

# Nouvelles du LHC

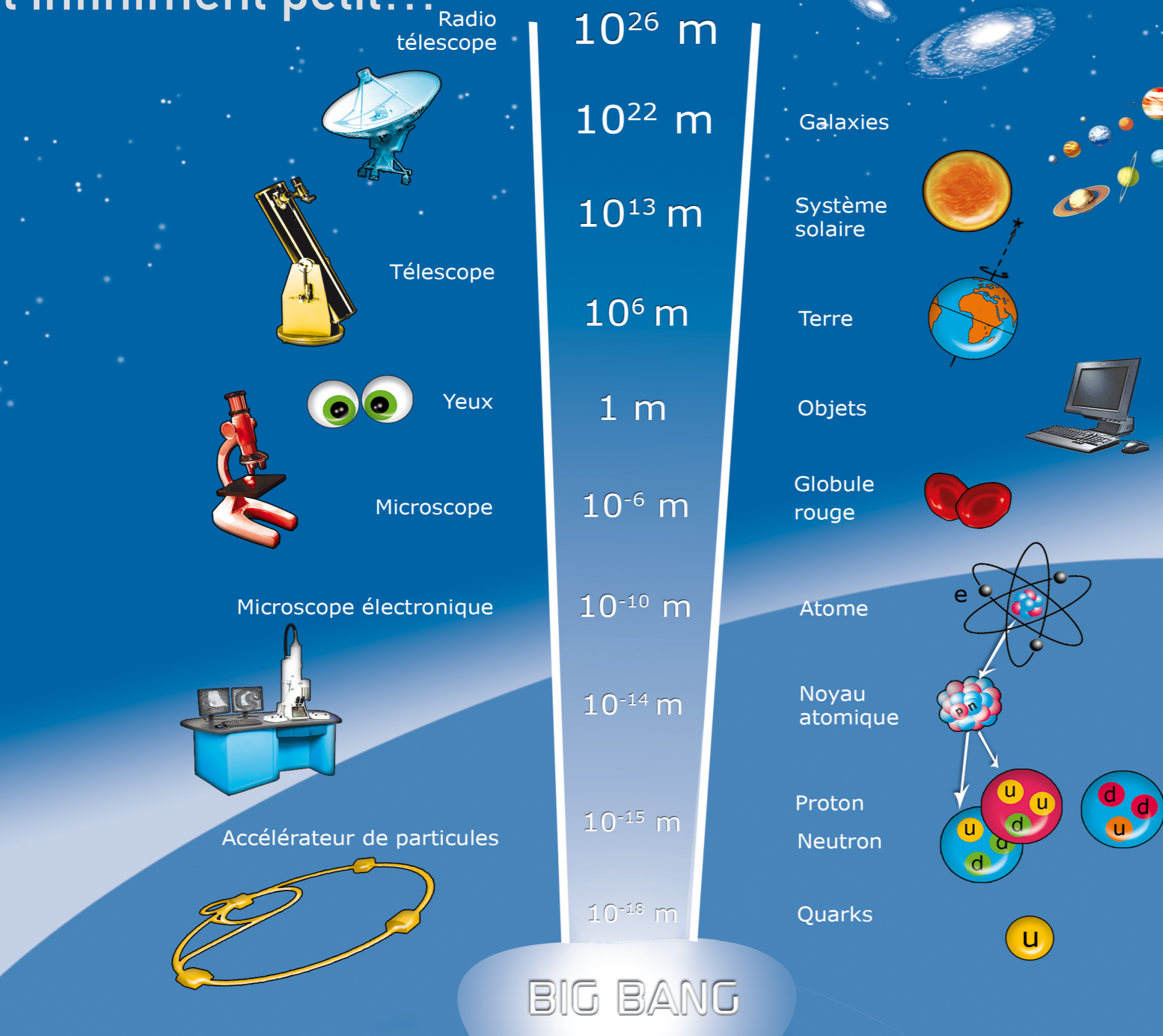
**Dimitris Varouchas**  
(LAL, Orsay - IN2P3/CNRS/Univ. Paris-Saclay)

[varouchas@lal.in2p3.fr](mailto:varouchas@lal.in2p3.fr)

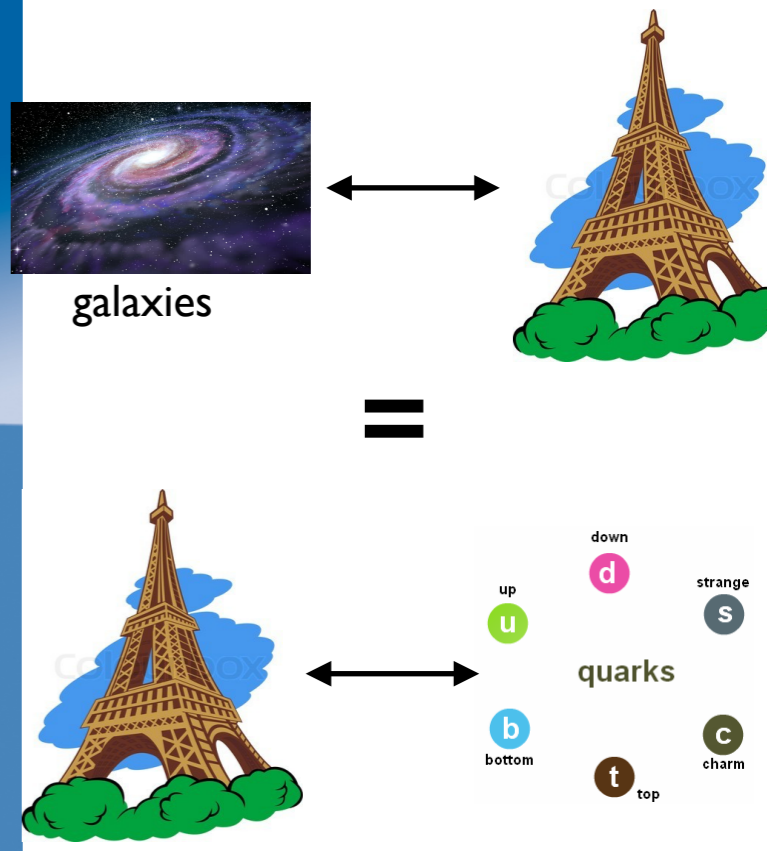
\* remerciements à : Nathalie Besson, David Rousseau, Sandrine Laplace

# Une plongée dans l'infiniment petit...

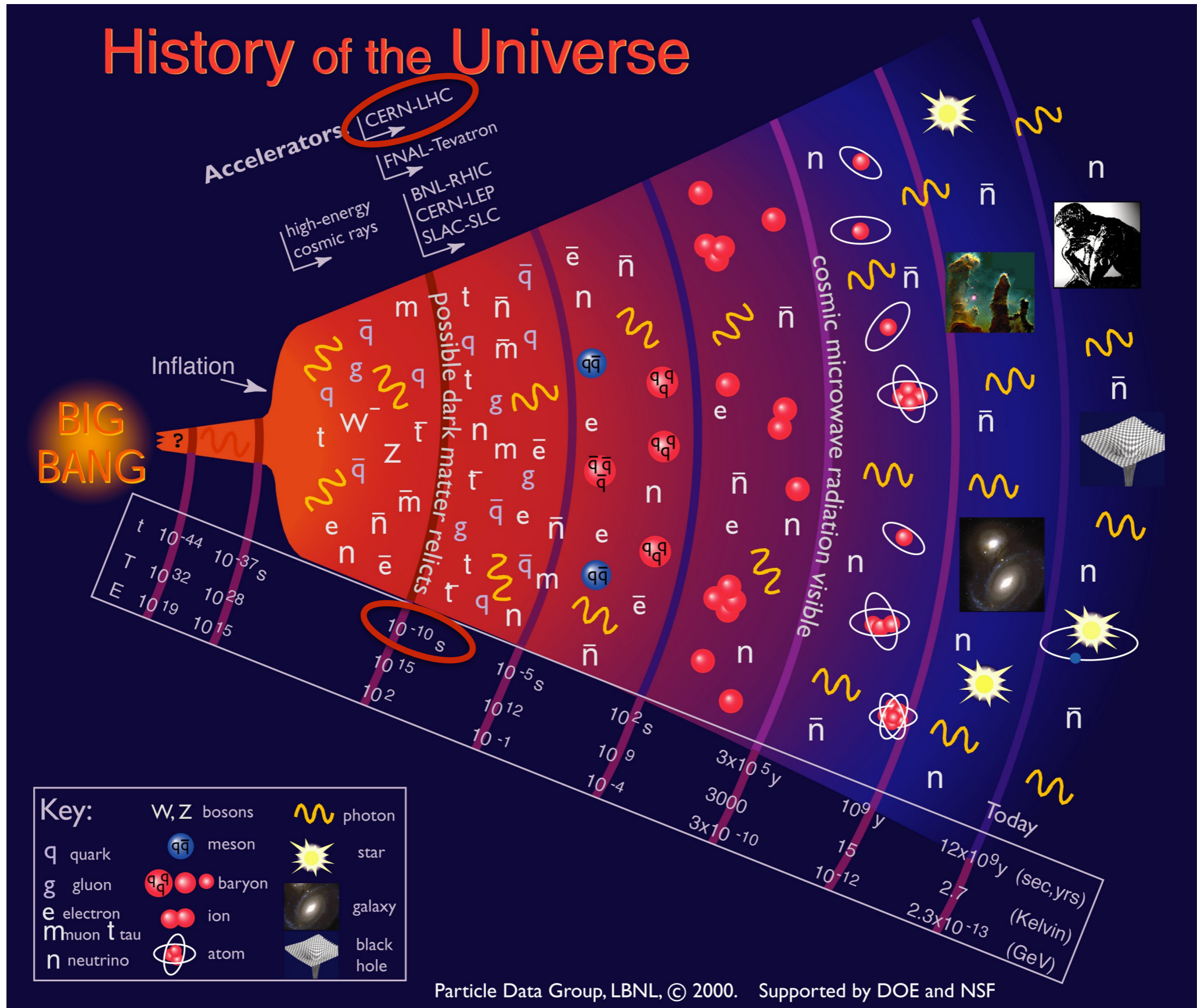
# UNIVERS



## Différence de taille



Faire des expériences dans les mêmes conditions que  $10^{-10}$  s après le Big Bang !



# Le Modèle Standard

- Le **monde microscopique** est constitué de **particules** de matière, qui interagissent entre elles via des **forces (interactions)**
- La **théorie** décrivant la **matière** et ses **interactions** est le **Modèle Standard**

	Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions	boson de masse
	I	II	III		
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 <b>u</b> up	1.27 GeV +2/3 1/2 <b>c</b> charm	171.2 GeV +2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon	125 GeV 0 0 <b>H</b> boson de Higgs
	4.8 MeV -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 GeV -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon	
LEPTONS	<2.2 eV 0 1/2 <b><math>\nu_e</math></b> neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 <b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 <b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 <b><math>Z^0</math></b> boson Z	
	511 KeV -1 1/2 <b>e</b> électron	105.7 MeV -1 1/2 <b><math>\mu</math></b> muon	1.777 GeV -1 1/2 <b><math>\tau</math></b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> bosons W	
				<b>BOSONS DE JAUGE</b>	

nom	spin	charge électrique	masse	symbole
	0	0	125 GeV	<b>H</b>
	0	0		<b>H</b>
	0	0		<b>H</b>
	1			<b>H</b>
	1			<b>H</b>

# Le Modèle Standard

## Quarks



Up



Down



Charm



Strange



Top



Beauty

## Leptons



Electron



Neutrino



Muon



Neutrino Muon



Tau



Neutrino Tau

## Bosons



Photon



Gluon



Z<sup>0</sup>



W<sup>-</sup>



W<sup>+</sup>



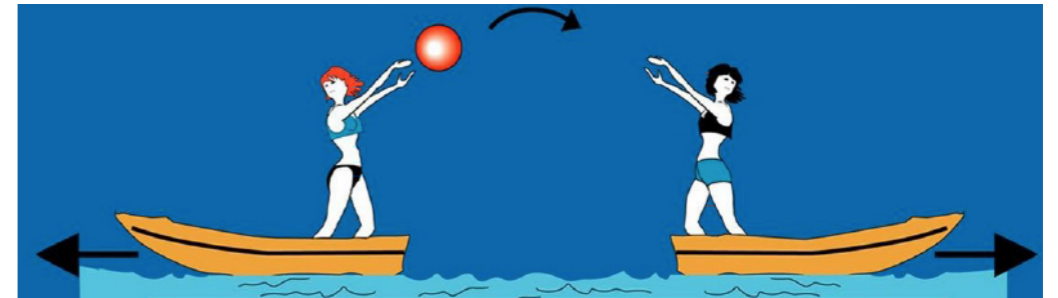
Higgs



Graviton

# Les Interactions

- **Quatre interactions** décrivent le monde connu, et procèdent (pour 3 d'entre elles) par l'échange de **particules médiatrices**: les **bosons de jauge**



Force	Intensité relative	Bosons de jauge	Ex. de phénomènes
Forte	1	8 gluons	Liaison des quarks dans les noyaux
Electromagnétique	$10^{-2}$	photon	Lumière, électricité, magnétisme
Faible	$10^{-14}$	bosons intermédiaires ( $W^+, W^-, Z^0$ )	Radioactivité, combustion du soleil
Gravité	$10^{-38}$	? graviton ?	Pesanteur, marée, trajectoire des planètes

# Le "problème" de la masse

		Particules de matière (fermions)			(Bosons de jauge)
		I	II	III	Particules d'interactions
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 u up	1.27 GeV +2/3 1/2 c charm	171.2 GeV +2/3 1/2 t top	0 0 1 $\gamma$ photon	
	4.8 MeV -1/3 1/2 d down	104 GeV -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon	
LEPTONS	<2.2 eV 0 1/2 $\nu_e$ neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 $\nu_\mu$ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 $\nu_\tau$ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 Z <sup>0</sup> boson Z	
	511 KeV -1 1/2 e électron	105.7 MeV -1 1/2 $\mu$ muon	1.777 GeV -1 1/2 $\tau$ tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 W <sup>±</sup> bosons W	

**Le Modèle Standard impose que les bosons de jauge particules doivent être de masse nulle**

# Le "problème" de la masse

Particules de matière (fermions)				(Bosons de jauge) Particules d'interactions
	I	II	III	
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 <b>u</b> up	1.27 GeV +2/3 1/2 <b>c</b> charm	171.2 GeV +2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon
	4.8 MeV -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 GeV -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
	<2.2 eV 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> boson Z
LEPTONS	511 KeV -1 1/2 <b>e</b> électron	105.7 MeV -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 1/2 <b>τ</b> tau	80.4 GeV ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> bosons W

**Le Modèle Standard impose que les bosons de jauge particules doivent être de masse nulle**

**L'observation montre que certains bosons de jauge ont une masse non nulle !**





# Le "problème" de la masse

Particules de matière (fermions)				(Bosons de jauge) Particules d'interactions
	I	II	III	
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 <b>u</b> up	1.27 GeV +2/3 1/2 <b>c</b> charm	171.2 GeV +2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon
	4.8 MeV -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 GeV -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
LEPTONS	<2.2 eV 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> boson Z
	511 KeV -1 1/2 <b>e</b> électron	105.7 MeV -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 1/2 <b>τ</b> tau	80.4 GeV ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> bosons W

**Le Modèle Standard impose que les bosons de jauge particules doivent être de masse nulle**

**L'observation montre que certains bosons de jauge ont une masse non nulle !**

Trois solutions:

- La loi (=le Modèle Standard) est fausse
- Les observations sont mal comprises
- Il faut inventer quelque chose qui réconcilie la loi et les observations

C'est la révolution de ce qu'est la notion de "masse" !

D'où vient la masse des particules élémentaires ?







# Le Boson de Higgs



# Le mécanisme de Higgs

Aux premiers instants de l'univers:

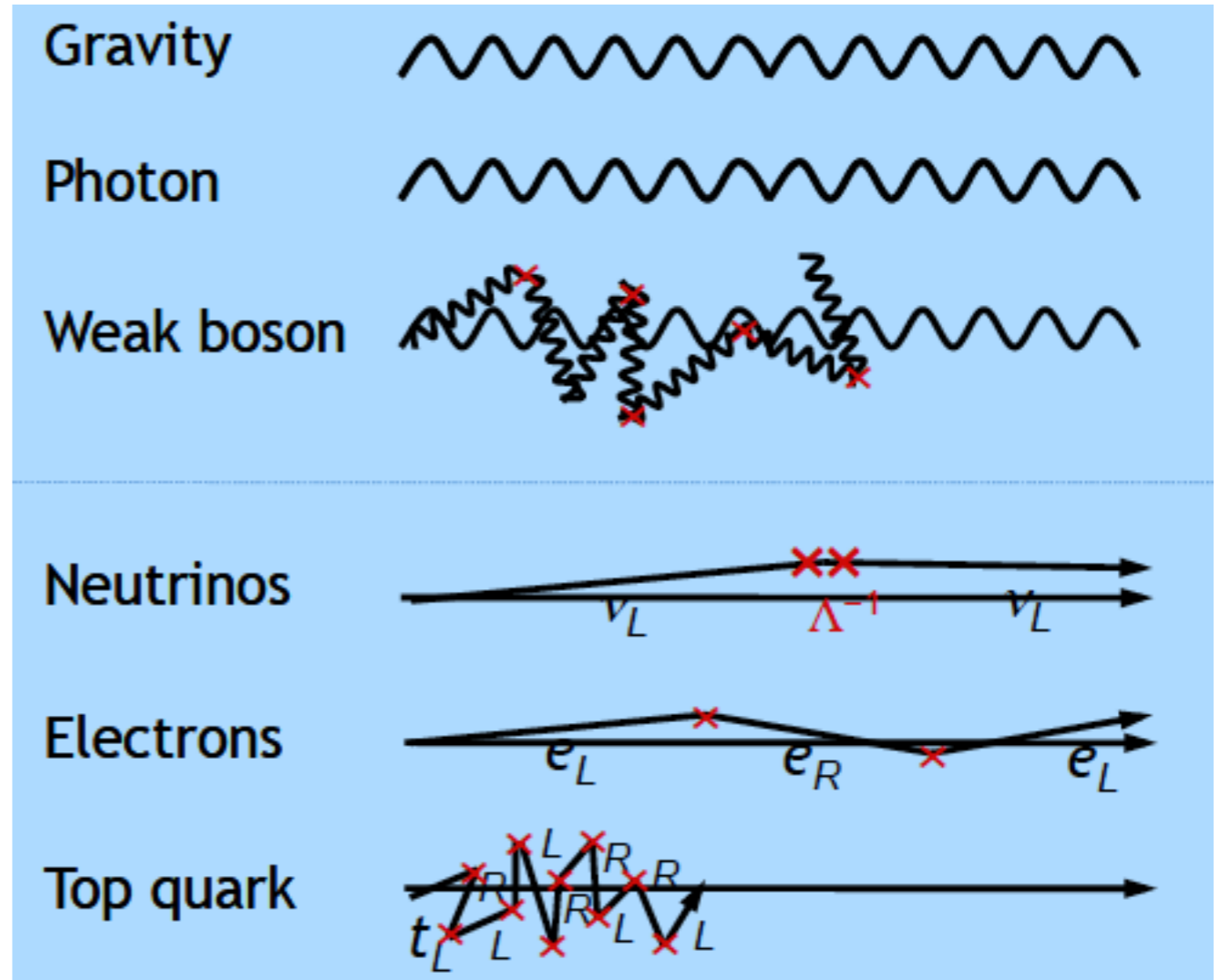
- le **champ** de Higgs **emplit** tout l'espace, mais n'a **aucun effet** sur les autres **particules**
- les particules se déplacent à la vitesse de la lumière (=n'ont pas de masse)

Gravity	
Photon	
Weak boson	
<hr/>	
Neutrinos	
Electrons	
Top quark	

# Le mécanisme de Higgs

Quand l'univers est âgé de  $10^{-10}$  s:

- le champ de Higgs emplie tout l'espace, et acquiert une "valeur dans le vide non nulle"
- certaines particules interagissent alors avec le champ de Higgs, ce qui les ralentit (=elle acquièrent une masse)



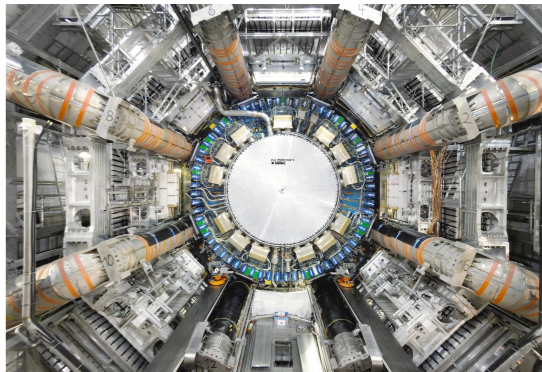
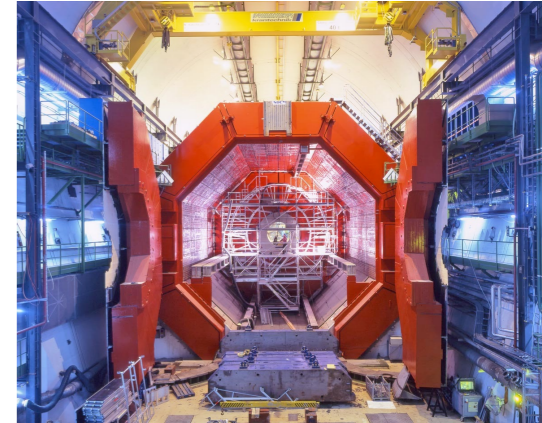
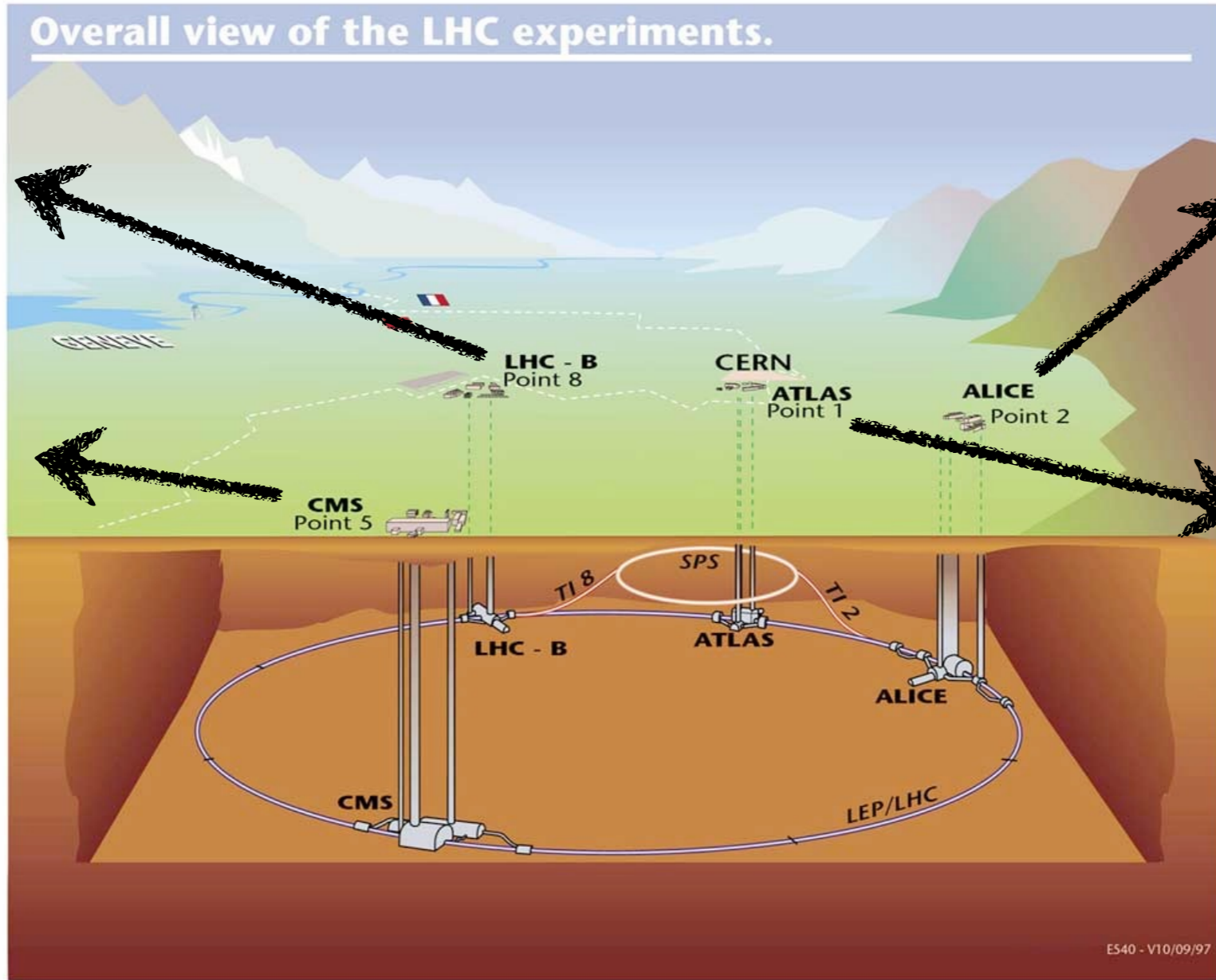
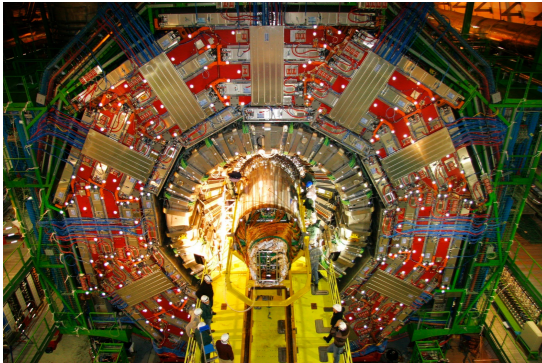
**la masse n'est pas une propriété intrinsèque** des particules, mais résulte d'une **interaction** avec le champ de Higgs qui emplie le vide !!  
**Le Boson de Higgs est la particule correspondant au champ de Higgs.**

# Le mécanisme de Higgs

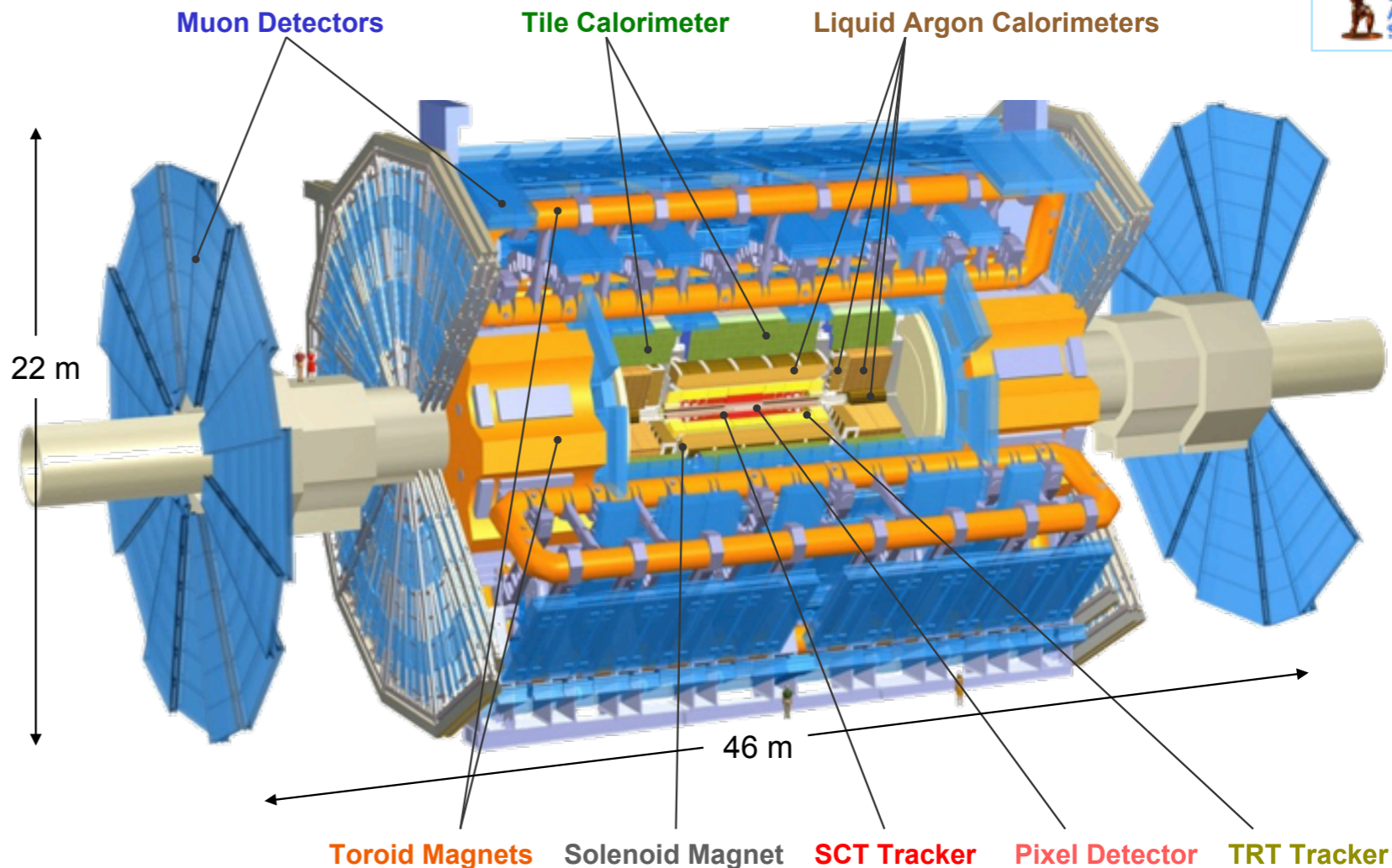
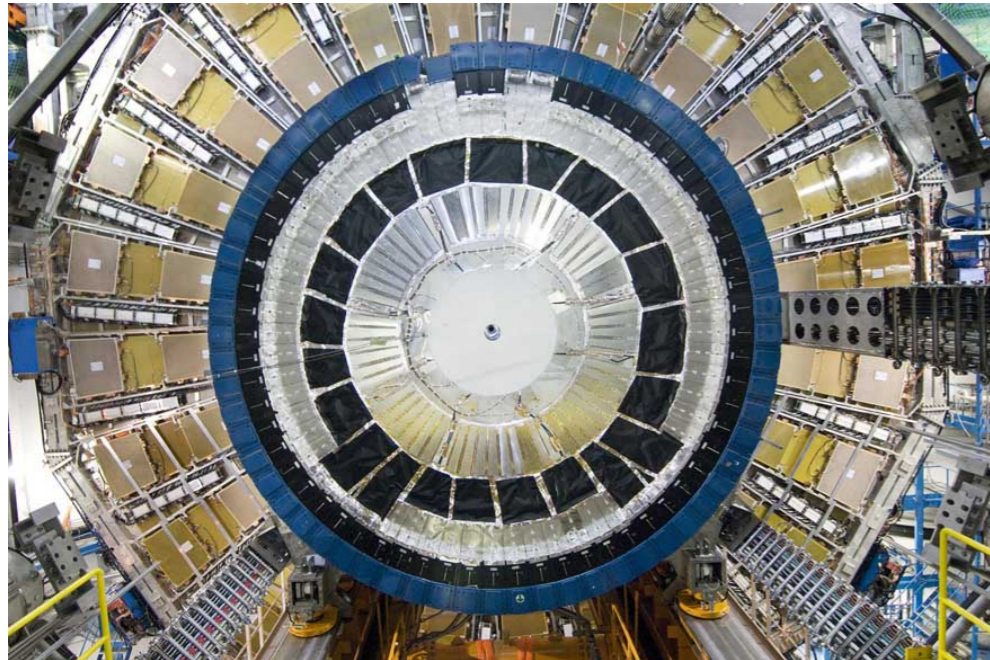
# Le Large Hadron Collider



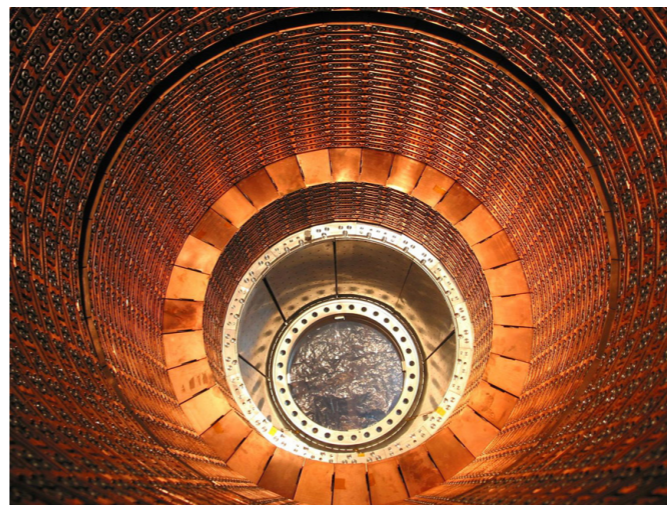
# Les expériences



# ATLAS: Un détecteur typique du LHC

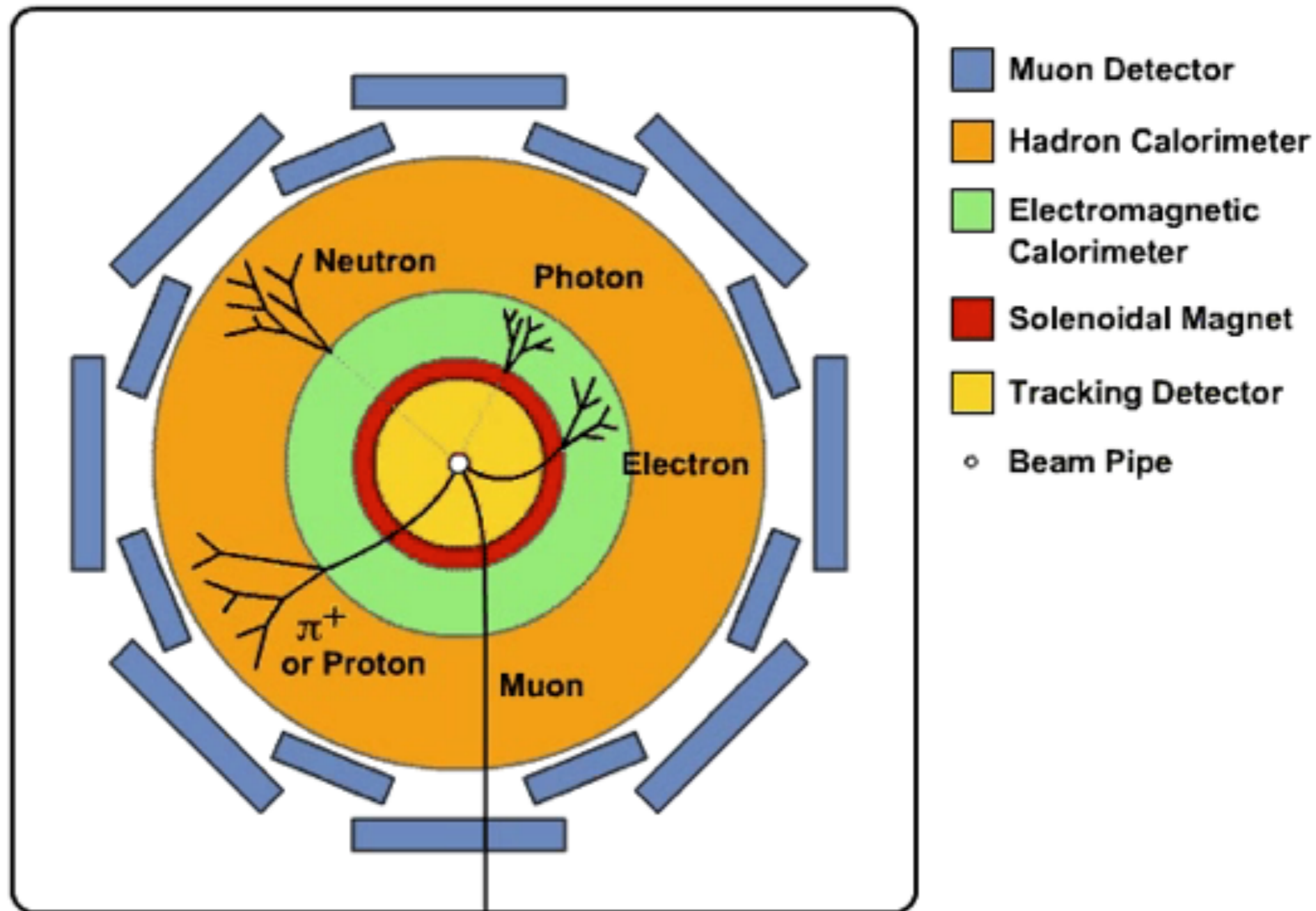


- 22x46 mètres (1/2 Notre Dame de Paris)
- 7000 tonnes (comme la Tour Eiffel)
- 100 million de canaux électroniques
- 3000 km (Paris - Athènes) de cables
- 3000 physiciens provenant de 38 pays, 174 institutions

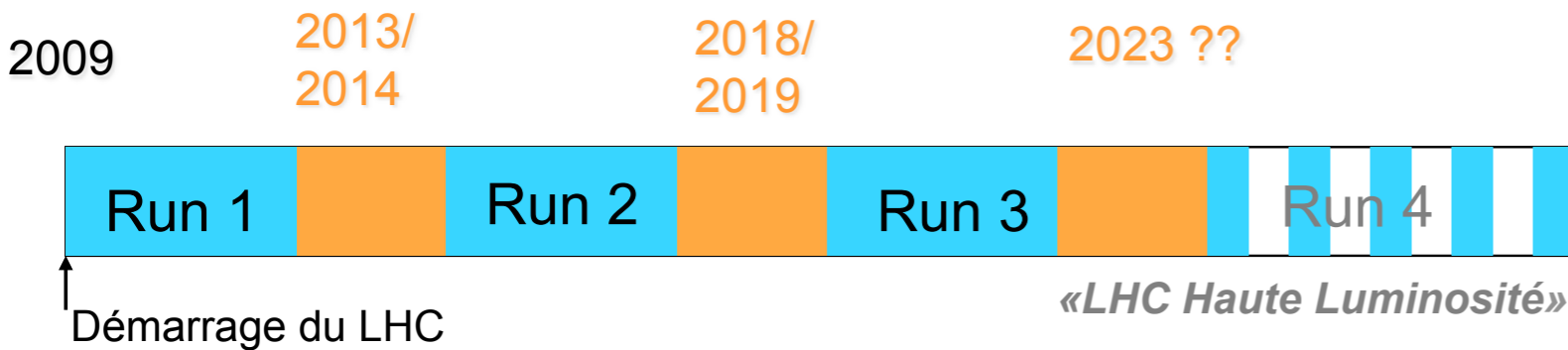




# Comment détecter les particules produites ?



# Le Large Hadron Collider

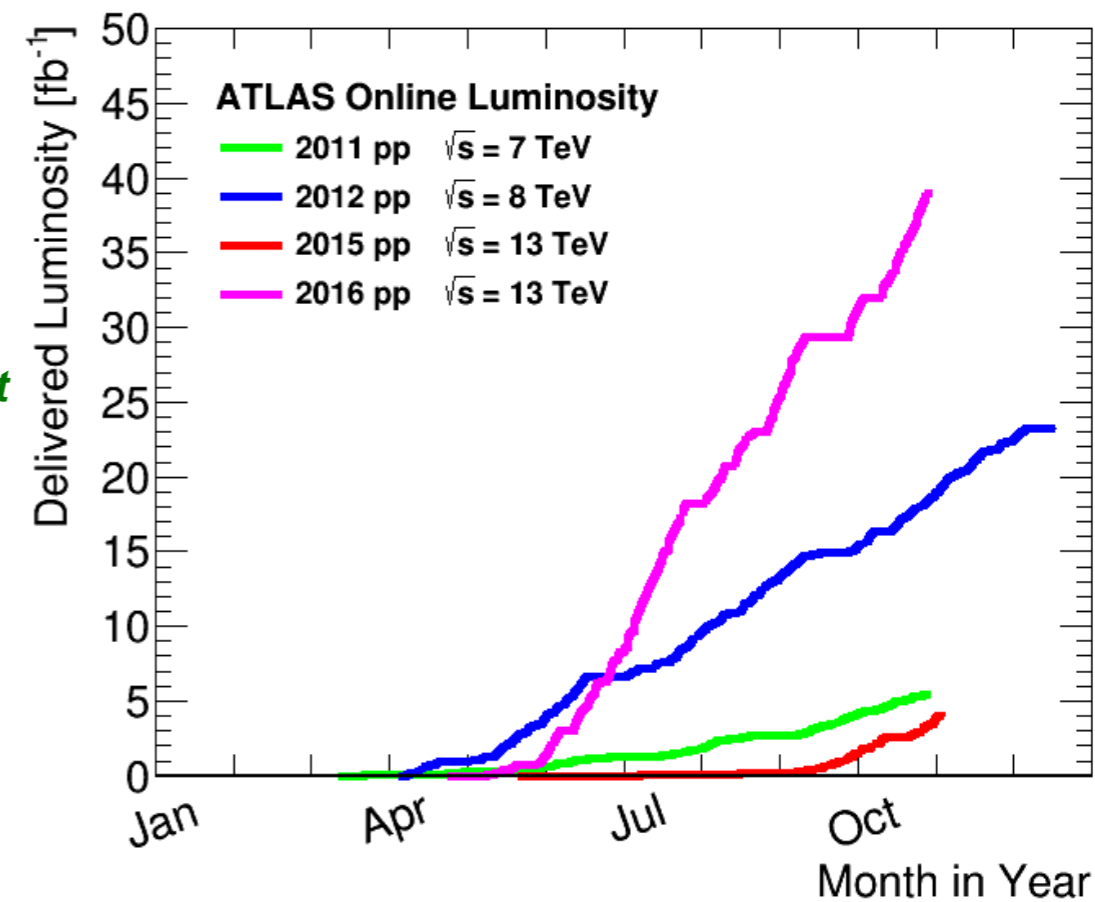


	Énergie totale (TeV)	Nombre (x 10 <sup>14</sup> ) de collisions pp
Run 1	7 et 8	~25
Run 2	13 ou 14	~50
Run 3		200 à 500
Run 4		3000

luminosité et énergie x 2

luminosité x 5 à 10

luminosité x 10

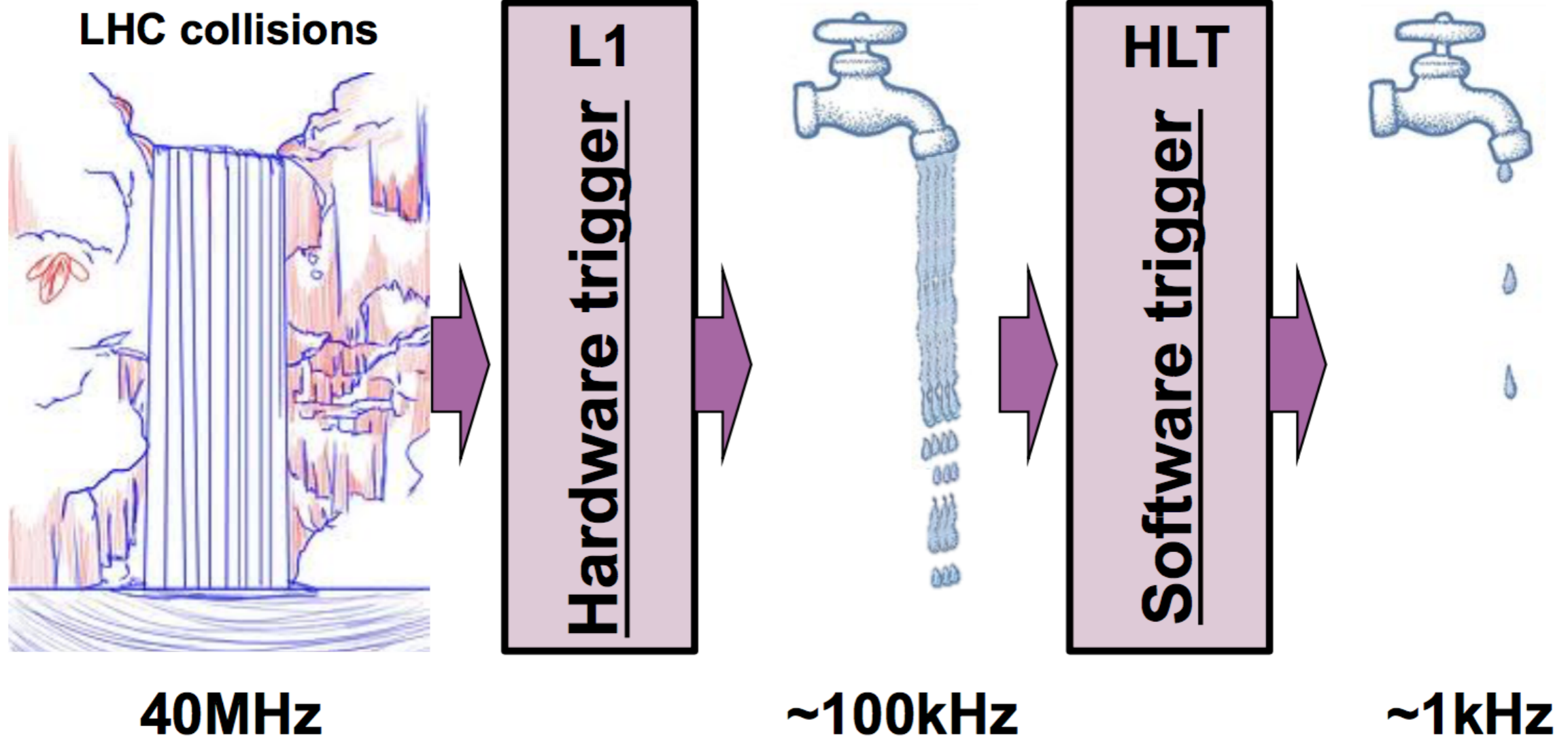


$$N_{events} = \sigma \times L$$

$\sigma$ , section efficace : probabilité d'un événement de physique  
 L, luminosité : moyen de quantifier le nombre des collisions

- Le LHC produit 1 boson de Higgs toutes les 10 s

# “Trigger” les événements intéressants



- Ne garde que 1000 evts/s sur les 40 millions/s produits: le «trigger» doit être 100% efficace sur nos canaux préférés...

- Le LHC produit:

- 1 Higgs toutes les 10 s
- 1  $H \rightarrow \gamma\gamma$  toutes les 10 min
- 1  $H \rightarrow 4l$  toutes les 3 heures...

# Traitement des données



Centre de calcul au CERN

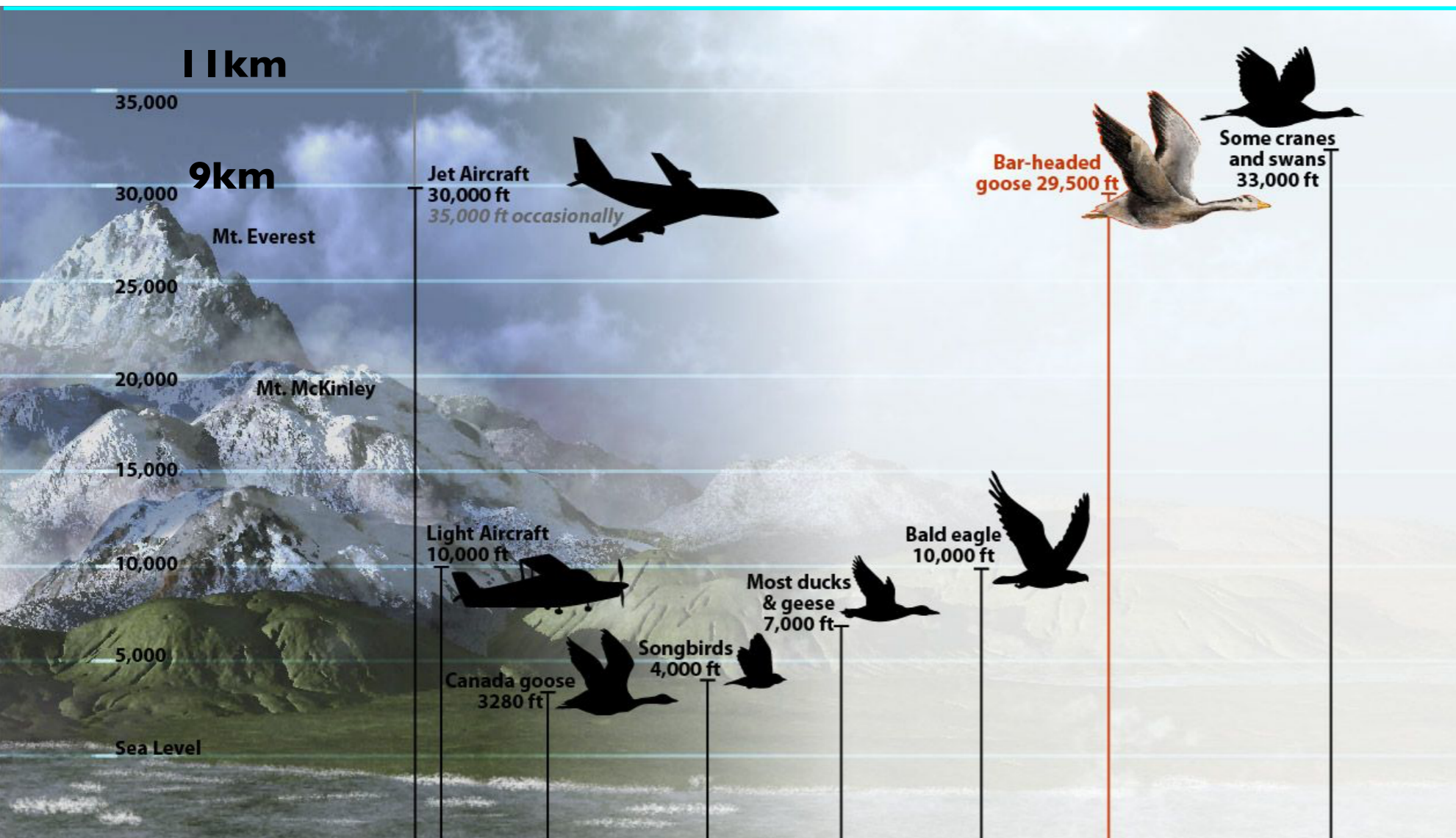


## La Grille (GRID)

- Permet de faire du **calcul distribué**.
- Exploite la puissance de calcul (processeurs, mémoires...) de milliers d'ordinateurs afin de donner l'illusion d'un ordinateur virtuel très puissant.
- Pas de boson de Higgs sans elle...

# Quantité de données gigantesque

12km



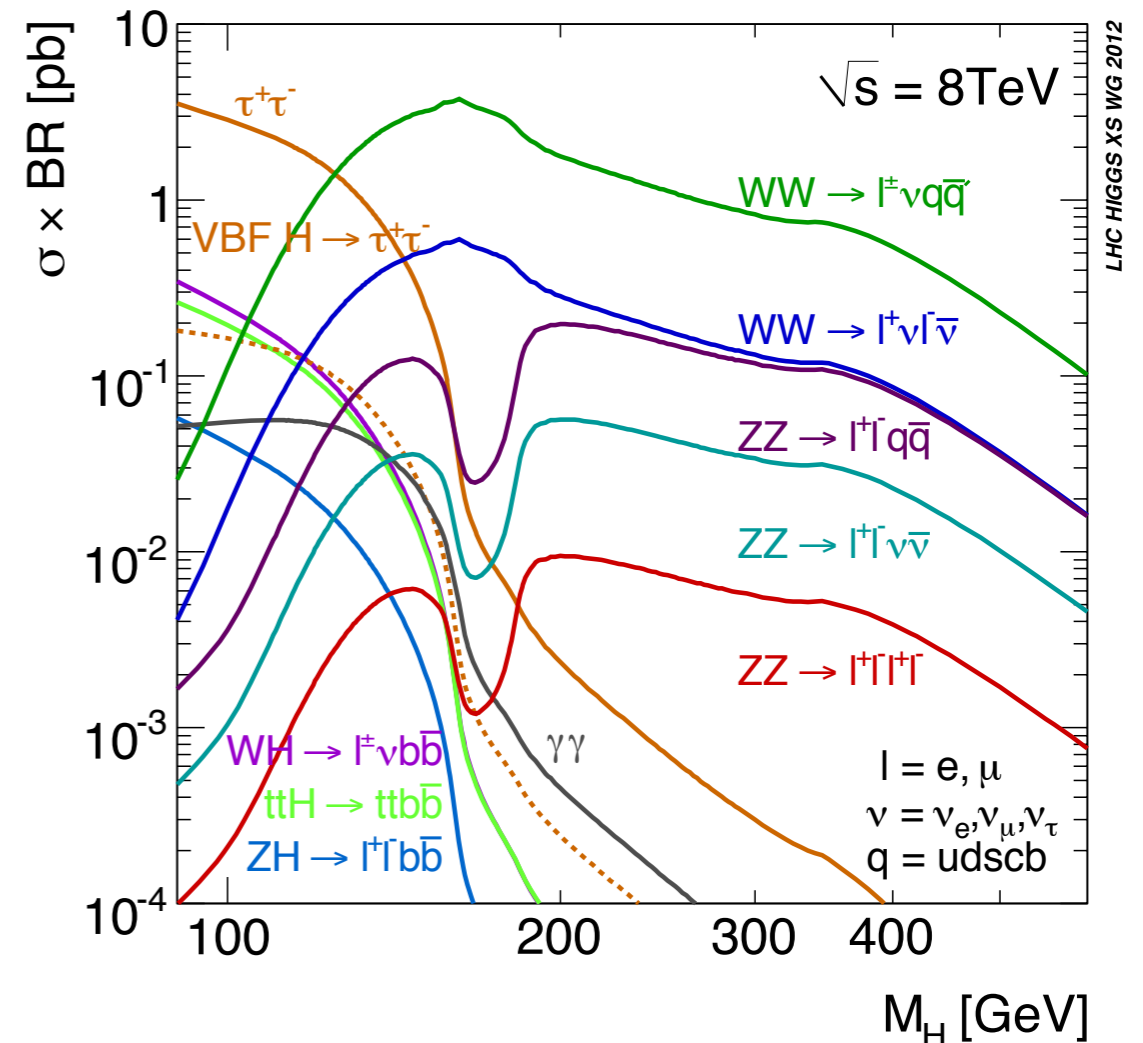
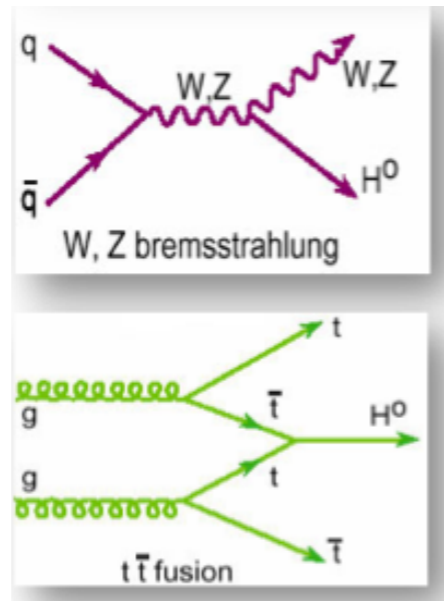
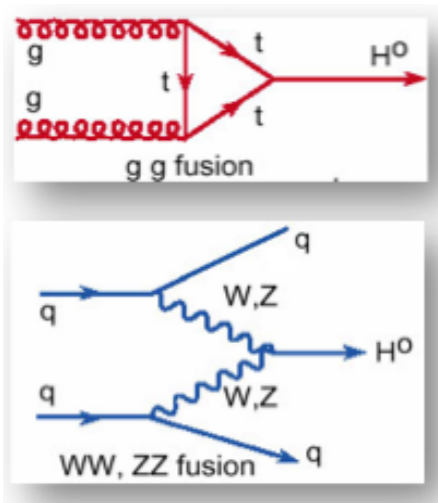
- Prise des données 2015 et 2016 : 1 collision par personne sur la planète (~7.4 milliards)
- 7 PB (  $7 * 10^9$  MB) de données
- Si nous stockions tout en CD, nous aurions un tas de CD d'une hauteur de 12km! ( $10^7$  CD)

# La recherche du Boson de Higgs

Que savions nous du Boson de Higgs avant de le découvrir ?  
Presque tout... sauf sa masse, et la certitude qu'il existe !

Production du Boson de Higgs:  
collisions des constituants des protons  
(gluons, quarks)

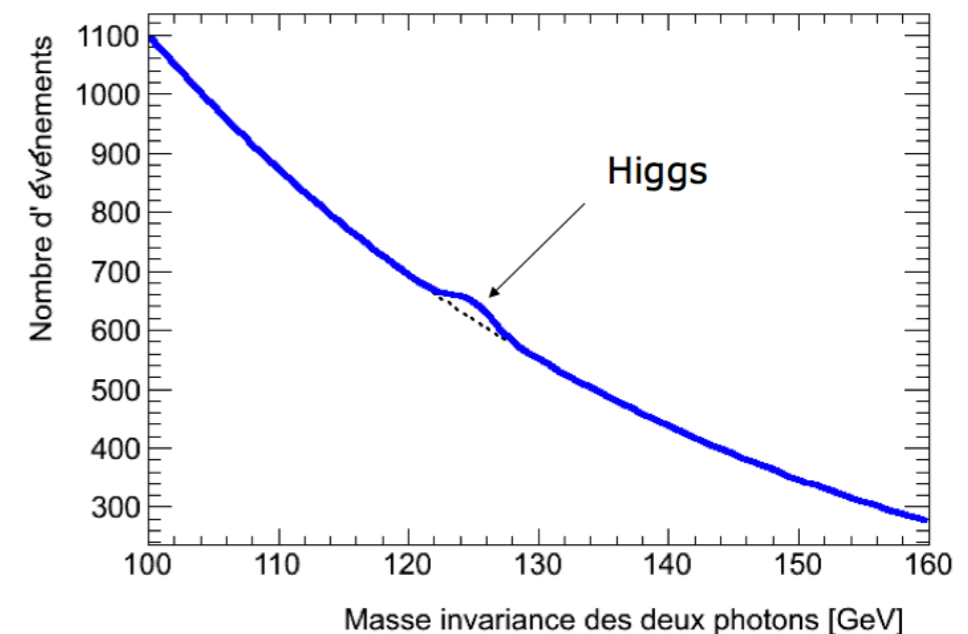
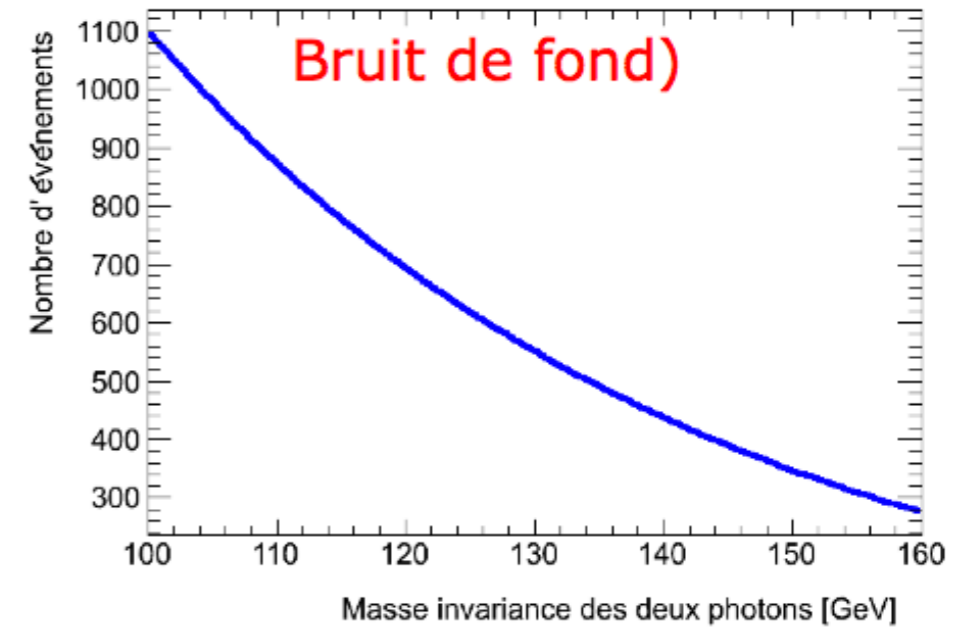
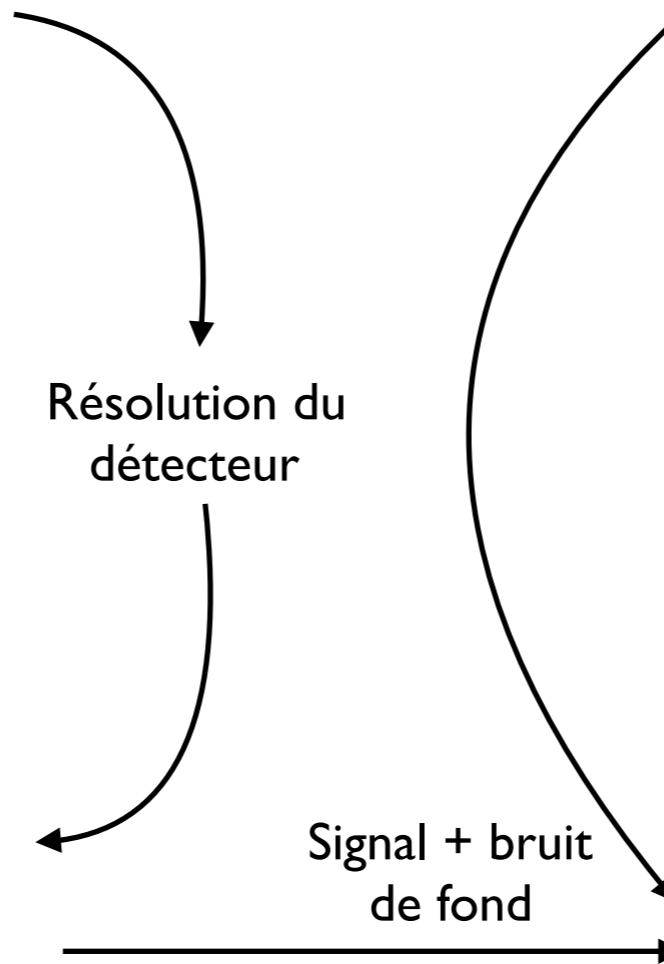
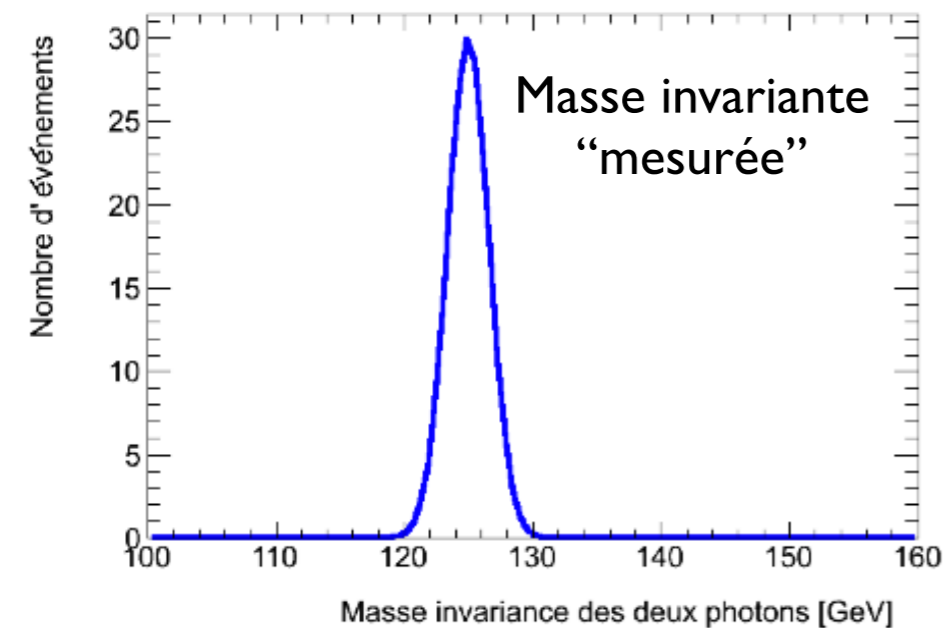
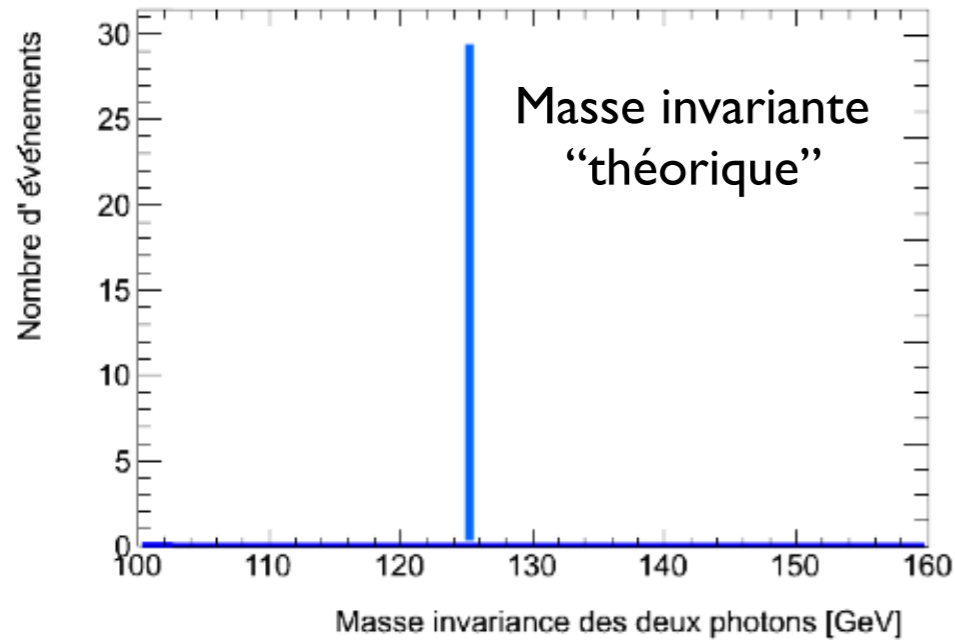
Désintégration du Boson de Higgs:  
le Boson de Higgs est une particule instable



# Désintégration du Higgs en deux photons

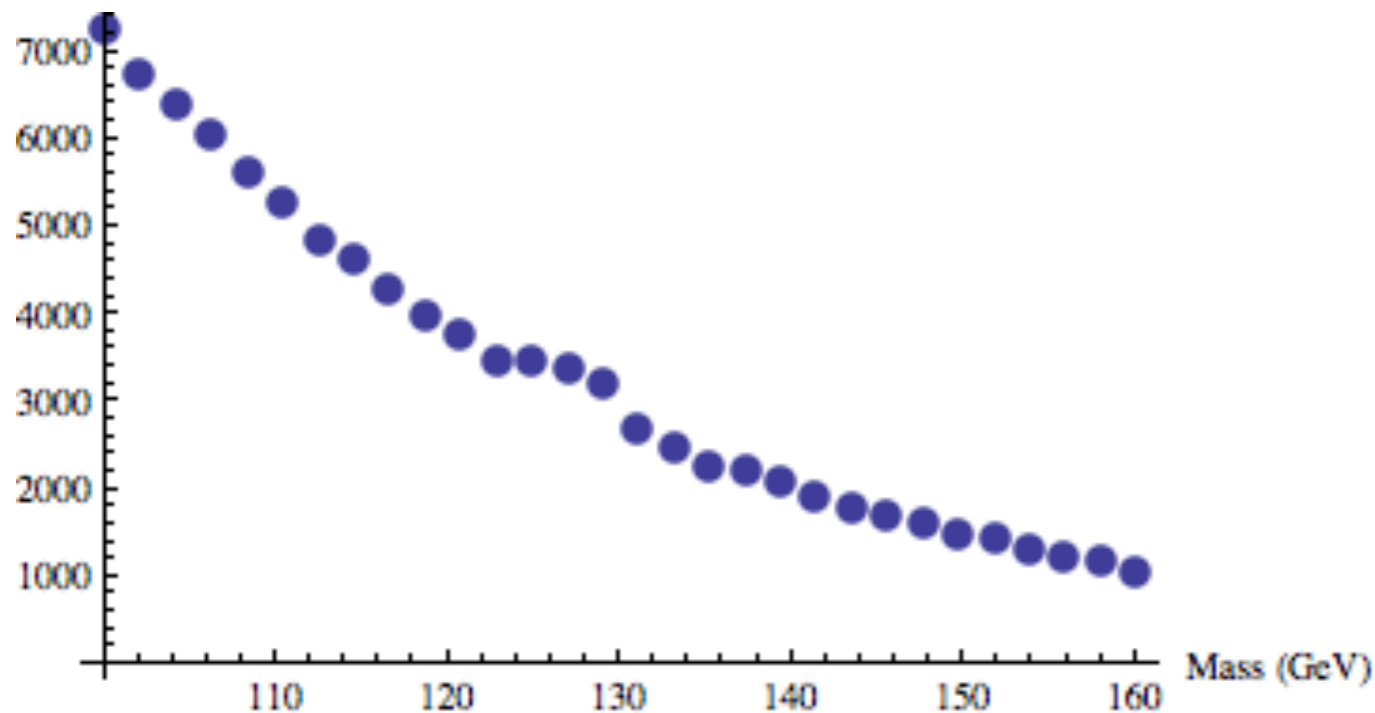
Masse invariante diphotons construite à partir de l'énergie et impulsion de chacun des deux photons:

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{\frac{(E_1 + E_2)^2}{c^2} - \left(\frac{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}{c}\right)^2} \quad E=mc^2$$



# Jobs du physicien

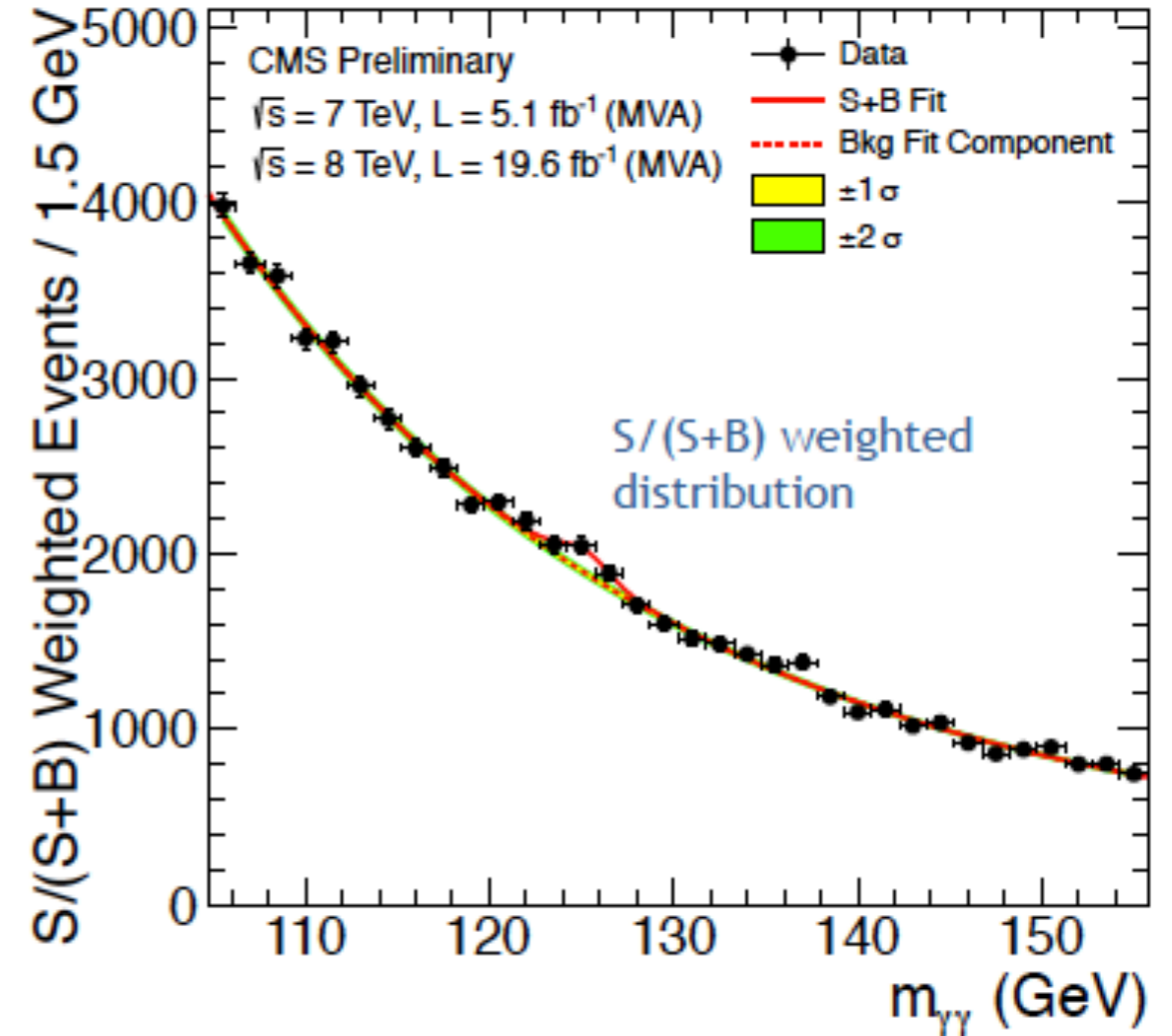
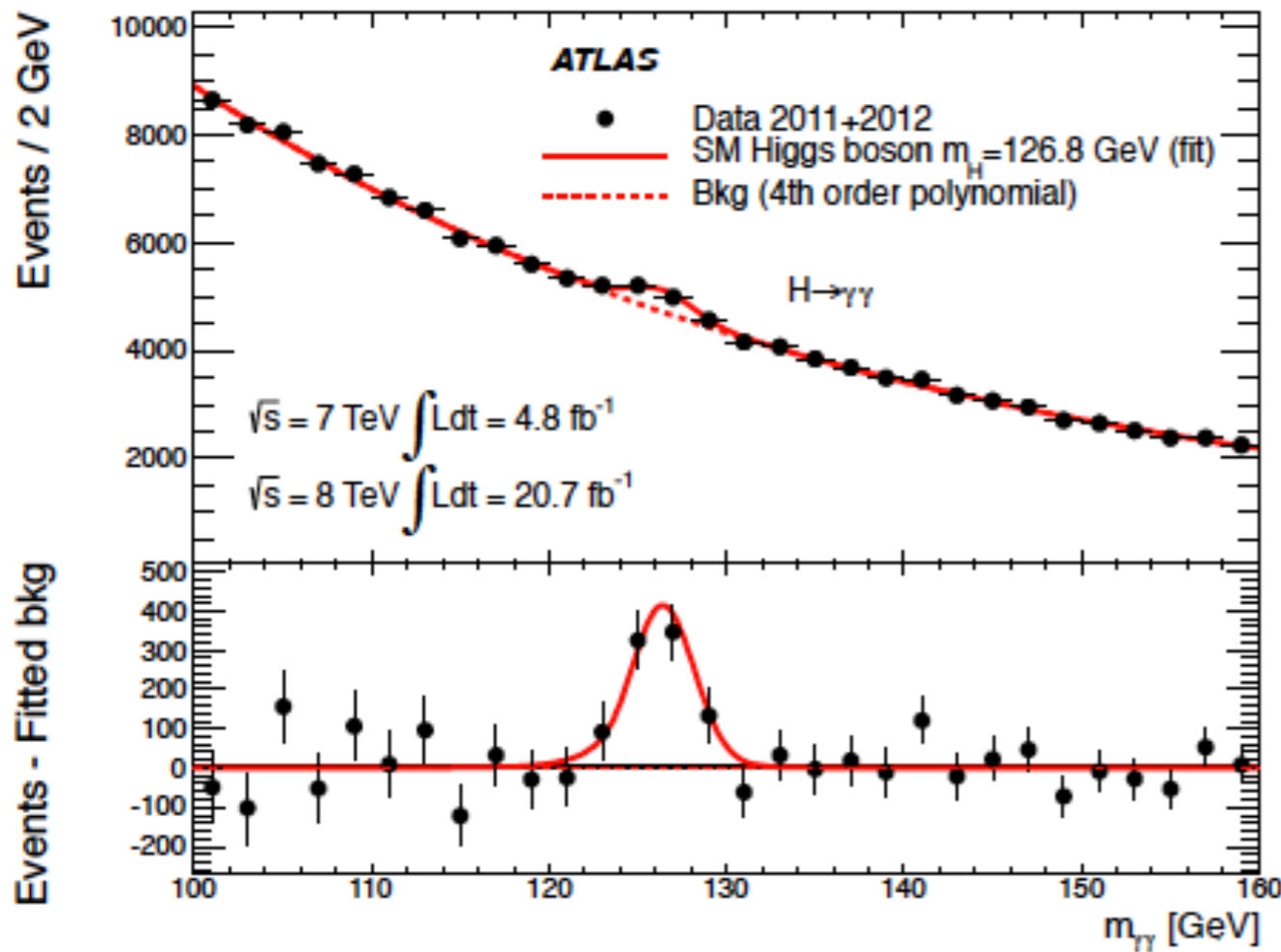
- Augmenter la taille du pic
- Réduire sa largeur
- Réduire le fond



Job du LHC : augmenter la statistique,  
accompli au-delà des espérances

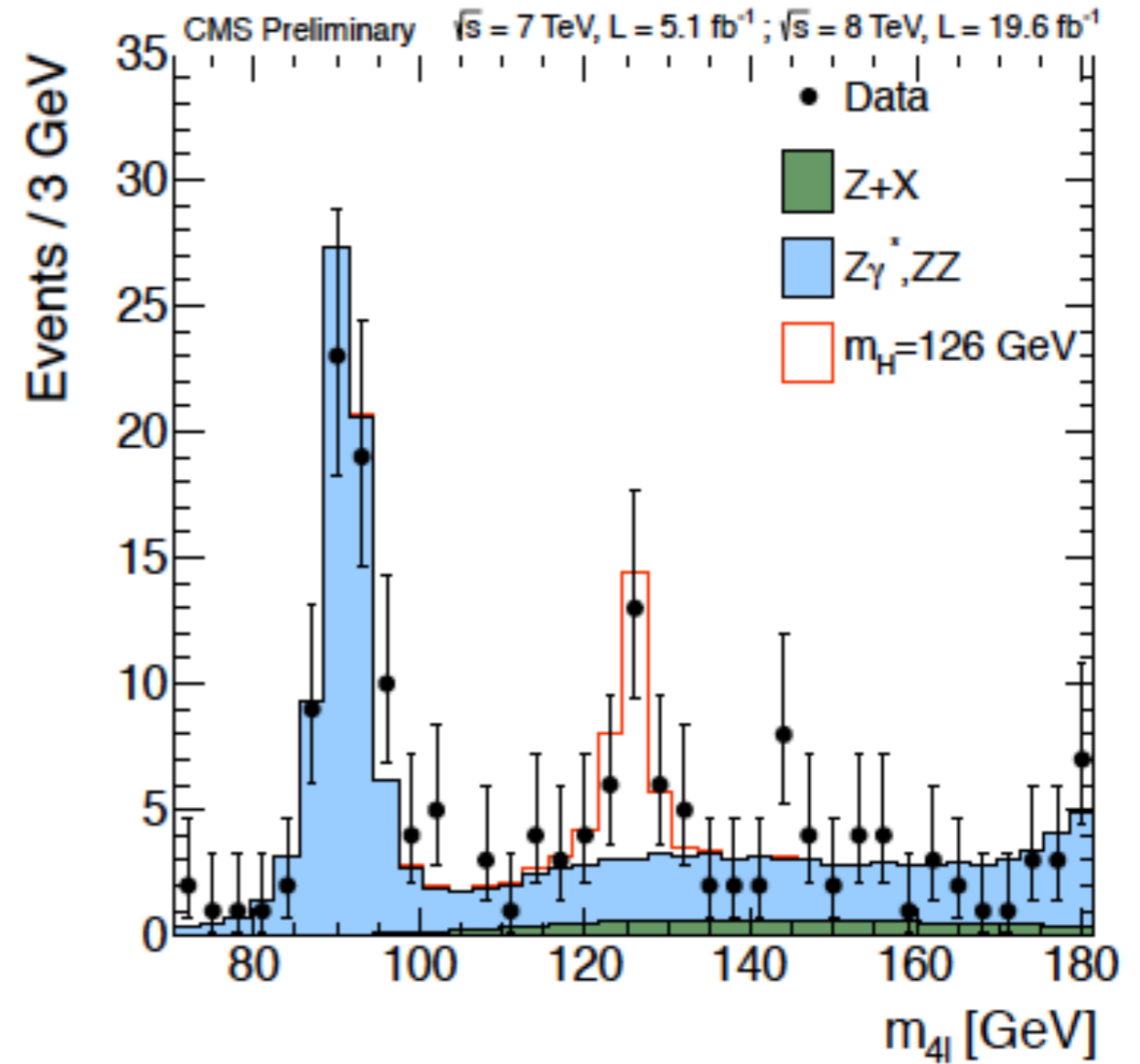
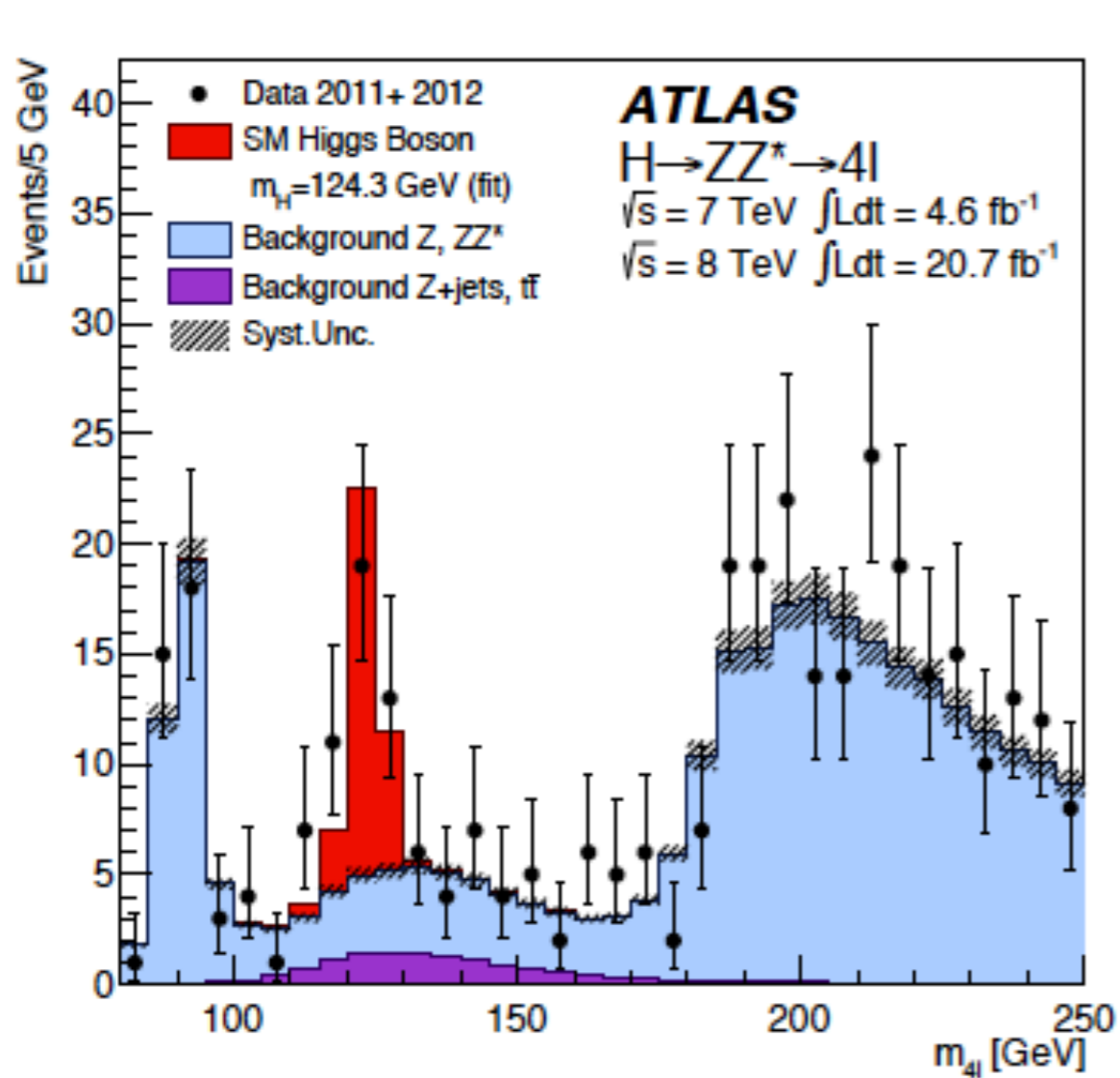


# Higgs en deux photons

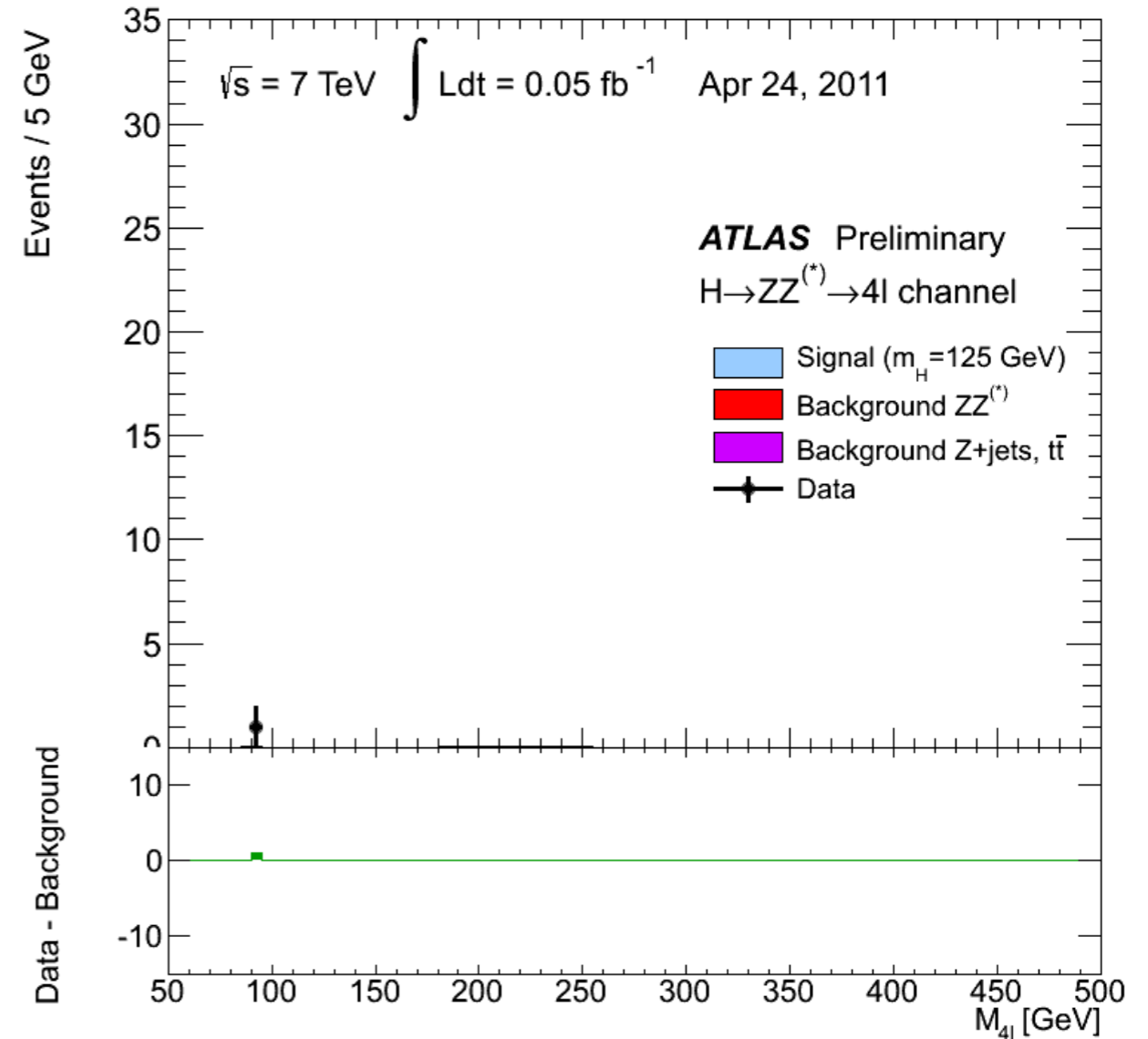
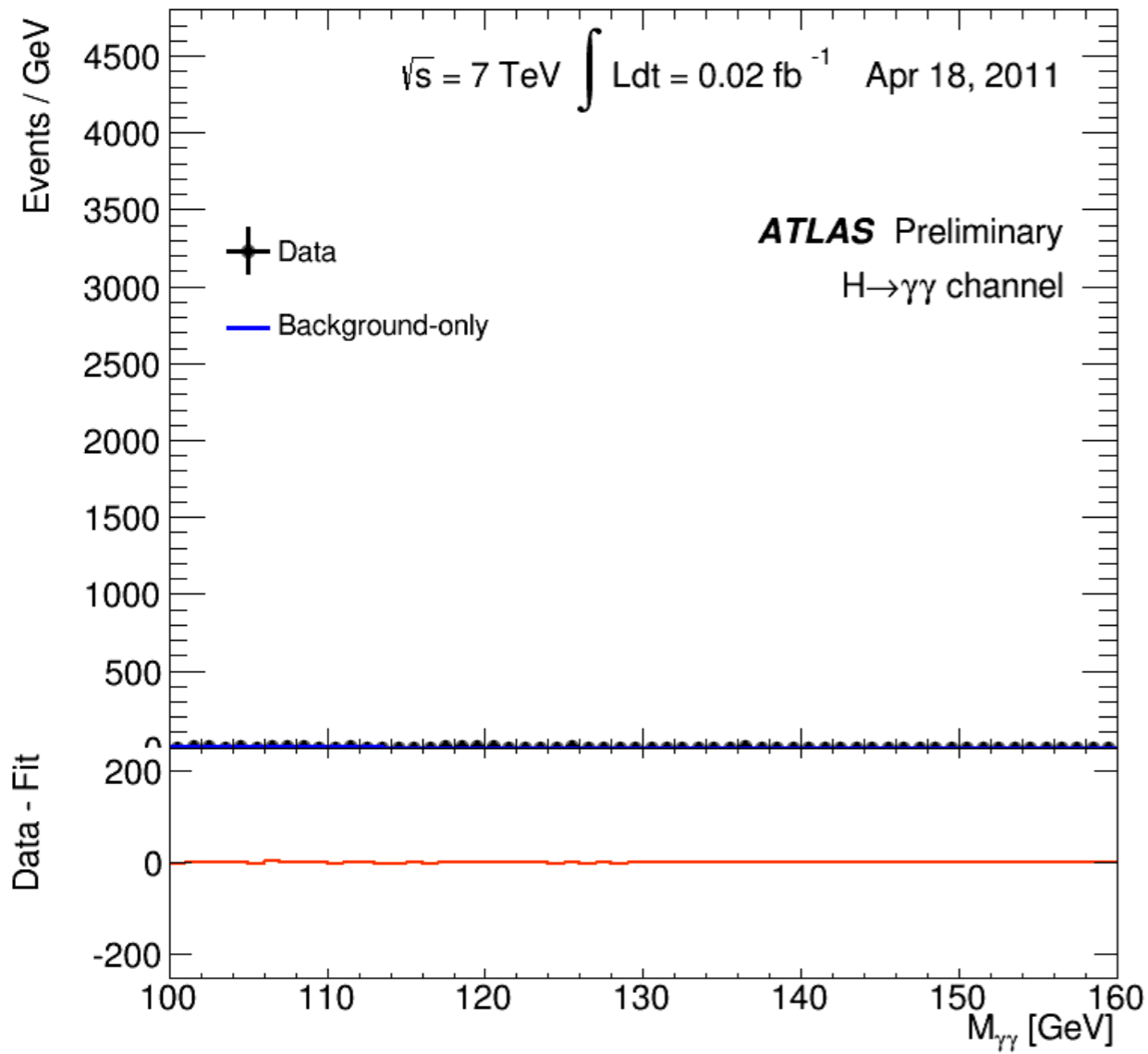


La masse du Boson de Higgs est d'environ 125 GeV

# Higgs en deux Z (puis 4l)



# Découverte du boson de Higgs en “temps réel”





# Découverte du Boson de Higgs

4 juillet 2012



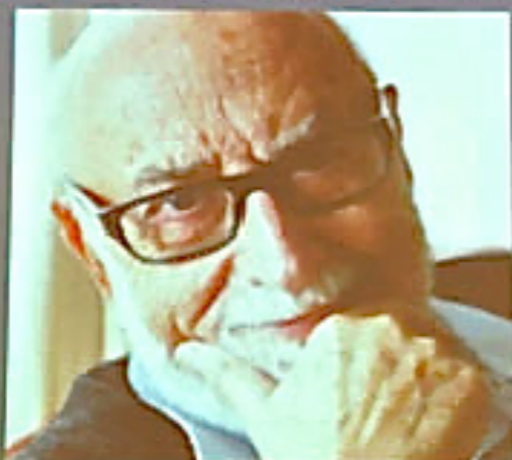
And then in Oct 2013:



Nobelpriset 2013

The Nobel Prize 2013

## The Nobel Prize in Physics 2013



**François Englert**  
Université Libre de Bruxelles, Belgium



**Peter W. Higgs**  
University of Edinburgh, UK

*"För den teoretiska upptäckten av en mekanism som bidrar till förståelsen av massans ursprung hos subatomära partiklar, och som nyligen, genom upptäckten av den förutsagda fundamentala partikeln, bekräftats av ATLAS- och CMS-experimenten vid CERN:s accelerator LHC."*

*"For the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."*

© Kungl. Vetenskapsakademien

« Pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a récemment été confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS auprès du grand collisionneur de hadrons du CERN »

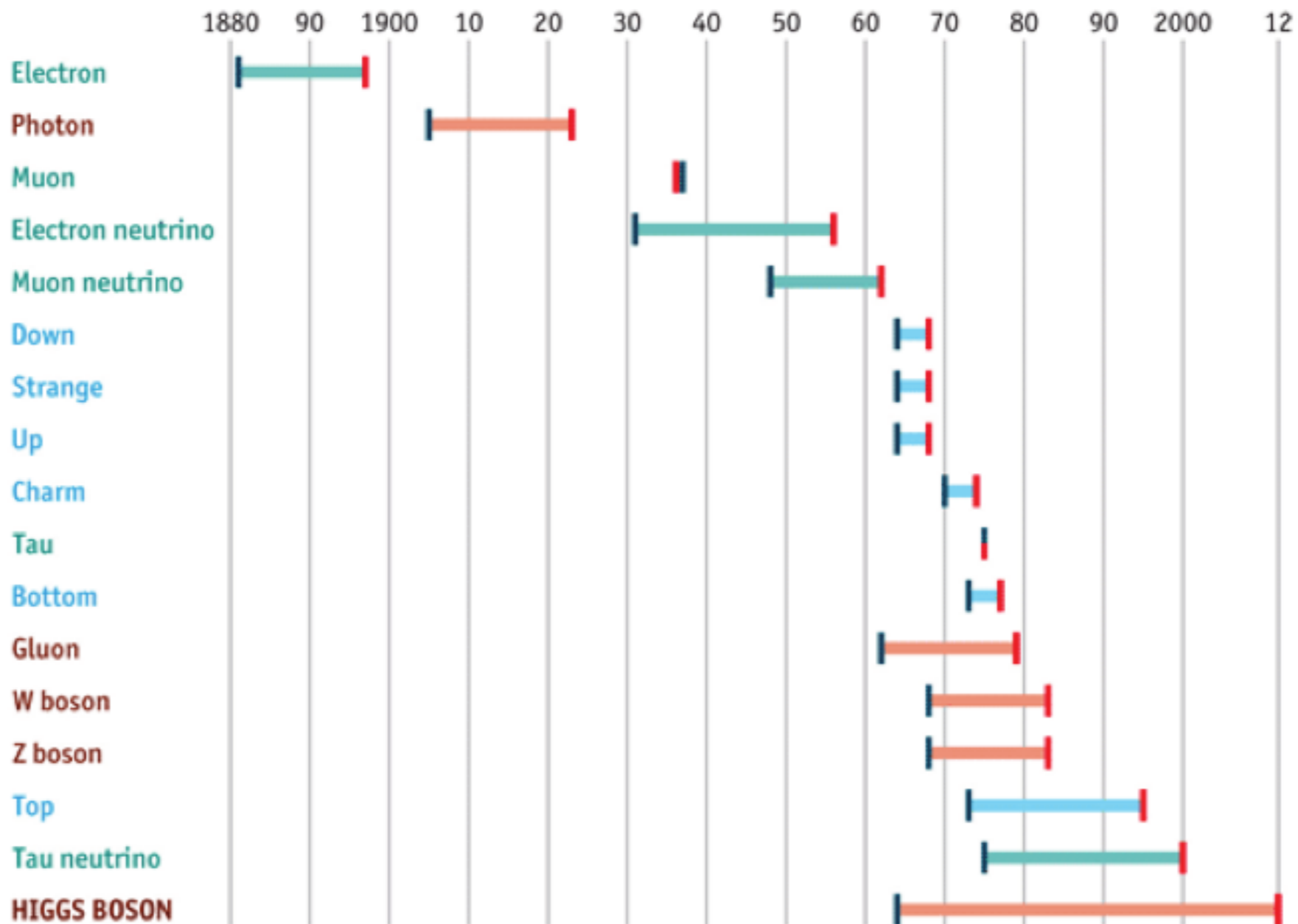
# La fin d'une longue quête...

## The Standard Model of particle physics

Years from concept to discovery

Leptons  
Bosons  
Quarks

Theorised/explained  
Discovered



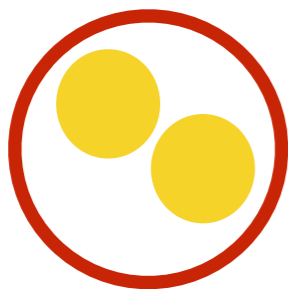
Source: *The Economist*



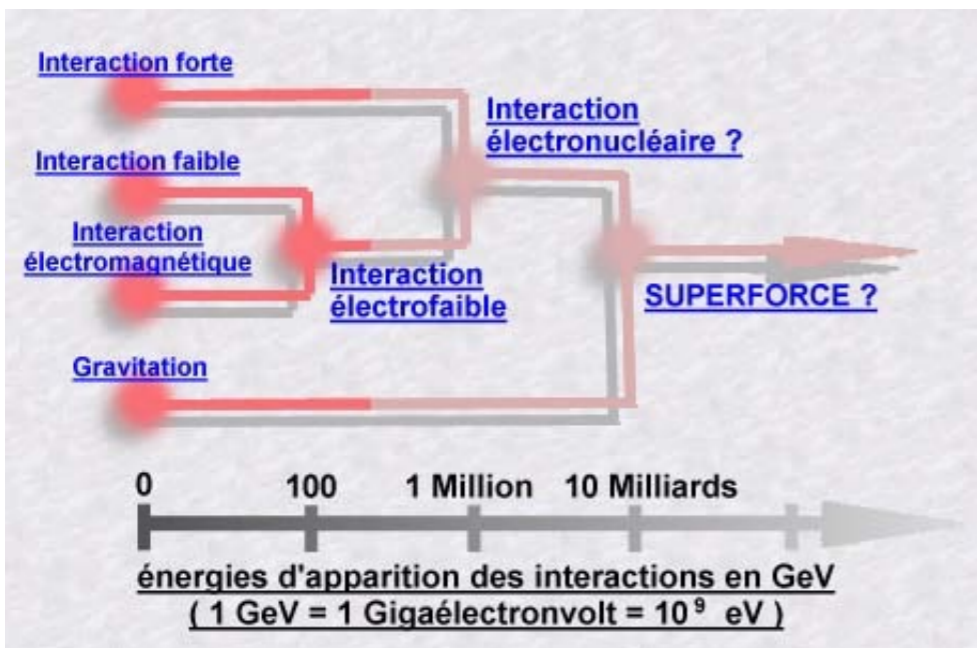
# La nouvelle physique ?

# Des modèles à la pelle...

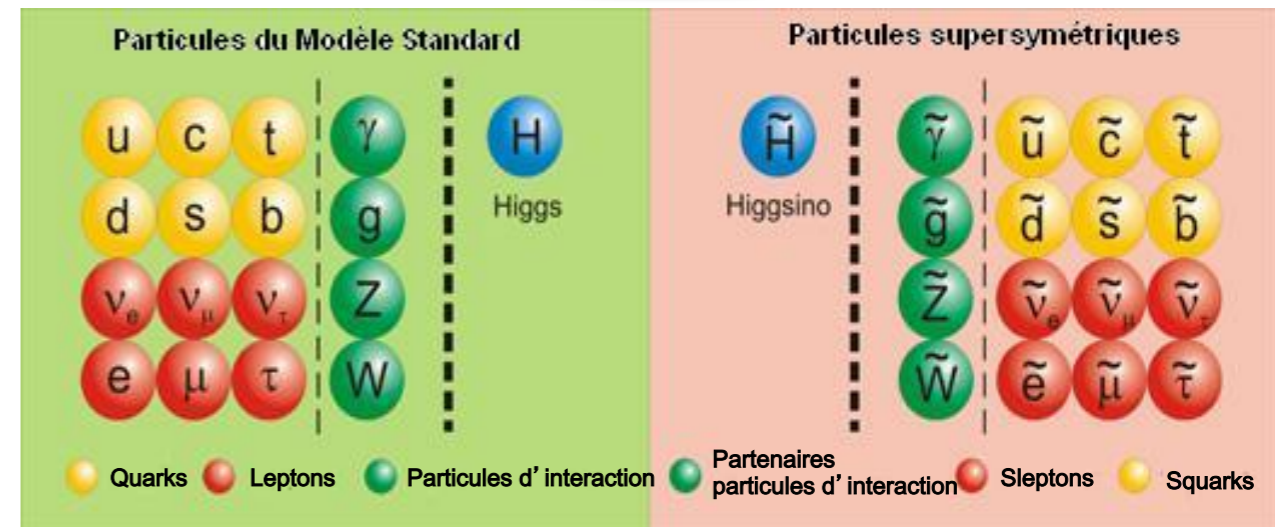
Particules  
composites



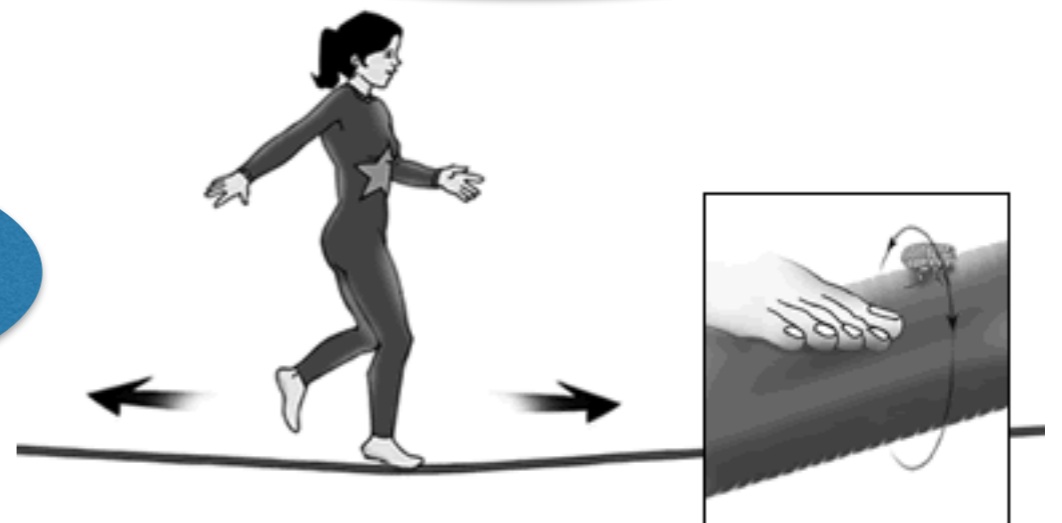
Grande unification



Supersymmetrie



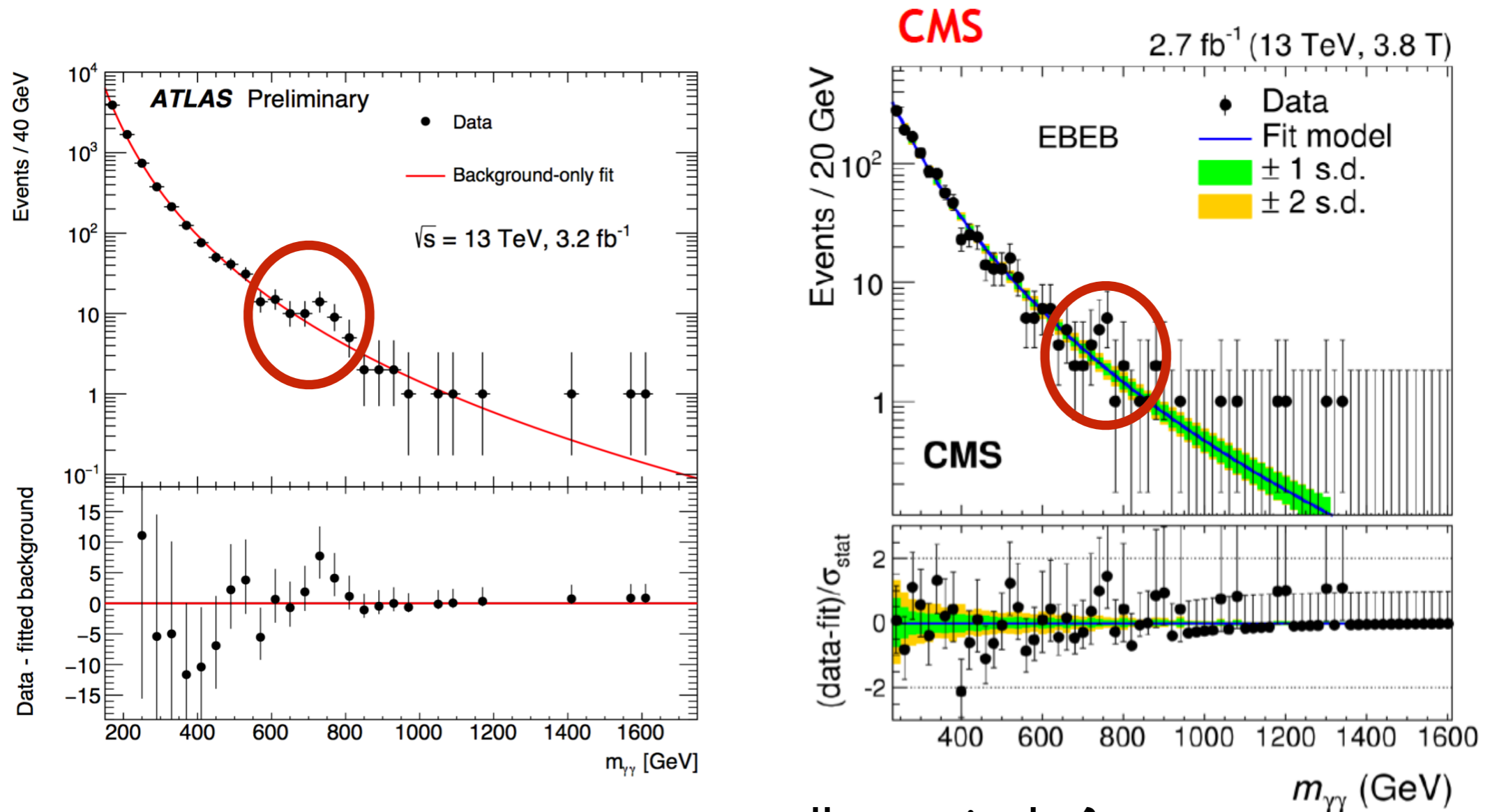
Dimensions  
supplémentaires





# Une « bosse » à 750 GeV en 2015?

Fin 2015, excitation des théoriciens et des médias sur une « bosse » observée à une masse de 750 GeV par les deux expériences ATLAS et CMS:



est-ce une nouvelle particule ?

# Buzz dans les médias...

## L'UNIVERS N'EST PAS CE QU'ON CROIT !

Science et Vie  
Mai 2016

« et soudain, un simple signal  
a tout bouleversé... »

À LA UNE

*Je n'ai jamais vu ça !*  
ABDELHAK DJOUADI  
LABORATOIRE DE PHYSIQUE THÉORIQUE D'ORSAY

*Nous sommes tous  
dans un état  
d'excitation inédit*  
ADAM FALKOWSKI  
LABORATOIRE DE PHYSIQUE  
THÉORIQUE D'ORSAY

*Plus de 200 articles ont  
été publiés sur le sujet  
depuis décembre !*  
GEORGES AZUELO  
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL (CANADA)

*Cela pourrait  
être une révolution  
en physique*  
GIAN GIUDICE  
CERN

*Des impacts  
majeurs sur notre  
façon de penser  
le monde  
microscopique*  
YASUNORI NOMURA  
UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE  
BERKELEY

*Un tsunami  
intellectuel !*  
YVES SIROIS  
LABORATOIRE LEPRINCE-RINGLET,  
PALAISEAU

*Si ça se  
confirme,  
ce sera  
fantastique*  
DANIEL  
DENEGRÉ  
CERN

*Officiellement, l'excitation  
est interdite*  
TESSA BAKER  
UNIVERSITÉ D'OXFORD (ROYAUME-UNI)

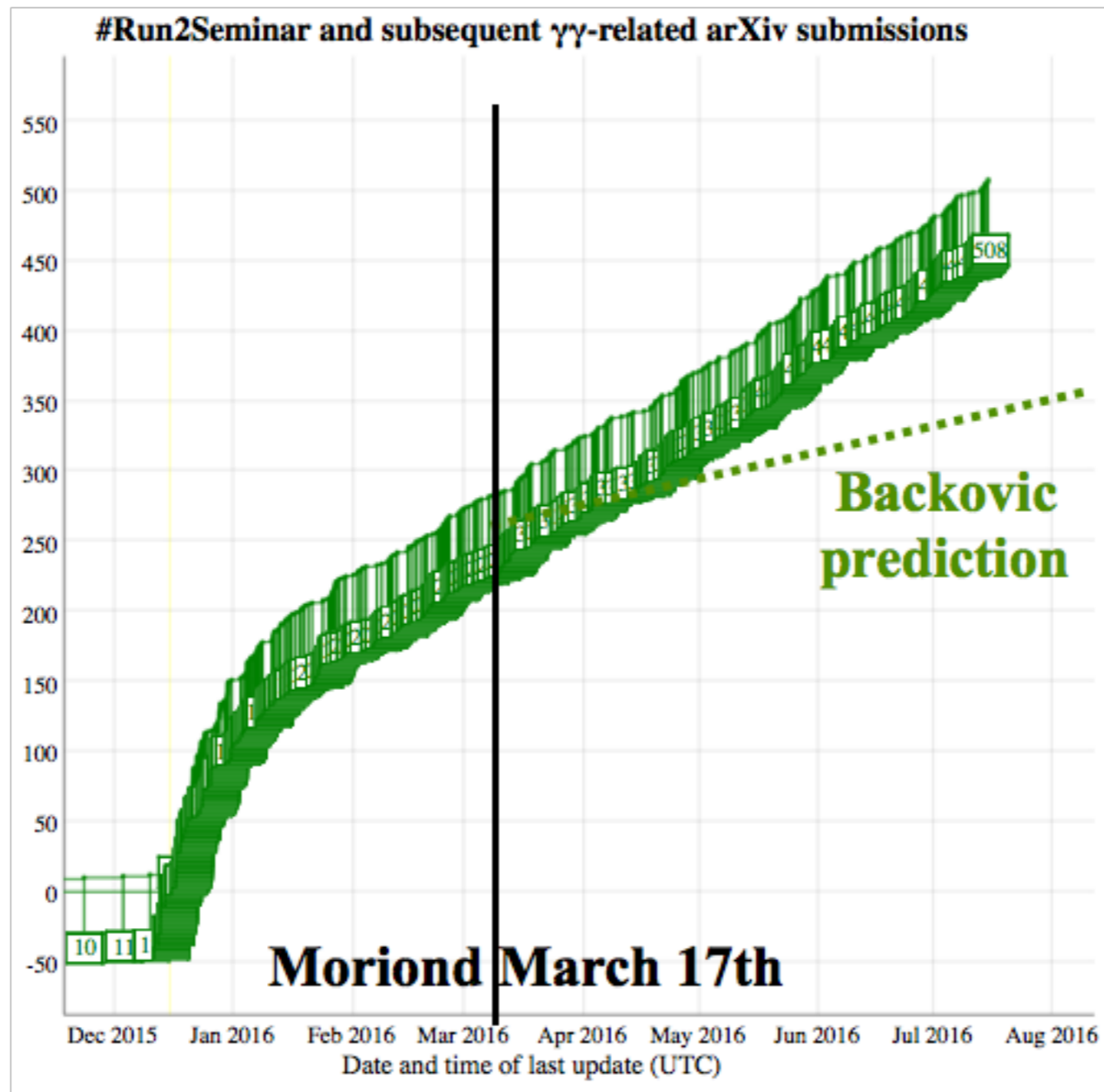
*C'est un moment crucial*  
GUILLAUME UNAL  
CERN

« Un tsunami intellectuel ! »



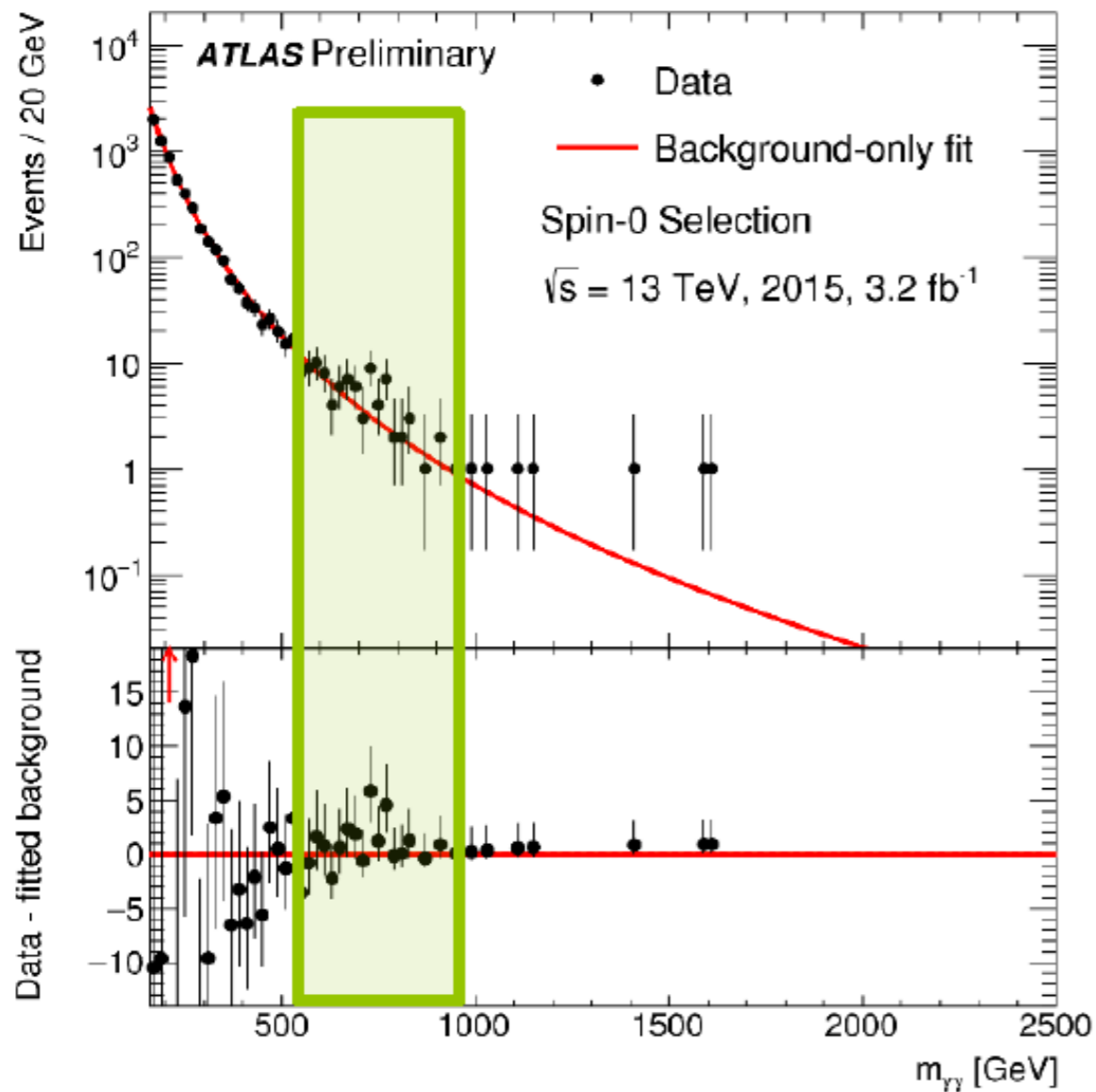
un risque d'erreur inférieur à  
0,00003% !

# Buzz chez les théoriciens...

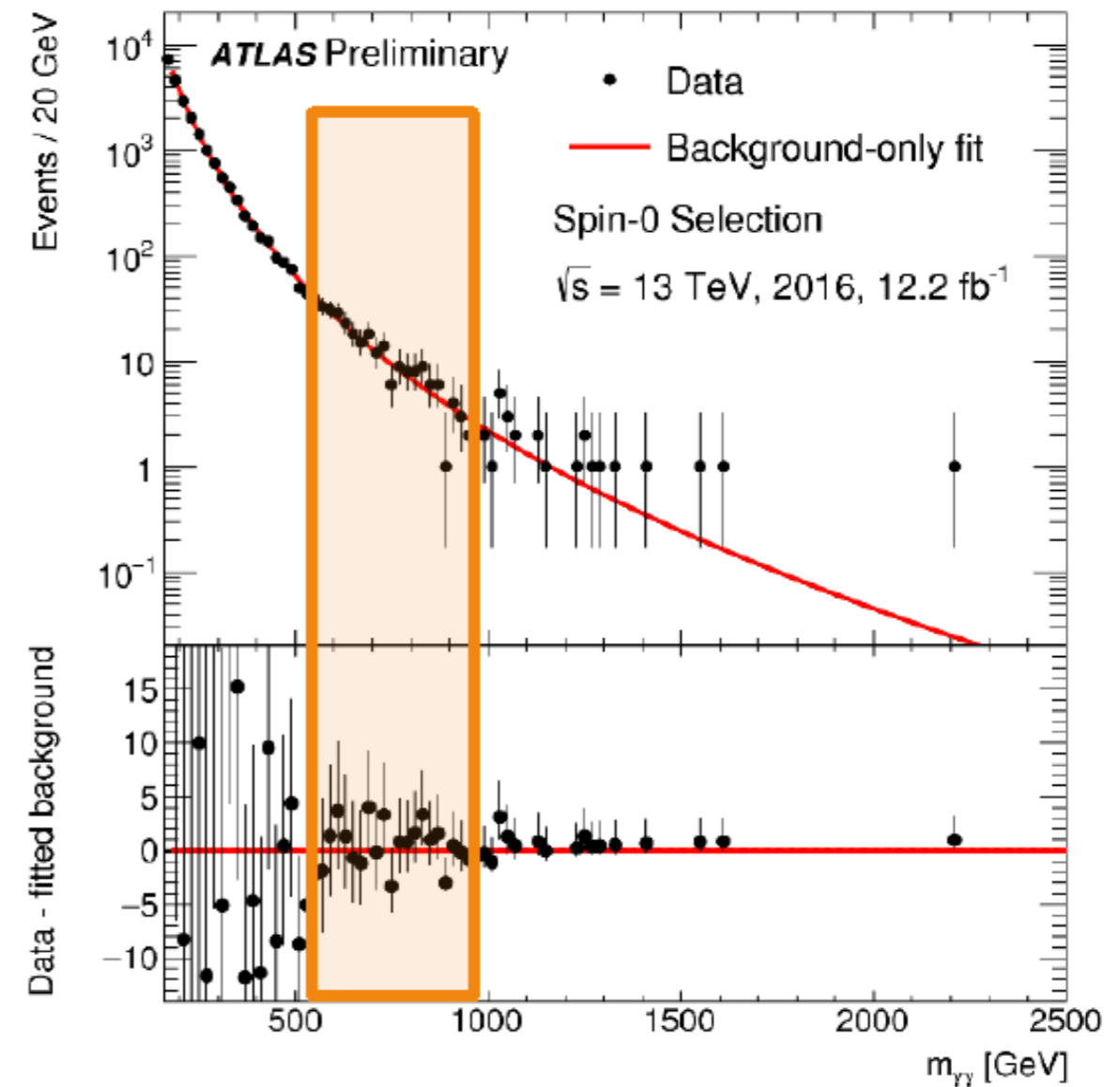


# Mais dans les données 2016...

2015, 3.2 fb<sup>-1</sup>



2016, 12.2 fb<sup>-1</sup>



La « bosse » a disparu...

# Que s'est-il passé ?

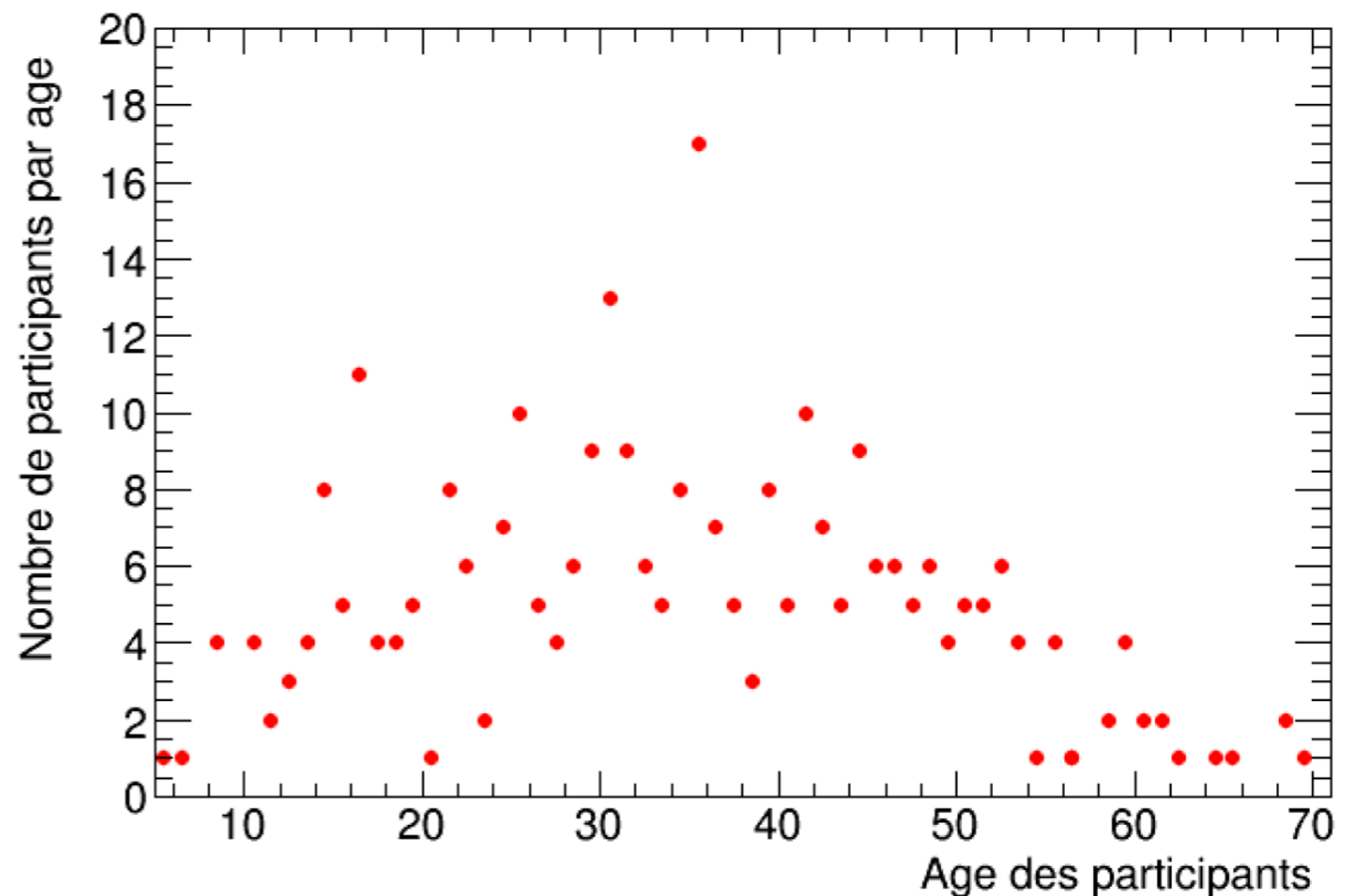
- Cette histoire illustre bien ce que veut dire « découvrir une nouvelle particule » :
  - on n'observe pas une particule directement, mais un ensemble de mesures que l'on peut confronter à un modèle
  - une découverte = les mesures **ne sont pas en accord** avec le modèle « absence de nouvelle particule »
  - il faut quantifier le « **ne sont pas en accord** »:
    - notion de **SIGNIFICATION STATISTIQUE**

# Un exemple

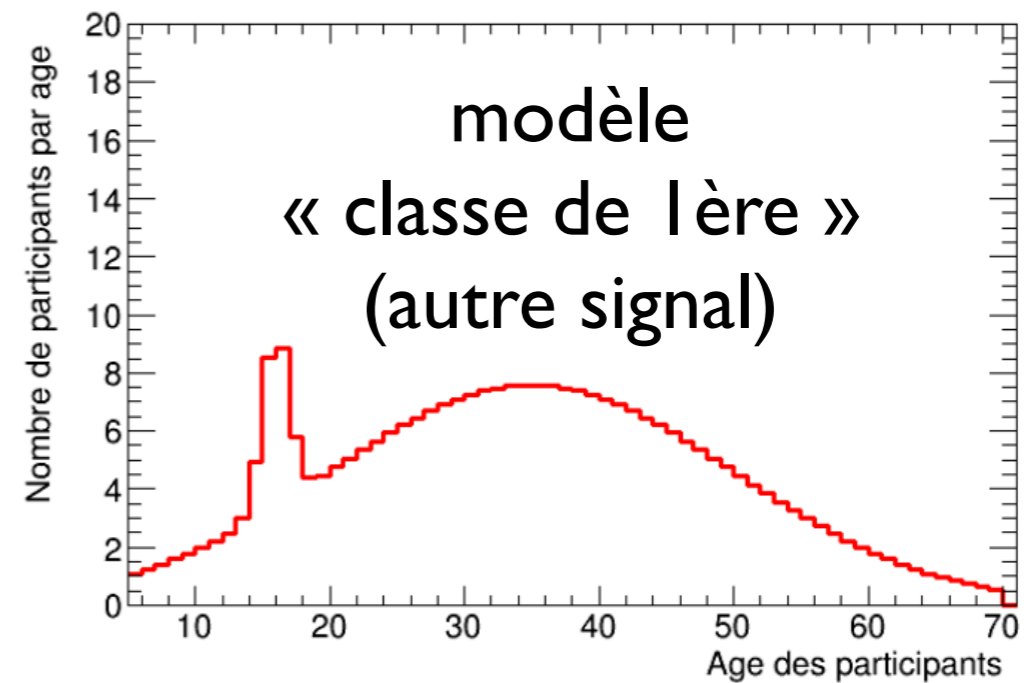
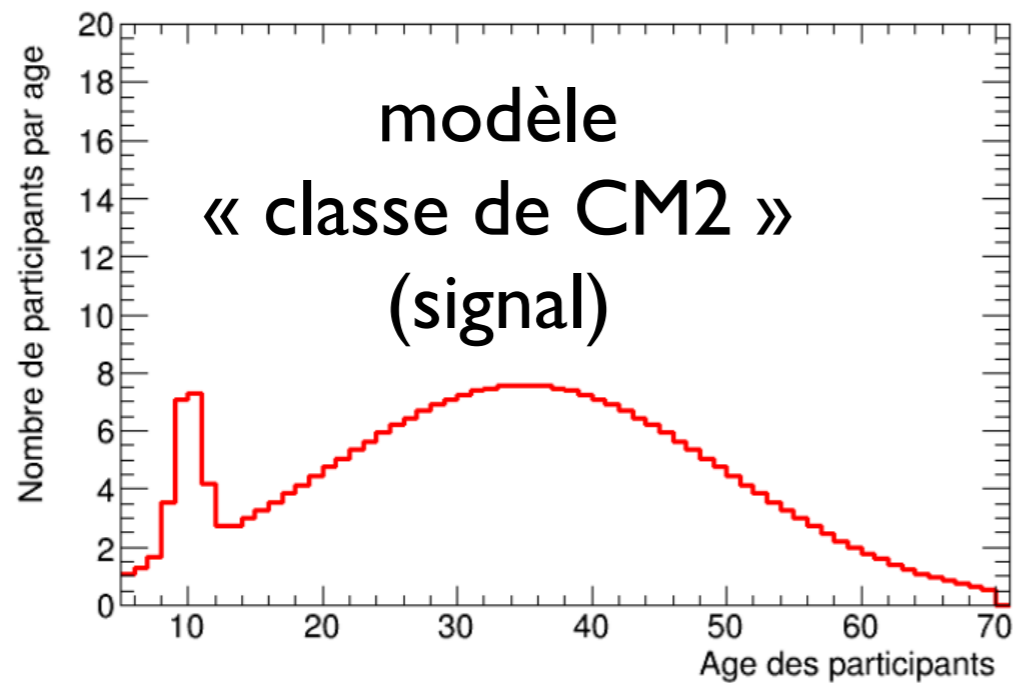
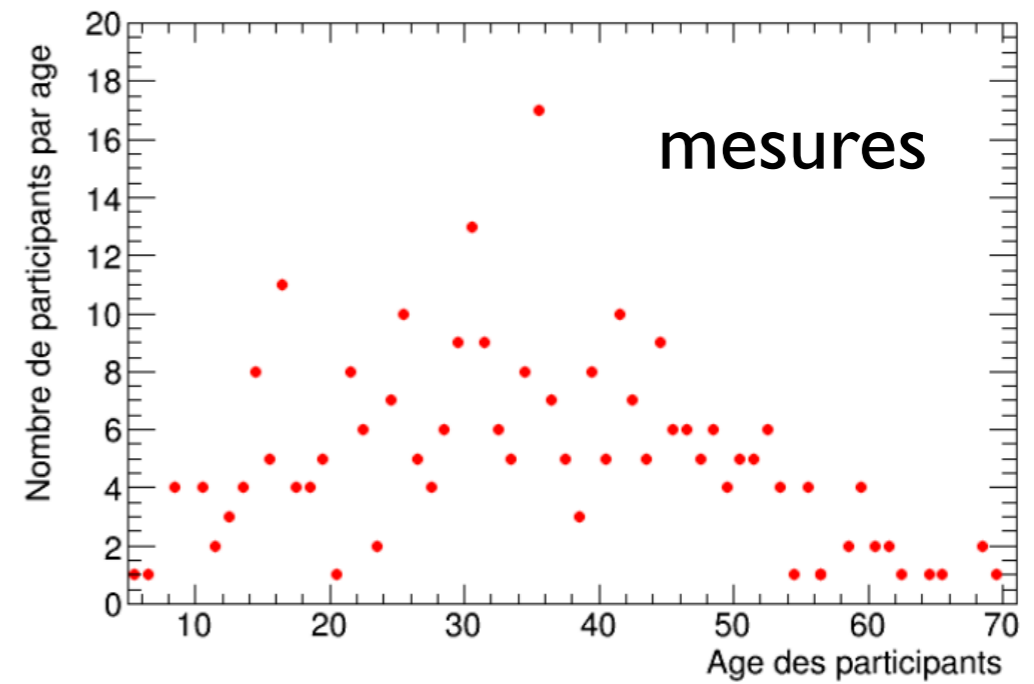
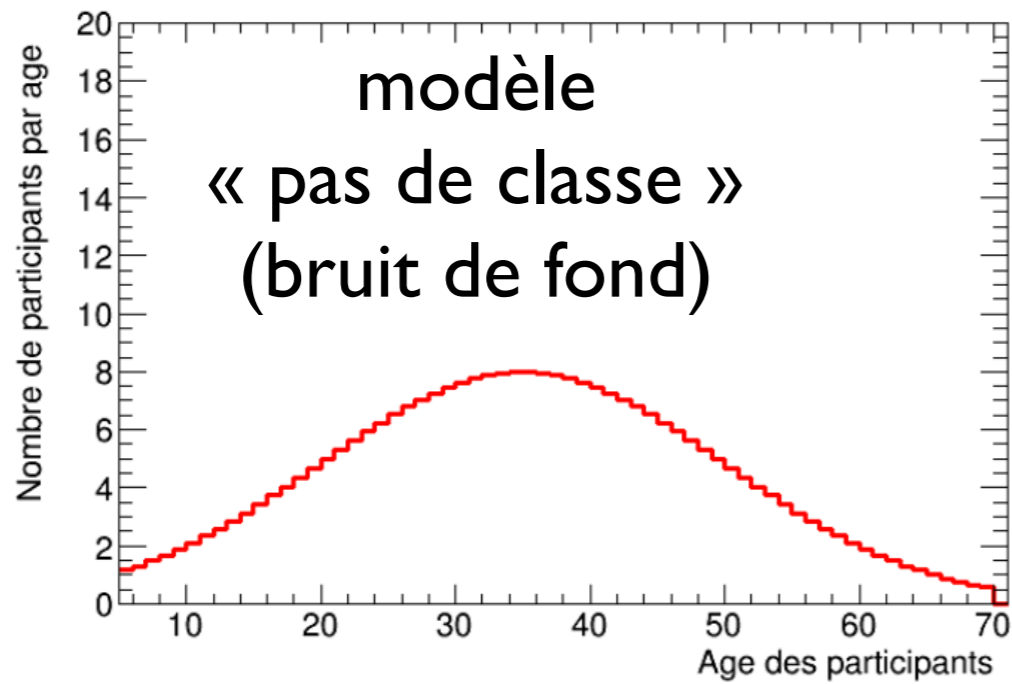
(courtesy Nathalie Besson @ CEA)

- 300 personnes sont venues assister à une conférence. Est-ce qu'une classe de lycéens est présente parmi le public ?
- Quelle mesure (observable) ? Je possède un « détecteur » qui peut mesurer l'âge des participants. Voici le résultat de la mesure:

« histogramme » avec  
65 intervalles (« bins ») entre  
5 ans et 70 ans



# Comparaison mesure-modèle



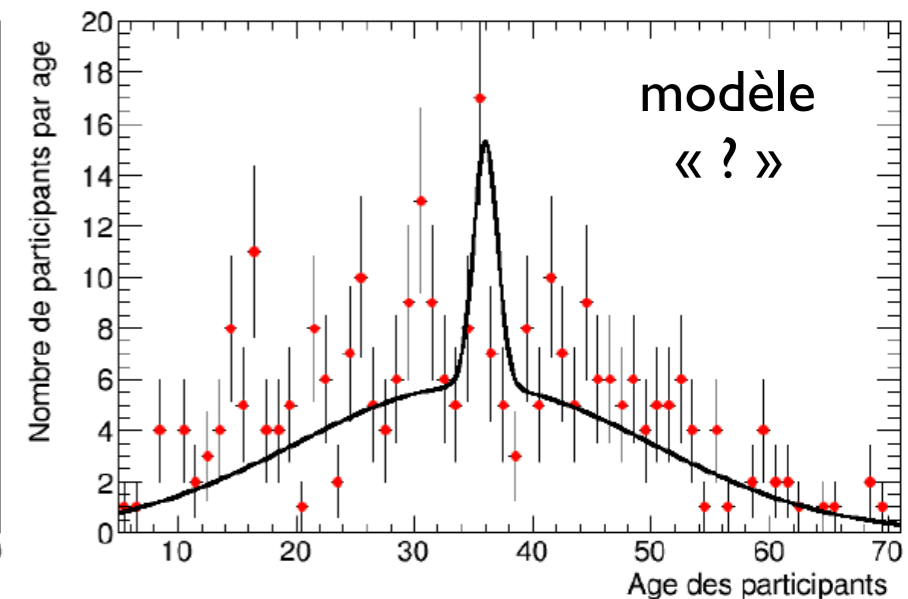
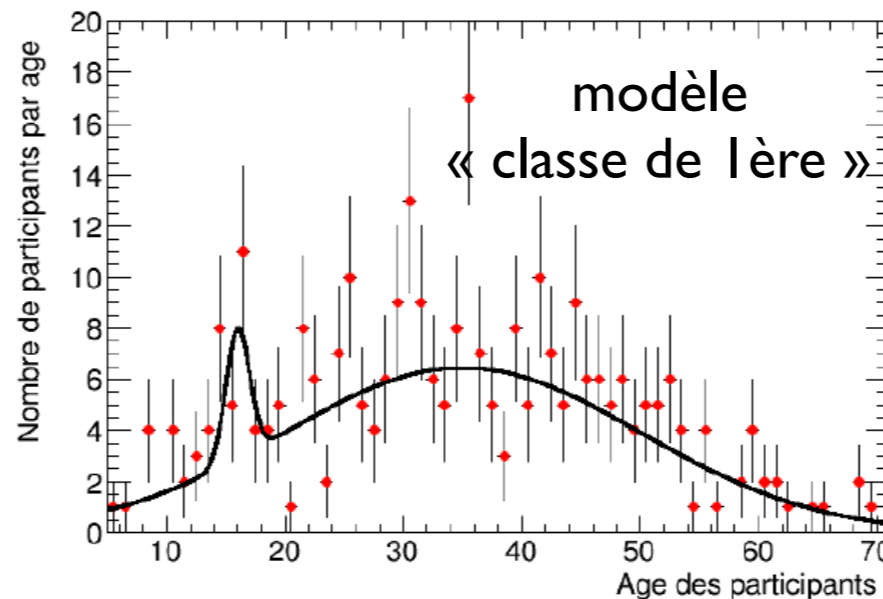
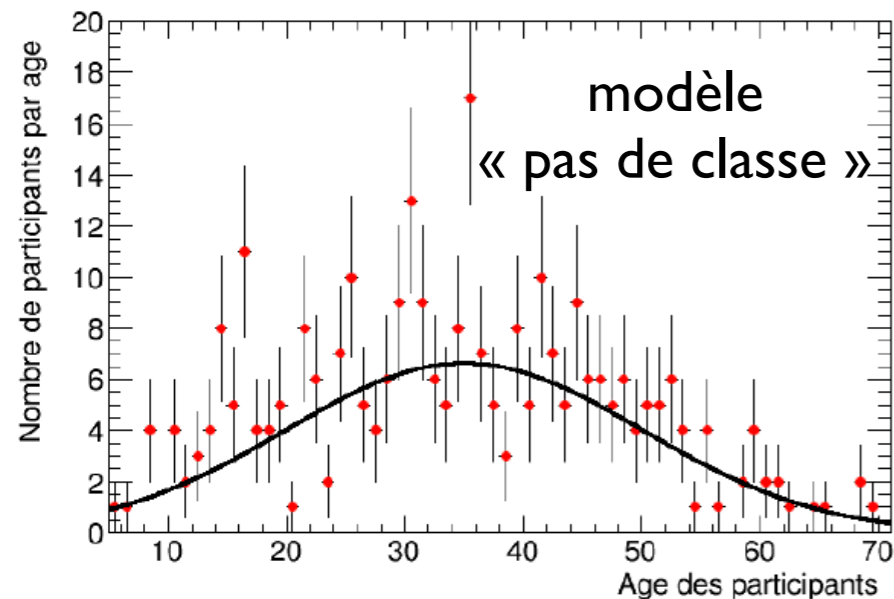
# Comparaison mesure-modèle

L'histogramme des résultats est compatible:

avec ça

mais aussi avec ça

et ça etc...

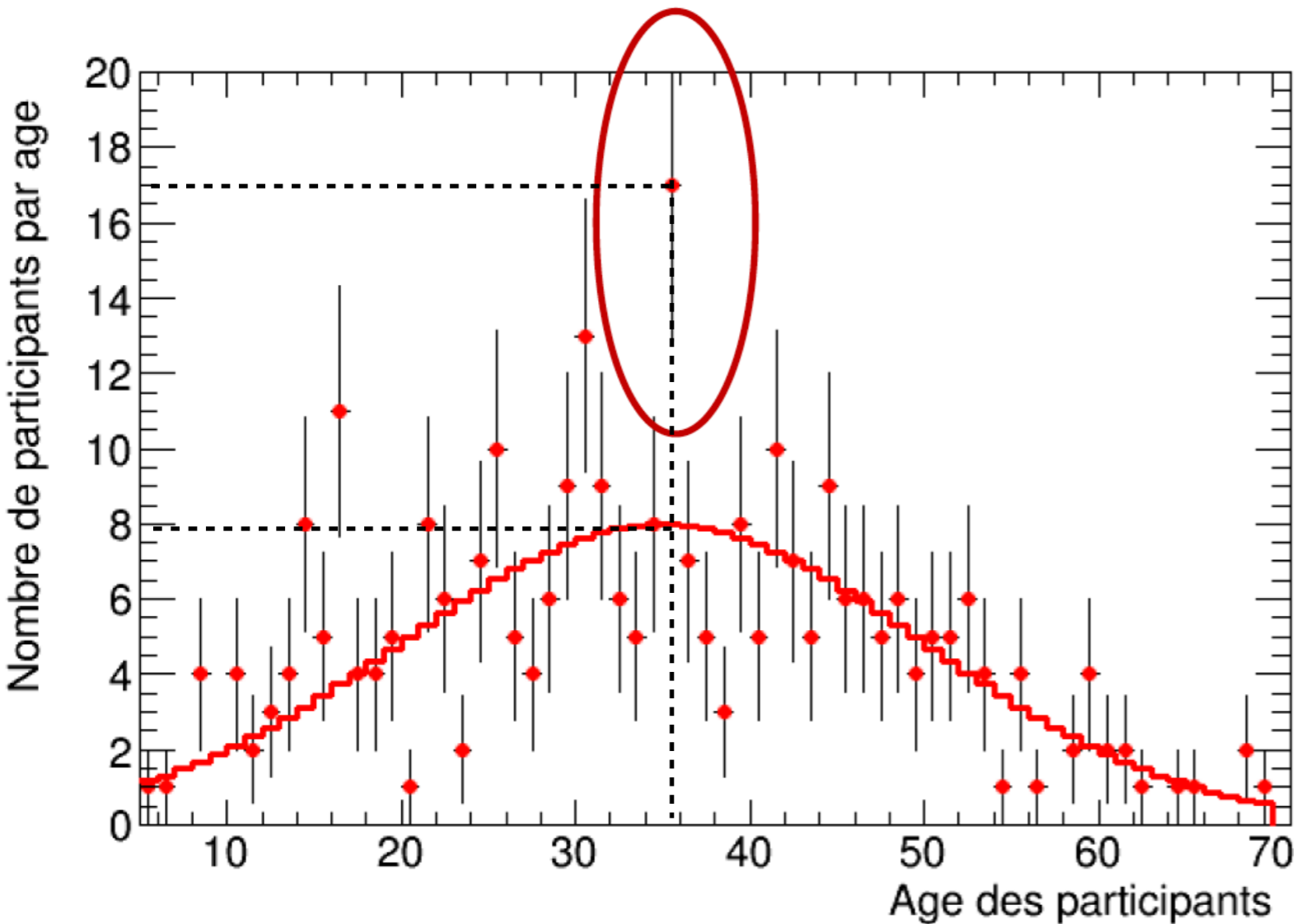


Pour répondre à la question « est-ce qu'il y a une classe au public ? », on doit rejeter l'hypothèse « pas de classe » (=bruit de fond)



# Signification statistique

Revenons à notre mesure



Dans le bin « 36 ans » on attend 7,98 événements sur 300 et on en observe 17.

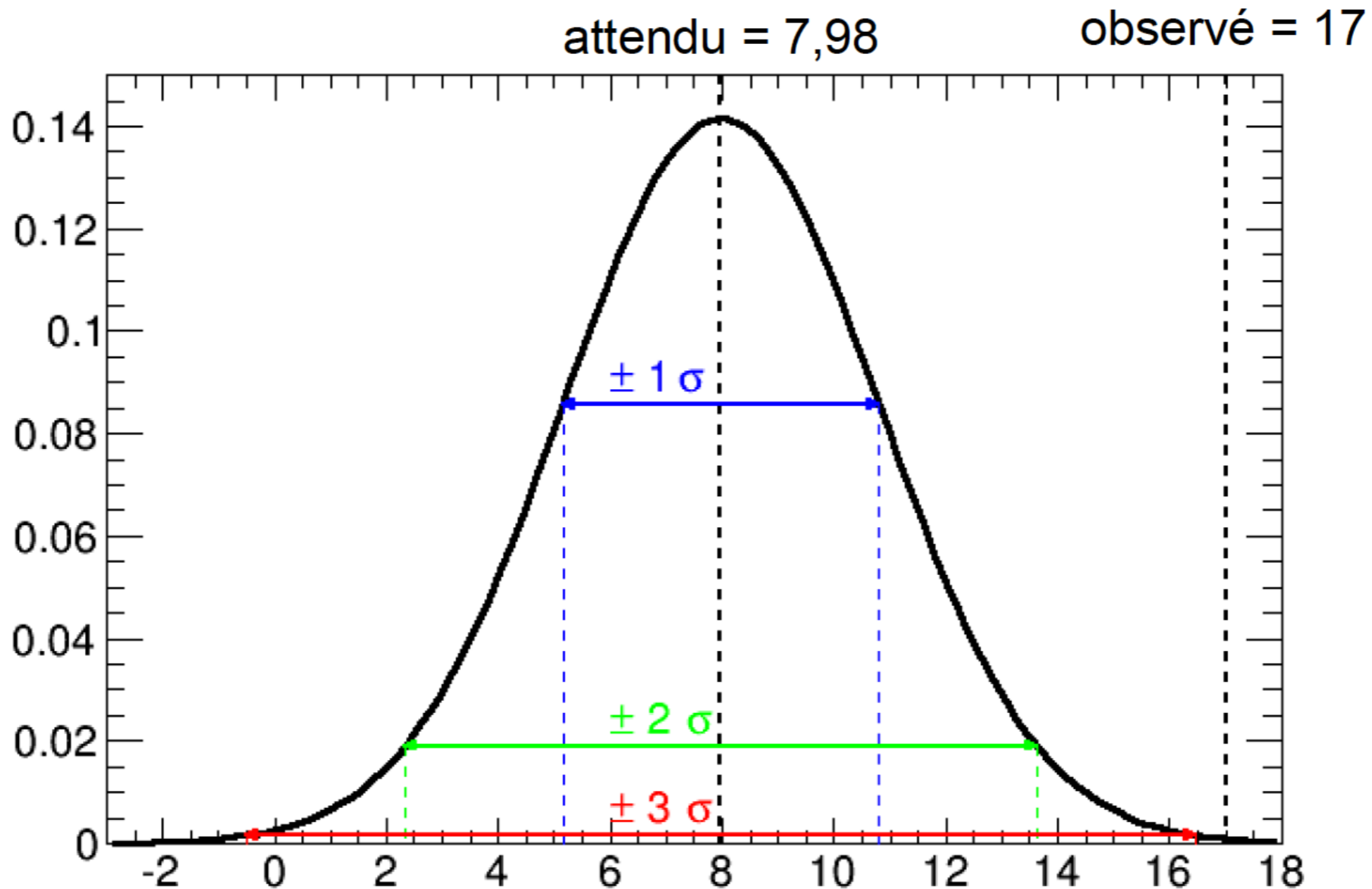
FLUCTUATION statistique ou bien est-ce que l'écart est SIGNIFICATIF ?

Il faut calculer la probabilité qu'un tel écart existe.

Les probabilités de fluctuation pour des grands nombres d'événements suivent la loi normale ou gaussienne.

# Signification statistique

On la calcule en utilisant une gaussienne centrée sur le nombre moyen attendu 7,98 de largeur (écart type ou « sigma » ( $\sigma$ ))  $\sqrt{7,98}$



# Signification statistique

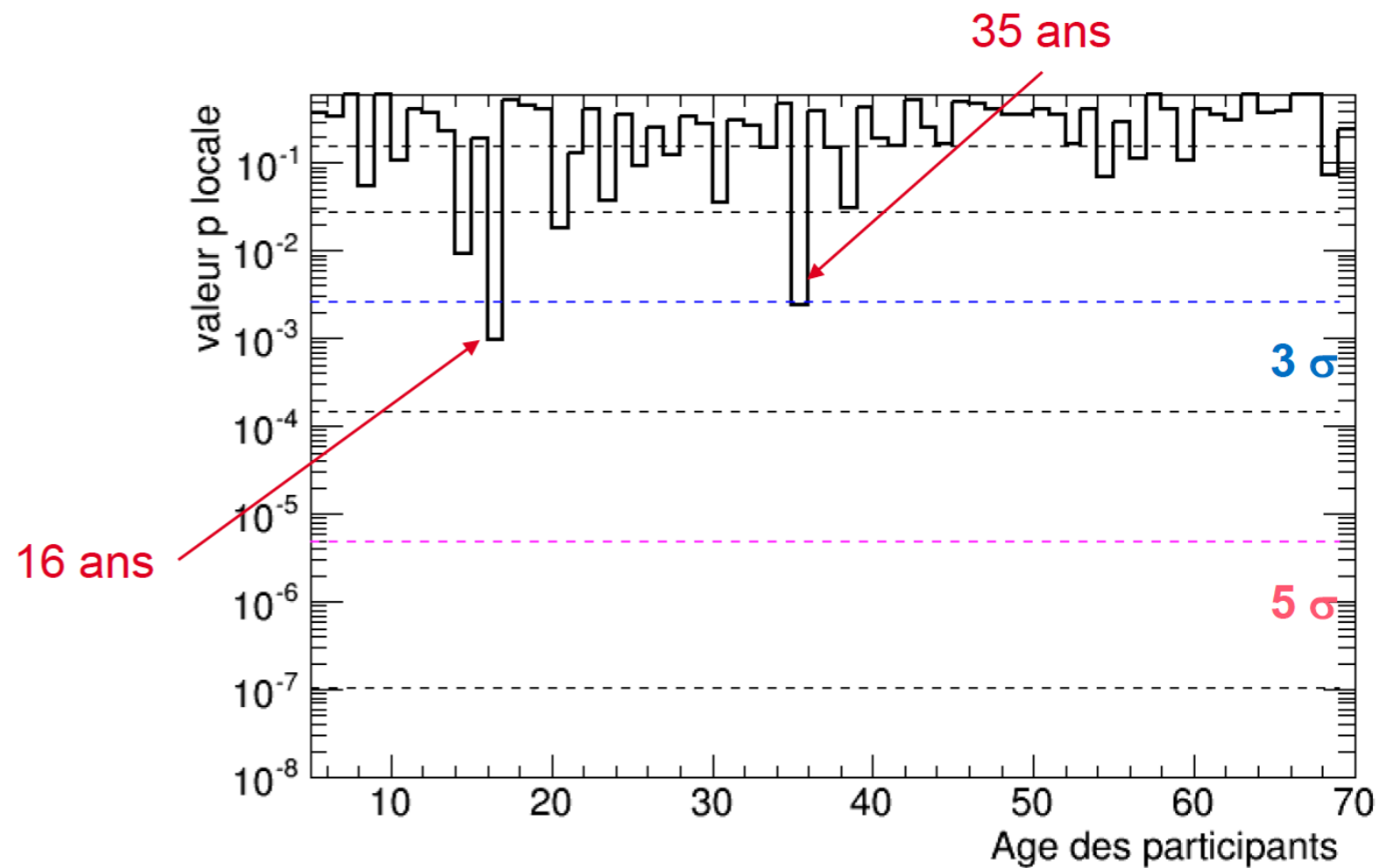
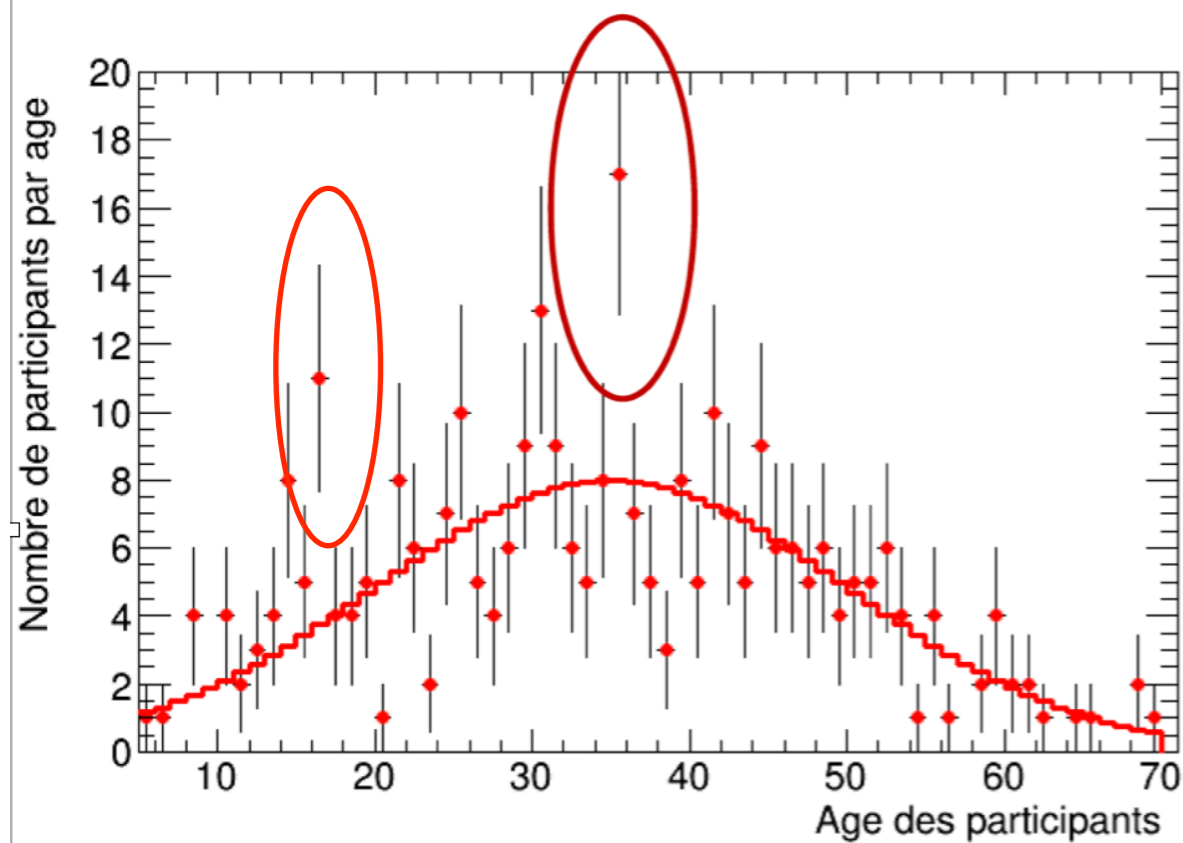
Fraction de l'aire sous la gaussienne à  $\pm n \sigma$  de la valeur moyenne :

- $\pm 1 \sigma$       0.6826 : « région à 68% de niveau de confiance »
- $\pm 2 \sigma$       0.9545 : « région à 95% de niveau de confiance »
- $\pm 3 \sigma$       0.9973 : que 0,27% de chance d'observer un résultat hors de cette région.  
**Les fameux 3 sigmas.**
- $\pm 4 \sigma$       0.999937 : que une chance sur 15787,2 d'observer un résultat en-deça (ou au-delà) de cette région.
- $\pm 5 \sigma$       0.999999 : que **une chance sur 1 744 278,3** d'observer un résultat en-deça (ou au-delà) de cette région.  
**Les fameux 5 sigmas.**

# Signification statistique

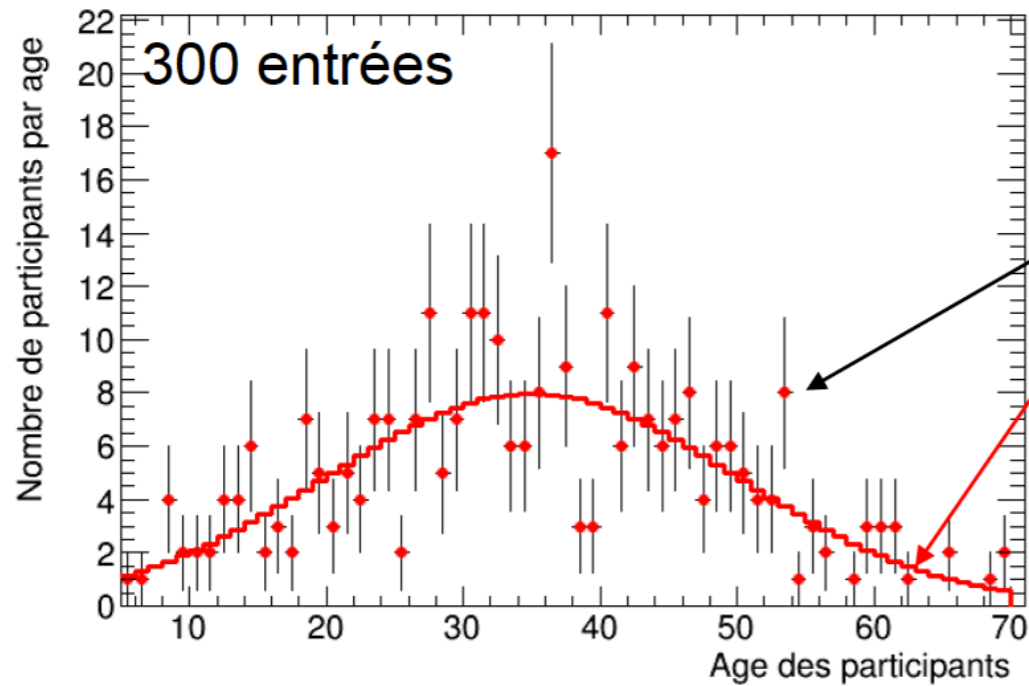
Quelle est la probabilité que la valeur observée dans chaque bin soit une fluctuation du modèle « pas de classe » ?

Revenons à notre mesure



Notre « seuil » pour parler de découverte est 5 sigmas

# Incertitudes statistiques

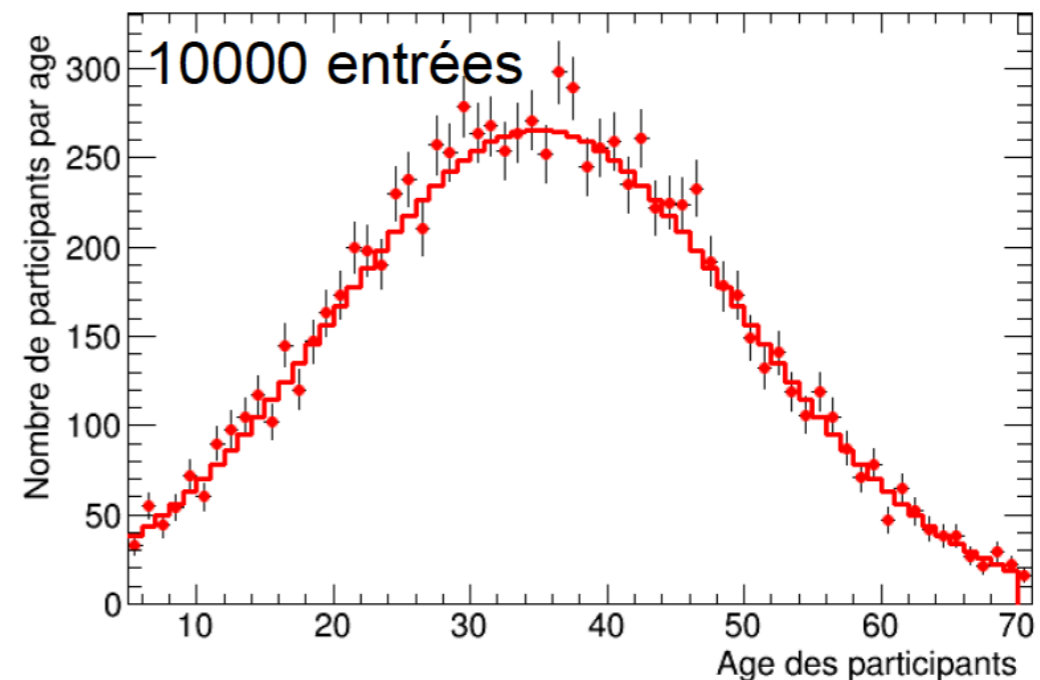
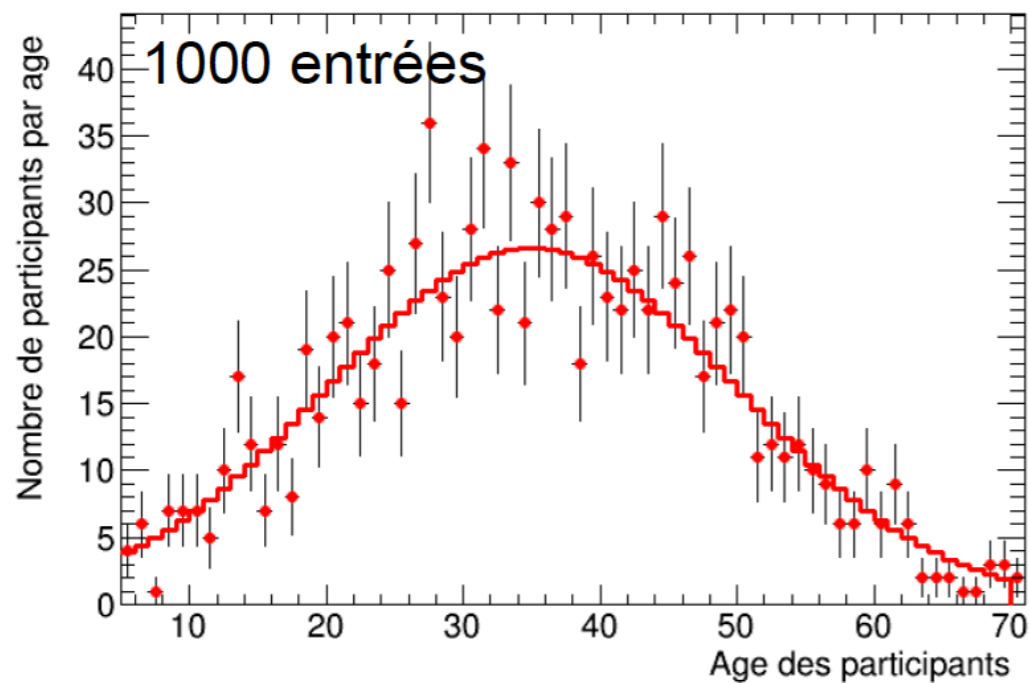


Observé  
Attendu

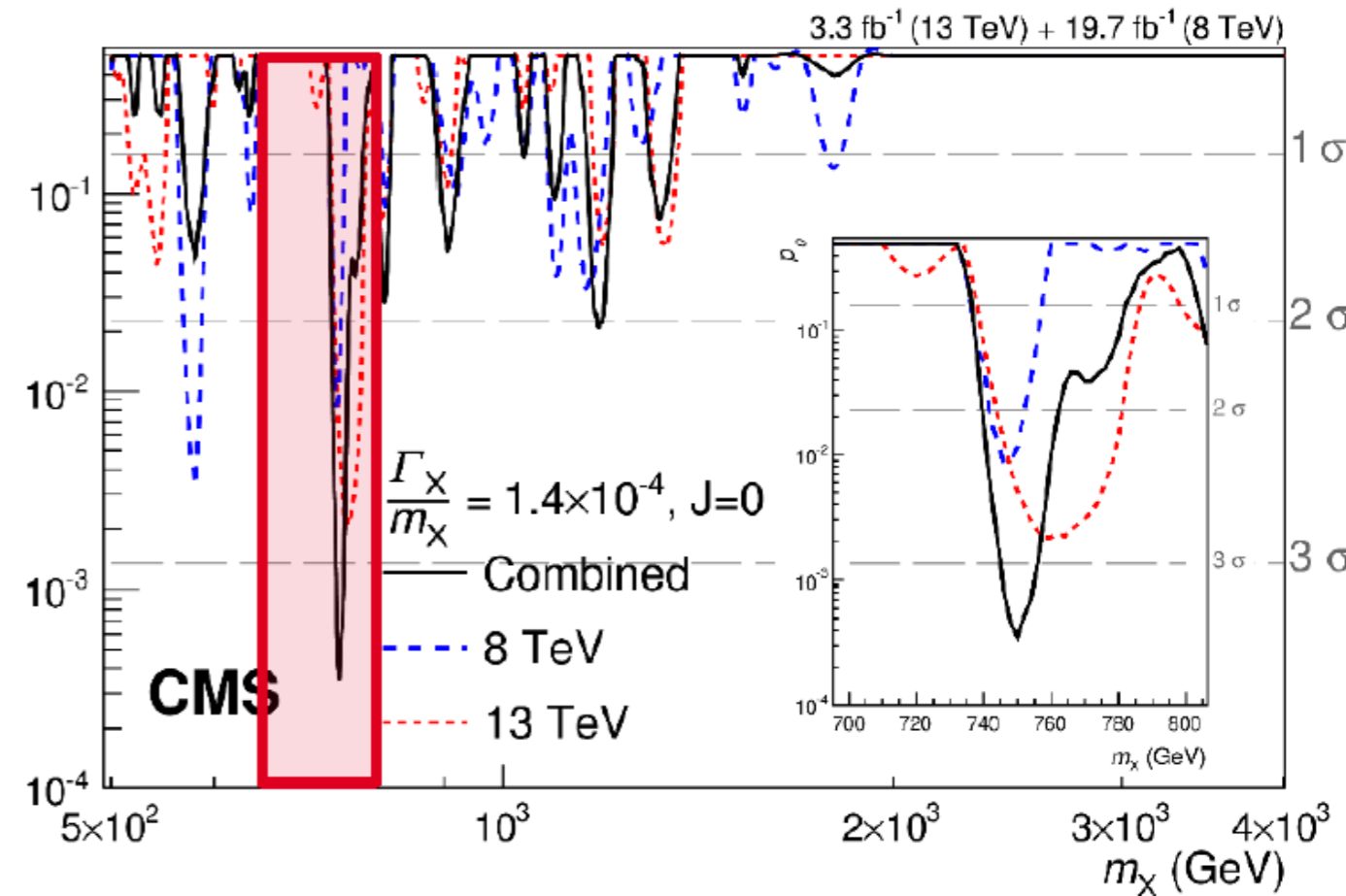
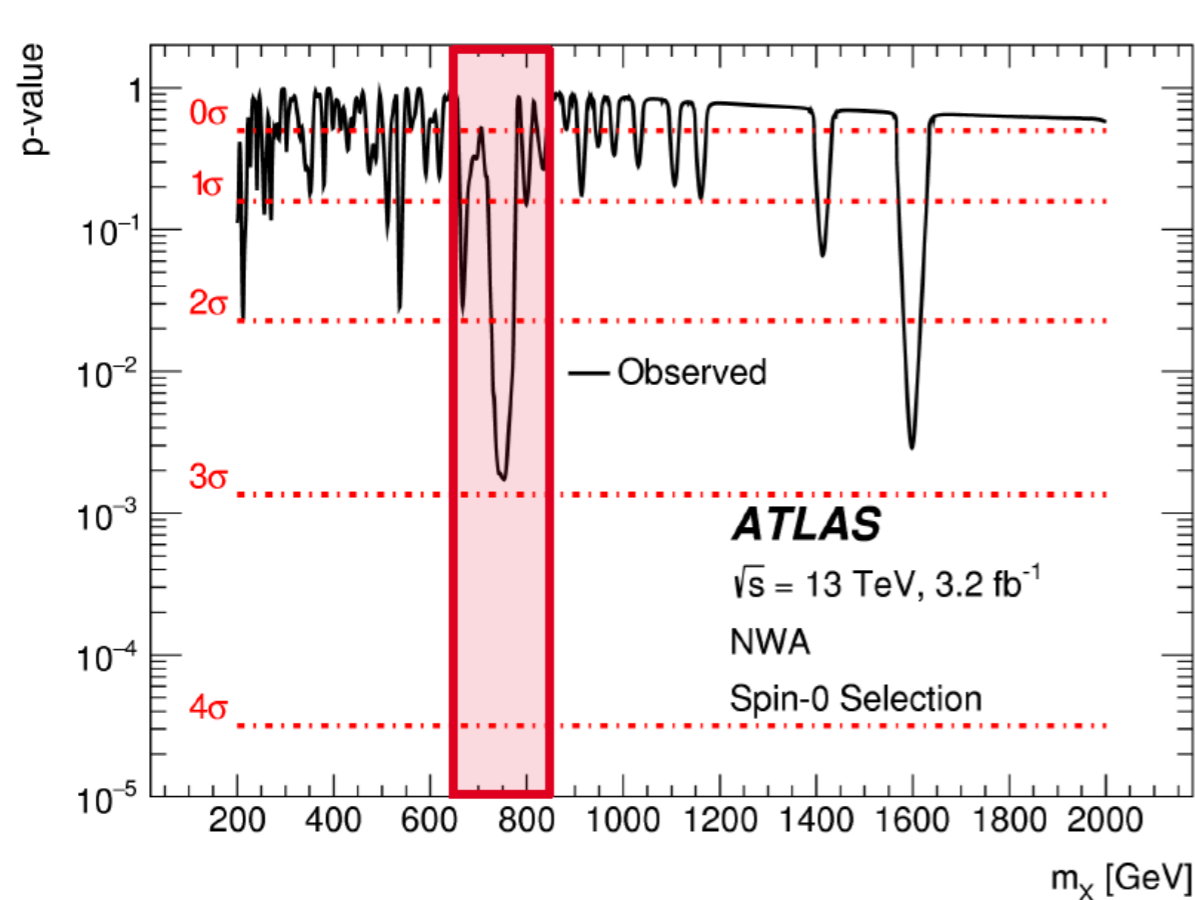
Chaque point est affecté d'une **incertitude statistique** liée au nombre  $n$  d'événements dans le **bin** – intervalle de résultats – de  $1/\sqrt{n}$  (lorsque  $n$  est grand).

Et le résultat peut **fluctuer** selon cette **incertitude**

« On manque de stat ! »



# Revenons a la « bosse » de 2015



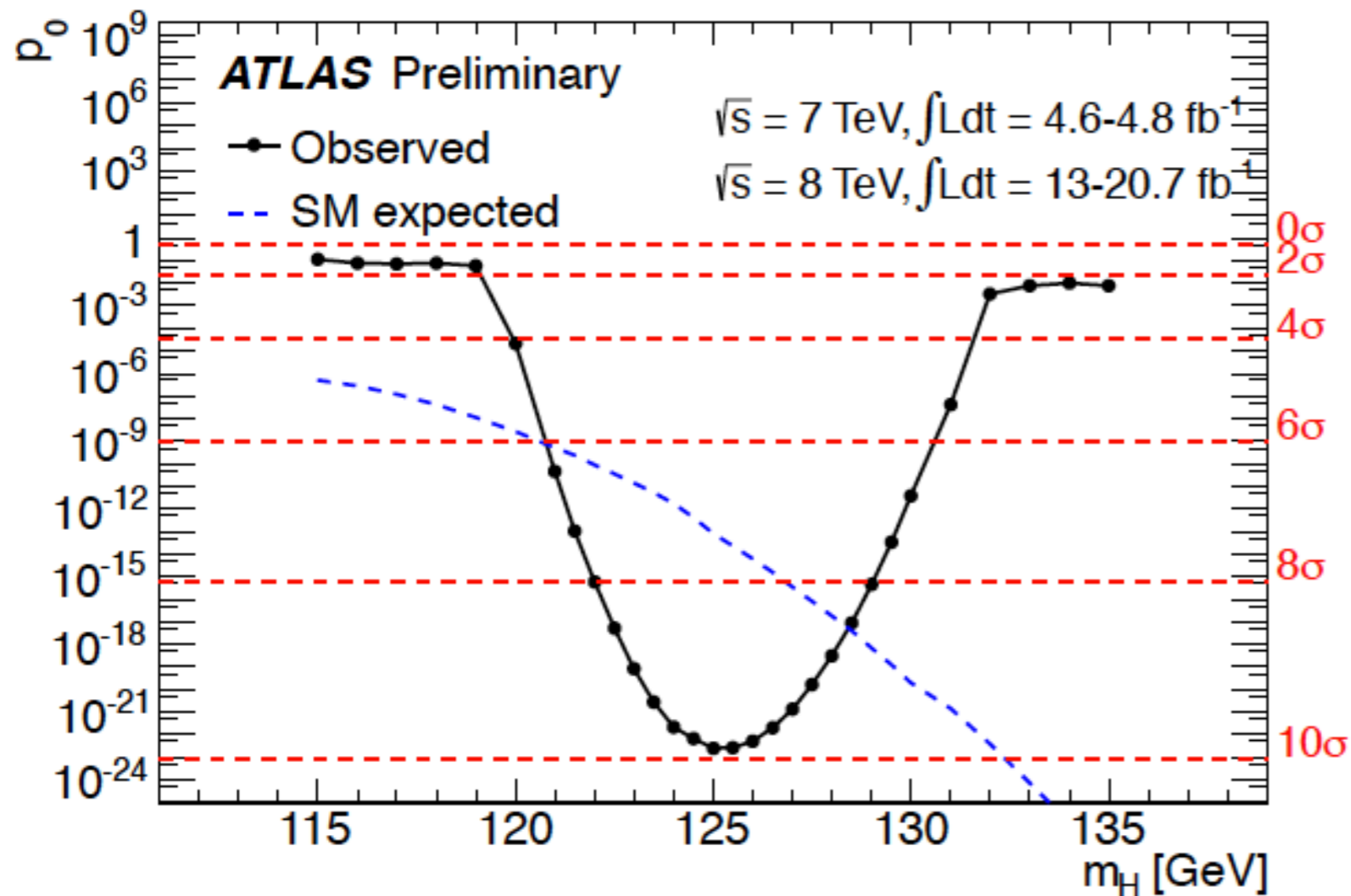
signification statistique inférieure à 3 sigmas: il ne s'agit pas d'une découverte.

Il fallait réaliser plus de mesures pour conclure.

Dans les collisions de 2016, ces bosses ont disparu:

il s'agissait de fluctuations statistiques !

# Alors que pour le boson de Higgs...



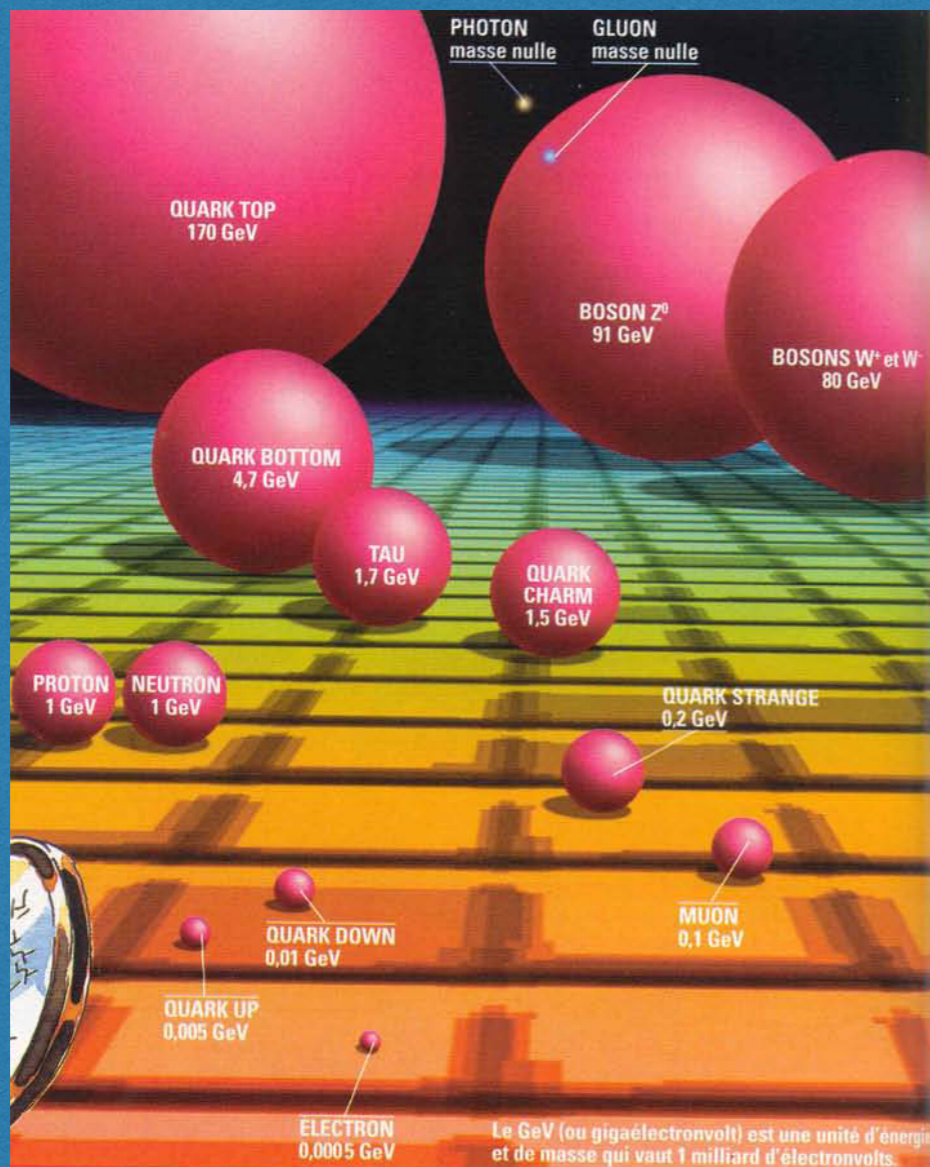
Probabilité que le signal observé ne soit en fait que du bruit de fond:  
1 chance sur  $10^{24}$  !

# Et ensuite ?

- Est-ce qu'on doit arrêter après la découverte du boson de Higgs?
- **Bien sur que non**



# Les questions reliées au Higgs



Il n'explique pas pourquoi les particules élémentaires ont des masses aussi différentes



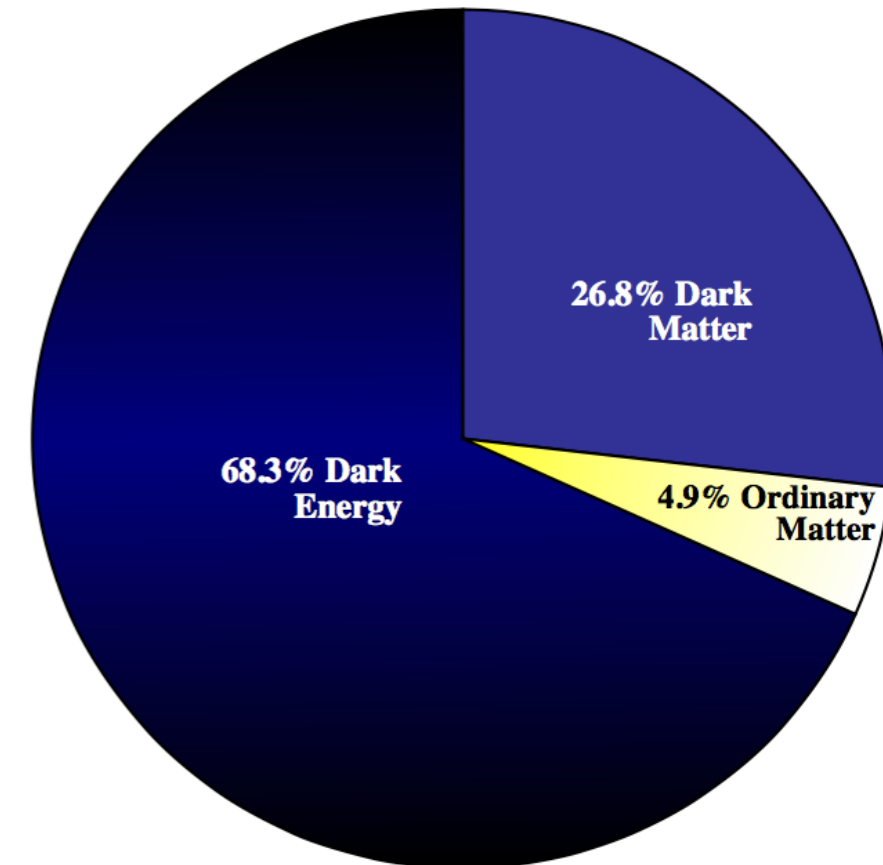
La masse du Boson de Higgs est "extraordinaire" (aussi improbable qu'un glaçon dans du feu)

# Particules élémentaires et univers ?

Les particules du Modèle Standard ne rendent compte que de <5% de l'énergie totale de l'univers !

- **matière noire:** masse manquante à la dynamique d'objets astrophysiques, la formation des grandes structures et la cosmologie de l'univers - origines possibles:
  - *nouvelles particules ?*
  - *gravité modifiée ?*
- **énergie noire:** expansion accélérée de l'univers - origines possibles:
  - *nouvelle matière ?* champs scalaires, «fluides»
  - *gravité modifiée ?* dimensions supplémentaires,...

▣ Le Modèle Standard ne permet pas d'expliquer tout le contenu de l'univers ! Nécessité d'une «**nouvelle physique**»...





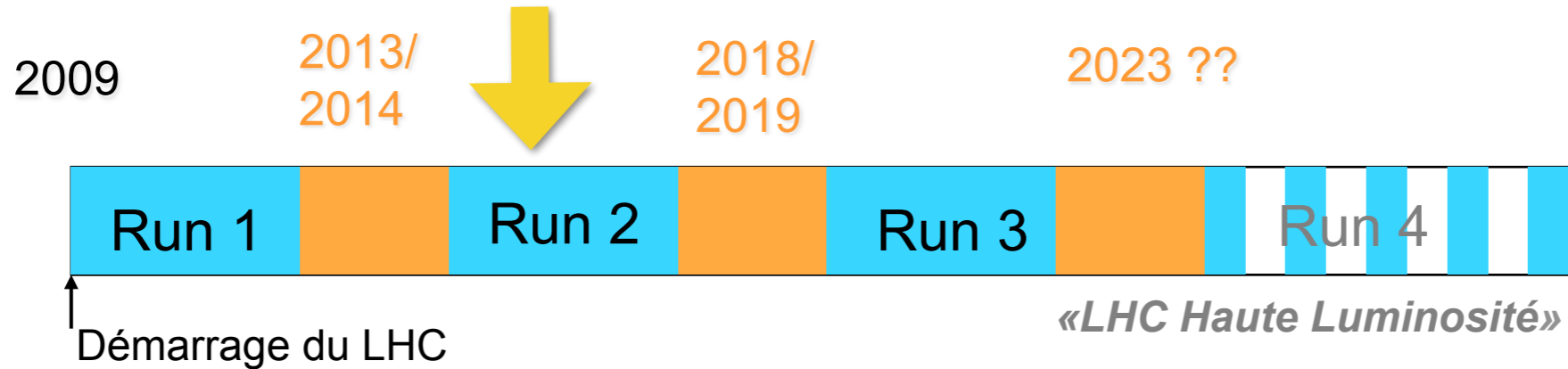
# Dark Matter

# Matière Noire



# Quoi attendre dans le futur?

- Nous ne sommes qu'au début du programme du LHC:



- Bien sur, nous espérons découvrir de nouvelles particules qui pourraient nous aider à comprendre la **matière noire** par exemple. Des candidats pour la matière noire sont les particules **supersymétriques** (SUSY)



# ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: August 2016

ATLAS Preliminary

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

Model	$e, \mu, \tau, \gamma$	Jets	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$	Reference	
<b>Inclusive Searches</b>	MSUGRA/CMSSM	0-3 $e, \mu$ /1-2 $\tau$	2-10 jets/3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.85 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	13.3	$\tilde{q}$	1.35 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$	ATLAS-CONF-2016-078
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	3.2	$\tilde{q}$	608 GeV	$m(\tilde{q})-m(\tilde{\chi}_1^0) < 5 \text{ GeV}$	1604.07773
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	13.3	$\tilde{g}$	1.86 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-078
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow qqW^\pm \tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	13.3	$\tilde{g}$	1.83 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}^\pm)=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$	ATLAS-CONF-2016-078
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq(\ell\ell/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	3 $e, \mu$	4 jets	-	13.2	$\tilde{g}$	1.7 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-037
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qqWZ\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 jets	Yes	13.2	$\tilde{g}$	1.6 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 500 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-037
	GMSB ( $\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau$ + 0-1 $\ell$	0-2 jets	Yes	3.2	$\tilde{g}$	2.0 TeV		1607.05979
	GGM (bino NLSP)	2 $\gamma$	-	Yes	3.2	$\tilde{g}$	1.65 TeV	$c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}$	1606.09150
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.37 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 950 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu < 0$	1507.05493
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	2 jets	Yes	13.3	$\tilde{g}$	1.8 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 680 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu > 0$	ATLAS-CONF-2016-066
	GGM (higgsino NLSP)	2 $e, \mu$ (Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	900 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	
<b>3<sup>rd</sup> gen. <math>\tilde{g}</math> med.</b>	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0	3 $b$	Yes	14.8	$\tilde{g}$	1.89 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-052
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	14.8	$\tilde{g}$	1.89 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-052
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.37 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) < 300 \text{ GeV}$	1407.0600
<b>3<sup>rd</sup> gen. squarks direct production</b>	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $b$	Yes	3.2	$\tilde{b}_1$	840 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 100 \text{ GeV}$	1606.08772
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^\pm$	2 $e, \mu$ (SS)	1 $b$	Yes	13.2	$\tilde{b}_1$	325-685 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 150 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_1^\pm) = m(\tilde{\chi}_1^0) + 100 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-037
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$	0-2 $e, \mu$	1-2 $b$	Yes	4.7/13.3	$\tilde{t}_1$	117-170 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 2m(\tilde{\chi}_1^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$	1209.2102, ATLAS-CONF-2016-077
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $t\tilde{\chi}_1^0$	0-2 $e, \mu$	0-2 jets/1-2 $b$	Yes	4.7/13.3	$\tilde{t}_1$	90-198 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1506.08616, ATLAS-CONF-2016-077
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet	Yes	3.2	$\tilde{t}_1$	90-323 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0)=5 \text{ GeV}$	1604.07773
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	150-600 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	13.3	$\tilde{t}_2$	290-700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-038
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + h$	1 $e, \mu$	6 jets + 2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_2$	320-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1506.08616
<b>EW direct</b>	$\tilde{\ell}_{L,R}\tilde{\ell}_{L,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\ell}$	90-335 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tilde{\ell}\nu(\ell\bar{\nu})$	2 $e, \mu$	0	Yes	13.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	640 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	ATLAS-CONF-2016-096
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tilde{\tau}\nu(\tau\bar{\nu})$	2 $\tau$	-	Yes	14.8	$\tilde{\chi}_1^\pm$	580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	ATLAS-CONF-2016-093
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_L\nu\tilde{\ell}_L(\bar{\nu}\nu), \tilde{\ell}\nu\tilde{\ell}_L(\bar{\nu}\nu)$	3 $e, \mu$	0	Yes	13.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	1.0 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	ATLAS-CONF-2016-096
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 $e, \mu$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	425 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \tilde{\ell}$ decoupled	1403.5294, 1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\bar{b}/WW/\tau\tau/\gamma\gamma$	$e, \mu, \gamma$	0-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \tilde{\ell}$ decoupled	1501.07110
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\tau}_R\ell$	4 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_{2,3}^0$	635 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	$\tilde{W}$	115-370 GeV	$c\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
	GGM (bino NLSP) weak prod.	2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{W}$	590 GeV	$c\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
<b>Long-lived particles</b>	Direct $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ 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 $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$	dE/dx trk	-	Yes	18.4	$\tilde{\chi}_1^\pm$	495 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	$\tilde{g}$	850 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	-	-	3.2	$\tilde{g}$	1.58 TeV		1606.05129
	Metastable $\tilde{g}$ R-hadron	dE/dx trk	-	-	3.2	$\tilde{g}$	1.57 TeV		1604.04520
	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	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, \tau > 10 \text{ ns}$	1411.6795
	GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$ , long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	440 GeV	$10 < \tau < \tan\beta < 50$	1409.5542
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\nu/e\mu\nu/\mu\mu\nu$	displ. $ee/e\mu/\mu\mu$	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$1 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}, \text{SPS8 model}$	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	$7 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 740 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.3 \text{ TeV}$	1504.05162
	$6 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 480 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.1 \text{ TeV}$								
<b>RPV</b>	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/e\tau/\mu\tau$	$e\mu, e\tau, \mu\tau$	-	-	3.2	$\tilde{\nu}_\tau$	1.9 TeV	$\lambda'_{311}=0.11, \lambda'_{132/133/233}=0.07$	1607.08079
	Bilinear RPV CMSSM	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.45 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{LSP} < 1 \text{ mm}$	1404.2500
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\nu, e\mu\nu, \mu\mu\nu$	4 $e, \mu$	-	Yes	13.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	1.14 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 400 \text{ GeV}, \lambda_{12k} \neq 0 (k=1,2)$	ATLAS-CONF-2016-075
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\nu_e, e\nu_\tau$	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	4-5 large- $R$ jets	-	14.8	$\tilde{g}$	1.08 TeV	$\text{BR}(t)=\text{BR}(b)=\text{BR}(c)=0\%$	ATLAS-CONF-2016-057
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\tilde{q}$	0	4-5 large- $R$ jets	-	14.8	$\tilde{g}$	1.55 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=800 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-057
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\tilde{q}$	1 $e, \mu$	8-10 jets/0-4 $b$	-	14.8	$\tilde{g}$	1.75 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=700 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-094
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 t, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	1 $e, \mu$	8-10 jets/0-4 $b$	-	14.8	$\tilde{g}$	1.4 TeV	$625 \text{ GeV} < m(\tilde{t}_1) < 850 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2016-094
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	0	2 jets + 2 $b$	-	15.4	$\tilde{t}_1$	410 GeV		ATLAS-CONF-2016-022, ATLAS-CONF-2016-084
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\ell$	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	
<b>Other</b>	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $c$	Yes	20.3	$\tilde{c}$	510 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.

10<sup>-1</sup>

1

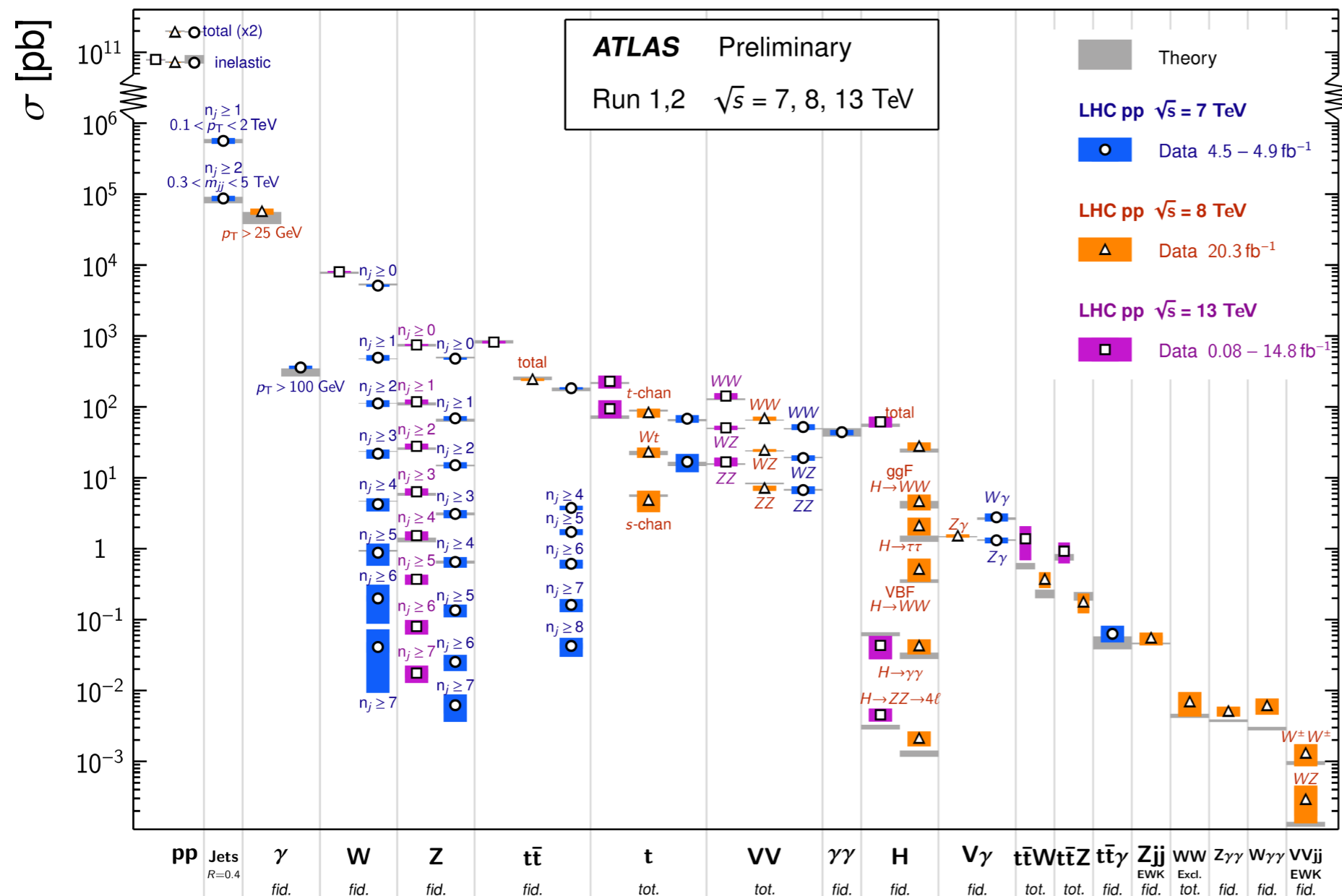
Mass scale [TeV]

# La moisson du LHC

- Découvertes prennent souvent du temps...
- Au LHC, nous réalisons des milliers de mesures nous apprenant de plus en plus de choses sur les constituants élémentaires de la matière, même sans découvrir de nouvelles particules

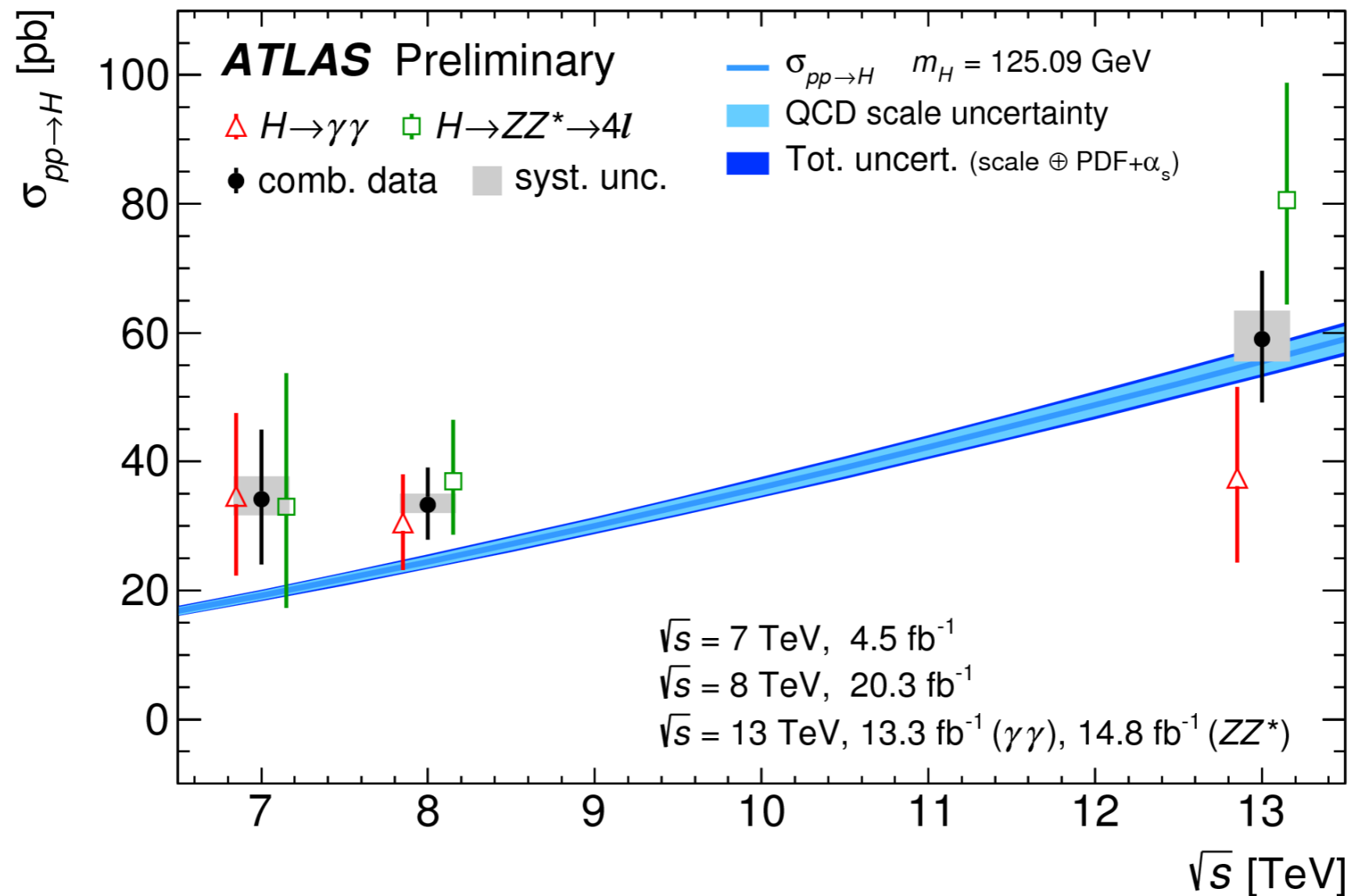
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: August 2016



**Comparaison du taux de production des particules du Modèle Standard avec les prédictions**

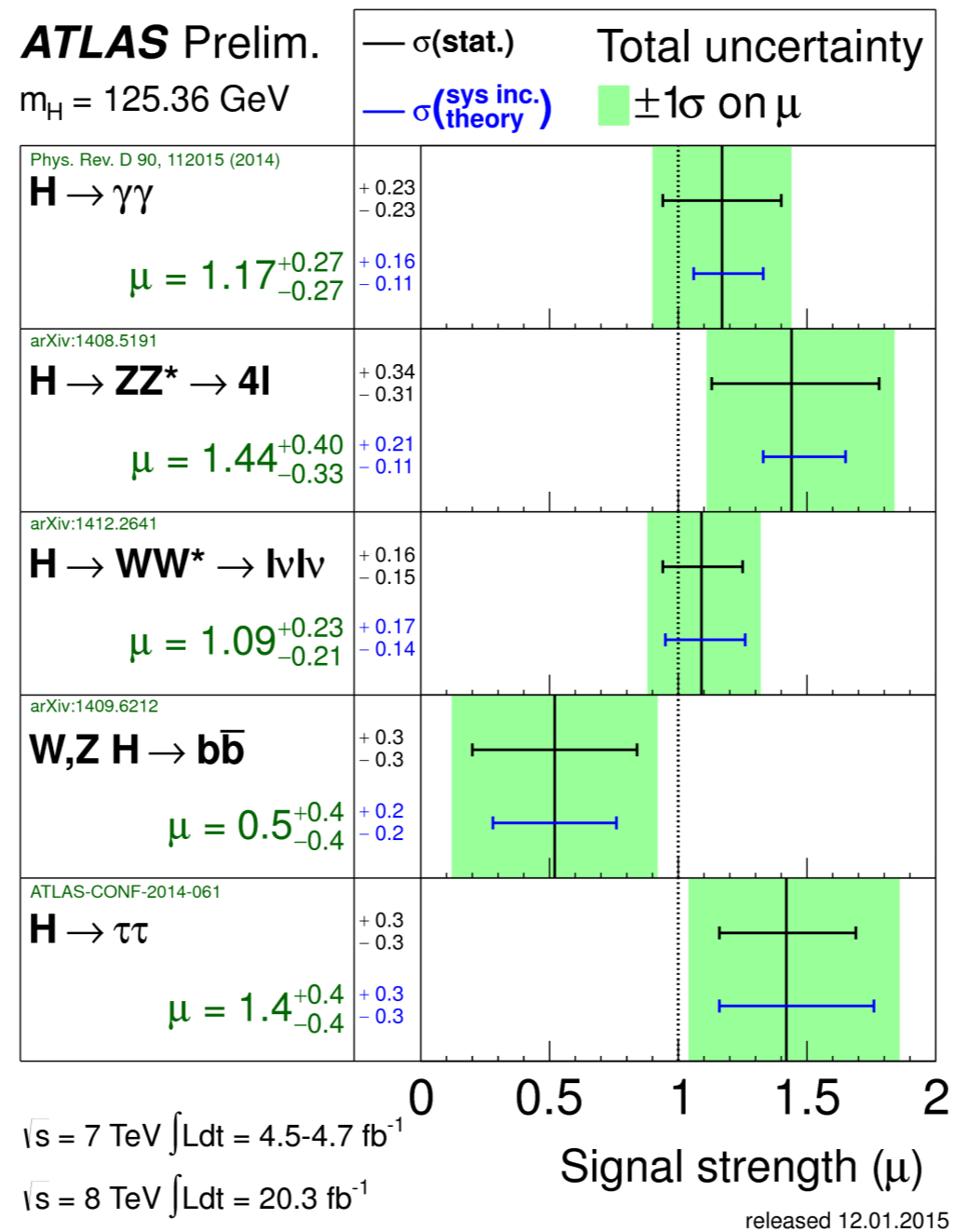
# La moisson du LHC



**Nombre de bosons de Higgs produit en fonction de l'énergie des collisions**



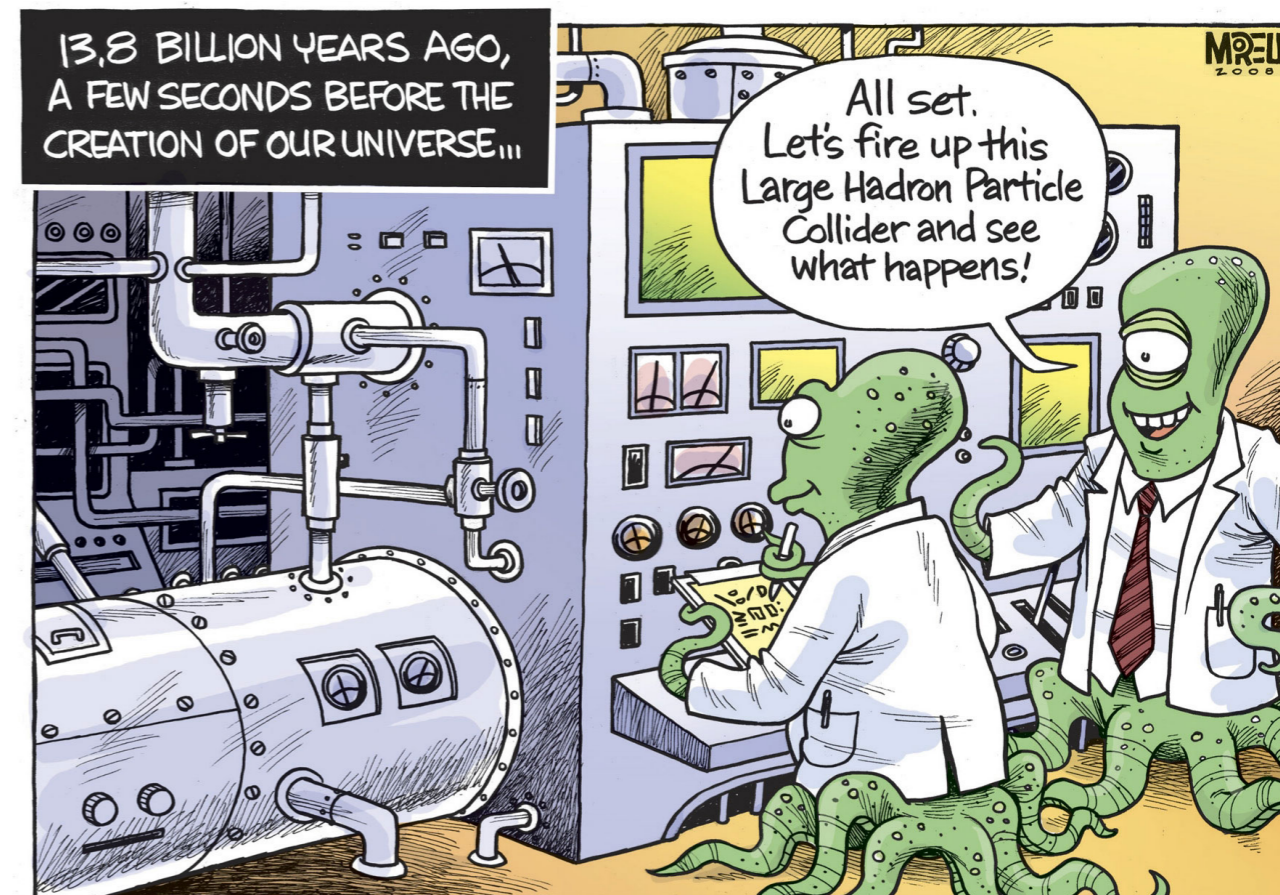
# La moisson du LHC



**Nombre de bosons de Higgs produit en fonction de son mode de désintégration**

# Conclusion

- **Le LHC est une fantastique aventure humaine et scientifique**
  - **Preuve de l'existence du Boson de Higgs en 2012 (Prix Nobel de physique en 2013) !**
  - Mais aussi des milliers de mesures moins « médiatiques » qui font avancer la compréhension des particules élémentaires et de l'univers...
- **Il reste encore de nombreuses questions irrésolues (“noires”): nous cherchons activement de la “nouvelle physique”...**
  - Peut être de nouvelles découvertes dans le futur ? Patience et rigueur sont nos guides





# annexe

# Particules élémentaires, vide quantique

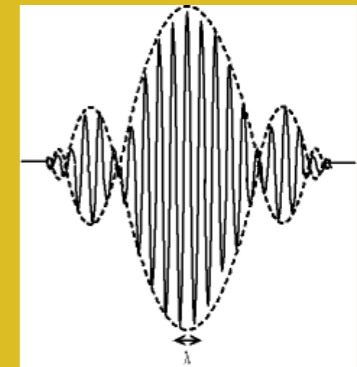
Vision "naive":

Vision "quantique":

Particules élémentaires



bille



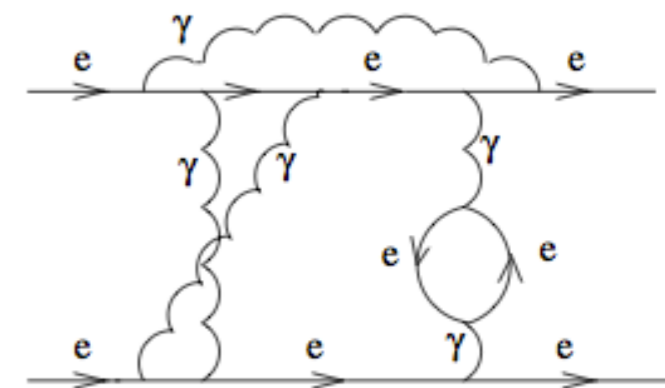
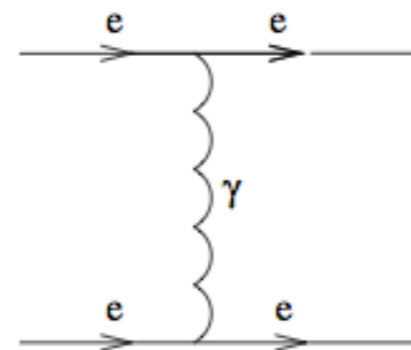
paquet d'onde  
excitation d'un champ

Vide

[rien]

état d'énergie  
minimale d'un champ

- inégalités d'Heisenberg  $\Delta E \Delta t > \hbar$
- création de particules virtuelles lourdes pendant un temps court
- fluctuations du vide, corrections radiatives



# $E=mc^2$

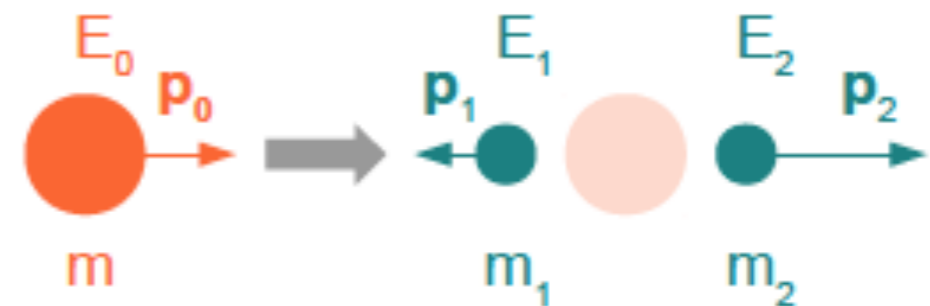
## Relativité restreinte

$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$  (p: quantité de mouvement)  
→ transformation énergie cinétique - masse

Création de particules «lourdes» lors de collisions de particules plus légères:

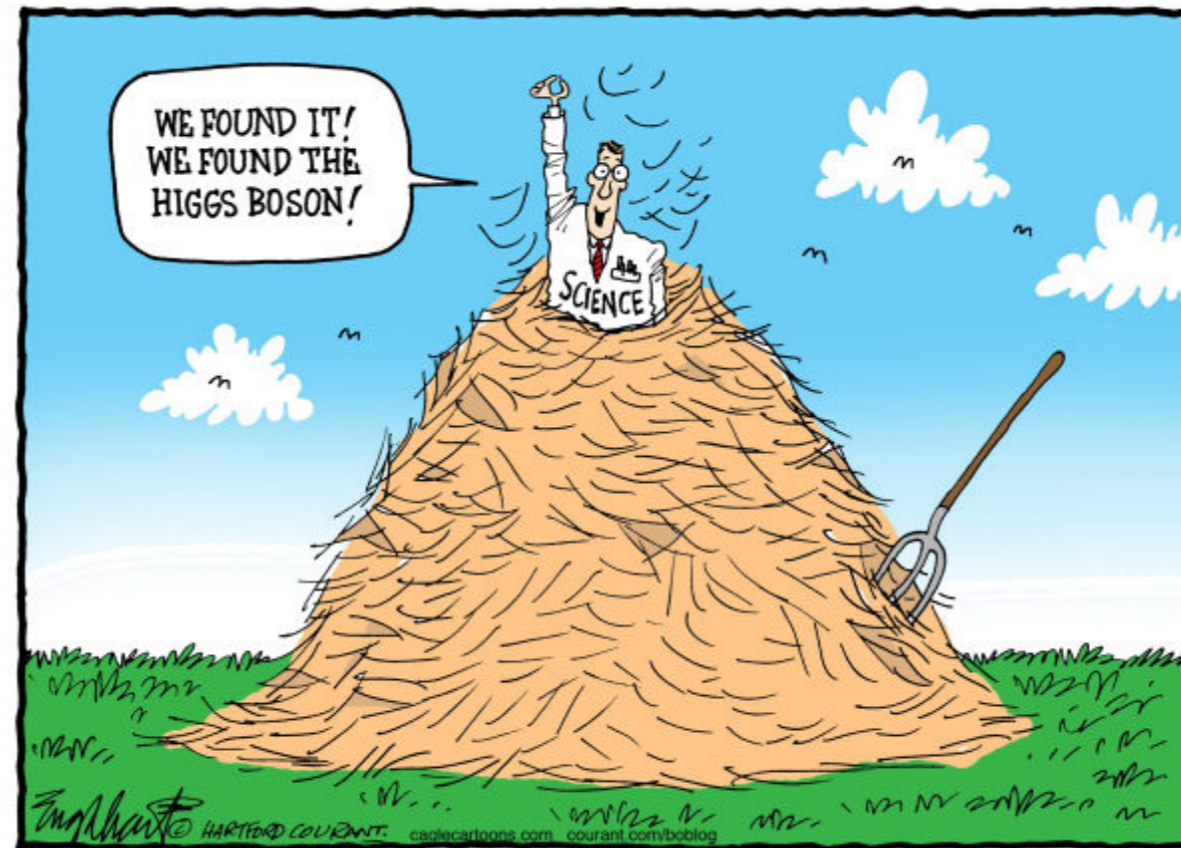


Désintégration de particules lourdes instables en particules plus légères:



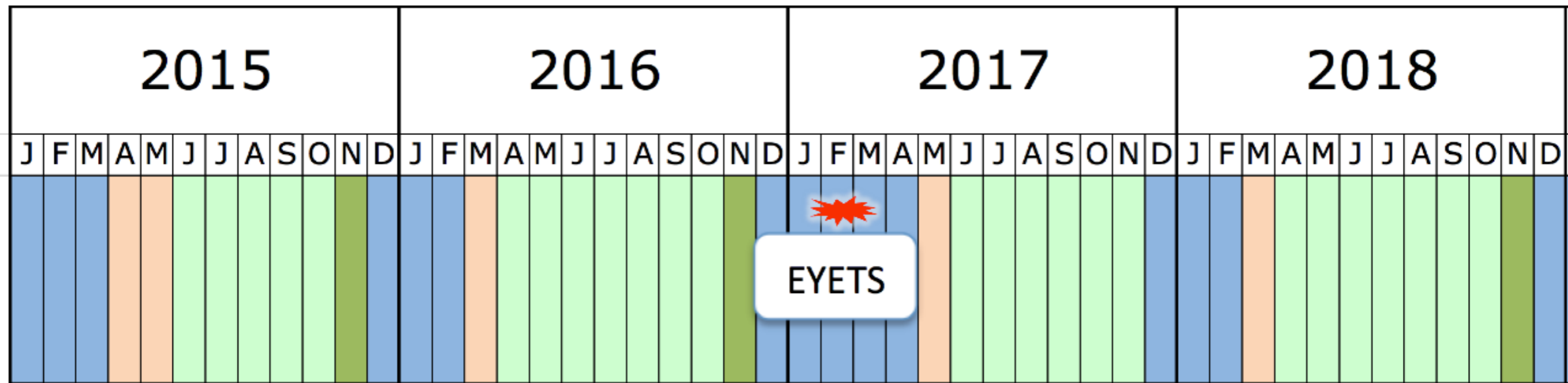
# Un exemple (simplifié) d'analyse dans ATLAS

## Le Boson de Higgs en deux photons

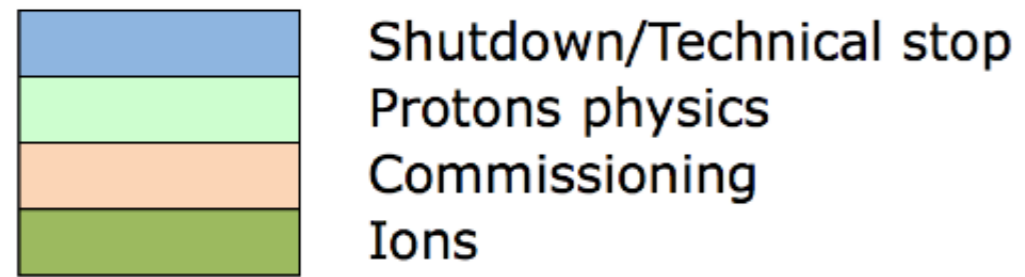


# Run 2 and Run 3

Ion runs end of 2018 (Pb-Pb)

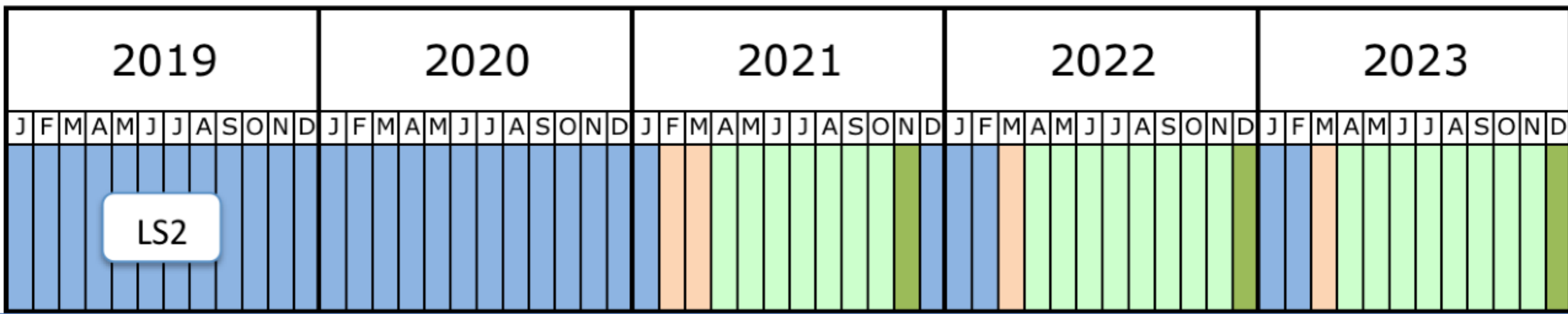


EYETS



>120 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)

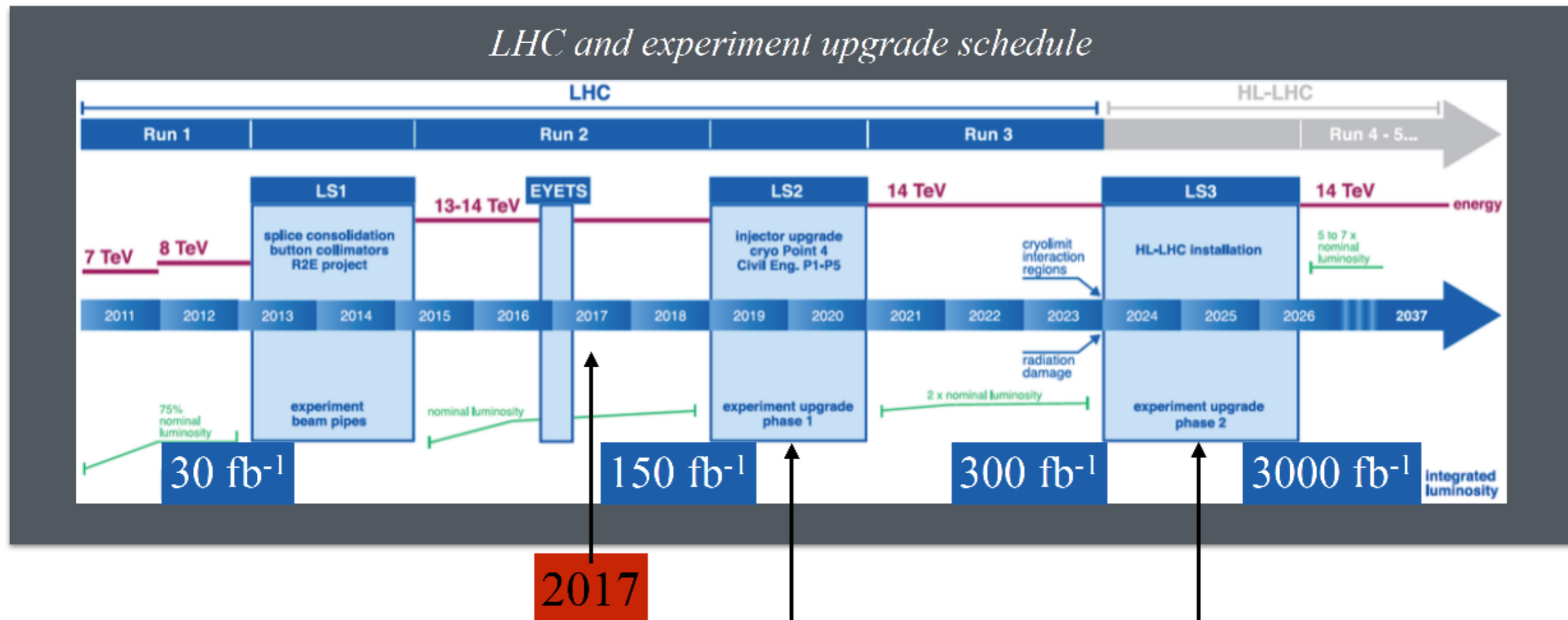
Σ 300 fb<sup>-1</sup> (14 TeV ?)



LS2

# Timeline for upgrades

Carlson 20



## ATLAS upgrade

2017

Upgrade 2019

Upgrade 2024

- 2019: significant upgrades in trigger readout electronics and L1 trigger electronics
- 2024: upgrades to tracker, calorimeters, muon system and trigger

Needed to cope with increasing pileup & add new features