

Qu'est-ce que la physique des particules

Synopsis

- # Le CERN, le Centre Européen de Recherche Nucléaire, le LHC et ATLAS
- # Le Modèle Standard des particules fondamentales et leur interactions
- # Questions sans réponses en physique actuelle et but des expériences du CERN
- # Recherche fondamentale

LE CERN

- # Centre Européen de la Recherche Nucléaire
- # CERN emploie ~ 1800 personnes et accueille ~10000 chercheur-e-s des quatre coins du monde
- # Subventionné par les états membres (la plupart des pays européens) plus États-Unis, Canada, Japon, Israël, Turquie, Inde, Pakistan etc.
- # Son but est de répondre à une question toute simple: **de quoi la matière est-elle faite?**

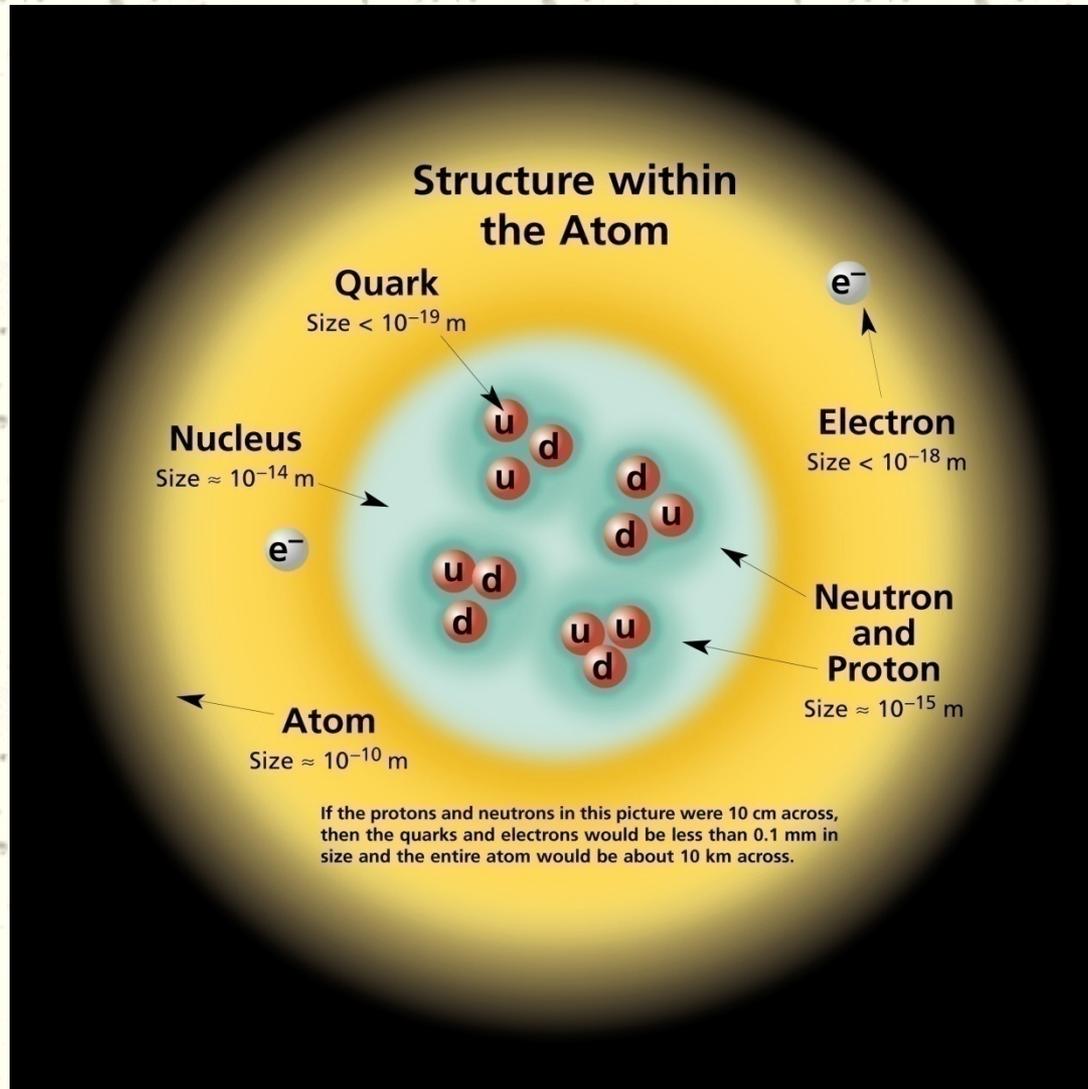
Le Modèle Standard

- # Un modèle théorique qui décrit les composantes fondamentales de la matière et leurs interactions
- # C'est le fruit d'un long et complexe processus entre physique théorique et expérimentale

Deux idées centrales:

1. Toute matière est faite de quarks et de leptons
2. Les forces agissant entre quarks et leptons le font en échangeant des particules d'échange: les bosons
 W^\pm , Z^0 , photons: γ^0 , gluons: g

1. Particules fondamentales: les leptons et les quarks



Constituents fondamentaux de la matière: les fermions

Leptons

| Saveur | Masse (MeV/c ²) | Charge électrique |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| ν_e neutrino électronique | $< 1 \times 10^{-5}$ | 0 |
| e: électron | 0.511 | -1 |
| ν_μ neutrino muonique | < 0.2 | 0 |
| μ | 106 | -1 |
| ν_τ neutrino tauonique | < 20 | 0 |
| τ tau | 1777 | -1 |

Quarks

| Saveur | Masse (MeV/c ²) | Charge électrique |
|------------|--------------------------------|----------------------|
| u: up | 3 | 2/3 |
| d: down | 6 | -1/3 |
| c: charm | 1300 | 2/3 |
| s: strange | 100 | -1/3 |
| t: top | 175000 | 2/3 |
| b: bottom | 4.3 | -1/3 |

Famille des hadrons

Les baryons ont 3 quarks ou 3 antiquarks

• Proton: u, u, d

• Sa charge = $u (+2/3) + u (+2/3) + d (-1/3) = +1$

• Neutron: u, d, d

• Sa charge = $u (+2/3) + d (-1/3) + d (-1/3) = 0$

Les mésons ont 1 quark et 1 antiquark

• Pion: u, anti-d

• Sa charge = $u (+2/3) + \text{anti-d} (+1/3) = +1$

Forces fondamentales

| Forces | Gravitation | Faible | Electro-magnétique | Forte |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|----------------|
| Agit sur | Masse ou énergie | saveur | charge électrique | couleur |
| Particules affectées | toutes | quarks, leptons | particules chargées | quarks, gluons |
| Particule d'échange | graviton (pas observé) | W^+ , W^- , Z^0 | photon | gluons |
| Force relative à la force e-m | 10^{-41} | 0.8 | 1 | 25 |

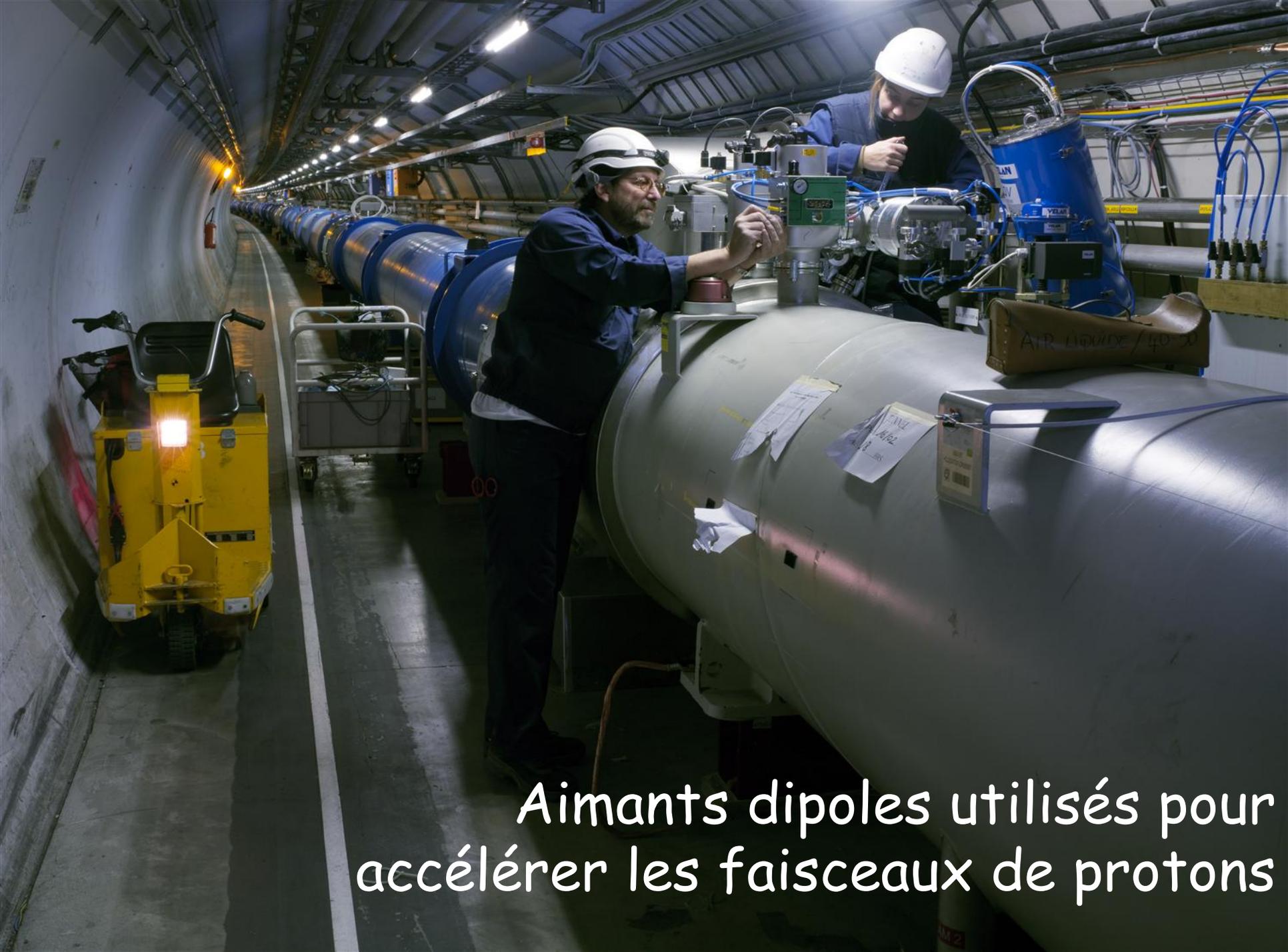
Outils de la physique des particules

- # L' "accélérateur " ... accélère des protons dans un gigantesque tunnel à presque la vitesse de la lumière. Deux faisceaux de protons circulent en sens inverse.
- # Les faisceaux entrent en "collisions " à 4 points précis. L'énergie de ces collisions se matérialise et crée de nouvelles particules: $E = mc^2$
- # Ces particules sont instables et se désintègrent en plus petites particules
...comme dans un feu d'artifice microscopique
- # Les "détecteurs" agissent comme des microscopes géants
...ils prennent des "clichés" des fragments de ces nouvelles particules lors de leur désintégration

Le Grand Collisionneur de Hadrons Ou "Large Hadron Collider" (LHC)

*Le LHC est un accélérateur
de particules consistant en
un tunnel de 27 km de long
situé à 100 m sous terre
près de Genève*





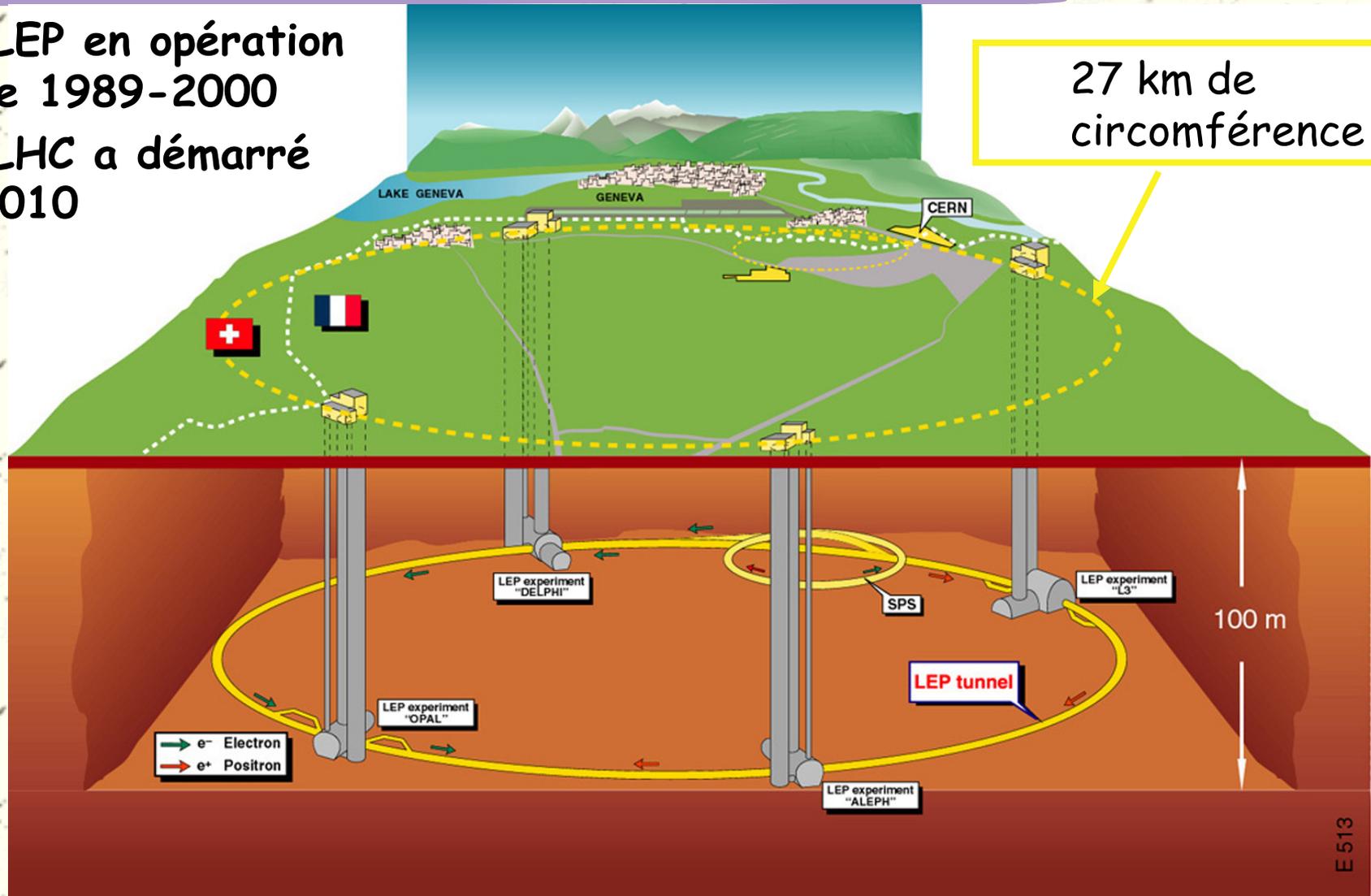
Aimants dipoles utilisés pour accélérer les faisceaux de protons

Des aimants quadrupoles focalisent les faisceaux de protons pour atteindre la plus grande densité aux 4 points d'interaction au centre des détecteurs

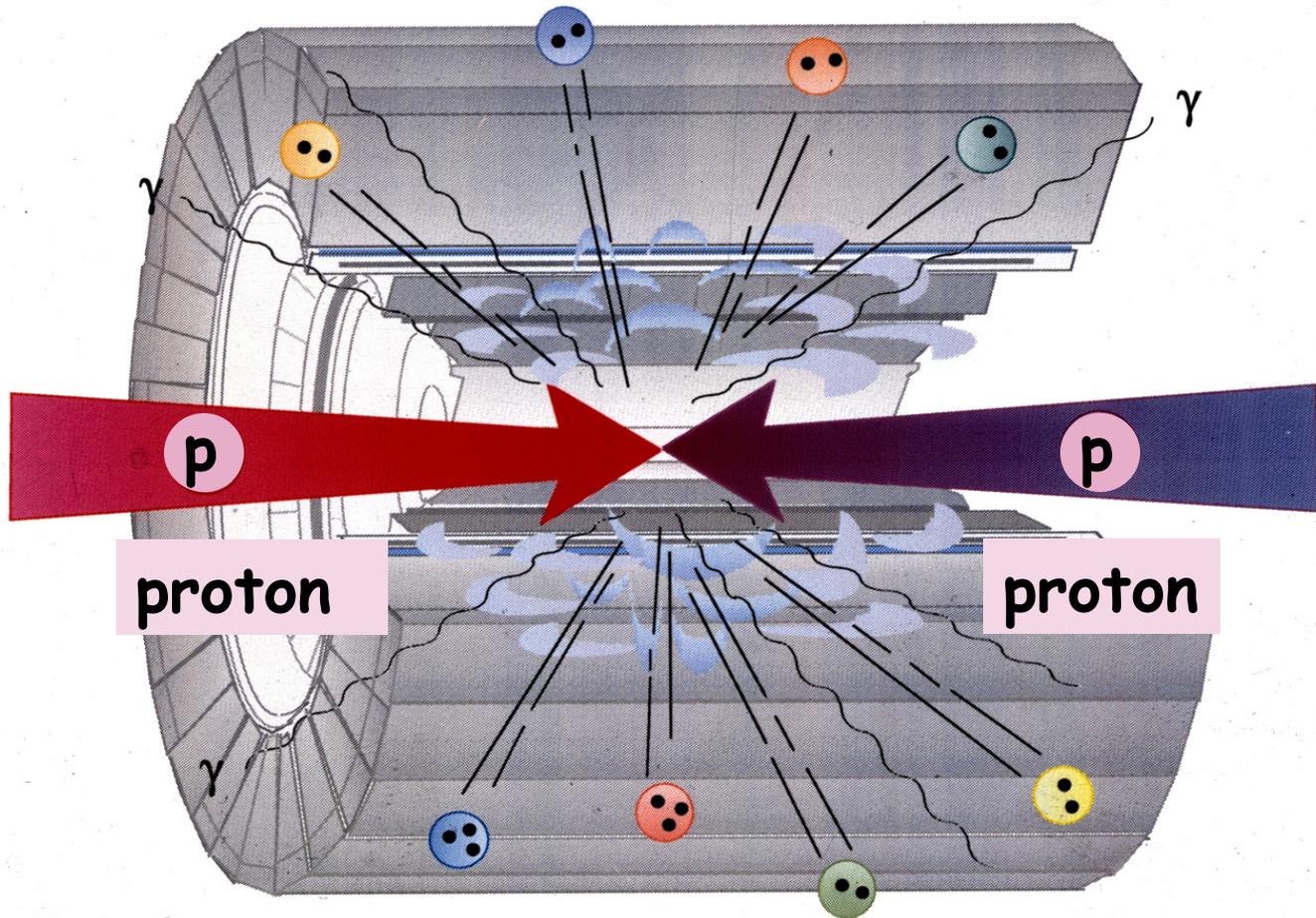


Avant, on avait le LEP: Large Electron Positron Maintenant, le LHC: Large Hadron Collider

- Le LEP en opération entre 1989-2000
- Le LHC a démarré en 2010

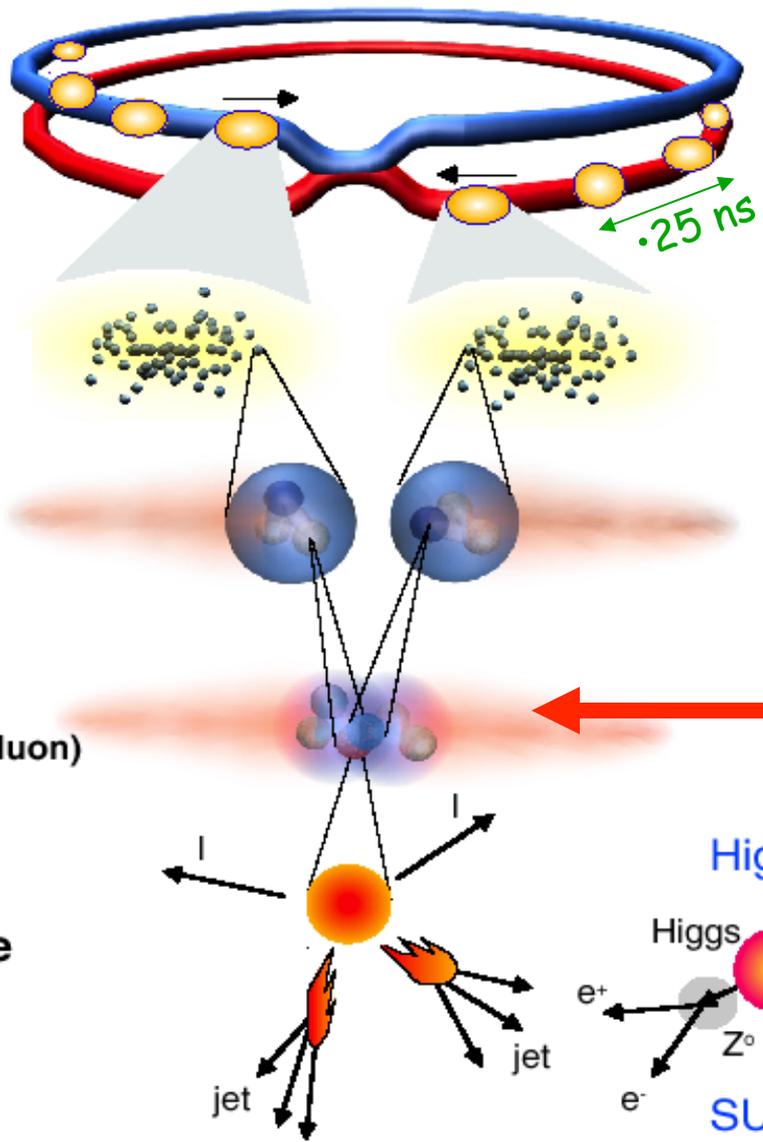


L'énergie dégagée lors de ces collisions crée des particules: $E=mc^2$



Eliane Onursal

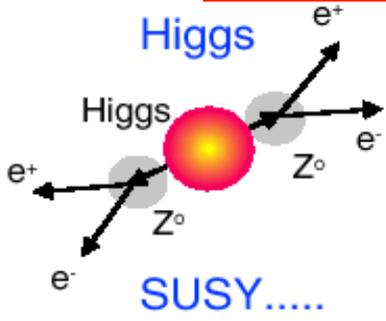
Collisions at LHC



Proton-Proton

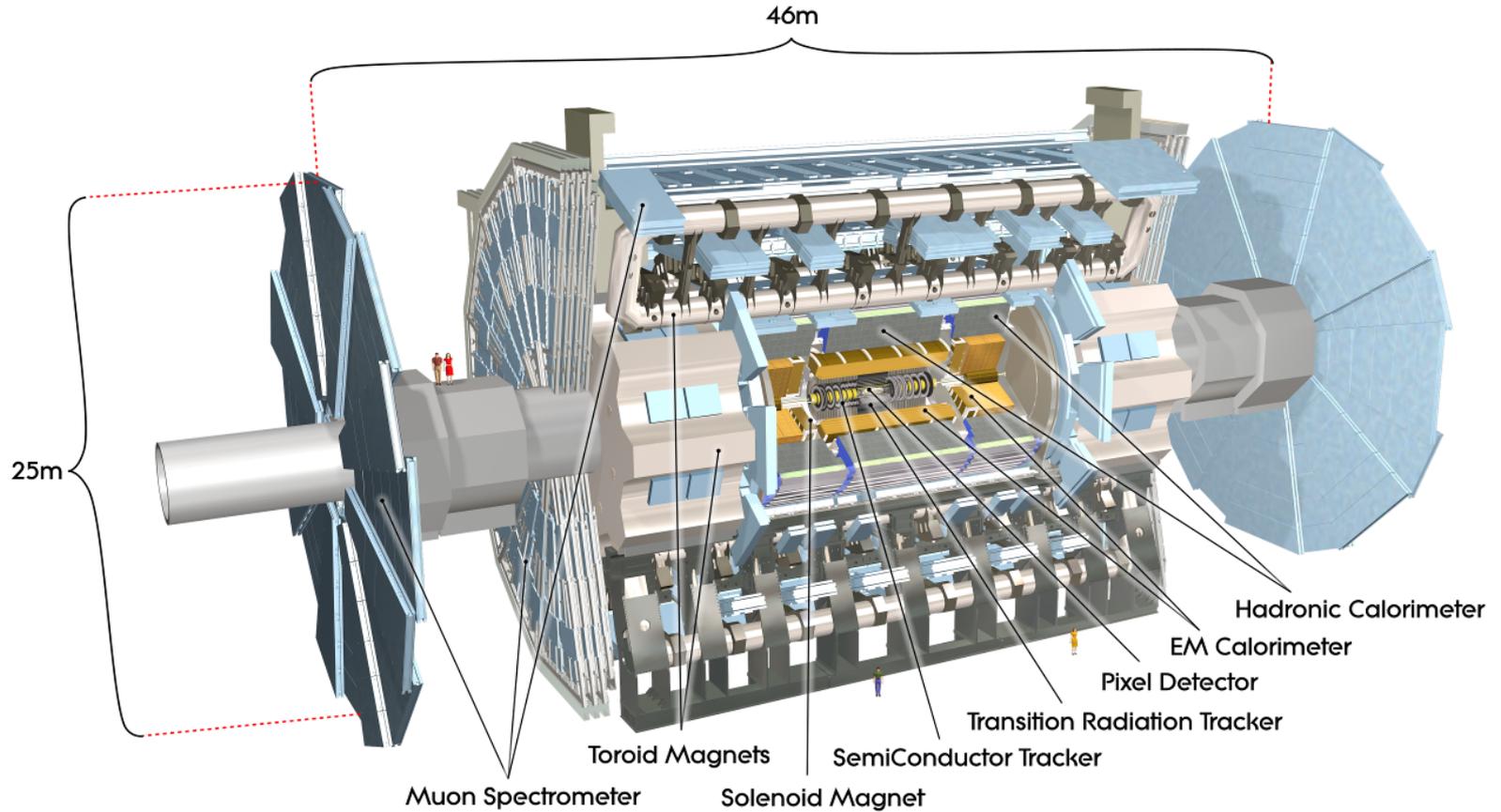
Protons/grappe 10^{11}
Energie par faisceau 7 TeV
 $7 \times 10^{12} \text{ eV}$
Luminosité $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
interactions par seconde: 10^9
 (la plupart ont peu d'énergie et sont rejetées)
Interaction intéressante avec un gros échange d'énergie (~200 Hz)

Trigger: Sélection de 1 sur 10 millions



→ Décisions prises super rapidement

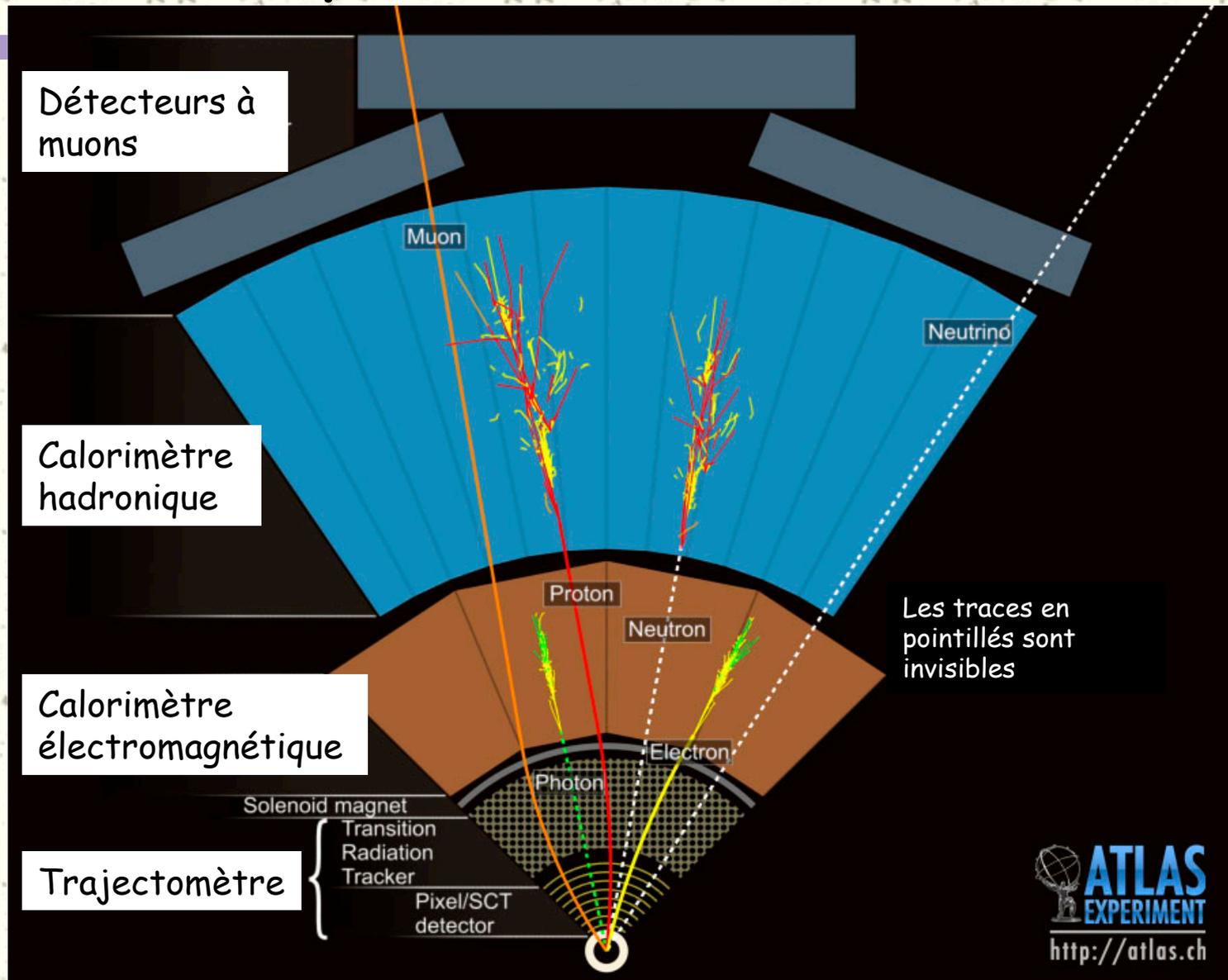
Schéma du détecteur ATLAS



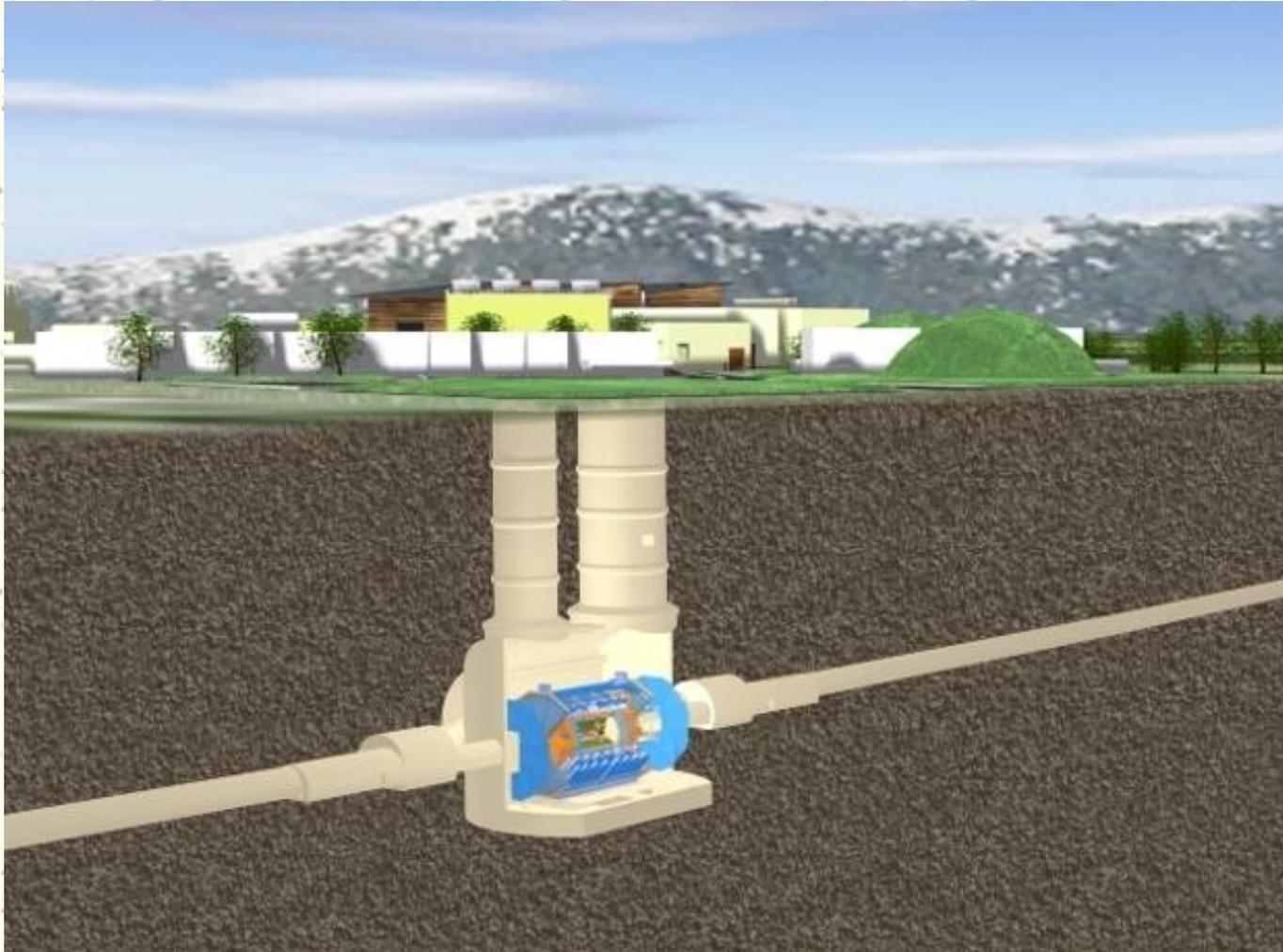
- Diamètre
- Longueur
- Poids total

25 m
46 m
7000 tonnes

Rôle de chaque couche du détecteur



Le détecteur ATLAS a été assemblé sous terre, comme un bateau dans une bouteille



La caverne est aussi vaste que la cathédrale Notre-Dame de Paris

Cavern:

Longueur = 55 m

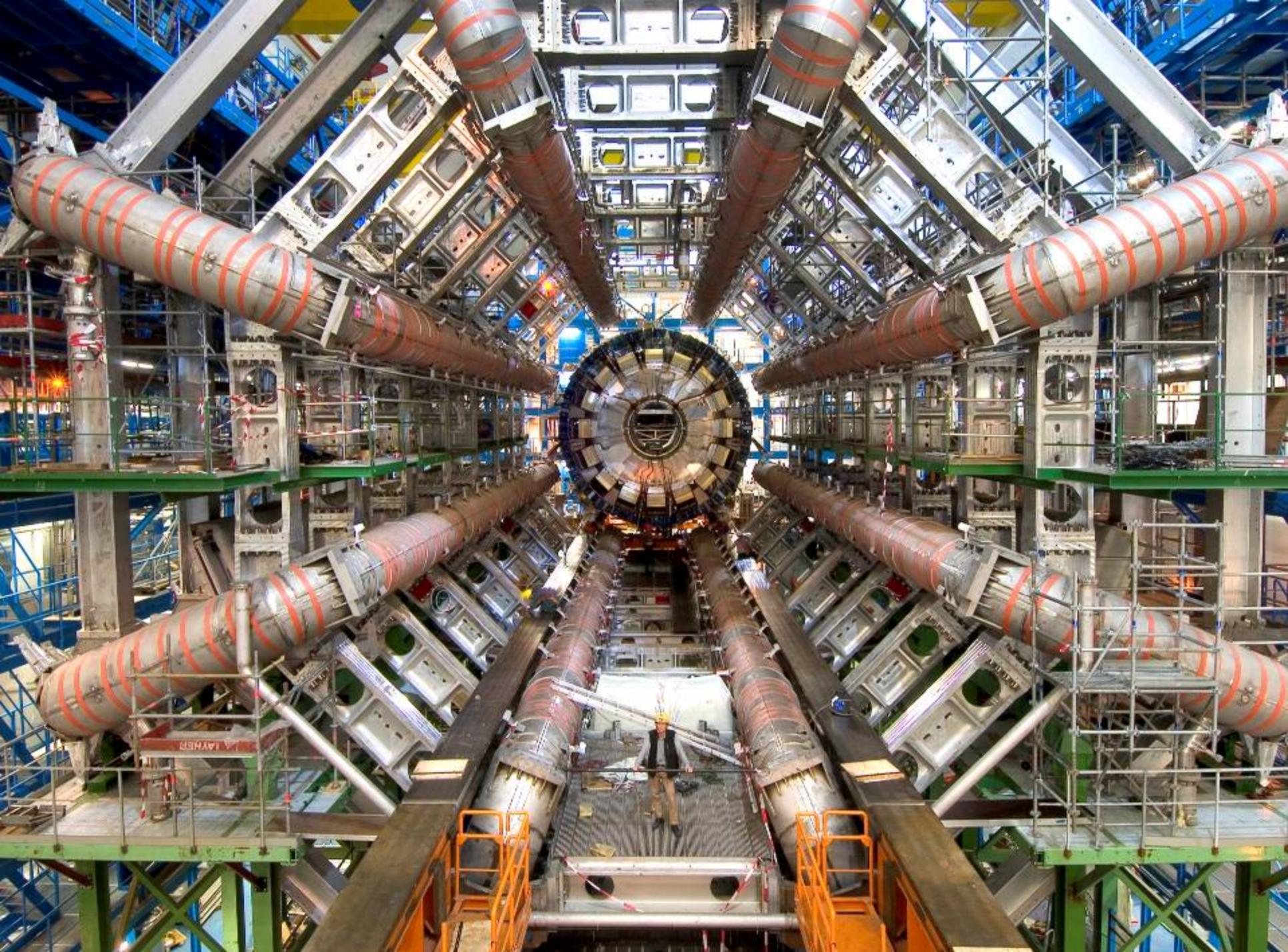
Largeur = 32 m

Hauteur = 35 m

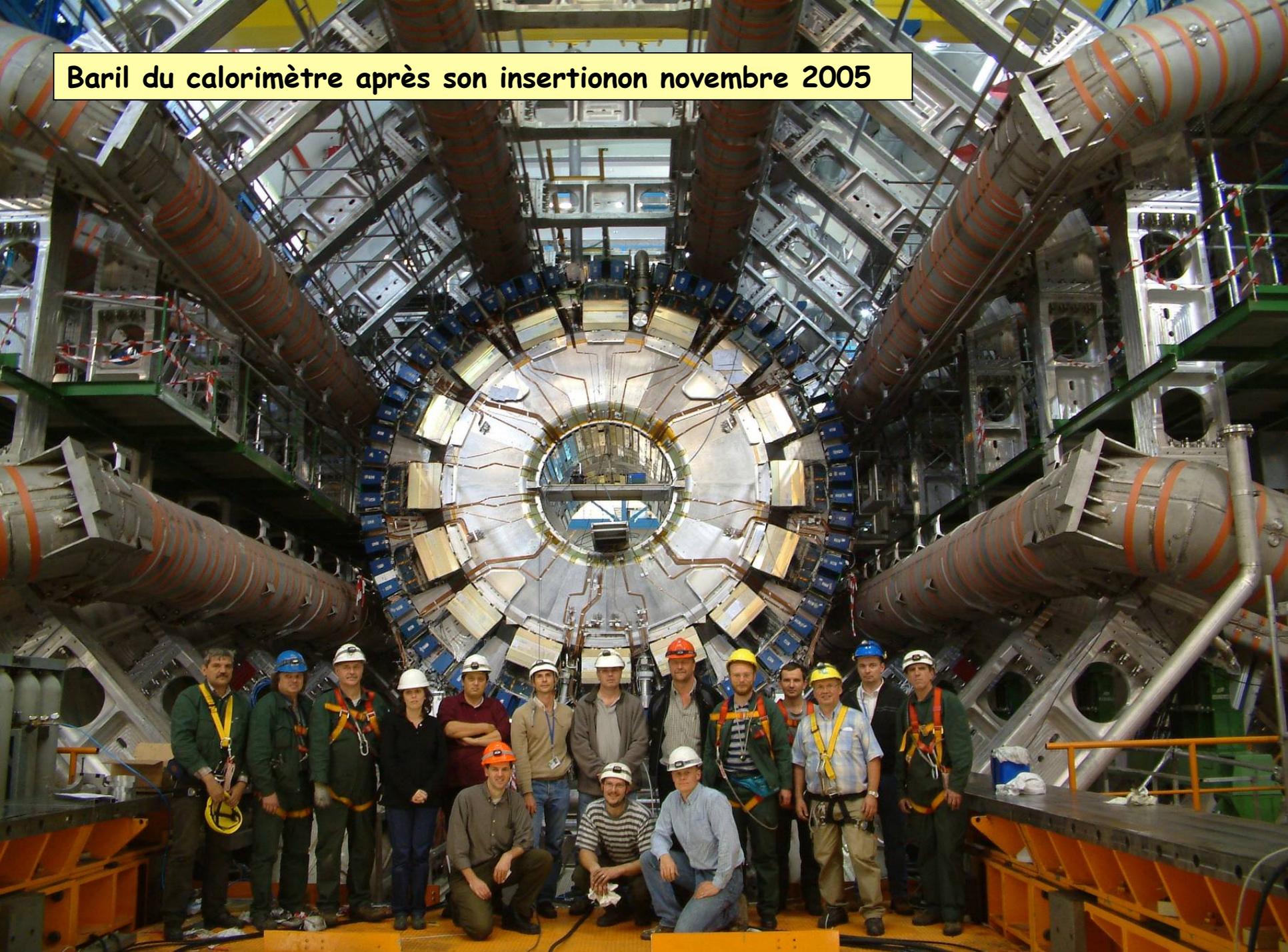
Profondeur = 100 m

Un aimant toroidal durant son transport



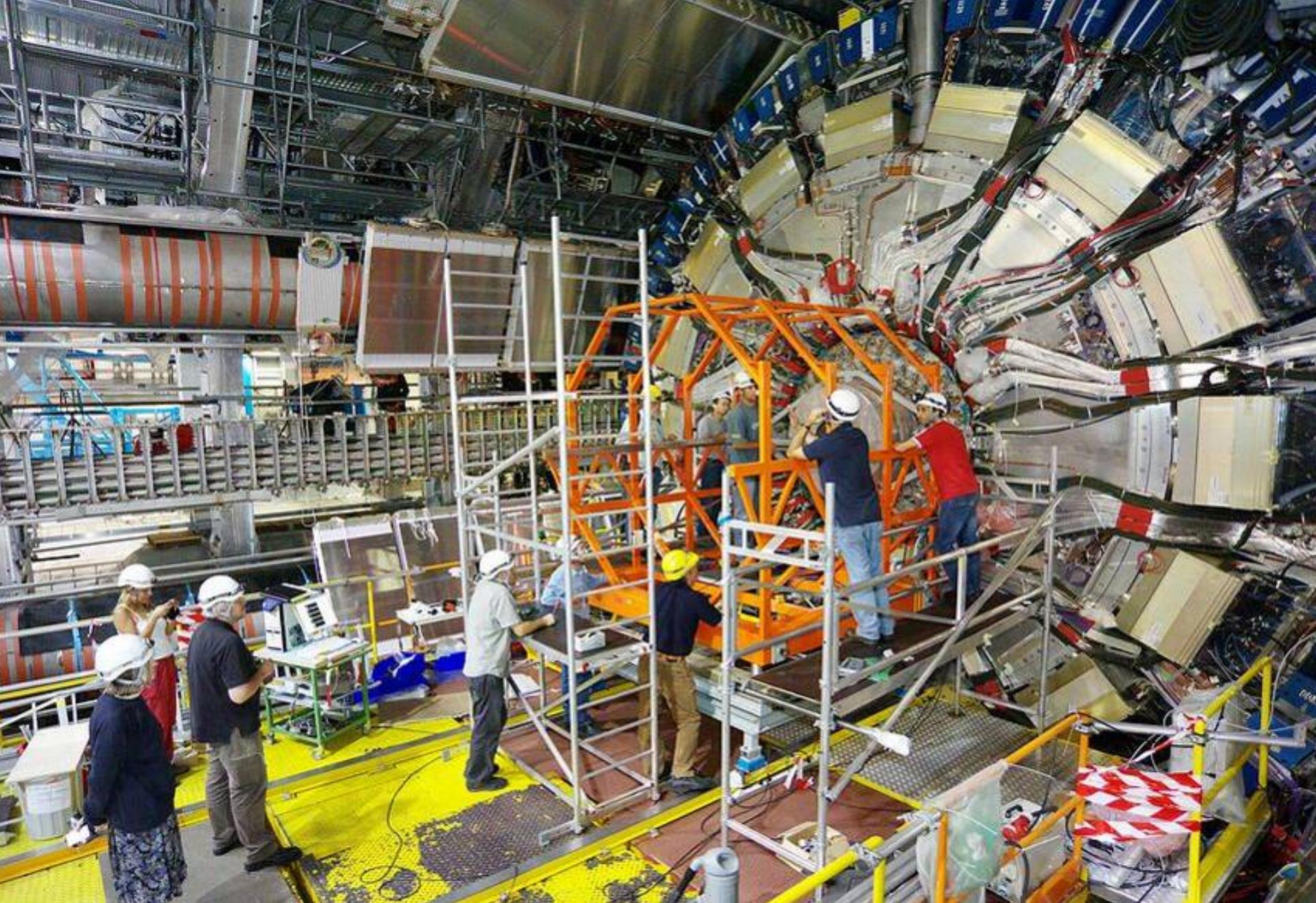


Baril du calorimètre après son insertion novembre 2005





Février 2006: le baril du trajectomètre est assemblé...



..et insérer à l'intérieur du calorimètre été 2006

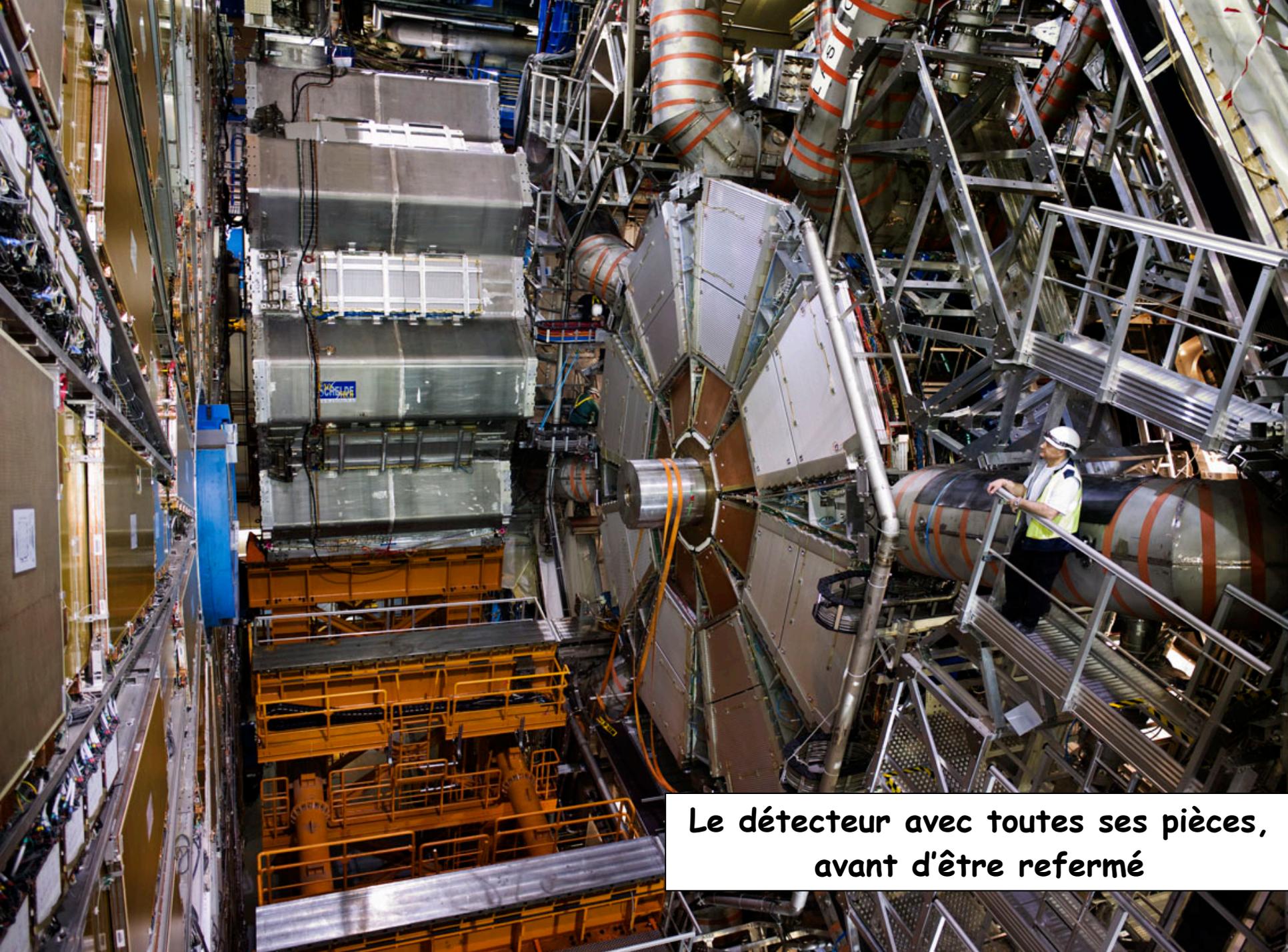
bouchons de l'aimant toroidal

Transport et installation par une entreprise spécialisée

Il pèse 250 tonnes, 15 m hauteur, 5 m largeur

Descendu en juin 2007





**Le détecteur avec toutes ses pièces,
avant d'être refermé**

Collaboration ATLAS

(Statut en mai 2008)



- 37 pays
- 170 institutions
- 3000+ scientifiques
dont 18% de femmes

• Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, Göttingen,

• LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow,

• MEPHI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen,

• BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen,

• Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney,

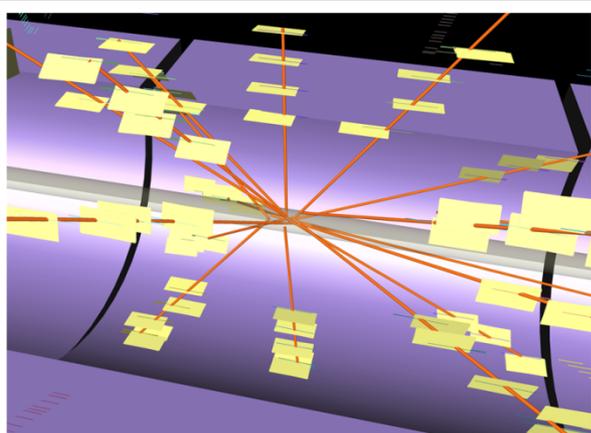
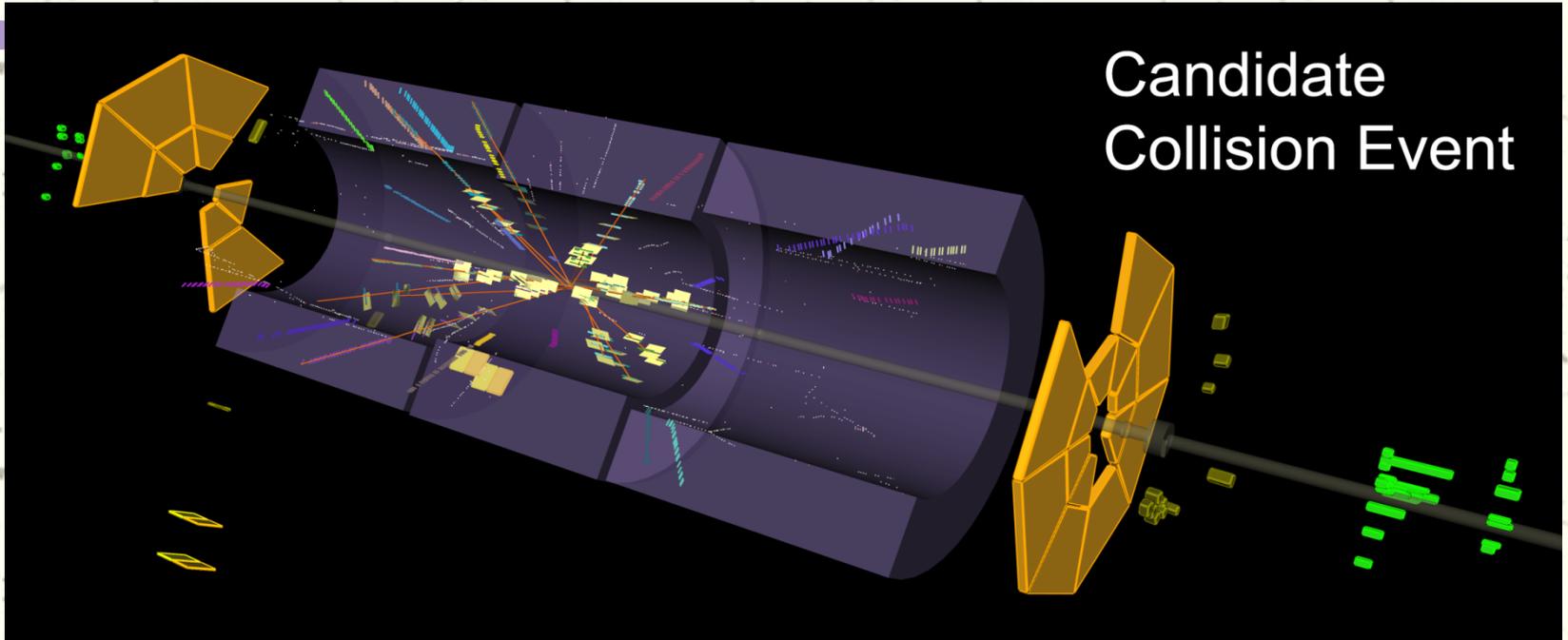
• AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

ATLAS collaboration par nationalité (70 nationalités différentes)

| Nationalité | % | Nationalité | % |
|--------------|-------|-------------|-------|
| Allemagne | 12.7% | Hollande | 2.0% |
| Italie | 12.3% | Pologne | 1.6% |
| Etats-Unis | 11.4% | Suède | 1.6% |
| Angleterre | 8.2% | Israël | 1.5% |
| France | 6.9% | Roumanie | 1.2% |
| Russie | 6.2% | Portugal | 1.2% |
| Japon | 4.0% | Suiss | 1.1% |
| Espagne | 3.6% | Autriche | 1.0% |
| Rép. tchèque | 3.3% | Norvège | 0.9% |
| Canada | 3.1% | Turquie | 0.9% |
| Chine | 2.4% | Inde | 0.8% |
| Grèce | 2.3% | Autres (47) | 10.0% |

Toute première collision

Candidate
Collision Event



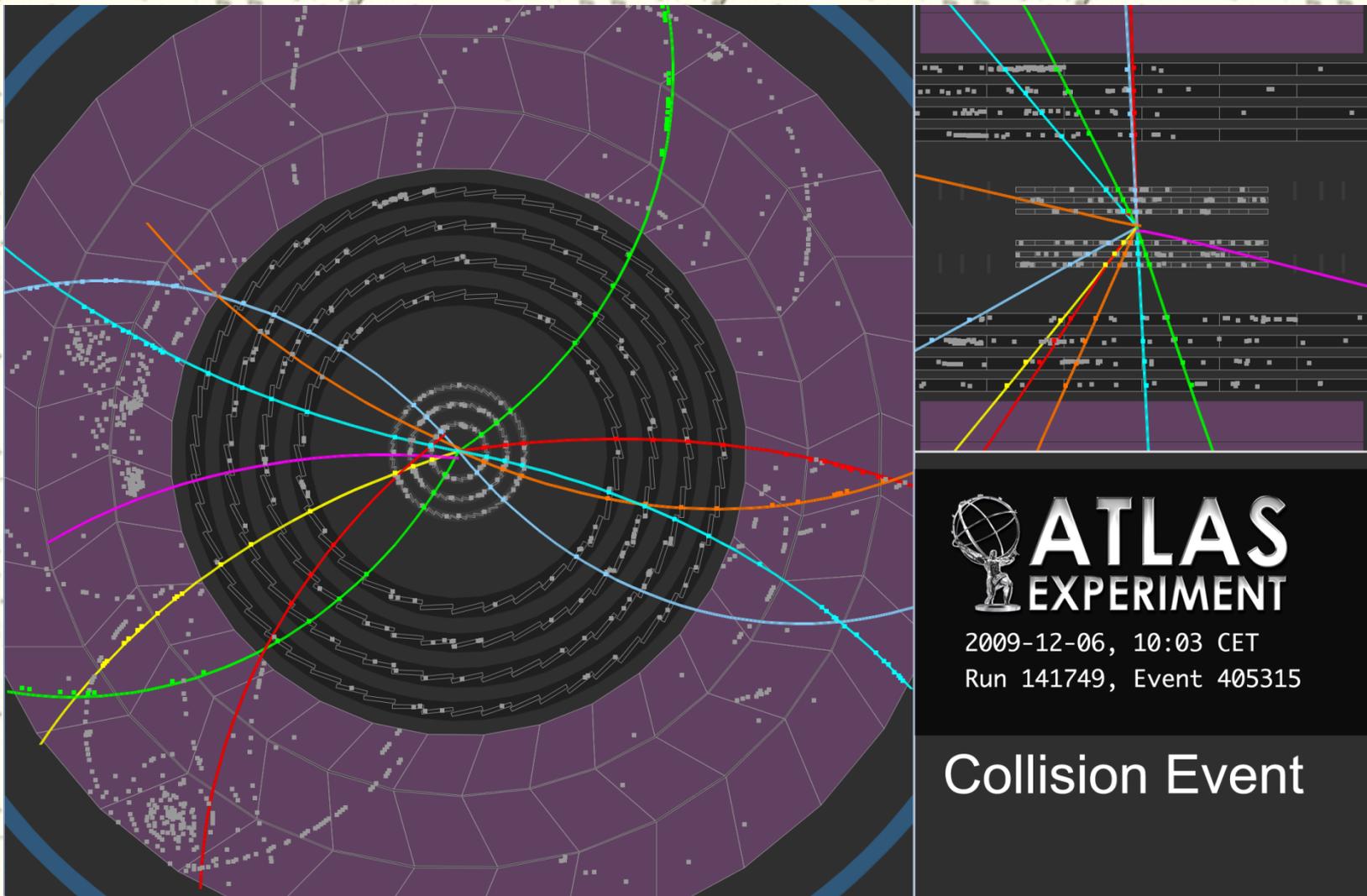
 **ATLAS**
EXPERIMENT

2009-11-23, 14:22 CET

Run 140541, Event 171897

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

Premières collisions avec tous les trajectomètres allumés



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

Questions sans réponse du Modèle Standard

1. L'origine de la masse:

Les équations du Modèle Standard ne prédisent que des particules sans masse

2. La nature de la matière sombre

3. Y a-t-il une théorie encore plus fondamentale que le modèle standard?

Supersymétrie, Vallée Cachée, extra dimensions

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- # En 1964, 3 théoriciens, Peter Higgs, Robert Brout et François Englert, ont proposé un mécanisme pour expliquer comment les particules peuvent acquérir une masse:
- # Ils ont proposé un nouveau champ de force et une nouvelle particule, le boson de Higgs
- # Ce champ modifie les propriétés de l'espace et ralentit toute particule qui interagit avec lui mais sans perdre d'énergie
- # Comme $E = mc^2$, l'énergie cinétique perdue est transformée en masse

Qu'est-ce que le boson de Higgs ?

| Unified Electroweak spin = 1 | | |
|------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Name | Mass GeV/c ² | Electric charge |
| γ photon | 0 | 0 |
| W^- | 80.4 | -1 |
| W^+ | 80.4 | +1 |
| Z^0 | 91.187 | 0 |

La théorie prédit **4 bosons** sans masse

Le mécanisme de Higgs brise cette symétrie en changeant les 4 bosons sans masse en:

- 3 bosons massifs : W^+ , W^- , Z^0 et
- 1 boson sans masse: γ^0

Tous les fermions acquièrent une masse en interagissant avec le boson de Higgs

Recherche du boson de Higgs avec ATLAS

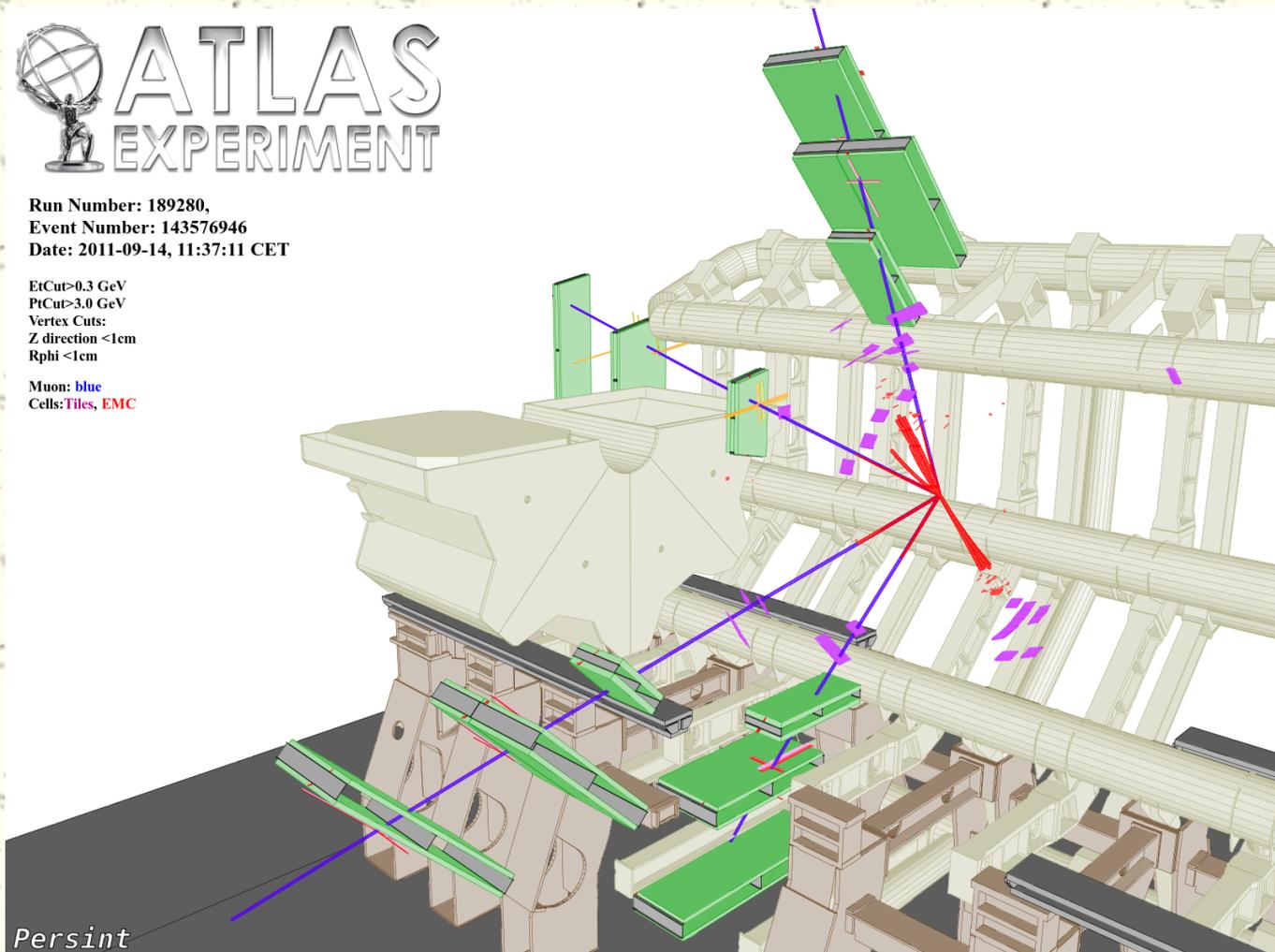
$H \rightarrow ZZ$ avec $Z \rightarrow \mu\mu$, et $Z \rightarrow \mu\mu$



Run Number: 189280,
Event Number: 143576946
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

EtCut > 0.3 GeV
PtCut > 3.0 GeV
Vertex Cuts:
Z direction < 1cm
Rphi < 1cm

Muon: blue
Cells: Tiles, EMC

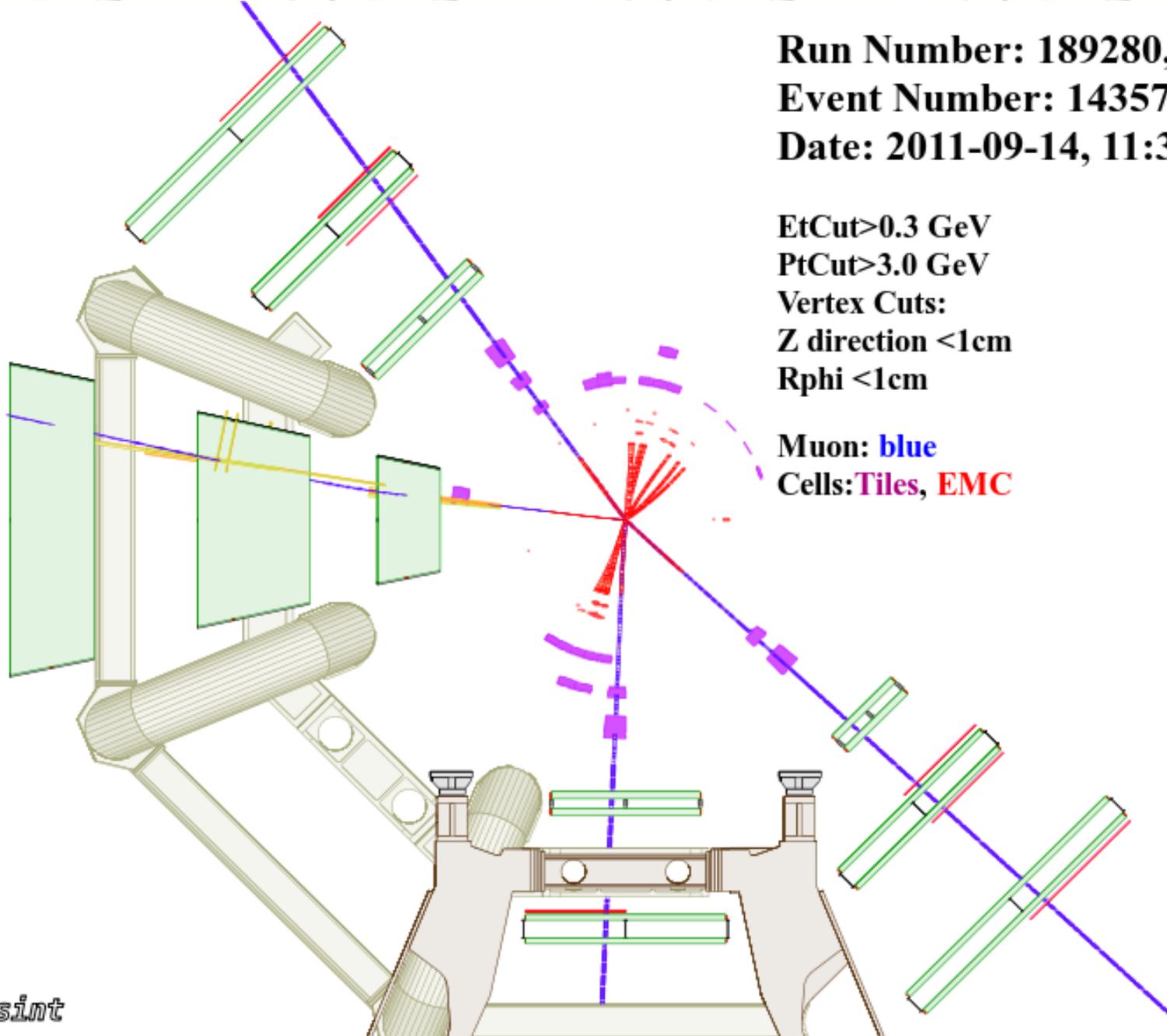


Persint

Run Number: 189280,
Event Number: 143576946
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CE'

EtCut > 0.3 GeV
PtCut > 3.0 GeV
Vertex Cuts:
Z direction < 1cm
Rphi < 1cm

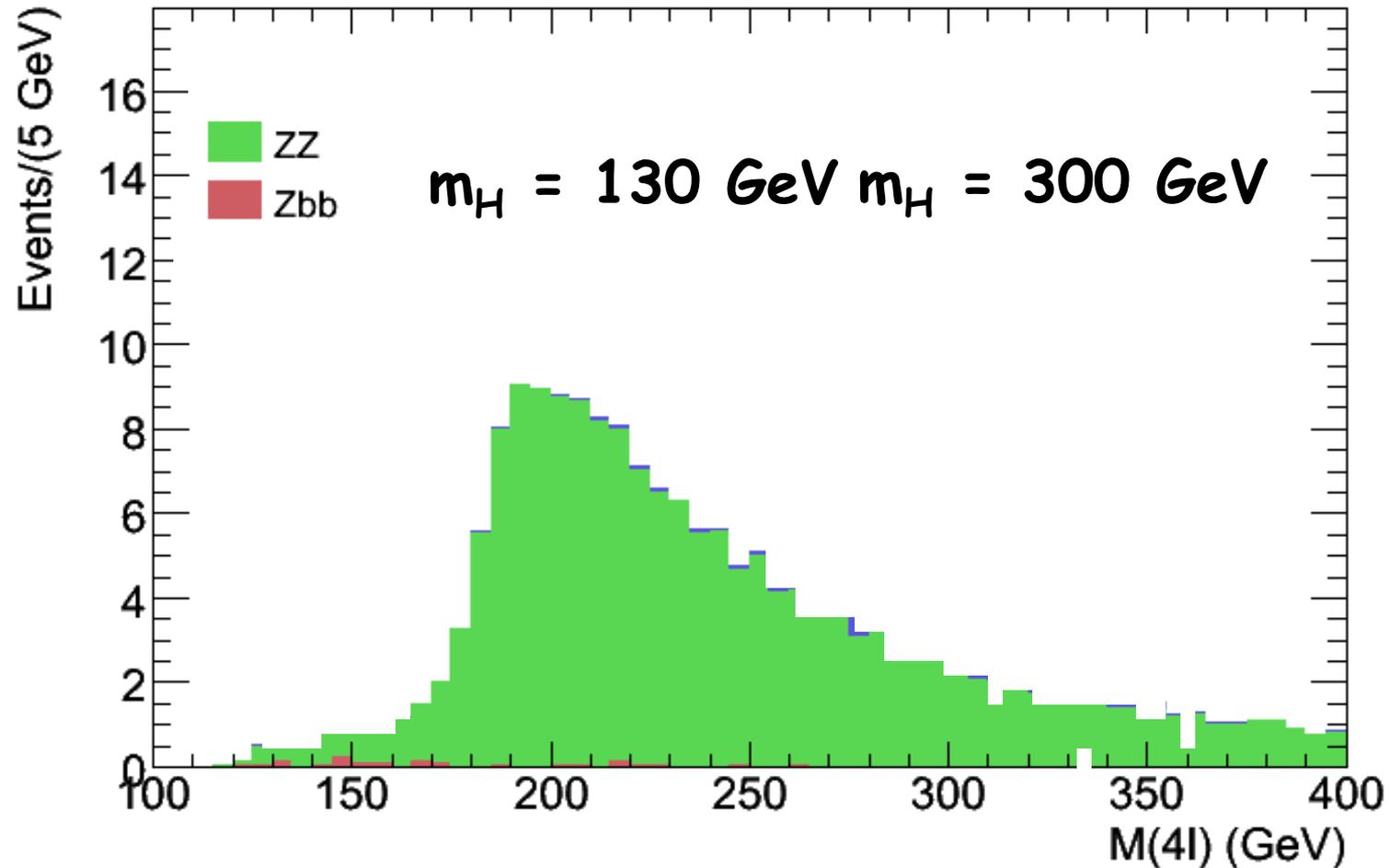
Muon: blue
Cells: Tiles, EMC



Persint

Comment distinguer un événement contenant un Higgs des autres types d'évènements?

En utilisant des méthodes statistiques



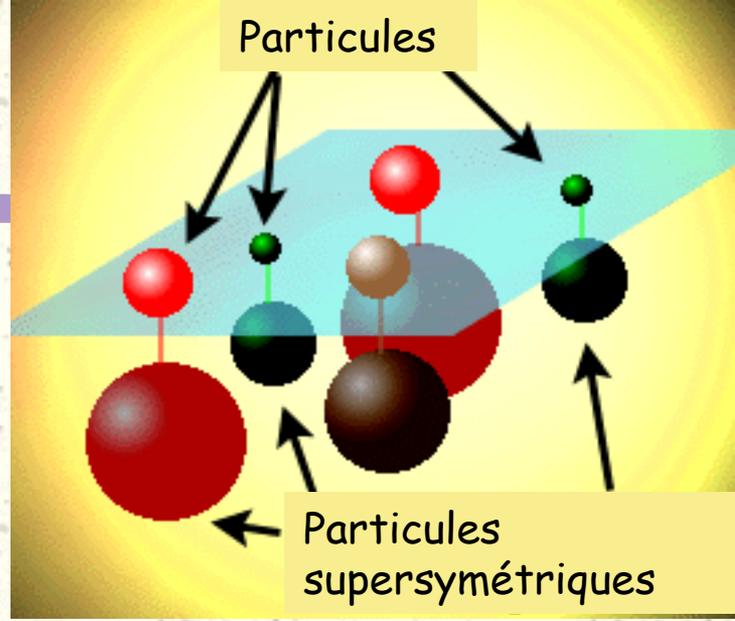
En résumé

- # Le Modèle Standard explique presque tous les phénomènes observés en physique des particules
- # Mais sans le mécanisme de Higgs, on ne peut expliquer l'origine de la masse
 - on sait que les particules élémentaires en ont une
- # Si le boson de Higgs reste introuvable même avec le LHC, il faudra trouver une alternative...

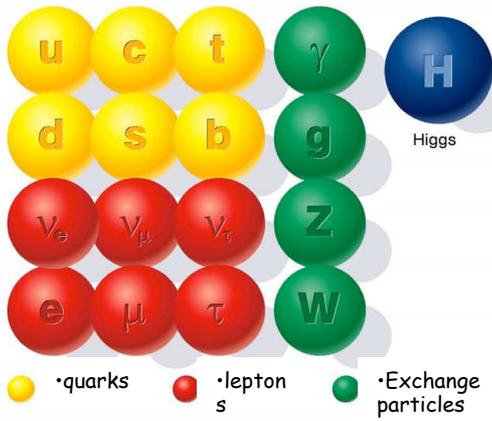
Supersymétrie (SUSY)

- Etablie une correspondance entre matière (fermions) et forces (bosons):
- Chaque particule a un partenaire supersymétrique
- Tous les fermions ont un spin 1/2
- les bosons des spins 0 ou 1

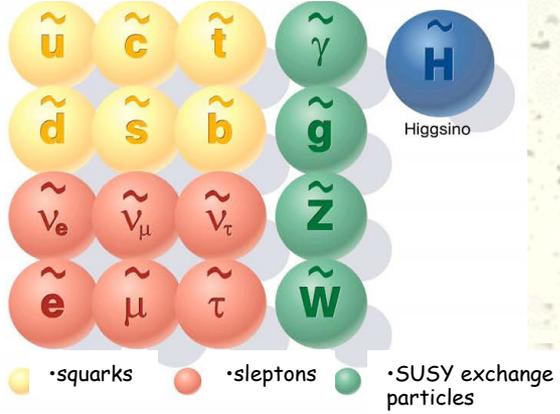
- Exemples $q (s=1/2) \rightarrow \tilde{q} (s=0)$ squark
- $g (s=1) \rightarrow \tilde{g} (s=1/2)$ gluino



Le monde des particules standard

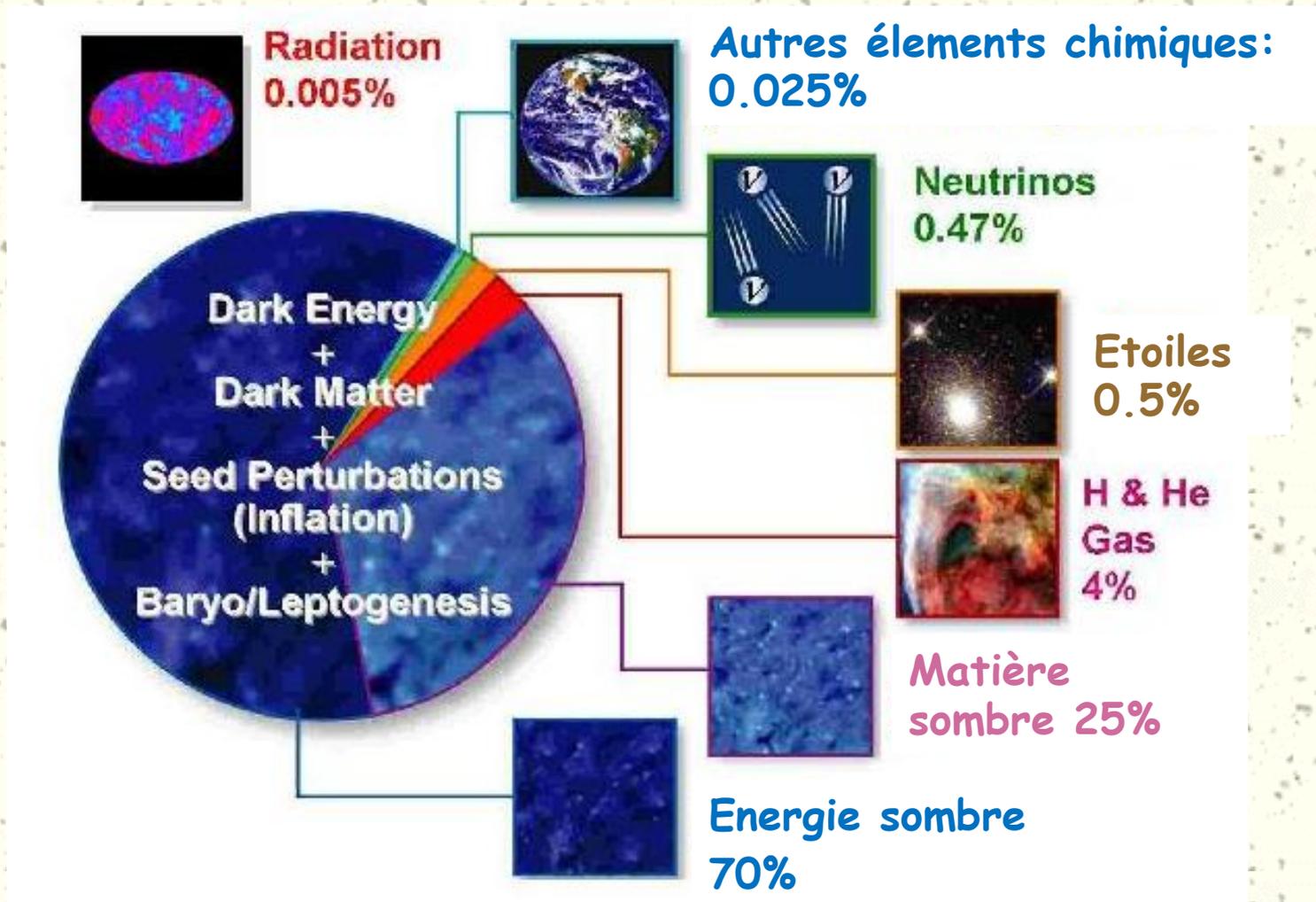


Peut-être un monde de particules SUSY



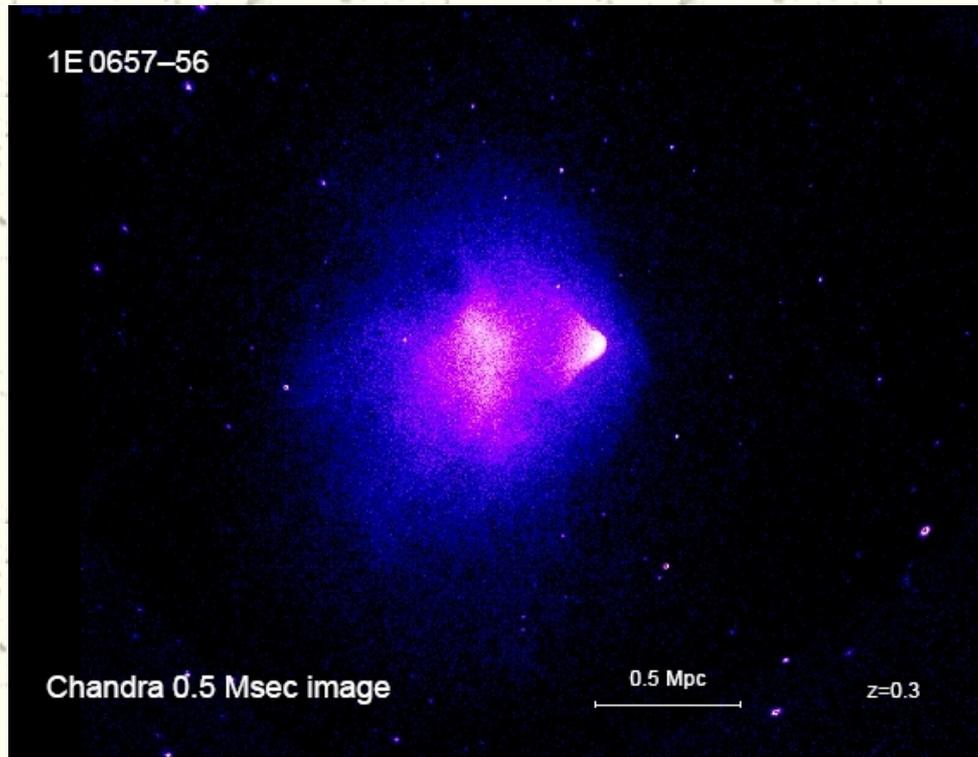
*Motivation:
Unifier matière et forces*

Matière sombre et énergie sombre: mais de quoi notre univers est-il fait?



Tiré d'un article de John Ellis: Les questions de Gauguin en physique des particules

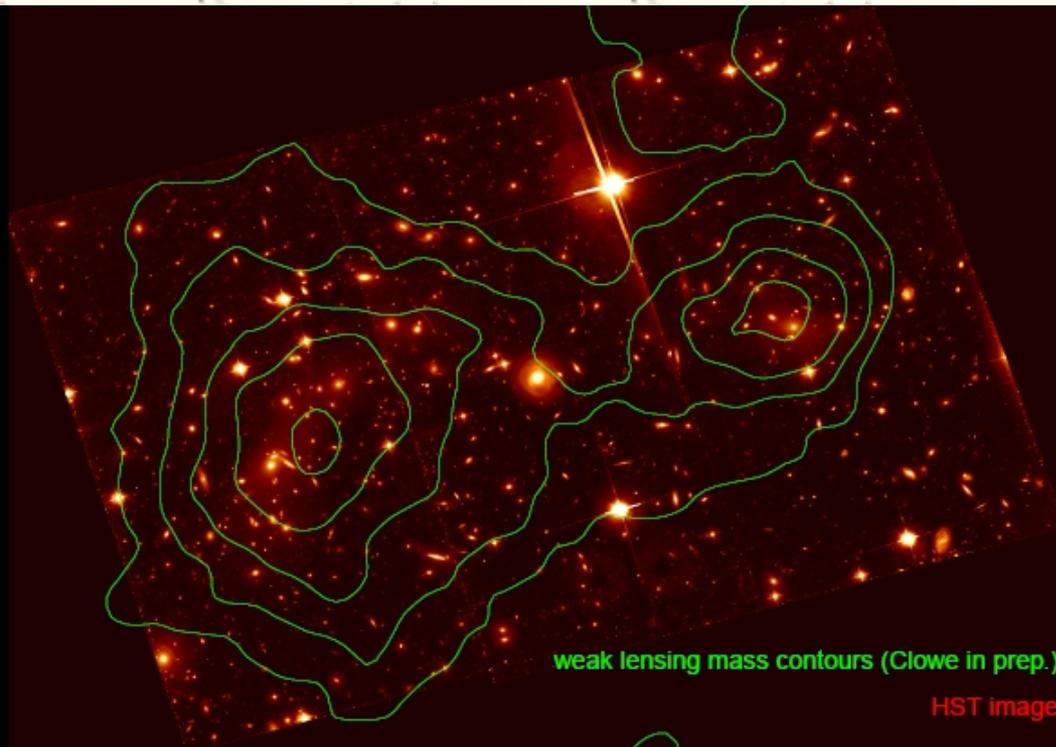
Preuve de l'existence de la matière sombre



- # Photo d'une collision entre deux groupes de galaxies
- # C'est le matériel inter-galactique (gaz) qui entre en collision
- # Le tout chauffe à 160×10^6 °C puis émet des rayons X
- # On voit ici une photo montrant l'intensité des rayons X émis

- Durée d'exposition: 140 heures!
- Largeur: 1.6 année-lumière

Matière sombre vue sous l'effet de "lentille gravitationnelle"



Même collision
observée par le
télescope Hubble

Ici on voit la densité du
champ gravitationnel
généré par la matière
sombre

La matière sombre de
chaque amas de
galaxies passe par
dessus l'autre sans
interagir

La matière sombre est là mais elle interagit que très faiblement avec la matière ordinaire

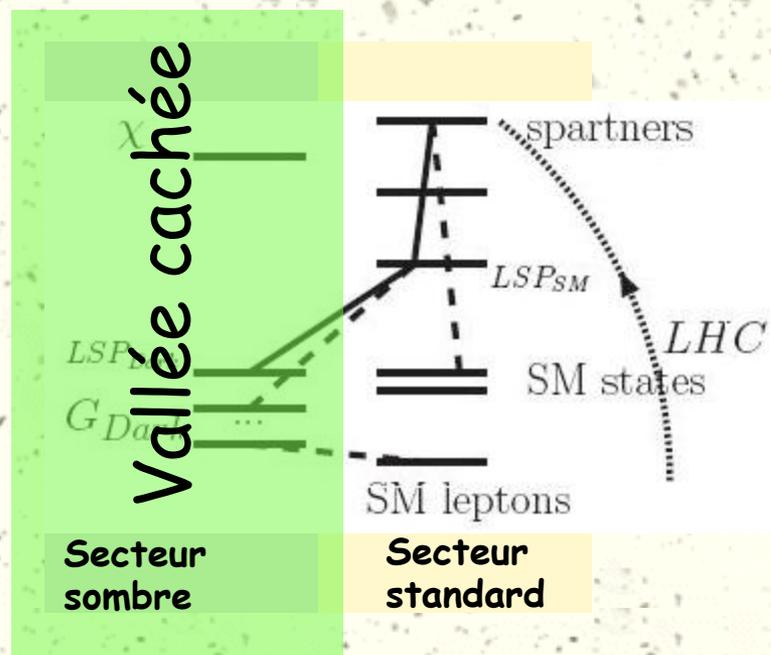


Les amas de gaz intergalactique se frappent mais la matière sombre elle poursuit son chemin

Les centres de gravité de la matière visible et sombre ne coïncident pas

Matière sombre et vallée cachée

- # Deux mondes en parallèle:
 - Modèle Standard + SUSY
 - Le secteur sombre vient aussi avec $SUSY_{\text{sombre}}$
- # Plusieurs états excités pour la matière sombre, du plus lourd au plus léger
- # Au LHC, on peut produire les particules de SUSY les plus lourdes du côté du modèle standard
- # Celles-ci se désintègrent en cascade jusqu'à la particule supersymétrique la plus légère (LSP_{SM})
- # Mais ce LSP_{SM} est un messenger qui peut passer de l'autre côté (dans le secteur sombre) puis se désintégrer jusqu'au vrai LSP, le LSP_{sombre}
- # Et finalement le LSP_{sombre} est aussi un messenger qui peut retraverse du côté du modèle standard en se désintégrant en leptons



Seul le LHC est assez énergétique pour produire les plus hauts états de SUSY nous donnant accès au secteur de la matière sombre après des cascades en série et une traversée de l'autre côté