

ATLAS au LHC, un projet mondial de physique des particules



Fabrice Hubaut

CPPM/IN2P3 - Université de la Méditerranée
Marseille, FRANCE



IN2P3
Les deux infinis



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

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 2009 : ACTION!

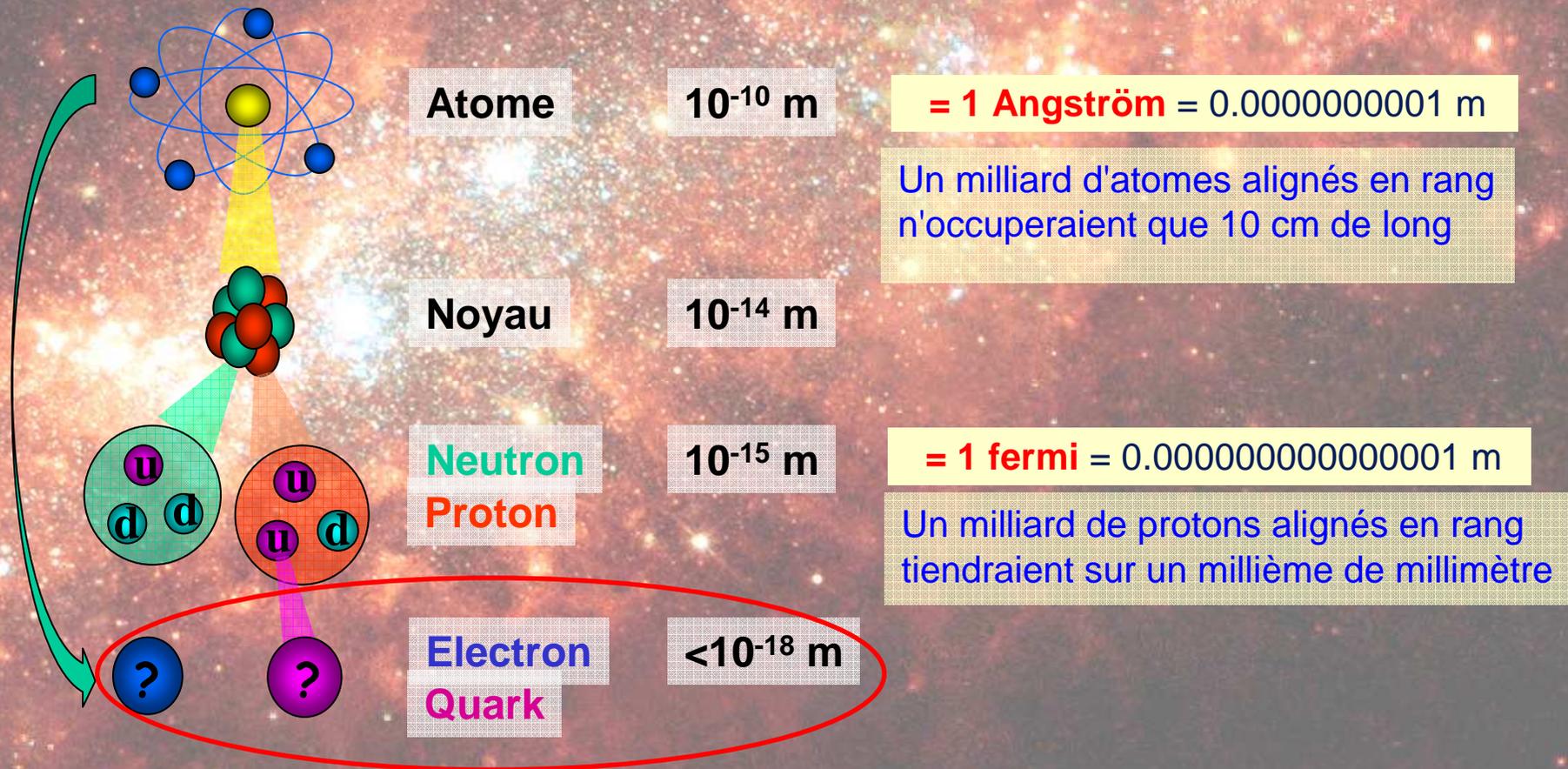
Le décor



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!

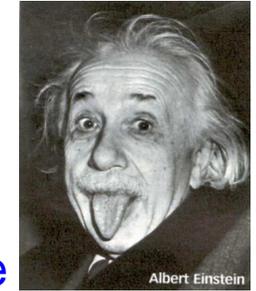
Les vitesses et les énergies

- 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 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 sont à la fois infimes, car concernent de minuscules corpuscules ... et très importantes à leur échelle, car les vitesses sont très importantes

- 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

- Remarque: l'électronvolt (eV) est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt

$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

Les acteurs

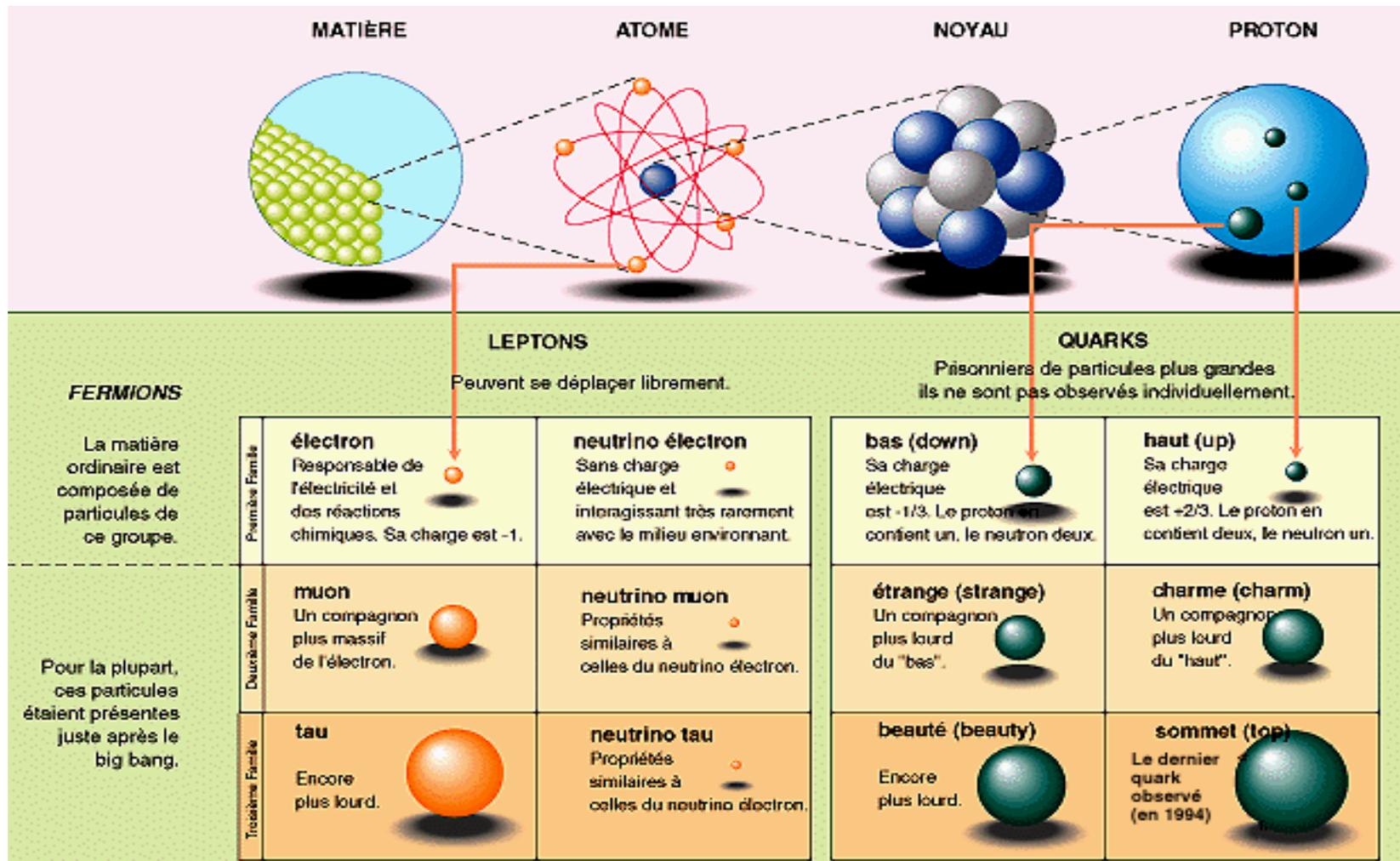


Plongée dans l'infiniment petit

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

Modèle Standard

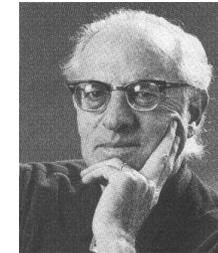
Panorama des particules



Des découvertes étalées sur 1 siècle

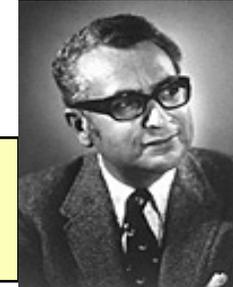
- Electron : 1897
- Muon : 1937
- Neutrino-e : 1956
- Neutrino- μ : 1962
- Quarks up, down et étrange : 1964
- Quark charmé : 1974
- Quark de beauté : 1977
- Tau : 1975
- Quark top : 1995
- Neutrino- τ : 2000

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



F. Reines
(1918-)
Prix Nobel 1995

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

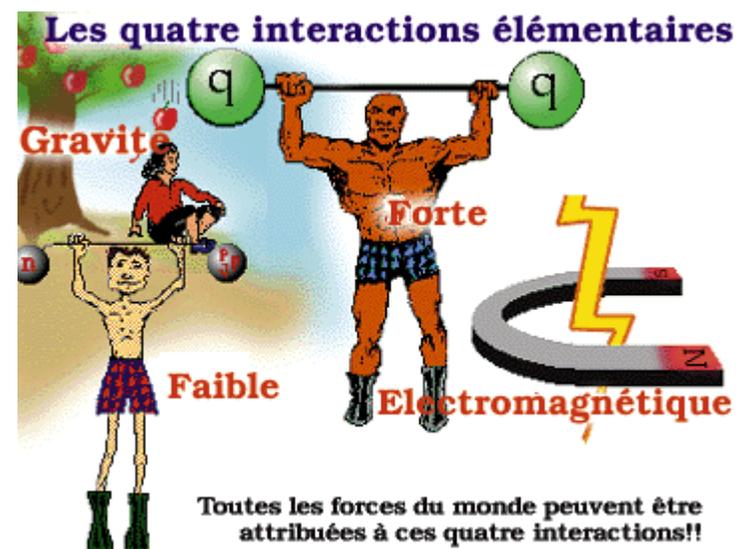


B. Richter et S. Ting
Prix Nobel 1976

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, ...)

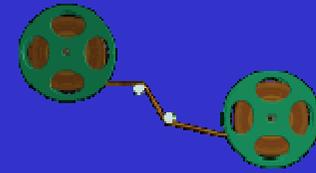


Interactions et messagers

- 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

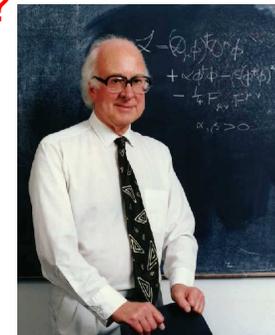
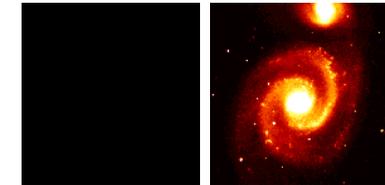


Les intrigues



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 \rightarrow boson de Higgs ?
- L'unification des forces \rightarrow supersymétrie, cordes, ...?
- Où est passée l'antimatière ? Asymétrie matière/antimatière
- Le graviton et les ondes gravitationnelles



Mr Higgs



La scène



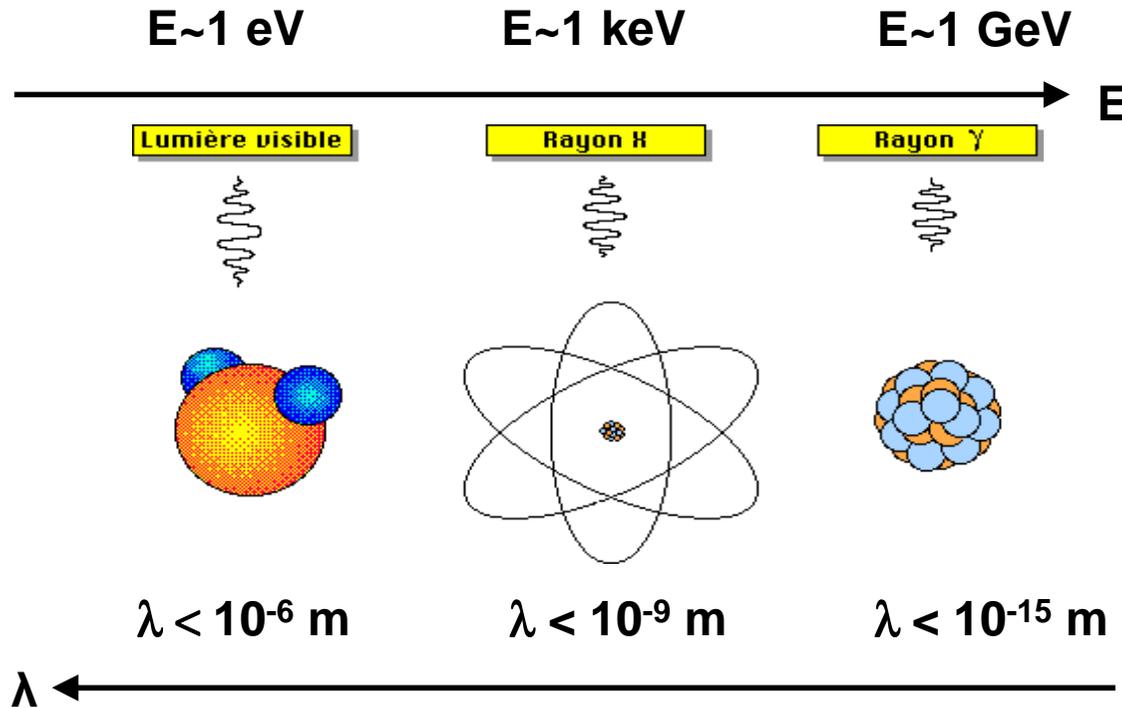
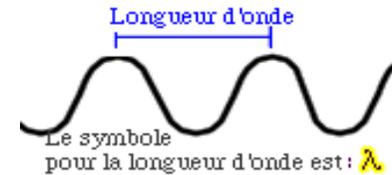
Pourquoi faut-il de hautes énergies ?

- 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

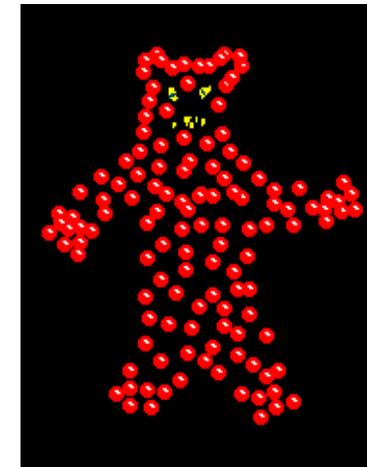
Le LHC, Large Hadron Collider

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 ...

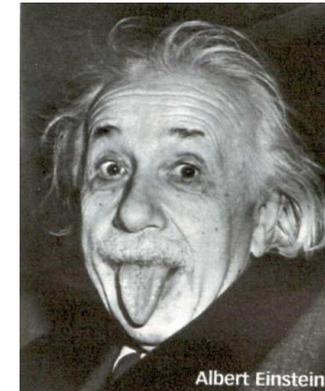
$$E + E > m c^2$$

- 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!

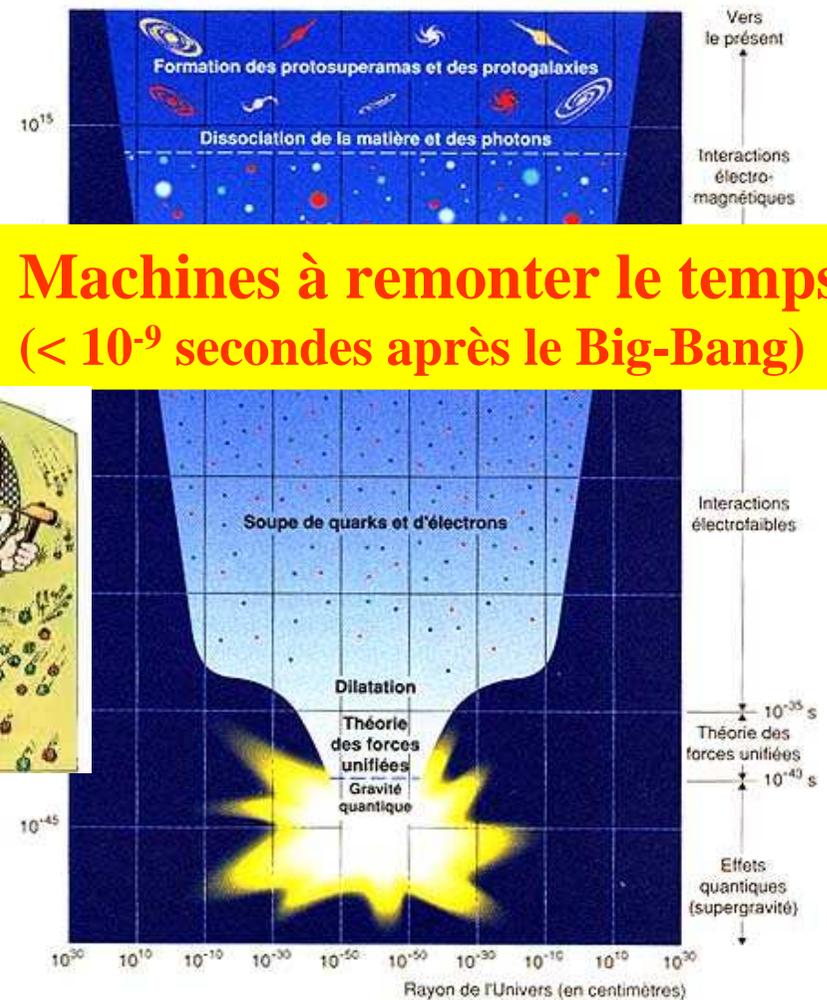


Les accélérateurs de particules

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 Cern: une aventure mondiale

➤ Création en 1954 de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

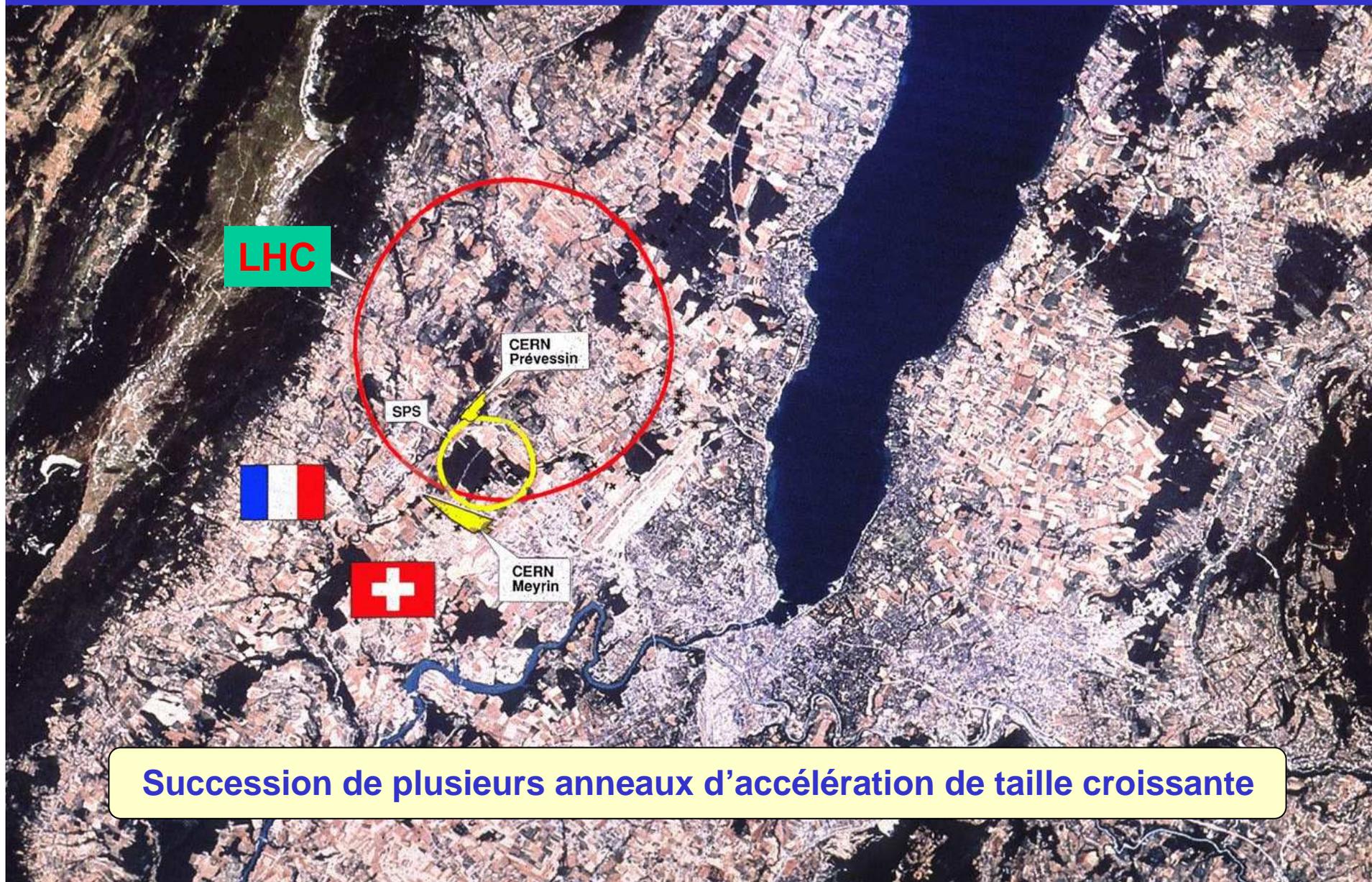
- les Européens s'unissent pour leur science fondamentale, dépassée au lendemain de la seconde Guerre mondiale: situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève, le Cern a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne
- Objectif: collaboration entre États européens pour les recherches civiles nucléaires de caractère **purement scientifique et fondamental**. Pas de militaire!
- Cela perdure aujourd'hui, tourné vers la physique des particules: la découverte des constituants et des lois de l'Univers

➤ Une organisation internationale

- Le CERN compte vingt États membres européens...
- ... mais de nombreux pays non européens participent également à ses activités
- Des scientifiques de quelques 580 instituts et universités du monde entier (85 nationalités des 5 continents!) utilisent les installations du CERN

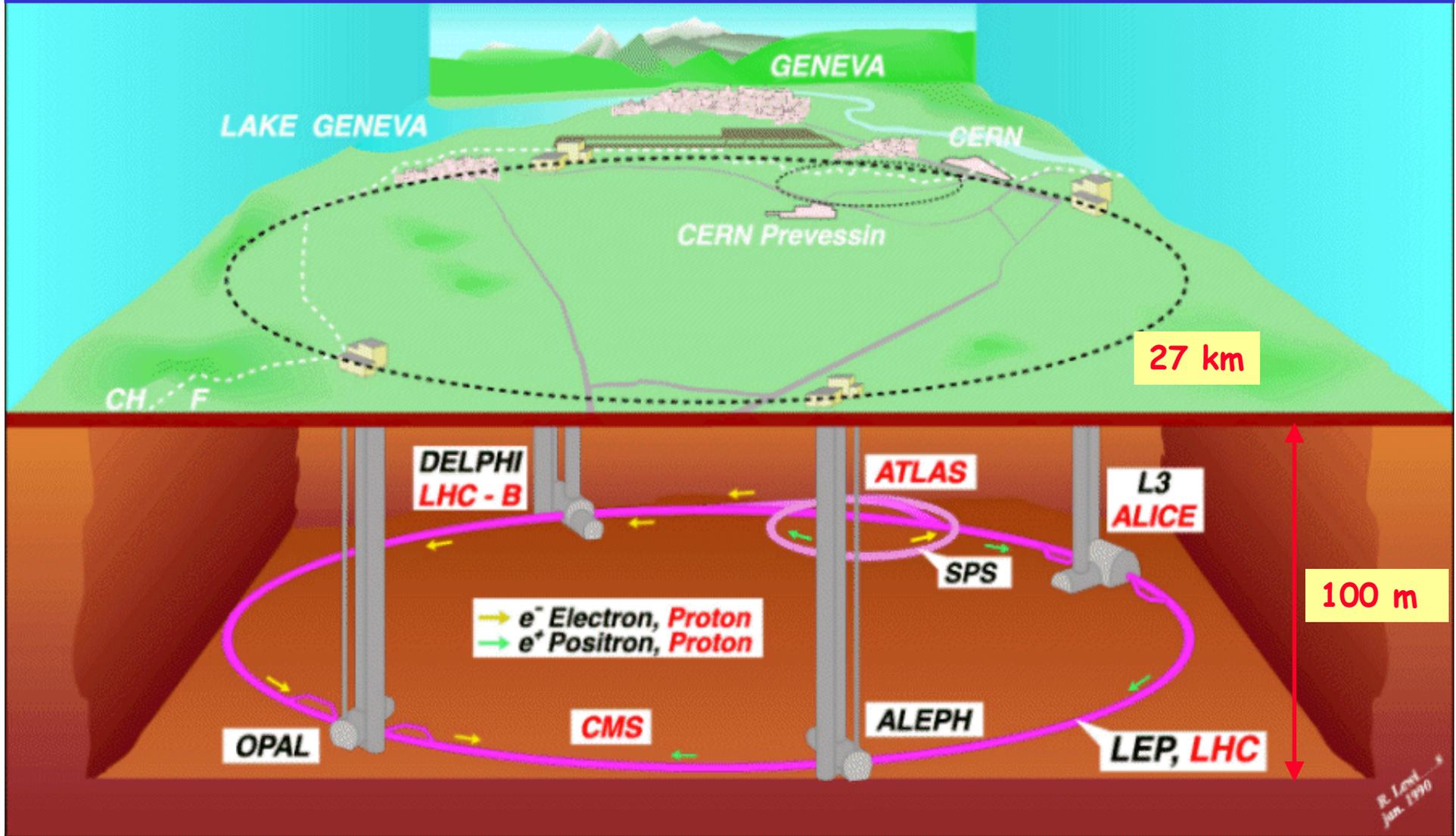


Le complexe du Cern



Succession de plusieurs anneaux d'accélération de taille croissante

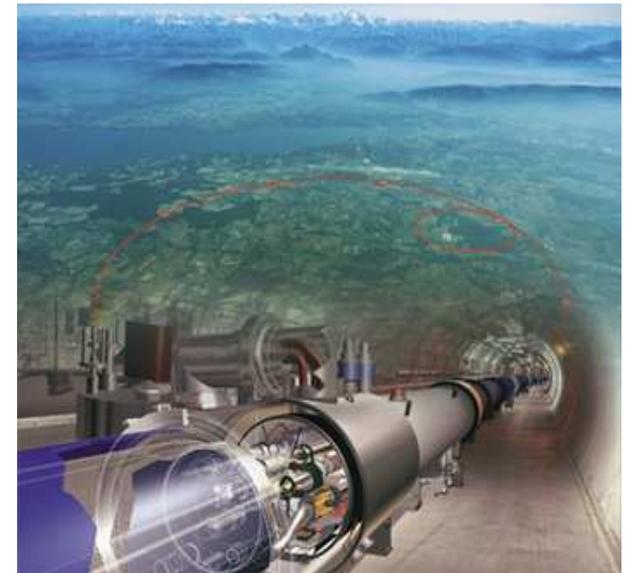
Le LHC (Large Hadron Collider)



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 ~4 Milliards d'euros

- Démarrage **EN CE MOMENT!!**



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



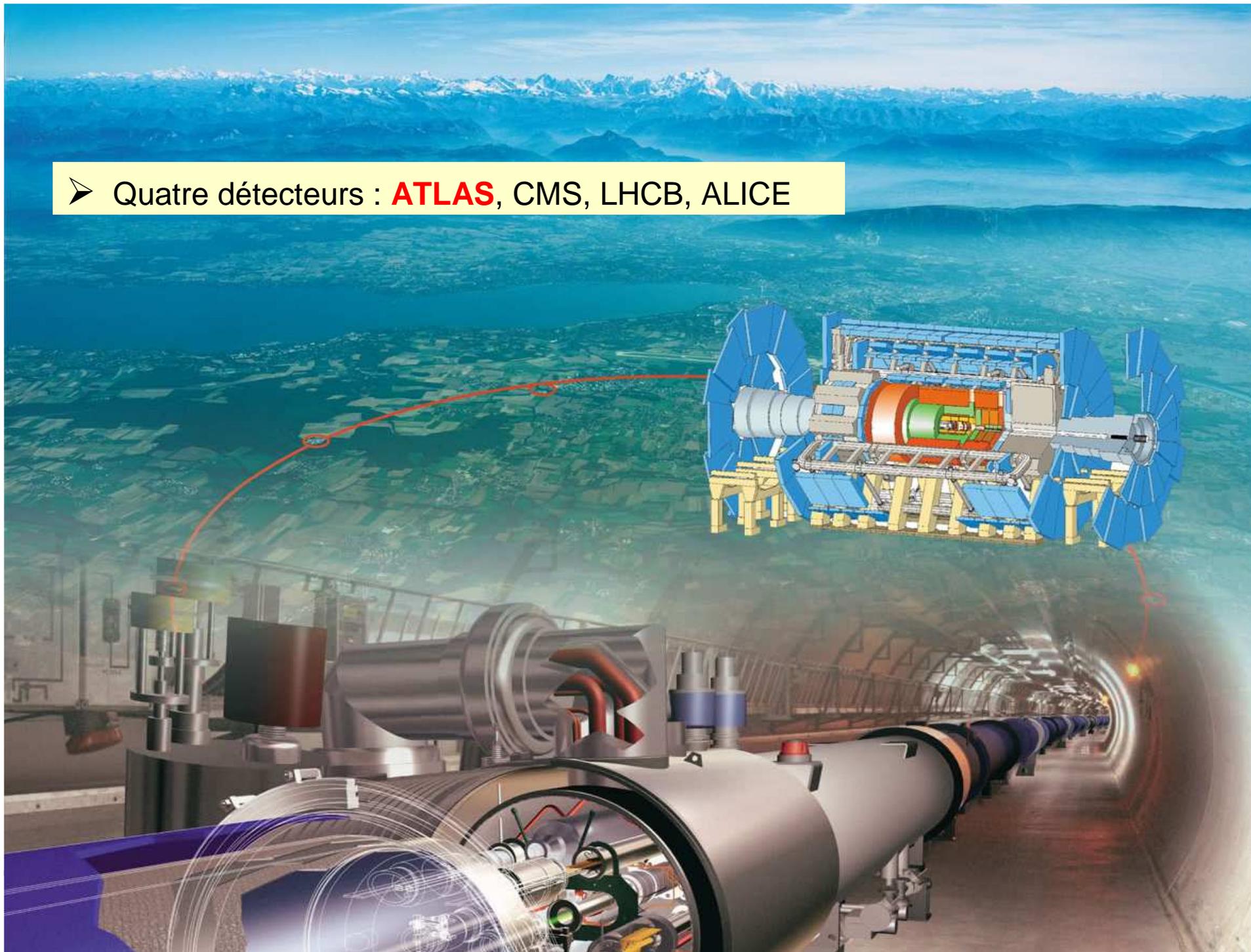
Le détecteur ATLAS

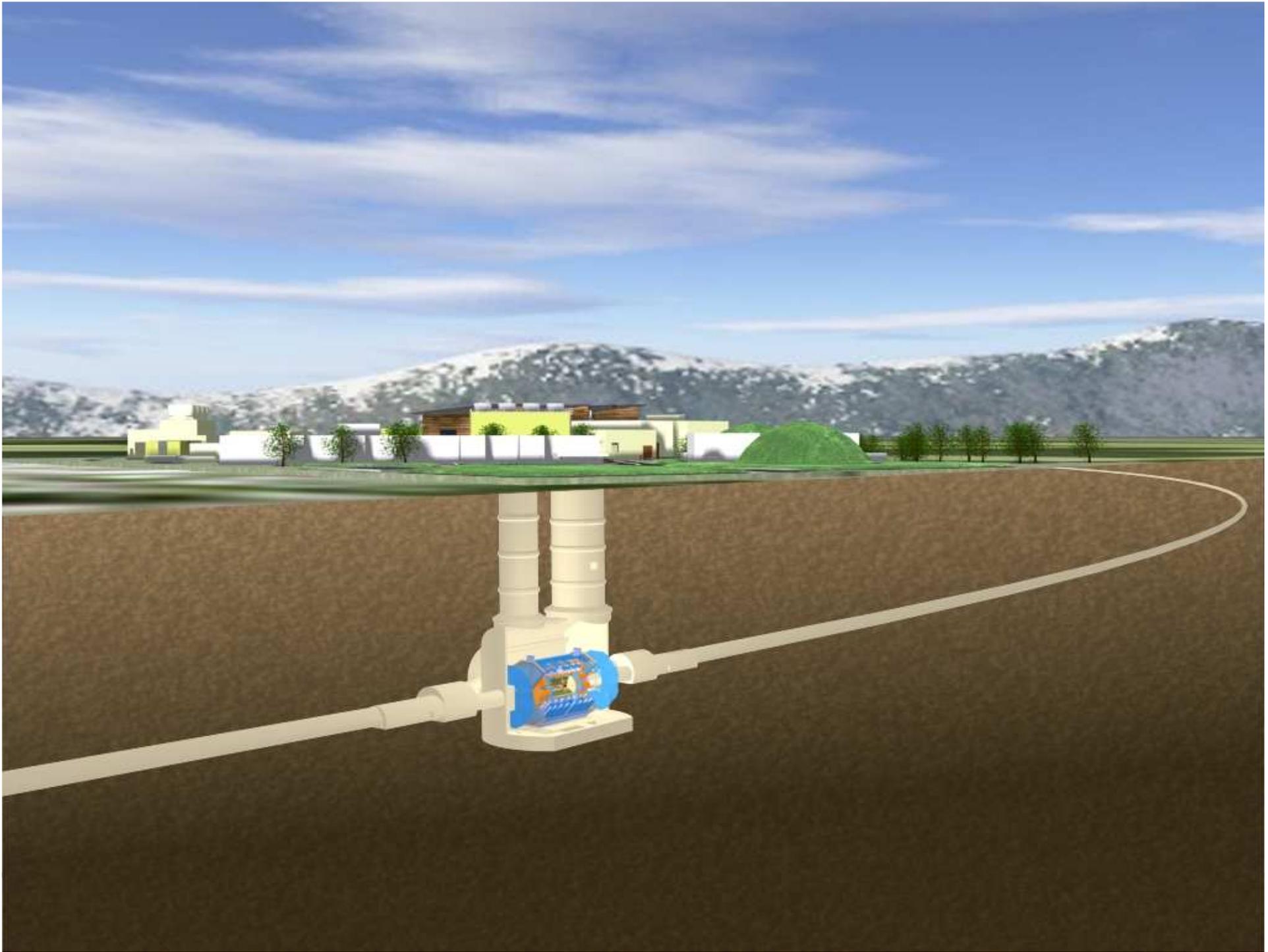
(A Toroidal Lhc ApparatuS)

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

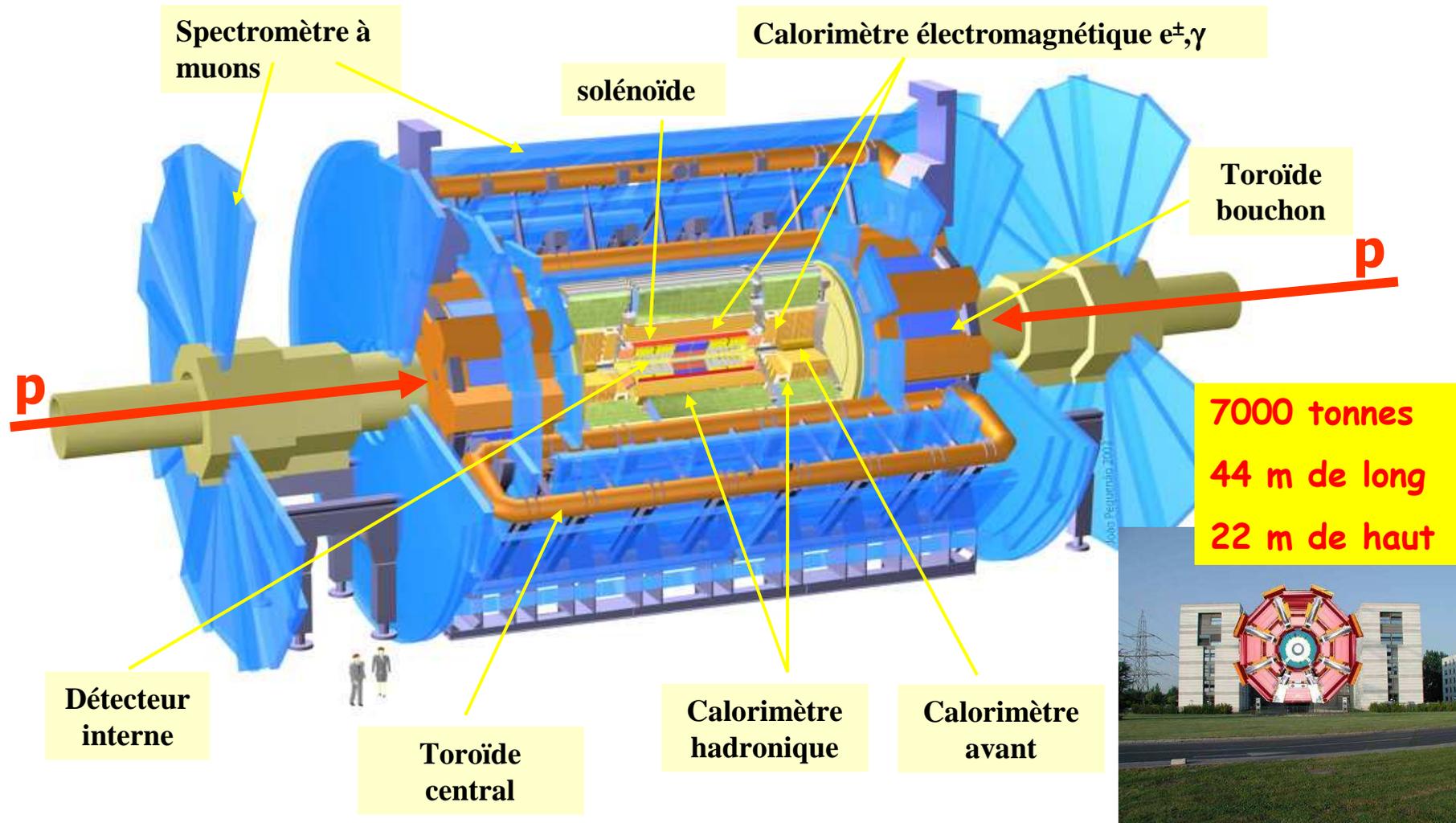


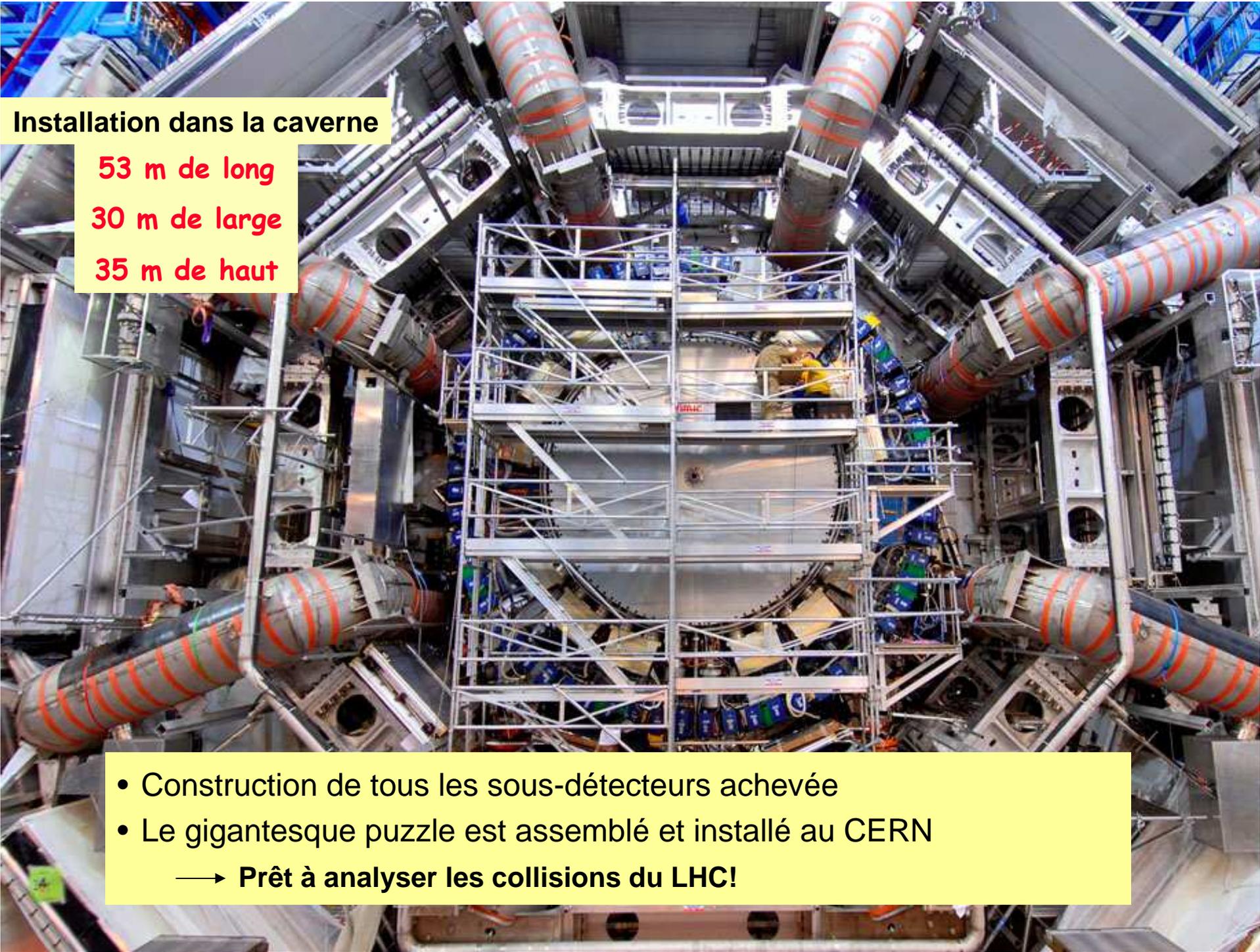
➤ Quatre détecteurs : **ATLAS**, CMS, LHCb, ALICE





Le détecteur ATLAS





Installation dans la caverne

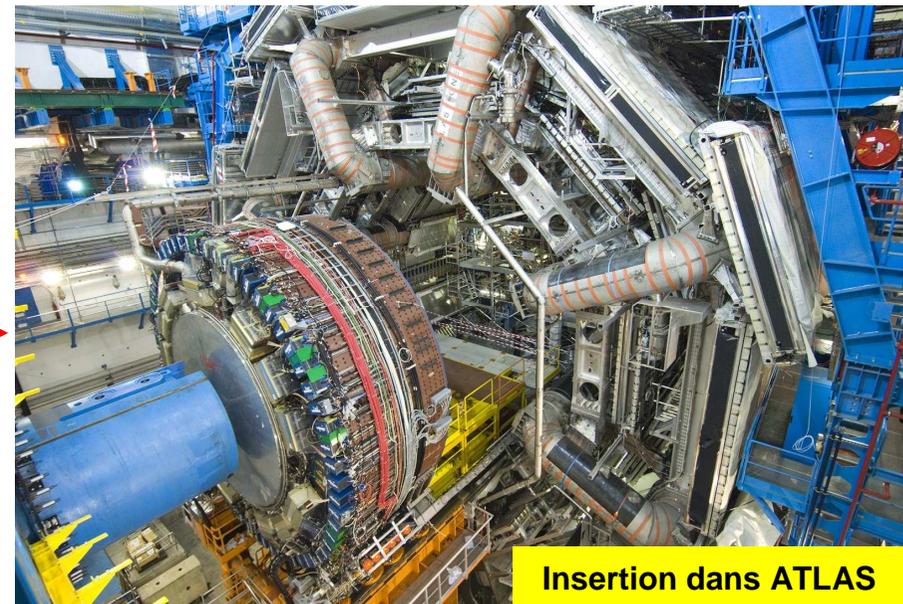
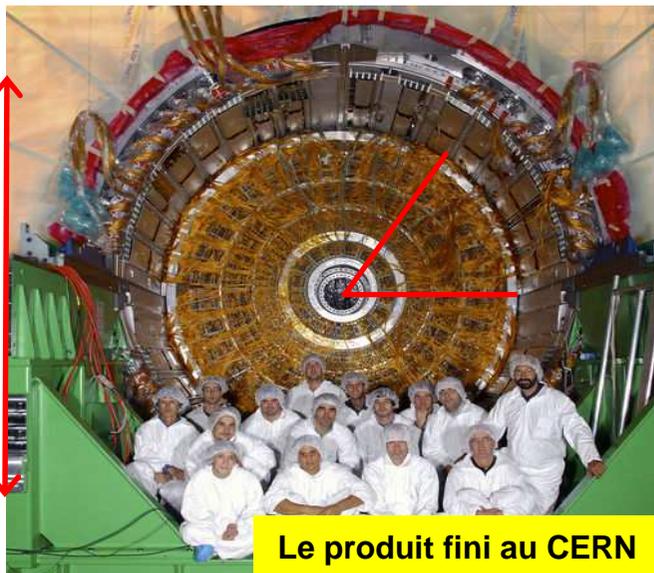
53 m de long

30 m de large

35 m de haut

- Construction de tous les sous-détecteurs achevée
- Le gigantesque puzzle est assemblé et installé au CERN
→ Prêt à analyser les collisions du LHC!

Construction au CPPM: calorimètre



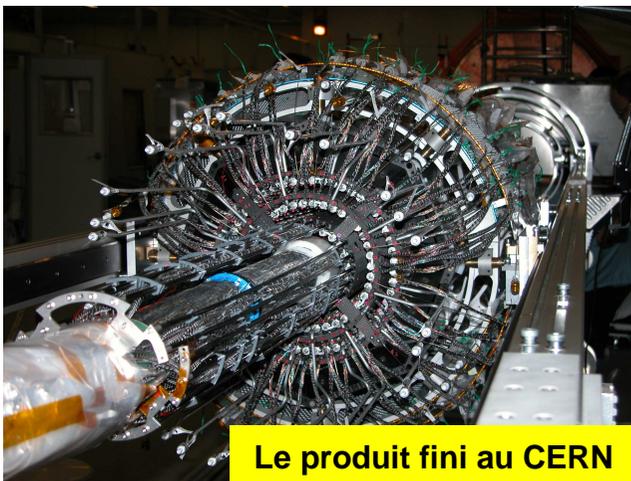
Construction au CPPM: trajectographe



Element de base



Assemblage



Le produit fini au CERN



Insertion dans ATLAS

Et maintenant...

1. Depuis le 20 novembre, des faisceaux de protons circulent dans le LHC

- Comme en septembre 2008, puis il y avait eu un incident...
- ...dû à une défaillance d'une connexion électrique (parmi ~10000)
- 1 an de réparation et surtout consolidation pour que cela n'arrive plus...

2. Le 23 novembre, premières collisions entre protons

- À une énergie d'abord basse: phase de rodage!
- Puis à une énergie plus élevée (2.4TeV) le 08 décembre → record du monde
- Et cela continue en ce moment...

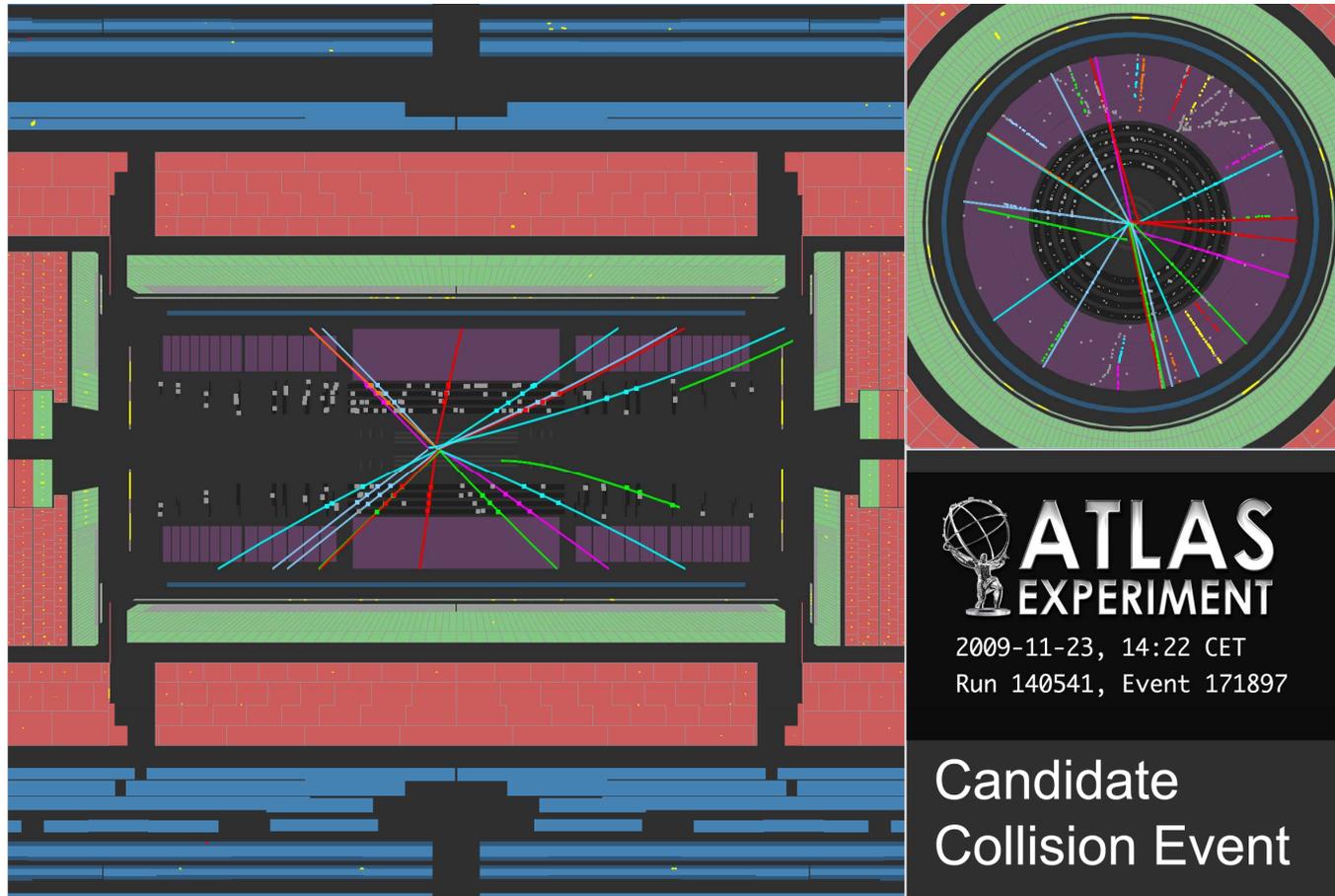
3. En 2010, collisions à plus haute énergie

- Mais pas encore la puissance maximale...

4. Puis, augmentation de la puissance

- Pour prendre des données pendant plusieurs années (une dizaine!)

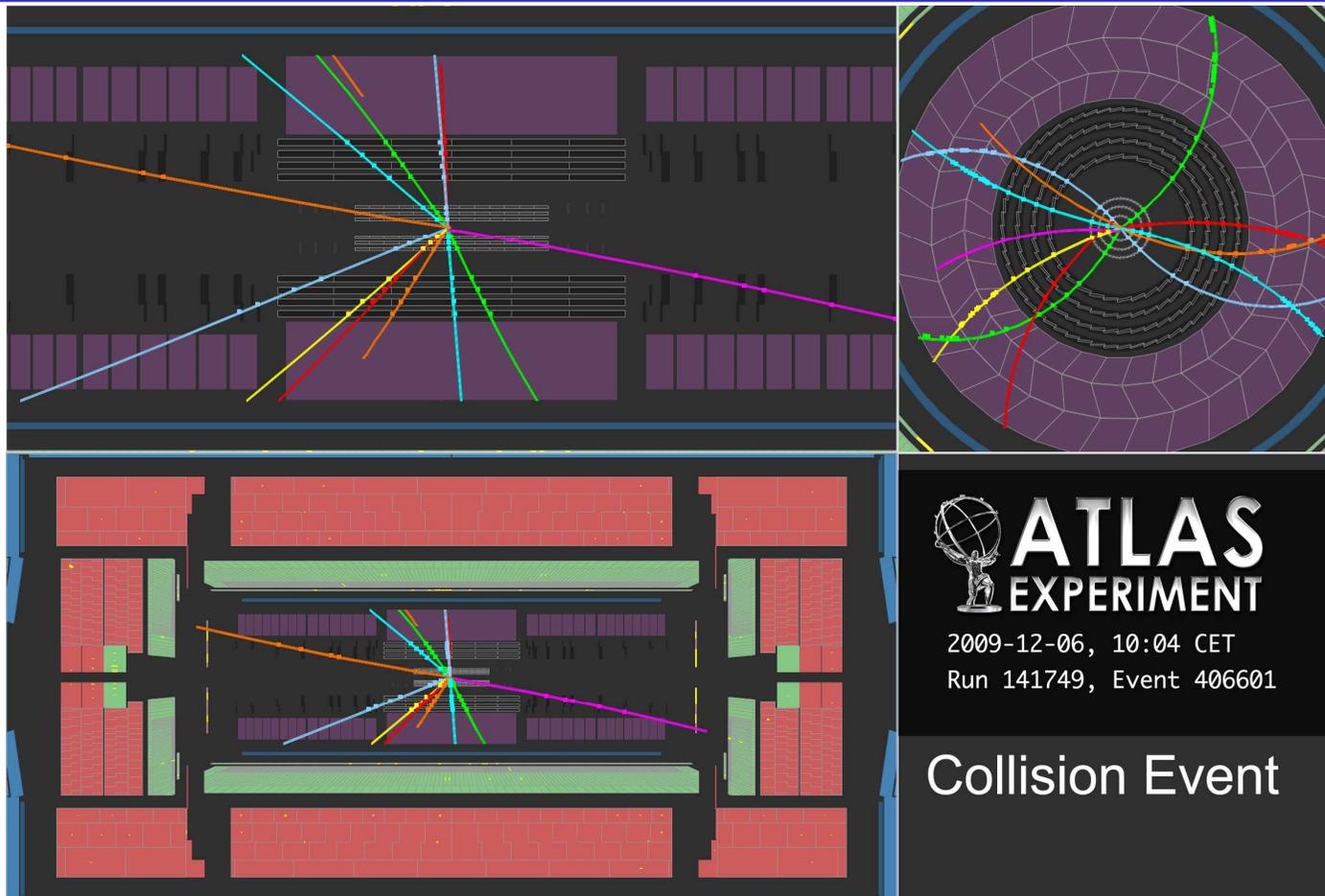
Les premiers “clichés” d’ATLAS



<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

23/11/09, 14H22: première collision de protons vue par ATLAS

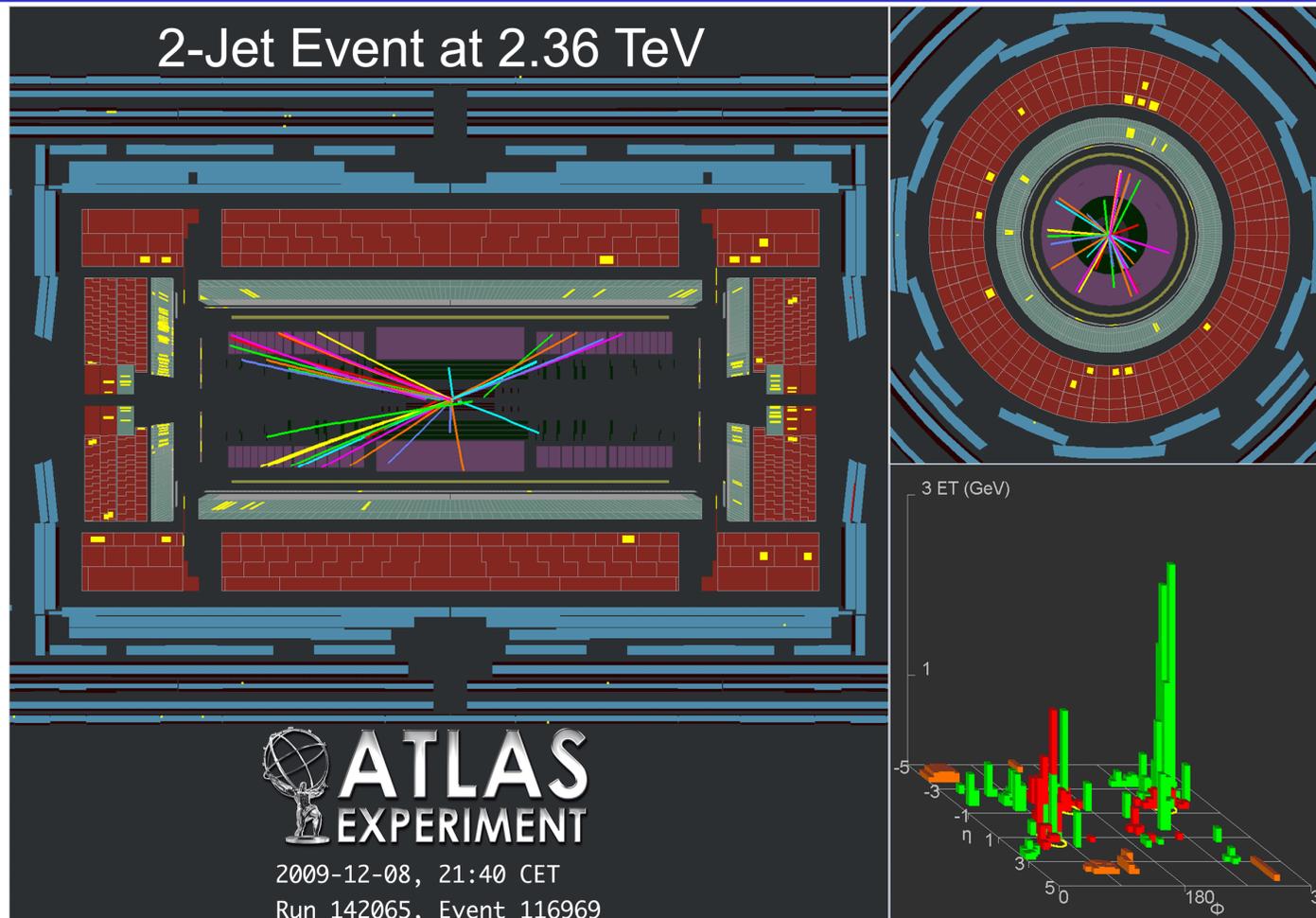
Les premiers “clichés” d’ATLAS



<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

06/12/09: autre collision de protons vue par ATLAS

Les premiers “clichés” d’ATLAS

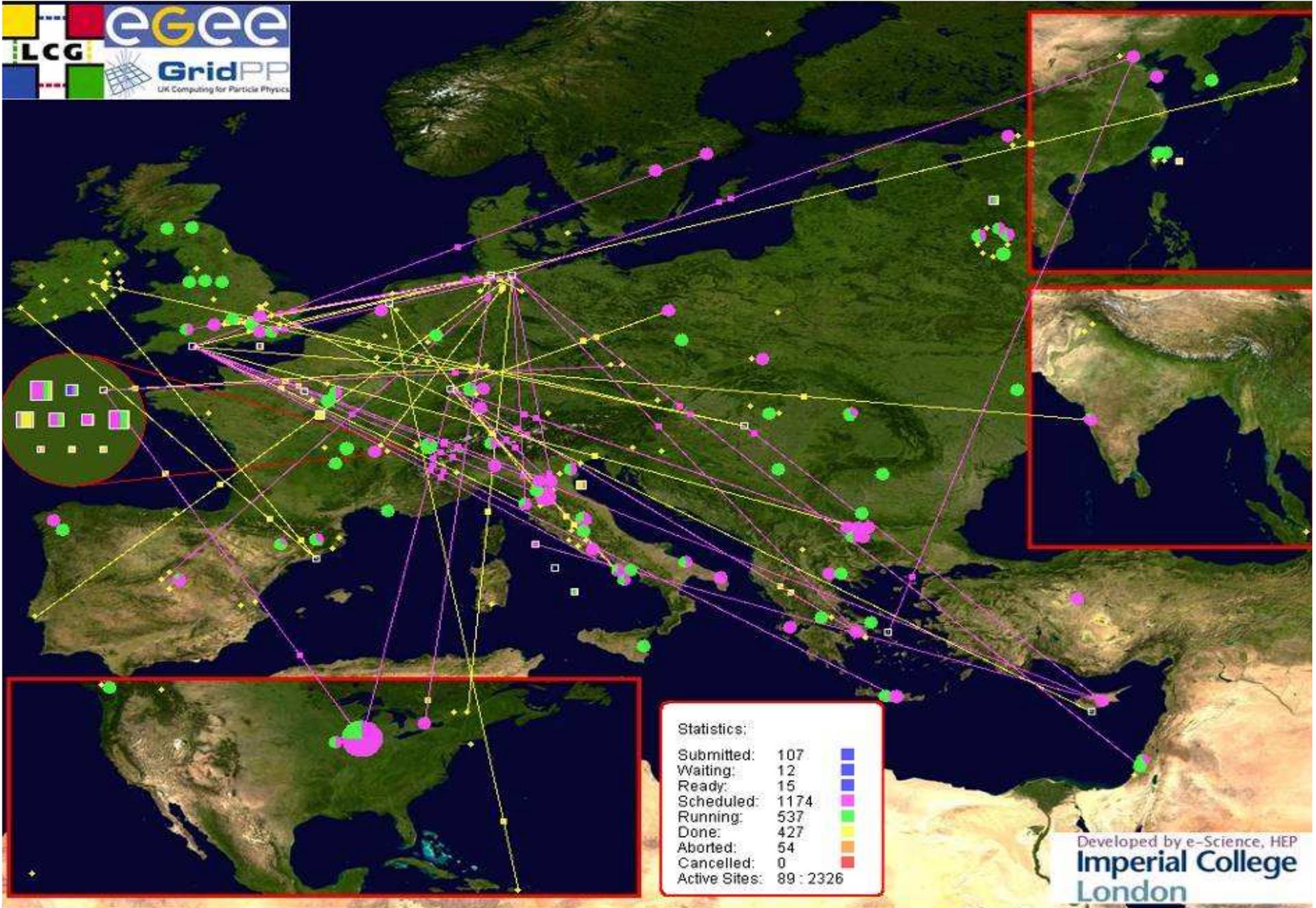


**08/12/09: collision de protons
à 2.4 TeV vue par ATLAS**

Le “clap”: déclenchement

- 2800 paquets de 10^{11} protons se croiseront 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 (observation de la Terre, prévisions climatiques, recherche pharmaceutique, ...)





Les retombées

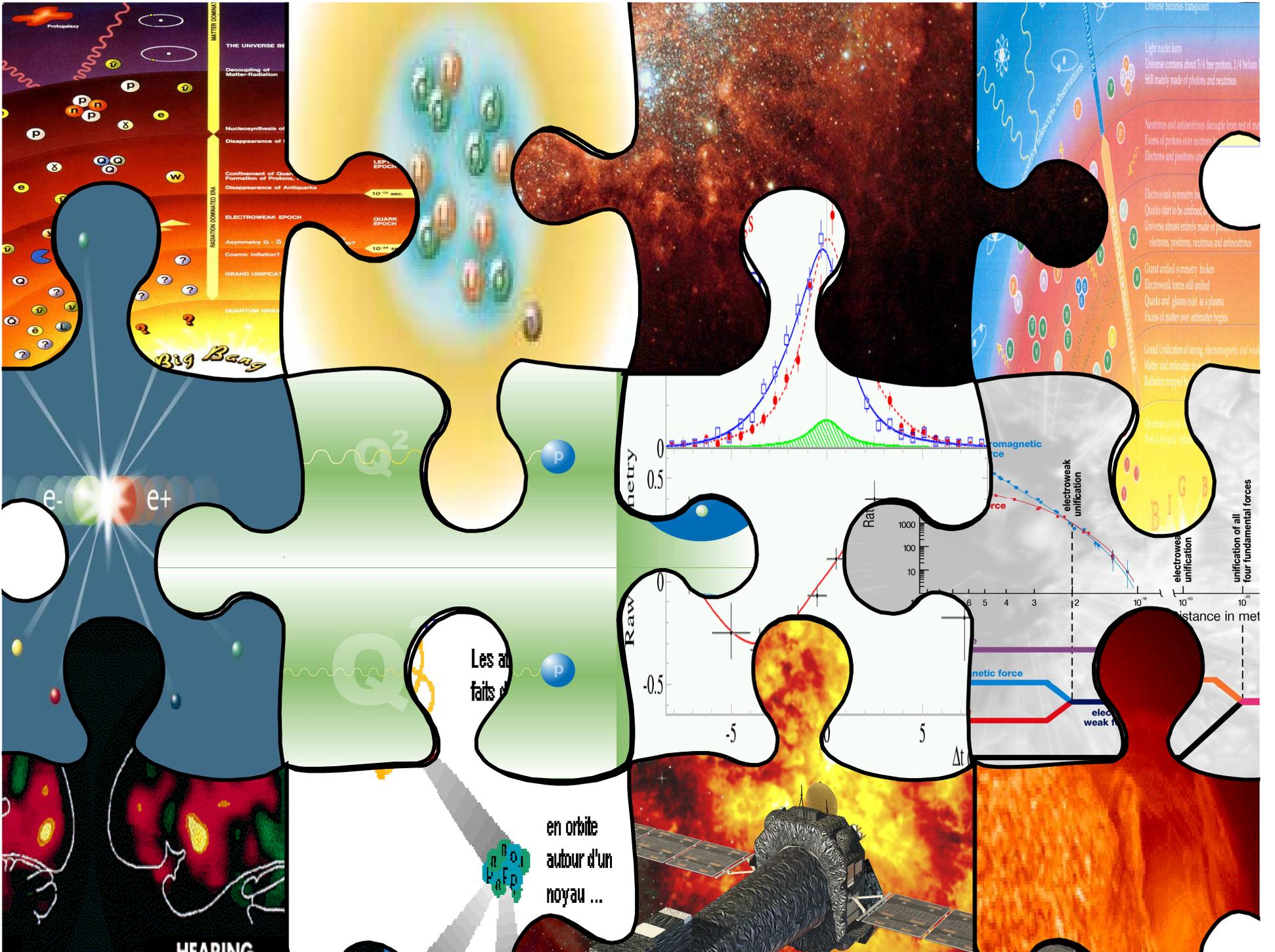
- Les limites des connaissances sont repoussées → source d'innovation ...
 - A quoi sert la mécanique quantique? GPS, laser, ...
 - A quoi servent les rayons X, l'anti-matière? L'imagerie médicale...
 - A quoi sert la fission, la fusion? Production d'énergie...
 - A quoi sert l'électron? Tout votre quotidien!!
 - Jamais possible de cerner les implications d'une découverte fondamentale
- ...en mettant au œuvre des technologies avancées en électronique, mécanique, informatique, ...
 - Ces retombées sont très nombreuses
 - Exemple: le partage d'informations entre scientifiques dans les années 90 → le Web!
Et aujourd'hui, la grille de calcul...
- ...grâce à l'espace laissé à la curiosité et à l'imagination dont la Science doit disposer

ATLAS au LHC, une super-production

- Un détecteur **gigantesque** de plusieurs milliers de tonnes...
- ...mais très **précis** $\sim 10 \mu\text{m}$ et extrêmement rapide (ns)
- Presque 10 ans de R&D, 7 ans de fabrication
- Des TeraBytes de données informatiques à gérer en temps réel
- Une **collaboration** de plus de 2000 personnes dans le monde (37 pays, 170 universités/laboratoires) \rightarrow formidable **aventure humaine**
- Des **compétences** extrêmement diverses (mécanique de précision, électronique de pointe, informatique, cryogénie, supraconductivité, génie civil, ...) \rightarrow **nombreuses retombées interdisciplinaires** (web et maintenant grille de calcul, imagerie médicale, ...)



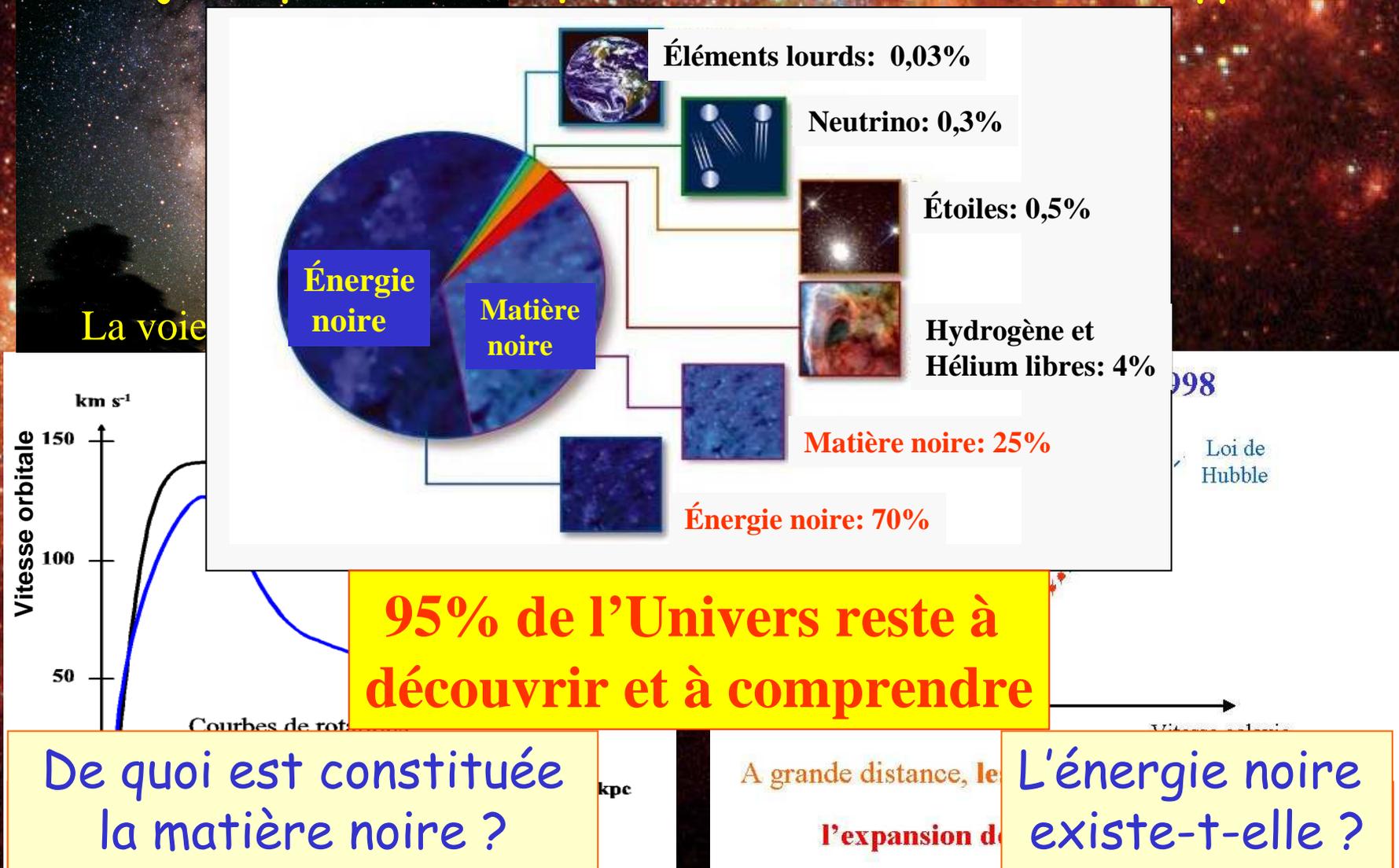
Un défi colossal à l'échelle mondiale



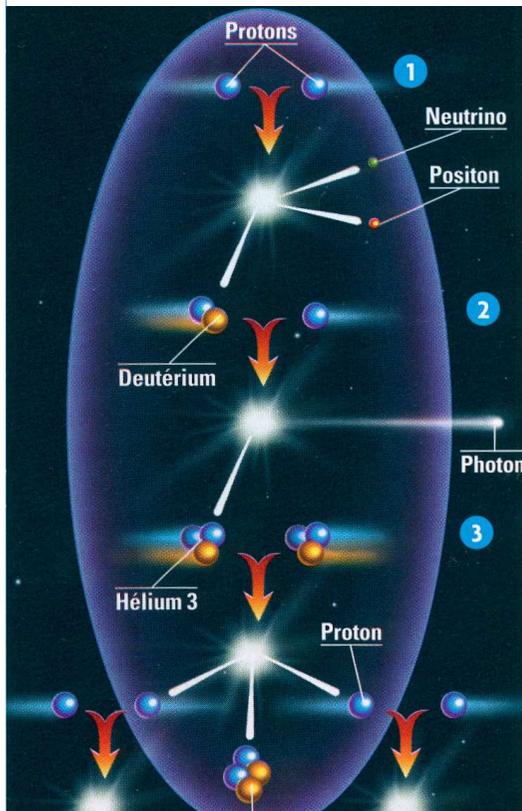
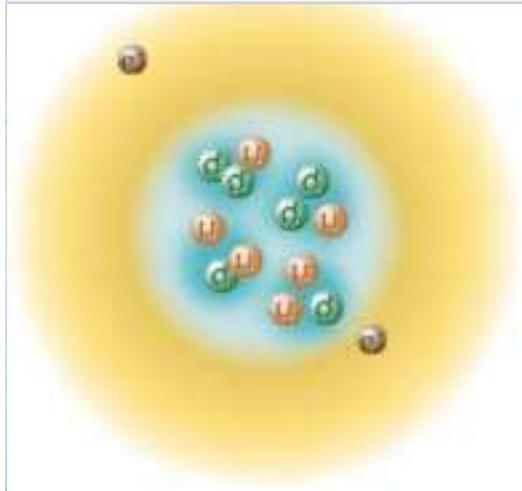
SPARES

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

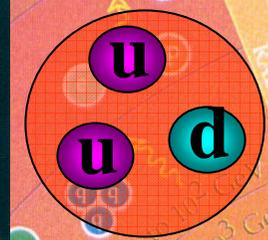
- L'antimatière disparaît
- Les interactions se différencient
- Les particules deviennent massives

< 10⁻⁹ s

10⁻¹⁰ seconds
10¹⁵ degrees 10² GeV

10⁻³⁵ seconds
10²⁸ degrees 10¹⁵ GeV

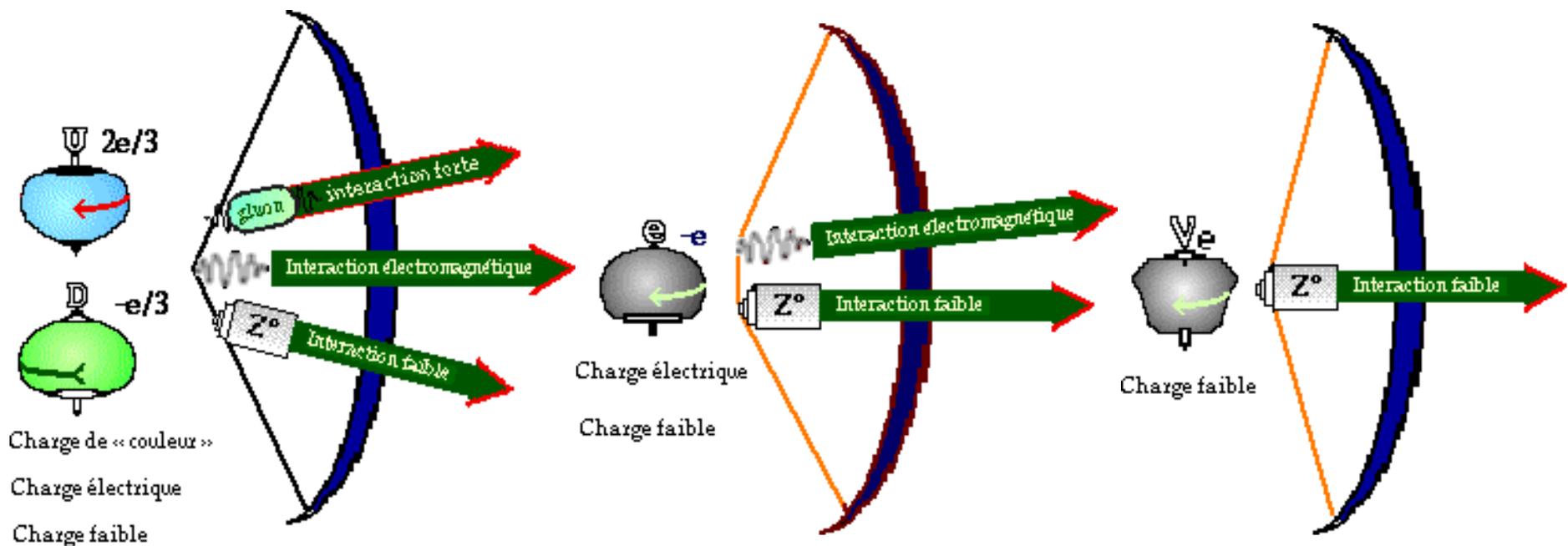
La physique des particules s'intéresse à ce premier milliardième de seconde



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

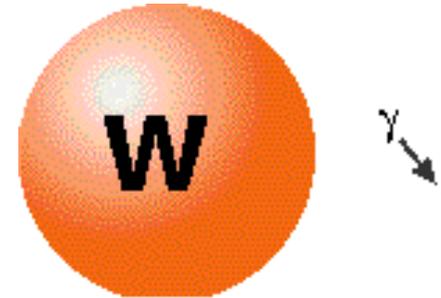


Le pourquoi des masses

➤ 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 : $175 \text{ GeV}/c^2$

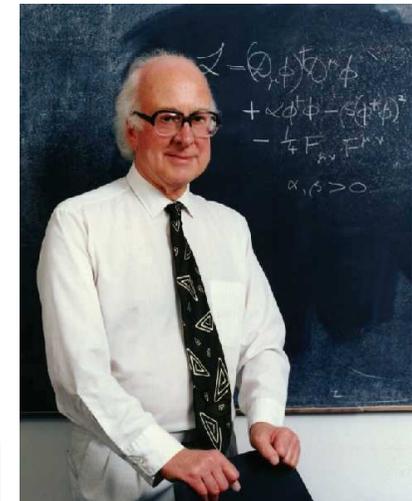
($1 \text{ GeV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)



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

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

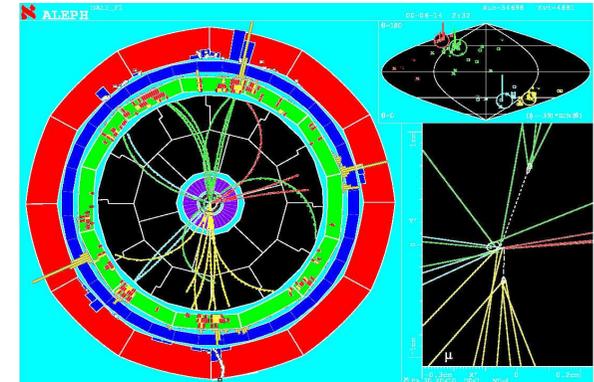
Hypothèse du rôle d'une particule : le boson de Higgs



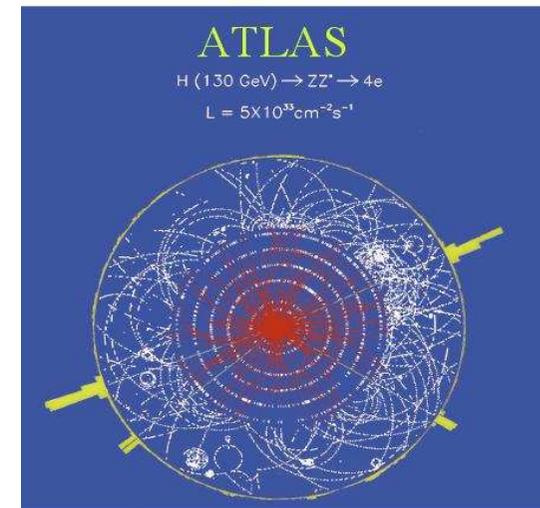
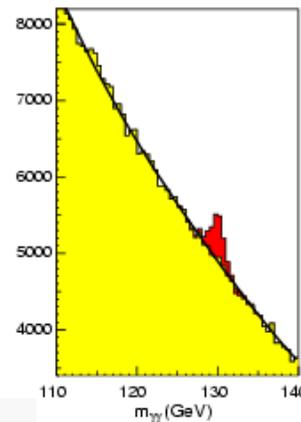
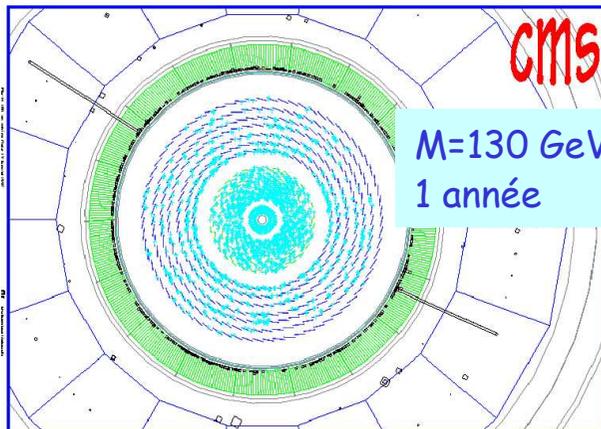
Mr Higgs

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 !

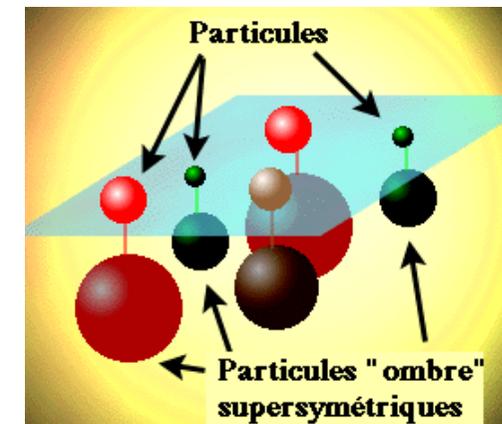
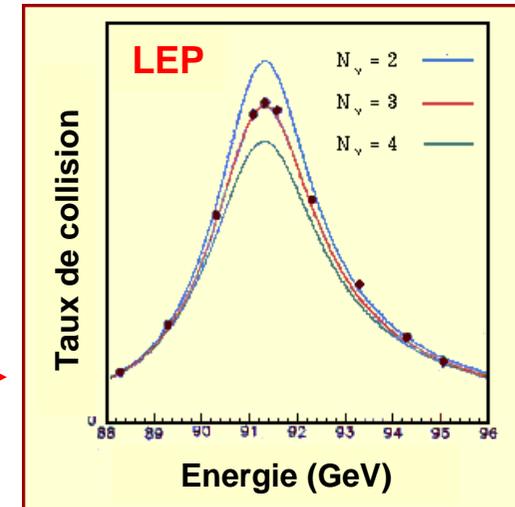


Première « photo » du Higgs ?



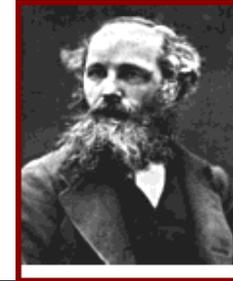
Le Zoo est-il complet?

- 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 ?

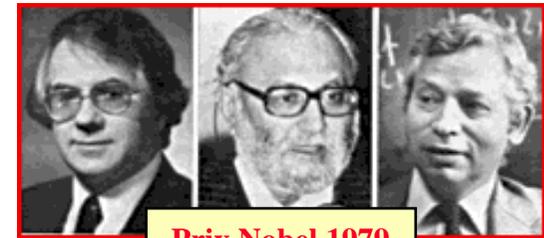


Unification des forces

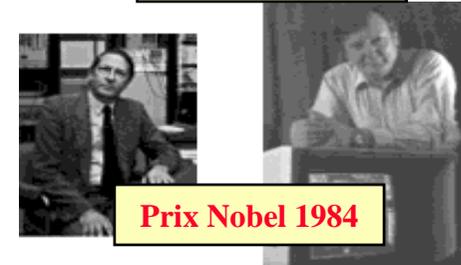
- Gravitation (Newton)
 - Chute des corps et mouvement des astres = même phénomène, deux facettes d'une seule interaction
- Electricité et magnétisme
 - 1868, **Maxwell** réunit l'électricité et le magnétisme
 - C'est l'électromagnétisme
- Forces électrofaibles
 - Dans les années 1970, **Glashow, Weinberg 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)

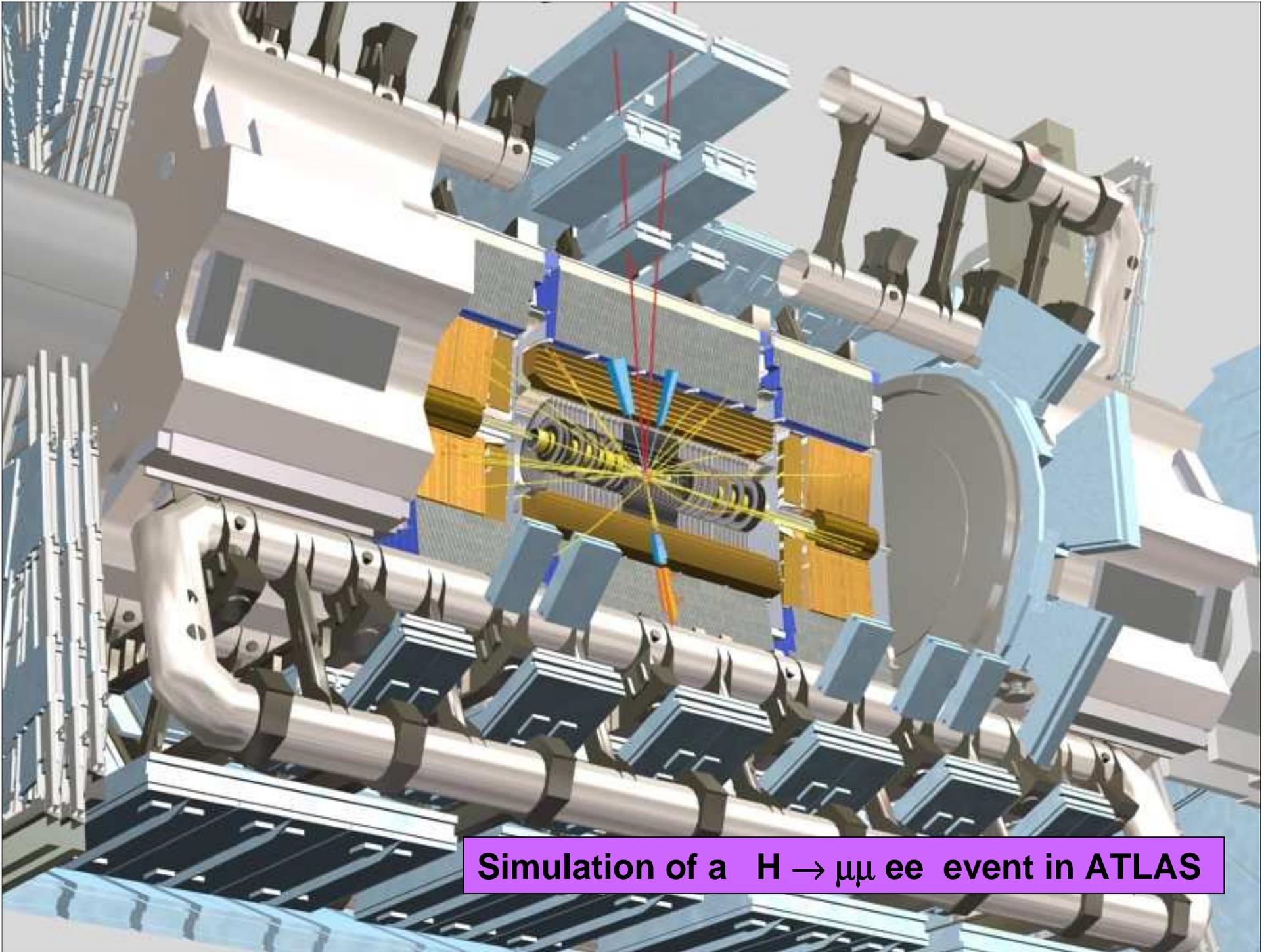


Prix Nobel 1979



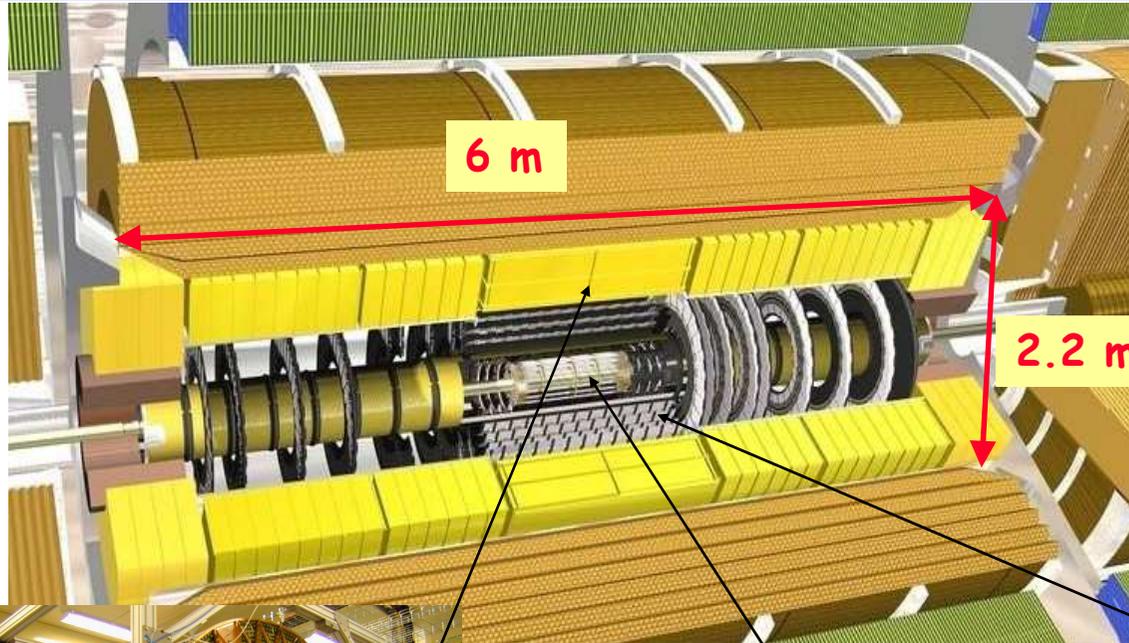
Prix Nobel 1984

↳ **Supersymétrie, cordes, gravité quantique**

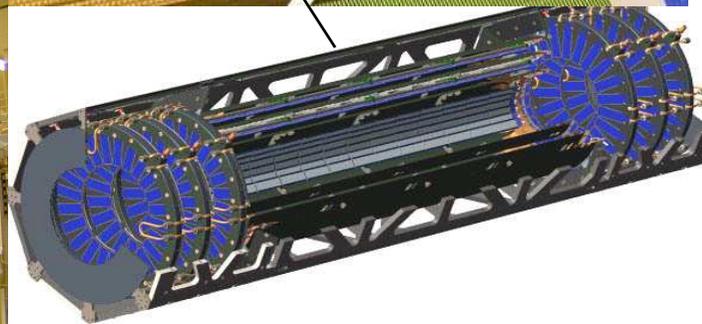
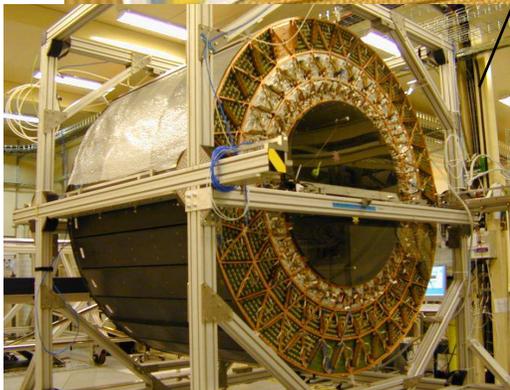


Simulation of a $H \rightarrow \mu\mu ee$ event in ATLAS

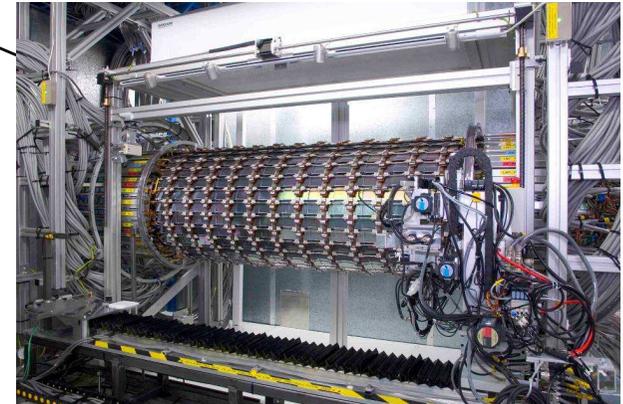
Les trajectographes d'ATLAS



- 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

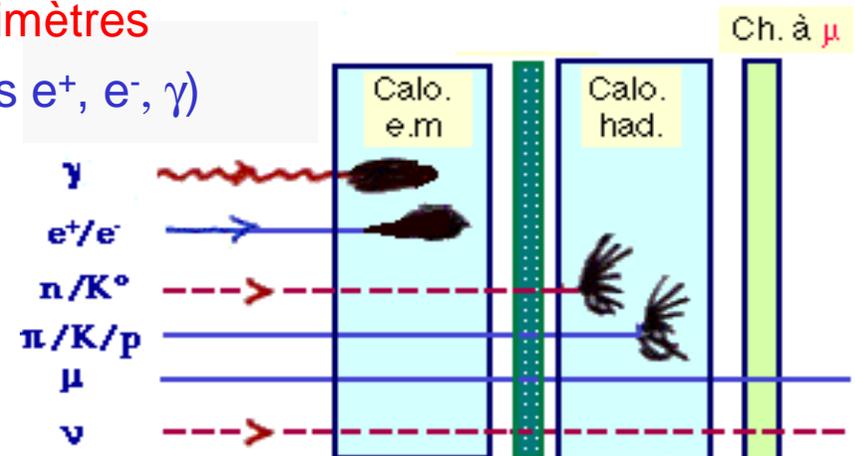


Le système calorimétrique d'ATLAS

- Identifier les particules
- Mesurer leur énergie

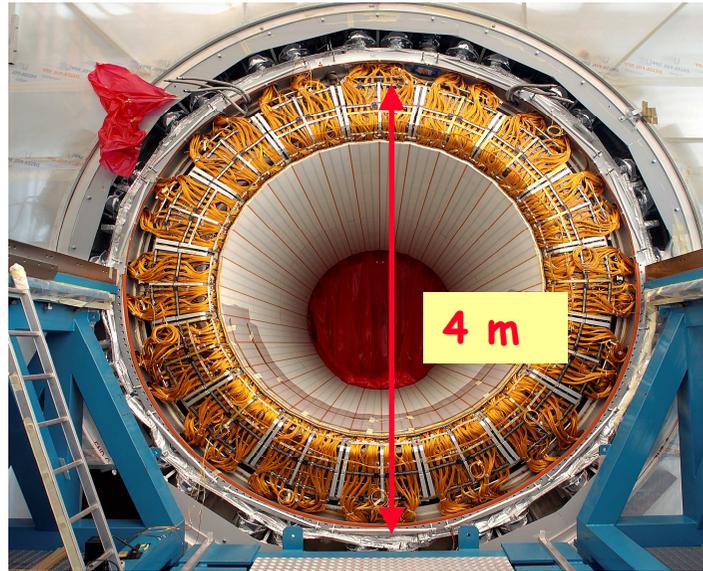
- Passage des particules dans la matière :
 - Electrons vite arrêtés par matière, car faible masse et rayonnent beaucoup
 - Autres particules «rayonnent» peu, mais interagissent nucléairement, ... sauf muons
 - Les muons sont donc les plus pénétrants (sauf neutrinos)
- Dispositif classique de **2 couches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

Traversée des couches de détecteurs par diverses particules

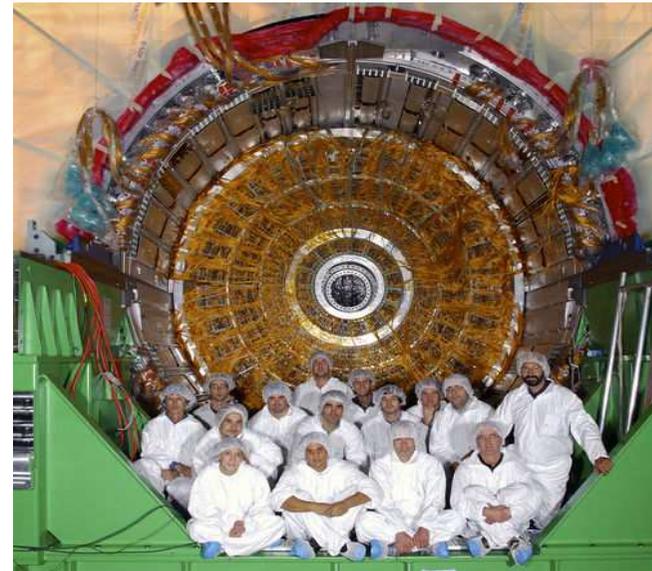


Le calorimètre électromagnétique d'ATLAS

partie centrale



partie « tonneau »



Géométrie en accordéon

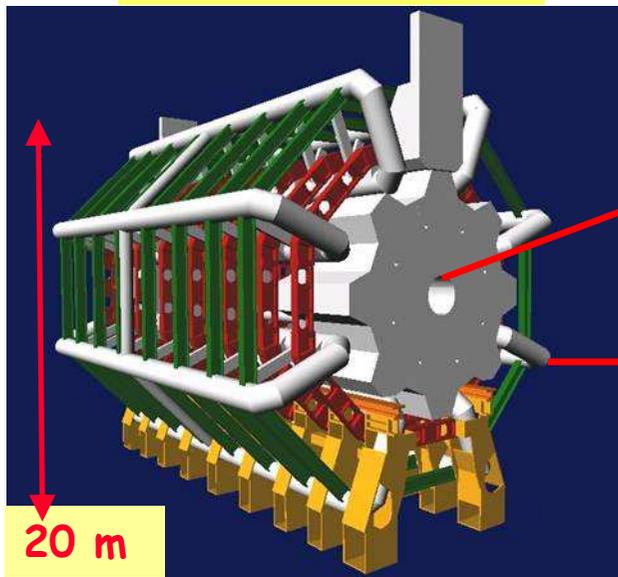


Le tout baigne dans de l'argon liquide (90 K)

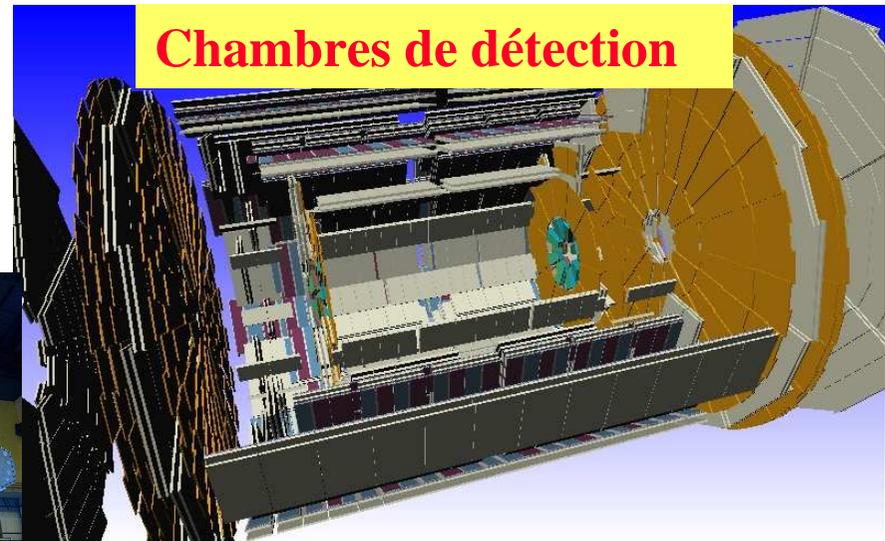
Le trajectographe à muons d'ATLAS

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

Aimant toroïdal



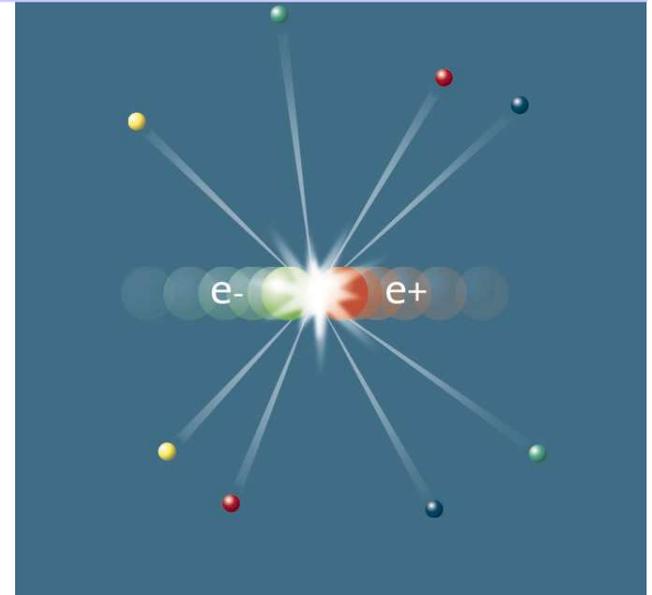
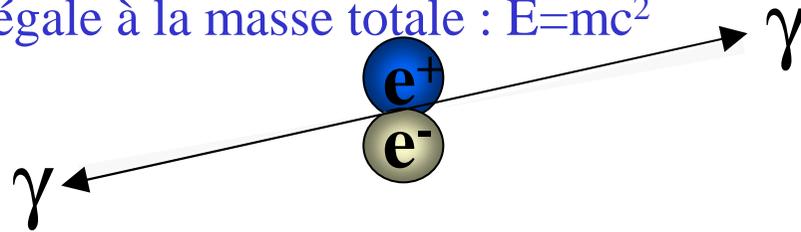
Chambres de détection



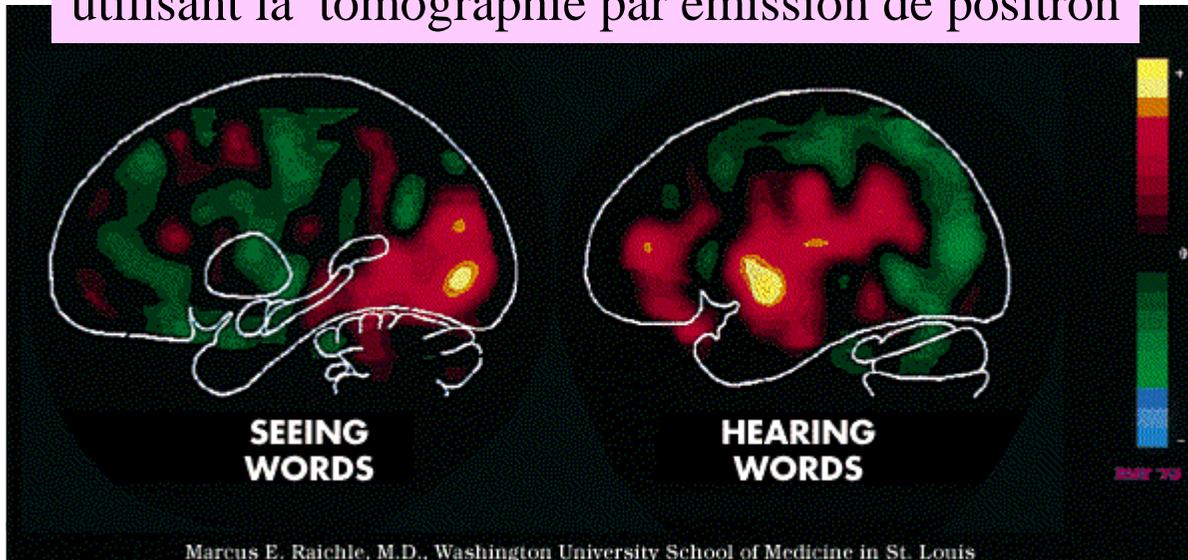
Quand l'antimatière rencontre la matière ...

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 : $E=mc^2$

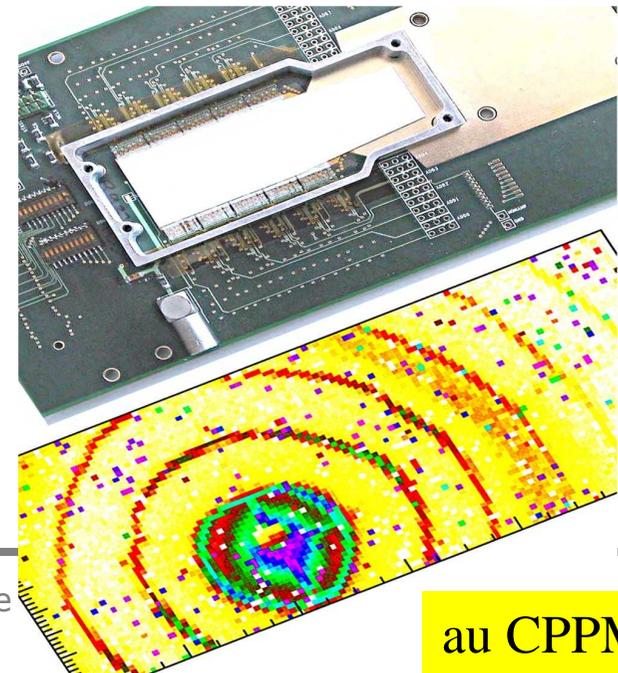


Permet de faire des images médicales en utilisant la tomographie par émission de positron



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

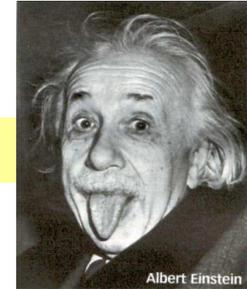
Les vitesses et le temps

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

➤ La lumière met 8 minutes pour venir du Soleil

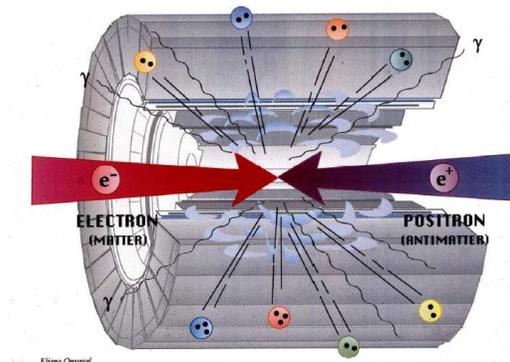


$c = 300\,000 \text{ km/s}$



- 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



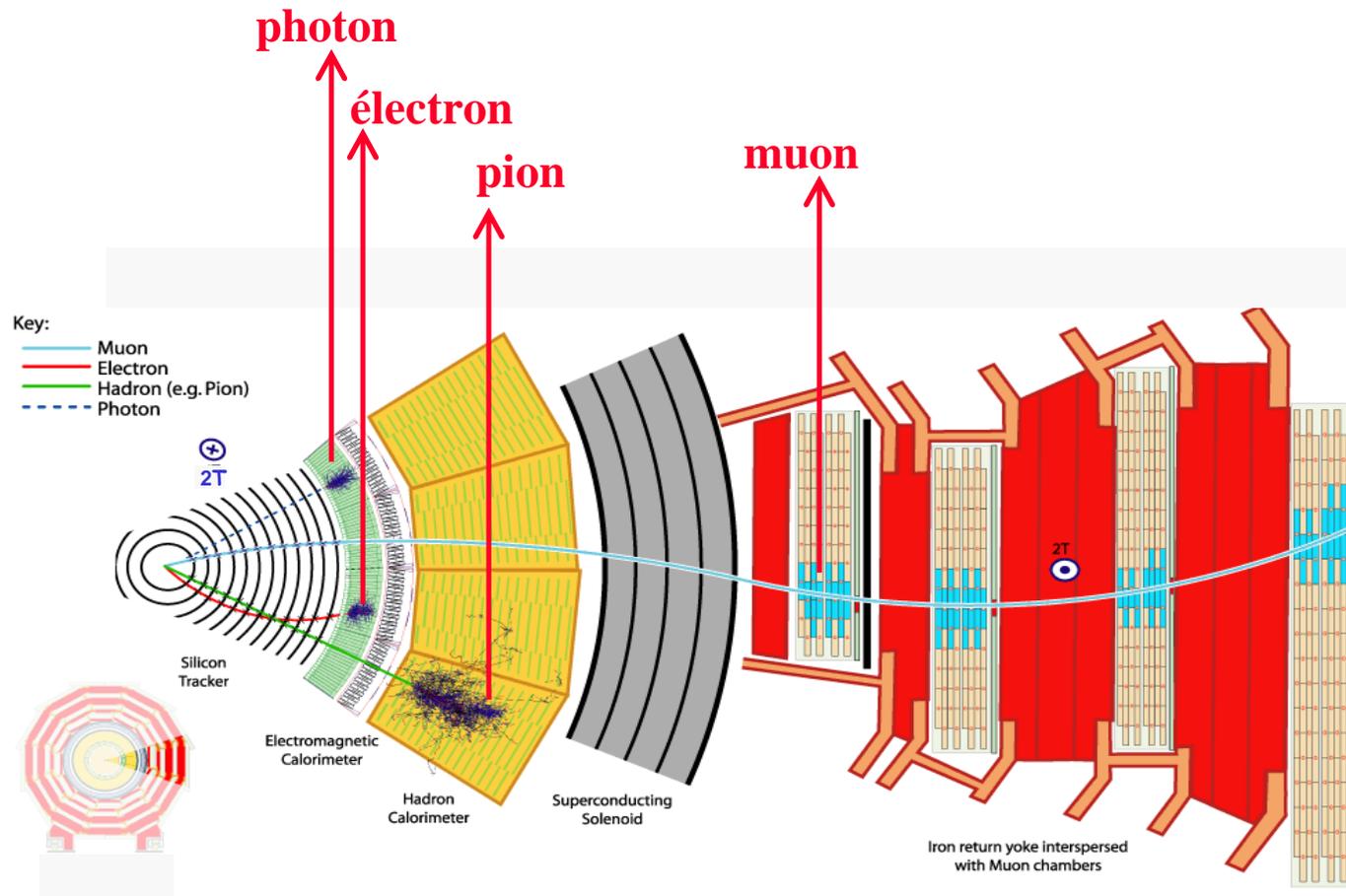
- Il leur faut un milliardième de seconde pour parcourir un mètre

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



les détecteurs de particules doivent être rapides et précis

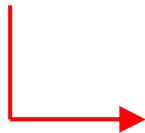
Bilan : toute la scène est filmée



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

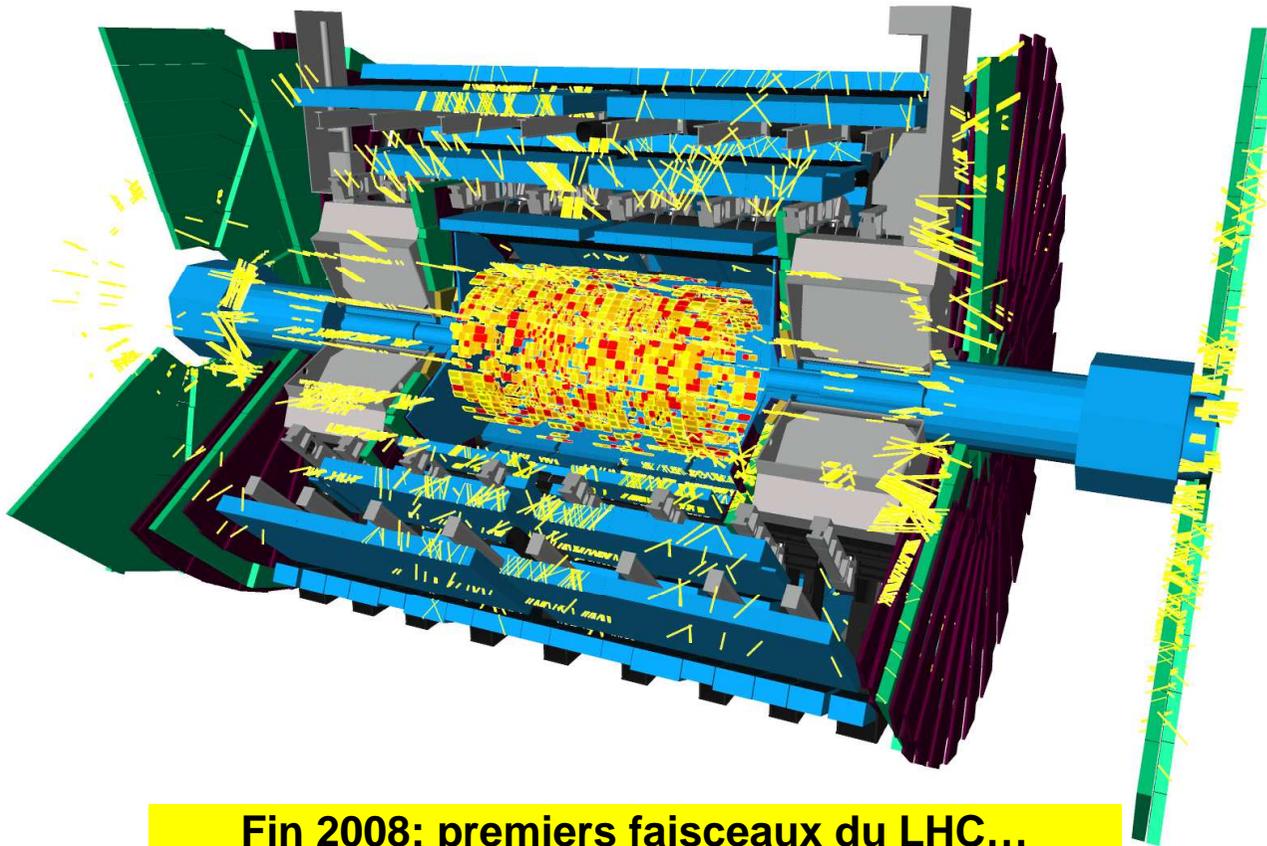
Assemblage de sous-détecteurs

- 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**)



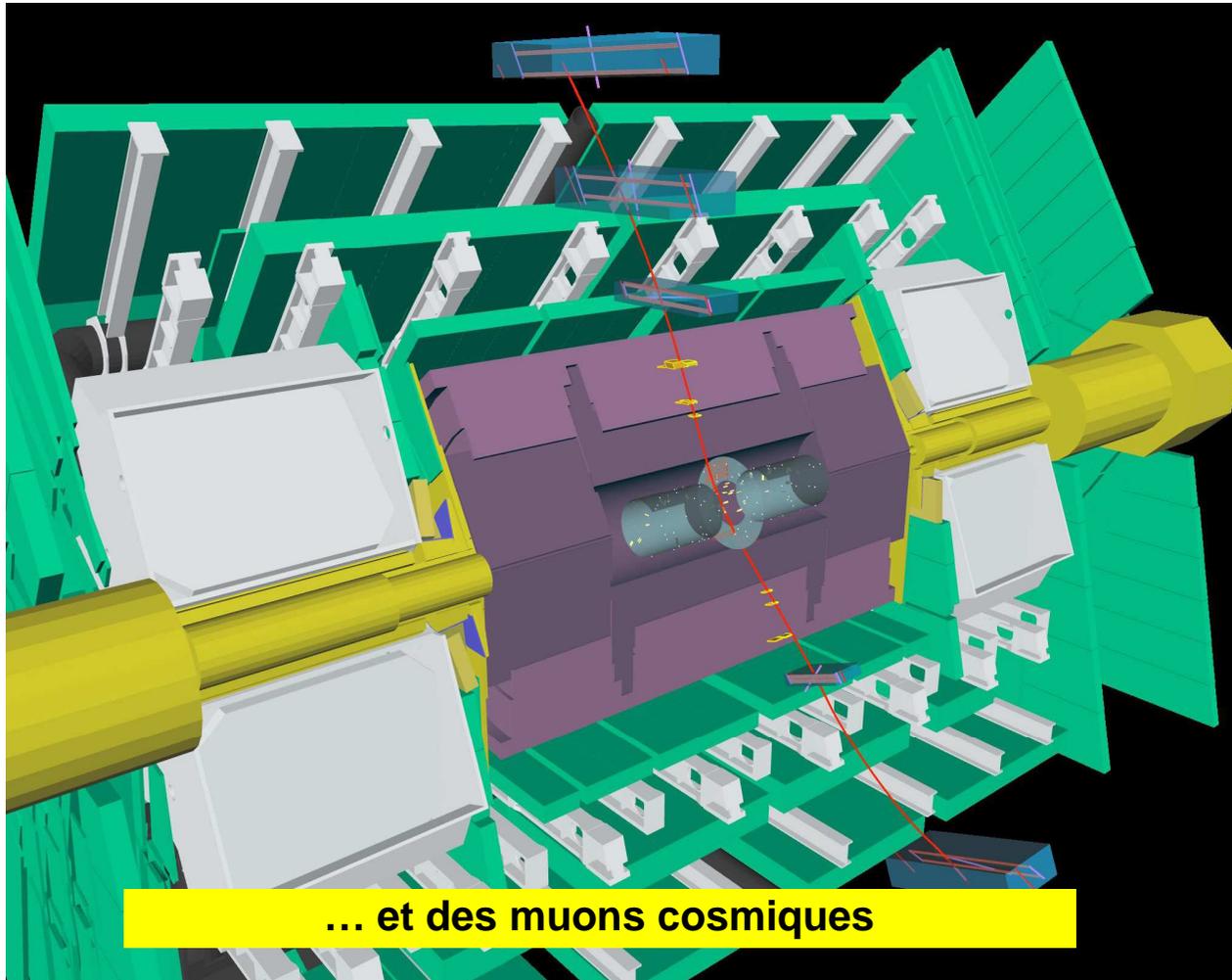
- **Identification des particules**
- **Mesure de leur énergie, vitesse, direction, temps de passage**

Les premiers “clichés” d’ATLAS

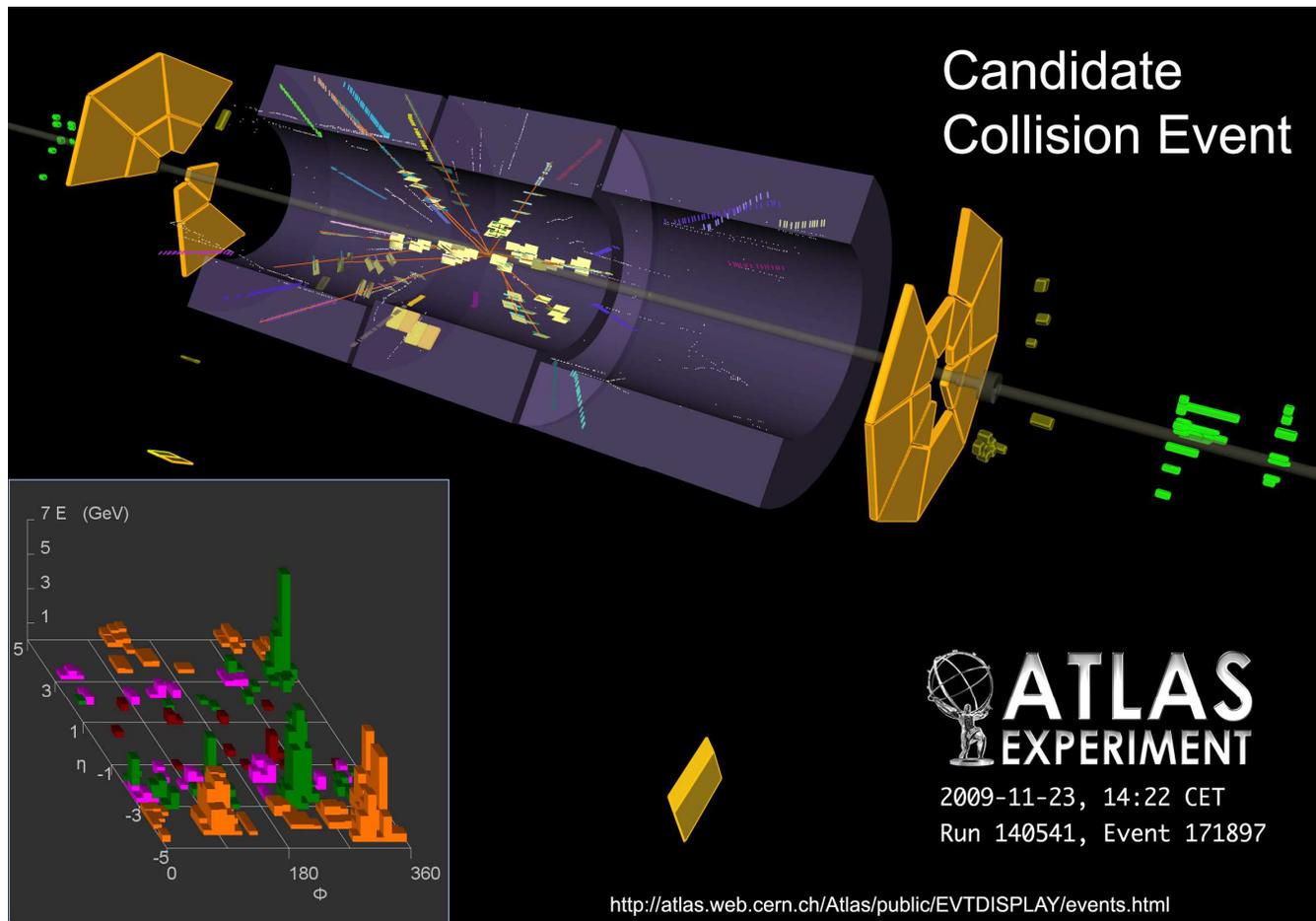


Fin 2008: premiers faisceaux du LHC...

Les premiers “clichés” d’ATLAS



...c'est reparti...



23/11/09, 14H22: première collision de protons vue par ATLAS