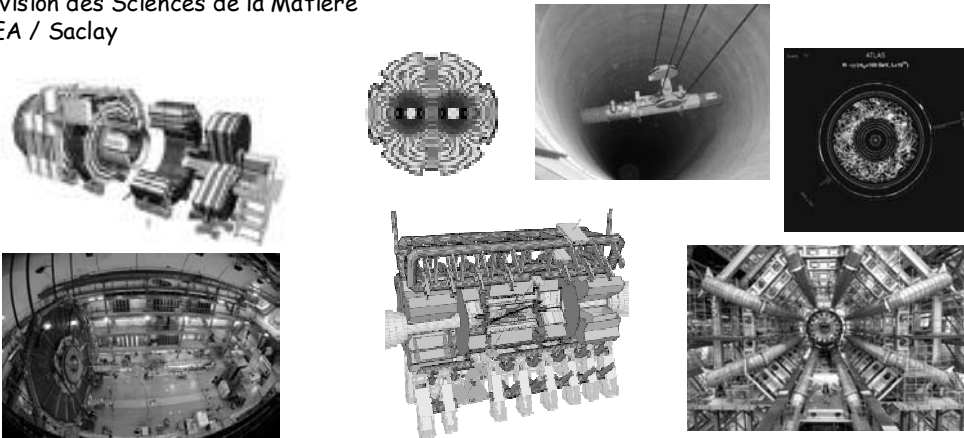


## LHC: un géant pour l'infiniment petit

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

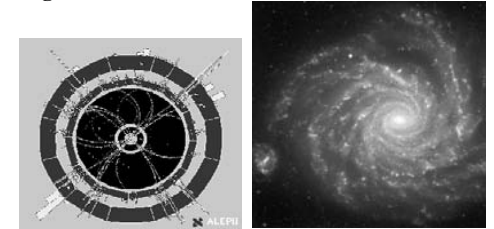


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

1

## La physique des particules en (très) bref

- La matière: constituants ("particules") et interactions.
- Lesquels?
  - Particules élémentaires: quarks, électrons,...
  - Interactions: électromagnétique, faible, forte, gravité
  - Matière noire?
- Pourquoi?
  - Les particules existent-elles?
  - D'où vient leur masse, leur charge?
  - Y a-t'il 3 dimensions à l'espace?
  - ...



Des plus petites distances... aux plus grandes

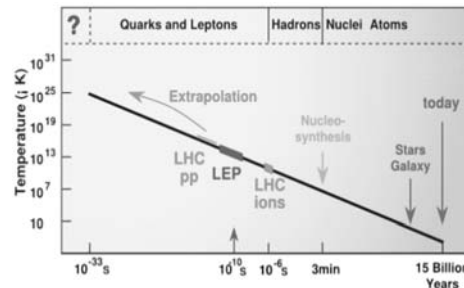
- D'où viennent-ils?
  - Big bang (il y a 13 milliards d'années!)
  - Evolution de l'univers:  
particules => atomes => galaxies, étoiles, planètes, nous...

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

2

## Une façon de voir: évolution de l'univers

- Théorie du Big Bang:
  - A  $t = 0$ , univers très dense, très chaud, distances très petites
  - Puis: expansion:  $D \uparrow$ ,  $\rho \downarrow$ ,  $T \downarrow$
  - Age actuel de l'univers:  
~  $13 \pm 1$  milliard d'années



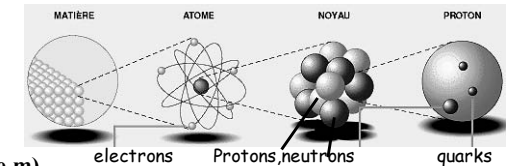
- Relation température/énergie
  - Univers très chaud : énergie cinétique des particules très élevée
- Remonter dans le temps
  - => univers de + en + dense et chaud, énergies des particules de + en + élevées
  - => relation physique des particules/cosmologie.

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

3

## La matière élémentaire...aujourd'hui

- Echelles de taille
  - Cheveu: 0,1 mm
  - Cellule : 1 micron (millionième de m)
  - Atome : 1 nano mètre (milliardième de m)
  - Noyau atomique: 1 fermi = 1 millionième de nano mètre
  - Quarks, électrons, neutrinos,... : « ponctuels » = moins de 1/100è de fermi



- Théorie: le « Modèle Standard »: notre vision des constituants élémentaires et de leurs interactions



- Mécanique Quantique + Relativité (20<sup>e</sup> siècle)

+ Des principes de symétrie très profonds

Planck

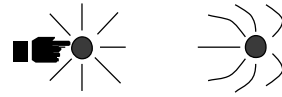
Einstein

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

4

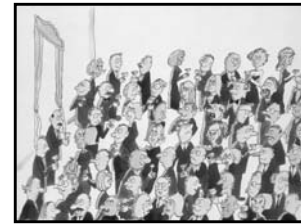
## Le « boson de Higgs » et le problème de la masse des particules

- L'origine des masses des particules est au cœur de beaucoup de grandes questions:
  - Qu'est-ce qu'une particule élémentaire?
    - Pourquoi y-a-t'il de l'énergie là et pas ailleurs?
    - Pourquoi ça « résiste » ?
  - Relation avec gravitation, énergie noire,
  - etc.
- Juste pour le point (1): les « principes de symétrie » profonds ci-dessus exigeraient que toutes les particules aient des masses nulles!
- Le « boson de Higgs »: comment donner une masse « naturelle » aux particules....



## Le mécanisme de Higgs

Le défi du ministre anglais aux chercheurs: expliquez moi ça simplement !  
Réponse de David Miller, mise en BD : Cern.



Une assemblée de physiciens: le « vide quantique » (avec un champ de Higgs)



Arrive une personnalité libre de ses mouvements (« particule sans masse »)



Un amas s'accumule autour: la personnalité a « acquis » une masse !

Le mécanisme de Higgs donne une masse aux particules de matière.

## Le boson de Higgs



Une rumeur est lancée dans la pièce...



Un amas se forme, c'est une nouvelle particule!

La théorie prédit l'existence d'une nouvelle particule: le boson de Higgs

... mais elle ne dit (presque) rien sur sa masse !  
Le boson de Higgs est donc recherché activement à chaque nouvelle génération d'expériences... et toujours pas découvert!

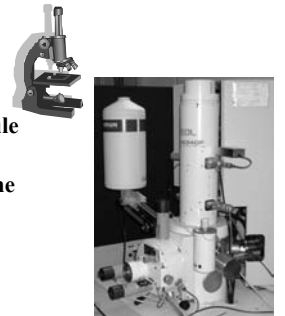
## Expériences en physique des particules

- Comment « sonder » la matière à toute petite échelle?
  - Avec des particules connues de grande énergie.

Microscope optique (photons de 0,5 eV) => résolution ~ 1 micron: cellule

Microscope électronique: électrons (~10 keV) => 0,02 nanomètre: atome

Au-delà (noyau atomique, quarks): rayons cosmiques, accélérateurs

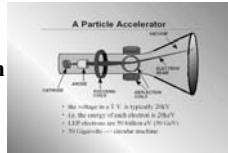


Stanford Linac (1966-2005)

2<sup>e</sup> moitié du 20<sup>e</sup> siècle: succession d'accélérateurs de plus en plus grands (puissants)

# Principe des accélérateurs de particules

- Accélérer : avec un champ électrique
  - Ex: tube TV cathodique. Tension ~20 000 Volts, 20 cm



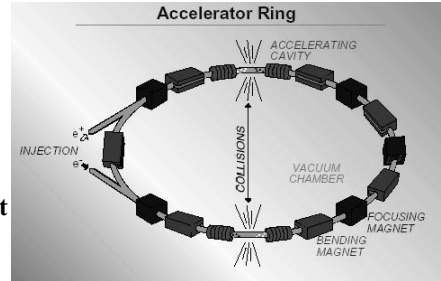
- Pour atteindre 7 TeV = 7 000 000 000 000 V ?

En ligne droite: 7000 km !



Et le faisceau ne passerait qu'une seule fois!

- Solution: courber la trajectoire sur un cercle par un champ magnétique (électroaimants) et à chaque tour une petite accélération => l'énergie maximum (champ max des aimants)



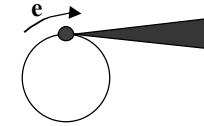
- Collisionneur: 2 anneaux, 2 faisceaux tournant en sens opposés  
Collisions à chaque tour

# Performance des accélérateurs circulaires (aperçu)

- Energie

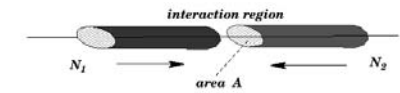
Limitations:

- faisceau d'électrons : rayonnement synchrotron => limite = perte d'énergie par tour...
  - Ex: LEP 27km circonférence, E (faisceau)= 100 GeV, perte par tour: 3,6 GeV!
- faisceau de protons: très peu de rayonnement synchrotron => limite = champ magnétique max. E (faisceau) proportionnel à Bmax.
  - Aimants « classiques » (Cu/Fe): 2T. aimants supraconducteurs: 4 à 8 T



- Intensité: nombre des collisions

- nombre de paquets (plus grand possible)
- taille de la région d'interaction
  - plus petite possible: focalisation



PS Cern:  
protons 28 GeV  
Cibles fixes  
Diamètre 72 m  
1959 => ...



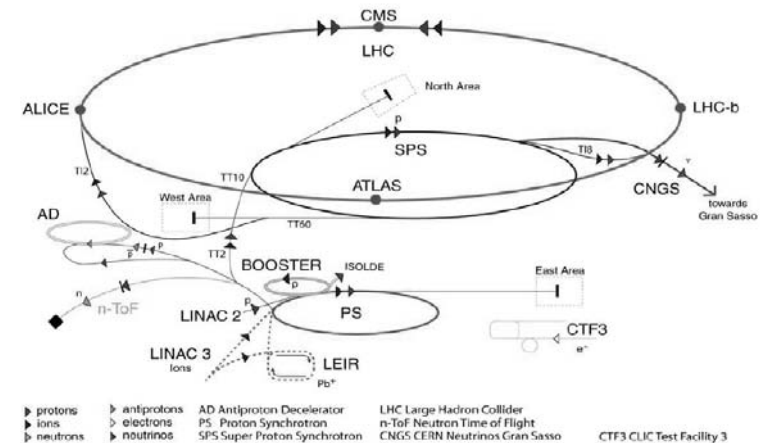
LEP : e+ e-, 100 + 100 GeV  
collisions  
Diamètre 9 km  
Tunnel à 100m sous terre  
1989- 2000



LHC p + p, 7 + 7 TeV  
collisions  
Tunnel du LEP  
2008 .....



# Le complexe des accélérateurs du CERN



▶ protons    ▶ antiprotons    AD Antiproton Decelerator    LHC Large Hadron Collider  
 ▶ ions        ▶ electrons    PS Proton Synchrotron        n-ToF Neutron Time of Flight  
 ▶ neutrons   ▶ neutrinos    SPS Super Proton Synchrotron    CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso    CTF3 CLIC Test Facility 3

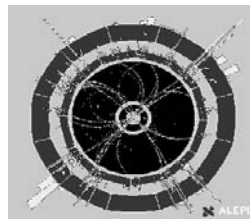
## L'expérimentation aux grands accélérateurs

- **Grands centres internationaux:**  
Europe : CERN (Genève), DESY(All.),  
US : FNAL, SLAC, Japon : KEK

- **Au CERN : LEP de 1989 à 2000**  
(anneau souterrain 27 km,  
collisions électron-positon => 207 GeV

*Une réussite : machine, expériences, analyses  
ont dépassé leurs engagements initiaux.*

*Une moisson de résultats  
de précision sur le Modèle Standard  
... mais toujours pas de « Higgs » (?)  
ni de « nouvelle physique ».*

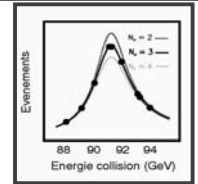
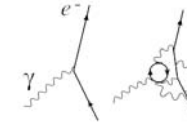


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

13

## Enjeu scientifique du LHC

- **Modèle Standard très puissant:**  
– confirmé par toutes les mesures  
et calculs aujourd'hui!



- **Mais incomplet :**  
– Côté particules: Boson de Higgs? autre mécanisme?  
– Côté cosmologie: Matière noire? *Energie noire*?



Peter Higgs

⇒ Théories « au-delà du Modèle Standard »:  
Supersymétrie, dimensions supplémentaires, etc.

- **Toutes les mesures indiquent: la/les clé(s) à une échelle de distance d'1/1000<sup>e</sup> de fermi**  
⇒ observable avec une énergie par particule de « 1 TeV » (1000 GeV)

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

14

## 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**



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

15

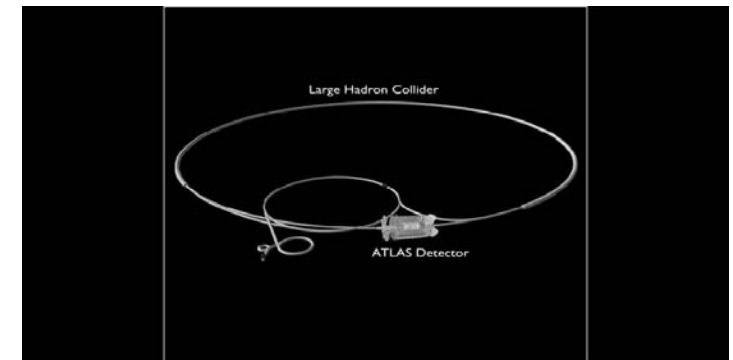
## LHC : collisionneur proton - proton

**LHC: proton-proton**  
**7 + 7 TeV = 14 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**



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

16

## Aimants de guidage et cryogénie

- 1232 électroaimants de courbure (dipôles) champ magnétique 8,4 Tesla (record pour un accélérateur)
- > 5000 autres aimants (focalisation)
- Tous supraconducteurs, à 1,8K (!) (- 271° C, hélium liquide *superfluide*)

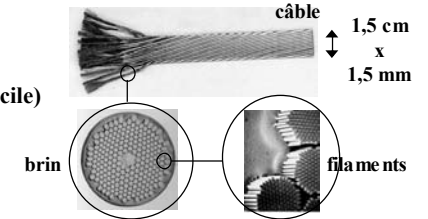


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

17

## (Electro-) aimants supraconducteurs

- La supraconductivité
  - Découverte en 1911 (K Onnes): en dessous d'une température (très basse), certains matériaux ont une résistance électrique ~nulle.
  - Matériaux: type céramiques...NbTi pour LHC.
  - Température : < 5 K (-268°C)!
    - Heureusement: Helium liquide : 4K
  - Câble: matériau supra enrobé dans Cu ou Al (difficile)
- Aimant supraconducteur
  - Enroulements câble supra, dans un cryostat
  - Courant énorme (LHC: 13000 A), forces magnétiques énormes ( typ > 200 tonnes/m)
  - Energie stockée très élevée
  - Quench (retour accidentel brutal à l'état non supra) => protection !!!



- Utilisation courante: IRM médicale

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

18

## Construction et démarrage

- 2005-2008
- Installation
- Connexions
- Tests
- Refroidissement



- Démarrage 10 septembre 2008
- Succès complet: en quelques heures les 2 faisceaux circulent dans les anneaux...



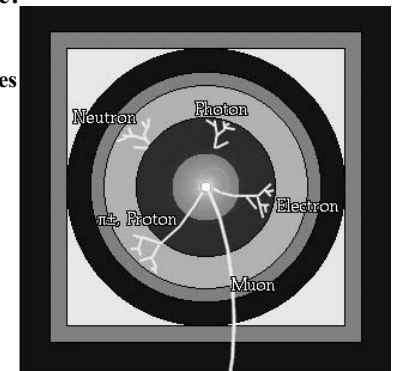
- Incident du 19 septembre 2008... pas de collisions avant l'automne 2009

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

19

## Expériences sur collisionneurs: principe

- A chaque point d'interaction: une grande expérience: "observatoire de collisions"
- Collision proton-proton => dizaines de particules sortantes
- Expérience autour du point de collision: détection des particules "stables"
- Différentes couches => milliers (millions) de détecteurs élémentaires (électroniques)
- Chaque détecteur élémentaire: si une particule le touche:



- Position
  - Energie
  - Type
- (ou /et) de la particule

Taille ~ 20 m x 20 m x 30 m

- Champ(s) magnétique(s) => courbure trace => mesure énergie particule

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

20

## Reconstruction, analyse, découverte

- Une expérience: sur un point de croisement: observatoire de collisions

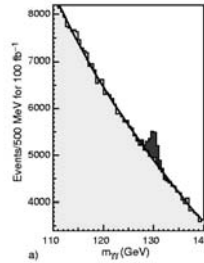
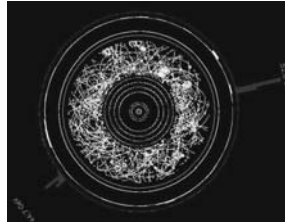
- Chaque collision donne un événement différent!
- On recherche les collisions "intéressantes".

- 40 millions de croisements de paquets chaque seconde
- Plusieurs collisions proton-proton à chaque croisement

- Détection et mesure des particules issues des collisions

- Tri des collisions "intéressantes"  
(quelques unes parmi des milliards) => enregistrement

- Reconstitution de la collision à l'aide de (très gros) logiciels



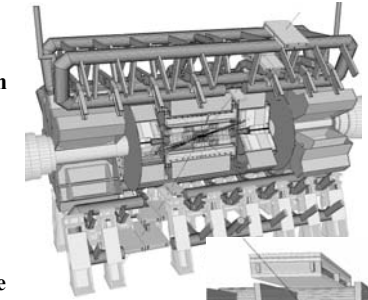
Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

21

## Simulations informatiques

- (Gros) logiciels pour simuler :

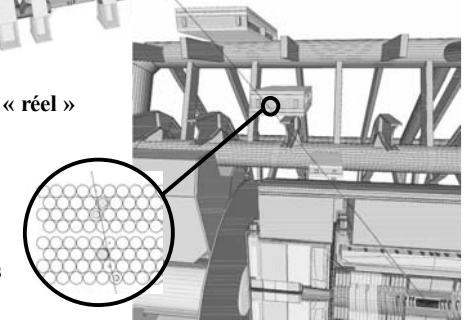
- Physique de la collision proton-proton
- Trajectoires des particules stables
- Désintégrations en vol
- Interactions particule/détecteur
- Suivi des particules secondaires
- Réponse du détecteur
- Traitement électronique/informatique



- Fournissent des « événements simulés au format « réel »  
... mais on sait quelle physique on y a mis!

- Conception/optimisation de l'expérience

- Aide à l'analyse: comparaison réalité/simulations



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

22

## Expériences

- ATLAS et CMS  
proton-proton à haute luminosité  
(Higgs, etc.)

Alice  
ion-ion

LHCb  
physique du quark B

- ⇒ Détecteurs très grands
- ⇒ très rapides (10 - 100 ns)
- ⇒ finement divisés  
(millions de voies)
- ⇒ résistants aux rayonnements
- ⇒ flux d'information très élevé

- ⇒ Expériences grandes et complexes
- Collaborations mondiales
- ~2000 physiciens, 150 instituts...



CMS (ouverte)

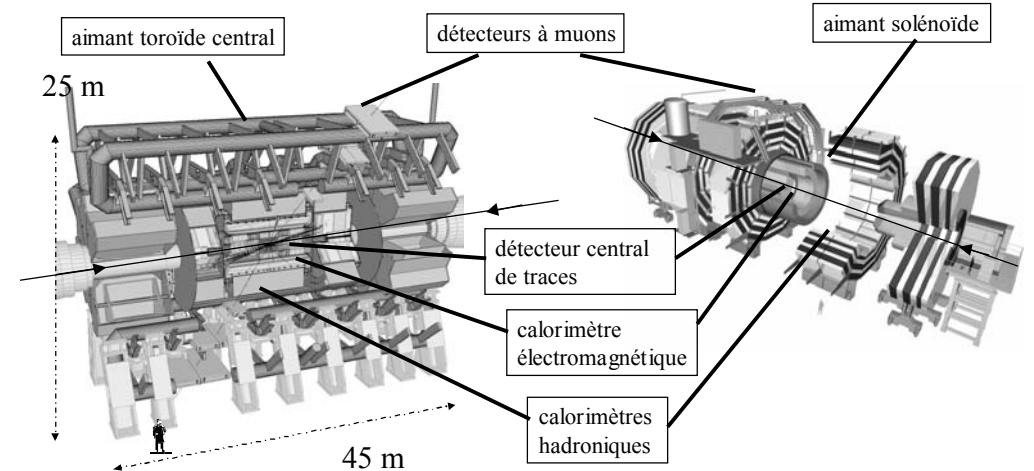
En France: CEA et CNRS

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

23

## ATLAS et CMS

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



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

24

## Grandes collaborations internationales

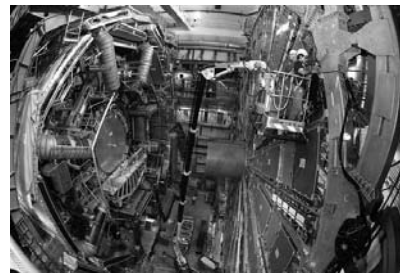
- Conception initiale de l'expérience: quelques groupes/dizaine de personnes (~1990)
- Rassemblement équipes du monde entier (150, de 40 pays)
- Partage tâches réalisation
  - conception
  - construction
  - rôle de l'industrie locale
  - assemblage/intégration au Cern
- Tâches « soft »
  - tests (labo ou faisceaux)
  - logiciels
  - analyses
- Gestion collaboration « autonome ».
- Beaucoup de bonne volonté et de « faire soi-même »



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

25

## Quelques images d'Atlas...



Du très grand...

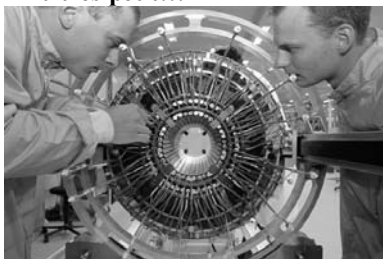


Du très lourd...  
(ici > 100 t)

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

26

Du très petit...



Du très propre...



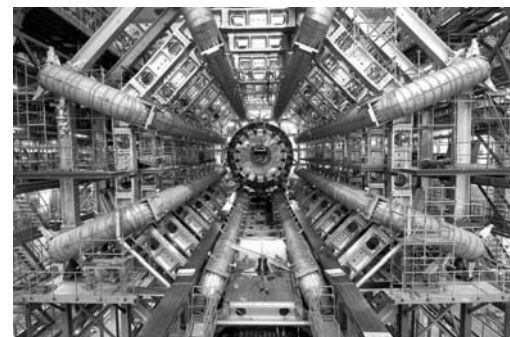
Du lourd, propre,  
et compliqué...



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

27

## Aimant extérieur central Atlas



8 bobines supraconductrices  
de 25 m x 5 m disposées en étoile

Diamètre total 26 m

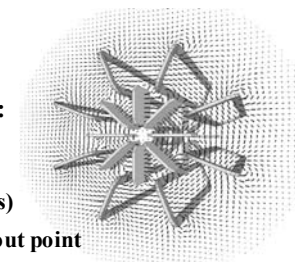
Conception aimant:  
CEA-IRFU (Saclay)

Champ magnétique:

Réalisation:  
Industrie, labos, Cern

Calcul  
Mesure (2000 sondes)

Reconstruction en tout point



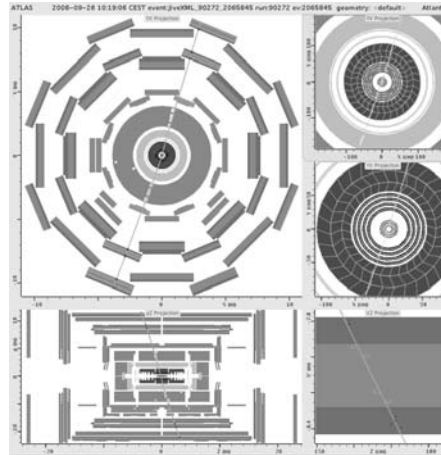
Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

28

## Atlas: Système à muons

- **But : Mesure des trajectoires des MUONS**  
*Reconstruction de leur énergie*

- 3000 m<sup>2</sup> de détecteurs à fils, autour de et dans l'aimant
- position de tous les détecteurs connue à 30 microns près en temps réel (système optique)



- Logiciel de reconstruction et mesure, *actuellement en test avec les muons cosmiques*

## CMS: détecteur de traces interne en silicium

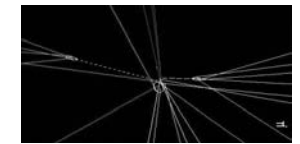
- **But: détection des traces près du point d'interaction**



- 200 m<sup>2</sup> de plaquettes de silicium

- 1 million de micro-rubans (100μ x 15cm)
- 65 millions de pixels (100 μ x 150 μ)

Simulation

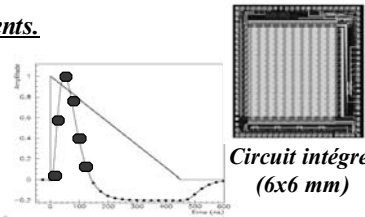


1 cm

## Electronique de traitement

- **Fonctions: traitement du signal, sélection des événements.**

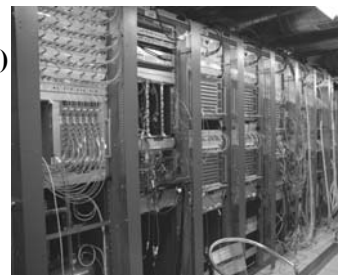
- Pour chacun des millions de détecteurs élémentaires (et 40 millions de fois par seconde):
  - Traitement du signal, Numérisation



- 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



Atlas: 750 armoires

## Logiciels, Analyse, grille de calcul

- enregistrement de ~100 événements/sec

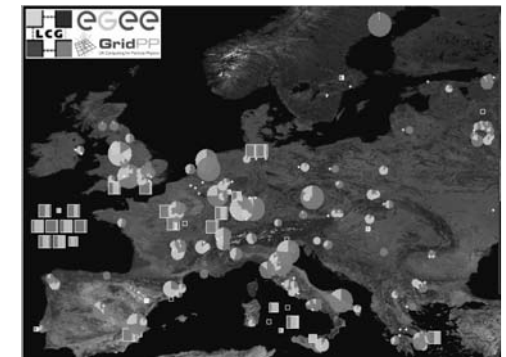
1 événement = 1,5 MegaByte

=> ~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 ou Emule)



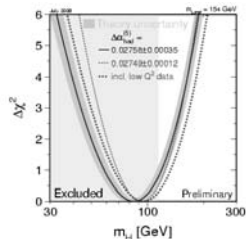
Mardi, 17:21.

37682 jobs actifs sur 140 sites



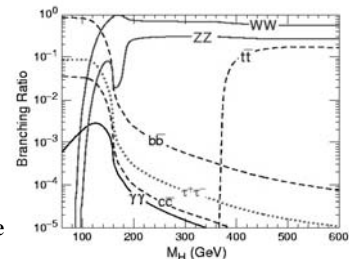
## Recherche du Boson de Higgs à LHC: avant la chasse...

- Que sait-on du Higgs aujourd'hui?
- Expériences
  - Recherche directe:
    - $m(H) > 114 \text{ GeV}$  (à LEP)
    - $m(H) \notin [160-170] \text{ GeV}$  (Fermilab, Chicago)
  - Mesures indirectes (cohérence):  $m(H) \leq 163 \text{ GeV}$  (95% confiance)



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

- Production:  $p + p \rightarrow H$
- Désintégration  $H \rightarrow$  (particules stables)



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

## Recherche du Higgs à LHC

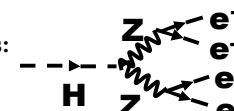
- « Stratégie de chasse »: optimiser l'analyse sur les modes les plus produits et les plus détectables



- 2 exemples

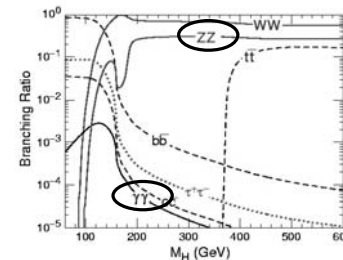
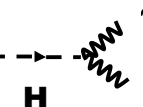
- Masse > 140 GeV :  $H \rightarrow Z + Z$

- Particules finales détectées: 4 électrons (ou muons)



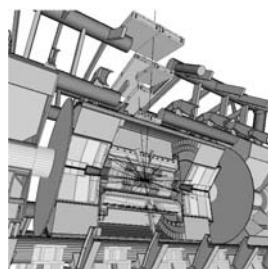
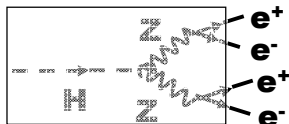
- Masse < 140 GeV :  $H \rightarrow \gamma \gamma$

- Particules finales détectées: 2 photons



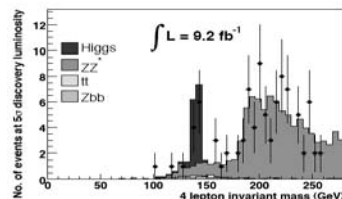
## Recherche du Higgs: le cas « Z Z »

- En ligne: sélection de tous les événements: avec particules de grande énergie qui pourraient être des électrons (ou muons) => enregistrement

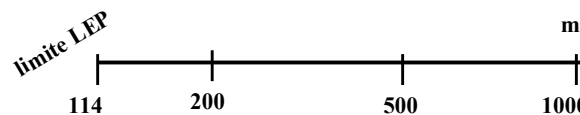


- Analyse des données enregistrées:
  - Sélection : 4 électrons (ou muons)
  - Y-a-t'il 2 paires qui viennent chacune d'un Z?
  - Quelle serait alors la masse du H « reconstitué »?

Simulations



## Higgs standard: potentiel de découverte (Atlas et CMS)



$H \rightarrow \gamma \gamma$

$H \rightarrow \tau \tau$

$H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4 l$

$H \rightarrow Z Z^* \rightarrow ll \nu \nu$

$H \rightarrow WW \rightarrow l \nu$  jets

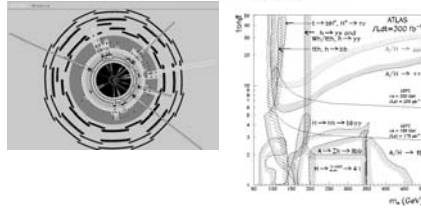
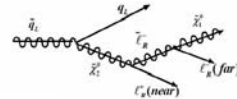
Après ~ 3 ans de fonctionnement toute la gamme est couverte.

## Recherche plus large à LHC

- Bosen de Higgs "Standard": Découverte quasi certaine (si c'est bien la bonne théorie!)
- Le "Modèle Standard": peut-être pas toute l'histoire?

– Autres théories (plus vastes), susceptibles de répondre aux grandes questions :

- Supersymétrie,
- dimensions supplémentaires,
- etc...



- Très nombreuses simulations  
=> optimiser les détecteurs

- Et aussi: ne pas manquer l'inattendu!

Energie naturelle du Modèle Standard  $\leftarrow$  1 TeV  $\Rightarrow$  Energie des collisions à LHC

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

37

## L'incident du 19 septembre 2008

- Origine: défaut sur une jonction entre aimants supra.
  - Moins protégées que les aimants eux-mêmes.
  - Difficiles à tester
- Dégâts importants
  - Enchaînement de problèmes pas imaginé: énergie aimants => réchauffement brutal Helium => surpression => dégâts matériels (pas de personnel dans le tunnel).
- Conséquences
  - Réparations longues
  - Installation système de protection électrique (8000 cartes!)
  - Installation soupapes de sûreté
  - Nombreuses autres vérifications...

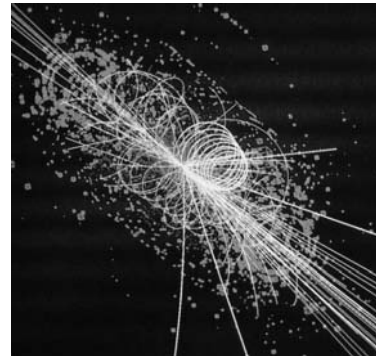
Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

38

## Conclusion

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

- Aboutissement 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 à la concurrence du « TeVatron » de Chicago...

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

39

## Merci!

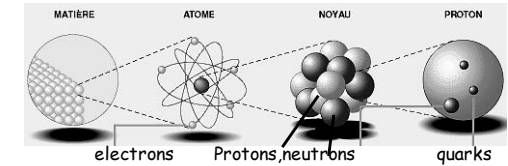


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

40

Back up

• **Le Modèle Standard**



**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 lourde*  
*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>

**Le Modèle Standard**

**INTERACTIONS**

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

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.

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			Charge électrique
<i>Quarks</i> (Forte et Electro-faible)	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	2/3 e
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	-1/3 e
<i>Leptons</i> (Electro-faible)	<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>τ</i>	- e
	<i>ν<sub>e</sub></i>	<i>ν<sub>μ</sub></i>	<i>ν<sub>τ</sub></i>	0