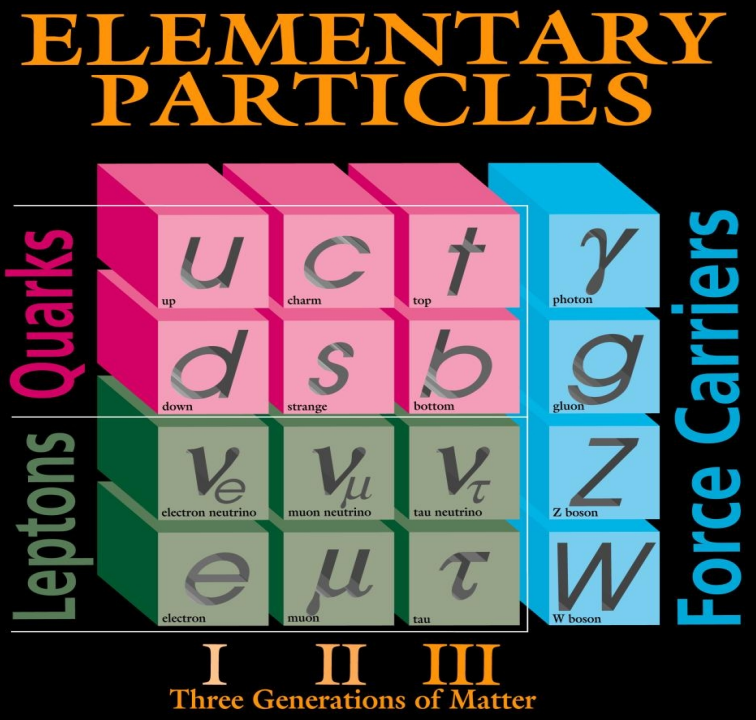
Introduction à la physique des particules élémentaires



Julien Cogan

Sommaire

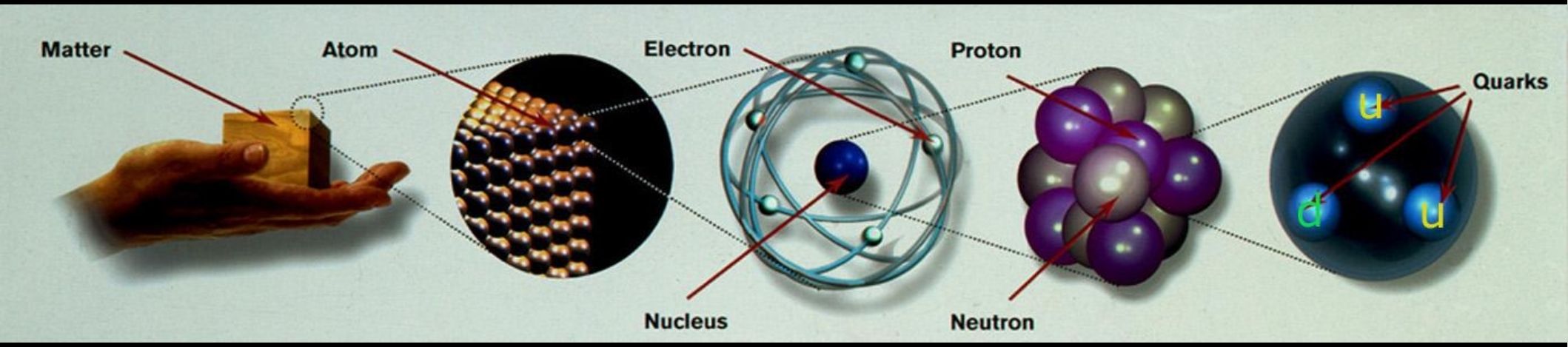
Descente vers l'infiniment petit : structure la matière ordinaire

Le Modèle Standard de la physique des particules

Illustrations

Conclusion

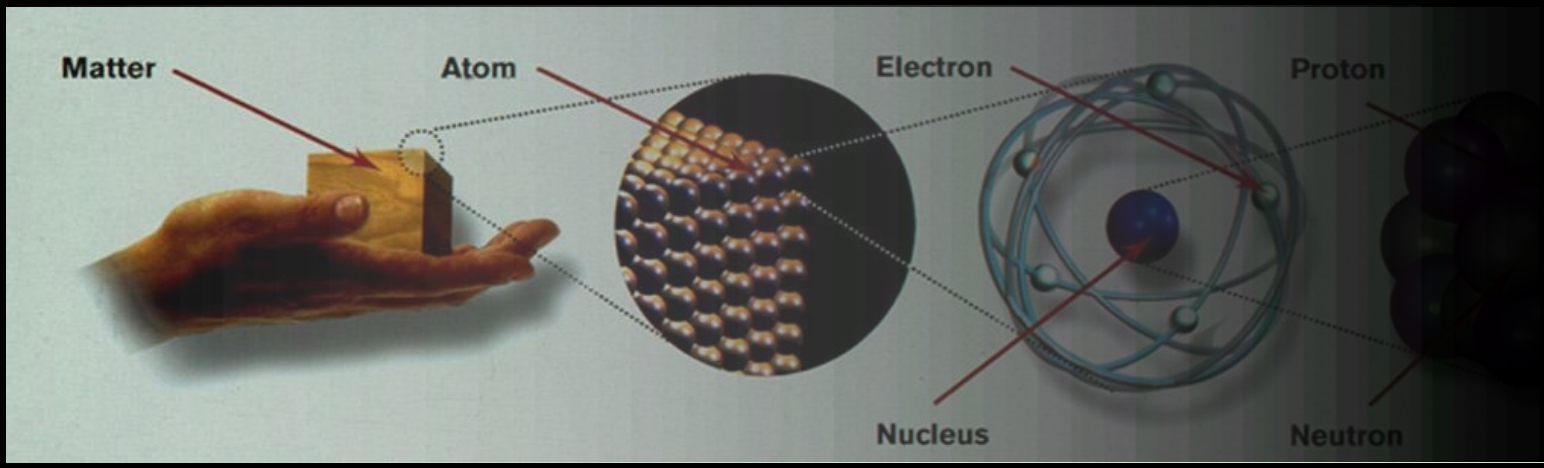
Descente vers l'infiniment petit

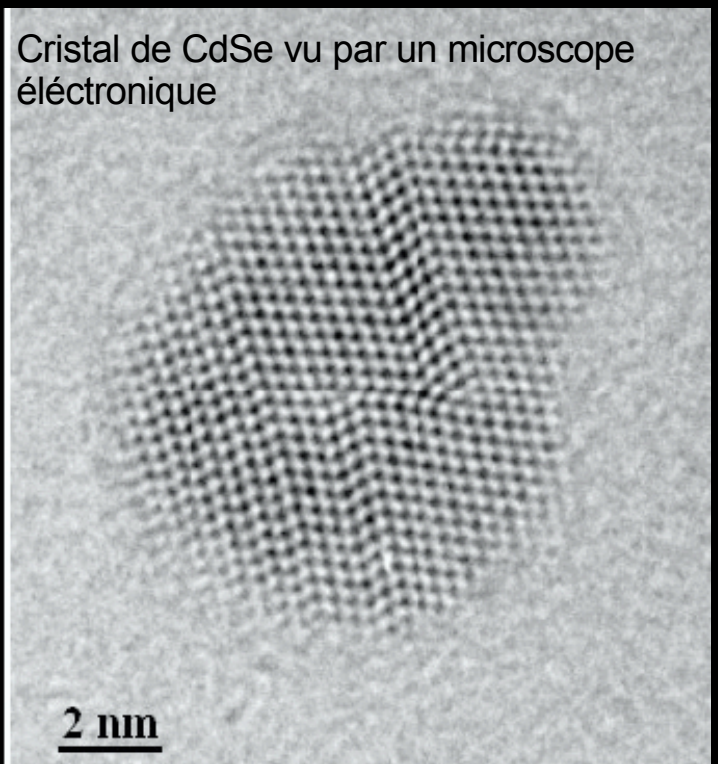


Structure de la matière ordinaires :

ses constituants élémentaires et leurs interactions

Descente vers l'infiniment petit





Cristal de CdSe vu par un microscope éléctronique

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-t-elles leurs propriétés ?

→ structure de l'atome

Descente vers l'infiniment petit

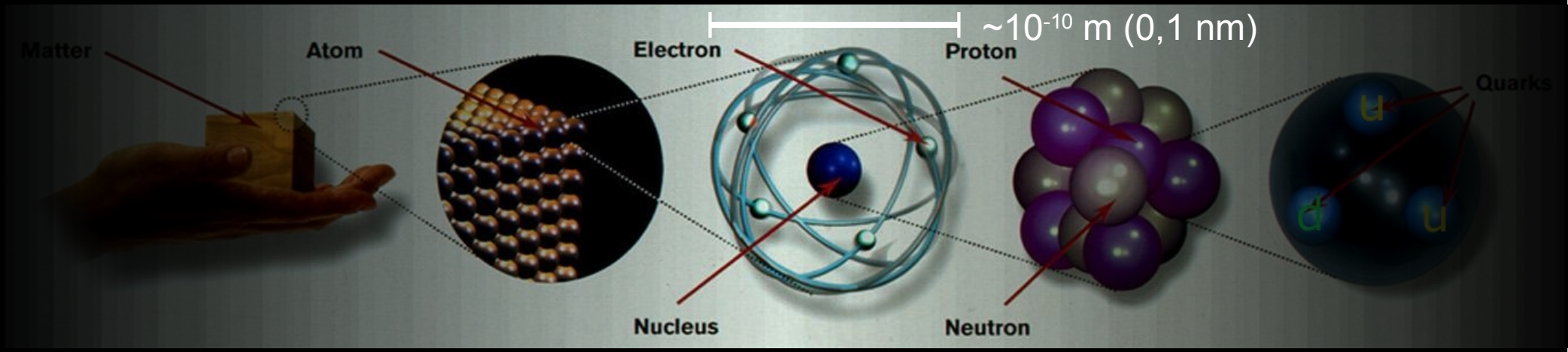


Table des éléments atomiques :

Etat physique du corps simple(25°C,1 atm)	SOLIDE	LIQUIDE	GAZEUX	SYNTHESE

	1												13	14	15	16	17	18
1	H 1	2																He 2
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
3	Na 11	Mg 12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
6	Cs 55	Ba 56	La* 57	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 86
7	Fr 87	Ra 88	Ac# 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109									

	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 70	Lu 71
* Lanthanides														
# Actinides	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 102	Lr 103

Atomes composés :

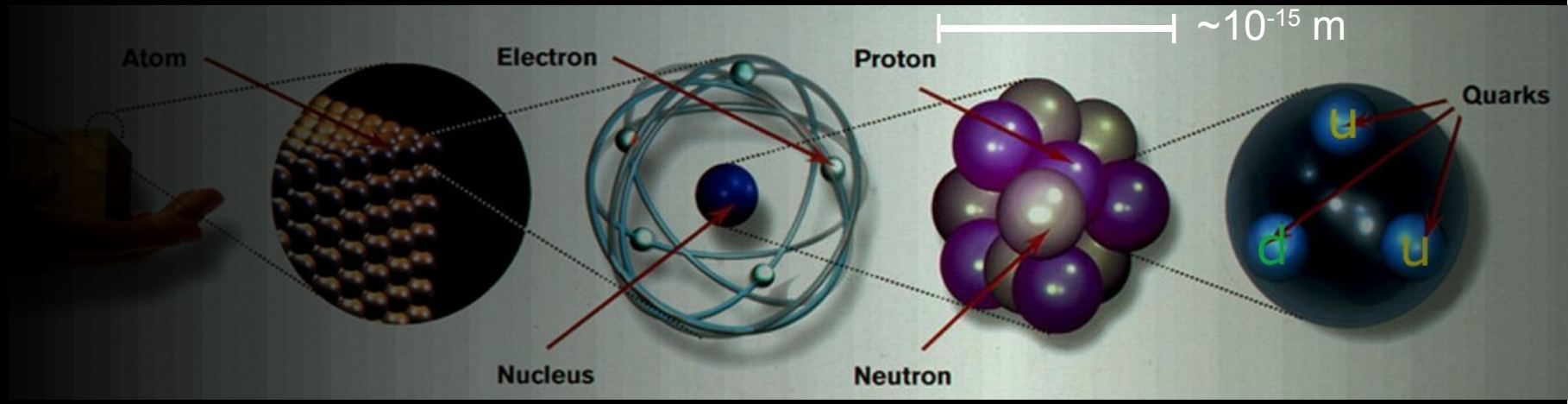
- d'un noyau
  - ~100 000 x plus petit que l'atome
- d'un nuage d'électrons en orbite autour du noyau
  - régit les interactions entre atomes ou molécules

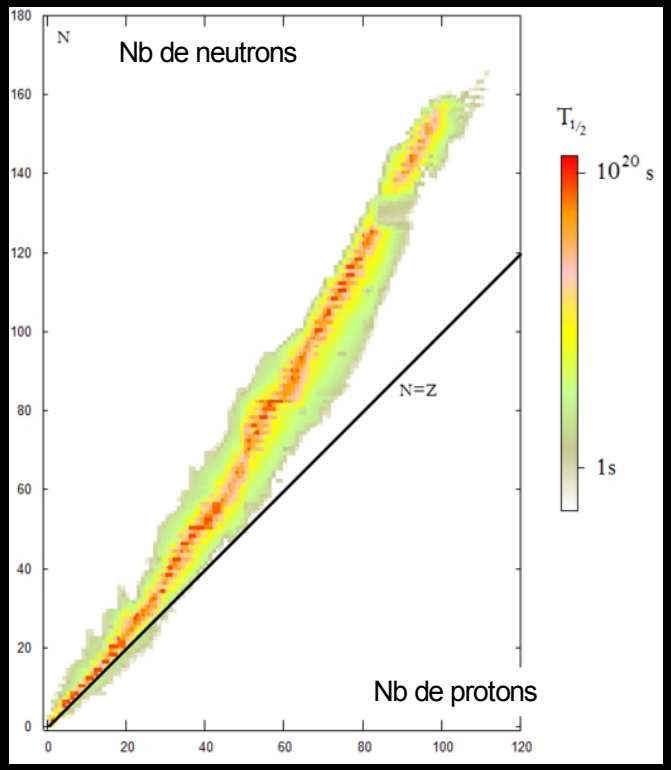
→ **interaction électromagnétique**

Qu'est-ce qui différencie ces atomes ?

→ structure du noyau

Descente vers l'infiniment petit





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.

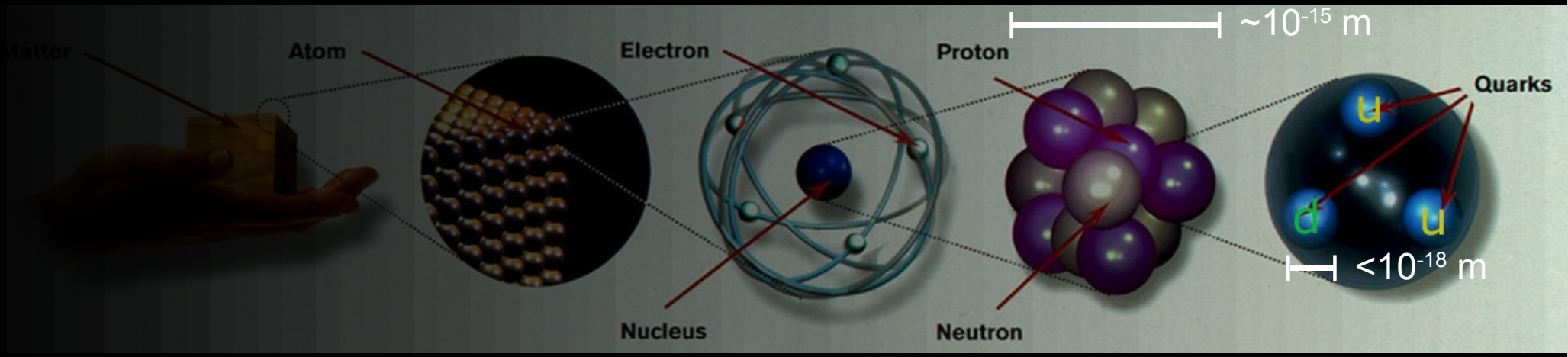
Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un neutrino : e.g. $^{14}C \rightarrow {}^{14}N + e + \nu$

→ **interaction faible**

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

→ structure du nucléons

Descente vers l'infiniment petit



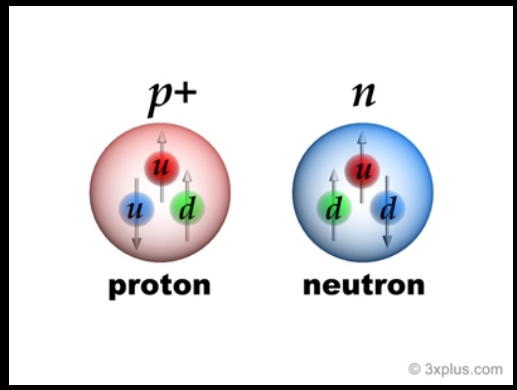
Nucléons (protons & neutrons) sont constitués de quarks

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

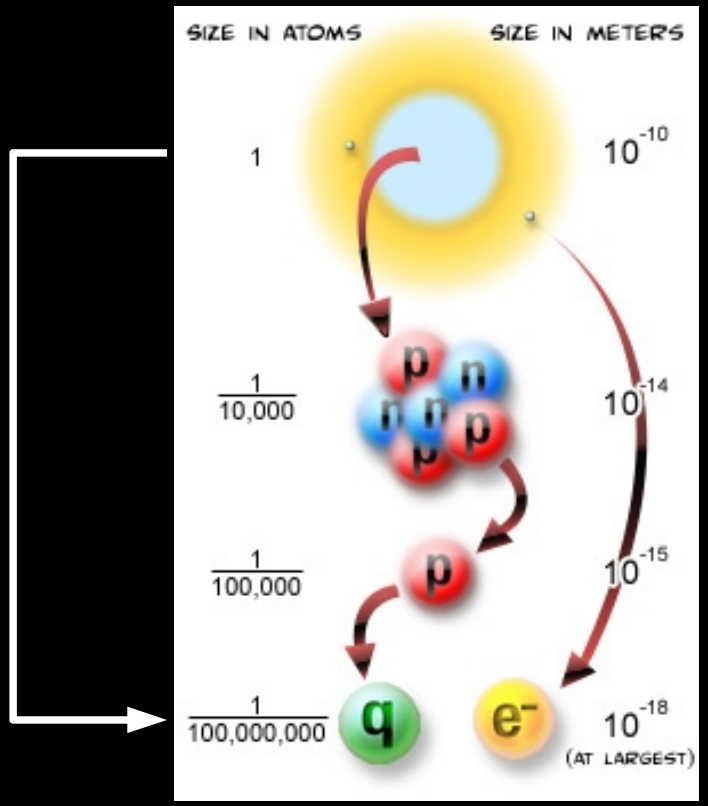


Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

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 :

- 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

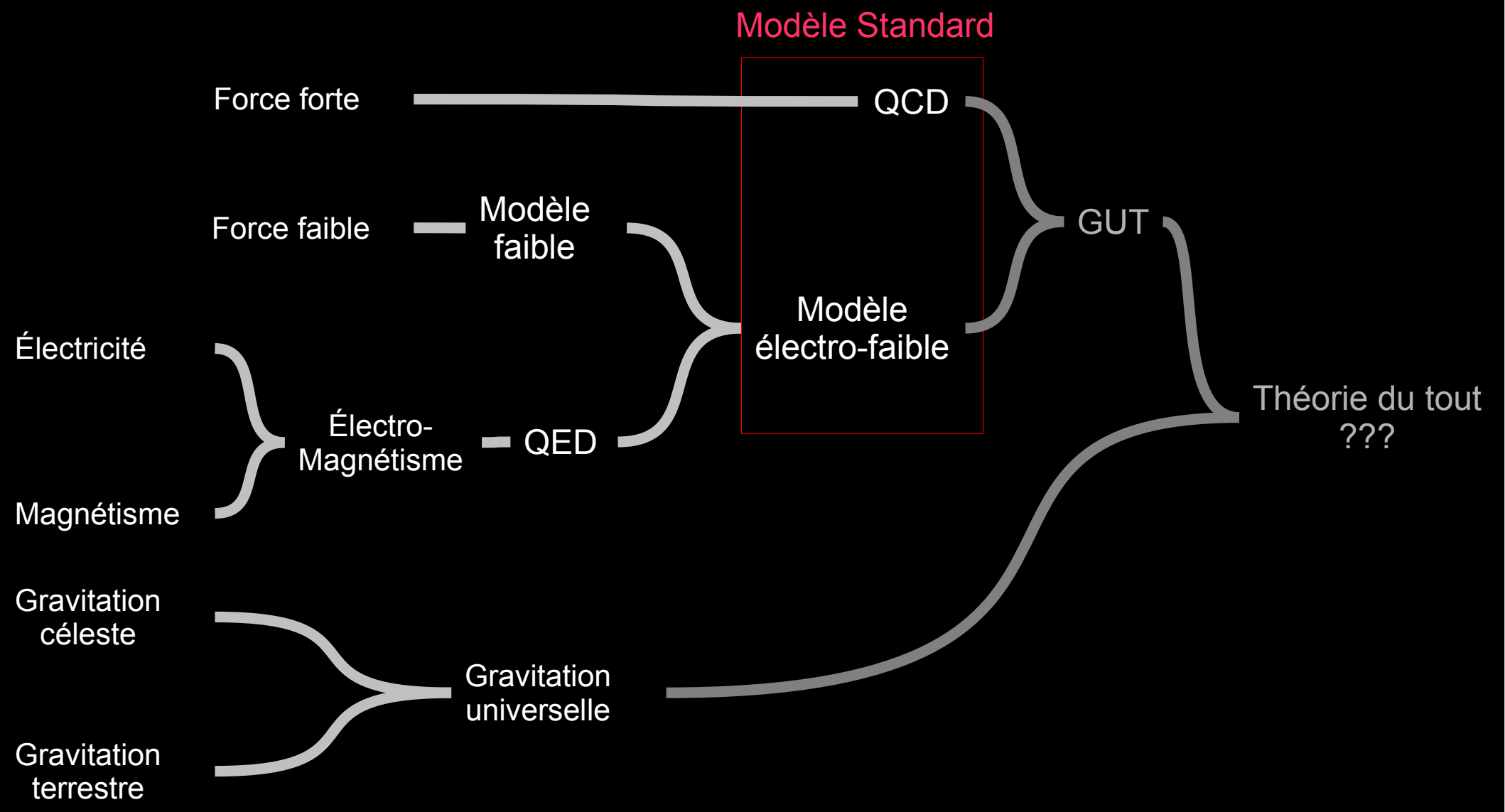
		1ère famille		2ème famille		3ème famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tau	τ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_e	neutrino tau	ν_τ

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

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

Le Modèle Standard

Théories fondamentales



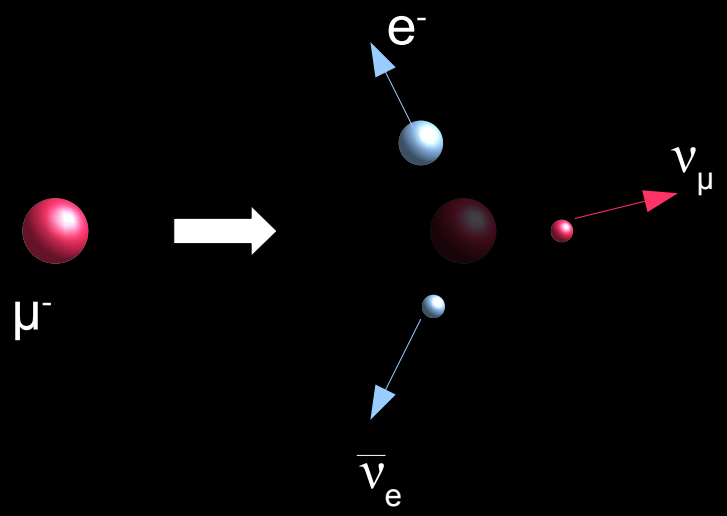
CLASSIQUE RELATIVISTE / QUANTIQUE CORDES ?

Le Modèle Standard

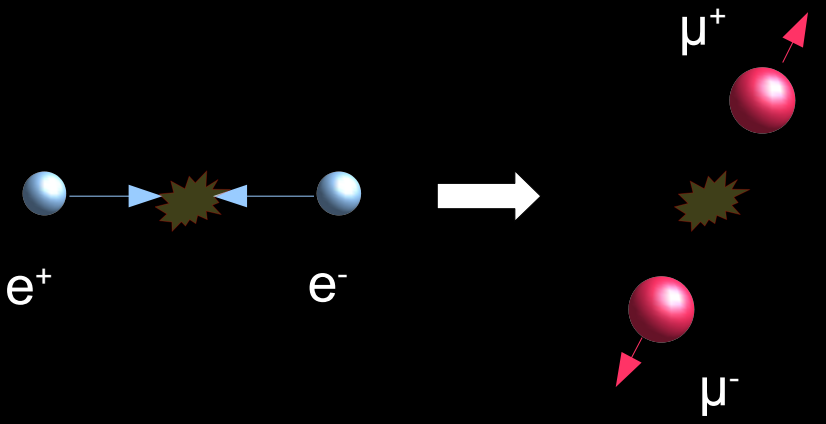
Théorie sous-jacente *: mécanique quantique* ***relativiste***

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'un 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

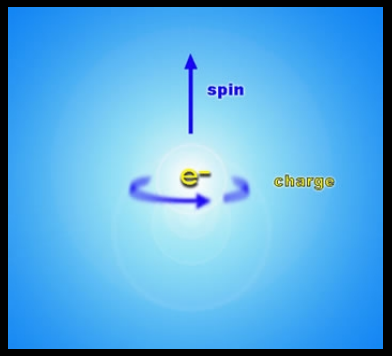
Théorie sous-jacente *: mécanique **quantique** relativiste*

<u>Quantique</u> : adaptée au monde microscopique

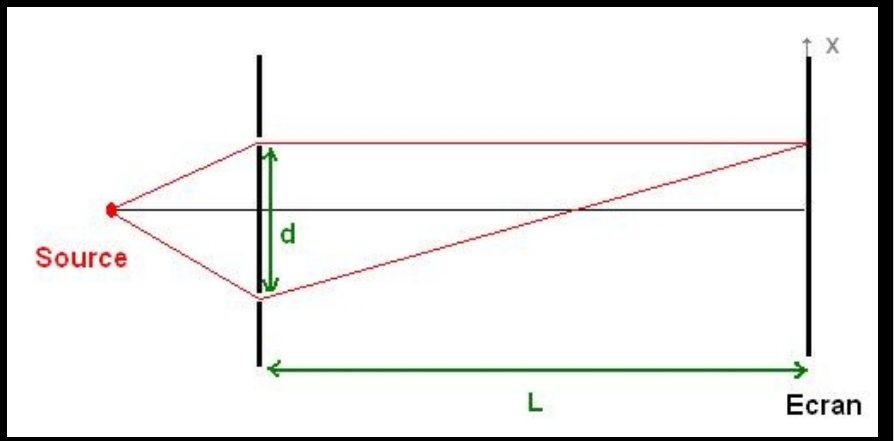
- dualité onde-corpuscule
  - onde : effet d'interférence
    - λ : longueur d'onde
  - corpuscule : comportement individuel
    - P : quantité de mouvement
  - dualité :
    - λ = h/P (h = constante de Planck)

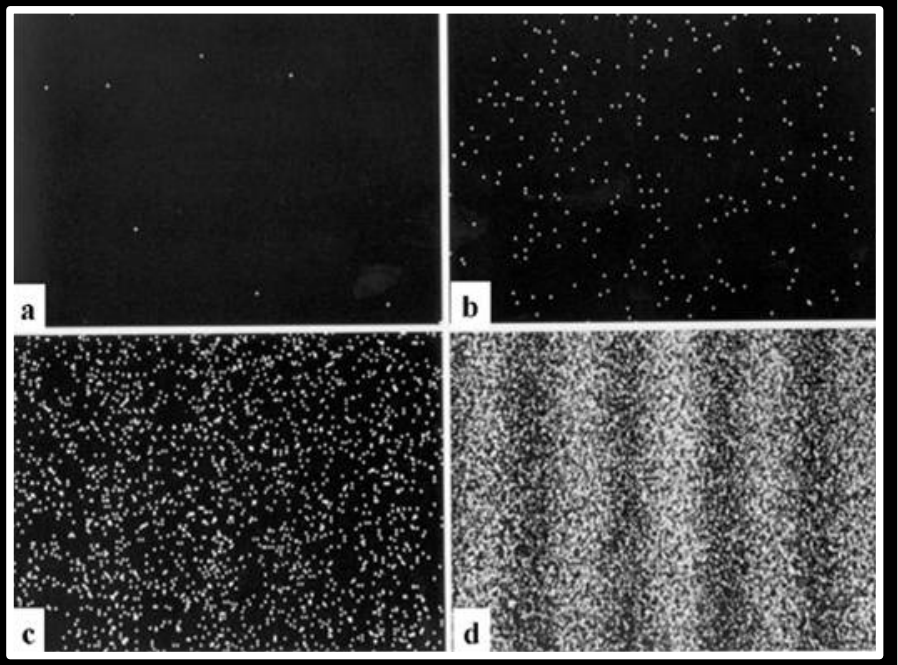
→ Plus l'énergie est élevé, plus la longueur d'onde est faible (plus on sera sensible à des détails petits)

- propriétés purement quantique
  - spin :



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



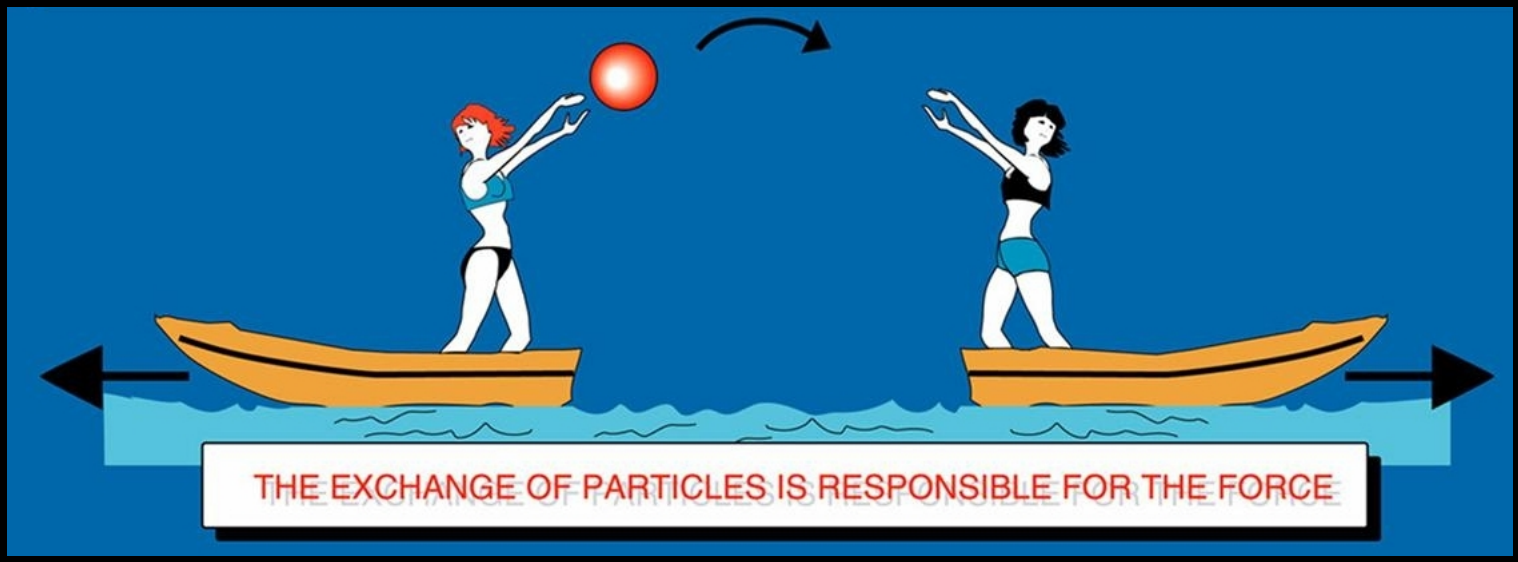


Expérience des fentes d'Young

Le Modèle Standard

Les interactions

Les vecteurs des interactions



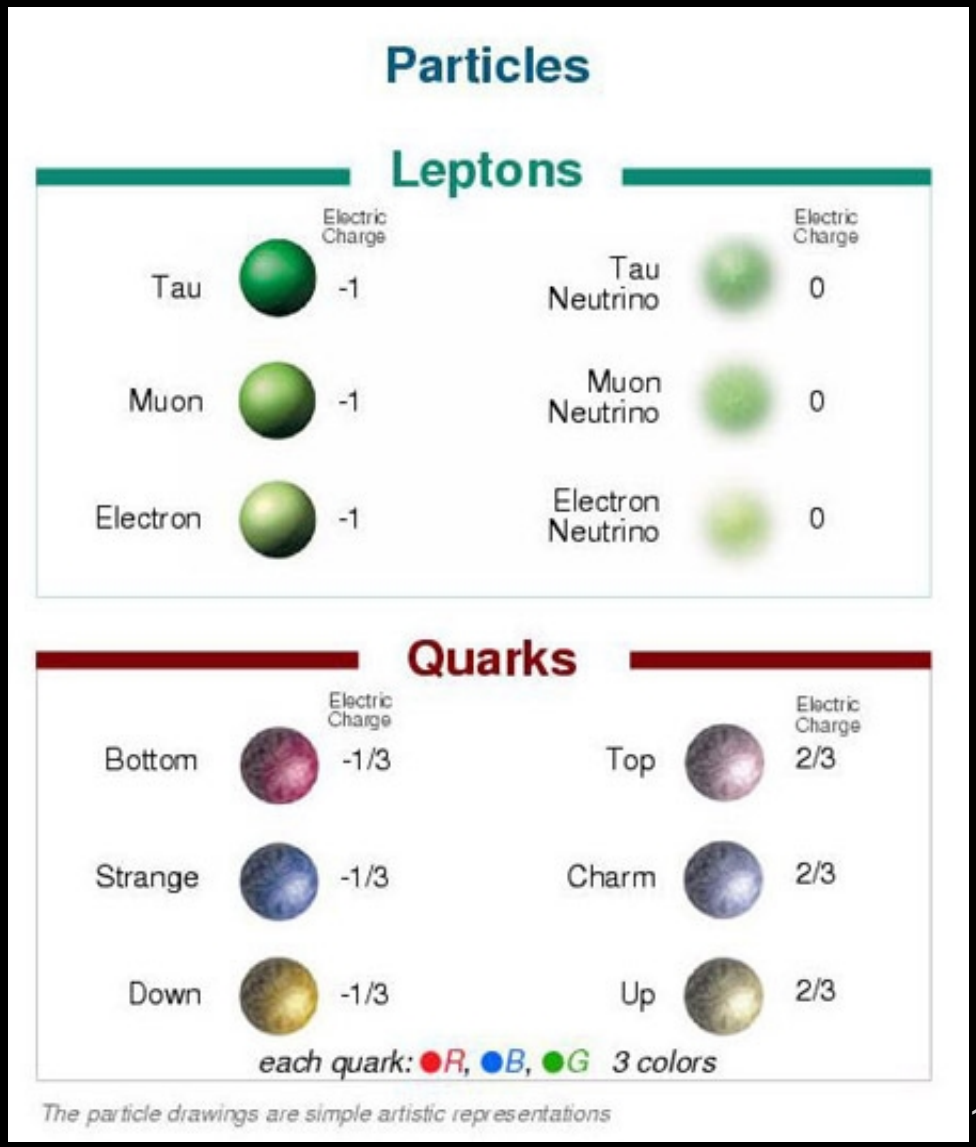
→ les forces élémentaires sont véhiculées par des particules

Les charges des interactions

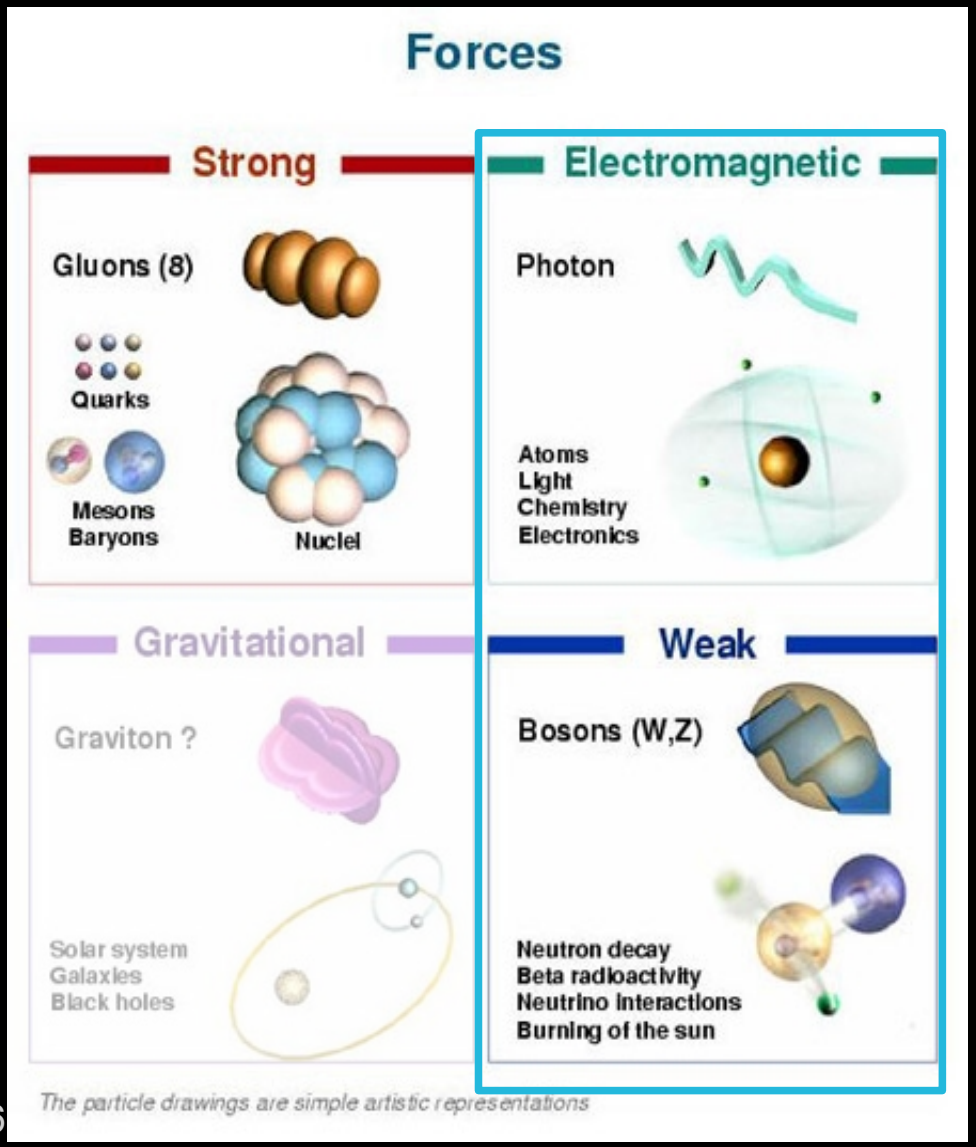
- forces interagissent avec les porteurs des charges associées, e.g. :
  - force électromagnétique : charge électrique
  - force forte : charge de couleur (b,r,v)
- la charge totale d'un système est conservée lors d'une réaction

Le Modèle Standard

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



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



Le Modèle Standard

L'antimatière

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

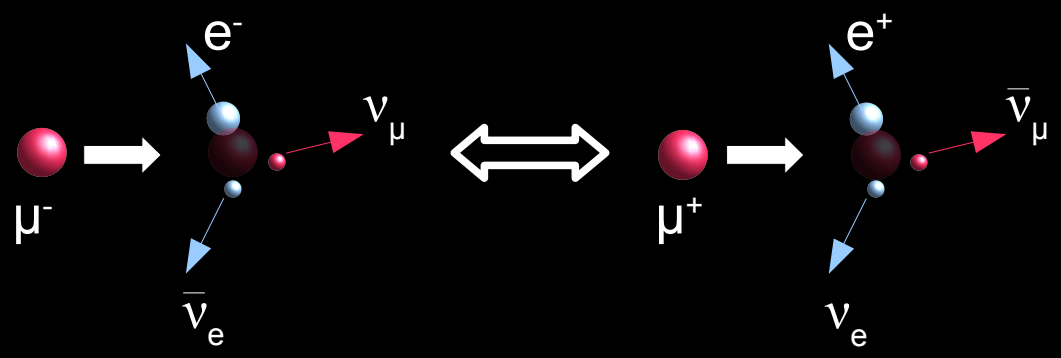
- de même masse et de même spin
- autres nombres quantiques renversés
  - e.g. : charge électrique
- notation courante : $\bar{b}$ antiparticule associée au quark b

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 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 eV/c^2 = 1,8 10^{-36} kg
- exemples :
  - proton : m_P = 1,67 10^{-27} kg = 938 MeV/c^2
  - électron : me = 9,11 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

	Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge	
0	ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times10^{-9}$	0	
1	e electron	0.000511	–1	
0	ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times10^{-9}$	0	
200	μ muon	0.106	–1	
0	ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times10^{-9}$	0	
3800	τ tau	1.777	–1	

Quarks spin =1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge	
u up	0.002	2/3	6
d down	0.005	–1/3	8
c charm	1.3	2/3	3000
s strange	0.1	–1/3	340
t top	173	2/3	360000
b bottom	4.2	–1/3	9000

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
γ photon	0	0
W^-	80.39	–1
W^+ W bosons	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin =1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Le Modèle Standard

L'origine des masses

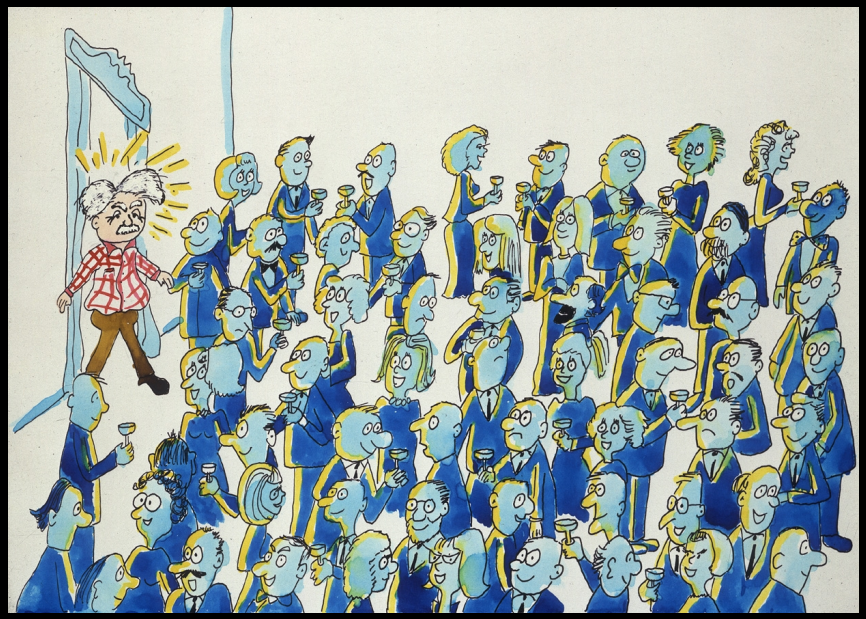
Dans la théorie, les particules sont sans masse.

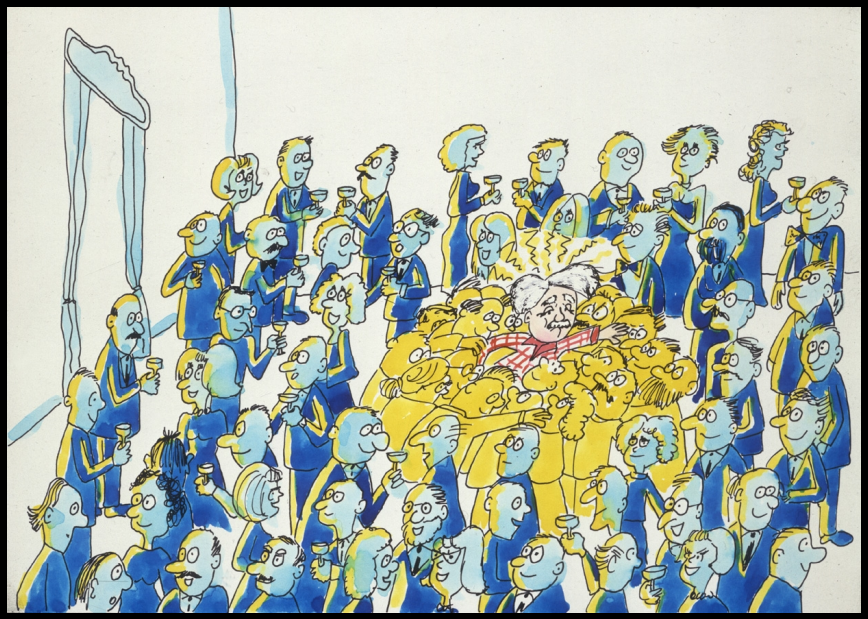
Pour les faire apparaître : mécanisme de Higgs

Implique l'existence d'un bosons supplémentaire :

→ le boson de Higgs

Pas encore observé mais activement recherché





Le Modèle Standard

Tout est là :

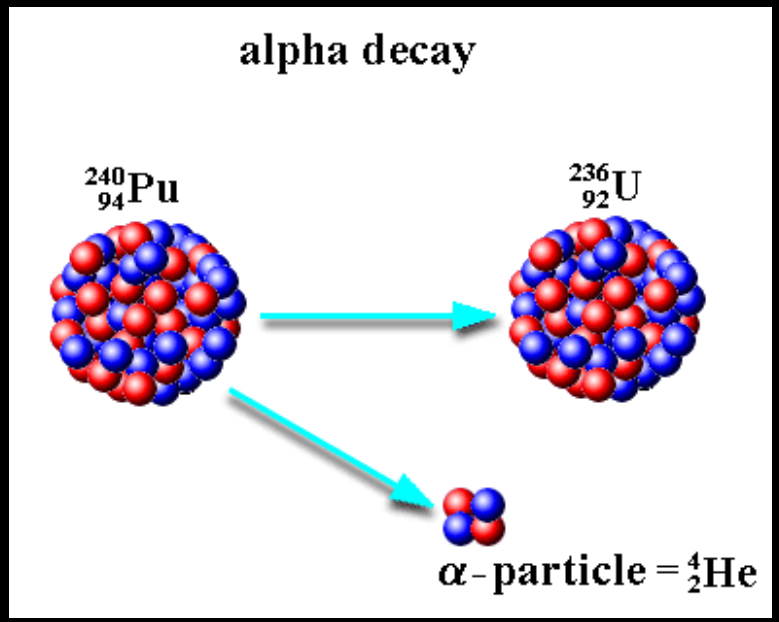
- la matière : les fermions fondamentaux
  - 6 quarks + 6 antiquarks
  - 6 leptons + 6 antileptons
- les vecteurs des interactions
  - 8 gluons pour l'interaction forte
  - W^+, W^-, Z^0, γ pour l'interaction électrofaible
- le boson de Higss
  - par lequel les particules acquièrent leur masse

Illustrations

Désintégrations

Qu'est-ce qu'une désintégration ?

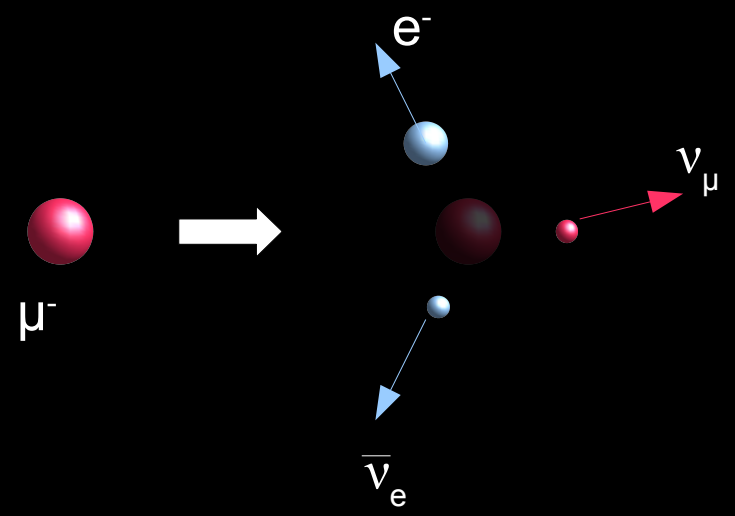
Désintégration nucléaire



Séparation des nucléons :

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

Désintégration d'une particule élémentaire



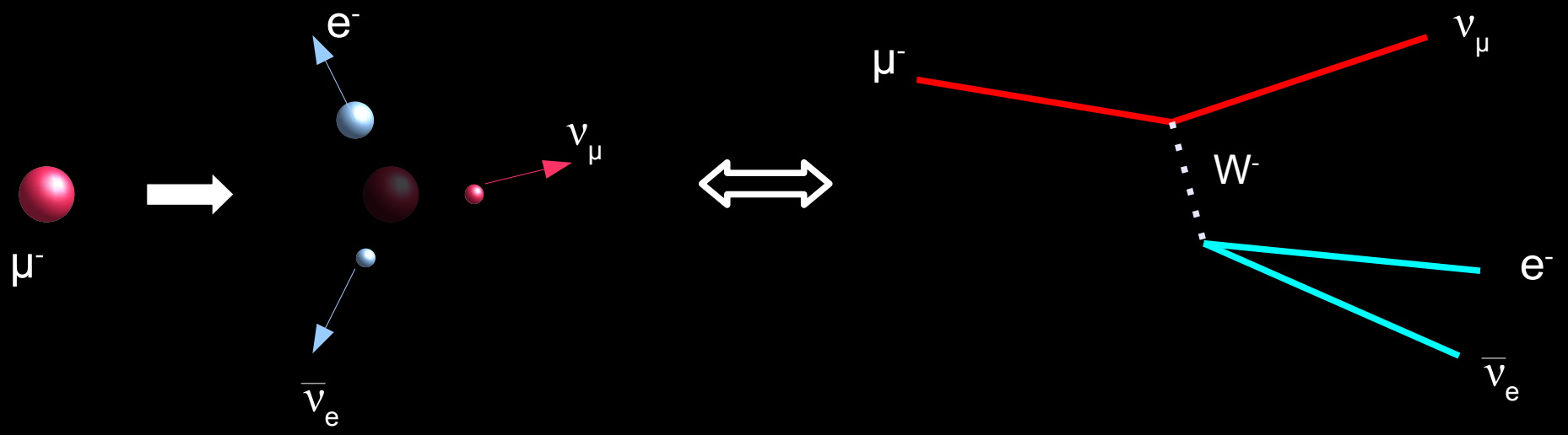
Transformation de la particule initiale :

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

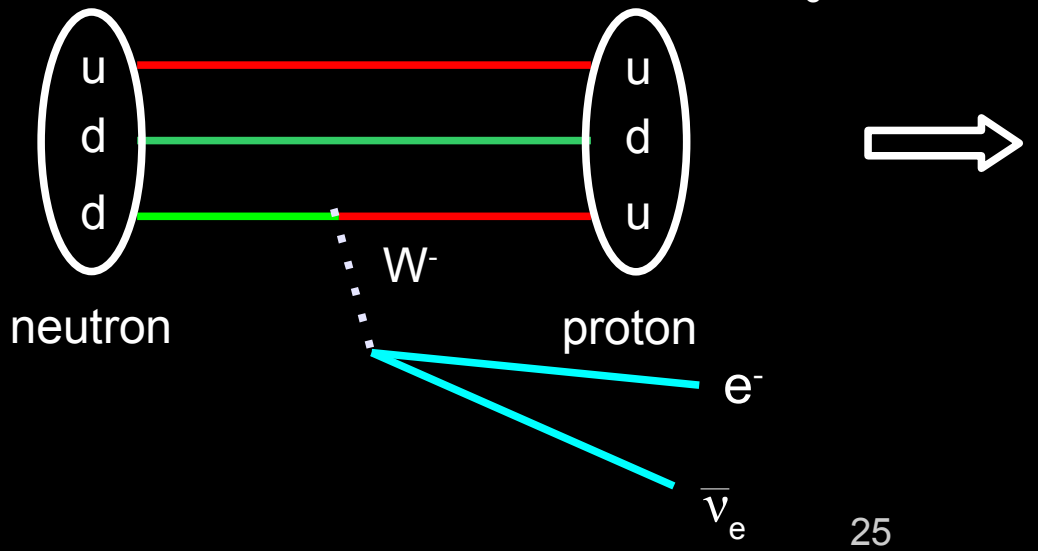
Désintégrations

Exemples

Désintégration du muon : $\mu \rightarrow \nu_\mu e \nu_e$



Désintégration du neutron : $n \rightarrow p e \nu_e$



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

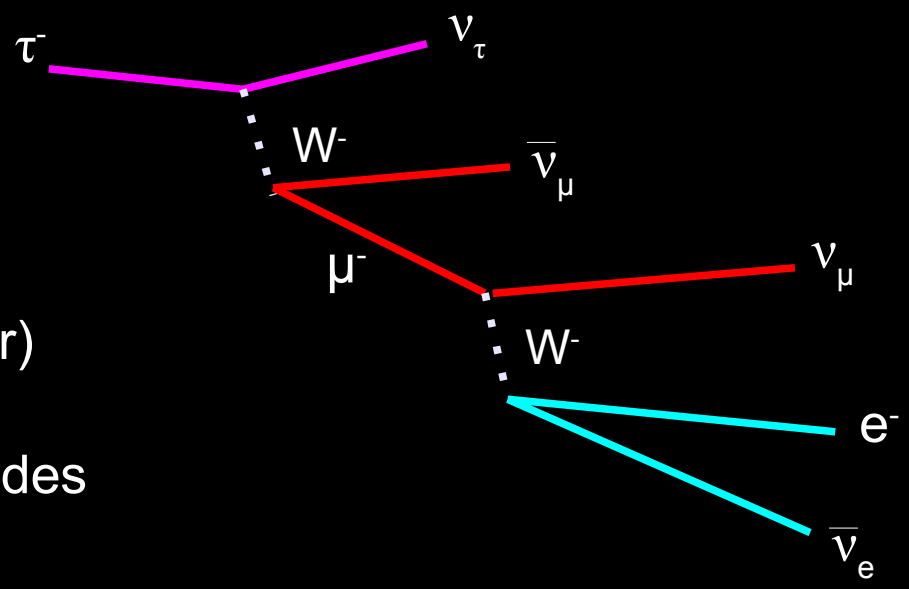
→ $^{14}C \rightarrow {}^{14}N + e + \nu$

Désintégrations

La force (electro-)faible en action

Loi de conservation :

- l'énergie totale
  - désintégration de particules lourdes vers des particules plus légères, le sucroît 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



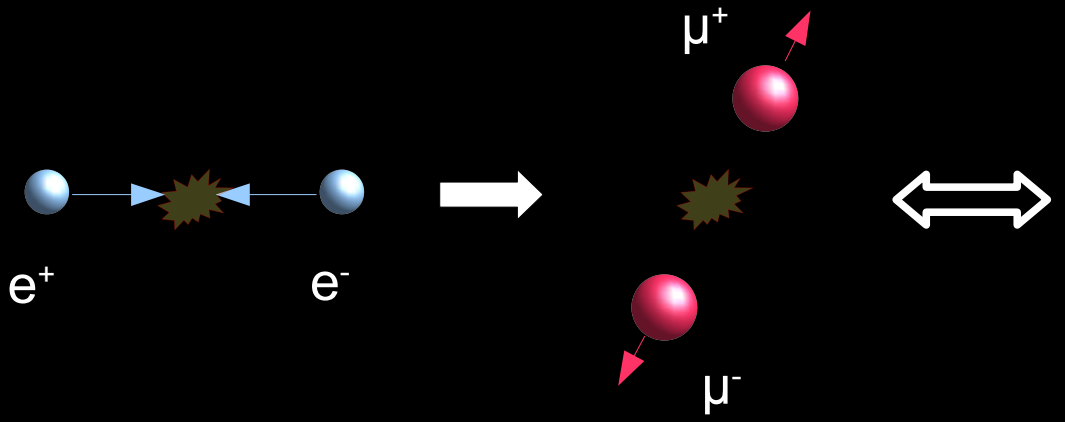
Force faible :

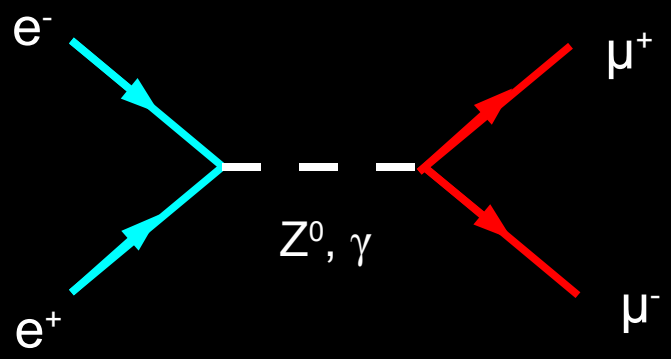
- autorise le changement de nature (saveur) des quarks
- responsable de toute les désintégrations des particules élémentaires
  - seules les plus légères sont stables

Annihilations

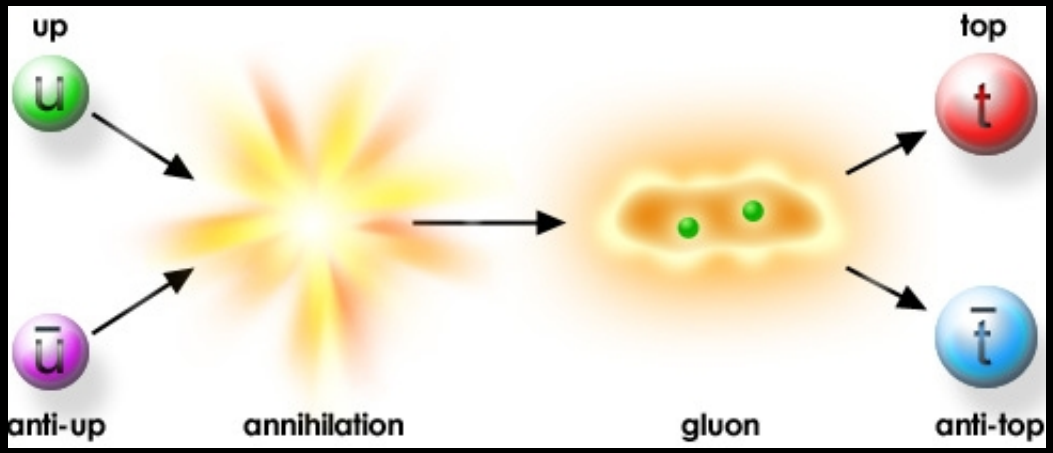
Exemples

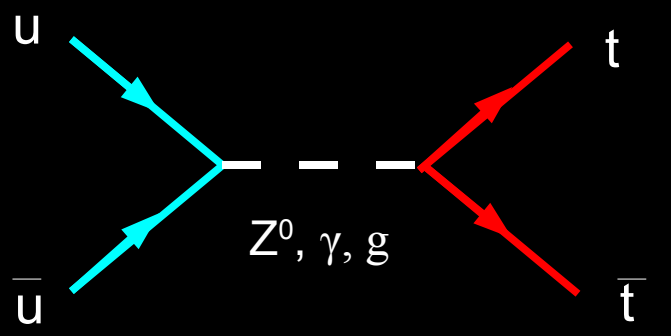
Annihilation e^+e^- (interaction faible)





Annihilation qq





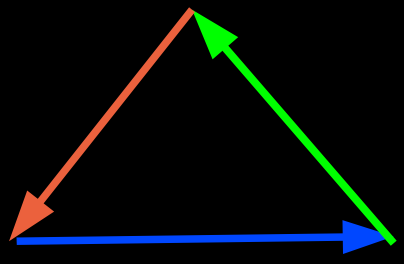
→ réactions possibles si assez d'énergie cinétique à transformer en masse

Interaction forte

Chromodynamique

Charge : couleur

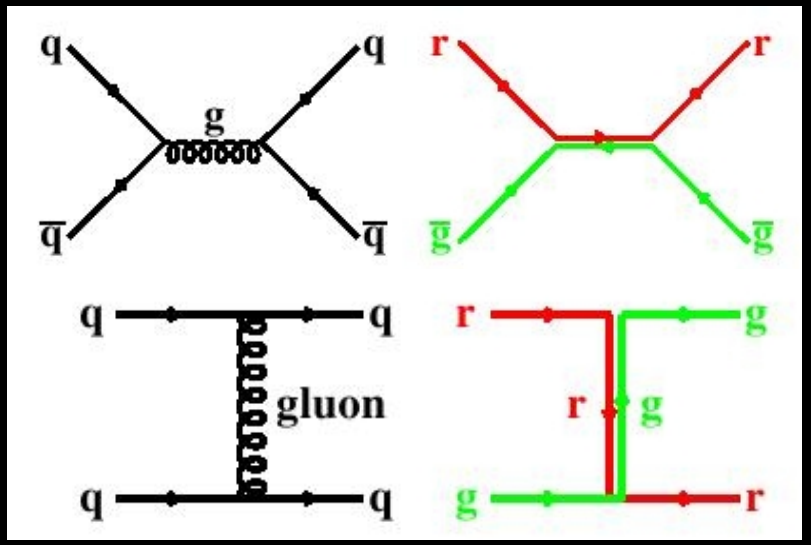
- → **B V R & ~~B V R~~** (« anticouleur »)
- → les couleurs s'ajoutent vectoriellement
- → **B+V+R= Blanc**
- → **B+~~B~~= Blanc**



Vecteur : gluons (8)

- → porte une couleur et une « anticouleur »

Les couleurs sont conservées par interaction forte

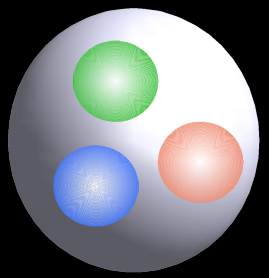


Interaction forte

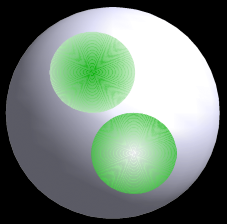
Hadronisation

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



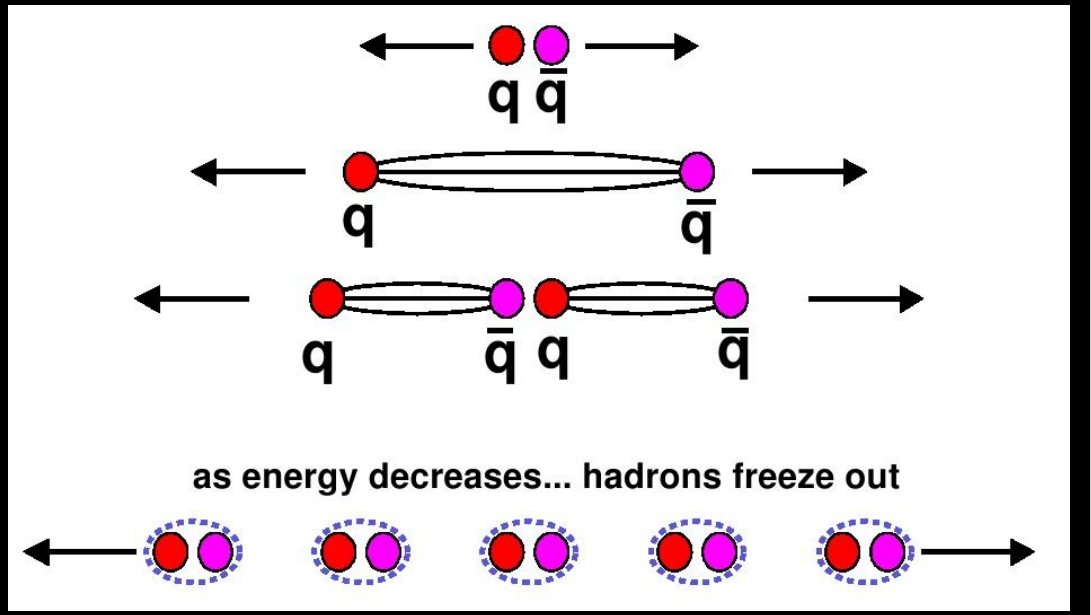
baryon



méson

L'interaction forte agit comme un élastique :

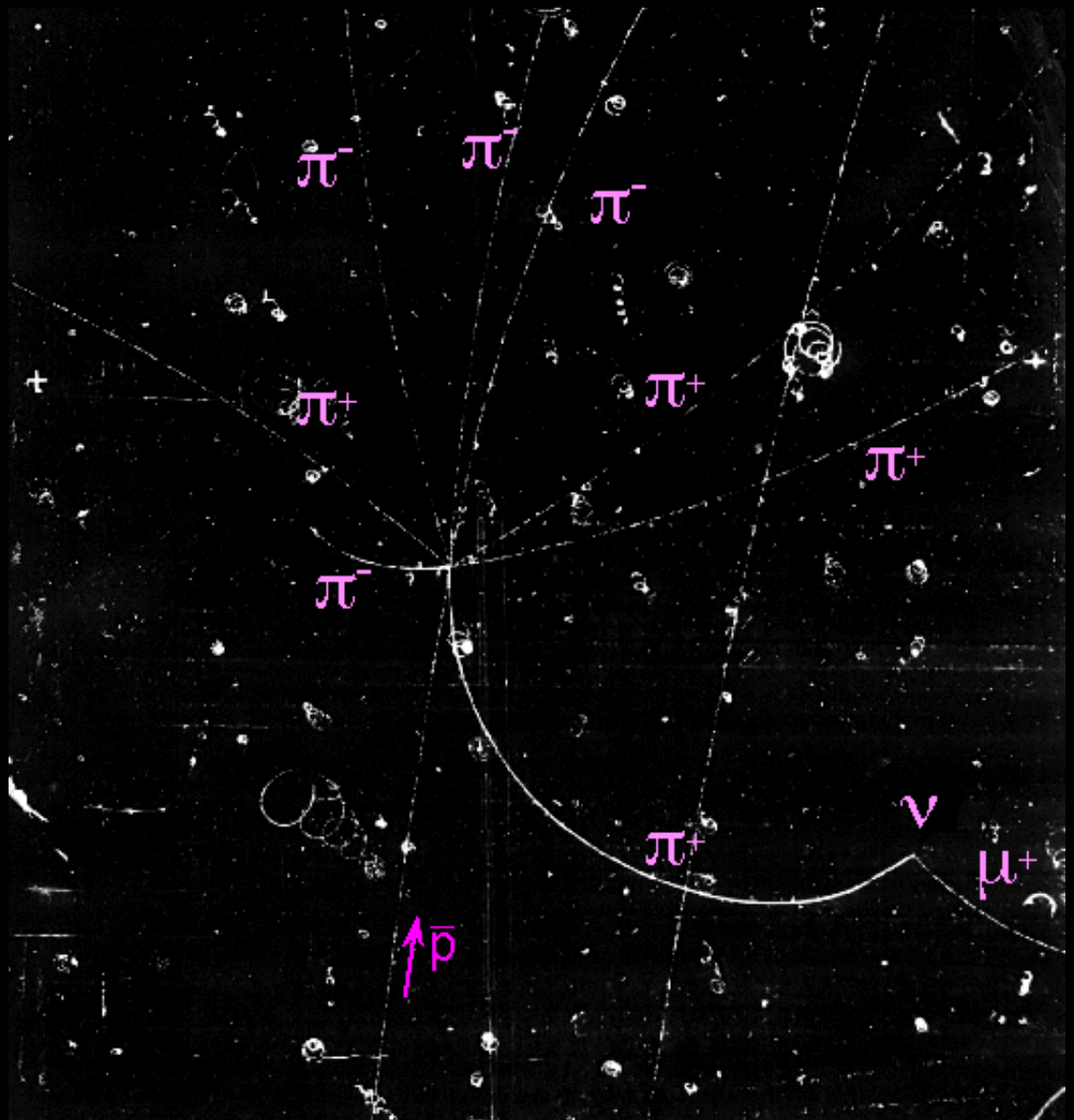
- → son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- → quand l'énergie disponible est suffisante des paires de quarks sont créées ($E>2m_q$)



L'interaction forte en action

En action

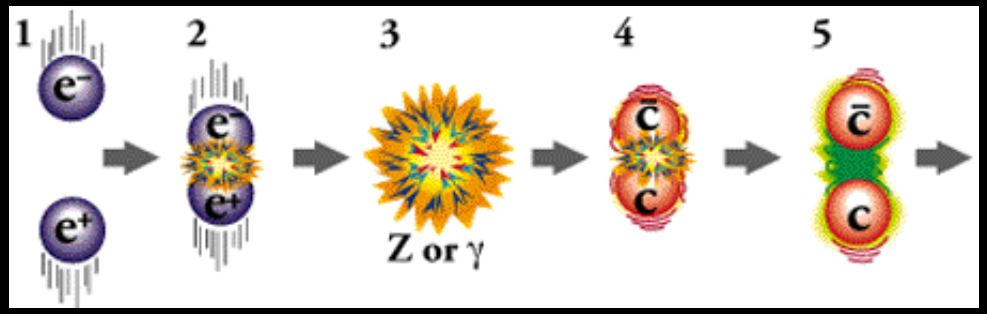
Un antiproton (projectile) s'annihile avec un proton au repos



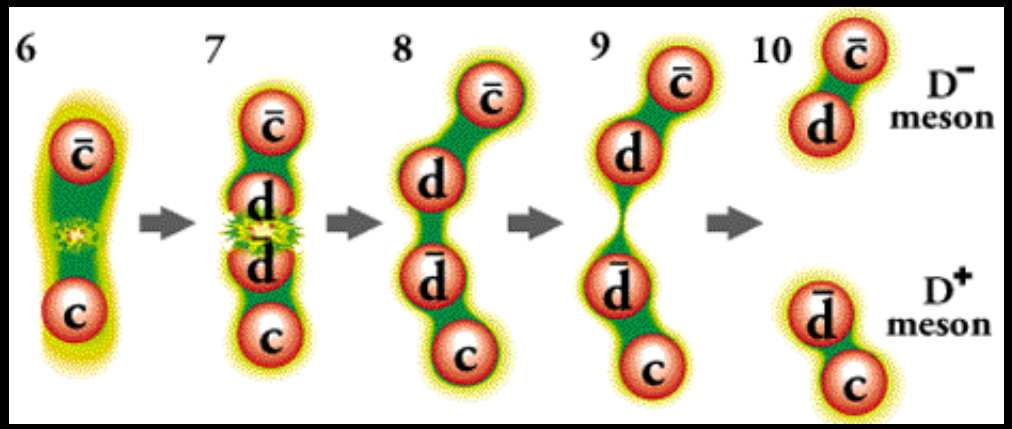
(photo de chambre à bulles)

Un exemple complet

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



Hadronisation des quarks :



Le Modèle Standard

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=mc² !! 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

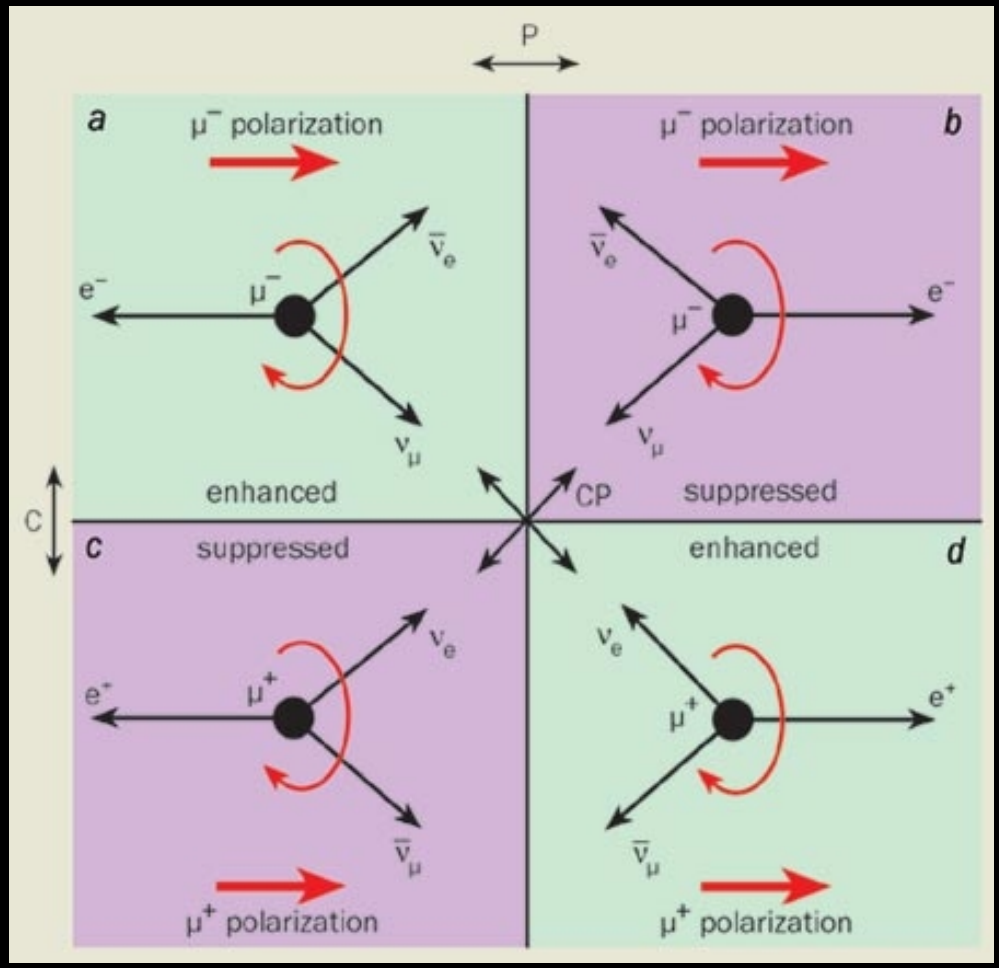
Effet de transformations discrètes :

- 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.

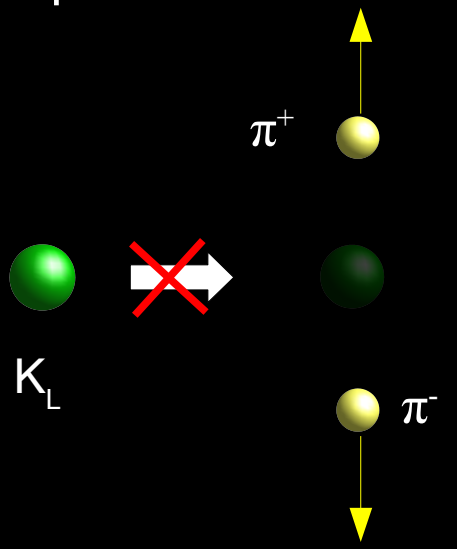


Le Modèle Standard

La violation de CP

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

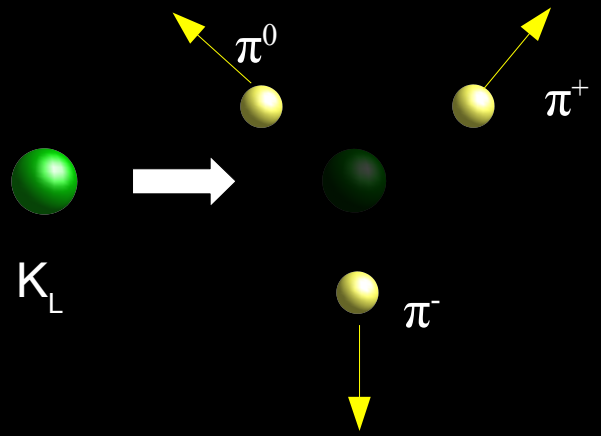
Si la conservation de CP est une propriété de la nature, certaines réactions sont impossibles :



CP = -1 CP = +1

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$

Désintégration du K_L en 2 pions
→interdite



CP = -1 CP = -1

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

Désintégration du K_L en 3 pions
→autorisée

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.