipse**
- Relativité restreinte : des particules à l'astrophysique, Eric Gourgoulhon, Editeur : CNRS éditions
- **Mécanique quantique, Jean-Louis Basdevant, Jean Dalibard, Manuel Joffre, Editeur : Polytechnique.**
- **Introduction to quantum mechanics, David Griffiths, Editteur : Prentice-Hall**
- Mécanique quantique I et II, Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë, Editeur : Hermann

Fin

Liu

Du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, les unités de base du Système international ont toutes été redéfinies en référence à sept constantes physiques dont la valeur exacte est alors définitivement fixée. Réforme attendue depuis trente ans et qui devrait entrer en vigueur en mai 2019.

Kg, K, A

<https://lejournal.cnrs.fr/articles/mesures-le-grand-renversement>

