

Les objectifs scientifiques du LHC : le boson de Higgs

Sylvain Tisserant

Centre de Physique des Particules de Marseille
IN2P3/CNRS – Université de la Méditerranée

29 mars 2008



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

Plan

- Notre vision actuelle du monde des particules
- Le boson de Higgs
- Principes d'une expérience de physique des particules
- L'expérience Atlas
(avec les contributions du CPPM)

A la fin du XIX^{ème} siècle

- Physique ≡ science aboutie
- Deux piliers :
 - Mécanique Newtonienne
 - Electromagnétisme de Maxwell
- Peut-être deux problèmes :
 - L'éther
 - Le rayonnement du corps noir

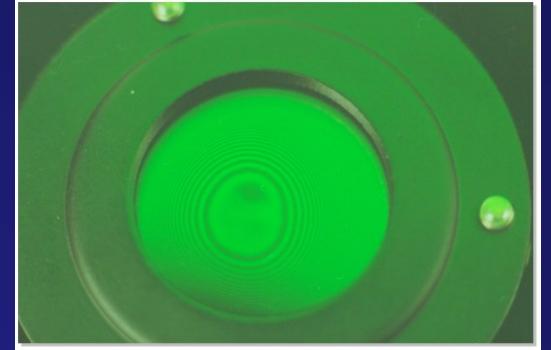
Deux seulement ?

- 1895 : une année faste
 - Découverte des rayons X (W. Röntgen)
 - Découverte de la radioactivité de l'uranium (H. Becquerel)
 - Cinématographe (Frères Lumière)
- 1896 :
 - Découverte de l'électron (J.-J. Thomson)
- 1898 :
 - Découverte de la radioactivité du radium et du polonium (P. et M. Curie)
- 1903 : Prix Nobel pour H. Becquerel, P. et M. Curie

La radioactivité

- Remise en cause de la physique et de la chimie classiques
- Émission spontanée d'un rayonnement
 - Matière et énergie : alpha et bêta
 - Rayonnement : gamma (semblable aux rayons X)
- Transmutation de la matière (rêve des alchimistes)
 - Uranium → thorium
- Devait-on toujours croire dans les principes de conservation de la masse et/ou de l'énergie ?

La vitesse de la lumière



- Maxwell :
 - Électrostatique : charges et champs électriques
 - Magnétisme : aimants, bobines et champs magnétiques
 - Deux aspects d'une même théorie : électromagnétisme (1864)
 - La lumière est une onde électromagnétique (vérifiée en 1888 par Hertz)
 - Uniquement 4 équations avec une constante : la vitesse de la lumière
- L'éther luminifère :
 - Interférences lumineuses prouvaient la nature ondulatoire de la lumière
 - Question (Huygens) : support matériel de ces ondes ?
 - La vitesse de la lumière constante dans un référentiel lié à l'éther

La vitesse de la lumière (2)

- Michelson :
 - Mesure du mouvement de la terre par rapport à l'éther : $c+v$ et $c-v$ à 6 mois d'intervalle
 - Détermination de c et v
 - Résultat expérimental : la vitesse de la lumière était la même
- Lorentz et Poincaré, puis Einstein
 - Invariance des équations de Maxwell pour certaines transformations, indétectabilité de l'éther, puis relativité et absence d'éther

Il y a (un peu plus de) cent ans

- En 1905 A. Einstein publie 4 articles :
 - Explication de l'effet photoélectrique
 - Photon, dualité onde-corpuscule
 - Prix Nobel en 1921
 - Interprétation du mouvement brownien
 - Atomes et molécules
 - Relativité de l'espace-temps
 - Relativité restreinte
 - Équivalence masse et énergie
 - $E = m c^2$
- Ne pas oublier M. Plank et la quantification (Prix Nobel 1918)

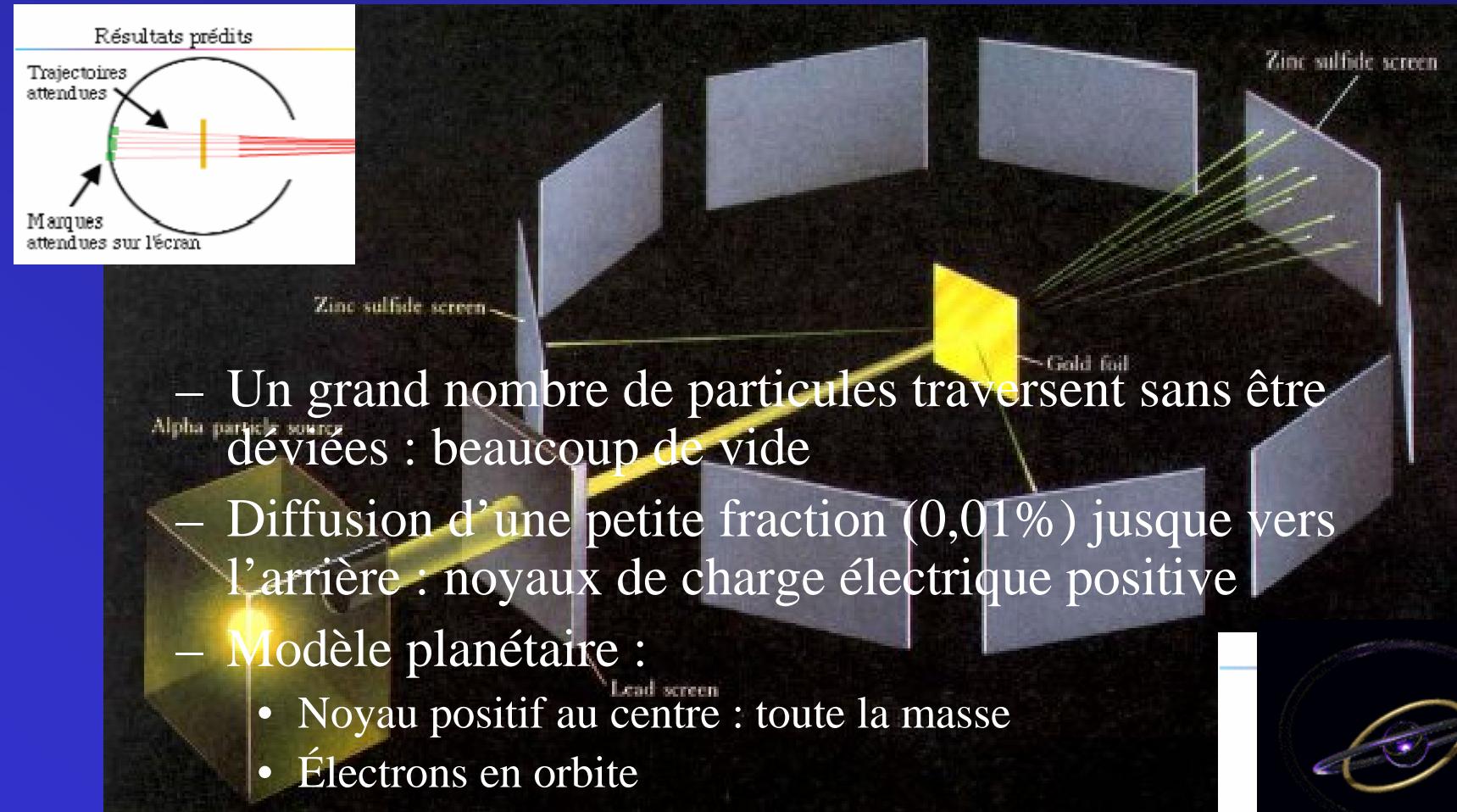
Naissance d'une nouvelle physique

- Grande effervescence d'idées en une trentaine d'années
- Mécanique quantique et Relativité
- Ce qu'on croyait continu (matière, lumière, énergie, etc.) devient discontinu :
 - Atomes et molécules
 - Photons
 - Quanta
- Ce qu'on croyait déterministe devient probabiliste
 - Une particule n'est ni ponctuelle, ni localisée
 - On peut lui associer une onde

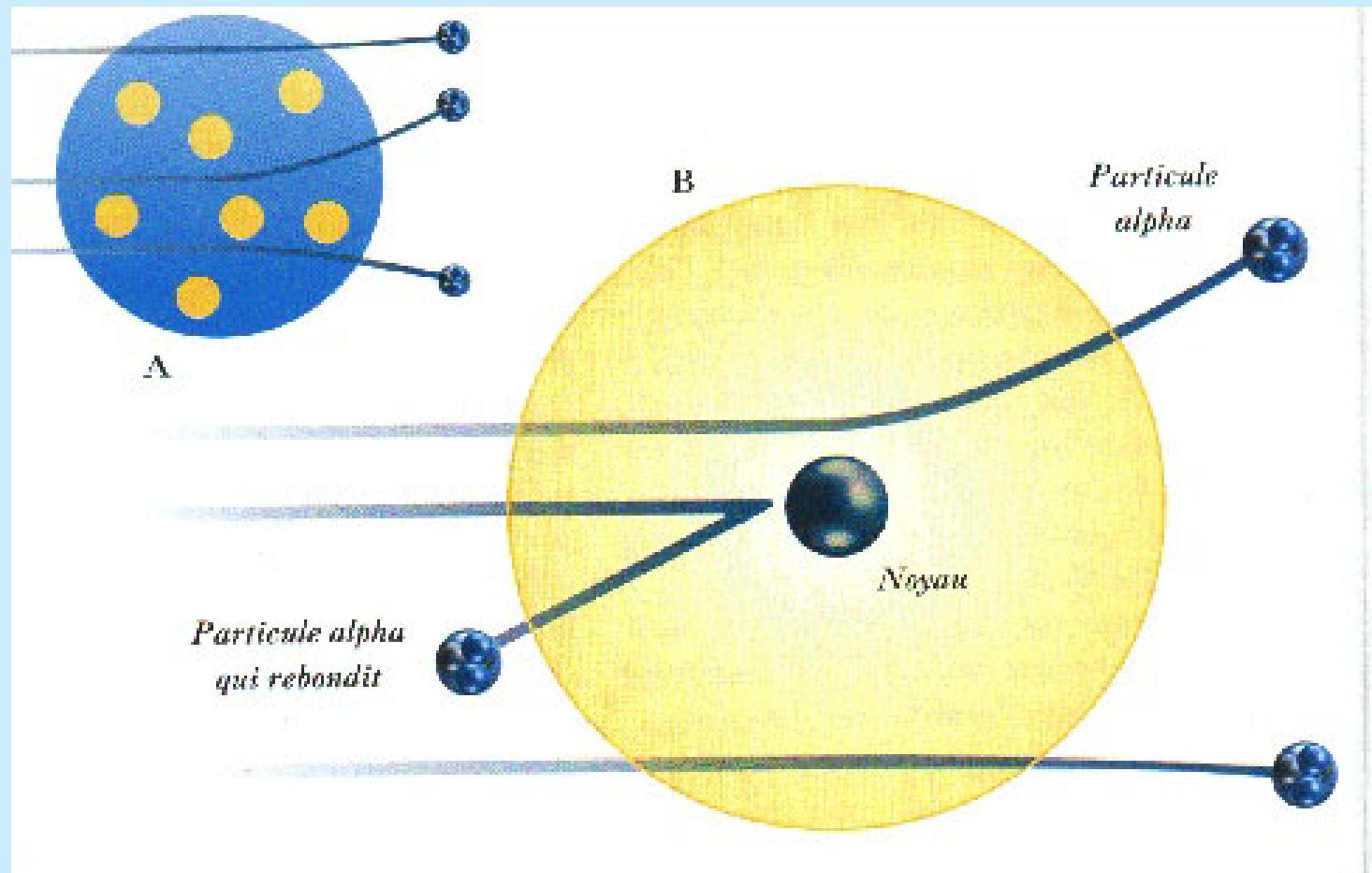
Naissance d'une nouvelle physique (2)

- Les longueurs ou le temps peuvent se dilater ou se contracter :
 - Une horloge en mouvement bat plus lentement qu'au repos
- Un nouveau niveau d'abstraction
- S'applique à l'infiniment petit et à l'infiniment grand :
 - Physique du solide, nucléaire et des particules
 - Univers : Big-Bang, nucléo-synthèse, expansion, étoiles, galaxies, etc.

La structure de l'atome



L'expérience de Rutherford 1911



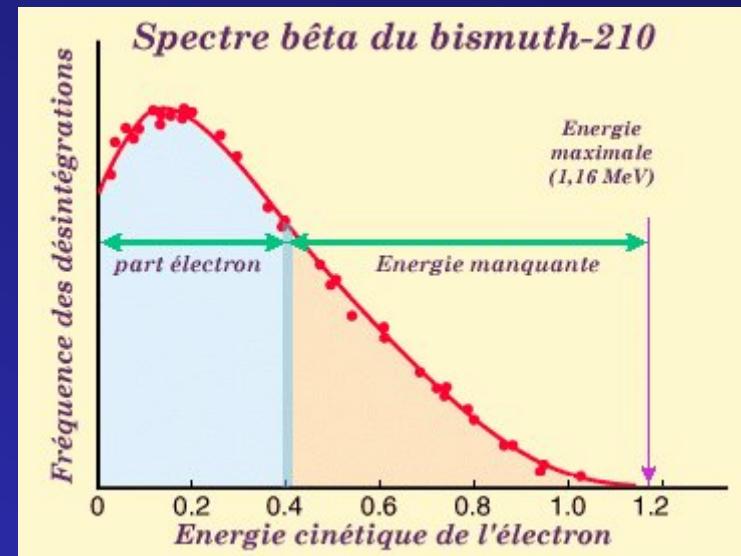
Il existe au centre de l'atome un noyau chargé positivement

Le monde des particules

- Atome : noyau + électrons
- Noyau : protons et neutrons
 - Presque même masse
- Radioactivité bêta :

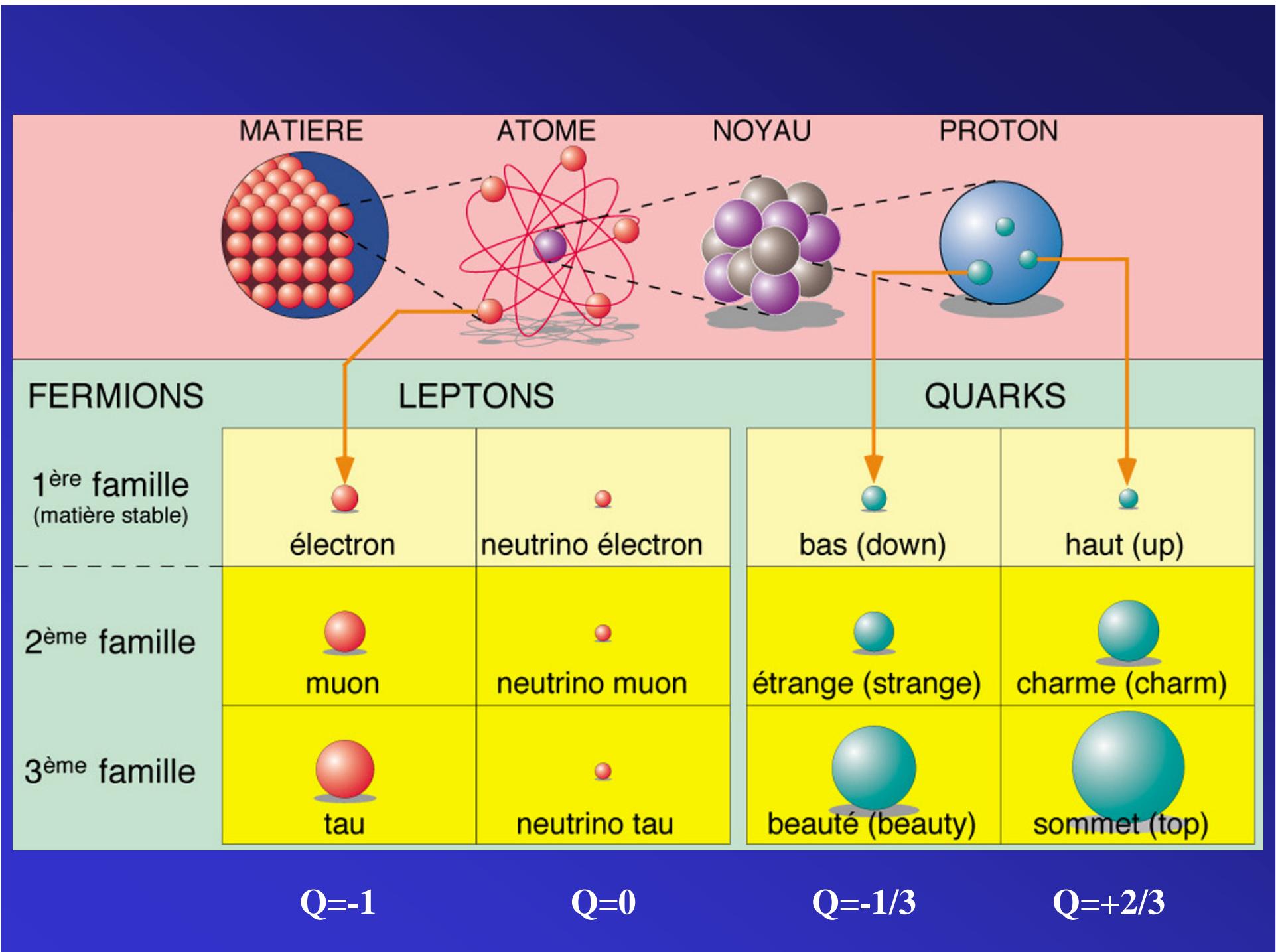


- conservation de la charge
- mais pas conservation de l'énergie, sauf si émission d'une particule neutre "invisible" : neutrino (W. Pauli, 1930) :



Le monde des particules (2)

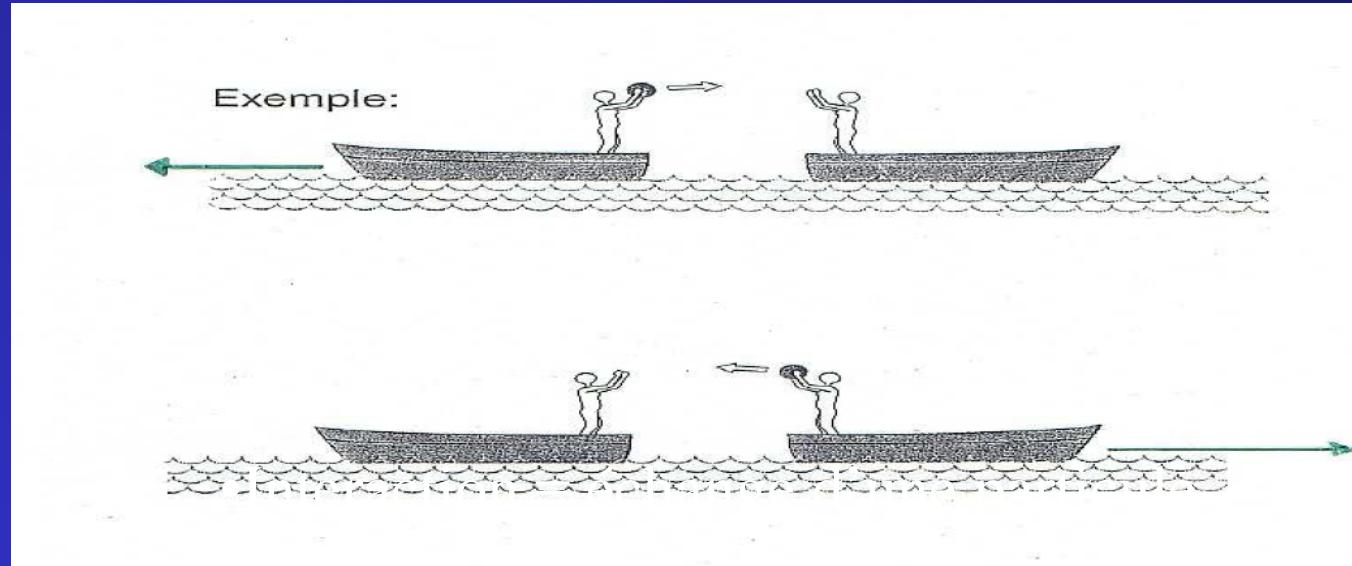
- Années 50 et 60 : premiers accélérateurs
 - des particules à foison
 - sous-structure des protons et des neutrons : quarks
 - les nouvelles particules peuvent être expliquées comme des assemblages de quarks
- Première famille : le monde visible
 - Deux quarks (u et d), et deux leptons (e, ν_e)
- Deux autres familles :
 - Copies de la première avec des masses plus grandes
 - Pourquoi deux autres familles et seulement deux ?



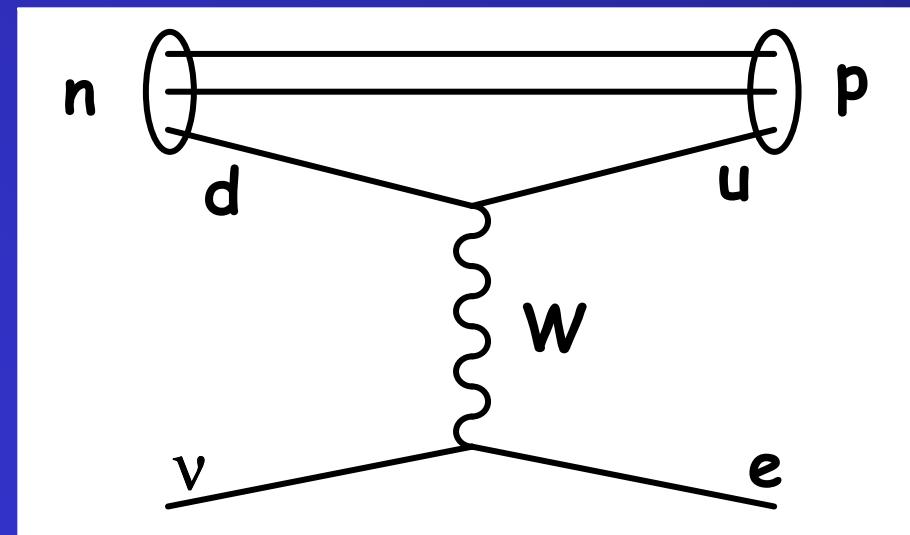
Les interactions (forces)

- Quatre types d'interaction entre les particules :
 - Gravité
 - Toujours attractive, portée infinie
 - Interaction électromagnétique
 - Explique l'atome avec les électrons gravitant autour du noyau
 - Attractive ou répulsive, portée infinie
 - Interaction faible
 - Désintégration bêta du neutron
 - Courte portée
 - Interaction forte
 - Cohésion des quarks dans proton et neutron
 - Cohésion du noyau
 - Nulle à très courte portée, augmente avec la distance

Interaction \equiv échange d'un boson



$n \equiv udd$
 $p \equiv uud$



$d \rightarrow u \quad W$
 $-1/3 \rightarrow +2/3 \quad -1$

$W \rightarrow e \quad \nu$
 $-1 \rightarrow -1 \quad 0$

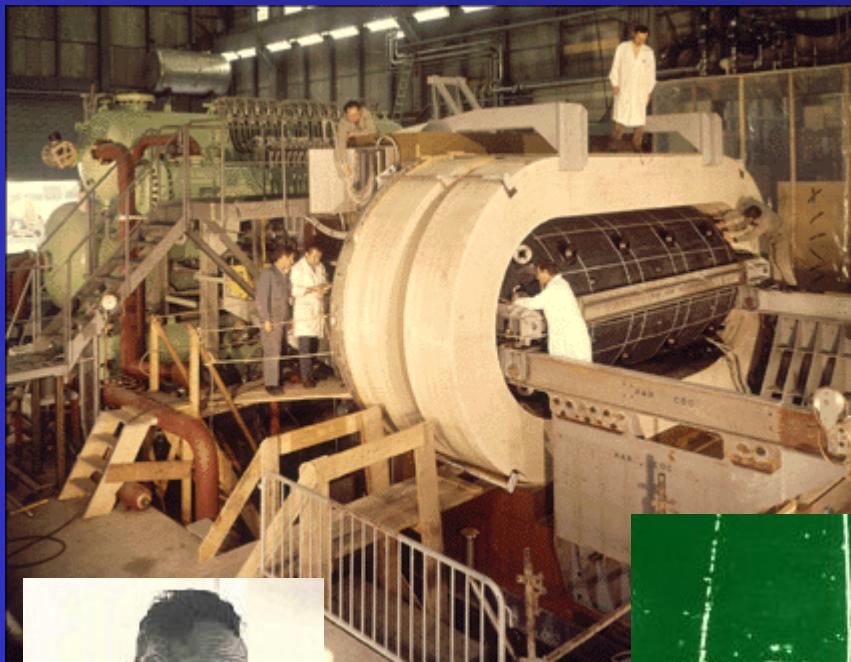
Unification des interactions

- Premier exemple d'unification par J. Maxwell :
 - Électrostatique : charges et champs électriques
 - Magnétisme : aimants, bobines et champs magnétiques
 - Deux aspects d'une même théorie : électromagnétisme
 - Applications importantes : ondes radio, télévision, etc.
 - La lumière (donc le photon) est une onde électromagnétique !
 - Les rayons X et γ sont également des ondes électromagnétiques
 - La nature et les effets de ces ondes dépendent de la longueur d'onde :
 - Radio, IR, visible, UV, X et γ

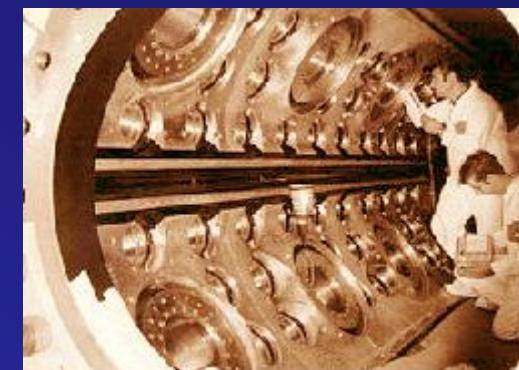
Unification des interactions (2)

- Un but et un regret de Einstein
- Interaction électrofaible
 - S. Glashow, A. Salam et S. Weinberg (1967)
 - Unification des interactions électromagnétique et faible
 - Prédictions :
 - manifestation inconnue de l'interaction faible : les courants neutres découverts en 1973 (Gargamelle, A. Lagarrigue)
 - trois nouvelles particules : W^\pm et Z^0 , découvertes en 1983 (UA1, C. Rubbia)
- Il existe des modèles d'unification des interactions électrofaible et forte, mais aujourd'hui aucune de leur prédition n'a pu être confirmée par l'expérience

Courants neutres et Gargamelle



A. Lagarrigue - 1973



Unification des interactions (3)

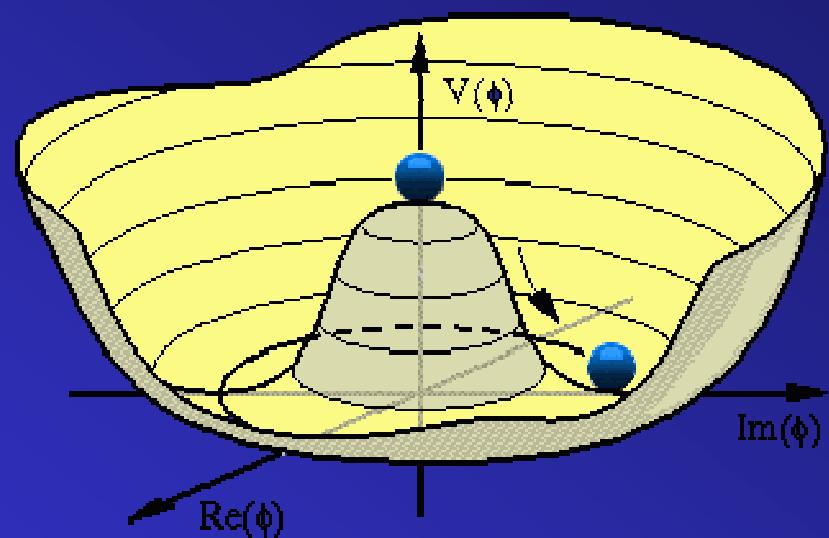
- L'unification de la gravitation aux autres interactions est difficile, avec des manifestations qui semblent inaccessibles à l'observation aujourd'hui

Origine de la masse des particules ?

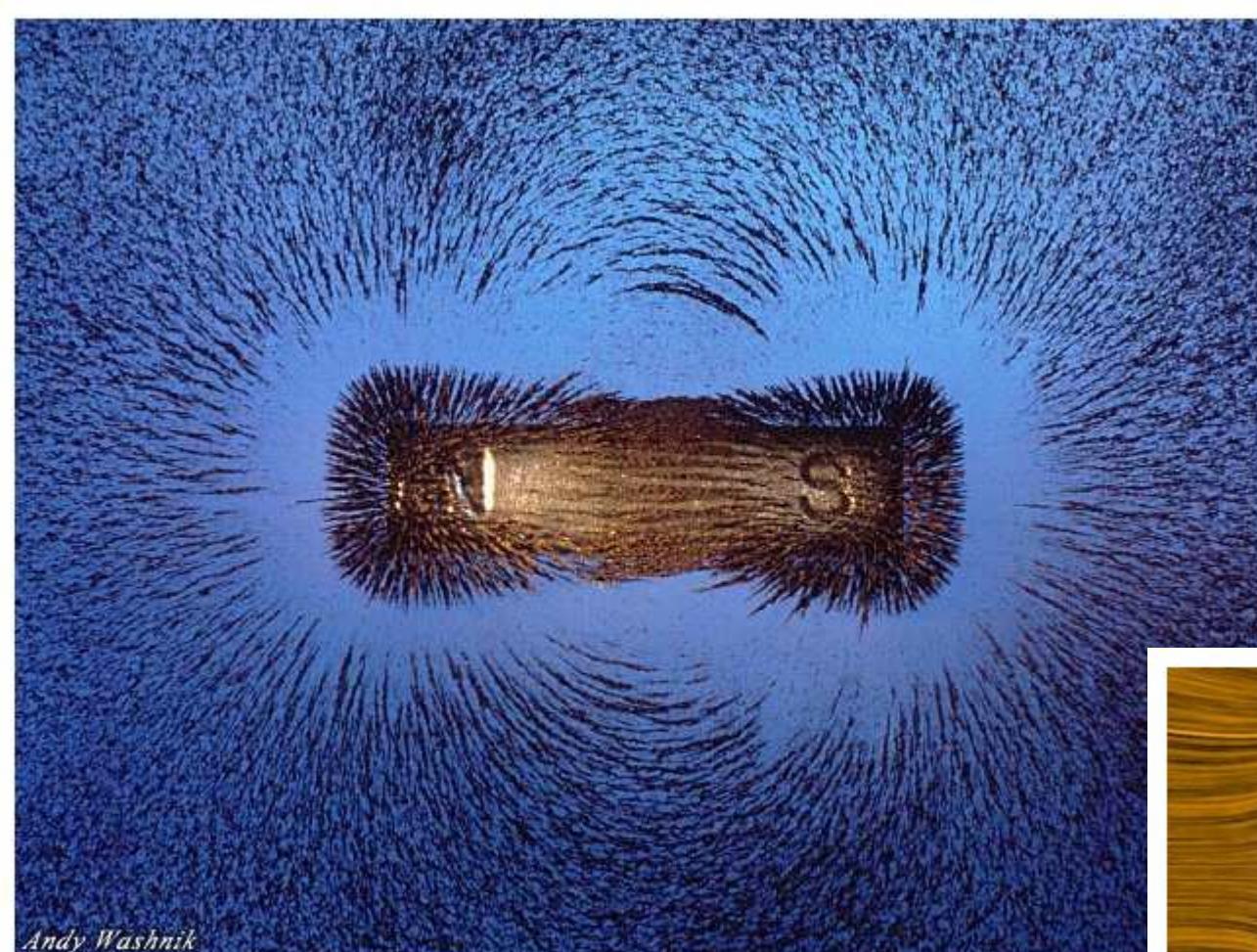
- Interaction électrofaible
- Quatre particules jouant le même rôle :
 - photon et trois bosons W^\pm et Z^0
 - Pourquoi le photon est-il sans masse alors que les trois bosons ont des masses d'environ 100 protons ?
- Mécanisme mathématique (transposé de la physique du solide) permet d'expliquer ce phénomène :
 - Très joli car donne une masse aux bosons, mais pas au photon
 - Prédiction d'une nouvelle particule : le boson de Higgs
 - Il faut donc la trouver

Mécanisme de Higgs

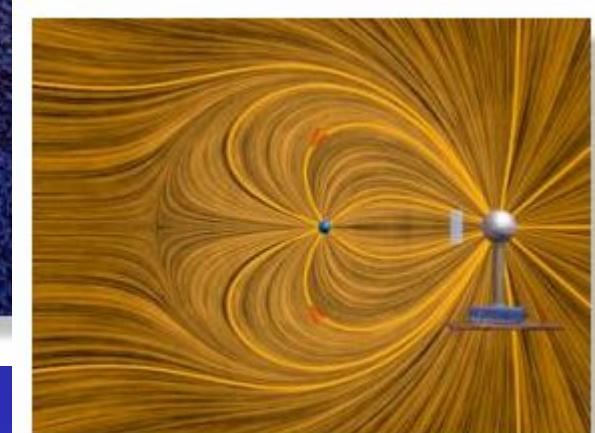
- Le vide n'est pas vide
 - Les particules baignent dans un champ
 - Ether le retour
- Brisure de symétrie
 - Particule au sommet
 - Symétrie
 - Système instable
 - Particule au fond
 - Plus de symétrie
 - Système stable



Exemples de champs



Andy Washnik



Invisible, mais on en ressent les effets

Visualisation du Higgs

D. J. Miller (Londres) pour son ministre (1993)



"Le champs de Higgs du vide"

Visualisation du Higgs (2)

D. J. Miller (Londres) pour son ministre (1993)



"La masse d'une particule"

Visualisation du Higgs (3)



"Le boson de Higgs"

Visualisation du Higgs (4)



"Le boson de Higgs"

Une autre façon de voir

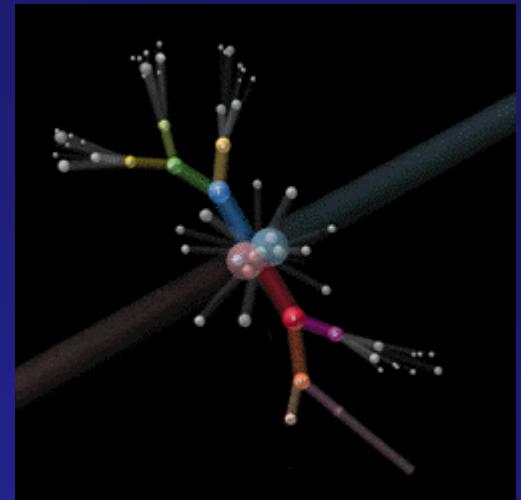
- Analogie avec un plan d'eau
- Masse :
 - Frottement
 - Modification du comportement cinématique du bateau (inertie, etc.)
- Boson de Higgs :
 - Les ondes en surface après avoir jeté un caillou

LHC et Atlas

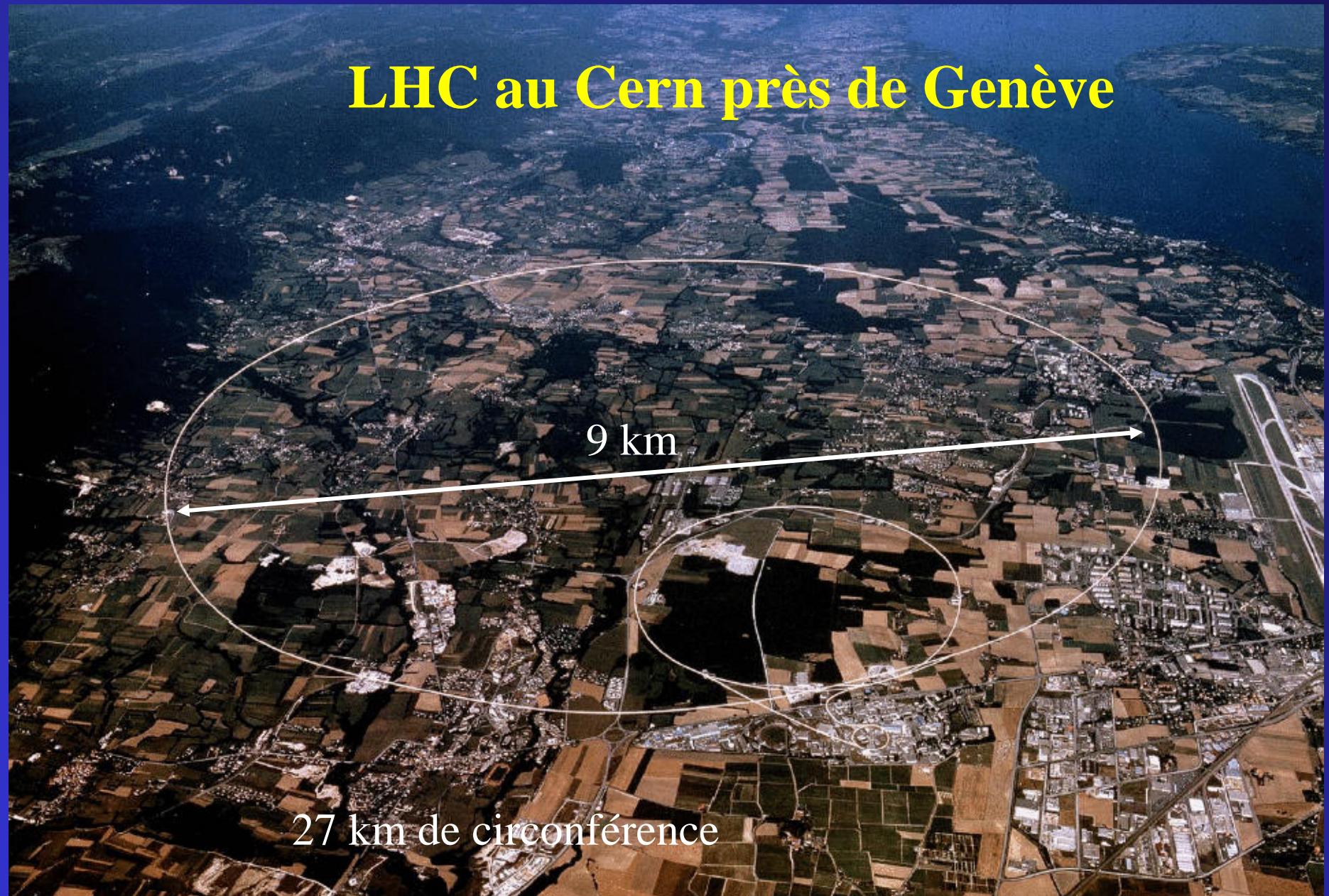
- Le futur accélérateur en construction au Cern : Large Hadron Collider
- Collisions protons-protons
- Mise en service : fin-2008
- Objectifs :
 - Boson de Higgs
 - Origine de la masse
 - Violation de la symétrie CP (avec LHCb)
 - Antimatière de l'Univers
 - Unification des interactions
 - Recherche de nouvelles particules, sous-structure des quarks, etc.
 - Masse manquante
 - Sous-structures des quarks ou des électrons

Pourquoi de la haute énergie ?

- Création de particules
 - $E = m c^2$
 - Unités :
 - Électron-Volt (eV)
 - Processus atomiques (chimie, etc.) : qq eV
 - Processus nucléaires : million de eV (MeV)
 - Masse des nucléons (p et n) : 1 GeV \equiv 1000 MeV
 - LHC : 14 TeV (1 TeV \equiv 1000 GeV)
 - Il a fallu atteindre 100 GeV pour découvrir les bosons W et Z et ainsi confirmer la théorie
- Sonder l'infiniment petit



$$E = \hbar v \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{\hbar c}{E}$$

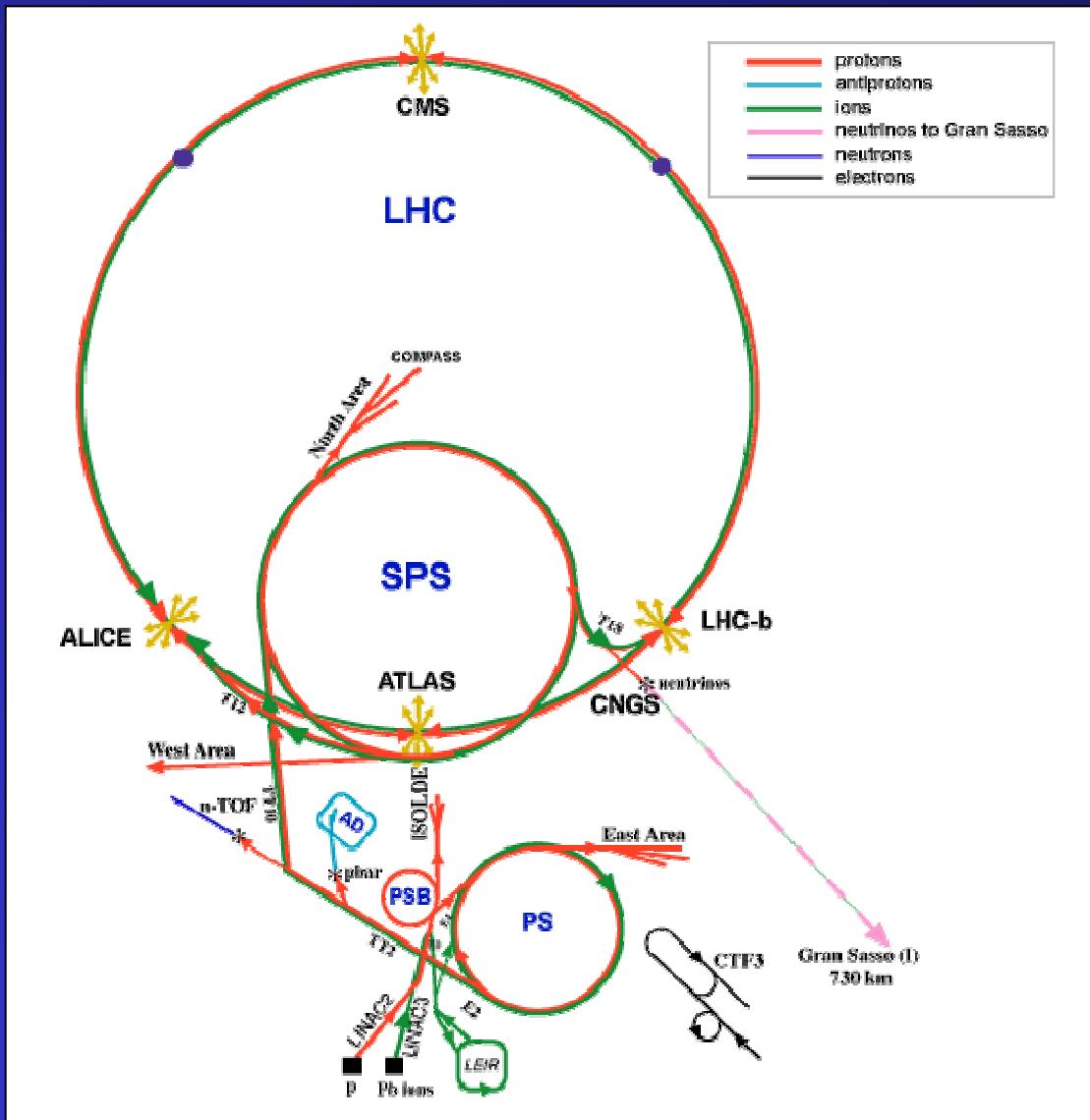


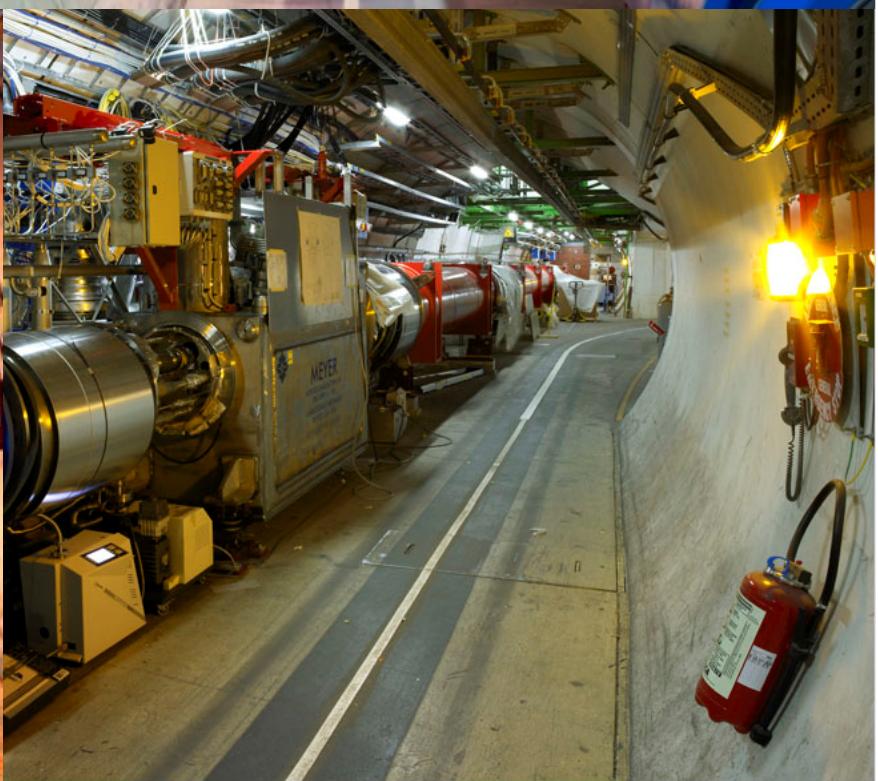
LHC au Cern près de Genève

9 km

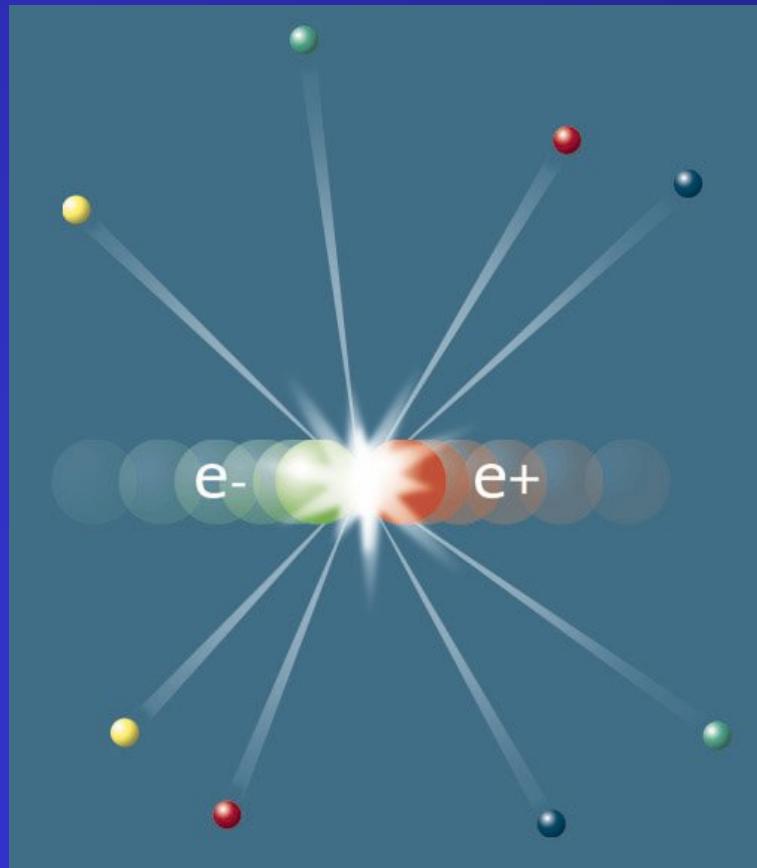
27 km de circonférence

Le complexe des accélérateurs du Cern



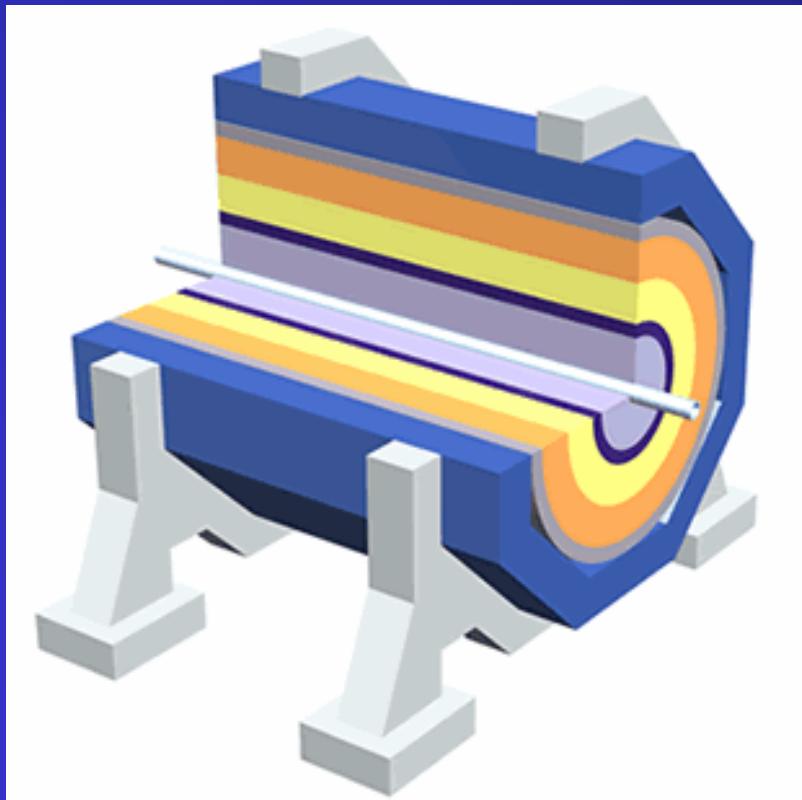


Une expérience de physique des particules



- Accélérateur :
 - Énergie cinétique aux particules
- Collision :
 - Création de particules
 - $E = m c^2$
 - Conservations : charge, énergie, impulsion, etc.
- DéTECTEUR :
 - Identifier et mesurer toutes les particules produites
 - Trier les collisions intéressantes
- Physicien :
 - Analyser les enregistrements et comprendre

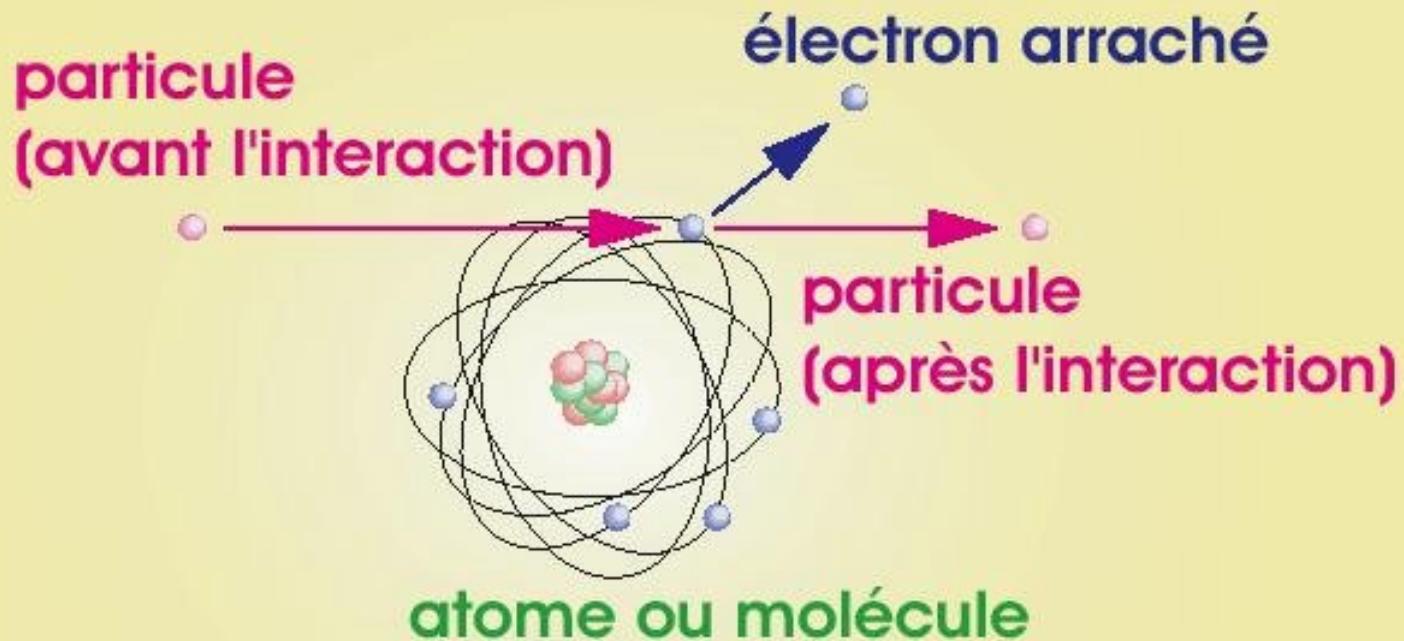
Un détecteur



- Structure en couche autour de la collision
- Suivi des traces :
 - "photographie" de la collision
 - mesure charge et quantité de mouvement (avec B)
- Mesure énergie
- Mesure des muons

Principe de détection (1)

ionisation des atomes



La particule arrache des électrons aux atomes.
Ces électrons produisent un

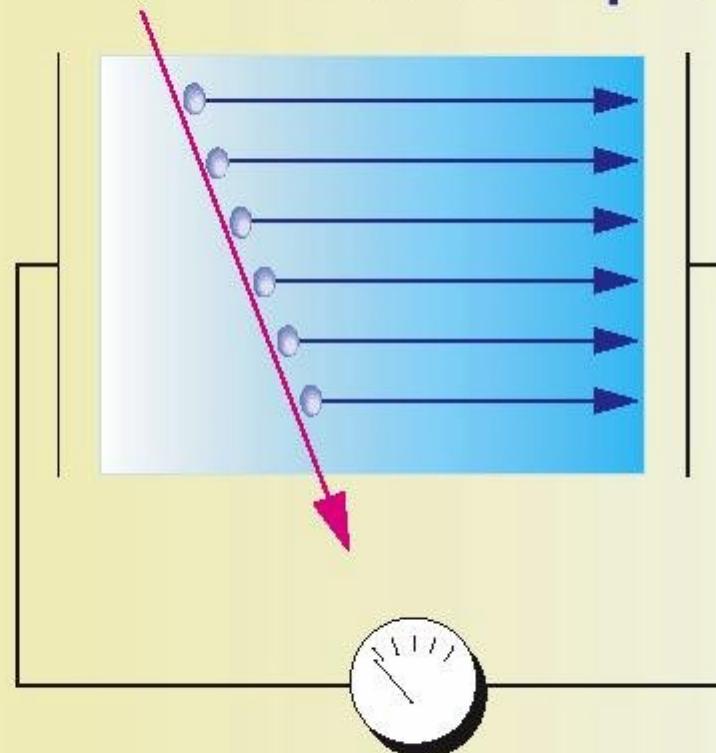
→ **Signal électrique détectable**

Principe de détection (2)

Particule chargée

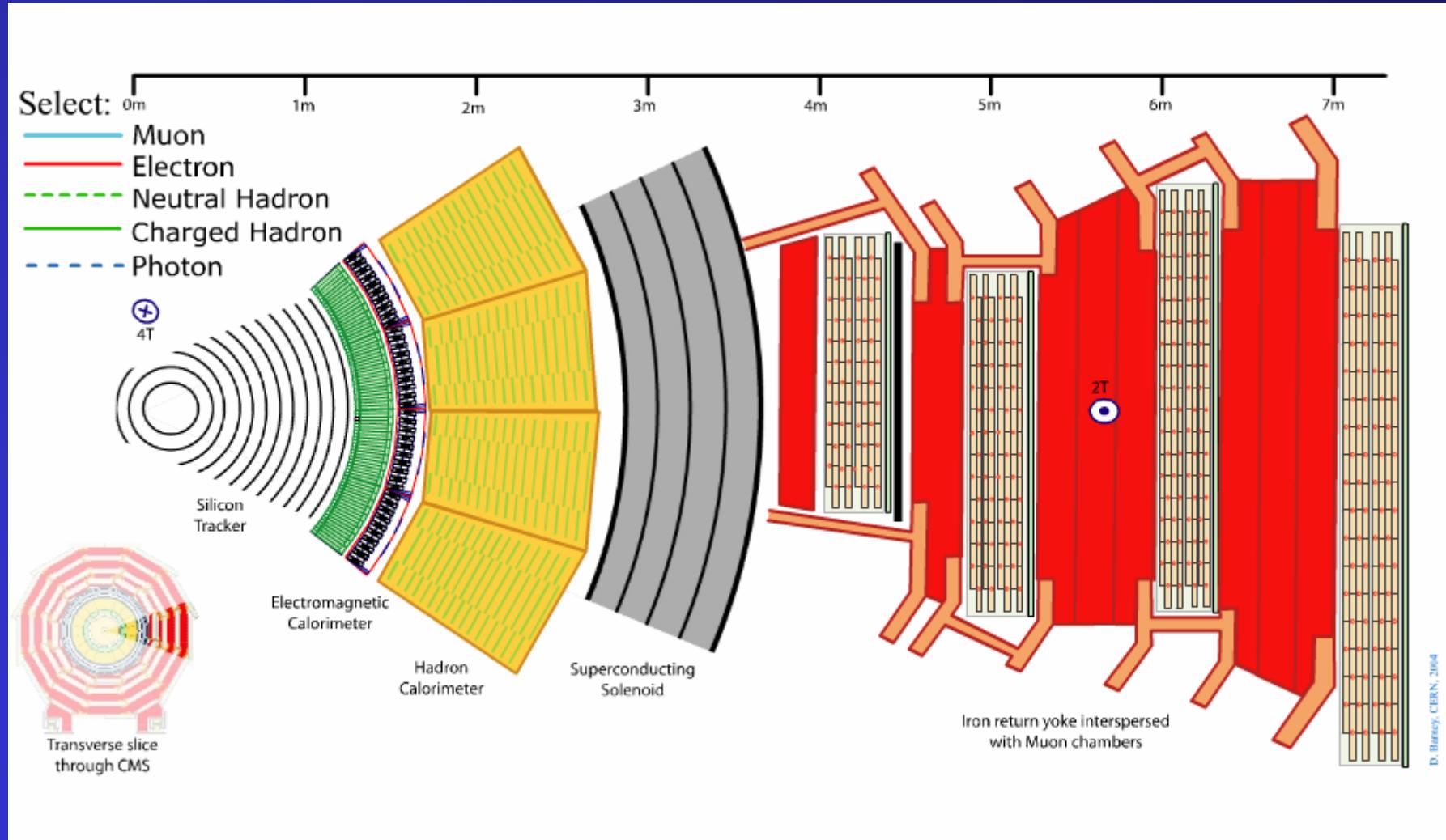
En pratique, la matière est placée dans un champ électrique. Il guide les électrons pour les collecter.

Electrons émis,
migrant le long
du champ électrique



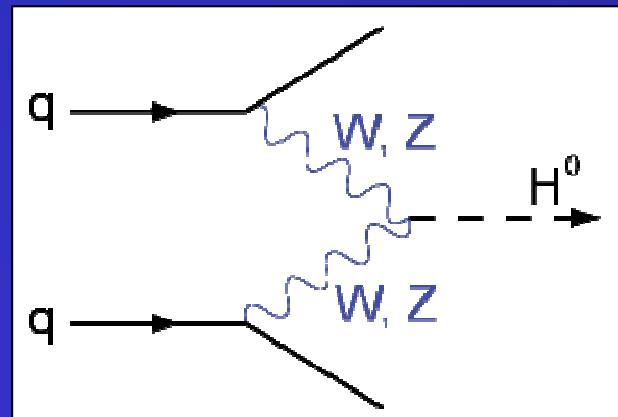
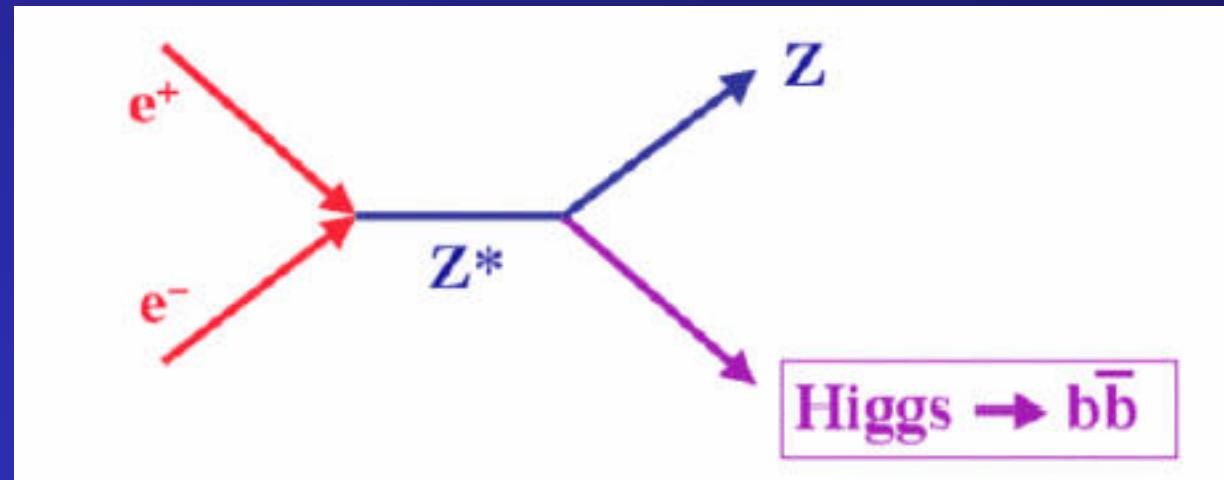
Mesure du signal induit par les électrons

Une tranche de l'expérience CMS

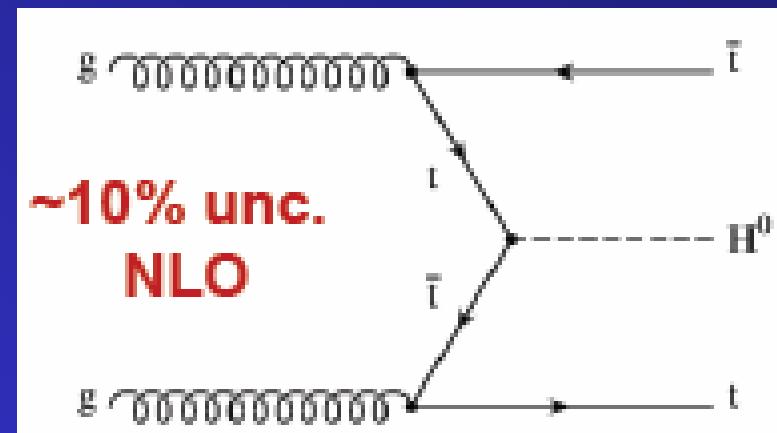


Higgs : recherche depuis très longtemps

LEP :

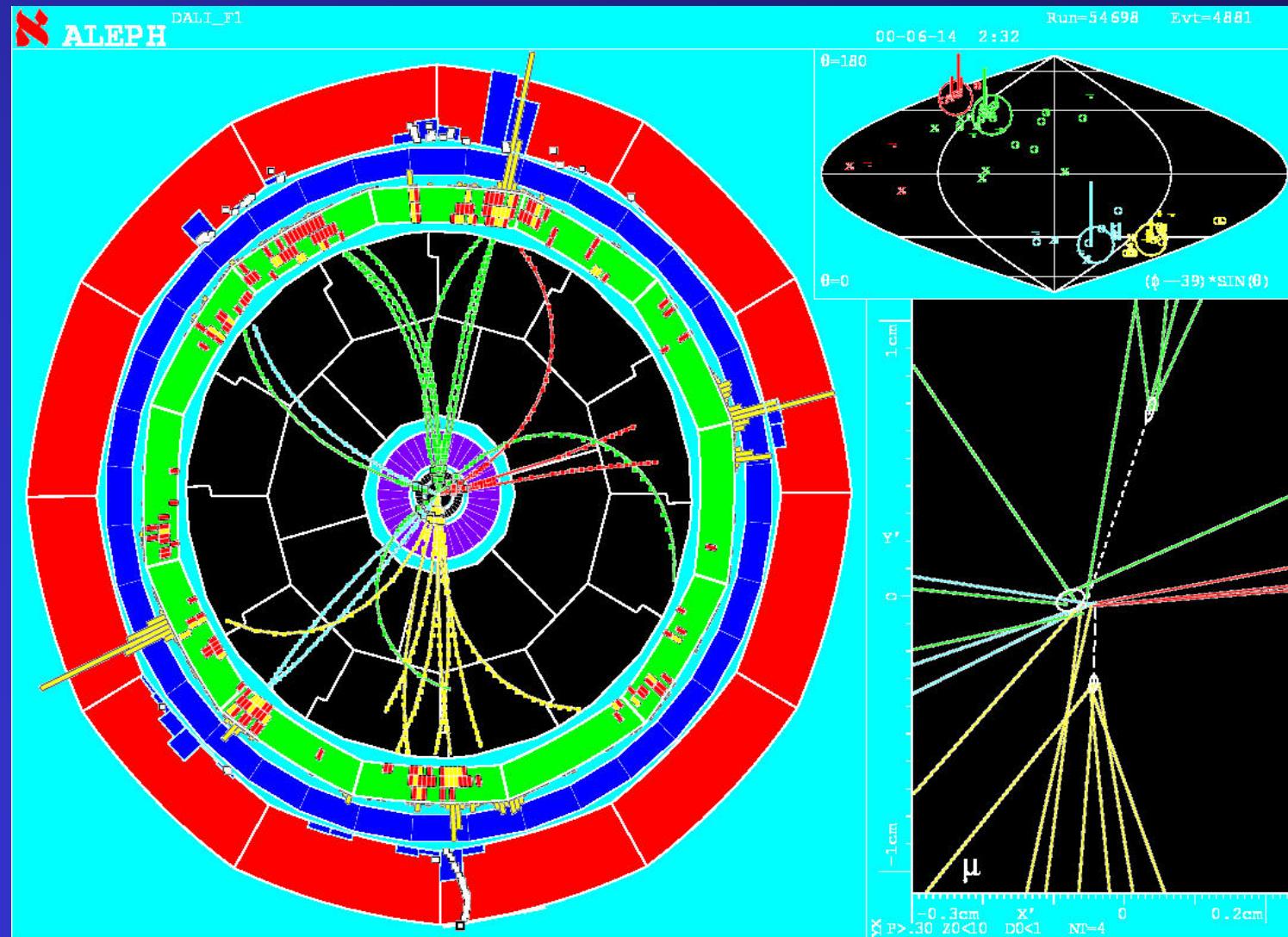


TeVatron

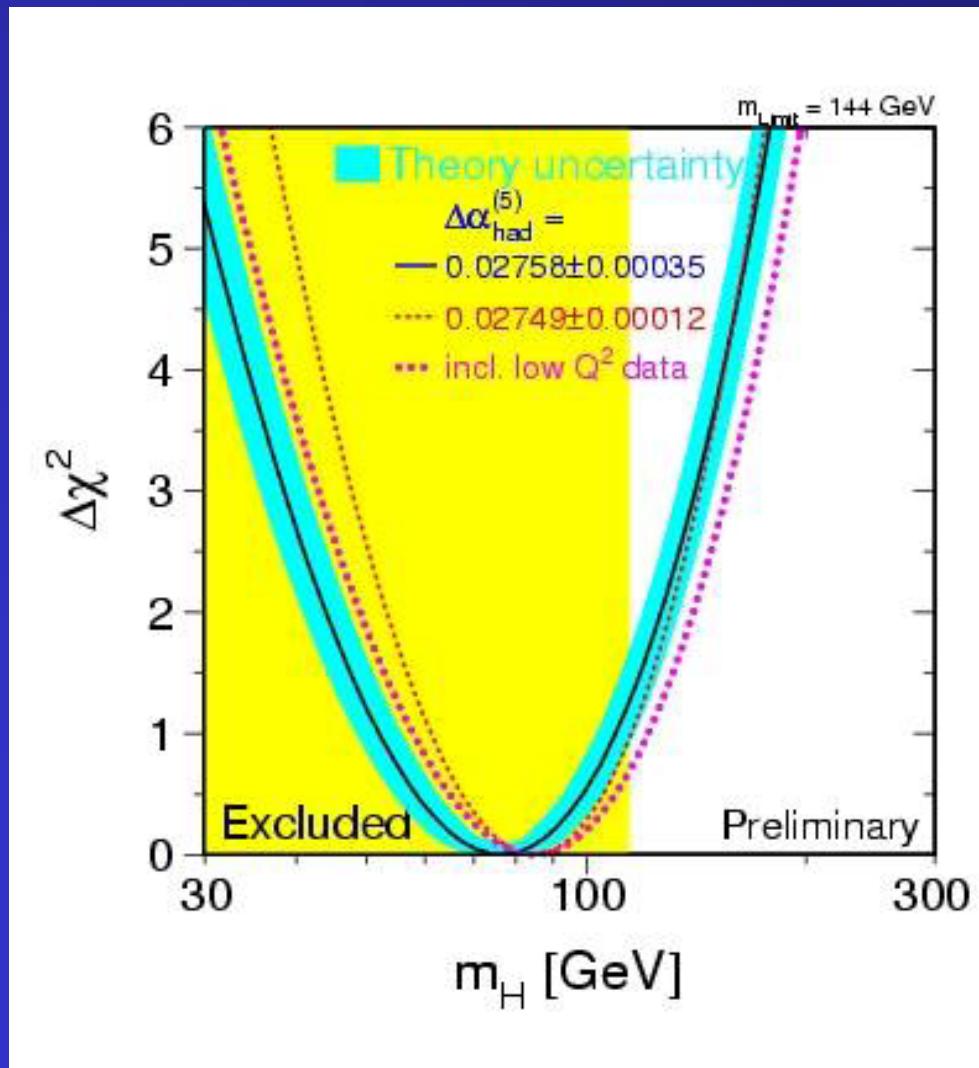


LHC

Candidat $e^+e^- \rightarrow Z^0 H \rightarrow q\bar{q}bb$, $m_H=115$ GeV



Higgs : ce qu'on croît savoir



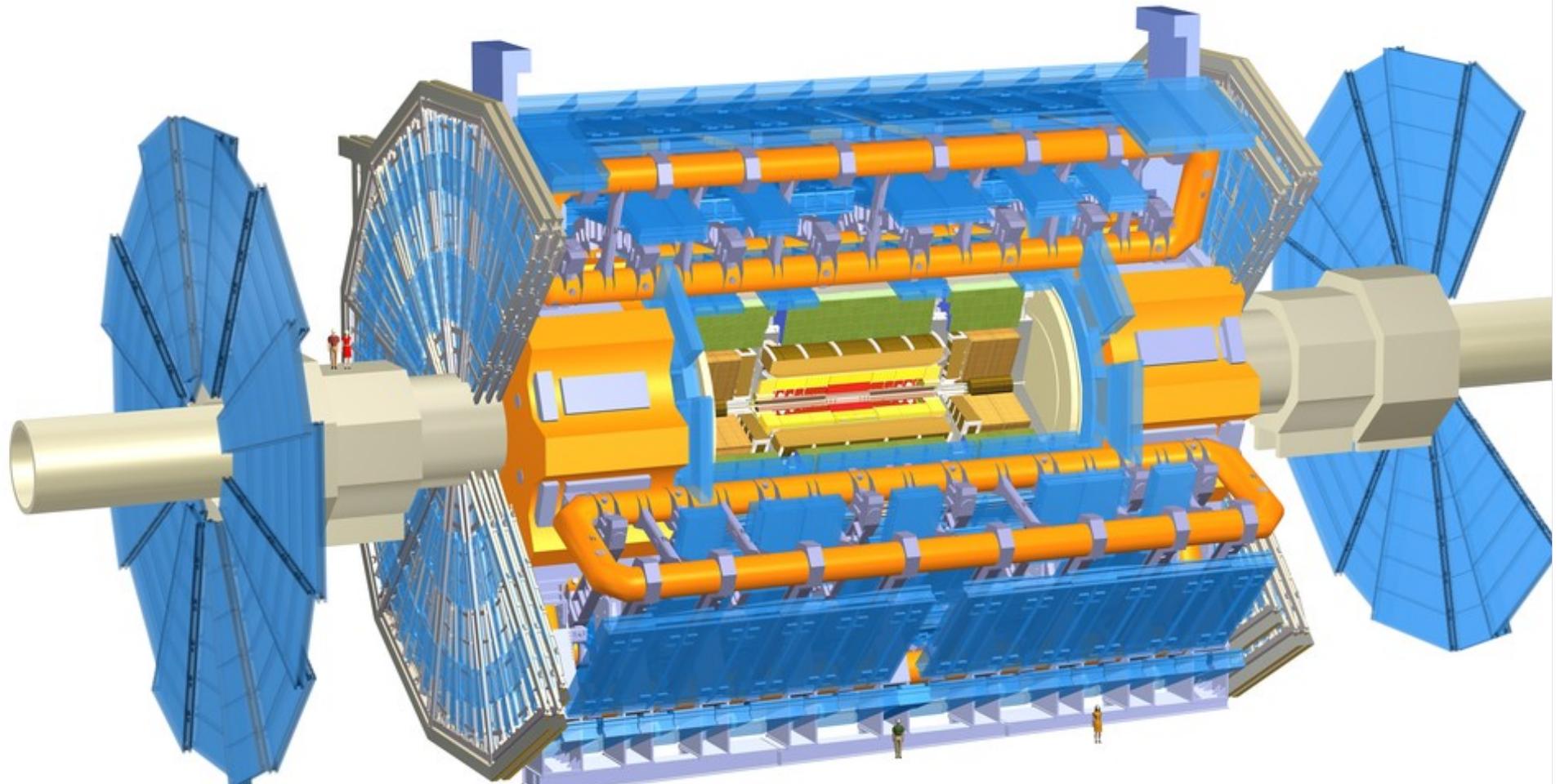
Recherche directe :

$$m_H > 114 \text{ GeV}/c^2$$

Théorie et expérience :

$$m_H = 76^{+33}_{-24} \text{ GeV}/c^2$$

Atlas



Longueur : 46 m
Diamètre : 25 m
Masse : 7000 tonnes

Collaboration ATLAS

35 Pays

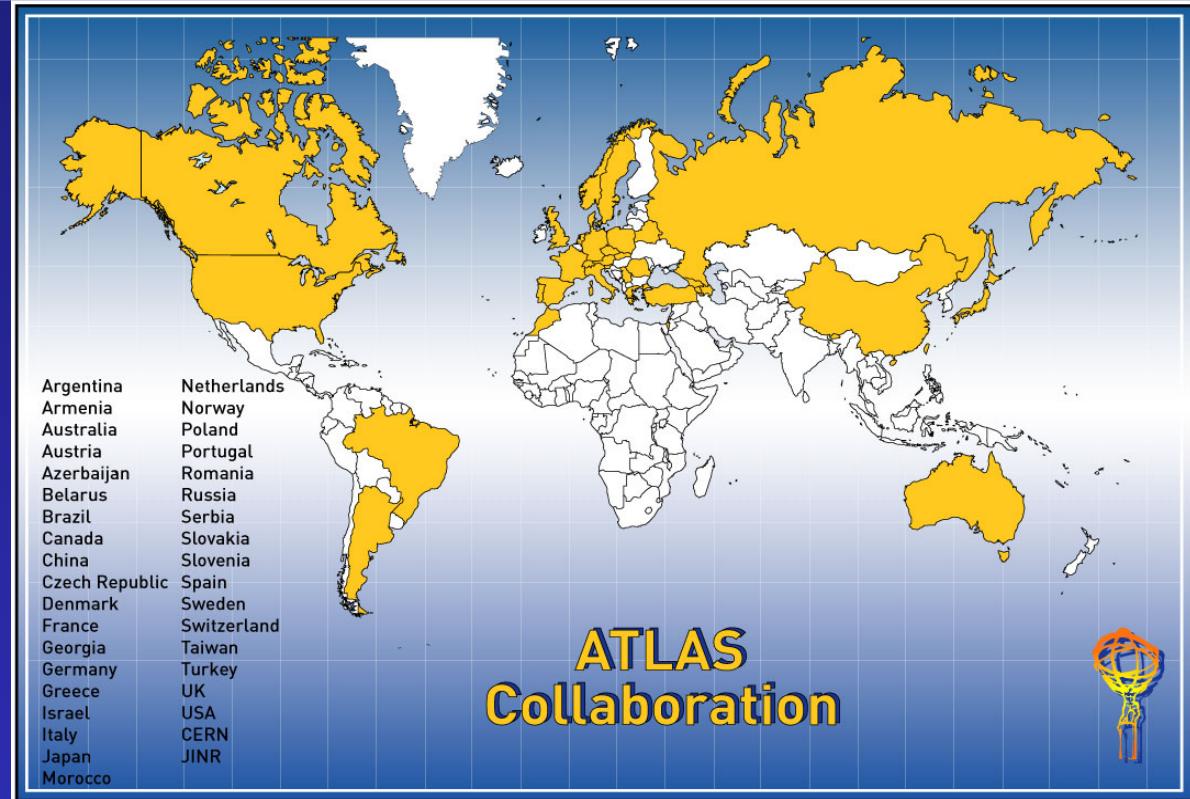
161 Laboratoires

1830 Scientifiques

2500 Physiciens et ingénieurs
pendant 15 ans

A comparer à :

Airbus : 1000 ingénieurs
mais aussi à la Formule 1



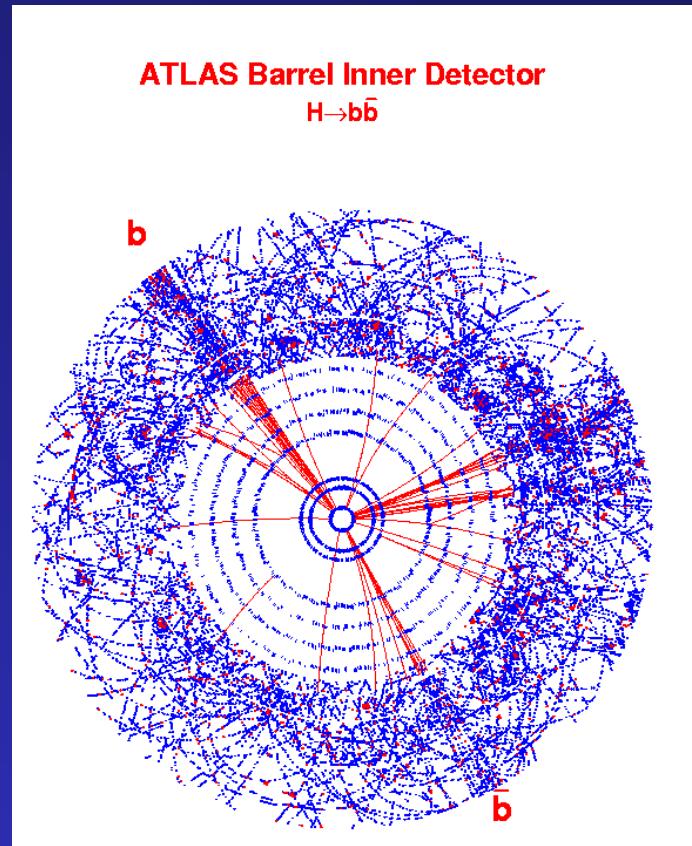
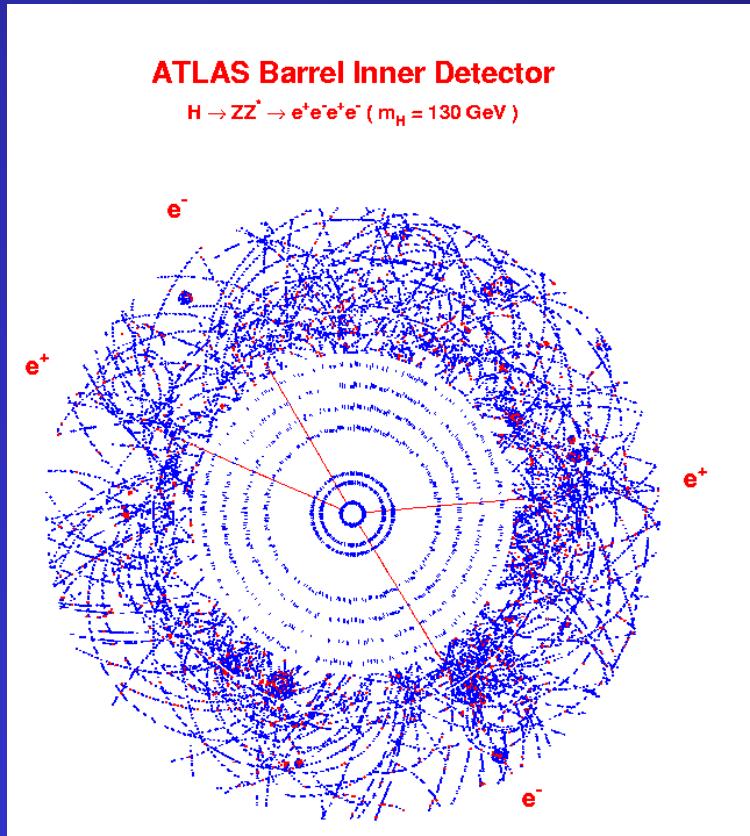
Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, 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, 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, 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, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, 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, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan



Un défi pour les expériences

- Les processus recherchés sont extrêmement rares
- LHC : machine de très haute intensité
 - 40 000 000 de croisements par seconde
 - Une vingtaine de collisions par croisement
(superposition de ~20 photographies)
- Au moins dix fois plus difficile que les expériences antérieures :
 - Résistance aux radiations
 - Pouvoir de sélection
 - Précision des mesures

Illustration de la complexité



- Très grande finesse
- Résistance aux radiations

Illustration de la complexité (2)

$H \rightarrow \gamma\gamma$

Des précisions de mesure jamais atteintes pour des détecteurs de ces dimensions

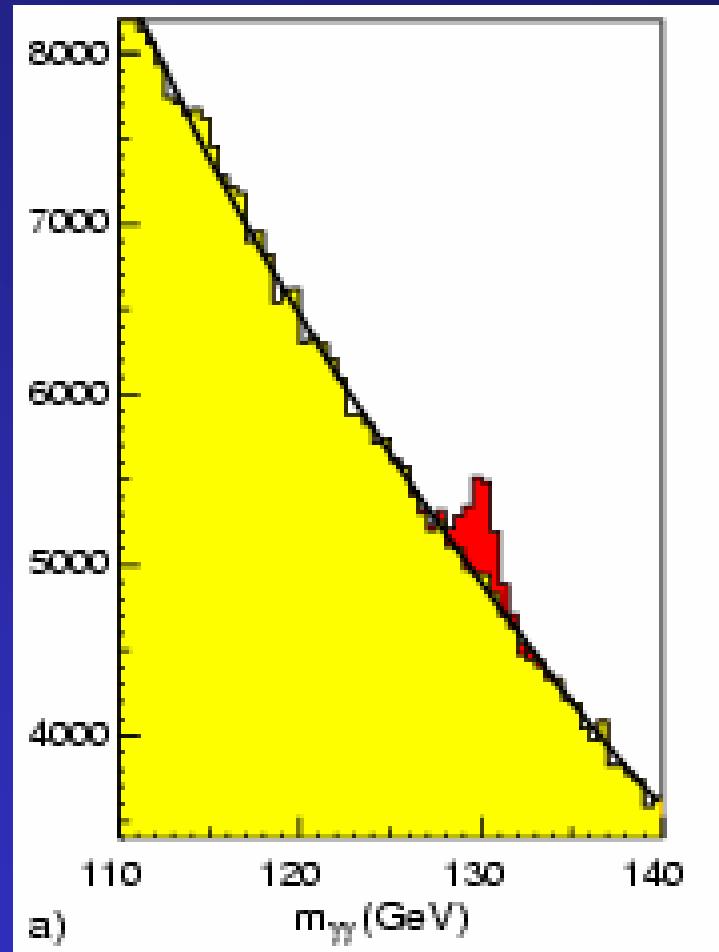
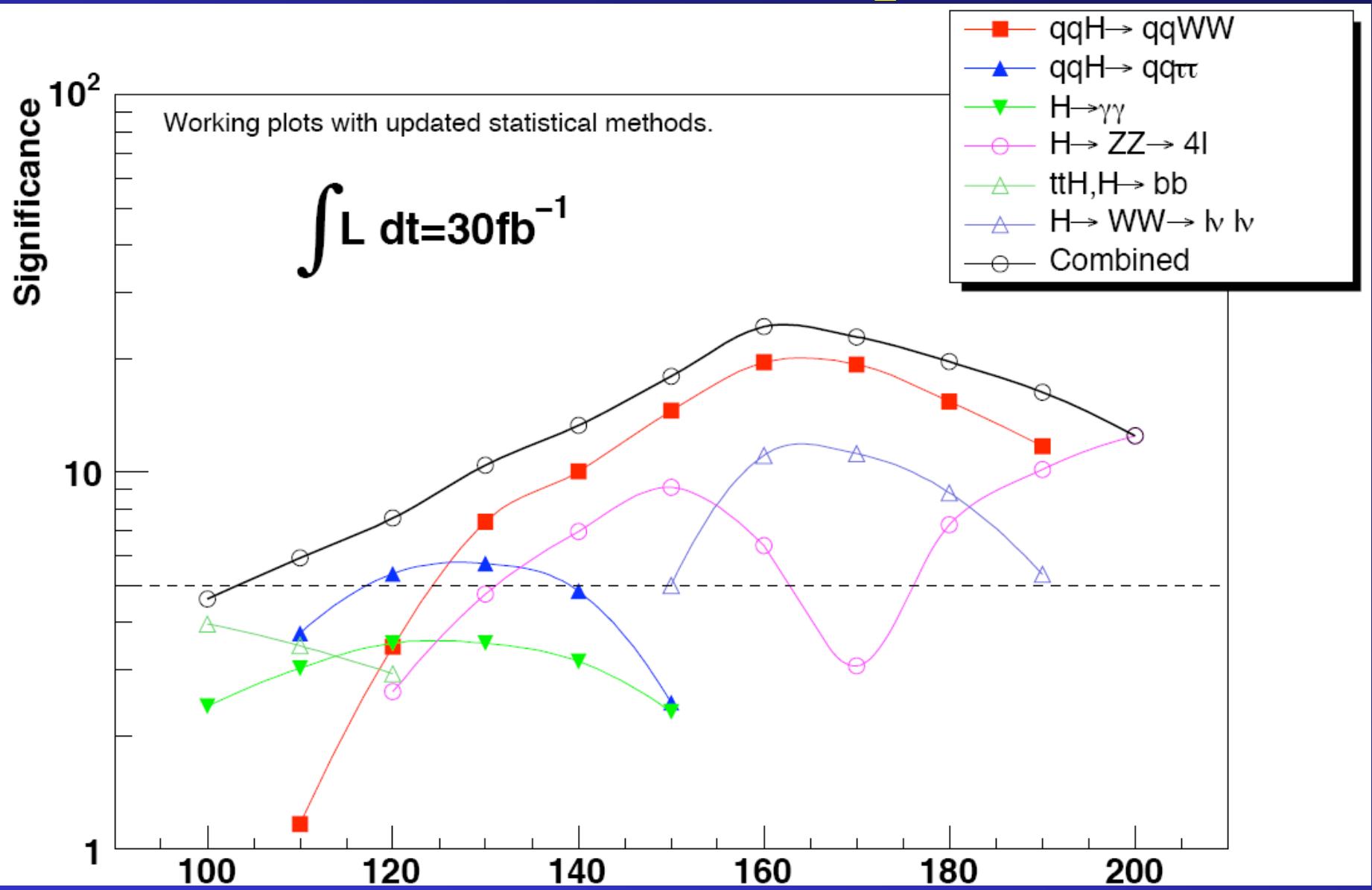
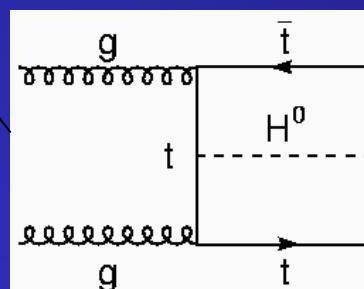
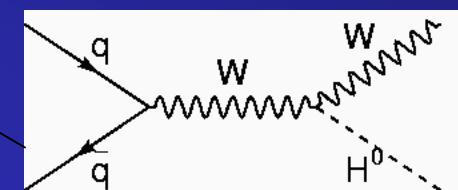
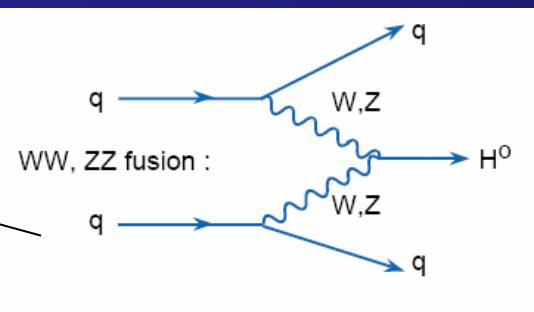
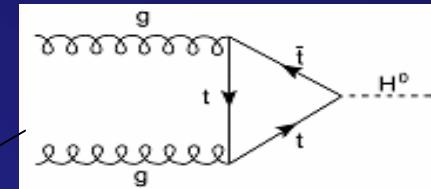
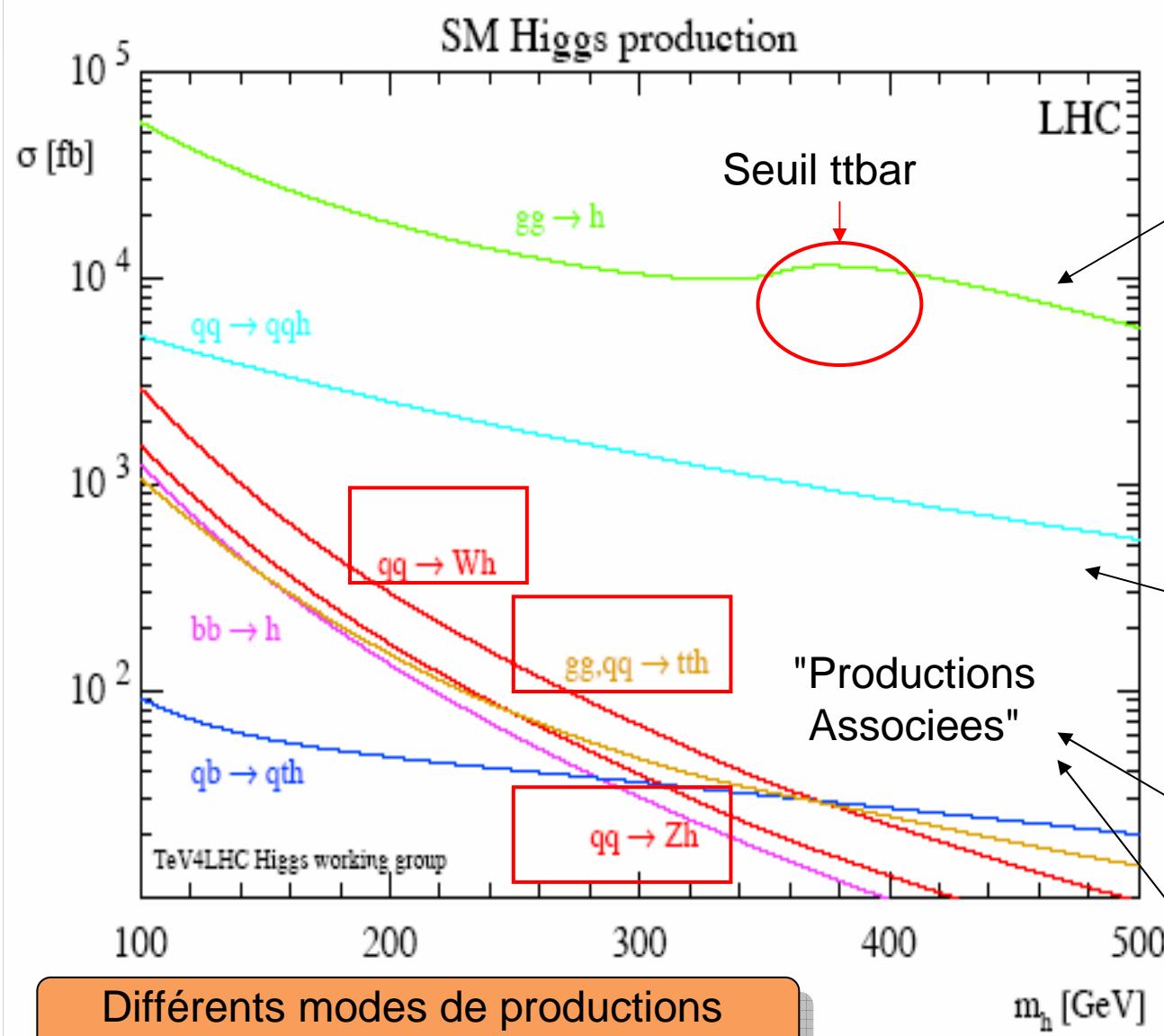


Illustration de la complexité (3)

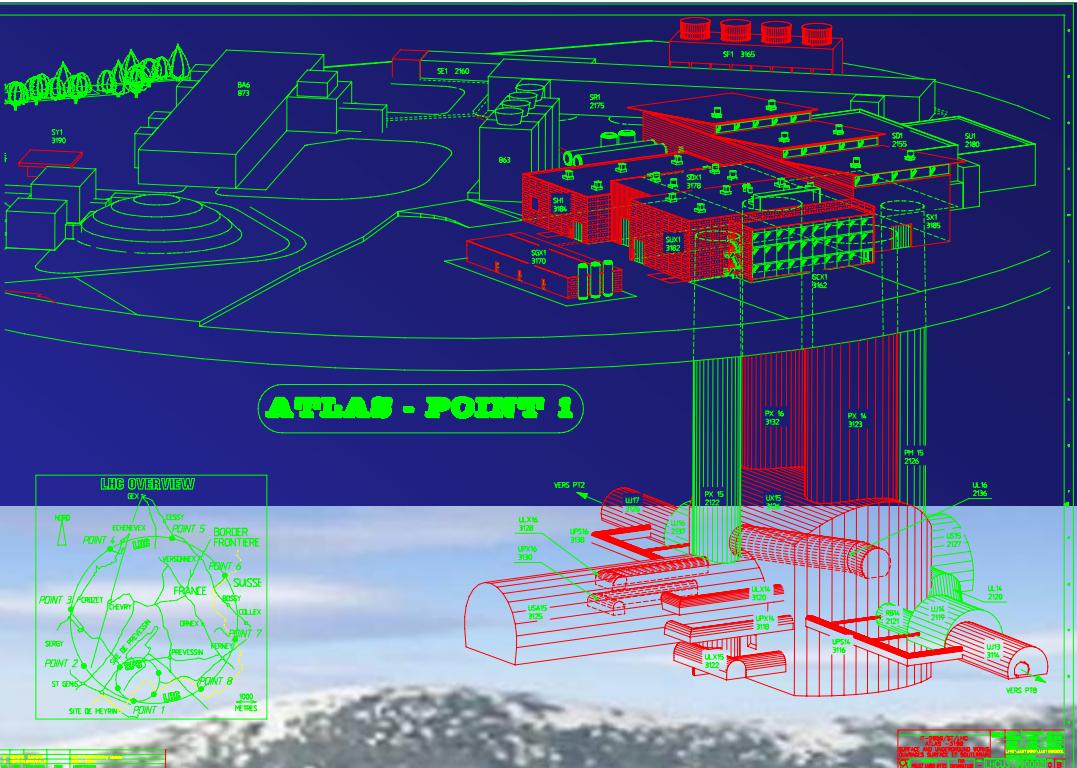


Production du Higgs





Profondeur = 100 m
Longueur = 55 m
Largeur = 32 m
Hauteur = 35 m



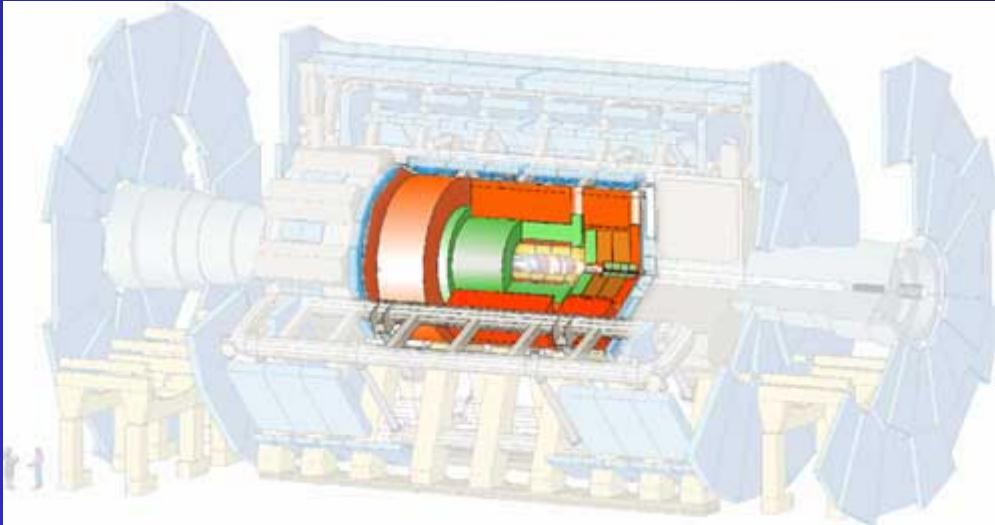
Vue Aérienne des installations en surface



Le CPPM dans Atlas

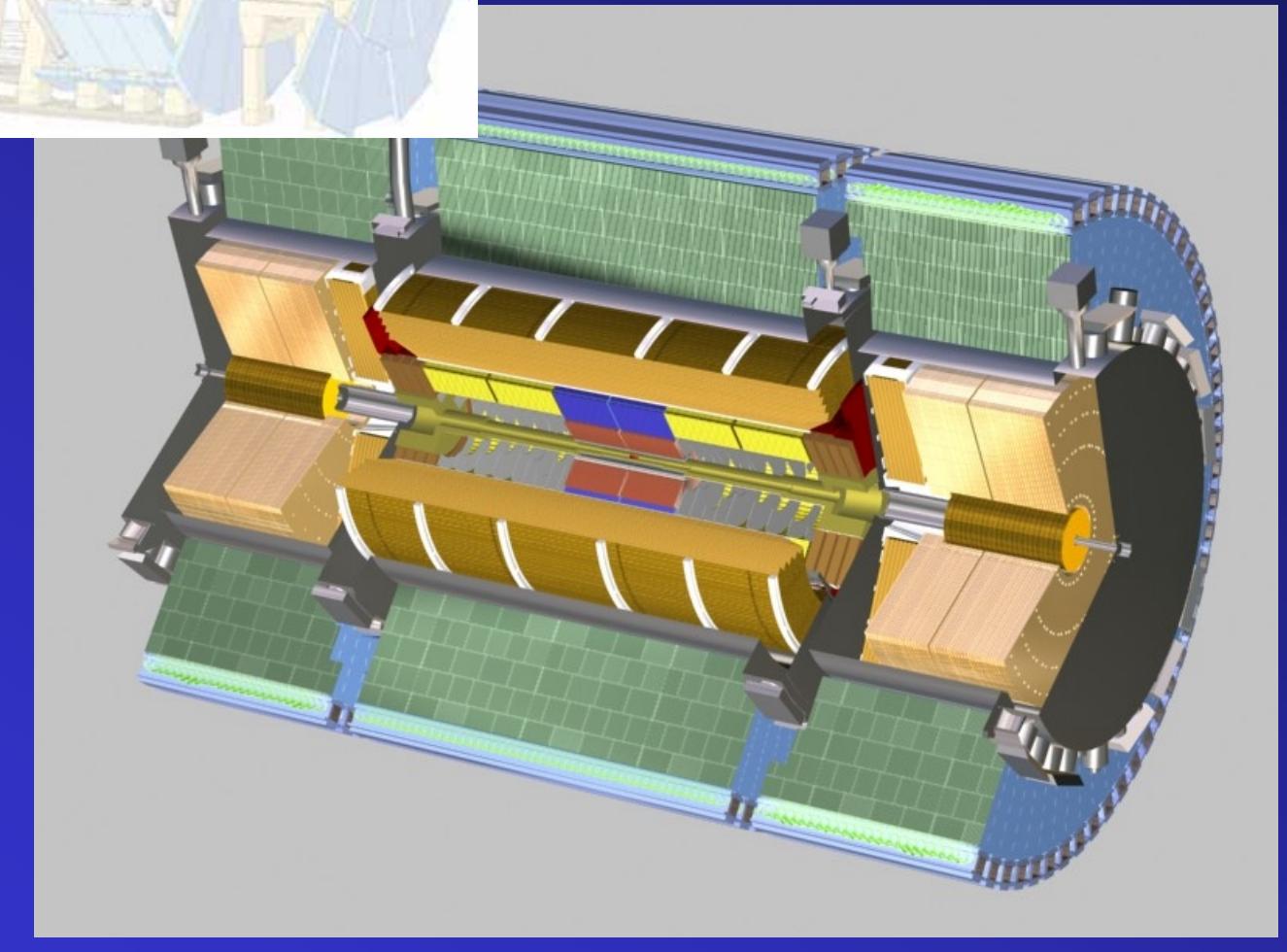
- Une vingtaine de physiciens
- Calorimètre électromagnétique
- DéTECTeur de vertex
- Sélection en temps réel des événements
 - 40 000 000 de collisions par seconde
 - Enregistrement : 100 événements (photographies) par seconde
 - Electronique et informatique
 - Architecture (circulation des données et calcul)
 - Algorithmes de sélection



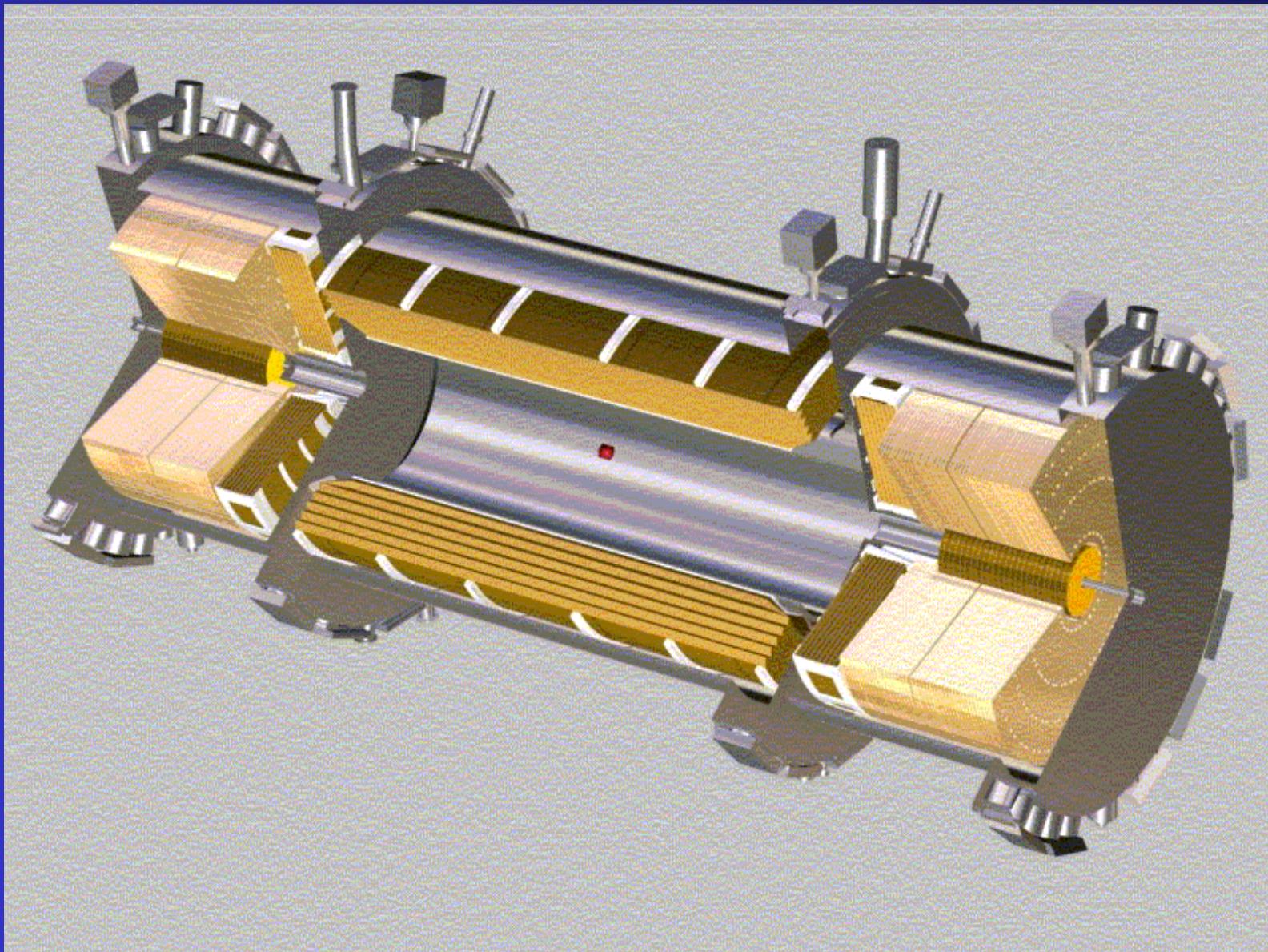


Au cœur d'Atlas

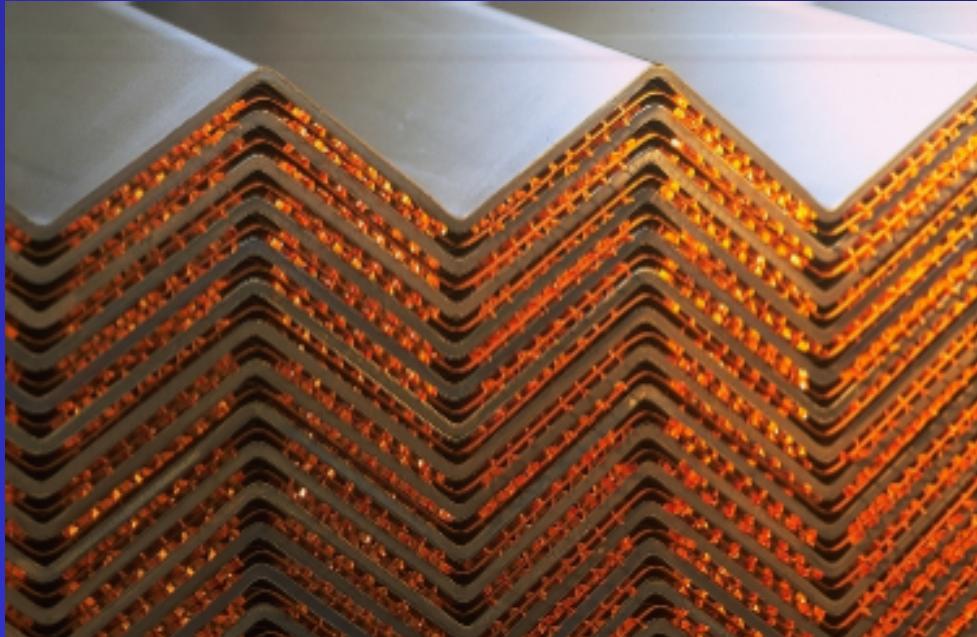
Calorimètres
Trajectographe



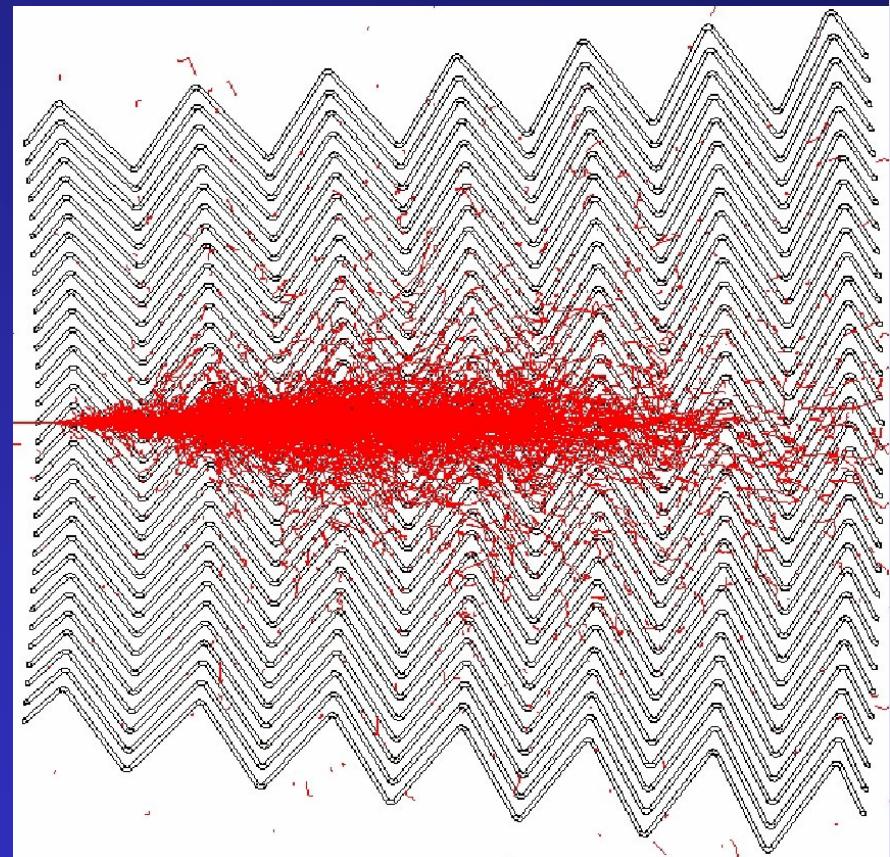
Calorimètres à argon liquide

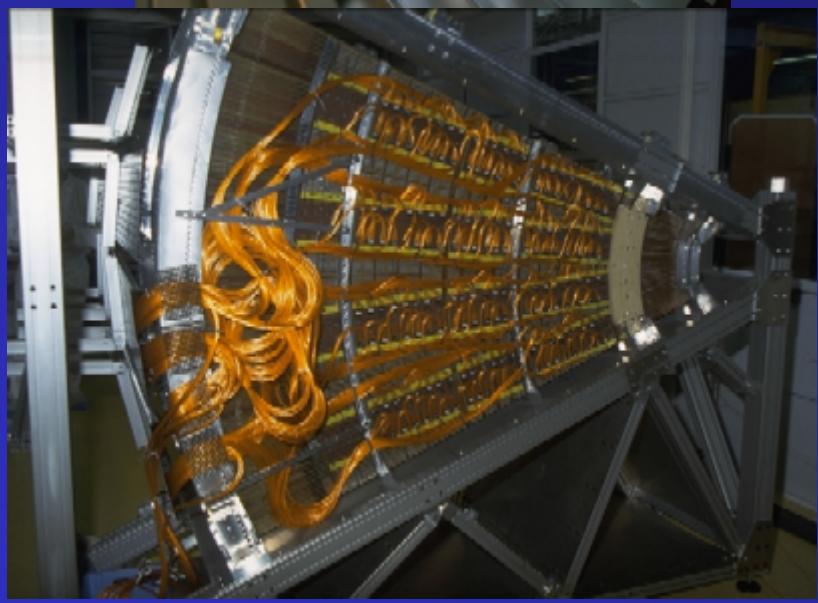


Calorimétrie à argon liquide



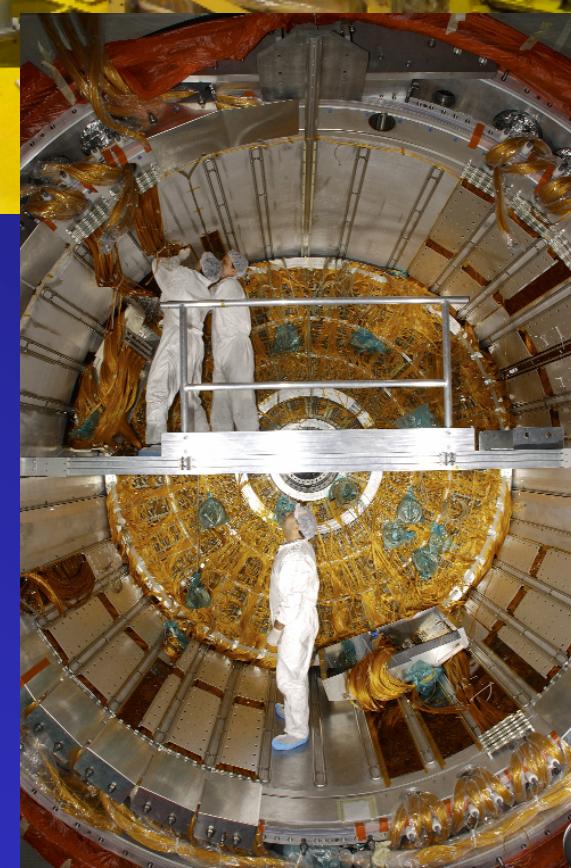
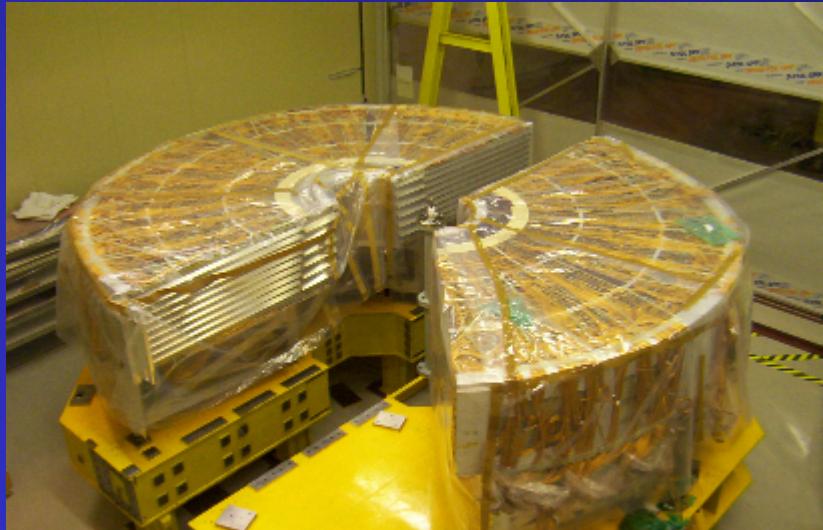
Mesure de l'énergie des particules
en les arrêtant
Processus en gerbes
DéTECTeur à ionisation
Plomb et argon liquide
Géométrie en accordéon



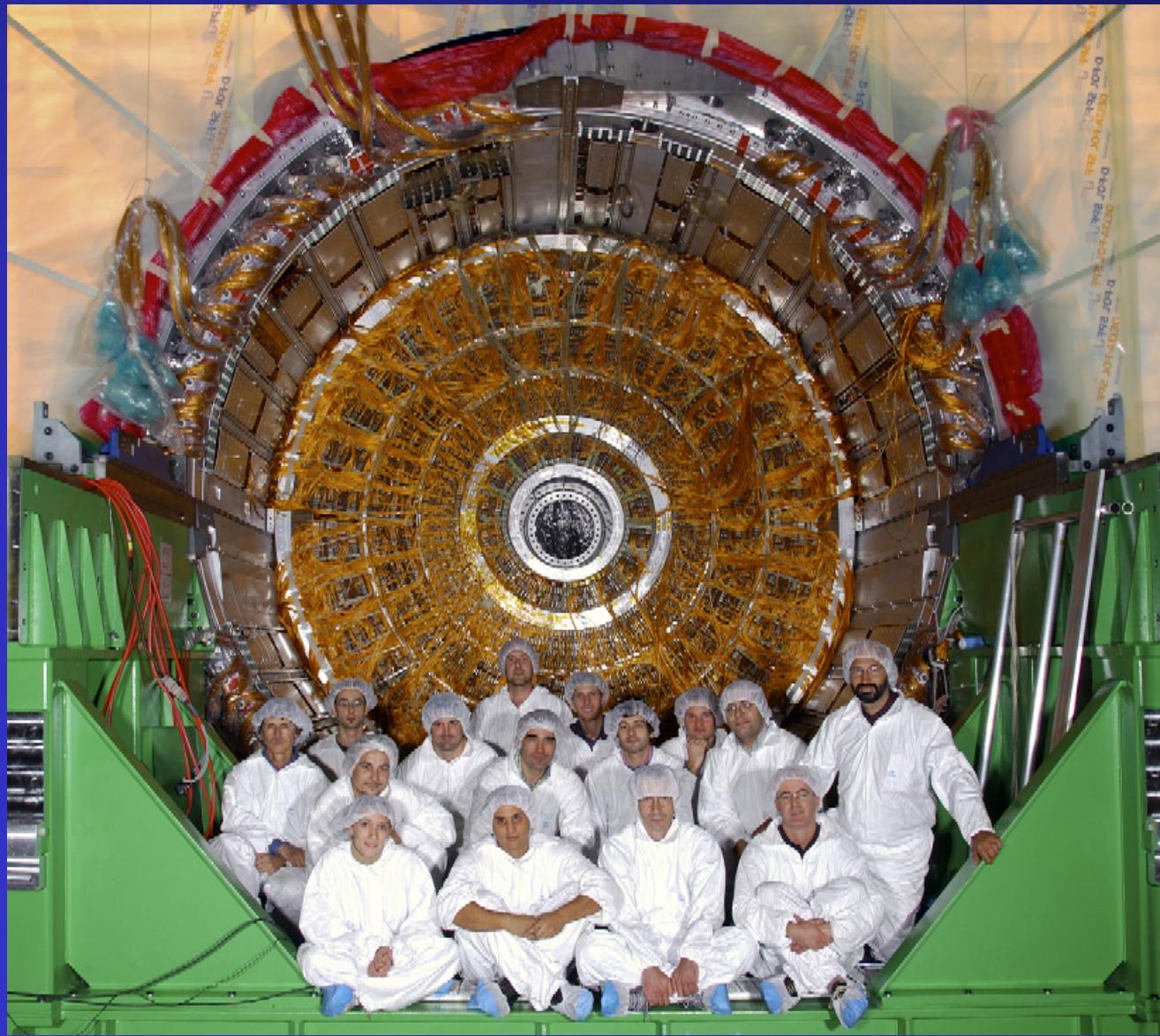


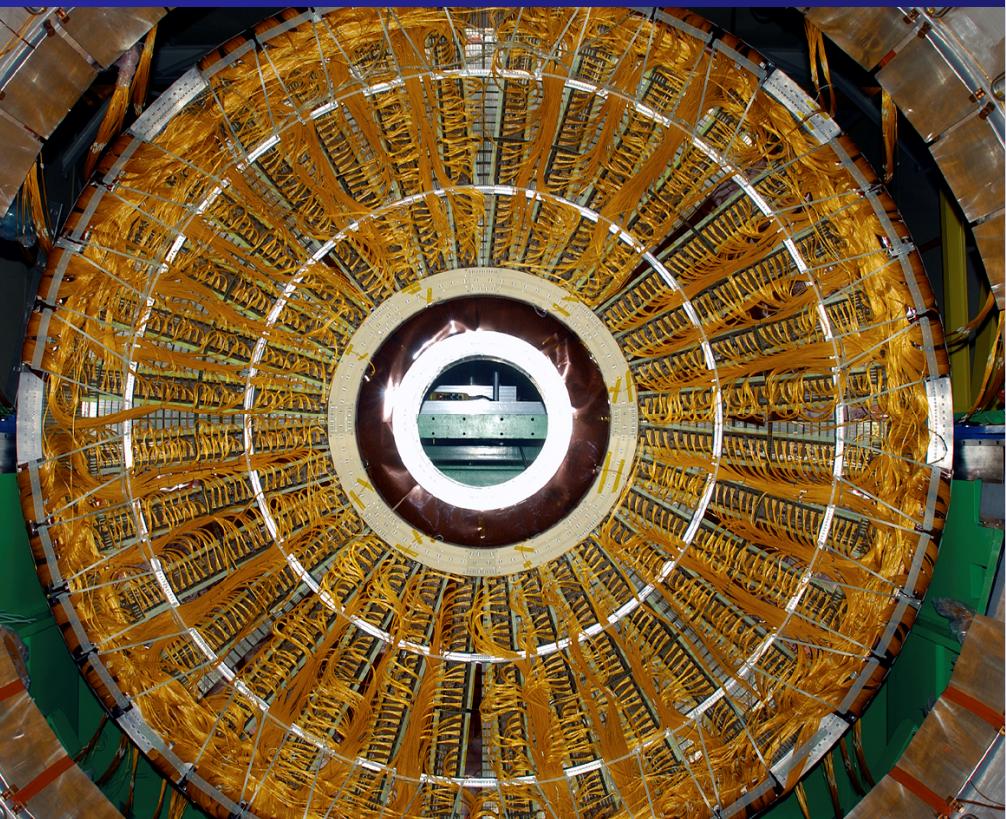
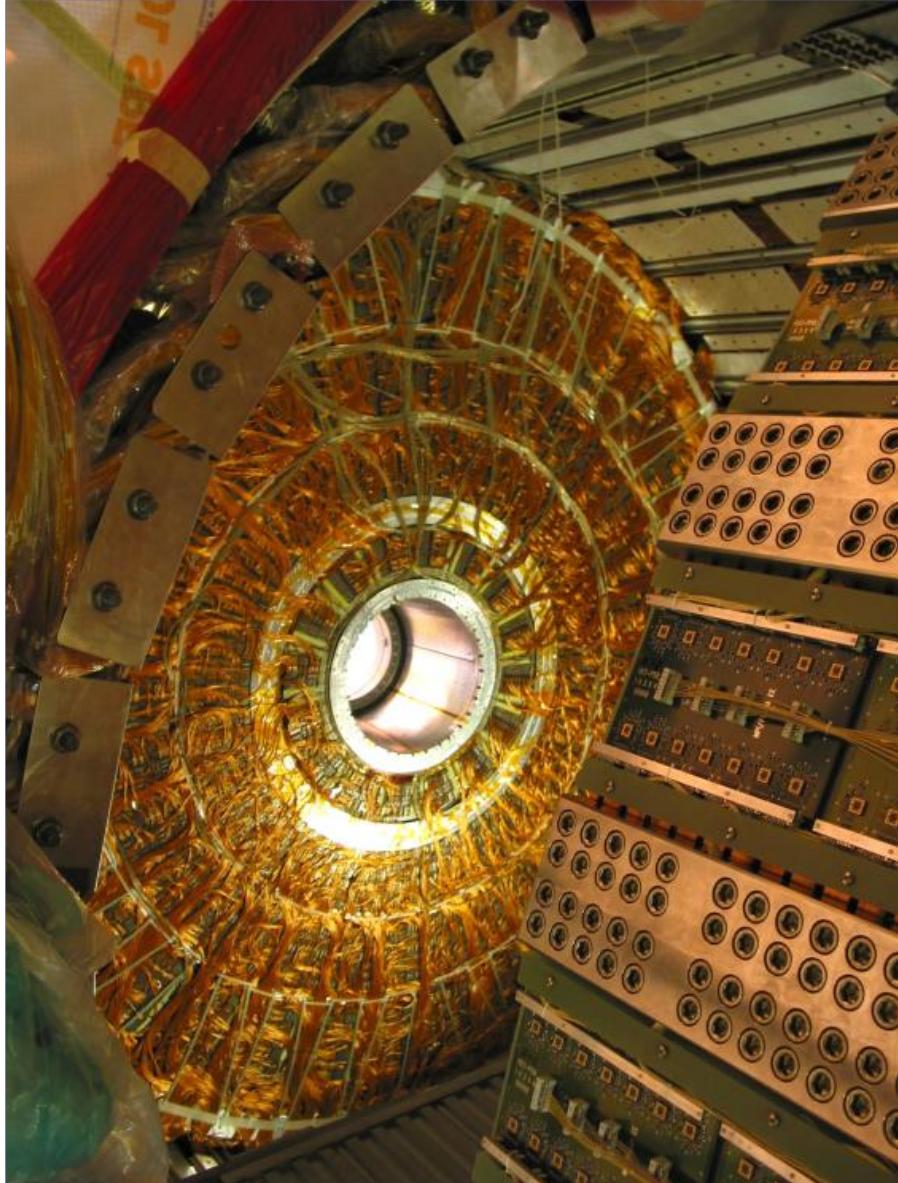
Au CPPM ...

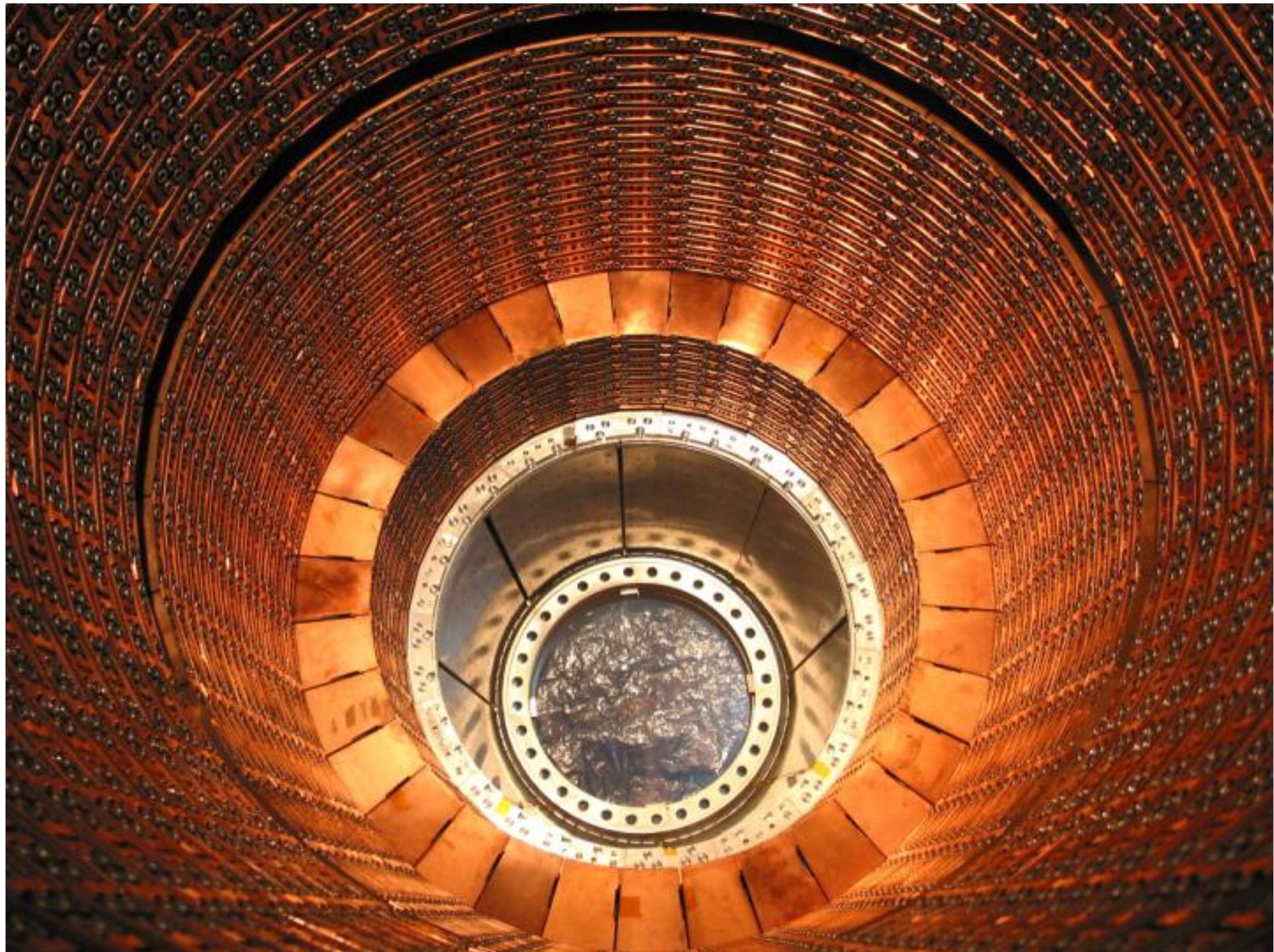
... puis au Cern

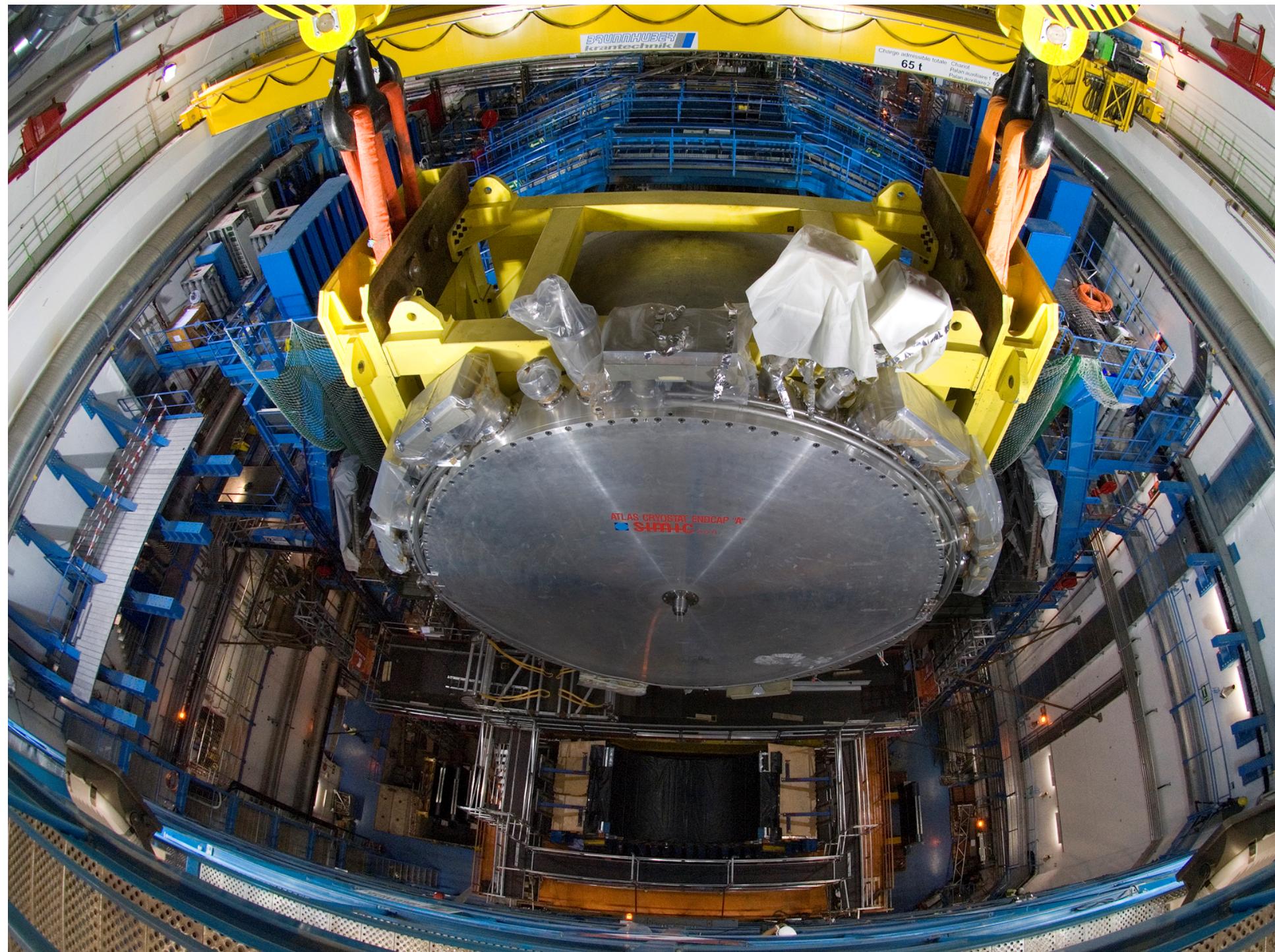


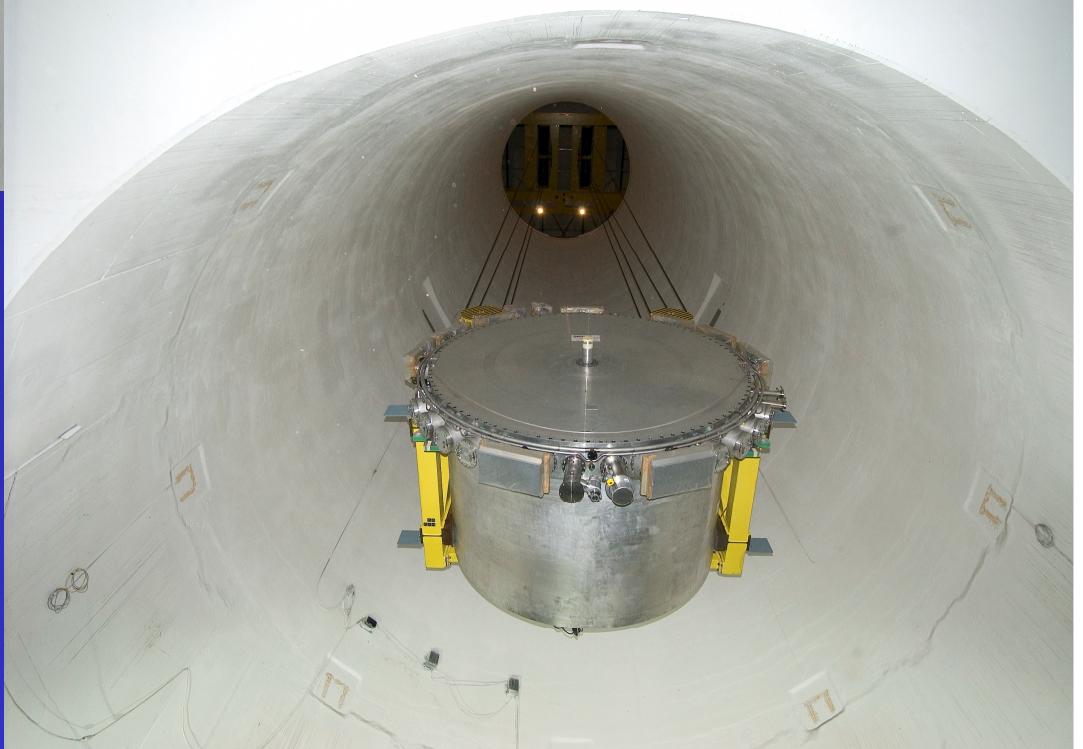
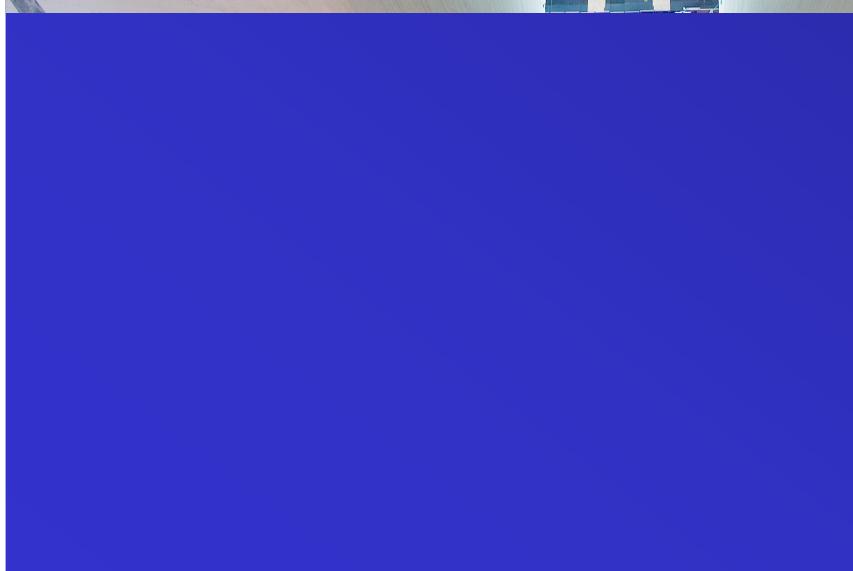
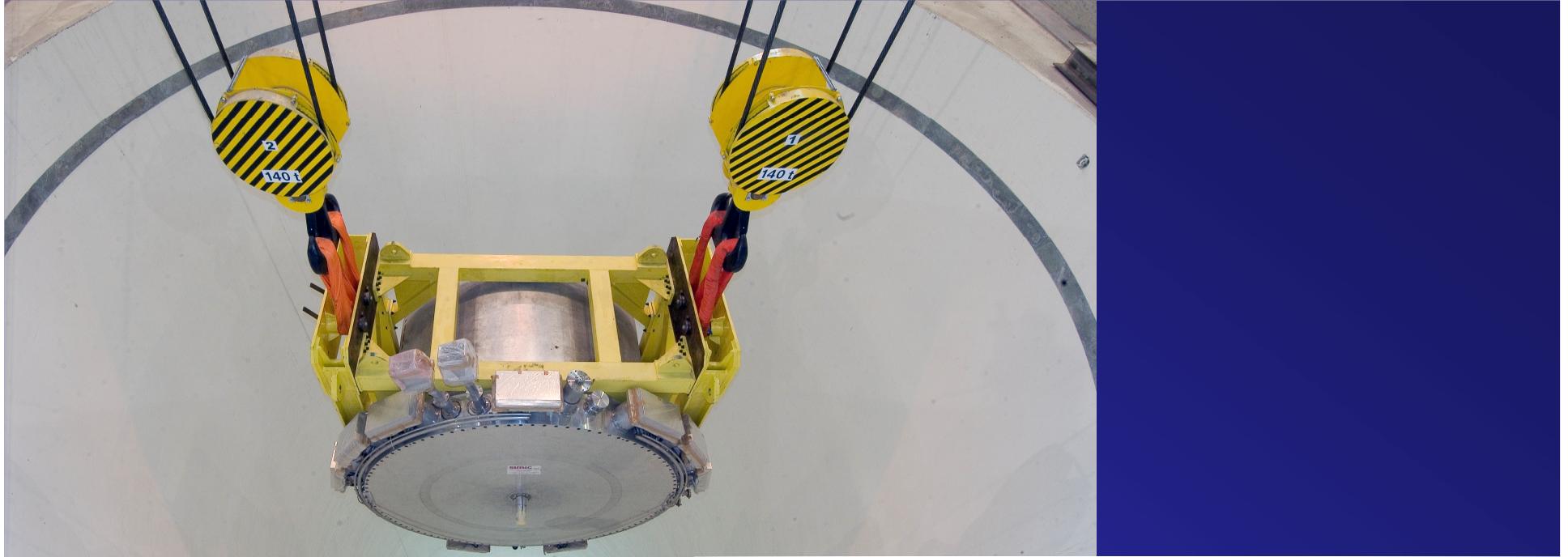
Fiers du résultat



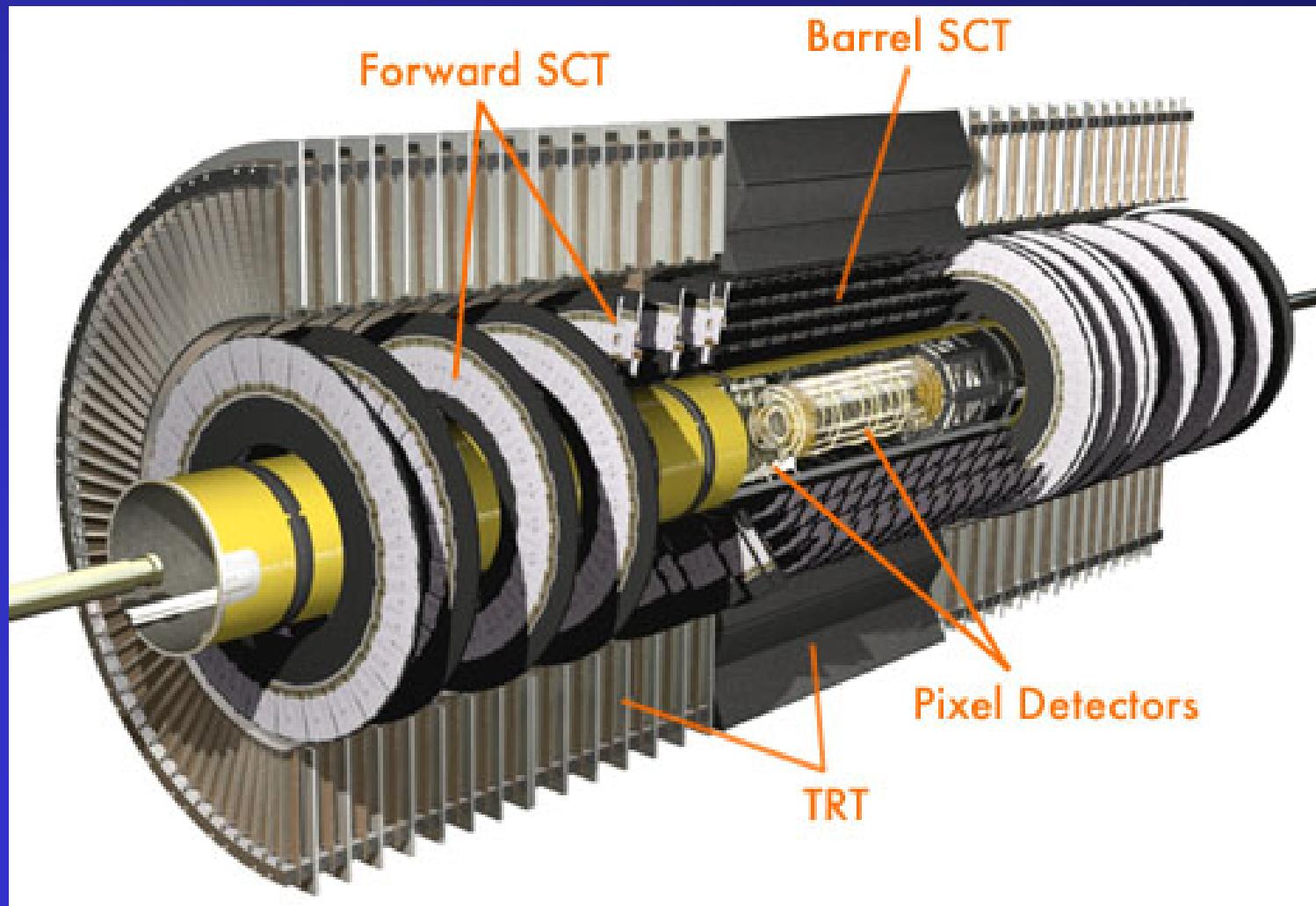






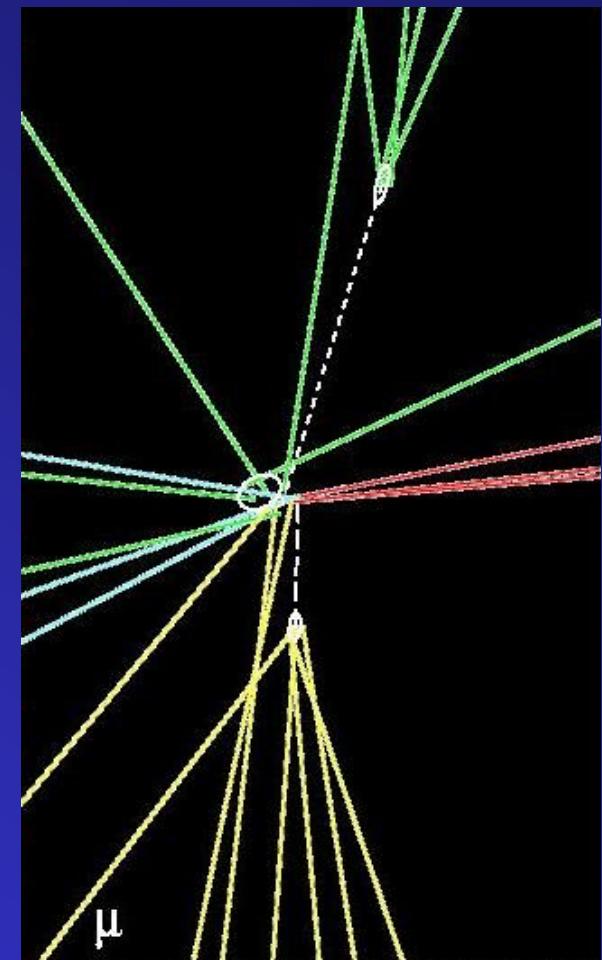
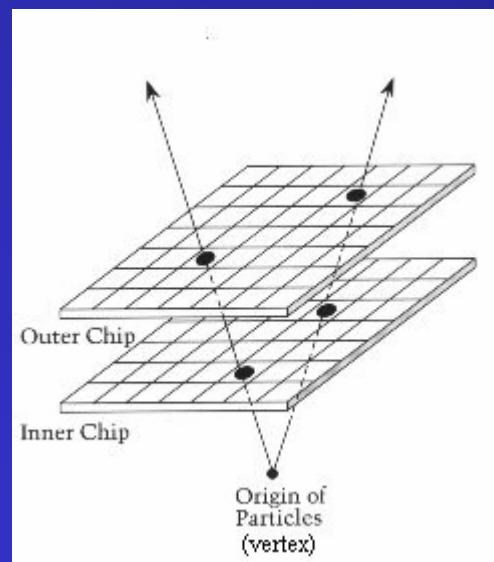
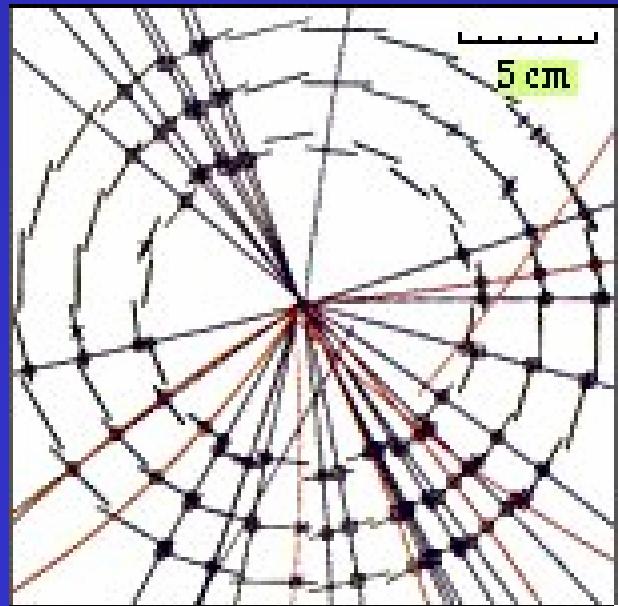


Trajectographe d'Atlas

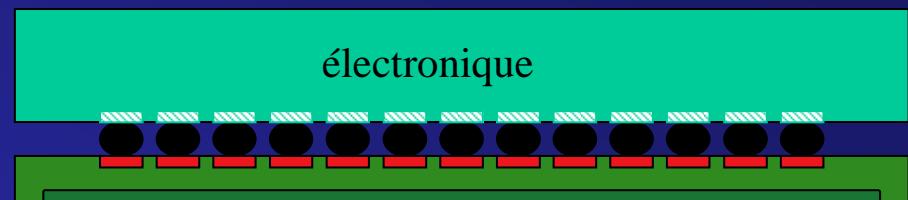
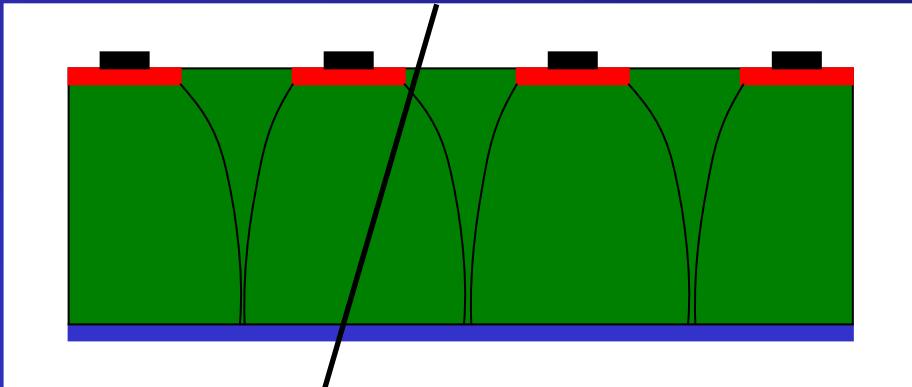


Détecteur de vertex

Recherche de particules à courtes durées de vie
Proche du point de collision
Très haute résolution et très grande précision



Détecteur à pixels



Détecteur à semi-conducteur (Si)

Détecteur à ionisation mais

électrons

trous (particule virtuelle de charge positive)

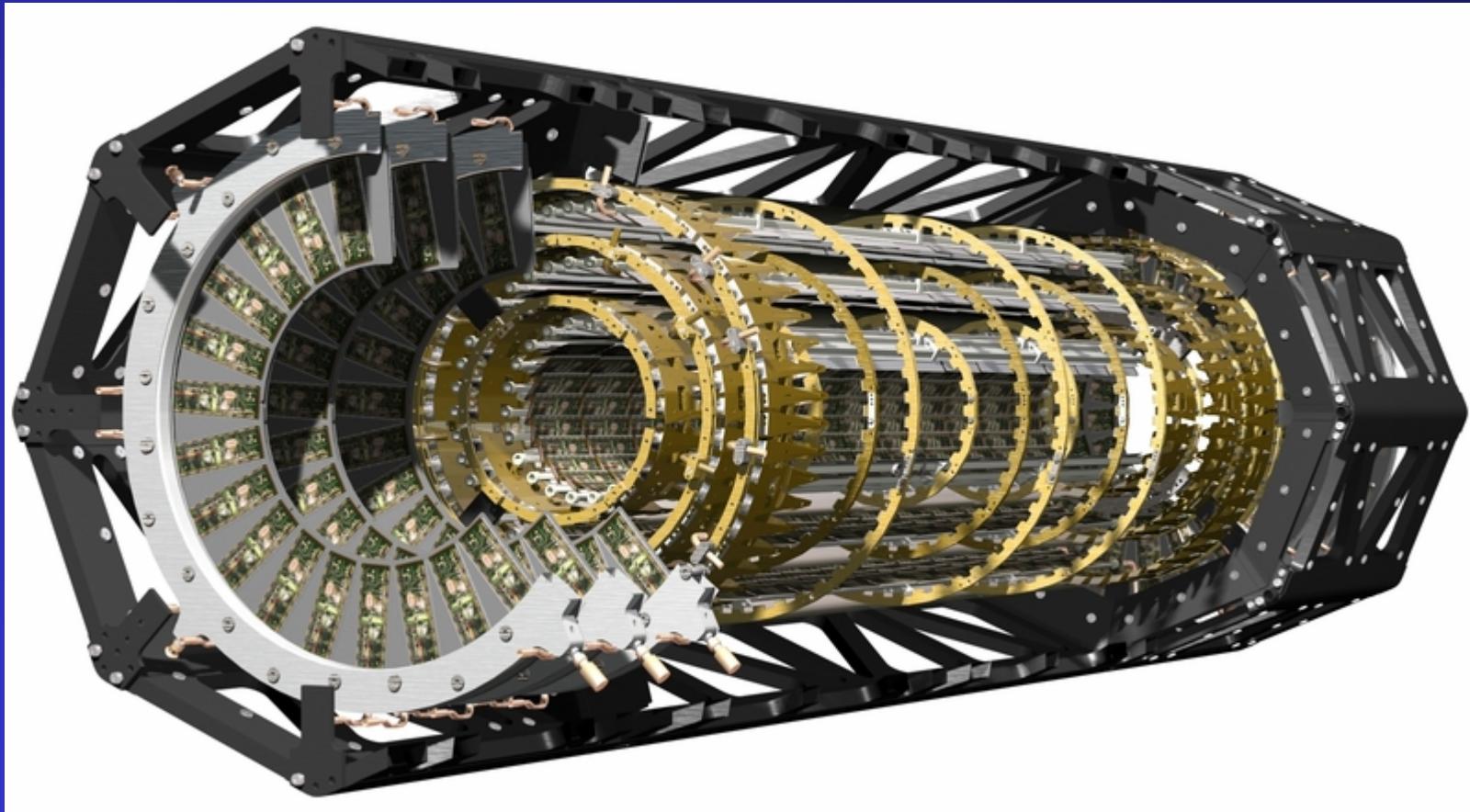
Techniques de miniaturisation de l'électronique

⇒ juxtaposition d'un grand nombre de micro-condensateurs

⇒ information sur la position de la particule

⇒ un circuit d'électronique de lecture par pixel

Détecteur de vertex d'Atlas



80 millions de pixels : $50 \times 400 \mu\text{m}^2$

3 couches : 5, 9 et 12 cm

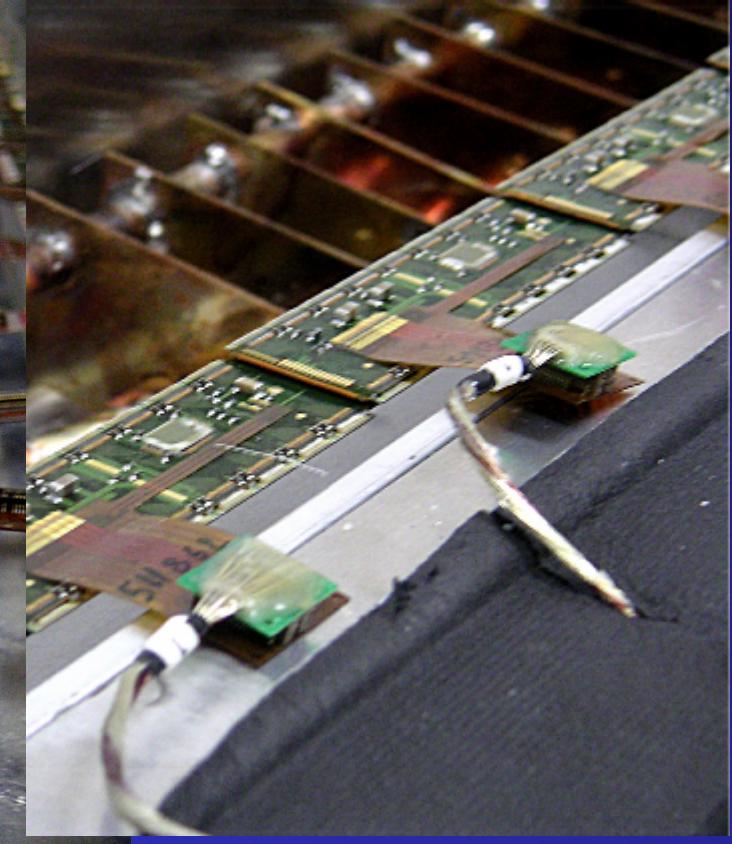
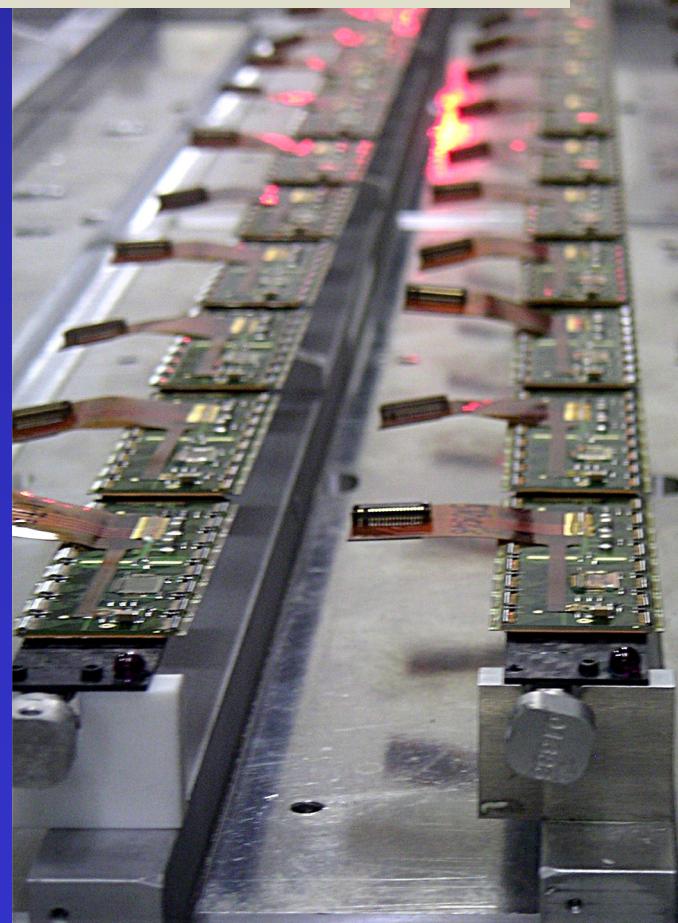
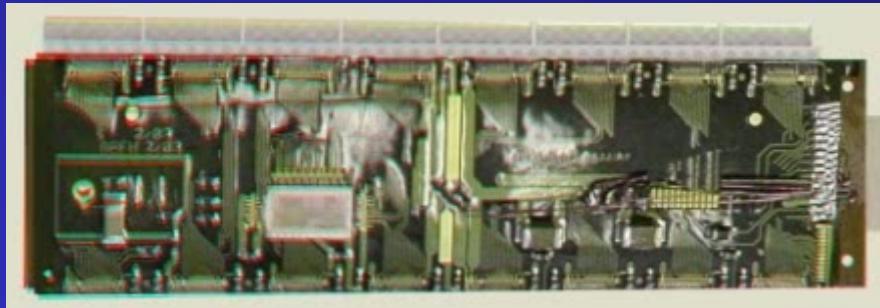
2 x 3 disques

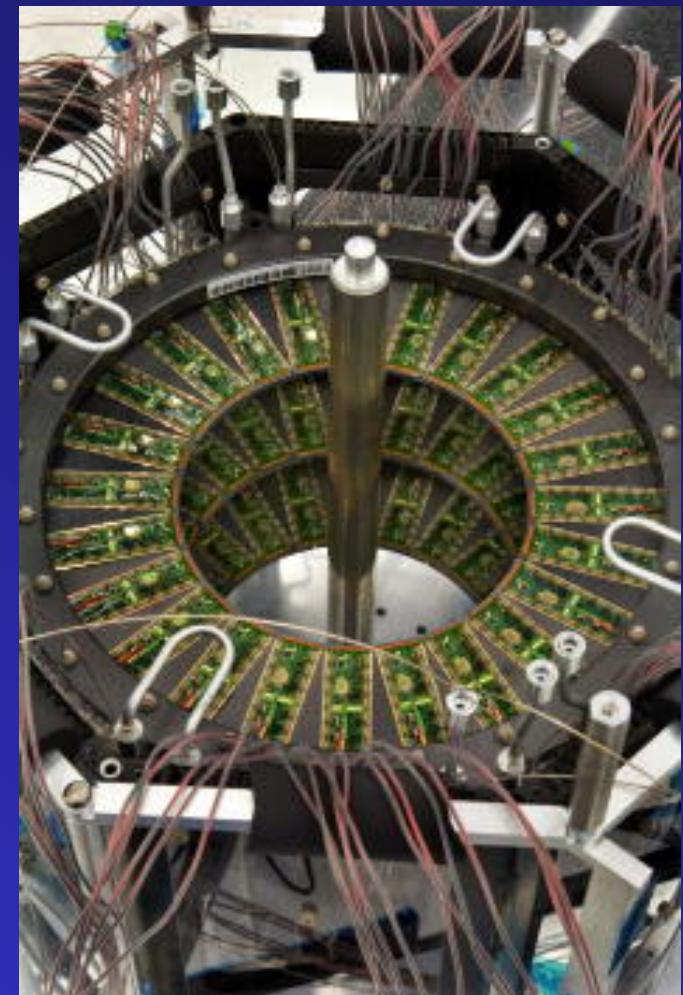
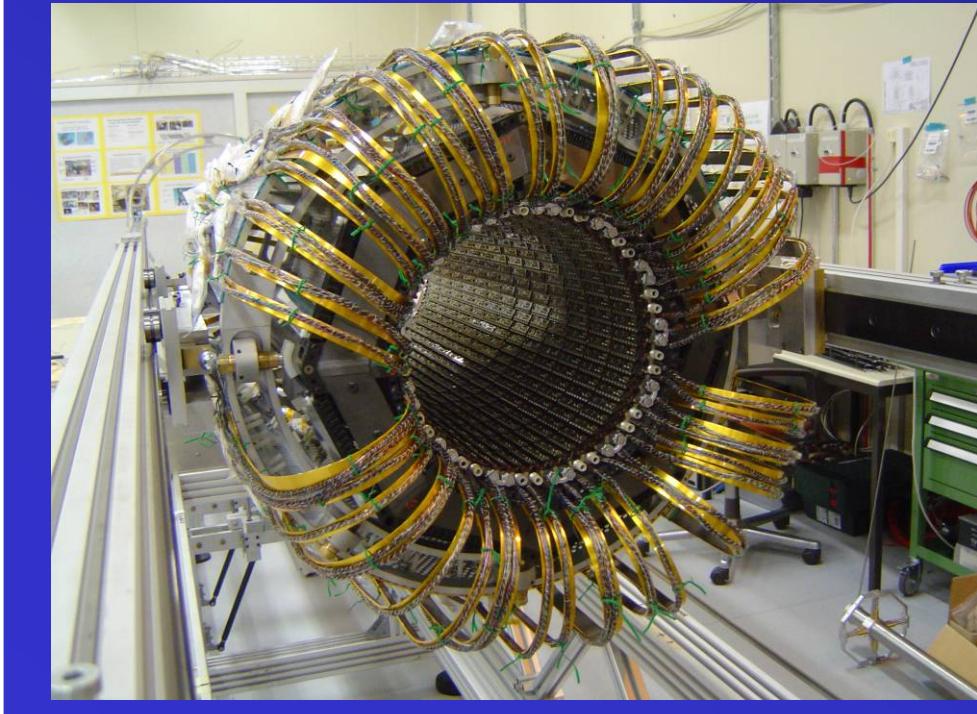
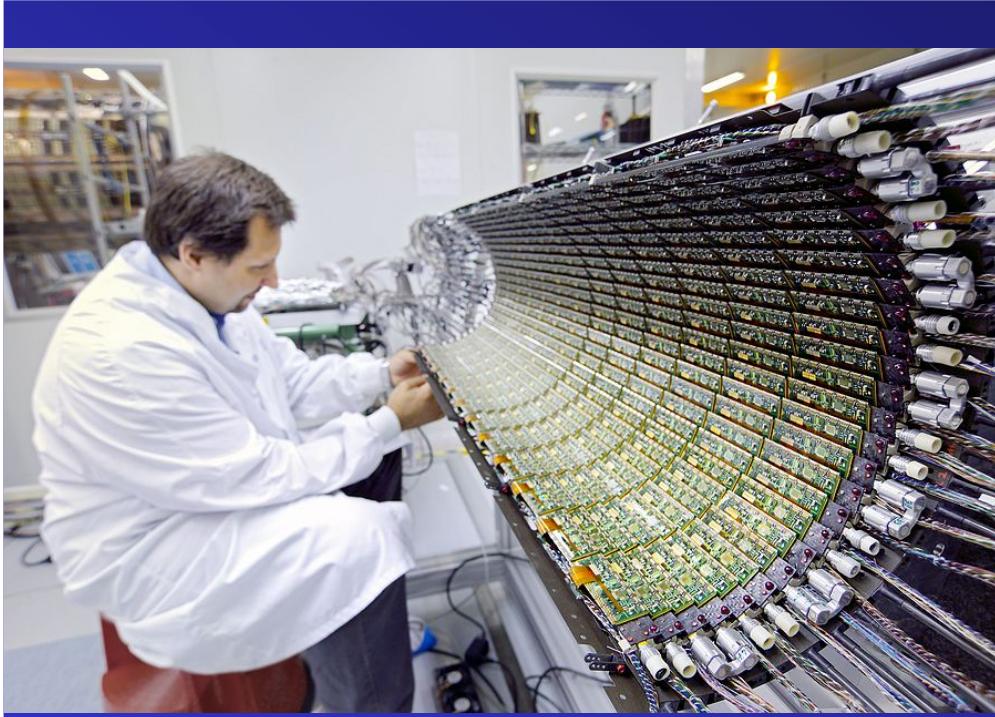
Au cœur du cœur

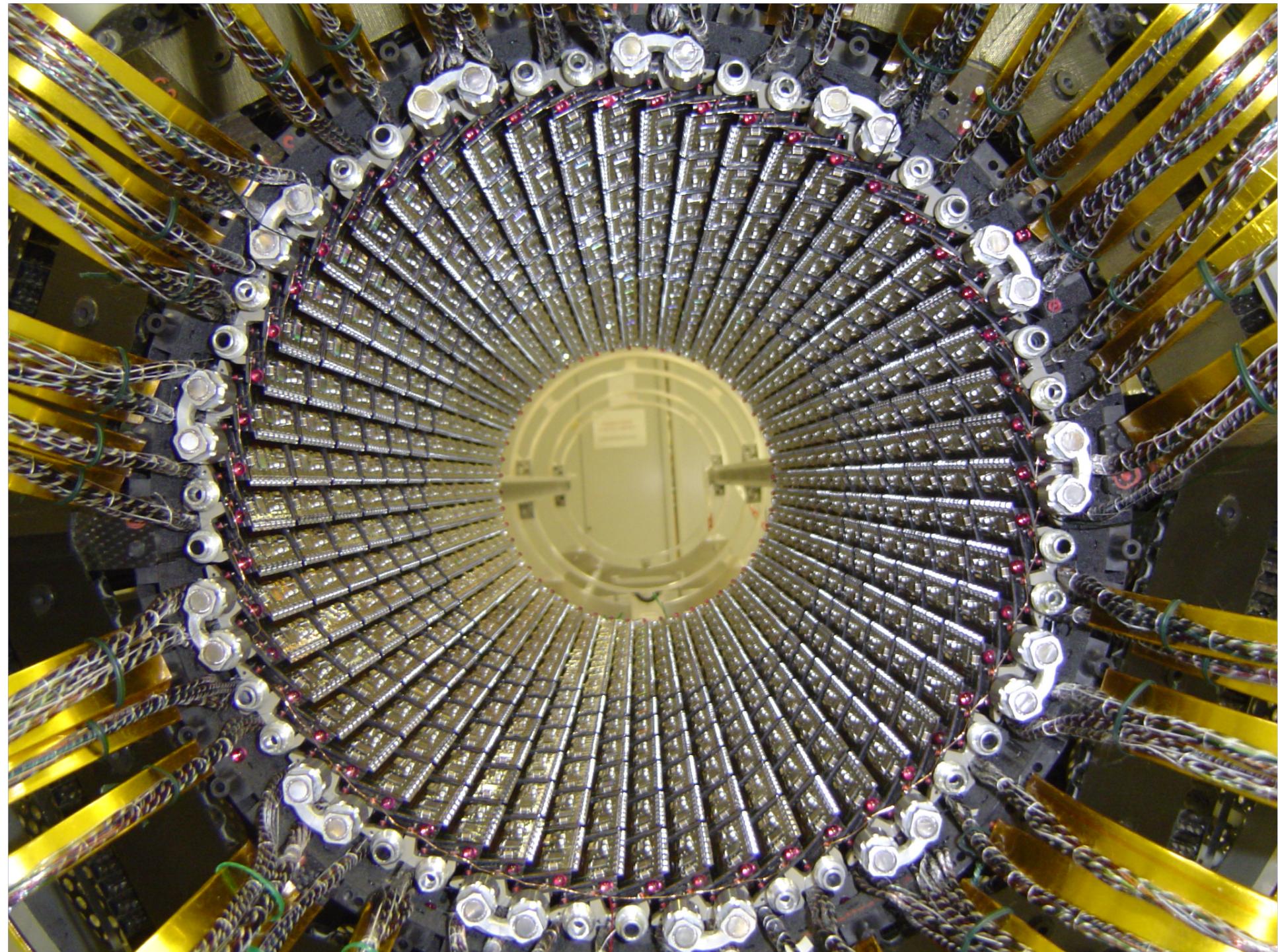


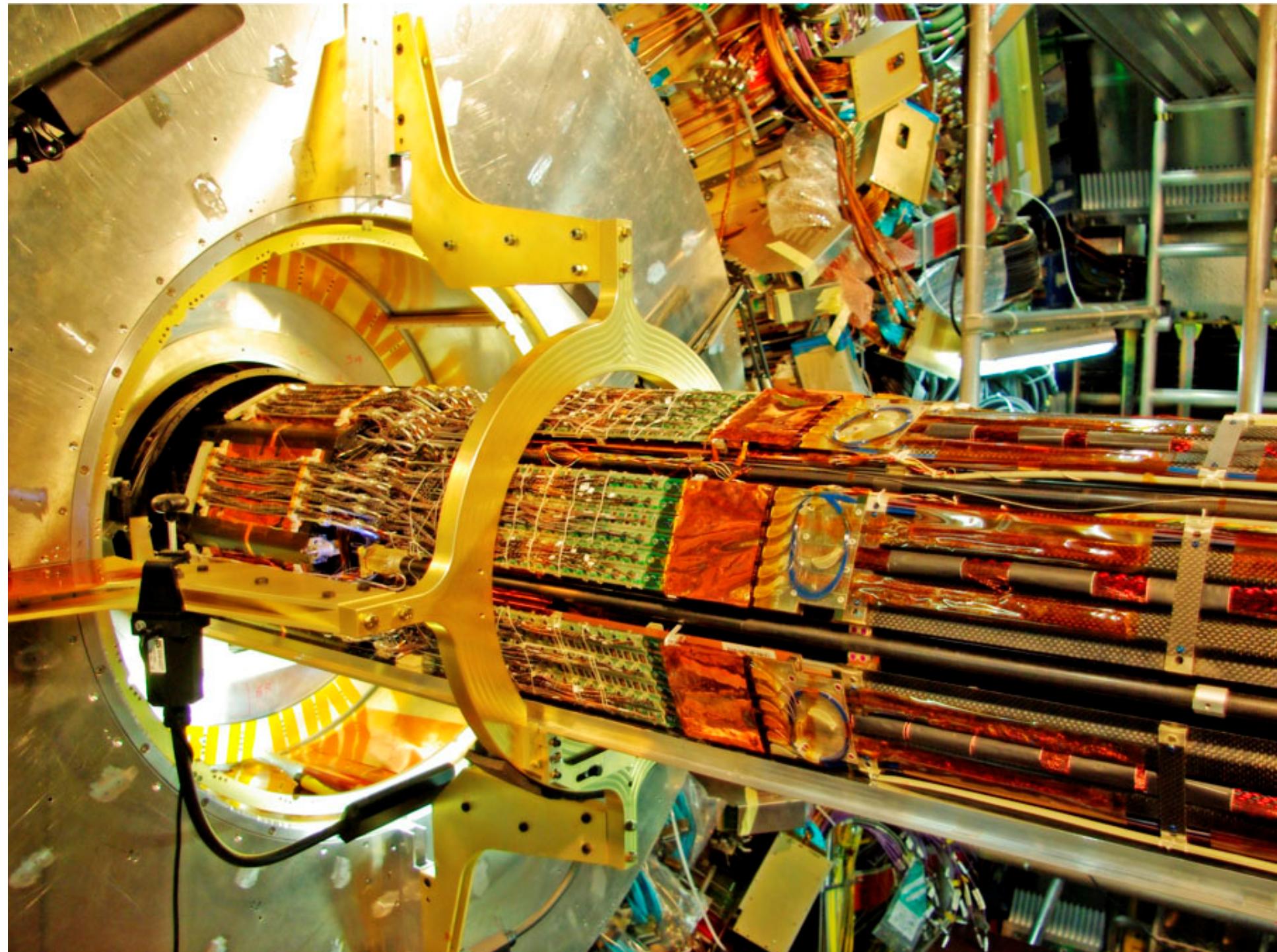
Quelques photos prises au CPPM

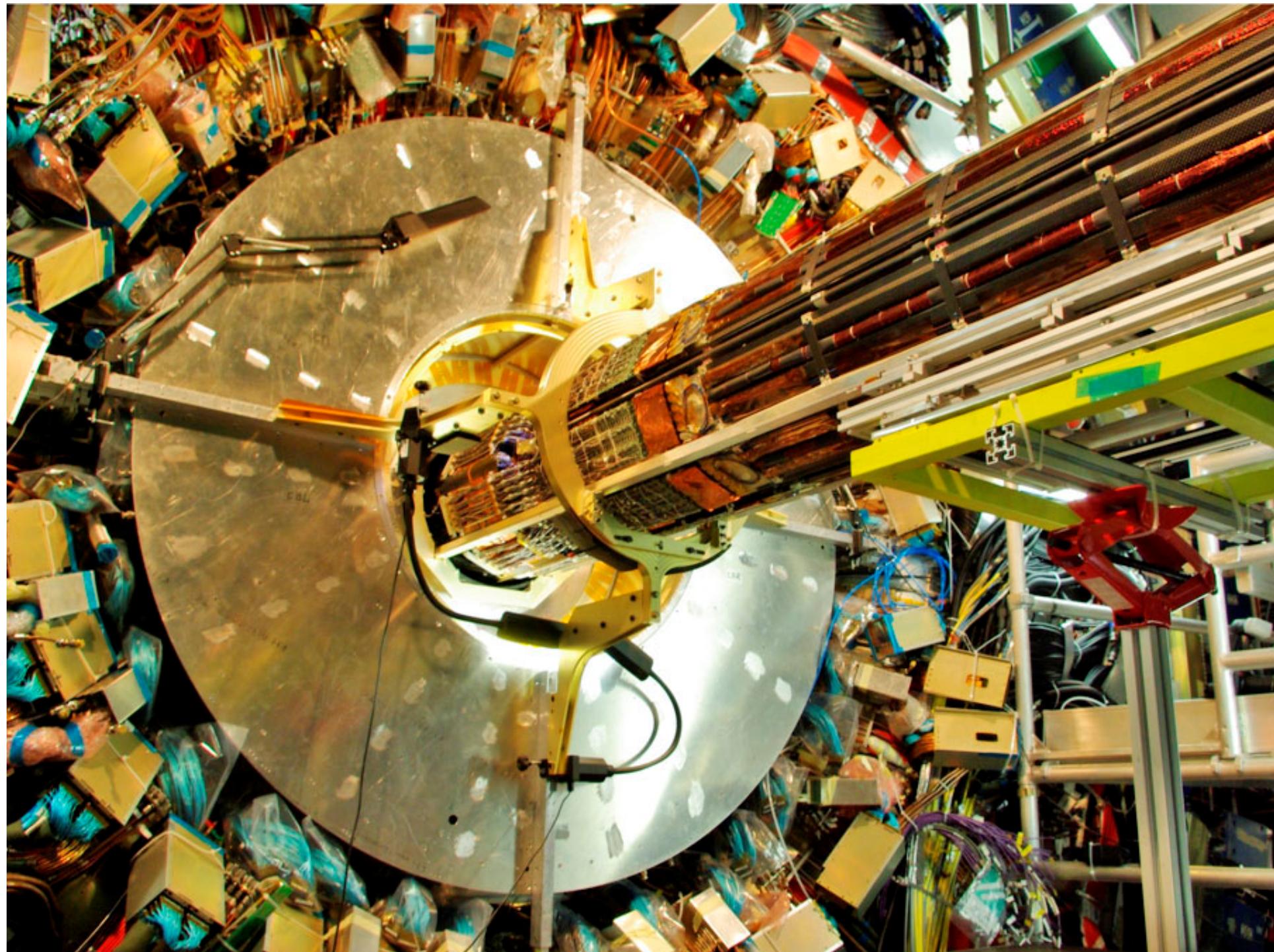
Et encore

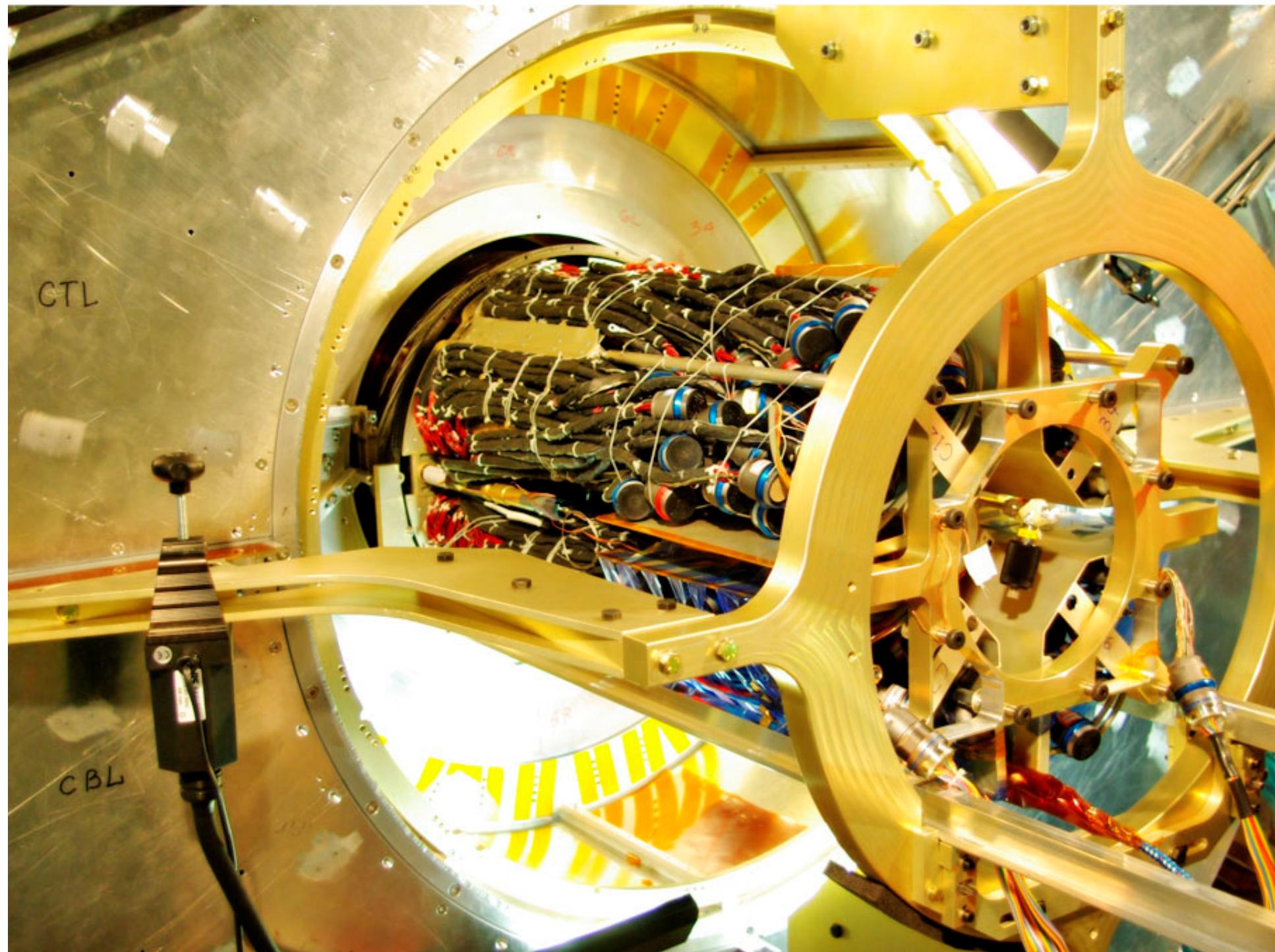


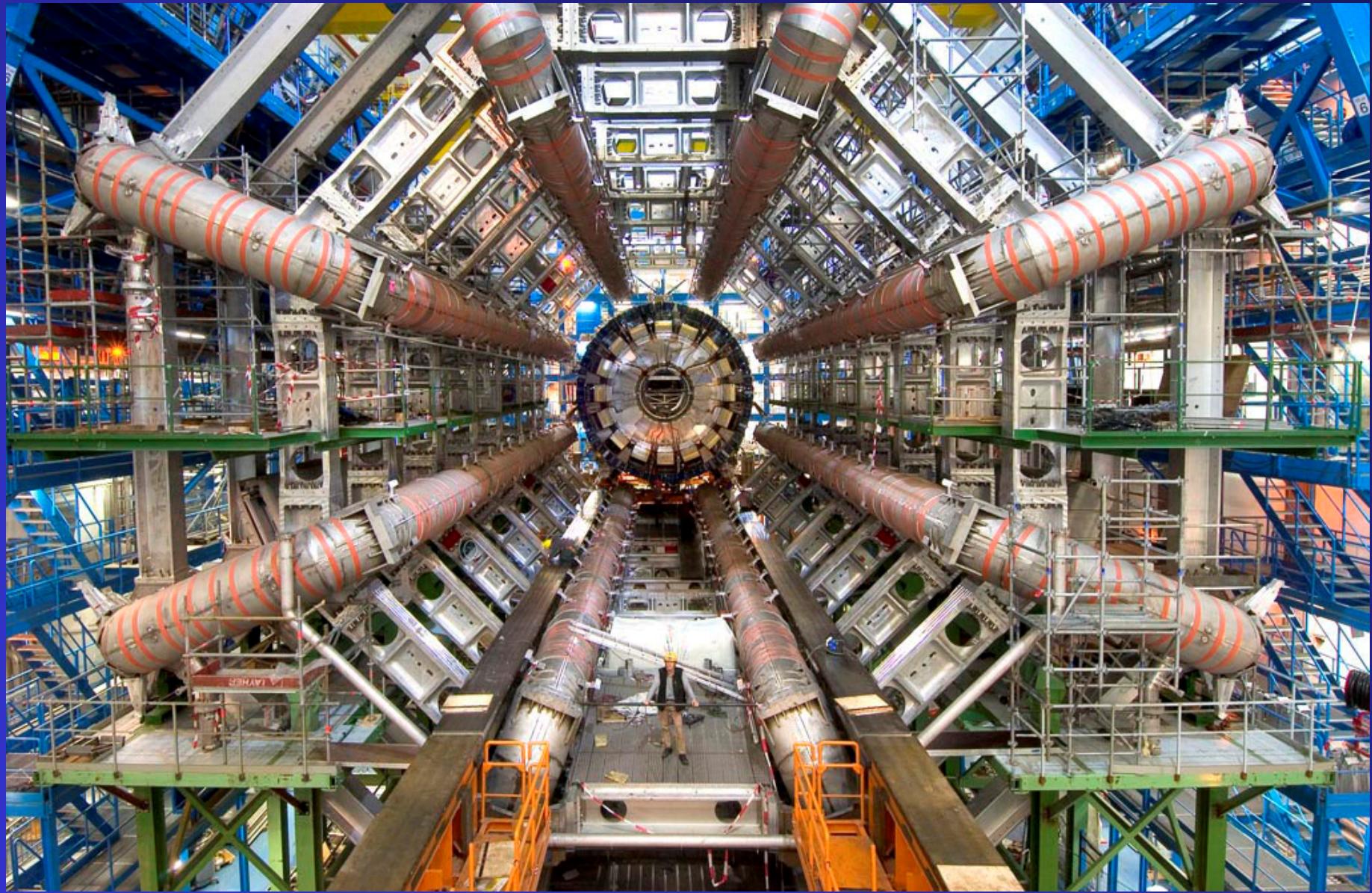


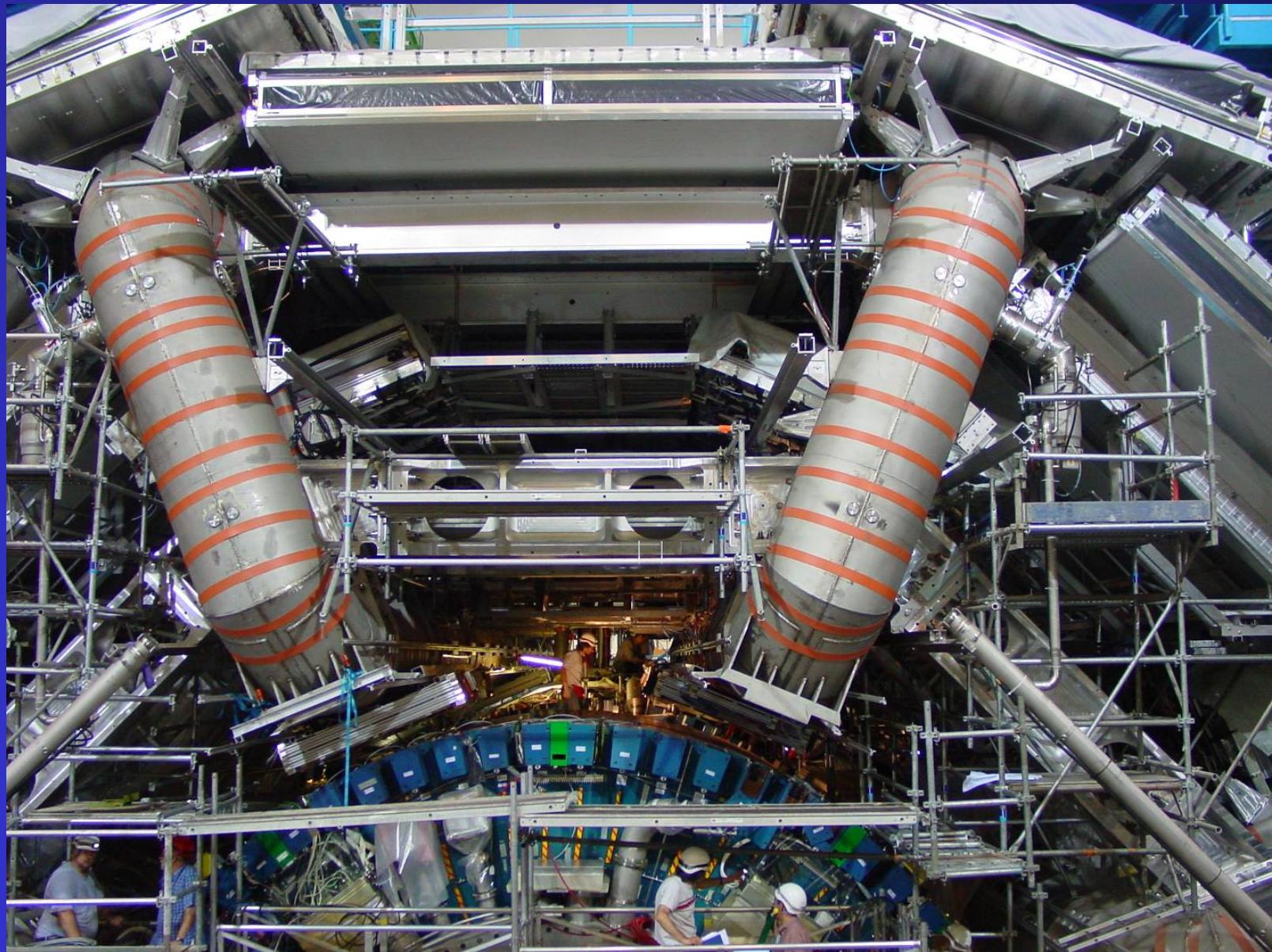


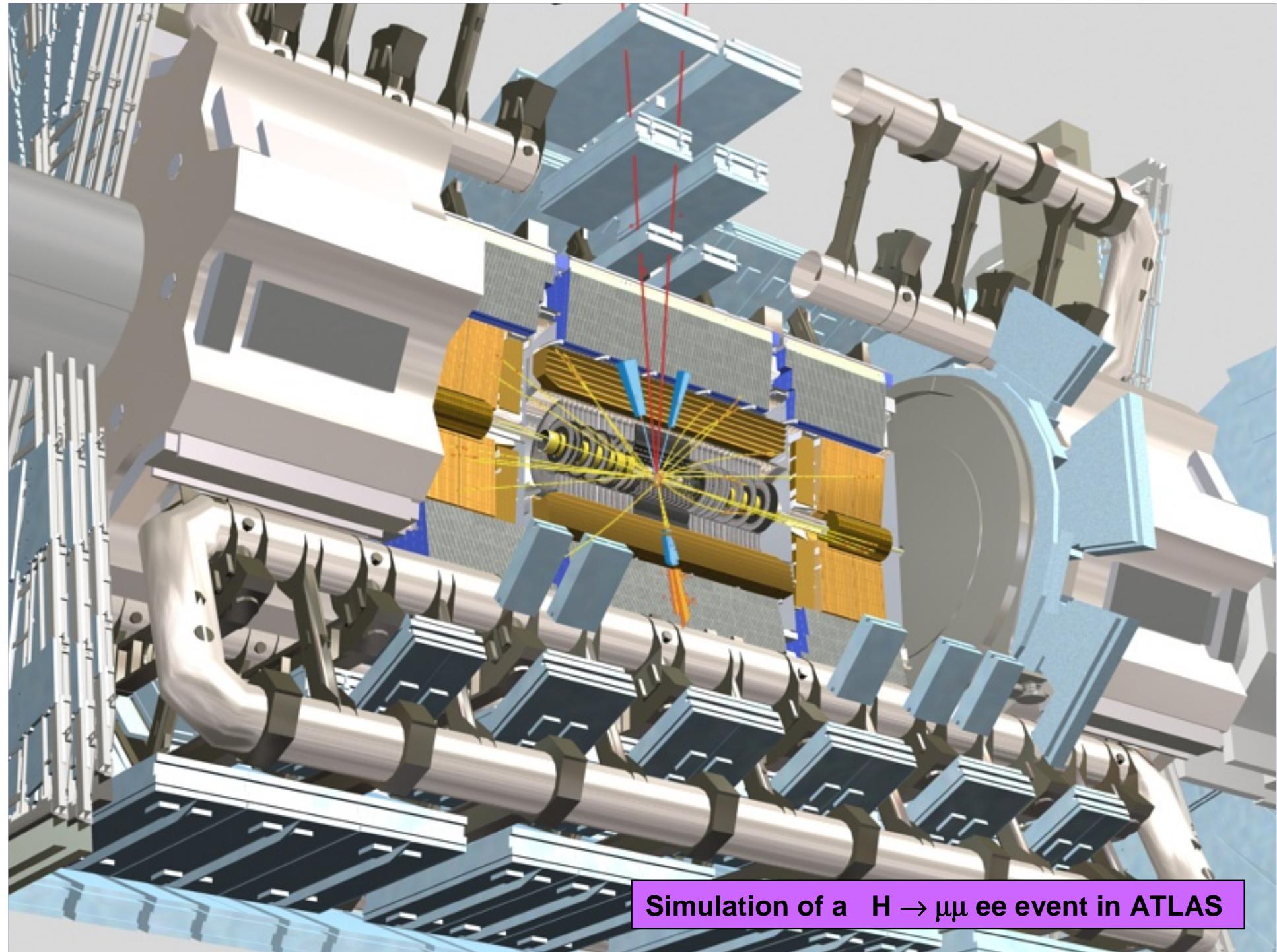




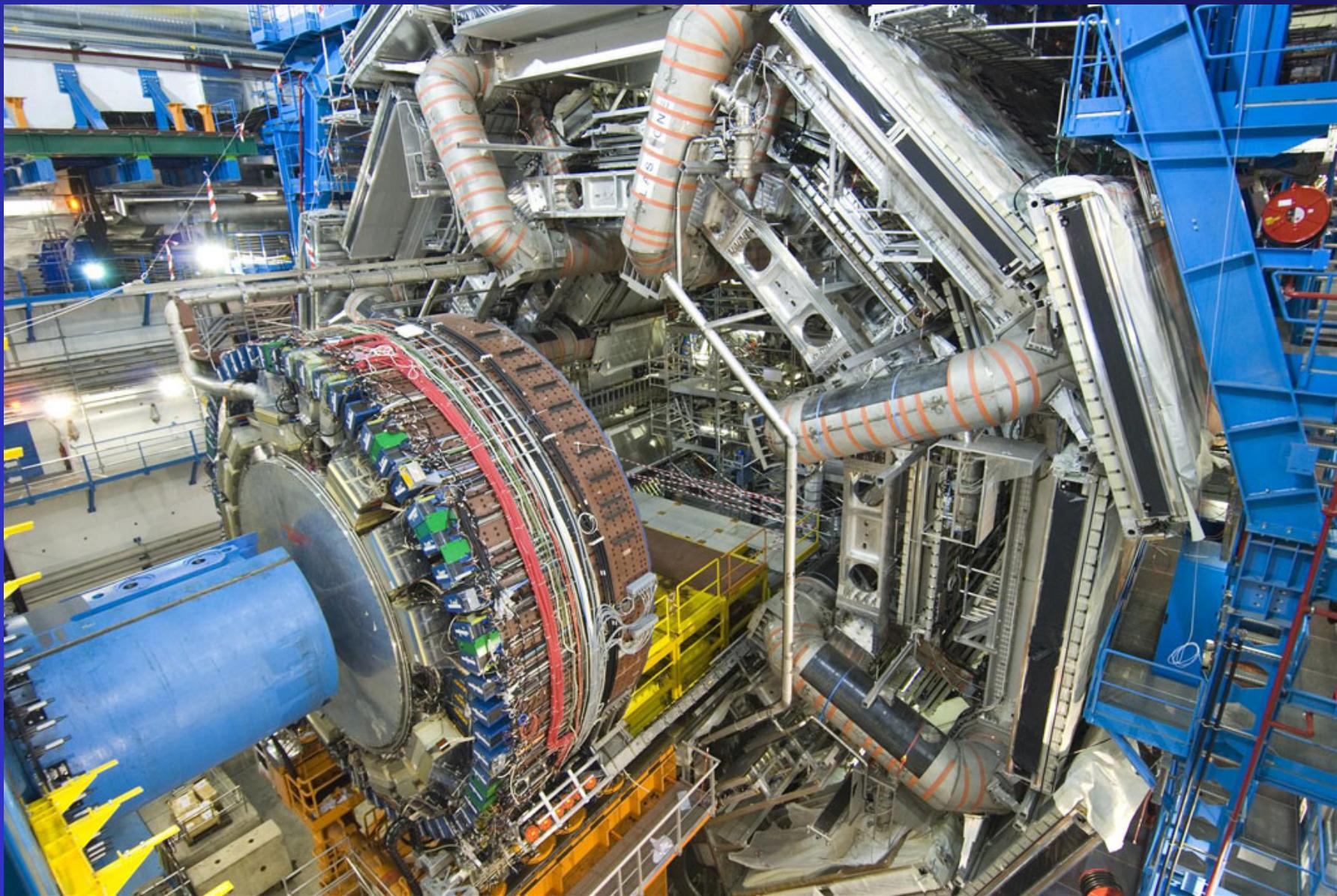


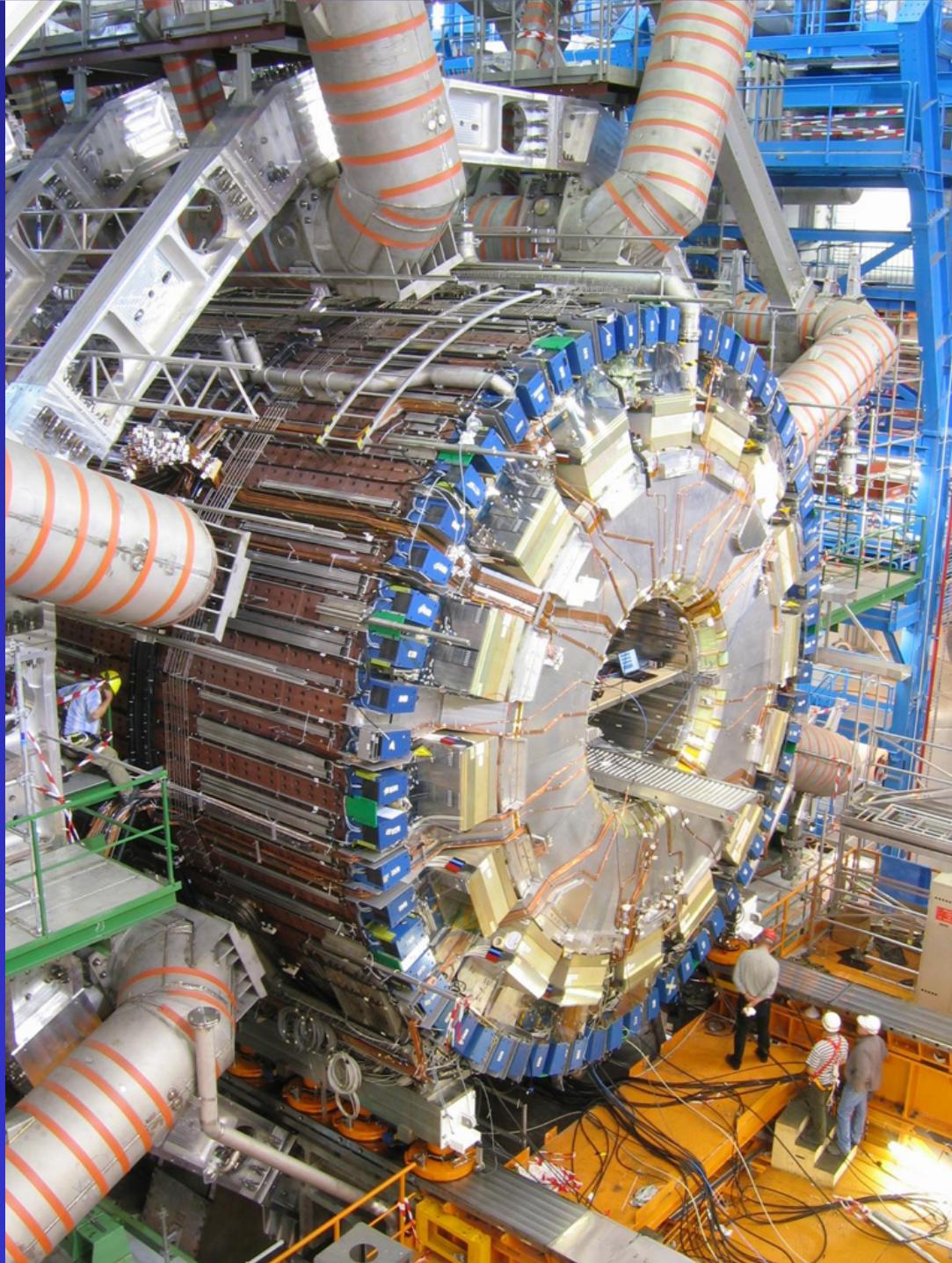


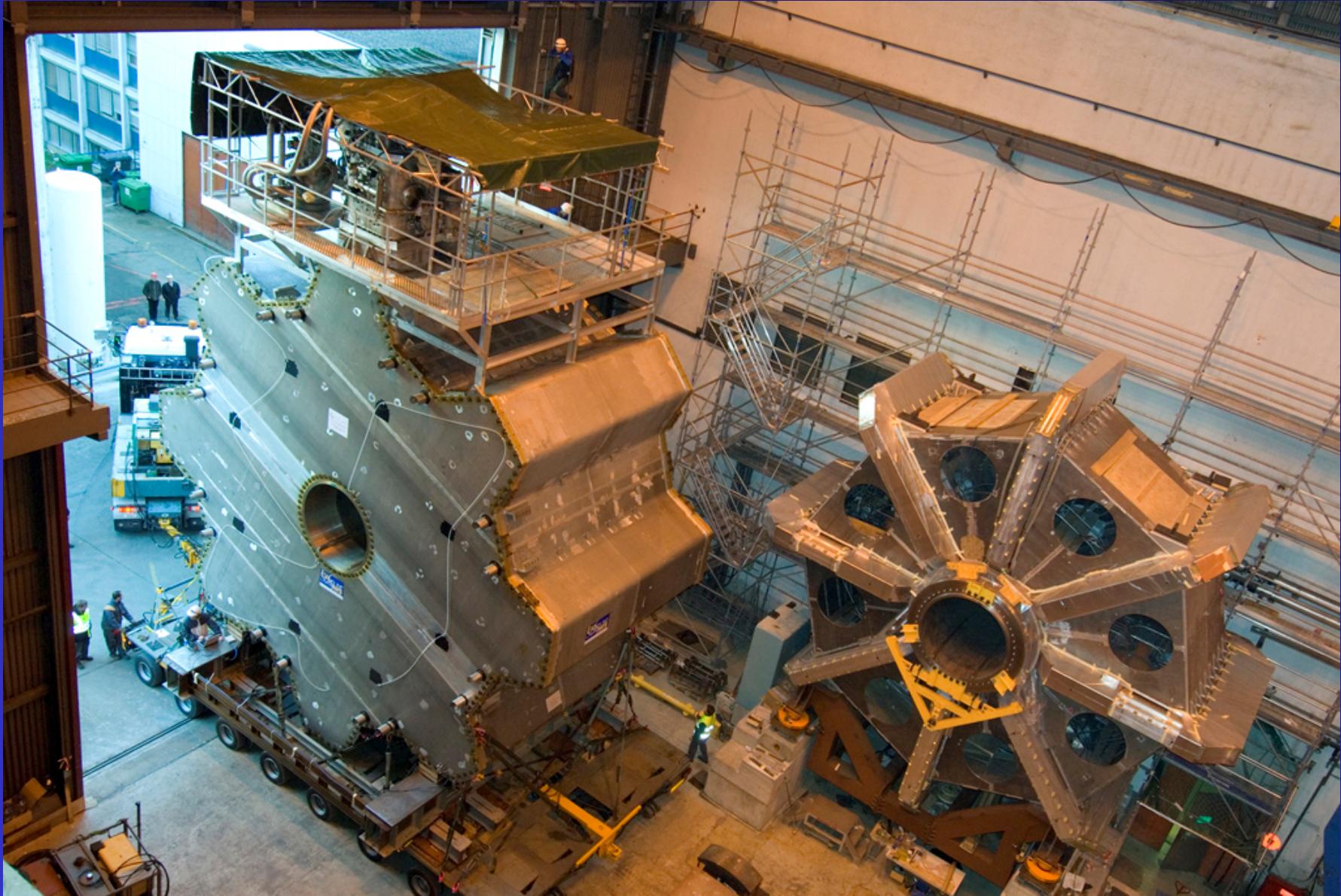




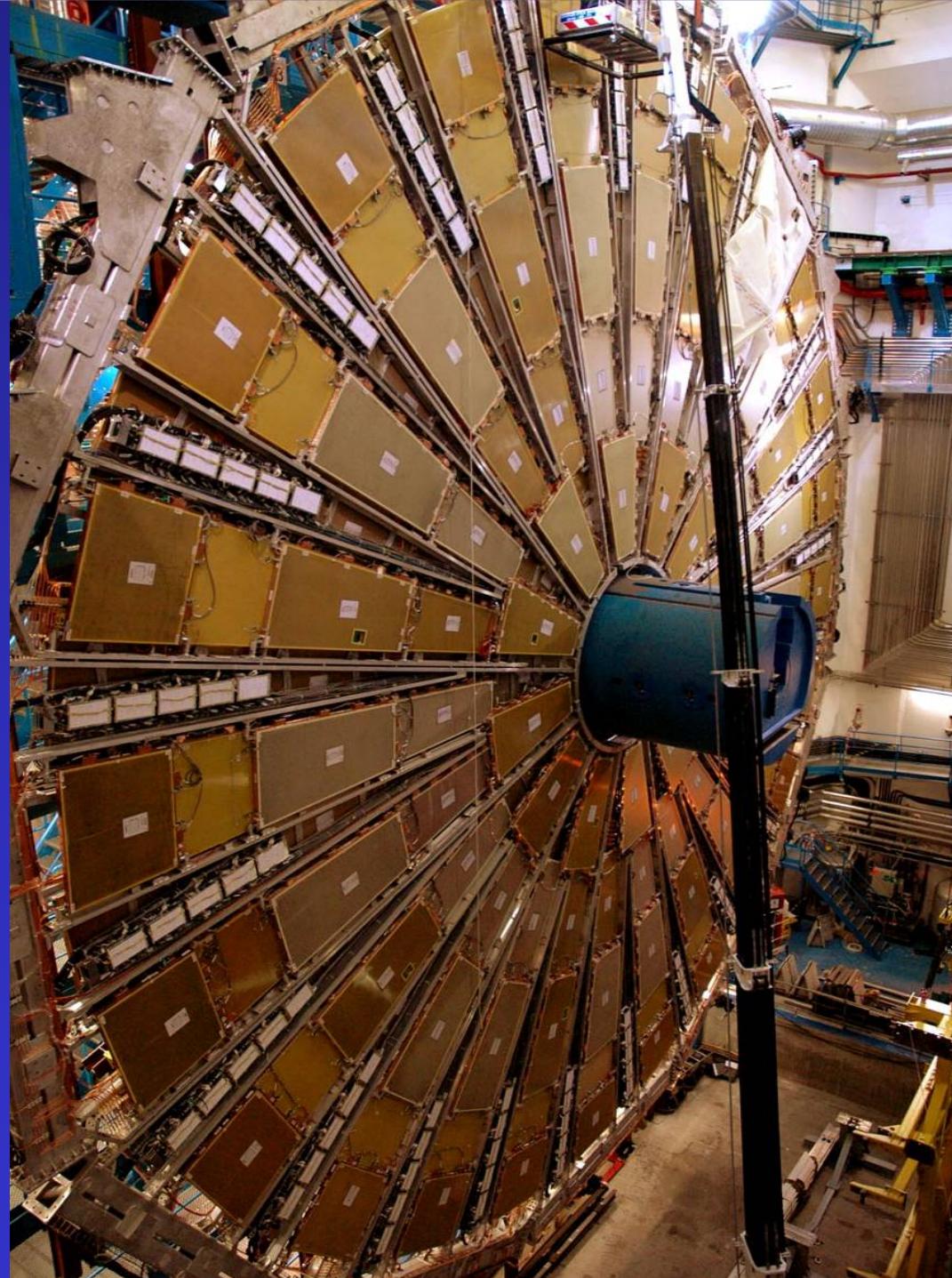
Simulation of a $H \rightarrow \mu\mu ee$ event in ATLAS

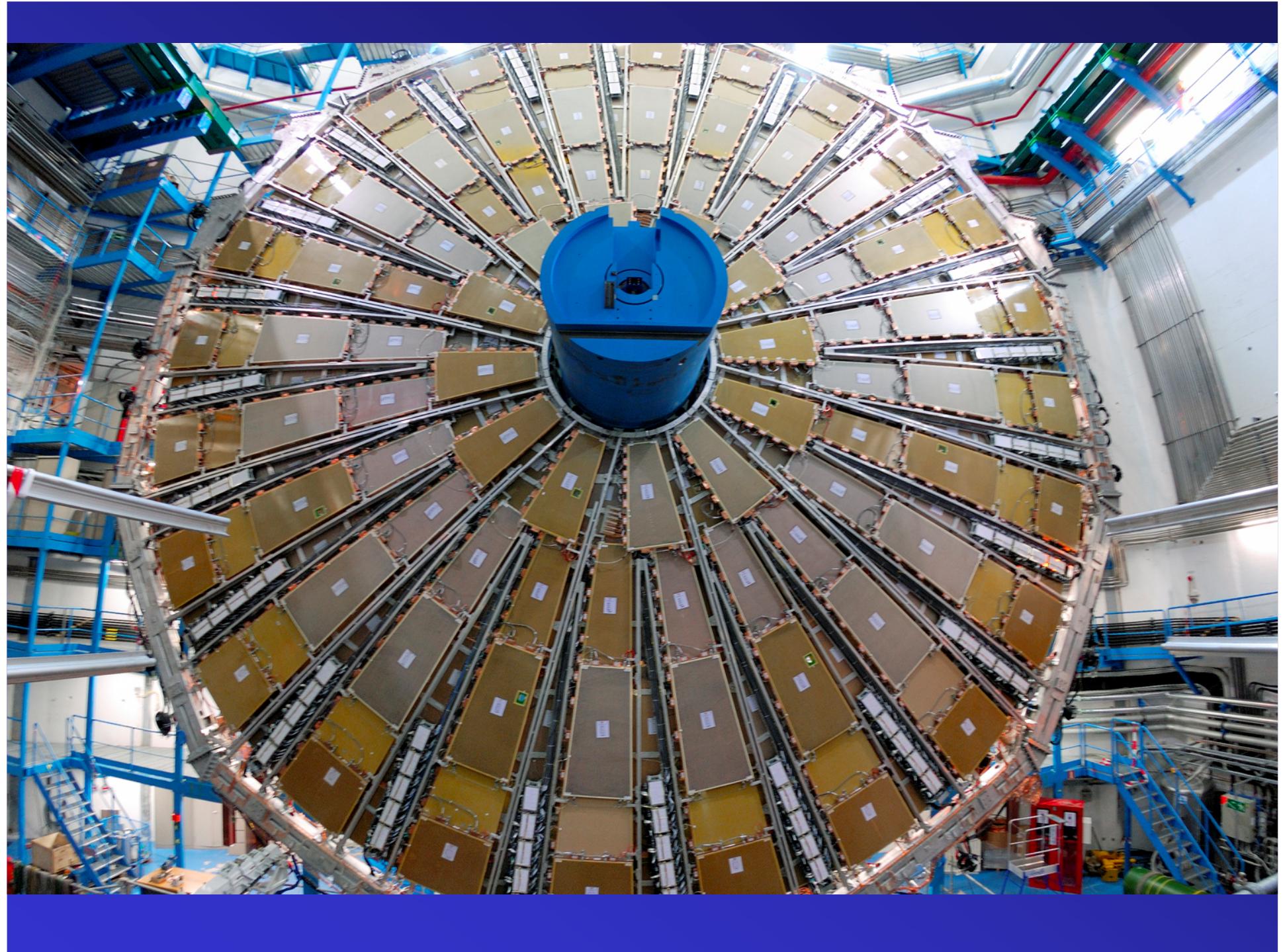












Grille de calcul



- **10000 Toctets de données**
 - 1 téra \equiv 1 million de millions
 - 20 km de CDs empilés
- **100000 ordinateurs dans le monde reliés dans un gigantesque réseau pour analyser ces données**
- **Rappel : le web a été inventé au Cern**

Grille de calcul (2)



Nombreuses applications hors de la physique des particules :
Biologie, Sciences de la Terre, etc.
Un exemple de retombée de nos recherches

La suite ...

- Premières études en 1989
- Mise en service du LHC et d'Atlas : automne 2008 ?
- En route pour une nouvelle aventure d'au moins dix ans.



Remerciements

- Présentation inspirée de nombreuses contributions de physicien(ne)s du CPPM, du Cern, de l'IN2P3, etc.
- Site du CPPM
 - <http://marwww.in2p3.fr/>
- Site Atlas :
 - <http://atlas.ch/index.html>

Où est passée l'antimatière ?

- Antiparticule :
 - même masse que la particule, mais nombres quantiques (par exemple charge électrique) opposés
- Antimatière : réalité ou science fiction ?
 - Première antiparticule (positon) prédite par Dirac en 1931, découverte par Anderson en 1932
 - Radioactivité β : en fait antineutrino
 $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$
(conservation du nombre leptonique)
 - Antiatomes d'hydrogène produits au Cern

Où est passée l'antimatière ? (2)

- Expériences de physique des particules :
 - Transformation de l'énergie cinétique des faisceaux en particules, toujours $E = m c^2$
 - Souvent production en paire particule et antiparticule, par exemple:

$$\gamma \rightarrow e^+ e^-$$

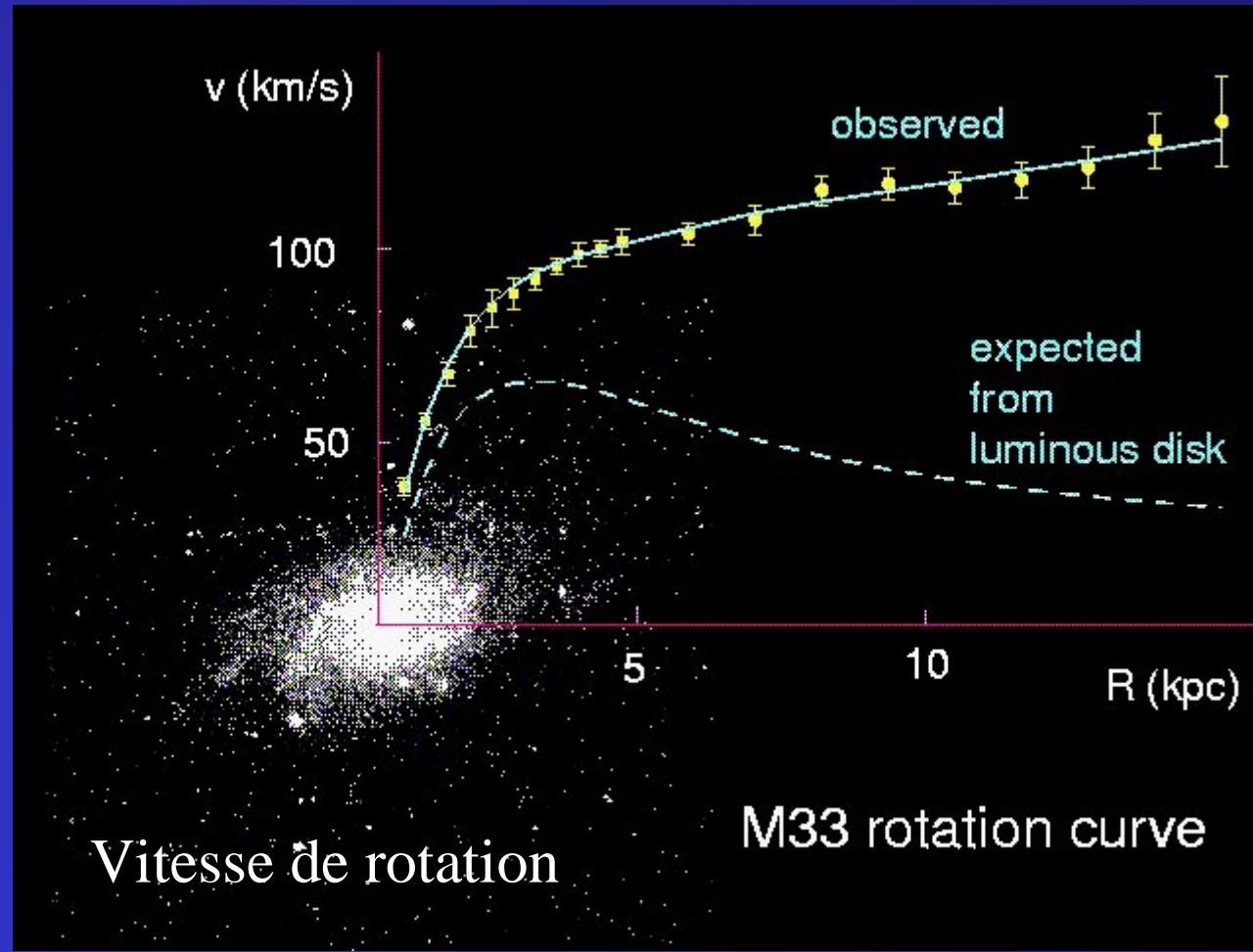
toujours la conservation des nombres quantiques

- Particule et antiparticule peuvent s'annihiler en produisant de l'énergie

Où est passée l'antimatière ? (3)

- Big Bang :
 - Univers primordial : énergie
 - Production des particules initiales par paires
 - Il devrait y avoir autant d'antimatière que de matière, ou tout l'Univers aurait dû s'annihiler
 - Ce n'est pas ce qui est observé
- Il existe une propriété de l'interaction électrofaible (la violation de la symétrie CP – charge-parité) qui pourrait expliquer que l'Univers ne contienne que de la matière
- Il faut comprendre l'origine de ce phénomène

Masse manquante dans l'univers



Masse manquante (2)

- La matière visible ne représente que 4 % de l’Univers
- La matière noire représente 23 %
 - Particule massive inconnue ?
- Le reste (les trois-quarts !) serait de l’énergie noire dont on ne sait rien