

LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES



Anne-Isabelle Etienvre
(anne-isabelle.etienvre@cea.fr)



- Les particules, leurs interactions

- Mise en évidence expérimentale
 - ▣ *Les détecteurs de physique des particules*
 - ▣ *L'accélérateur LHC*

- Le boson de Higgs

3

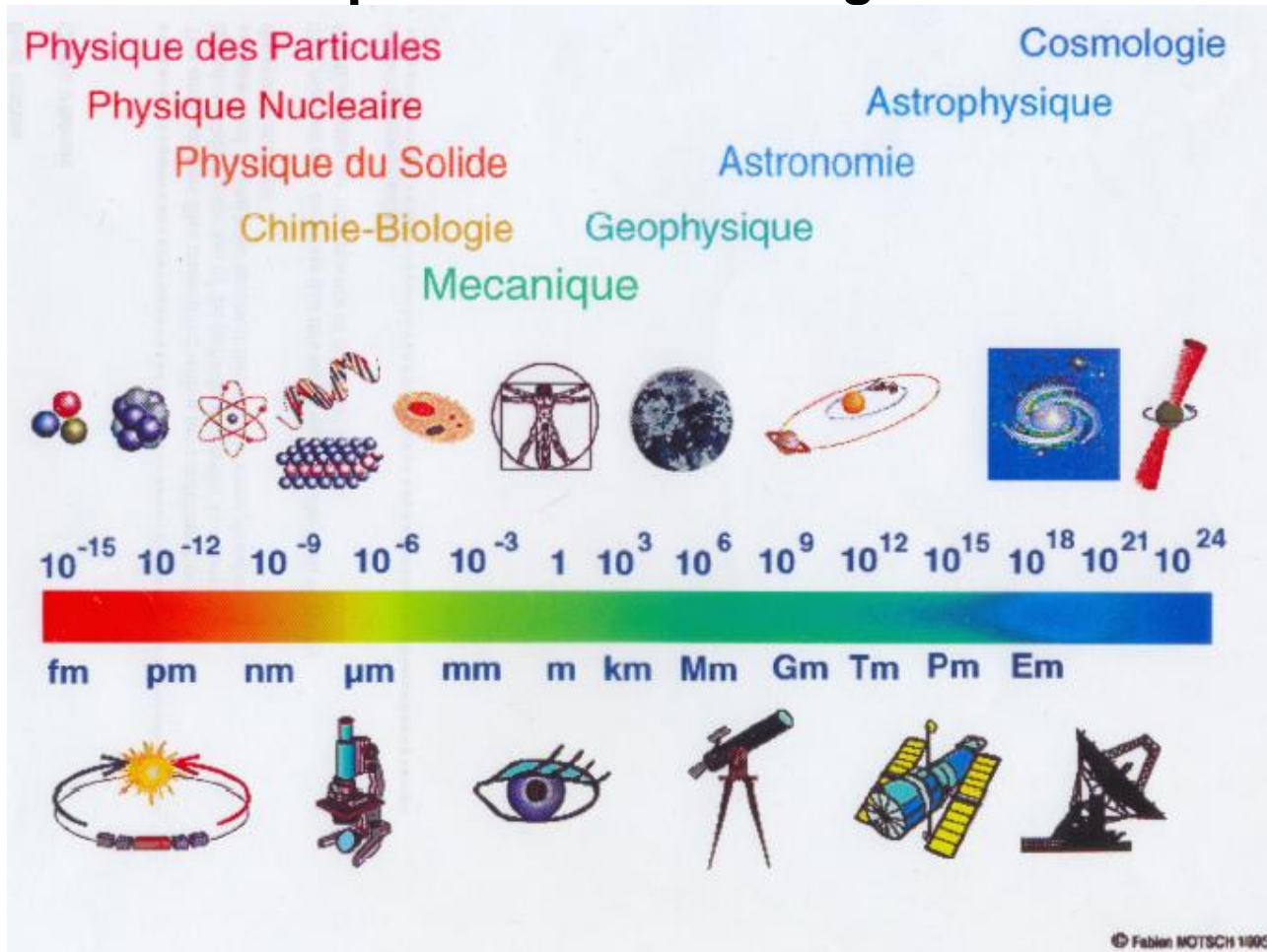
Episode 1

Les particules et leurs interactions



A quelle échelle se situe-t-on?

□ De l'infiniment petit à l'infiniment grand

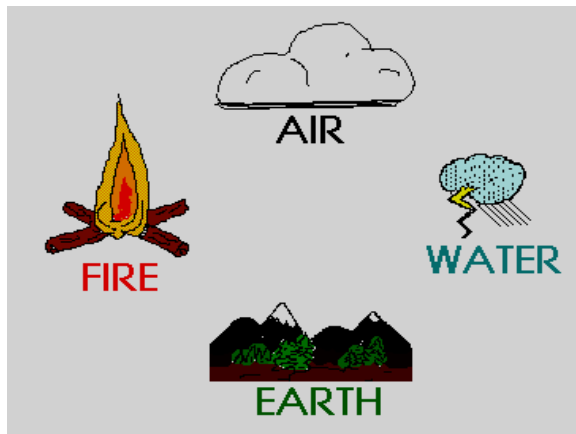




Un brin d'histoire

□ Le concept d'éléments

▣ Aristote : 4 éléments



▣ Dalton (1808) : 20 éléments

ELEMENTS			
○	Hydrogen 1	⊕	Strontian 86
◐	Azote 5	⊗	Barytes 68
●	Carbon 4	Ⓛ	Iron 54
○	Oxygen 7	Ⓩ	Zinc 66
⊖	Phosphorus 9	Ⓢ	Copper 59
⊕	Sulphur 13	Ⓛ	Lead 207
⊖	Magnesia 28	Ⓢ	Silver 197
⊖	Lime 28	⊕	Gold 197
⊖	Soda 23	Ⓢ	Platina 197
⊖	Potash 39	⊕	Mercury 167



Un brin d'histoire

- **Tableau périodique des éléments:**
 - *Mendeleev (1869)*



Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18										
Period																												
1	1 H																	2 He										
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne										
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr										
5	37 Rb	38 Sr											39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* Lu	71 Hf	72 Ta	73 W	74 Re	75 Os	76 Ir	77 Pt	78 Au	79 Hg	80 Tl	81 Pb	82 Bi	83 Po	84 At	85 Rn										
7	87 Fr	88 Ra	** Lr	103 Rf	104 Db	105 Sg	106 Bh	107 Hs	108 Mt	109 Uun	110 Uuu	111 Uub	112 Uut	113 Uuq	114 Uup	115 Uuh	116 Uus	117 Uuo										
*Lanthanides			* La	57 Ce	58 Pr	59 Nd	60 Pm	61 Sm	62 Eu	63 Gd	64 Tb	65 Dy	66 Ho	67 Er	68 Tm	69 Yb												
**Actinides			** Ac	89 Th	90 Pa	91 U	92 Np	93 Pu	94 Am	95 Cm	96 Bk	97 Cf	98 Es	99 Fm	100 Md	101 No												



Un brin d'histoire

□ La première particule découverte : l'électron

□ 1897: J.J. Thomson

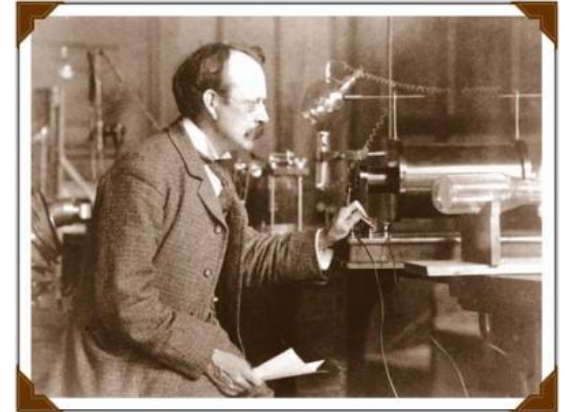
- mesure la déviation des « rayons cathodiques » sous l'effet de champs électriques et magnétiques

- En déduit que:

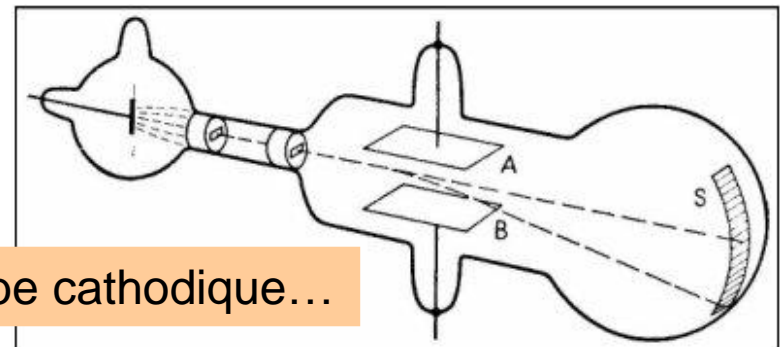
« In all known cases in which

negative electricity occurs in gases

at very low pressures, it occurs in the form of corpuscles, small bodies with an invariable charge and mass.



**C'est la découverte de
l'électron avec le premier
accélérateur!**



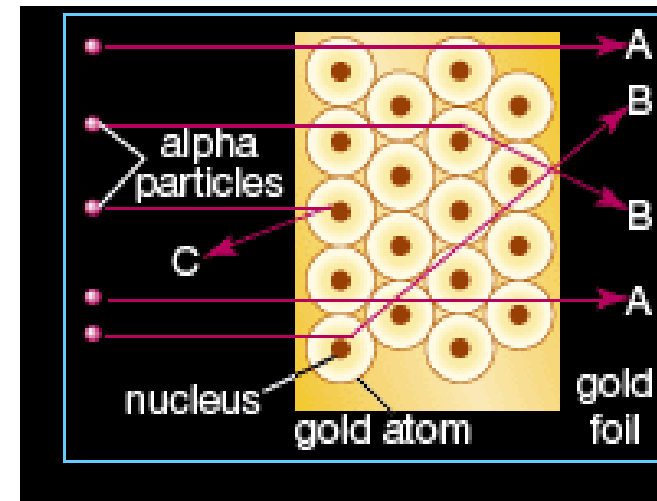
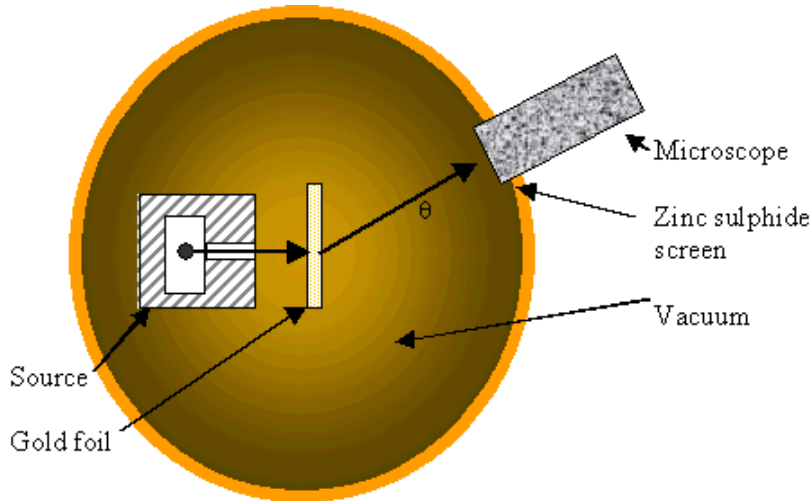
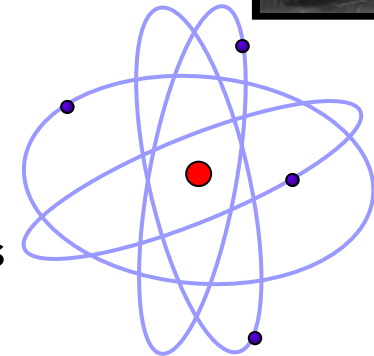
Le tube cathodique...



Un brin d'histoire

□ La structure de l'atome

- ▣ *Rutherford (1912): diffusion de particules α sur une feuille en or \rightarrow bcp non déviées*
 - Les atomes sont fait de bcp de vide!
 - Les atomes contiennent un noyau central
 - Les électrons circulent sur des orbites circulaires d'énergie et de position bien définies



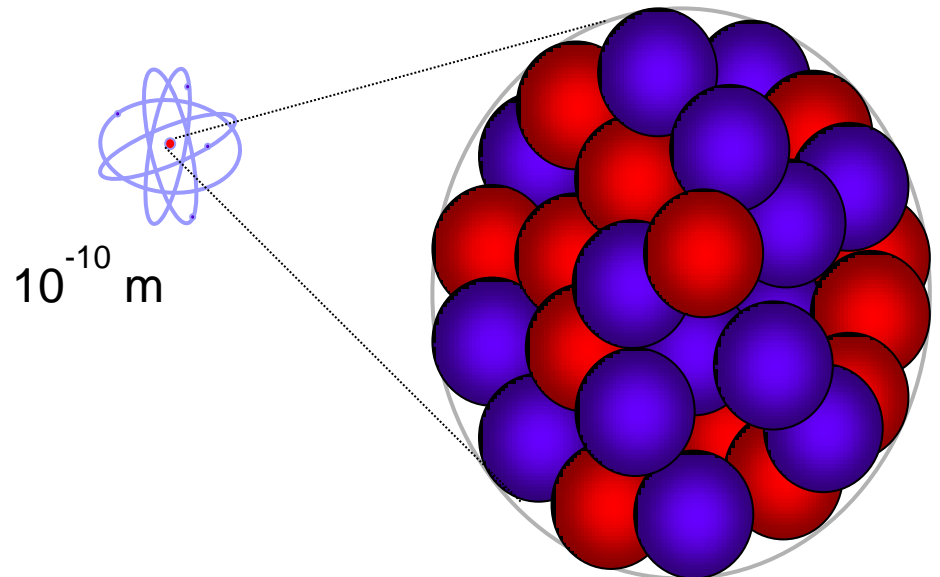


Un brin d'histoire

□ La structure du noyau

- *Le noyau contient des protons chargés positivement, et des neutrons non chargés*
 - Chadwick (1932) découvre le neutron

- *Un noyau = Z protons + N neutrons = A nucléons* 10^{-14} m





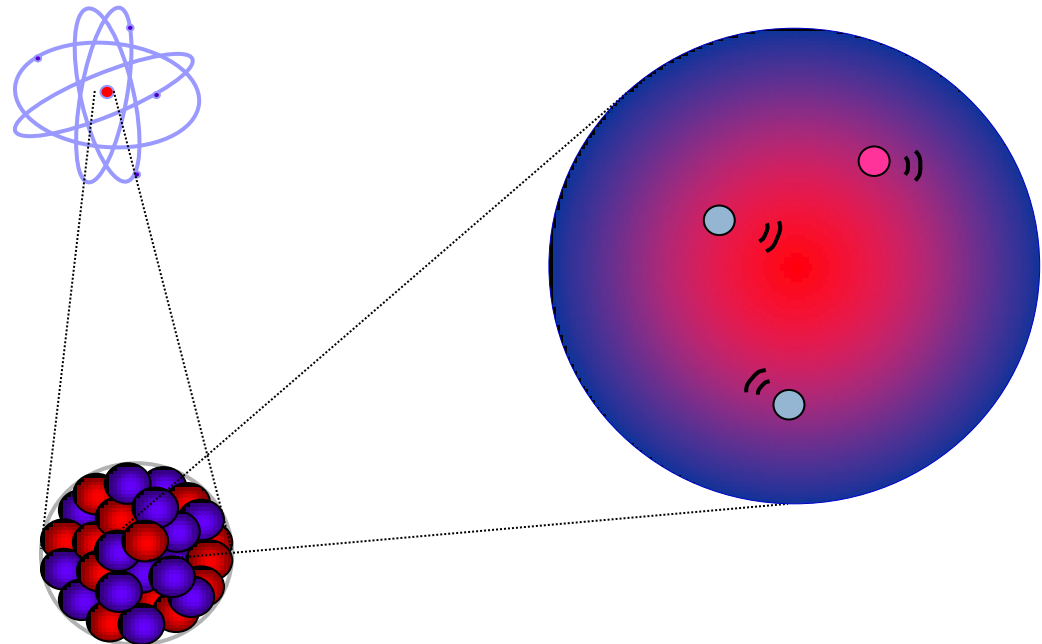
Un brin d'histoire

□ La structure du nucléon (années 60)

□ *Les nucléons sont constitués de particules élémentaires, appelés quarks:*

- Petits comparés aux nucléons
- Se déplaçant à très grande vitesse
- Liés solidement les uns aux autres, à l'intérieur du nucléon

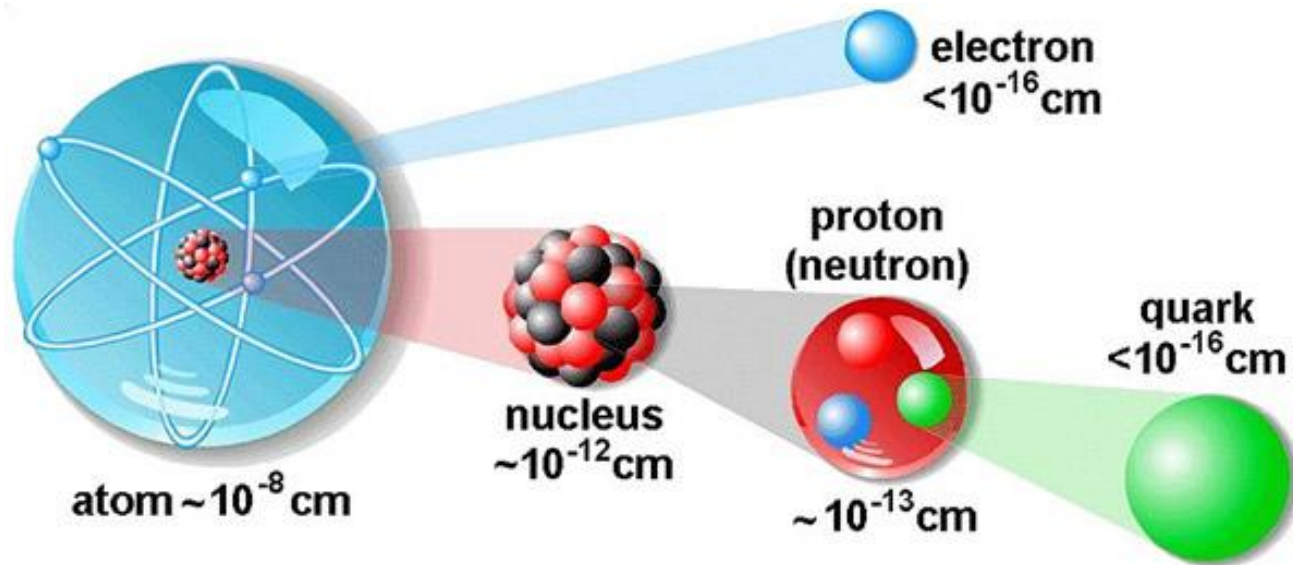
□ *Et l'histoire s'arrête là
...pour l'instant!*





L'échelle subatomique

□ De l'atome aux quarks



L'échelle subatomique est nettement inférieure à la longueur d'onde de la lumière visible: nous ne pouvons pas les "voir"

→ besoin d'accélérateurs de particules (cours de demain)

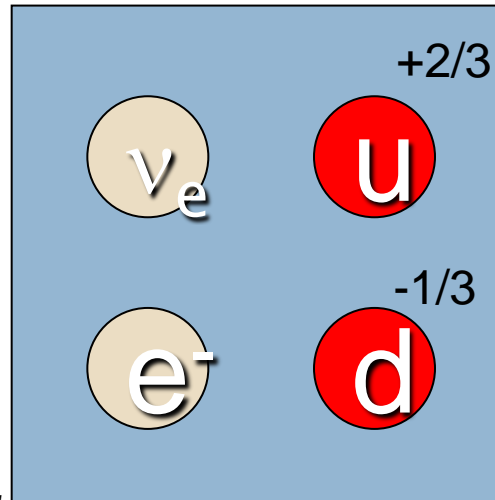


Les 12 particules élémentaires

- **2 types de particules: les leptons et les quarks**
 - *Leptons: chargés ou neutres (neutrinos: cours C. Augier)*
 - *Quarks: chargé électrique fractionnaire*

- **Description de la matière ordinaire, stable: 4 particules**

Leptons:
 ν = neutrino
 e = electron



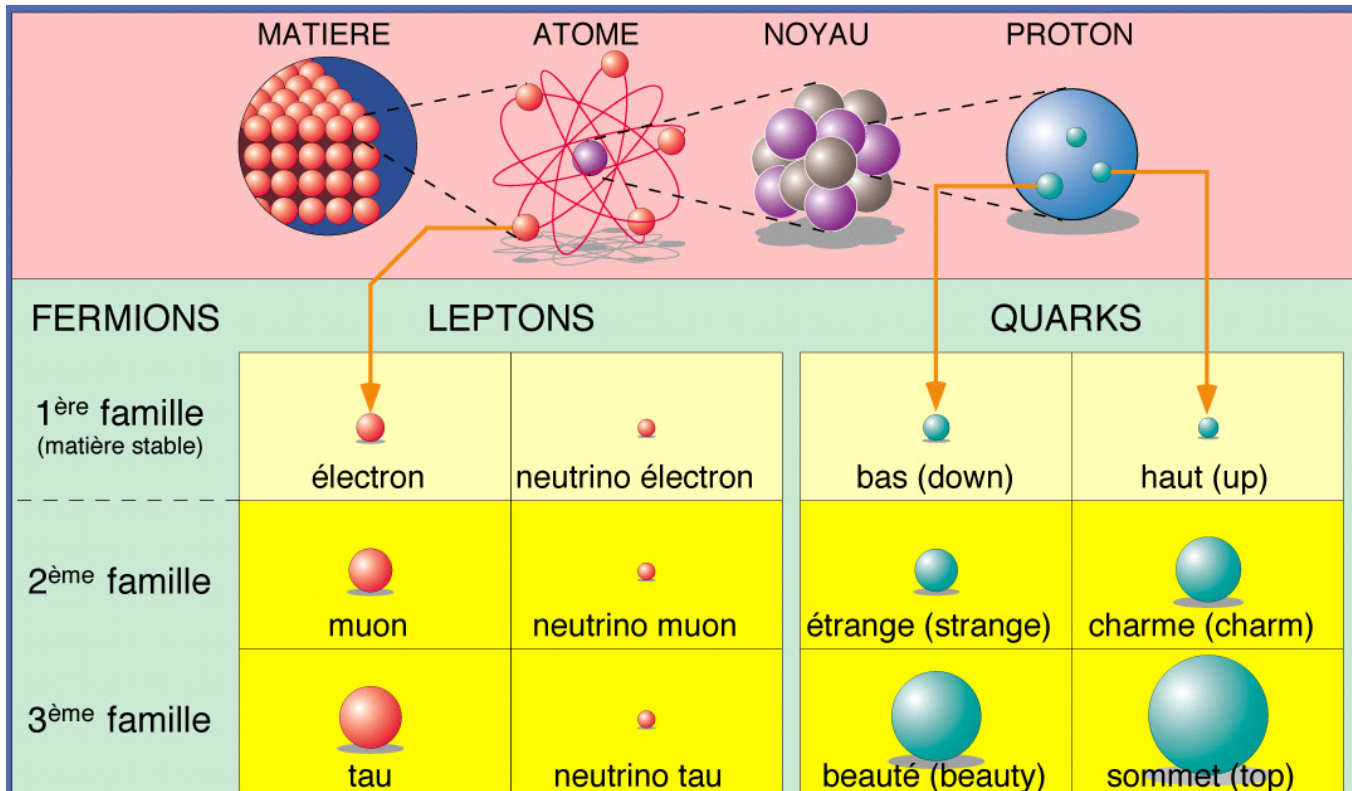
Quarks:
 u = up
 d = down

- *Proton : 3 quarks uud*
- *Neutron : 3 quarks udd*



Les 12 particules élémentaires

- 3 familles de particules élémentaires = 12 constituants élémentaires (fermions, spin $1/2$)

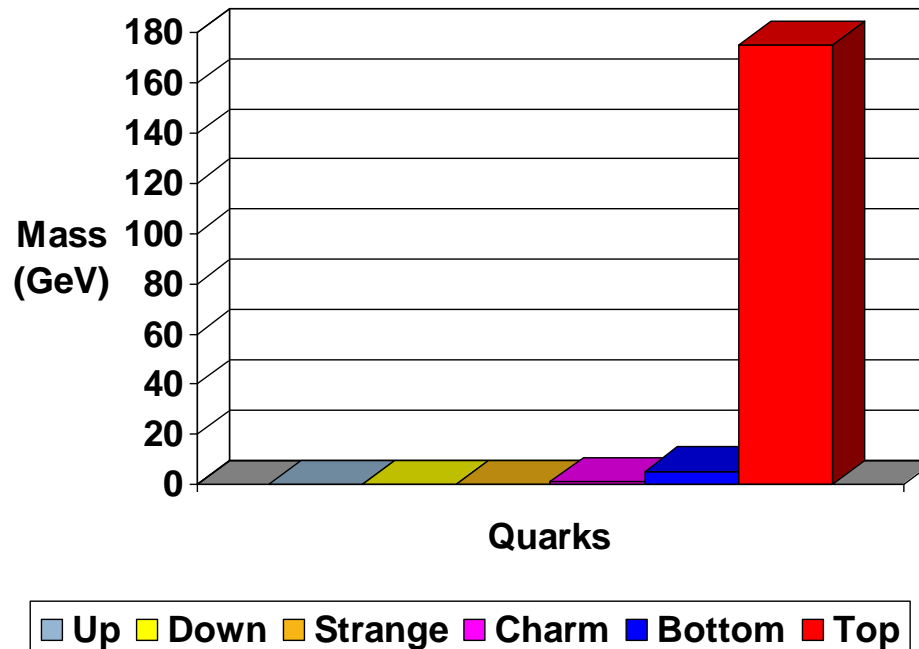


- Ces 3 familles sont semblables en tout, hormis la masse de leurs membres



Les 12 particules élémentaires

□ Les masses des quarks

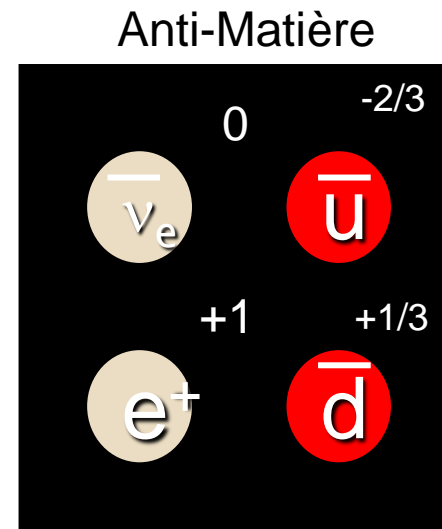
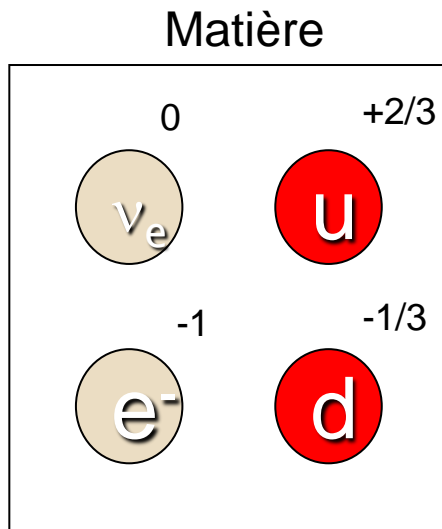


- *Le quark top est beaucoup plus lourd que ses semblables!*
 - Fut l'objet d'une longue quête!



Qu'est-ce que l'antimatière?

- **A toute particule élémentaire est associée une anti-particule**
 - *Même spin, même masse*
 - *charge électrique opposée*
 - Positron (e^+) prédit par Paul Dirac en 1928, découvert en 1932 par Anderson





Qu'est-ce que l'antimatière?

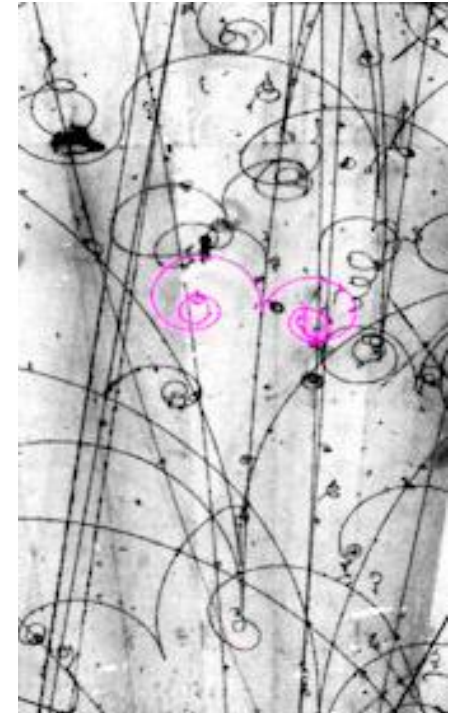
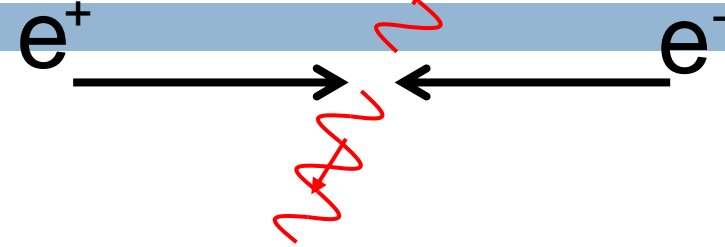
□ Illustrations:

□ *annihilation electron-positron:*

- Création de photons
- Transformation de masse en énergie ($E = mc^2$)

□ *Création de paires e^+e^- :*

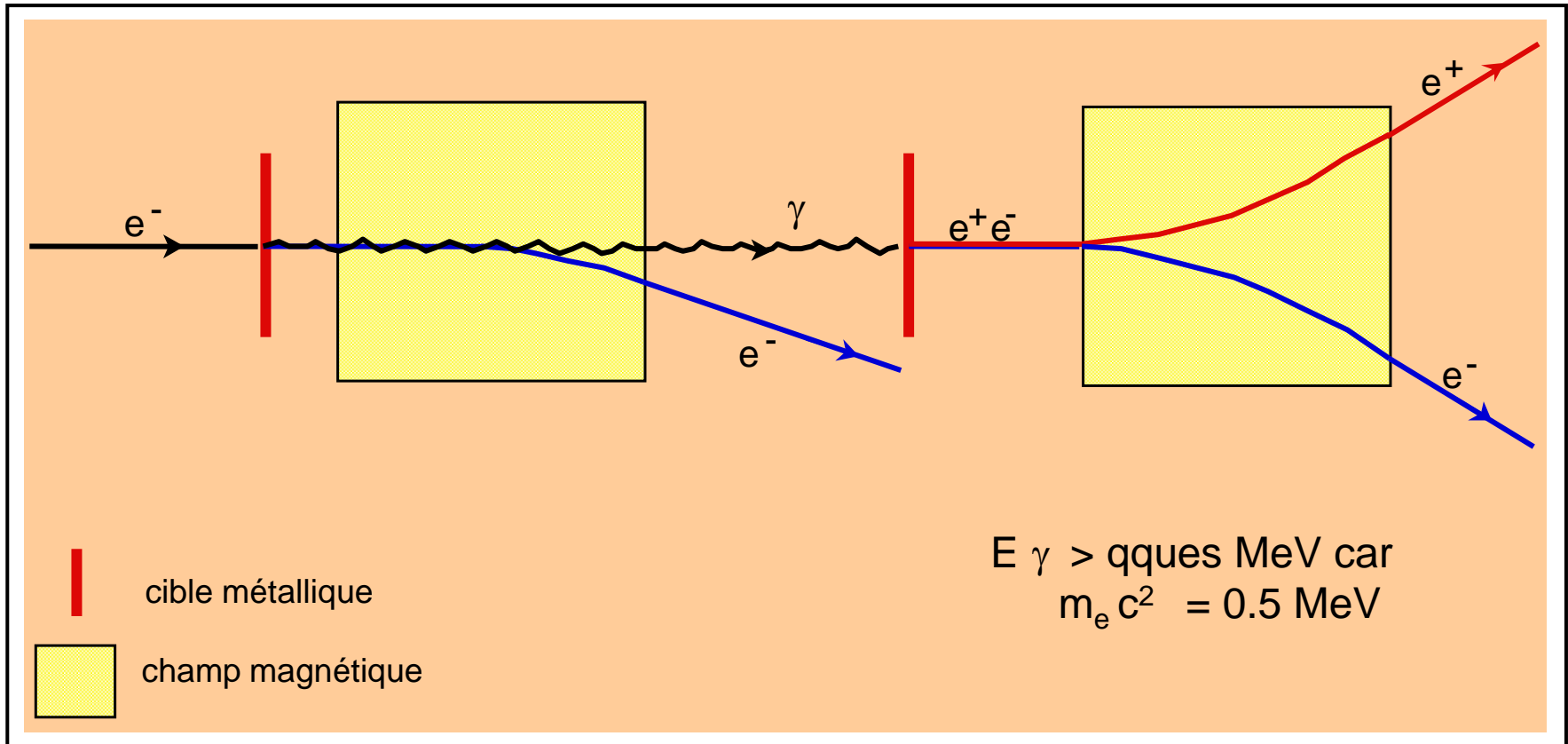
- Réciproquement, énergie transformée en masse
- Photon traversant une chambre à bulles
 - création d'une paire e^+e^- , en spirales opposées (champ magnétique)





Qu'est-ce que l'antimatière?

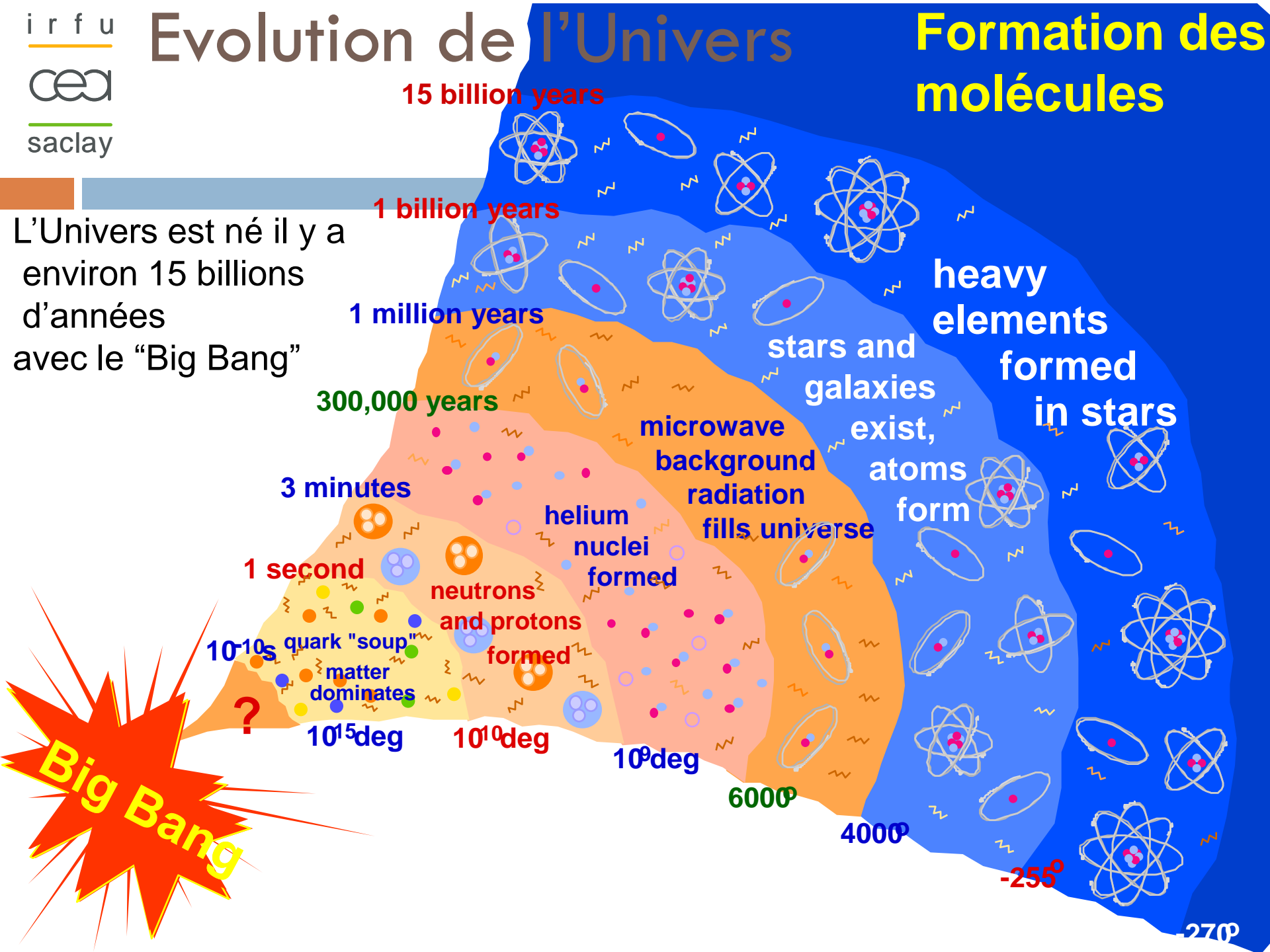
□ Création d'anti-matière en laboratoire



Evolution de l'Univers

Formation des molécules

L'Univers est né il y a environ 15 billions d'années avec le "Big Bang"





Question ouverte

- **A l'origine de l'Univers:**
 - *Autant de matière que d'antimatière*
 - *Mais aujourd'hui:*
 - Grande quantité de matière dans l'Univers observée
 - Mais aucune certitude de l'existence d'une grande quantité d'antimatière

- *Comment l'Univers a-t-il évolué?*
 - Matière et antimatière évoluent donc différemment



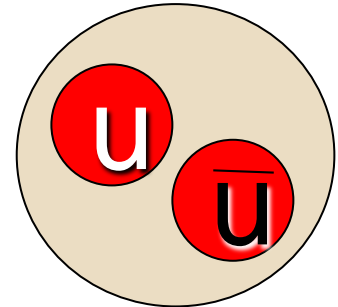
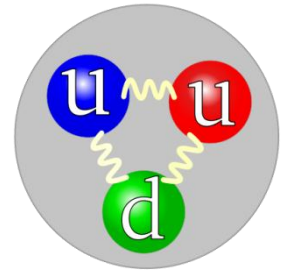
Les hadrons

□ Qu'est-ce qu'un hadron?

- Une particule non leptonique donc faite de quarks

□ Deux types de hadrons:

- *Baryons* :
 - Constitués de 3 quarks, spin $\frac{1}{2}$ entier
 - Exemple : proton
- *Mésons*:
 - Constitués de 2 quarks (quark-antiquark), spin entier



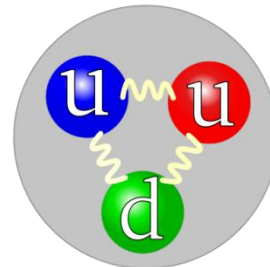


La couleur des quarks

- **Chaque quark a un nombre quantique appelé couleur:**
 - *Expérimentalement: observation de la particule Δ^{++} :*
 - Spin $3/2$, faite de 3 quarks u
 - Principe de Pauli violé -> nécessité d'introduire un nouveau nombre quantique, la couleur

 - *Chaque quark est pourvu d'une couleur: Rouge, Vert, Bleu*
 - Rouge+vert+Bleu = Blanc
 - Les couleurs se déclinent en « anti-couleurs » pour les antiparticules: Rouge-anti-rouge = blanc , par exemple.

 - *Les particules observables sont obligatoirement constituées de quarks tels que la couleur résultante est blanche*
 - Exemple : le proton





La zoologie

Des centaines de particules ont été observées

La plupart sont instables et se désintègrent en particules plus légères

Mésosons →

LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$) J^PC		STRANGE ($S=\pm 1, C=B=0$) J^PC		CHARMED, STRANGE ($C=S=\pm 1$) J^PC		$c\bar{c}$ J^PC			
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0(0^-)$	$\eta_c(1S)$	$0^+(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	$D_s^{*\pm}$	$0(2^?)$	$J/\psi(1S)$	$0^-(1^-)$
η	$0^+(0^-)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	D_s^{*0}	$0(0^-)$	$\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$\phi(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$	$\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$a_2(1700)$	$1^-(2^+)$	$K_{S1}^0(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$	$h_c(1P)$	$2^+(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\phi_2(1710)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}(2573)$	$0(2^?)$	$\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^+)$
$\eta'(958)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	$K_1^*(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^*(2700)^\pm$	$0(1^-)$	$\eta_c(2S)$	$0^+(0^-)$
$\phi(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_{11}^*(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^*(2860)^\pm$	$0(2^?)$	$\psi(2S)$	$0^-(1^-)$
$a_0(980)$	$1^-(0^+)$	$\phi_2(1810)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(2^?)$	$\psi(3770)$	$0^-(1^-)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1835)$	$?^?(?^-)$	$K_{11}^*(1430)$	$1/2(0^+)$			$X(3872)$	$0^?(2^?)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^+)$	$\phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_{21}^*(1430)$	$1/2(2^+)$	BOTTOM ($B=\pm 1$)		$X(3915)$	$0^+(2^+)$
$h_1(1235)$	$1^+(1^-)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	B_c^\pm	$1/2(0^-)$	$X(3940)$	$?^?(2^?)$
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\pi_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$	B_c^0	$1/2(0^-)$	$\psi(4040)$	$0^-(1^-)$
$\phi_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(2^?)$	B_c^\pm/B_c^0 ADMIXTURE		$X(4050)^\pm$	$?^?(2^?)$
$\phi_2(1285)$	$0^+(1^+)$	$\phi_2(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	$B_c^\pm/B_c^0/B_c^0/b$ baryon ADMIXTURE		$X(4140)$	$0^+(2^+)$
$\eta(1295)$	$0^+(0^+)$	$\phi_2(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1680)$	$1/2(1^-)$	V_{cb} and V_{cb} CKM Matrix Elements		$\psi(4160)$	$0^-(1^-)$
$\pi(1300)$	$1^-(0^-)$	$\rho(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_2(1770)$	$1/2(2^-)$	B_c^*	$1/2(1^-)$	$X(4160)$	$?^?(2^?)$
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$\phi_2(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1780)$	$1/2(3^-)$	$B_c^*(5732)$	$?^?(2^?)$	$X(4250)^\pm$	$?^?(2^?)$
$\phi_2(1370)$	$0^+(0^+)$	$\phi_2(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$	B_c^*	$1/2(1^-)$	$X(4260)$	$?^?(1^-)$
$h_1(1380)$	$?^-(1^+)$	$a_4(2040)$	$1^-(4^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	$B_c^*(5721)^0$	$1/2(1^+)$	$X(4350)$	$0^+(2^+)$
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^-)$	$\phi_4(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_{11}^*(1830)$	$1/2(0^+)$	$B_c^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$	$X(4360)$	$?^?(1^-)$
$\eta(1405)$	$0^+(0^-)$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	$K_{11}^*(1950)$	$1/2(0^+)$			$X(4415)$	$0^-(1^-)$
$\phi_2(1420)$	$0^+(1^+)$	$\phi_2(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_{11}^*(1980)$	$1/2(2^+)$			$X(4430)^\pm$	$?^?(2^?)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$\phi_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_{21}^*(2045)$	$1/2(4^+)$			$X(4660)$	$?^?(1^-)$
$\phi_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$	BOTTOM, STRANGE ($B=\pm 1, S=\mp 1$)			
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$\phi(2170)$	$0^-(1^-)$	$K_1(2320)$	$1/2(3^+)$	B_c^0	$0(0^-)$		
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$\phi_2(2200)$	$0^+(0^+)$	$K_{21}^*(2380)$	$1/2(5^-)$	B_c^*	$0(1^-)$	$\eta_b(1S)$	$0^+(0^-)$
$\eta(1475)$	$0^+(0^+)$	$\phi_2(2220)$	$0^+(2^+)$	$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$	B_{cb}	$0(1^+)$	$\Upsilon(1S)$	$0^-(1^-)$
$\phi_2(1500)$	$0^+(0^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^-)$	$K(3100)$	$?^?(2^?)$	B_{cb}^*	$0(2^+)$	$\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$\phi_2(1510)$	$0^+(1^+)$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^-)$	CHARMED ($C=\pm 1$)		B_{cb}^*	$?^?(2^?)$	$\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$\rho_2'(1525)$	$0^+(2^+)$	$\phi_2(2300)$	$0^+(2^+)$	D^\pm	$1/2(0^-)$	BOTTOM, CHARMED ($B=C=\pm 1$)		$h_b(1P)$	$?^?(1^+)$
$\phi_2(1565)$	$0^+(2^+)$	$\phi_2(2300)$	$0^+(4^+)$	D^0	$1/2(0^-)$	B_c^\pm	$0(0^-)$	$\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^+)$
$h_1(1595)$	$0^-(1^+)$	$\phi_2(2330)$	$0^+(0^+)$	$D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$			$\Upsilon(1D)$	$0^-(2^-)$
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^-)$	$\phi_2(2340)$	$0^+(2^+)$	$D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$			$\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^+)$
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$\rho_3(2350)$	$1^+(5^-)$	$D_{s1}^*(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$			$\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^+)$
$\phi_2(1640)$	$0^+(2^+)$	$a_0(2450)$	$1^-(6^+)$	$D_{s1}^*(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$			$h_b(2P)$	$?^?(1^+)$
$\eta_b(1645)$	$0^+(2^-)$	$\phi_2(2510)$	$0^+(6^+)$	$D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$			$\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^+)$
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$	OTHER LIGHT		$D_1(2420)^\pm$	$1/2(2^?)$			$\Upsilon(3S)$	$0^-(1^-)$
$\omega_b(1670)$	$0^-(3^-)$	Further States		$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$			$\chi_b(3P)$	$?^?(2^?)$
				$D_{s1}^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$			$\Upsilon(4S)$	$0^-(1^-)$
				$D_{s1}^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$			$X(10610)^\pm$	$?^?(1^+)$
				$D(2550)^0$	$1/2(0^-)$			$X(10650)^\pm$	$?^?(1^+)$
				$D(2600)$	$1/2(2^?)$			$\Upsilon(10860)$	$0^-(1^-)$
				$D^*(2640)^\pm$	$1/2(2^?)$			$\Upsilon(11020)$	$0^-(1^-)$
				$D(2750)$	$1/2(2^?)$				



La zoologie

■ **Baryons** →

p	1/2 ⁺ ****	Δ(1232)	3/2 ⁺ ****	Σ ⁺	1/2 ⁺ ****	Ξ ⁰	1/2 ⁺ ****	Λ _c ⁺	1/2 ⁺ ****
n	1/2 ⁺ ****	Δ(1600)	3/2 ⁺ ***	Σ ⁰	1/2 ⁺ ****	Ξ ⁻	1/2 ⁺ ****	Λ _c {2595} ⁺	1/2 ⁻ ***
N(1440)	1/2 ⁺ ****	Δ(1620)	1/2 ⁻ ****	Σ ⁻	1/2 ⁺ ****	Ξ(1530)	3/2 ⁺ ****	Λ _c {2625} ⁺	3/2 ⁻ ***
N(1520)	3/2 ⁻ ****	Δ(1700)	3/2 ⁻ ****	Σ(1385)	3/2 ⁺ ****	Ξ(1620)	*	Λ _c {2765} ⁺	*
N(1535)	1/2 ⁻ ****	Δ(1750)	1/2 ⁺ *	Σ(1480)	*	Ξ(1690)	***	Λ _c {2880} ⁺	5/2 ⁺ ***
N(1650)	1/2 ⁻ ****	Δ(1900)	1/2 ⁻ **	Σ(1560)	**	Ξ(1820)	3/2 ⁻ ***	Λ _c {2940} ⁺	***
N(1675)	5/2 ⁻ ****	Δ(1905)	5/2 ⁺ ****	Σ(1580)	3/2 ⁻ *	Ξ(1950)	***	Σ _c {2455}	1/2 ⁺ ****
N(1680)	5/2 ⁺ ****	Δ(1910)	1/2 ⁺ ****	Σ(1620)	1/2 ⁻ **	Ξ(2030)	≥ 3/2 ⁺ ***	Σ _c {2520}	3/2 ⁺ ***
N(1685)	*	Δ(1920)	3/2 ⁺ ***	Σ(1660)	1/2 ⁺ ***	Ξ(2120)	*	Σ _c {2800}	***
N(1700)	3/2 ⁻ ***	Δ(1930)	5/2 ⁻ ***	Σ(1670)	3/2 ⁻ ****	Ξ(2250)	**	Ξ ⁺ _c	1/2 ⁺ ***
N(1710)	1/2 ⁺ ***	Δ(1940)	3/2 ⁻ **	Σ(1690)	**	Ξ(2370)	**	Ξ ⁰ _c	1/2 ⁺ ***
N(1720)	3/2 ⁺ ****	Δ(1950)	7/2 ⁺ ****	Σ(1750)	1/2 ⁻ ***	Ξ(2500)	*	Ξ ⁺ _c	1/2 ⁺ ***
N(1860)	5/2 ⁺ **	Δ(2000)	5/2 ⁺ **	Σ(1770)	1/2 ⁺ *			Ξ ⁰ _c	1/2 ⁺ ***
N(1875)	3/2 ⁻ ***	Δ(2150)	1/2 ⁻ *	Σ(1775)	5/2 ⁻ ****	Ω ⁻	3/2 ⁺ ****	Ξ _c {2645}	3/2 ⁺ ***
N(1880)	1/2 ⁺ **	Δ(2200)	7/2 ⁻ *	Σ(1840)	3/2 ⁺ *	Ω(2250) ⁻	***	Ξ _c {2790}	1/2 ⁻ ***
N(1895)	1/2 ⁻ **	Δ(2300)	9/2 ⁺ **	Σ(1880)	1/2 ⁺ **	Ω(2380) ⁻	**	Ξ _c {2815}	3/2 ⁻ ***
N(1900)	3/2 ⁺ ***	Δ(2350)	5/2 ⁻ *	Σ(1915)	5/2 ⁺ ****	Ω(2470) ⁻	**	Ξ _c {2930}	*
N(1990)	7/2 ⁺ **	Δ(2390)	7/2 ⁺ *	Σ(1940)	3/2 ⁻ ***			Ξ _c {2980}	***
N(2000)	5/2 ⁺ **	Δ(2400)	9/2 ⁻ **	Σ(2000)	1/2 ⁻ *			Ξ _c {3055}	**
N(2040)	3/2 ⁺ *	Δ(2420)	11/2 ⁺ ****	Σ(2030)	7/2 ⁺ ****			Ξ _c {3080}	***
N(2060)	5/2 ⁻ **	Δ(2750)	13/2 ⁻ **	Σ(2070)	5/2 ⁺ *			Ξ _c {3123}	*
N(2100)	1/2 ⁺ *	Δ(2950)	15/2 ⁺ **	Σ(2080)	3/2 ⁺ **			Ω _c ⁰	1/2 ⁺ ***
N(2120)	3/2 ⁻ **	Λ	1/2 ⁺ ****	Σ(2100)	7/2 ⁻ *			Ω _c {2770} ⁰	3/2 ⁺ ***
N(2190)	7/2 ⁻ ****	Λ(1405)	1/2 ⁻ ****	Σ(2250)	***			Ξ ⁺ _{cc}	*
N(2220)	9/2 ⁺ ****	Λ(1520)	3/2 ⁻ ****	Σ(2455)	**				
N(2250)	9/2 ⁻ ****	Λ(1600)	1/2 ⁺ ***	Σ(2620)	**				
N(2600)	11/2 ⁻ ***	Λ(1670)	1/2 ⁻ ****	Σ(3000)	*			Λ _b ⁰	1/2 ⁺ ***
N(2700)	13/2 ⁺ **	Λ(1690)	3/2 ⁻ ****	Σ(3170)	*			Σ _b ⁺	1/2 ⁺ ***
		Λ(1800)	1/2 ⁻ ***					Σ _b ⁰	3/2 ⁺ ***
		Λ(1810)	1/2 ⁺ ***					Ξ ⁰ _b , Ξ ⁻ _b	1/2 ⁺ ***
		Λ(1820)	5/2 ⁺ ****					Ω _b ⁻	1/2 ⁺ ***
		Λ(1830)	5/2 ⁻ ****						
		Λ(1890)	3/2 ⁺ ****						
		Λ(2000)	*						
		Λ(2020)	7/2 ⁺ *						
		Λ(2100)	7/2 ⁻ ****						
		Λ(2110)	5/2 ⁺ ***						
		Λ(2325)	3/2 ⁻ *						
		Λ(2350)	9/2 ⁺ ***						
		Λ(2585)	**						

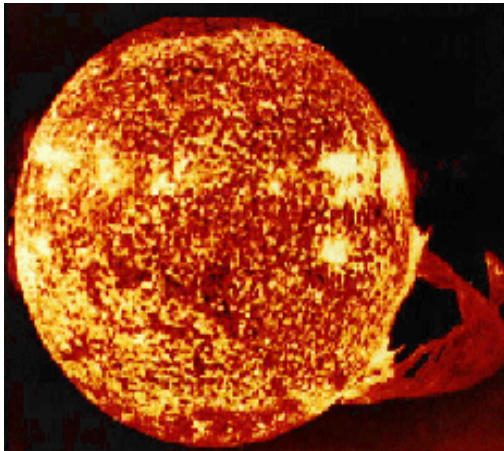


Les interactions entre particules

□ 4 interactions existent:

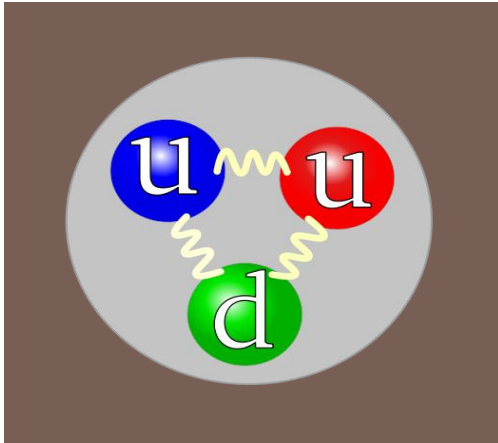
Faible

Radioactivité β
(Soleil!)



Forte

Cohésion
du noyau



Electromagnétique

TV, PCs
Aimants



Gravité

Négligeable à
l'échelle subatomique



Les interactions entre particules

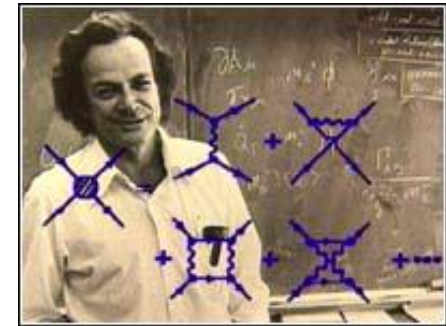
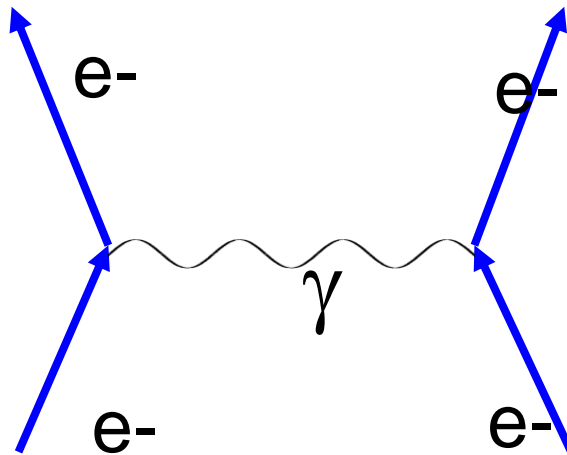
- **Lorsque deux particules interagissent, elles échangent une particule vecteur de l'interaction:**
 - *Caractéristique(s) de l'interaction*
 - *Bosons (spin 1)*

- **Caractéristiques des interactions:**
 - *Bosons vecteurs*
 - *Portée*
 - *Temps*



L'interaction électromagnétique

- Agit sur les quarks et les leptons chargés
- Boson vecteur: le photon



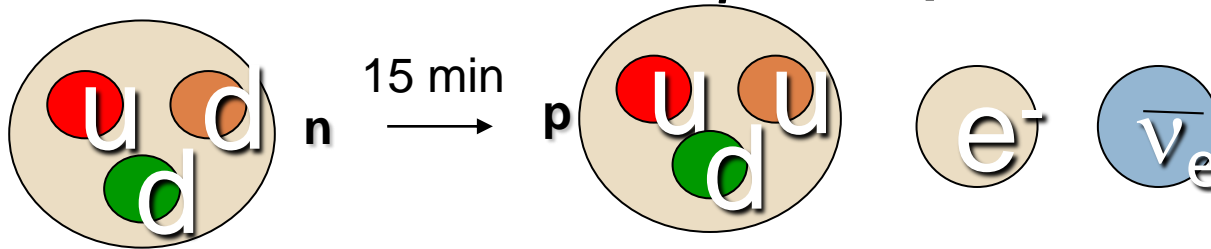
Feynman earned his Nobel for creating these diagrams
(Courtesy Auckland University)

- *Grappe de Feynman pour représenter toutes les interactions entre particules à l'échelle subatomique (ici, annihilation e^+e^-)*
- **Portée : infinie**



L'interaction faible

- Agit sur les quarks et tous les leptons (dont neutrinos)
- Illustration : la radioactivité β du noyau

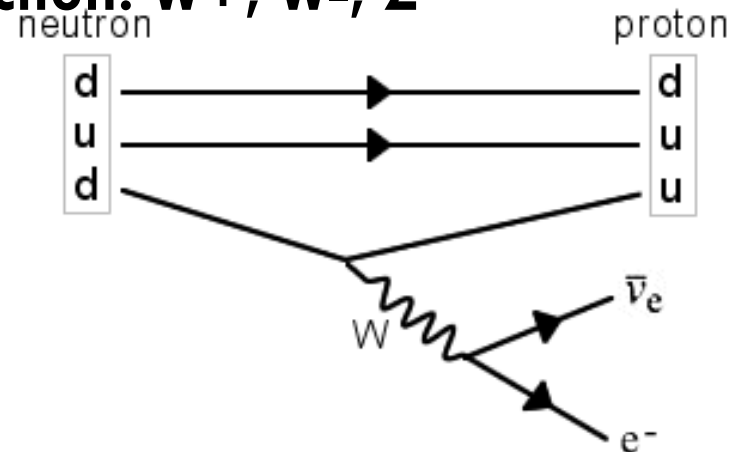


□ Au niveau des quarks: $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$

- 3 bosons vecteurs de l'interaction: W^+ , W^- , Z^0

- Prédits par la théorie
- Observés expérimentalement

- Portée: 10^{-18} m



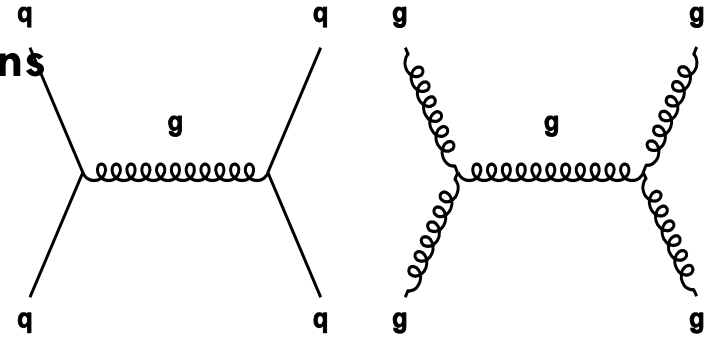


L'interaction forte

- **Agit sur les quarks**

- **Bosons vecteurs de l'interaction : 8 gluons**

- *Interagissent avec les quarks, et entre eux*
- *Portent des combinaisons de couleur différentes*







- **Confinement des quarks au sein des hadrons:**

- *Les quarks n'existent pas à l'état libre:*
 - Mais confinés dans un hadron de charge de couleur blanche
 - « collés » par les gluons



Les interactions entre particules: bilan

- 4 interactions existent
 - La gravitation est négligeable à l'échelle subatomique
- Les particules interagissent en échangeant un boson caractéristique de l'interaction

Interaction	Electromagnétique	Faible	Forte	Gravitation
Bosons	 photon		 gluon	 graviton
Portée	infinie	0.001 fm	1 fm	infinie
Responsable de	Cohésion atomique, moléculaire, électricité, magnétisme	Radioactivité	Cohésion nucléaire	Pesanteur

- Interactions électromagnétique et faible sont unies par la théorie
- Question ouverte : unification de toutes les interactions?