

Accélérateurs et détecteurs

Centre de physique des particules de Marseille

INTERNATIONAL
MASTERCLASSES

hands on particle physics

Mars-avril 2014



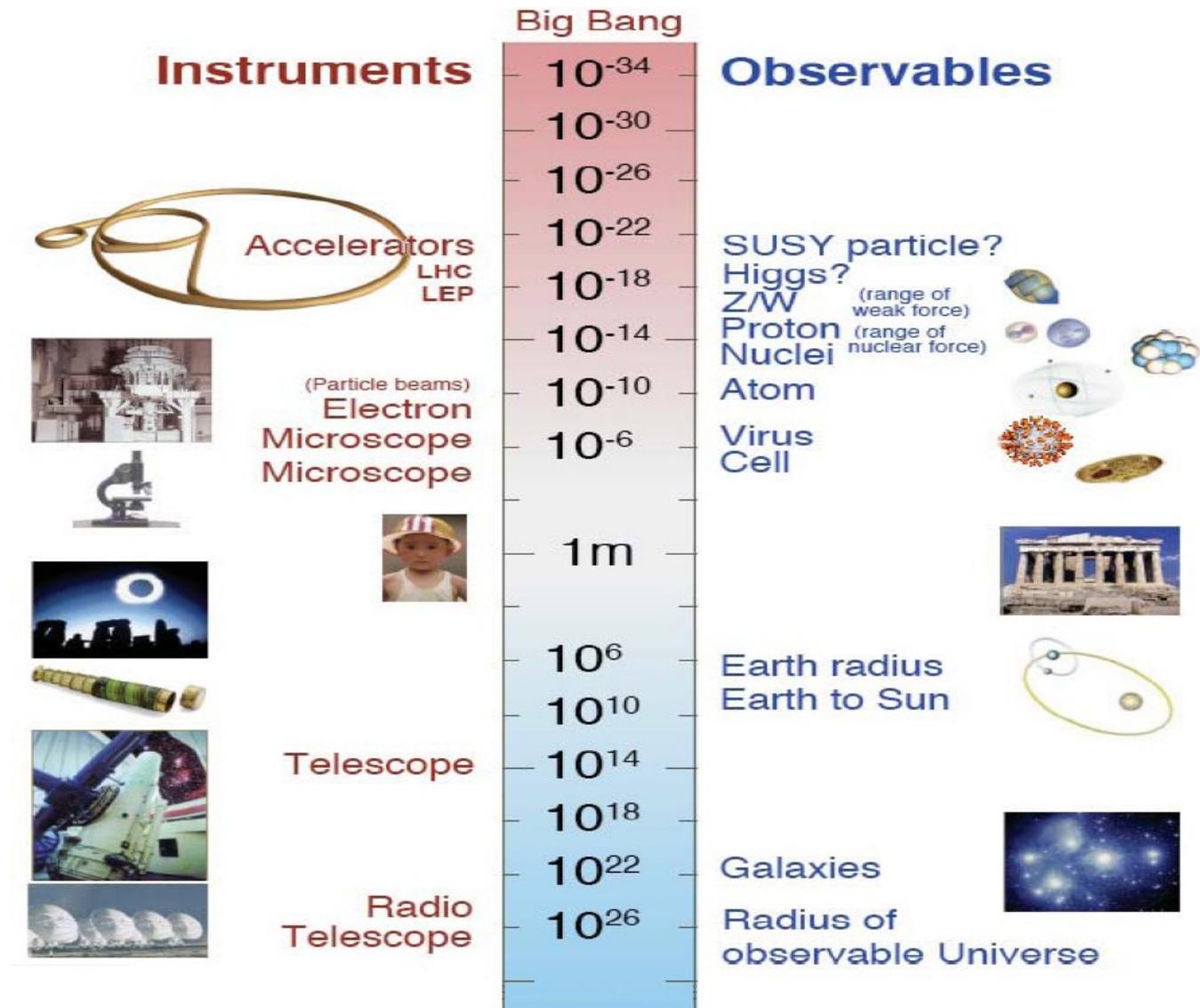
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :

▶ longueur d'onde associée $\lambda = h/p$

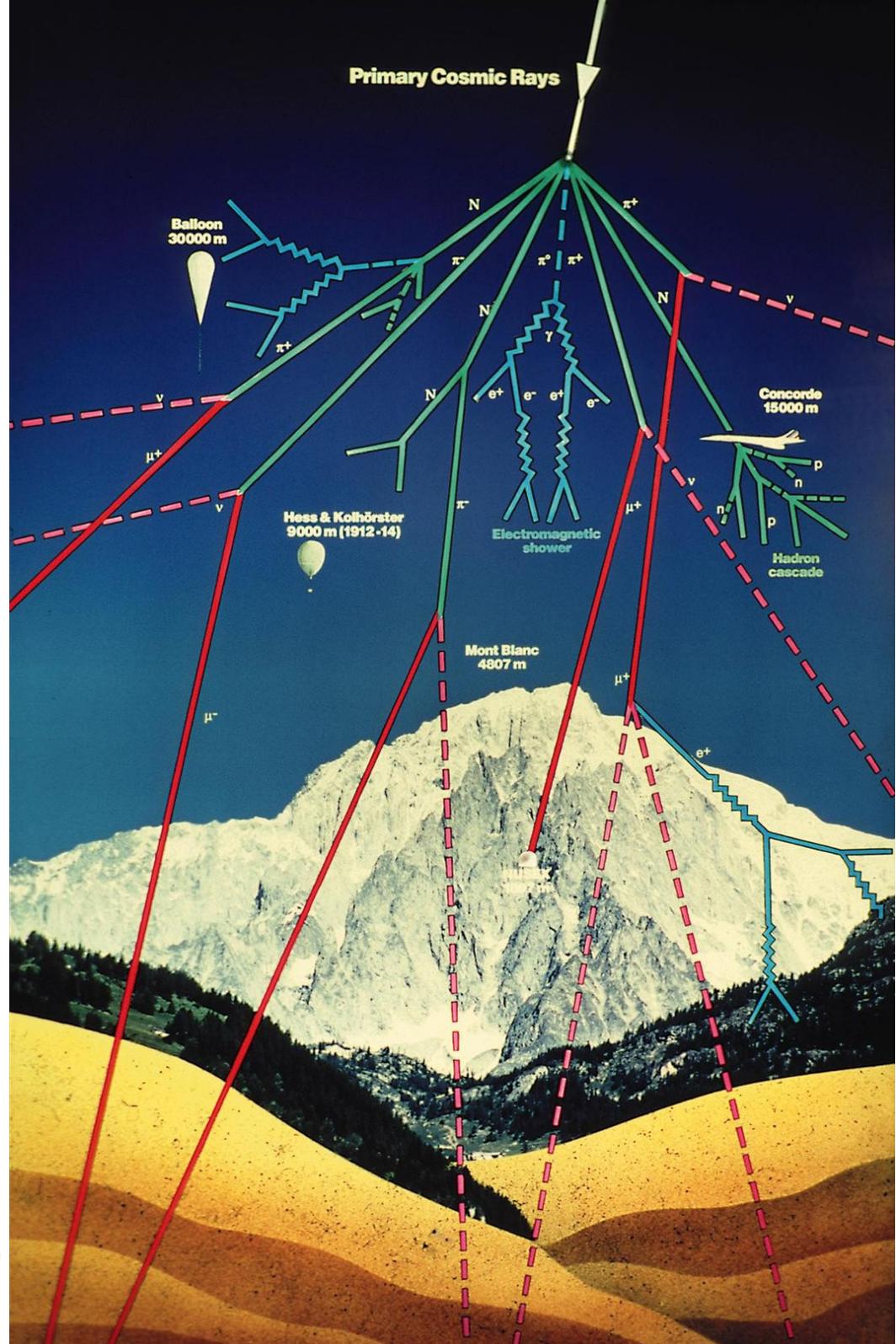
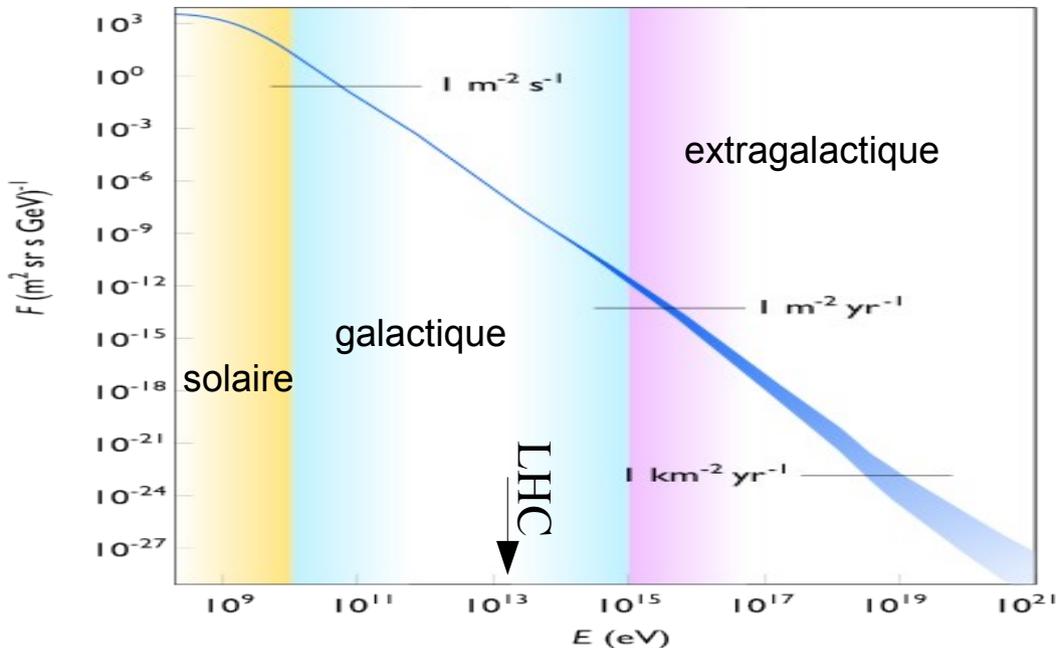
- Pour créer des particules plus lourdes

▶ $E = mc^2$



Accélérateur naturel

- Rayons cosmiques de très haute énergie
- Découverts par Hess en 1912
- Avantage : énergies faramineuses
- Problème : hasard



Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

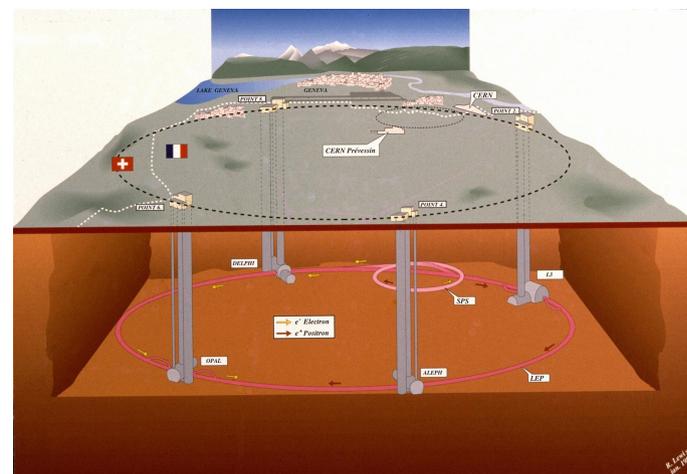
- ▶ Au CERN, Genève
- ▶ Collisions e^+e^-
- ▶ 1989-2000

- Le Tevatron

- ▶ Fermilab, Chicago
- ▶ Collisions proton-antiproton
- ▶ 1983-2011

- Le LHC

- ▶ Au CERN
- ▶ Collisions proton-proton
- ▶ Depuis 2009

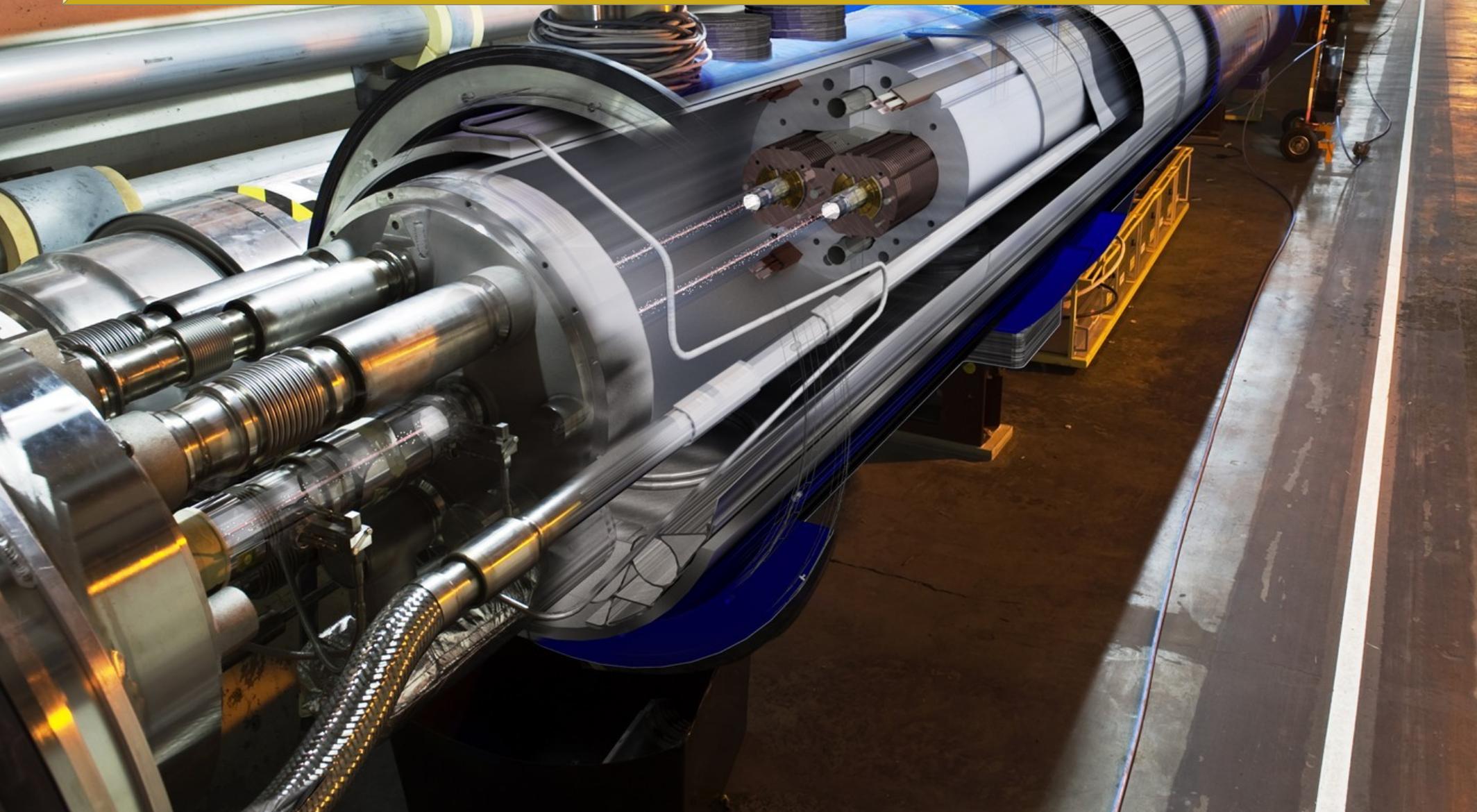


Le LHC : la machine à superlatifs



Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite



Le LHC : la machine à superlatifs



27 km de circonférence
100 m sous terre

Le LHC : la machine à superlatifs



Protons voyageant à
99,9999991%
de la vitesse de la lumière,
soit 11000 tours
par seconde

Le LHC : la machine à superlatifs



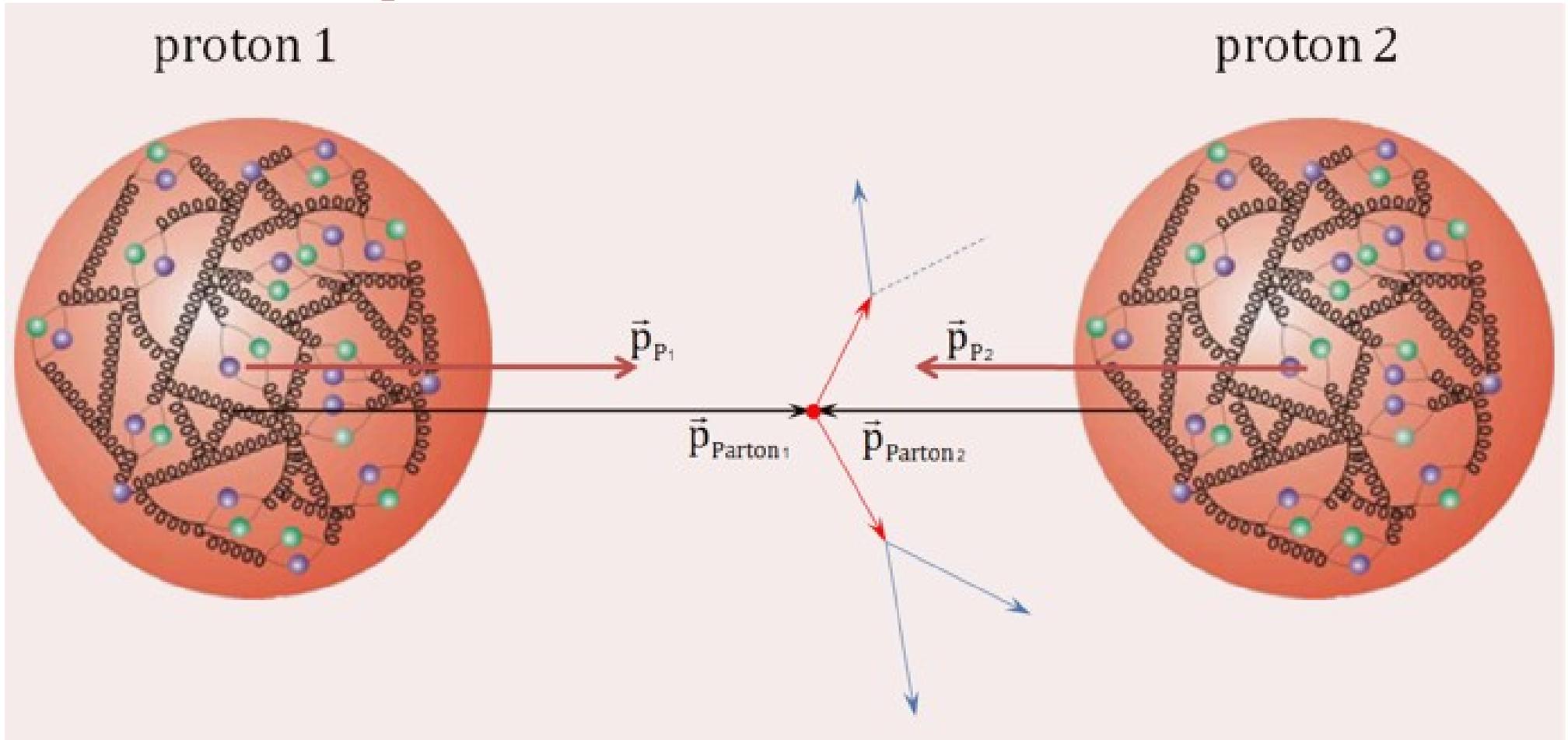
Paquets de 100 milliards de protons entrent en collision en quatre points du LHC

LHC, le grand collisionneur de hadrons

film



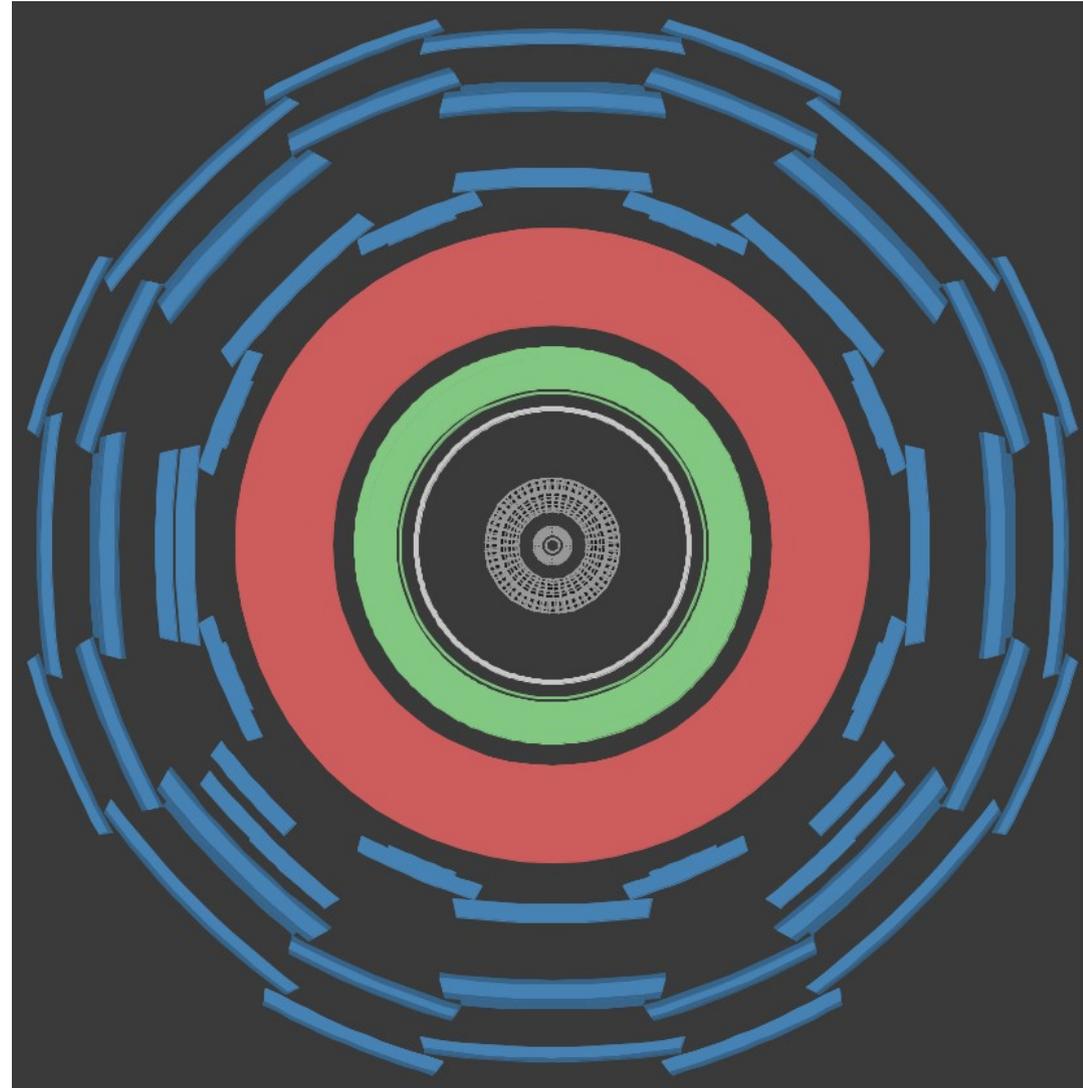
Deux protons se rencontrent...



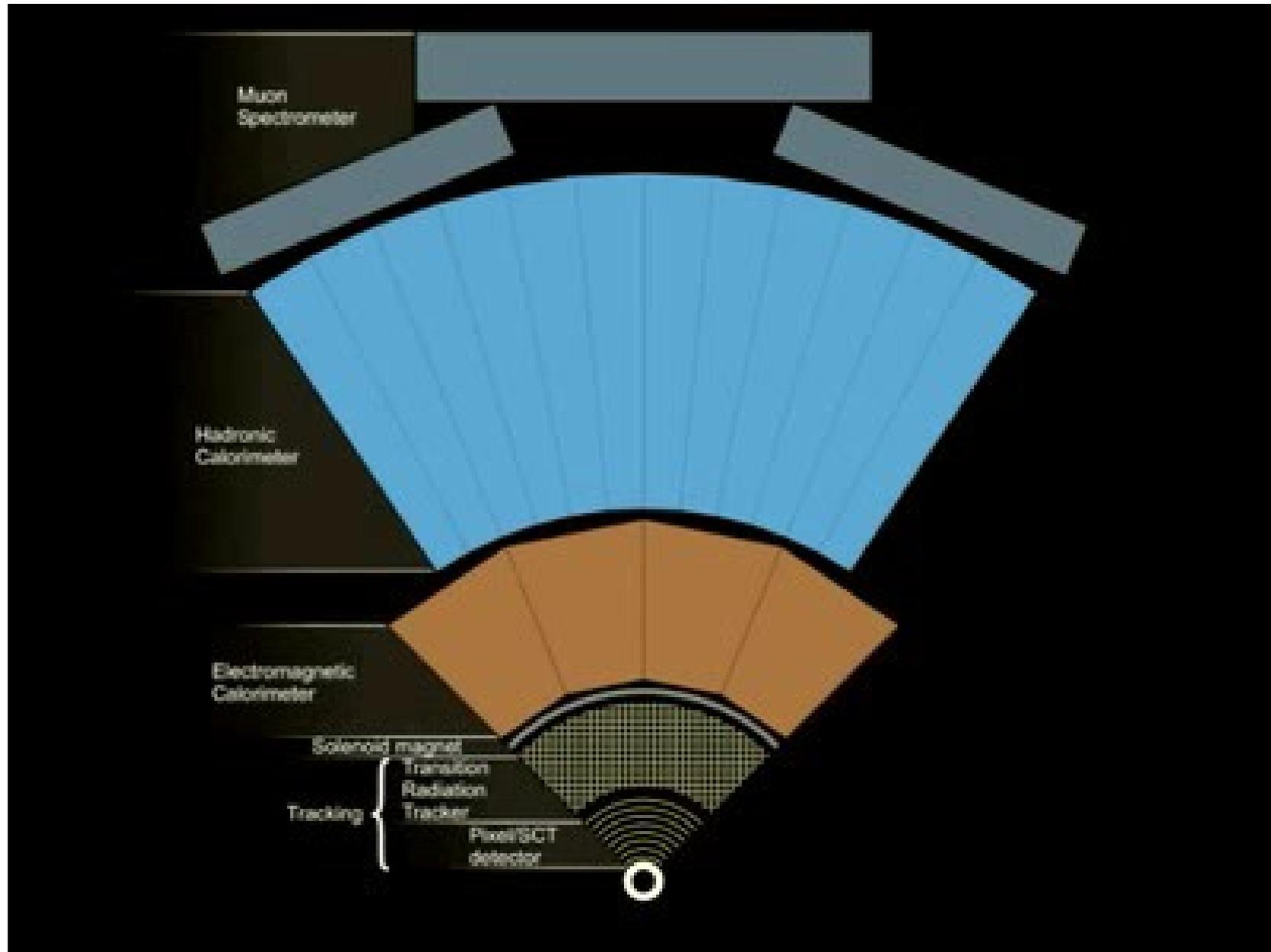
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

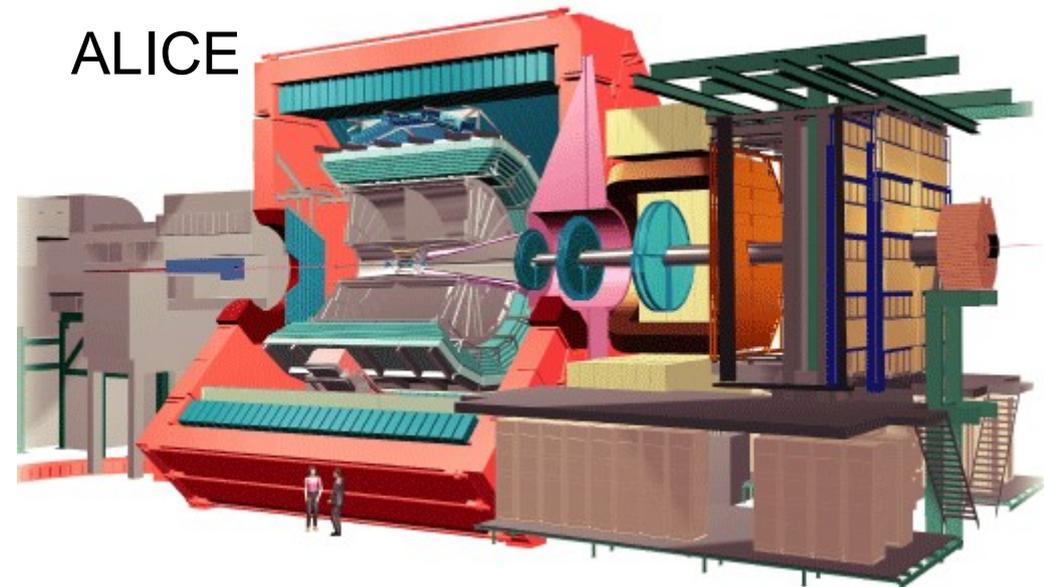
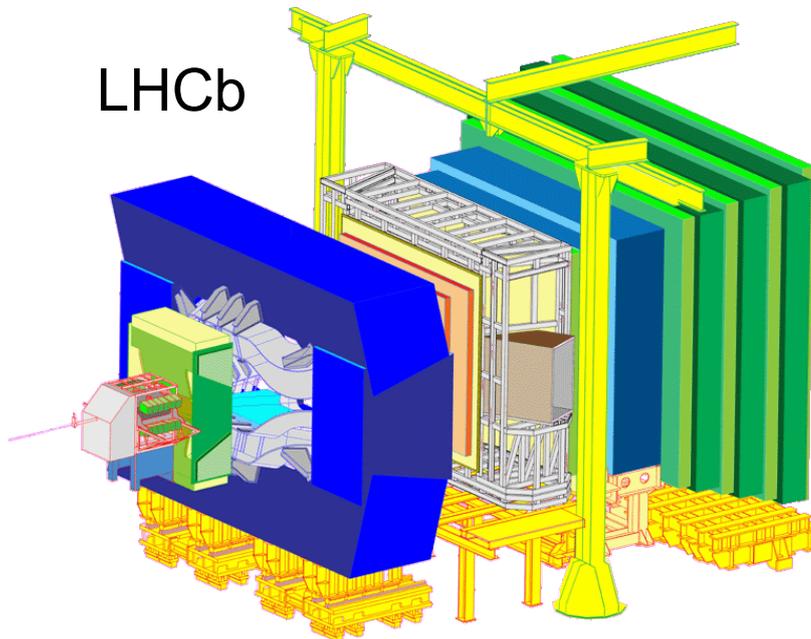
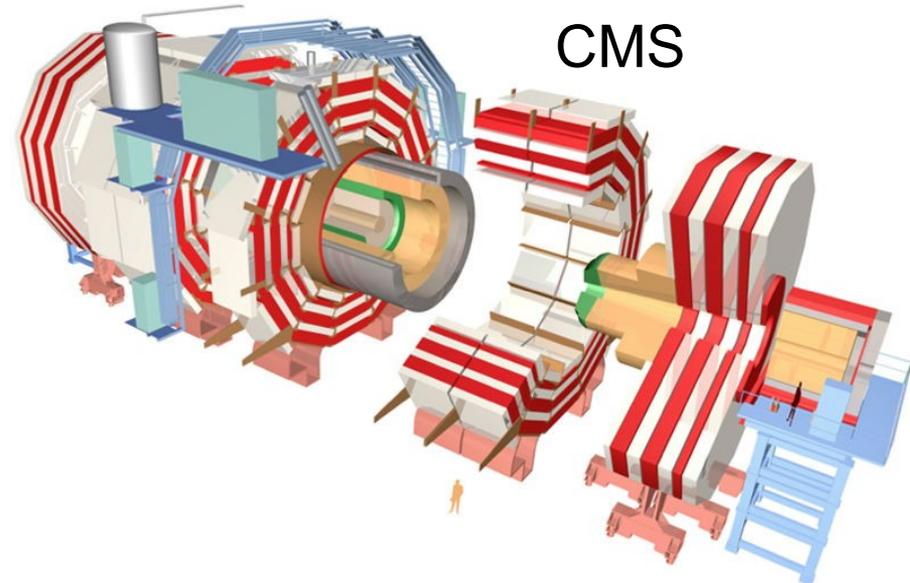
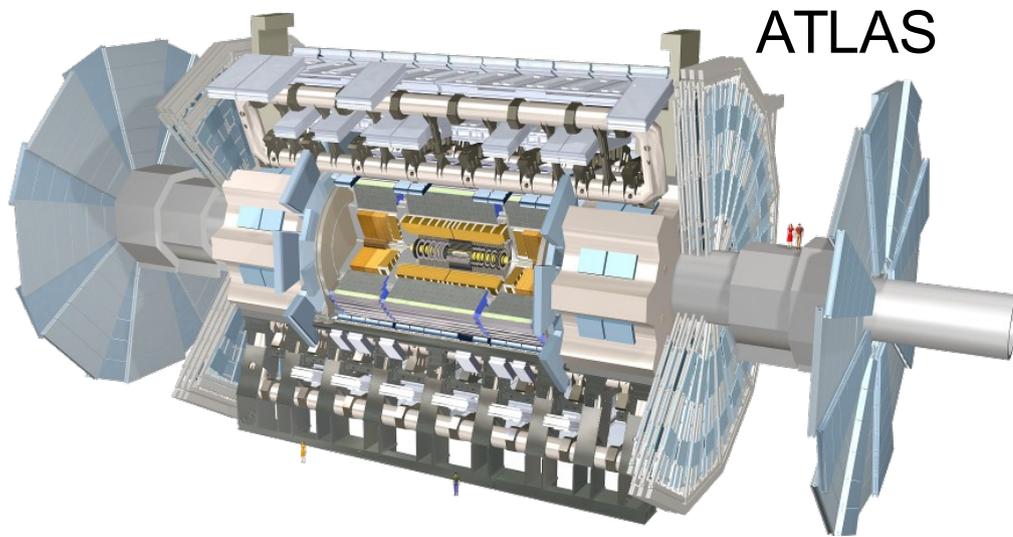
- Détecteur interne (trajectographe)
 - ▶ Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
 - ▶ Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
 - ▶ Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme les protons, neutrons, pions, etc.
- Détecteur à muons
 - ▶ Mesure la charge et l'impulsion des muons



Interaction des particules avec le détecteur



Les détecteurs géants du LHC



La collaboration ATLAS

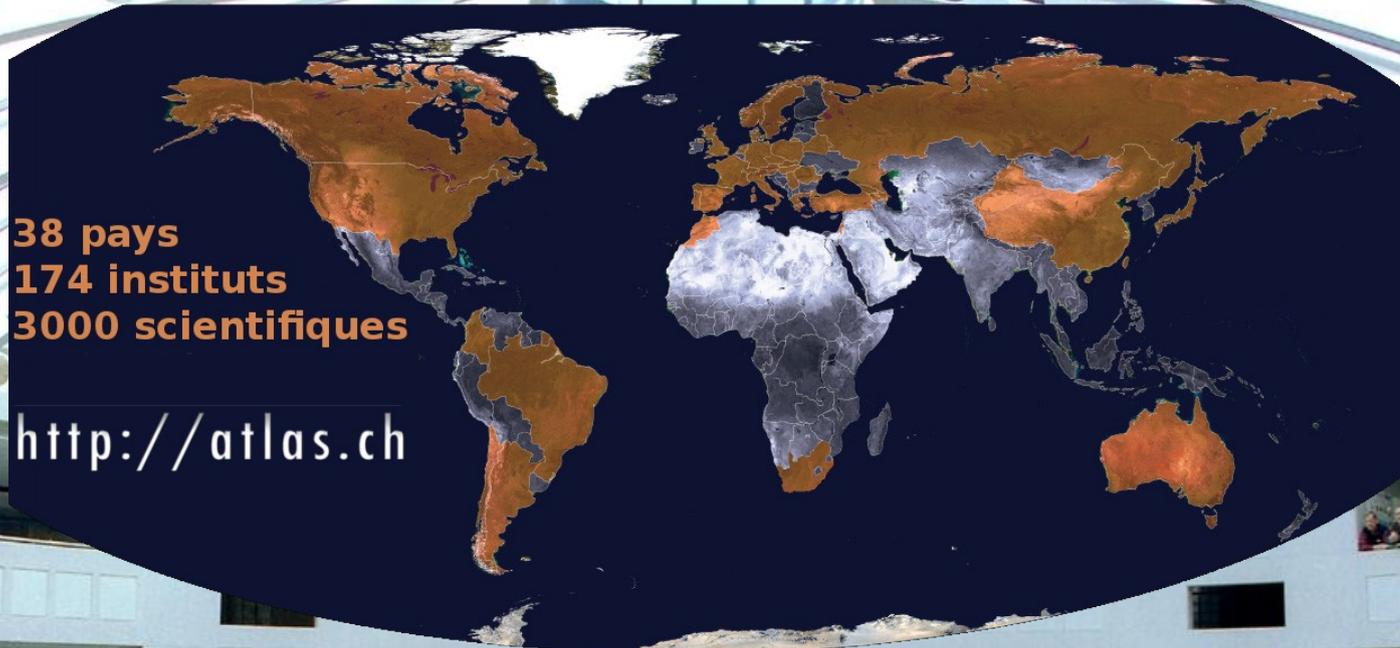


 **ATLAS**
EXPERIMENT

La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

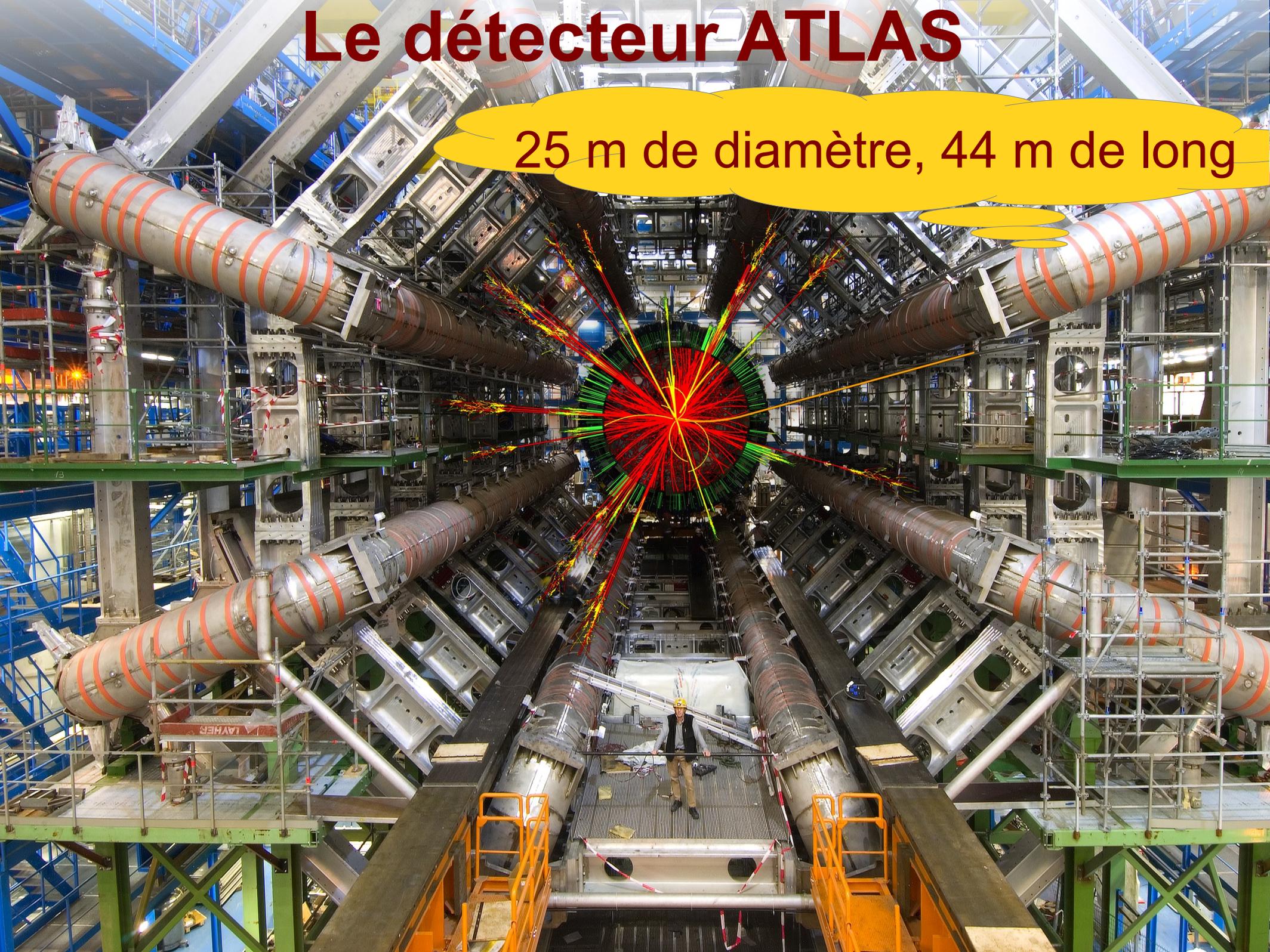


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

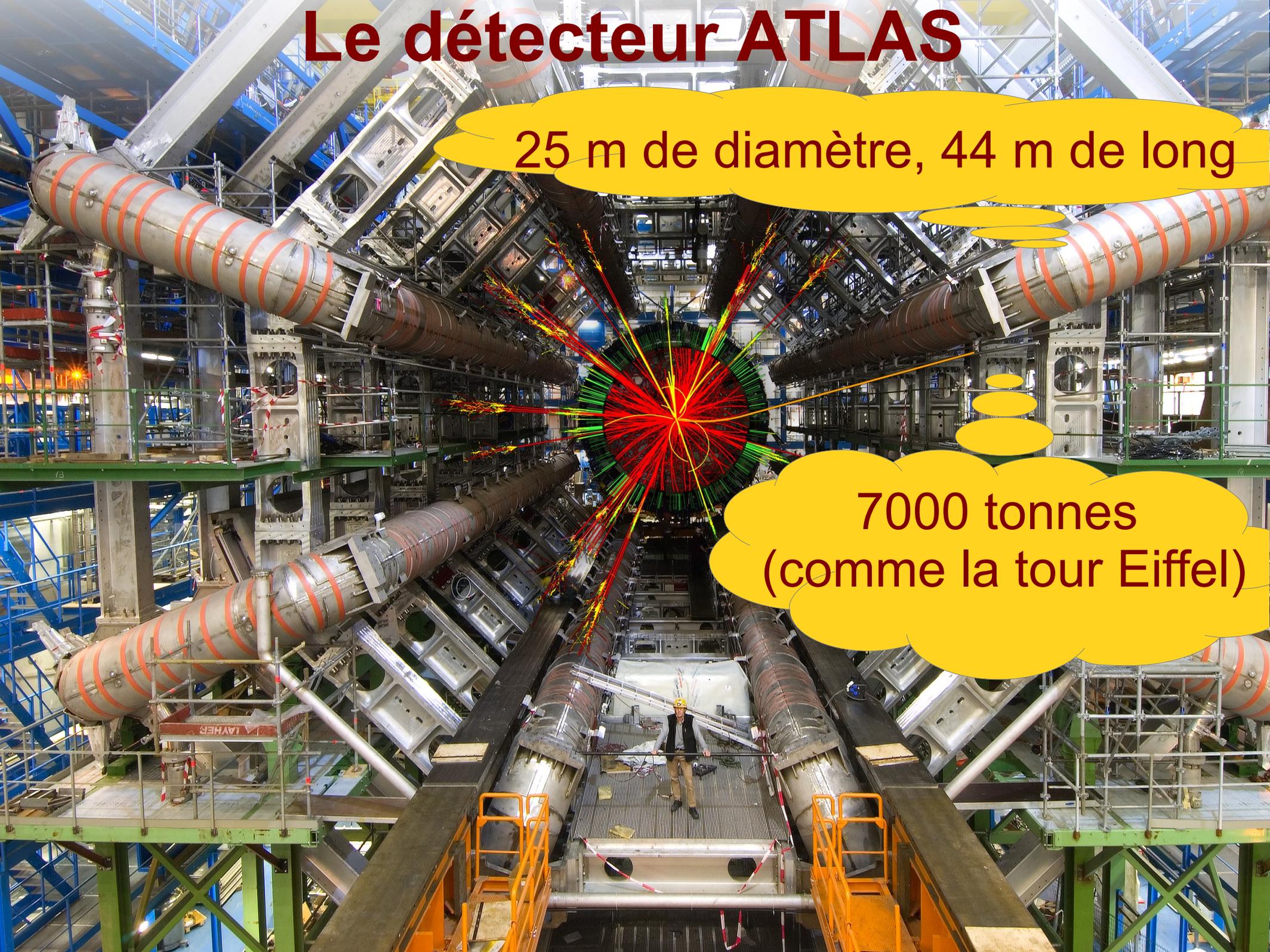
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

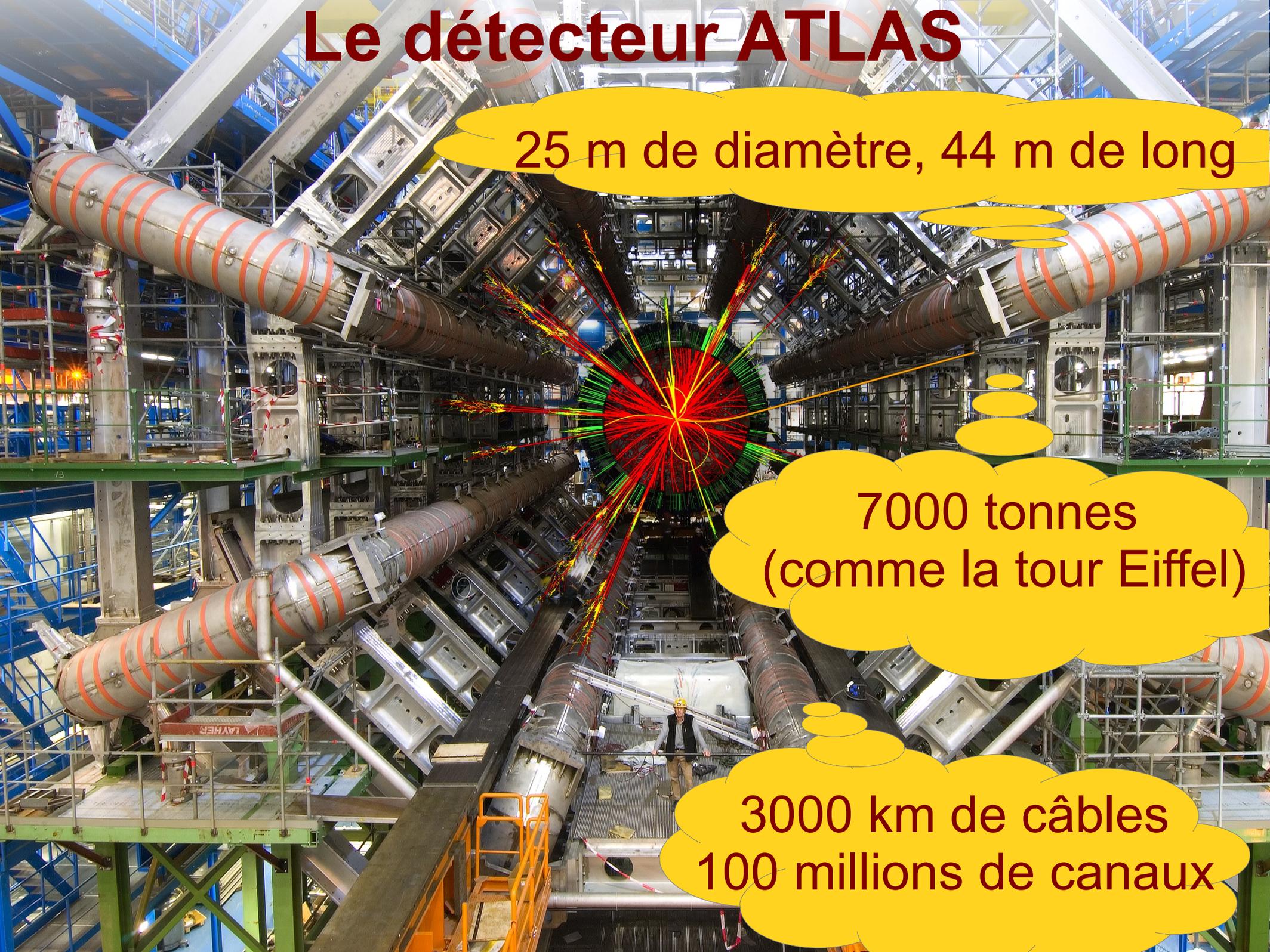


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



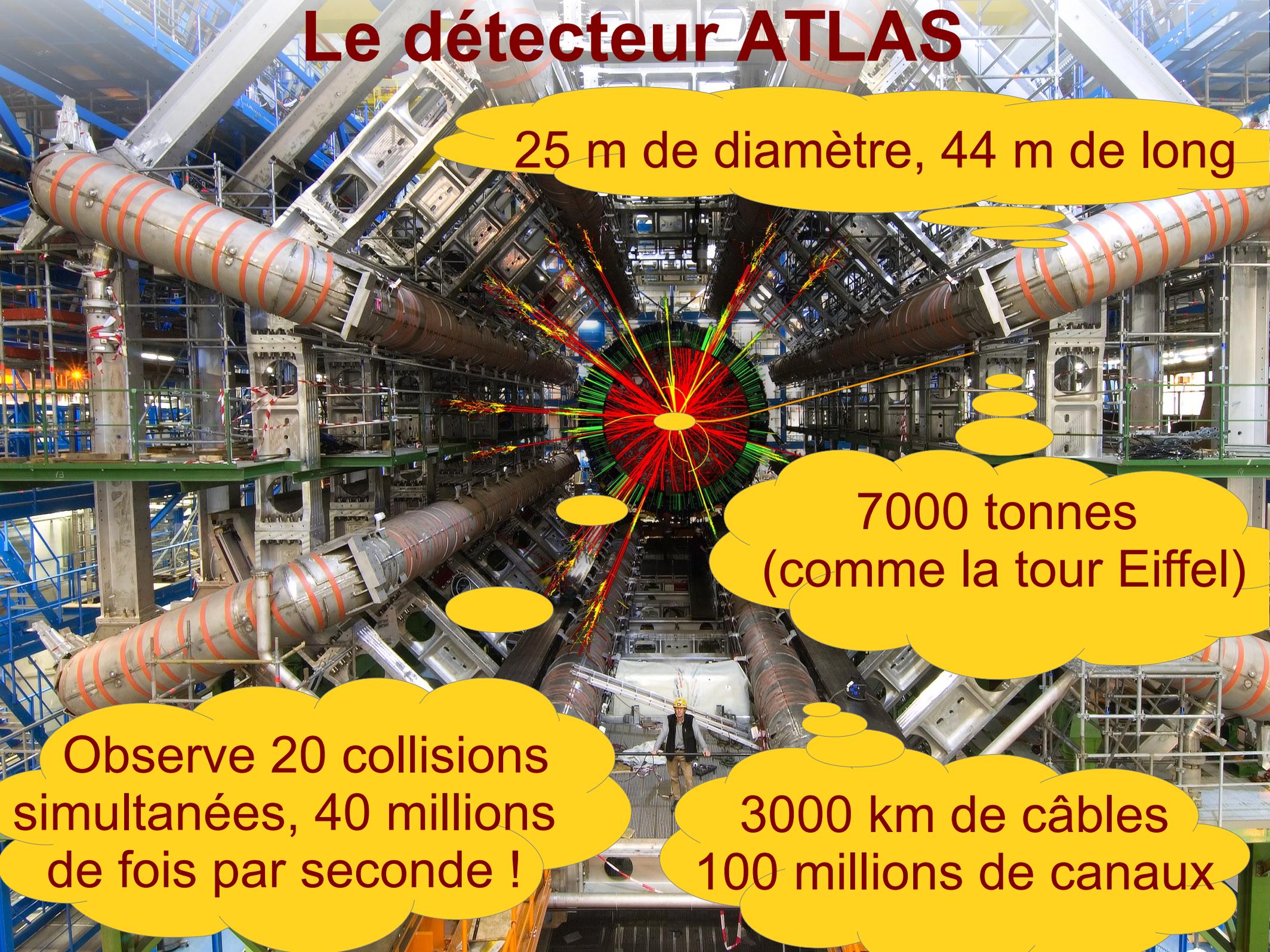
Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux



Le détecteur ATLAS

The background image shows the interior of the ATLAS detector tunnel. It is a long, narrow, cylindrical structure with a complex internal structure of metal supports and pipes. In the center, there is a large, circular detector structure. A person wearing a yellow hard hat and a dark vest is standing on a platform in the middle of the tunnel, providing a sense of scale. The lighting is bright, and the overall atmosphere is industrial and technical.

25 m de diamètre, 44 m de long

En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

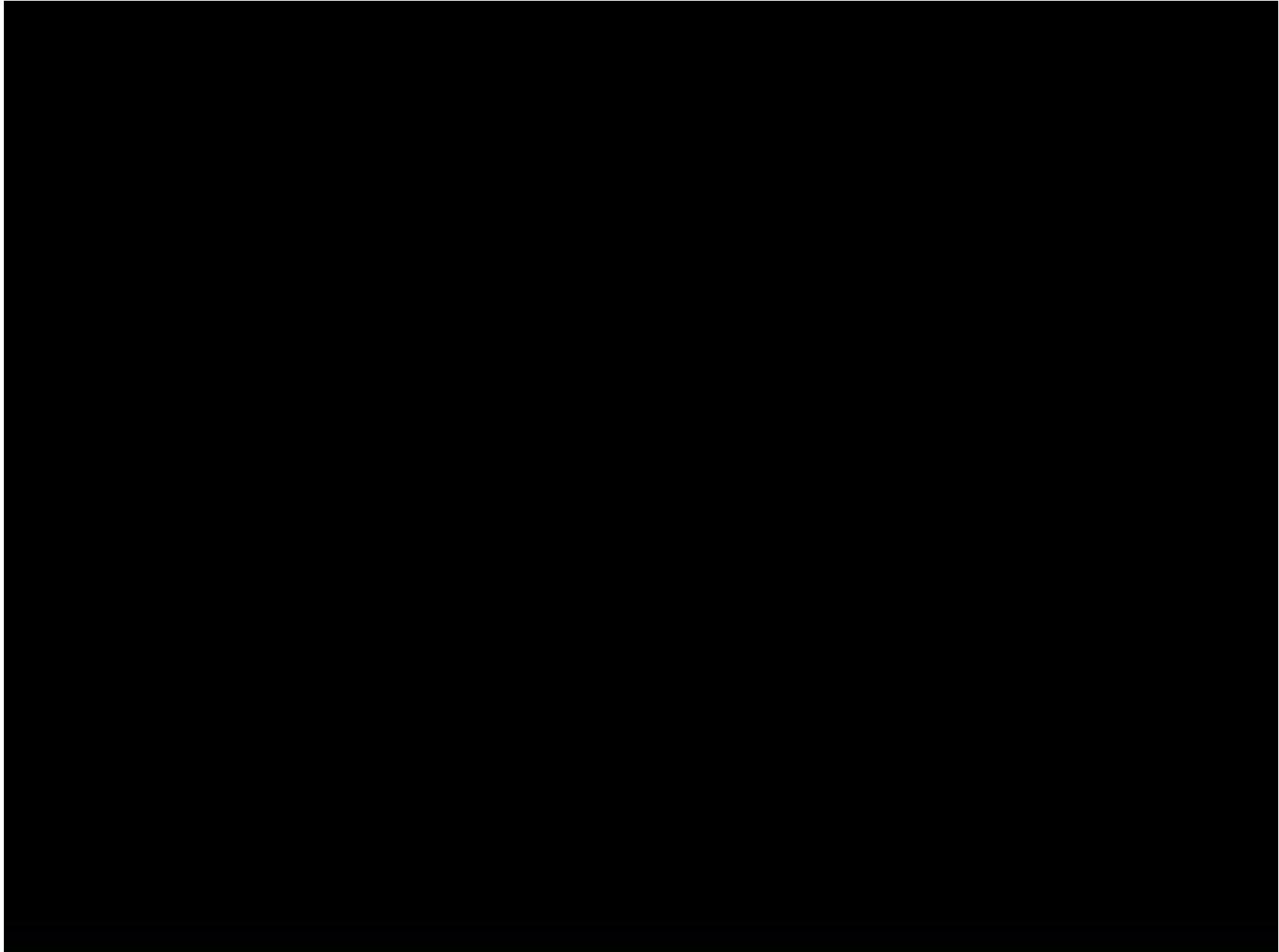
Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux

Le détecteur ATLAS construit en 1 minute



Le détecteur ATLAS avec des explications

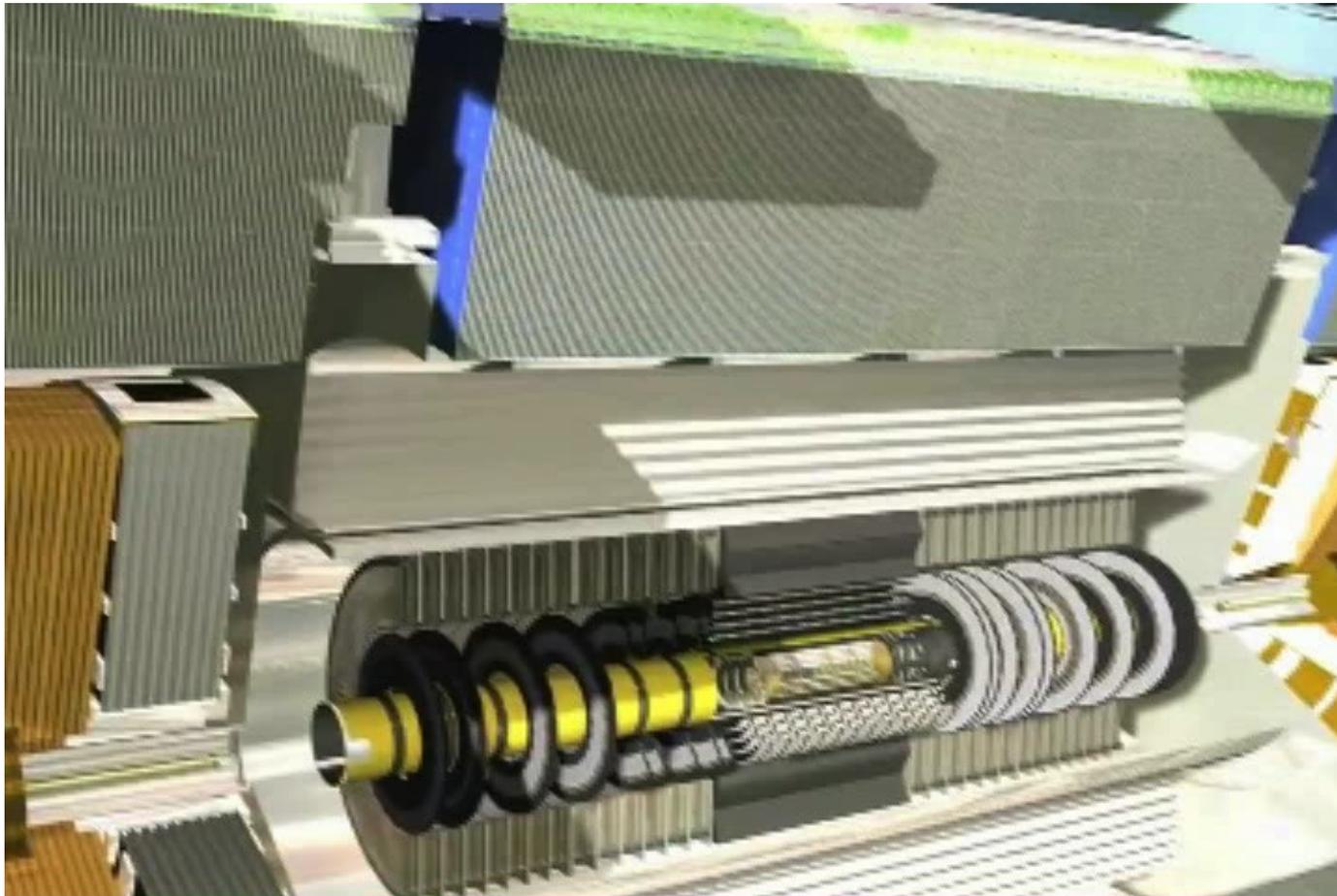


Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



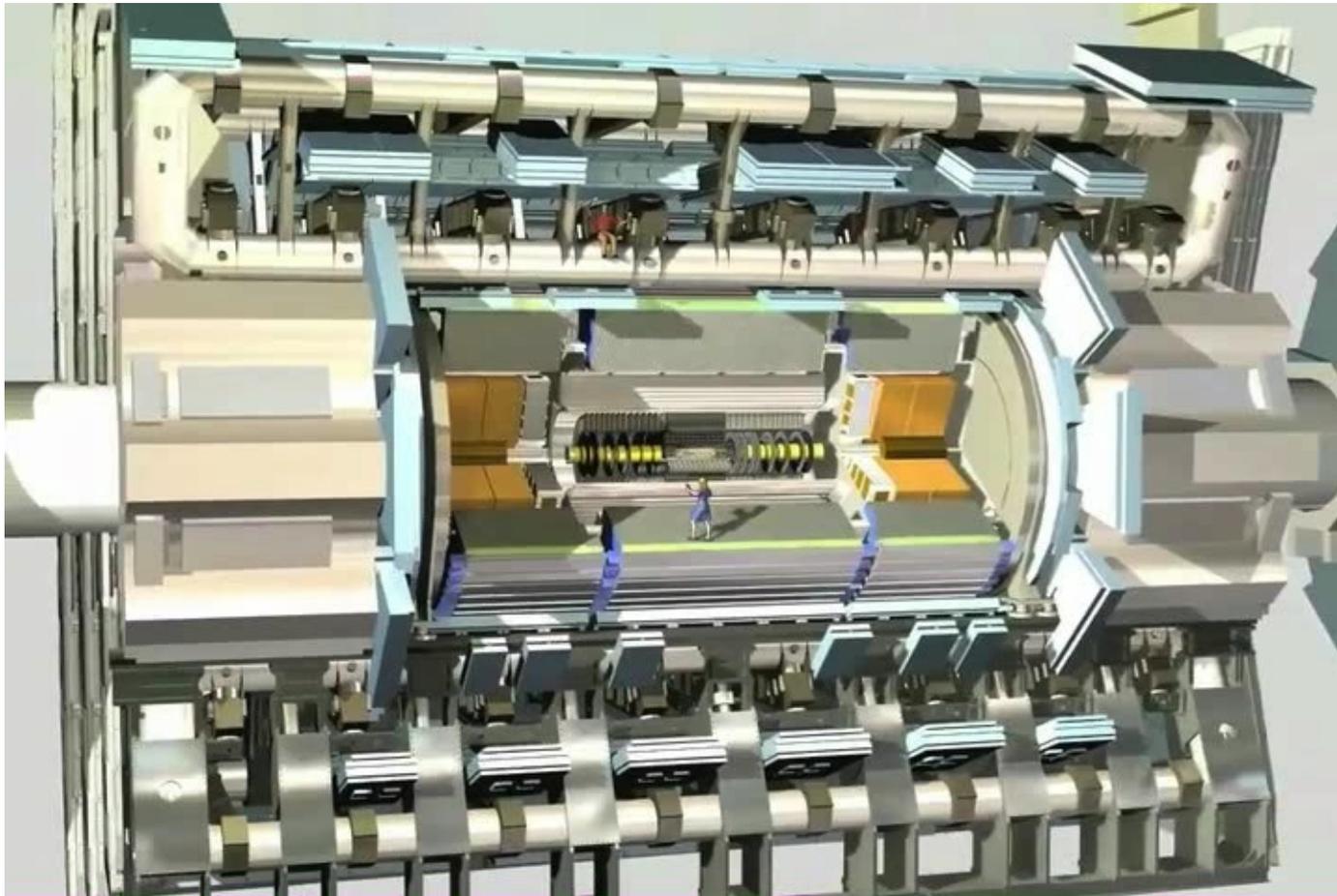
- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m² de silicium

Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



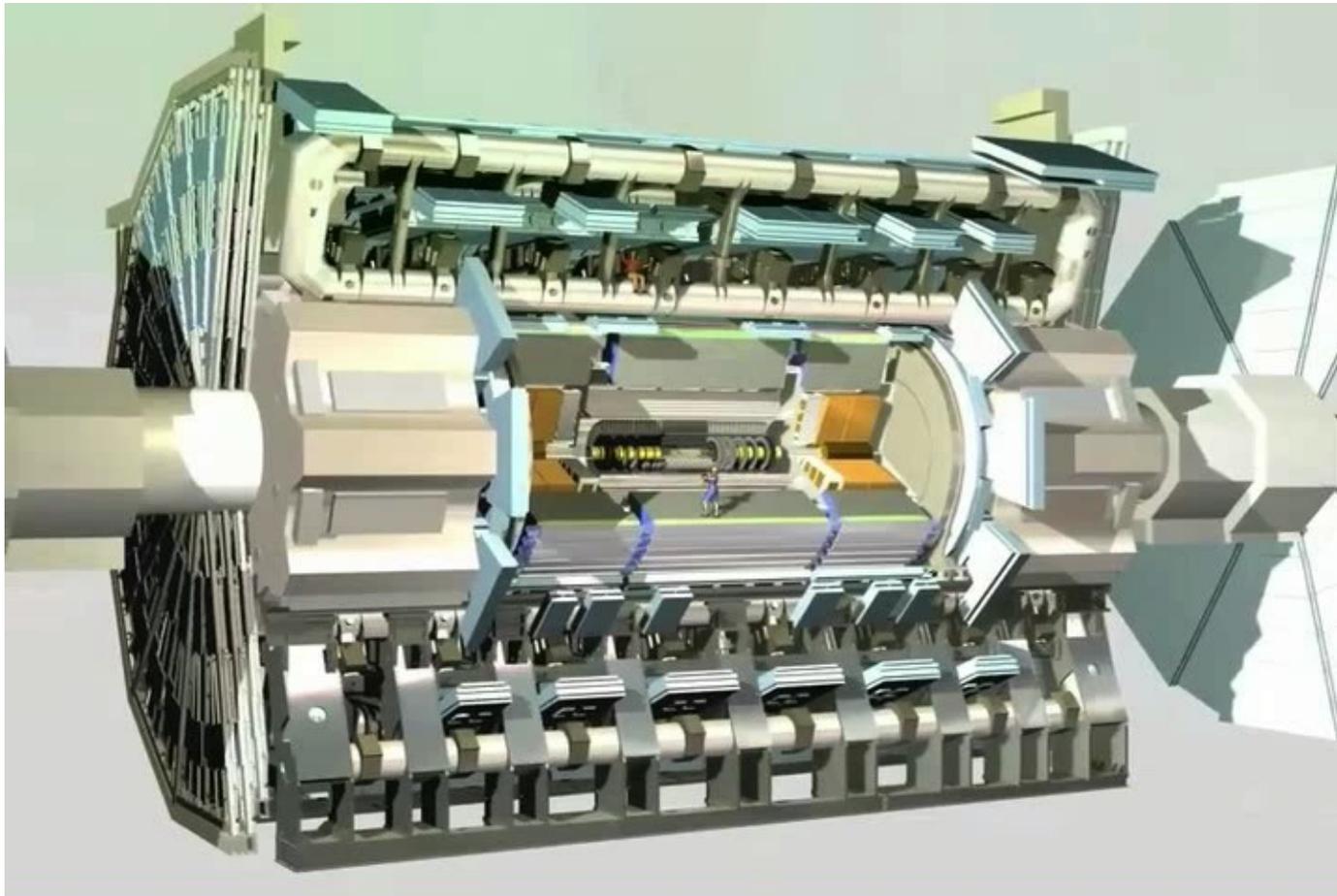
- Argon liquide à -183°C

Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



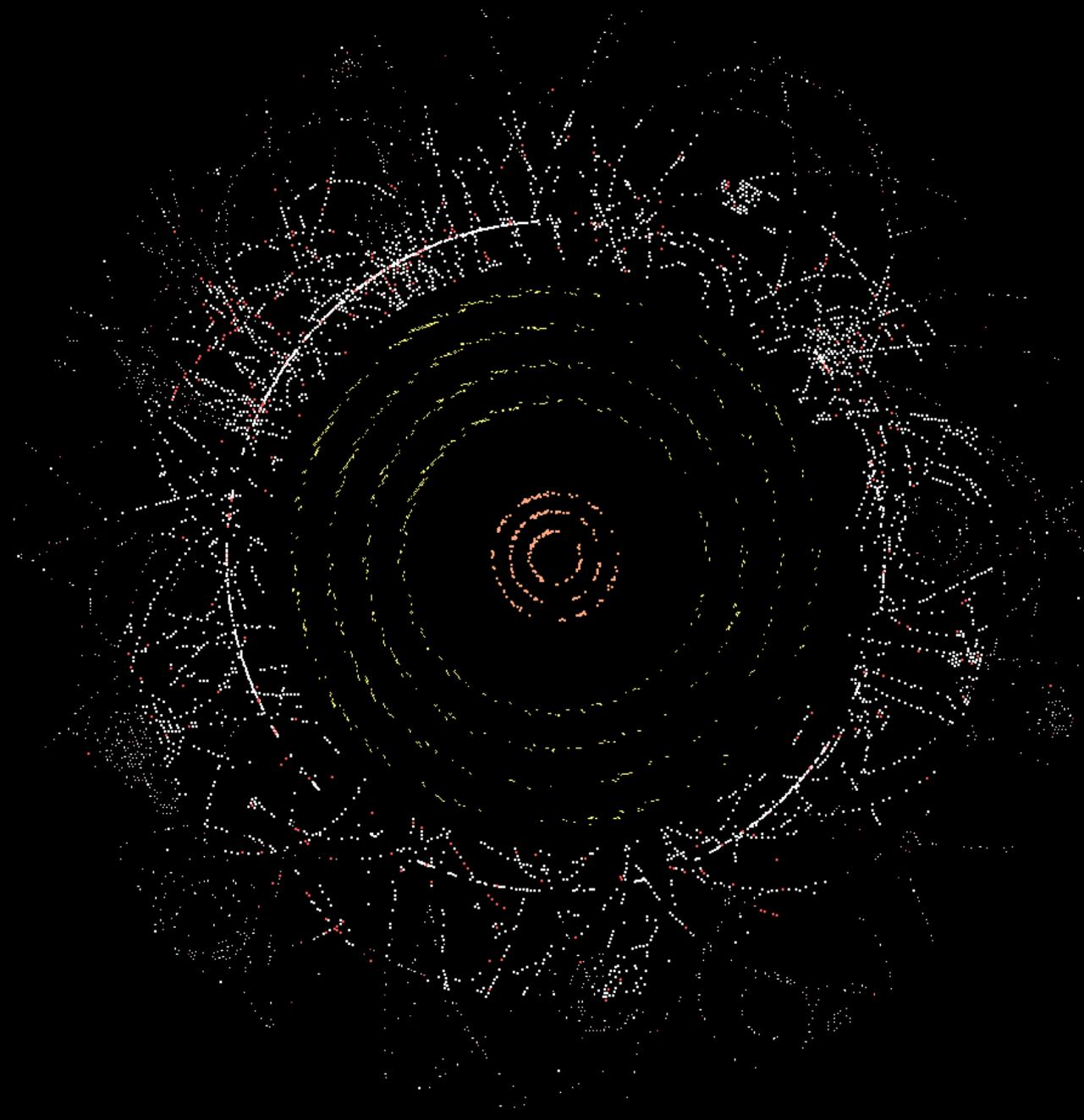
- 500 000 tuiles de plastique scintillant

Mesurer le passage des particules dans le système à muons



- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

Passage des particules



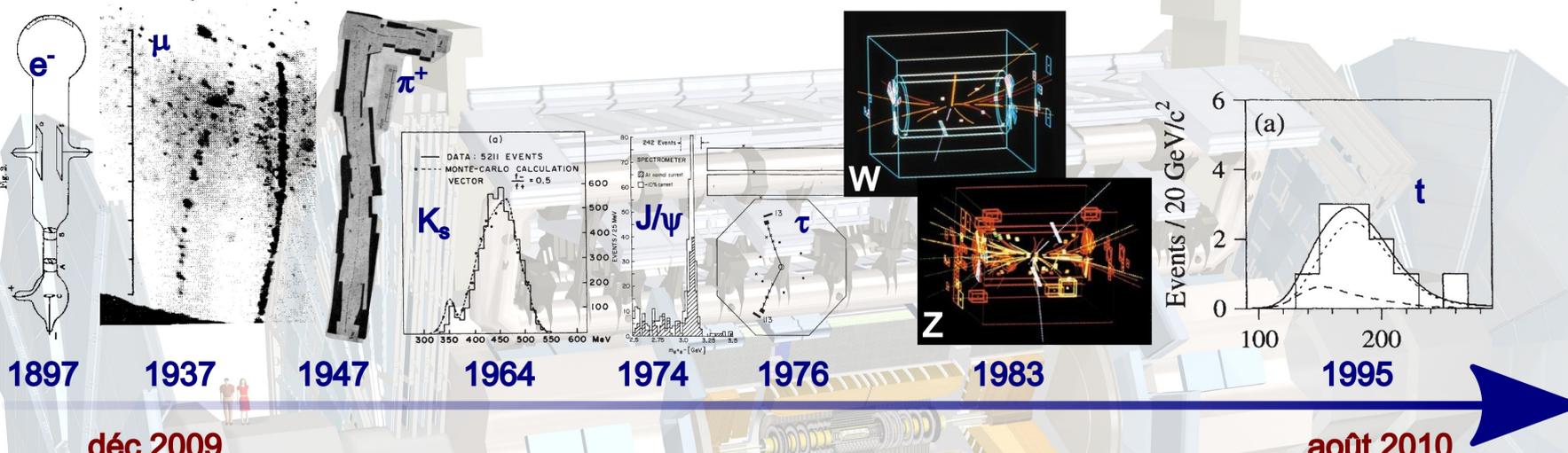
Reconstruction des trajectoires



Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

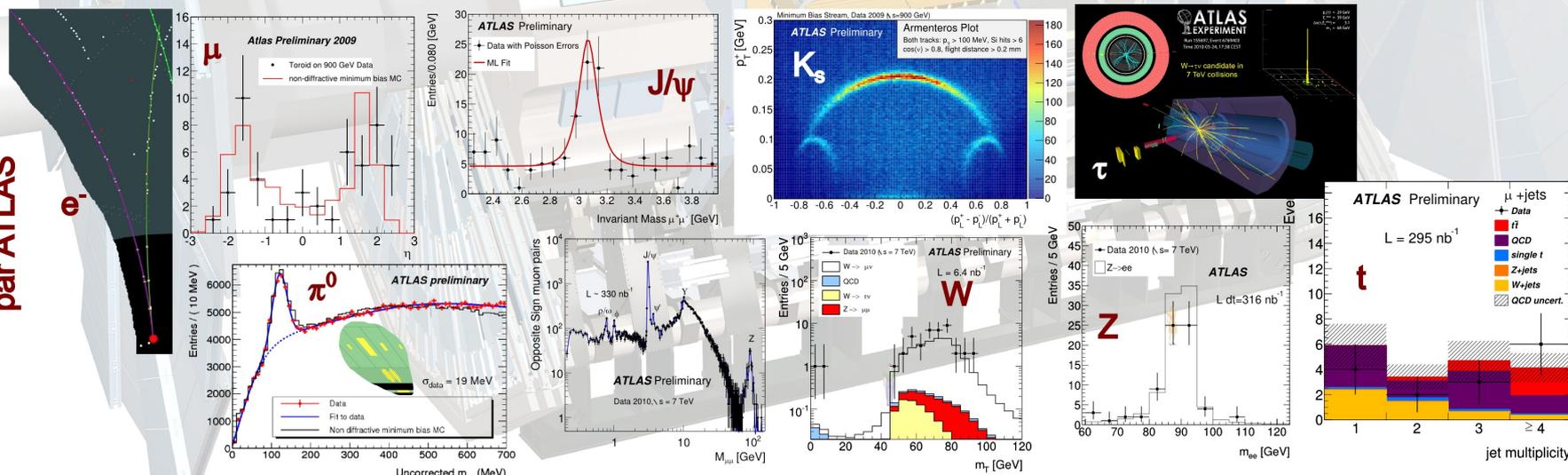
Découverte historique



déc 2009

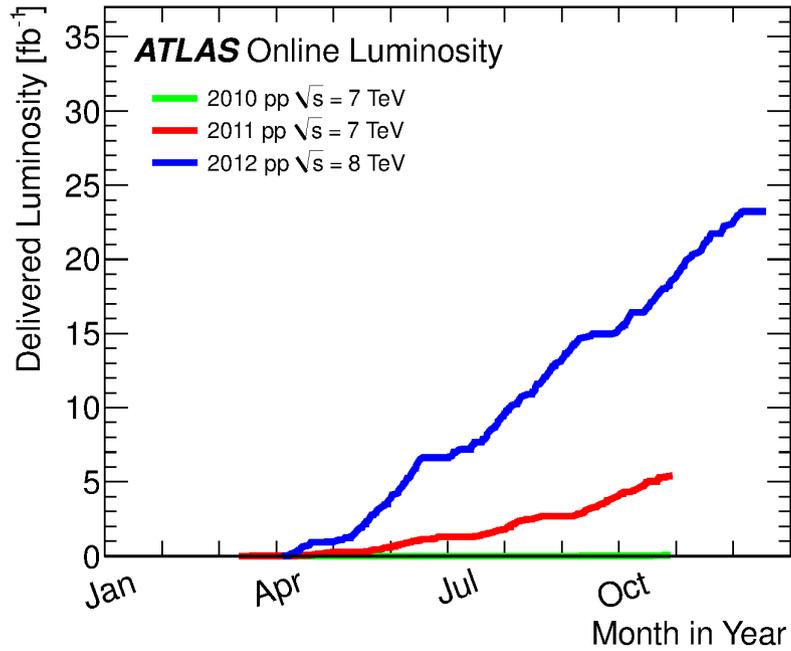
août 2010

Redécouverte par ATLAS

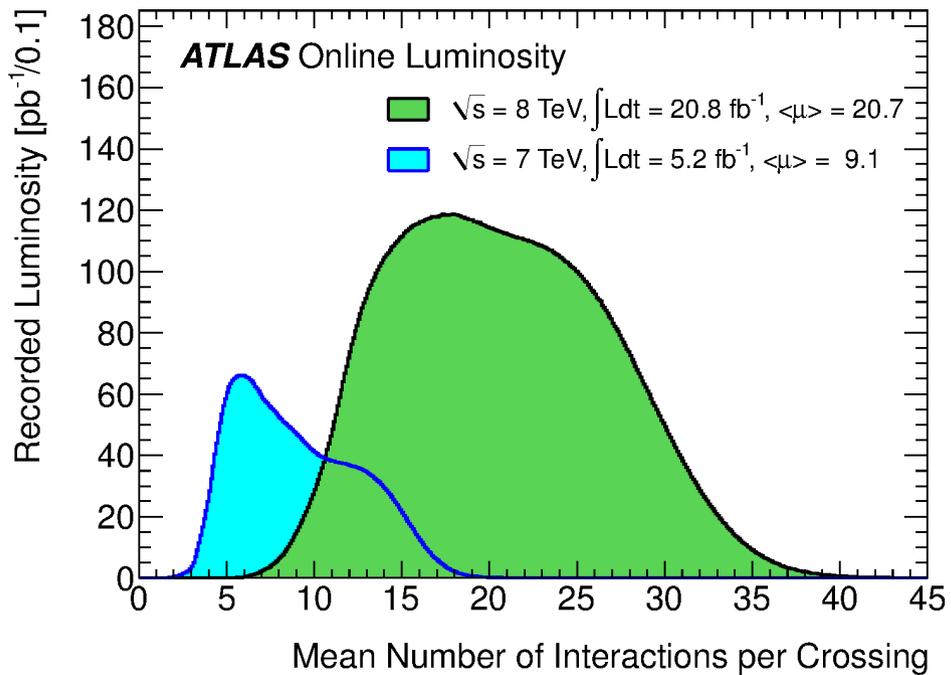
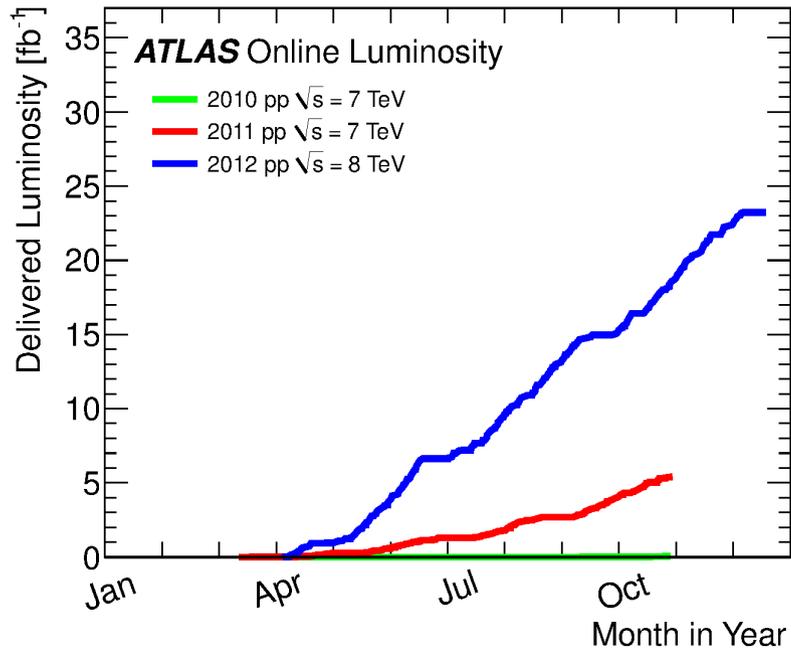


Accumulation des données

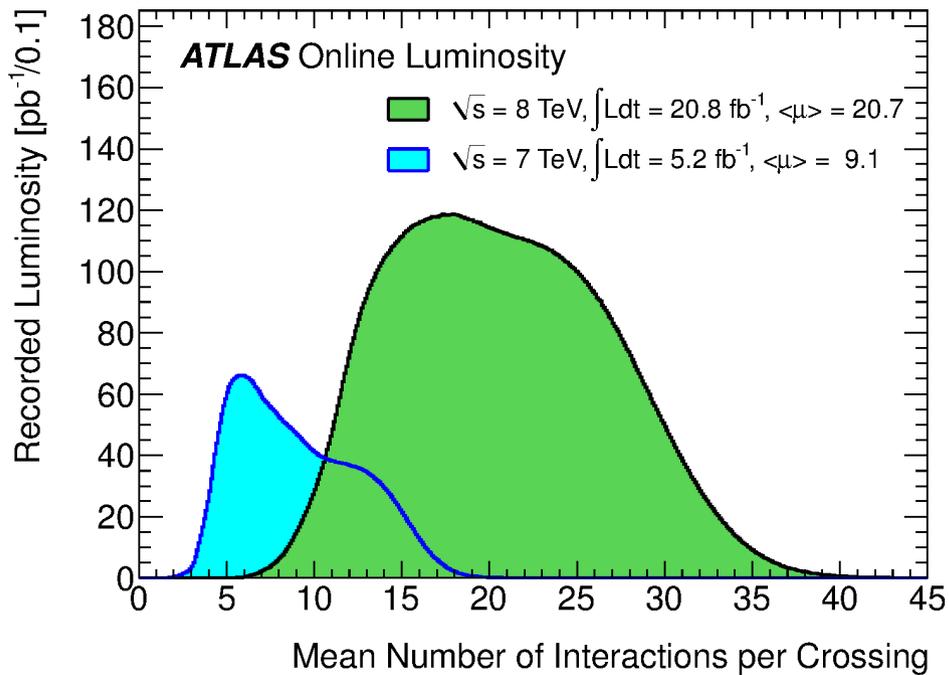
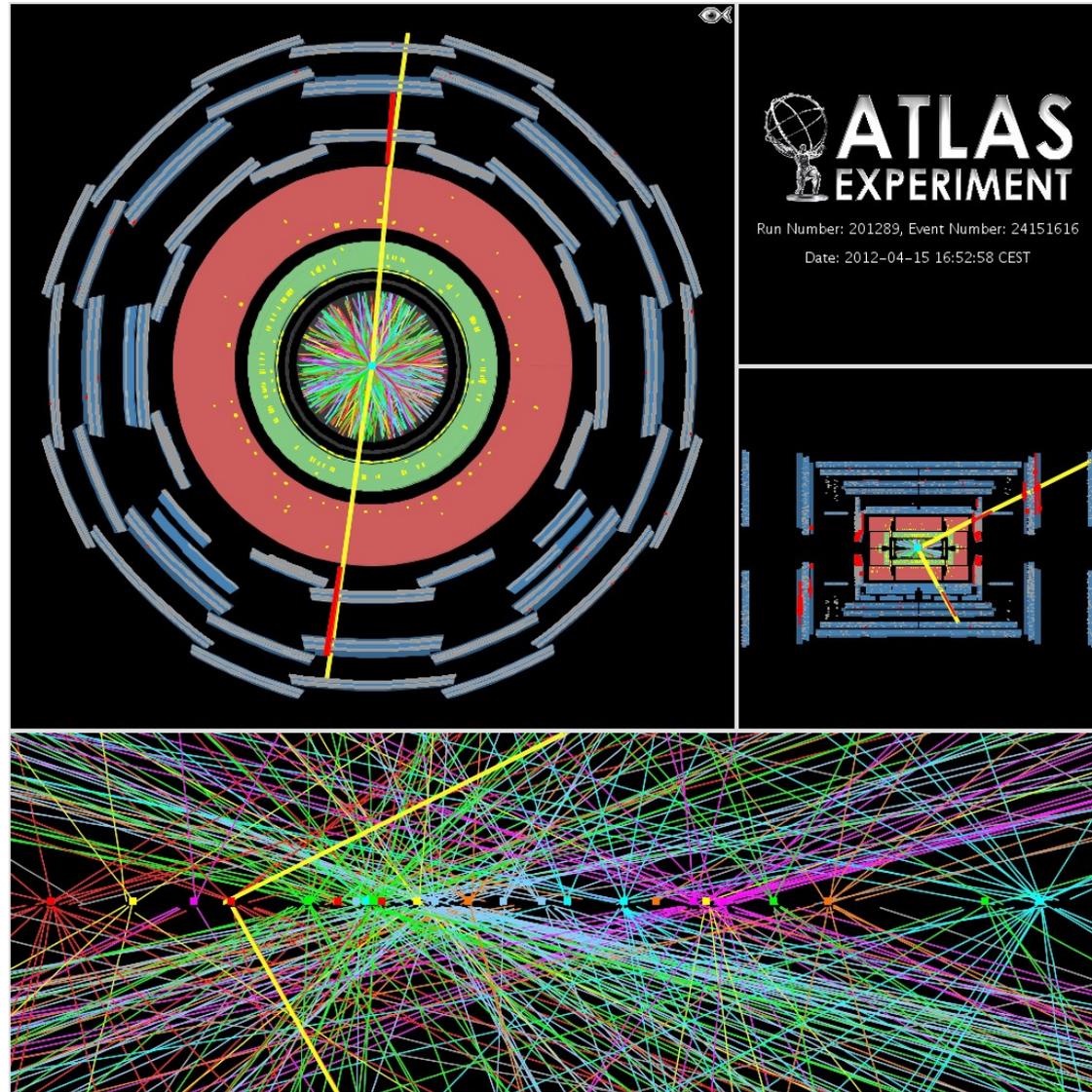
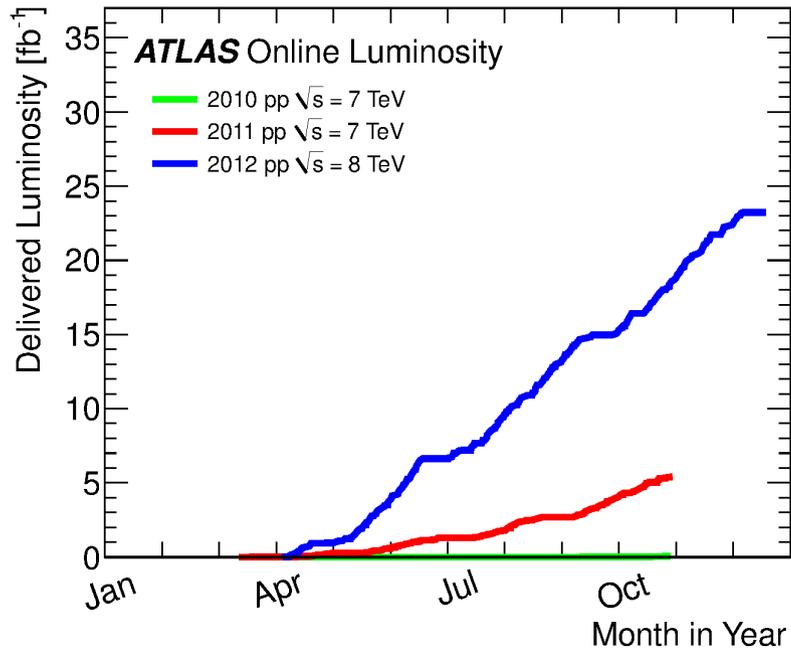
Accumulation des données



Accumulation des données

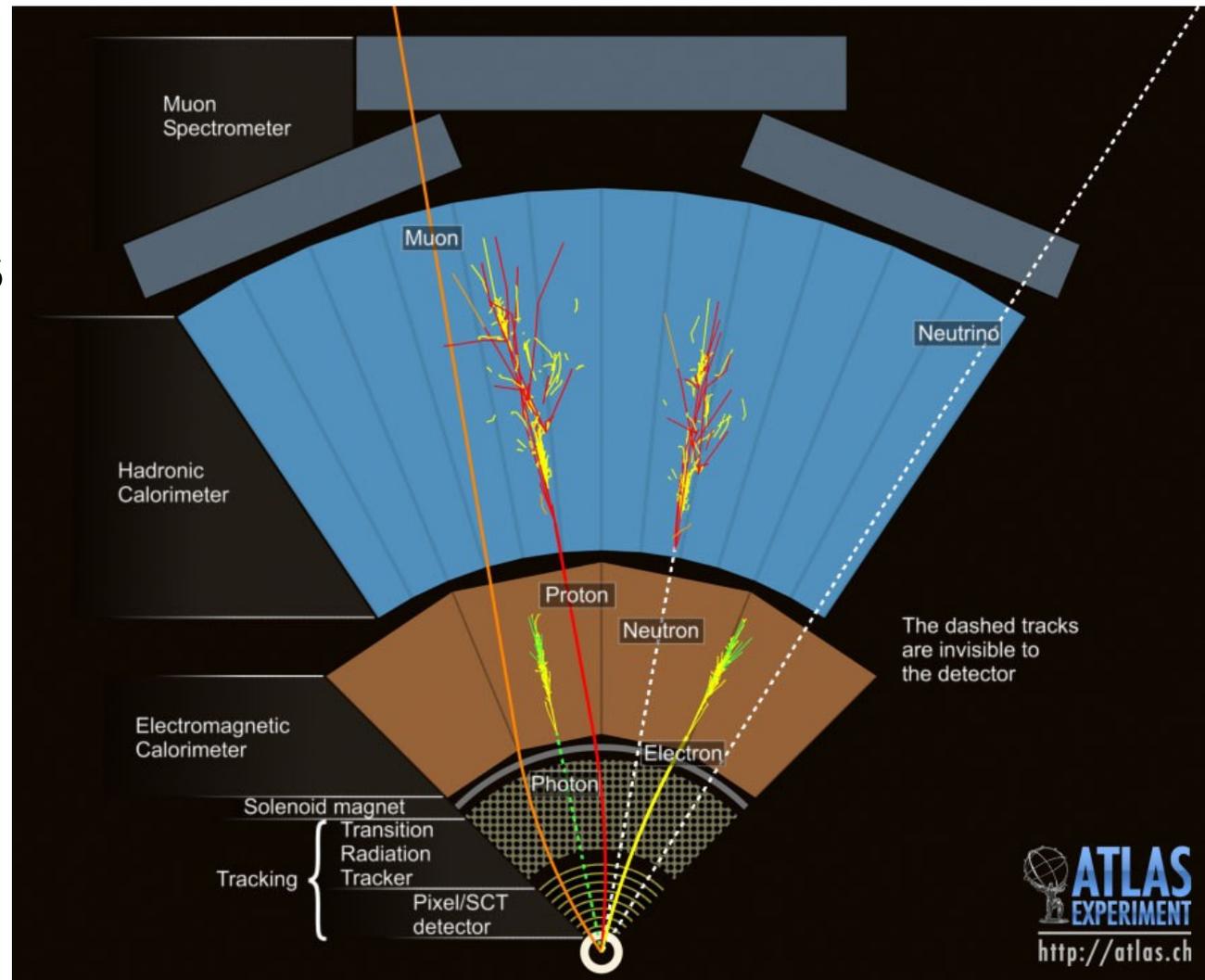
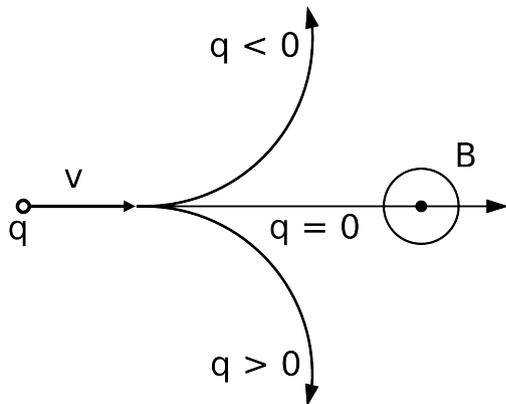


Accumulation des données

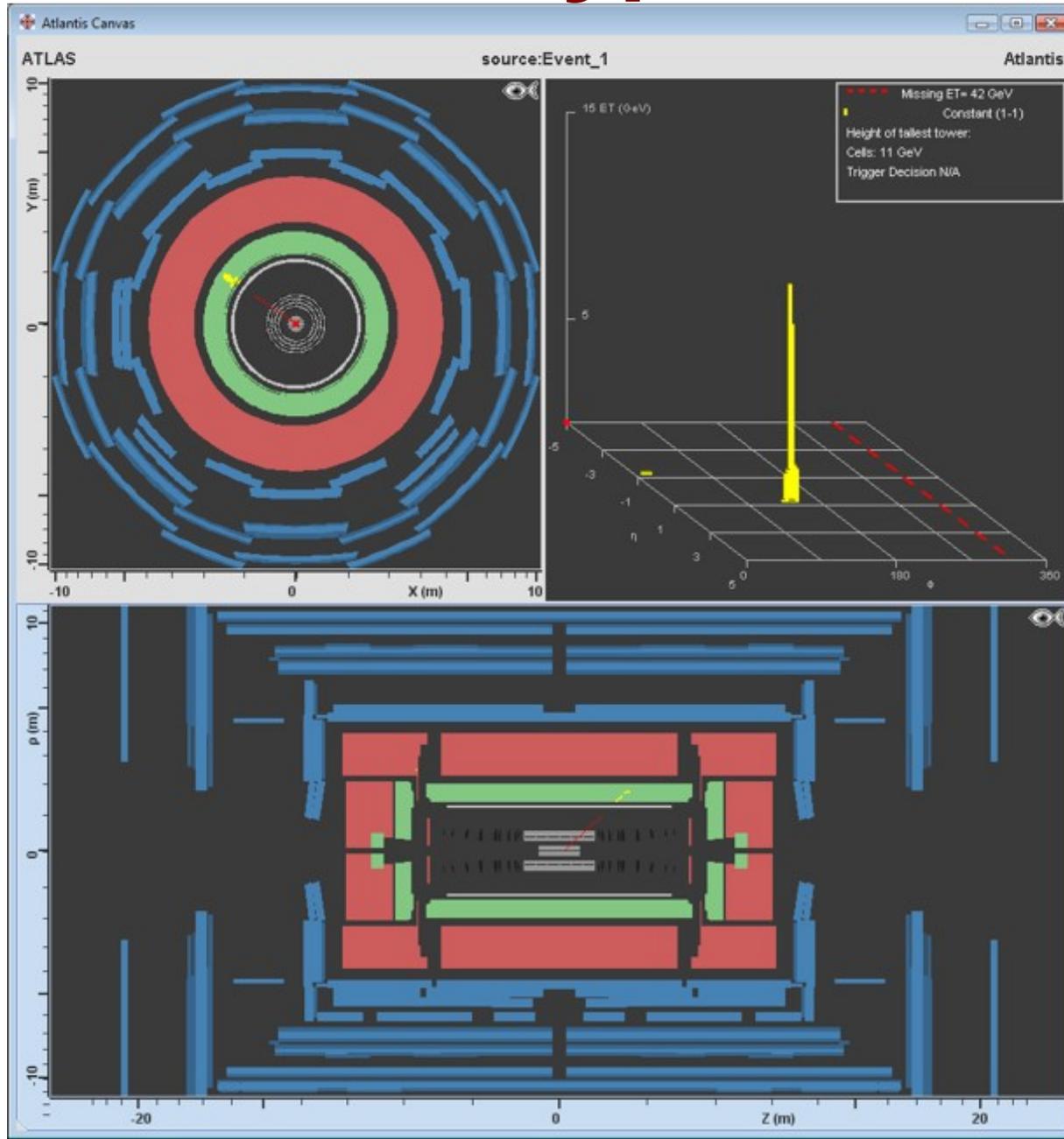


Identifier les électrons/positrons et photons

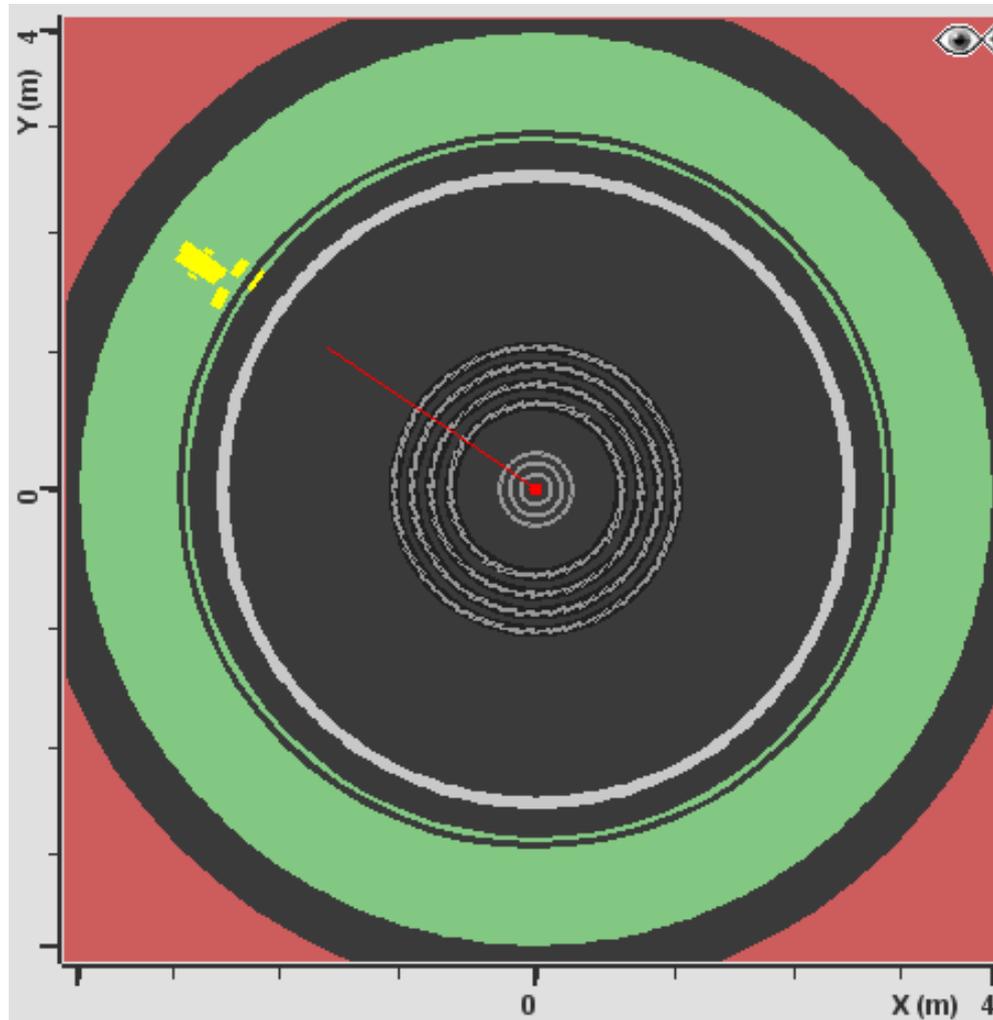
- Gerbe dans le calorimètre EM
- e^+/e^- : particule chargée, trace dans le trajectographe
- Courbure de la trace \rightarrow signe de la charge électrique



Identifier les électrons/positrons avec Hypatia

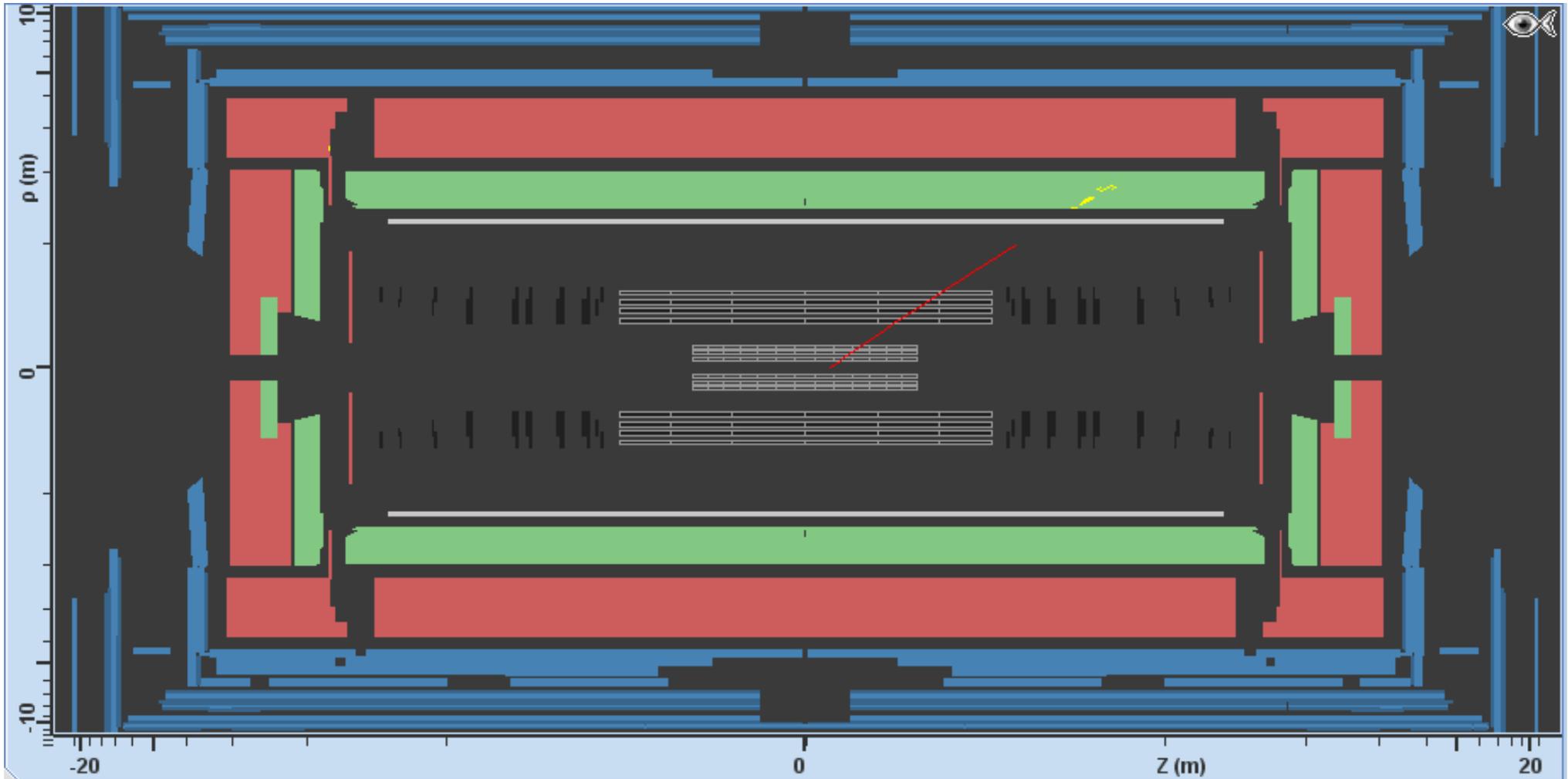


Identifier les électrons/positrons avec Hypatia



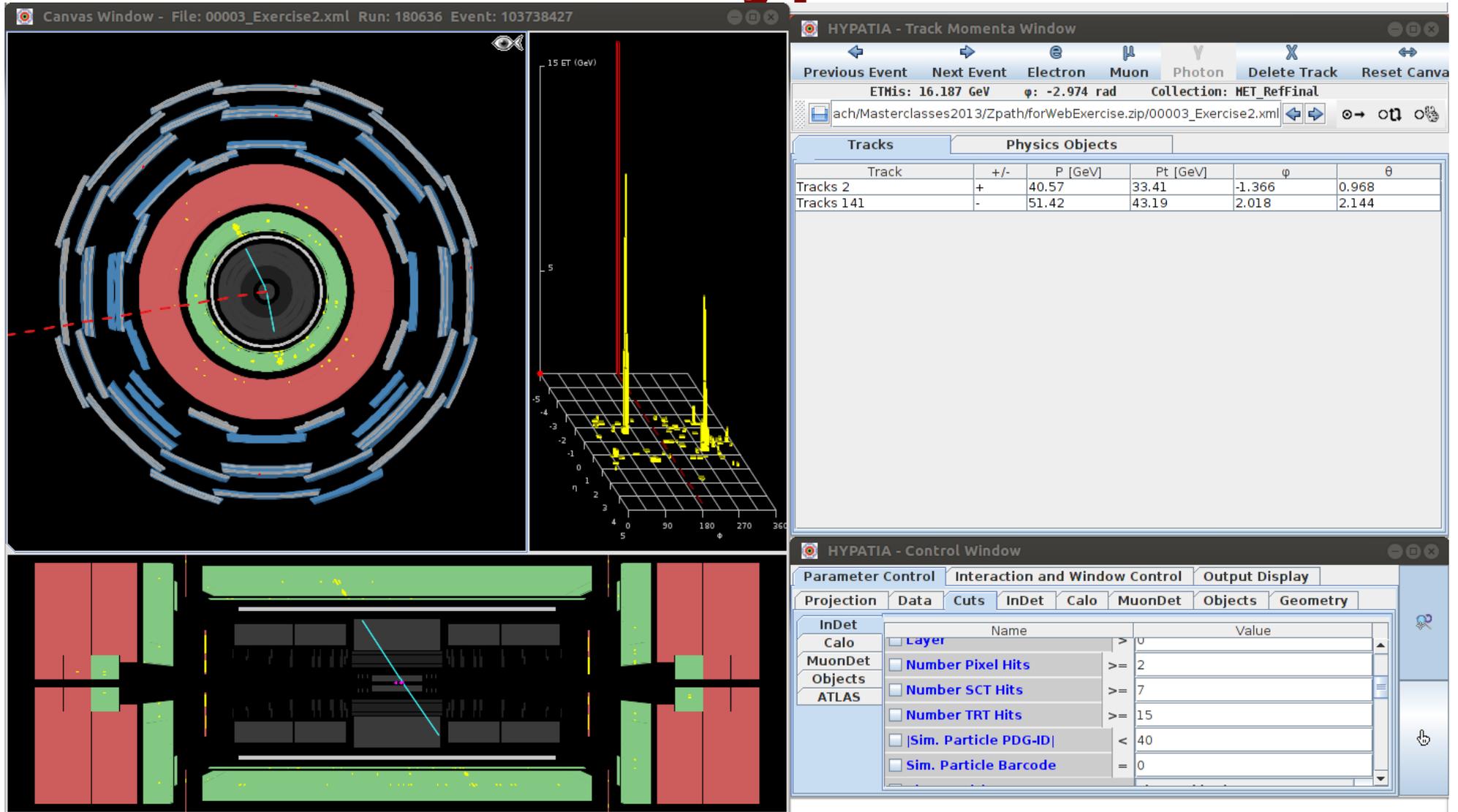
- Trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

Identifier les électrons/positrons avec Hypatia



- Trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

Identifier les électrons/positrons avec Hypatia



- Choisir la main et cliquer sur la trace
- La ligne correspondante est surlignée en haut à droite

Identifier les électrons/positrons avec Hypatia

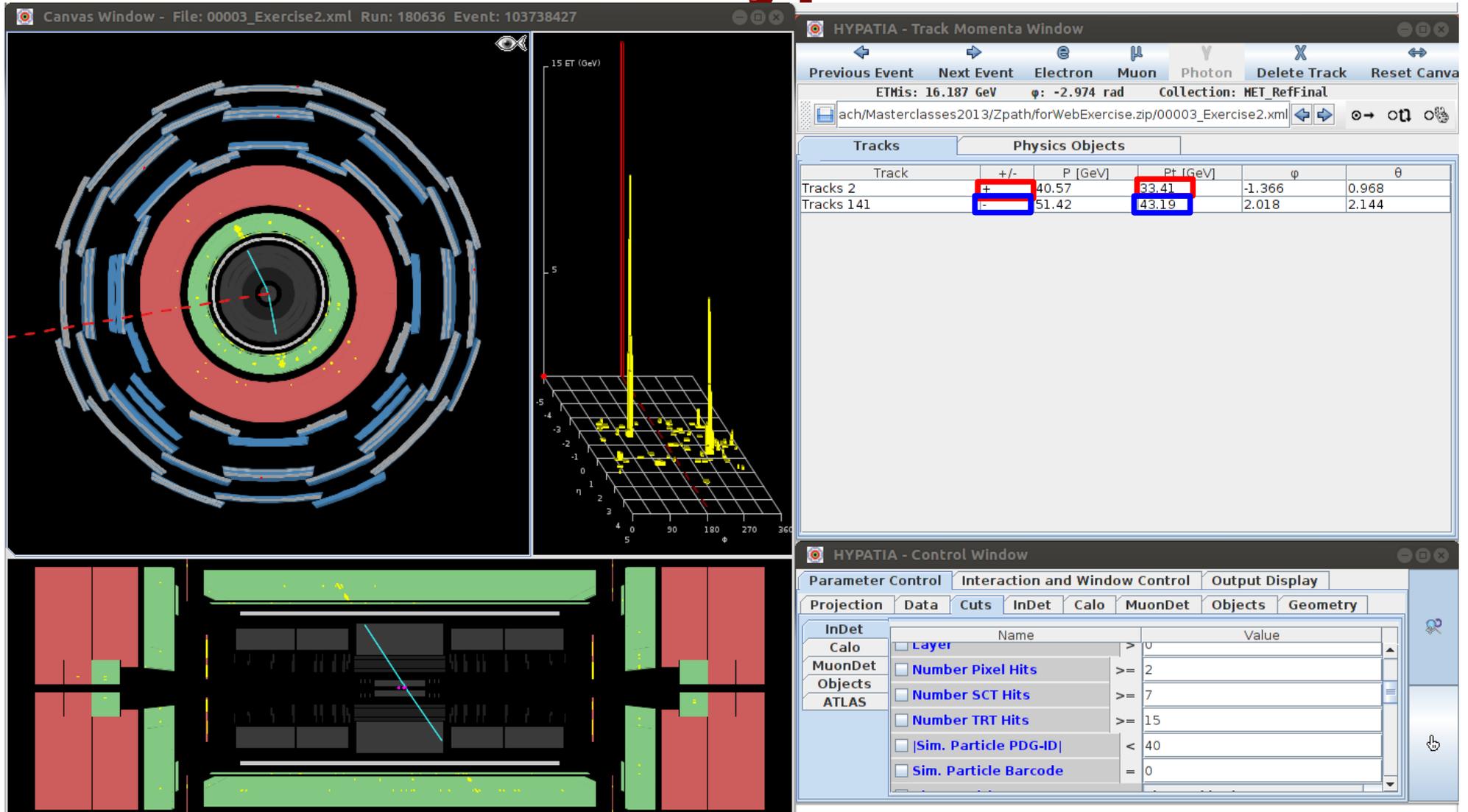
The screenshot displays the Hypatia software interface with three main windows:

- Canvas Window:** Shows a top-down view of the ATLAS detector with particle tracks. A red dashed line indicates a track passing through the inner layers.
- HYPATIA - Track Momenta Window:** Displays a table of track parameters. The table is as follows:

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Tracks 2	+	40.57	33.41	-1.366	0.968
Tracks 141	-	51.42	43.19	2.018	2.144
- HYPATIA - Control Window:** Shows the 'InDet' section of the control panel. A red circle highlights the mouse cursor icon, indicating that the user should click on a track in the canvas to select it.

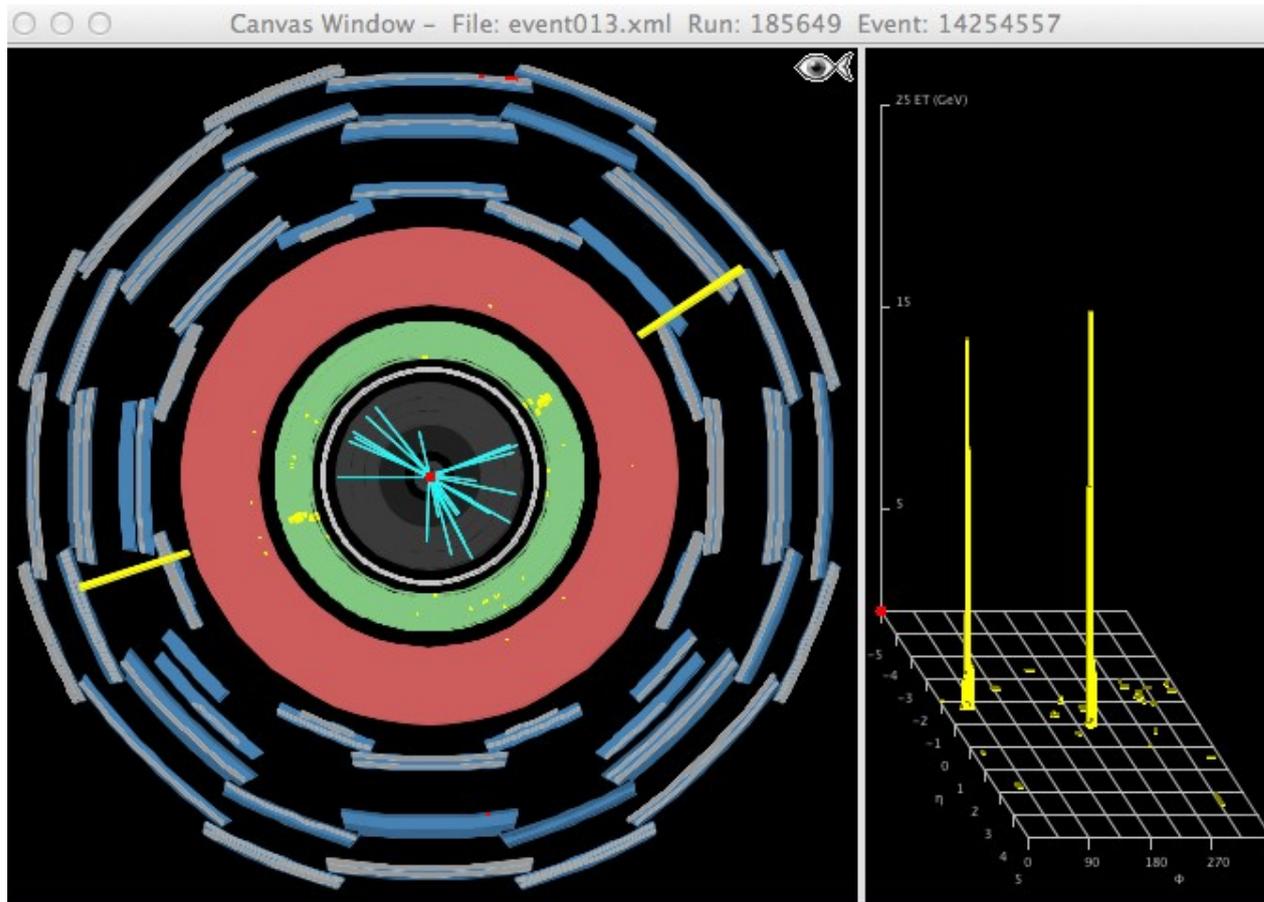
- Choisir la main et cliquer sur la trace
- La ligne correspondante est surlignée en haut à droite,

Identifier les électrons/positrons avec Hypatia

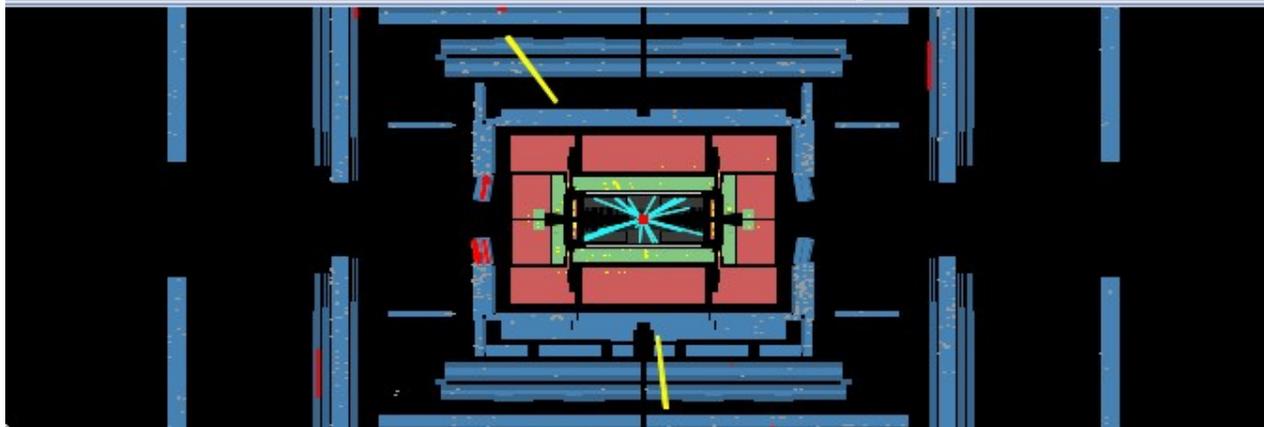


- Pt = impulsion transverse
- Ici charge **négative** → électron, **positive** → positron

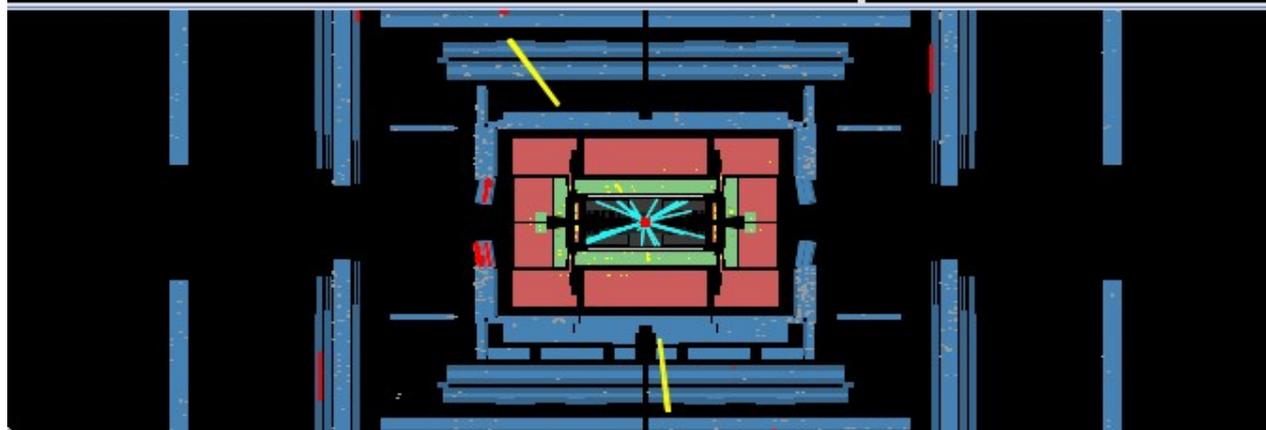
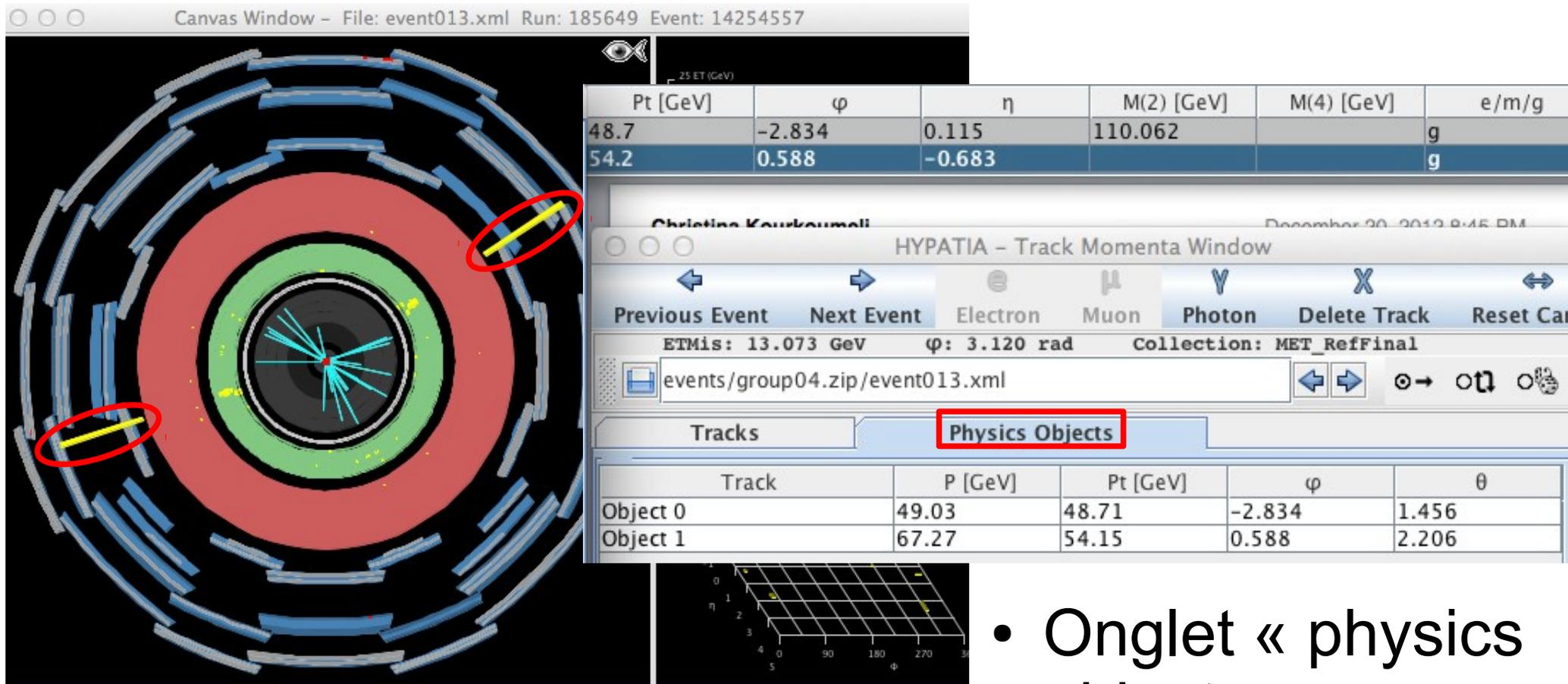
Identifier les photons avec Hypatia



- Ressemble à un électron
- Pas de trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

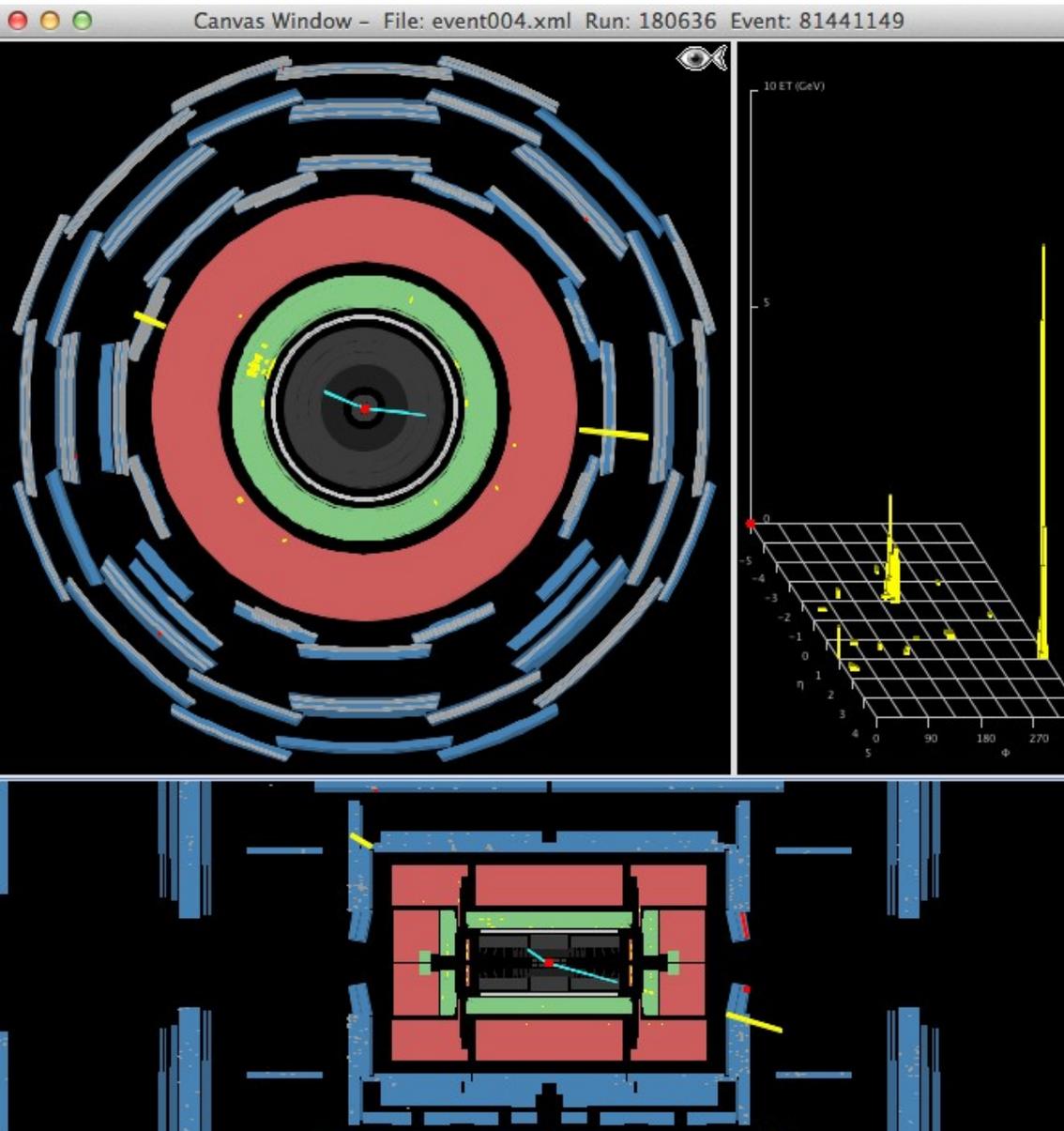


Identifier les photons avec Hypatia



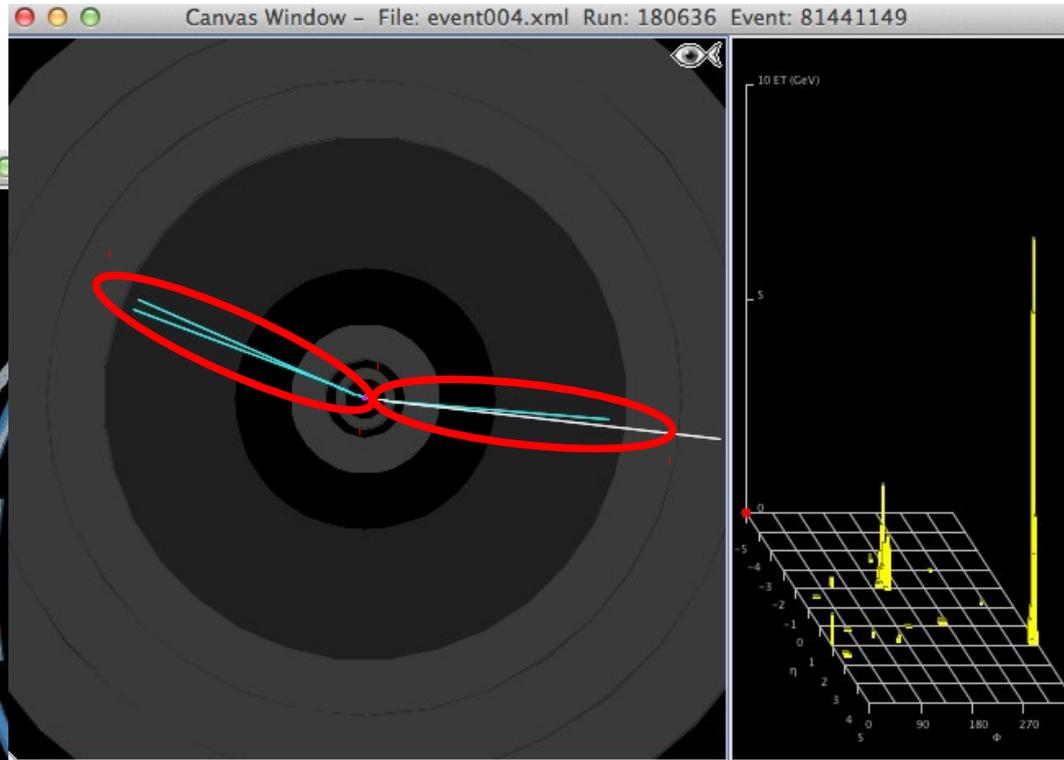
- Onglet « physics objects »
- Énergie dans le calorimètre
- Facile...

Identifier les photons avec Hypatia



- Le piège : les photons peuvent être « convertis » :
 $\gamma \rightarrow e^+e^-$
- Présence de traces...
- Il faut zoomer pour comprendre

Identifier les photons avec Hypatia



Pt [GeV]	ϕ	η	M(2) [GeV]	M(4) [GeV]	e/m/g
31.5	-0.097	1.941	0.087	134.282	e
8.1	-0.103	1.941			e
5.3	2.762	-1.210	0.097		e
12.7	2.750	-1.209			e

HYPATIA - Track Momenta Window

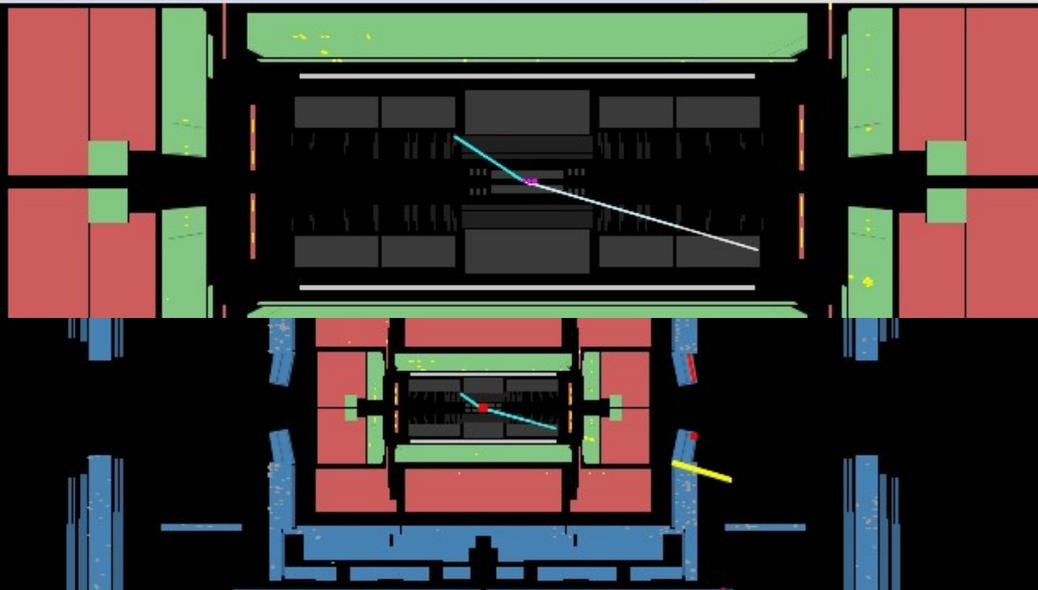
Previous Event Next Event Electron Muon Photon Delete Track Reset Can

ETMis: 13.100 GeV ϕ : 2.678 rad Collection: MET_Reffinal

events/group04.zip/event004.xml

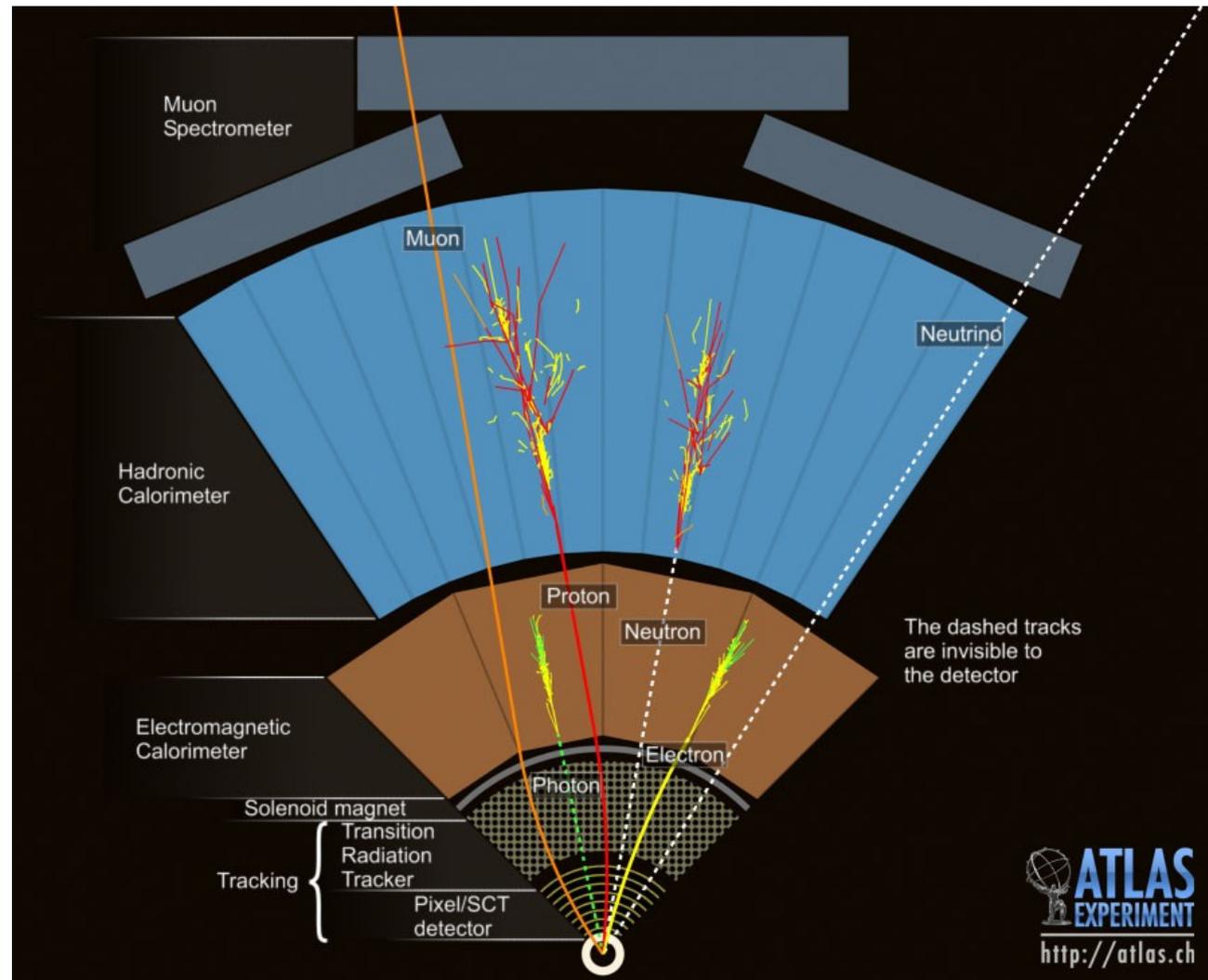
Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Tracks 0	+	111.98	31.51	-0.097	0.285
Tracks 1	-	28.94	8.14	-0.103	0.285
Tracks 36	+	9.59	5.25	2.762	2.562
Tracks 38	-	23.21	12.72	2.750	2.562

- En fait 2 traces très proches, de charges opposées
- Masse des traces proche de 0 = masse du photon

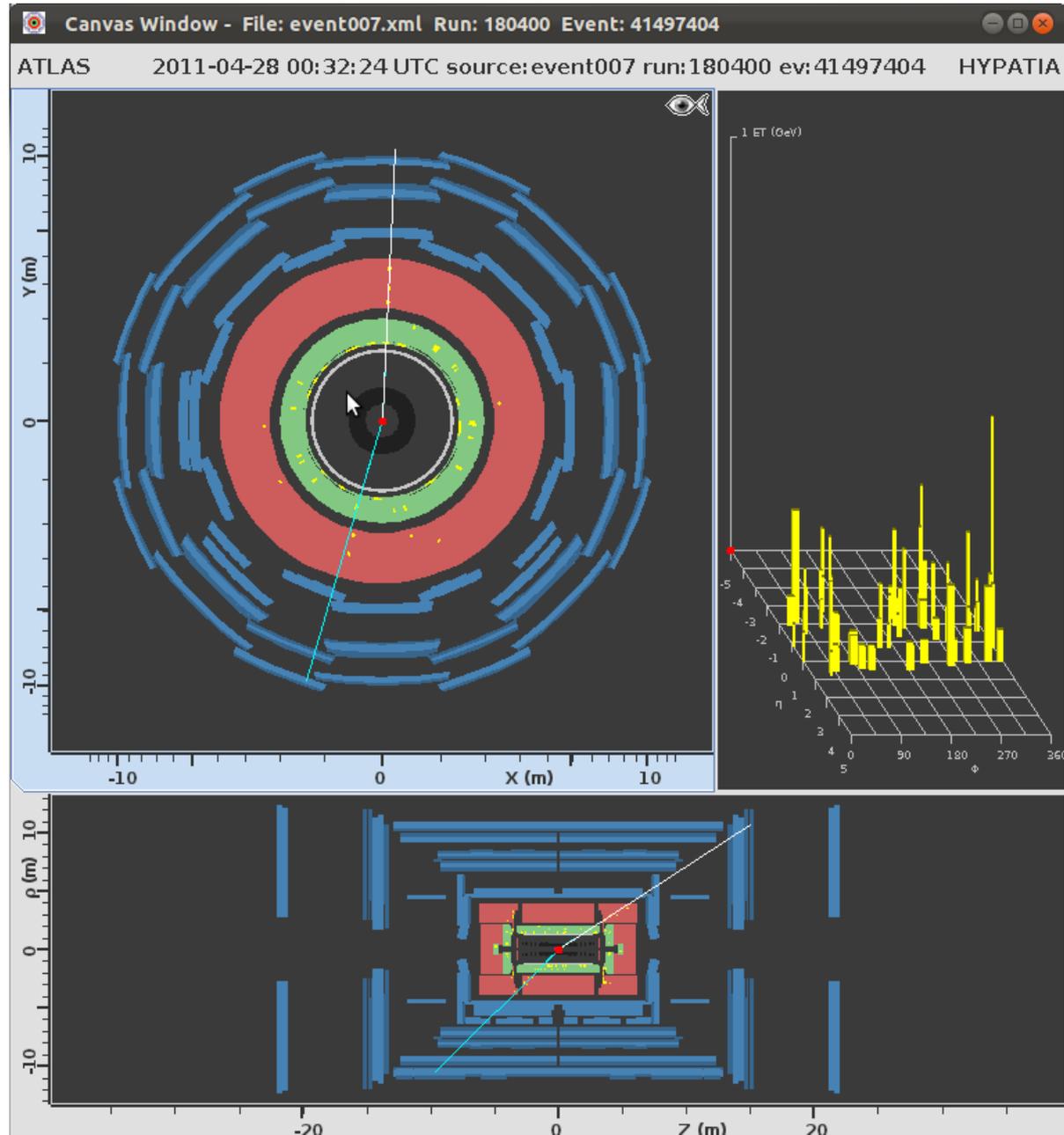


Identifier les muons et antimuons

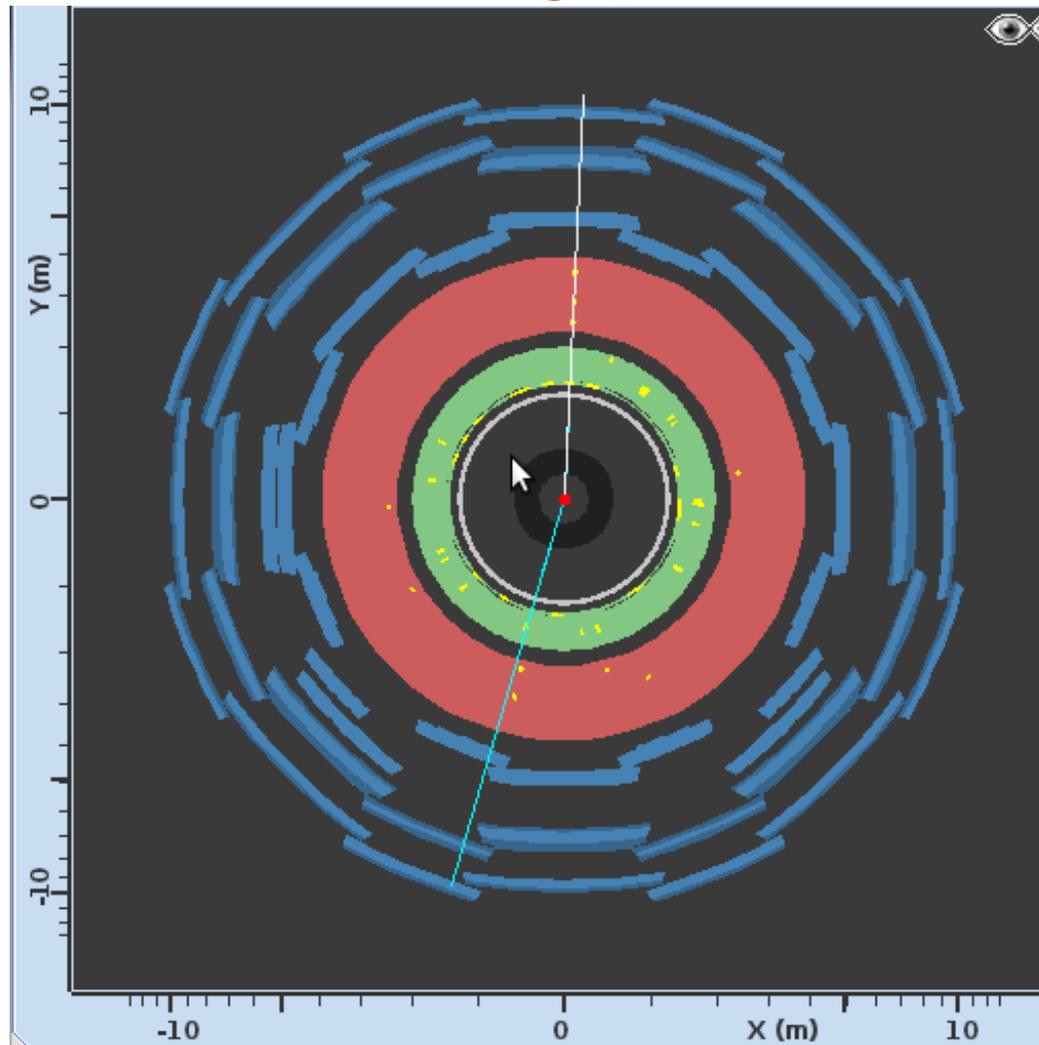
- Particule chargée, trace dans le trajectographe
- Un peu d'énergie dans le calorimètre
- Trace dans le détecteur à muons
- Courbure de la trace → signe de la charge électrique
- Continue sa course à l'extérieur d'ATLAS



Identifier les muons/antimuons avec Hypatia

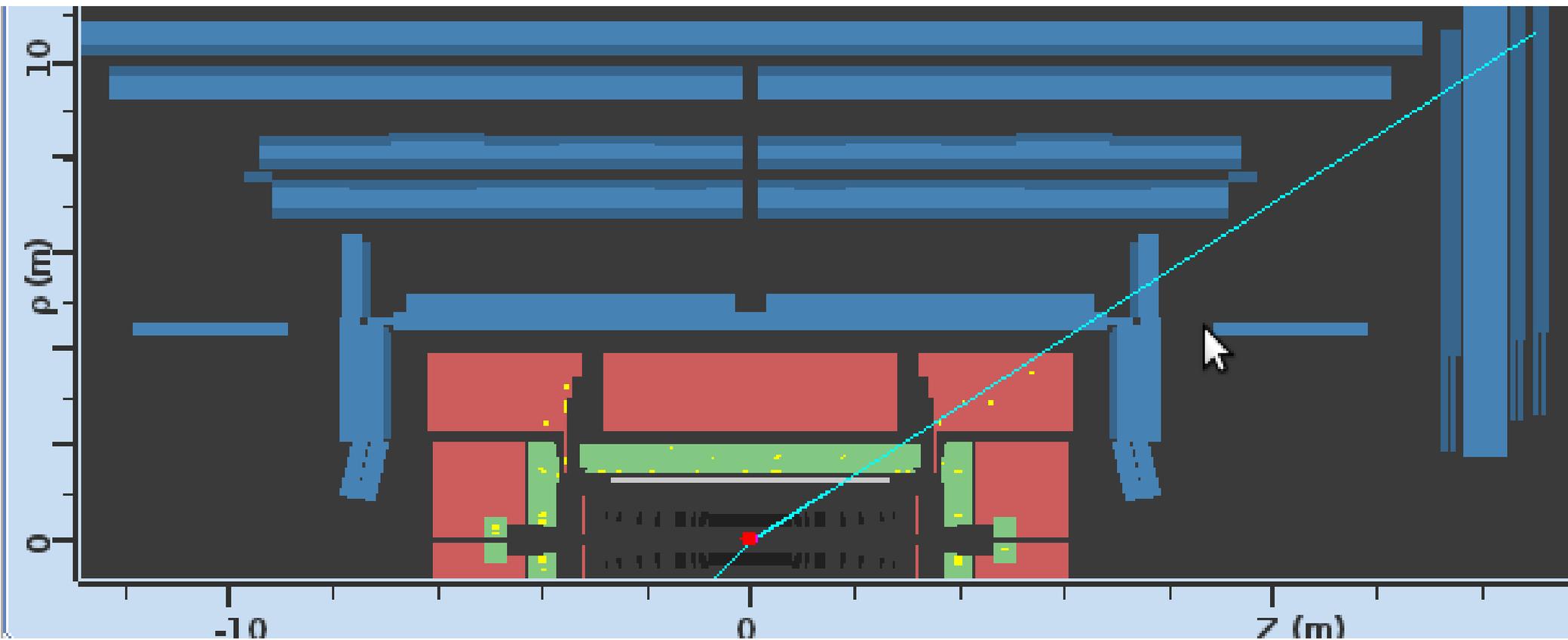


Identifier les muons/antimuons avec Hypatia



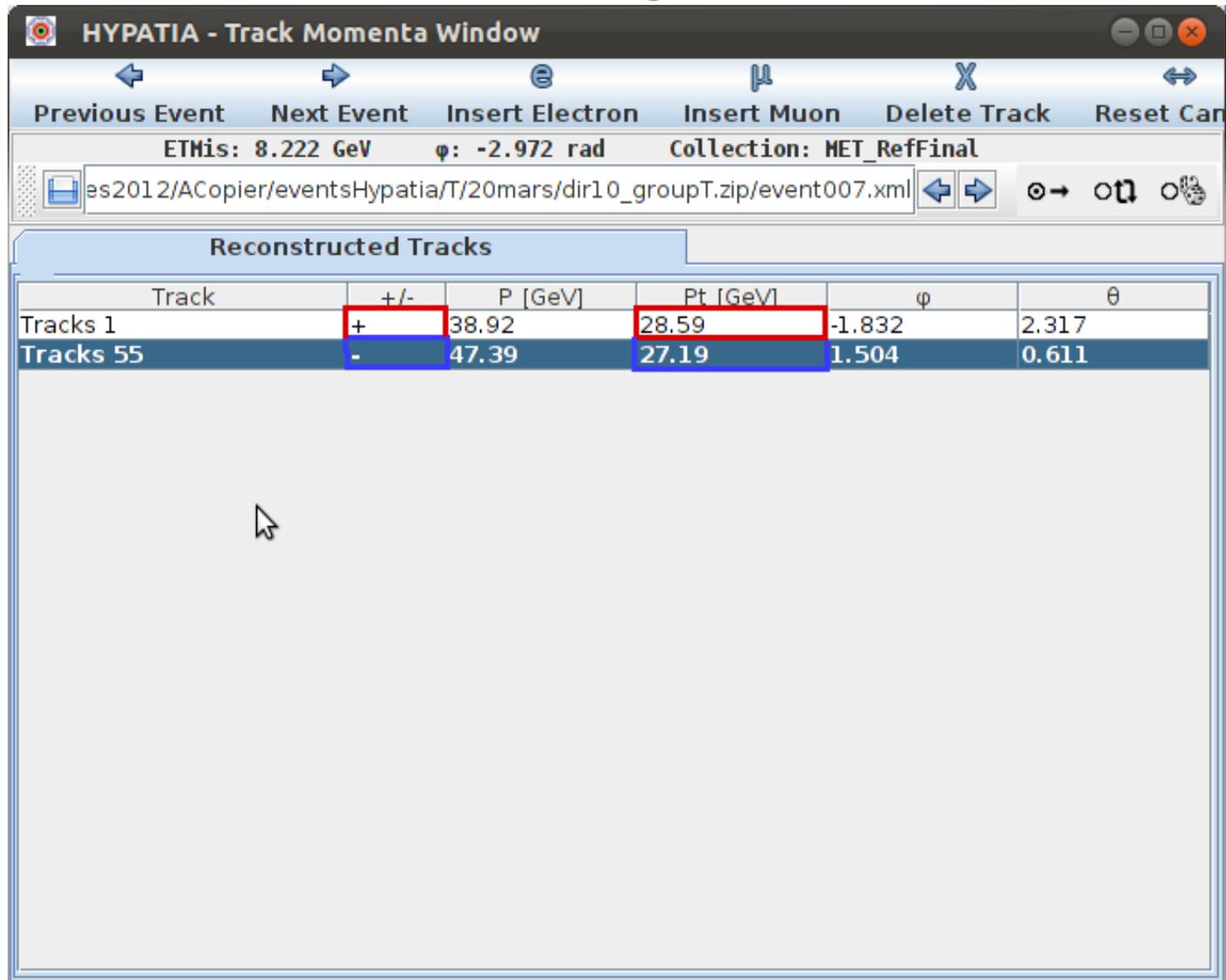
- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Parfois un peu d'énergie dans les calorimètres

Identifier les muons/antimuons avec Hypatia



- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Parfois un peu d'énergie dans les calorimètres

Identifier les muons/antimuons avec Hypatia



HYPATIA - Track Momenta Window

Previous Event Next Event Insert Electron Insert Muon Delete Track Reset Car

ETHis: 8.222 GeV ψ : -2.972 rad Collection: MET_RefFinal

es2012/ACopier/eventsHypatia/T/20mars/dir10_groupT.zip/event007.xml

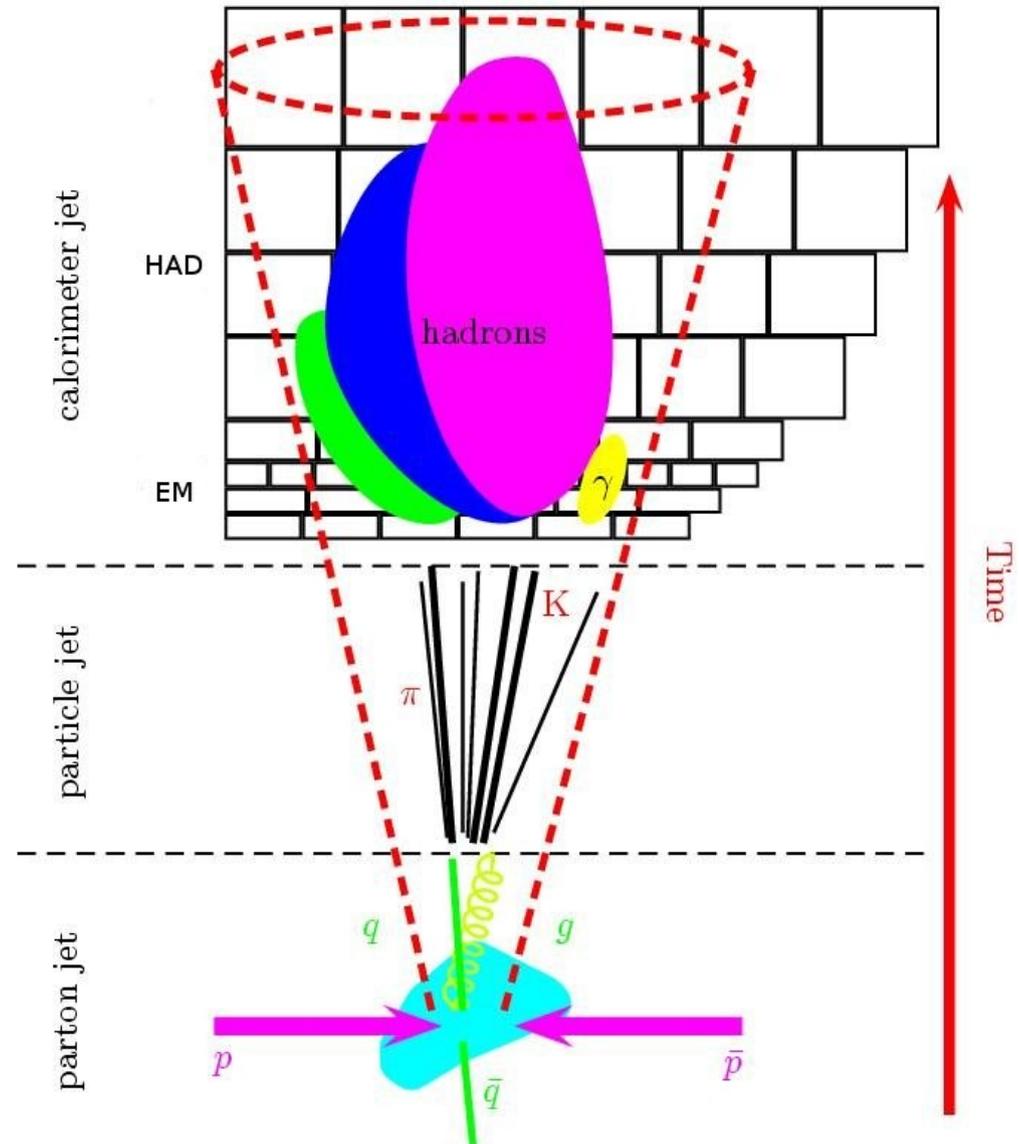
Reconstructed Tracks

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Tracks 1	+	38.92	28.59	-1.832	2.317
Tracks 55	-	47.39	27.19	1.504	0.611

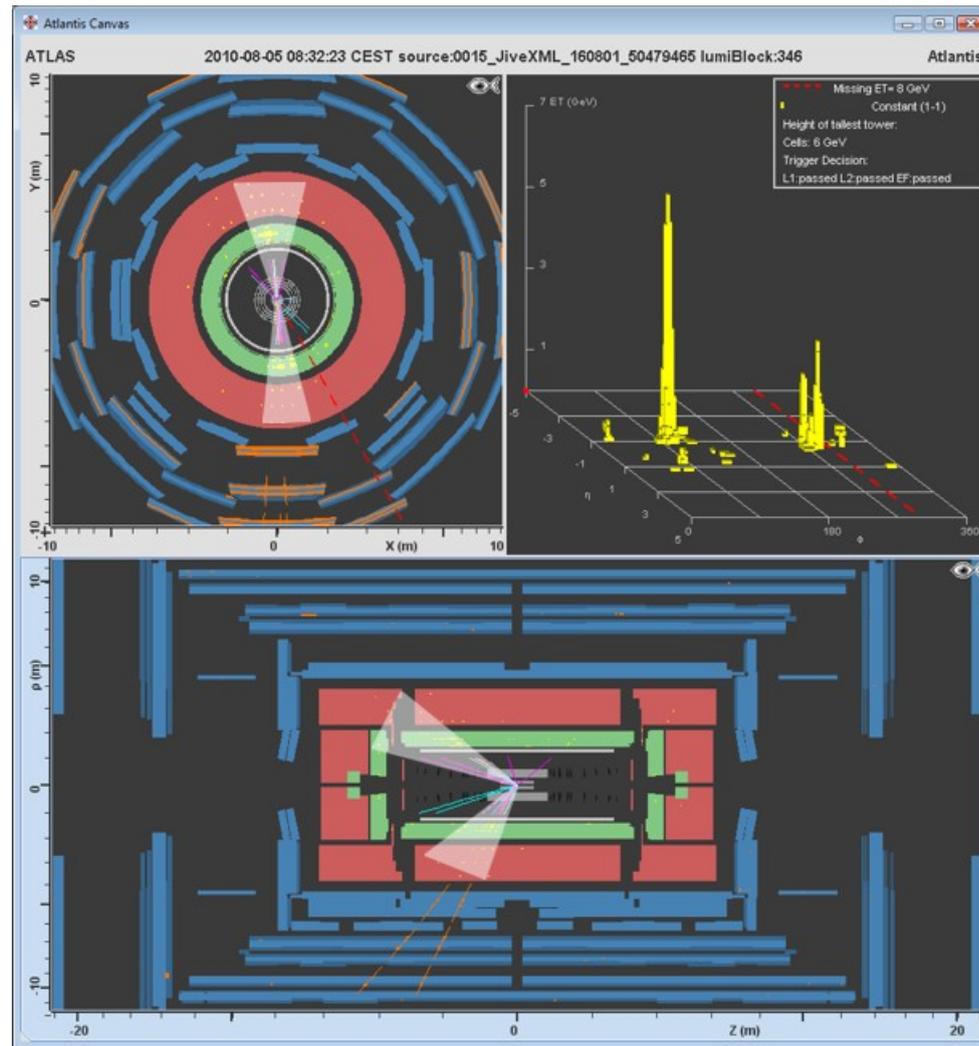
- charge **négative** → muon, **positive** → antimuon

Identifier les quarks/antiquarks et gluons

- Jamais seuls, forment des hadrons
- Gerbes dans le calorimètre électromagnétique et surtout hadronique
- Particules chargées, traces dans le trajectographe

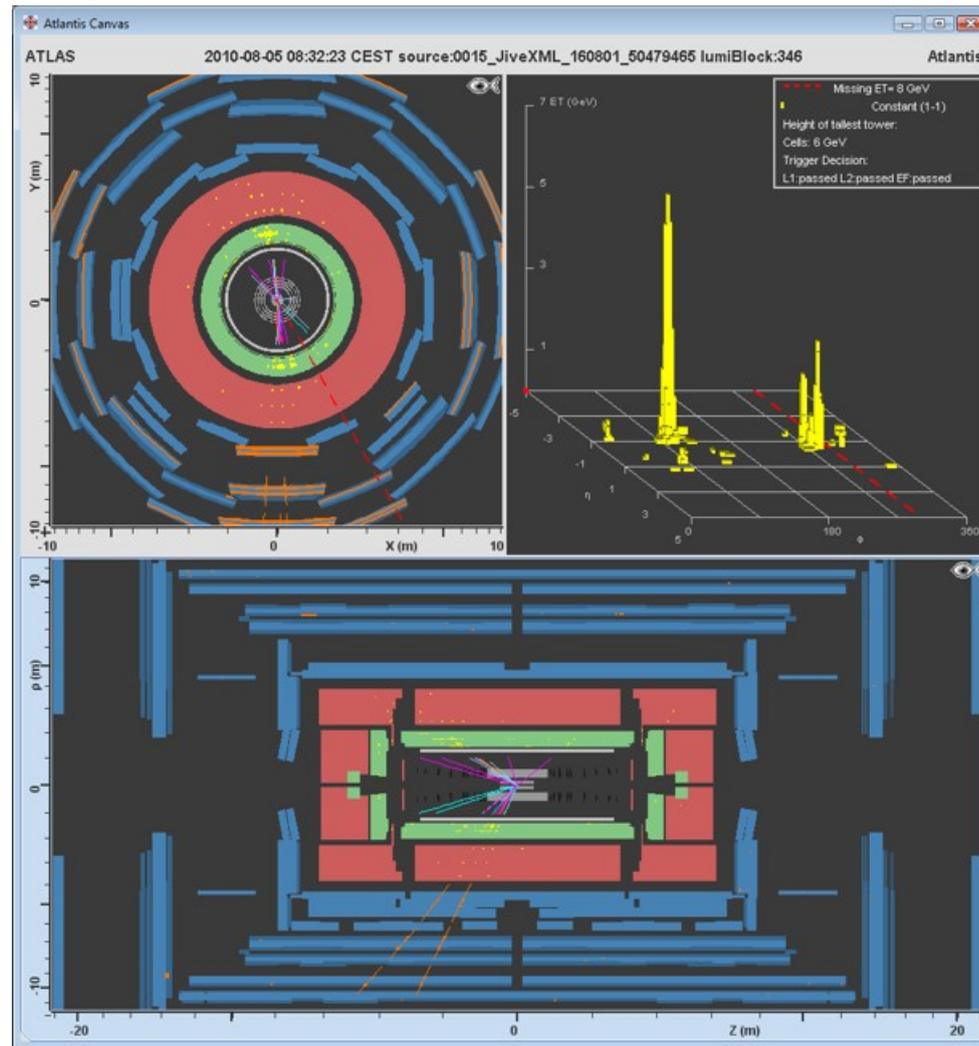


Identifier les jets avec Hypatia



- Nombreuses particules → nombreuses traces
- Dépôts d'énergie dans les calorimètres (surtout hadronique)

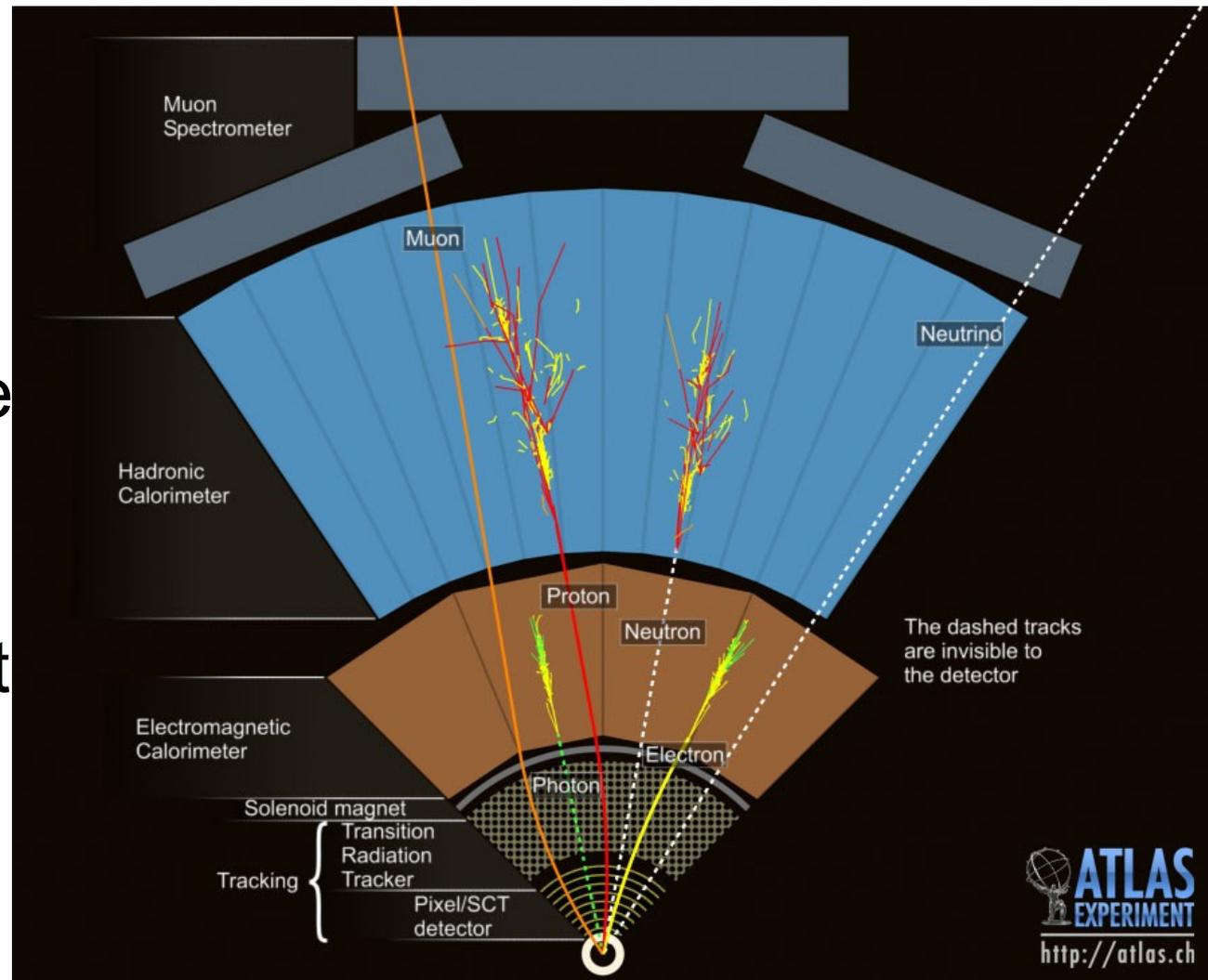
Identifier les jets avec Hypatia



- Nombreuses particules → nombreuses traces
- Dépôts d'énergie dans les calorimètres (surtout hadronique)

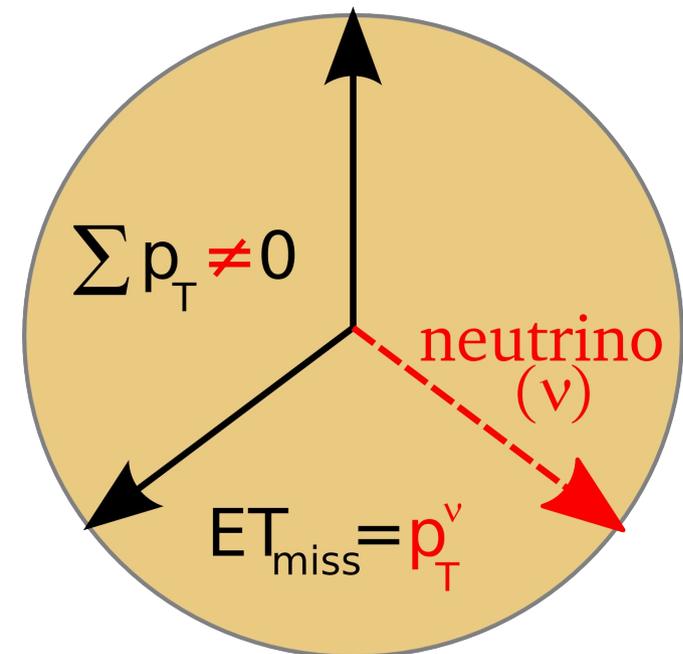
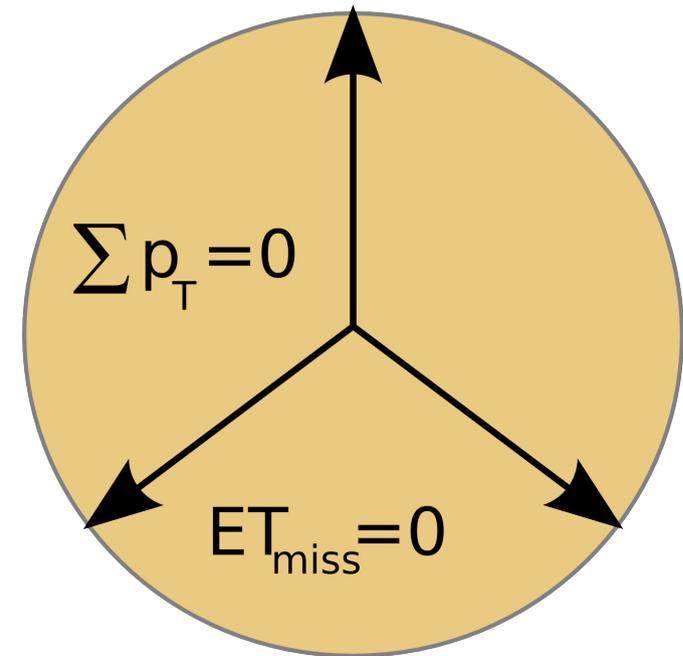
Identifier les neutrinos

- Particule neutre qui n'interagit presque pas avec la matière
- Aucune trace dans le détecteur
- Identifié par induction, en utilisant la conservation de l'impulsion

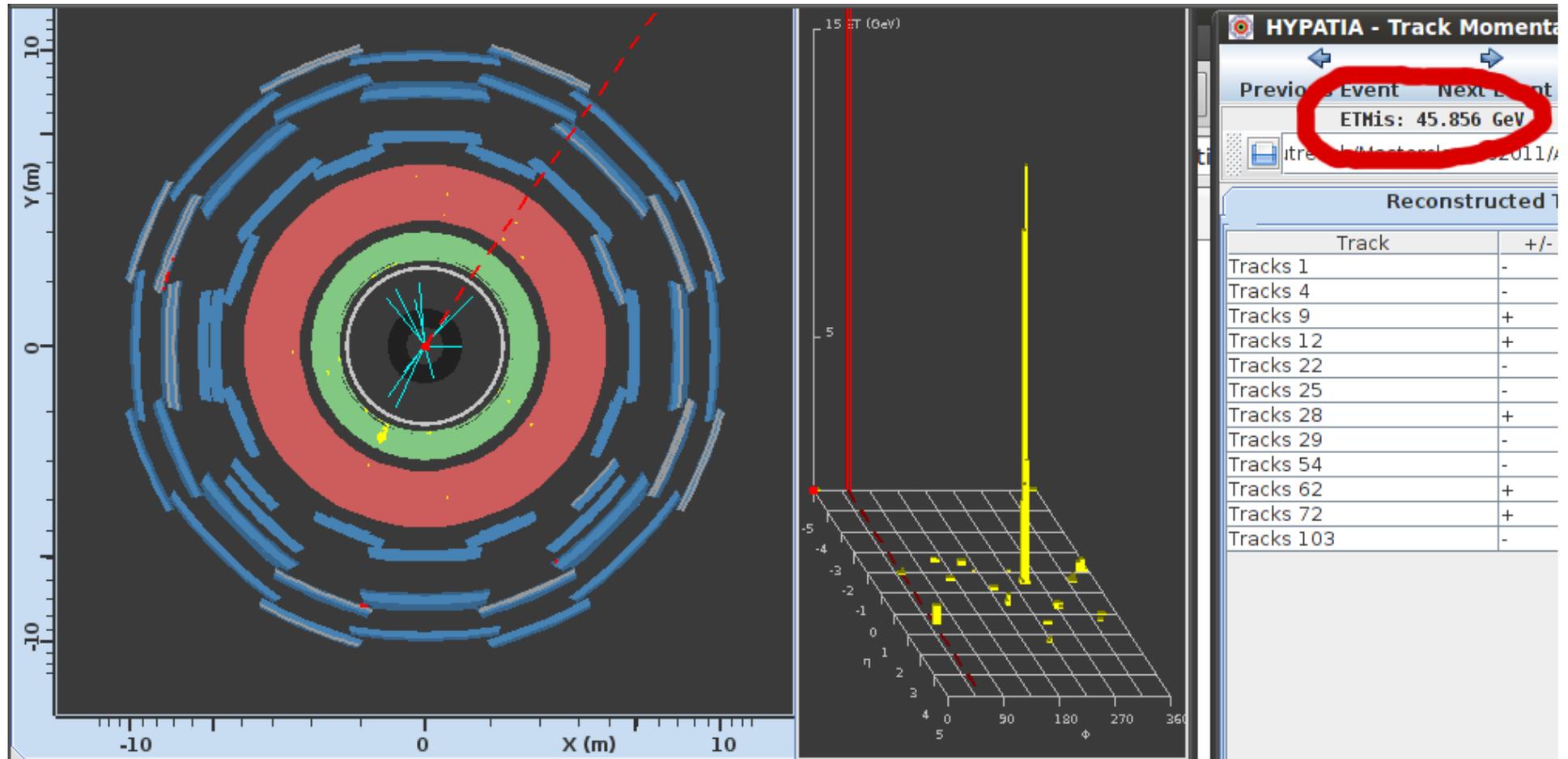


Energie transverse manquante

- Sans neutrino
 - ▶ 3 particules reconstruites
 - ▶ Somme des impulsions dans le plan transverse : 0
 - ▶ Donc $E_{T\text{miss}} = 0$
- Avec un neutrino
 - ▶ On « voit » seulement une partie de l'événement
 - ▶ La somme des impulsions n'est pas nulle
 - ▶ La différence est $E_{T\text{miss}}$, associée au neutrino



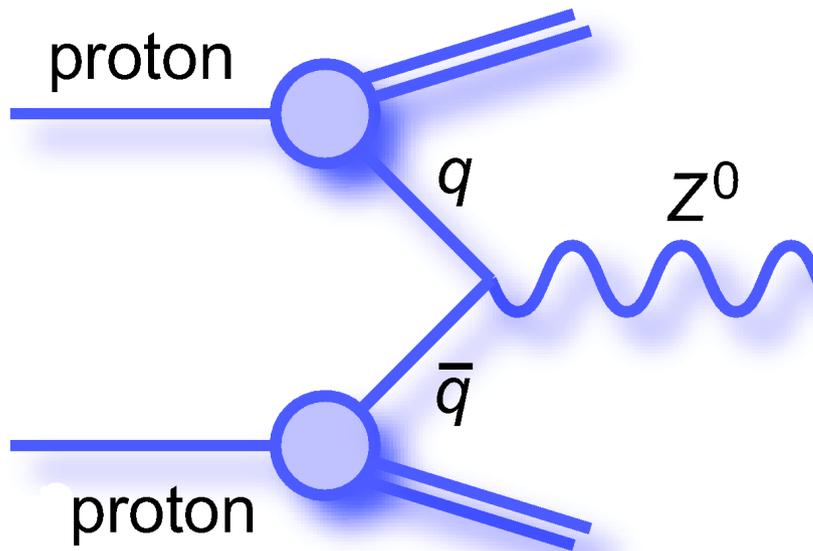
Identifier un neutrino avec Hypatia



- Par conservation, somme des impulsions dans le plan transverse = 0
- Sinon, « énergie transverse manquante (ETMis) » : particules indétectables (ex : neutrinos), non détectées ou mal mesurées

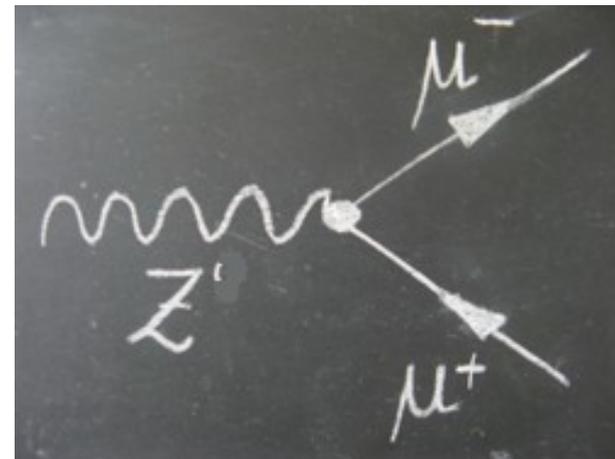
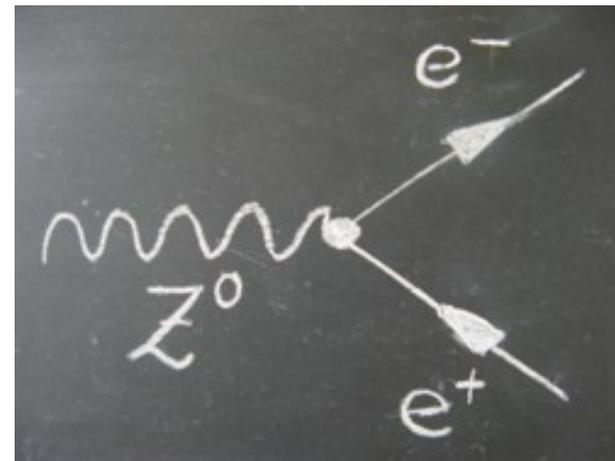
Analyse : observer des résonances, comme des bosons Z

Production



- Fusion d'un quark et d'un antiquark
- Antiquark dans la « soupe » à l'intérieur du proton

Désintégration



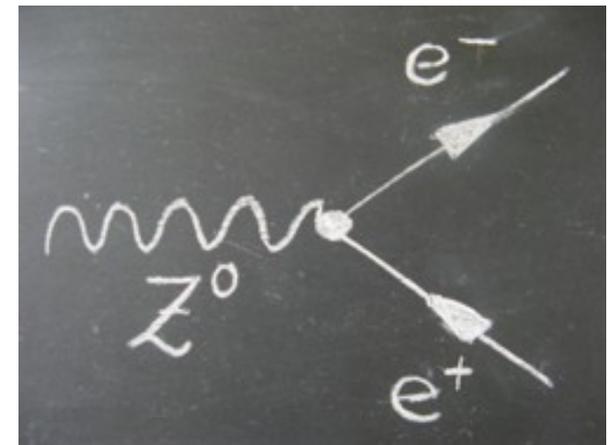
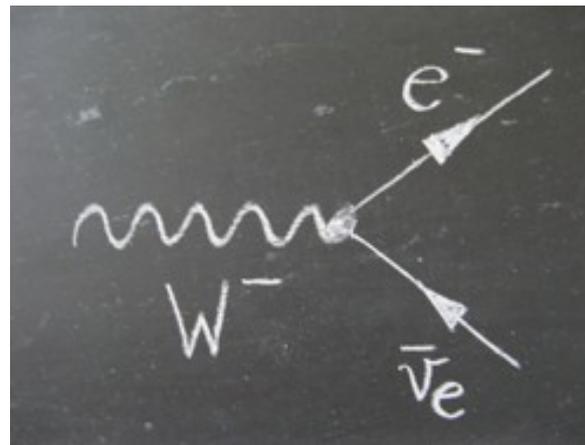
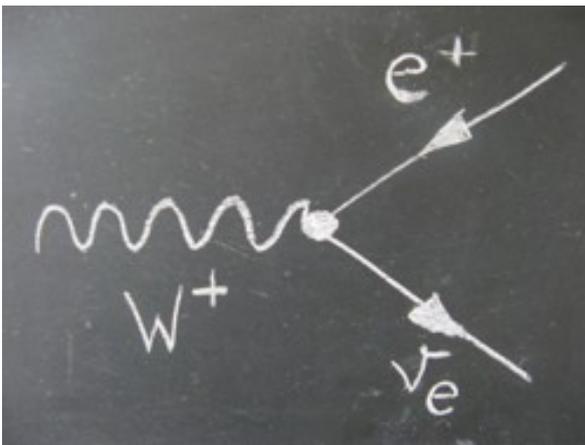
Difficulté : le bruit de fond

- Signature similaire à ce que l'on cherche, mais venant d'une source différente
- Peut être un vrai processus qui fournit le même état final
- Ou bien dû au fait qu'une particule n'est pas vue dans le détecteur
 - par exemple s'échappe le long du faisceau
- Ou bien à une mauvaise reconstruction dans le détecteur
 - il y a un jet et je crois que c'est un électron
- Ou encore à la présence d'autres particules dans l'événement
 - chaque événement contient plusieurs collisions

Exemple de signal et bruit de fond

- Bruit de fond : désintégration de bosons $W \rightarrow e\nu$
- Si un jet supplémentaire est pris pour un électron, cela peut ressembler à un Z

- Signal : $Z \rightarrow ee$



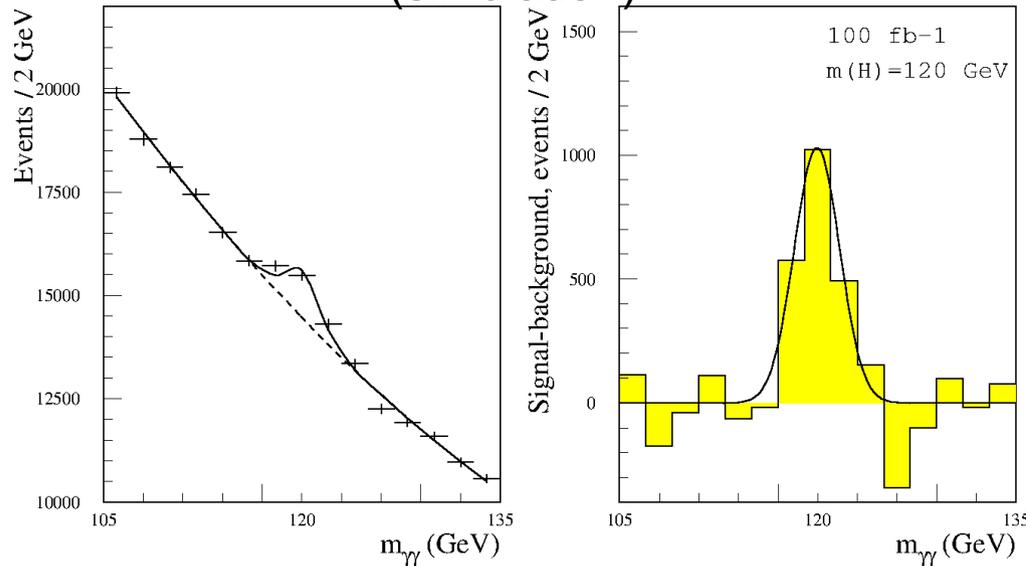
- Si on cherche des événements W , alors les Z peuvent être un bruit de fond !

Et vous ?

- Recherche de bosons Z
 - ▶ et d'autres résonances se désintégrant en deux leptons
- Recherche du boson de Higgs
 - ▶ $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^- / e^+e^-\mu^+\mu^- / \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$
 - ▶ $H \rightarrow \gamma\gamma$

Observer des bosons de Higgs

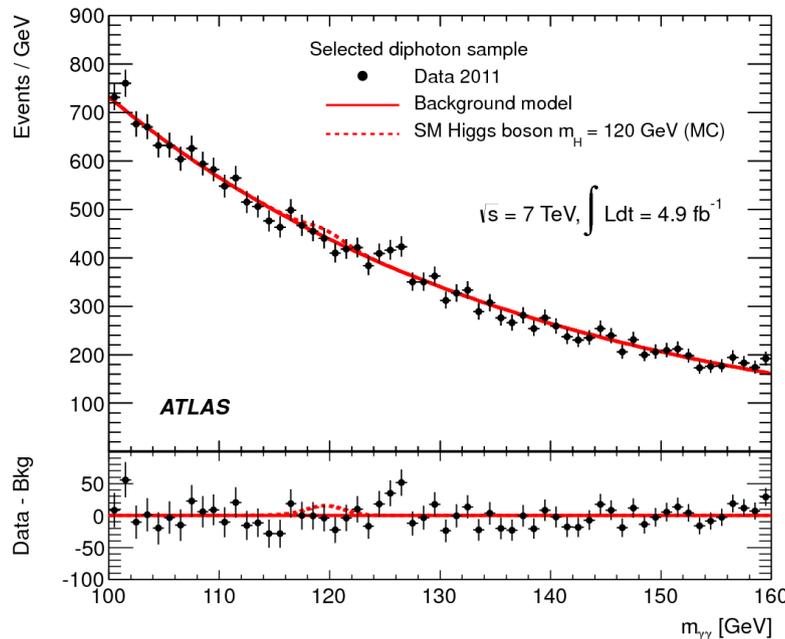
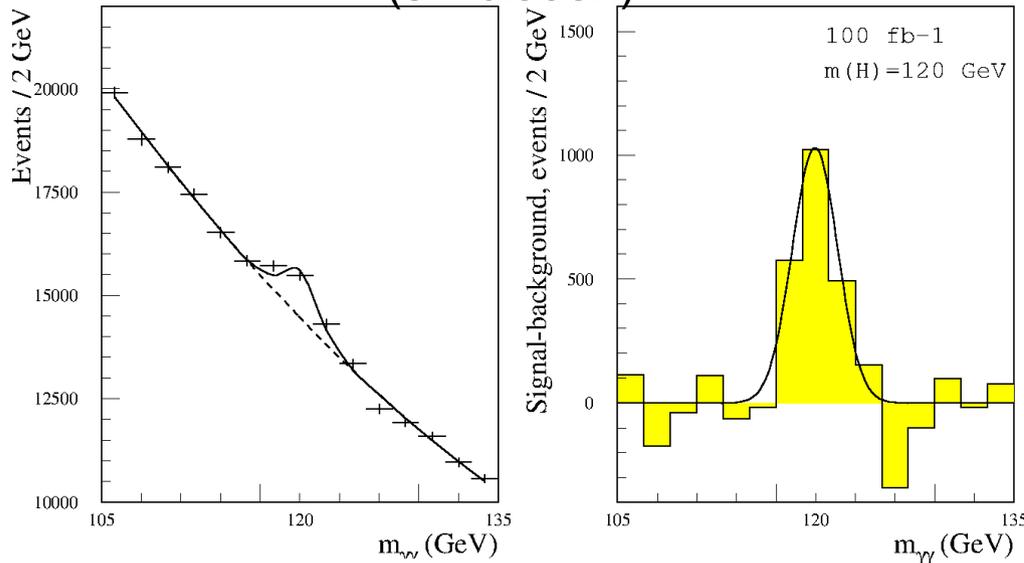
Masse invariante $\gamma\gamma$ avec beaucoup de données
(simulation)



- Si les deux photons (γ) proviennent de la désintégration d'une particule, on obtient la masse de cette particule
- Les mesures ne sont pas parfaites
 - petites variations autour d'une moyenne
- Ici : boson de Higgs de masse 120 GeV
- Le continuum sous le pic est dû au bruit de fond, où les deux particules combinées ne sont pas des paires $\gamma\gamma$ ou ne proviennent pas de la même désintégration

Observer des bosons de Higgs

Masse invariante $\gamma\gamma$ avec beaucoup de données (simulation)



$m_{\gamma\gamma}$ avec 20 fois moins de données (ATLAS, mars 2012)

- Si les deux photons (γ) proviennent de la désintégration d'une particule, on obtient la masse de cette particule
- Les mesures ne sont pas parfaites
 - petites variations autour d'une moyenne
- Ici : boson de Higgs de masse 120 GeV
- Le continuum sous le pic est dû au bruit de fond, où les deux particules combinées ne sont pas des paires $\gamma\gamma$ ou ne proviennent pas de la même désintégration

Liens

Nos présentations



indico.in2p3.fr/event/Masterclasses2014

Les Masterclasses

physicsmasterclasses.org

ATLAS grand public



atlas.ch

ATLAS en direct

atlas-live.cern.ch

ATLAS sur



twitter.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.facebook.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.google.com/+ATLASexperiment

ATLAS sur



www.youtube.com/theATLASExperiment

Site français du



www.lhc-france.fr

Le CPPM



marwww.in2p3.fr

Le CERN



cern.ch

Le CERN sur



twitter.com/cern