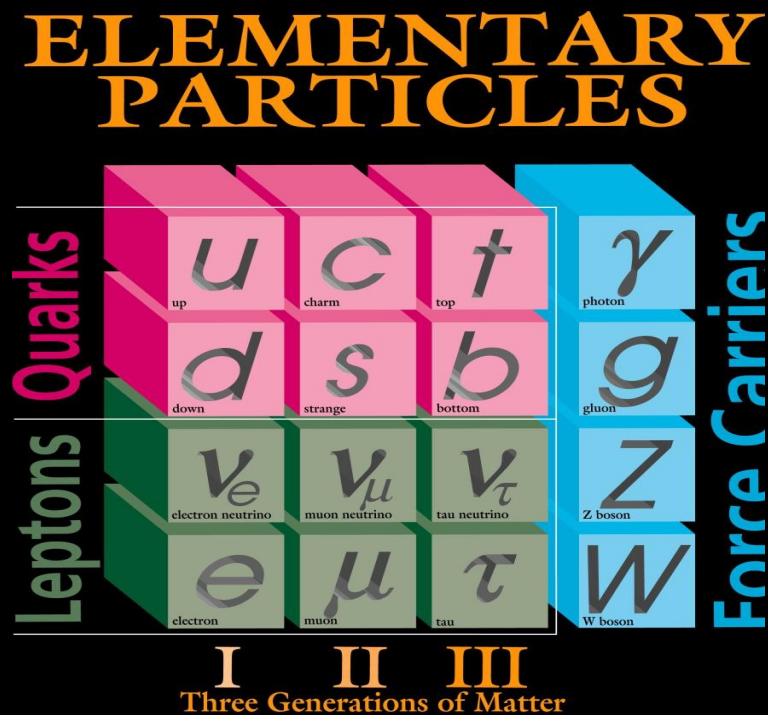


# Introduction à la physique des particules élémentaires



Julien Cogan

# Sommaire

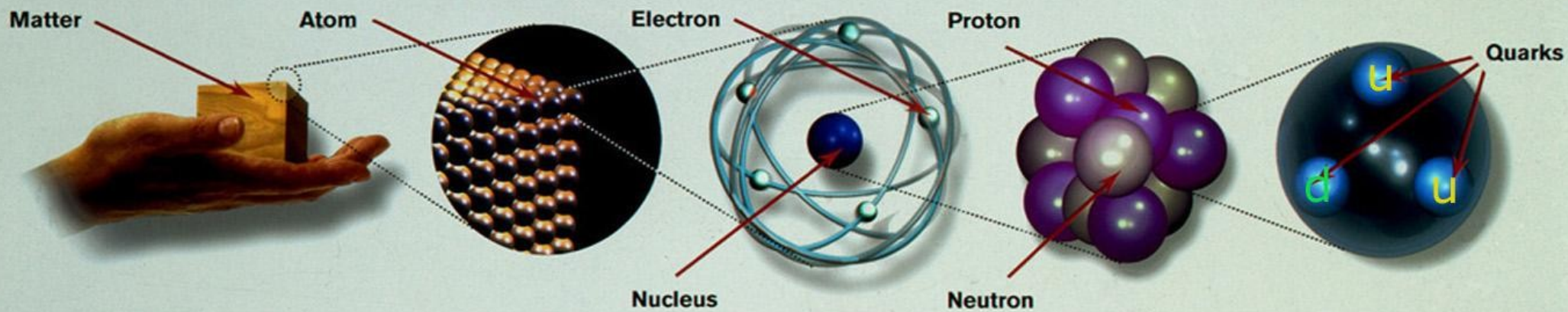
Descente vers l'infiniment petit : structure la matière ordinaire

Le Modèle Standard de la physique des particules

Illustrations

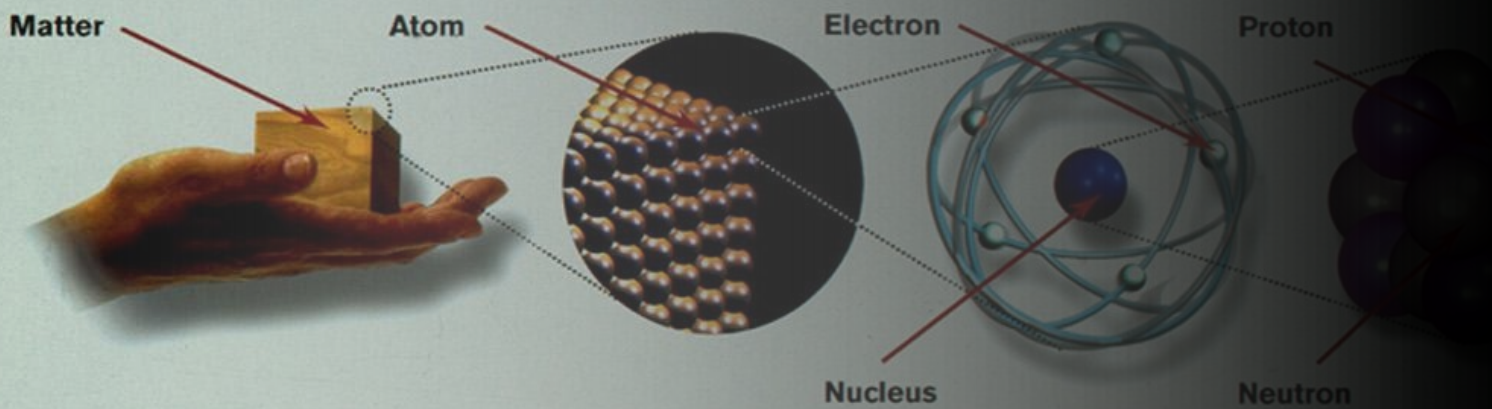
Observations

Conclusion

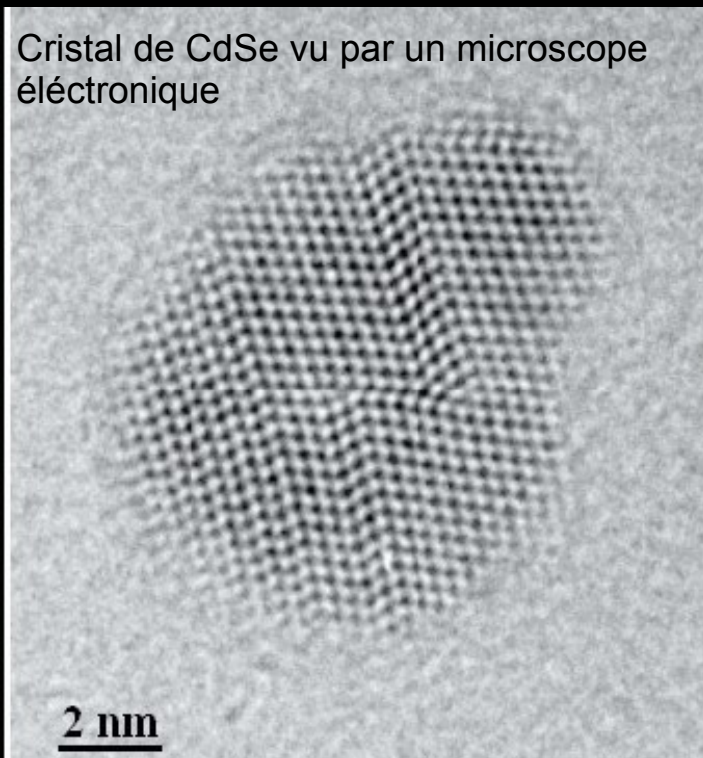


# Descente vers l'infiniment petit

Structure de la matière ordinaire :  
ses constituants élémentaires et leurs interactions



Cristal de CdSe vu par un microscope électronique

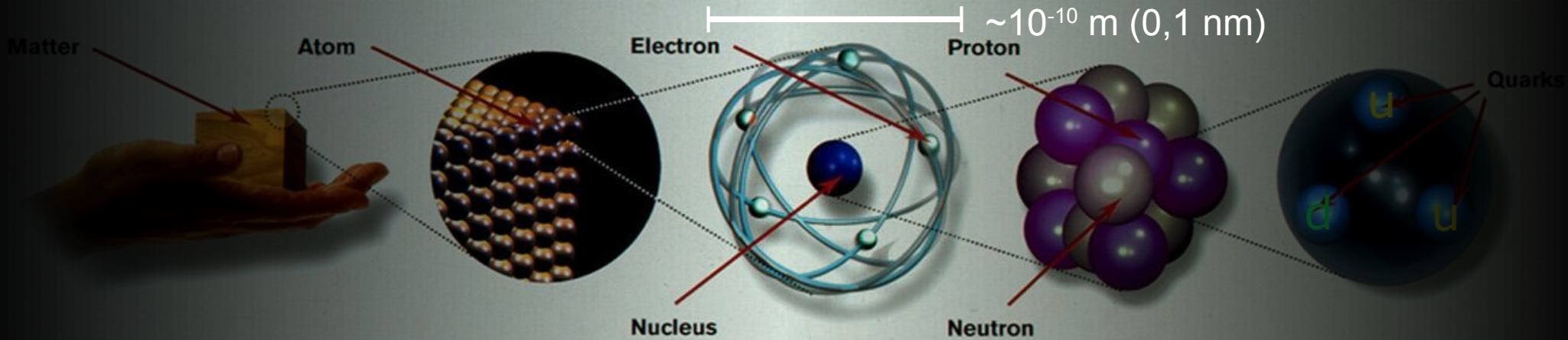


La matière qui nous entoure tient ses propriétés des molécules qui la composent.

Les **molécules** sont un assemblage d'atomes.

*Comment ces molécules se forment ? Comment interagissent-elles ? D'où tirent-elles leurs propriétés ?*

→ structure de l'atome



*Table des éléments atomiques :*

Etat physique du corps simple(25°C,1 atm)		SOLIDE			LIQUIDE			GAZEUX			SYNTHÈSE							
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			
1	H											He						
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									

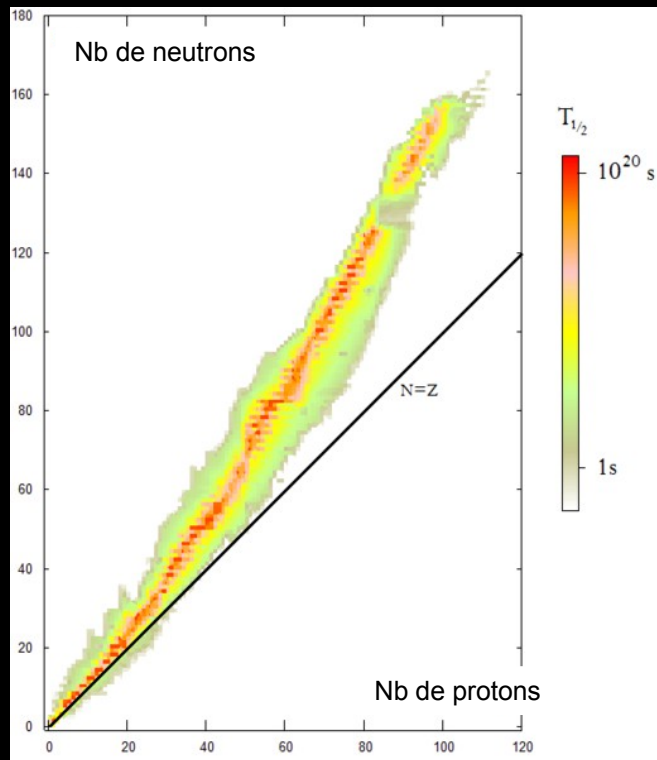
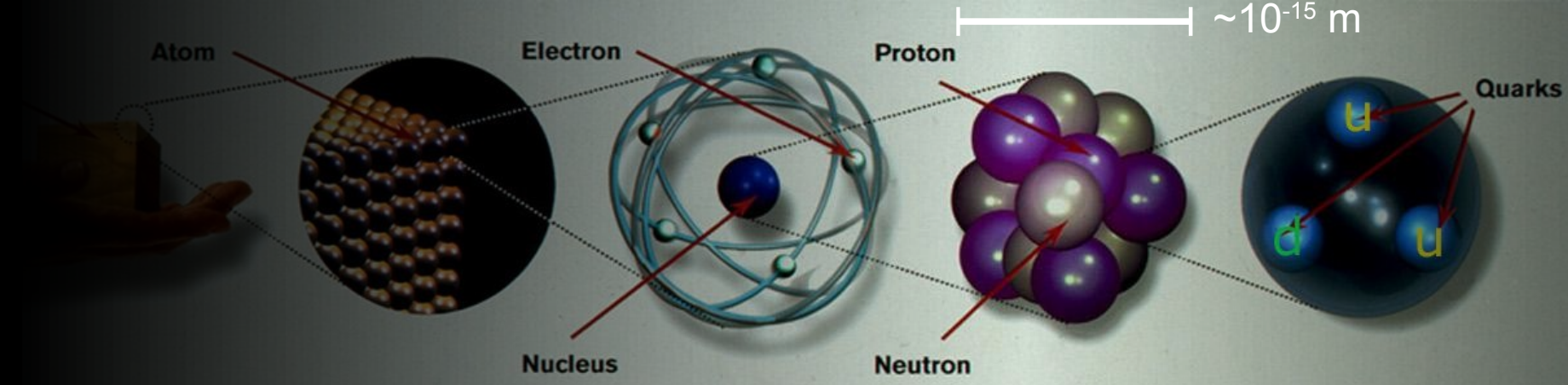
**Atomes composés :**

- d'un noyau
  - ↳ ~100 000 x plus petit que l'atome
- d'un nuage d'électrons en orbite autour du noyau
  - ↳ régit les interactions entre atomes ou molécules

→ **interaction électromagnétique**

*Qu'est-ce qui différencie ces atomes ?*

→ structure du noyau

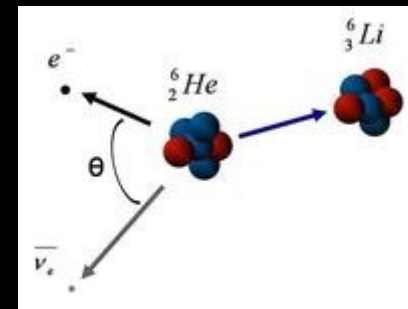


**Noyau** atomique formé de nucléons : protons & neutrons.  
 Le nombre de protons (=nombre d'électrons) détermine la nature de l'élément chimique.

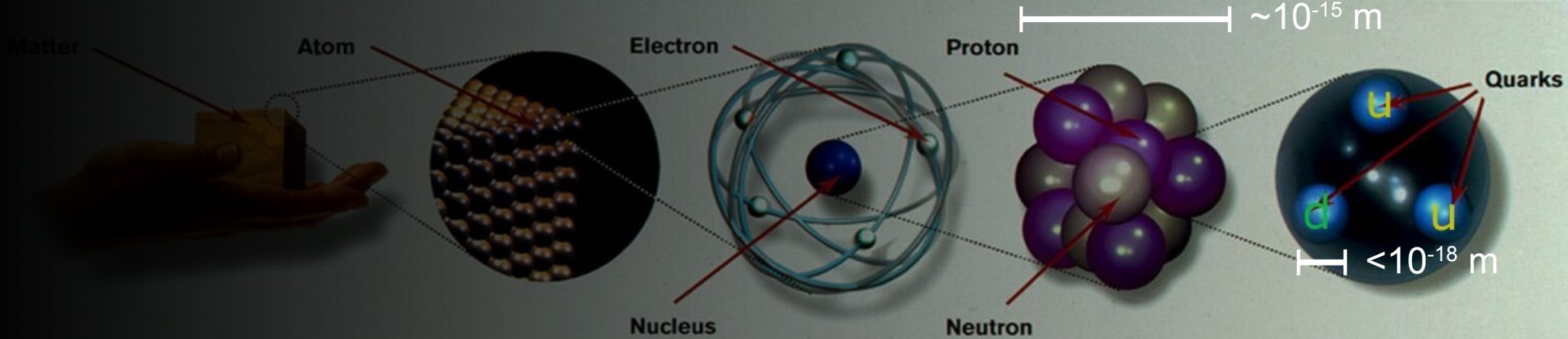
La cohésion du noyau est assurée par l'**interaction forte**  
 La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un **neutrino**, e.g. :  
 → **interaction faible**

Désintégration  $\beta$   
 (Pauli - 1930)



*Qu'est-ce qui différencie les protons et les neutrons ?*  
 → structure du nucléon



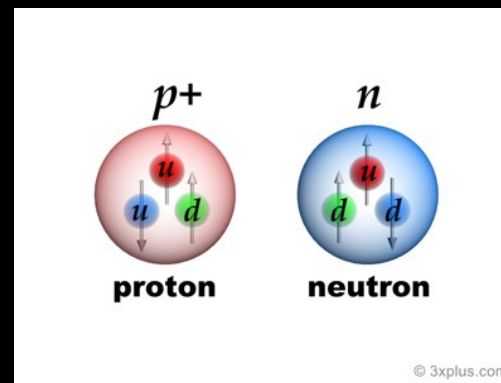
**Nucléons** (protons & neutrons) sont constitués de quarks

2 types de quarks (à ce stade) :

- ↘ Up ( $q=+2/3$ ) : u
- ↘ Down ( $q=-1/3$ ) : d

Teneur en quarks des nucléons :

- ↘ proton ( $q=1$ ) : uud
- ↘ neutron ( $q=0$ ) : udd



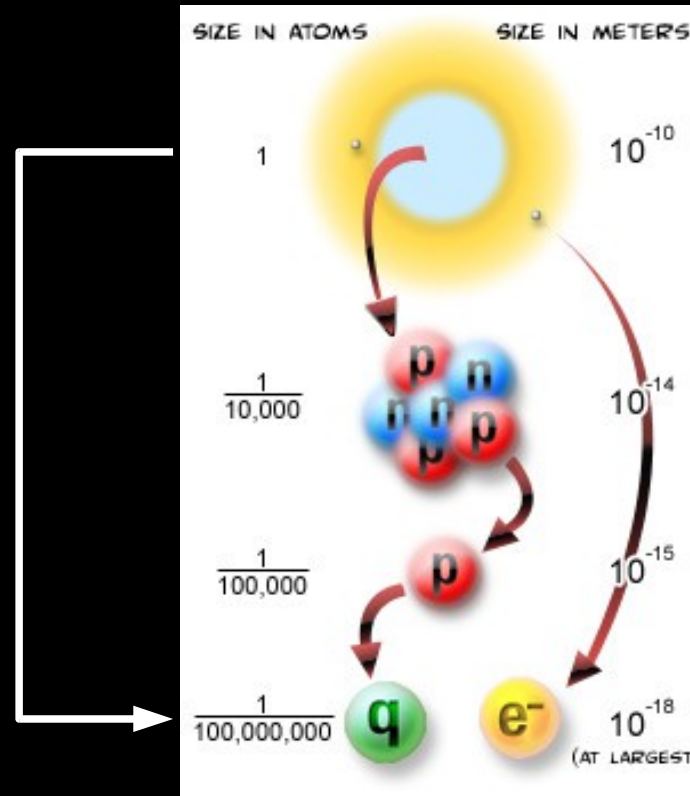
Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

- ↘ on n'observe pas les quarks librement dans l'espace

# Descente vers l'infiniment petit

## La matière ordinaire

8 ordres de grandeur



Quarks, électrons, neutrinos sont des **particules élémentaires**  
→ pas de structure interne (connue à ce jour !)



# Descente vers l'infiniment petit

## La matière ordinaire

Constituants **élémentaires** :

	q	nom	
Quarks	+2/3	up	} sensible à l'interaction forte
	-1/3	down	
Leptons	-1	electron	} ne réagissent pas à l'interaction forte
	0	neutrino	

Interactions fondamentales entre ces constituants :

- gravitation (trop faible : pas de rôle en physique des particules)
- faible (agit sur toutes les particules)
- électromagnétique (agit sur les particules chargées électriquement)
- forte (agit sur les quarks seulement)

# Descente vers l'infiniment petit

## La matière ordinaire

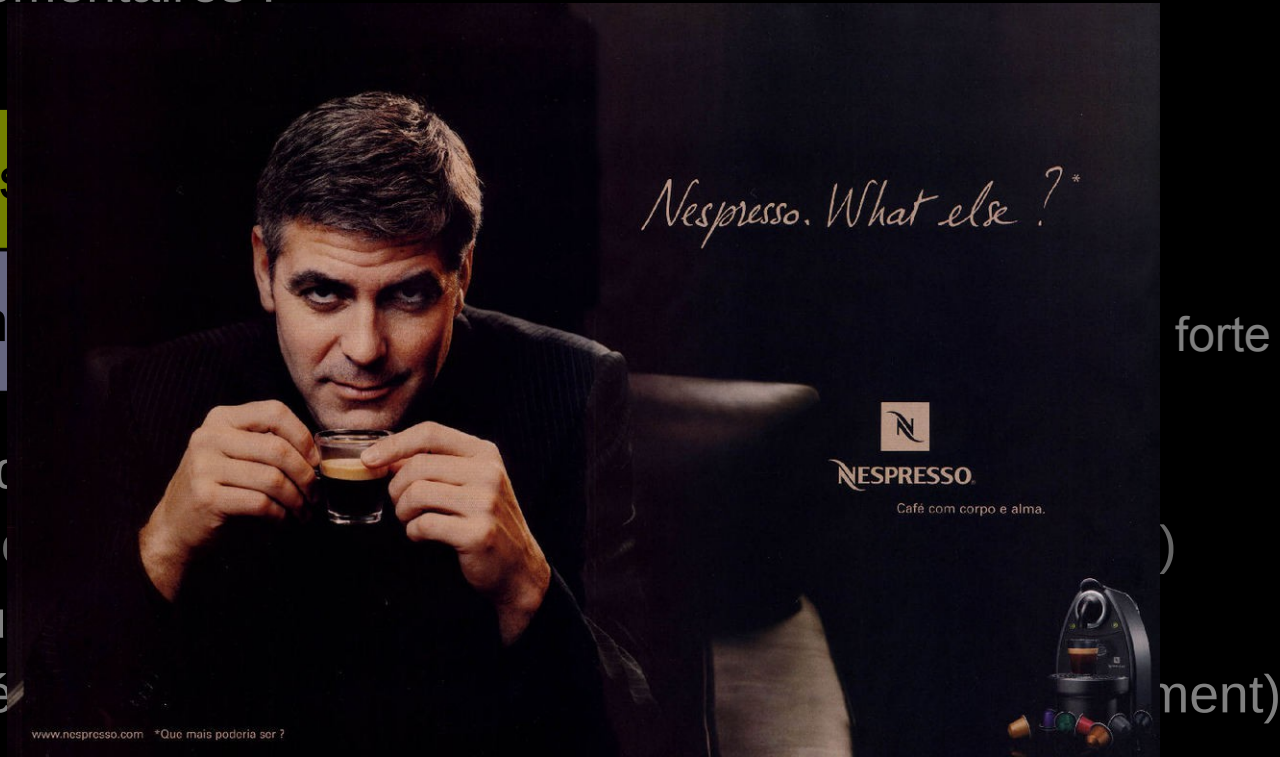
Constituants élémentaires :

Quarks

Lepton

Interactions fondamentales :

- gravitation (très faible)
- faible (agit sur les leptons et les quarks)
- électromagnétique (agit sur les leptons et les quarks)
- forte (agit sur les quarks seulement)



→ **What else ?**

# Descente vers l'infiniment petit

## Autres formes de matière

		1 <sup>ère</sup> famille		2 <sup>ème</sup> famille		3 <sup>ème</sup> famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	$\mu$	tau	$\tau$
	0	neutrino	$\nu_e$	neutrino muon	$\nu_\mu$	neutrino tau	$\nu_\tau$

Il existe 2 autres générations de particules en plus de celles composant la matière ordinaire :

→ même structure (même contenue en quarks et leptons)

‣ **une organisation remarquable !**

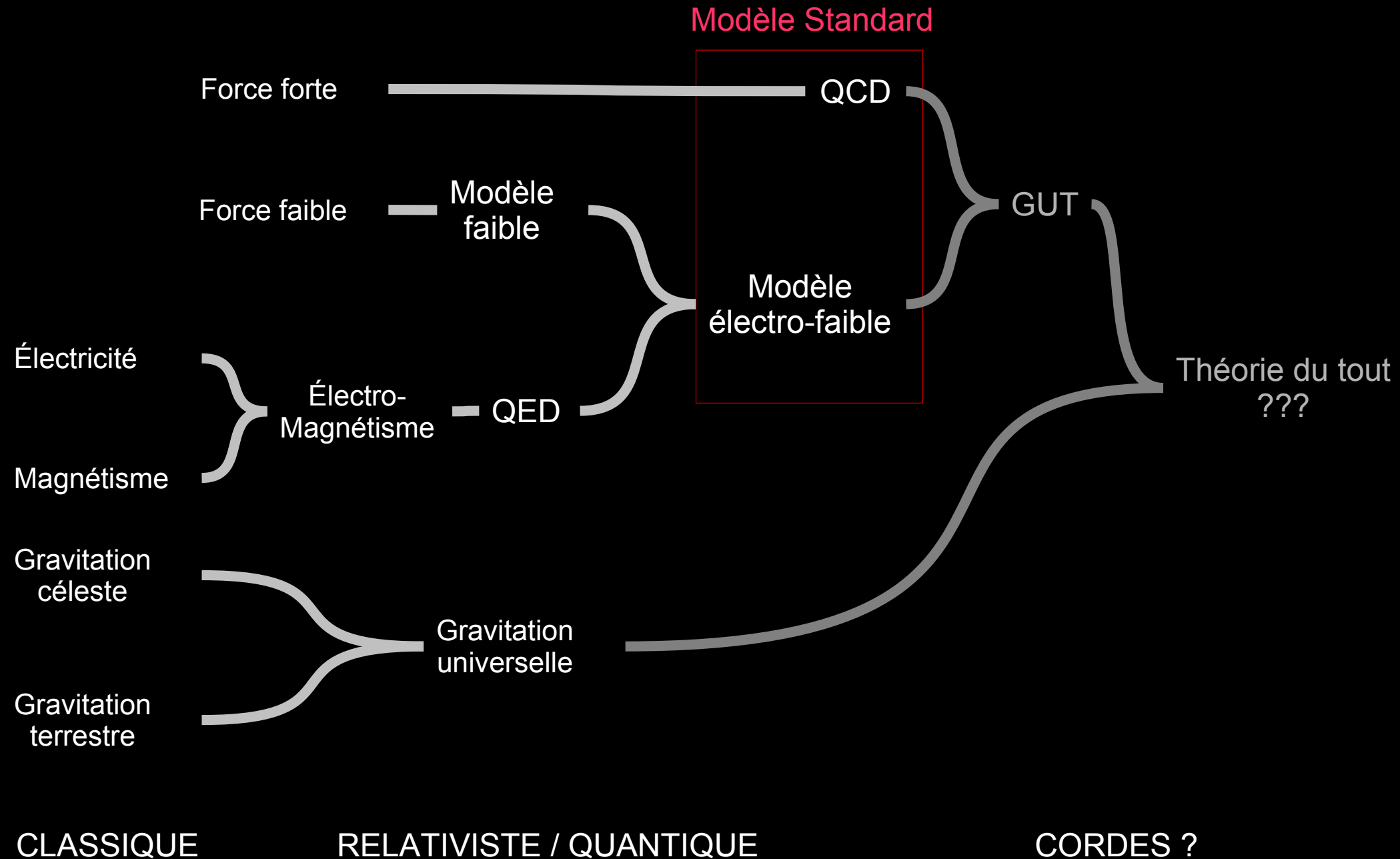
→ dont les particules sont :

‣ **plus lourdes**

‣ **instables** : vont se désintégrer spontanément en donnant des particules plus légères

# Le Modèle Standard

# Théories fondamentales

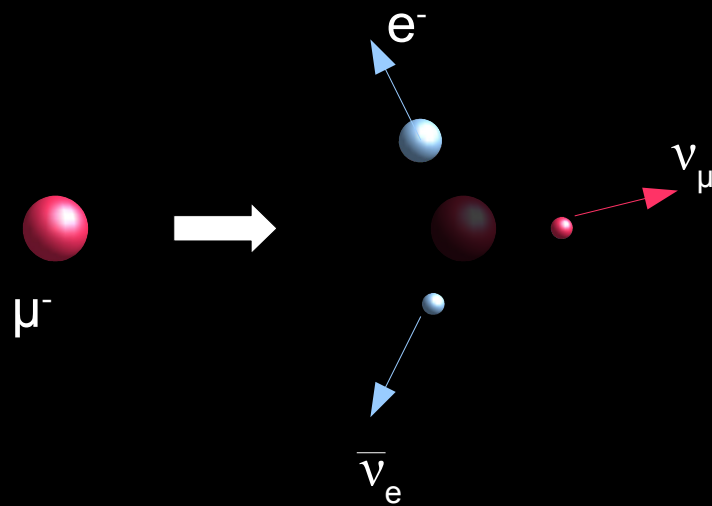


# Le Modèle Standard

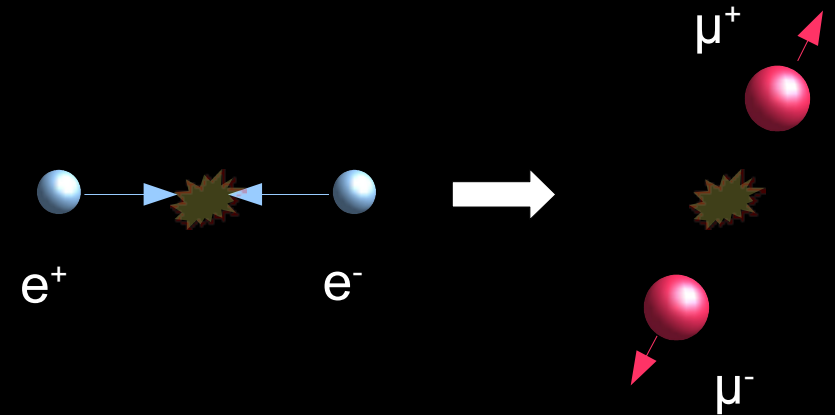
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique* relativiste

Relativiste : adaptée aux vitesses proches de celle de la lumière

→  $E=mc^2$  : équivalence entre matière et énergie



Désintégration du muon



Collision de particules :  
annihilation d'une paire d'électrons ( $e^+e^-$ )  
et création d'une paire de muons ( $\mu^+\mu^-$ )

→ **En mettant en jeu suffisamment d'énergie cinétique, on peut créer des particules très lourdes !**

# Le Modèle Standard

Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*

Quantique : adaptée au monde microscopique

→ dualité onde-corpuscule

↘ onde : effet d'interférence

–  $\lambda$  : longueur d'onde

↘ corpuscule : comportement individuel

–  $P$  : quantité de mouvement

↘ dualité :

–  $\lambda = \hbar/P$  ( $\hbar$  = constante de Planck)

→ **Plus l'énergie est élevée, plus la longueur d'onde est faible (plus on sera sensible à des détails petits)**

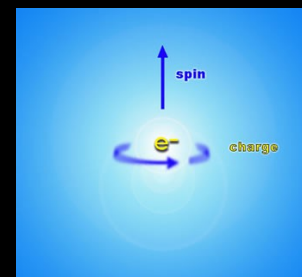
→ propriétés purement quantique

↘ relations d'incertitude (Heisenberg) :

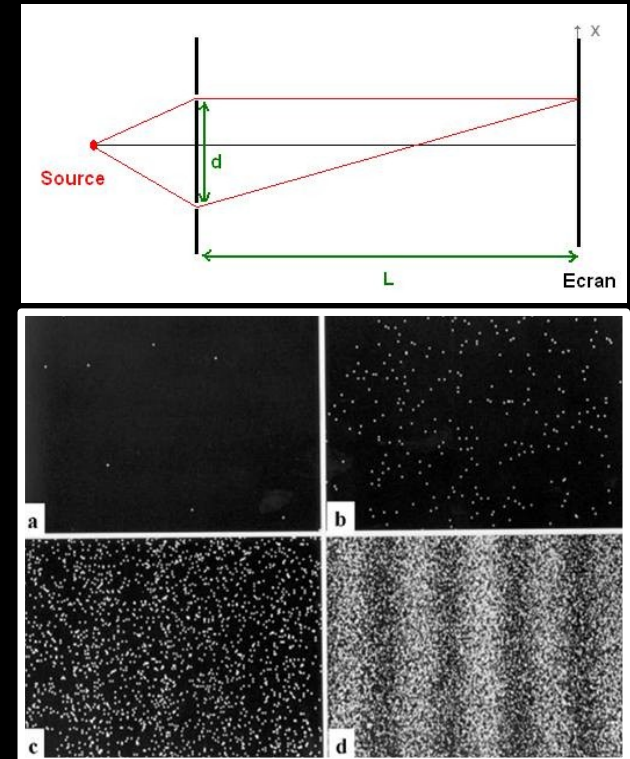
–  $\Delta x \cdot \Delta P > \hbar$

–  $\Delta t \cdot \Delta E > \hbar$

↘ spin :



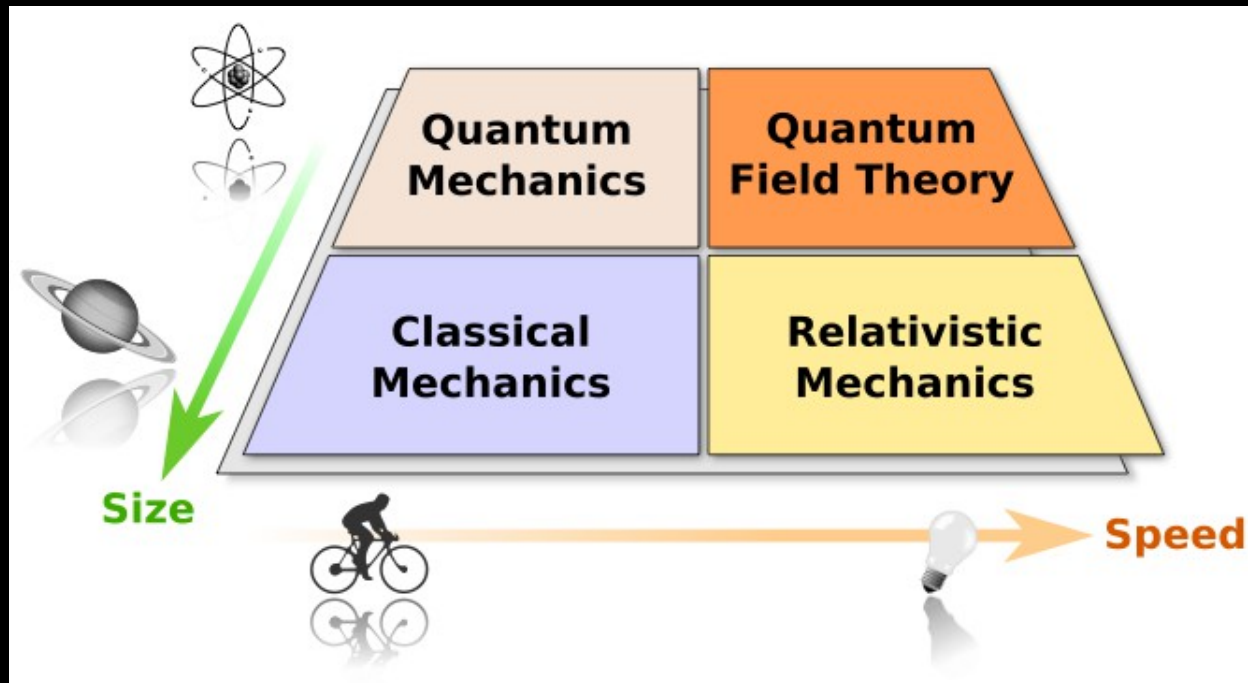
assimilable à une rotation intrinsèque d'une particule (moment angulaire)



Expérience des fentes d'Young

# Le Modèle Standard

Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*



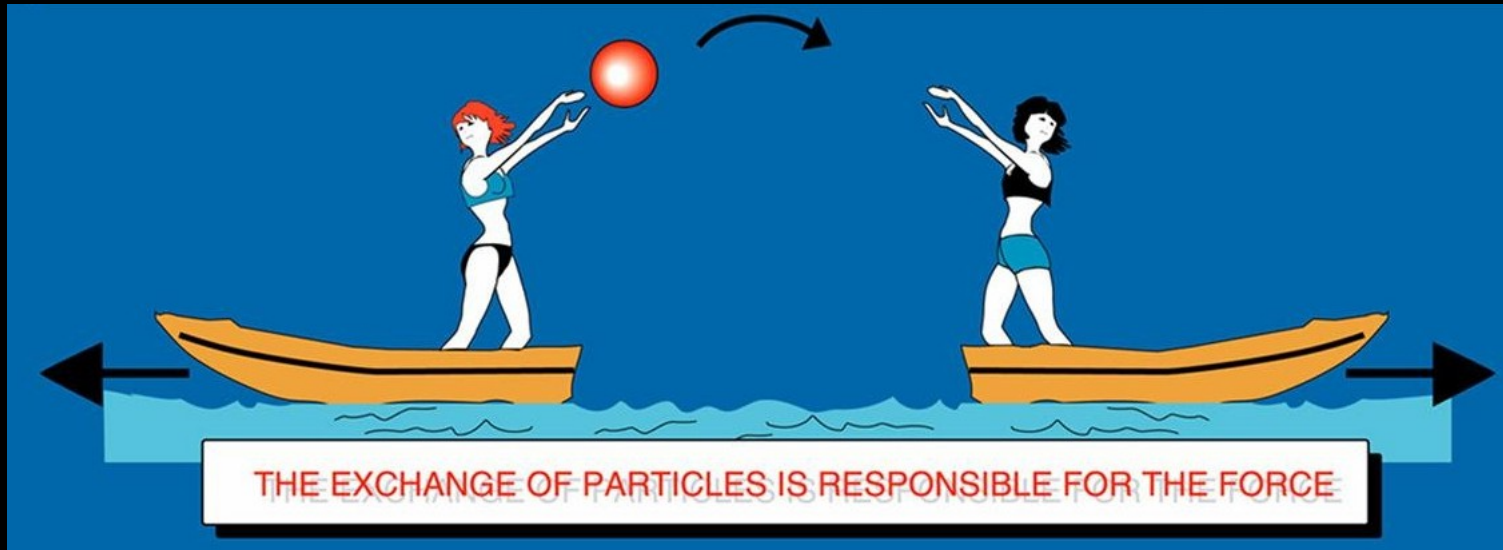
→ Dans ce cadre : description des particules élémentaires et de leur **interactions**



# Le Modèle Standard

## Les interactions

Les vecteurs des interactions :



→ **les forces élémentaires sont véhiculées par des particules**

Les charges des interactions :

- forces interagissent avec les porteurs des charges associées, e.g. :
  - force électromagnétique : charge électrique
  - force forte : charge de couleur ( $b, r, v$ )
- la charge totale d'un système est conservée lors d'une réaction

# Le Modèle Standard

Les particules de matière :  
**les fermions (spin demi-entier)**

Les particules vecteurs de forces :  
**les bosons (spin entier)**

## Particles

### Leptons

Particle	Electric Charge	Particle	Electric Charge
Tau	-1	Tau Neutrino	0
Muon	-1	Muon Neutrino	0
Electron	-1	Electron Neutrino	0

### Quarks

Particle	Electric Charge	Particle	Electric Charge
Bottom	-1/3	Top	2/3
Strange	-1/3	Charm	2/3
Down	-1/3	Up	2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

The particle drawings are simple artistic representations

## Forces

### Strong

**Gluons (8)**

**Quarks**

**Mesons Baryons**

**Nucléi**

### Electromagnetic

**Photon**

**Atoms Light Chemistry Electronics**

### Gravitational

**Graviton ?**

**Solar system Galaxies Black holes**

### Weak

**Bosons (W,Z)**

**Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun**

The particle drawings are simple artistic representations

# Le Modèle Standard

## L'antimatière

A toute ces particules, il faut adjoindre une **antiparticule**, c.à.d. une particule :

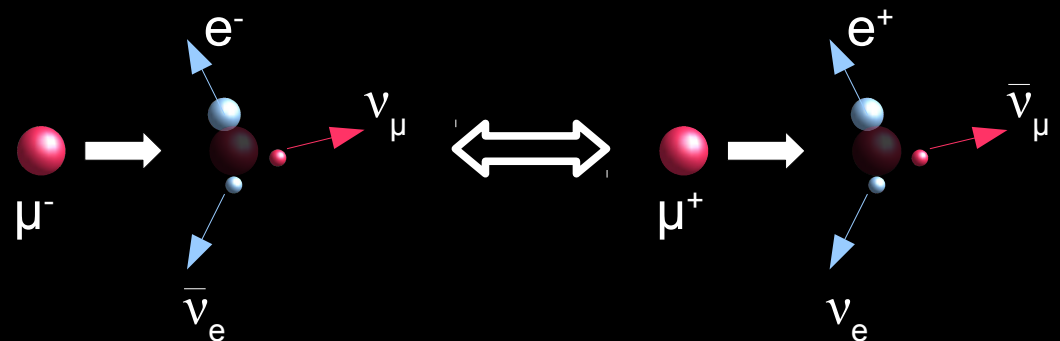
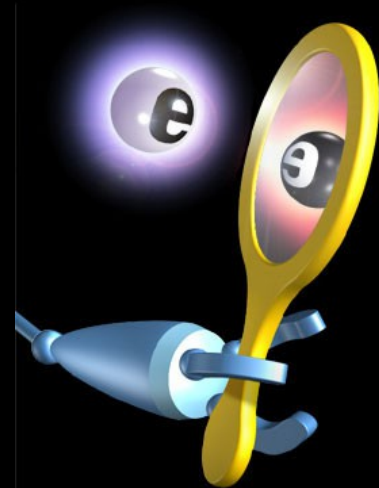
- de même masse et de même spin
- autres nombres quantiques renversés
  - e.g. : charge électrique
- notation courante :  $\bar{b}$  antiparticule associée au quark  $b$

Certaines particules sont leurs propres antiparticules, e.g. :

- le photon

Les antiparticules se comportent comme les particules (vu dans un miroir)

- en première approximation
- en réalité, la symétrie n'est pas parfaite
  - sujet d'étude très actif



# Digression : les unités

Unité d'énergie : l'électron-Volt (eV)

→ 1 eV = énergie acquise par un électron accéléré par un champ électrique de 1V

→ 1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joules

→ Multiples usuels :

□ 1 keV =  $10^3$  eV

□ 1 MeV =  $10^6$  eV

□ 1 GeV =  $10^9$  eV

□ 1 TeV =  $10^{12}$  eV

Unité de masse : ( $E=mc^2$ , équivalence masse-énergie)

→  $1 \text{ eV}/c^2 = 1,8 \cdot 10^{-36}$  kg

→ exemples :

□ proton :  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg = 938 MeV/ $c^2$

□ électron :  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg = 0.511 MeV/ $c^2$

→ Dans ce cadre : description des particules élémentaires et de leur interactions

# Le Modèle Standard

## La masse des particules

### FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

#### Leptons spin = 1/2

#### Quarks spin = 1/2

	Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	
~ 0	$\nu_L$ lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	
1	<b>e</b> electron	0.000511	-1	
~ 0	$\nu_M$ middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	
200	$\mu$ muon	0.106	-1	
~ 0	$\nu_H$ heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	
3500	$\tau$ tau	1.777	-1	
	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	
	<b>u</b> up	0.002	2/3	4
	<b>d</b> down	0.005	-1/3	10
	<b>c</b> charm	1.3	2/3	3000
	<b>s</b> strange	0.1	-1/3	200
	<b>t</b> top	173	2/3	340000
	<b>b</b> bottom	4.2	-1/3	8000





# Le Modèle Standard

## La masse des particules


### BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

#### Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
 photon	0	0
 <b>W<sup>-</sup></b>	80.39	-1
 <b>W<sup>+</sup></b> W bosons	80.39	+1
 <b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	91.188	0

#### Strong (color) spin = 1

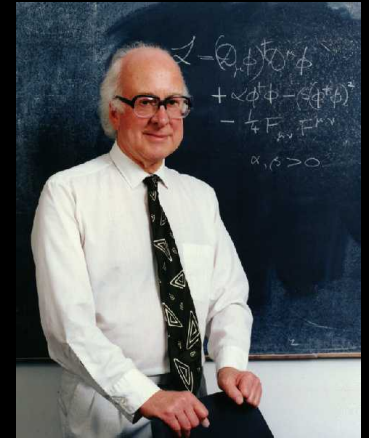
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
 gluon	0	0

# Le Modèle Standard

## L'origine des masses

Dans la théorie, les particules sont sans masse.

Pour les faire apparaître : **mécanisme de Higgs**



Le physicien britannique  
Peter Higgs



# Le Modèle Standard

## L'origine des masses

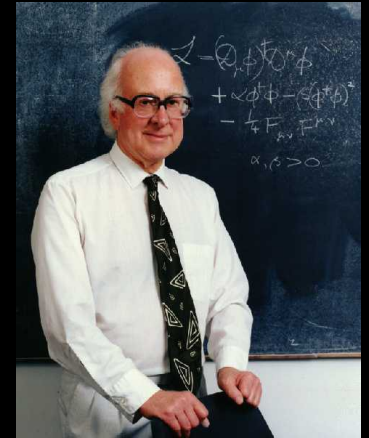
Dans la théorie, les particules sont sans masse.

Pour les faire apparaître : mécanisme de Higgs

Implique l'existence d'un bosons supplémentaire :

→ le boson de Higgs

Pas encore observé mais activement recherché



Le physicien britannique  
Peter Higgs





# Le Modèle Standard

Tout est là :

→ la **matière** : les fermions fondamentaux

- ↘ 6 quarks + 6 antiquarks
- ↘ 6 leptons + 6 antileptons

→ les vecteurs des **interactions**

- ↘ 8 gluons pour l'interaction forte
- ↘  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $\gamma$  pour l'interaction électrofaible

→ le **boson de Higgs**

- ↘ par lequel les particules acquièrent leur masse
- ↘ le chaînon manquant

Particules déjà observées

Mesures

- de plus en plus précises
- s'accordent avec les prédictions du modèle (jusqu'à présent)

Pas encore vu !

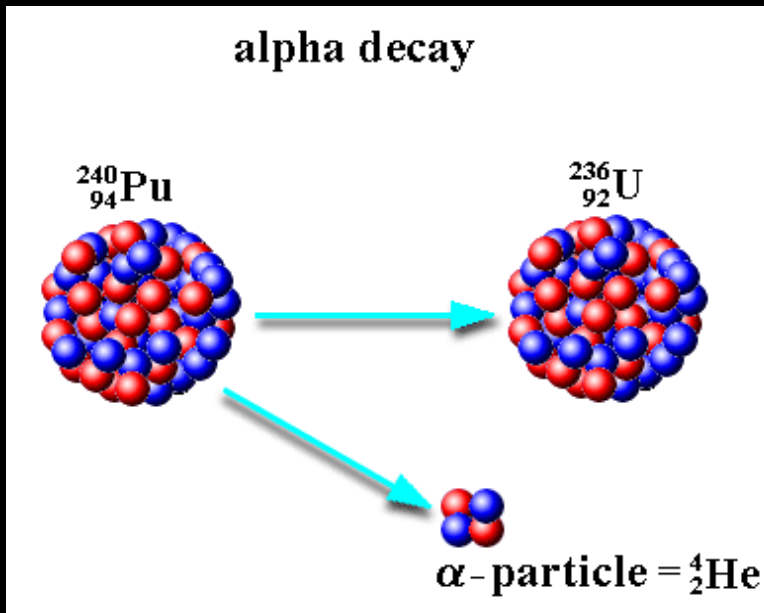
Activement recherché

# Illustrations

# Désintégrations

Qu'est-ce qu'une désintégration ?

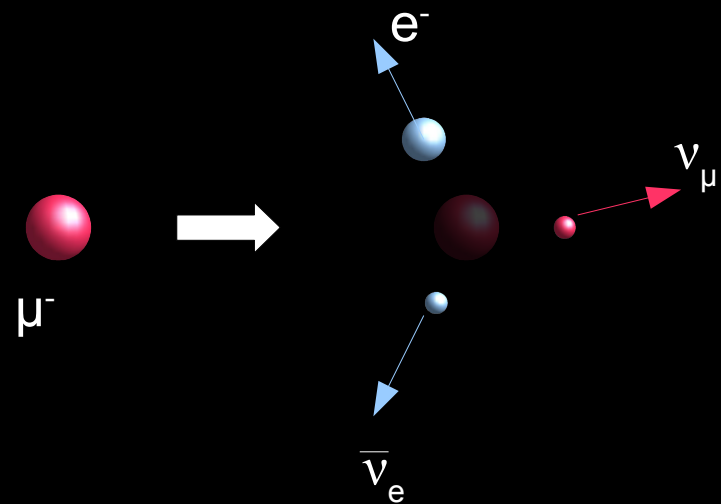
Désintégration nucléaire



Séparation des nucléons :

- le noyau initial (Pu) se scinde en 2 :
- pas de modification des constituants

Désintégration d'une particule élémentaire



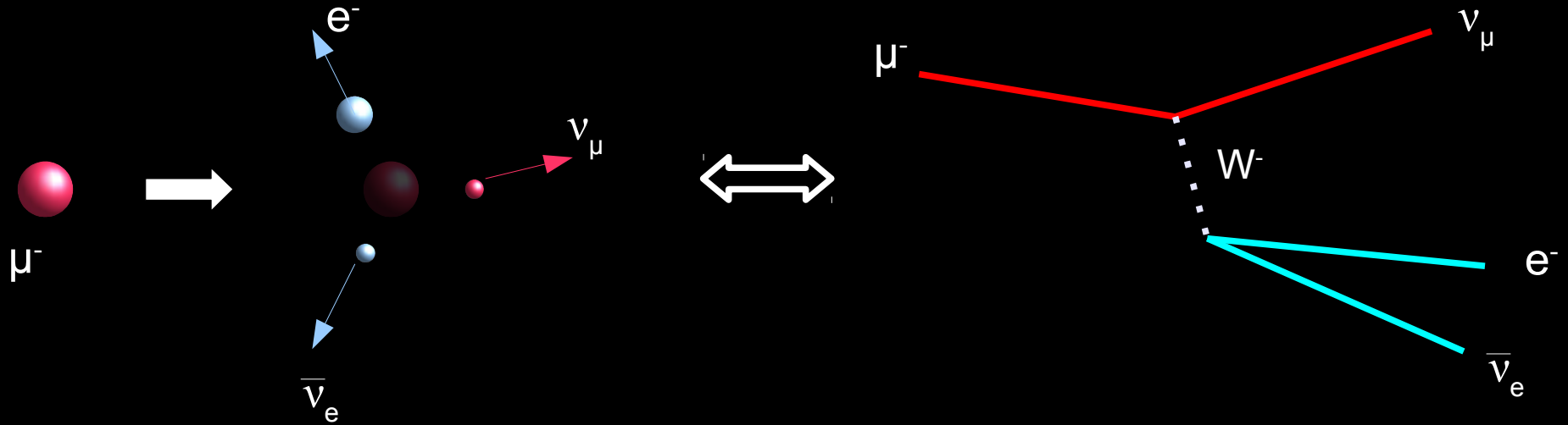
Transformation de la particule initiale :

- disparition de la particule initiale
- apparition de particules de natures différentes

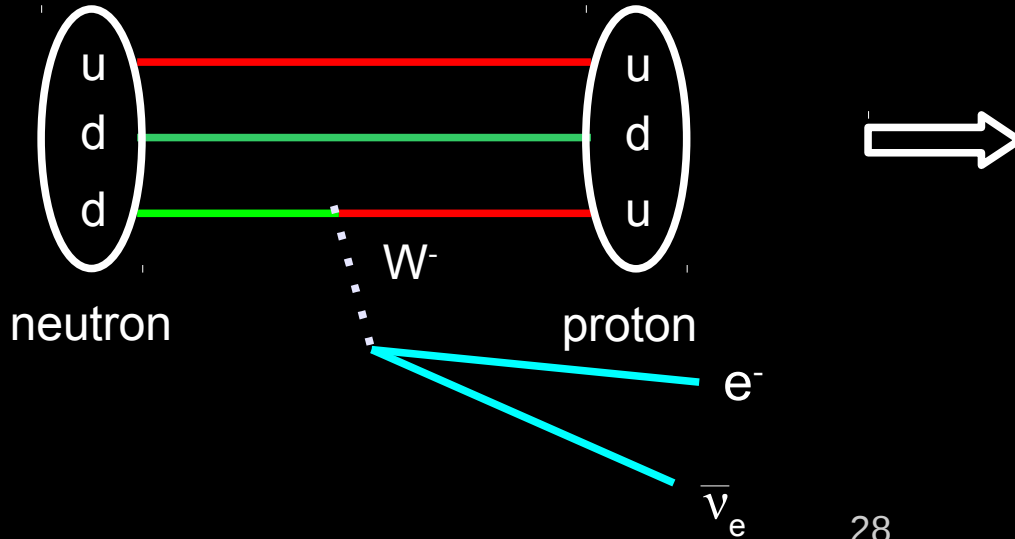
# Désintégrations

## Exemples

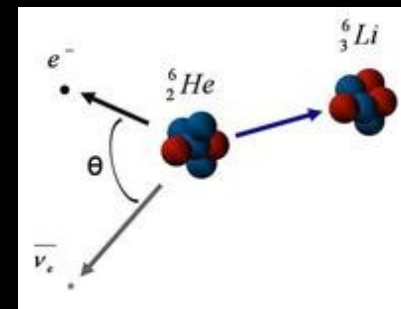
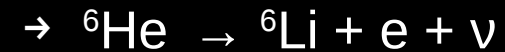
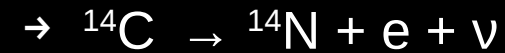
Désintégration du muon :  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$



Désintégration du neutron :  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$



C'est ce qui se passe dans le noyau dans les désintégrations «β»



# Désintégrations

## La force (électro-)faible en action

Loi de conservation :

→ l'**énergie totale**

□ désintégration de particules lourdes vers des particules plus légères, le surcroît étant transformé en énergie cinétique

→ le **nombre leptonique**

□ e.g. si il y a 1 lepton muonique en entrée, on doit en retrouver un à la sortie

→ la **charge électrique**

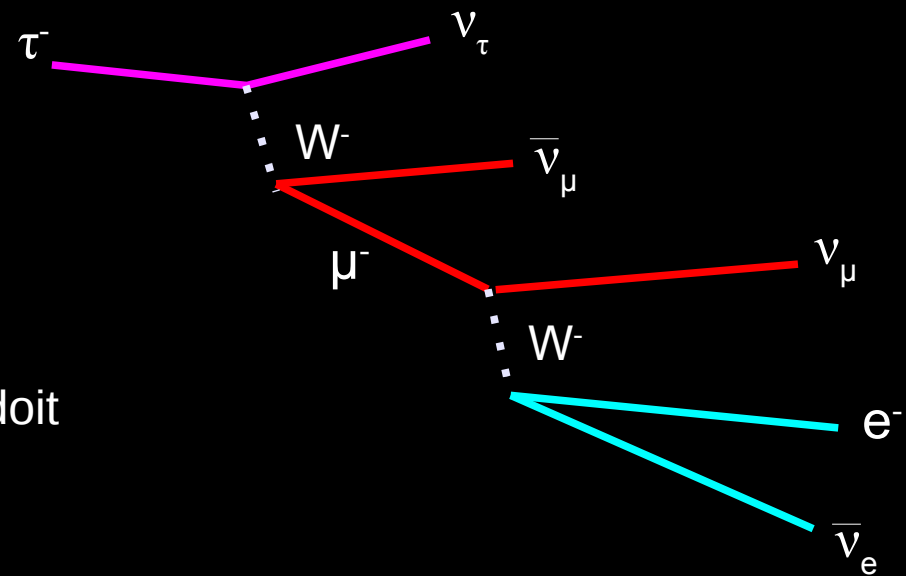
→ ...

Force faible :

→ autorise le changement de nature (saveur) des quarks

→ responsable de toute les désintégrations des particules élémentaires

□ seules les plus légères sont stables



D'une façon générale :

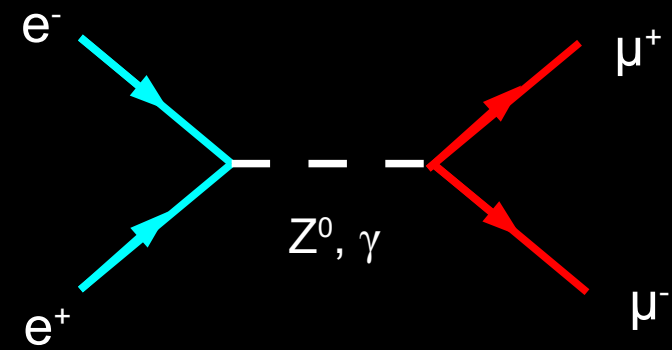
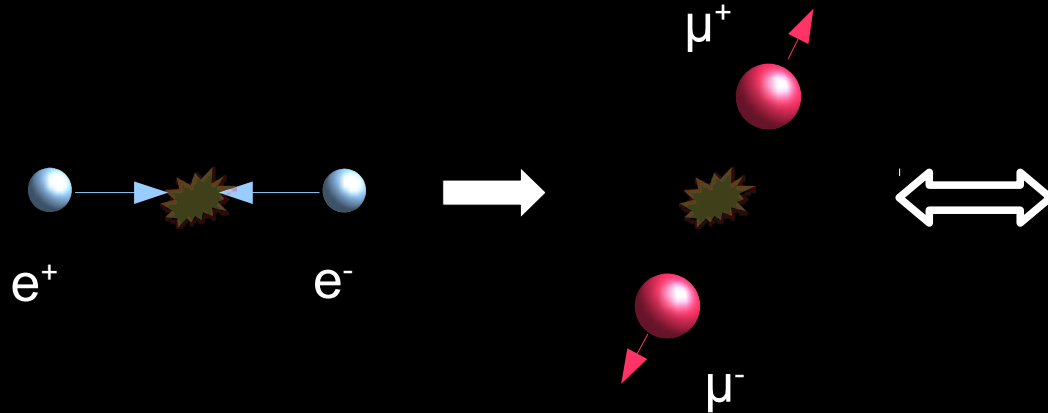
Toute particule pouvant se désintégrer le fait :

- multiples états finaux possibles
- temps de vie dépend du nombre d'états finaux et des interactions en jeu

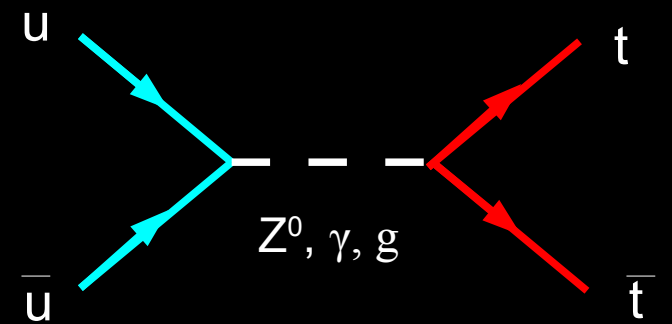
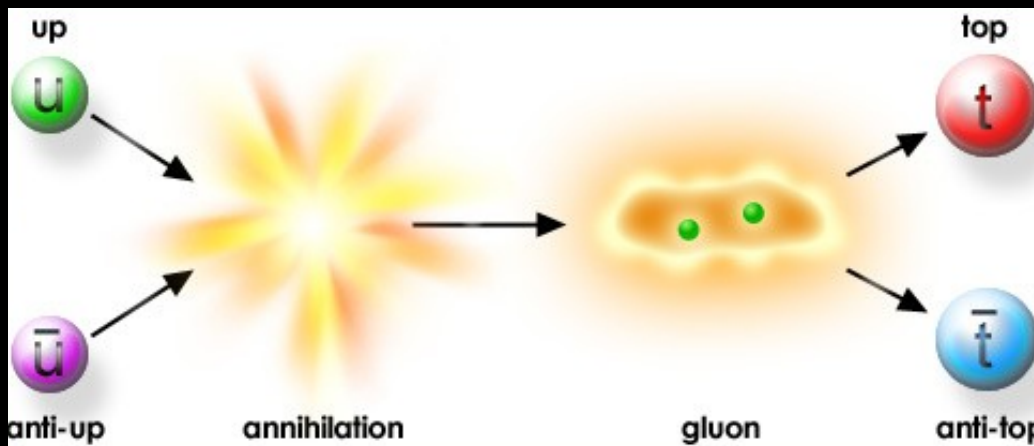
# Annihilations

## Exemples

Annihilation  $e^+e^-$  (interaction faible)



Annihilation  $q\bar{q}$



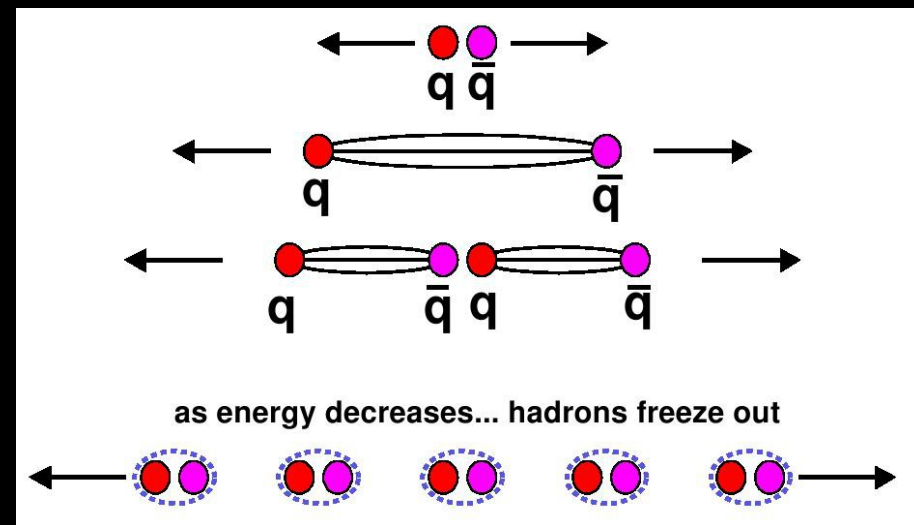
→ réactions possibles si assez d'énergie cinétique à transformer en masse

# Interaction forte

## Hadronisation

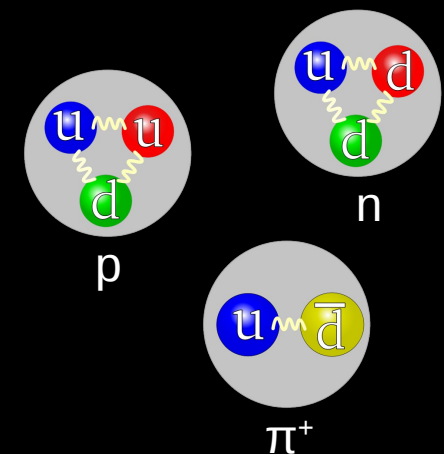
L'interaction forte agit comme un élastique :

- son intensité augmente avec la distance ( 1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )



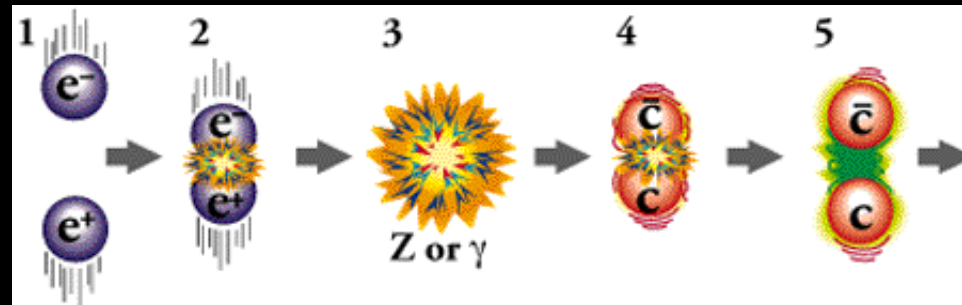
Conséquence : Les quarks sont confinés dans des « hadrons »

- **baryon** : composé de 3 quarks de couleurs différentes
- **méson** : composé de 2 quarks de couleurs opposées

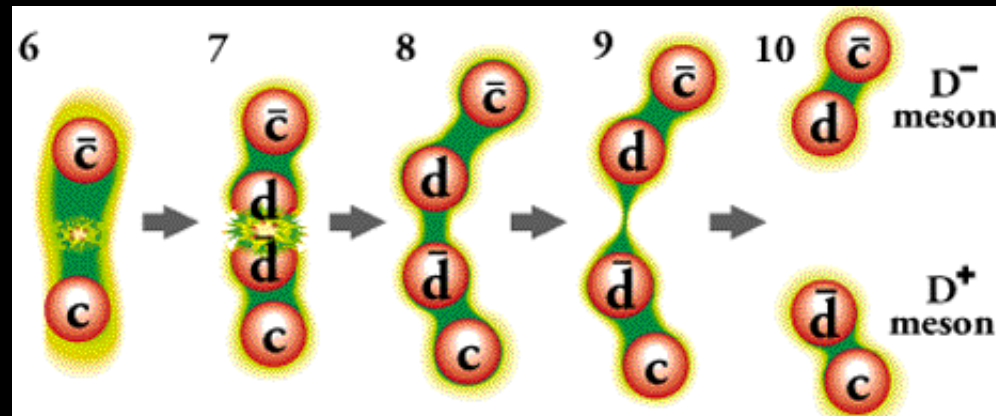


# Un exemple complet

Annihilation électron-positron et création d'une paire de quarks (*int. faible*) :



Hadronisation des quarks (*int. forte*):





# Les particules composites

Le zoo des baryons et mésons

... et leurs modes de désintégration

**Baryons:**  
 p (uud) proton, n (udd) neutron,  $\Omega$  (sss) hyperion omega,  $\Sigma^0$  (uus) hyperion sigma,  $\Sigma^-$  (uds) hyperion sigma,  $\Sigma^+$  (dds) hyperion sigma,  $\Xi^0$  (uus) hyperion cascade,  $\Xi^-$  (uds) hyperion cascade,  $\Lambda_c$  (uud) hyperion charme,  $\Lambda^0$  (uds) hyperion lambda.

**Mesons:**  
 $\pi$  (quark-antiquark) pion,  $\pi^0$  pion,  $\kappa^0$  (quark-antiquark) kaon,  $\kappa^+$  (quark-antiquark) kaon,  $\eta^0$  eta,  $\phi$  (quark-antiquark) phi,  $\psi$  (charm-anticharm) psi,  $Y$  (bottom-antibottom) upsilon,  $\rho^0$  rho,  $\rho^+$  rho,  $\omega$  (quark-antiquark) omega,  $F^+$  (charm-anticharm) F+ charme,  $D^0$  (charm-antiquark) D0 charme,  $D^+$  (charm-antiquark) D+ charme.

**$J/\psi(1S)$**   $J^G(J^PC) = 0^-(1^{--})$

Mass  $m = 3096.916 \pm 0.011$  MeV  
 Full width  $\Gamma = 92.9 \pm 2.8$  keV ( $S = 1.1$ )  
 $\Gamma_{ee} = 5.55 \pm 0.14 \pm 0.02$  keV

$J/\psi(1S)$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level	$\rho$ (MeV/c)
hadrons	(87.7 $\pm$ 0.5 ) %		—
virtual $\gamma \rightarrow$ hadrons	(13.50 $\pm$ 0.30 ) %		—
$ggg$	(64.1 $\pm$ 1.0 ) %		—
$\gamma gg$	( 8.8 $\pm$ 0.5 ) %		—
$e^+ e^-$	( 5.94 $\pm$ 0.06 ) %		1548
$e^+ e^- \gamma$	[a] ( 8.8 $\pm$ 1.4 ) $\times 10^{-3}$		1548
$\mu^+ \mu^-$	( 5.93 $\pm$ 0.06 ) %		1545
<b>Decays involving hadronic resonances</b>			
$\rho\pi$	( 1.69 $\pm$ 0.15 ) %	S=2.4	1448
$\rho^0\pi^0$	( 5.6 $\pm$ 0.7 ) $\times 10^{-3}$		1448
$a_2(1320)\rho$	( 1.09 $\pm$ 0.22 ) %		1123
$\omega\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$	( 8.5 $\pm$ 3.4 ) $\times 10^{-3}$		1392
$\omega\pi^+\pi^-\pi^0$	( 4.0 $\pm$ 0.7 ) $\times 10^{-3}$		1418
$\omega\pi^+\pi^-$	( 8.6 $\pm$ 0.7 ) $\times 10^{-3}$	S=1.1	1435
$\omega f_2(1270)$	( 4.3 $\pm$ 0.6 ) $\times 10^{-3}$		1142
$K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$	( 2.3 $\pm$ 0.7 ) $\times 10^{-4}$		1266
$K^*(892)^\pm \bar{K}^*(892)^\mp$	( 1.00 $\pm$ 0.22 $\pm$ 0.40 ) $\times 10^{-3}$		1266
$K^*(892)^\pm \bar{K}^*(800)^\mp$	( 1.1 $\pm$ 1.0 $\pm$ 0.6 ) $\times 10^{-3}$		—
$\eta K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$	( 1.15 $\pm$ 0.26 ) $\times 10^{-3}$		1003
$K^*(892)^0 \bar{K}_2^*(1430)^0 + c.c.$	( 6.0 $\pm$ 0.6 ) $\times 10^{-3}$		1012
$K^*(892)^0 \bar{K}_2^*(1770)^0 + c.c. \rightarrow K^*(892)^0 K^- \pi^+ + c.c.$	( 6.9 $\pm$ 0.9 ) $\times 10^{-4}$		—
$\omega K^*(892) \bar{K} + c.c.$	( 6.1 $\pm$ 0.9 ) $\times 10^{-3}$		1097
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c.$	( 5.12 $\pm$ 0.30 ) $\times 10^{-3}$		1373
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c. \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	( 1.97 $\pm$ 0.20 ) $\times 10^{-3}$		—
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c. \rightarrow K^0 K^\pm \pi^\mp$	( 3.0 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$		—

# Observation

# Sources

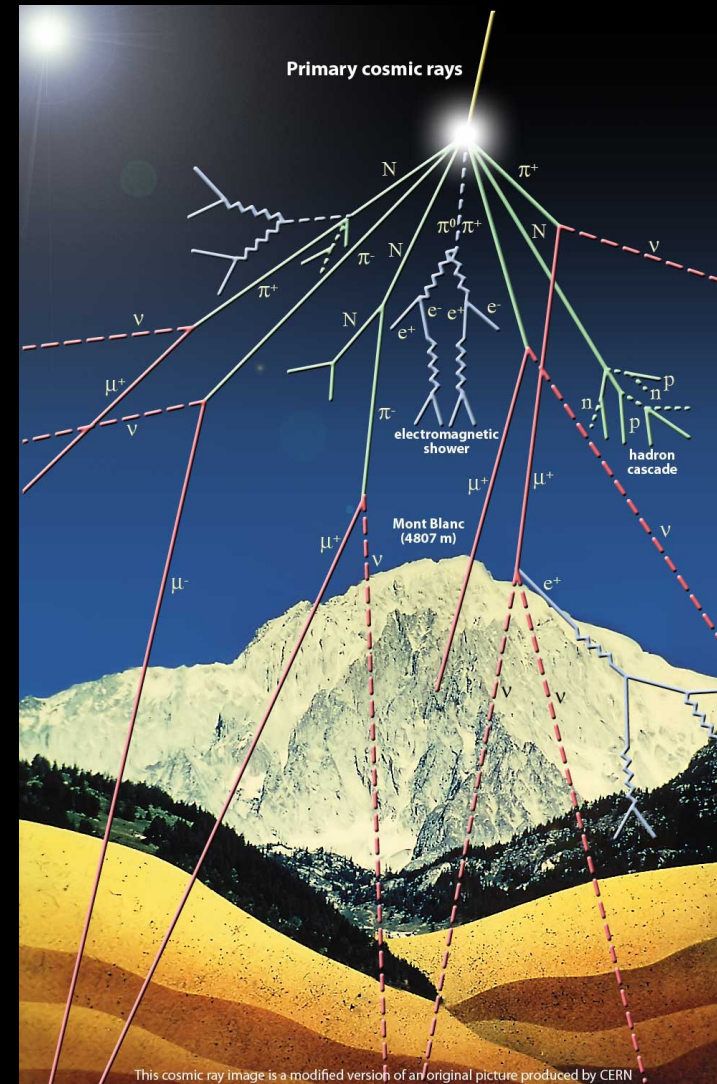
Comment créer les particules que l'on veut découvrir ou étudier ?

→ sources naturelles :  
↳ e.g. rayons cosmiques

2012 : célébration des 100 ans de la découverte des rayons cosmiques

Ont permis la découverte :

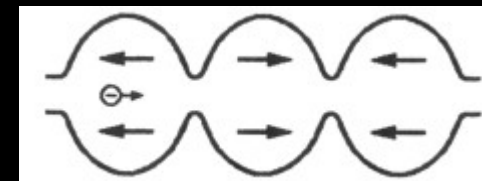
- du positron
- du muon
- de particules étranges
- ...



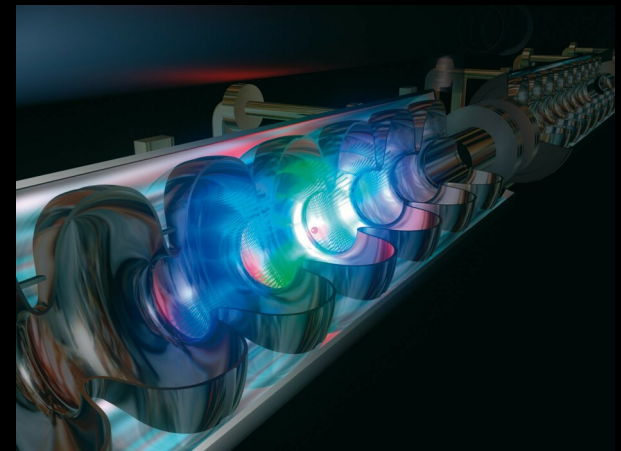
# Sources

Comment créer les particules que l'on veut découvrir ou étudier ?

- sources naturelles :
  - ↘ e.g. rayons cosmiques
  
- mettre suffisamment d'énergie en jeu pour les créer ( $E > mc^2$ )
  - ↘ accélérateurs de particules  
accélération de particules chargées dans des champs électriques
  - ↘ cible ou collisions
  
- ensuite on observe
  - ↘ les particules suffisamment stables, i.e. qui vivent assez longtemps pour être vus
  - ↘ ou bien, leurs produits de désintégration



cavité accélératrice



# Conclusion

# Les questions en suspens

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes observés en laboratoire de l'eV au TeV

→ il reste un élément prédit par le Modèle non encore observé : le Higgs

Pour autant, il reste insatisfaisant :

→ pourquoi **3 familles** de particules ?

→ pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g.  $m(t) \sim 10^5 m(u)$  !

→ le MS décrit la force électromagnétique et la force faible comme une seule et même force (la force électrofaible).

- pourquoi la force forte est-elle si différente ?
- GUT (Grand Unified Theory) ? SUSY ?
- quid de la gravitation ?

→ il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

De plus, l'astronomie & la cosmologie montre que :

→ **96%** de l'énergie de l'univers est d'origine inconnue (**énergie noire**)

→ **75%** de la matière dans l'univers est d'origine inconnue (matière noire)

**→ Qu'y a-t-il au delà du Modèle Standard ?**

# Au delà du Modèle Standard ?

Comment y accéder ?

Les clefs :

- $E=mc^2$  !! Pour produire des particules très massive (bosons de Higgs, particules supersymétriques), il faut mettre en jeu suffisamment d'énergie dans les collisions
- Pour voir des effets fins et rares, il faut produire un très grand nombre de collisions

Réponse ?

Le Large Hadron Collider (**LHC**) construit au CERN près de Genève sur la frontière franco-suisse et ses détecteurs ...

# Backup

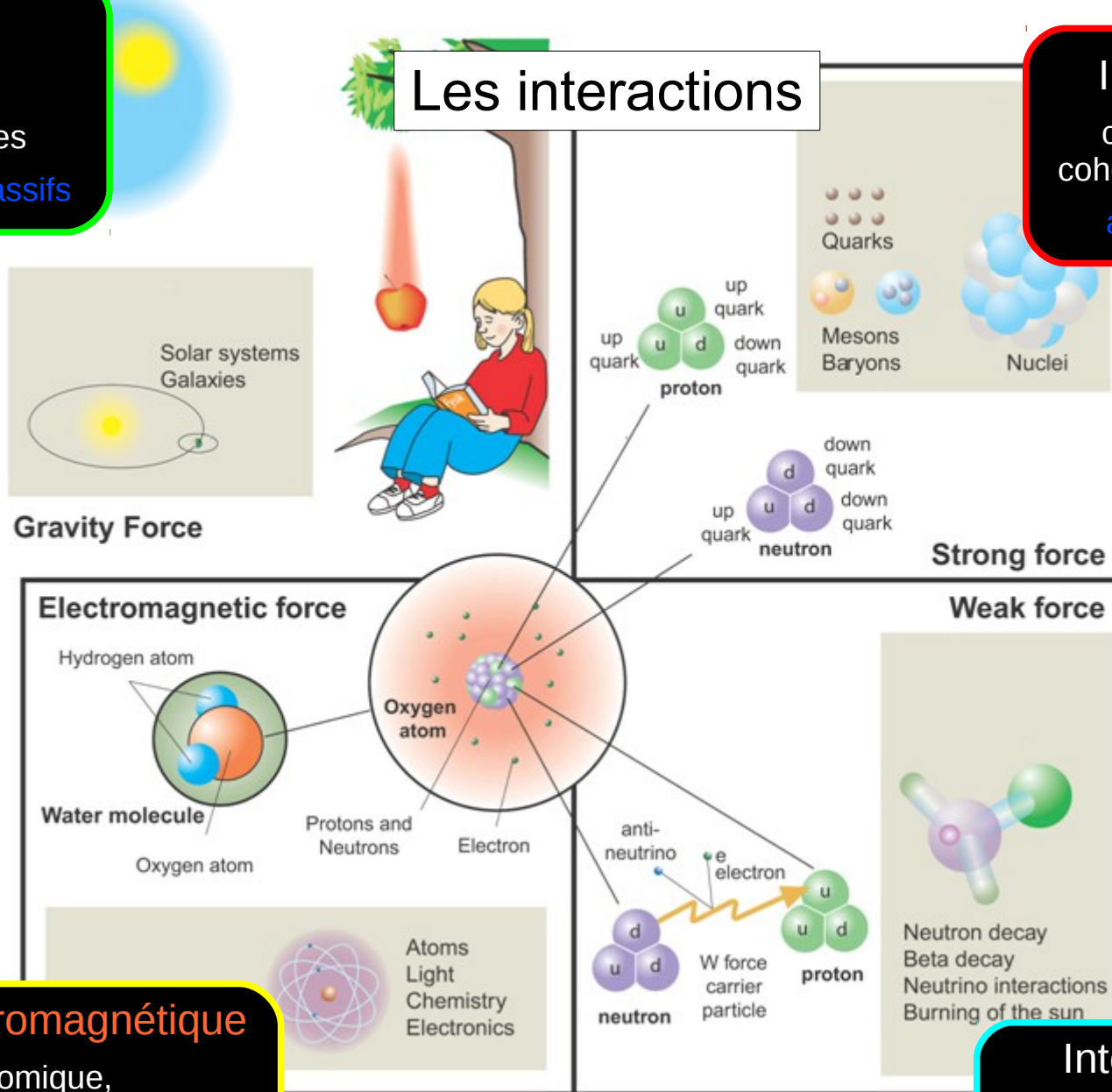


# Les interactions

# Le Modèle Standard

## gravitation

pesanteur  
mouvements astres  
agit sur les objets massifs



## Interaction forte

cohésion du noyau,  
cohésion des hadrons, ...  
agit sur les quarks

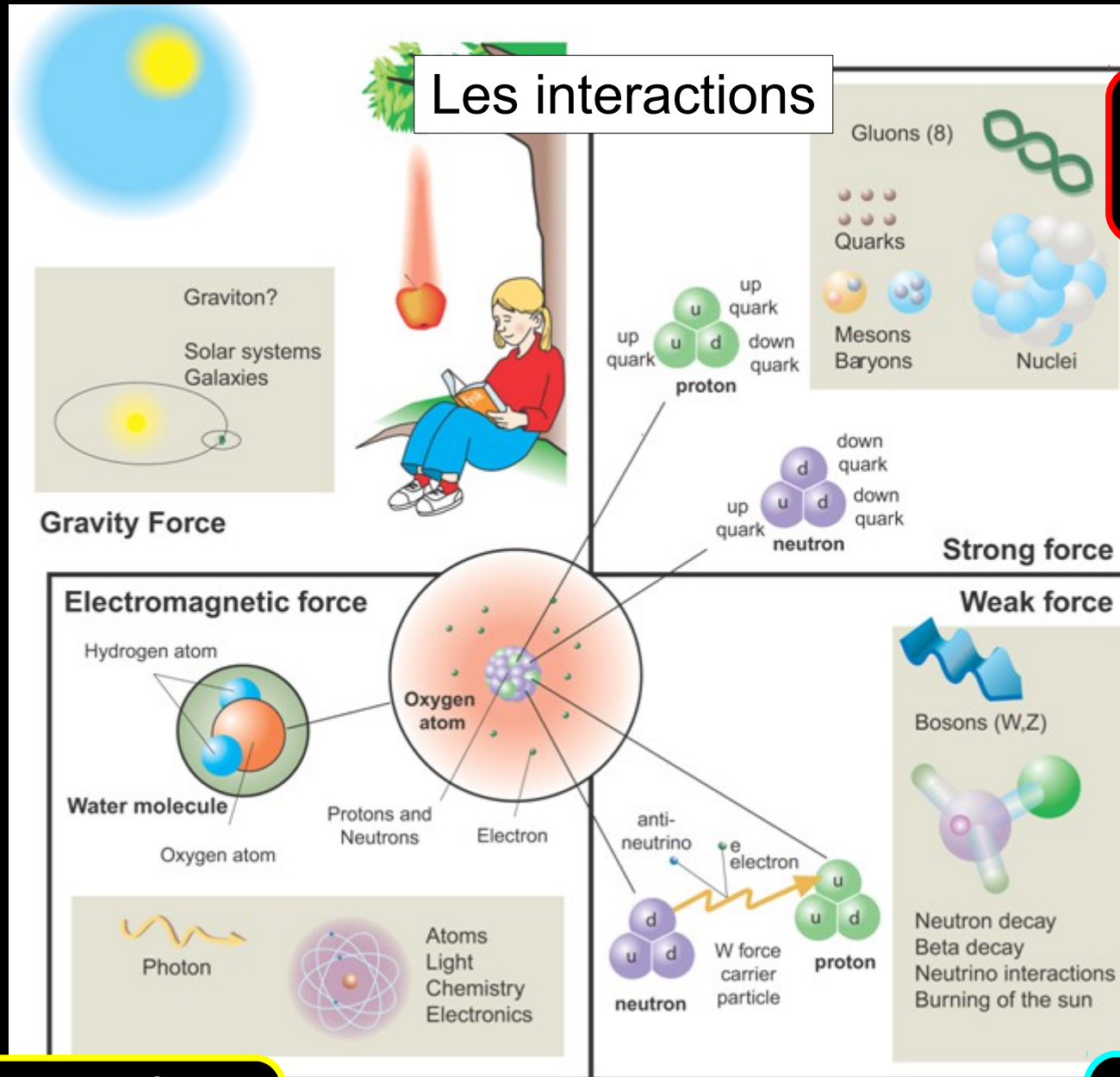
## Interaction électromagnétique

cohésion atomique,  
liaisons chimiques,  
lumière, ...  
agit sur les particules chargées

## Interaction faible

désintégration du neutron,  
radioactivité  $\beta$ , ...  
agit sur toutes les particules

# Le Modèle Standard



**Interaction forte**  
vecteur : gluon (g)  
M=0  
charge : couleur

**Interaction électromagnétique**  
vecteur : photon ( $\gamma$ ) ; M=0  
charge : charge électrique

**Interaction faible**  
vecteur :  $Z^0, W^+, W^-$   
M= 80 à 90 GeV !!!  
charge : isospin

# L'interaction forte

# Interaction forte

## Chromodynamique

Charge : couleur

→ **B V R** &  **$\bar{B} \bar{V} \bar{R}$**  (« anticouleur »)

→ les couleurs s'ajoutent vectoriellement

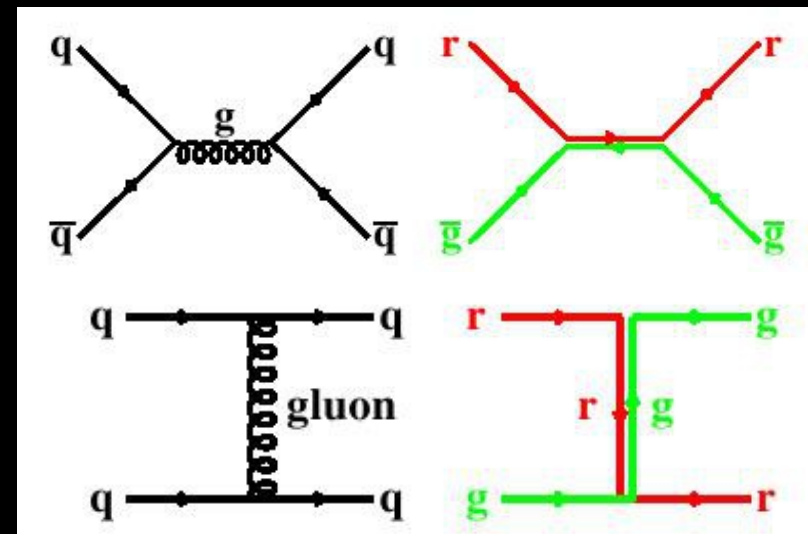
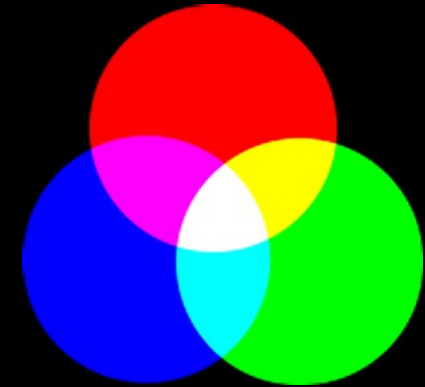
→ **B+V+R= Blanc**

→ **B+ $\bar{B}$ = Blanc**

Vecteur : **gluons** (8)

→ porte une couleur et une « anticouleur »

Les couleurs sont conservées par interaction forte

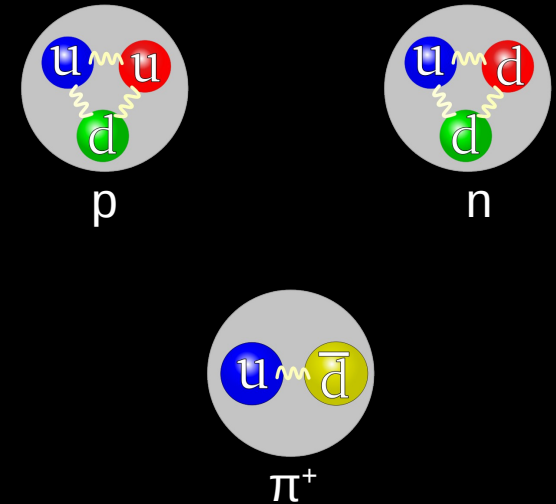


# Interaction forte

## Hadronisation

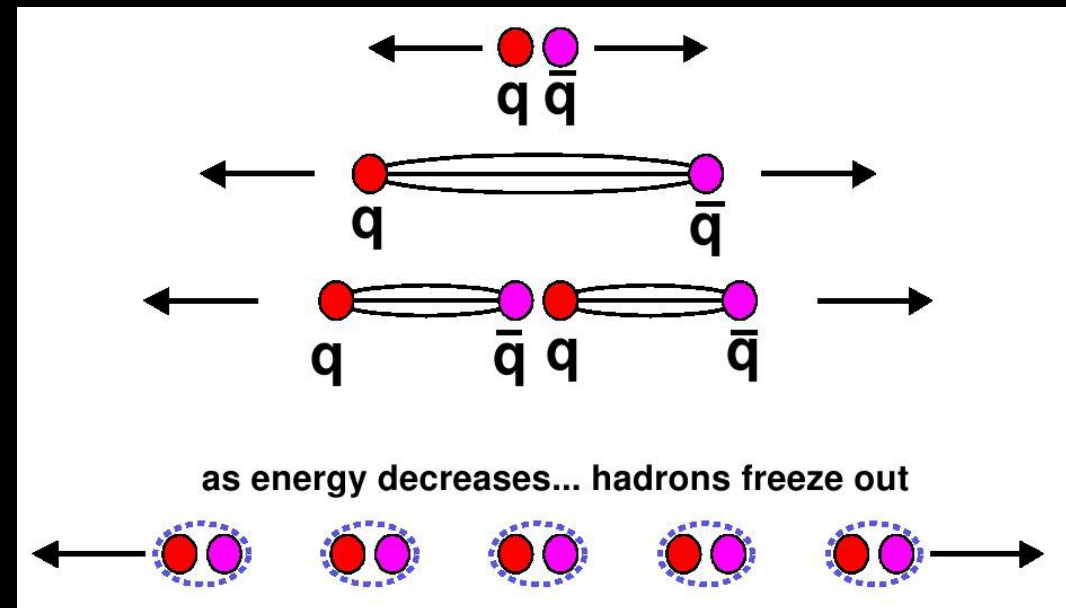
Le vide est opaque à la couleur :

- seuls les objets blancs circulent librement
- les quarks sont confinés dans des hadrons
  - **baryon** : composé de 3 quarks de couleurs différentes
  - **méson** : composé de 2 quarks de couleurs opposées



L'interaction forte agit comme un élastique :

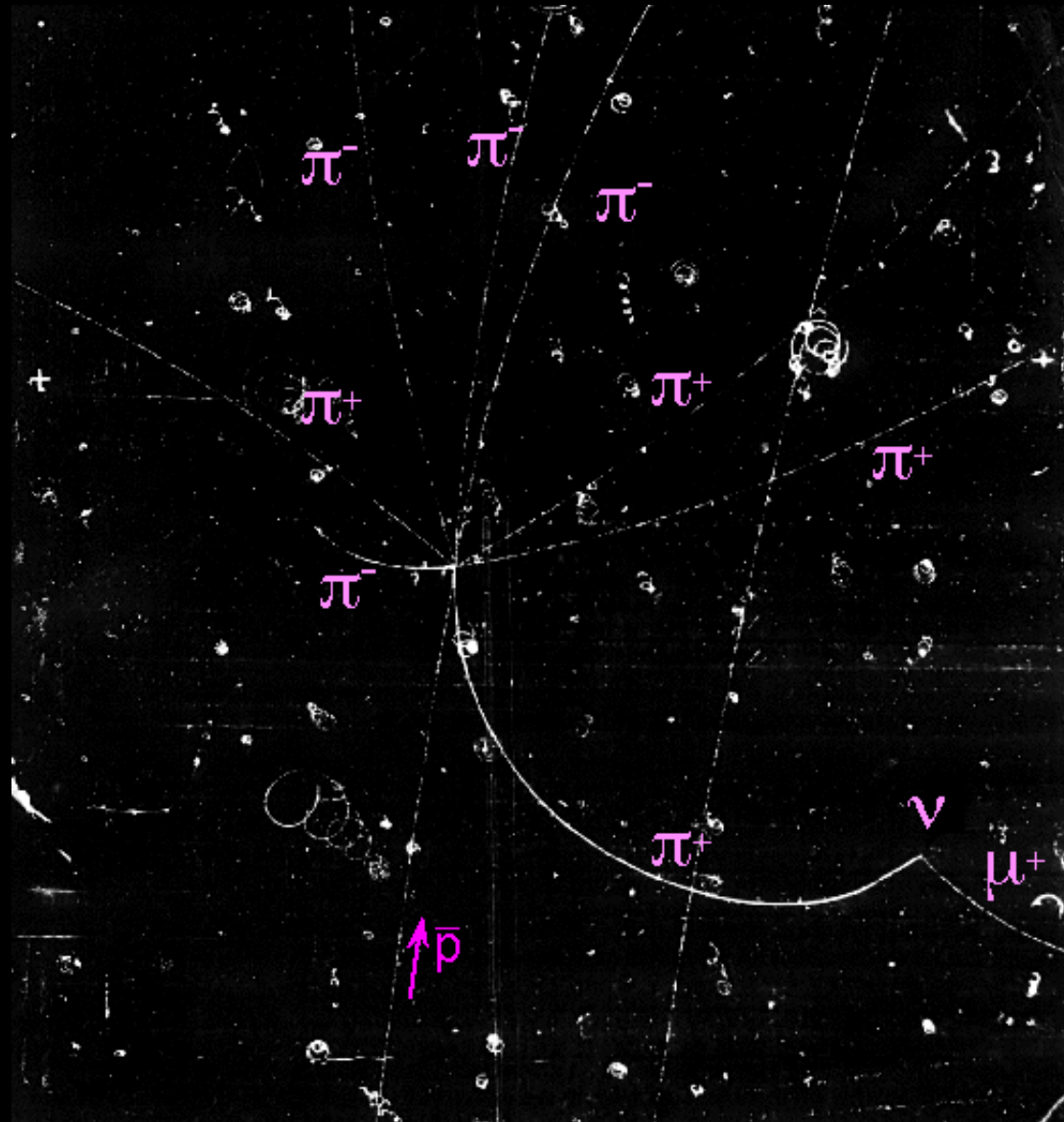
- son intensité augmente avec la distance ( 1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )



# L'interaction forte en action

En action

Un antiproton (projectile) s'annihile avec un proton au repos



(cliché de chambre à bulles)

# La violation de CP



# Le Modèle Standard

## Les symétries

La construction du modèle standard s'appuie sur des symétries :

- symétries d'espace-temps :
  - conservation de l'énergie
  - conservation du moment angulaire
  - conservation de l'impulsion
  
- symétrie de « jauge » propres aux interactions
  
- **symétries discrètes** :
  - renversement droite/gauche : Parité (**P**)
  - renversement des charges : Conjugaison de charge (**C**)
  - renversement du temps (**T**)

# Le Modèle Standard

## La symétrie CP

Effet de transformations discrètes :

→ Opération P :

□ symétrie miroir

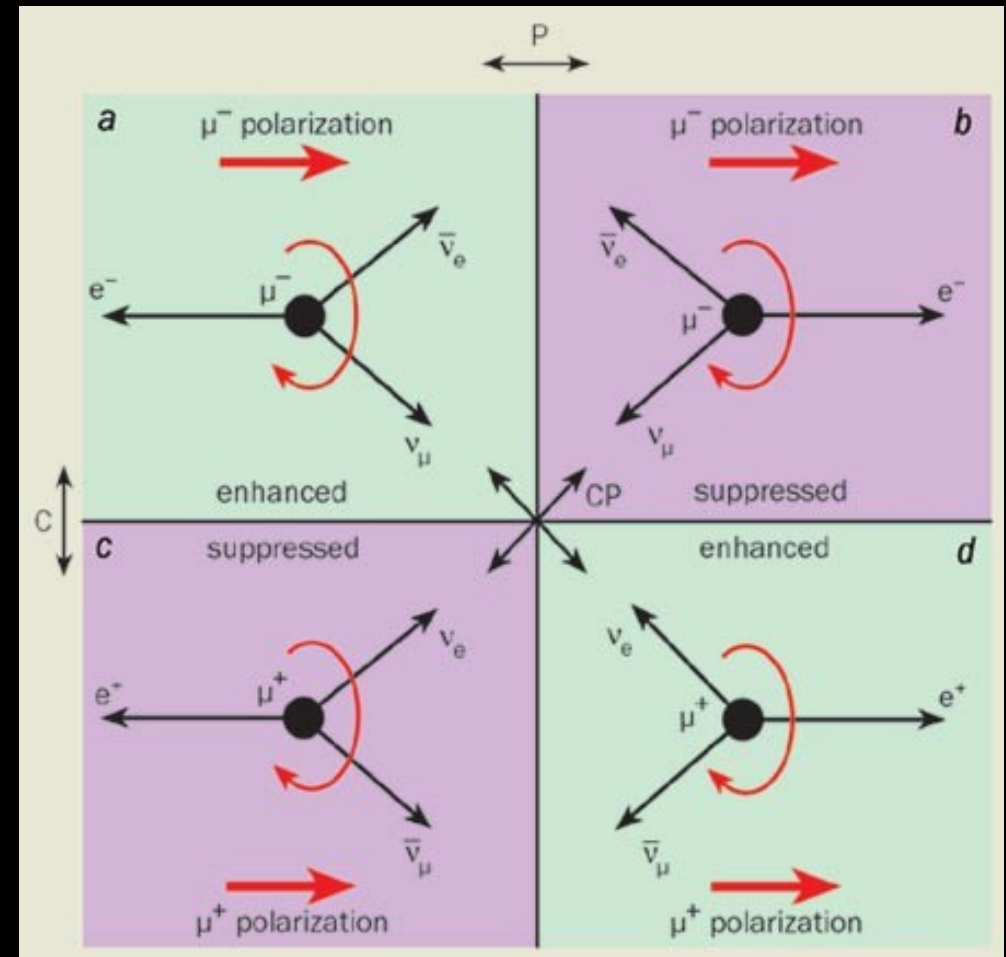
→ Opération C

□ particule → anti-particule

La désintégration du muon (met en jeu l'interaction faible) n'est symétrique ni par C ni par P

→ Madame WU (1957)

→ **CP** : la composé des 2 transformations semble rester valide ! c.à.d : l'anti-matière se comporte comme le reflet de la matière dans un miroir.

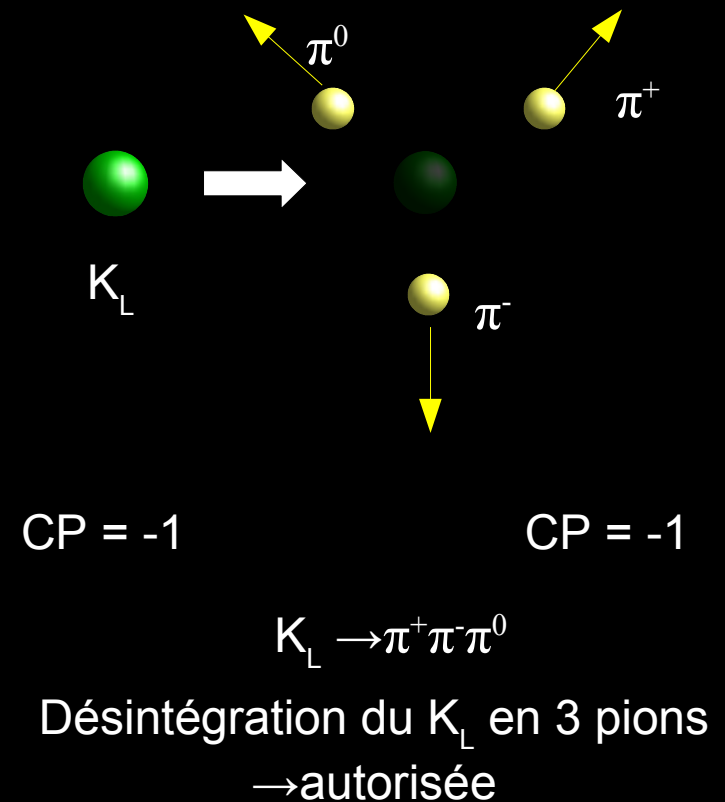
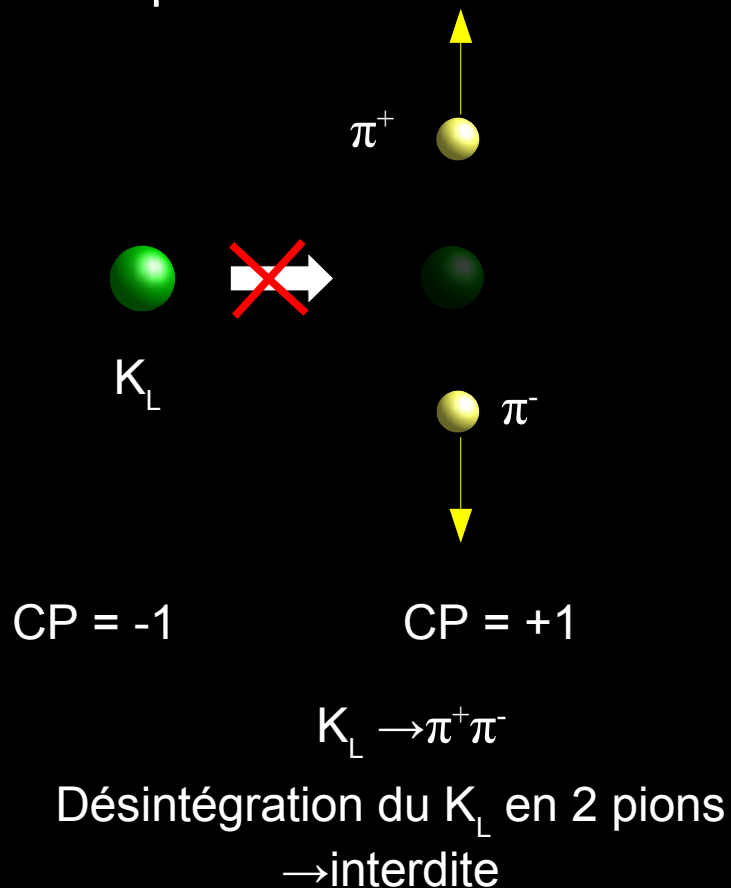


# Le Modèle Standard

## La violation de CP

Les particules possèdent des parités intrinsèques (propriété quantique !).

Si la conservation de CP est une propriété de la nature, certaines réactions sont impossibles :



# Le Modèle Standard

## La violation de CP

En 1964, Christenson, Cronin, Fitch & Turlay observent la désintégration :  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$

→ **découverte de la violation de CP**

□ faible : ~2 cas pour mille seulement

A l'époque, seul les 3 quarks les plus légers étaient connues (u,d & s)

Les théoriciens se rendent compte que la théorie en vigueur s'accommoderait naturellement de la violation de CP si il y avait 3 familles de quarks

→ 1974 : découverte du quark c

→ 1977 : découverte du quark b

→ 1995 : découverte du quark t

→ **la matière et l'anti-matière ne sont pas rigoureusement symétrique.**

Depuis l'étude de la violation de CP a continué de susciter un très fort intérêt. Elle reste un moyen de tester le Modèle Standard très finement.