

Physique des particules



De quoi le monde est-il fait ?

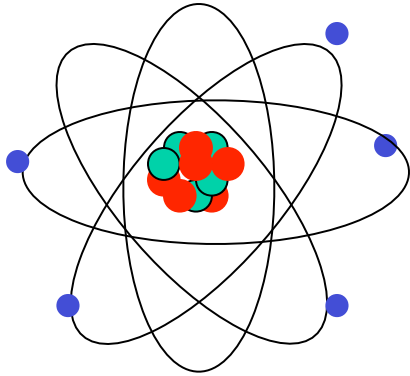
Comment décrire son évolution ?

Master Class IIHE

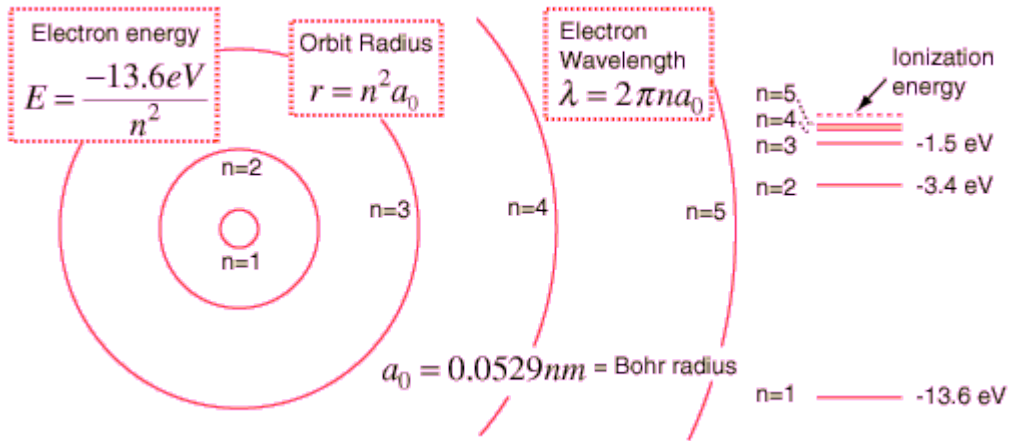
21 mars 2026

Laurent Favart

L'atome



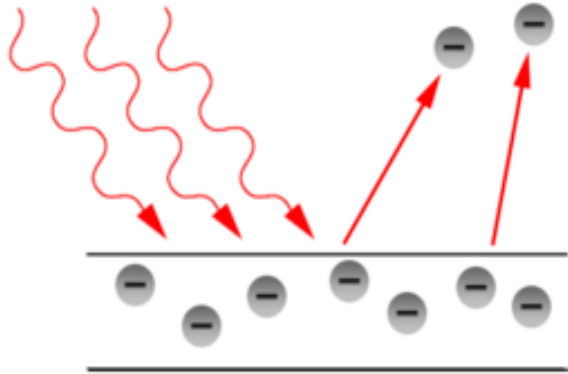
Pourquoi les électrons ne tombent-ils pas sur le noyau ?



Quantification des niveaux d'énergie

Bohr 1913

L'effet photoélectrique



- Les électrons ne sont émis que si la fréquence est suffisamment grande
- le courant d'électrons augmente avec l'intensité lumineuse

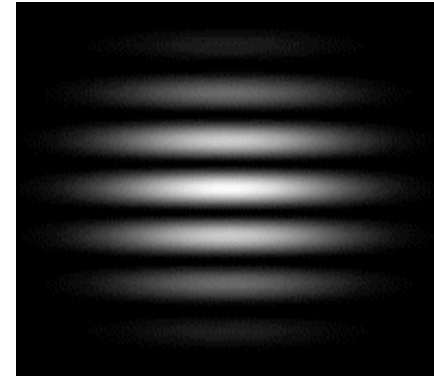
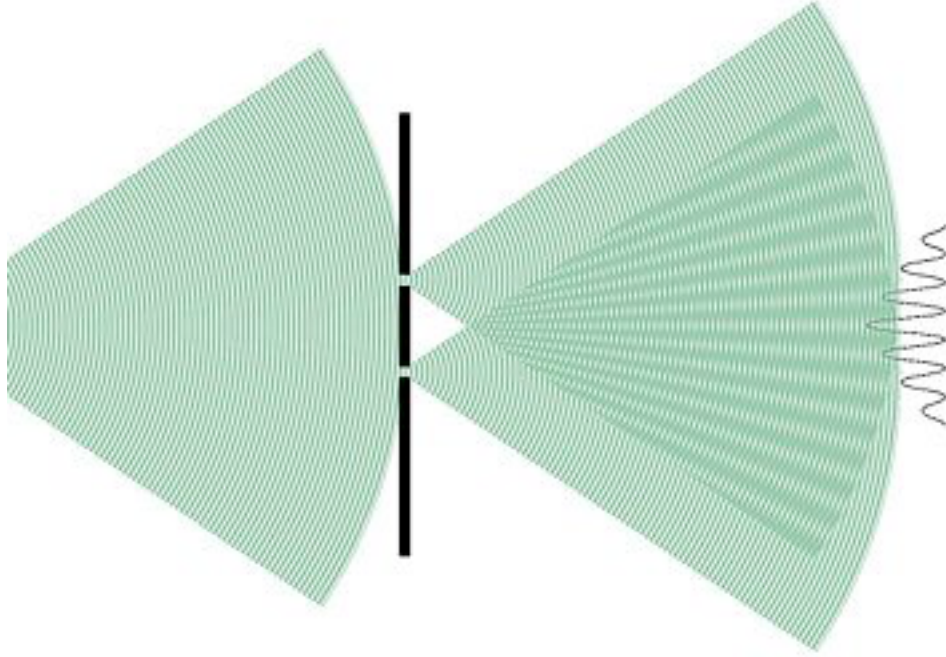
→ la lumière est composée de particules : les photons

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



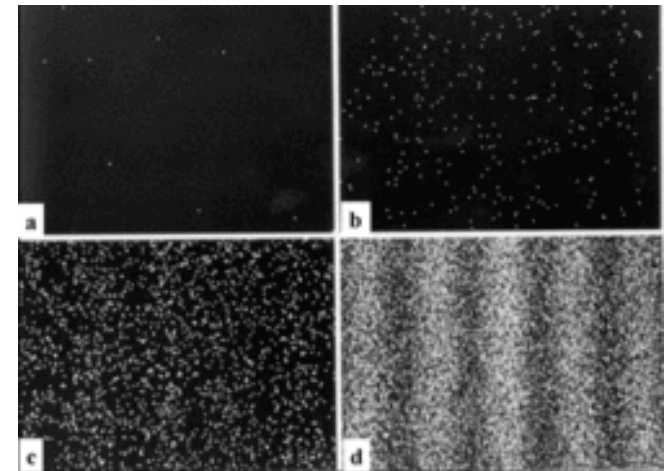
grande fréquence = grande énergie

Onde ou corpuscule?



- diminue l'intensité du faisceau :

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

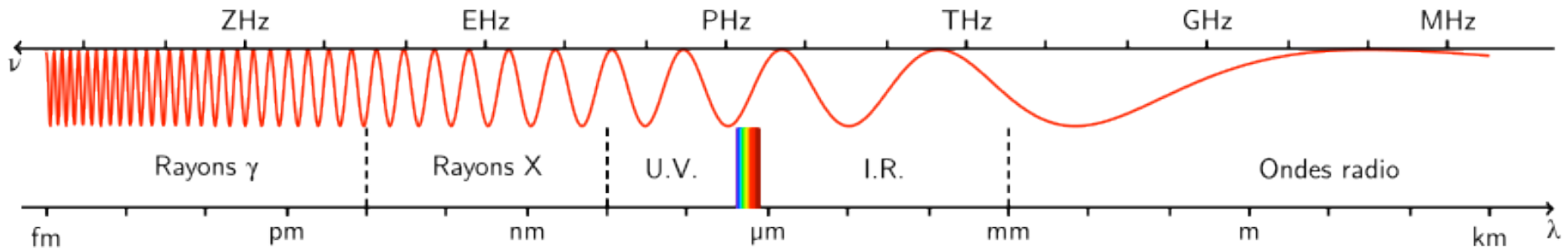


Mécanique quantique : équivalence onde - corpuscule

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

↑
petite longueur d'onde = grande énergie

Les photons, particules de lumière ou les ondes électromagnétiques:



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 energies.

Relativité : équivalence masse - énergie

$$E = mc^2 + T$$

énergie de masse + énergie 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

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

⇒ projectiles à très, très grande vitesse

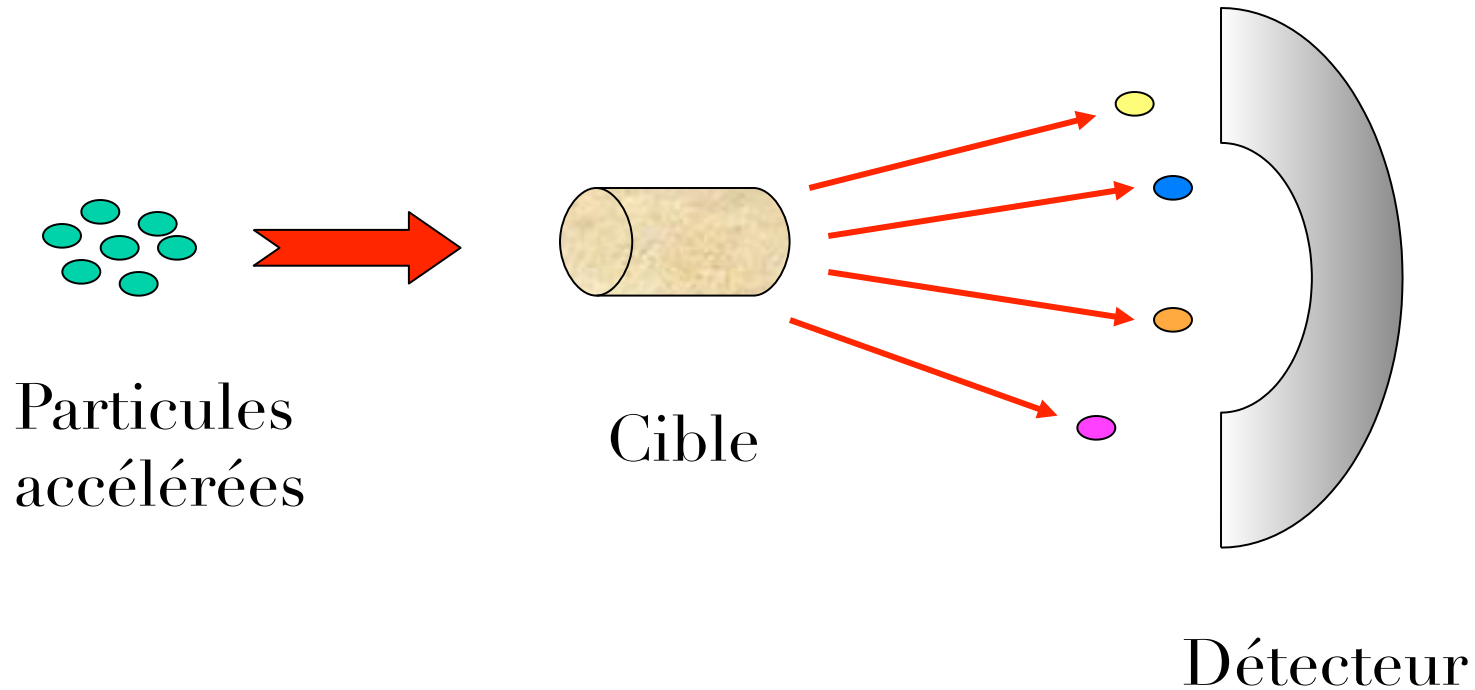
⇒ Permet de créer des particules de masse plus grande

→ c'est une énergie énorme

Atoll de Bikini - juillet 1946

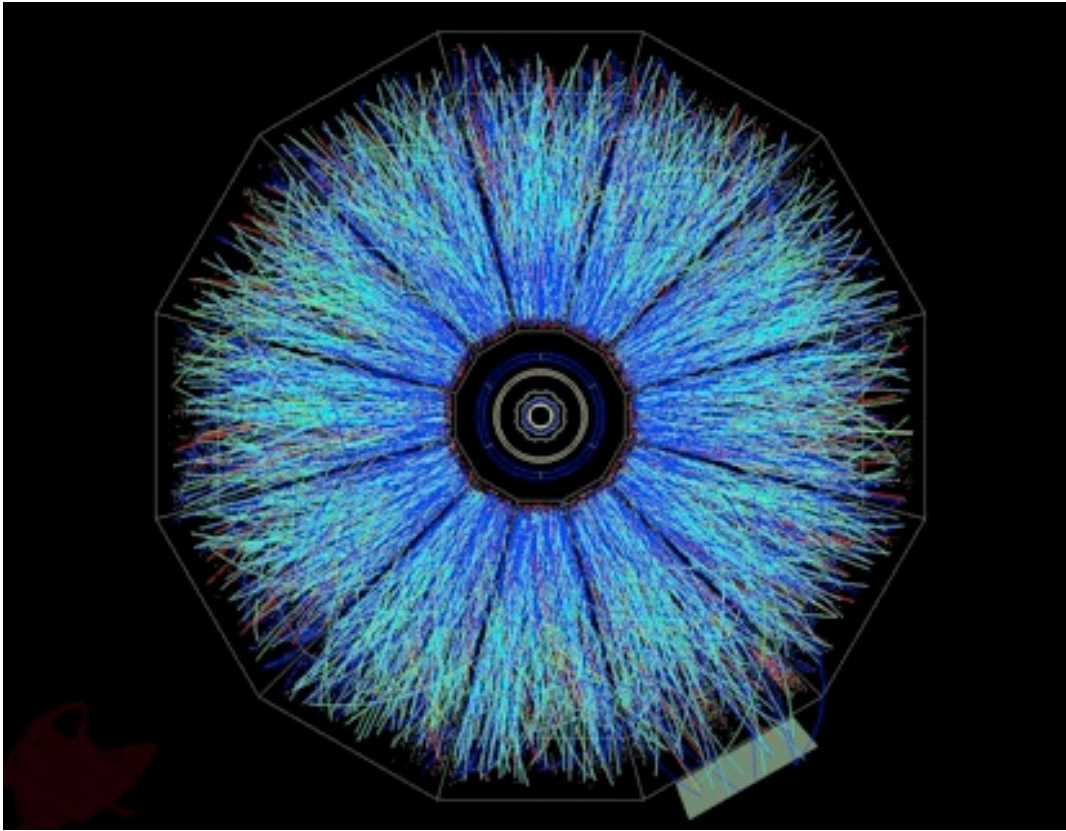


Expérience sur cible fixe



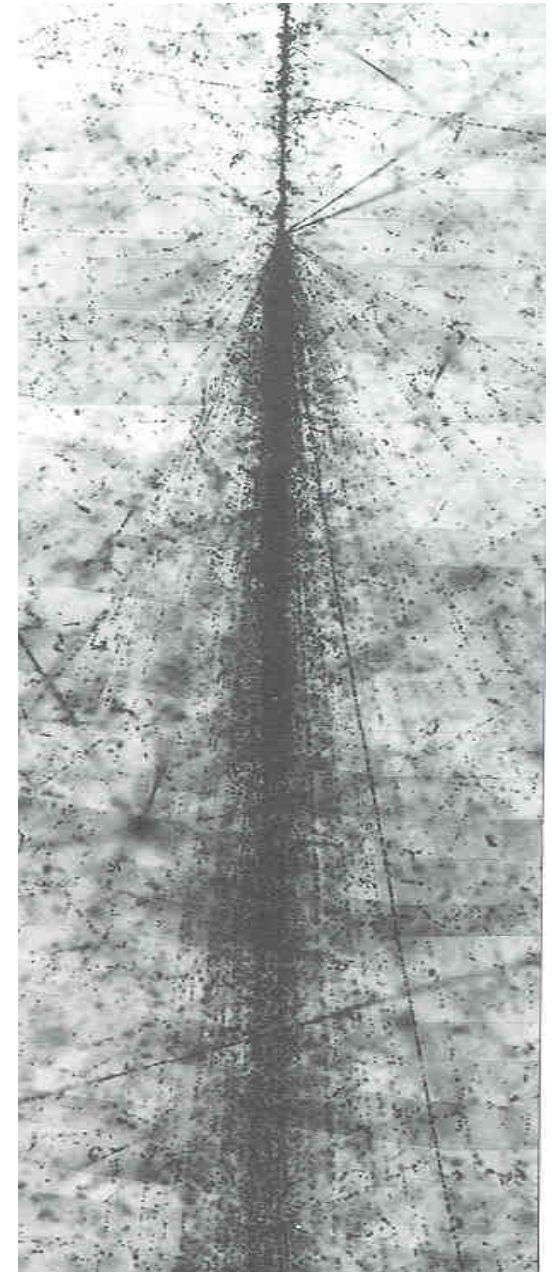
Note : la cible est parfois le détecteur lui-même !

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



Accélérateurs = Super microscopes

Avec des ondes-particules de très haute énergie

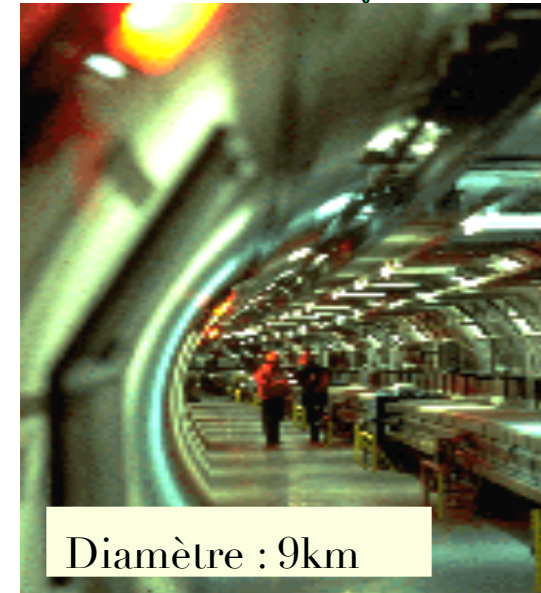
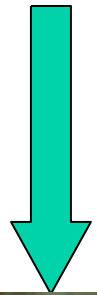
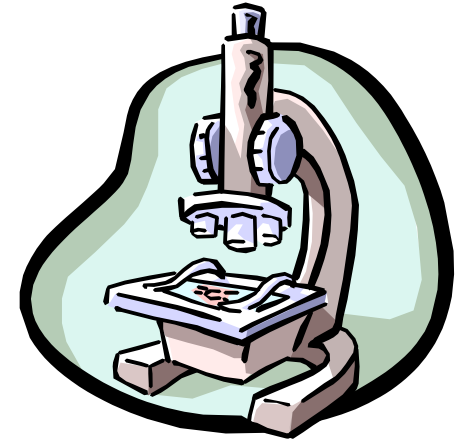


Longueur d'onde plus petite que la taille des protons et des neutrons

(10^{-15} m):

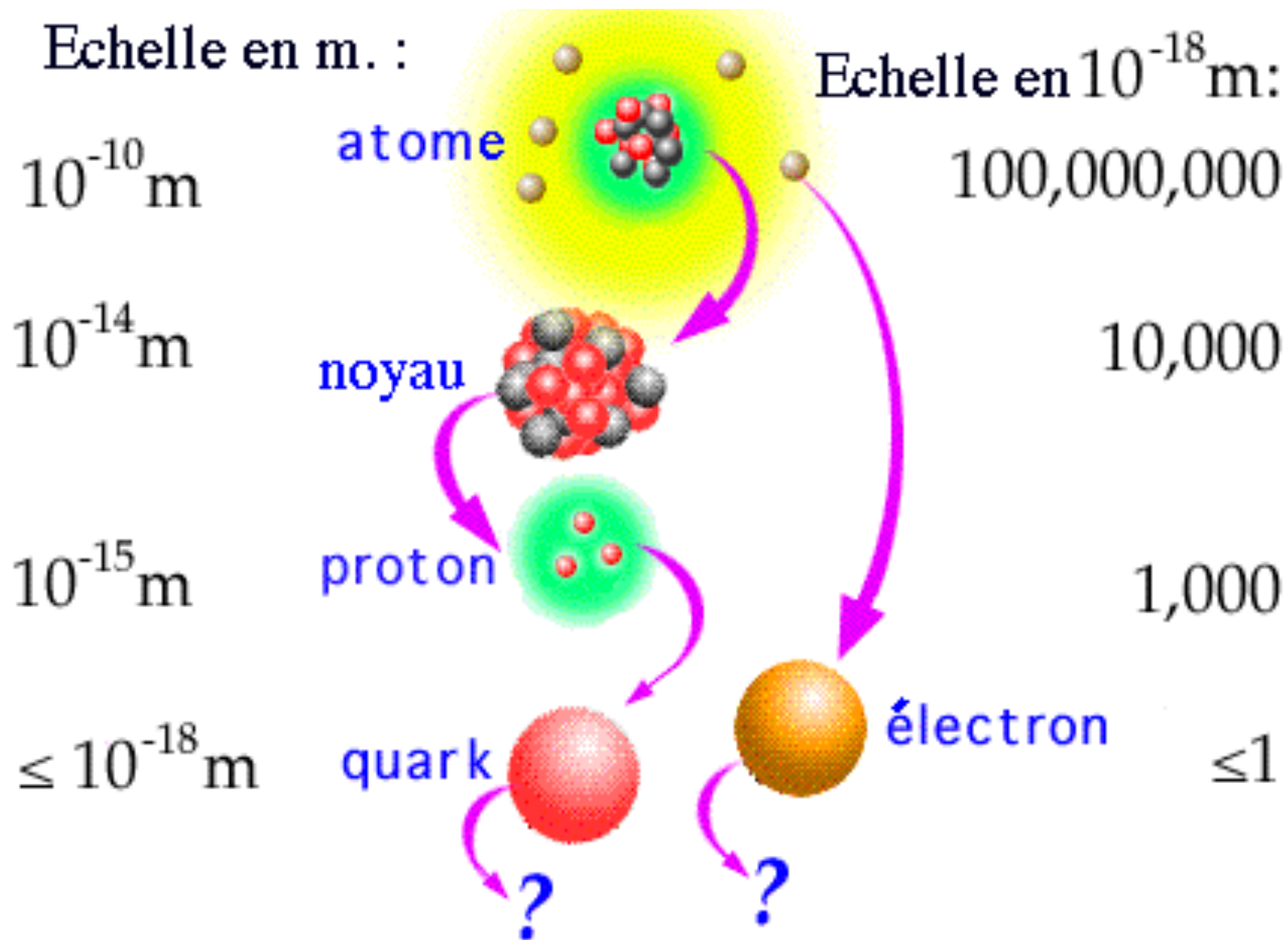
10^{-20} m

(0.01 milliardième de milliardième de mètre)



Diamètre : 9km

Ordres de grandeur des dimensions



Echelle des énergies

Electronvolt

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

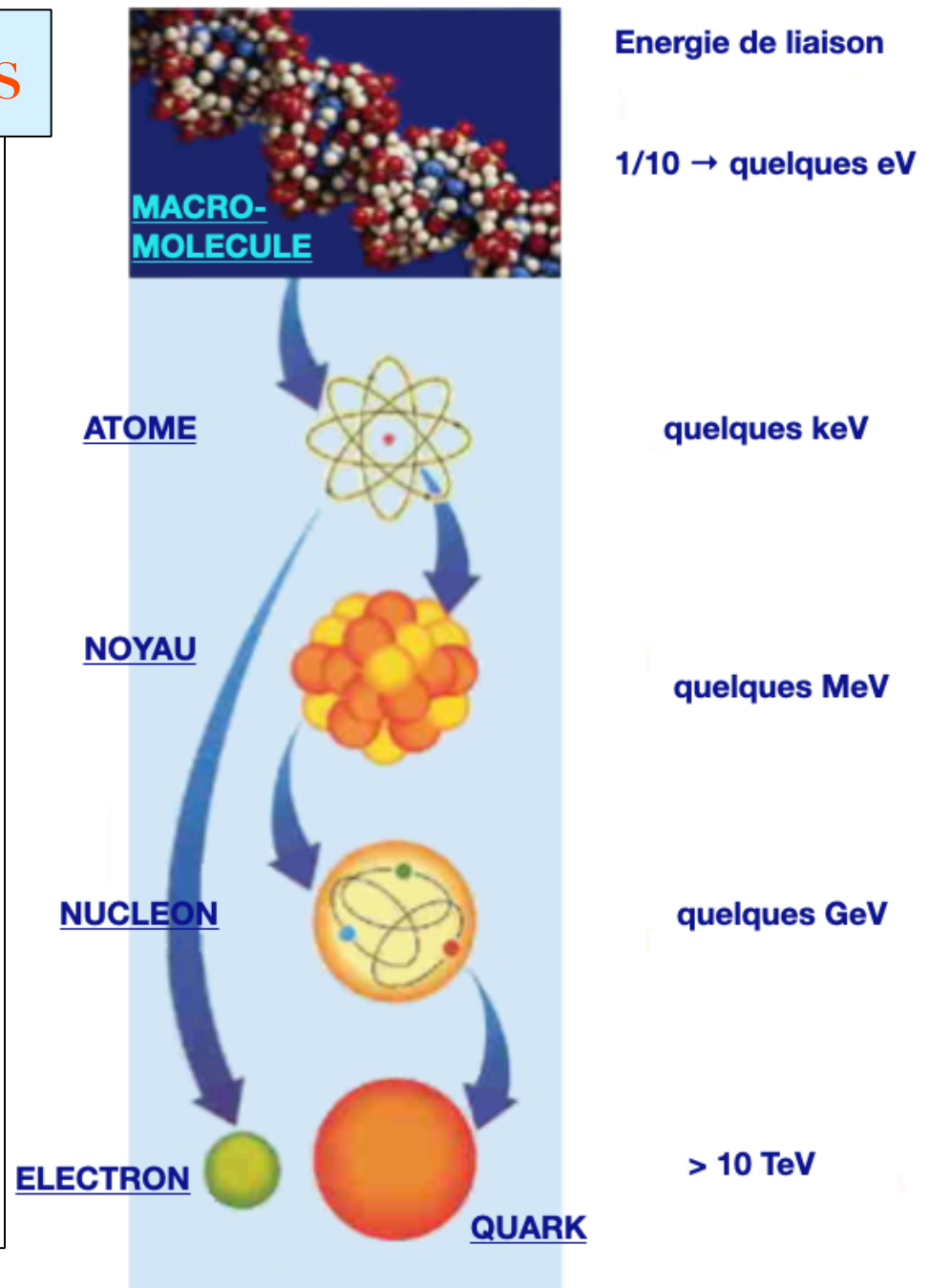
Kilo **keV** 10^3

Méga **MeV** 10^6

Giga **GeV** 10^9

Téra **TeV** 10^{12}

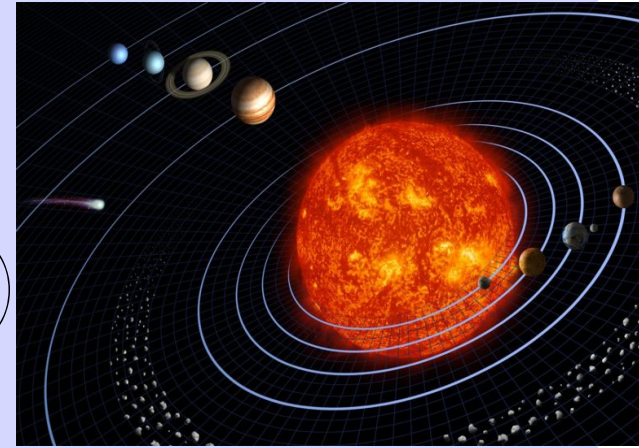
Péta **PeV** 10^{15}



Les quatre interactions fondamentales

L'interaction gravitationnelle: Relativité générale

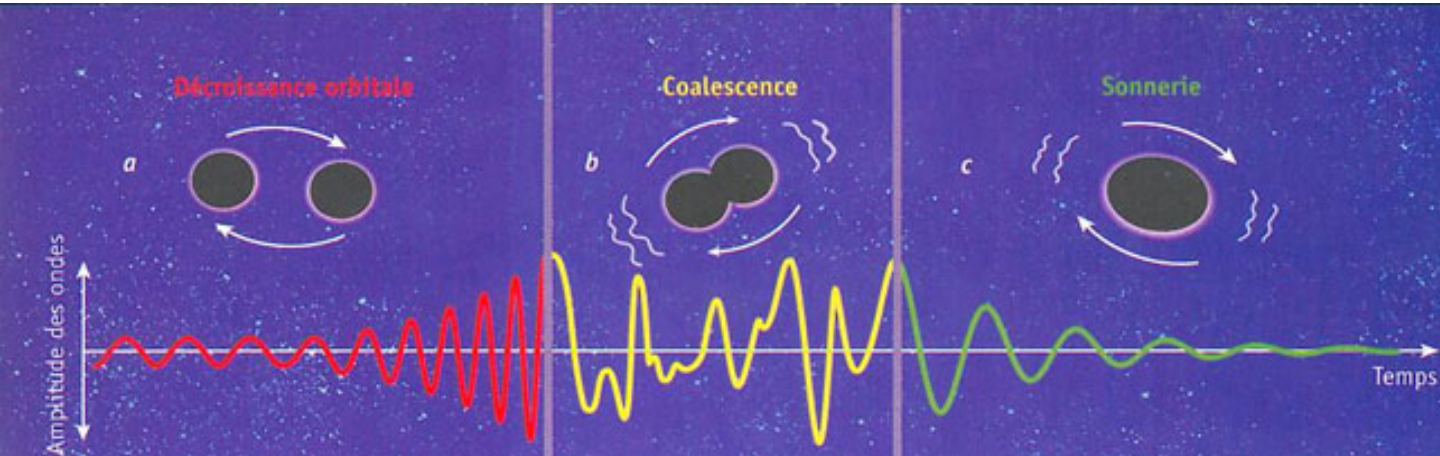
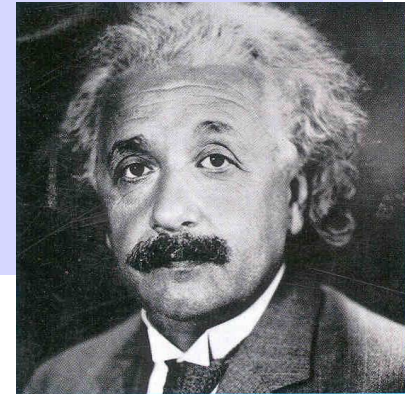
- toujours attractive
- agit sur toute forme de matière (ou d'énergie)
- intensité extrêmement faible (10^{-40})

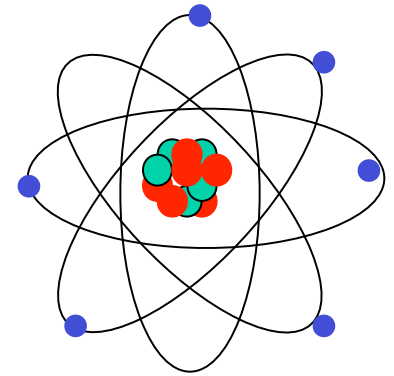
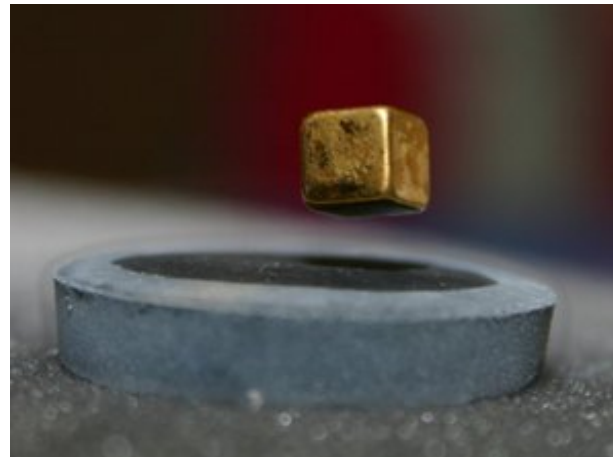


Dominante aux grandes échelles

Sans objet aux petites échelles

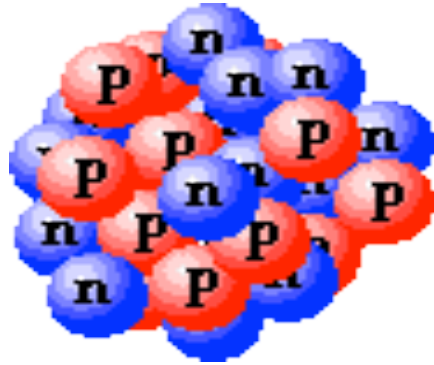
➡ Nous n'en parlerons plus ici



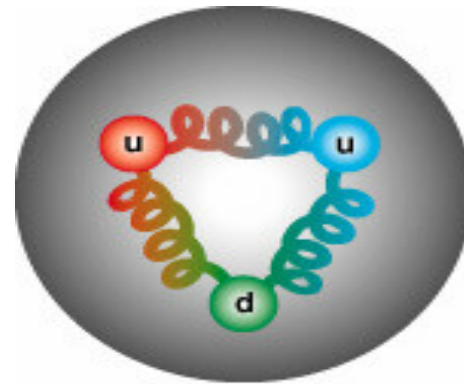


L'interaction électromagnétique:

- 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



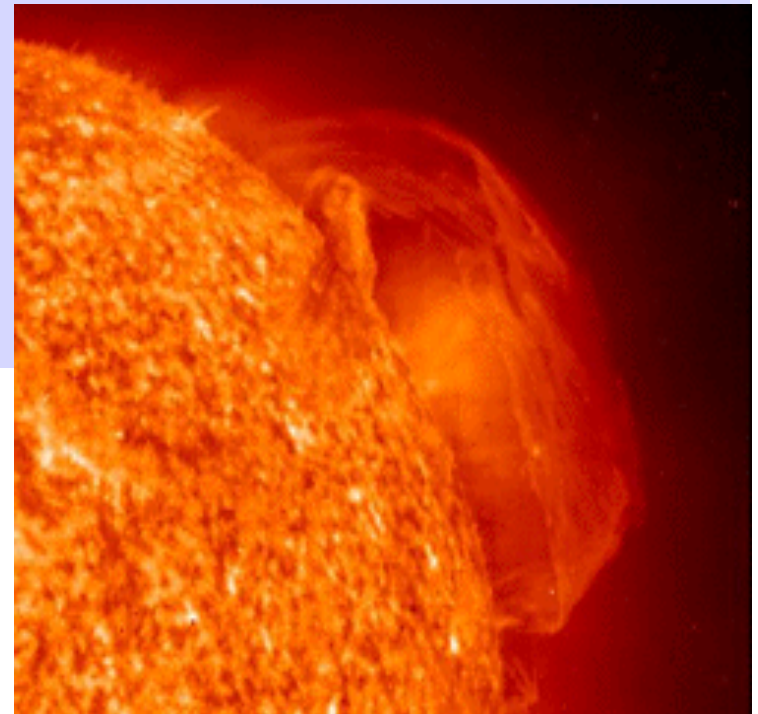
Proton

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 β
(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 He^4
à partir de 4 protons)



De nouvelles particules élémentaires

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

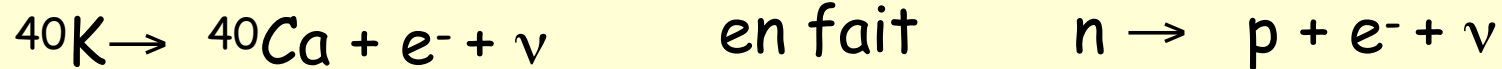
Désintégration β^-



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



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

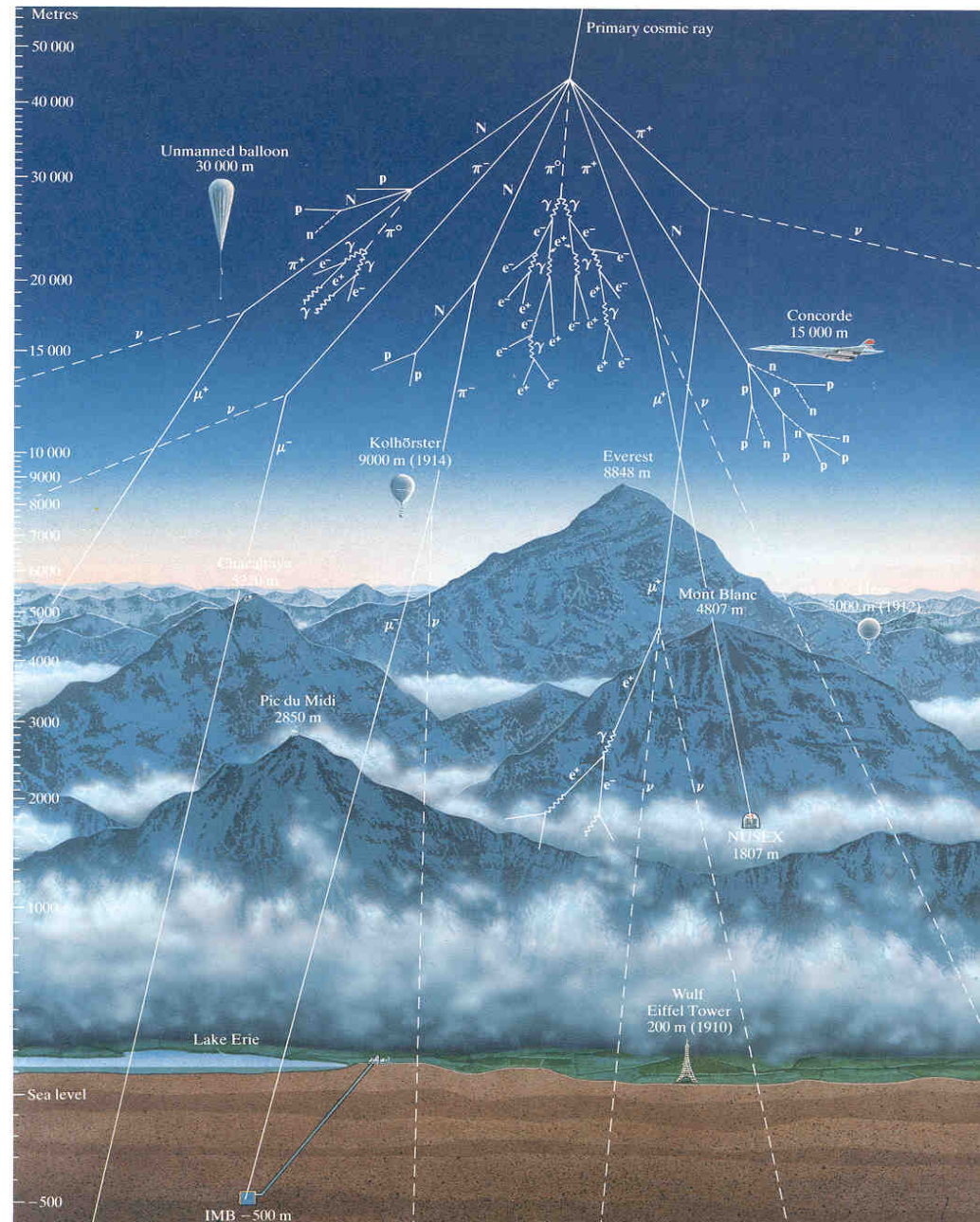
1956: détection des interactions de neutrinos auprès d'un réacteur nucléaire

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

Découvertes :

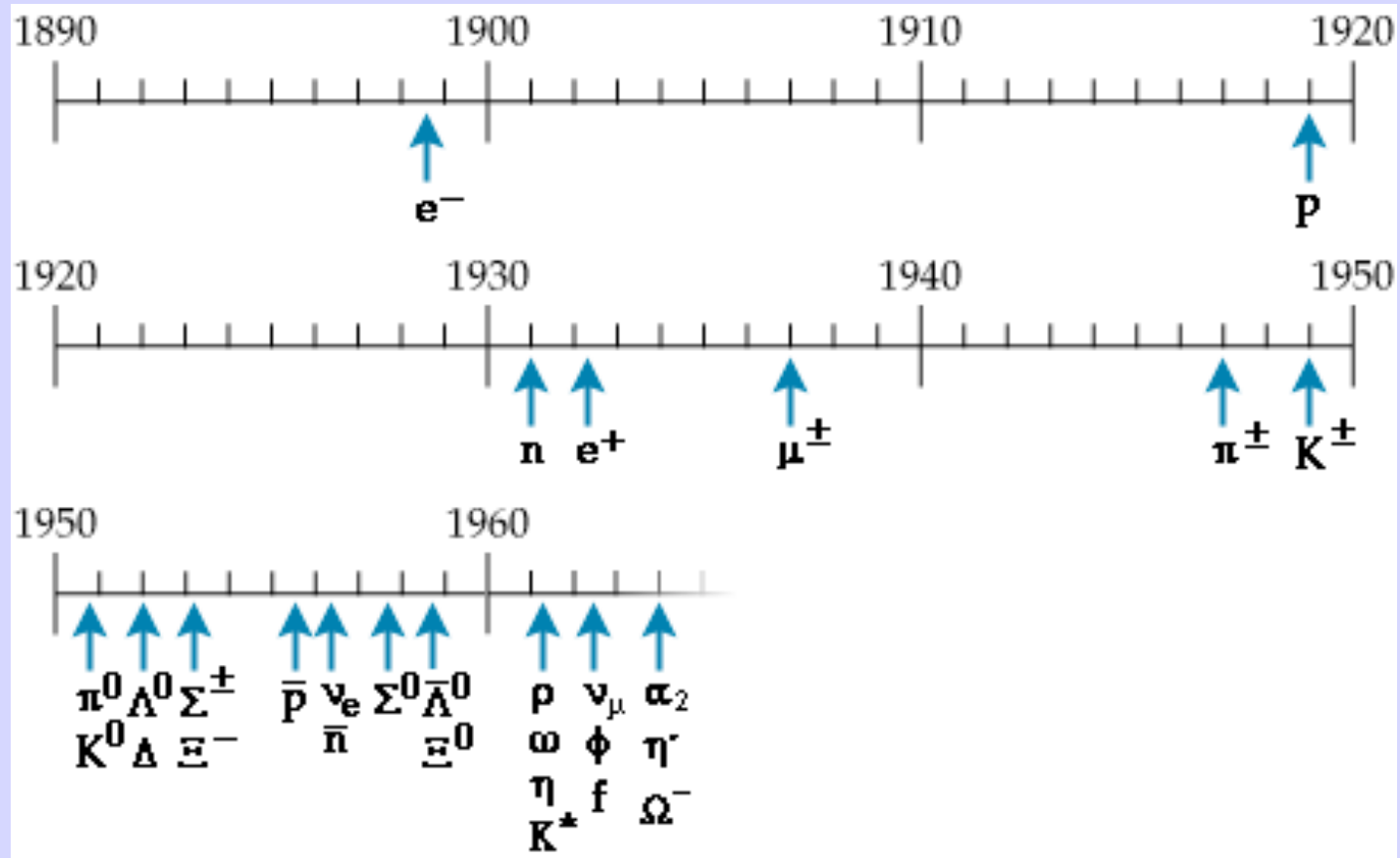
- du positon e^+
- des muons μ^- et μ^+
 $\mu^- \sim e^-$ mais 200X plus lourd !
- de nouvelles particules
comparables au proton mais
hautement instables ($< 10^{-8}$ s)

$\pi^+, \pi^-, \pi^0, K^+, K^-, K^0, \Lambda^0$



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**)
 $e^+ = \text{anti } e^-$, $p = \text{antiproton}$, $n = \text{antineutron}$, 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, μ, ν) : pas sensibles à l'interaction forte

HADRONS : Mésons (spin entier: bosons) π, K, \dots

Baryons (spin $1/2$ entier: fermions) p, n, Λ, \dots

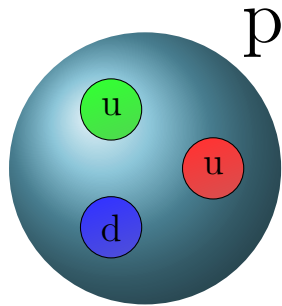
PHOTON : mis à part

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

Méson : 1 quark et 1 antiquark
exemple:

Baryon : 3 quarks

Anti-baryon : 3 antiquarks

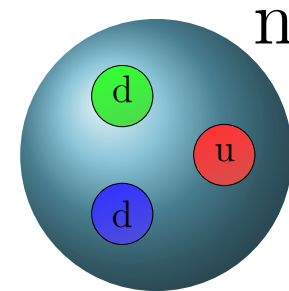
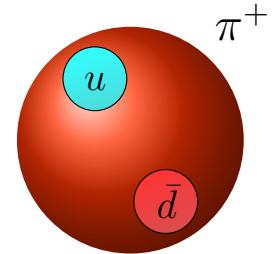


$$q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$$

$$\pi^+ = (u\bar{d})$$

$$p = (uud)$$

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



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

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:

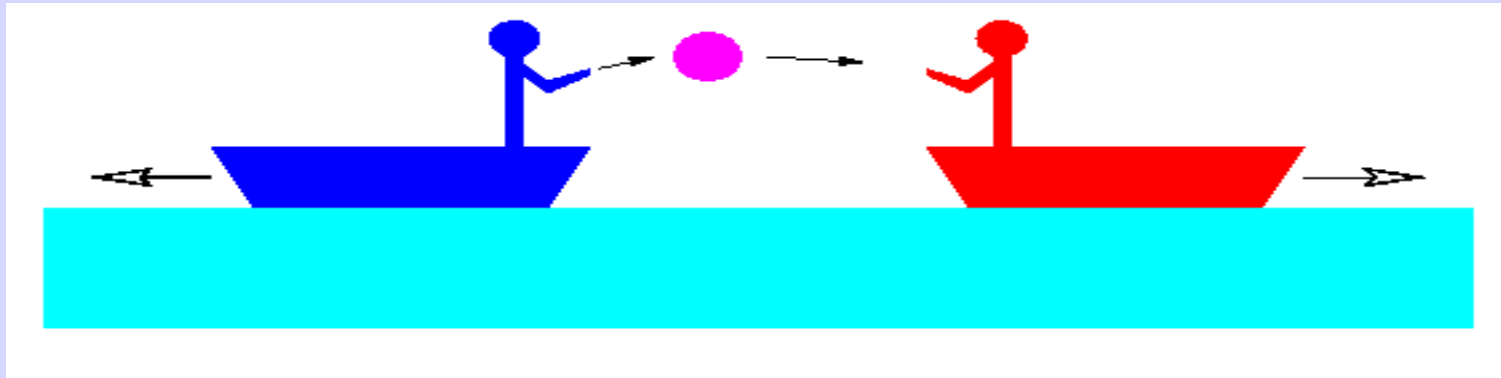
Les constituants élémentaires de la matière:

2.3 MeV <i>u</i> up RGB 2/3	1.28 GeV <i>c</i> charme RGB 2/3	173.2 GeV <i>t</i> top RGB 2/3	← masse ← couleurs ← charge
4.8 MeV <i>d</i> down RGB -1/3	95 MeV <i>s</i> étrange RGB -1/3	4.7 GeV <i>b</i> beauté RGB -1/3	quarks
511 keV <i>e</i> electron -1	105.7 MeV <i>μ</i> muon -1	1.777 GeV <i>τ</i> tau -1	
< 2 eV <i>ν_e</i> <i>e</i> neutrino	< 190 keV <i>ν_μ</i> <i>μ</i> neutrino	< 18 MeV <i>ν_τ</i> <i>τ</i> neutrino	leptons

Matière ordinaire

Retournons à nos interactions

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



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

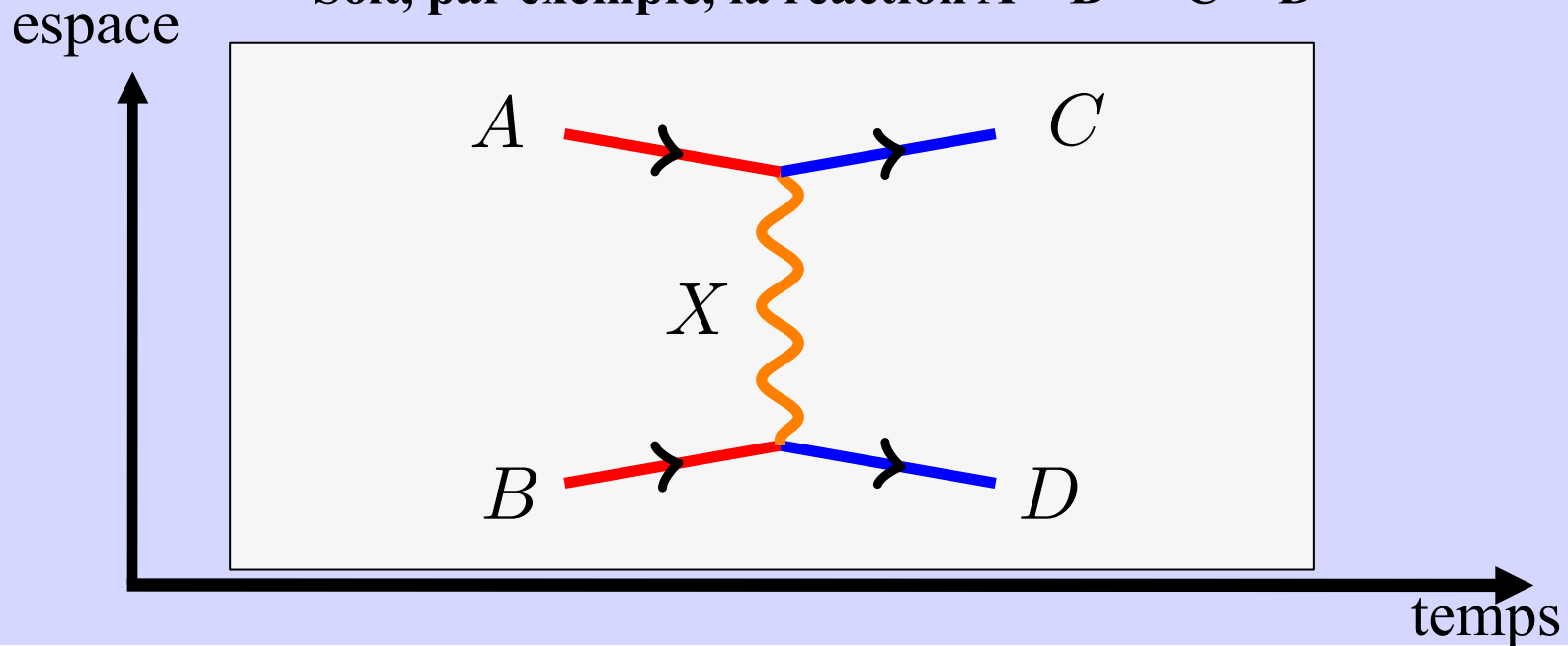
Tout est donc particules: matière et interactions

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 ΔE pendant un temps Δt fixé par le **principe d'indétermination** :

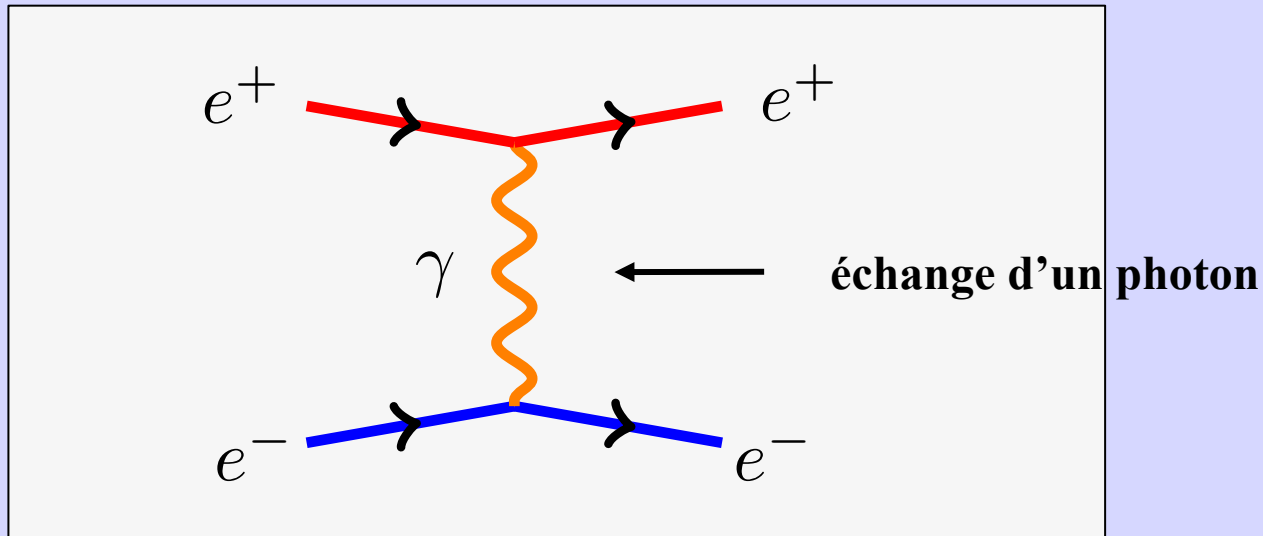
$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar/2\pi = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ MeV}\cdot\text{s}$$

Interaction électromagnétique

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

Exemple:

$$e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$$



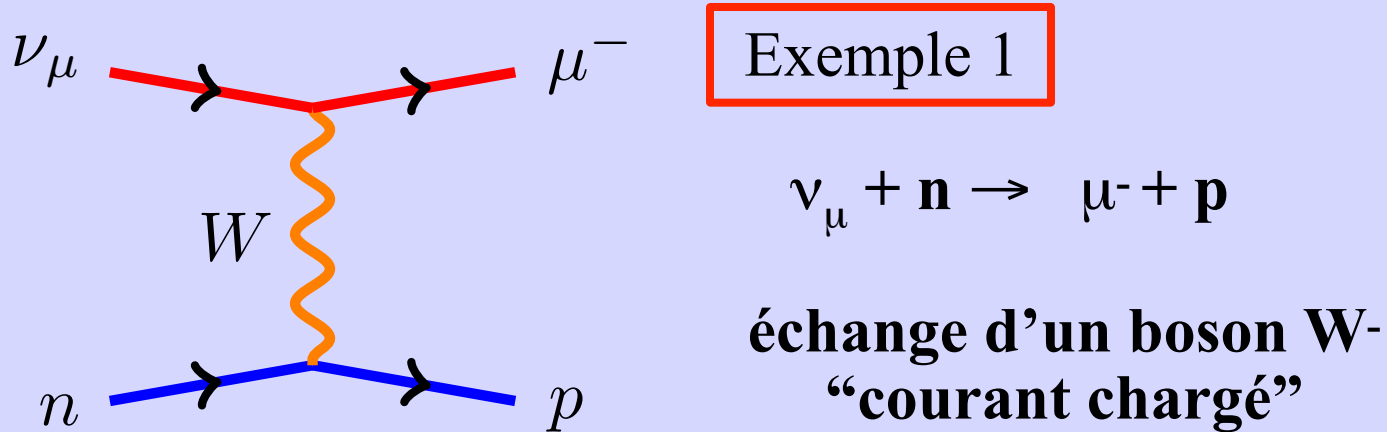
portée infinie car $m_\gamma = 0$

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

Interaction faible

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

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



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

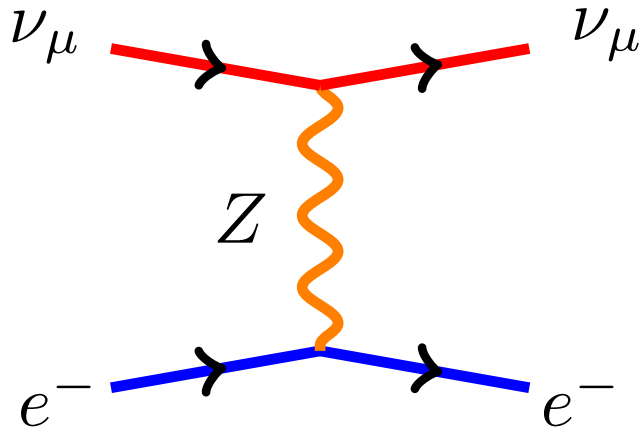
$$\nu_\mu + d(\text{du}) \rightarrow \mu^- + u(\text{du})$$

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

Exemple 2

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

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



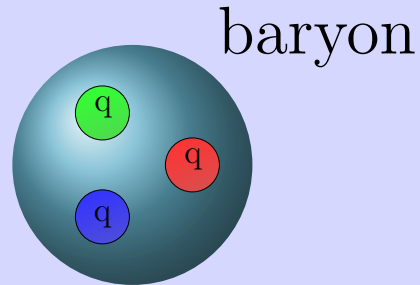
Théorie électrofaible (1967) :

explique **simultanément** QED et int. faibles

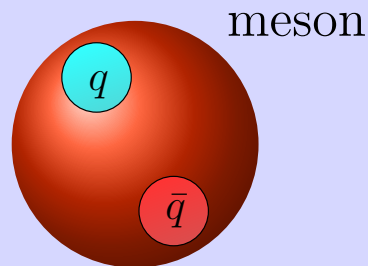
- bosons Z^0 , W^+ et W^- prédits et observés en 1983
- vérifiée avec une grande précision, notamment par les expériences au LEP au CERN (1989 – 2000)

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».



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

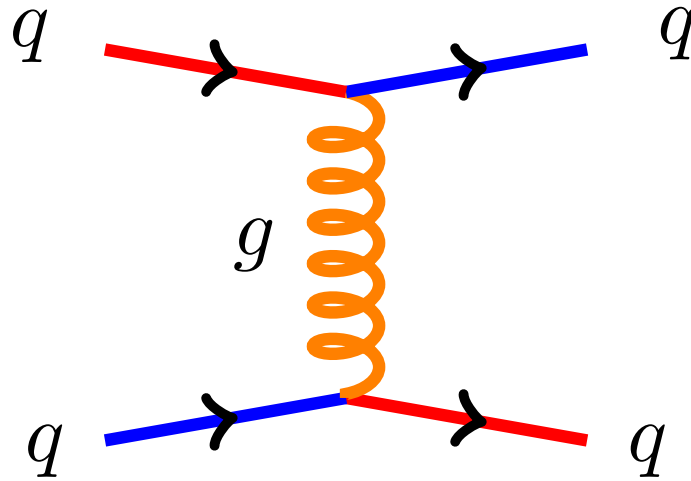


L'interaction entre 2 hadrons :

Forces de couleurs résiduelles

Interaction forte

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

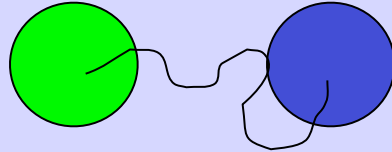


Comme le photon, les gluons sont de masse nulle. MAIS :

- 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.

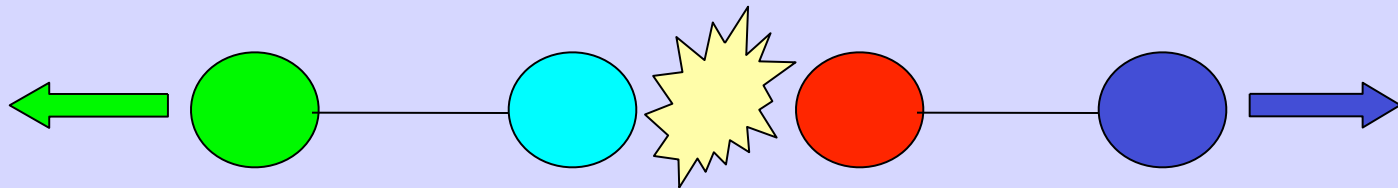


- S'ils s'éloignent, leur interaction augmente
-> les quarks sont confinés dans les hadrons.

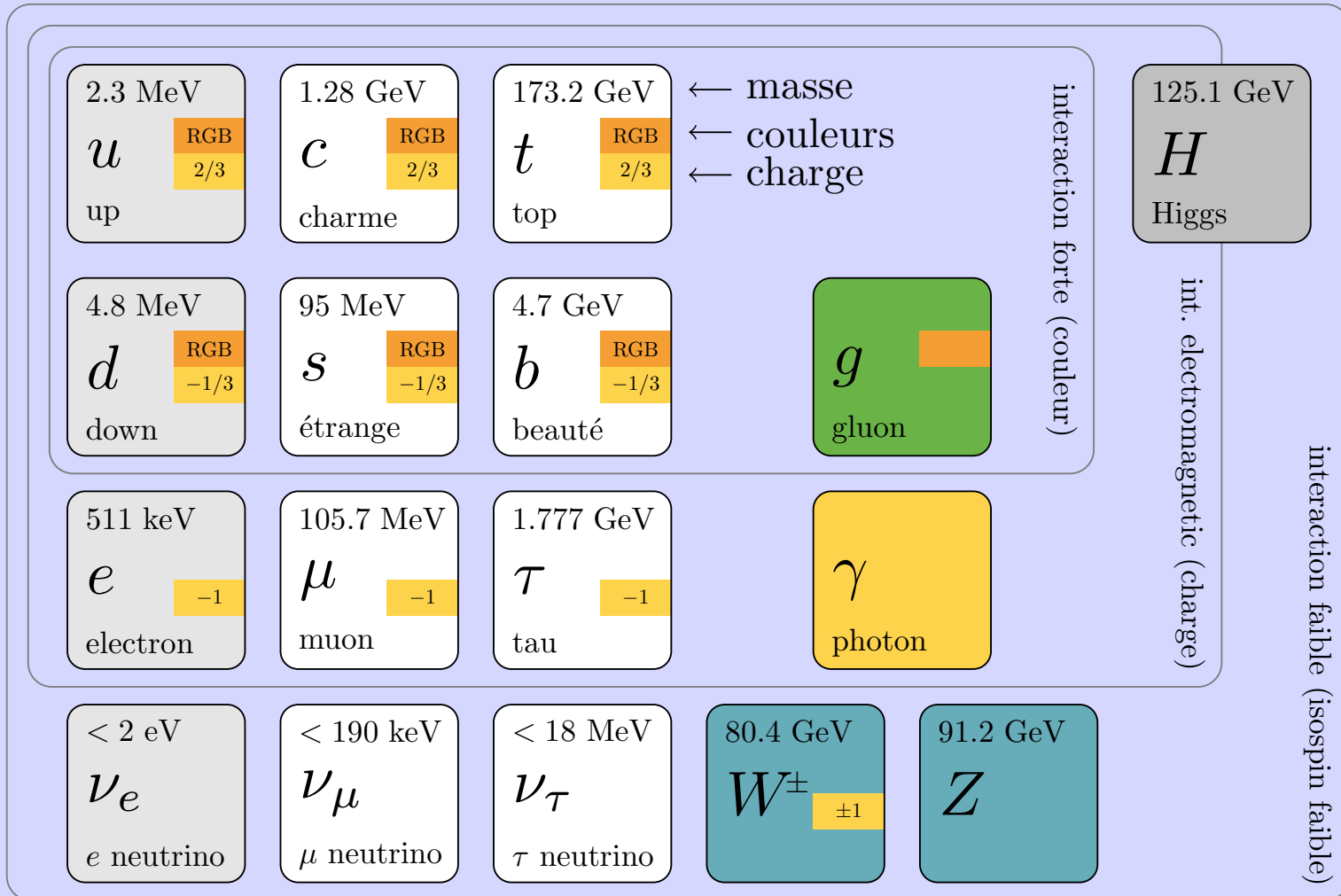


Si on tire trop sur l'élastique, il «casse» : une paire quark-antiquark est formée et s'apparie aux quarks initiaux

→ **hadronisation**

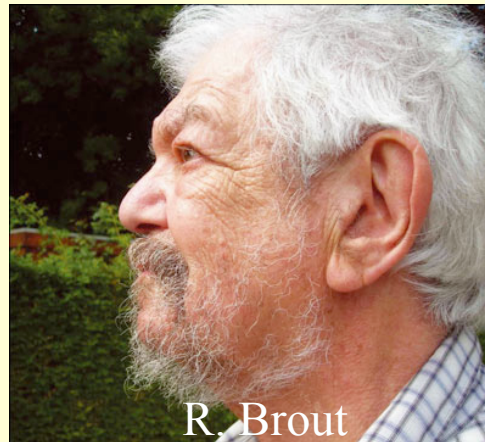
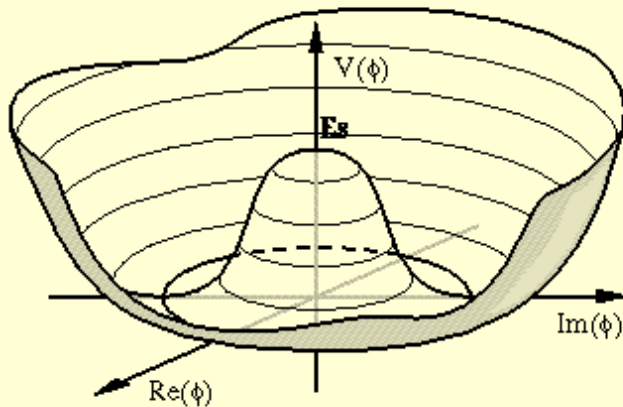


Le Modèle Standard



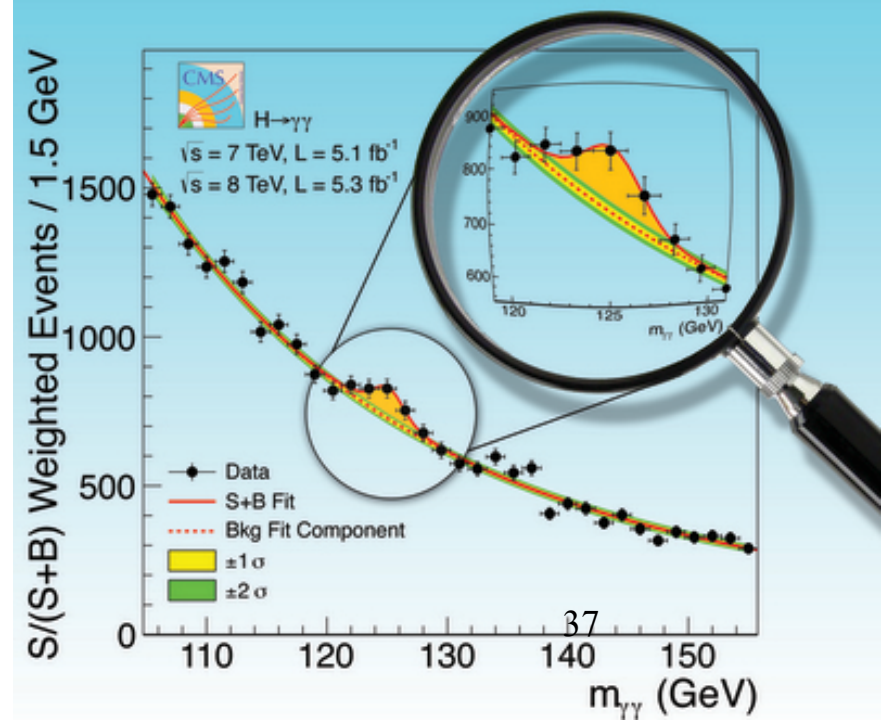
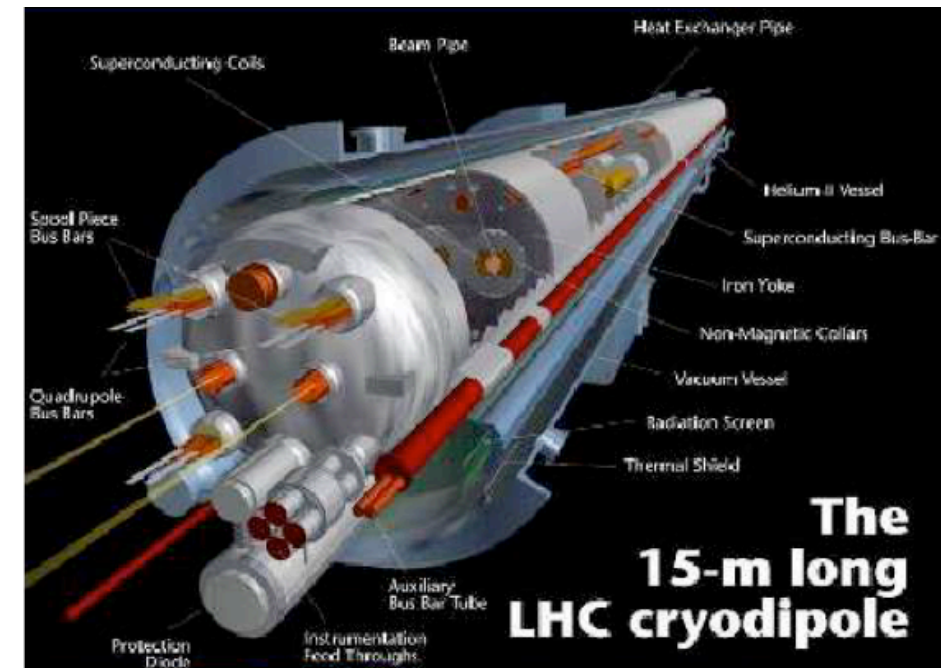
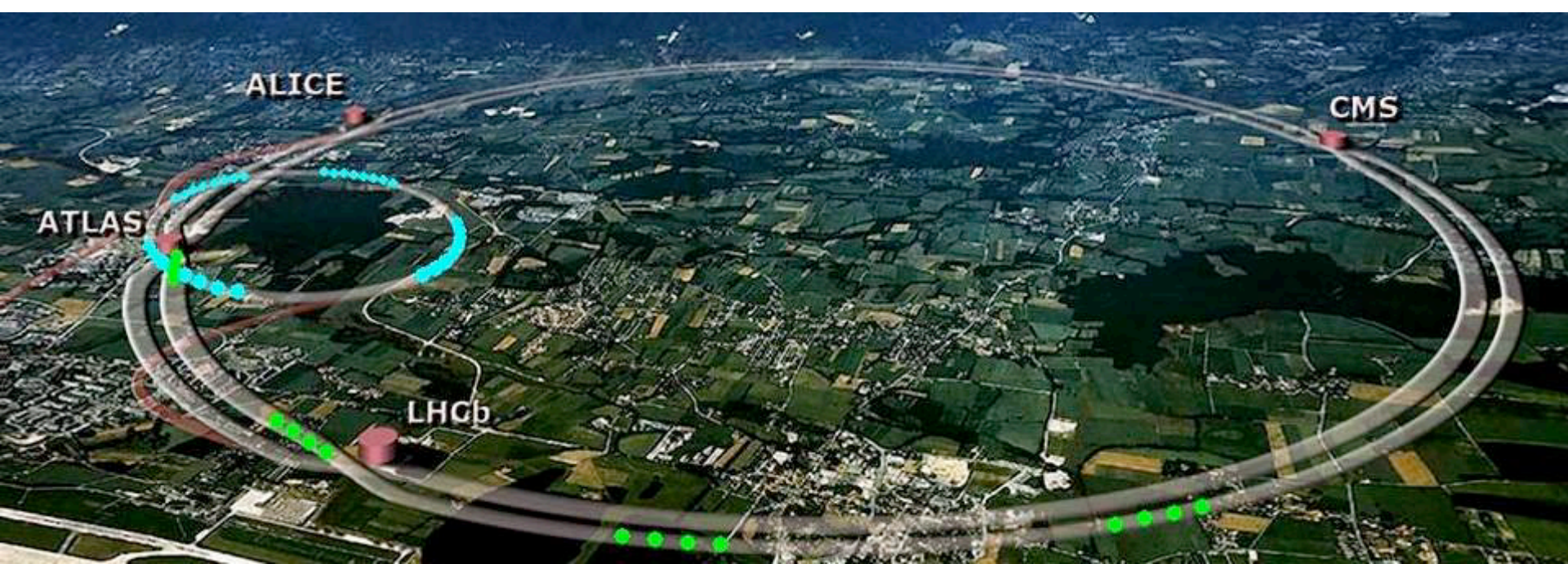
L'origine des masses...

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs rend compte des **masses des particules**. Il implique l'existence d'une particule supplémentaire: **le boson de Higgs**



... découvert en 2012 par les expériences ATLAS et CMS sur le LHC (collisionneur protons-protons) du CERN.

-> Prix Nobel de Physique 2013



Lien avec la cosmologie

L'Histoire de L'Univers

Formation des atomes

photons échappent
CMB 3K

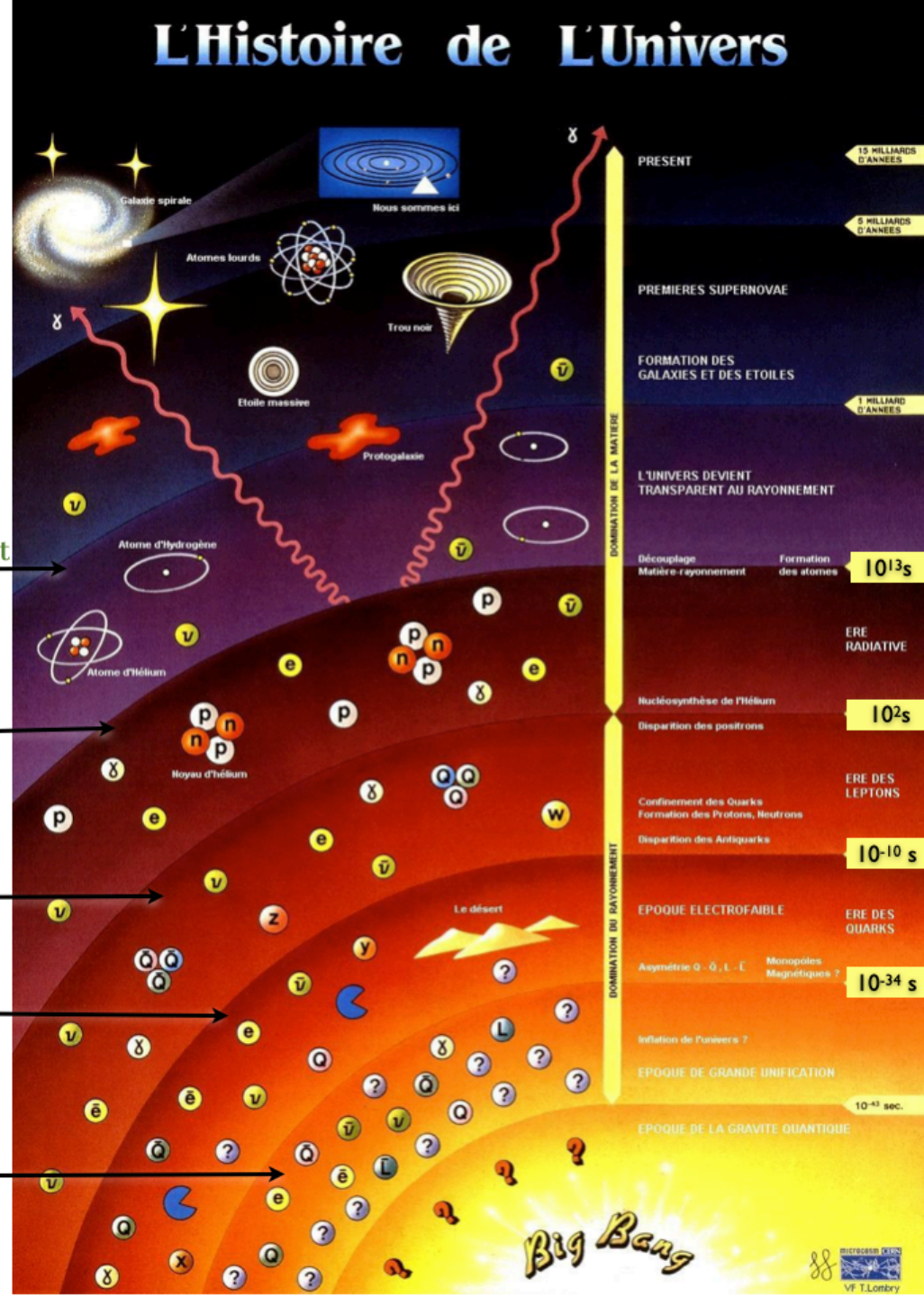
Formation des noyaux
D, He, Li

Formation des hadrons

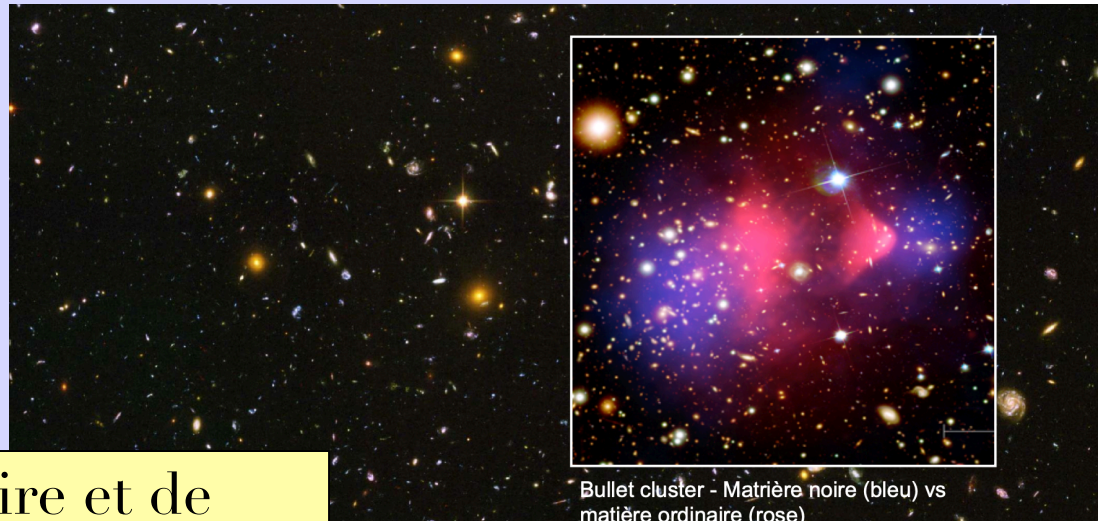
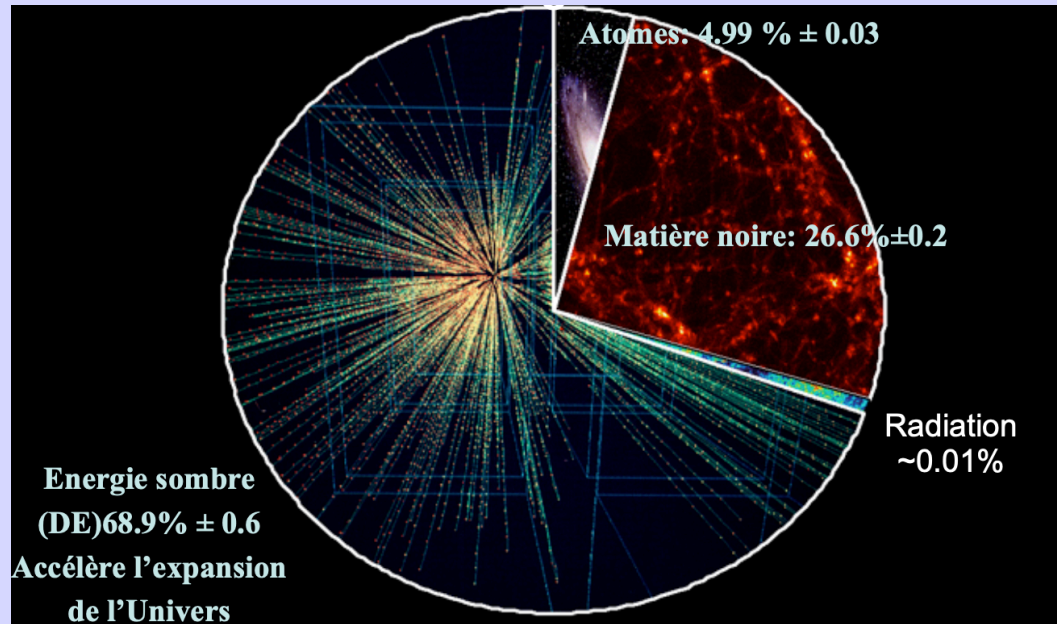
disparition anti-quarks

Brisure électro-faible

Création de particules
par paires



La matière dans l'univers



La nature de la matière noire et de l'énergie sombre nous sont **inconnues**

Principales questions ouvertes

- Pourquoi n'y a-t-il que de la matière (où est passée l'antimatière ?)
- Comment résoudre l'incompatibilité entre la relativité générale et la mécanique quantique ?
- L'espace et le temps sont-ils continus ou quantifiés ?
- Quelle est la nature de la matière noire ?
- Y a-t-il une énergie sombre ? ...