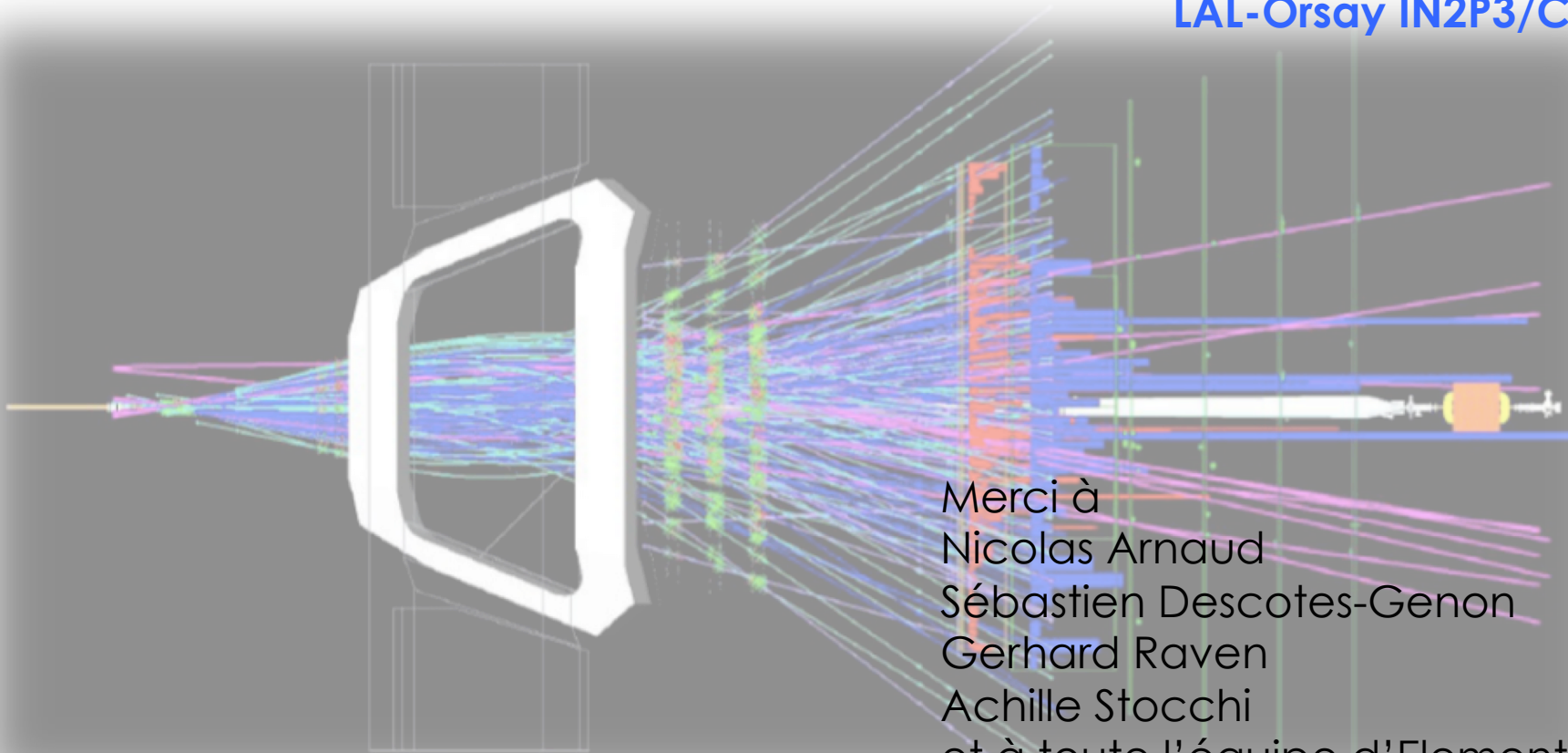


La physique des particules

Marie-Hélène SCHUNE
LAL-Orsay IN2P3/CNRS



Merci à
Nicolas Arnaud
Sébastien Descotes-Genon
Gerhard Raven
Achille Stocchi
et à toute l'équipe d'Elementaire

Préambule

Chercheur-e au CNRS (IN2P3) au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire à Orsay
Etudes : Université d'Orsay

- LEP-DELPHI Etude du Z^0 : 3 types de neutrinos**

$$N_\nu = 2.4 \pm 0.4 \pm 0.5$$

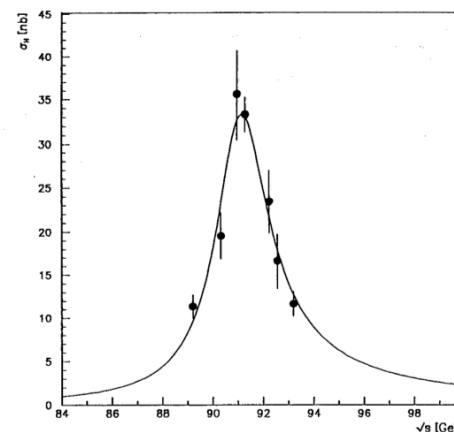
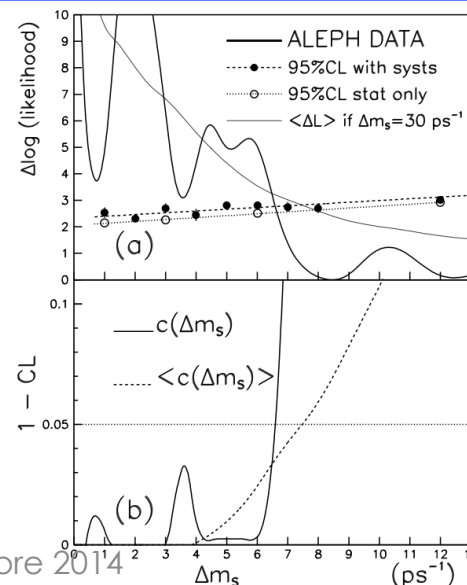


Figure 4. The measured Z^0 peak. The data and the fit are described in the text.

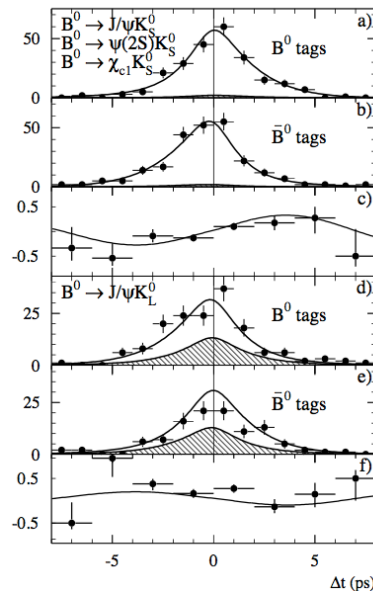
- LEP-ALEPH : phénomène quantique d'oscillation $B_s^0 - \bar{B}_s^0$**

$$\Delta m_s > 6.6 \text{ ps}^{-1} \text{ @95 \%CL}$$



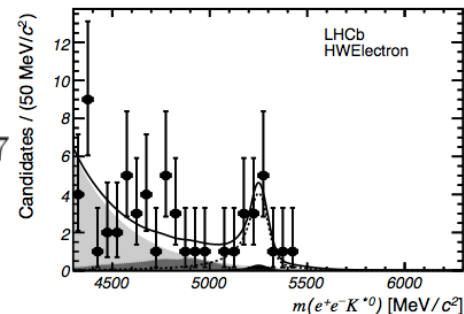
BaBar à SLAC : violation de CP

$$\sin 2\beta = 0.59 \pm 0.14 \text{ (stat)} \pm 0.05 \text{ (syst)}$$

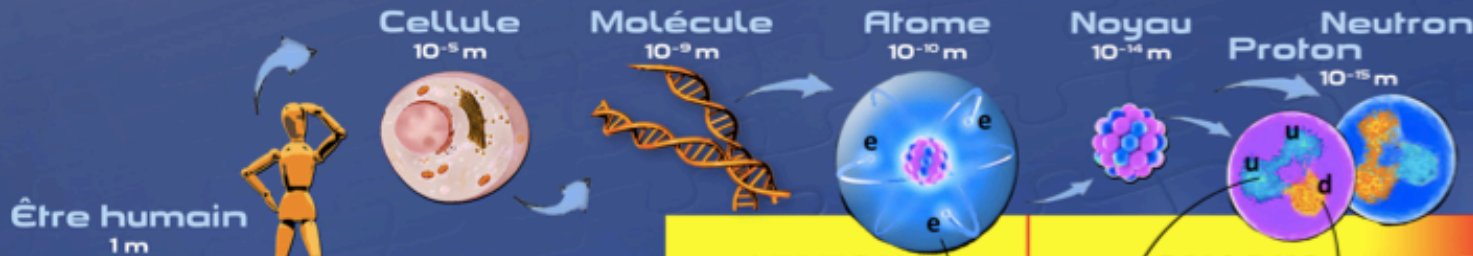


LHCb desintégrations rares (recherche de “Nouvelle Physique”)

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-)_{30-1000 \text{ MeV}/c^2} = (3.1^{+0.9}_{-0.8} \text{ }^{+0.2}_{-0.3} \pm 0.2) \times 10^{-7}$$



Composants élémentaires de la matière



Être humain
1 m

Terre
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	<p>Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.</p> <p>Champ de Higgs</p>
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W[±]	Désintégrations radioactives β ⁺ et β ⁻ de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Plans des trois cours

- Mise en place du paysage
 - historiquement : de l'atome au noyau
 - des échelles très différentes
 - Mécanique quantique et relativité : ondes et particules
 - rayons cosmiques et accélérateurs de particules
- La physique des particules aujourd'hui 1/2
 - les constituants élémentaires
 - « voir » les particules
 - les interactions
 - les symétries
- La physique des particules aujourd'hui 2/2
 - l'interaction forte
 - l'interaction faible
 - matrice CKM et violation de CP
 - les neutrinos
 - l'unification électrofaible
 - les grandes questions !

Mise en place du paysage

de l'atome au noyau

VI^{ème} siècle av JC : Thalès de Milet et ses disciples et Héraclite d'Ephèse : l'univers est constitué de composants fondamentaux : la terre, l'eau, le feu et l'air

⇒ **V^{ème} siècle av JC** : Démocrite d'Abdère : l'être est constitué de minuscules parcelles invisibles et insécables les atomes. le monde est matériel, l'esprit et l'âme aussi

XVII^{ème} siècle Epoque des chimistes et de l'expérimentation :

- Lavoisier : les molécules sont composées de plusieurs éléments, conservation de la quantité de matière lors d'une réaction chimique

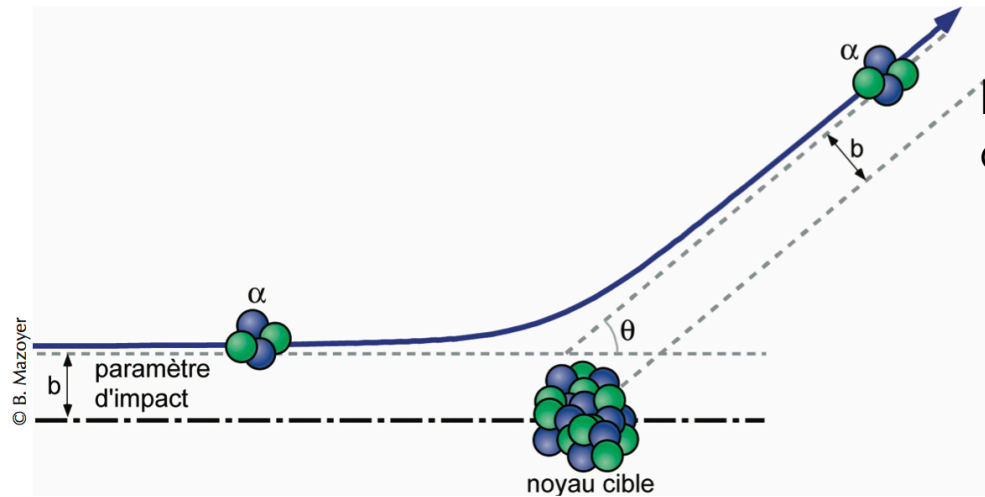
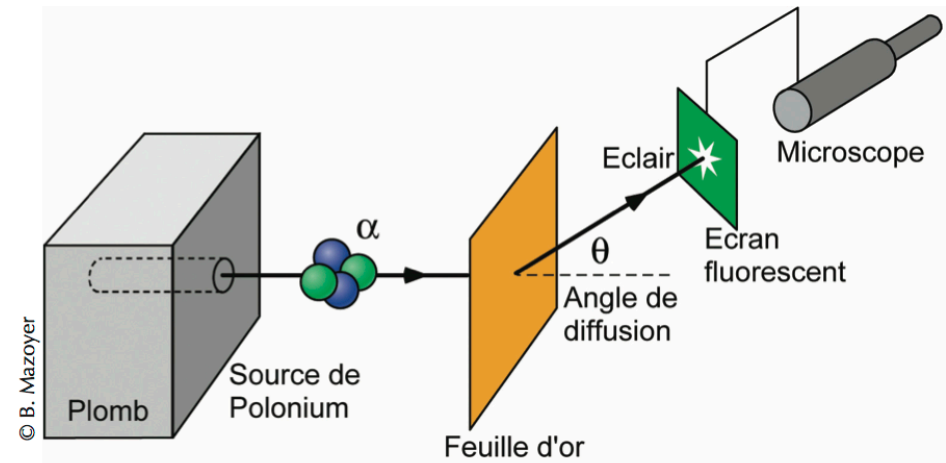
- **XIX^{ème} siècle** : Prout & Dalton : poids atomiques des éléments chimiques

- **1869** : Le tableau périodique de Mendeleïev

La découverte du noyau

1909 Geiger, Mardsen et Rutherford

- La plupart des particules α sont peu déviées
- Observation de diffusions à grand angle 1/8000

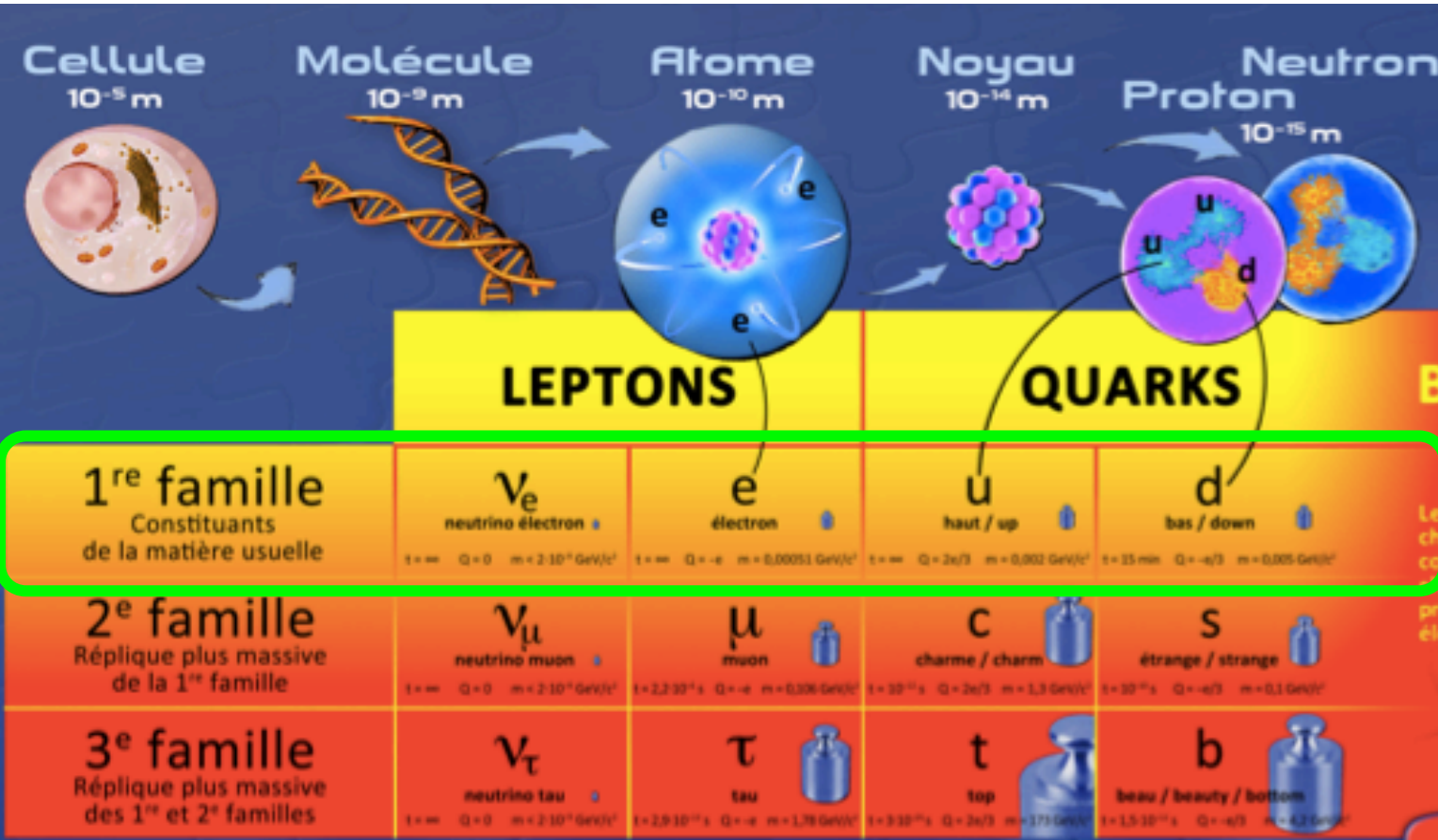


Particules α ($q=2e$) sont déviées par le champ électrique ($q=Ze$) du noyau

$$b = \frac{Ze^2}{E} \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Le même genre d'expériences sera utilisé en physique des particules modernes

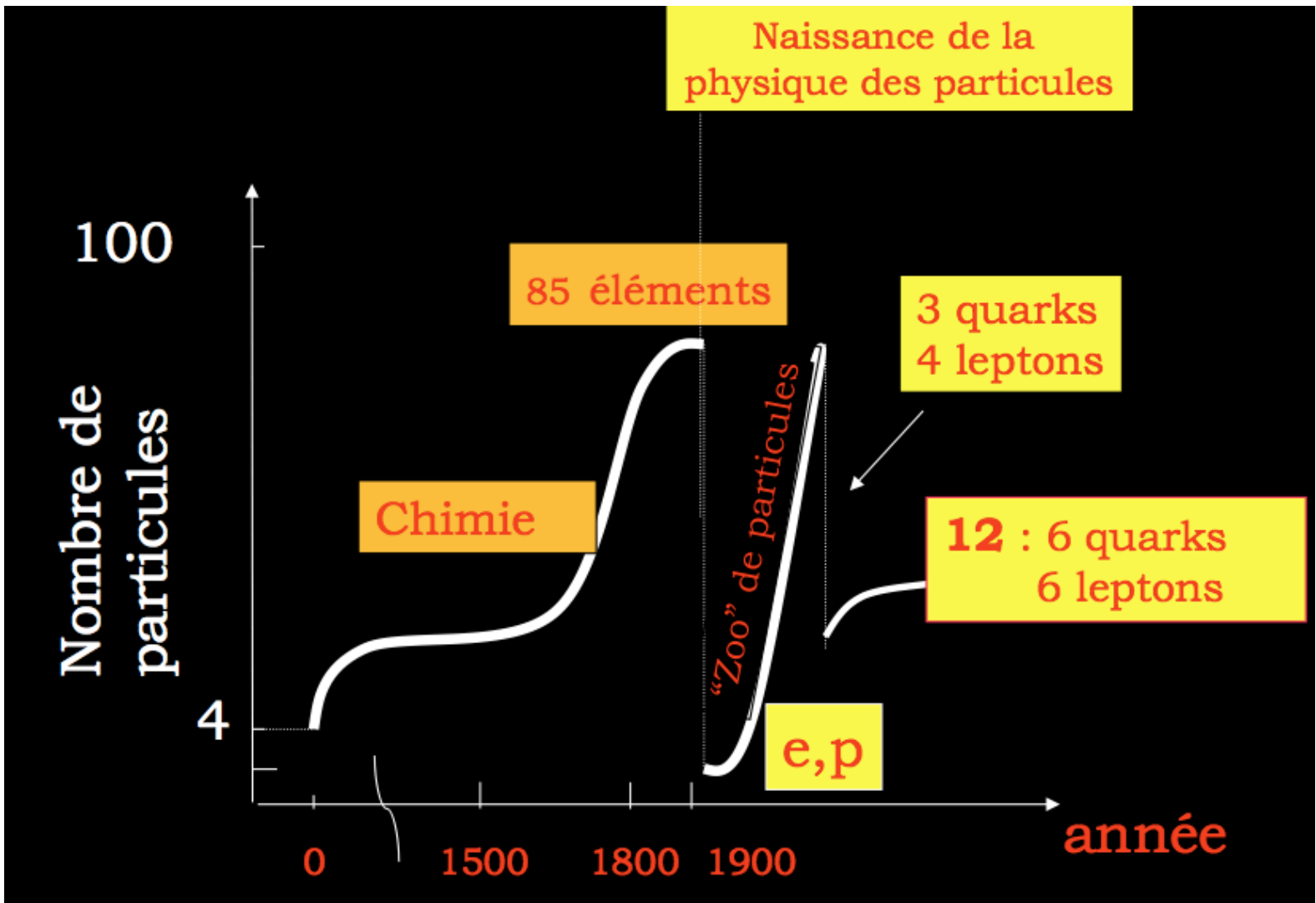
...à l'autre



matière ordinaire

- u, d : proton, neutron
- électrons : liaisons chimiques, électricité
- neutrino électronique (ν_e) : désintégration $\beta n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ (15 min)

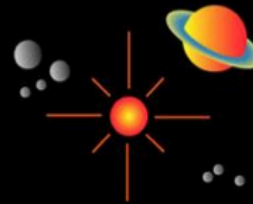
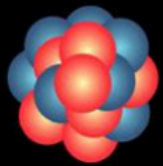
Une approche « réductionniste » : expliquer la diversité et la complexité de la Nature à l'aide d'un petit nombre de "briques élémentaires"



Des échelles très différentes

La Physique des particules étudie la matière dans ses dimensions les plus petites

L'astrophysique étudie la matière dans ses dimensions les plus grandes



10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 10^0 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18} 10^{21} 10^{24}

Accélérateurs
et Détecteurs

physique
des
particules

Microscopes

Œil nu

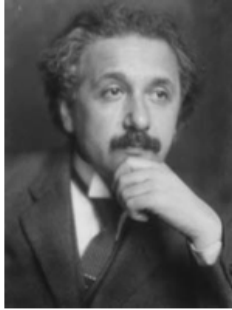
Jumelles
binoculaires

Télescopes
Optique et radio

Physique quantique et relativiste

Relativité

Albert Einstein



$E = Mc^2$
Physique des hautes
énergies)

Masse/Énergie



Production de nouvelles particules

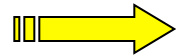
Mécanique
Quantique

Niels Bohr



$p = h/\lambda$
(Physique de l'infiniment
petit)

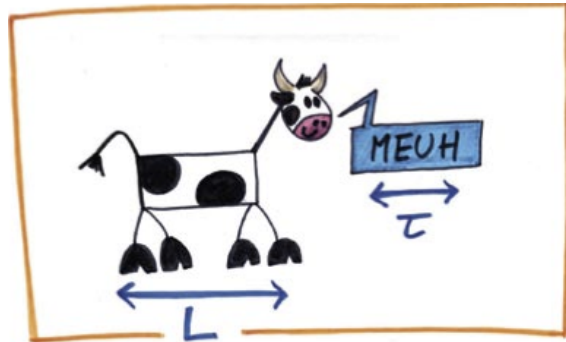
Corpuscule/Onde



Sonder la structure de la matière

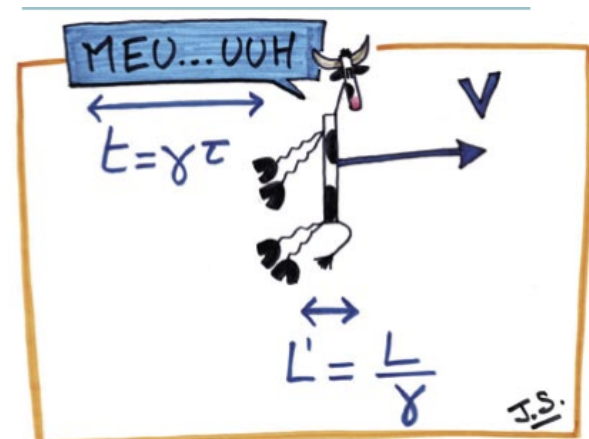
La relativité restreinte

Les particules que l'on étudie ont une vitesse proche de celle de la lumière



$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E}{M}$$

Dilatation des temps
Contraction des longueurs

Certaines particules sont instables, leur durée de vie est mesurée dans le référentiel où la particule est au repos dans le référentiel du laboratoire certaines particules semblent stables !

L'énergie et la masse

- La masse
 - réservoir d'énergie des particules
 - ne varie pas avec leur vitesse
 - définie par :

$$M^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

Longueur invariante du quadri-vecteur énergie-impulsion

au repos :

$$E = M c^2$$

- quand *la vitesse* augmente E^2 et $p^2 c^2$ augmentent mais leur différence est constante
- *m est un invariant de Lorentz*

Avec $c=1$ E , p et m sont exprimés dans les mêmes unités

Puisque c est grand
Faible masse = grande quantité d'énergie

La masse ?

responsable de l'énergie libérée
lors des réactions chimiques

Energie de liaison : $M_{\text{composite}} = \sum m_{\text{constituants}} - E_{\text{liaison}}$

- Atome: $M_H = m_p + m_e - 13.6 \text{ eV}/c^2$ (1/100 000 000 du tout)
- Noyau: $M_D = m_p + m_n - 2.2 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$ (1/1000 du tout)
- Quark: $M_p = 2m_u + m_d + 0.93 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2$ (99% du tout)

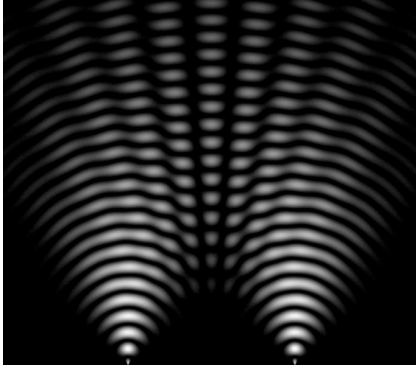
Mais alors pourquoi le proton est-il stable ?

Interaction forte !

Mais d'où vient la masse des quarks ?

ondes et particules

La lumière : une onde



Expérience des fentes de Young

Electromagnétisme de Maxwell

⇒ la mécanique quantique !

Les particules élémentaires ont un aspect corpusculaire (elles ont une masse, une charge électrique on peut les compter ...)

On ne peut pas leur attribuer simultanément une position et une vitesse bien définies ⇒ notion de probabilité

Le photon

Expériences du corps noir +
effet photoélectrique :
⇒ quanta lumineux

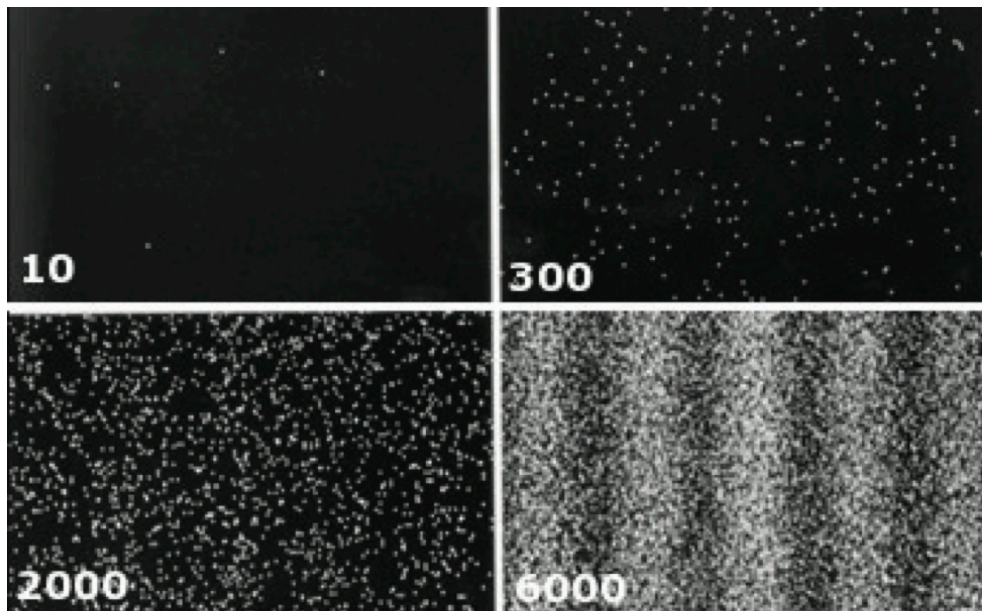
$$E_{\text{photon}} = h\nu$$

Et cela fonctionne pour toutes les particules élémentaires !

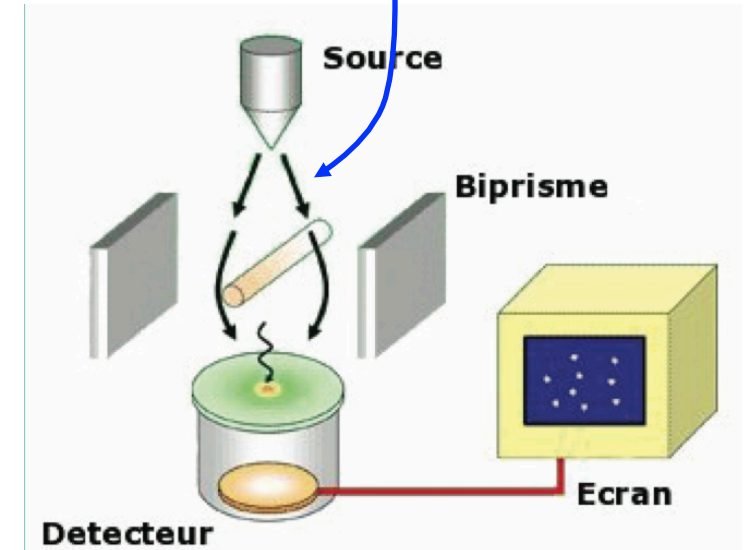
$$p = \frac{h}{\lambda} \leftarrow \text{longueur d'onde}$$

$$h = 6.62606876(52) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Mesure sur l'écran

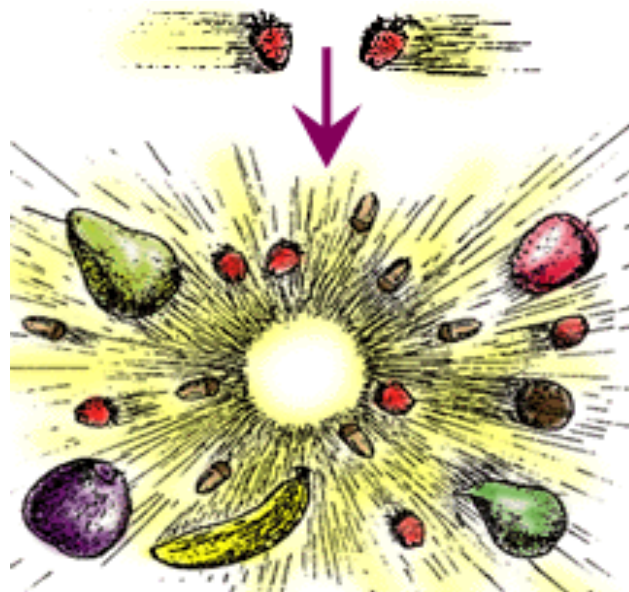


deux faisceaux d'électrons



rayons cosmiques et accélérateurs de particules

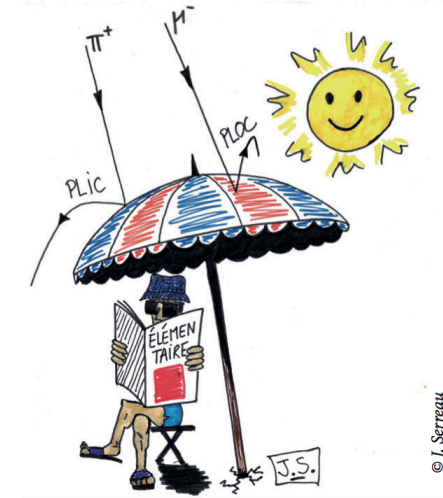
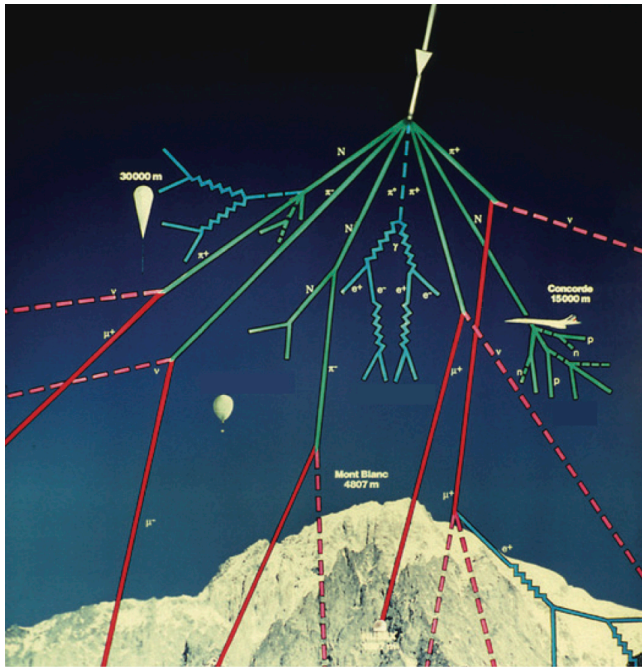
Production de nouvelles particules:



Masse/Énergie

Il ne s'agit pas de “divisibilité” ou de “filiation” presque géométrique

Le premier accélérateur de particules :



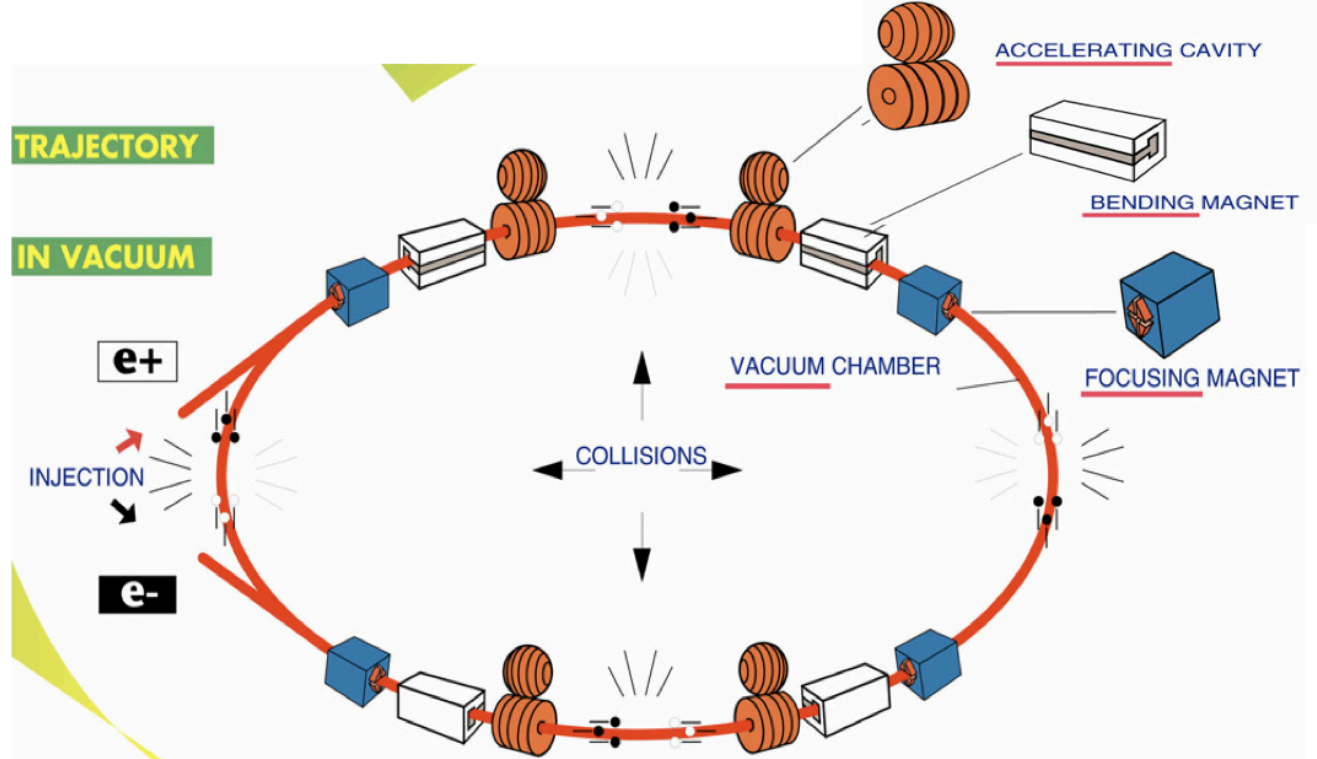
Au niveau du sol : 240
particules chargées par m^2
et par seconde

Certains rayons cosmiques ont des énergies bien supérieures à ce que l'on peut produire sur Terre... mais :

- flux (très) faible et non contrôlable
- énergie non contrôlable

⇒ Accélérateurs de particules

Collisionneurs



$$s = (E_a + E_a)^2 - (\vec{p}_a + \vec{p}_a)^2$$

collisionneur : $s = (2E_a)^2$

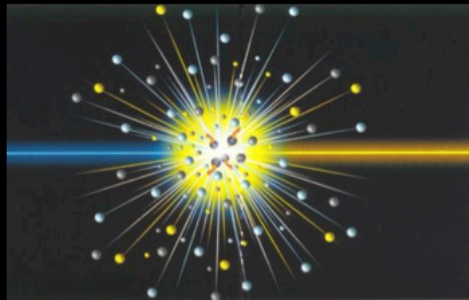
cible fixe : $s = 2m_a \times (m_a + E_a)$

proton de 100 GeV contre un proton de 100 GeV : $\sqrt{s} = 200$ GeV

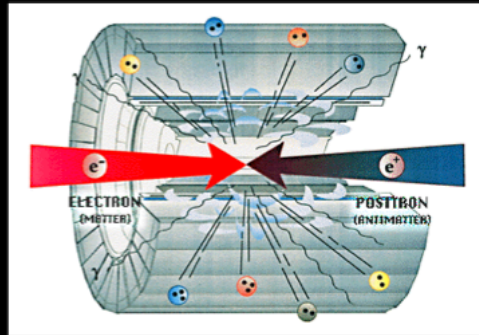
proton de 100 GeV contre une cible fixe (proton au repos) : $\sqrt{s} = 14$ GeV

Collision de particules accélérées → « Grain » d'énergie → Nouvelles particules

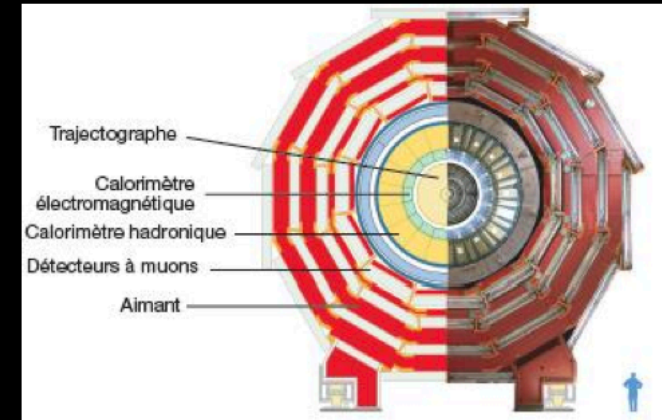
Accélérateur



$$E = mc^2$$



Détecteur



Une grande énergie disponible :

- on peut créer des particules encore inconnues
- on a un grand pouvoir de résolution

$$\lambda(\text{m}) = 1.24 \cdot 10^{-15} / P(\text{GeV}/c)$$

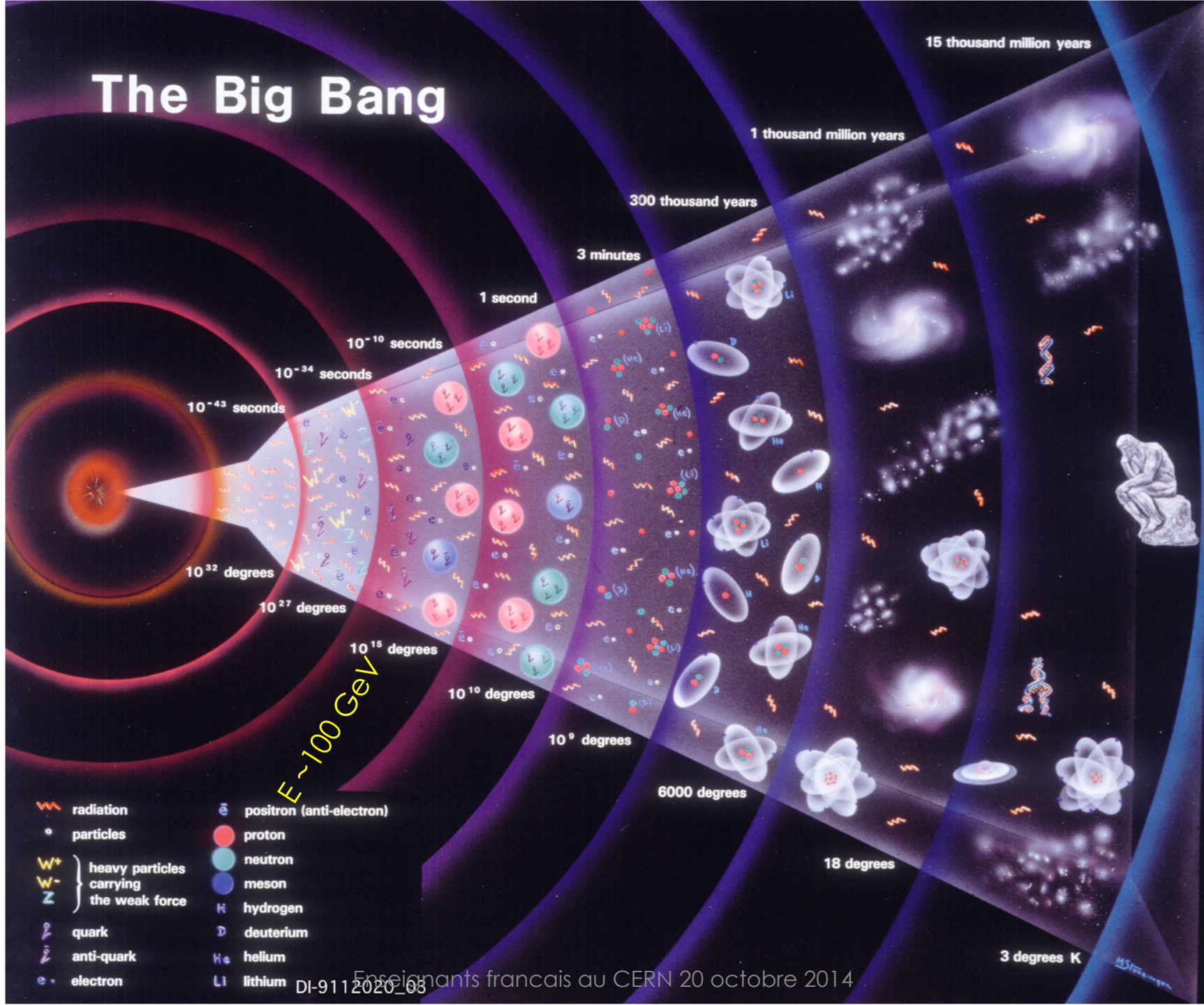
$$E = Mc^2$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Un très grand nombre de collisions :

- On a accès à des phénomènes très rares

The Big Bang

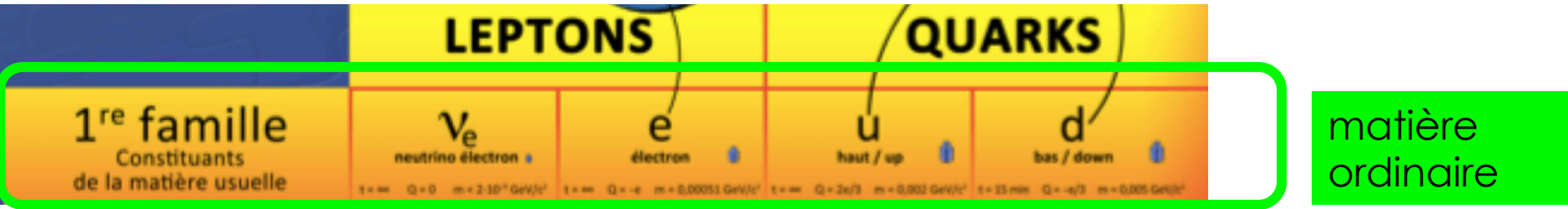


E ~ 100 GeV

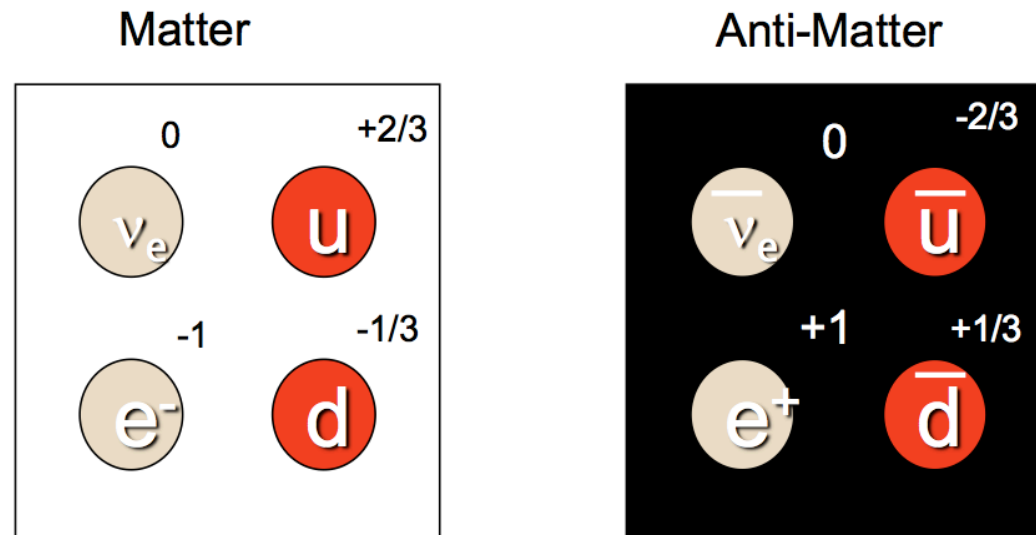
- radiation
- particles
- W^+ } heavy particles carrying the weak force
- W^- }
- Z }
- quark
- anti-quark
- electron
- positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- H hydrogen
- D deuterium
- He helium
- Li lithium

La physique des particules aujourd'hui 1/2

Les constituants élémentaires de la matière



+ anti-matière : à chaque particule correspond une antiparticule de même masse mais de charge électrique opposée



En 1931 Dirac prédit l'existence d'une particule similaire à l'électron mais de charge opposée

Photo dans une chambre à brouillard (« de Wilson »), soumise au rayonnement cosmique

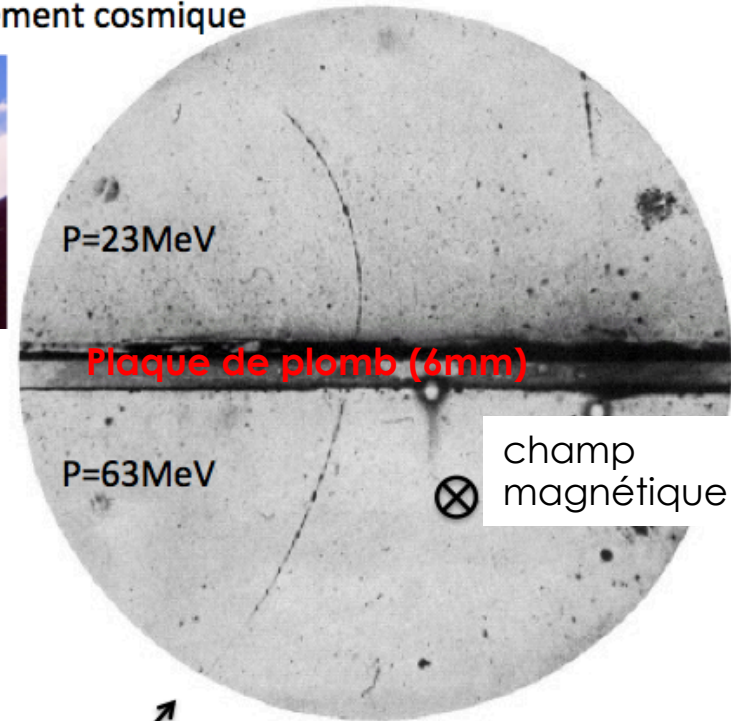
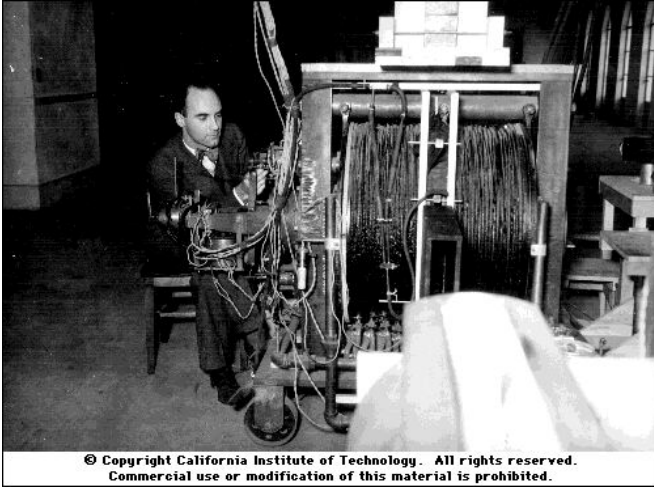
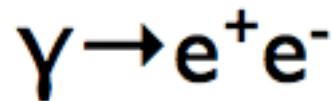


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 7.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

Anderson 1932

- Le rayon de courbure est plus grand au dessous de la plaque
⇒ la particule vient d'en bas
⇒ charge positive
- Longueur trace + densité des gouttelettes :
masse faible

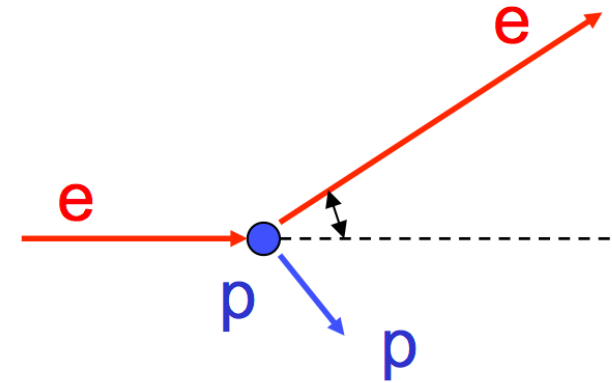
Il s'agit de l'anti-électron : le positron



Protons et neutrons sont composites

Expérience similaire à celle de Rutherford

le proton a une taille finie $R_p \sim 0.8 \text{ fm}$

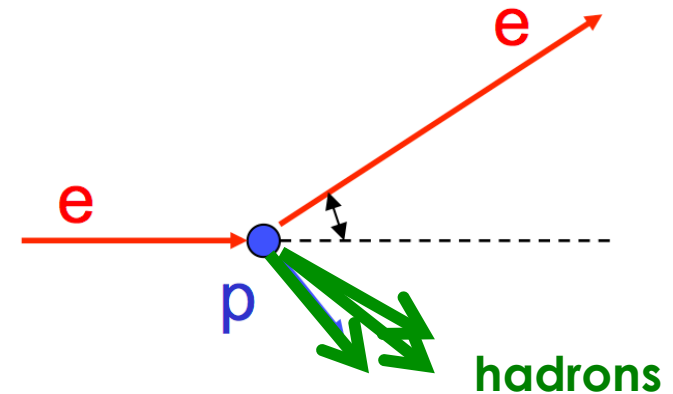


- Même résultat pour le neutron
- Même expérience avec une cible d'électrons \Rightarrow aucun effet de taille!

$R_e < 10^{-3} \text{ fm}$

On pense que l'électron est ponctuel

- Diffusion inélastique



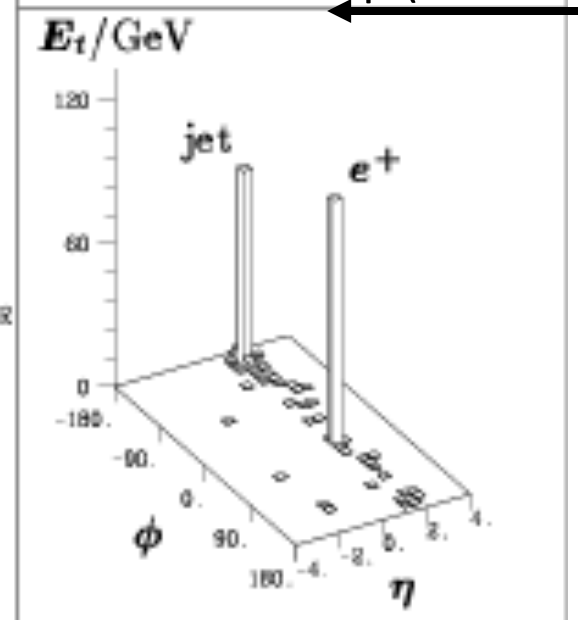
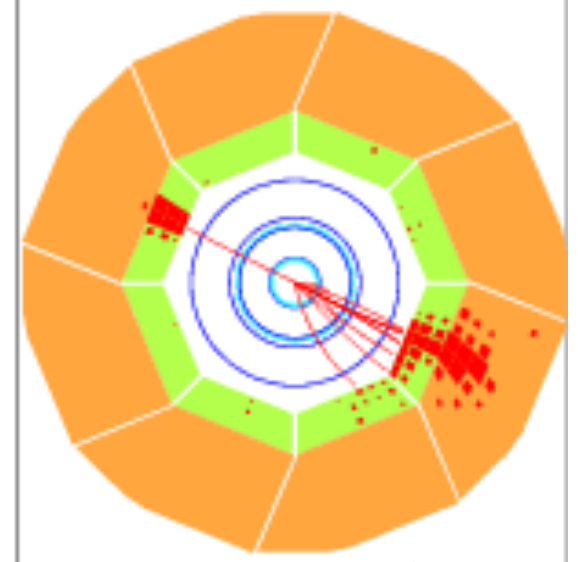
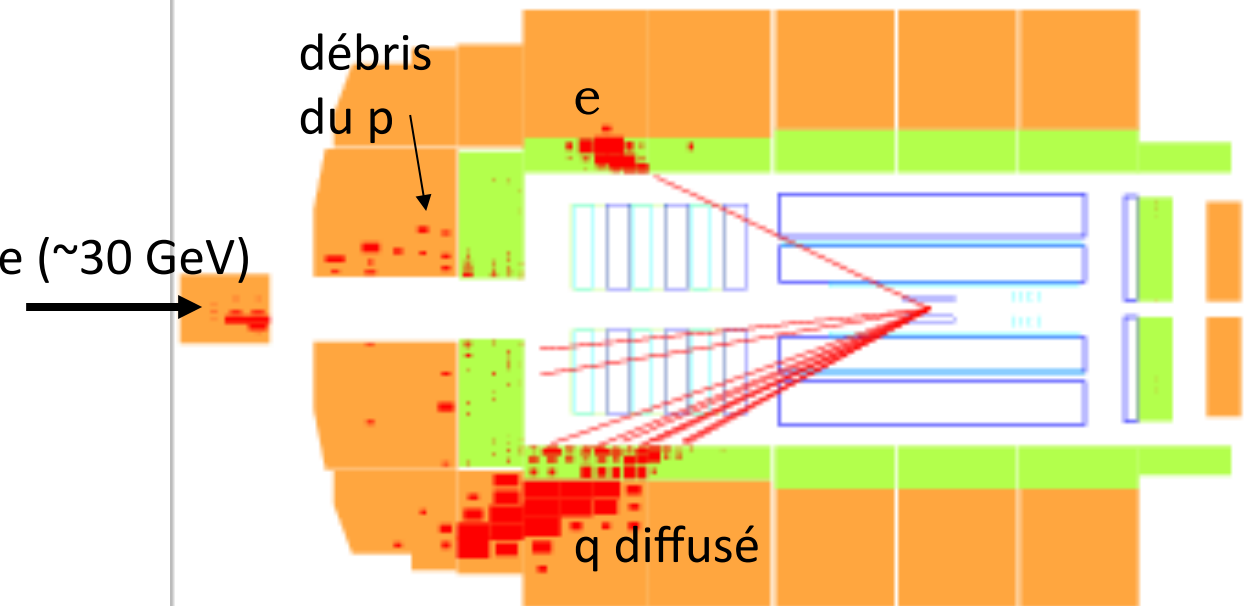
comportement identique à celui de diffusions élastiques sur des **objets ponctuels** \Rightarrow quarks

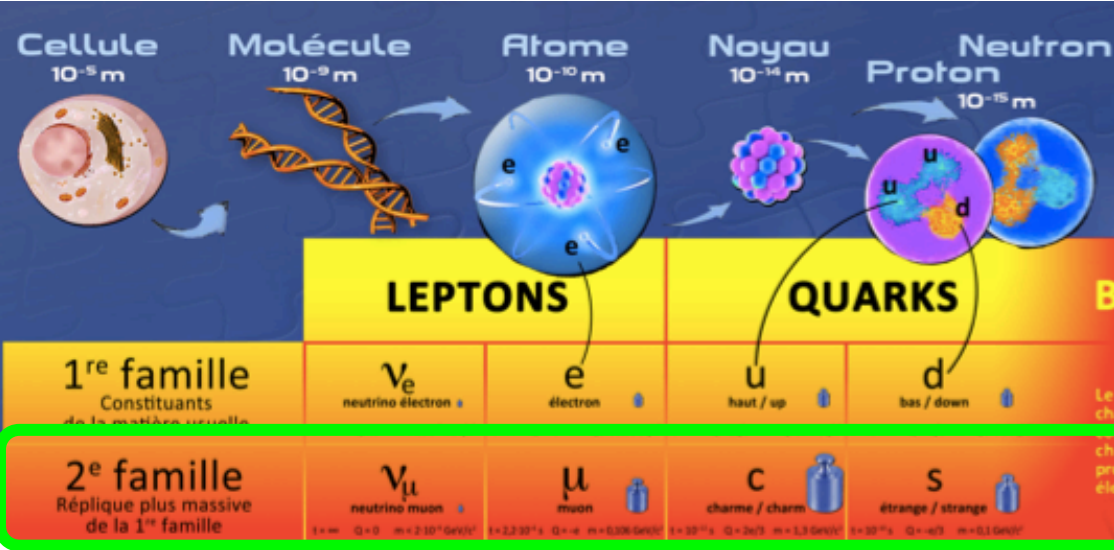
\Rightarrow aucun effet de taille des quarks!

$R_q < 10^{-3} \text{ fm}$

On pense que les quarks sont ponctuels

$Q^2 = 25030 \text{ GeV}^2, y = 0.56, M = 211 \text{ GeV}$





un deuxième lepton (muon) découvert (1936)

un deuxième neutrino (1962)

particules « étranges » (1947)

particules « charmées » (1976)

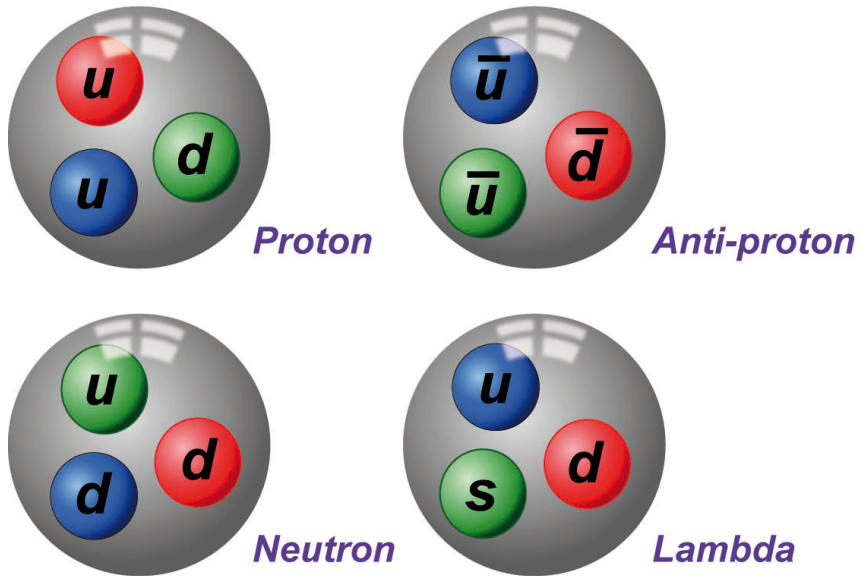
Certaines de ces particules sont instables : ex le muon $\tau=2.2 \cdot 10^{-6}$ s dans les collisions ils sont produits avec une énergie de quelques dizaines de GeV (au LHC)

$$\gamma = \frac{E}{m} \sim \frac{50}{.105} \sim 500 \quad L = \beta \gamma c \tau \sim 300 \text{ km !}$$

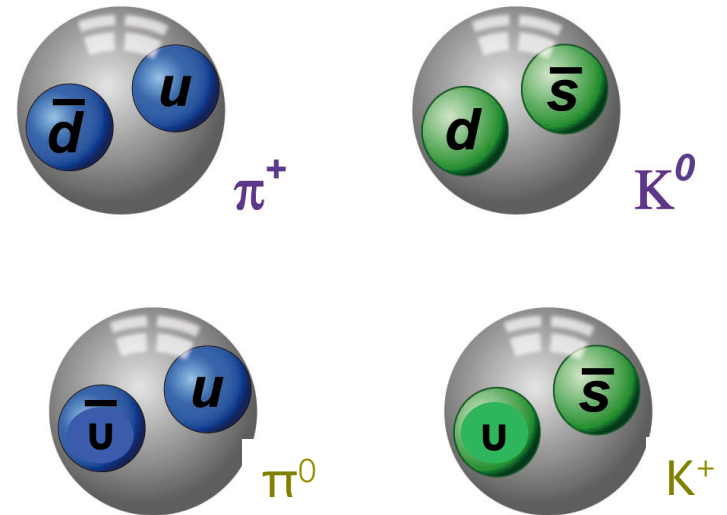
Mais on n'observe pas de quarks libres comme on observe des électrons ...

baryons : 3 quarks

anti-baryons : 3 anti-quarks



mésons : 1 quark et 1 anti-quark





	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom

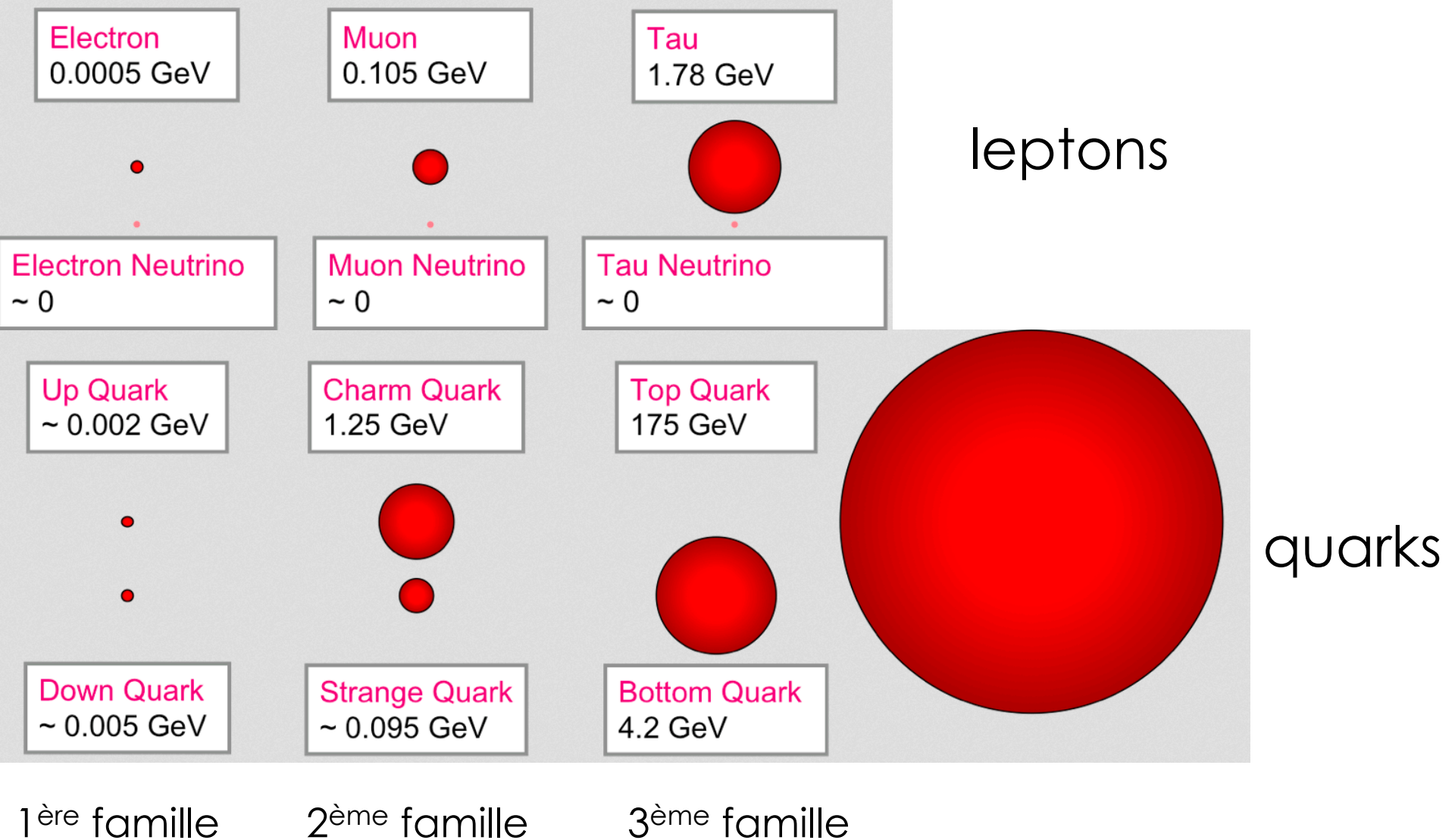
2000

1976

1994 1977 particules de Quark top « beauté »

+ les anti-particules !

Mais pourquoi trois familles ?

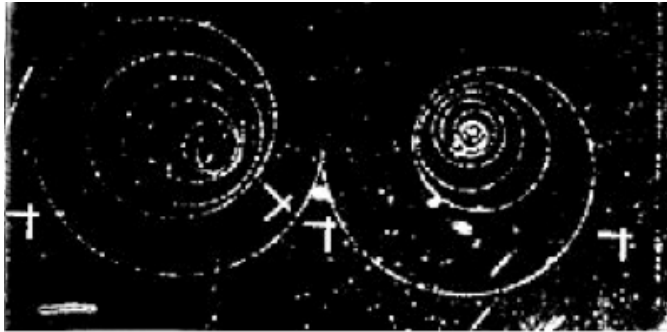


0.0005 GeV (mass de l'électron) correspond à environ $9.109 \cdot 10^{-31}$ kg

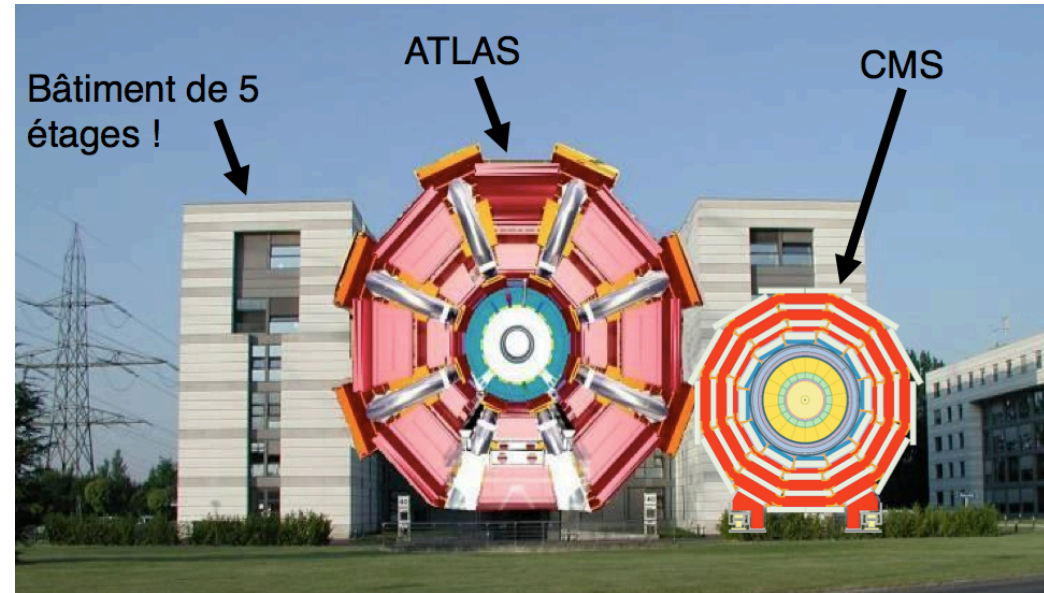
Mais pourquoi cette hiérarchie de masse?

Comment « voit-on » les particules ?

jusque vers 1970 -1980

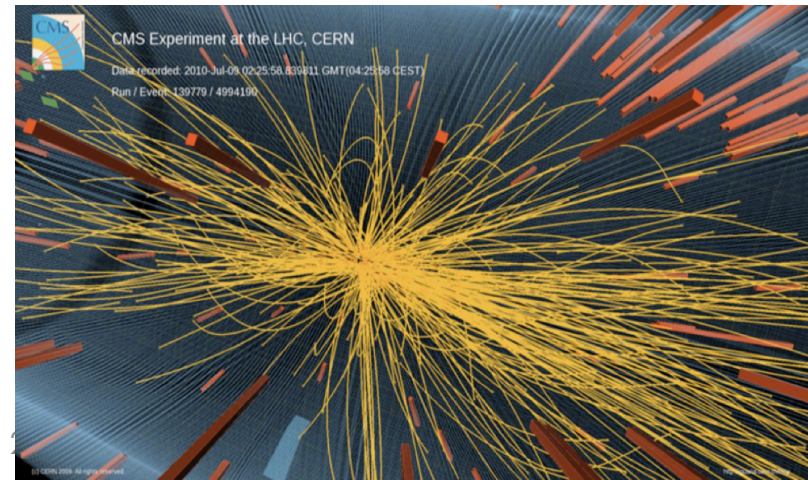


Aujourd'hui

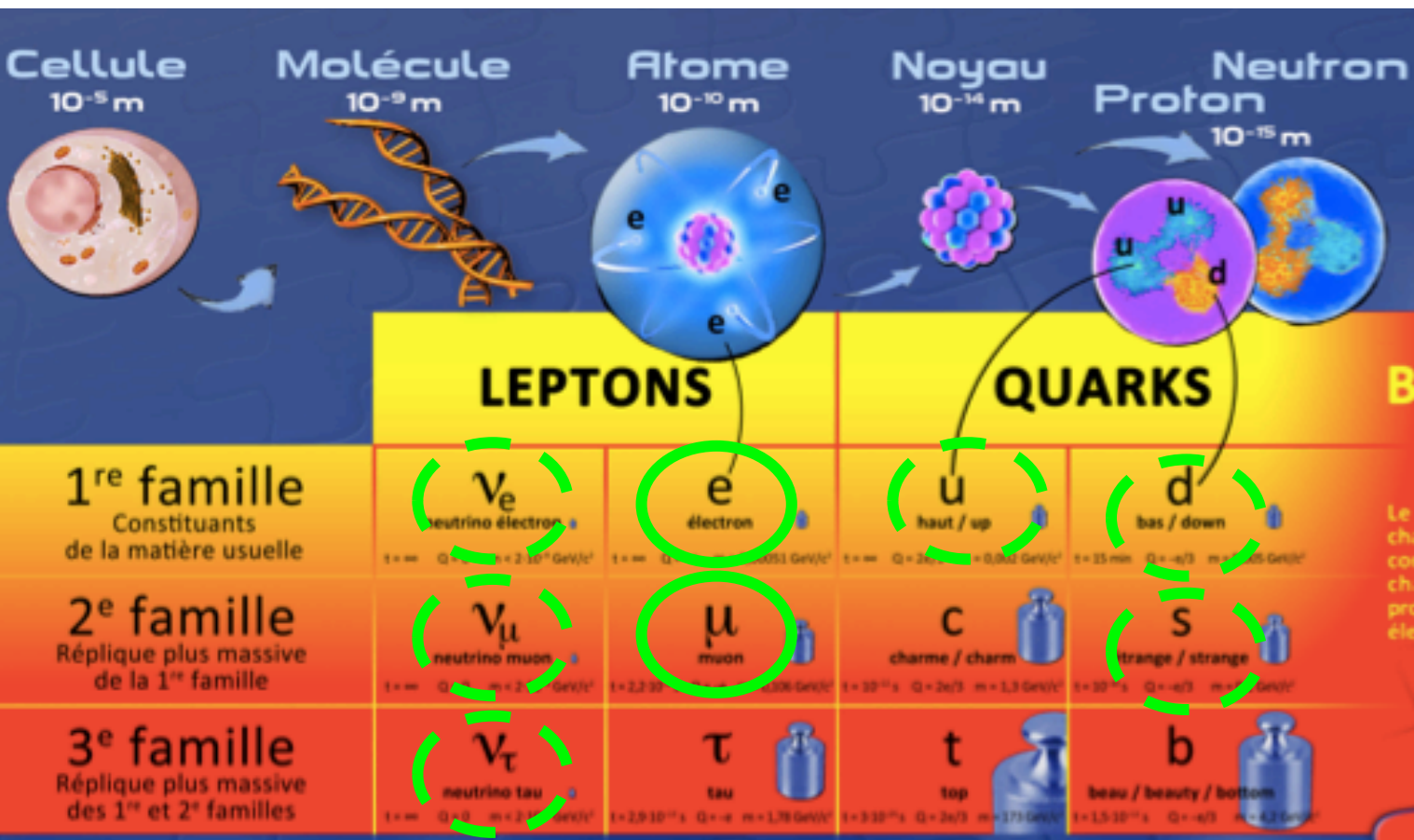


(les plus gros !)

Enorme masses de données
(taux et taille des événements)



De toutes les particules dont on a parlé on ne va voir dans nos détecteurs que :



VU

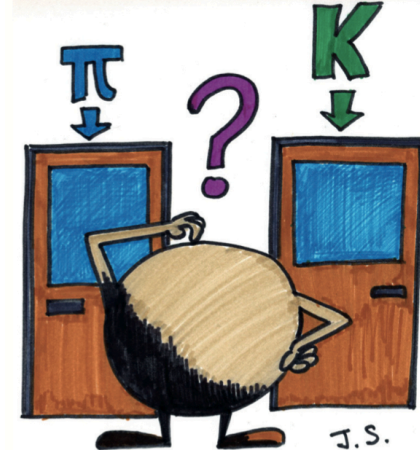
proton (uud), neutron (udd)

π^+ (ud) , K^+ (us) and neutral version

Et les autres ?

Ils se désintègrent !

- Mesurer l'impulsion des particules
- Mesurer la charge des particules
- Identifier la nature de ces particules (e, ou μ ou K ou π ?)



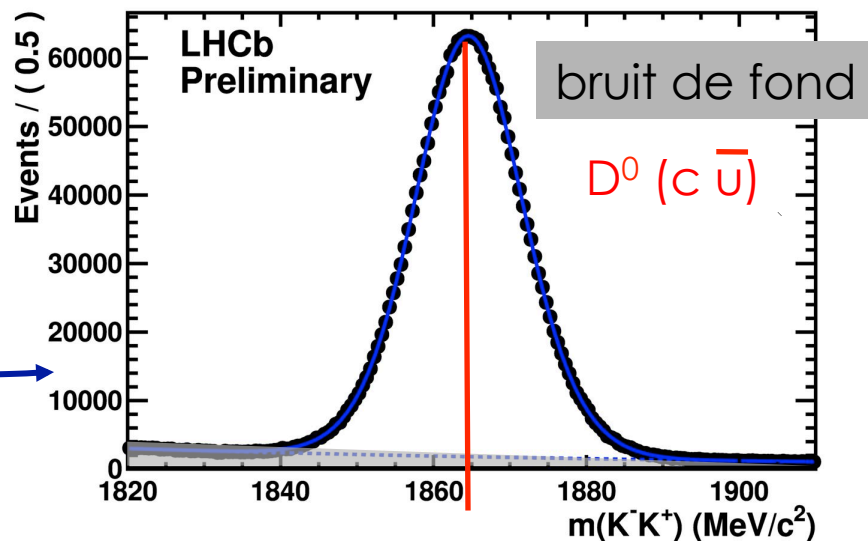
$$P \rightarrow P_1 \text{ et } P_2$$

$$E_P = E_1 + E_2$$

$$\vec{p}_P = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

$$M_P = \sqrt{E_P^2 - |\vec{p}_P|^2}$$

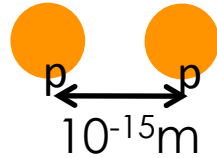
On mesure donc \vec{p}_i et M_i on en déduit E_i ($i=1,2$)



Gaussienne : effet du détecteur
($\sim 7/1865 = 0.04\%$)



Les interactions



10^{-40}

10^{-8}

10^{-2}

1

Gravitation

Attraction universelle, planètes, galaxies.

GRAVITON?

Interaction faible

Désintégrations radioactives.

Z^0 , W^+ , W^-

Interaction électromagnétique

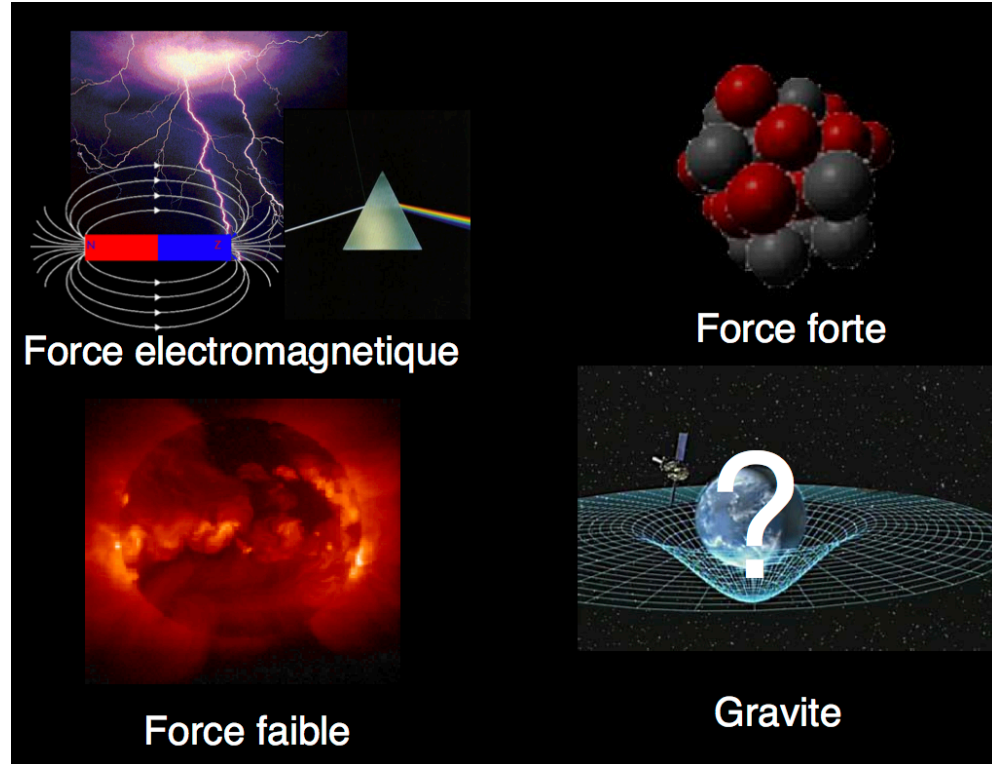
Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie.

PHOTON

Interaction forte

Cohésion des protons et des noyaux.

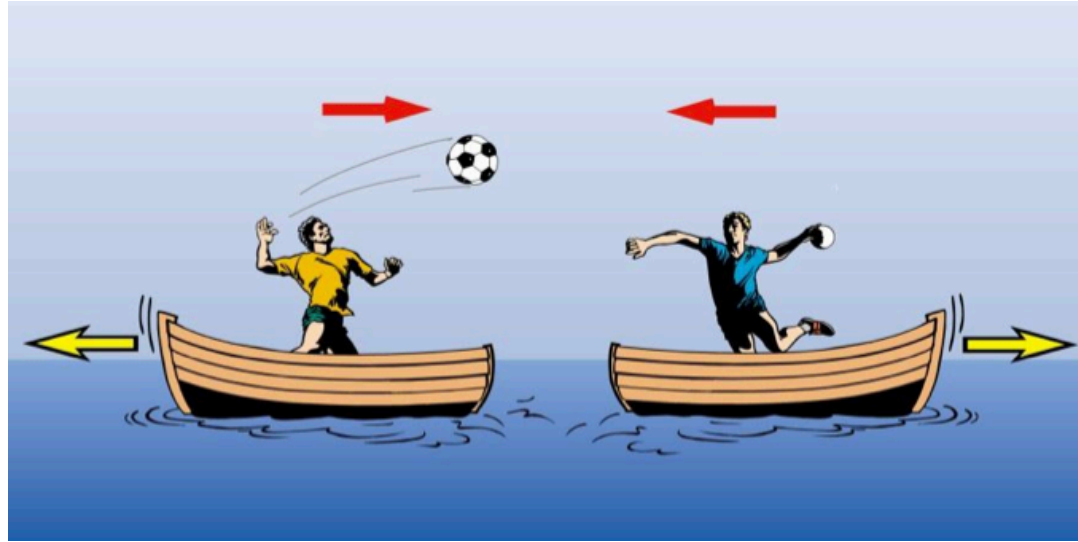
GLUON



La gravitation

- est négligeable au niveau subatomique
- on ne sait pas la « quantifier »

Les interactions s'expriment en termes d'échanges de particules (bosons vecteurs de l'interaction) :



Les différentes interactions se différencient par :

- le type de messenger (c'est à dire la particule)
- la portée de l'interaction (qui dépend de la masse du messenger)
- la charge du messenger

Portée d'une interaction

Création et échange d'une particule d'interaction
⇒ violation du principe de conservation de l'énergie
pendant un temps limité

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{mc^2} \quad \text{Heisenberg}$$

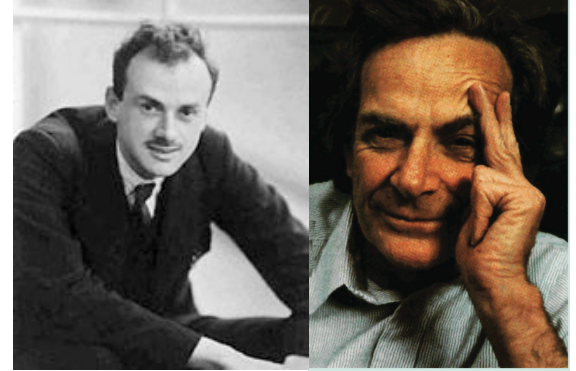
En Δt la particule peut parcourir $R = c\Delta t$

$$R \approx \frac{hc}{mc^2}$$

Pour une particule d'interaction avec $m = 0$: $R = \text{infini}$

Pour une particule d'interaction avec $m = 80 \text{ GeV}$: $R = 10^{-3} \text{ fm}$

L'électrodynamique quantique :



Paul Dirac

Richard Feynman (1918-1988)

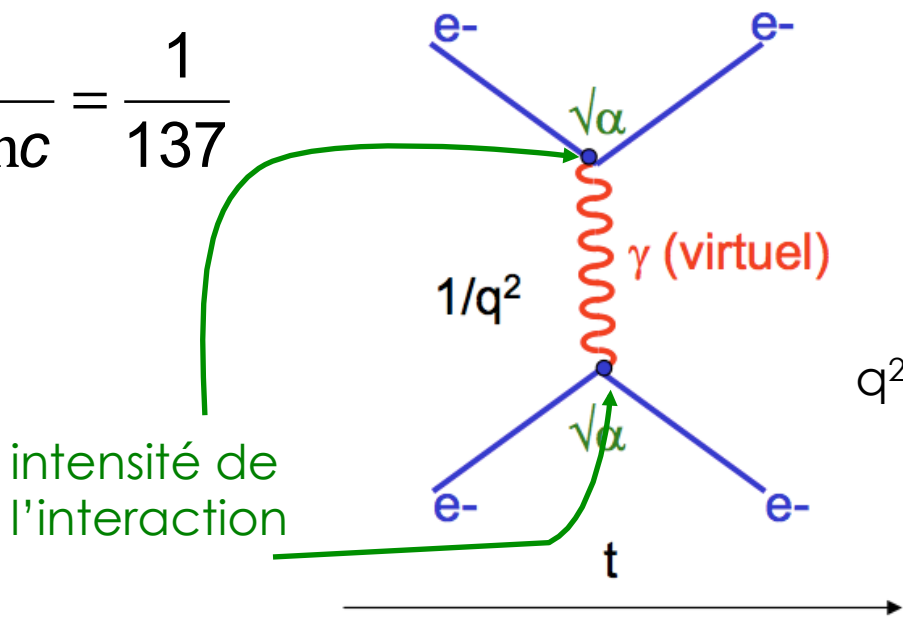
Maxwell :
champs électrique et magnétique
les ondes électromagnétiques se
propagent à la vitesse de la lumière c

quantification : les photons
les photons ont une vitesse c
 \Rightarrow masse nulle

Théorie des champs associés aux particules
chargées et décrivant leurs interactions, par
émission et absorption de photons

Un outil indispensable au physicien les graphes de Feynman !

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 hc} = \frac{1}{137}$$



intensité de l'interaction

q^2 : quadrivecteur du photon

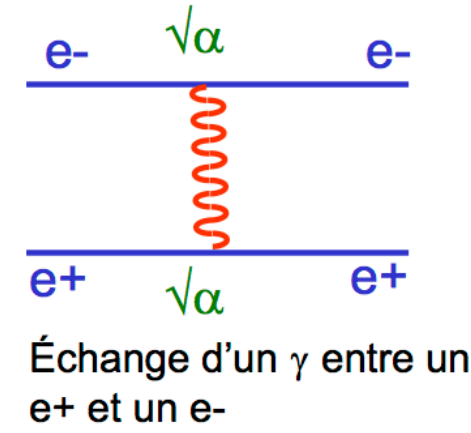
- Les lignes sont donc des particules qui se propagent dans l'espace-temps
- Les \bullet symbolisent les vertex «lieux» de l'interaction (il y a conservation des nb quantiques en ce point)

Électrons qui s'échangent un photon

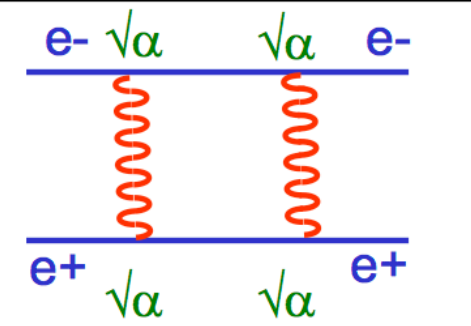
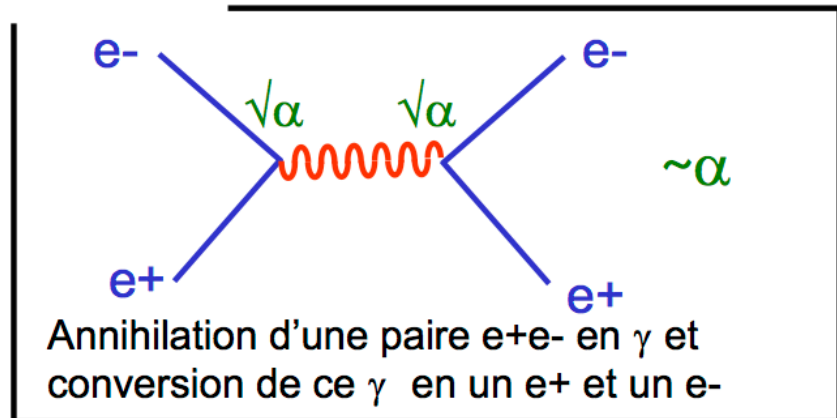
ou

Un e^- qui émet un γ et recule. Le γ est absorbé par un autre e^- dont la direction est modifiée

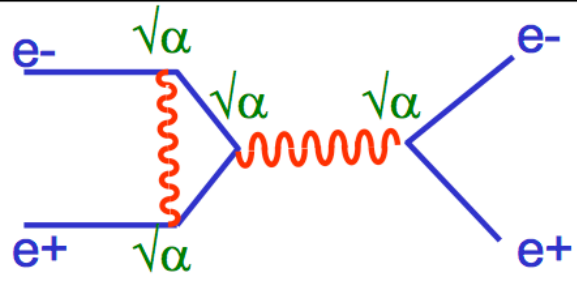
Interaction $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$



+

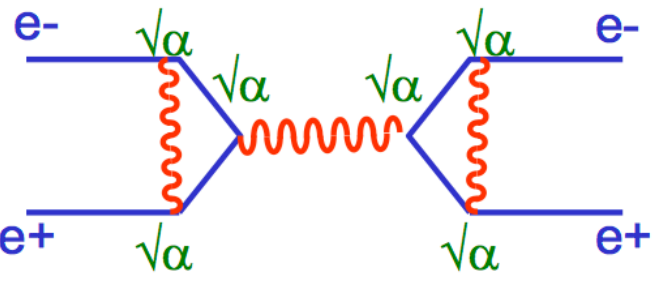


+



+ ...

$\sim \alpha^2$



+ ...

$\sim \alpha^3$

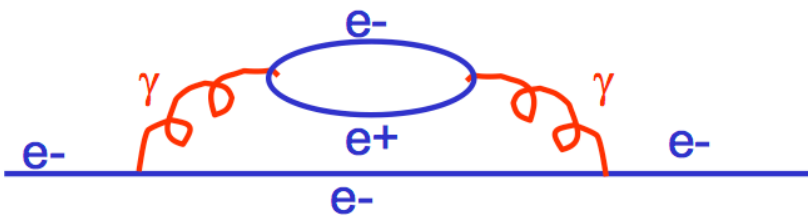
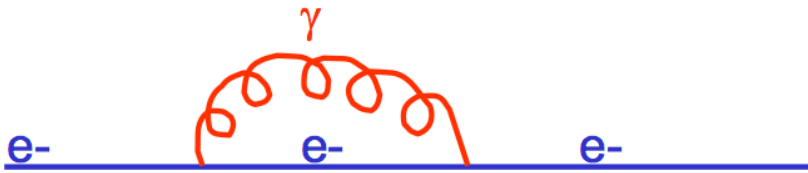
α petit (1/137) : le développement en série de perturbations fonctionne

Modification de notre vision de l'électron et du photon

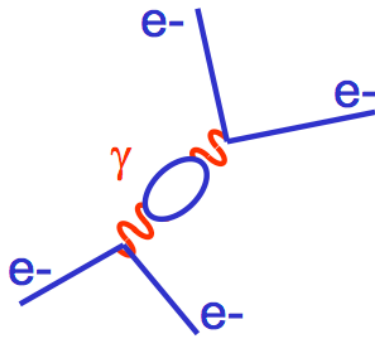
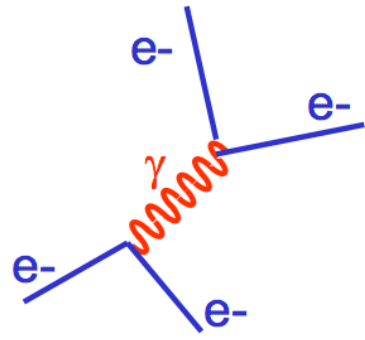
L'électron :



L'électron émet et absorbe continuellement des γ virtuels, d'où on peut le voir aussi comme :



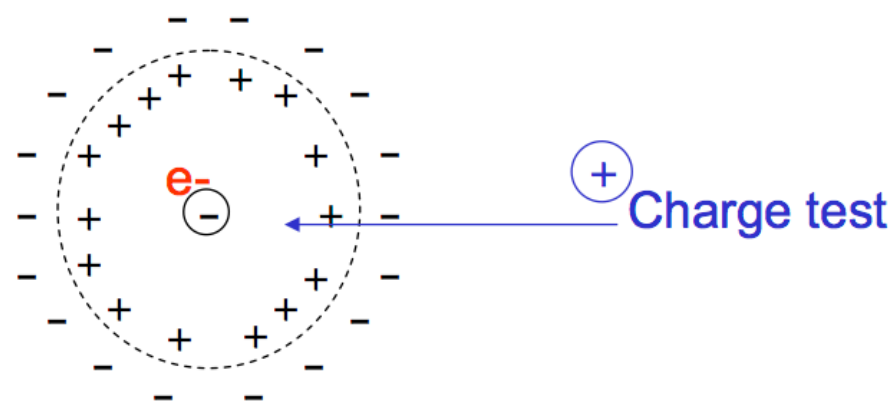
Le photon :



Conséquence de la modification de notre vision de l'électron

L'électron est entouré de paires e^+e^-
avec e^+ de préférence vers l'électron

→ Écrantage de la charge de l'électron

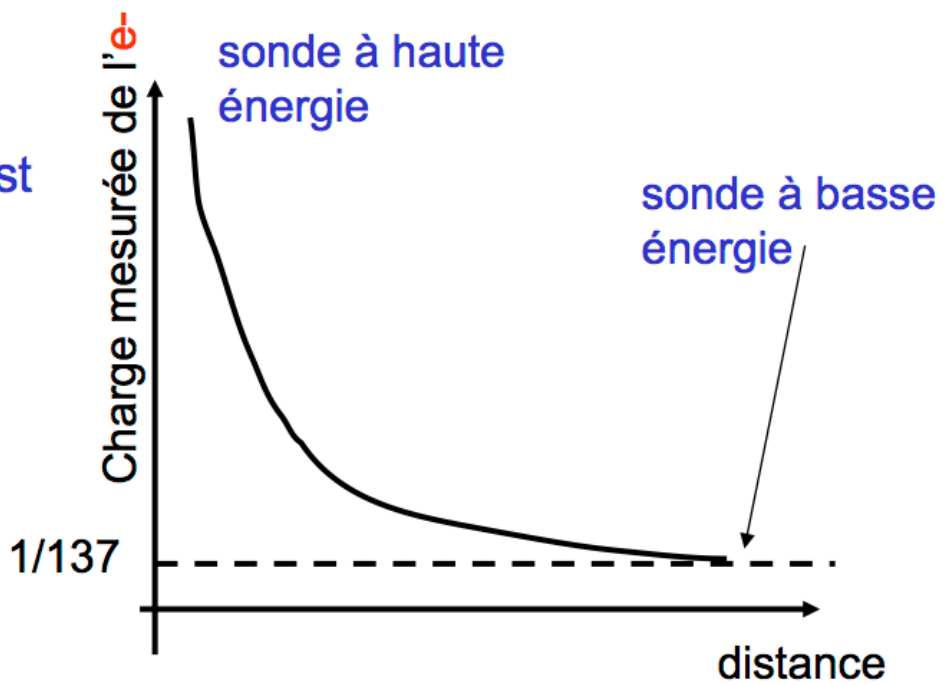


Polarisation du vide

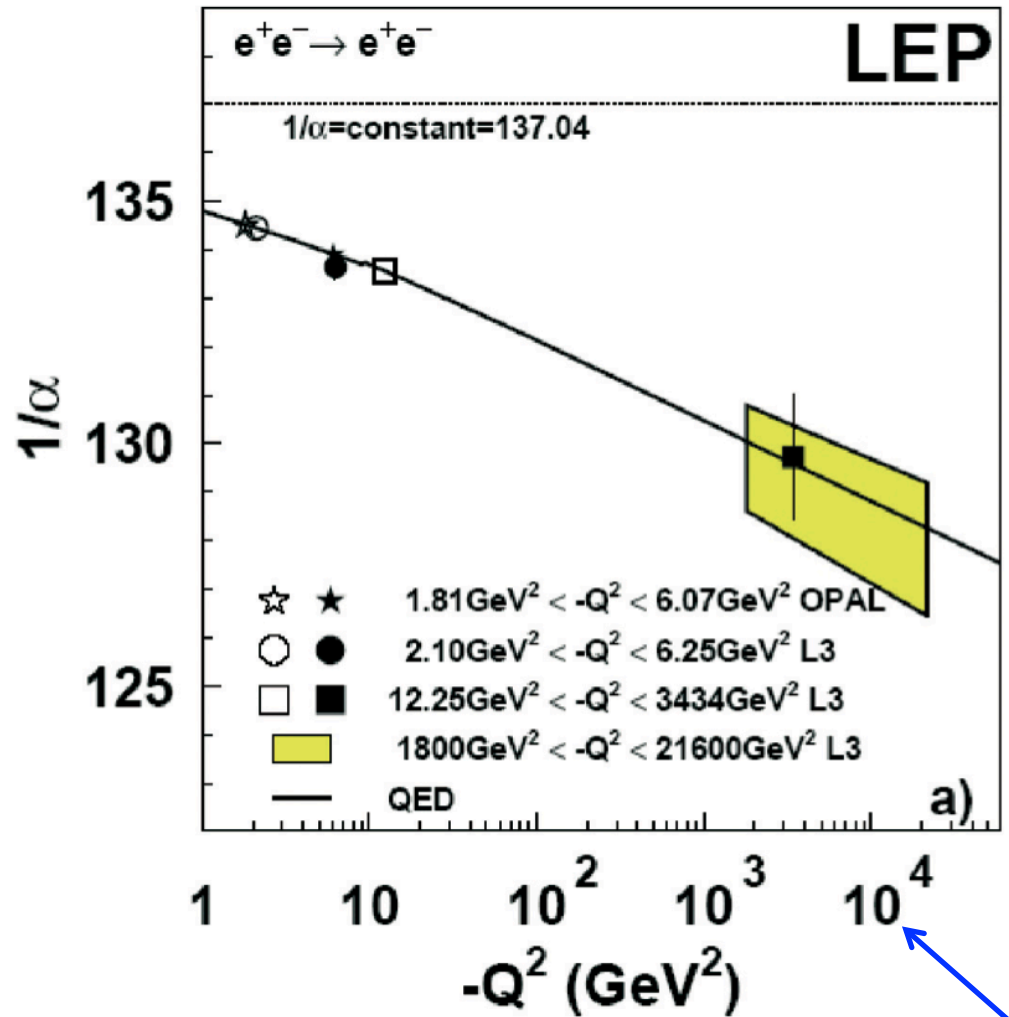
$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \log\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

Mesure de la charge de l'électron avec une charge test :

Plus on s'approche plus on voit une charge importante



Variation de l'intensité de QED avec l'énergie (ou la distance) est vérifiée expérimentalement



$$\alpha_{EM} \approx \frac{1}{137.0} \rightarrow \alpha(m_Z^2) \approx \frac{1}{128.9}$$

Les symétries : un outil indispensable pour le physicien des particules



Le mont Fuji est invariant par rotation autour de l'axe z (symétrie cylindrique)

L'image présente une symétrie miroir

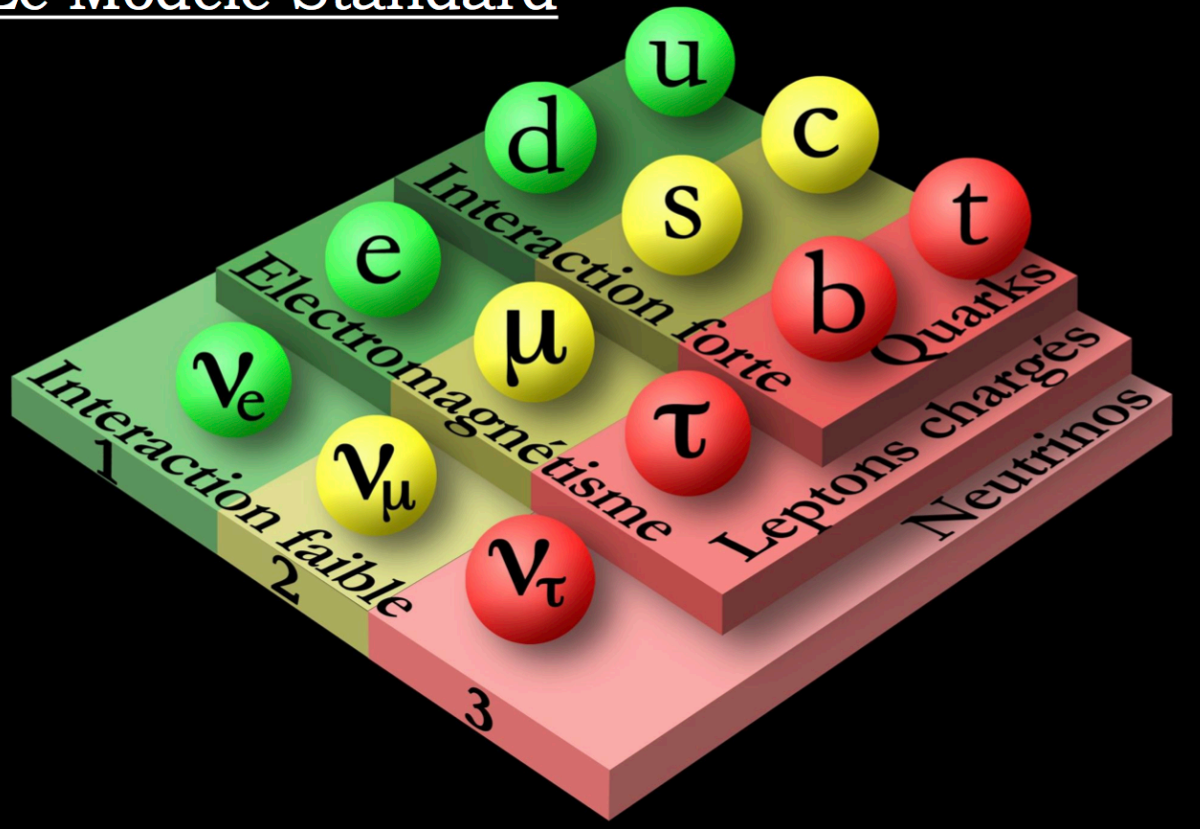
L'objet n'est pas symétrique par hasard : la mesure d'une symétrie nous apprend quelque chose sur la théorie sous-jacente

Symétrie continue pour un système \Leftrightarrow **loi de conservation** pour ce système

Symétrie discrète : **conservation de nombre quantique** (nombre baryonique, charge ...)

La physique des particules aujourd'hui 2/2

Le Modèle Standard

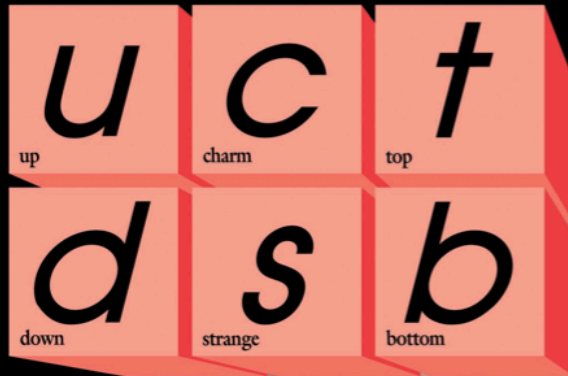


Les quarks sont sensibles aux interactions forte, faible et électromagnétique

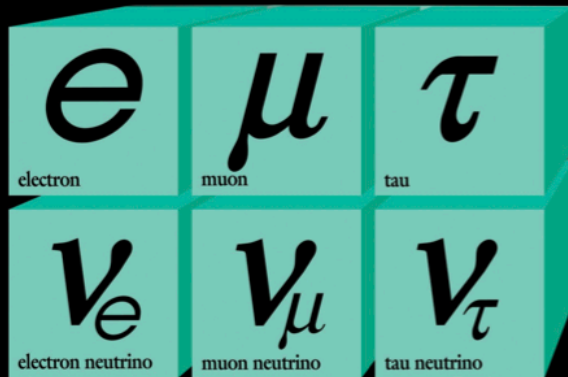
Les leptons chargés sont sensibles aux interactions faible et électromagnétique

Les leptons neutres sont sensibles à l'interaction faible

Quarks



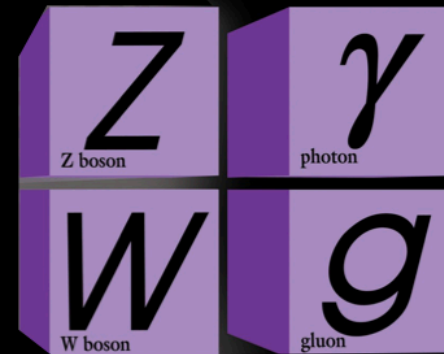
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

Forces



+ boson de Higgs



**David Rousseau en
fin d'après-midi**

particules de matière : fermions
particules vecteurs des interactions : bosons

Le Modèle Standard

- élaboré au cours du XX^{ème} siècle : démarche conjointe théorie-expérience

“It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong.”

[Feynman]

électromagnétisme
(QED)

interaction faible



interaction électro-faible

interaction forte
(QCD)

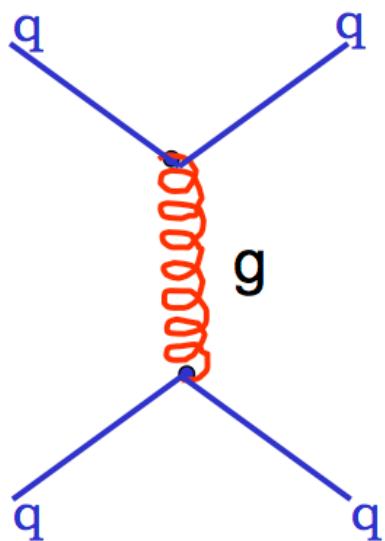
+ mécanisme de Higgs

L'interaction forte (chromodynamique quantique : QCD)

La charge électrique est remplacée par la "couleur"

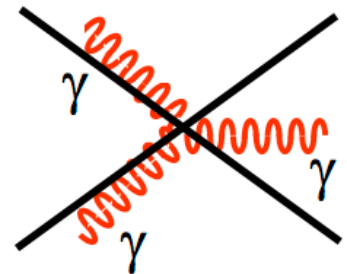


Comme dans QED, il existe le diagramme :



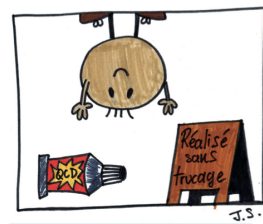
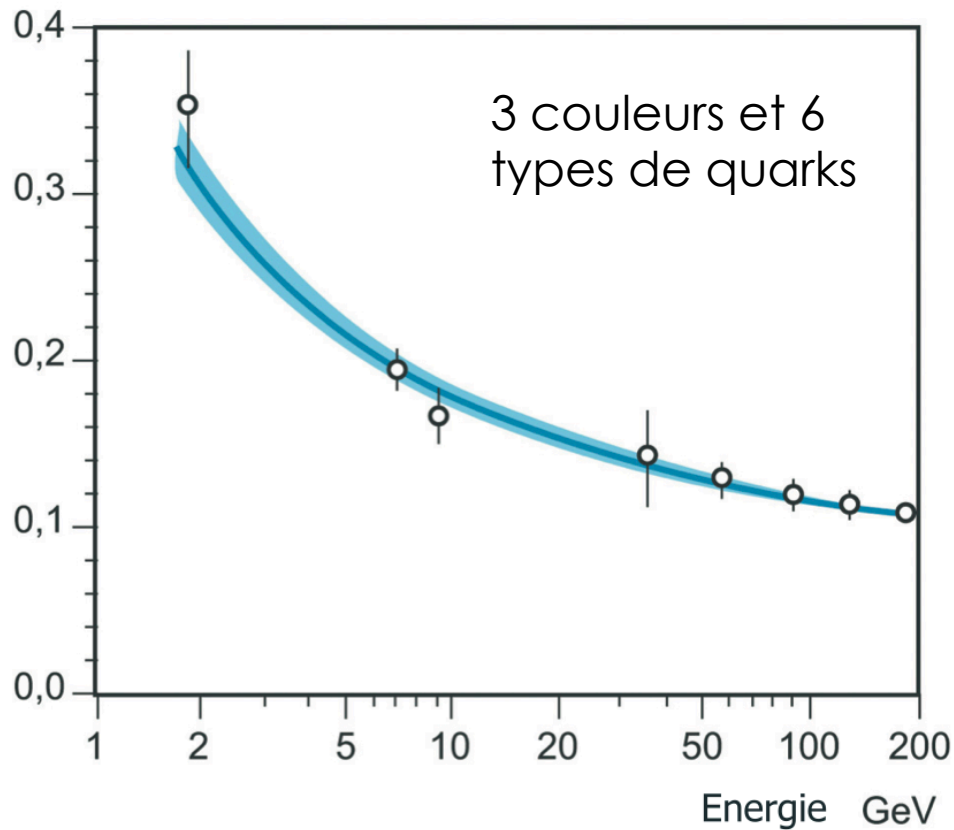
Mais:

QCD	QED
3 couleurs	Une seule charge
Gluons : colorés → Couplage entre 3 et 4 gluons	Photon : neutre → Pas de couplage entre photons



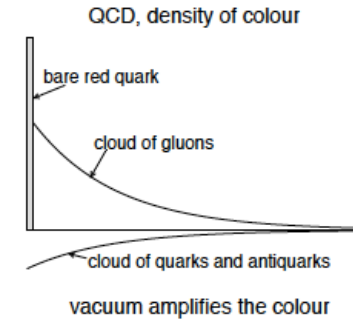
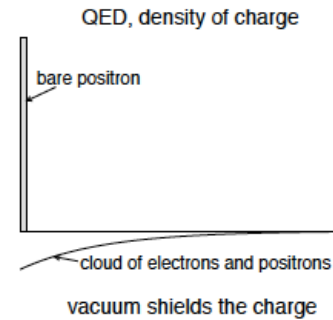
8 gluons « colorés »

Constante de couplage, $\alpha_s(E)$



Insights and puzzles in particle physics
H. Leutwyler

<http://arxiv.org/abs/1410.4000>

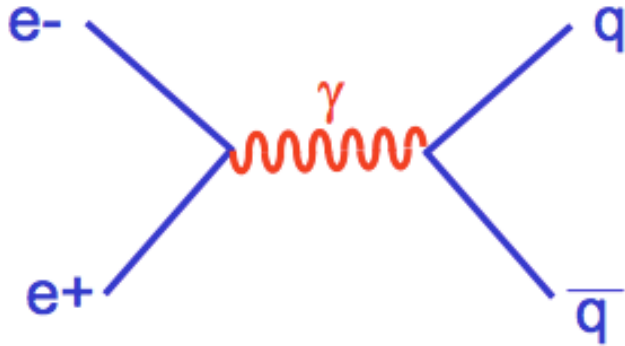


l'intensité de l'interaction augmente quand l'énergie diminue (= quand la distance augmente !)

De nombreuses conséquences !

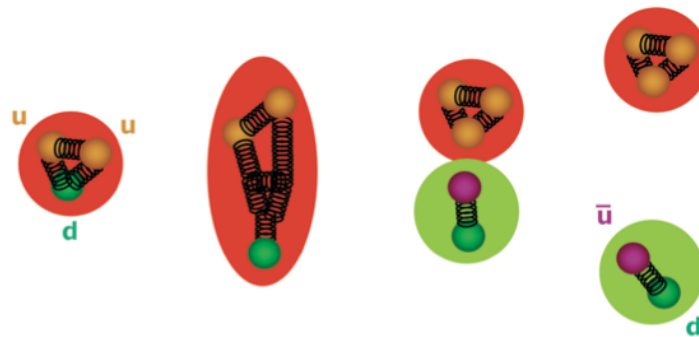
Pas de quarks libres

Nécessité de modèles à basse énergie



les quarks ont une charge électrique : ils se couplent au photon

- que se passe-t-il lorsque q et \bar{q} se séparent? **2 jets de hadrons**
- si un gluon est émis par un quark: $e^+ e^- \rightarrow q \bar{q} g$ **3 jets de hadrons**

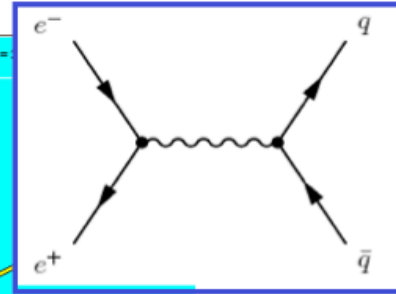
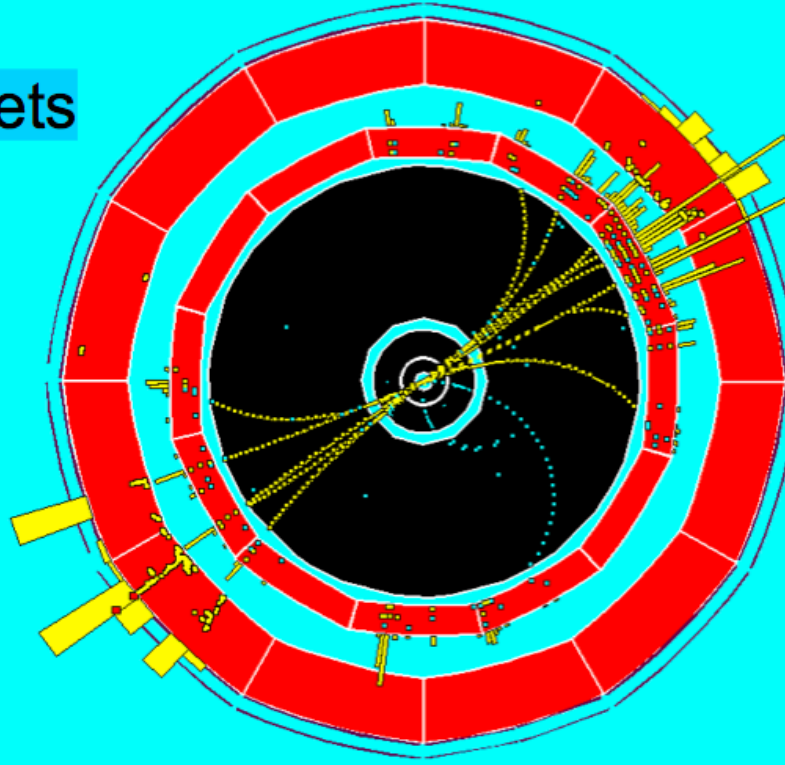


Jets de hadrons au LEP

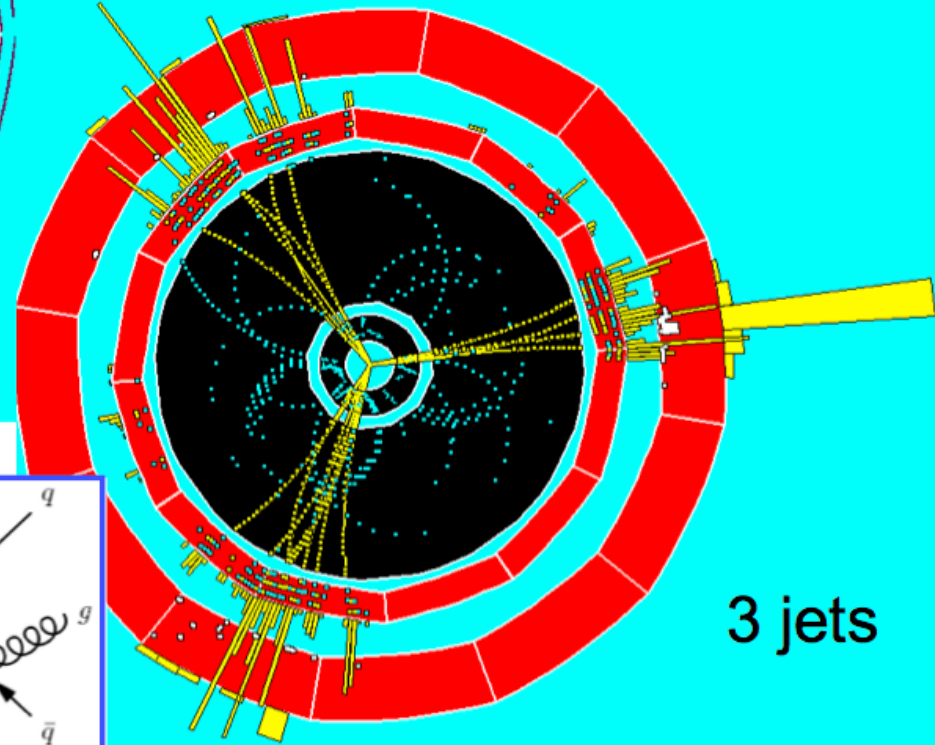
ALEPH DALI

Run=

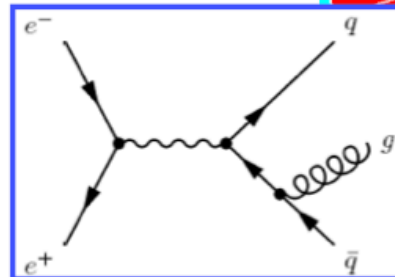
2 jets



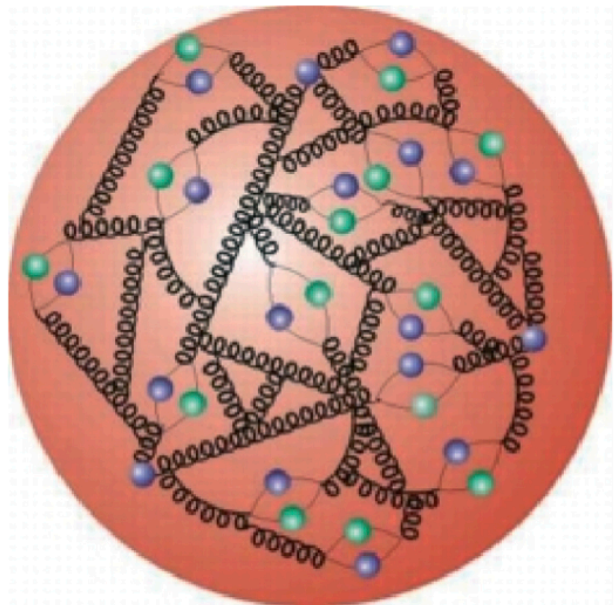
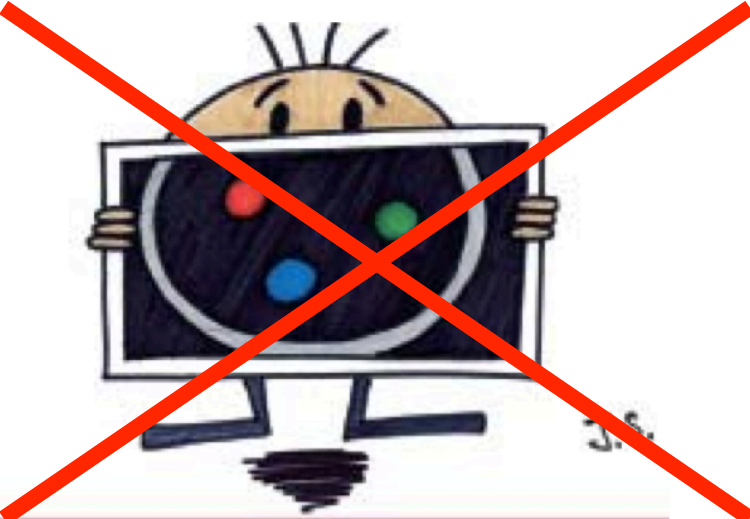
Run=9063 Evt=7848



3 jets



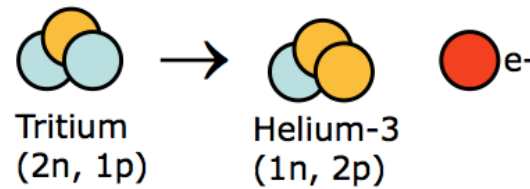
Le proton ressemble donc finalement



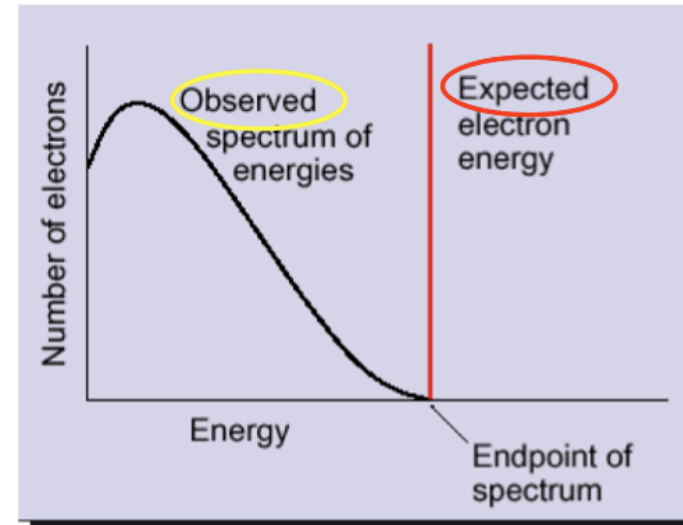
3 quarks + une multitude de gluons et de paires quark antiquark

L'interaction faible

Désintégration β :



Existence du neutrino !



Particules avec de « longues » durées de vie :

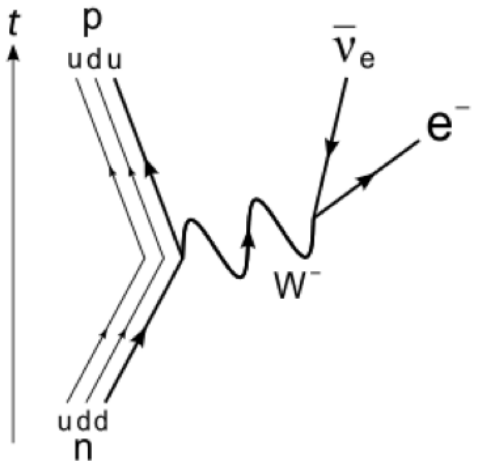
- $\Delta^{++} \rightarrow p\pi \sim 10^{-23}$ sec } Strong
- $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma \sim 6 \cdot 10^{-20}$ sec } Electromagnetic
- $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \sim 10^{-16}$ sec }
- $\Sigma \rightarrow n\pi \sim 10^{-10}$ sec }
- $\pi \rightarrow \mu\nu \sim 10^{-8}$ sec } Weak
- $n \rightarrow pve \sim 15$ minutes }

Nécessité d'introduire une nouvelle interaction

Désintégration β :

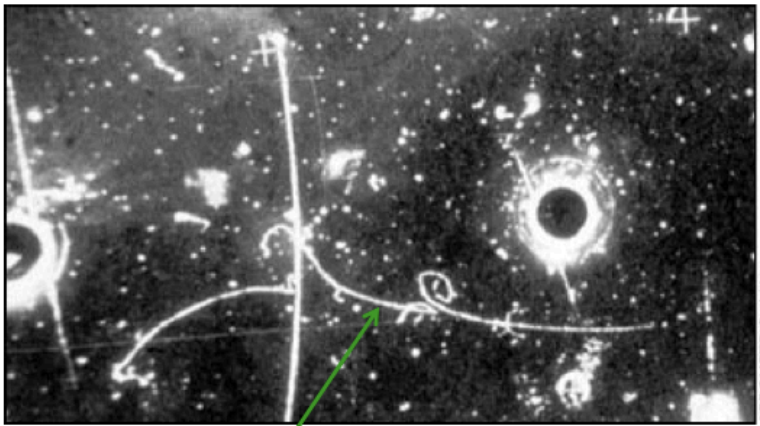
$M(W) = 80 \text{ GeV} \Rightarrow$ courte portée

Violation de nombreux nombres quantiques



Expérience Gargamelle 1973

Premier événement: $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$



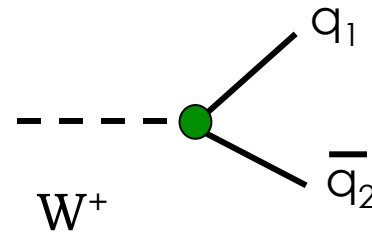
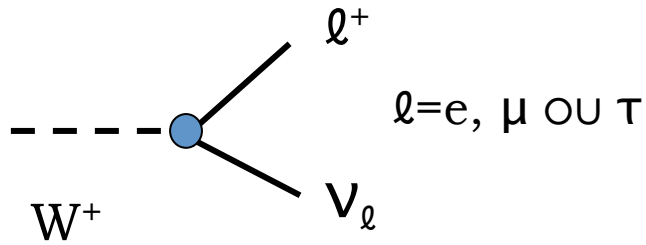
Utilisation de neutrinos : sensibles *uniquement* à l'interaction faible

e^- de 400 MeV
direction proche de celle du faisceau de ν incident

Sur un total de 1.4 million de photos : 3 événements (prise de données : 2 ans)

L'interaction faible concerne toutes les particules :

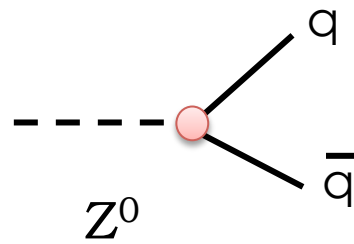
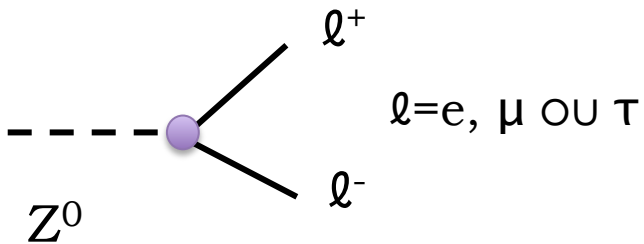
Les bosons médiateurs sont les W^+ , W^- et le Z^0



charge de q_1 : $2/3$

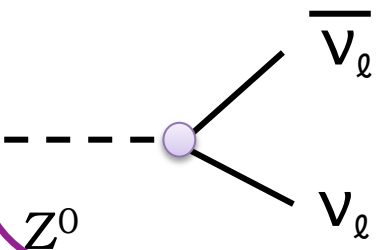
charge de q_2 : $-1/3$

$q_i=u,d,s,c,b,t$



$q=u,d,s,c,b$

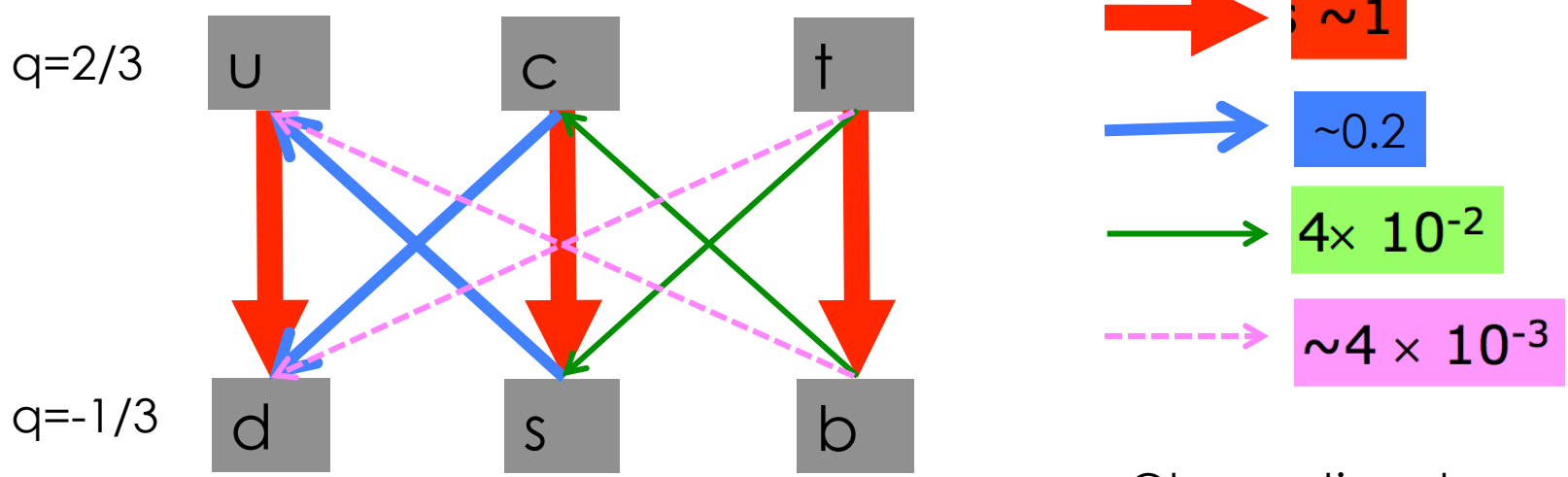
mais pas le top (trop lourd)



L'interaction faible est la seule des interactions qui permet des transitions entre familles :



1^{ère} famille 2^{ème} famille 3^{ème} famille

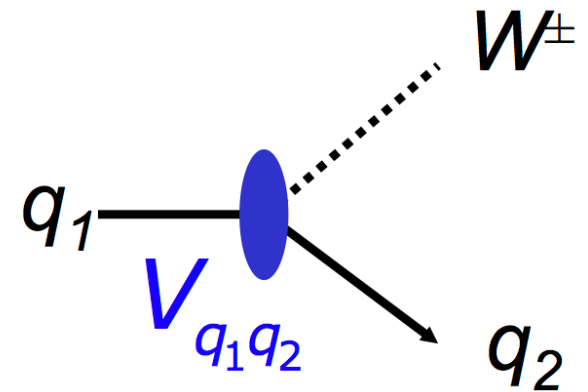


Observation des intensités relatives

Mais pourquoi cette hiérarchie ?

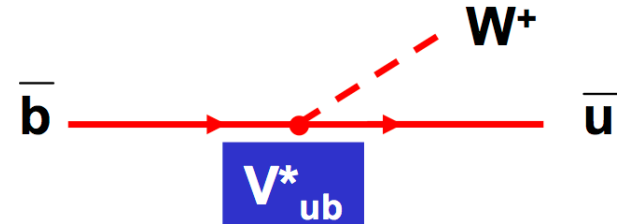
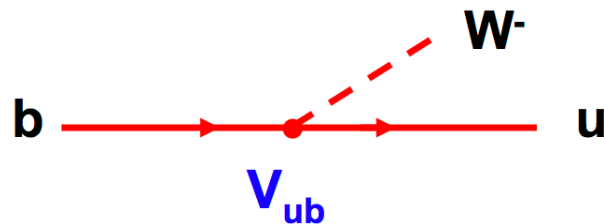
Formalisation matricielle :

$$(u \quad c \quad t) \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$



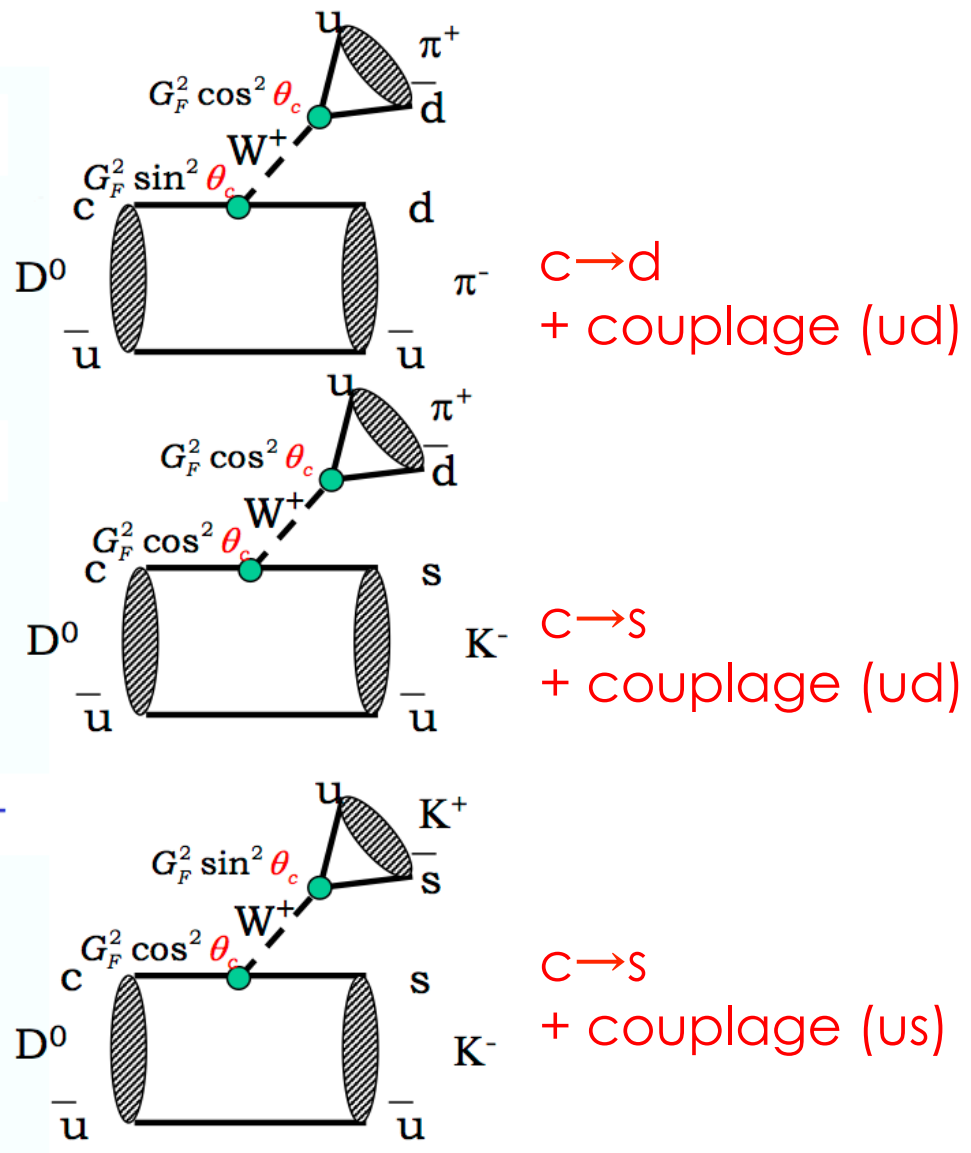
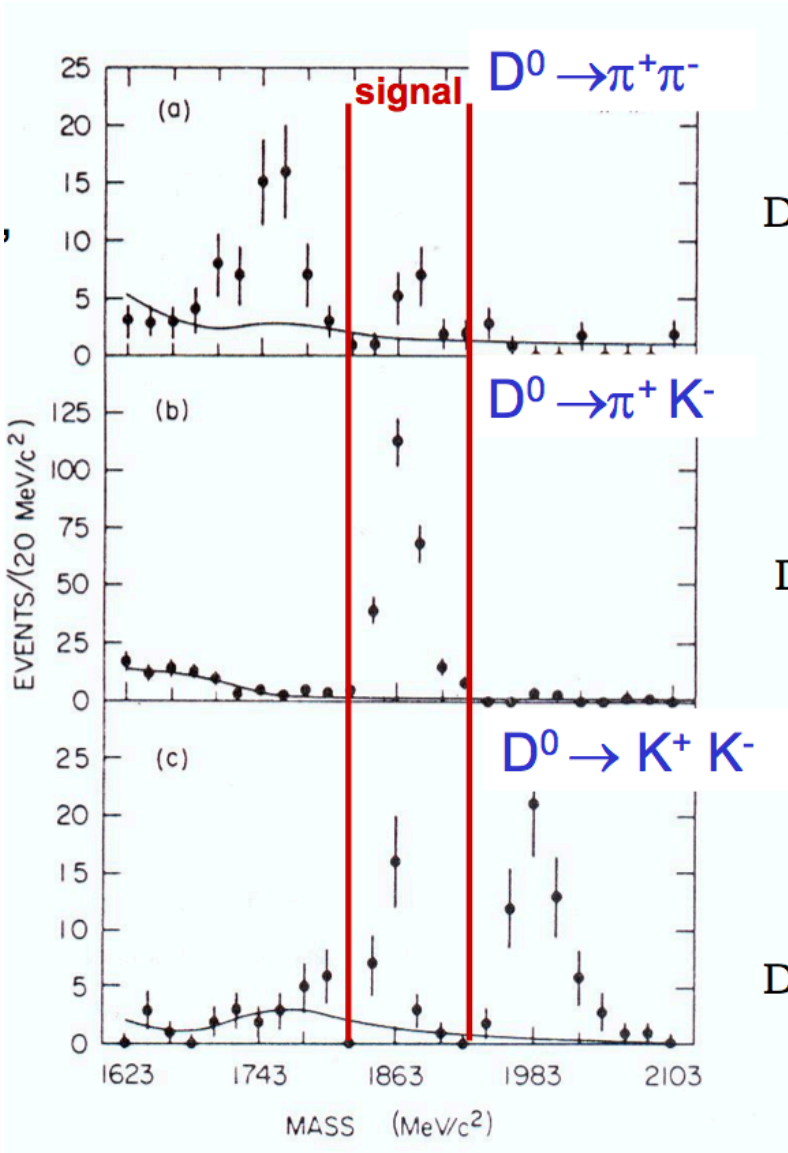
V_{CKM} est la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa

On peut montrer que les éléments de cette matrice sont complexes quand il y a au moins 3 familles dans la théorie

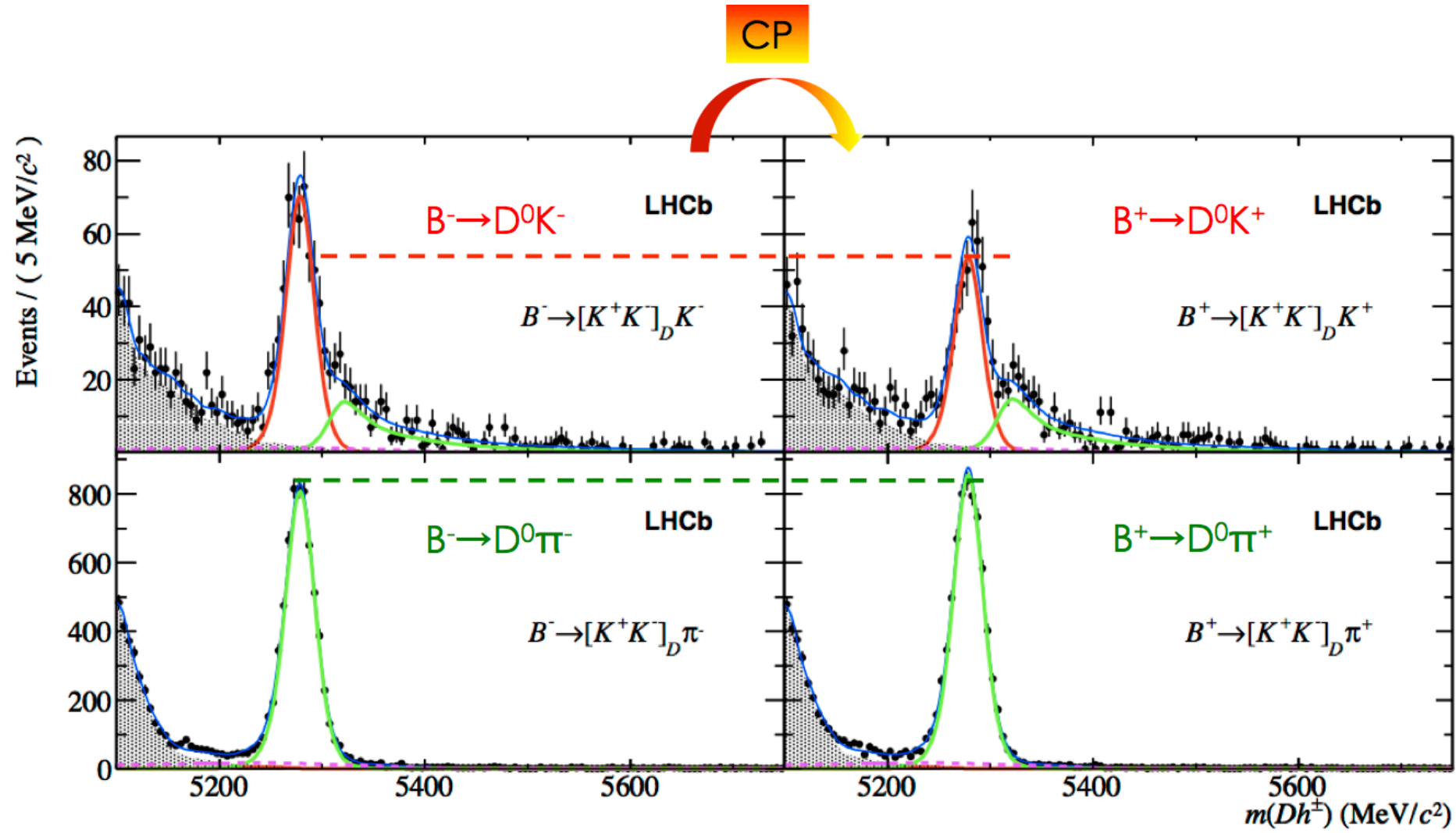


Si $V_{ub}^* \neq V_{ub}$ alors la matière se comporte différemment de l'anti-matière : « violation de CP »

En accord avec l'expérience :



Et effectivement la matière se comporte différemment de l'antimatière :



canal de signal : on attend ici de la violation de CP (et on la voit !)

canal de contrôle : pas de violation de CP attendue



Les neutrinos

Zurich, 4 décembre 1930,

Chères Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs,

Comme va vous l'expliquer avec plus de détails celui qui vous apporte ces lignes et auquel je vous prie d'accorder toute votre bienveillante attention, il m'est venu en désespoir de cause, face à la statistique « fausse » concernant les noyaux N et Li6 [azote et lithium-6] ainsi que le spectre bêta continu, l'idée d'un expédient pour sauver le « principe d'échange » de la statistique et le principe de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité qu'il existe dans les noyaux des particules électriquement neutres, que je propose d'appeler neutrons, dotés d'un spin de valeur 1/2, obéissant au principe d'exclusion et qui de surcroît se distinguent des quanta de lumière par le fait qu'ils ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons doit être du même ordre de grandeur que celle des électrons, et en tout cas non supérieure à 0,01 de celle des protons. - Le spectre bêta continu se comprendrait alors en admettant par hypothèse que lors de toute désintégration bêta est émis, outre l'électron, aussi un neutron, de telle sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante. [...]

A l'heure actuelle, cependant, je ne m'aventurerai pas à publier quelque chose sur cette idée, et je me tourne d'abord en toute confiance vers vous, chers Radioactifs, pour vous demander ce qu'il en serait d'une expérimentation établissant l'existence d'un tel neutron [...]

Je concède que mon expédient pourrait bien apparaître a priori comme peu crédible, parce que si les neutrons existaient, on les aurait sans doute vus depuis bien longtemps. Mais il faut oser pour réussir, et la gravité de la situation en ce qui concerne le spectre bêta continu est bien mise en lumière par un propos de mon très éminent prédécesseur, M. Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh, c'est comme pour les nouveaux impôts : il vaut mieux ne pas y penser du tout ! » Mais c'est bien pourquoi il importe de discuter sérieusement de tout chemin qui pourrait nous mener hors de l'impasse. - Ainsi donc, chers Radioactifs, examinez et jugez.- Malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tübingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.- [...]

Votre très dévoué,

W. Pauli

Wolfgang Pauli : « Physique moderne et philosophie » (trad. Claude Maillard), Albin Michel
1999

62

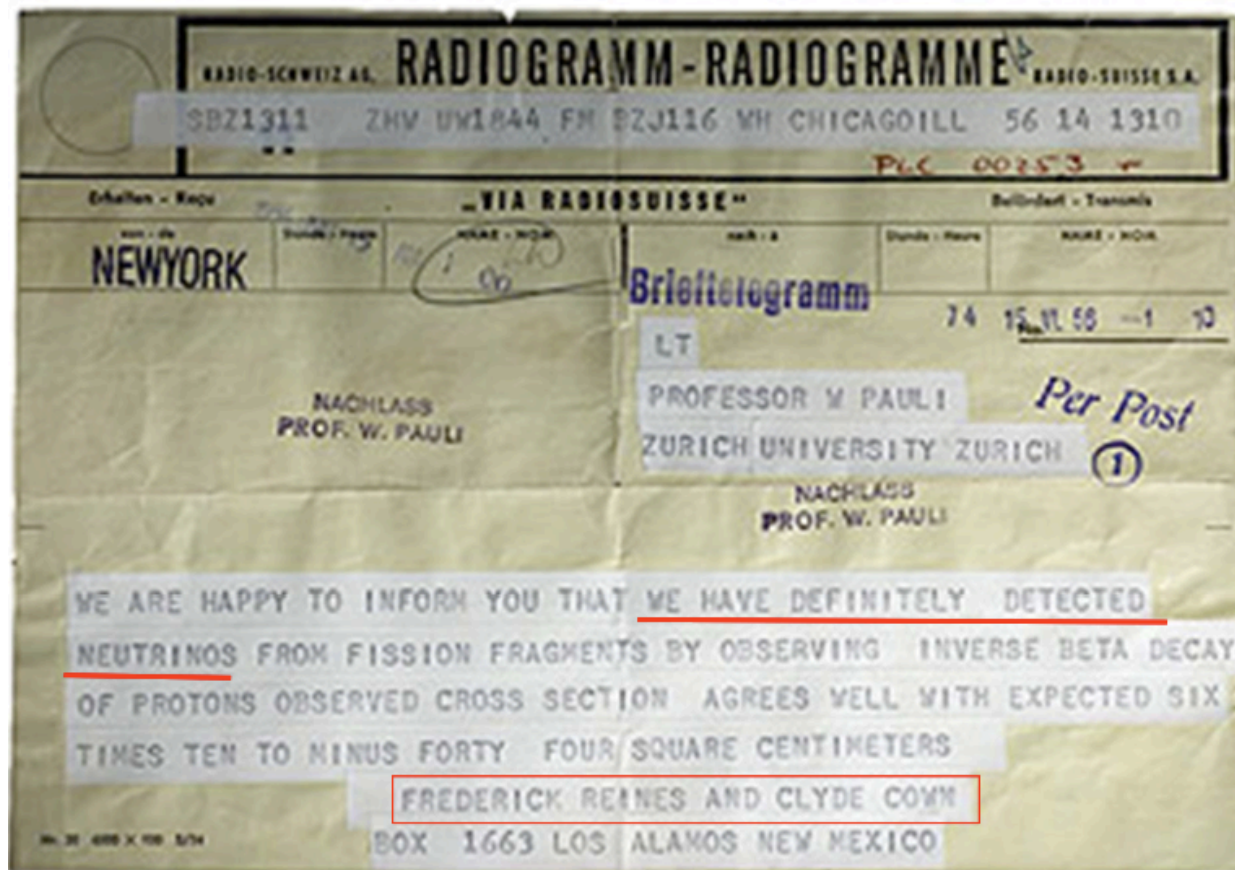
Quelques années plus tard Fermi a appelé cette particule le neutrino

Première mise en évidence expérimentale : 1956

Pauli (1930) : "I have done a terrible thing. I have proposed a particle that cannot be detected. It is something no theorist should ever do."



Reines et Cowan à Pauli (1956)



Pauli :

Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico
Thanks for message. Everything comes to
him who know how to wait.

Pauli



Détecter un neutrino est très difficile

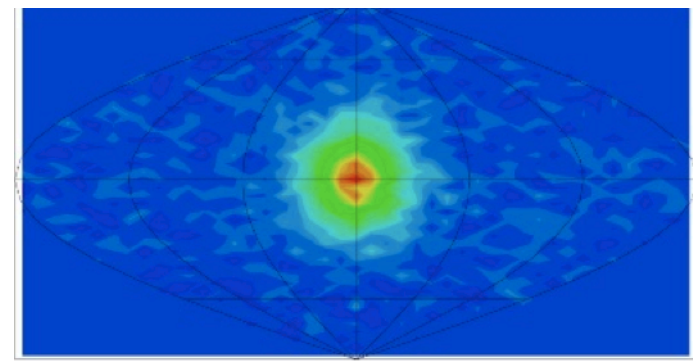
Si les neutrinos sont produits dans les désintégrations β alors on peut les détecter en utilisant la réaction inverse

Mais il s'agit d'interaction faible !

Soleil : flux énorme : $6 \cdot 10^{10}$ neutrinos/cm²/s sur Terre

Le plus gros détecteur : 50 000 m³ d'eau : 20 neutrinos détectés par jour !

« photo » du soleil prise 1000m sous terre



Ou **réacteurs**



Et alors ?

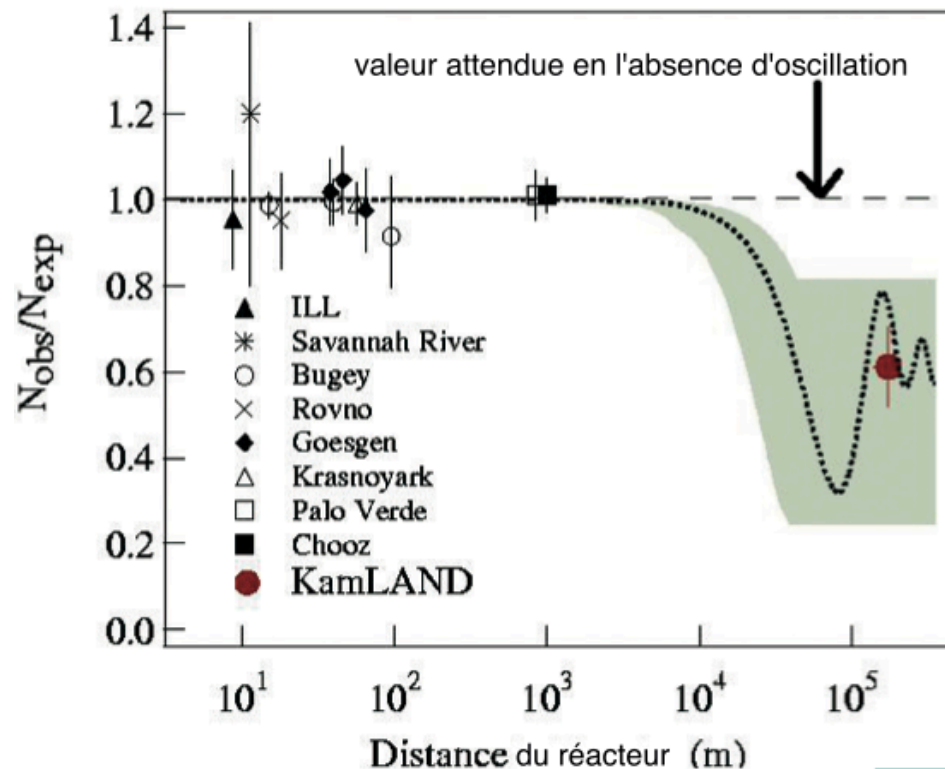
- on ne voit pas le nombre attendu de neutrinos

- phénomène d'oscillation !

- les masses des neutrinos sont non nulles mais incroyablement petites ... :

$$< M_{\text{electron}}/1000000$$

On espère que les propriétés très étonnantes des neutrinos apporteront la réponse à certaines questions



Unification électrofaible :

Un peu comme l'unification de l'électricité et du magnétisme

électromagnétisme
(QED)

interaction faible



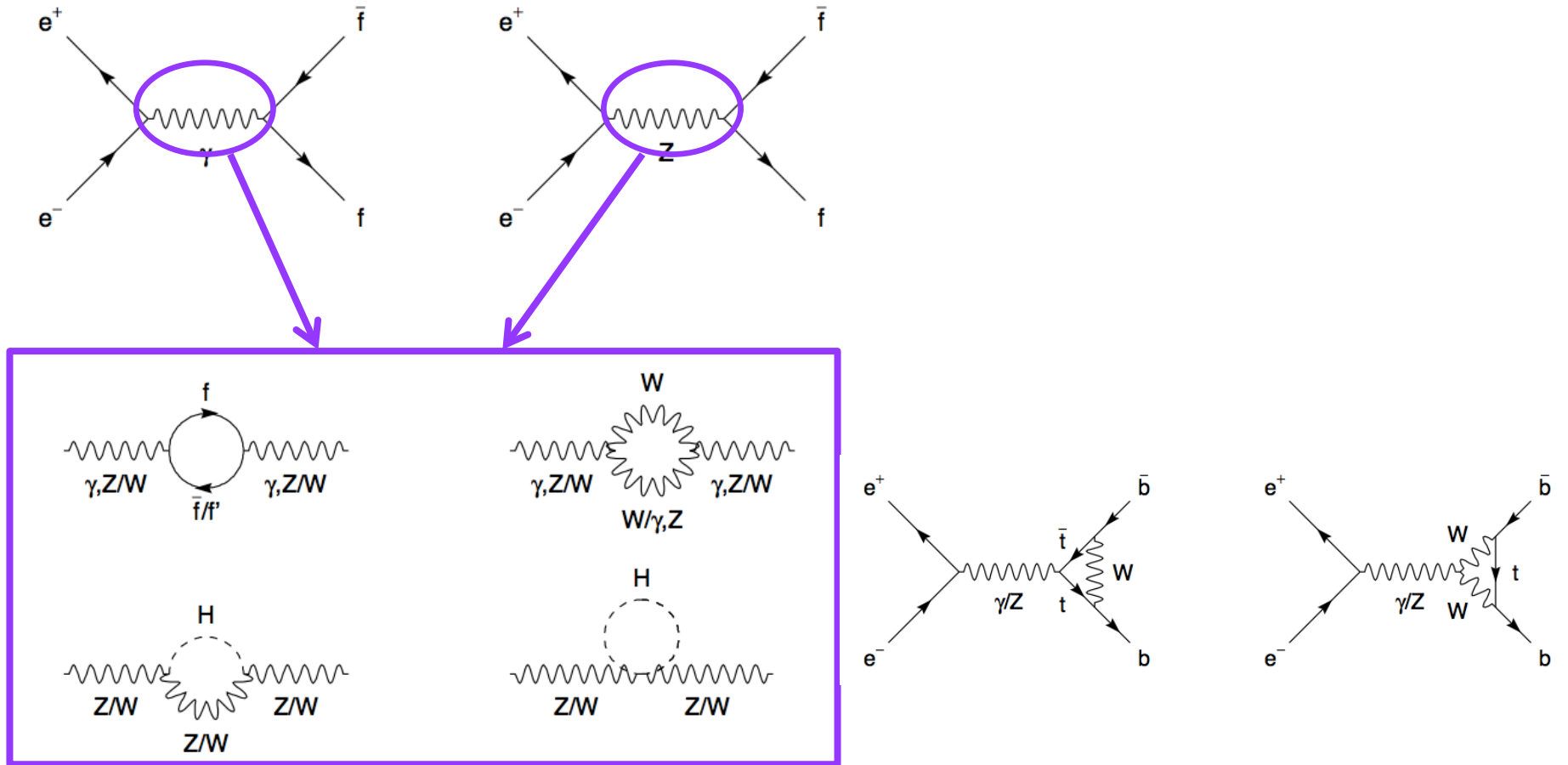
interaction électro-faible

+ brisure spontanée de symétrie
(mécanisme de Higgs)

- 3 bosons vecteurs massifs :
 - 2 chargés (les W^+ et W^-)
 - un neutre le Z^0
- un boson neutre sans masse : le photon

tests expérimentaux de haute précision en accord avec
cette description théorique

Le triomphe du MS (et de LEP et SLD)



Les particules qui circulent dans les boucles sont virtuelles : leurs masses peut être bien supérieures à l'énergie disponible dans le centre de masse

Calculs extrêmement précis de certaines quantités \Rightarrow **prédictions** sur les masses des particules virtuelles que l'on n'a jamais directement observées !

Comment savoir ce qu'il y a dans la boîte ?

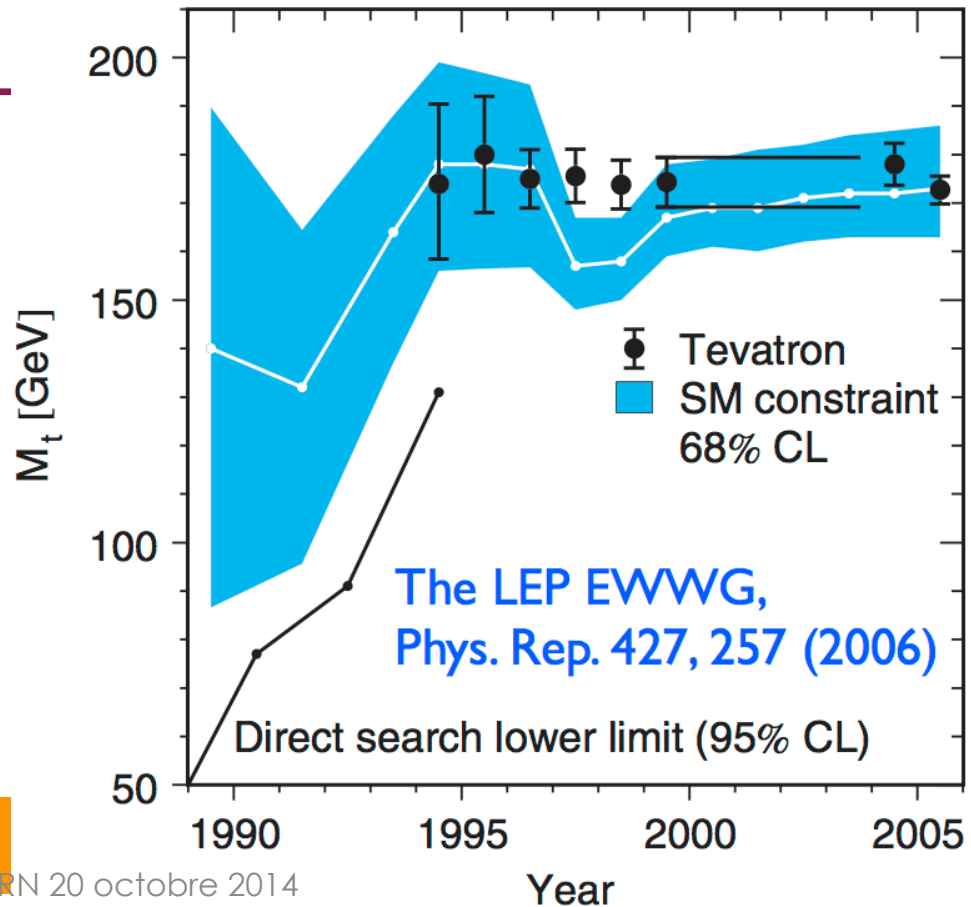


prédictions a partir des données de LEP1
(énergie = 90 GeV)

Masse du quark top



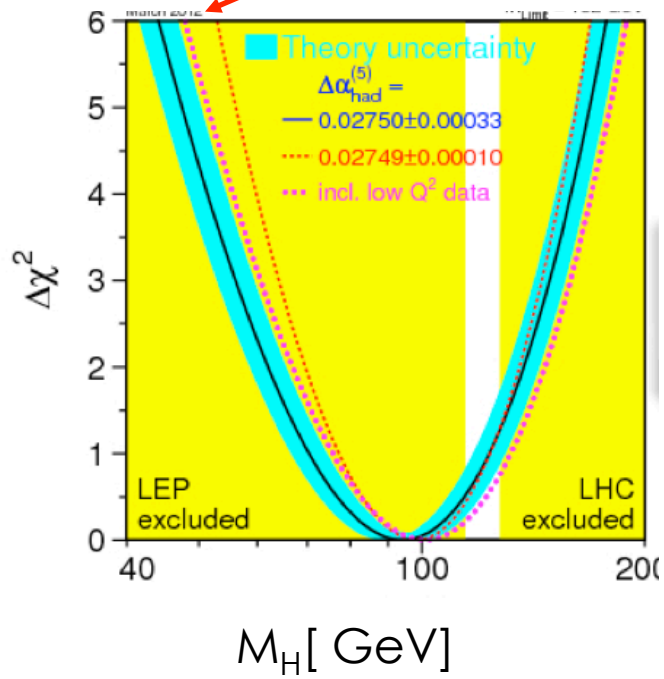
Mesure directe au TeVatron
(E= 1.8 TeV)



Très bon accord !

Masse du boson de Higgs

Mars 2012



$m_{\text{BEH}} < 152 \text{ GeV}/c^2 \quad 95\% \text{ CL.}$

2014 Review of Particle Physics.
Please use this CITATION: K.A. Olive *et al.* (Particle Data Group), Chin. Phys. C, **38**, 090001 (2014).

H⁰ [INSPIRE search](#)

In the following H⁰ refers to the signal that has been discovered in the Higgs searches. Whereas the observed signal is labeled as a spin 0 particle and is called a Higgs Boson, the detailed properties of H⁰ and its role in the context of electroweak symmetry breaking need to be further clarified. These issues are addressed by the measurements listed below.

Concerning mass limits and cross section limits that have been obtained in the searches for neutral and charged Higgs bosons, see the sections "Searches for Neutral Higgs Bosons" and "Searches for Charged Higgs Bosons (H[±] and H^{±±})", respectively.

H⁰ MASS	125.7 ± 0.4 GeV
H⁰ SPIN AND CP PROPERTIES	
H⁰ DECAY WIDTH	
H⁰ SIGNAL STRENGTHS IN DIFFERENT CHANNELS	
Combined Final States	1.17 ± 0.17 (S = 1.2)
W W* Final State	0.87 ^{+0.24} _{-0.22}
Z Z* Final State	1.11 ^{+0.34} _{-0.28} (S = 1.3)
γ γ Final State	1.58 ^{+0.27} _{-0.23}
b b̄ Final State	1.1 ± 0.5
τ ⁺ τ ⁻ Final State	0.4 ± 0.6
Z γ Final State	< 9.5 CL=95.0%

Le boson de Brout-Englert-Higgs a été découvert (Juillet 2012)

Sa masse est mesurée : 125.7 ± 0.4 GeV

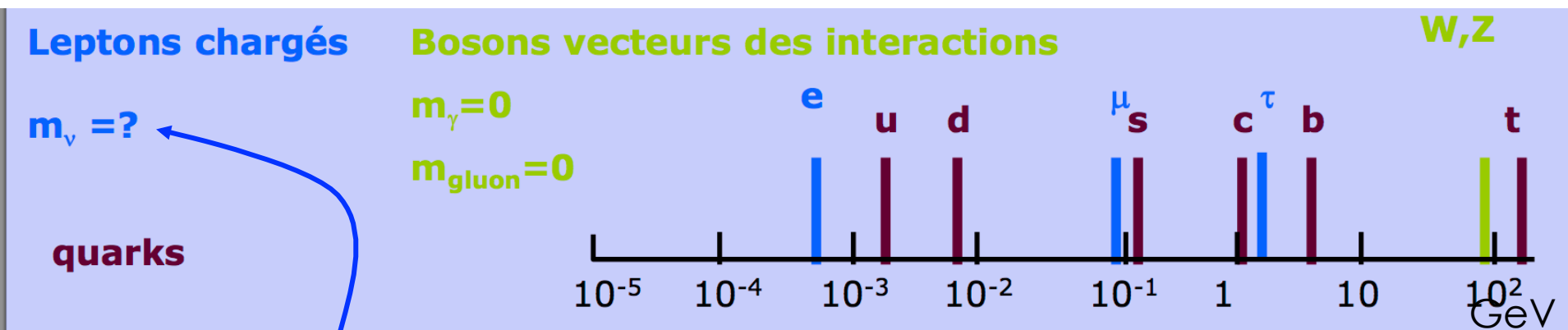
David Rousseau en fin d'après-midi



Tout est compris ?

Tout est trouvé ?

Q1 : pourquoi les constituants de la matière ainsi que les particules qui véhiculent les interactions ont-ils des masses si disparates ?



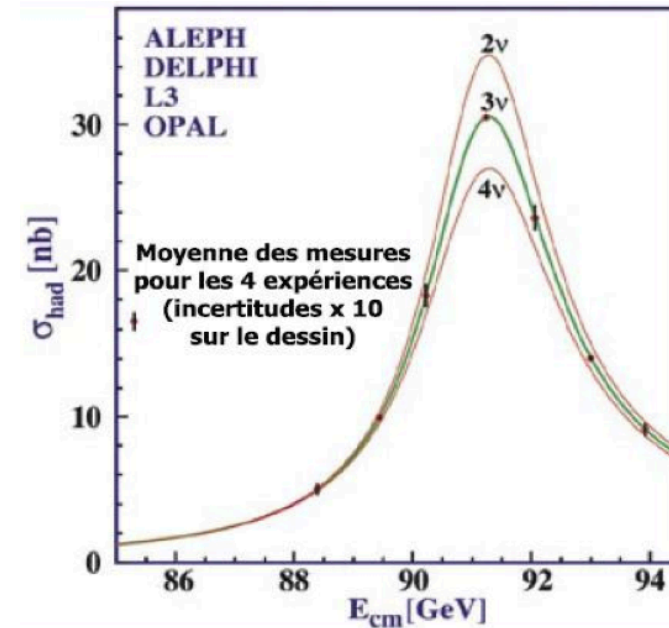
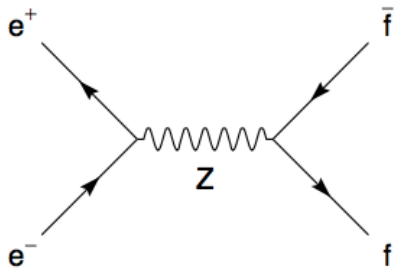
presque 0 mais pas tout à fait

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs explique pourquoi les particules élémentaires ont une masse mais pas l'incroyable variété de valeurs

Q2 : pourquoi 3 familles ?

On observe l'existence de trois familles de matière ordinaire mais on ne sait pas pourquoi ...Pourrait-il y en avoir plus ?

⇒ on sait qu'il n'y a que 3 familles avec des neutrinos légers (masse < 45 GeV)



⇒ on ne trouve pas pour l'instant de signe d'une 4^{ème} famille



Q3 : vers l'unification ou de plus grandes symétries?

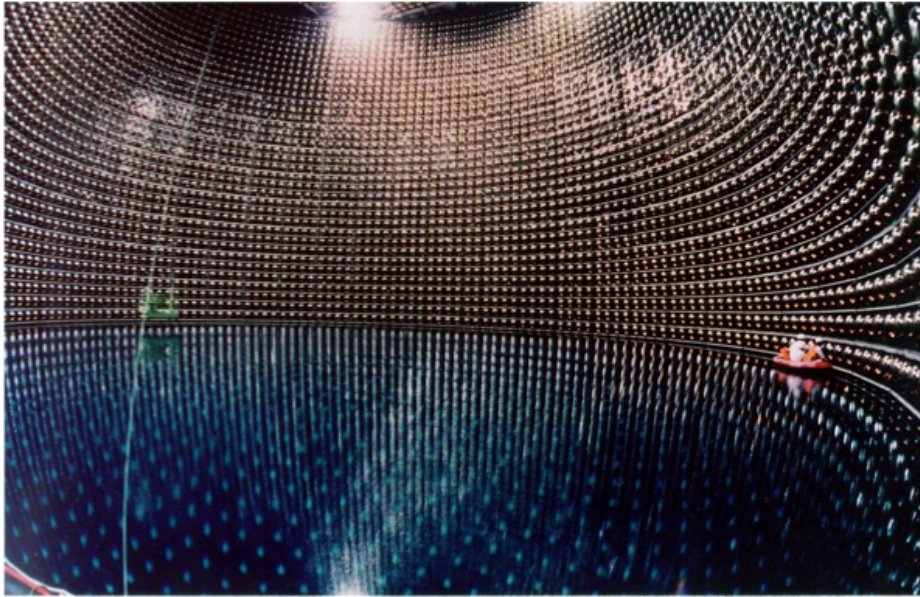
La charge des quarks serait alors liée à la charge des e et au nombre de couleurs !

$$Q(d) = 1/3 Q(e)$$

Mais :

- de nombreux bosons supplémentaires (**non observés**)
- instabilité du proton : **fortes contraintes expérimentales**

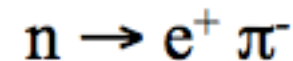
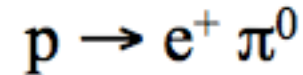
$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \\ \bar{d}_r \\ \bar{d}_g \\ \bar{d}_b \end{array} \right)_L$$



Detecteur SuperKamiokande

50000 tonnes d'eau

$3 \cdot 10^{34}$ nucléons (protons et neutrons)

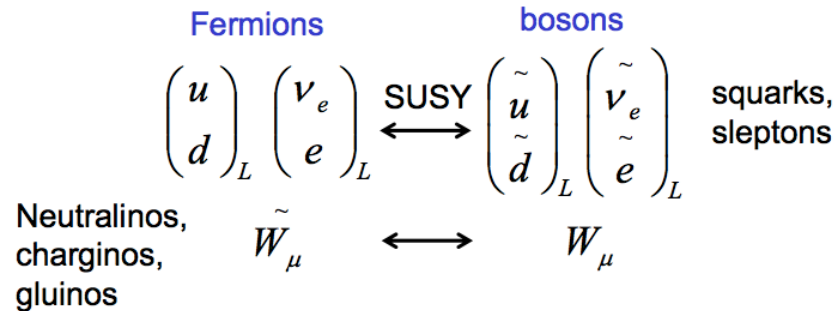


Vie moyenne $> 10^{33}$ ans

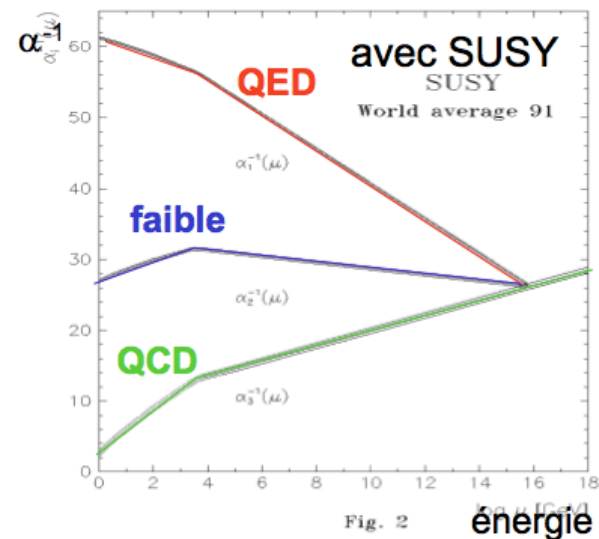
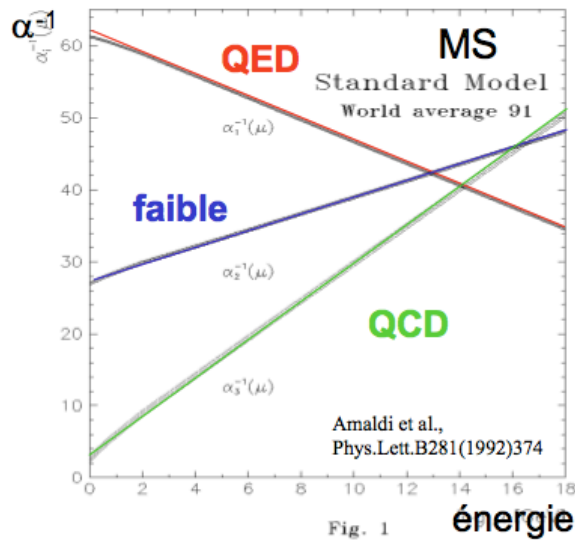
Unification $> 10^{15}$ GeV

(âge de l'Univers $1.4 \cdot 10^{10}$ ans)

Supersymétrie : symétrie entre fermion (spin 1/2 entier) et boson (spin entier)



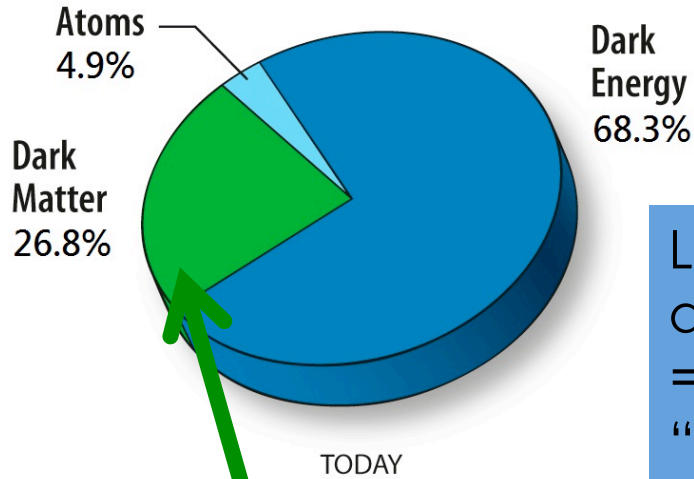
unification des couplages de jauges:



Mais :

- si ces particules existent leur masse est \gg à celle des particules du Modèle Standard (non observés)

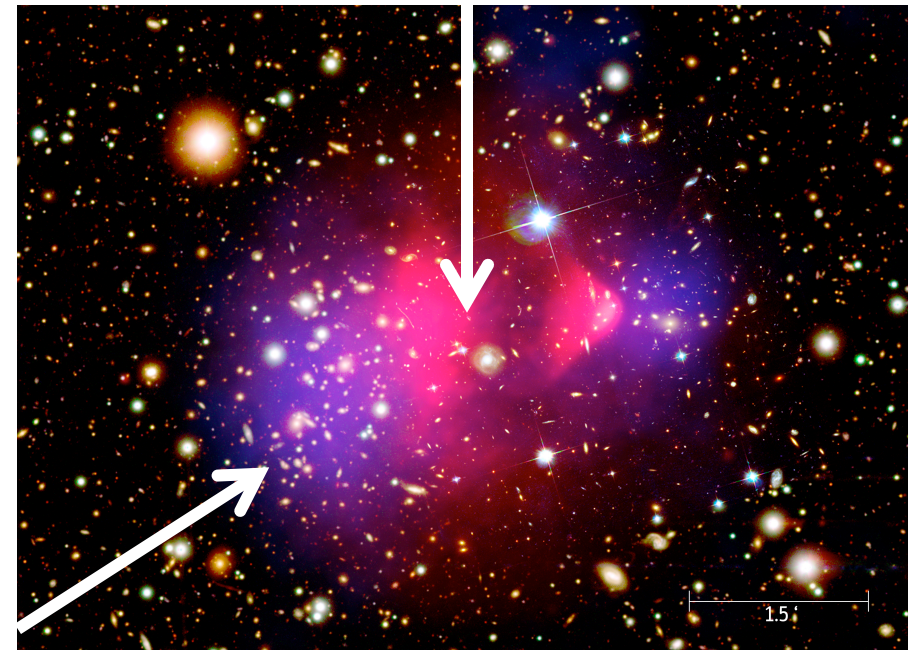
Q4 : comprend-on la composition de l'Univers?



L'expansion de l'univers est plus rapide qu'attendu (Big Bang + relativité générale)
⇒ quelque chose d'autre doit entrer en jeu : "énergie noire"

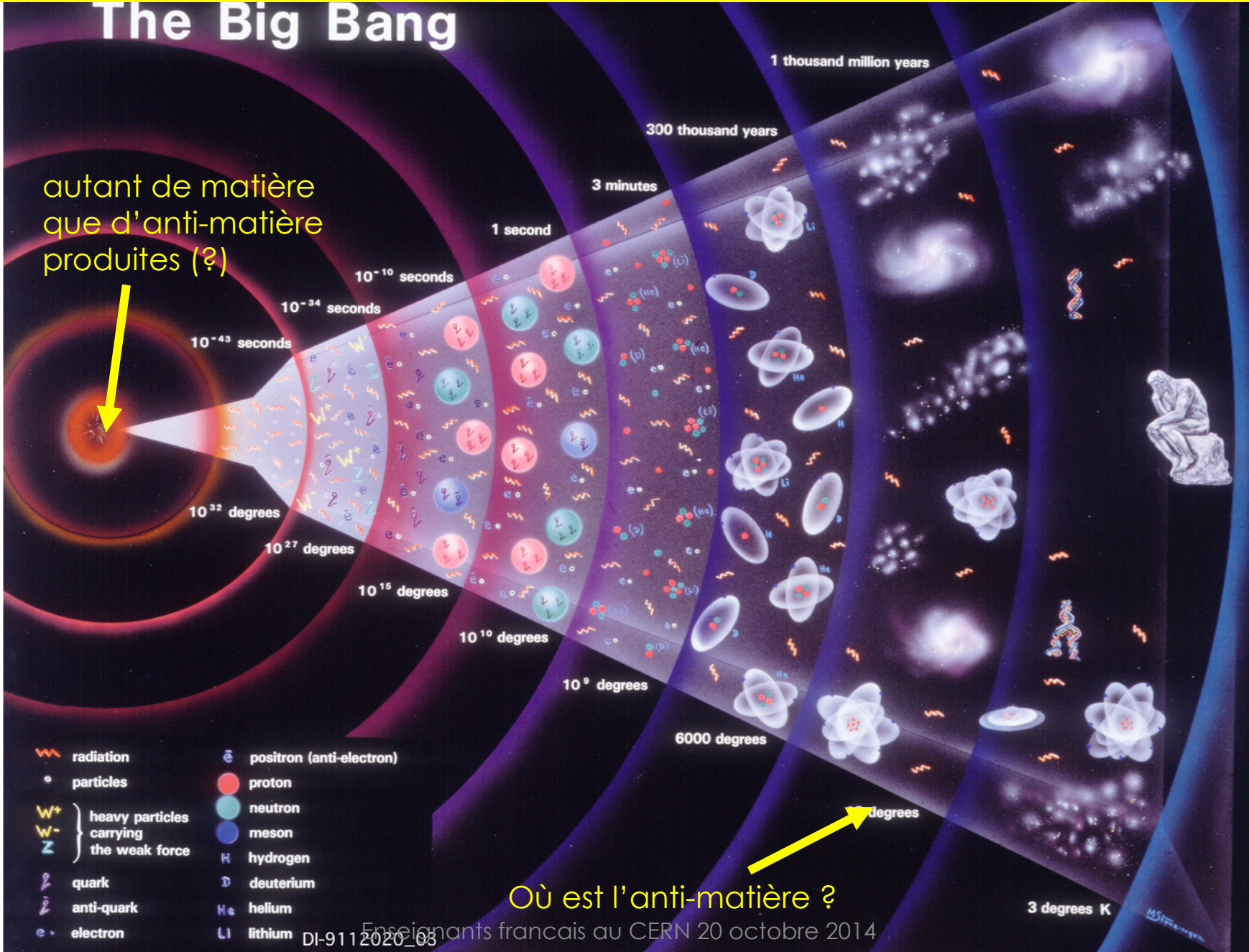
Matière autre que celle du Modèle Standard

Mat. Baryonique (X-rays)



Mat. Noire (weak lensing)

Q5 : mais ou est passée l'anti-matière ?

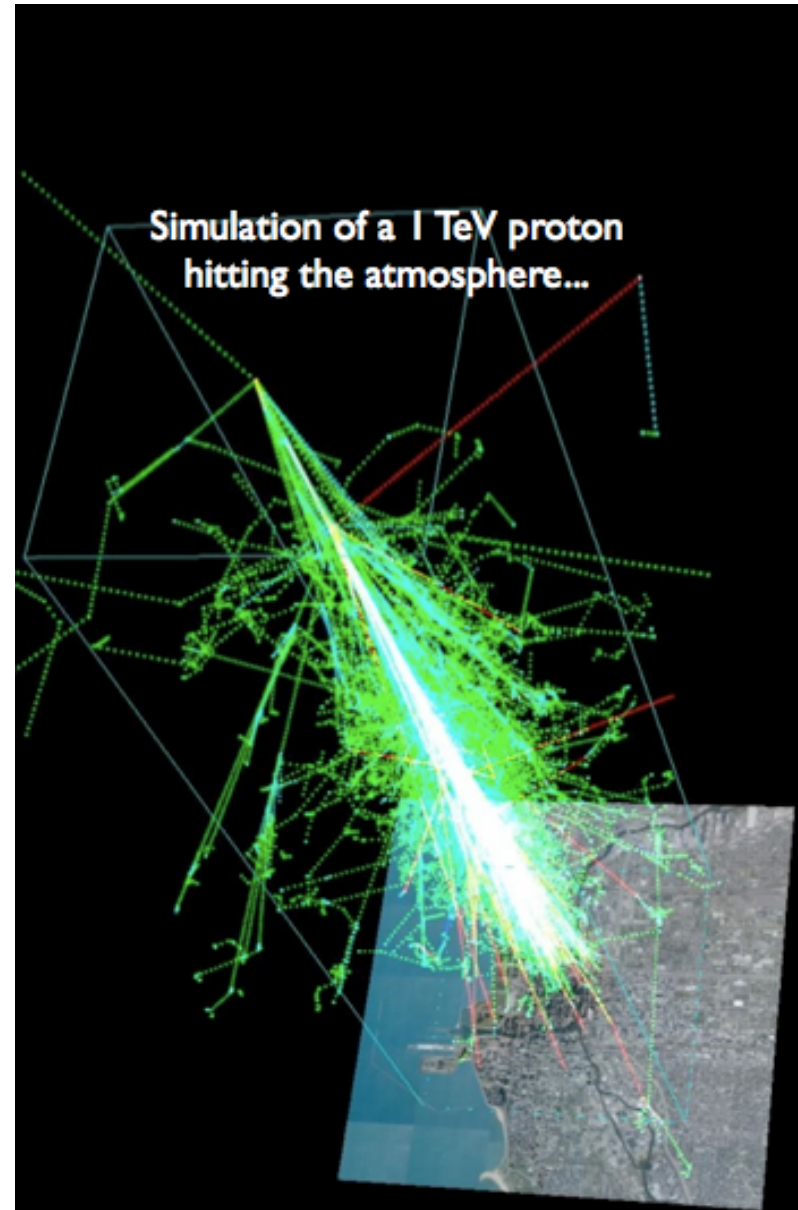


- il y a des anti-particules dans les rayons cosmiques
- mais il faut savoir si le rayon cosmique initial était (ou pas) une anti-particule

Dans la semaine :

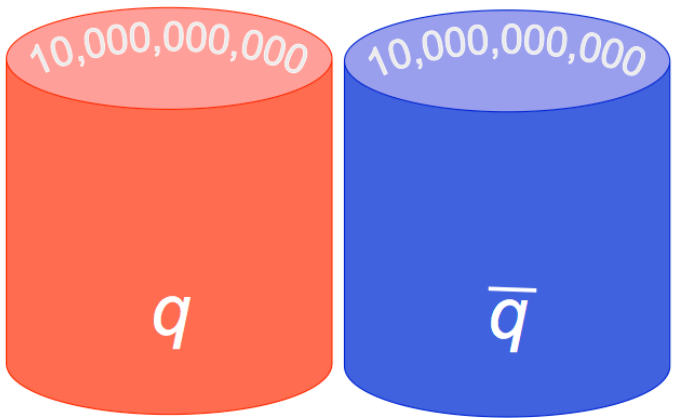
Corinne Berat (mercredi)

Sylvie Rosier (, jeudi AMS)

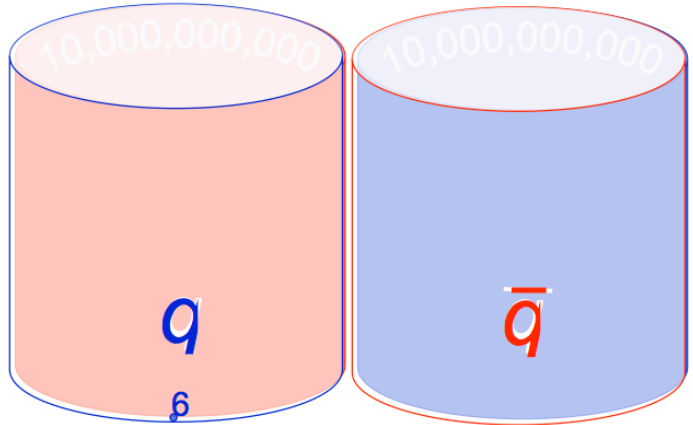


Recherche de l'anti-matière dans l'Univers (bref résumé)

- pas d'anti-noyau vu
- pas d'émission intense de photons due à l'annihilation de galaxies distantes avec de l'antimatière



univers primordial



univers actuel : un tout petit peu de matière et beaucoup de photons $N_{\text{baryons}}/N_{\text{photons}} \sim 6 \cdot 10^{-10}$

Il s'est passé quelque chose qui a favorisé la matière

le mécanisme de violation de CP du Modèle Standard est beaucoup trop faible

Conclusion (?!)

- La physique des particules est née au 20^{ème} siècle
- Elle repose sur des concepts fondamentaux (mécanique quantique et relativité restreinte)
- Nous disposons d'un modèle (« Modèle Standard ») qui est extrêmement puissant et performant
- La physique des particules est le fruit d'un travail conjoint entre expérimentateurs et théoriciens
- De nombreuses questions restent ouvertes
- Certains sont en lien avec l'observation de l'Univers

<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>

Back up slides

Le spin

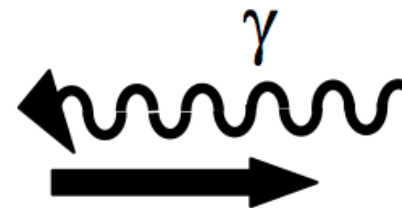
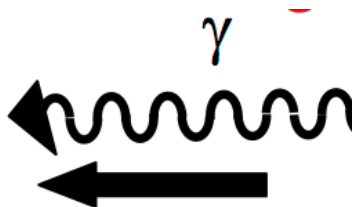
Le spin d'une particule est son moment angulaire intrinsèque : pas d'équivalent classique.

Le spin ne peut prendre que des valeurs entières ou demi-entières.

Une particule de spin demi-entier est un fermion : statistique de Fermi-Dirac : principe d'exclusion de Pauli (deux fermions ne peuvent pas se trouver au même endroit dans le même état quantique)

Une particule de spin entier est un boson : statistique de Bose-Einstein

Polarisation de la lumière : liée à la projection du spin sur l'impulsion du photon



Une particule peut avoir n'importe quel moment orbital L mais son spin S est fixé

	spin entier (Bosons)		spin demi-entier (Fermions)	
	spin 0	spin 1	spin 1/2	spin 3/2
Elémentaire	-	vecteurs des interactions	quarks, leptons	-
Composite	mésons pseudo-scalaires (p,K..)	mésons vecteurs(r,K*)	certaines baryons (octet)	certaines baryons (décuplet)



Pauli et Bohr observant une toupie tippy-top, ou « toupie magique », dont la particularité est de se retourner durant sa rotation (spin).
(Lund, Suède, juillet 1954)