

Le LHC - la machine à remonter le temps



Fabrice Hubaut

CPPM/IN2P3 - Université de la Méditerranée
Marseille, FRANCE



1. Le décor
2. Les acteurs : plongée dans l'infiniment petit
3. Les intrigues : les questions des physiciens
4. La scène : les accélérateurs de particules
5. La photographie : les détecteurs
6. Fin 2008 : ACTION!

Conférences 2008 - autour du LHC

1. 100 ans d'exploration en physique des particules : de Becquerel au LHC...
26 janvier 2008, Maximilien Melissas
2. Le LHC - la machine à remonter le temps
01 mars 2008, Fabrice Hubaut
3. Le LHC - objectifs scientifiques : le Higgs
29 mars 2008, Sylvain Tisserant
4. Le LHC - objectifs scientifiques : l'antimatière, les dimensions supplémentaires
26 avril 2008, Julien Cogan
5. A la croisée des deux infinis
17 mai 2008, Damien Dornic
6. La cosmologie
07 juin 2008, Charling Tao
7. Du LHC à l'imagerie médicale
18 octobre 2008, Jean-Claude Clemens
8. La recherche à hautes énergies : incitateur de hautes technologies depuis 100 ans
15 novembre 2008
9. Nouvelles du LHC
13 décembre 2008

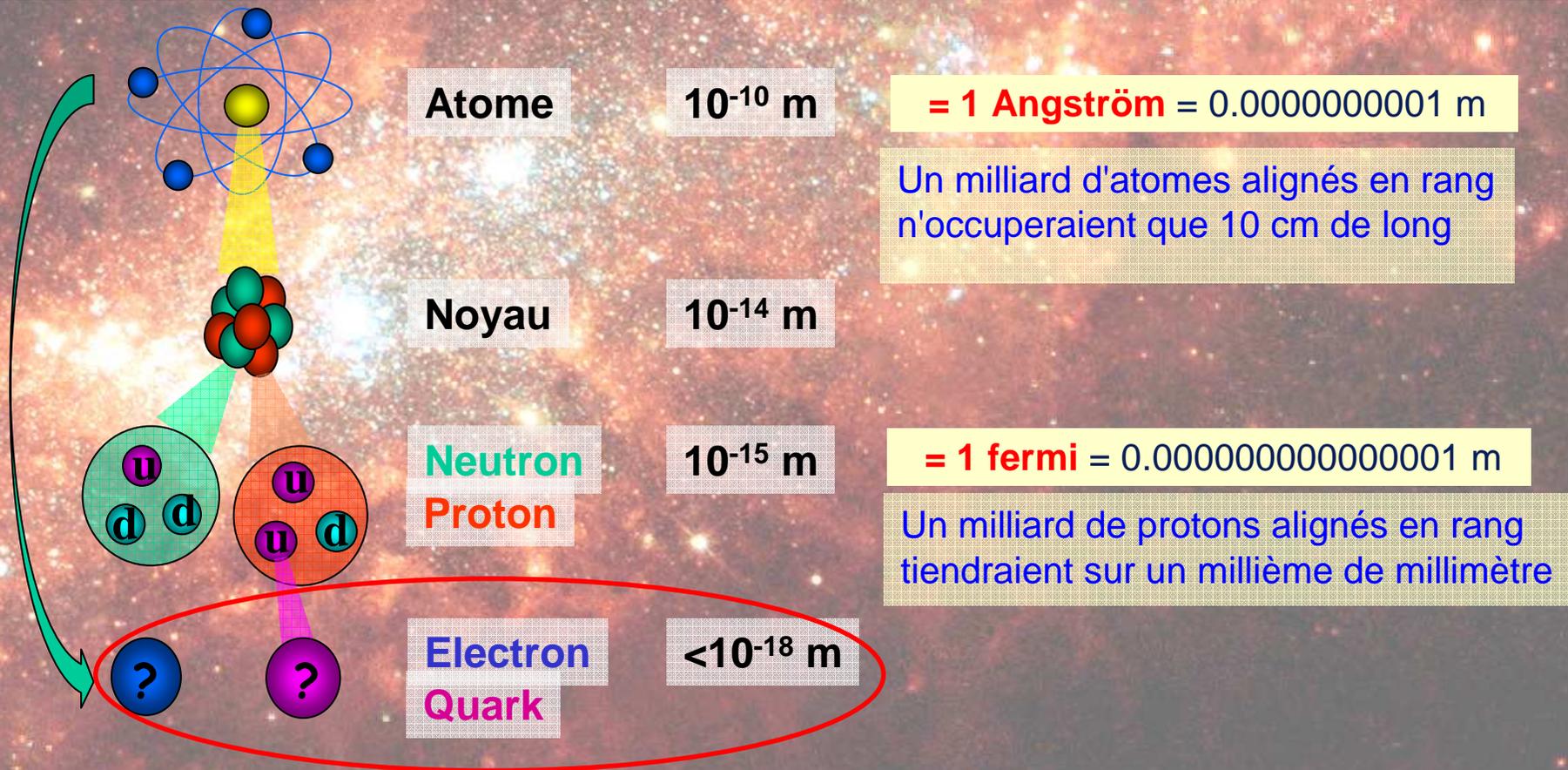
Le décor



Un monde extrême

- Avant de plonger dans l'infiniment petit, il convient de fixer des échelles dans l'espace et dans le temps
- Les unités usuelles sont inadaptées
- Il faut changer repères et habitudes (la mécanique quantique est à l'œuvre!)

Les distances



les accélérateurs de particules sondent à cette échelle!

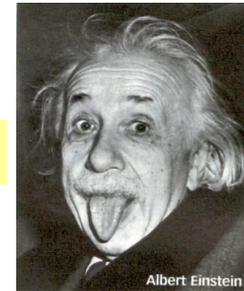
Les vitesses et le temps

- Rien ne va plus vite que la lumière dans le vide

➤ La lumière met 8 minutes pour venir du Soleil

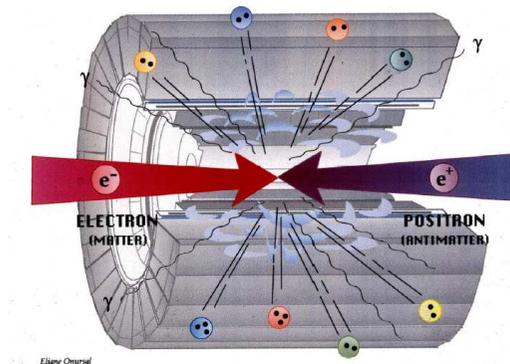


$c = 300\,000 \text{ km/s}$



- C'est ~ la vitesse des particules impliquées dans les collisions de haute énergie

➤ Vitesse des protons du LHC=99.9999991% de la vitesse de la lumière



- Il leur faut un milliardième de seconde pour parcourir un mètre

$1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ sec}$



les détecteurs de particules doivent être rapides et précis

Les énergies

- A la fois infimes, car concernent de minuscules corpuscules ... et très importantes à leur échelle, car les vitesses sont proches de celle de la lumière
 - ex.: **1 TeV (LHC)** = énergie cinétique d'un moustique en vol. Ici concentrée dans un volume mille milliards de fois (10^{-12}) inférieur au moustique
- L'électronvolt (**eV**) est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt **$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$**
 - relie l'infiniment petit (charge de l'électron) et la physique usuelle (Volt)
 - GeV (10^9 eV) \equiv énergie des quarks et gluons présents dans un proton
 $1 \text{ GeV} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ Joule}$

Les acteurs

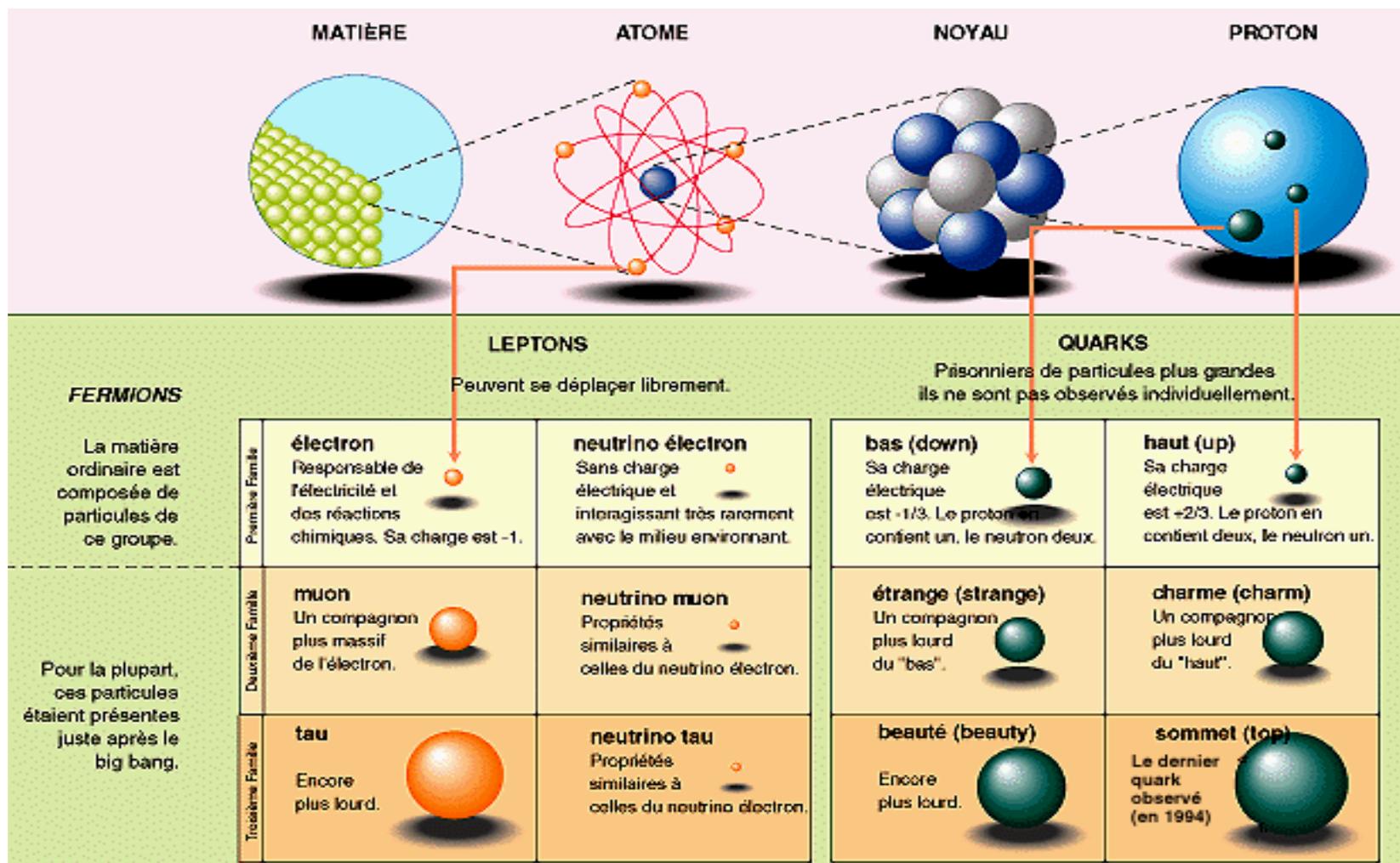


Plongée dans l'infiniment petit

- Atomes : « insécable » en grec
- Poupées russes : molécules, atomes, noyaux, nucléons, quarks
- Panorama des particules élémentaires
- Les interactions fondamentales

Modèle Standard

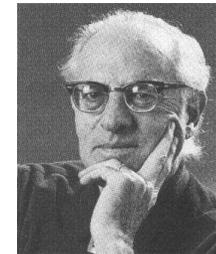
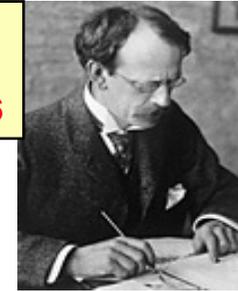
Panorama des particules



Des découvertes étalées sur un siècle

- Electron : 1897
- Muon : 1937
- Neutrino-e : 1956
- Neutrino- μ : 1962
- Quarks up, down et étrange : 1964
- Quark charmé : 1974
- Quark de beauté : 1977
- Tau : 1975
- Quark top : 1995
- Neutrino- τ : 2000

J.-J. Thomson
(1856 - 1940)
Prix Nobel 1906



F. Reines
(1918-)
Prix Nobel 1995

M. Gell-Mann
(1929-)
Prix Nobel 1969

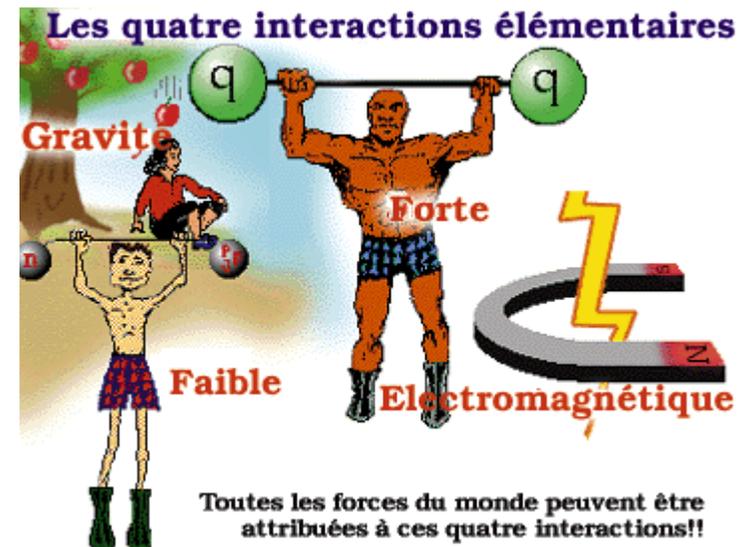


B. Richter et S. Ting
Prix Nobel 1976

Les quatre interactions

Tous les processus physiques, chimiques ou biologiques connus peuvent être expliqués à l'aide de seulement **quatre** interactions fondamentales

- **interaction électromagnétique** (électricité, magnétisme, lumière, réactions chimiques et biologiques, ...)
- **interaction forte** (cohésion des noyaux atomiques)
- **interaction faible** (radio-activité beta, qui permet au Soleil de briller)
- **interaction gravitationnelle** (pesanteur, marée, phénomènes astronomiques, ...)

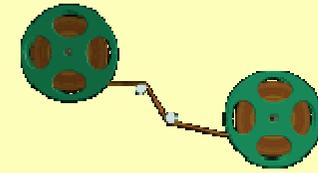


Interactions et messagers

- Principe d'action-réaction : interaction à distance par échange d'un objet intermédiaire = **vecteur de l'interaction**
 - Idem en physique des particules
 - Les vecteurs sont eux-même des particules = **bosons**
- Les bosons vecteurs des 4 interactions sont :
 - Le **photon** pour l'interaction électromagnétique
 - Les **gluons** pour l'interaction forte
 - Les bosons **W⁺, W⁻ et Z⁰** pour l'interaction faible
 - Le **graviton** pour l'interaction gravitationnelle
- Plus la particule vectrice d'une interaction sera lourde plus cette interaction sera de courte portée

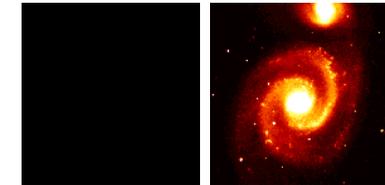


Les intrigues



Les préoccupations des physiciens

- La compréhension de l'univers, sa création, son évolution
- Pourquoi existe-t-il trois familles de particules ?
- Existe-t-il de nouvelles particules et de nouveaux phénomènes ?
- Les quarks et des leptons sont-ils élémentaires ($<10^{-18}$ m)?
- La compréhension des masses → boson de Higgs ?
- L'unification des forces → supersymétrie, cordes, ...?
- Où est passée l'antimatière ? Asymétrie matière/antimatière
- Le graviton et les ondes gravitationnelles



Détaillé dans les prochaines conférences...

Le pourquoi des masses?

➤ La hiérarchie impressionnante des masses :

- Photon, neutrinos : ~ 0
- Electron : $0.0005111 \text{ GeV}/c^2$
- Quarks up et d : quelques $0.001 \text{ GeV}/c^2$
- Muon : $0.106 \text{ GeV}/c^2$
- Quark charmé : $\sim 1.2 \text{ GeV}/c^2$
- Tau : $1.77 \text{ GeV}/c^2$
- Quark b : $4 \text{ GeV}/c^2$
- Boson W : $80 \text{ GeV}/c^2$
- Boson Z⁰ : $92 \text{ GeV}/c^2$
- Quark top : $175 \text{ GeV}/c^2$

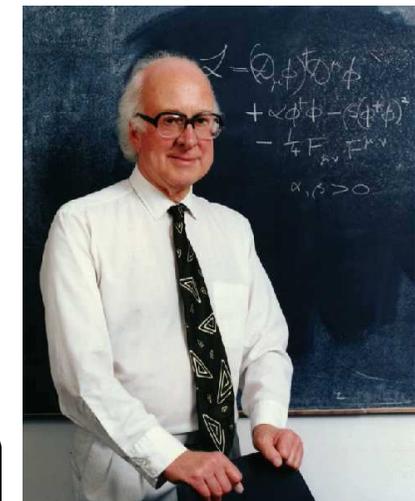
(1 $\text{GeV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)



Pourquoi le W est-il très lourd et le photon sans masse ?

➤ Pourquoi ? En particulier, pourquoi le quark top est-il si lourd?

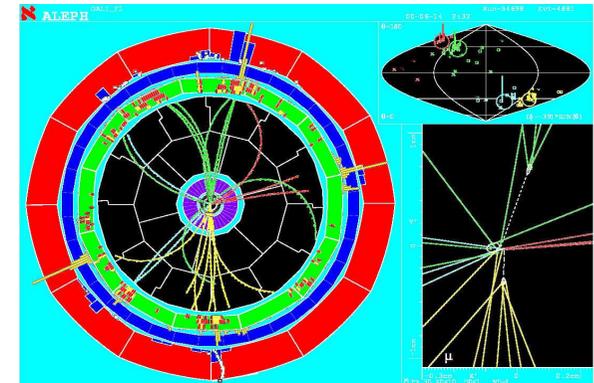
➔ Hypothèse du rôle d'une particule : le boson de Higgs



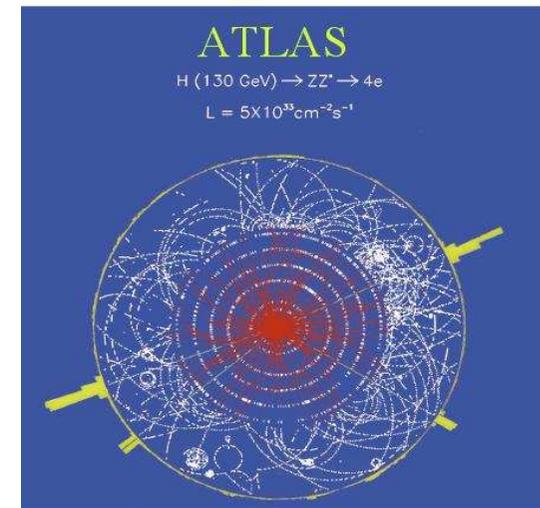
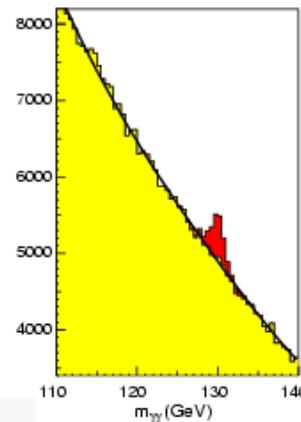
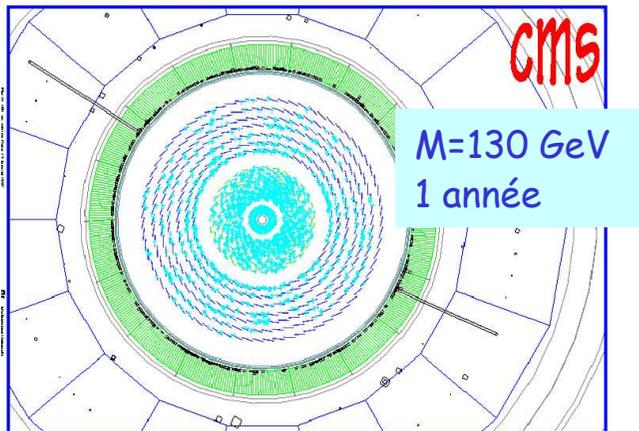
Mr Higgs

Le boson de Higgs

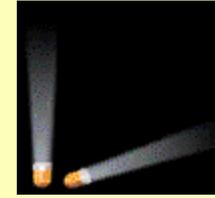
- Cette particule crée un **champ** qui emplit tout l'espace (tout comme les photons créent un champ électro-magnétique)
- Les particules baignent et interagissent avec ce champ de Higgs, ce qui leur donne une **masse**
- La recherche du Higgs est encore vaine
 - Indication éventuelle suggérée par le LEP en 2000 :
 - Le LHC verra le Higgs ... s'il existe !



Première « photo » du Higgs ?



La scène



Pourquoi faut-il de hautes énergies ?

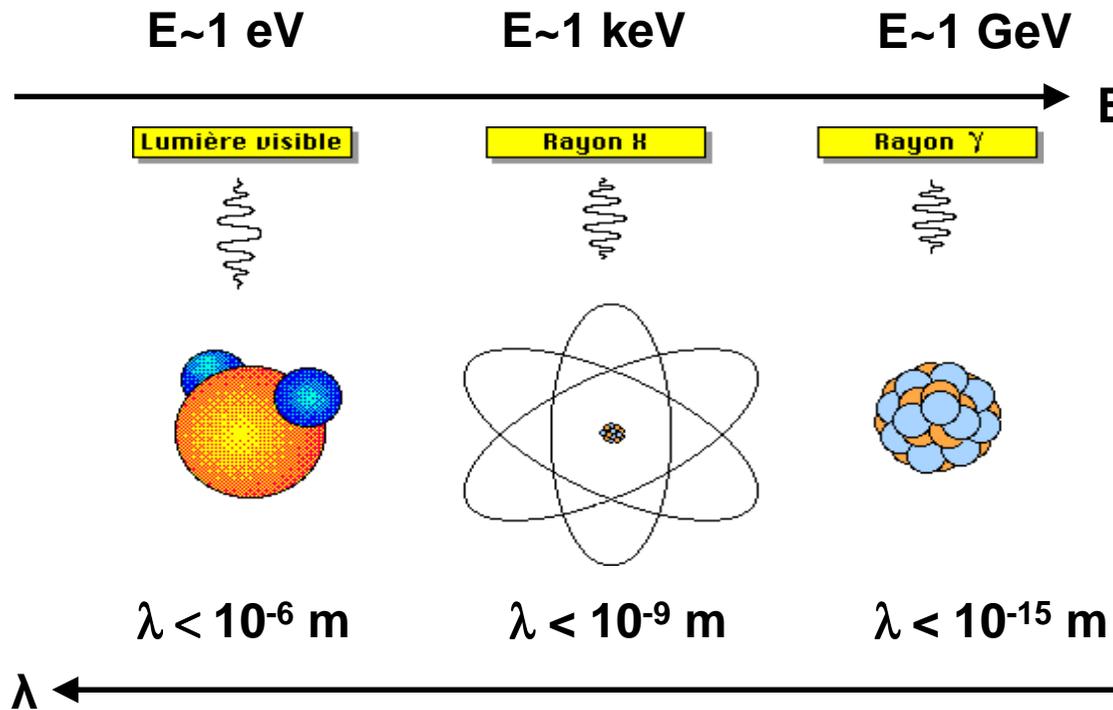
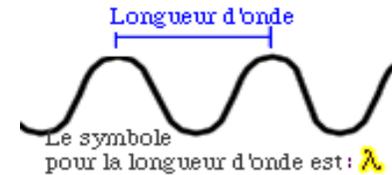
- Sonder la matière à des échelles de plus en plus petites
 - Les accélérateurs jouent le rôle de super-microscopes

- Reproduire les conditions des premiers instants de l'Univers
 - Les accélérateurs jouent le rôle de machines à remonter le temps

Le LHC, Large Hadron Collider

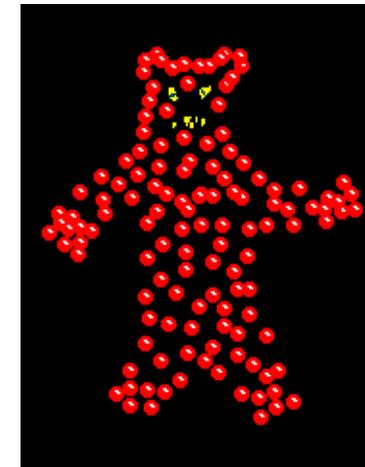
Des super-microscopes

Exemple de la lumière : $E \lambda = 1.24 \cdot 10^{-6} \text{ eV.m}$



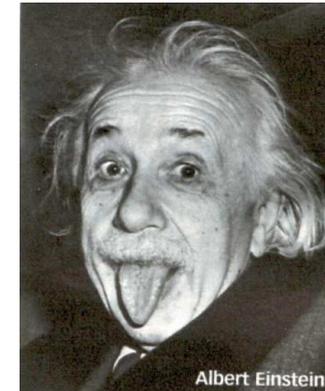
- Avec des photons d'énergie donnée on ne peut pas sonder des détails plus petits que λ
- Généralisation à toutes les particules

➔ Plus on grimpe en énergie, plus on sonde petit



Des machines à remonter le temps

- Recréer des particules instables qui existaient après le Big-Bang et qui ont disparu
- La production d'une particule de masse m requiert de l'énergie
 - Méthode simple des anneaux de collisions



- Pour produire m il faut ... **$E + E > m c^2$**
- Exemples historiques : il a fallu
 - **SPEAR** (1974) : 3.1 GeV pour produire une paire de **quarks c**
 - **LEP** (1990) : 92 GeV pour produire le **boson Z^0**
 - **Tévatron** (1995) : 1.4 TeV pour produire le **quark top**

➔ **Reproduire les conditions des premiers instants de l'Univers**

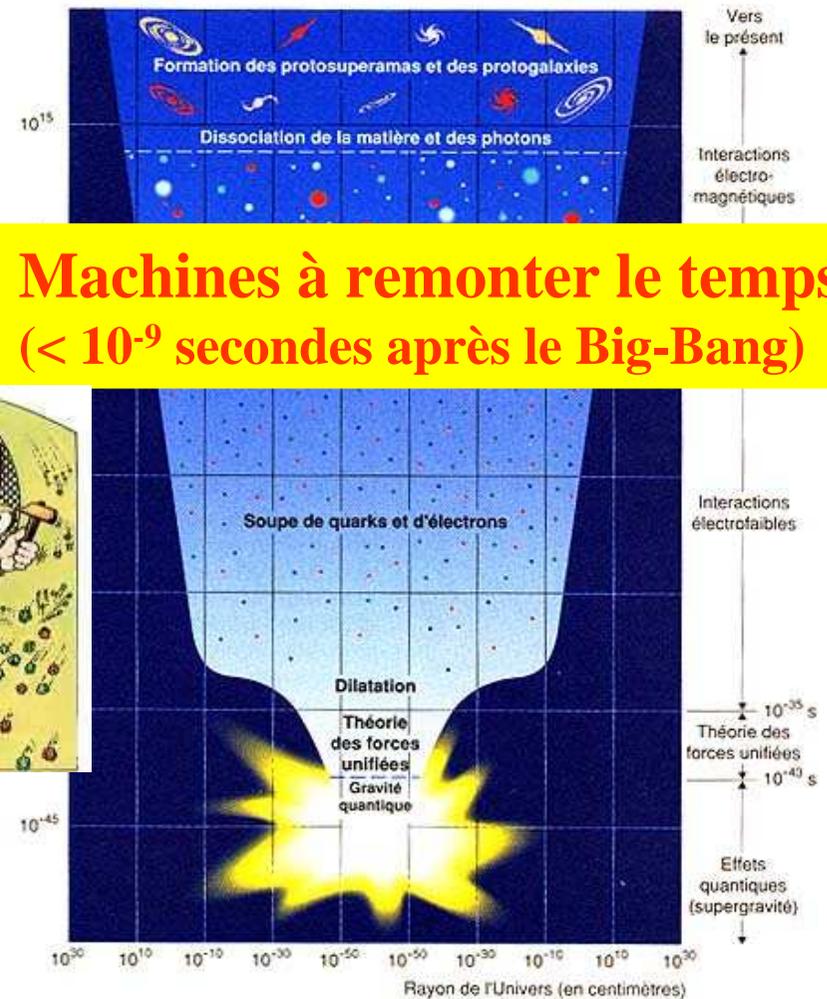
- LHC équivaut à un milliardième de seconde après le Big-Bang!

Les accélérateurs de particules

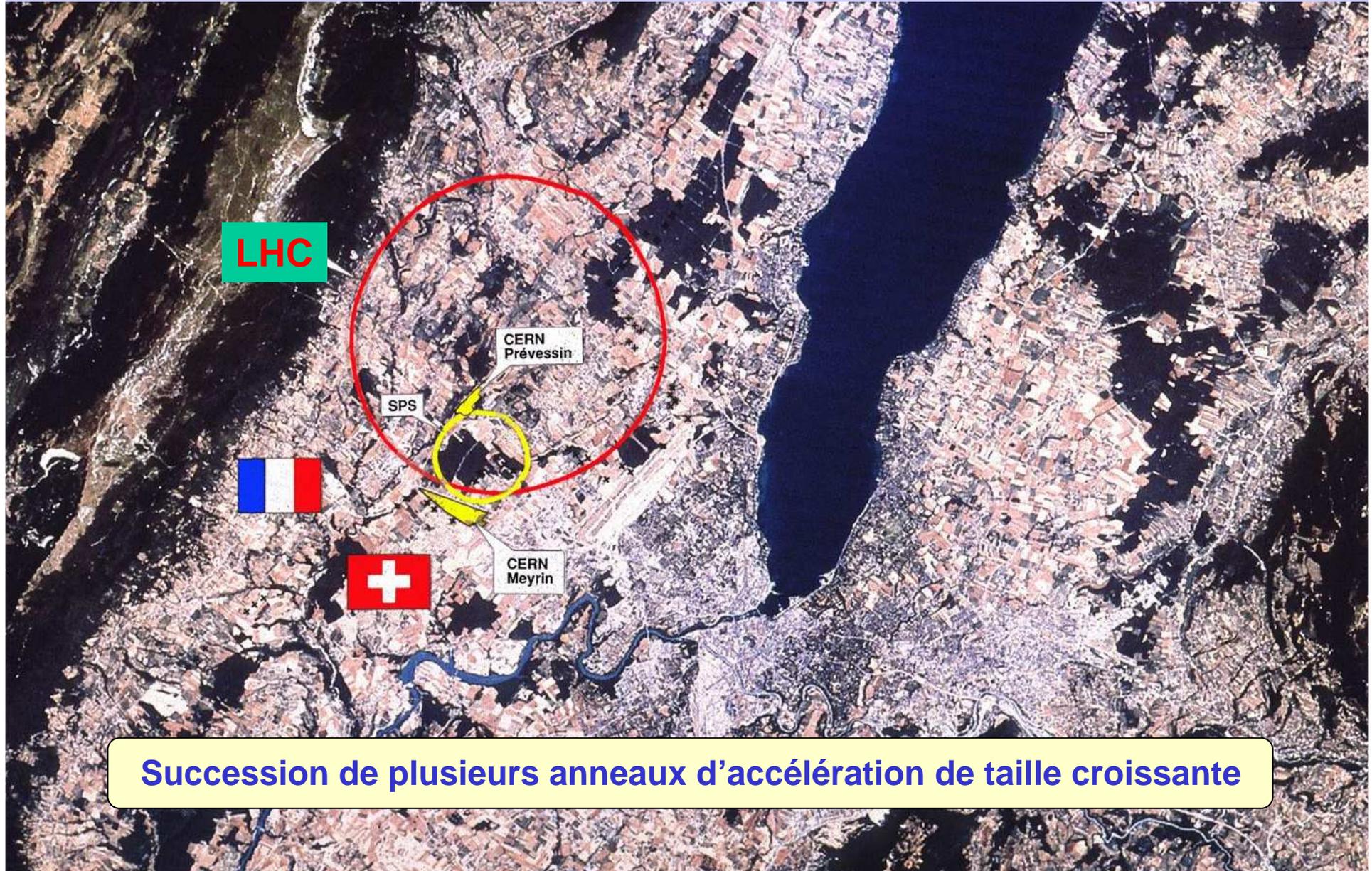
Microscopes les plus puissants
(sondent la matière à mieux que 10^{-18} m)



Machines à remonter le temps
($< 10^{-9}$ secondes après le Big-Bang)



Le complexe du CERN

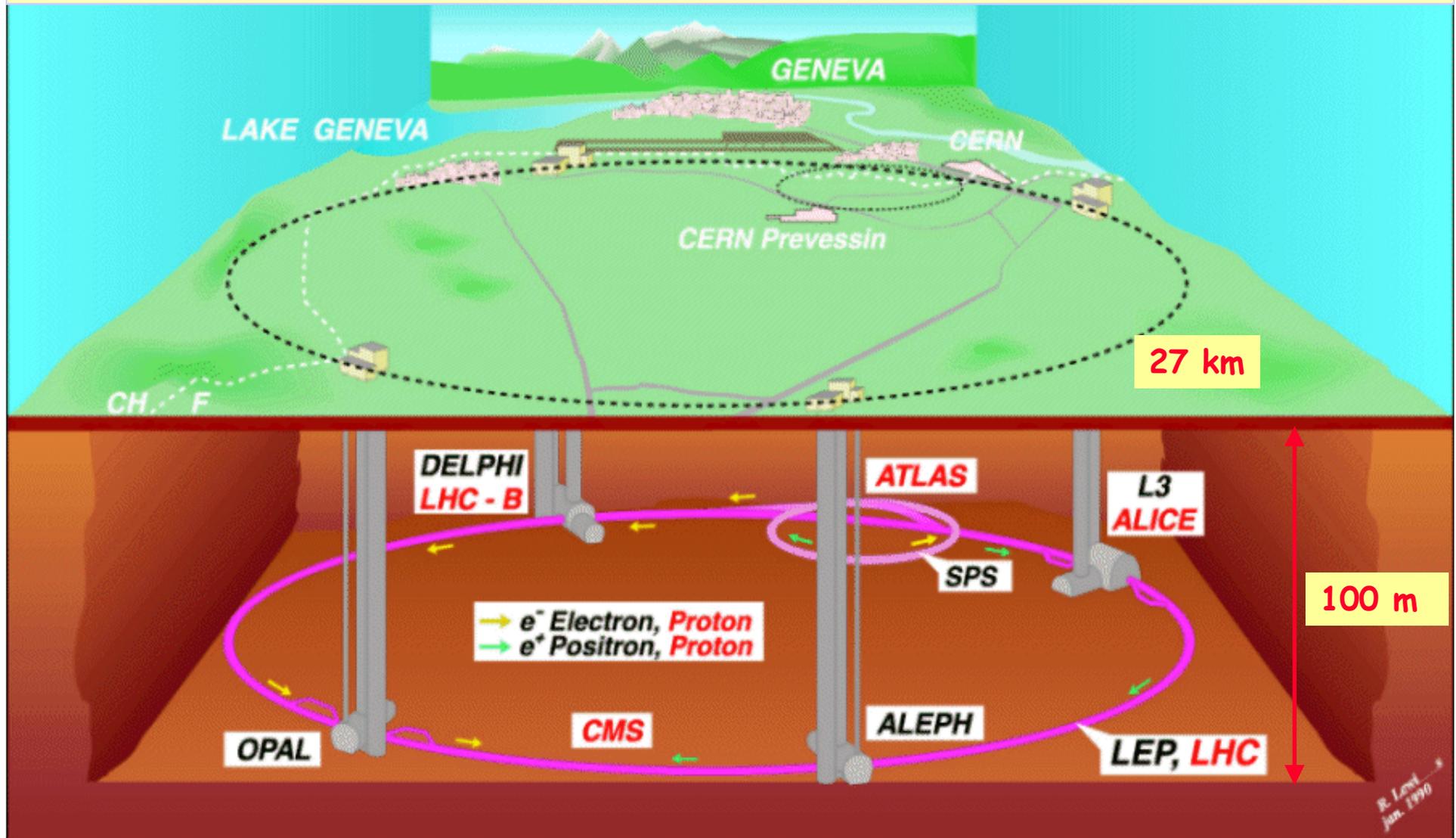


Succession de plusieurs anneaux d'accélération de taille croissante

Le complexe du CERN



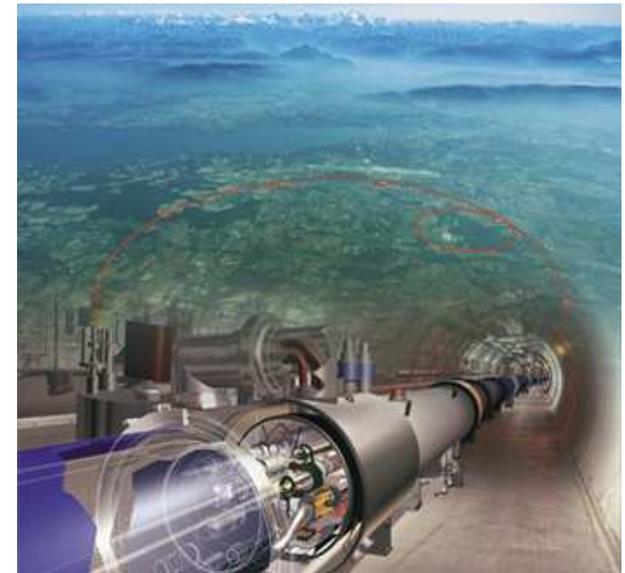
Le LHC (Large Hadron Collider)



Le LHC, projet mondial

- L'anneau utilise le tunnel creusé pour le LEP
- Proton contre proton :
 - Energie colossale : **14 TeV**
- Le projet LHC dépasse le cadre européen :
 - japonais, américains, chinois, ... y participent
 - Machine unique mondiale
 - détecteurs et défis techniques en proportion
 - Le plus puissant jamais construit
 - Coût ~1 Milliard d'euros

- Démarrage **CETTE ANNÉE!!**



L'accélérateur LHC

Quelques chiffres :

- La plus grande installation supraconductrice du monde :
1.9 K (-271.3 °C), hélium superfluide sur 27 km
- 96 tonnes d'Hélium liquide pour refroidissement
- Vide 10 fois plus poussé que sur la lune
- 120 MW de consommation électrique
- 350 MJ d'énergie par faisceau (~TGV à 200 km/h)!



La photographie



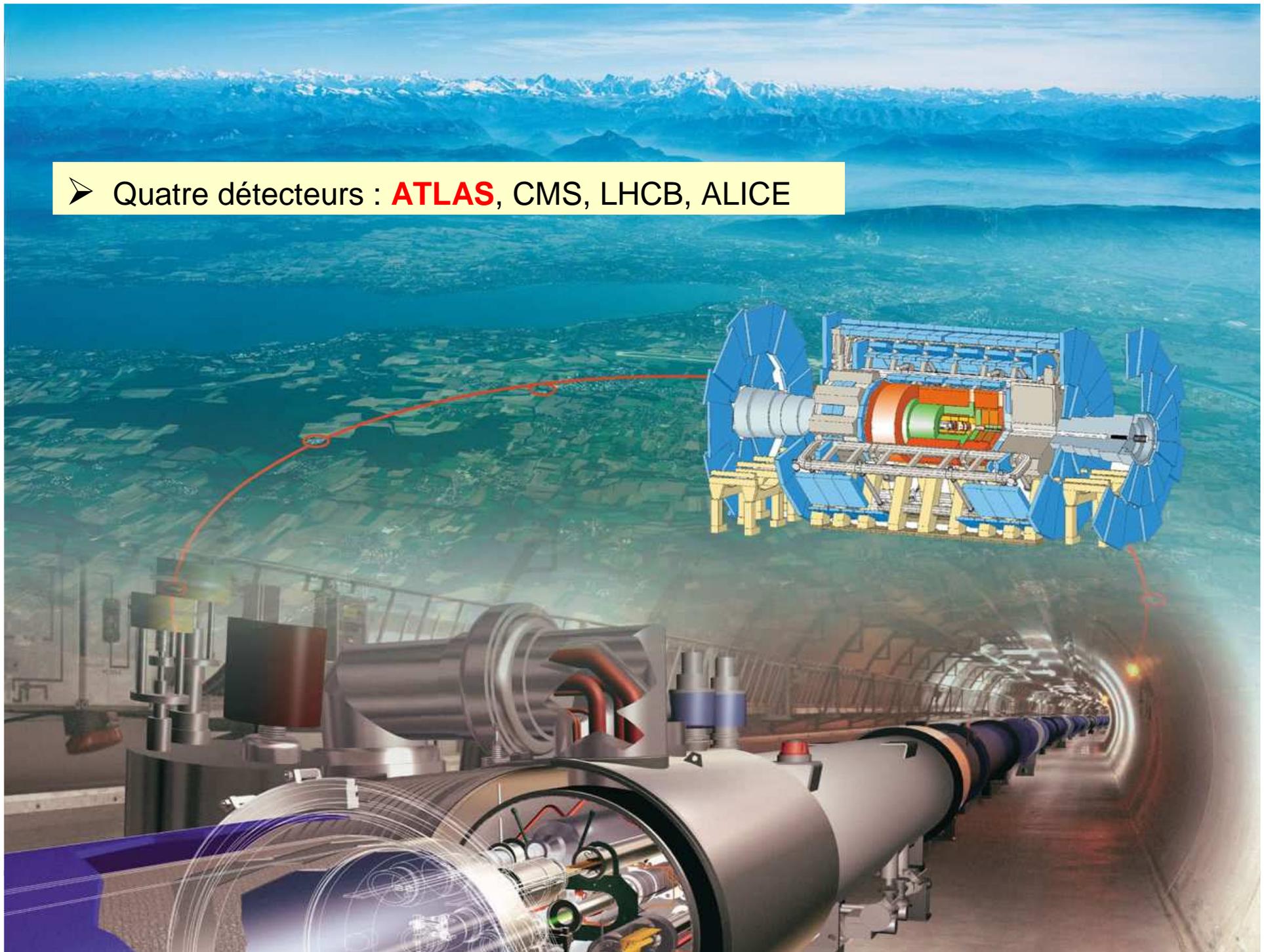
Le détecteur ATLAS

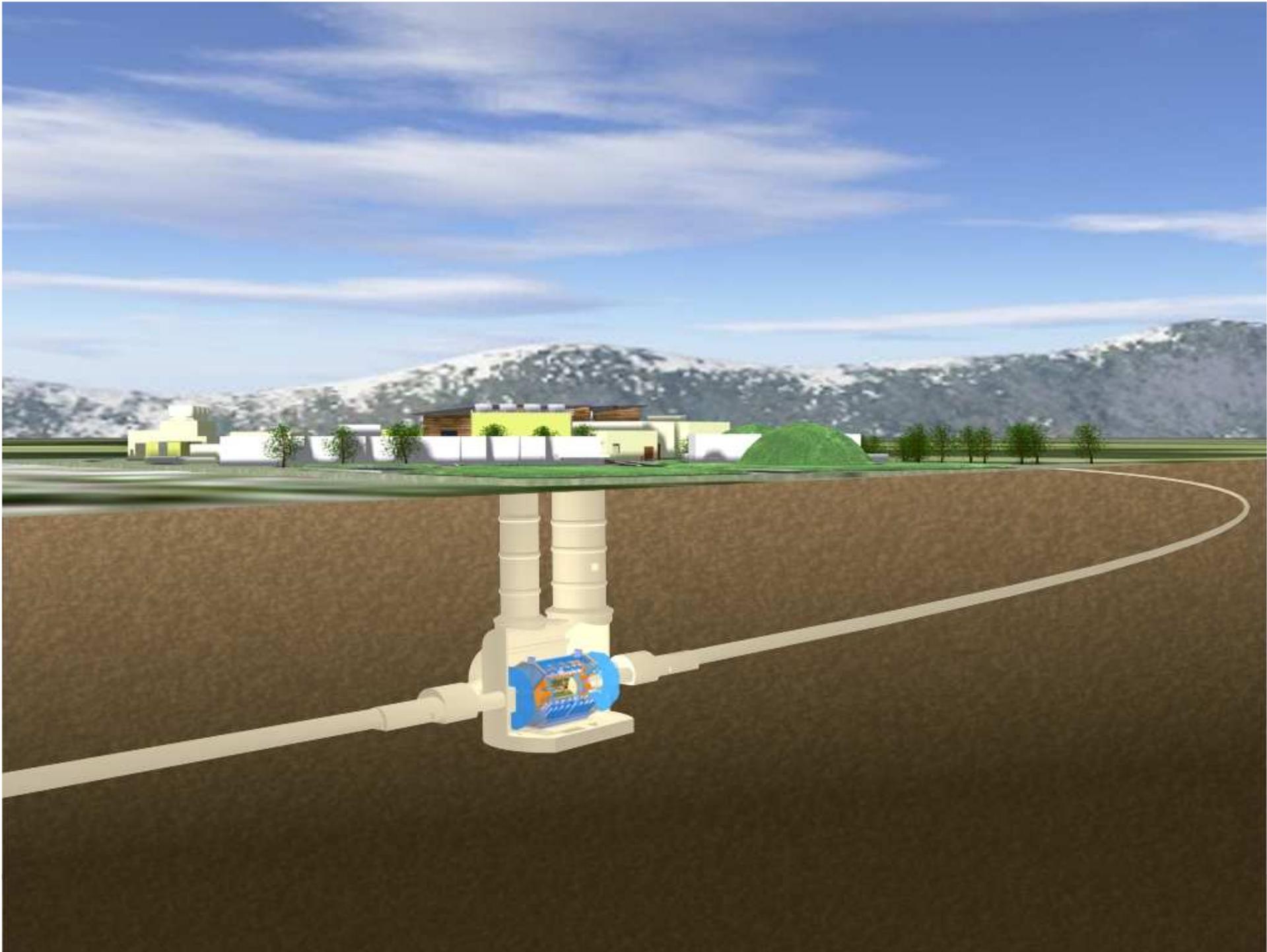
(A Toroidal Lhc ApparatuS)

- Assemblage de sous-détecteurs
- Les fonctions des sous-détecteurs
- Etat des lieux

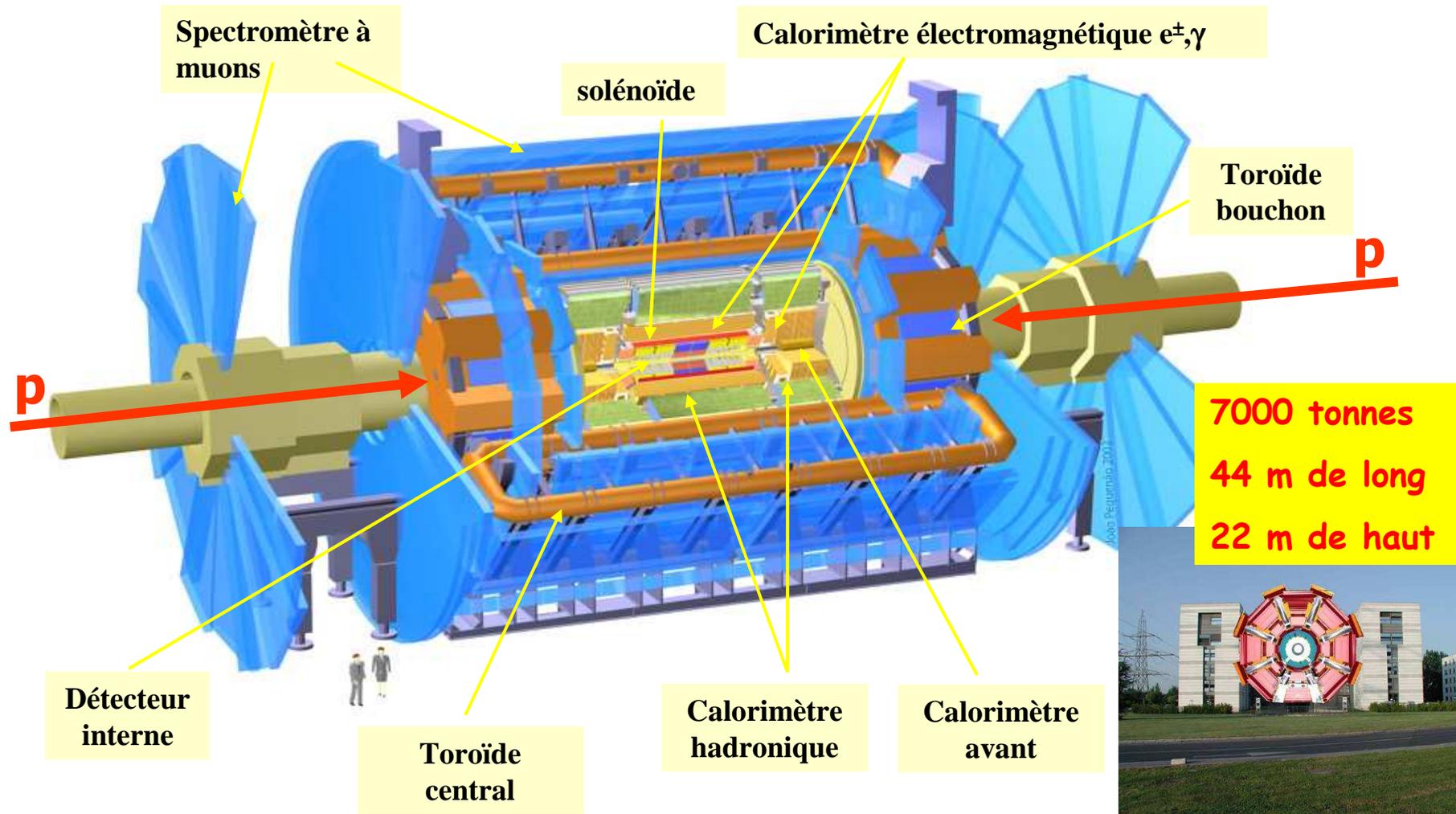


➤ Quatre détecteurs : **ATLAS**, CMS, LHCb, ALICE



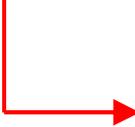


Le détecteur ATLAS



Assemblage de sous-détecteurs

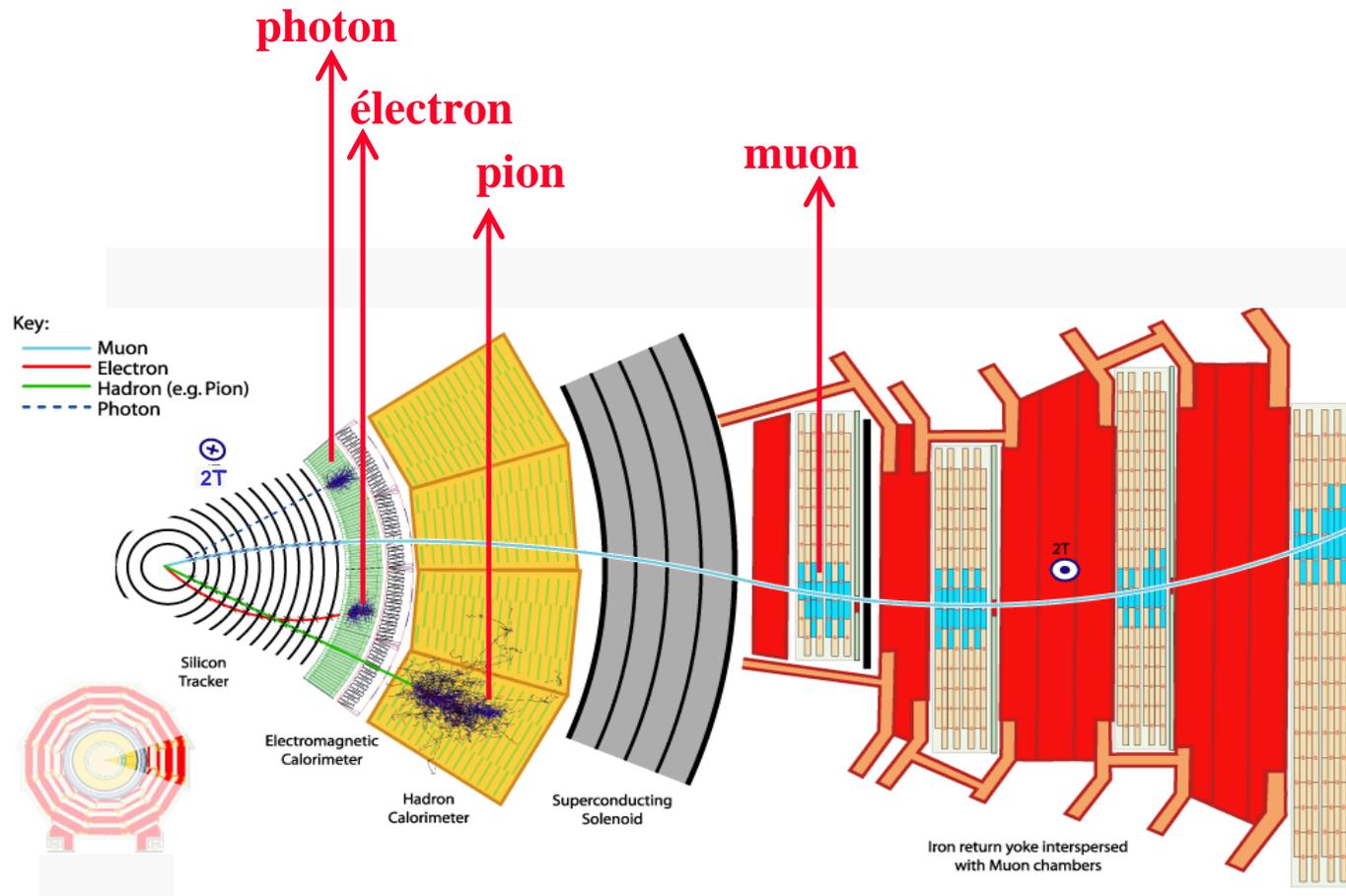
- Anatomie d'un détecteur : structure en oignon = assemblage de **sous-détecteurs**
- Couches internes = **trajectographes**
 - Une sorte de gigantesque appareil photo
 - Mesure de trajectoires et de quantité de mouvement
 - Précision de mesure de l'ordre de 10 microns
- **Systèmes calorimétrique** : mesurer l'énergie des particules
 - Calorimètre électromagnétique
 - Calorimètre hadronique
- A l'extérieur, **trajectographe à muons**
- Ces sous-détecteurs essayent de couvrir tout l'espace (**4π**)



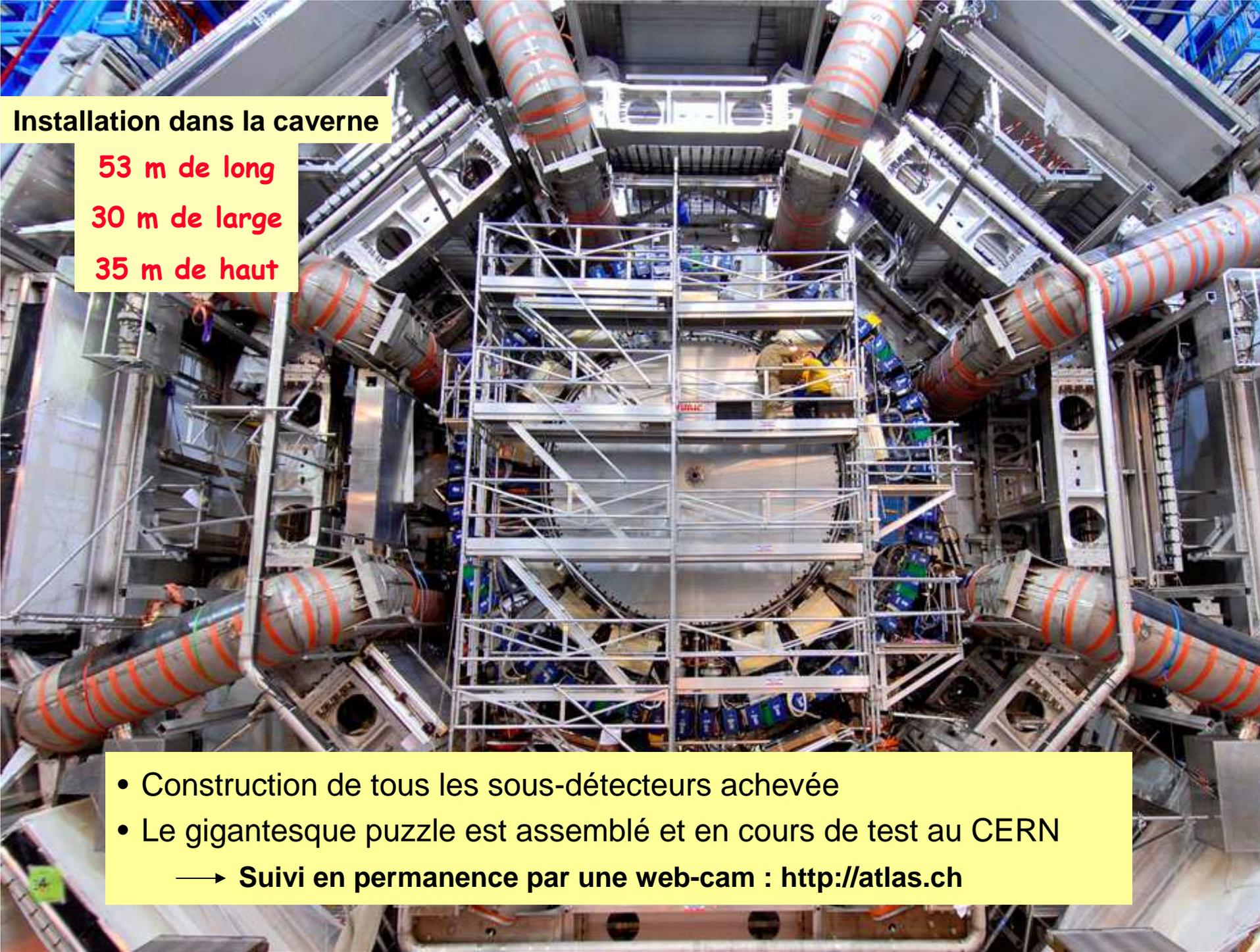
- **Identification des particules**

- **Mesure de leur énergie, vitesse, direction, temps de passage**

Bilan : toute la scène est filmée



Détecteur hermétique → ce qui reste pour faire la conservation de l'énergie (transverse) est donnée aux **neutrinos** ...



Installation dans la caverne

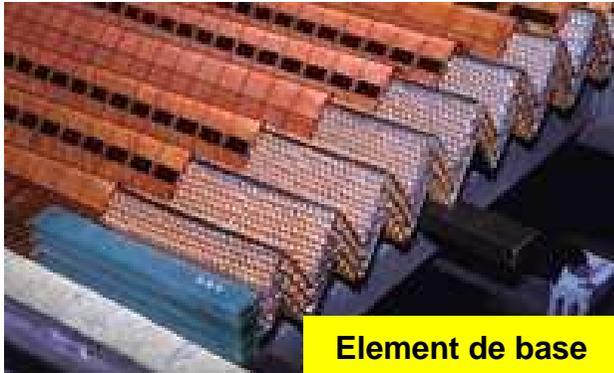
53 m de long

30 m de large

35 m de haut

- Construction de tous les sous-détecteurs achevée
- Le gigantesque puzzle est assemblé et en cours de test au CERN
→ Suivi en permanence par une web-cam : <http://atlas.ch>

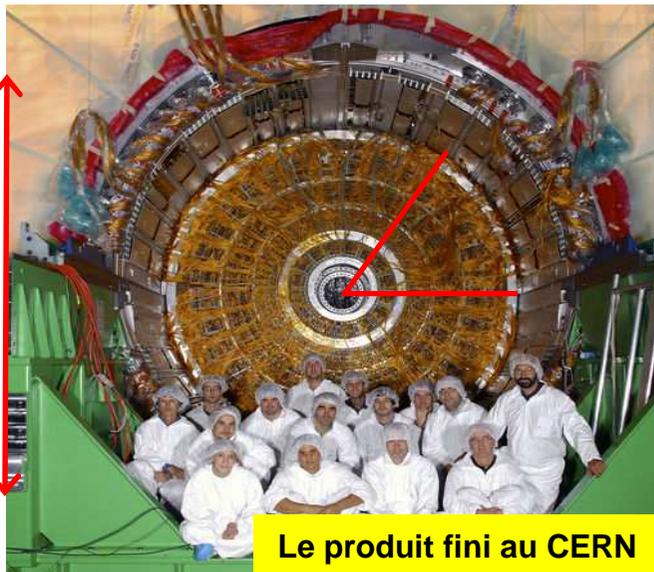
Construction au CPPM : calorimètre



Element de base

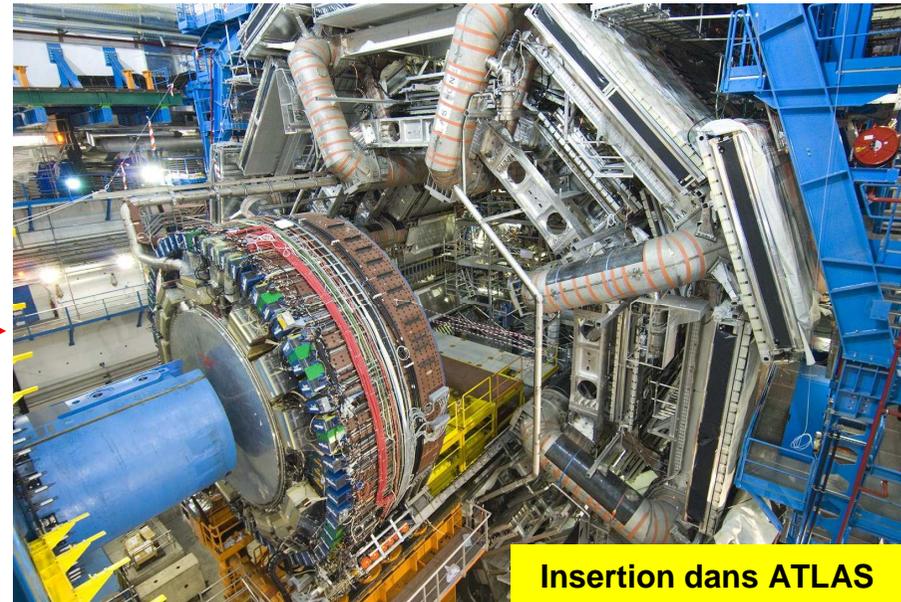


Assemblage au CPPM



4 mètres
25 tonnes

Le produit fini au CERN



Insertion dans ATLAS

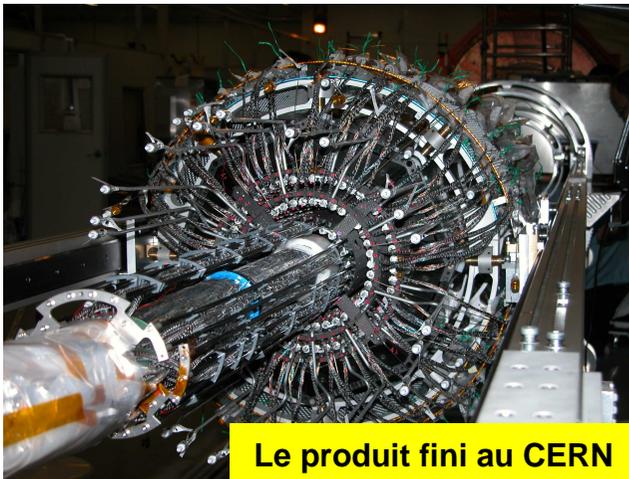
Construction au CPPM : trajectographe



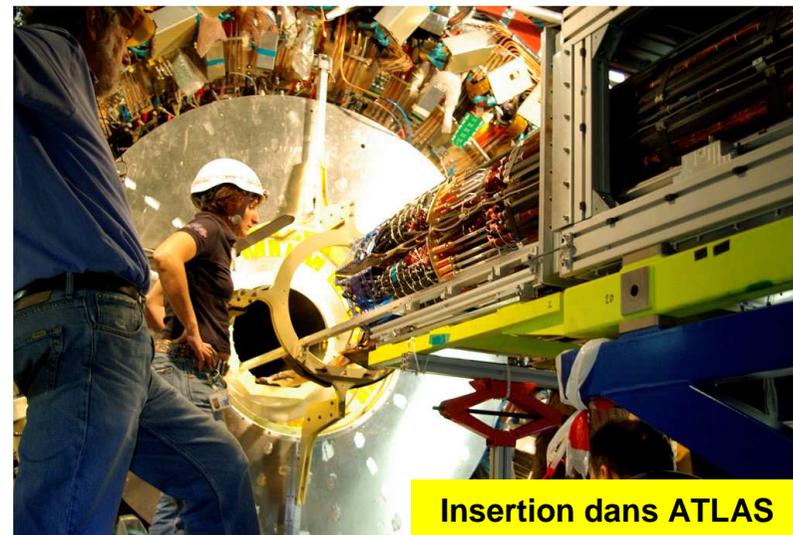
Element de base



Assemblage



Le produit fini au CERN



Insertion dans ATLAS

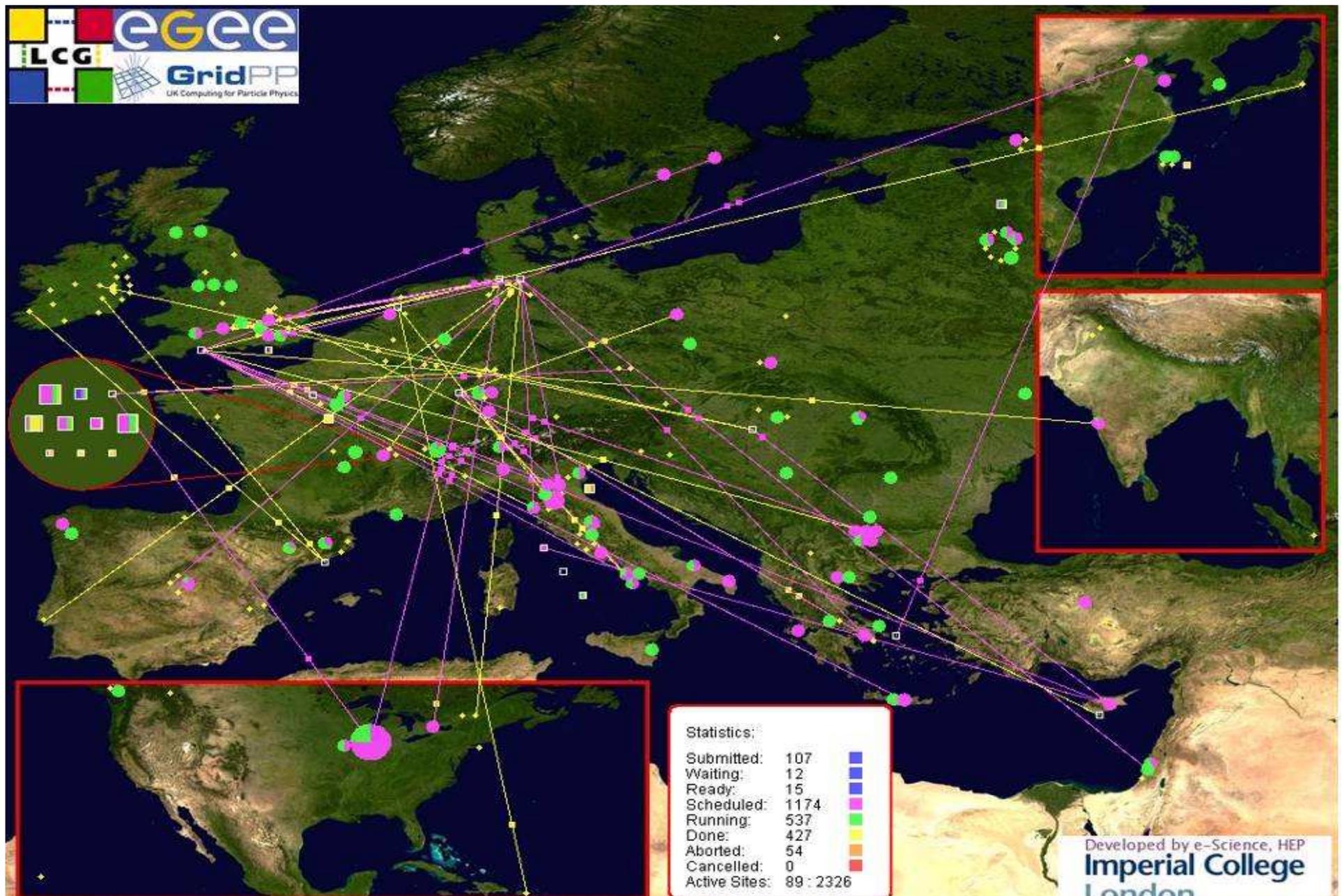
Le « clap » : déclenchement

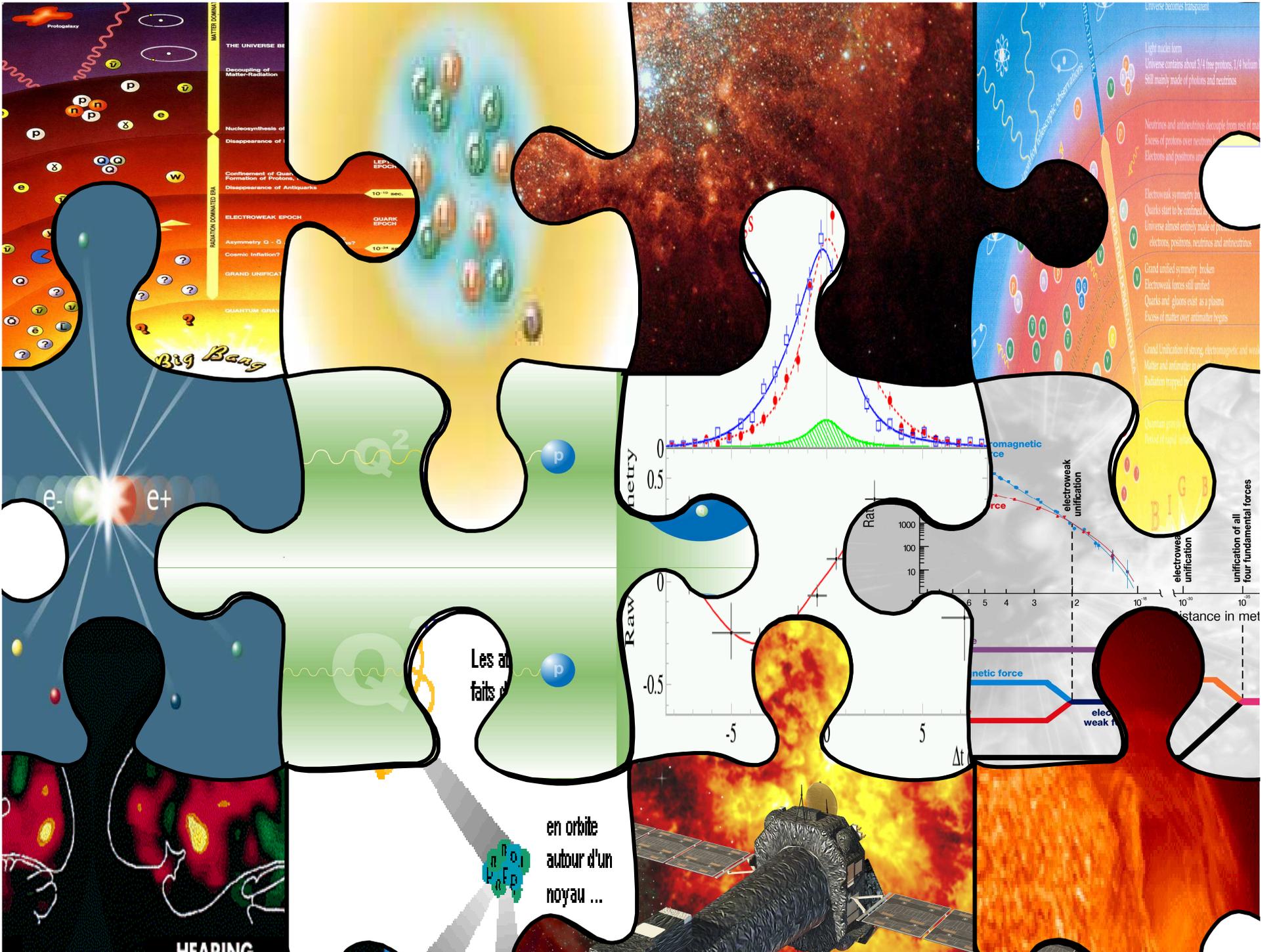


- 2800 paquets de 10^{11} protons se croisent toutes les 25 ns !
 - Chaque proton parcourt l'anneau 11000 fois par seconde
 - En 10 heures, il aura effectué l'aller-retour vers Neptune (10 milliards de km)!
- 1 Milliard d'événements sont produits dans ATLAS chaque seconde !!
 - débit d'information \equiv 20 comm. téléphoniques simultanées par personne sur Terre
- Analyse et sélection des événements en temps réel
 - Electronique rapide et complexe, véritables défis
 - 100 événements sélectionnés par seconde
- 1 PetaOctet (10^{15}) de données enregistrées par an
 - \equiv 1 millions de CD-ROM, soit une pile de 1.5 km (5 tours Eiffel)
- Grille de calcul = analogue d'un réseau électrique
 - Mise en commun des ressources mondiales (calcul + stockage)
 - Autres applications (Sciences de la Terre, Biologie, industrie, ...)



Worldwide LHC Computing Grid





LHC 2008 - SeaMonkey

File Edit View Go Bookmarks Tools Window Help

Back Forward Search Print

Bookmarks Members WebMail Connections BizJournal SmartUpdate Mktplace

CERN home > LHC 2008 English | Français

 **LHC 2008 - Journée Portes Ouvertes**

Home Journée Portes Ouvertes Programme Infos Pratiques LHC Sponsors

Dimanche 6 Avril 2008 : Plongez dans le fabuleux monde du LHC !

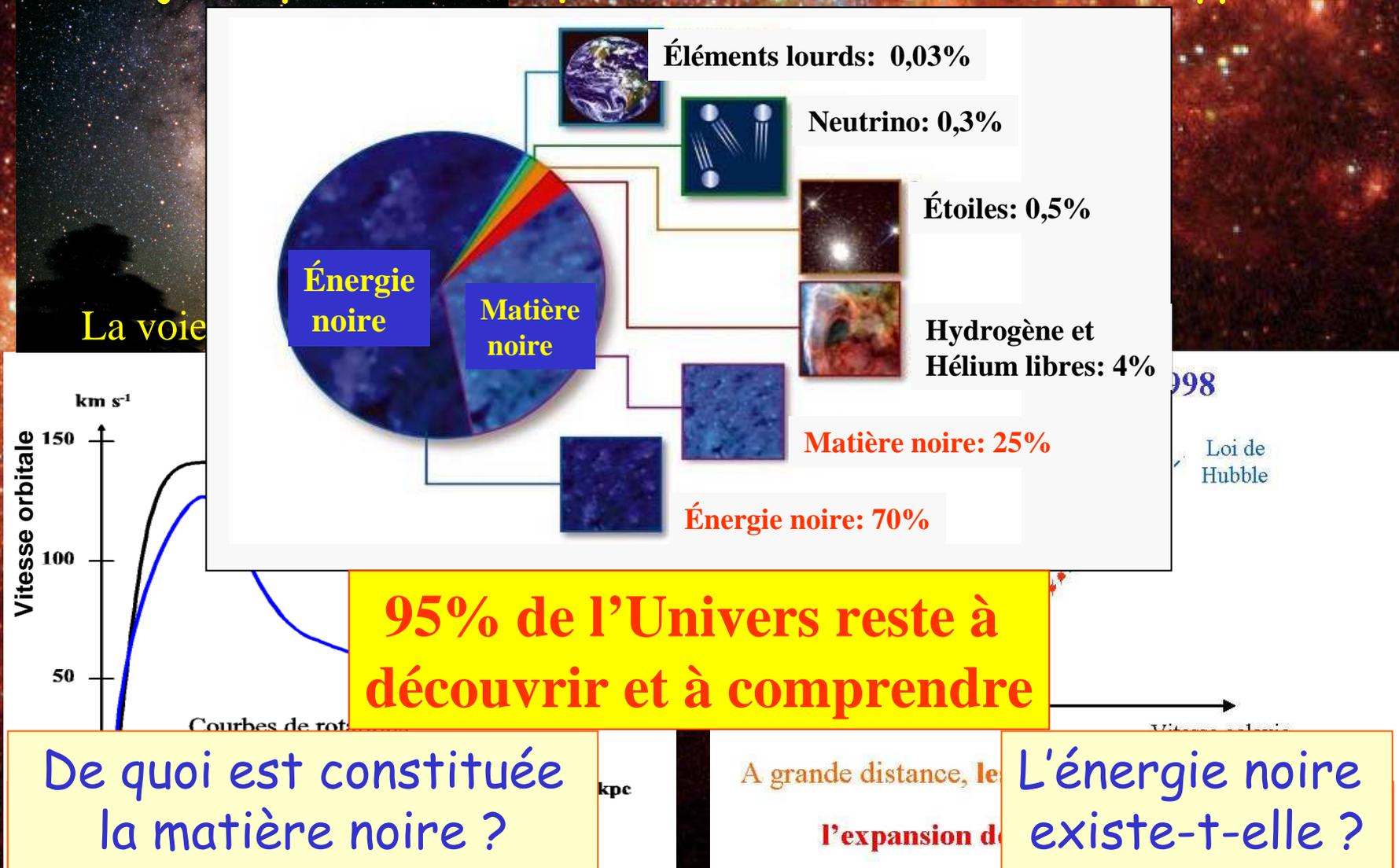


<http://lhc2008.web.cern.ch/LHC2008/index.html>

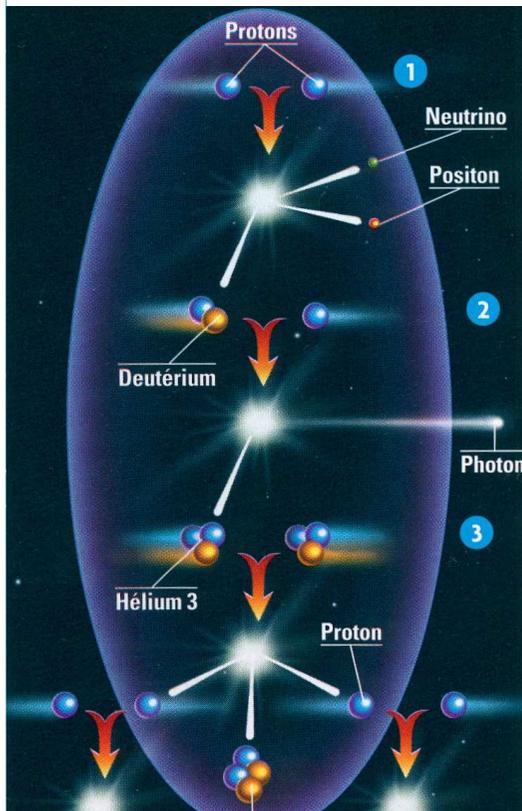
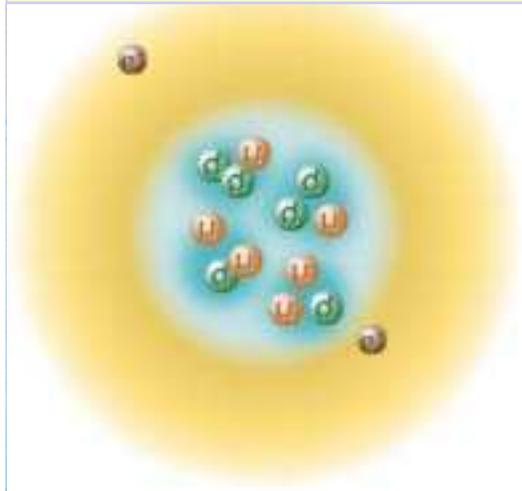
SPARES

La constitution de l'Univers en question

... la majeure partie de ce qui constitue l'univers nous échappe



Comprendre l'Univers



Les objets du cosmos se forment

- Les astres naissent vivent et meurent
- ... et la vie apparaît

NOUS SOMMES ICI !!

< 14 milliards d'années

10¹⁰ years
2.7 degrees Kelvin

L'univers est en route

- Les atomes sont créés
- L'univers devient transparent

10⁹ years
10 degrees Kelvin

~300 000 ans

10⁵ years
4000 degrees Kelvin

Nucléosynthèse

- Les noyaux sont créés

qqs min

3 minutes
10⁹ degrees 0.1 MeV

Les neutrinos s'échappent

Baryogénèse

- Les protons et les neutrons sont créés

< 10 s

1 second
10¹⁰ degrees 1 MeV

Soupe primaire de particules

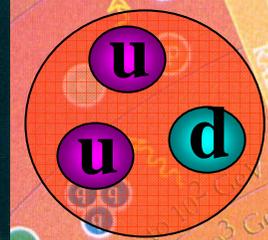
- L'antimatière disparaît
- Les interactions se différencient
- Les particules deviennent massives

< 10⁻⁹ s

10⁻¹⁰ seconds
10¹⁵ degrees 10² GeV

10⁻³⁵ seconds
10²⁸ degrees 10¹⁵ GeV

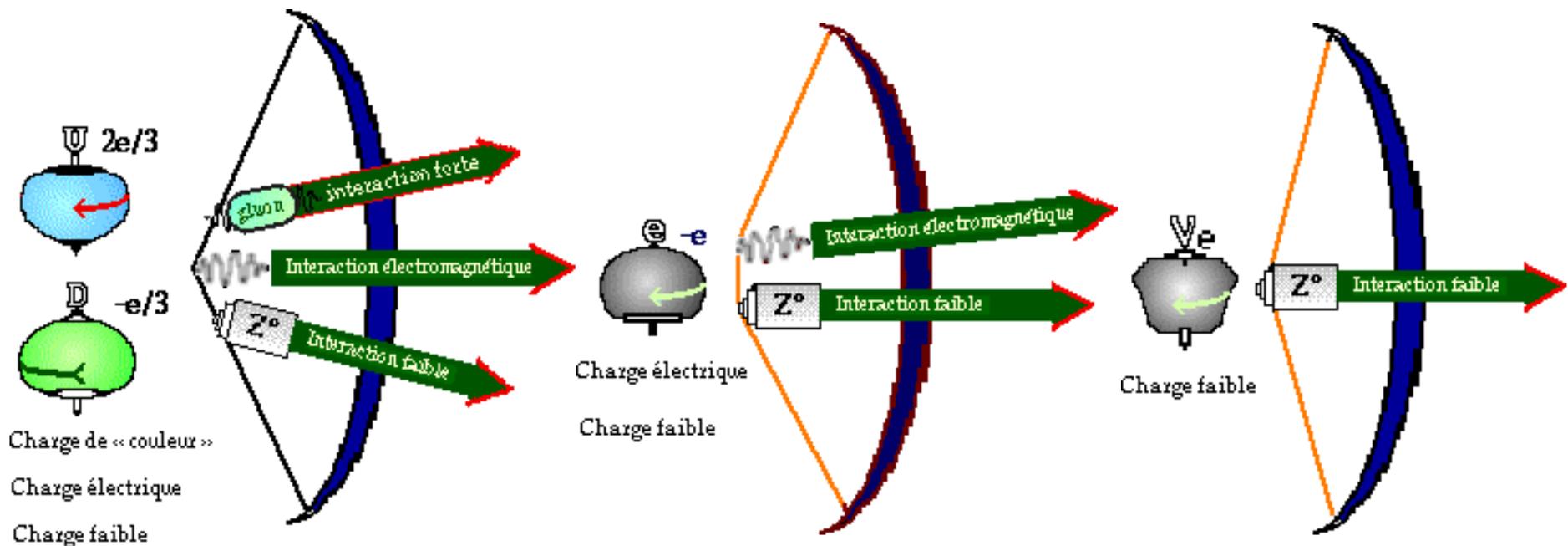
La physique des particules s'intéresse à ce premier milliardième de seconde



Charges et messagers

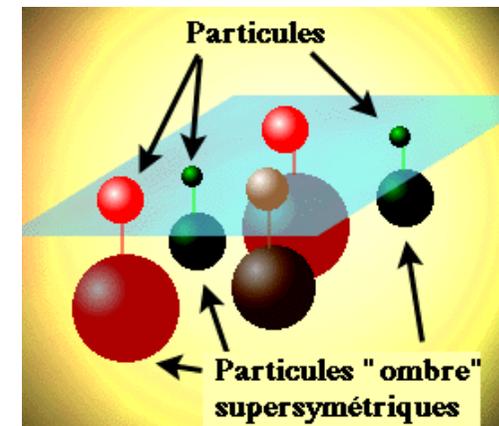
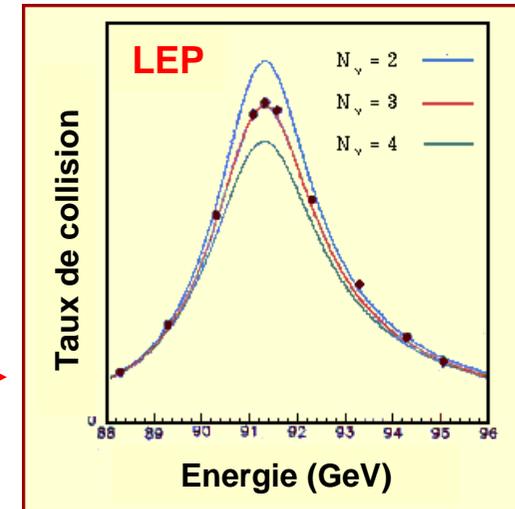
La capacité d'interaction des particules est représentée par leur "charge" :

- La **charge électrique** pour l'interaction électromagnétique
- La **charge de couleur** pour l'interaction forte
- La **charge d'isospin** pour l'interaction faible
- La **masse** pour l'interaction gravitationnelle



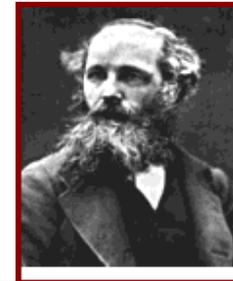
Le Zoo est-il complet?

- Zoo des corpuscules connues à ce jour :
 - 6 quarks, 6 leptons
 - 1 photon, 8 gluons, 3 bosons lourds W^+ , W^- et Z^0
- Ce Zoo est-il complet ?
- Pourquoi y a-t-il 3 familles ? →
- Les quarks et les leptons sont-ils élémentaires ?
 - Explorés actuellement jusqu'à 10^{-18} m
- Découvrira-t-on de nouvelles particules lourdes ?
 - Zoo théorique:
 - Bosons de Higgs
 - Particules super-symétriques
 - Découvrir des terres inconnues ?

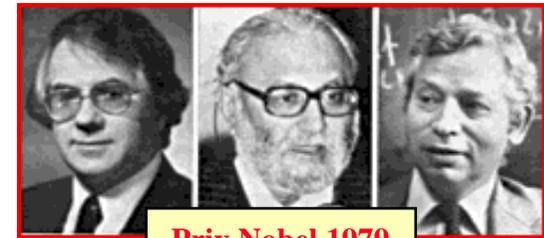


Unification des forces

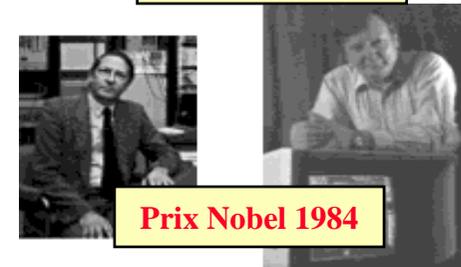
- Gravitation (Newton)
 - Chute des corps et mouvement des astres = même phénomène, deux facettes d'une seule interaction
- Electricité et magnétisme
 - 1868, **Maxwell** réunit l'électricité et le magnétisme
 - C'est l'électromagnétisme
- Forces électrofaibles
 - Dans les années 1970, **Glashow, Weinberg et Salam** proposent une théorie unique des interactions électromagnétiques et faibles
 - Ils prédisent les bosons W^+ , W^- et Z^0 , découverts en 1983 par **Rubbia et Van der Meer**
- Recherche d'une unification des autres interactions



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

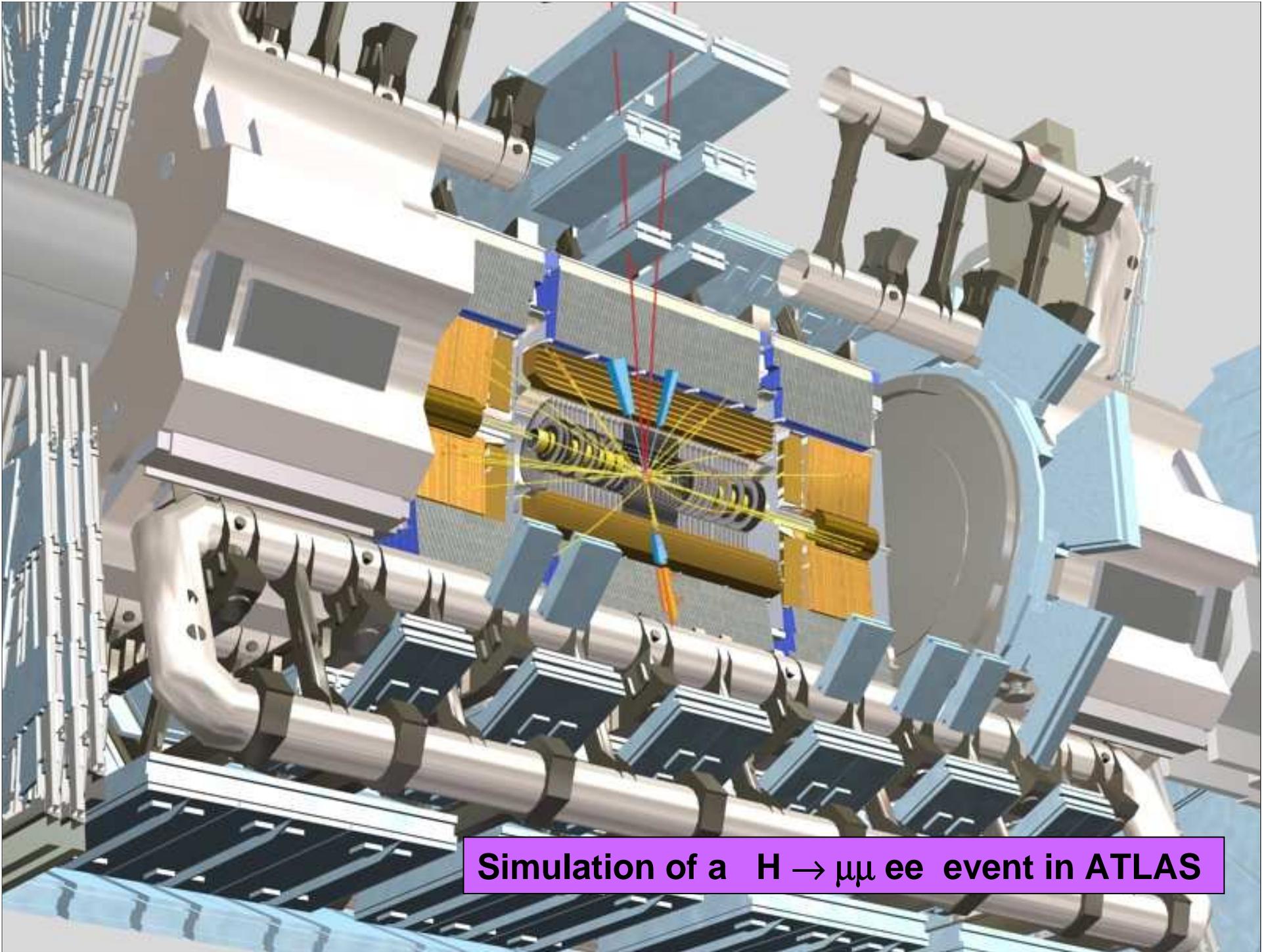


Prix Nobel 1979



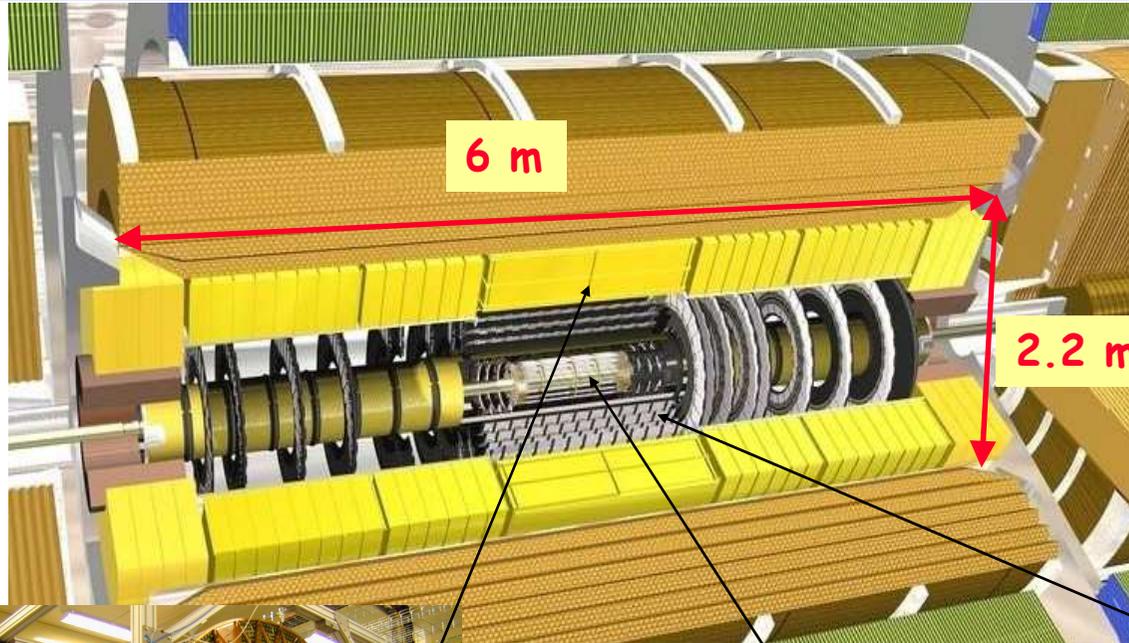
Prix Nobel 1984

↳ **Supersymétrie, cordes, gravité quantique**

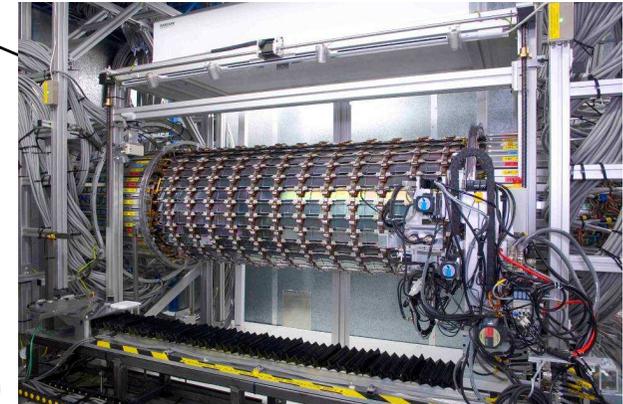
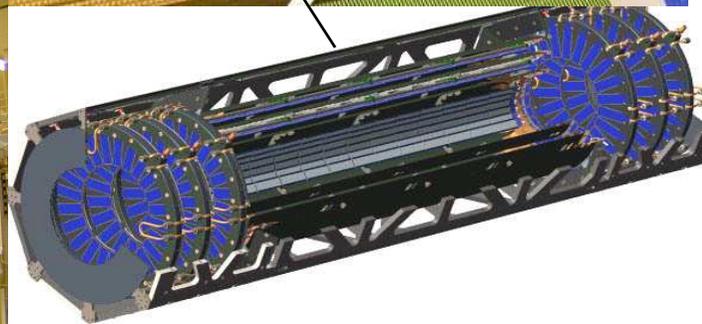
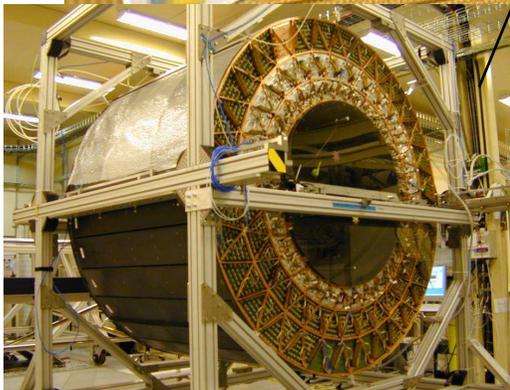


Simulation of a $H \rightarrow \mu\mu ee$ event in ATLAS

Les trajectographes d'ATLAS



- Une sorte de gigantesque appareil photo
- 3 couches différentes
- Précision de mesure de l'ordre de 10 microns !



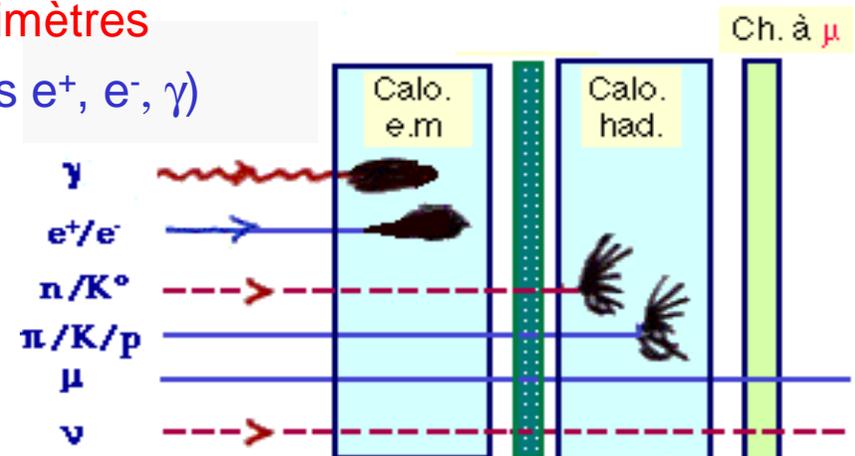
- 100 millions de pixels (50X400 μm , Si)
- Taux de radiations : 50 kGy par an

Le système calorimétrique d'ATLAS

- Identifier les particules
- Mesurer leur énergie

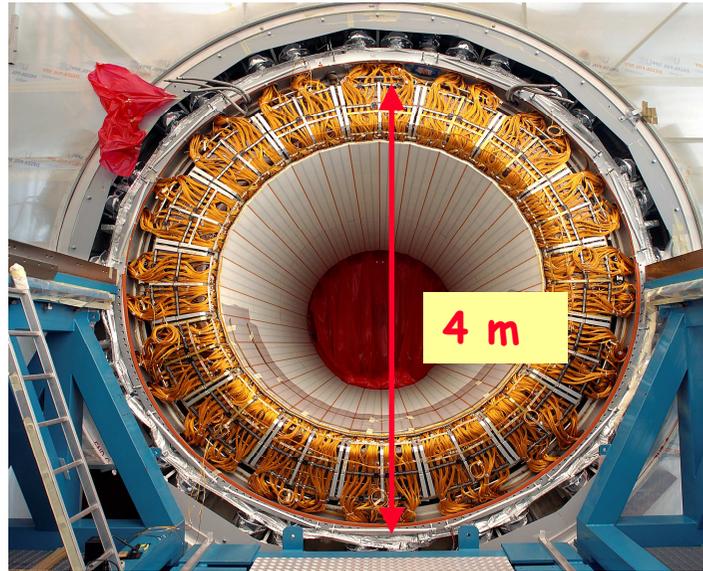
- Passage des particules dans la matière :
 - Electrons vite arrêtés par matière, car faible masse et rayonnent beaucoup
 - Autres particules «rayonnent» peu, mais interagissent nucléairement, ... sauf muons
 - Les muons sont donc les plus pénétrants (sauf neutrinos)
- Dispositif classique de **2 couches de calorimètres**
 - Calorimètre électromagnétique (gerbes e^+ , e^- , γ)
 - Calorimètre hadronique

Traversée des couches de détecteurs par diverses particules

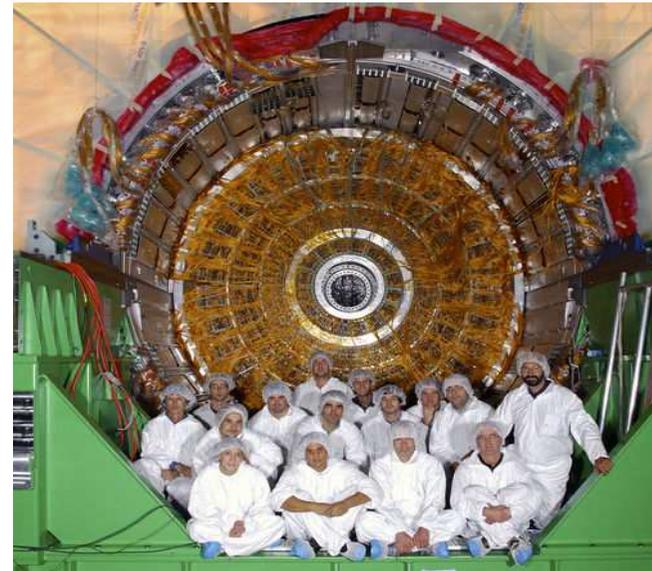


Le calorimètre électromagnétique d'ATLAS

partie centrale



partie « tonneau »



Géométrie en accordéon

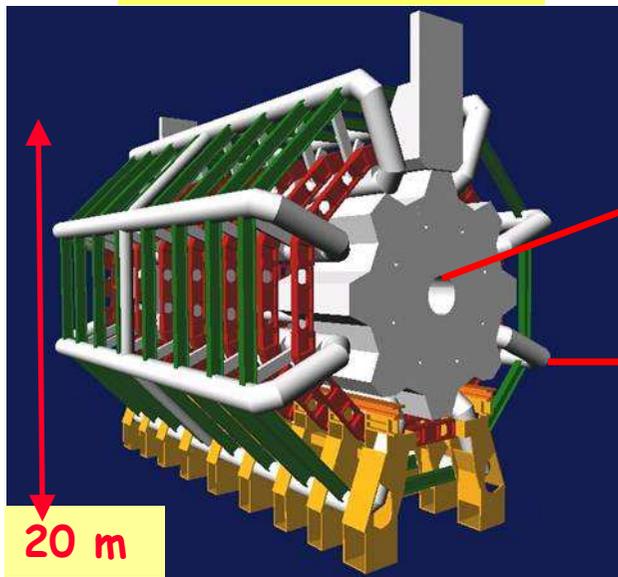


Le tout baigne dans de l'argon liquide (90 K)

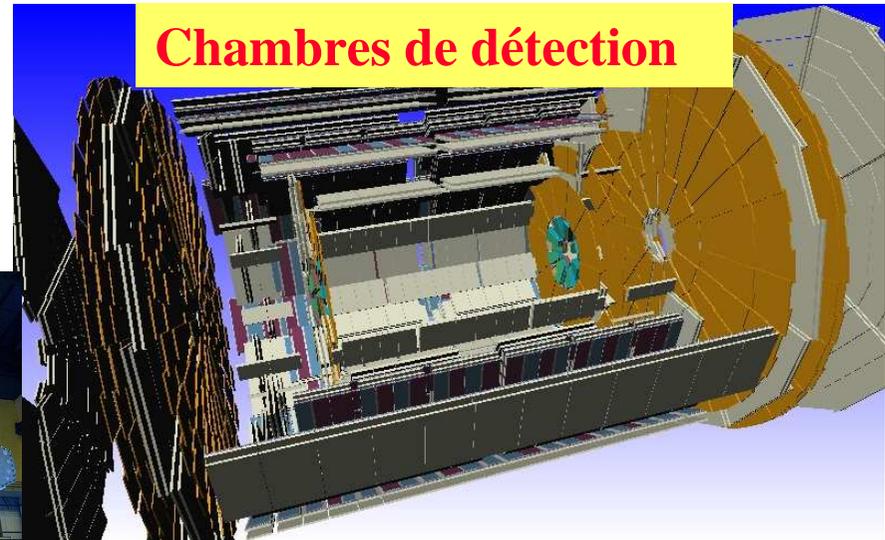
Le trajectographe à muons d'ATLAS

- Reconstruire les trajectoires des muons
- Mesurer leur impulsion
- Créer un champ magnétique pour courber les trajectoires

Aimant toroïdal



Chambres de détection



Les retombées

Elles sont innombrables... Quelques exemples directs :

- La radioactivité



Imagerie médicale

- La mécanique quantique



Transistor, laser, GPS, horloge atomique, ...

- Les processus de fission ... et de fusion



La production d'énergie

... et d'autres indirects parfois insolites

- Le transport d'information

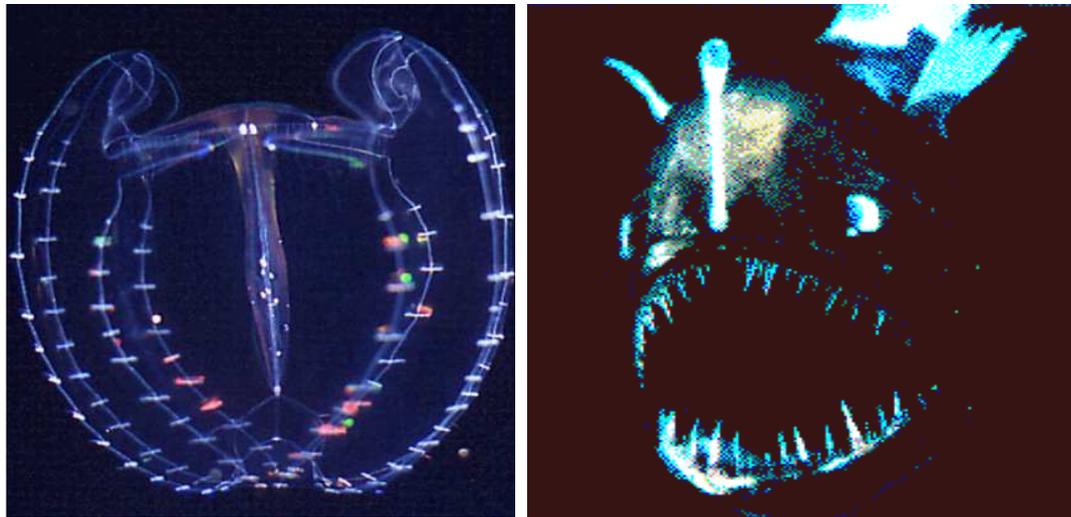


Le web ... et demain la grille de calcul

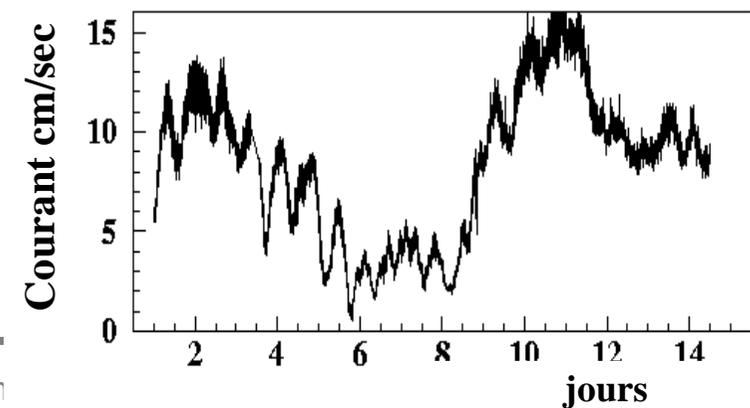
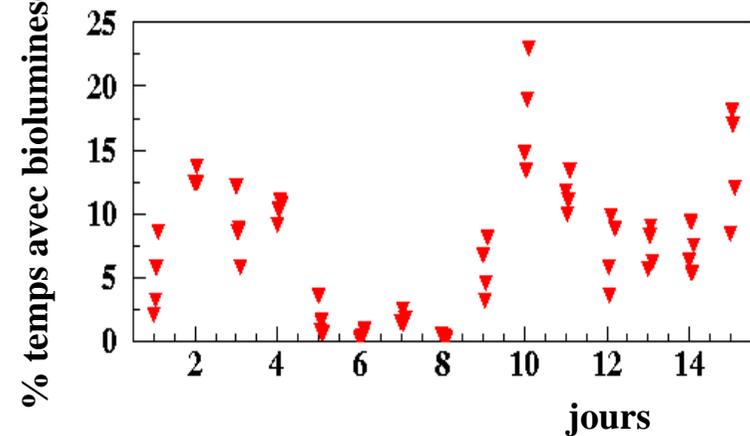
Bioluminescence : la lumière des espèces naturelles

Bruit de fond pour la détection des neutrinos

Données inédites pour les biologistes de la mer



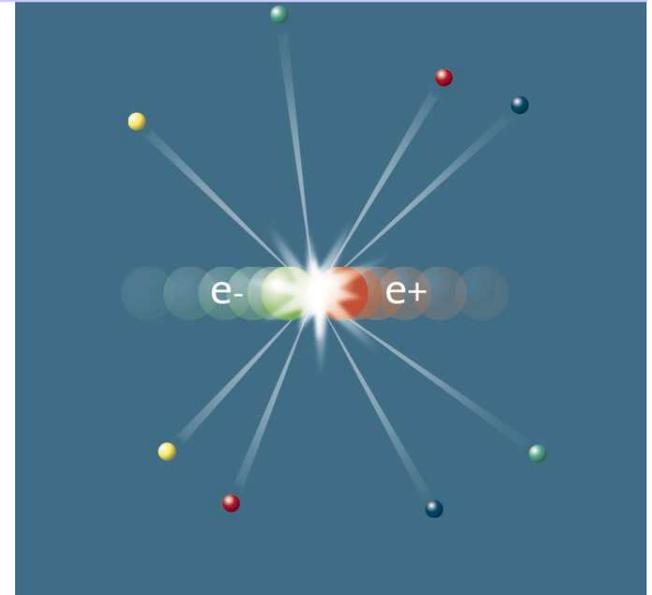
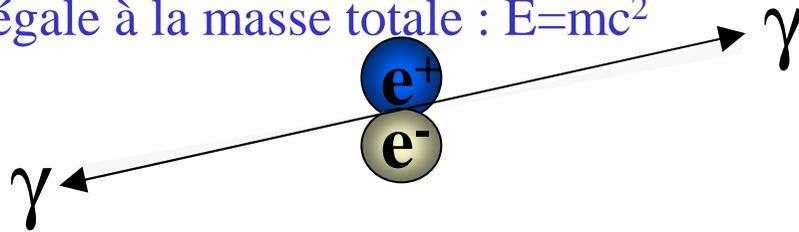
Correlations entre la bioluminescence et le courant sous-marin



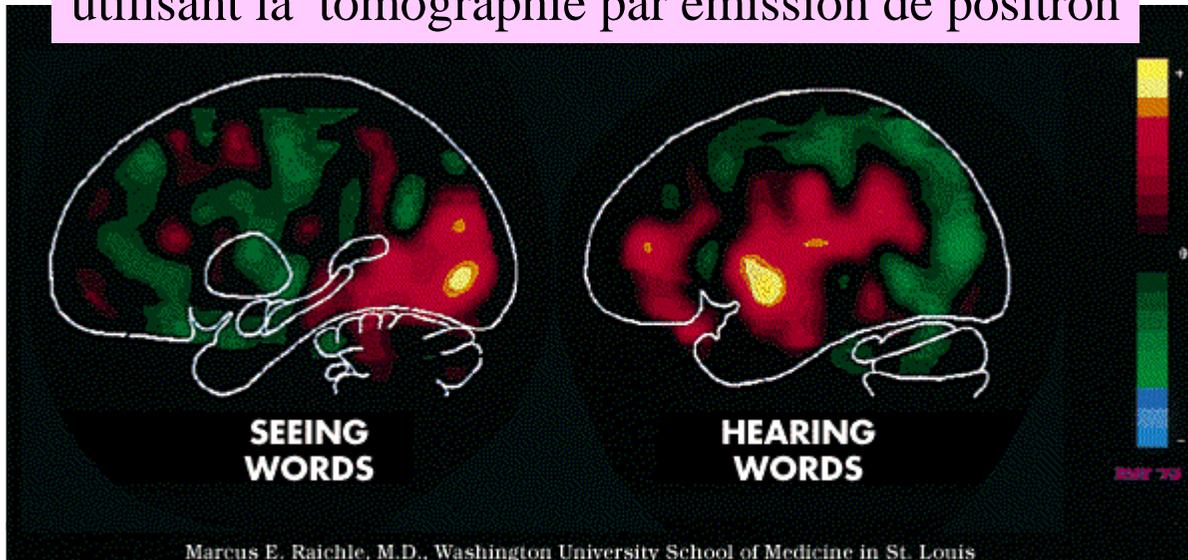
Quand l'antimatière rencontre la matière ...

Elles s'annihilent en produisant une énergie égale à leur énergie sous forme d'autres particules et de photons.

Si elles sont au repos alors l'énergie produite est égale à la masse totale : $E=mc^2$

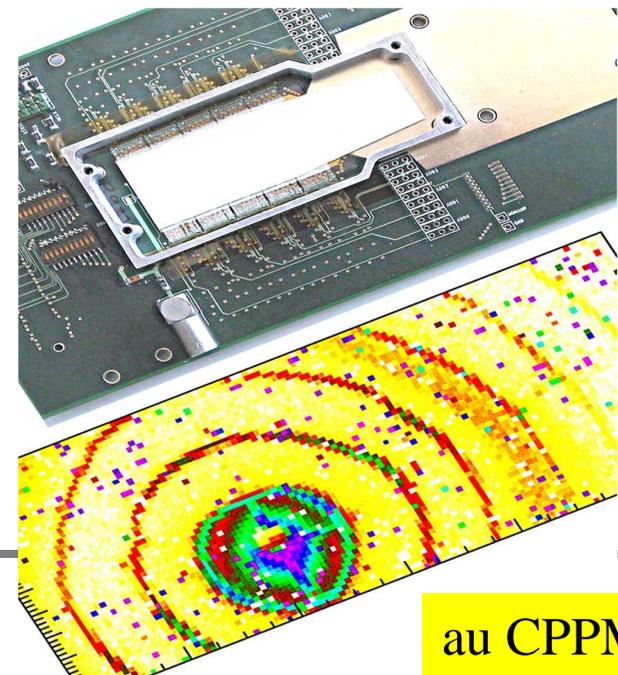


Permet de faire des images médicales en utilisant la tomographie par émission de positron



Marcus E. Raichle, M.D., Washington University School of Medicine in St. Louis

The PET scan on the left shows two areas of the brain (red and yellow) that become particularly active when volunteers read words on a video screen: the primary visual cortex and an additional part of the visual system, both in the back of the left



au CPPM

Conclusions

- But = comprendre les tous premiers instants de la création de l'Univers
- L'infiniment petit gouverne l'évolution de l'Univers et donc l'infiniment grand
 - Connaître les constituants fondamentaux (primordiaux) de l'Univers
 - Comprendre les forces et mécanismes qui gouvernent leurs interactions
 - Comprendre l'origine et la masse de la matière
- Deux axes de recherche complémentaires (+ nombreuses retombées)
 - **Accélérateurs de particules** → le LHC à partir de 2008
 - **Astroparticules** comme messagers de l'Univers → l'exploration s'approfondit à l'aide de nombreux projets comme ANTARES en méditerranée (neutrinos)
- Assembler peu à peu les pièces du puzzle



À la croisée des deux infinis