

# LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES



Anne-Isabelle Etievre  
([anne-isabelle.etievre@cea.fr](mailto:anne-isabelle.etievre@cea.fr))



- Les particules, leurs interactions
  
- Mise en évidence expérimentale
  - ▣ *Les détecteurs de physique des particules*
  - ▣ *L'accélérateur LHC*
  
- Le boson de Higgs

3

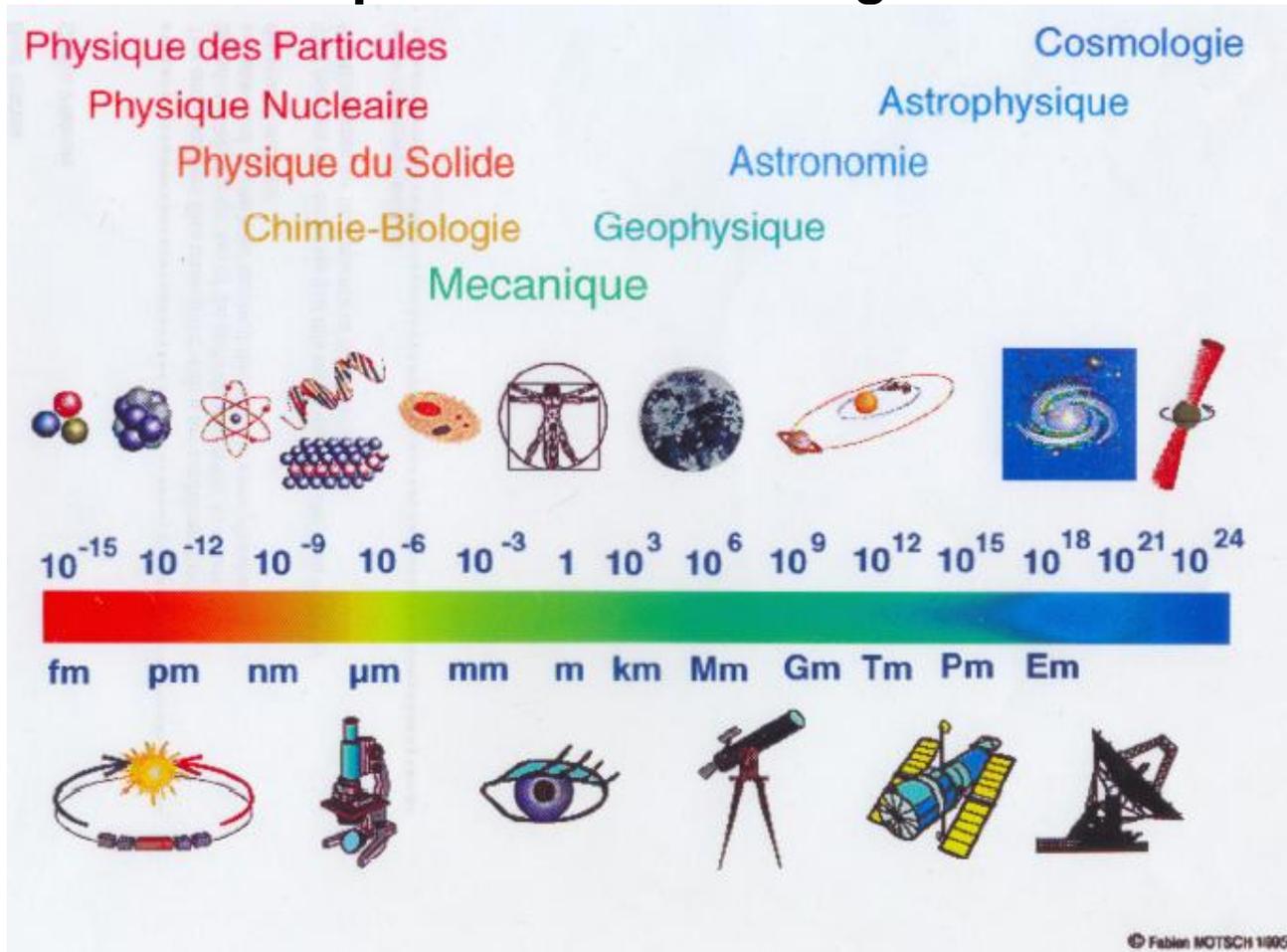
# Episode 1

Les particules et leurs interactions



A quelle échelle se situe-t-on?

□ De l'infiniment petit à l'infiniment grand

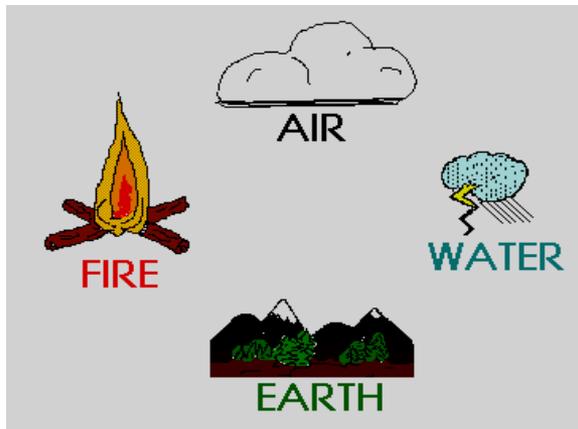




# Un brin d'histoire

## □ 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 80
Ⓛ	Magnesia 20	Ⓢ	Silver 108
Ⓛ	Lime 28	Ⓢ	Gold 196
Ⓛ	Soda 23	Ⓢ	Platina 197
Ⓛ	Potash 39	Ⓢ	Mercury 167





# Un brin d'histoire

## □ La première particule découverte : l'électron

□ 1897: J.J. Thomson

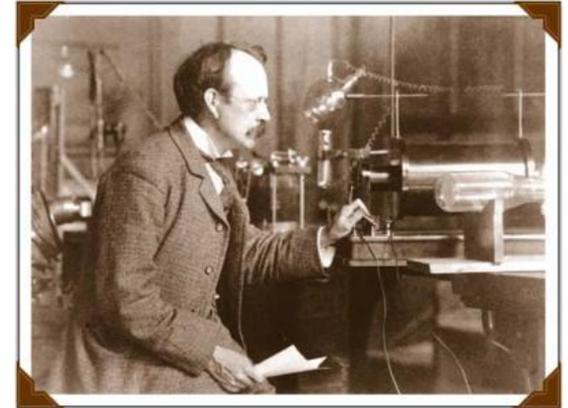
- mesure la déviation des « rayons cathodiques » sous l'effet de champs électriques et magnétiques

- En déduit que:

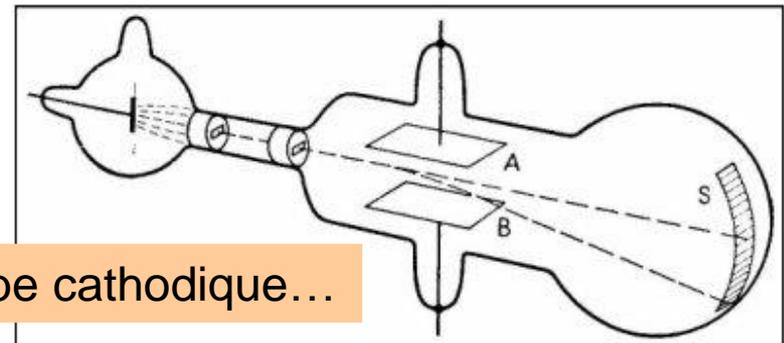
*« In all known cases in which*

*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!**



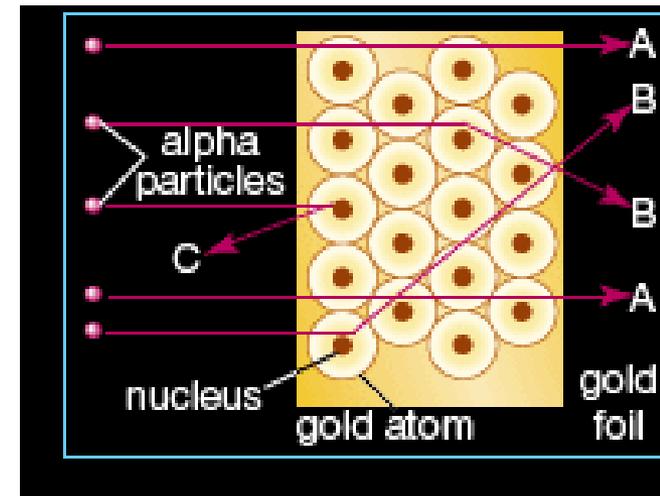
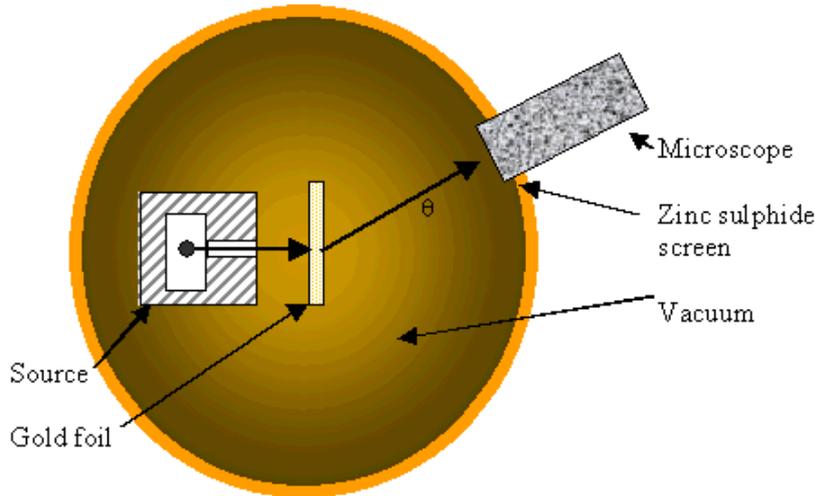
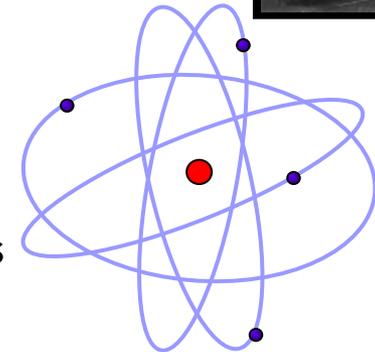
Le tube cathodique...



# Un brin d'histoire

## □ La structure de l'atome

- ▣ *Rutherford (1912): diffusion de particules  $\alpha$  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



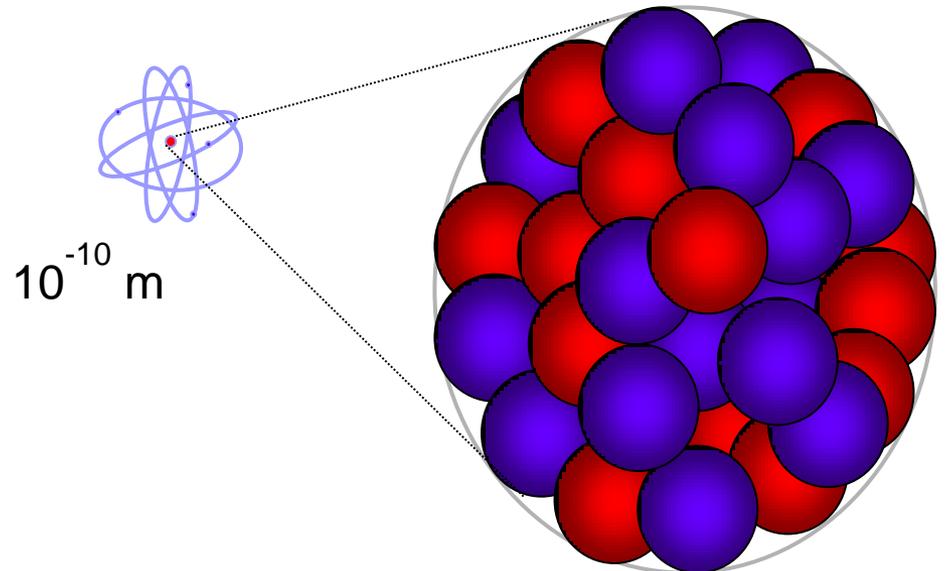


# Un brin d'histoire

## □ 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





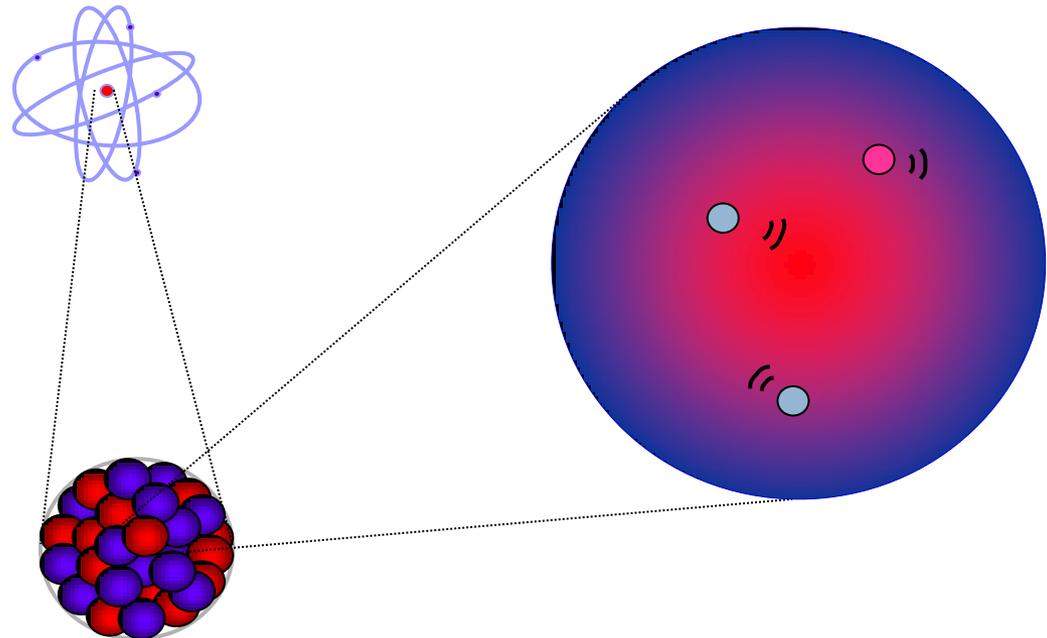
# Un brin d'histoire

## □ 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

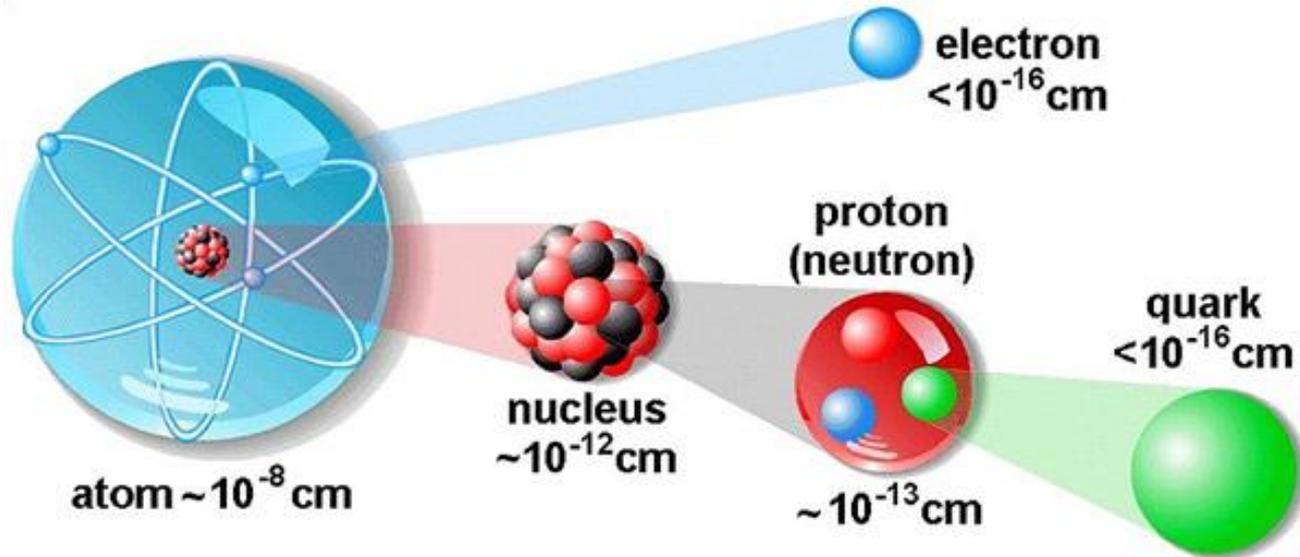
□ *Et l'histoire s'arrête là  
...pour l'instant!*





# 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)

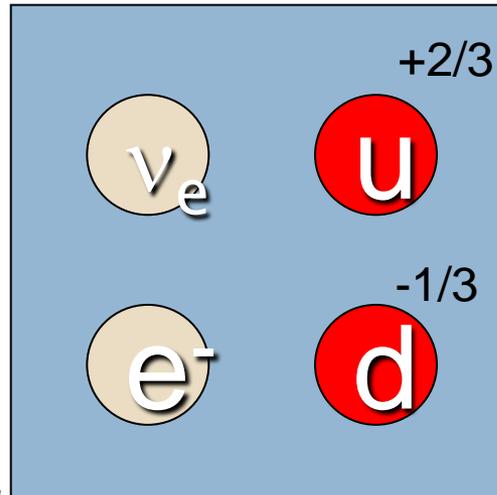


# Les 12 particules élémentaires

- **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:**  
 $\nu$  = neutrino  
 $e$  = electron



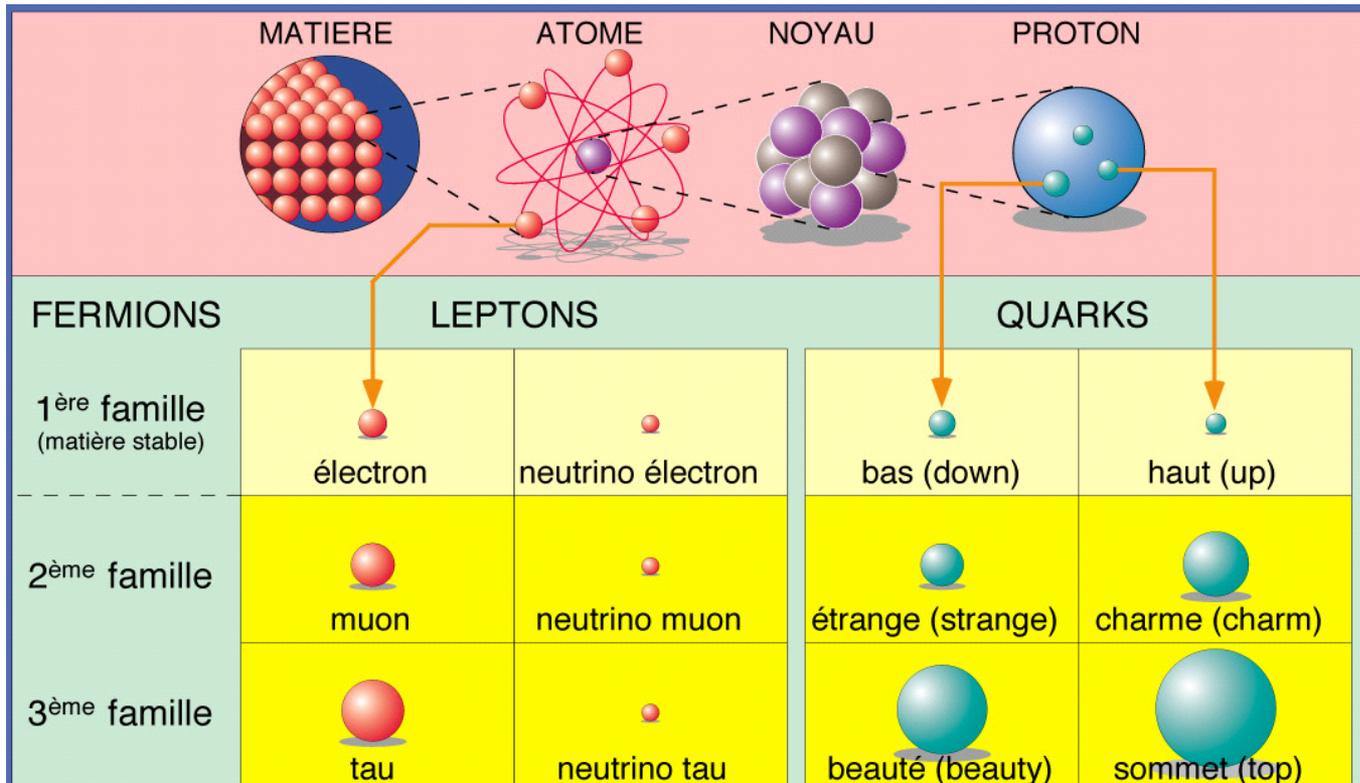
**Quarks:**  
 $u$  = up  
 $d$  = down

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



# Les 12 particules élémentaires

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



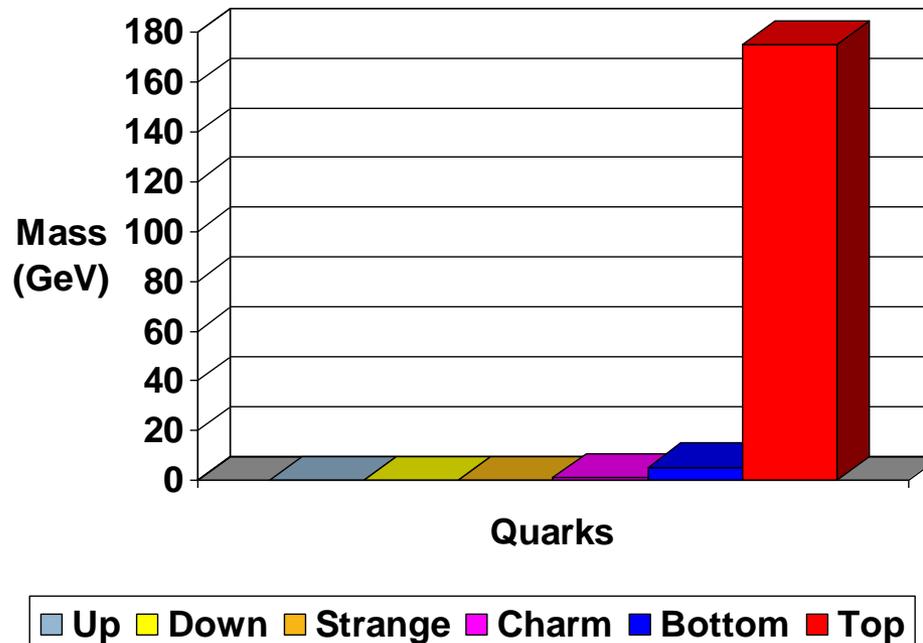
- Ces 3 familles sont semblables en tout, hormis la masse de leurs membres

Rayons  
cosmiques  
accélérateurs



# Les 12 particules élémentaires

## □ Les masses des quarks

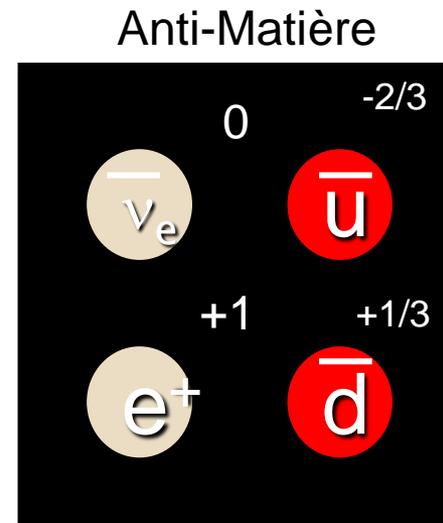
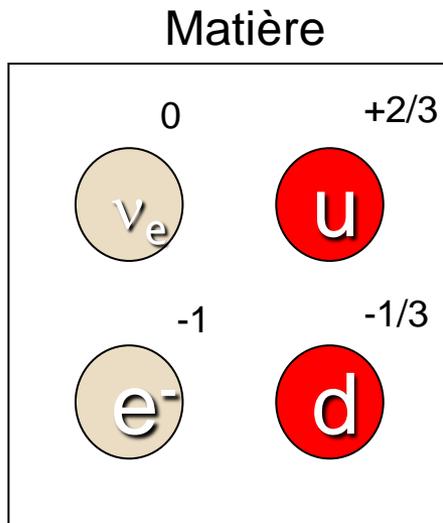


- *Le quark top est beaucoup plus lourd que ses semblables!*
  - Fut l'objet d'une longue quête!



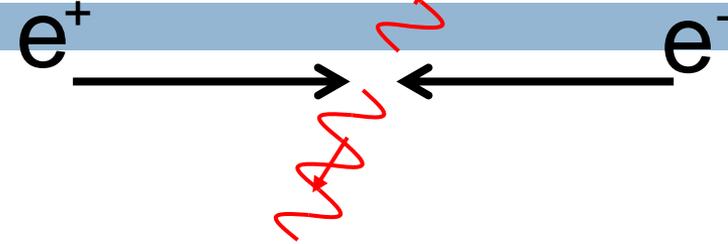
# Qu'est-ce que l'antimatière?

- **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?



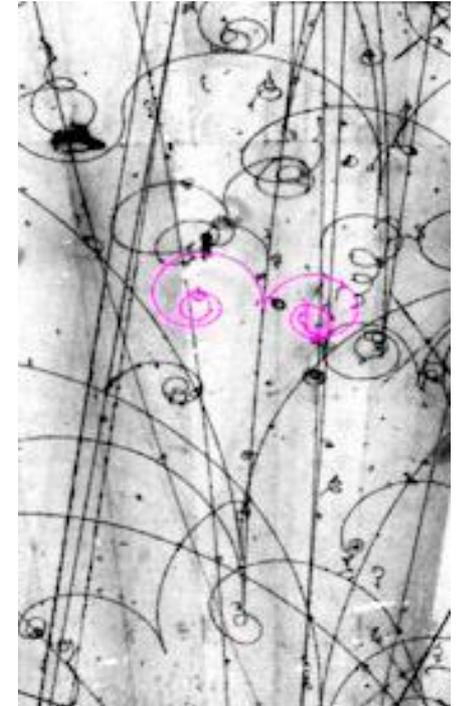
## □ Illustrations:

### □ *annihilation electron-positron:*

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

### □ *Création de paires $e^+e^-$ :*

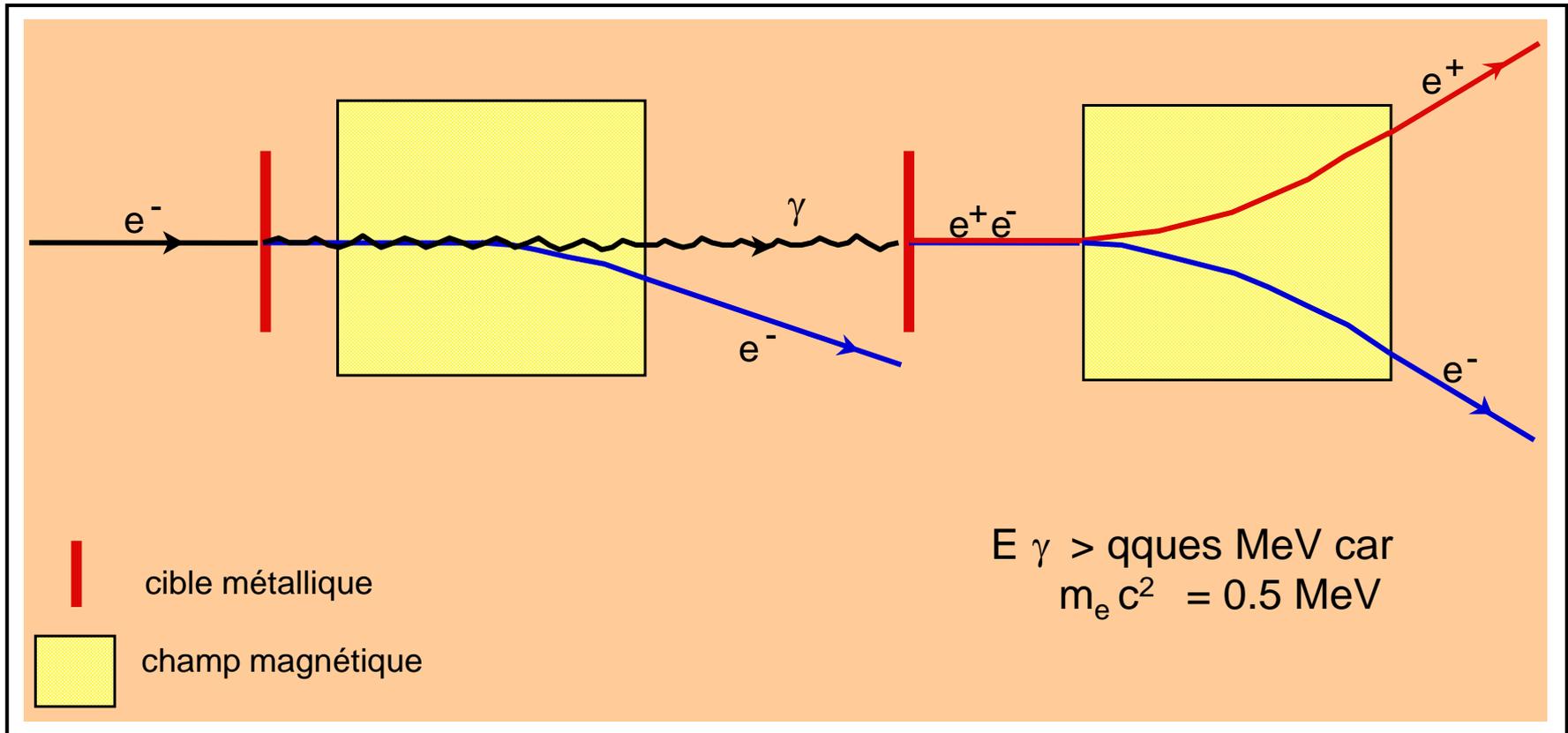
- Réciproquement, énergie transformée en masse
- Photon traversant une chambre à bulles
  - création d'une paire  $e^+e^-$ , en spirales opposées (champ magnétique)





# Qu'est-ce que l'antimatière?

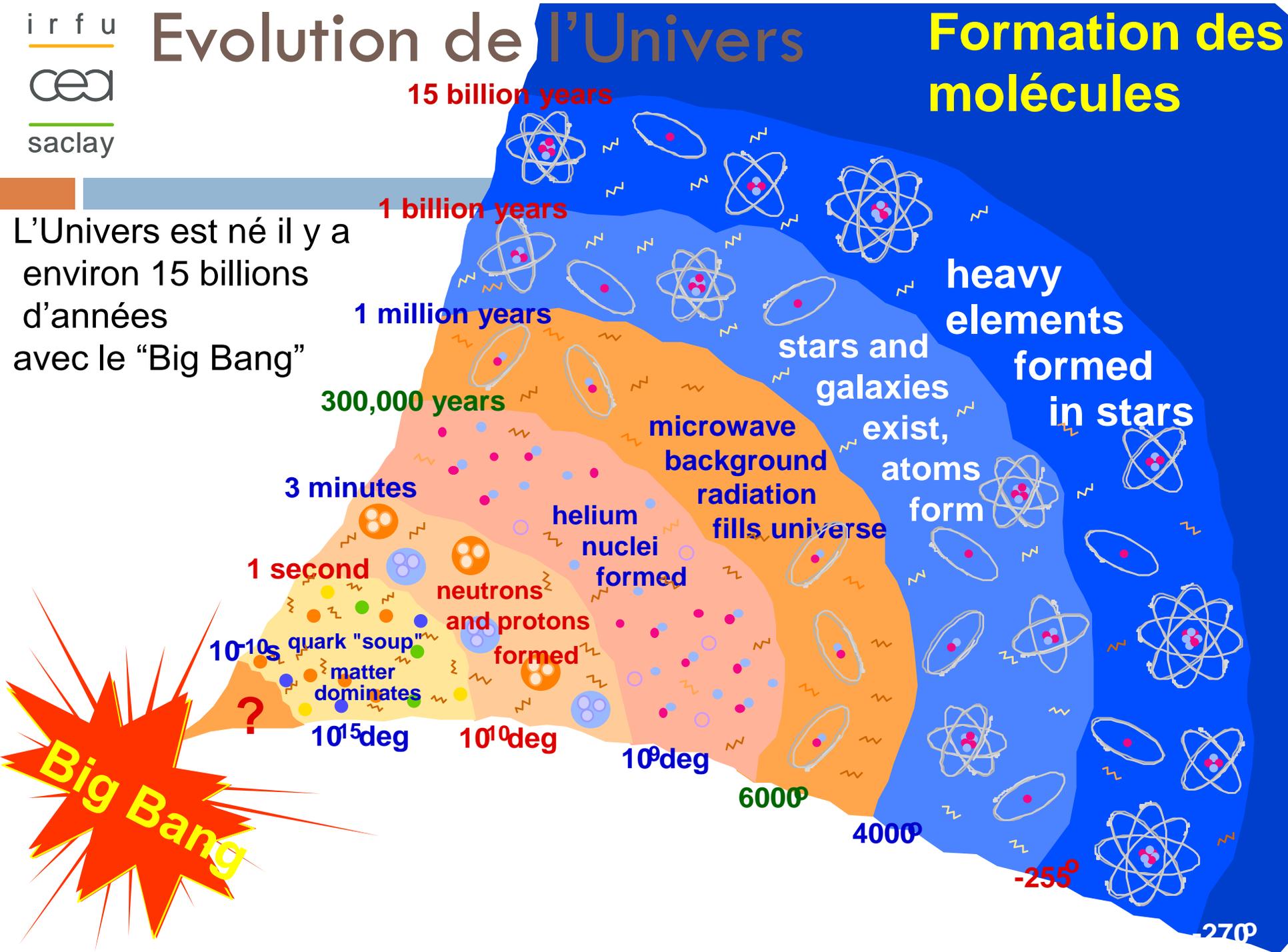
## □ Création d'anti-matière en laboratoire



# 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



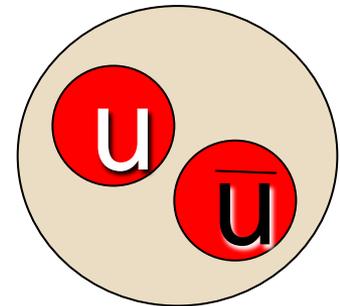
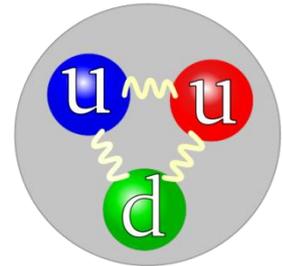
# Les hadrons

## □ Qu'est-ce qu'un hadron?

- Une particule non leptonique donc faite de quarks

## □ Deux types de hadrons:

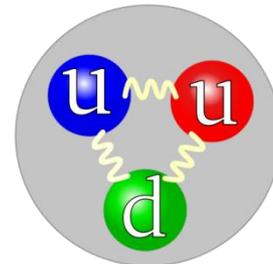
- *Baryons* :
  - Constitués de 3 quarks, spin  $\frac{1}{2}$  entier
  - Exemple : proton
- *Mésons*:
  - Constitués de 2 quarks (quark-antiquark), spin entier





# La couleur des quarks

- **Chaque quark a un nombre quantique appelé couleur:**
  - *Expérimentalement: observation de la particule  $\Delta^{++}$ :*
    - Spin  $3/2$ , faite de 3 quarks u
    - Principe de Pauli violé  $\rightarrow$  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

## ■ Baryons →

$p$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	$\Sigma^+$	$1/2^+$ ****	$\Xi^0$	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c^+$	$1/2^+$ ****
$n$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma^0$	$1/2^+$ ****	$\Xi^-$	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c[2595]^+$	$1/2^-$ ***
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma^-$	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_c[2625]^+$	$3/2^-$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	*	$\Lambda_c[2765]^+$	*
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1480)$	*	$\Xi(1690)$	***	$\Lambda_c[2880]^+$	$5/2^+$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ **	$\Sigma(1560)$	**	$\Xi(1820)$	$3/2^-$ ***	$\Lambda_c[2940]^+$	***
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ *	$\Xi(1950)$	***	$\Sigma_c[2455]$	$1/2^+$ ****
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ **	$\Xi(2030)$	$\geq 3/2^?$ ***	$\Sigma_c[2520]$	$3/2^+$ ***
$N(1685)$	*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(2120)$	*	$\Sigma_c[2800]$	***
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ ***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(2250)$	**	$\Xi_c^+$	$1/2^+$ ***
$N(1710)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1690)$	**	$\Xi(2370)$	**	$\Xi_c^0$	$1/2^+$ ***
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***	$\Xi(2500)$	*	$\Xi_c^+$	$1/2^+$ ***
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$ *			$\Xi_c^0$	$1/2^+$ ***
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Omega^-$	$3/2^+$ ****	$\Xi_c[2645]$	$3/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$ **	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ *	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$ *	$\Omega[2250]^-$	***	$\Xi_c[2790]$	$1/2^-$ ***
$N(1895)$	$1/2^-$ **	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Omega[2380]^-$	**	$\Xi_c[2815]$	$3/2^-$ ***
$N(1900)$	$3/2^+$ ***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ *	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****	$\Omega[2470]^-$	**	$\Xi_c[2930]$	*
$N(1990)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$ ***			$\Xi_c[2980]$	***
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$ *			$\Xi_c[3055]$	**
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****			$\Xi_c[3080]$	***
$N(2060)$	$5/2^-$ **	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ *			$\Xi_c[3123]$	*
$N(2100)$	$1/2^+$ *	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ **			$\Omega_c^0$	$1/2^+$ ***
$N(2120)$	$3/2^-$ **			$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ *			$\Omega_c[2770]^0$	$3/2^+$ ***
$N(2190)$	$7/2^-$ ****	$\Lambda$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2250)$	***			$\Xi_c^+$	*
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2455)$	**			$\Xi_c^0$	*
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**			$\Lambda_b^0$	$1/2^+$ ***
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ ***	$\Sigma(3000)$	*			$\Sigma_b^+$	$1/2^+$ ***
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(3170)$	*			$\Sigma_b^0$	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****					$\Xi_b^+$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***					$\Xi_b^0$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ***					$\Xi_b^-$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****					$\Omega_b^-$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****						
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****						
		$\Lambda(2000)$	*						
		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$ *						
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****						
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***						
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ ***						
		$\Lambda(2585)$	**						

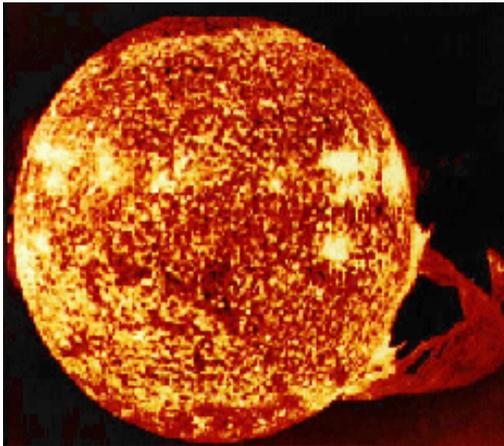


# Les interactions entre particules

## □ 4 interactions existent:

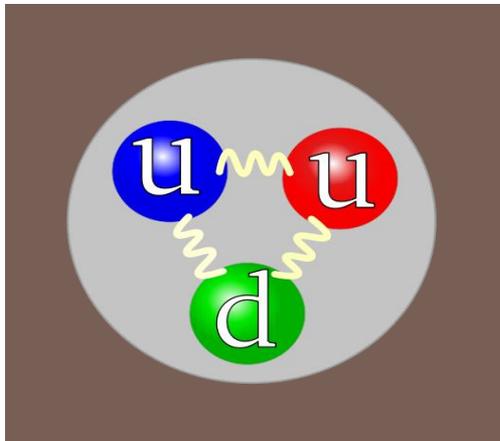
### Faible

Radioactivité  $\beta$   
(Soleil!)



### Forte

Cohésion  
du noyau



### Electromagnétique

TV, PCs  
Aimants



### Gravité

Négligeable à  
l'échelle subatomique



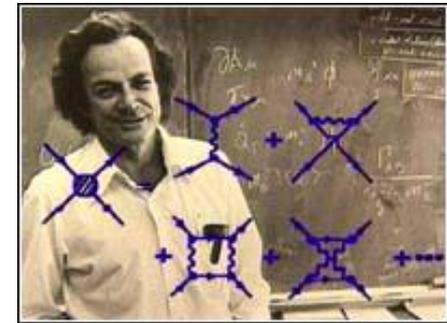
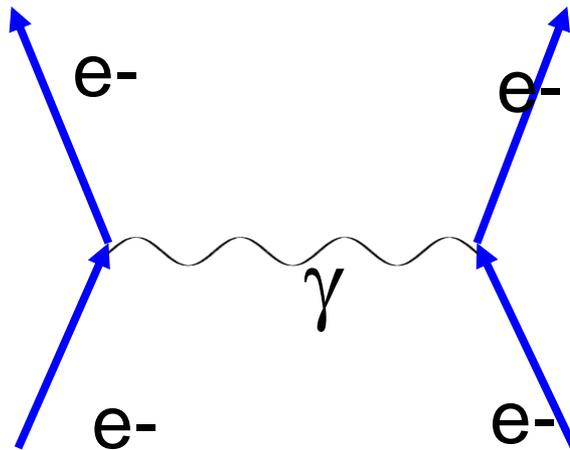
# Les interactions entre particules

- **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



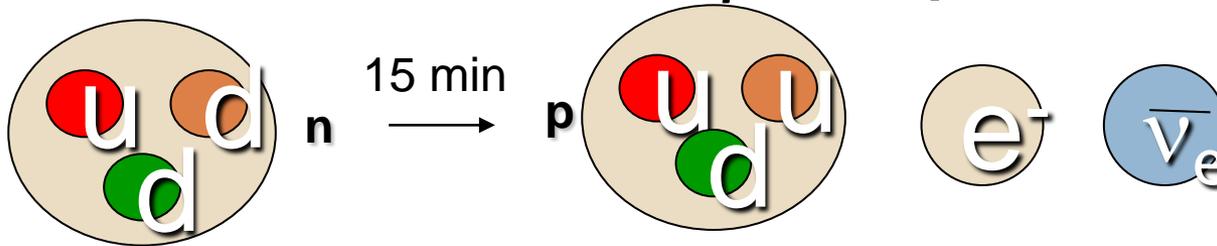
Feynman earned his Nobel for creating these diagrams  
(Courtesy Auckland University)

- *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  $\beta$  du noyau

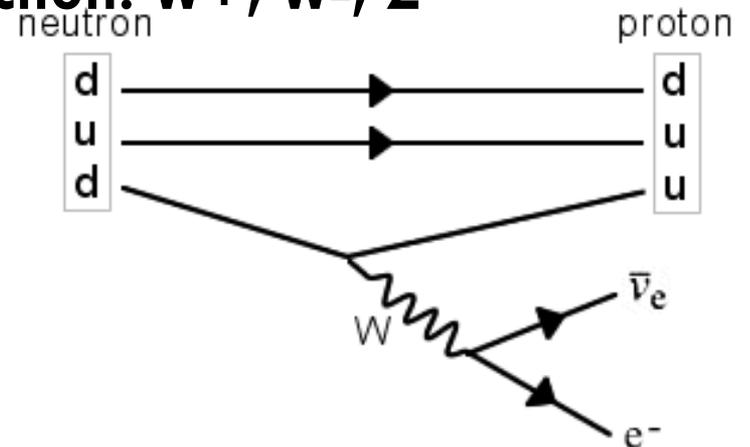


□ Au niveau des quarks:  $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$

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

- Prédits par la théorie
- Observés expérimentalement

- Portée:  $10^{-18}$  m



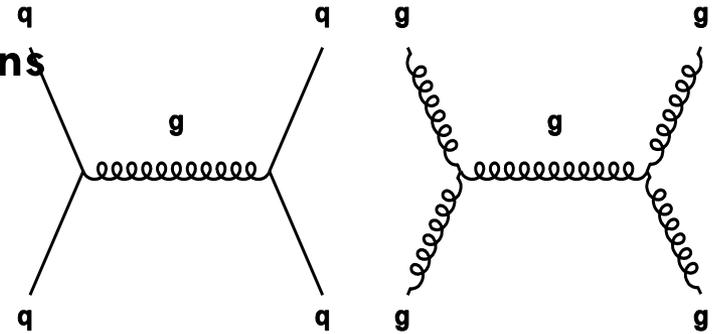


# L'interaction forte

- **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?