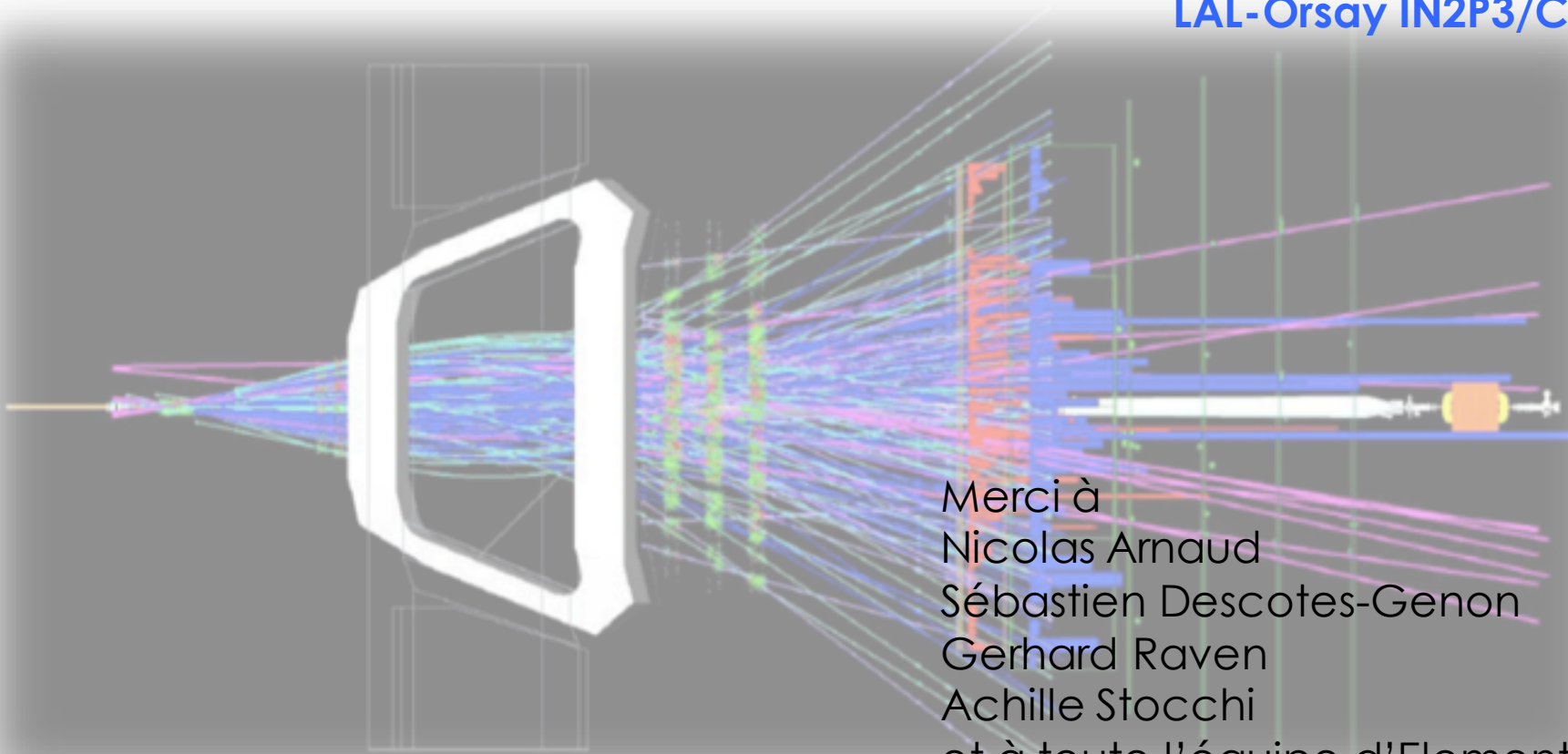


La physique des particules

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

13.09.2010 19:49:24

Préambule

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

LEP-DELPHI (thèse) CERN

LEP-ALEPH

CERN

BaBar

SLAC

LHCb

CERN

SoLid

BR2@Mol (Belgique)

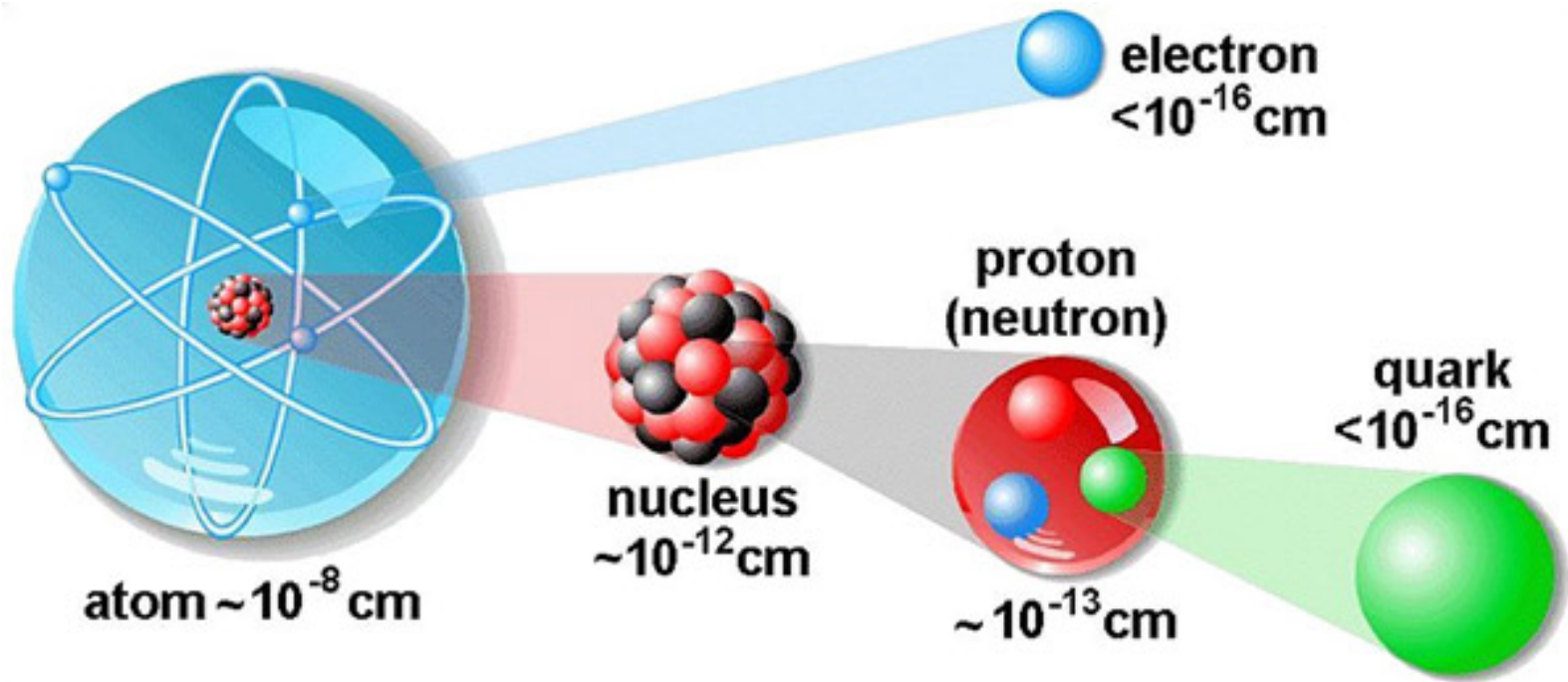


Plans des trois cours

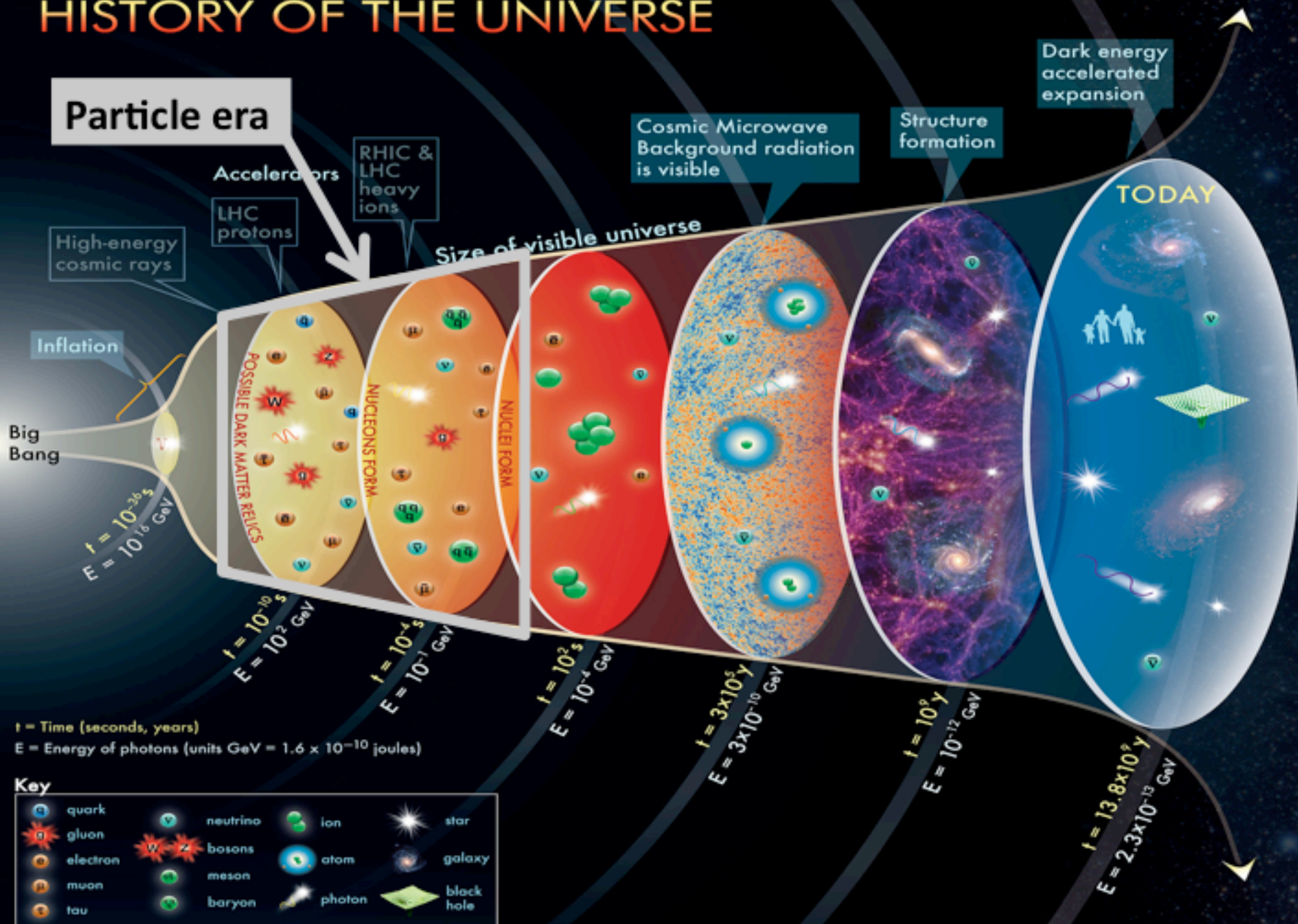
- Mise en place du paysage
 - introduction
 - mécanique quantique et relativité : ondes et particules
 - rayons cosmiques et accélérateurs de particules
- La physique des particules aujourd'hui 1/2
 - les constituants élémentaires
 - « voir » les particules
 - les interactions et QED
 - les symétries
- 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

Infiniment petit



HISTORY OF THE UNIVERSE



t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

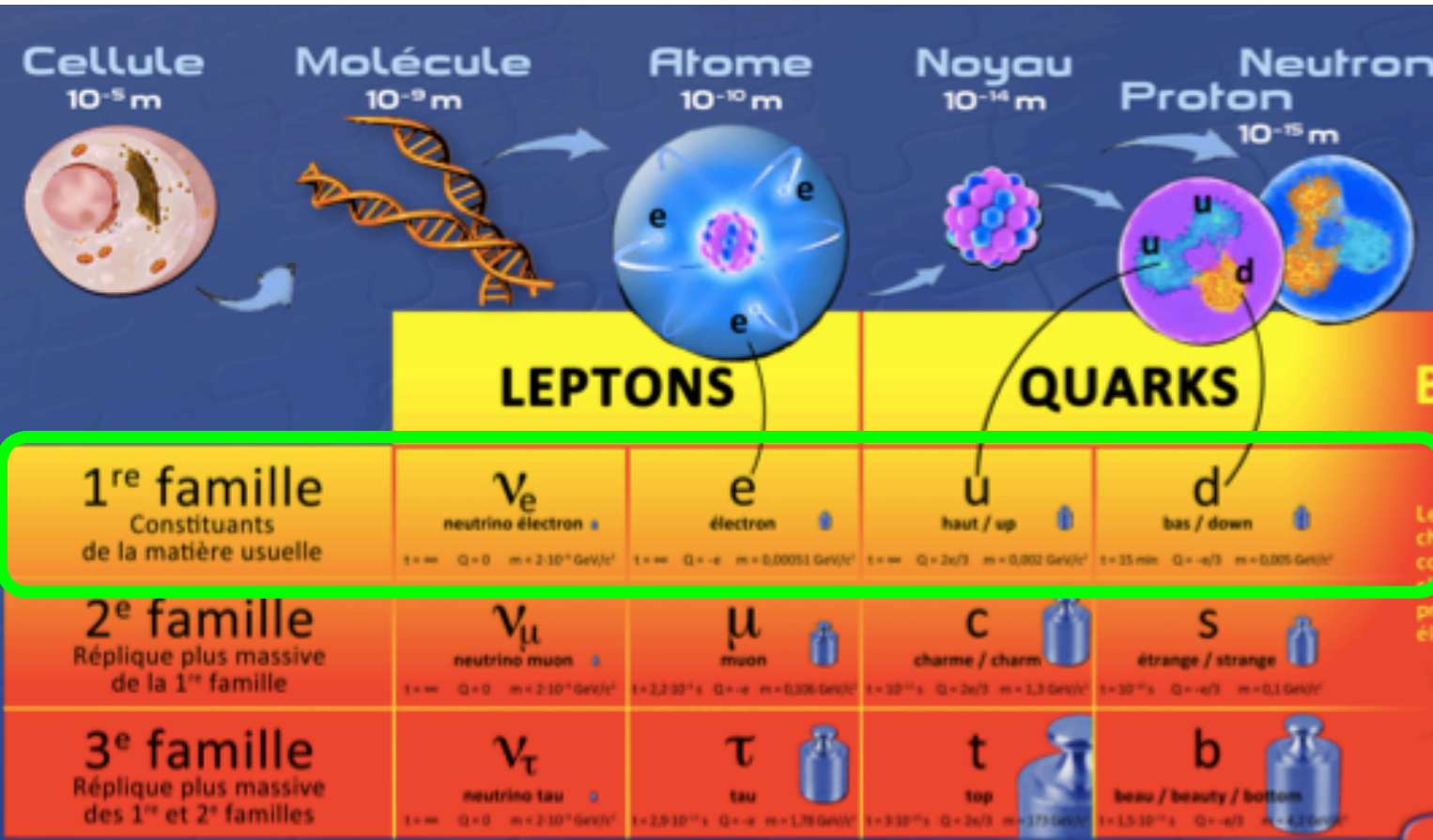
Key

	quark		neutrino		ion		star
	gluon		bosons		atom		galaxy
	electron		meson		photon		black hole
	muon		baryon				
	tau						

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

...à l'autre

particules de matière
spin 1/2



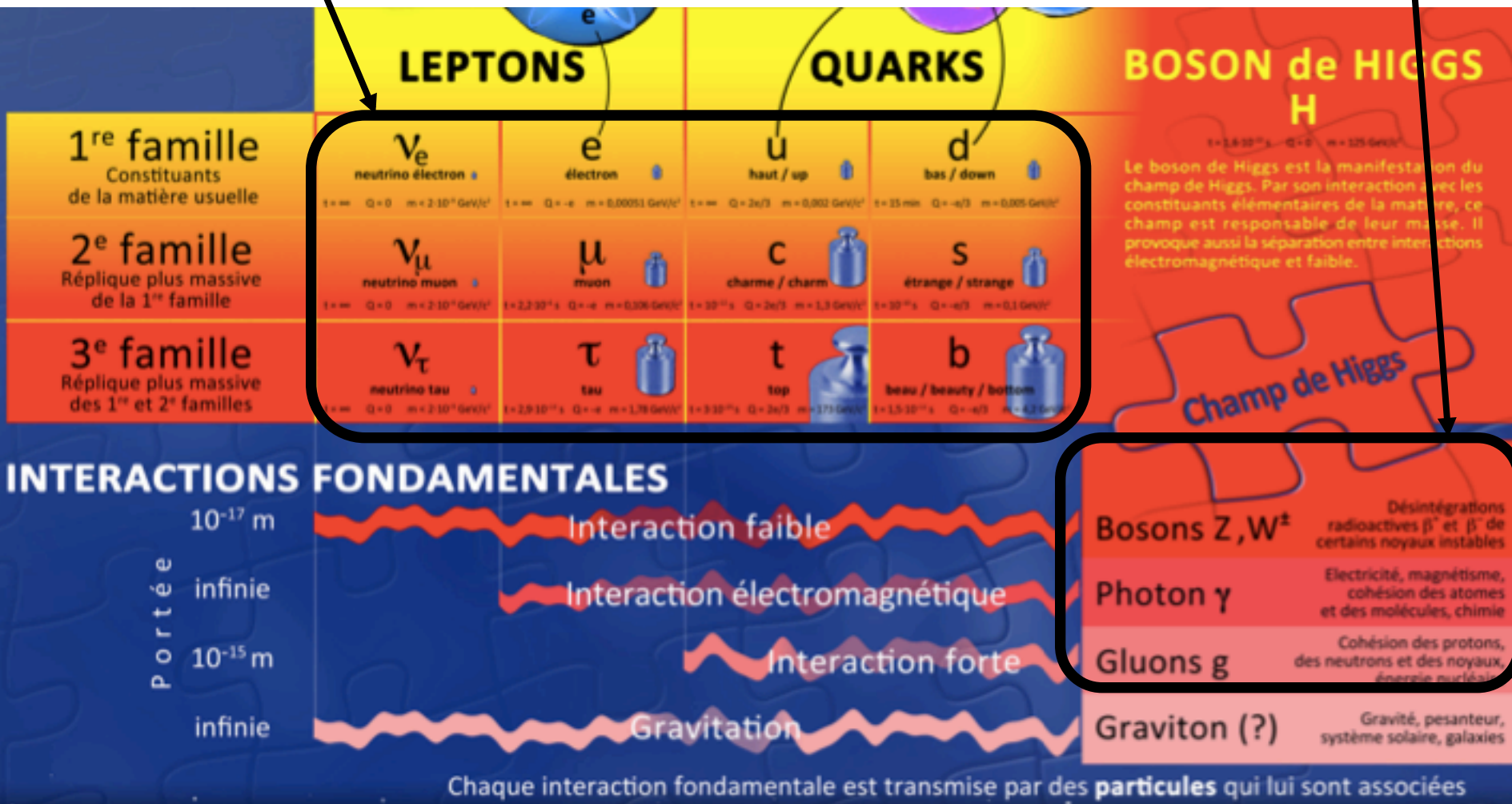
matière
ordinaire

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

particules de matière
spin $\frac{1}{2}$ (fermions)

et le boson de
Higgs (spin 0)

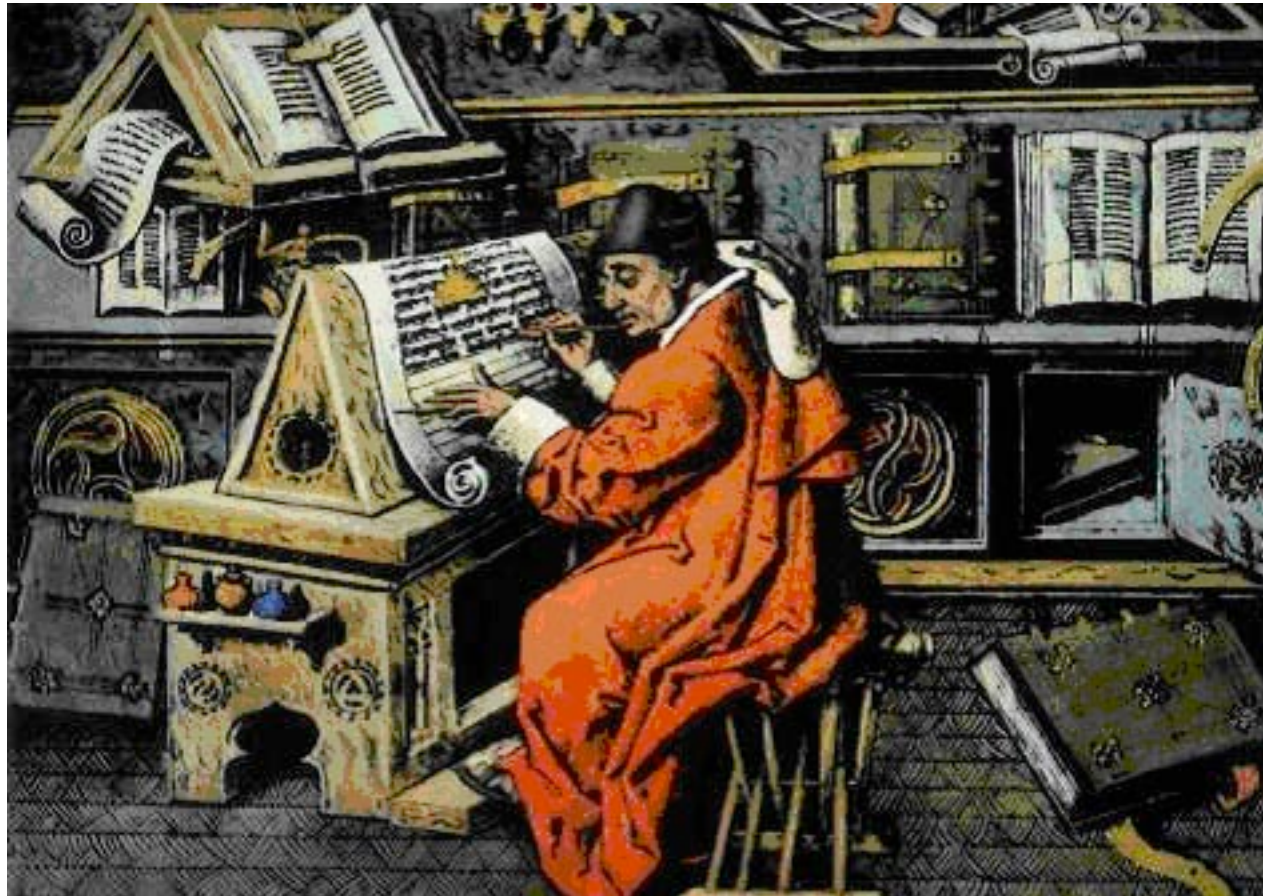
particules vecteurs
des interactions
spin 1 (boson)



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

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

Néanmoins ...

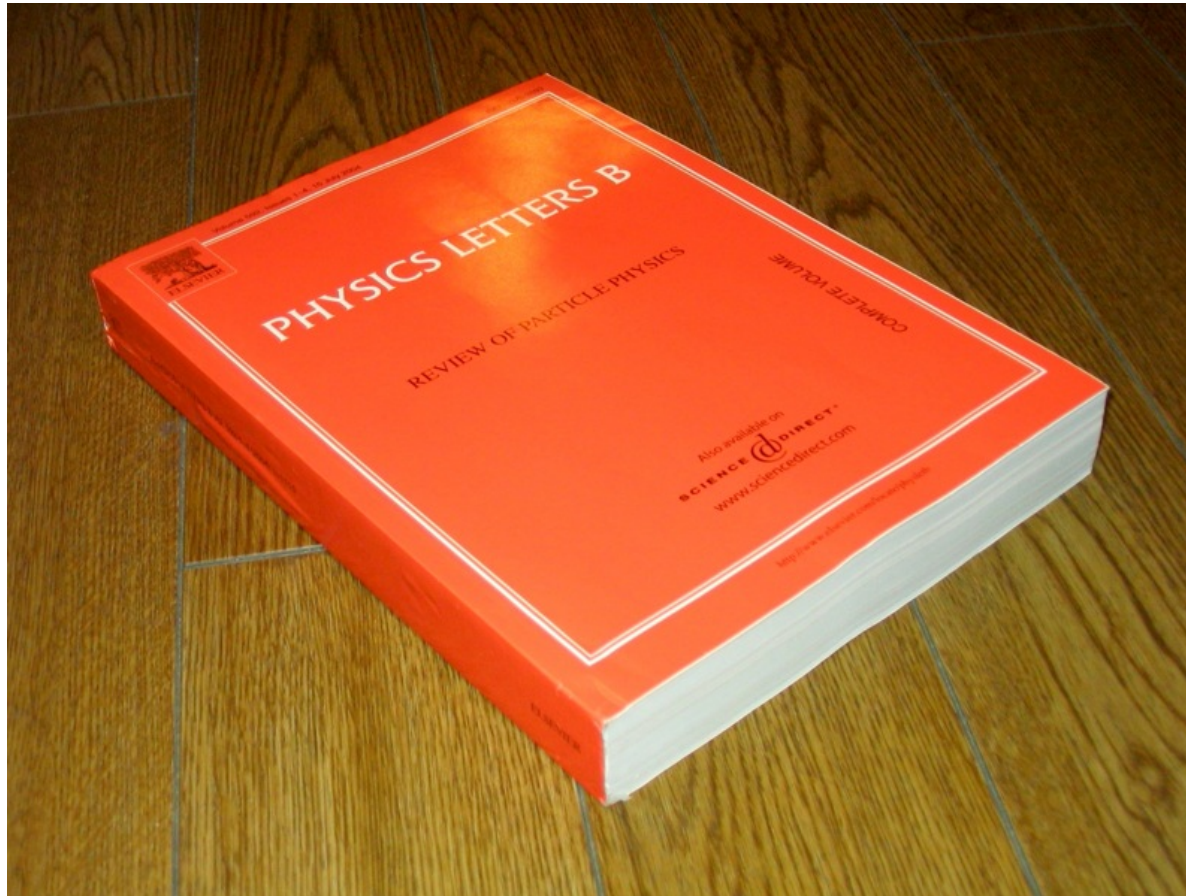


© V. Gligorov

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

Néanmoins ...

Notre bible moderne

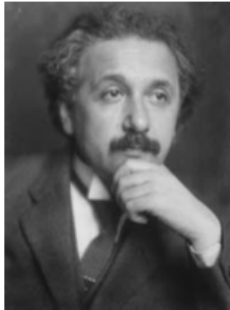


© V. Gligorov

Physique quantique et relativiste

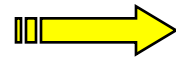
Relativité

Albert Einstein



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

Masse/Énergie



Production de nouvelles particules

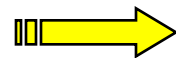
Mécanique
Quantique

Niels Bohr



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

Corpuscule/Onde



Sonder la structure de la
matière

La relativité restreinte

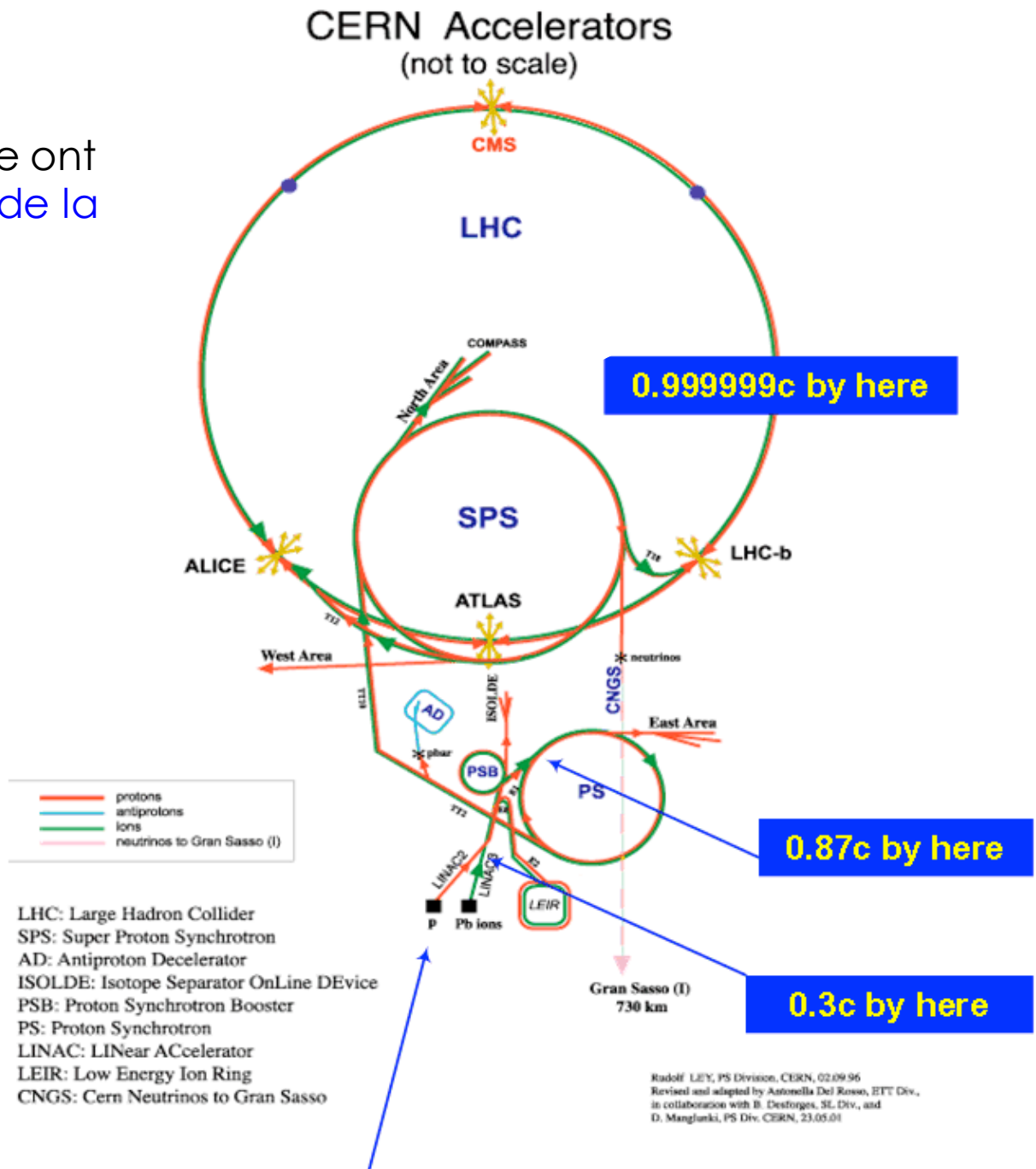
Les particules que l'on étudie ont une vitesse proche de celle de la lumière

Dilatation des temps
 Contraction des longueurs

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

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$t = \gamma\tau$$



Stadof, LEIR, PS Division, CERN, 02.09.96
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,
 in collaboration with B. Desforges, SE Div., and
 D. Manglunki, PS Div. CERN, 23.05.01

La plupart des particules sont instables, leur durée de vie est mesurée dans le référentiel où la particule est au repos.

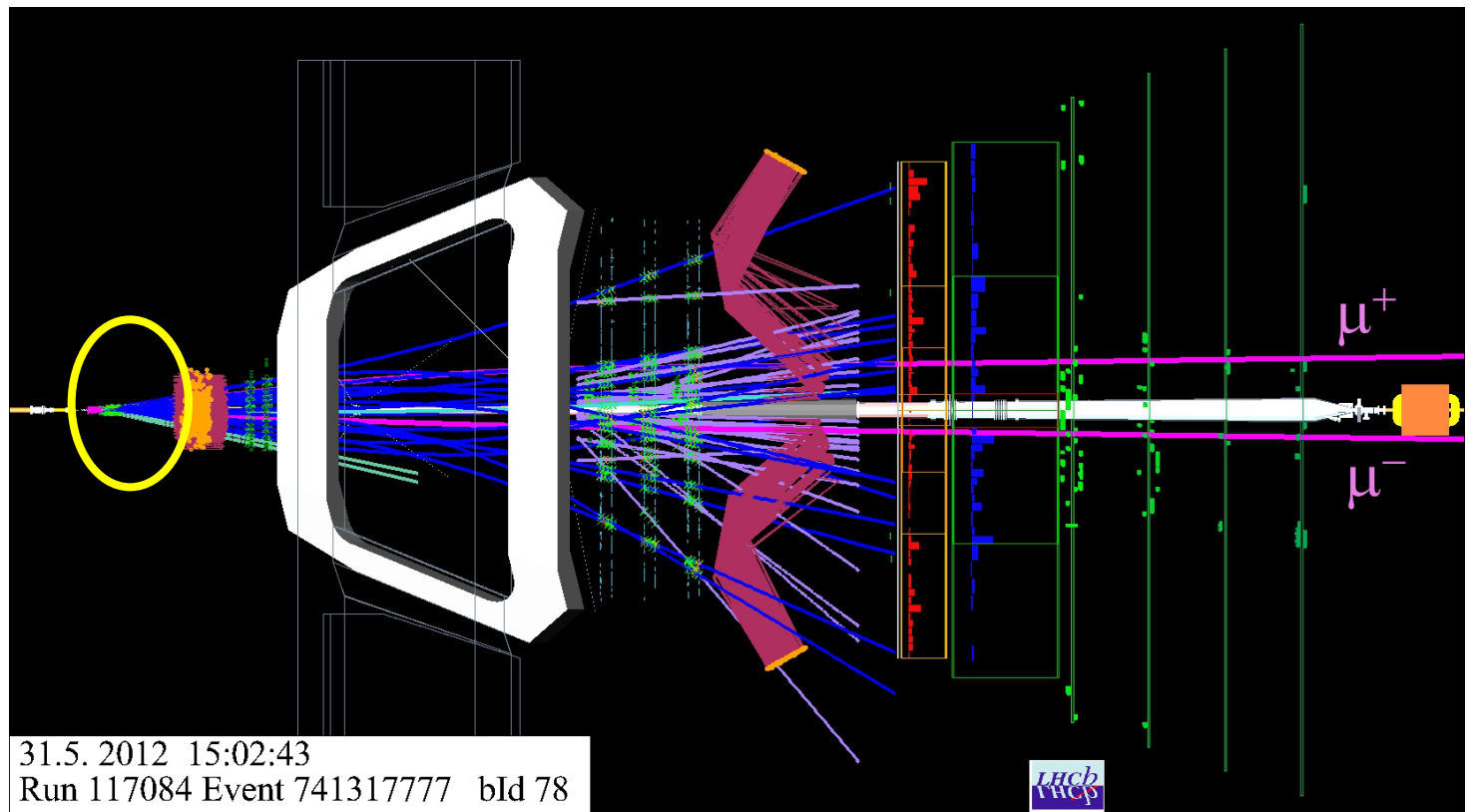
Dans le référentiel du laboratoire c'est très différent :

- ex les mésons B ($\bar{b}q$) durée de vie $\sim 1.5 \cdot 10^{-12}$ s volent au LHC ~ 1 cm avant de se désintégrer
- Certaines particules semblent stables !

$$B_s \rightarrow \mu \mu$$

$$\tau = 1.5 \text{ ps}$$

$$\bar{b}s$$



La plupart des particules sont instables, leur durée de vie est mesurée dans le référentiel où la particule est au repos.

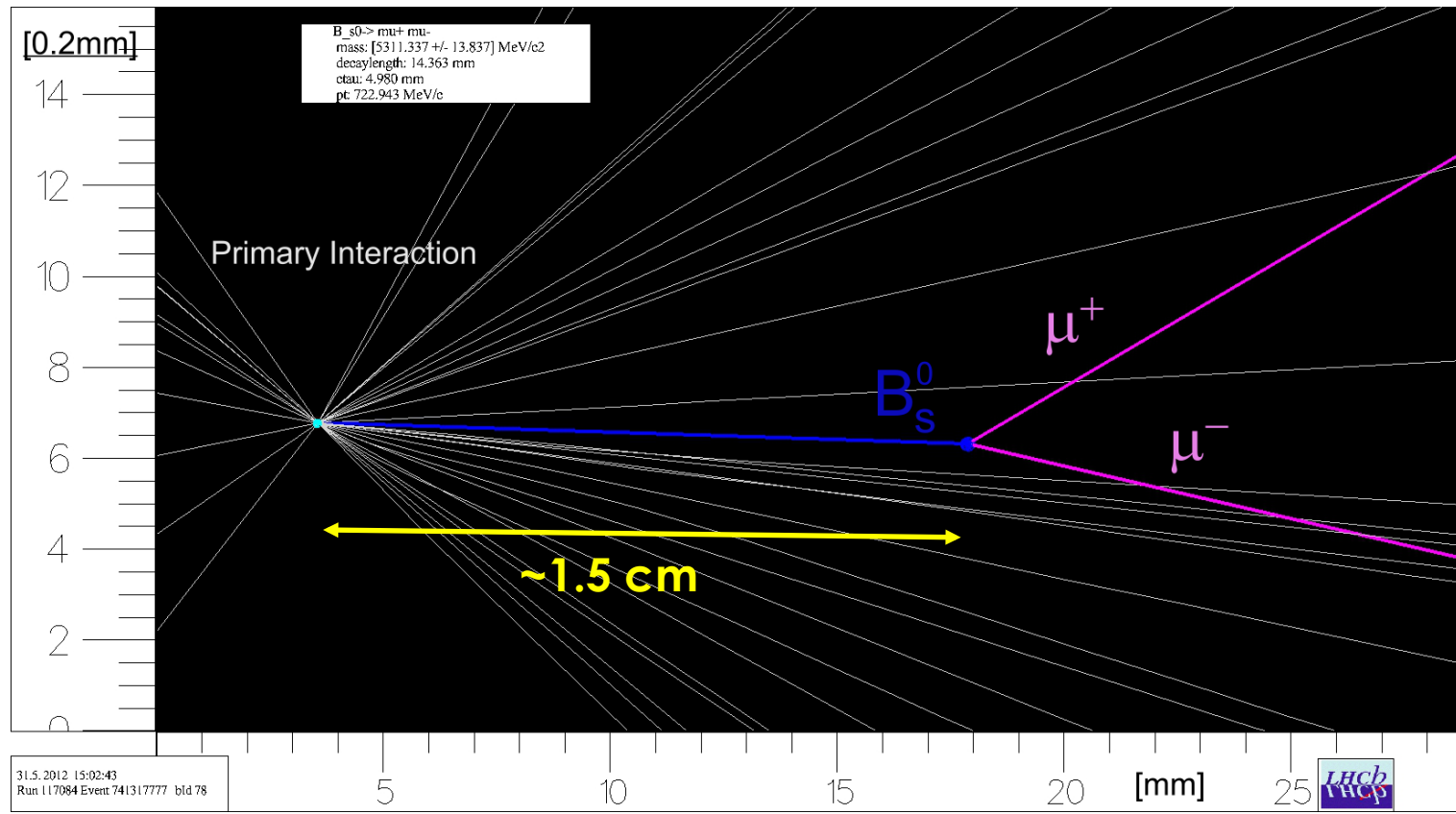
Dans le référentiel du laboratoire c'est très différent :

- ex les mésons B ($\bar{b}q$) durée de vie $\sim 1.5 \cdot 10^{-12}$ s volent au LHC ~ 1 cm avant de se désintégrer
- Certaines particules semblent stables !

$B_s \rightarrow \mu \mu$

$\tau = 1.5$ ps

$\bar{b}s$



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 ?

Les particules composites :

masse = somme des masses – énergie de liaison

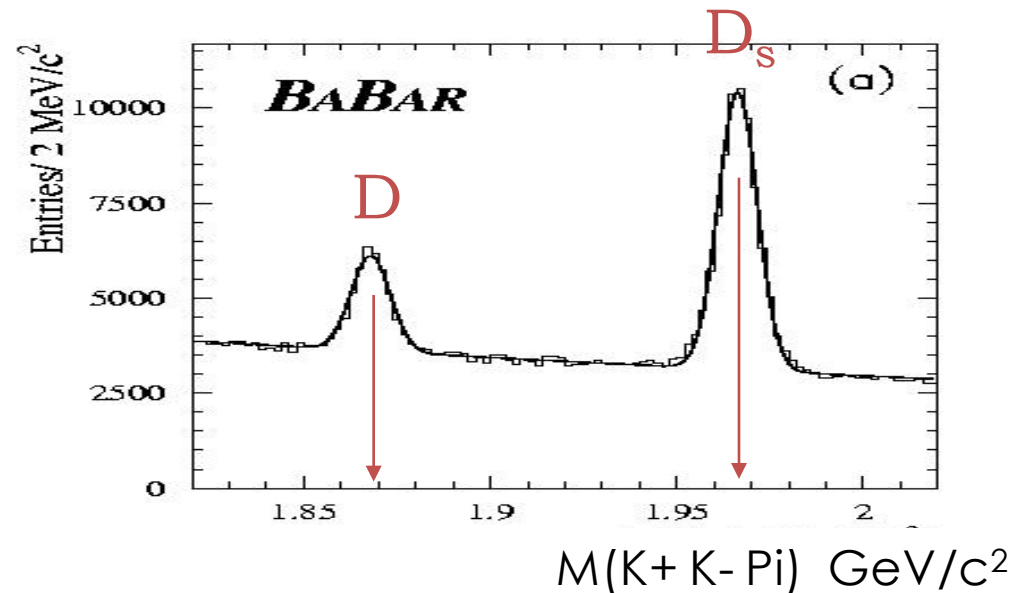
Lorsque des particules se désintègrent :

$a \rightarrow 1+2$

$$M_a = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Effet de résolution du détecteur

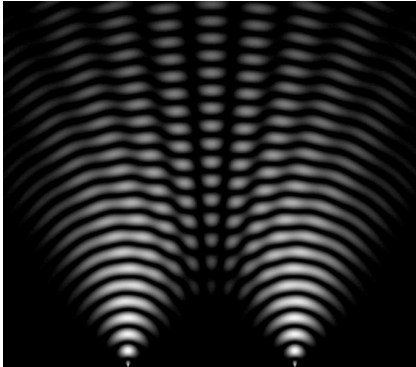
$D : (c\bar{d})$ $D_s : (c\bar{s})$



Mais d'où vient la masse des particules élémentaires?

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

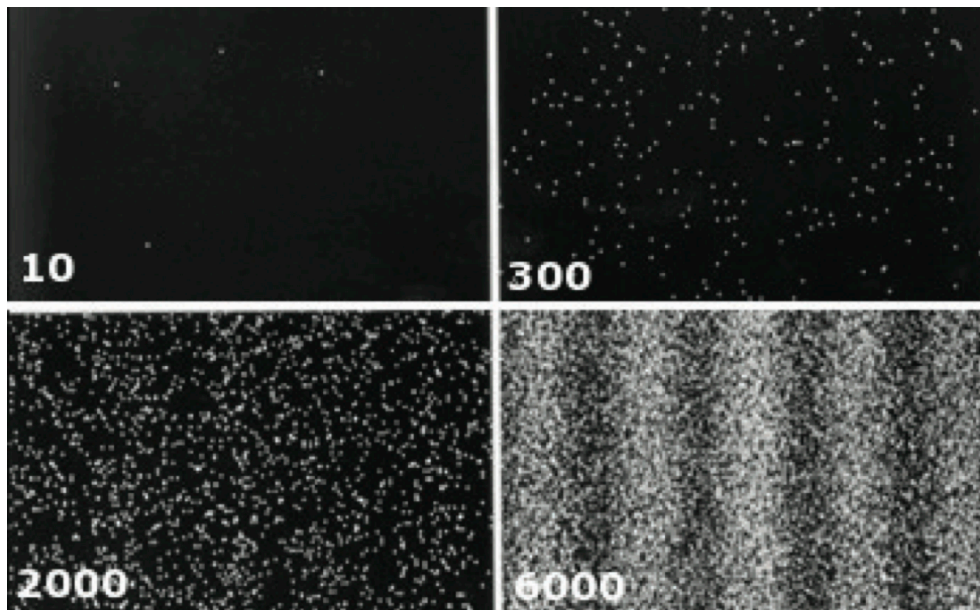
$$E_{\text{photon}} = h\nu$$

Et cela fonctionne pour toutes les particules élémentaires !

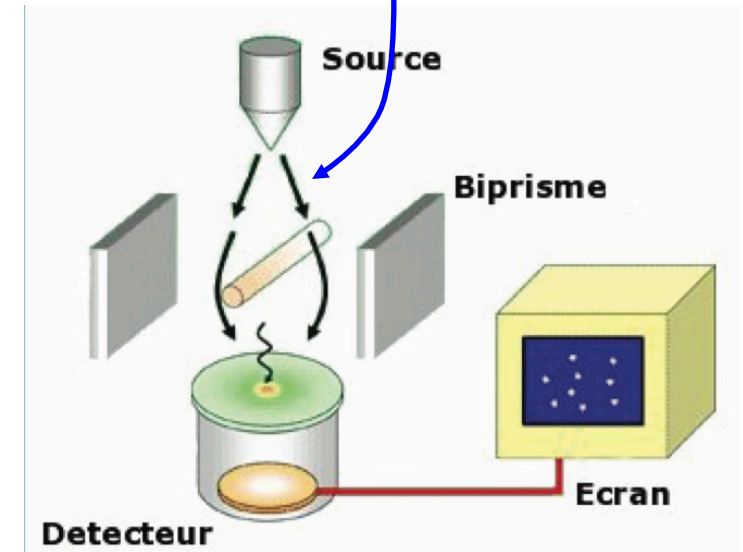
$$p = \frac{h}{\lambda} \leftarrow \text{longueur d'onde}$$

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

Mesure sur l'écran

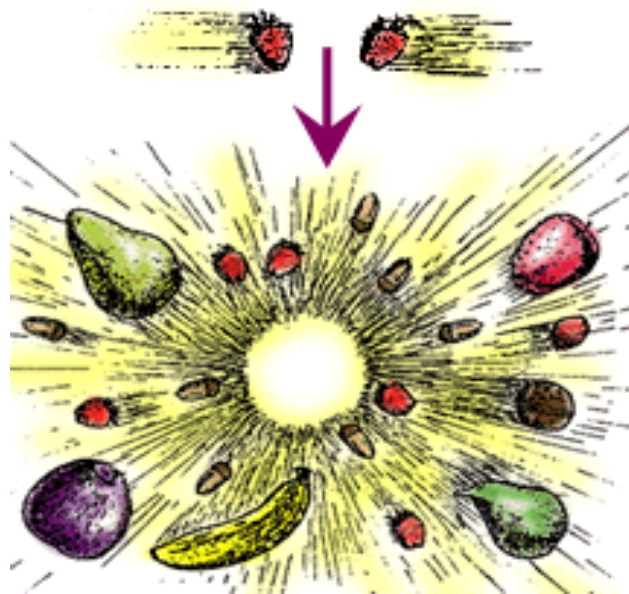


deux faisceaux d'électrons



rayons cosmiques et accélérateurs de particules

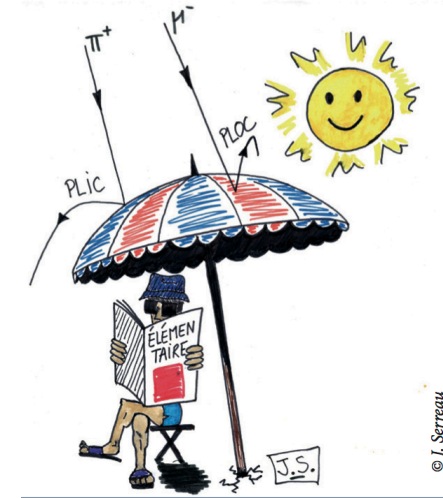
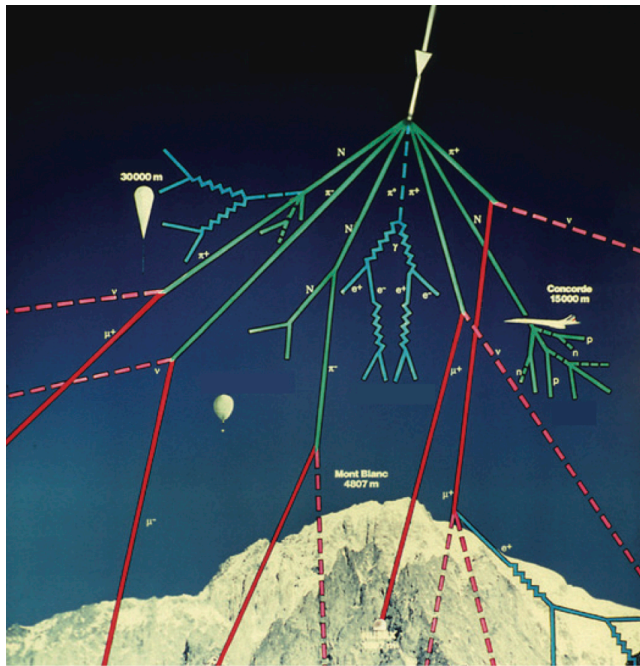
Production de nouvelles particules:



Masse/Énergie

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

Le premier accélérateur de particules :



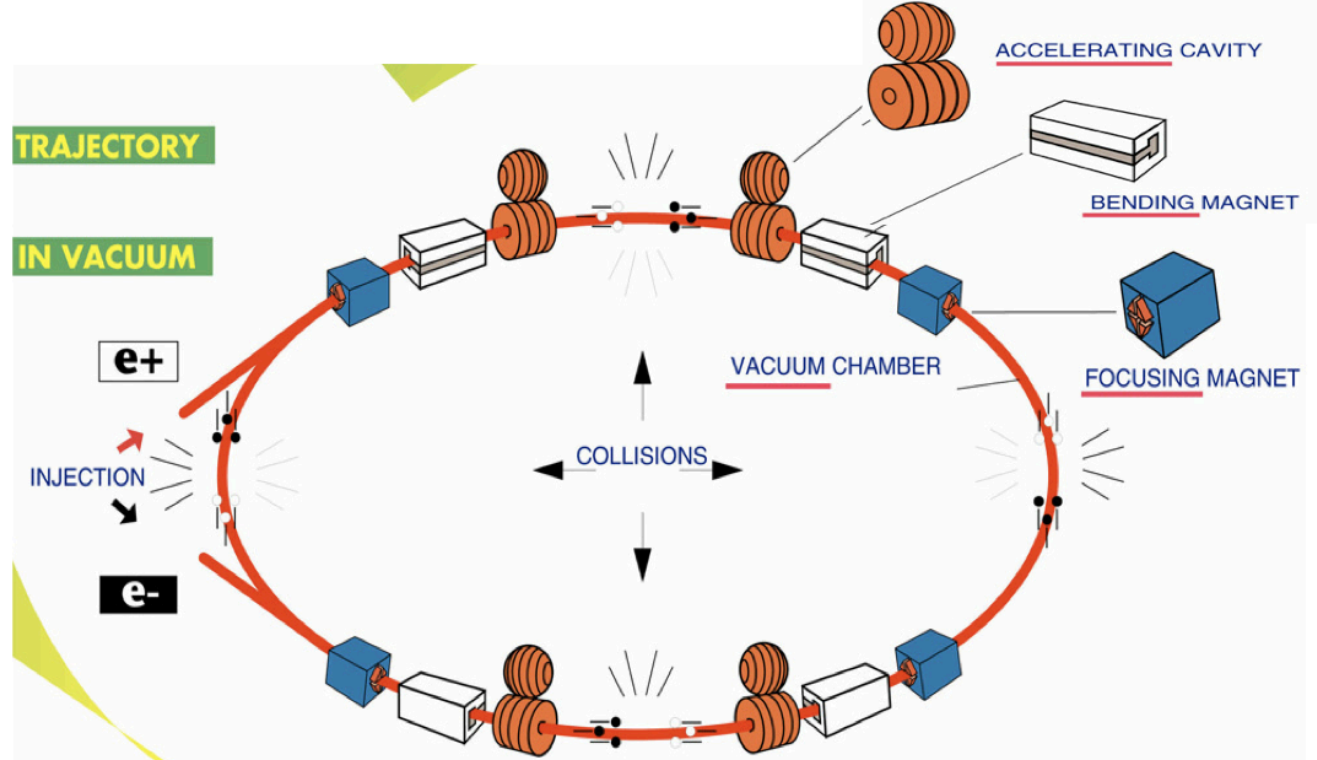
Au niveau du sol : 240
particules chargées par m^2
et par seconde

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: $s = (2E_a)^2$

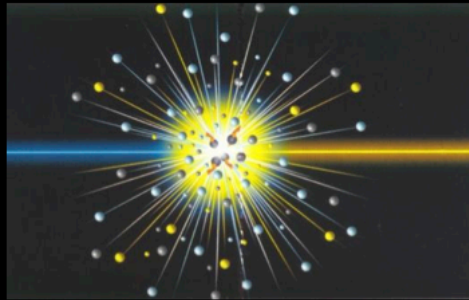
cible fixe: $s = 2m_a \times (m_a + E_a)$

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

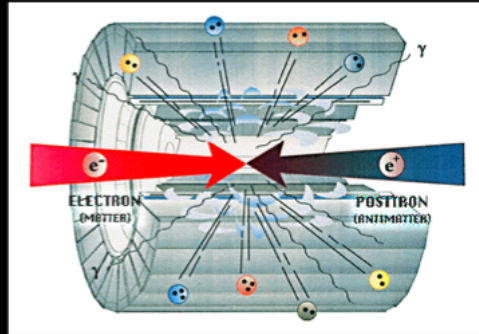
proton de 100 GeV contre une cible fixe (proton au repos) : $\sqrt{s} = 14$ GeV

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

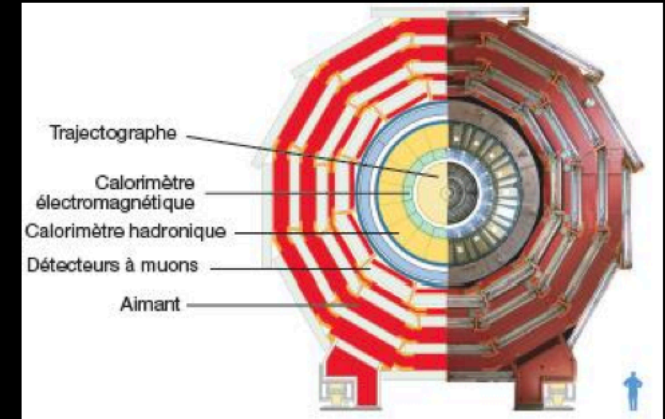
Accélérateur



$$E = mc^2$$



Détecteur



Une grande énergie disponible :

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

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

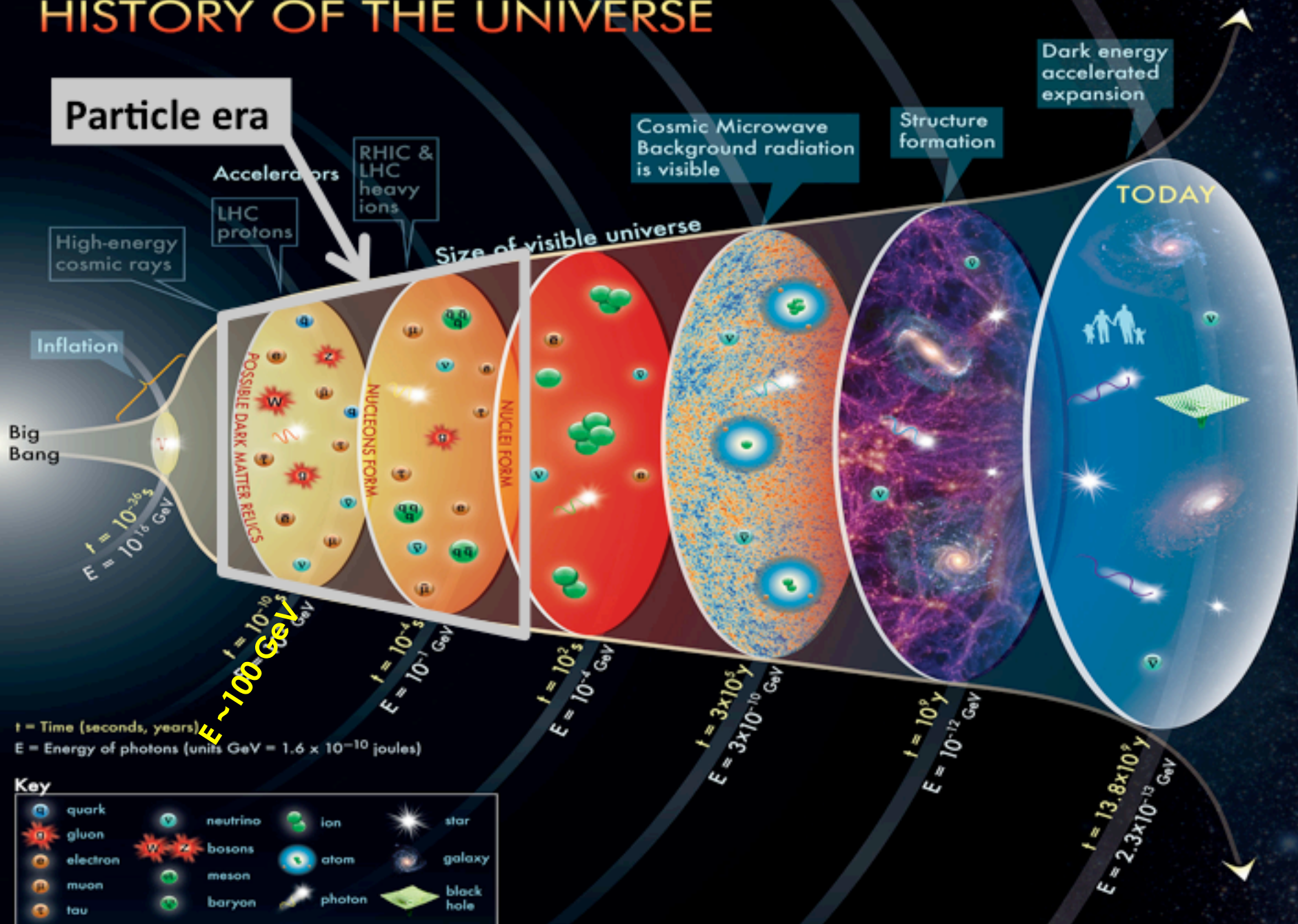
$$E = Mc^2$$

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

Un très grand nombre de collisions :

- On a accès à des phénomènes très rares

HISTORY OF THE UNIVERSE



t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

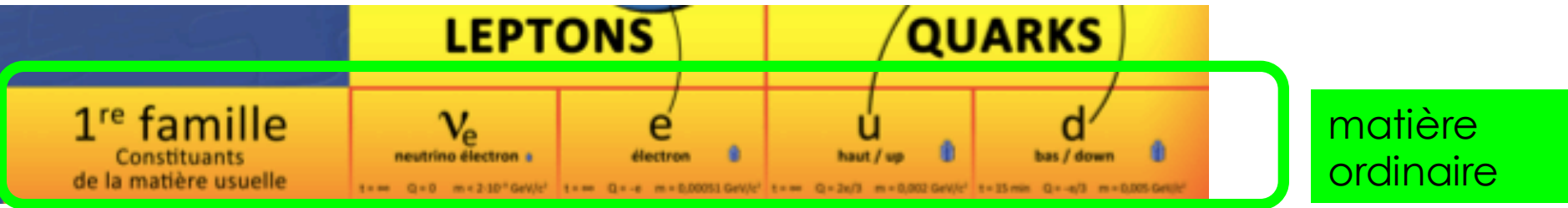
Key

quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

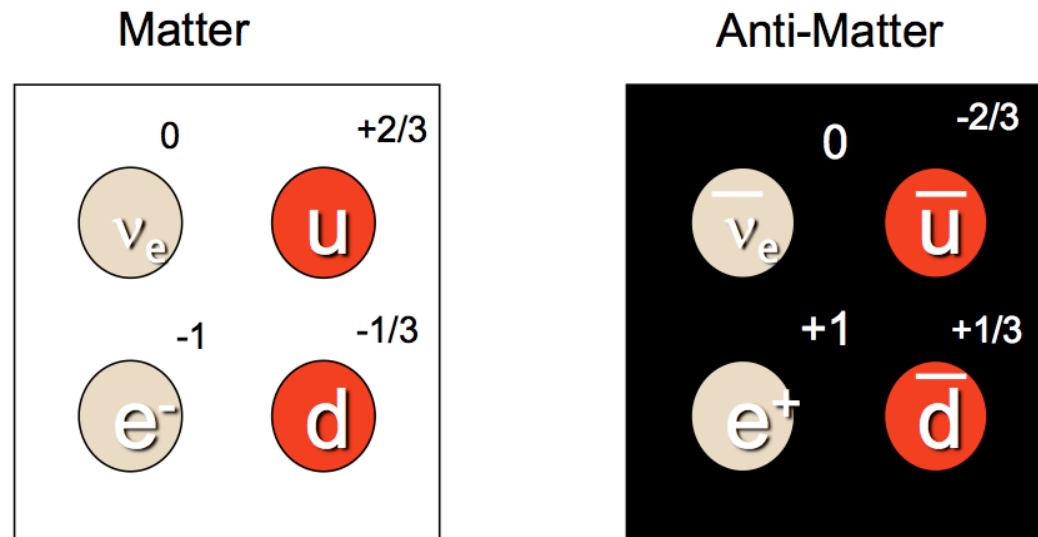
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

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

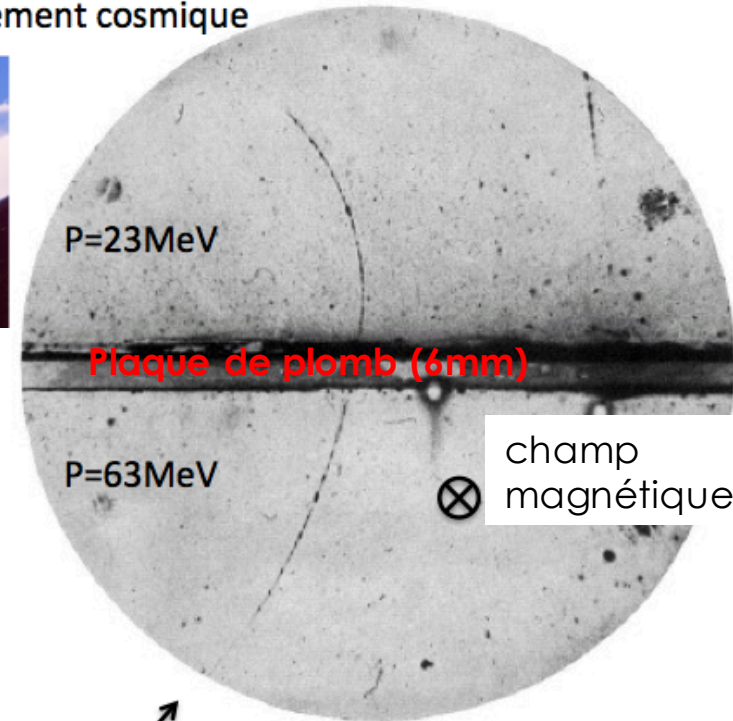
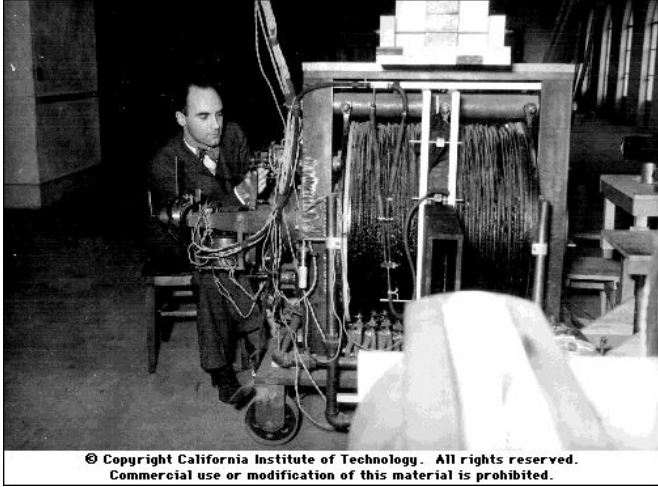
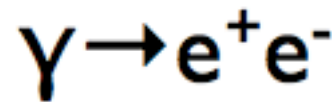


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 7.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

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 ($< 20 m_e$)

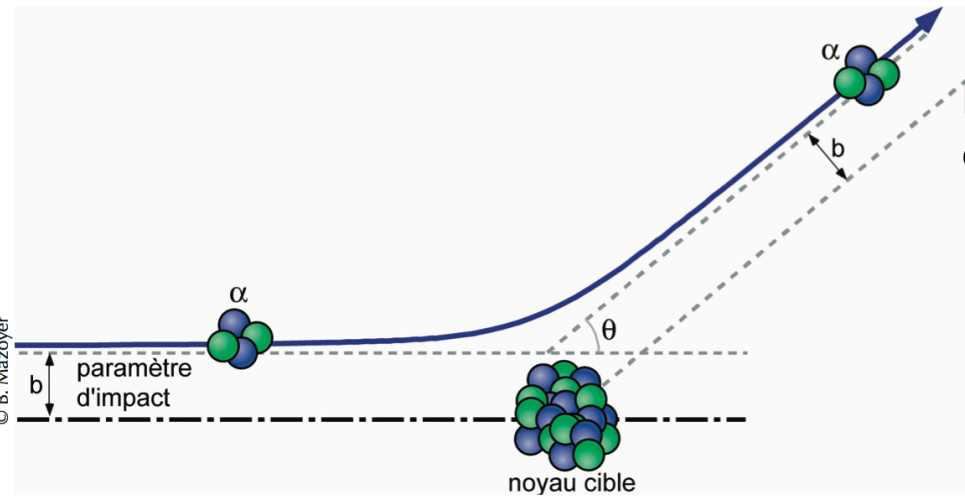
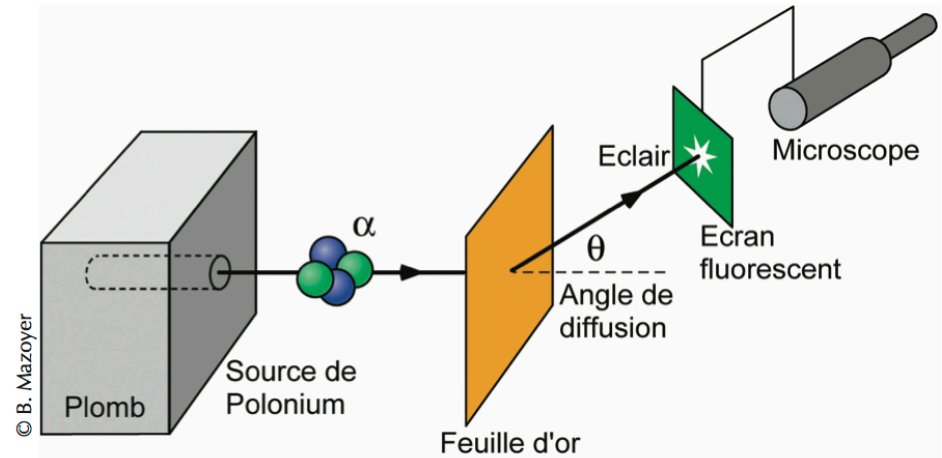
Il s'agit de l'anti-électron : le positron



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

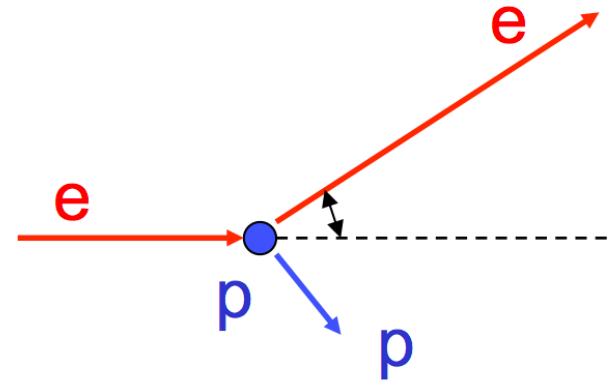
$$b = \frac{Ze^2}{E} \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

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

Protons et neutrons sont composites

Expérience similaire à celle de Rutherford

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

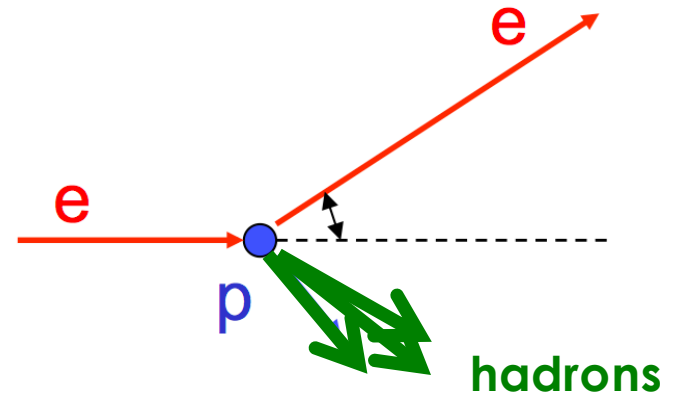


- Même résultat pour le neutron
- Même expérience avec une cible d'électrons \Rightarrow aucun effet de taille!

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

On pense que l'électron est ponctuel

- Diffusion inélastique



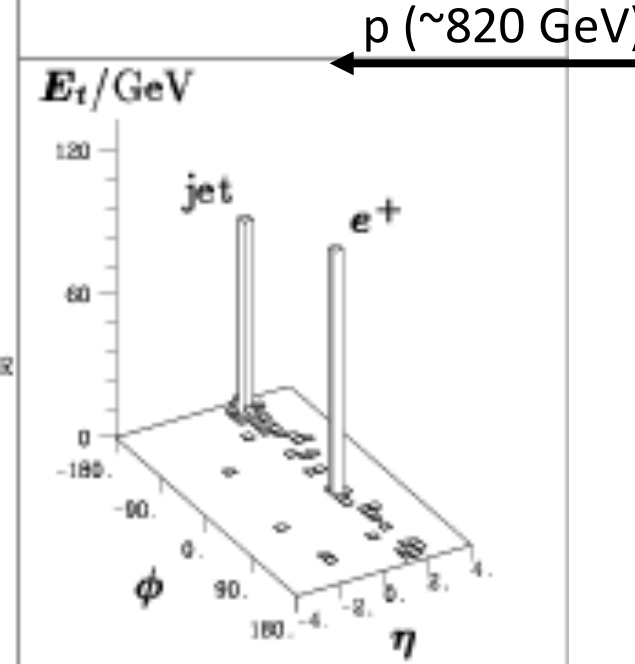
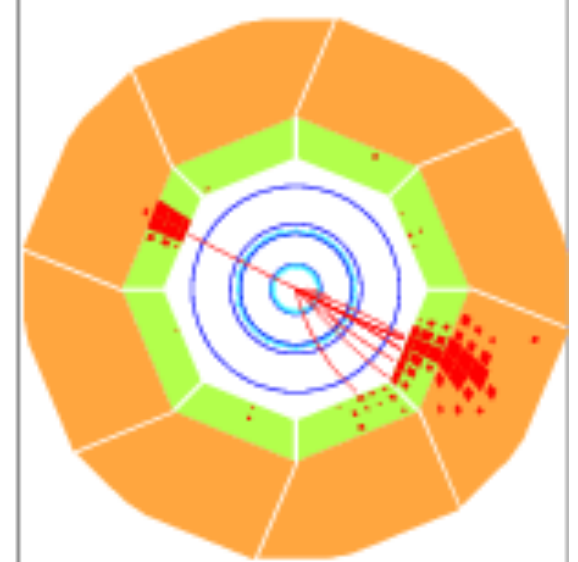
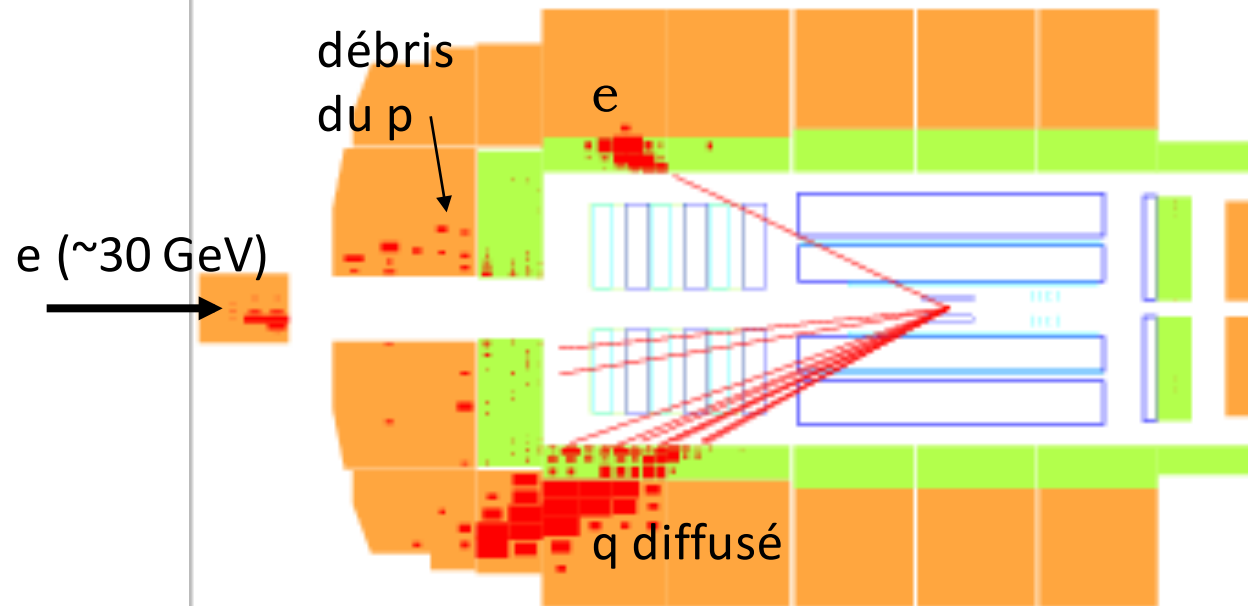
comportement identique à celui de diffusions élastiques sur des **objets ponctuels** \Rightarrow quarks

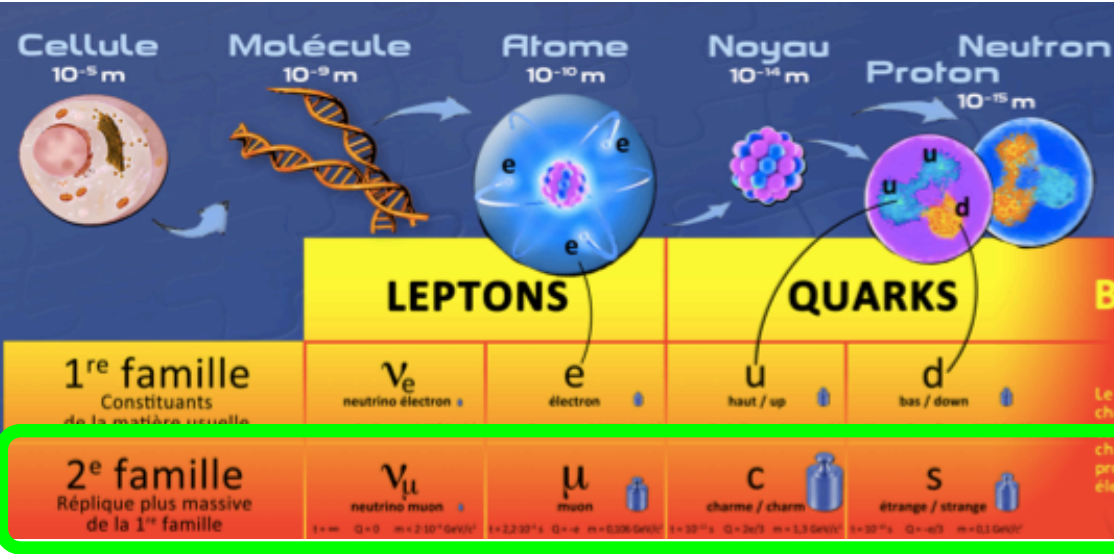
\Rightarrow aucun effet de taille des quarks!

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

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)

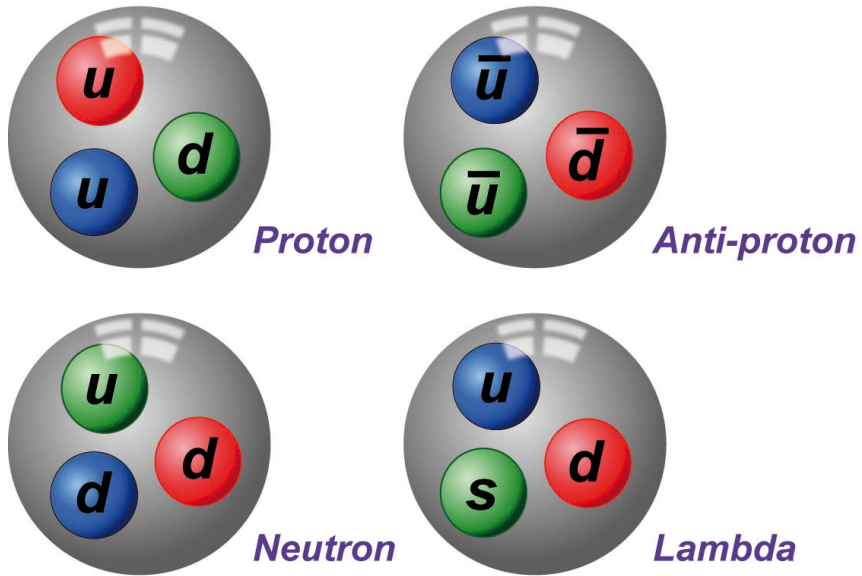
Certaines de ces particules sont instables : ex le muon $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6}$ s dans les collisions ils sont produits avec une énergie de quelques dizaines de GeV (au LHC)

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

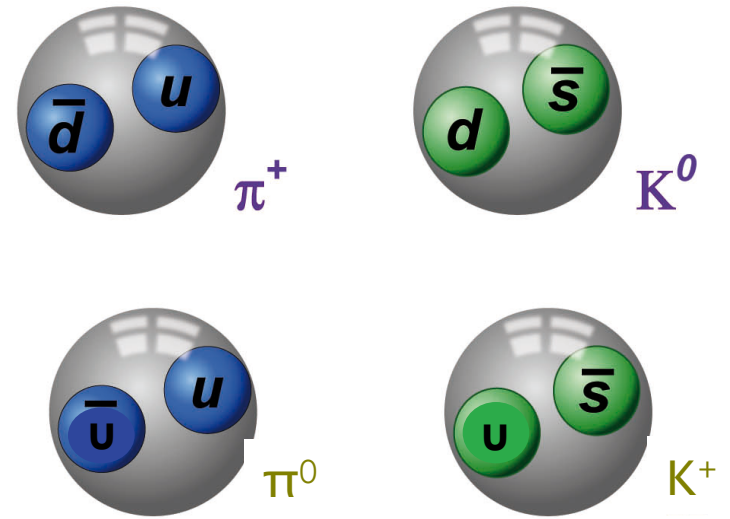
Mais on n'observe pas de quarks libres comme on observe des électrons ...

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
Quark top

1977 particules de « beauté »

Mais pourquoi trois familles ?

Matière

	1 ^{ere} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille
lepton	e^-	μ^-	τ^-
	ν_e	ν_μ	ν_τ
quark	u	c	t
	d	s	b

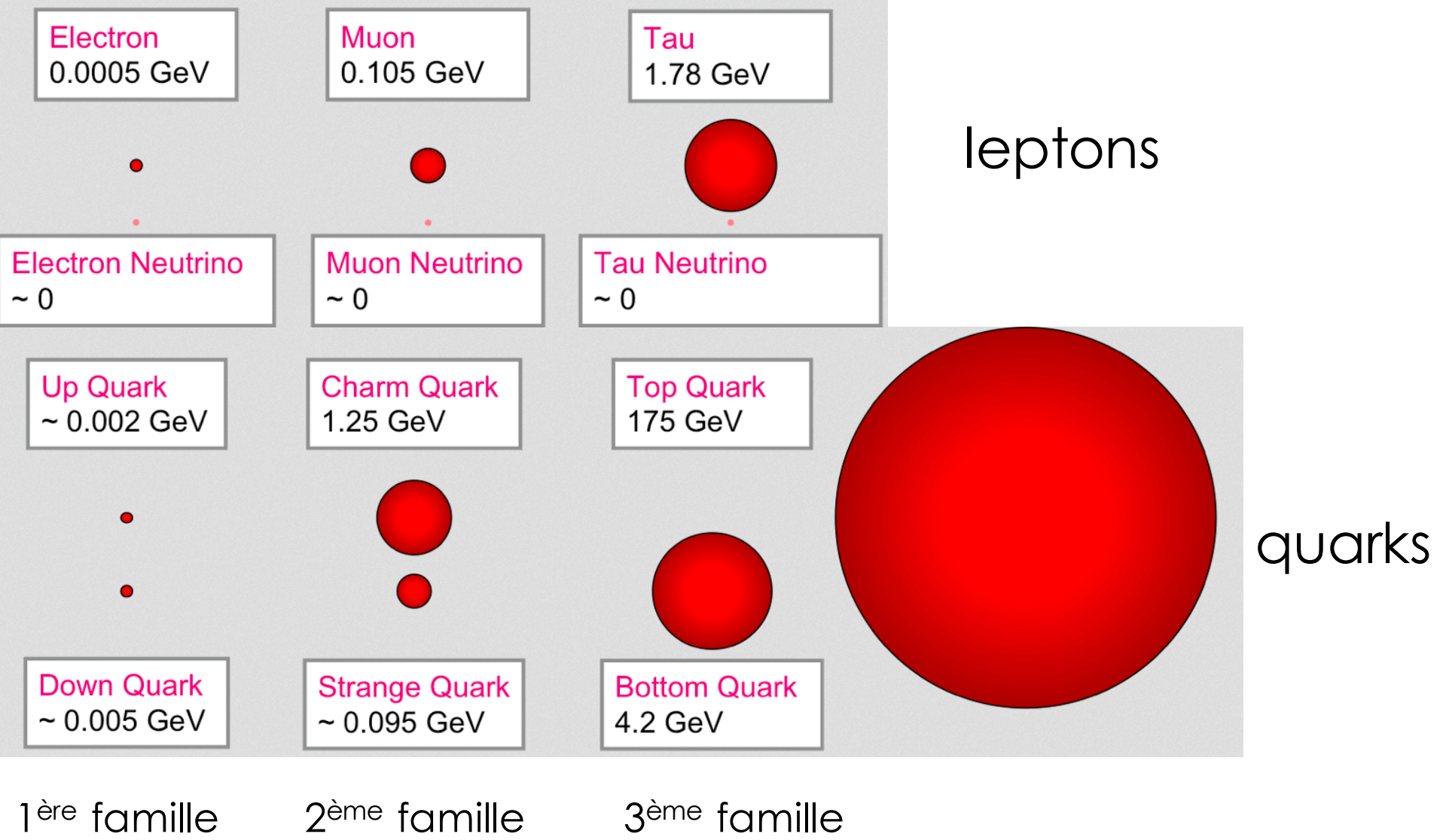
+ antimatière !

- Même masse
- Même durée de vie
- Charges (électrique,...) opposées

Antimatière

	1 ^{ere} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille
anti-lepton	e^+	μ^+	τ^+
	$\overline{\nu_e}$	$\overline{\nu_\mu}$	$\overline{\nu_\tau}$
anti-quark	\overline{u}	\overline{c}	\overline{t}
	\overline{d}	\overline{s}	\overline{b}

**Matière + antimatière →
énergie**



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

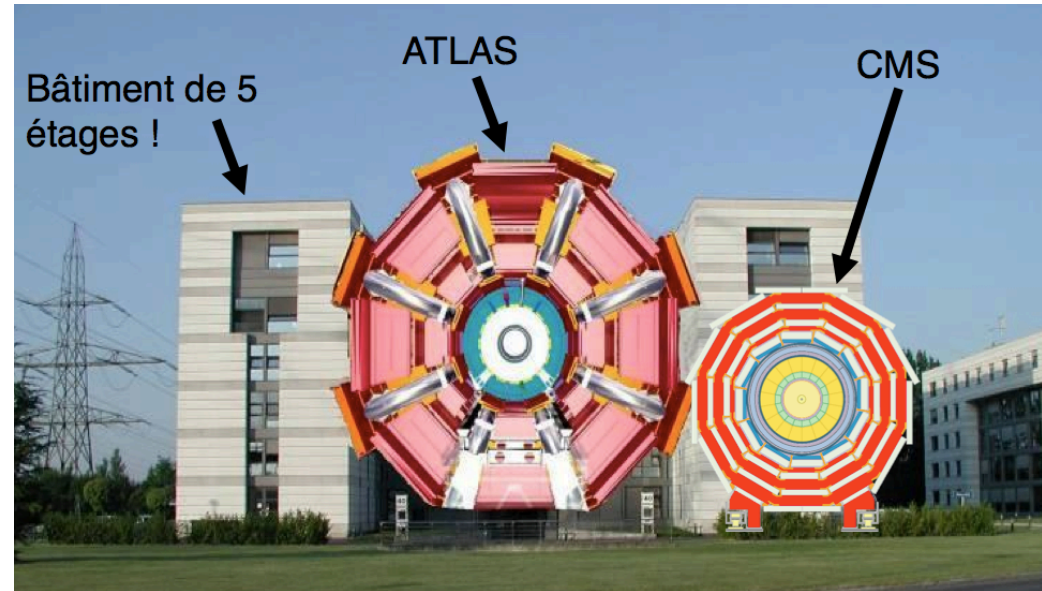
Mais pourquoi cette hiérarchie de masse?

Comment « voit-on » les particules ?

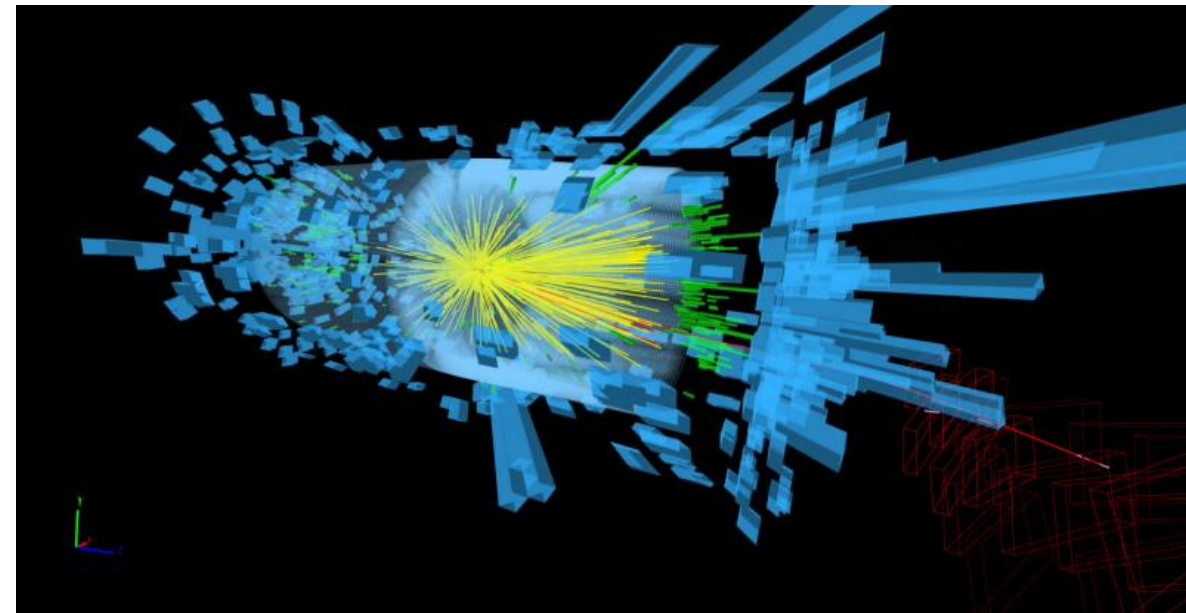
jusque vers 1970 -1980



Aujourd'hui



(les plus gros !)



Collision de proton à 13 TeV
dans le détecteur CMS

Des défis expérimentaux énormes (ex LHCb) !

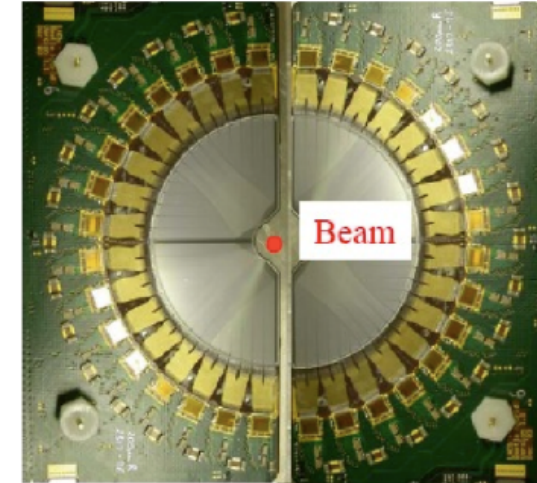
Mesure des points de désintégrations à quelques dizaines de microns

Taux de croisement des faisceaux du LHC : 40 MHz

- taux 1.5 TB/second !
- 15 000 PB/ an !!! (Facebook : 180 ...)
- la plupart des interactions ne nous intéressent pas (plus ..)

→ Sélection des événements à plusieurs niveaux

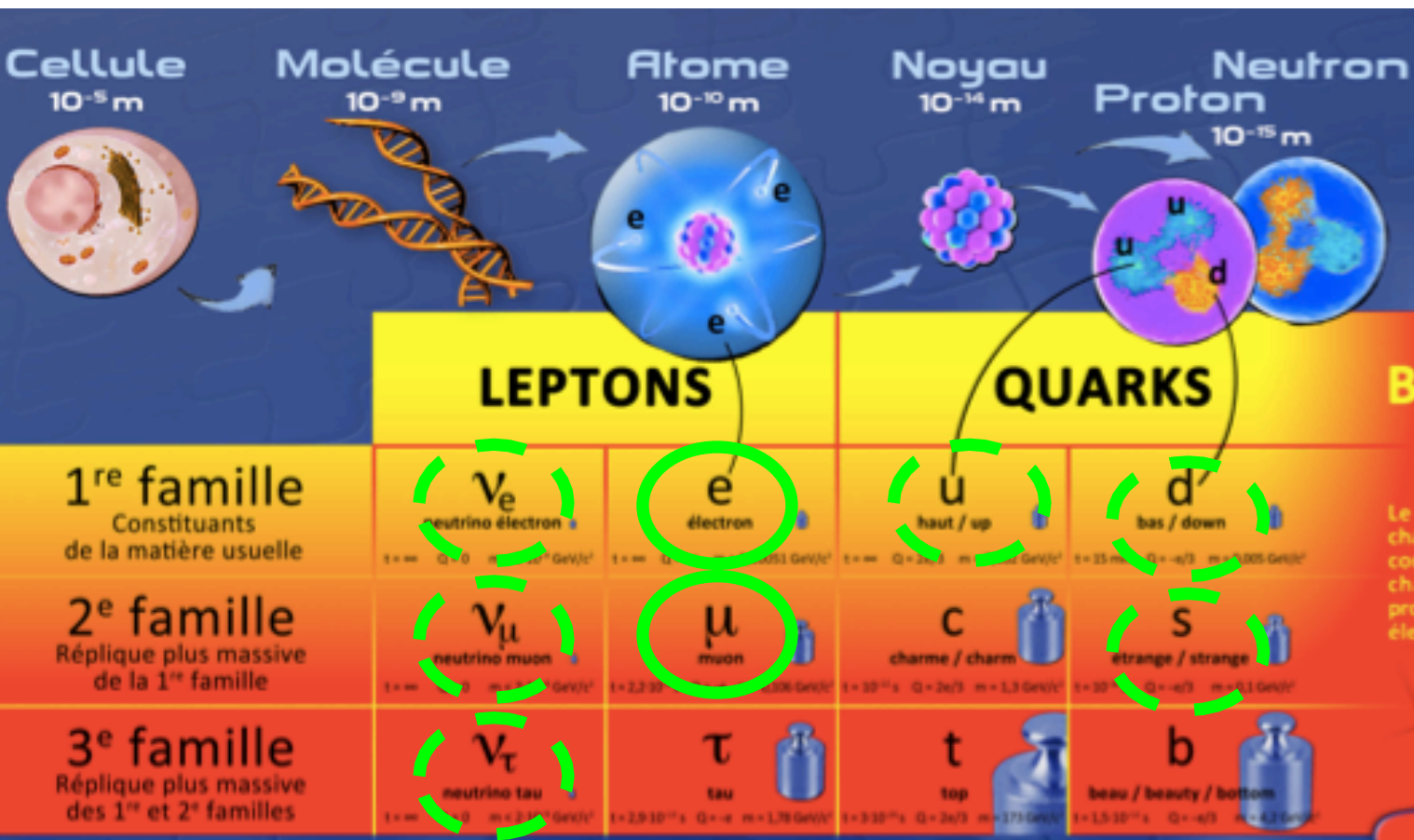
→ Ecriture sur disque à un taux de 70 GB/s (décision en 30 ms)



active zone : 8mm from the LHC beam : retractable



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



VU

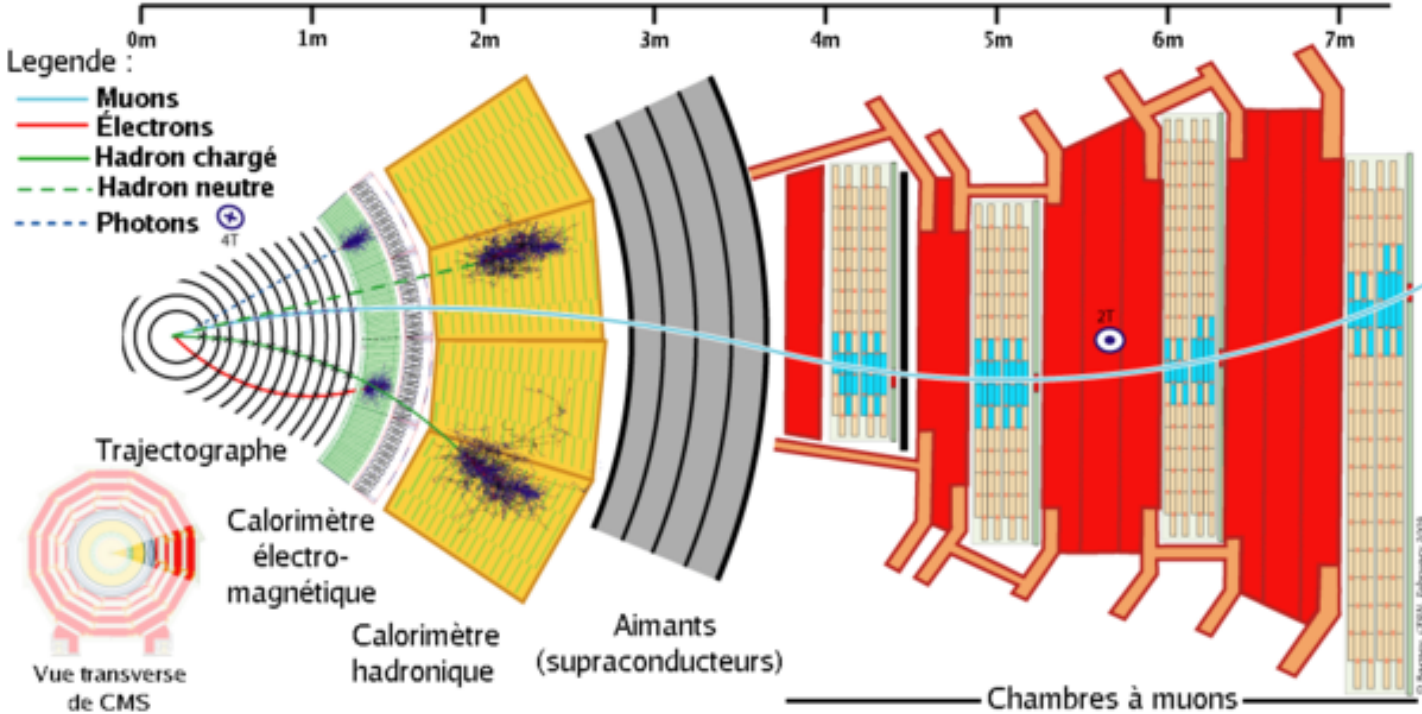
proton (uud), neutron (udd)

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

Et les autres ?

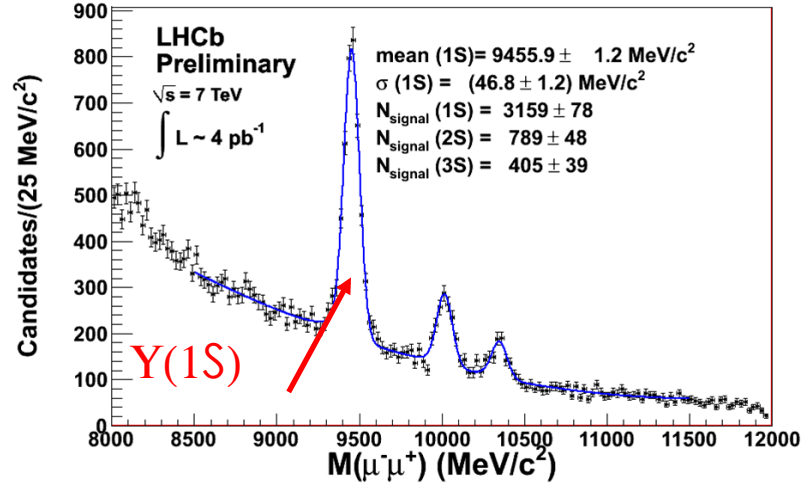
Ils se désintègrent !

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



$$a \rightarrow 1+2$$

$$M_a = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

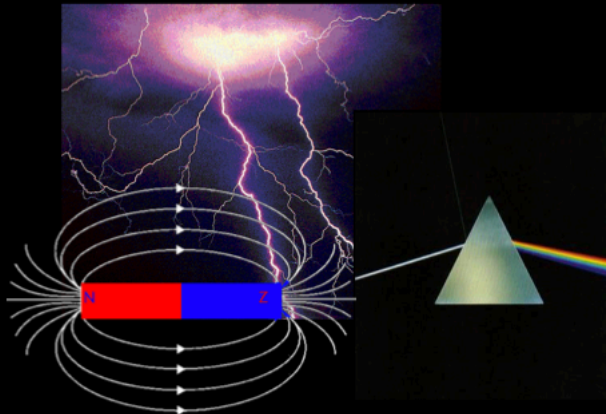


→ Jeudi

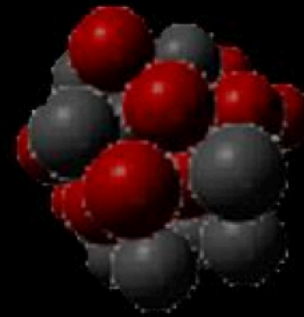
Gaussienne : effet du détecteur
 (~47/9456 = 0.5%)

bruit de fond

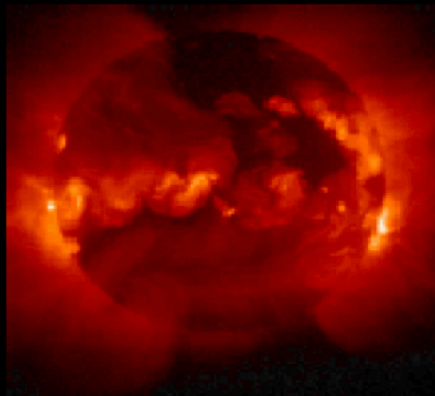
Les interactions



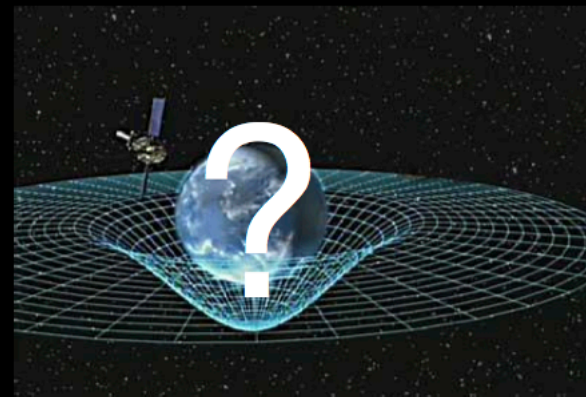
Force electromagnetique



Force forte

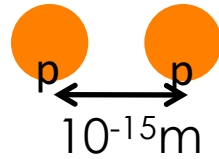


Force faible



Gravite

Quelles interactions pour qui ?



Gravitation
Attraction universelle,
planètes, galaxies.
GRAVITON?

10^{-40}

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

Interaction faible
Désintégrations radioactives.
Z⁰, W⁺, W⁻

10^{-8}

quarks & leptons

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

10^{-2}

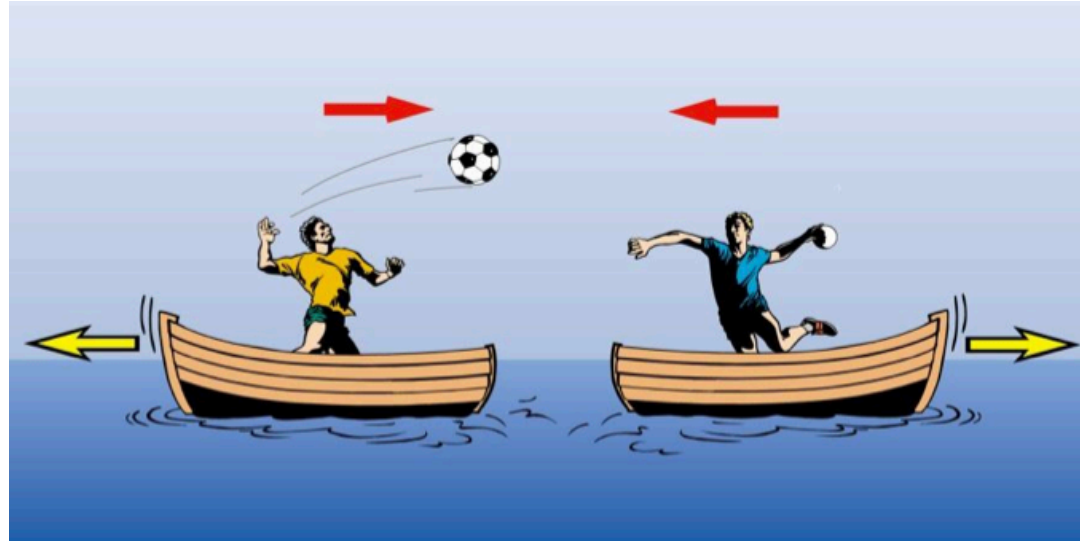
quarks & leptons chargés

Interaction forte
Cohésion des protons et des noyaux.
GLUON

1

quarks

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

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

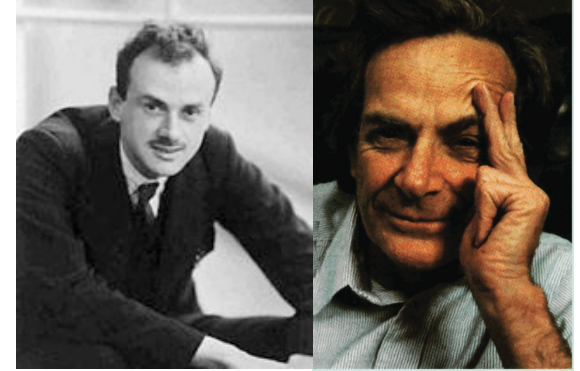
En Δt la particule peut parcourir $R = c\Delta t$

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

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)

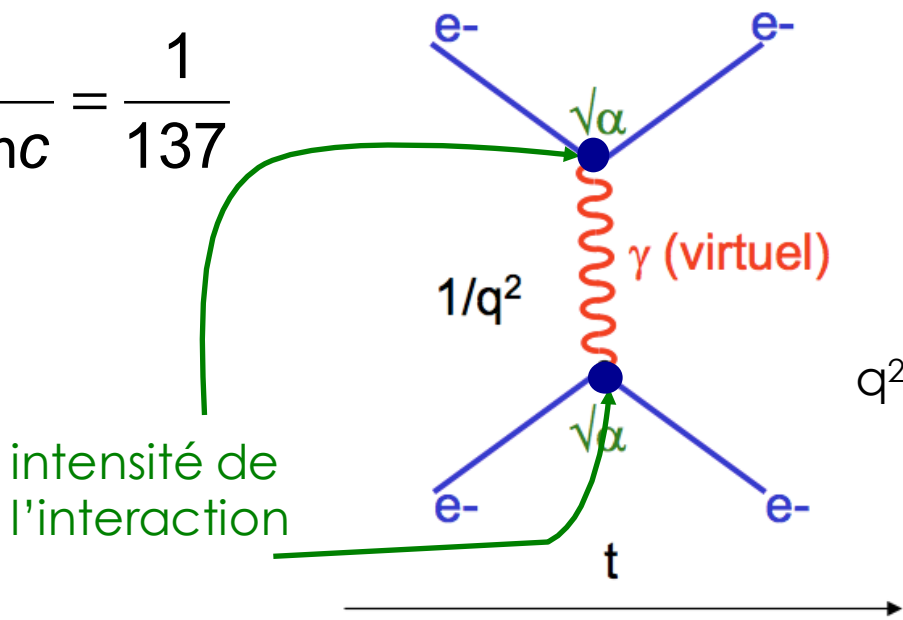
Maxwell :
champs électrique et magnétique
les ondes électromagnétiques se
propagent à la vitesse de la lumière c

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 !

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



q^2 : quadrivecteur du photon

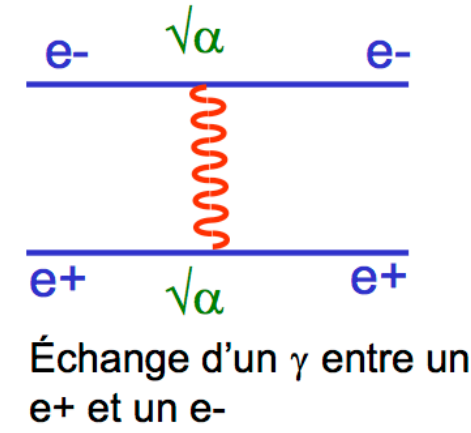
Les lignes sont des particules qui se propagent dans l'espace-temps
 Les ● symbolisent les vertex « lieux » de l'interaction : intensité, conservation (ou non) des nombres quantiques

Électrons qui s'échangent un photon

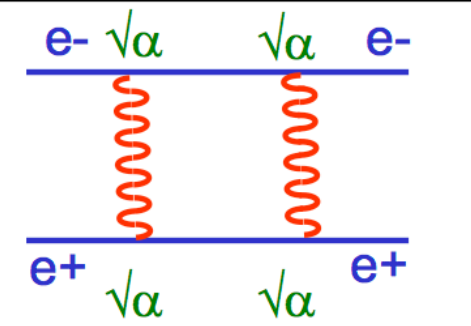
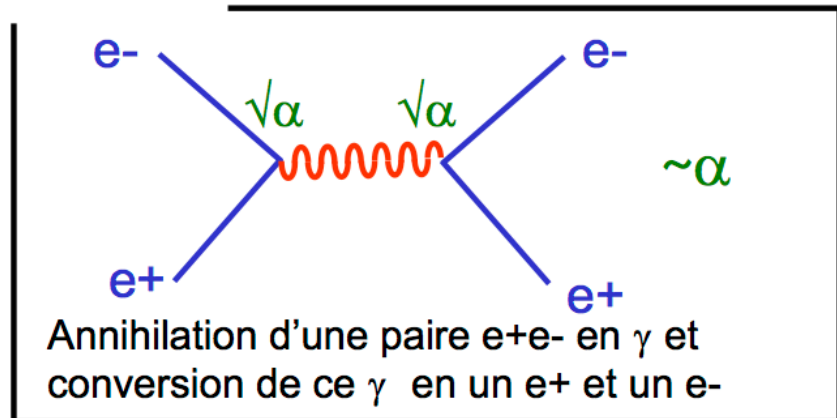
ou

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

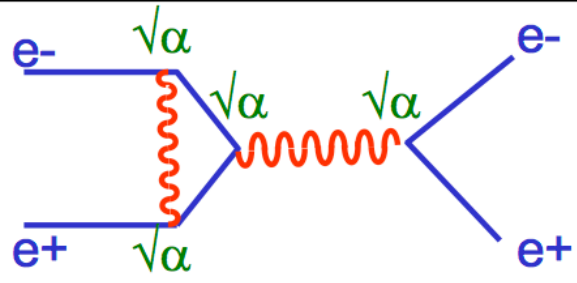
Interaction $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$



+



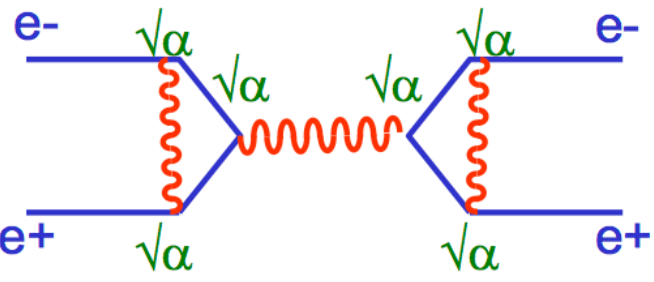
+



+ ...

$\sim \alpha^2$

Échange de 2 γ entre un e^+ et un e^-



+ ...

$\sim \alpha^3$

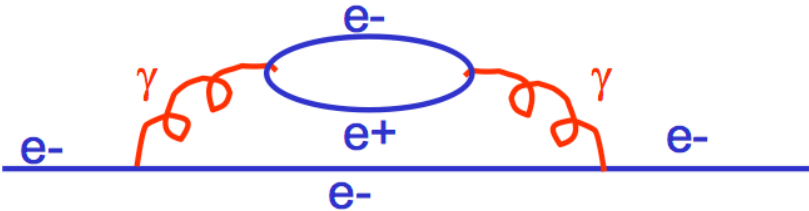
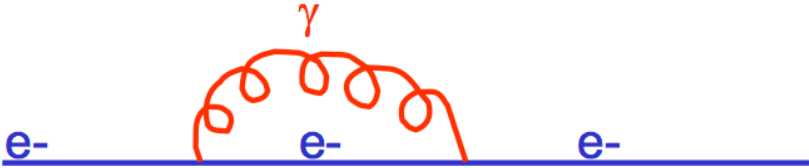
α petit (1/137) : le développement en série de perturbations fonctionne

Modification de notre vision de l'électron et du photon

L'électron :

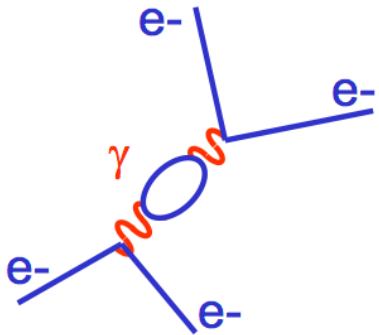
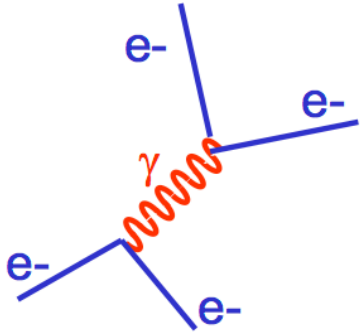


L'électron émet et absorbe continuellement des γ virtuels, d'où on peut le voir aussi comme :



...

Le photon :

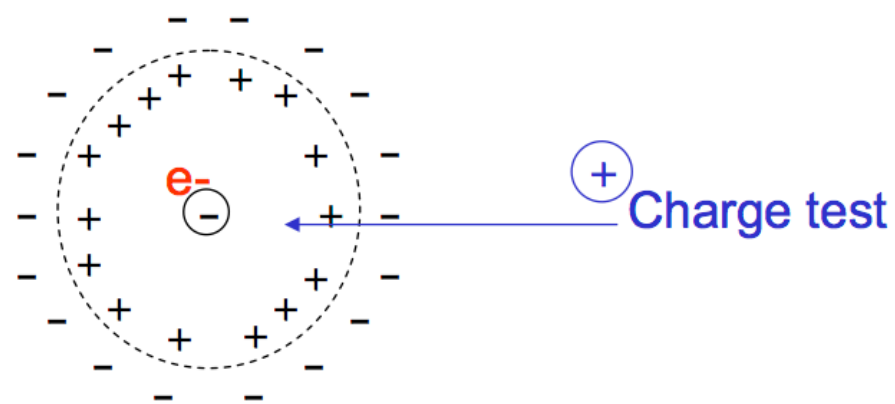


...

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

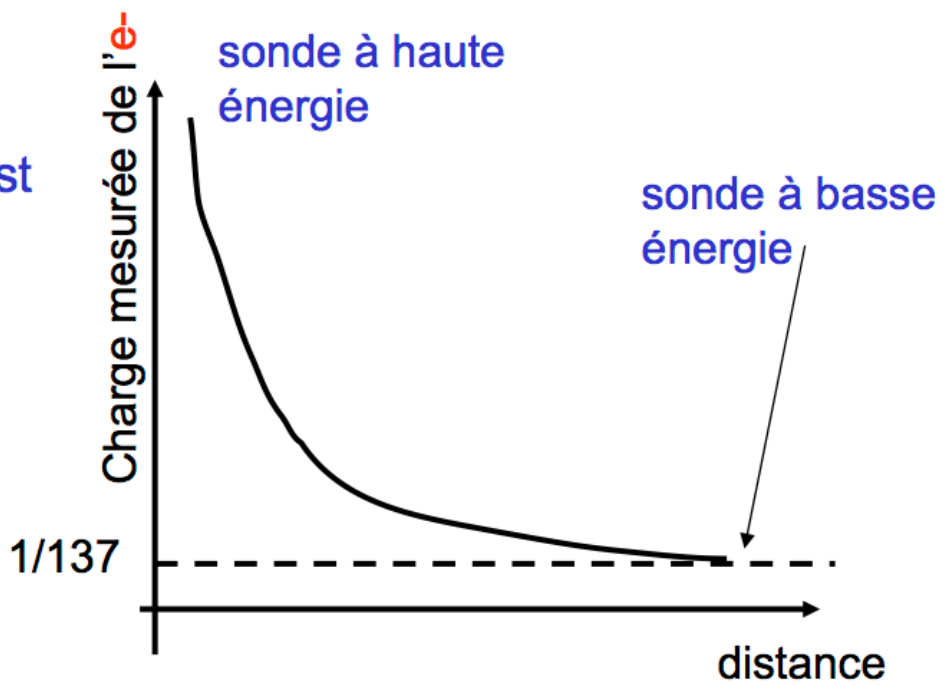


Polarisation du vide

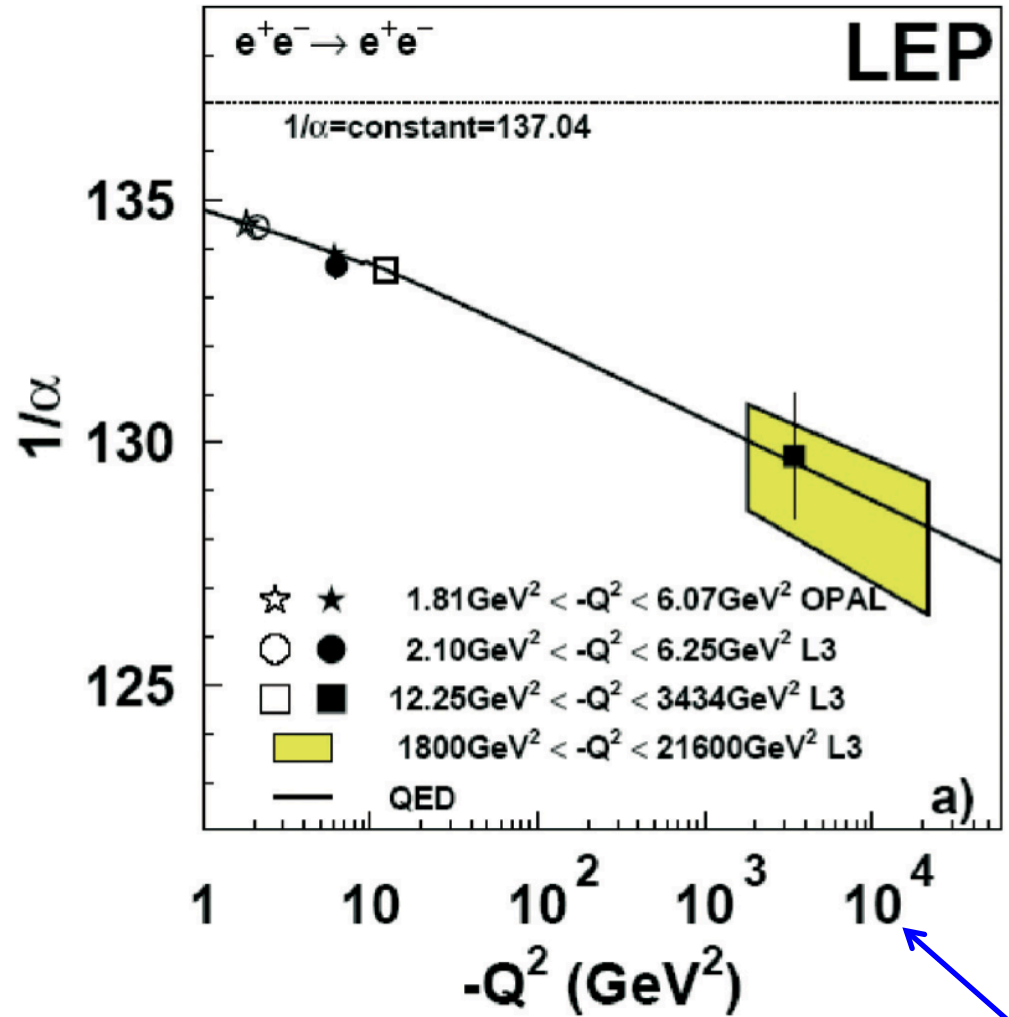
$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \log\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

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

Plus on s'approche plus on voit une charge importante



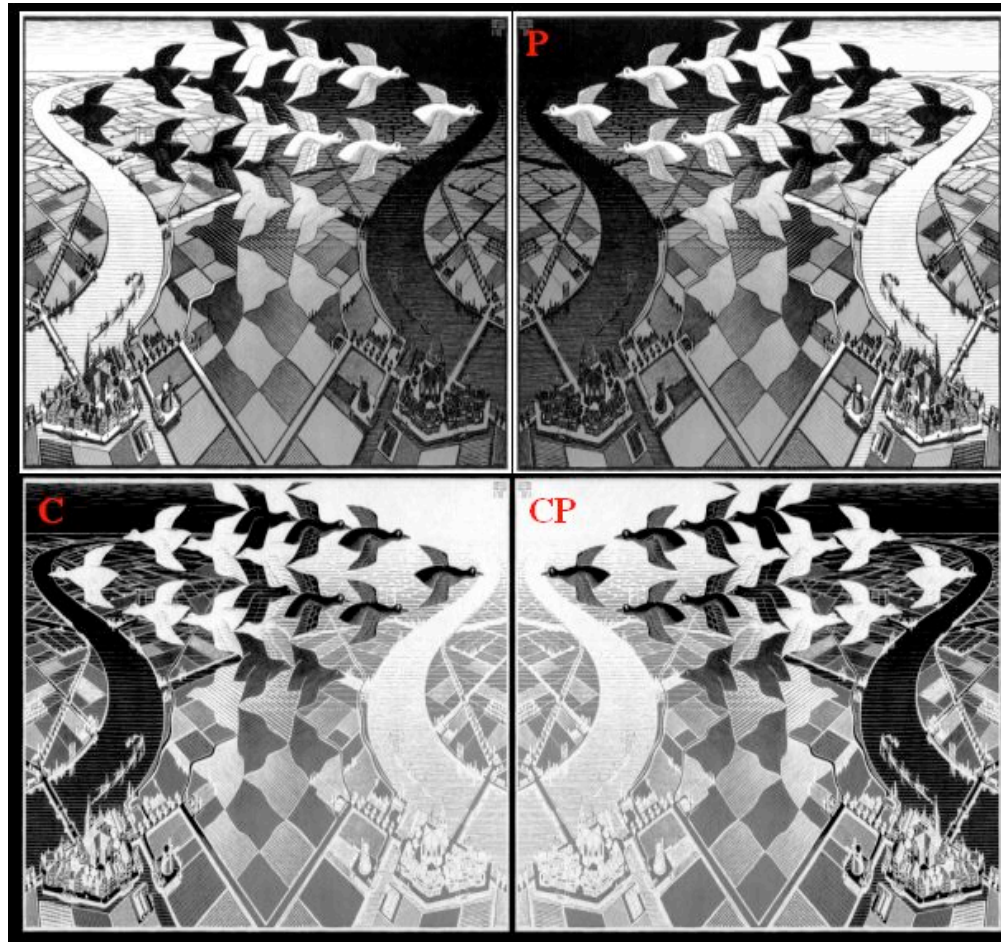
Variation de l'intensité de QED avec l'énergie (ou la distance) est vérifiée expérimentalement



E^2

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

Symétries



Les symétries : un outil indispensable pour le physicien des particules



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

Position absolue non observable \Leftrightarrow Invariance par translation \Leftrightarrow Loi de conservation de l'impulsion

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



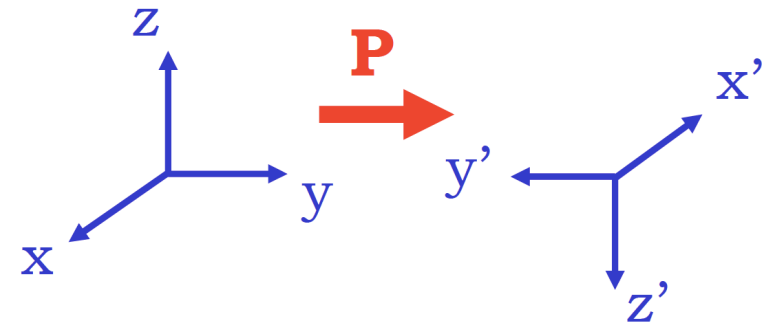
L'objet n'est pas symétrique par hasard : la mesure d'une symétrie nous apprend quelque chose sur la théorie sous-jacente

Les symétries C, P, T

3 symétries :

- **C** : change la charge
- **T** renverse le sens du temps
- **P** symétrie miroir

Quantité		C	T	P
temps	t	t	$-t$	t
vecteur spatial	x	x	x	$-x$
impulsion	p	p	$-p$	$-p$



→ Transformation CPT :

- On a changé la charge (**C**)
- On a renversé le temps (**T**)
- pour ne pas renverser l'impulsion il faut aussi renverser les coordonnées spatiales (**P**)

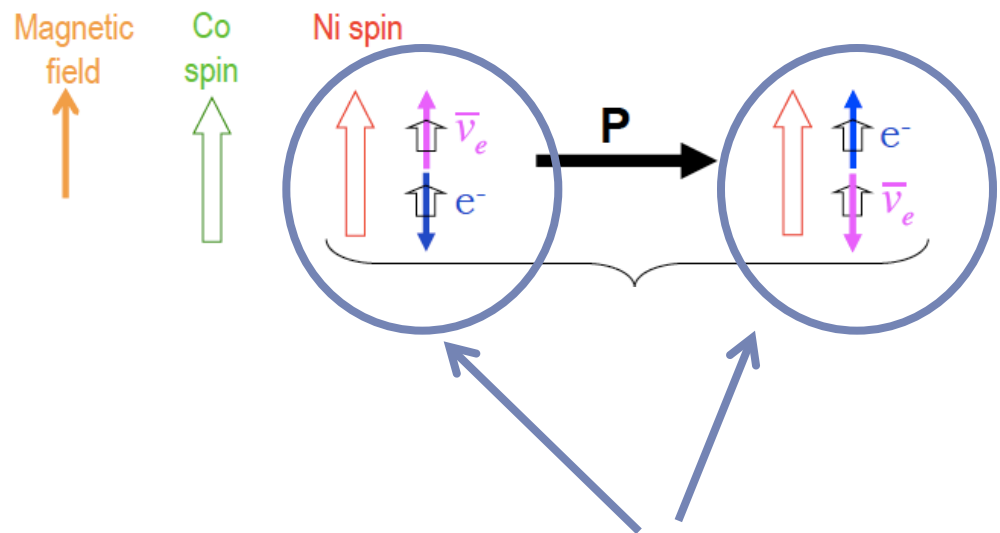
Les lois de la physique sont invariantes sous CPT

Expérience de Wu (1956)



Expérience de Wu :

- les spins des atomes de Co^{60} sont alignés grâce à un champ magnétique
- Enregistrement de la direction d'émission des électrons



utilisation du spin pour connaître la parité.

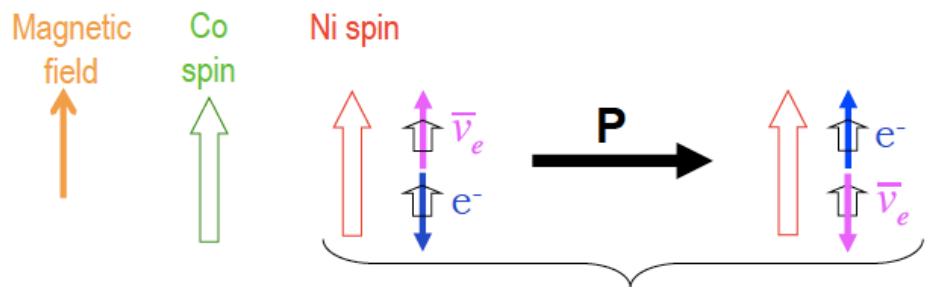
si P est conservée : deux configurations équiprobables

Expérience de Wu (1956)

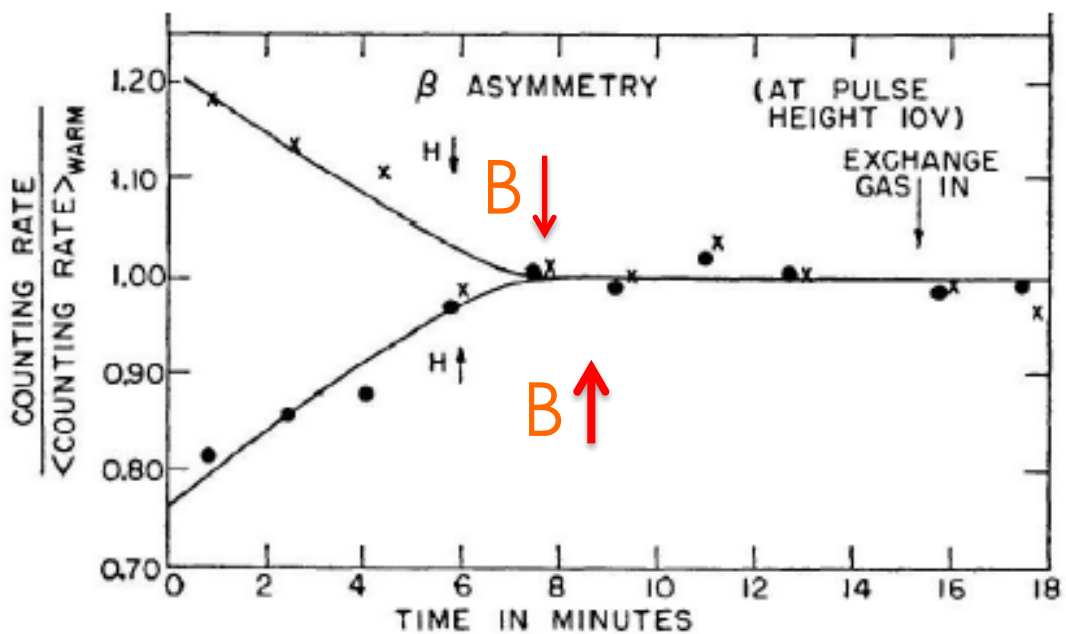


Expérience de Wu :

- les spins des atomes de Co^{60} sont alignés grâce à un champ magnétique
- Enregistrement de la direction d'émission des électrons

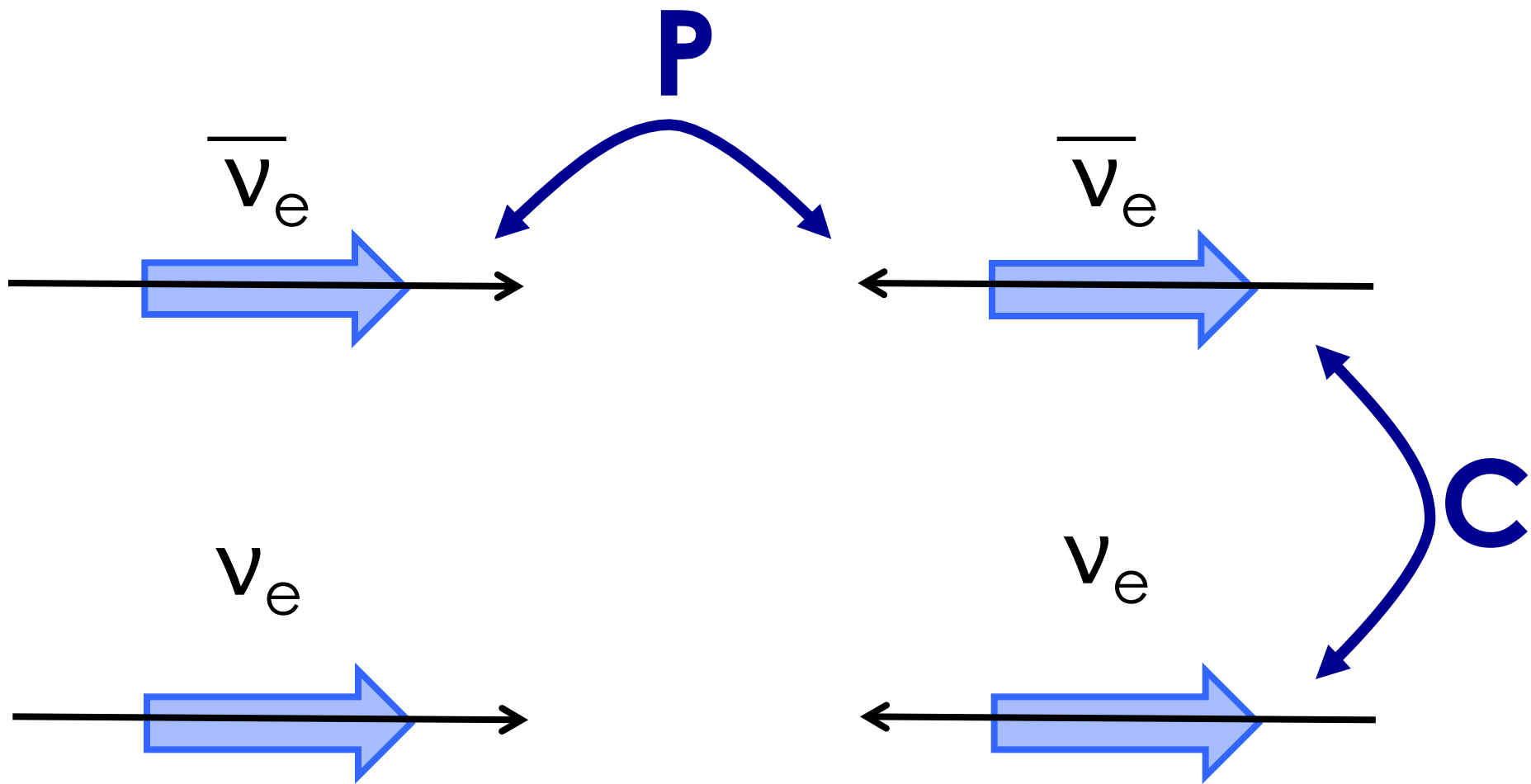


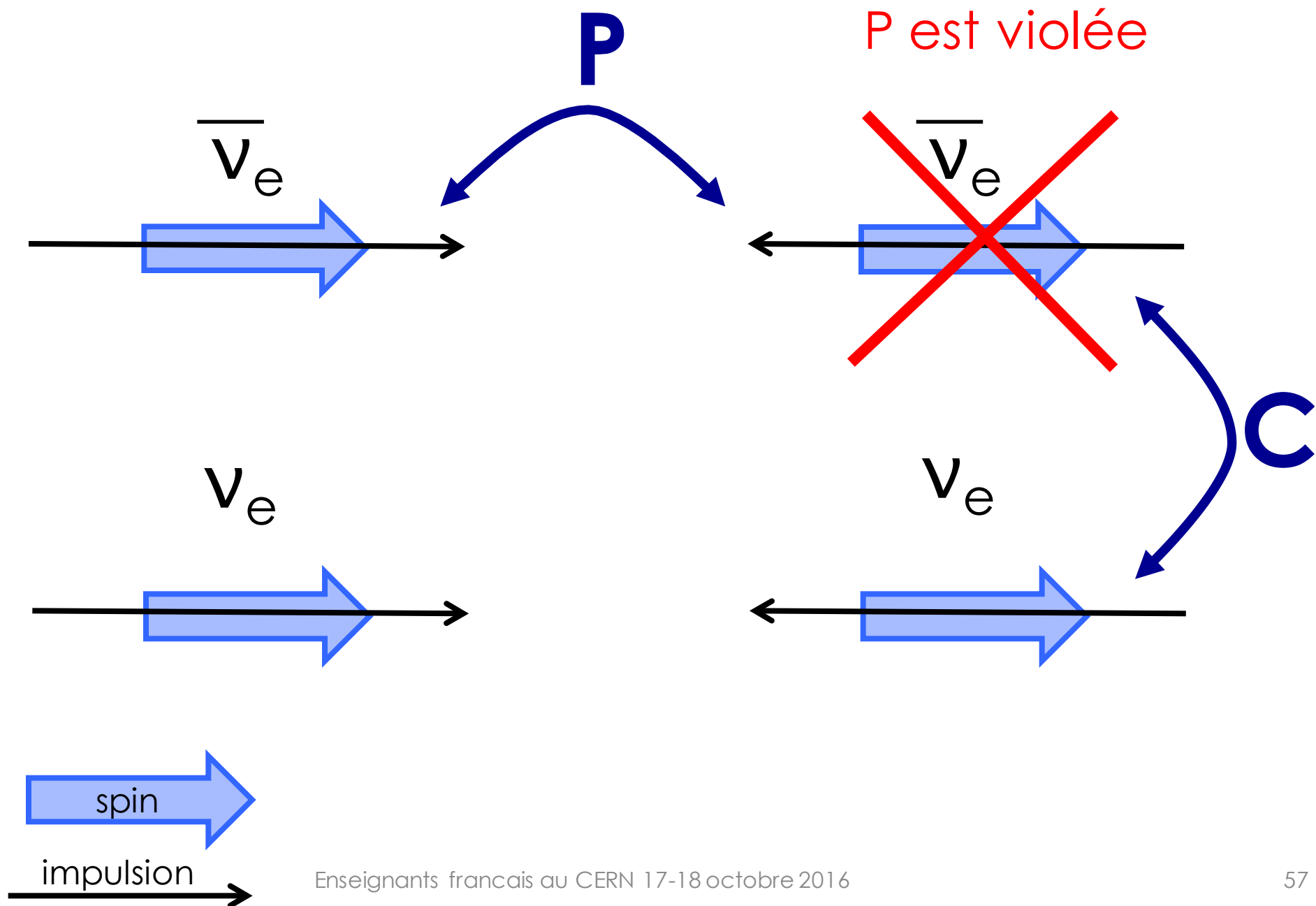
utilisation du spin pour connaître la parité.



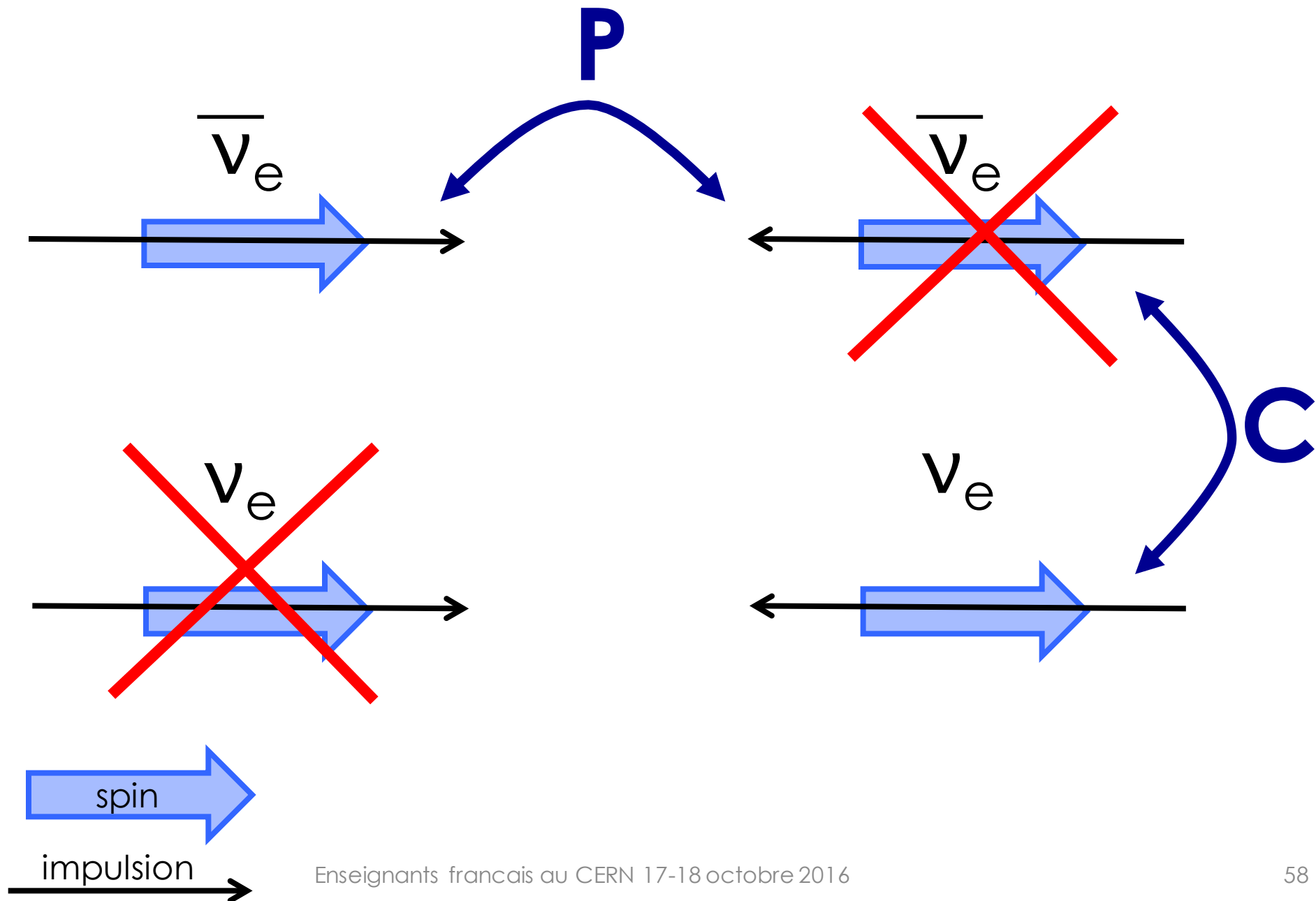
Les électrons sont émis préférentiellement dans la direction opposée au spin du Co^{60}

l'interaction faible viole P (de façon maximale)

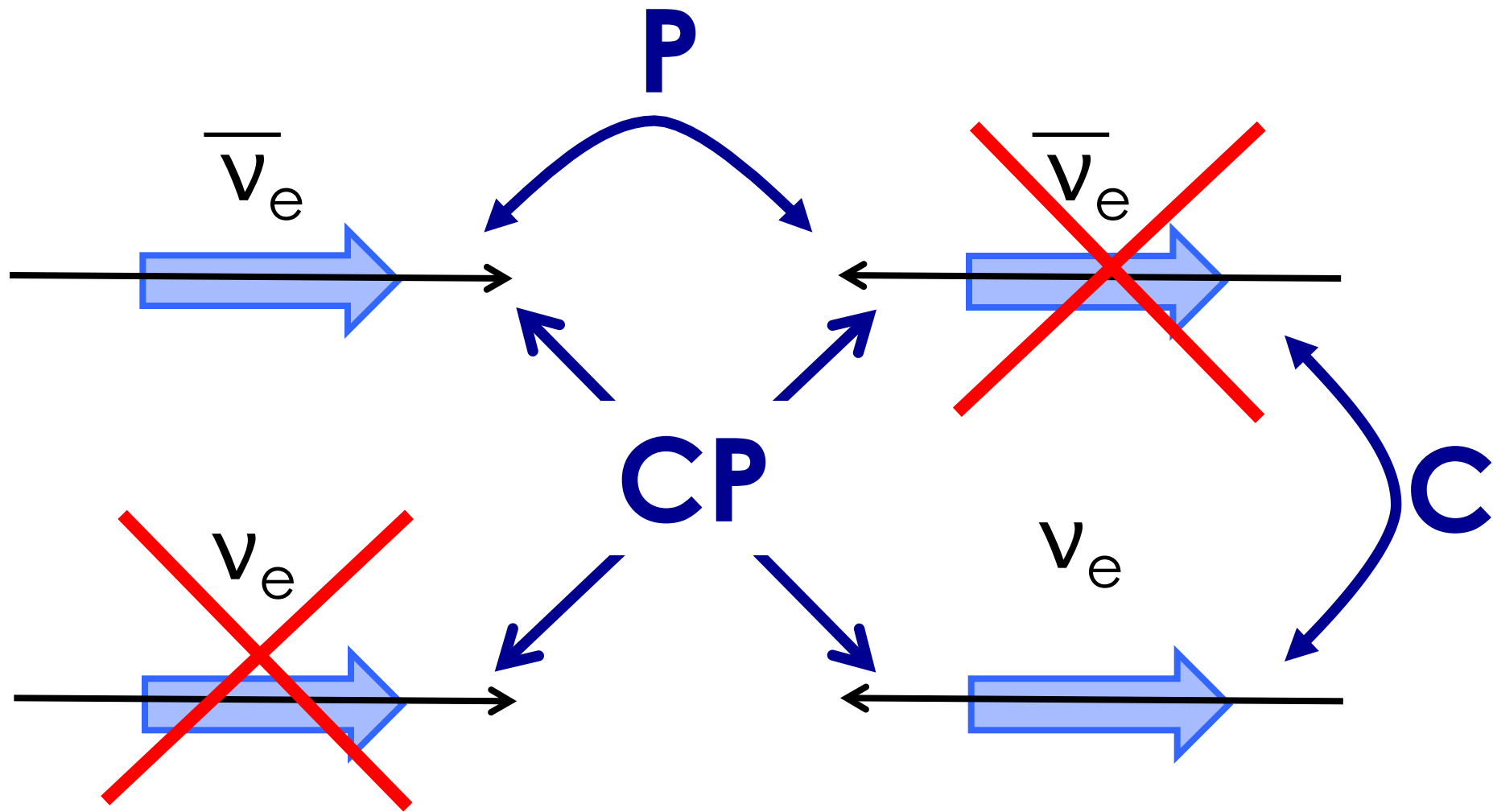




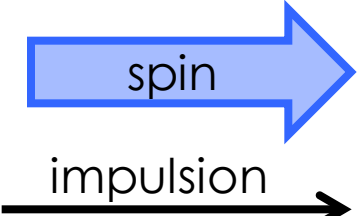
D'autres expériences ont montré que C était également violée par l'interaction faible



D'autres expériences (Lederman 1957) ont montré que C était également violée par l'interaction faible

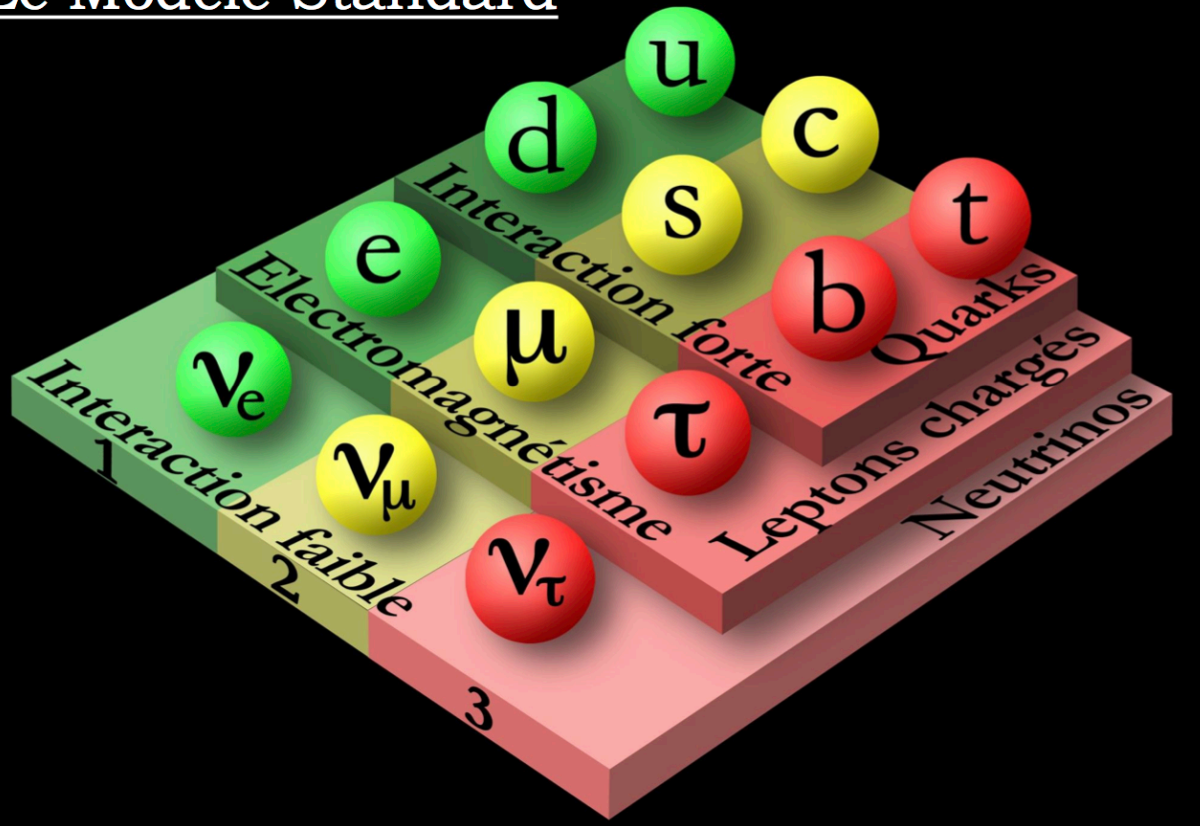


CP bonne symétrie de l'interaction faible ?



La physique des particules aujourd'hui 2/2

Le Modèle Standard

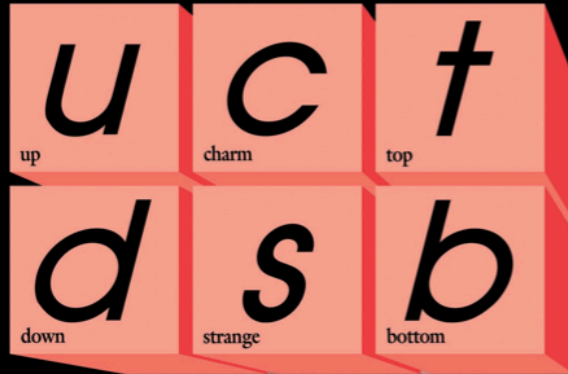


Les quarks sont sensibles aux interactions forte, faible et électromagnétique

Les leptons chargés sont sensibles aux interactions faible et électromagnétique

Les leptons neutres sont sensibles à l'interaction faible

Quarks



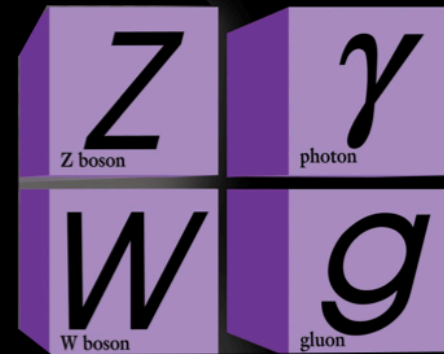
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

Forces



+ boson de Higgs



mercredi

particules de matière : fermions
particules vecteurs des interactions : bosons

Le Modèle Standard

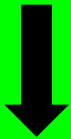
- élaboré au cours du XX^{ème} siècle : démarche conjointe théorie-expérience

“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)

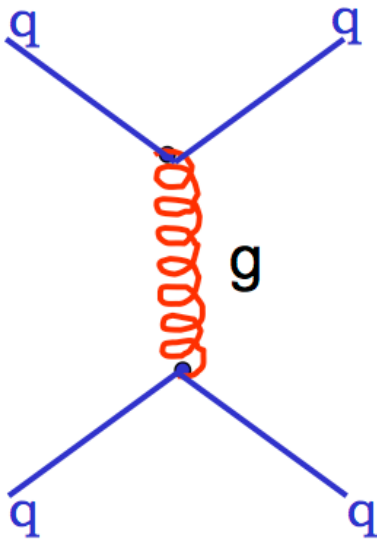
+ mécanisme de Higgs

L'interaction forte (chromodynamique quantique : QCD)

La charge électrique est remplacée par la "couleur"



Comme dans QED, il existe le diagramme :



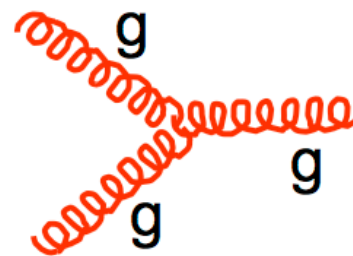
Mais:

QCD

3 couleurs

Gluons : colorés

→ Couplage entre 3 et 4 gluons

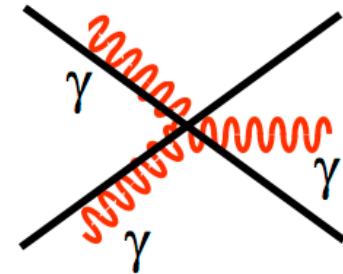


QED

Une seule charge

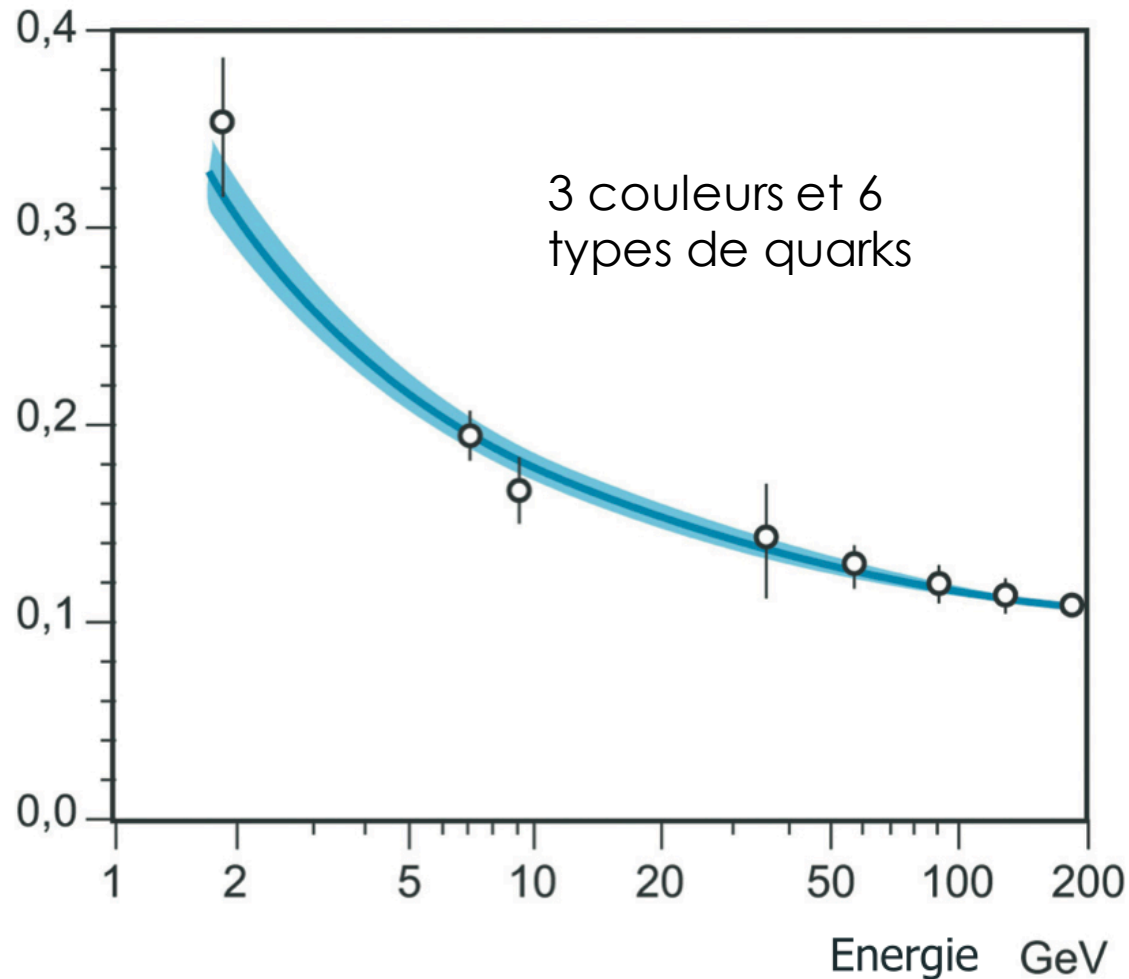
Photon : neutre

→ Pas de couplage entre photons



8 gluons « colorés »

Constante de couplage, α_s (E)

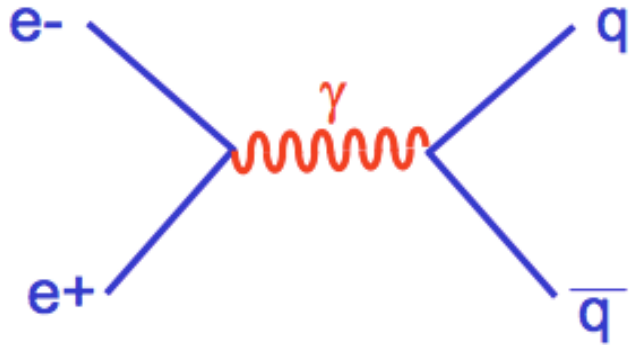


l'intensité de l'interaction augmente quand l'énergie diminue (= quand la distance augmente !)

De nombreuses conséquences !

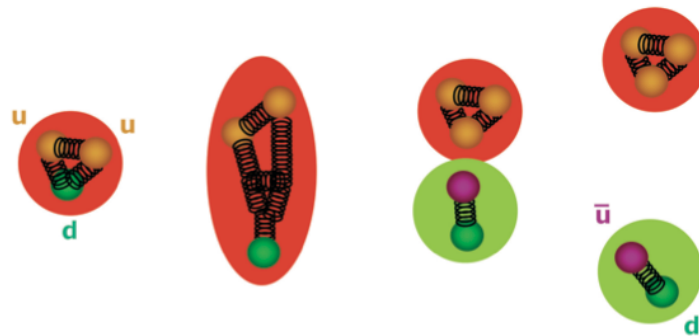
Pas de quarks libres

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**

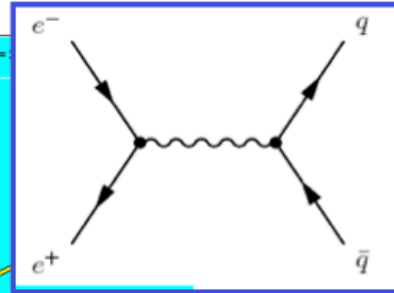
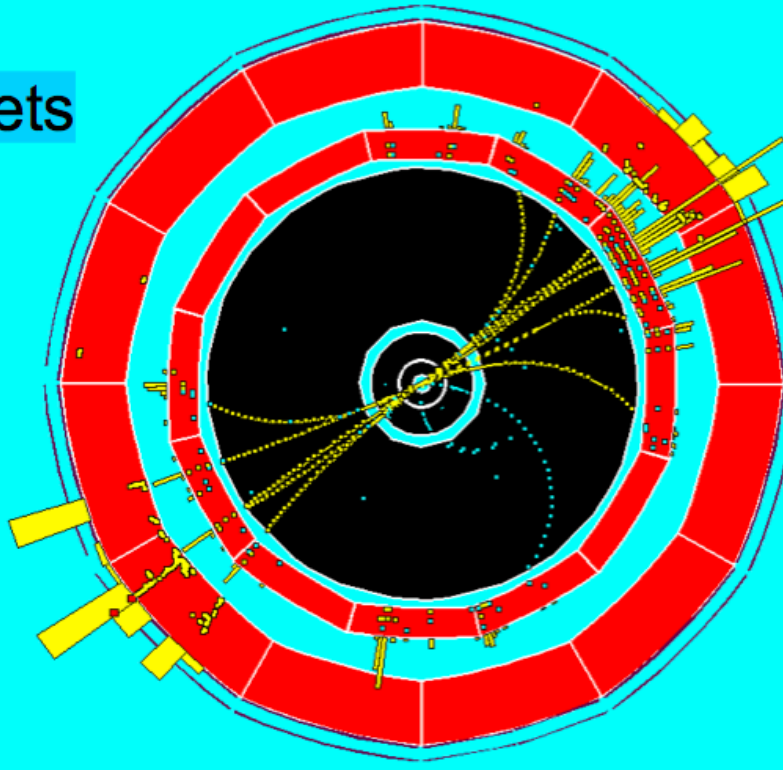


Jets de hadrons au LEP

ALEPH DALI

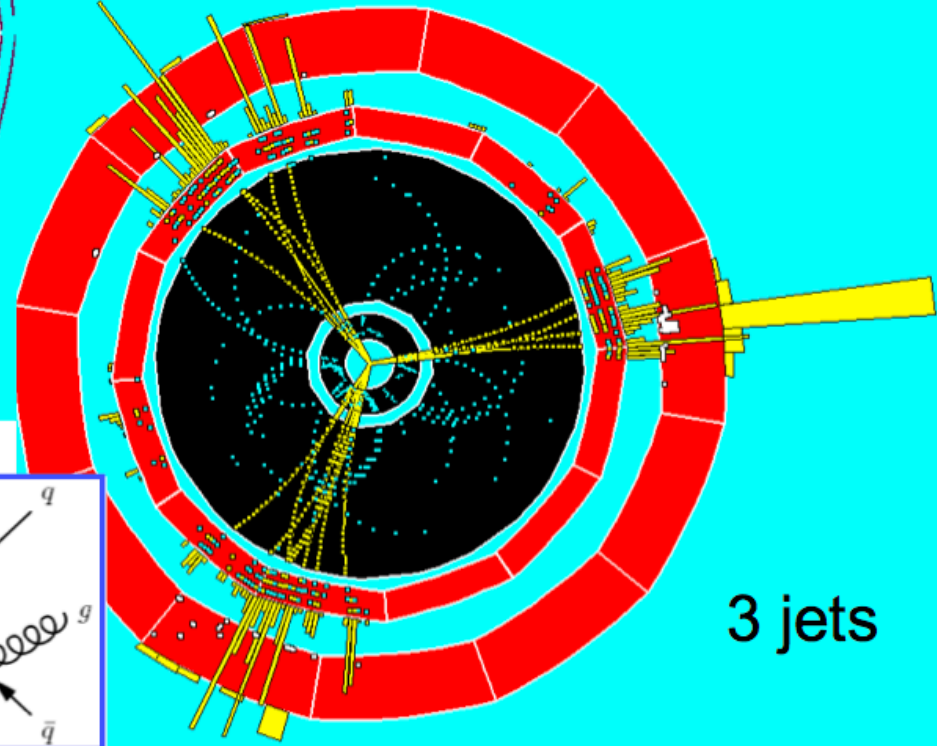
Run=

2 jets

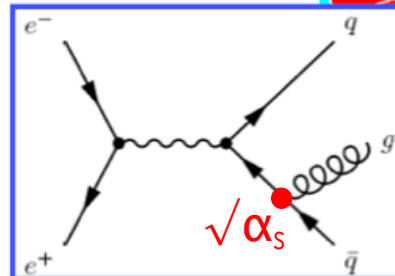


Run=9063 Evt=7848

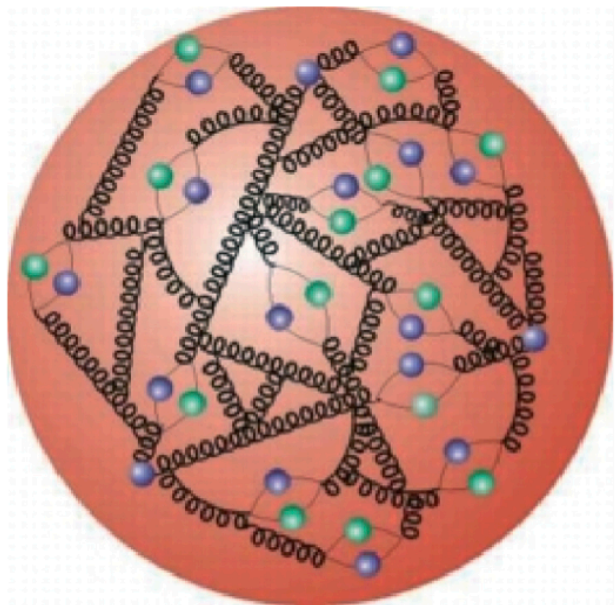
3 jets



Probabilité de radiation
d'un gluon : α_s



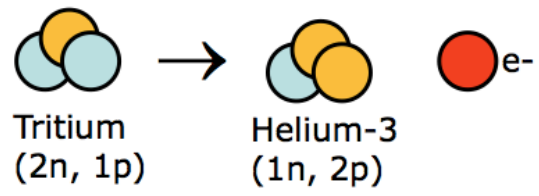
Le proton ressemble donc finalement



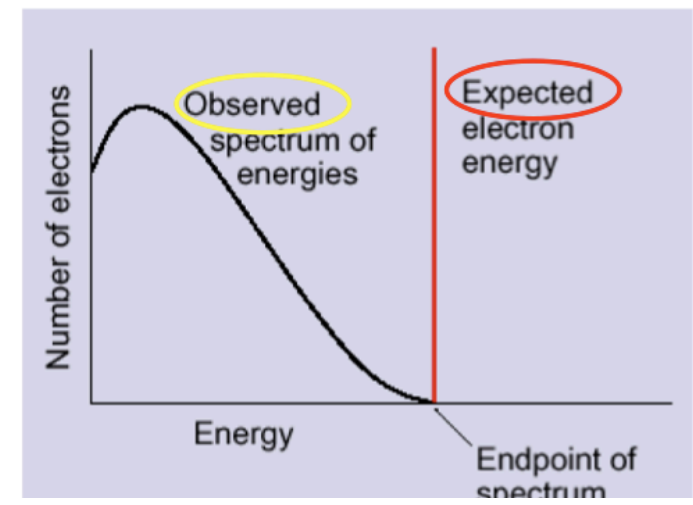
3 quarks + une multitude de gluons et de paires quark antiquark

L'interaction faible

Désintégration β :



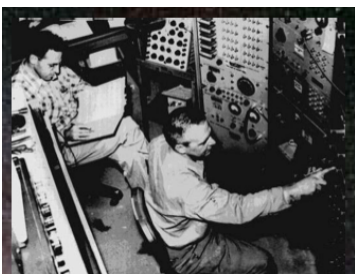
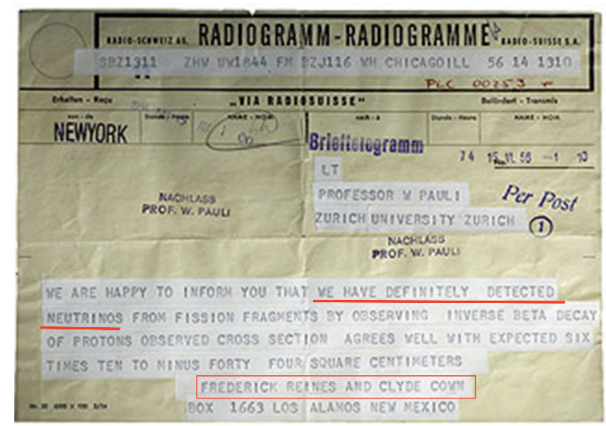
Existence du neutrino !



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)
« [...] we have definitively detected neutrinos [...] »



Pauli : « [...] everything comes to him who know how to wait

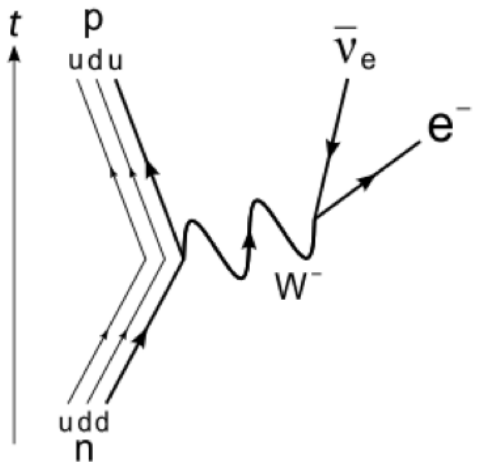
Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico
Thanks for message. Everything comes to him who know how to wait.

Pauli

Désintégration β :

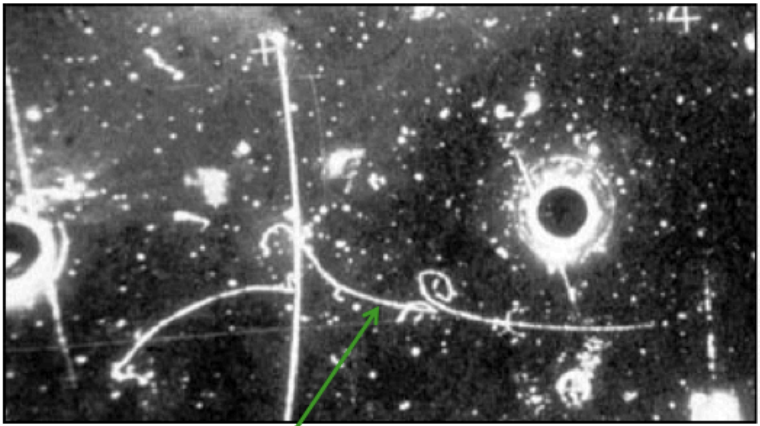
$M(W) = 80 \text{ GeV} \Rightarrow$ courte portée

Violation de nombreux nombres quantiques
 \Rightarrow durées de vie « longues »



Expérience Gargamelle 1973

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



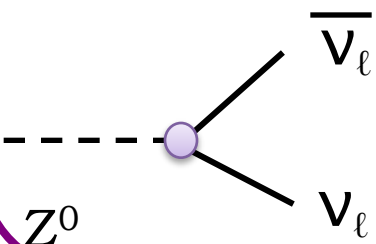
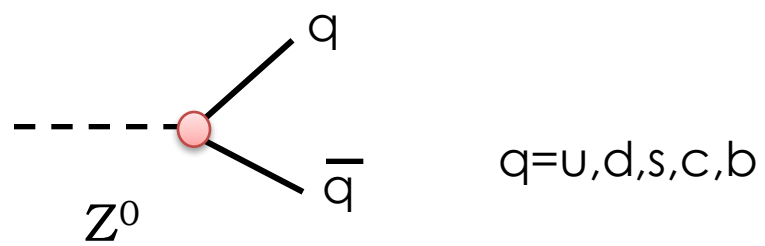
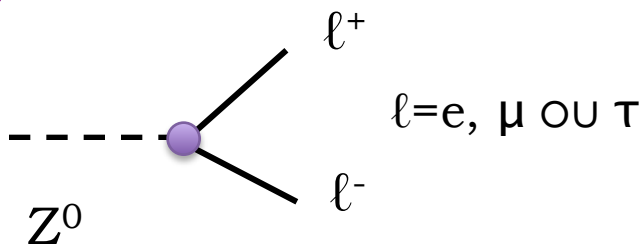
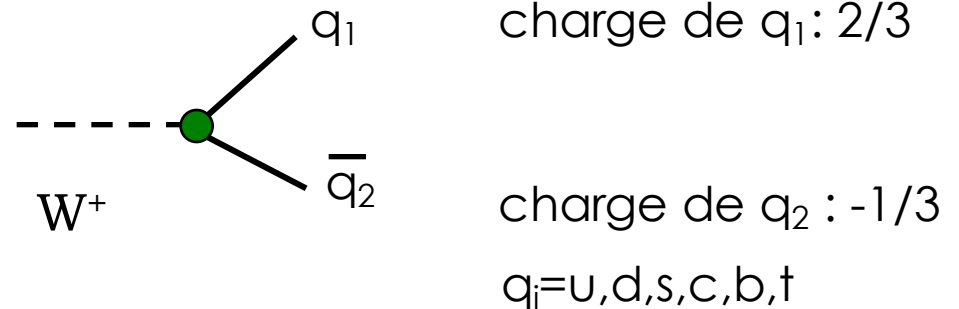
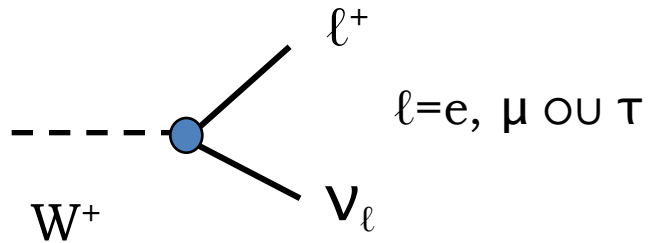
Utilisation de neutrinos :
 sensibles *uniquement* à
 l'interaction faible

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

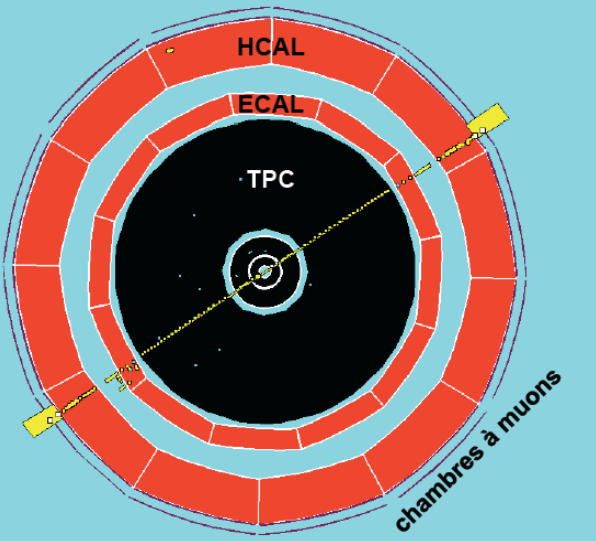


mais pas le top (trop lourd)

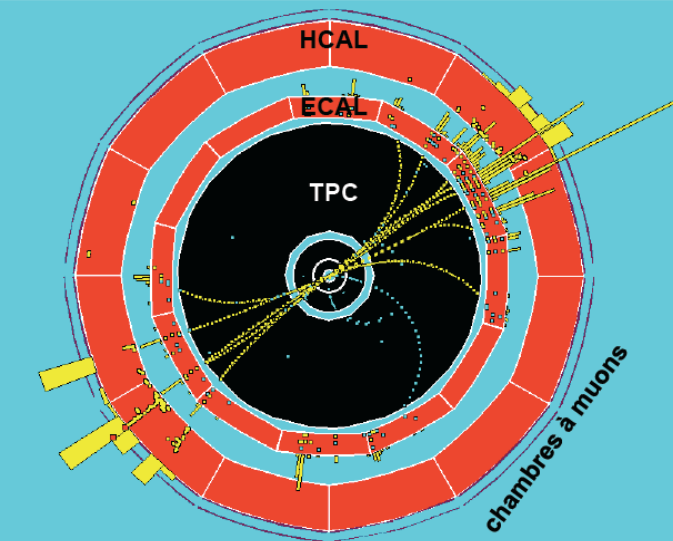
Il ne peut pas être produit de façon directe, mais il peut y avoir des diagrammes avec des paires top – antitop virtuelles

Le Z^0 et les W^+ et W^- des particules que l'on observe dans les détecteurs !

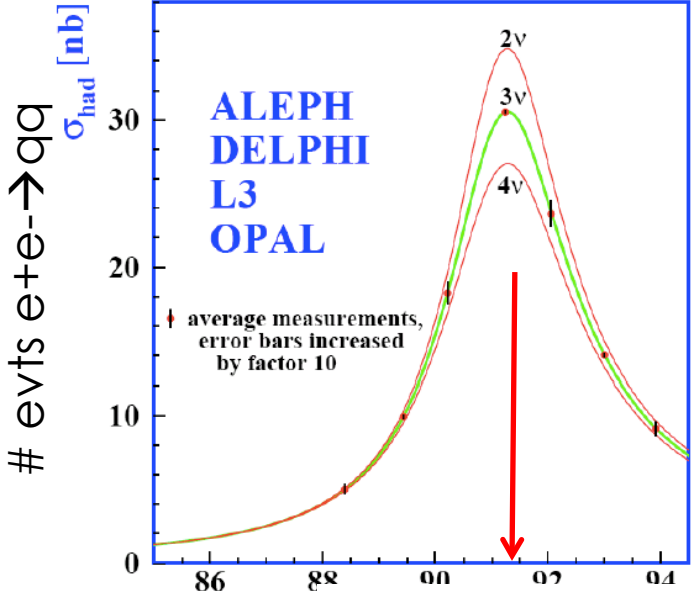
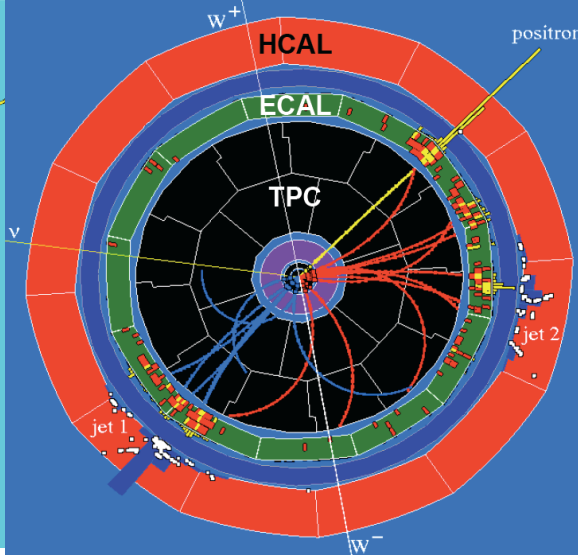
Un candidat
 $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu\mu$



Un candidat
 $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow q\bar{q}$



Un candidat
 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$



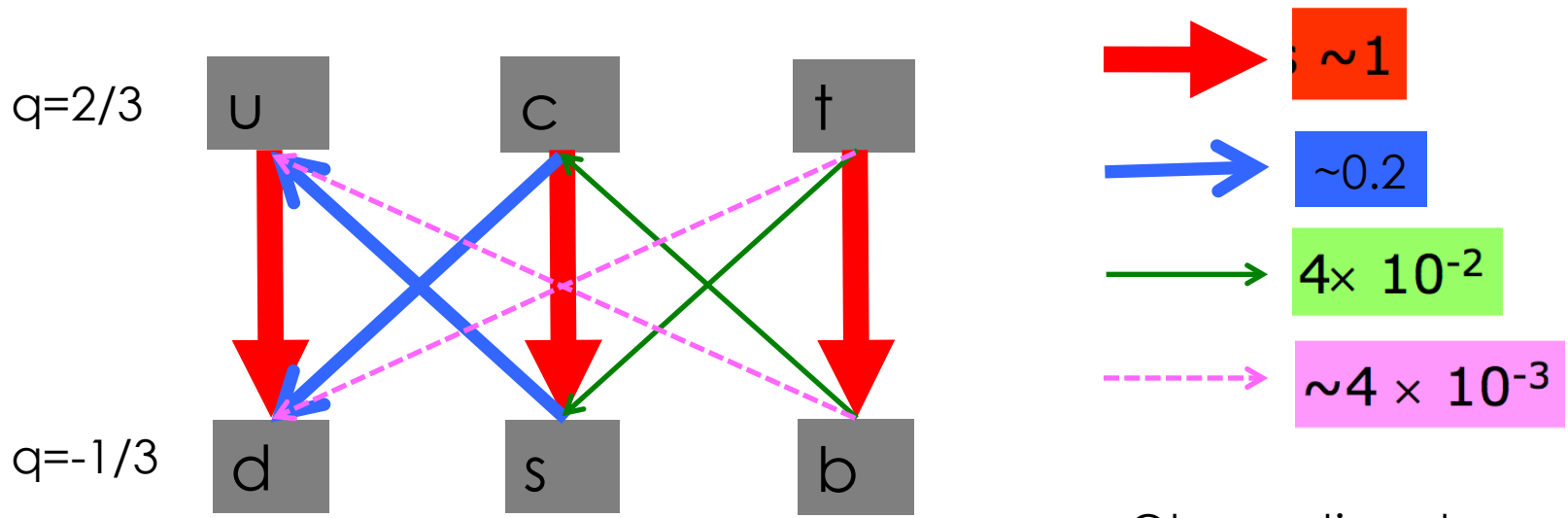
largeur intrinsèque due à la durée de vie de la particule

$$\tau = \frac{\hbar}{c^2 \Gamma}$$

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 ?

Les particules étranges :

$$|K^0\rangle = |s\bar{d}\rangle$$

$$|\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle$$

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

$$\text{CP } |K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

$$\text{CP } |K_1\rangle = |K_1\rangle$$

$$\text{CP } |K_2\rangle = -|K_2\rangle$$

$$\text{CP}(\pi\pi) = +1 \text{ et } \text{CP}(\pi\pi\pi) = -1$$

Si CP est une symétrie de l'interaction faible alors :

$$|K_1\rangle \rightarrow \pi\pi$$

$$|K_2\rangle \rightarrow \pi\pi\pi$$

→ durée de vie du $K_2 \sim 10000$ durée de vie du K_1

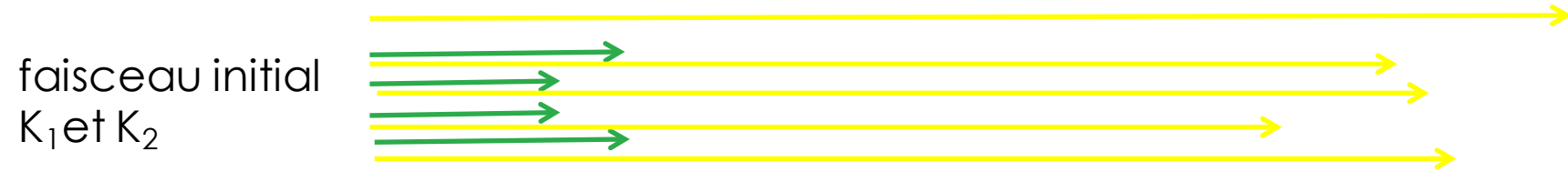
~~$$|K_2\rangle \rightarrow \pi\pi$$~~

$$M(\pi) \sim 140 \text{ MeV}$$

$$M(K) \sim 500 \text{ MeV}$$

$$|K_1\rangle \rightarrow \pi\pi$$

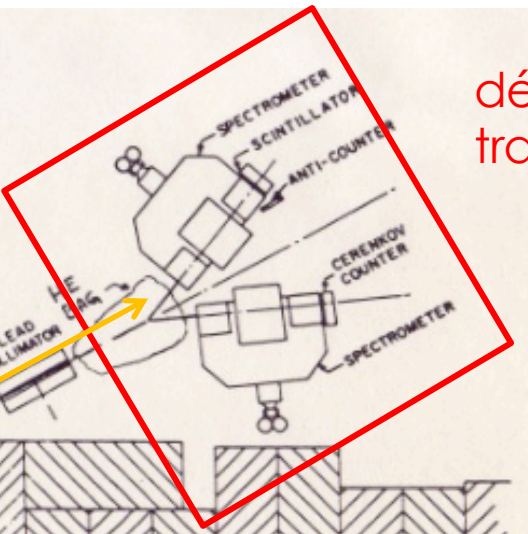
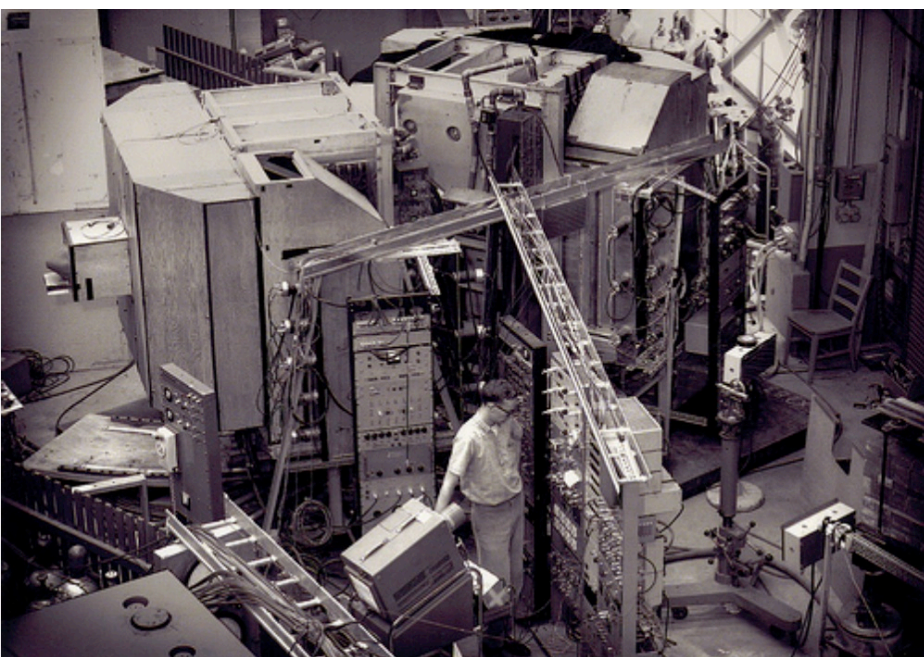
Après un certain temps faisceau pur de K_2



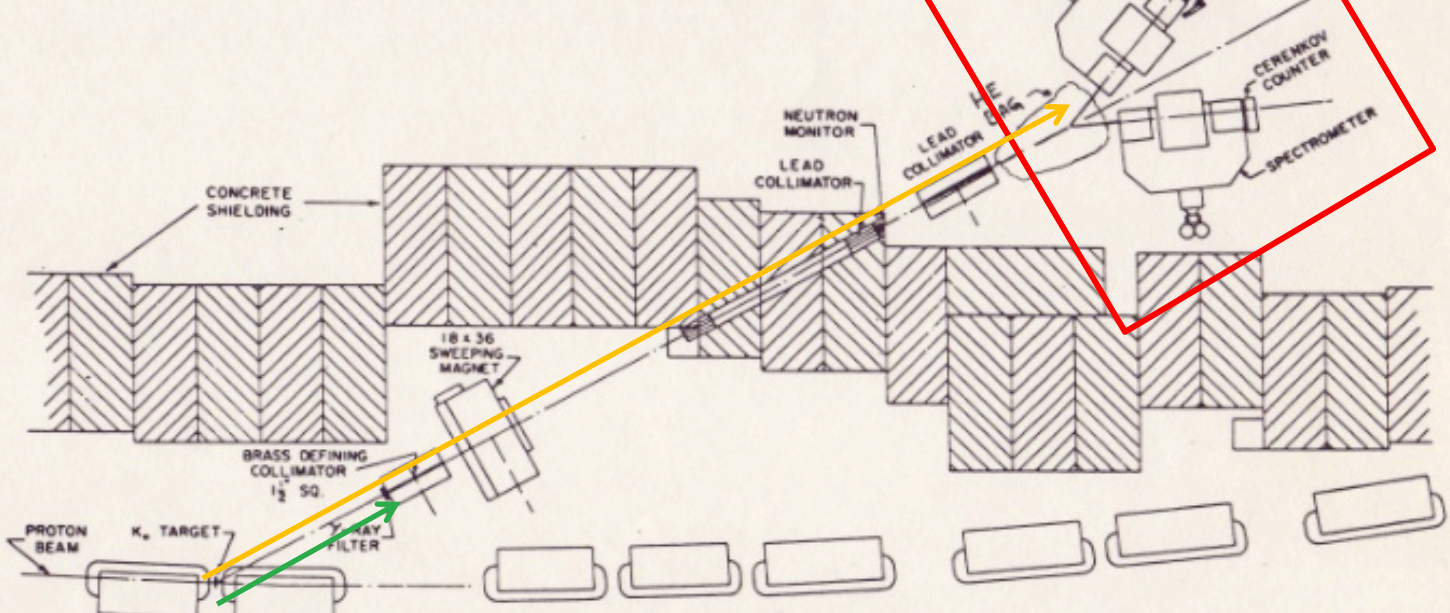
Signal de désintégration $|K_2\rangle \rightarrow \pi\pi$ loin (20 mètres) du point
de production des K_1 et K_2

?

Expérience de Cronin & Fitch 1964 :

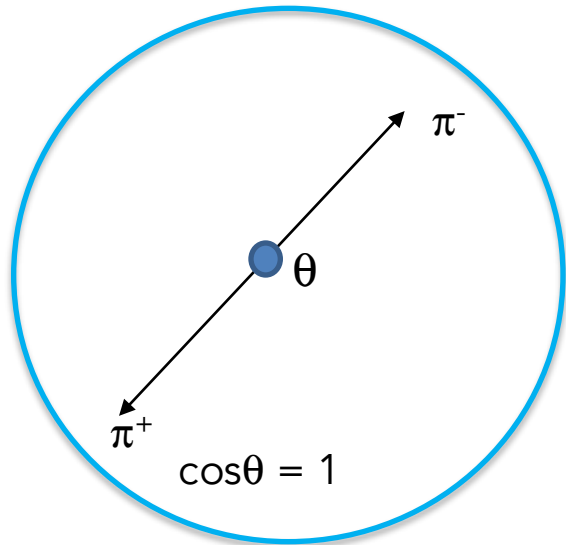


détecteur de traces chargées

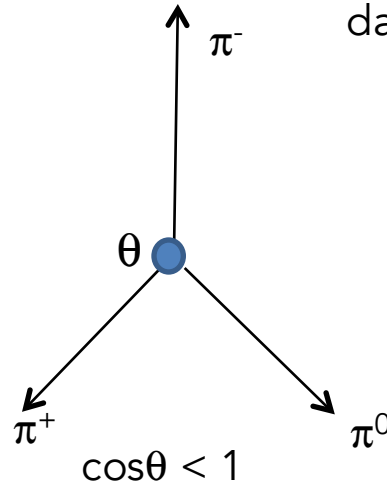


Faisceau initial : K₁ et K₂

signal

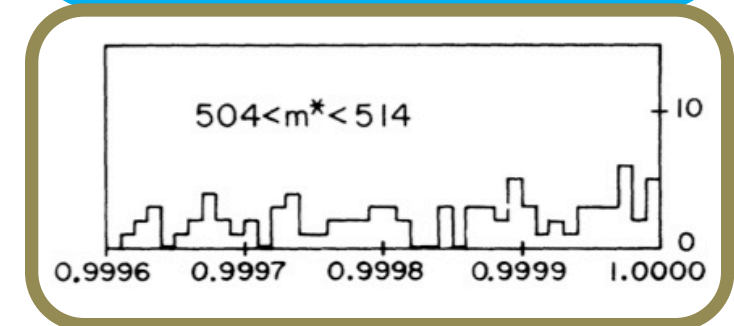
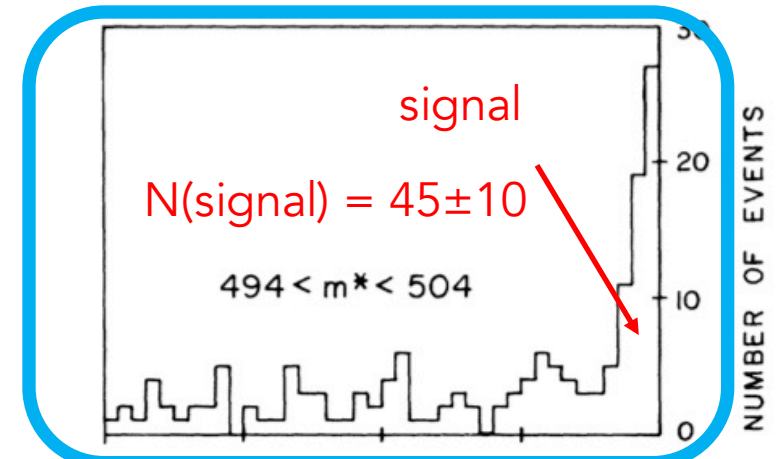
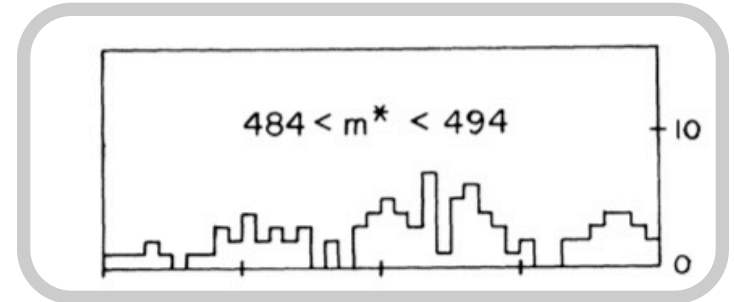
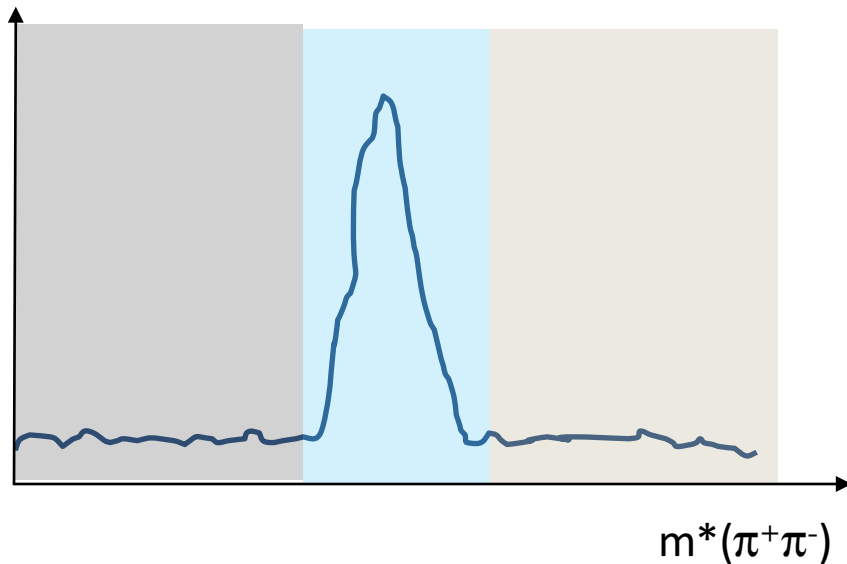


Bruit



Deux informations :

- la masse invariante $\pi^+\pi^-$ (m^*)
- L'angle d'ouverture entre les deux π chargés dans le centre de masse du K



Expérience de Cronin & Fitch 1964 :

$$\frac{A \left(|K_2\rangle \rightarrow \pi\pi \right)}{A \left(|K_1\rangle \rightarrow \pi\pi \right)} = (2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$$

$$\dots = (2.232 \pm 0.0011) \cdot 10^{-3}$$

PARAMETERS FOR $K_L^0 \rightarrow 2\pi$ DECAY S013315

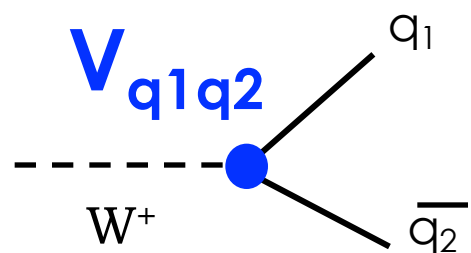
$ \eta_{00} = A(K_L^0 \rightarrow 2\pi^0) / A(K_S^0 \rightarrow 2\pi^0) $	0.002220 ± 0.000011 (S = 1.8)
$ \eta_{+-} = A(K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-) / A(K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-) $	0.002232 ± 0.000011 (S = 1.8)
$ \epsilon = (2 \eta_{+-} + \eta_{00})/3$	0.002228 ± 0.000011 (S = 1.8)
$ \eta_{00}/\eta_{+-} $	0.9950 ± 0.0007 (S = 1.6)
$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (1 - \eta_{00}/\eta_{+-})/3$	0.00166 ± 0.00023 (S = 1.6)
ϕ_{+-} , PHASE of η_{+-}	$43.51 \pm 0.05^\circ$ (S = 1.2)
ϕ_{00} , PHASE OF η_{00}	$43.52 \pm 0.05^\circ$ (S = 1.3)
$\phi_\epsilon = (2\phi_{+-} + \phi_{00})/3$	$43.52 \pm 0.05^\circ$ (S = 1.2)
$\text{Im}(\epsilon'/\epsilon) = -(\phi_{00} - \phi_{+-})/3$	$-0.002 \pm 0.005^\circ$ (S = 1.7)

0,05 % de précision !

Nobel prize committee (1980) : « The discovery emphasizes, once again, that even almost self evident principles in science cannot be regarded fully valid until they have been critically examined in precise experiments. »

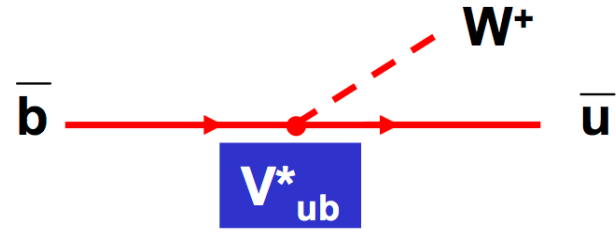
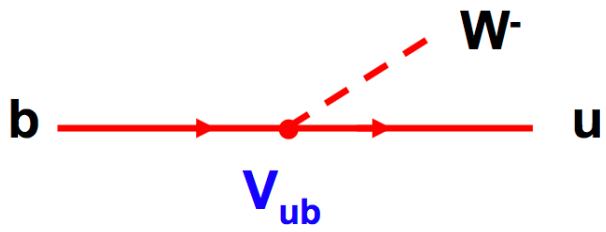
La violation de CP est sous-jacente dans le MS :

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



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

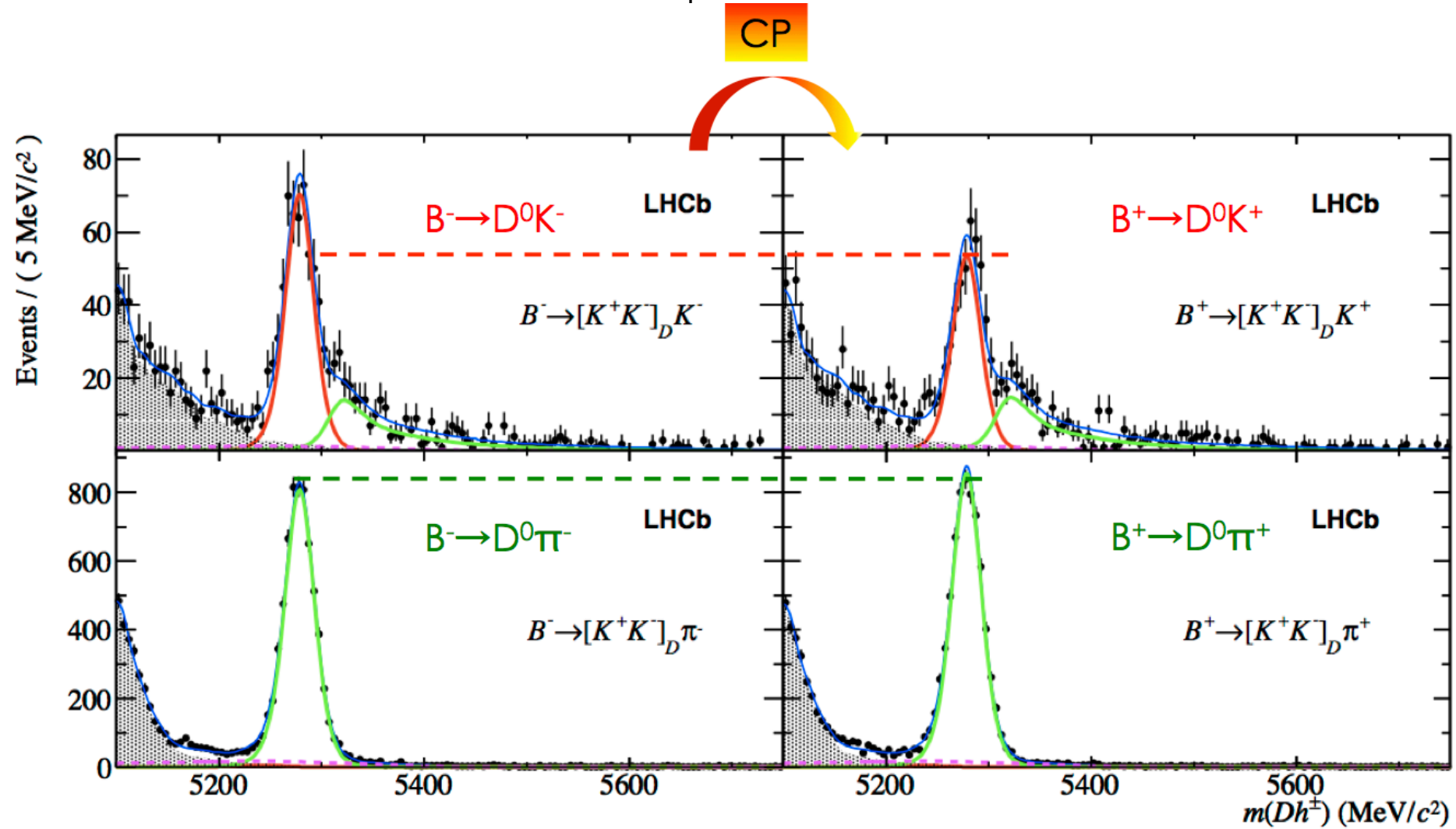
On peut montrer que les éléments de cette matrice sont complexes quand il y a au moins 3 familles dans la théorie



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

Autant de B- que de B+ produits

...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

→ Mercredi

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,

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

W. Pauli

Quelques années plus tard Fermi a appelé cette particule le neutrino



Détecter un neutrino est très difficile

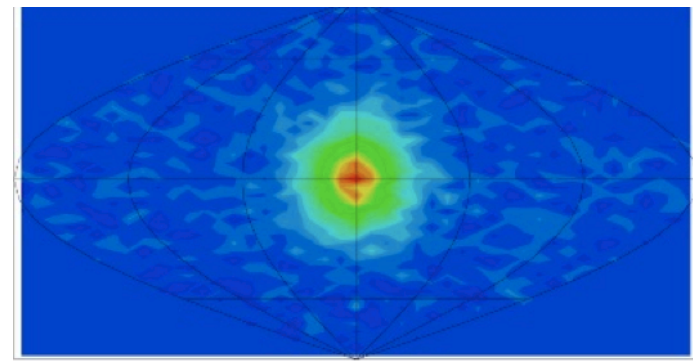
Si les neutrinos sont produits dans les désintégrations β alors on peut les détecter en utilisant la réaction inverse

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 ?

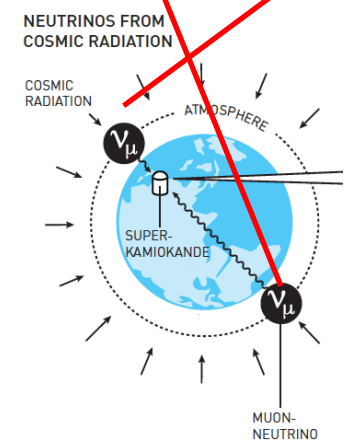
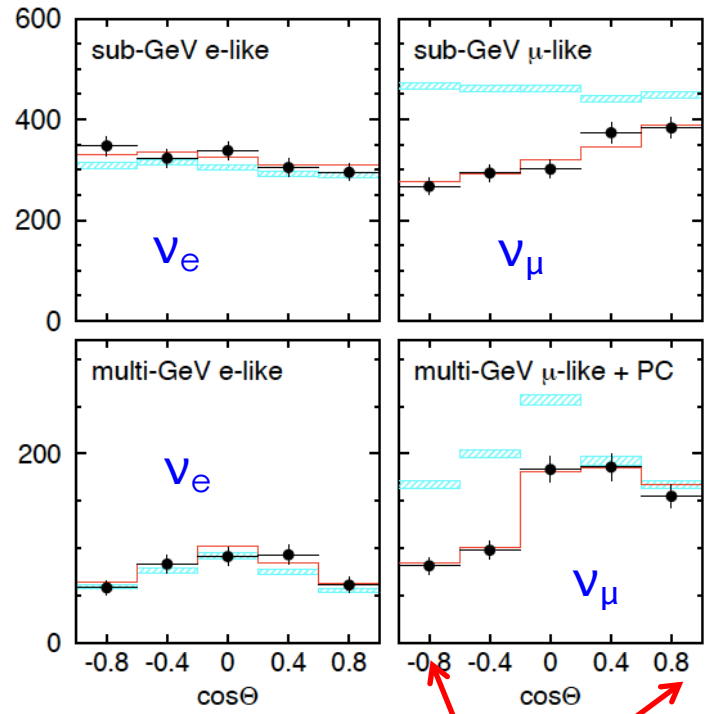
- on ne voit pas le nombre attendu de neutrinos

- 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

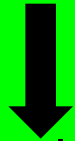
→ Prix Nobel de physique 2015 !

Unification électrofaible :

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

électromagnétisme
(QED)

interaction faible



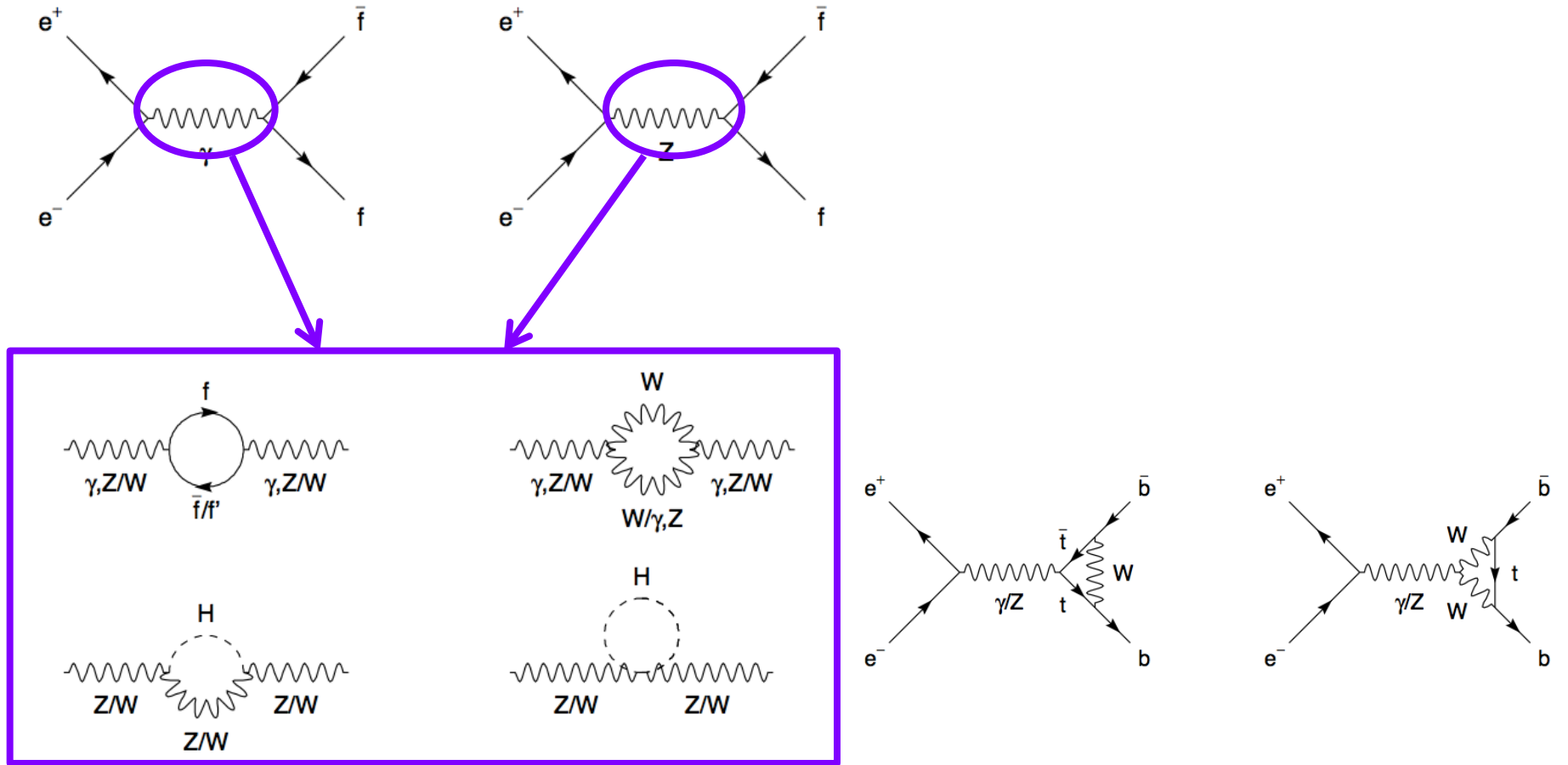
interaction électro-faible

+ 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 ?

Masse du quark top

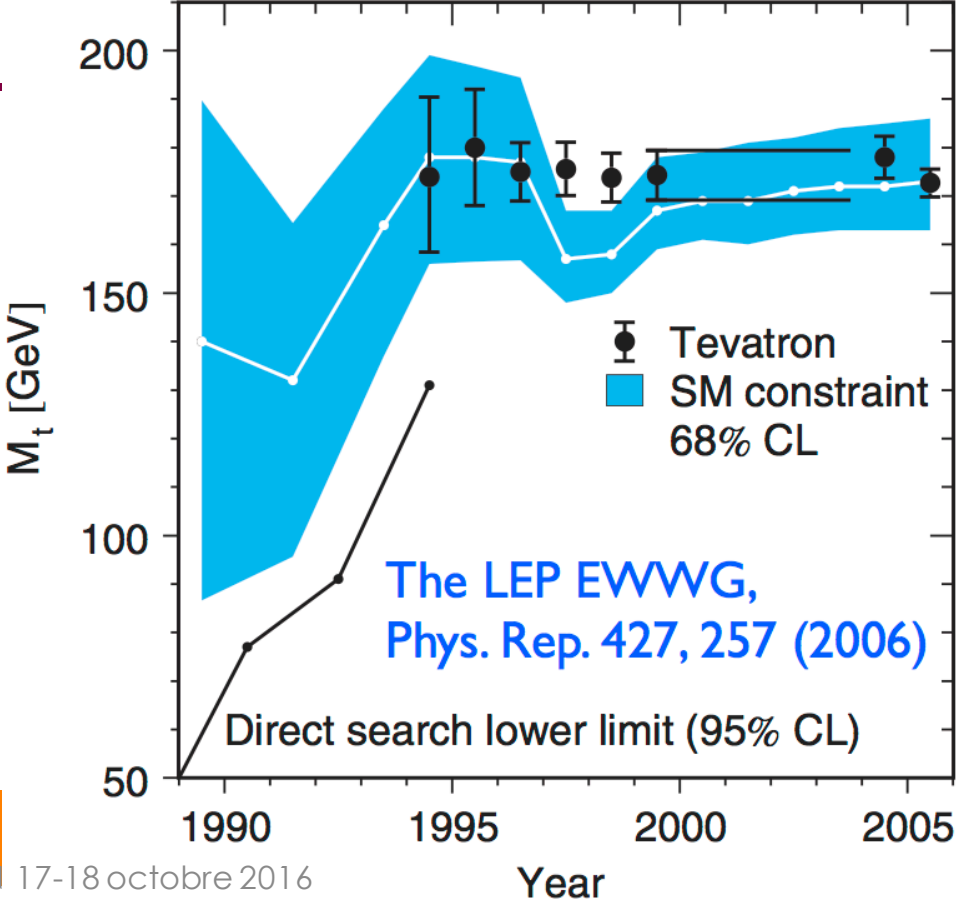


prédictions a partir des données de LEP1 (énergie = 90 GeV)



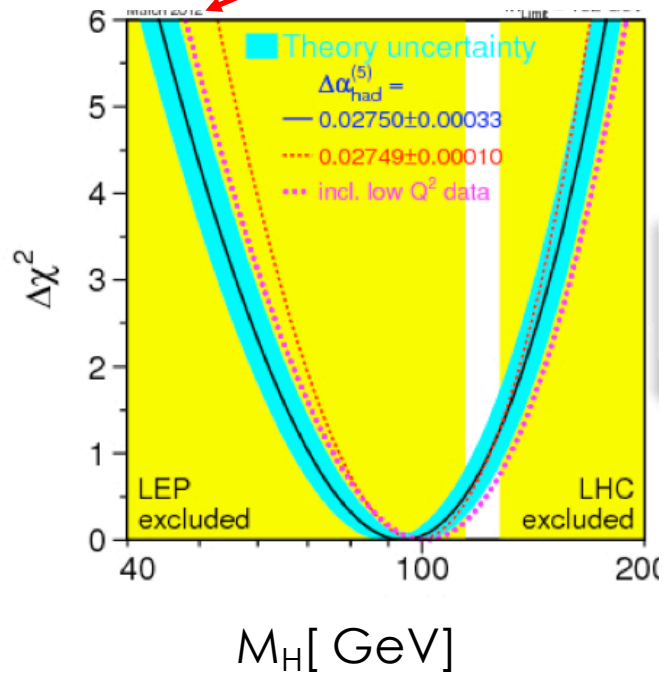
Mesure directe au TeVatron (E= 1.8 TeV)

Très bon accord !



Masse du boson de Higgs

Mars 2012



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

GAUGE AND HIGGS BOSONS INSPIRE search

H^0 $J = 0$

In the following H^0 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 H^0 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^\pm and $H^{\pm\pm}$)", respectively.

H^0 MASS	$125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$		
H^0 SPIN AND CP PROPERTIES			
H^0 DECAY WIDTH	$< 1.7 \text{ GeV}$ CL=95.0%		
H^0 SIGNAL STRENGTHS IN DIFFERENT CHANNELS			
Combined Final States	1.10 ± 0.11		
$W W^*$ Final State	$1.08^{+0.18}_{-0.16}$		
$Z Z^*$ Final State	$1.29^{+0.26}_{-0.23}$		
$\gamma \gamma$ Final State	1.16 ± 0.18		
$b \bar{b}$ Final State	0.82 ± 0.30 (S = 1.1)		
$\mu^+ \mu^-$ Final State	< 7.0 CL=95.0%		
$\tau^+ \tau^-$ Final State	1.12 ± 0.23		
$Z \gamma$ Final State	< 9.5 CL=95.0%		
$t \bar{t} H^0$ Production	$2.3^{+0.7}_{-0.6}$		
Decay Modes			
Mode	Fraction (Γ_i / Γ)	Scale Factor/ Confidence Level	P (MeV/c)
Γ_1 $W W^*$			
Γ_2 $Z Z^*$			
Γ_3 $\gamma \gamma$			62545
Γ_4 $b \bar{b}$			
Γ_5 $e^+ e^-$	$< 1.9 \times 10^{-3}$	CL=95%	62545
Γ_6 $\mu^+ \mu^-$			62545
Γ_7 $\tau^+ \tau^-$			62520
Γ_8 $Z \gamma$			29308
Γ_9 $J/\psi \gamma$	$< 1.5 \times 10^{-3}$	CL=95%	62507
Γ_{10} $Y(1S) \gamma$	$< 1.3 \times 10^{-3}$	CL=95%	62187
Γ_{11} $Y(2S) \gamma$	$< 1.9 \times 10^{-3}$	CL=95%	62143
Γ_{12} $Y(3S) \gamma$	$< 1.3 \times 10^{-3}$	CL=95%	62116
Γ_{13} $\mu \tau$	$< 1.51\%$	CL=95%	62532
Γ_{14} invisible	$< 58\%$	CL=95%	

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

Sa masse est mesurée : $125.09 \pm 0.21 \pm 0.11 \text{ GeV}$

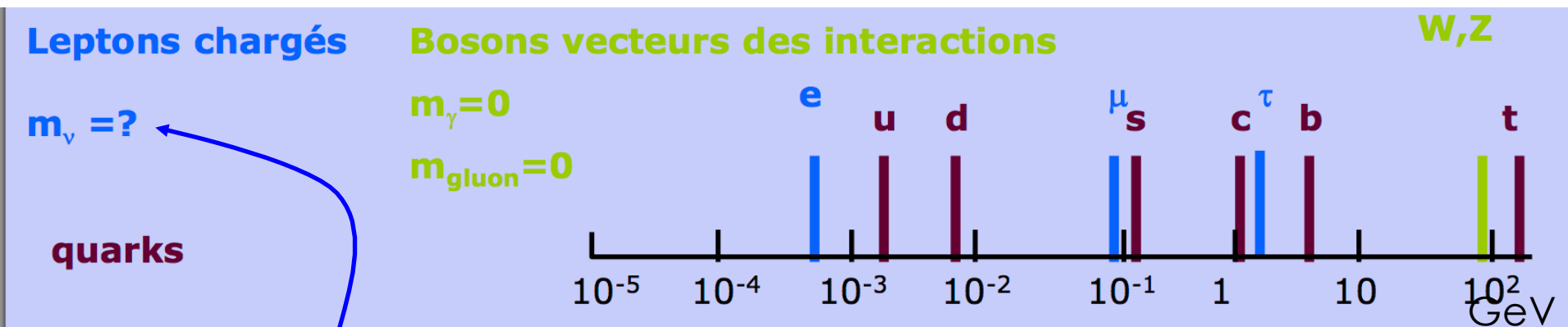
**Gaëlle Boudoul,
mercredi**



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 ?



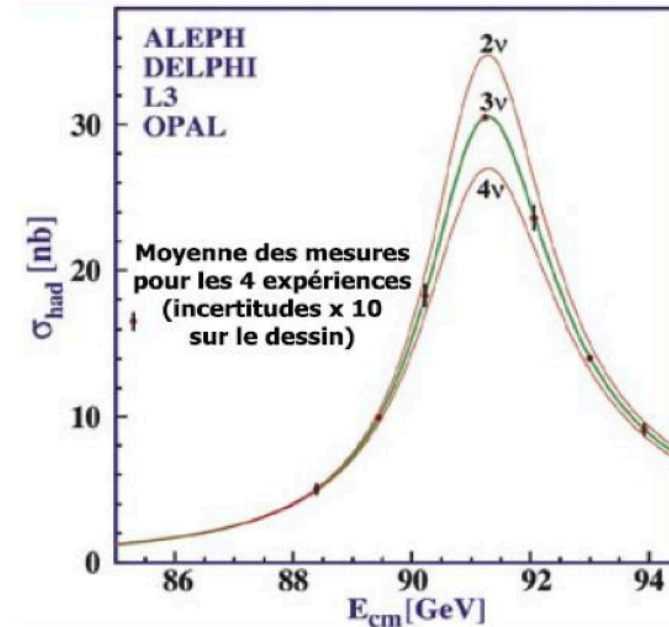
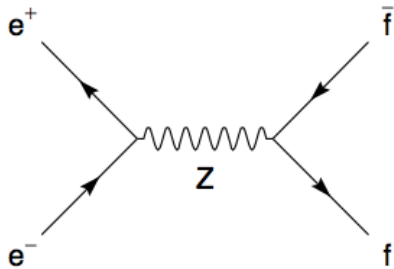
presque 0 mais pas tout à fait

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?

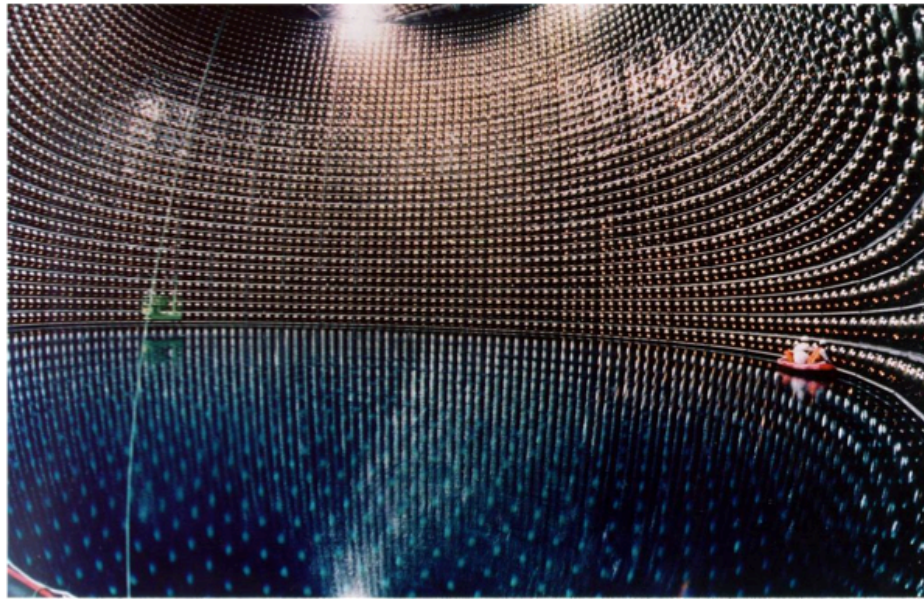
La charge des quarks serait alors liée à la charge des e et au nombre de couleurs !

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

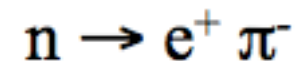
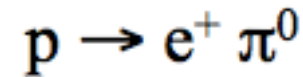
Mais :

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

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



Detecteur SuperKamiokande
50000 tonnes d'eau
 $3 \cdot 10^{34}$ nucléons (protons et neutrons)

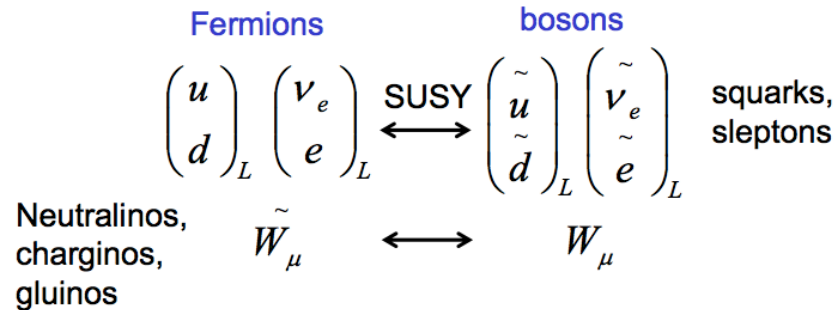


Vie moyenne $> 10^{33}$ ans

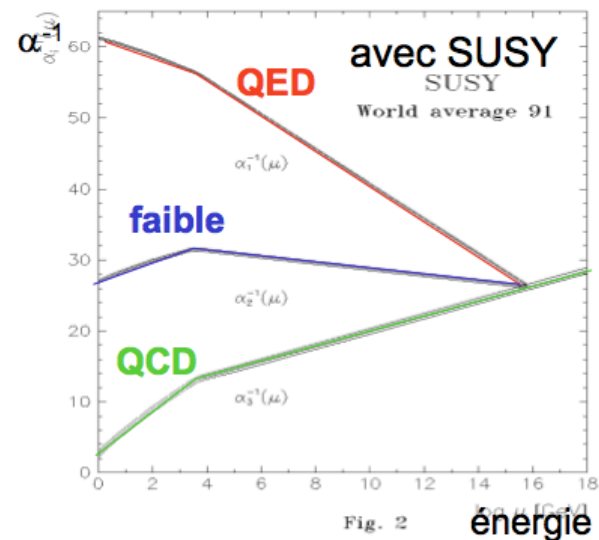
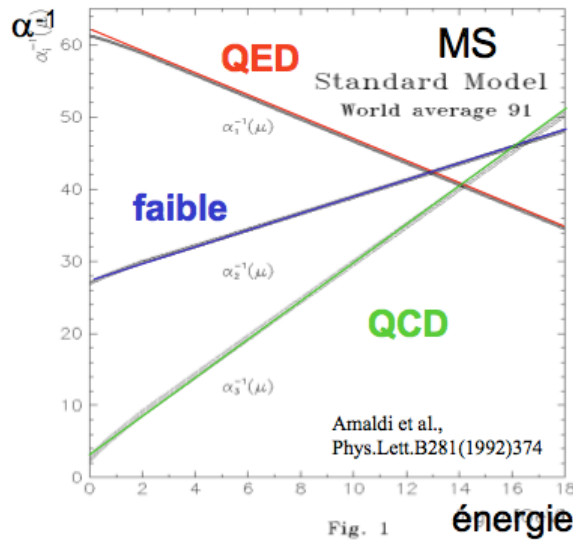
Unification $> 10^{15}$ GeV

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

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



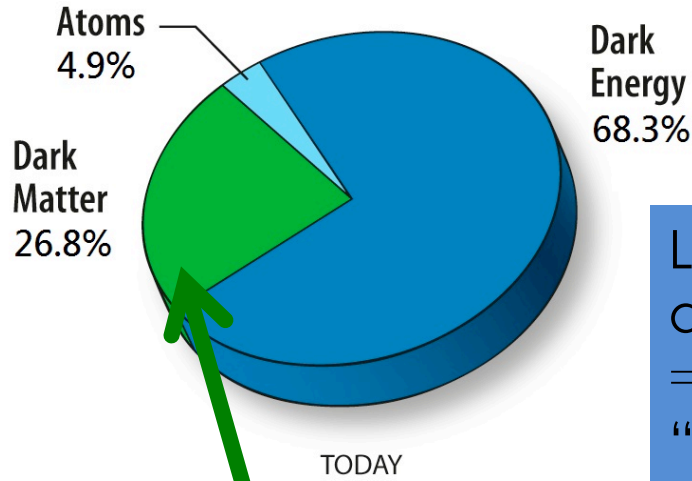
unification des couplages de jauges:



Mais :

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

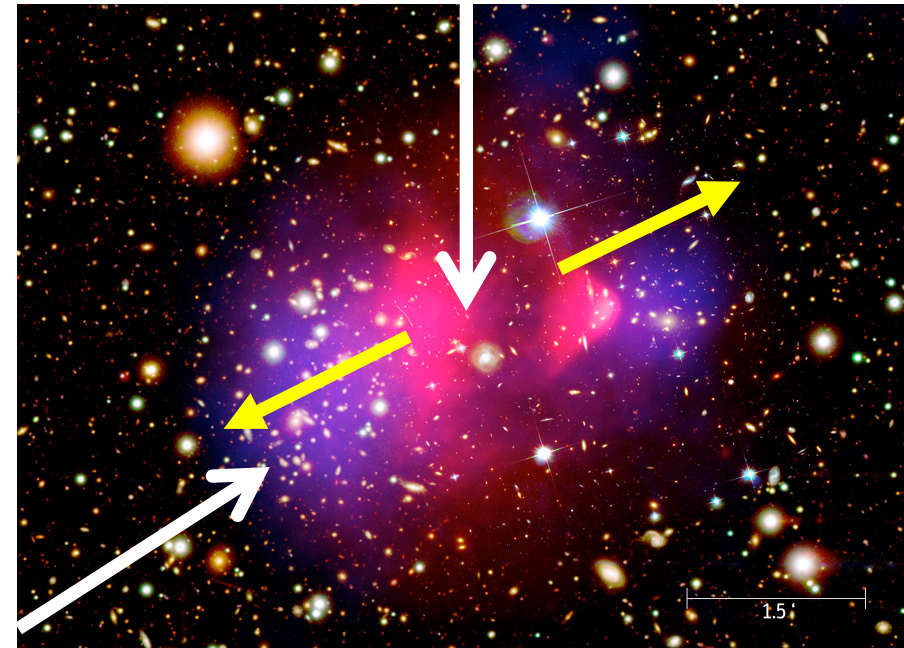
Q4 : comprend-on la composition de l'Univers?



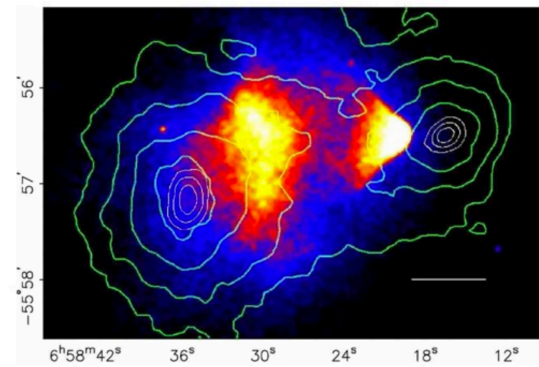
L'expansion de l'univers est plus rapide qu'attendu (Big Bang + relativité générale) ⇒ quelque chose d'autre doit entrer en jeu : "énergie noire"

Matière autre que celle du Modèle Standard

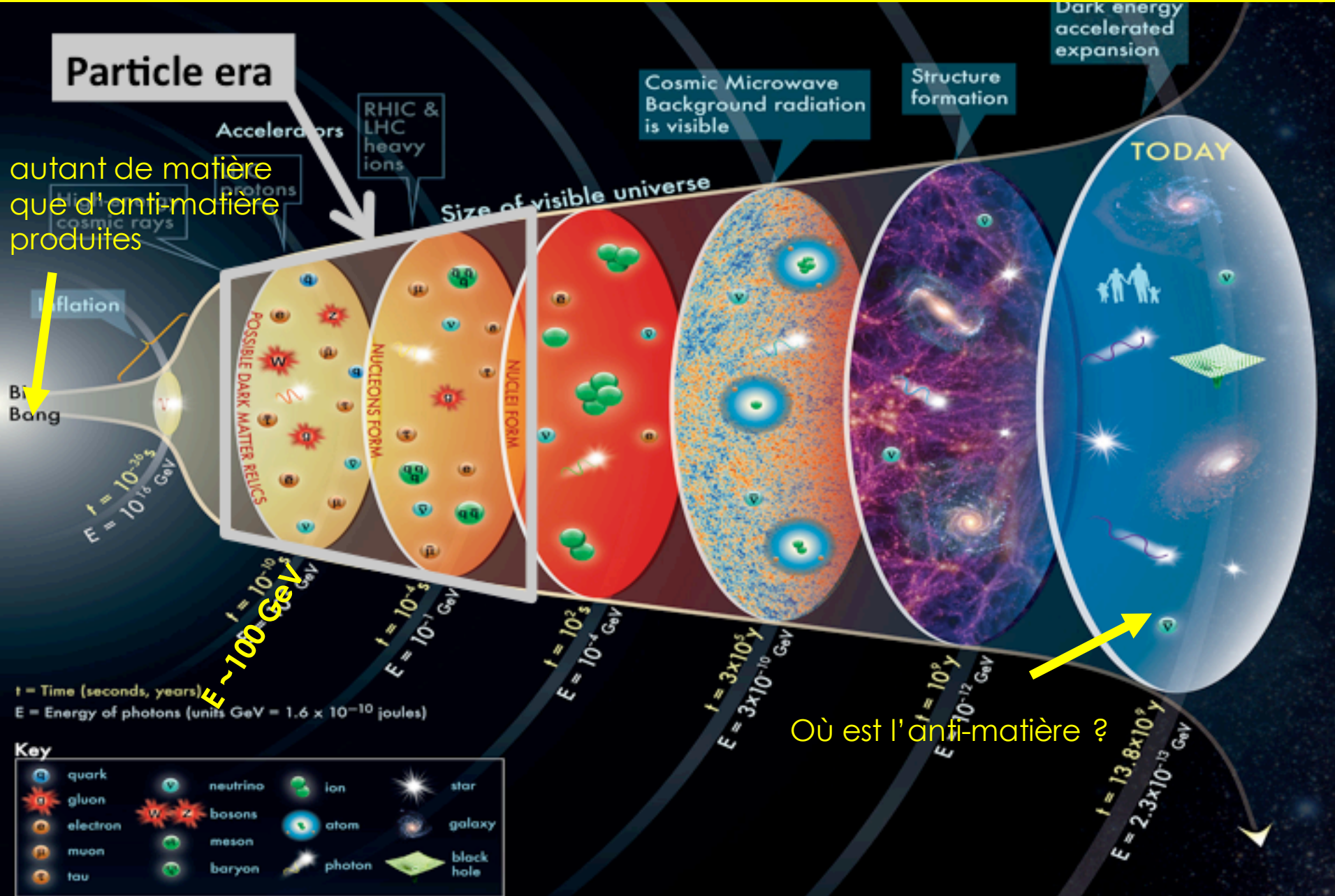
Mat. Baryonique (X-rays)



Mat. Noire (weak lensing)



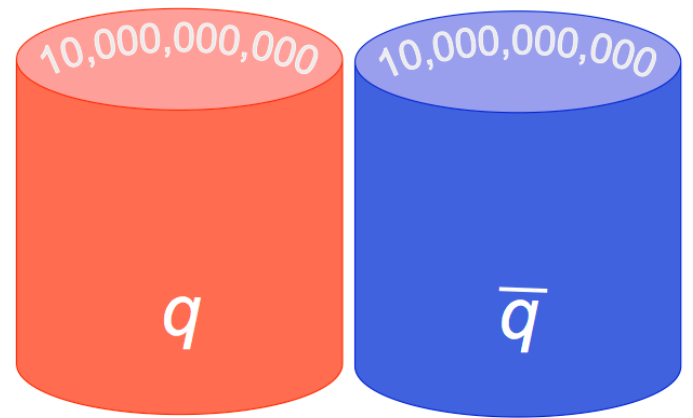
Q5 : mais ou est passée l'anti-matière ?



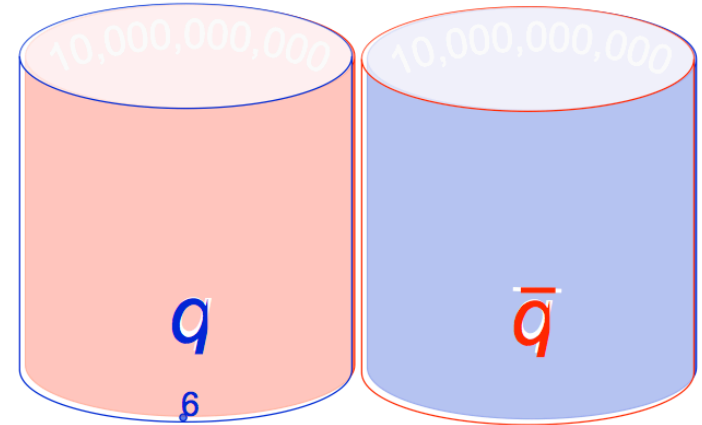
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

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

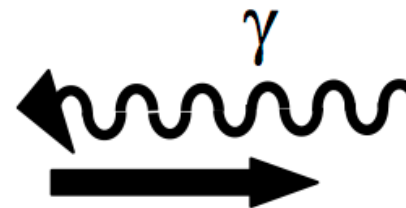
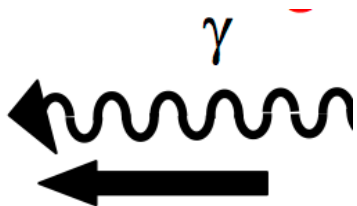
Le spin d'une particule est son moment angulaire intrinsèque : pas d'équivalent classique.

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



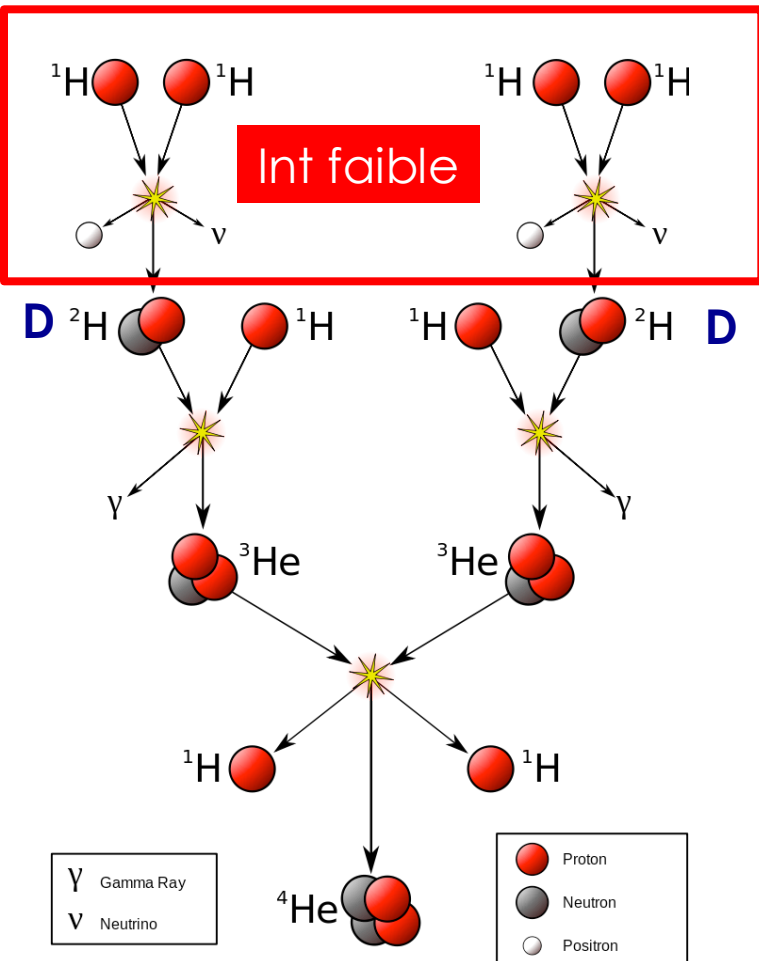
Une particule peut avoir n'importe quel moment orbital L mais son spin S est fixé

	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 (π, K, \dots)	mésons vecteurs (ρ, K^*)	certaines baryons (octet)	certaines baryons (décuplet)

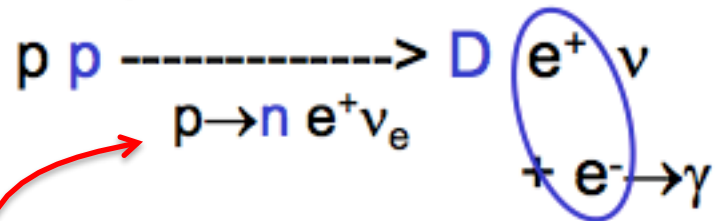


Pauli et Bohr observant une toupie tipp-top, ou « toupie magique », dont la particularité est de se retourner durant sa rotation (spin).
(Lund, Suède, juillet 1954)

L'interaction faible et le soleil



Wikipedia



bilan énergétique : +0.4 MeV

Diproton → Deutérium : extrêmement rare

1/2 vie du proton ds le soleil : 10¹⁰ ans

