

# La quête du boson de Higgs

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

Médiathèque municipale, Le Cannet des Maures  
26 avril 2013

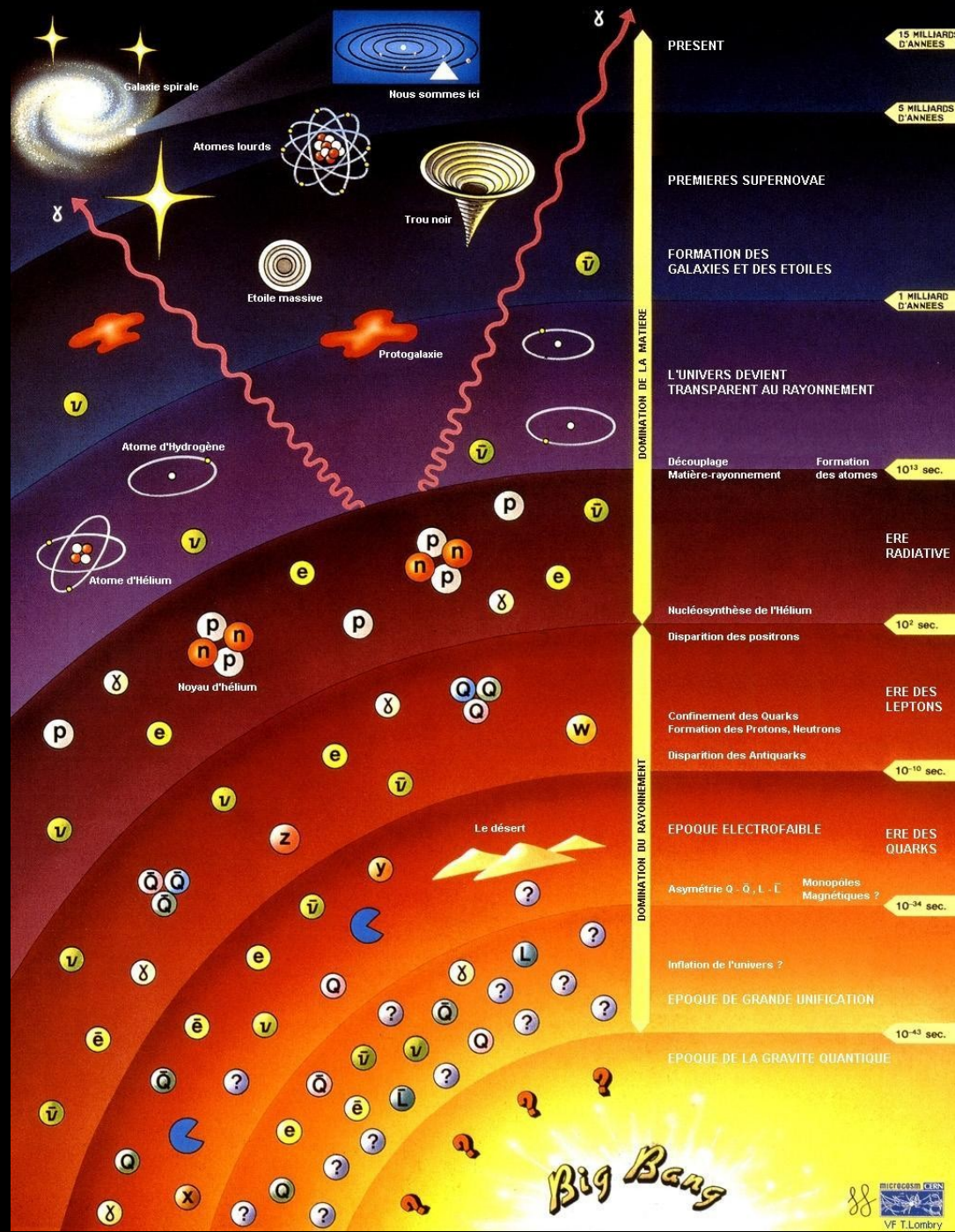


# De l'infiniment grand vers l'infiniment petit

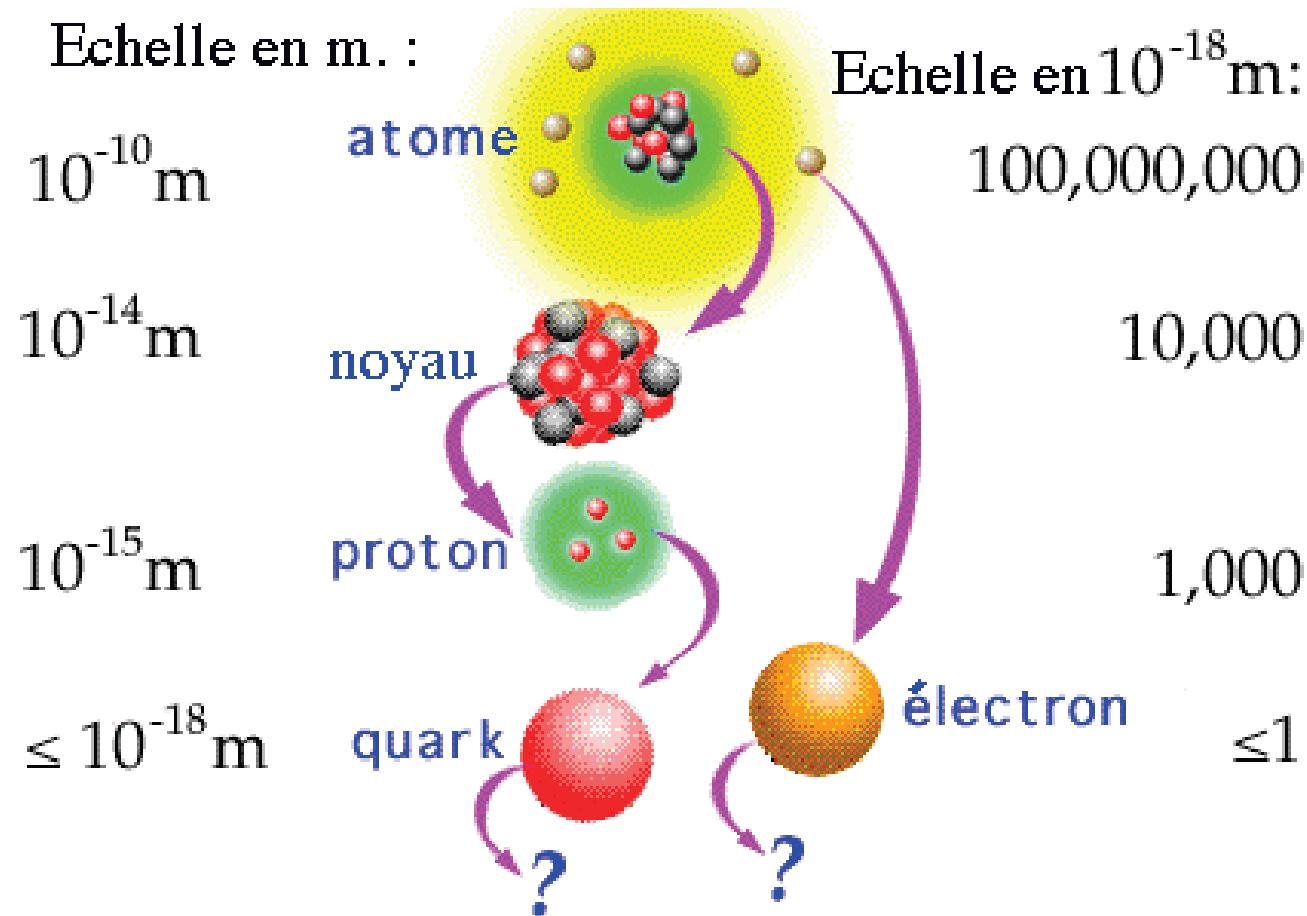




# L'histoire de l'Univers



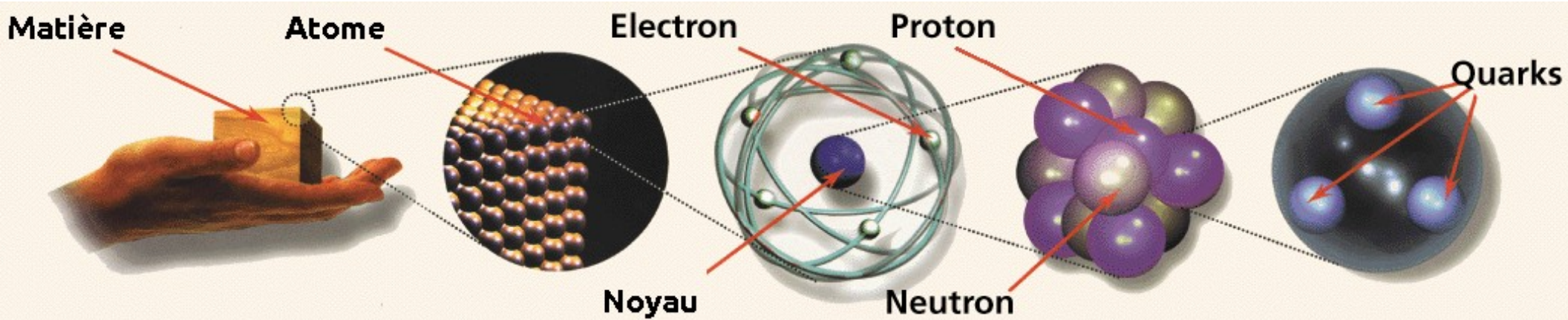
# Échelle des distances en physique des particules



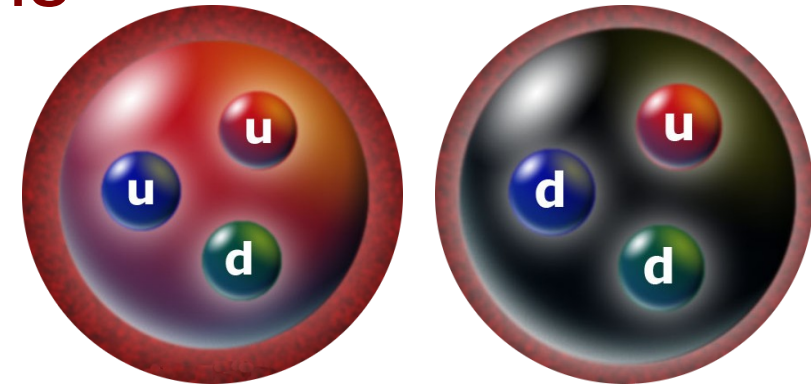
Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**



# De quoi est fait l'Univers visible ?

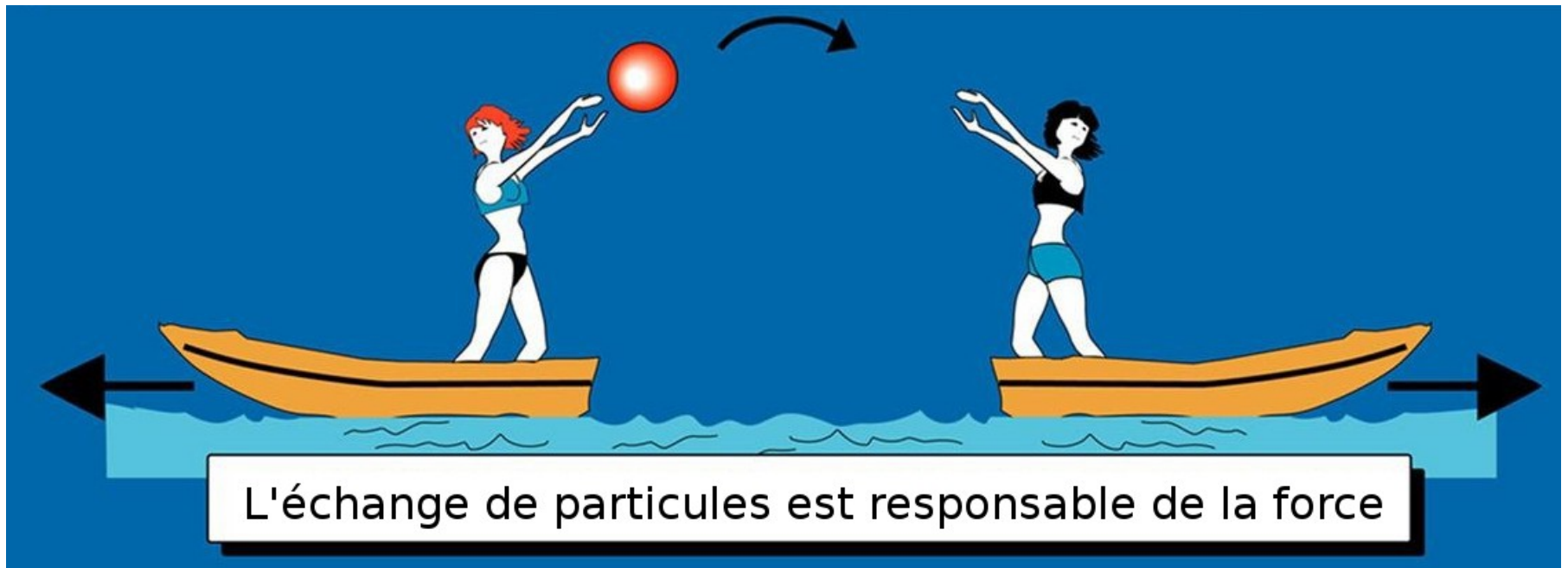


- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles



# Interaction fondamentale

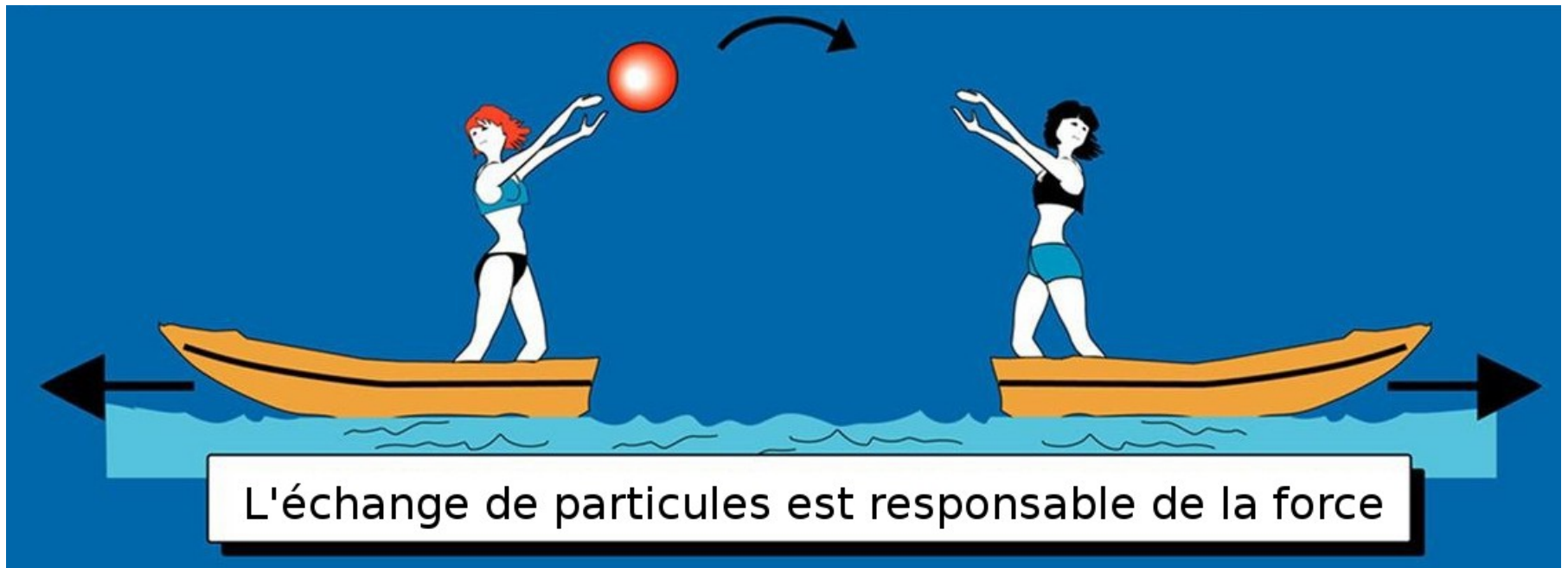
Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



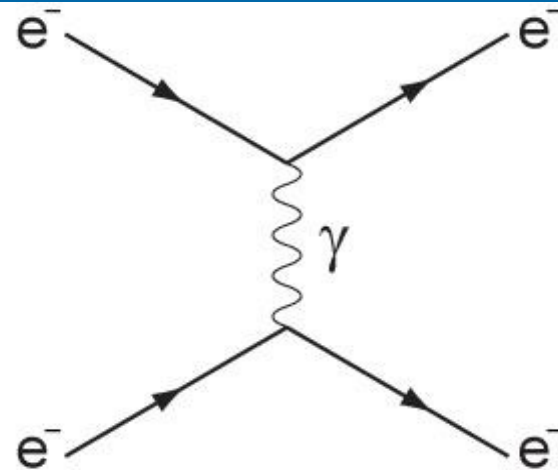


# Interaction fondamentale

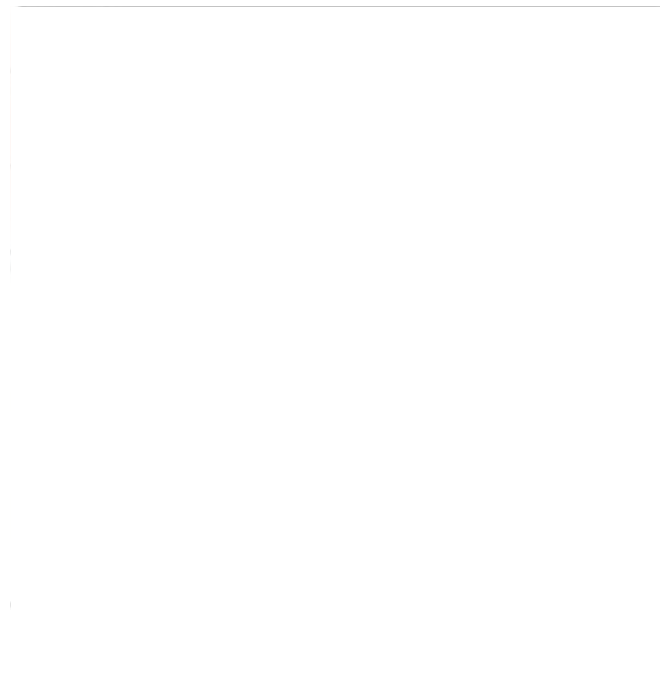
Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



En physique des particules :

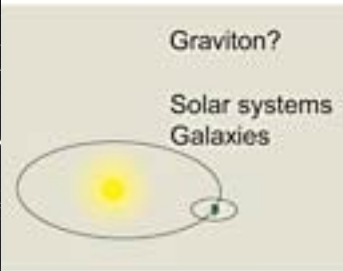


# Les forces





# Les forces



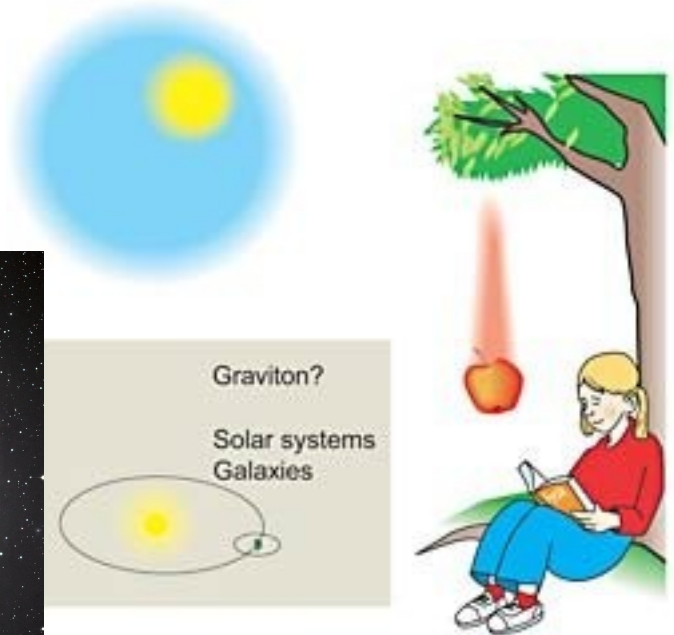
Graviton?

Solar systems  
Galaxies

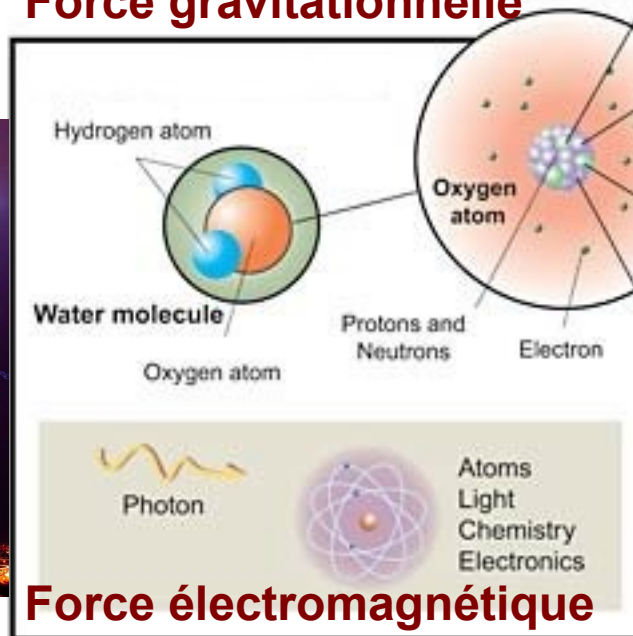


**Force gravitationnelle**

# Les forces



**Force gravitationnelle**

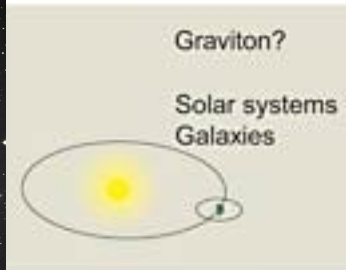


**Force électromagnétique**

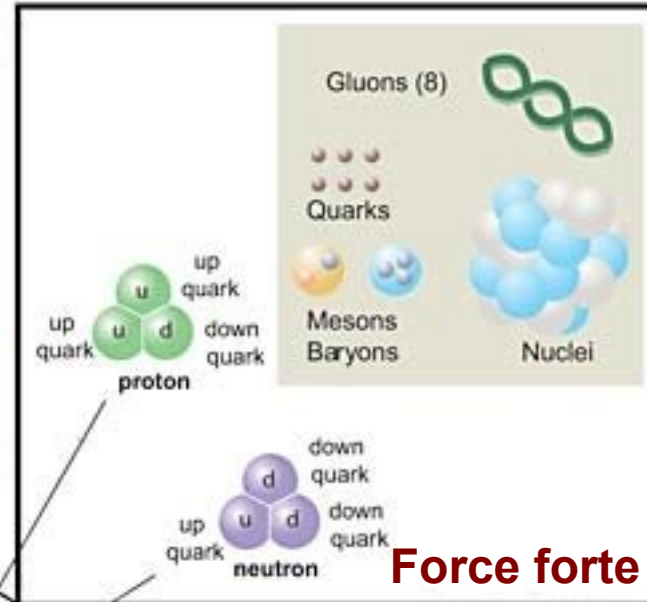




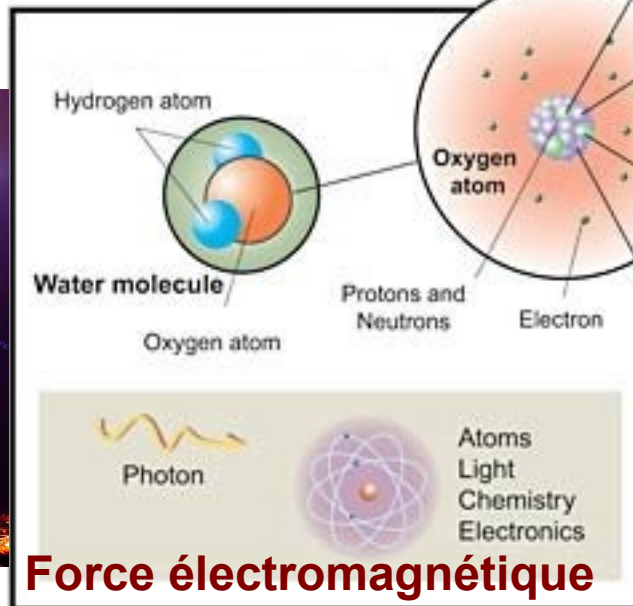
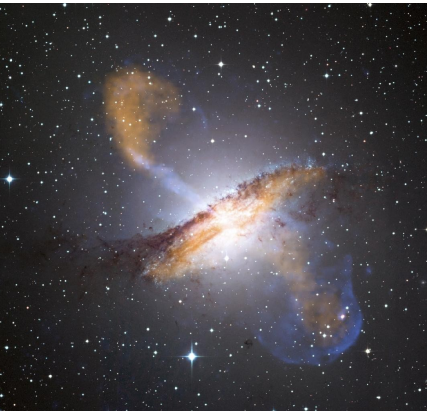
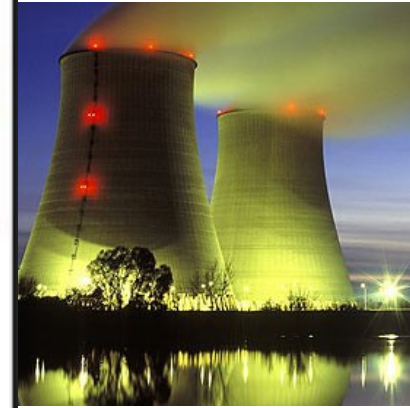
# Les forces



**Force gravitationnelle**



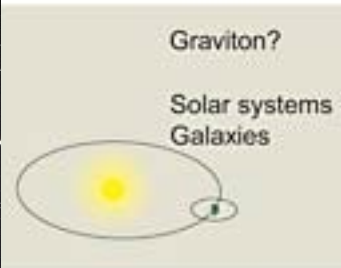
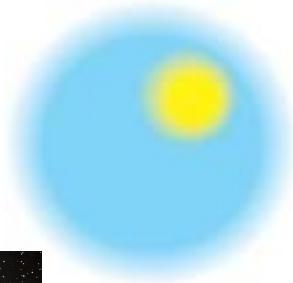
**Force forte**



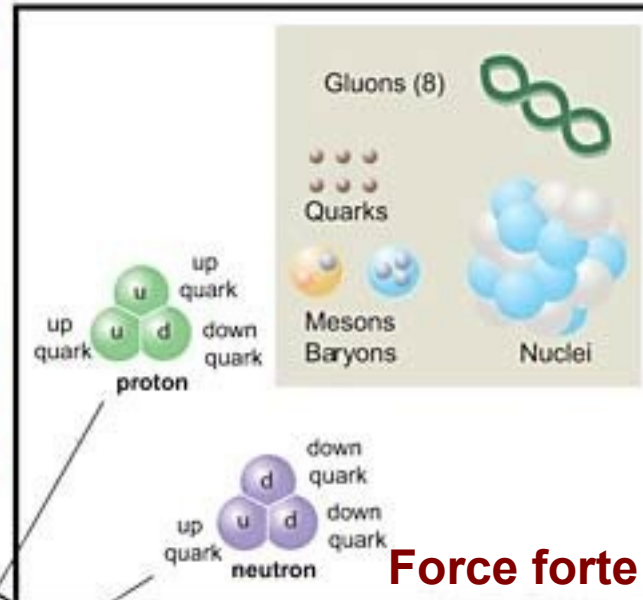
**Force électromagnétique**



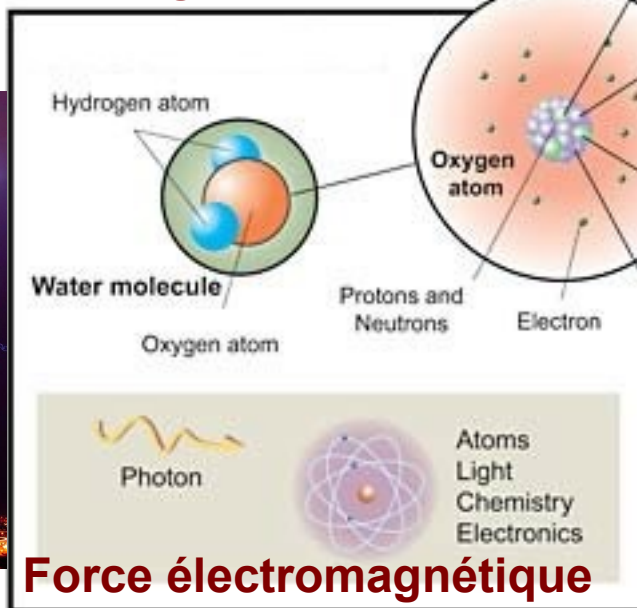
# Les forces



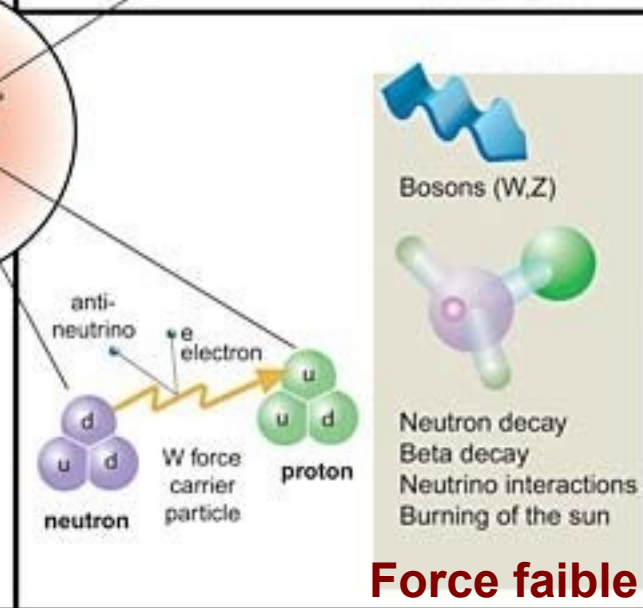
**Force gravitationnelle**



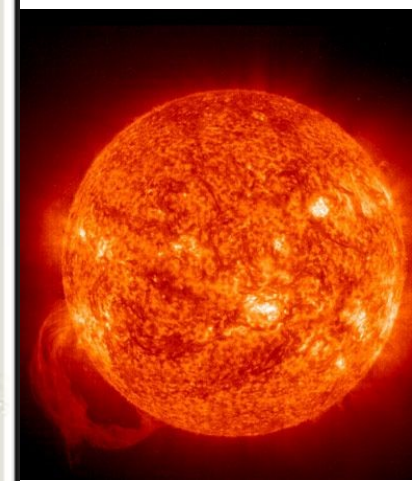
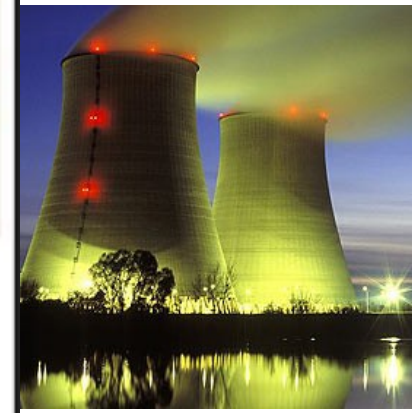
**Force forte**



**Force électromagnétique**

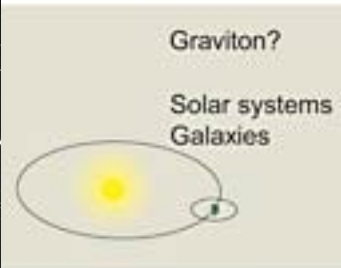


**Force faible**

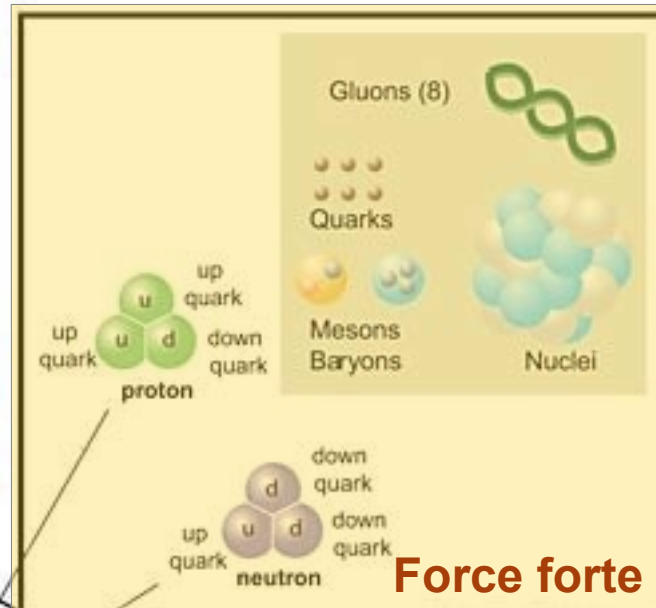




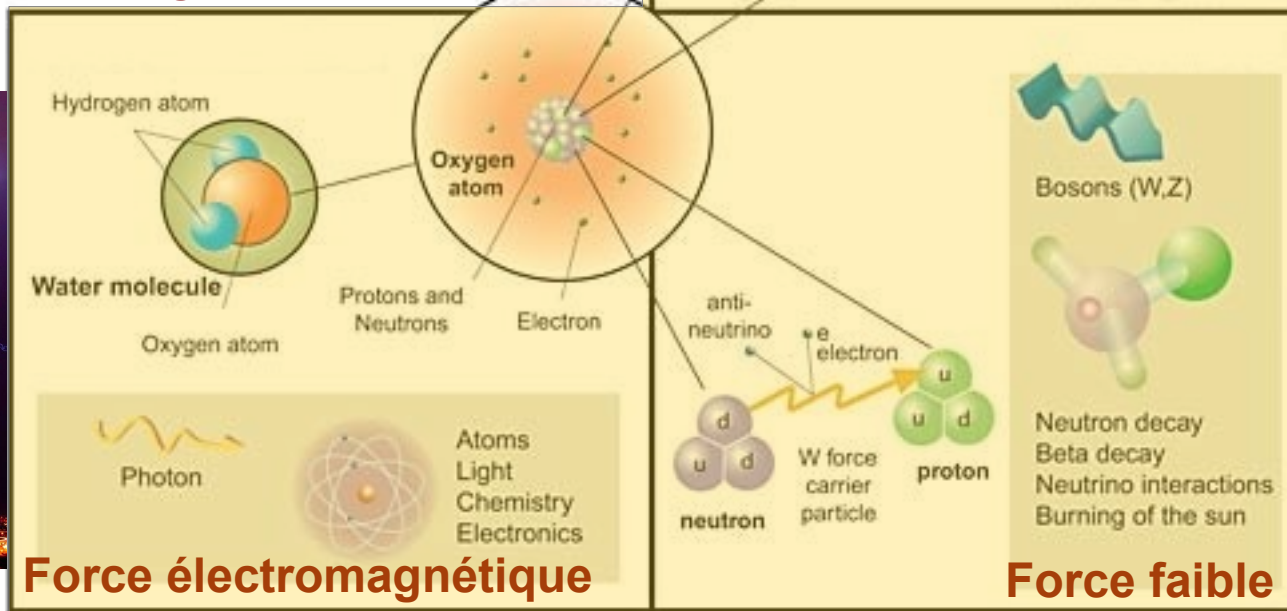
# Les forces



**Force gravitationnelle**

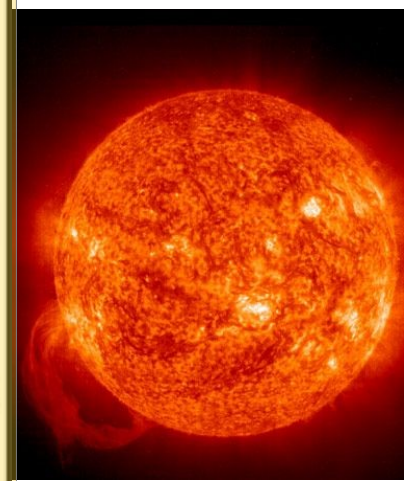
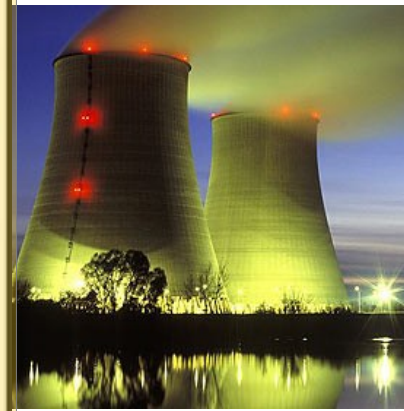


**Force forte**

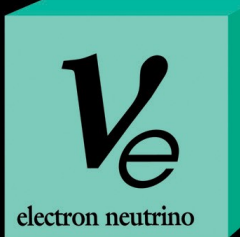
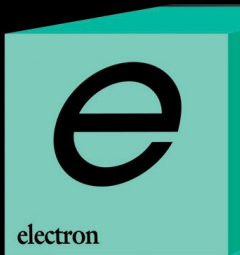


**Force électromagnétique**

**Force faible**



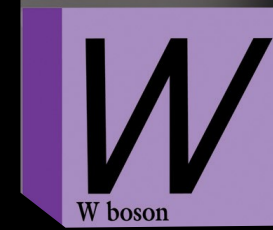
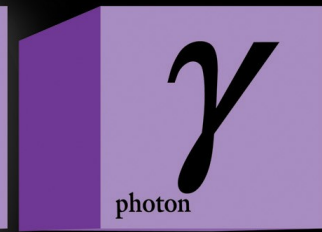
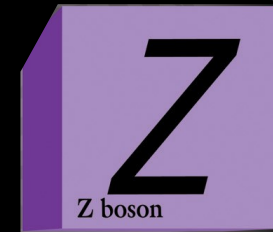
# Quarks



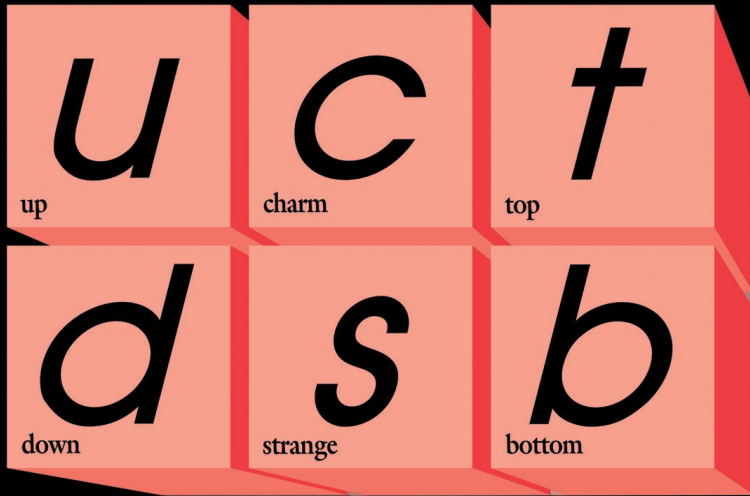
# Leptons

# Le modèle standard

# Forces

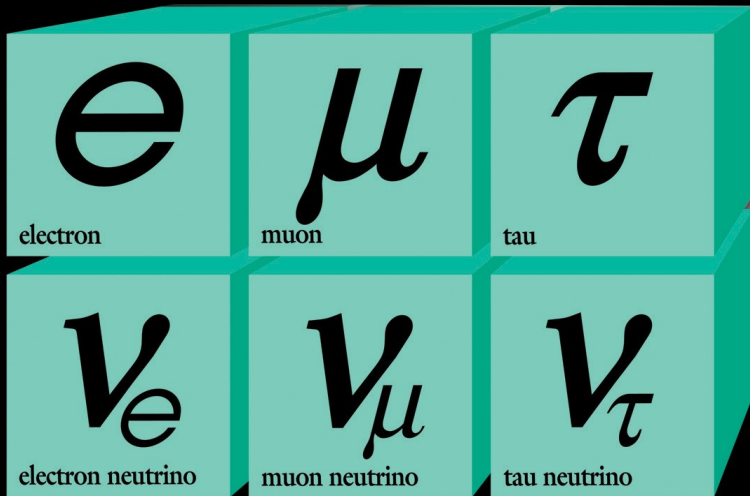
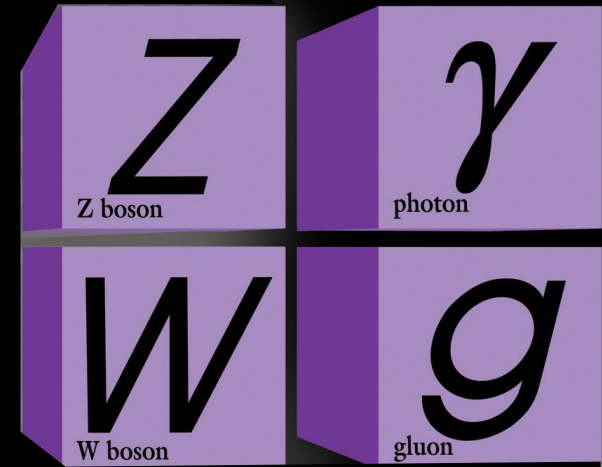


# Quarks



# Le modèle standard

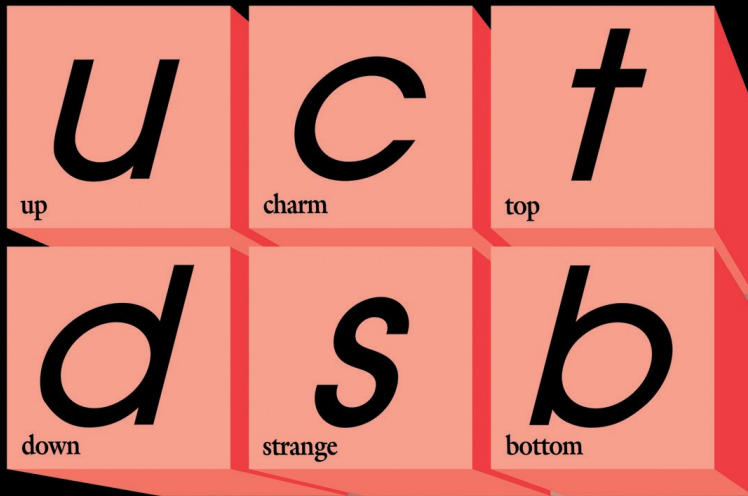
# Forces



# Leptons

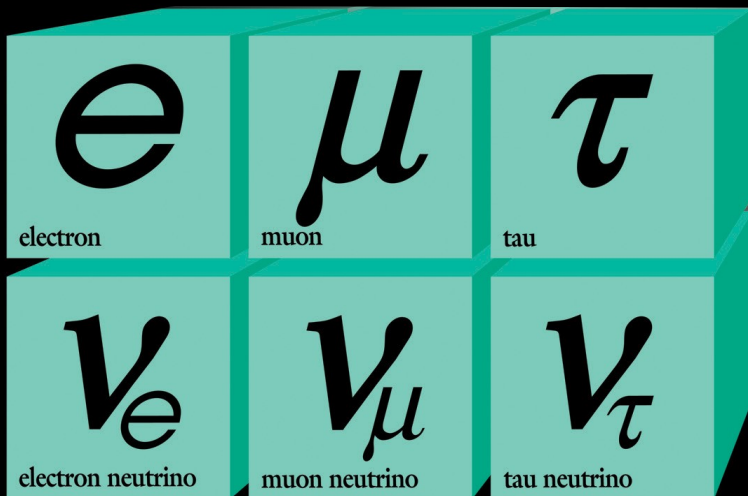
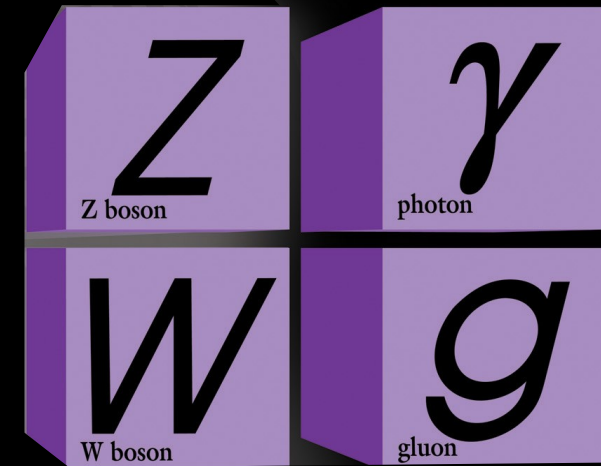


# Quarks



# Le modèle standard

# Forces

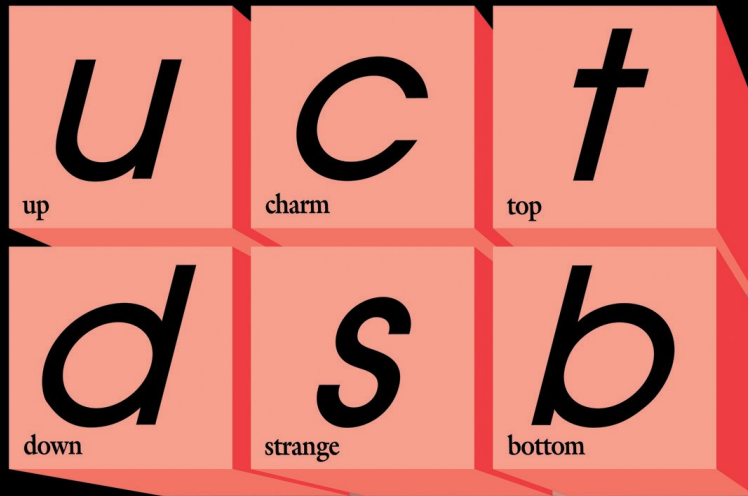


# Leptons

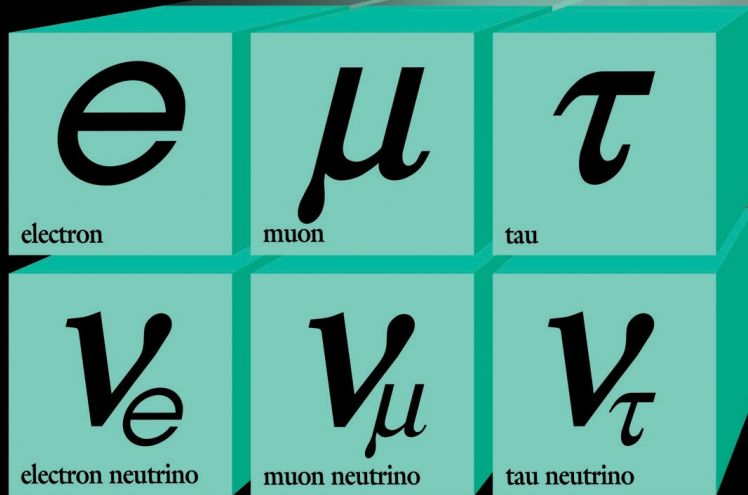
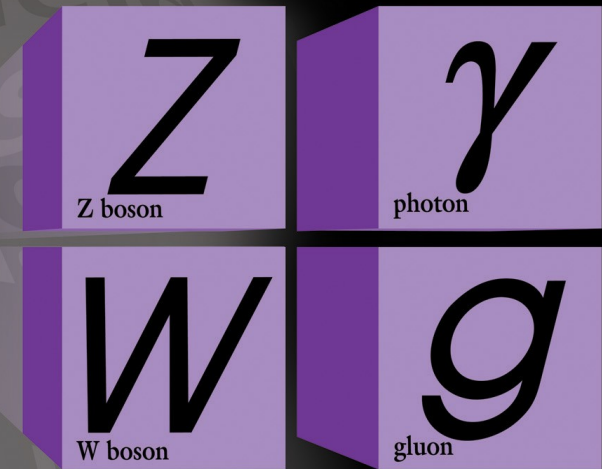
Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...

# Quarks

# Le modèle standard



# Forces



# Leptons

Solution : rajouter un champ de Higgs

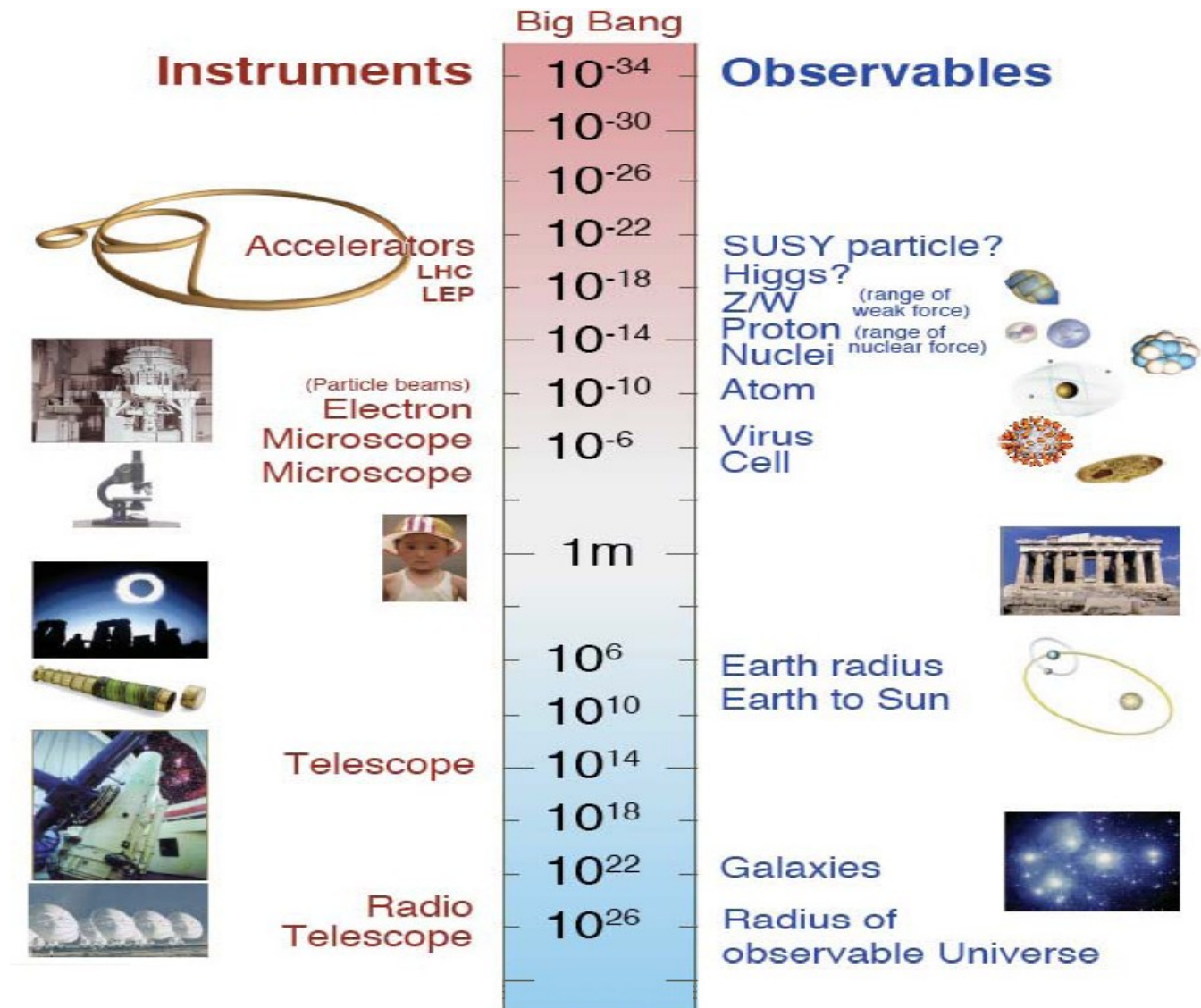
# Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- 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

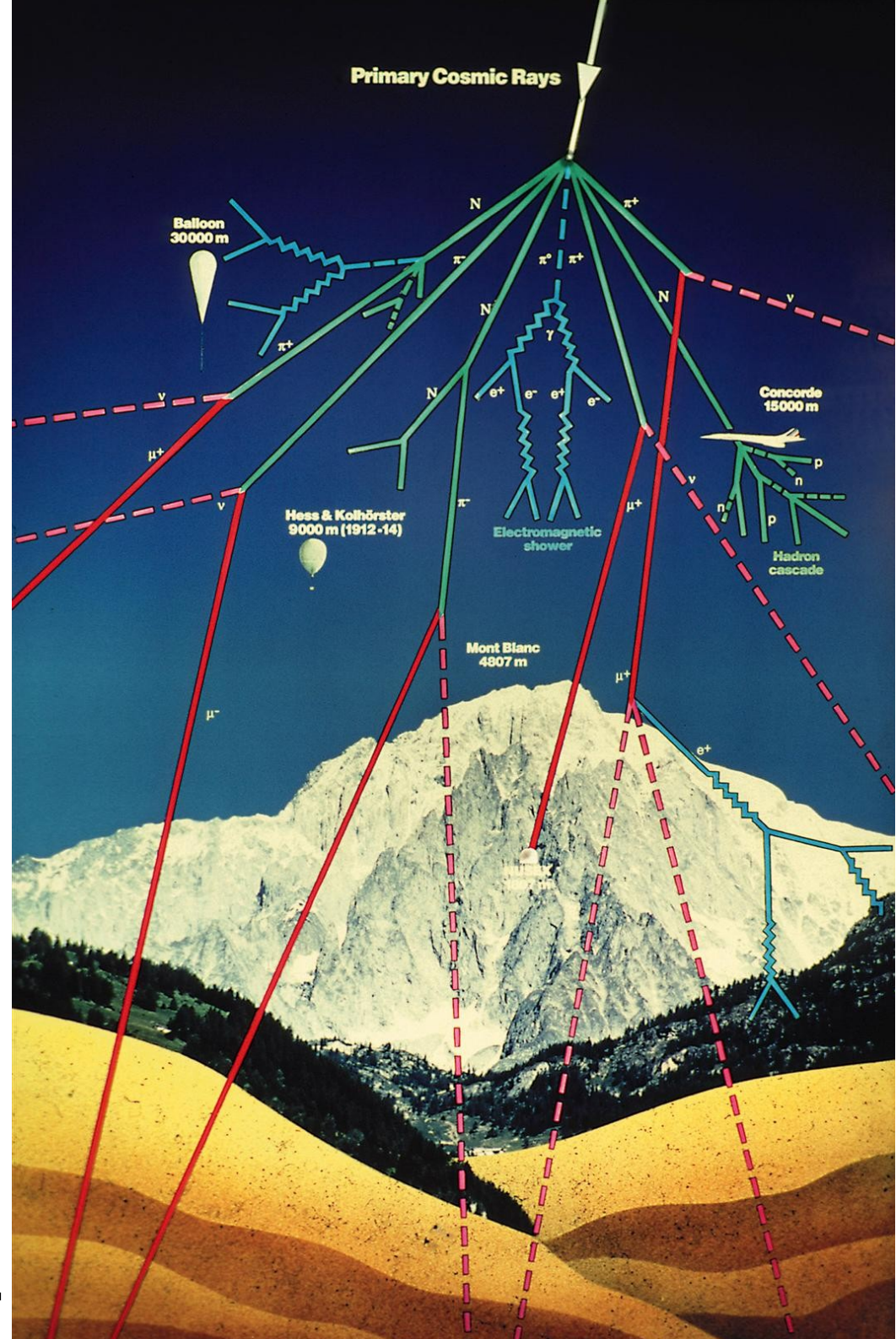
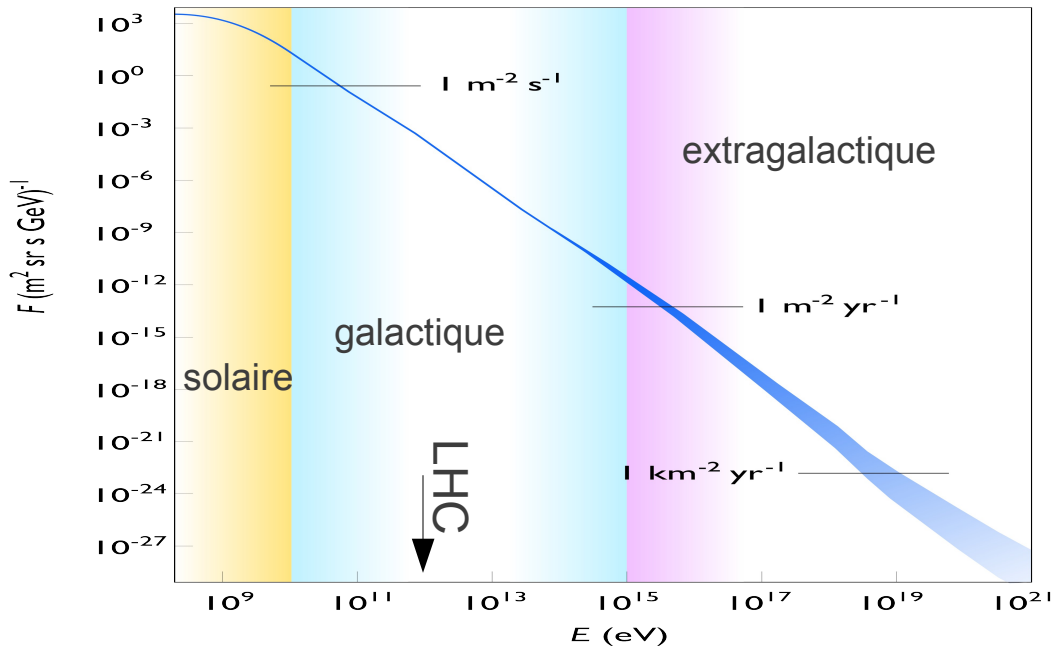
- ◆  $E = mc^2$





# Accélérateur naturel

- Rayons cosmiques de très haute énergie
- Découverts par Hess en 1912
- Avantage : énergies faramineuses
- Problème : hasard



# Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

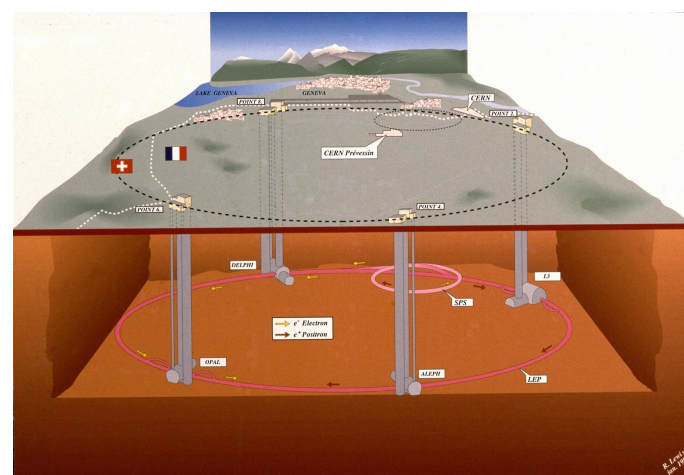
- Au CERN, Genève
- Collisions  $e^+e^-$
- 1989-2000

- Le Tevatron

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

- Le LHC

- Au CERN
- Collisions proton-proton
- Depuis 2009





# Le LHC : la machine à superlatifs





# Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite





# Le LHC : la machine à superlatifs



27 km de circonférence  
100 m sous terre



# Le LHC : la machine à superlatifs



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




# Le LHC : la machine à superlatifs



Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C), plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K), avec de l'hélium superfluide pour rendre les câbles supraconducteurs et générer un champ magnétique de 8,3 T (200000 fois le champ magnétique terrestre)



# Le LHC : la machine à superlatifs



1232 dipôles.  
Un dipôle :  
15 m de long  
35 tonnes



# Le LHC : la machine à superlatifs

Longueur des câbles supraconducteurs :  
assez pour 5 aller-retours Terre-soleil





# Le LHC : la machine à superlatifs

Vide presque parfait ( $10^{-13}$  atm) :  
pression 10 fois plus faible  
que sur la Lune





# Le LHC : la machine à superlatifs



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

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



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
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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,
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?





# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



# Le CERN



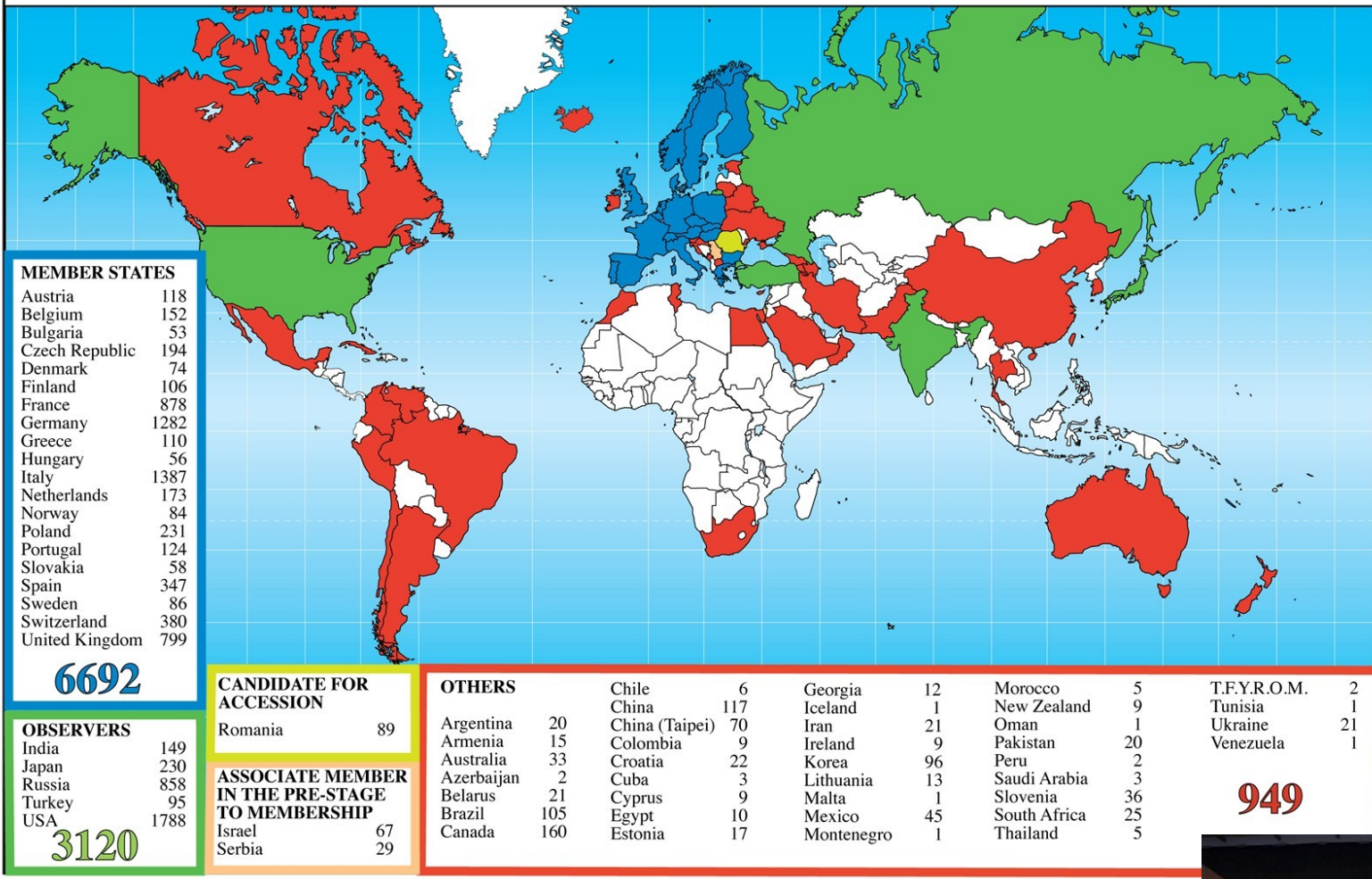
- Organisation européenne pour la recherche nucléaire
- Fondé en 1954
- Basé à Genève (Suisse), sites également en France
- Organisation internationale (les employés sont fonctionnaires internationaux)
- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques
- Plusieurs prix Nobel
- Programme d'étudiant d'été





# Le CERN : laboratoire mondial

Distribution of All CERN Users by Nation of Institute on 3 September 2012



- 20 États membres
- Une centaine de nationalités, tout le monde coopère
- 10000 scientifiques



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure



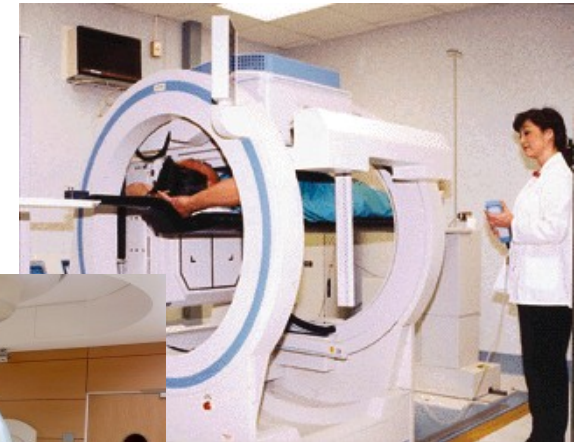
# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

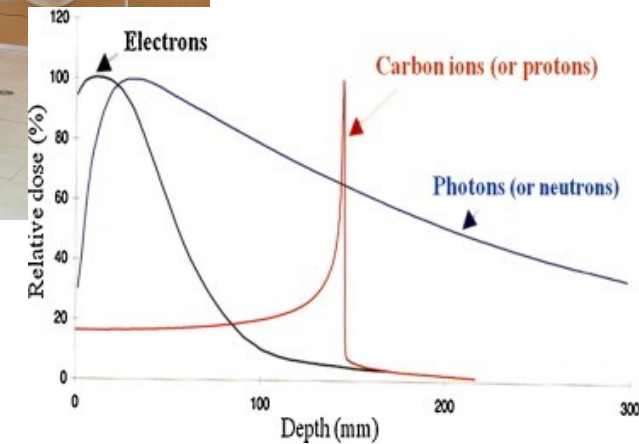
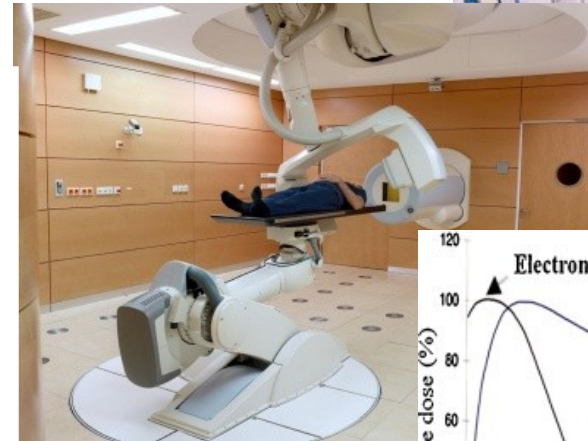
- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie





# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

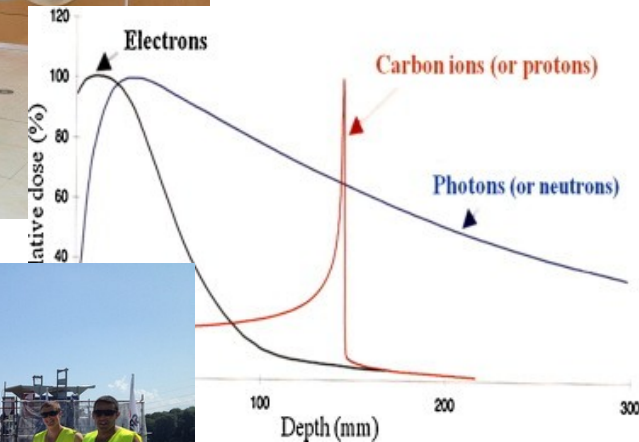
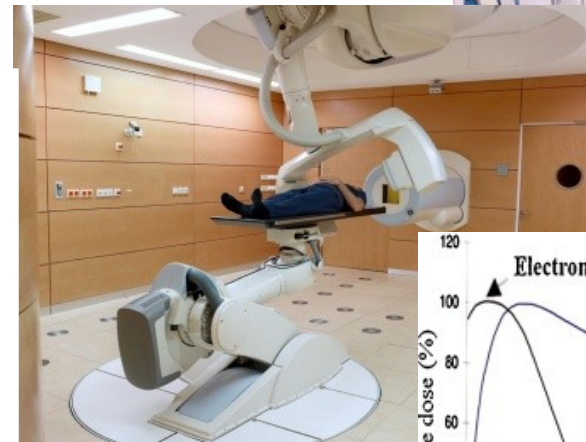
- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

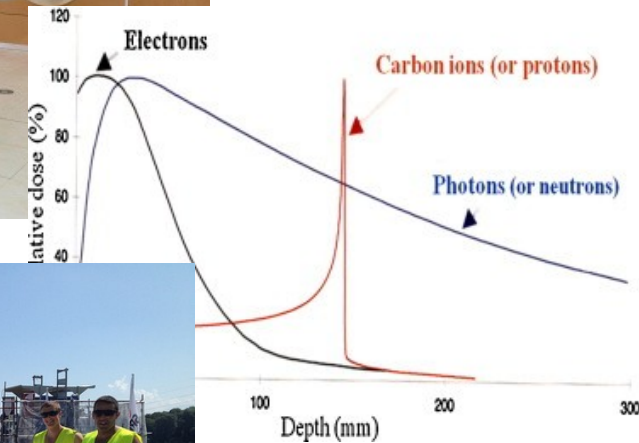
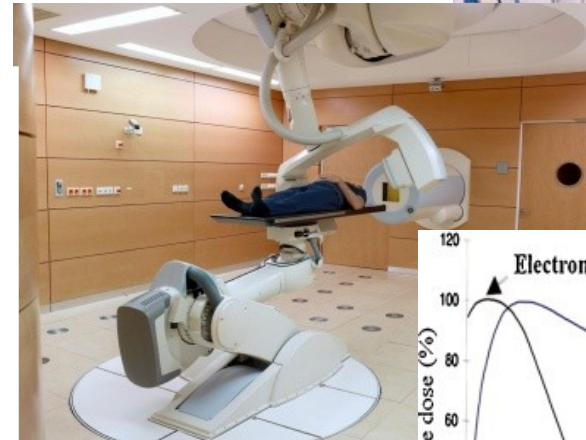
- Grille de calcul
- Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
- Le Web a été inventé au CERN



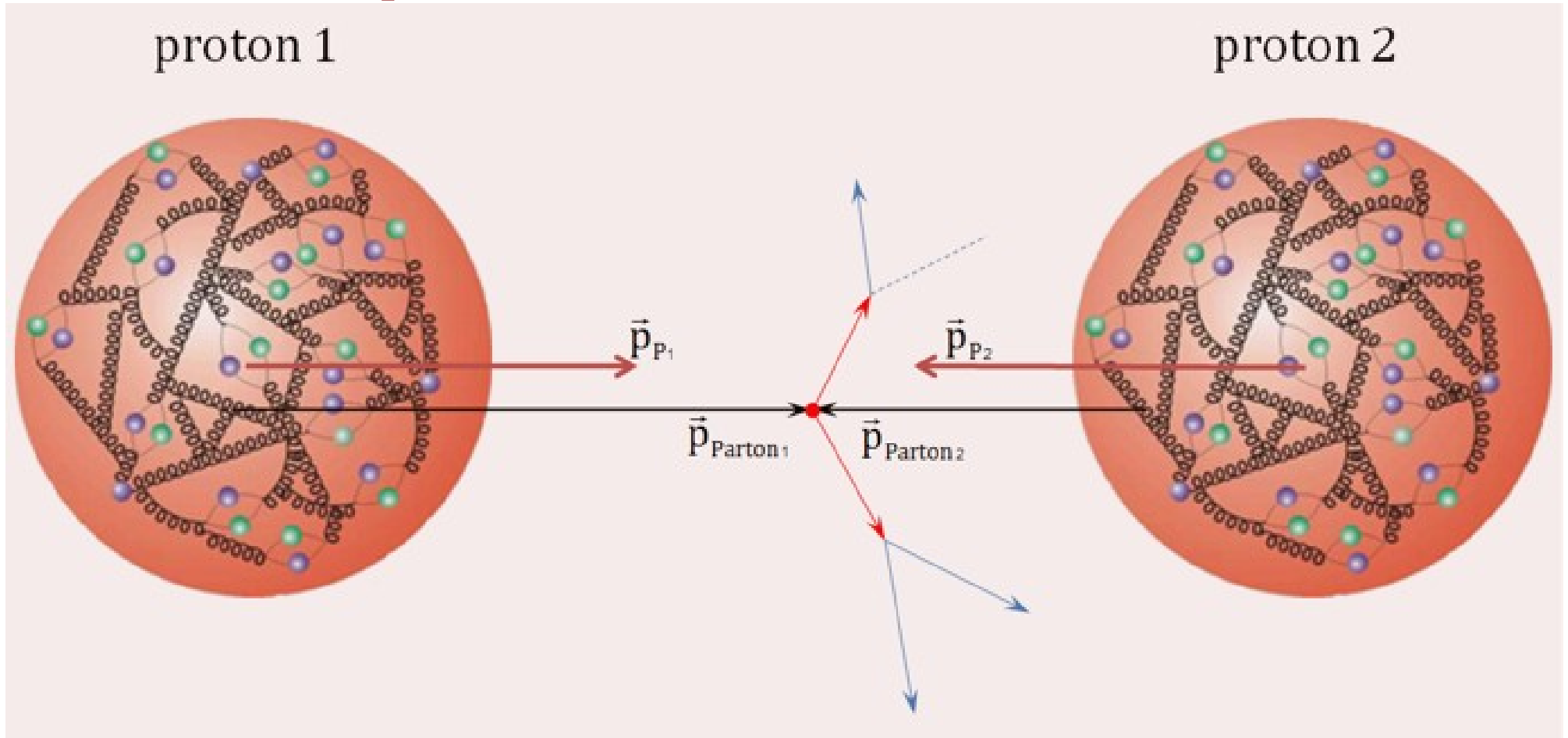


# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie
- Plus inattendu :
  - Grille de calcul
  - Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
  - Le Web a été inventé au CERN



# Deux protons se rencontrent...

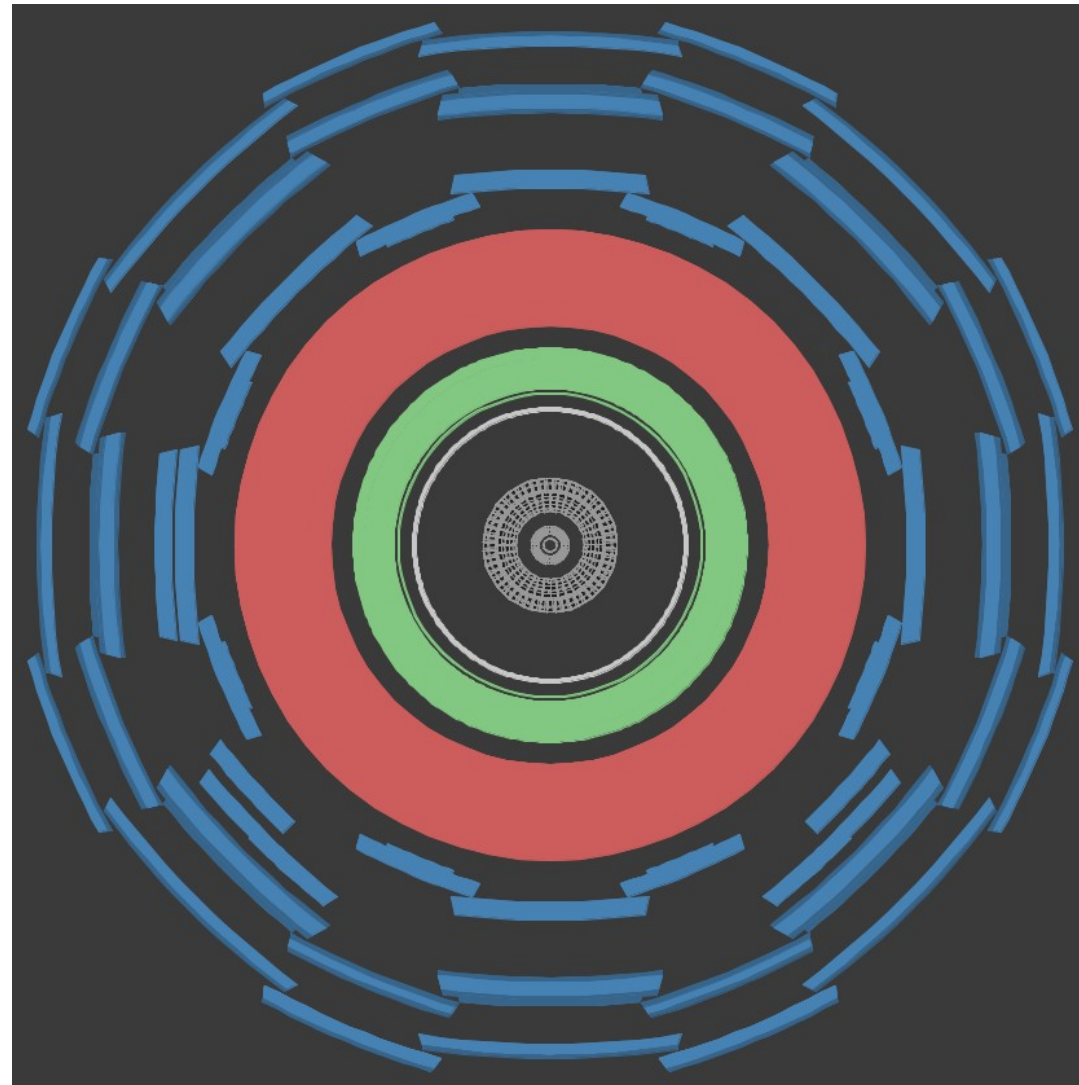


- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction



# 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

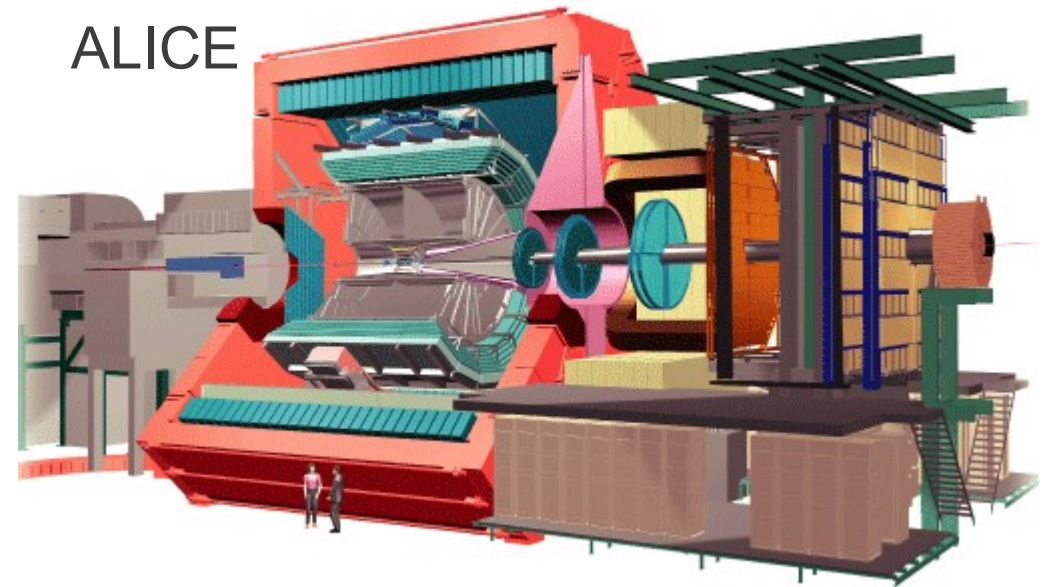
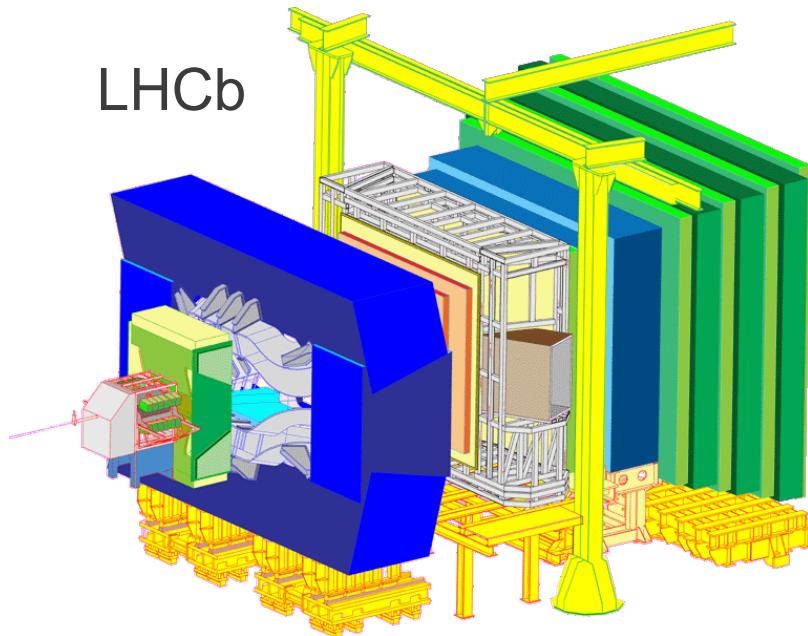
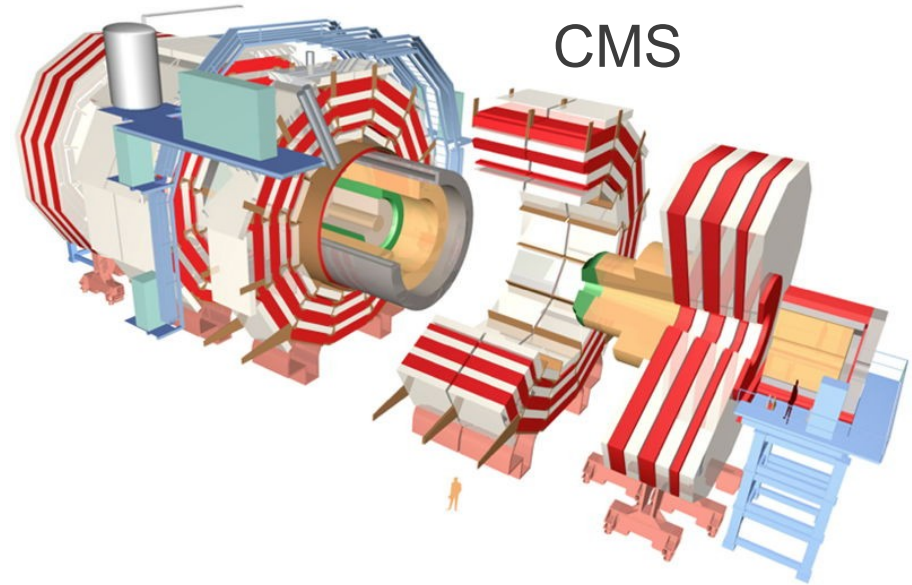
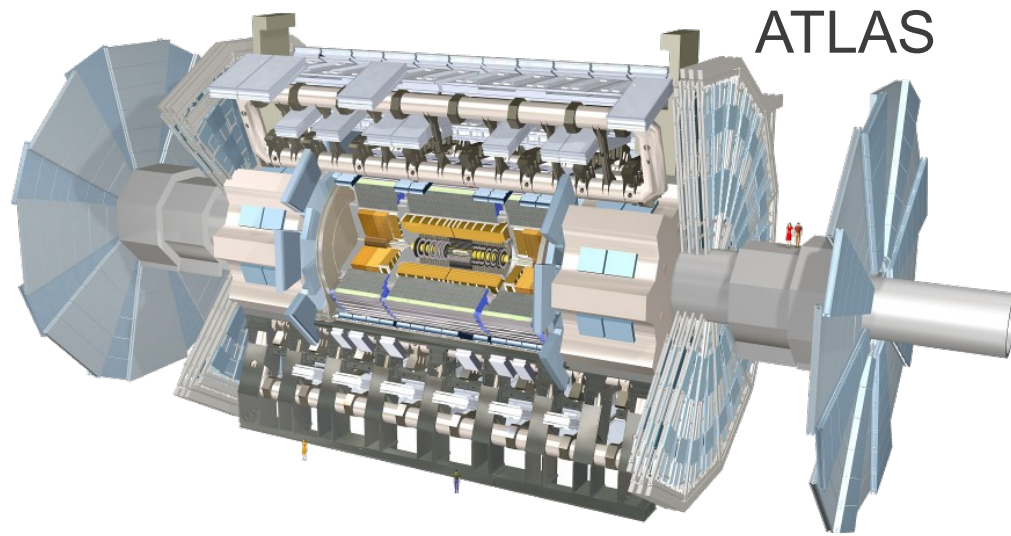


# Interaction des particules avec le détecteur





# Les détecteurs géants du LHC





# La collaboration ATLAS



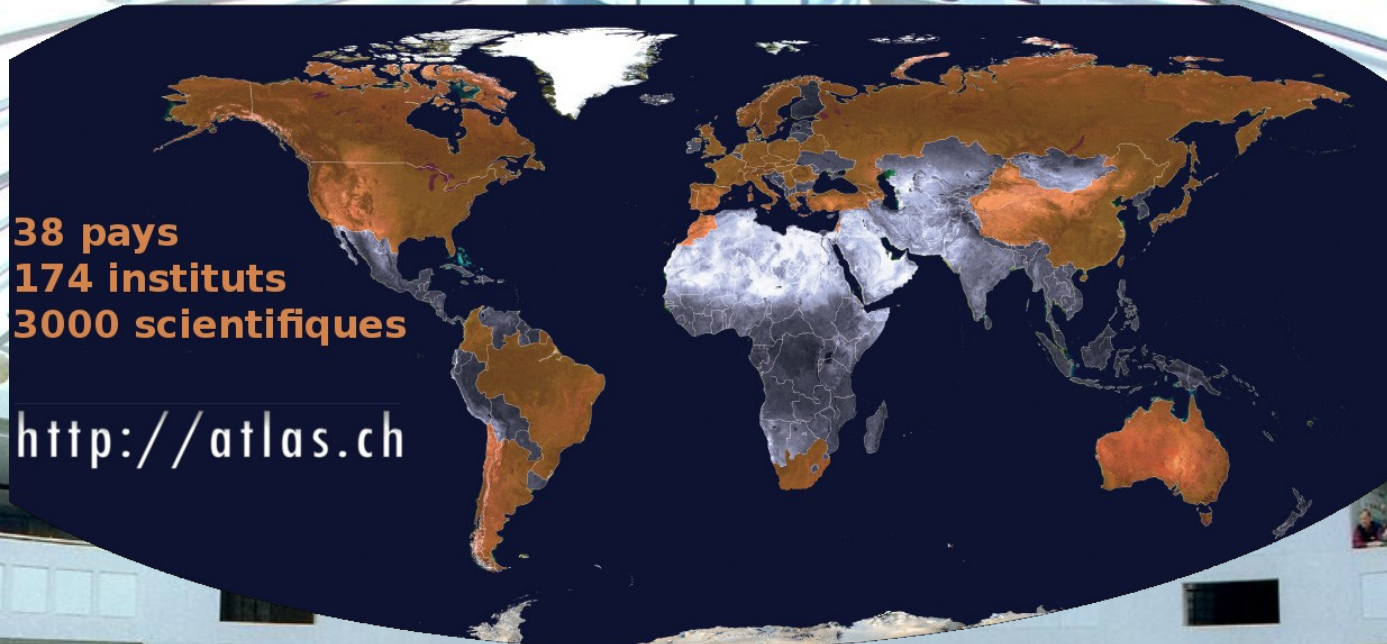
 **ATLAS**  
EXPERIMENT



# La collaboration ATLAS

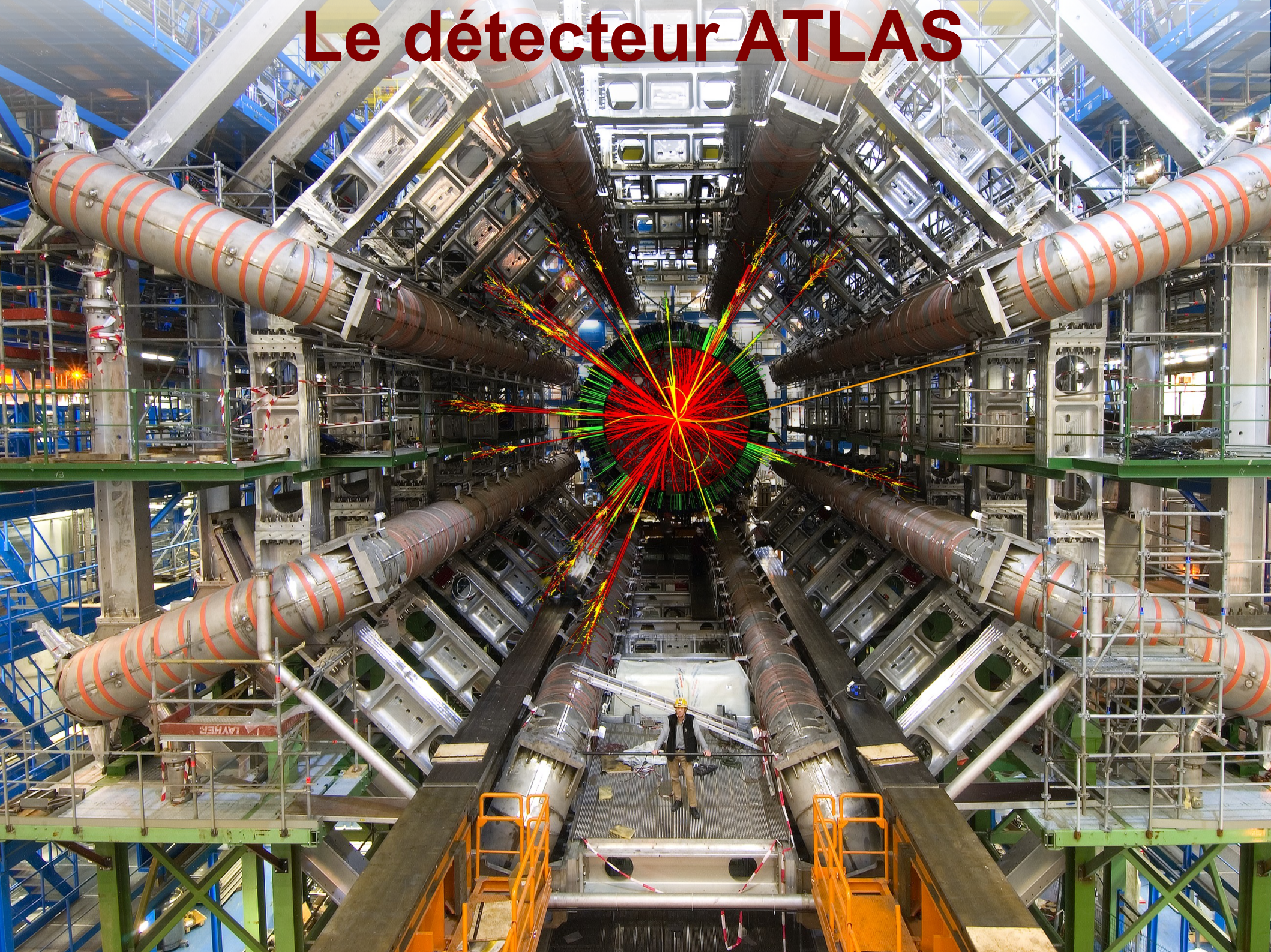
38 pays  
174 instituts  
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>





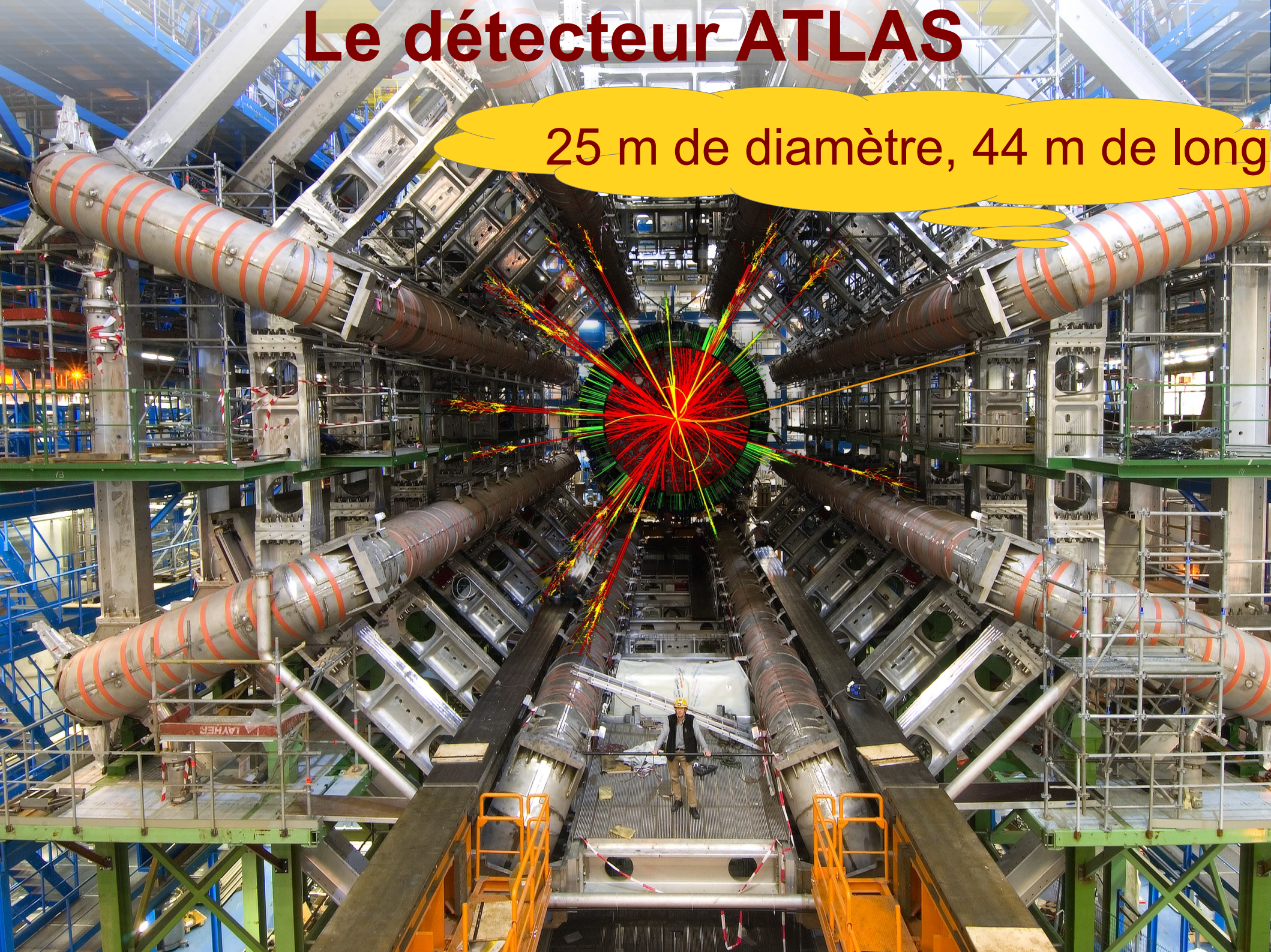
# Le détecteur ATLAS





# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

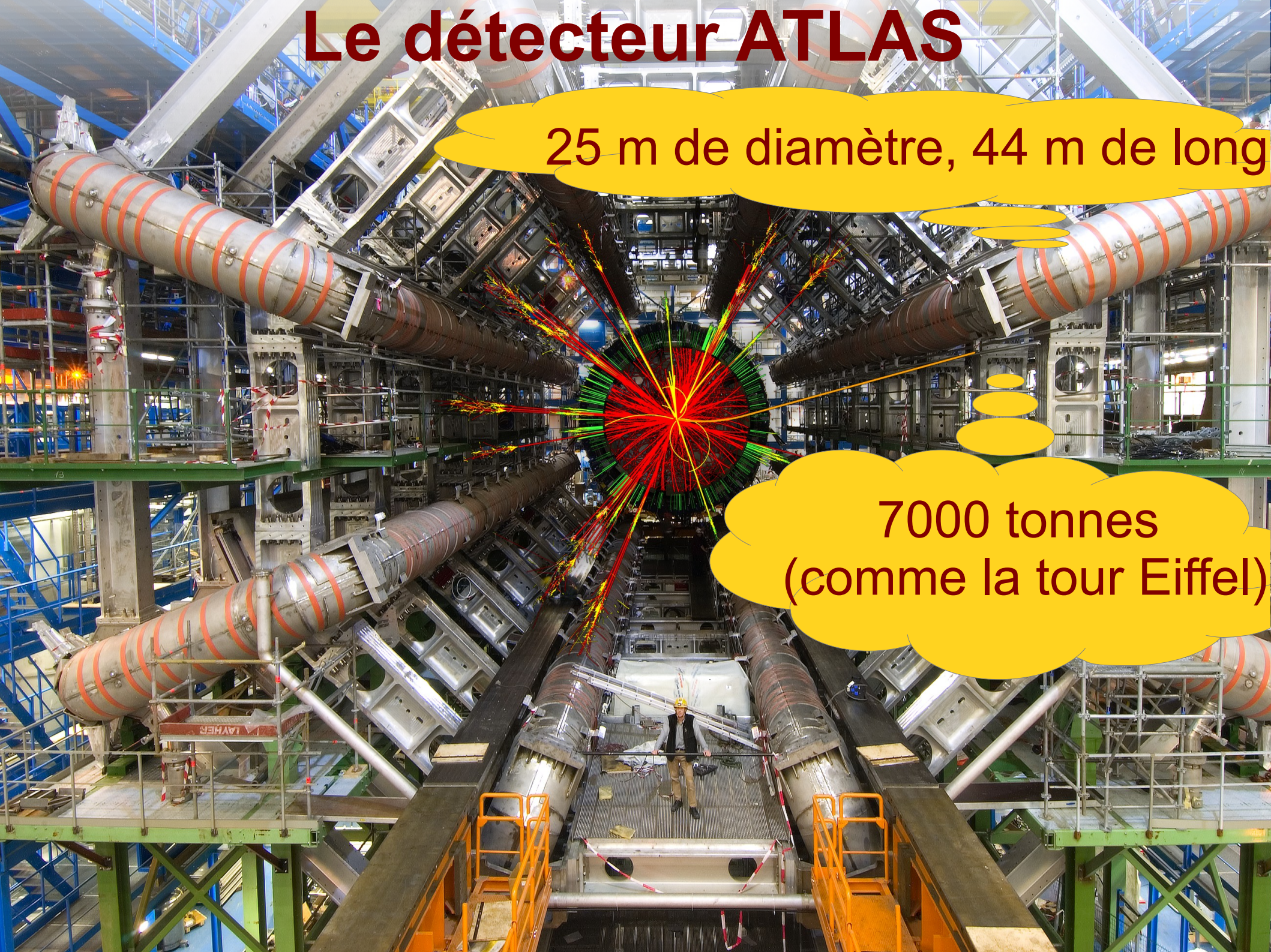




# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)



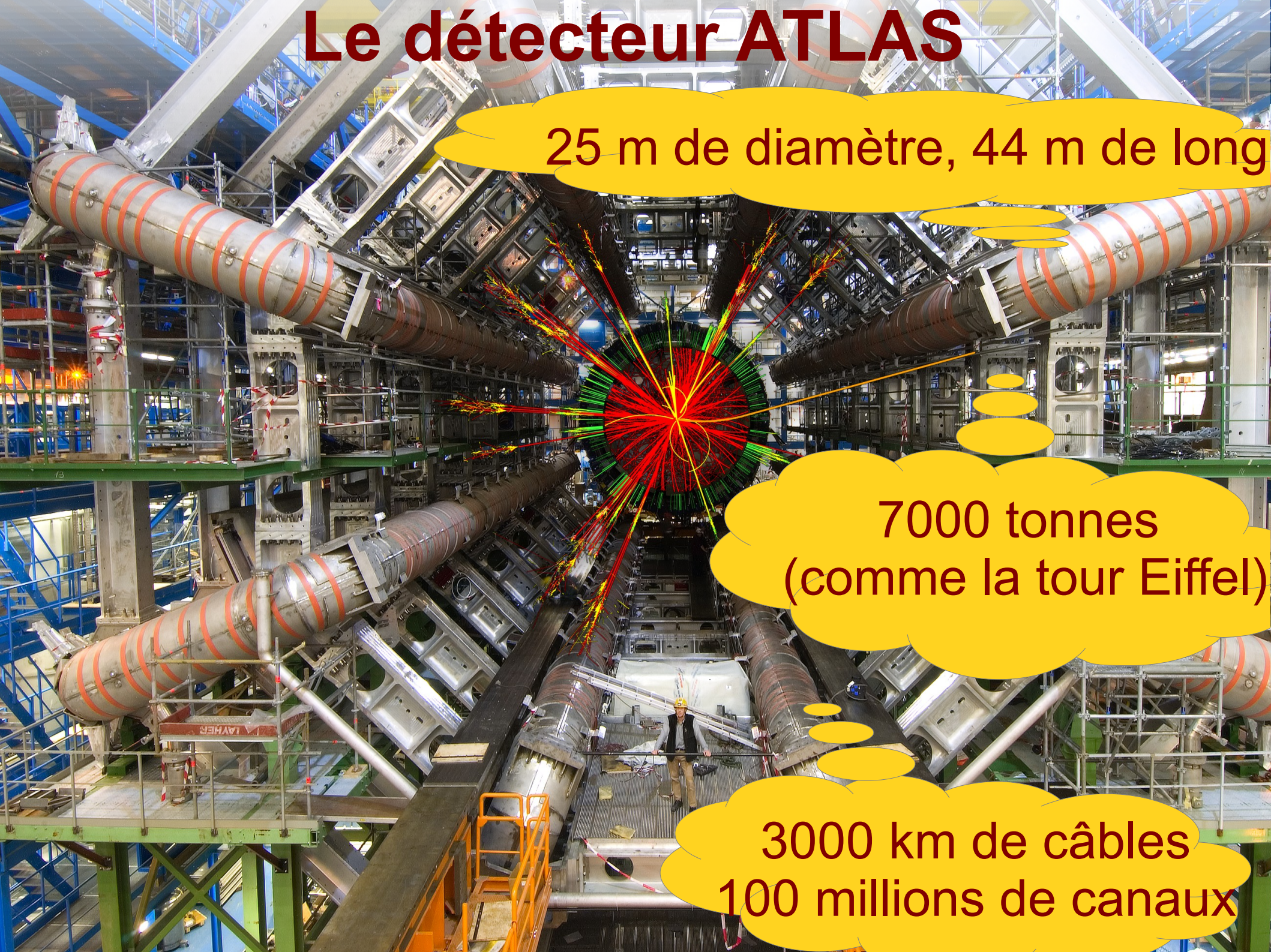


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux





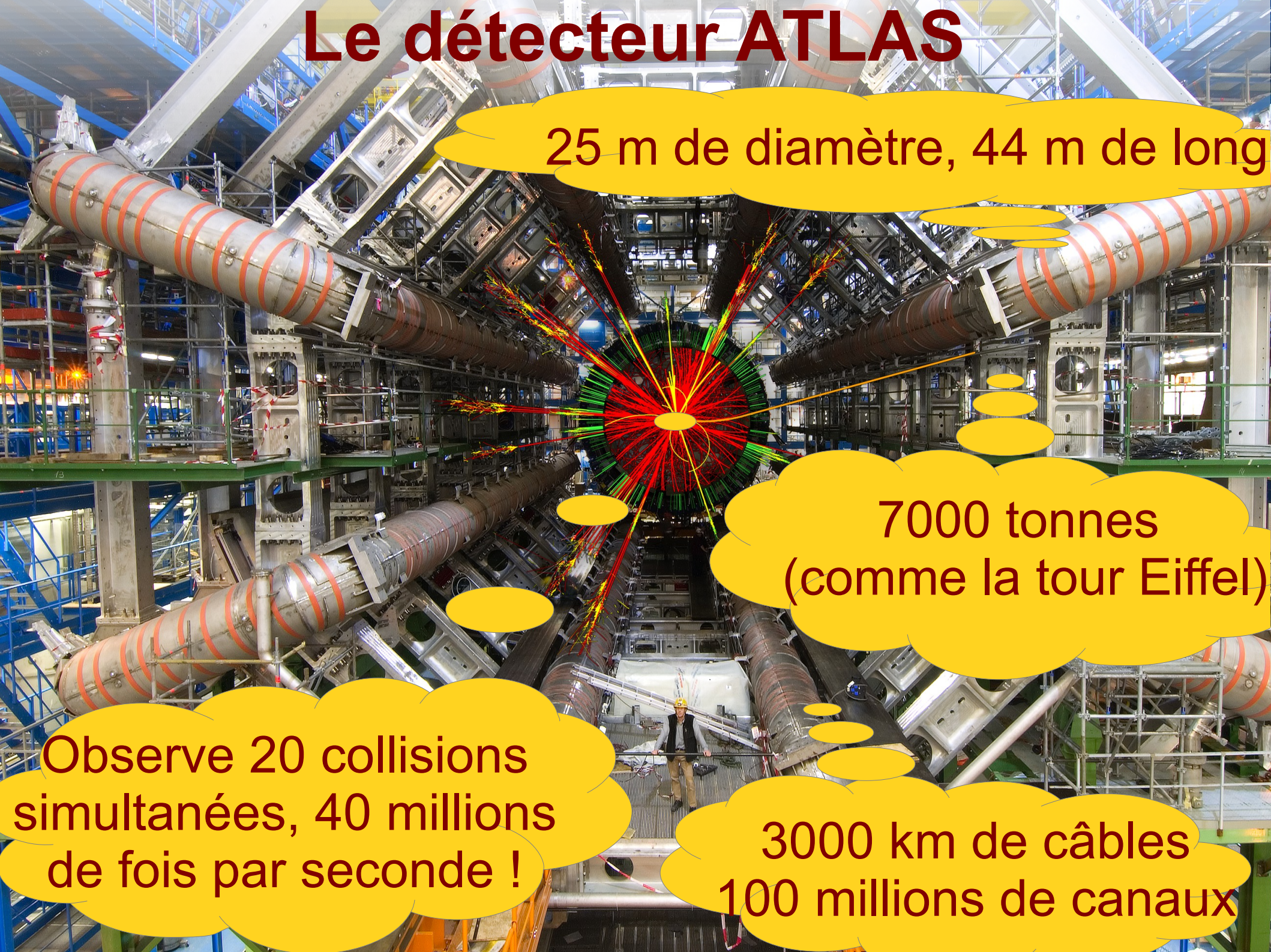
# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

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

3000 km de câbles  
100 millions de canaux





# Le détecteur ATLAS

The image shows the interior of the ATLAS detector at CERN. It is a massive, complex structure with a central circular detector core. The core is surrounded by a dense network of pipes, scaffolding, and support structures. The overall color scheme is dominated by metallic grays and blues, with some red and yellow accents. The perspective is from a low angle, looking down the length of the detector, emphasizing its scale and complexity.

25 m de diamètre, 44 m de long

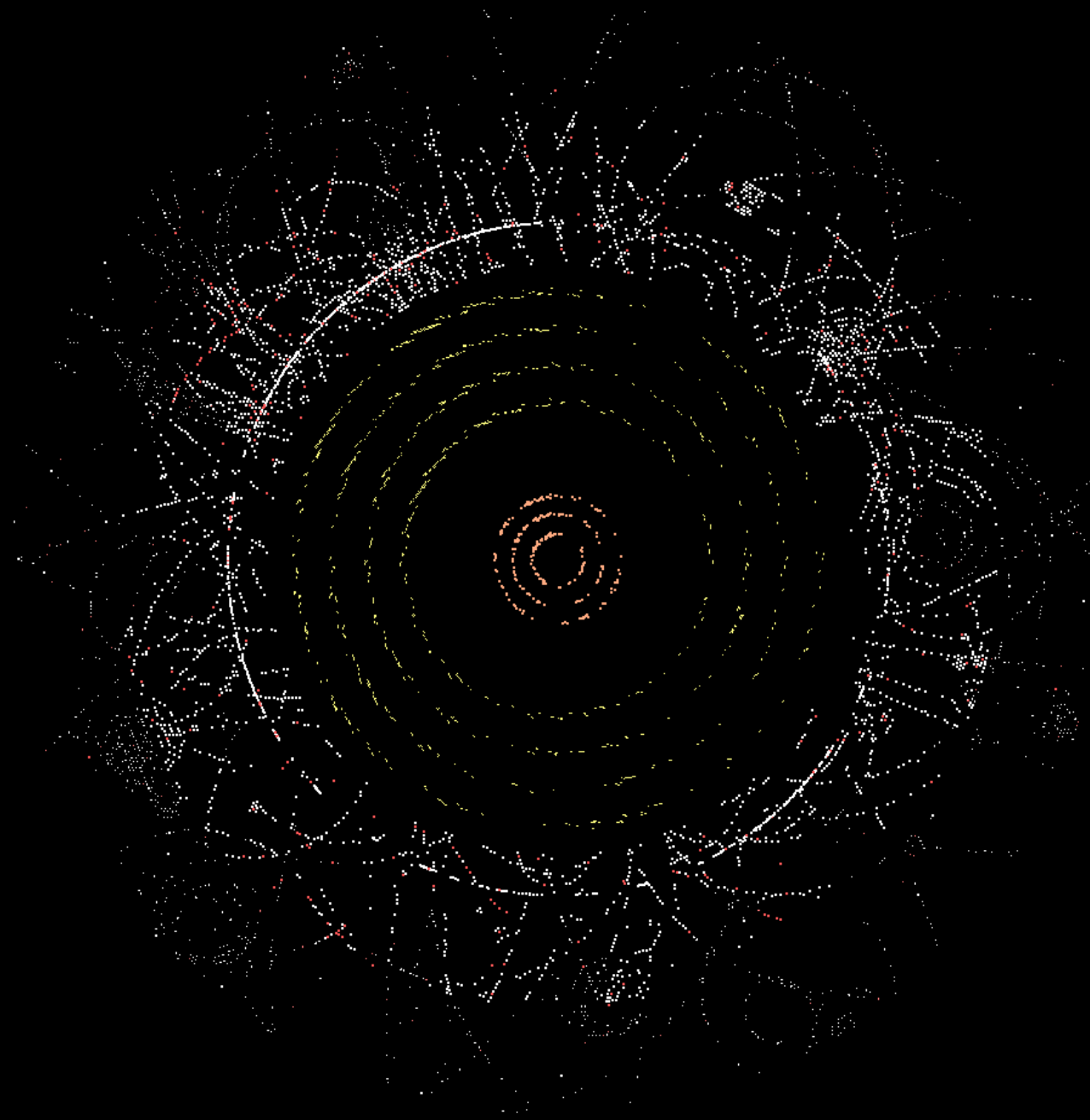
En France :  
6 laboratoires CNRS,  
1 CEA, 400 personnes  
(physiciens, ingénieurs,  
étudiants)

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

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

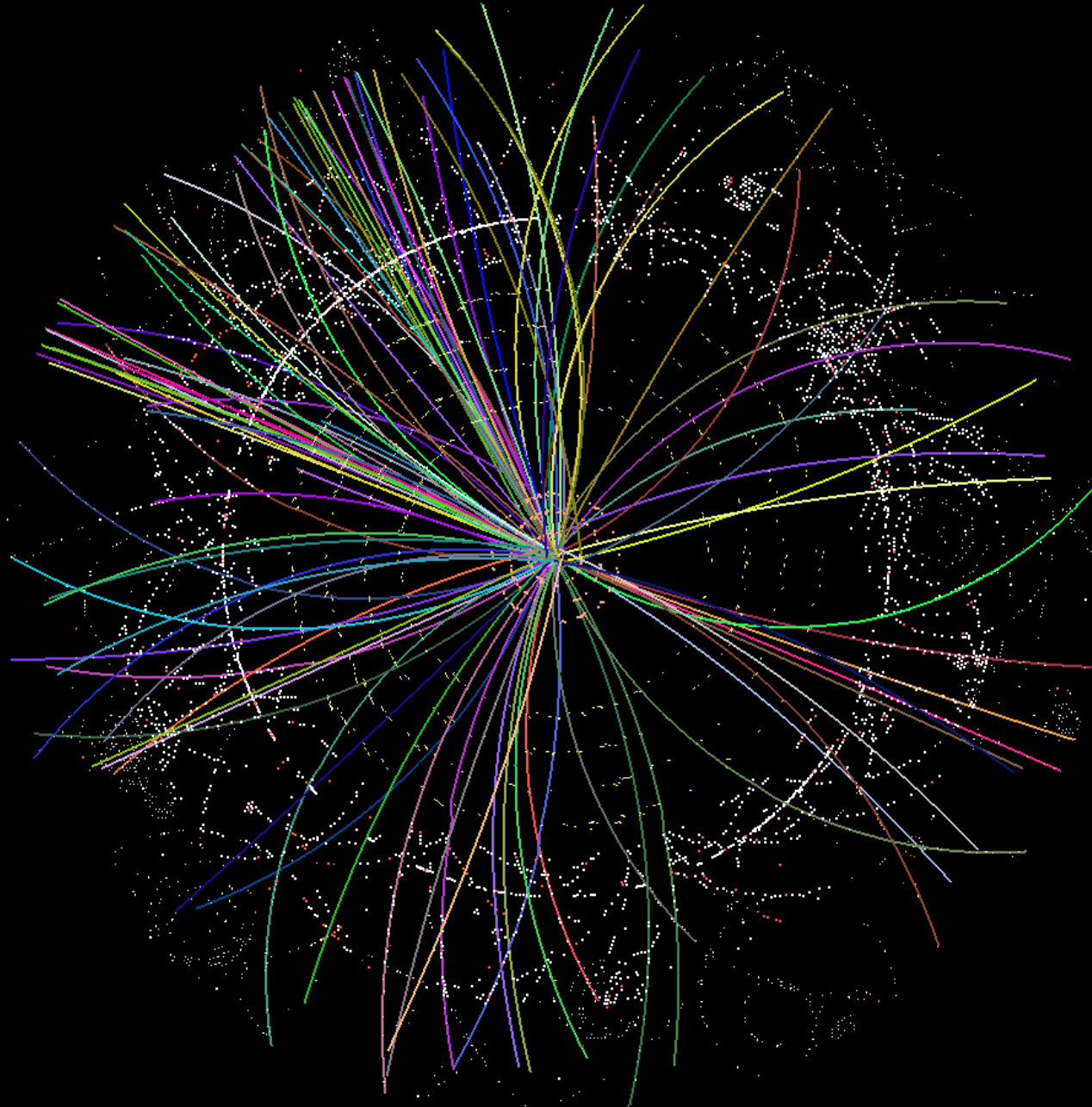
3000 km de câbles  
100 millions de canaux

# Passage des particules





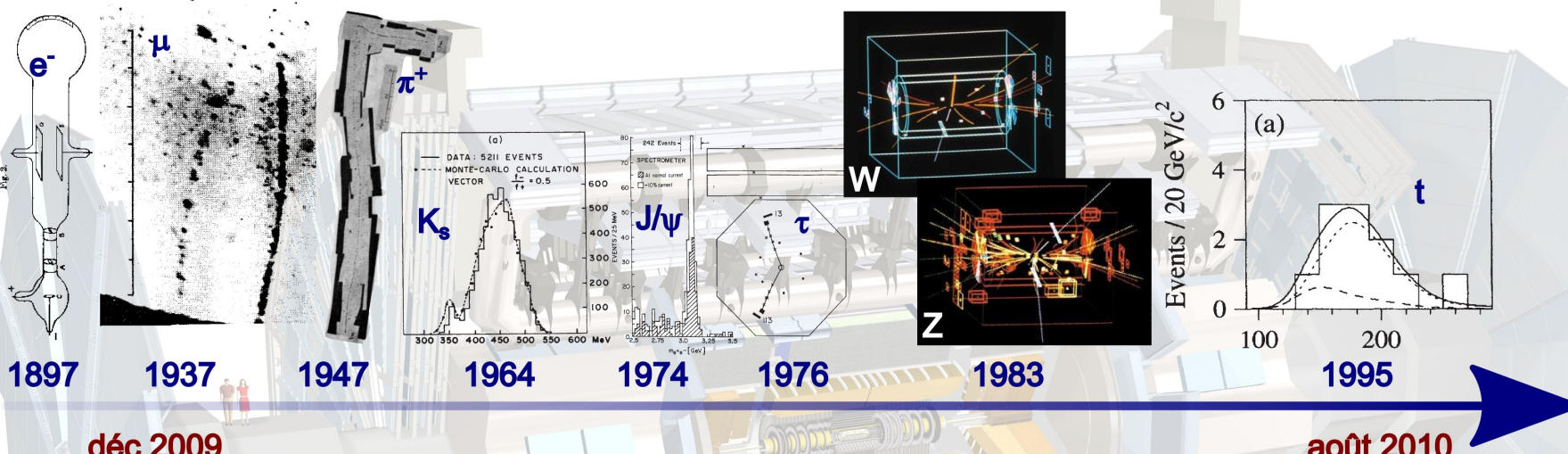
# Reconstruction des trajectoires



# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

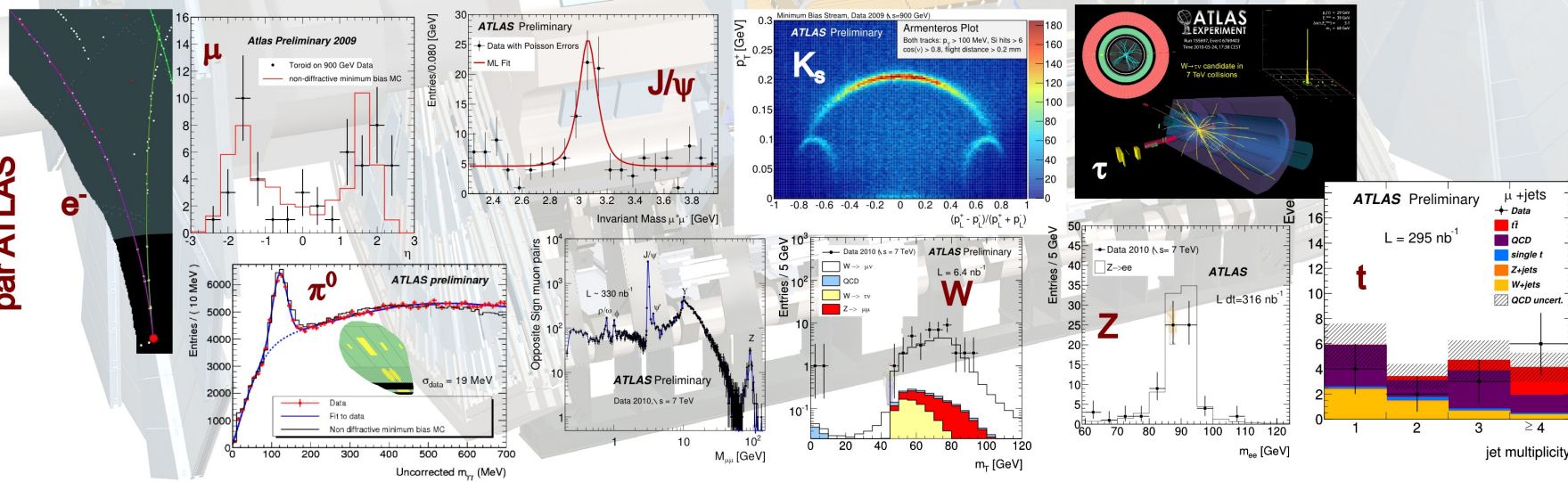
Découverte historique



déc 2009

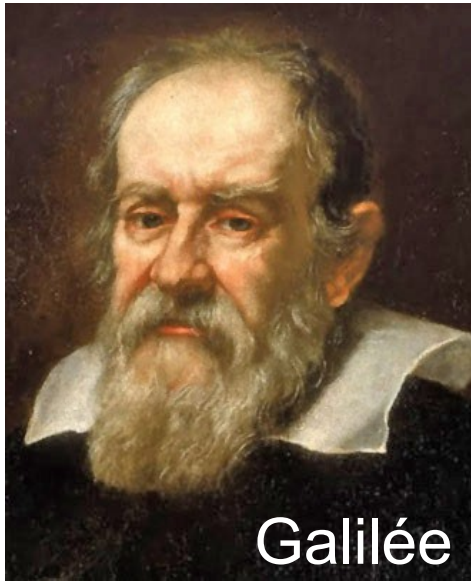
août 2010

Redécouverte par ATLAS





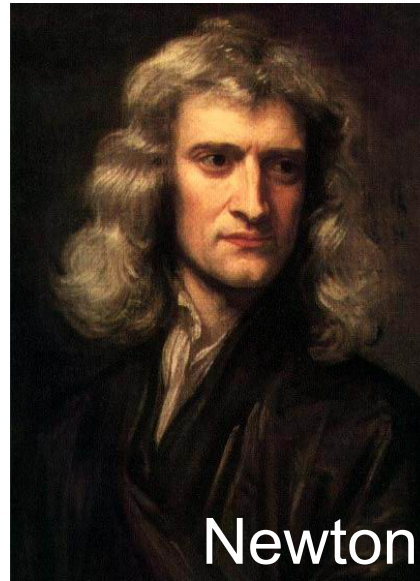
# La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

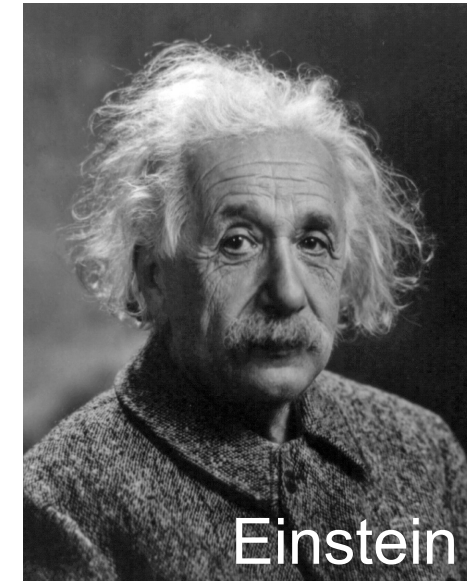
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



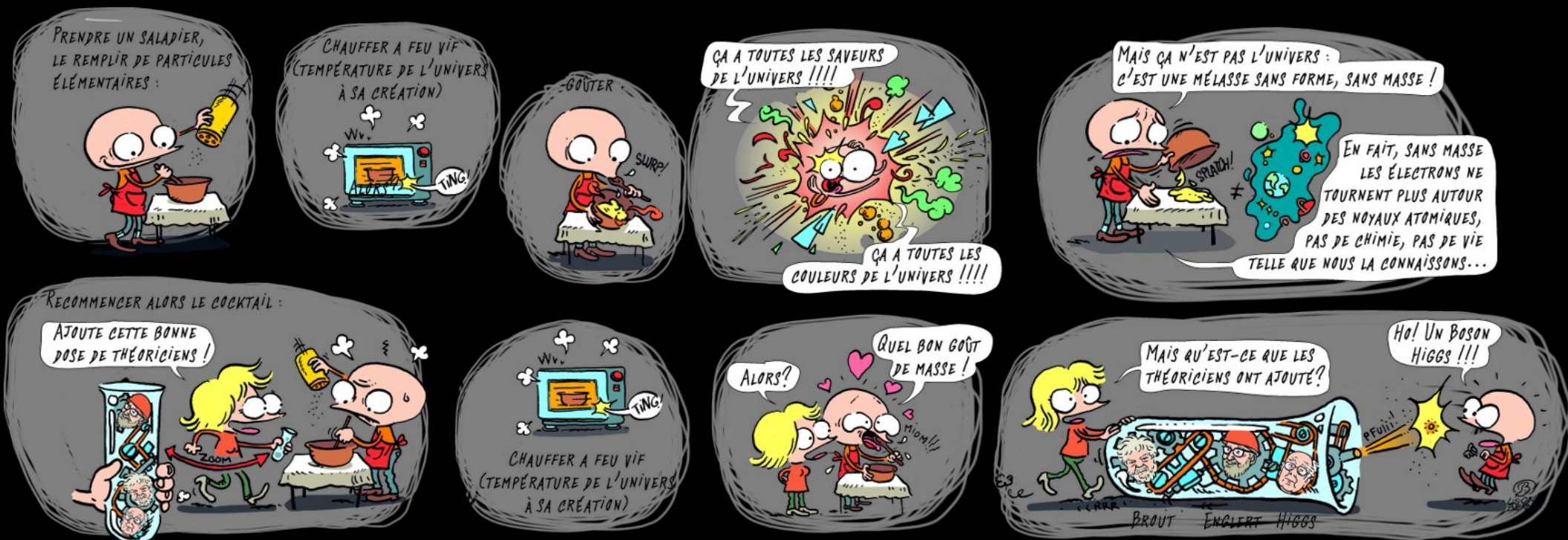
Einstein

- Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

- Diverses interprétations de la notion de masse, toutes équivalentes
- D'après la théorie les particules élémentaires ont une masse nulle
  - L'Univers tel que nous le connaissons n'existe pas...
  - Contraire à l'expérience, introduction d'un mécanisme pour générer la masse

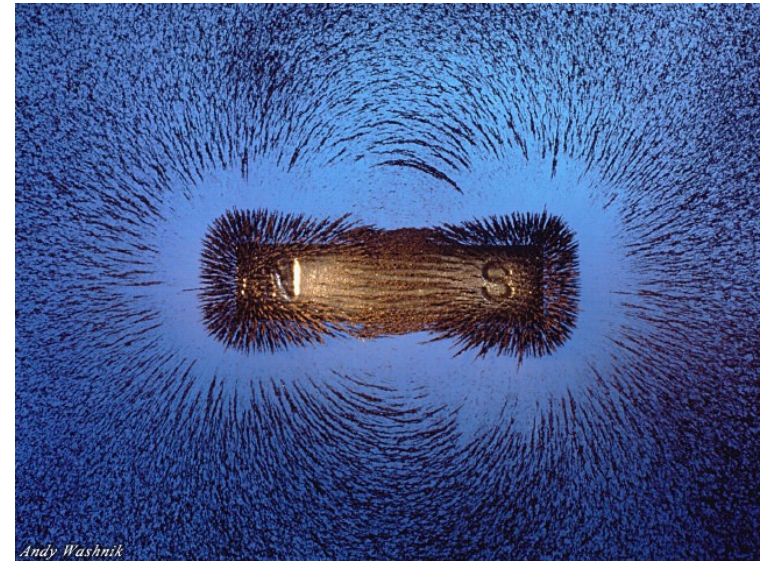
# Velouté d'Univers avec un soupçon de boson de Higgs





# Notion de champ

- Ensemble des valeurs prises par une grandeur physique en tout point de l'espace
  - Champ orienté : vecteur
    - Champ magnétique



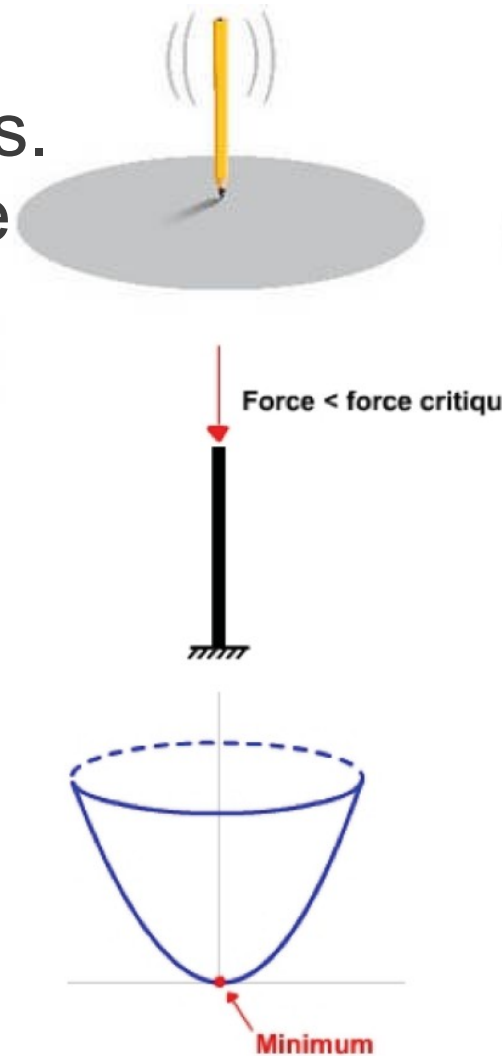
- Champ non-orienté : scalaire
  - Carte des températures
  - Champ de Higgs !

Bonus en théorie quantique des champs :  
particule associée (excitation du champ)

# Brisure spontanée de symétrie

- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :

- du crayon qui tourne sur lui-même
- d'une barre en compression





# Brisure spontanée de symétrie

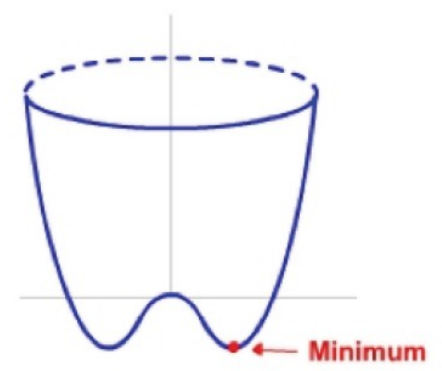
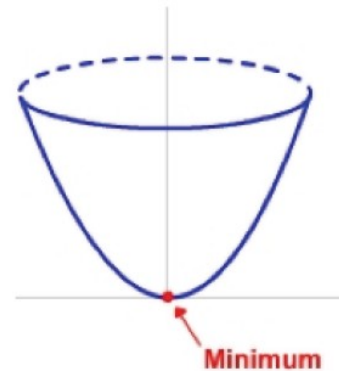
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :
  - du crayon qui tourne sur lui-même
  - d'une barre en compression
- Les solutions ne respectent pas forcément les mêmes symétries :
  - chute du crayon
  - flambage de la barre dans une direction donnée



Force < force critique

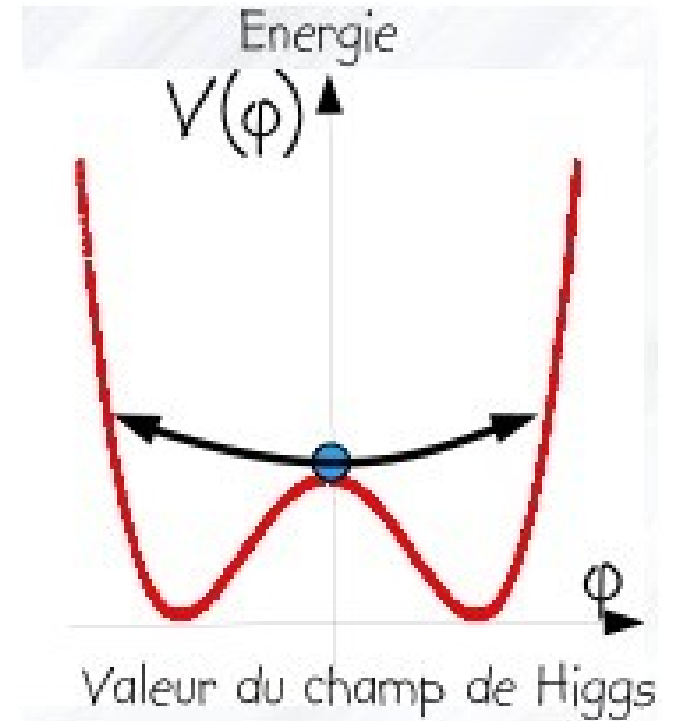


Force > force critique



# Brisure de la symétrie électrofaible

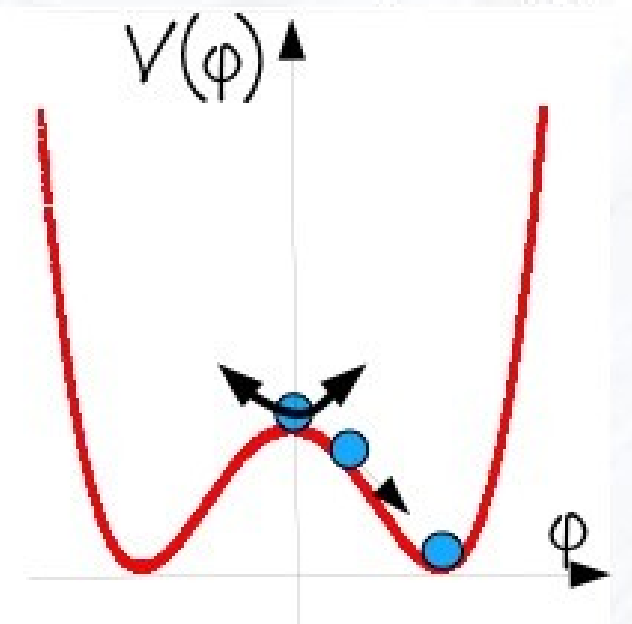
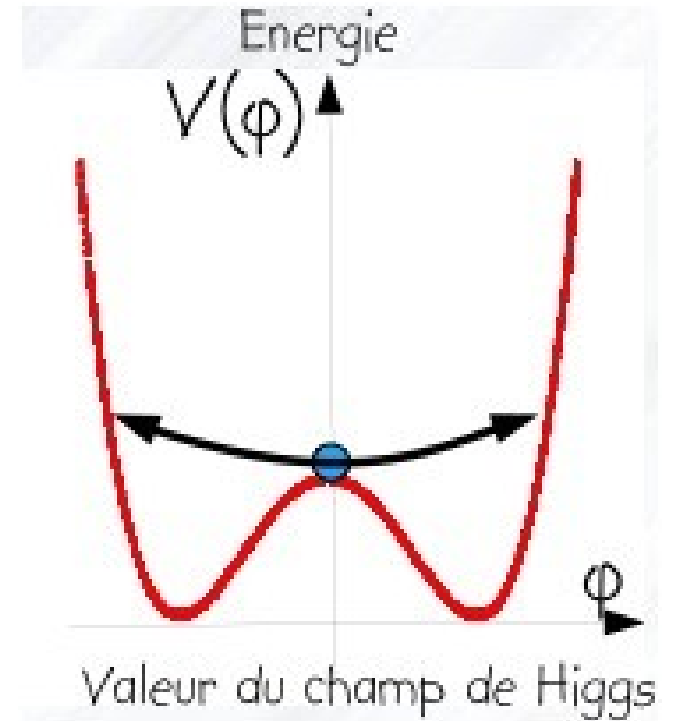
- A haute température, juste après le Big Bang :
  - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - les particules restent sans masse



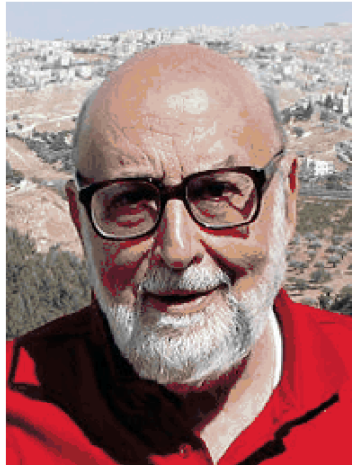


# Brisure de la symétrie électrofaible

- A haute température, juste après le Big Bang :
  - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - les particules restent sans masse
- Réduction de la température ( $10^{-12}$  s après le Big Bang) :
  - brisure de symétrie
  - champ non nul
  - les particules élémentaires acquièrent une masse non nulle en **interagissant avec le champ de Higgs**



# 1964 : Le mécanisme de Higgs



## BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS\*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

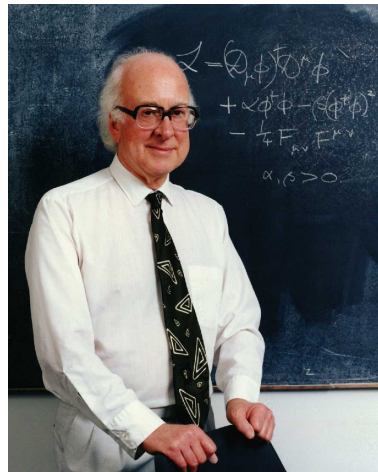
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction<sup>1</sup>; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field<sup>2</sup> associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.<sup>3</sup> In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.<sup>4-6</sup> A

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local  $\gamma_5$ -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the  $\gamma_5$  invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-



VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

## BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phe-

about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

- Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble publient à quelques mois d'intervalle
- Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**



# Mécanisme de Higgs en images



Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...



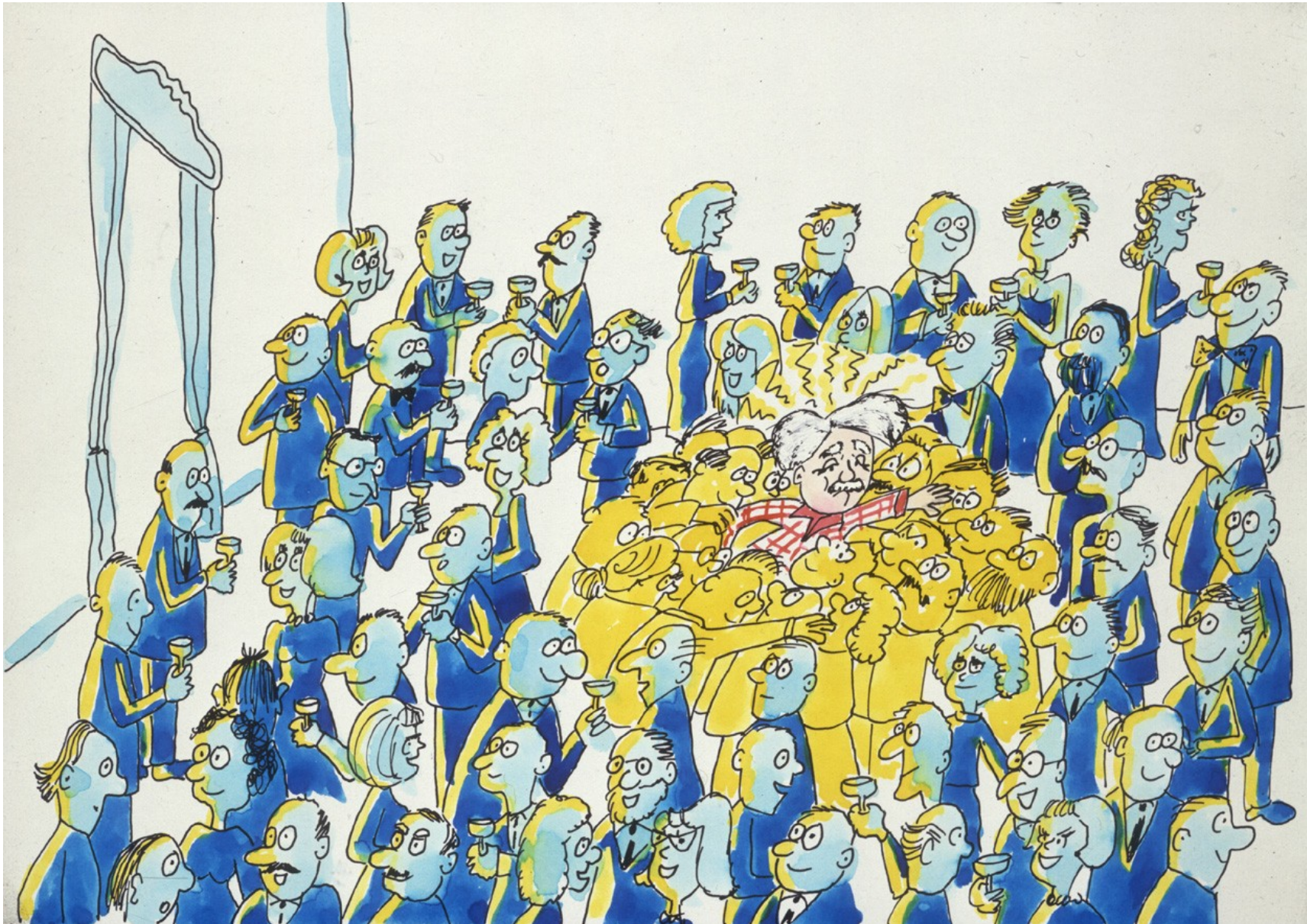
# Mécanisme de Higgs en images



... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...



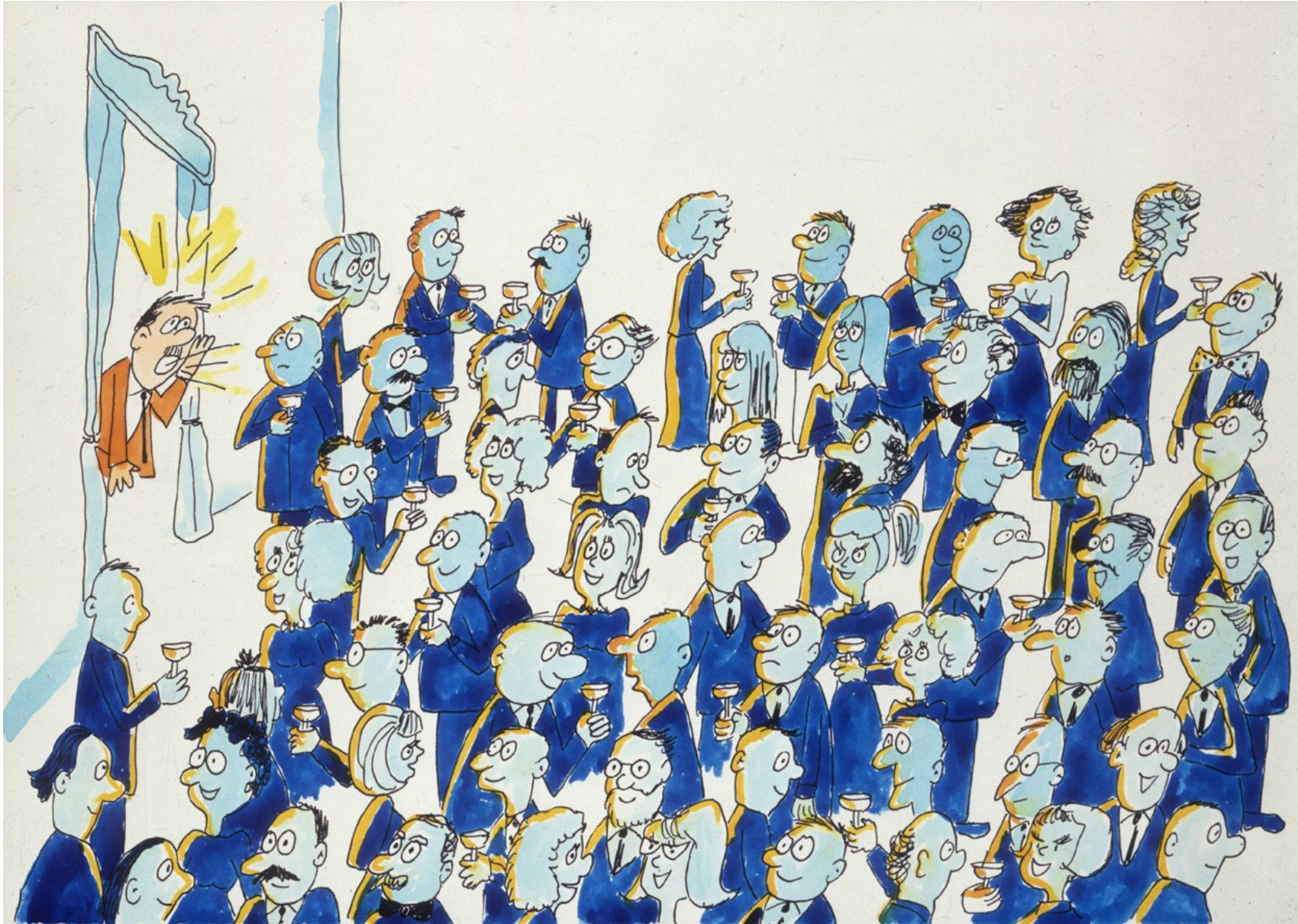
# Mécanisme de Higgs en images



ce qui accroît la résistance à son déplacement : il acquiert une masse, comme une particule se déplaçant dans un champ de Higgs



# Mécanisme de Higgs en images



... si une rumeur traverse la salle ...



# Mécanisme de Higgs en images



... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

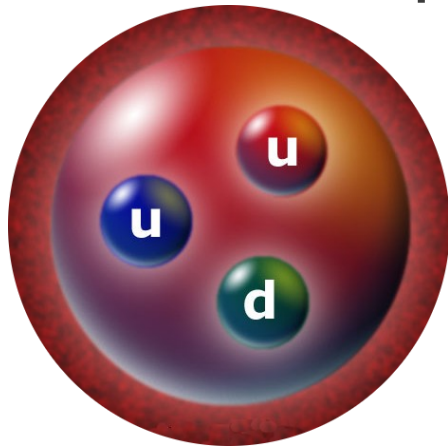
# Interactions avec le boson de Higgs





# La masse

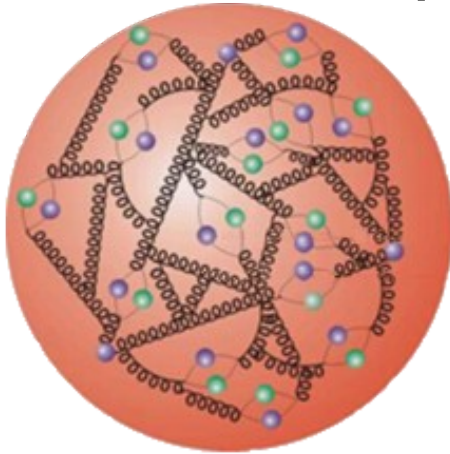
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- Proton, neutron : 3 quarks, masse  $\sim 10$  MeV

# La masse

- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV

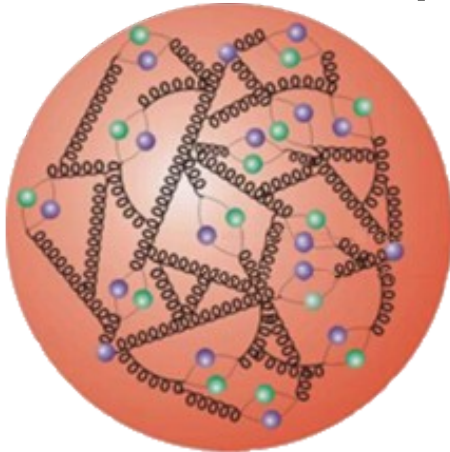


- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )



# La masse

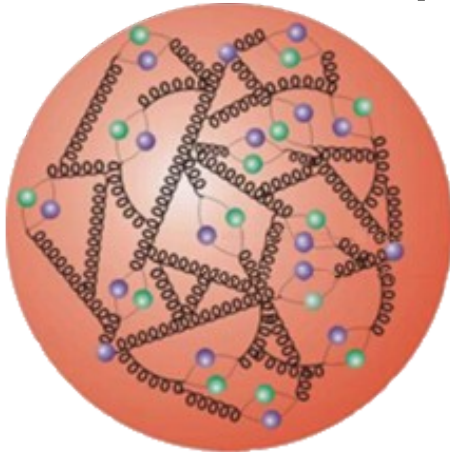
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne

# La masse

- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne
- Pas grand chose ? Sans lui, pas d'atomes, pas de chimie, pas de vie ou d'Univers tels que nous les connaissons...

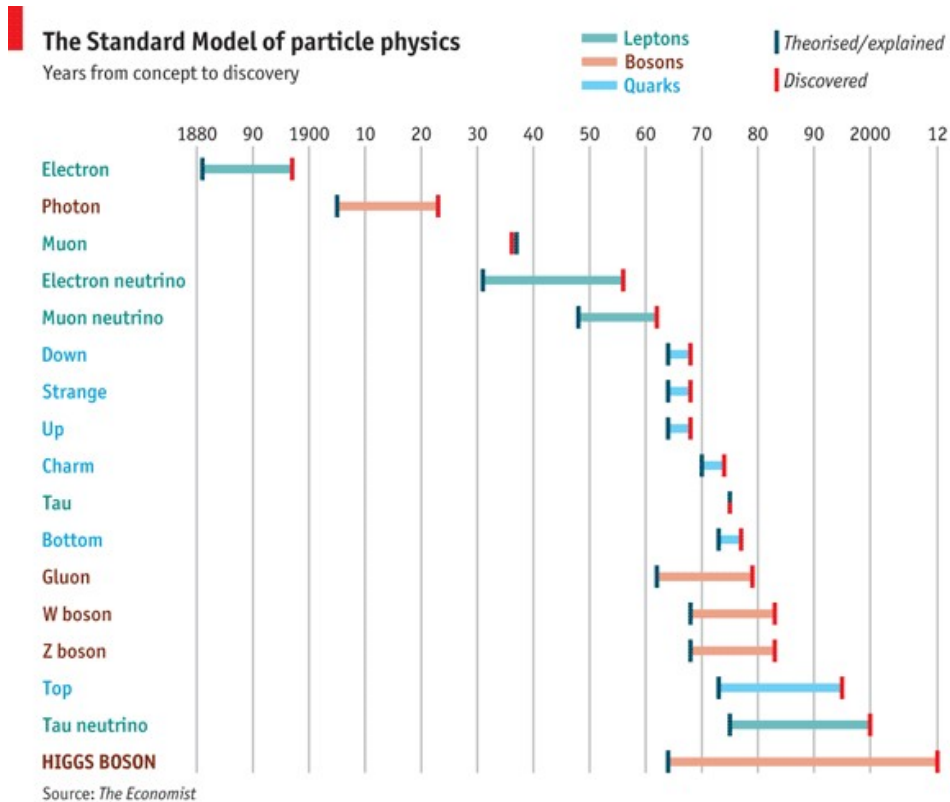


# Pourquoi ce battage médiatique le 4 juillet 2012 ?





# Une longue quête



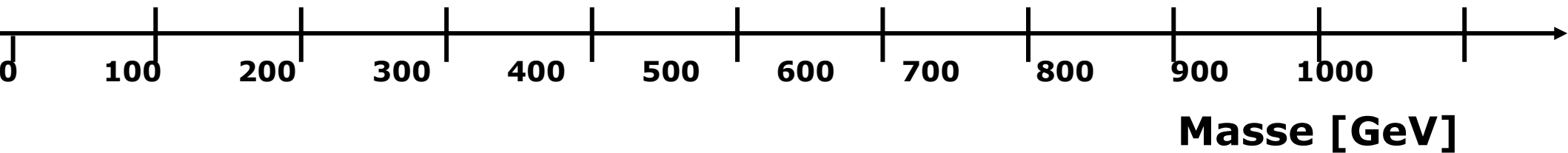
© The Economist

- 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

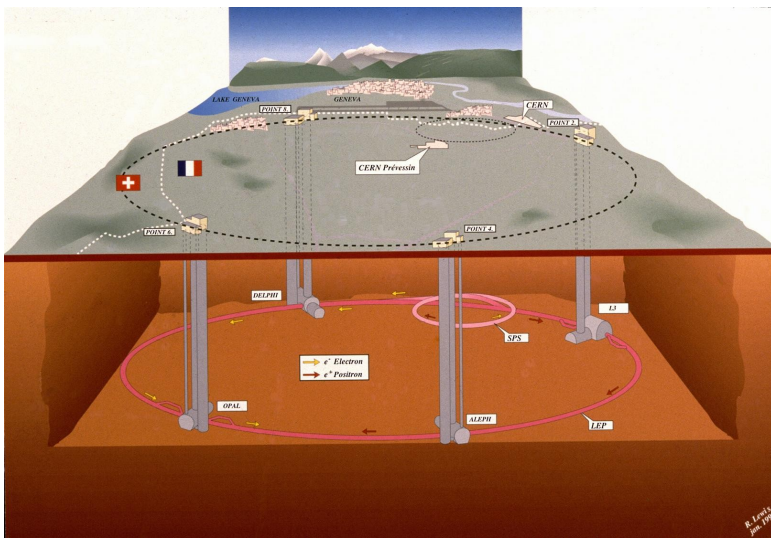
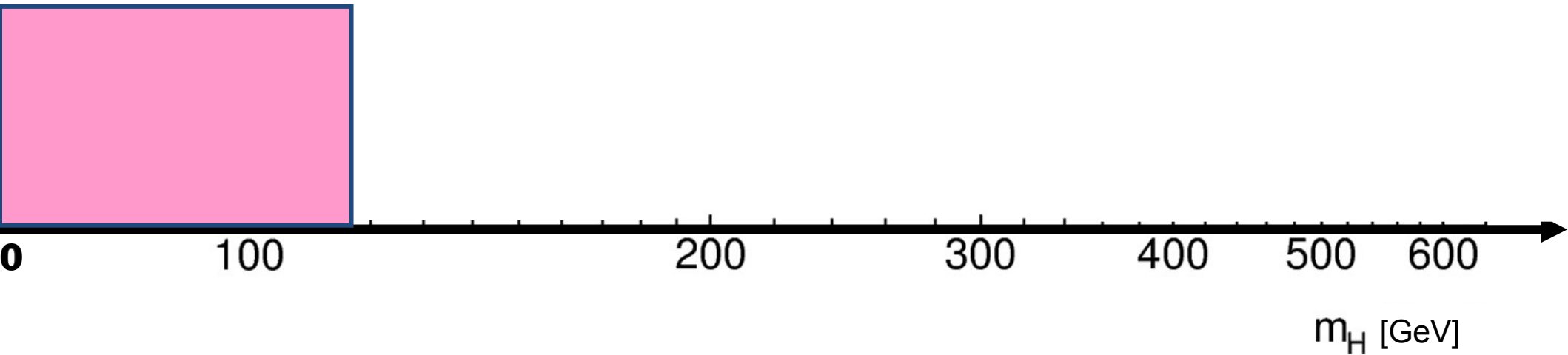
?



- Seule contrainte théorique : masse  $< 1000$  GeV

# La chasse au boson de Higgs

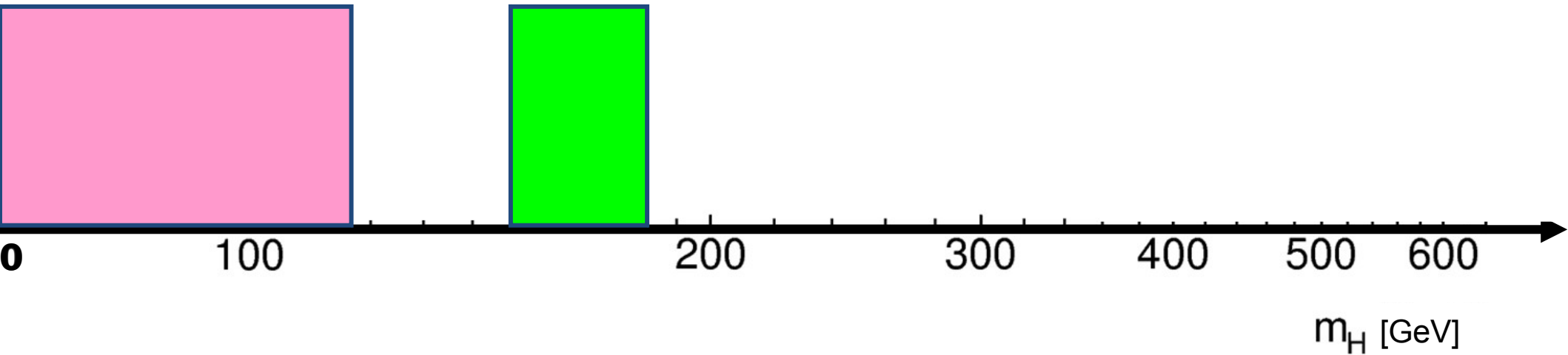
LEP  
1989-2000





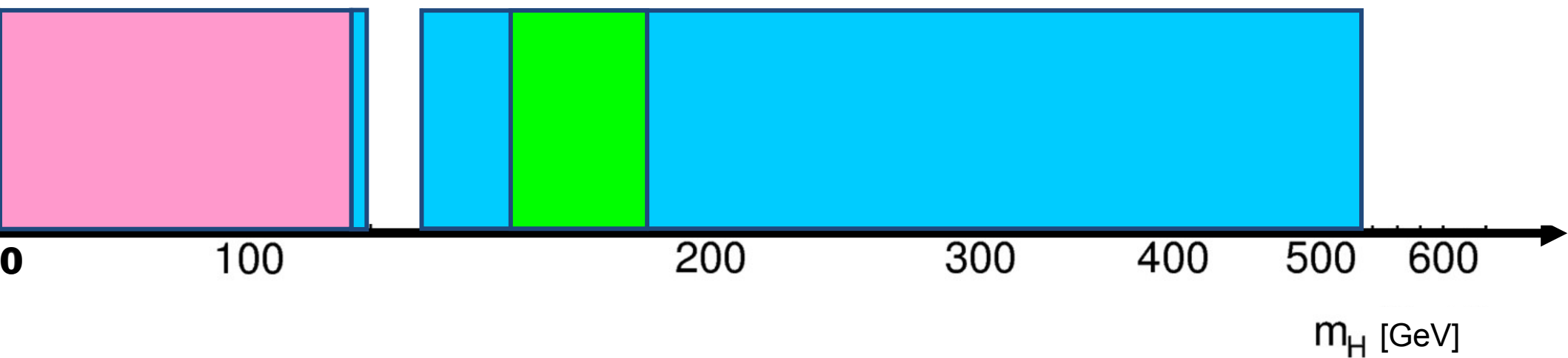
# La chasse au boson de Higgs

Tevatron  
1983-2011



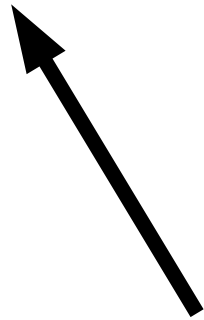
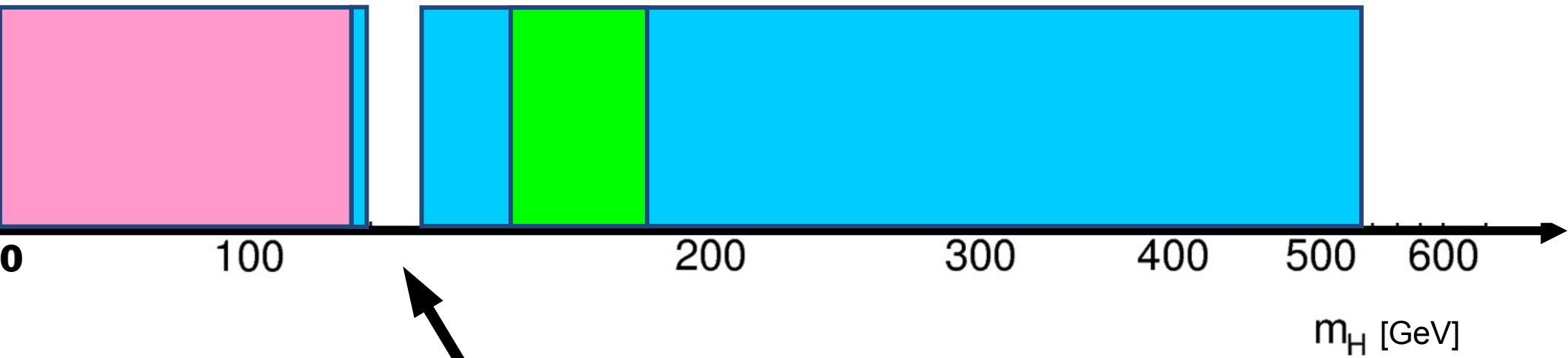
# La chasse au boson de Higgs

LHC  
2009-2011





# La chasse au boson de Higgs



?

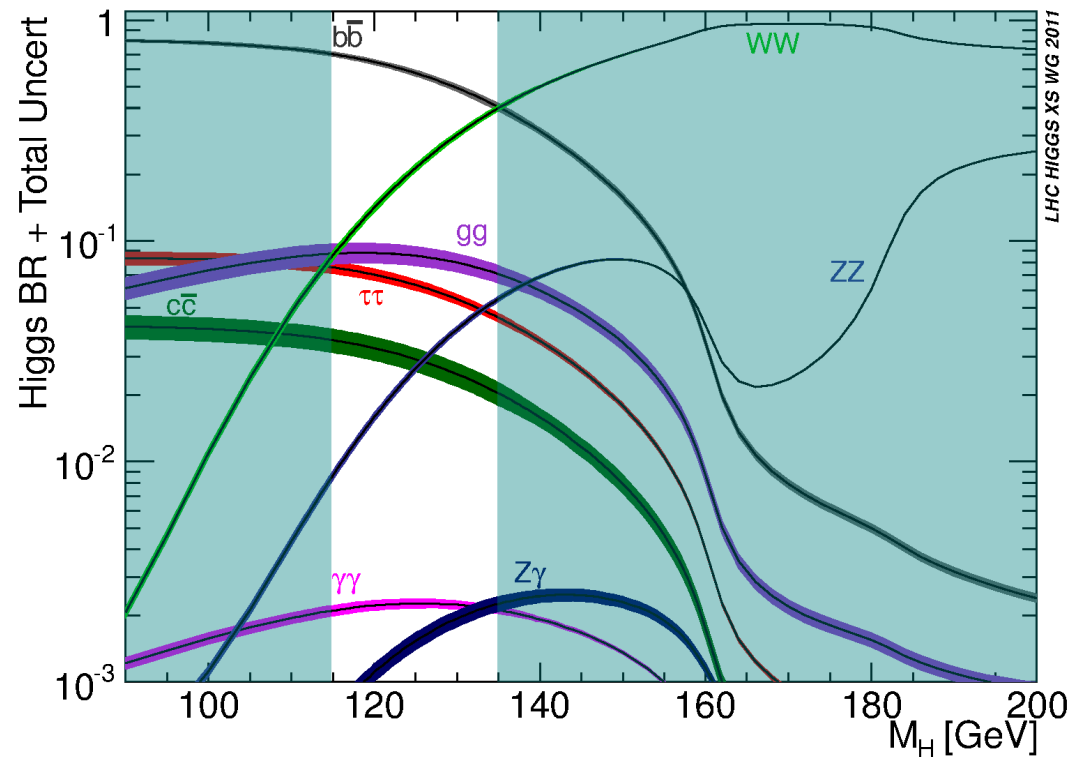


# Comment s'y prend-on ?

- 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 126 GeV :

- 56 fois sur 100 en  $b\bar{b}$
- 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, c'est le bruit de fond

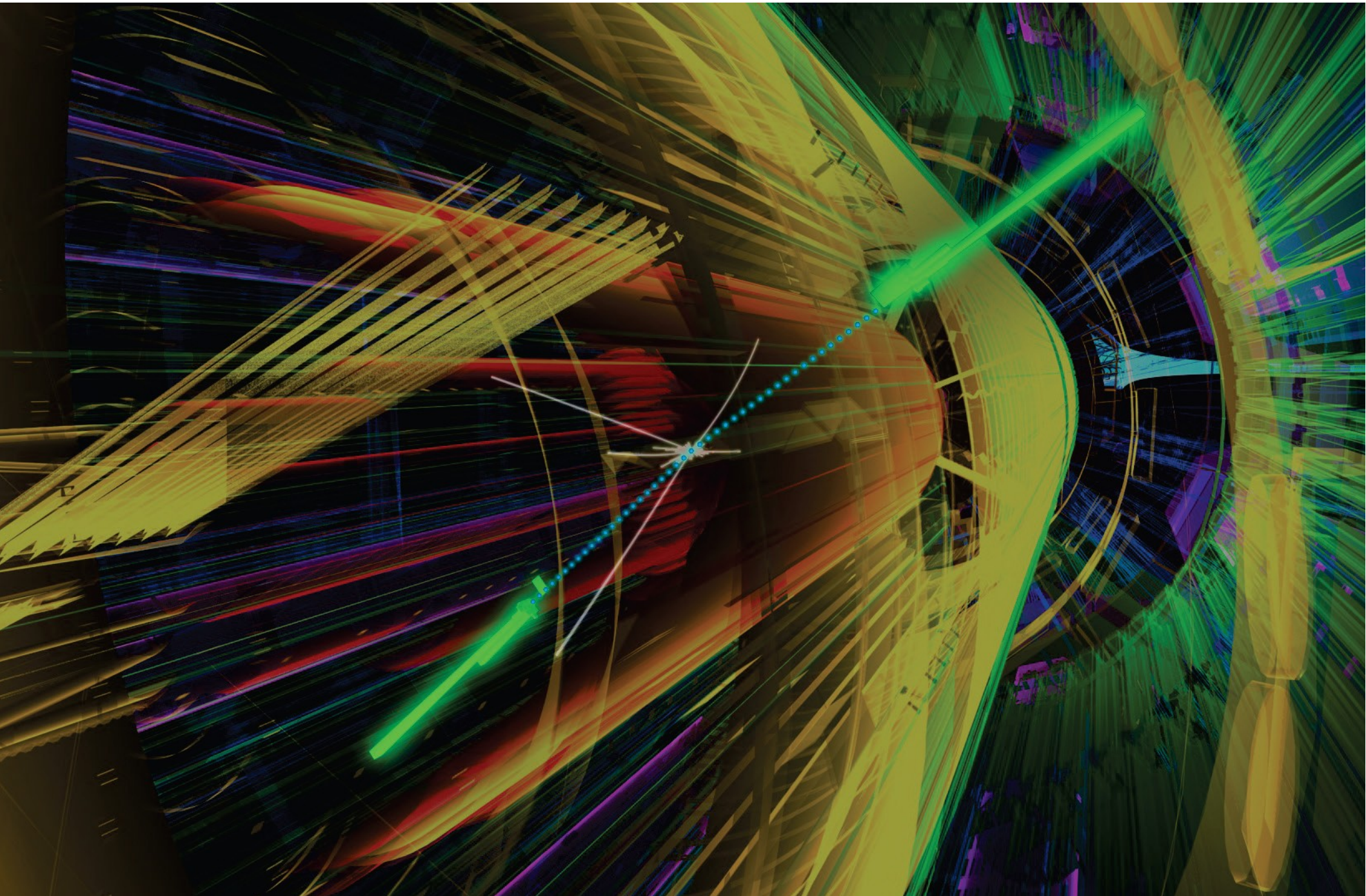


# Boson de Higgs dans ATLAS



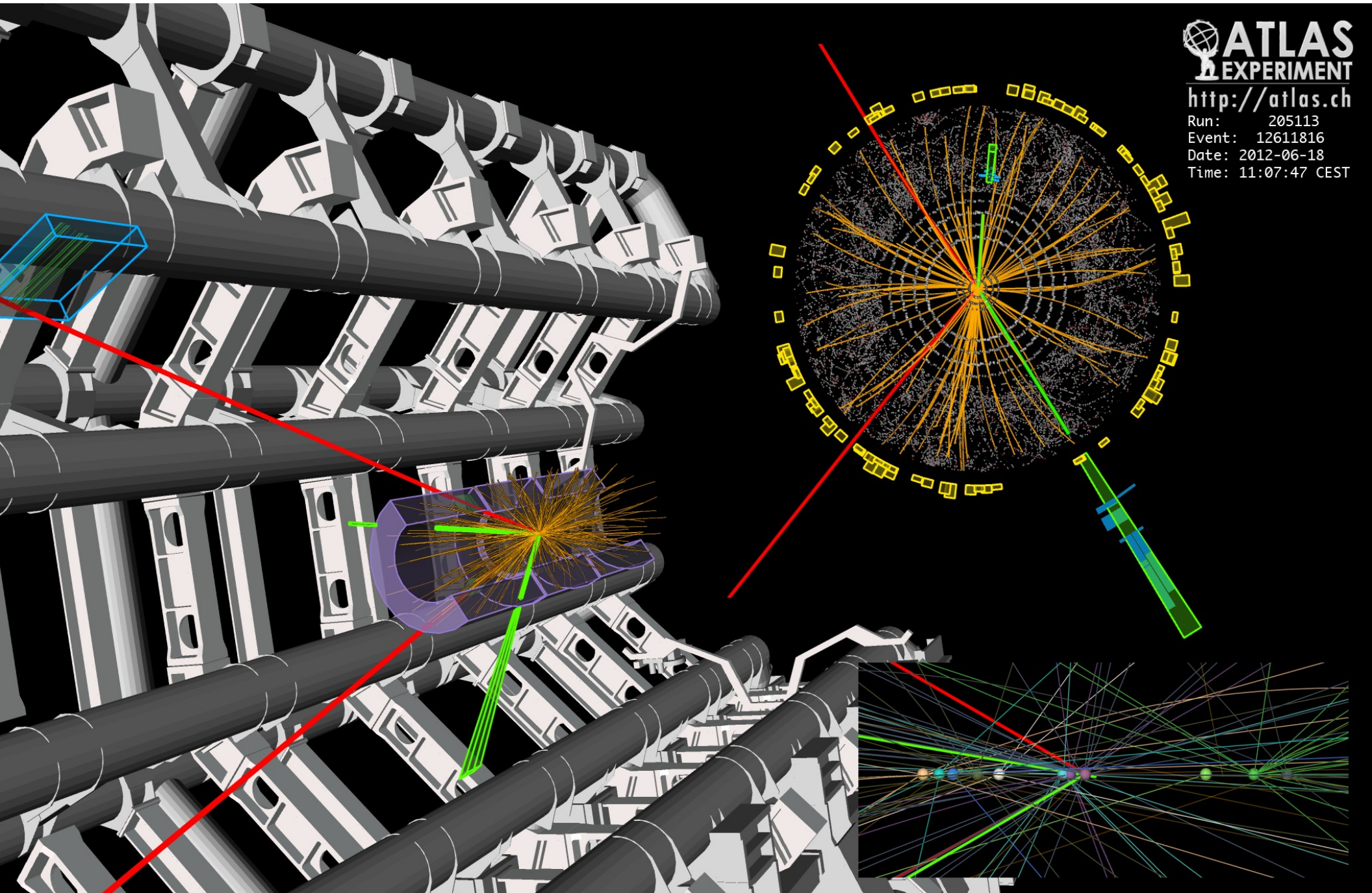


# Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$





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



**ATLAS**  
EXPERIMENT

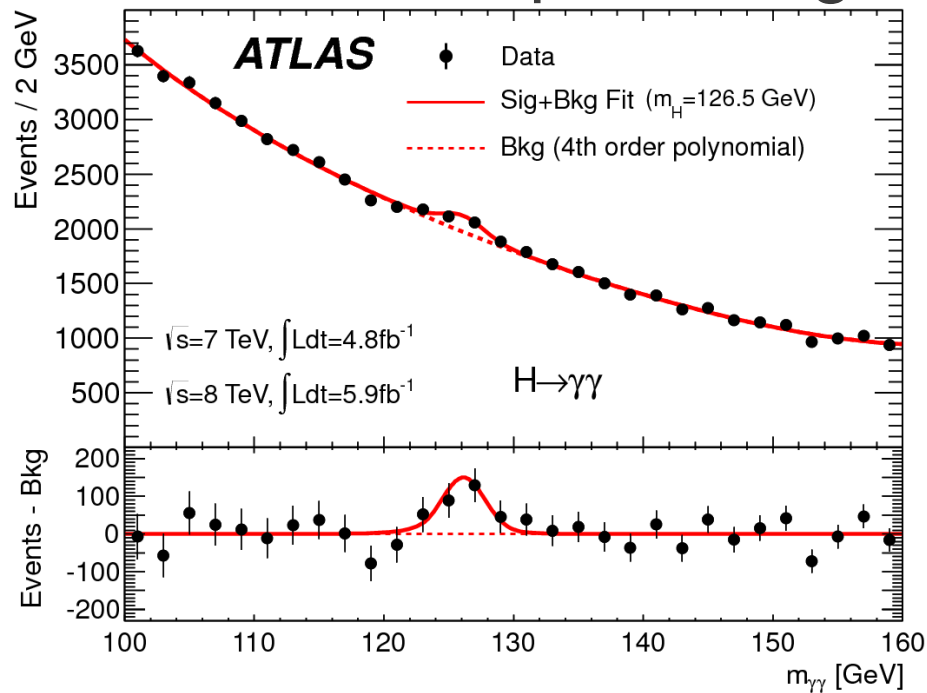
<http://atlas.ch>

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

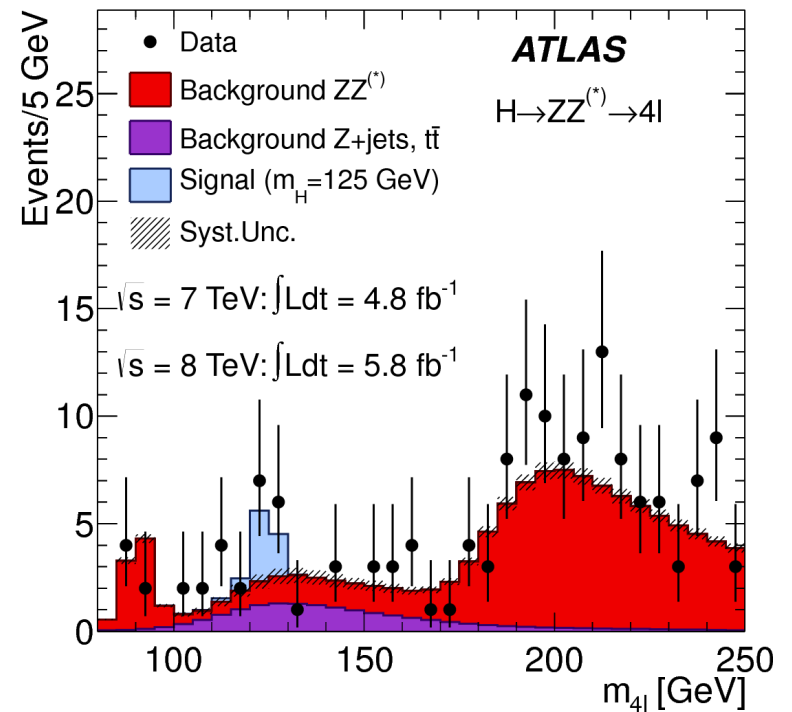


# Mesure

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

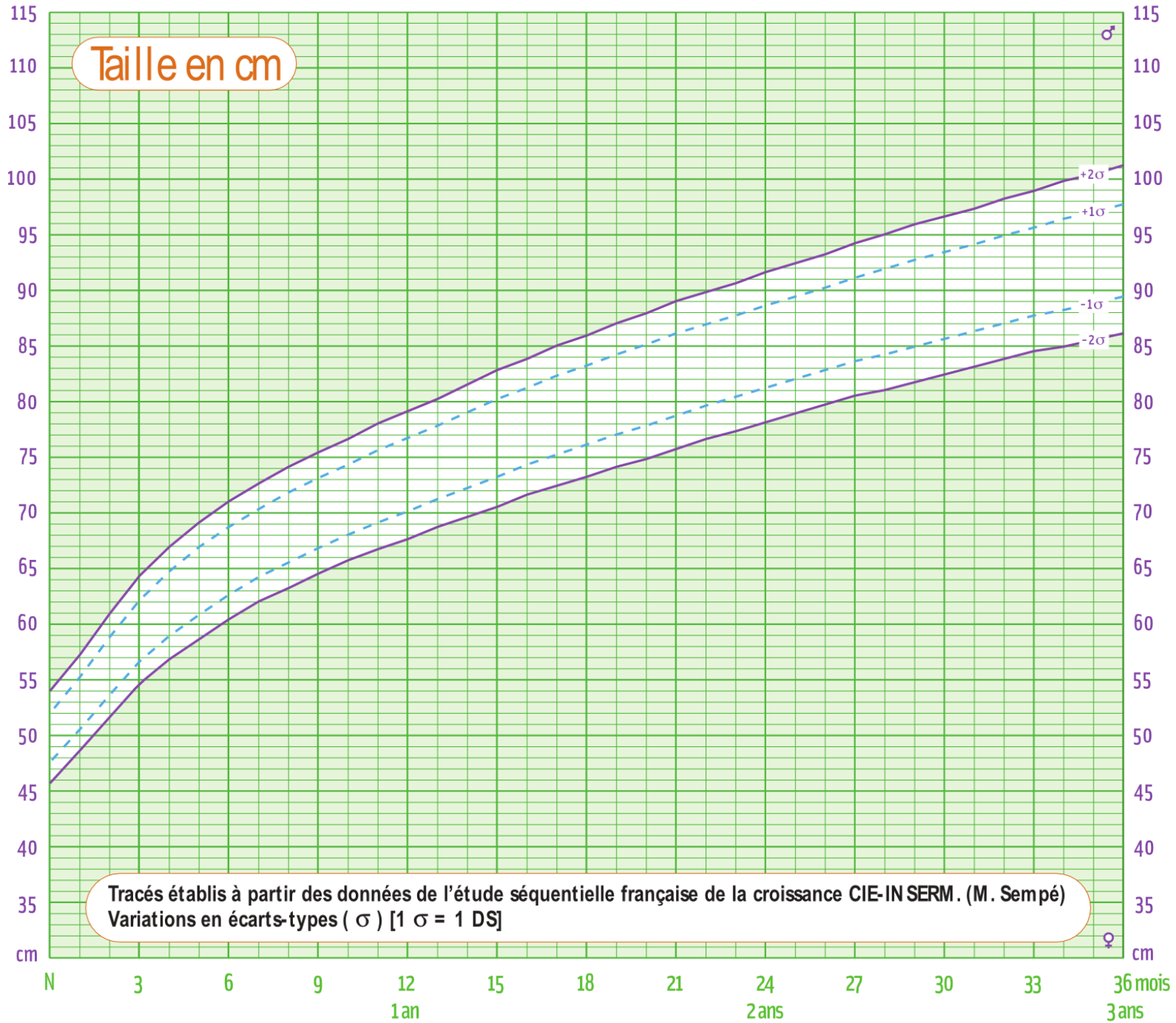


- Higgs en ZZ
  - Très peu de bruit de fond
  - Très peu d'événements



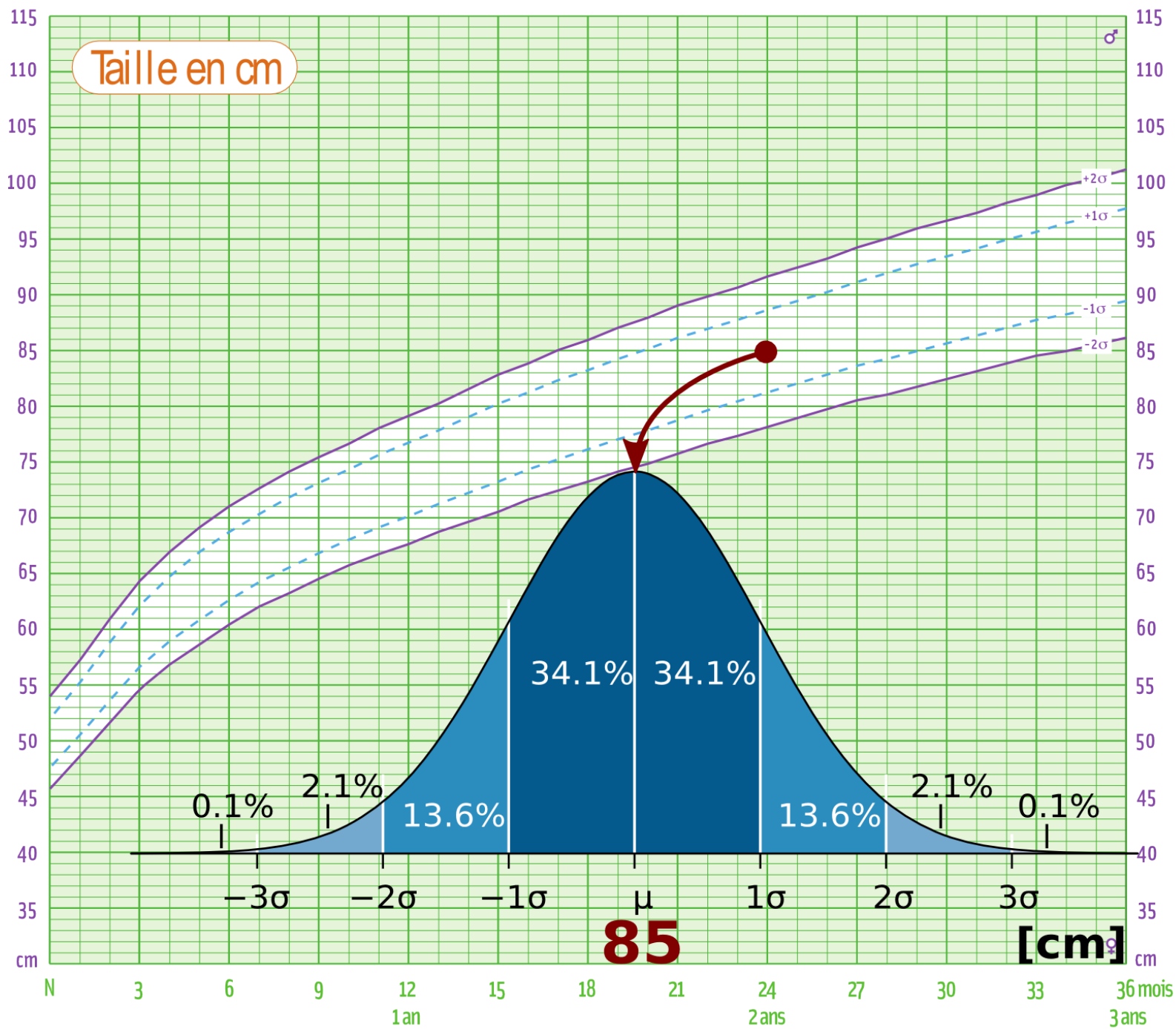
- Est-ce que cela est significatif ?
- Outils statistiques pour répondre

# La Gaussienne

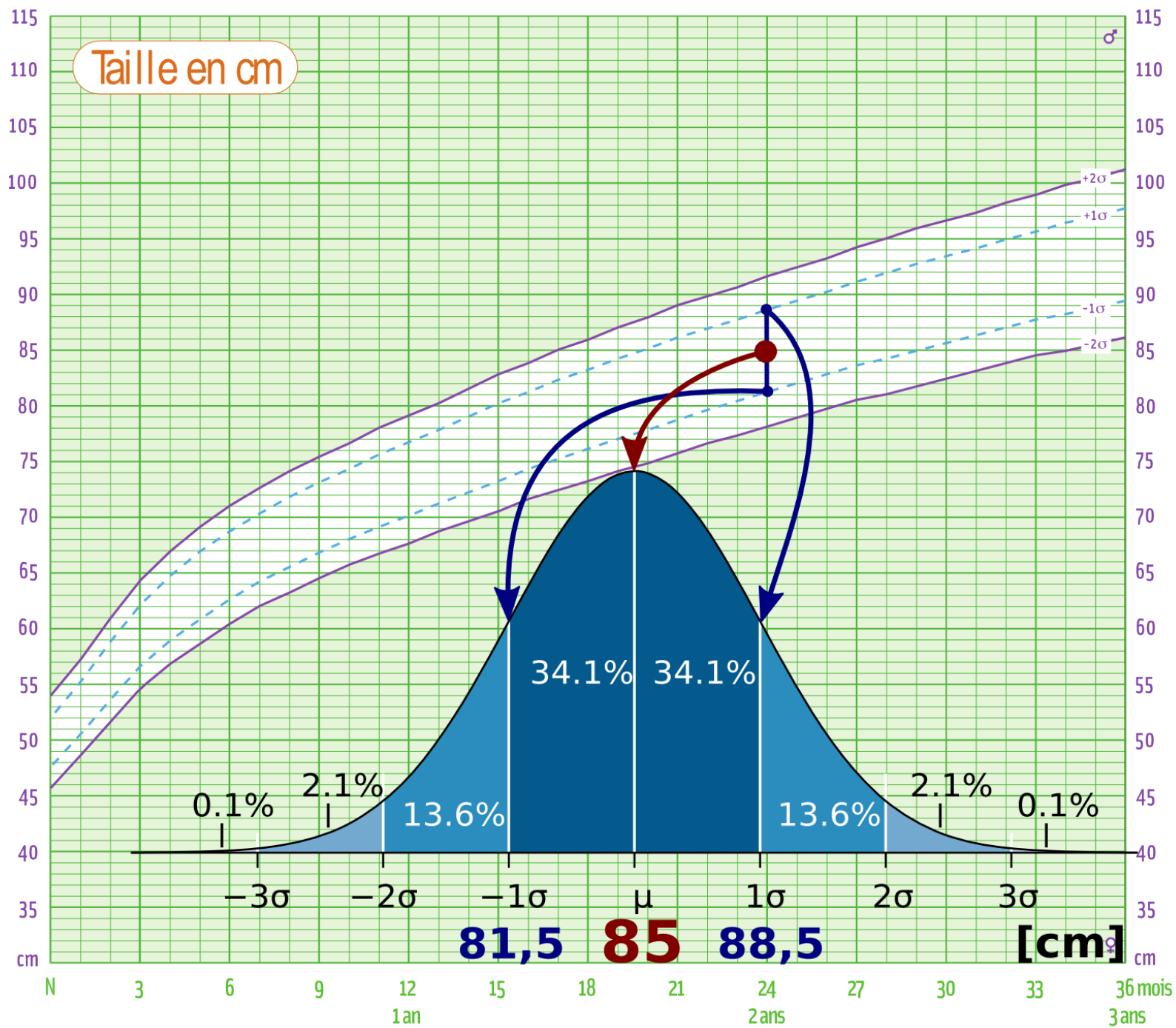




# La Gaussienne

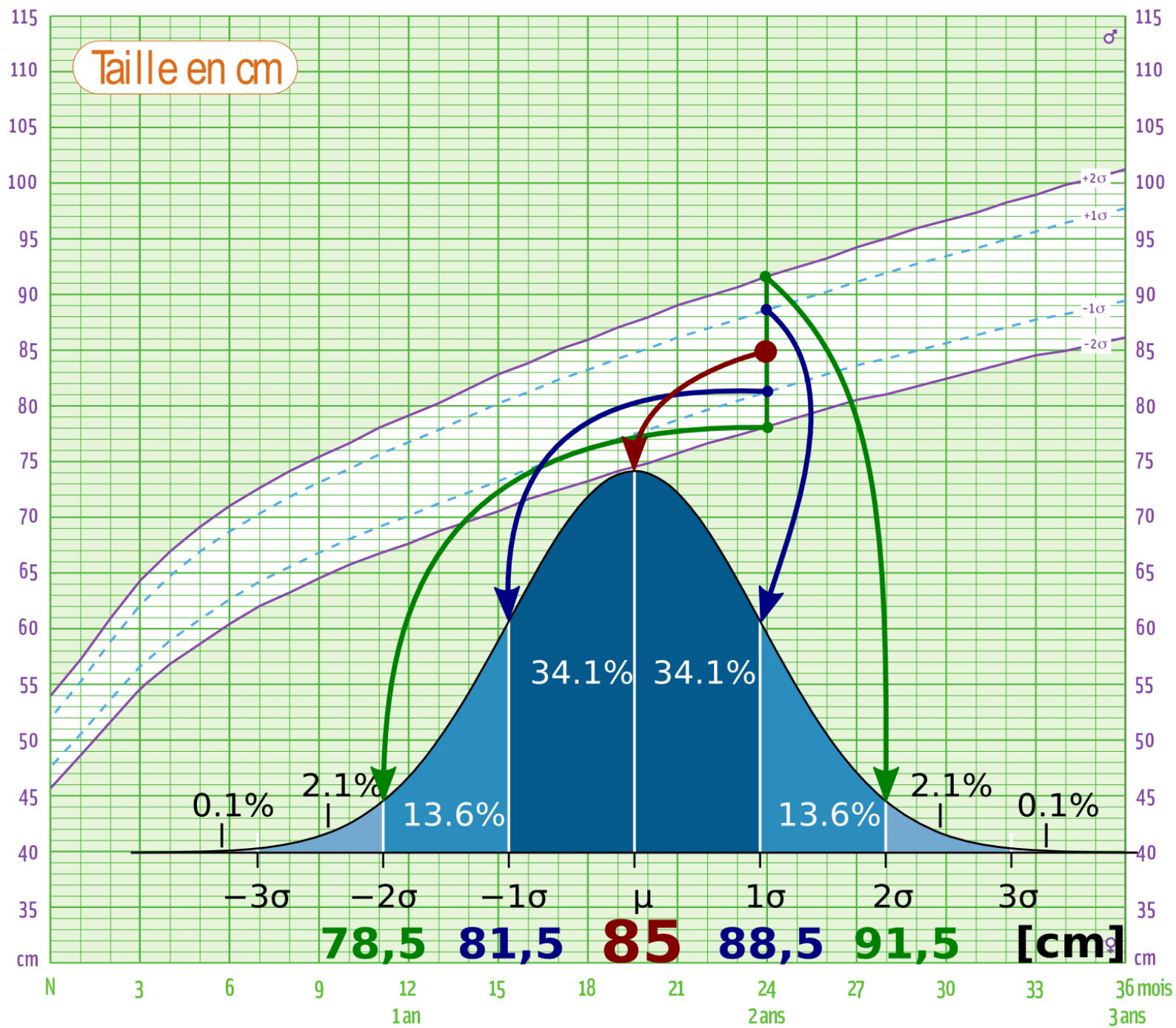


# La Gaussienne





# La Gaussienne



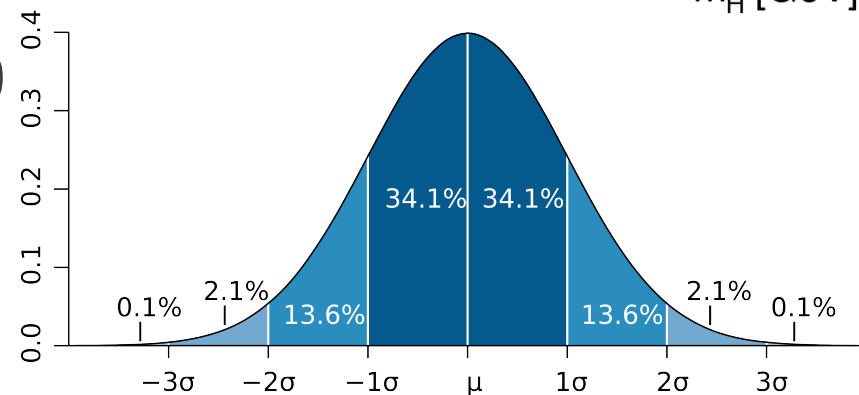
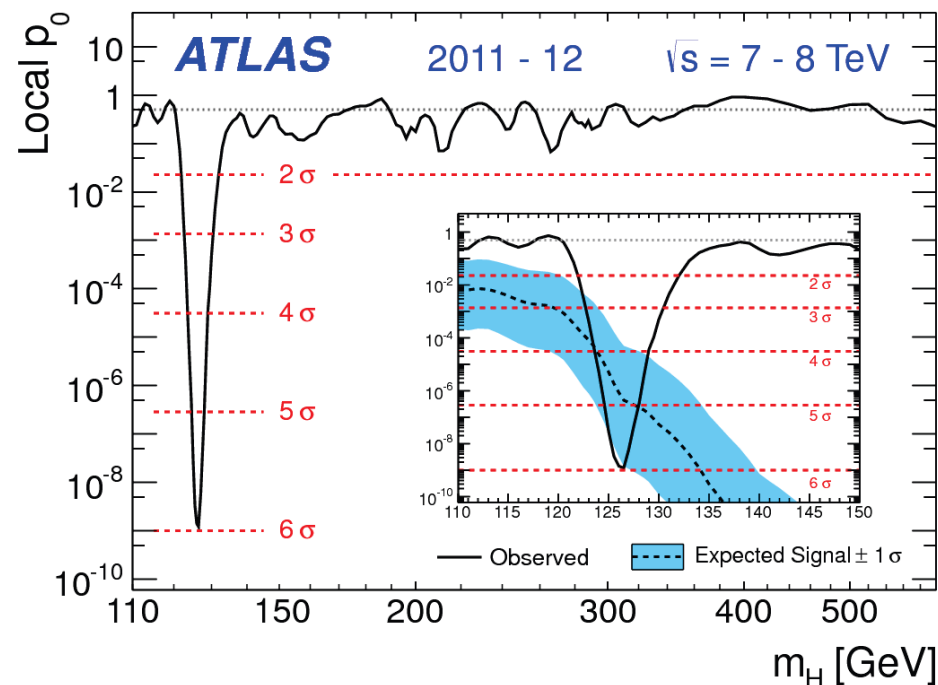
# Significance statistique

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

- Quantifié en nombre de déviations standard :

- $1\sigma$  : 1 chance sur 3
- $3\sigma$  (évidence) : 3 chances sur 1000
- $5\sigma$  (observation) : 1 chance sur 2 millions
- $5,9\sigma$  : 3 chances sur 1 milliard

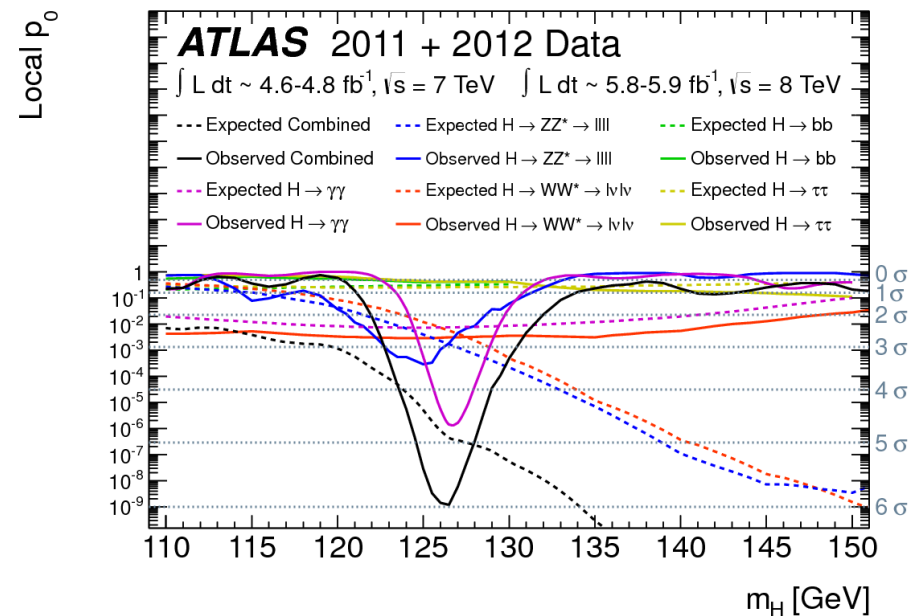
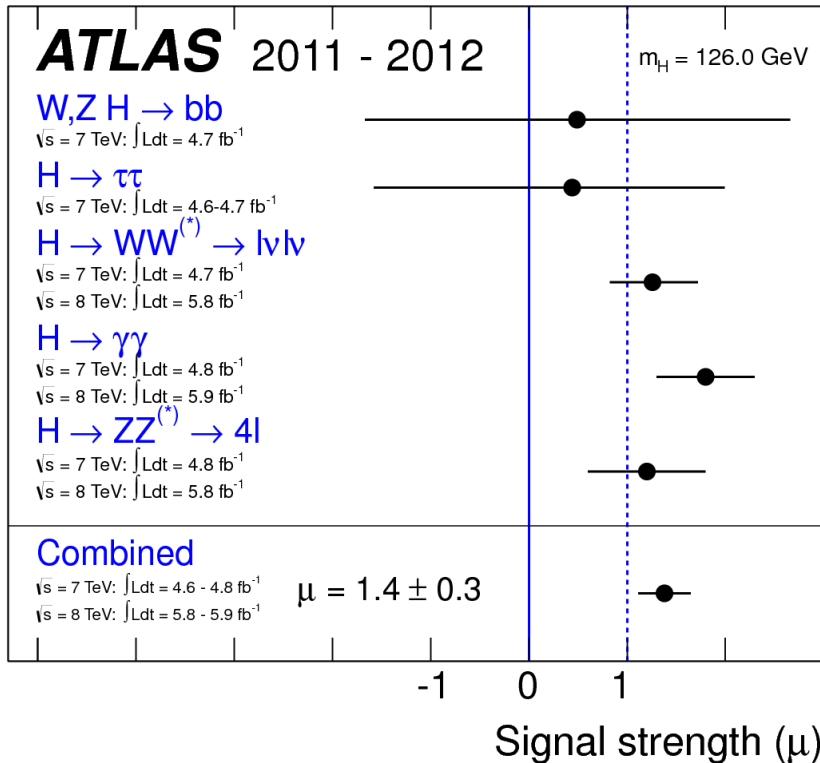
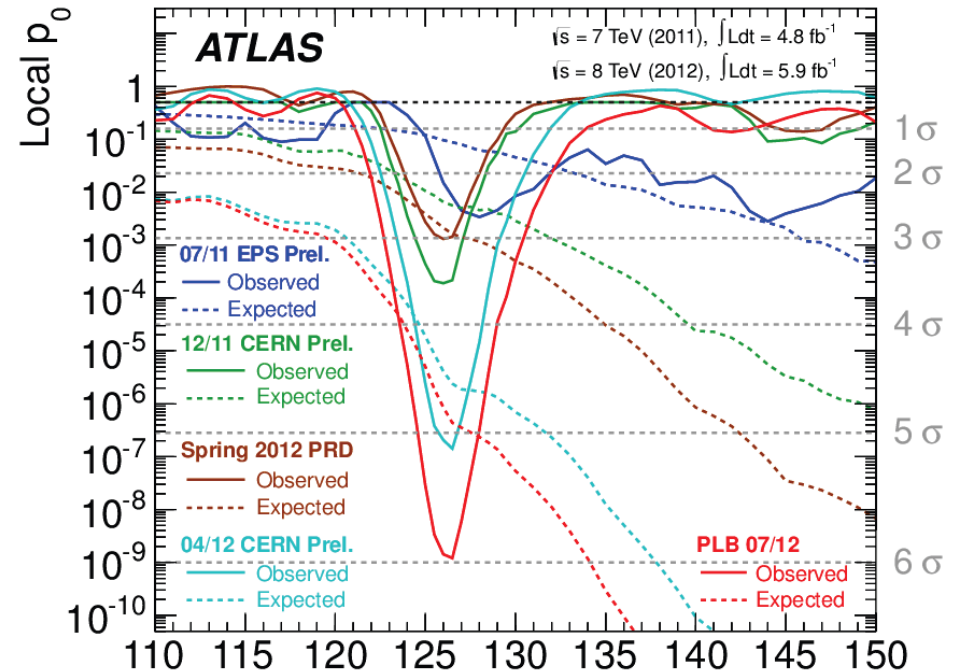
- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose





# Est-ce consistant ?

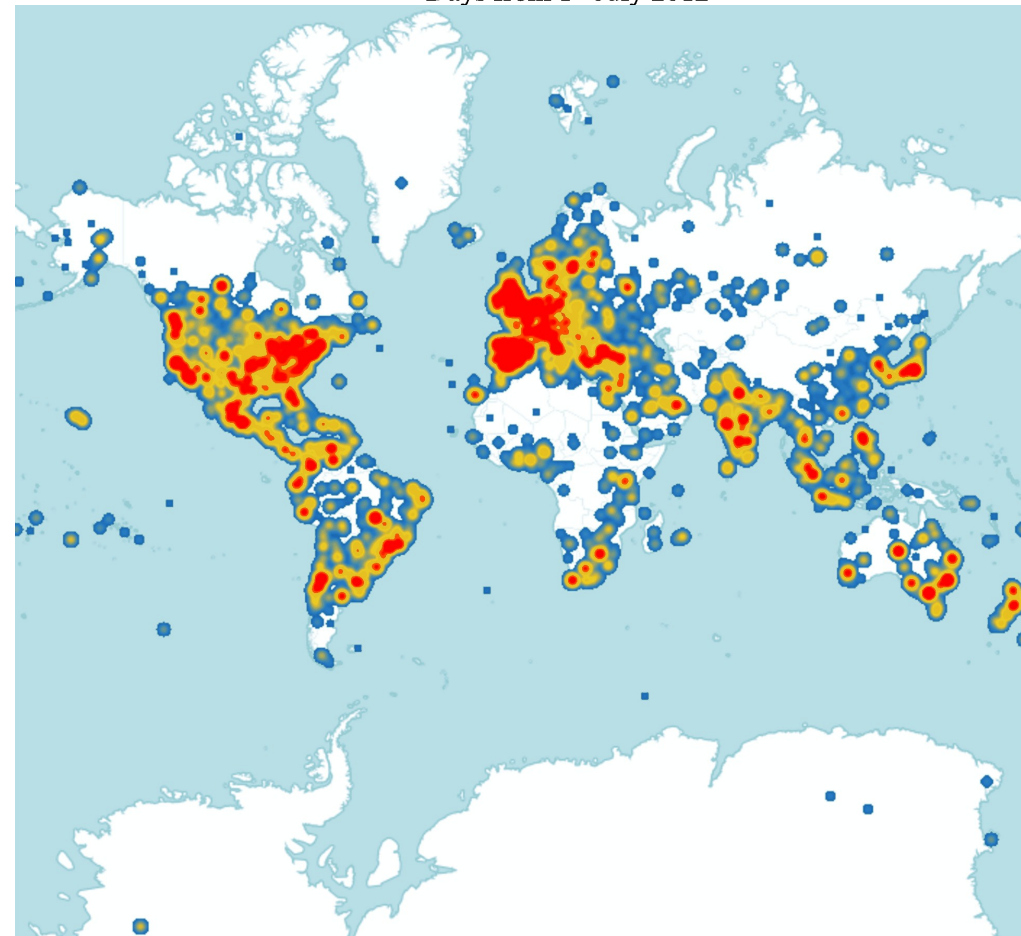
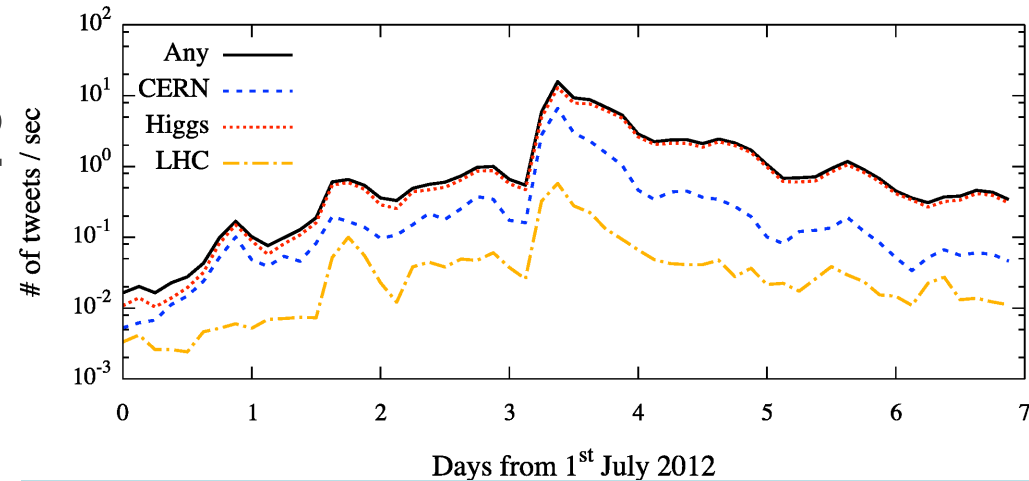
- Evolution dans le temps
- Mesure dans les différents canaux de désintégration, qui dépendent de différentes parties du détecteur
- ATLAS et CMS voient la même chose



# Résultats

- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN

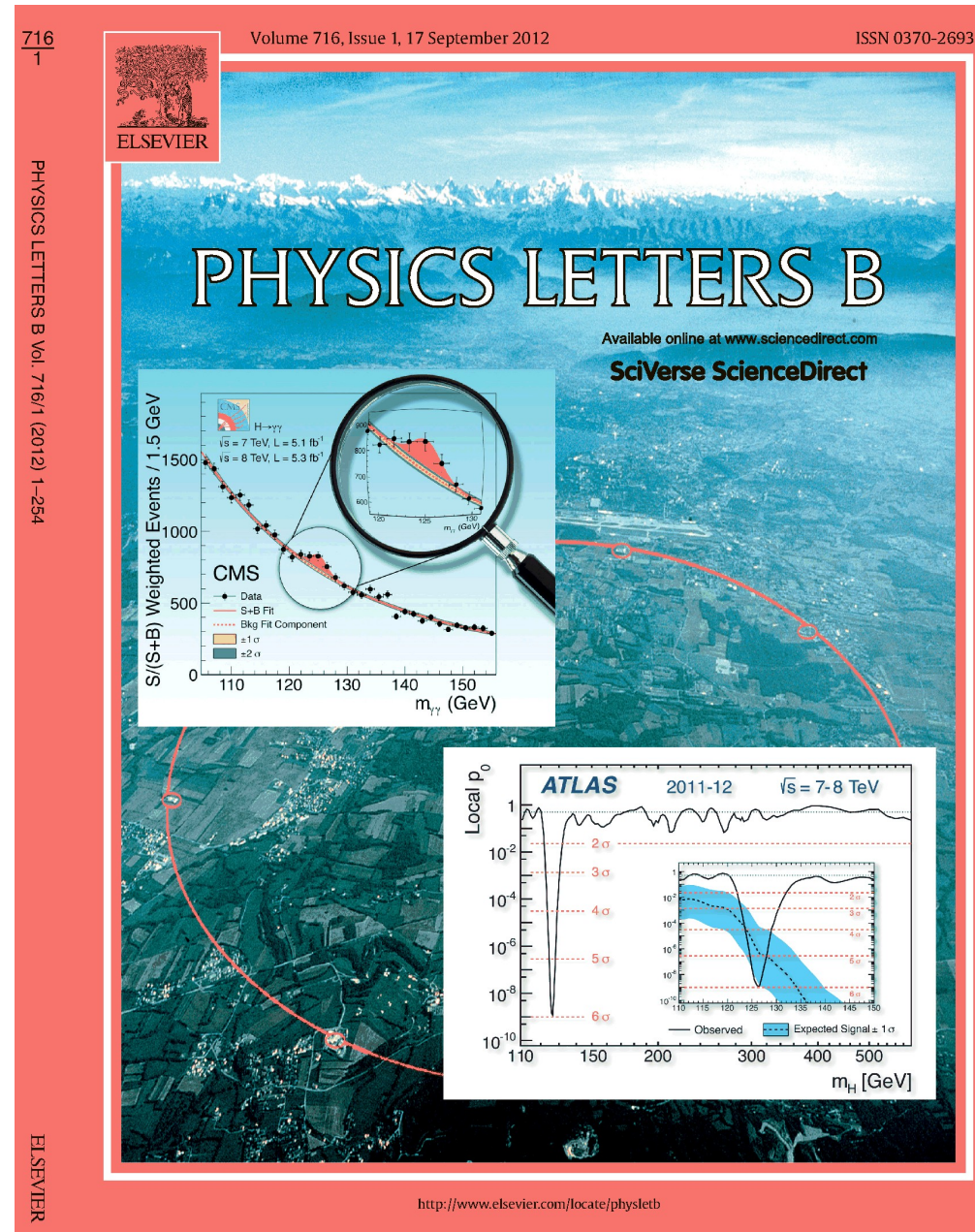
- 55 médias sur place
- 500 000 connexions webcast
- Vu sur >1000 chaînes de télévision
- Plus d'un million de tweets (gazouillis)





# Résultats

- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN
  - 55 médias sur place
  - 500 000 connexions webcast
  - Vu sur >1000 chaînes de télévision
  - Plus d'un million de tweets (gazouillis)
- Publiés fin juillet
- Et depuis ?



# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard,  **$\sim 126 \text{ GeV}$**  (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés au mois de mars 2013)
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Mesure de propriétés comme le spin
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Pas de signe d'autres phénomènes au-delà du modèle standard (Higgs composite, autres bosons de Higgs, autres particules, etc.)



# Évolution dans le temps



film

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



film

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

# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard,  **$\sim 126 \text{ GeV}$**  (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés au mois de mars 2013)
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Mesure de propriétés comme le spin
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Pas de signe d'autres phénomènes au-delà du modèle standard (Higgs composite, autres bosons de Higgs, autres particules, etc.)



# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard,  $\sim 126 \text{ GeV}$  (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés au mois de mars 2013)
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Mesure de propriétés comme le spin
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Pas de signe d'autres phénomènes au-delà du modèle standard (Higgs composite, autres bosons de Higgs, autres particules, etc.)

**Pour le moment, cette particule ressemble beaucoup au boson de Higgs du modèle standard.**

**Les nouvelles données à partir de 2015 devraient permettre de tout mesurer avec une bien meilleure précision, modèle standard ou au-delà**

# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



**Modèle standard**



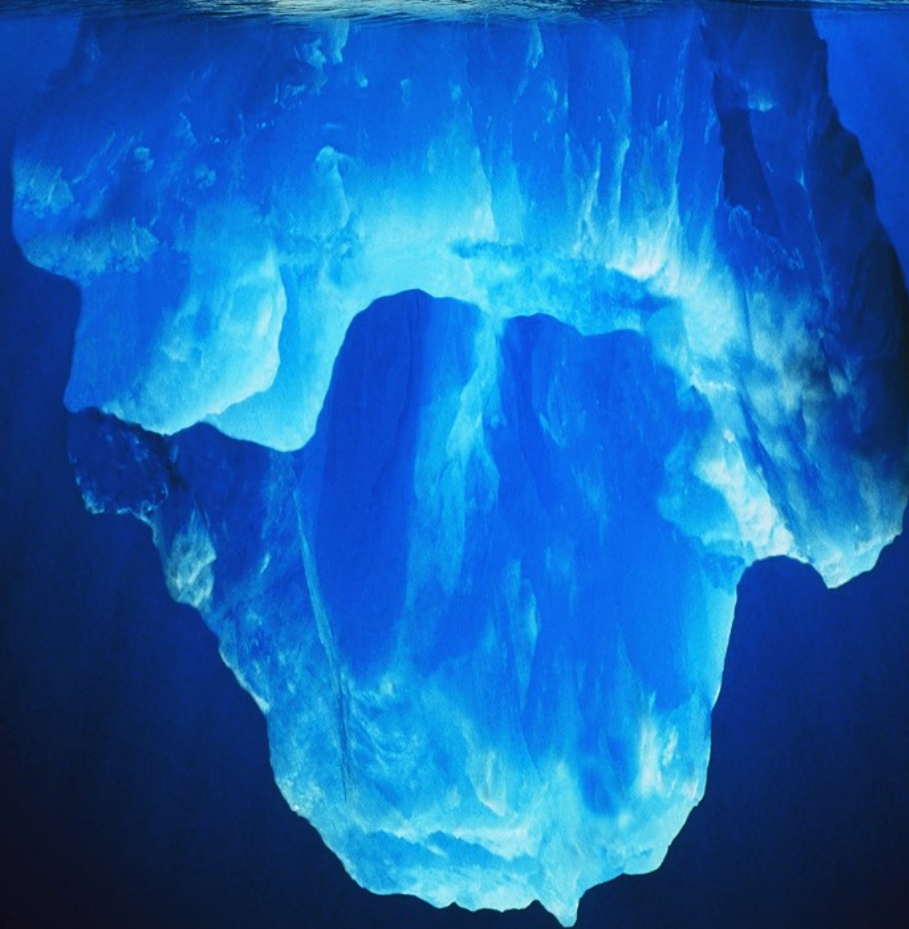


# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



**5% Modèle standard**





# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

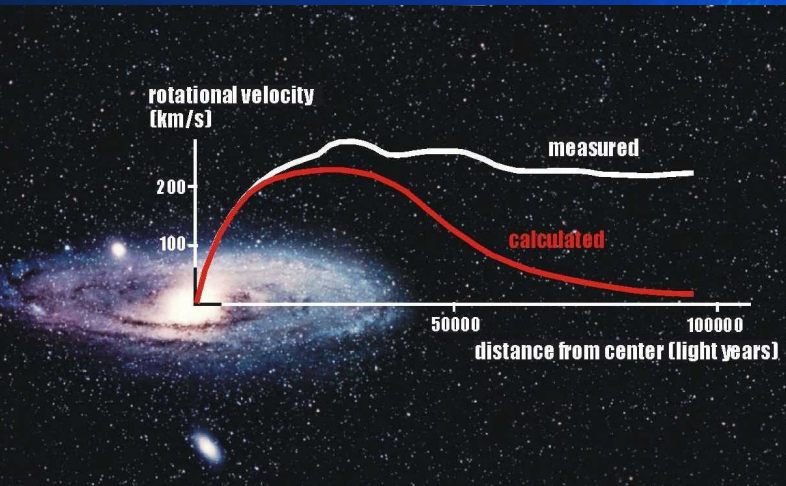


5% Modèle standard

27% Matière noire

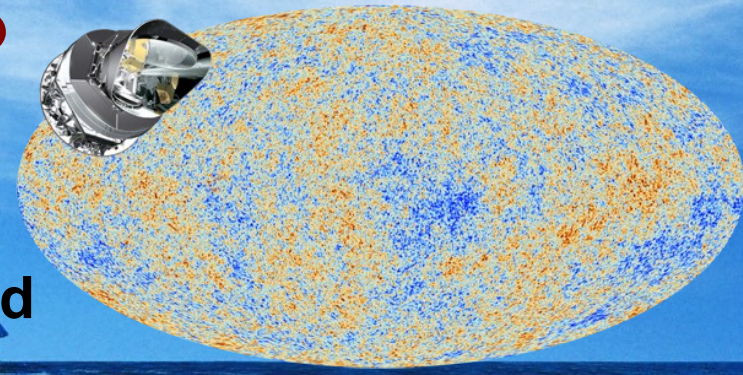


- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?





# C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

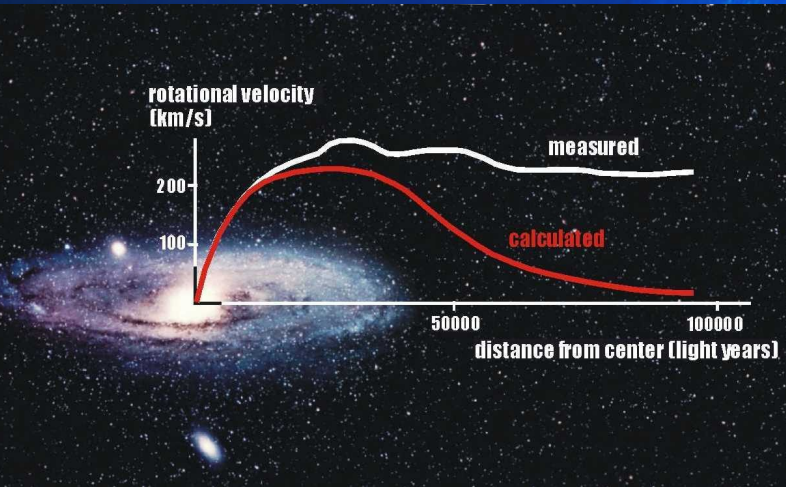


5% Modèle standard

27% Matière noire



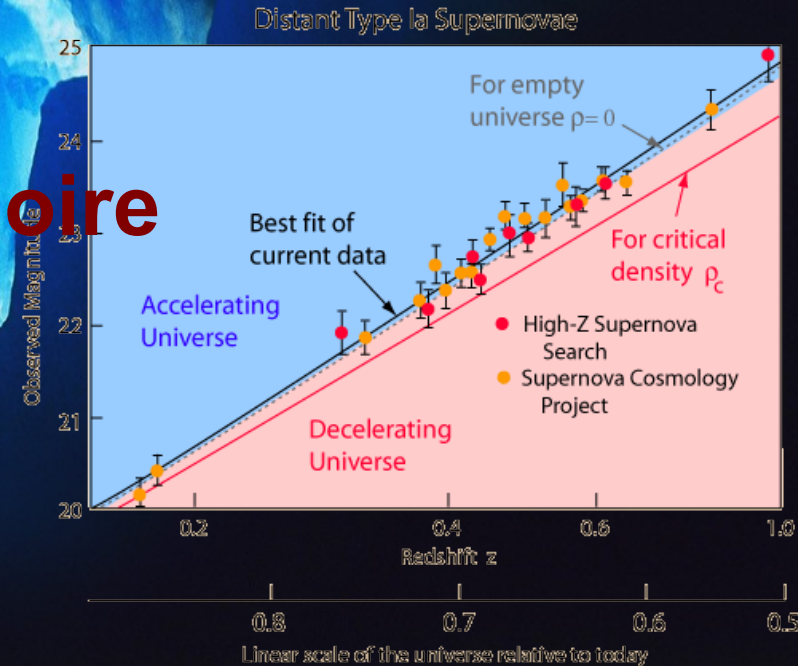
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ... ) ?



68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !





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

A Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map showing temperature variations across the sky. The map is overlaid with a network of colored lines (red, orange, yellow, green, blue) representing particle tracks or paths. The tracks are most dense and concentrated in the central region, where they appear to radiate outwards. The background is a dark blue field with lighter blue and white spots representing CMB fluctuations. The map is framed by a white grid of squares, suggesting a coordinate system.

Lien entre le boson de Higgs et l'inflation de l'Univers ?



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



Au LHC :

- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- Des surprises ? On l'espère !



# Conclusion





# Liens

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 

[marwww.in2p3.fr](http://marwww.in2p3.fr)

Le CERN 

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

Le CERN sur 

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