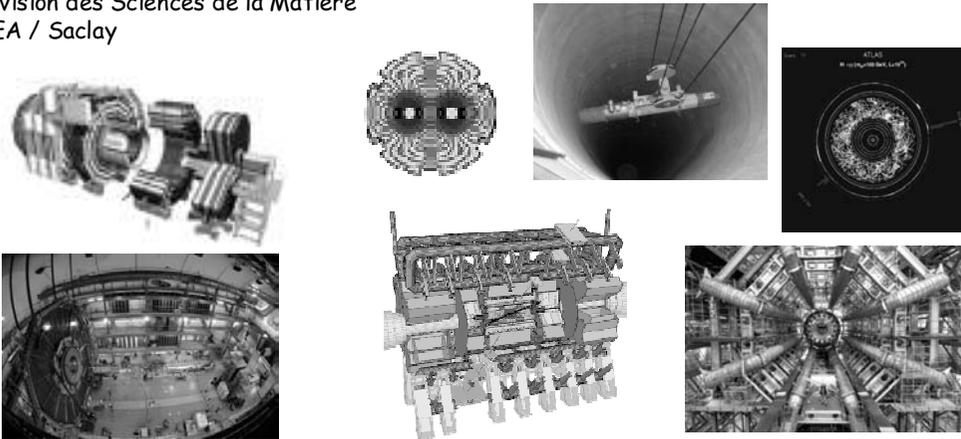


LHC: un géant pour l'infiniment petit

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

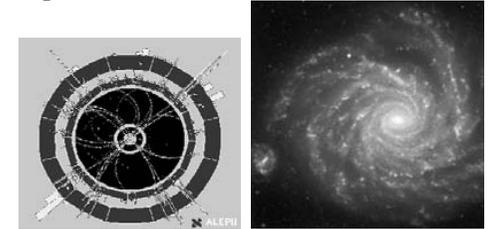


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

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

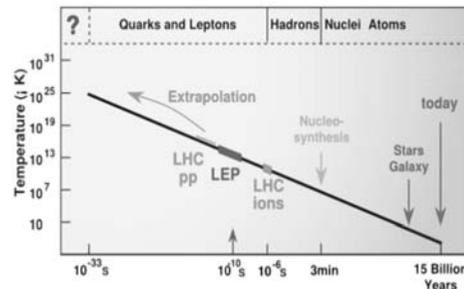
- D'où viennent-ils?
 - Big bang (il y a 13 milliards d'années!)
 - Evolution de l'univers:
particules => atomes => galaxies, étoiles, planètes, nous...

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 ± 1 milliard d'années



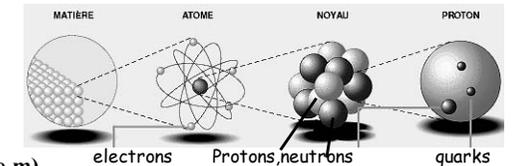
- Relation température/énergie
 - Univers très chaud : énergie cinétique des particules très élevée
- Remonter dans le temps
 - => univers de + en + dense et chaud, énergies des particules de + en + élevées
 - => relation physique des particules/cosmologie.

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^e siècle)



+ Des principes de symétrie très profonds

Planck

Einstein

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

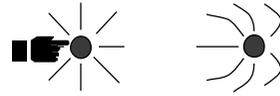
4

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

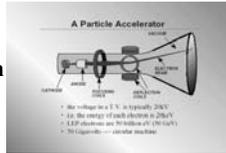


Stanford Linac (1966-2005)

2^e moitié du 20^e 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



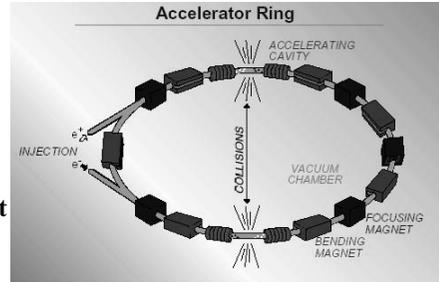
- Pour atteindre 7 TeV = 7 000 000 000 000 V ?

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)



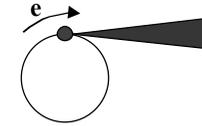
- Collisionneur: 2 anneaux, 2 faisceaux tournant en sens opposés
Collisions à chaque tour

Performance des accélérateurs circulaires (aperçu)

- Energie

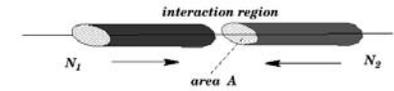
Limitations:

- 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 => ...



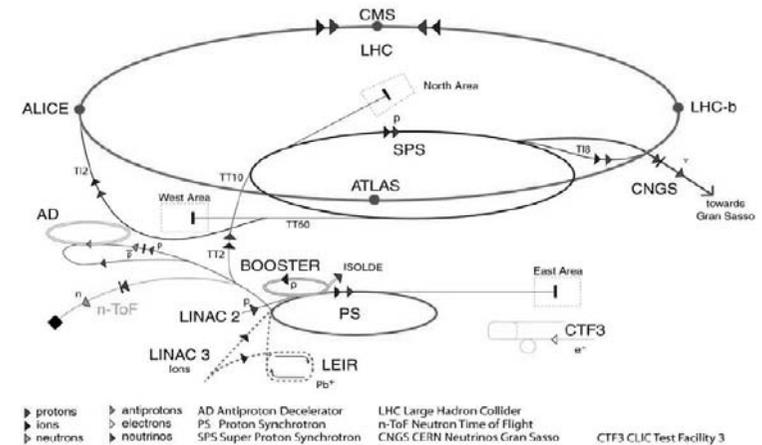
LEP : e+ e-, 100 + 100 GeV
collisions
Diamètre 9 km
Tunnel à 100m sous terre
1989- 2000



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

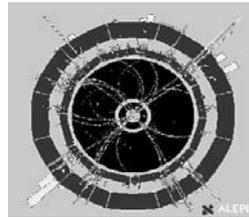
L'expérimentation aux grands accélérateurs

- **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 ».*

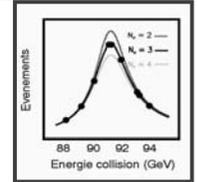
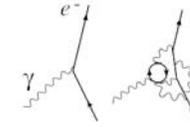


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

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^e 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

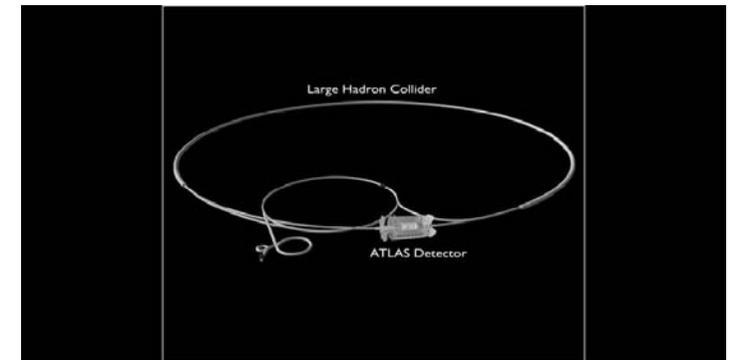
LHC : collisionneur proton - proton

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

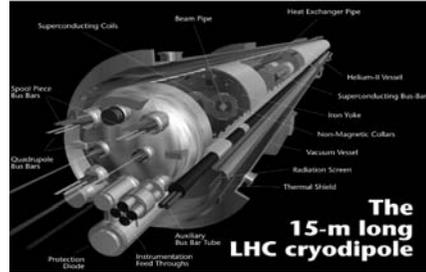


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

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*)



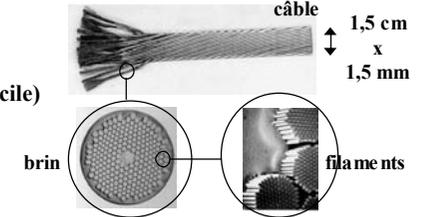
Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert



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...



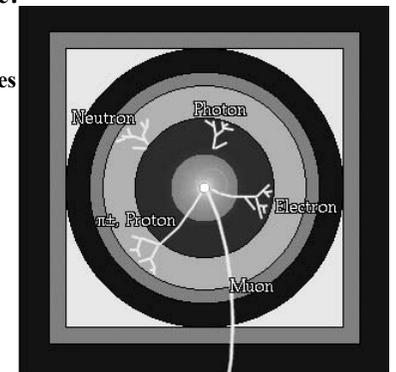
- Incident du 19 septembre 2008... pas de collisions avant l'automne 2009

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:



Taille ~ 20 m x 20 m x 30 m

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

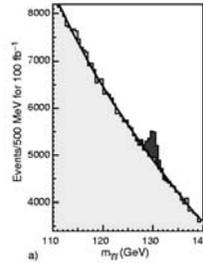
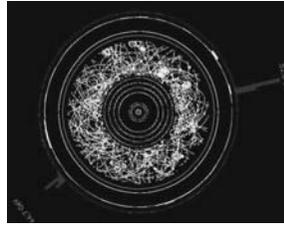
- Champ(s) magnétique(s) => courbure trace => mesure énergie particule

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

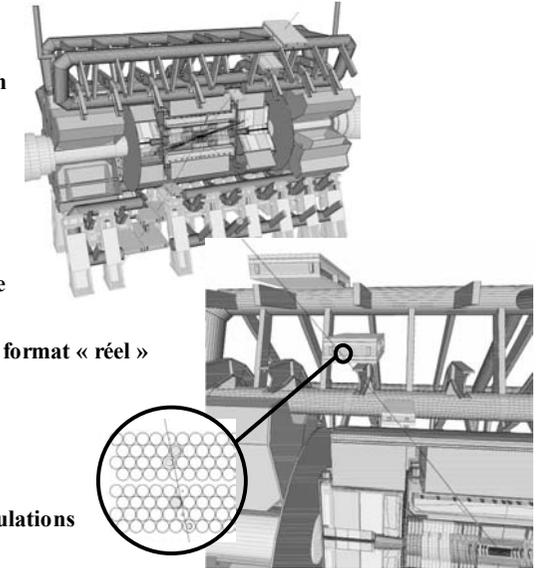


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

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)

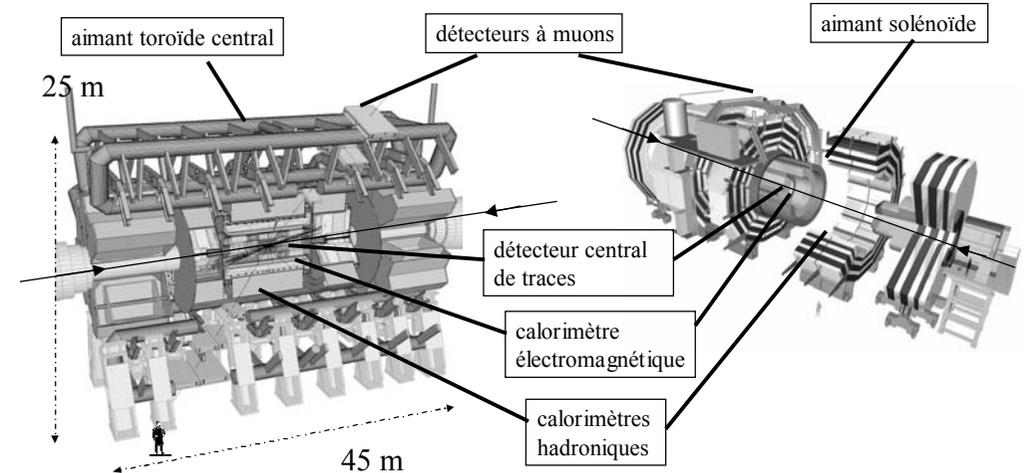
En France: CEA et CNRS

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

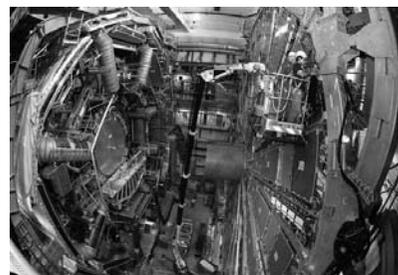
- Conception initiale de l'expérience: quelques groupes/dizaine de personnes (~1990)
- Rassemblement équipes du monde entier (150, de 40 pays)
- Partage tâches réalisation
 - conception
 - construction
 - rôle de l'industrie locale
 - assemblage/intégration au Cern
- Tâches « soft »
 - tests (labo ou 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...

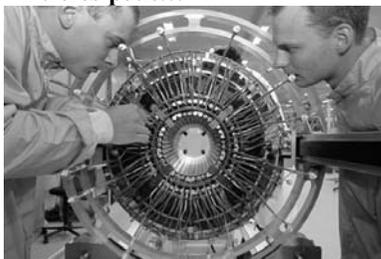


Du très lourd...
(ici > 100 t)

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

26

Du très petit...



Du très propre...



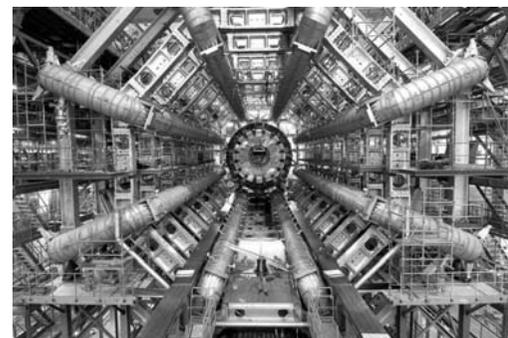
Du lourd, propre,
et compliqué...



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

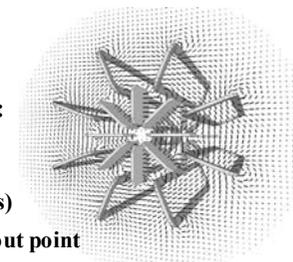
Conception aimant:
CEA-IRFU (Saclay)

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

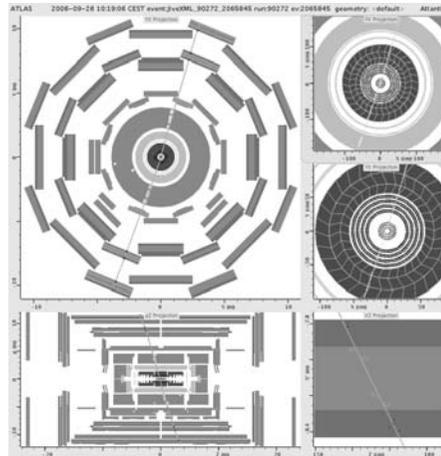
Atlas: Système à muons

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

- 3000 m² 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

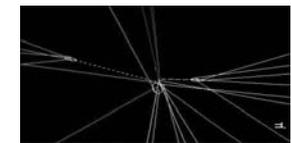
- But: détection des traces près du point d'interaction

- 200 m² de plaquettes de silicium



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

Simulation

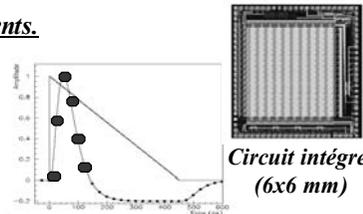


1 cm

Electronique de traitement

- Fonctions: traitement du signal, sélection des événements.

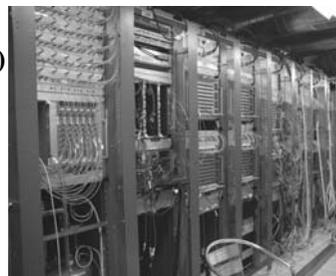
- Pour chacun des millions de détecteurs élémentaires (et 40 millions de fois par seconde):
 - Traitement du signal, Numérisation



- 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

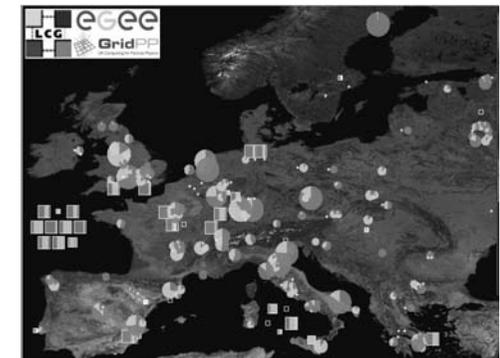
1 événement = 1,5 MegaByte

=> ~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)

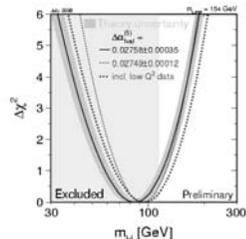


Mardi, 17:21.

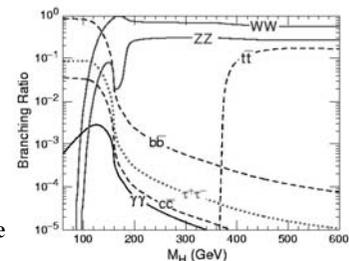
37682 jobs actifs sur 140 sites

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!

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

33

Recherche du Higgs à LHC

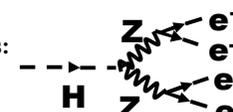
- « Stratégie de chasse »: optimiser l'analyse sur les modes les plus produits et les plus détectables



- 2 exemples

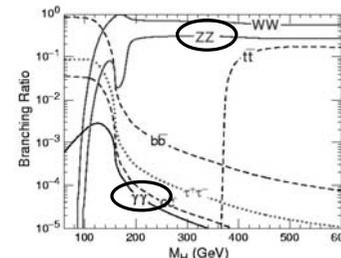
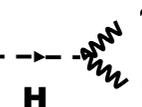
- Masse > 140 GeV : $H \rightarrow Z + Z$

- Particules finales détectées: 4 électrons (ou muons)



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

- Particules finales détectées: 2 photons

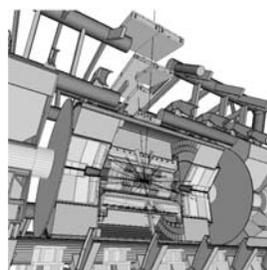


Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

34

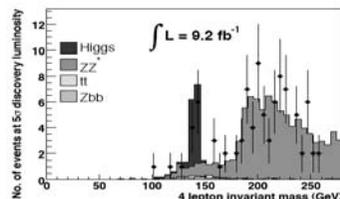
Recherche du Higgs: le cas « Z Z »

- 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 »?

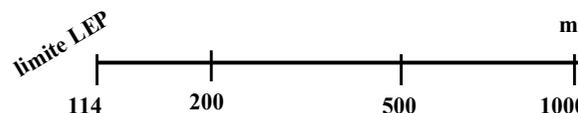
Simulations



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

35

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.

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

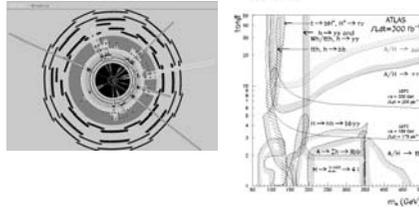
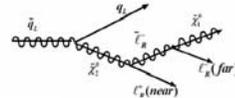
36

Recherche plus large à LHC

- **Boson 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...

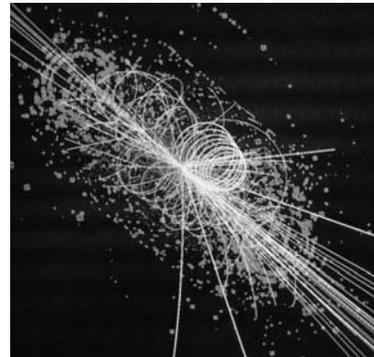
Bruno Mansoulié, CEA/IRFU-SPP Fleurance, 11 Août 2009 / Fil Vert

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

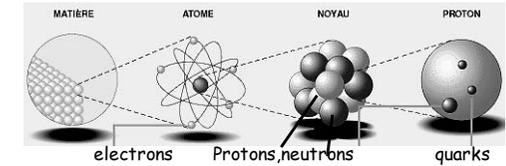
Merci!



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

40

• **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_e</i>	<i>ν_μ</i>	<i>ν_τ</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_e</i>	<i>ν_μ</i>	<i>ν_τ</i>	0