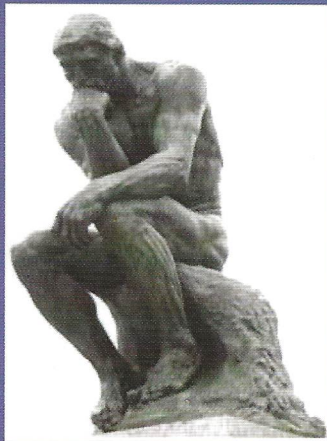


Présentation de François Vazeille,  
Directeur de Recherche au CNRS

Laboratoire de Physique Corpusculaire (IN2P3-CNRS)

1<sup>er</sup> cycle de conférences, données au Centre Diocésain de Pastorale en avril 2008

## 1. Remonter le temps? Un rêve pour l'Homme. ... un rêve pour l'Homme et le Philosophe



- Rajeunir.
- Retrouver des êtres chers disparus et des personnages célèbres.
- ... et peut-être orienter sa vie d'une autre façon.

Mais ...

## 2. Est-il possible de remonter le temps?

Aisément résolu par l'écrivain.

Par exemple: H. G. WELLS

en utilisant La machine à explorer le temps  
qui met à profit la 4<sup>ème</sup> dimension: le temps

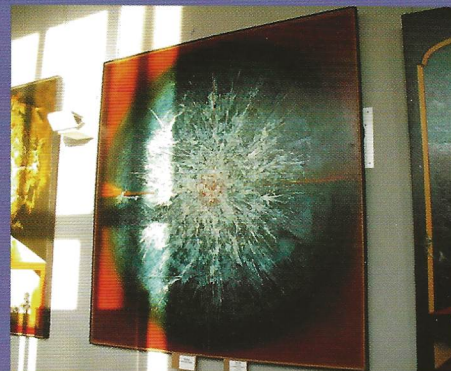
Projection en l'année 802 701  
puis retour au présent.



Herbert George Wells  
(1866-1946)

Sa Machine à remonter le temps est l'imagination et l'inspiration, plus le talent.

Par exemple, Slobo nous ramène au Big Bang, il y a 13.7 milliards d'années!



Le Big Bang  
ou  
Gate away of darkness

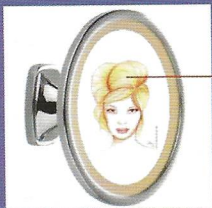
Opus 1000 (1982)  
F 170 x 170

Mais c'est de la Science Fiction.

Et qu'en pense le scientifique?

C'est le moment de révéler la solution d'une grande énigme.

Pourquoi la Castafiore rit-elle de se voir si belle en ce miroir ?



Que s'est-il passé ?

- Elle est à 1,5 mètre du miroir.
- Son image lui revient en parcourant la même distance, soit 3 mètres au total.
- Comme la lumière a une vitesse de 300 000 km/seconde, cela prend 10 ns, soit 10 milliardièmes de seconde.

Elle se voit donc plus jeune !

La Galaxie Andromède est à 2 millions d'années-lumière.



Nous la voyons telle qu'elle était il y a 2 millions d'années.

Peut-on voir plus tôt ?

En observant les Galaxies ?

NON: C'est la période dite des Ages sombres ou des ténèbres.

OUI en observant le rayonnement fossile reliquat du Big Bang.

• Avant 380 000 ans après le Big Bang:

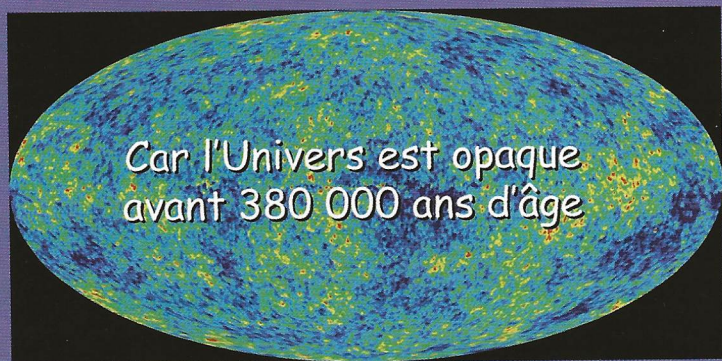
Univers constitué de particules chargées (électrons en particulier) et de photons (lumière) qui sont en interaction  
lumière piégée l'Univers était opaque.

• Vers 380 000 ans: les électrons sont capturés pour former des atomes (neutres).  
Les photons interagissent moins  
l'Univers devient transparent.

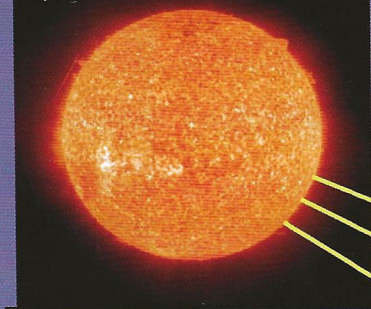
→ Conclusion: la lumière peut s'échapper.

→ Aujourd'hui: cette lumière s'est refroidie.

Mais on ne peut pas voir plus loin ... ou plus tôt.



De la Terre, regardons le Soleil. Il est à 150 millions de km.

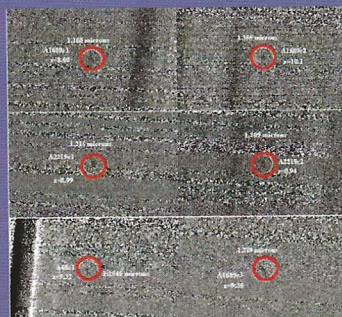


La lumière du Soleil met environ 8 minutes pour atteindre la Terre.



Nous voyons donc le Soleil tel qu'il était ... 8 minutes plus tôt.

Les Galaxies observées les plus lointaines sont à environ 13 milliards d'années-lumière.



C'est très récent (juillet 2007) et très difficile à voir (Au centre des ronds rouges).

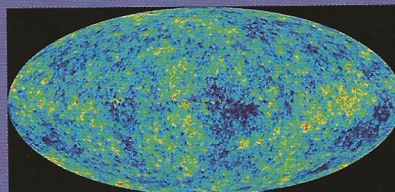
Et contesté aujourd'hui.

Mais d'autres publications encore plus récentes (mars 2008) ont trouvé une autre candidate dans la Galaxie cluster Abell 1689.



Alors que notre Univers n'est guère plus vieux (13,7 milliards d'années).

... et nous baignons dans le rayonnement fossile issu du Big Bang à 2,7 K (-270,4 °C).



Voici l'Univers (vu de la Terre) où apparaît ce rayonnement.

Les différences de couleur rendent compte des variations infimes de température de quelques dix millièmes de degré (Prix Nobel 2006).

On se rapproche ainsi à 380 000 ans du Big Bang.

est de reproduire en laboratoire ce qui a pu se passer ...

... une fraction de seconde après le Big Bang

... grâce à l'instrument le plus complexe jamais conçu par l'Homme:

L'accélérateur de particules LHC du CERN et les 4 expériences géantes associées.

Pour avoir un scénario unique de l'évolution de l'Univers:

- mariant les mondes de l'infiniment grand et de l'infiniment petit ,

- et recherchant la théorie dite **théorie du tout** qui engloberait toutes les forces élémentaires de la nature en une **Super-Force** unique.

Les particules élémentaires ... aujourd'hui, c'est quoi ?

• Comme tout édifice , l'Univers est constitué de briques et de ciments avec lesquels on peut bâtir tous les types d'atomes.

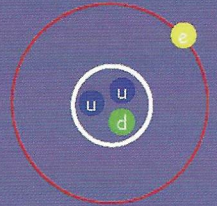
mais ici briques et ciments sont des **particules élémentaires**.

• Les briques sont les particules de matière :

Exemples: les quarks et électrons.

L'atome le plus simple: Hydrogène

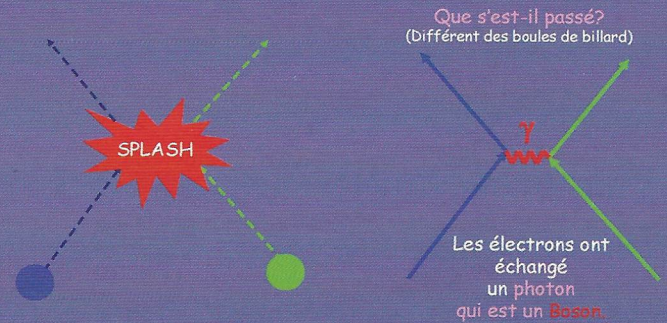
- Un noyau (Charge +): 3 quarks
- Un électron (Charge -).



• Les ciments sont les messagers des forces qui les lient.

Exemples: le photon, le gluon...

... illustration des forces lors de la collision élastique de 2 électrons.



Le photon est le messager de la force électromagnétique.

Exemple précédent de l'atome d'hydrogène: l'électron échangeait des photons avec le noyau.  
Exemple précédent de l'atome d'hydrogène: l'électron échangeait des photons avec le noyau.

On contredit Auguste Comte qui écrivait, en 1852, dans son *Catéchisme positiviste* « Du tout tu ne parleras pas ».

### Quelles sont les 4 forces élémentaires de la nature ?

**La force forte** : la première force nucléaire , la plus intense  
Cohésion des noyaux de l'atome et des nucléons (Protons, neutrons)...

**La force faible** : la seconde force nucléaire  
Désintégrations radioactives, énergie des étoiles...

**La force électromagnétique**  
Electricité, magnétisme, cohésion de l'atome, chimie, biologie...

**La force Gravitationnelle**: la plus petite  
La plus visible à l'échelle humaine: s'applique à l'Univers dans son ensemble mais **pas encore** au monde des particules.



... Bilan actuel des particules élémentaires

#### Fermions: "briques"

Leptons		Quarks	
e	$\nu_e$	u	d
électron	neutrino é	haut	bas
$\mu$	$\nu_\mu$	c	s
muon	neutrino $\mu$	charme	étrange
$\tau$	$\nu_\tau$	t	b
tau	neutrino $\tau$	top	beau

- 1<sup>ère</sup> famille: matière ordinaire
- 2<sup>ème</sup> famille: réplique 1<sup>ère</sup>, plus massive et instable
- 3<sup>ème</sup> famille: ... encore plus ...

#### Bosons: "ciments"

Interaction <b>forte</b>	<b>g</b> 8 gluons
Interaction <b>électromagnétique</b>	<b><math>\gamma</math></b> photon
Interaction <b>faible</b>	<b>Z<sup>0</sup> W<sup>+</sup> W<sup>-</sup></b> 3 bosons vecteurs
Interaction <b>gravitationnelle</b>	<b>G</b> graviton
A l'origine de la <b>masse</b> des particules	<b>H</b> Boson de Higgs

### Quel est le bilan du 20<sup>ème</sup> siècle ?

Deux grands cadres théoriques qui **marchent** ... mais qui **s'ignorent**.



Les grandes structures de l'Univers



Le monde des Particules élémentaires

Et le besoin de théories plus globales et d'expériences pour les valider.

#### Fermions

Leptons		Quarks	
e	$\nu_e$	u	d
électron	neutrino é	haut	bas
$\mu$	$\nu_\mu$	c	s
muon	neutrino $\mu$	charme	étrange
$\tau$	$\nu_\tau$	t	b
tau	neutrino $\tau$	top	beau

12 Fermions + 12 Anti-Fermions = 24  
14 Bosons  
Total = 38

Toutes découvertes ...  
Sauf le Higgs (pour très bientôt au LHC)  
et le Graviton (peut-être bientôt au LHC)

Question:  
existe-t-il encore une sous-structure?

#### Bosons

<b>g</b> 8 gluons
<b><math>\gamma</math></b> photon
<b>Z<sup>0</sup> W<sup>+</sup> W<sup>-</sup></b> 3 bosons vecteurs
<b>G</b> graviton
<b>H</b> Boson de Higgs

# La cosmologie aujourd'hui ... c'est quoi?

Un scénario de l'évolution de l'Univers appelé Big Bang .

*Assimiler l'instant zéro du Big Bang est un abus de langage, néanmoins nous commettrons cette faute pour simplifier l'exposé.*

Comme nous allons le voir, l'histoire officielle de l'Univers commence

**10<sup>-43</sup> seconde après l'instant zéro**

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 1

et depuis il est en expansion.

comme un ballon de baudruche qui gonfle. Attention, c'est une image et ce n'est pas à l'échelle.



Juste après la naissance: 10<sup>32</sup> K  
soit 100 000 milliards de milliards de milliards de degrés

7 avril 2008  
- 270.43 °C

Le temps	La température	Les forces	La matière
ère de Planck < 10 <sup>-43</sup> s	> 10 <sup>32</sup> K	Super-Force inconnue	L'atome primitif
10 <sup>-43</sup> s	10 <sup>32</sup> K	Gravitation Electronucléaire	
<b>10<sup>-35</sup> s</b>	10 <sup>28</sup> K	Forte Electrofaible	Quarks, Antiquarks...
10 <sup>-11</sup> s	10 <sup>15</sup> K	Faible Electromagnétique	
10 <sup>-10</sup> s			Protons, neutrons
1 s			Noyaux légers
3 min			Atomes stables légers
380 000 ans			Découplage lumière/matière
> 100 millions a			Etoiles, galaxies, amas...
> 1 milliard a			Carbone, oxygène...
13.7 milliards a	2.7 K		

**Inflation**  
(Expansion accélérée et brutale)  
La Taille de l'Univers est 4,73 10<sup>26</sup> mètres  
Mais depuis quelques milliards d'années, l'expansion s'accélère de nouveau, mais pas de façon brutale.

## Essays de remonter le temps Que deviennent les forces et les théories ?

Le temps	La température	Les forces	La matière
< 10 <sup>-43</sup> s	> 10 <sup>32</sup> K	Super-Force inconnue	L'atome primitif
10 <sup>-43</sup> s	10 <sup>32</sup> K	Gravitation Electronucléaire	
10 <sup>-35</sup> s	10 <sup>28</sup> K	Forte Electrofaible	Quarks, Antiquarks
10 <sup>-11</sup> s	10 <sup>15</sup> K	Faible Electromagnétique	
10 <sup>-10</sup> s			Protons, neutrons
1 s			Noyaux légers
3 min			Atomes stables légers
380 000 ans	3 000 K		Découplage lumière/matière
> 100 millions a			Etoiles, galaxies, amas...
> 1 milliard a			Carbone, oxygène...
13.7 milliards a	2.7 K		

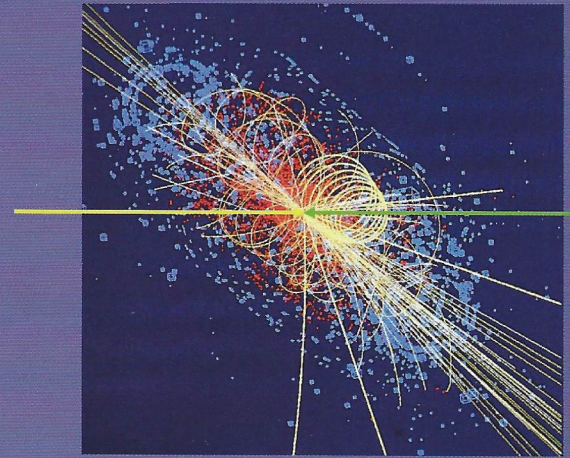
Problème dit de la hiérarchie :  
2 échelles d'énergie



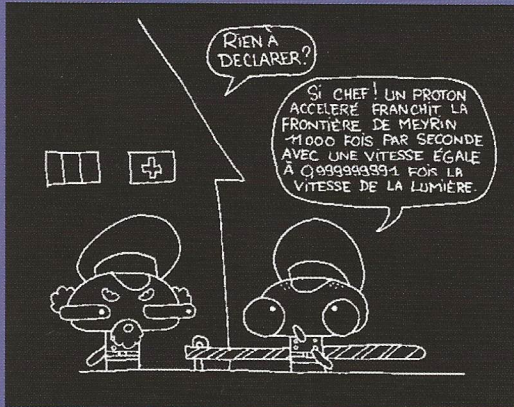
- Un nouvel accélérateur de particules: Le LHC  
 - Avec 4 expériences géantes?

Nom de code: LHC.

- L** ( Large en anglais) signifie grand: un anneau de 27 km de circonférence.
- H** ( Hadron ) implique l'accélération de protons et ions (Plomb).
- C** ( Collider en anglais) indique que les hadrons entrent en collisions frontales.



Création de particules de hautes masses qui n'ont existé qu'une fraction de seconde après le Big Bang et observation dans les grands détecteurs.



Les Hadrons circulent en sens contraire dans 2 anneaux qui se croisent en 4 points (Les 4 expériences),

dans un vide très poussé: ultravide de  $10^{-13}$  atmosphère.

Ils sont accélérés par des champs électriques intenses en 8 points: 5 millions V par mètre.

et déviés par des aimants supraconducteurs, dont des dipôles fournissant un champ de plus de 8 teslas (200 000 fois le champ terrestre).



Champ électrique

Cavité accélératrice

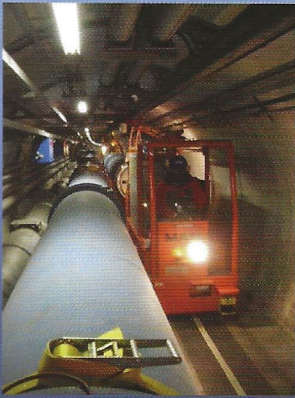
Champ magnétique

Aimant

9300 aimants  
dont 1232 dipôles  
- Longueur 14 mètres  
- Masse 35 tonnes



Consommation: 120 MW  
~ Canton de Genève



Câbles supraconducteurs Niobium-Titane à  $-271,3^{\circ}\text{C}$

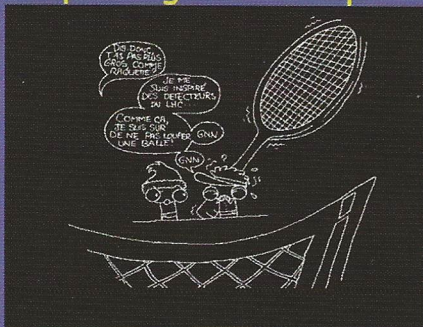
Petite définition: énergies exprimées en eV (Electron-volt)  
 Énergie acquise par un électron accéléré par un champ électrique de 1 volt.

### Quelques chiffres sur le LHC

- Le LHC trône les records mondiaux:
  - Le plus grand collisionneur (Circonférence de 27 km).
  - Le plus puissant (La plus grande intensités de hadrons).
  - Le plus énergétiques: 7 TeV par faisceau  
7 000 milliards d'électronvolts.
- Un vide comparable au vide spatial. (1 atome par  $\text{m}^3$ ).
- Une température plus basse que celle du rayonnement fossile:
  - LHC  $1,9\text{ K } (-271,3^{\circ}\text{C})$
  - Cosmos:  $2,7\text{ K } (-270,4^{\circ}\text{C})$ .

Le plus grand réfrigérateur au monde!

### Et pourquoi 4 grandes expériences?



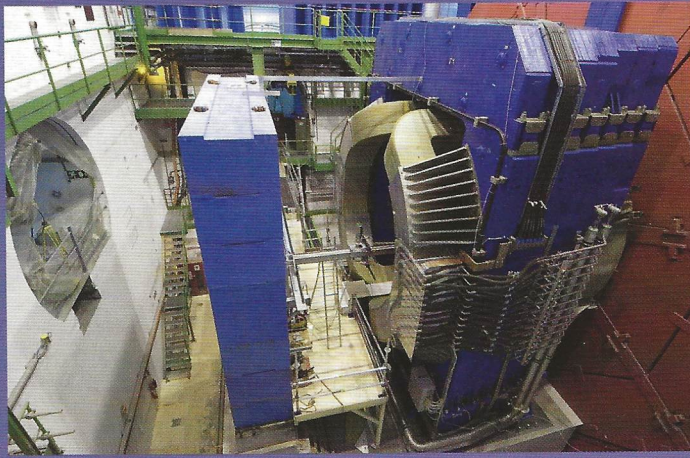
Pour atteindre les objectifs de Physique en tenant compte des difficultés expérimentales et des performances du LHC.

Les 4 expériences sont complémentaires et balayent tous les buts de Physique, avec des choix technologiques différents possibilités de recoupement pour valider les découvertes.

Pas à l'échelle

<b>ALICE</b> 16 m x 26 m  1000 chercheurs	<b>LHCb</b> 11 m x 20 m  660 chercheurs
<b>CMS</b> 15 m x 21 m  2000 chercheurs	<b>ATLAS</b> 25 m x 45 m  2000 chercheurs

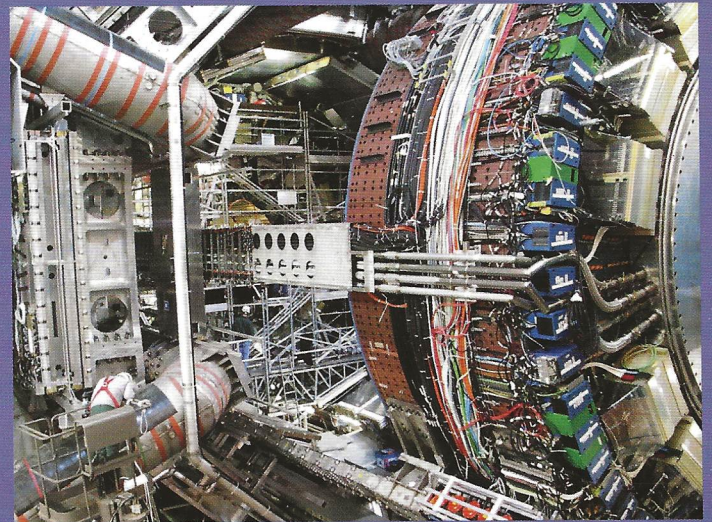
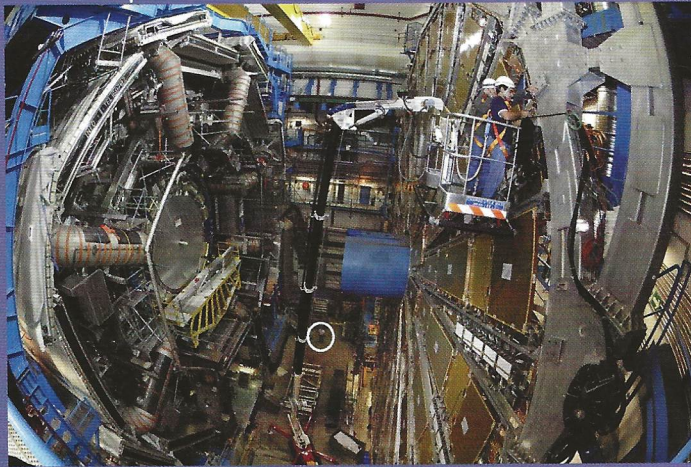
ALICE: partie avant



LHCb: vue de côté



ATLAS: partie avant



### Quelques chiffres

• Deux grandes périodes:

1990-2008: Recherche&Développement, puis conception et construction.  
2008-2020: Prises de données, jour et nuit

Soit plus de 30 ans!

• Tout est high-tech et hors du commun.

Par exemple:

ATLAS - La plus grande caverne artificielle au monde.  
- Le plus gros aimant toutes catégories (Toroïde supraconducteur).

CMS - Le plus gros aimant solénoïdal supraconducteur.

Des défis dans tous les domaines:

génie civil, mécanique, électronique, informatique...

Etats-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Inde, Iran, Islande, Israël, Italie, Japon, Kazakhstan, Malte, Maroc, Mexique, Norvège, Nouvelle Zélande, Ouzbékistan, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Slovaquie, Roumanie, Royaume-Uni, Russie, Serbie, Suède, Suisse, Taïwan, Tchèque, Turquie, Ukraine...



Plus de 60 pays dans les expériences, 500 laboratoires et 6000 chercheurs ... sans compter la construction du LHC.



LPC: Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand  
laboratoire mixte IN2P3-CNRS/Université Blaise Pascal.



Un flux de données gigantesque, généré par le nombre de collisions (des centaines de millions par seconde) et le nombre de canaux électroniques (des centaines de millions).

Soit 15 Téra octets par an (1 Téra = 10<sup>15</sup> ou million de milliards), équivalent à une pile de CD de 20 km de haut!

Le plus grand ordinateur au monde!



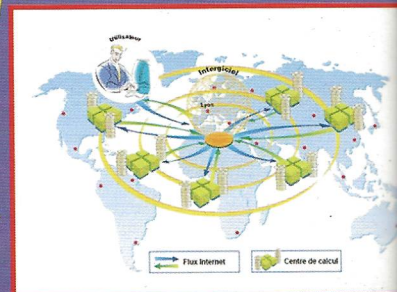
Mont Blanc

### Comment?

Grille mondiale de calcul: Mise en commun de 100 000 ordinateurs.

100 centres de calcul

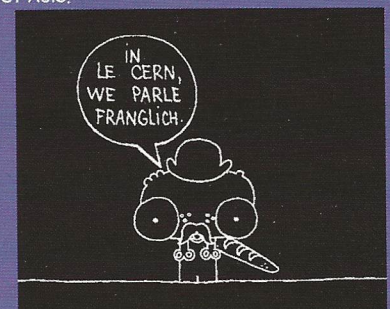
dont le nœud LPC de Clermont-Ferrand.



rtout: Europe, Etats-Unis, Russie et Asie.

Mais au CERN nous parlons CERNOIS.

c'est à dire anglais dans le travail et français dans les restaurants et avec les pompiers!



Au-delà de la quatrième dimension

$10^{-43}$  s ???

La matière noire

Matière et antimatière

Le vide n'est pas si vide

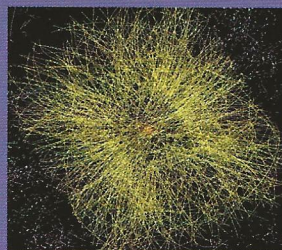
Le mini Big Bang

$10^{-35}$  s à  $10^{-11}$  s  
( $10 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}$ )

$10^{-11}$  s  
(1/100 de milliardième)

10 à 100  $\mu$ s  
( $\mu$ s = milliardièmes de seconde)

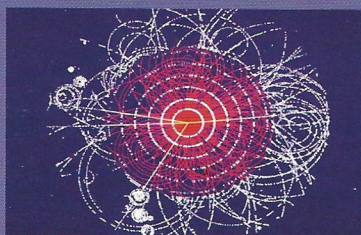
- Avant la formation des protons et neutrons, soit 10 à 100  $\mu$ s ( $\mu$ s = Milliardièmes de seconde) après le Big Bang quarks et gluons étaient libres dans un plasma extrêmement chaud et dense.
- Les collisions d'ions lourds Plomb permettront de recréer cette soupe primordiale de quarks et de gluons comme un mini Big Bang et d'en étudier les propriétés.



Particules issues d'une collision Plomb sur Plomb

Le vide n'est pas si vide

- La force électrofaible s'est partagée en force faible et électromagnétique environ  $10^{-11}$  seconde après le Big Bang.
- Le vide abrite une force qui donne une masse à la plupart des particules, dont le médiateur est le **Boson de Higgs**, prévu par la théorie électrofaible mais **pas encore découvert**.
- Les collisions de protons au LHC doivent permettre de créer le Boson de Higgs et d'en étudier les propriétés.



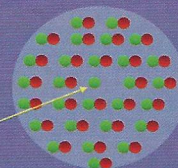
Désintégration du Boson de Higgs en 4 muons

Matière et antimatière

- Entre  $10^{-35}$  et  $10^{-11}$  seconde après le Big Bang, les **quarks** et **antiquarks** ont été créés par paires ... et se sont mutuellement annihilés !



- Heureusement, pour la matière de l'Univers (et nous!), pour chaque 10 milliards de paires créées, il y aurait eu un excès de **1 quark**.



Cette victoire de la matière sur l'antimatière pourrait être définitivement expliquée à partir des collisions de protons au LHC.

La matière noire

- 95% de la matière de l'Univers échappent à notre observation !
- La majeure partie est constituée de:
  - 25 % de Matière noire: révélée par la gravitation.  
*Exemple: Les Galaxies Bullet cluster*  
*En rouge: matière ordinaire*  
*En bleu: reconstitution matière noire*
  - 75% d'Energie sombre: probablement responsable de l'accélération de l'expansion.
- Cette Matière noire aurait été formée en même temps que les quarks, soit  $10^{-39}$  à  $10^{-11}$  seconde après le Big Bang.
- Elle pourrait être constituée des particules dites super-symétriques les plus légères (mais très massives) appelée **neutralinos**.
- Les collisions de protons au LHC pourraient produire ces neutralinos: La Machine LHC deviendrait ainsi une usine à Matière noire !



Au-delà de la quatrième dimension

Est-il possible d'atteindre la frontière de l'ère de Planck, c'est-à-dire l'instant de  $10^{-43}$  seconde ?

Cela correspondrait à une température de  $10^{32}$  K, [soit une énergie de  $10^9$  GeV (1 GeV = 1 milliard d'électron-volt)] hors d'atteinte de tout accélérateur.

L'unification de la Gravitation avec les autres forces est-elle un rêve inaccessible ? Les particules élémentaires sont-elles composées de briques plus petites qui seraient les **constituants ultimes** de l'Univers ?

Ce rêve est peut-être possible !

- L'échelle de Planck est abaissée à une énergie de 1 TeV (accessible au LHC) si notre Univers a 7 dimensions d'espace supplémentaires, soit au total **11 dimensions: 10 d'espace et une de temps**.
- Dans ce cadre, la théorie dite des **Supercordes** définit la brique élémentaire ultime qui a la longueur de Planck de  $10^{-35}$  mètre. Le LHC est capable de réaliser ce rêve ... si la théorie dit vrai.

5. Quelles conclusions ... aujourd'hui?

Est-il possible de remonter le temps?

La réponse des physiciens est OUI.

- **Directement** en regardons loin dans l'espace ou en mesurant le rayonnement fossile remontant à 380 000 ans.
- **Indirectement** en reproduisant en laboratoire ce qui a pu se passer bien avant. grâce en particulier au projet LHC, une réalisation hors norme:
  - Près de **20 ans** d'études et de construction (accélérateur et expériences) et **plus de 15 ans** qui seront consacrées aux prises de données.
  - Des **défis technologiques**  
L'accélérateur LHC: le plus grand et le plus puissant au monde. **4 expériences** géantes sans équivalent.
  - Des **collaborations mondiales**: Plus de 60 pays, 110 nationalités, 500 laboratoires et 6000 chercheurs.

Les conséquences pourraient être extraordinaires:

- Mise en évidence des extra dimensions au LHC à partir de la formation de ... mini Trous noirs.
- Possibilités d'Univers repliés, d'Univers parallèles, etc.
- Explication de la faiblesse de la Gravitation.
- Problème de la hiérarchie résolu: pas utile de remonter si loin que les  $10^{-43}$  s.

Ces fourmis qui se déplacent sur un ruban à 2 dimensions savent-elles qu'elles vivent dans un espace à 3 dimensions ?

Et nous les Humains, imaginons-nous des dimensions cachées ?



- Une **contribution française majeure**:
  - France et Suisse: pays hôtes du LHC.
  - France présente dans les 4 expériences.
- **Contribution très importante du LPC de Clermont-Ferrand** présent dans 3 expériences sur 4: **ALICE, LHCb et ATLAS** (Le seul laboratoire français dans ce cas) et dans la **Grille de calcul** (Un des 3 centres français).
- Des **buts physiques** multiples et ambitieux, qui vont du monde de **l'infiniment petit** à celui de **l'infiniment grand**.

qui pourraient déboucher sur une révolution dans notre compréhension de l'Univers.

## Le calendrier ... enfin.

- Fin juin 2008: Fermeture des cavernes.
- Juillet-Aout 2008: Travaux d'injection de protons dans le LHC.
  - Avec un gros effort médiatique mondial (et local) pour les premiers protons qui circulent.
- Septembre-novembre 2008: Collisions à 10 TeV (seulement) et intensité réduite.
  - Avec inauguration officielle le 21 octobre (Autorités de tous les pays) et les mêmes efforts médiatiques.
- Décembre 2008-février ou mars 2009: Arrêt hivernal et améliorations.
- A partir de mars ou avril 2009: Collisions à 14 TeV et intensité croissante.
- Vers 2015: Super-LHC (plus intense) et prises de données jusqu'à 2020 environ...

Une exposition  
A eu lieu au  
Lycée Godefroy de Bouillon  
du 8 avril au 13 mai 2008,

et en octobre puis  
en novembre 2008  
en d'autres lieux  
de l'agglomération clermontoise.



## Les enjeux scientifiques du LHC

En 2008 ce plus puissant des accélérateurs de particules est mis en service au CERN. Un évènement pour le monde des physiciens. Ce collisionneur équipé de ses détecteurs de particules va permettre d'accroître notre connaissance de la nature en explorant un vaste domaine qui est encore une "terra incognita"... Nous allons faire un grand pas dans l'infiniment petit mais ce collisionneur est aussi une formidable machine à remonter le temps pour essayer de comprendre les tout premiers instants de l'Univers.

En Auvergne, le Laboratoire de Physique Corpusculaire (I.N.2.P.3./C.N.R.S.) participe à ces recherches. La communication est un souci permanent de cette équipe car, nous dit **François Vazeille**, c'est à la fois un moyen de rendre compte au grand public et aux instances officielles et politiques de l'usage qui est fait des deniers publics. Nous souhaitons que cette présentation contribue à attirer davantage d'élèves vers cette discipline de la physique.  
(La rédaction)