

Accélérateurs et détecteurs

Centre de physique des particules de Marseille

INTERNATIONAL

MASTERCLASSES

hands on particle physics



IN2P3
Les deux infinis



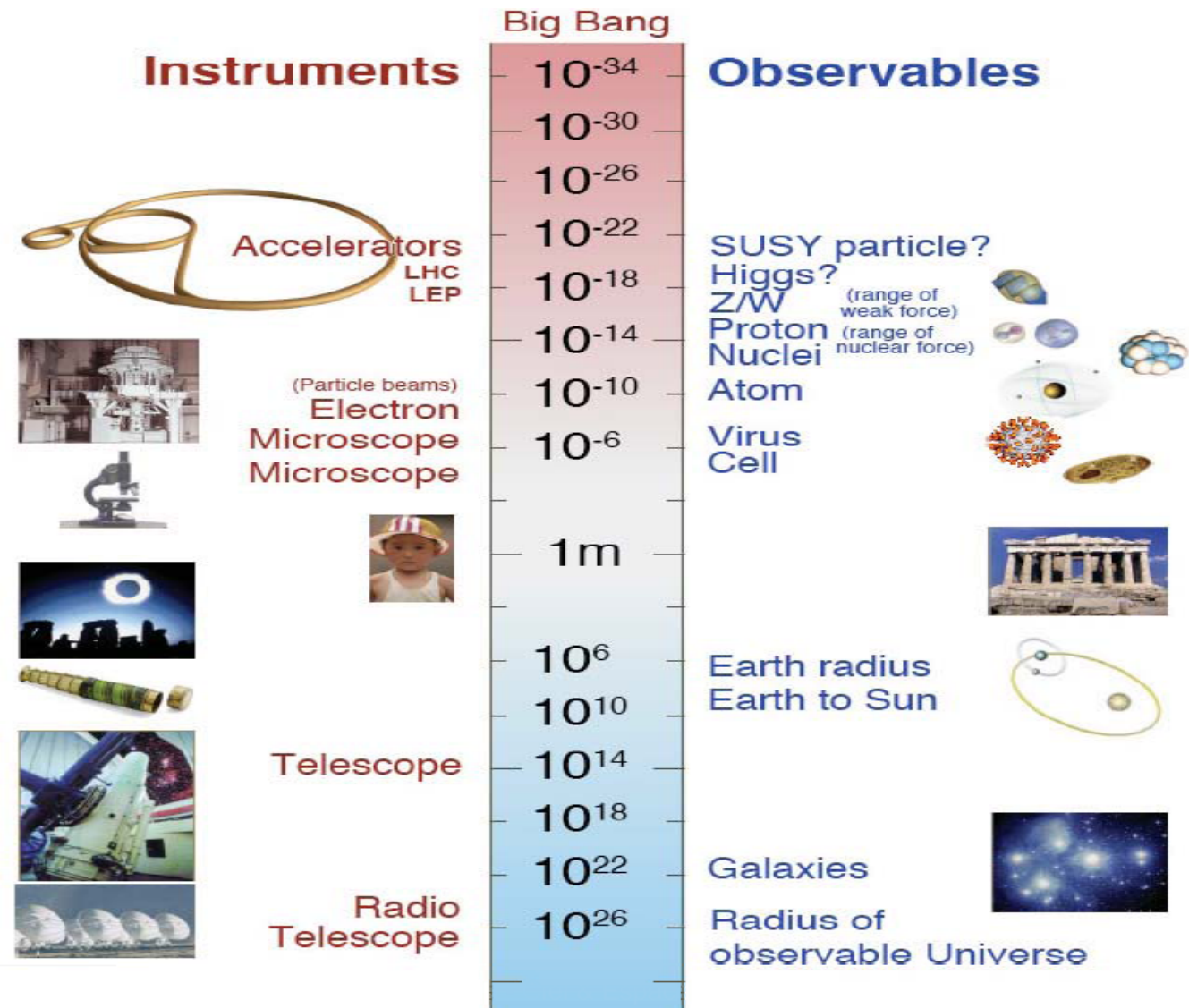
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

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

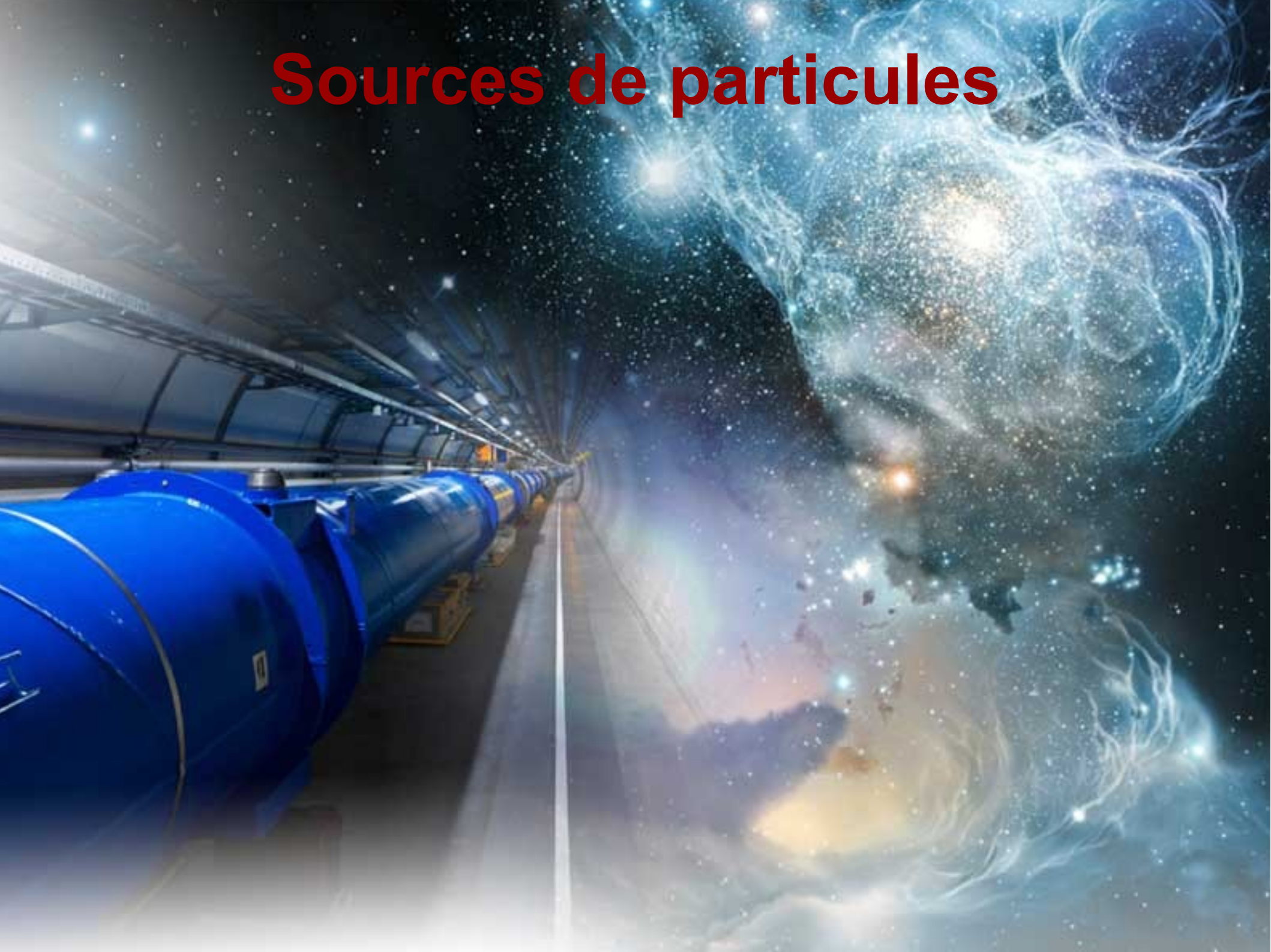
- ▶ longueur d'onde associée $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

- ▶ $E = mc^2$



Sources de particules



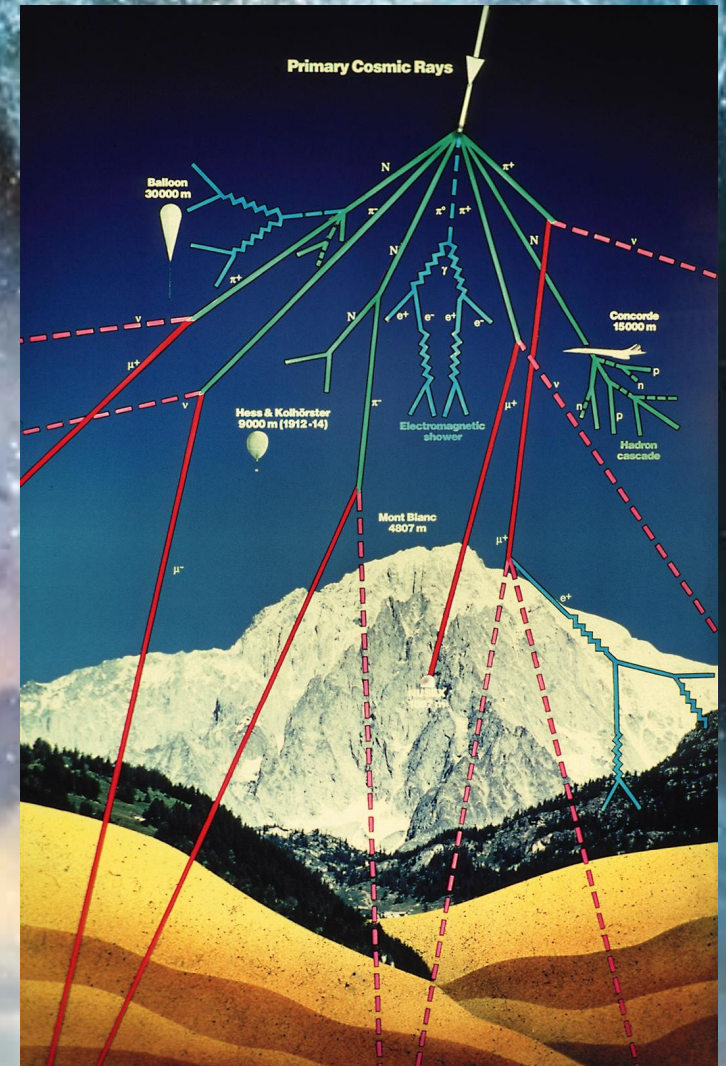
Sources de particules

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



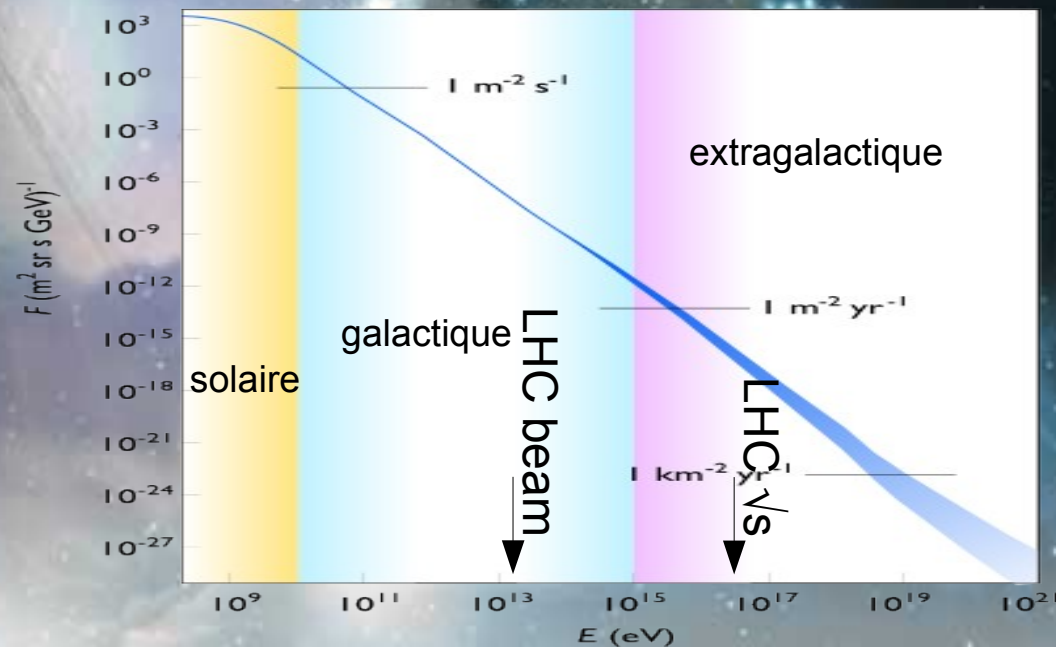
Sources de particules

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

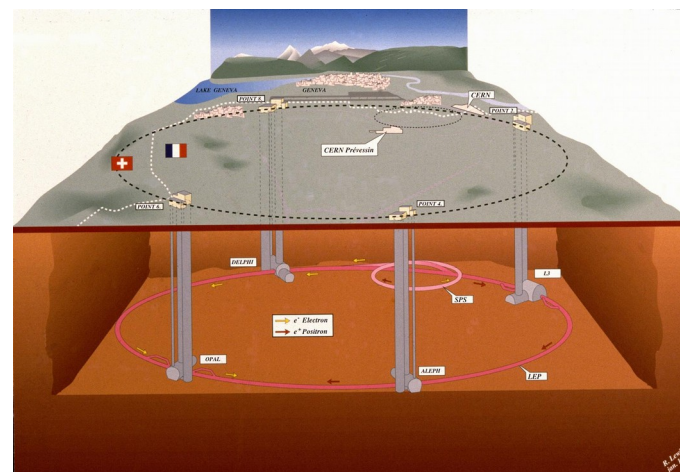
- ▶ Au CERN, Genève
- ▶ Collisions e^+e^-
- ▶ 1989-2000

- 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)

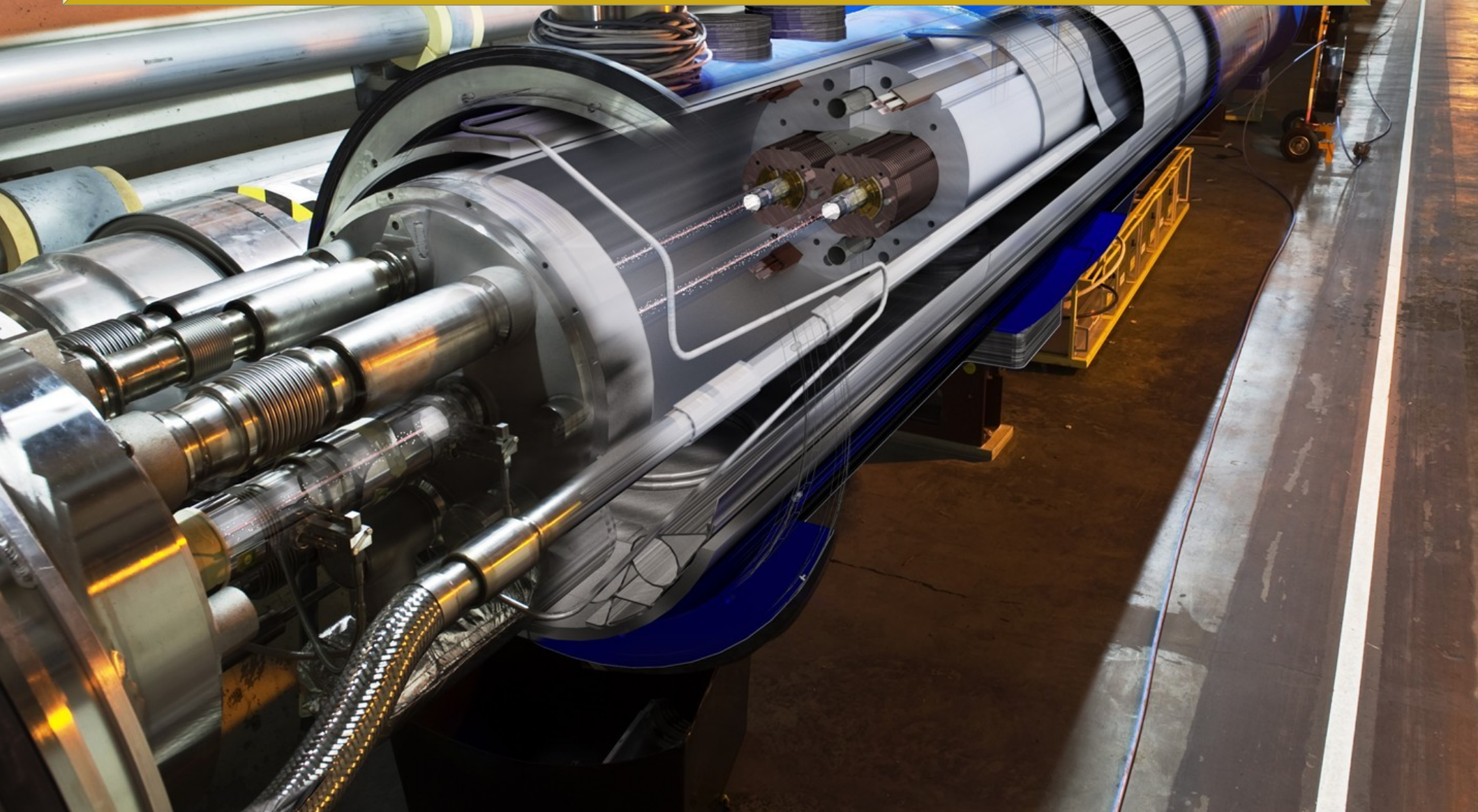


Le LHC : la machine à superlatifs



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



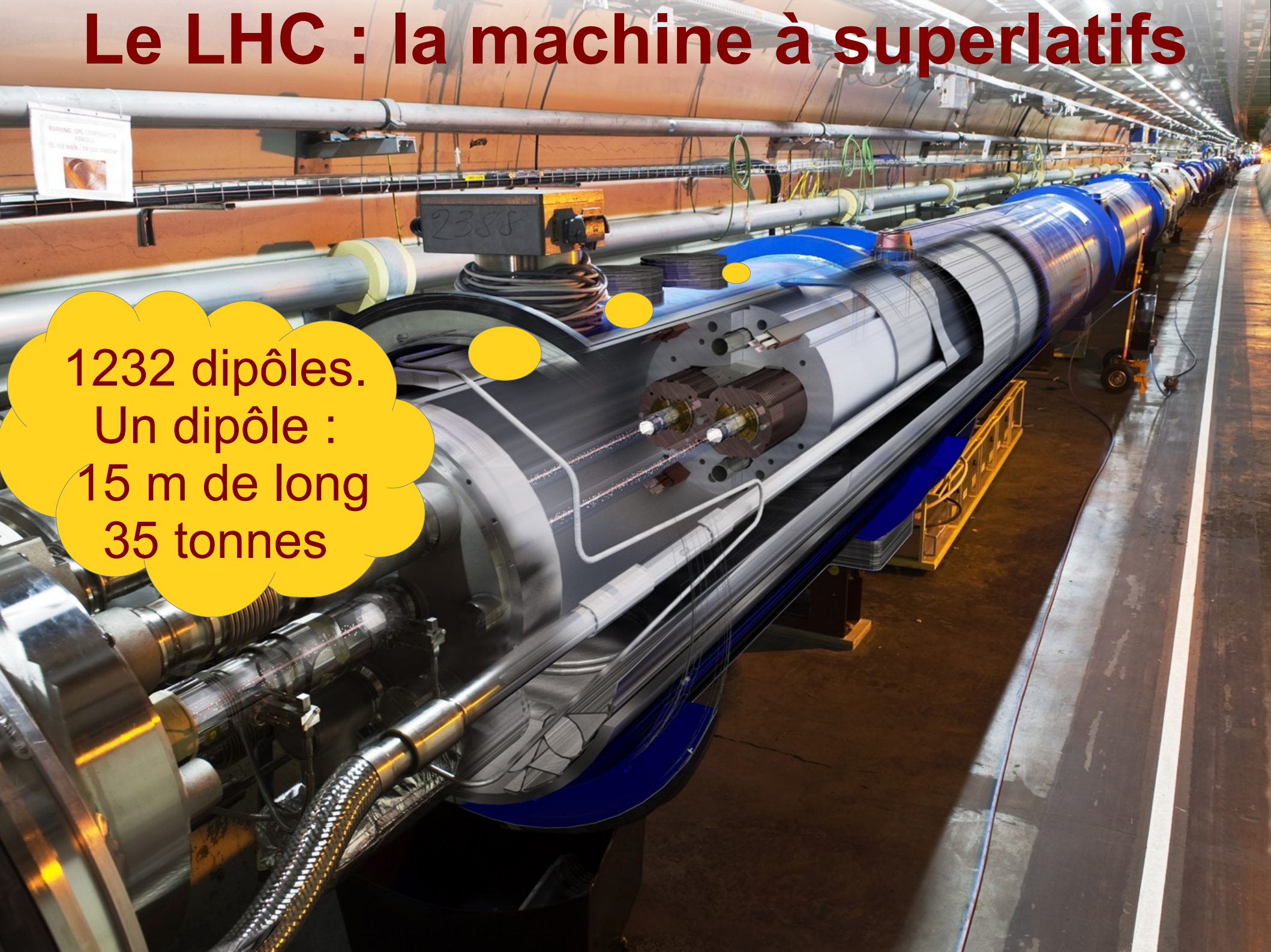
Protons voyageant à
99,9999991%
de la vitesse de la lumière,
soit 11000 tours
par seconde

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



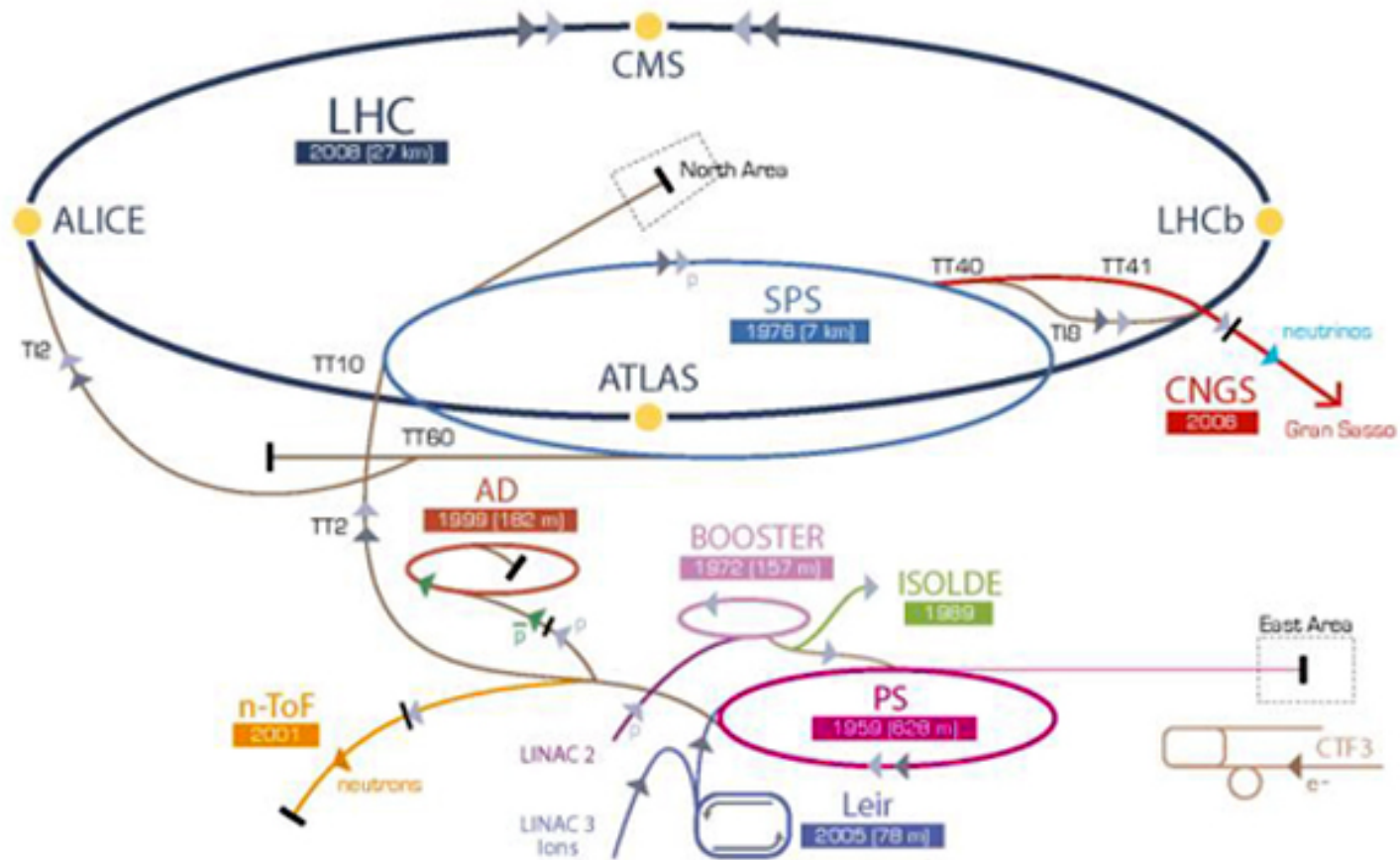
Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol, mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !
▶ Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

Le LHC : la machine à superlatifs

The image shows a perspective view of the LHC tunnel. The tunnel is filled with a complex network of pipes, conduits, and machinery. The main feature is a large, blue-wrapped cylindrical structure, likely a superconducting magnet, which is supported by a yellow metal frame. The tunnel walls are lined with orange-brown panels. The floor is a dark, polished surface. The lighting is bright and even, highlighting the industrial nature of the facility.

Consommation électrique :
Tous les foyers du canton de Genève

Le CERN : les accélérateurs

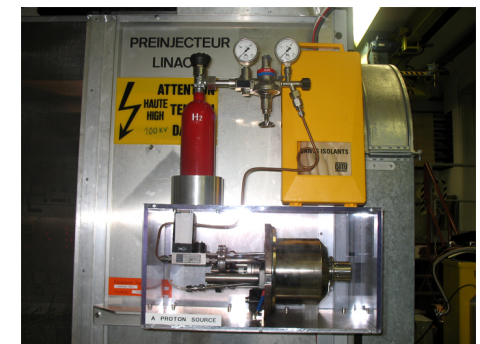


▶ p [protons] ▶ ions ▶ neutrons ▶ \bar{p} [antiproton] ↔ conversion proton/antiproton ▶ neutrons ▶ électrons

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



Accélérateur de science

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
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

25 ans d'exploitation

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
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

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
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

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
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



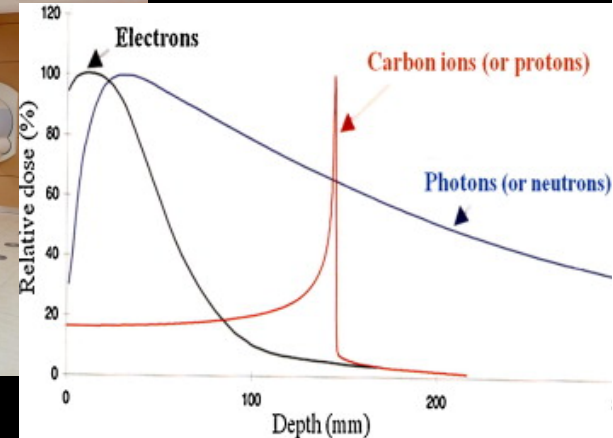
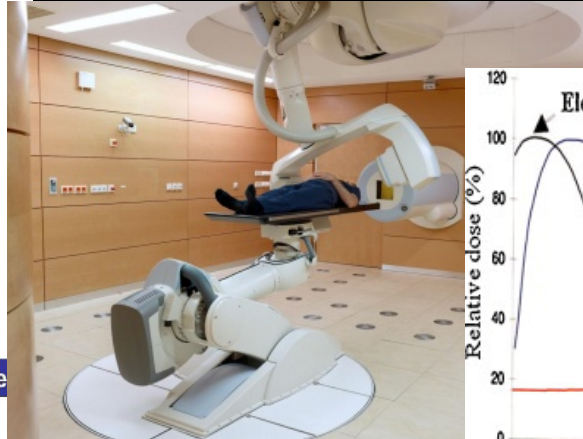
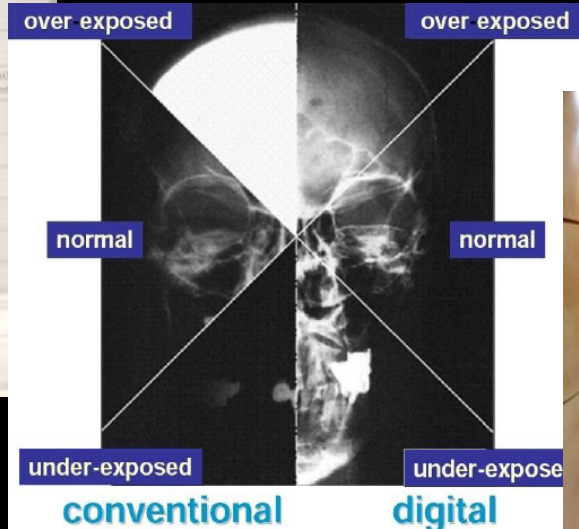
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

25 ans d'exploitation

A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



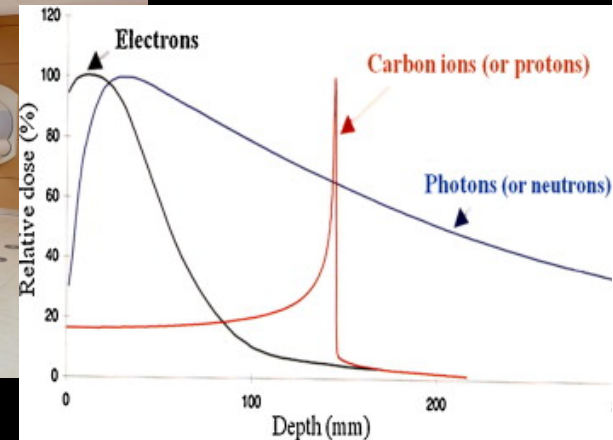
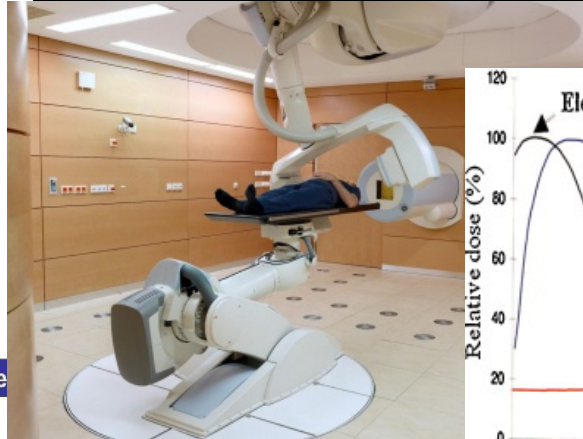
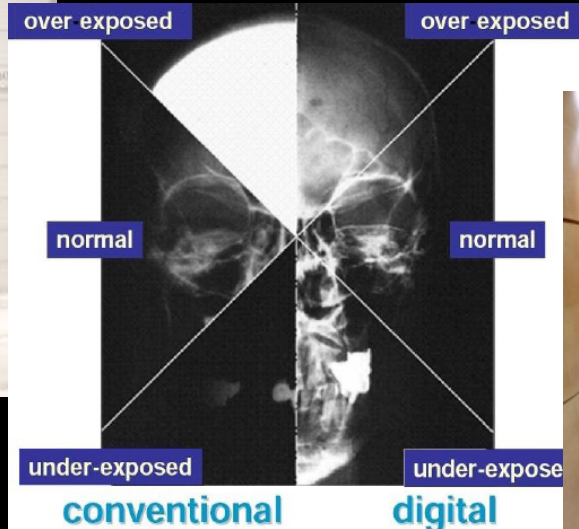
Running jobs: 246791
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
© 2012 Google
US Dept of State Geographer
© 2009 GeoBasis-DE/BKG



A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

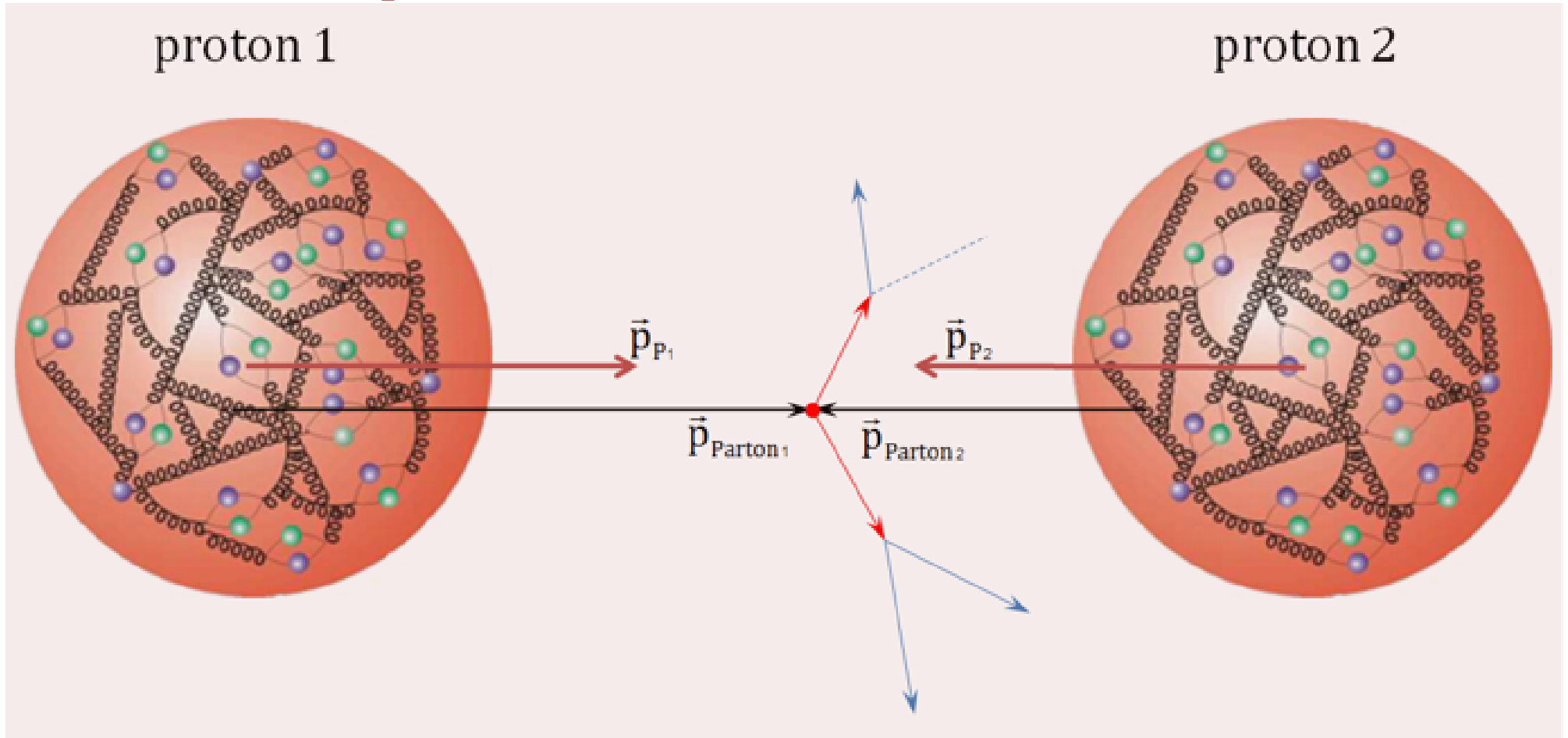


Running jobs: 246791
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



► Le Web a été inventé au CERN !

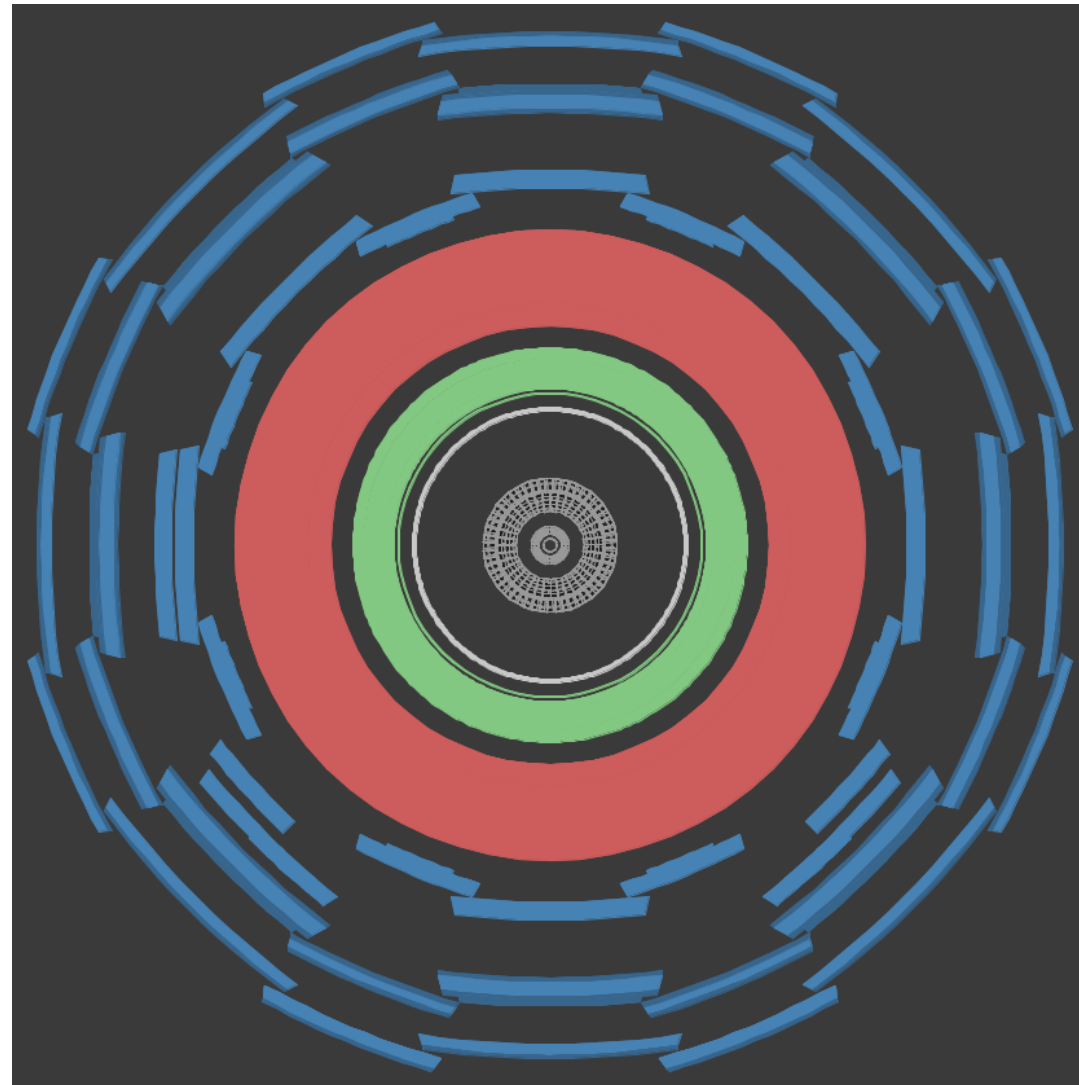
Deux protons se rencontrent...



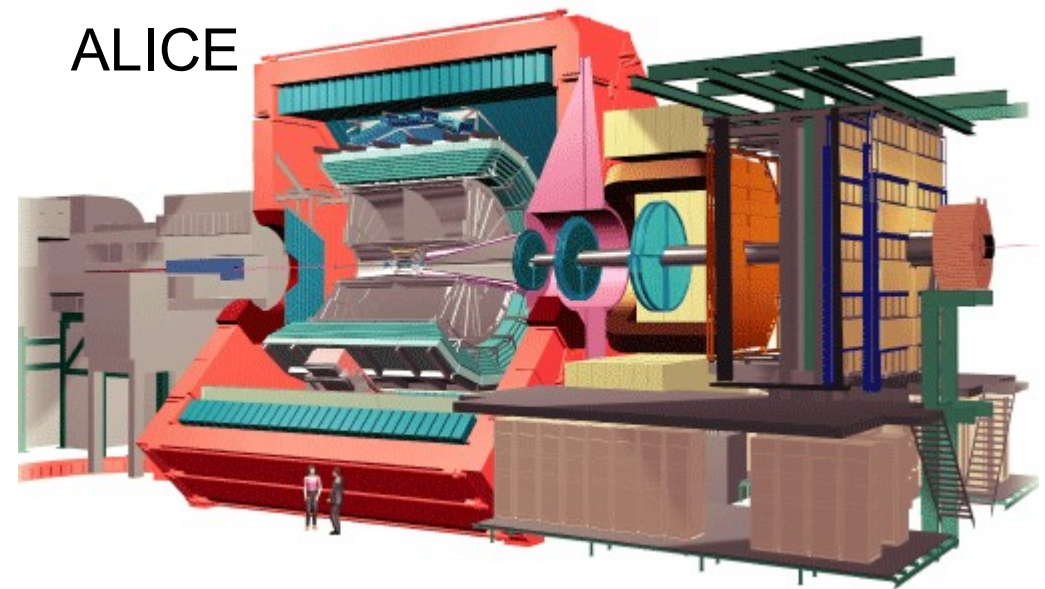
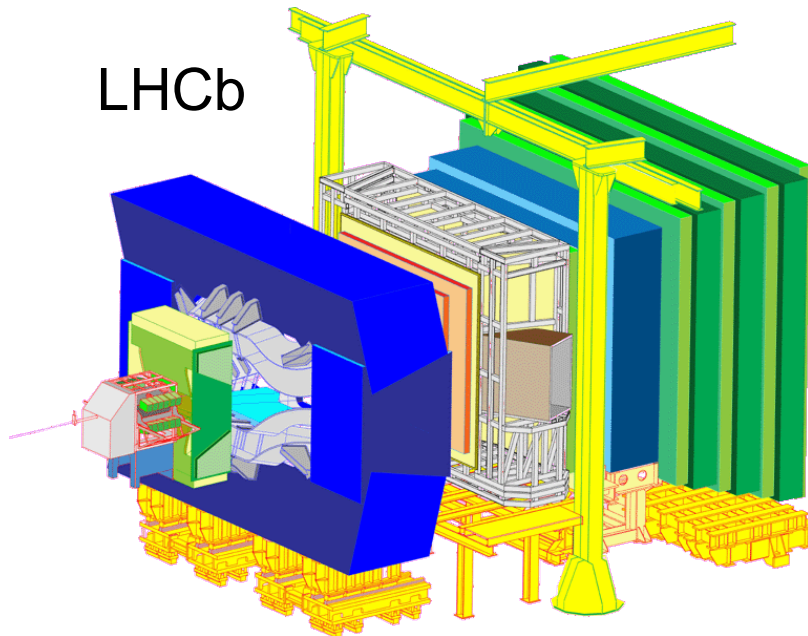
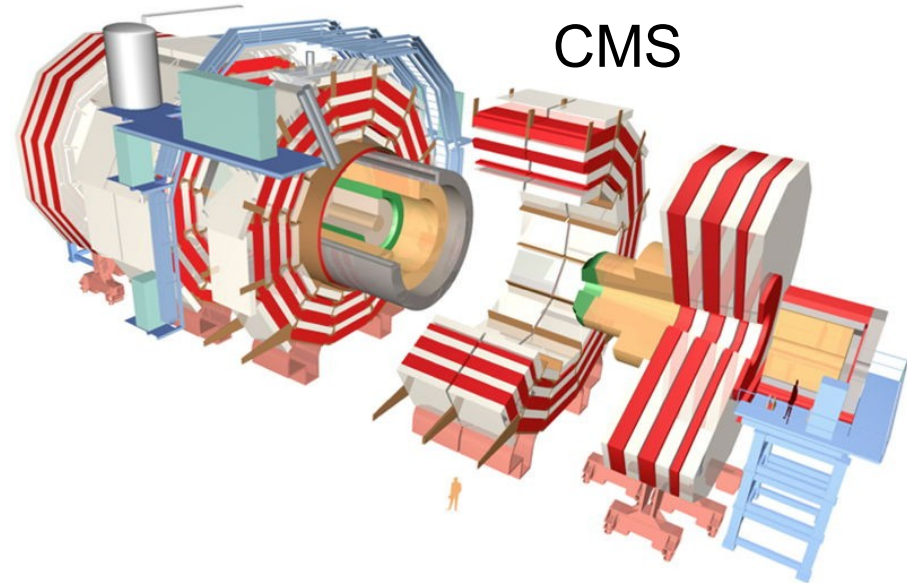
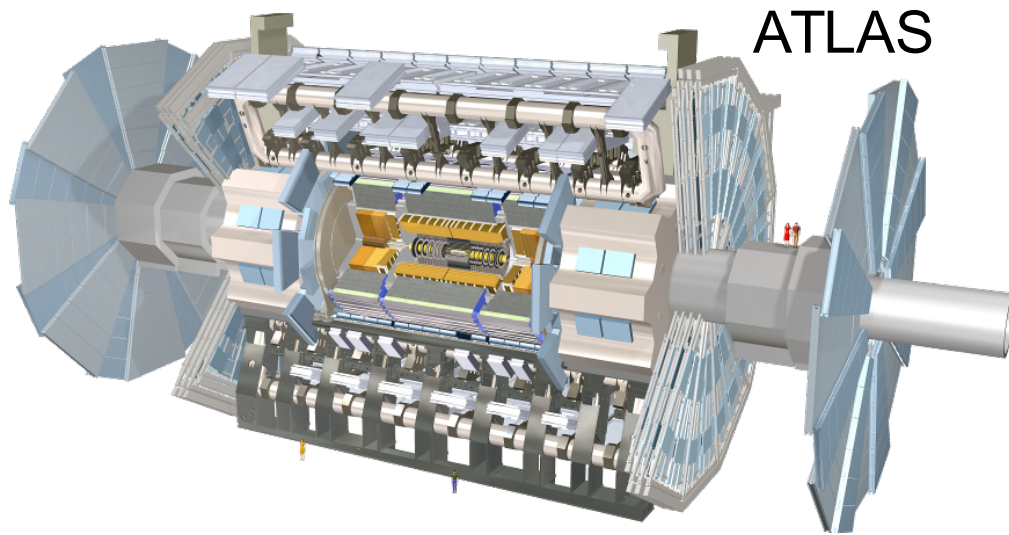
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

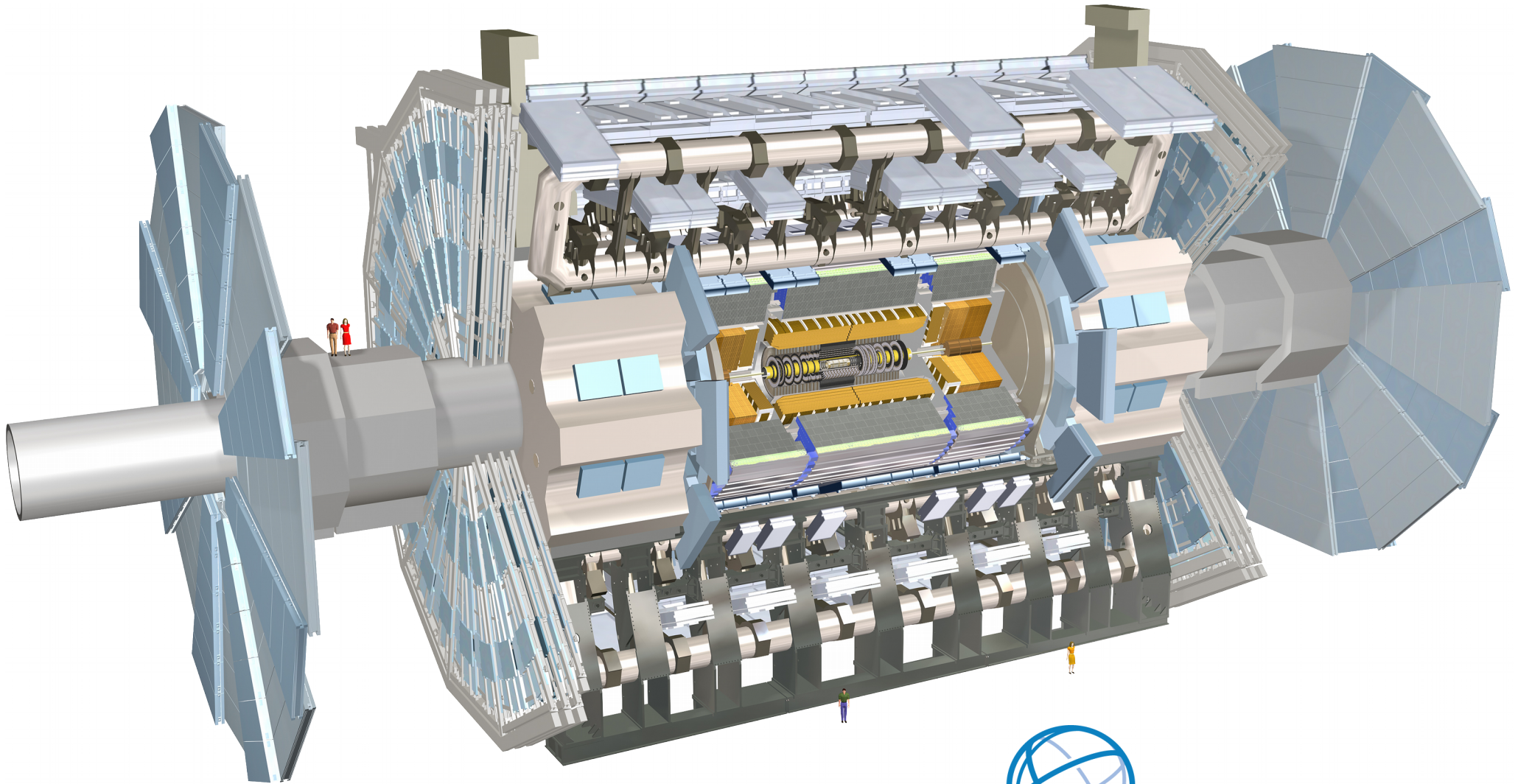
- Détecteur interne (trajectographe)
 - ▶ Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
 - ▶ Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
 - ▶ Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks),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



Les détecteurs géants du LHC



Le détecteur ATLAS



ATLAS
EXPERIMENT

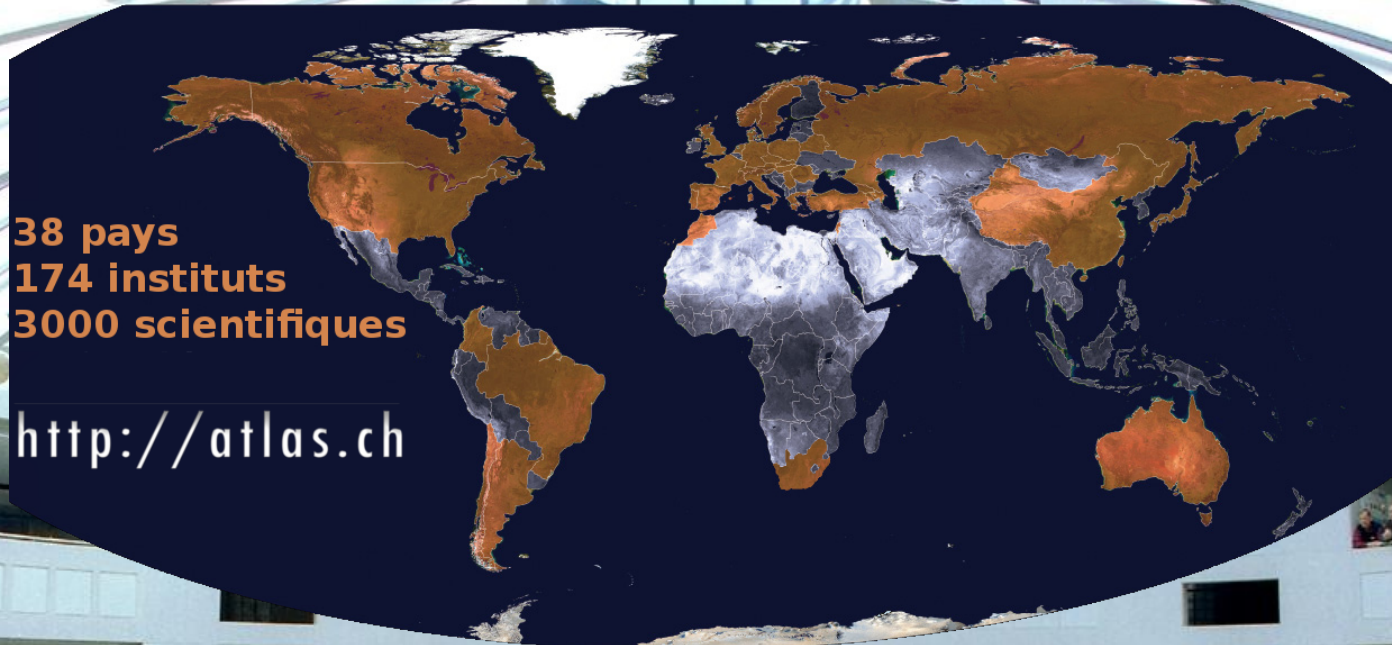
La collaboration ATLAS



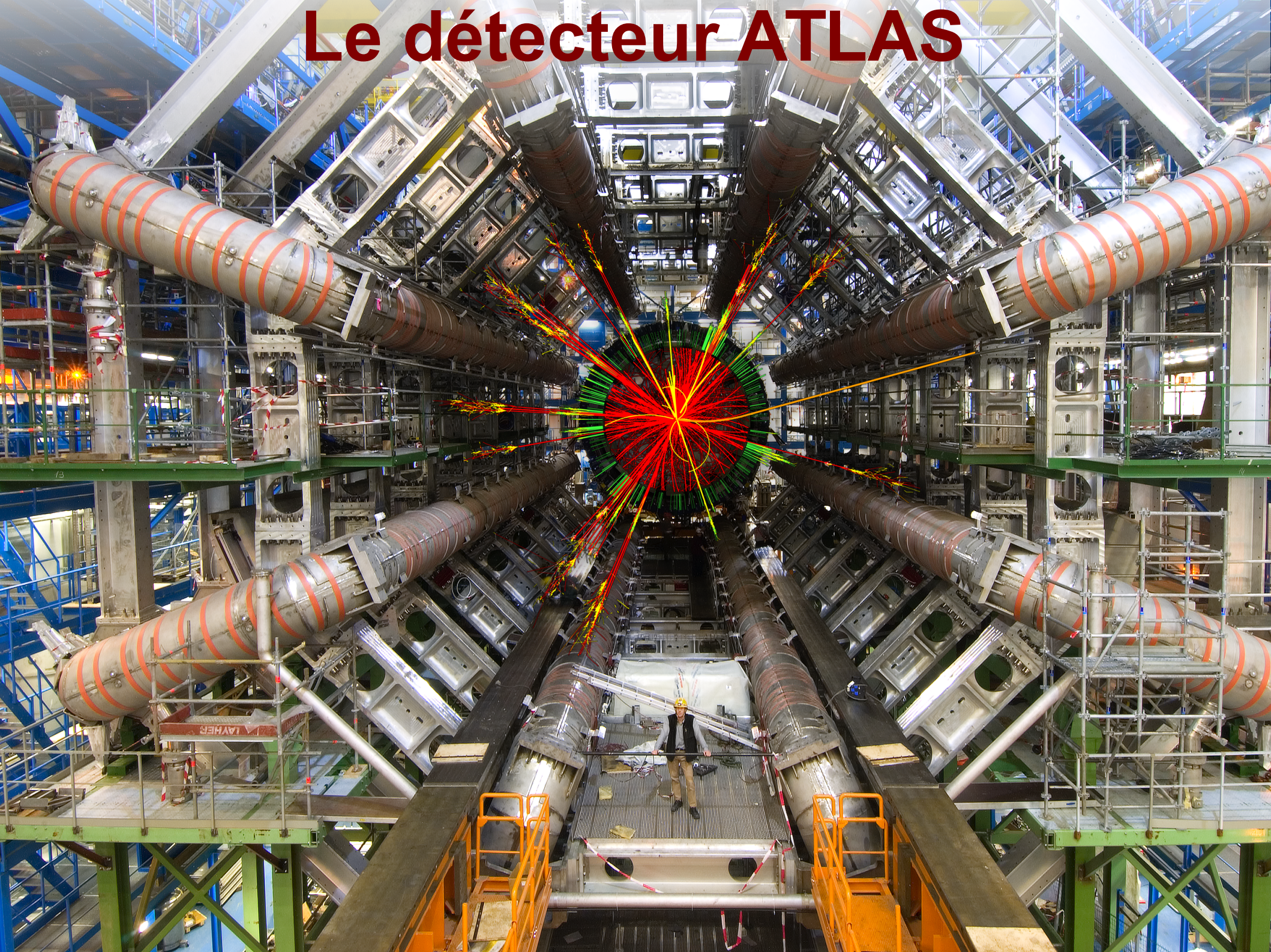
La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

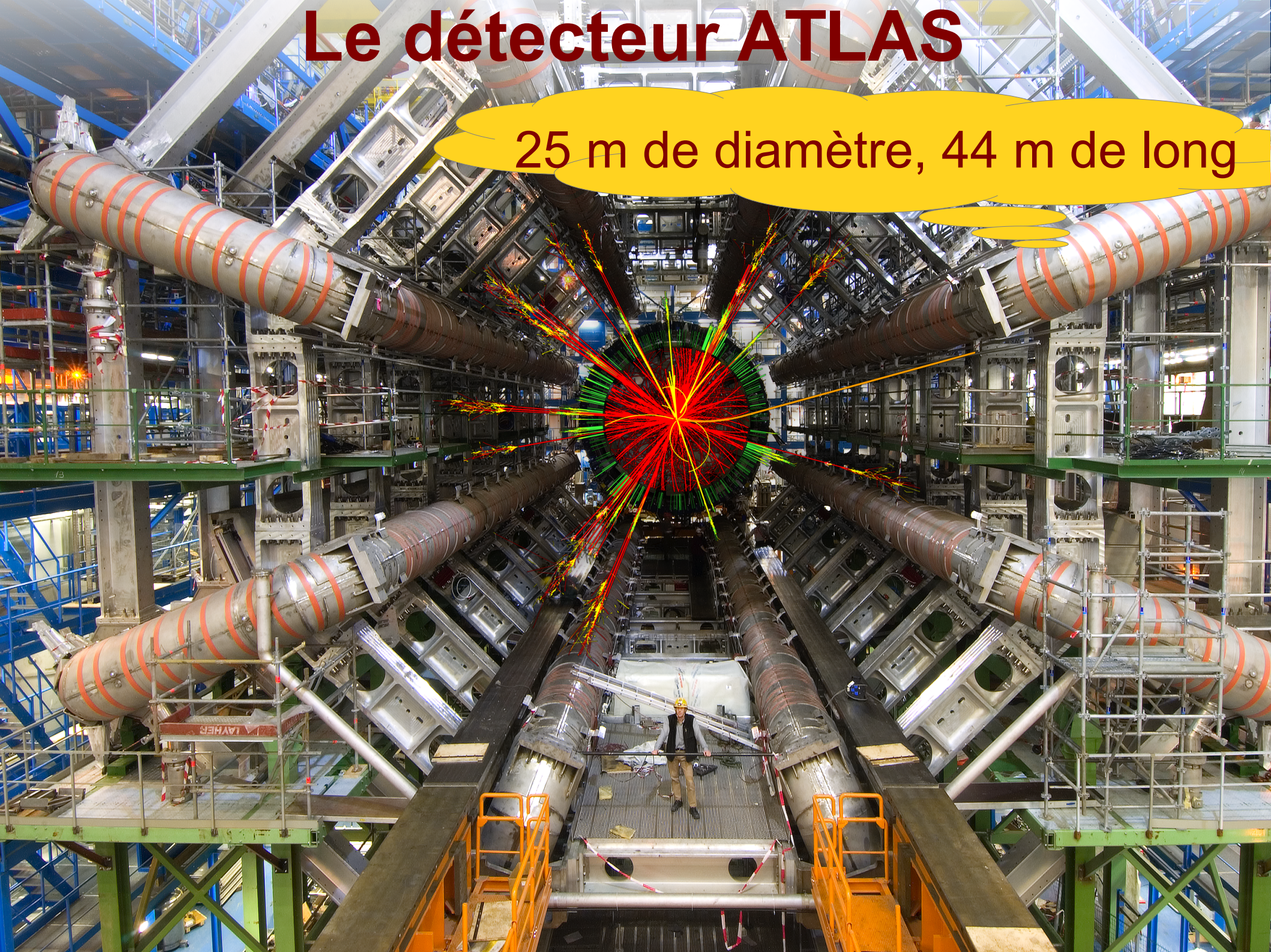


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

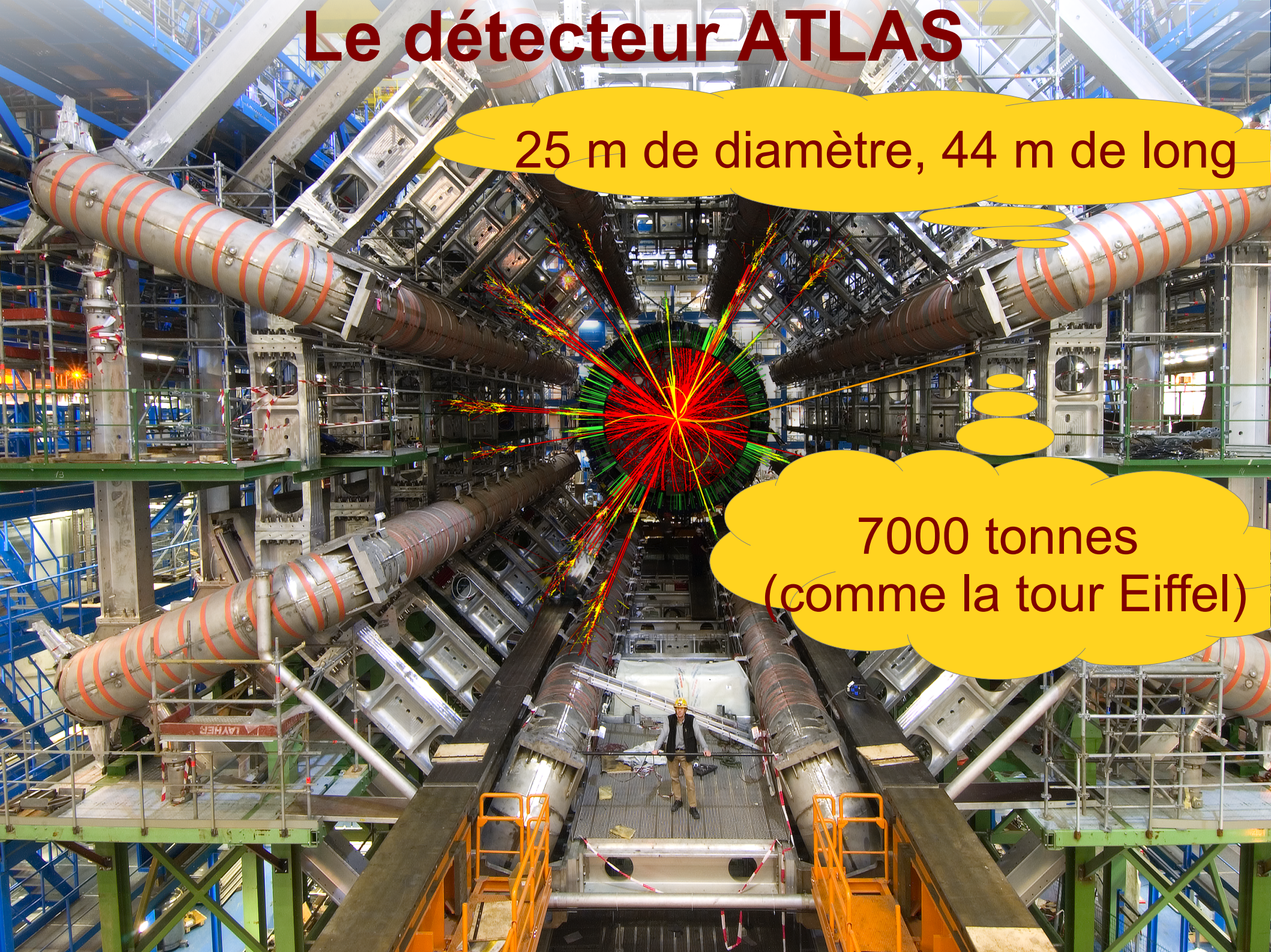
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

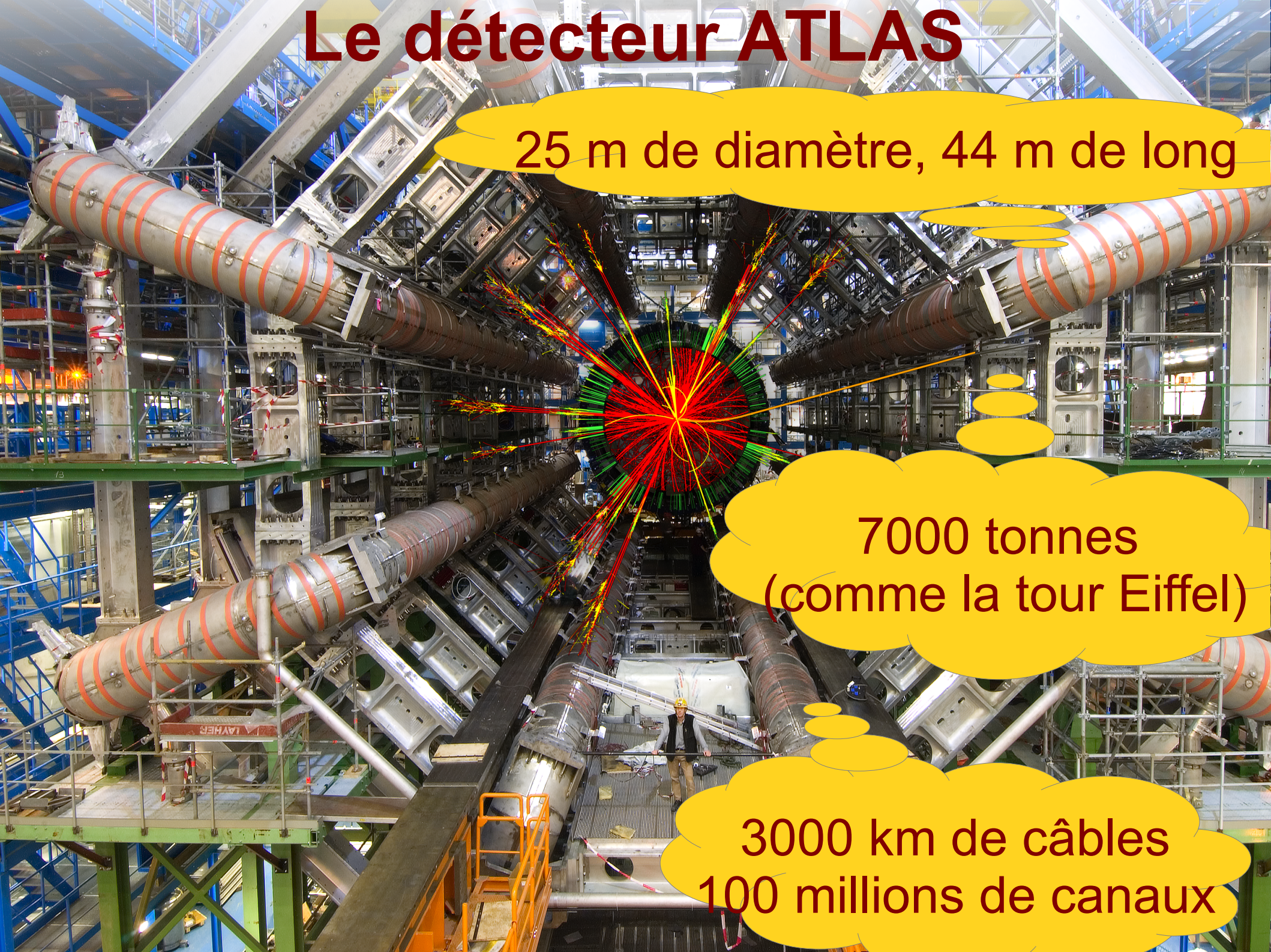


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



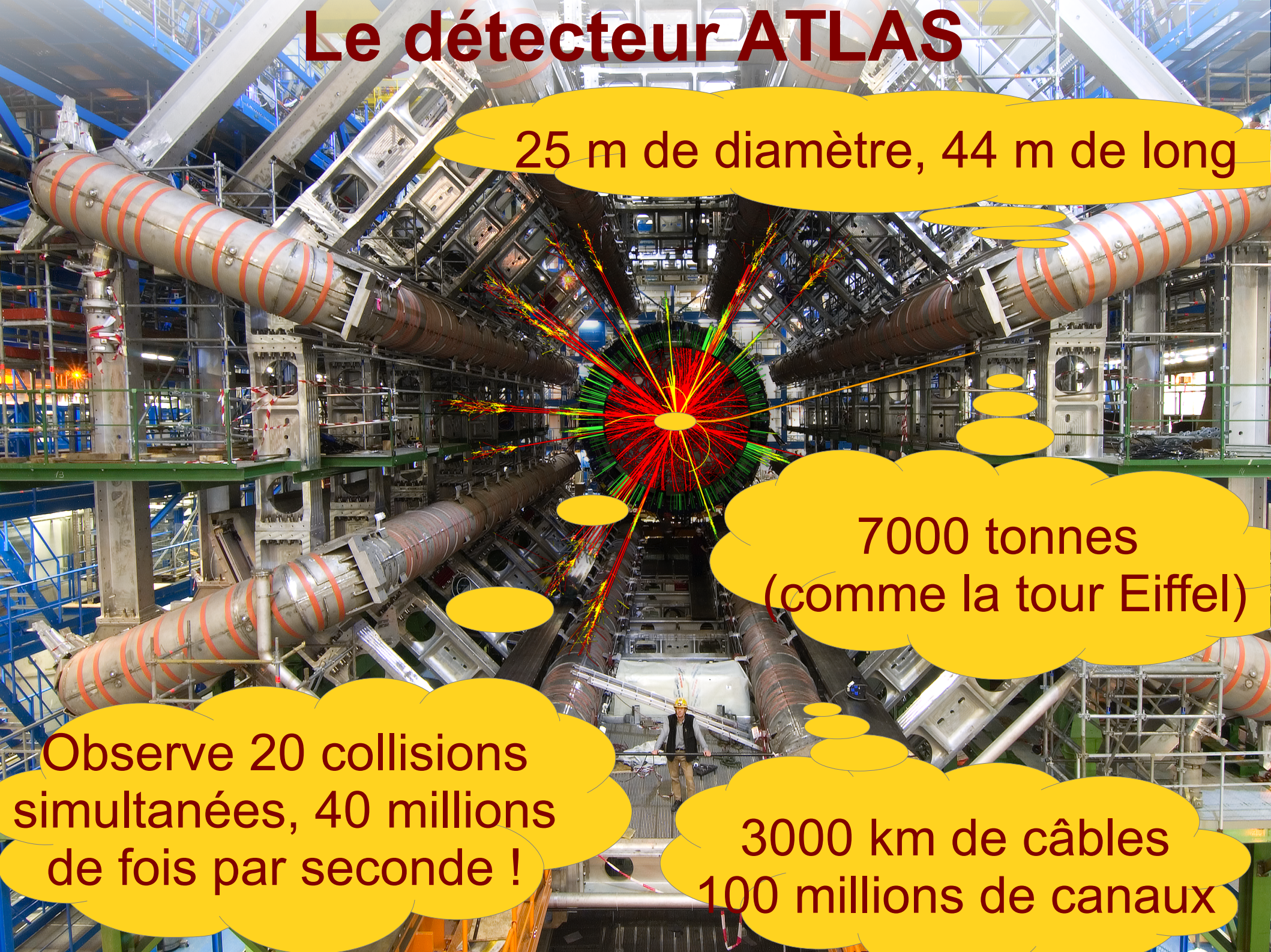
Le détecteur ATLAS

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

The image shows the interior of the ATLAS detector tunnel. A central calorimeter is visible, surrounded by a complex network of cables and pipes. A worker in a hard hat and safety vest is standing on a platform in the center of the tunnel, providing a sense of scale. The tunnel is lined with blue metal structures and various equipment.

25 m de diamètre, 44 m de long

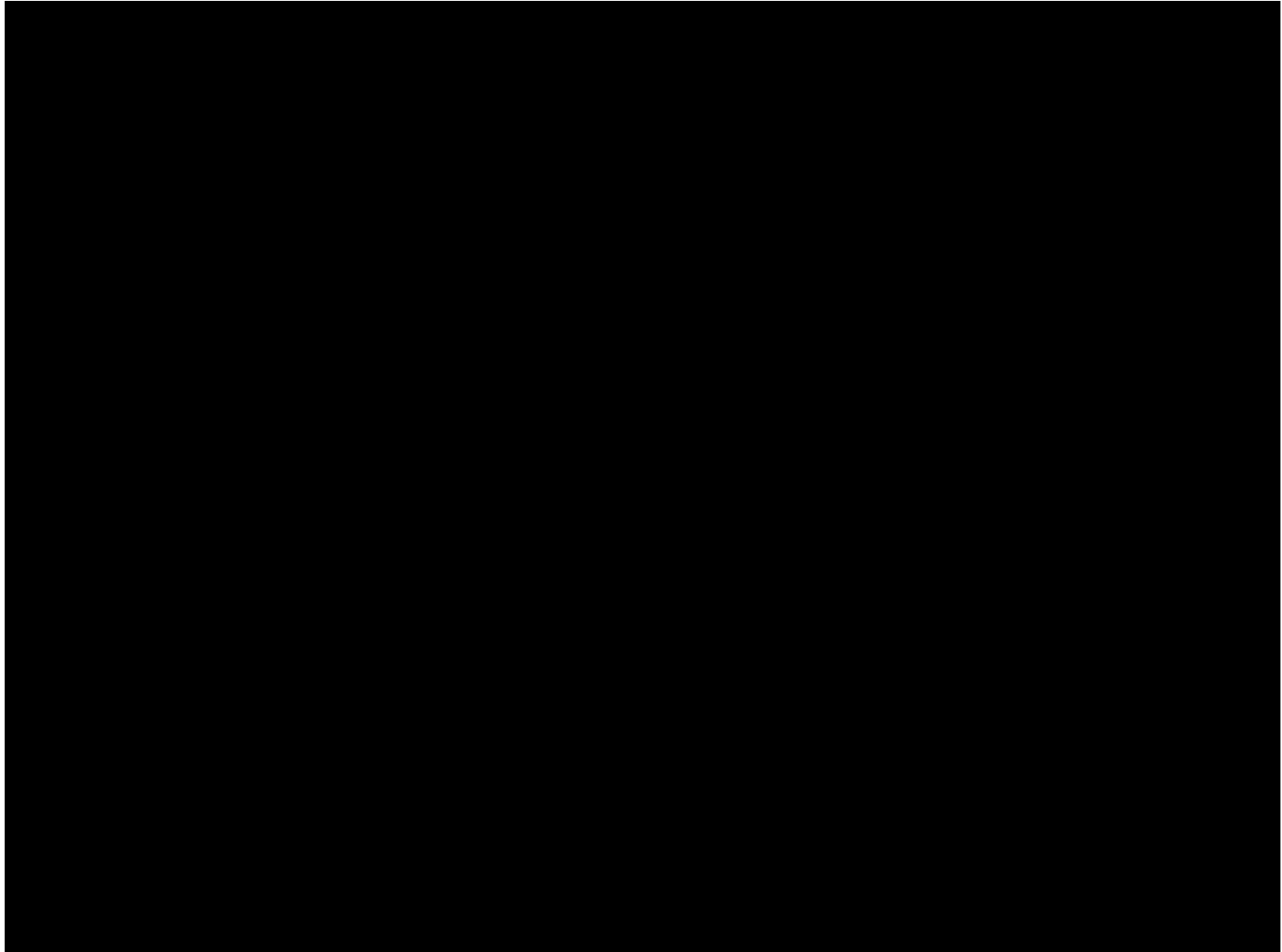
En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

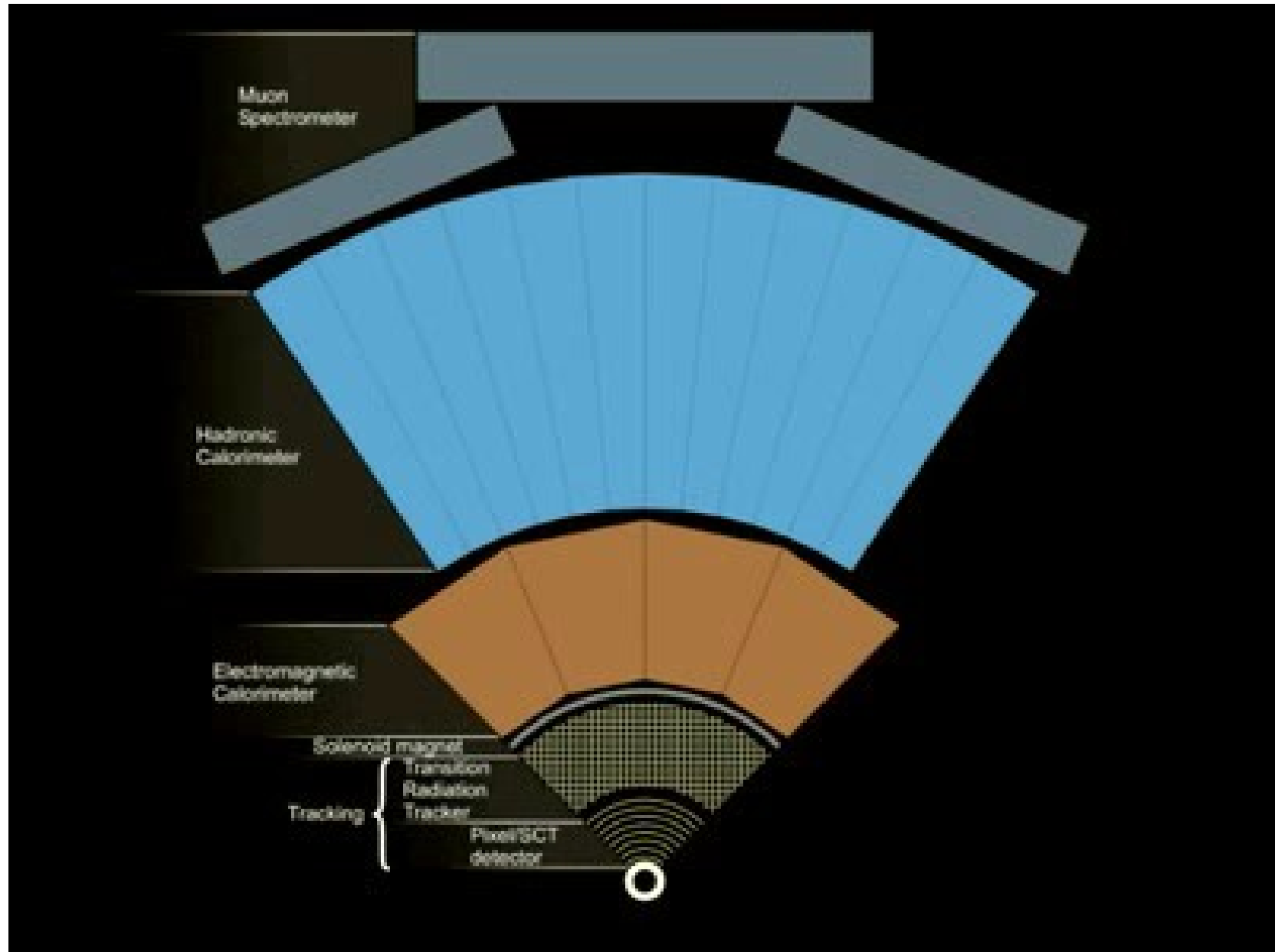
Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux

Le détecteur ATLAS avec des explications



Interaction des particules avec le détecteur

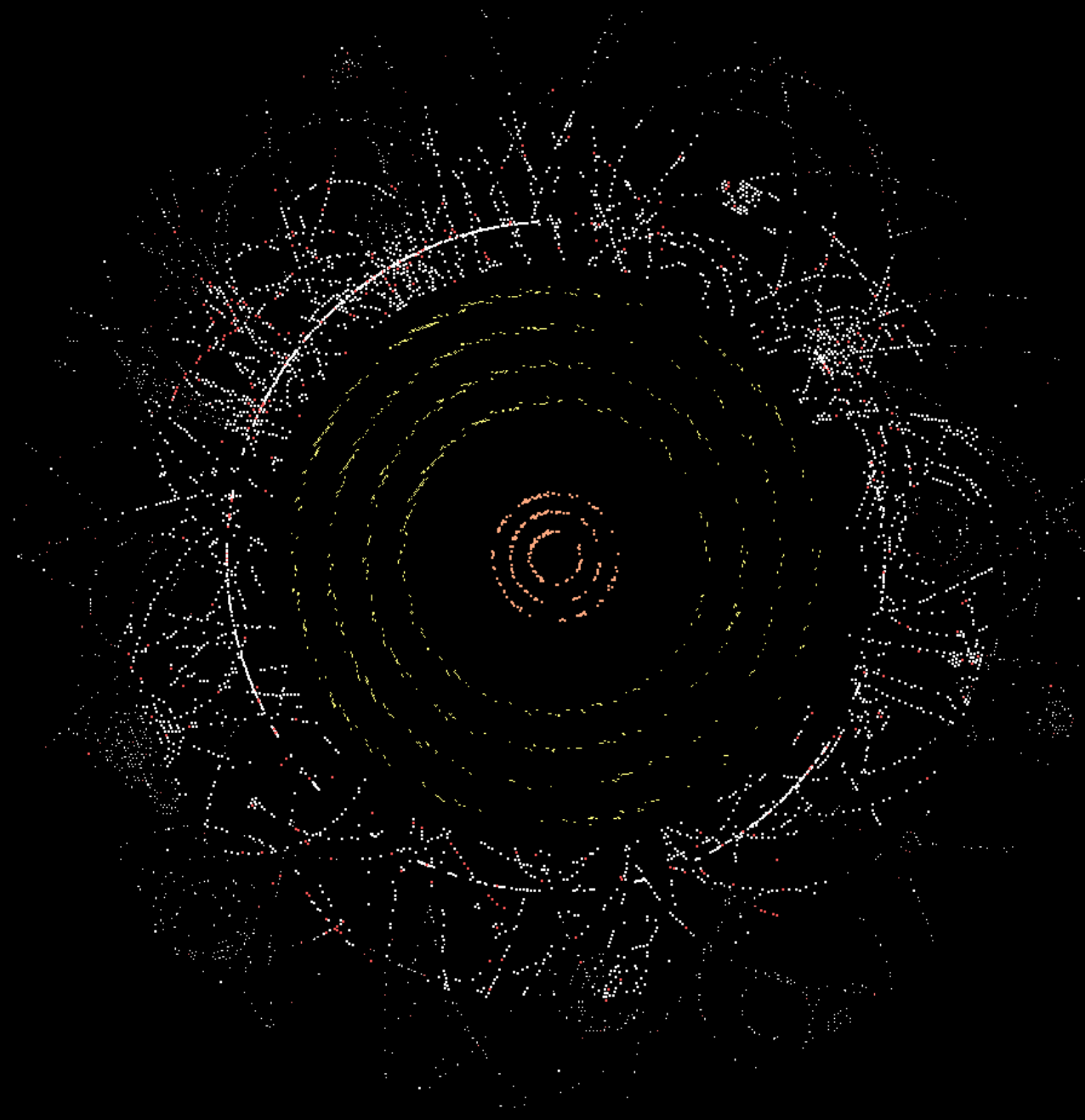


Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



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

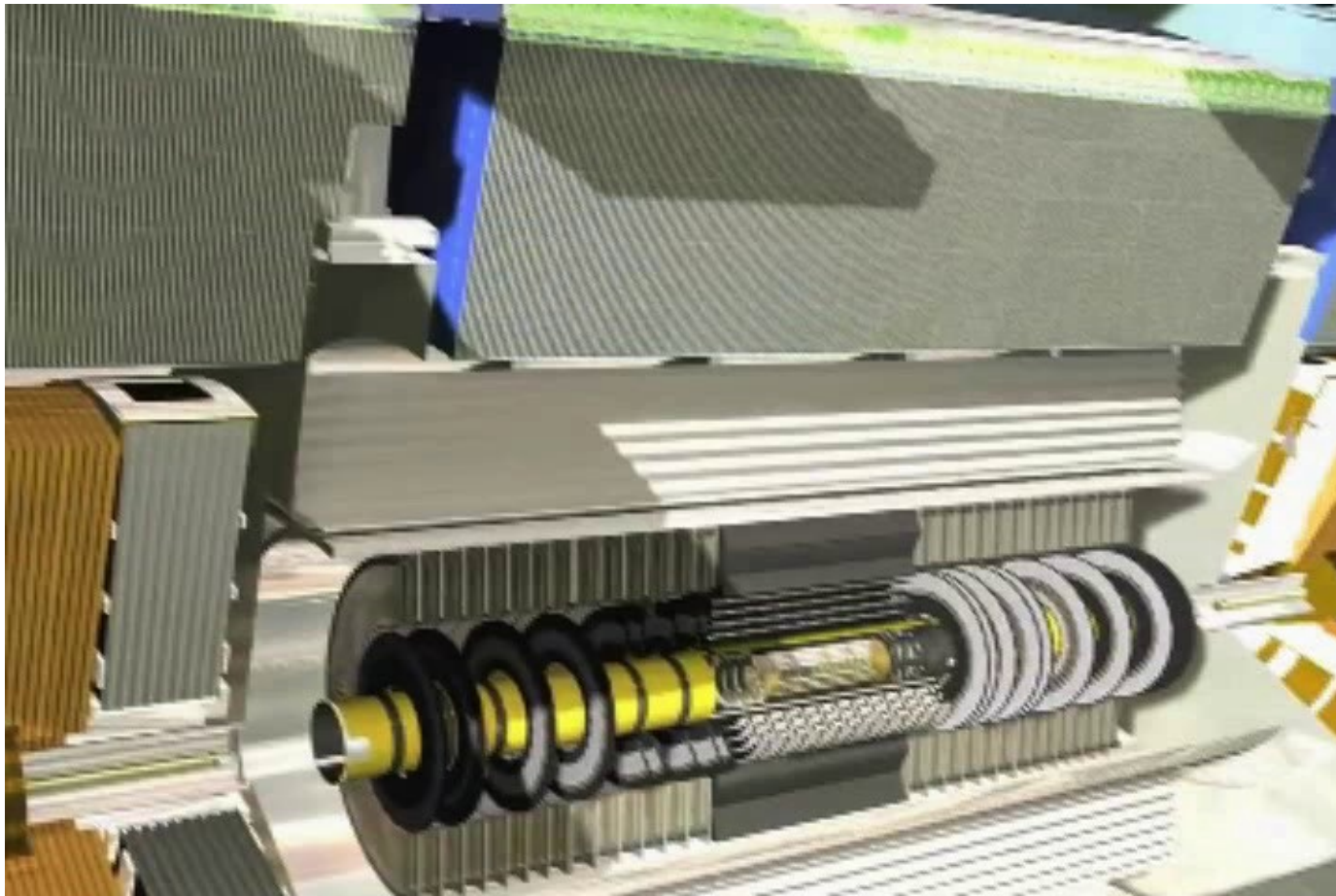
Passage des particules



Reconstruction des trajectoires

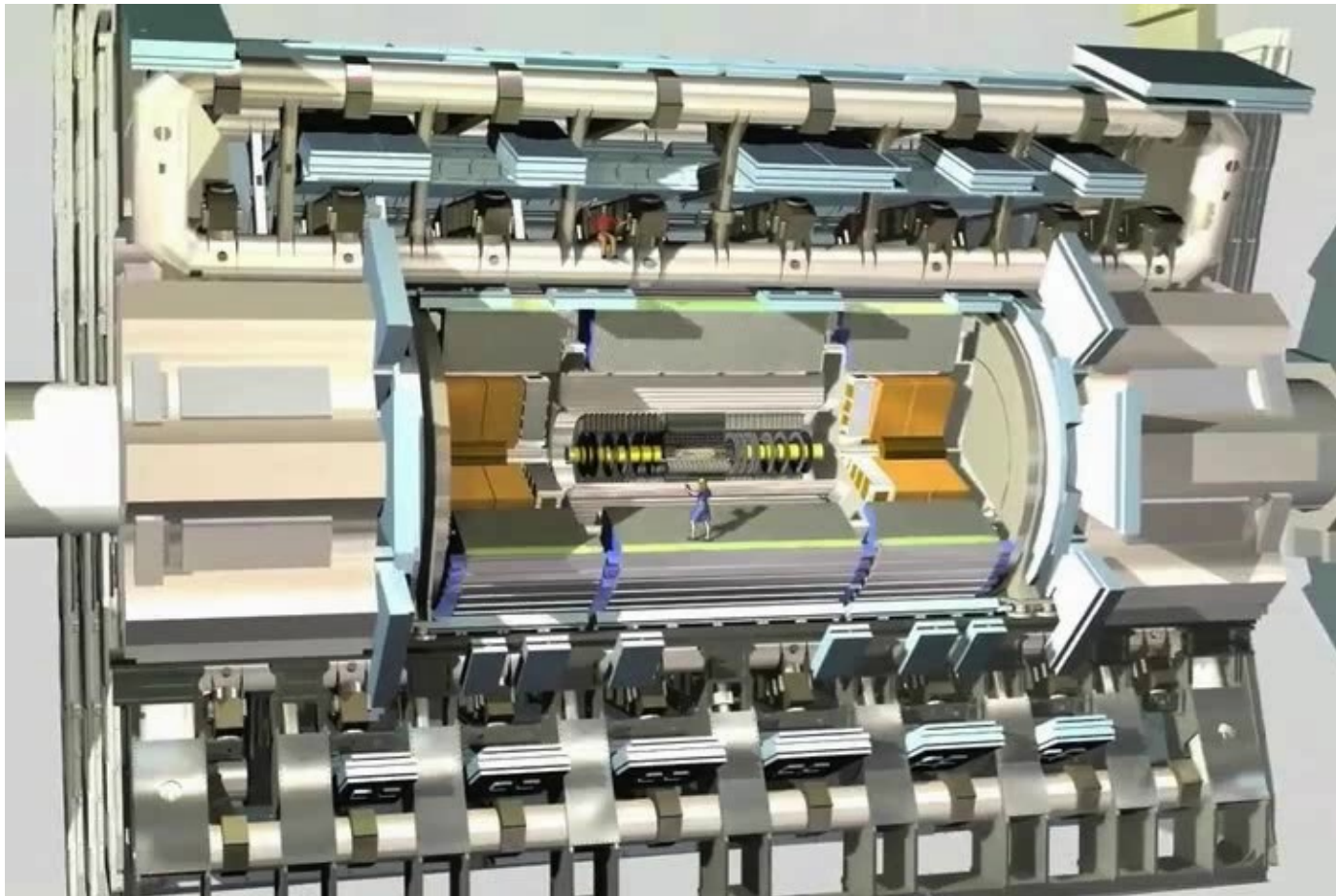


Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



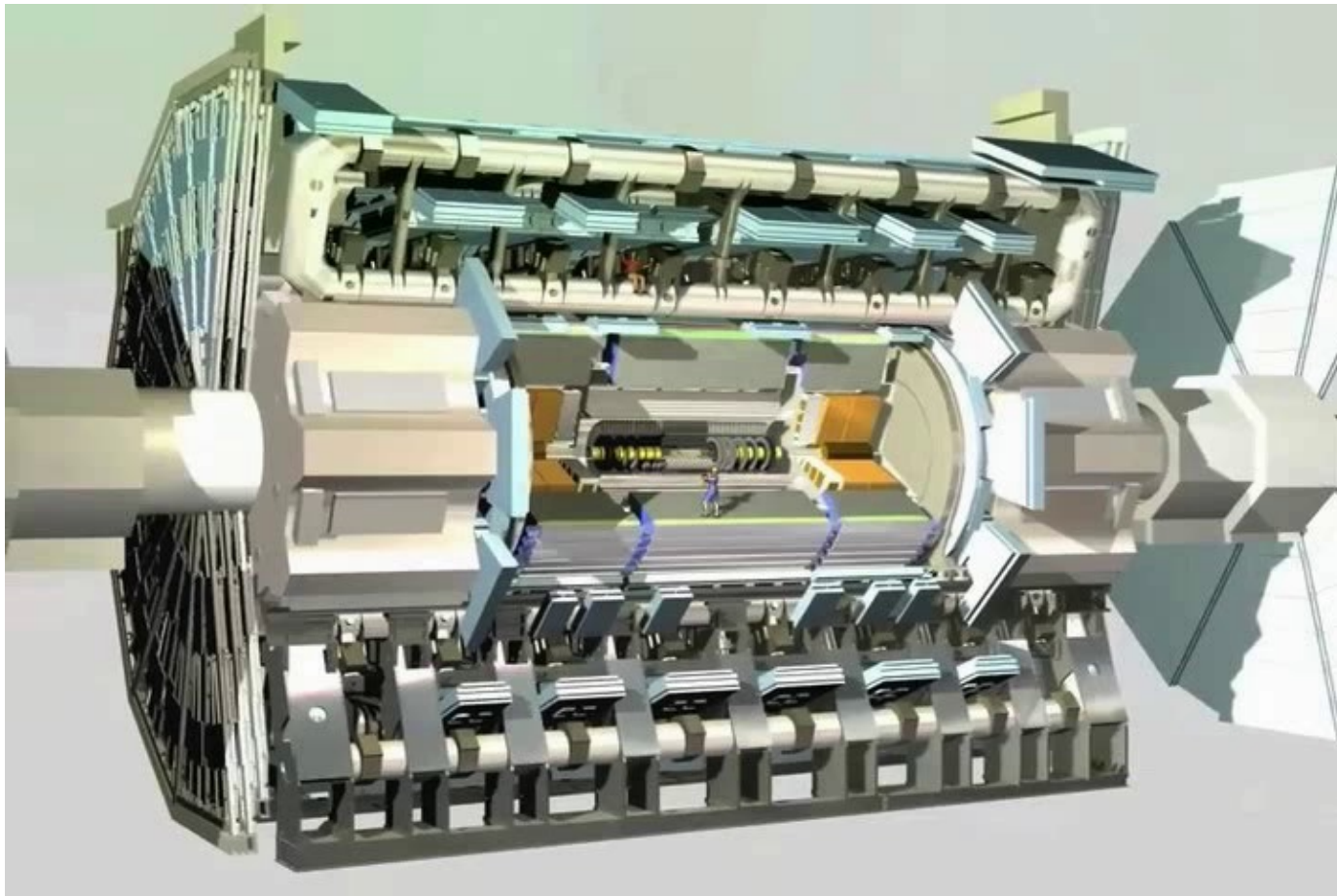
- Argon liquide à -183°C

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

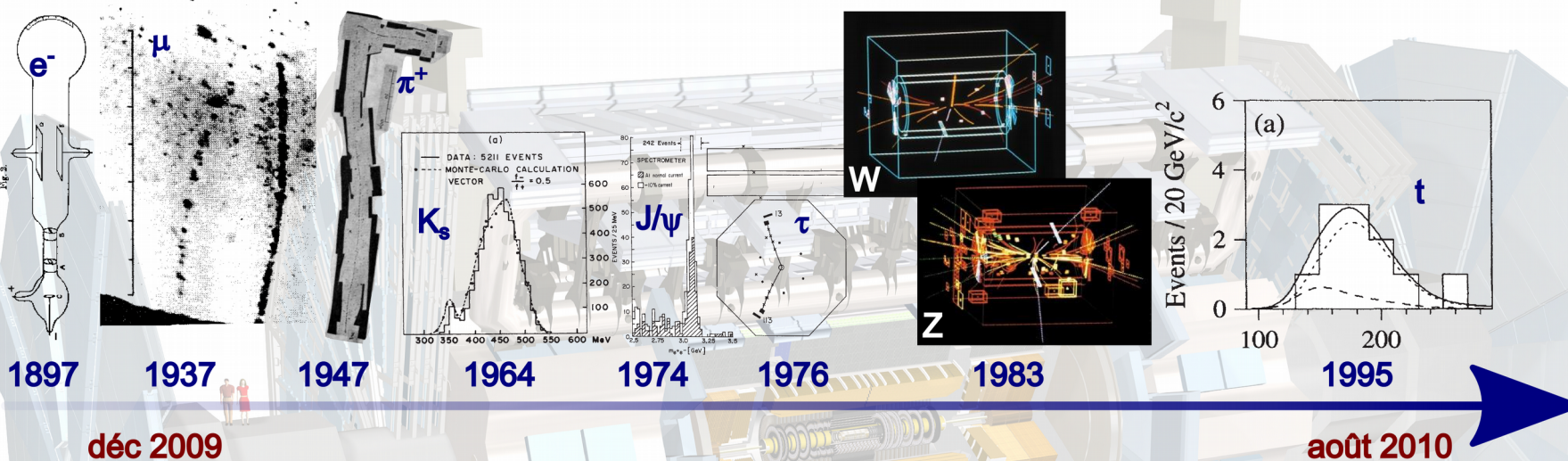


- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

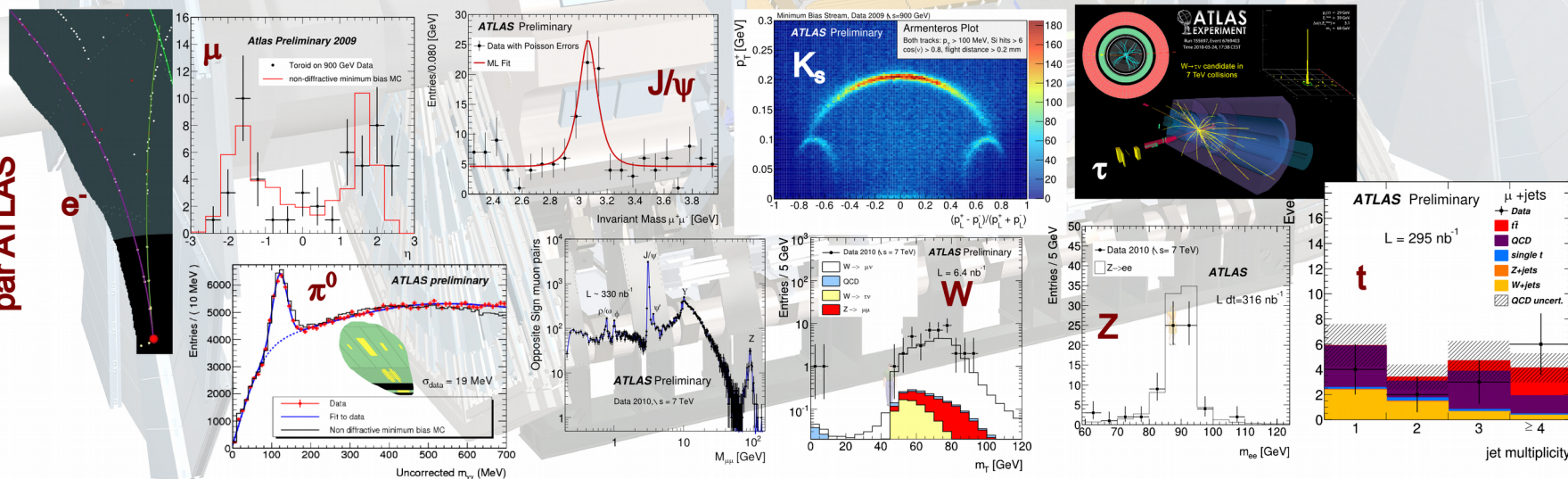
Découverte historique



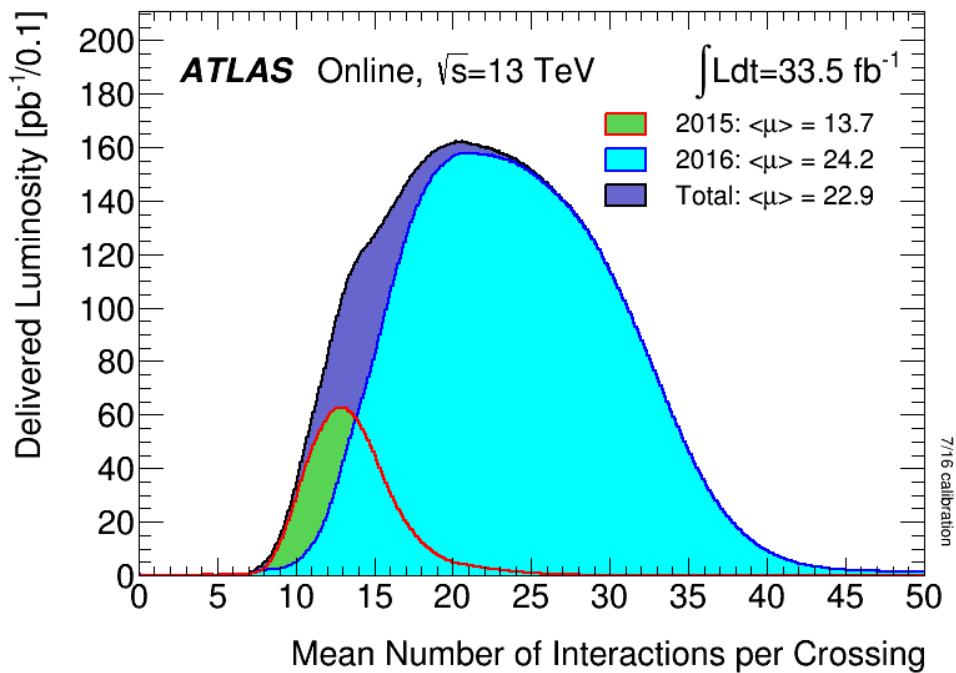
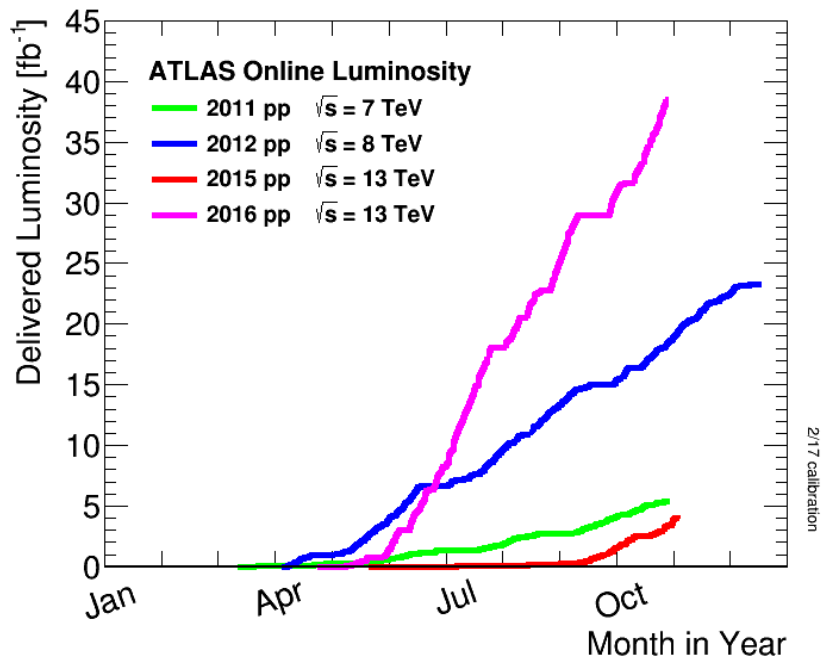
déc 2009

août 2010

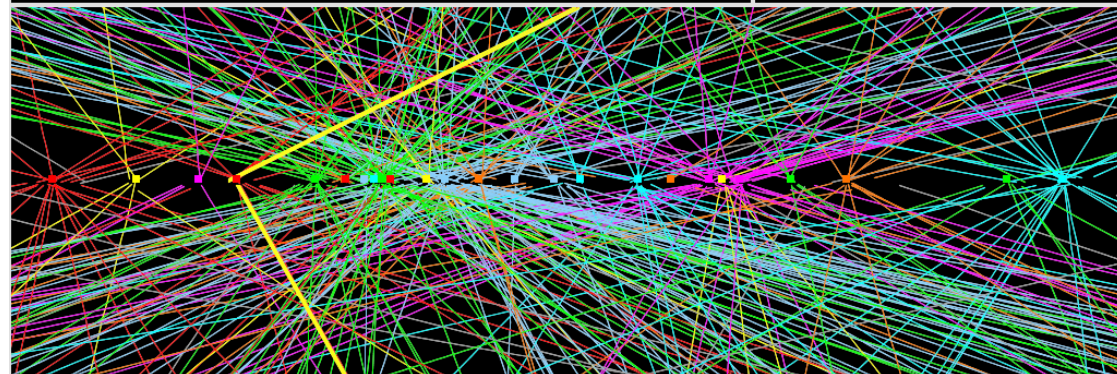
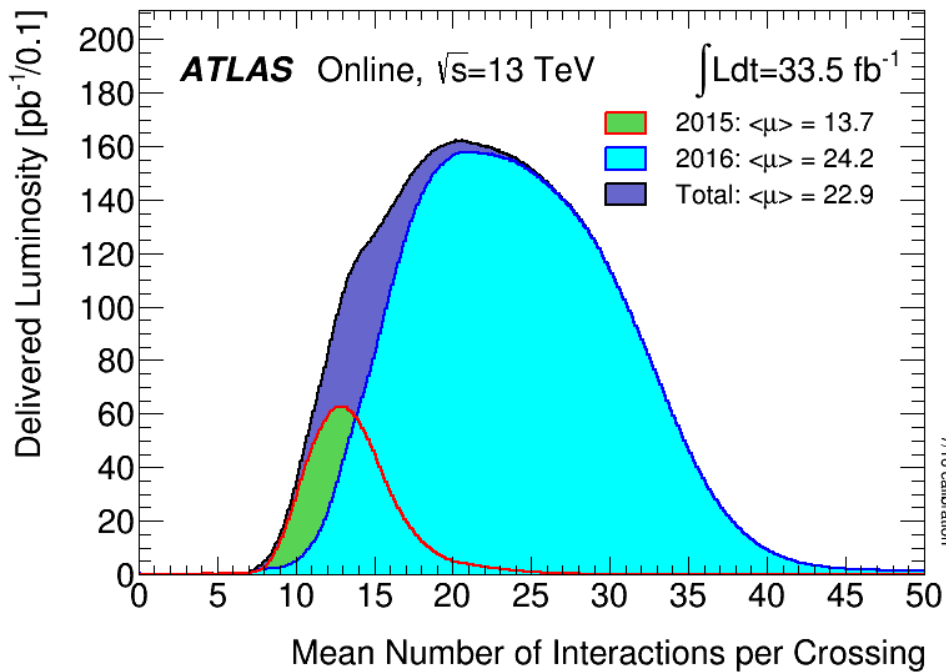
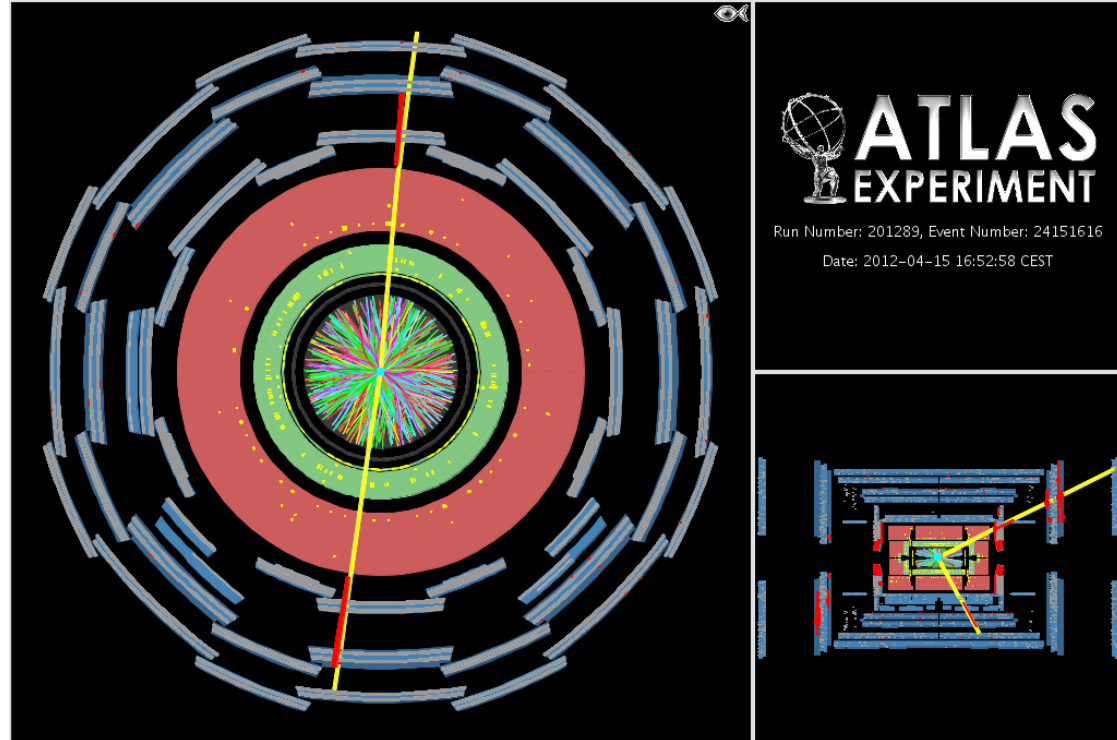
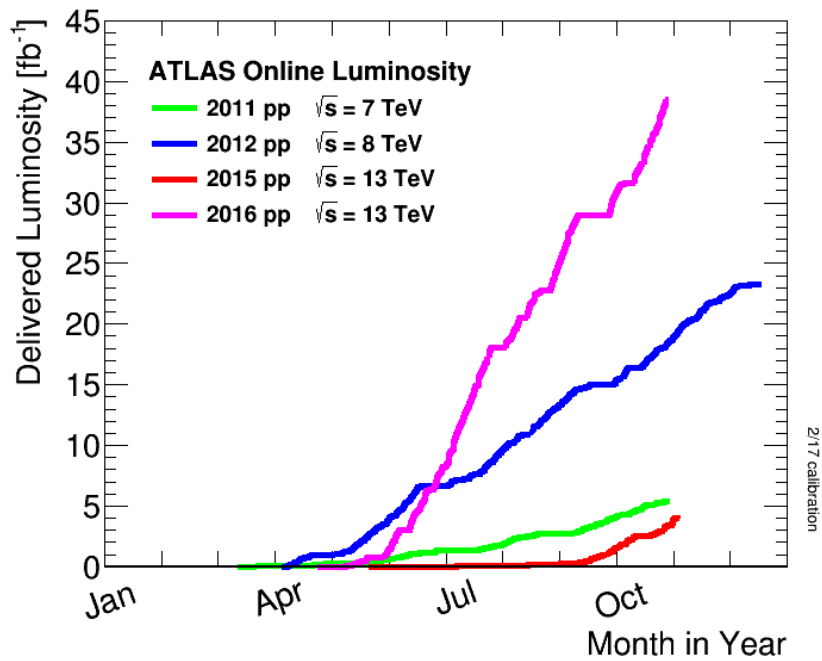
Redécouverte par ATLAS



Accumulation des données



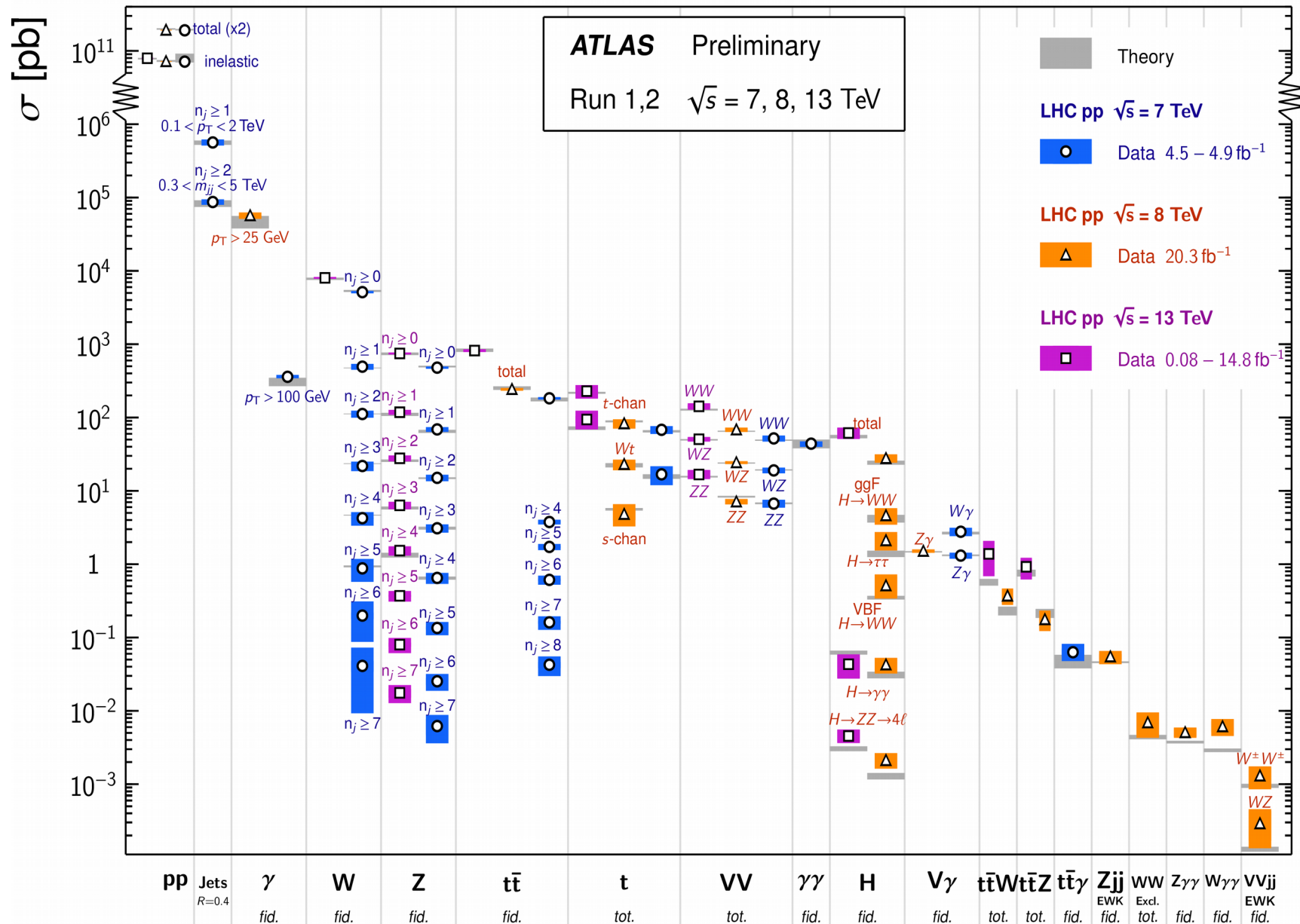
Accumulation des données



Modèle standard : état des lieux

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: August 2016

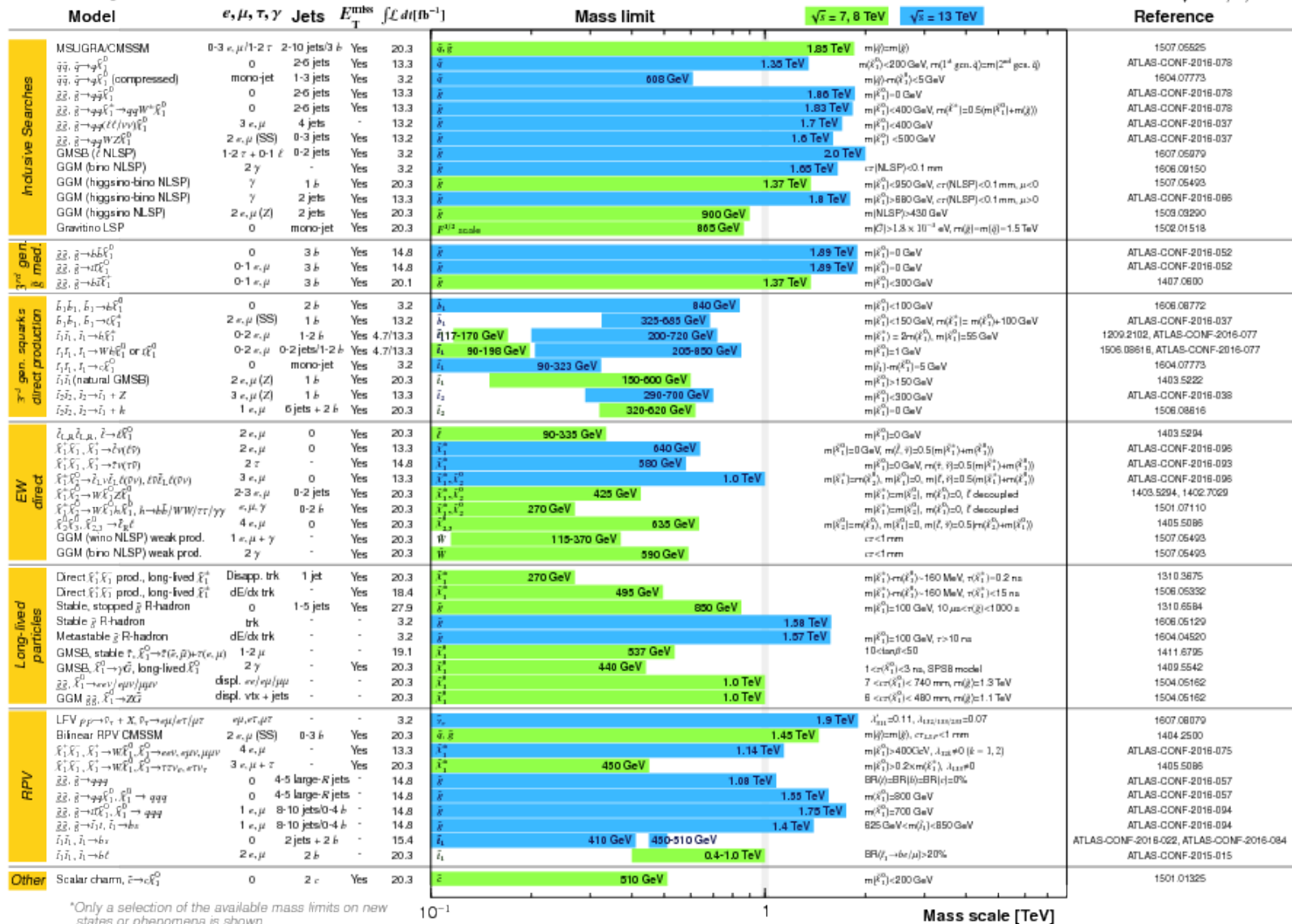


- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

Supersymétrie : état des lieux

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits
 Status: August 2016

ATLAS Preliminary
 $\sqrt{s} = 7, 8, 13 \text{ TeV}$



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

• On n'a rien trouvé, et pourtant on cherche !

Exotiques : état des lieux

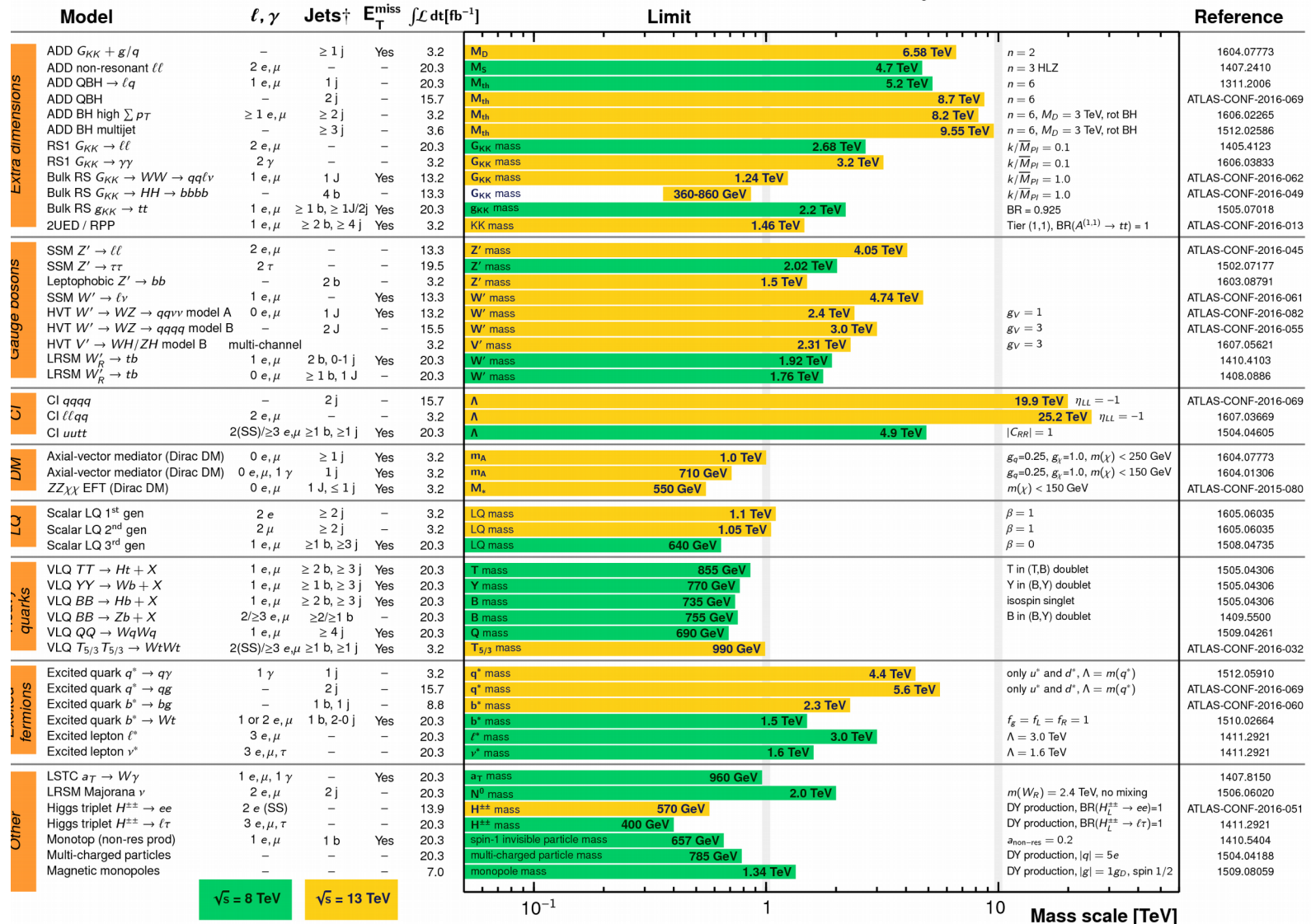
ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion

Status: August 2016

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$



$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Lower bounds are specified only when explicitly not excluded.

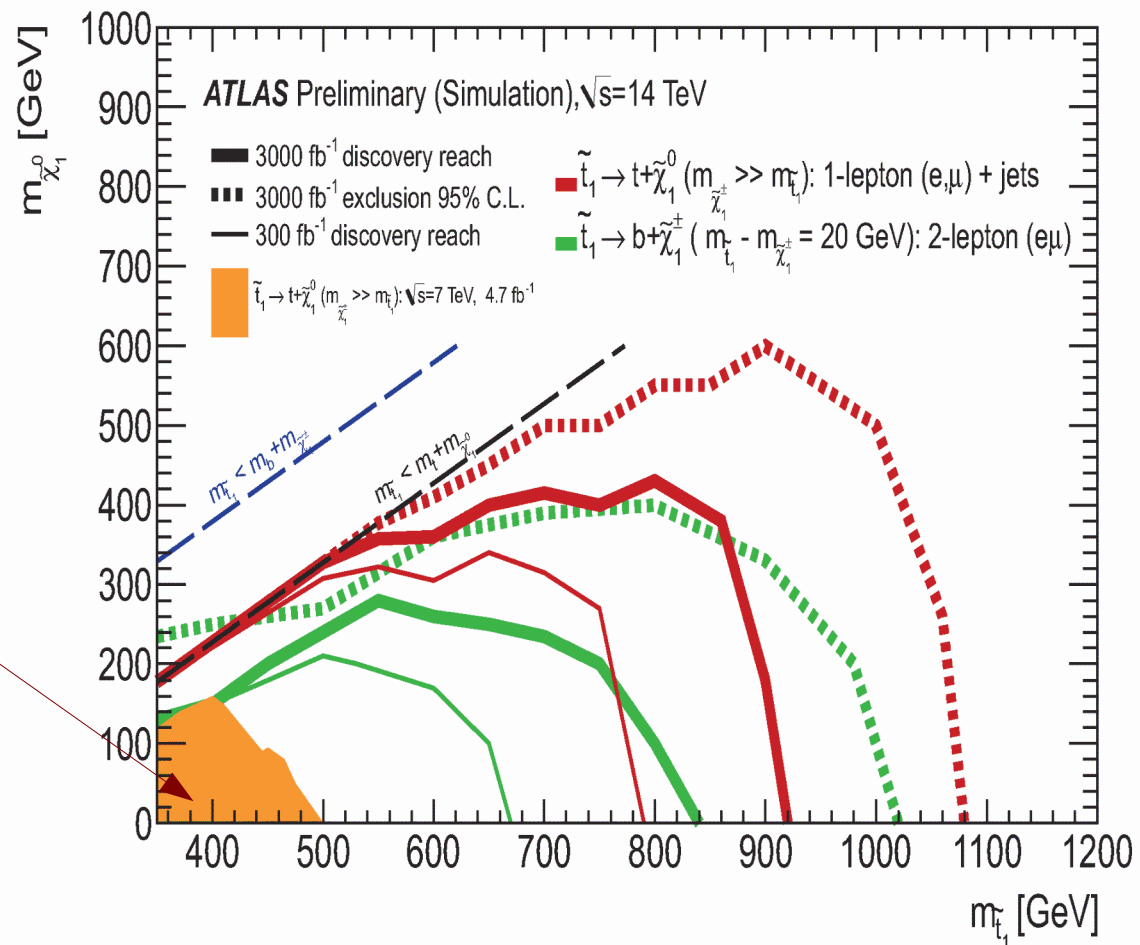
†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

• On n'a rien trouvé non plus, mais on continue de chercher !

SUSY et exotiques : le futur

- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés jusqu'en 2012 (7-8 TeV), 35 fb⁻¹ depuis juin 2015 (13 TeV)
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2021-2022
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030-2035

Exclus actuellement



Conclusion

- Vous savez maintenant comment fonctionne un détecteur de particules
- Il est temps d'apprendre à s'en servir
- Prochaine présentation :

**Comment détecter
« pour de vrai »
des particules avec
l'expérience ATLAS**

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



www.cppm.in2p3.fr/Masterclasses

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

www.cppm.in2p3.fr

cern.ch

twitter.com/cern

www.particuleselementaires.fr

Twitter :

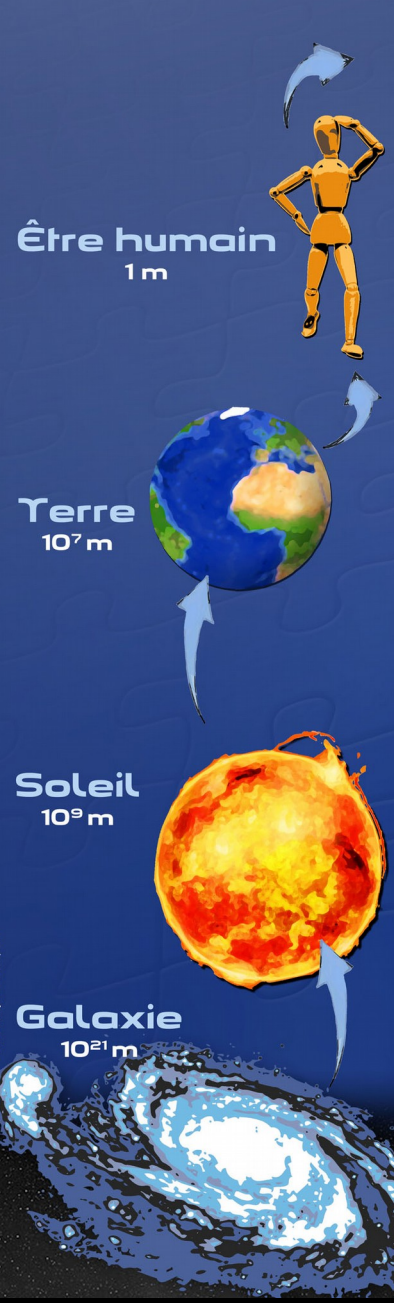
#LHCIMC17

@physicsIMC



<http://atlasathome.cern.ch>

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	e électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c ²	u haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c ²	d bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c ²	$t = 1,6 \cdot 10^{-12}$ s $Q = 0$ $m = 125$ GeV/c ² 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.
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	μ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c ²	c charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c ²	s étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c ²	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	τ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c ²	t top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c ²	b beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c ²	



INTERACTIONS FONDAMENTALES

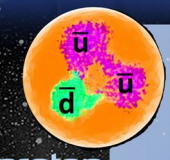
Portée	Interaction
10^{-17} m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10^{-15} m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W [±]	Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	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/le-grand-zoom-de-l-univers>
- Chaîne d'accélération du LHC
<http://cds.cern.ch/record/2020780>
- Détection des particules dans ATLAS
<http://cds.cern.ch/record/1458883>
- 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://cds.cern.ch/record/1406035>
- 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/4l-FixedScale-NoMuProf2.gif>
- Bille qui tourne et brisure de symétrie
<https://indico.in2p3.fr/event/10164/material/5/0.wmv>