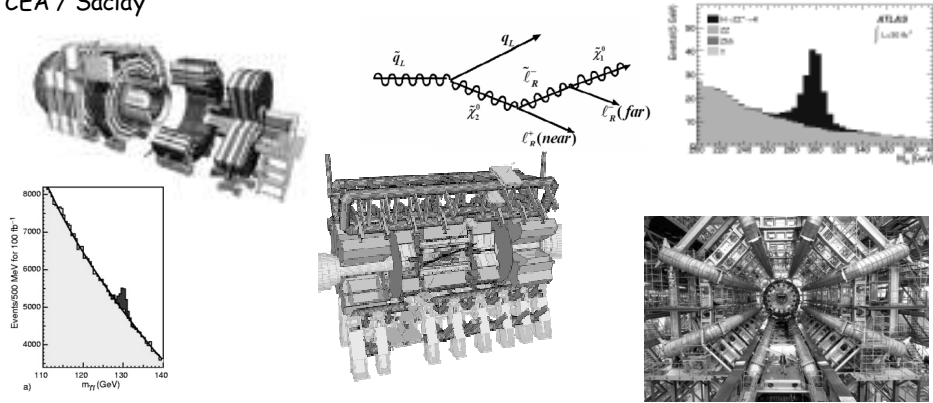


# Physique à LHC

Bruno Mansoulié  
 Service de Physique des Particules  
 IRFU (Institut de Recherche sur les Loix Fondamentales de l'Univers)  
 Division des Sciences de la Matière  
 CEA / Saclay



Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

# Plan

- Présentation de la physique des particules 3-11
- Le Modèle standard (et ses questions) 12-23
- LHC et les expériences 24-29
- Physique au LHC 30-41
  - Conditions expérimentales
  - Recherche du boson de Higgs
  - Recherche « exotiques »
    - Supersymétrie
    - Dimensions supplémentaires

Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

## Présentation Physique des Particules

### Plutôt physique de « l'élémentaire ». Structures, plutôt que « poupées Russes »

Invariances, symétries, unification.



- Les « Eléments » modernes: *champs, cordes, énergie du vide*, etc.

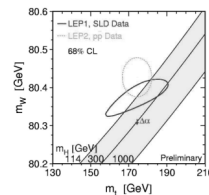
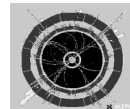
- Ambition: description « élémentaire » du monde.

Lien (récent) avec la cosmologie: théorie du Big Bang, évolution de l'Univers



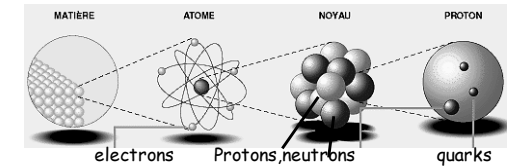
- Questionnements:

- Aujourd'hui, un modèle ( le « Modèle Standard ») sophistiqué, très prédictif, confirmé par toutes les expériences.
- D'immenses questions sans réponses:
  - fonctionnement interne du modèle,
  - extrapolation à plus haute énergie,
  - et aussi « contenu énergétique de l'Univers »...



Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

## En commençant par la fin: (état des lieux)



### CONSTITUANTS:

Ces constituants élémentaires sont des *fermions: spin 1/2, statistique de Fermi*

- Première colonne (« famille »):  
 constituants des particules « ordinaires »:  
 . électron (et son neutrino)  
 . proton (uud), neutron (udd)

- Deux autres : répliques identiques à tous points de vue *sauf la masse: plus lourd*  
*On ne sait pas pourquoi il y a 3 familles!*  
 Produites dans des réactions de « haute énergie », soit naturelles (rayons cosmiques), soit artificielles (accélérateurs...)

Nom Type d'interaction	3 familles		
<i>Quarks</i> (Forte et Electro-faible)	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>
<i>Leptons</i> (Electro-faible)	<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>τ</i>
	<i>ν<sub>e</sub></i>	<i>ν<sub>μ</sub></i>	<i>ν<sub>τ</sub></i>

Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

## INTERACTIONS

L'interaction **ELECTROMAGNETIQUE** est la plus habituelle: charge électrique, liaison de l'atome, molécules.

Charge électrique

L'interaction **FORTE** concerne les quarks. De nombreux états liés existent: les hadrons.  
Les quarks u et d sont les constituants des protons et des neutrons. La cohésion du noyau est aussi due à l'interaction forte.

2/3 e

-1/3 e

-e

0

L'interaction **FAIBLE** se manifeste dans les désintégrations radioactives. C'est elle qui fait « brûler » le soleil. Les neutrinos ne connaissent qu'elle.

**GRAVITATION:** Concerne toutes les formes de matière et d'énergie. Mais très faible par rapport aux autres interactions au niveau de quelques particules.

Nom Type d'interaction	3 familles		
Quarks (Forte et Electro-faible)	u	c	t
	d	s	b
Leptons (Electro-faible)	e	$\mu$	$\tau$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

Pour en arriver là: tout le 20<sup>è</sup> siècle!

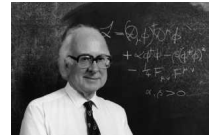
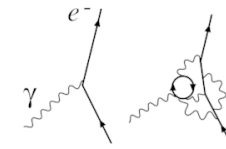


Théorie :

Mécanique quantique et relativité : ~1905

Théorie quantique des champs: ~1950

Mécanisme de Higgs: 1964



Expérimentation :

électron: J J Thomson 1897



quark top: accélérateur Fermilab 1995

## • Cadre théorique de la physique des particules:

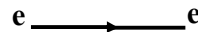
– Relativité restreinte + Mécanique quantique = Théorie Quantique des Champs  
(le plus souvent sous la forme de « théorie des perturbations »...)

– Particule libre :

- masse { = énergie « au repos » via  $E = m c^2$ ; translations }
- spin { = moment cinétique intrinsèque; rotations; unité:  $\hbar$ ; spin 1/2 entier: fermion, spin entier bosons }
- nombre quantiques { = charge(s), propriétés vis à vis des interactions, autres symétries }

– ex: un électron libre:

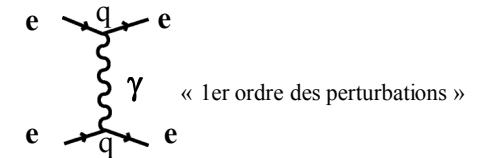
- masse: 511 keV/c<sup>2</sup>, spin 1/2 ( $\hbar$ )
- charge électrique: - e, charge faible: 1/2, charge forte: 0
- particule stable



– Interaction

ex: l'interaction de 2 électrons:

(la banale force de Coulomb en 1/r<sup>2</sup> !)



« 1er ordre des perturbations »

– L'interaction est décrite par l'échange d'une particule; ici UN photon

A chaque « vertex », l'énergie-impulsion n'est pas conservée !

Mais possible en mécanique quantique à l'intérieur des relations d'incertitude:

□  $\Delta E \times \Delta t \sim \hbar$  (Constante de Planck)

– Remarque: l'interaction n'est plus instantanée à distance (comme dans la loi de Coulomb): relativité oblige!

– Les « vecteurs » des interactions sont des **bosons**:

Electromagnétique	Faible	Forte	Gravitation
Photon	$Z^0, W^+, W^-$	Gluons	Graviton (?)

– L'intensité de l'interaction: une « charge »

Electrique	Faible	Couleur	Masse (grave)
------------	--------	---------	---------------

- Résumé
  - **Modèle relativiste ET quantique**
  - **3 familles de fermions constituants, différentes seulement par la masse.**
  - **4 interactions transmises par des bosons**
  - **Dans une famille, différentes charges pour chaque constituant vis à vis des interactions.**

- Complément 1)

Toute particule (fermion ou boson) possède son antiparticule:

Même masse, même spin, toutes charges opposées. Ex:  $e^- \Leftrightarrow e^+$  ;  $\nu \Leftrightarrow \bar{\nu}$  ;  $q \Leftrightarrow \bar{q}$

- Complément 2)

Particules composites: état lié de particules élémentaires . ex : proton = {u, u, d}; ou H = {p, e} !

Tout dépend à quelle échelle de distance (d'énergie) on regarde!

Les particules du tableau sont-elles élémentaires? => oui pour le moment, expérimentalement !

- Complément 3)

Particule instable: une particule (élémentaire ou non) se désintègre => autre système de particules

si  $m_0 > m_1 + m_2 + \dots$ , et s'il y a une interaction qui le permet.

Ex:  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$       **Durée de vie:**  $\tau$        $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$

## Unités naturelles, ordres de grandeur

- Lien par c:  $E = mc^2$

✓ **Énergie d'une particule:** eV; keV, MeV, GeV, TeV  
(1 eV = énergie cinétique d'un électron accéléré par un Volt)

✓ **Masse :** eV/c<sup>2</sup> ; **énergie au repos :**  $E (eV) = m (eV/c^2) c^2$

Ex: m(proton) ~ 1 GeV/c<sup>2</sup> ; m(électron) = 511 keV ;

Masse des quarks: u, d : quelques MeV; s : ~ 100 MeV ; c : 1.5 GeV ; b : 4.7 GeV ; t : 175 GeV

Masse des leptons chargés: électron : 511 keV; muon : 105 MeV; tau : 1.8 GeV

Neutrinos? masse non nulle, inconnue, très petite.

Masse des bosons intermédiaires: photon : 0 ; W : 81 GeV ; Z : 91 GeV

✓ **Impulsion :** eV/c ;  $E^2(eV) = [P (eV/c) \times c]^2 + [m (eV/c^2) \times c^2]^2$

**Dans la pratique, on travaille toujours dans le système où c = 1 .**

**Énergie, impulsion, masse en MeV, GeV...**

Nom Type d'interaction	3 familles		
	u	c	t
Quarks (Forte et Electro-faible)	d	s	b
	e	$\mu$	$\tau$
Leptons (Electro-faible)	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

- Lien par h

**Longueur d'onde associée à une particule:**  $\lambda = h/p$  ; relie distances et impulsions

**De même, relations d'incertitude:**  $\Delta x \Delta p_x \sim h$ ,  $\Delta E \Delta t \sim h$  : distance x impulsion, énergie x temps

✓ **A savoir par coeur:**  $h c \sim 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$  (1 fm = 10<sup>-15</sup> m)

Ex: Résolution d'un "microscope électronique" : sonder la matière avec un faisceau (ou des collisions)

Energie du faisceau	0,5 eV	10 keV	100 MeV	100 GeV
Longueur d'onde	0,4 $\mu$	0,2 A	2 fm	2 10 <sup>-3</sup> fm

Echelle	Visible	Atome	Noyau	~Limite actuelle
---------	---------	-------	-------	------------------

✓ **Autre relation: portée d'une interaction (modèle de Yukawa):**

**Interaction transmise par un boson de masse m  $\Leftrightarrow$  portée:  $h / m$**  (en fait  $h/mc \dots$ )

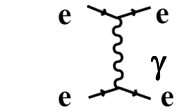
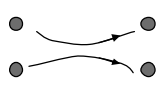
Interaction	Electromagnétique	Faible	Forte
Boson médiateur	$\gamma$ , m = 0	Z, W, m = 100 GeV	$\pi$ , m = 100 MeV (dans ce modèle)
Portée	infinie	2 10 <sup>-4</sup> fm	2 fm

## Le Modèle Standard



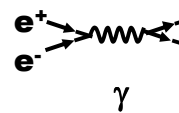
• **Interaction électromagnétique** : Particules « chargées », médiateur: photon

- Collision « classique »:

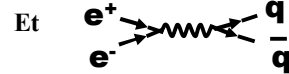
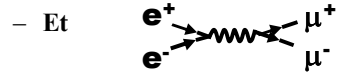


Amplitude totale

- Mais aussi (quantique relativiste!) :



Interférence

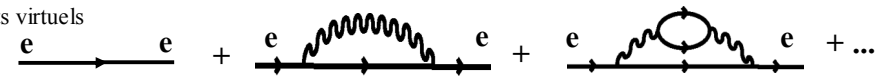


- La collision e-e donne accès à toute la physique possible,  
- pourvu que l'énergie soit suffisante! [ici 2E > 2M(X)]

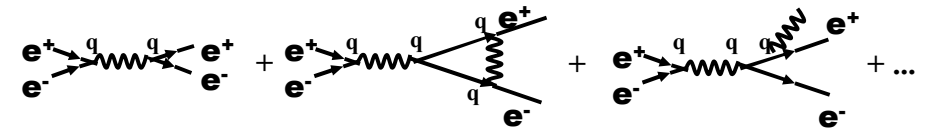


• **Electrodynamique quantique (QED): électrons et photons**

• Effets virtuels



• Calcul d'un processus : série en puissances du « couplage » (ici  $\alpha = 1/137$ ) [série de perturbations]



$(q^2)^2 \sim \alpha^2$

$\alpha^2 + \alpha^3$

• QED « Renormalisable ». => extrêmement efficace pour les calculs. (raison: symétrie « de jauge »)

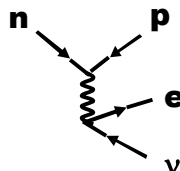
Succès: des atomes (Lamb shift, effet Casimir...) aux plus hautes énergies atteintes (LEP)

=> QED : le modèle de théorie

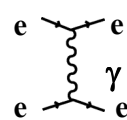
• **Interaction faible**

• **Observation:** désintégration  $\beta$  des noyaux atomiques :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^- + \nu_e$

ex: neutron  $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$



rappelle



... si (n,p) sont la même particule et  $(e^-, \nu_e)$  aussi pour l'interaction faible => « doublets »

• Noter : la particule échangée est chargée, et massive :  $W^+$  et  $W^-$  ( $m = 80$  GeV)

• Peut-on « unifier » les interactions électromagnétique et faible ?

- Garder les bonnes symétries (de jauge)

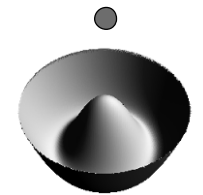
- Avec des constituants (fermions) massifs

- Trouver une bonne raison pour que  $m(W) \neq m(\gamma)$

• **Unification des interactions électromagnétique et faible**

• **Solution:** mécanisme de « brisure spontanée de symétrie »:

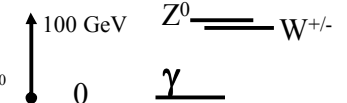
Potentiel symétrique, état fondamental non-symétrique



• **Réalisation pratique:** introduction du boson de Higgs.

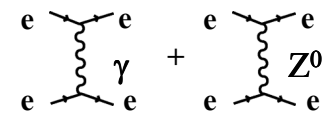
• **Conséquences:**

- Le photon reste sans masse
  - Les fermions constituants acquièrent une masse, ainsi que le boson W
  - Existence d'un médiateur neutre de l'interaction faible: le  $Z^0$
  - L'interaction « électrofaible » est « renormalisable »:
- On sait tout calculer!



• **La brisure de symétrie électro-faible vue du haut**

- Interactions EM et faible « indiscernables » (symétriques) à très haute énergie  $E \gg 100$  GeV
- Se séparent à plus basse énergie sous l'effet du champ de Higgs et prennent chacune leur structure et leur portée.



• **Interactions fortes**

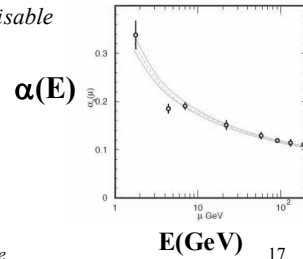
• **Observations**

- Cohésion des noyaux => force forte, courte portée
- Expériences  $e + p$ ,  $\mu + p$ ,  $\nu + p$  => existence des quarks:  $p = uud$ ,  $n = udd$
- Quarks jamais libres! (charge électrique :  $2/3$ ,  $-1/3$ )
  - Etats liés : mésons (2 quarks), baryons(3 quarks)
  - Quark dans l'état final d'une collision: jets de particules
- Charge forte: 3 « couleurs » (groupe)



• **Théorie : Chromodynamique Quantique.(QCD)**

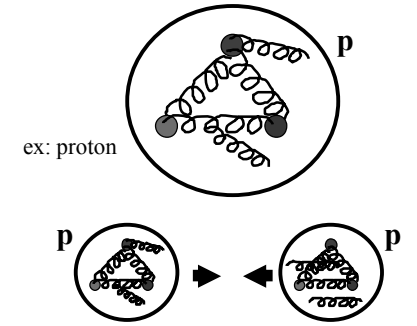
- A nouveau copiée sur QED, « théorie de jauge » renormalisable
- Médiateur: gluon
- Propriété étrange: le couplage augmente avec la distance! (diminue avec l'énergie de « sondage »)
- Aussi performante que QED à haute énergie
- Difficile à basse énergie



Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

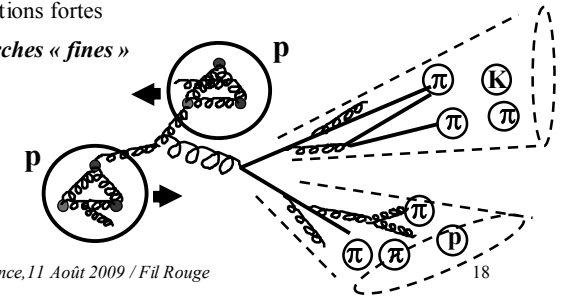
• **Interaction forte: phénoménologie**

- Basse énergie: états liés de quarks et gluons: (mésons  $\pi$ ,  $K$ ,  $D$ ,  $B...$ ; proton, neutron, etc.)
  - Fonctions de structure
    - (semi-empiriques)
- Couplages forts: sections efficaces élevées
  - Collisions proton-proton: interactions fortes



= **principal bruit de fond à toutes les recherches « fines »**

- Haute énergie: état final = jets
  - Jets de quarks légers
  - Jets de gluons
  - Jets de quarks lourds



Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

**Modèle Standard et au-delà**

• **Résumé du MS**

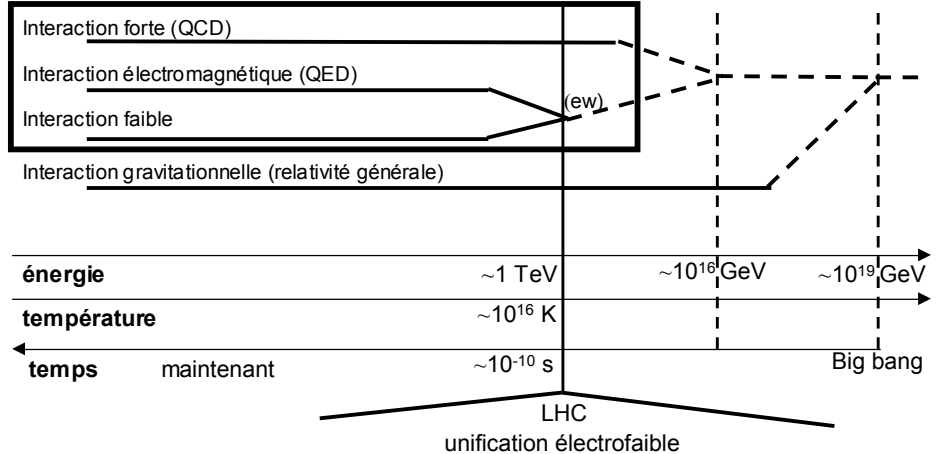
- Constituants : 3 familles ( 2 quarks, 1 lepton chargé, un neutrino)
- Interactions: Electro-faible (+ brisure), Forte; toutes: théories de jauge, renormalisables
- Toutes les masses des particules élémentaires, tous les couplages: proviennent de la brisure de symétrie électrofaible via le mécanisme de Higgs; mais leurs valeurs sont des paramètres libres ( ~25 paramètres)
- Efficace dans son cadre: calculs corrections quantiques, cohérence...

Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

**Unification(s), évolution de l'Univers**

Théories de jauge

**Model Standard**



Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge

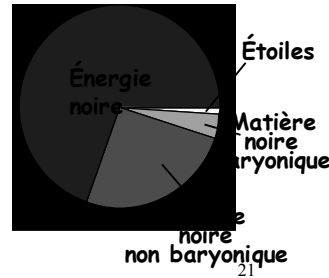
• Les questions/problèmes du MS

- Pourquoi:
  - Ces symétries?
  - 3 familles ? (*lien avec asymétrie matière-antimatière univers*)
  - Valeurs des paramètres? (*masses, couplages: > 27 paramètres libres!*)
- Extrapolation à plus haute énergie/courte distance:
  - Unification électrofaible-forte? Si oui:  $\sim 10^{16}$  GeV
  - Unification gravité:  $10^{19}$  GeV
  - « hiérarchie »  $10^{16}$  GeV / 100 GeV ?

- Contenu énergétique de l'Univers:

*Matière noire, énergie noire...*

Le MS ne décrit que 4% du contenu!



• Au-delà du Modèle Standard

Théories censées englober le MS, et résoudre au moins certains des problèmes! (*Hypothétiques!*)

• Modèles composites

- Particules composites, Higgs composite...  
*Pas de bon modèle aujourd'hui*



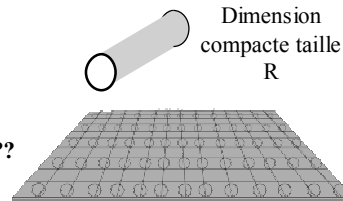
• Super-Symétrie

- Symétrie entre bosons et fermions
- Dernière symétrie fondamentale non encore observée!
- Chaque particule a un s-partenaire.
- Non observée => symétrie brisée.
- Echelle naturelle de brisure: échelle électrofaible => plein de physique à  $\sim 1$  TeV!
- Résout (plus ou moins) le problème de hiérarchie
- Candidat idéal pour la matière noire: LSP (lightest supersymmetric particle):  
(en général: neutralino)



• Dimensions supplémentaires

- Kaluza-Klein 1920 : relativité générale en 5 dimensions. dont une compacte => relativité + électromagnétisme !! ??
- Années 1980: théories de cordes: théorie quantique de la gravitation. Taille des dimensions supp:  $R \sim L$  Planck  $10^{-33}$ cm ( $=1/10^{19}$  GeV)
- Récemment: dimensions supp "grandes"  $\sim 1/(1 \text{ TeV})$  : gravité quantique à  $\sim 1$  TeV!
- Résout (plus ou moins) le problème de hiérarchie: une seule échelle d'énergie pour tout!
- Phénoménologie inconnue (puisque pas de théorie quantique de la gravitation)...



Entre autres: possibilité de créer des (*micro-*) trous noirs !



LHC: l'accélérateur

LHC: collisionneur proton-proton dans le tunnel du LEP (circonférence 27 km).  
Énergie de faisceau : 7 TeV => collisions à 14 TeV (7 fois le TeVatron » de Chicago)  
Intensité nominale: 40 millions de collisions/seconde (100 fois TeVatron).

1984 Première réunion à Lausanne

1991 Résolution de principe sur LHC

1993 Abandon du concurrent US: SSC

1994 Accord pays européens pour LHC

1995 Approbation ATLAS et CMS

1997 US, Japon, Inde rejoignent LHC

1998 Début génie civil cavernes expériences

... Construction machine et expériences...

2008 Mise en service



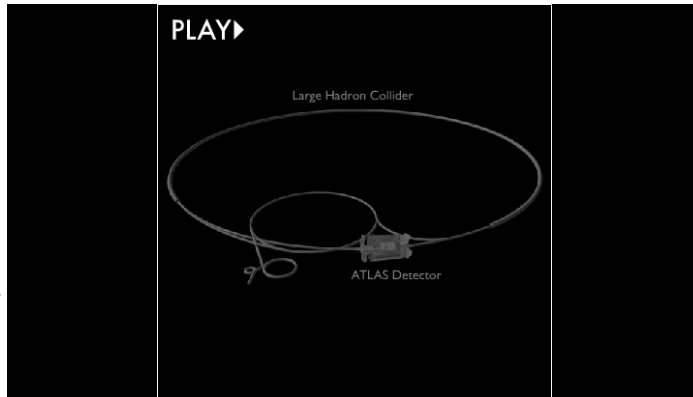
• **L'accélérateur**

• LHC: proton-proton  $7 + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$  dans le tunnel du LEP

• 2800 paquets de protons dans chaque sens

• 4 points d'intersection: 4 expériences

• Complexe d'accélérateurs du Cern utilisé comme injecteurs



• **Aimants et cryogénie**

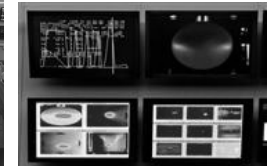
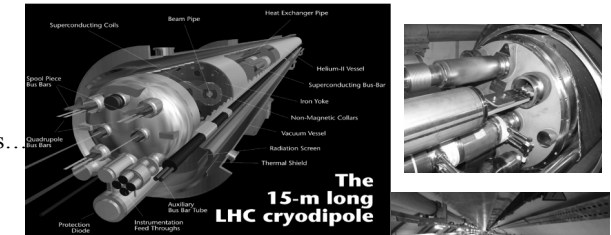
- 1232 dipôles, 2-in-1.
- 392 quadripôles
- 2464 sextupôles, 1232 octupôles...
- > 1200 autres petits aimants

- Supra: Helium superfluide 1,8K
  - Note: Amenées de courant en supra Haut TC !

• **Etat des lieux**

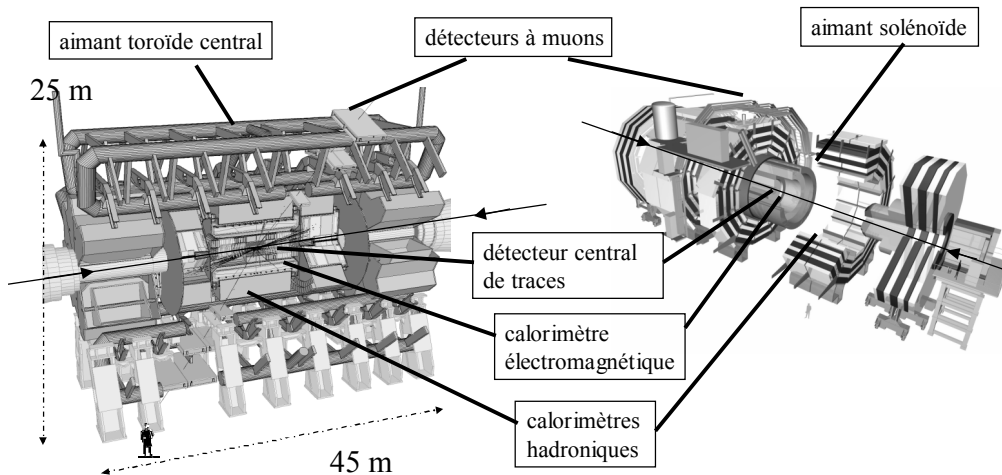
- Démarrage le 10/09/2008
- Succès complet: en quelques heures les 2 faisceaux circulent dans les anneaux...*

- Incident le 19/10/2008
- pas de collisions avant l'automne 2009**



**Expériences ATLAS et CMS**

Mêmes buts (Higgs, etc), conceptions très différentes: complémentarité, sécurité.



• **Traitement des données**

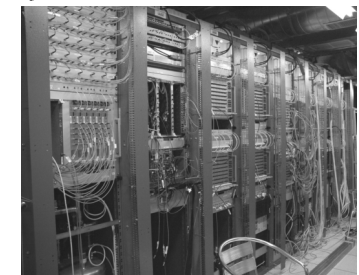
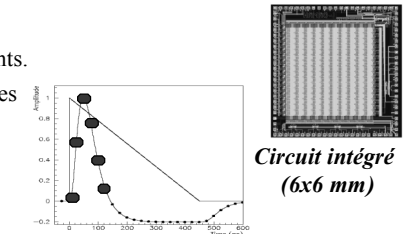
• **En-ligne**

- Fonctions: traitement du signal, sélection des événements.
  - Pour chacun des millions de détecteurs élémentaires (et 40 millions de fois par seconde): Traitement du signal, Numérisation

- Pour l'événement complet: Calculs rapides => quantités physiques (E, t, ...)
- Sélection des événements

Sur "fermes" de PC (~2000 PC en parallèle)

=> **Enregistrement de l'événement (100 à 200/seconde)**



Atlas: 750 armoires

**Hors-ligne:**

~100 événements/sec; 1 événement = 1,5 MB

⇒ ~10 millions GigaByte par an à stocker et processor

• nécessite ~100 000 PC tournant 24h/24

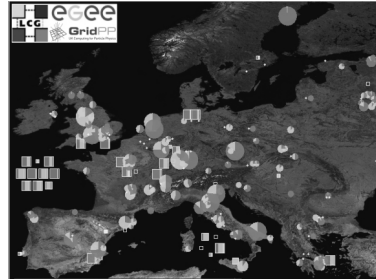
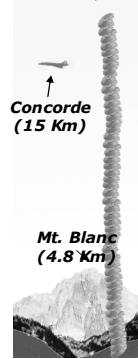
⇒ Grilles de calcul

- Centres de calcul (fermes de processeurs)
- Réseaux rapides
- Software « transparent » (~ hyper Kazaa)

-Organisation « hiérarchique »

- 1 Tier 0 = Cern
- 10 Tier 1's : France: CC-Lyon
- 100 Tier 2's : régionaux
- X Tier 3's

Balloon (30 Km)  
CD stack with 1 year LHC data! (~20 Km)



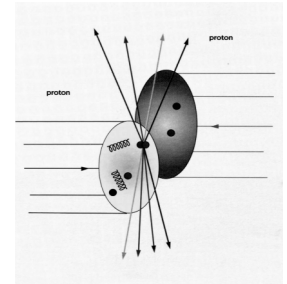
Mardi, 17:21.  
37682 jobs actifs sur 140 sites

**Les conditions expérimentales à LHC**

• Faisceaux de protons (7 TeV) en paquets [7 cm x (15 μm)<sup>2</sup>]

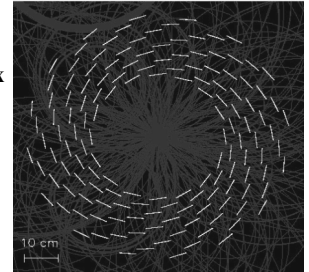
À pleine luminosité:

- Paquets nombreux (2800) et intenses (10<sup>11</sup> p)
- Un croisement toutes les 25 nanosecondes (40 MHz) à chacun des 4 points d'expérimentation



- Protons non élémentaires: Événements « durs » rares
- Événements banals nombreux

- 20 collisions proton-proton par croisement
- > 100 particules produites par interaction p-p
- > 2000 particules toutes les 25 ns



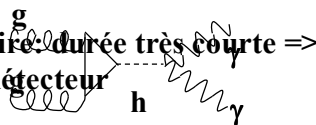
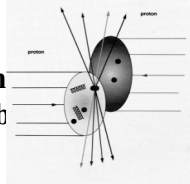
**Les "événements": un processus statistique**

- Chaque intersection de 2 paquets => collisions n-n (hasard)
- Chaque collision p-p => collision + ou - dure de quarks/gluons
- Une collision dure quark-quark (ou gluon-gluon) => plusieurs possibilités d'interaction

[ physique quantique]. Ex: processus "banal" ou "nouvelle particule ou interaction" ..

Ex: p-p -> h -> γγ

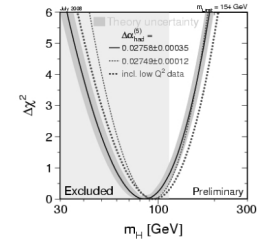
- Inobservable: durée très courte => s le détecteur



**Recherche du Boson de Higgs à LHC: avant la chasse...**

**Que sait-on du Higgs?**

- Expériences
  - Recherches directes:
    - m(H) > 114 GeV (à LEP)
    - m(H) ∉ [160-170] GeV (Fermilab, Chicago)
  - Mesures indirectes (cohérence): m(H) ≤ 163 GeV (95% confiance)

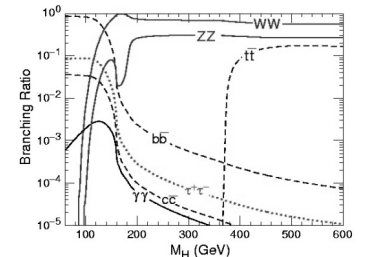


• Théorie: tout, sauf sa masse (< 1 TeV)

- Production: p + p → H
- Désintégration H → (particules stables)



- Plusieurs « modes » possibles pour une masse donnée
- Proportions changent avec valeur de la masse!





# Recherche du Higgs

## • Higgs → γ γ

Utile pour la zone de « basse masse » : 114 → 140 GeV

Modes: bb, cc, ττ, inobservables.  $H \rightarrow \gamma\gamma$ : petit rapport de branchement (~10<sup>-3</sup>) mais ~bonne signature

Très exigeant pour la détection des photons (calorimètres électromagnétiques)

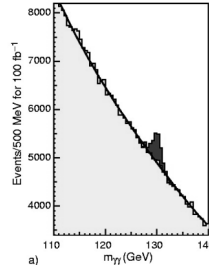
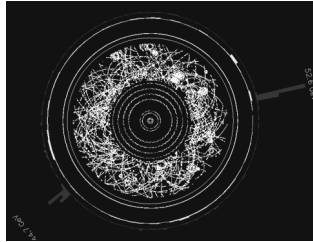
- Identifier les 2 photons/ bruit de fond: évts jets banals: 10<sup>6</sup> x signal
- rejection jets : 10<sup>3</sup> par jet... pas si facile... => détecteurs spéciaux juste pour ce cas!

- bruit de fond vrais γ γ banals

=> résolution en masse nécessaire :

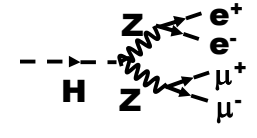
- résolution en énergie excellente
- Vertex inconnu ( parmi ~20 vertex ) => angle photon? => résolution en direction

[autre mode possible pp → W + H, H → bb]



## • Higgs → 4 leptons

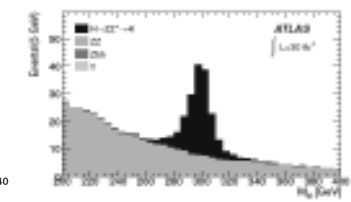
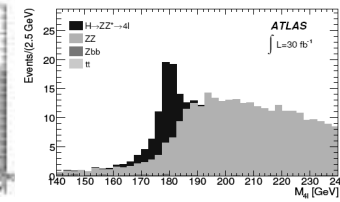
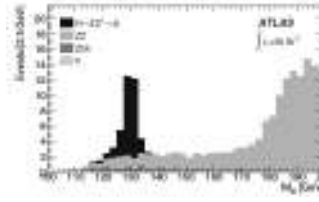
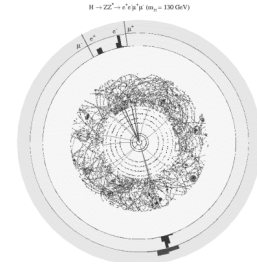
- Si  $m_H > 2 m(Z^0) = 180$  GeV,  $H \rightarrow W^+ W^-$  (70%) et  $Z^0 Z^0$  (30%)
  - $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$  ou  $\mu^+ \mu^-$  (B. R. 3% chaque)
  - Événements 'en or' :  $p p \rightarrow H \rightarrow Z Z \rightarrow 4 e, 4 \mu, 2e 2\mu$



- Encore valide si  $140 \text{ GeV} < m_H < 2 m_Z$ , avec un Z virtuel
  - $p p \rightarrow H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$
  - Mais peu de signal (sous le seuil)

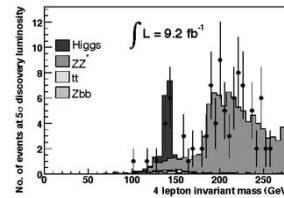
- Détection relativement facile, peu de bruit de fond instrumental

- Fonds physiques: dominé par « continuum ZZ »



## • Higgs: Analyse statistique

- **Découverte** : excès de signal > « 5 déviations standard (σ) »
  - Probabilité ( fluctuation > 5 σ ) = 3 10<sup>-7</sup>
  - Pour un fond parfaitement connu!
  - Pour un signal attendu à cet endroit là

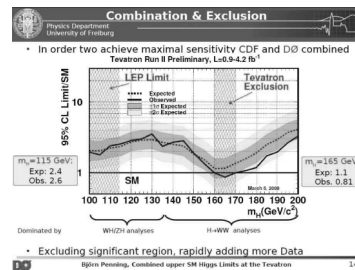


- **Exclusion**: limite sur le signal à 95% CL  
Valeur max du signal pour laquelle 95 expériences sur 100 seraient encore compatibles avec les données.

## • Combinaison plusieurs modes

- possible de combiner pour augmenter la sensibilité
- traitement des erreurs délicat

- ... et plusieurs expériences ex CDF + D0 à Fermilab (vraies données!)  
combinaison dizaines de modes / 2 expériences...



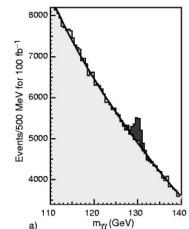
## • Evaluation du bruit de fond?

### - Simulation Monte-Carlo:

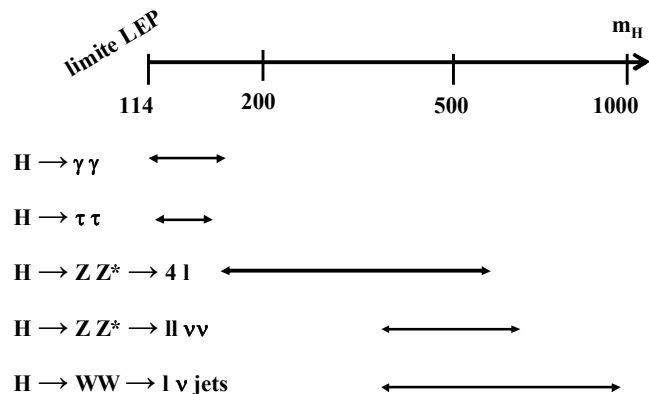
- Physique du fond connue: processus élémentaire × désintégrations × détecteur × analyse
  - Difficultés:
    - Incertitudes « théoriques »: fonctions de structure, ordres supérieurs...
    - Ex H -> 4 leptons : forme du seuil Z Z
    - Nombre d'événements de fond de départ énorme × réjection énorme
    - Ex H -> γ γ, fond 2 jets = 10<sup>6</sup> x signal, réjection chaque jet > 1000
- Impossible de simuler >> 10<sup>6</sup> évts, et même: sens d'une telle simulation?

### - A partir des données elles-mêmes:

- Le plus simple: « side-bands »
- Plus sophistiqué: « control samples »:  
Echantillons de données ~signal, mais en relaxant un ou plusieurs critères de sélection..  
(attention aux corrélations!)



• **Résumé des simulations : potentiel de découverte du Higgs standard (Atlas et CMS)**



**Après ~ 3 ans de fonctionnement toute la gamme est couverte.**

**Recherches « Exotiques »**

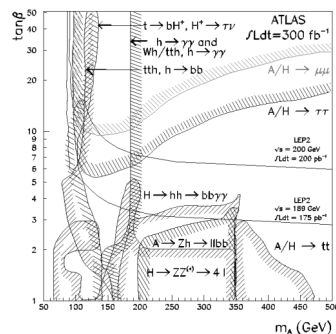
**SUSY**

- **Rappel:** Supersymétrie: actuellement « meilleure » extension du MS
  - Résout (+ ou -) le problème de « hiérarchie »
  - LSP candidat matière noire
  - Lien avec gravitation (?)
- **Mais:**
  - Aucun signe aujourd'hui (« *Desperately seeking Susy* »)
  - Nombreuses particules prédites (partenaires, fermions ↔ bosons, [ spin entier ↔ demi-entier])
  - Très nombreux paramètres
  - Nombreux modèles possibles => difficile d'explorer tout...
    - MSSM (Minimal SuperSymmetric Model), avec « mSugra » pour des calculs réalistes
- **Grands « secteurs »**
  - Higgs: MSSM: 5 Higgs! 3 neutres, 2 chargés;  $m(h^0) < 130 \text{ GeV!}$
  - Int fortes: squarks, gluinos. Masse élevée (1-10 TeV?)
  - Int faibles : sleptons, neutralinos. Masse moins élevée ?

• **Higgs SuSy**

MSSM : secteur des Higgs :  $H^+, H^-, h^0, H^0, A^0$   
2 paramètres:  $m_A, \tan(\beta)$ .

Analyse très complexe!  
Plan  $m_A, \tan(\beta)$  entièrement couvert.

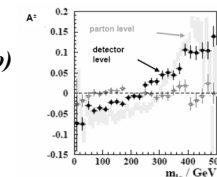
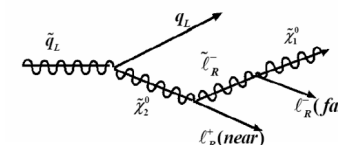
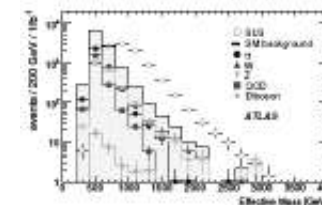


• **Pour une partie de l'espace des paramètres:** Susy se manifeste à une échelle proche du MS  
=> Higgs chargés, plusieurs Higgs : caractéristique!

• **Ailleurs :** l'échelle de Susy est déjà assez éloignée de celle du MS  
=>  $h^0$  seul, ressemble au Higgs standard! => comment le distinguer?  
=> autres mesures à LHC. (*Sinon: futur collisionneur e+e- ILC!*)

• **Particules SuSy autres que les Higgs**

- Premières études:  $pp \rightarrow \tilde{q} \tilde{q}^* \rightarrow q + \chi^0 + q + \chi^0$   
= 2 jets acoplanaires + rien  
Événement « spectaculaires »,  
Limites possibles: squarks, gluinos  $m > 2\sim 3 \text{ TeV}$
- Par la suite, modèles précis (Ex: mSUGRA)  
avec tout le spectre de s-particules.
  - Événements complexes mais riches  
 $pp \rightarrow q q$   
 $\rightarrow \chi^0_2 q \rightarrow l^+ l^- q \rightarrow \chi^0_1 l^+ l^- q$

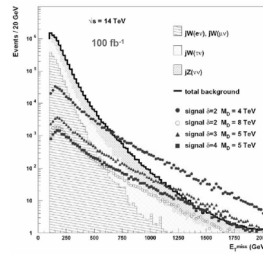


Permettant par exemple la mesure de la masse du LSP (neutralino)

Et des mesures de spin (caractéristique de SuSy)

## Dimensions supplémentaires

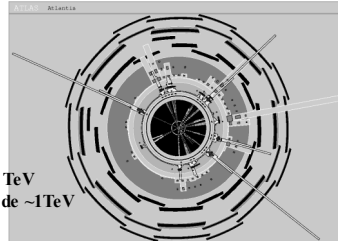
- Principe: une ou plusieurs dimension(s) d'espace en plus des 3.
  - « compactifiée »: « enroulée sur une taille (TeV)<sup>-1</sup> »
  - Ainsi la gravitation devient « forte » à 1 TeV = échelle électrofaible
  - Résout le problème de hiérarchie (?)



## Plusieurs classes de modèles

- Pas de phénoménologie poussée (trop vague)
- Possibles:
  - énergie manquante (partie dans les extras dim!)
  - particules lourdes type Z', -> e<sup>+</sup> e<sup>-</sup>, μ<sup>+</sup> μ<sup>-</sup>
    - résolution en énergie/impulsion**
  - Trous noirs: Évts spectaculaires!
    - mais sans danger!!!**

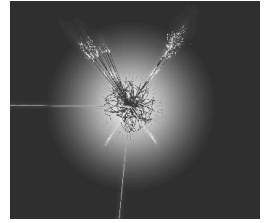
Trou noir 8 TeV  
-> 8 quarks de ~1TeV  
dans Atlas



## Conclusions

### 2008: mise en service du LHC et de ses expériences

- Abouissement d'un grand effort technologique
- Début d'une grande aventure scientifique (pour au moins 10 ans...)
- Très forte attente de la communauté internationale des chercheurs



### Découverte? Jamais garantie, mais LHC est le premier accélérateur capable d'explorer complètement l'échelle d'énergie du Modèle Standard: 1 TeV, où se concentrent les attentes.

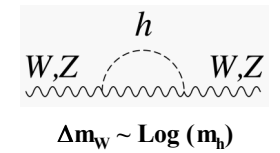
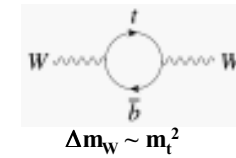
- Mais attention au Tevatron (US)... Une « fenêtre d'opportunité » sur le Higgs vers 2010 si sa masse est entre 115 et 160 GeV... Pas trop de retard pour LHC!!
- Sans oublier le croisement avec les mesures « astroparticules »!  
Ex: SuSy à LHC/ recherche de matière noire directe/ indirecte...

### Vers une décennie passionnante...

## Back-up

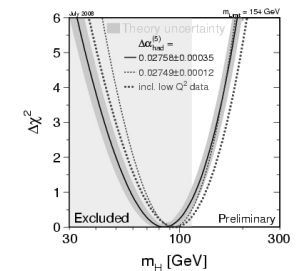
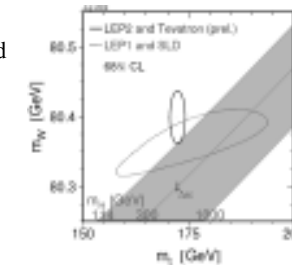
### 4.2.6 Relation m(t)/m(W) et m(H)

- m(W) prédite dans le MS à partir de M(Z) et G<sub>F</sub> (temps de vie du muon, très précis)



Compatible avec un Higgs standard

M(H) < 185 GeV (95% CL)



- **6.2.4 Higgs: Combinaison**

A basse masse (115 – 200 GeV) : nécessaire combiner analyses.  
(vrai aussi TeVatron actuellement).

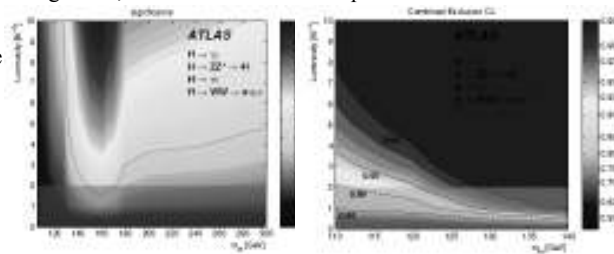
- **Procédure difficile**, surtout si les fonds estimés à partir des données.

- Tenir compte des corrélations? Ajustements vite très lourds.
- « Pseudo-expériences »
  - distributions signal et fond obtenues par M-C complet
  - Simulations nombreuses « expériences » chacune avec N (événements)
 ⇒ Evaluer nombre de fluctuations
- Mais  $P(5\sigma) \approx 3 \cdot 10^{-7}$ : difficile à générer; confiance dans les extrapolations?

– Combinaison ATLAS récente

– Modes:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4l$
- $H \rightarrow \tau\tau$
- $H \rightarrow W W \rightarrow e\nu\mu\nu$



Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP

Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Rouge