

Experience de Physique des particules

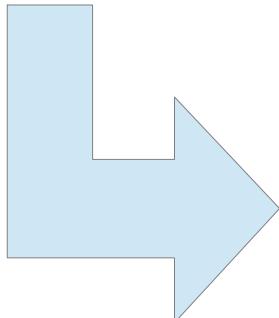
De l'accélérateur à l'analyse

Plan

- Principes et caractéristiques des expériences de physique des particules
- Outils instrumentaux : collisionneurs, détecteurs
- L'analyse, présentation du logiciel

Expérience aux collisionneurs

- Modèle Standard : théorie de champs quantiques
 - Processus intrinsèquement aléatoires
 - Prédictions théoriques = « probabilité d'occurrence » (\sim sections efficaces)



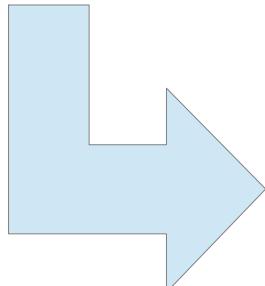
*Analyses de nature statistiques
Faibles probabilités pour les processus recherchés*

Grand nombre d'interaction nécessaire !

(\sim 600M collisions/s au LHC)

Expérience aux collisionneurs

- **Influence de l'Energie disponible**
 - Masse élevée des particules à produire (Higgs, autres...)
 - Sections efficaces augmentent avec l'energie

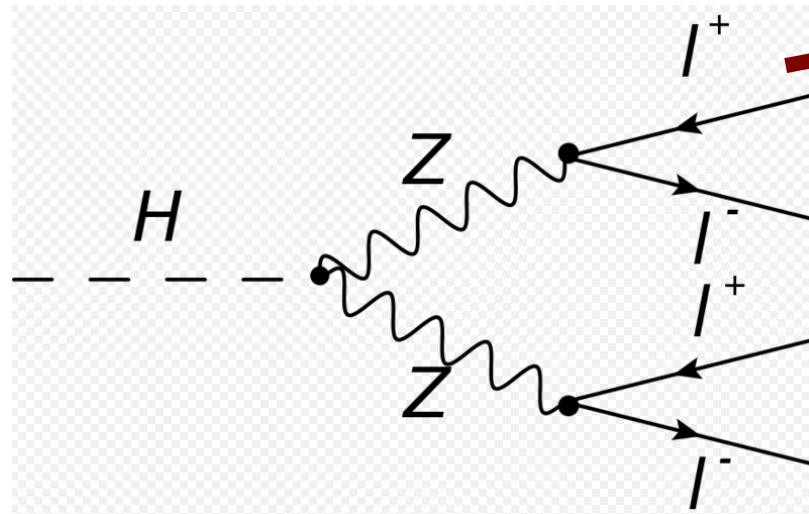


Plus haute énergie possible dans le centre de la collision

(13TeV au LHC)

Principe d'une Analyse

Choix d'un processus à observer



Prédition théorique : « étant données N_{Total} collisions à 13TeV on attend N_H occurrence de ce processus »

$$N_H = \mathcal{L} \times \sigma_H \times \epsilon$$

Luminosité (en fb^{-1}) :
intensité/concentration
du faisceau incident

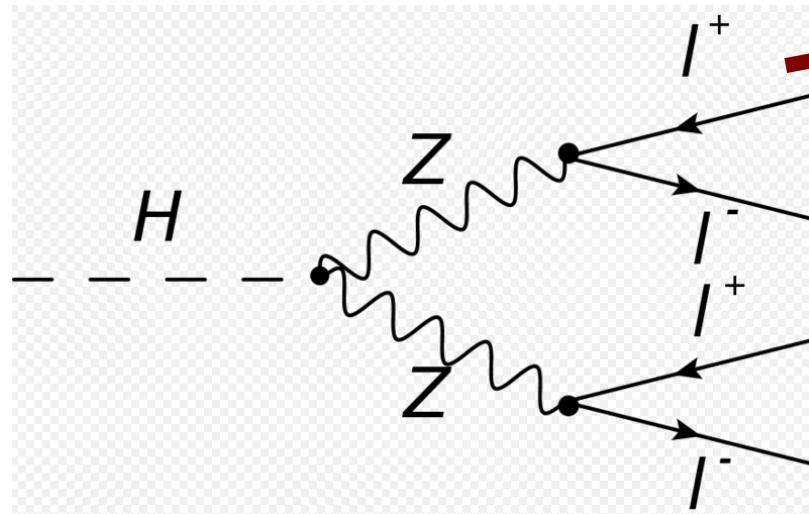
Unité de section efficace :
 $\text{fb} = \text{femtobarn}$
 $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ cm}^2$
~surface d'un proton

section efficace (en fb) :
caractéristique intrinsèque au
processus

Efficacité de détection

Principe d'une Analyse

Choix d'un processus à observer



Prédition théorique : « étant données N_{Total} collisions à 13TeV on attend N_H occurrence de ce processus »

$$N_H = \mathcal{L} \times \sigma_H \times \epsilon$$

Experience !

- On produit N_{Total} collisions (événements) à 13TeV
- On sélectionne les événements compatible avec le processus
- On compte ... et on compare à N_H

Il faut tenir compte :

- **Bruits de fonds !**
- Incertitudes instrumentales
- Incertitudes des prédictions

Outils Instrumentaux

- Provoquer une interaction
 - Collisions entre particules accélérées
Accélérateur (LHC)
- Identifier le processus produit
 - DéTECTeur de particules
ATLAS

L'accélérateur : principe et composantes

Le principe:

- une source de particules: p, e⁻ ou ions⁺, obtenus à partir d'atomes ionisés par une décharge électrique
- un bon vide où faire circuler les particules
- des champs électriques pour accélérer ces particules
- des champs magnétiques pour les guider

Les composantes:

La source:

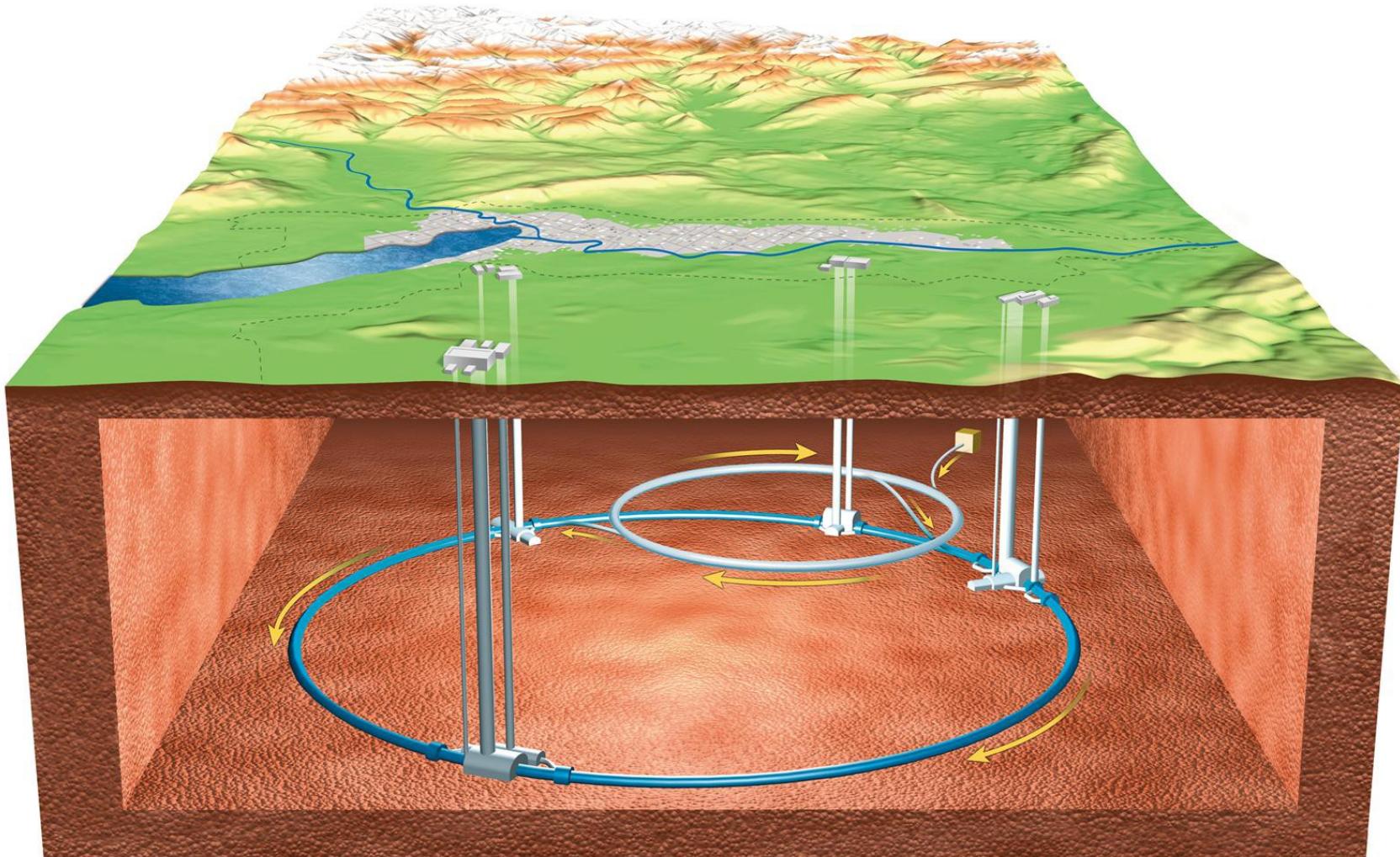


Au LHC :

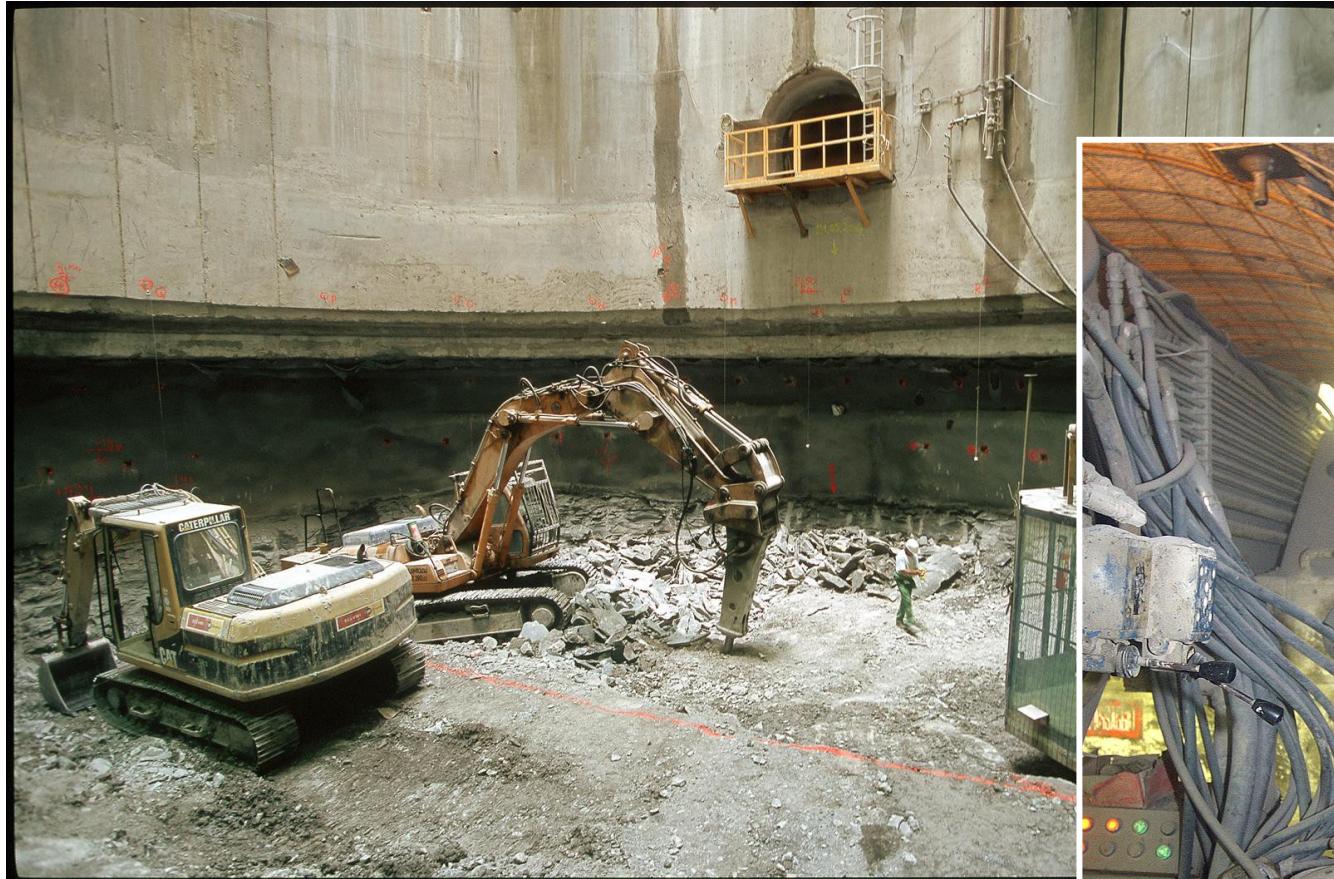
- Prendre une bouteille de protons
(De l'hydrogène qui sera ionisé!)
- Besoin en hydrogène au LHC :
2 faisceaux de protons, ≈ 3000 paquets
de proton, 10^{11} protons par paquet
 ~ 1 nanogramme par jour

Le LHC : Large Hadron Collider

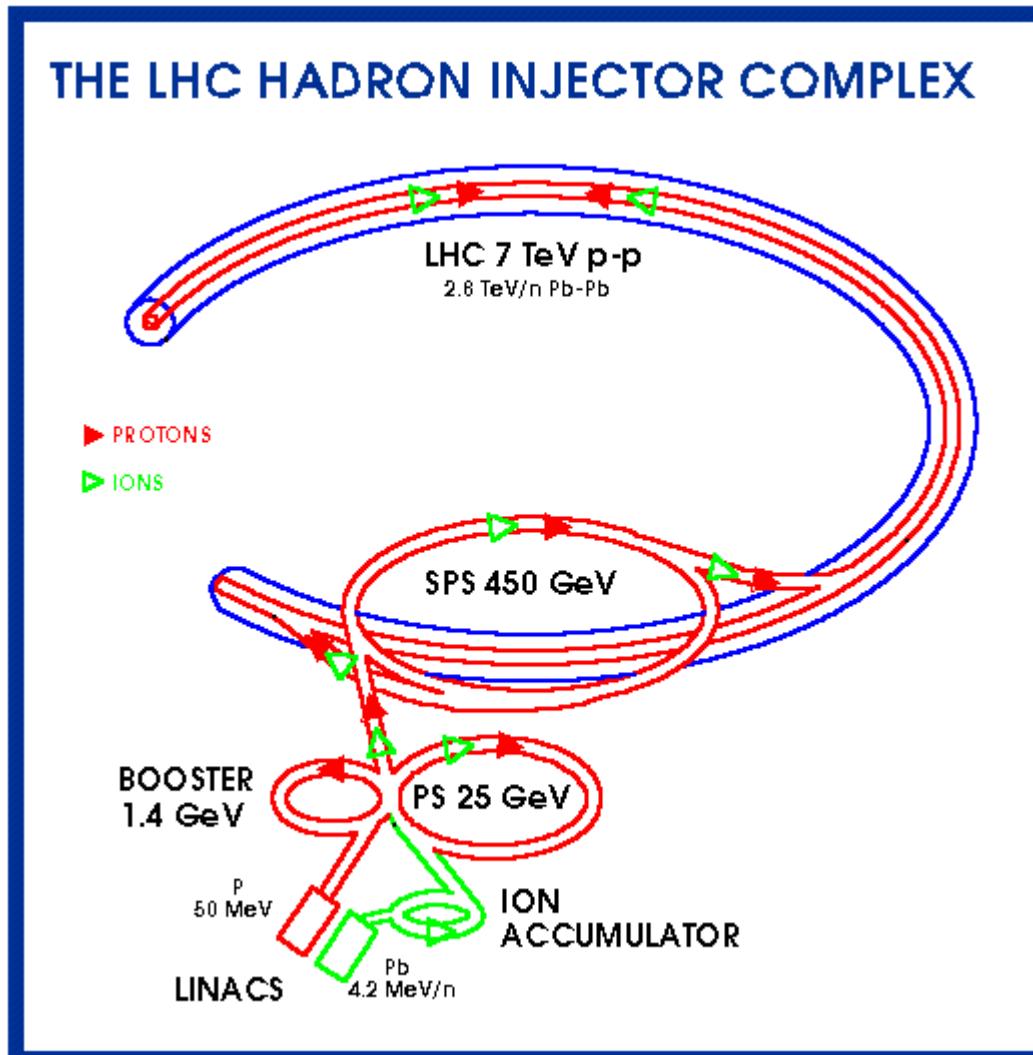
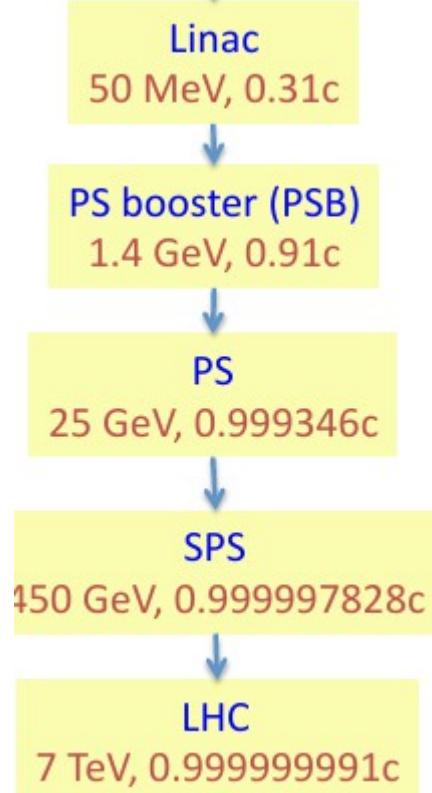
- = grand collisionneur de hadrons (protons, ions plomb ...)
- = anneau de 27 km de circonférence à ≈ 100 m sous terre
situé sous la frontière franco-suisse



À 100 m sous terre



En fait un complexe d'accélérateur



Le LHC se remplit de protons en \sim 5 minutes, l'accélération prend \sim 20 min.
Le faisceau peut circuler pendant une dizaine d'heures.

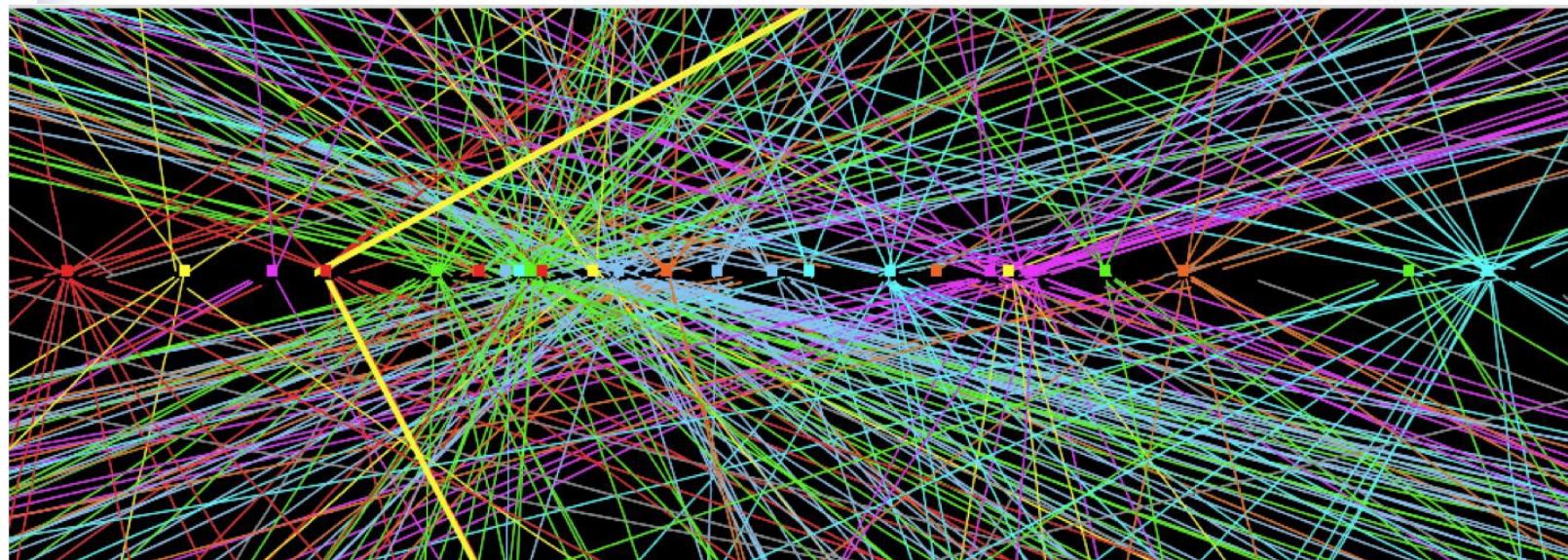
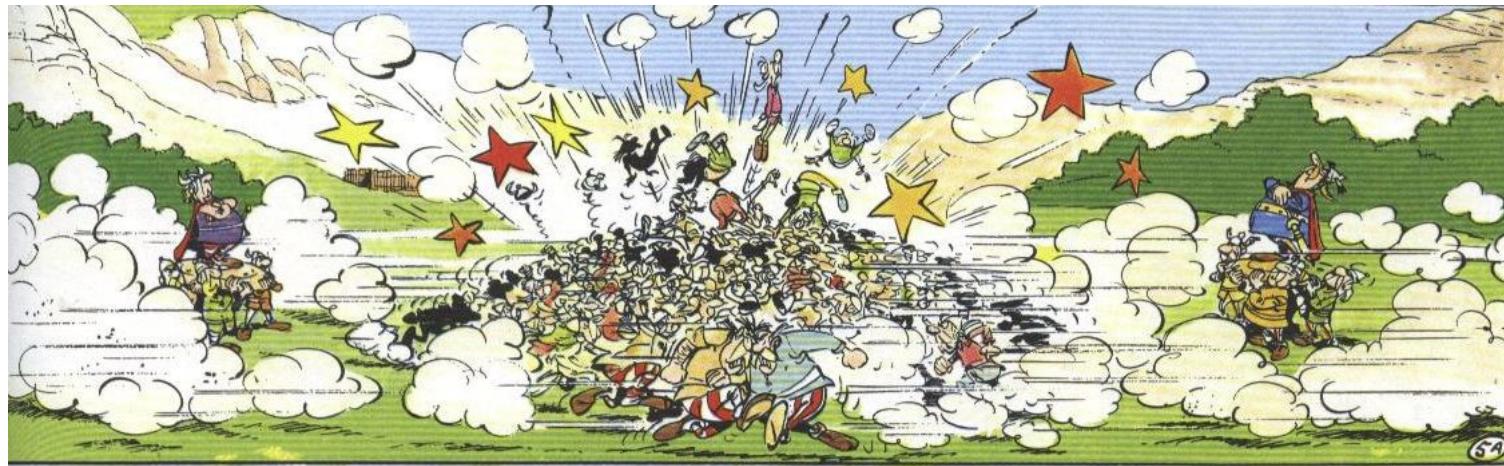
Structure des faisceaux

- Le faisceau, c'est en fait :
 - 2800 paquets de protons, séparés d'environ 7.5 m
 - Chaque paquet contient 10^{11} protons
- Les paquets circulant en sens opposés se rencontrent chaque 25 ns
- Afin de maximiser les chances de collision, les paquets sont comprimés au voisinage des détecteurs, pour mesurer 16 micromètres

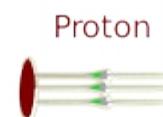
Ces paramètres déterminent la **luminosité**

Collisions

À chaque croisement de paquet de protons, plusieurs dizaines de collisions ont lieu au même moment ...



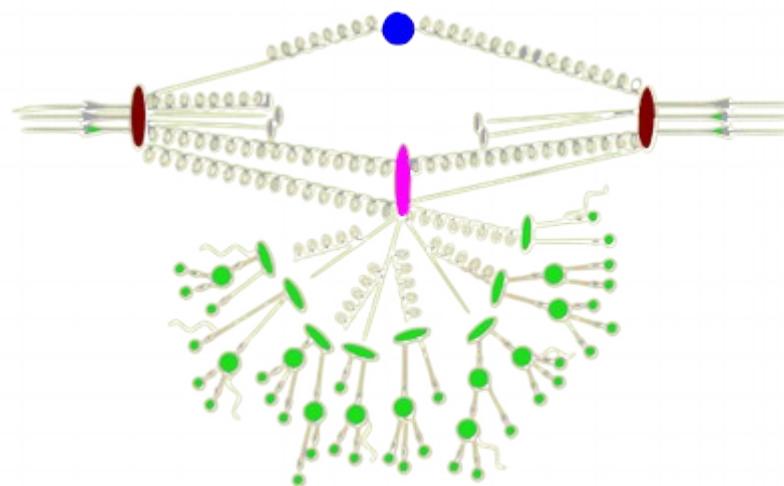
Collision p-p



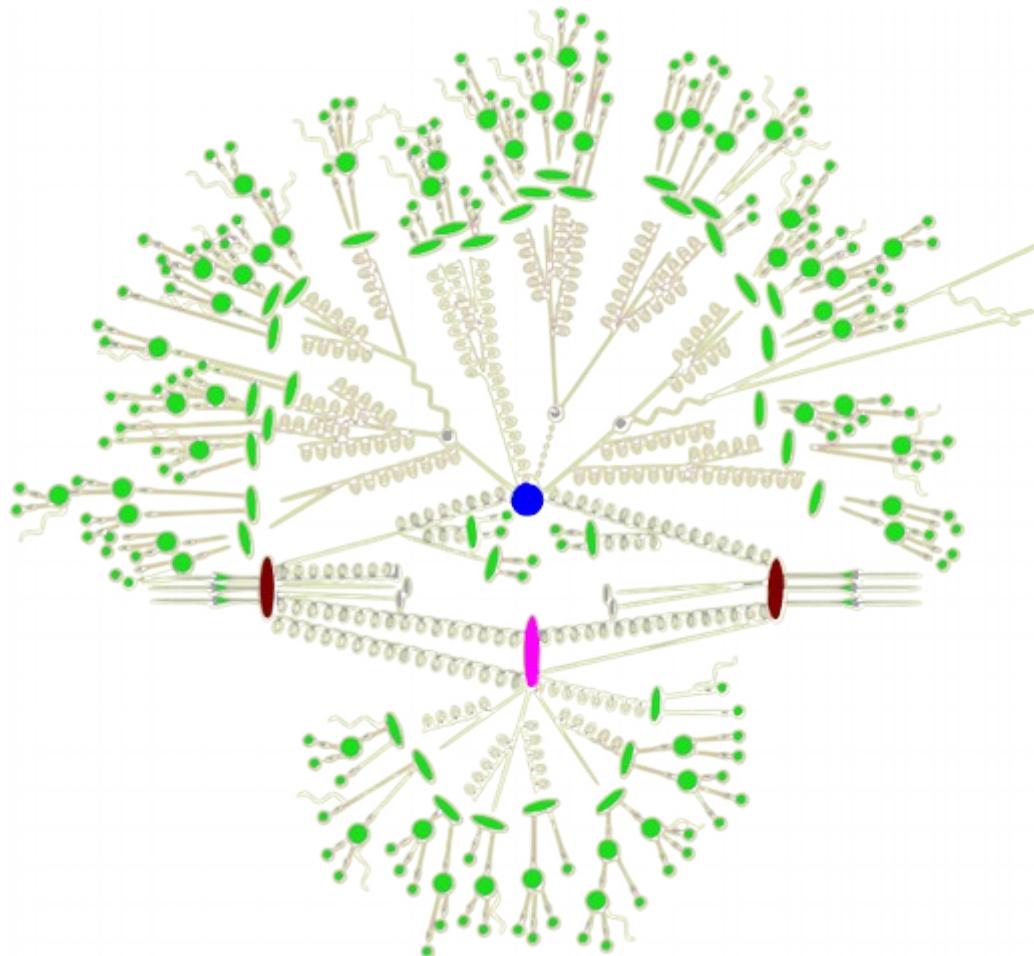
Collision p-p



Collision p-p

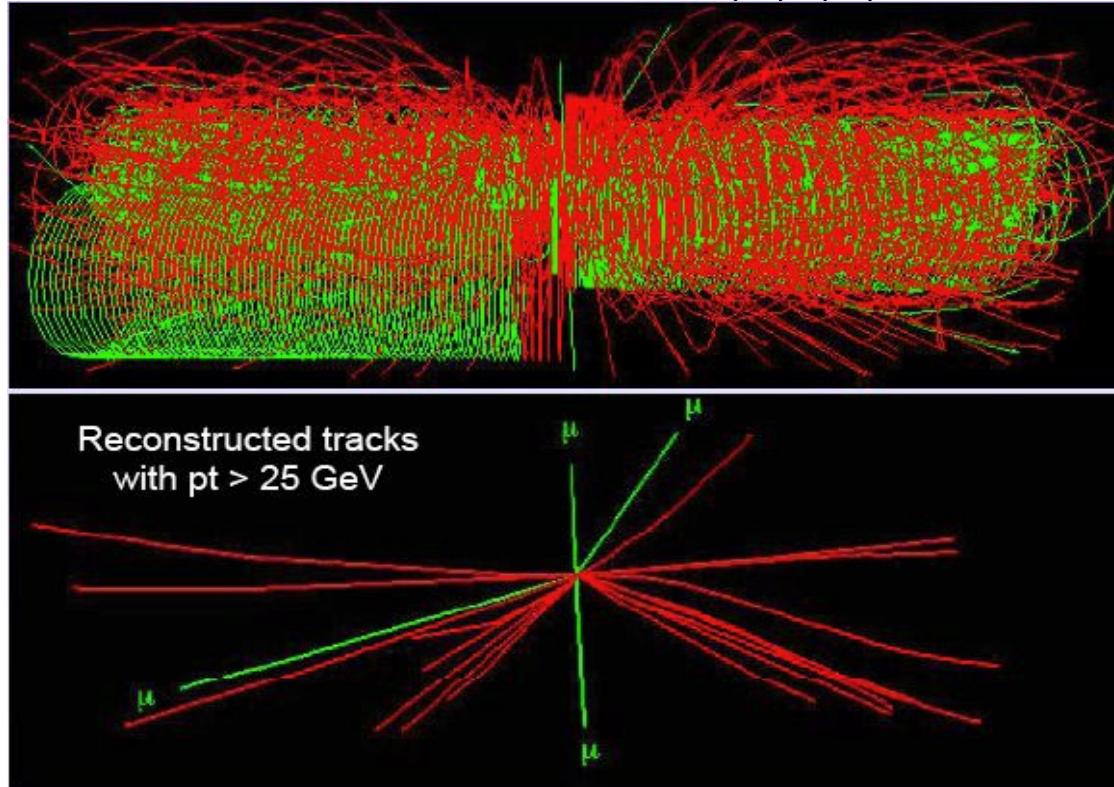


Collision p-p



Collisions dans le détecteur

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$$



Il nous faut des instruments qui permettent d'identifier et mesurer les particules avec précision...
mais aussi dans un délai très court ...

Détecteurs

- Les particules recherchée ont un temps de vie court
- Désintégration **immédiate** en particules stables
 - **photons**
 - **electrons** (et positrons)
 - **muons**
 - hadrons (composés de quarks u et d) : protons, neutrons, pions, ... Ces particules sont toujours produites en **Jets**
 - neutrinos. Indetectables : on ne repère que de l'**énergie manquante**.

On ne détecte que ces particules formant **l'état final**

Objectifs

- Être en mesure de bien voir toutes les particules produites => le détecteur doit entourer le point de collision (hermétique)
- Être en mesure d'identifier les particules produites (électron, muon, ...) et de mesurer leurs propriétés (charge, énergie...) => divers détecteurs pour diverses particules/propriétés
- Contraintes techniques :
 - Avoir une mesure rapide pour éviter l'empilement des données
 - Avoir une bonne « tenue aux radiations » : les détecteurs doivent être résistants pour durer dans un environnement irradié pendant plusieurs années...
 - Budget, contraintes de volume...

DéTECTEURS ACTUELS

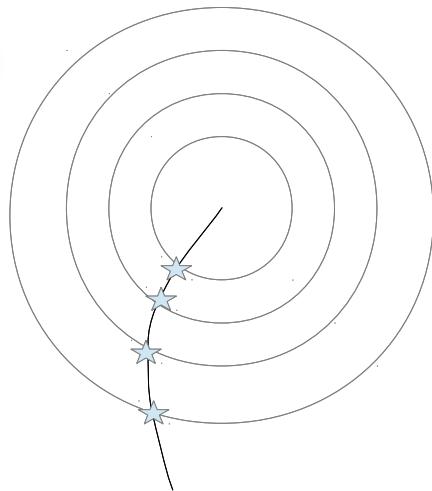
Complémentarité entre deux types de techniques :

- **La trajectographie** : observation de la trajectoire des particules dans un champ magnétique externe -> charge, impulsion
 - Uniquement pour particules chargées électriquement
 - Besoin d'un champ magnétique important
- **La calorimétrie** : mesure de l'énergie de chaque particule
 - Calorimètres électromagnétique et hadronique

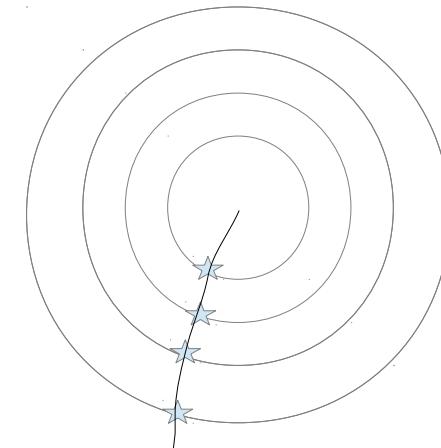
En pratique, on a 3 couches de détecteurs distincts :

- le trajectographe
- le(s) calorimètre(s)
- les chambres à muons

Trajectographe



Sens de la courbure :
signe de la charge électrique

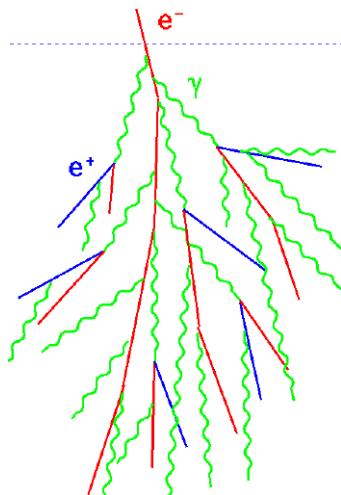
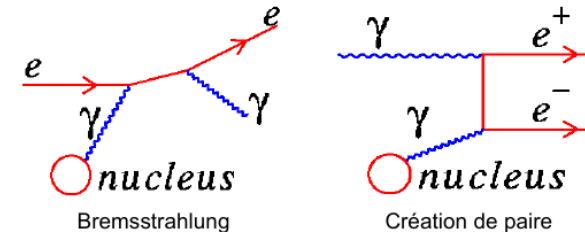


Rayon de courbure :
Quantité de mouvement

Ainsi, observer la trajectoire → charge, masse (impulsion)
→ différents vertex.

Calorimètre électromagnétique

- Arrêter les particules **légères** : électrons, positrons, photons
- Deux processus électromagnétiques s'enchaînent:
 - Rayonnement de freinage
 - Création de paireet forment une **gerbe électromagnétique**

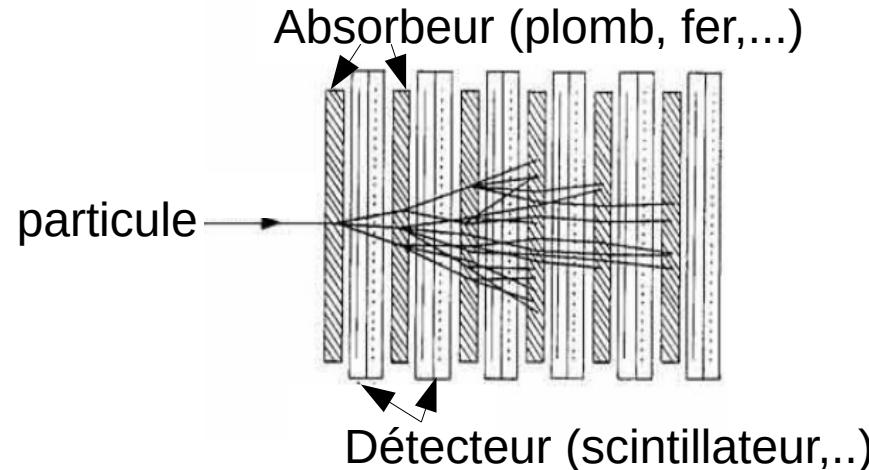


La gerbe s'arrête quand les particules ont trop peu d'énergie pour continuer

Les calorimètres sont « destructeurs » pour la particule incidente

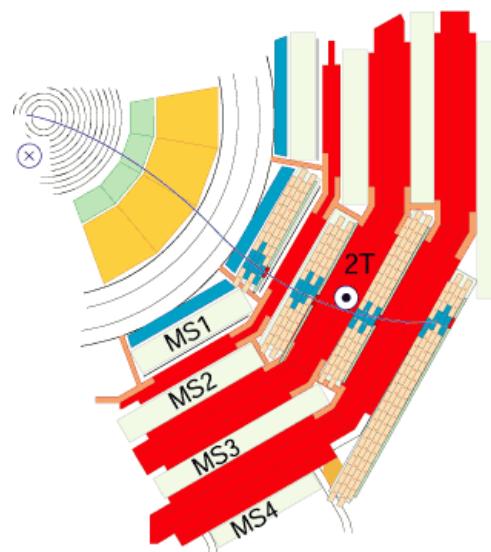
Calorimètre hadronique

- Les particules à détecter sont des hadrons (p , n et autres)
- Principe : beaucoup de matière (absorbeur) et des couches de détecteur (par exemple, du scintillateur – un matériel qui émet de la lumière au passage de particules chargées)
- Les particules interagissent principalement par l'interaction forte (résiduelle) avec les noyaux de l'absorbeur, ce qui crée des particules secondaires et par la suite une gerbe hadronique.

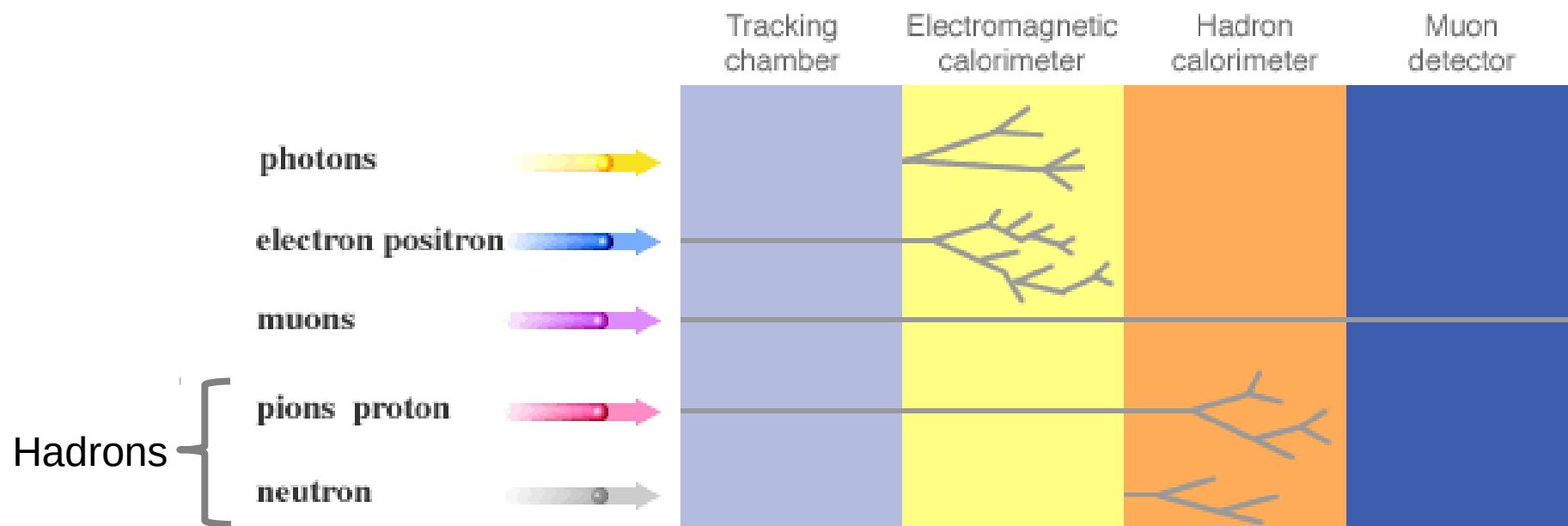
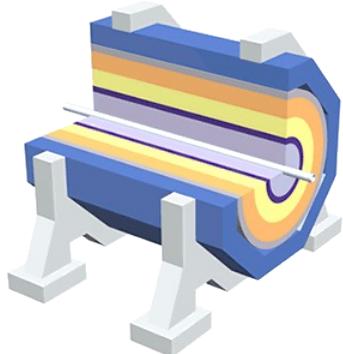


Chambre à muons

- Les **muons traversent les calorimètres sans s'arrêter**
- Mettre un autre « trajectographe » à l'extérieur des calorimètres pour identifier les muons, utiliser l'information des trajectographes interne et externe pour voir la trace complète du muon

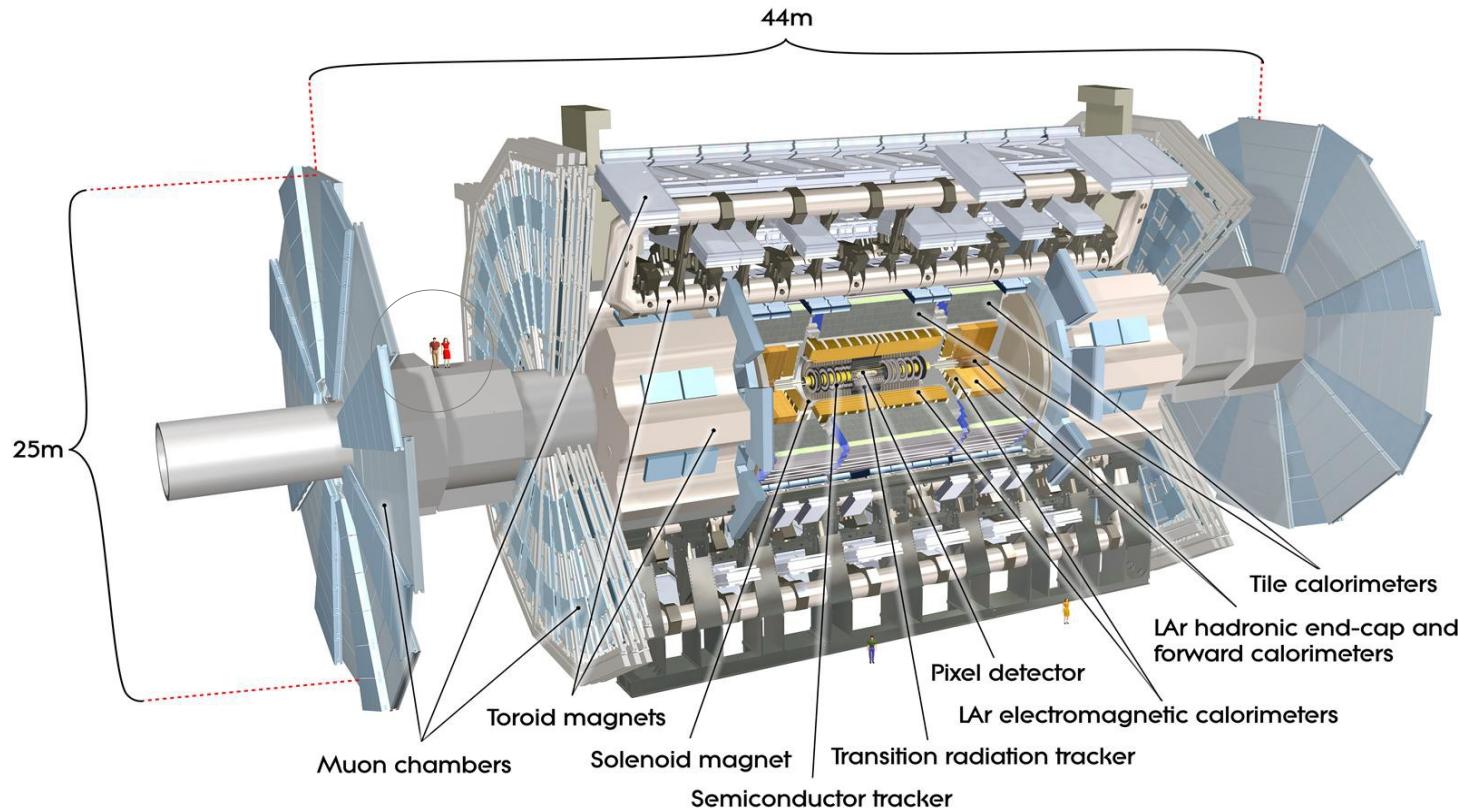


Les détecteurs dans le détecteur

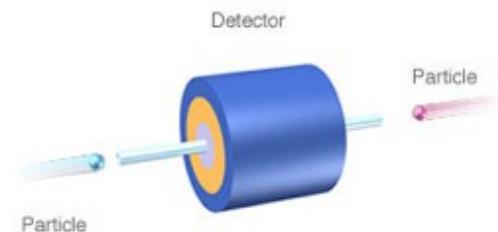


Un géant généraliste : ATLAS

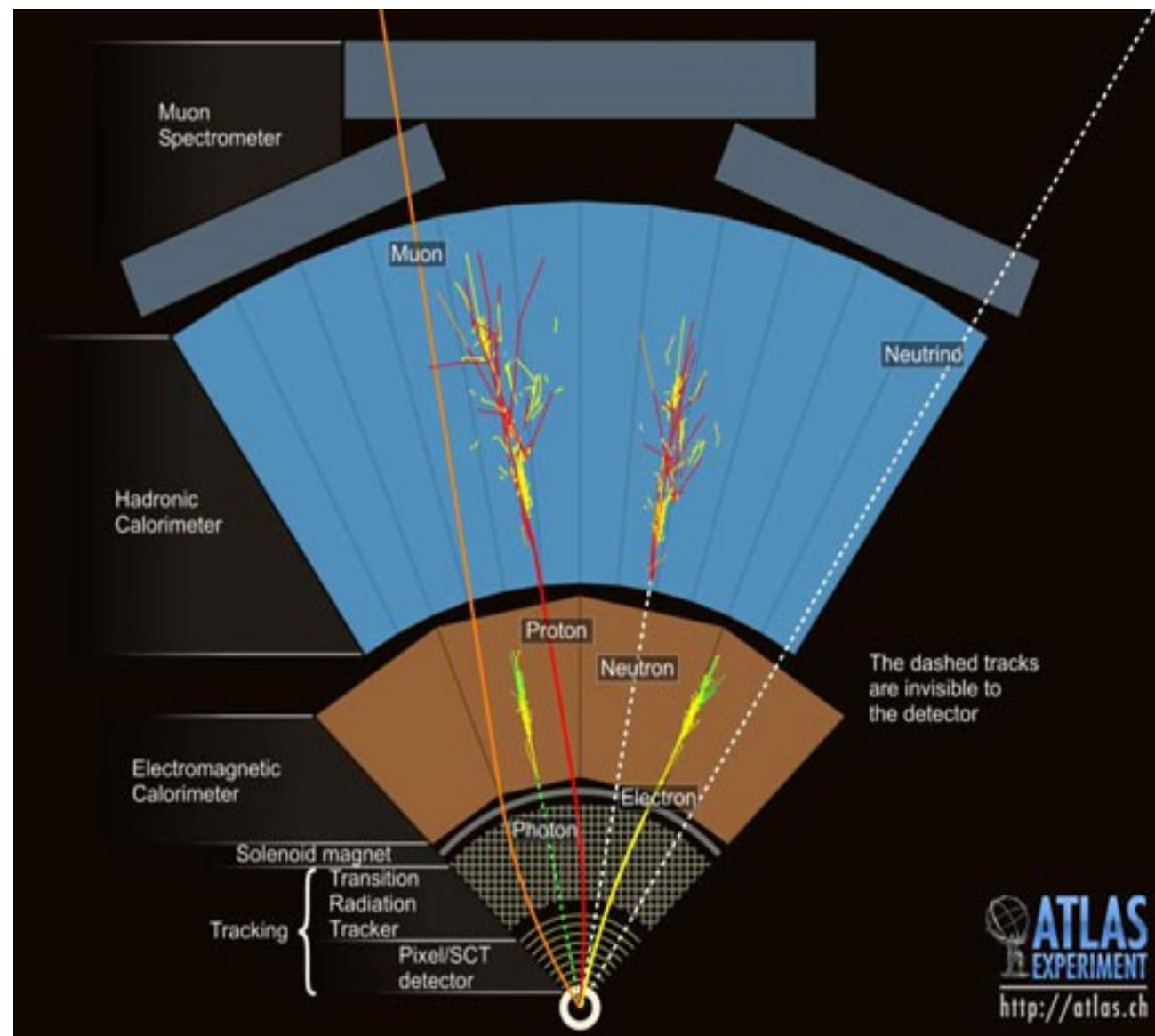
38 pays, 174 institutions, 3000 scientifiques, 1000 étudiants

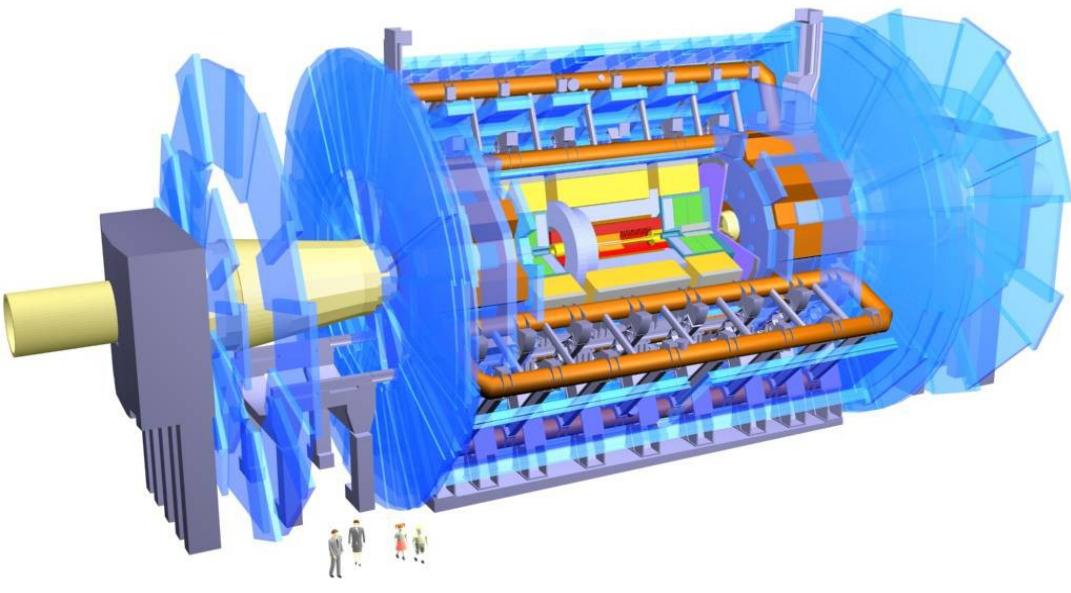


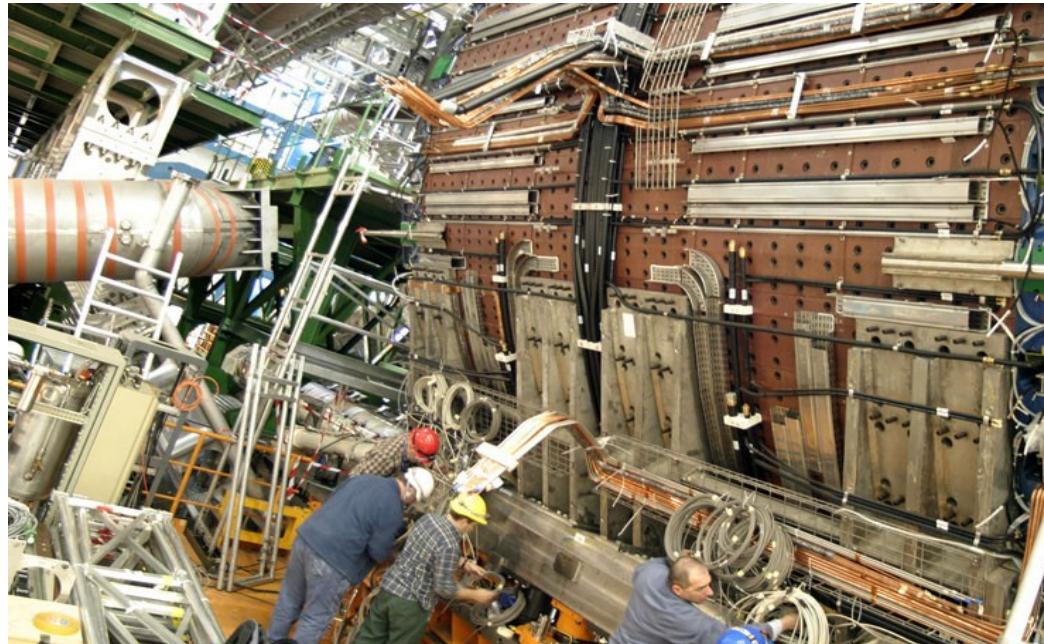
**25 m de haut,
46 m de long,
7000 tonnes
(~ la masse de la
tour Eiffel)**



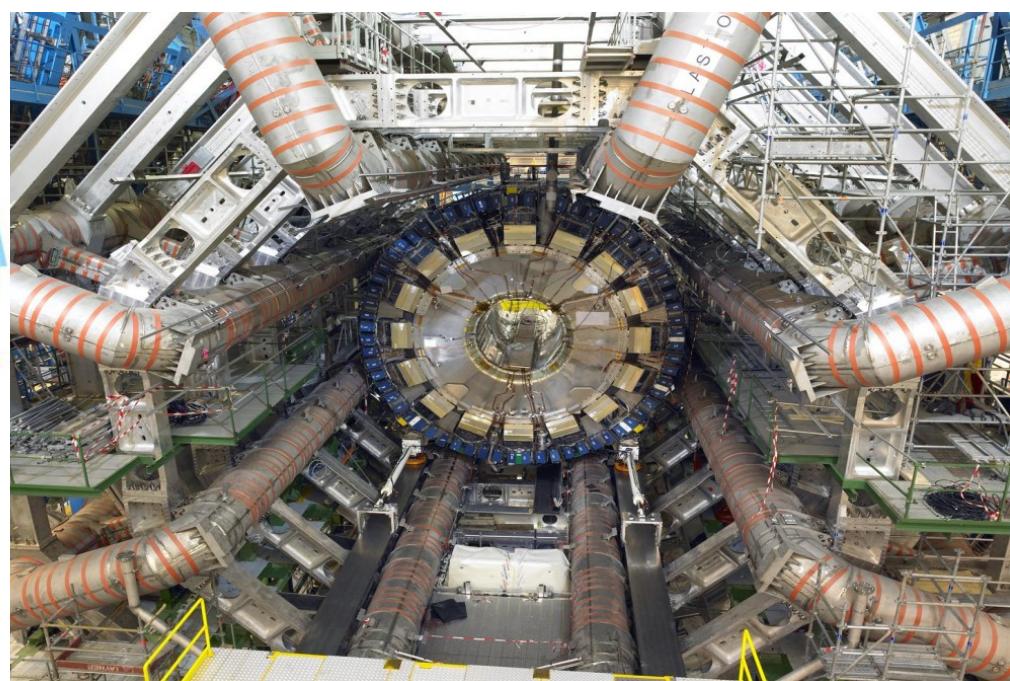
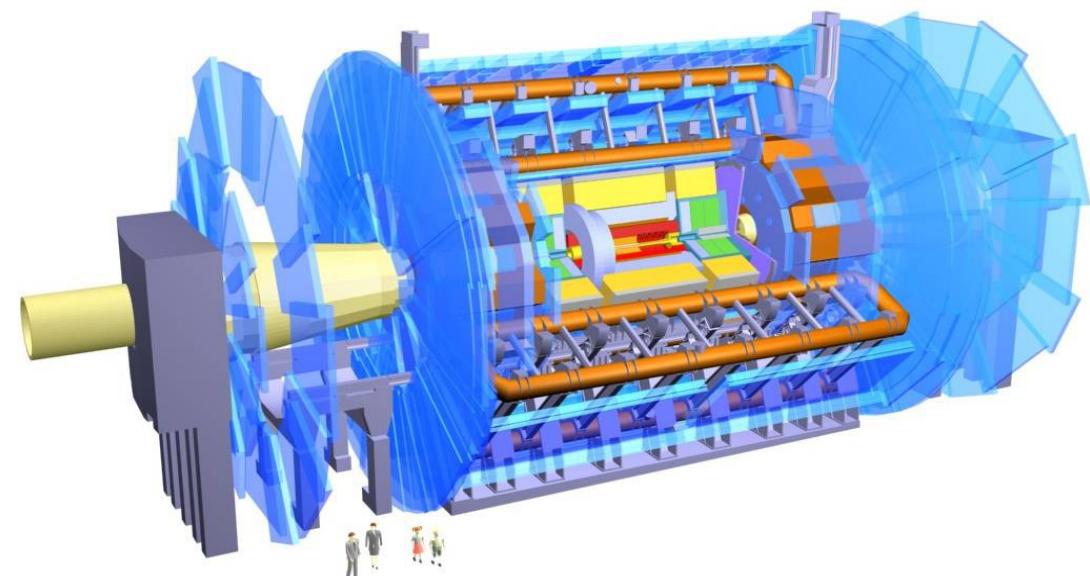
ATLAS







Novembre 2005



L'Analyse

Utilisant des vraies données d'ATLAS

- Recherche de processus $Z \rightarrow \ell\ell$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell$ et $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Utilisation d'un logiciel de visualisation d'ATLAS
 - Identification et sélection des événements
 - Comptage des données
- Après la sélection :
 - combinaison des données
 - Interprétation statistique

L'Analyse

Utilisant des vraies données d'ATLAS

- calcul de la **Masse Invariante** de l'état final
 - caractéristique de la particule mère
- $$M_{inv}^2 = E^2 - \vec{P} \cdot \vec{P}$$
$$(E, \vec{P}) = (E_1, \vec{P}_1) + (E_2, \vec{P}_2)$$
- Après la sélection :
 - combinaison des données
 - Interprétation statistique

HYPATHIA

Masse invariante

Impulsion des traces

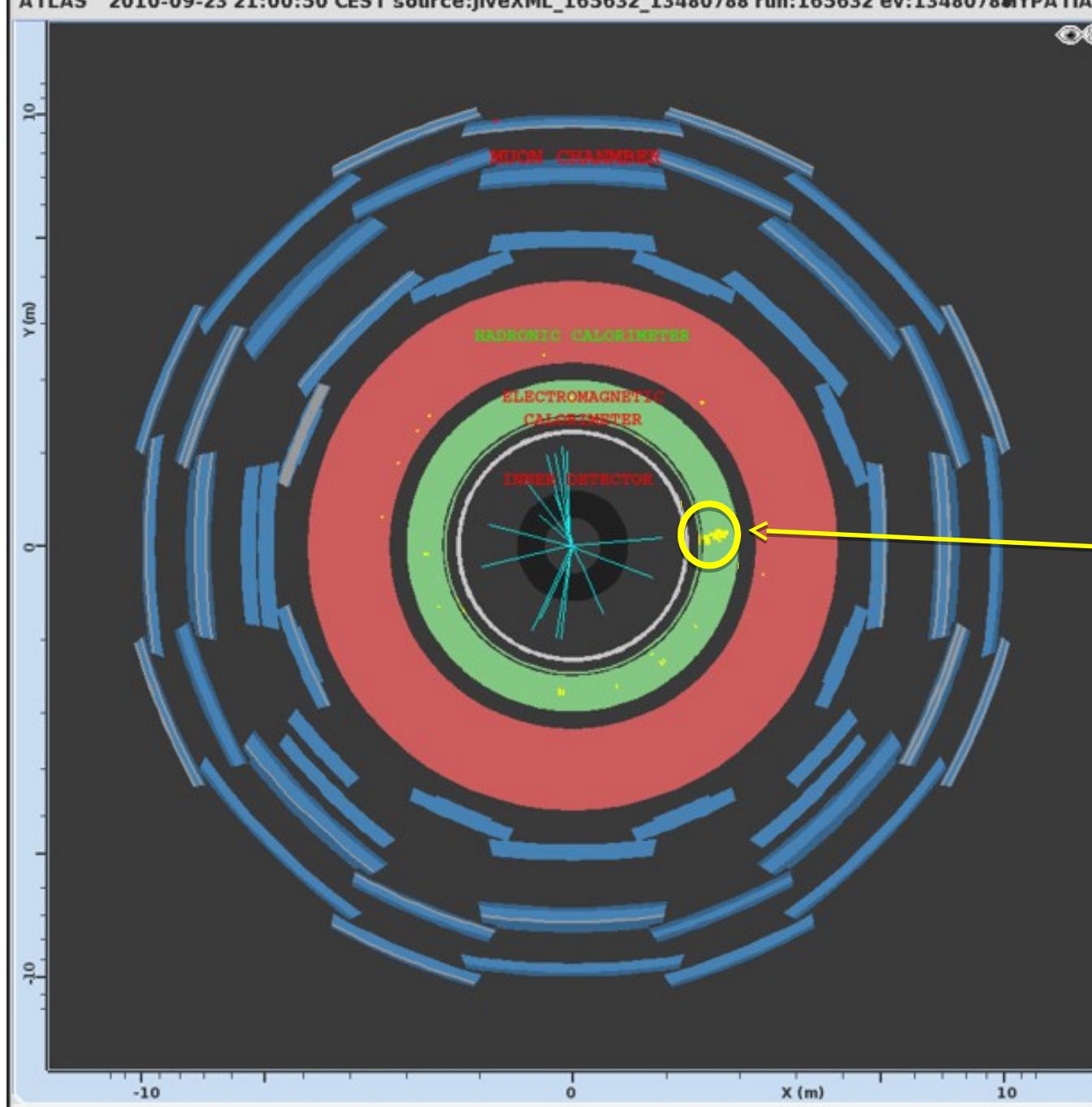
Contrôle

Vue en coupe

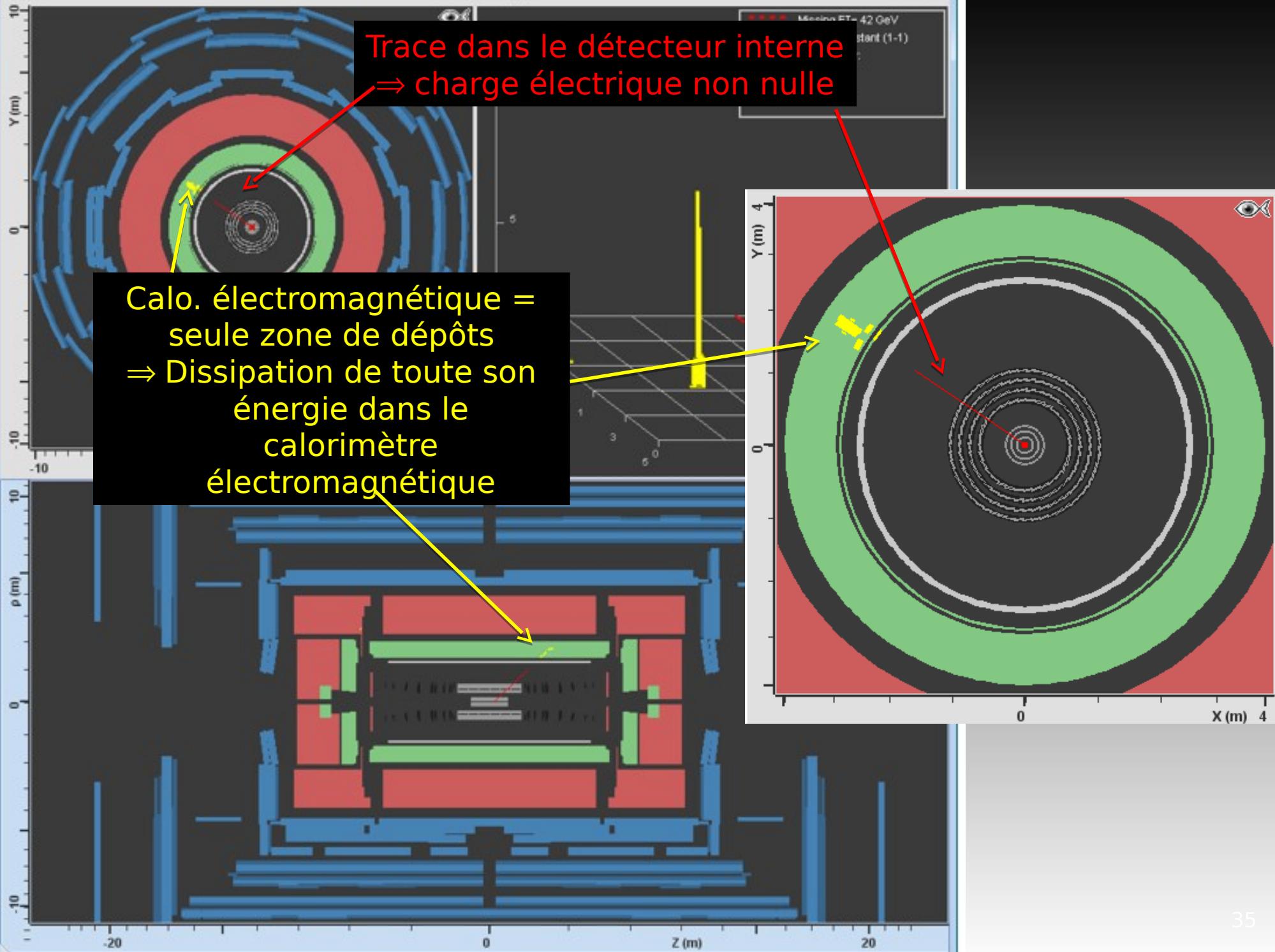
côté

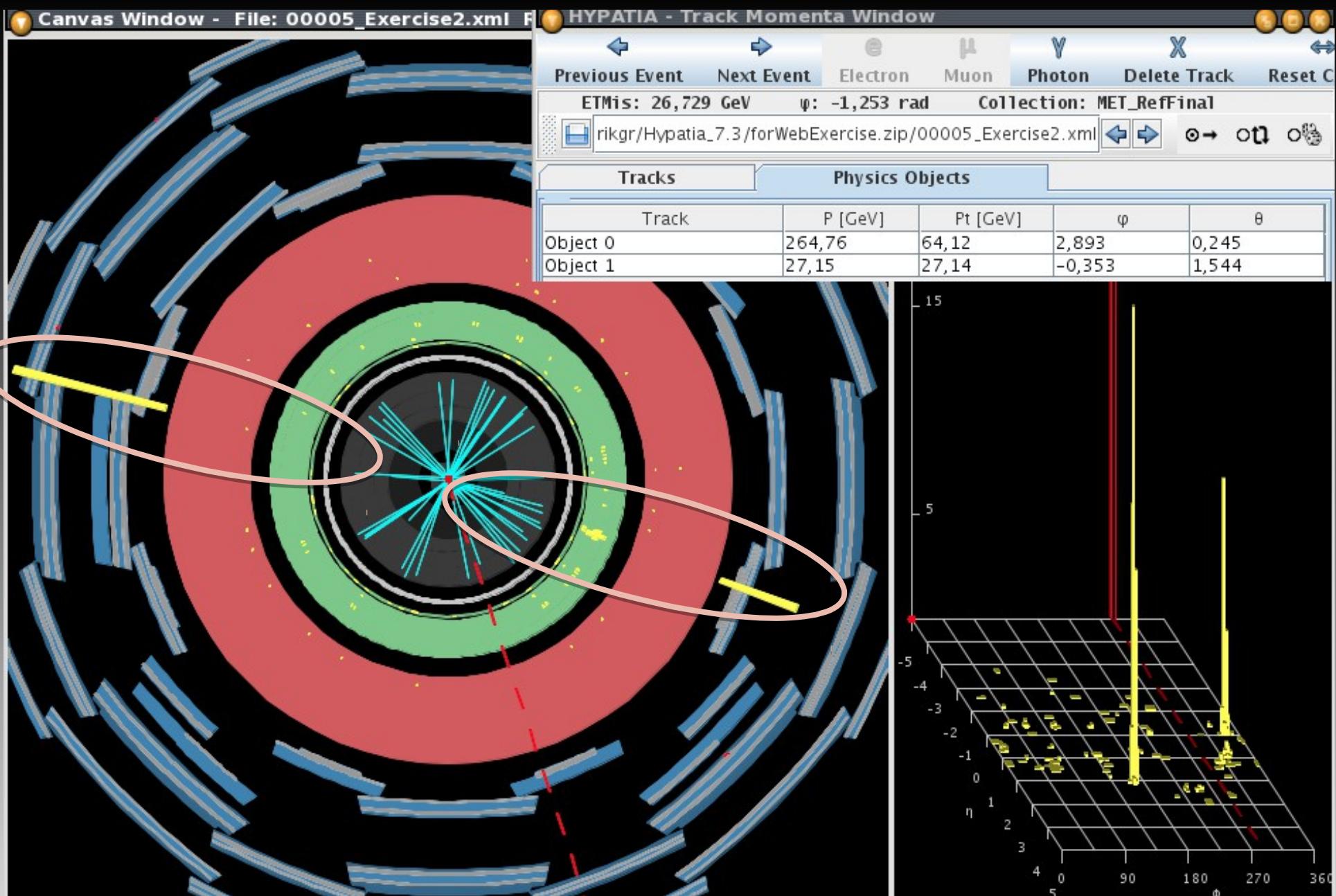
The image shows the HYPATHIA software interface with four main windows:

- Invariant Mass Window:** Top-left window showing a table of particle properties. One row highlights "Tracks 1" with values: P [GeV] = 50.5, Pt [GeV] = 37.0, q = 0.030, n = 0.827, M(2l) [GeV] = 85.929, and M(4l) [GeV] = e.
- Canvas Window:** Middle-left window displaying two plots: a circular "Y(m)" vs "X(m)" plot showing concentric rings of blue and red, and a 3D "Y(m)" vs "Z(m)" vs "Phi" plot showing vertical yellow lines.
- Control Window:** Bottom-right window titled "HYPATHIA - Control Window" containing tabs for Parameter Control, Interaction and Window Control, Output Display, Projection, Data, Cuts, InDet, Calo, MuonDet, Objects, and Geometry. It also includes a "Data" panel with a table of checked status items: Status, InDet, Calo, MuonDet, and Objects.
- Summary Window:** Middle-right window titled "Reconstructed Tracks" showing a table of reconstructed tracks with columns: Track, +/-, P [GeV], Pt [GeV], q, and phi. The table lists several tracks, with "Tracks 1" highlighted in bold.



dépot d'energie

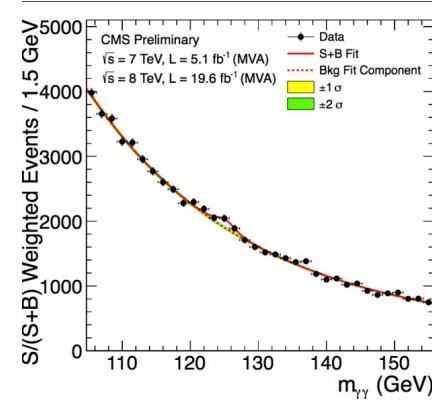




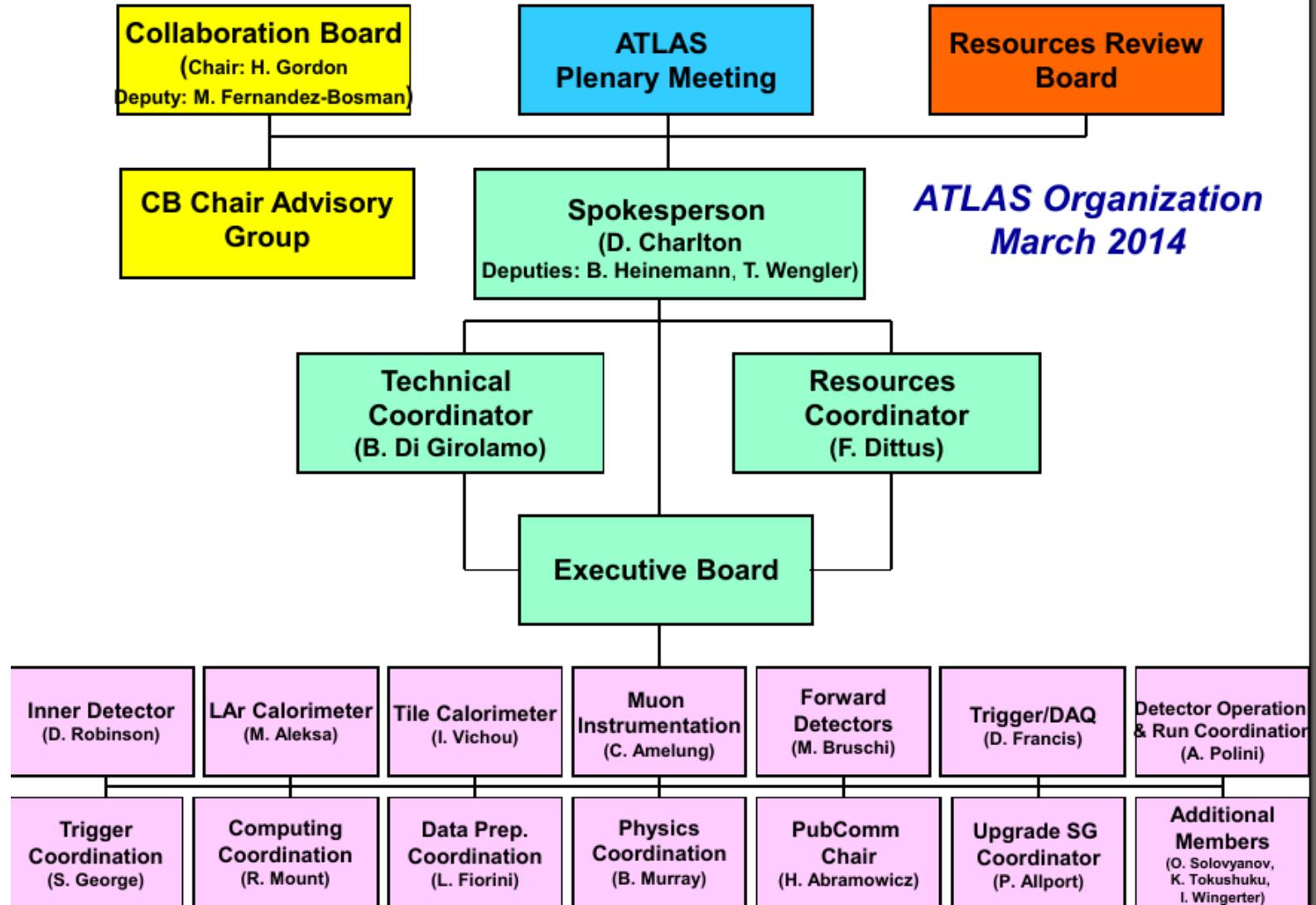
Déroulement d'une expérience

Très longue durée (idée => découverte : 28 ans!):

- 1984 (Lausanne) : premières discussions sur le LHC
- Décembre 1993 : LHC présenté au conseil du CERN
- 16 décembre 1994 : la proposition du LHC approuvée par le conseil du CERN
- 1996 : ATLAS et CMS approuvés
- 2000 : dernière année d'opération du LEP
- 2002 : LEP retiré du tunnel
- 2003 : début de l'installation du LHC
- 2005 : début des tests des équipements du LHC
- Avril 2007 : descente du dernier aimant
- Juin 2008 : ATLAS & CMS complètent l'anneau du LHC en fermant le tube à vide
- 10 septembre 2008 : le 1^{er} faisceau de proton (450 GeV) circule dans le LHC
- 30 novembre 2009 : le 1^{er} faisceau à 1.18 TeV (record d'énergie)
- 16 décembre 2009 : première collision à 2.36 TeV (proton-proton)
- 19 mars 2010 : le 1^{er} faisceau à 3.5 TeV
- 30 mars 2010 : première collision à 7 TeV (proton-proton)
- 5 novembre 2010 : première collision à 2.76 TeV (plomb-plomb)
- 4 juillet 2012 : annonce de la découverte du boson de Higgs



Organisation



Le soleil ne se couche jamais sur le LHC



Ex : ATLAS

- 38 pays
- 177 institutions
- 2000 physiciens
- techniciens,
administratifs,

...

Plus de 8,000 scientifiques, (> 1/2 des physiciens des particules dans le monde) sont des utilisateurs du CERN.
Ils représentent 580 universités et plus de 85 nationalités !

Un parcours typique

Doctorat en physique à
l'université de Montréal



Une physique qui rapproche les nations et unie les hommes





En 2014, le CERN célèbre 60 ans de science au service de la paix :

- Former les scientifiques de demain
- Chercher des réponses aux questions concernant l'univers
- Repousser les limites de la technologie
- Rassembler les nations à travers la science