

# Les enjeux et défis du LHC au CERN

Olivier Schneider



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Laboratoire de Physique  
des Hautes Energies (LPHE)

Olivier.Schneider@epfl.ch



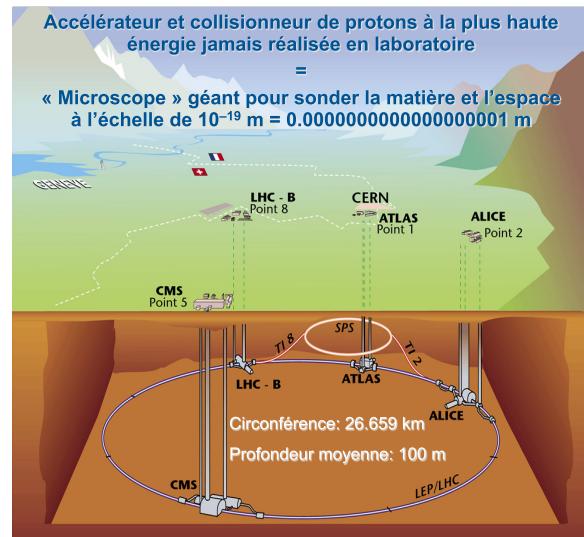
CERN – Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire  
Laboratoire européen pour la physique des particules

10'000 scientifiques du monde entier utilisent le CERN pour leurs recherches  
20 états européens membres du CERN + collaboration avec 60 autres pays

LHC  
= Large  
Hadron  
Collider

Recherche fondamentale – Formation et collaboration – Technologie et innovation

## LHC – Large Hadron Collider



Les enjeux et défis du LHC au CERN

### Un projet scientifique de longue haleine

Conception dans les années 80  
(ré-utilisation du tunnel du LEP  
= Large Electron Positron Collider)  
Construction approuvée en 1994

Construction des quatre grands détecteurs ATLAS, CMS, ALICE et LHCb approuvée de 1996 à 1998

Arrêt du LEP en 2000

Premier faisceau LHC en 2008

Démarrage des expériences en 2009

Plein régime atteint en 2012 (?)

Durée des expériences (1ère phase):  
env. 10 ans

O. Schneider, 1 octobre 2008

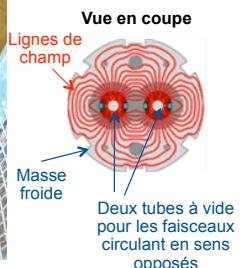
3

## Aimants du LHC



Descente du premier aimant dipolaire  
par un puits du LHC (mars 2005)

9593 électro-aimants dont  
1232 aimants dipolaires cryogéniques puissants  
(B = 8.3 T) pour garder les protons sur leur trajectoire circulaire



Les aimants dipolaires, de 15 m chacun, occupent ensemble 70% de la circonference du LHC

Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

4

# La course poursuite la plus folle

## jamais organisée sur terre



2808 pelotons de protons par faisceau, à 7m les uns des autres ...

100 milliards de protons par peloton ...

plus de 11000 fois le tour du LHC par seconde ...

à 99.9999991% de la vitesse de la lumière (1 milliard km/h)  
...

Équivalents énergétiques			
proton du LHC	7 TeV	moustique en vol	
faisceau du LHC	350 MJ	TGV de 400 t à 150 km/h	

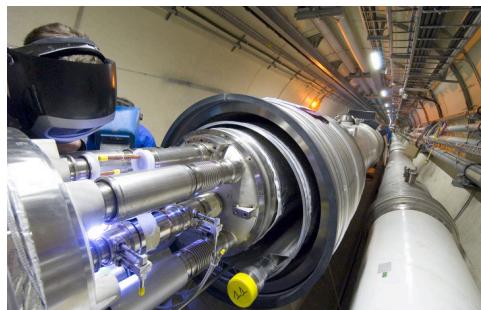
Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

5

# Le vide le plus poussé

## du système solaire



Ultra-vide dans les tubes des faisceaux:  
pression 10 fois plus faible que sur la Lune

Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

6

# Un des endroits les plus froids

## de l'Univers



Aimants du LHC refroidis à l'hélium superfluide,  
plus froid que l'espace interstellaire

Liquide réfrigérant	Quantité nécessaire au LHC	Température	
		degrés Celsius	degrés Kelvin
azote	10'000 t	-195.8 °C	77.4 K
hélium	120 t	-271.3 °C	1.9 K

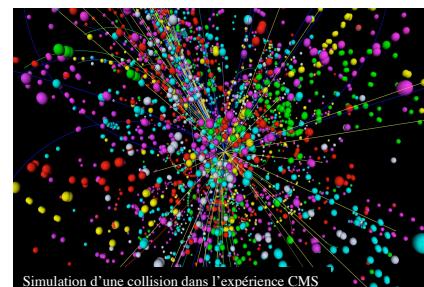
Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

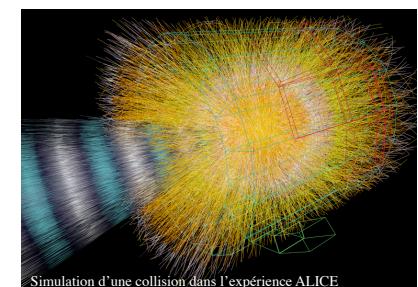
7

# Les points les plus bouillants

## de notre galaxie



Simulation d'une collision dans l'expérience CMS



Simulation d'une collision dans l'expérience ALICE

Aux quatre points de collision des faisceaux:

- température > 1 milliard de fois la température au centre du Soleil
- grande densité d'énergie dans un tout petit volume
- création (= matérialisation) de particules, détectées par les expériences

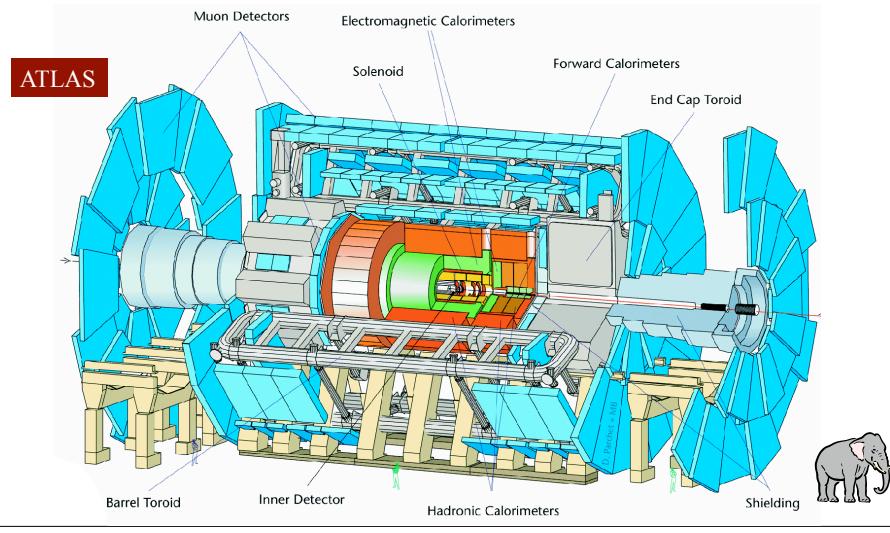
$E = mc^2$   
énergie = masse

Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

8

## Des détecteurs géants, complexes ...

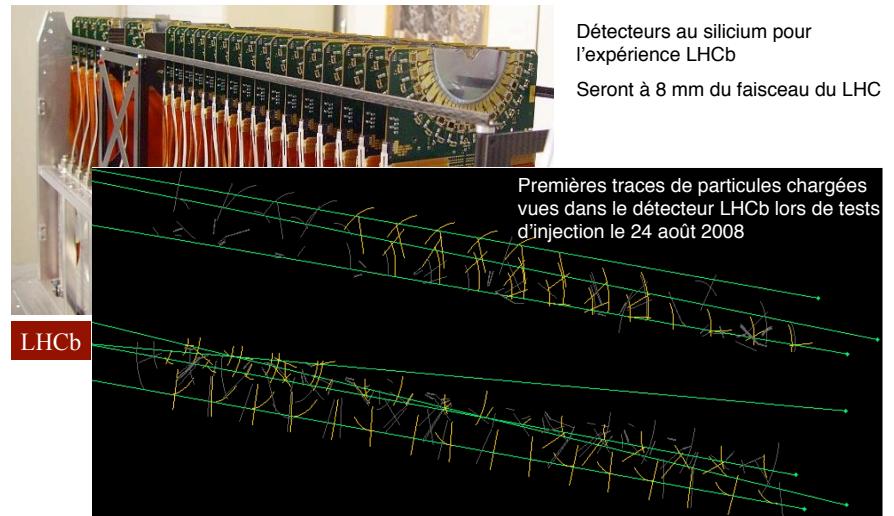


Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

9

## Les premiers signaux...



Détecteurs au silicium pour l'expérience LHCb  
Seront à 8 mm du faisceau du LHC

Premières traces de particules chargées vues dans le détecteur LHCb lors de tests d'injection le 24 août 2008

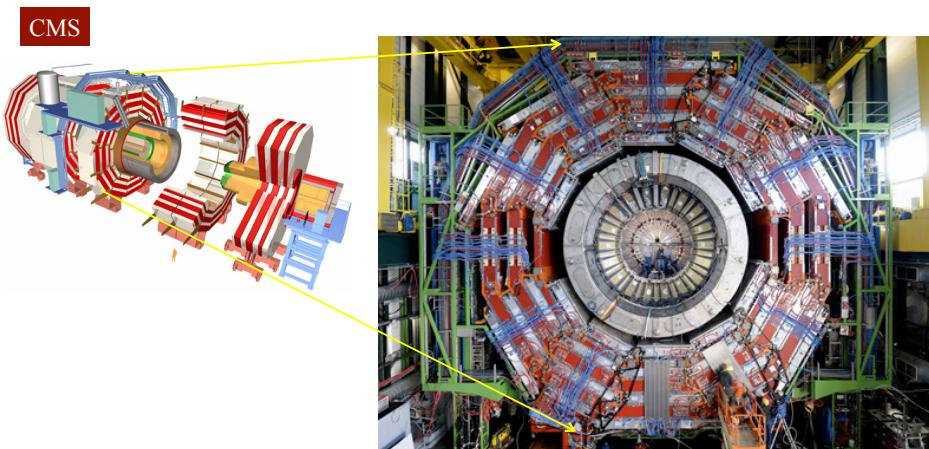
Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

11

## ... rapides, résistants au radiations ...

pour déetecter 600 millions de collisions par seconde



Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

10

## Une grille de calcul planétaire



Des dizaines de milliers d'ordinateurs sur la planète s'apprêtent à analyser les données des expériences du LHC:

En 1 année: 15 millions de Go = pile de CD-ROM de 20 km de haut

Les enjeux et défis du LHC au CERN

O. Schneider, 1 octobre 2008

12

# Pourquoi tout ça ?

- Par curiosité ! ... Pour comprendre la nature à son niveau le plus fondamental, c'est-à-dire au niveau:
  - des particules élémentaires et de leurs interactions
  - des notions telles que l'espace et le temps
  - des principes de symétrie
- Les expériences de physique des particules du 20<sup>ème</sup> siècle
  - nous ont beaucoup appris et nous ont permis de développer une théorie prédictive appelée « Modèle Standard » (MS)
  - ont démontré que le MS décrit bien tous les phénomènes (de basse énergie) observés jusqu'ici
- Il y a encore des questions sans réponse:
  - on sait que le MS ne peut pas tout expliquer
  - il doit donc y avoir de la « Nouvelle Physique » au-delà du MS

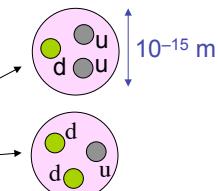
## Le Modèle Standard

- Toute la matière connue est formée de combinaisons de 6 leptons et 6 quarks
- Pour chacune de ces 12 particules, il existe une anti-particule de charge électrique opposée (anti-matière)
- Ces constituants élémentaires n'ont pas de structure connue

Leptons	électron e	muon $\mu$	tau $\tau$
Quarks	up u	charm c	top t
	down d	strange s	bottom b

Charge électrique [e]	Charge de couleur
-1	non
0	
+2/3	
-1/3	oui

- La matière courante (stable) est formée seulement de trois types de particules élémentaires: e, u, d
  - Chaque atome contient des électrons et un noyau
  - Les noyaux sont faits de protons et de neutrons
  - Un proton est une combinaison de quarks u, u et d
  - Un neutron est une combinaison de quarks u, d et d

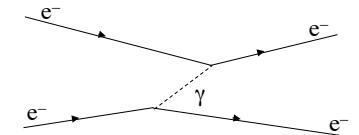


## Les interactions fondamentales

Interaction	Particules sensibles	Particules échangées
Gravifique	toutes	graviton
Electro-magnétique	particules chargées électriquement	photon $\gamma$
Faible	toutes	$W^+, W^-, Z^0$
Forte	particules ayant une « charge de couleur » = quarks et gluons	gluons

Modèle Standard

- Les  $W^+, W^-, Z^0$ , prédits en 1968 par le MS, ont été découverts au CERN en 1983:
  - ils sont très massifs ( $\sim 100$  fois la masse du proton), alors que les autres particules d'échange ont une masse nulle



## L'origine de la masse

- Pourquoi les particules sont-elles massives ? Pourquoi ont-elles des masses si différentes ?

— exemples:

- le photon n'a pas de masse mais le Z est 100 fois plus lourd qu'un proton
- le quark top est 300'000 fois plus lourd que l'électron

- Le MS propose une réponse théorique: le **boson de Higgs**

- encore inobservé jusqu'à présent
- la « pièce manquante » du MS !

- Si le boson de Higgs existe, le LHC devrait le découvrir !

- un des buts principaux du LHC

# Au-delà du Modèle Standard

## □ Questions auxquelles le MS ne donne pas de réponse:

- Les particules connues sont-elles vraiment fondamentales ?
- Pourquoi y a-t-il le même nombre de quarks que de leptons ?
- Les interactions à haute énergie peuvent-elles décrirer de façon unifiée ?
- Comment incorporer la gravitation générale dans la théorie quantique ?
- ...

## □ Réponses proposées par de nouvelles théories plus générales:

- Supersymétrie: chaque particule du MS aurait un « partenaire supersymétrique » encore inconnu
- Espace-temps à plus que 4 dimensions (mais alors combien ? 10 ou plus ?)
- ...

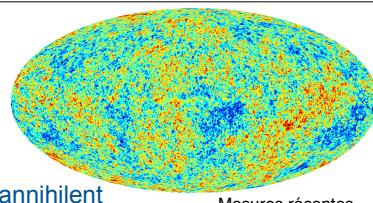
## □ Le LHC pourra:

- trouver peut-être les particules supersymétriques les plus légères
- chercher à observer des phénomènes de gravitation quantique, des dimensions supplémentaires, ...

# Pourquoi la matière existe-t-elle ?

## □ Théorie cosmologique du Big-Bang:

- au départ, des quantités égales de matière et d'anti-matière sont créées
- une minute plus tard, une très légère asymétrie entre matière et anti-matière est apparue, puis matière et anti-matière s'annihilent
- un petit surplus de matière a survécu et forme tout ce que nous connaissons aujourd'hui



Mesures récentes du rayonnement d'annihilation (carte de l'Univers)

## □ Asymétrie entre matière et anti-matière:

- découverte en 1964
- a trouvé une explication dans le cadre du MS, confirmée expérimentalement
- mais est des milliards de fois trop faible pour l'explication cosmologique !

## □ Le LHC pourra:

- étudier cette asymétrie plus en détail, avec des mesures de précision
- chercher des nouvelles sources d'asymétrie

# La composition de notre Univers

## □ Tout ce que nous connaissons

- planètes, étoiles, galaxies, ...
- atomes, rayonnement électromagnétique
- neutrinos

ne représente que 5% de la densité d'énergie de l'Univers



## □ Des « choses » inconnues et invisibles forment le 95% restant:

- « matière noire »:
  - une nouvelle forme de matière encore non-identifiée
- « énergie sombre »:
  - ???
  - [forme d'énergie associée au vide de l'espace, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers]

# Matière noire

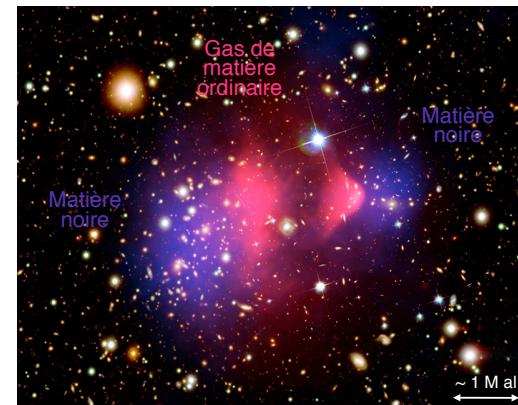


Photo de la NASA avec superposition (en fausses couleurs) de:  
— distribution de gaz chauds émettant des rayons X  
— distribution de masse obtenue par technique de lentille gravitationnelle

## □ « Bullet Cluster » 1E0657-56

- deux amas de galaxies entrés en collision il y a 150 millions d'années
- la matière ordinaire (principalement des gaz) a été très ralentie par les interactions électromagnétiques
- mais une grande partie de la masse de ces amas a été beaucoup moins ralentie

## □ La matière noire pourrait être formée de particules (WIMPs) qui pourraient être découvertes au LHC

# Enjeux et défis

