

# Le détecteur ATLAS et la découverte du boson de Higgs

Yann Coadou



Origines, Constituants et Evolution de l'Univers

Summer Camp

8 juin 2018

Centre de physique des particules de Marseille

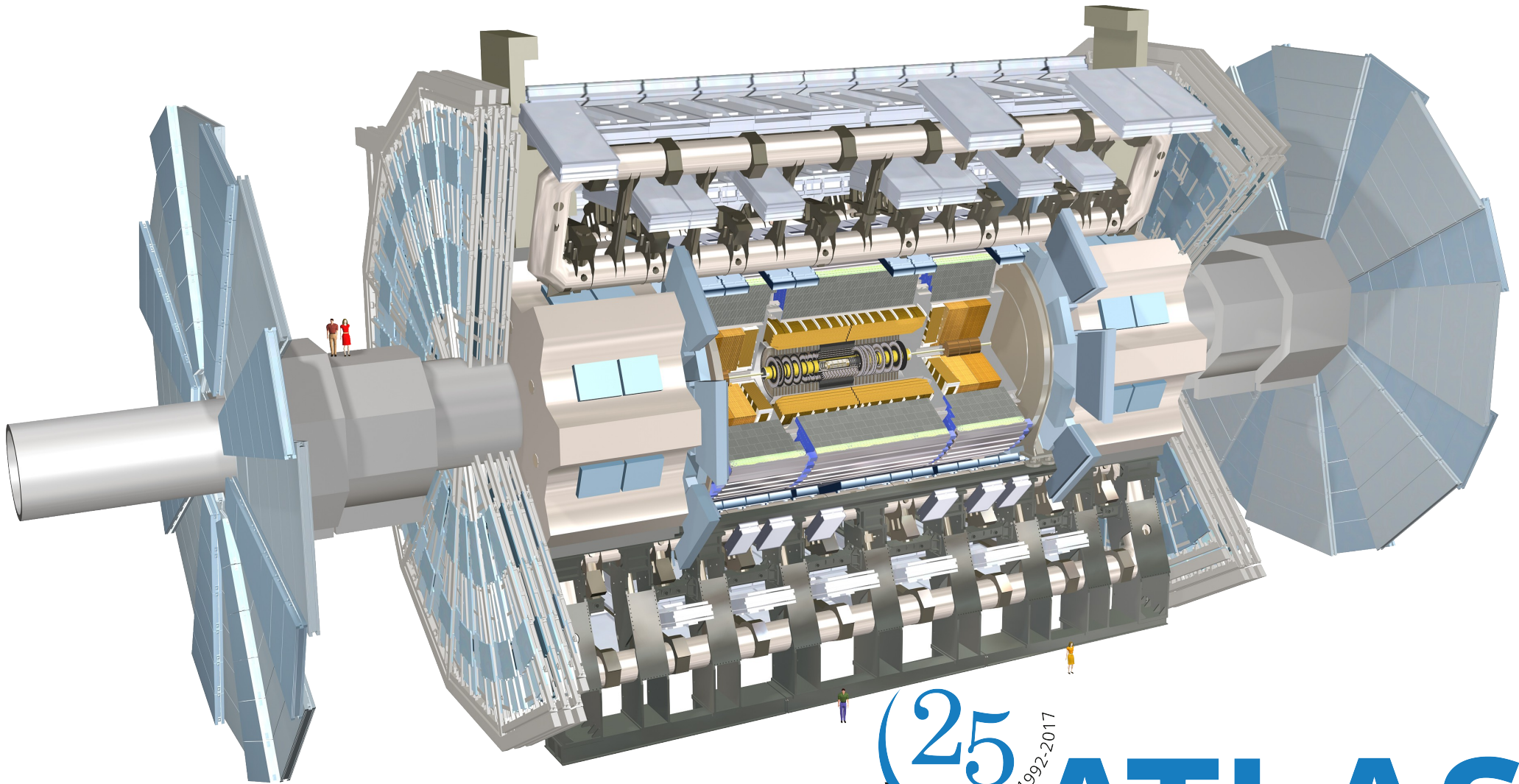


IN2P3  
Les deux infinis

Aix\*Marseille  
université  
Initiative d'excellence



# Le détecteur ATLAS



**ATLAS**  
EXPERIMENT

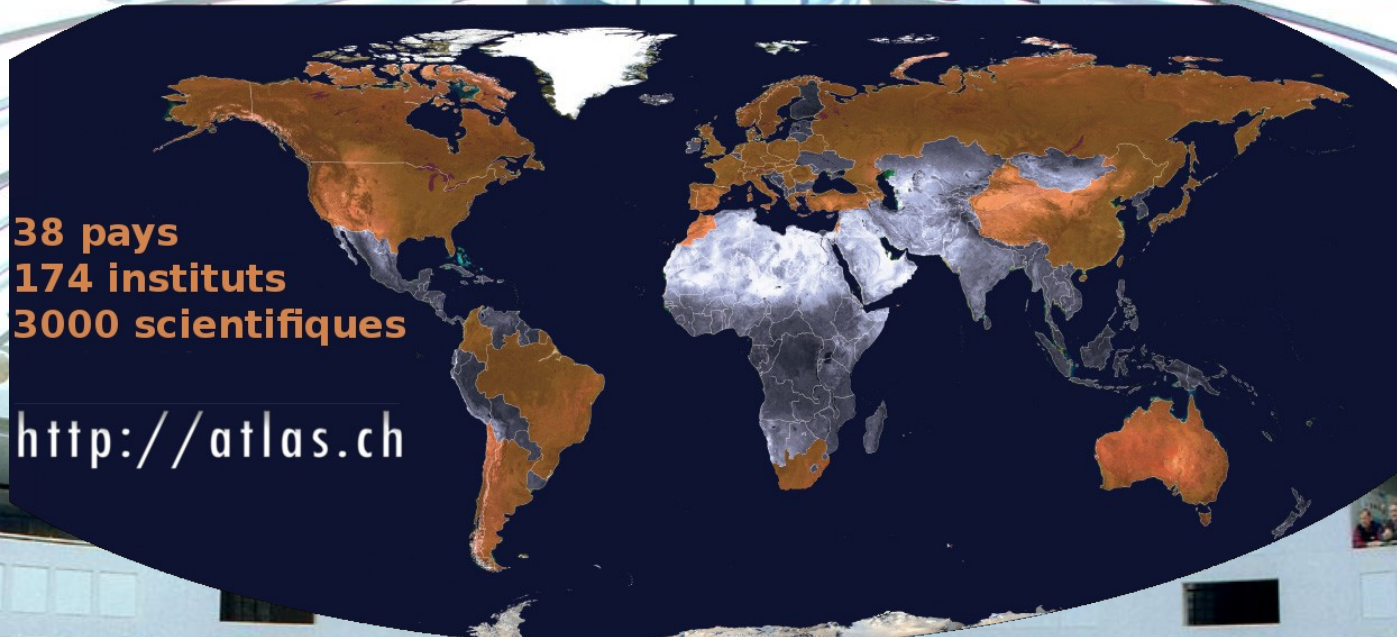
# La collaboration ATLAS



# La collaboration ATLAS

38 pays  
174 instituts  
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

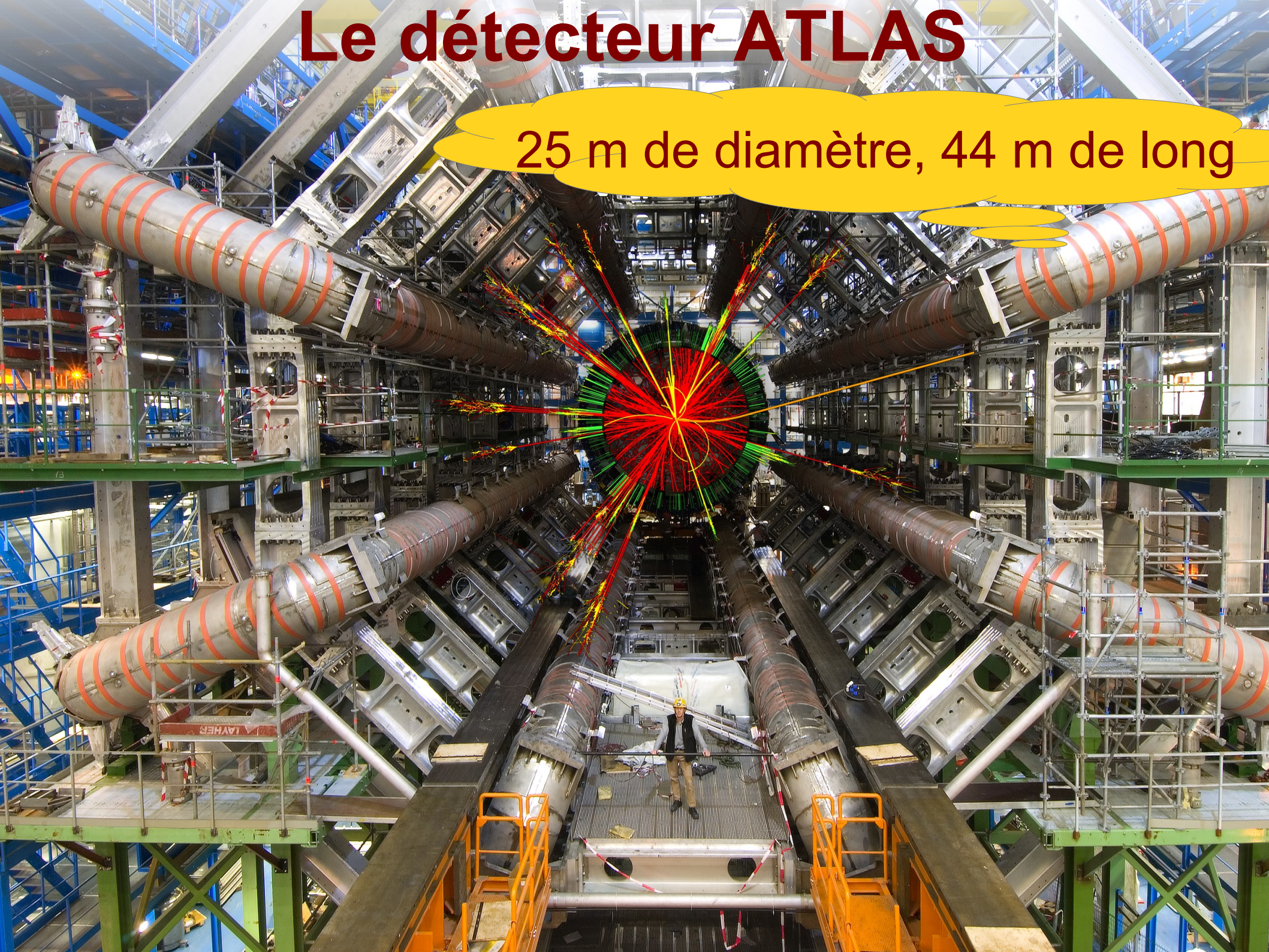


# Le détecteur ATLAS



# Le détecteur ATLAS

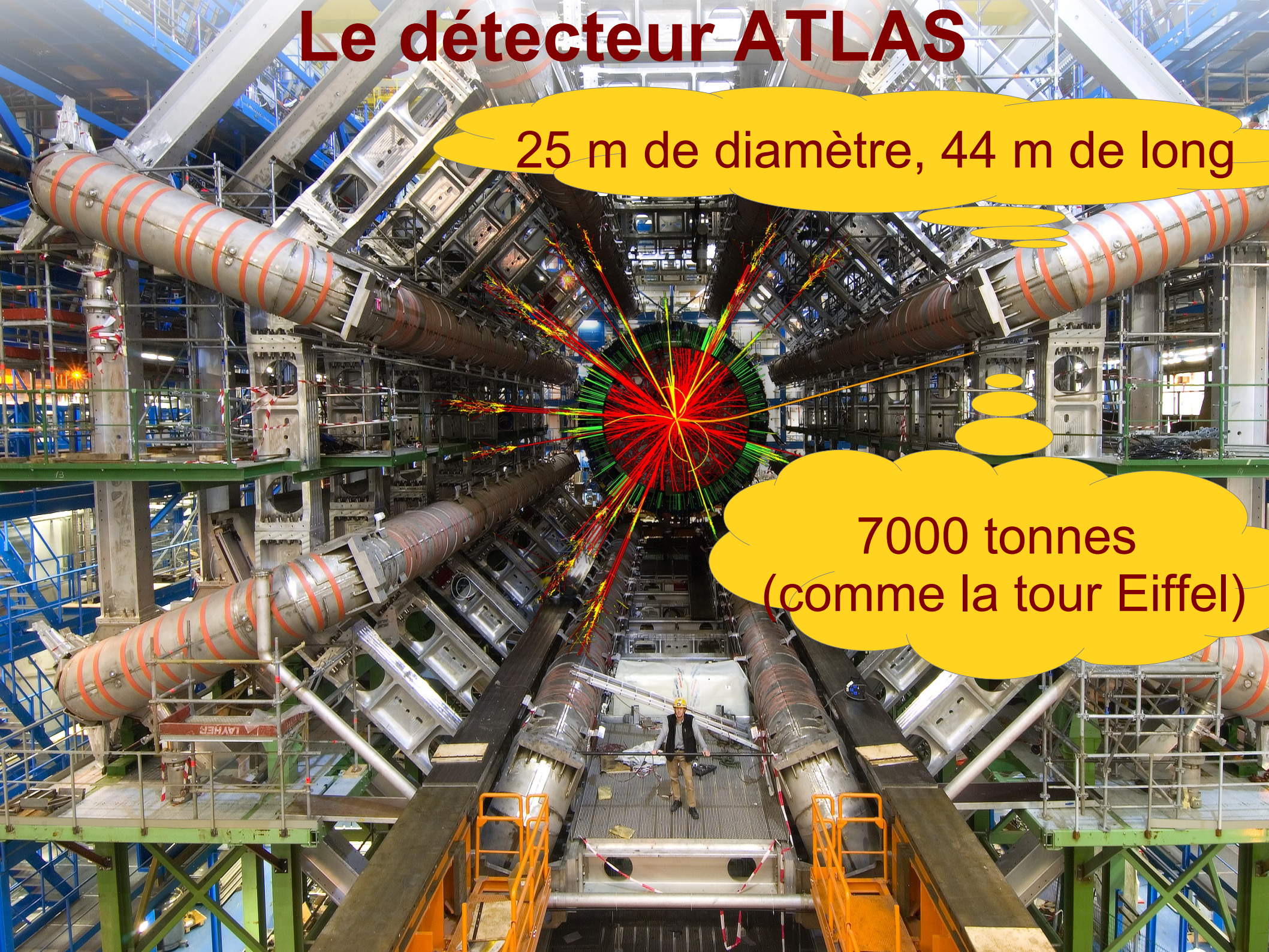
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

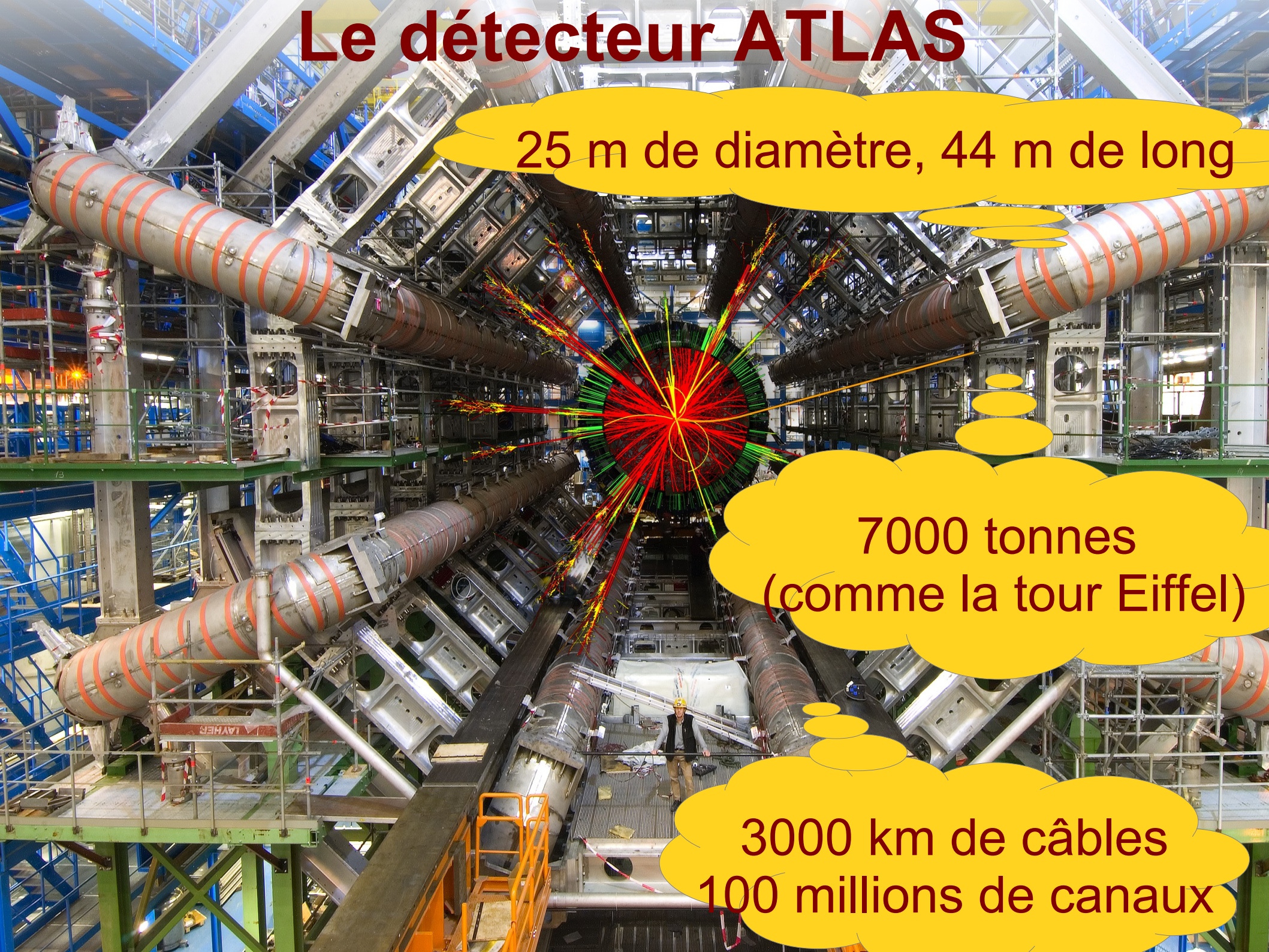


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux





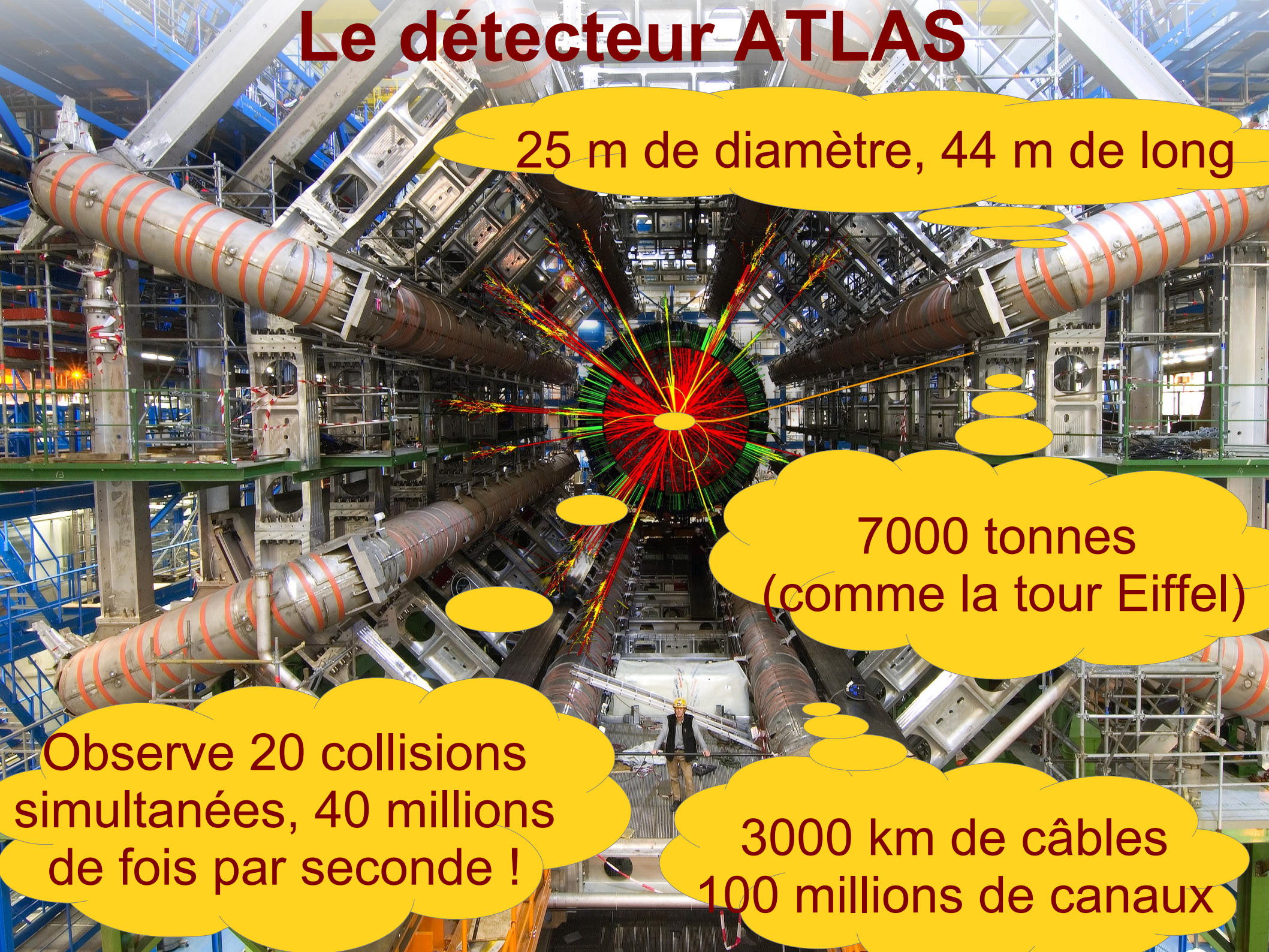
# Le détecteur ATLAS

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 background image shows the interior of the ATLAS detector tunnel. It is a long, narrow structure with a complex network of pipes, cables, and structural supports. In the center, a large, circular calorimeter is visible, surrounded by a dense array of colorful cables (red, green, yellow, blue) that fan out from a central point. A worker wearing a yellow hard hat and safety vest is standing on a metal platform in the lower center of the frame, providing a sense of scale to the massive structure. The lighting is bright, highlighting the metallic surfaces and the intricate details of the detector's construction.

25 m de diamètre, 44 m de long

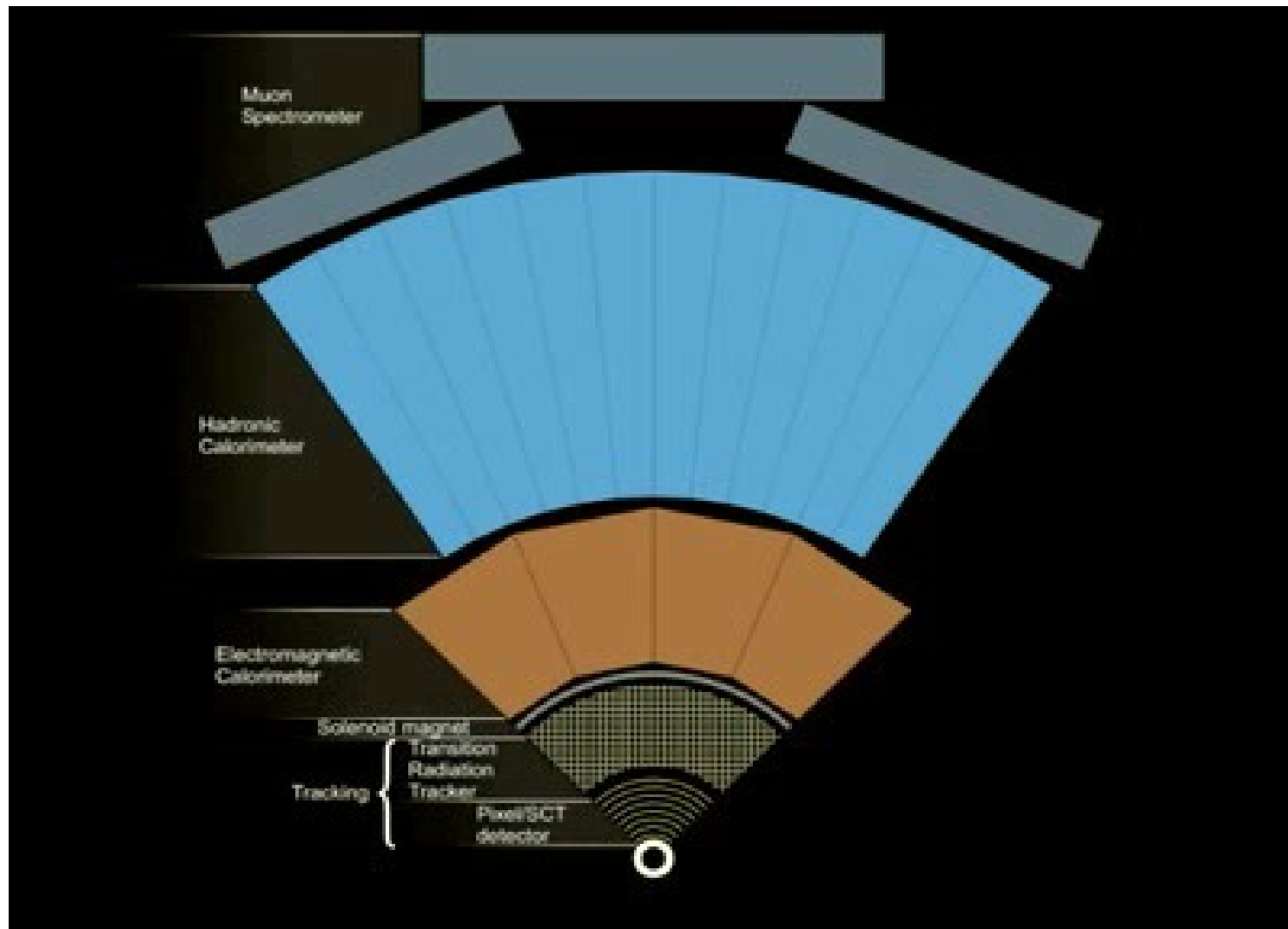
En France :  
6 laboratoires CNRS,  
1 CEA, 400 personnes  
(physiciens, ingénieurs,  
étudiants)

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

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

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

# Interaction des particules avec le détecteur

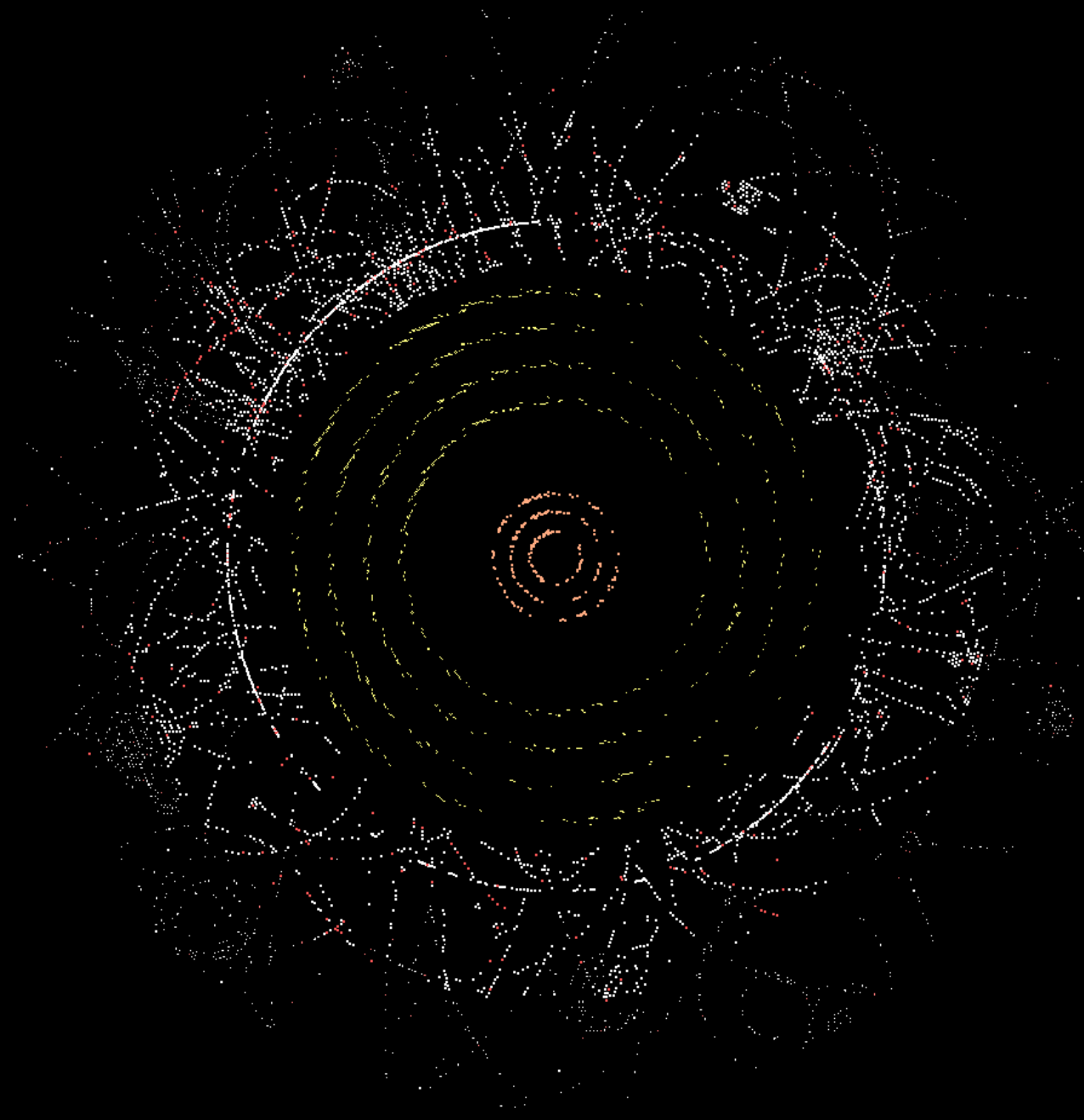


# Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



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

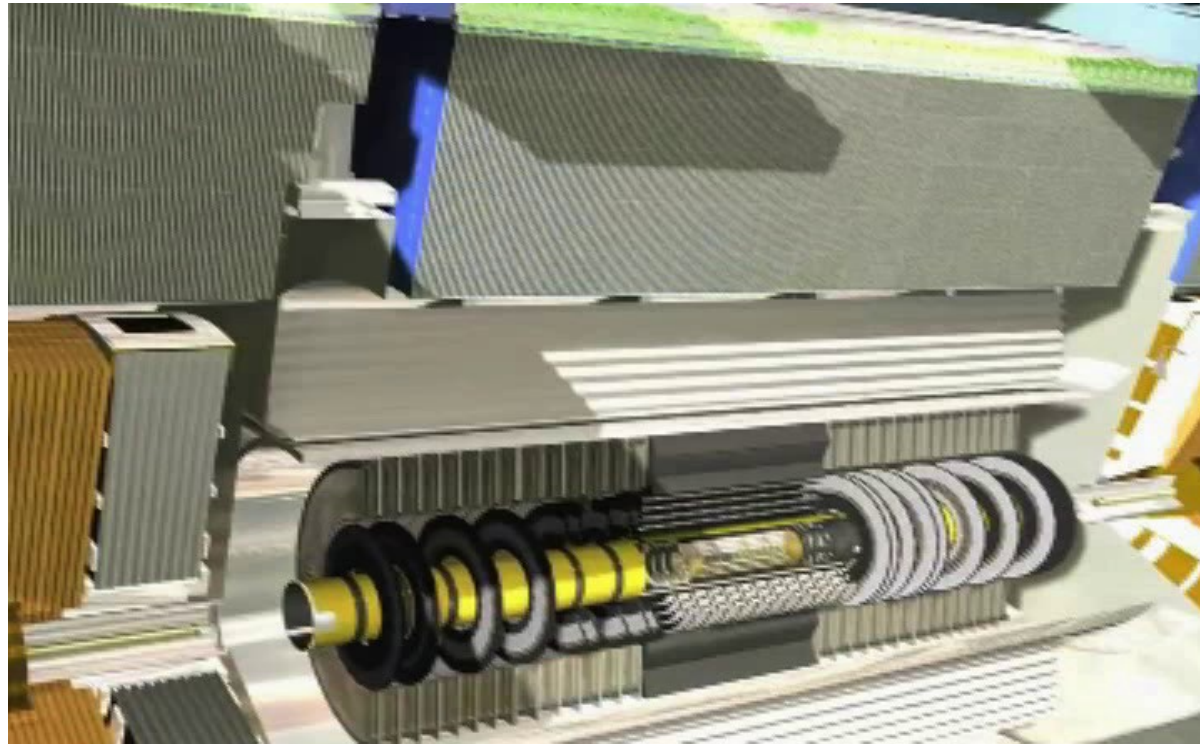
# Passage des particules



# Reconstruction des trajectoires



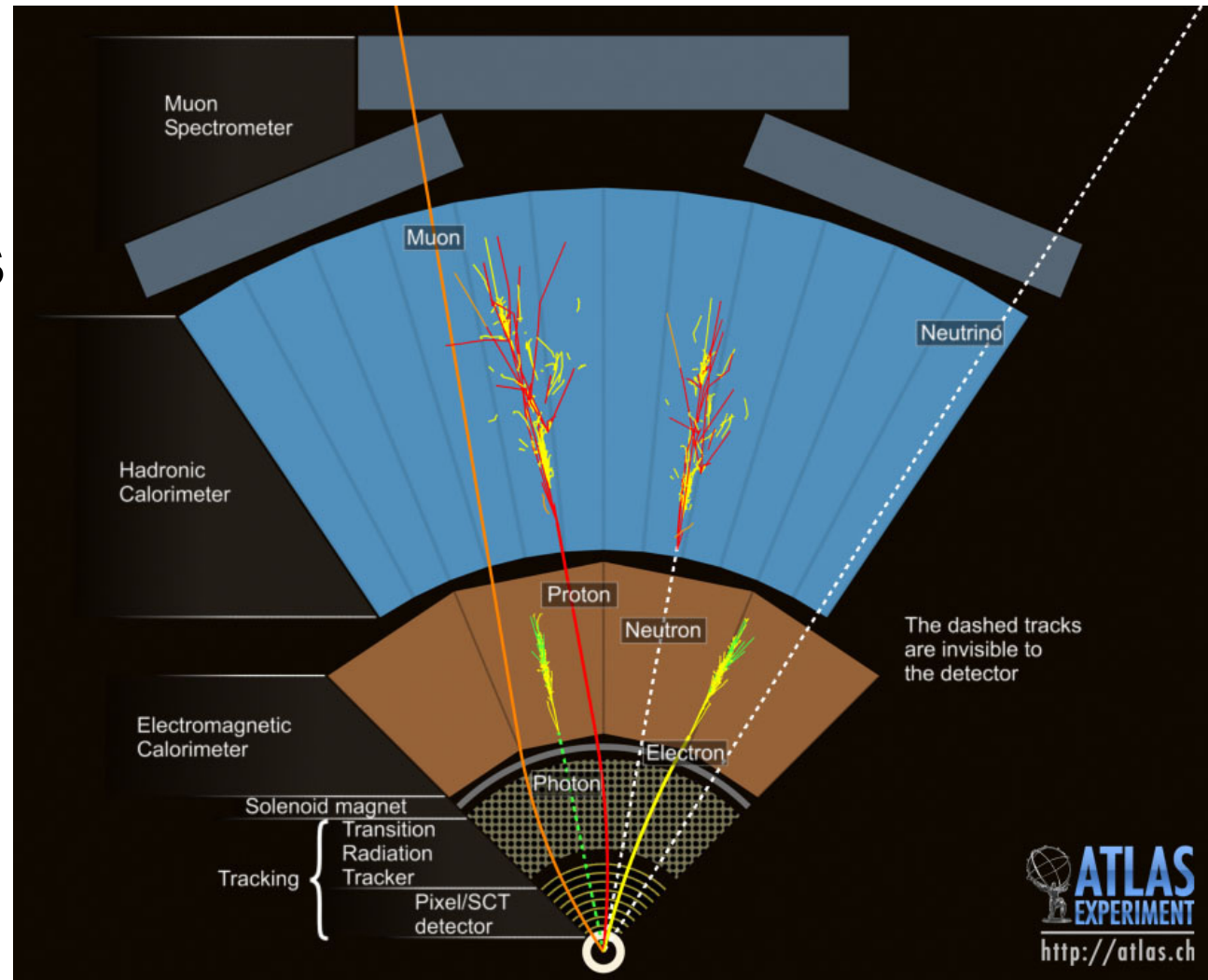
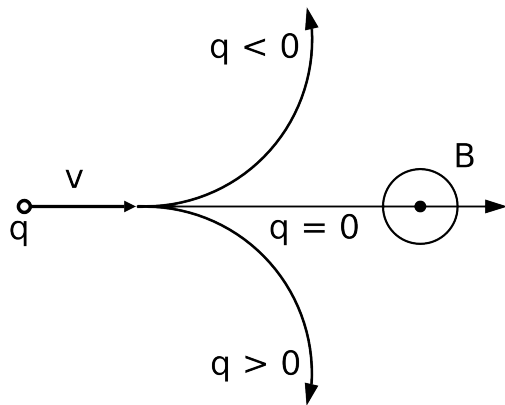
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



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

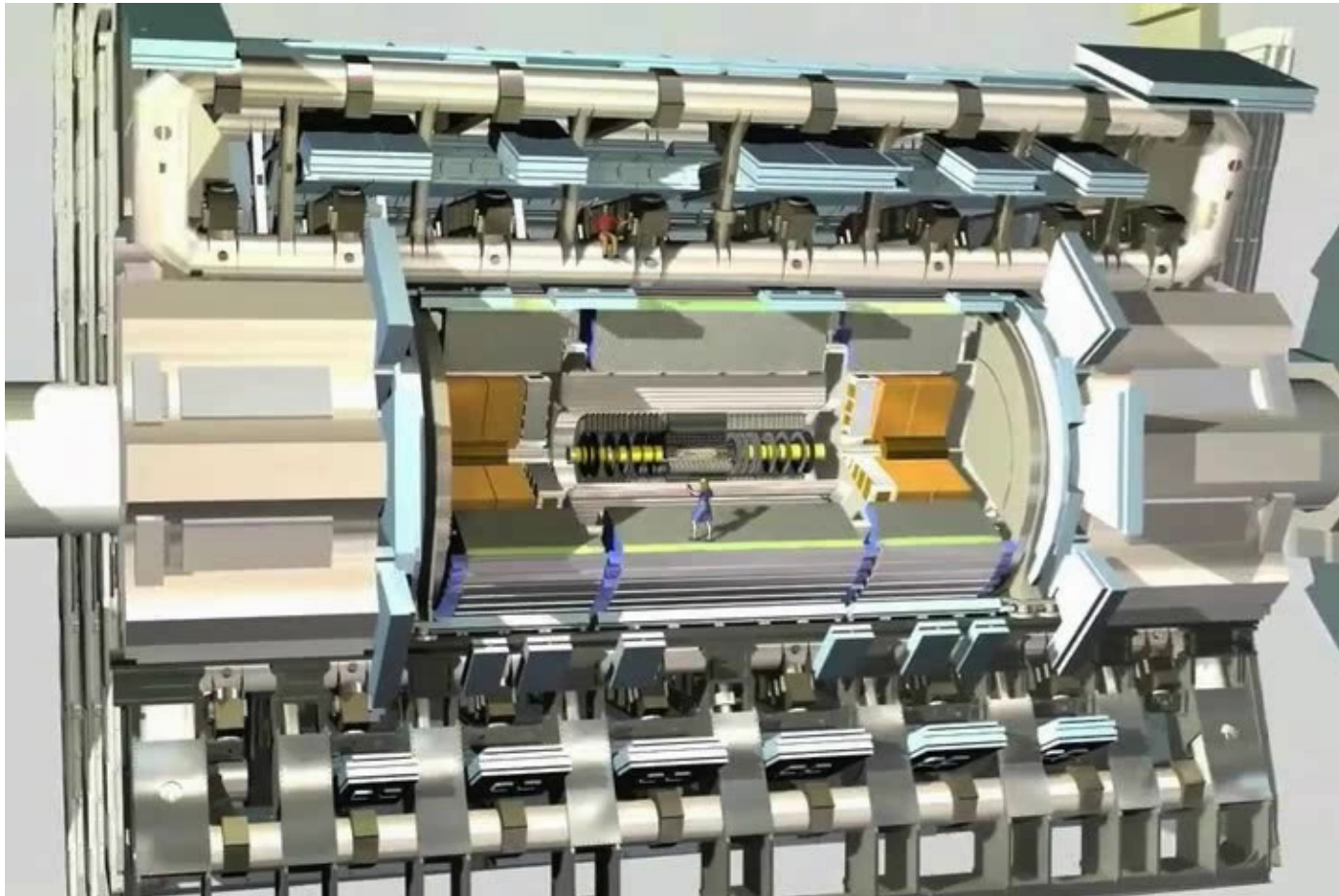
# Identifier les électrons/positrons et photons

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





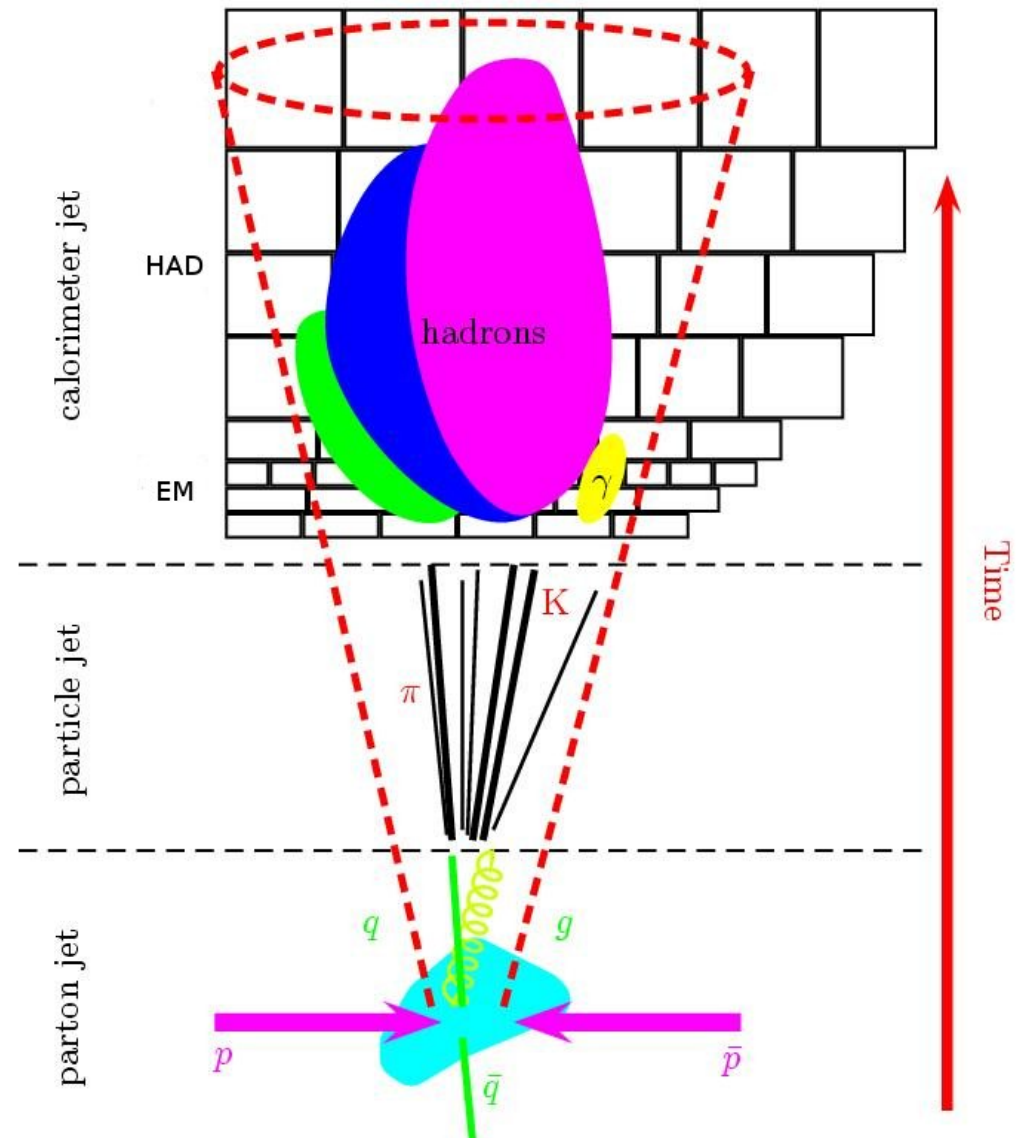
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



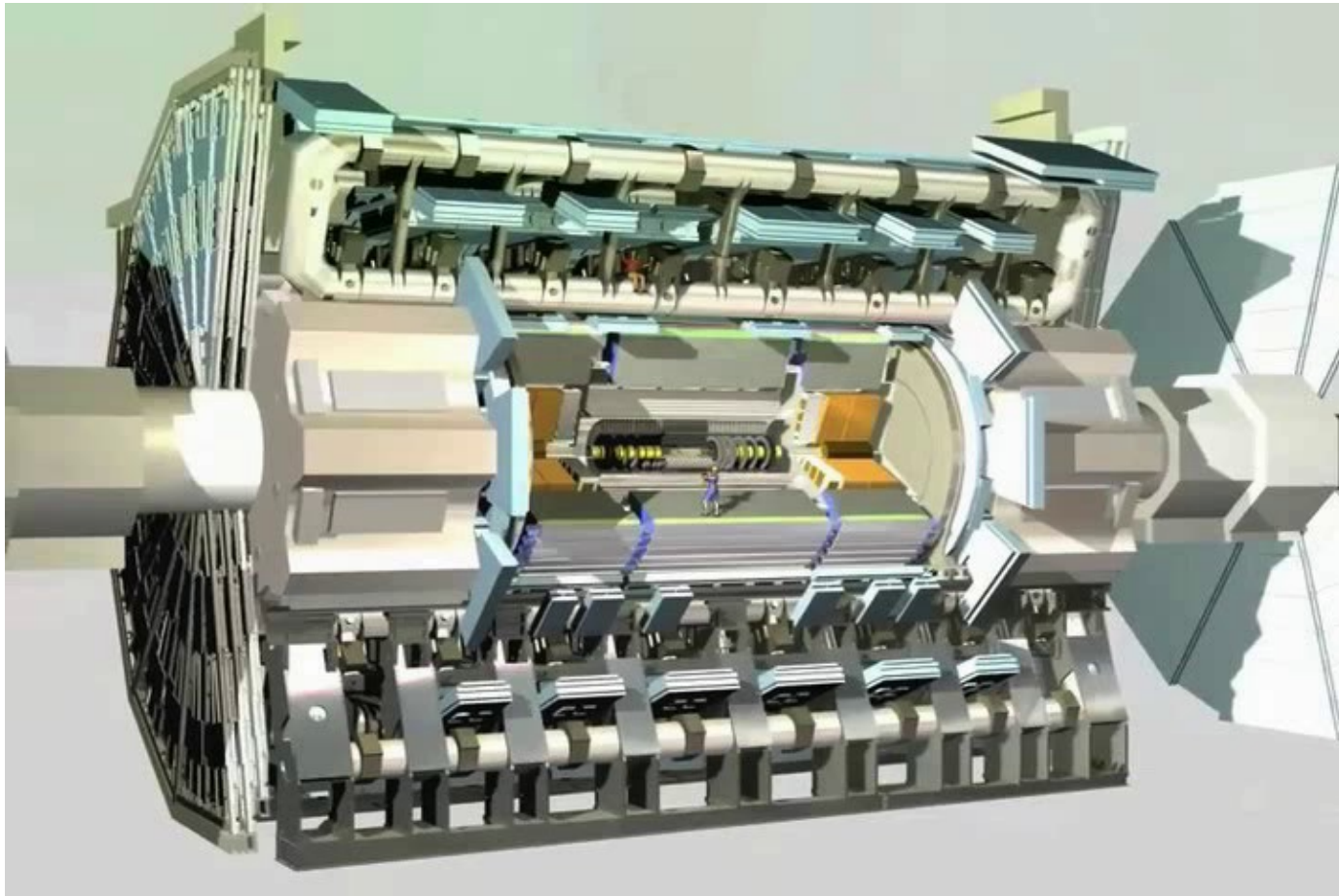
- 500 000 tuiles de plastique scintillant

# 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



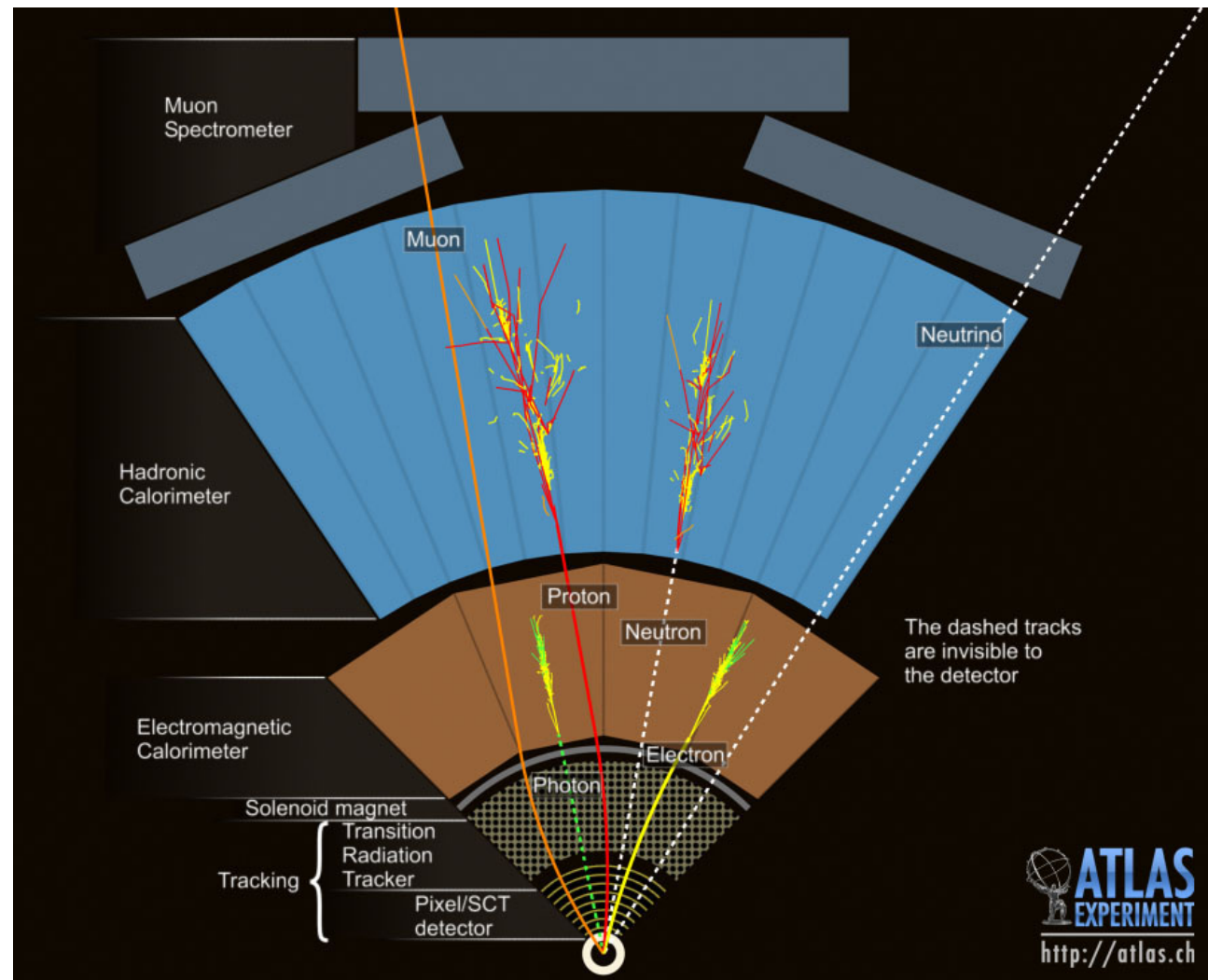
# Mesurer le passage des particules dans le système à muons



- 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

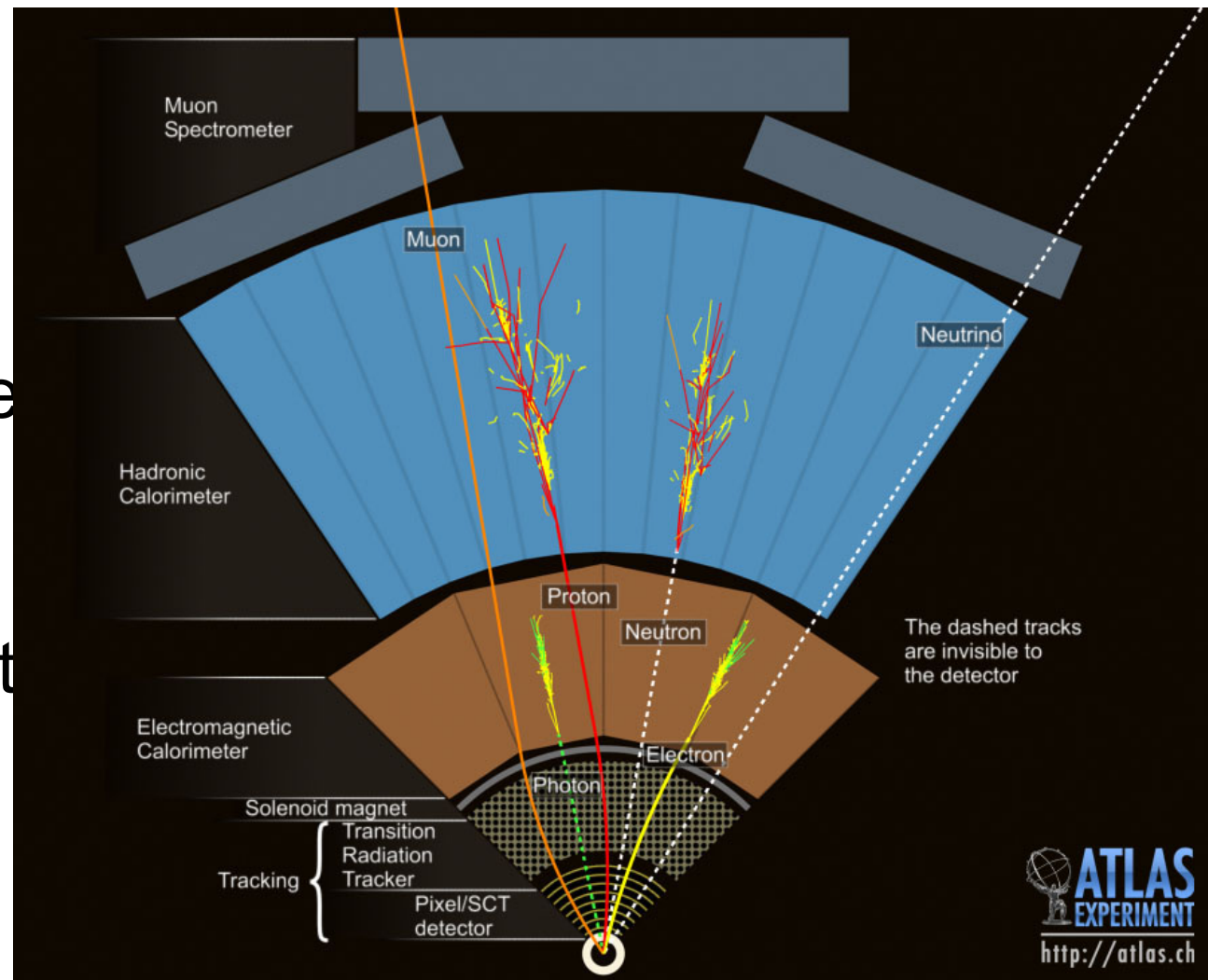
# Identifier les muons et antimuons

- 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



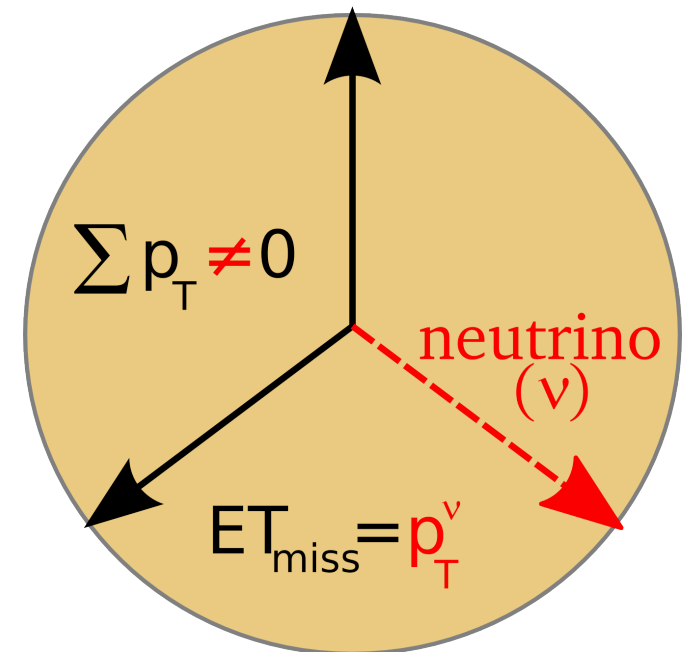
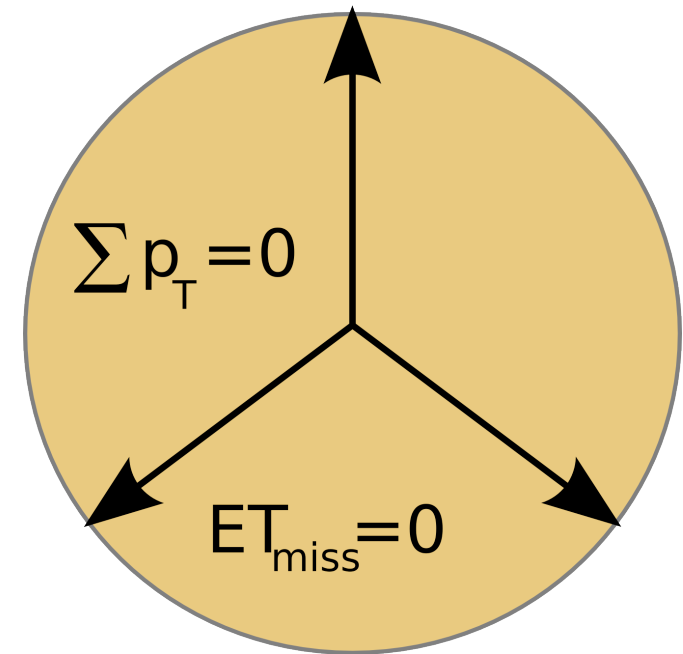
# Identifier les neutrinos

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



# Energie transverse manquante

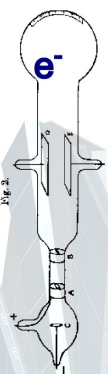
- Sans neutrino
  - ▶ 3 particules reconstruites
  - ▶ Somme des impulsions dans le plan transverse : 0
  - ▶ Donc  $E_T^{\text{miss}} = 0$
- Avec un neutrino
  - ▶ On « voit » seulement une partie de l'événement
  - ▶ La somme des impulsions n'est pas nulle
  - ▶ La différence est  $E_T^{\text{miss}}$ , associée au neutrino



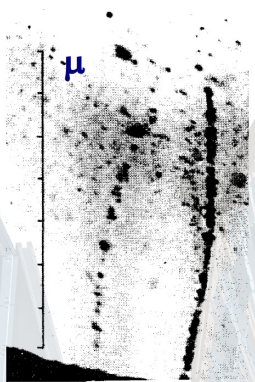
# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

Découverte historique



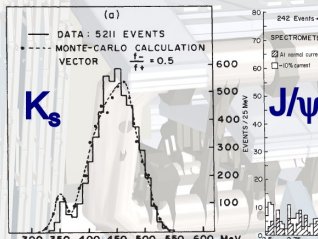
1897



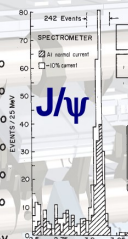
1937



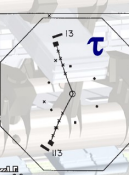
1947



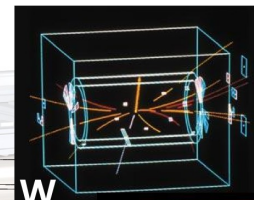
1964



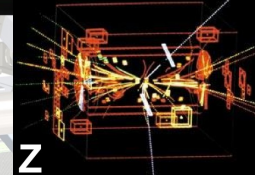
1974



1976

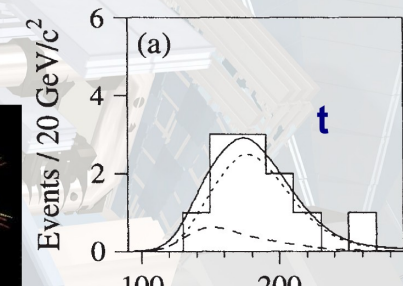


W



Z

1983

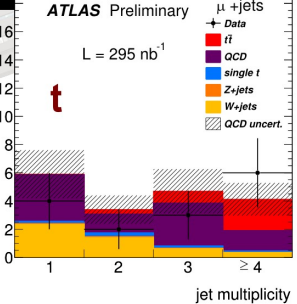
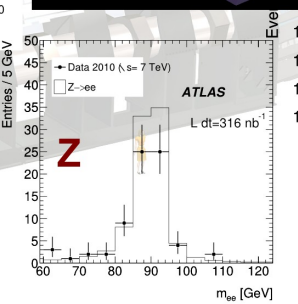
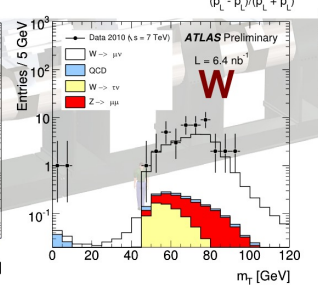
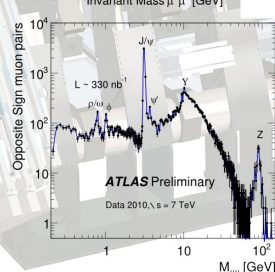
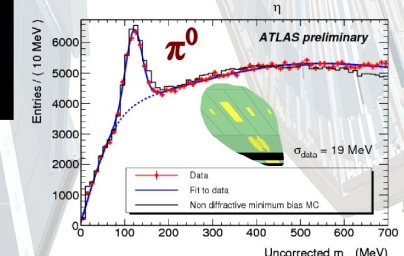
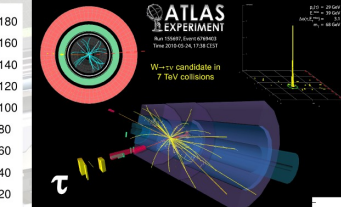
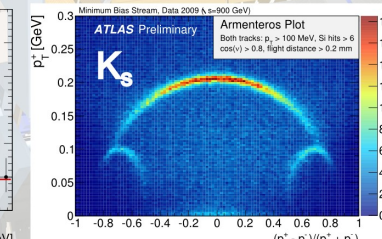
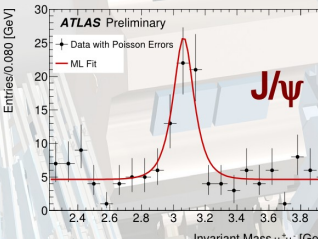
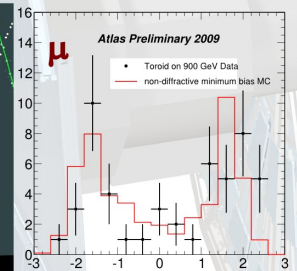


1995

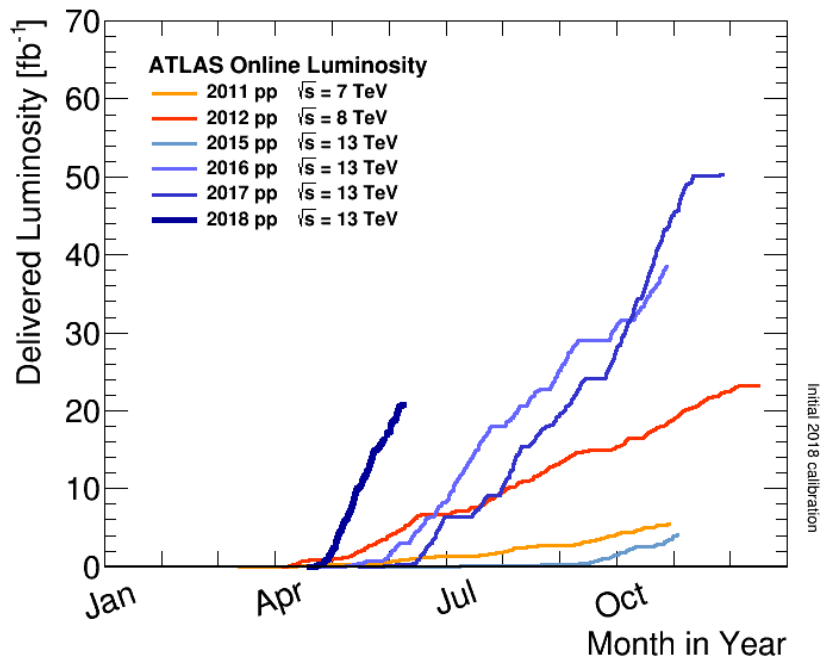
déc 2009

août 2010

Redécouverte par ATLAS

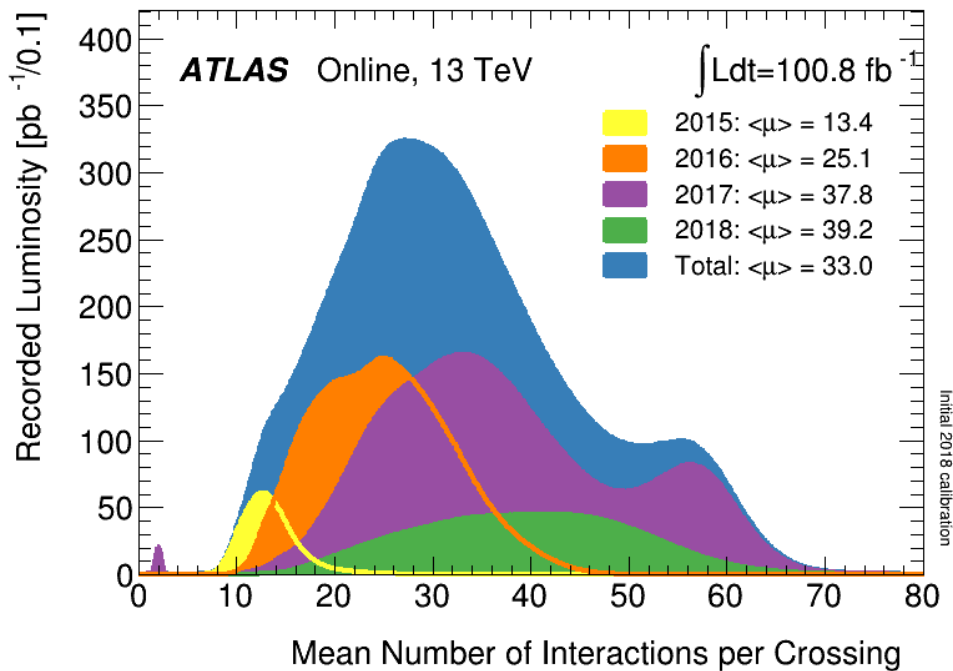
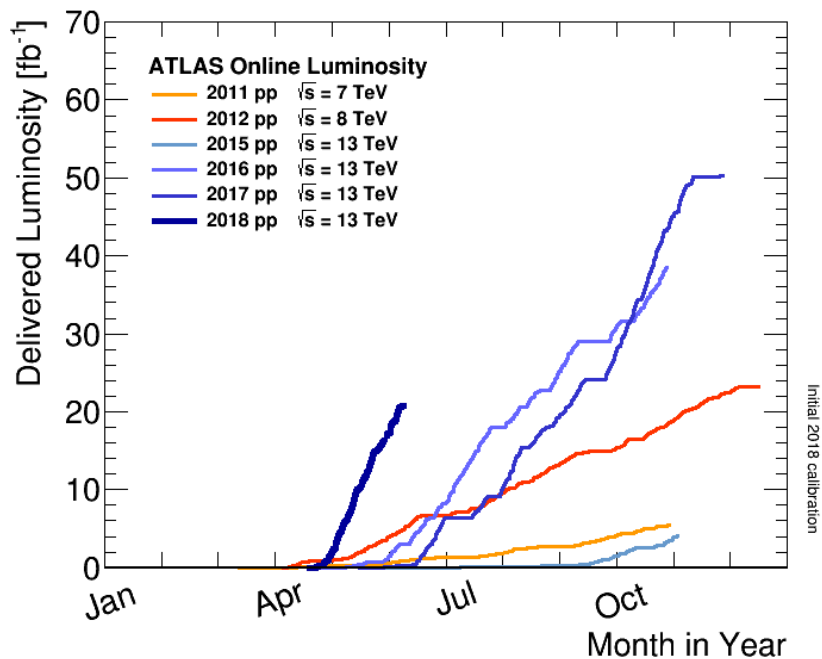


# Accumulation des données

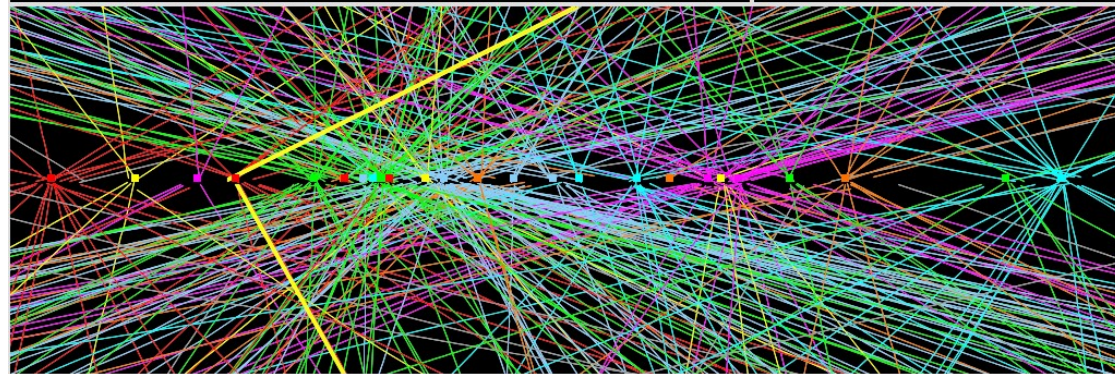
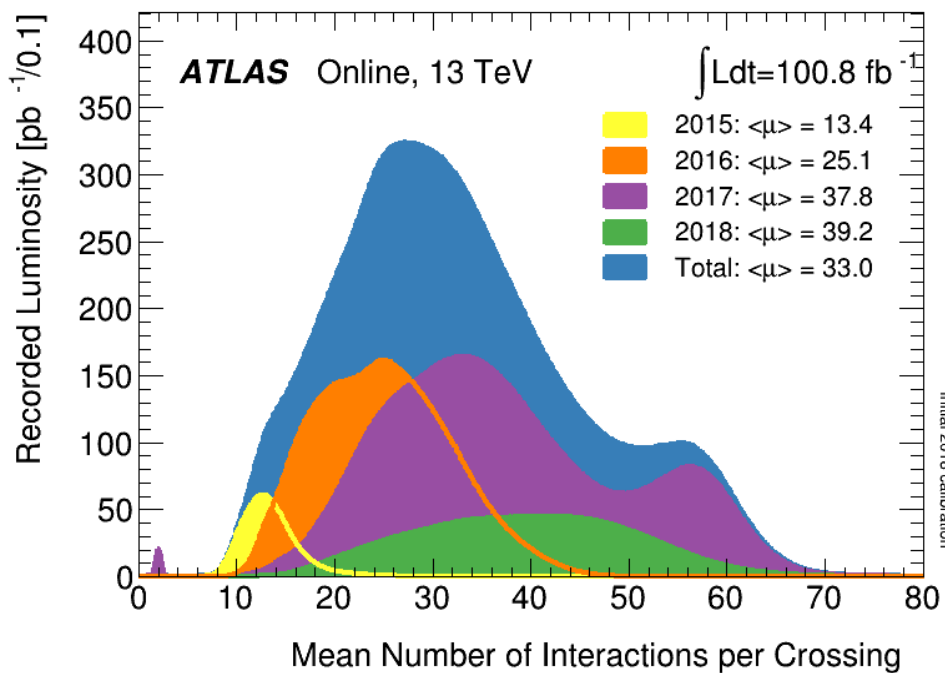
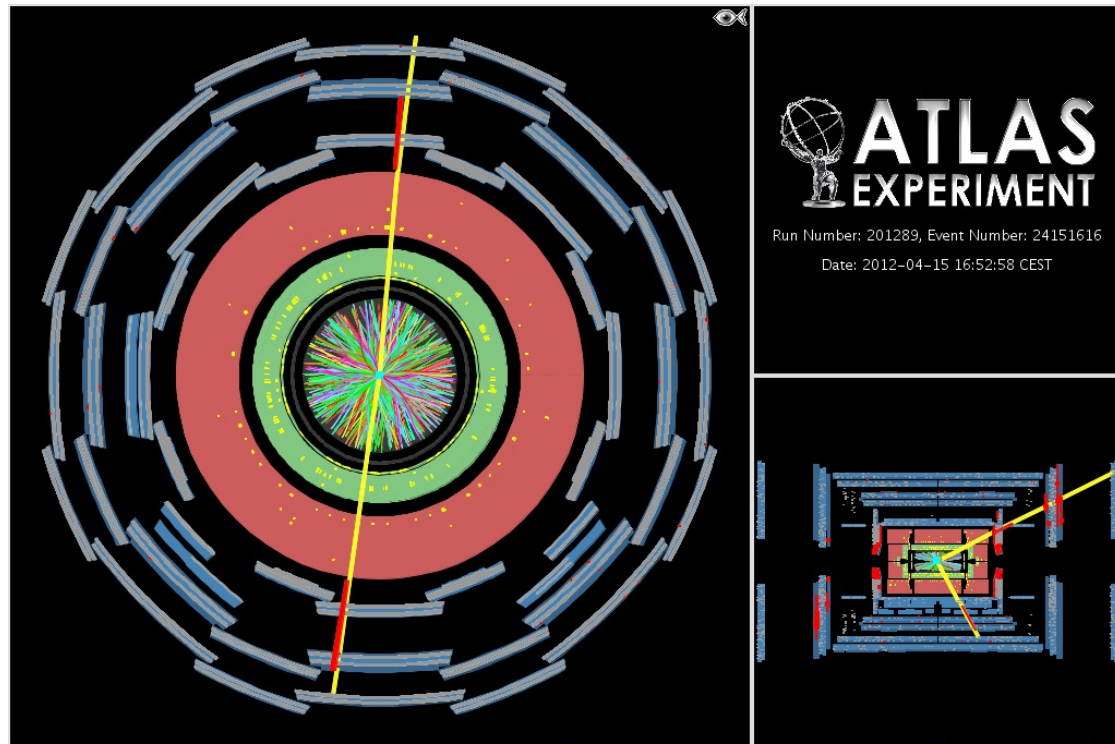
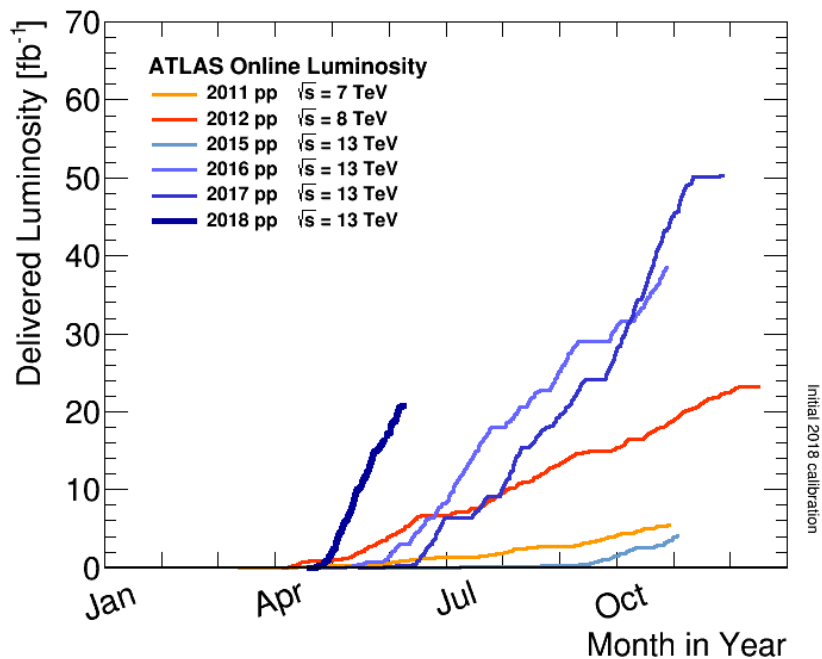




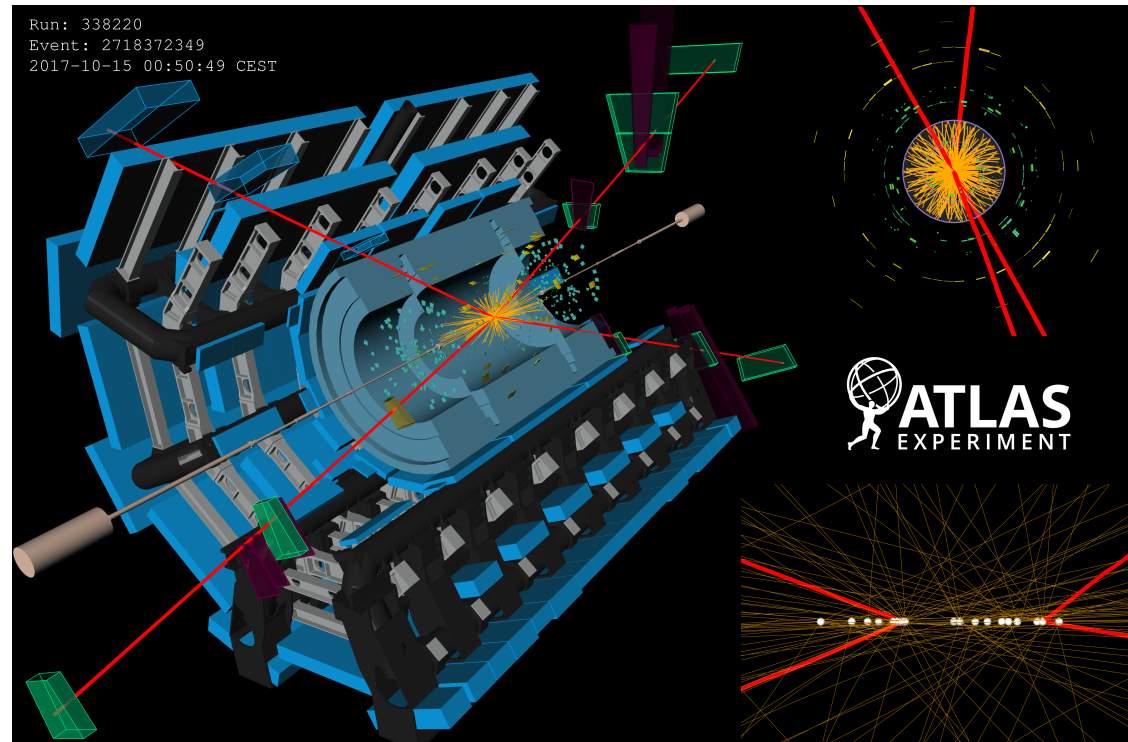
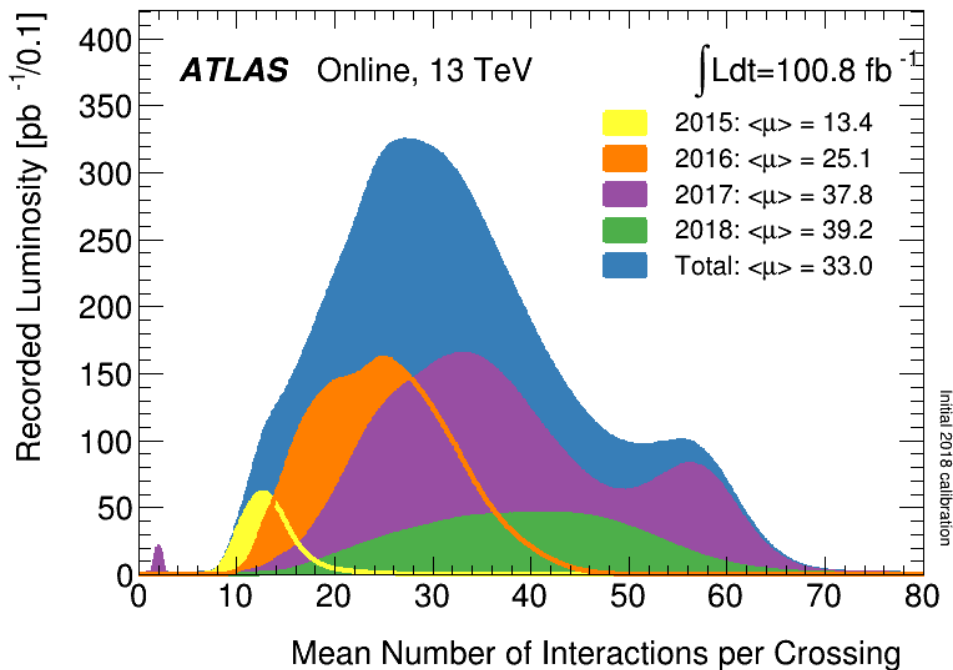
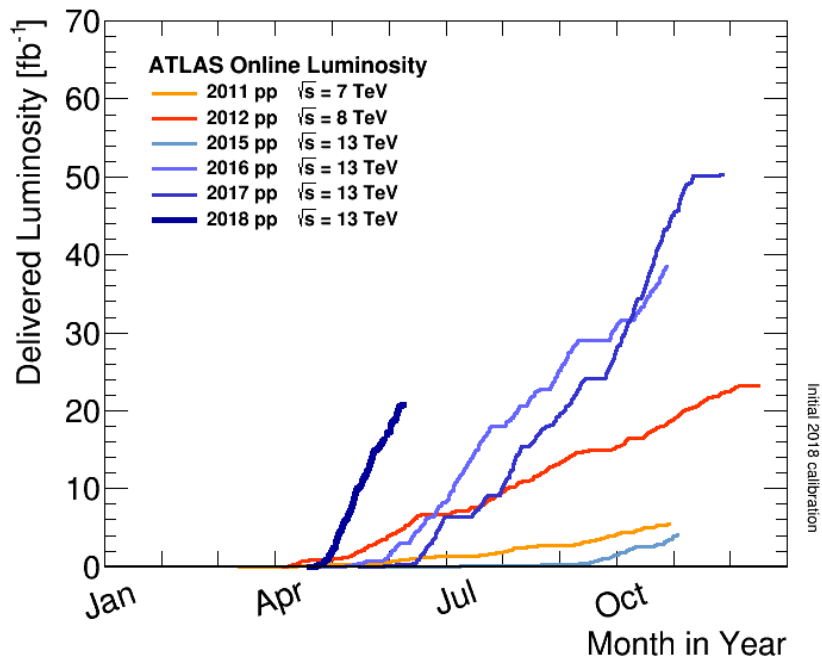
# Accumulation des données



# Accumulation des données

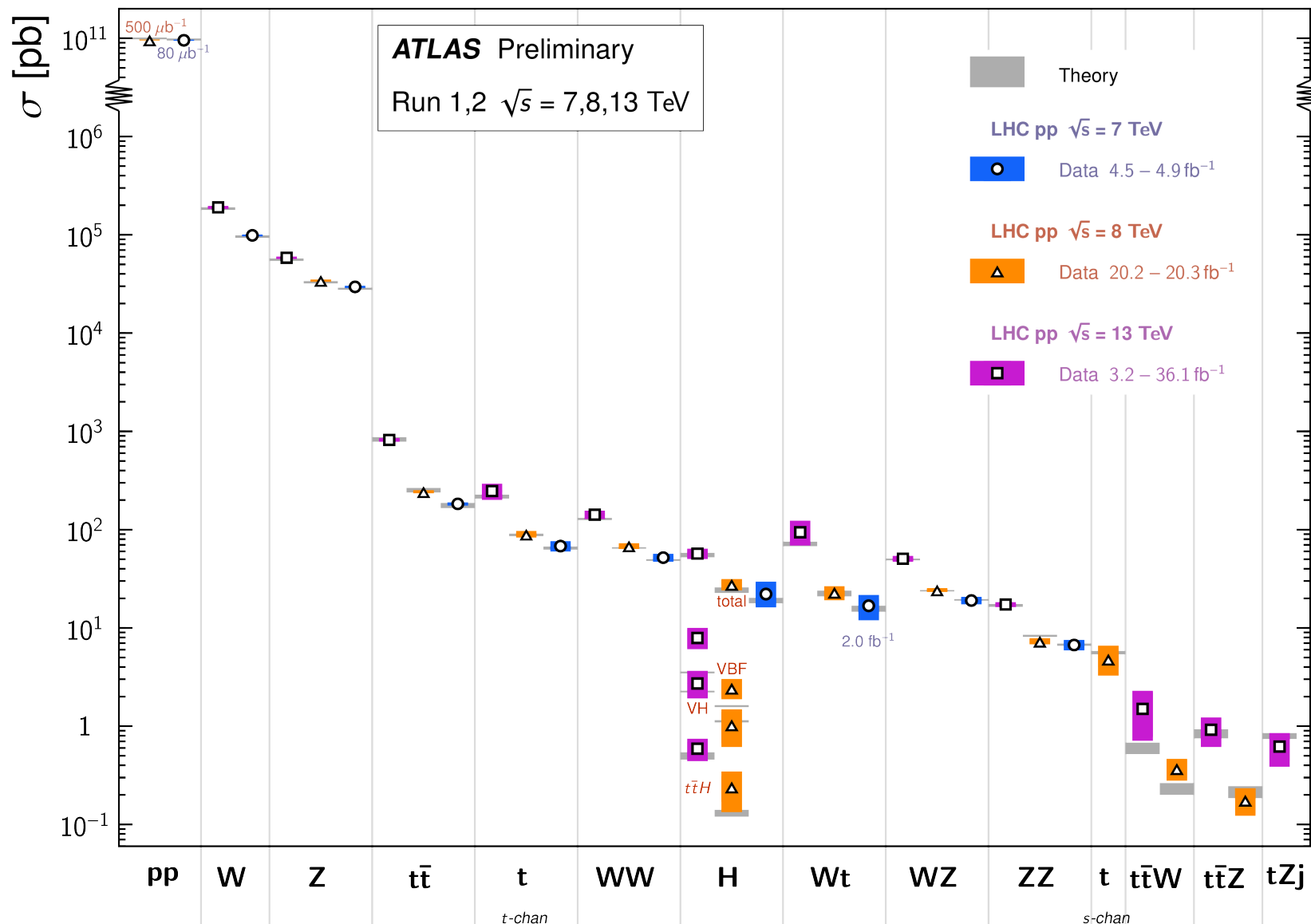


# Accumulation des données



# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements *Status: March 2018*

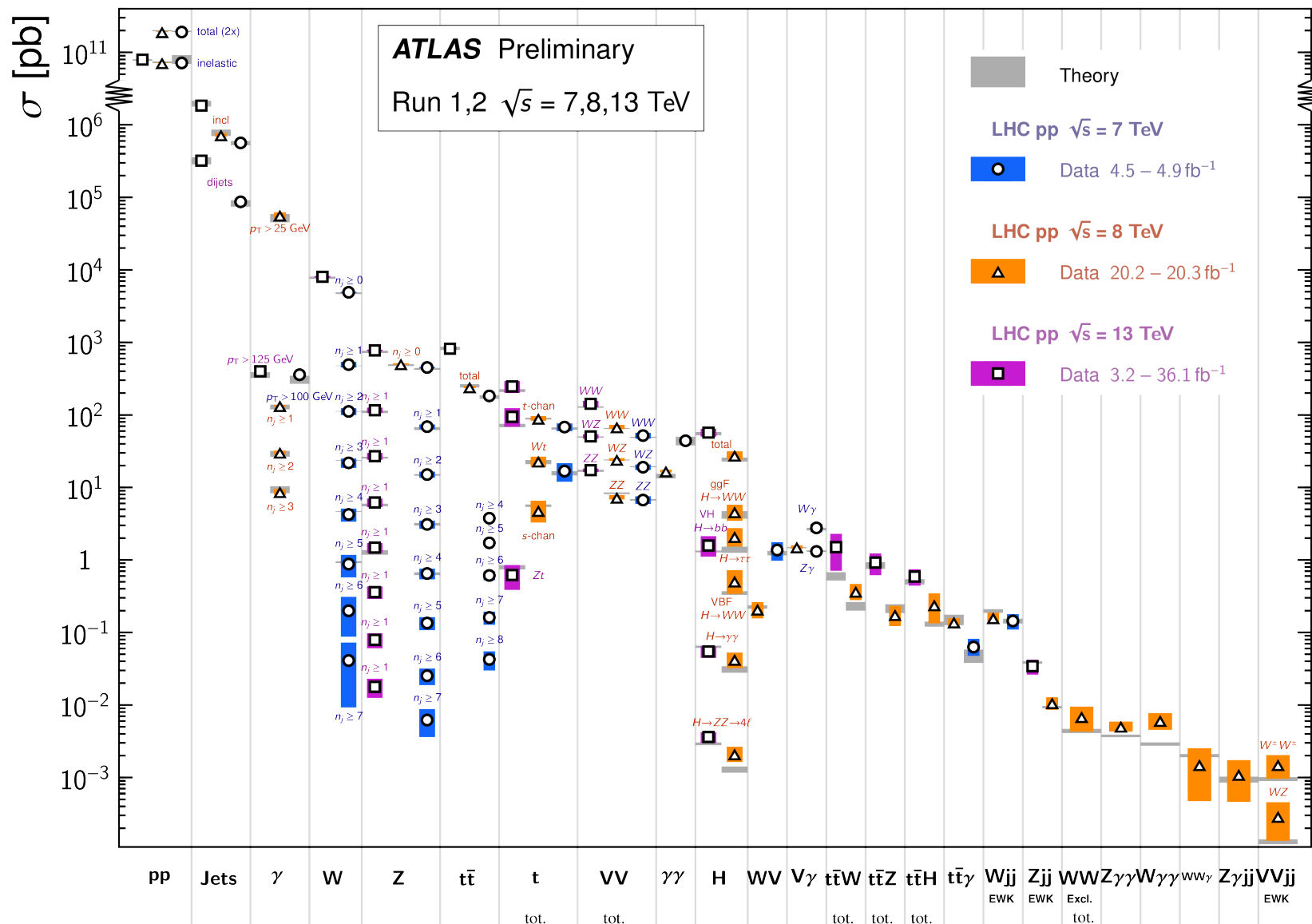


- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2018



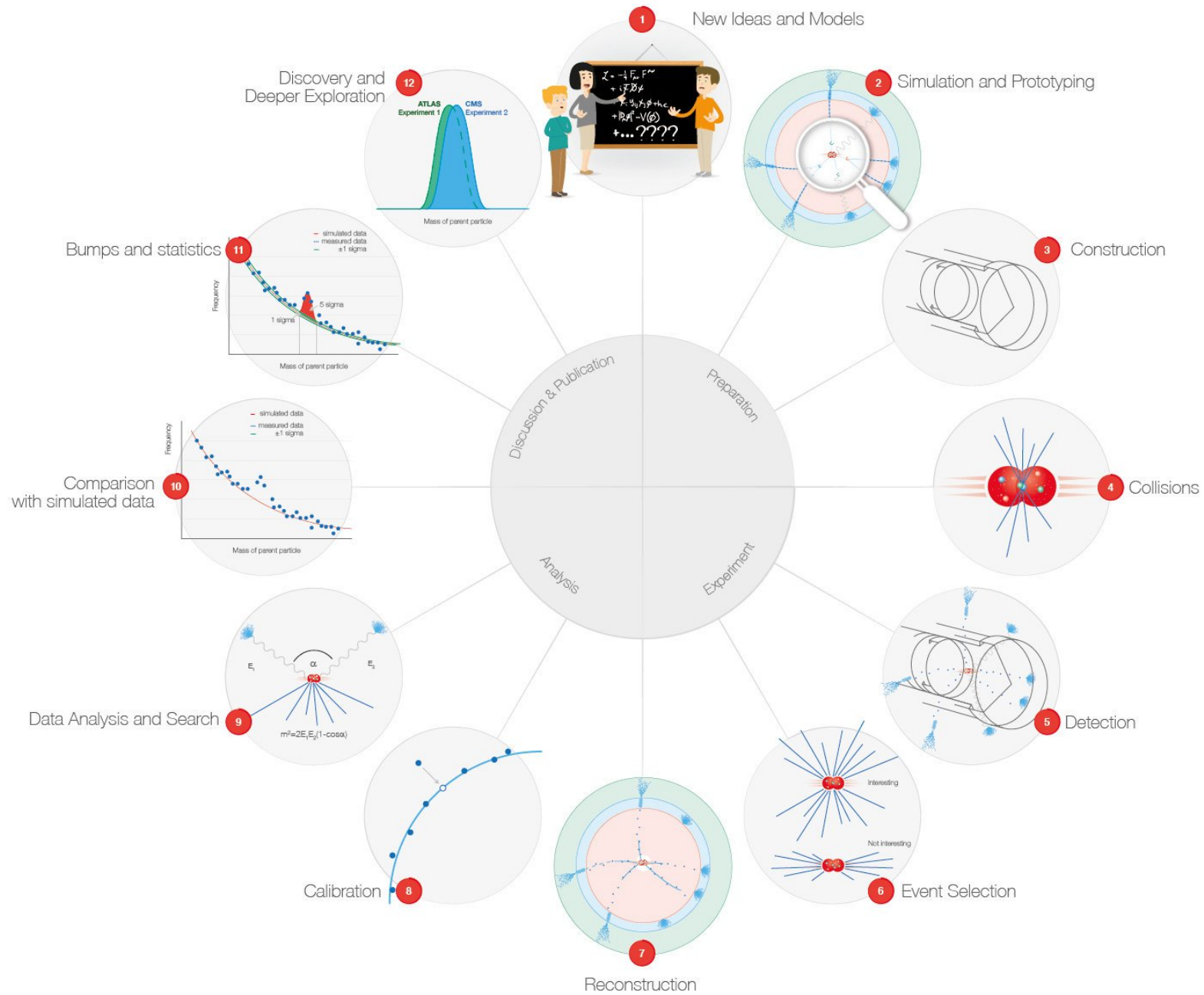
- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

# Le LHC en action

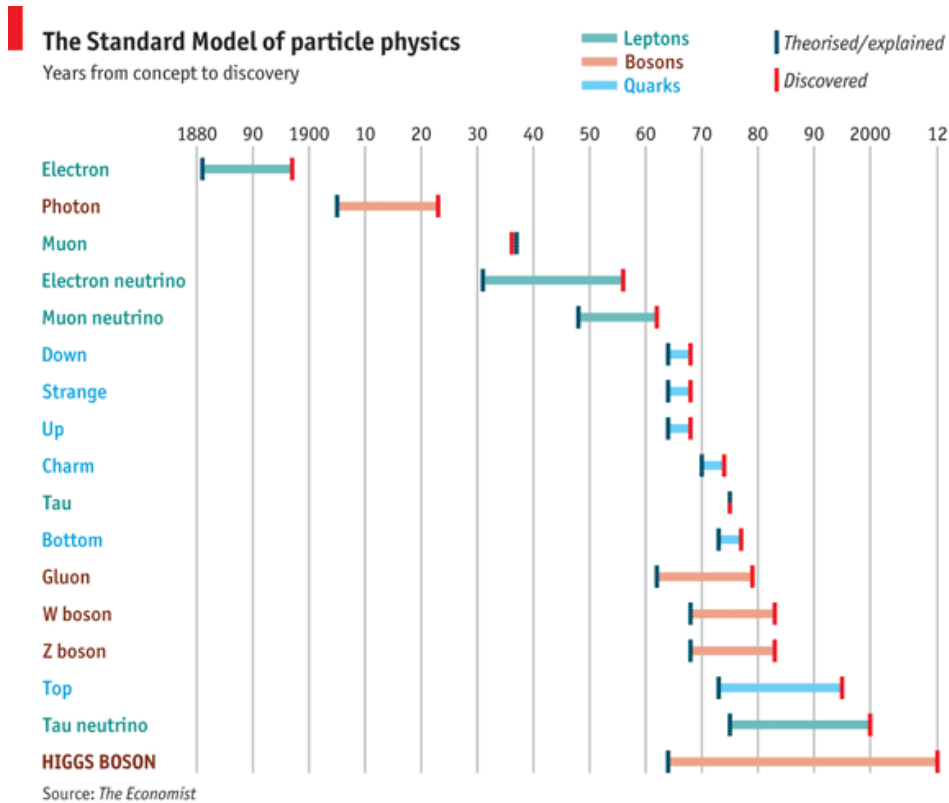


Accélérateur de science

# Cycle de vie



# La longue quête du boson de Higgs



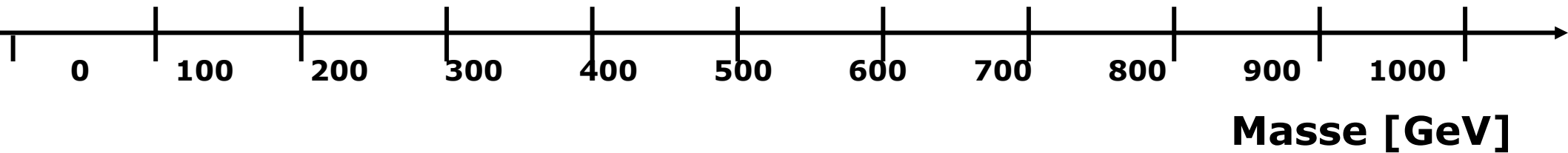
© The Economist

- Modèle standard : énorme succès, sauf que les particules n'ont pas de masse...
- Boson de Higgs : pièce essentielle pour accorder théorie et expérience
- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !
- Pourquoi ? La théorie prédit tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse ! Il faut donc chercher partout...



# La chasse au boson de Higgs

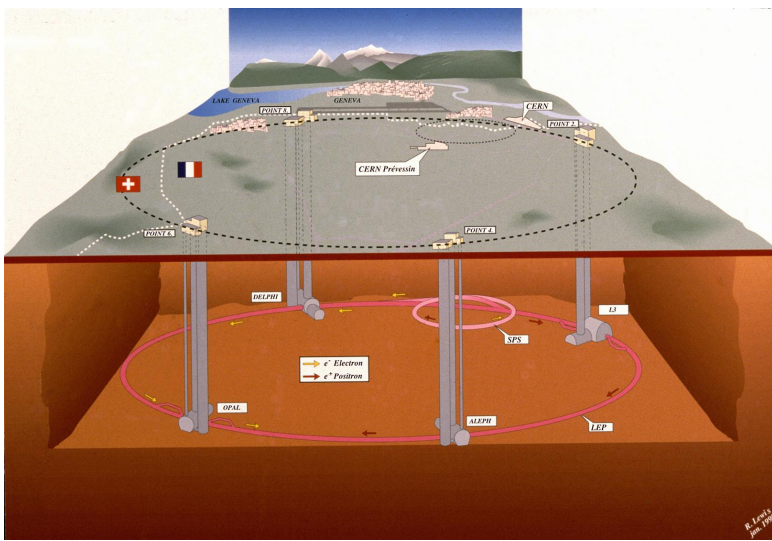
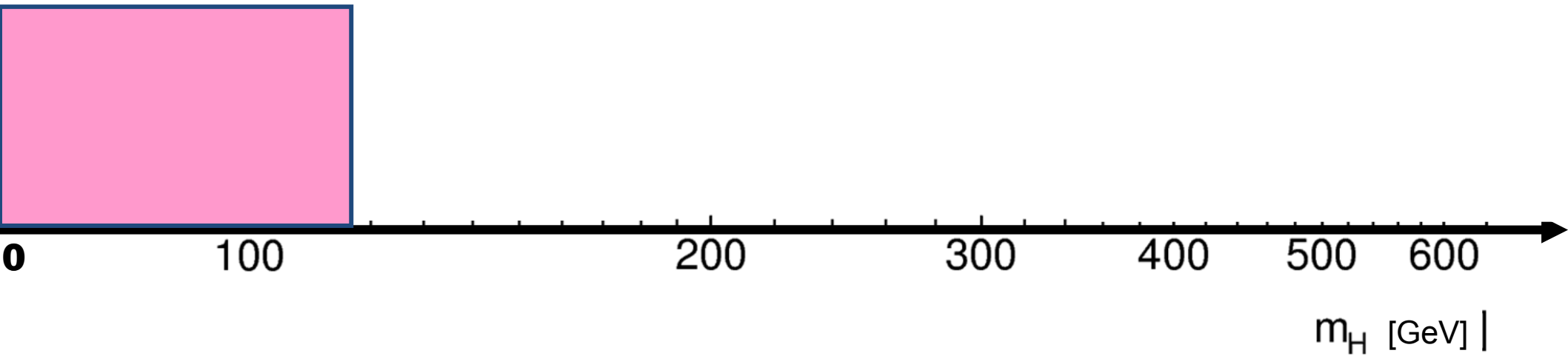
?



- Seule contrainte théorique : masse  $< 1000$  GeV

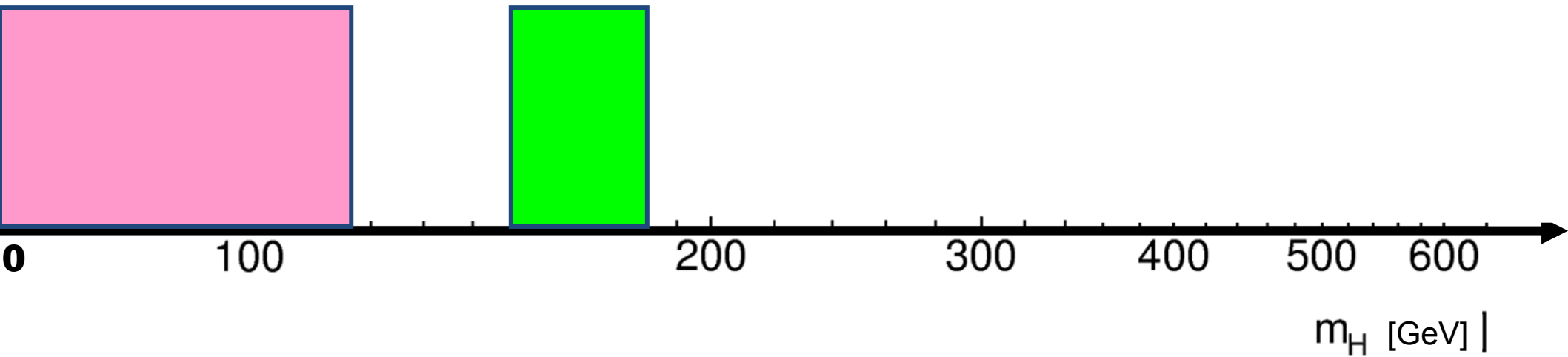
# La chasse au boson de Higgs

LEP  
1989-2000



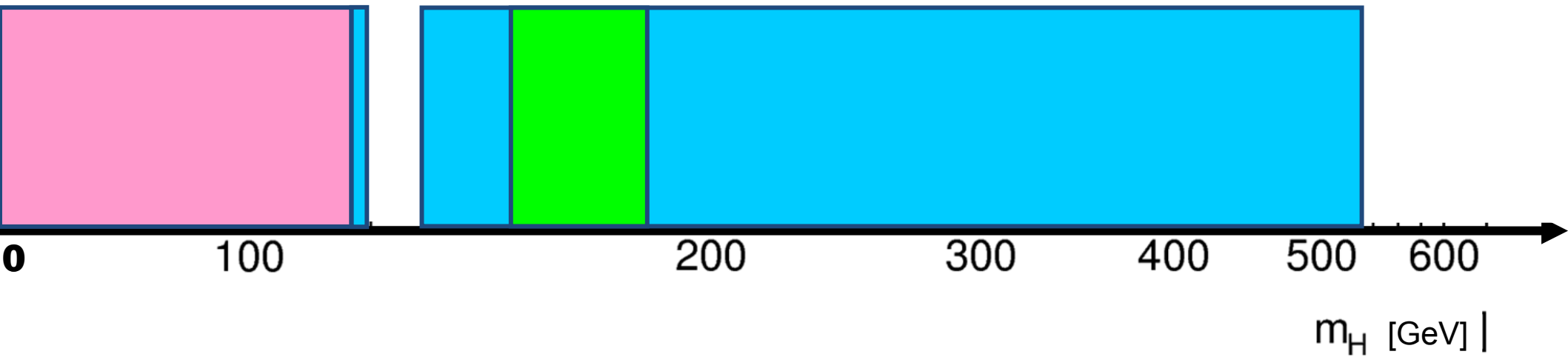
# La chasse au boson de Higgs

Tevatron  
1983-2011

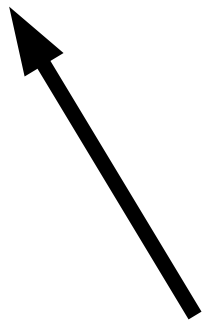
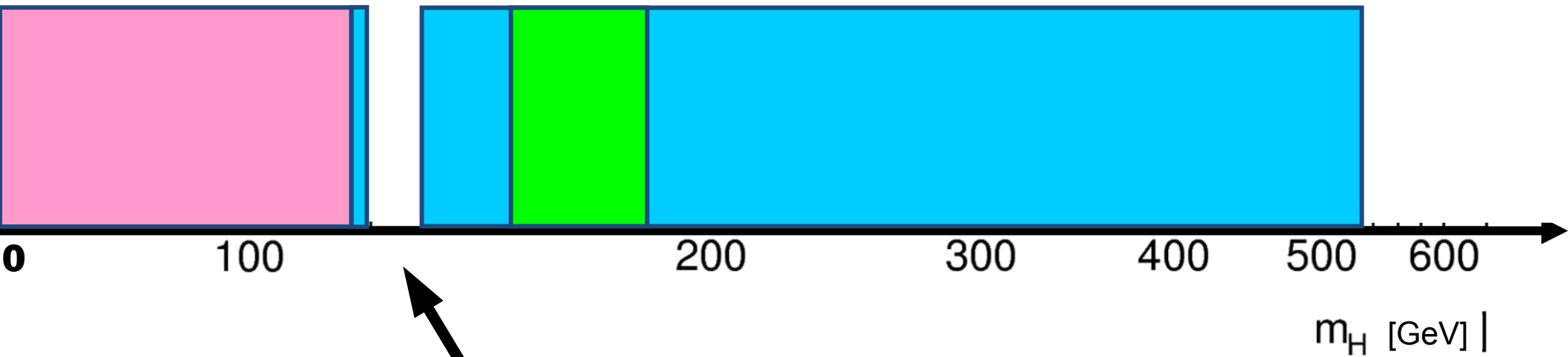


# La chasse au boson de Higgs

LHC  
2009-2011



# La chasse au boson de Higgs



?



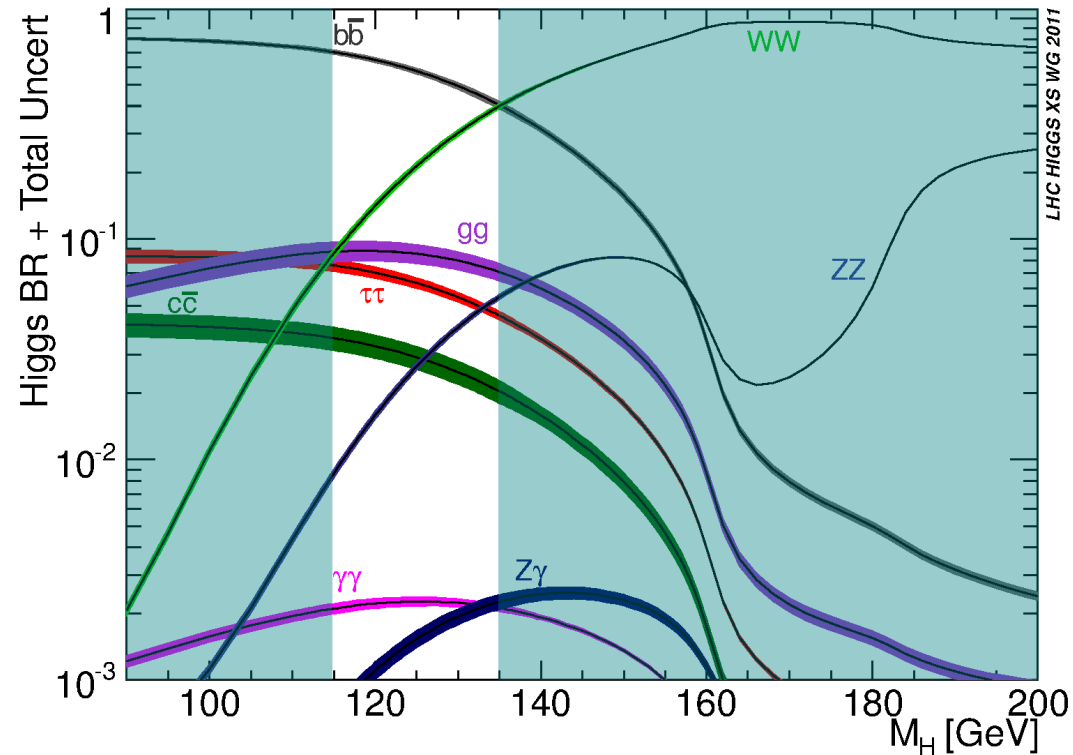
# Comment s'y prend-on ?

- Collision de protons  $\rightarrow (E = mc^2) \rightarrow$  création d'un boson de Higgs, une fois sur 10 milliards

- Ensuite il se désintègre, différemment suivant sa masse. Exemple à 125 GeV :

- ▶ 58 fois sur 100 en  $b\bar{b}$
- ▶ 21 fois sur 100 en  $WW$
- ▶ 3 fois sur 100 en  $ZZ$
- ▶ 2 fois sur 1000 en  $\gamma\gamma$

- Note : le plus fréquent n'est pas forcément le plus facile à observer

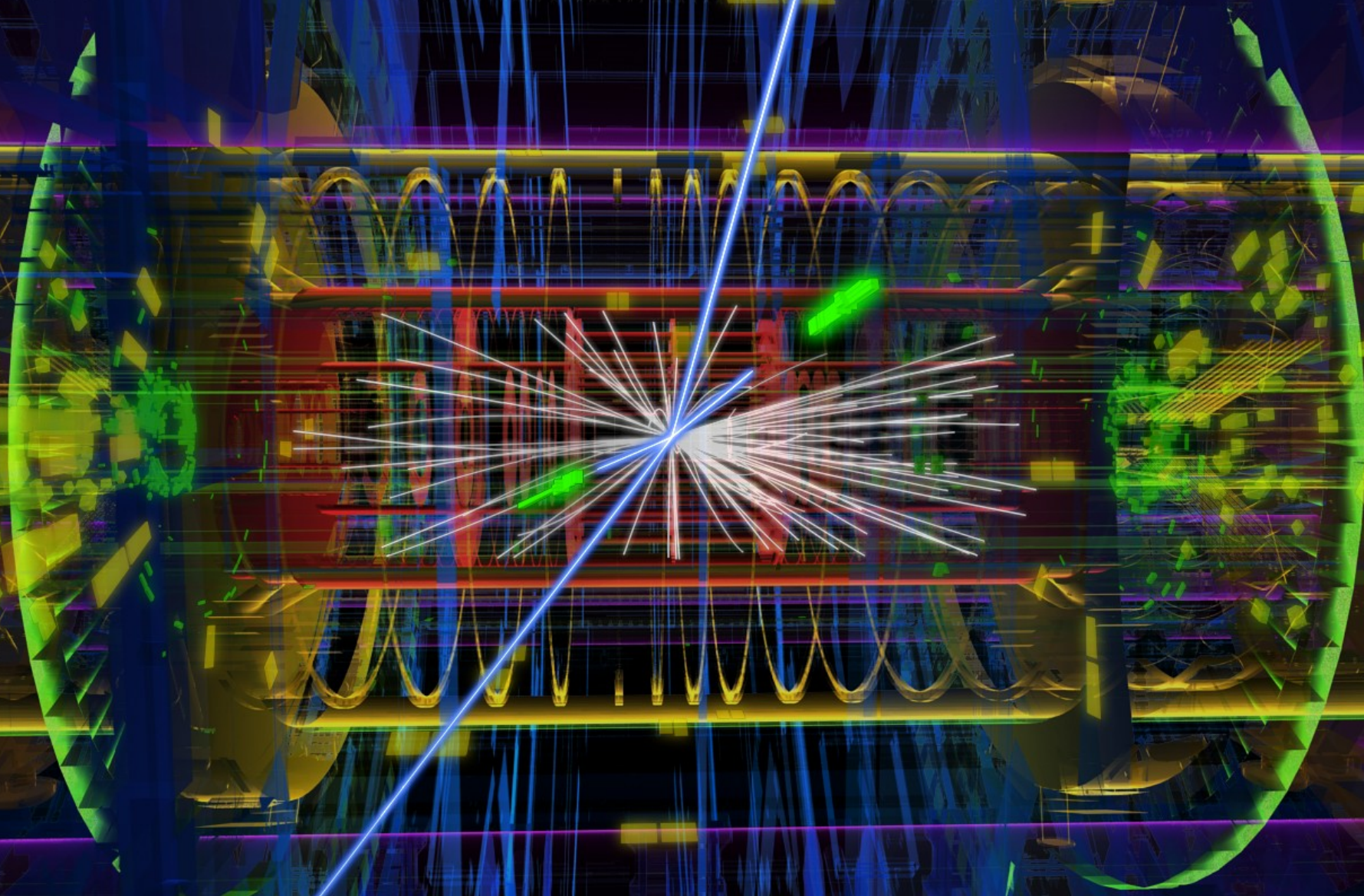


# Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles

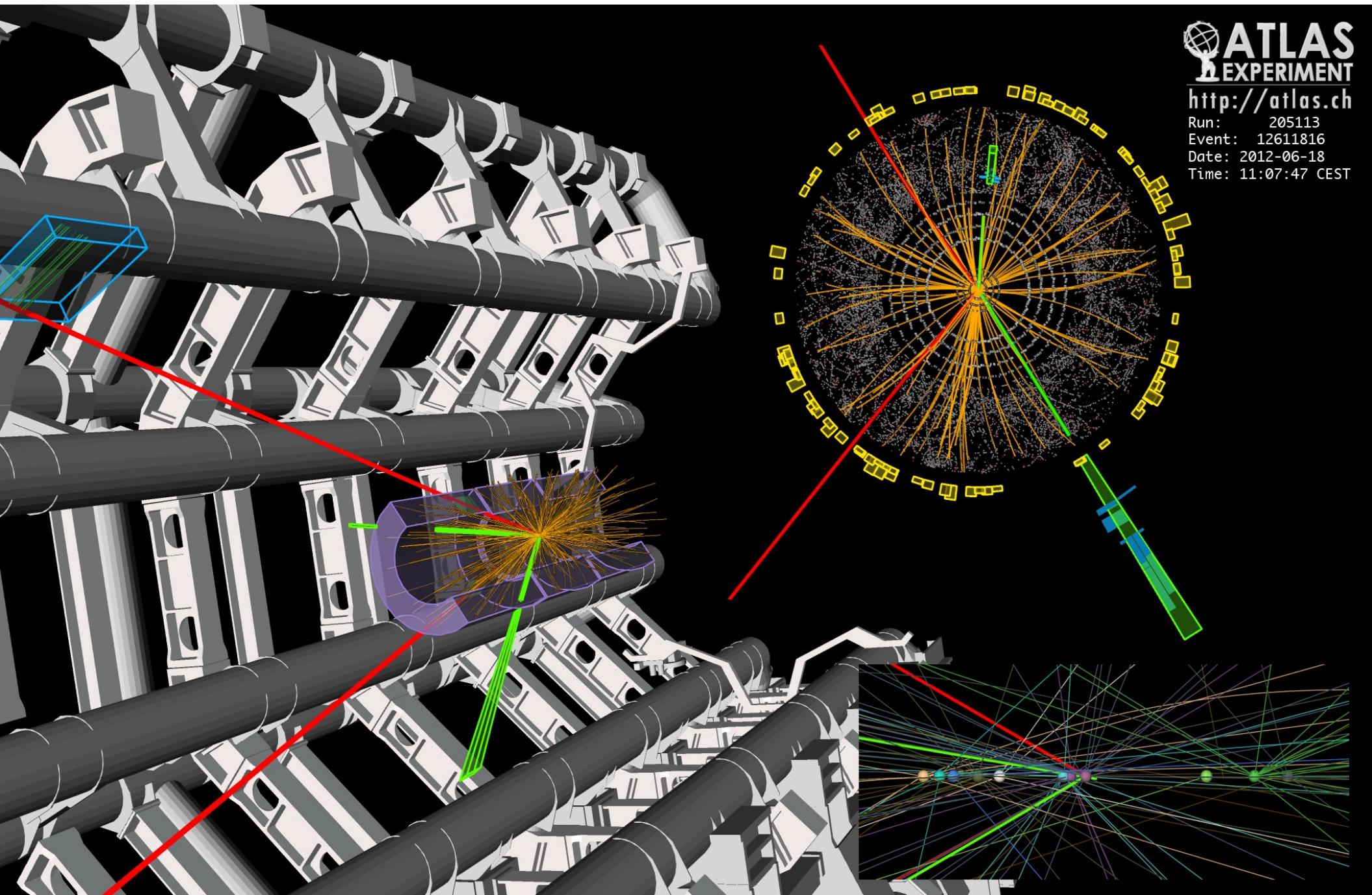


Candidat  $H \rightarrow \gamma\gamma$





# Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



ATLAS  
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

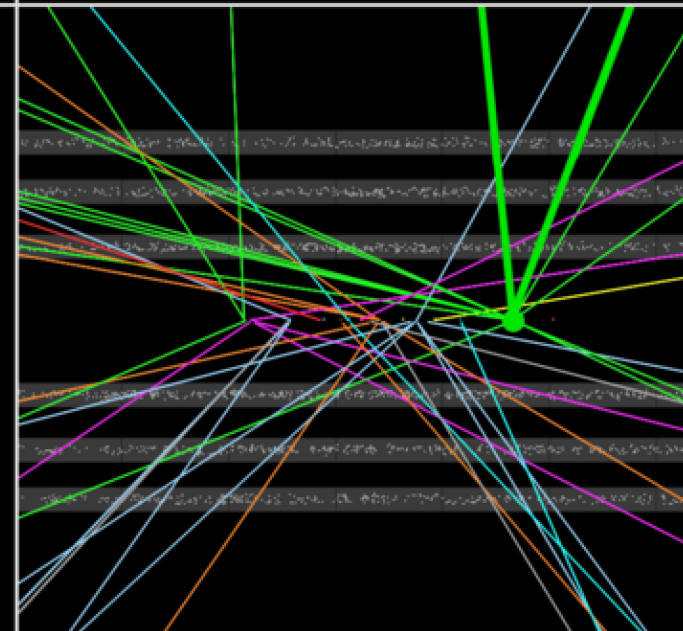
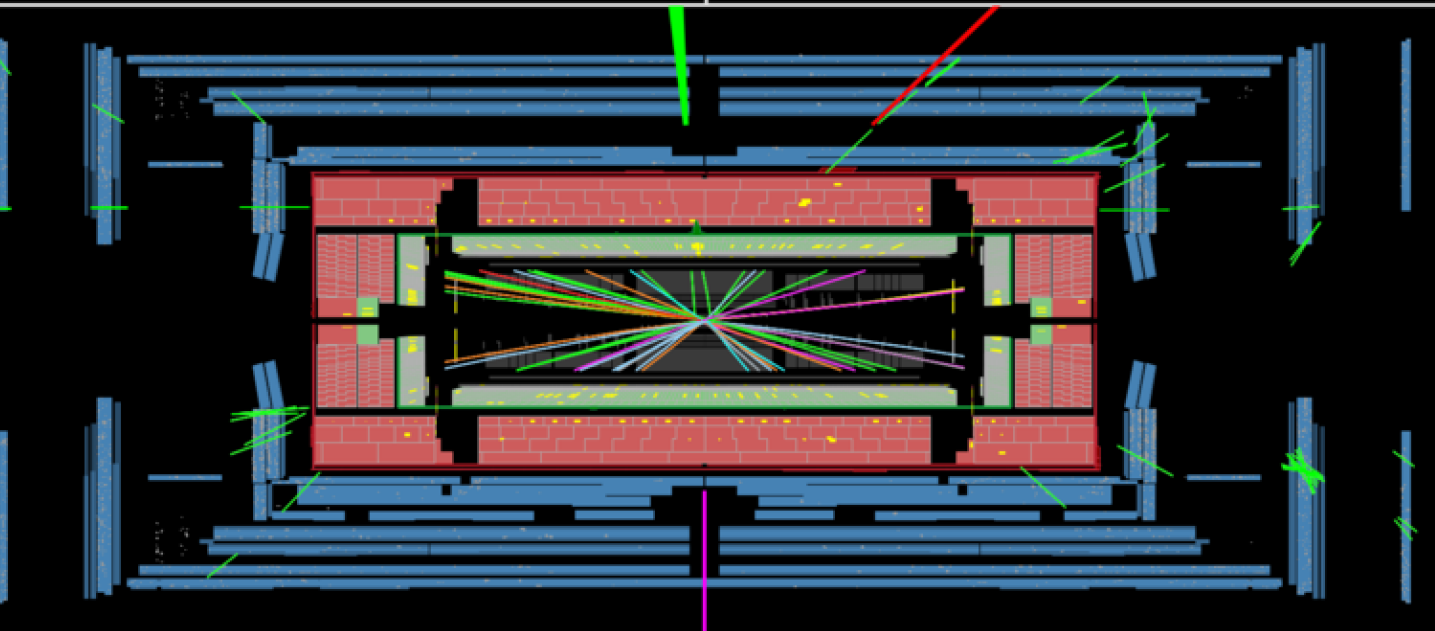
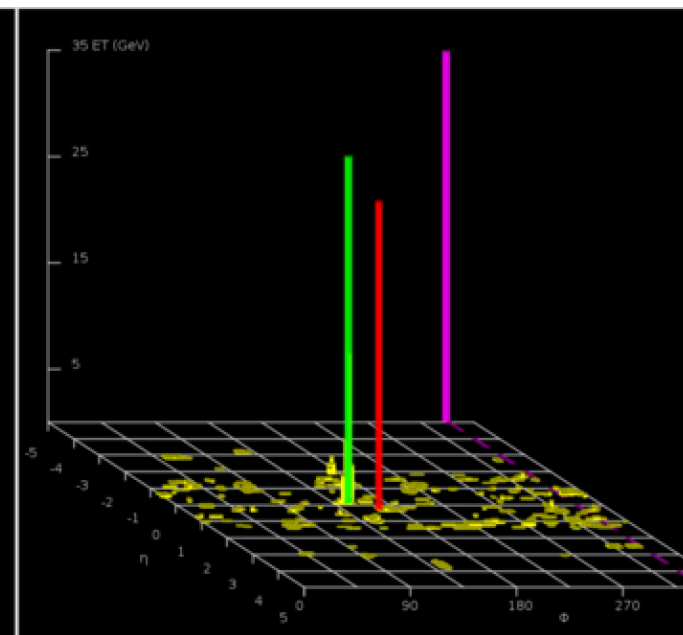
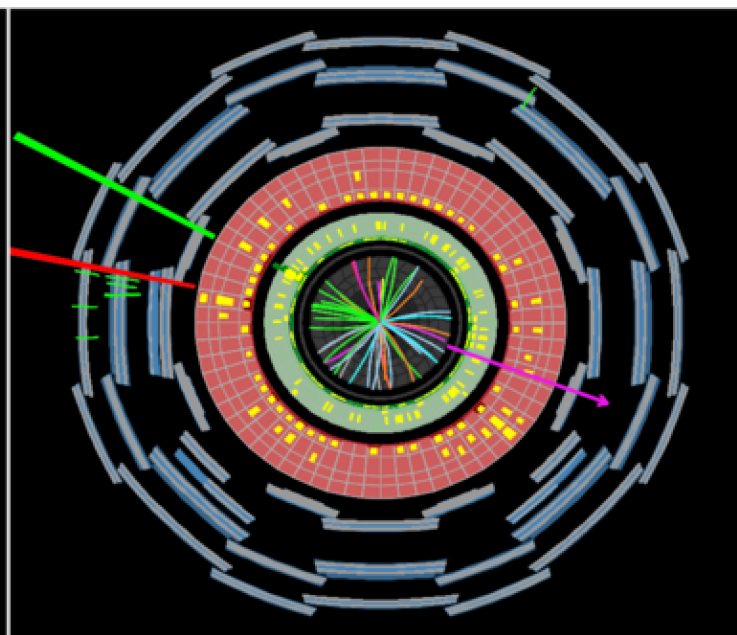
Run: 205113  
Event: 12611816  
Date: 2012-06-18  
Time: 11:07:47 CEST

# Candidat $H \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$



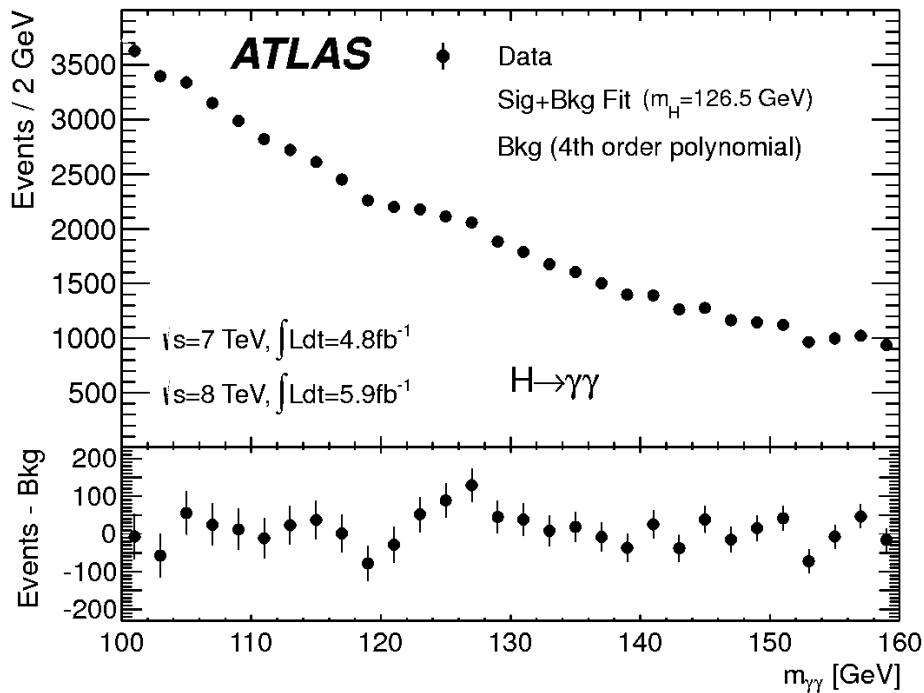
**ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 204026, Event Number: 33133446  
Date: 2012-05-28 07:23:47 CEST



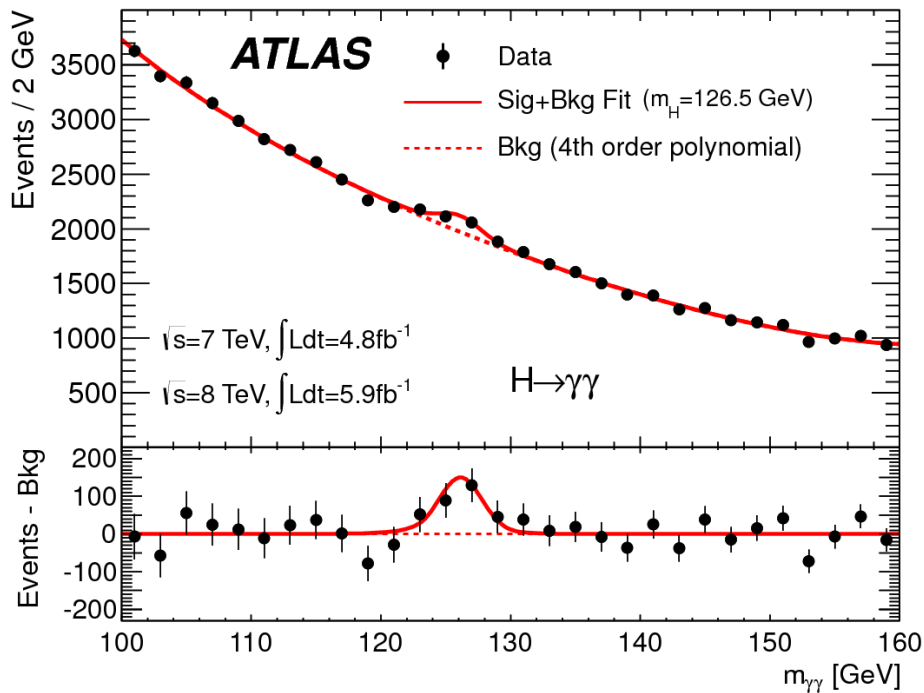
# Mesure

- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



# Mesure

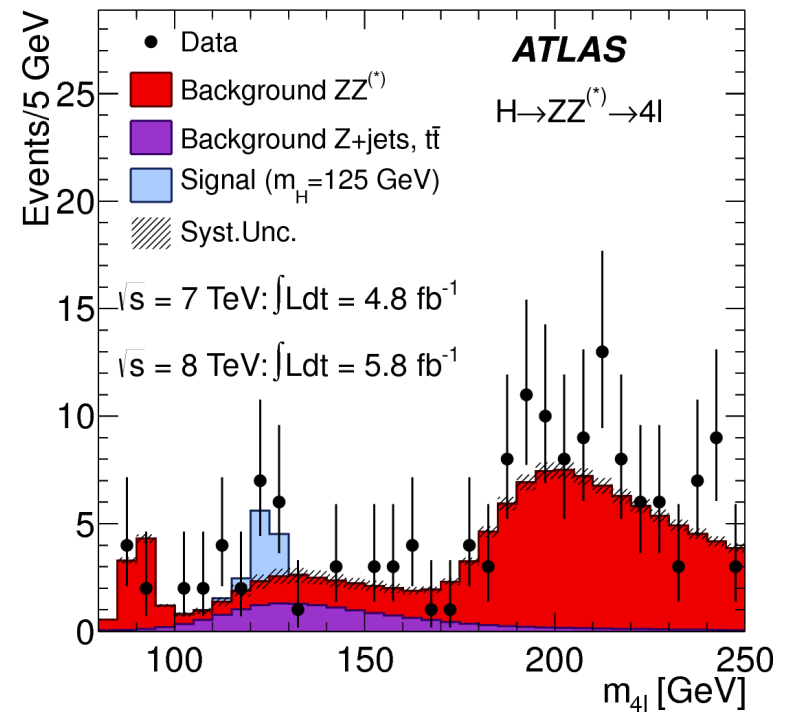
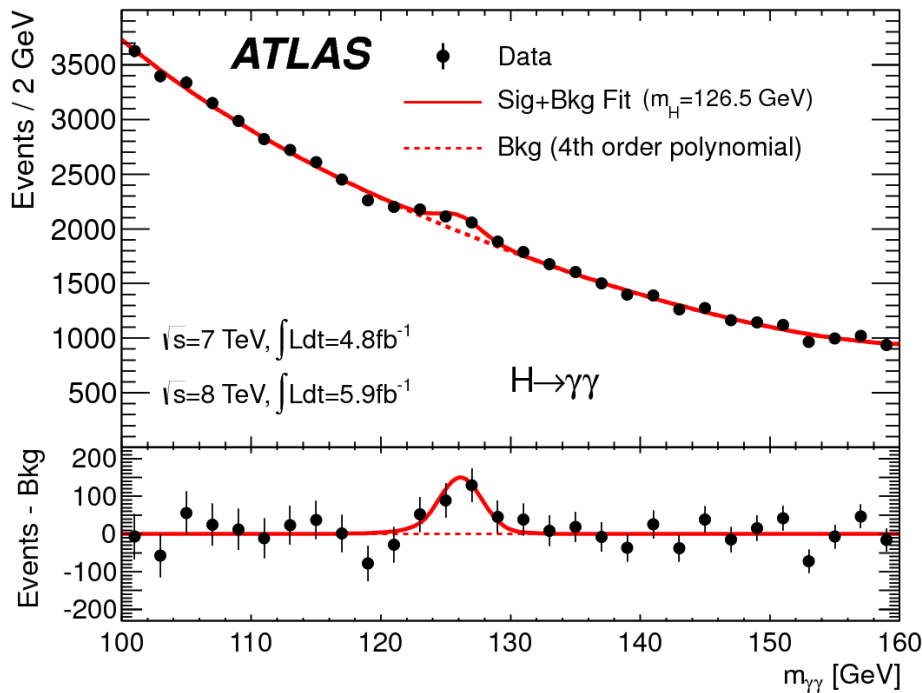
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



# Mesure

- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

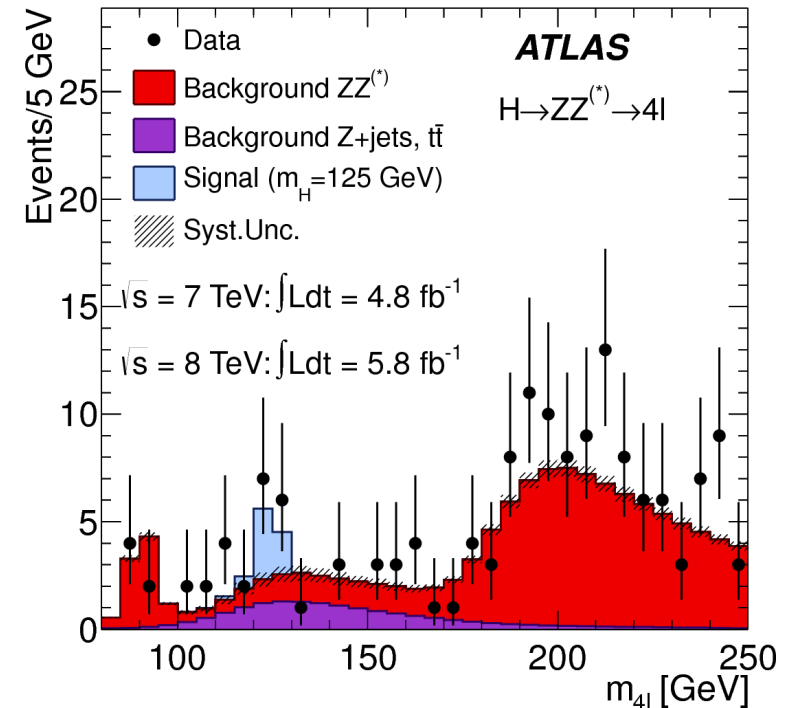
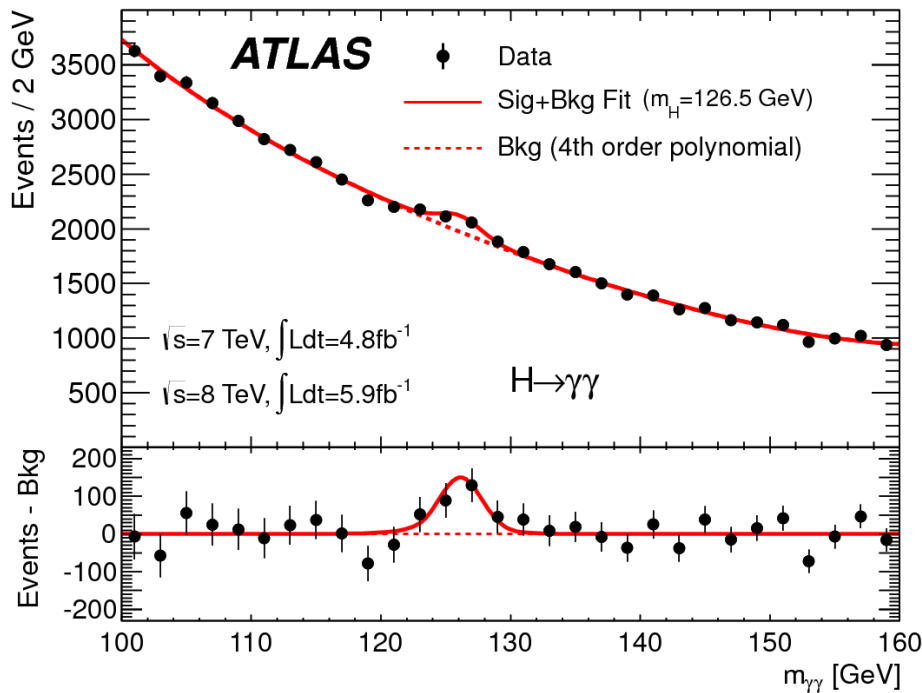
- Higgs en ZZ
  - ▶ Très peu de bruit de fond
  - ▶ Très peu d'événements



# Mesure

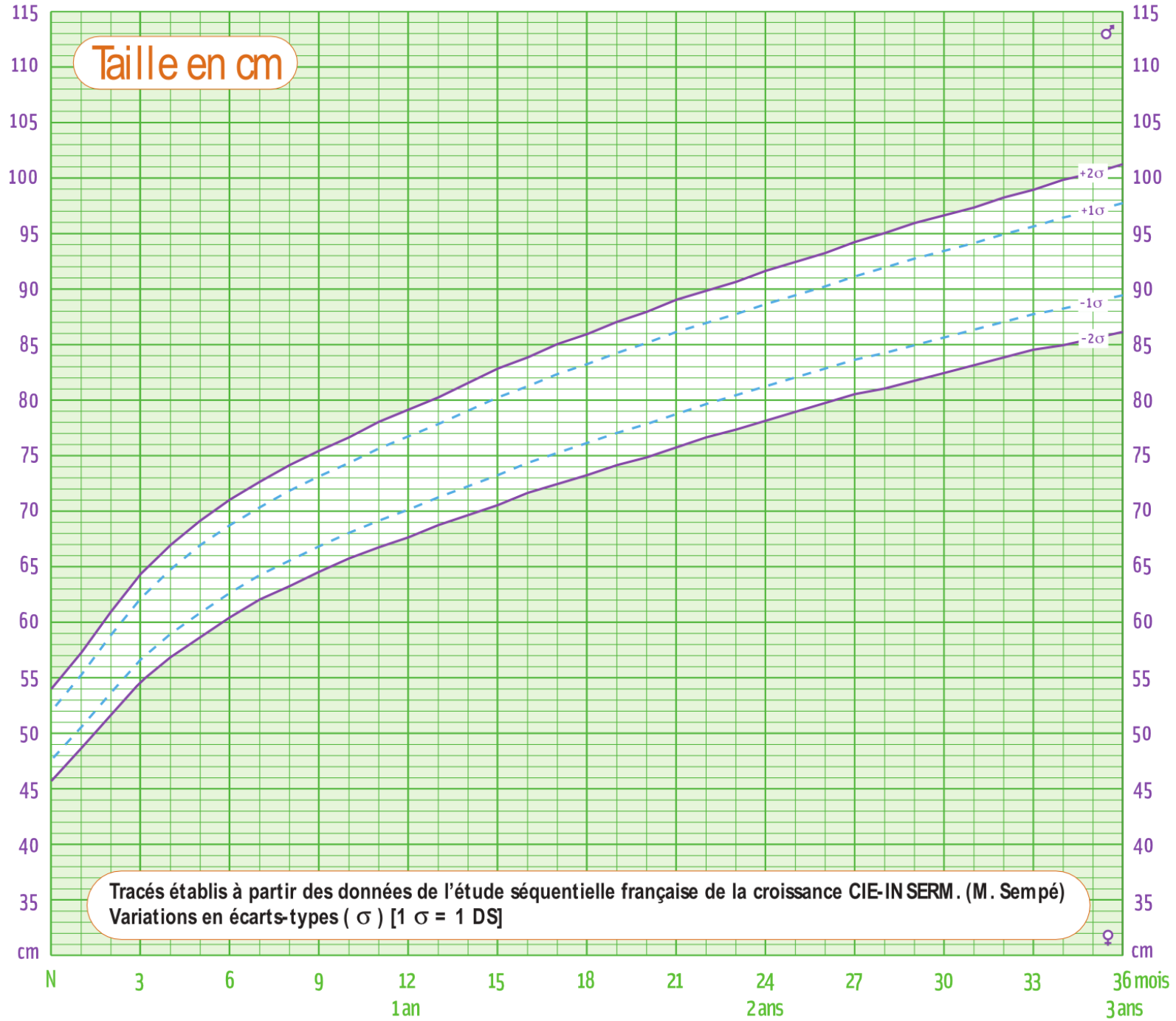
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

- Higgs en ZZ
  - ▶ Très peu de bruit de fond
  - ▶ Très peu d'événements

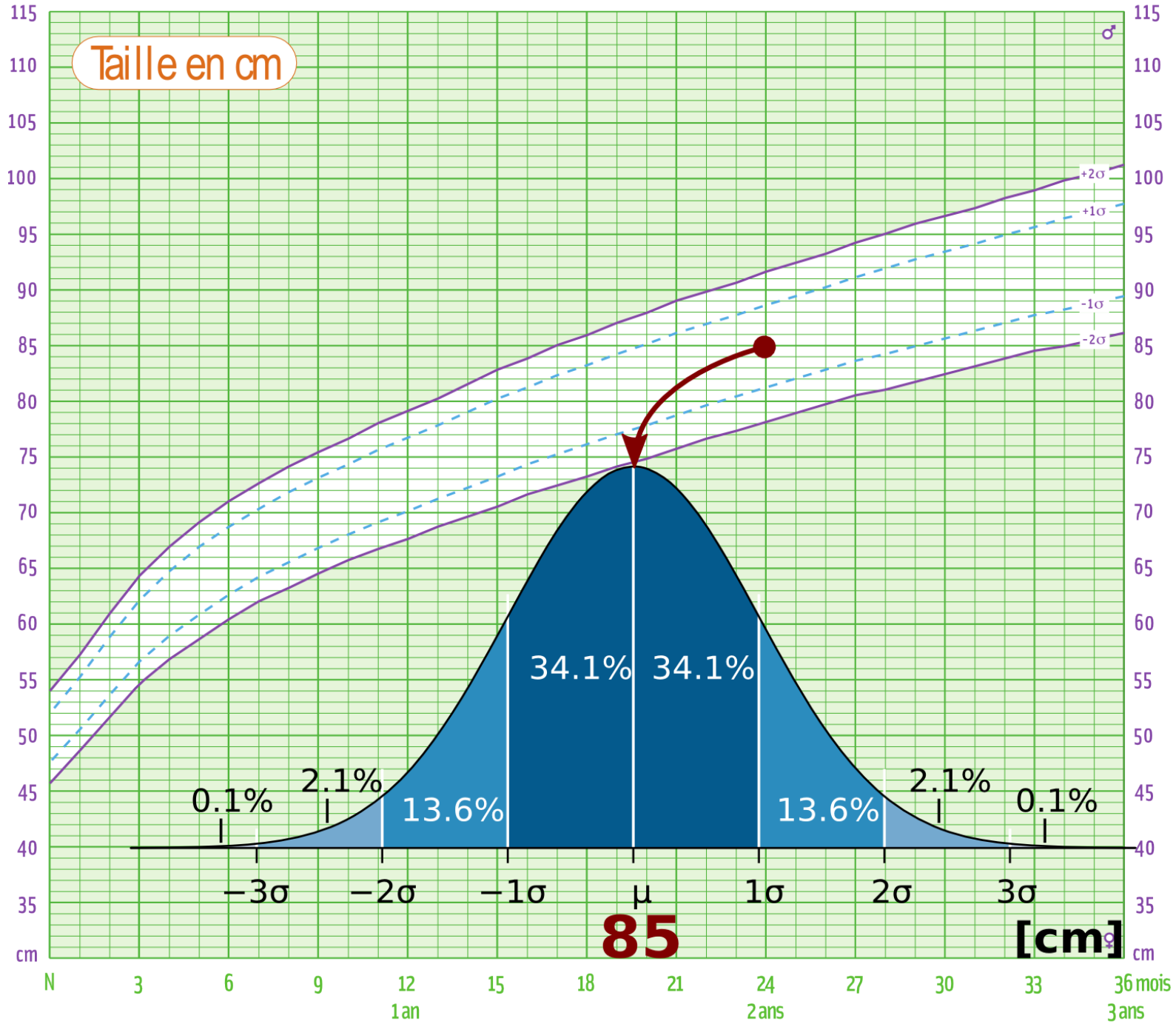


Est-ce que cela est significatif ?  
Outils statistiques pour répondre

# La Gaussienne

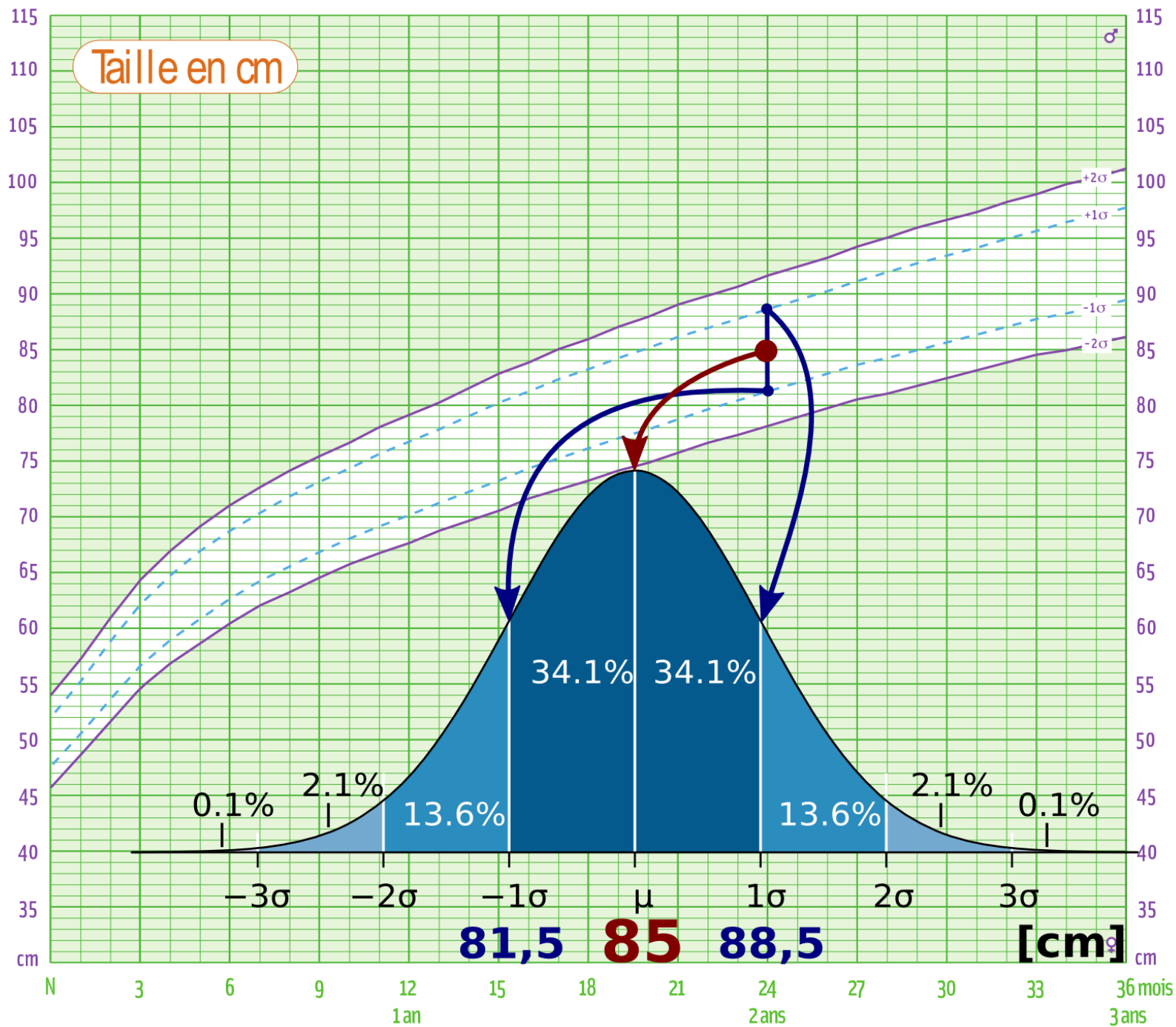


# La Gaussienne

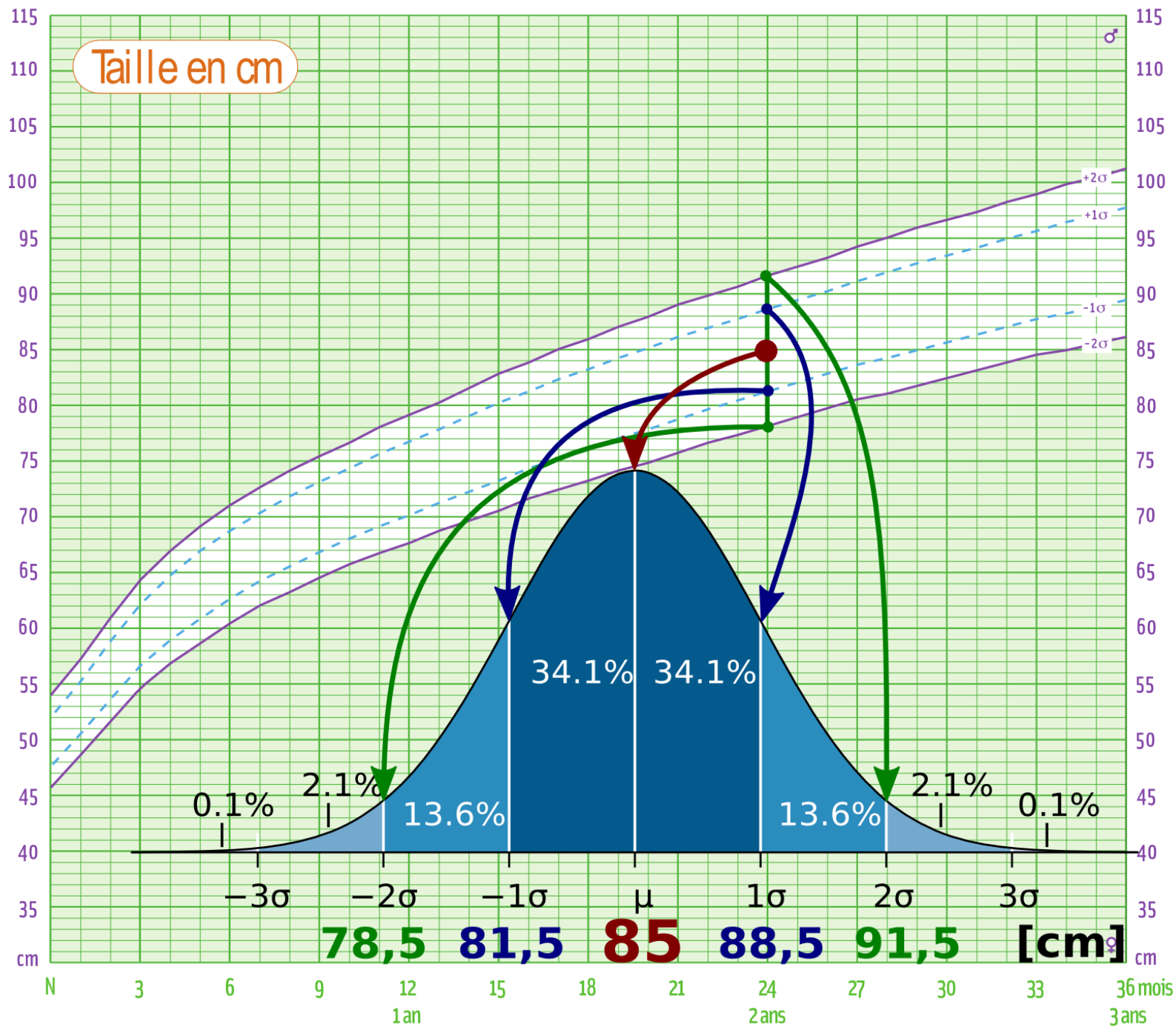




# La Gaussienne



# La Gaussienne



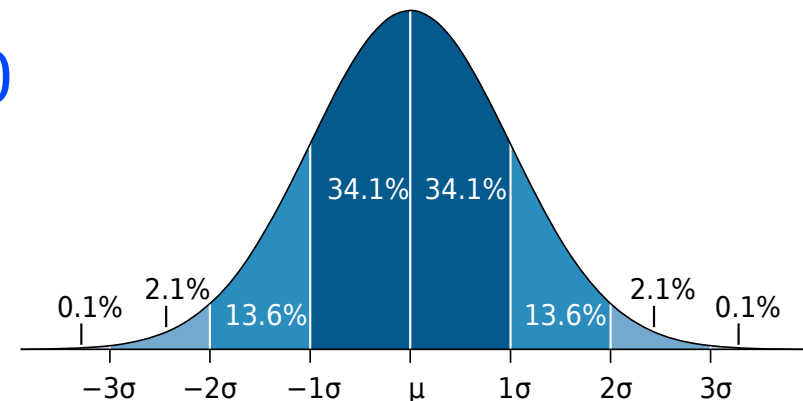
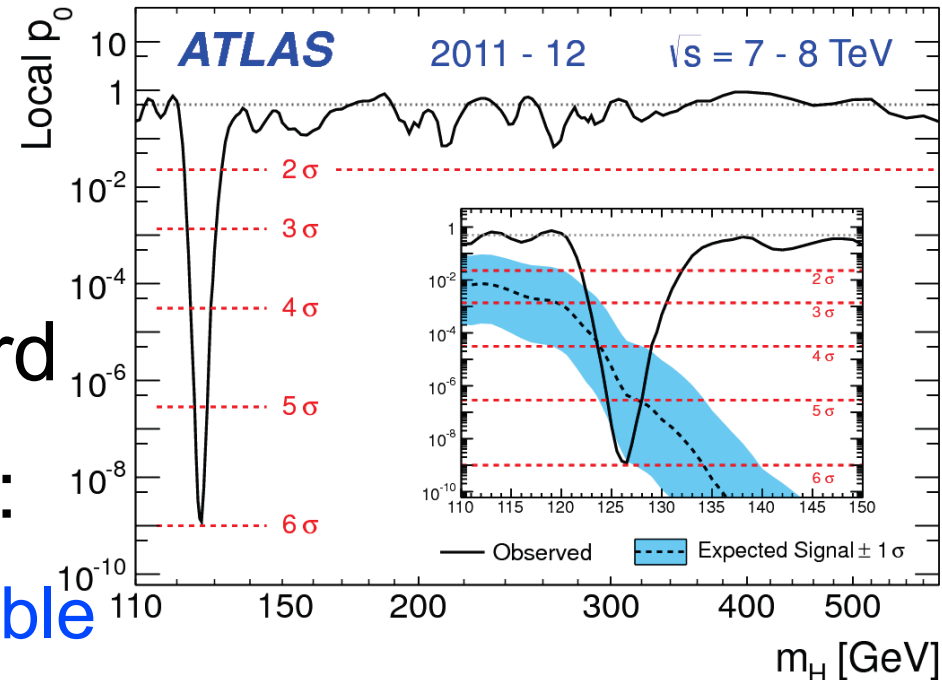
# Résultat sur le Higgs : est-ce significatif statistiquement ?

- p-value  $p_0$  : mesure la probabilité que des événements du bruit de fond produisent quelque chose qui ressemble autant au signal recherché par hasard

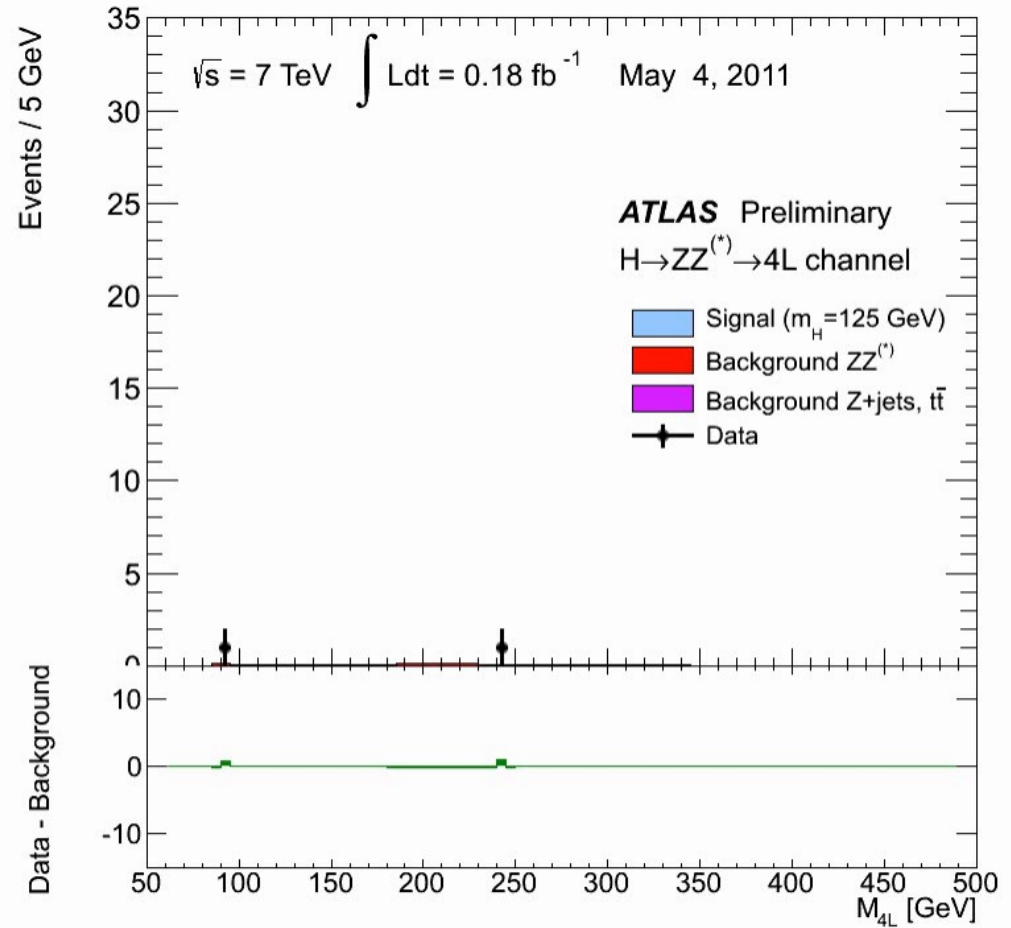
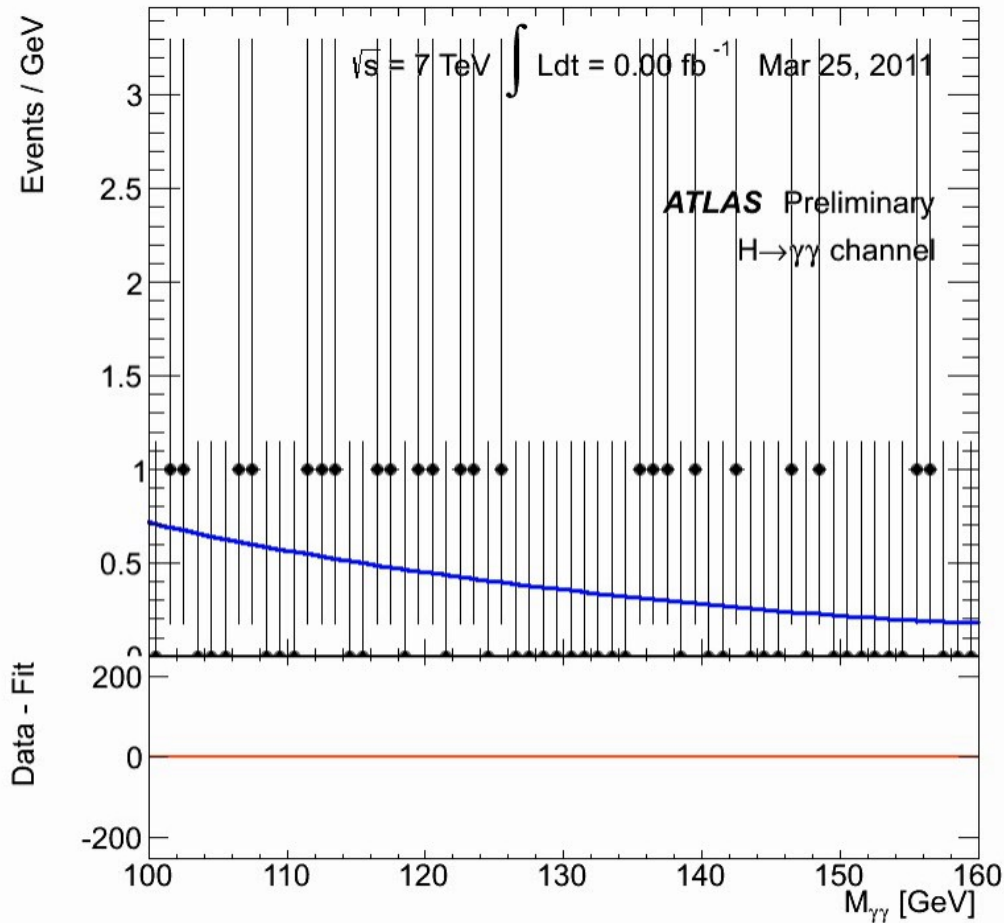
- Quantifié en nombre de «  $\sigma$  » :

- ▶  $1\sigma$  : 1 chance sur 3 (trop probable pour conclure quoi que ce soit)
- ▶  $3\sigma$  (évidence) : 3 chances sur 1000
- ▶  $5\sigma$  (observation) : 1 chance sur 2 millions
- ▶  $5,9\sigma$  : 3 chances sur 1 milliard

- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose



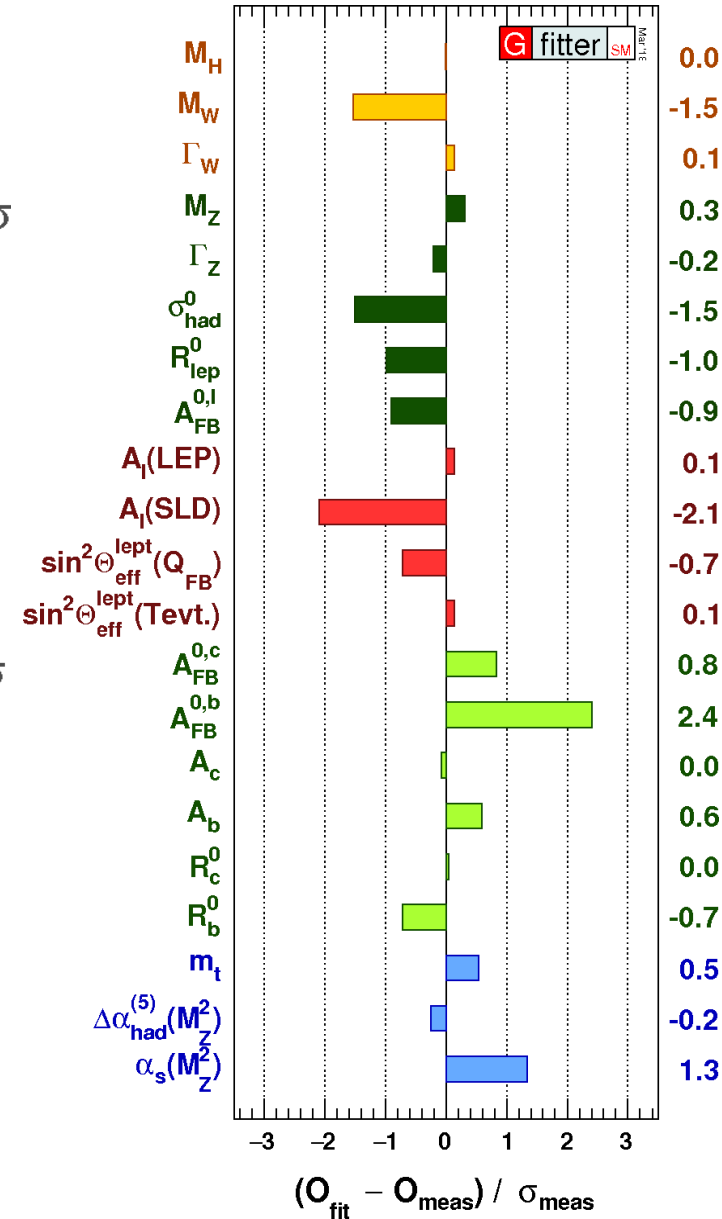
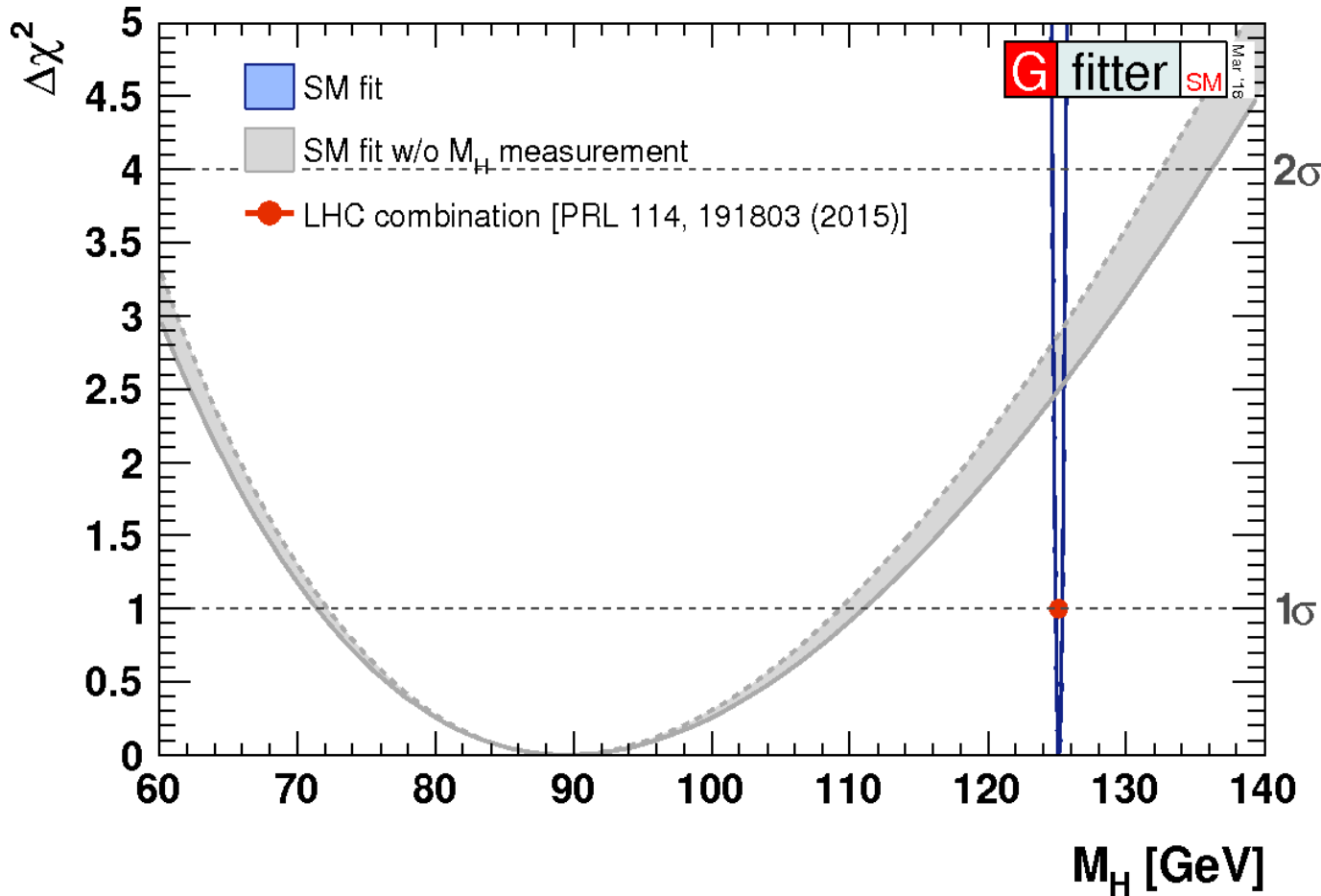
# Évolution dans le temps (jusqu'à fin 2012)



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

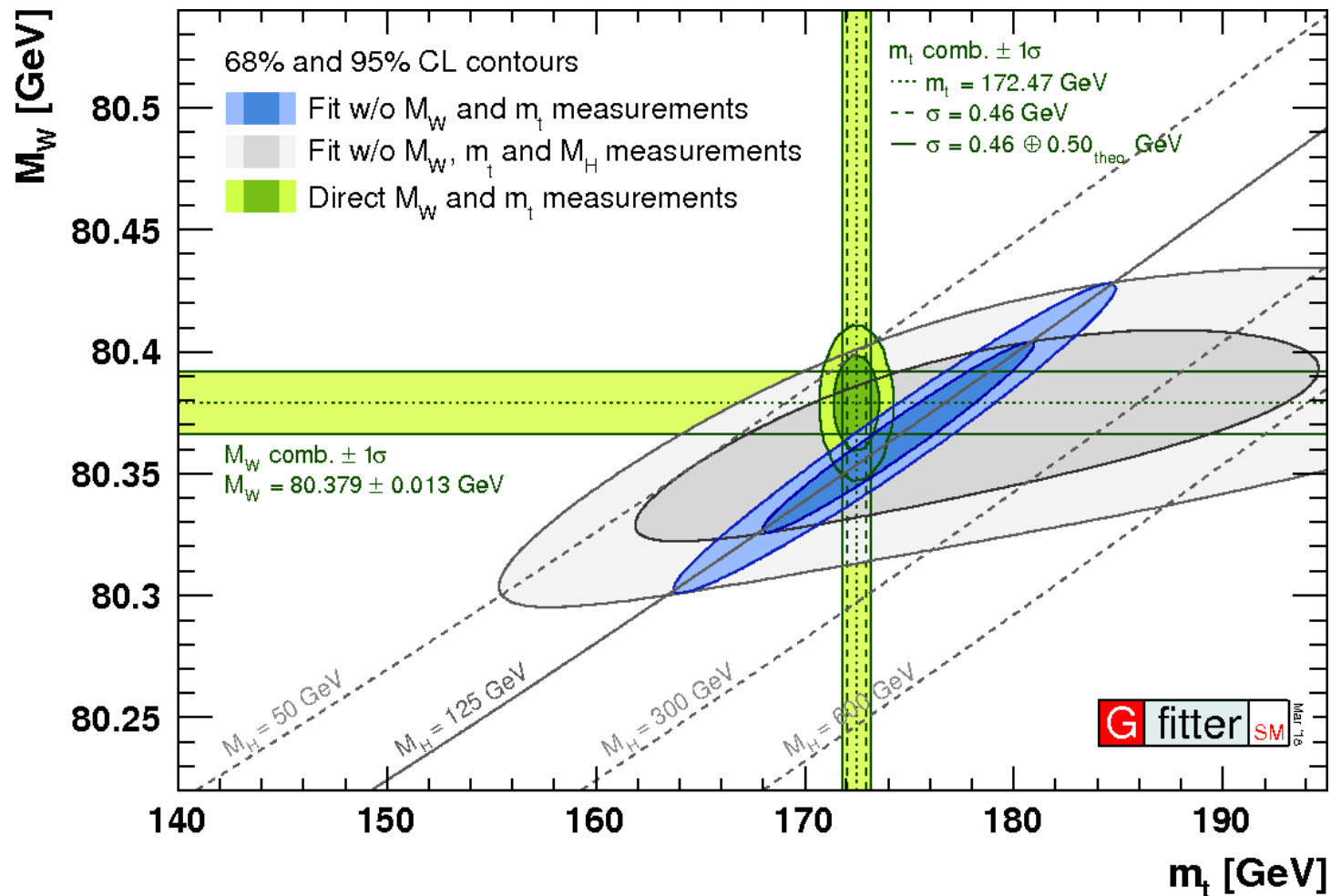
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

# Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

# Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?

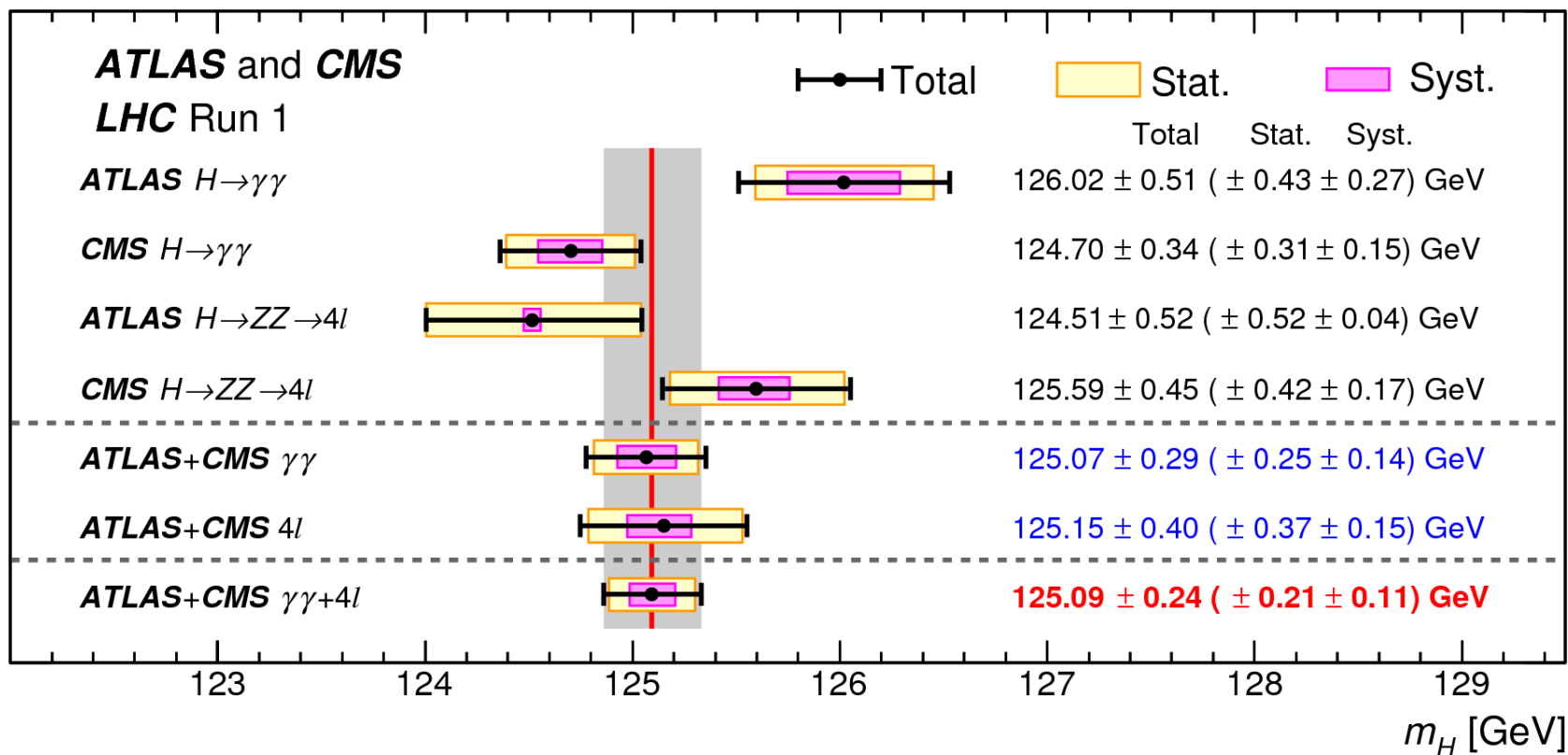


- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquent
- Pas de « tension » avec le modèle standard

# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

- ▶  $m_H = 125.09 \pm 0.24$  (0.21 stat.  $\pm$  0.11 syst.) GeV  
 [ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]  
 (134 fois la masse du proton)

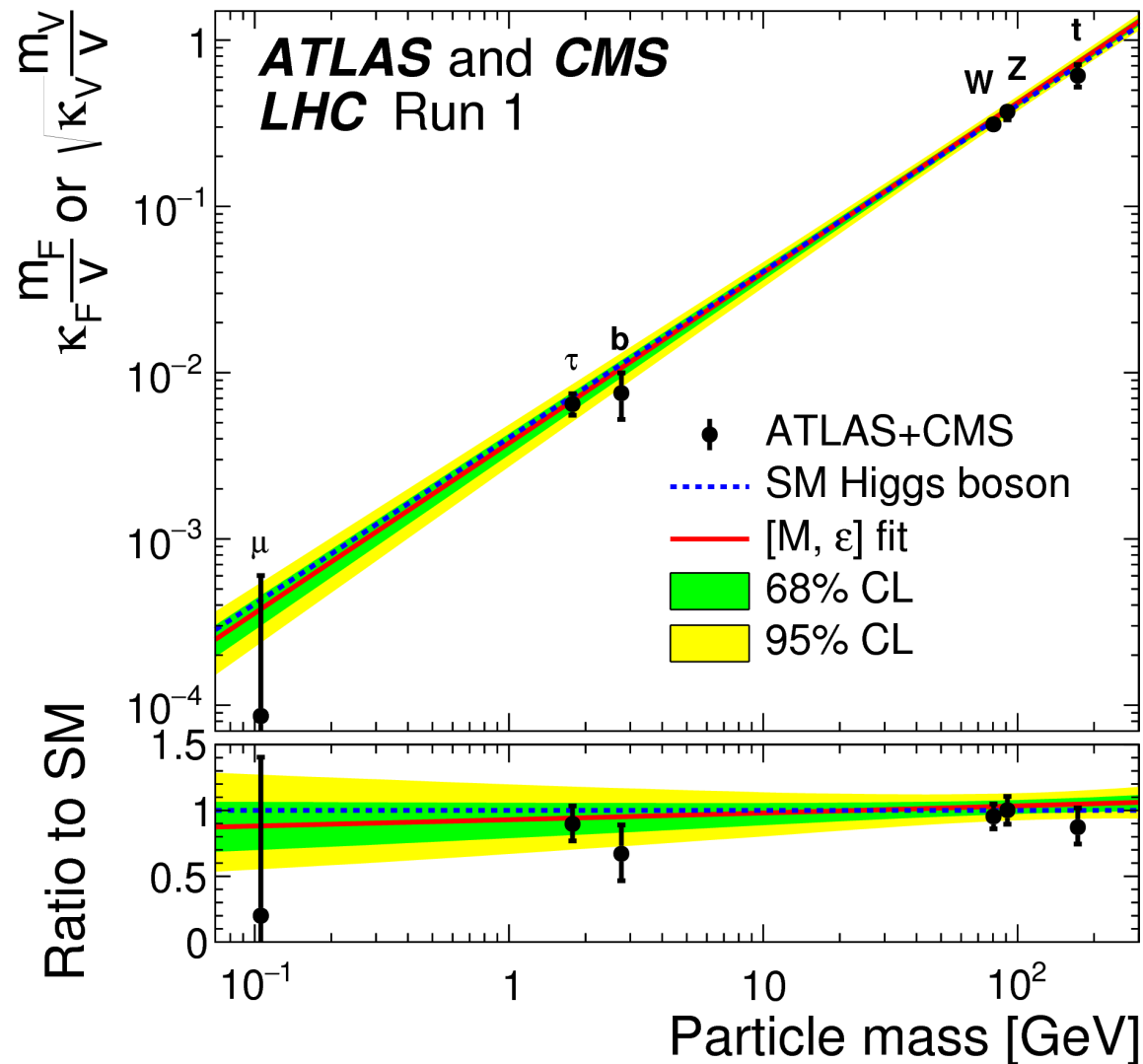


# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :
  - ▶  $m_H = 125.09 \pm 0.24$  (0.21 stat.  $\pm$  0.11 syst.) GeV  
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]  
(134 fois la masse du proton)
- La signification statistique a continué d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Mesure des propriétés :
  - ▶ Canaux divers, modes de production, couplages, spin...
  - ▶ Confirmation du modèle standard...



# Masse des particules et couplage au boson de Higgs

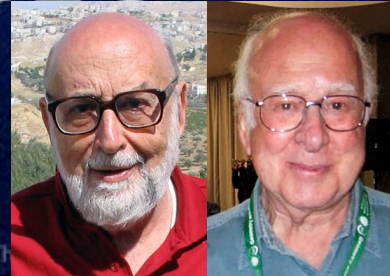


- Relation comme prévue par le modèle standard

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

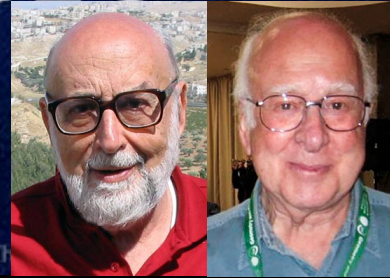


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

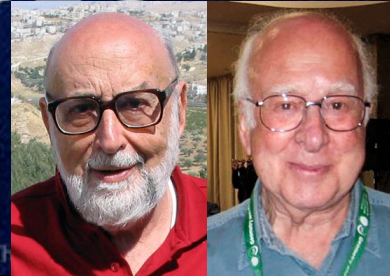


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



**Le CERN et les expériences ATLAS & CMS**

# C'est tout ?

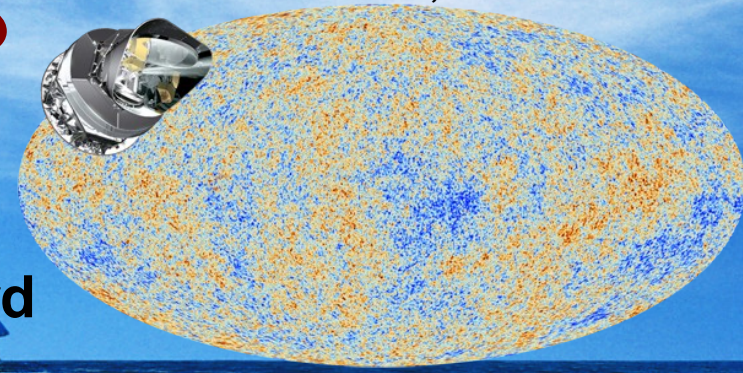
Nous et l'Univers visible



**Modèle standard**



# C'est tout ?



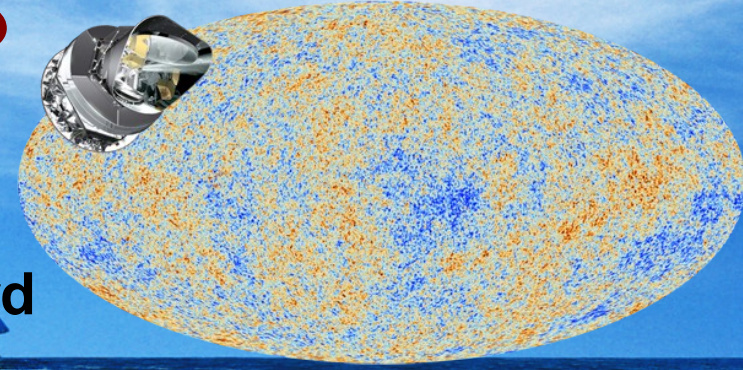
Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



# C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

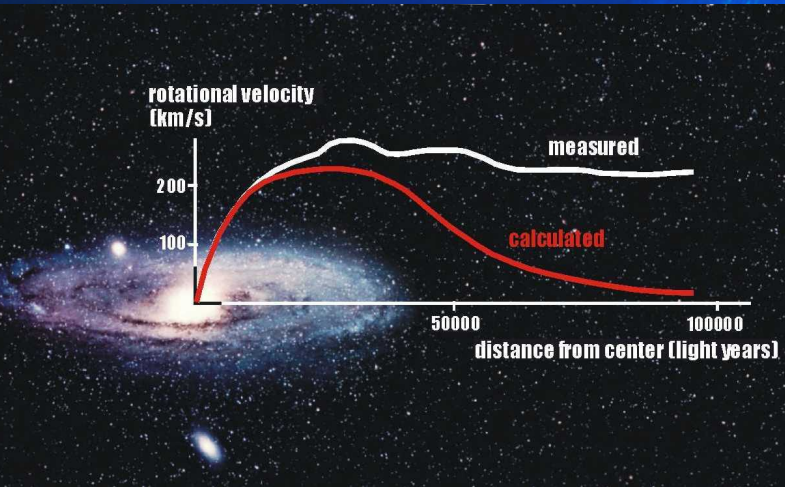


5% Modèle standard

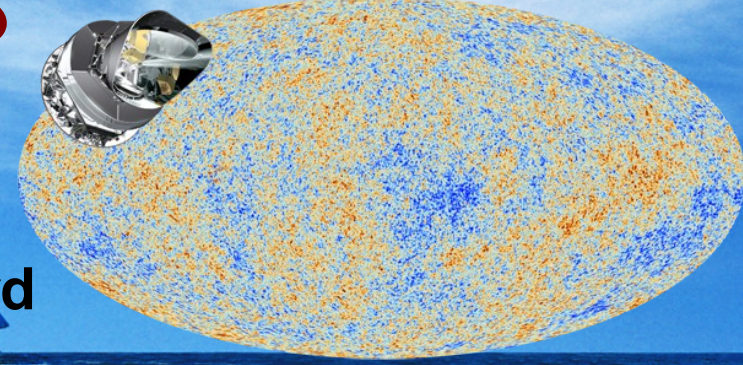
27% Matière noire



- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



# C'est tout ?



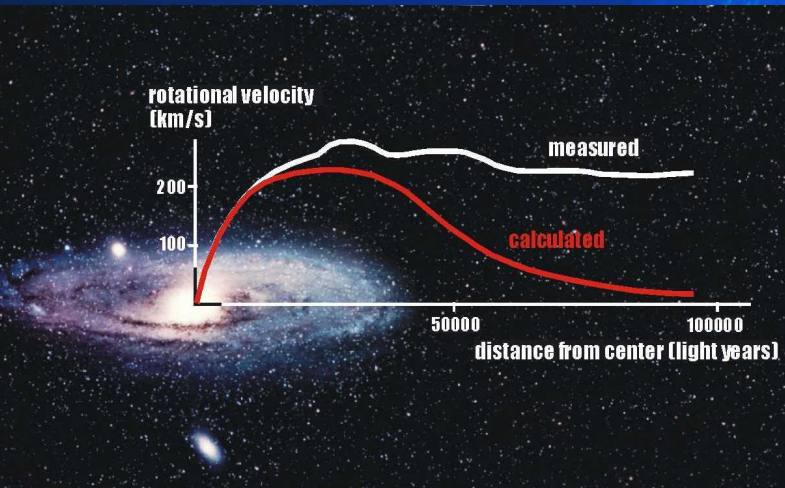
Nous et l'Univers visible



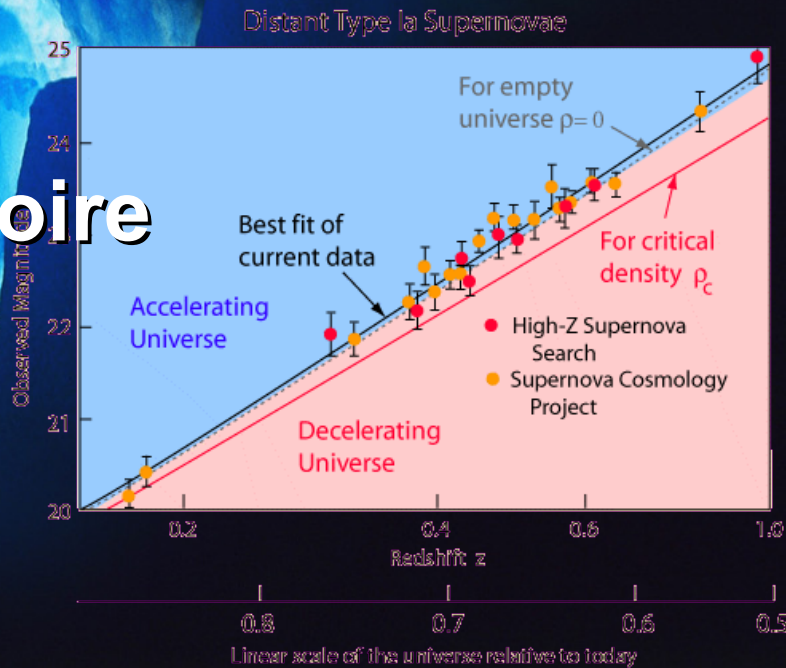
5% Modèle standard

27% Matière noire

- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...)?



68% Énergie noire

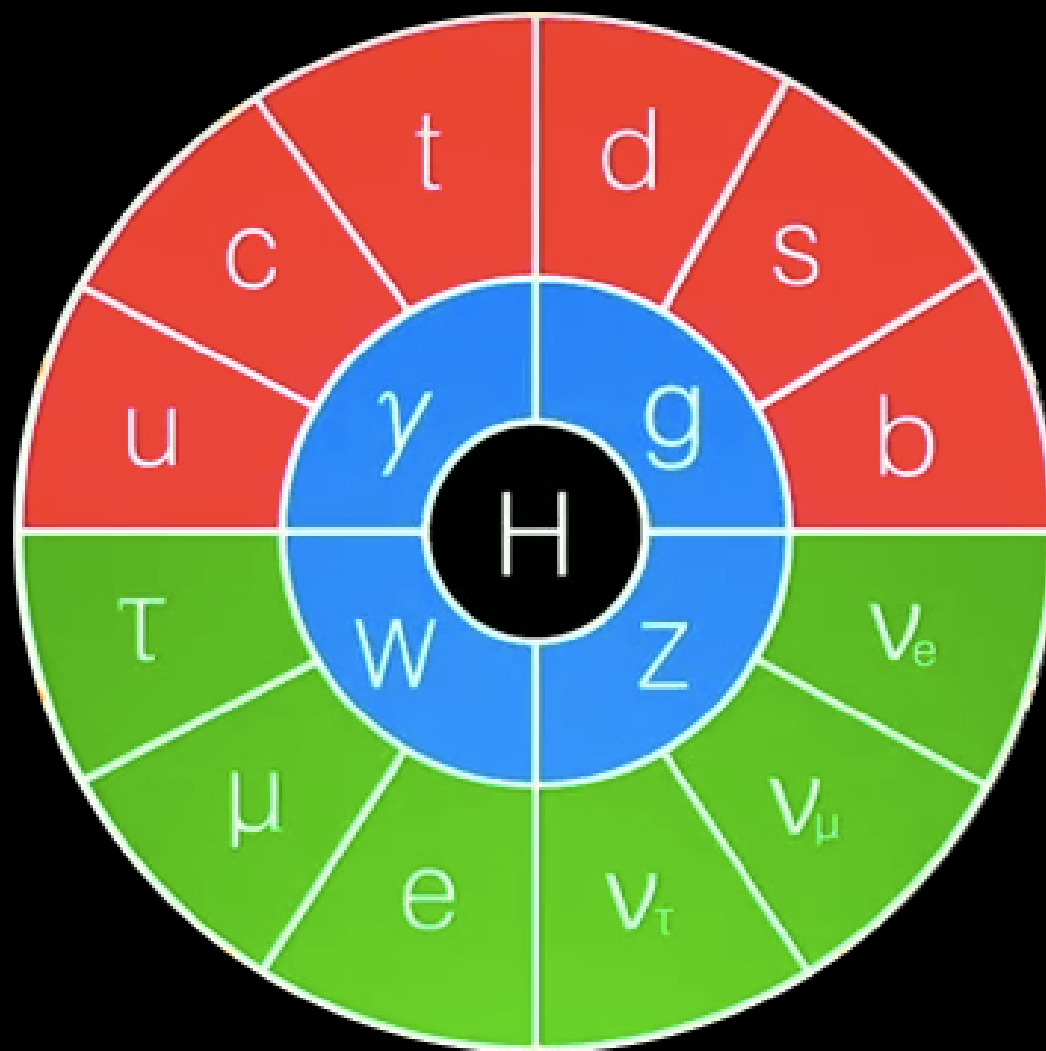


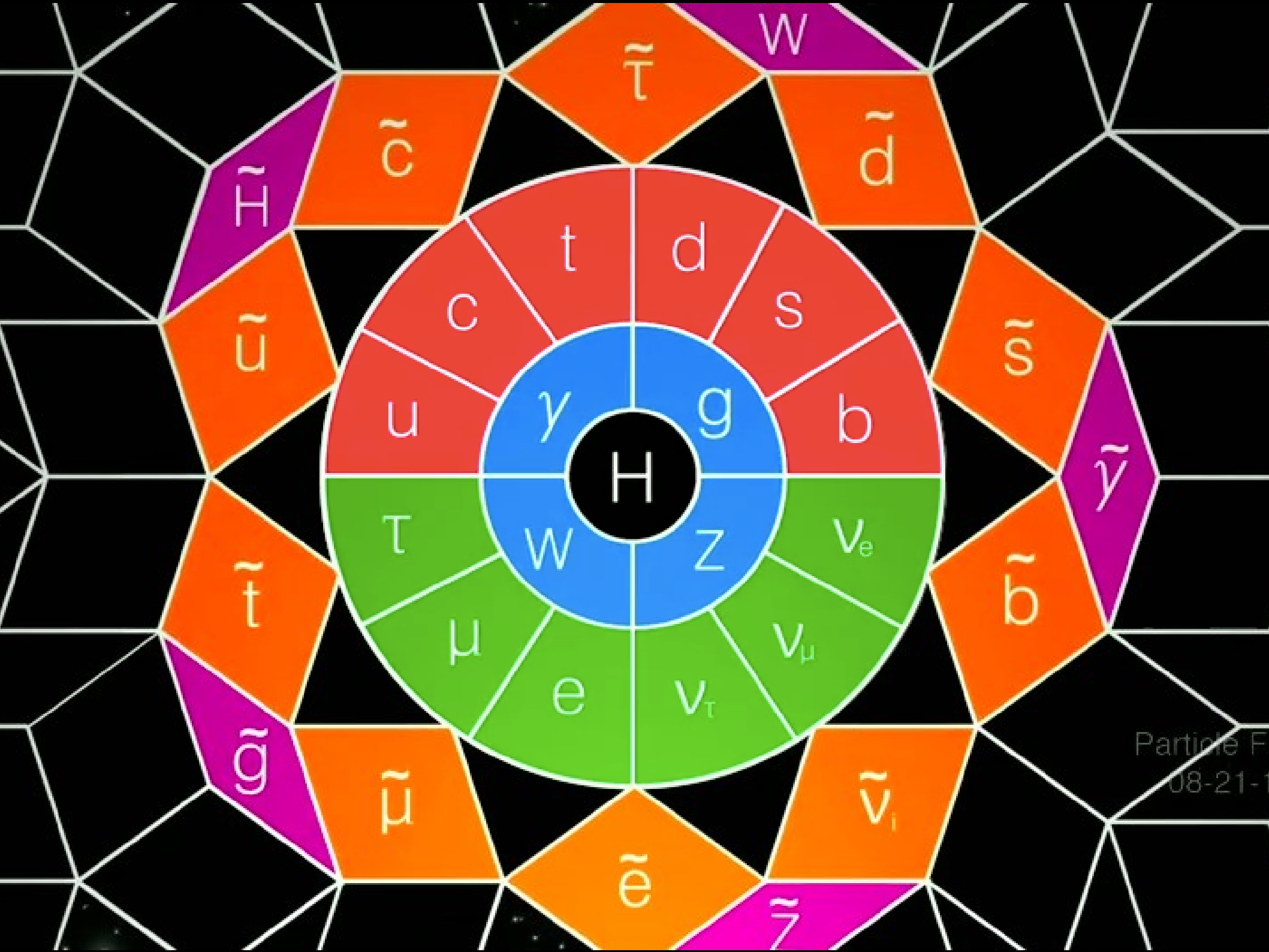
Pas la moindre idée de son origine !



# Autres théories

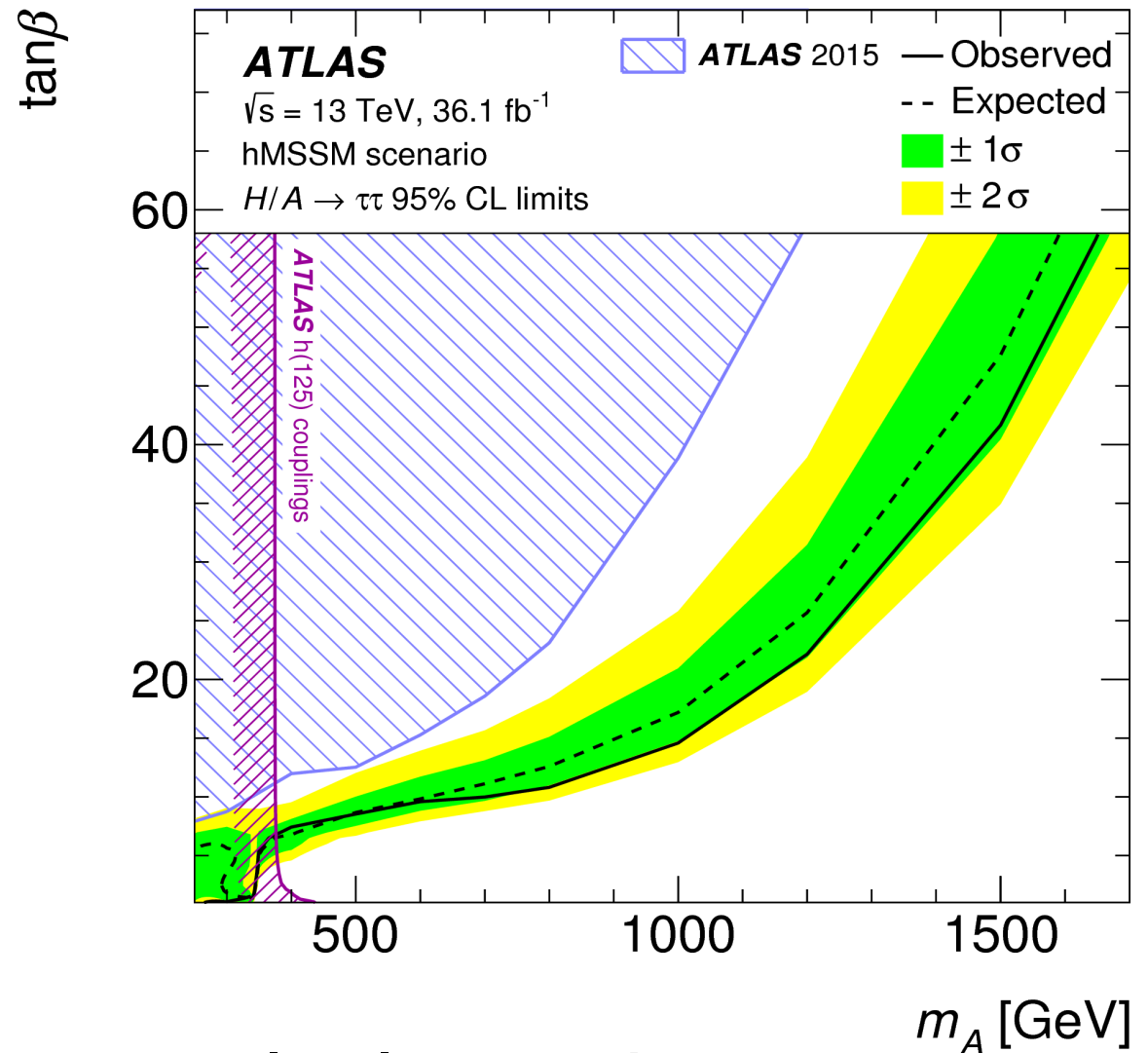
- Le modèle standard n'explique pas tout :
  - ▶ Pourquoi trois familles ?
  - ▶ Pourquoi les particules élémentaires ont des masses si différentes ?
  - ▶ Que sont la matière noire et l'énergie noire ?
  - ▶ Pourquoi l'antimatière a presque disparu ?
- Les théoriciens ne manquent pas d'idées pour le compléter
- Beaucoup de modèles font des prédictions que l'on peut tester au LHC
- Supersymétrie, modèles exotiques, dimensions supplémentaires d'espace, ...
  - ▶ Prédiction de nouvelles particules, ou d'effets sur les phénomènes déjà connus
- Besoin de mesures expérimentales pour orienter les théoriciens





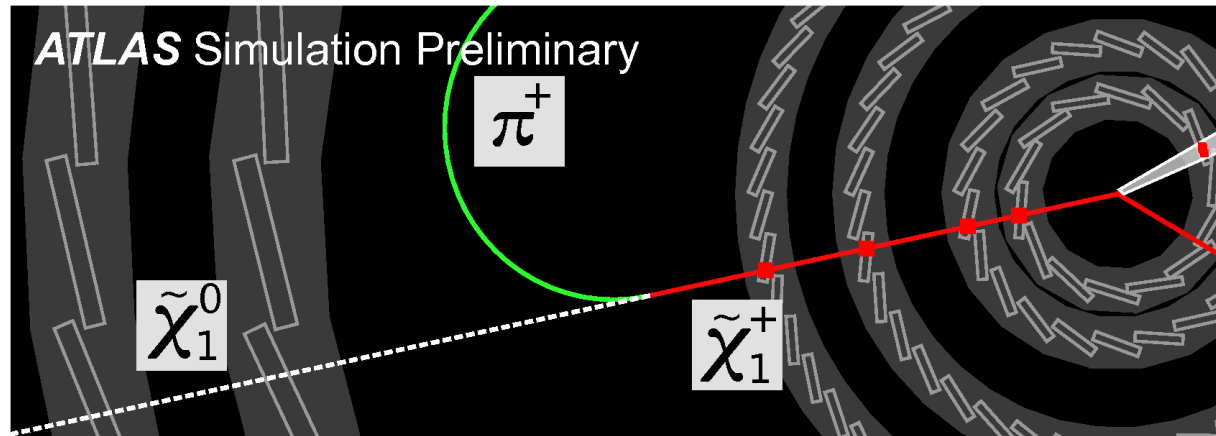
# D'autres bosons de Higgs ?

- Extensions du modèle standard avec 5 bosons de Higgs au lieu d'un
- Apparaît par exemple en supersymétrie
- Nouveaux paramètres



- Jusqu'à maintenant on exclut leur existence
- De moins en moins de recoins encore disponibles

# « Disappearing tracks » / « displaced vertex »

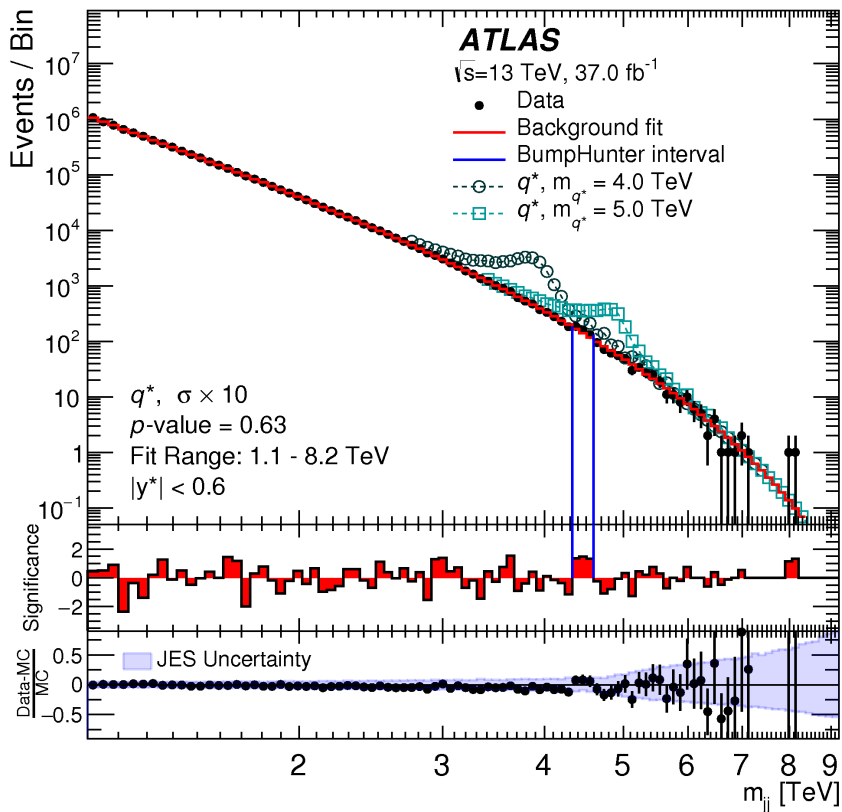


- Nouvelle particule chargée
- Voyage suffisamment longtemps pour laisser une trace dans le détecteur à pixels
- Puis se désintègre : la trace s'arrête
- On a aussi cherché le contraire : une particule neutre qui traverse les premières couches, et des traces qui apparaissent plus loin
- Rien trouvé d'anormal...



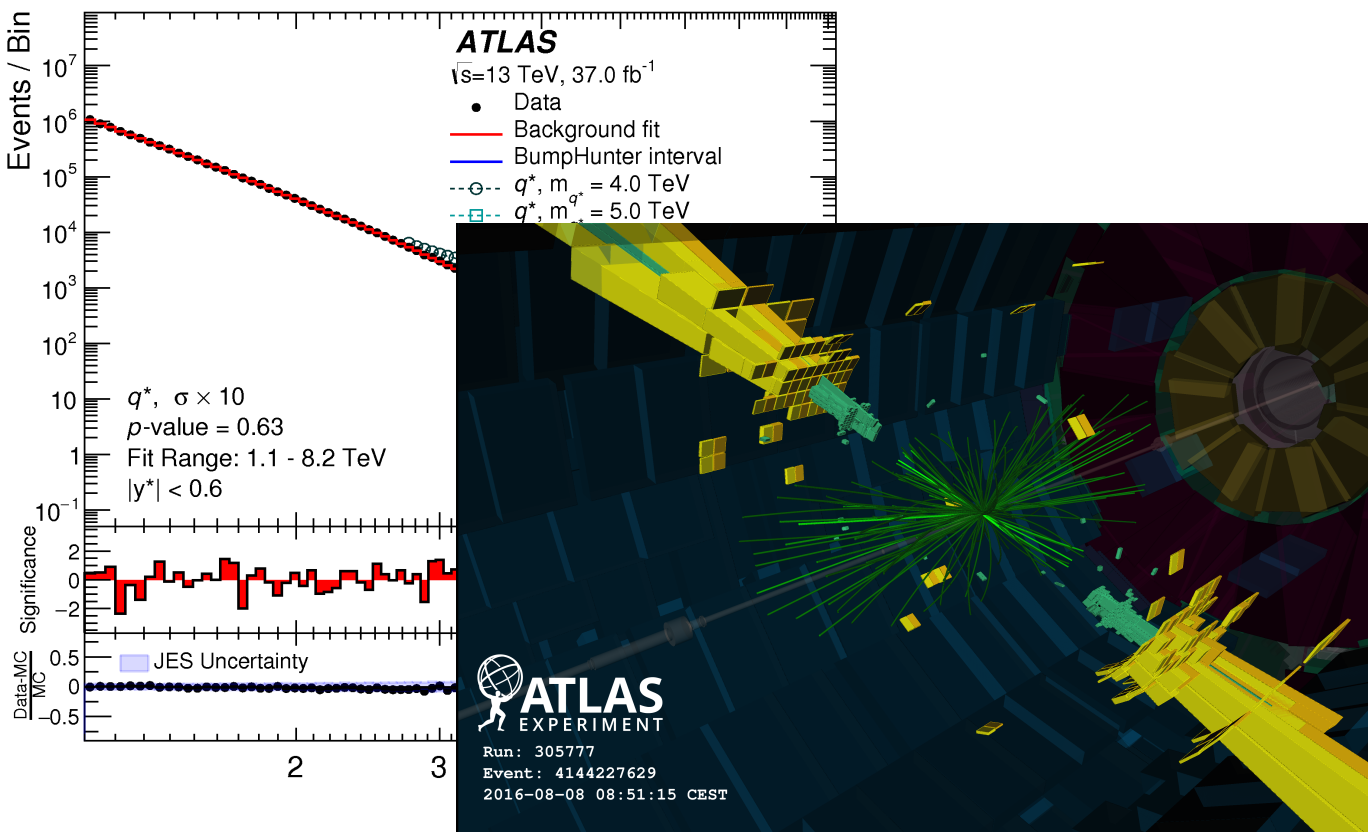
# Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



# Exotiques

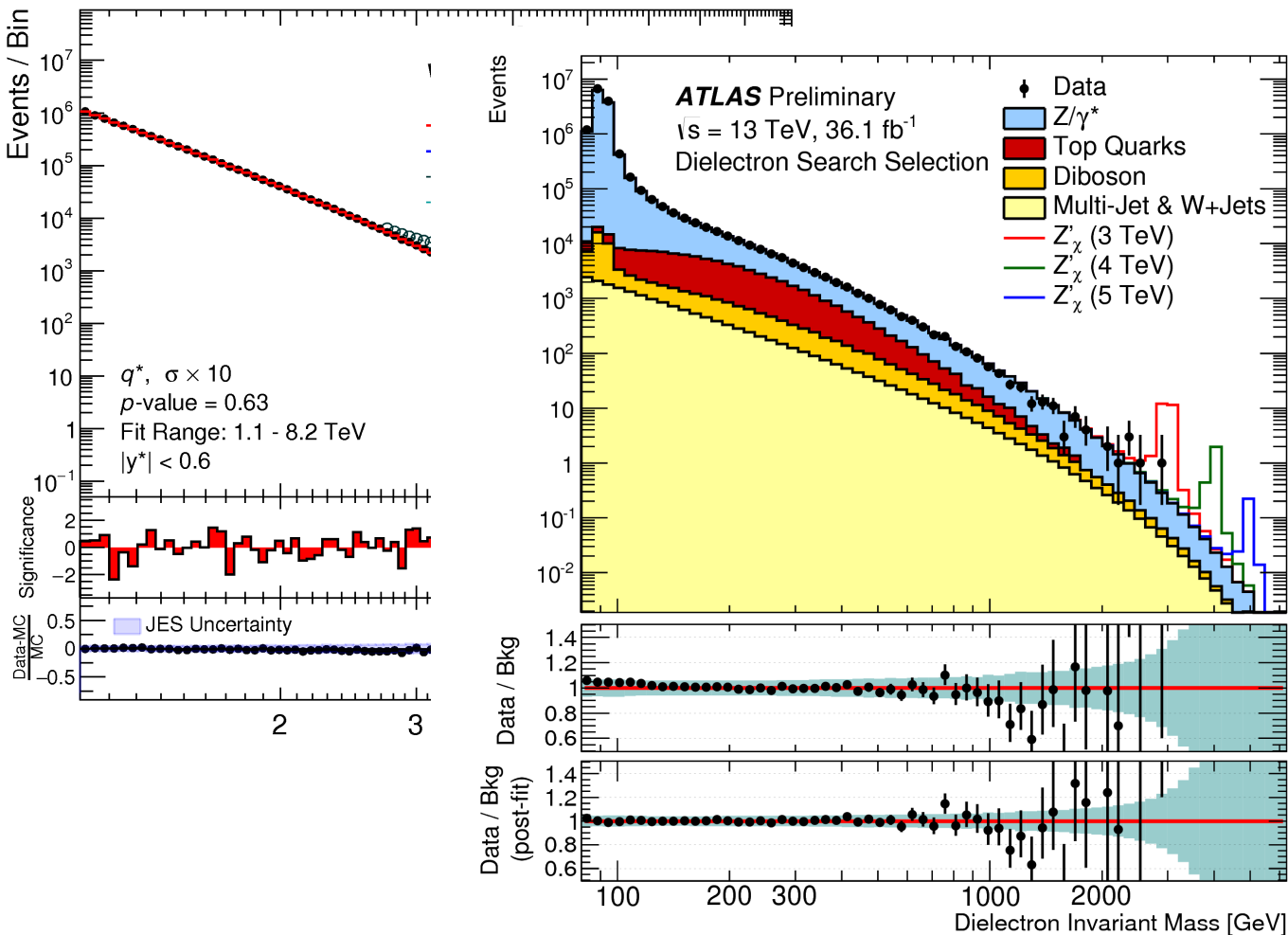
- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...





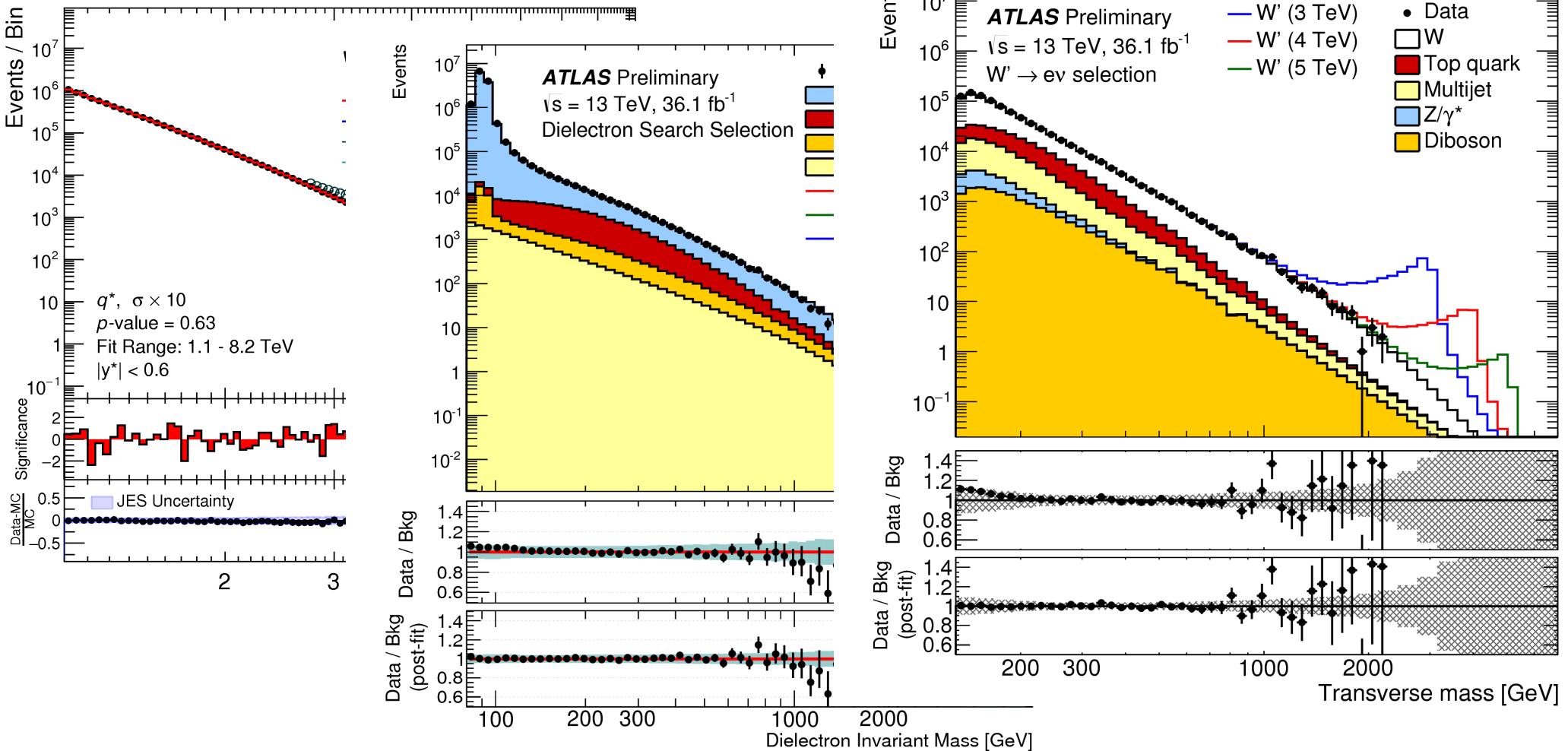
# Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



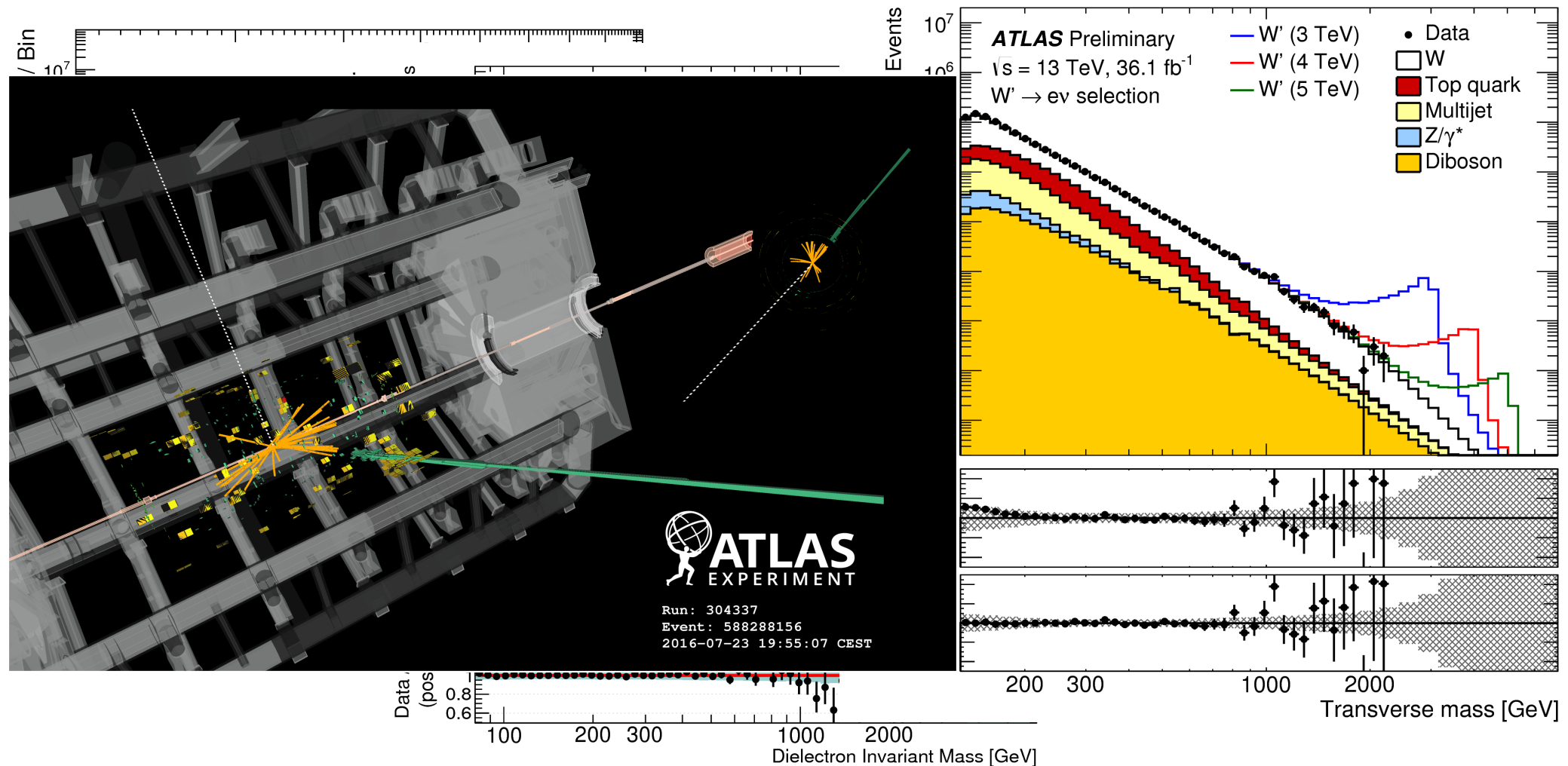
# Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



# Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



# Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: July 2017

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 37.0) \text{ fb}^{-1}$

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

Model	$\ell, \gamma$	Jets <sup>†</sup>	$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference		
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	$0 e, \mu$	$1-4 j$	Yes	36.1	$M_D$ 7.75 TeV	$n = 2$	ATLAS-CONF-2017-060
	ADD non-resonant $\gamma\gamma$	$2 \gamma$	-	-	36.7	$M_S$ 8.6 TeV	$n = 3 \text{ HLZ NLO}$	CERN-EP-2017-132
	ADD QBH	-	$2 j$	-	37.0	$M_{\text{th}}$ 8.9 TeV	$n = 6$	1703.09217
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2 j$	-	3.2	$M_{\text{th}}$ 8.2 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$	1606.02265
	ADD BH multijet	-	$\geq 3 j$	-	3.6	$M_{\text{th}}$ 9.55 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$	1512.02586
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	$2 \gamma$	-	-	36.7	$G_{KK} \text{ mass}$ 4.1 TeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 0.1$	CERN-EP-2017-132
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1 e, \mu$	$1 J$	Yes	36.1	$G_{KK} \text{ mass}$ 1.75 TeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 1.0$	ATLAS-CONF-2017-051
2UED / RPP	$1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	13.2	$KK \text{ mass}$ 1.6 TeV	Tier (1,1), $\mathcal{B}(A^{(1,1)} \rightarrow tt) = 1$	ATLAS-CONF-2016-104	
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	36.1	$Z' \text{ mass}$ 4.5 TeV		ATLAS-CONF-2017-027
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	$2 \tau$	-	-	36.1	$Z' \text{ mass}$ 2.4 TeV		ATLAS-CONF-2017-050
	Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	$2 b$	-	3.2	$Z' \text{ mass}$ 1.5 TeV		1603.08791
	Leptophobic $Z' \rightarrow tt$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	3.2	$Z' \text{ mass}$ 2.0 TeV	$\Gamma/m = 3\%$	ATLAS-CONF-2016-014
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1 e, \mu$	-	Yes	36.1	$W' \text{ mass}$ 5.1 TeV		1706.04786
	HVT $V' \rightarrow WW \rightarrow qq\bar{q}q$ model B	$0 e, \mu$	$2 J$	-	36.7	$V' \text{ mass}$ 3.5 TeV	$g_V = 3$	CERN-EP-2017-147
	HVT $V' \rightarrow WH/ZH$ model B	multi-channel	-	-	36.1	$V' \text{ mass}$ 2.93 TeV	$g_V = 3$	ATLAS-CONF-2017-055
LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$1 e, \mu$	$2 b, 0-1 j$	Yes	20.3	$W'_R \text{ mass}$ 1.92 TeV		1410.4103	
LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$0 e, \mu$	$\geq 1 b, 1 J$	-	20.3	$W'_R \text{ mass}$ 1.76 TeV		1408.0886	
CI	CI $qq\bar{q}q$	-	$2 j$	-	37.0	$\Lambda$ 21.8 TeV	$\eta_{LL}^-$	1703.09217
	CI $\ell\ell q\bar{q}$	$2 e, \mu$	-	-	36.1	$\Lambda$ 40.1 TeV	$\eta_{LL}^-$	ATLAS-CONF-2017-027
	CI $uutt$	$2(SS) \geq 3 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	20.3	$\Lambda$ 4.9 TeV	$ C_{RR}  = 1$	1504.04605
DM	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1-4 j$	Yes	36.1	$m_{\text{med}}$ 1.5 TeV	$g_a=0.25, g_s=1.0, m(\chi) < 400 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2017-060
	Vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu, 1 \gamma$	$\leq 1 j$	Yes	36.1	$m_{\text{med}}$ 1.2 TeV	$g_a=0.25, g_s=1.0, m(\chi) < 480 \text{ GeV}$	1704.03848
	VV $\chi\chi$ EFT (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1 J, \leq 1 j$	Yes	3.2	$M_*$ 700 GeV	$m(\chi) < 150 \text{ GeV}$	1608.02372
LQ	Scalar LQ 1 <sup>st</sup> gen	$2 e$	$\geq 2 j$	-	3.2	LQ mass 1.1 TeV	$\beta = 1$	1605.06035
	Scalar LQ 2 <sup>nd</sup> gen	$2 \mu$	$\geq 2 j$	-	3.2	LQ mass 1.05 TeV	$\beta = 1$	1605.06035
	Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	LQ mass 640 GeV	$\beta = 0$	1508.04735
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht + X$	$0 \text{ or } 1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	13.2	T mass 1.2 TeV	$\mathcal{B}(T \rightarrow Ht) = 1$	ATLAS-CONF-2016-104
	VLQ $TT \rightarrow Zt + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 3 j$	Yes	36.1	T mass 1.16 TeV	$\mathcal{B}(T \rightarrow Zt) = 1$	1705.10751
	VLQ $TT \rightarrow Wb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	36.1	T mass 1.35 TeV	$\mathcal{B}(T \rightarrow Wb) = 1$	CERN-EP-2017-094
	VLQ $BB \rightarrow Hb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	B mass 700 GeV	$\mathcal{B}(B \rightarrow Hb) = 1$	1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2/\geq 3 e, \mu$	$\geq 2/\geq 1 b$	-	20.3	B mass 790 GeV	$\mathcal{B}(B \rightarrow Zb) = 1$	1409.5500
	VLQ $BB \rightarrow Wt + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	36.1	B mass 1.25 TeV	$\mathcal{B}(B \rightarrow Wt) = 1$	CERN-EP-2017-094
	VLQ $QQ \rightarrow WqWq$	$1 e, \mu$	$\geq 4 j$	Yes	20.3	Q mass 690 GeV		1509.04261
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2 j$	-	37.0	$q^* \text{ mass}$ 6.0 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$	1703.09127
	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	$1 \gamma$	$1 j$	-	36.7	$q^* \text{ mass}$ 5.3 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$	CERN-EP-2017-148
	Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	$1 b, 1 j$	-	13.3	$b^* \text{ mass}$ 2.3 TeV		ATLAS-CONF-2016-060
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	$1 \text{ or } 2 e, \mu$	$1 b, 2-0 j$	Yes	20.3	$b^* \text{ mass}$ 1.5 TeV	$f_L = f_R = 1$	1510.02664
	Excited lepton $\ell^*$	$3 e, \mu$	-	-	20.3	$\ell^* \text{ mass}$ 3.0 TeV	$\Lambda = 3.0 \text{ TeV}$	1411.2921
	Excited lepton $\nu^*$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$\nu^* \text{ mass}$ 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$	1411.2921
Other	LRSM Majorana $\nu$	$2 e, \mu$	$2 j$	-	20.3	$N^0 \text{ mass}$ 2.0 TeV	$m(W_R) = 2.4 \text{ TeV, no mixing}$	1506.06020
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2,3,4 e, \mu$ (SS)	-	-	36.1	$H^{\pm\pm} \text{ mass}$ 870 GeV	DY production	ATLAS-CONF-2017-053
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{\pm\pm} \text{ mass}$ 400 GeV	DY production, $\mathcal{B}(H_L^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau) = 1$	1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1 e, \mu$	$1 b$	Yes	20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$	1410.5404
	Multi-charged particles	-	-	-	20.3	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q  = 5e$	1504.04188
	Magnetic monopoles	-	-	-	7.0	monopole mass 1.34 TeV	DY production, $ g  = 1g_D, \text{ spin } 1/2$	1509.08059

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

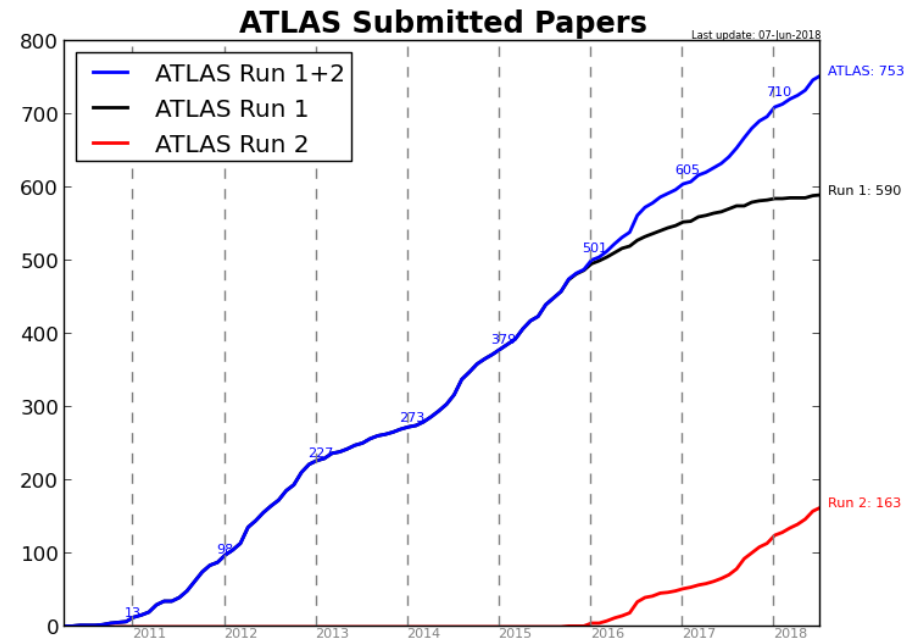
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

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

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

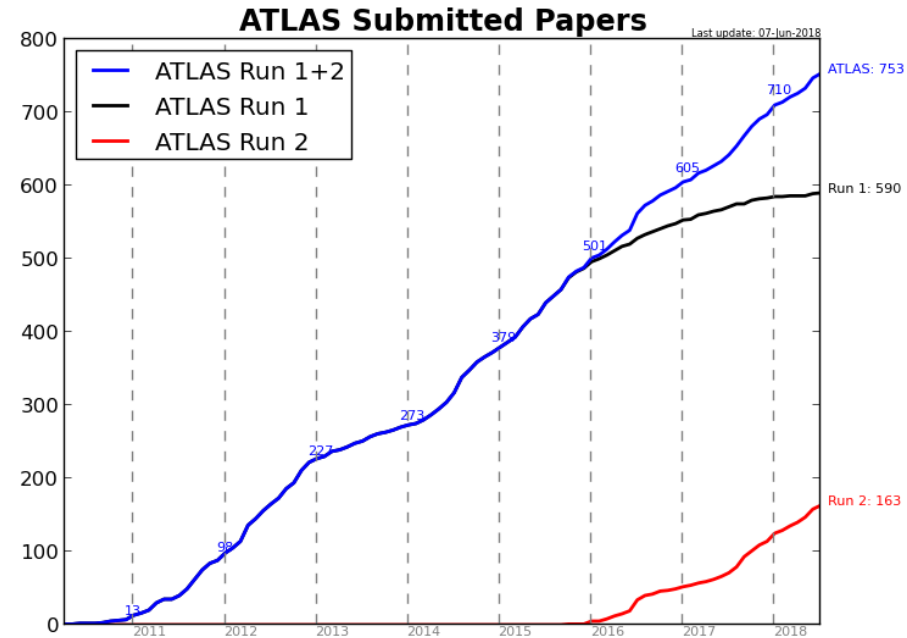
# Publications

- ATLAS :
  - ▶ ~750 publications
  - ▶ > 900 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ ~400 publications
- ALICE :
  - ▶ ~200 publications



# Publications

- ATLAS :
  - ▶ ~750 publications
  - ▶ > 900 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ ~400 publications
- ALICE :
  - ▶ ~200 publications



**Toutes les publications du  
LHC sont accessibles  
gratuitement par tous**

**Forte pression du CERN sur les journaux :  
Open Access**

# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?



# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## LHC Saison 2 :

- Étude des propriétés du boson observé
  - ▶ Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
  - ▶ Signe de nouvelle physique ?



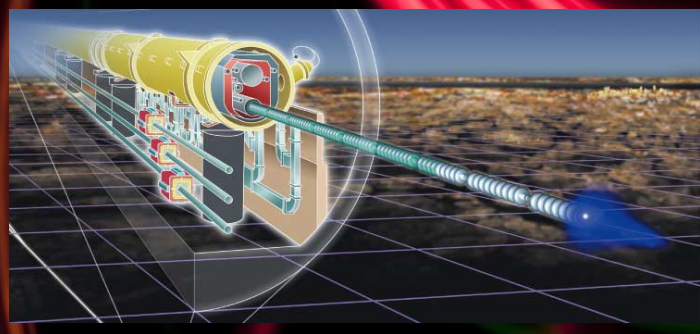
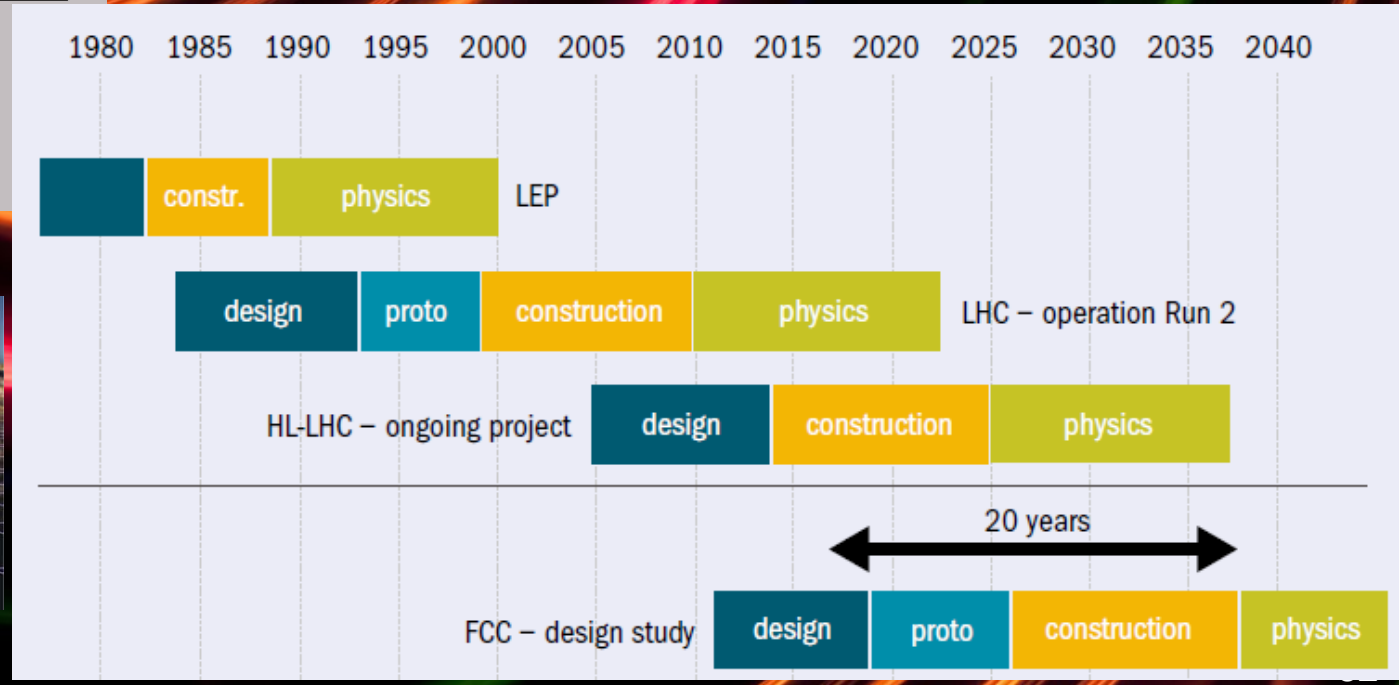
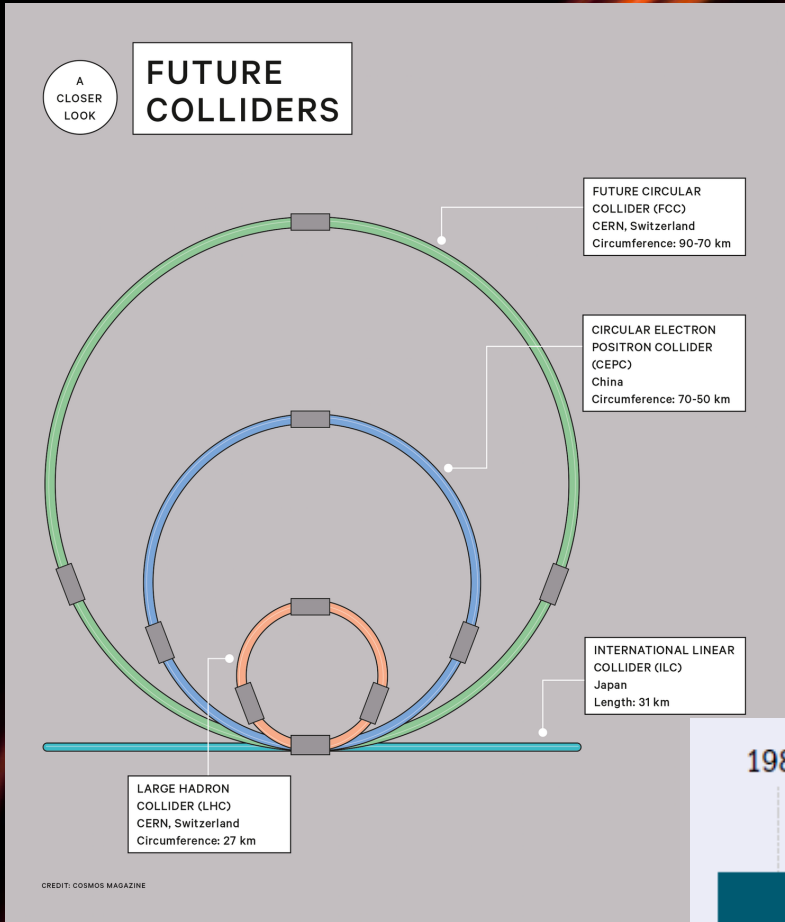
# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## LHC Saison 2 :

- Étude des propriétés du boson observé
  - Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
  - Signe de nouvelle physique ?
- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- On espère des surprises !

# Et après ?



# Liens

ATLAS@home



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

ATLAS grand public



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

ATLAS en direct

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

ATLAS sur



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

ATLAS sur



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

ATLAS sur



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

ATLAS sur



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

Site français du



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

Le CPPM



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

Le CERN



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

Le CERN sur



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

Nouvelle affiche du SM

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