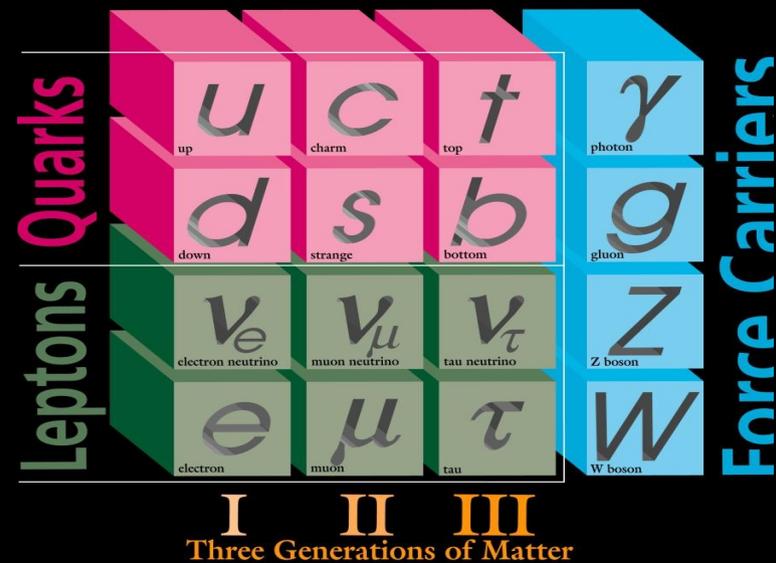


# Introduction à la physique des particules élémentaires

## ELEMENTARY PARTICLES



Julien Cogan

# Sommaire

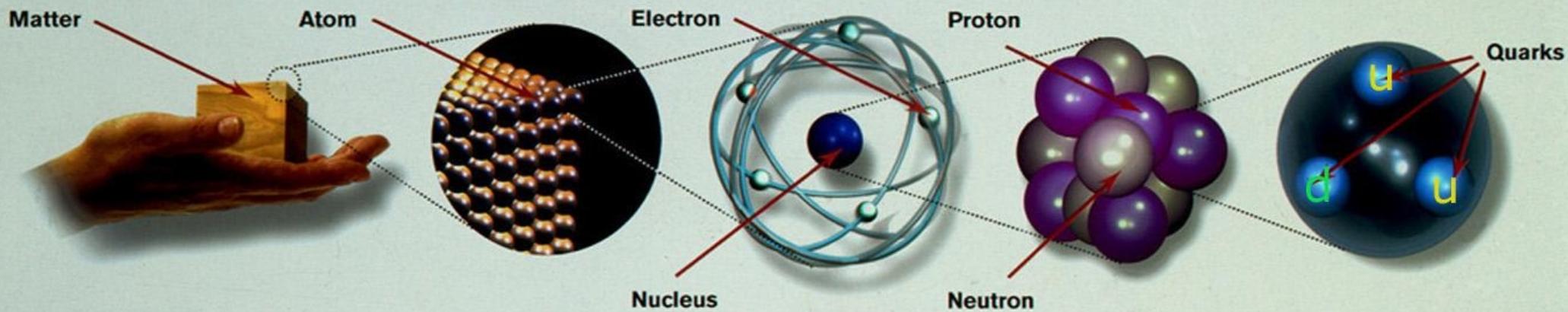
Descente vers l'infiniment petit : structure la matière ordinaire

Le Modèle Standard de la physique des particules

Illustrations

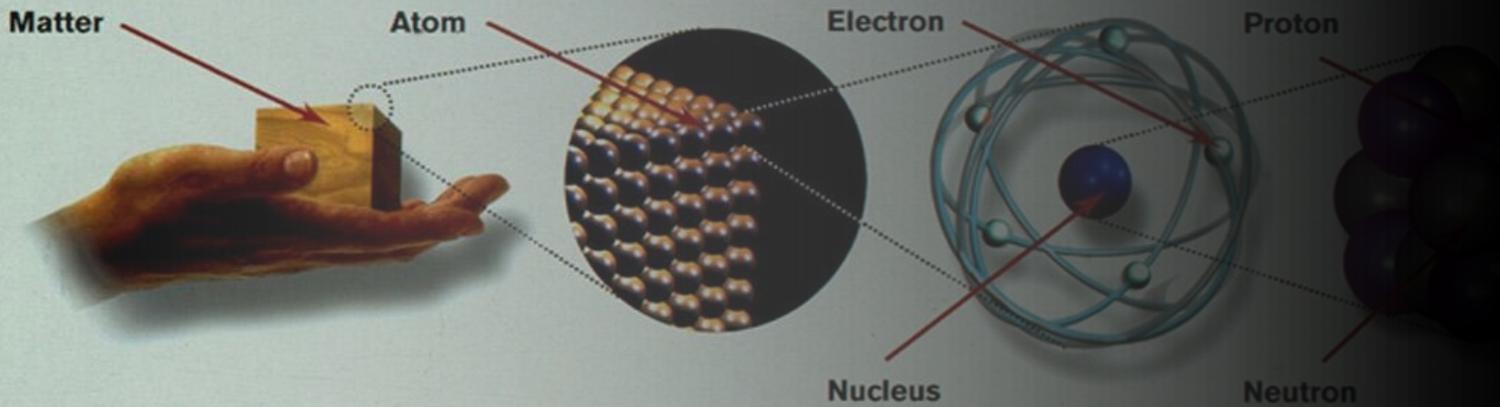
Observations

Conclusion

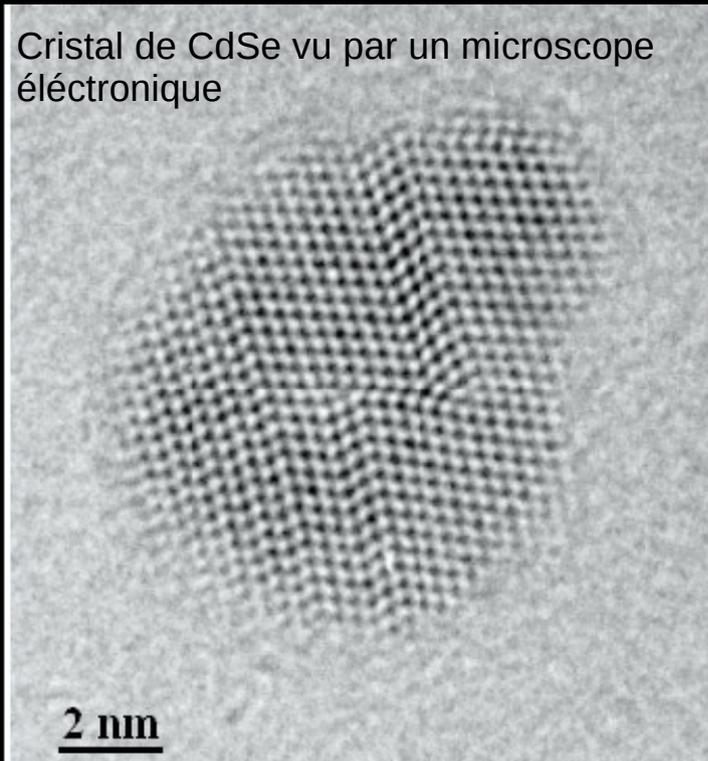


# Descente vers l'infiniment petit

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



Cristal de CdSe vu par un microscope électronique

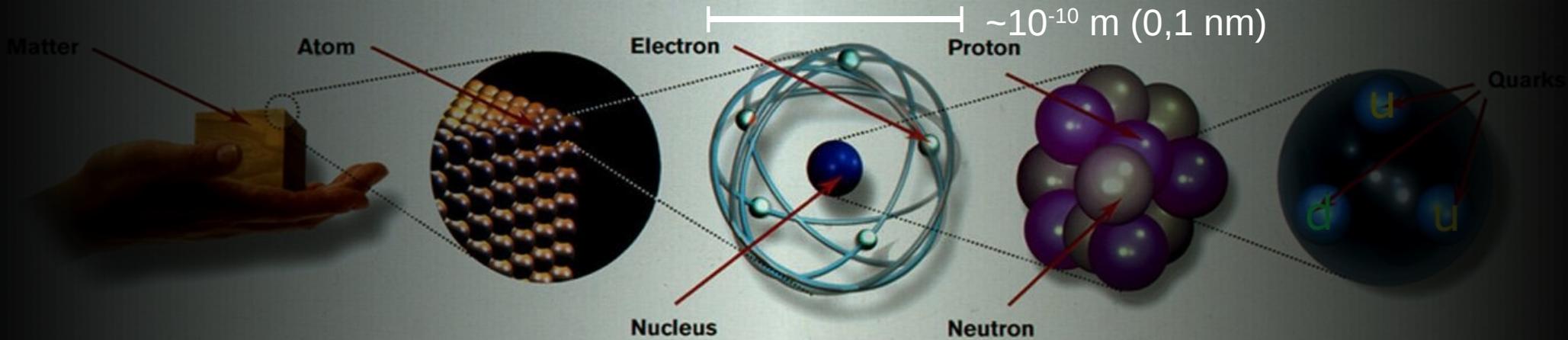


La matière qui nous entoure tient ses propriétés des molécules qui la composent.

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					SYNTHESE									
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71											
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											
		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103											
1	H											He	18													
1	1	2											2													
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne								
2	3	4											5	6	7	8	9	10								
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar								
3	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36								
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54								
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn								
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86								
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt																	
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109																	

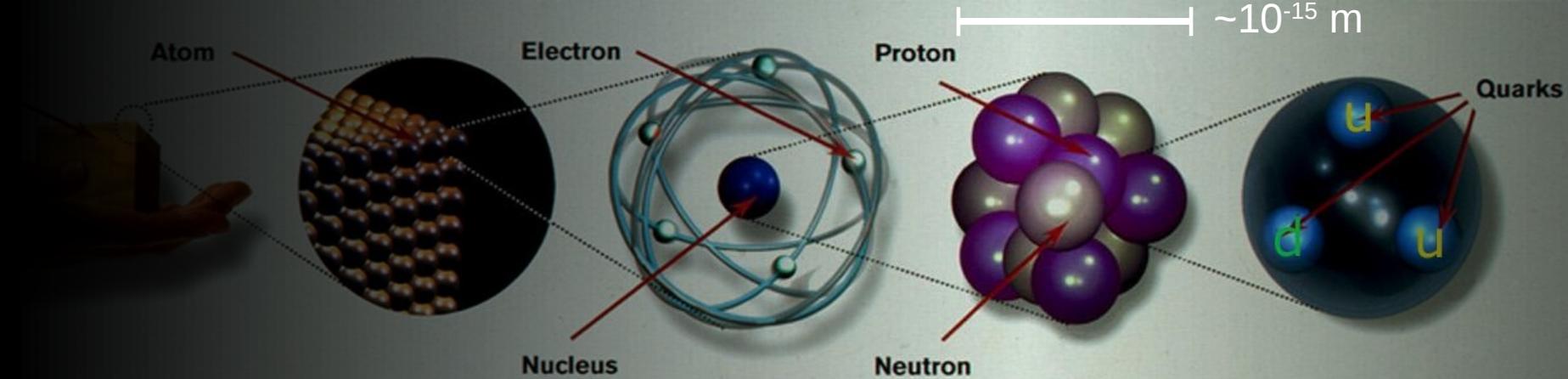
## Atomes composés :

- d'un noyau
  - ↳  $\sim 100\ 000$  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**

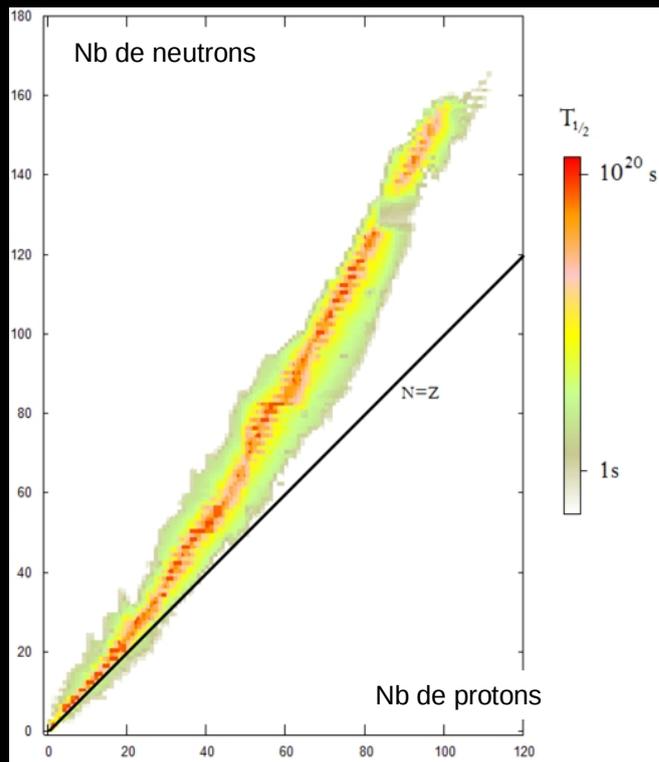
La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

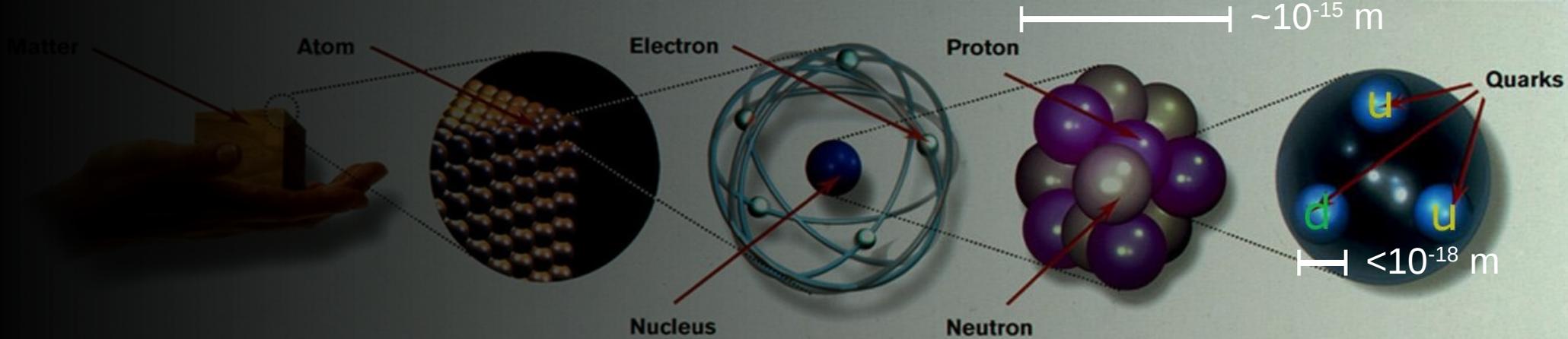
Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un neutrino : e.g.  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e + \nu$

→ **interaction faible**

*Qu'est-ce qui différencie les protons et les neutrons ?*

→ structure du nucléons





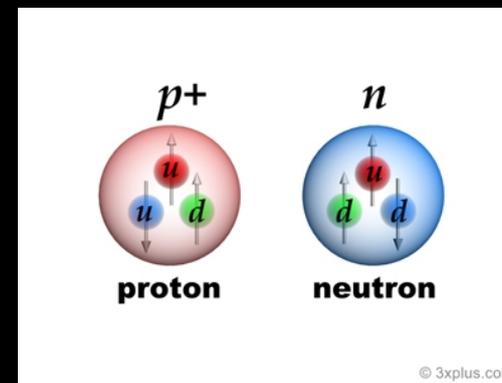
**Nucléons** (protons & neutrons) sont constitués de quarks

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

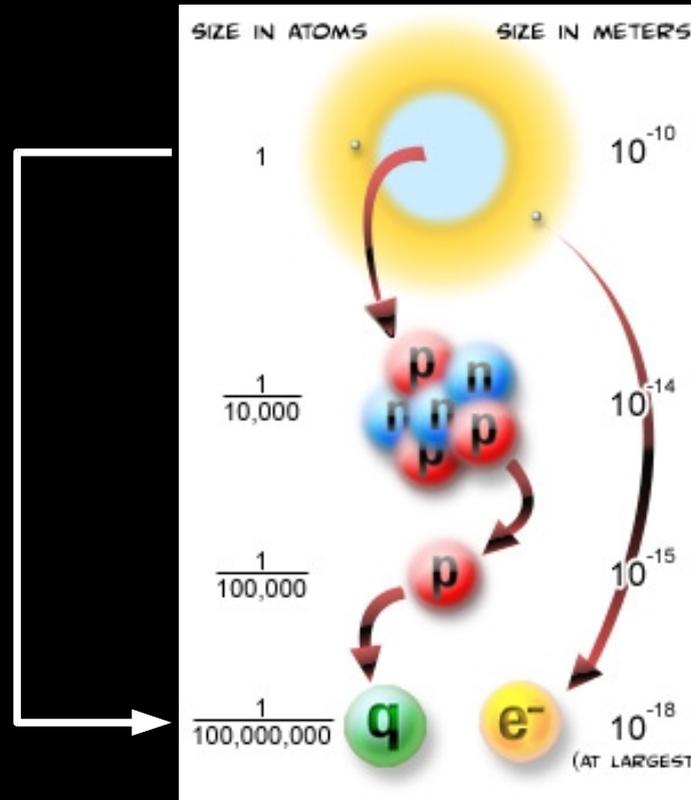


Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

# Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

8 ordres de grandeur



# 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)

→ **Est-ce tout ?**

# Descente vers l'infiniment petit

## Autres formes de matière

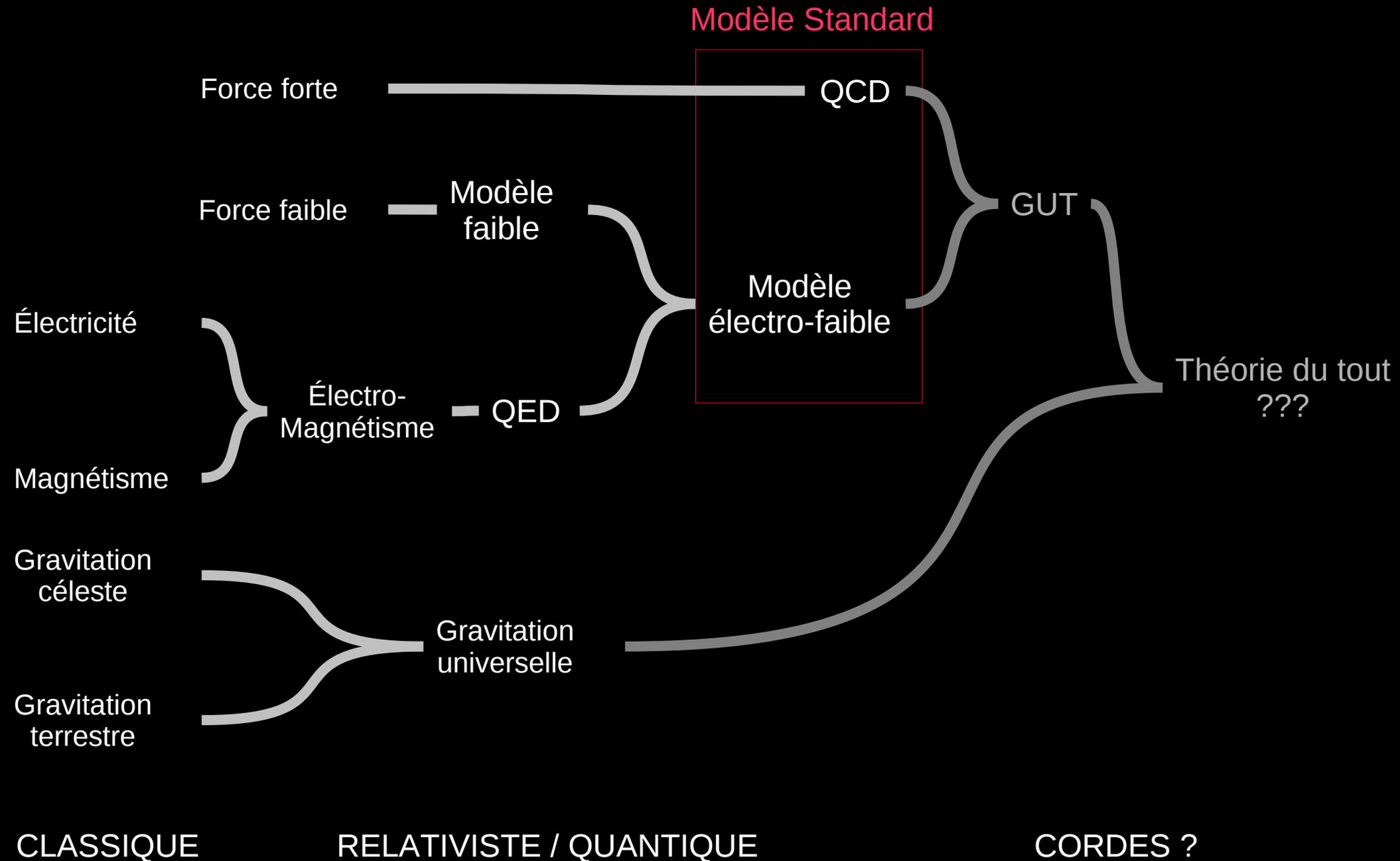
		1 <sup>ère</sup> famille		2 <sup>ème</sup> famille		3 <sup>ème</sup> famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	$\mu$	tau	$\tau$
	0	neutrino	$\nu_e$	neutrino muon	$\nu_e$	neutrino tau	$\nu_\tau$

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

- même structure (même contenue en quarks et leptons)
- dont les particules sont :
  - ↘ plus lourdes
  - ↘ instables : vont se désintégrer spontanément en donnant des particules plus légères

# Le Modèle Standard

# Théories fondamentales

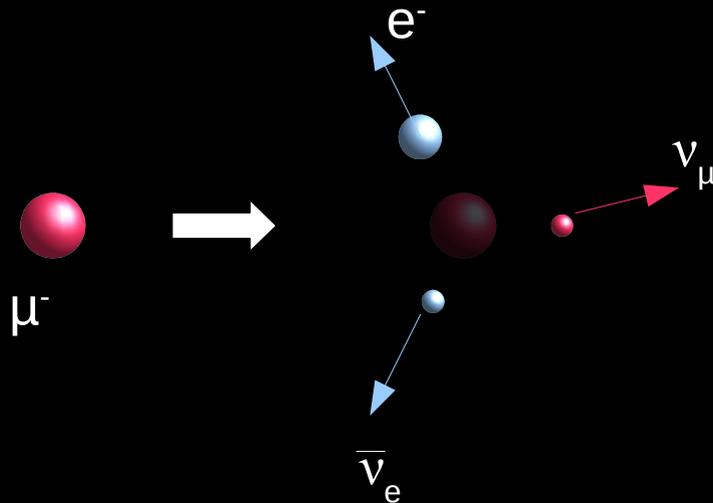


# Le Modèle Standard

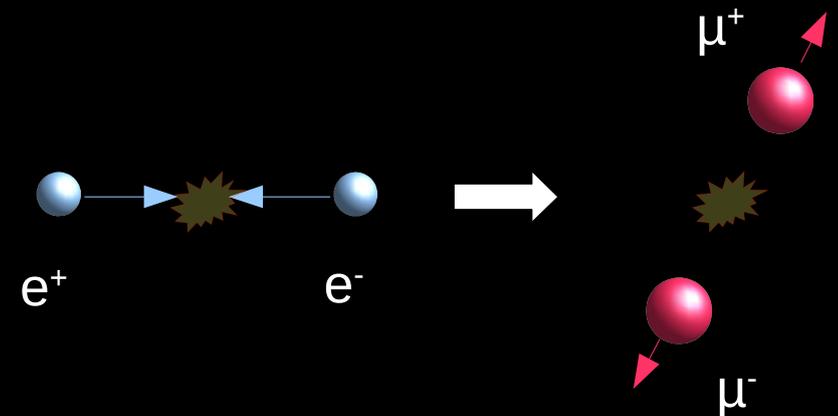
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique* relativiste

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

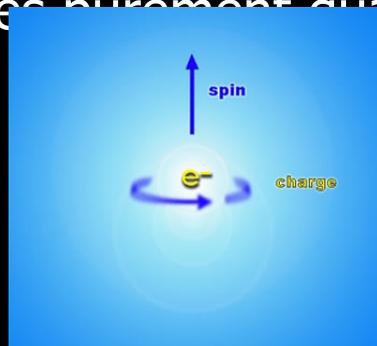
↘ dualité :

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

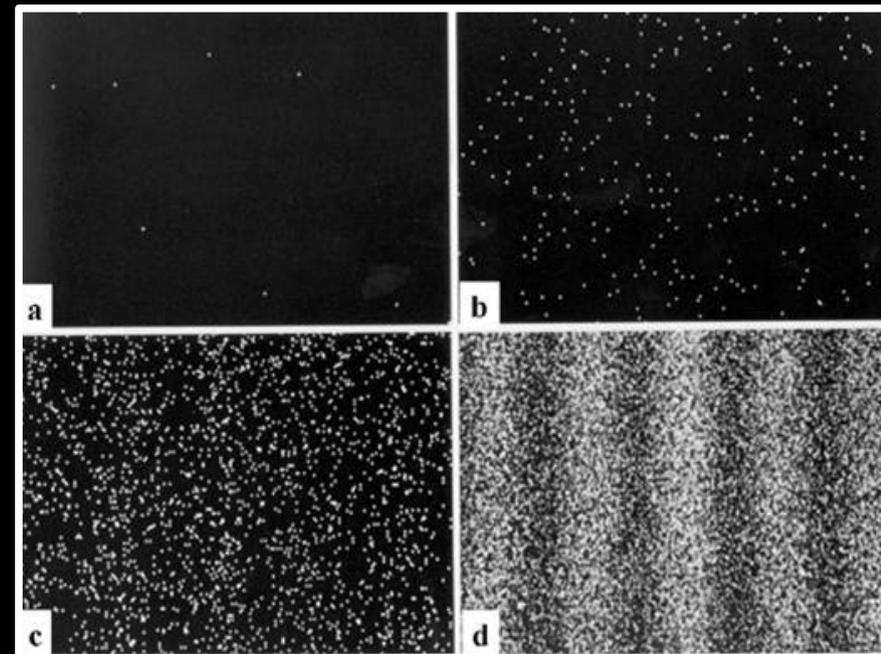
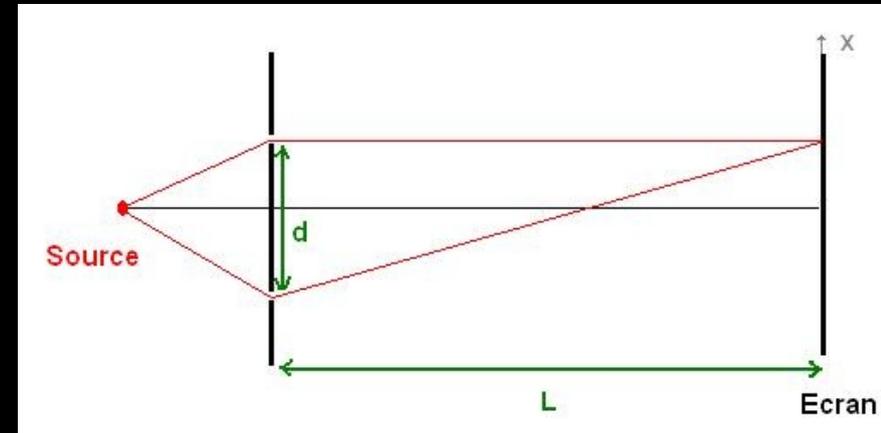
→ **Plus l'énergie est élevé, plus la longueur d'onde est faible (plus on sera sensible à des détails petits)**

→ propriétés purement quantique

↘ spin :



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

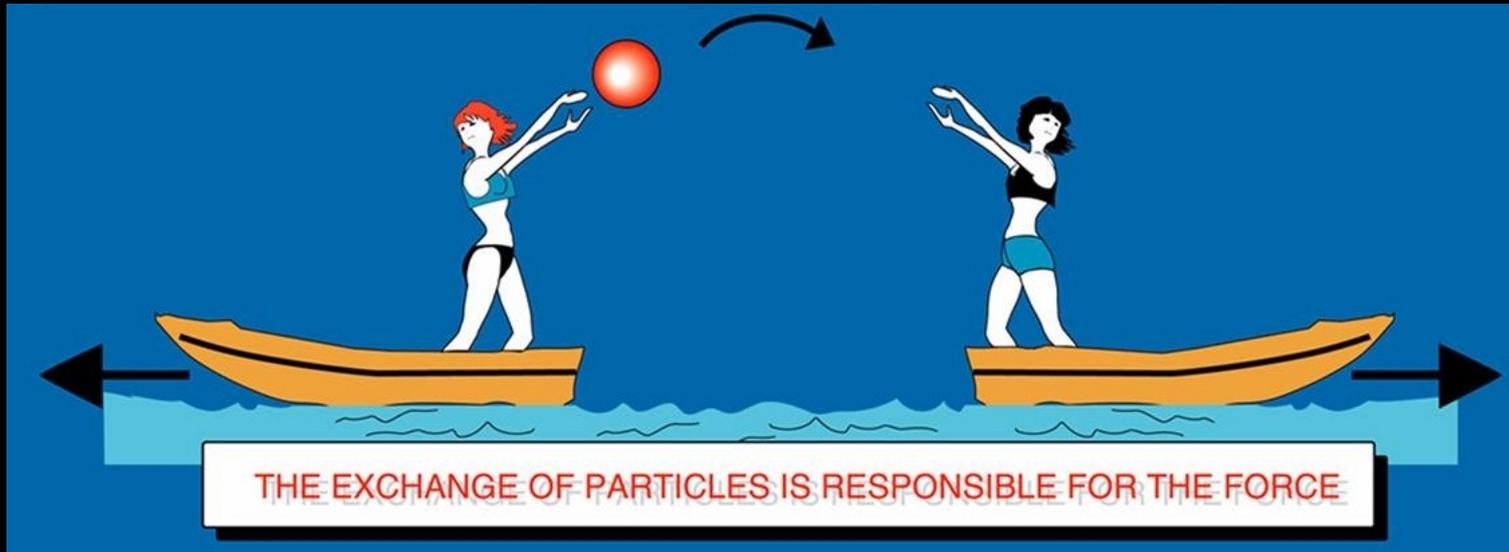


Expérience des fentes d'Young

# 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

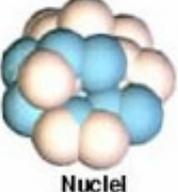
## Forces

### Strong

**Gluons (8)** 

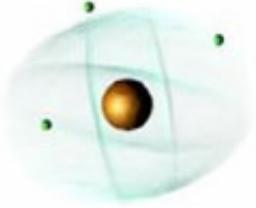
**Quarks** 

**Mesons Baryons** 

**Nucléi** 

### Electromagnetic

**Photon** 

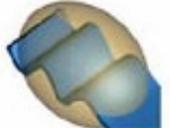
**Atoms Light Chemistry Electronics** 

### 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 :

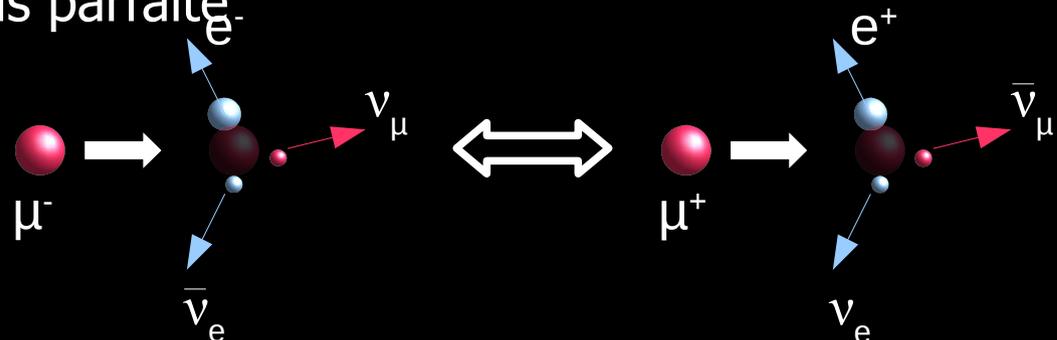
- de même masse et de même spin
- autres nombres quantiques renversés
  - e.g. : charge électrique
- notation courante :  $\bar{b}$  antiparticule associée au quark  $b$

Certaines particules sont leur 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/ $c^2$

# 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

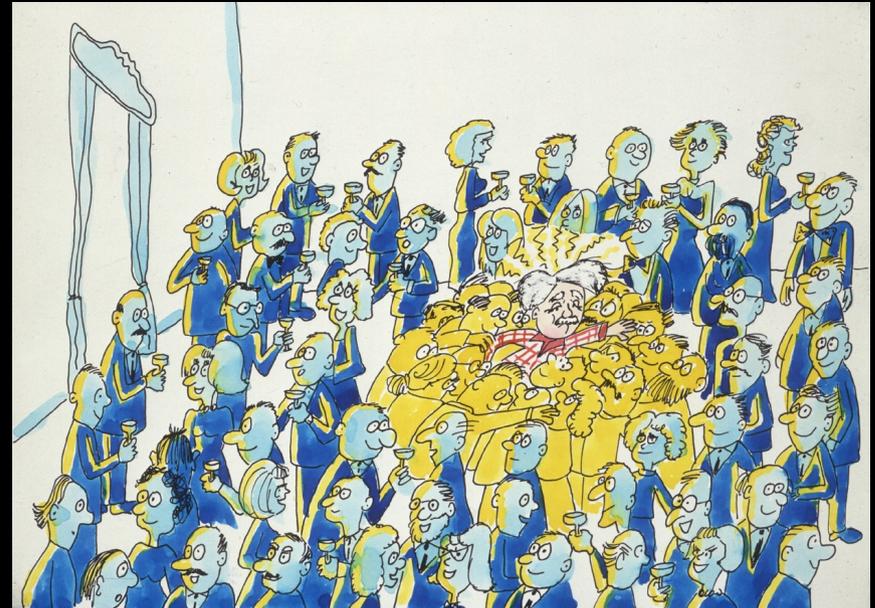
Dans la théorie, les particules sont sans masse.

Pour les faire apparaître : mécanisme de Higgs

Implique l'existence d'un bosons supplémentaire :

→ le boson de Higgs

Pas encore observé mais activement recherché



# Le Modèle Standard

Tout est là :

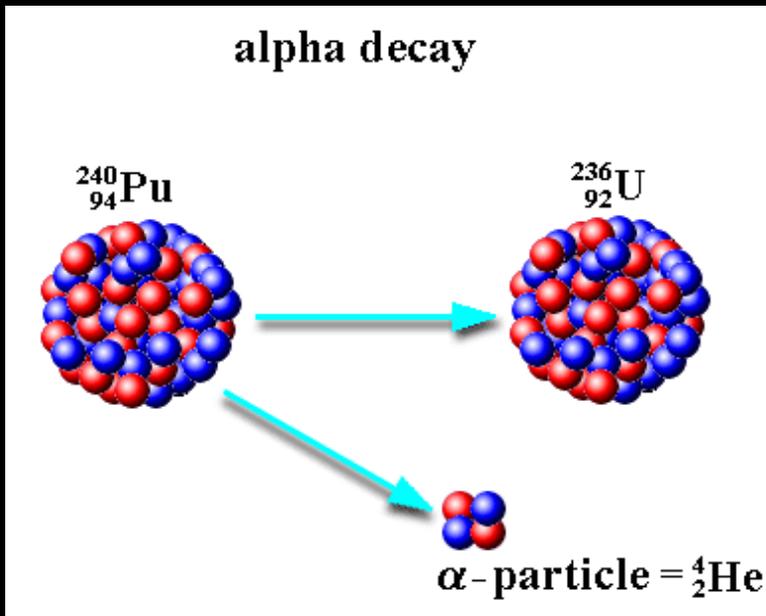
- la matière : les fermions fondamentaux
  - ↘ 6 quarks + 6 antiquarks
  - ↘ 6 leptons + 6 antileptons
- les vecteurs des interactions
  - ↘ 8 gluons pour l'interaction forte
  - ↘  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $\gamma$  pour l'interaction électrofaible
- le boson de Higgs
  - ↘ par lequel les particules acquièrent leur masse

# Illustrations

# Désintégrations

Qu'est-ce qu'une désintégration ?

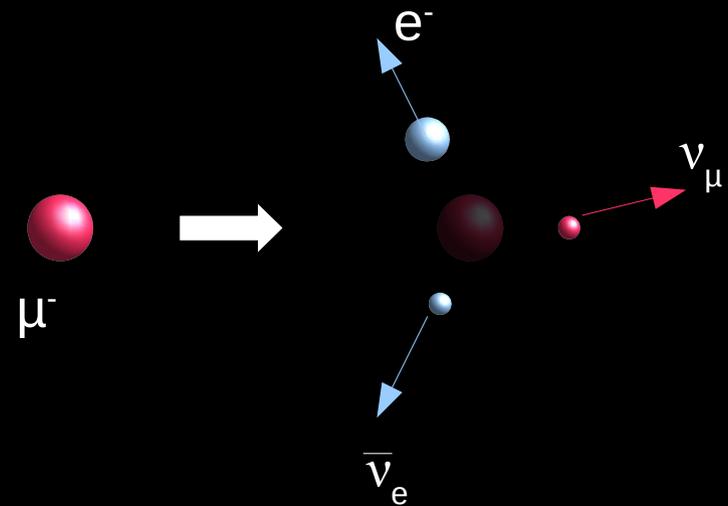
Désintégration nucléaire



Séparation des nucléons :

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

Désintégration d'une particule élémentaire



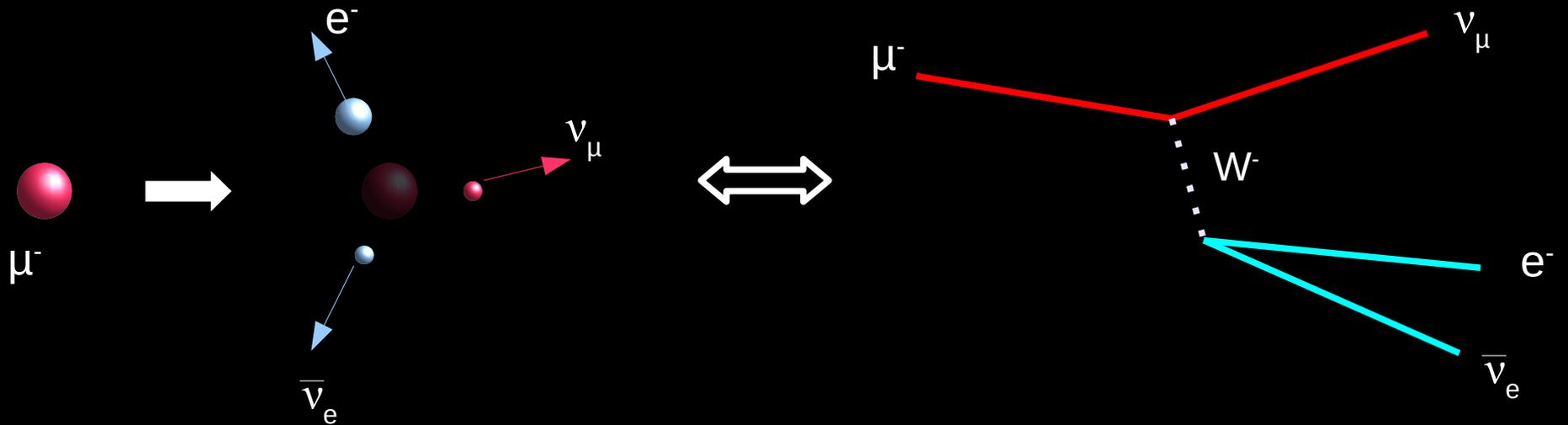
Transformation de la particule initiale :

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

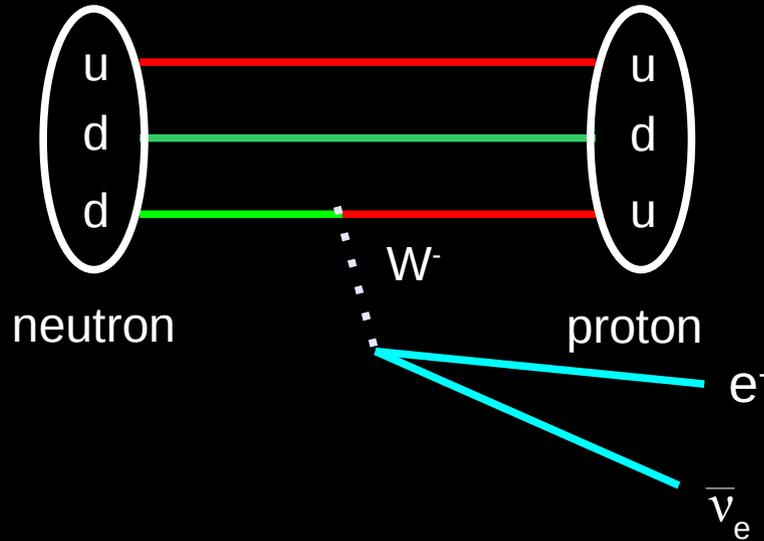
# Désintégrations

## 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 « $\beta$ »  
 $\rightarrow {}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + e + \nu$

# Désintégrations

## La force (electro-)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

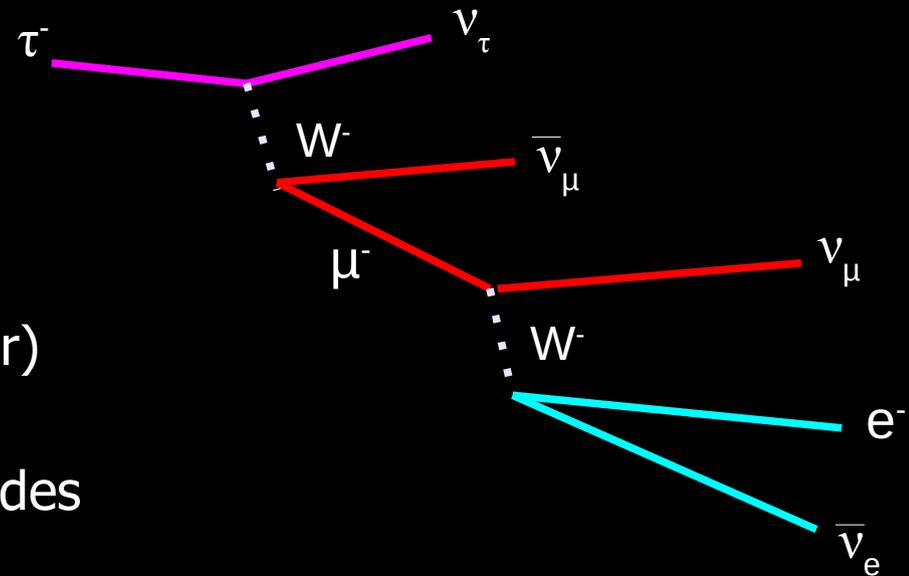
→ le nombre leptonique

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

→ la charge électrique

Force faible :

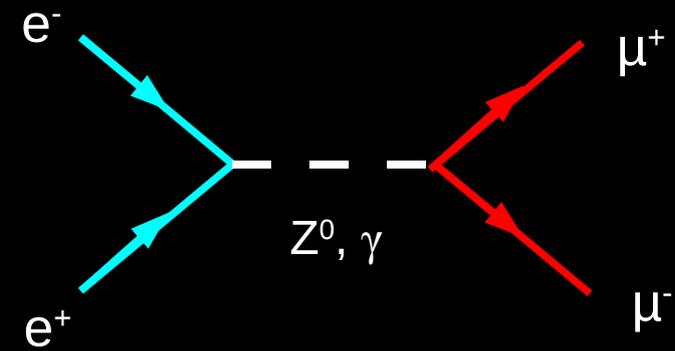
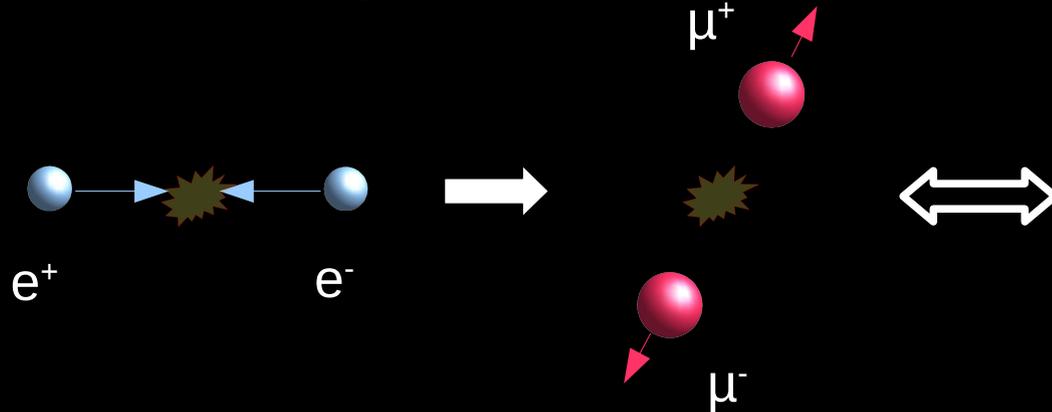
- autorise le changement de nature (saveur) des quarks
- responsable de toute les désintégrations des particules élémentaires
  - seules les plus légères sont stables



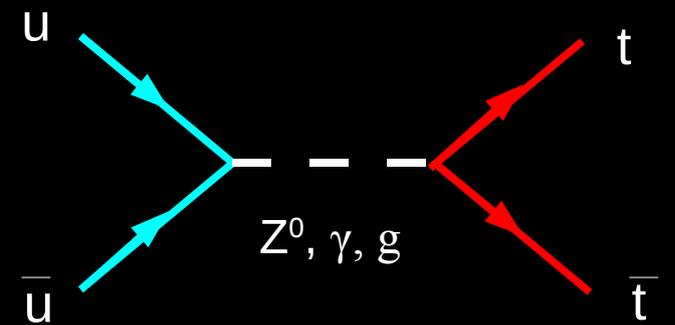
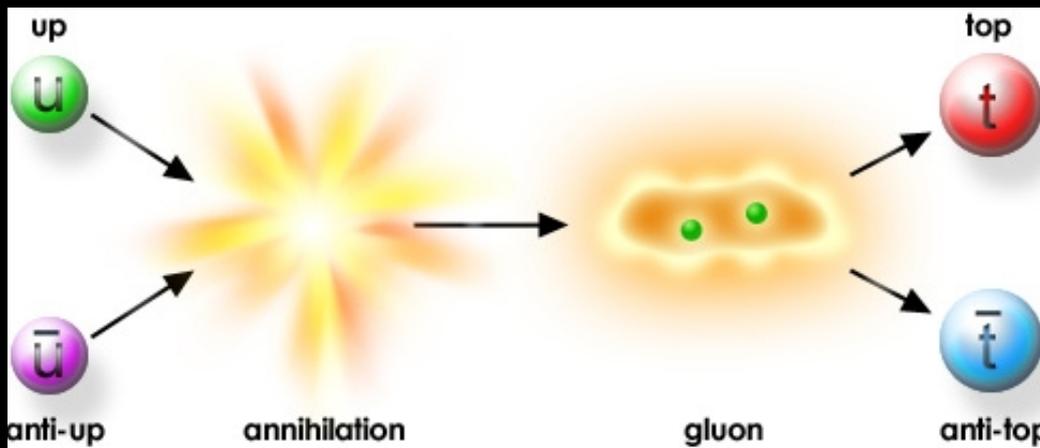
# Annihilations

## Exemples

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



Annihilation  $qq$



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

# Interaction forte

## Chromodynamique

Charge : couleur

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

→ les couleurs s'ajoutent vectoriellement

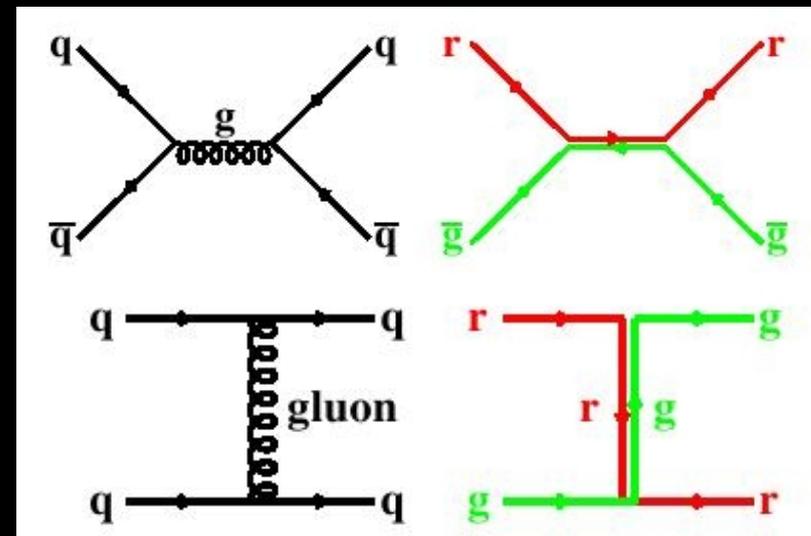
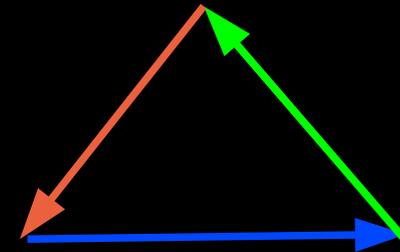
→ **B+V+R= Blanc**

→ **B+B= Blanc**

Vecteur : gluons (8)

→ porte une couleur et une « anticouleur »

Les couleurs sont conservées par interaction forte

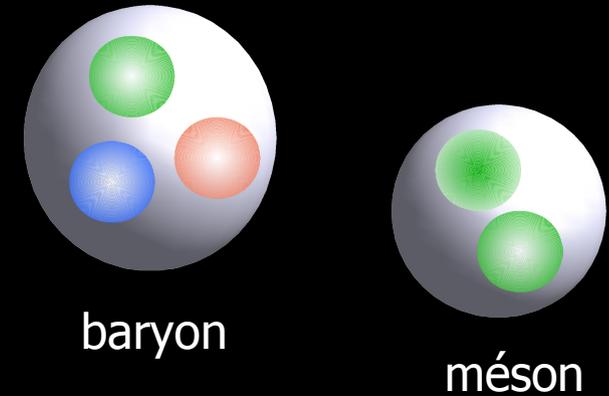


# Interaction forte

## Hadronisation

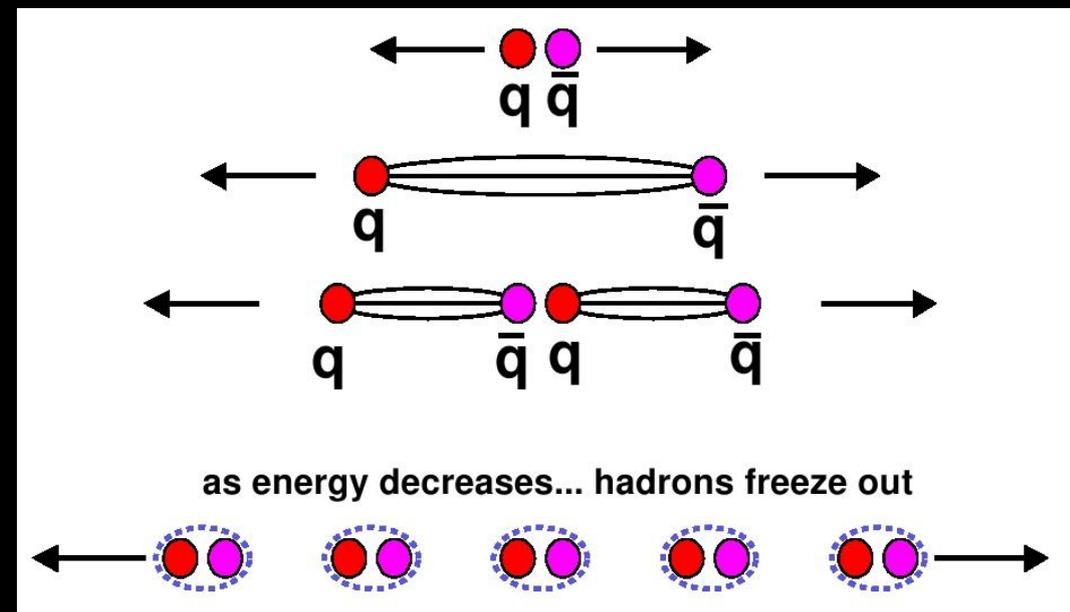
Le vide est opaque à la couleur :

- 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 :

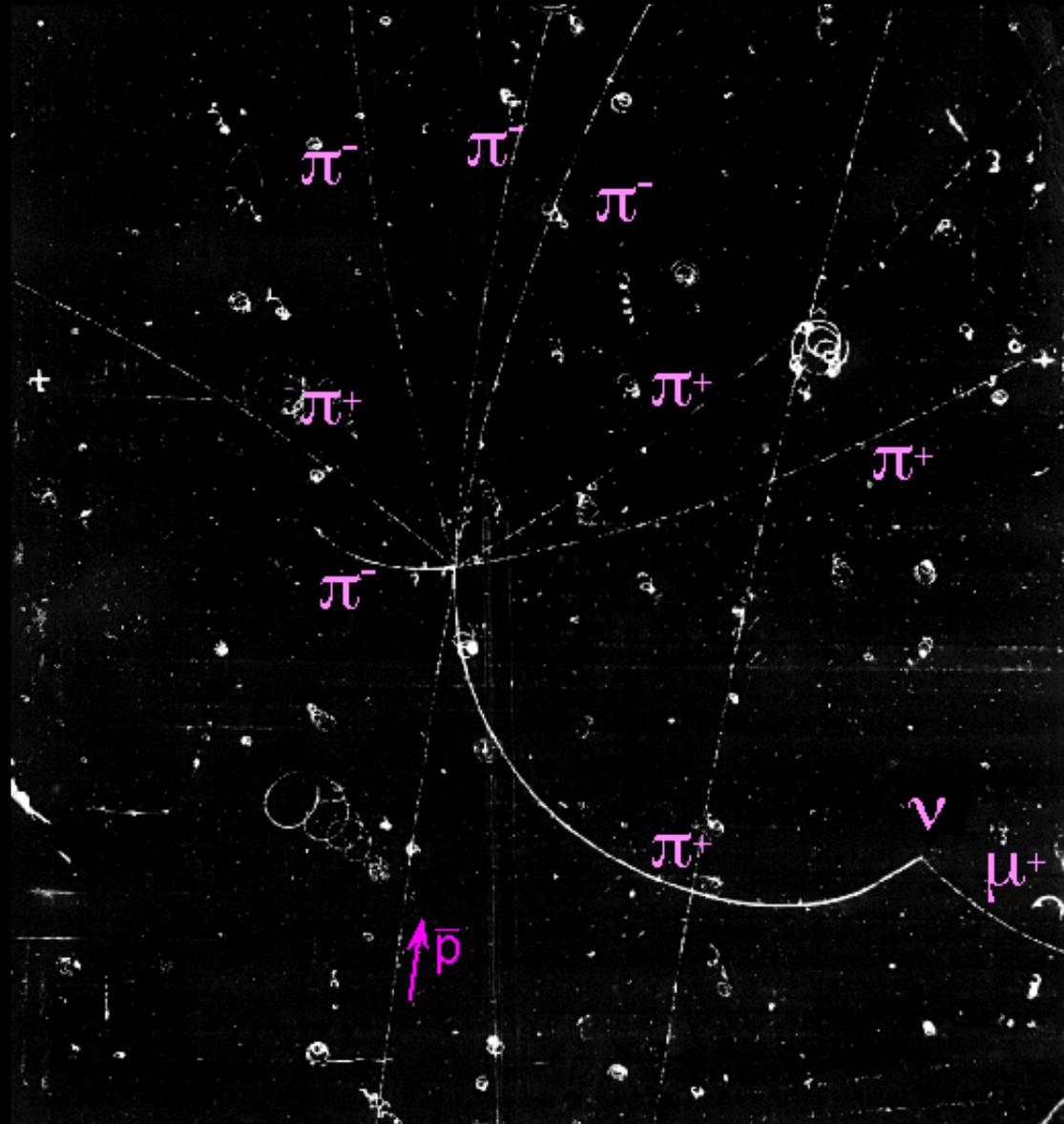
- son intensité augmente avec la distance ( 1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )



# L'interaction forte en action

En action

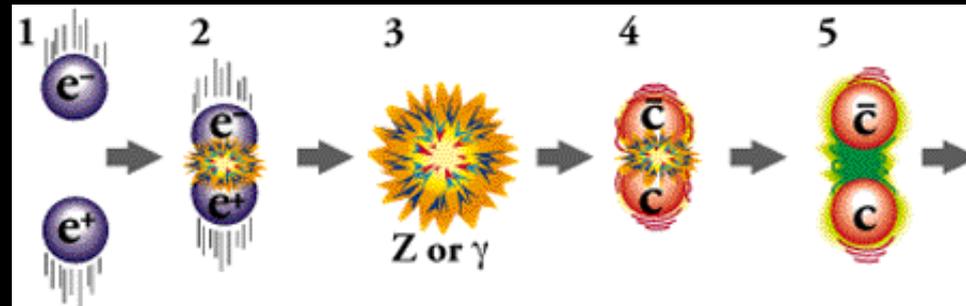
Un antiproton (projectile) s'annihile avec un proton au repos



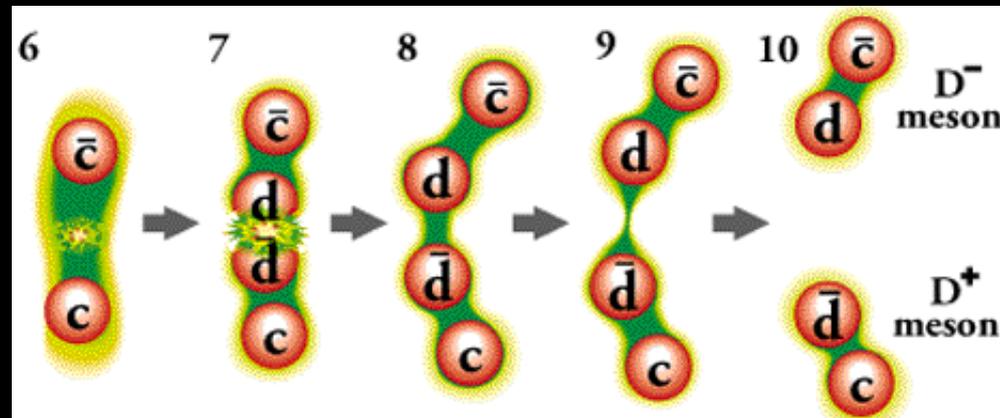
(photo de  
chambre à  
bulles)

# Un exemple complet

Annihilation électron-positron et création d'une paire de quarks :



Hadronisation des quarks :

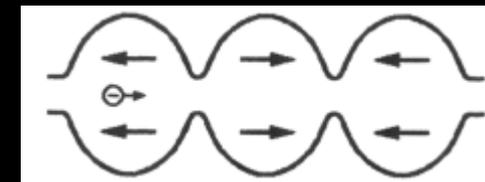


# Observation

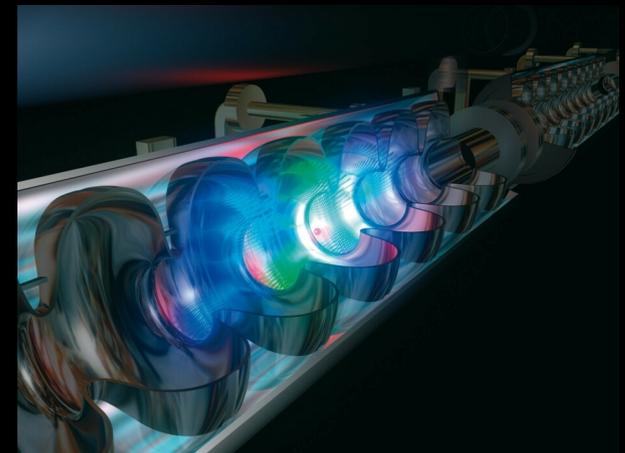
# Création

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

- sources naturelles :
  - ↘ e.g. neutrinos (extra-galactique, solaires, atmosphériques)
- 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



# Détection

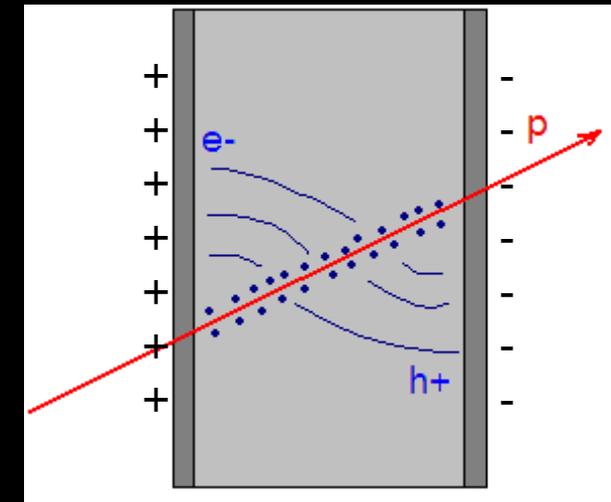
## Principe

Détecter une particule, c'est la faire interagir dans un milieu sensible, c'est à dire, qui va rendre visible cette interaction.

→ Particules chargées : facile, interaction électromagnétique

principe de detection assez générale pour des particules assez énergétique :

- milieu ionisable : création de paires  $e^-/ions$  au passage d'une particule
- champs électrique : déplacement des  $e^-/ions$ , création d'un courant électrique
- détection = mesure de ce courant



→ Particules neutres : les faire interagir pour créer des particules chargées

retour au problème précédent

# Détection

## Le détecteur classique

Trajectographe : au centre

ensemble d'éléments de détection permettant de reconstruire la trajectoire d'une particule (chargée) sans la perturber (ou de façon contrôlée)

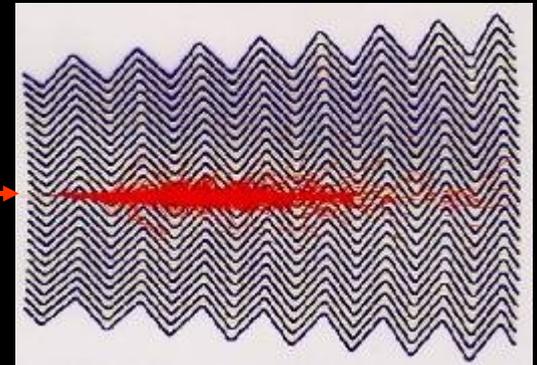
- milieu peu dense : gaz ou fine couche de silicium
- champs magnétique : courbe la trajectoire, permet la mesure de l'impulsion
- détecteur non-invasif !

Calorimètre : milieu dense où les particules chargées ou neutres déposent leur énergie en créant un gerbe

- électromagnétique :  $\gamma$ ,  $e^\pm$
- hadronique (plus dense, moins précis) :  $p$ ,  $n$ ,  $\pi^\pm$

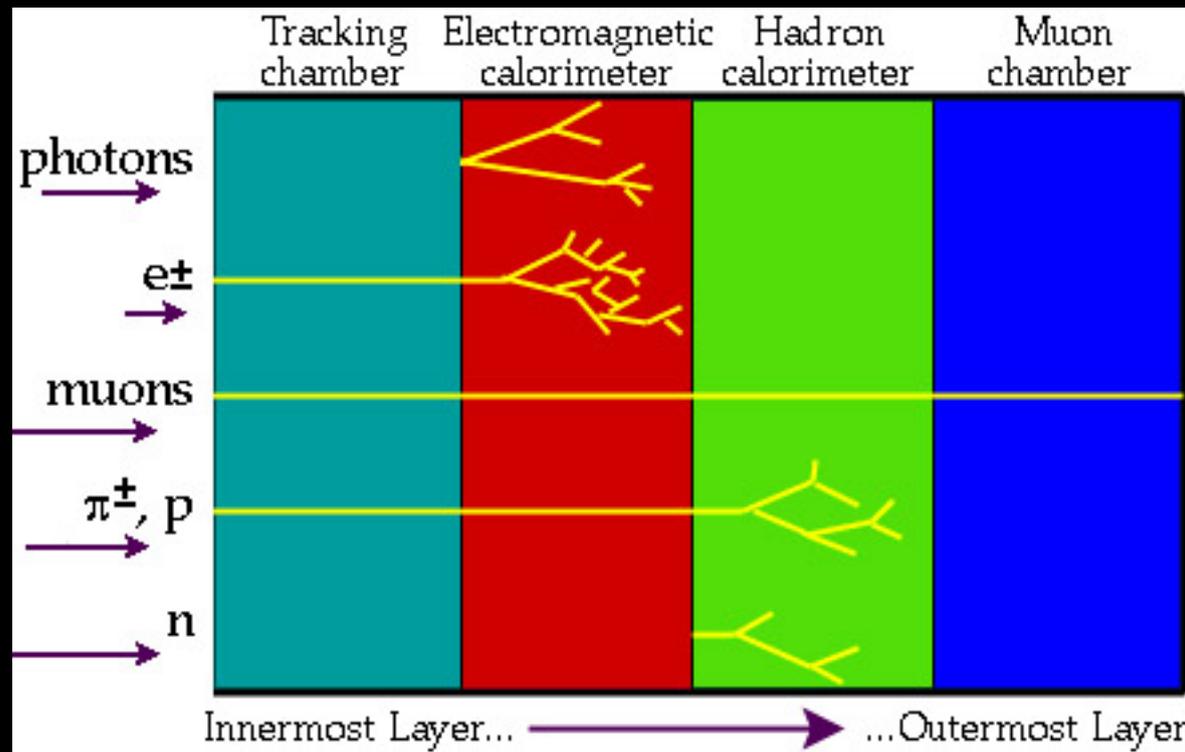
Détecteur de muons

- muon : seule particule chargée capable de traverser les calorimètres
- détecteur spécifiques à l'extérieur du<sup>35</sup>détecteur



# Détection

## Résumé



# Conclusion

# Les questions en suspens

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes aujourd'hui observés

→ 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 :

→ 95% 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

# Backup

# 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 « jauges » 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

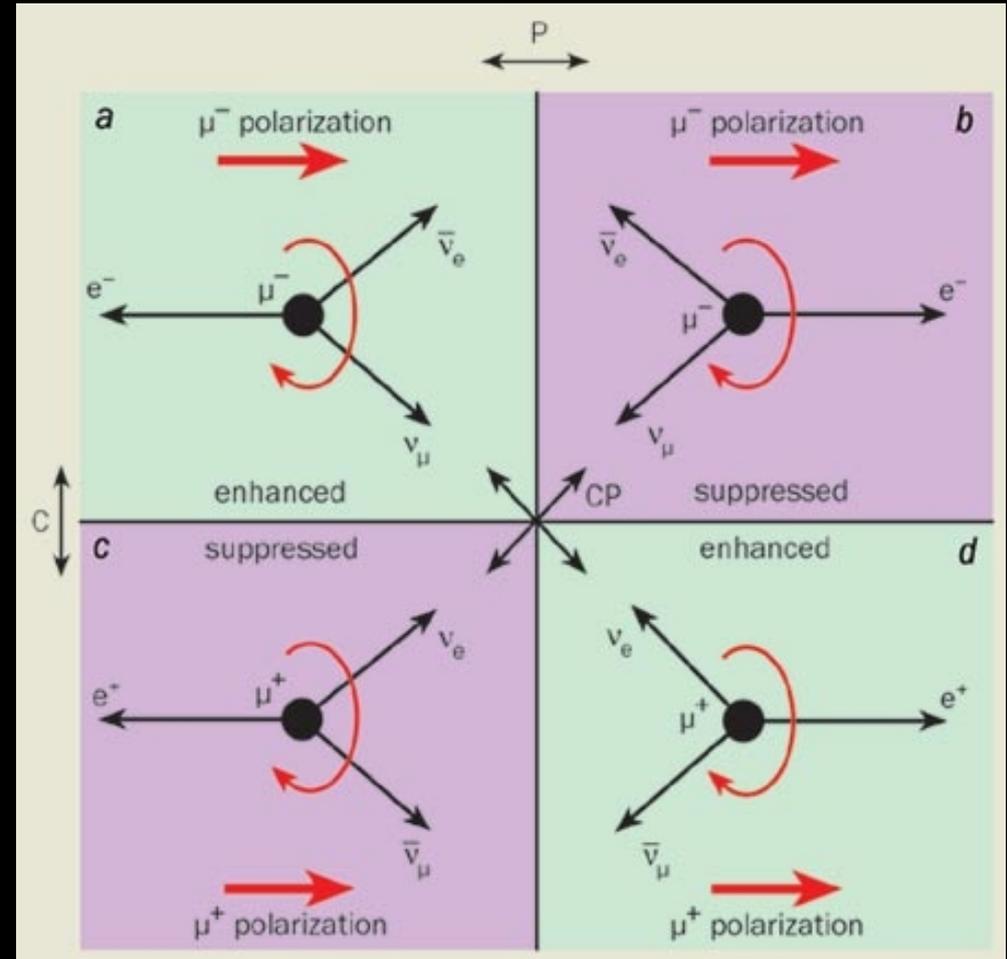
→ Opération C

□ 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.**

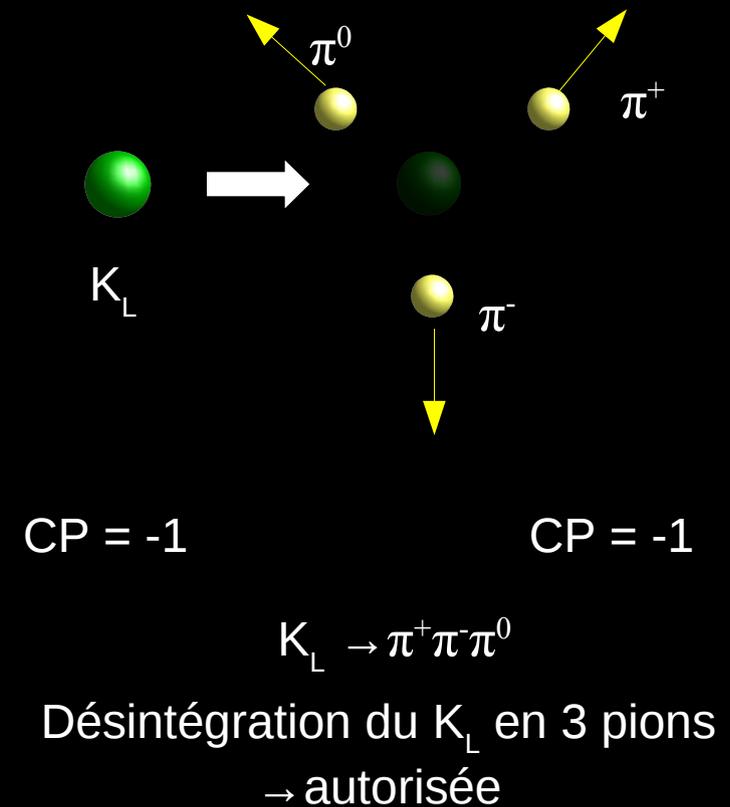
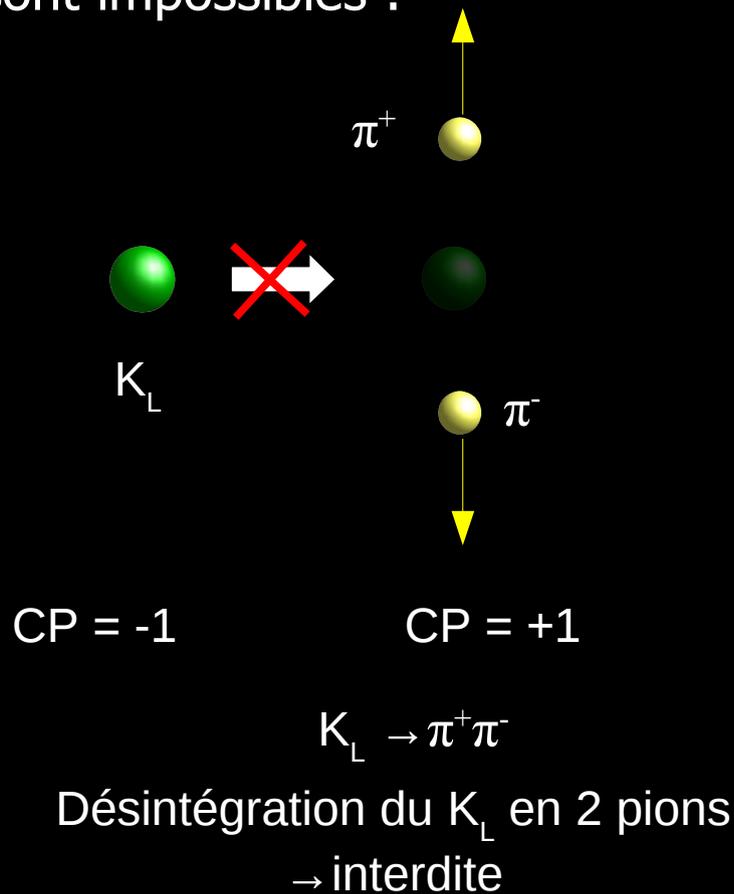


# Le Modèle Standard

## 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 :  $\sim 2$  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.