

# **Le Modèle Standard de la physique des particules**

Anne-Isabelle Etievre  
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



---

**Episode 1:**  
**Les particules**  
**Leurs interactions**

# A quelle échelle se situe-t-on?

- De l'infiniment petit à l'infiniment grand

Physique des Particules

Cosmologie

Physique Nucleaire

Astrophysique

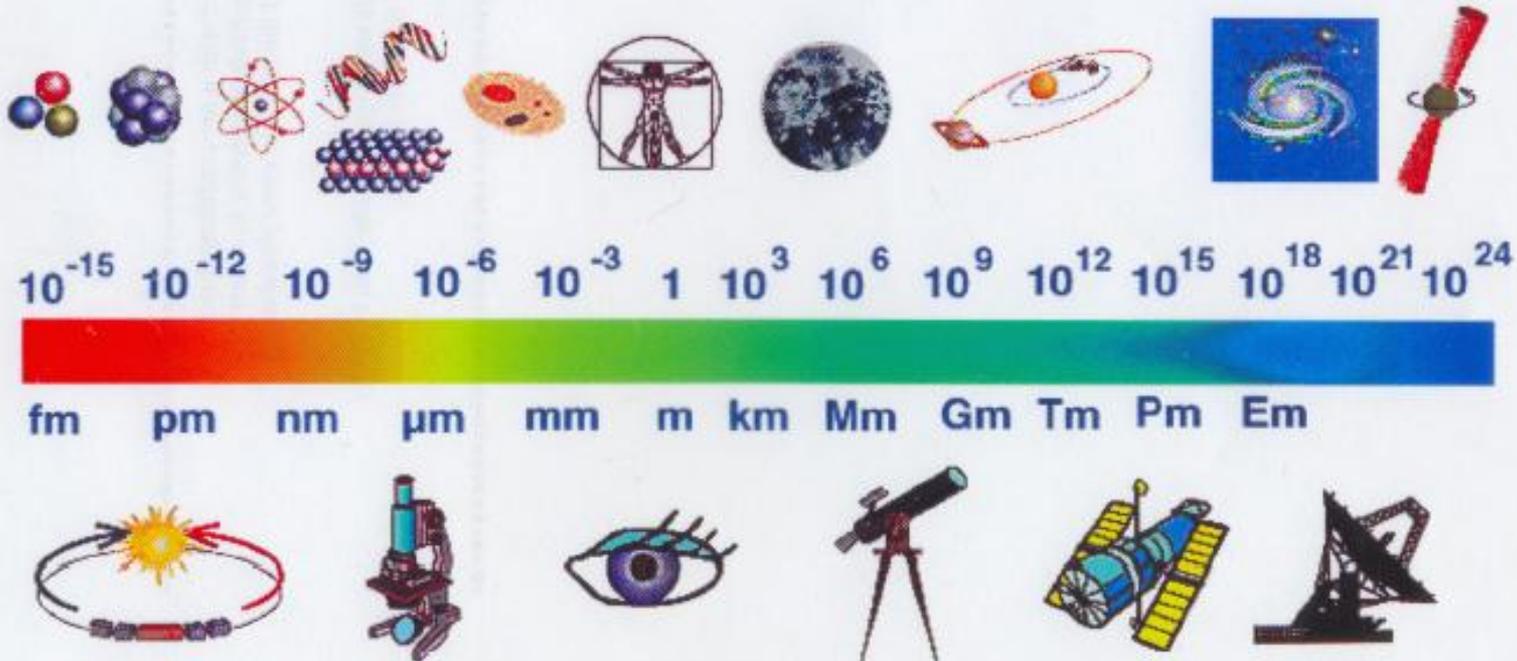
Physique du Solide

Astronomie

Chimie-Biologie

Geophysique

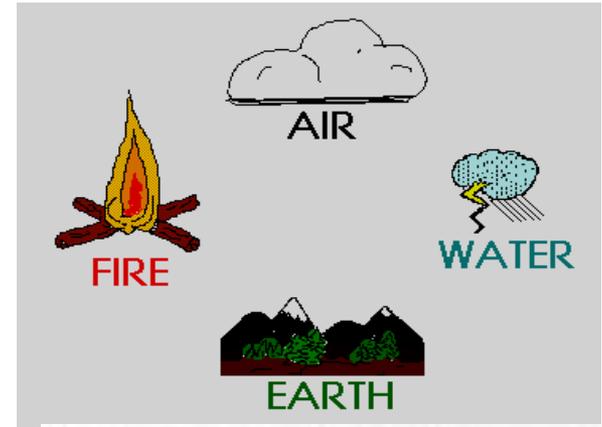
Mecanique



# 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	46	Iron	56
Oxygen	7	Zinc	66
Phosphorus	9	Copper	64
Sulphur	16	Lead	207
Magnesia	24	Silver	197
Lime	28	Gold	197
Soda	28	Platina	197
Potash	40	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
<b>Period</b>																		
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
<b>*Lanthanides</b>	* 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				
<b>**Actinides</b>	** 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

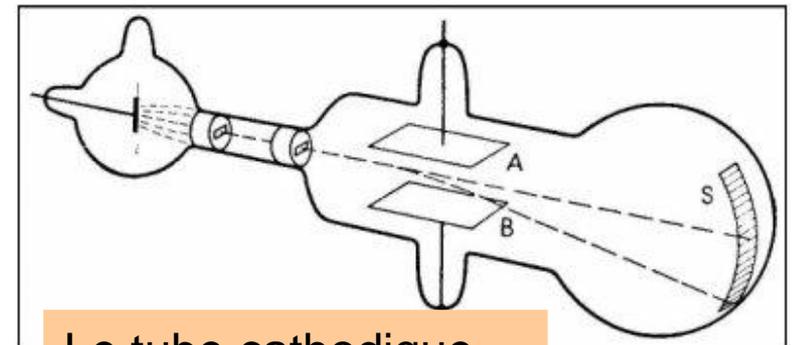
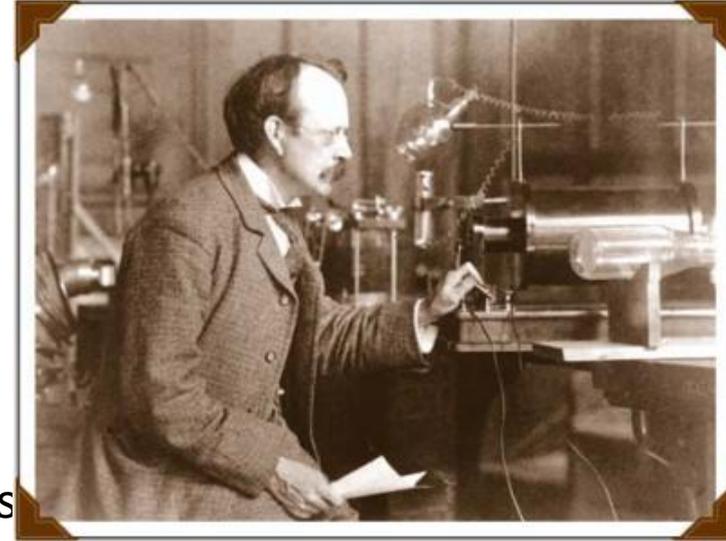
## • La première particule découverte : l'électron

✓ 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!**



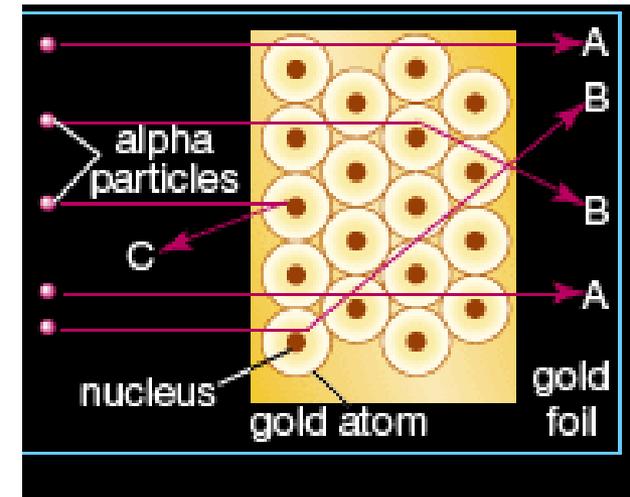
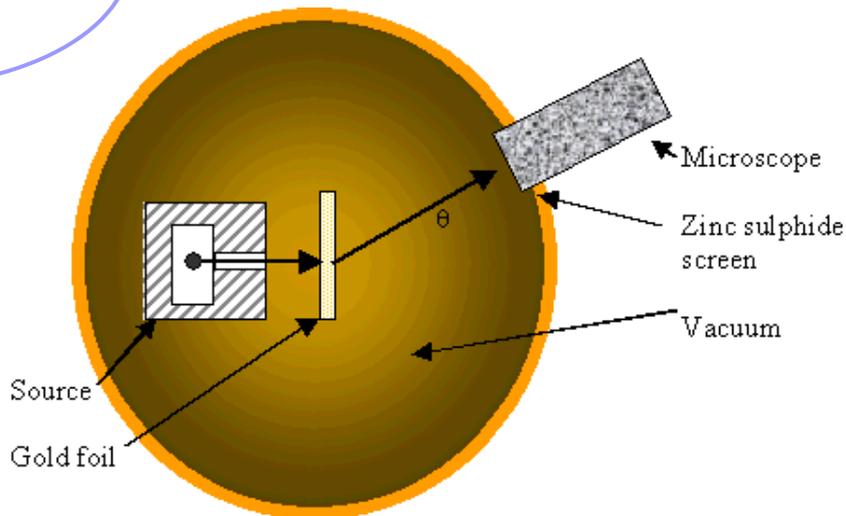
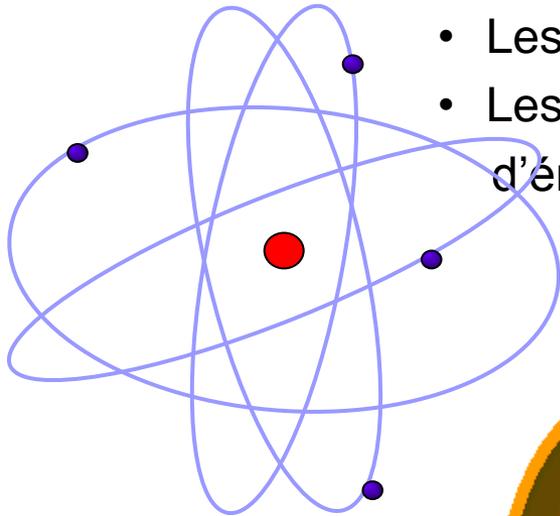
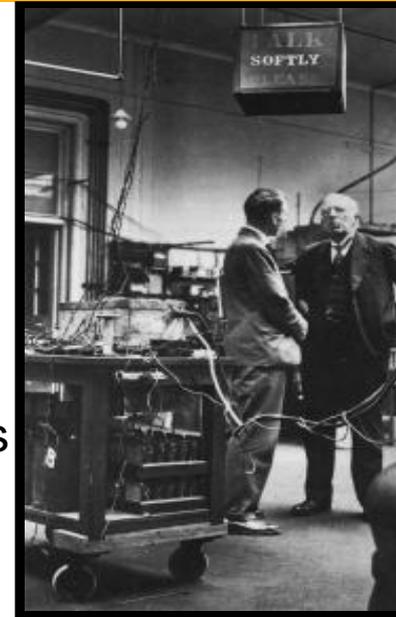
Le tube cathodique...

# Un brin d'histoire

## • La structure de l'atome

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



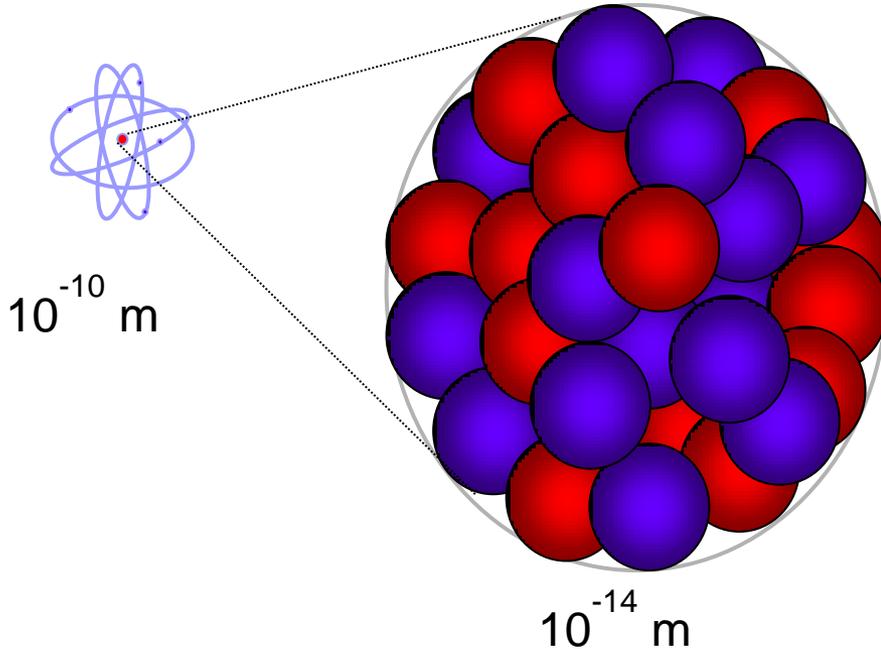
# Un brin d'histoire

- **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*



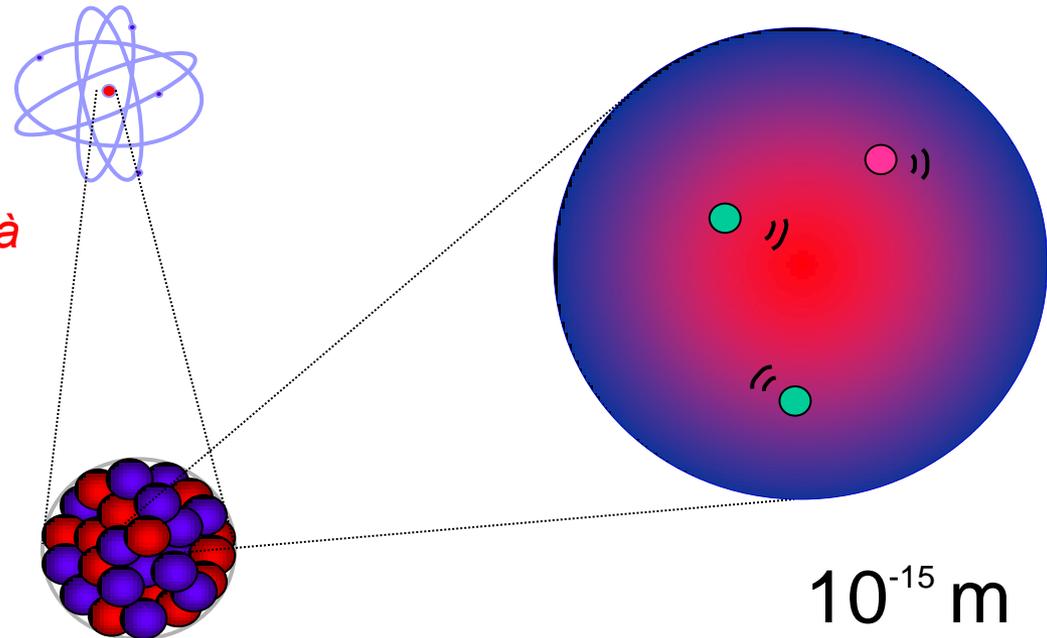
# Un brin d'histoire

- **La structure du nucléon (années 60)**

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

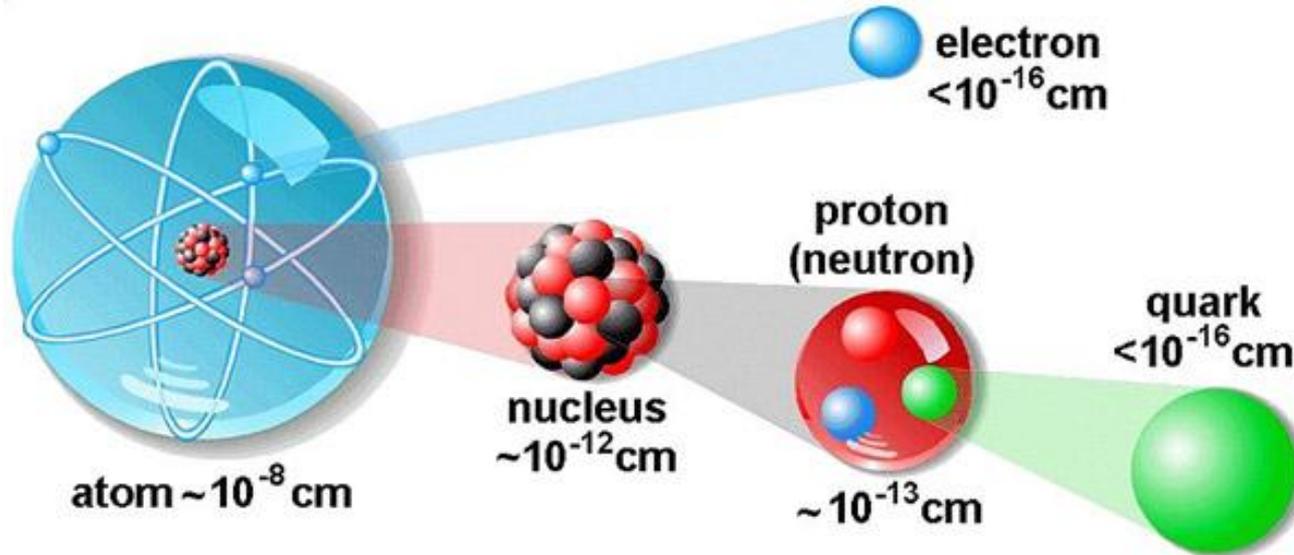
- Petits comparés aux nucléons
- Se déplaçant à très grande vitesse
- Liés solidement les uns aux autres, à l'intérieur du nucléon

- ✓ *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

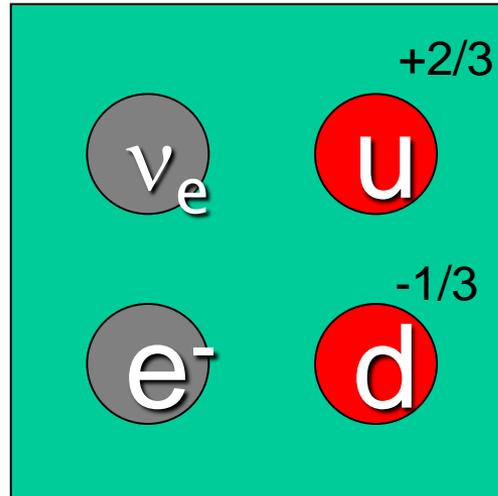
- **2 types de particules: les leptons et les quarks**
  - ✓ *Leptons: chargés ou neutres (neutrinos: cours C. Augier)*
  - ✓ *Quarks: chargé électrique fractionnaire*

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

**Leptons:**

$\nu$  = neutrino

e = electron



**Quarks:**

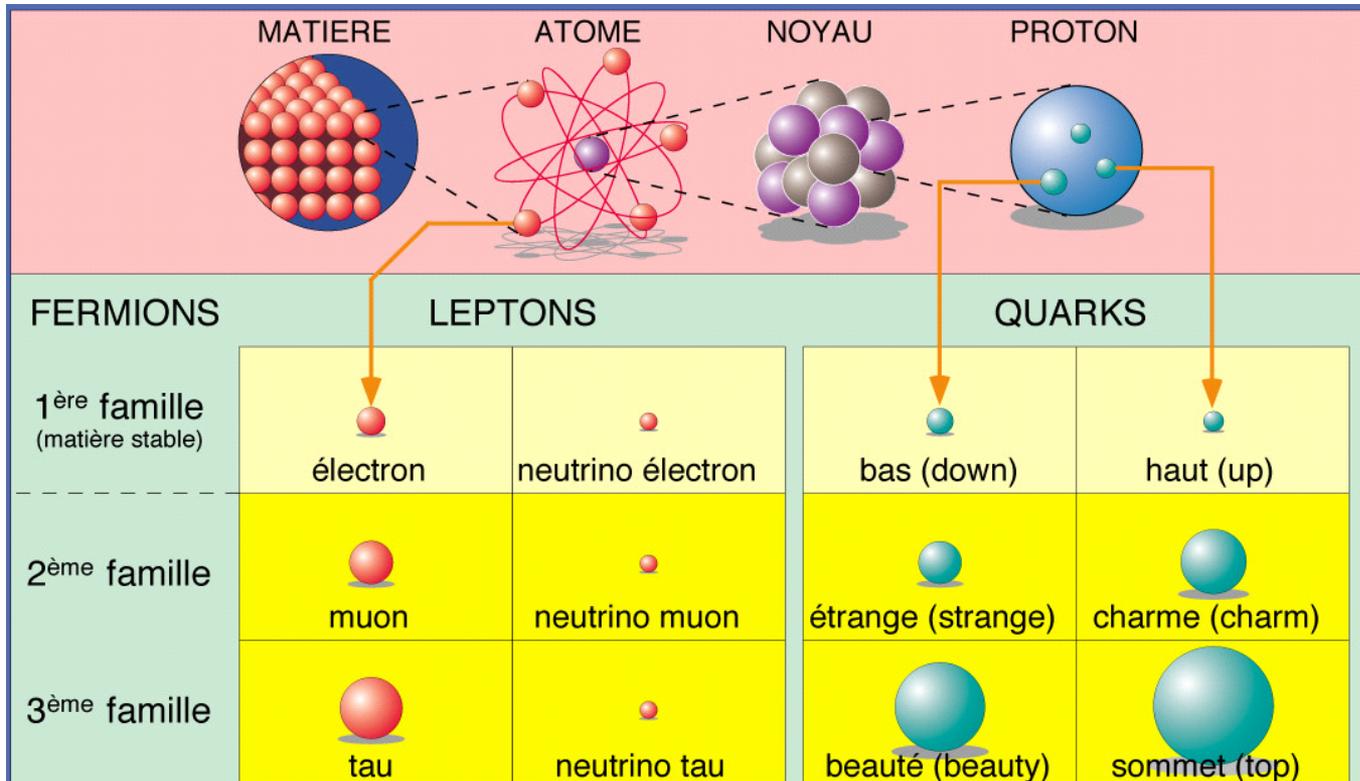
u = up

d = down

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

# Les 12 particules élémentaires

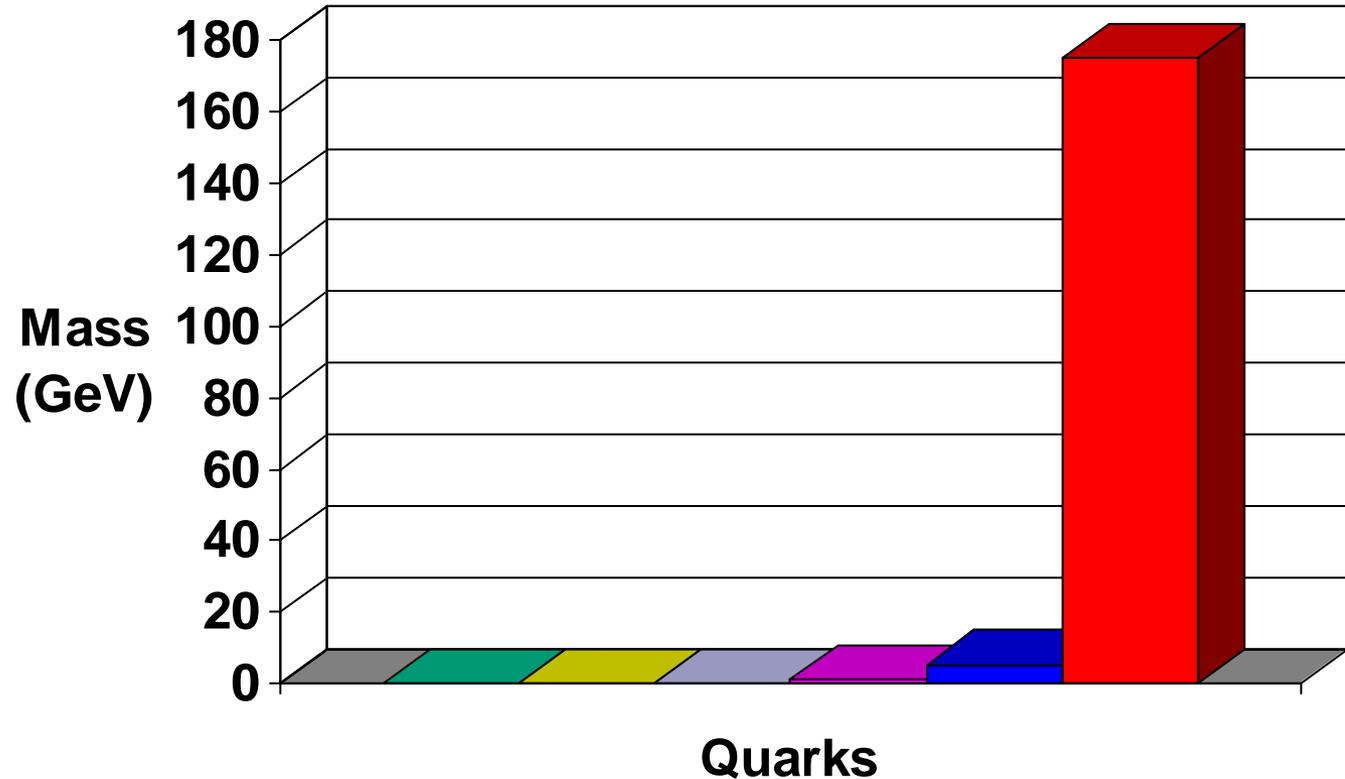
- 3 familles de particules élémentaires = 12 constituants élémentaires (fermions, spin  $\frac{1}{2}$ )



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

# Les 12 particules élémentaires

- Les masses des quarks



■ Up ■ Down ■ Strange ■ Charm ■ Bottom ■ Top

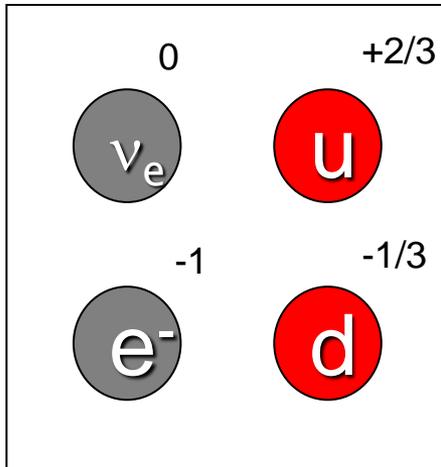
✓ *Le quark top est beaucoup plus lourd que ses semblables!*

- Fut l'objet d'une longue quête!

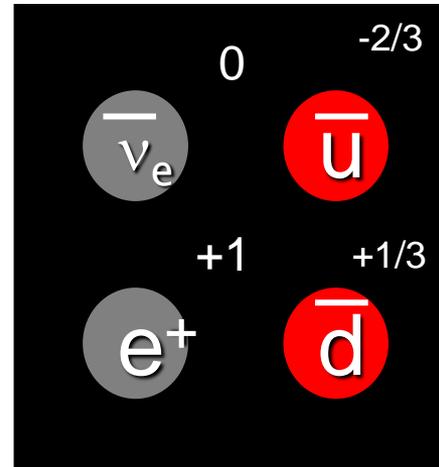
# Qu'est-ce que l'antimatière?

- **A toute particule élémentaire est associée une anti-particule**
  - ✓ *Aux mêmes nombres quantiques, de même masse*
  - ✓ *À l'exception de la charge électrique, opposée*
    - Positron ( $e^+$ ) prédit par Paul Dirac en 1928, découvert en 1932 par Anderson

Matière



Anti-Matière

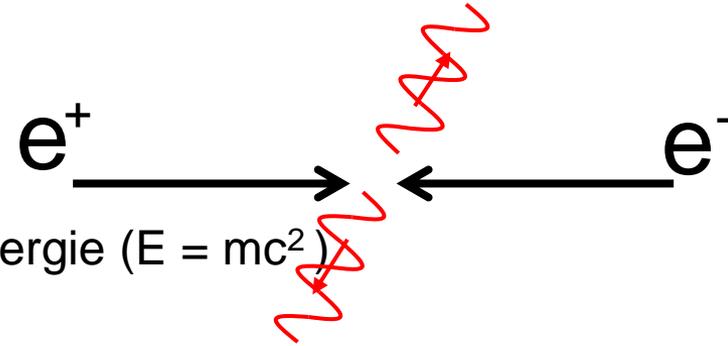


# Qu'est-ce que l'antimatière?

## • Illustrations:

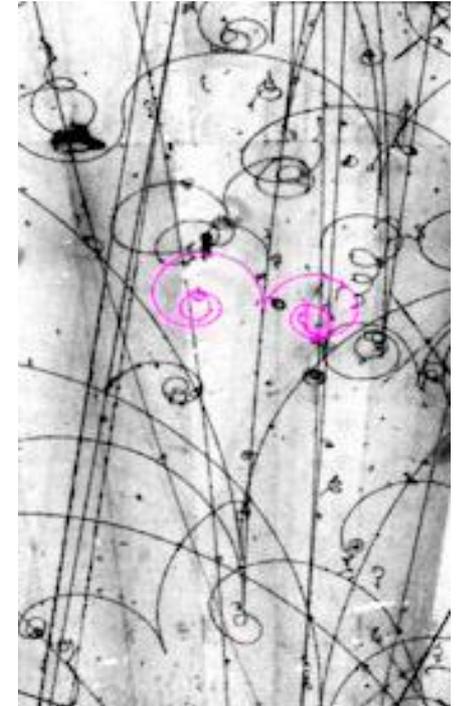
### ✓ *annihilation electron-positron:*

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



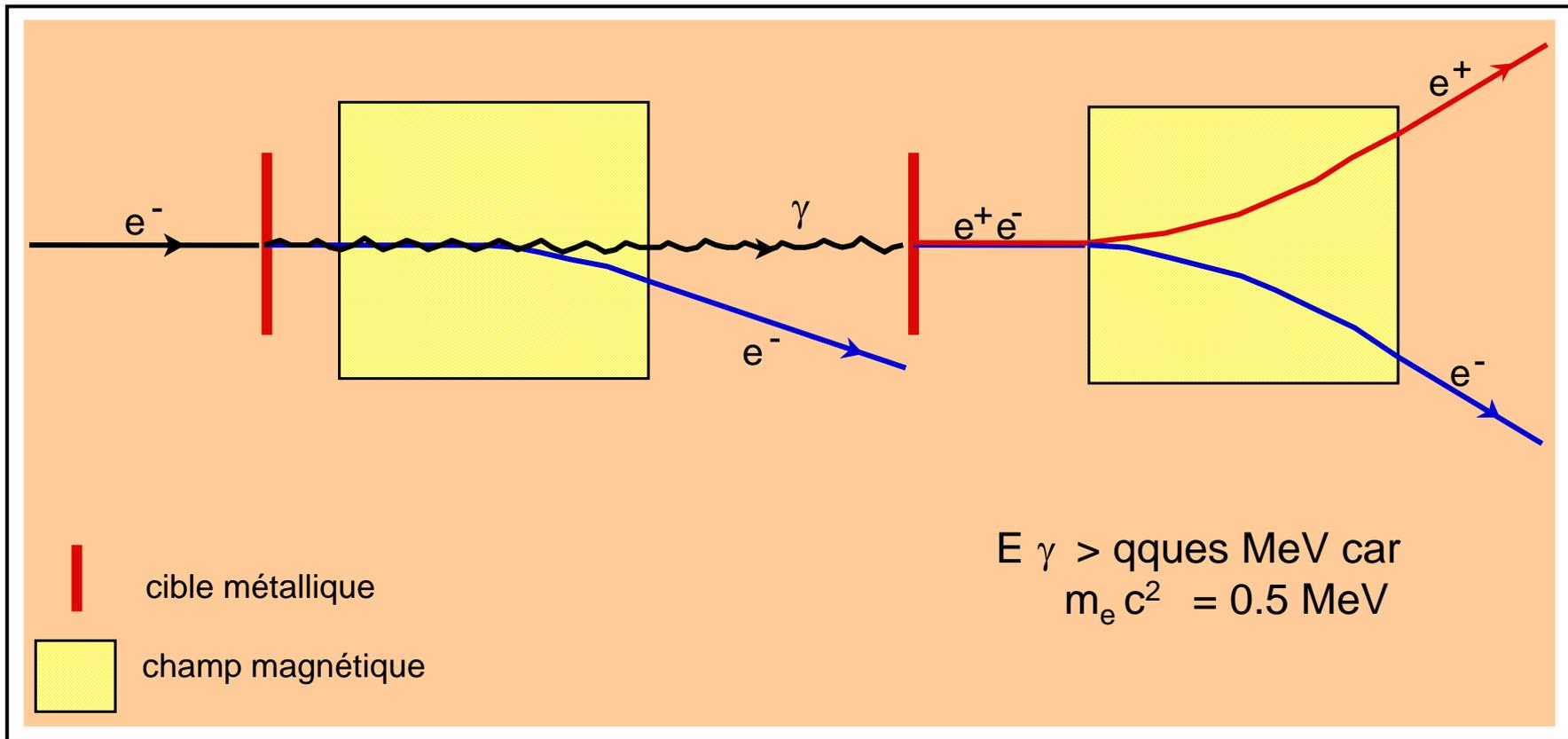
### ✓ *Création de paires $e^+e^-$ :*

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

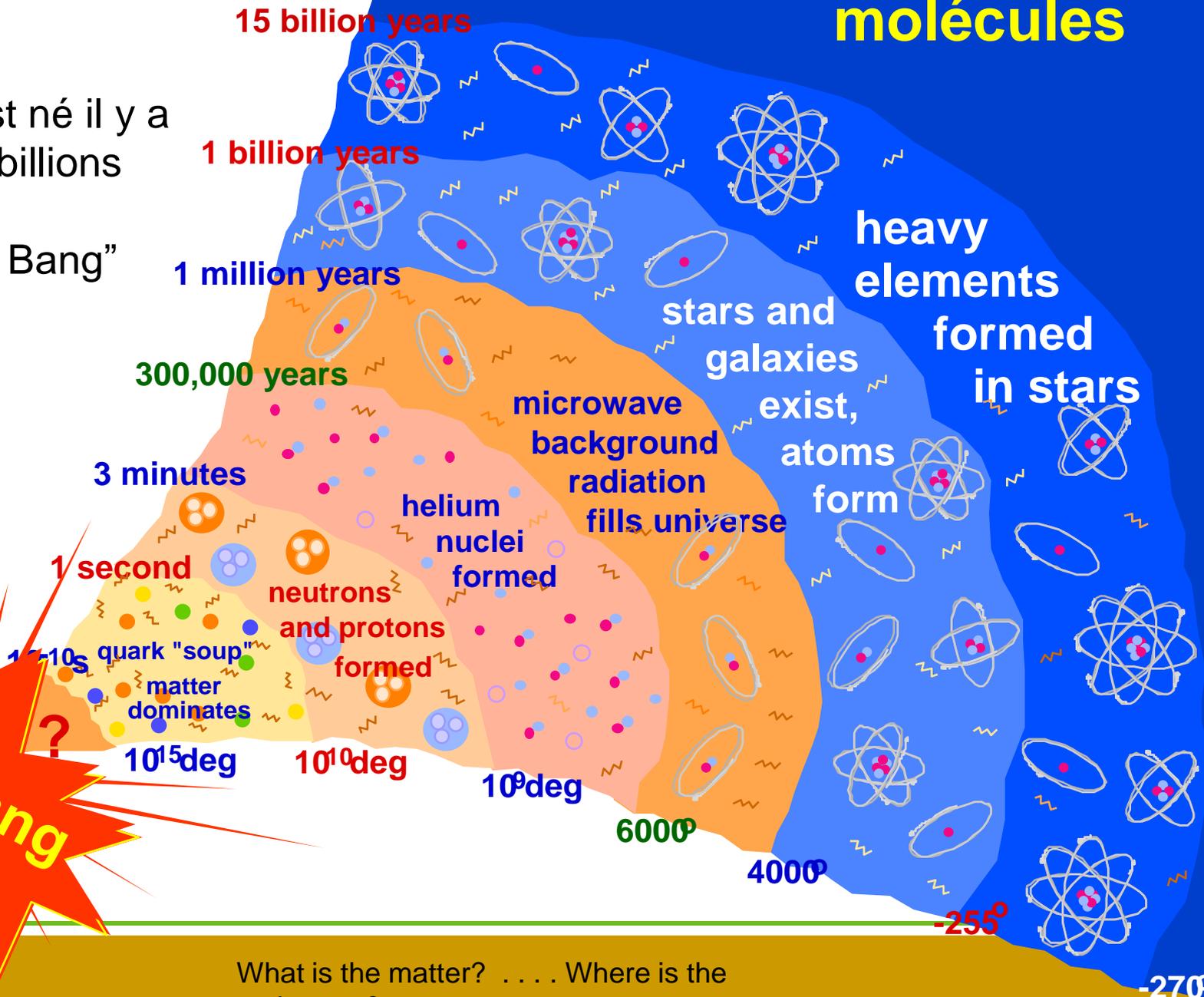


# Qu'est-ce que l'antimatière?

- Création d'anti-matière en laboratoire



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*

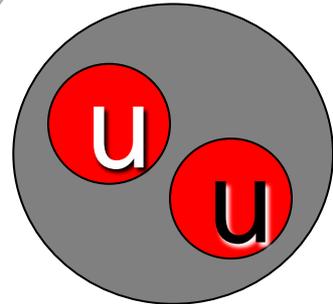
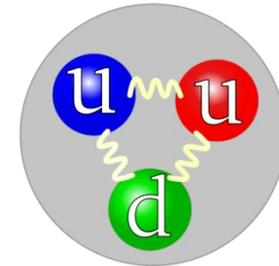
- **Deux types de hadrons:**

- ✓ *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  $D^{++}$ :*

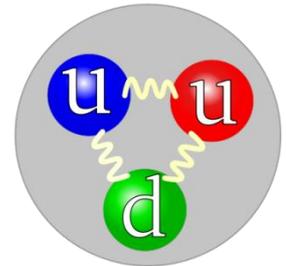
- Spin 3/2, faite de 3 quarks u
- Principe de Pauli violé -> nécessité d'introduire un nouveau nombre quantique, la couleur

- ✓ *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

---

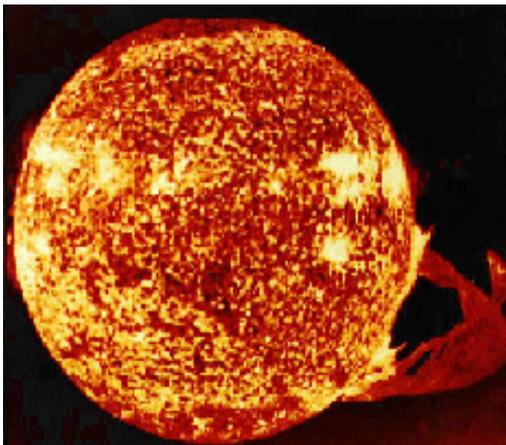
- **Des centaines de particules ont été observées**
  - ✓ *La plupart sont instables et se désintègrent en particules plus légères*

# Les interactions entre particules

- 4 interactions existent:

## Faible

Radioactivité  $\beta$   
(Soleil!)

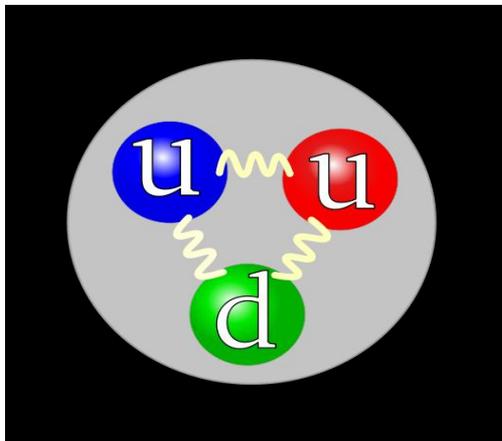


## Electromagnétique

TV, PCs  
Aimants

## Forte

Cohésion  
du noyau



## Gravité

Négligeable à  
l'échelle subatomique

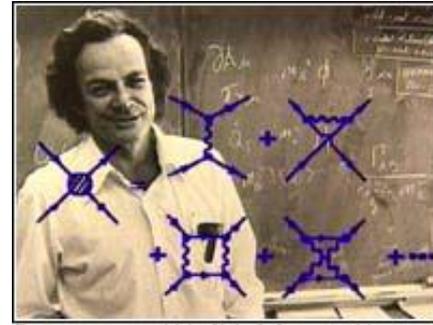
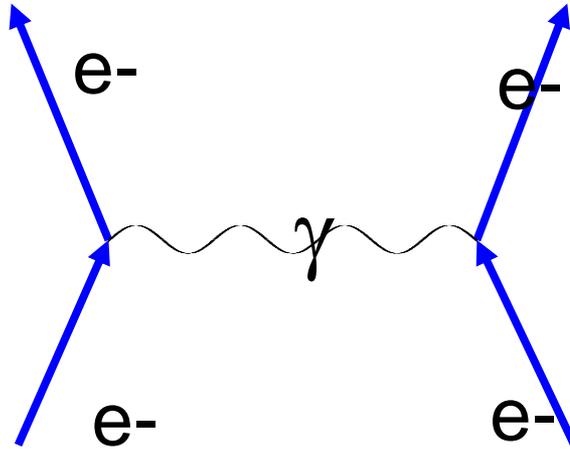
# Les interactions entre particules

---

- **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



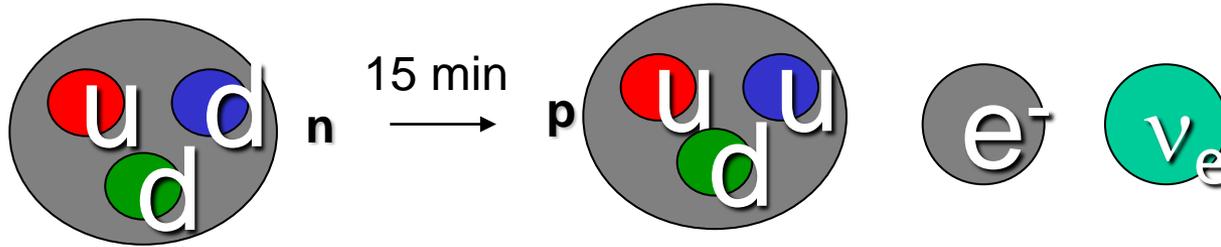
Feynman earned his Nobel for creating these diagrams  
(Courtesy Auckland University)

✓ *Grphe de Feynman pour représenter toutes les interactions entre particules à l'échelle subatomique (ici, annihilation  $e^+e^-$ )*

- **Portée : infinie**
- **Temps caractéristique:**

# L'interaction faible

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

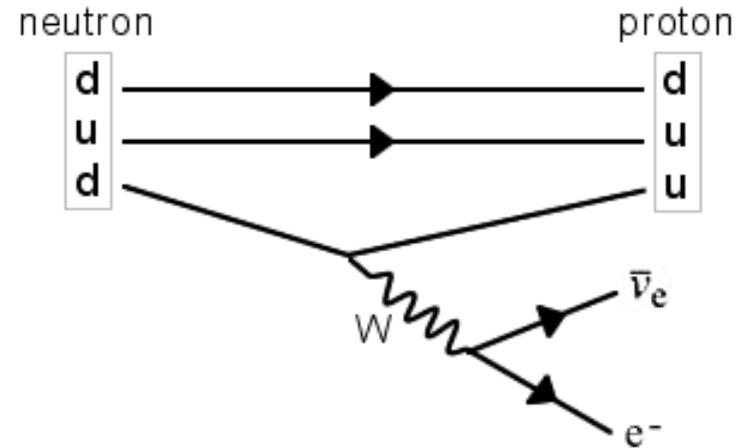


✓ *Au niveau des quarks:*  $d \rightarrow u e^- \nu_e$

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

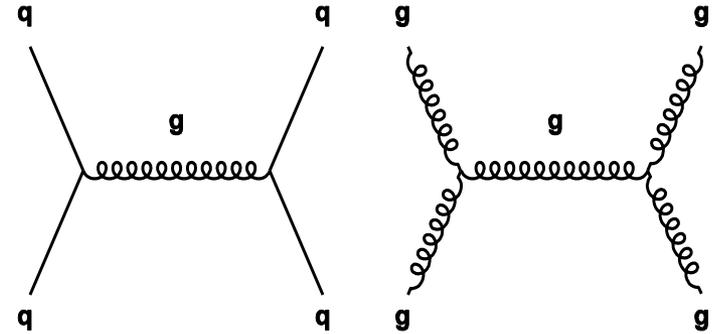
- ✓ *Prédits par la théorie*
- ✓ *Observés expérimentalement*

- 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?*