


L'ère du boson Z^0



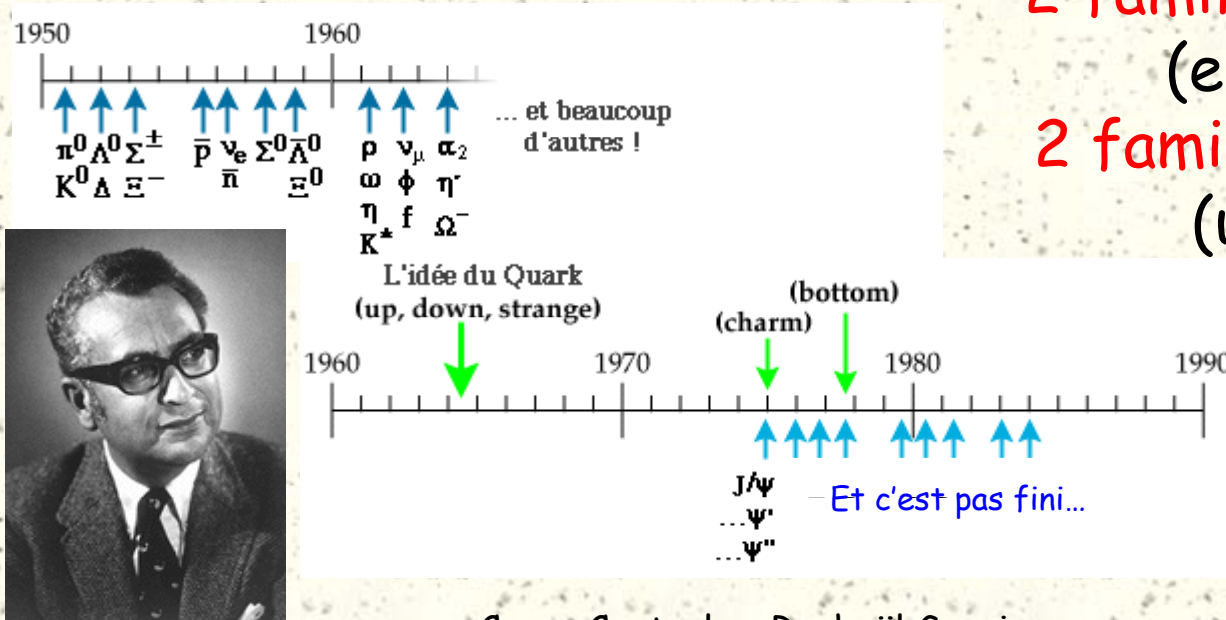
1973 - 2009...

Le modèle standard
(sans équation)

1973 - Bilan

- # Fantastiques succès de la QED (Feynman)
- # Doutes sur :
 - L'interaction faible (Fermi)
 - L'interaction forte (Yukawa)
- # Peu de particules élémentaires !

2 familles de leptons
 (e, ν_e) (μ, ν_μ)
 2 familles de quarks
 (u,d) (c,s)



Le modèle standard en lagrangiens

soit ...

Et encore, il manque des termes...

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{EF} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{g m_i}{2M_W} H \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu
 \end{aligned}$$

Electron, neutrinos, quarks...
Boson de Higgs
W⁺W⁻
Photon
Z⁰

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{QCD} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + i \sum_q \bar{\psi}_q^i \gamma^\mu (D_\mu)_{ij} \psi_q^j \\
 & - \sum_q m_q \bar{\psi}_q \psi_q
 \end{aligned}$$

Gluons
Couleur
Quarks
Saveur

Sa fonction

- # Le modèle de **T**héorie **Q**uantique des **C**hamps qui rend compte :
 - des **particules** les plus élémentaires que l'on connaisse aujourd'hui
 - et de leurs **interactions** !
- # Théorie (trop) complexe, mais fonctionnant (trop) bien
 - Quelques grandes idées
 - Quelques preuves expérimentales

Les quatre interactions

1. Electromagnétisme 1 * Infinie

→ particules chargés ⇒ cohésion atomique

2. Interaction faible 10^{-4} 10^{-18} m

→ quarks et leptons ⇒ désintégration β

3. Interaction forte 60 10^{-15} m

→ quarks ⇒ cohésion nucléaire

? Gravitation 10^{-41} Infinie

→ particules massives ⇒ mouvements célestes

* Intensité pour 2 quarks up distants de $3 \cdot 10^{-17}$ m

* Portée [$V \sim e^{(-r/r_0)} / r$]

Au fait, une particule élémentaire ?

Ponctuel ? Sans structure ?

■ Non, nuage de particules virtuelles

Sans constituant ?

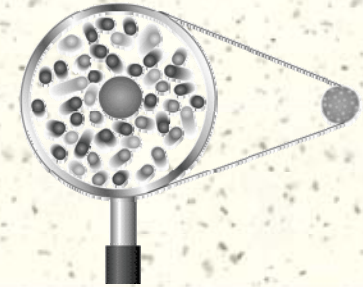
« que l'on ne peut fabriquer à l'aide d'autres particules » Définition récursive...

Un objet apparaissant dans les équations des processus les plus élémentaires ?


■ Définition formelle, peu attrayante...

■ Mais : équations invariantes sous certaines transformations...

... un objet possédant certaines symétries !



On lit ici ou là :




« Les particules élémentaires ne sont que les représentations irréductibles du groupe de Poincaré... »

Les symétries « élémentaires »

- # Les symétrie d'espace-temps
- # Le groupe de Poincaré :
 - Translation dans l'espace
 - Translation dans le temps
 - Rotation dans l'espace
 - Transformation de Lorentz (relativité restreinte)
- # Théorie des groupes établit qu'un objet invariant sous le groupe de Poincaré est étiquetable par deux nombres :
 - Un à valeur positive la masse ?
 - Un à valeur demi-entière le spin ?



Particule = une masse et un spin ?



Est-ce suffisant ?

Quid de la charge électrique ?

Pas que une représentation
du groupe de Poincaré...

Quelles autres symétries ?

I. L'électrodynamique quantique



ou *Quantum Electro Dynamics* (QED)
Une Théorie Quantique de Champs (TQC)

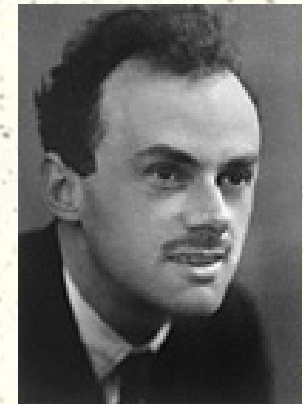
L'équation de Dirac



- # 1927 : Dirac établit l'équation du mouvement d'un électron libre, relativiste et quantique (spin $1/2$)

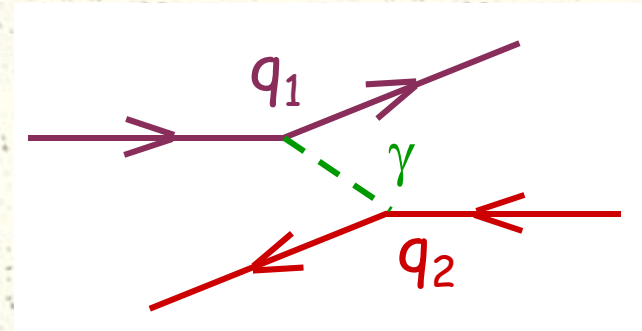
$$L = \bar{\Psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \Psi$$

- # Étrange équation admettant de nouvelles solutions → antimatière
- # 1932 : Découverte du positron
- # Ψ décrit particule + antiparticule
- # « *Mon équation est plus intelligente que moi* »



L'invariance de phase

- # L'équation de Dirac est invariante par transformation de phase globale $\psi \rightarrow \psi \cdot e^{i\alpha}$
- # Localité (indépendance de points éloignés) suggère des transfo. locale $\psi \rightarrow \psi \cdot e^{i\alpha(x)}$
- # Rétablir la localité \Rightarrow Coupler l'électron à
 - Un nouveau champ de spin 1, de masse nulle
 - Proportionnellement à un nouveau nombre (continu)
- # Ceci décrit fidèlement l'électromagnétisme ($m=0 \rightarrow$ portée infinie)
- # Deux particules **chargées** interagissent en échangeant un **photon**



Notion importante



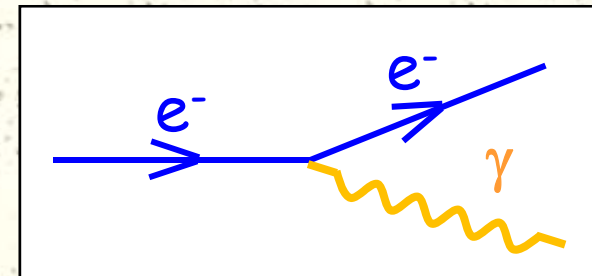
Symétrie ↔ Médiateur ↔ Propriété
Inv. de phase ↔ Photon ↔ Charge élec.

Les diagrammes de Feynman (1)

Schématisent et systématisent les calculs électromagnétiques

1. Le « vertex » élémentaire :

- Branches à orienter dans l'espace-temps.
- Si flèche dans le sens du temps : particule !
- Si flèche dans le sens inverse : antiparticule !
- Le photon étant son antiparticule : pas de flèche



La quantité naturelle, adimensionnée qui apparaît est :

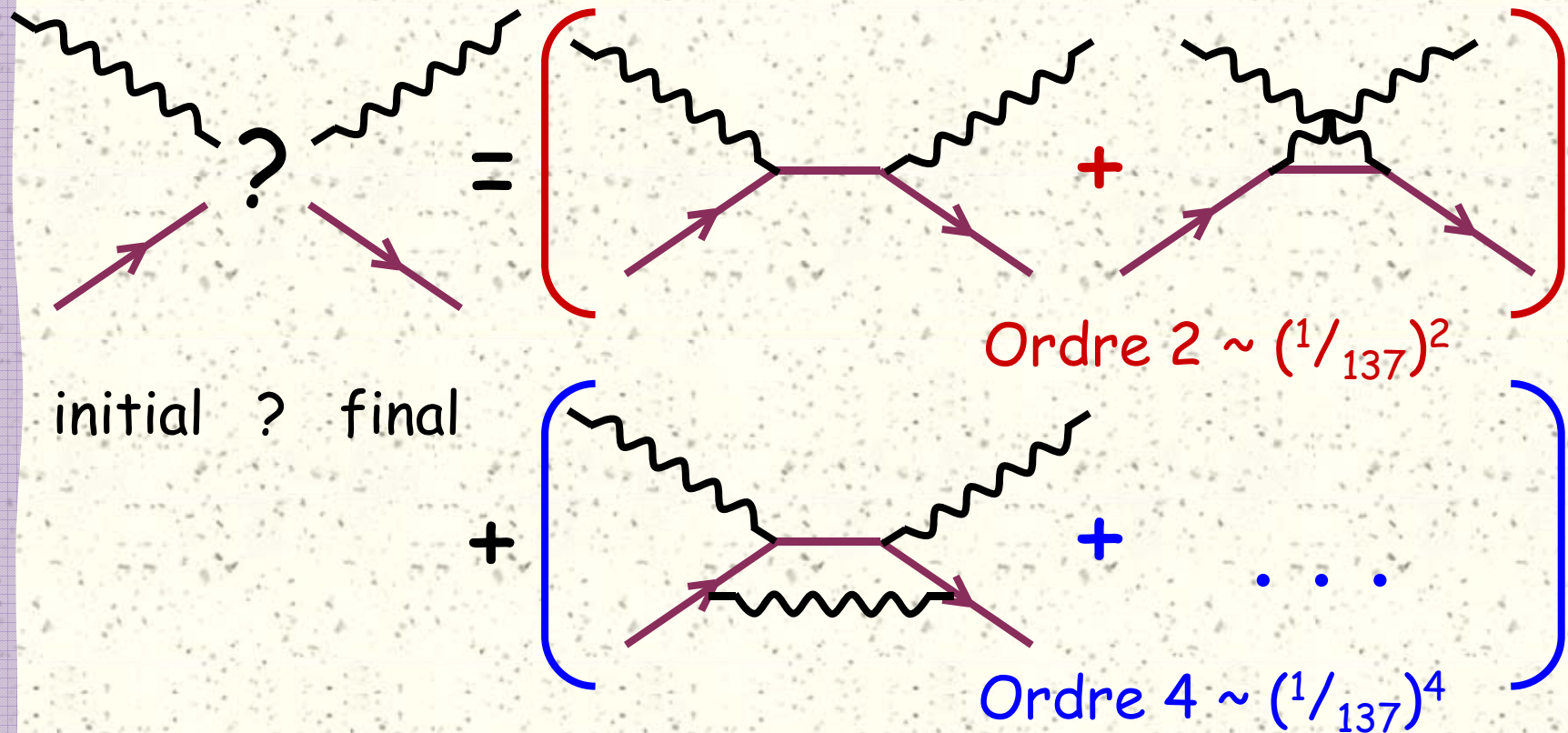
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

§ 1.3.1

Les diagrammes de Feynman (2)

2. Le développement « perturbatif »

Par exemple : la diffusion Compton



Succès de QED (1)

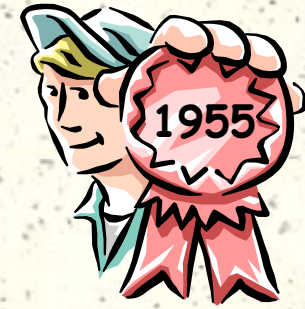
3. Règles de calcul des diagrammes...

- Intégrale des vertex sur l'espace-temps
- Conservation d'énergie-impulsion aux vertex
- Sommation sur énergie-impulsion non contrainte
- Particules intermédiaires *virtuelles* ($E^2 \neq p^2 + m^2$)

Bonne description de nombreux phénomènes :

- Compton $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$
 - Annihilation $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$
 - Møller $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$
 - Bhabha $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$
 - Bremsstrahlung $N + e^- \rightarrow N + e^- + \gamma$
 - Création de paires $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$
- (probabilité, distributions angulaires, etc.)

Succès de QED (2)



1947 deux mesures fines...

Lamb : structure fine de l'hydrogène

■ Séparation $2s^{1/2}$ $2p^{1/2}$

■ $\Delta E_{th} = 1057,864 \pm 0,014$ MHz ©1997

■ $\Delta E_{exp} = 1057,862 \pm 0,020$ MHz ©1997

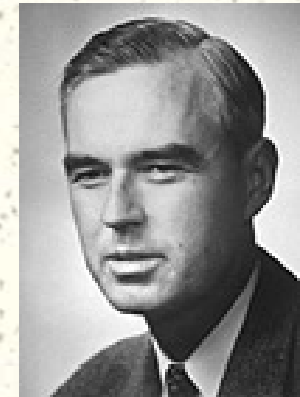
Kusch : moment magnétique de l' e^-

■ $a = (g-2)/2$

■ $a_{th} = 0,001\ 159\ 652\ 1535(240)$

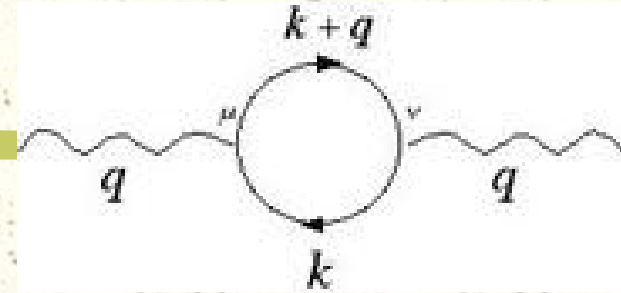
■ $a_{exp} = 0,001\ 159\ 652\ 1884(043)$

Théorie vérifiée à 10 décimales près !



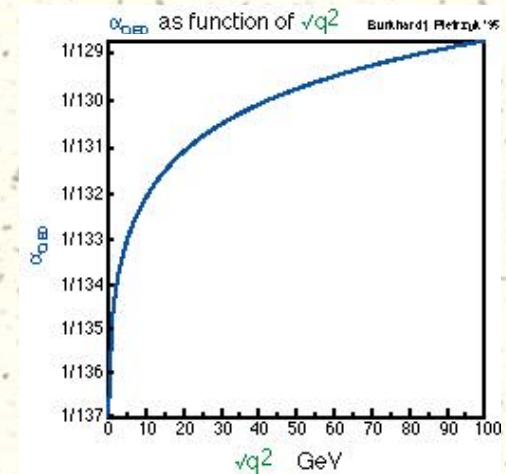
Un problème !

- # Certains diagrammes divergent (boucles)
- # Habillent les électrons d'un nuage de particules virtuelles
- # À basse énergie, invisibles
- # À haute énergie, visibles et modifient (*écranent*) la charge électrique
- # Or, la charge utilisée est celle de basse énergie ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \rightarrow \alpha = 1/137$) **Erreur !**



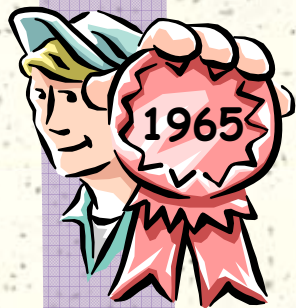
Une solution : la renormalisation

- # La procédure (très complexe) de **renormalisation** corrige cette erreur
- # Diagrammes divergents remplacés par constante α dépendant de l'énergie
- # Les constantes ne le sont plus ! Mais restent **fondamentales** !
- # **1/137** \rightarrow 1/129 @ 91 GeV
- # Vu dans collisions $e^+ e^-$

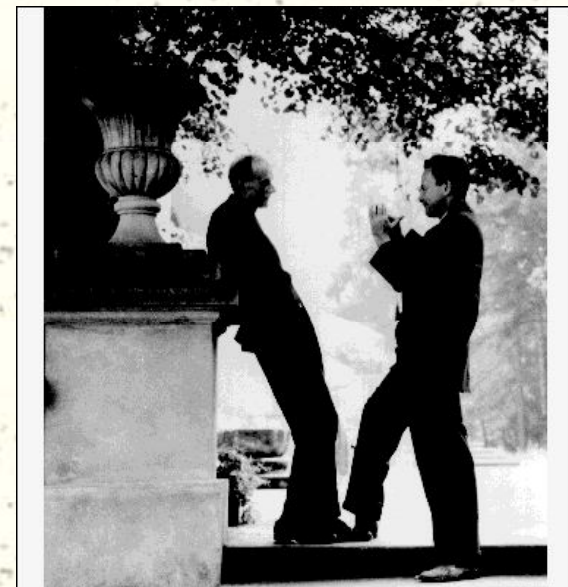


Électrodynamique quantique

- # 1927 : équation de Dirac
- # 1947 : diagrammes de « Feynman »
- # 1948 : renormalisation...



Feynman, Schwinger, Tomonaga



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

Dirac & Feynman

II. L'interaction faible

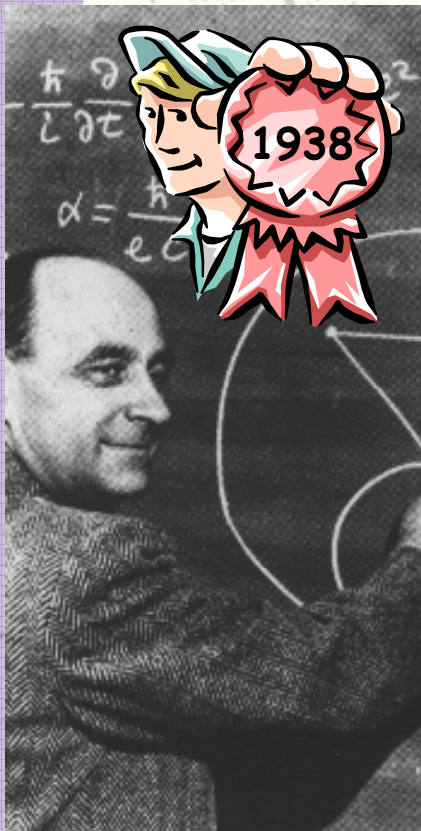


Ou plutôt électrofaible

1^{ère} tentative : théorie de Fermi

1933 : Enrico Fermi propose immédiatement une théorie...

$$G_F = 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$



Une seule constante capable de rendre compte de :

- Désintégration β^-
- Désintégration β^+
- Capture électronique
- Désintégration muon
- Capture muonique

Vertex à quatre branches

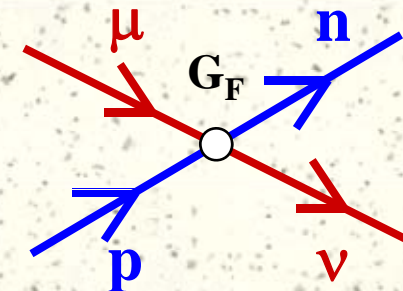
$$n \rightarrow p^+ + e^- + \text{anti}(\nu)$$

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$e^- + p^+ \rightarrow n + \nu_e$$

$$\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$$

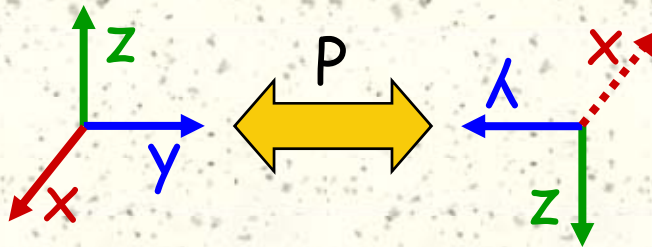
$$\mu^- + p^+ \rightarrow n + \nu_\mu$$



La parité

§ 4.2

P : opération de renversement des coordonnées spatiales



$$\begin{aligned}x &\leftrightarrow -x \\ p &\leftrightarrow -p \\ L &\leftrightarrow L \\ (L = x \wedge p)\end{aligned}$$

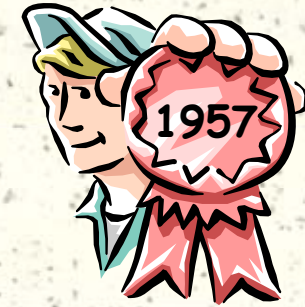
Problème : puzzle $\theta\tau$ (1956)

■ Deux particules de masse et temps de vie *identiques*, se désintègrent dans des modes de parités *opposés*...

■ $\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ & $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$

Solution : même particule $\theta^+ = \tau^+ = K^+$

Violation de la parité



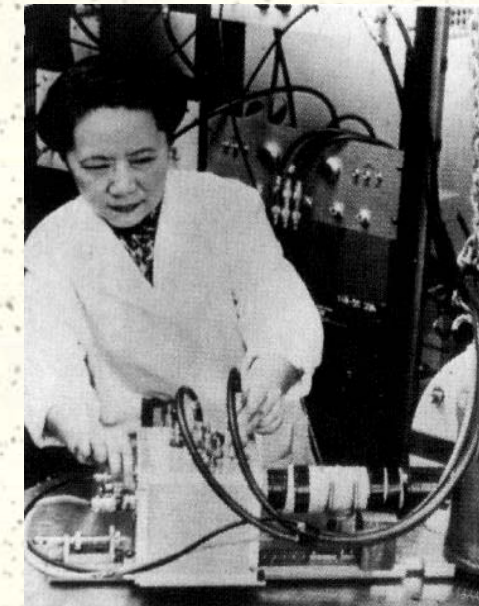
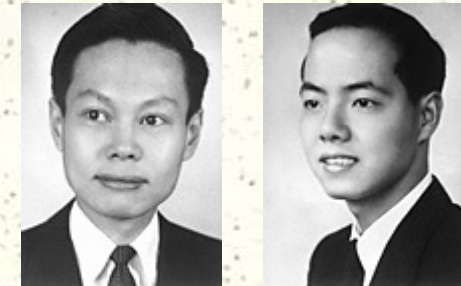
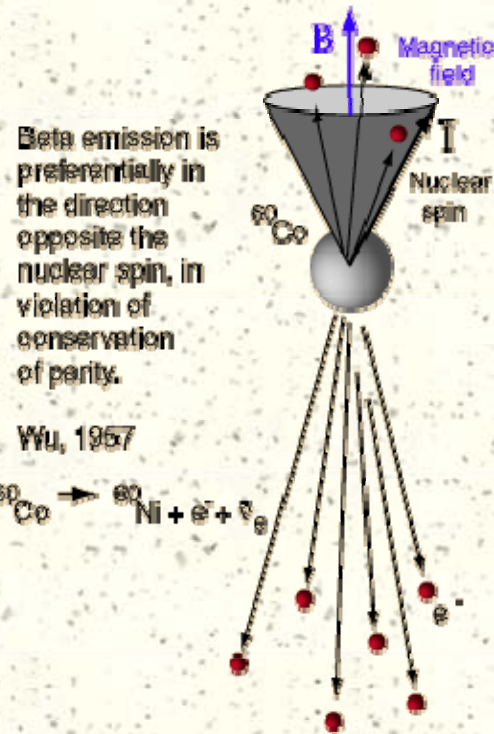
1956 : Lee et Yang

■ Interaction faible viole P ?

1957 : l'expérience de M^{me} Wu

■ Le montre...

Désintégration
 ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^{-} + \bar{\nu}_e$
dans champ
magnétique B,
électron est émis à
l'opposé de B !



Un problème...

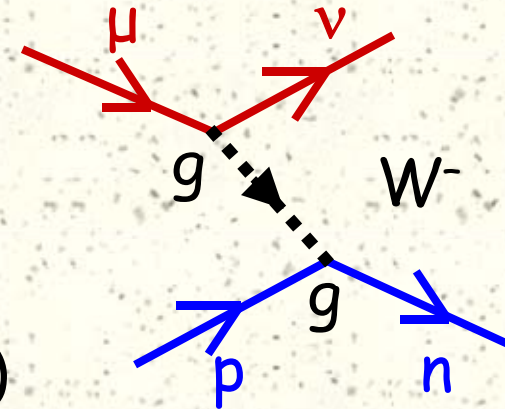
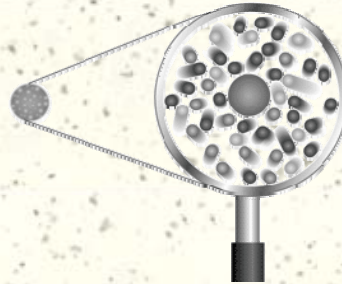
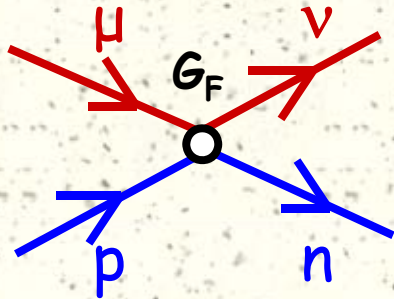
Théorie de Fermi + violation de parité

- Bonnes prédictions à basse énergie

Mais...

- Constante de couplage dimensionnée
 $G_F \sim 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} (\hbar c)^3$
- Sections efficaces divergent à haute énergie ($\sim 100 \text{ GeV}$)
- Théorie non renormalisable !

...une solution !



(petite distance = grande énergie)

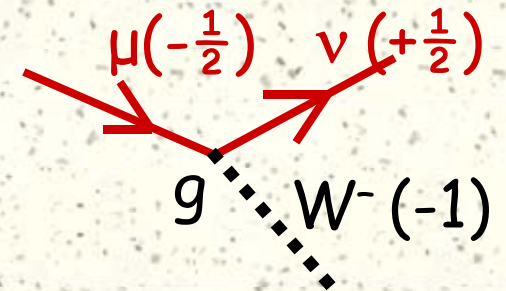
- # L'interaction faible portée par deux bosons médiateurs massifs et chargés
- # Quelle symétrie ? Quelle charge ?
- # Plusieurs tentatives !

$$G_F \sim g^2/M_W^2$$
$$M_W \sim 100 \text{ GeV}$$

Le groupe $SU(2) \otimes U(1)$ (Glashow 1960)

$SU(2)$ 3 bosons de charge +1, -1, et 0 (?)

- W^\pm + un boson neutre (pas le photon)
- Isospin faible I_3
- $(e, \nu_e)_L$: isospin $\frac{1}{2}$ projections $(-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2})$
- Pareil pour $(\mu, \nu_\mu)_L$ $(u, d)_L$ $(c, s)_L$



$\otimes U(1)$ un boson neutre

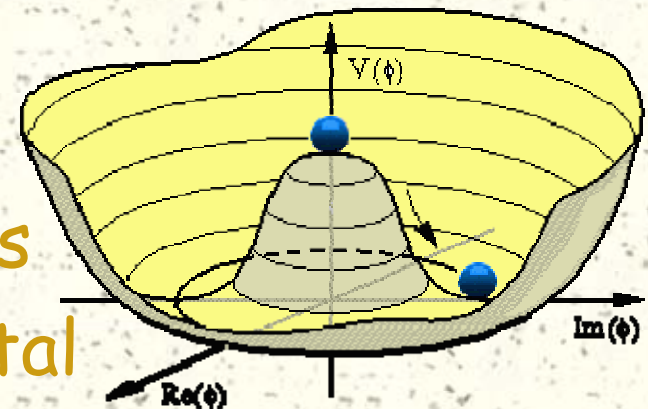
- Les deux neutres se mélangent pour donner :
- le photon
- un autre boson : le Z^0
- Hypercharge faible Y

$$Q = I_3 + Y/2$$

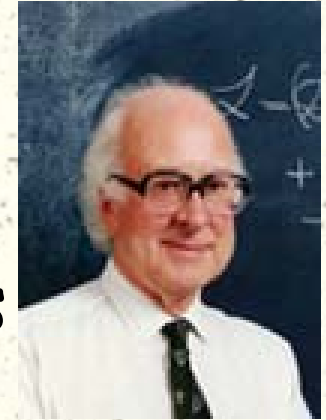
	I_3	Y	Q	
e	$-1/2$	-1	-1	μ
ν_e	$1/2$		0	ν_μ
d	$-1/2$	$1/3$	$-1/3$	s
u	$1/2$		$+2/3$	c

Encore un problème !

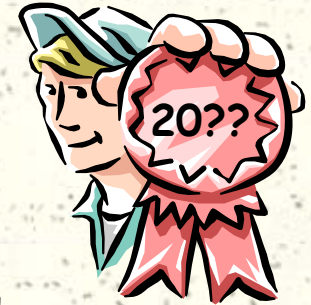
- # Théorie de type $SU(2)$ n'admettent pas de bosons médiateurs massifs !
 - Donner une masse \leftrightarrow brise la symétrie
- # Solution : brisure spontanée de symétrie
 - Potentiel symétrique
 - Minima égaux symétriques
 - Choix de l'état fondamental brise la symétrie



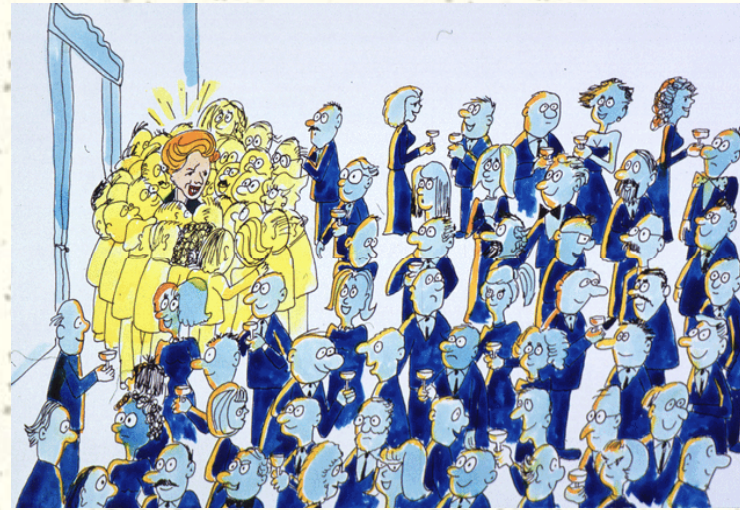
Le mécanisme de Higgs (1964)



- # Nouvelle particule : le boson de Higgs
 - Particule (champ) plongée dans un tel potentiel
- # Le couplage Higgs - W^\pm ou Z^0
 - leur donnent leur masse
- # Note : il en va de même de la masse des quarks et des leptons !
- # Très activement recherché !
- # de spin nul, de charge nulle et massif :
 - $114,4 \text{ GeV} < m_H < 241 \text{ GeV} \rightarrow \text{LHC construit pour...}$



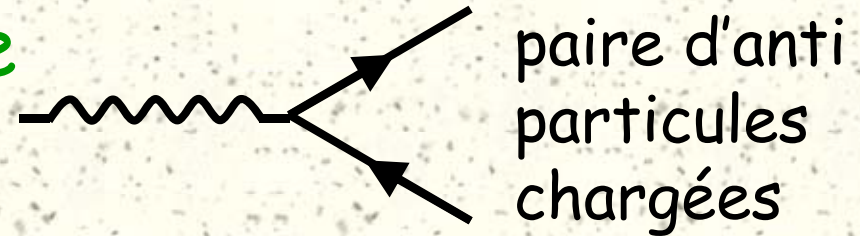
Le boson de Higgs avec les mains



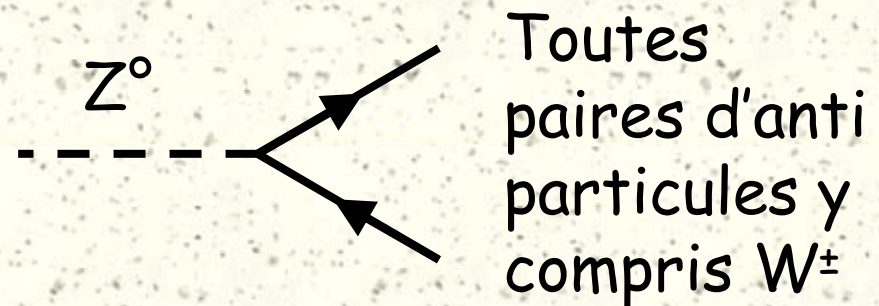
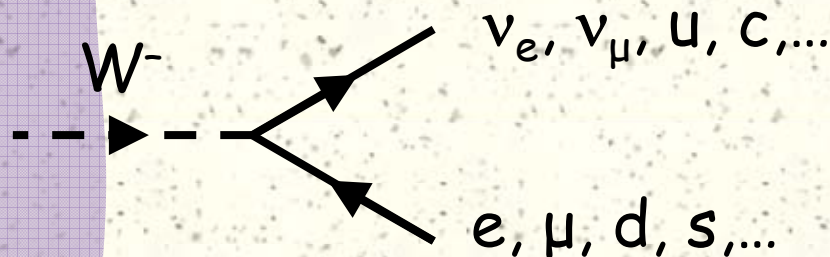
d'après David Miller.

1967 : $SU(2) \otimes U(1) + \text{Higgs}$

Photon, médiateur de l'électromagnétisme



$W^\pm Z^0$: médiateur de l'int. faible



Boson de Higgs...

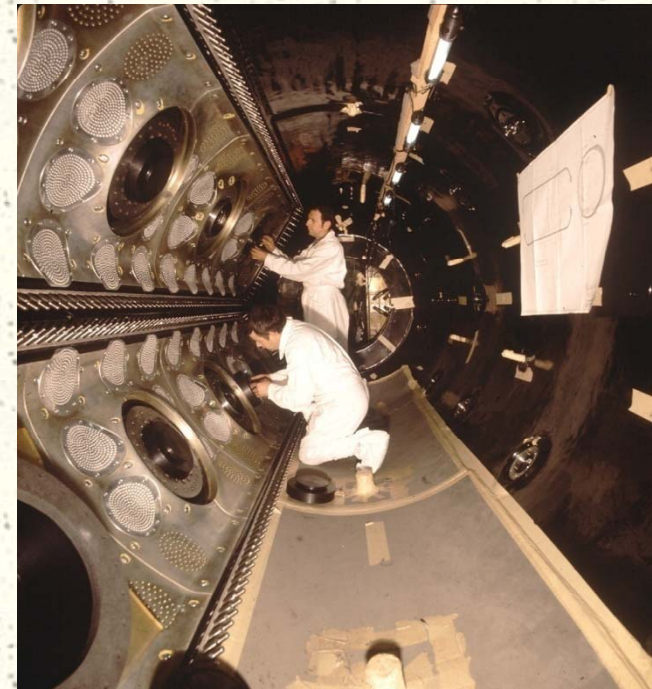
Découverte des courants neutres

1973 : expérience **GARGAMELLE** au CERN

▣ Chambre à bulles 6,3 m³ CF₃Br

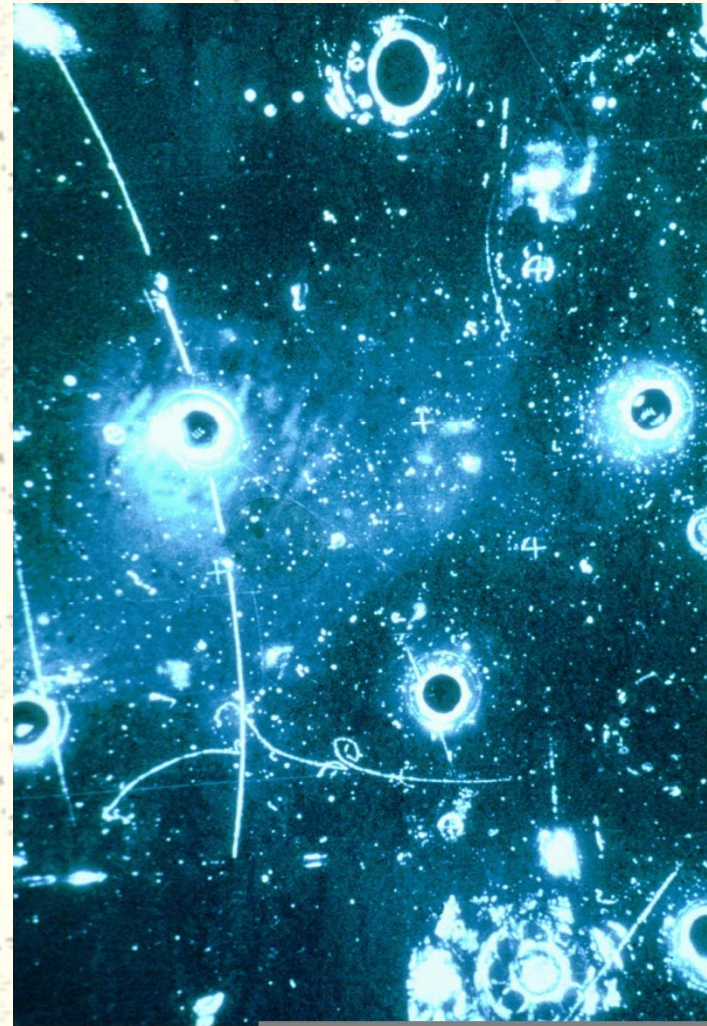
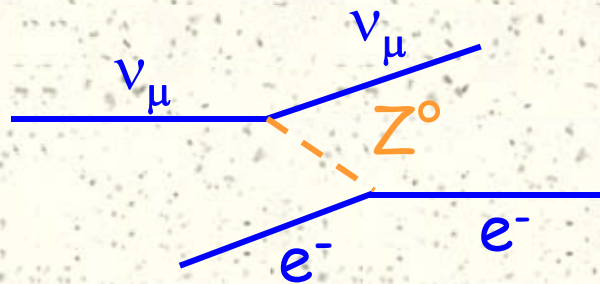
▣ Faisceau de neutrinos et antineutrinos

Inspiré par le modèle standard, Donald Perkins ré-analyse des données anciennes à la recherche de $\nu_{\mu} e(\text{repos}) \rightarrow \nu_{\mu} e \dots$



Le premier Z^0

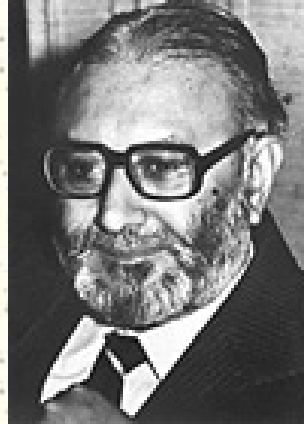
Un événement !



Prix Nobel électrofaible...



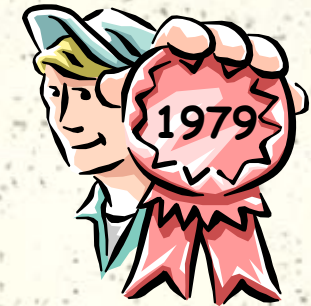
Glashow



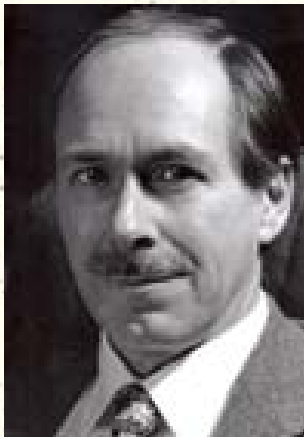
Salam



Weinberg

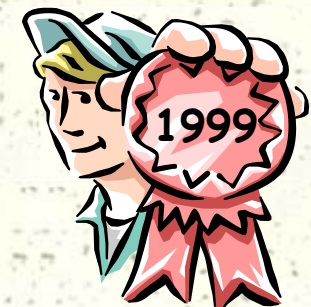


Veltman




't Hooft

Renormalisation
des théories
à la $SU(2)$

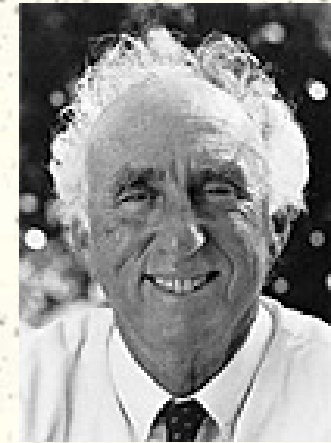


Parenthèse



La troisième famille

Le troisième lepton

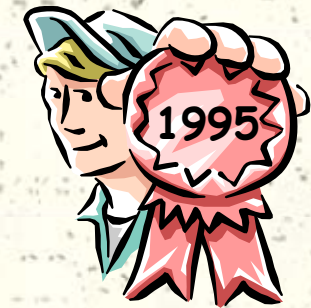


1975 : Martin Perl scanne les événements de l'exp. SPEAR (Stanford) de 73 et 74 à la recherche de $e^+e^- \rightarrow \mu^+e^-$

■ (violation du nombre leptonique)

Il en trouve tellement qu'il ne peut l'expliquer que par :

Un nouveau lepton !
(le τ) inattendu...

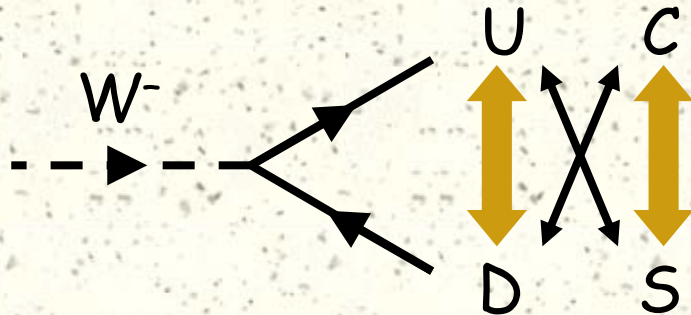


$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$$

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$$

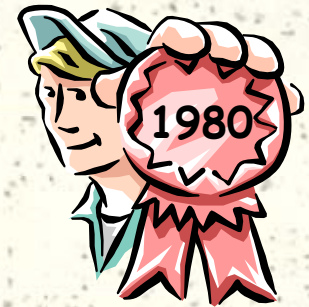
$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

Le mélange des quarks



Les états propres de « saveurs » ne sont pas les états propres « faibles »

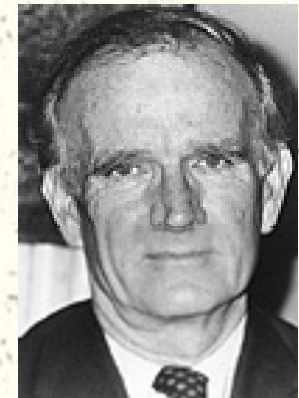
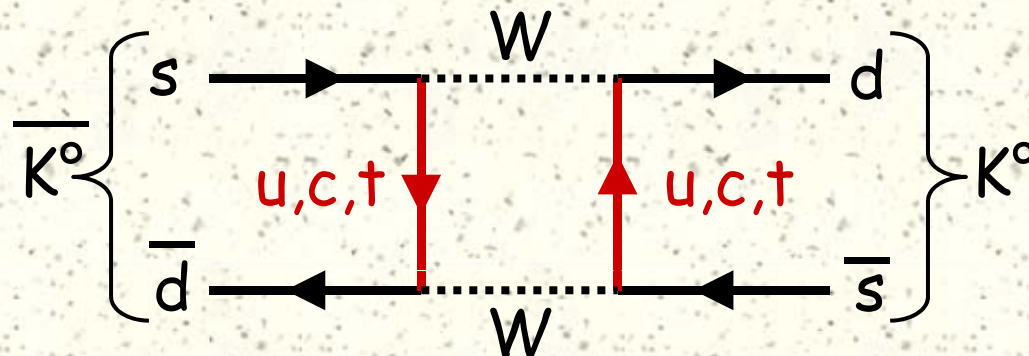
Violation de CP



- # 1957 : Violation *maximale* de C et P
 - Mais $C \times P$ conservée jusqu'à...
- # 1964 : découverte par Christensen, Cronin, Fitch & Turlay d'une légère violation.

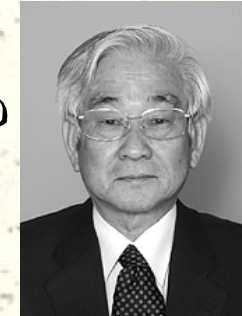
$$K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$$

- # 1973 : expliquée par Kobayashi & Maskawa s'il existe un troisième doublet de quarks !



Matrice Cabibbo Kobayashi Maskawa

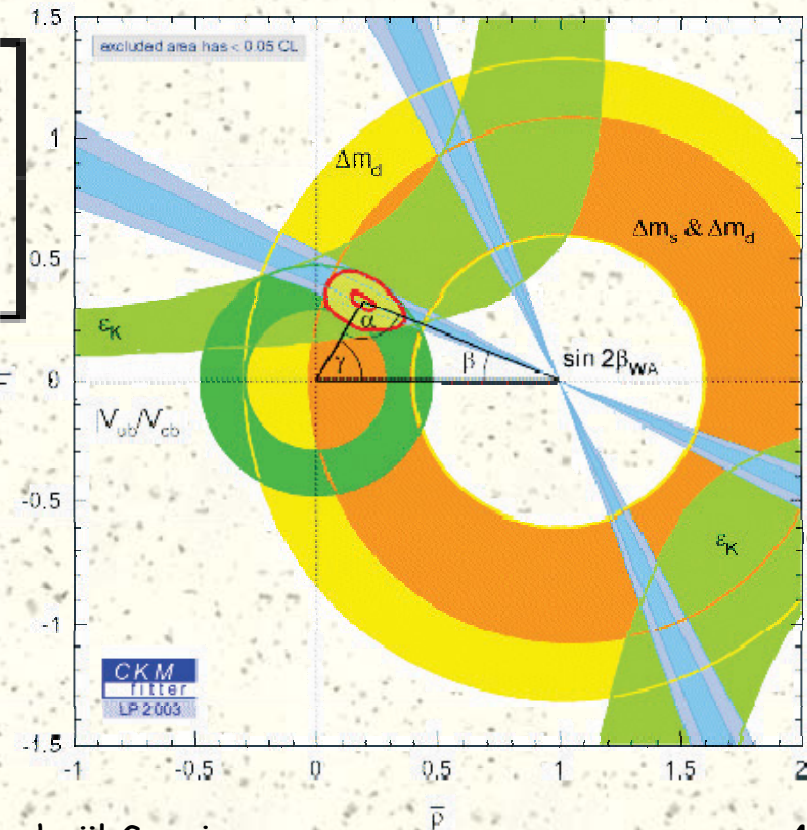
Une matrice donne la correspondance (u,c,t) (d,s,b)



$$\begin{bmatrix} 0.9753 & 0.221 & 0.003 \\ 0.221 & 0.9747 & 0.040 \\ 0.009 & 0.039 & 0.9991 \end{bmatrix}$$

Contient la violation de CP !

Testée de façon redondante →



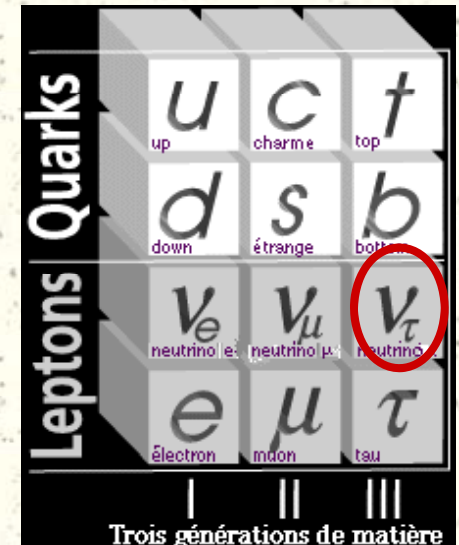
Le troisième doublet de quarks

1977 : découverte du quark b (bottom ou beauty)

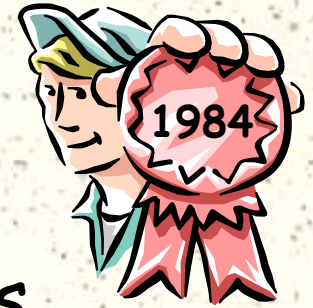
- Section efficace $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ @ 9,5 GeV
- Résonance Υ (Upsilon) = état lié $b\bar{b}$
- Proton sur cible @ 400 GeV @ Fermilab

1995 : découverte du quark t (top)

- Expériences D0 et CDF (FNAL)
- Collisions pp @ 1,8 TeV
- $m \sim 175$ GeV (le plus lourd)
- Prédit à 12% par le CERN!
 - (présence de top virtuel au Z^0)



Des tas de Z^0 et de W^\pm ...



1983 : le CERN produit plein de bosons

Collision p+p à 540 GeV

Mesure :

- des temps de vie,
- des masses,
- taux de désintégration,
- ...

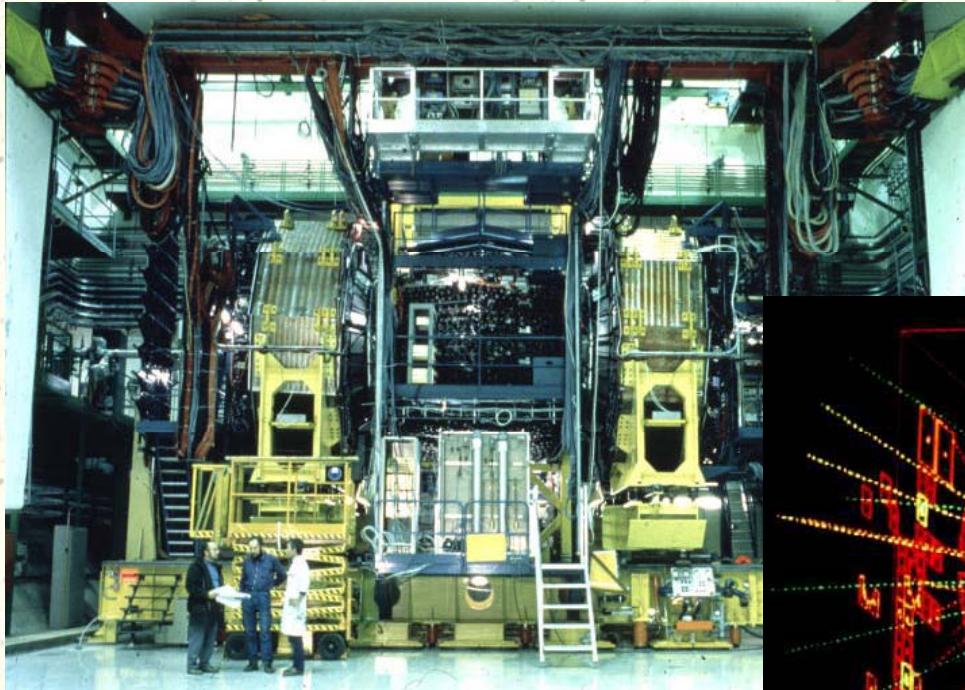


Carlo Rubbia et
Simon Van der Meer

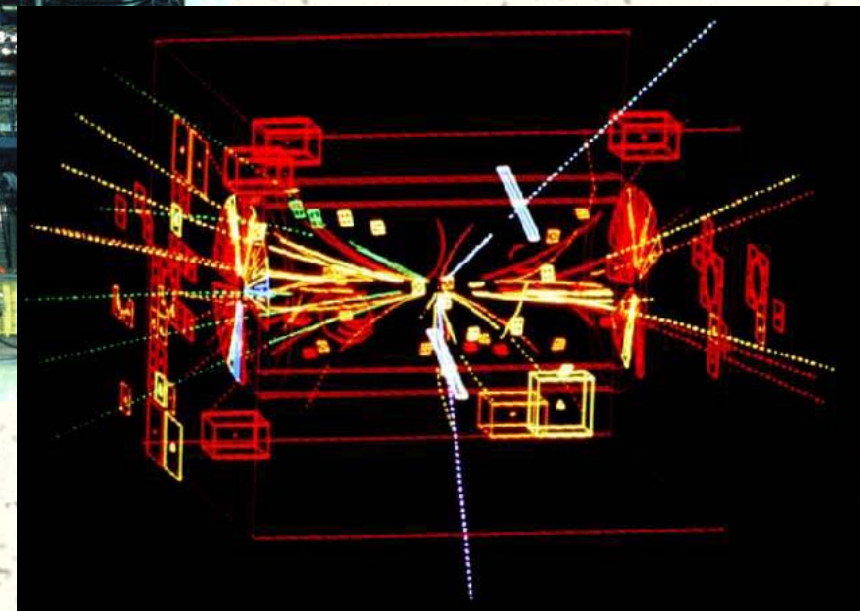
➤ Tests fins de l'interaction faible

➤ Prédiction (vérifiée) de la masse du top

Expériences électroniques...

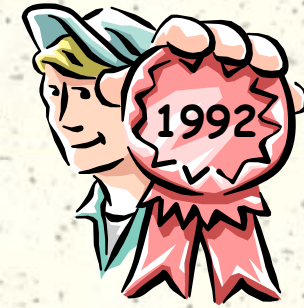


Expérience UA2



Premier Z^0 dans UA1

La chambre à fils



1969 Georges Charpak

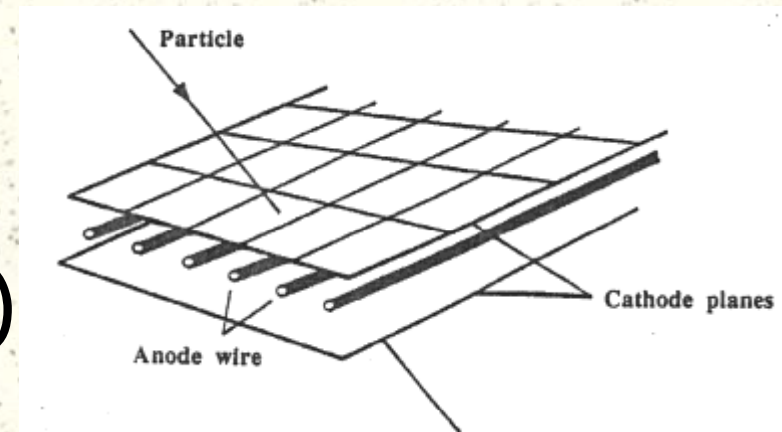
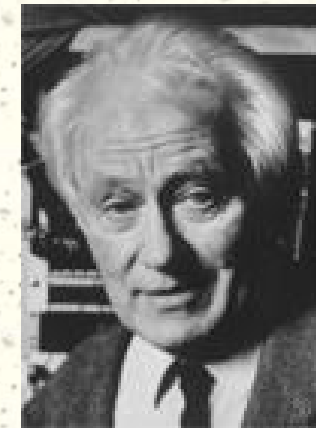
Particules chargés ionisent un gaz

Forte différence de potentiel

Des fils récupèrent les ions ou les électrons

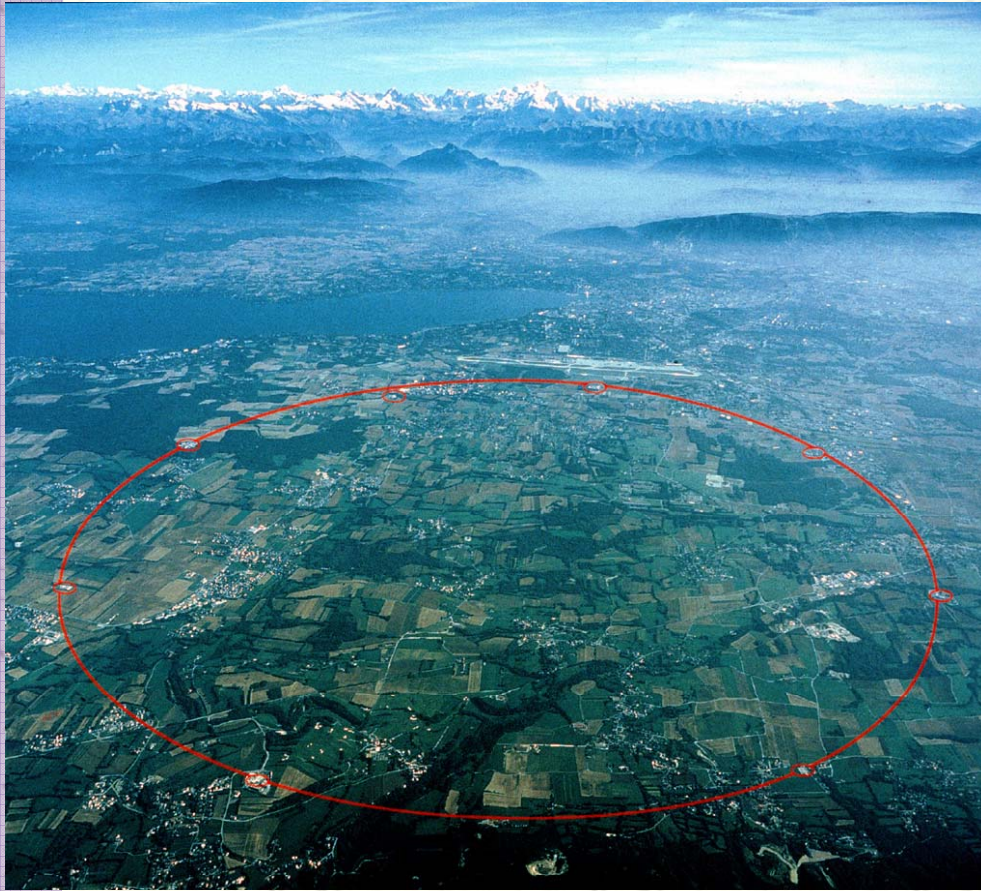
Analyse électronique

(plus de photographies)

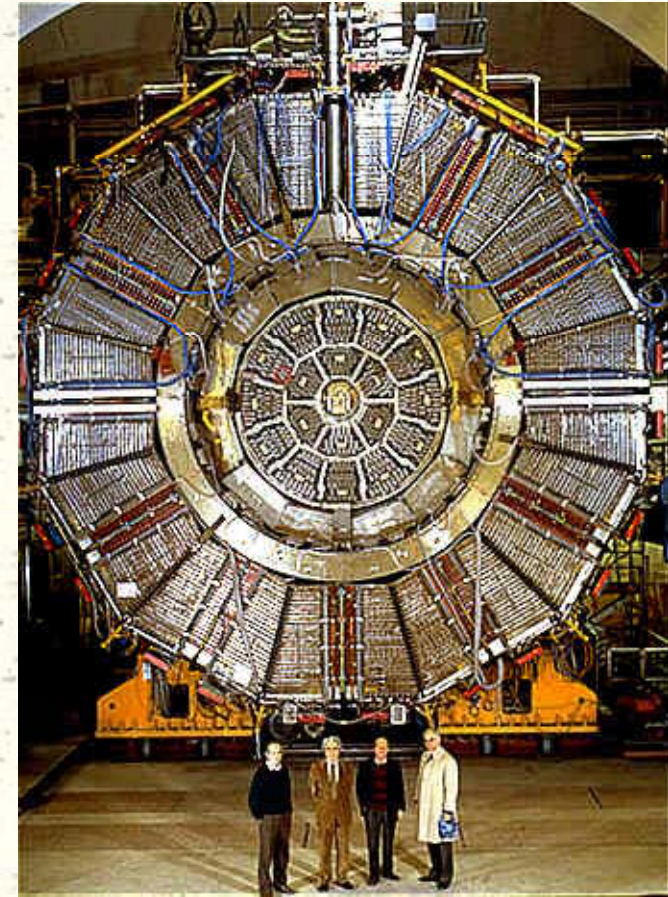


Toujours plus grand

Le LEP : collision $e^+ e^- \rightarrow Z^0$ (91 GeV)



Circonférence : 27 km



4 expériences

Le troisième neutrino

Un troisième neutrino manque dans la largeur du Z^0 mesurée au LEP (-> 2000)

■ $Z^0 \rightarrow$ paires particule + antiparticule

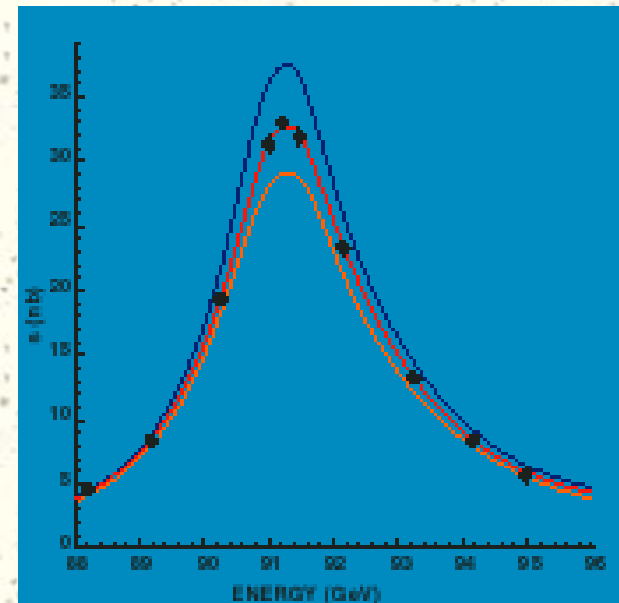
■ Seuls neutrinos invisibles...

■ **Il n'existe que 3 neutrinos !**

■ Légers ($m < m_{Z^0}/2 = 45 \text{ GeV}$)

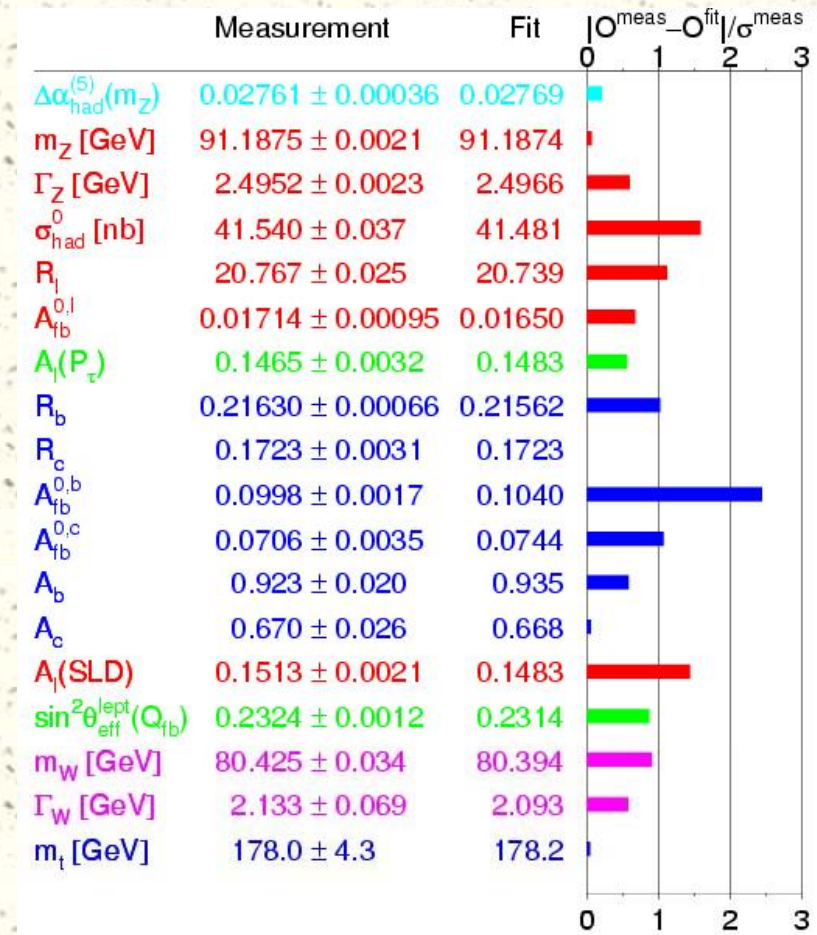
■ Que trois familles ?

Observé directement par l'expérience DONUT en 2000.



Résumons les succès électrofaibles

- # Diverses estimations des constantes
- # Prédiction de m_{top}
- # Violation de CP \sim mélange des quarks
- # Nombre de neutrinos légers
- # ...



III. La Chromodynamique Quantique

ou *Quantum Chromo Dynamics* (QCD)

Trois problèmes...

1. Hadrons =

- Baryons ($q_1q_2q_3$) & mésons ($q_1\bar{q}_2$)
- Pourquoi pas q_1q_2 ou $q_1q_2\bar{q}_3$?
- Ou même q ?

2. Δ^{++} = baryon (uuu) de spin $3/2$ ($\uparrow\uparrow\uparrow$)

- Interdit par le principe d'exclusion

3. Sections efficaces de production de paires $q\bar{q}$ trois fois trop grandes !...

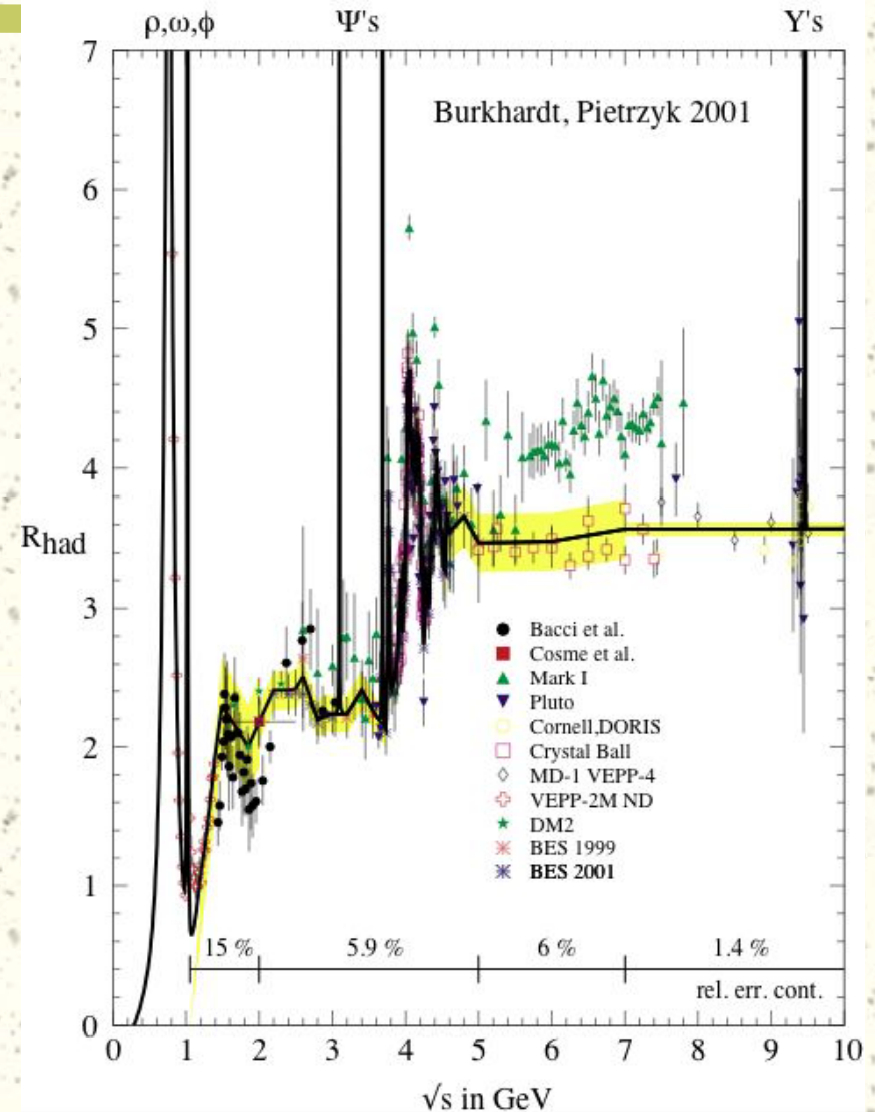
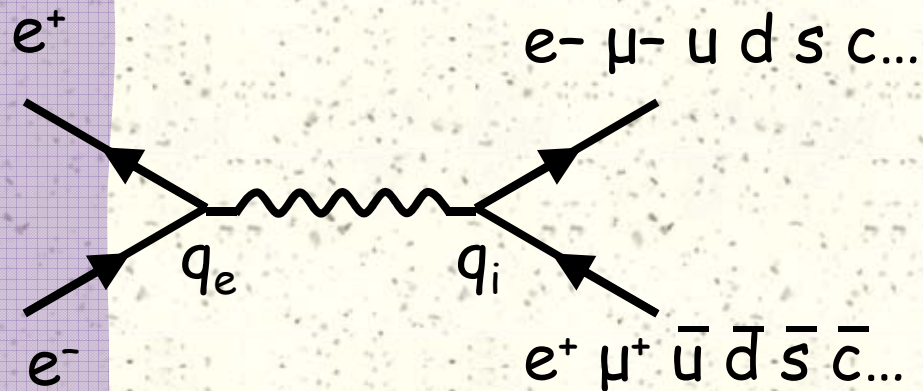
Rapport $q\bar{q} / \mu^+ \mu^-$

$R_{\text{had}} =$

■ $(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$
 $/ (e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$

Devrait valoir $\sum q_i^2$

■ $(q_i \text{ charge des quarks en } q_e)$



Une solution : la couleur !

Les quarks possèdent un nouveau nombre quantique pouvant prendre trois valeurs...

■ Problème du Δ^{++} réglé

■ Problème de R_{had} réglé

■ Hadrons = somme « nulle » de ces nombres

Par analogie : couleur trois états **RVB**

Hadrons « blancs »

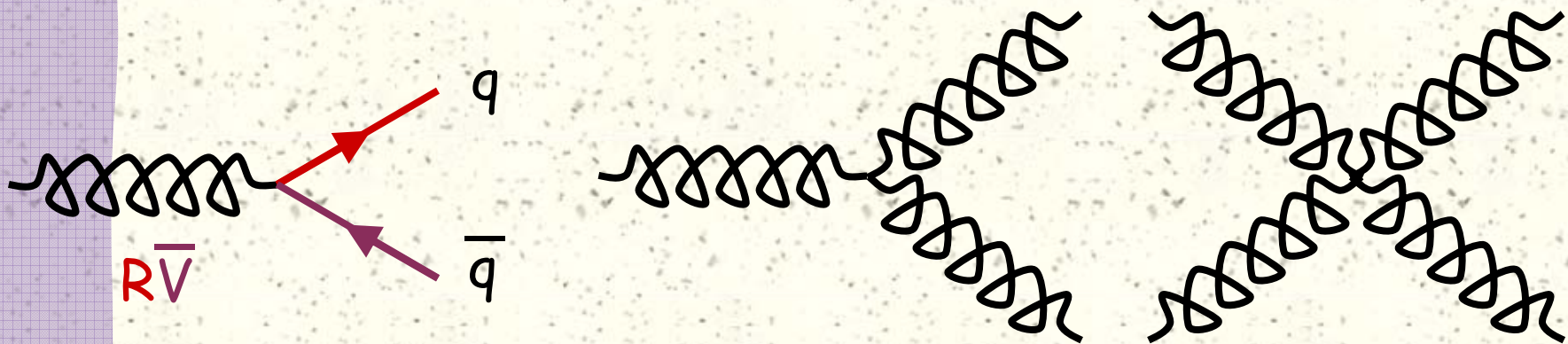
■ Baryons **RVB** ou mésons $\bar{V}V$ (**VV**)

Quelle symétrie ? Quels bosons ?

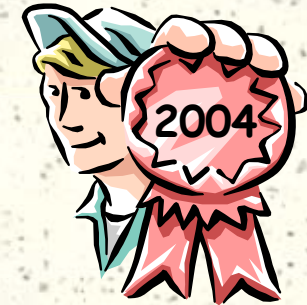
- # Groupe $SU(3)$ (de couleur)
- # Huit médiateurs = les gluons
 - (de charge nulle et masse nulle)
 - Mais eux-mêmes (bi)colorés
 - Se couplant entre eux...



© téléchat

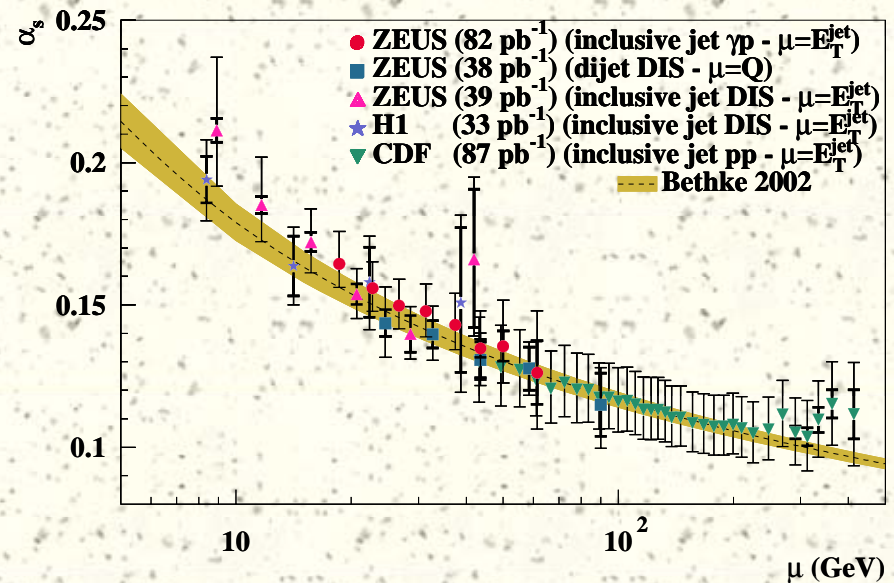
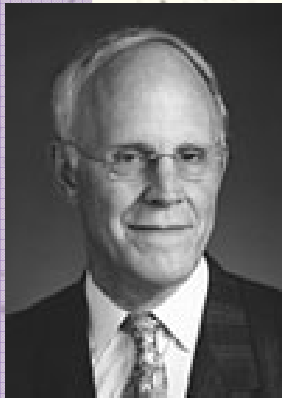


Renormalisation de QCD...



Liberté asymptotique

■ 1973 : Gross, Politzer, Wilczek

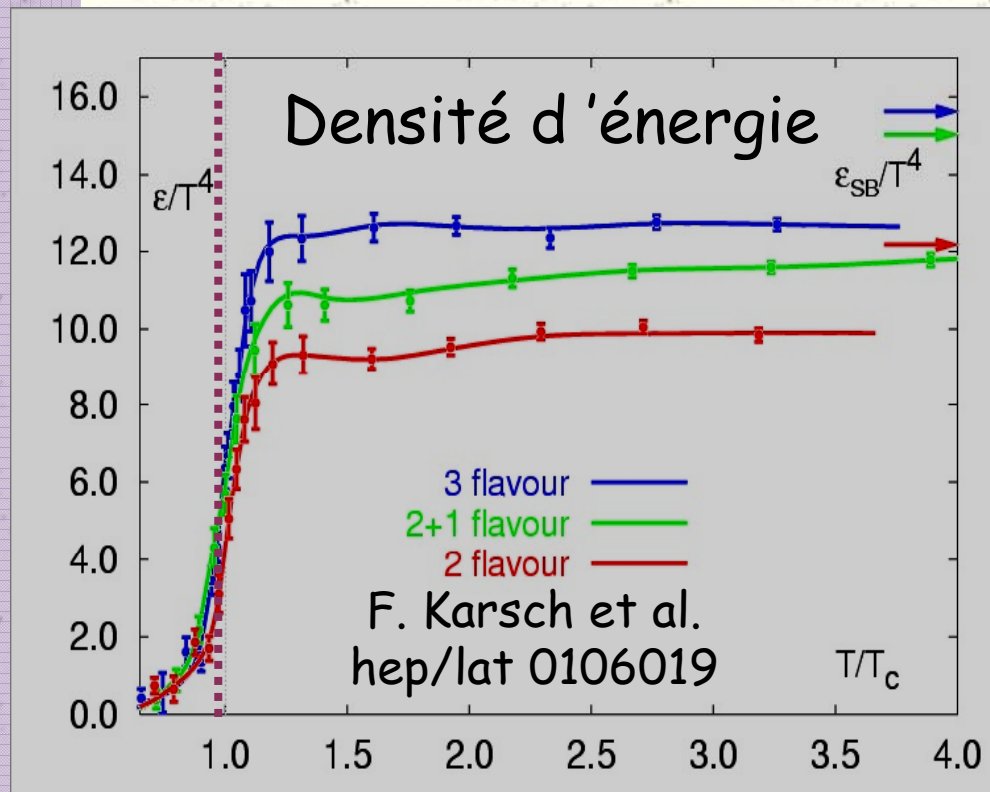


L'interaction forte est faible à haute énergie

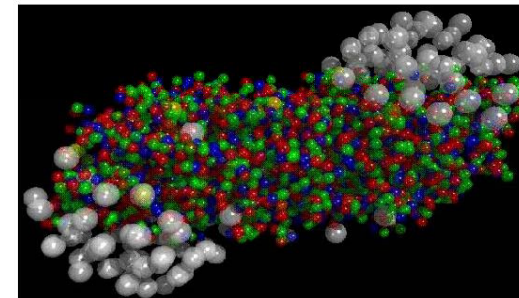
Le plasma de quarks et de gluons !

Transition de phases : déconfinement !

■ $T_c \sim 10^{13}$ K ($T_{\odot} \sim 10^8$) & $\epsilon_c \sim 0,7$ GeV/fm³



Press Release New State of Matter created at CERN



At a special seminar on 10 February, spokespersons from the experiments on CERN's Heavy Ion programme presented compelling evidence for the existence of a new state of matter in which quarks, instead of being bound up into more complex particles such as protons and neutrons, are liberated to roam freely.

Theory predicts that this state must have existed at about 10 microseconds after the Big Bang, before the formation of matter as we know it today, but until now it had not been confirmed experimentally. Our understanding of how the universe was created, which was previously unverified theory for any point in time before the formation of ordinary atomic nuclei, about three minutes after the Big Bang, has with these results now been experimentally tested back to a point only a few microseconds after the Big Bang.

Résumons-nous !



Combien de paramètres ?

- + 6 masses de quarks
- + 4 matrice CKM (mélange)
- + 3 masses de leptons
- + 3 masses de neutrinos
- + 4 matrice CKM leptonique
- + 3 intensités de force
- + 1 champ de Higgs
- + 1 masse de Higgs
- 1 unité de masse = **24 paramètres**

2006 - Bilan

Un modèle qui marche bien !

■ $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

■ Electromagnétisme + faible + forte

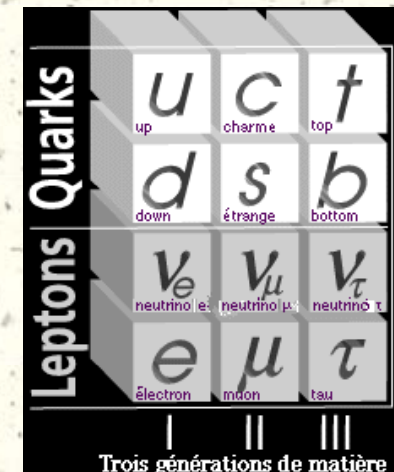
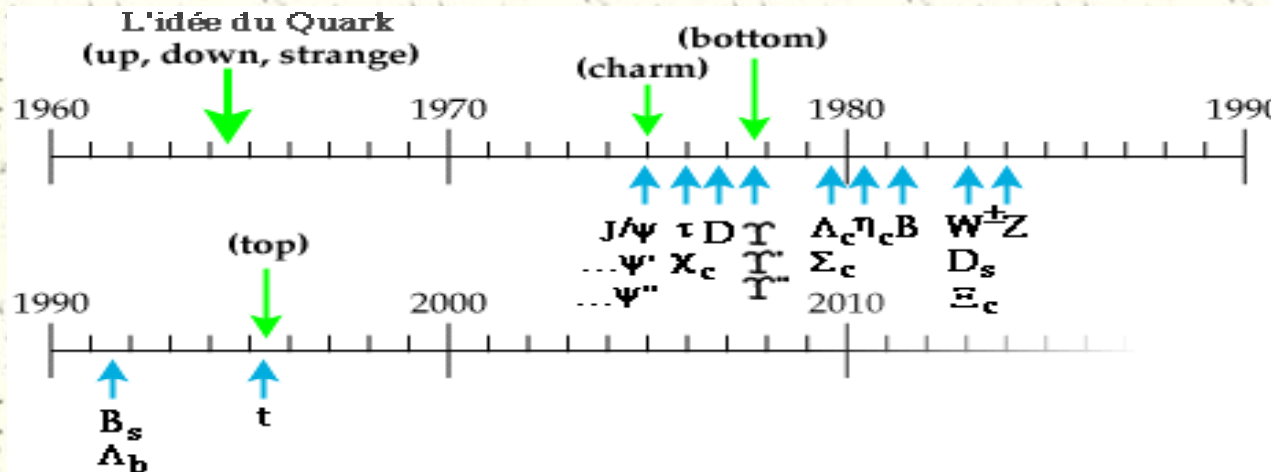
Peu de particules élémentaires !

INTERACTION

Photon (em)
 $W^+ W^- Z^0$ (faible)
 8 gluons (forte)

MATIÈRE

3 familles de leptons
 (e, ν_e) (μ, ν_μ) (τ, ν_τ)
 3 familles de quarks
 (u, d) (c, s) (b, t)



Quoi d'autres ?

Reste à observer **le boson de Higgs** !
Et le modèle standard sera complet...
Plus amusant s'il y avait **autre chose** !
(super-symétrie, extra dimensions,...)

Pour découvrir le Higgs

LHC : $p + p \rightarrow ???$ @ 14 TeV



Même tunnel
que le LEP

2 expériences
principales
ATLAS & CMS

Les particules de matière

Type	Charge	Famille 1	Famille 2	Famille 3
Lepton	-1	Électron 0,511	Muon 105,6	Tau 1 777
Neutrino	0	ν_e < $3 \cdot 10^{-6}$	ν_μ < 0,19	ν_τ < 1,2
Quark up	+2/3	<i>up</i> 1,5 à 4,5	<i>charm</i> 1000 à 1400	<i>top</i> 174 000
Quark down	-1/3	<i>down</i> 5 à 8,5	<i>strange</i> 80 à 155	<i>beauty</i> 4100 à 4400

TAB. 1.5 – *Les particules de matière connues aujourd’hui, ainsi que leur masse en MeV/c^2 . À chacune de ces particules correspond une antiparticule de même masse, mais de charge opposée.*

Les médiateurs des interactions

Interaction	Portée	Intensité	Médiateur	Charge	Spin	Masse
Électromagnétique	Infinie	1	Photon	0	1	0
Forte	10^{-15} m	60	8 gluons	0	1	0
Faible	10^{-17} m	10^{-4}	W^{\pm} Z^0	± 1 0	1 1	80 GeV/c ² 91 GeV/c ²
Gravitationnelle	Infinie	10^{-41}	Graviton?	0	2	0

TAB. 1.6 – *Les interactions fondamentales et leur boson médiateur. Les intensités relatives sont celles qui s'exercent sur deux quarks up distants de $3 \cdot 10^{-17}$ m, l'interaction électromagnétique étant arbitrairement prise comme référence.*