

# *Physique des particules*

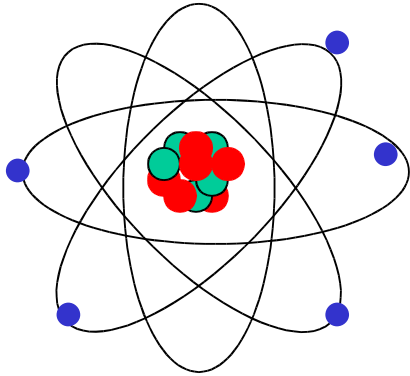


De quoi le monde est-il fait ?

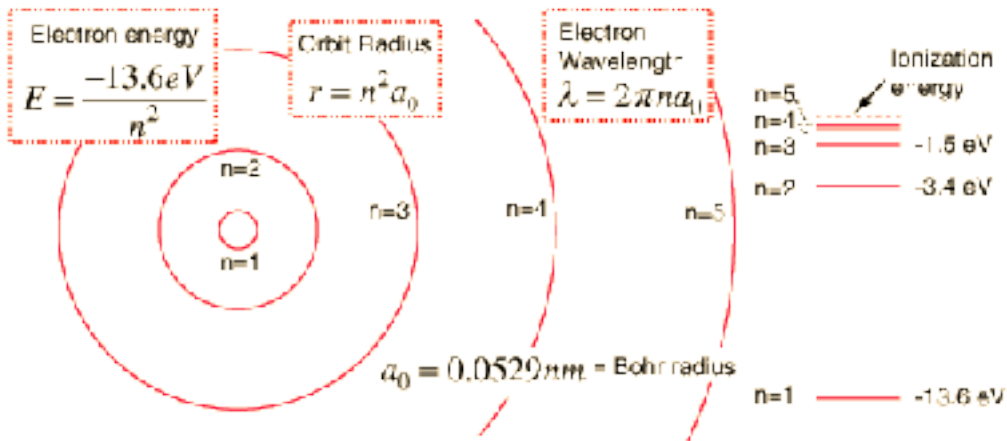
Comment décrire son évolution ?

Master Class 2009 Laurent Favart

# L'atome

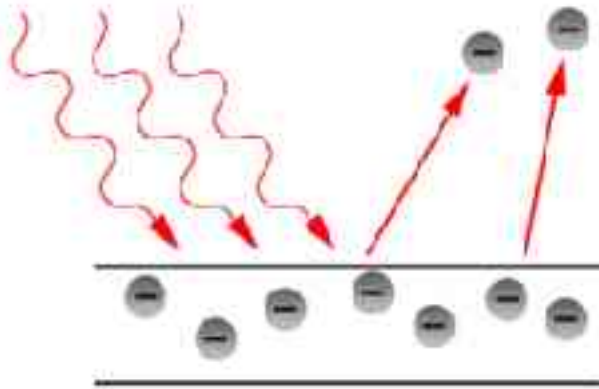


Pourquoi les électrons ne tombent-ils pas sur le noyau ?



Quantification des niveaux d'énergie

# L'effet photoélectrique



- Les électrons ne sont émis que si la fréquence est suffisamment grande

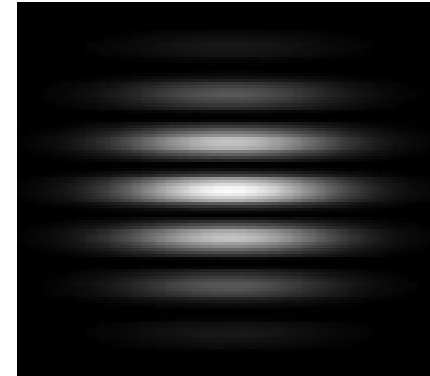
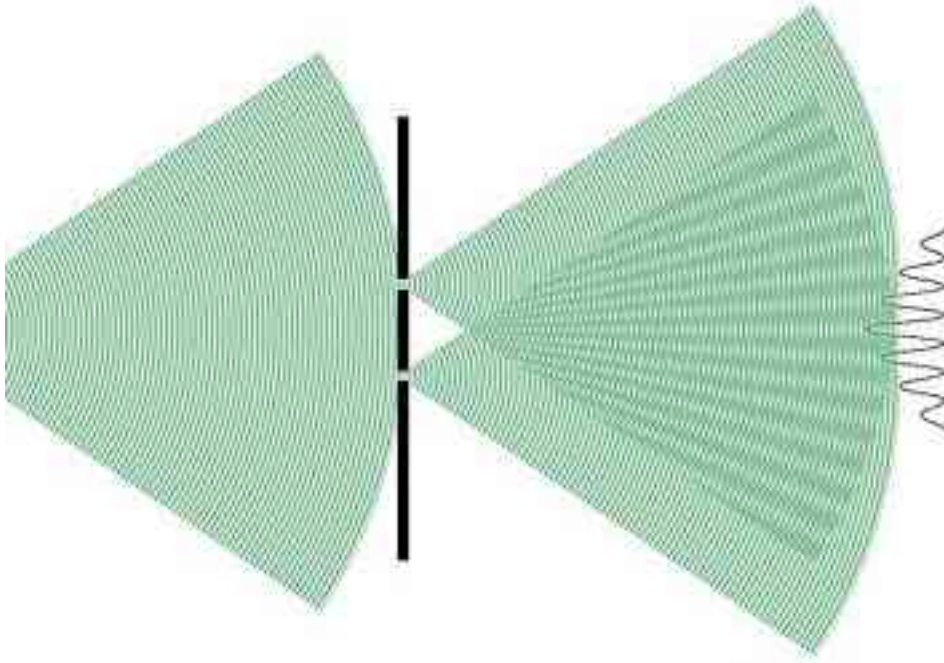
- le courant d'électrons augmente avec l'intensité lumineuse

➤ **la lumière est composée de particules : les photons**

$$E = h\nu \quad h = \text{constante de Planck}$$

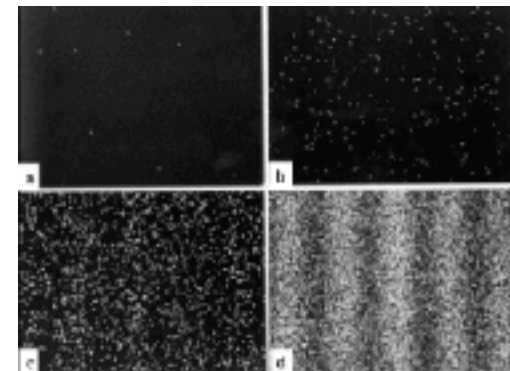
*grande fréquence = grande énergie*

# Onde ou Corpuscule?



-diminue l'intensite du faisceau :

**la lumière est à la fois onde et corpuscule**  
**- aussi vrai pour les e, p, atomes,...**



# Mécanique quantique :

## équivalence onde - corpuscule

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

↑

*petite longueur d'onde = grande énergie*

*Les photons, particules de lumière ou les ondes électromagnétiques:*

Ondes		Infra		Visible		Ultra		Rayon X		Rayons $\gamma$	
radio		rouge				violet					
		100		0.6		0.4		0.001		$10^{-6}$	$\mu m$ (millième mm)

*Pour observer des détails de dimension  $d$ , il faut «éclairer» un objet avec un faisceau de particules de longueur d'onde  $\lambda \leq d$  pour explorer les petites tailles il faut des grandes énergies.*

## Relativité : équivalence masse - énergie

$$E = mc^2 + T$$

énergie    énergie  
de masse    cinétique

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

- la masse est l'énergie d'une particule libre au repos
- seule une particule de masse nulle peut atteindre  $c$
- c'est une énergie énorme

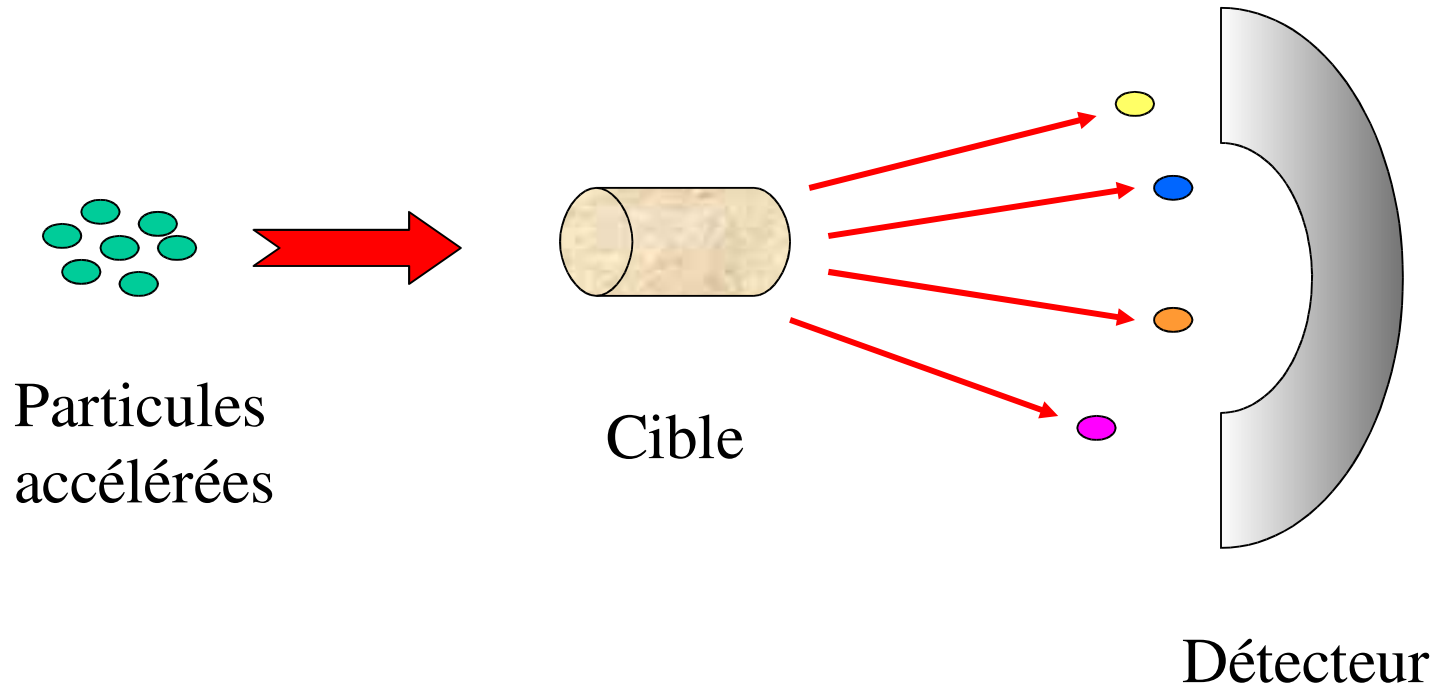
Utilisation d' **accélérateurs** afin d' amener des particules à des énergies très élevées

⇒ projectiles à très, très grande vitesse

⇒ Permet de créer des particules de masse plus grande



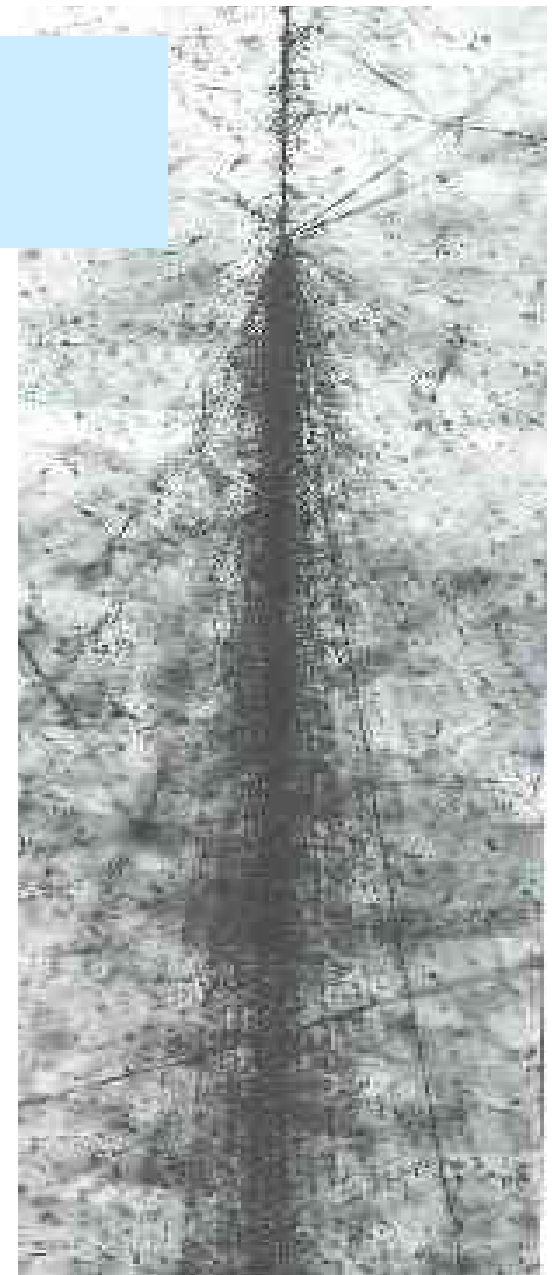
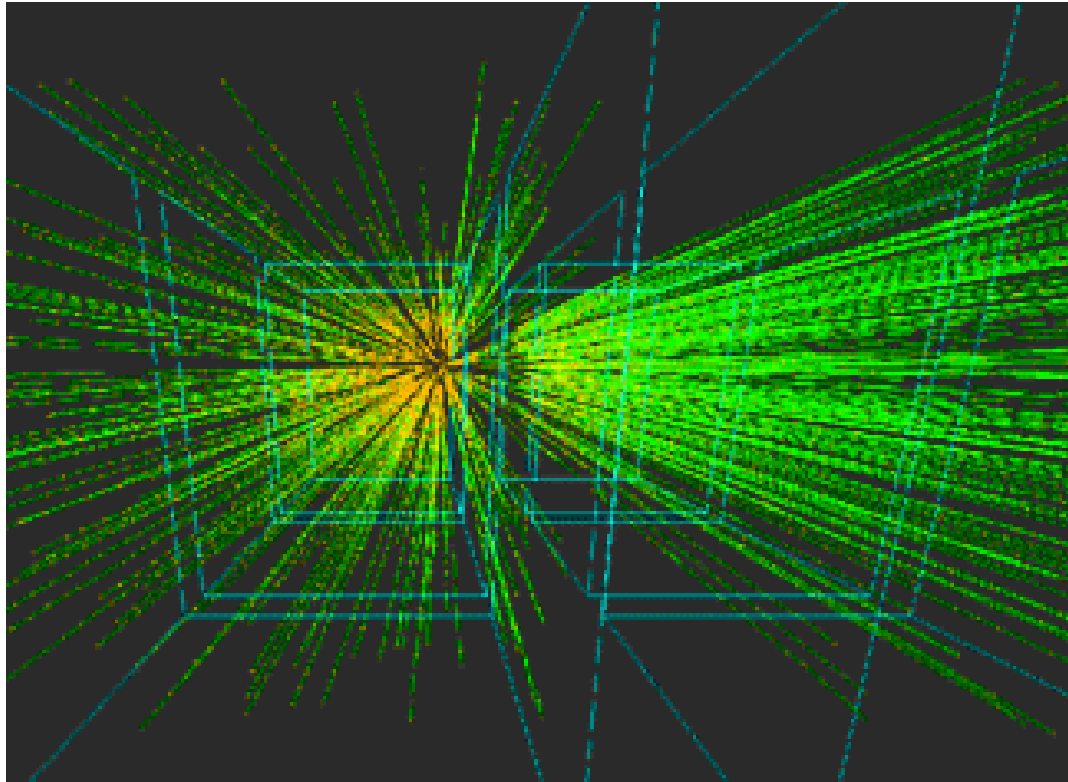
# Expérience sur cible fixe



Note : la cible est parfois le détecteur lui-même !



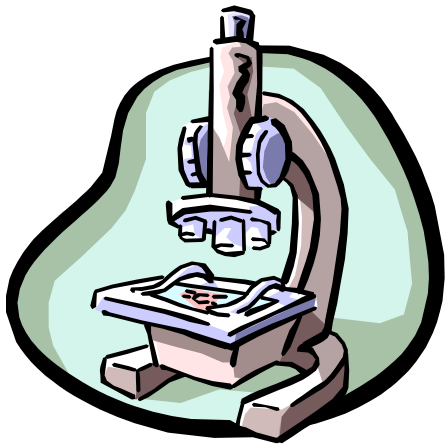
*Collision entre particules : production d'autres particules  
qui ne sont PAS les débris des particules initiales :  
conversion d'énergie en masse*



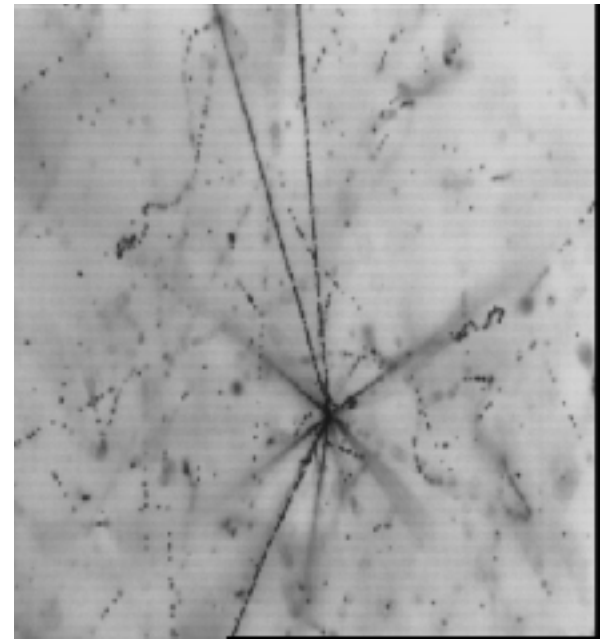
Energie totale finale = Energie totale initiale

Mais...

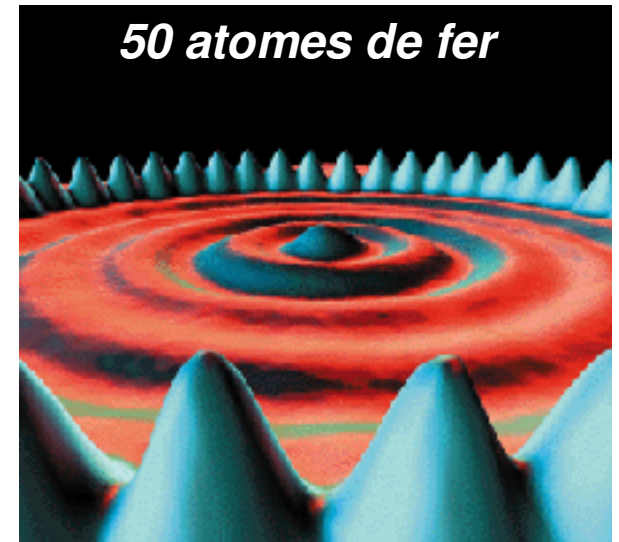
Masse totale finale  $\gg$  Masse totale initiale



*Microscope optique :*  
 $\lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$   
*grain photo*  $\approx 0.5 \mu\text{m}$



*Microscope électronique:*  
*avec des électrons accélérés,*  
*on «voit» des détails 10 000 fois plus petits,*  
*de la taille des atomes*



# Accélérateurs = Super microscopes

*Avec des ondes-particules de très haute énergie*

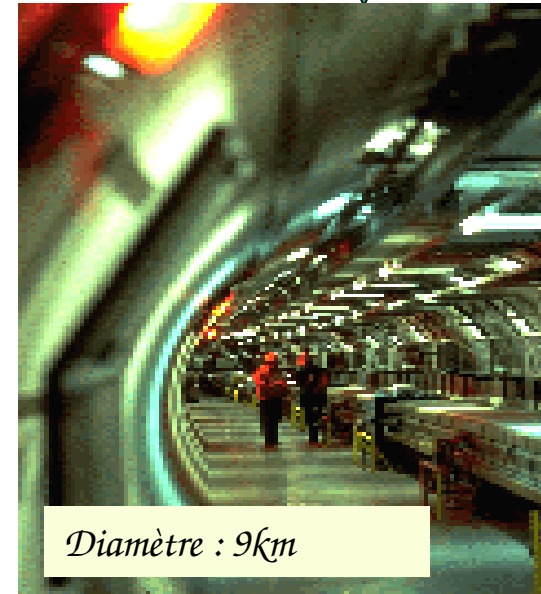
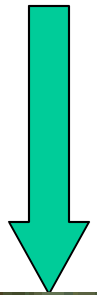
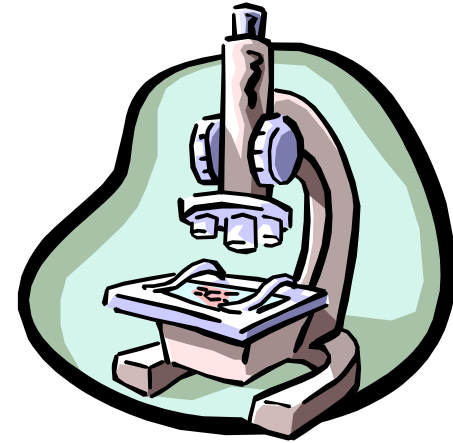


*Longueur d'onde plus petite que*

*la taille des protons et des neutrons ( $10^{-15}$  m):*

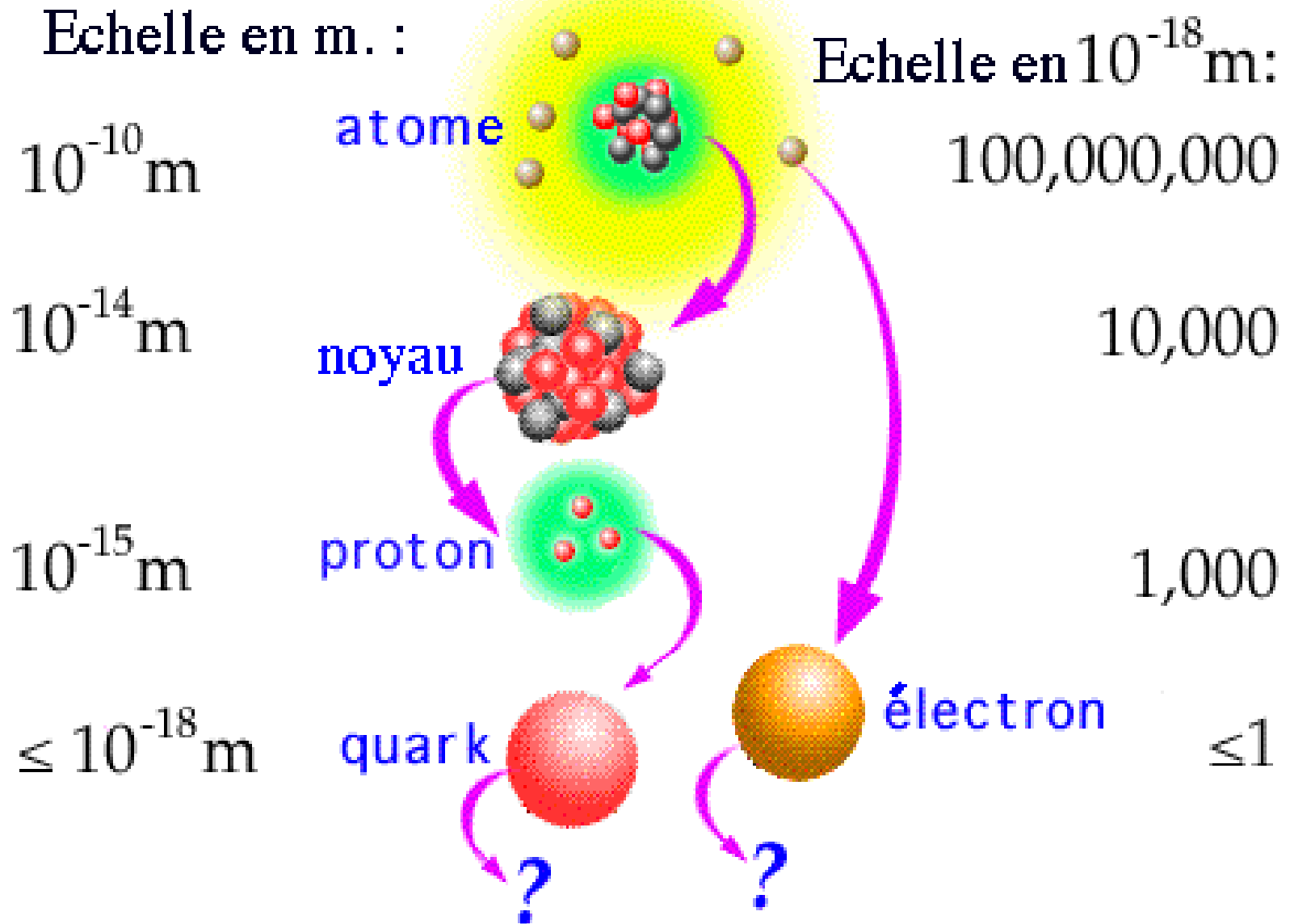
*$10^{-18}$  m*

*( 1 milliardième de milliardième de mètre)*



*Diamètre : 9km*

# Ordres de grandeur des dimensions



# Echelle des énergies

Electronvolt

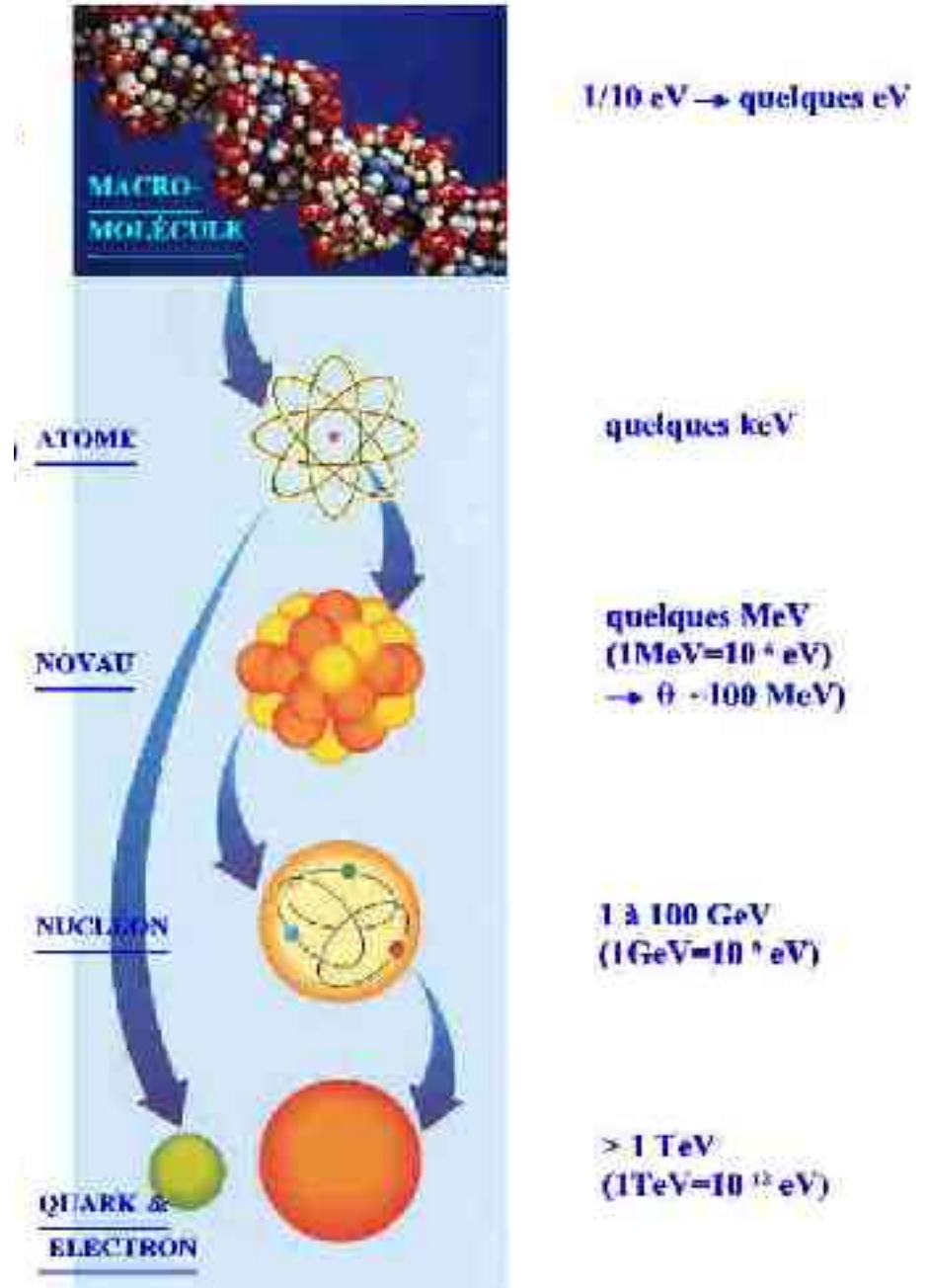
$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Kilo **keV**  $10^3$

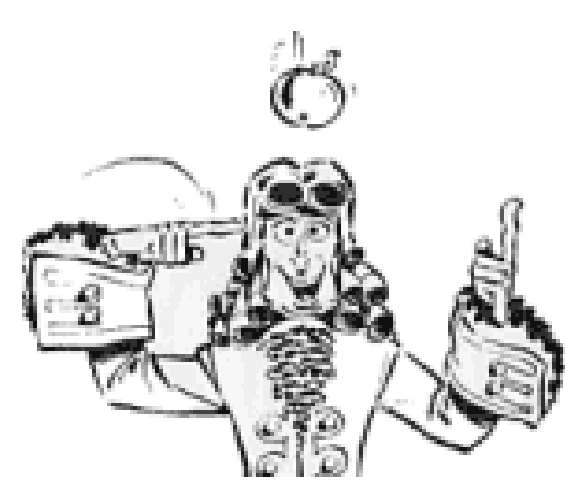
Méga **MeV**  $10^6$

Giga **GeV**  $10^9$

Téra **TeV**  $10^{12}$



# **Les quatre interactions fondamentales**

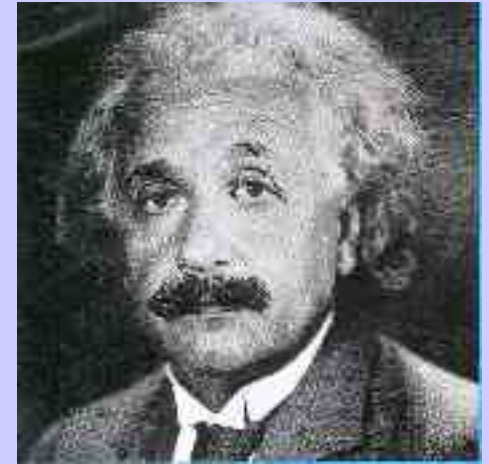


## L'interaction gravitationnelle: Relativité générale

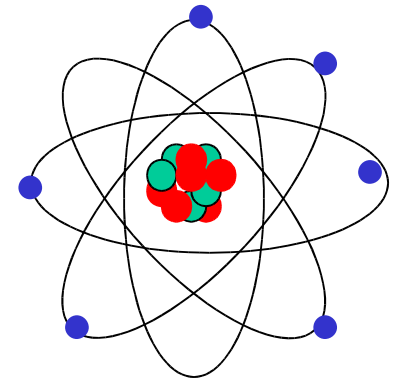
- toujours attractive
- agit sur toute forme de matière ( ou d'énergie )
- intensité extrêmement faible ( $10^{-40}$  )

*Dominante aux grandes échelles*

*Sans objet aux petites échelles*



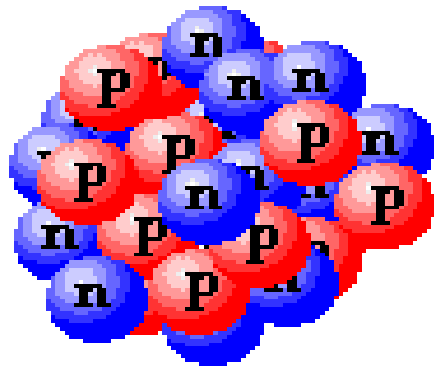
➡ Nous n'en parlerons plus ici



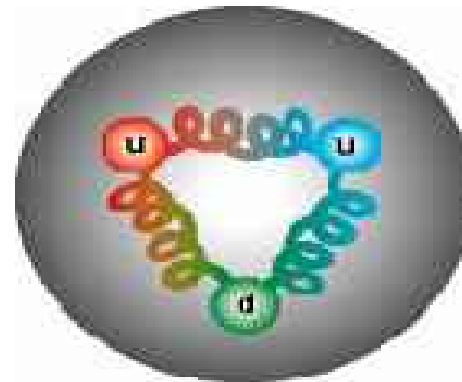
## L'interaction électromagnétique:

- attractive ou répulsive
- agit sur les particules porteuses d'une charge électrique
- intensité assez importante ( $10^{-2}$ )
- Responsable de l'électricité, lumière, ondes radio, magnétisme, électronique, lasers,...
- Lie les atomes, molécules, cristaux
- Nature quantique : le photon





noyau



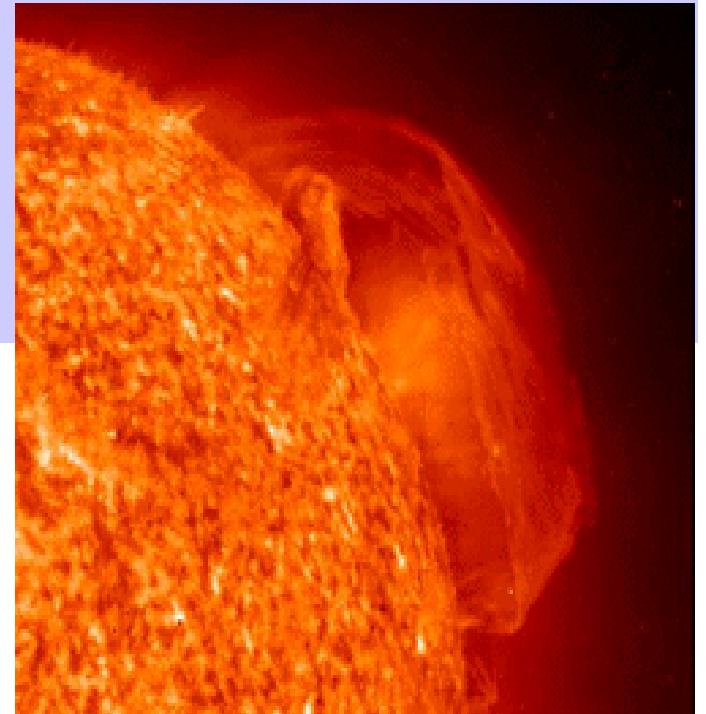
Proton

## L'interaction forte: force nucléaire

- intensité la plus importante (1)
- courte portée (  $\sim 10^{-13}$  m )
- responsable de la cohésion du noyau
- et de la cohésion du proton et du neutron
- n'agit pas sur l'électron

# L'interaction faible:

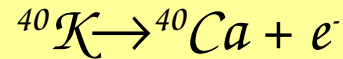
- mise en évidence par la radioactivité  $\beta$   
(transformation d'un neutron en proton + électron)
- intensité faible (  $10^{-5}$  )
- portée très petite (  $10^{-18}$  m )
- responsable de la fusion dans le Soleil :  
( formation d'un noyau  $\text{He}^4$  à partir de 4 protons)



# De nouvelles particules élémentaires

## 1914-1930: **Crise de la sacro-sainte loi de conservation de l'énergie**

Désintégration  $\beta$



Conservation de l'énergie: l'électron devrait avoir une énergie constante.

Ce n'est pas ce qui est observé !!??

L'idée de Pauli (1930):

- la non conservation de l'énergie n'est qu'apparente,
- une partie de l'énergie donnée à un troisième corps, neutre, non détecté



en fait  $n \rightarrow p + e^- + \nu$

**1933:** on le baptise **neutrino**, le petit neutre

**1956: détection des interactions de neutrinos auprès d'un réacteur nucléaire**

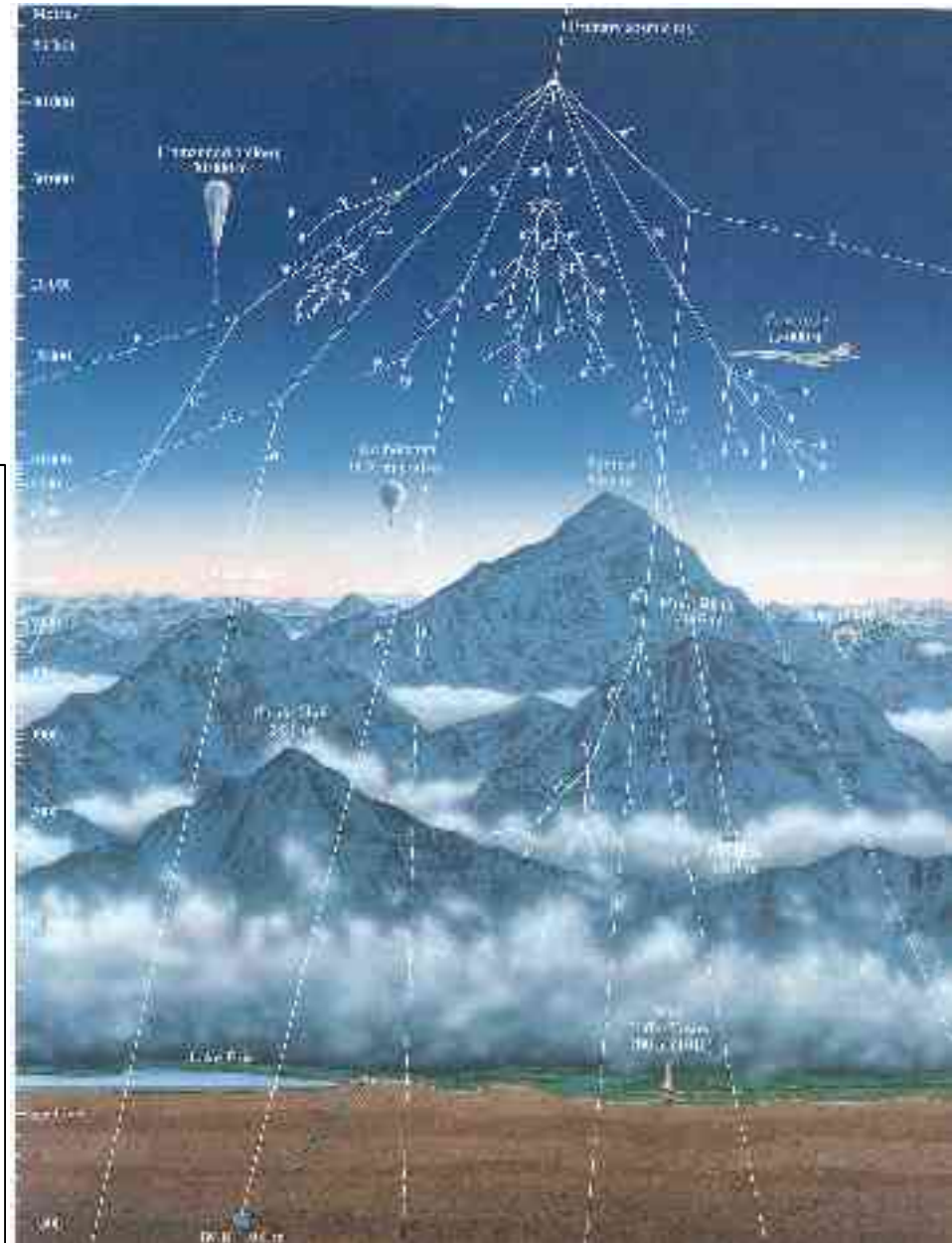
**Dès les années 1940** : étude du rayonnement cosmique (haute montagne, ballons stratosphériques)

### Découvertes :

- du positon  $e^+$
  - des muons  $\mu$  et  $\mu^+$
- $\mu \sim e$  mais 200X plus lourd !
- de nouvelles particules comparables au proton mais

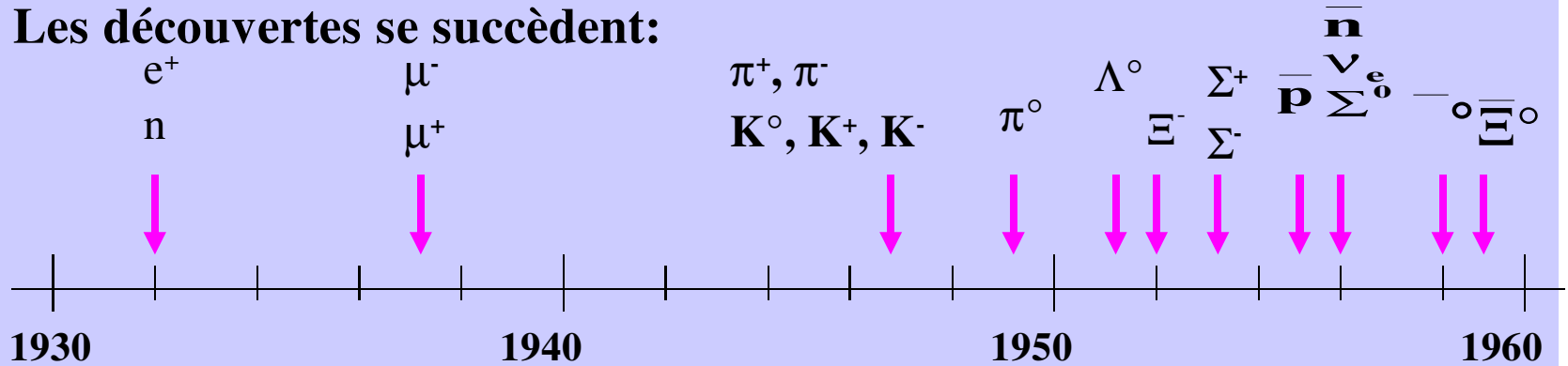
hautement instables ( $< 10^{-8}$  s)

$\pi^+$ ,  $\pi$ ,  $\pi^0$ ,  $\mathcal{K}^+$ ,  $\mathcal{K}$ ,  $\mathcal{K}^0$ ,  $\Lambda^0$



# 1953: premier accélérateur de haute énergie

Les découvertes se succèdent:



.....plus de 100 particules!!!!

1. A chaque particule est associée une anti-particule  
(même masse, même temps de vie, **charges opposées** )  
 $e^+ = \text{anti } e^-$ ,  $\bar{p} = \text{antiproton}$ ,  $\bar{n} = \text{antineutron}$ , etc...  
En 1995, au CERN : 9 atomes d'anti-hydrogène !

2. SPIN : les particules tournent comme des toupies !

On distingue	FERMIONS	BOSONS
spin =	$1/2, 3/2, \dots$	$0, 1, 2, \dots$

Principe d'**exclusion** (Pauli) :

**2 fermions identiques ne peuvent cohabiter**

3. LEPTONS ( $e, \mu, \nu$ ): pas sensibles à l'interaction forte

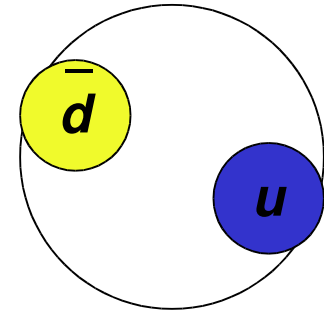
HADRONS : Mésons (spin entier-bosons)  $\pi, \mathcal{K}, \dots$

Baryons (spin  $1/2$  entier-fermions)  $p, n, \Lambda, \dots$

PHOTON : mis à part

# Première recette de fabrication d'un hadron : le modèle des quarks

Méson : 1 quark et 1 antiquark    exemple:  $\pi^+ = (u \bar{d})$



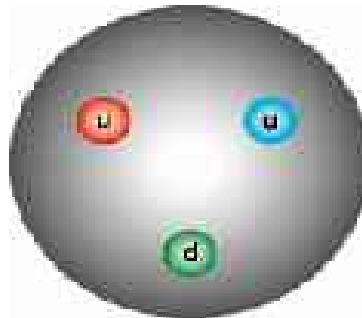
Baryon : 3 quarks

$$p = (u u d)$$

Anti-baryon : 3 antiquarks

$$\bar{n} = (\bar{u} \bar{d} \bar{d})$$

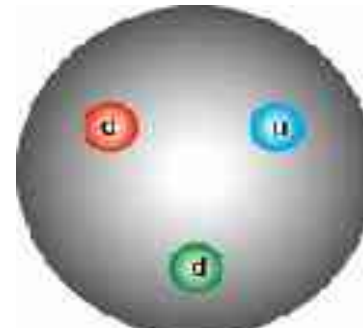
**proton**



Proton

$$q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$$

**neutron**



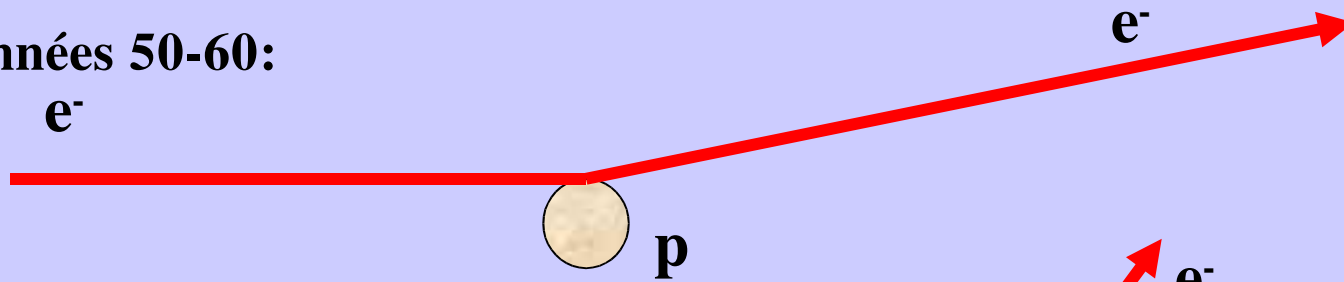
Neutron

$$q_n = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$$



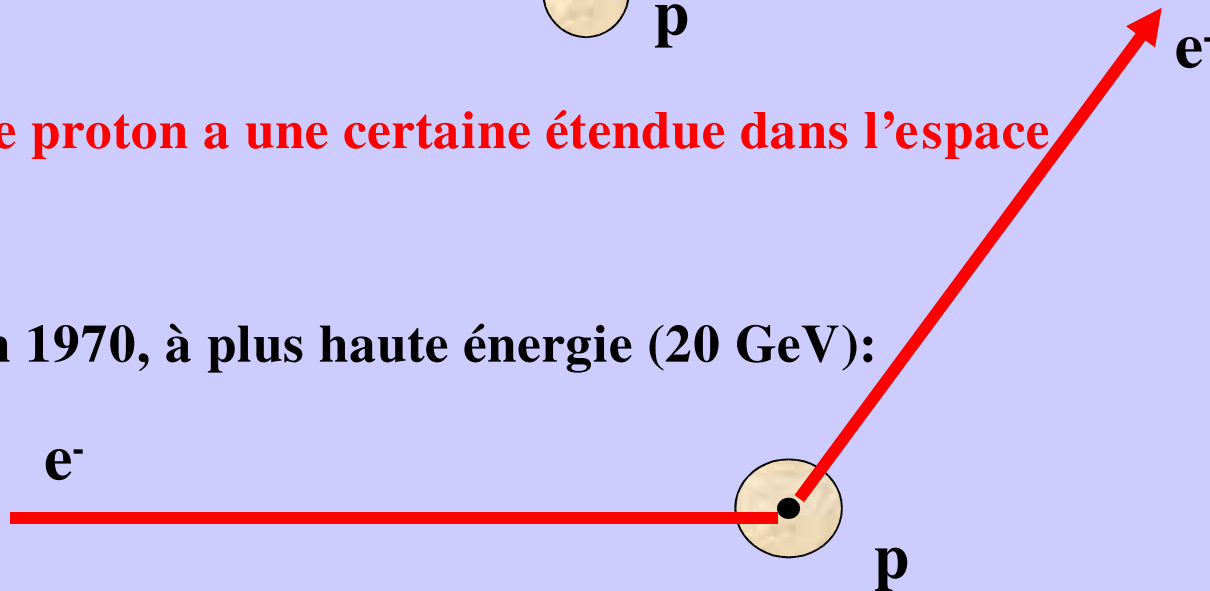
## Diffusion des électrons:

années 50-60:



**Le proton a une certaine étendue dans l'espace**

en 1970, à plus haute énergie (20 GeV):



**Dans le proton, il y a des grains durs!**

# Problèmes

1. Pas de quarks libres observés !

Ils semblent prisonniers dans les hadrons

2. Les quarks sont des fermions (de spin  $\frac{1}{2}$ )

Principe d'exclusion pas respecté ? Exemple:  $\Delta^{++} = (u u u)$

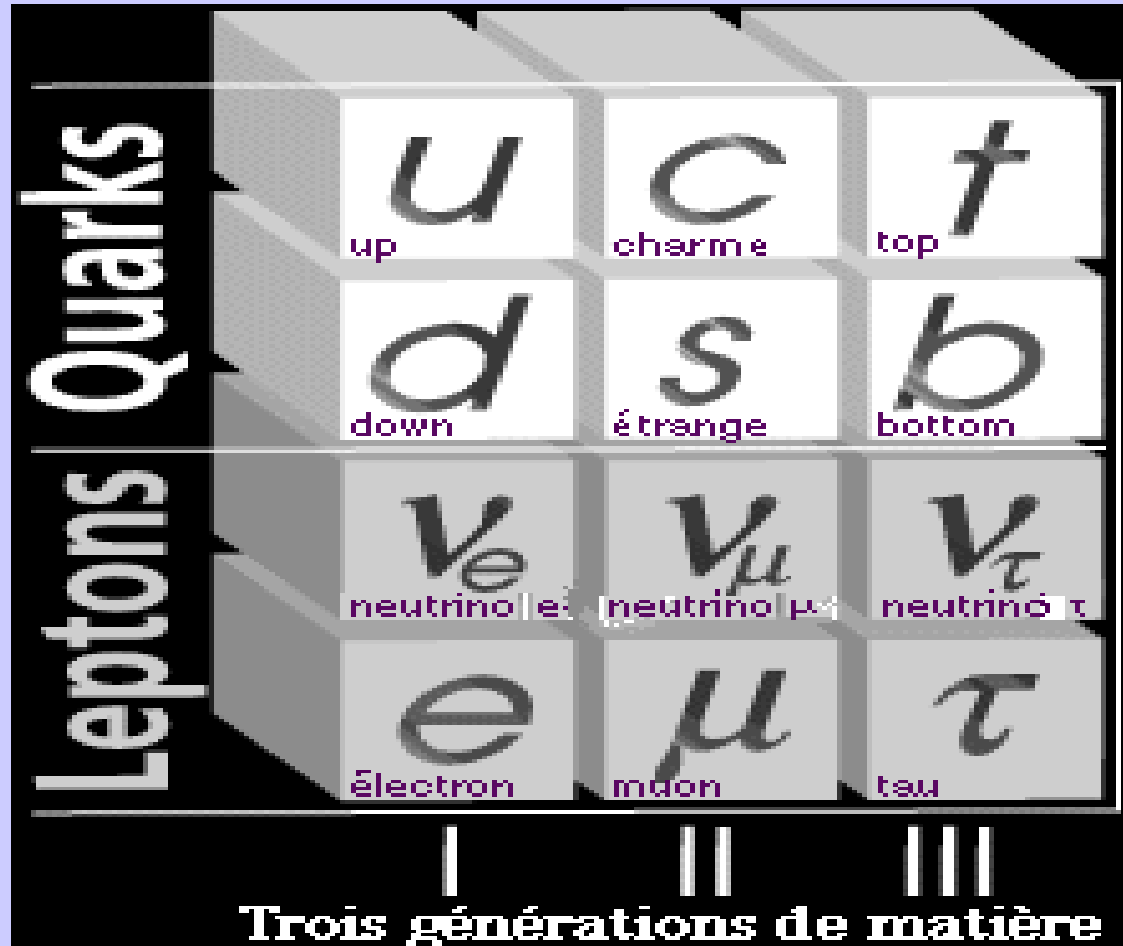
Solution (?) : les 3 quarks u ne sont pas identiques.

Ils sont de “couleurs ” différentes (voir + loin)

$$\Delta^{++} = (u u u)$$

# Résumé:

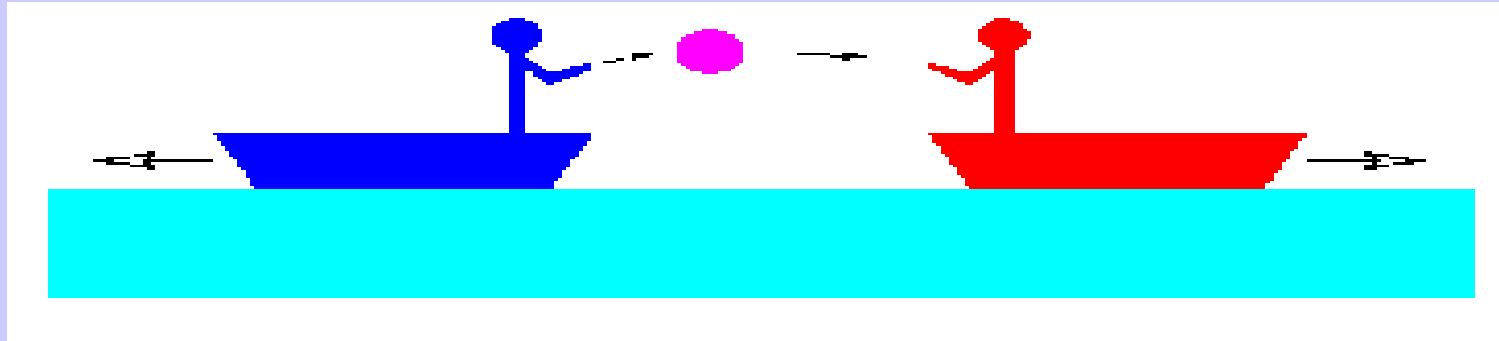
Les constituants élémentaires de la matière:



Matière ordinaire

# **Retournons à nos interactions**

**Dans le monde quantique, les interactions ont lieu par un mécanisme d'échange:**



**Les particules de matière interagissent à distance en échangeant une particule «messagère».**

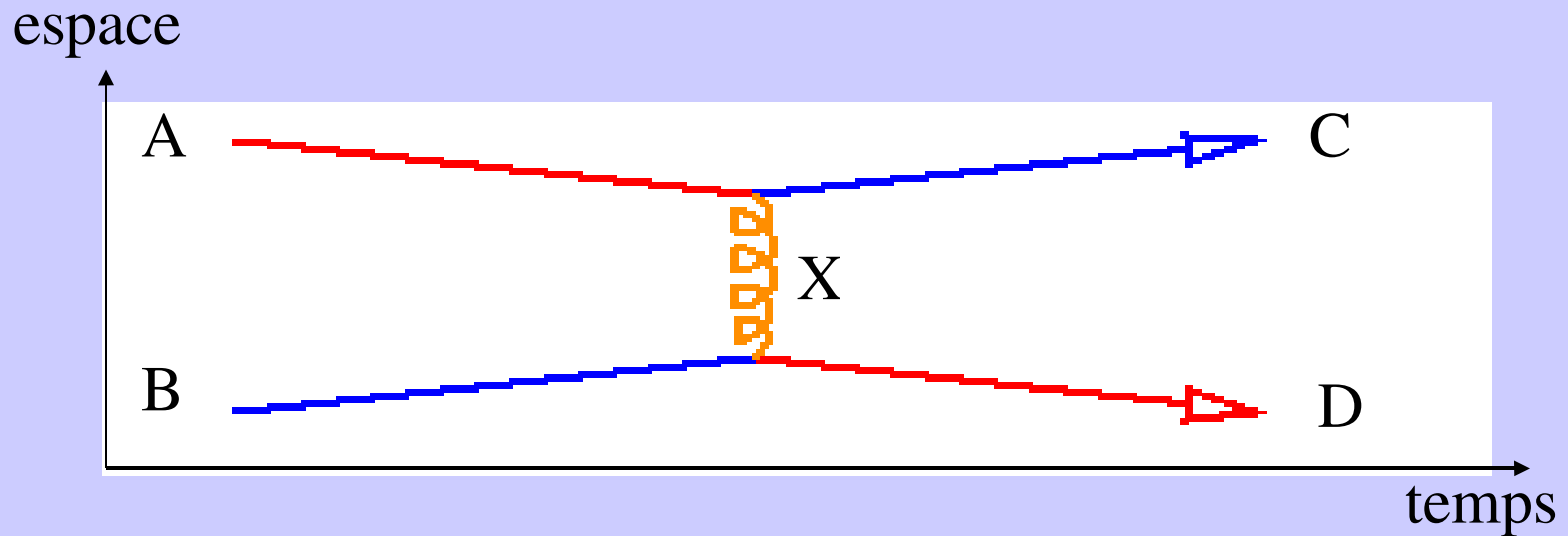
**Tout est donc particules: matière et interactions**

**La portée de l'interaction est petite lorsque la masse de la particule échangée est grande.**

# Représentation symbolique

## Le diagramme de Feynman

Soit, par exemple, la réaction  $A + B \rightarrow C + D$



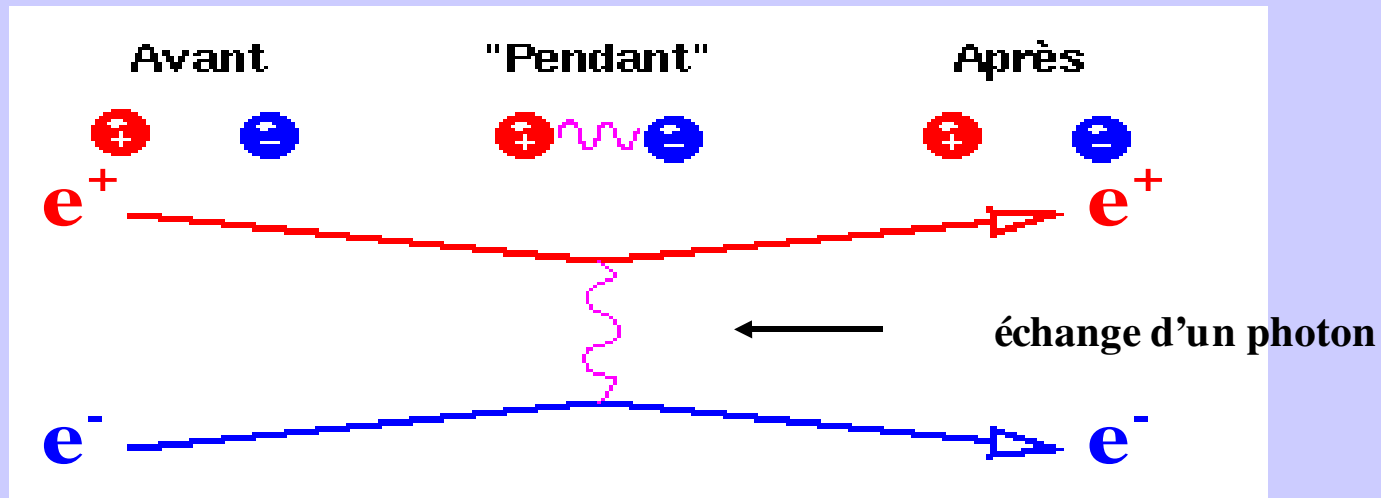
La particule échangée  $X$  est dite **virtuelle** : elle n'est **pas observable**. Elle “emprunte” une énergie  $\Delta E$  pendant un temps  $\Delta t$  fixé par le **principe d'indétermination** :

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s} = \text{constante de PLANCK}$$

# Interaction électromagnétique

L'électrodynamique quantique (QED) = échanges de photons.

Exemple:



$$\mathbf{m} = \mathbf{0}$$

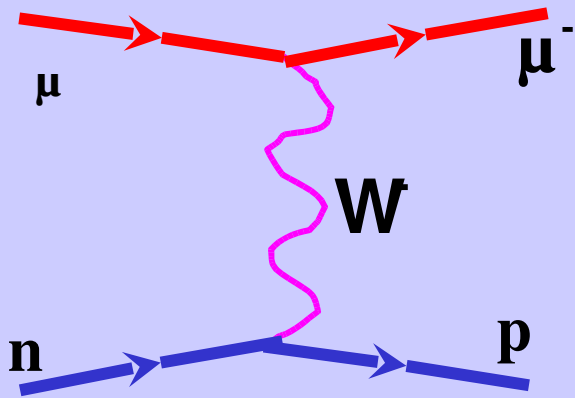
QED est la théorie la mieux vérifiée, à plus de 10 chiffres significatifs!!

# Interaction faible

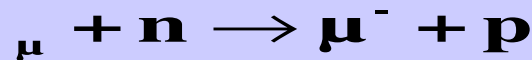
3 médiateurs: bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  **lourds**

$$m_W = 80 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$$

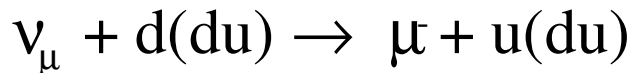


Exemple 1

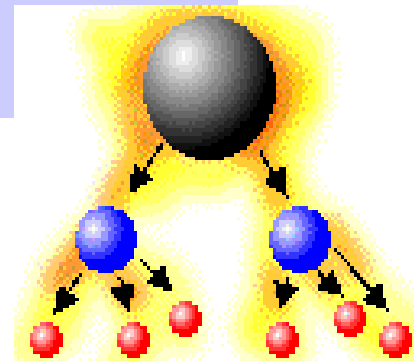


échange d'un boson  $W^-$   
"courant chargé"

Interaction à très courte portée : n'a lieu que si le neutrino passe au voisinage immédiat d'un quark



Note : l'échange d'un  $W$  change la "saveur" du quark  
- responsable de la désintégration des quarks lourds

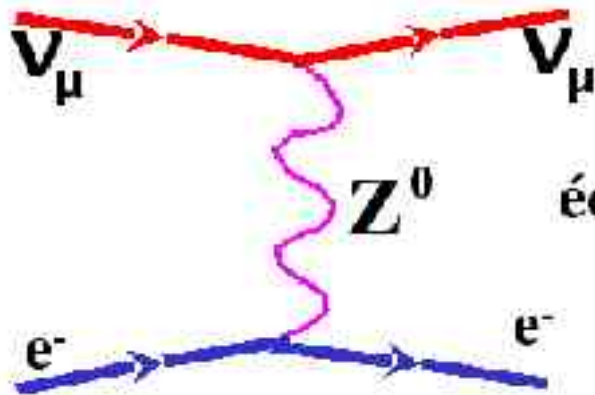


Il n'y a pas d'autre désintégration possible !



## Exemple 2

$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$$



échange d'un boson  $Z^0$   
"courant neutre"



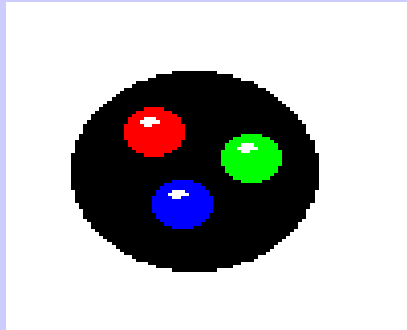
## Théorie électrofaible (1967) :

explique **simultanément** QED et int. faibles

- courants neutres prédits et observés en 1973
- bosons  $Z^0$ ,  $W^+$  et  $W^-$  prédits et observés en 1983
- vérifiée avec une grande précision, notamment par les expériences au LEP au CERN (1989 – 2000)

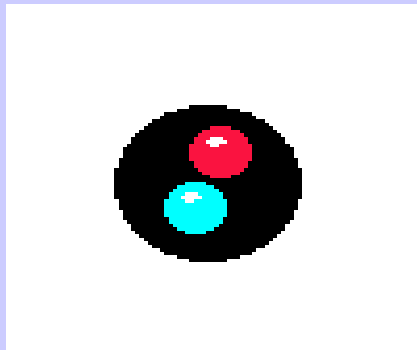
## Recette améliorée de fabrication d'un hadron

Trois quarks de couleurs différentes s'attirent. Les trois quarks des baryons sont de couleurs différentes et les baryons sont «blancs».



baryons

Le quark et l'antiquark d'un méson portent la couleur et l'anticouleur correspondantes; ils sont donc eux aussi «blancs».



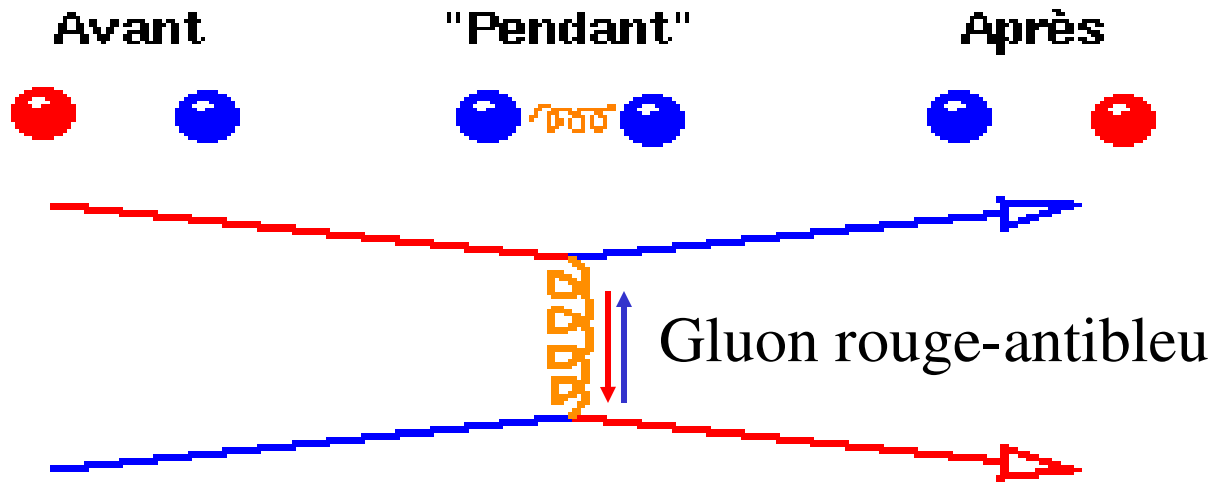
mésons

L'interaction entre 2 hadrons :

Forces de couleurs résiduelles

# Interaction forte

Lors de l'échange d'un gluon, deux quarks échangent leur couleur:

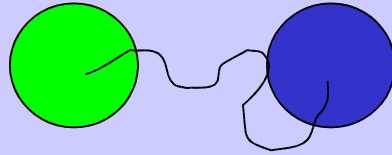


Comme le photon, les gluons sont de masse nulle. MAIS :

- le photon n'a pas de charge électrique
- les gluons ont une charge de couleur (couleur et anti-couleur) -> ils interagissent entre eux !

# La force forte ressemble à un élastique

- Quand ils sont très proches, les quarks interagissent peu entre eux.

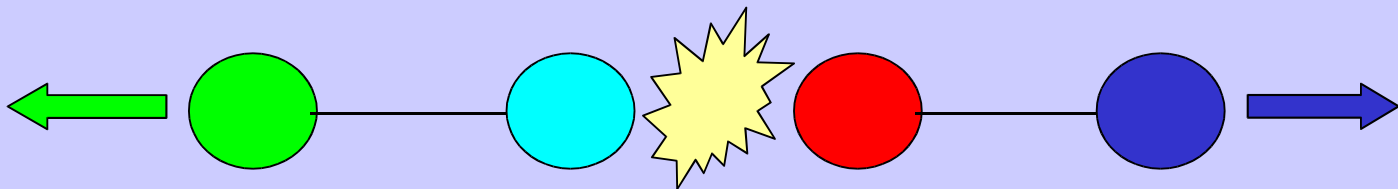


- S'ils s'éloignent, leur interaction augmente  
-> les quarks sont confinés dans les hadrons.



Si on tire trop sur l'élastique, il «casse» : une paire quark-antiquark est formée et s'apparie aux quarks initiaux ->

**hadronisation**



# Le Modèle Standard

## Particules

### Bosons "Rayonnement"

gluons	$W^+$	$Z^0$	photon
	$W^-$		

### Fermions "Matière"

Quarks		Anti quarks		Leptons		Anti leptons	
d	u	$\bar{d}$	$\bar{u}$	$e^-$	$\nu_e$	$e^+$	$\bar{\nu}_e$
s	c	$\bar{s}$	$\bar{c}$	$\mu^-$	$\nu_\mu$	$\mu^+$	$\bar{\nu}_\mu$
b	t	$\bar{b}$	$\bar{t}$	$\tau^-$	$\nu_\tau$	$\tau^+$	$\bar{\nu}_\tau$

Élémentaires

Mésons  
(Quark-anti-quark)



Baryons  
(Trois quarks)



Anti baryons  
(Trois anti-quarks)

Composites  
(Hadrons)

## Et demain ?

Une pièce manquante :

Dans le Modèle Standard, un mécanisme est introduit, appelé mécanisme de Brout- Englert-Higgs pour rendre compte des **masses des particules**. Il implique l'existence d'une particule supplémentaire: **le boson de Higgs**

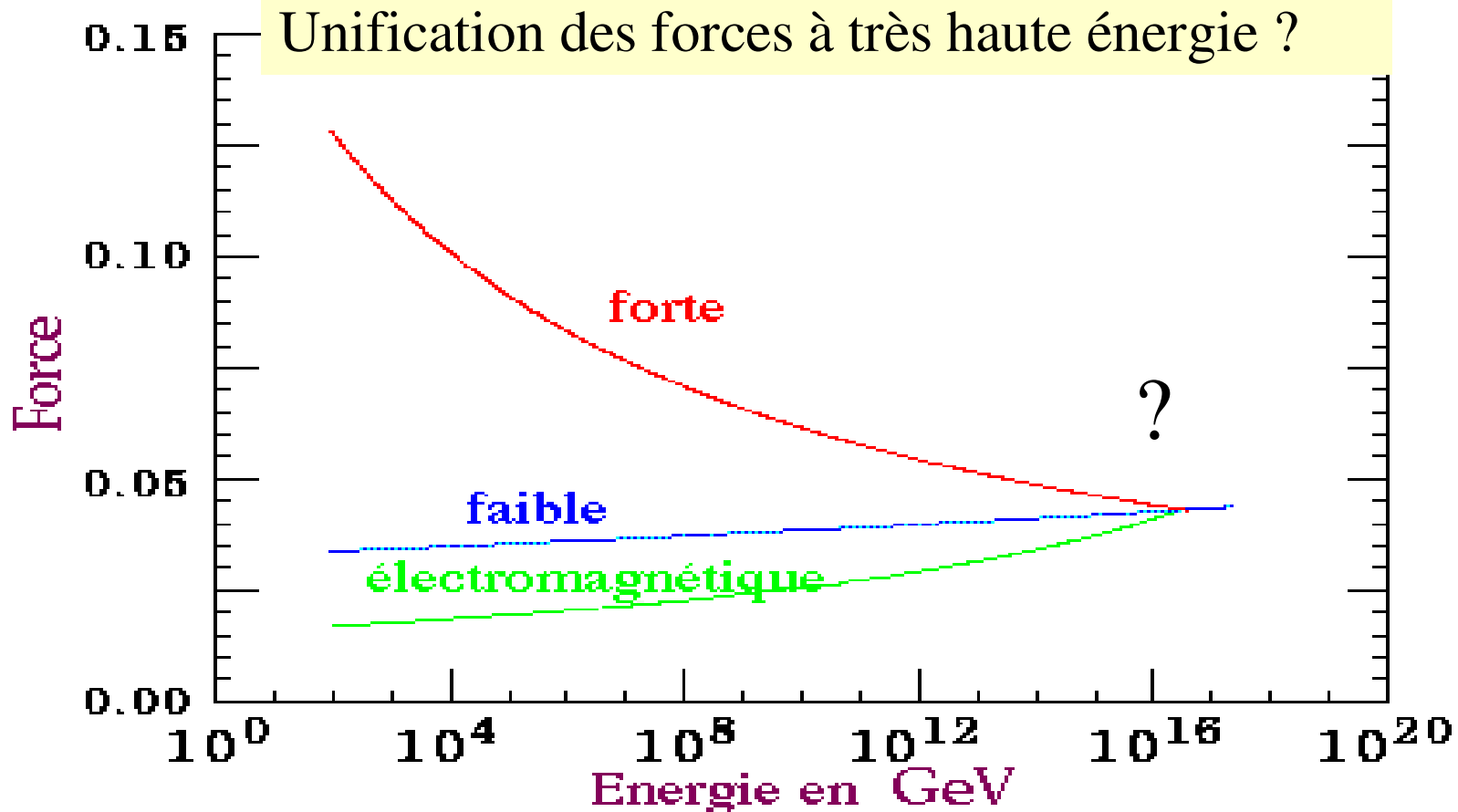
Sa découverte est l'un des principaux objectifs du **LHC**

( Large Hadron Collider ), un collisionneur protons-protons de  $7 + 7$  TeV qui entre en fonctionnement cette année au CERN.

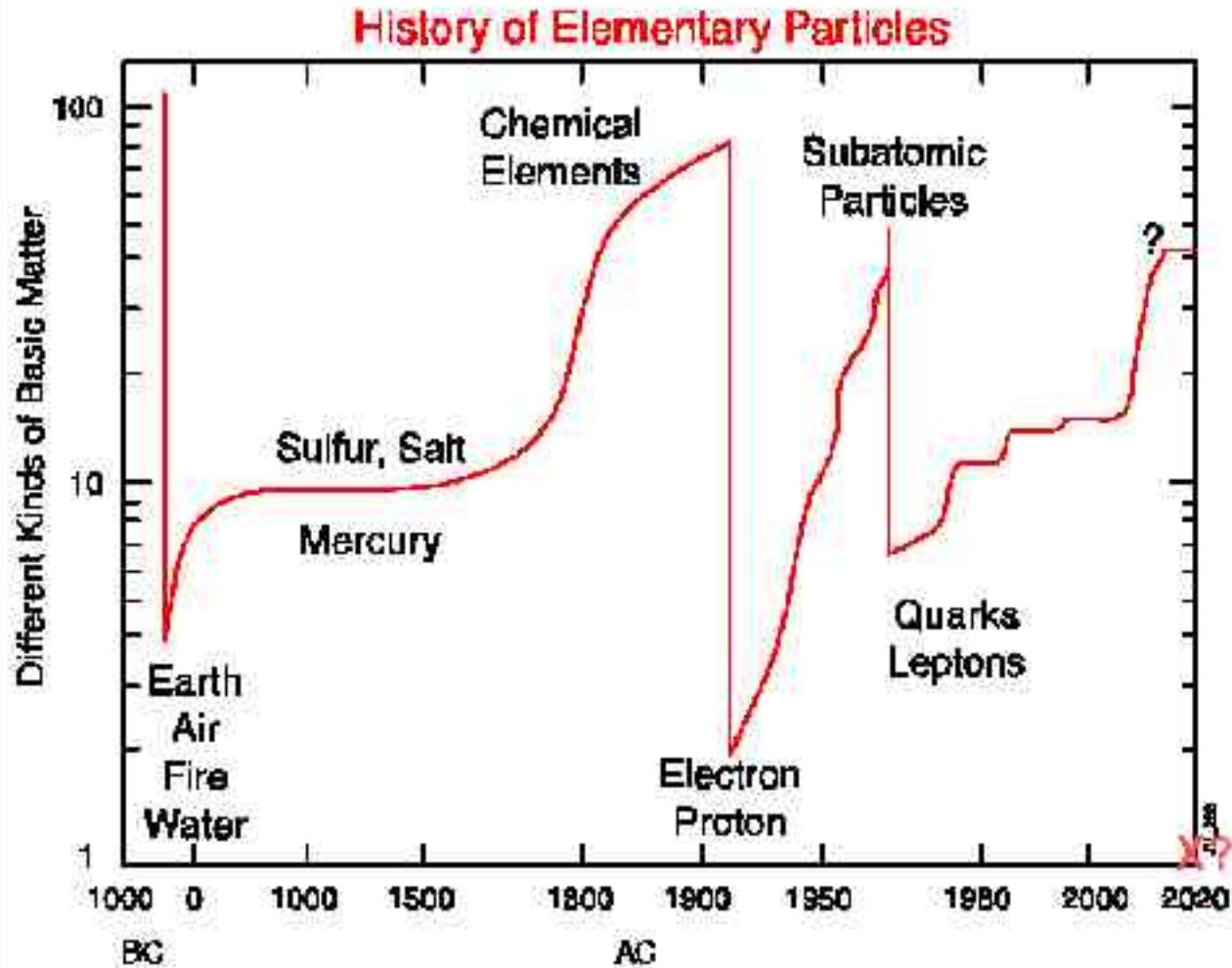
**Des surprises nous attendent peut-être ...**

## Le Modèle Standard n'est pas la théorie ultime:

- Il n'explique pas pourquoi 3 familles de fermions
- Il ne prédit pas leur masse
- Il n'unifie pas toutes les forces
- D'autres formes de matière semblent exister (voir prochain exposé)



# En guise de conclusion



Merci à  
Pierre V., Gilles,  
et wikipedia...