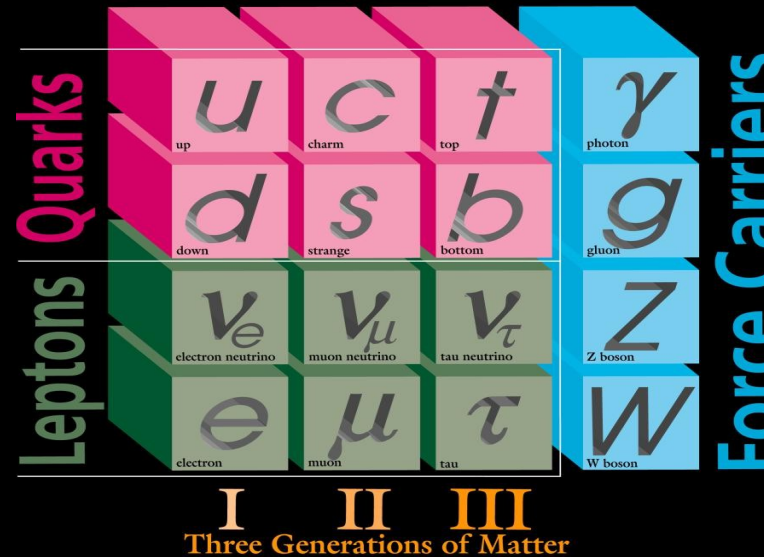


Introduction à la physique des particules élémentaires

ELEMENTARY PARTICLES



Julien Cogan

Sommaire

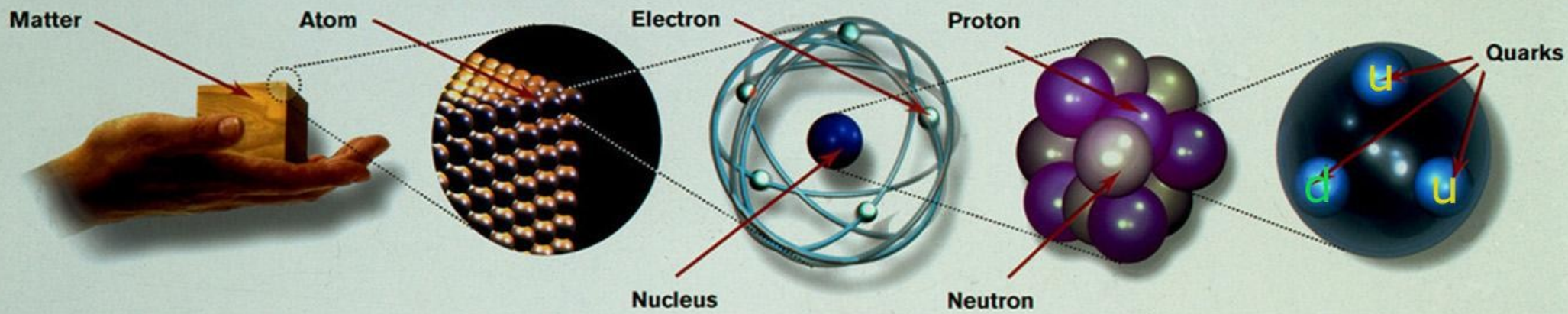
Descente vers l'infiniment petit : structure la matière ordinaire

Le Modèle Standard de la physique des particules

Illustrations

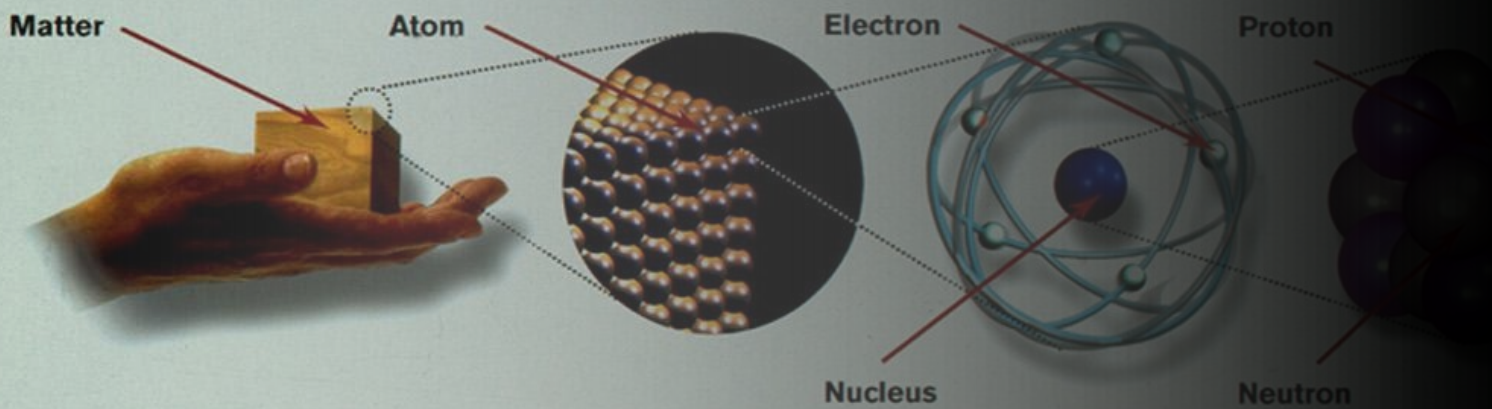
Observations

Conclusion

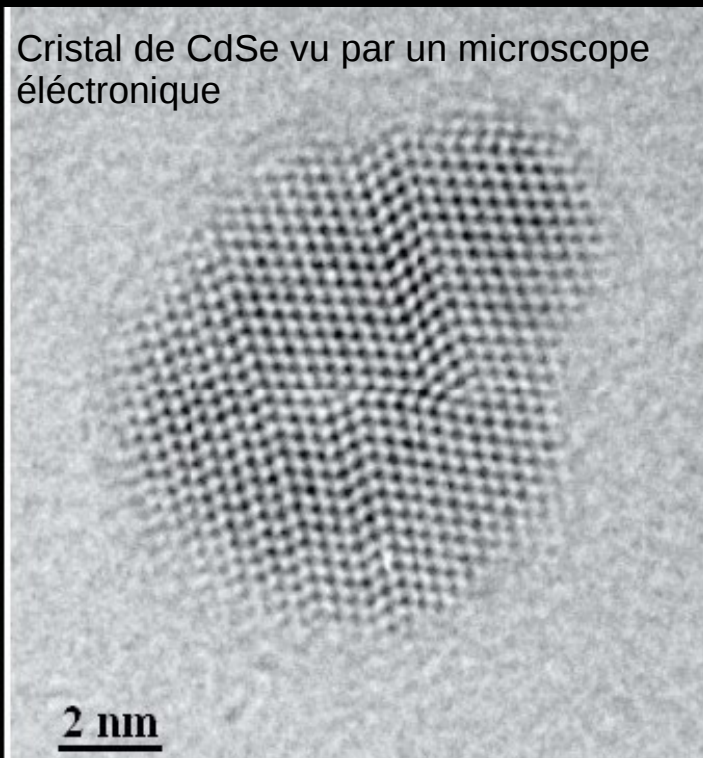


Descente vers l'infiniment petit

Structure de la matière 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

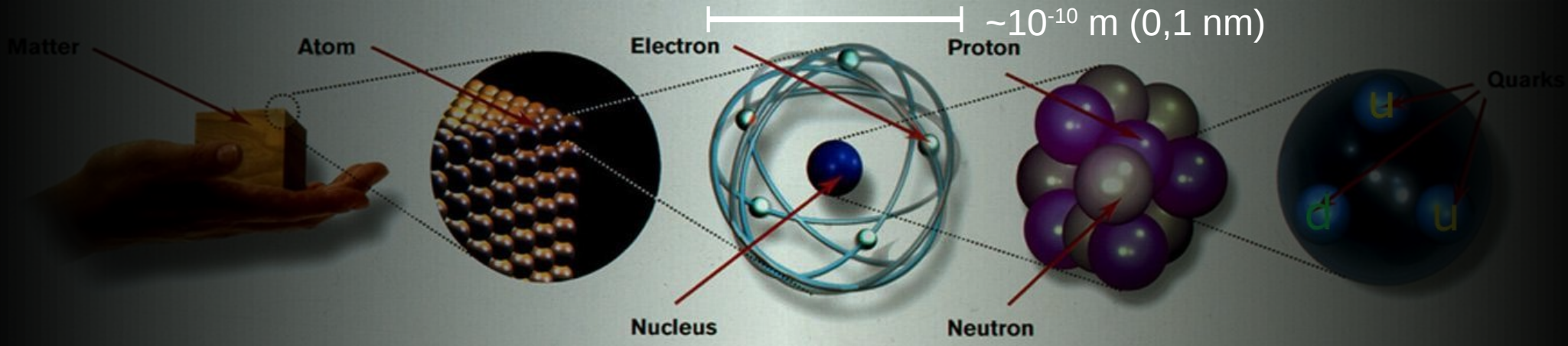


Table des éléments atomiques :

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																				18
1	H																			He
2	Li	Be																		Ne
3	Na	Mg																		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											

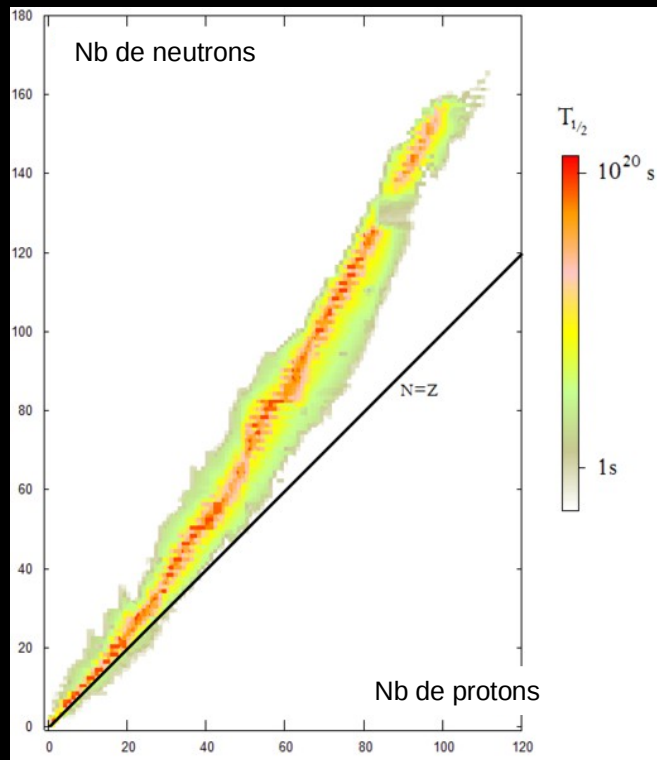
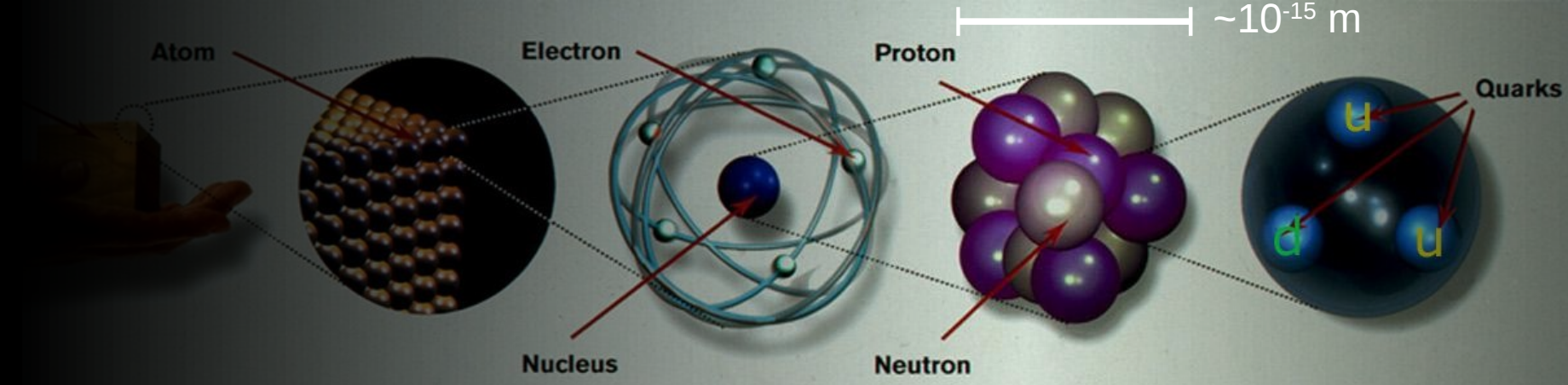
Atomes composés :

- d'un noyau
 - ↳ $\sim 100\ 000$ 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**

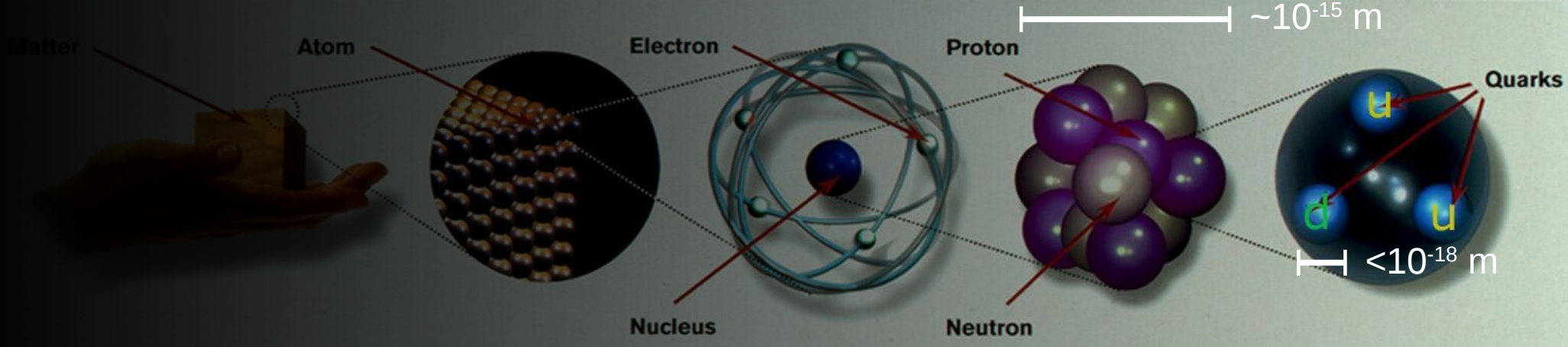
La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

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 nucléon



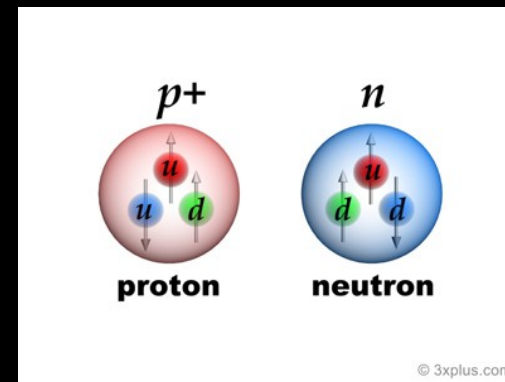
Nucléons (protons & neutrons) sont constitués de quarks

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

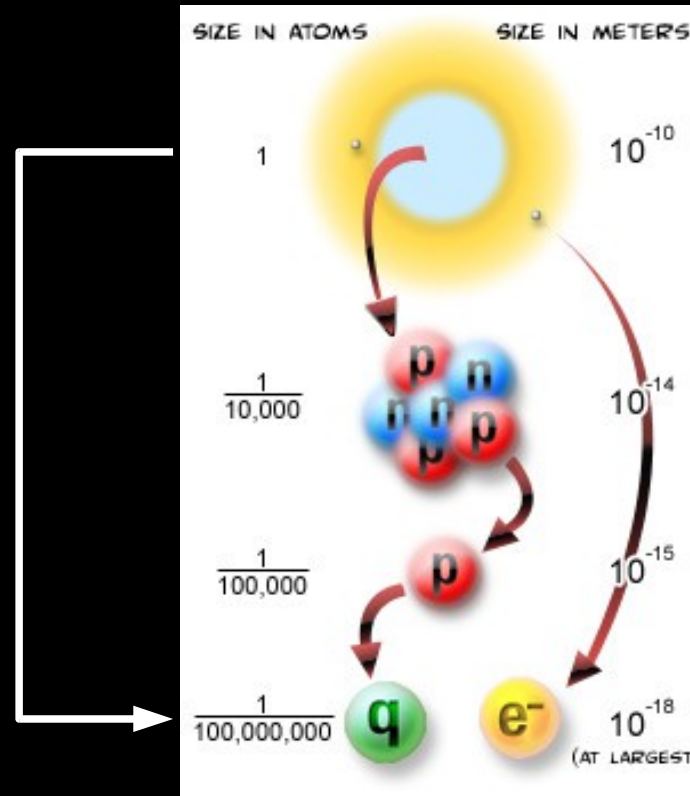


Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

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)

→ **Est-ce tout ?**

Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

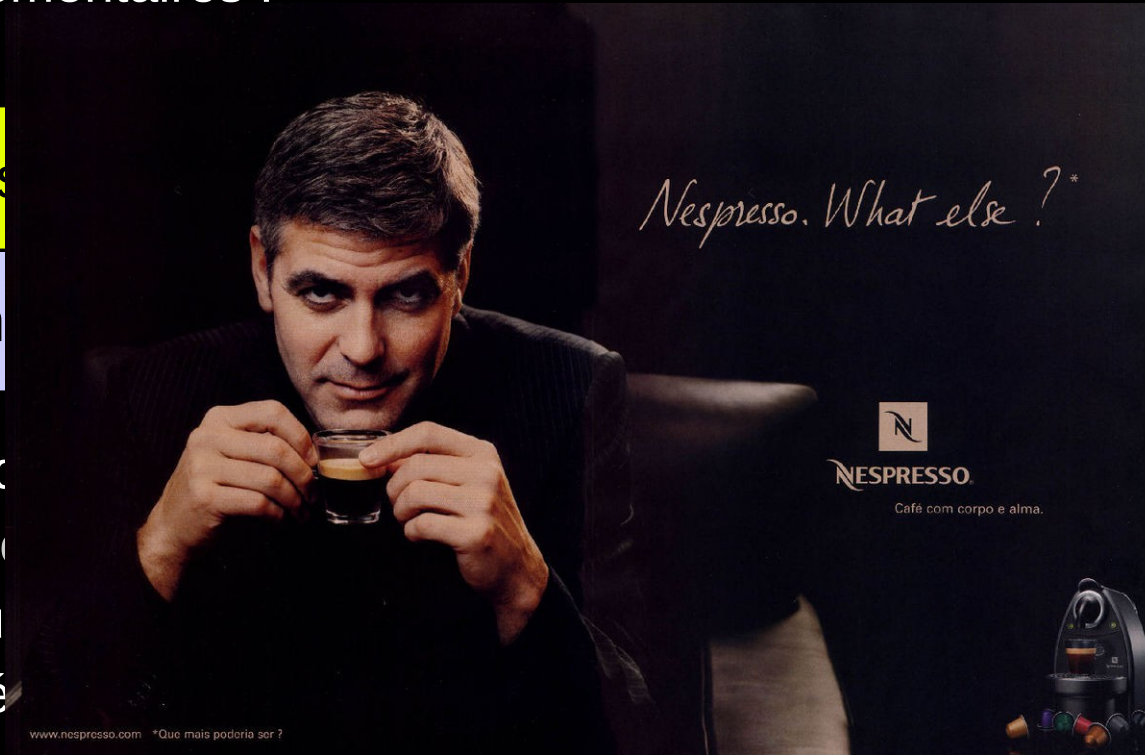
Constituants élémentaires :

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)



forte

)
nent)

→ **What else ?**

Descente vers l'infiniment petit

Autres formes de matière

		1 ^{ère} famille		2 ^{ème} famille		3 ^{ème} famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tau	τ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_μ	neutrino tau	ν_τ

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 !**

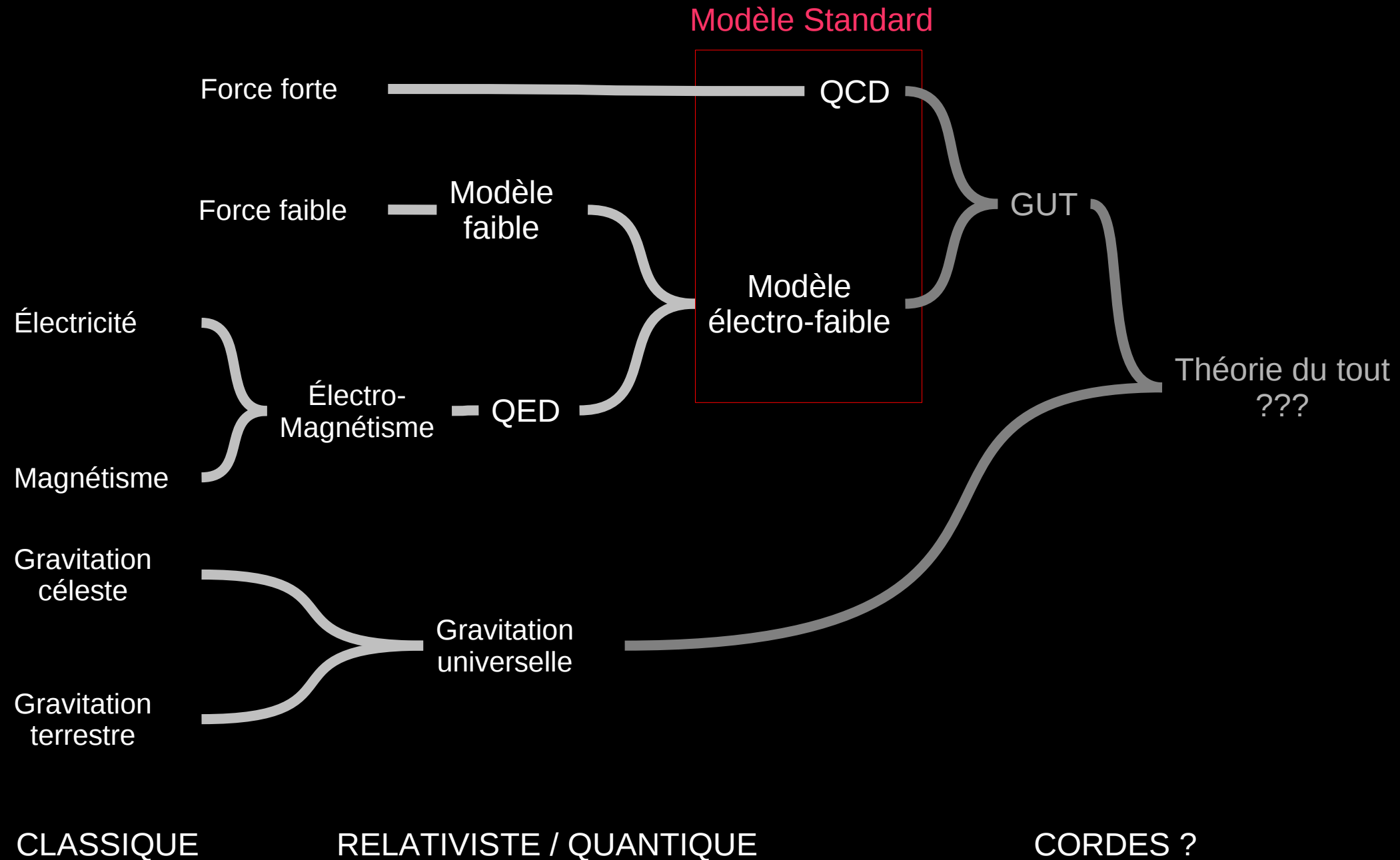
→ dont les particules sont :

‣ plus lourdes

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

Le Modèle Standard

Théories fondamentales

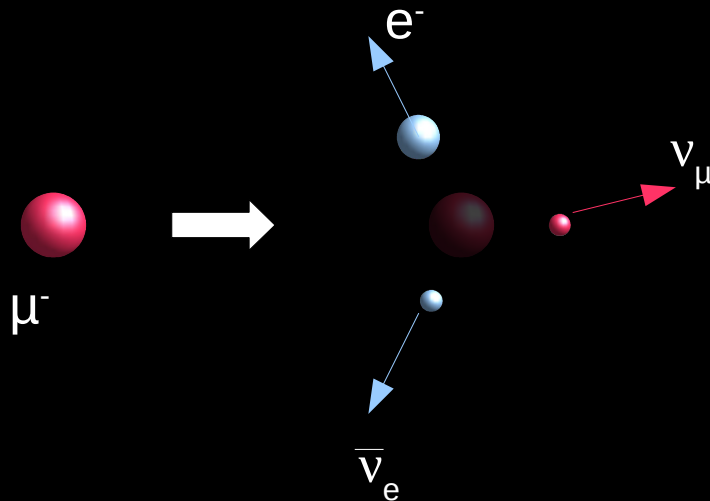


Le Modèle Standard

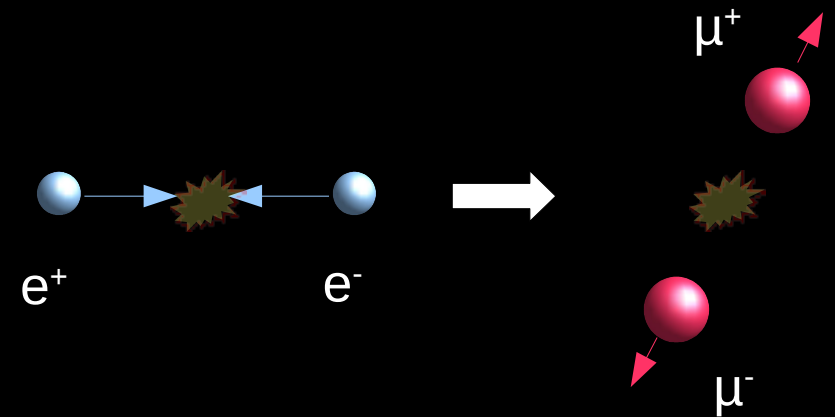
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique* **relativiste**

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

– λ : longueur d'onde

↘ corpuscule : comportement individuel

– P : quantité de mouvement

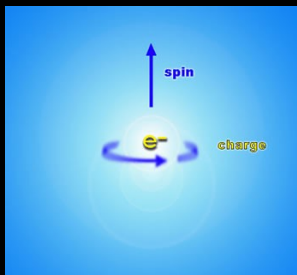
↘ dualité :

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

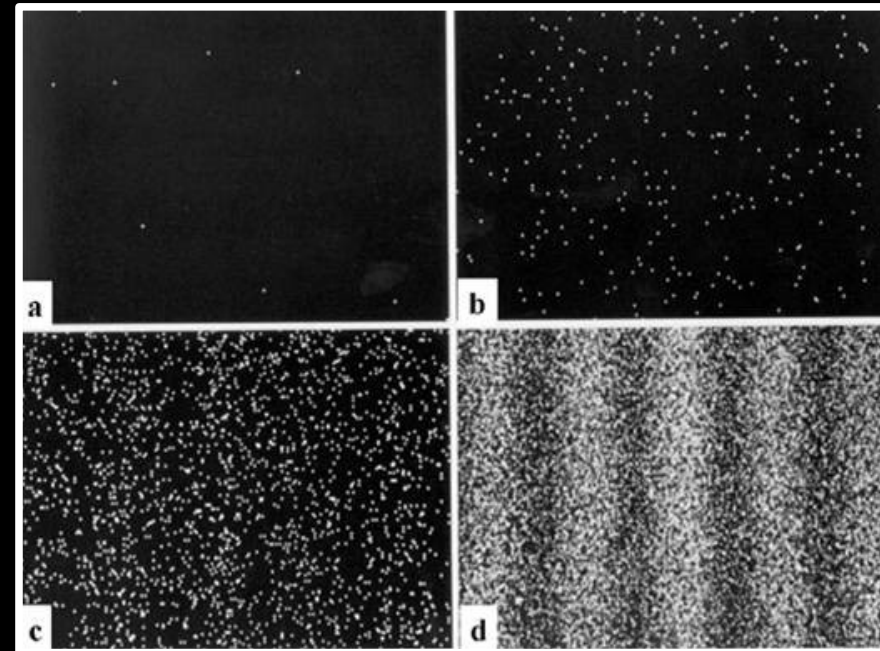
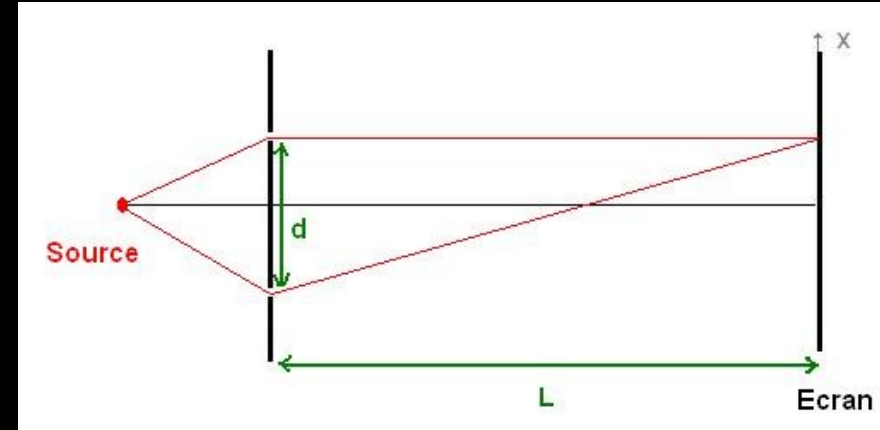
→ **Plus l'énergie est élevée, plus la longueur d'onde est faible (plus on sera sensible à des détails petits)**

→ propriétés purement quantique

↘ spin :



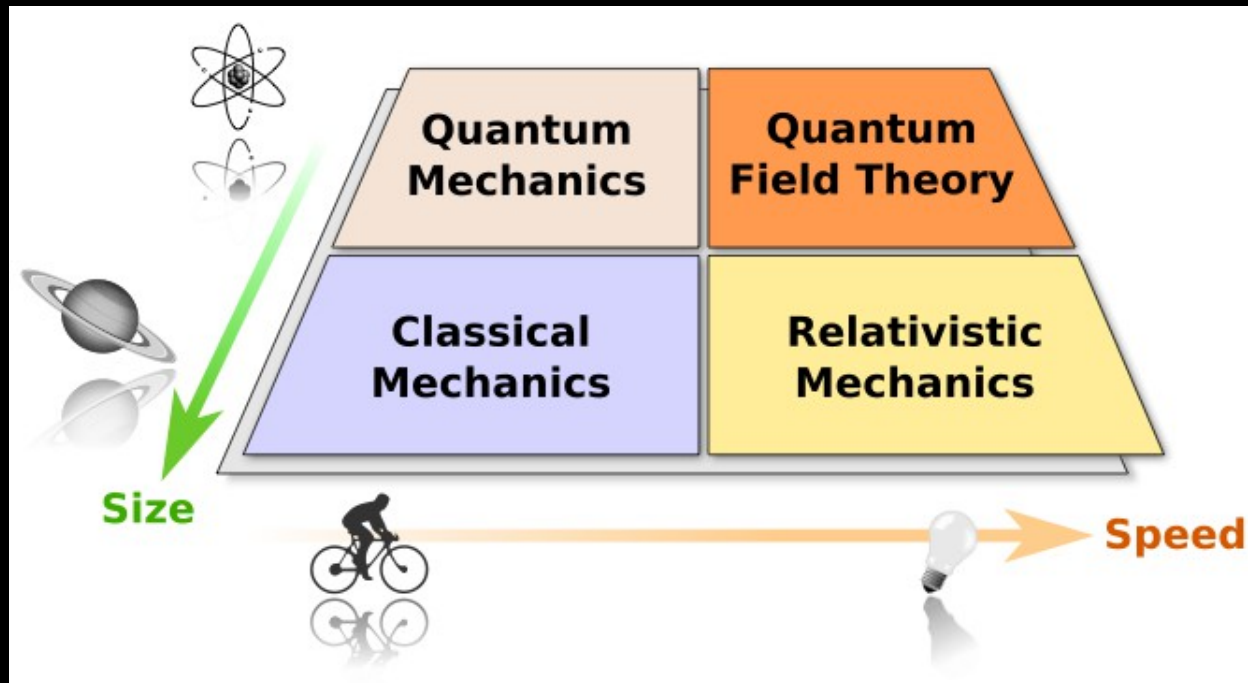
assimilable à une rotation intrinsèque d'une particule (moment angulaire)



Expérience des fentes d'Young

Le Modèle Standard

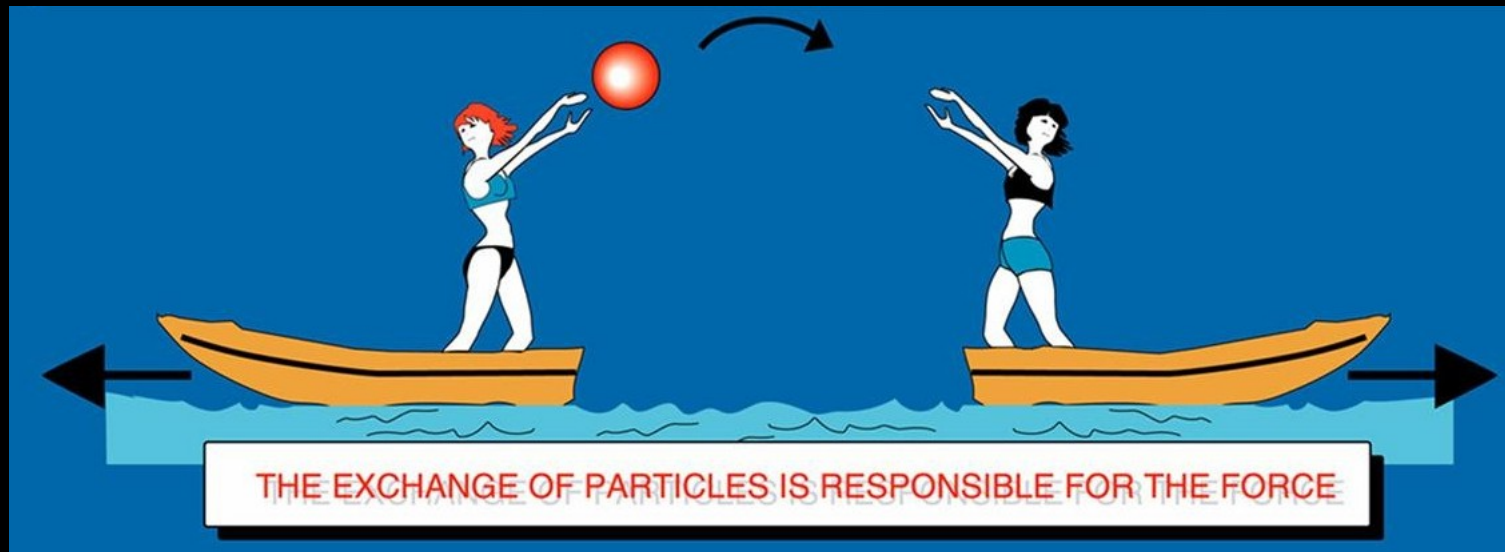
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*



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

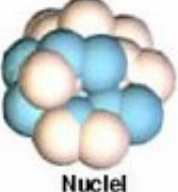
Forces

Strong


Gluons (8) 

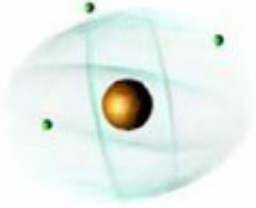
Quarks 

Mesons Baryons 


Nucléi 


Electromagnetic

Photon 

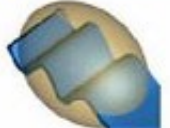
Atoms Light Chemistry Electronics 

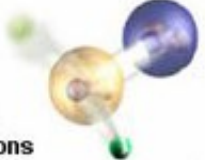
Gravitational

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 :

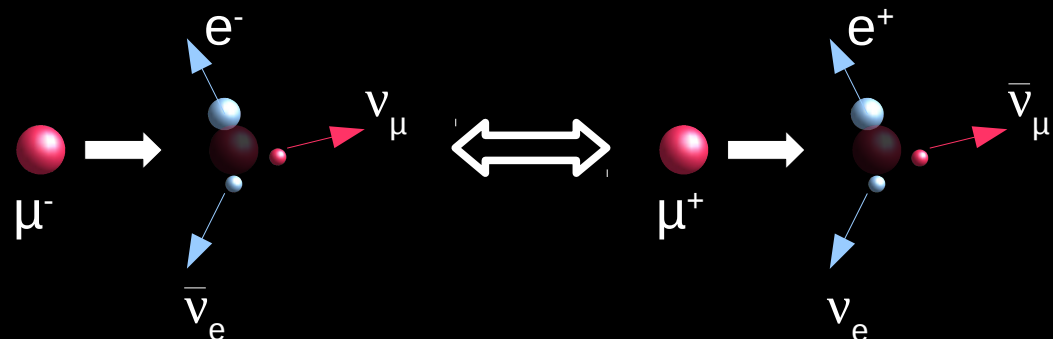
- de même masse et de même spin
- autres nombres quantiques renversés
 - e.g. : charge électrique
- notation courante : \bar{b} antiparticule associée au quark b

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

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 ²	Electric charge	
~ 0	ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	
1	e electron	0.000511	-1	
~ 0	ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	
200	μ muon	0.106	-1	
~ 0	ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	
3500	τ tau	1.777	-1	
	u up	0.002	2/3	4
	d down	0.005	-1/3	10
	c charm	1.3	2/3	3000
	s strange	0.1	-1/3	200
	t top	173	2/3	340000
	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 ²	Electric charge
 photon	0	0
 W⁻	80.39	-1
 W⁺ W bosons	80.39	+1
 Z⁰ Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

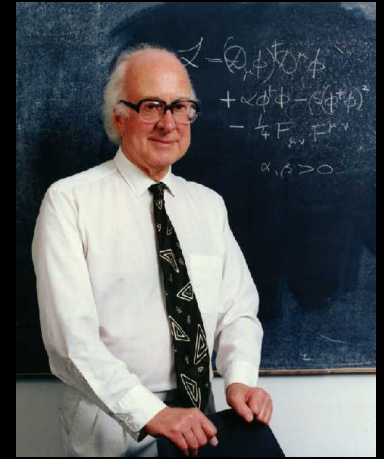
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

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

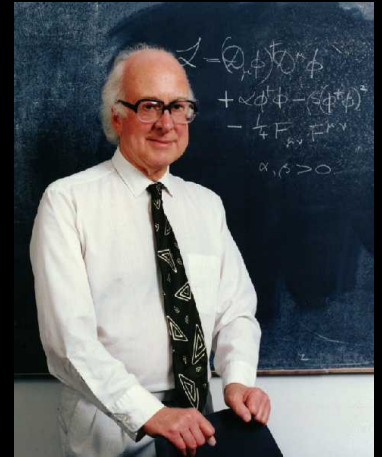
Dans la théorie, les particules sont sans masse.

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 , γ 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 !

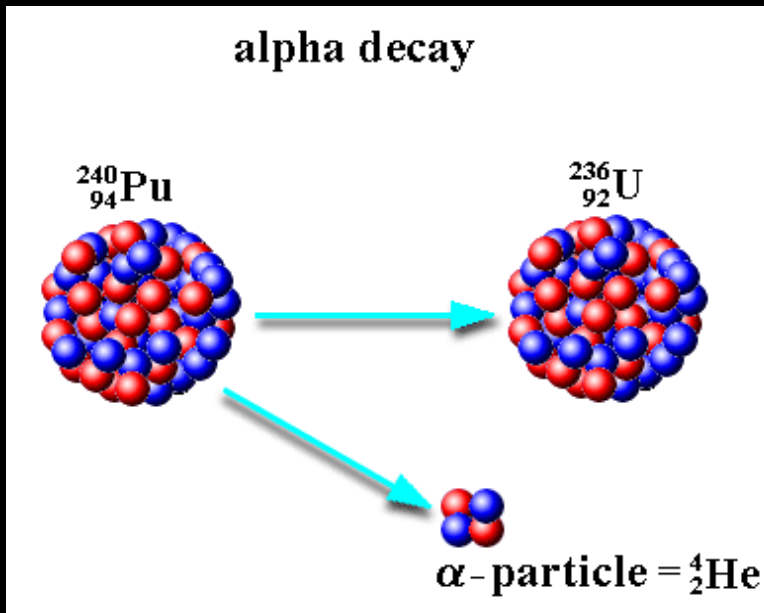
Activement recherché

Illustrations

Désintégrations

Qu'est-ce qu'une désintégration ?

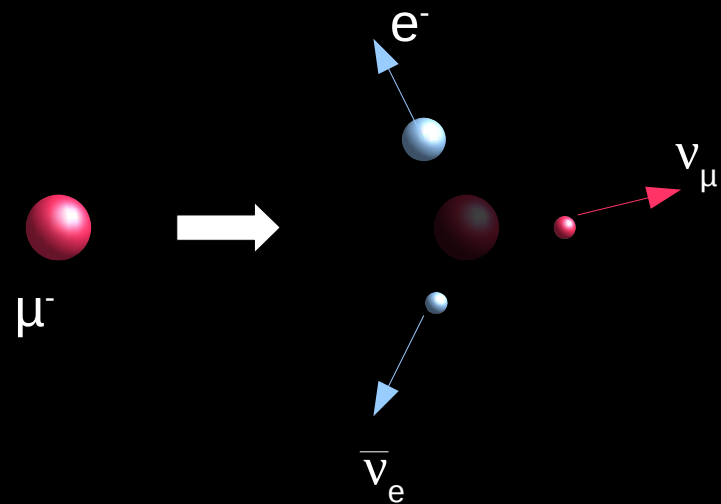
Désintégration nucléaire



Séparation des nucléons :

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

Désintégration d'une particule élémentaire



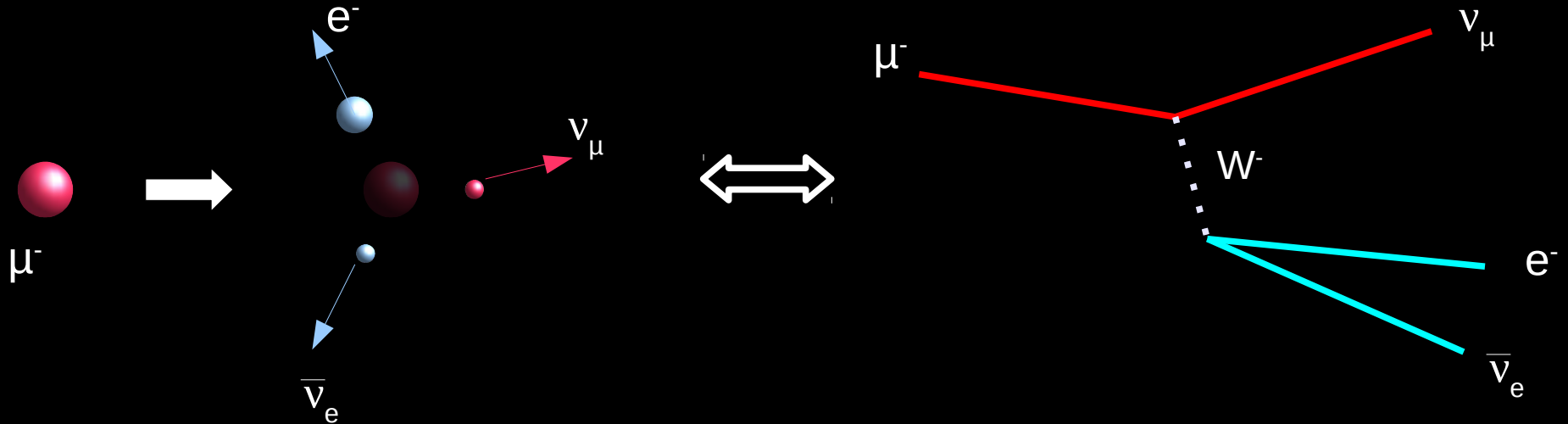
Transformation de la particule initiale :

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

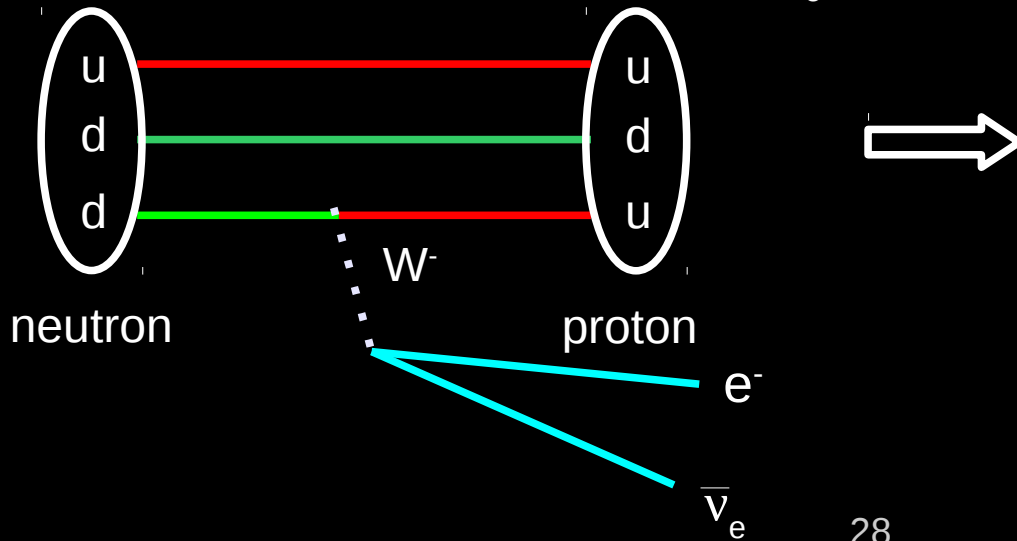
Désintégrations

Exemples

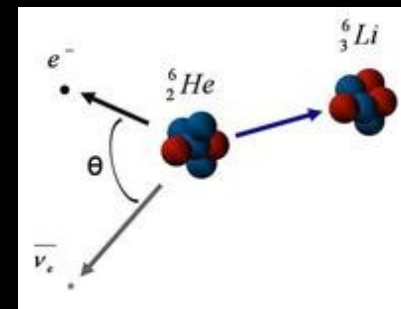
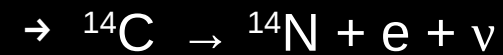
Désintégration du muon : $\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$



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 (electro-)faible en action

Loi de conservation :

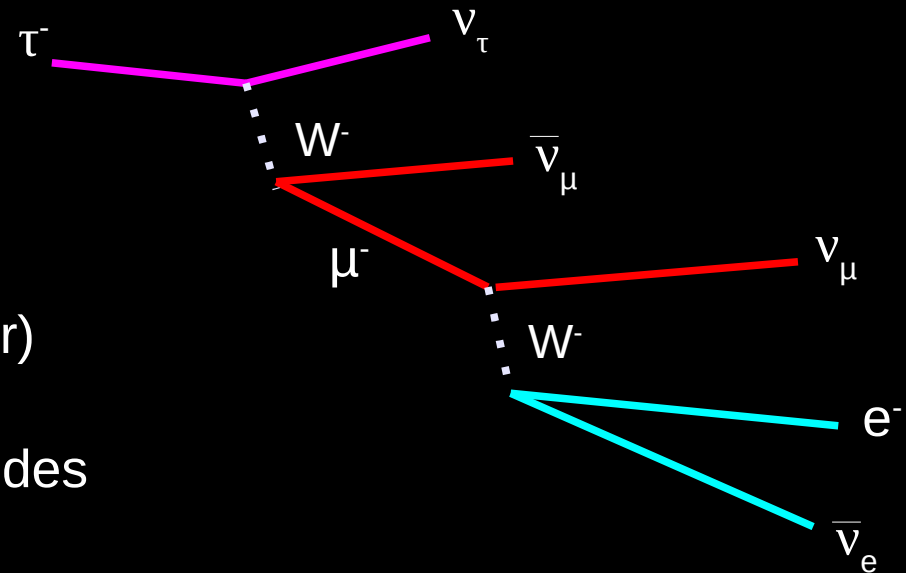
→ l'énergie totale

- 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

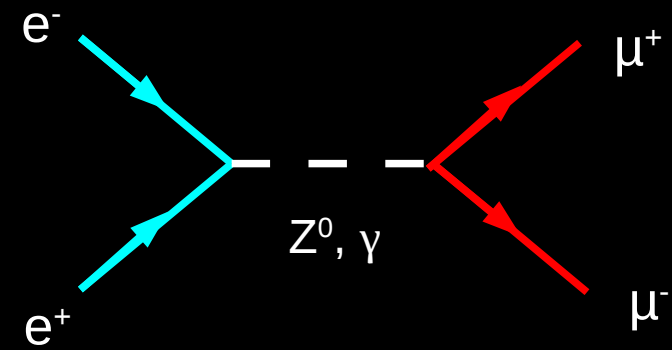
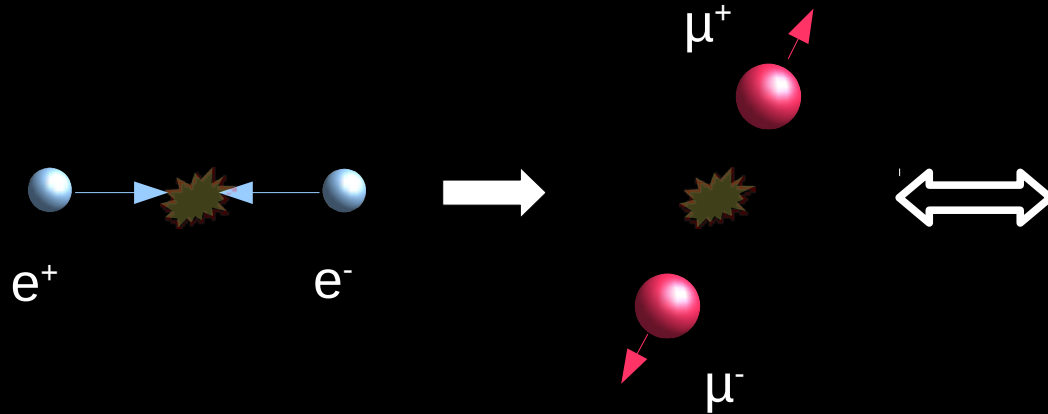
→ responsable de toute les désintégrations des particules élémentaires

- seules les plus légères sont stables

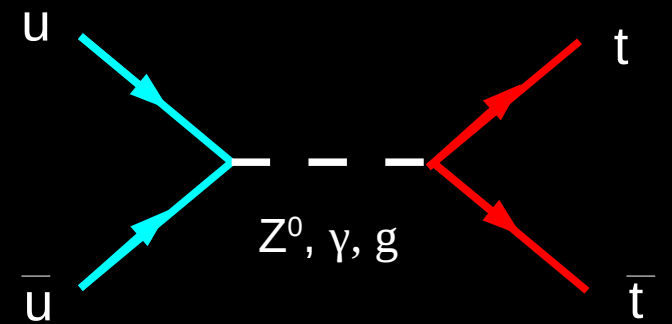
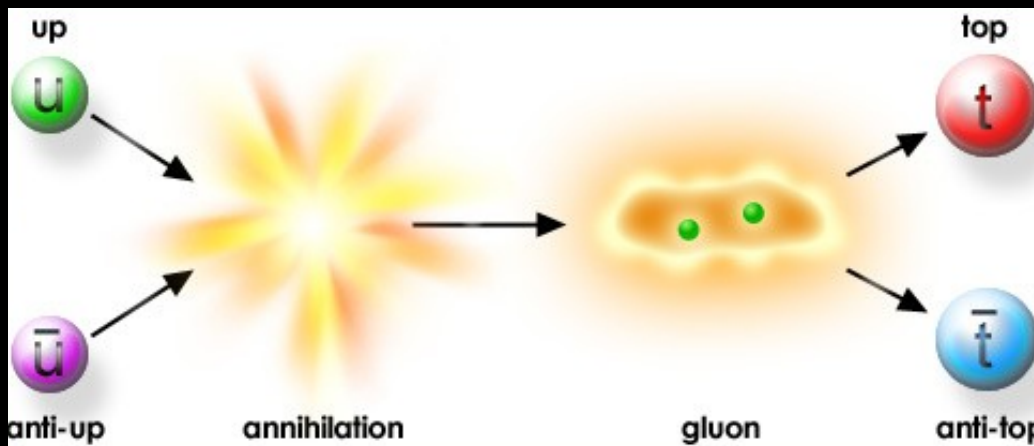
Annihilations

Exemples

Annihilation e^+e^- (interaction faible)



Annihilation $q\bar{q}$



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

Interaction forte

Chromodynamique

Charge : couleur

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

→ les couleurs s'ajoutent vectoriellement

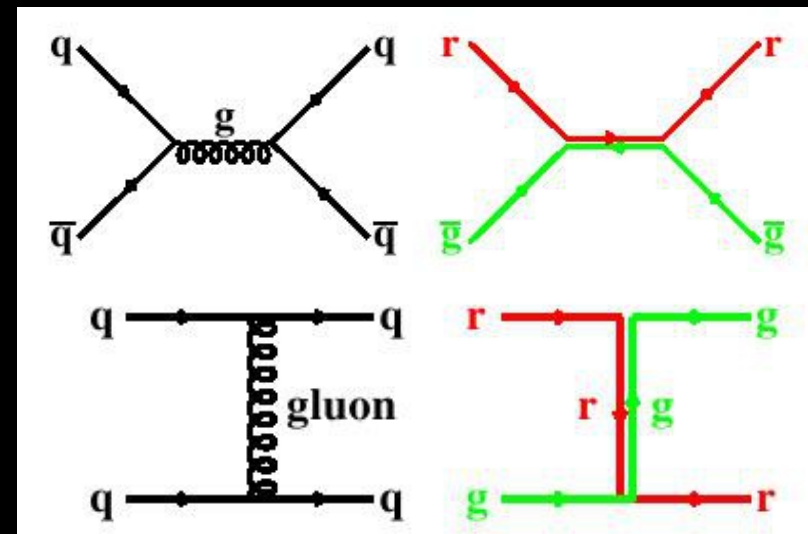
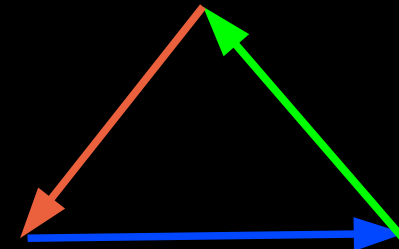
→ **B+V+R= Blanc**

→ **B+B= Blanc**

Vecteur : **gluons** (8)

→ porte une couleur et une « anticouleur »

Les couleurs sont conservées par interaction forte

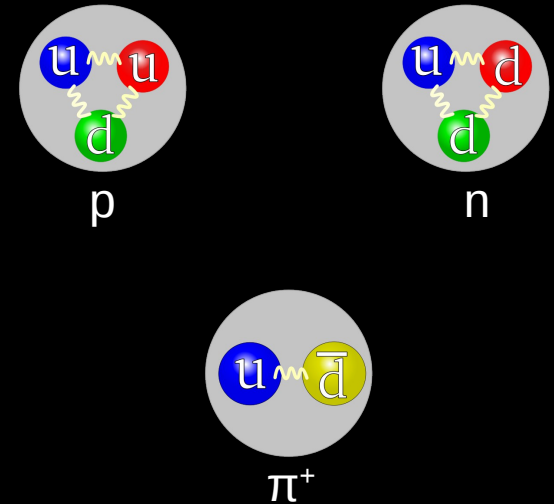


Interaction forte

Hadronisation

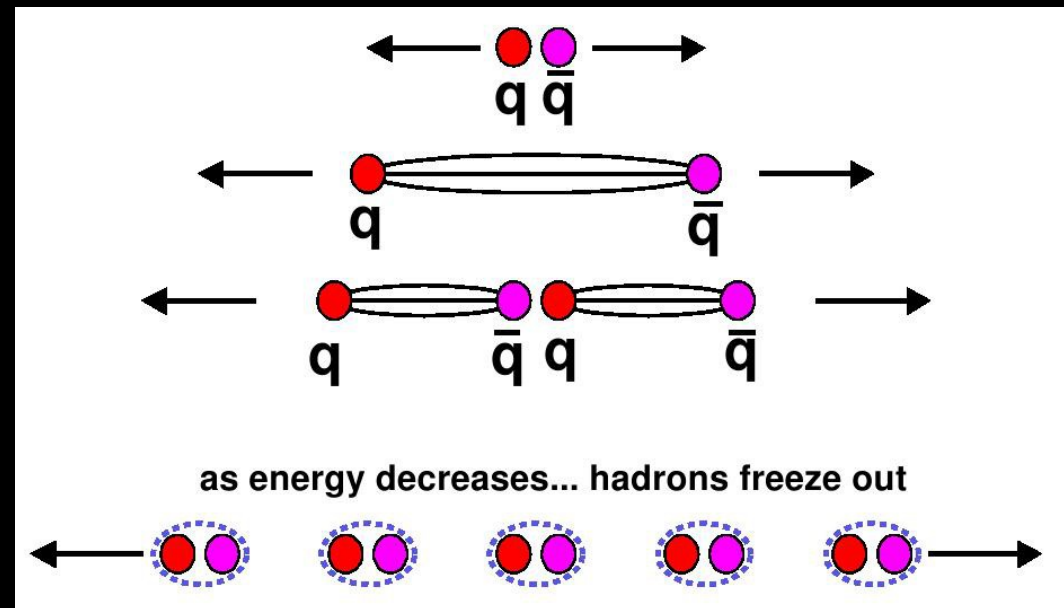
Le vide est opaque à la couleur :

- 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 :

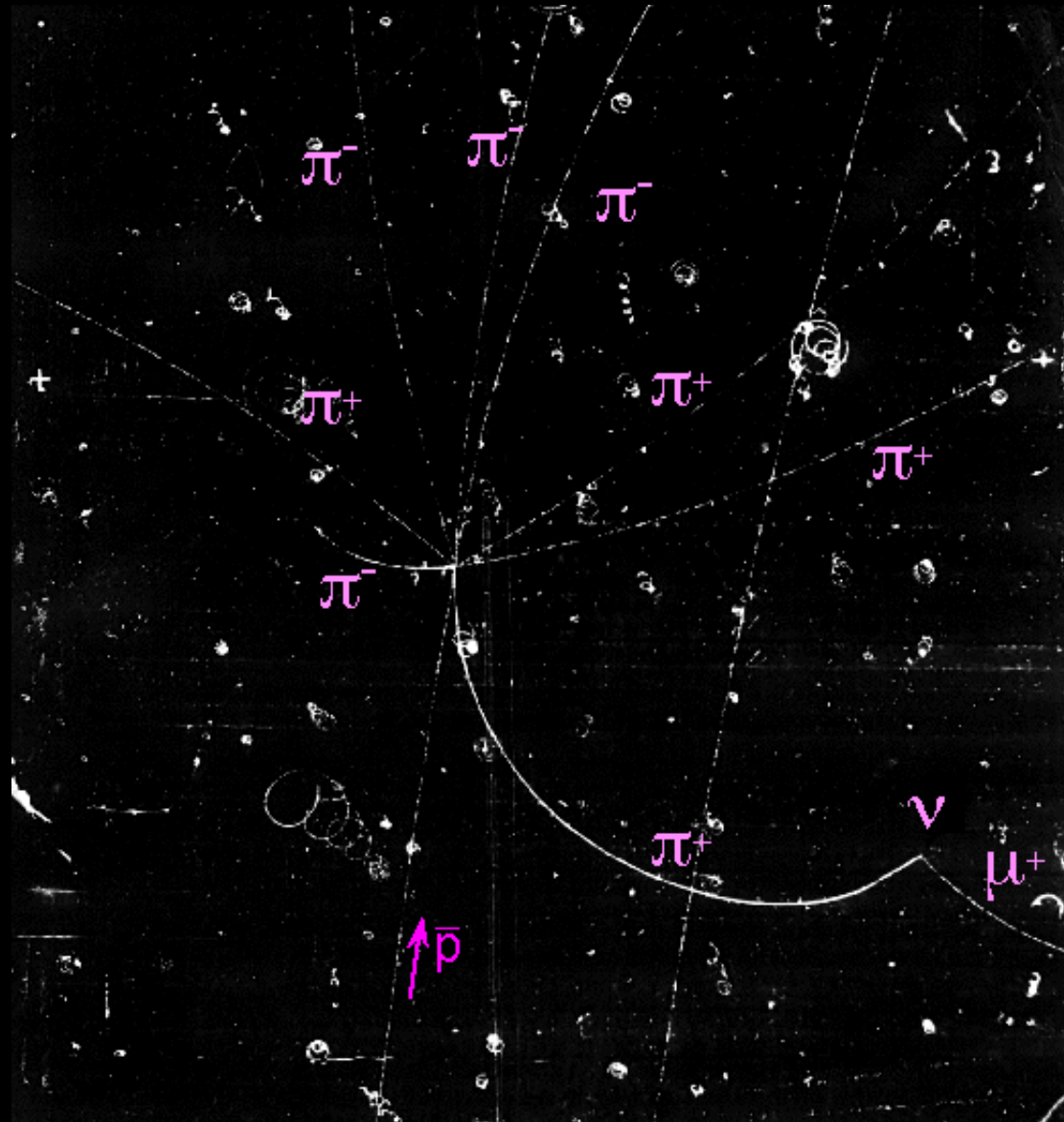
- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ($E > 2m_q$)



L'interaction forte en action

En action

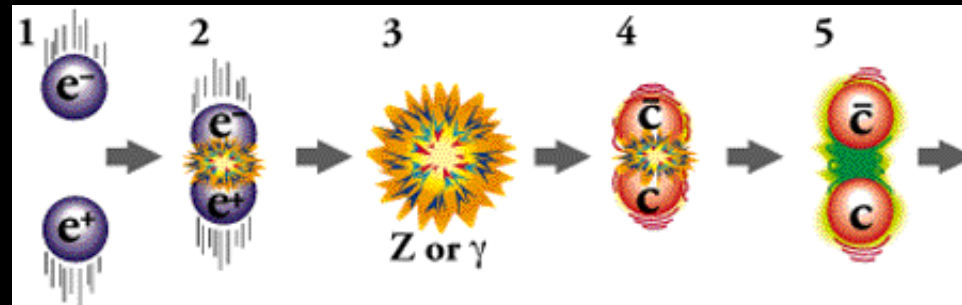
Un antiproton (projectile) s'annihile avec un proton au repos



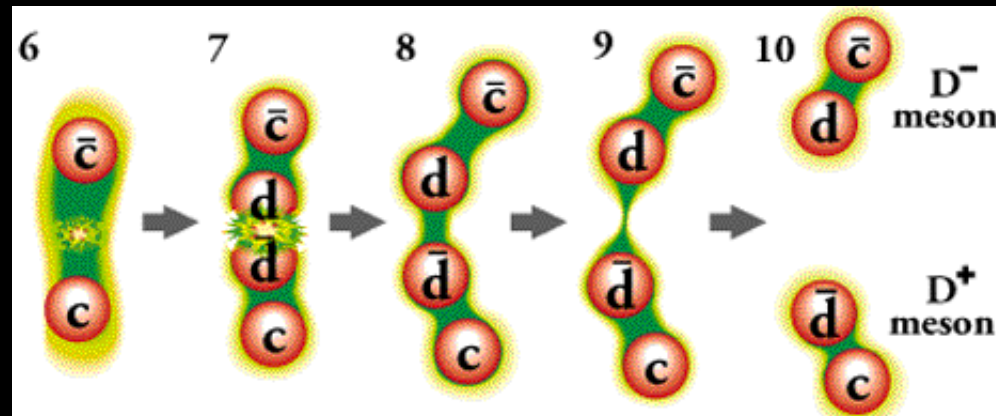
(photo de
chambre à bulles
)

Un exemple complet

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



Hadronisation des quarks (*int. forte*):

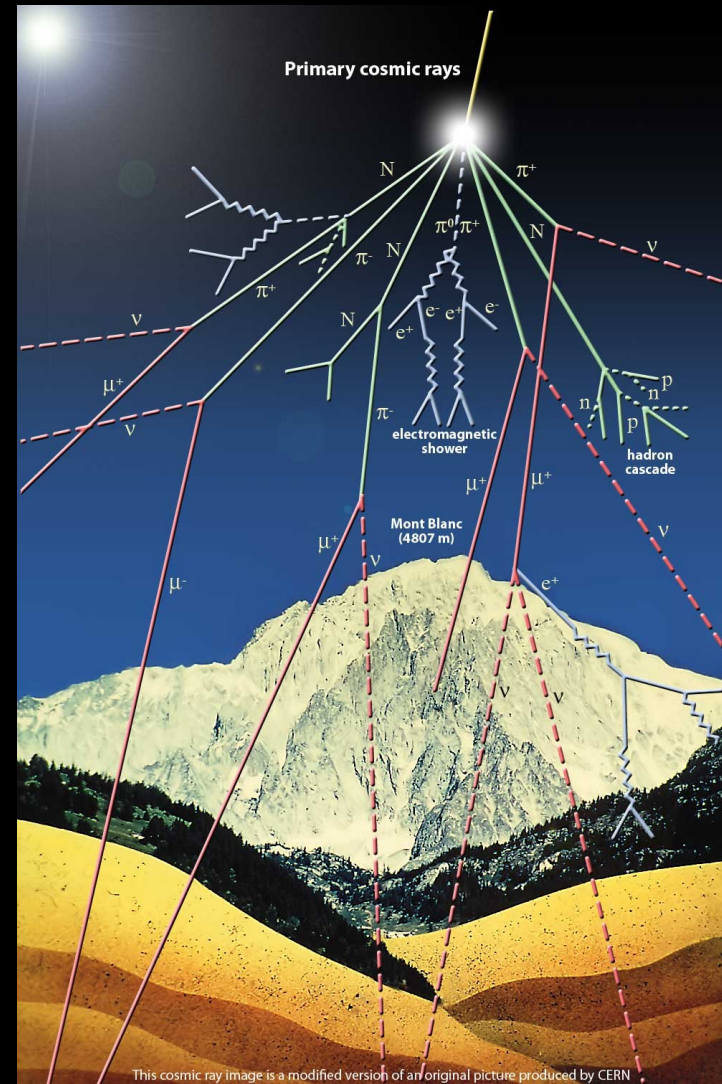


Observation

Création

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

- sources naturelles :
 - ↳ e.g. rayons cosmiques



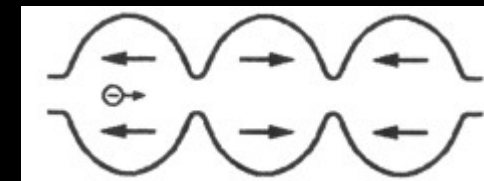
Création

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

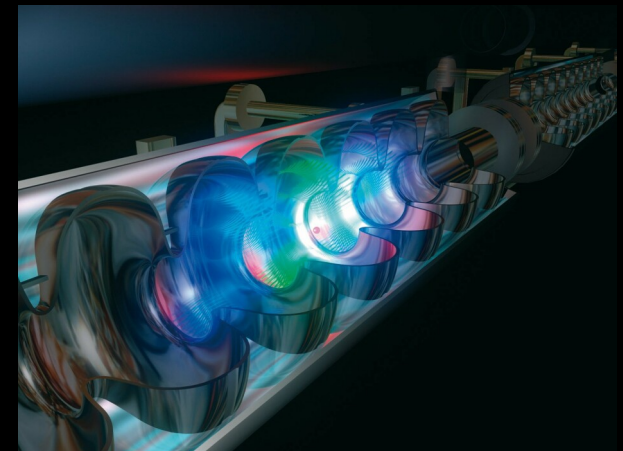
- sources naturelles :
 - ↳ e.g. rayons cosmiques

- 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

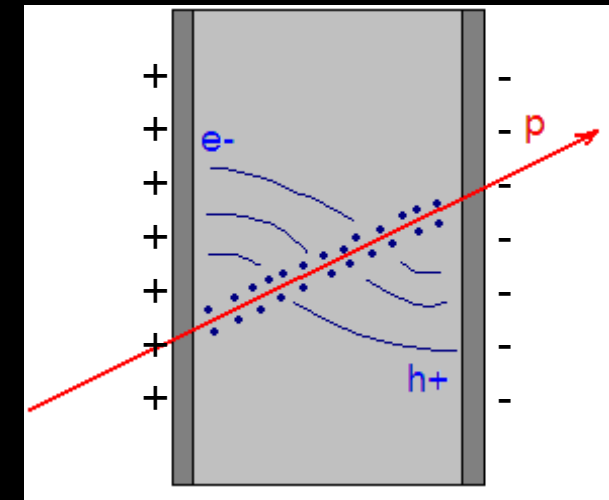


Détection

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)

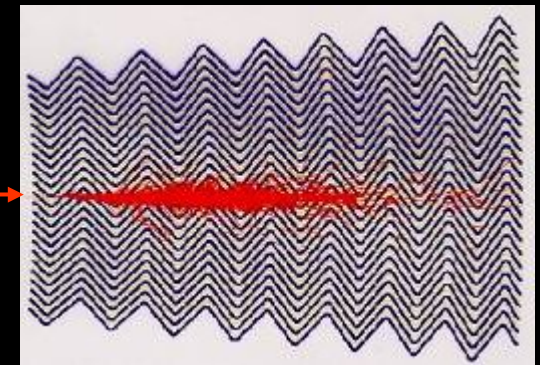
- milieu peu dense : gaz ou fine couche de silicium
- champs magnétique : courbe la trajectoire, permet la mesure de l'impulsion
- détecteur non-invasif !

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

- électromagnétique : γ , e^\pm
- hadronique (plus dense, moins précis) : p , n , π^\pm

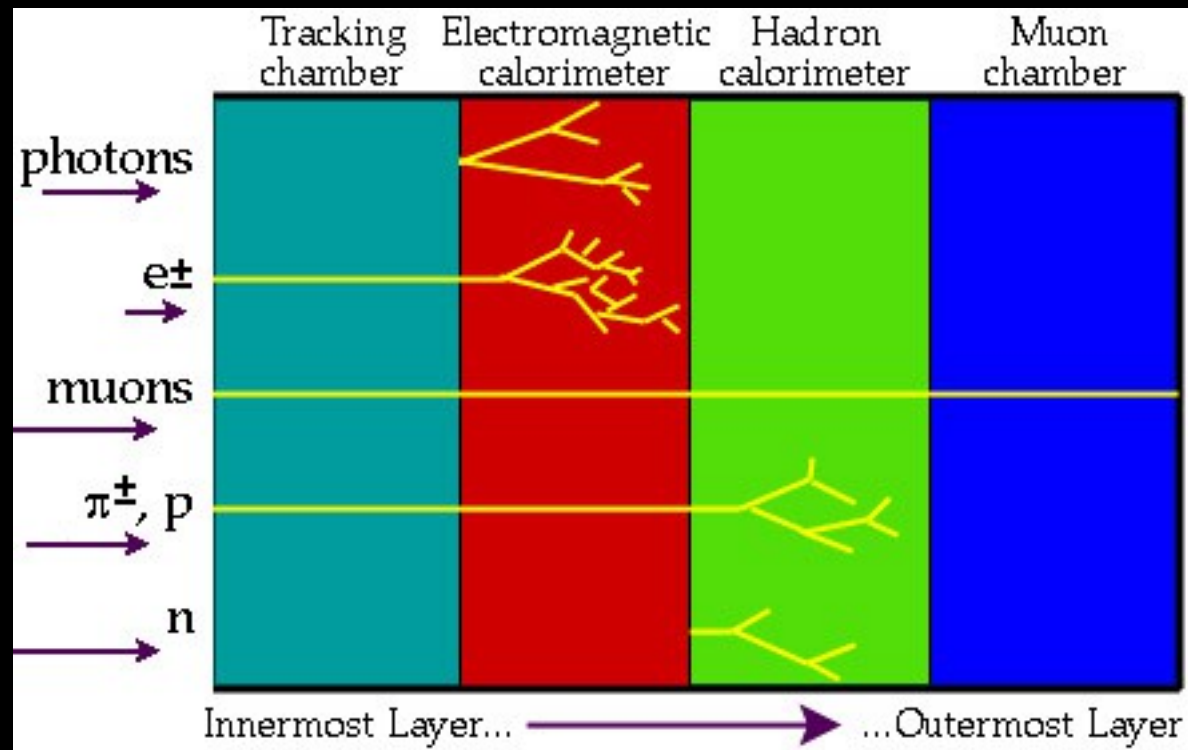
Détecteur de muons :

- muon : seule particule chargée capable de traverser les calorimètres
- détecteur spécifiques à l'extérieur du 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 :

→ **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

Backup

Les interactions

Le Modèle Standard

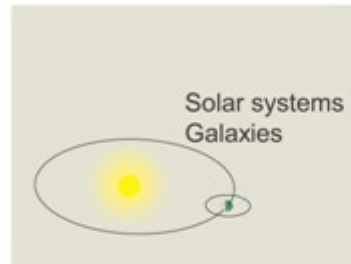
gravitation

pesanteur
mouvements astres
agit sur les objets massifs

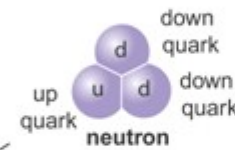
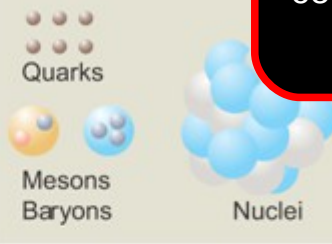
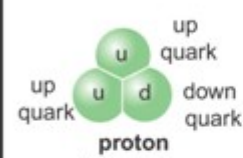
Les interactions

Interaction forte

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

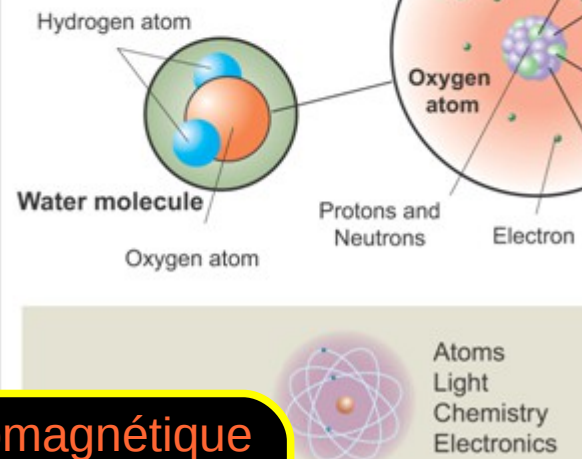


Gravity Force



Strong force

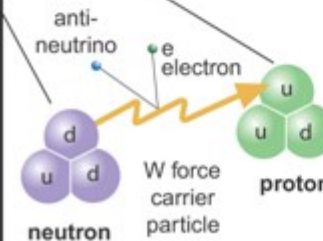
Electromagnetic force



Interaction électromagnétique

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

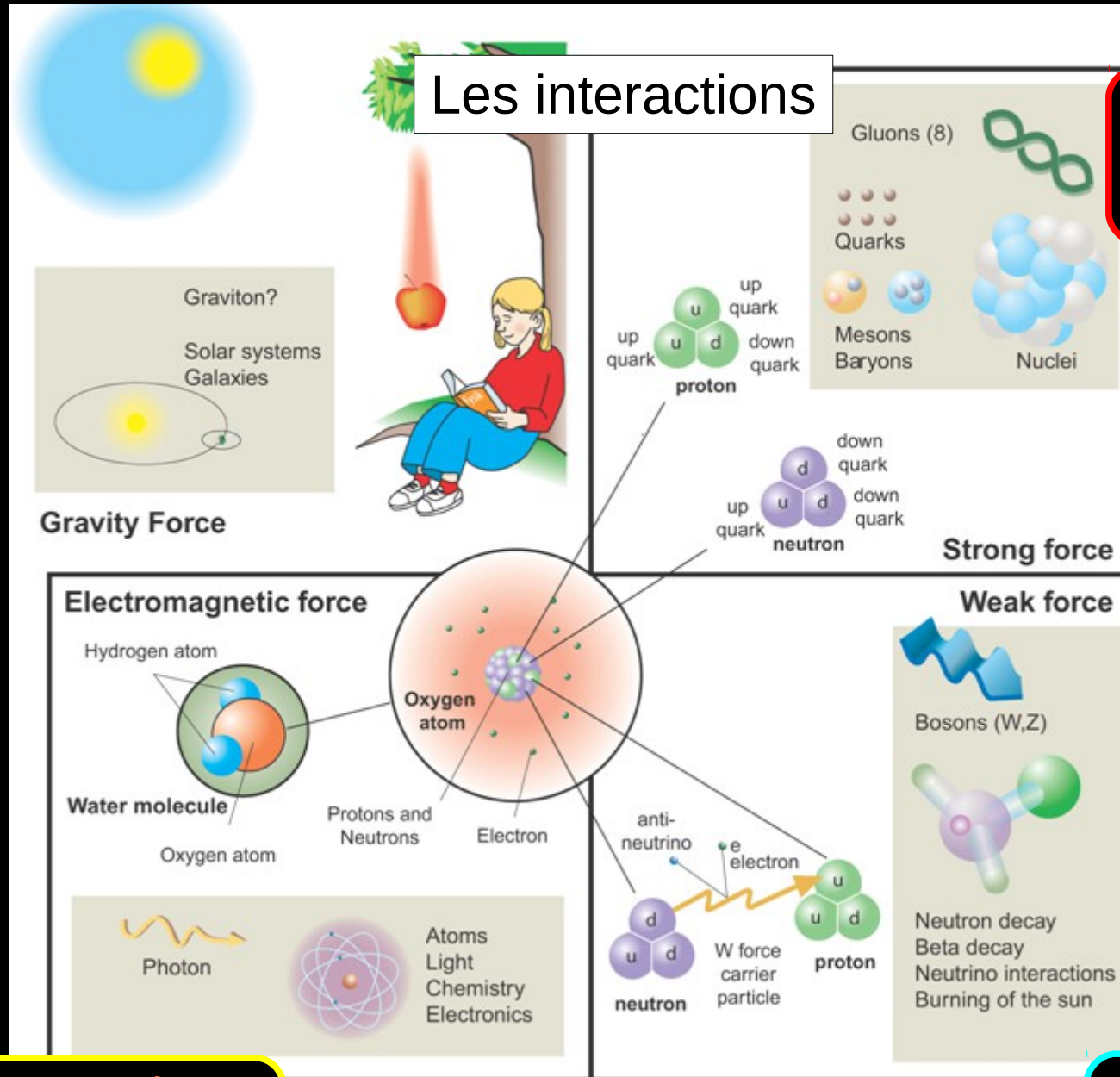
Weak force



Interaction faible

désintégration du neutron,
radioactivité β , ...
agit sur toutes les particules

Le Modèle Standard



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

Interaction électromagnétique
vecteur : photon (γ) ; M=0
charge : charge électrique

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

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

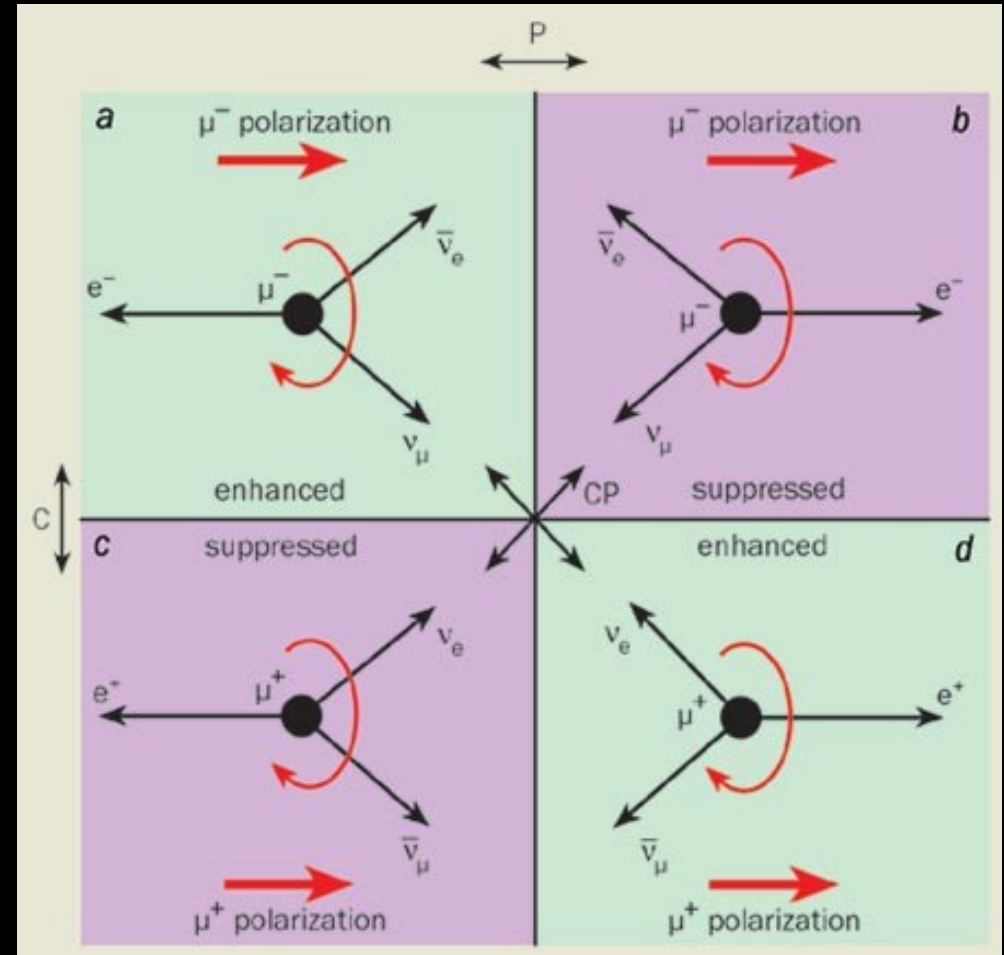
→ Opération C

□ 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.**

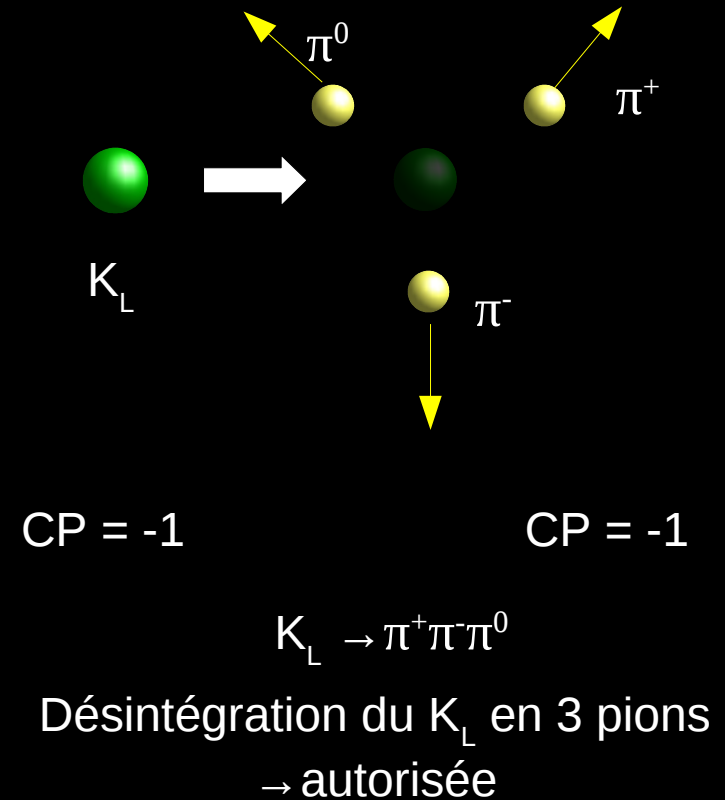
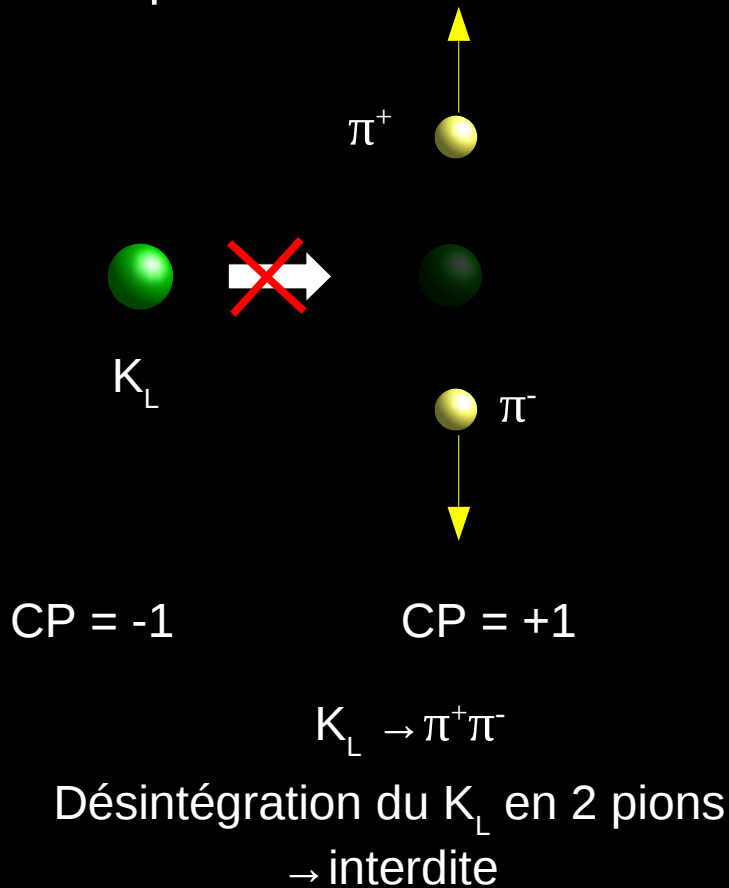


Le Modèle Standard

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.