

# Accélérateurs et détecteurs

Centre de physique des particules de Marseille

INTERNATIONAL

MASTERCLASSES

hands on particle physics Février-mars 2016



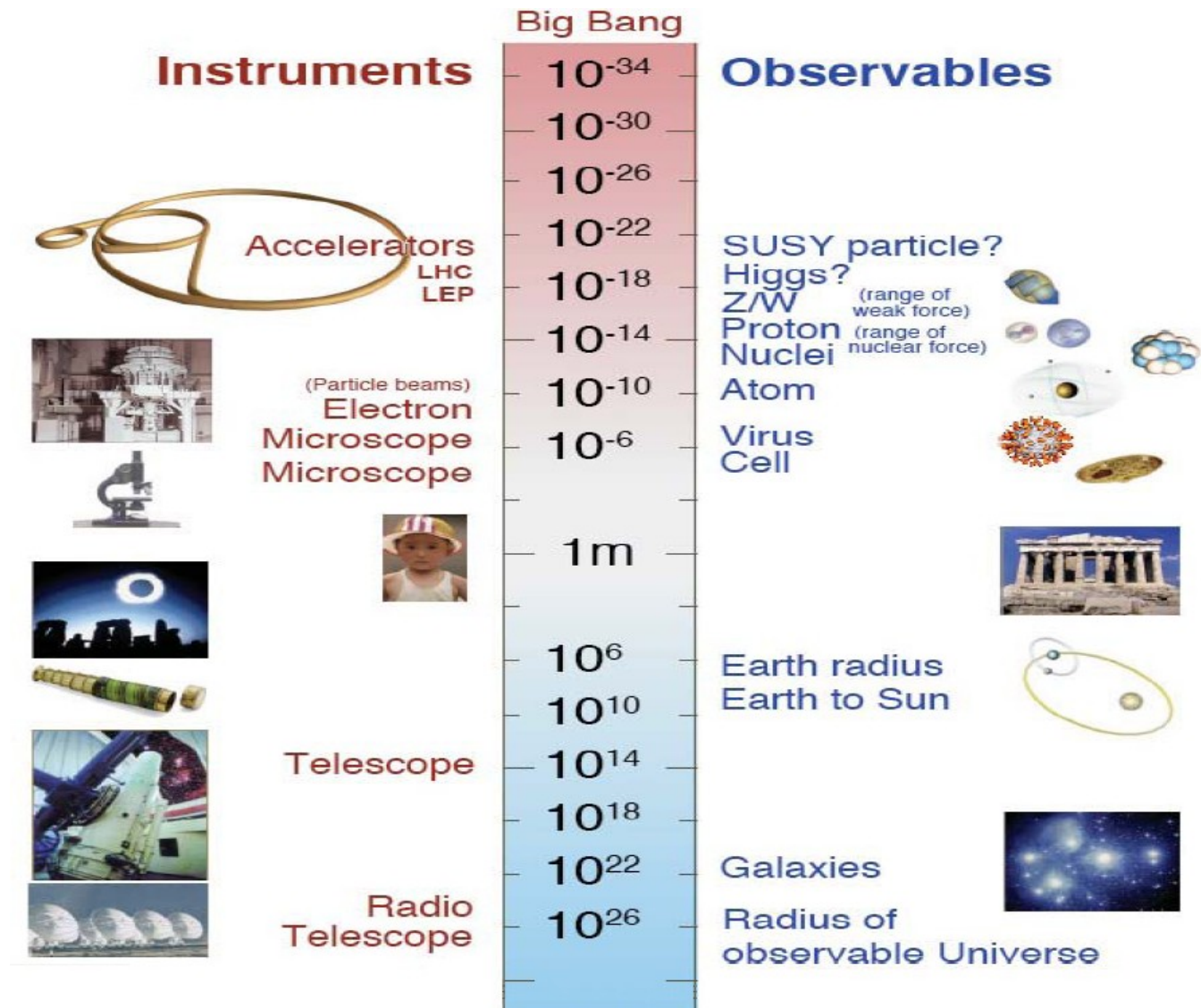
# Pourquoi des accélérateurs de particules ?

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

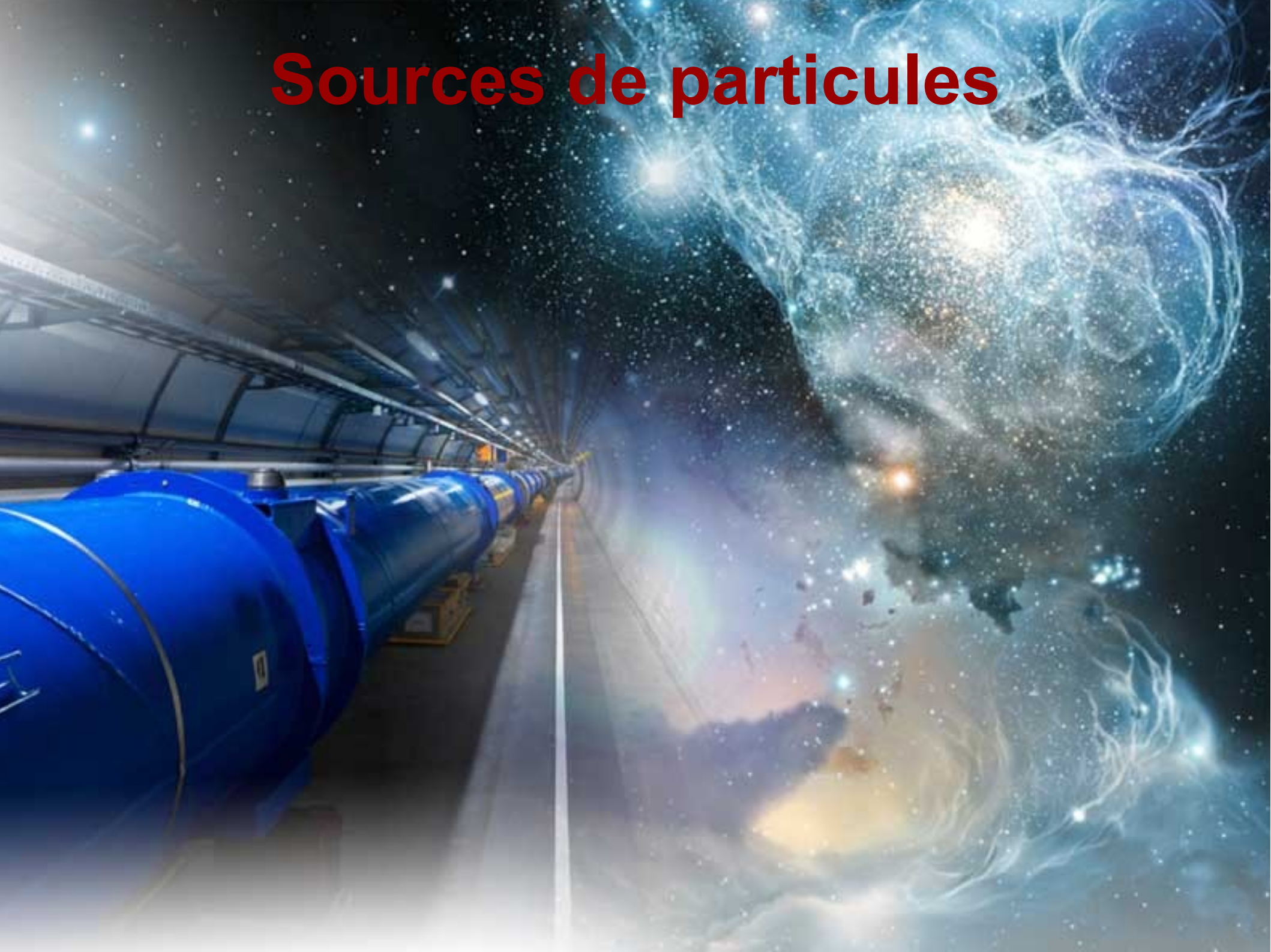
- ▶ longueur d'onde associée  $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

- ▶  $E = mc^2$



# Sources de particules



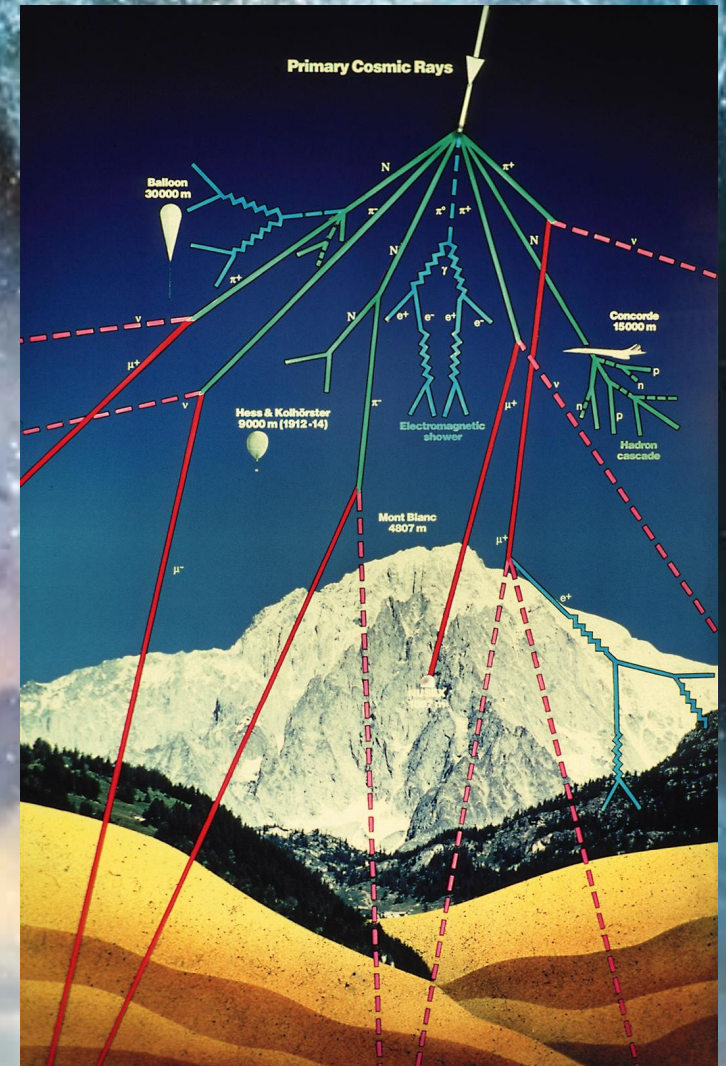
# Sources de particules

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



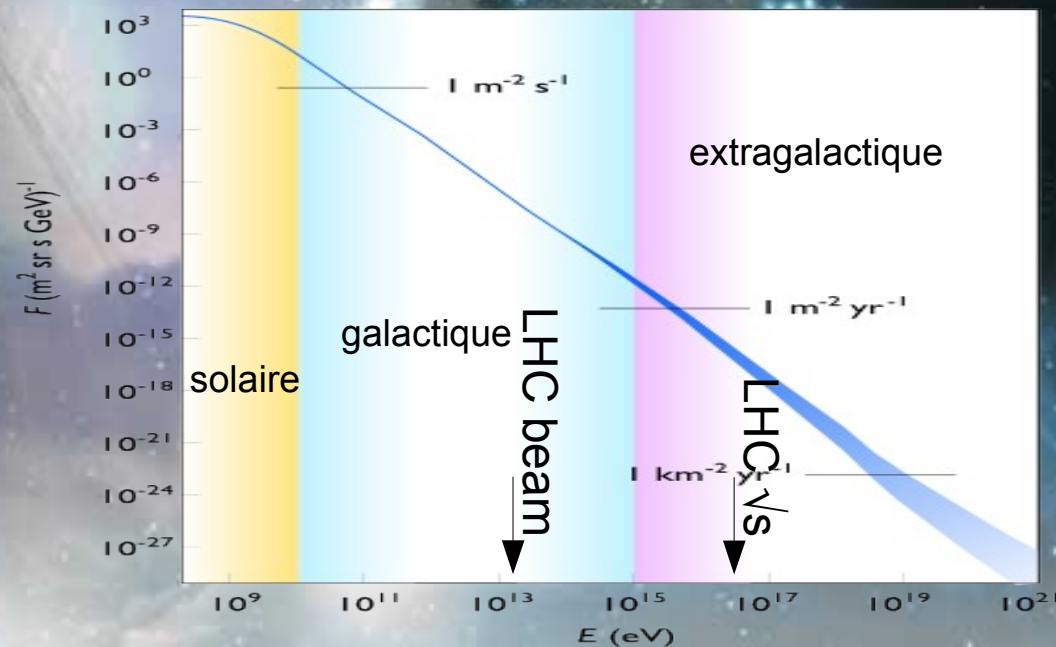
# Sources de particules

## 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

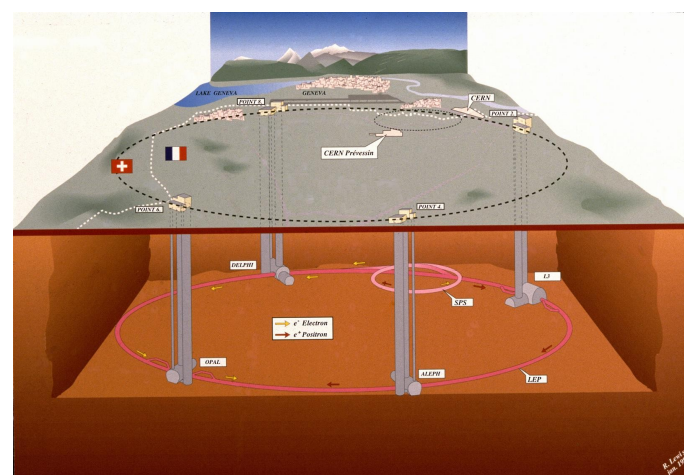
- ▶ Au CERN, Genève
- ▶ Collisions  $e^+e^-$
- ▶ 1989-2000

- 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

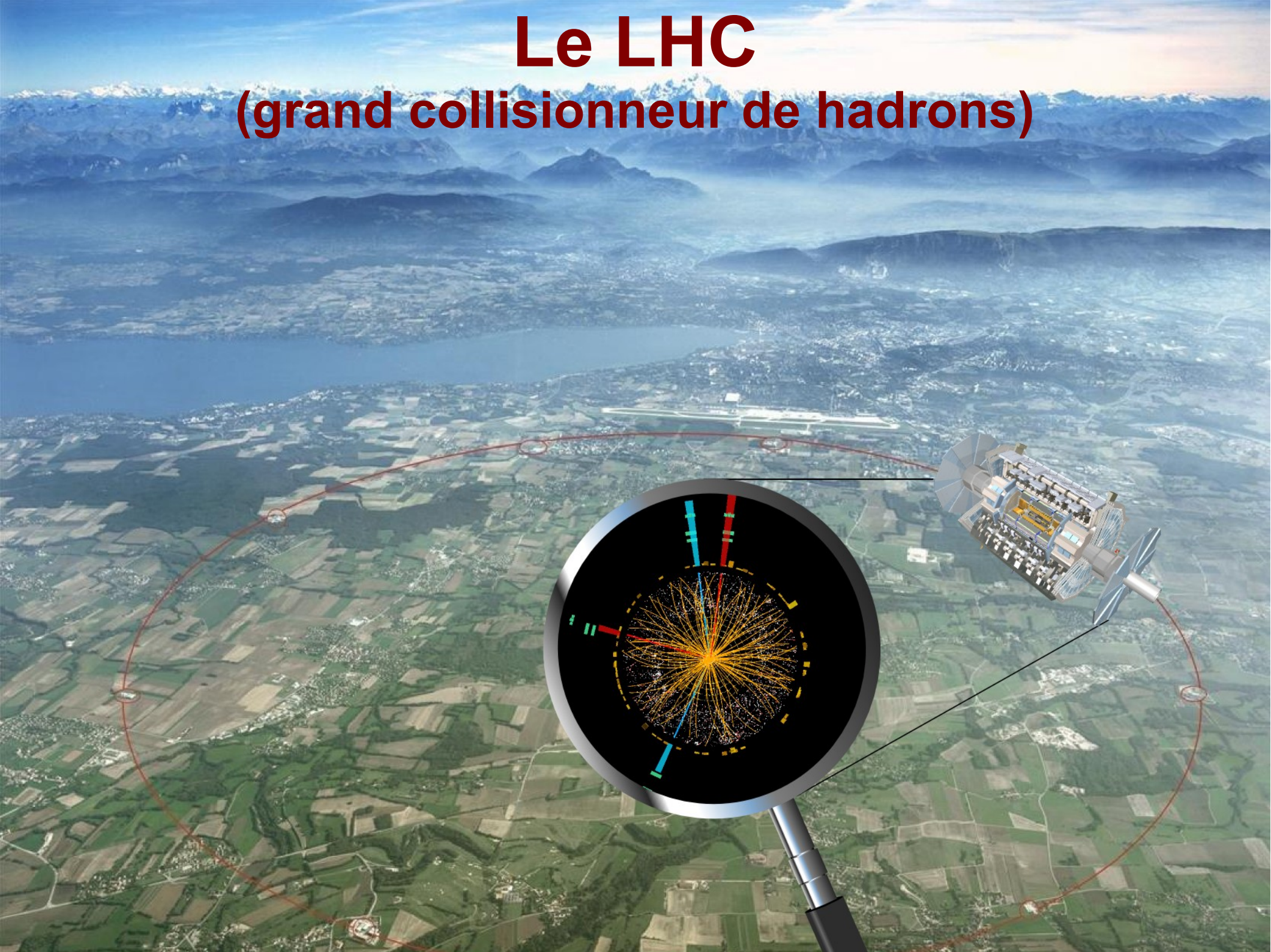
ATLAS

CMS

ALICE

# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

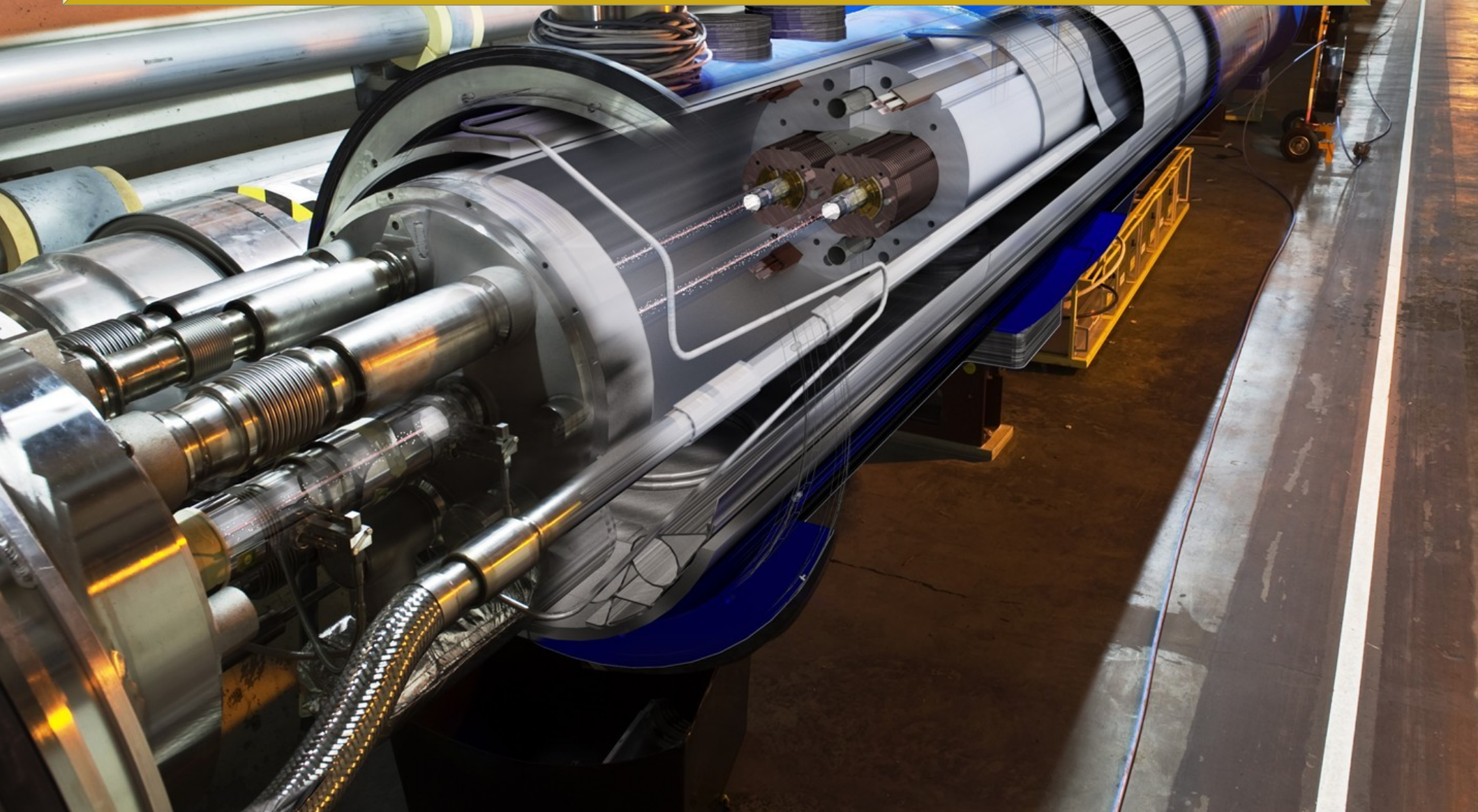


# Le LHC : la machine à superlatifs



# Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite



# Le LHC : la machine à superlatifs

A photograph of the LHC tunnel showing a long row of superconducting magnets. The magnets are blue and silver, and are arranged in a long line that recedes into the distance. A yellow callout bubble is overlaid on the image, containing text. The number '2385' is visible on a small black box attached to one of the magnets. A warning sign is visible on the left wall of the tunnel.

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

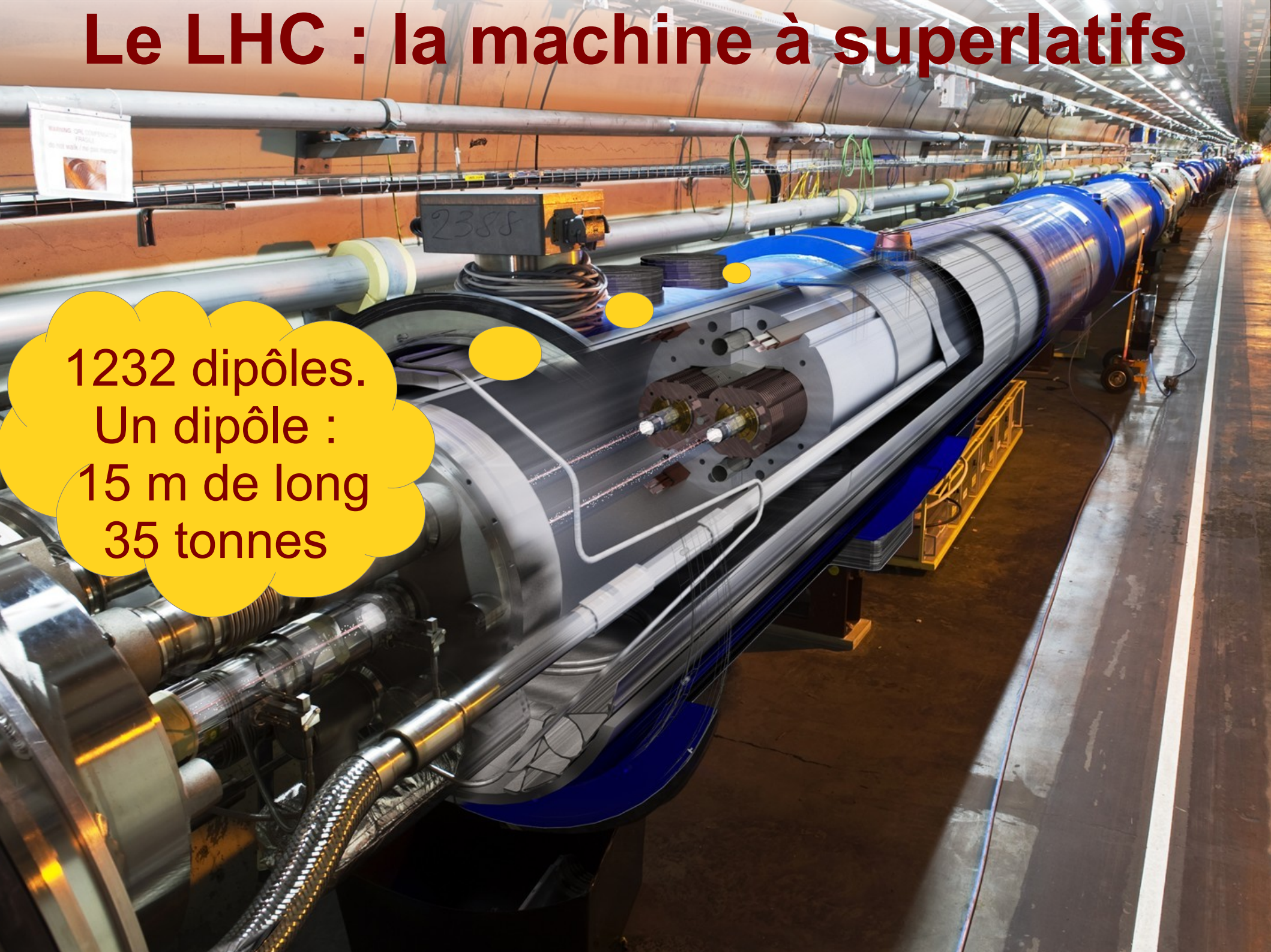


# Le LHC : la machine à superlatifs



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



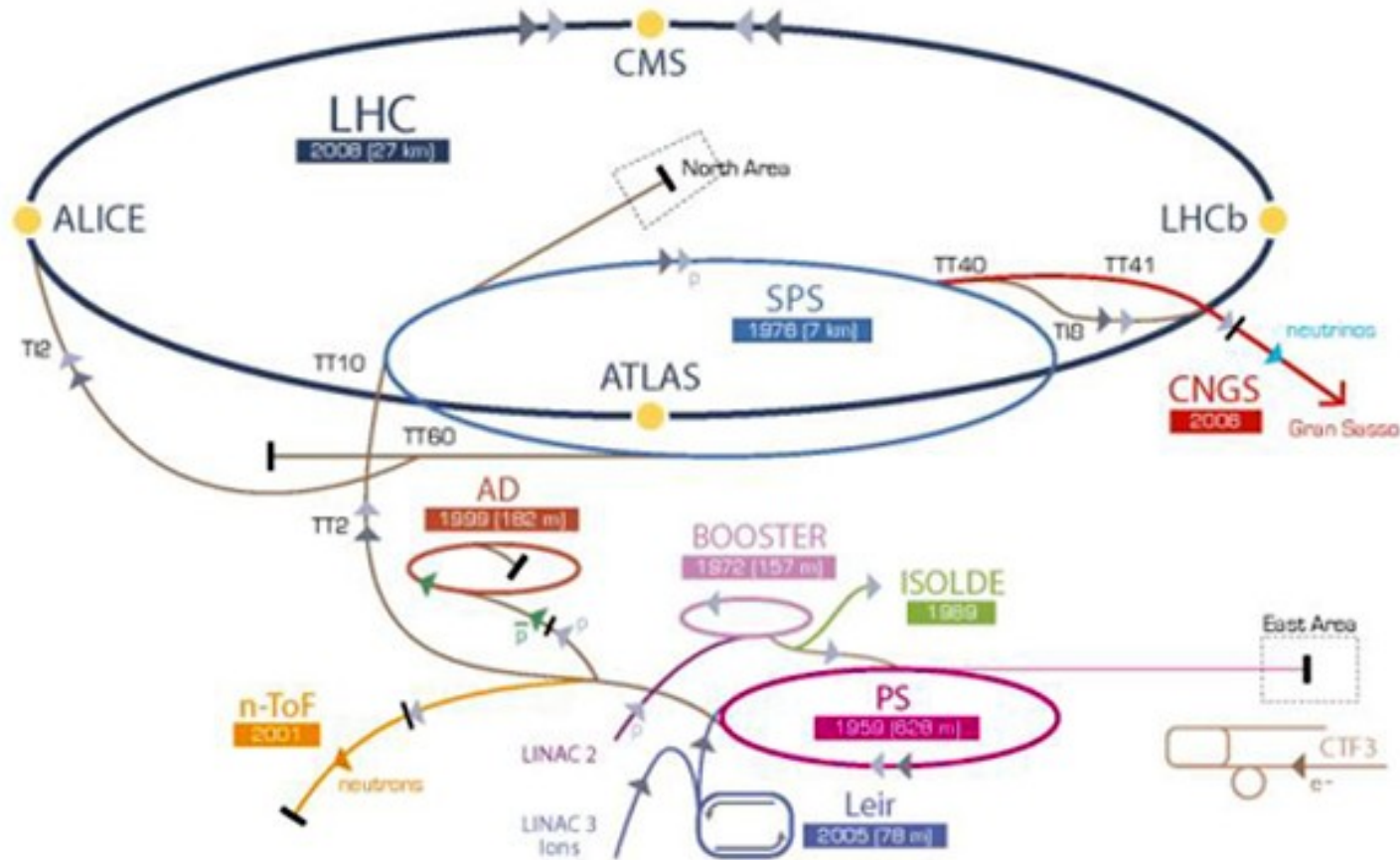
# Le LHC : la machine à superlatifs



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

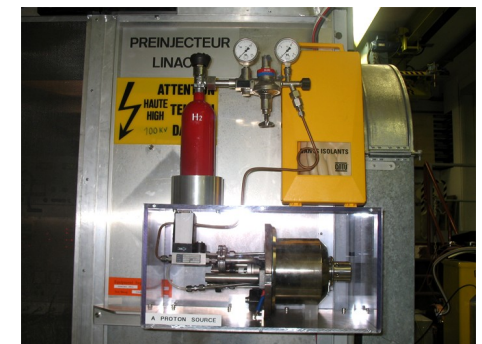


▶ p [protons]   ▶ ions   ▶ neutrons   ▶  $\bar{p}$  [antiproton]   ↔ conversion proton/antiproton   ▶ neutrinos   ▶ électrons

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

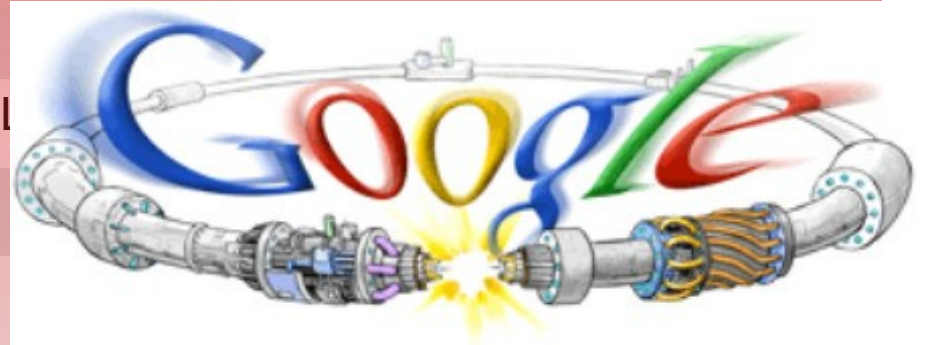
25 ans d'exploitation

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

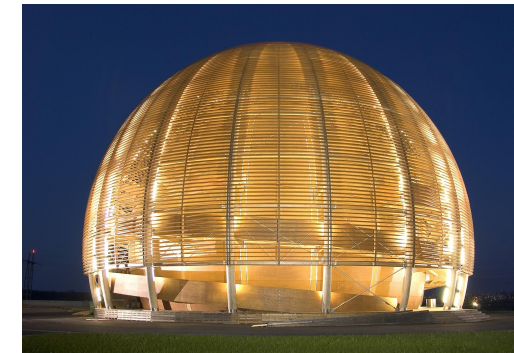
1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

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 ?



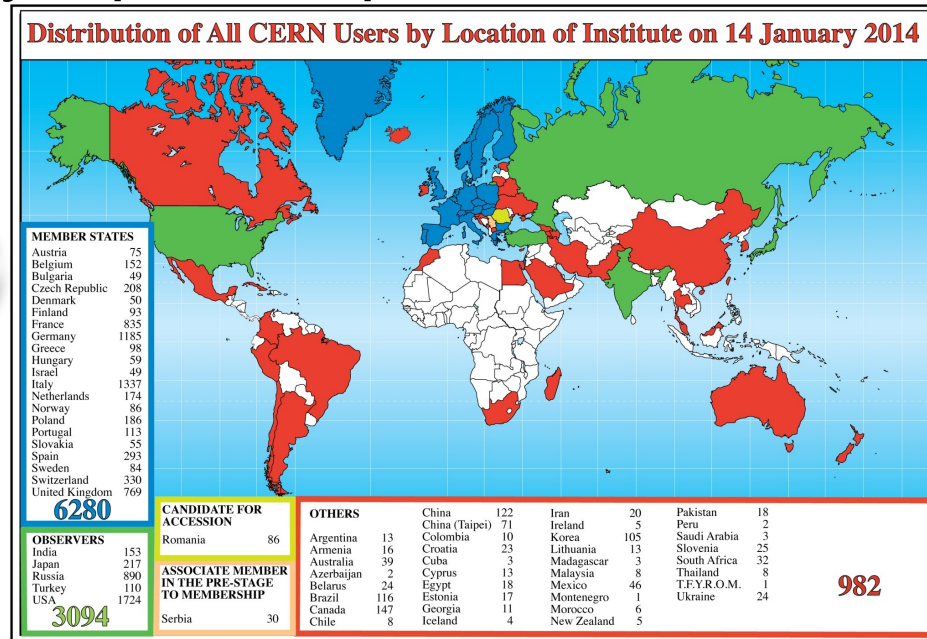
# Le CERN



*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*

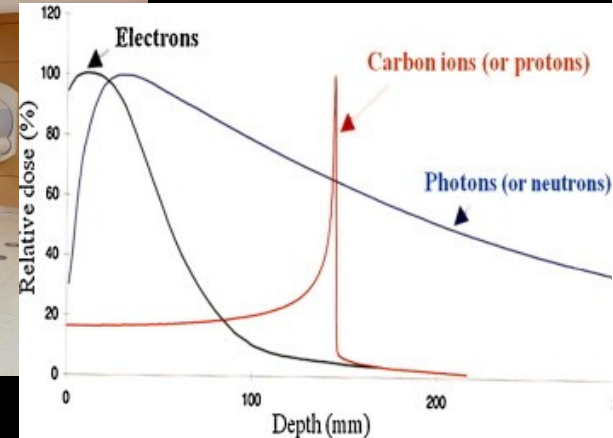
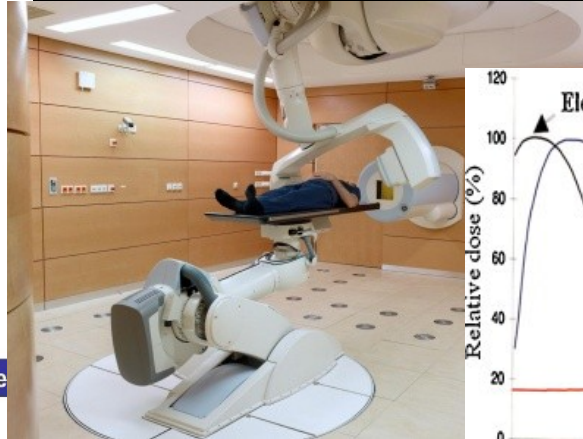
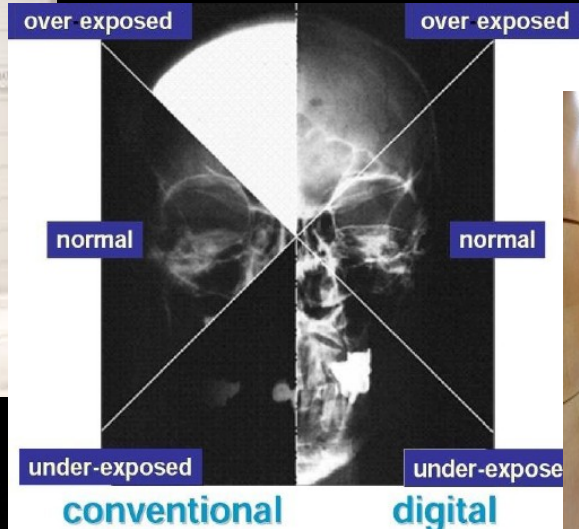
Le laboratoire européen pour la physique des particules

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

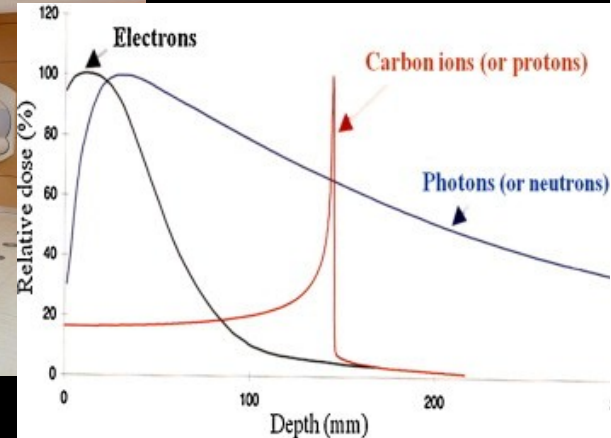
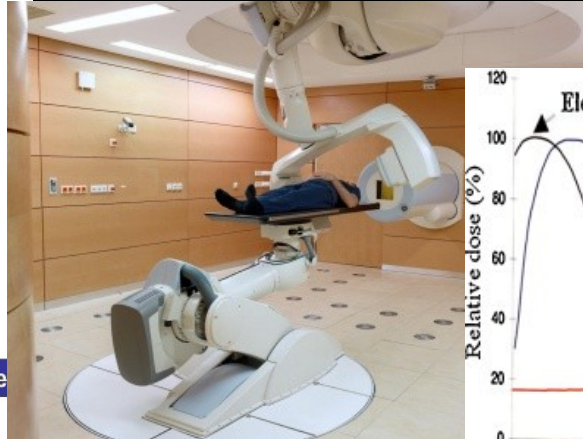
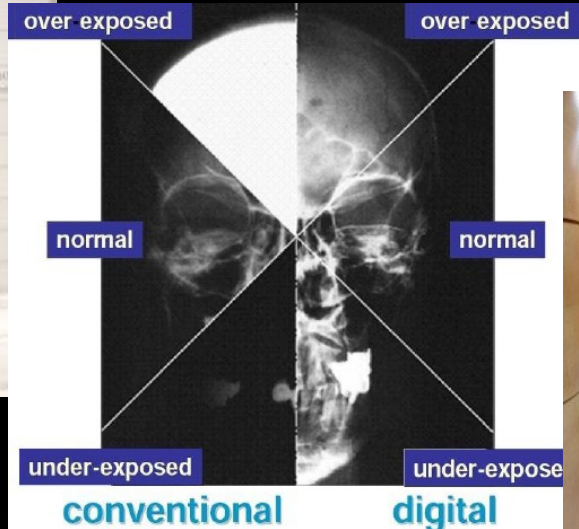


- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques / Plusieurs prix Nobel
- Formidable lieu de collaboration internationale
- Programme d'étudiant d'été

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



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

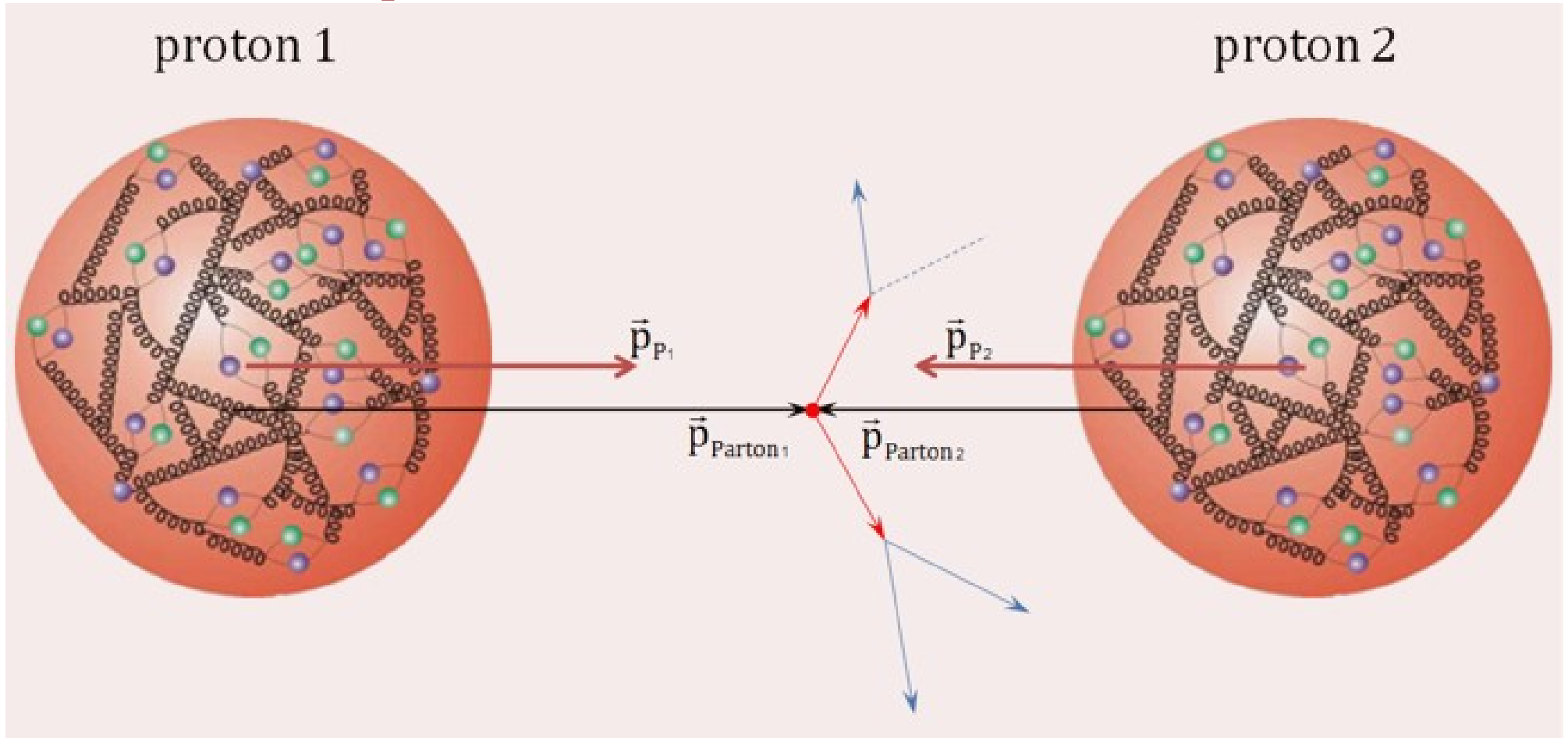


Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



► Le Web a été inventé au CERN !

# Deux protons se rencontrent...

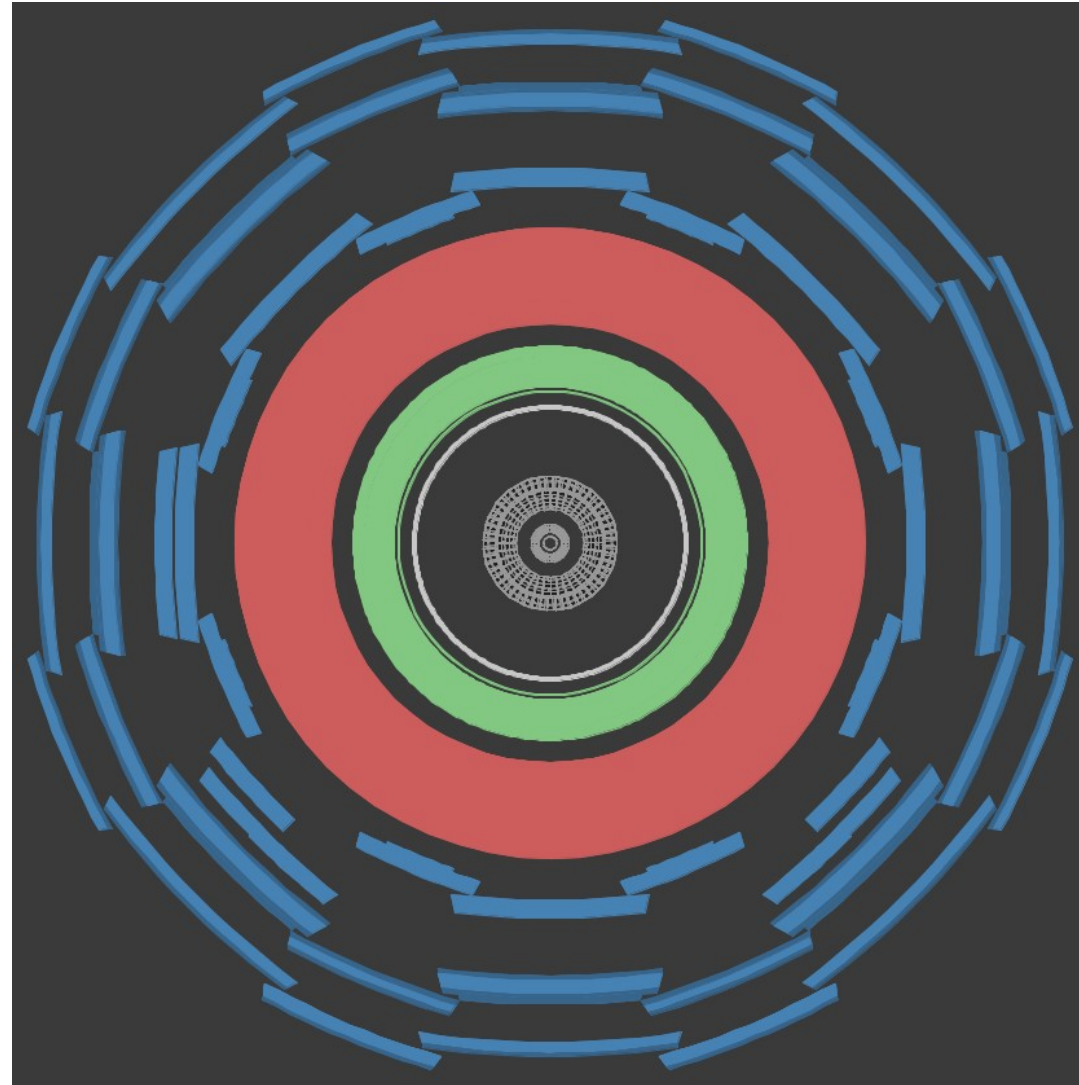


- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

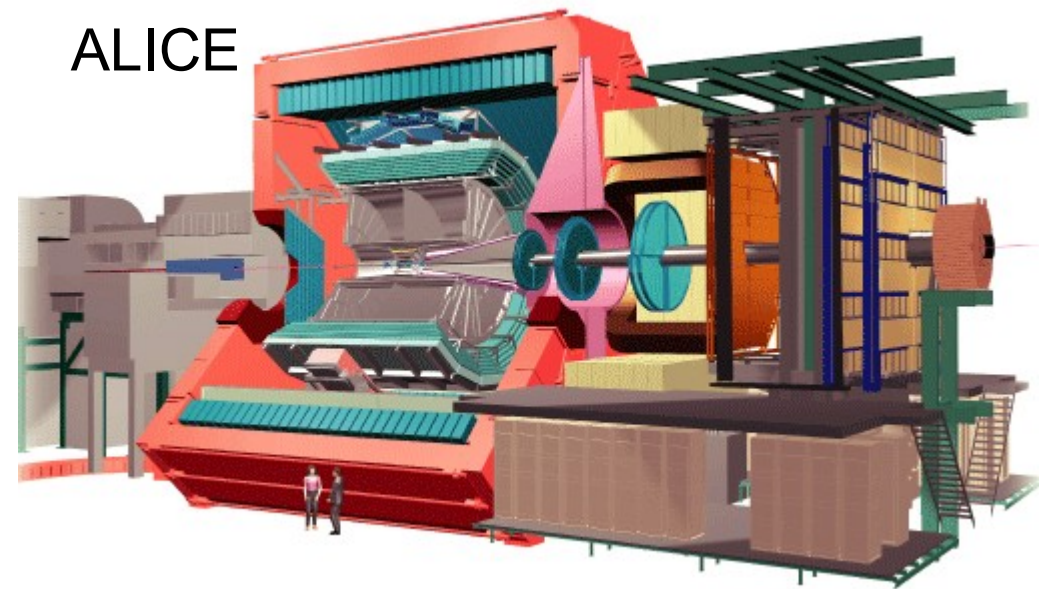
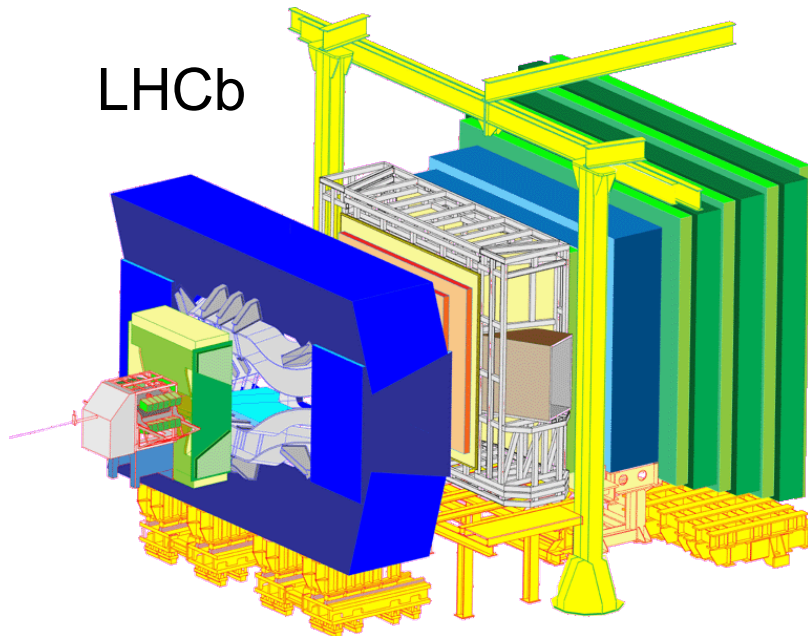
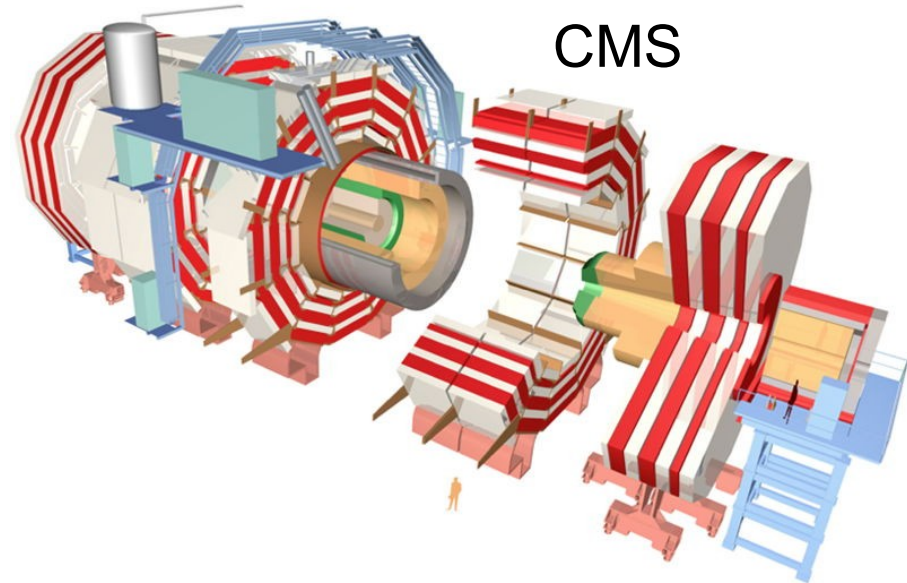
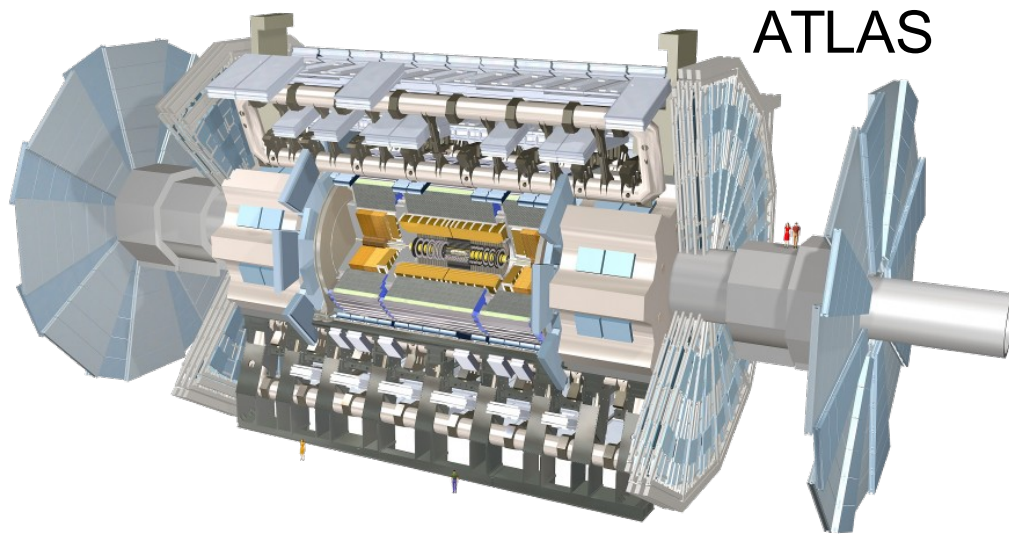


# Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

- 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

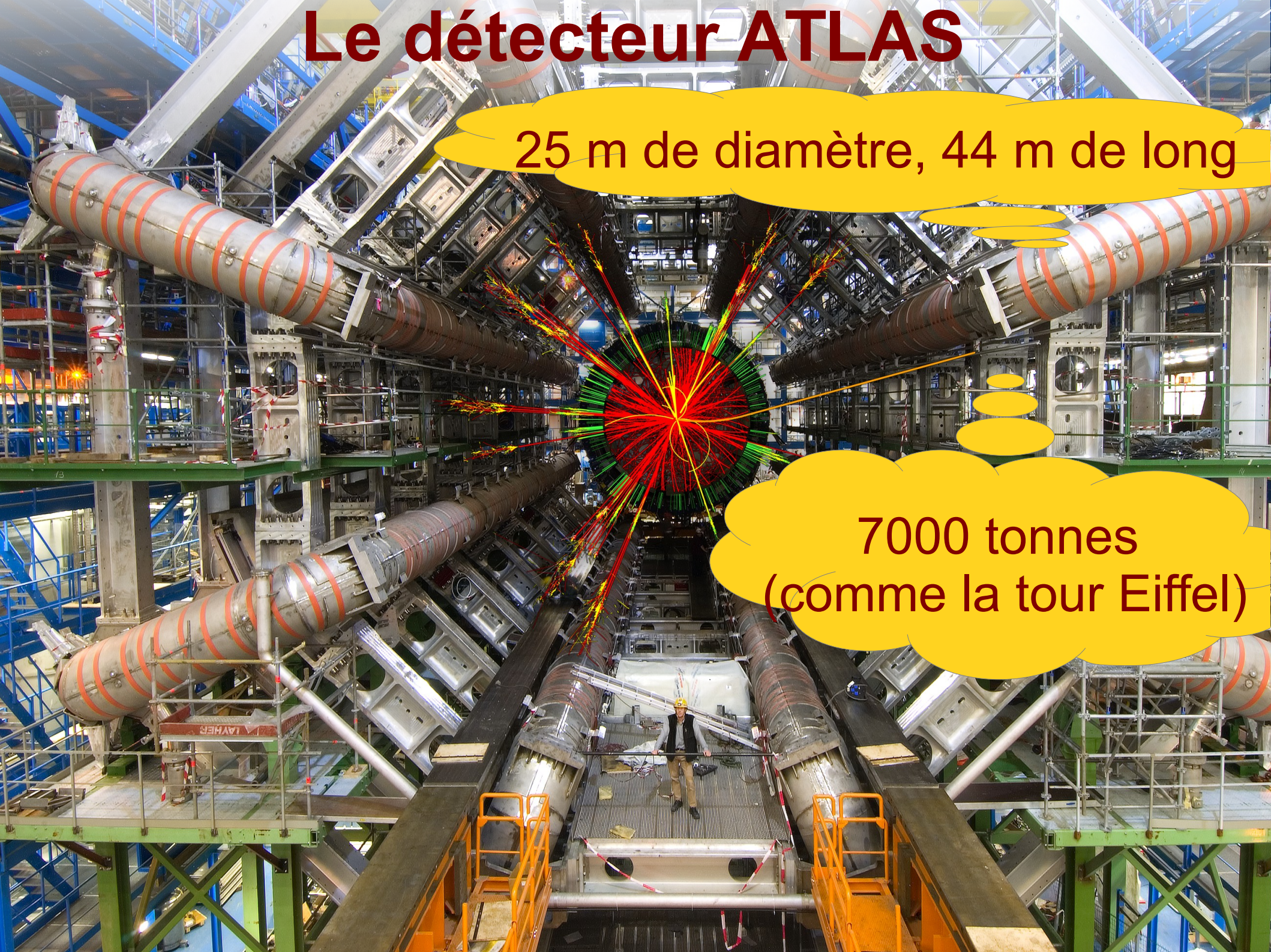
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

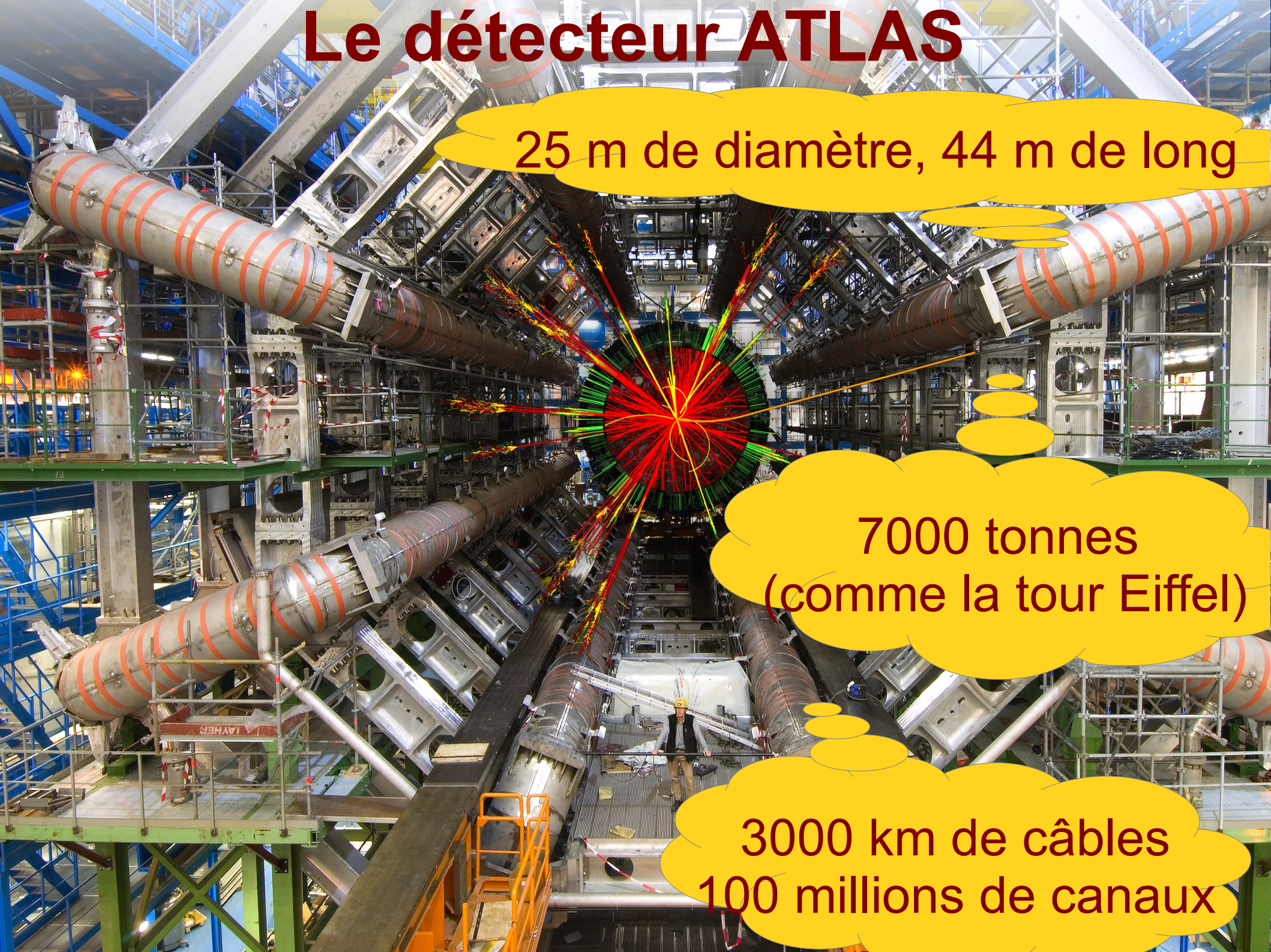


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux





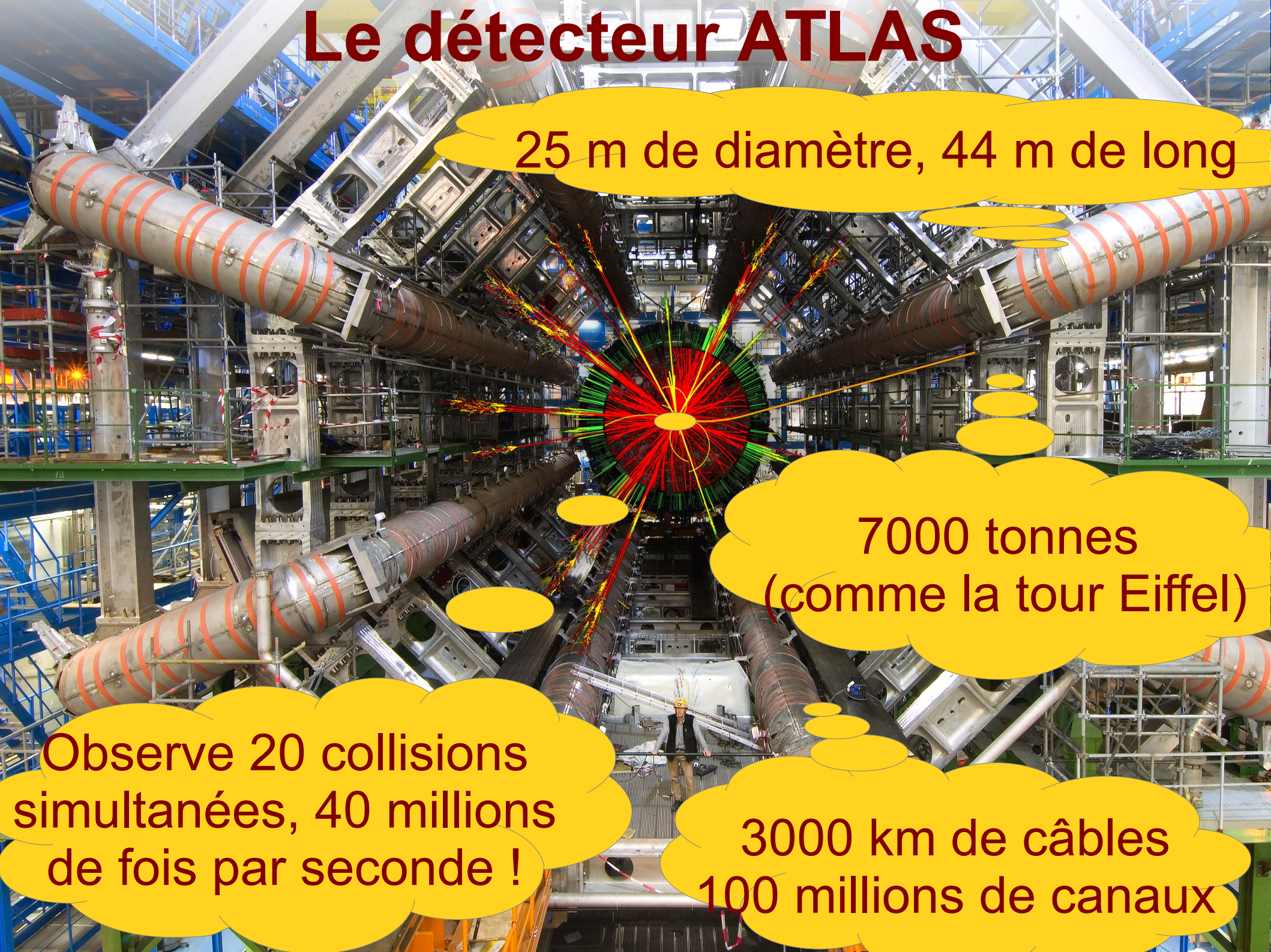
# Le détecteur ATLAS

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)

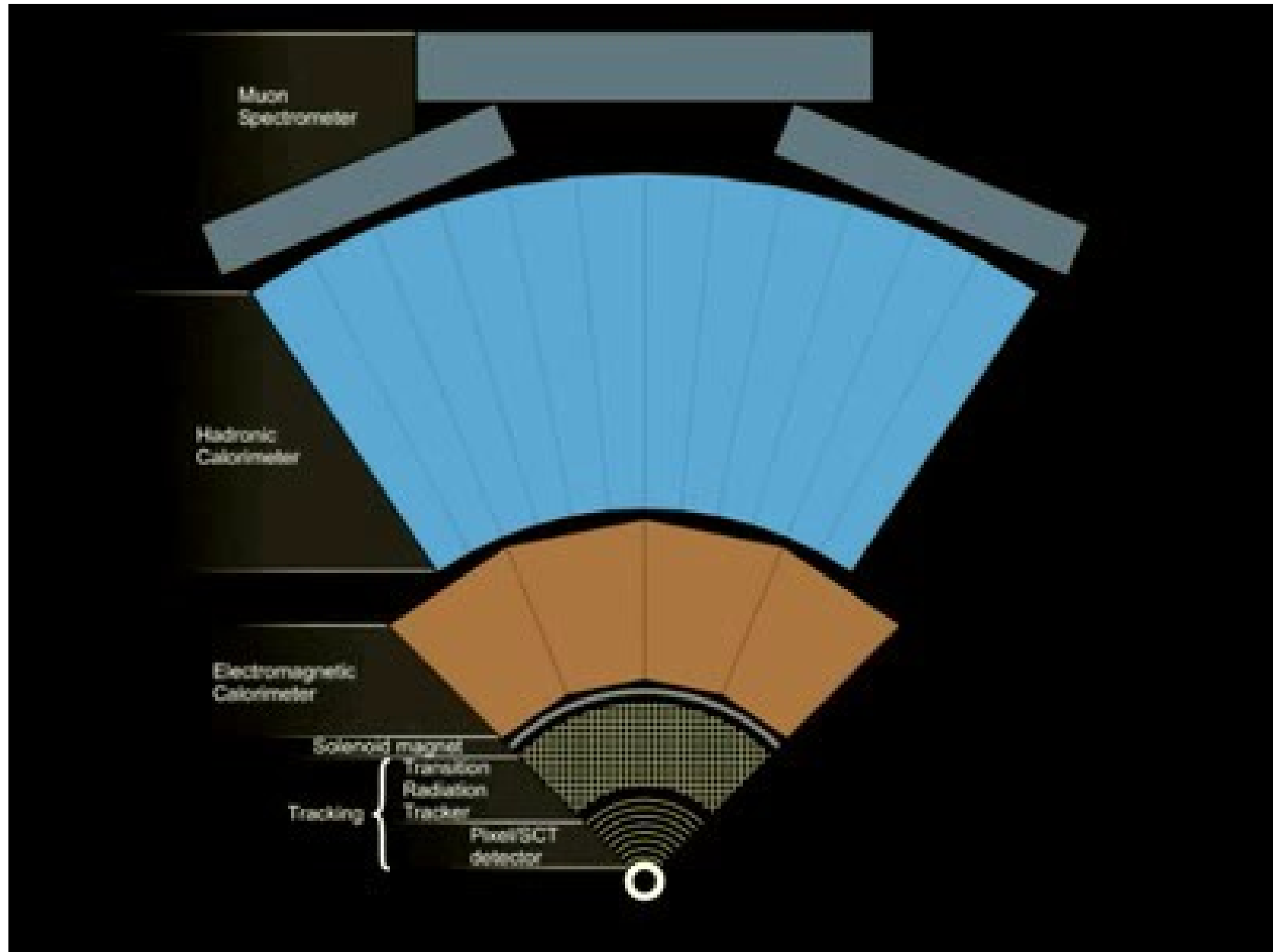
Observe 20 collisions  
simultanées, 40 millions  
de fois par seconde !

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

# Le détecteur ATLAS avec des explications



# Interaction des particules avec le détecteur

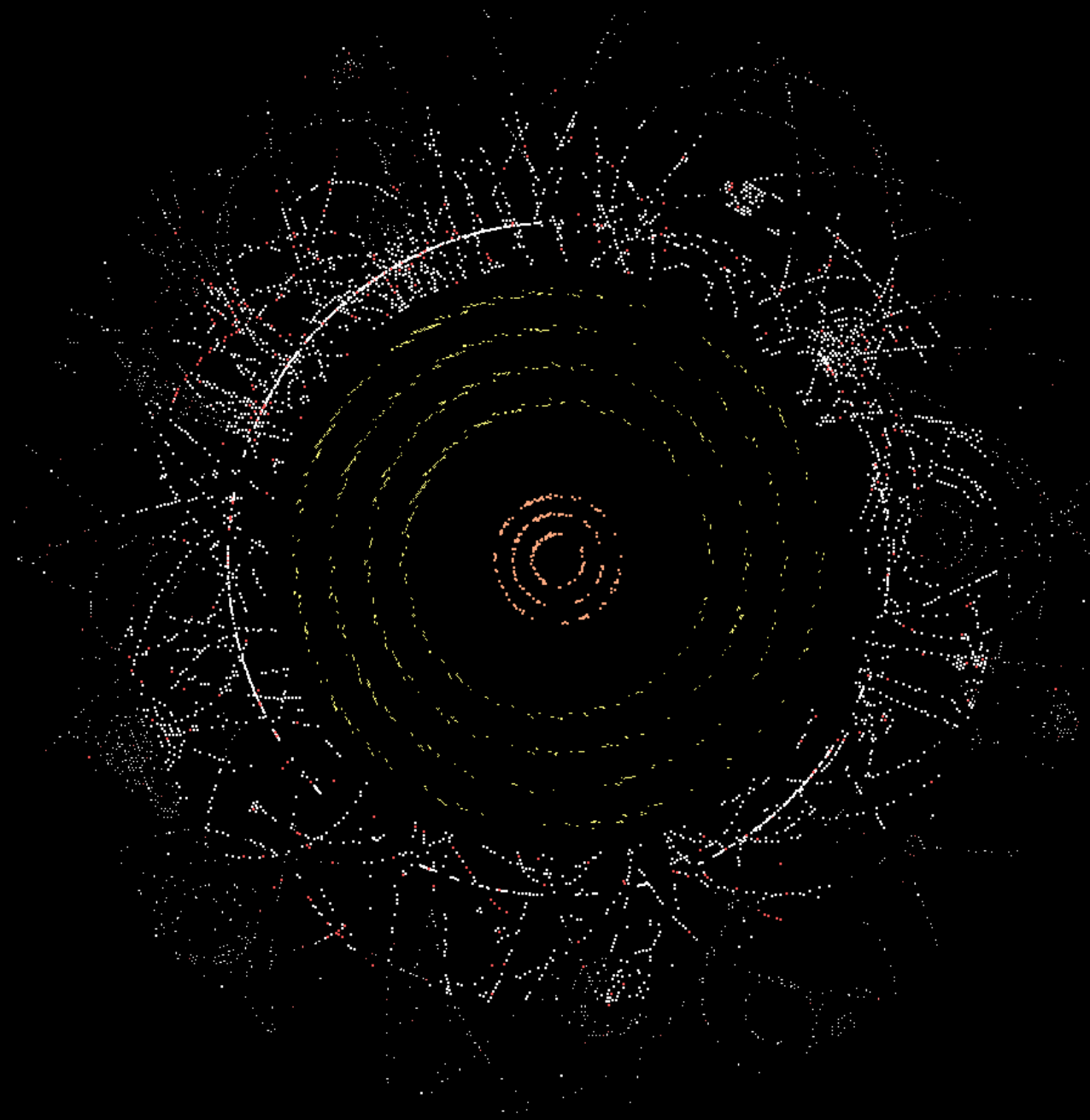


# Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels

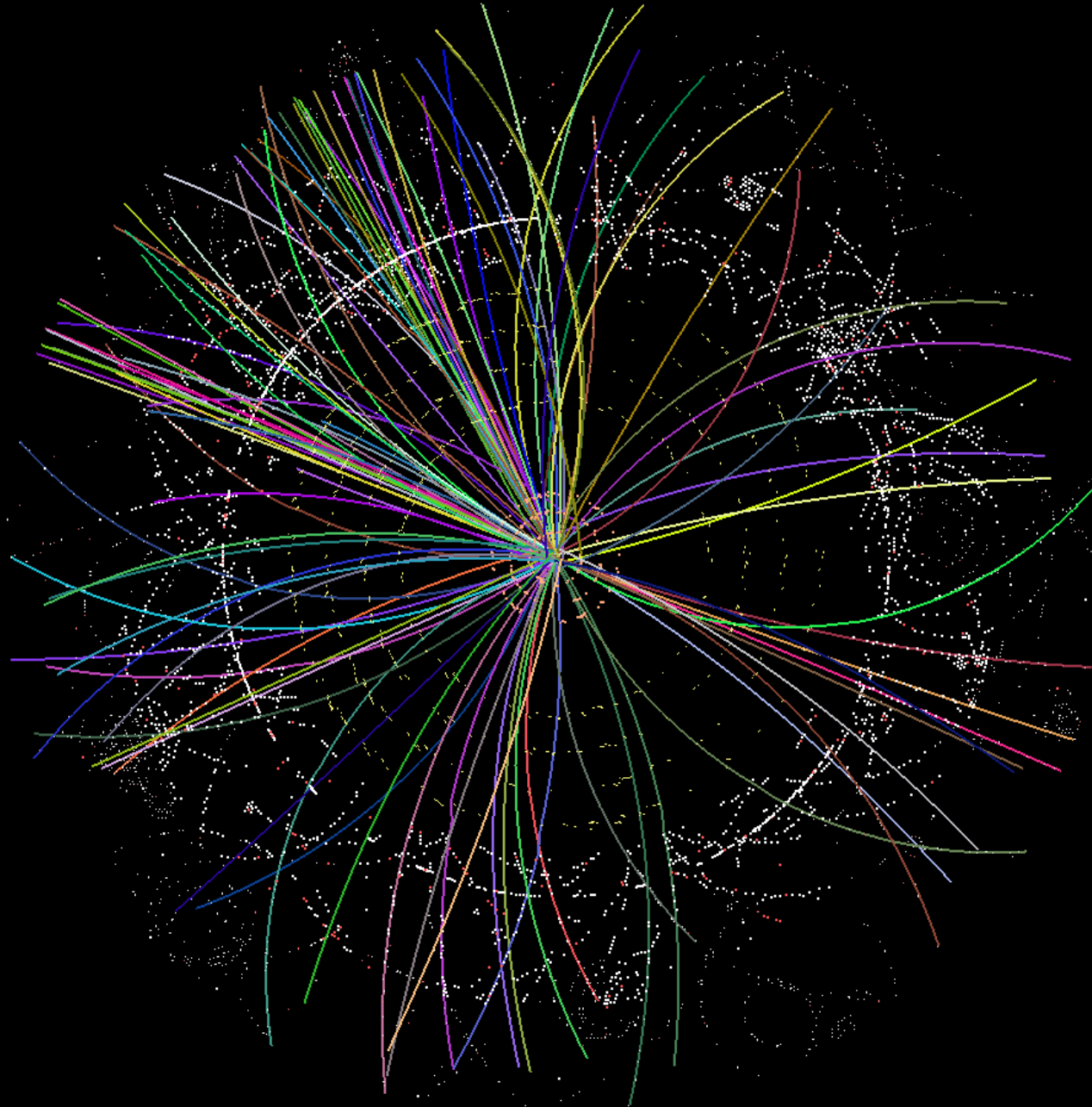


- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m<sup>2</sup> de silicium

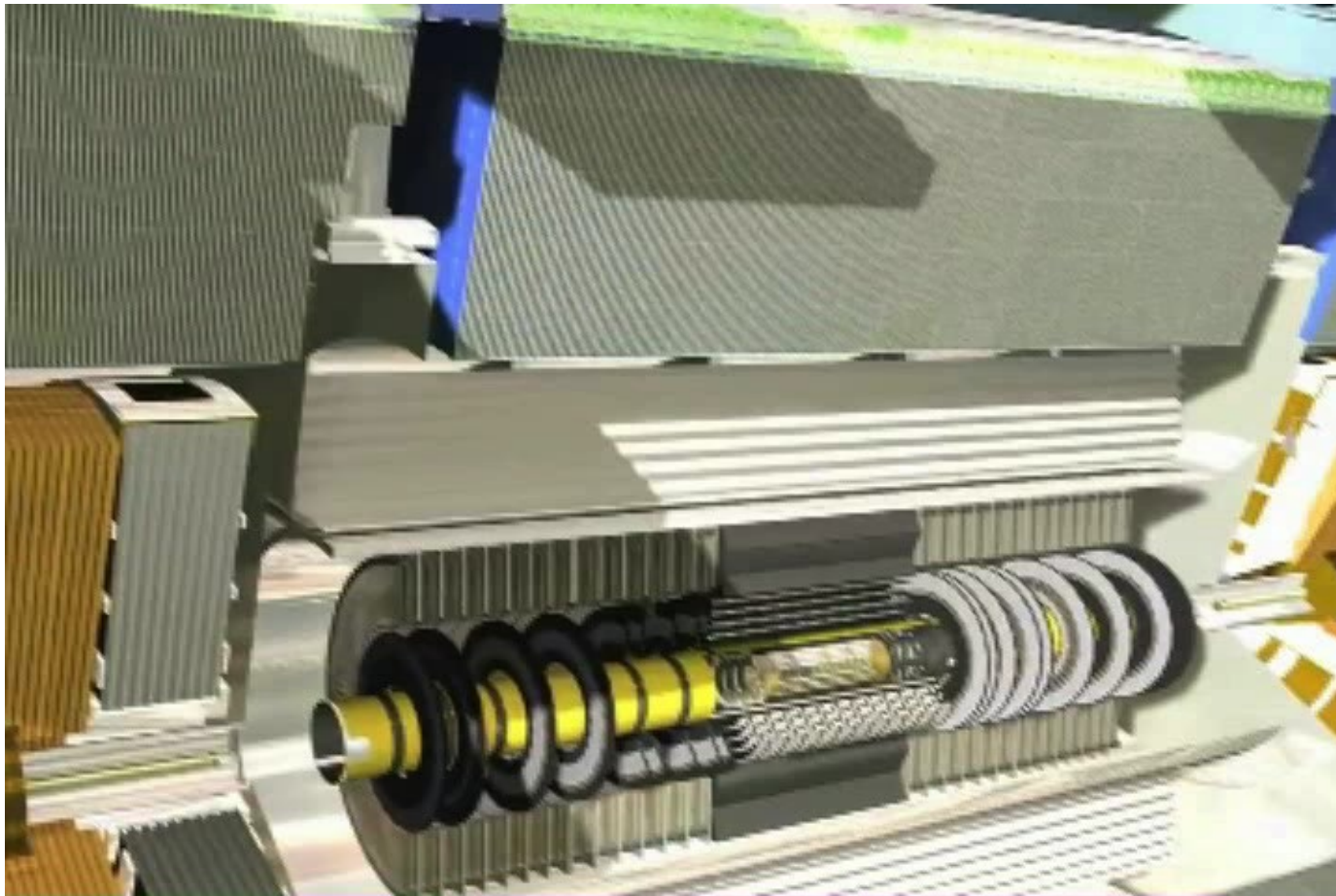
# Passage des particules



# Reconstruction des trajectoires



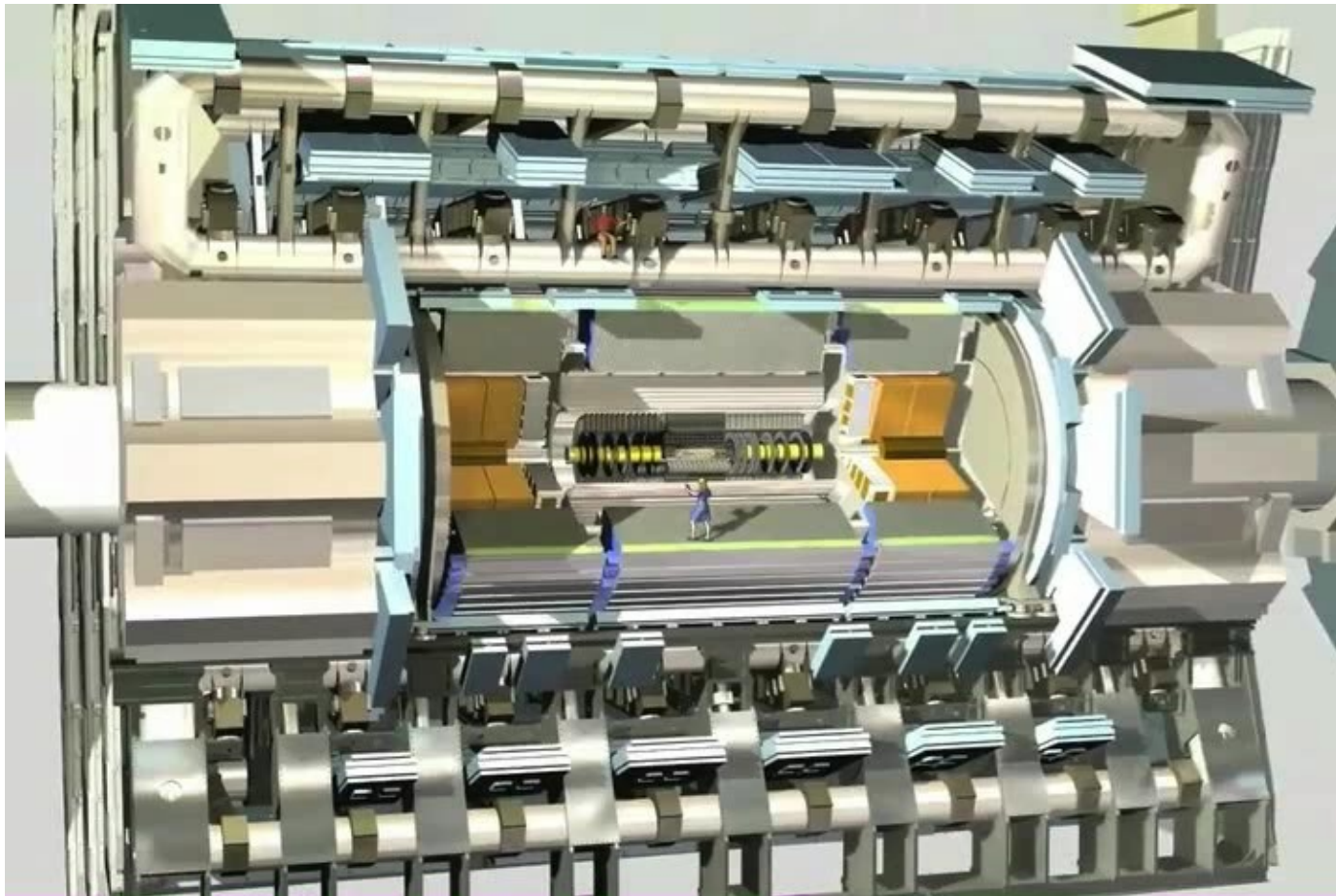
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



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

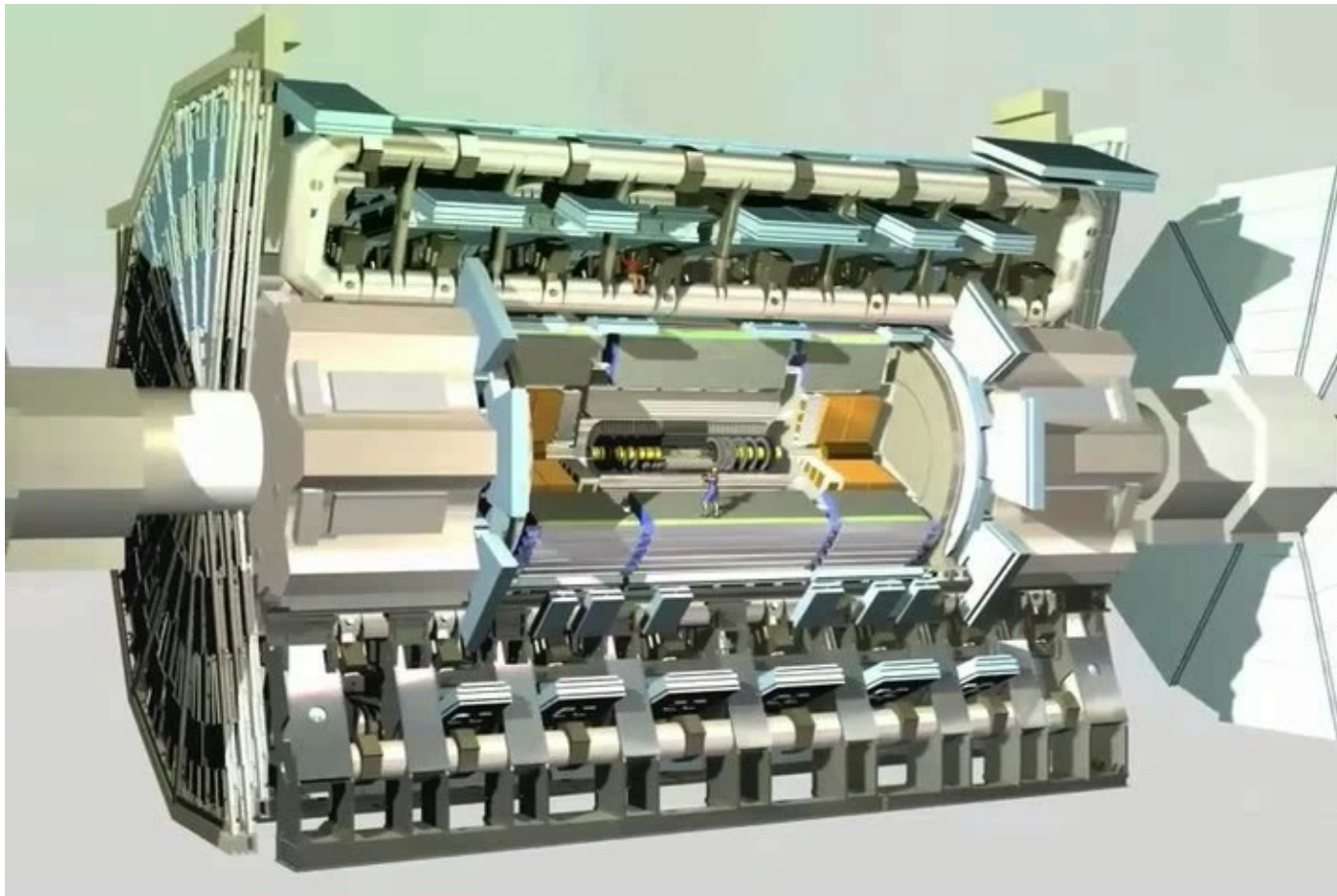


# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



- 500 000 tuiles de plastique scintillant

# Mesurer le passage des particules dans le système à muons

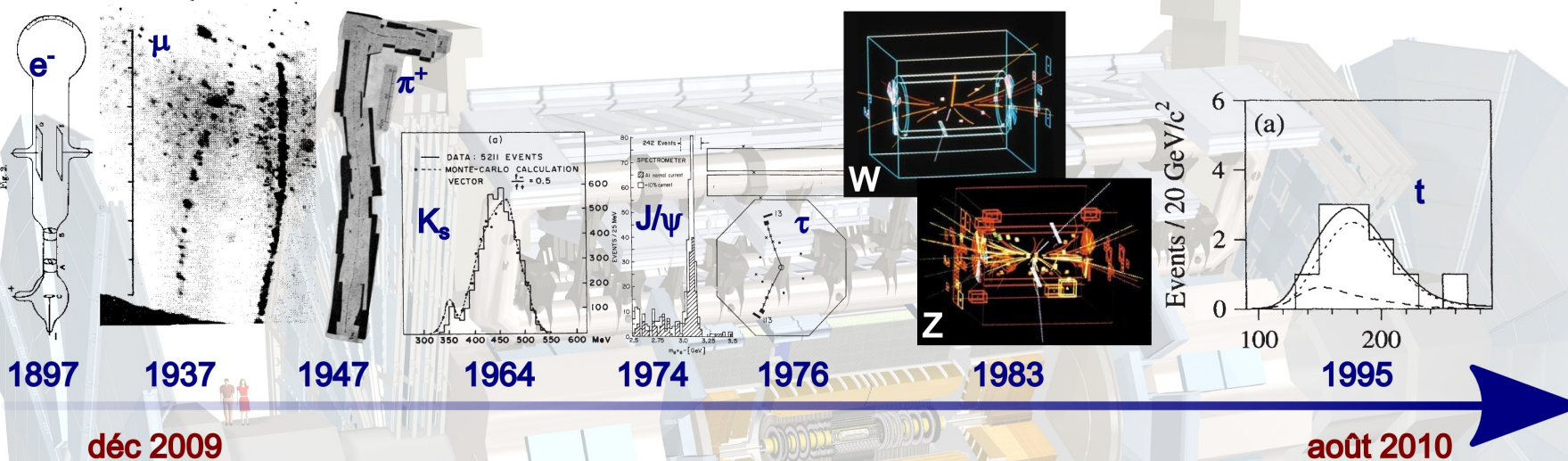


- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

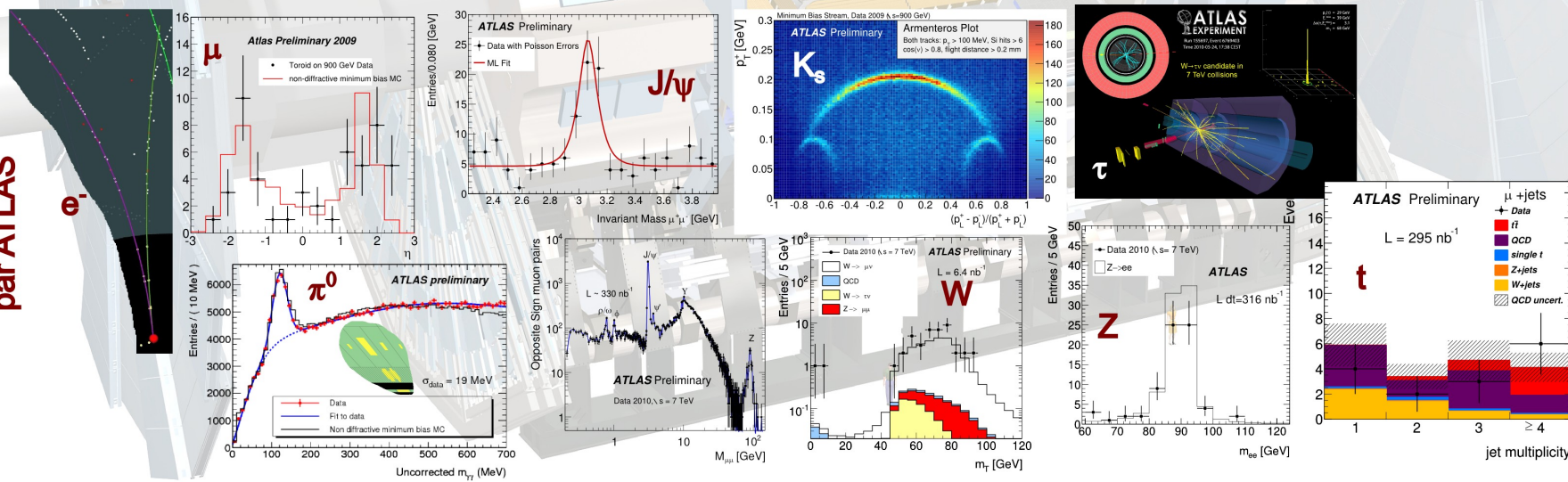
# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

Découverte historique

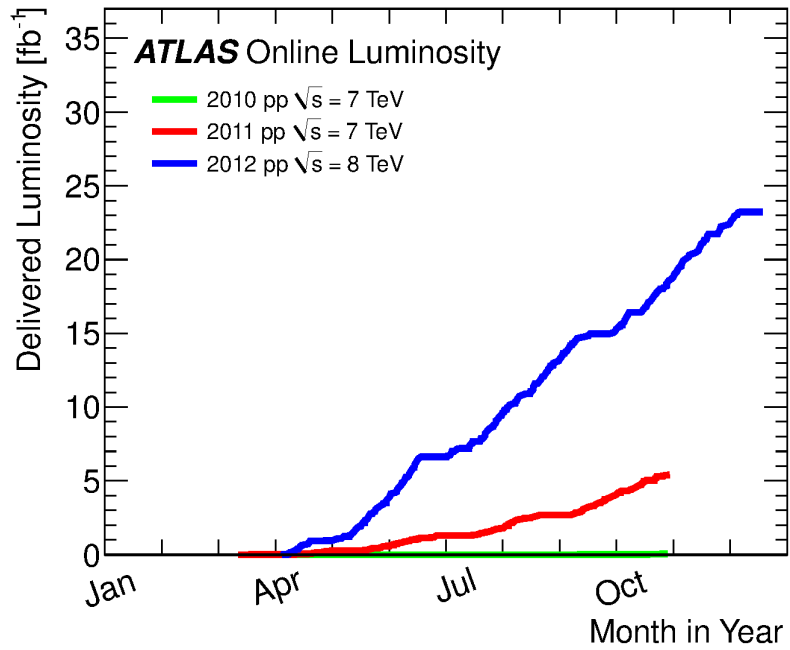


Redécouverte par ATLAS

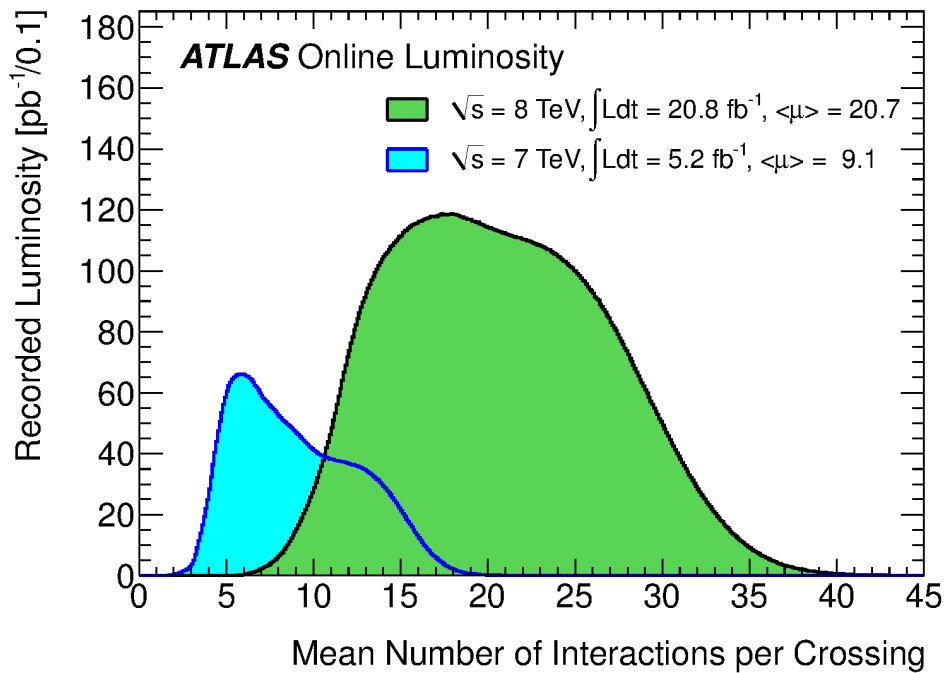
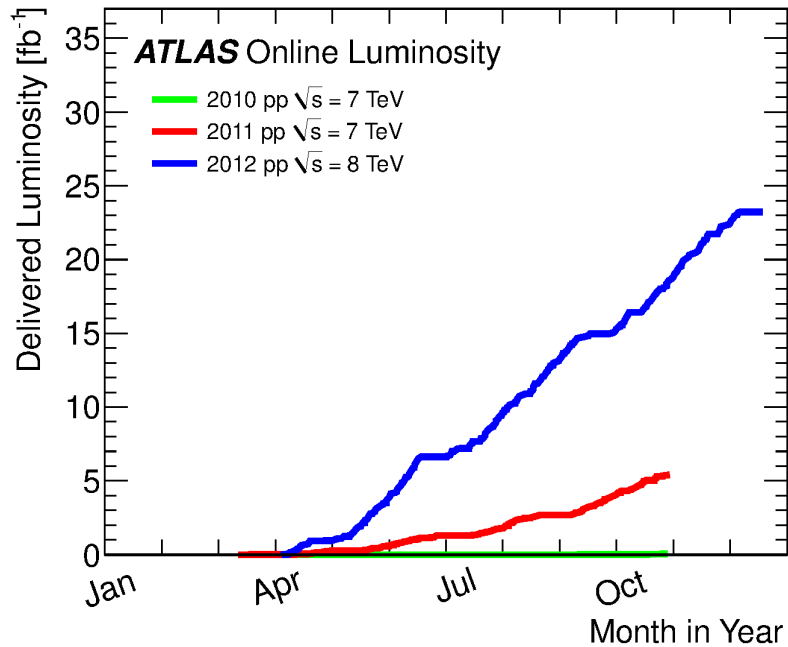


# Accumulation des données

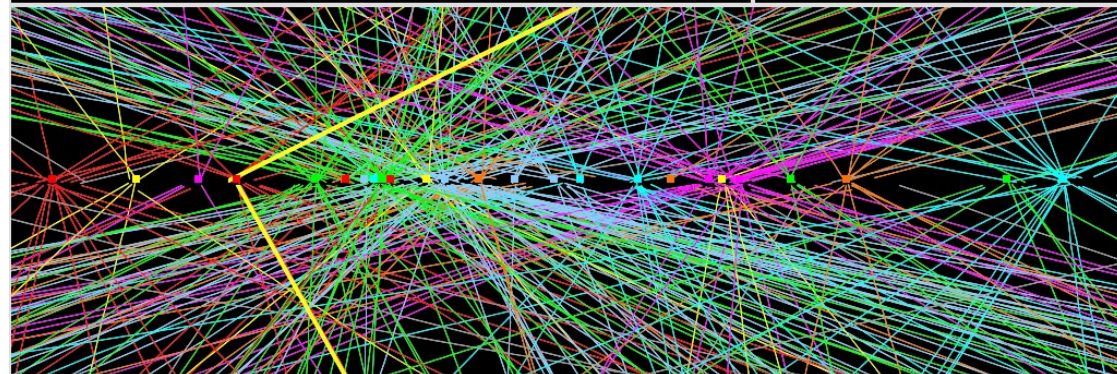
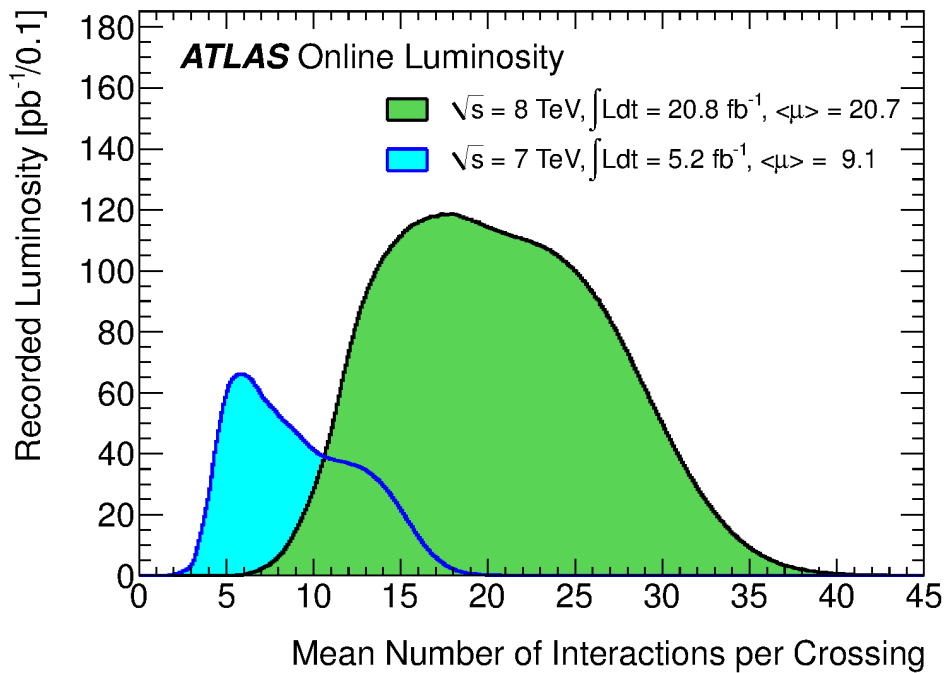
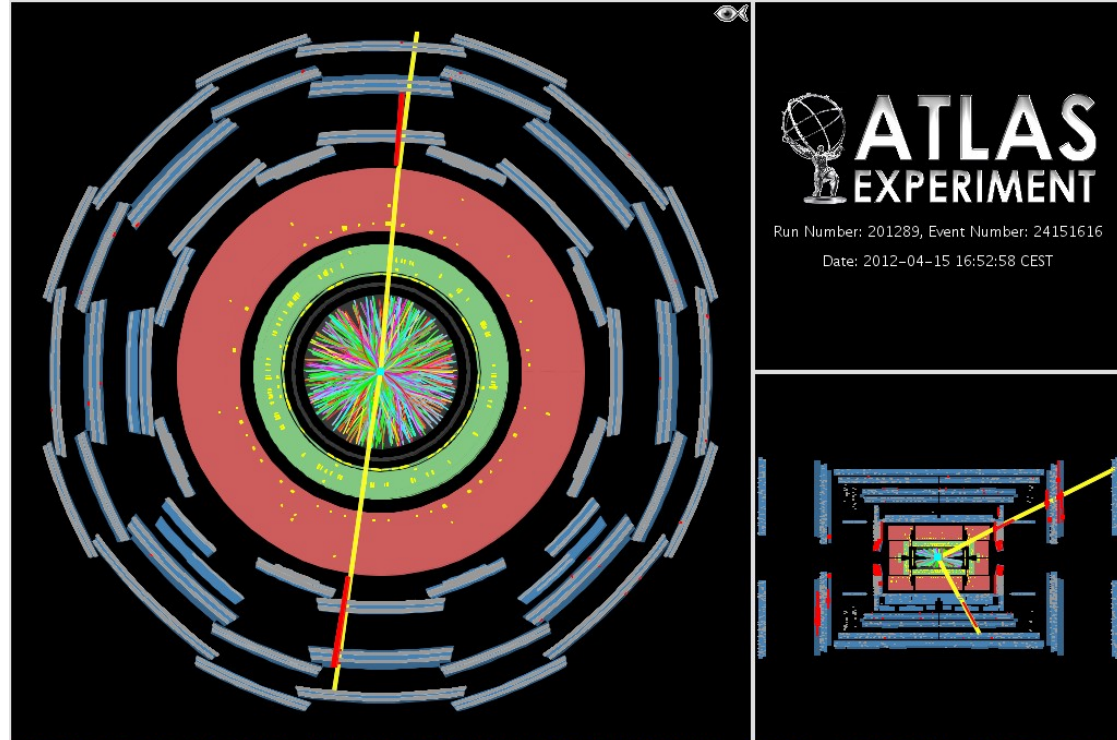
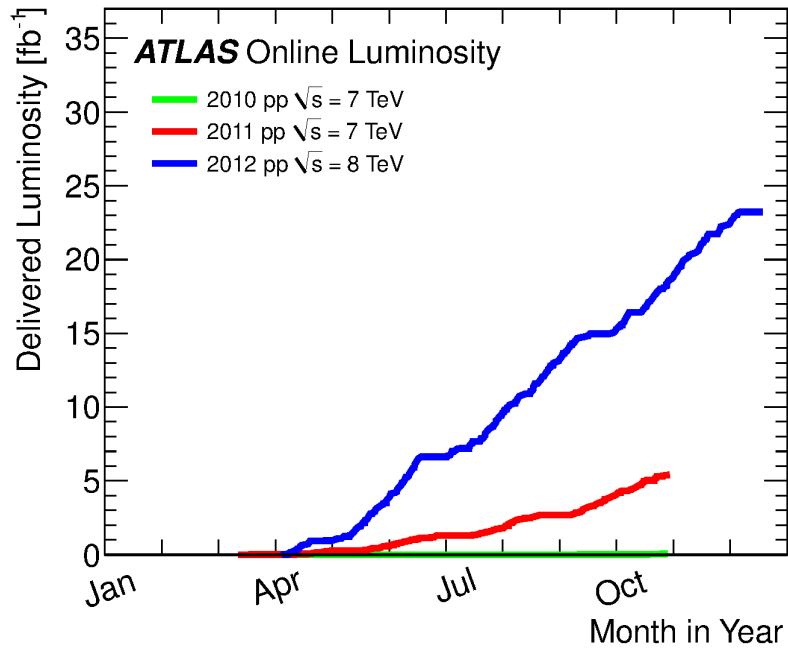
# Accumulation des données



# Accumulation des données

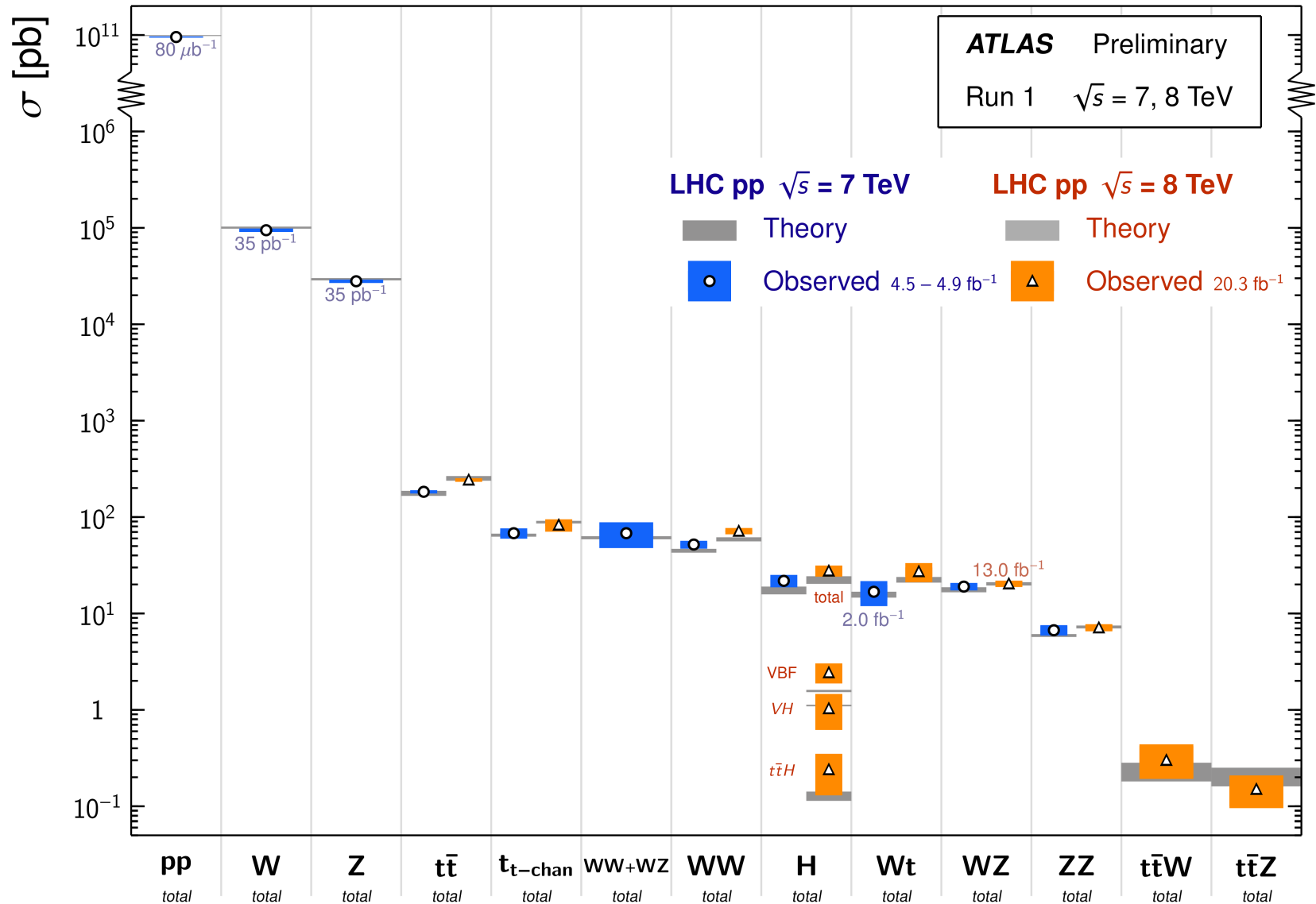


# Accumulation des données



# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements Status: March 2015



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !





# Supersymétrie : état des lieux

ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: July 2015

ATLAS Preliminary

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

Model	$e, \mu, \tau, \gamma$	Jets	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	Reference	
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0-3 $e, \mu$ /1-2 $\tau$	2-10 jets/3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.8 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g})$	1507.05525
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	850 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	100-440 GeV	$m(\tilde{q})-m(\tilde{\chi}_1^0)<10 \text{ GeV}$	1507.05525
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\ell(\ell/\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (off-Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	780 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1503.03290
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.33 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1405.7875
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	2-6 jets	Yes	20	$\tilde{g}$	1.26 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=300 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}^{\pm})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$	1507.05525
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\ell(\ell/\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0-3 jets	-	20	$\tilde{g}$	1.32 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1501.03555
	GMSB ( $\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.6 TeV	$\tan\beta > 20$	1407.0603
	GGM (bino NLSP)	2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.29 TeV	$c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}$	1507.05493
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 900 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu < 0$	1507.05493
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 850 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu > 0$	1507.05493
	GGM (higgsino NLSP)	2 $e, \mu$ (Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	850 GeV	$m(\text{NLSP}) > 430 \text{ GeV}$	1503.03290
Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$F^{1/2}$ scale	865 GeV	$m(\tilde{G}) > 1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5 \text{ TeV}$	1502.01518	
$3^{\text{rd}}$ gen. $\tilde{g}$ med.	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	0	7-10 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.1 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 350 \text{ GeV}$	1308.1841
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.34 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$	1407.0600
$3^{\text{rd}}$ gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $b$	Yes	20.1	$\tilde{b}_1$	100-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 90 \text{ GeV}$	1308.2631
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{b}_1$	275-440 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=2 m(\tilde{t}_1)$	1404.2500
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	1-2 $e, \mu$	1-2 $b$	Yes	4.7/20.3	$\tilde{t}_1$	110-167 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 2m(\tilde{t}_1), m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$	1209.2102, 1407.0583
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $t\tilde{\chi}_1^0$	0-2 $e, \mu$	0-2 jets/1-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	90-191 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1506.08616
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet/ $c$ -tag	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	90-240 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0) < 85 \text{ GeV}$	1407.0608
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	150-580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 150 \text{ GeV}$	1403.5222
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_2$	290-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$	1403.5222
EW direct	$\tilde{\ell}_{1,R}\tilde{\ell}_{1,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\ell}$	90-325 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \ell\nu(\ell\bar{\nu})$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	140-465 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm})+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \tilde{\tau}\nu(\tilde{\tau}\bar{\nu})$	2 $\tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	100-350 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm})+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1407.0350
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \tilde{\ell}_1\nu\tilde{\ell}_1(\ell\bar{\nu}), (\tilde{\nu}\tilde{\ell}_1\ell(\bar{\nu}\nu))$	3 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm})+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 $e, \mu$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^0$	420 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1403.5294, 1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\bar{b}/W\tilde{\chi}_1^0/\tau\tau/\gamma\gamma$	$e, \mu, \gamma$	0-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^0$	250 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1501.07110
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_R\ell$	4 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0$	620 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1405.5086
	GGM (wino NLSP) weak prod.	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{W}$	124-361 GeV	$c\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^{\pm})-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^{\pm})=0.2 \text{ ns}$	1310.3675
	Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	dE/dx trk	-	Yes	18.4	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	482 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^{\pm})-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^{\pm}) < 15 \text{ ns}$	1506.05332
	Stable, stopped $\tilde{g}$ R-hadron	0	1-5 jets	Yes	27.9	$\tilde{g}$	832 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$	1310.6584
	Stable $\tilde{g}$ R-hadron	trk	-	-	19.1	$\tilde{g}$	1.27 TeV	-	1411.6795
	GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{e}, \tilde{\mu}) + \tau(e, \mu)$	1-2 $\mu$	-	-	19.1	$\tilde{\chi}_1^0$	537 GeV	$10 < \tan\beta < 50$	1411.6795
	GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$ , long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	435 GeV	$2 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}, \text{SPS8 model}$	1409.5542
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\nu/\mu\nu/\mu\nu$	displ. $ee/\mu\mu/\mu\nu$	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$7 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 740 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.3 \text{ TeV}$	1504.05162
GGM $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}$	displ. vtx + jets	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$6 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 480 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.1 \text{ TeV}$	1504.05162	
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/\tau\mu$	$e\mu, \tau\mu$	-	-	20.3	$\tilde{\nu}_\tau$	1.7 TeV	$\lambda_{311}^{\nu} = 0.11, \lambda_{132}/\lambda_{133}/\lambda_{233} = 0.07$	1503.04430
	Bilinear RPV CMSSM	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.35 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{\text{LSP}} < 1 \text{ mm}$	1404.2500
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\nu, \mu\tilde{\nu}_\tau$	4 $e, \mu$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	750 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), \lambda_{121} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\tau\tilde{\nu}_\tau, e\tau\tilde{\nu}_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	450 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), \lambda_{133} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq\tilde{q}$	0	6-7 jets	-	20.3	$\tilde{g}$	917 GeV	$\text{BR}(\tilde{g}) = \text{BR}(h) = \text{BR}(c) = 0\%$	1502.05686
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\tilde{q}$	0	6-7 jets	-	20.3	$\tilde{g}$	870 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=600 \text{ GeV}$	1502.05686
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	850 GeV	-	1404.250
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	0	2 jets + 2 $b$	-	20.3	$\tilde{t}_1$	100-308 GeV	-	ATLAS-CONF-2015-026
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\ell$	2 $e, \mu$	2 $b$	-	20.3	$\tilde{t}_1$	0.4-1.0 TeV	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow b\ell/\mu) > 20\%$	ATLAS-CONF-2015-015	
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $c$	Yes	20.3	$\tilde{c}$	490 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$	1501.01325

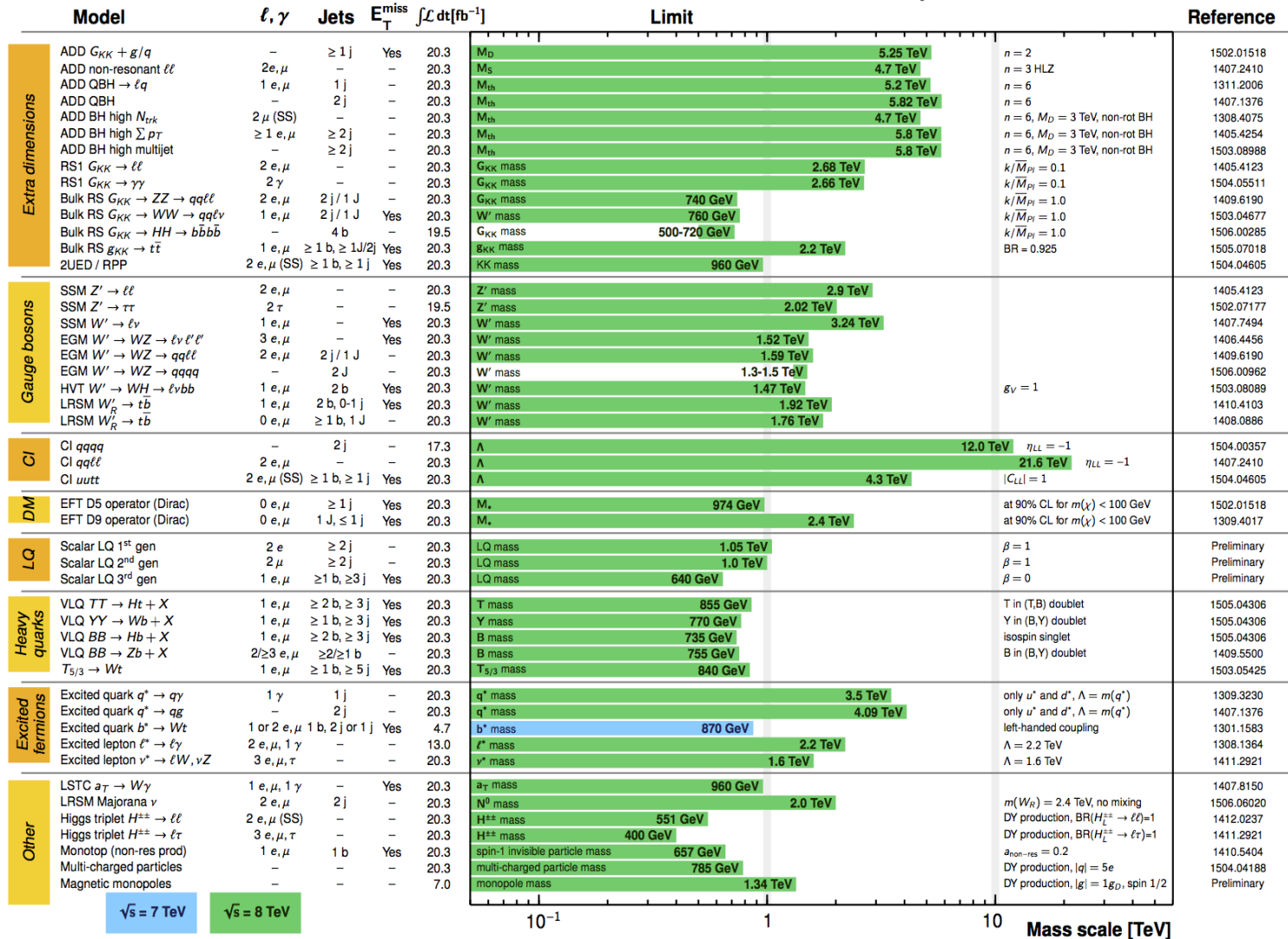
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus  $1\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

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

# Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Exclusion  
 Status: July 2015

ATLAS Preliminary  
 $\int \mathcal{L} dt = (4.7 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$   $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



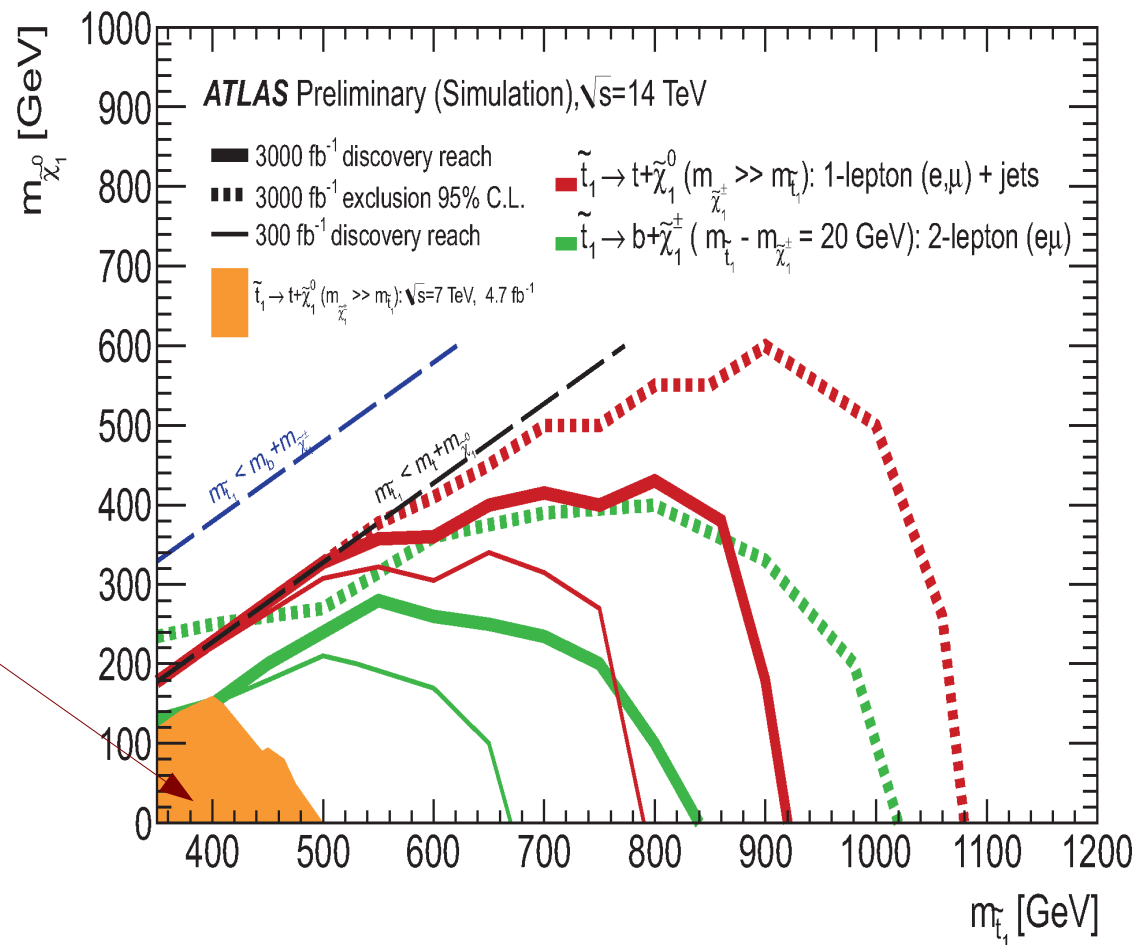
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

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

# SUSY et exotiques : le futur

- Pour l'instant, 25 fb<sup>-1</sup> collectés jusqu'en 2012 (7-8 TeV), 3,2 fb<sup>-1</sup> depuis juin 2015
- On envisage 300 fb<sup>-1</sup> d'ici 2021-2022
- puis 3000 fb<sup>-1</sup> 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](http://www.cppm.in2p3.fr/Masterclasses)

[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)

**Twitter :**

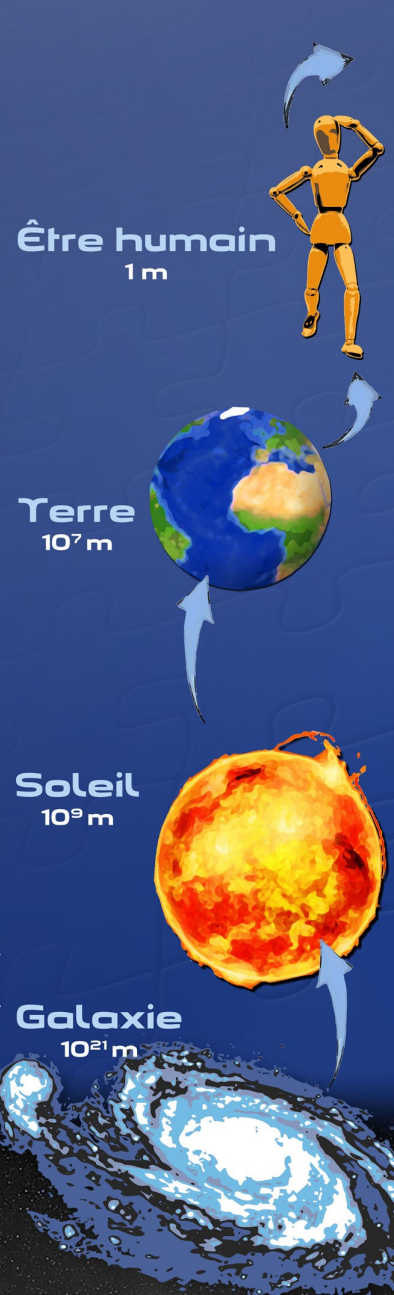
**#LHCIMC16**

**@physicsIMC**



<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>	<p><math>t = 1,6 \cdot 10^{-12}</math> s <math>Q = 0</math> <math>m = 125</math> GeV/c<sup>2</sup></p> <p>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.</p>
<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

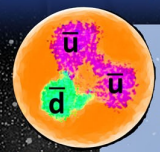
Portée	Interaction
$10^{-17}$ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
$10^{-15}$ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
Photon $\gamma$	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/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>