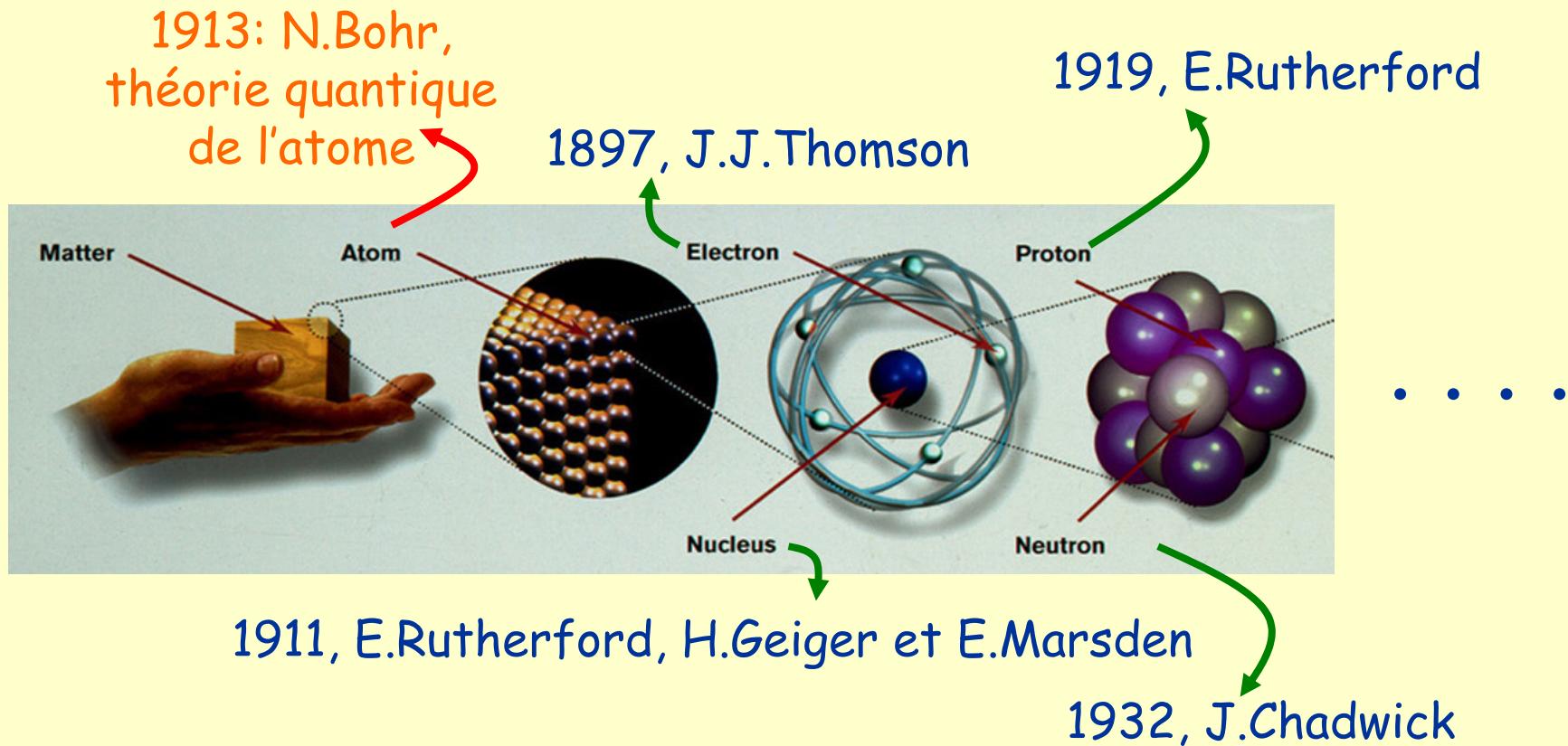


Comment la masse vient aux particules

Vanina Ruhlmann-Kleider
CEA-Saclay/DAPNIA/SPP

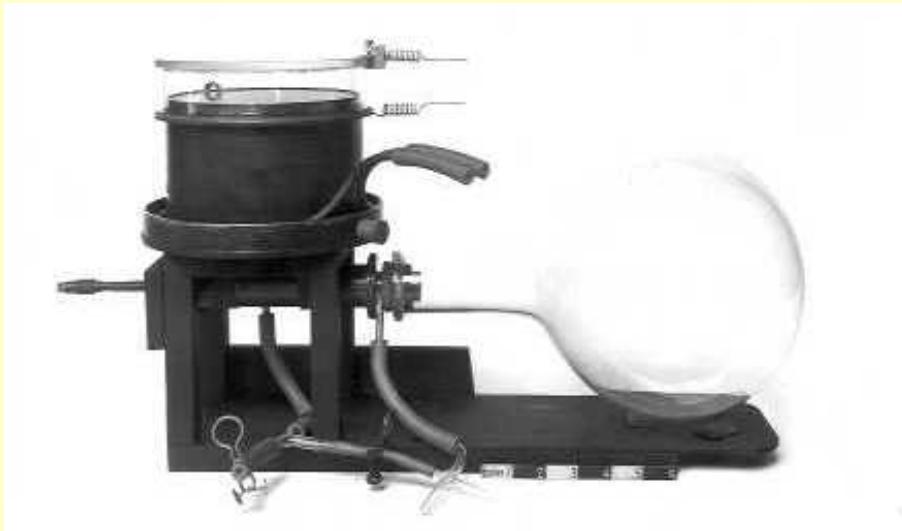
- 1) La préhistoire
- 2) Accélérateurs, détecteurs et collisions
- 3) Le modèle standard
- 4) Résultats récents
- 5) Bilan et perspectives

Le point de départ: la structure de l'atome



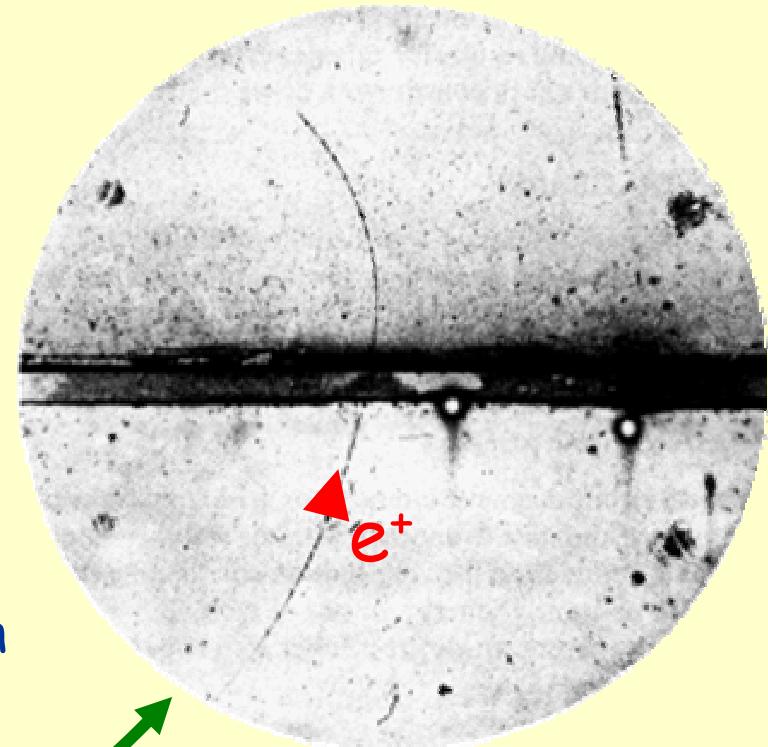
L'antimatière existe !

1931, P. Dirac : e^+ prédition théorique



chambre à brouillard

1932, C. Anderson : découverte du positon
dans les rayons cosmiques

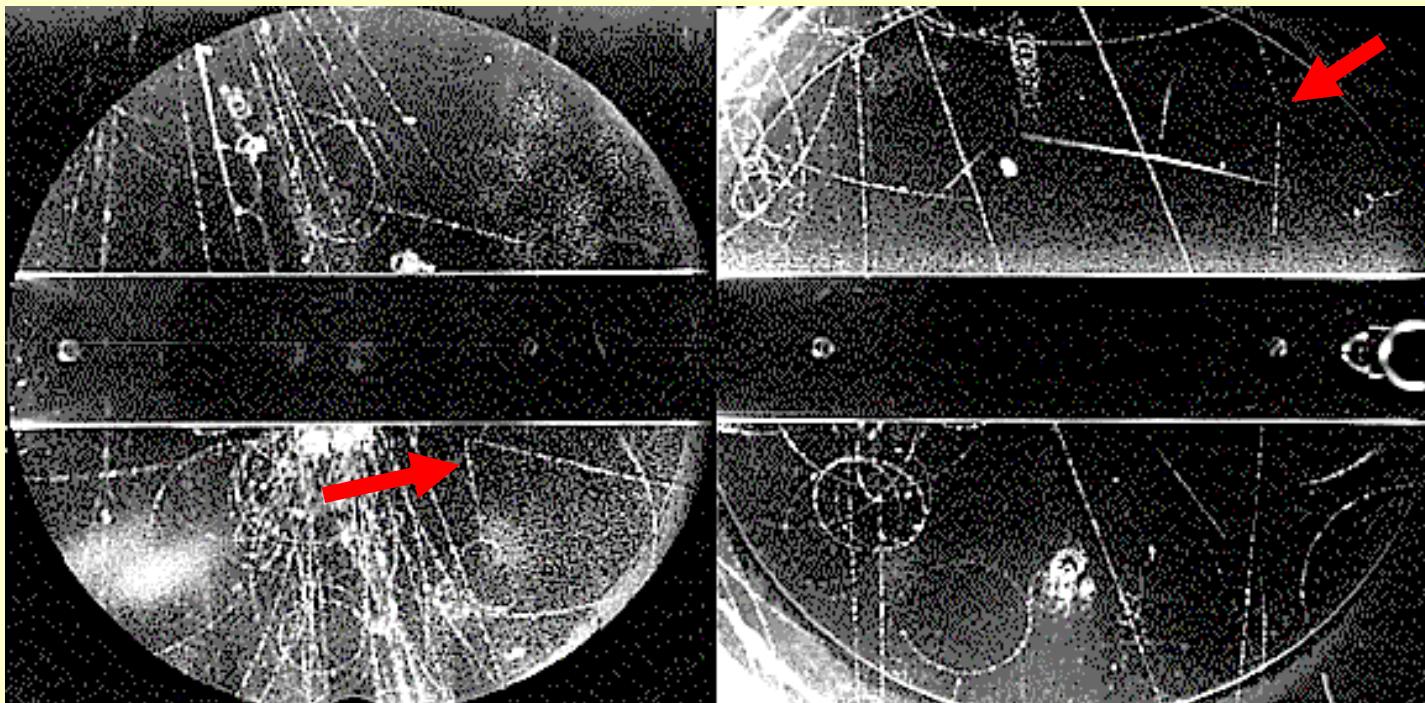
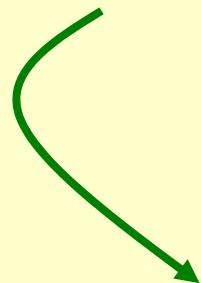


Au-delà de la matière ordinaire ...

1937, découverte du muon (C. Anderson et S. Neddermeyer)

1947, découverte du pion (C. Powell)

1947 découverte des kaons neutres et chargés (G. Rochester et C. Butler)



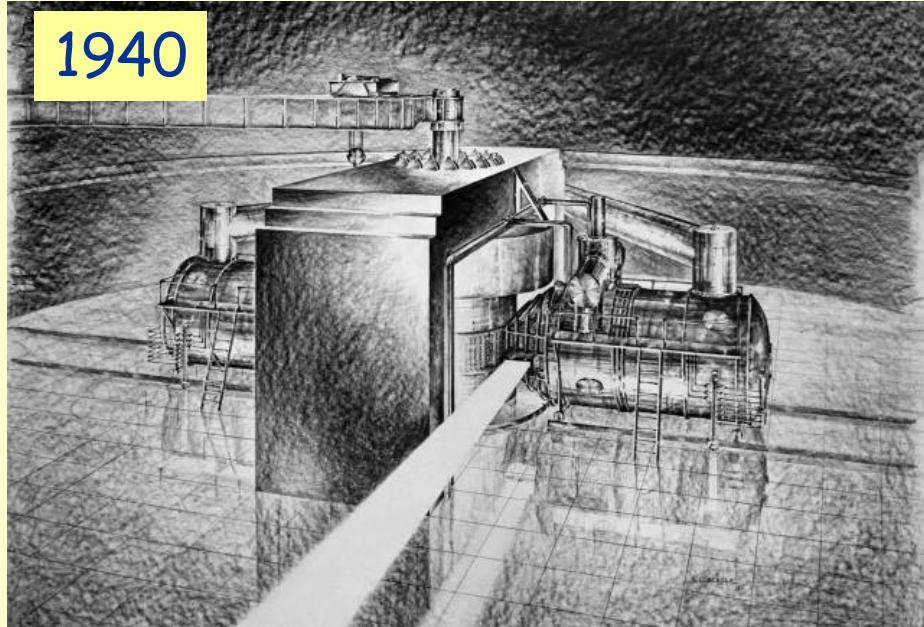
$$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu$$

clichés de chambre à brouillard exposée aux rayons cosmiques

Les accélérateurs entrent en scène

1940

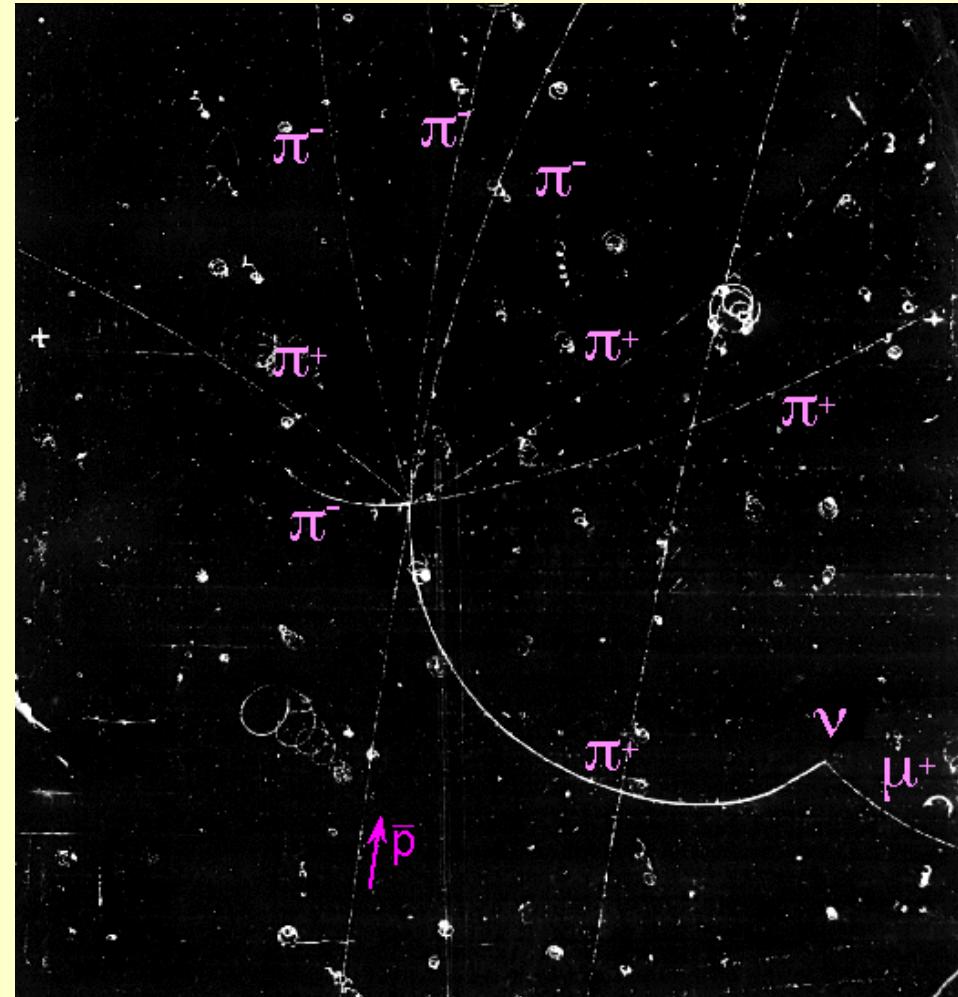


1948, cyclotron de Berkeley à 95MeV/nucléon: première production de π en laboratoire
(E.Gardner, G.Lattes)

Nb: 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV

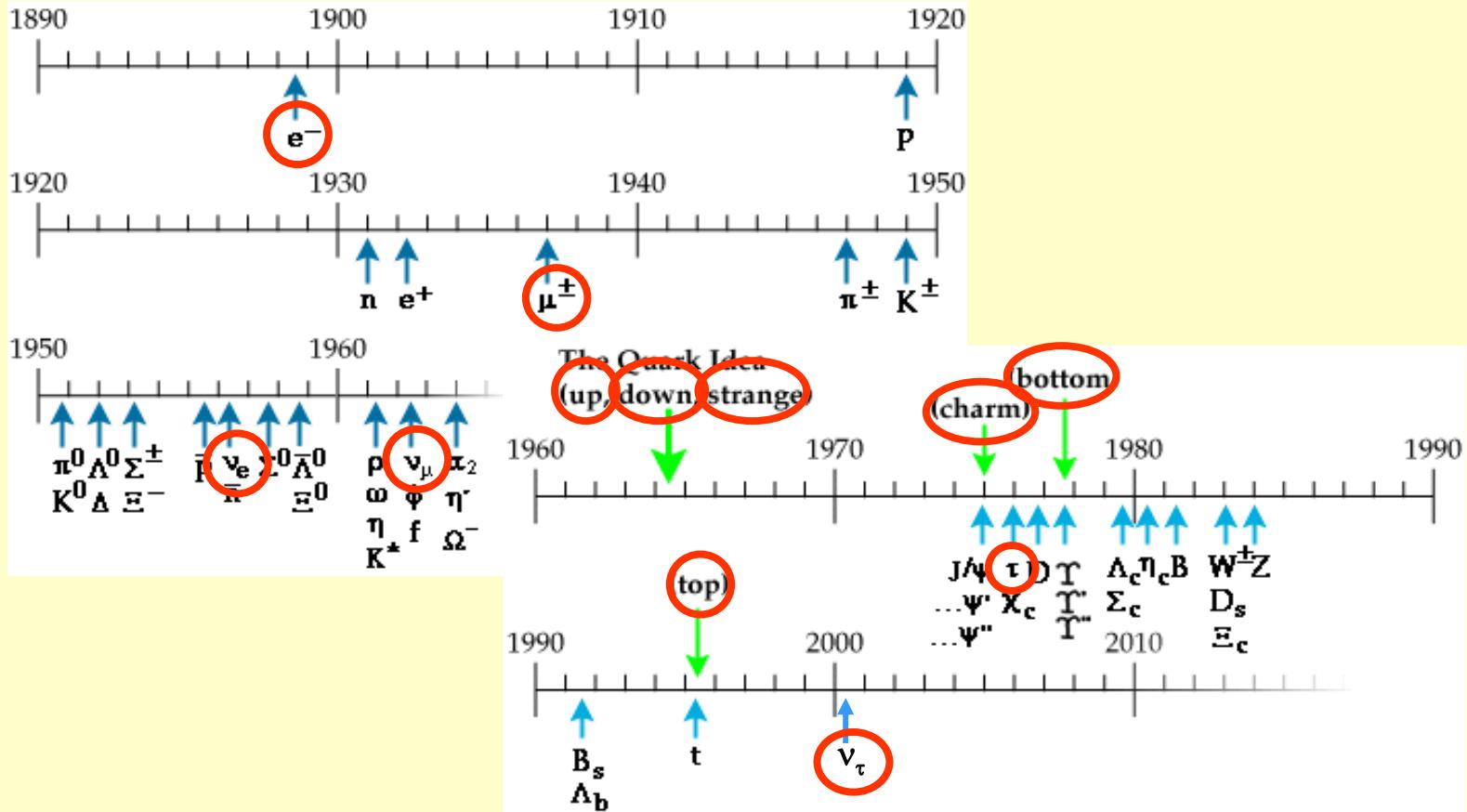
Ecole d'été e2phy 2007

Cliché de chambre à bulles:
interaction \bar{p} sur p

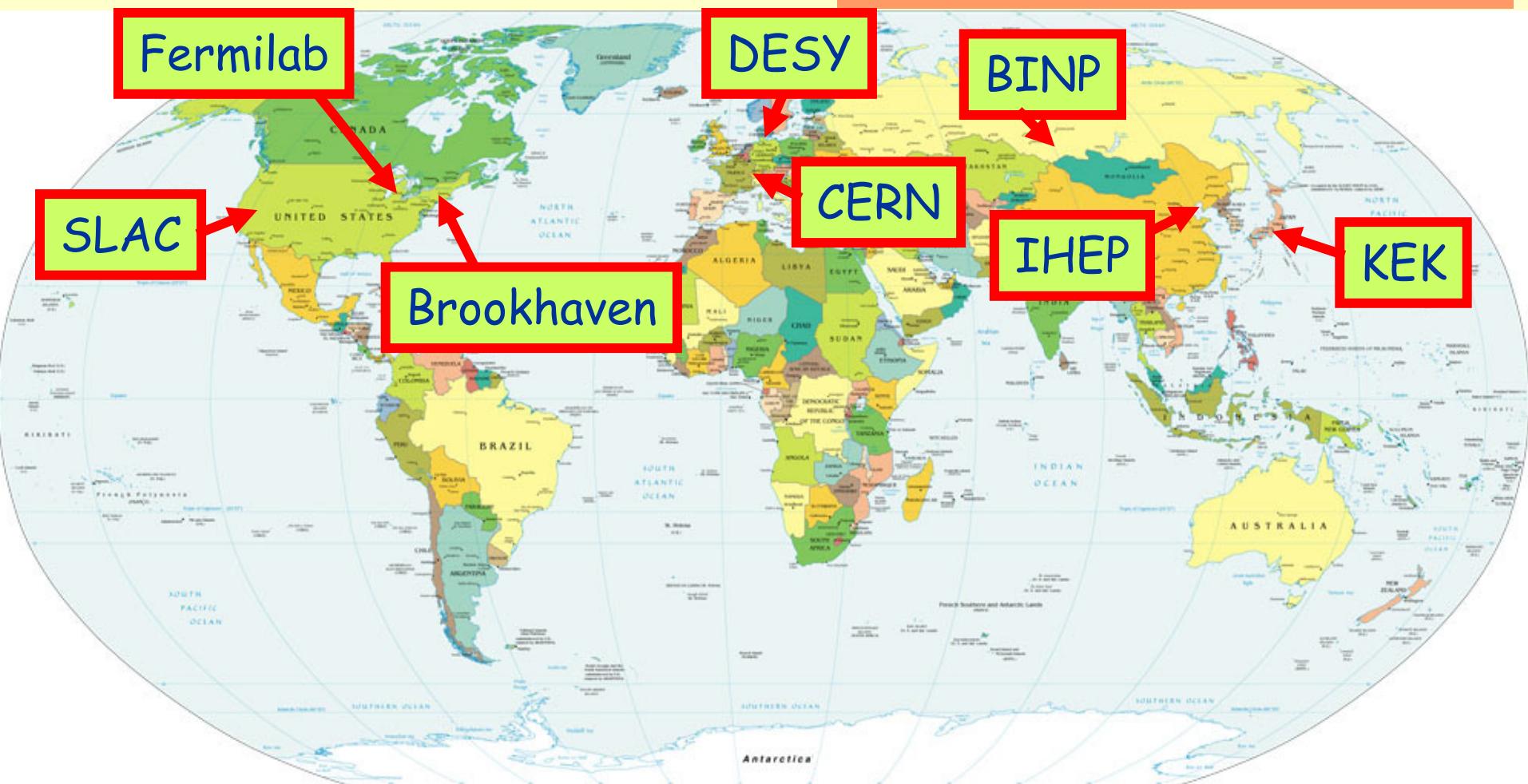


30 août 2007

Des particules à foison !

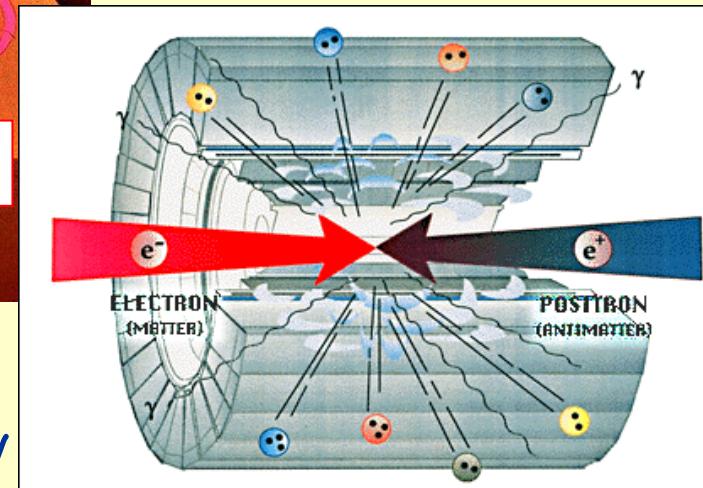
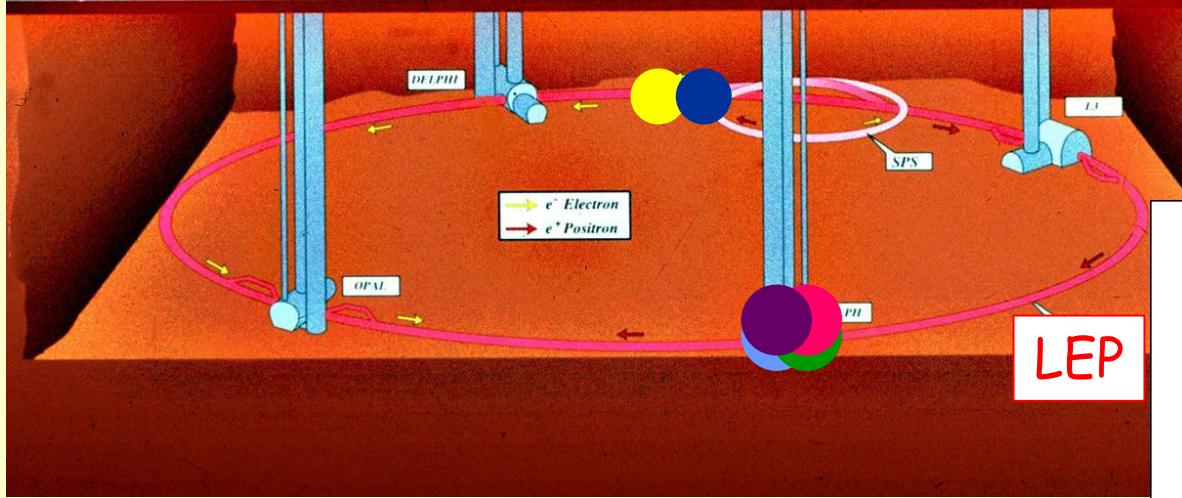
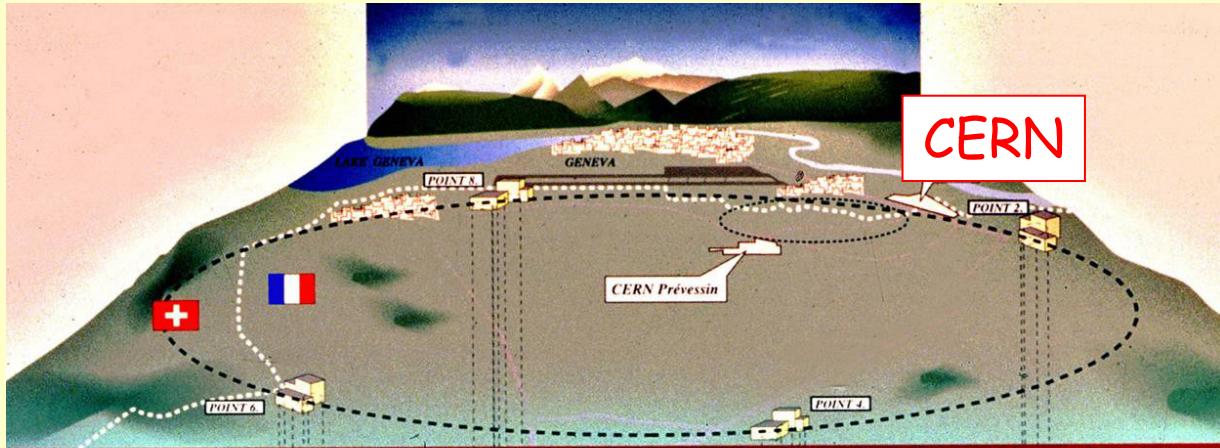


... mais seulement **12** constituants « élémentaires »
régis par **3** interactions fondamentales
dans un cadre quantique et relativiste



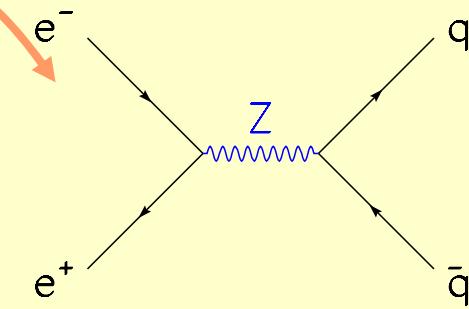
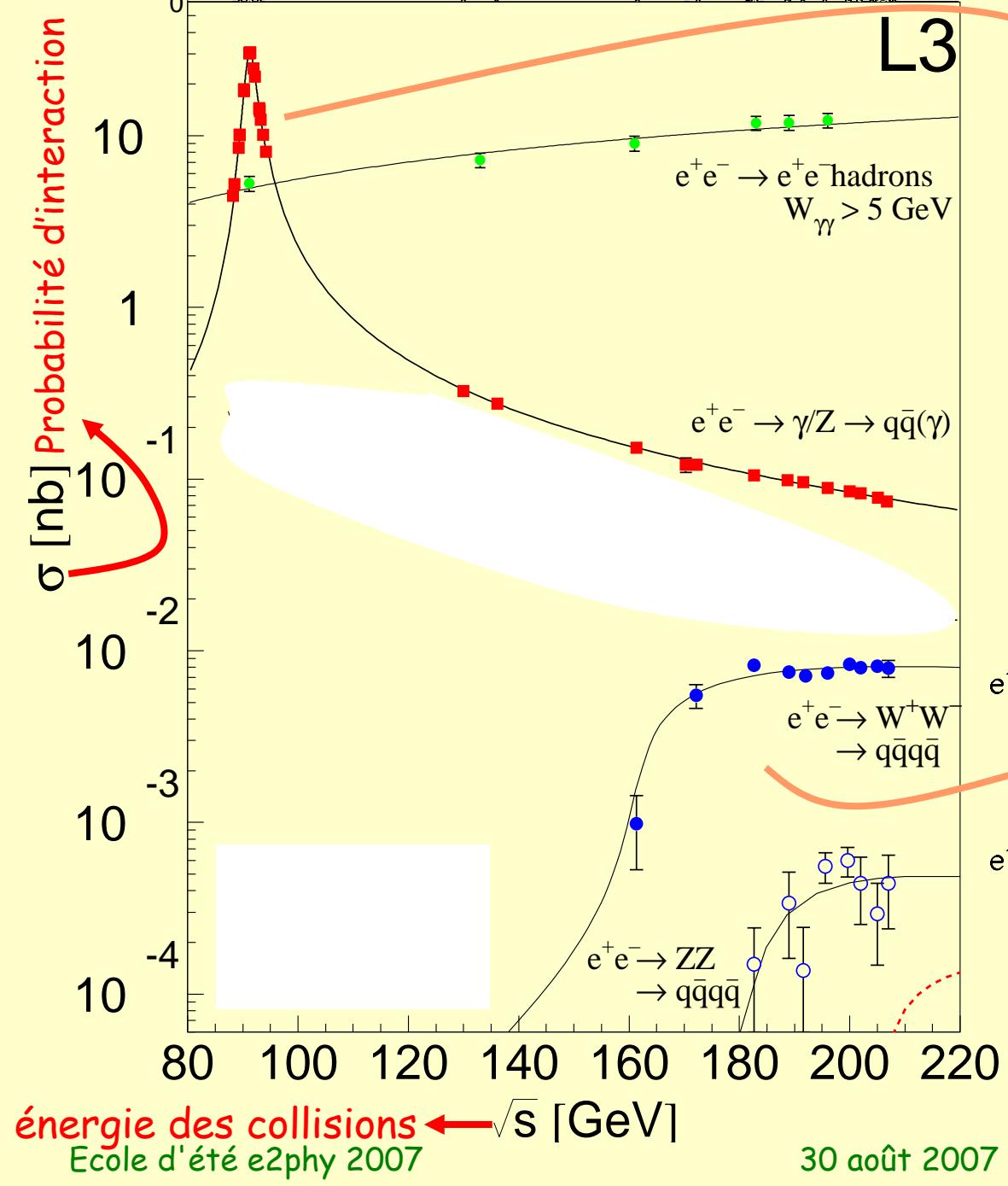
CERN : européen, le plus grand centre au monde, fondé en 1954;
20 états membres, 34 états associés;
3000 employés, 6500 scientifiques visiteurs (500 labos, 80 nations)

L'exemple du LEP au CERN

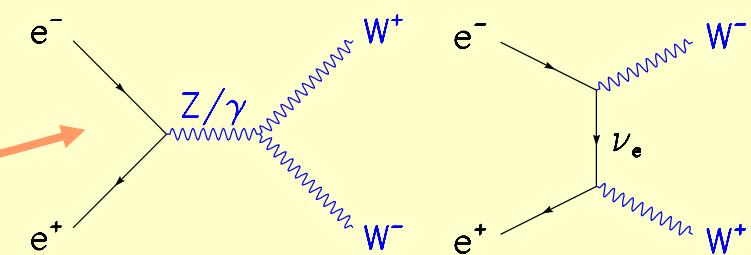


LEP 1 (1989-1995): collisions à 91 GeV

LEP 2 (1995-2000): collisions de 130 à 209 GeV

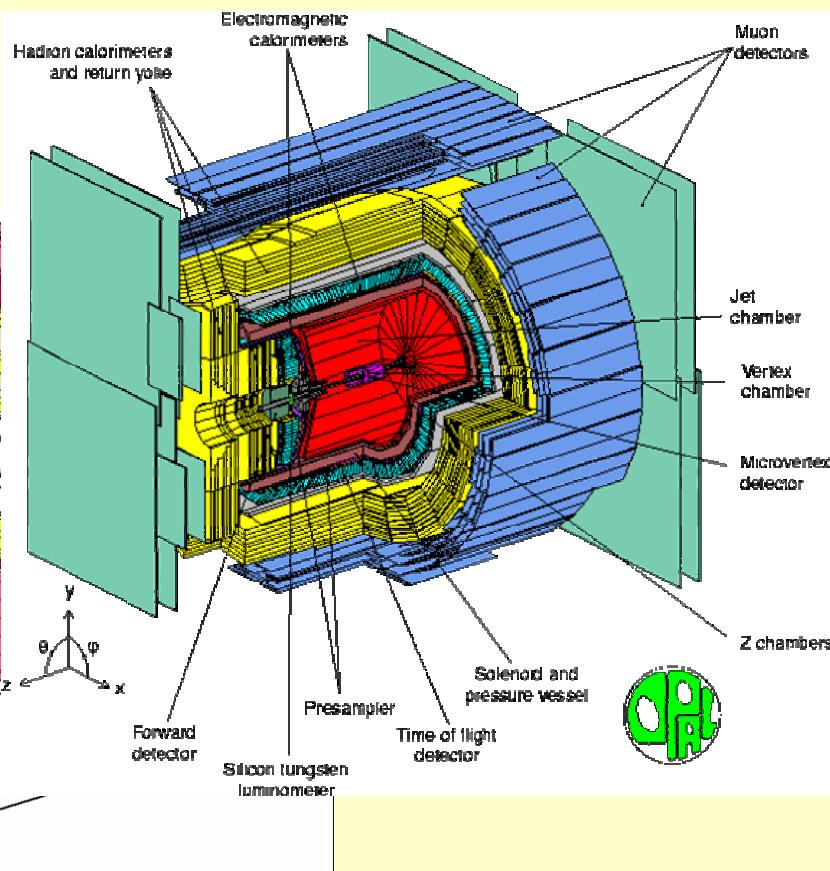
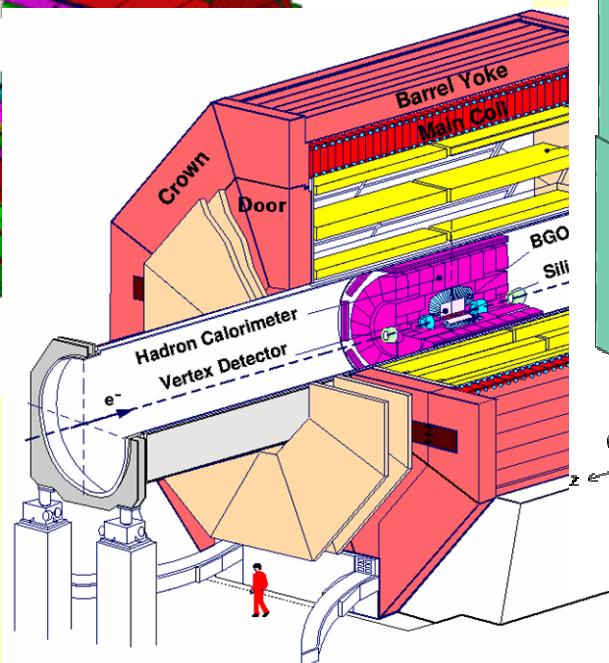
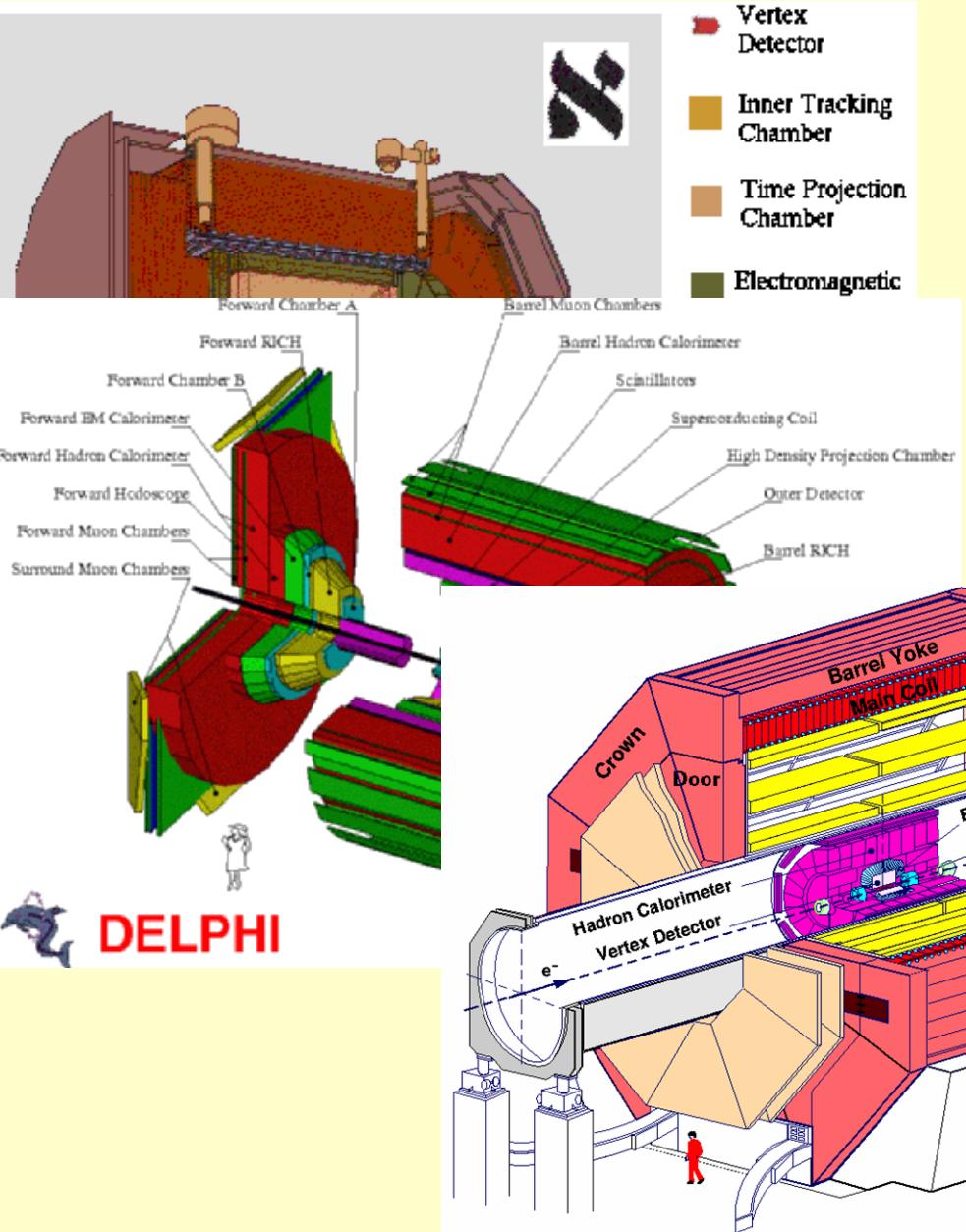


LEP 1: ~ 17 millions de désintégrations du Z

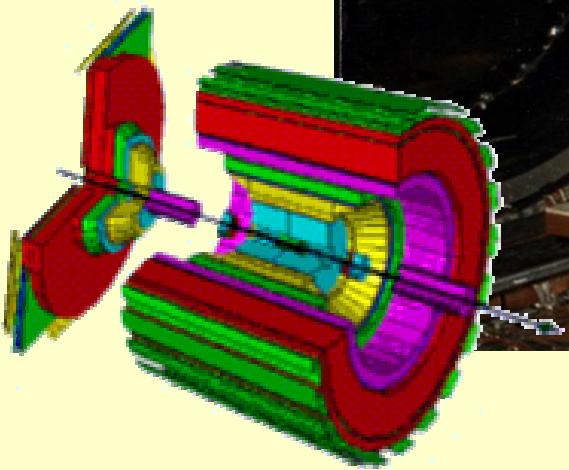


LEP 2: ~ 50 mille paires $W^+ W^-$

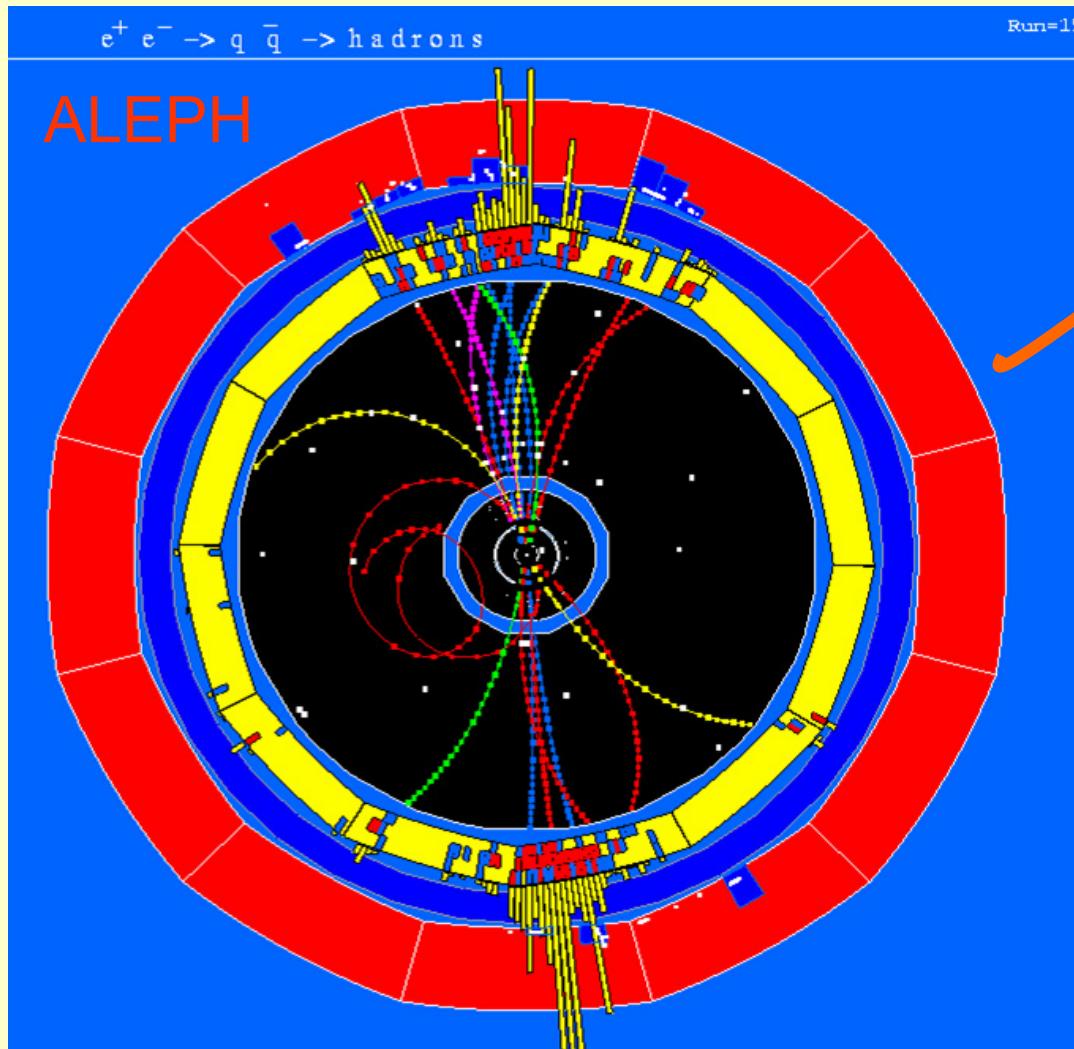
Les détecteurs au LEP



Le détecteur **DELPHI**



Un exemple d'état final de collision à LEP 1:

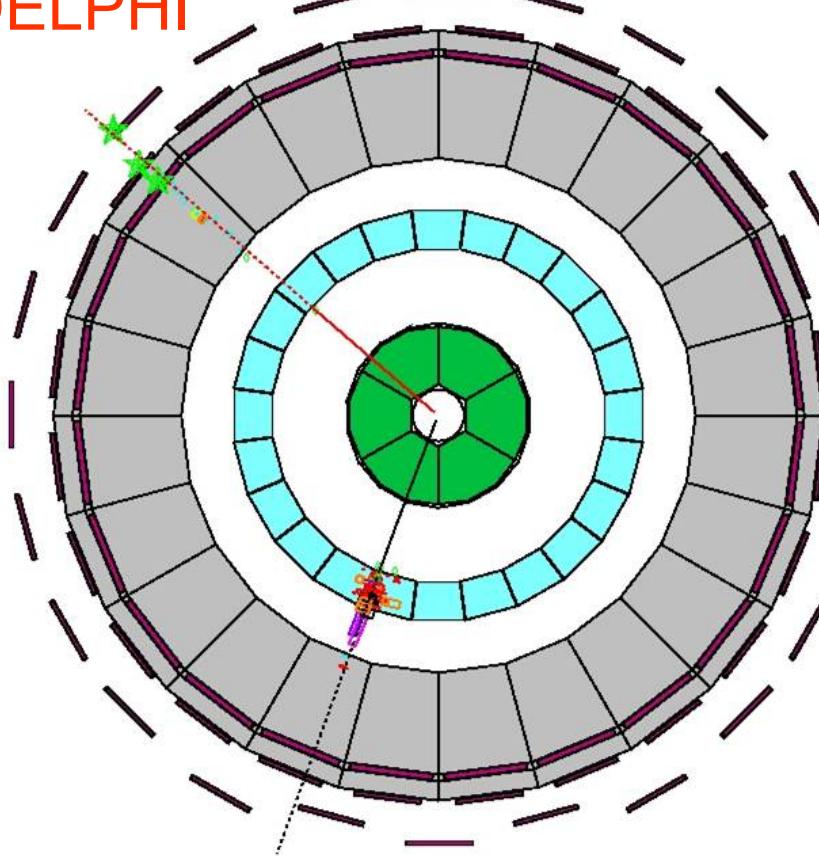


- o Désintégration d'un Z en deux **quarks** qui se matérialisent en **jets** de particules (~70% de probabilité)
 - o Autres désintégrations possibles:
 - o $Z \rightarrow e^+ e^-$, $\mu^+ \mu^-$, $\tau^+ \tau^-$ (10%)
 - o $Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$ (20%)

Un exemple d'état final de collision à LEP 2:

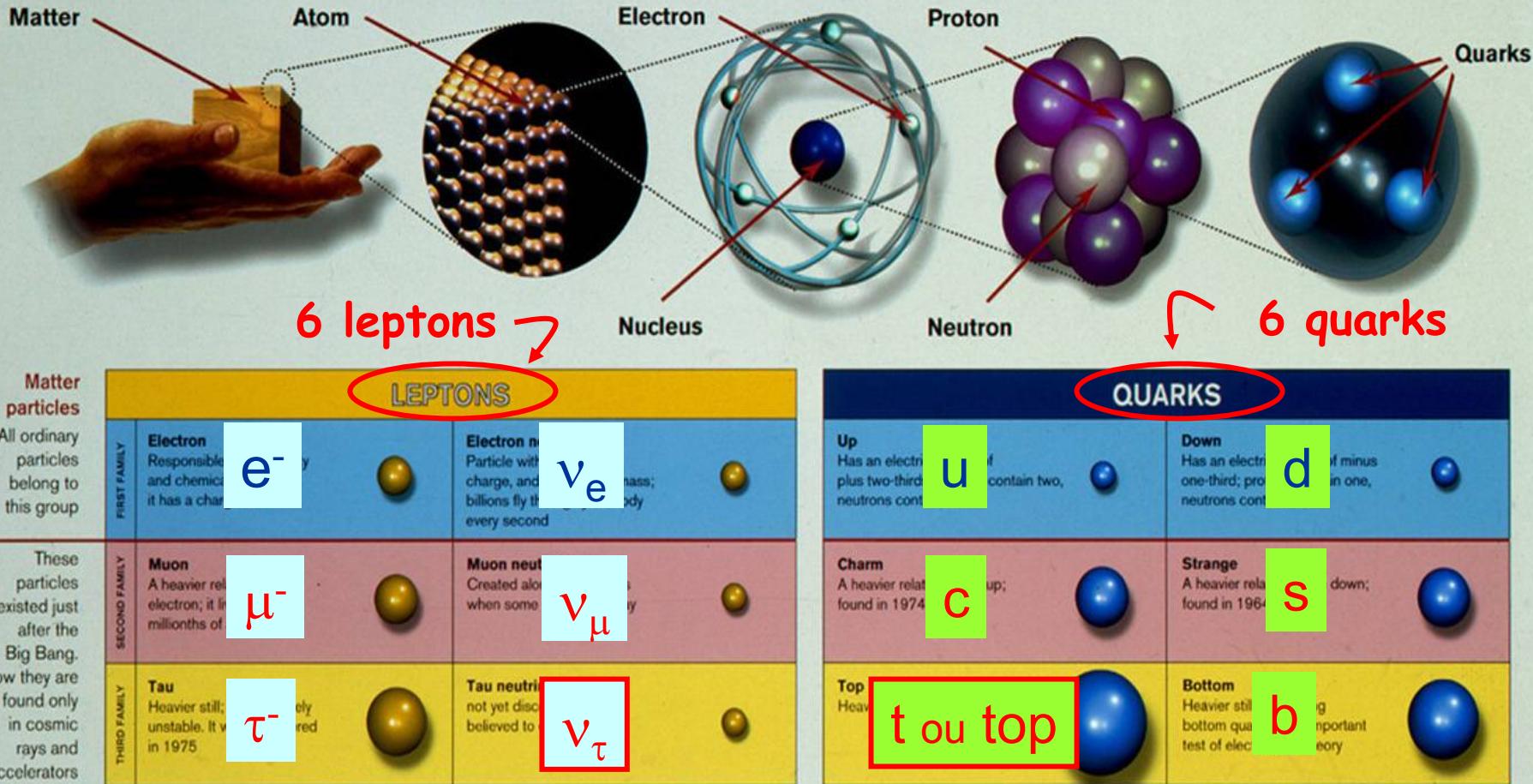


DELPHI



- o Production d'une paire de W se désintégrant en **leptons**, ici en e , μ et neutrinos indétectables (10%)
- o Autres désintégrations possibles:
 - ✓ $W W \rightarrow l\nu qq$ (43%)
 - ✓ $W W \rightarrow qq qq$ (47%)

les constituants élémentaires:



- Enjeux expérimentaux: # constituants; propriétés des constituants les moins bien connus (lepton τ , neutrinos, quarks lourds c , b et top).

rappels: masse d'un constituant élémentaire

- o Mécanique classique :

- o masse inertielle : $\vec{F} = m^{(i)} \vec{a}$

- o masse gravitationnelle : $\vec{P} = m^{(g)} \vec{g}$

- o $m^{(i)} = m^{(g)} \equiv m$ fait expérimental dès Newton, puis postulat de Relativité Générale (principe d'équivalence, Einstein 1916)

- o Relativité restreinte (Einstein, 1905) :

- o énergie de repos : $E_0 = m c^2$

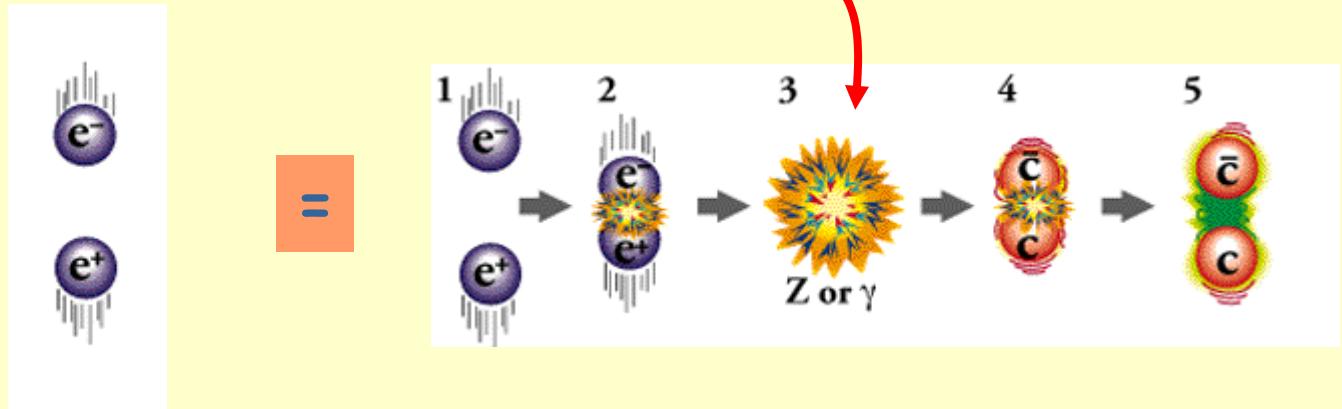
- o énergie totale : $E = E_c + E_0 = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = \gamma m c^2$
avec $\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$

masses des constituants élémentaires

- o Valeurs **non prédites** par le modèle standard
- o Mesures **expérimentales** :
 - o grande diversité des masses des constituants :
électron : $m_e = 511 \text{ keV} \sim 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
top : $m_{top} = 171 \text{ GeV} = 334400 m_e \sim 305 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
proton : $m_p = 938 \text{ MeV} = 1836 m_e \sim 2 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 - o certaines masses encore mal connues : **neutrinos !**
 $m_{\nu e}^{(\text{eff})} < 2 \text{ eV}, \quad m_{\nu \mu}^{(\text{eff})} < 0,19 \text{ MeV}, \quad m_{\nu \tau}^{(\text{eff})} < 18,2 \text{ MeV}$
avec $m_{\nu i}^{(\text{eff})} = \sqrt{\sum |U_{li}|^2 m_{\nu i}^2}$
- cosmologie:
 $\sum m_{\nu i} < (0,4 - 1) \text{ eV}$ (mais \exists hypothèses sous-jacentes)

les interactions fondamentales

- o Les interactions fondamentales entre particules de matière sont **propagées** par des **particules médiatrices** :



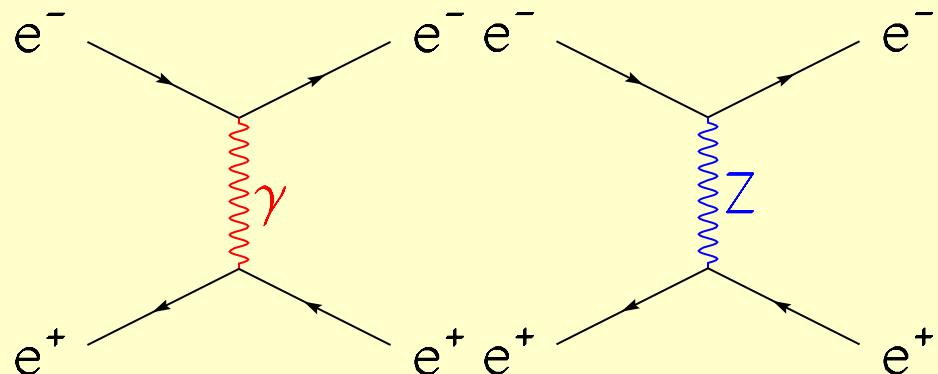
- o Bilan: 3 interactions fondamentales propagées par des **bosons médiateurs** de spin 1 :

- ❖ γ → interaction électromagnétique
- ❖ W^\pm et Z → interaction faible
- ❖ 8 gluons → interaction forte

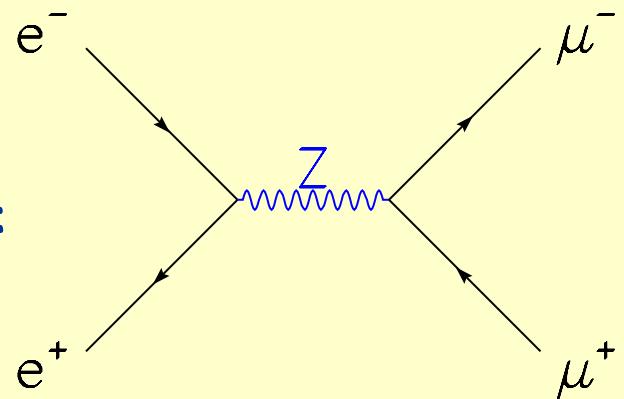
Masses ? A priori nulles ...

les interactions fondamentales

- Quelques autres exemples de processus d'interaction au LEP (en représentation diagrammatique):



mais aussi:



- Enjeu expérimental: tester la description quantique et relativiste des interactions **faible** et **forte**

symétrie et brisure de symétrie

- o Symétrie électrofaible : interactions électromagnétique et faible sont **indifférenciées** à haute énergie.
- o Brisure de la symétrie électrofaible : à basse énergie la symétrie est **spontanément brisée**.

⇒ **génération des masses** des particules:

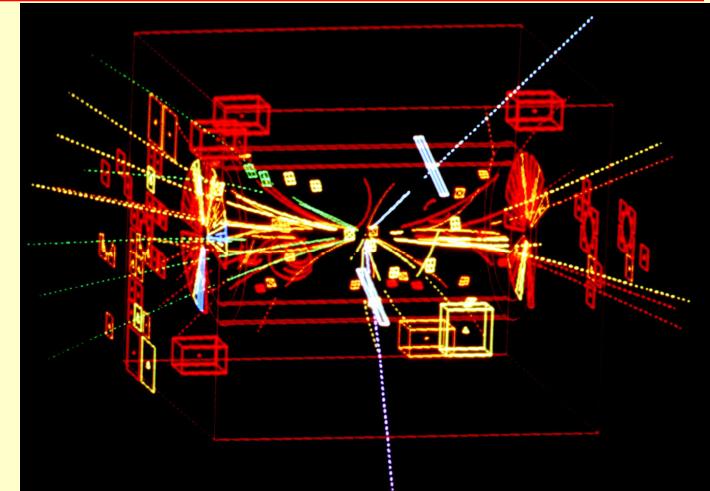
$M_\gamma = 0$ (\Leftrightarrow portée infinie de l'interaction électromagnétique)

$M_Z \sim 91 \text{ GeV}$, $M_W \sim 80 \text{ GeV}$ (\Leftrightarrow portée finie de l'interaction faible)

Nb: $M_{\text{proton}} \sim 1 \text{ GeV}$

valeurs confirmées

expérimentalement lors de la découverte
des W et Z au CERN (années 80)



symétrie et brisure de symétrie

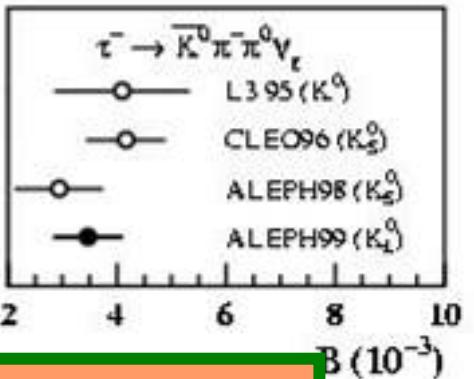
- o Question ouverte : quel est le mécanisme **exact** de la brisure de la symétrie électrofaible ?

Une possibilité : les masses des particules sont dues à leur **interaction** avec un champ de spin 0 dit **champ de Higgs**
= solution minimale (une seule particule supplémentaire : le **boson de Higgs**), viable théoriquement et à fort contenu prédictif

.... à part la valeur de la masse du boson de Higgs qui n'est **pratiquement pas** contrainte par la théorie !

$$0 < M_H < 1000 \text{ GeV}$$

- Enjeu expérimental: rechercher **tous** les indices sur le boson de Higgs (et sur les **autres** mécanismes possibles !)



Résultats récents: l'exemple du LEP

propriétés des
quarks c et b

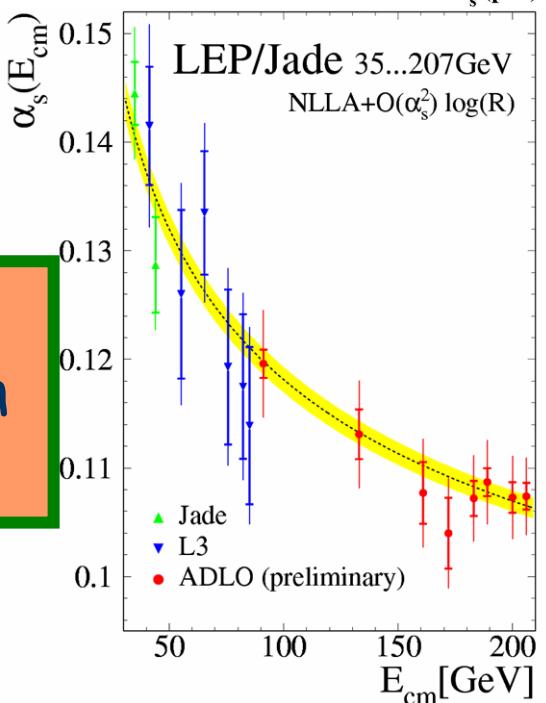
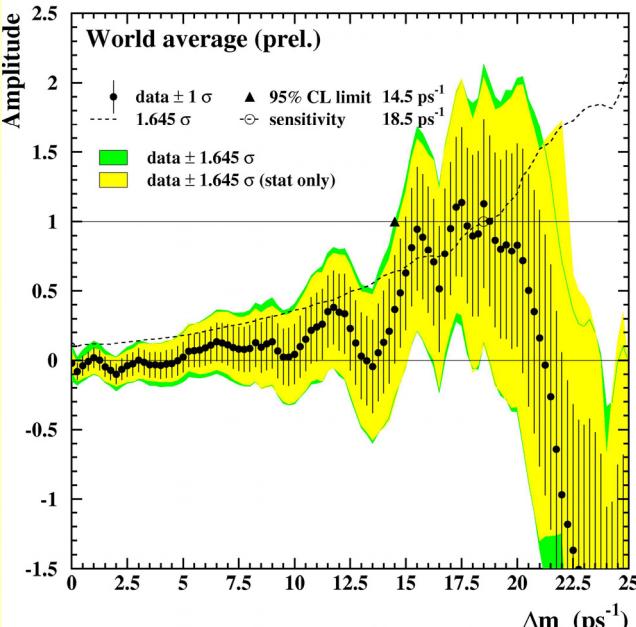
propriétés
du lepton τ

les sujets
d'étude
au LEP

mesures de précision

recherches de
nouvelles particules

étude de
l'interaction
forte



les deux outils-clefs pour révéler le
mécanisme de la brisure électrofaible !

Mesures de précision: l'exemple du Z

- Courbe de résonance du Z:

- mesure du nombre de neutrinos **légers**:

$$N_v = 2,9840 \pm 0,0082$$

⇒ 3 familles seulement !

$$M_Z = 91,1875 \pm 0,0021 \text{ GeV}$$

(précision $\sim 2 \cdot 10^{-5}$)

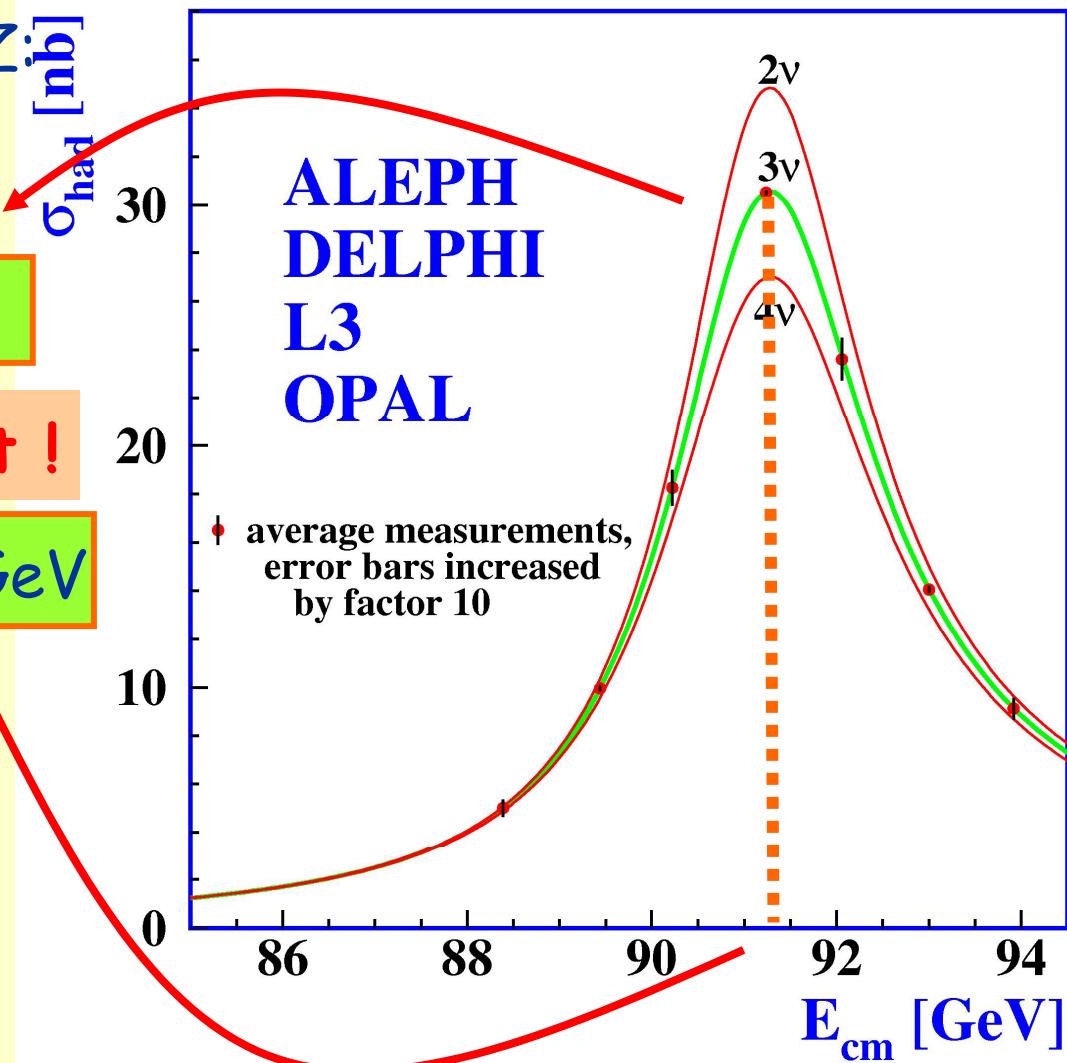


avant le LEP:

✓ $N_v \leq 4$ (cosmologie)

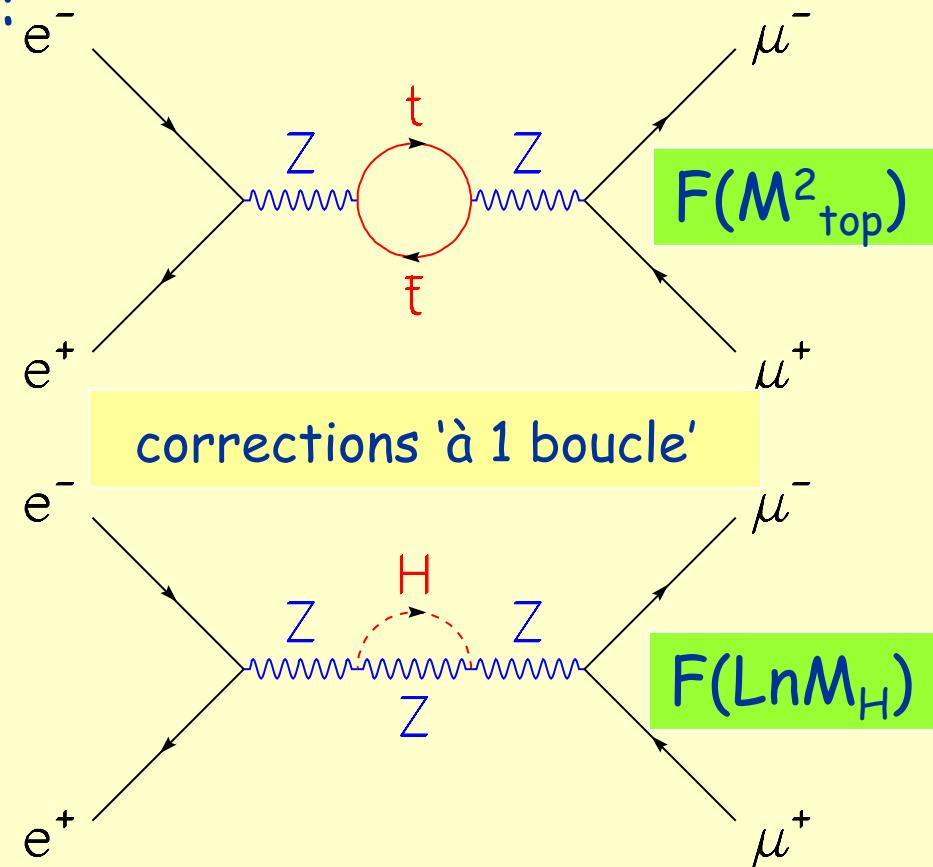
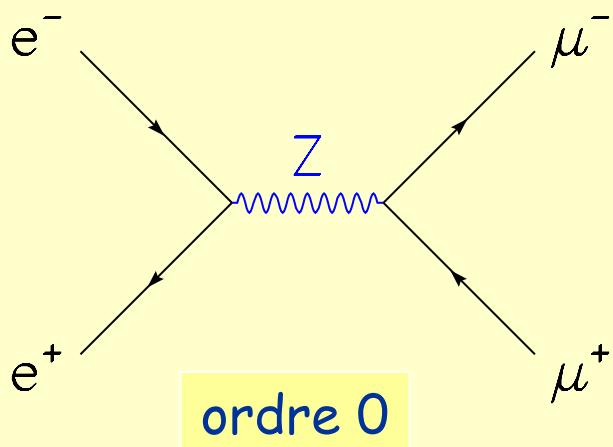
✓ précision sur M_Z :

$\geq 0,9 \text{ GeV} (1\%)$



Précision des mesures : pourquoi ?

- La précision est indispensable pour mesurer les **effets quantiques** d'ordre supérieur :
exemple:



► intérêt : **contraindre** par l'expérience les paramètres inconnus du modèle standard, par exemple M_{top} , M_W ou M_H .

Résultat 1: prédiction de la valeur de M_{top}

o Sur un même ensemble d'observables :

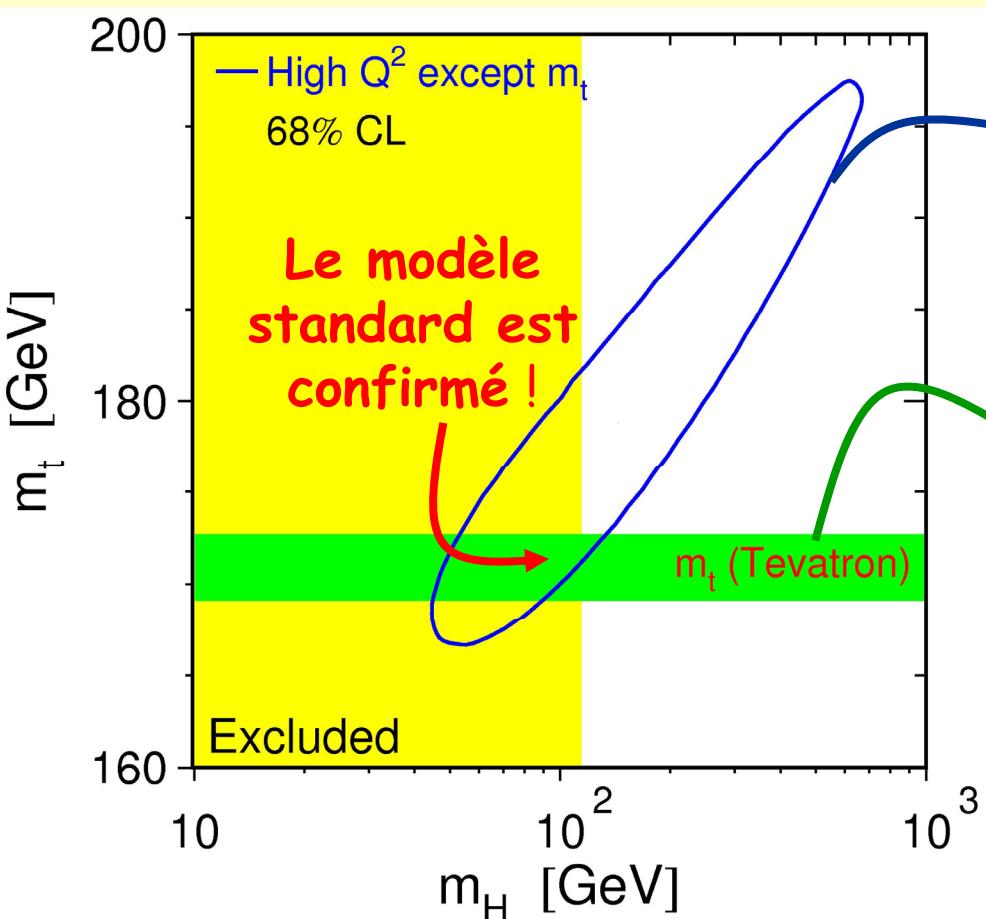
Théorie → prédictions fonction de M_{top}

Expérience → mesures précises



ajustement de la valeur de M_{top} :

$$M_{top} = 178,9^{+12}_{-9} \text{ GeV}$$

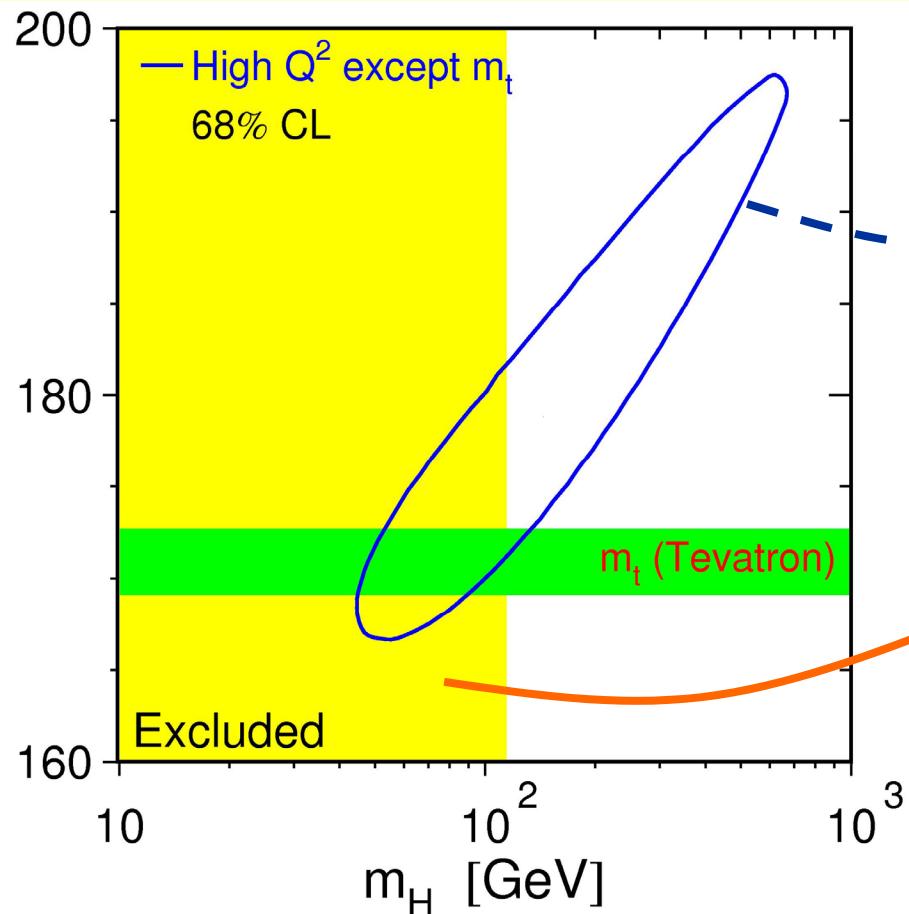


valeur mesurée directement
(Tevatron, USA):

$$M_{top} = 170,9 \pm 1,8 \text{ GeV}$$

- avant le LEP: $M_{top} > 60 \text{ GeV}$
- 1993: mesures de précision au LEP: $M_{top} = 166^{+25}_{-29} \text{ GeV}$
- 1995: découverte du top au Tevatron: $M_{top} = 180 \pm 12 \text{ GeV}$

Résultat 2: prédiction de la valeur de M_H



ajustement de la valeur de M_H :

$$M_H = 76^{+33}_{-24} \text{ GeV}$$

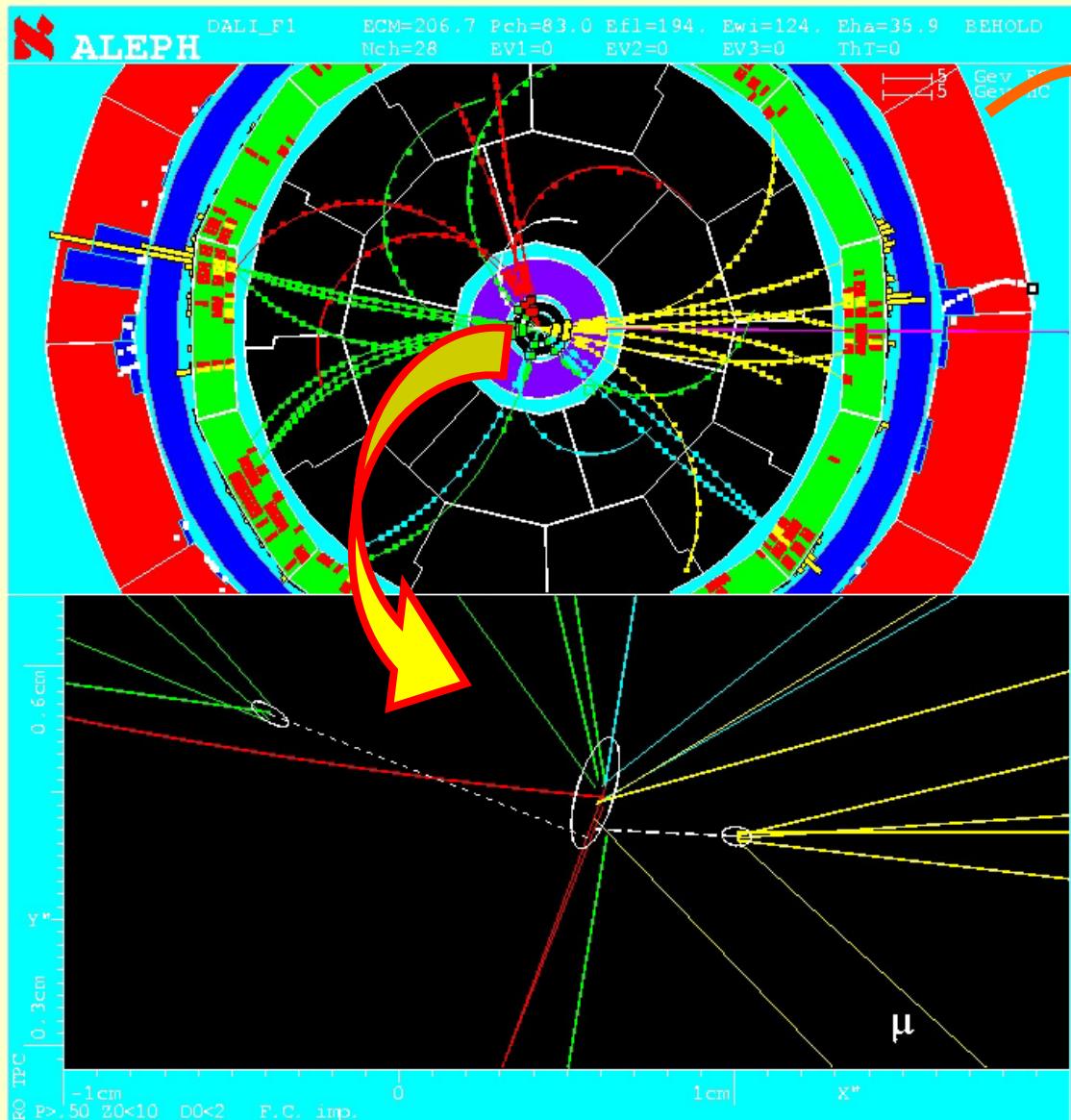
$$M_H < 144 \text{ GeV} \text{ (95% CL)}$$

domaine exploré par les recherches « directes » (LEP):

$$M_H > 114,4 \text{ GeV} \text{ (95% CL)}$$

☞ avant le LEP: expérience : $M_H > 100 \text{ MeV}$, théorie $M_H < 1000 \text{ GeV}$

A-t-on vu un boson de Higgs standard au LEP ?



4 jets de particules
deux jets dans les deux Résultats final de
LEP 2:

état final:
 $e^+e^- \rightarrow HZ$
 forte probabilité signal
 observé
 $qq \rightarrow bb$

compatibilité avec
 et l'hypothèse d'une
 fluctuation du fond: 9%
 $\ln(1+s/b) = 1,73$

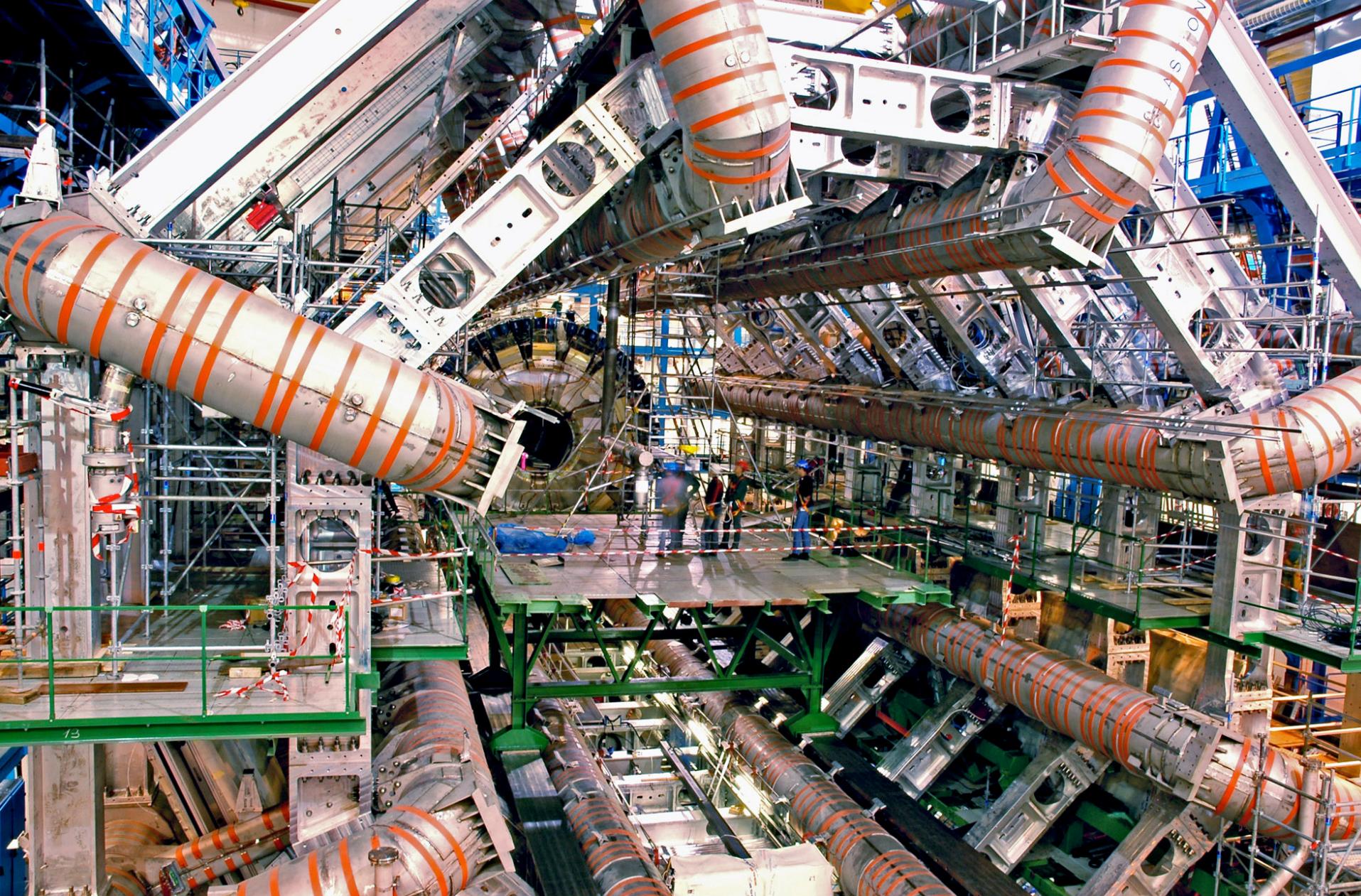
Comptabilité avec
 masse reconstruite:
 l'hypothèse d'un signal à
 $M_H = 144^{+3}_{-4} \text{ GeV}$
 115 GeV: 15%

Mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible

- o Bilan actuel (LEP (CERN), SLC (US), TeVatron (US)) :
 - o modèle standard confirmé au niveau quantique, mais pas de Higgs...
 $M_H > 114,4 \text{ GeV} \quad M_H < 144 \text{ GeV} \quad (M_H = 115-118 \text{ GeV} ?)$
 - o extensions : modèles composites défavorisés, modèles à plusieurs bosons de Higgs encore en course mais pas de nouvelle particule de $m < O(100 \text{ GeV})$
- o Le futur (TeVatron (US), LHC (CERN), ILC ?) :
 - o Recherche de nouvelles particules de masse $100 < m < O(1000) \text{ GeV}$
 - o Poursuite des mesures de précision
supersymétrie ?

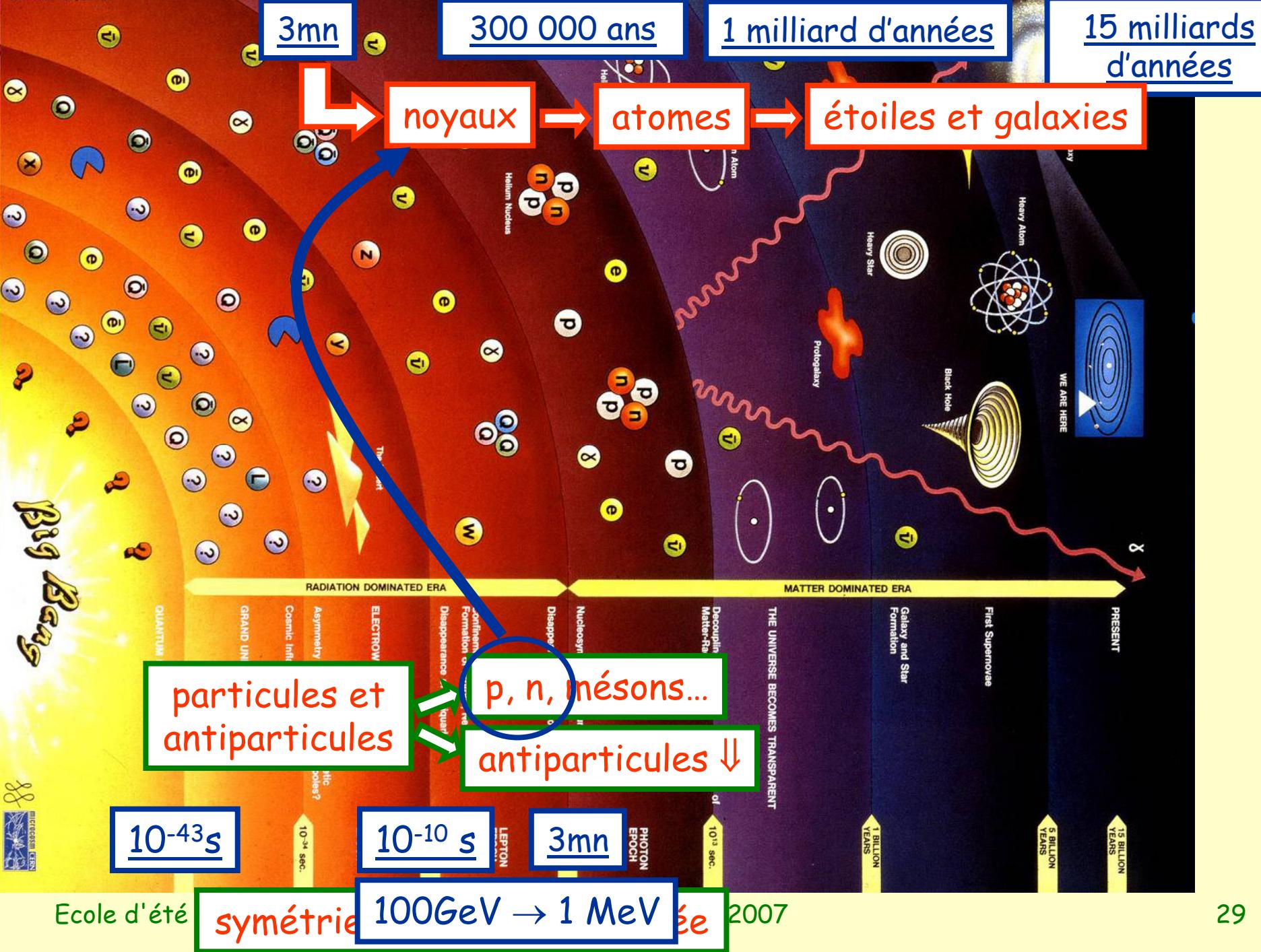
Les enjeux : **brisure de la symétrie électrofaible**, puis unification des interactions électrofaible et forte, autres symétries, théorie quantique des cordes ? de la gravitation...

nouvelles dimensions ?



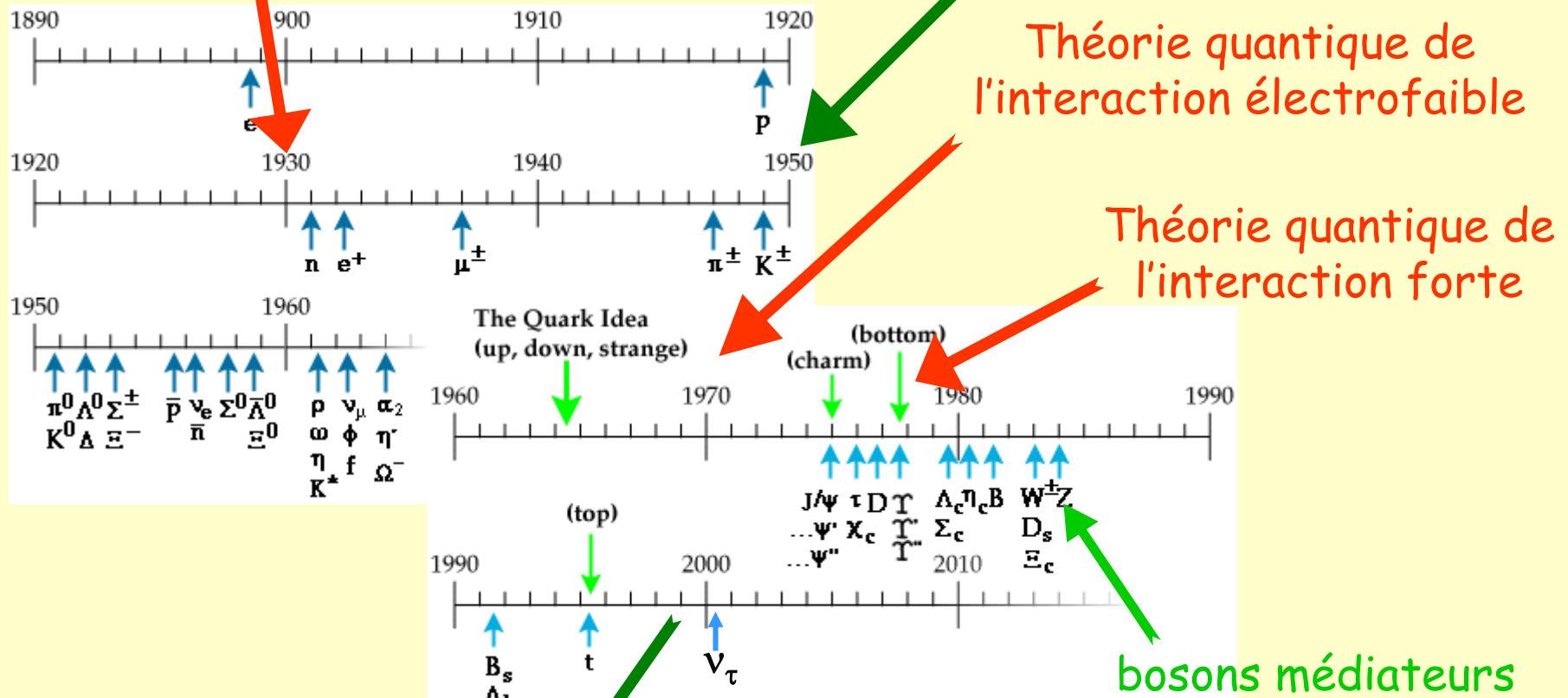
Expérience *ATLAS* au LHC en cours de montage au CERN

(juin 2007)



COMPLEMENTS

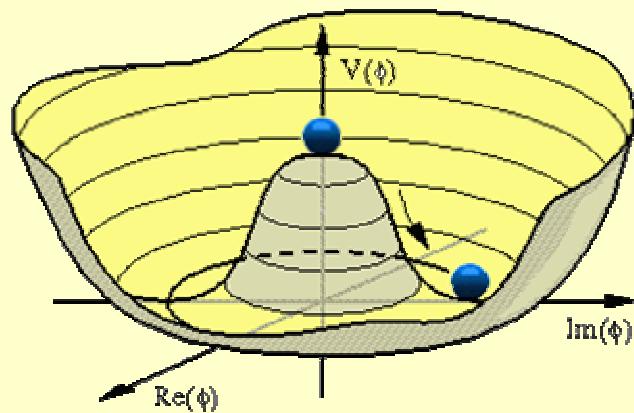
Théorie quantique de l'électromagnétisme Des particules élémentaires Tests de précision de l'électrodynamique quantique



Tests de précision de la théorie quantique de l'interaction électrofaible aux interactions fondamentales

Mécanisme de Higgs et brisure de symétrie

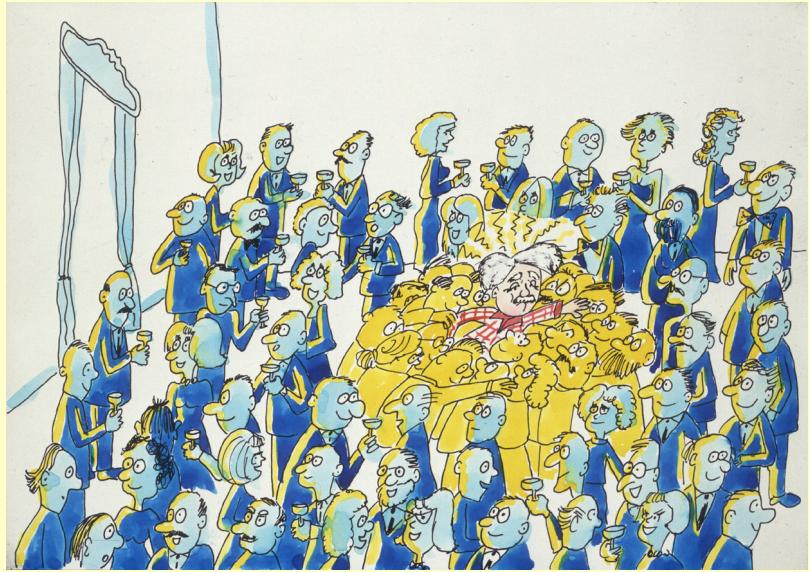
- La symétrie électrofaible, respectée par les équations de la théorie, est brisée au niveau de l'état d'énergie minimal (le « vide »);
- La brisure est due au fait que le champ de Higgs a dans le vide une valeur moyenne non nulle :



sélection d'un vide particulier
= brisure **spontanée** de symétrie

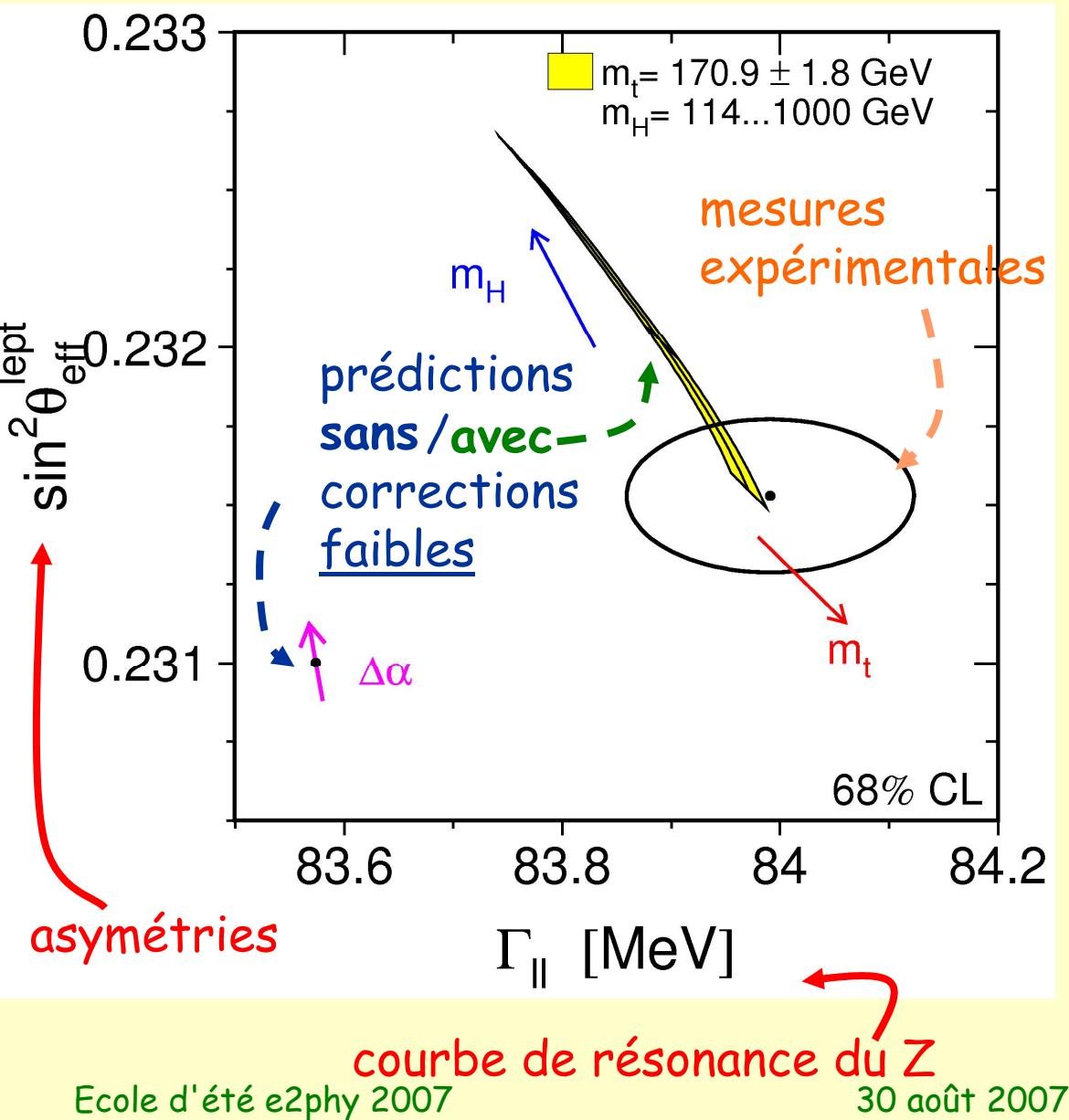
Mécanisme de Higgs et masse

masse d'une particule: le champ de Higgs « freine » la progression des particules



masse du boson de Higgs: le champ de Higgs interagit avec lui-même

Validation du modèle standard

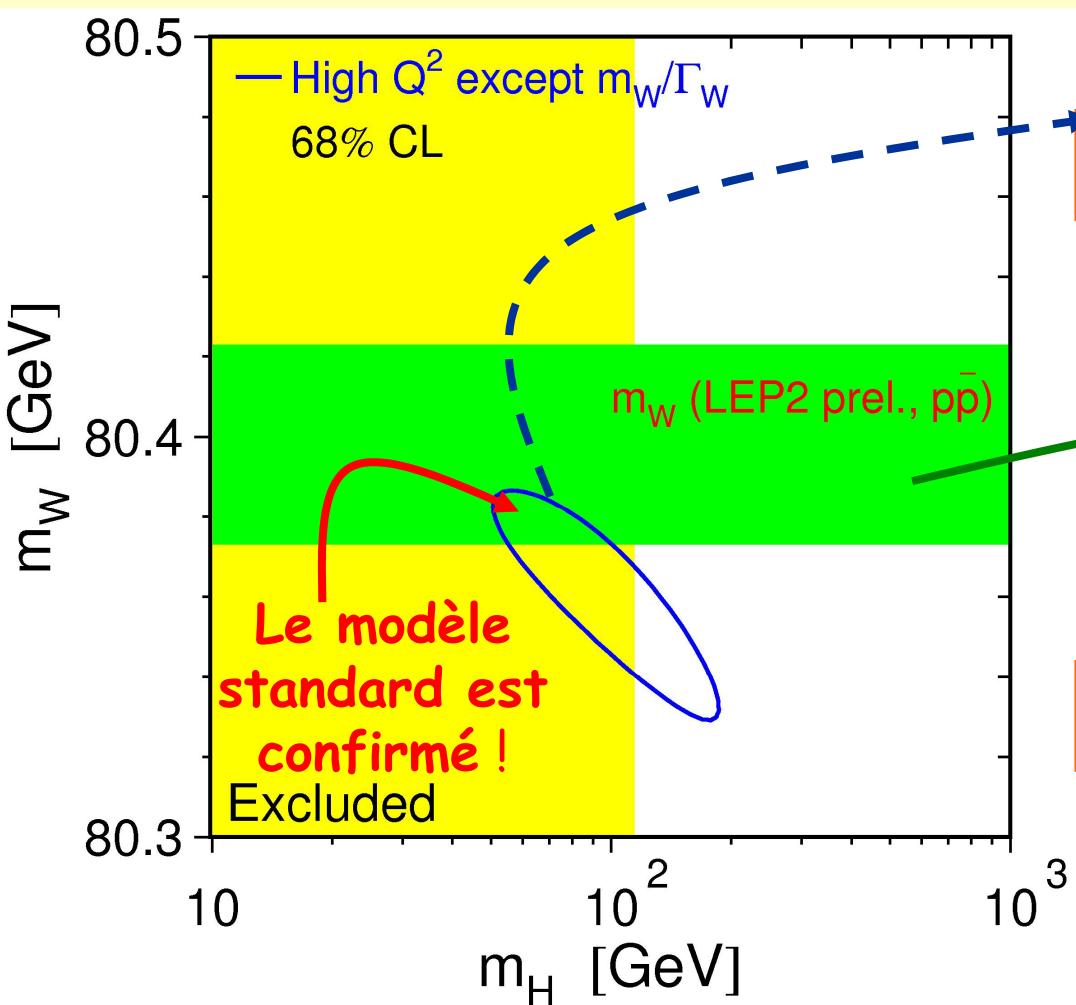


- o Mise en évidence des corrections quantiques dues à l'**interaction faible seule** !

☞ avant le LEP: test impossible par manque de précision (ex: $\sin^2\theta_{\text{eff}}$ mesuré à $\pm 0,005$)

- o Le modèle standard est **confirmé** !

Résultat 3: prédiction de la valeur de M_W



ajustement de la valeur de M_W :
 $M_W = 80,360 \pm 0,020 \text{ GeV}$

mesure directe de M_W (LEP et Tevatron):

$M_W = 80,398 \pm 0,025 \text{ GeV}$

avant le LEP:
précision sur M_W :
 $\geq 0,9 \text{ GeV (1%)}$

Brisure de la symétrie électrofaible

Violation de CP par l'interaction faible

→ Effets quantiques = prédictions

→ Mécanisme exact ?

→ Effets niveau quarks = prédictions

→ Poursuivre les mesures

LEP (CERN), SLC (US), TeVatron (US)

⇒ LHC (CERN)

L'interaction forte

→ Structure profonde du p

→ Intensité de l'interaction

→ Plasma quark-gluon ?

Hera (DE), RHIC (US) ... ⇒ LHC (CERN)

Les thèmes de la physique des particules

Babar (US), Belle (Japon)

⇒ LHC (CERN)

Les neutrinos

→ Les ν sont massifs

→ Masses ? $\nu = \bar{\nu}$ ou $\nu \neq \bar{\nu}$?

→ Violation de CP ?

Japon, US, Europe

La grande question: qu'y a-t-il au delà du modèle standard ?

Les Vingt Prochaines Années

Le panorama des futurs accélérateurs

Nouveaux phénomènes attendus au TeV

LHC (14 TeV) « machine à découvertes » sur le point de démarrer

Le LHC pourra difficilement apporter des réponses détaillées

Nécessite une « machine à mesures » ILC (0.2-1 TeV)

~2010 Décision ILC

CLIC (~50 TeV)

2008

LHC

2015

slHC

~2020

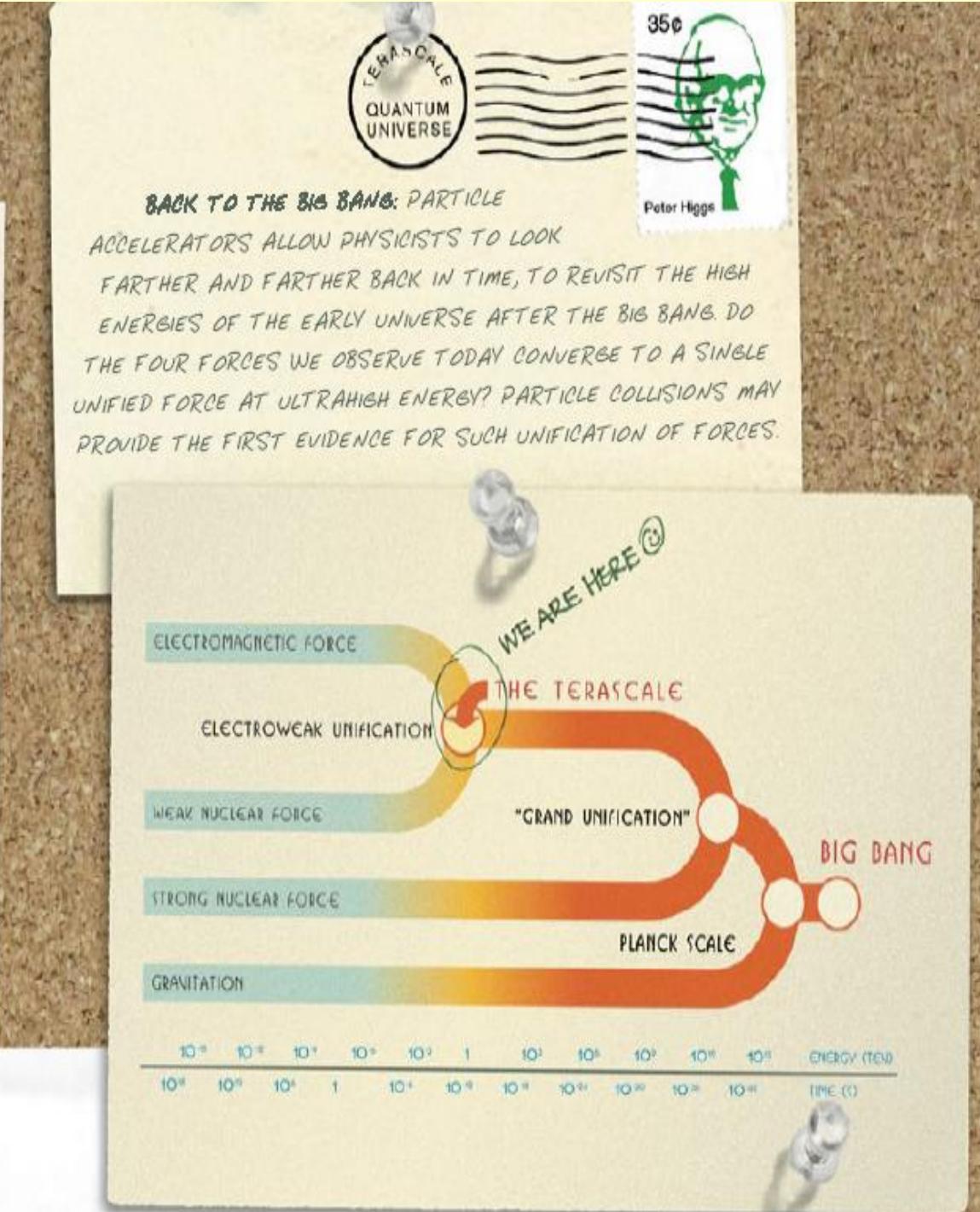
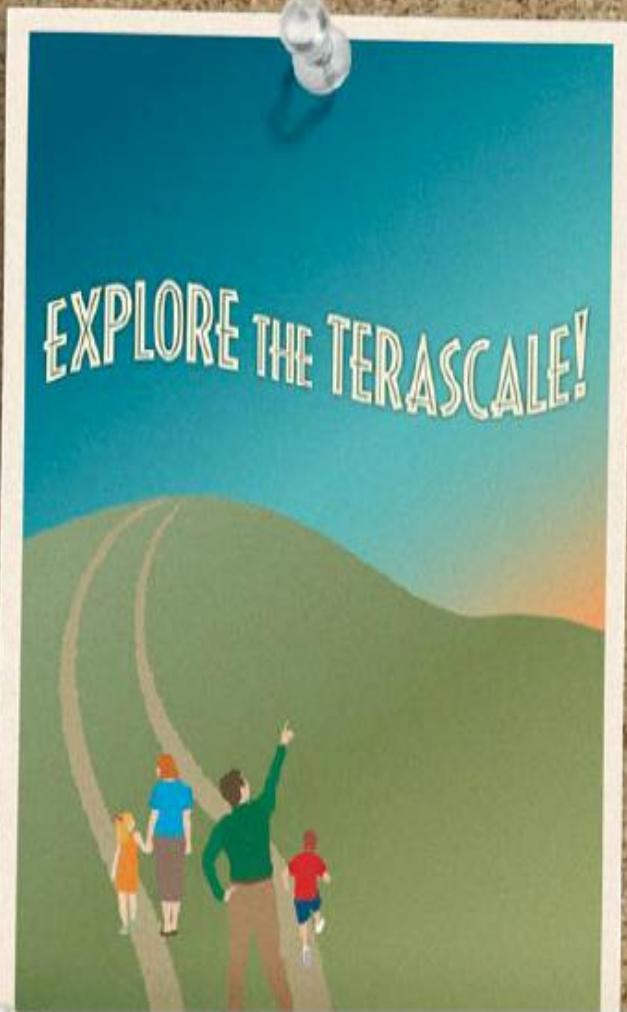
ILC

2025-2030

CLIC/vLHC

TeV

Multi-TeV





CERN : européen, le plus grand centre au monde, fondé en 1954;
20 états membres, 34 états associés;
3000 employés, 6500 scientifiques visiteurs (500 labos, 80 nations)