

Accélérateurs et détecteurs

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

INTERNATIONAL

MASTERCLASSES

hands on particle physics Mars 2013



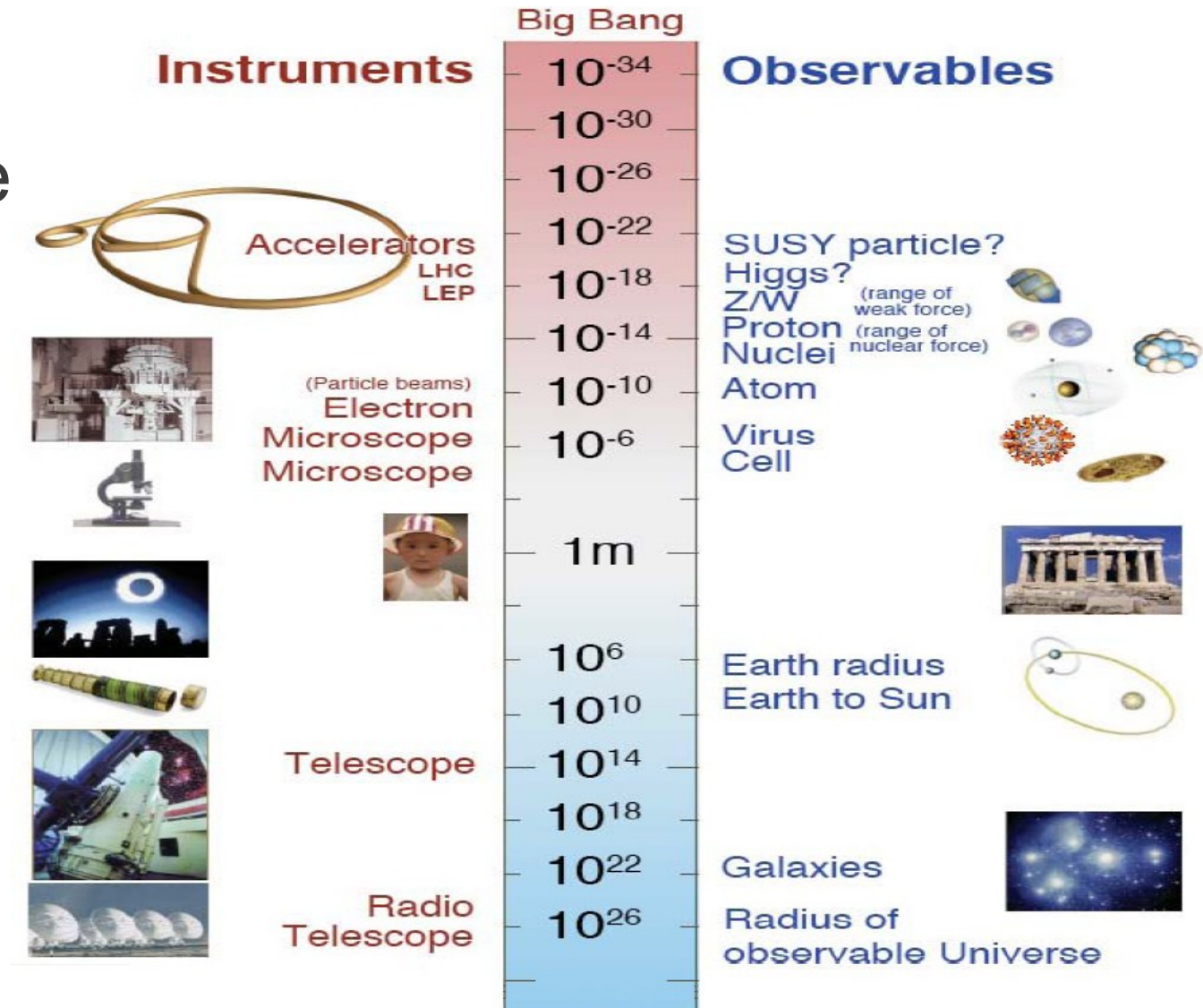
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- 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

- $E = mc^2$



Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

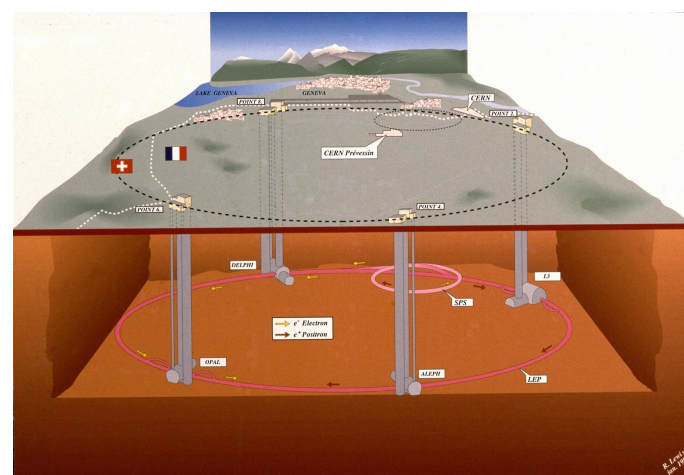
- Au CERN, Genève
- Collisions e^+e^-
- 1989-2000

- 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



Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C), plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K), avec de l'hélium superfluide pour rendre les câbles supraconducteurs et générer un champ magnétique de 8,3 T (200000 fois le champ magnétique terrestre)

Le LHC : la machine à superlatifs



1232 dipôles.
Un dipôle :
15 m de long
35 tonnes

Le LHC : la machine à superlatifs

Longueur des câbles supraconducteurs :
assez pour 5 aller-retours Terre-soleil



Le LHC : la machine à superlatifs

Vide presque parfait (10^{-13} atm) :
pression 10 fois plus faible
que sur la Lune



Le LHC : la machine à superlatifs



Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.
Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol,
mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !

LHC, le grand collisionneur de hadrons

film



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grands détecteurs
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des
1998-2008	Construction du L
Septembre 2008	Mise en service,
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

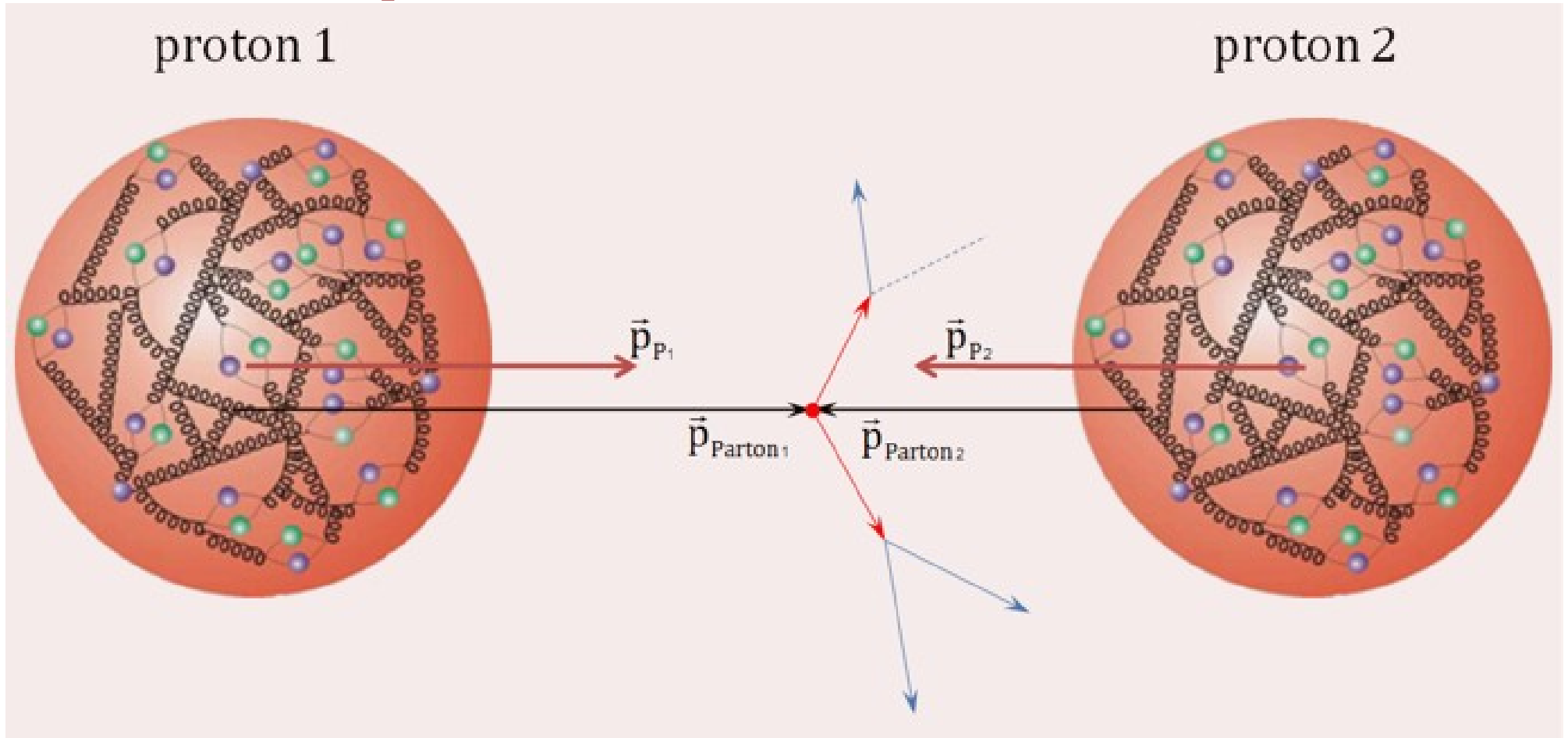
1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

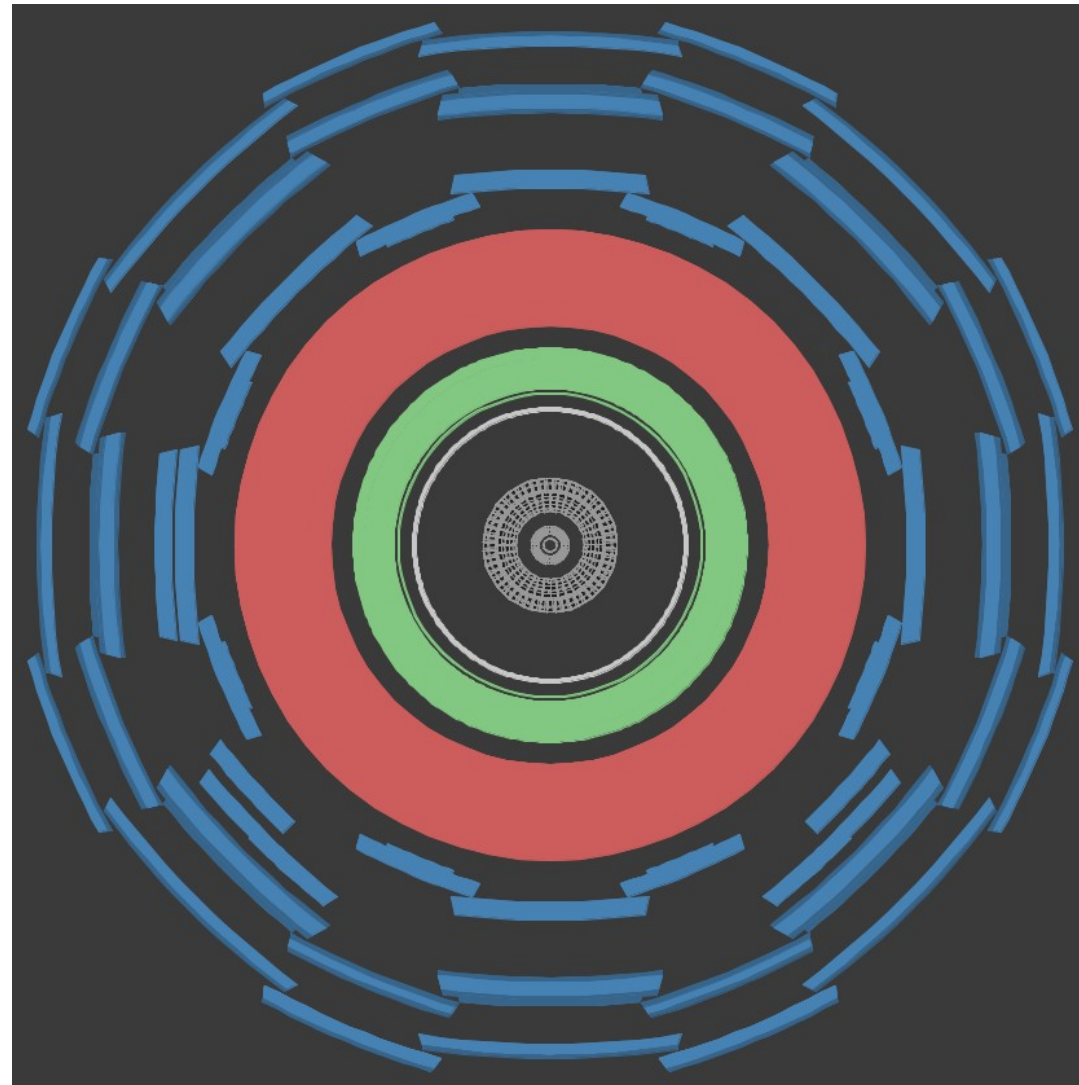
Deux protons se rencontrent...



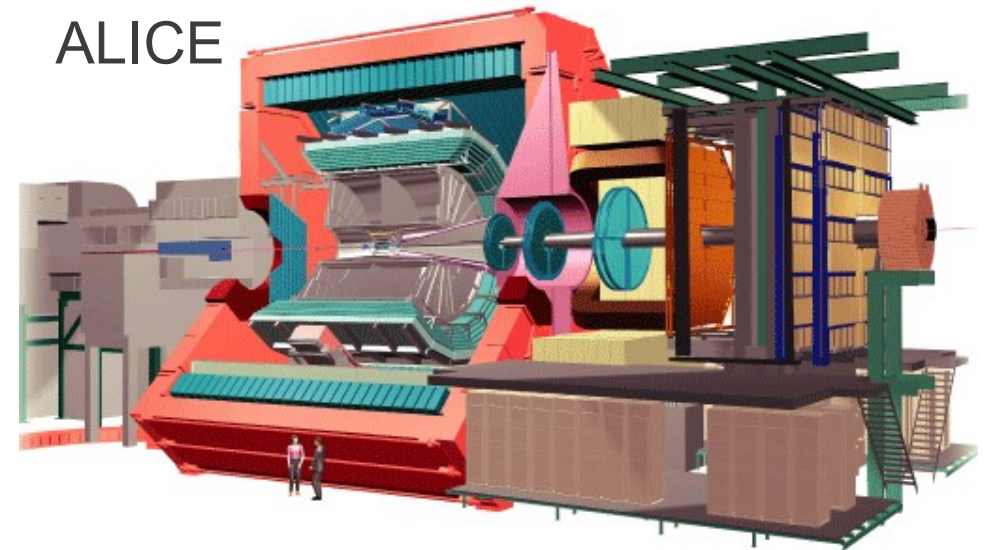
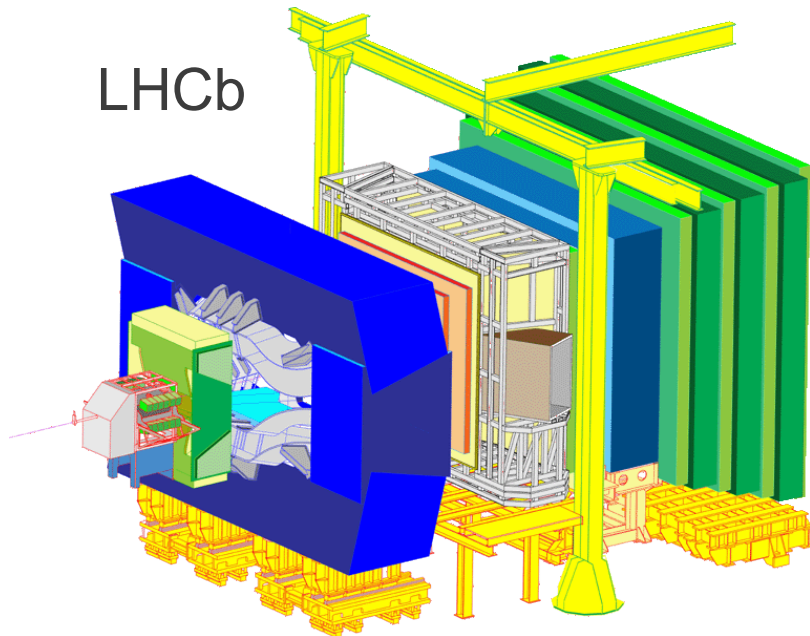
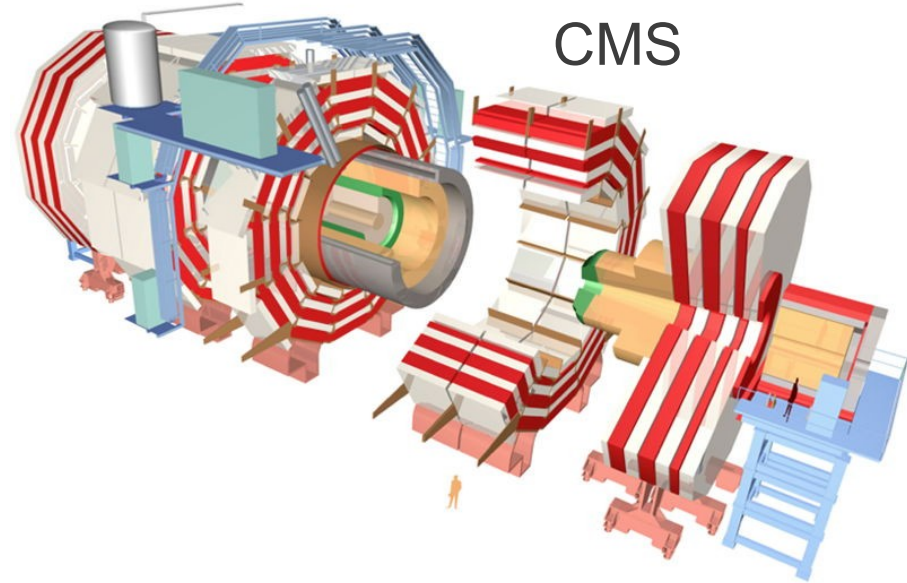
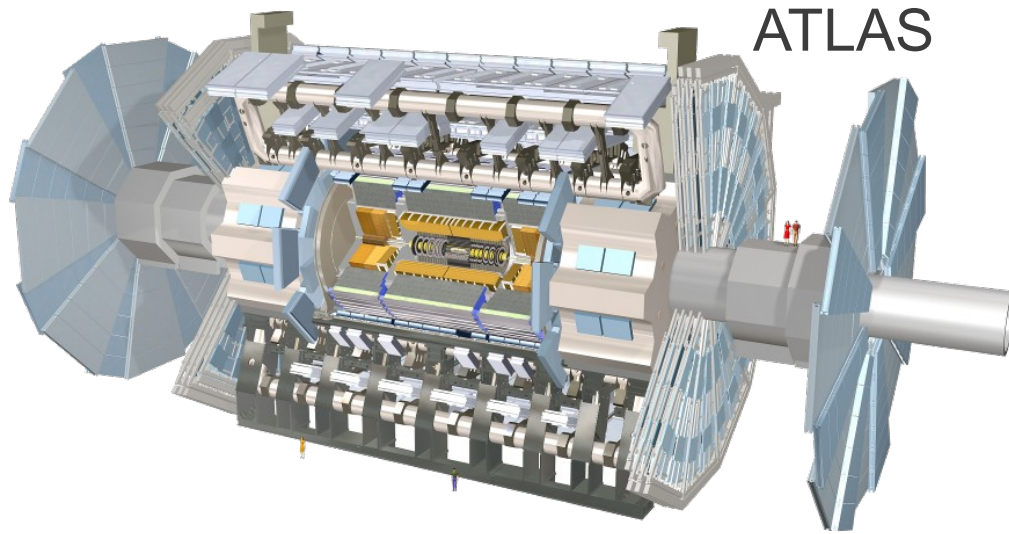
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

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



Des détecteurs géants



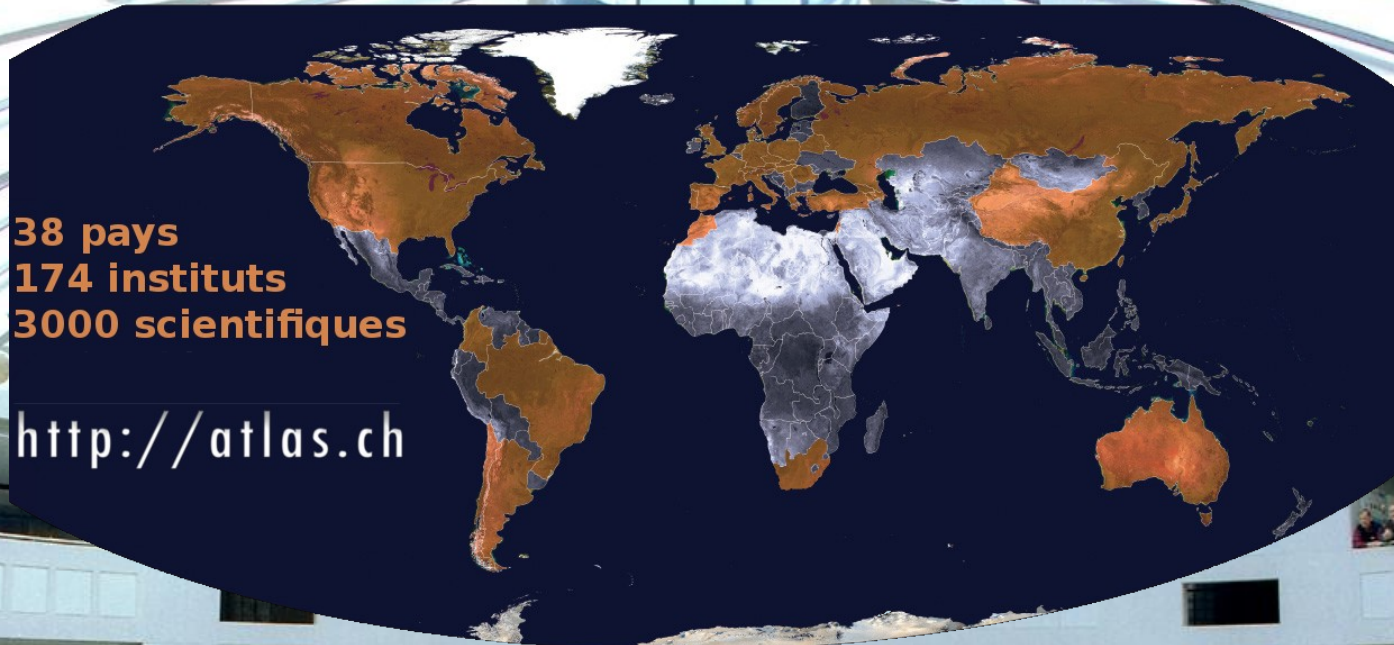
La collaboration ATLAS



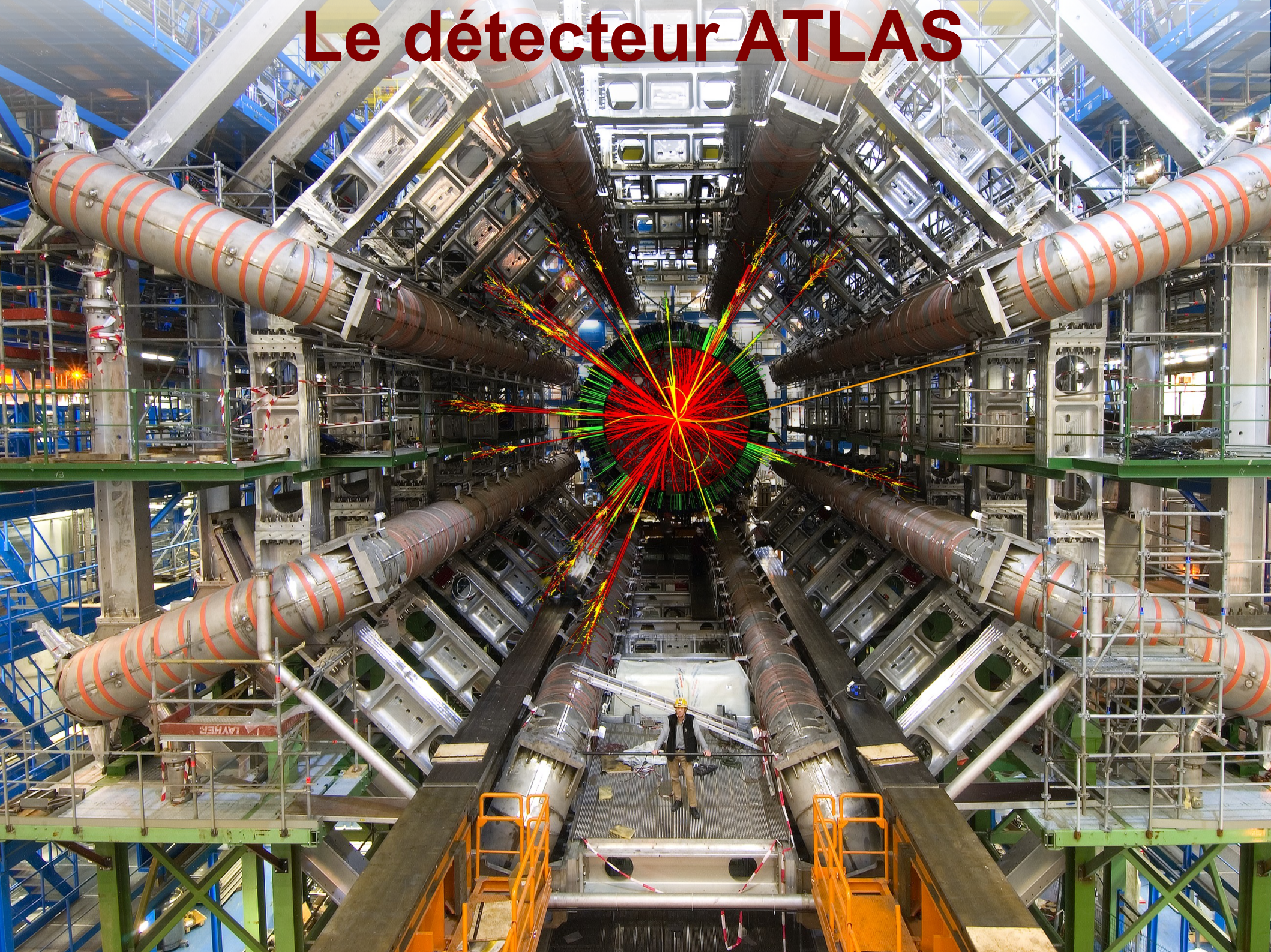
La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

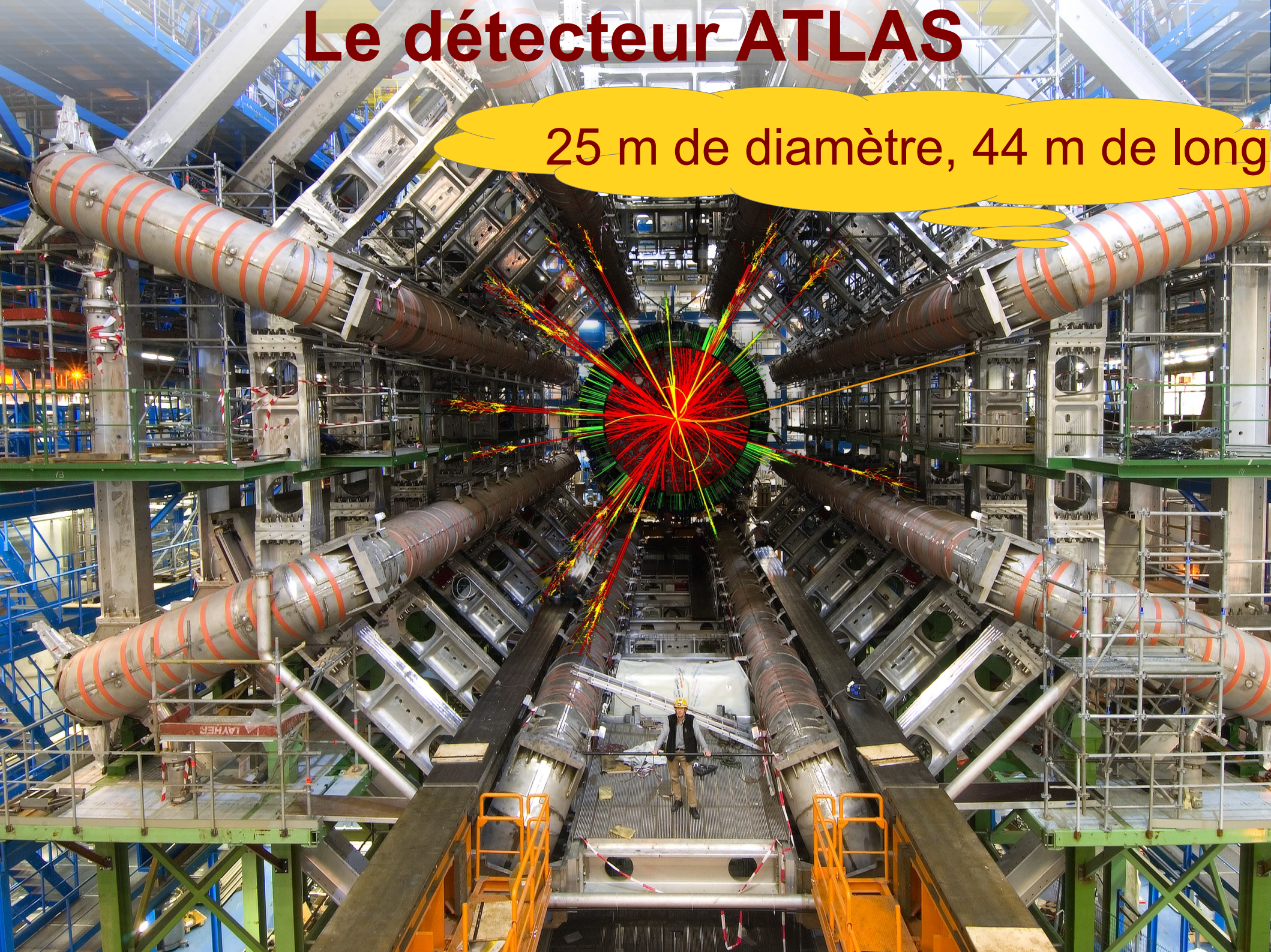


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

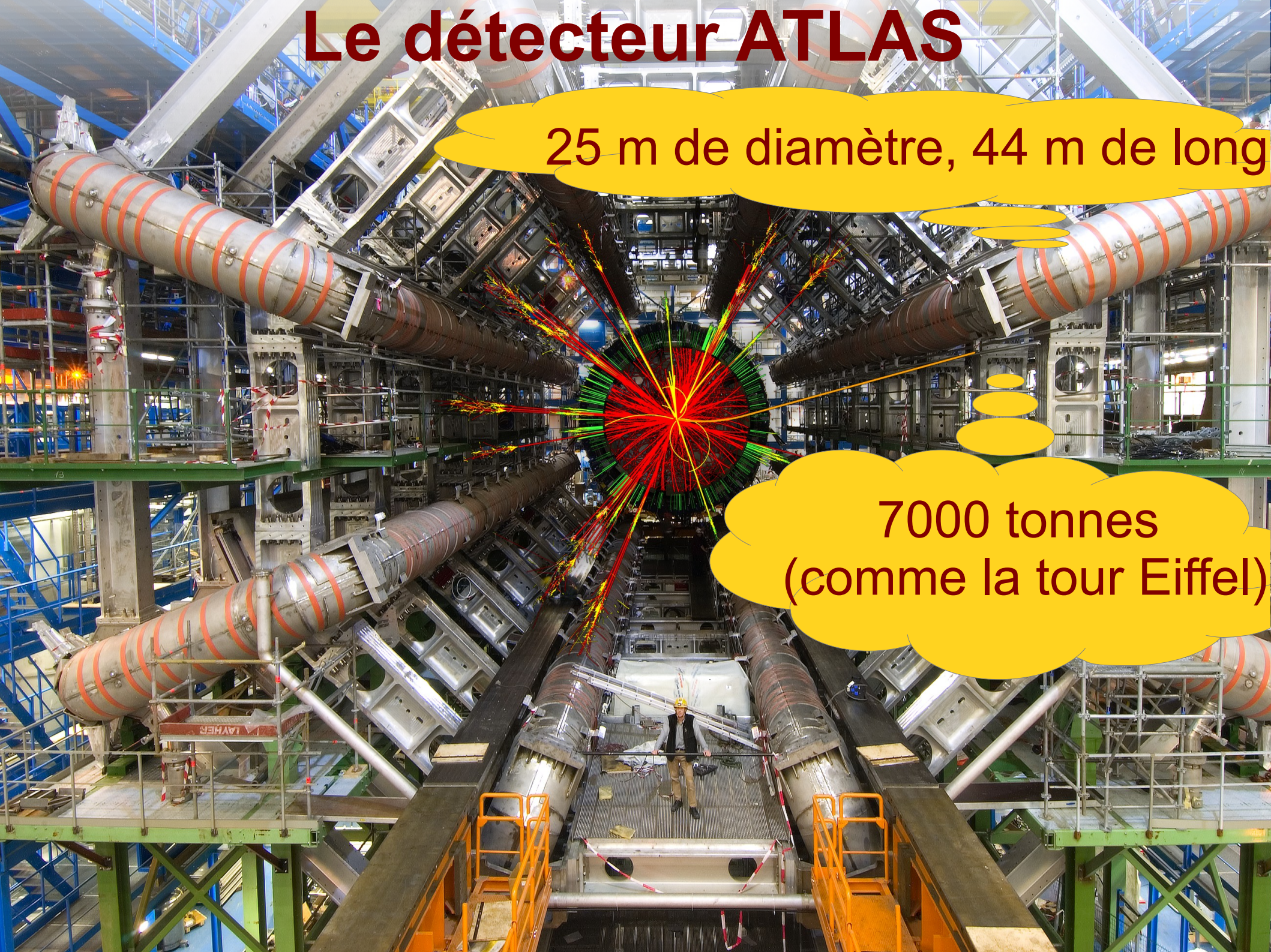
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

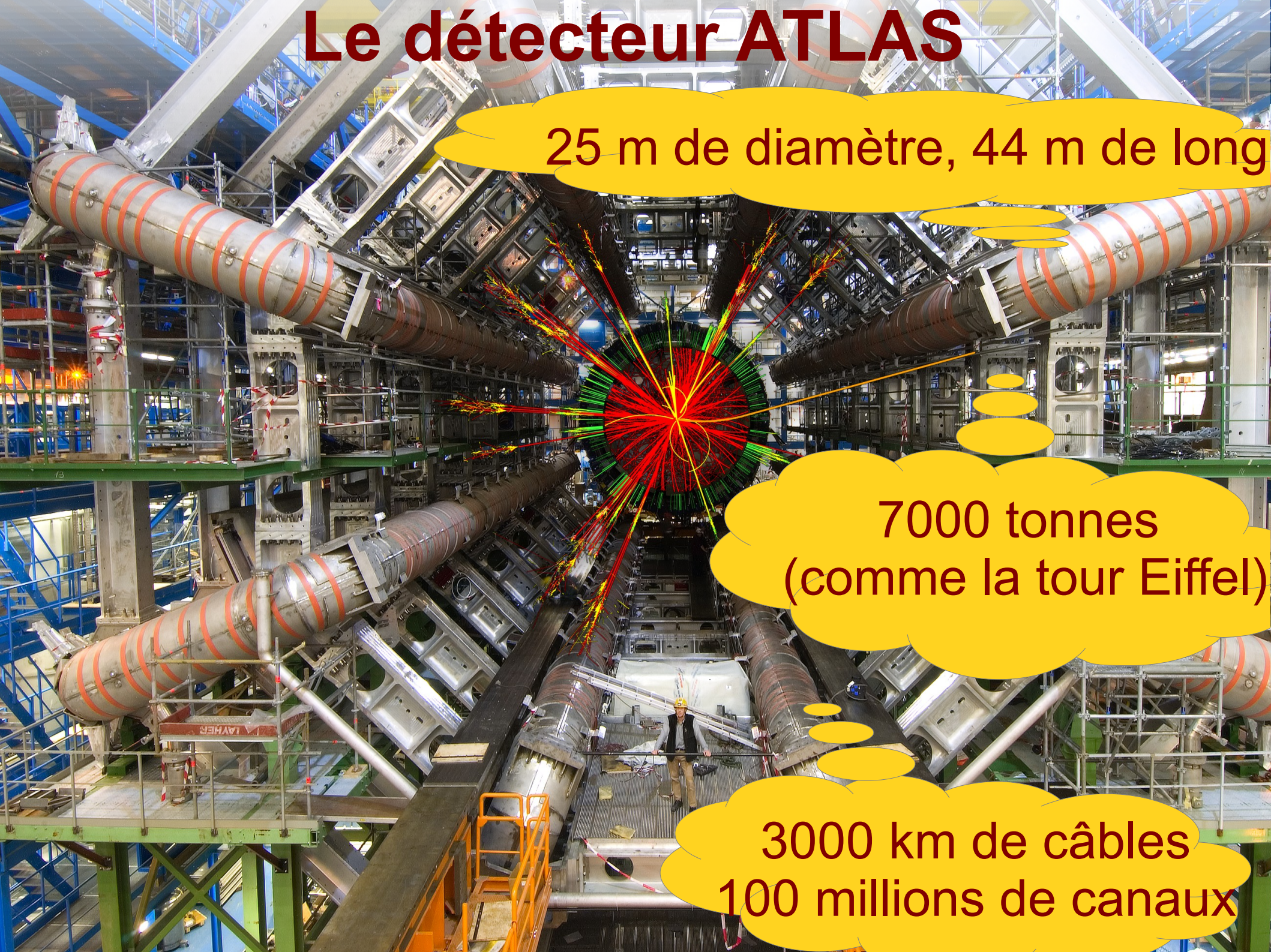


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



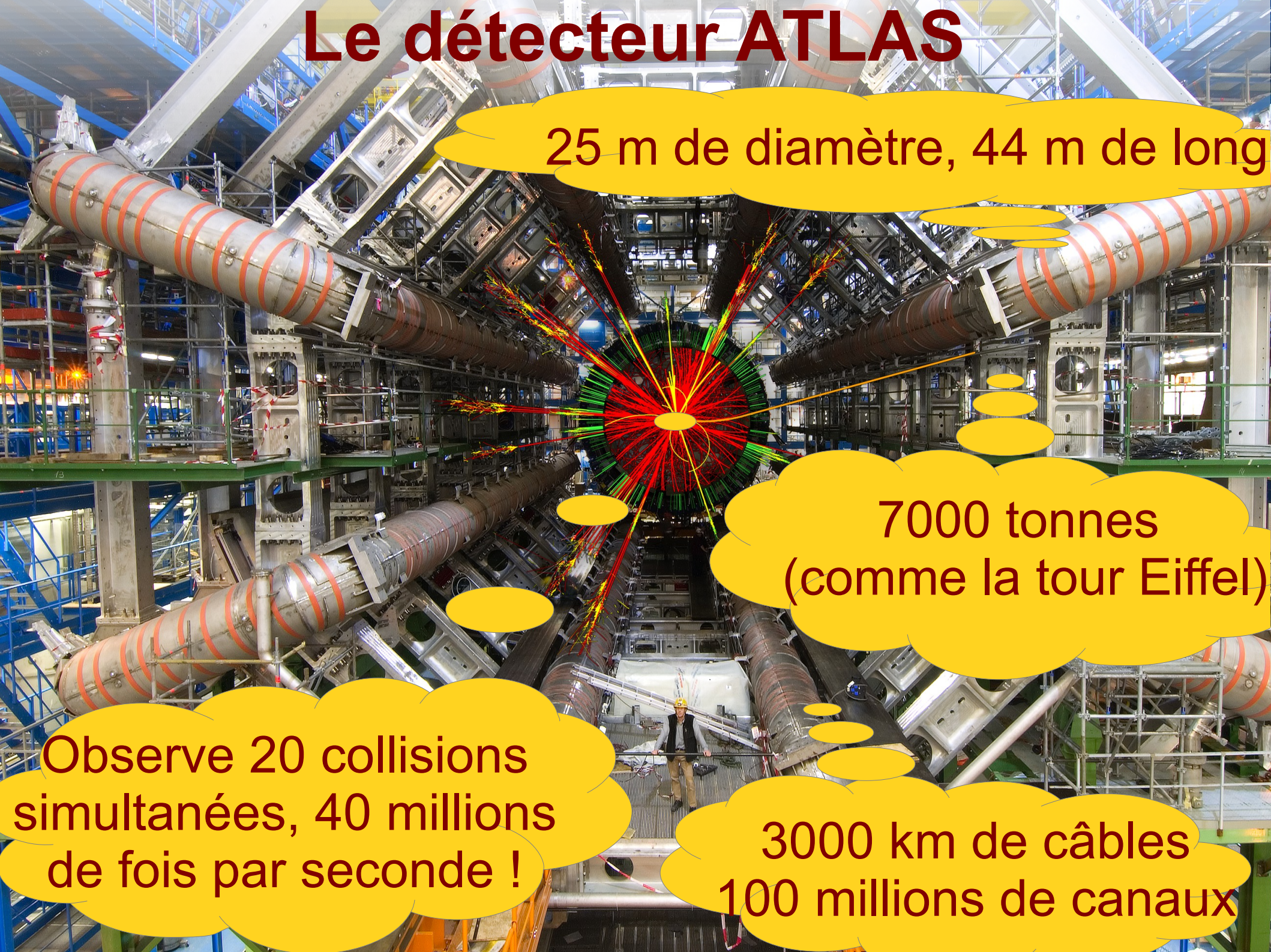
Le détecteur ATLAS

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



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



Interaction des particules avec le détecteur



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



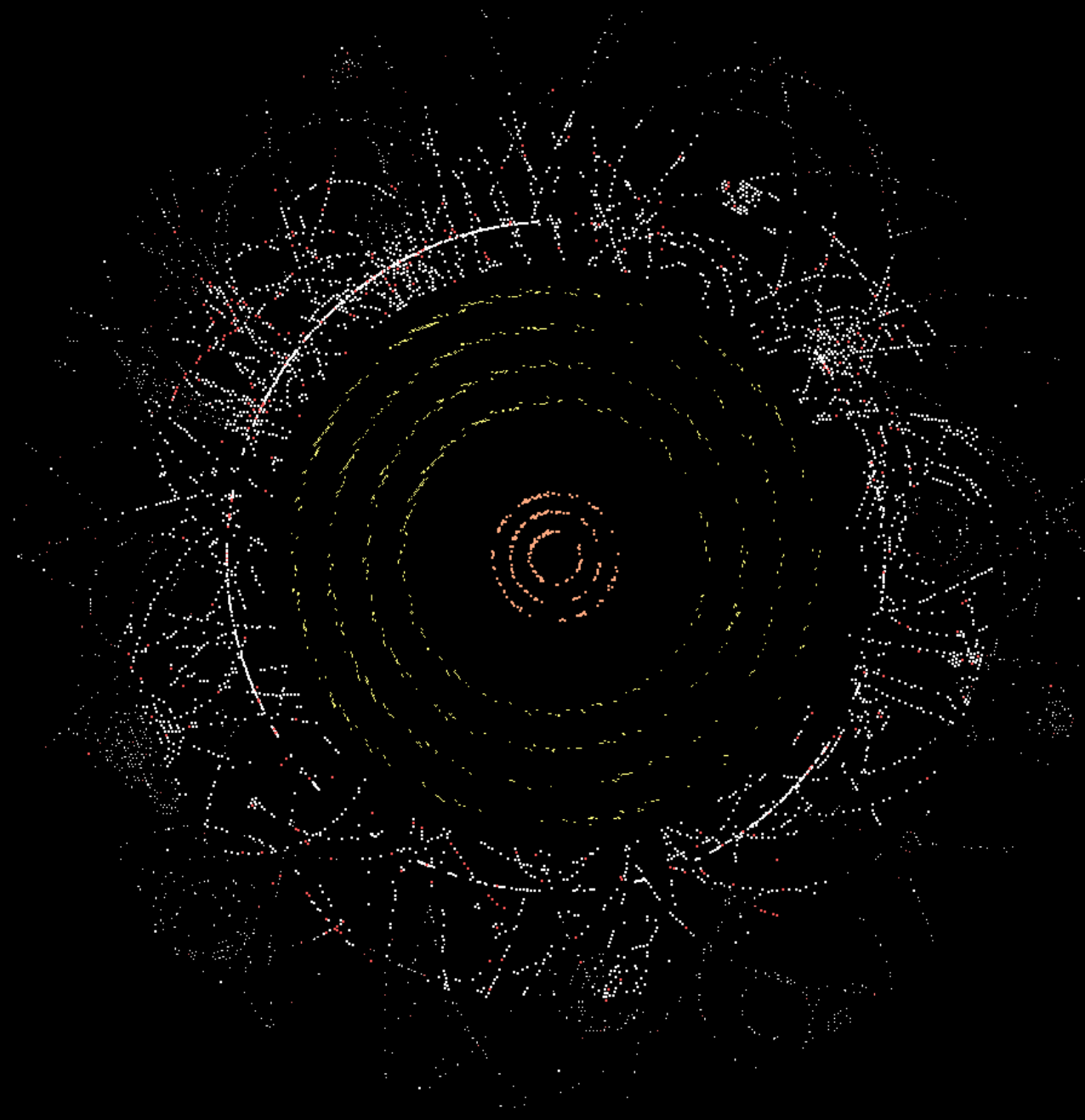
- 500 000 tuiles de plastique scintillant

Mesurer le passage des particules dans le système à muons

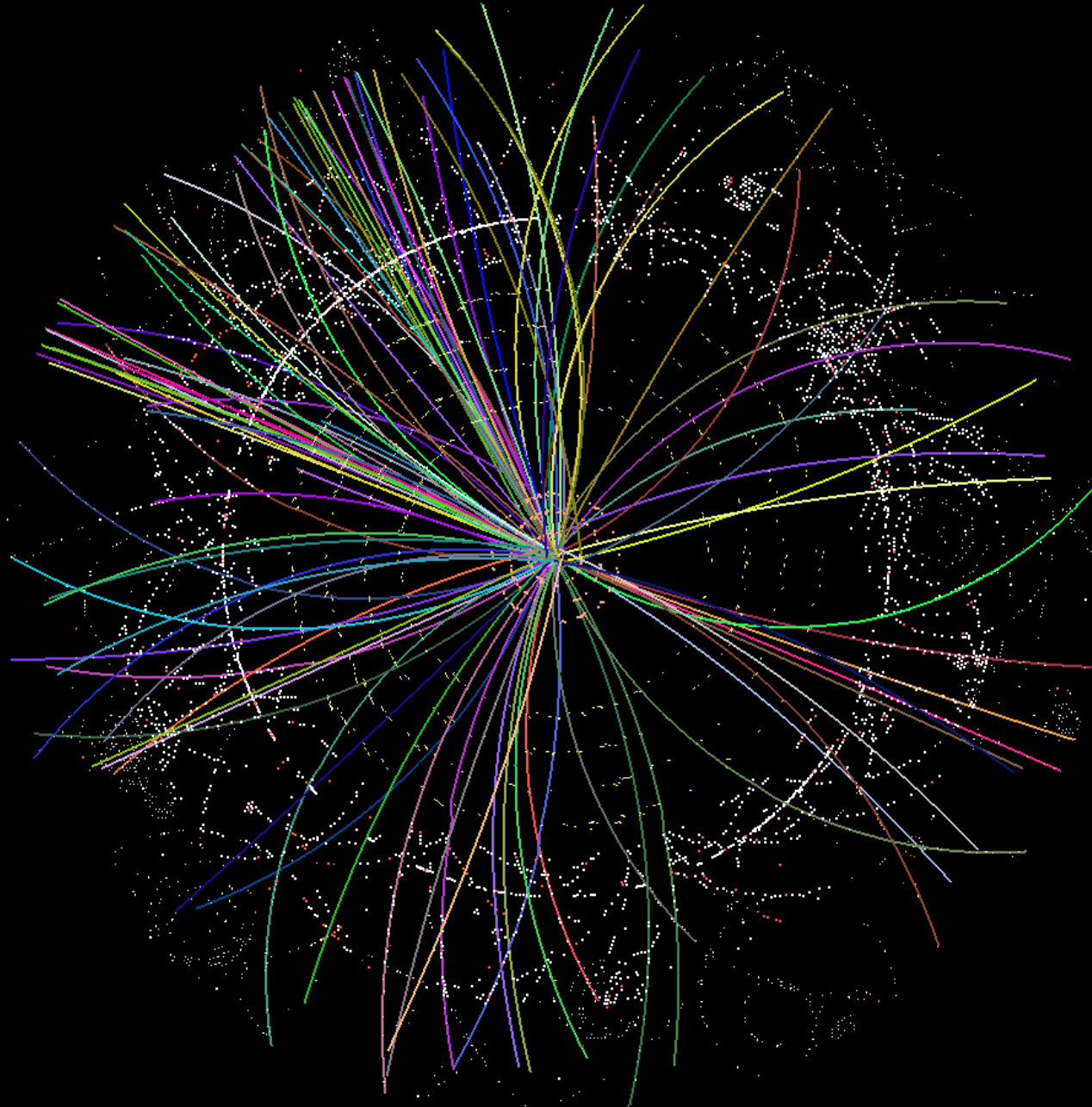


- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

Passage des particules

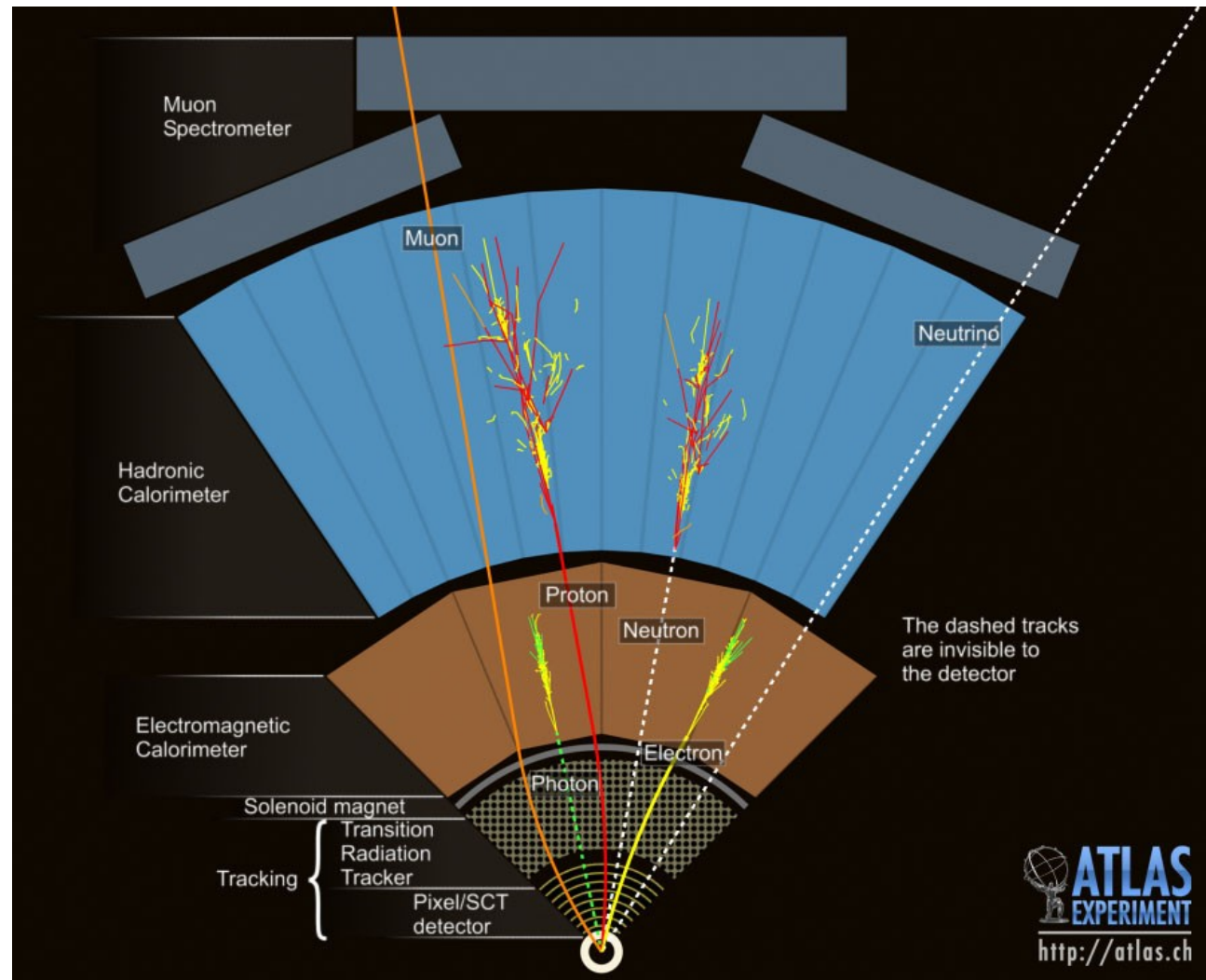
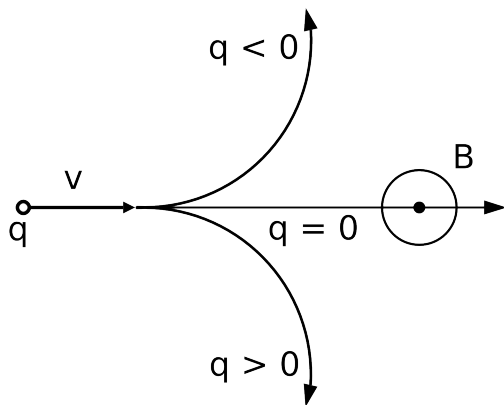


Reconstruction des trajectoires

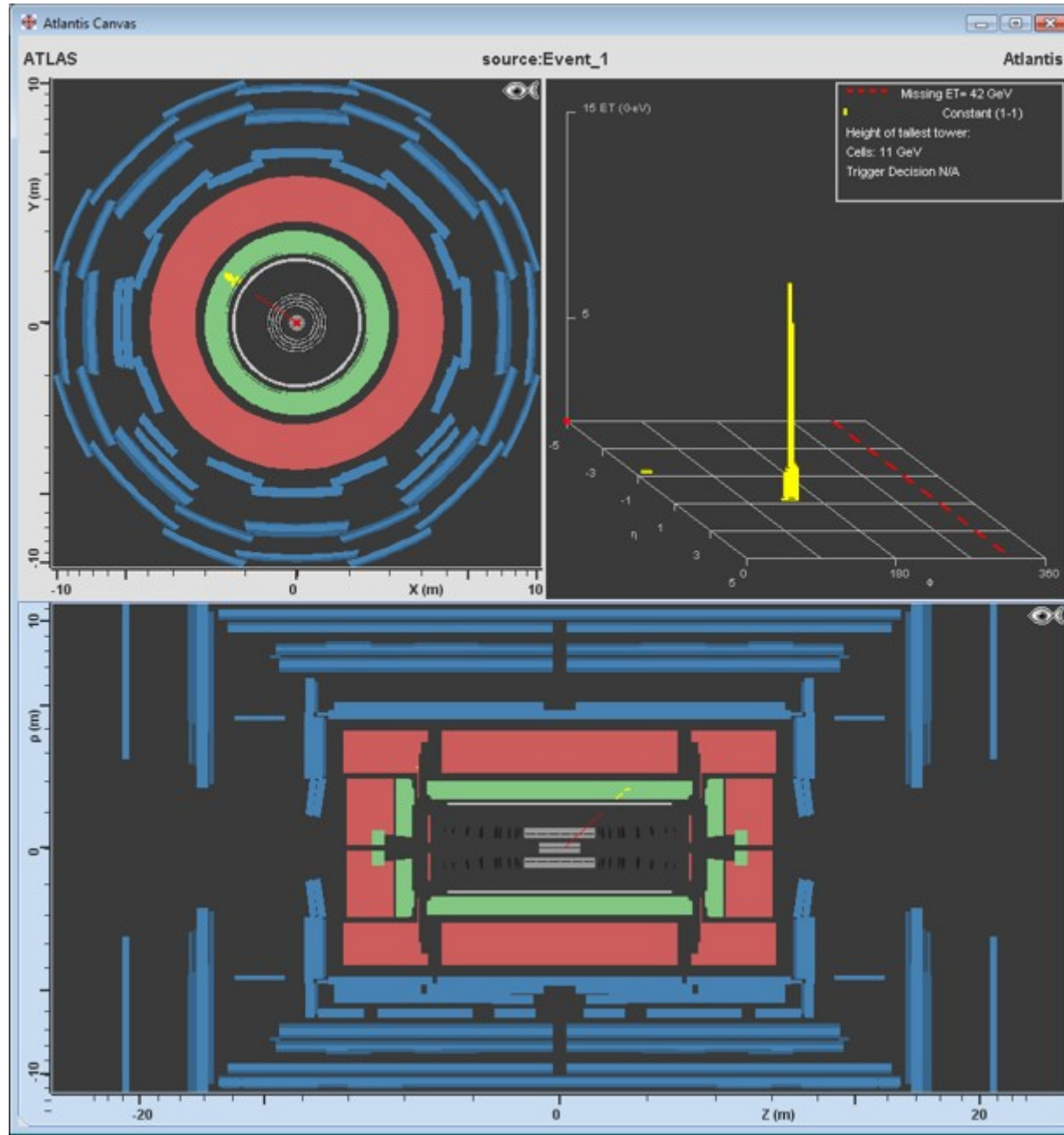


Identifier les électrons/positrons et photons

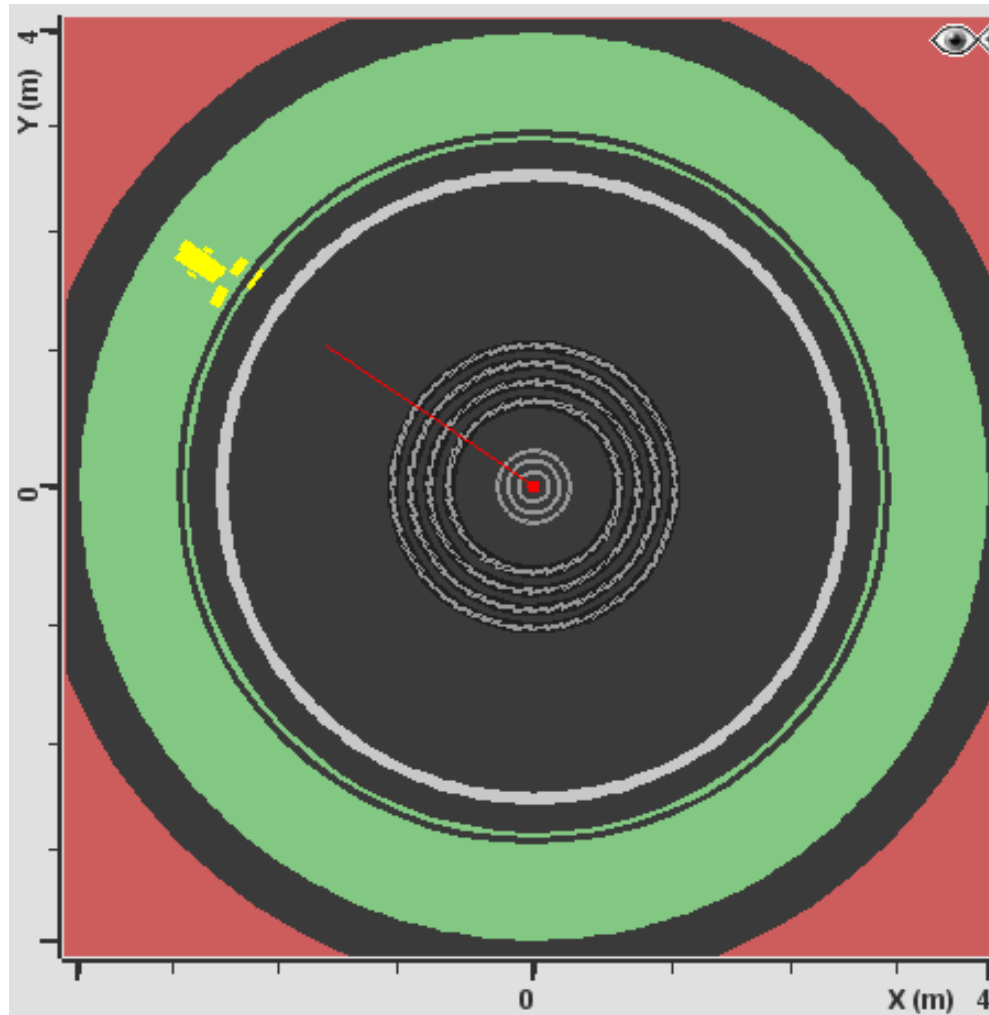
- Gerbe dans le calorimètre EM
- e^+/e^- : particule chargée, trace dans le trajectographe
- Courbure de la trace \rightarrow signe de la charge électrique



Identifier les électrons/positrons avec Minerva

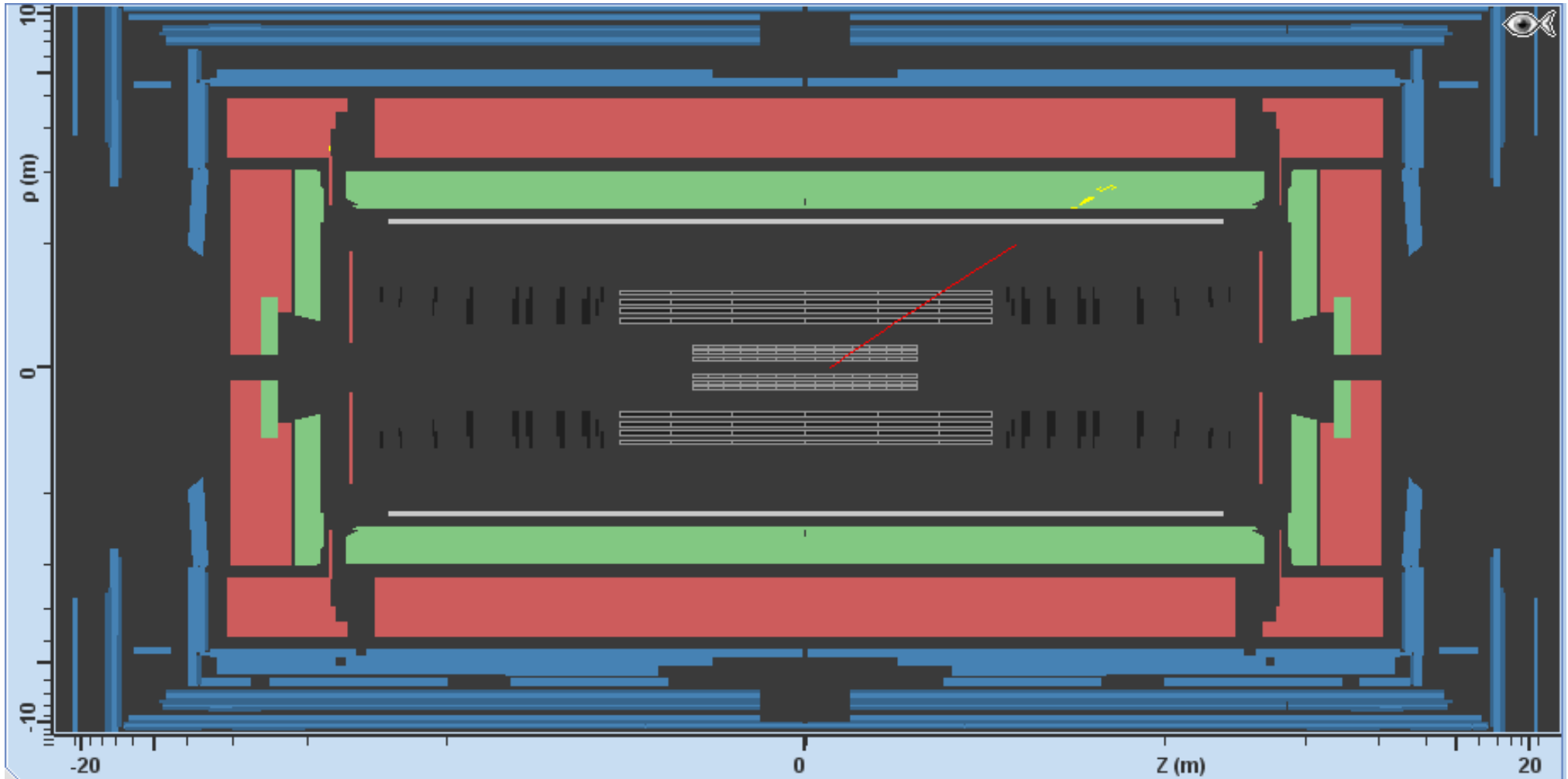


Identifier les électrons/positrons avec Minerva



- Trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

Identifier les électrons/positrons avec Minerva



- Trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

Identifier les électrons/positrons avec Minerva

The image displays the Atlantis GUI interface. On the left, there are three main views: a top-down view of the ATLAS detector, a 3D plot of the event, and a longitudinal cross-section of the detector. The top-down view shows a yellow track in the inner detector. The 3D plot shows the track in a 3D coordinate system. The longitudinal cross-section shows the track passing through the detector layers. On the right, there is a control panel with a toolbar and a data table. A red box highlights a hand icon in the toolbar, and a red arrow points from it to the data table. The data table has columns for Name and Value, and rows for Status, InDet, Calo, MuonDet, and Objects. The status is checked for all. Below the data table, there is a text area with the message "Welcome to Atlantis !" and the file name "Minerva.xml (10602000326459)".

Name	Value
Status	<input checked="" type="checkbox"/>
InDet	<input checked="" type="checkbox"/>
Calo	<input checked="" type="checkbox"/>
MuonDet	<input checked="" type="checkbox"/>
Objects	<input checked="" type="checkbox"/>

- Choisir la main et cliquer sur la trace
- Des infos apparaissent dans la fenêtre en bas à droite₄₃

Identifier les électrons/positrons avec Minerva

Atlantis Canvas source:Minerva1 Atlantis Atlantis GUI

ATLAS

15 ET (GeV)

Missing ET= 42 GeV
Constant (1-1)
Height of tallest tower:
Cells: 11 GeV
Trigger Decision N/A

Exercise2-Event04.xml (161562003969900)

Exercise2-Event05.xml (160472004700963)

$PT=44.730$ GeV

$PT=44.730$ GeV

$\eta = -1.139$
 $\Phi = 190.952^\circ$
 $P_x = -43.915$ GeV
 $P_y = -8.498$ GeV
 $P_z = 62.730$ GeV

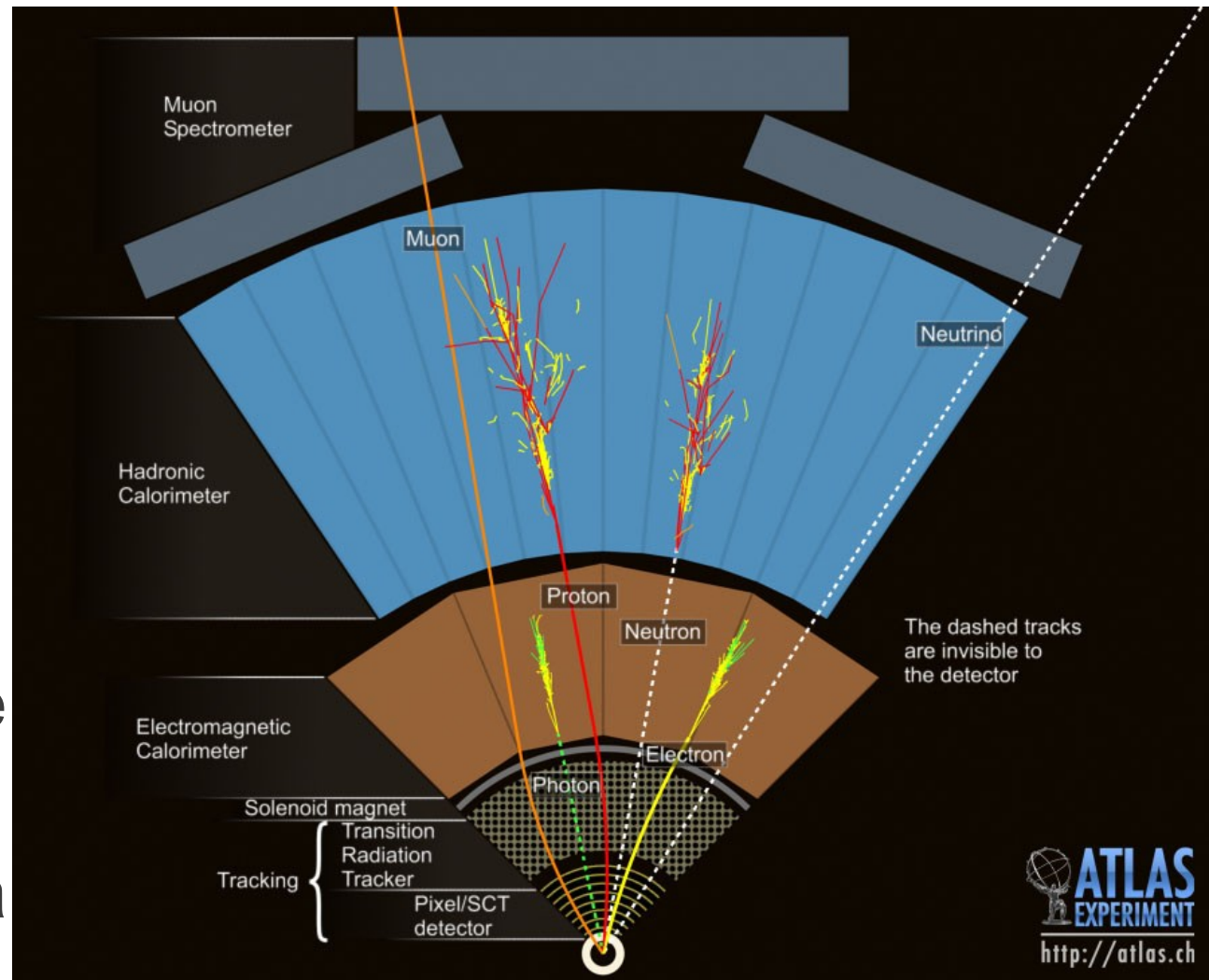
$Charge = -1$

$Charge = -1$

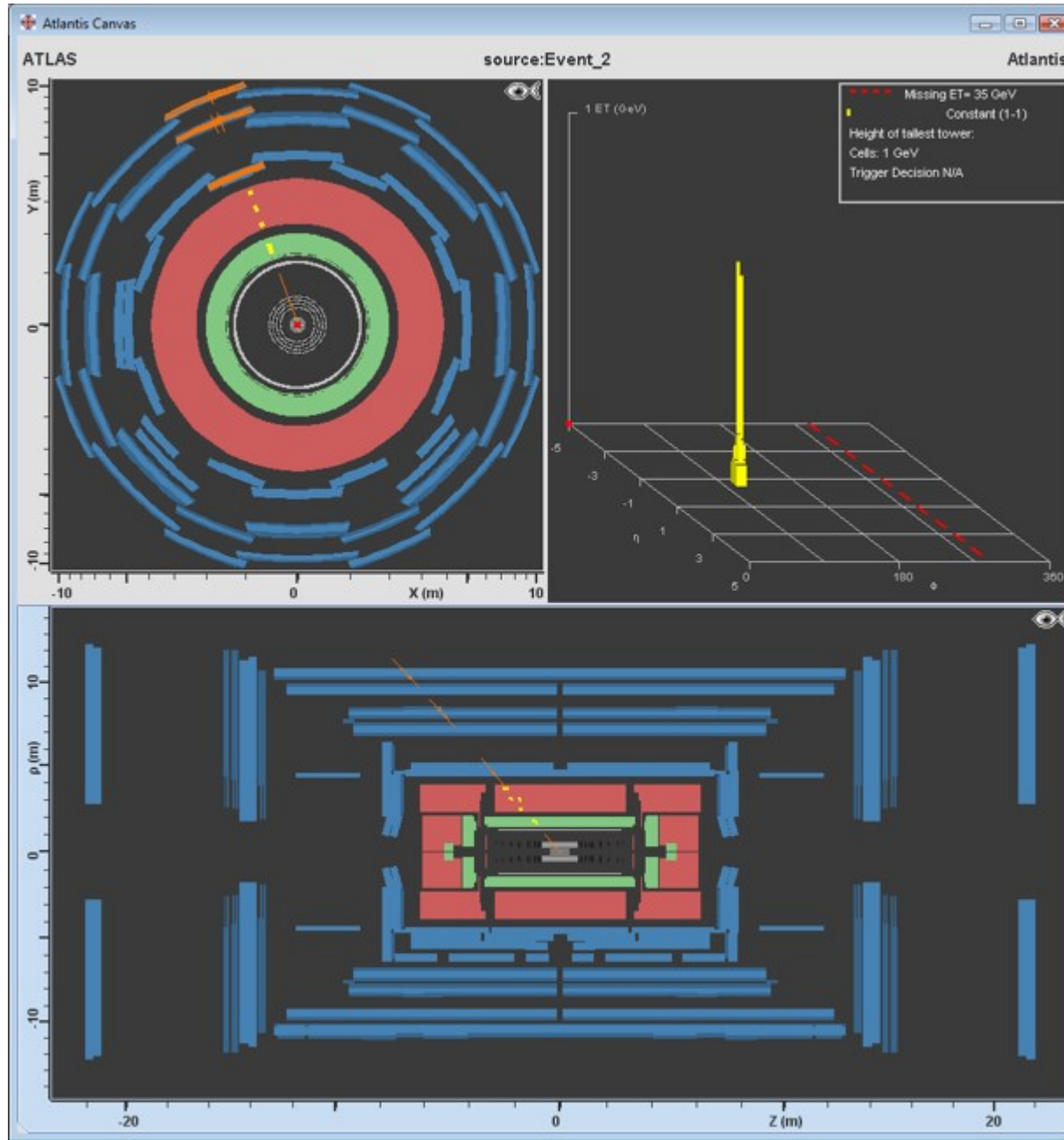
- PT = impulsion transverse
- Ici charge négative \rightarrow électron

Identifier les muons et antimuons

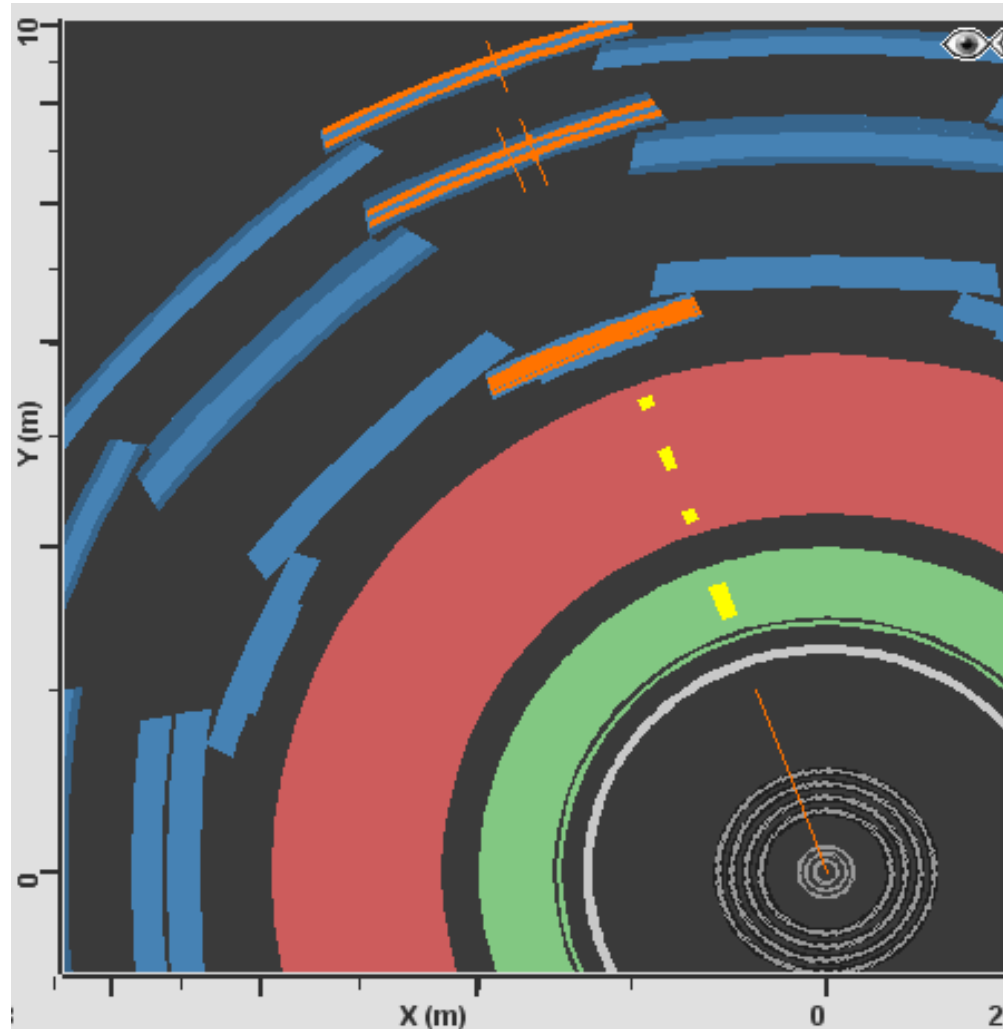
- Particule chargée, trace dans le trajectographe
- Un peu d'énergie dans le calorimètre
- Trace dans le détecteur à muons
- Courbure de la trace → signe de la charge électrique
- Continue sa course à l'extérieur d'ATLAS



Identifier les muons/antimuons avec Minerva

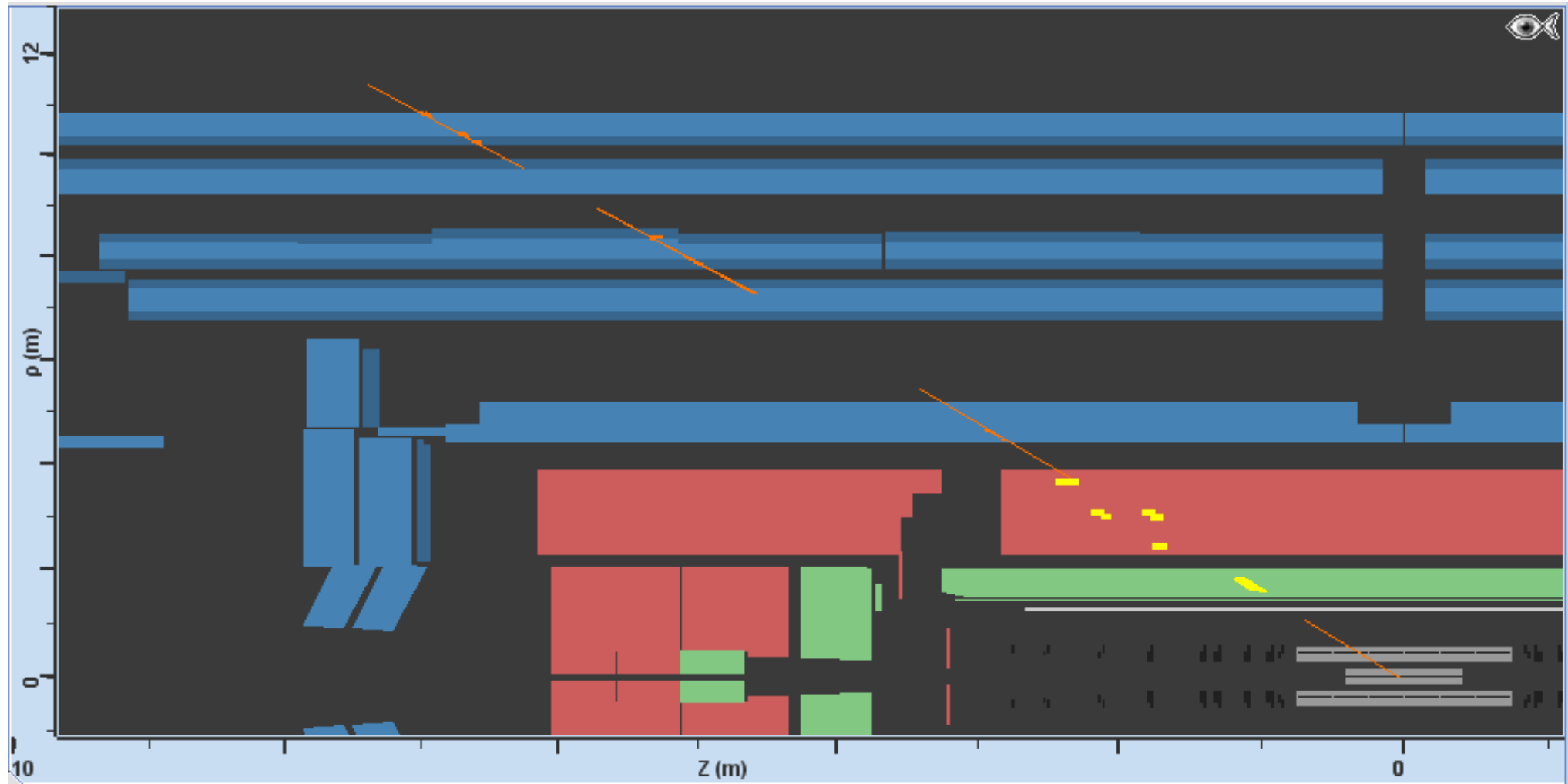


Identifier les muons/antimuons avec Minerva



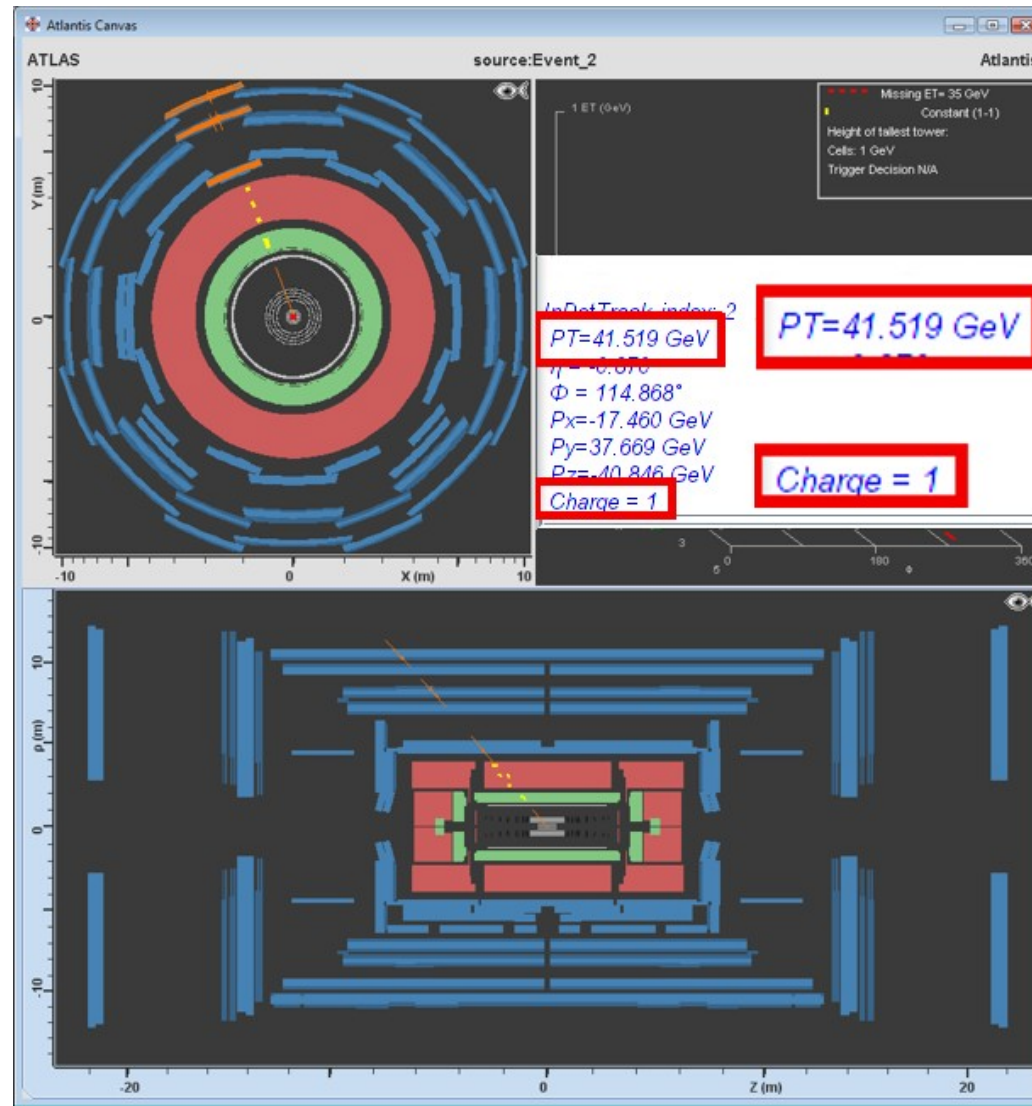
- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Un peu d'énergie dans les calorimètres

Identifier les muons/antimuons avec Minerva



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

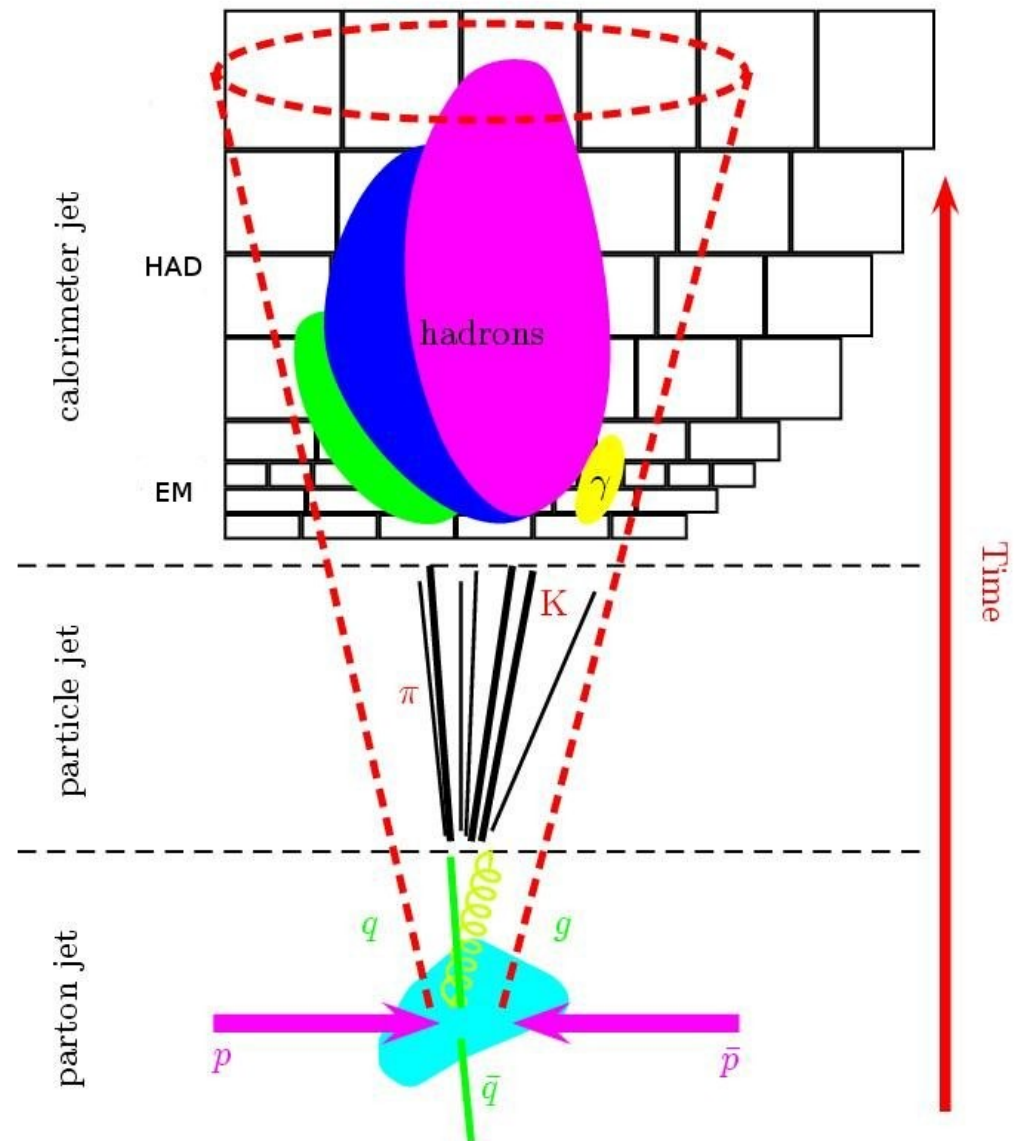
Identifier les muons/antimuons avec Minerva



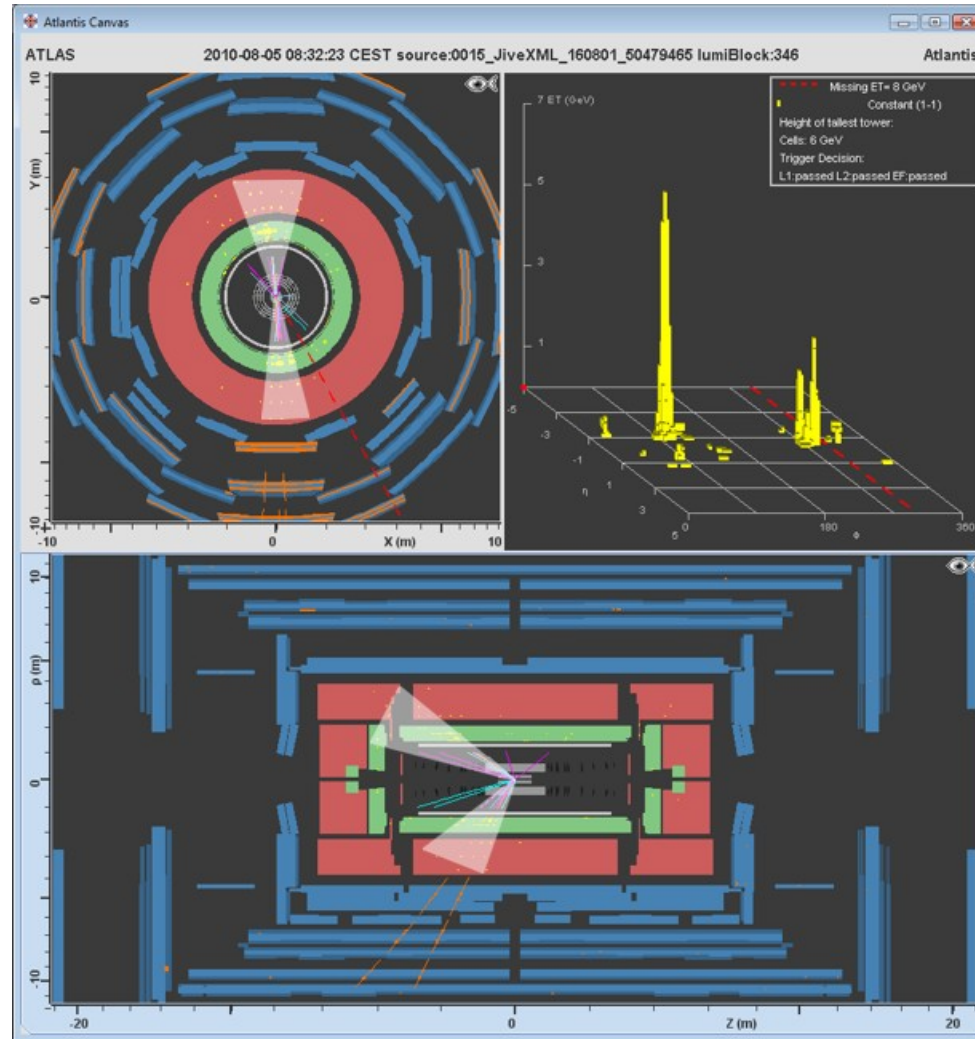
- Positif : antimuon

Identifier les quarks/antiquarks et gluons

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

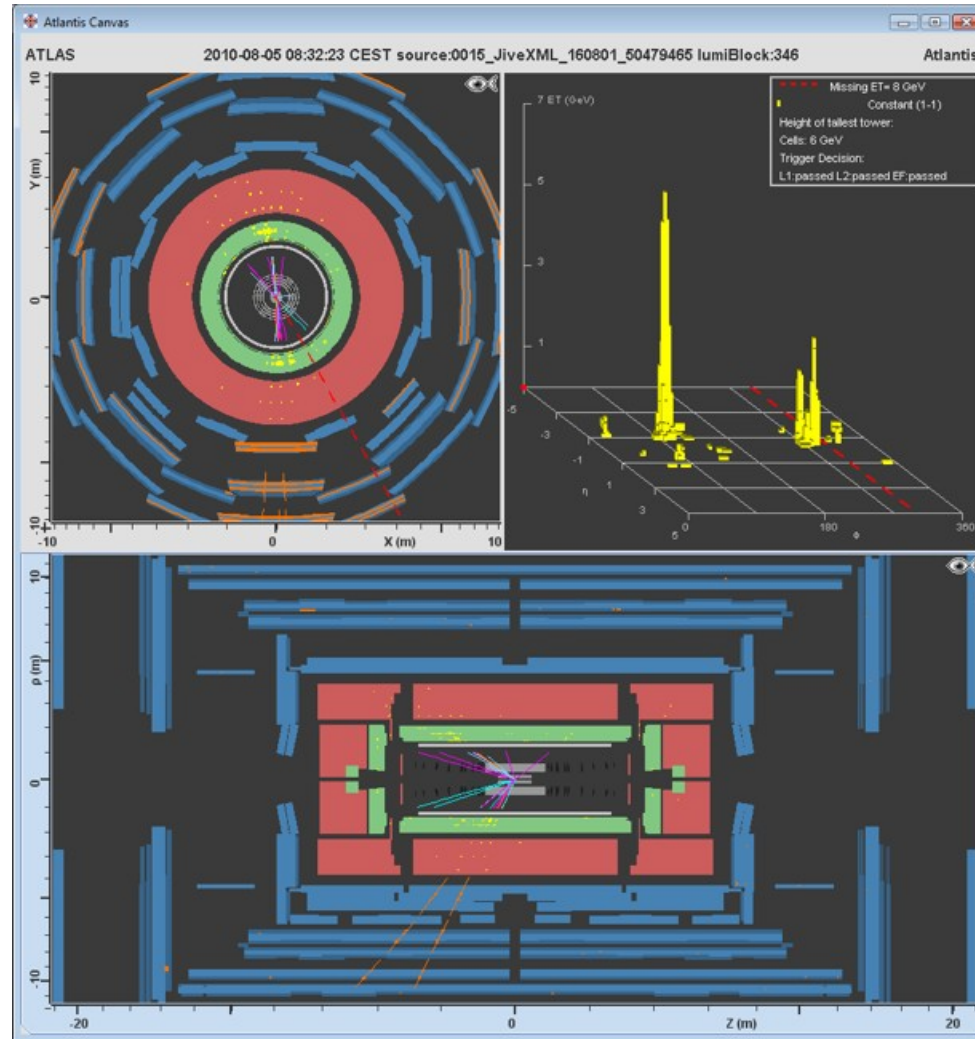


Identifier les jets avec Minerva



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

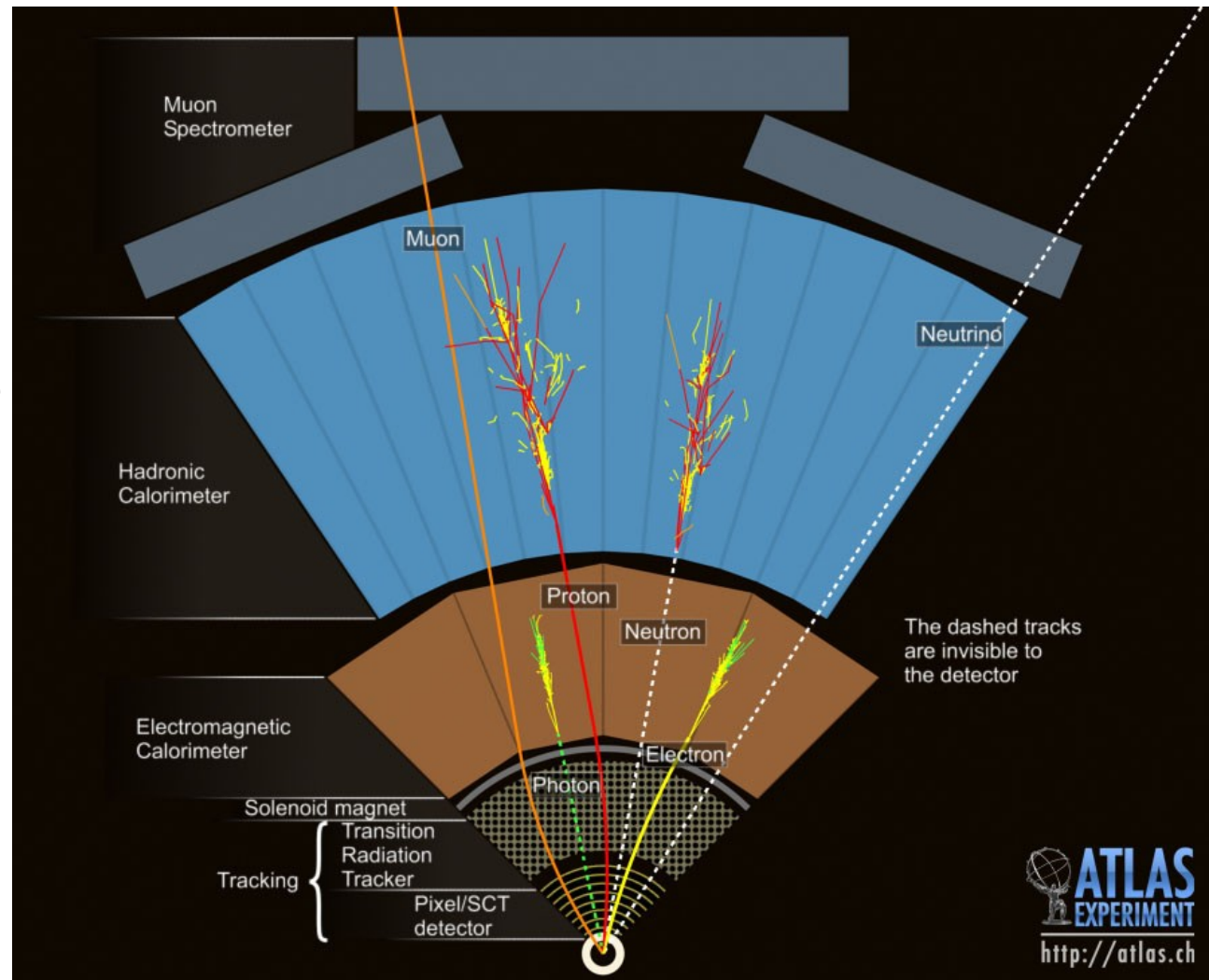
Identifier les jets avec Minerva



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

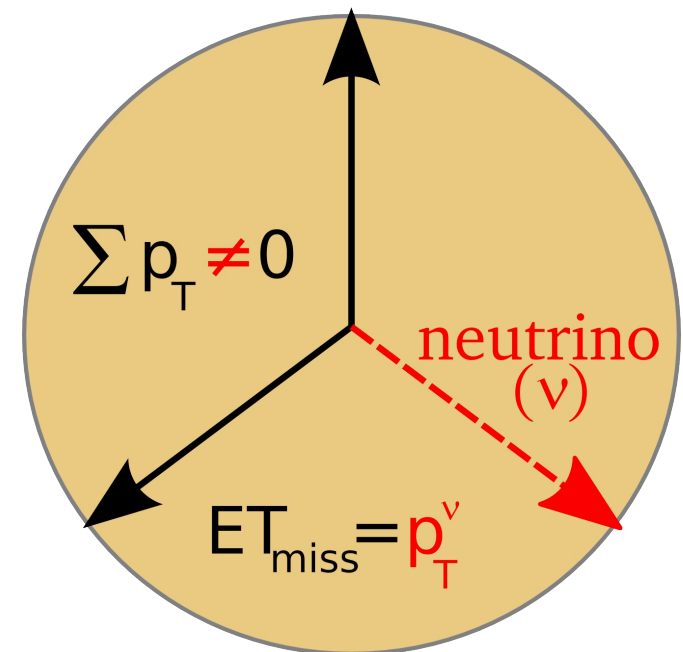
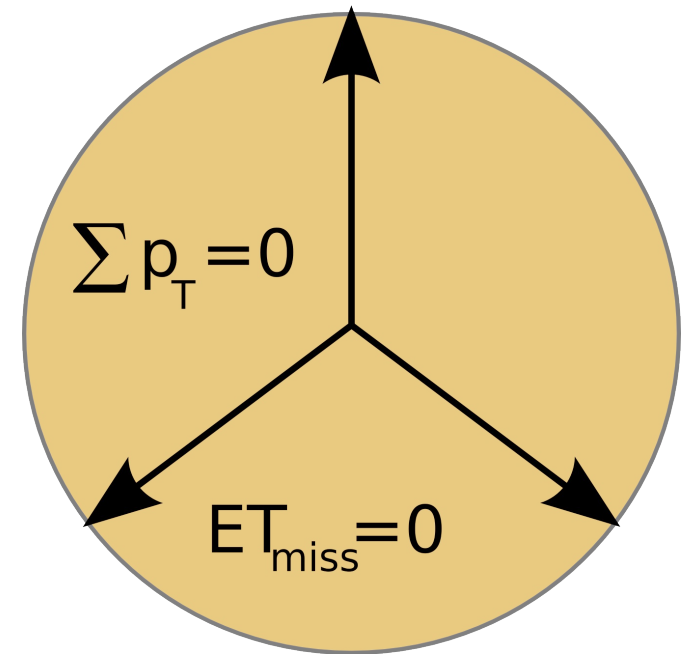
Identifier les neutrinos

- 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

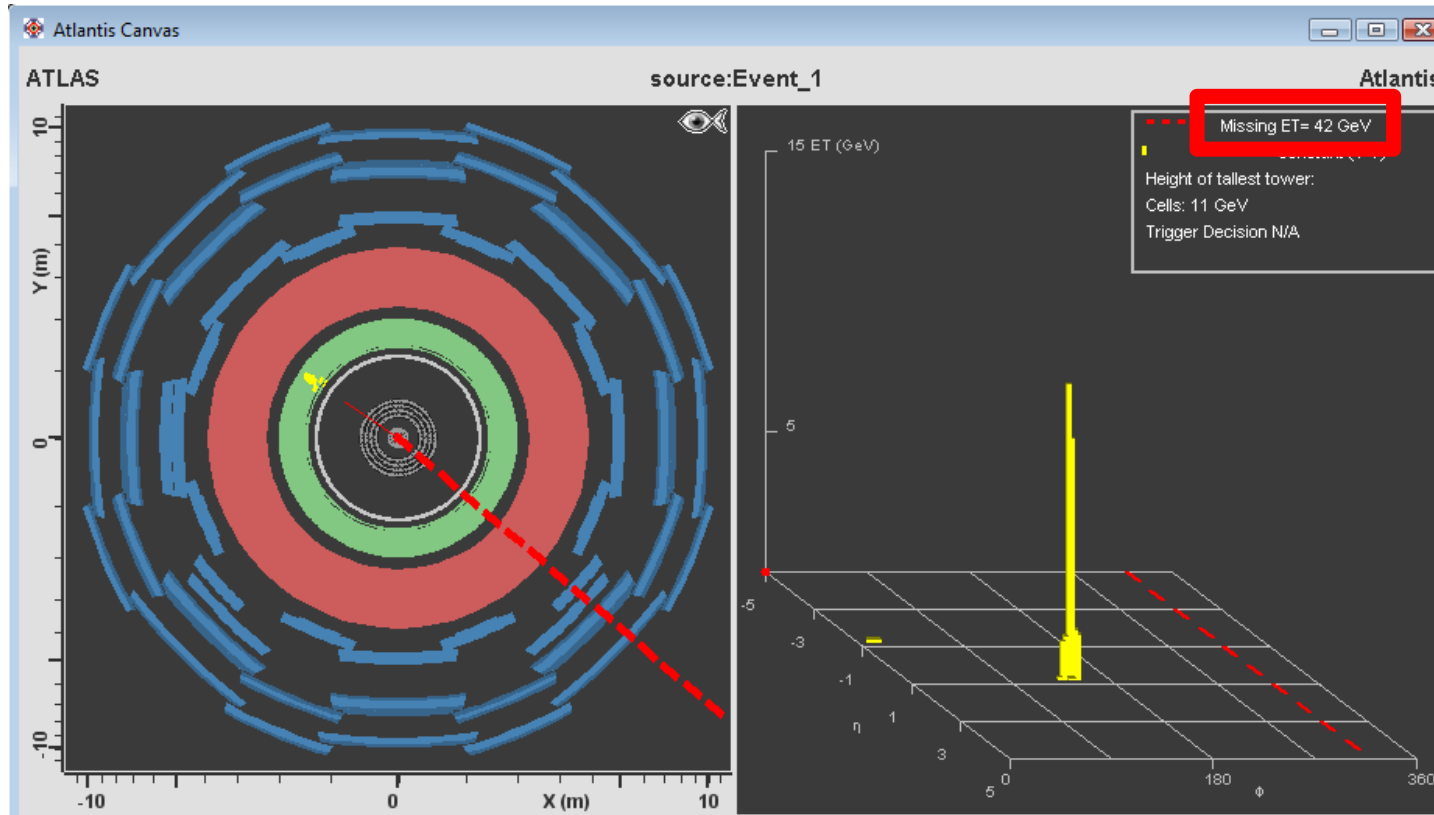


Energie transverse manquante

- 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^{miss} , associée au neutrino



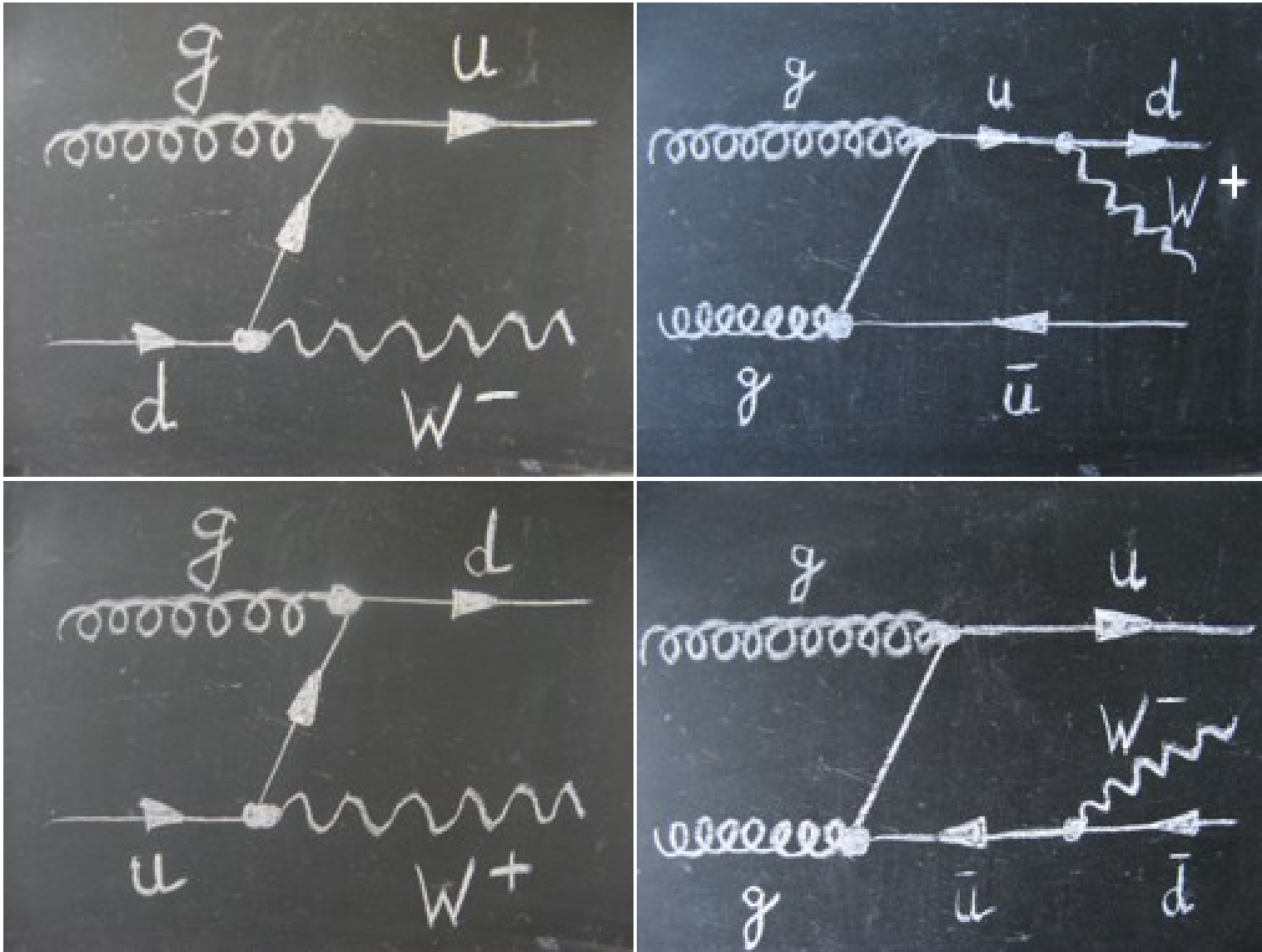
Identifier un neutrino avec Minerva



- Par conservation, la somme des impulsions dans le plan transversal vaut 0
- Sinon, « énergie transverse manquante (Missing ET) » : particules indétectables (comme les neutrinos), non détectées ou mal mesurées
- Représenté par une ligne rouge pointillée, valeur en haut à droite

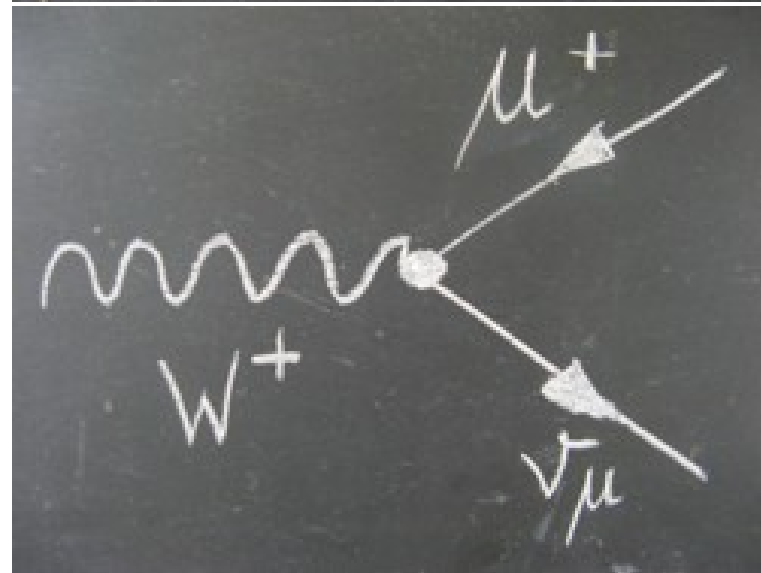
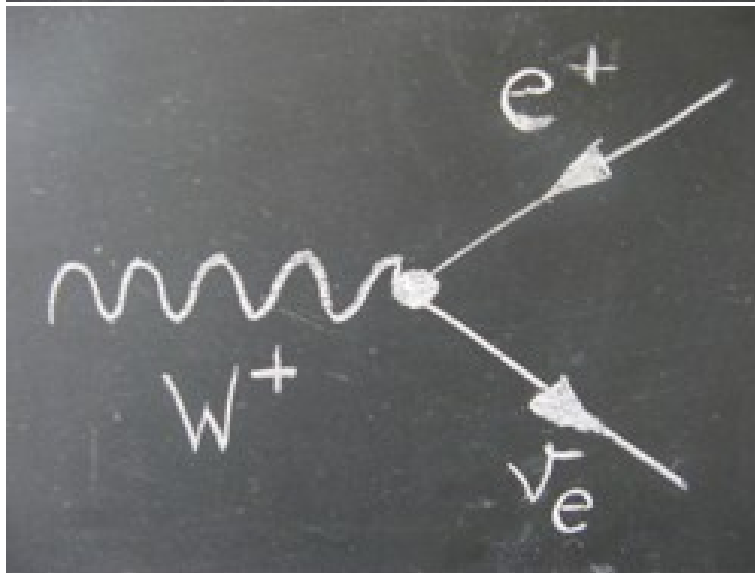
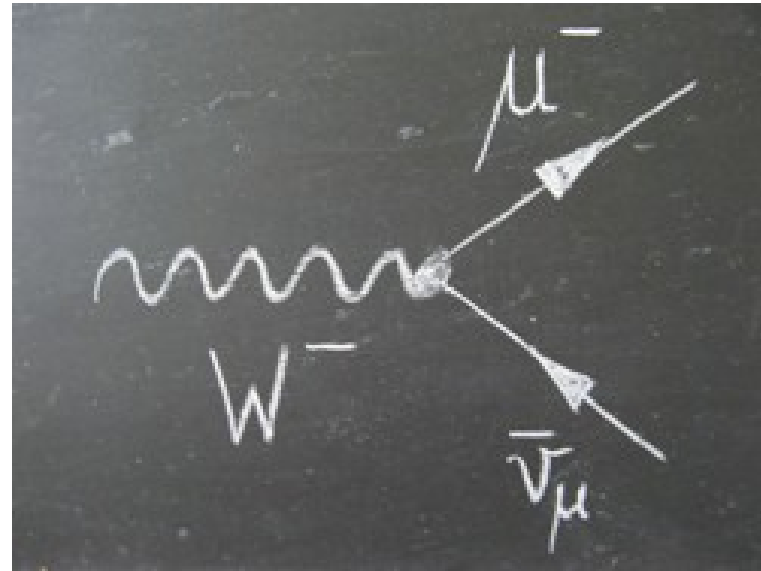
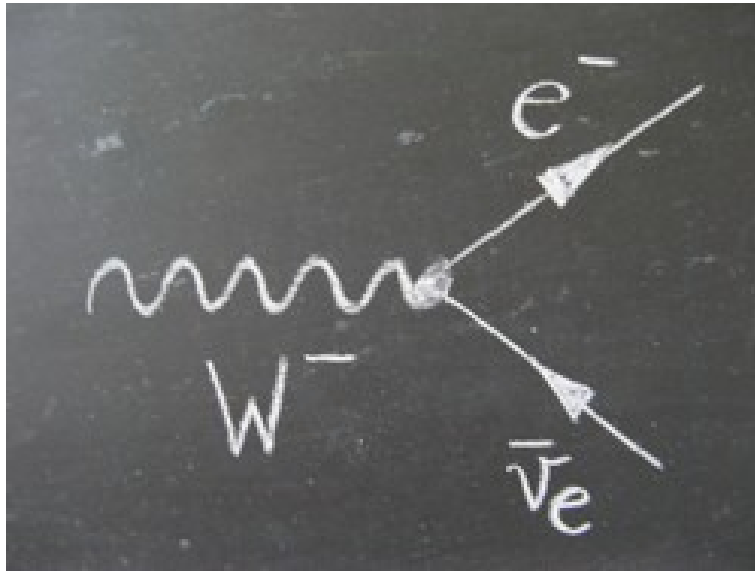
Analyse : observer des bosons W

Production



Analyse : observer des bosons W

Désintégration

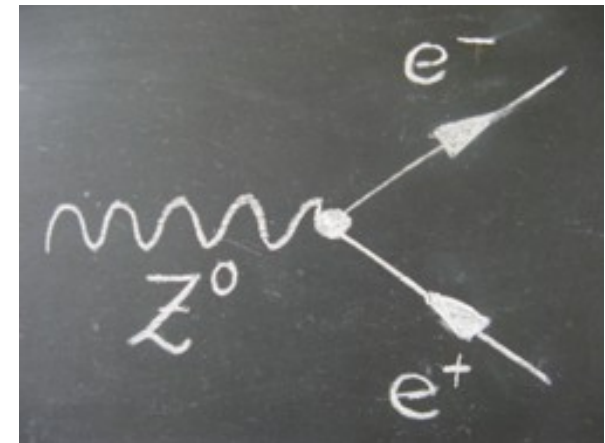
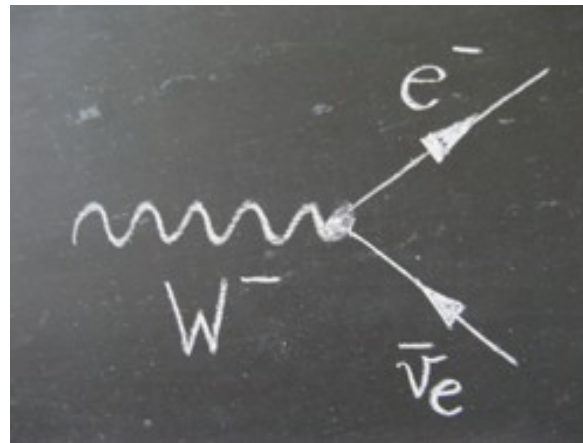
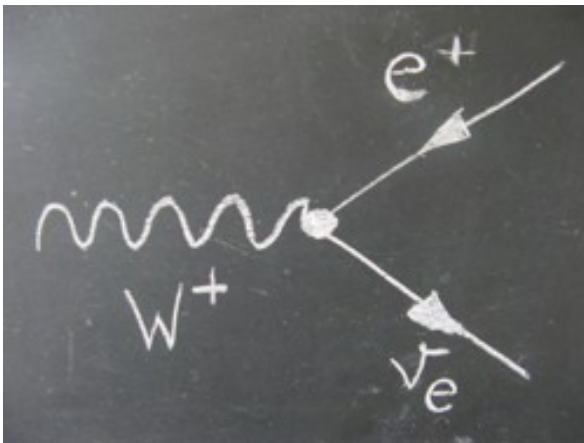


Difficulté : le bruit de fond

- 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

- Signal : désintégration de bosons $W \rightarrow e\nu$
- Bruit de fond : $Z \rightarrow ee$
- Un des e n'est pas reconstruit

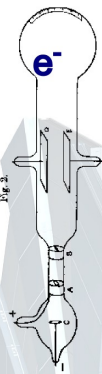


- Si on cherche des événements Z , alors les W peuvent être un bruit de fond !

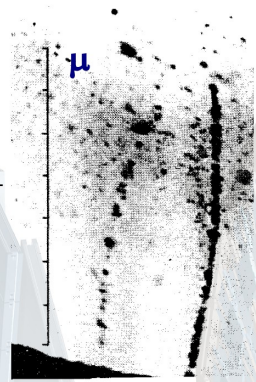
Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

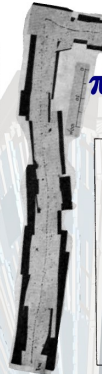
Découverte historique



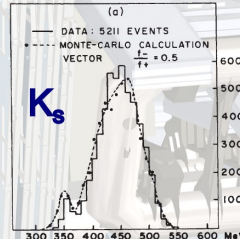
1897



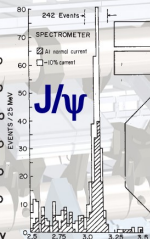
1937



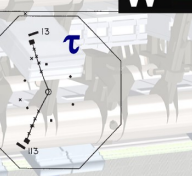
1947



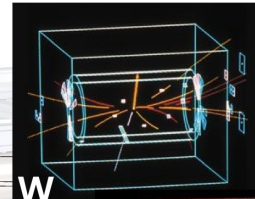
1964



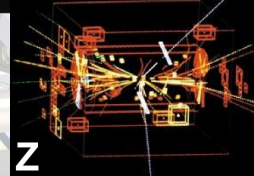
1974



1976

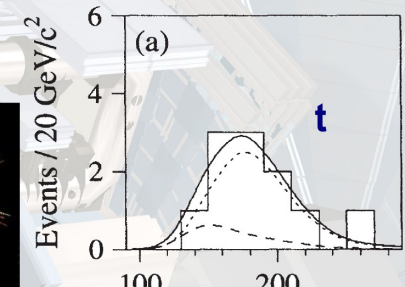


W



Z

1983

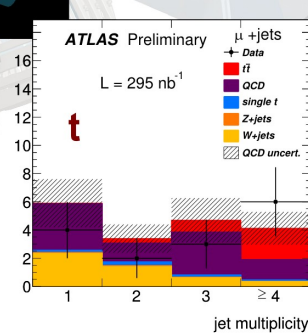
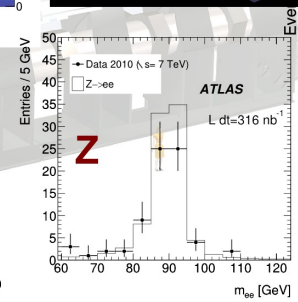
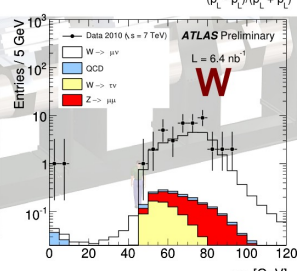
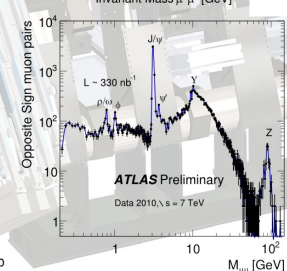
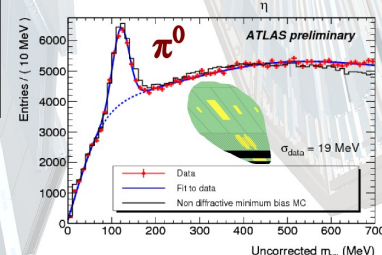
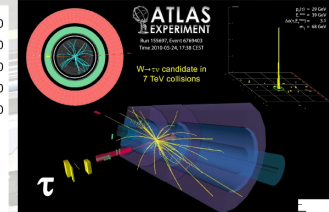
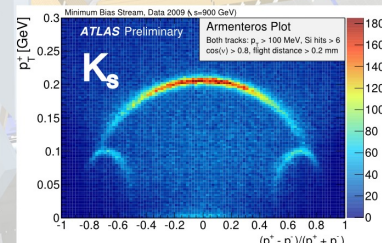
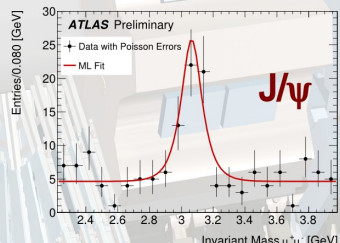
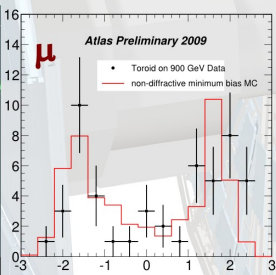
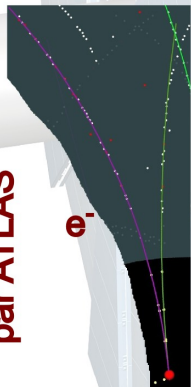


1995

déc 2009

août 2010

Redécouverte par ATLAS



Et vous ?

- Recherche de bosons W
 - Mesure de la structure du proton
- Recherche du boson de Higgs

Liens

Nos présentations



Les Masterclasses



ATLAS grand public




ATLAS en direct

ATLAS sur 

ATLAS sur 

ATLAS sur 

ATLAS sur 

Site français du 

Le CPPM 

Le CERN 

Le CERN sur 

indico.in2p3.fr/event/Masterclasses2013

physicsmasterclasses.org

atlas.ch

atlas-live.cern.ch

twitter.com/ATLASexperiment

www.facebook.com/ATLASexperiment

www.google.com/+ATLASexperiment

www.youtube.com/theATLASExperiment

www.lhc-france.fr

marwww.in2p3.fr

cern.ch

twitter.com/cern