

# Accélérateurs et détecteurs

Centre de physique des particules de Marseille

INTERNATIONAL

MASTERCLASSES

hands on particle physics

Avril 2016



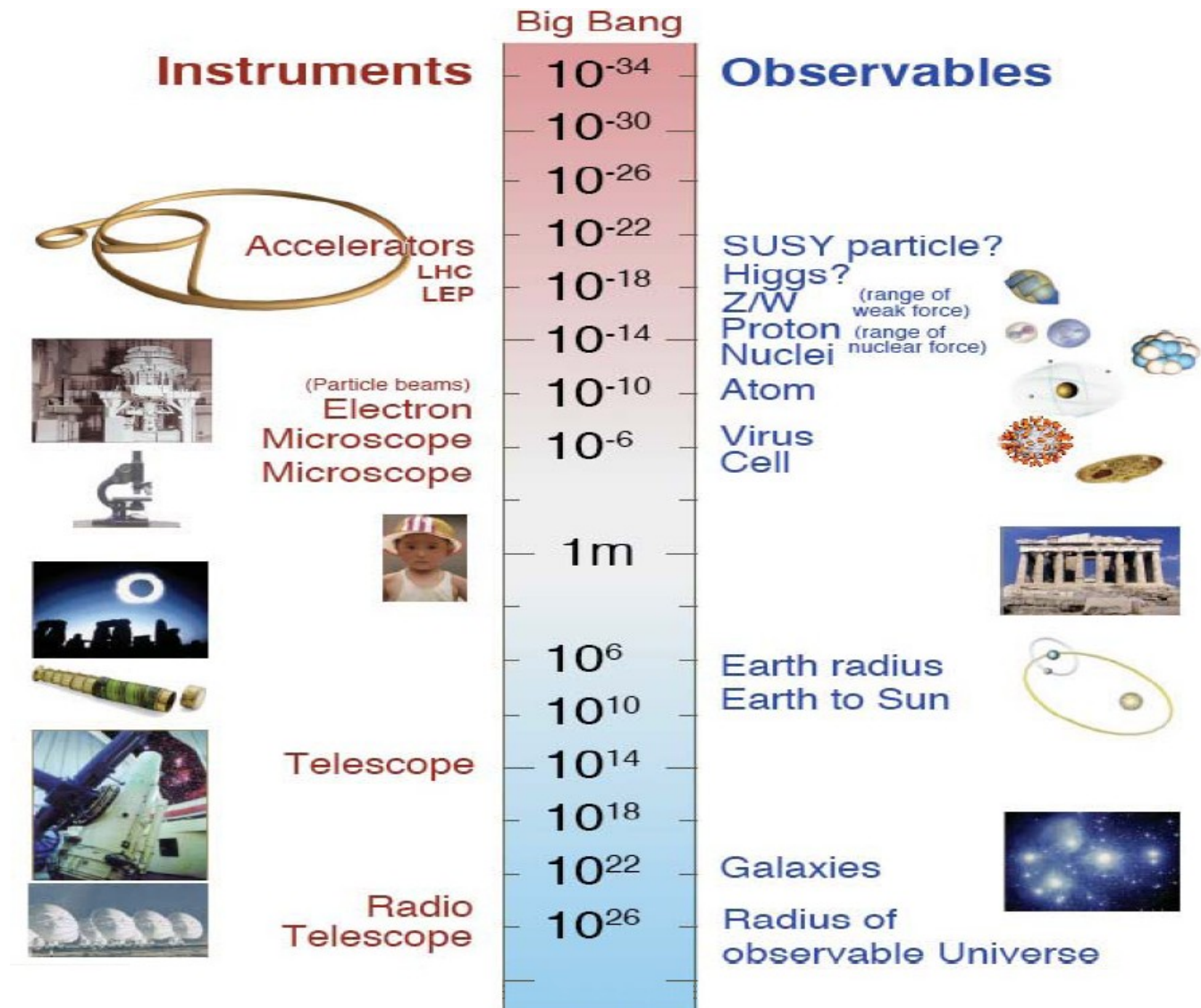
# Pourquoi des accélérateurs de particules ?

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

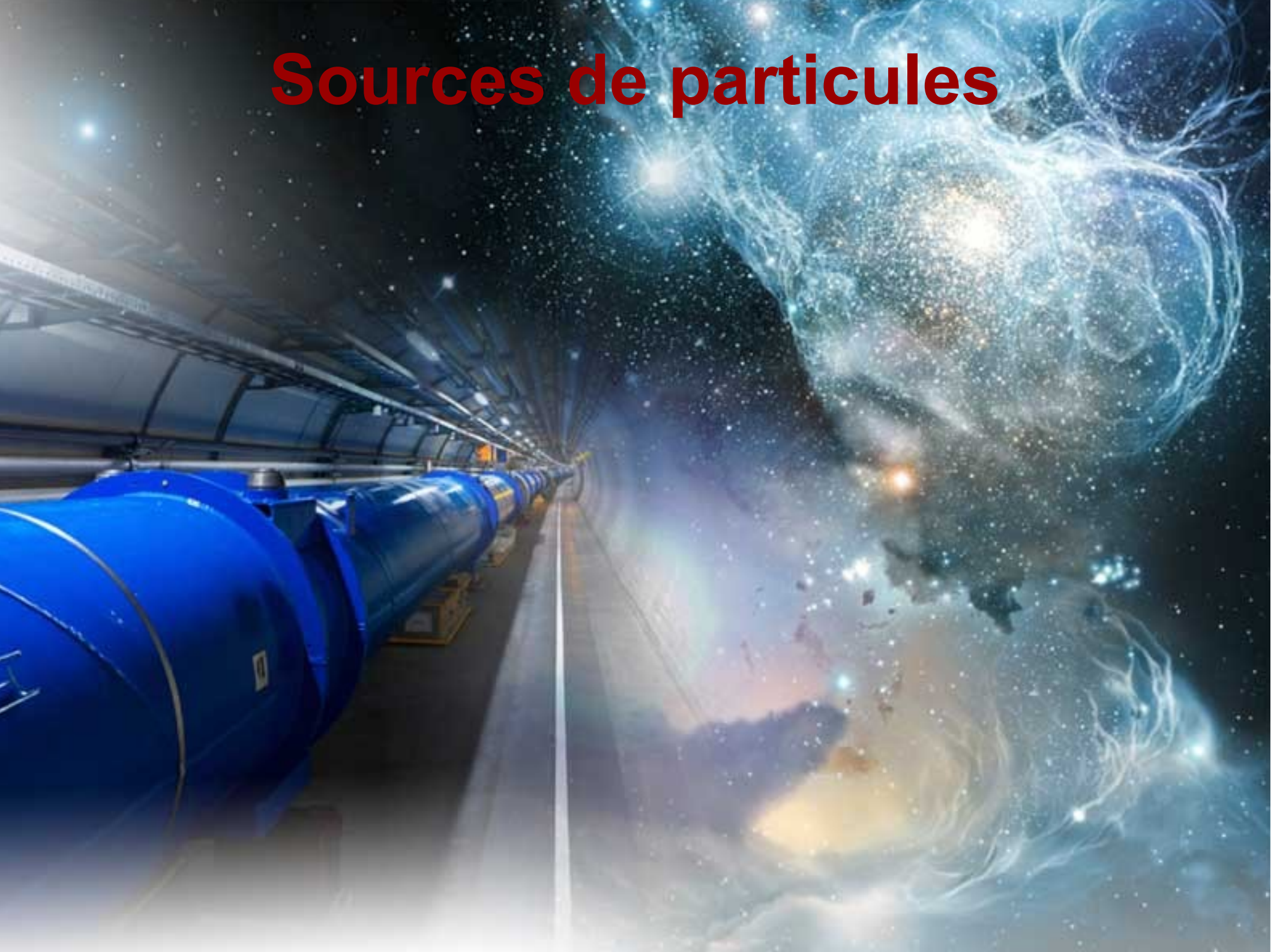
- ▶ longueur d'onde associée  $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

- ▶  $E = mc^2$



# Sources de particules



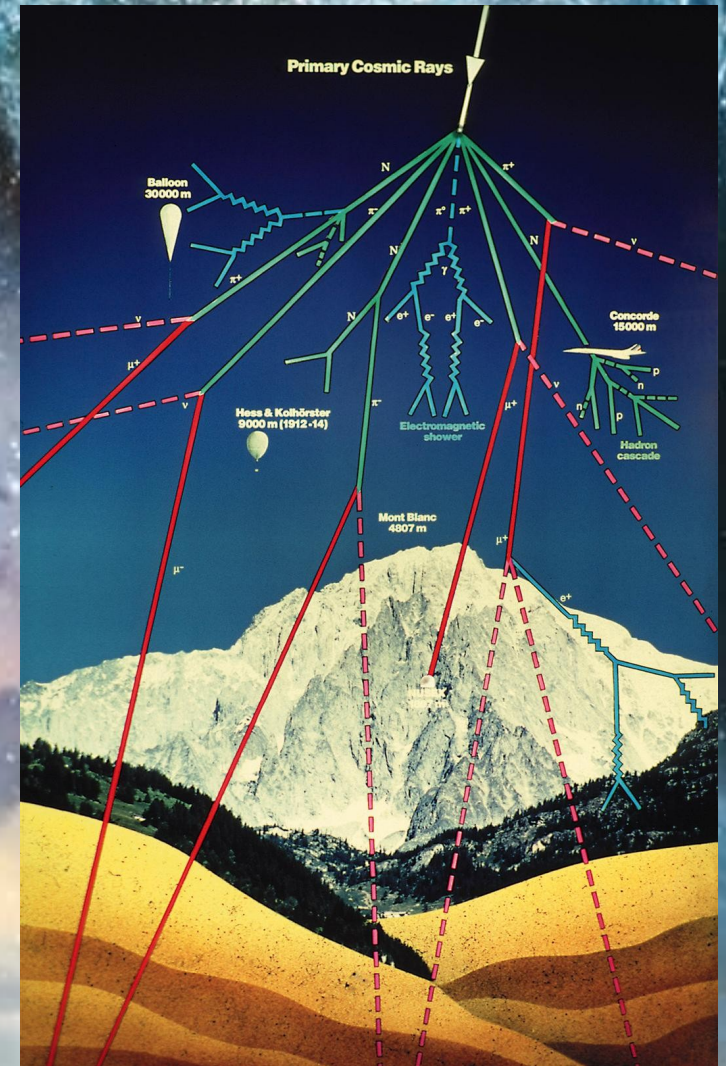
# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)



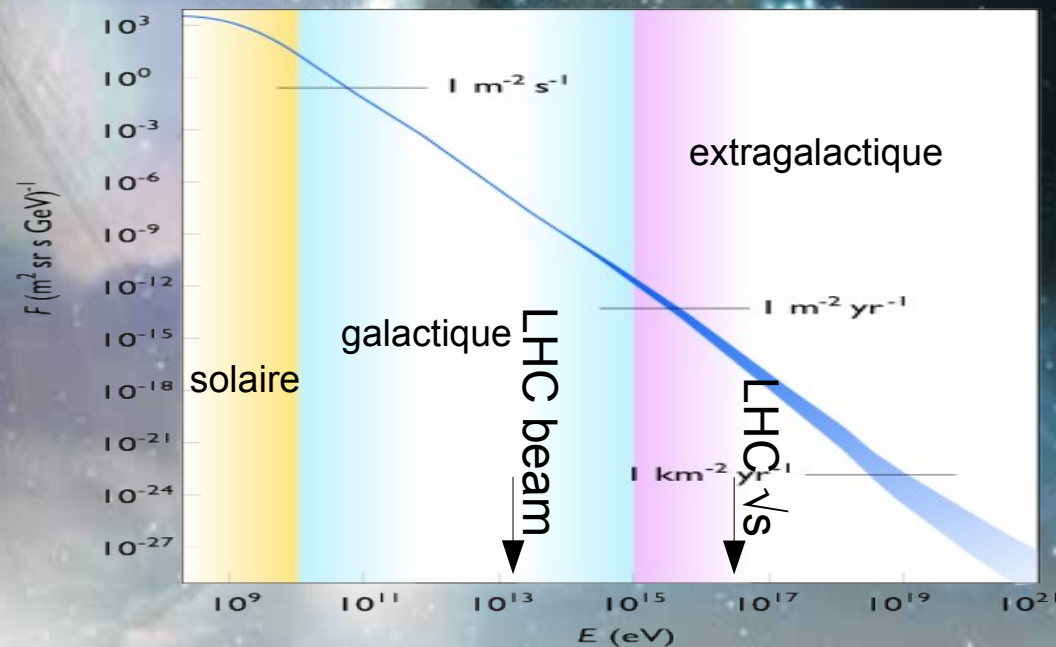
# Sources de particules

## L'Univers et les rayons cosmiques



# Sources de particules

L'Univers et les  
rayons cosmiques  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)



# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)

**Les accélérateurs  
de particules**  
(protons, photons,  
électrons, muons,  
pions, kaons, etc)



# Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

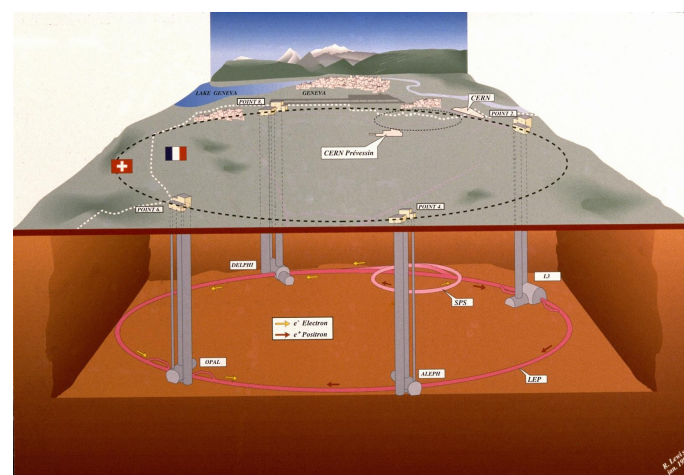
- ▶ Au CERN, Genève
- ▶ Collisions  $e^+e^-$
- ▶ 1989-2000

- Le Tevatron

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

- Le LHC

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





# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



LHCb

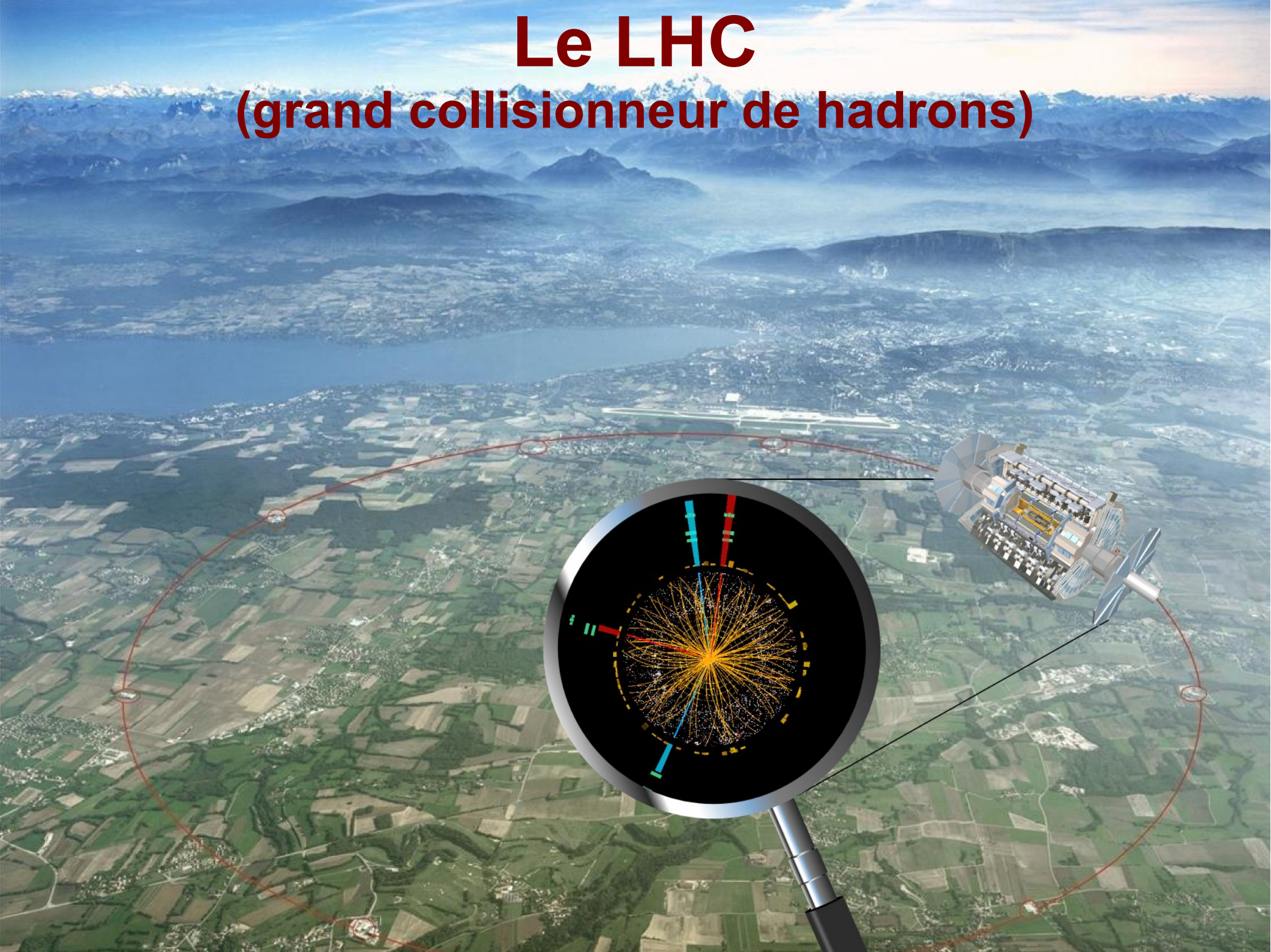
ATLAS

CMS

ALICE

# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

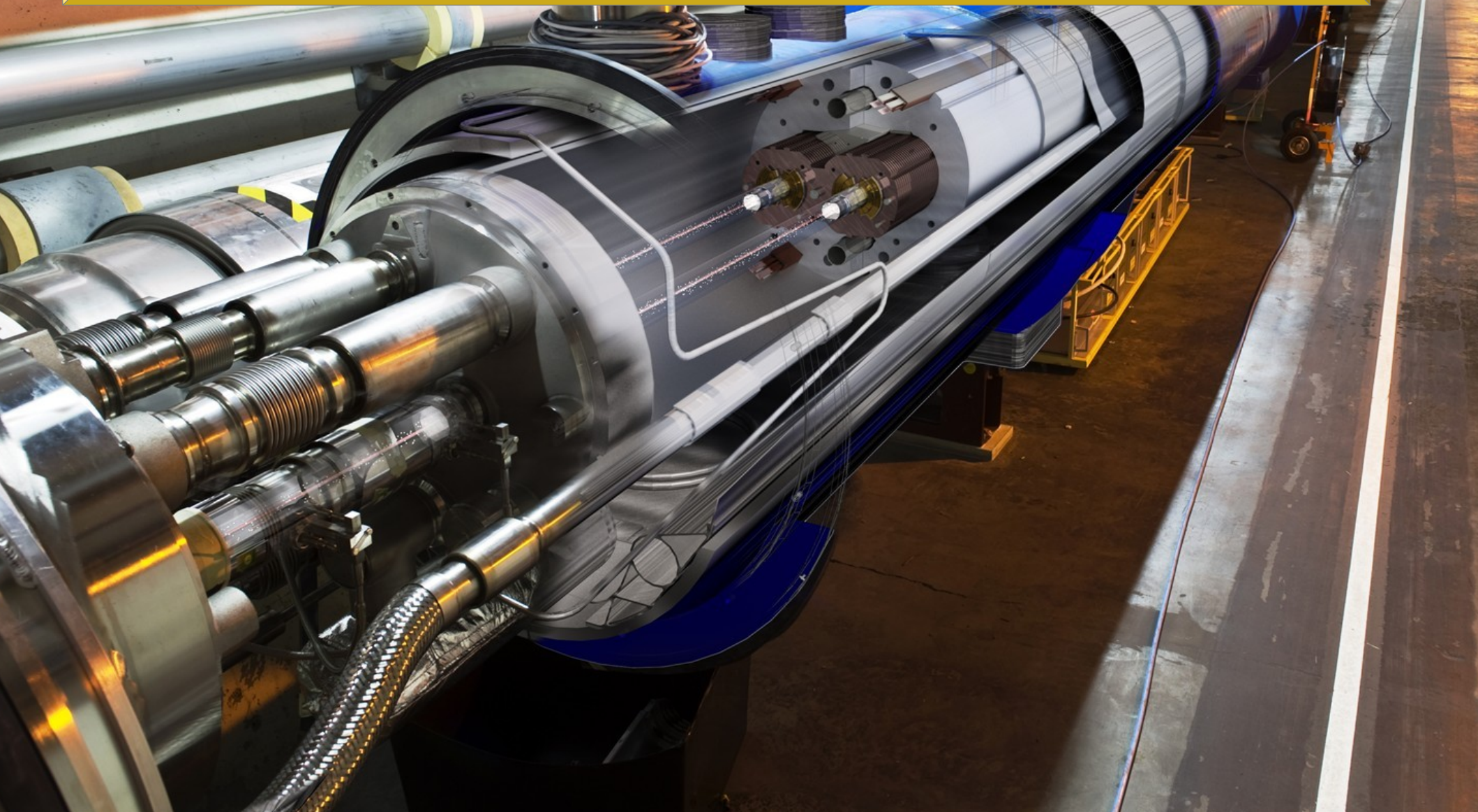


# Le LHC : la machine à superlatifs



# 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



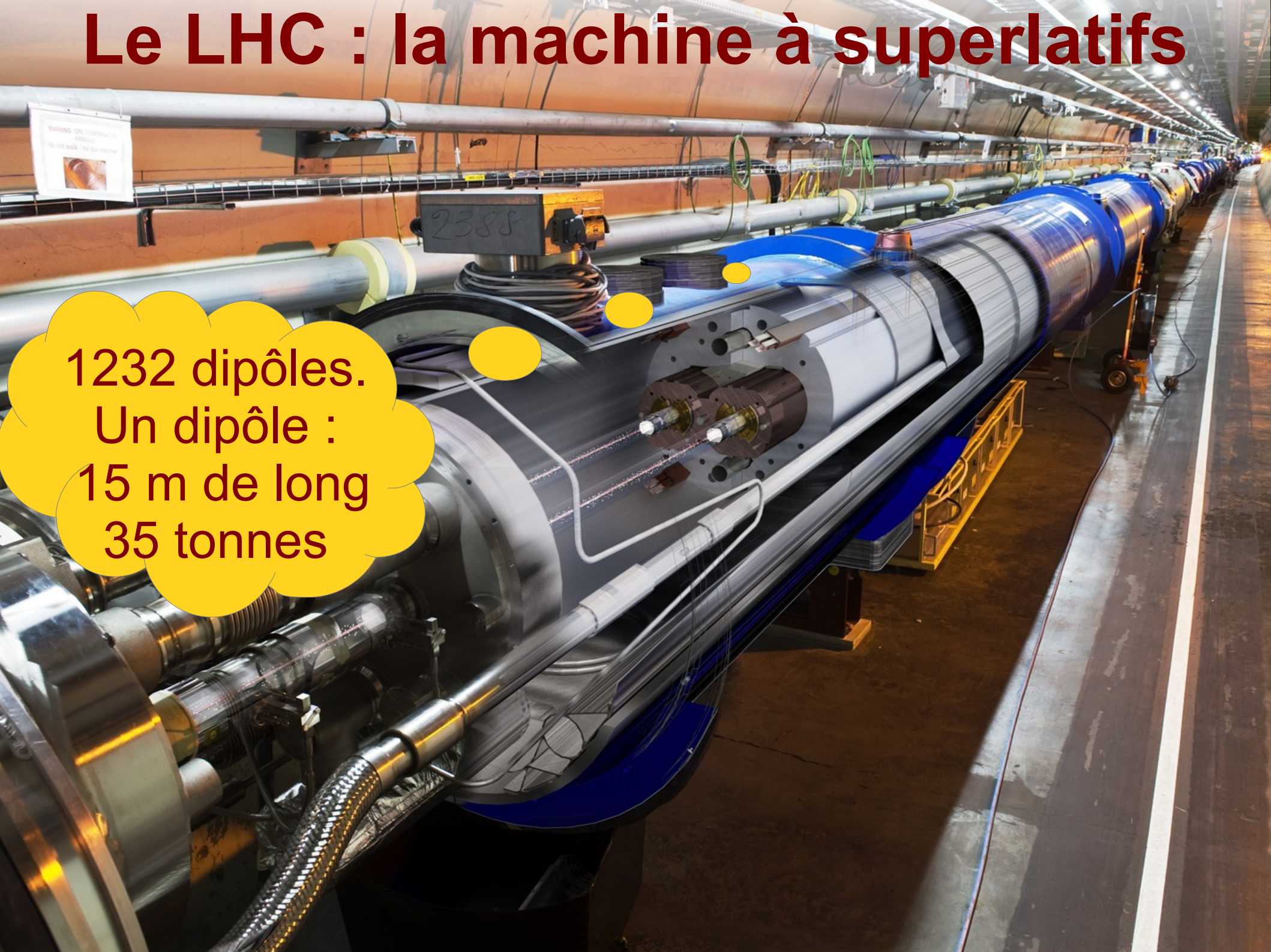
# Le LHC : la machine à superlatifs



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

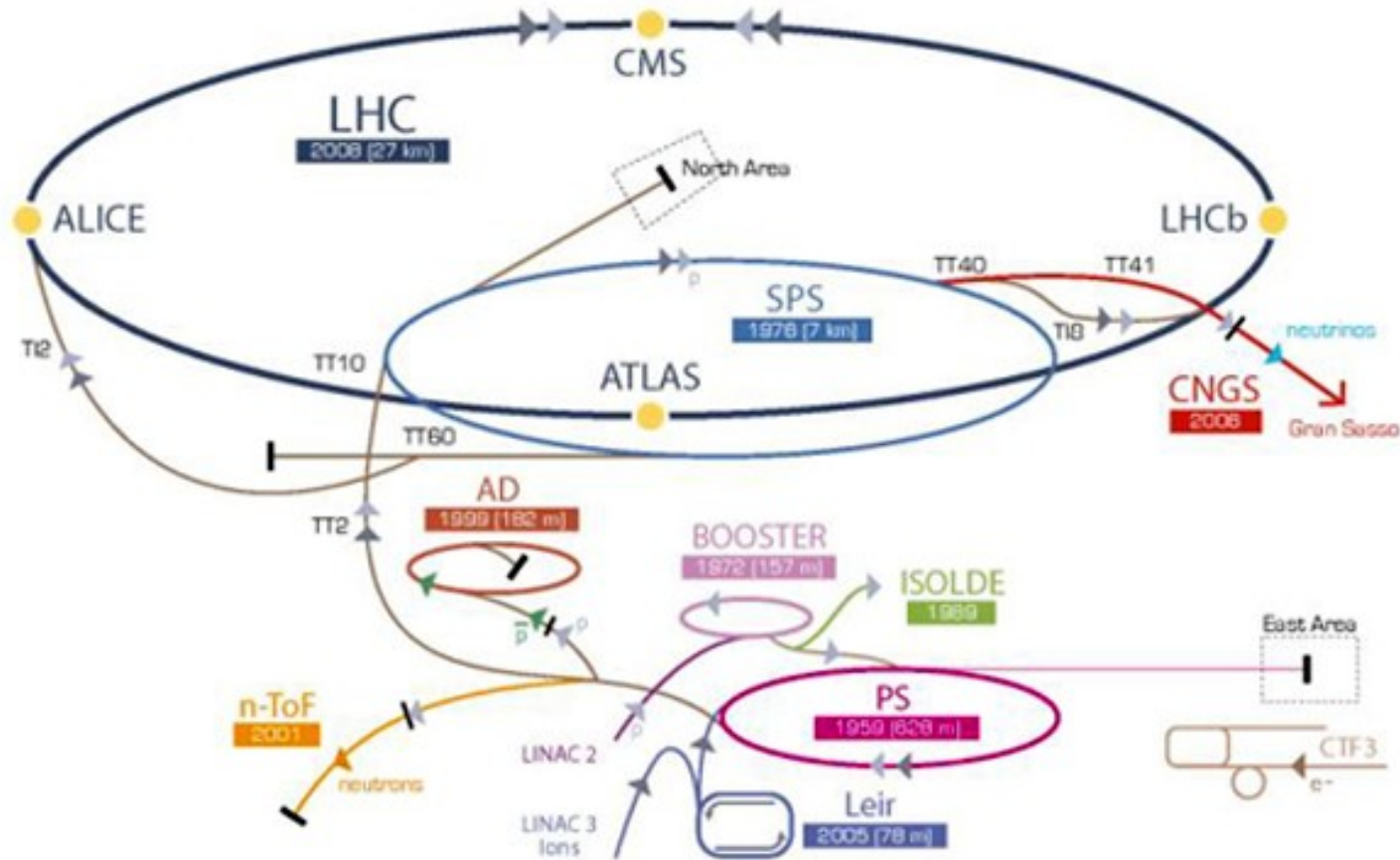


# Le LHC : la machine à superlatifs



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

# Le CERN : les accélérateurs



▶ p [protons]   ▶ ions   ▶ neutrons   ▶  $\bar{p}$  [antiproton]   ↔ conversion proton/antiproton   ▶ neutrinos   ▶ électrons

LHC Large Hadron Collider   SPS Super Proton Synchrotron   PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator   CTF3 Clic Test Facility   CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso   ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring   LINAC LINear ACcelerator   n-ToF Neutrons Time Of Flight



# Le LHC en action



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

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

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grands accélérateurs
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

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,



25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

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

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

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

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?



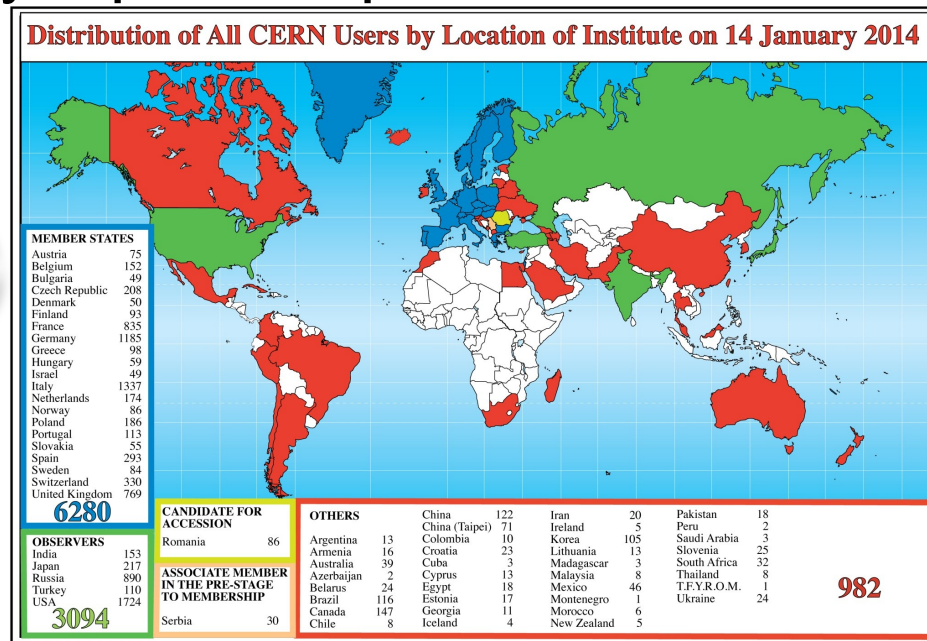
# Le CERN



*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*

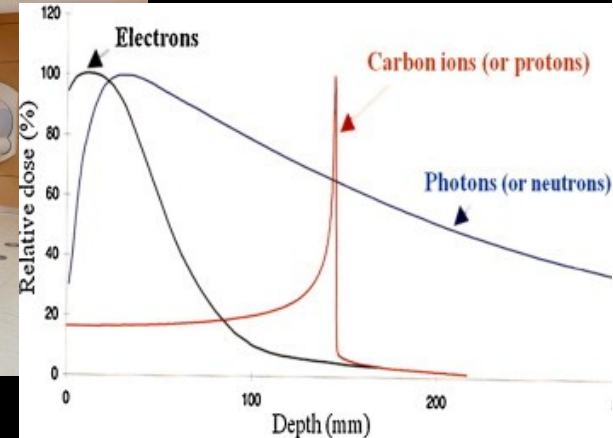
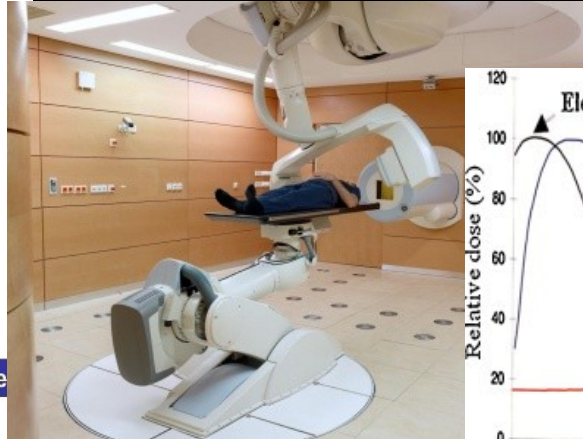
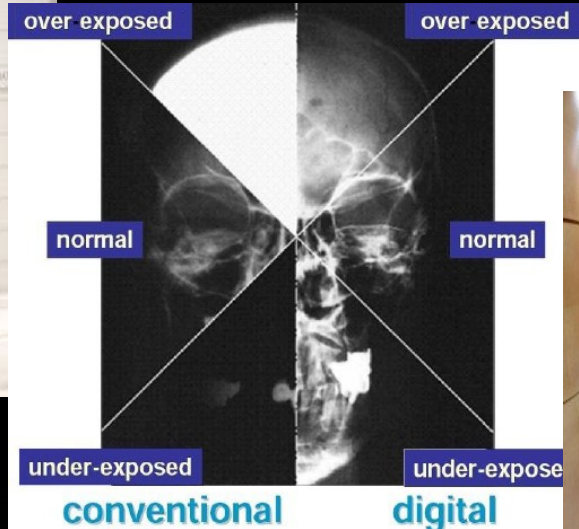
Le laboratoire européen pour la physique des particules

- organisation internationale
- créé en 1954 (festivités pour ses 60 ans l'an dernier)
- 21 état membres
- Emploie ~2500
- ~10000 utilisateurs
- 500 instituts, 80 pays



- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques / Plusieurs prix Nobel
- Formidable lieu de collaboration internationale
- Programme d'étudiant d'été

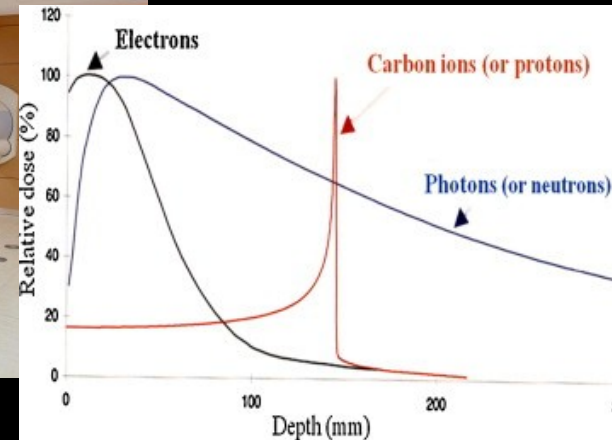
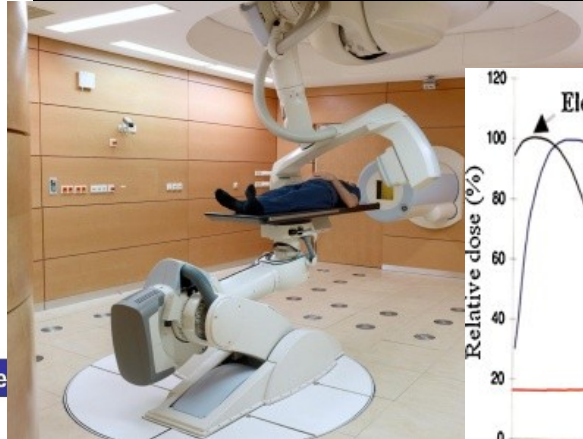
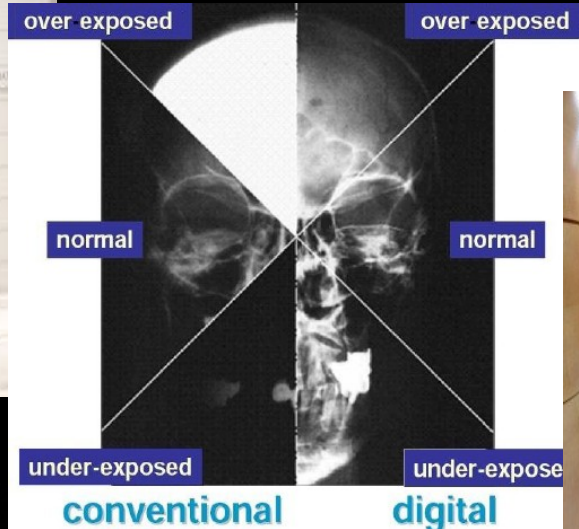
# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

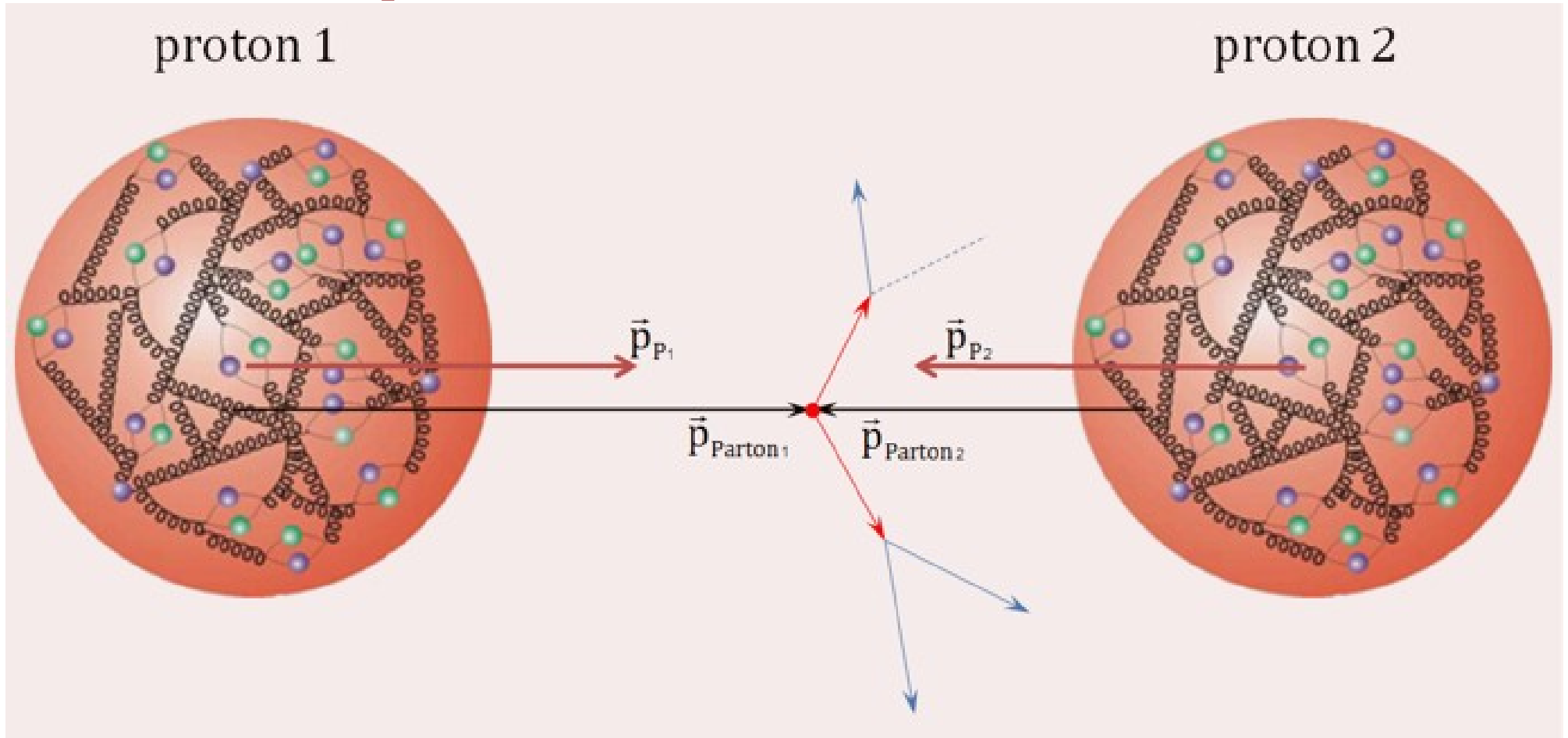


Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



► Le Web a été inventé au CERN !

# Deux protons se rencontrent...

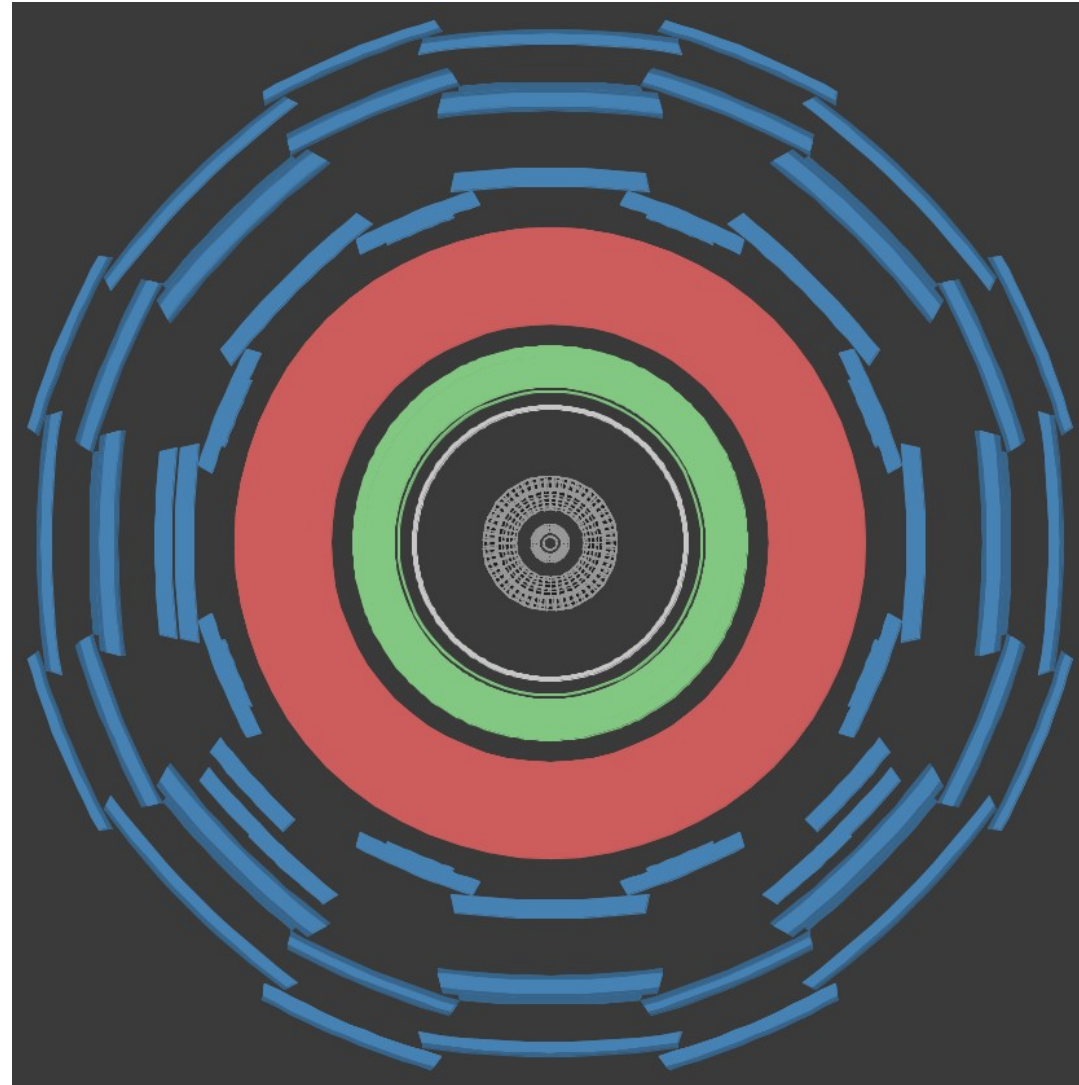


- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

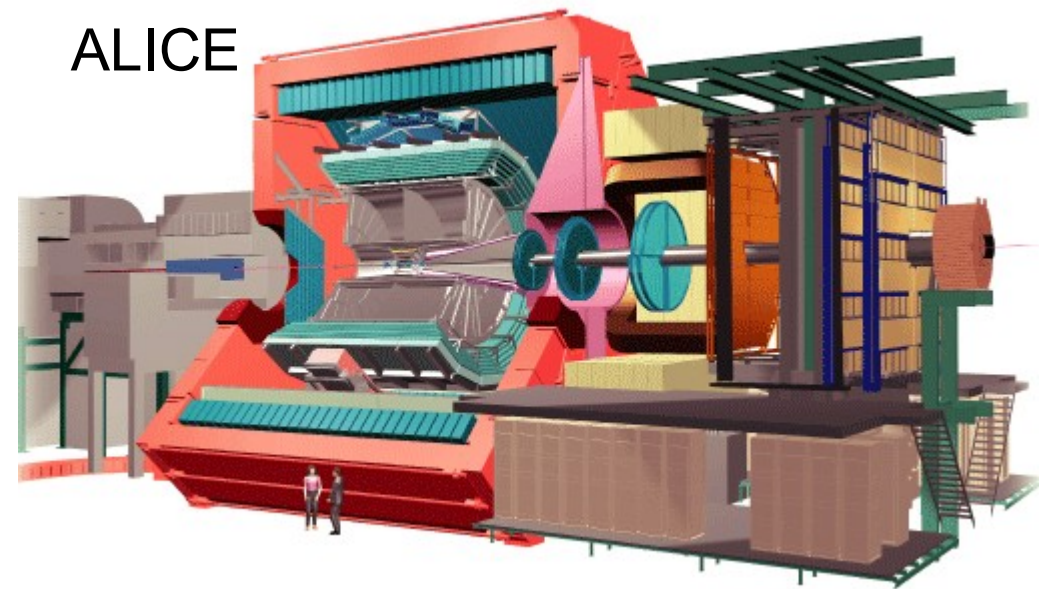
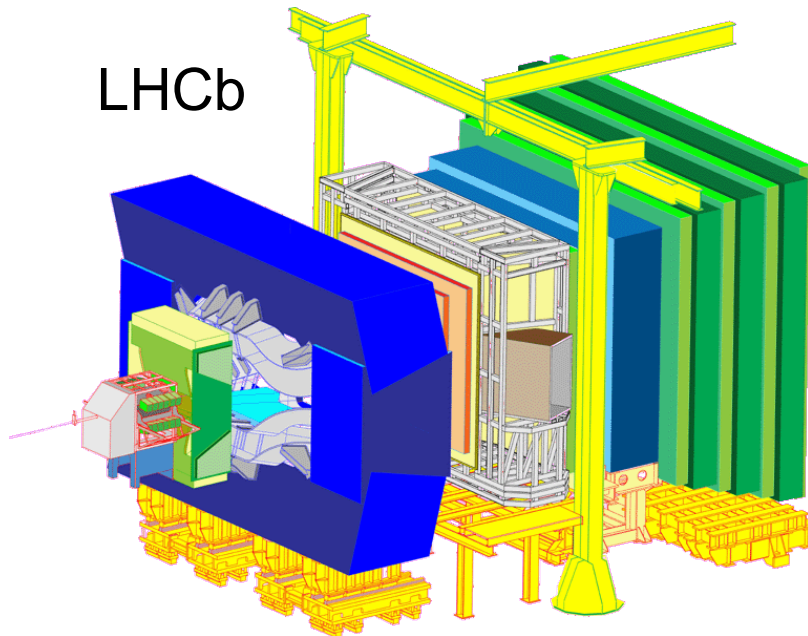
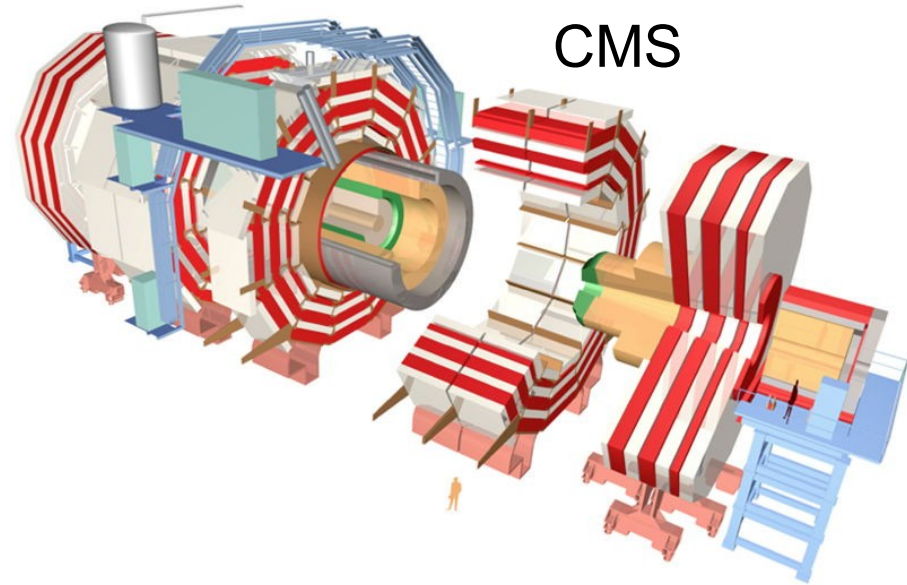
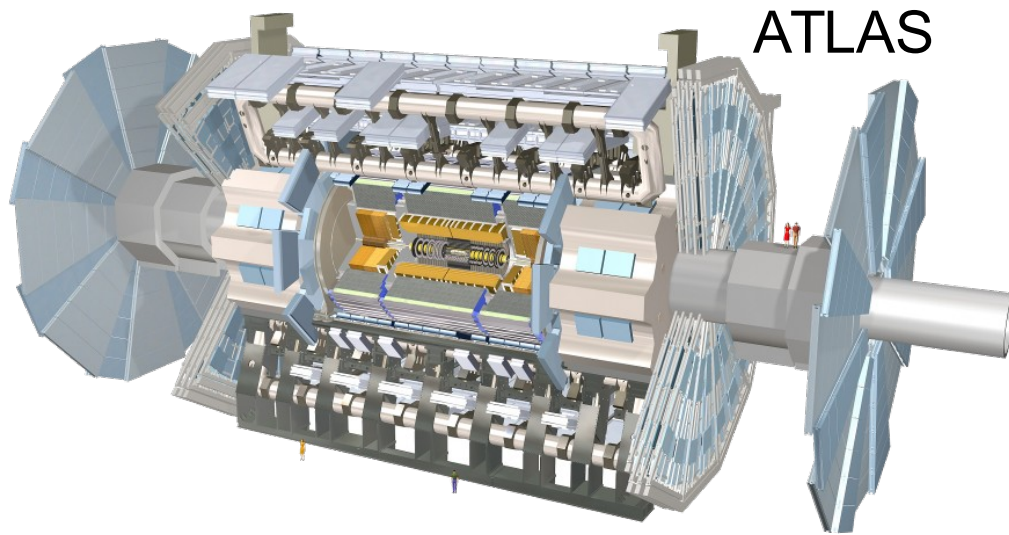


# Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

- 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



# Les détecteurs géants du LHC



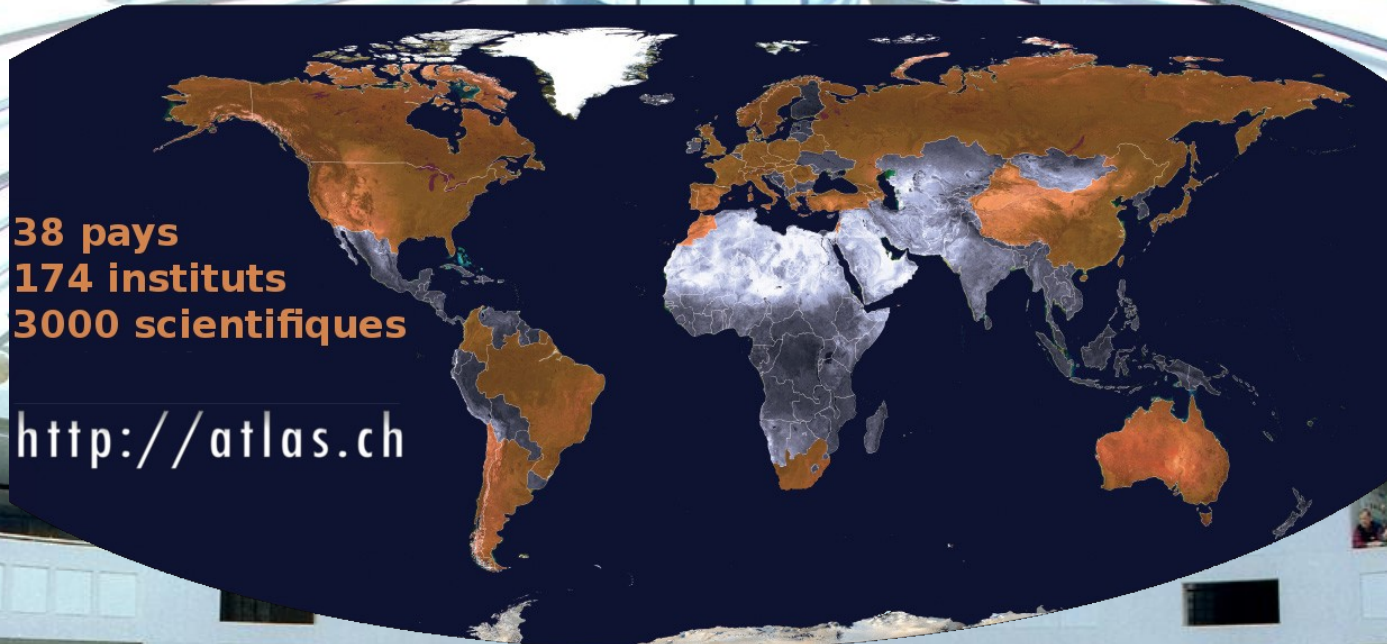
# La collaboration ATLAS



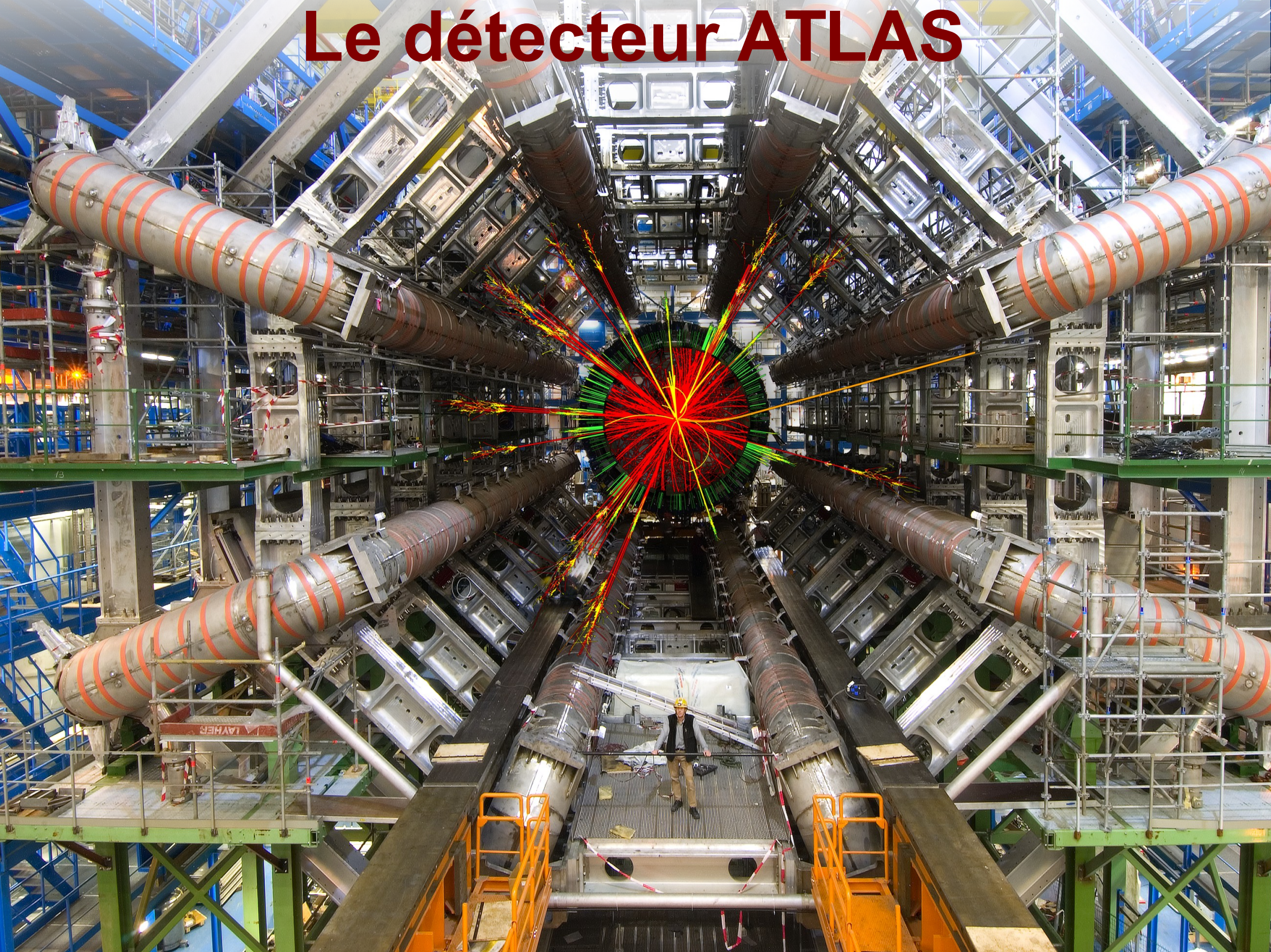
# La collaboration ATLAS

38 pays  
174 instituts  
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

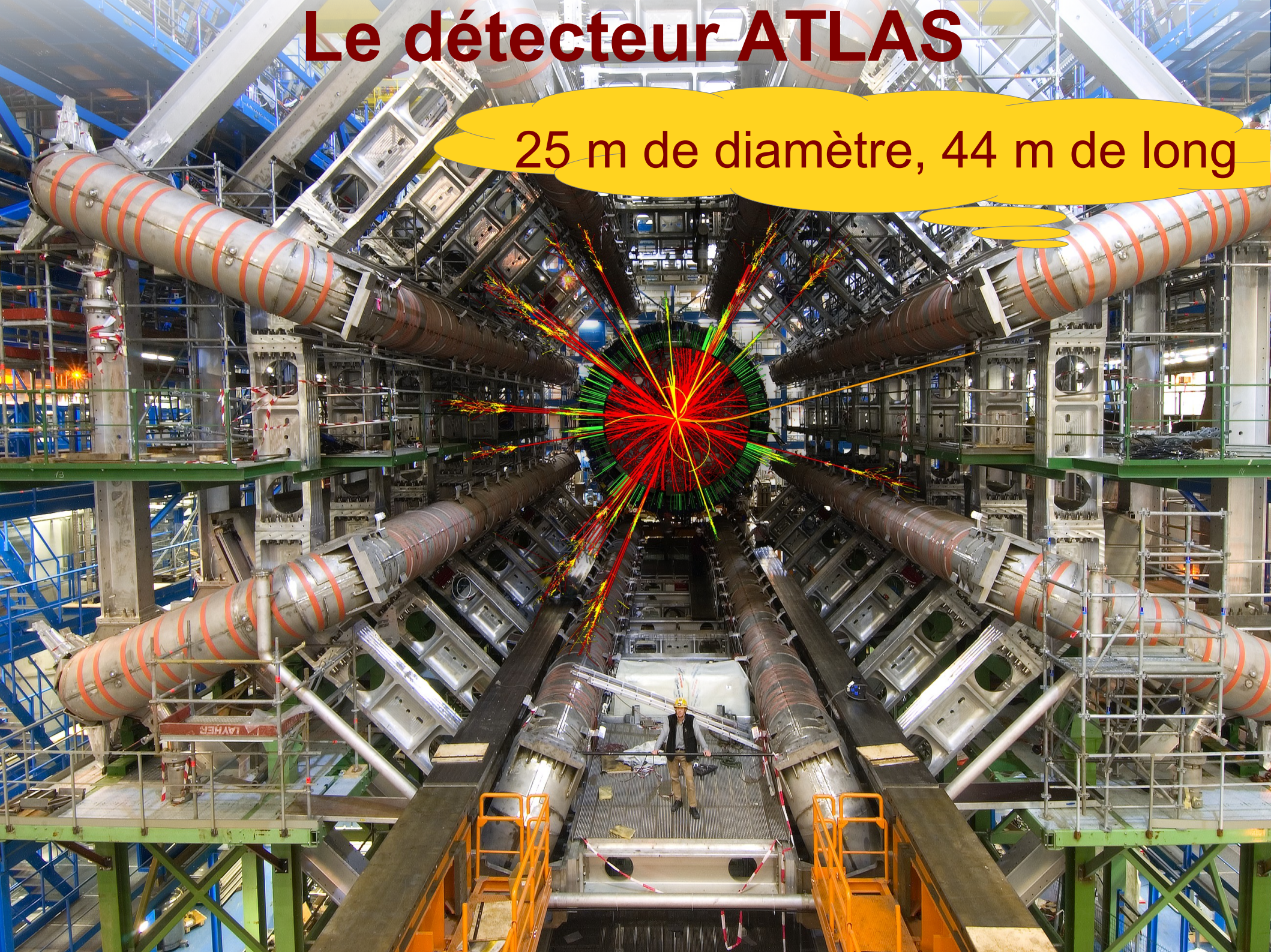


# Le détecteur ATLAS



# Le détecteur ATLAS

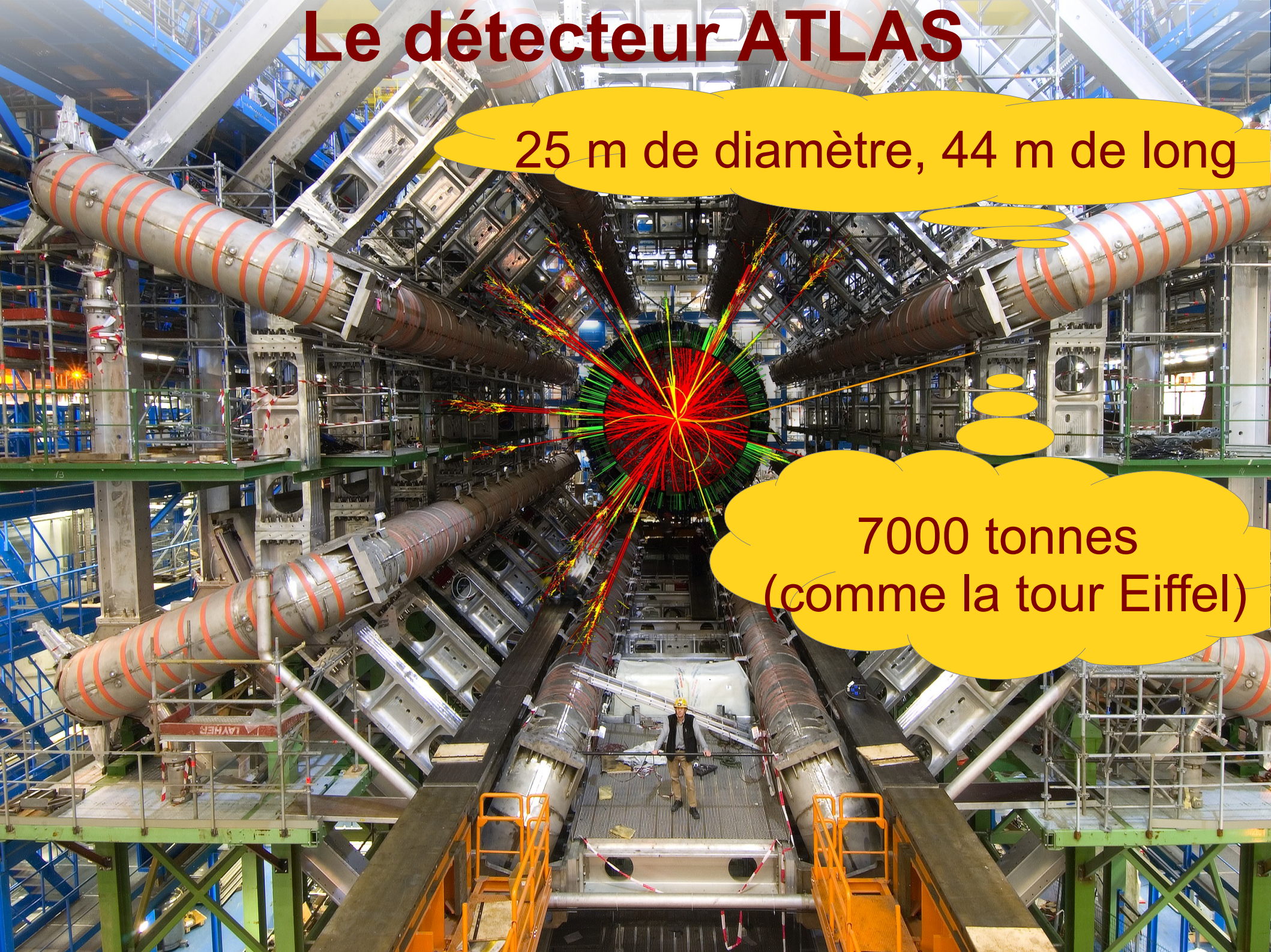
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

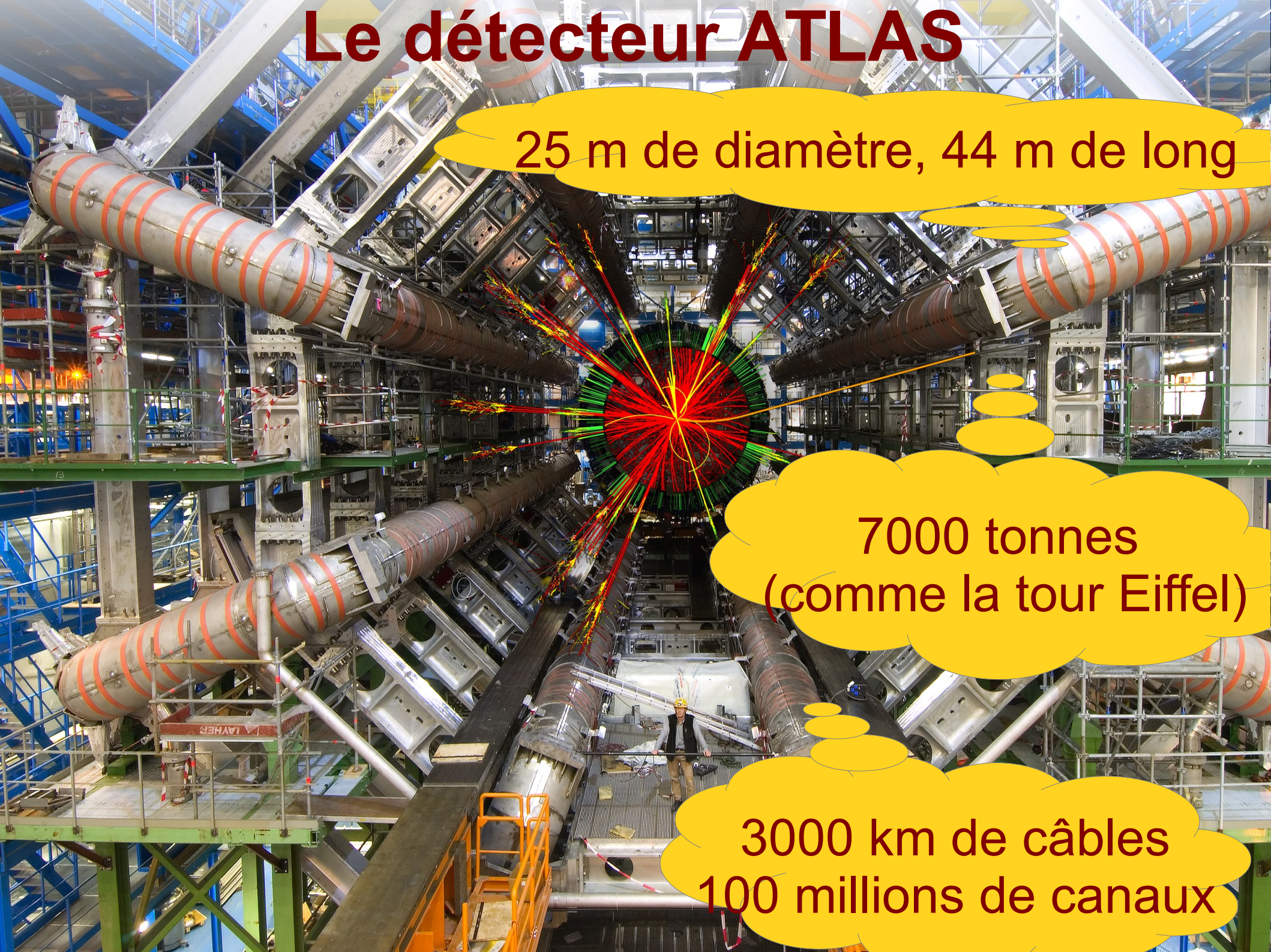


# Le détecteur ATLAS

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)

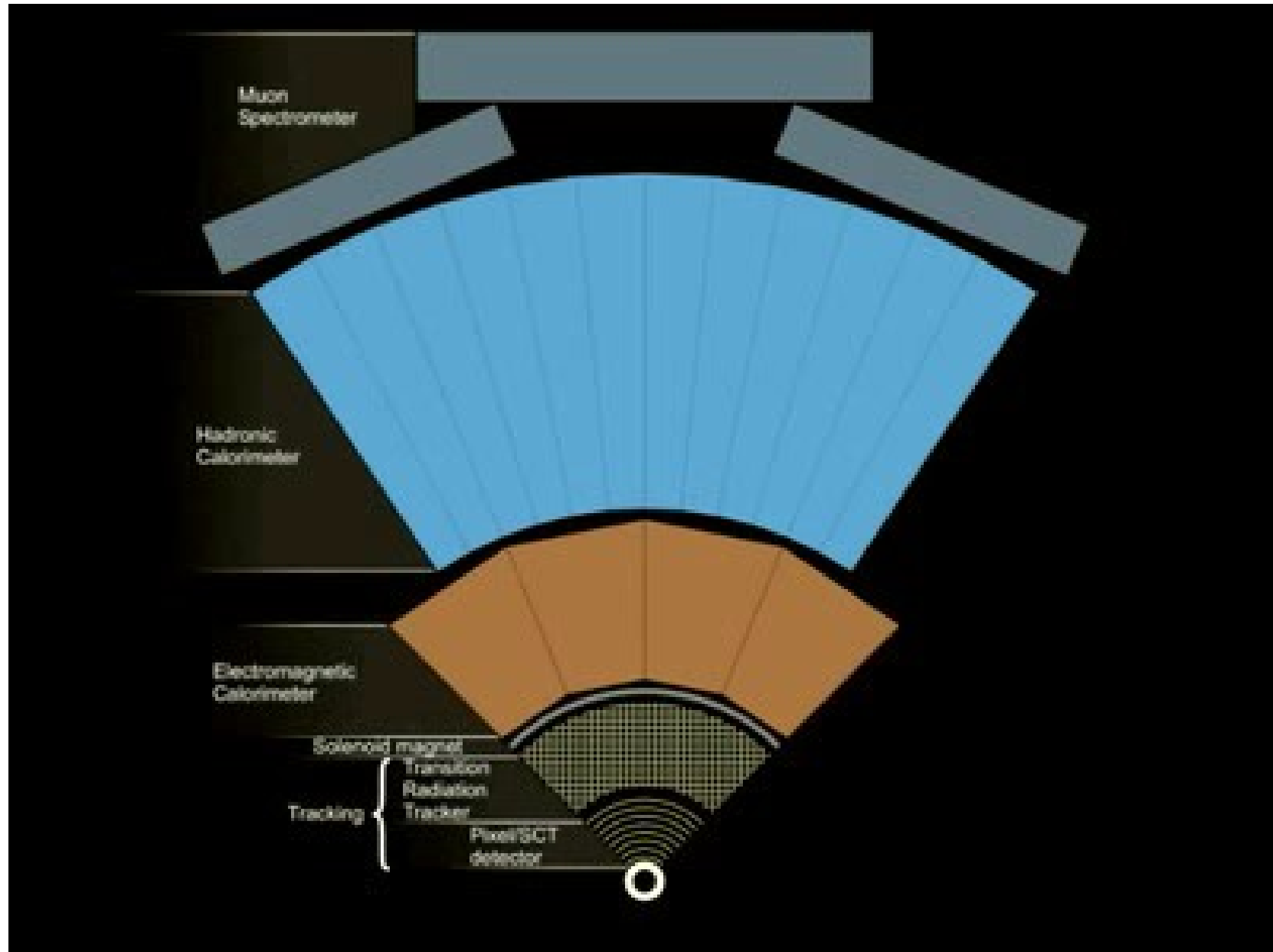
Observe 20 collisions  
simultanées, 40 millions  
de fois par seconde !

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

# Le détecteur ATLAS avec des explications



# Interaction des particules avec le détecteur

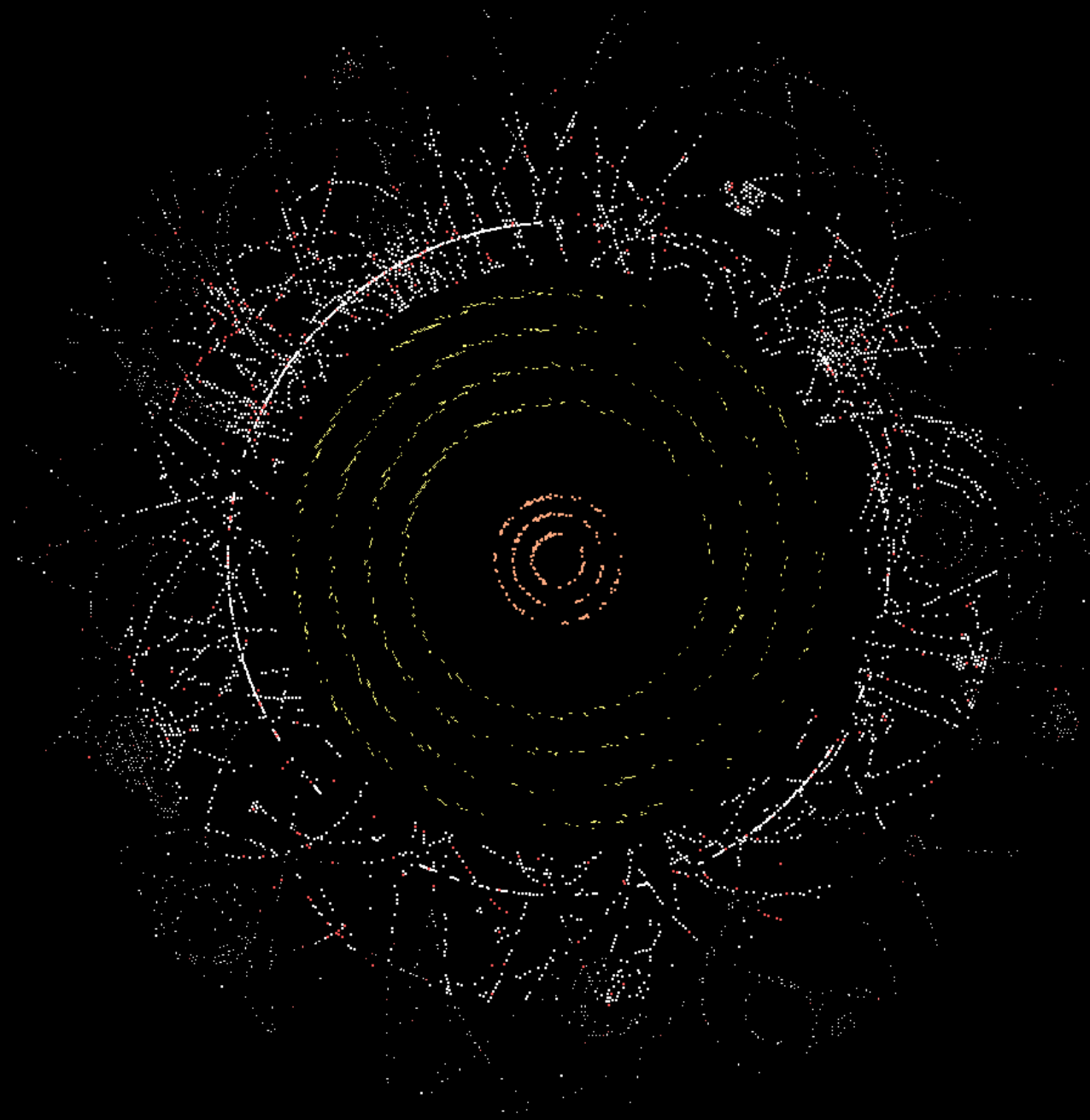


# Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m<sup>2</sup> de silicium

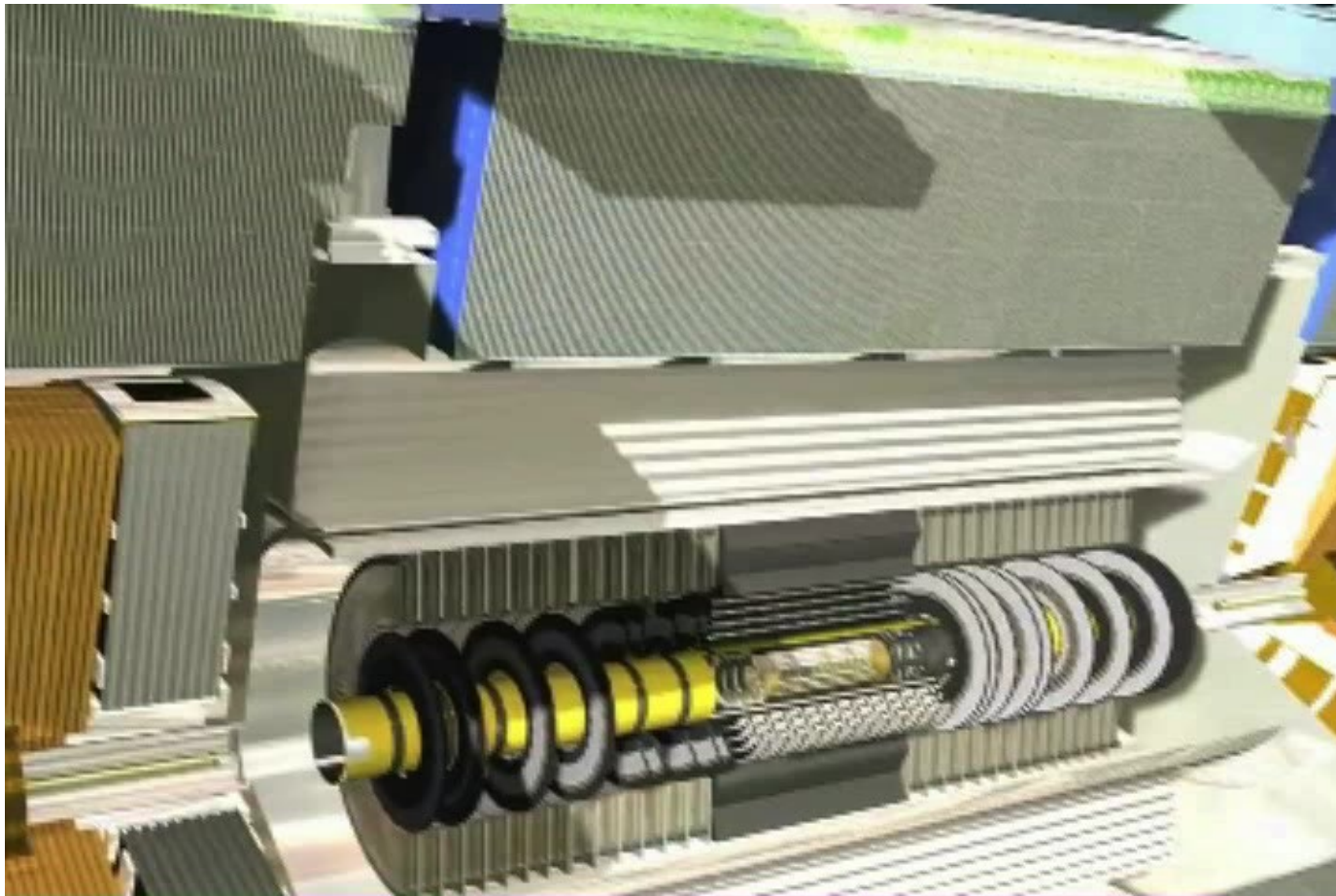
# Passage des particules



# Reconstruction des trajectoires



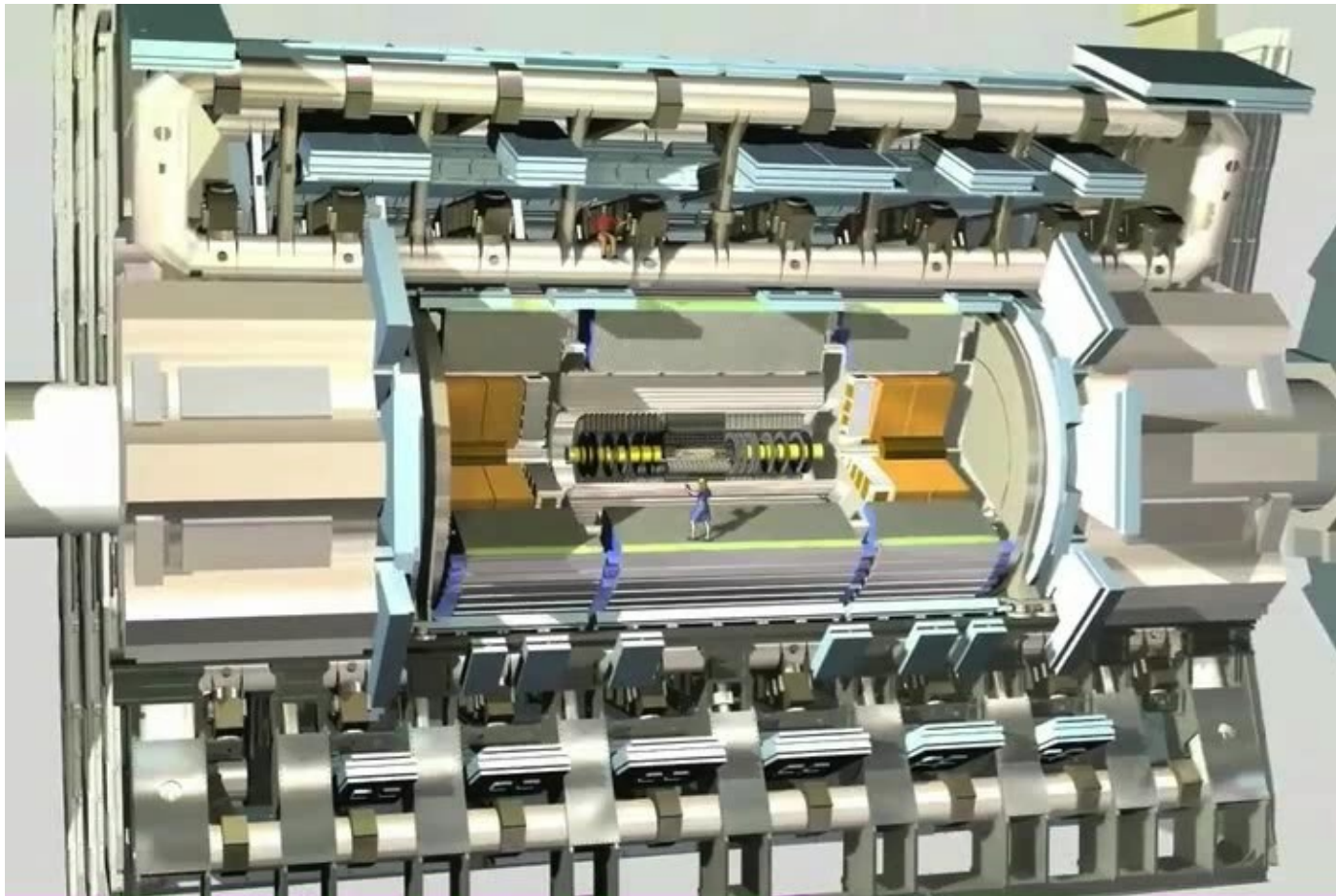
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



- Argon liquide à  $-183^{\circ}\text{C}$

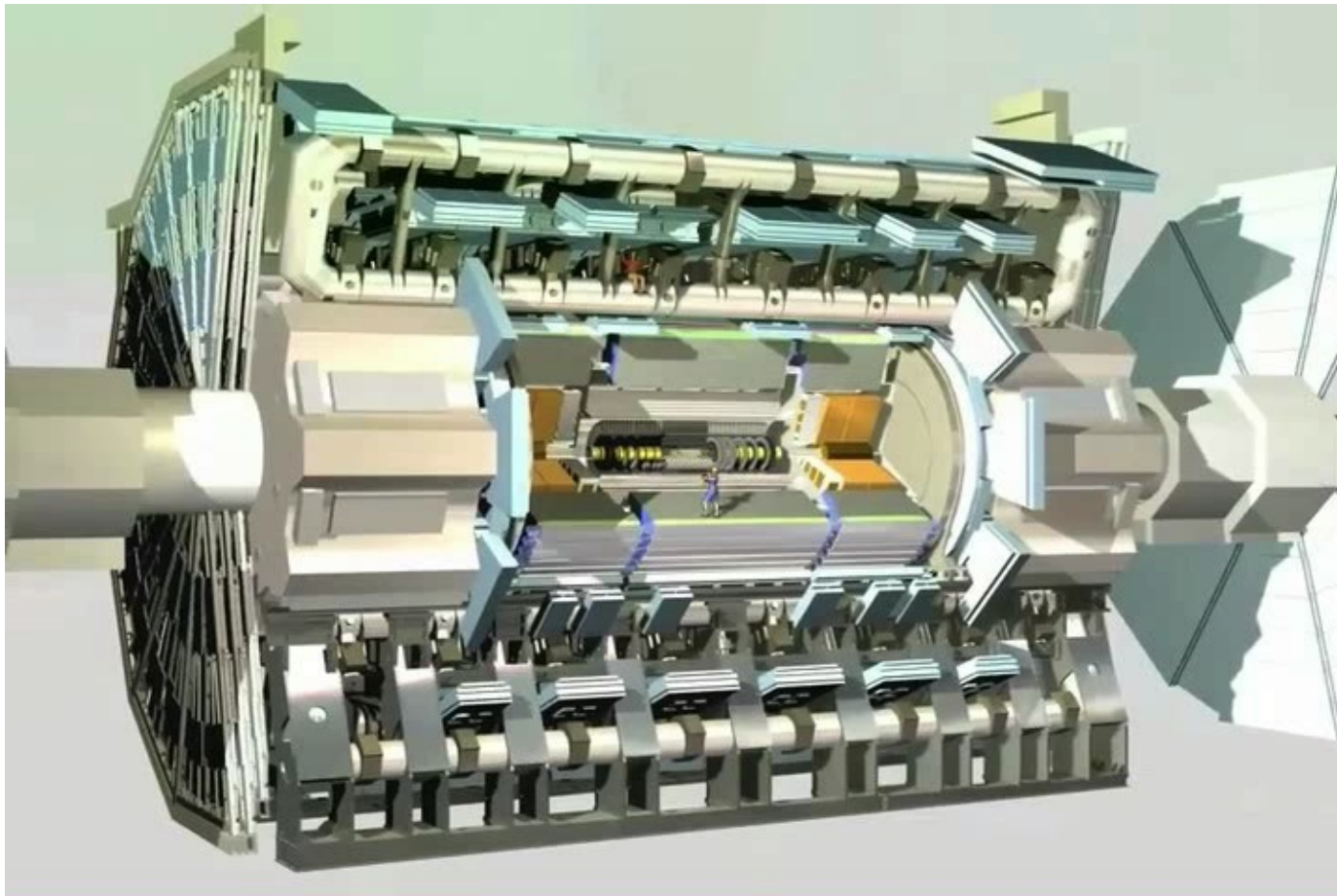


# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



- 500 000 tuiles de plastique scintillant

# Mesurer le passage des particules dans le système à muons

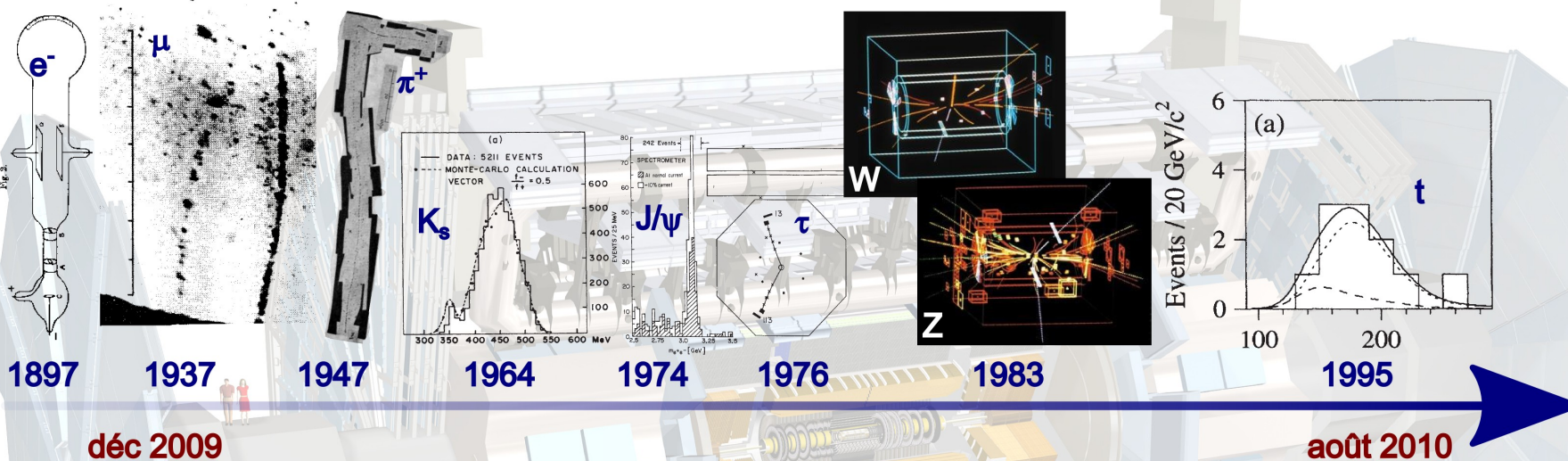


- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

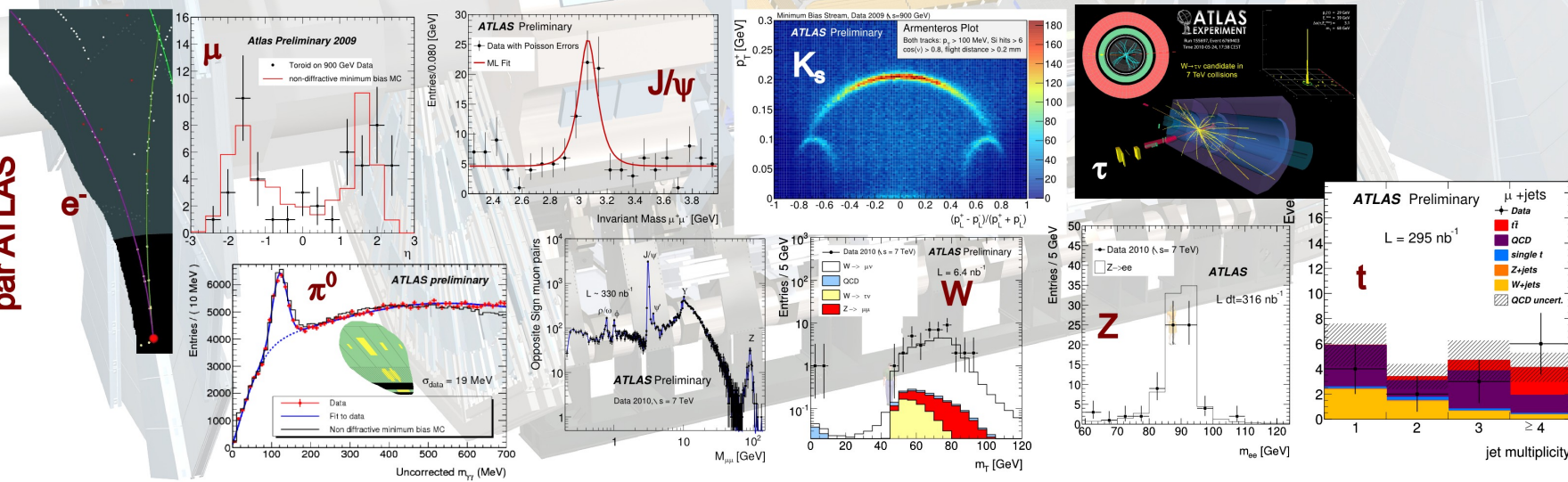
Découverte historique



déc 2009

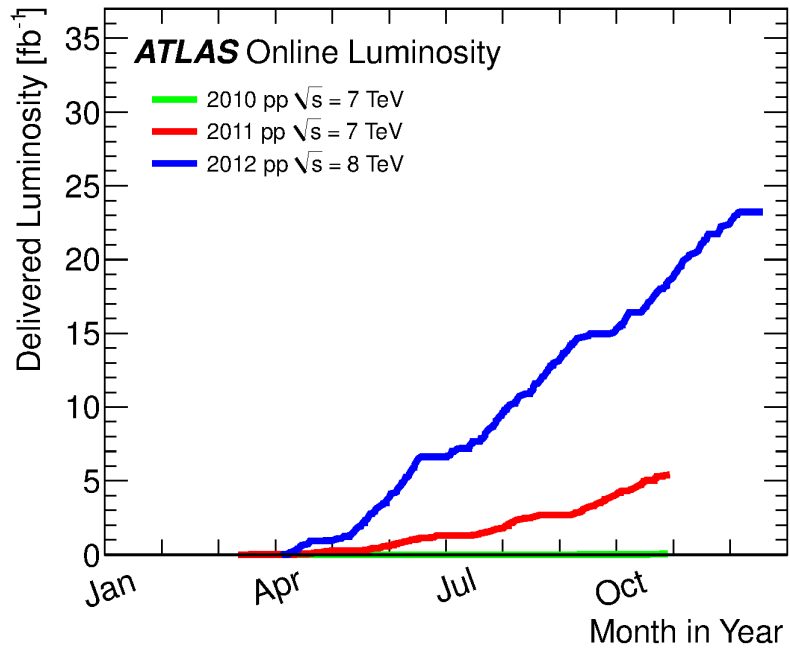
août 2010

Redécouverte par ATLAS

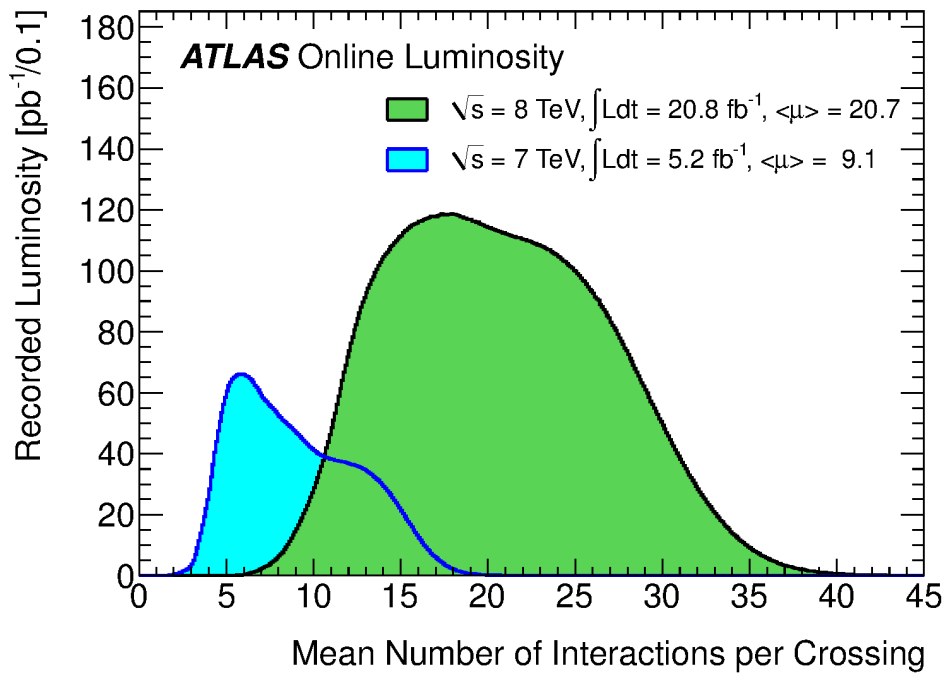
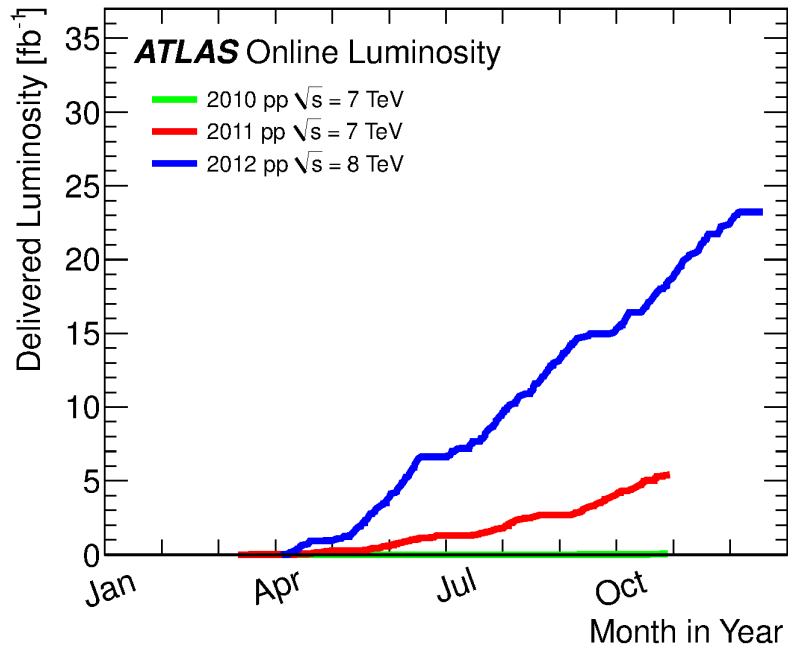


# Accumulation des données

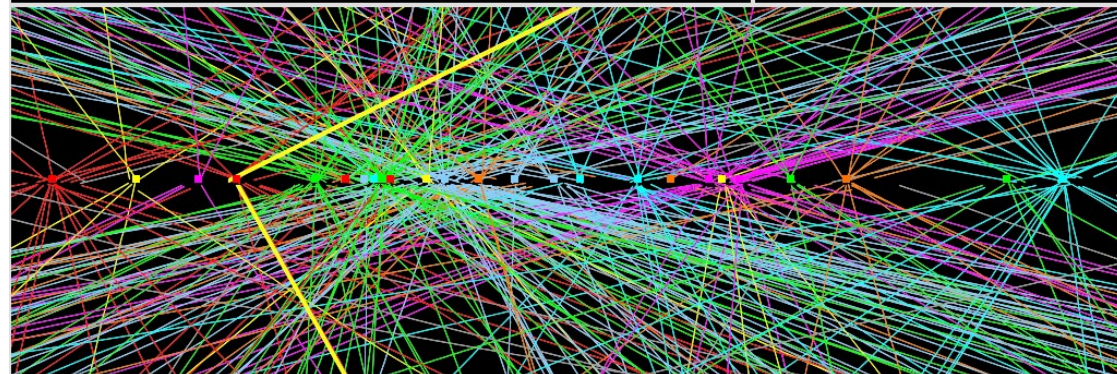
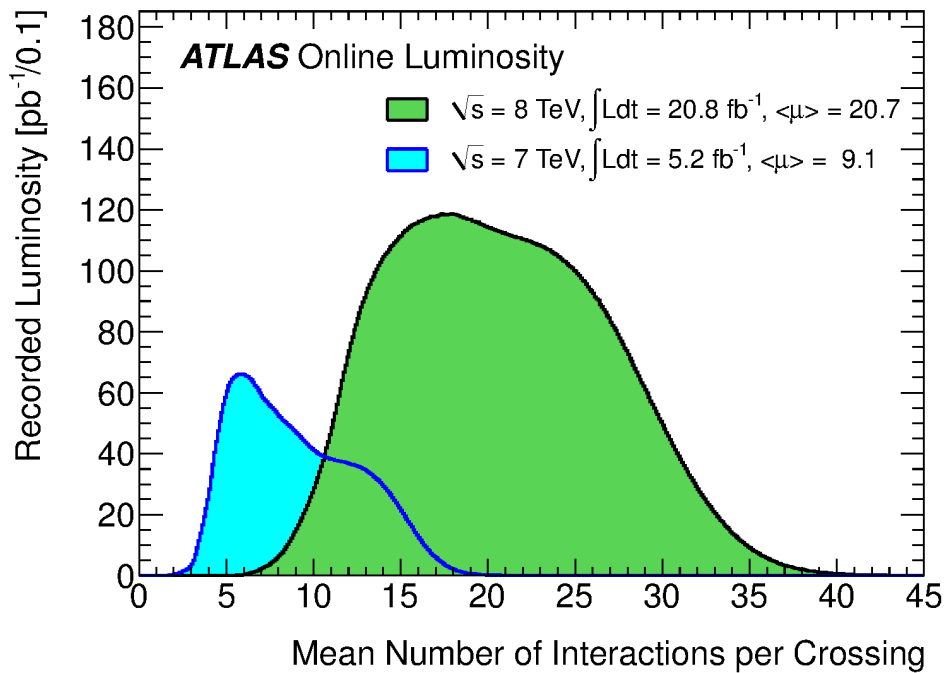
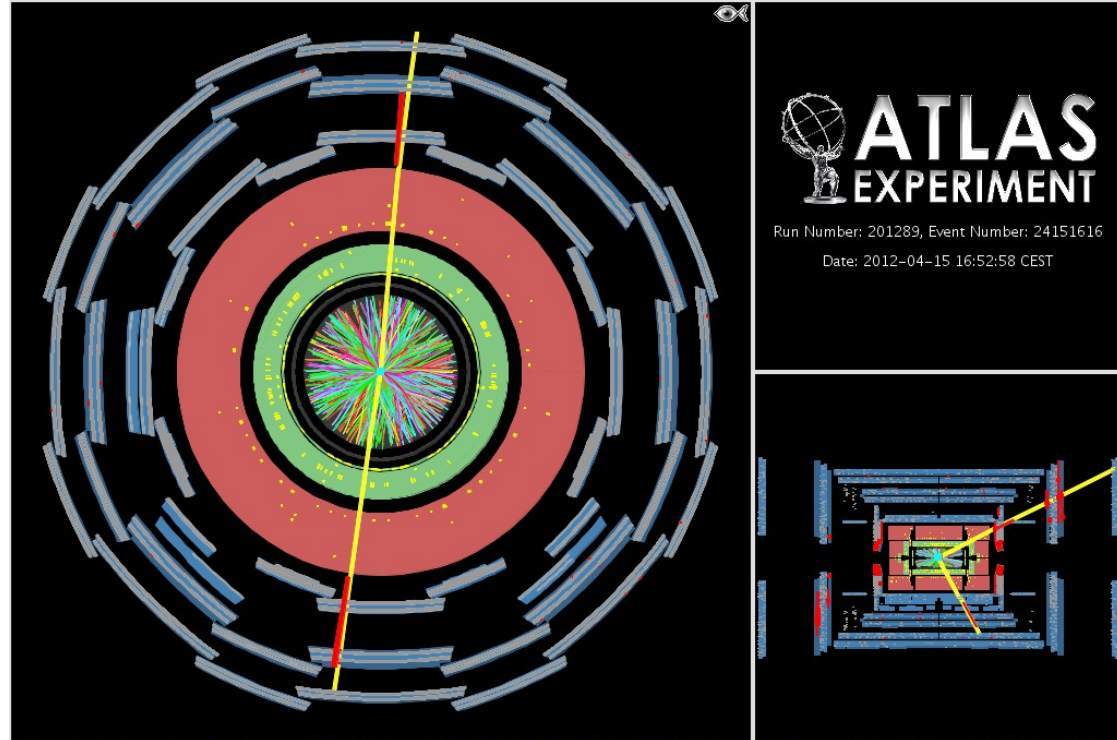
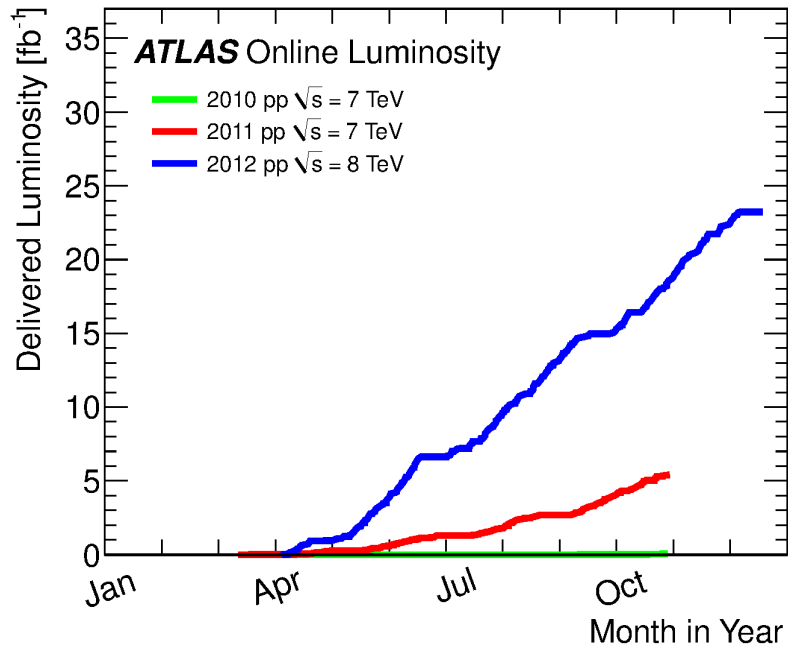
# Accumulation des données



# Accumulation des données

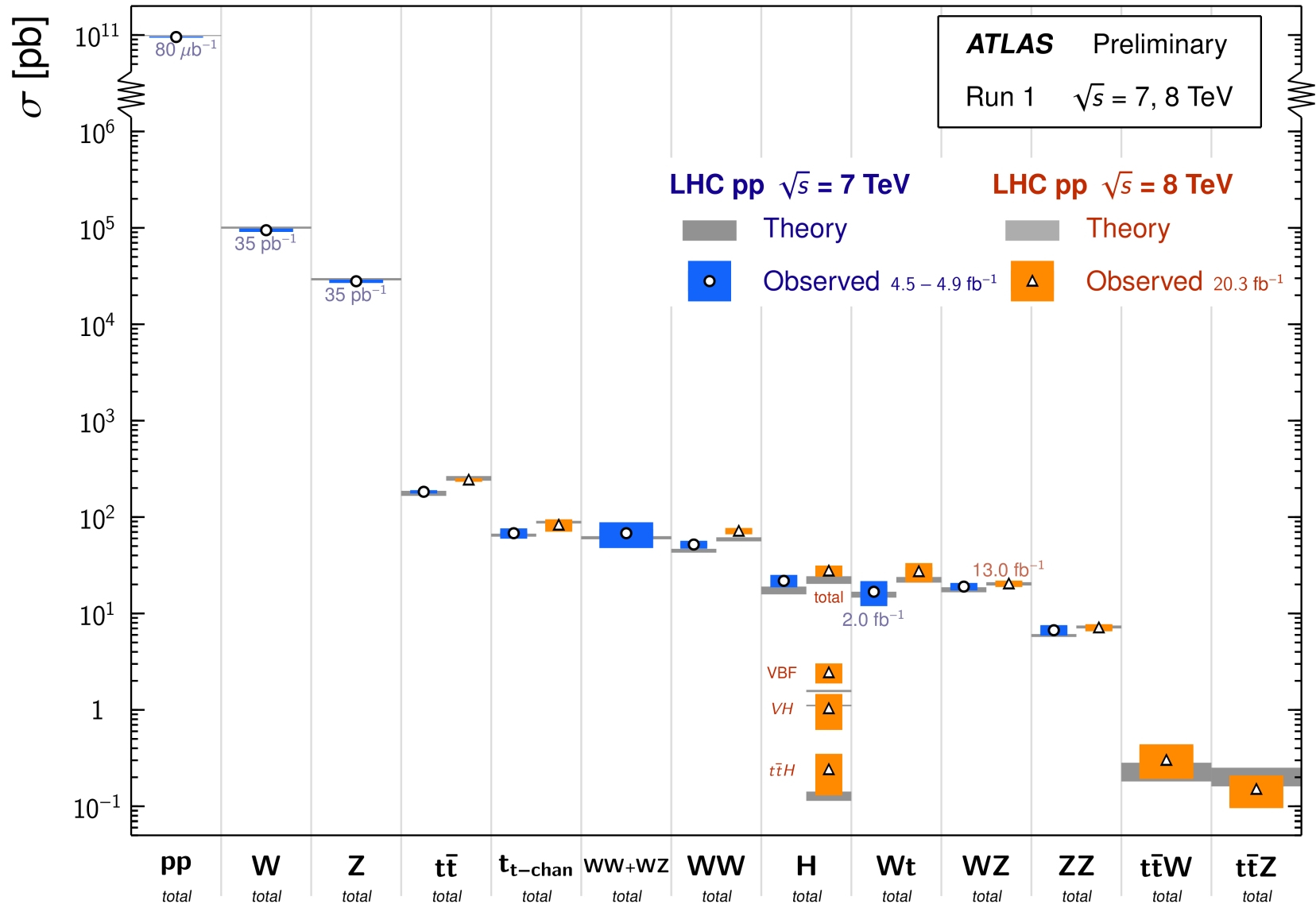


# Accumulation des données



# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements Status: March 2015



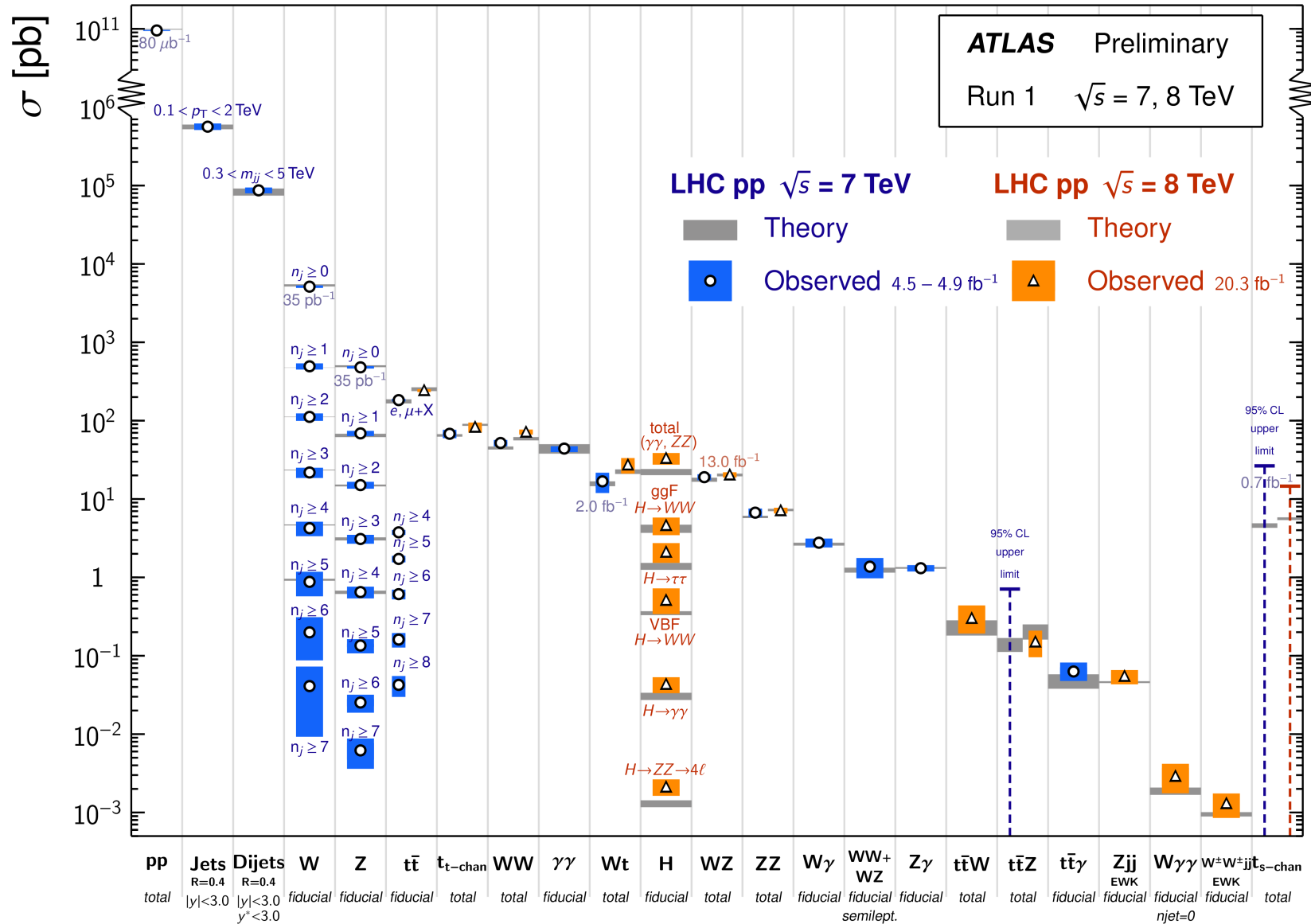
- Très bon accord avec les prédictions théoriques !



# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2015



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

# 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



Nouvelle affiche du SM



[indico.in2p3.fr/e/MasterclassAjaccio2016](http://indico.in2p3.fr/e/MasterclassAjaccio2016)

[physicsmasterclasses.org](http://physicsmasterclasses.org)



[atlas.ch](http://atlas.ch)

[atlas-live.cern.ch](http://atlas-live.cern.ch)

[twitter.com/ATLASexperiment](https://twitter.com/ATLASexperiment)

[www.facebook.com/ATLASexperiment](https://www.facebook.com/ATLASexperiment)

[www.google.com/+ATLASexperiment](https://www.google.com/+ATLASexperiment)

[www.youtube.com/theATLASExperiment](https://www.youtube.com/theATLASExperiment)

[www.lhc-france.fr](http://www.lhc-france.fr)

[www.cppm.in2p3.fr](http://www.cppm.in2p3.fr)

[cern.ch](http://cern.ch)

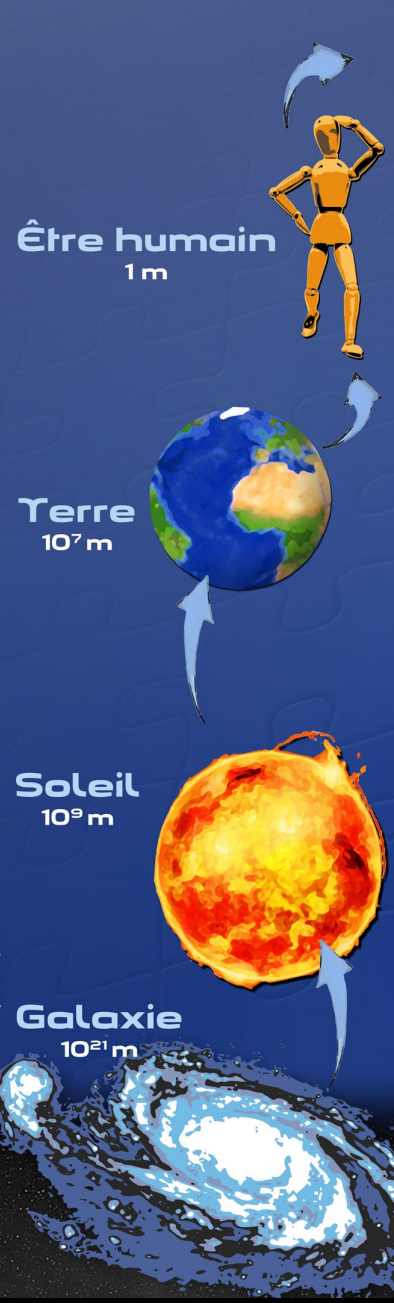
[twitter.com/cern](https://twitter.com/cern)

[www.particuleselementaires.fr](http://www.particuleselementaires.fr)



<http://atlasathome.cern.ch>

# Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c <sup>2</sup>	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c <sup>2</sup>	$d$ bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c <sup>2</sup>	<b>Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.</b>  $t = 1,6 \cdot 10^{-22}$ s $Q = 0$ $m = 125$ GeV/c <sup>2</sup>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c <sup>2</sup>	$c$ charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c <sup>2</sup>	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c <sup>2</sup>	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c <sup>2</sup>	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c <sup>2</sup>	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c <sup>2</sup>	



## INTERACTIONS FONDAMENTALES

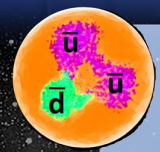
Portée	Interaction
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte
infinie	Gravitation

<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Désintégrations radioactives β <sup>+</sup> et β <sup>-</sup> de certains noyaux instables
<b>Photon γ</b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Films utilisés

- Zoom de l'infiniment grand à l'infiniment petit  
<http://www.science-et-vie.com/les-applications/le-grand-zoom-de-tout-lunivers>
- Chaîne d'accélération du LHC  
<http://cds.cern.ch/record/2020780>
- Détection des particules dans ATLAS  
<http://www.atlas.ch/multimedia/how-atlas-detects-particles.html>
- ATLAS : un nouvel espoir (épisode I)  
<https://cds.cern.ch/record/1458001>
- Le détecteur à pixels  
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/inner/index.html>
- Le calorimètre électromagnétique  
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/ecal/index.html>
- Le calorimètre hadronique  
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/hcal/index.html>
- Le détecteur de muons  
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/muons/index.html>
- Désintégration d'un boson de Higgs en deux photons dans ATLAS  
<http://www.atlas.ch/multimedia/2-photon-event.html>
- Evolution dans le temps du spectre de masse  $H \rightarrow \gamma\gamma$   
<http://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/Hgg-FloatingScale-Short2.gif>
- Evolution dans le temps du spectre de masse  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell\ell$   
<http://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/4I-FixedScale-NoMuProf2.gif>
- Bille qui tourne et brisure de symétrie  
<https://indico.in2p3.fr/event/10164/material/5/0.wmv>