La quête du boson de Higgs

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

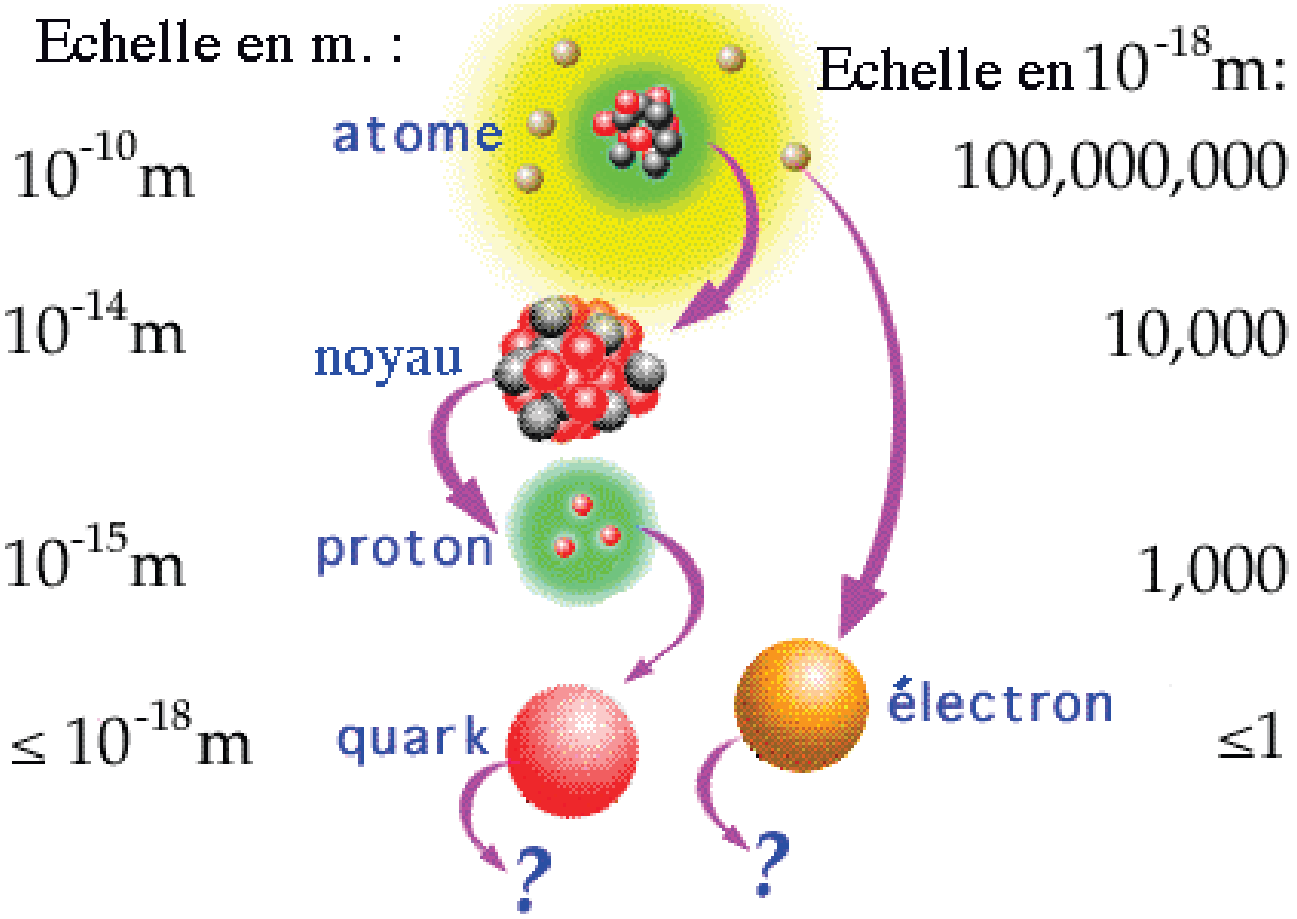
Association Andromède, Marseille
24 mai 2013

cnrs dépasser les frontières
IN2P3 Les deux infinis
Centre de Physique des Particules de Marseille CPPM
Aix*Marseille université

De l'infiniment grand vers l'infiniment petit

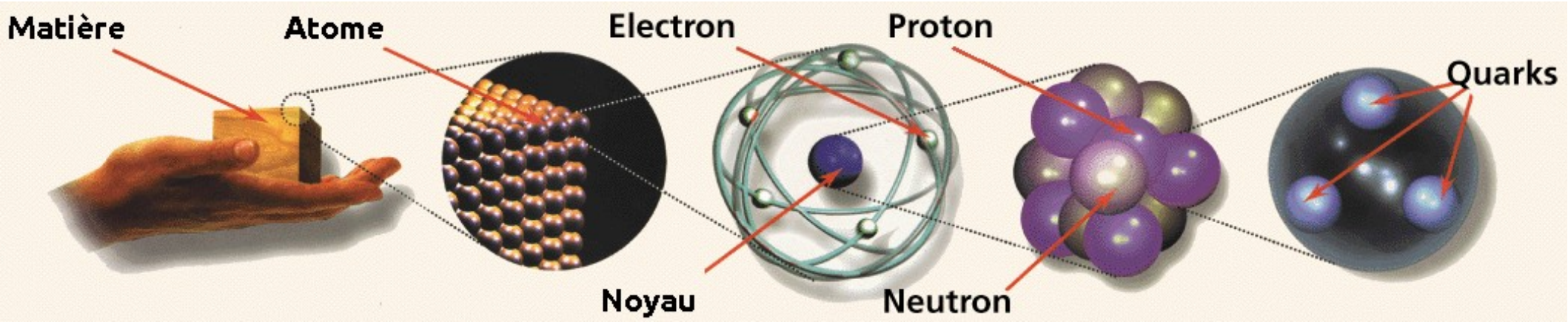
© Science et Vie

Échelle des distances en physique des particules

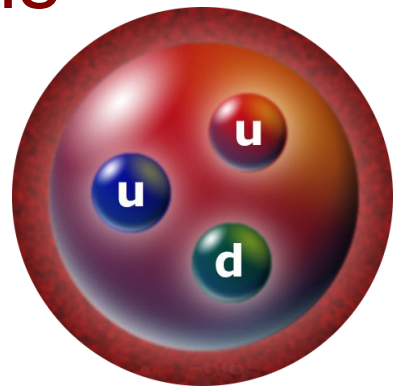


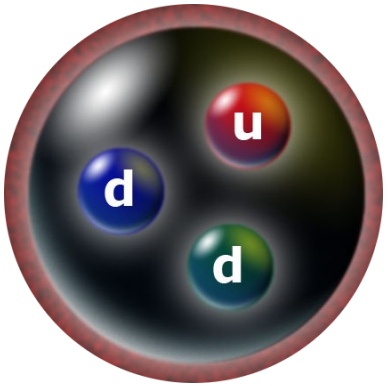
Si protons et neutrons étaient à 10 cm l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait moins de 0,1 mm et un atome environ 10 km

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

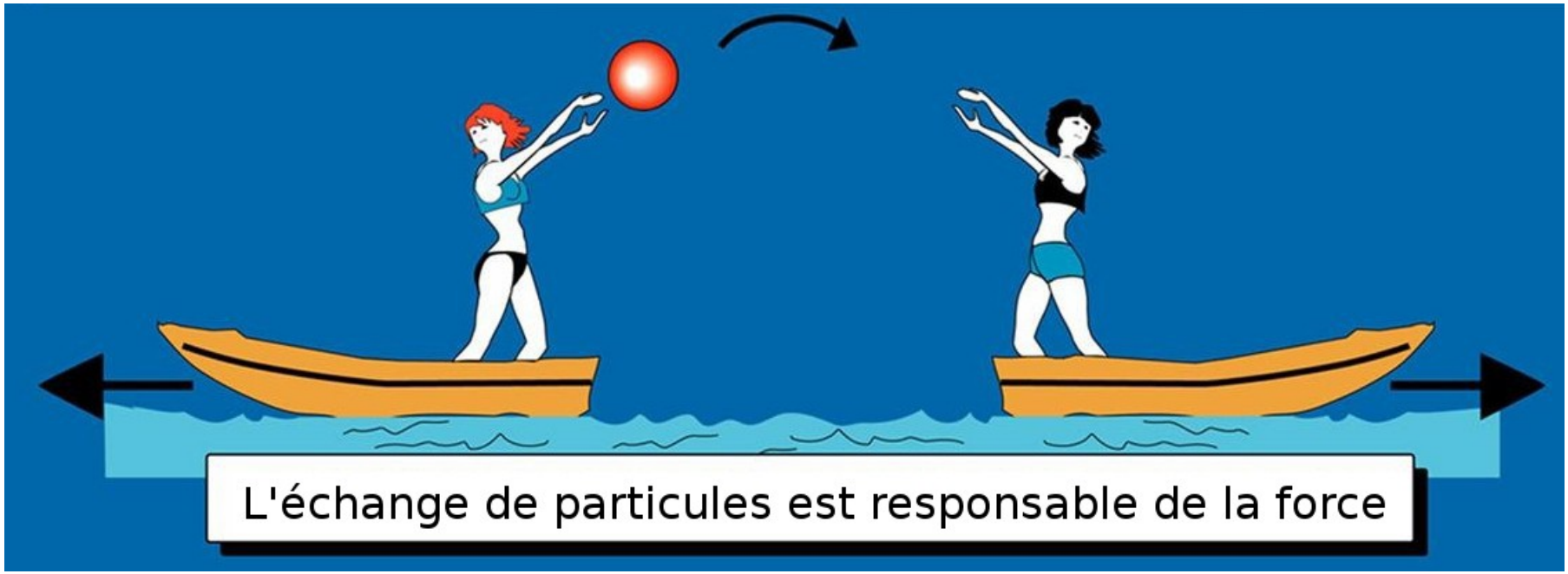




- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des neutrinos sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles

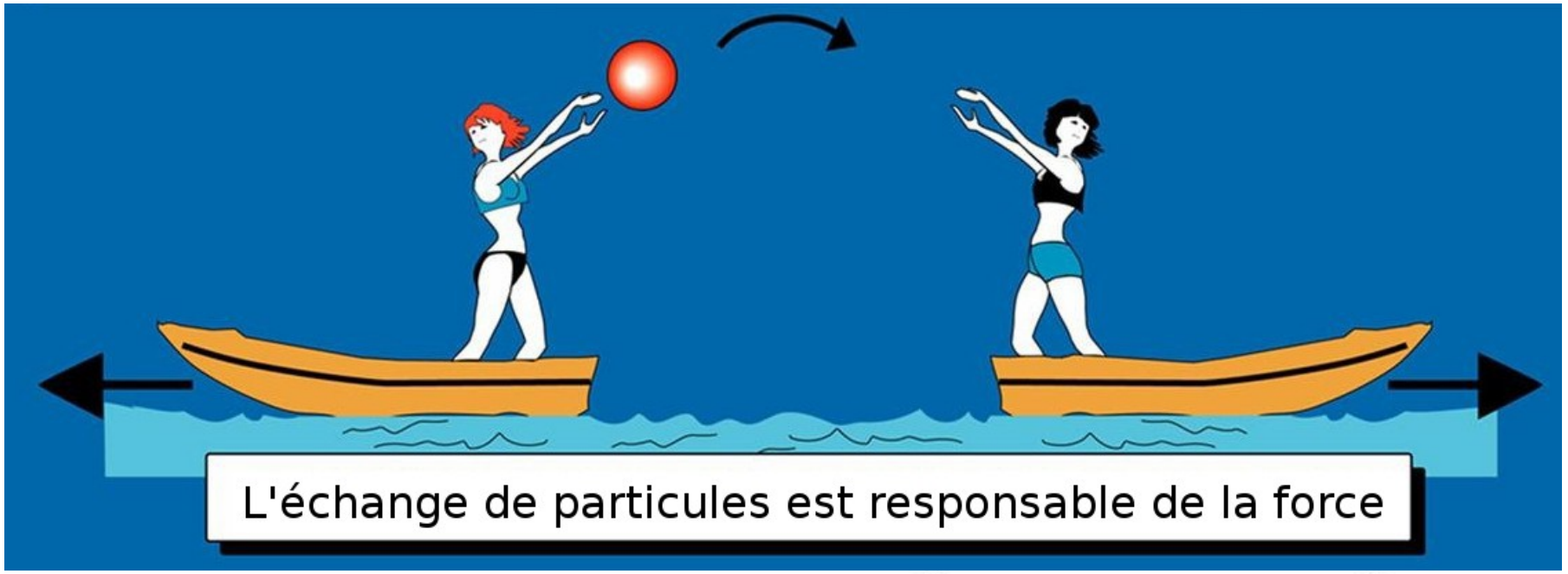
Interaction fondamentale

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

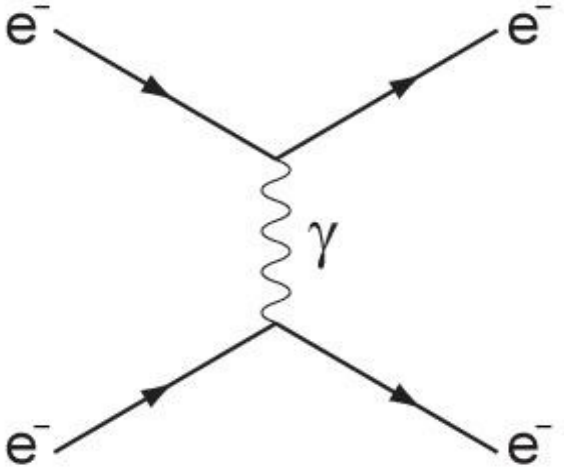


Interaction fondamentale

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

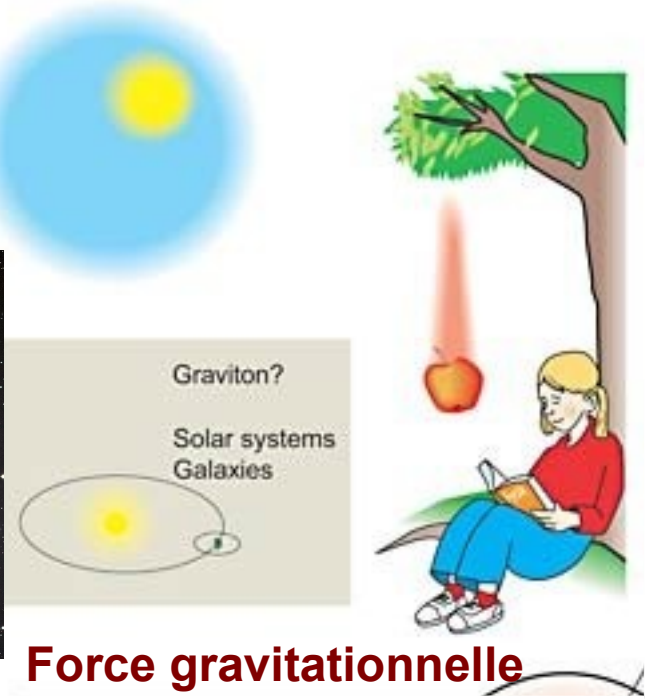


En physique des particules :



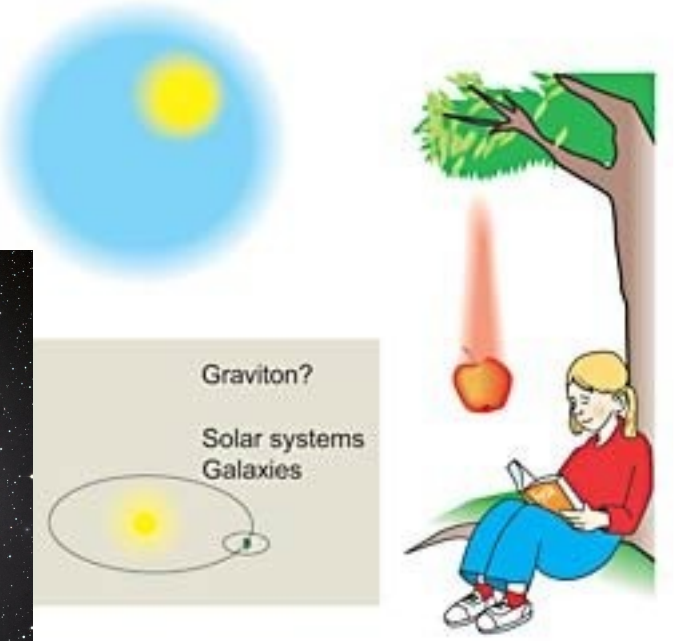
Les forces

Les forces

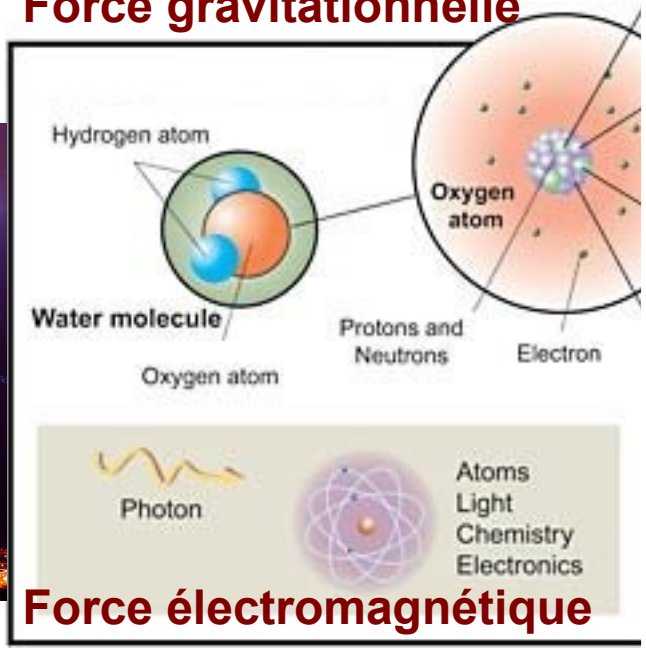


Force gravitationnelle

Les forces

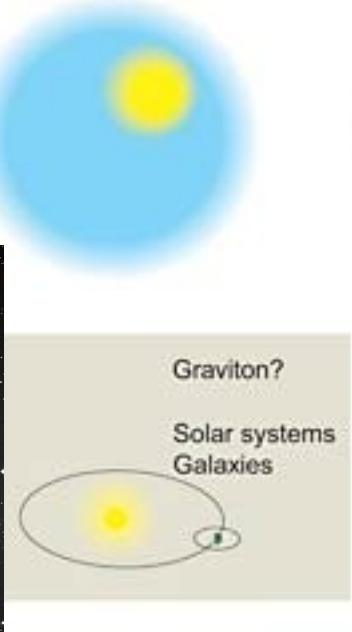


Force gravitationnelle

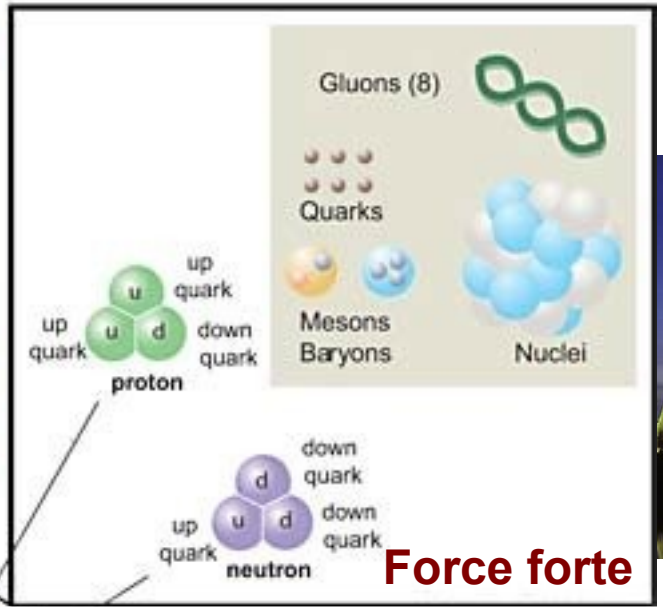


Force électromagnétique

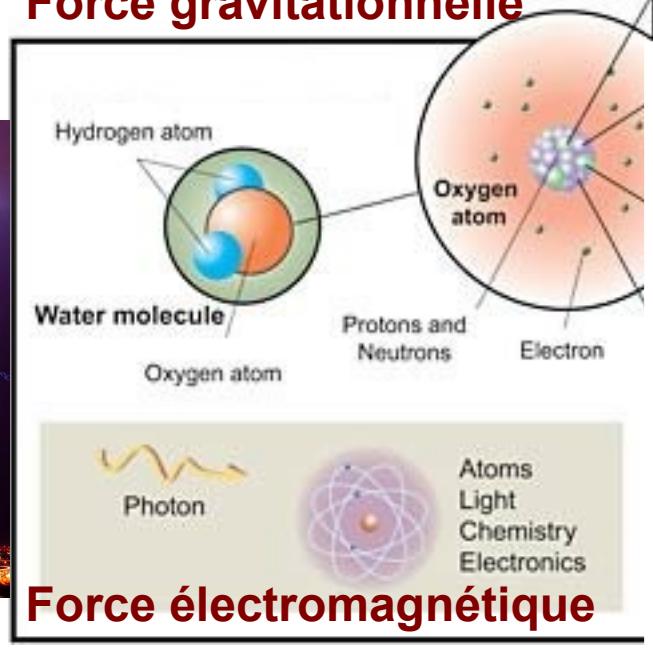
Les forces



Force gravitationnelle



Force forte



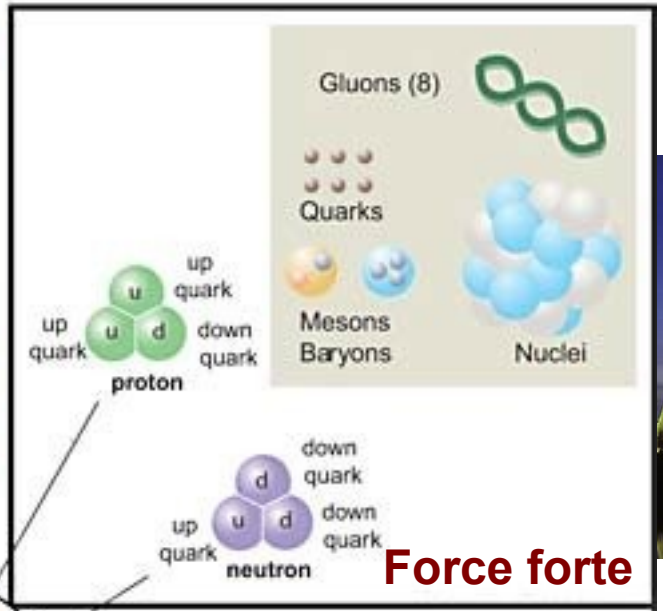
Force électromagnétique

Les forces

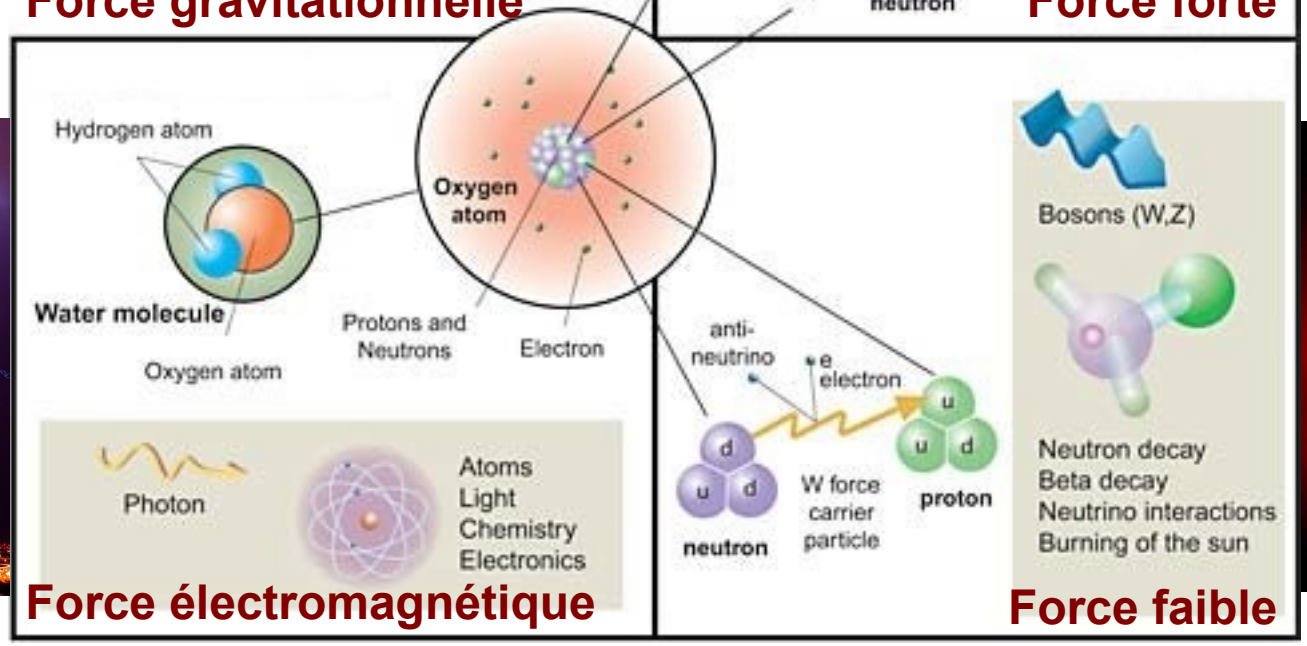
Graviton?

Solar systems
Galaxies

Force gravitationnelle

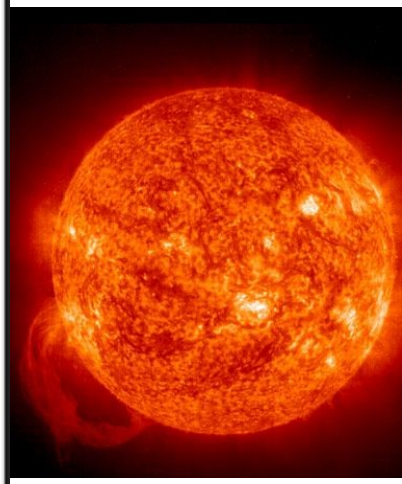


Force forte

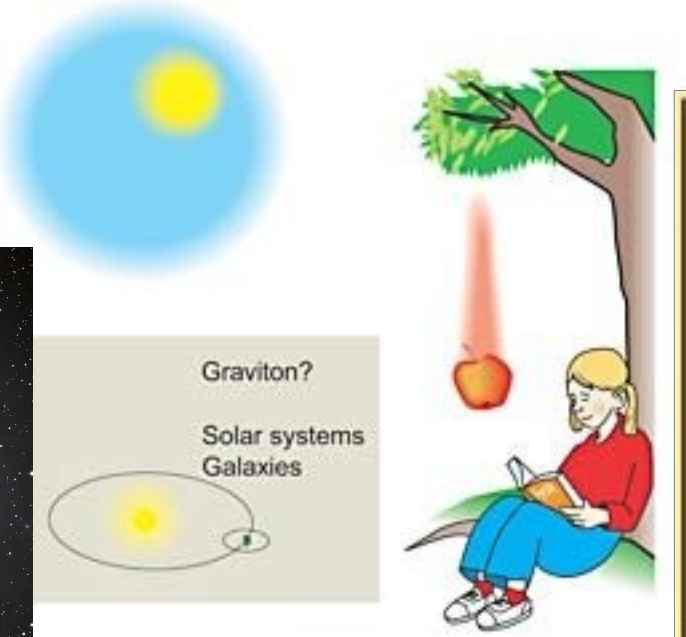


Force électromagnétique

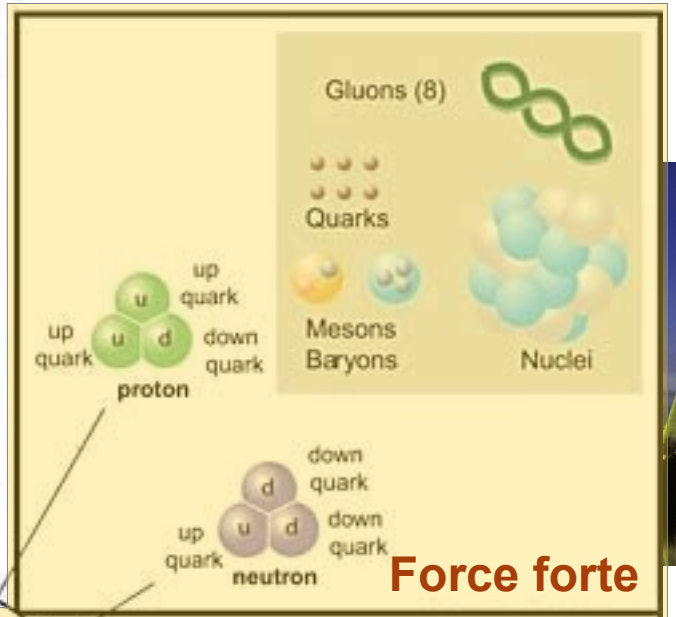
Force faible



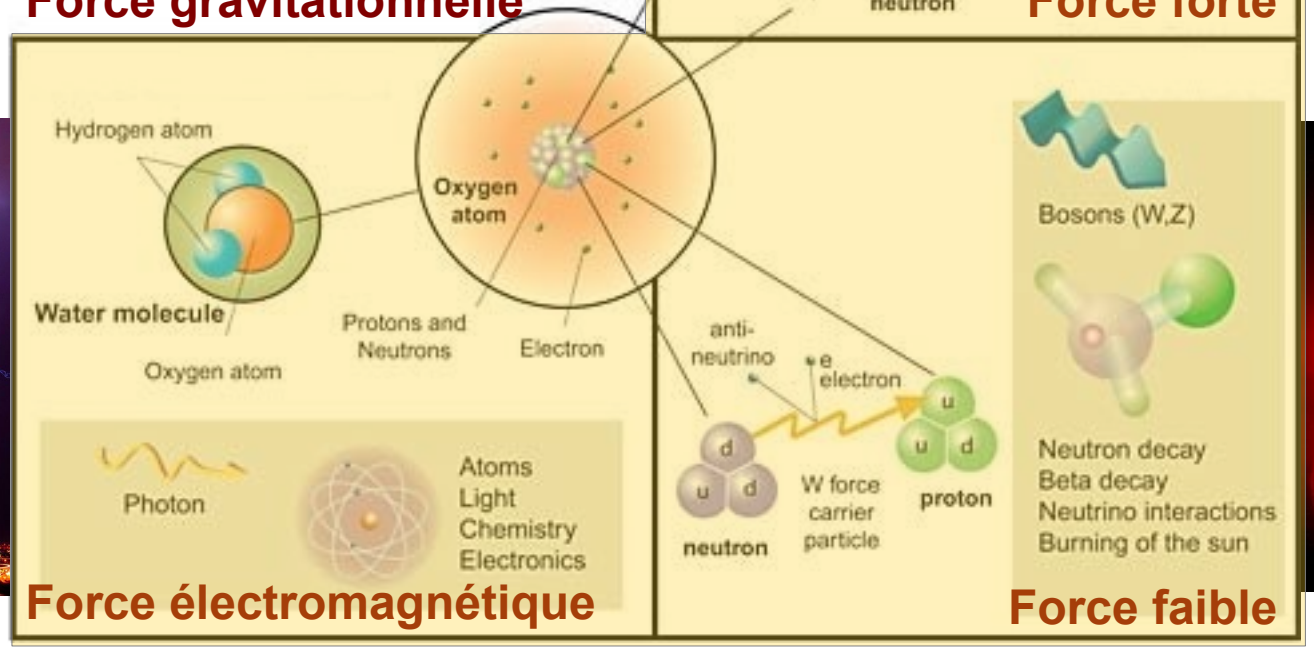
Les forces



Force gravitationnelle

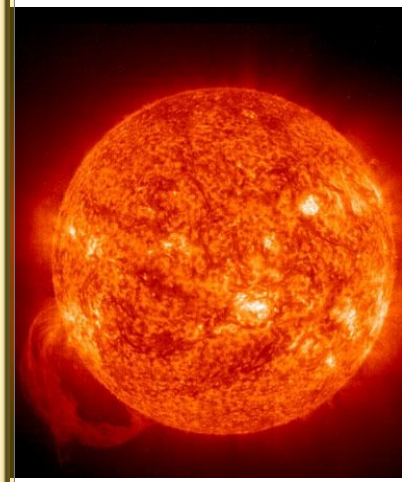


Force forte



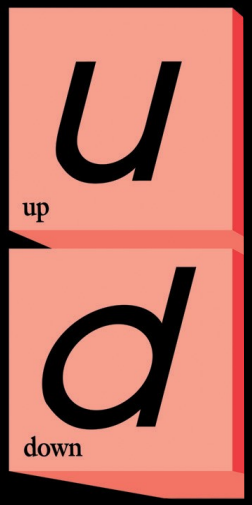
Force électromagnétique

Force faible

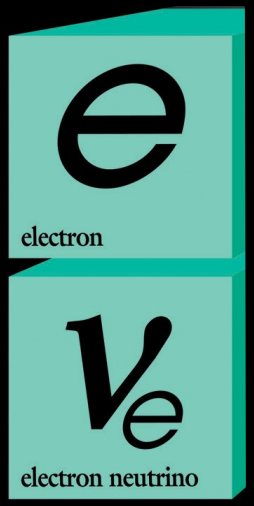


Le modèle standard

Quarks

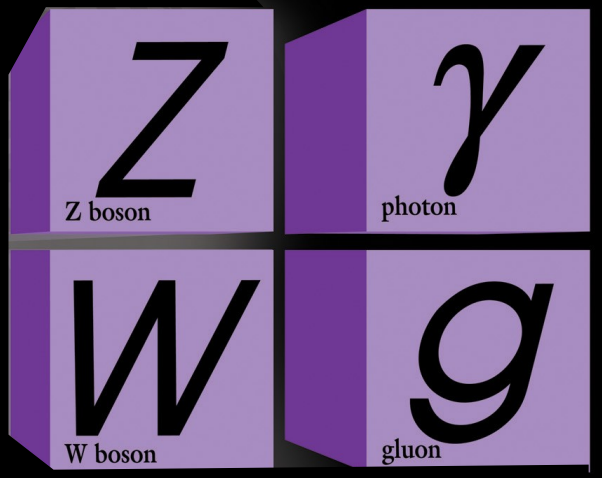


+ anti-matière



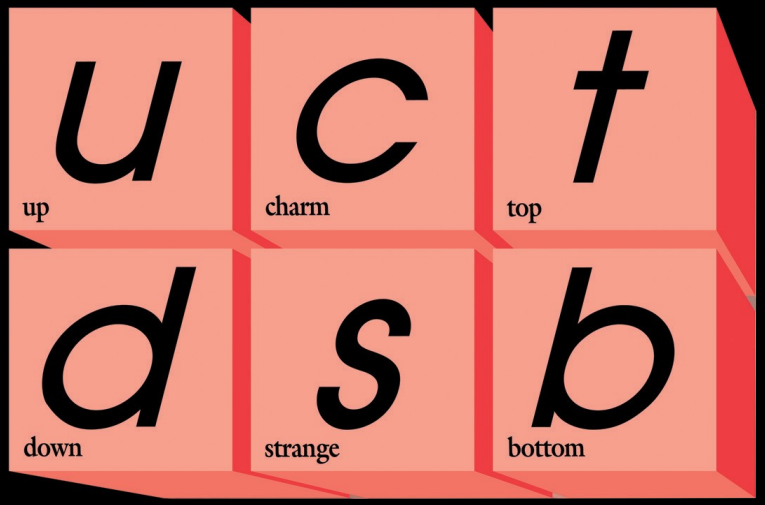
Leptons

Forces



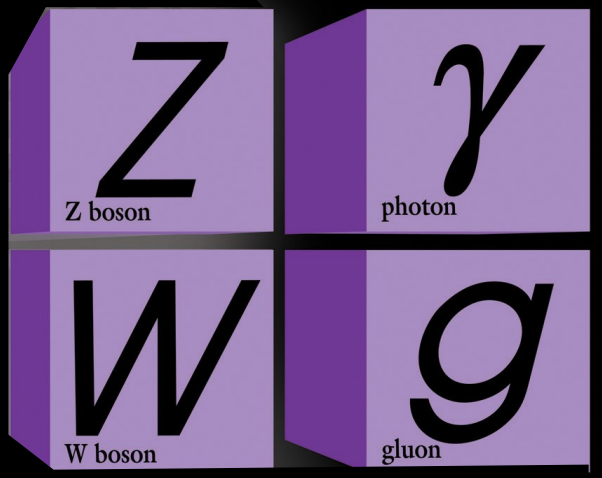
Le modèle standard

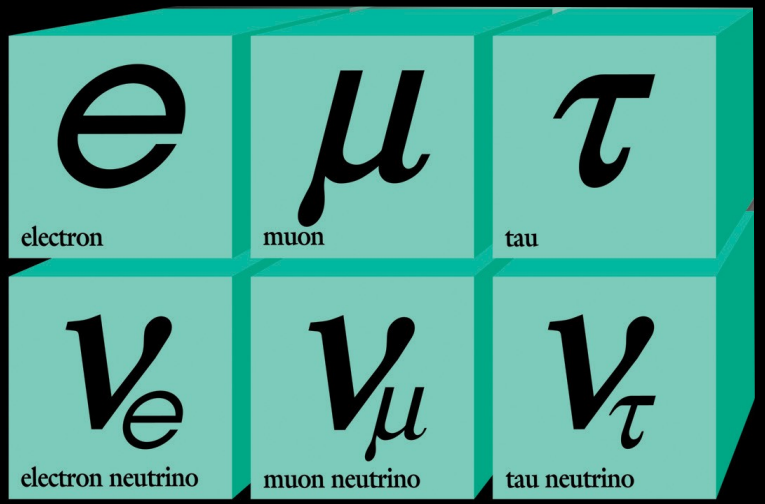
Quarks



+ anti-matière

Forces

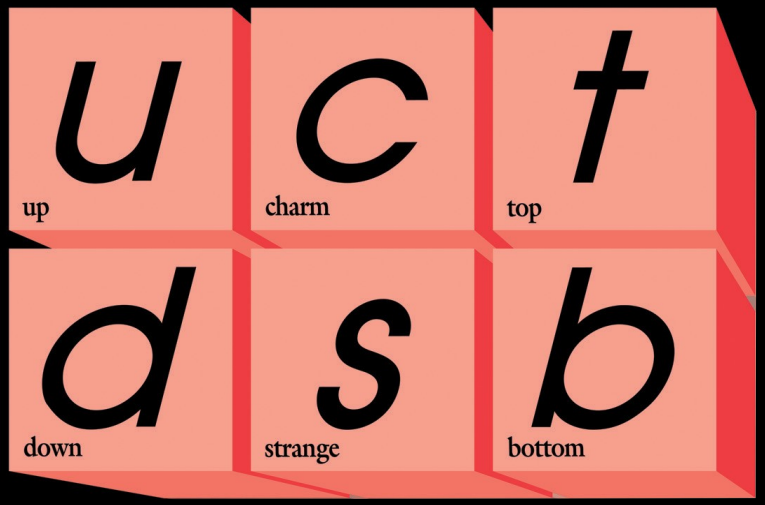




Leptons

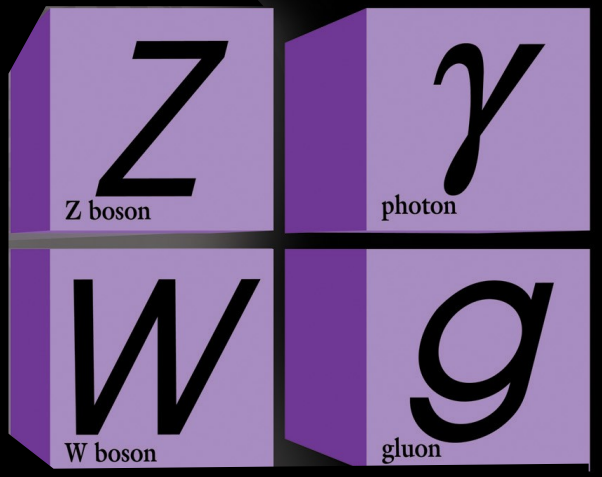
Le modèle standard

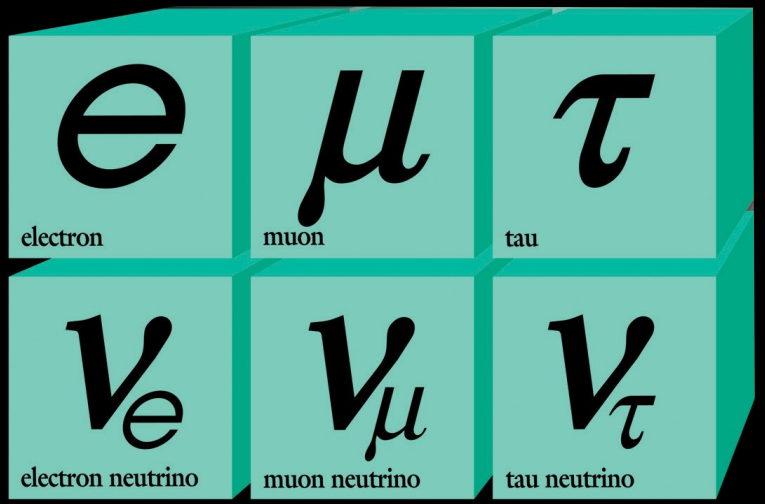
Quarks



+ anti-matière

Forces





Leptons

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

Le modèle standard

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

+ anti-matière

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Forces

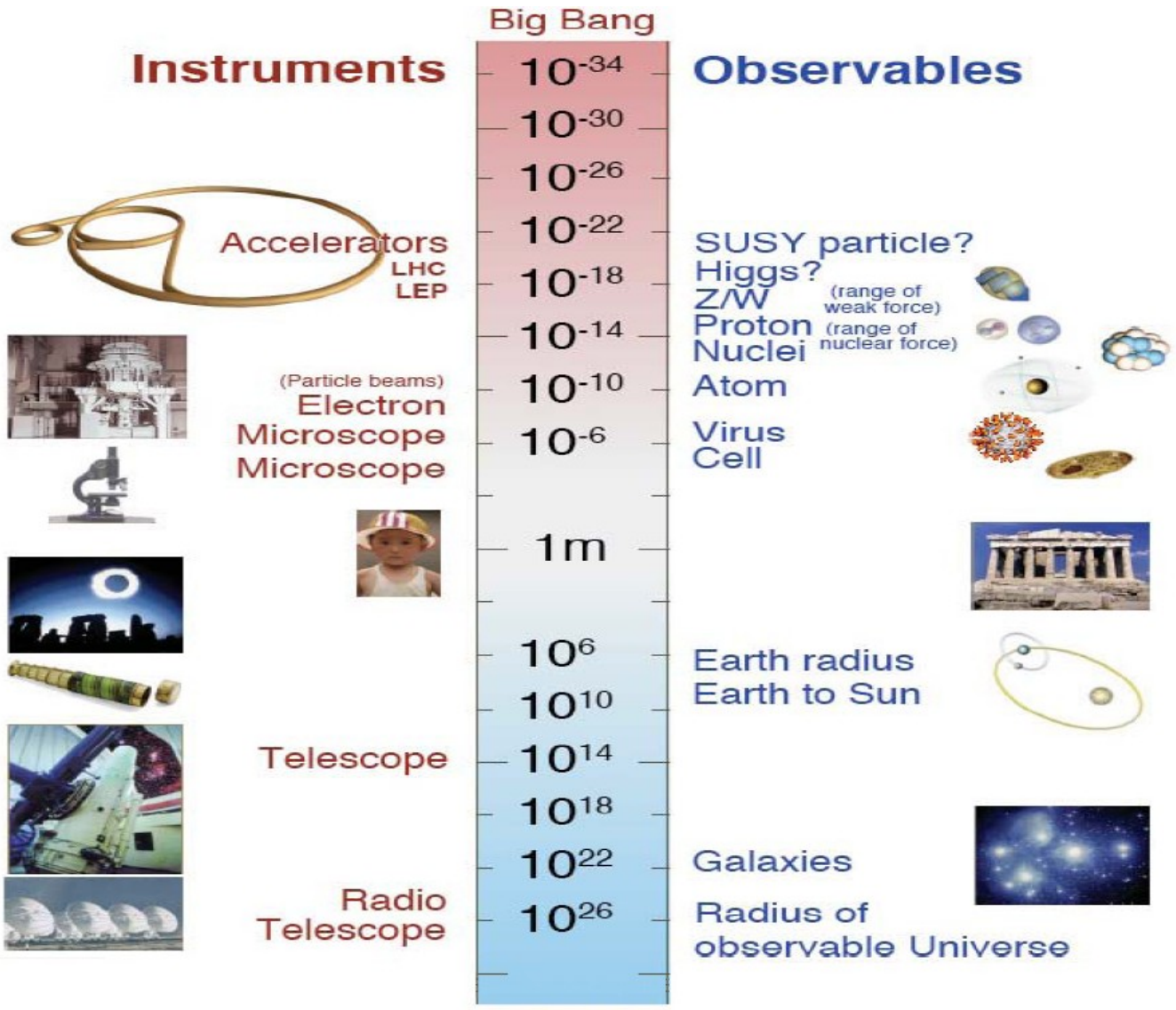
Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

H Higgs boson

Solution : rajouter un champ de Higgs

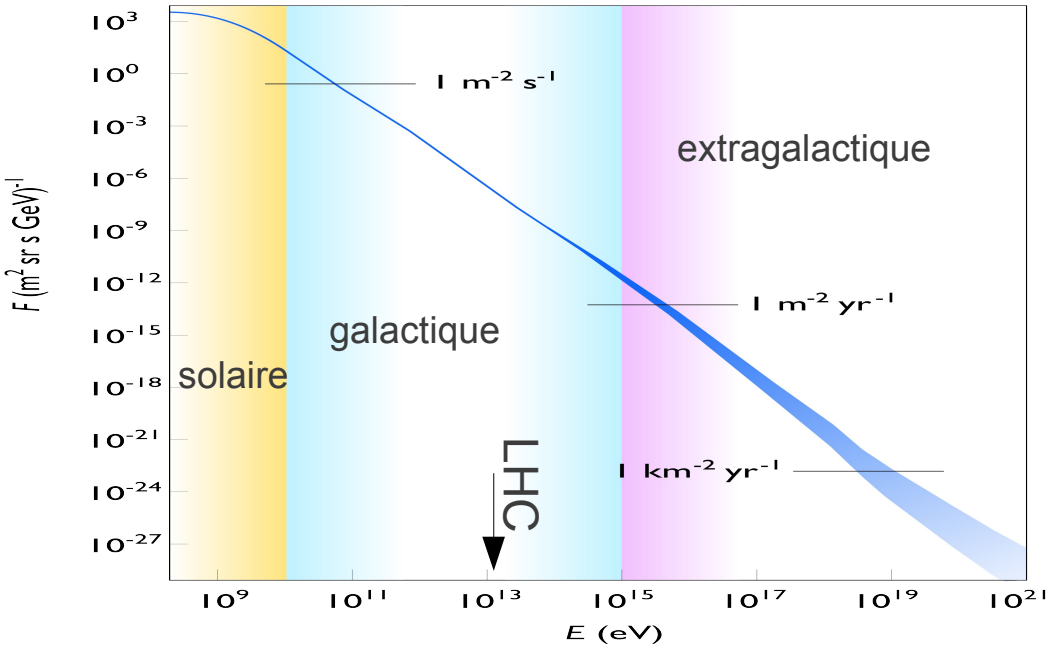
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

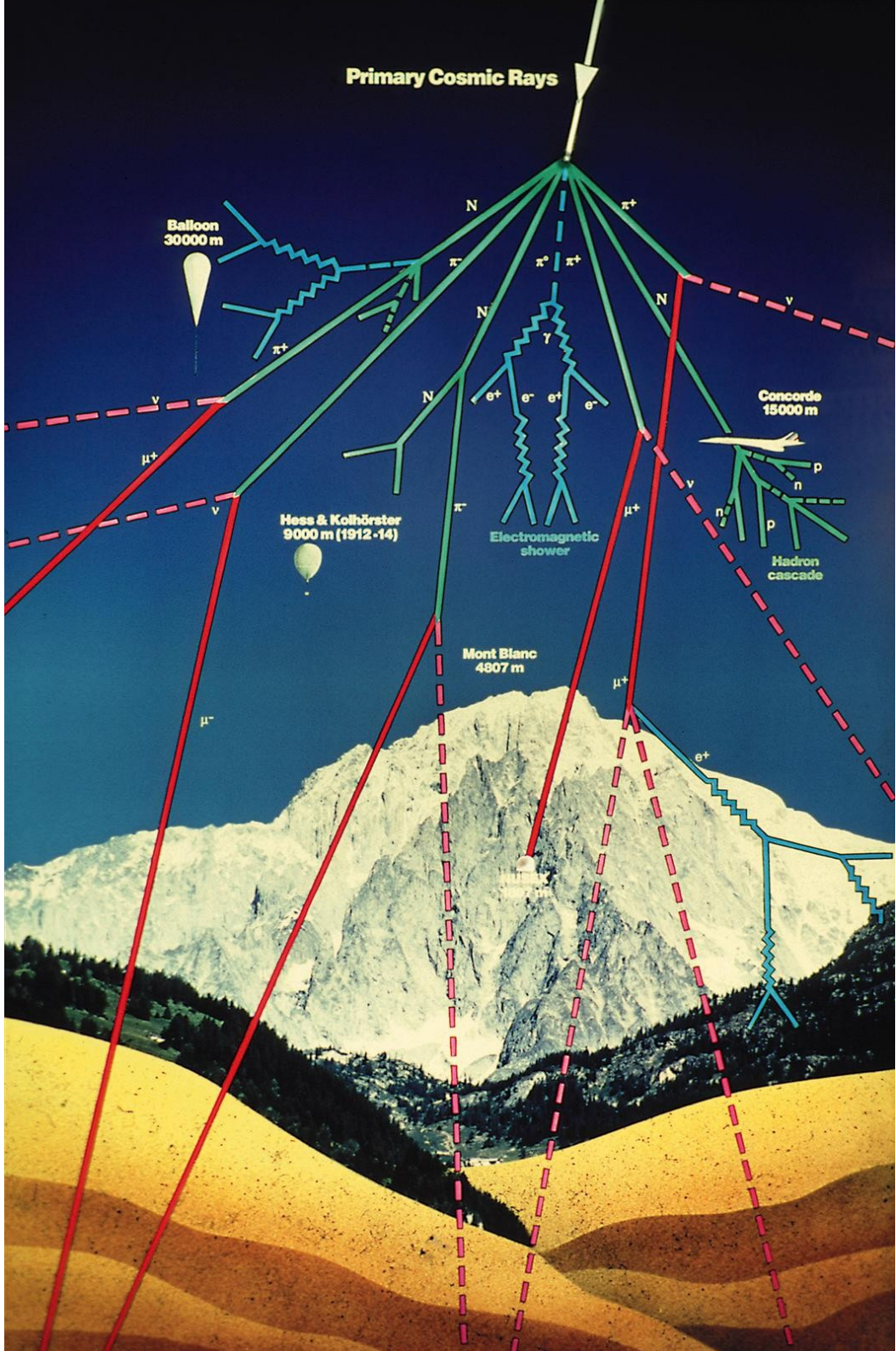
- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :
  - longueur d'onde associée $\lambda = h/p$
- Pour créer des particules plus lourdes
  - $E = mc^2$



Accélérateur naturel

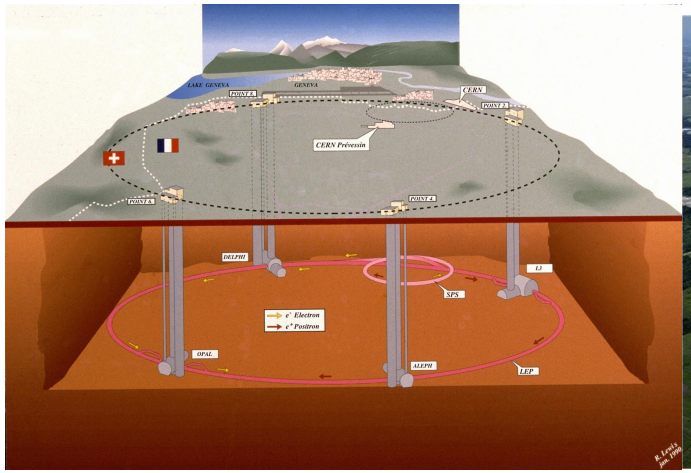
- Rayons cosmiques de très haute énergie
- Découverts par Hess en 1912
- Avantage : énergies faramineuses
- Problème : hasard





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

Le LHC : la machine à superlatifs

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

Le LHC : la machine à superlatifs

Le LHC : la machine à superlatifs

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 AT
1994	Approbation par le conseil du C
1996-1998	Approbation des quatre grande
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 ?

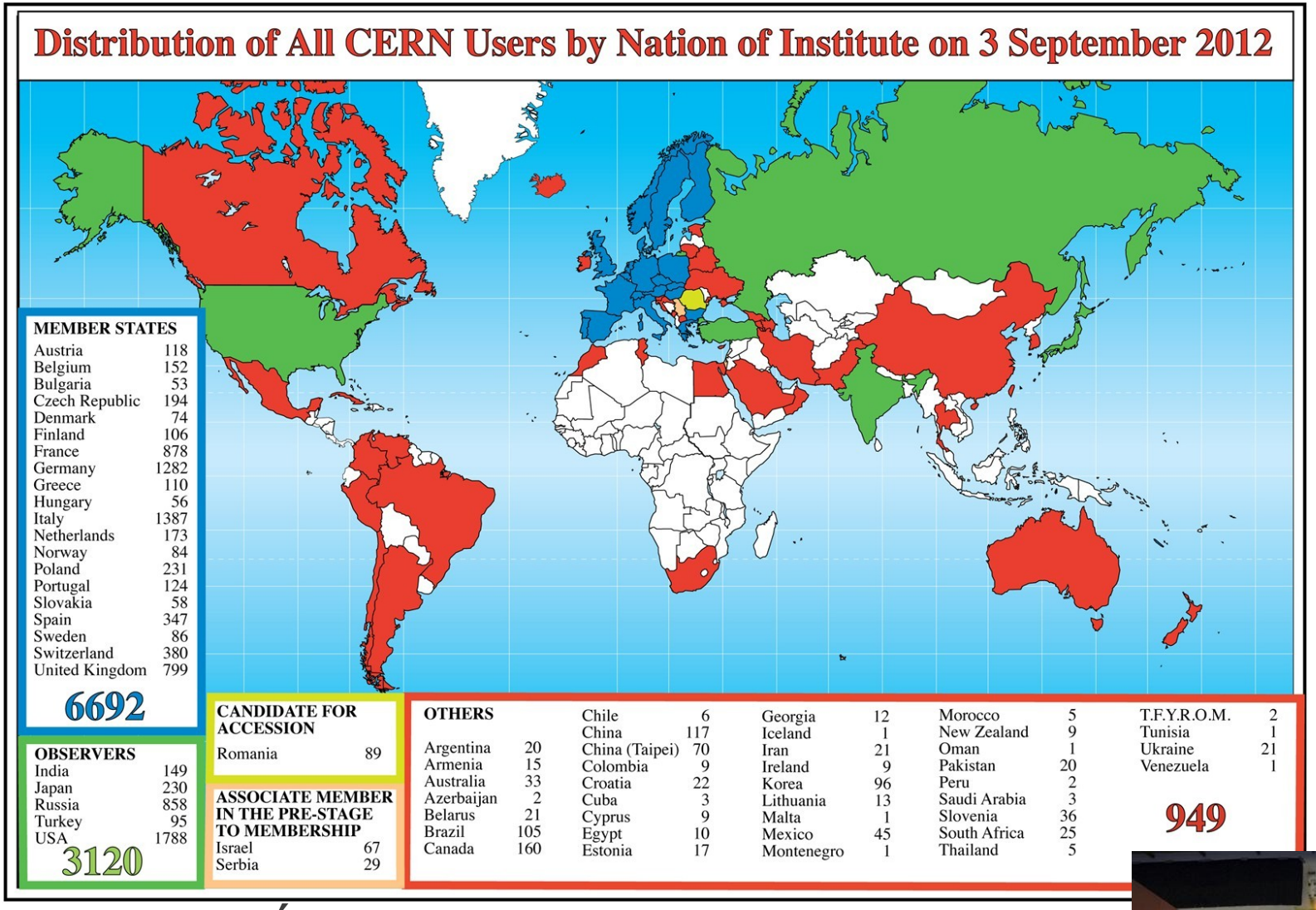
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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



- 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

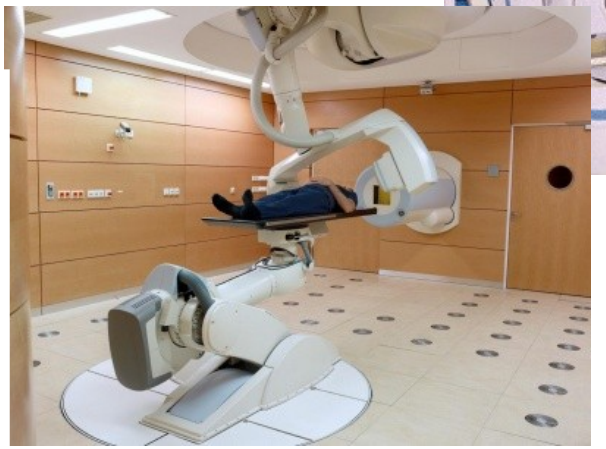
A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- 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 ?

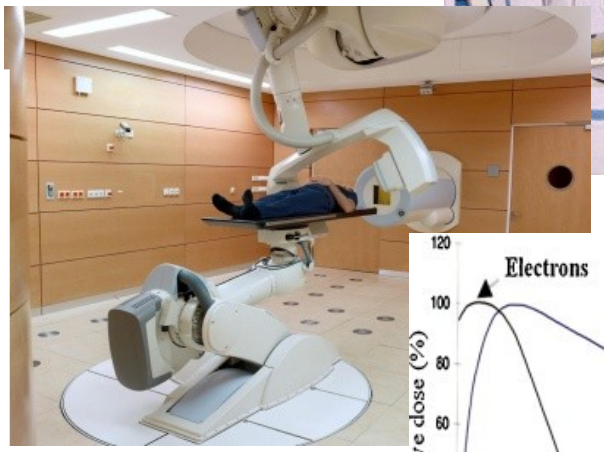
- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure



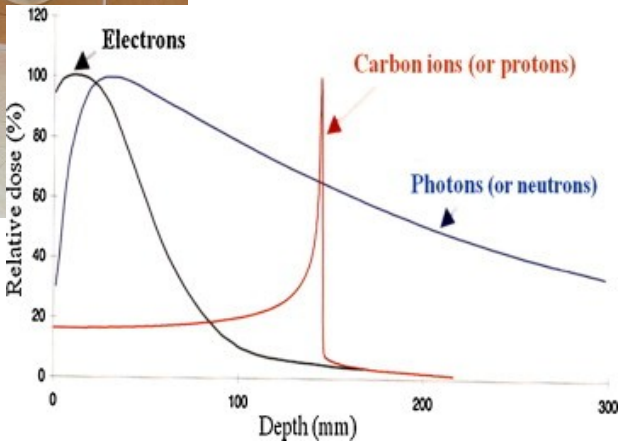
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie

A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

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

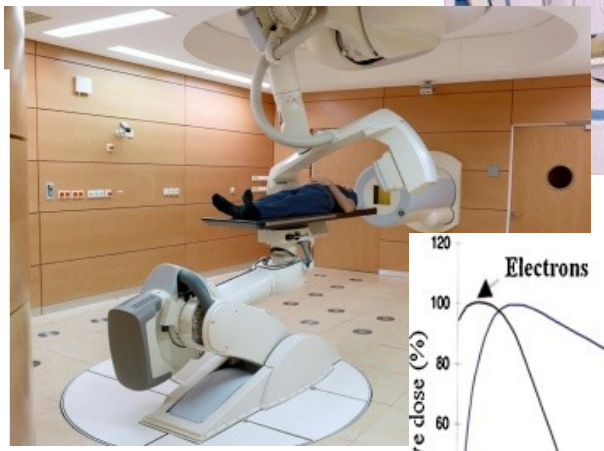


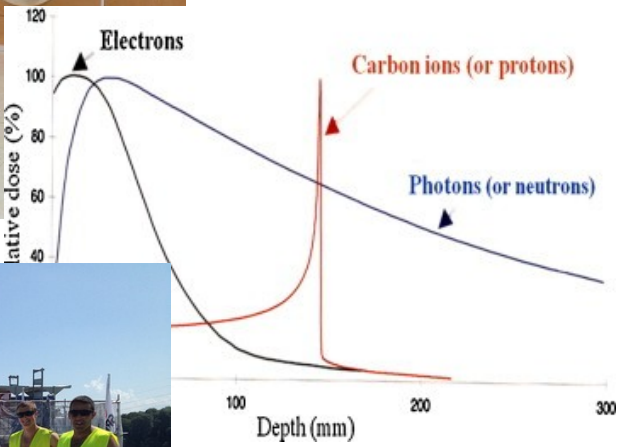
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

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

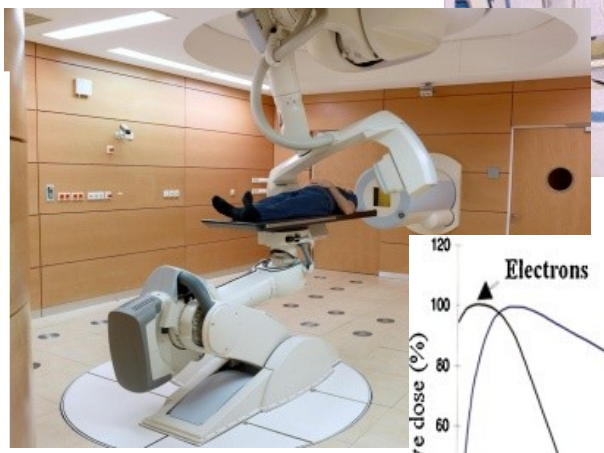




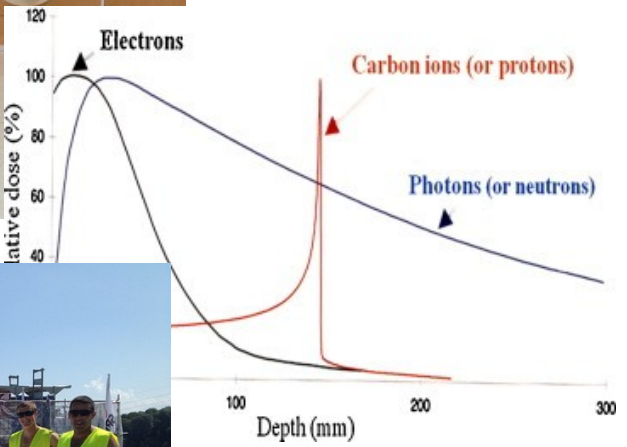
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie
- Plus inattendu :
  - Grille de calcul
  - Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
  - Le Web a été inventé au CERN

A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

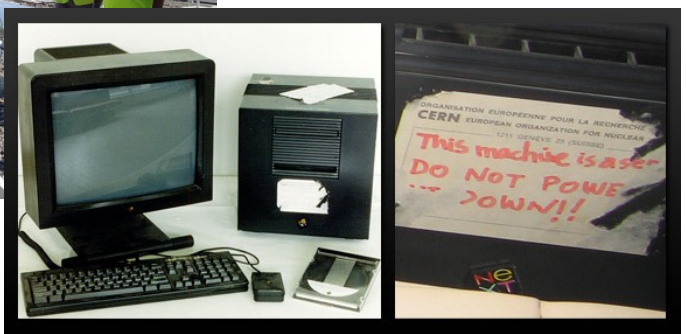
- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure



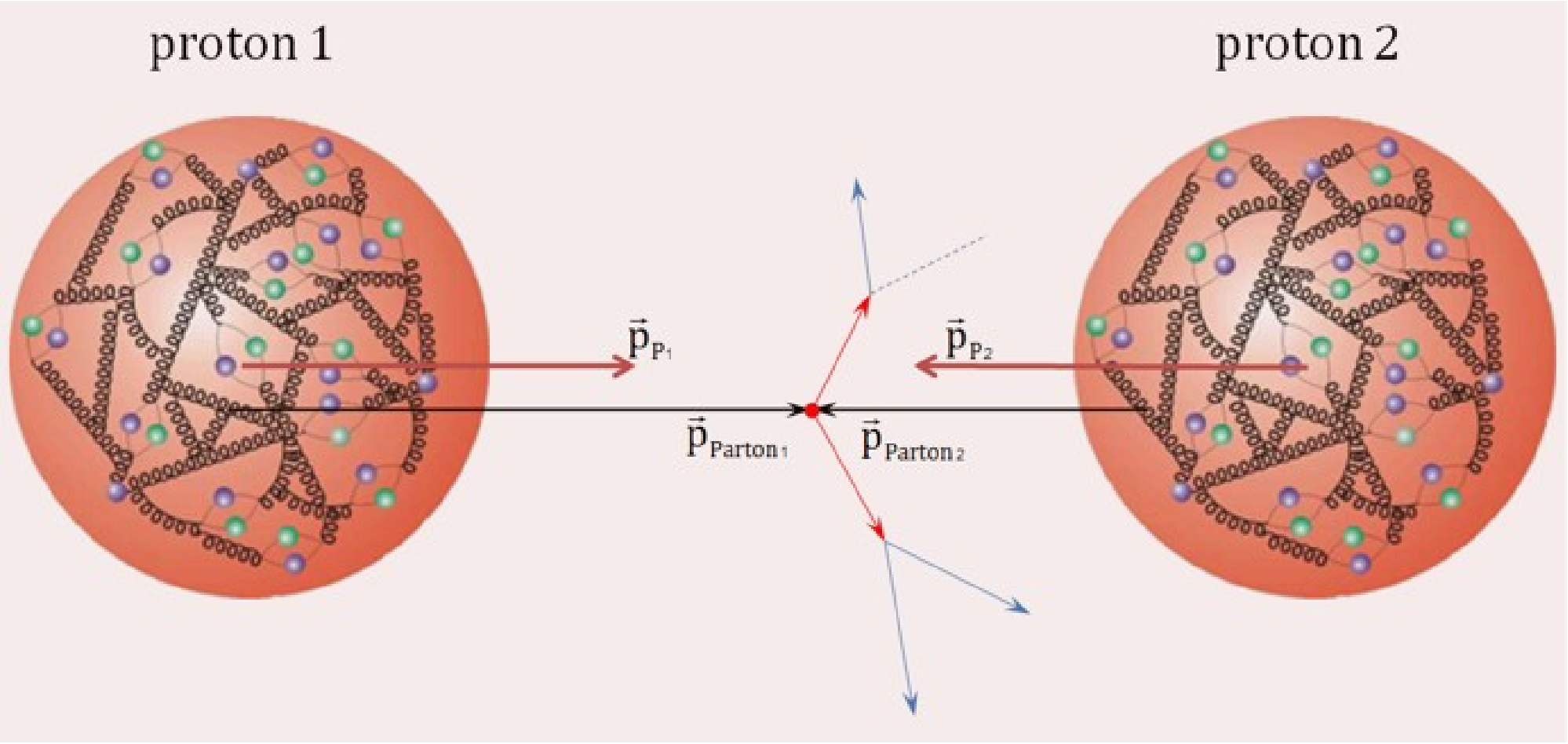
- Applications :
  - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - Faisceaux utilisés en hadronthérapie



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



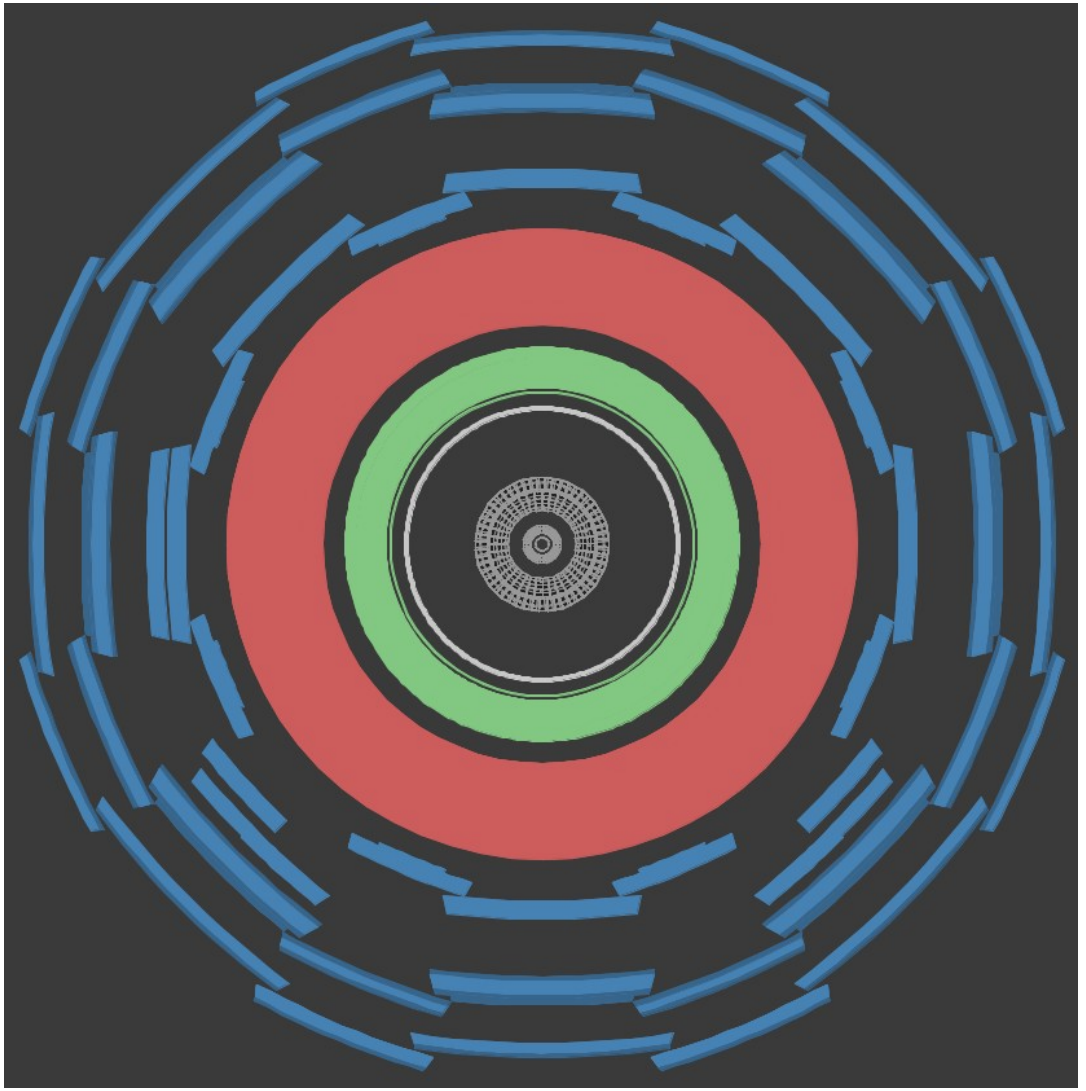
Deux protons se rencontrent...



- 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

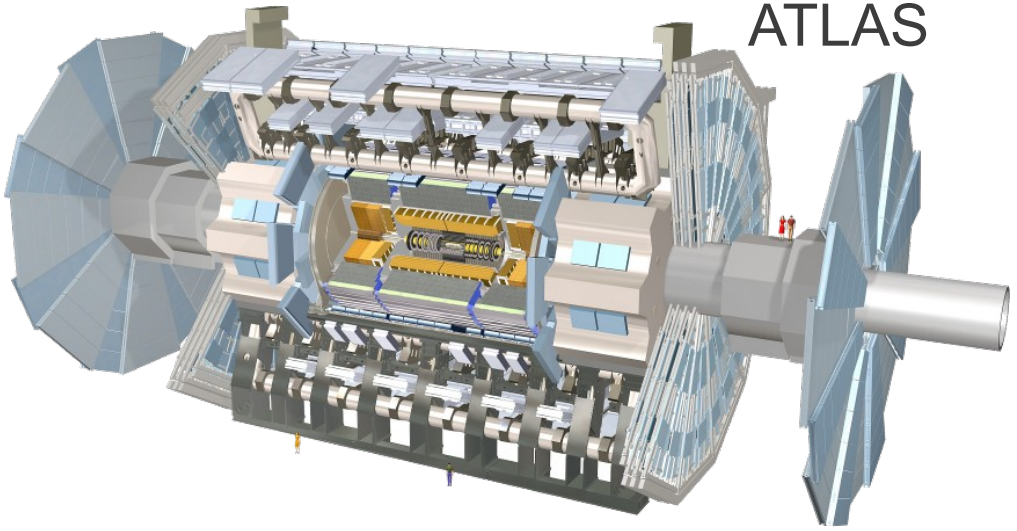
Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

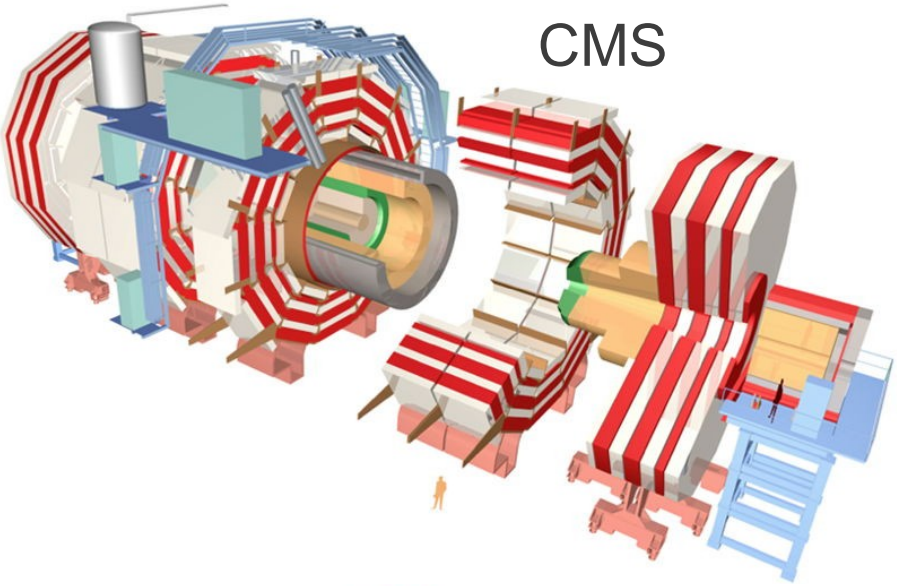
- Détecteur interne (trajectographe)
  - Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
  - Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
  - Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme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

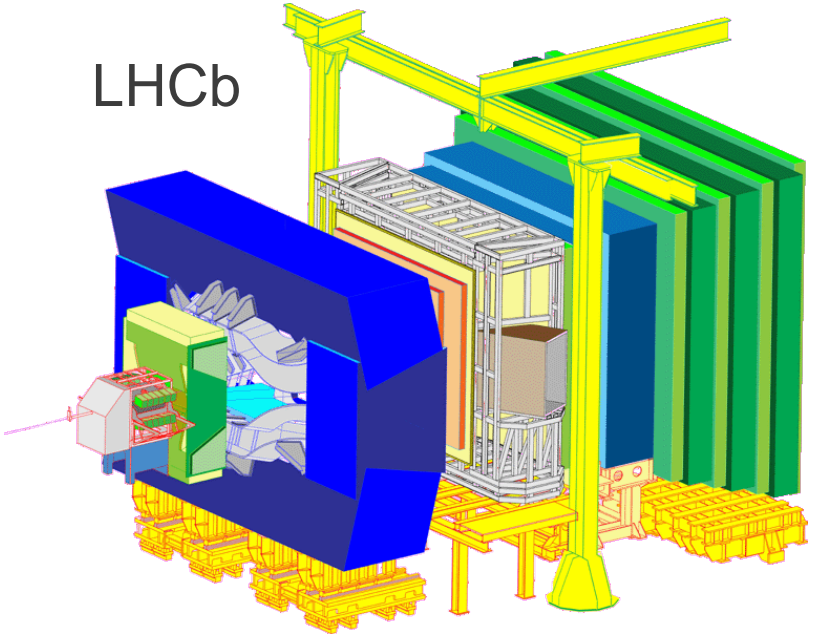


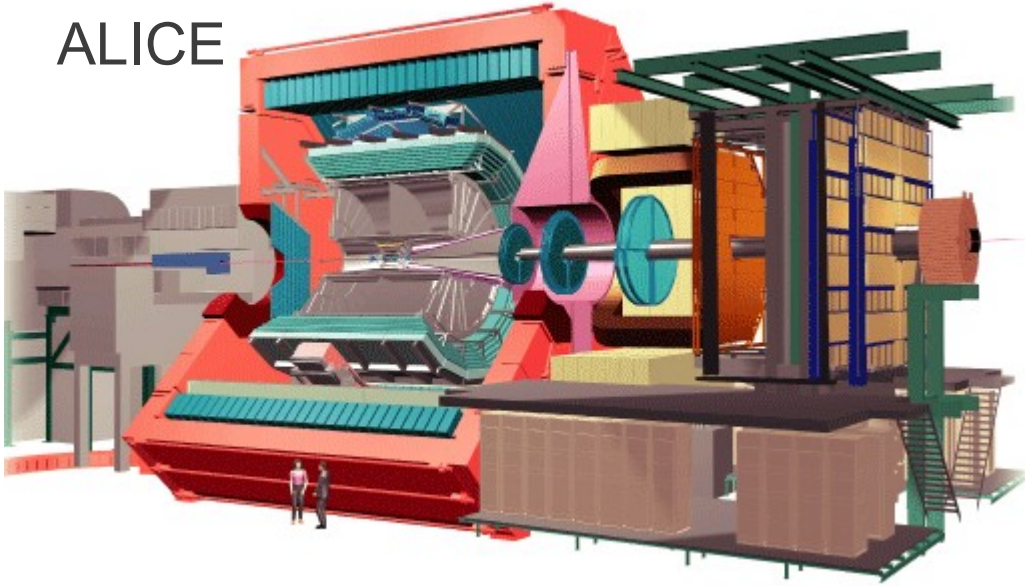
Interaction des particules avec le détecteur

Les détecteurs géants du LHC



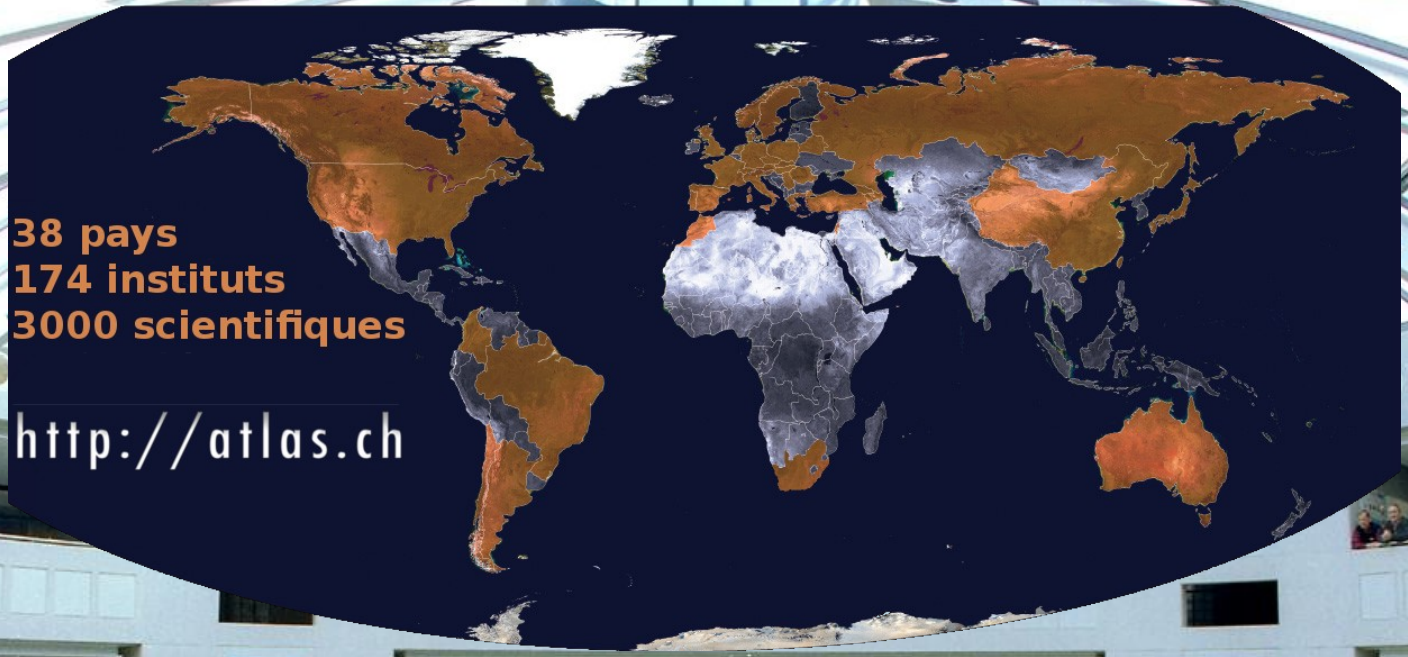






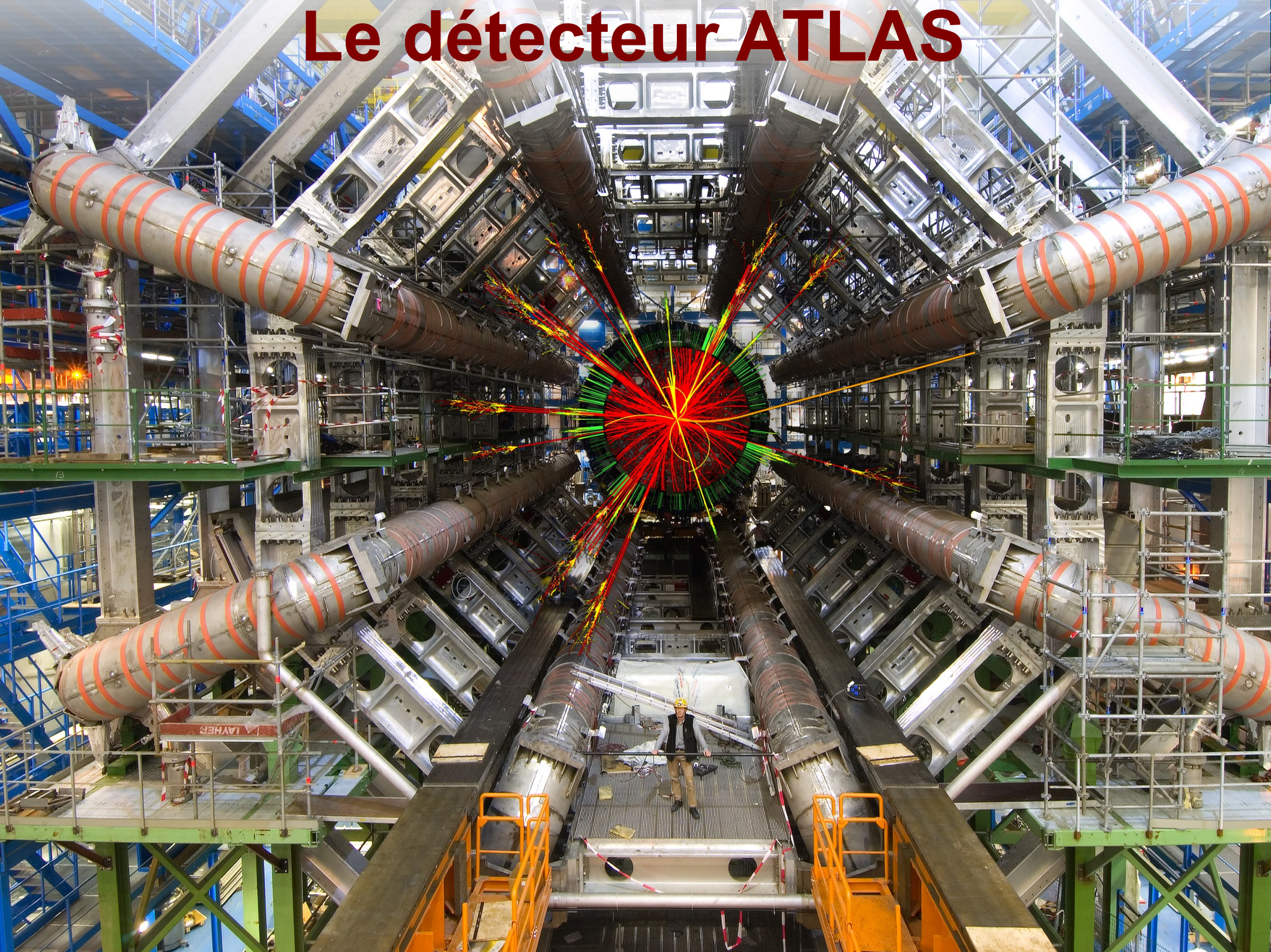
La collaboration ATLAS

La collaboration ATLAS



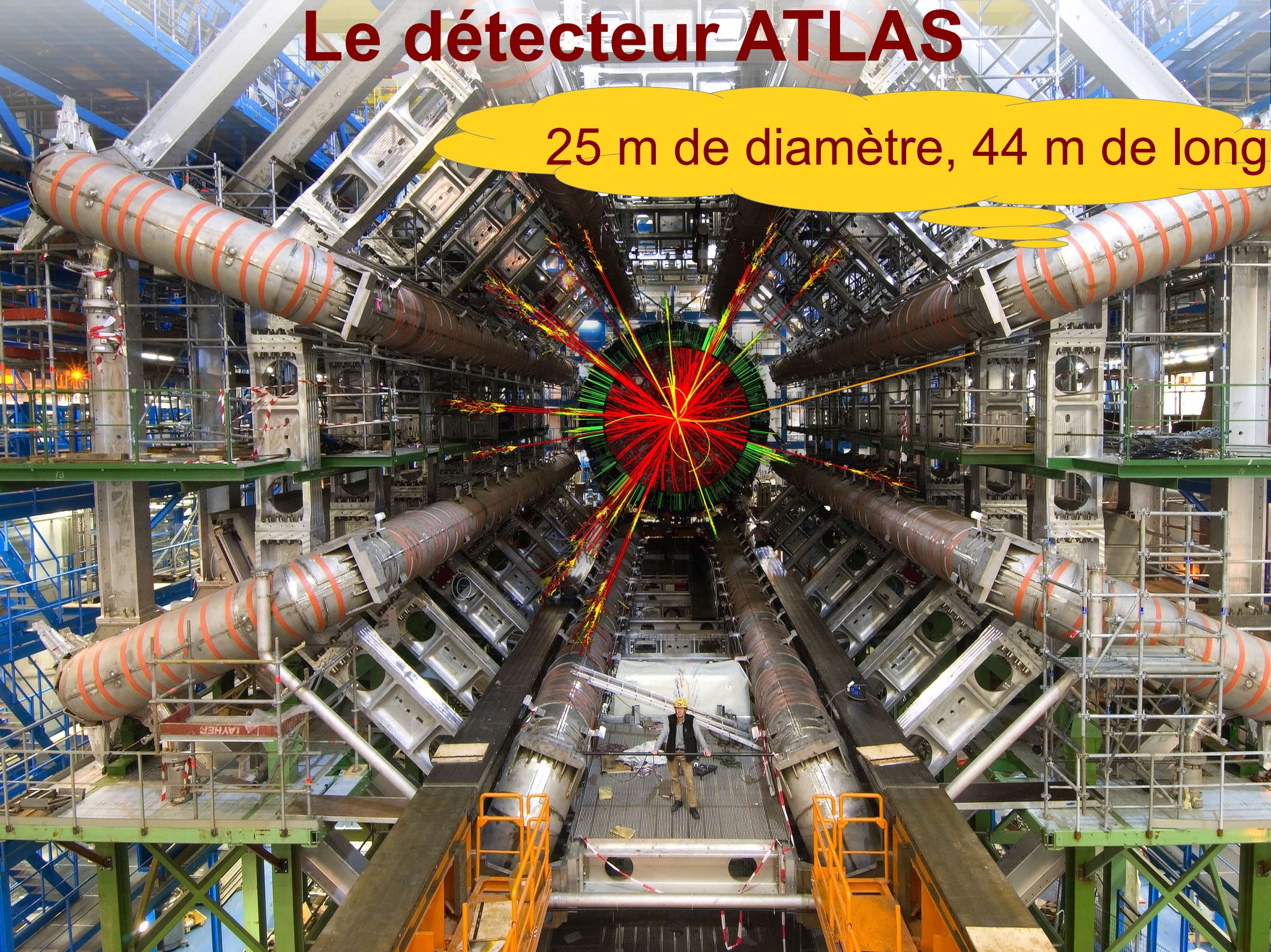
ATLAS EXPERIMENT

Le détecteur ATLAS

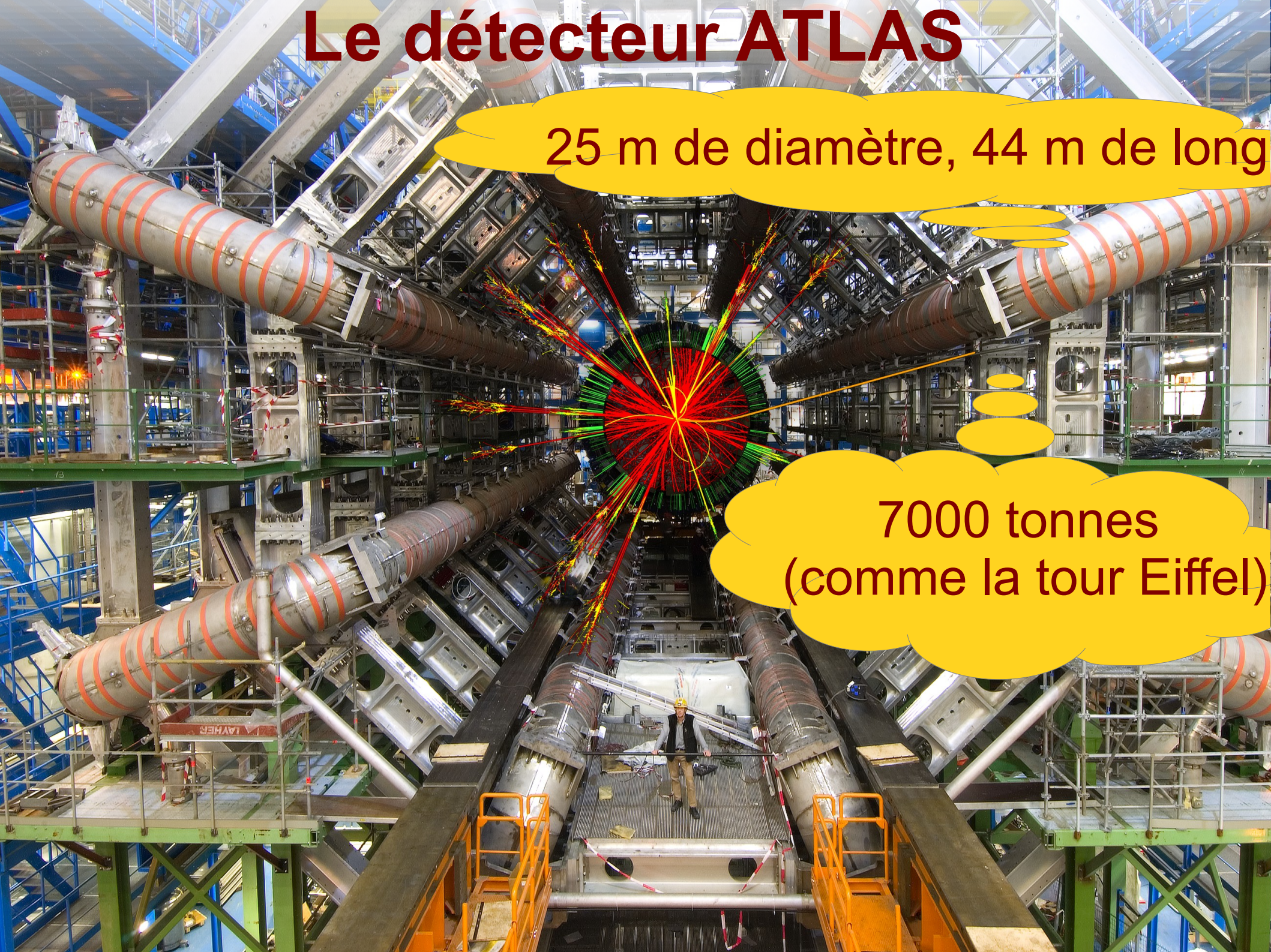


Le détecteur ATLAS

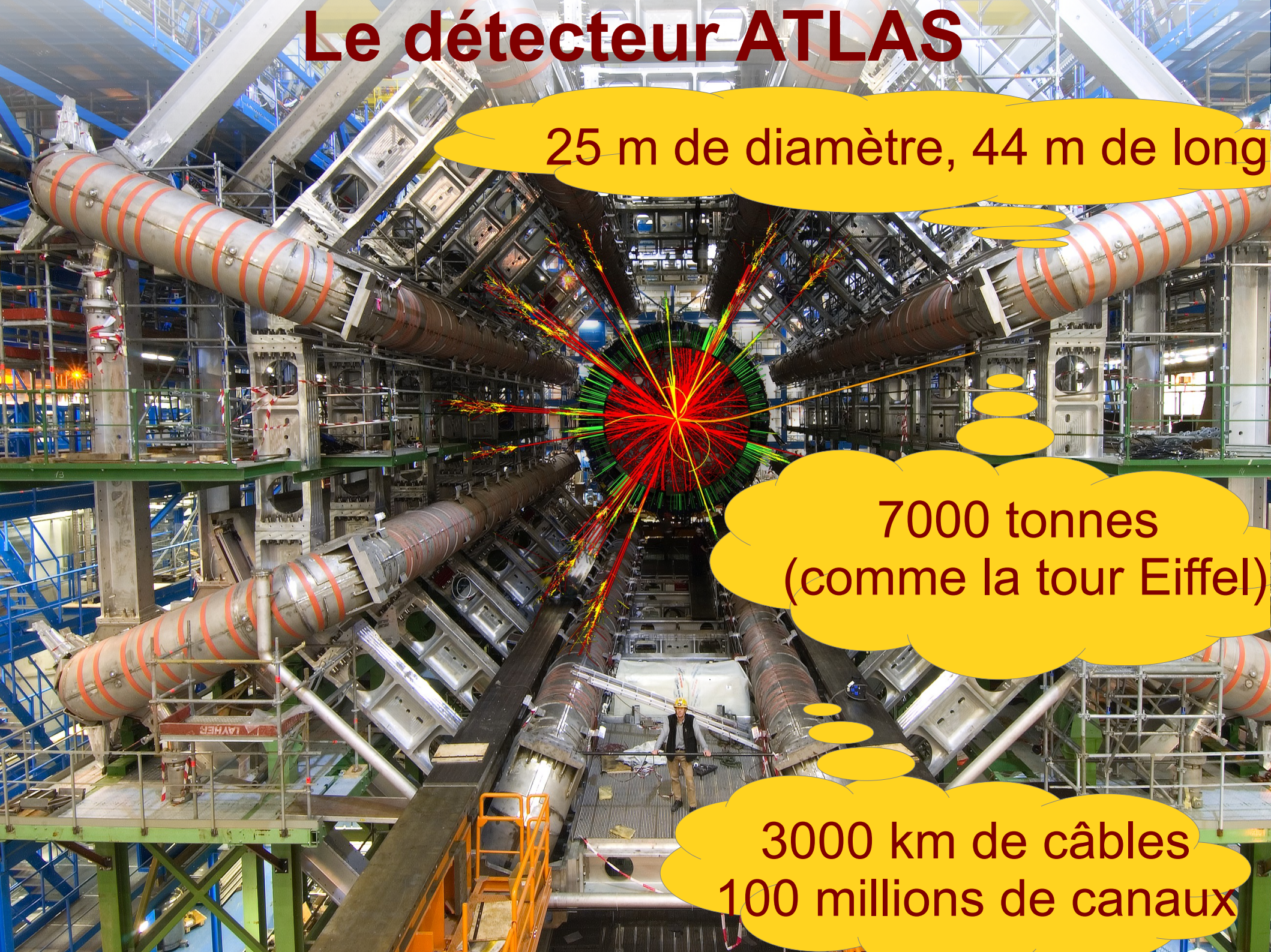
25 m de diamètre, 44 m de long



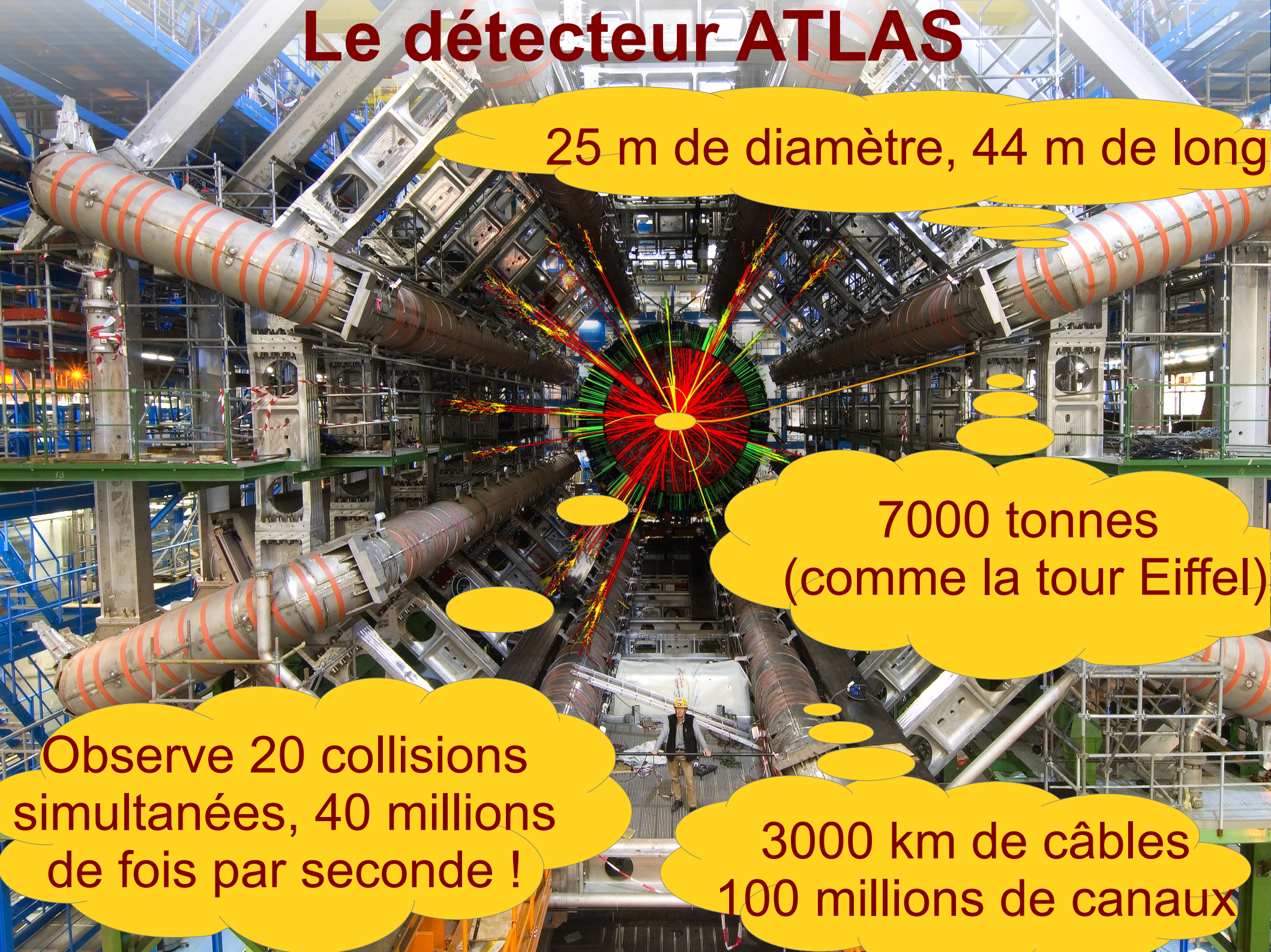
Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

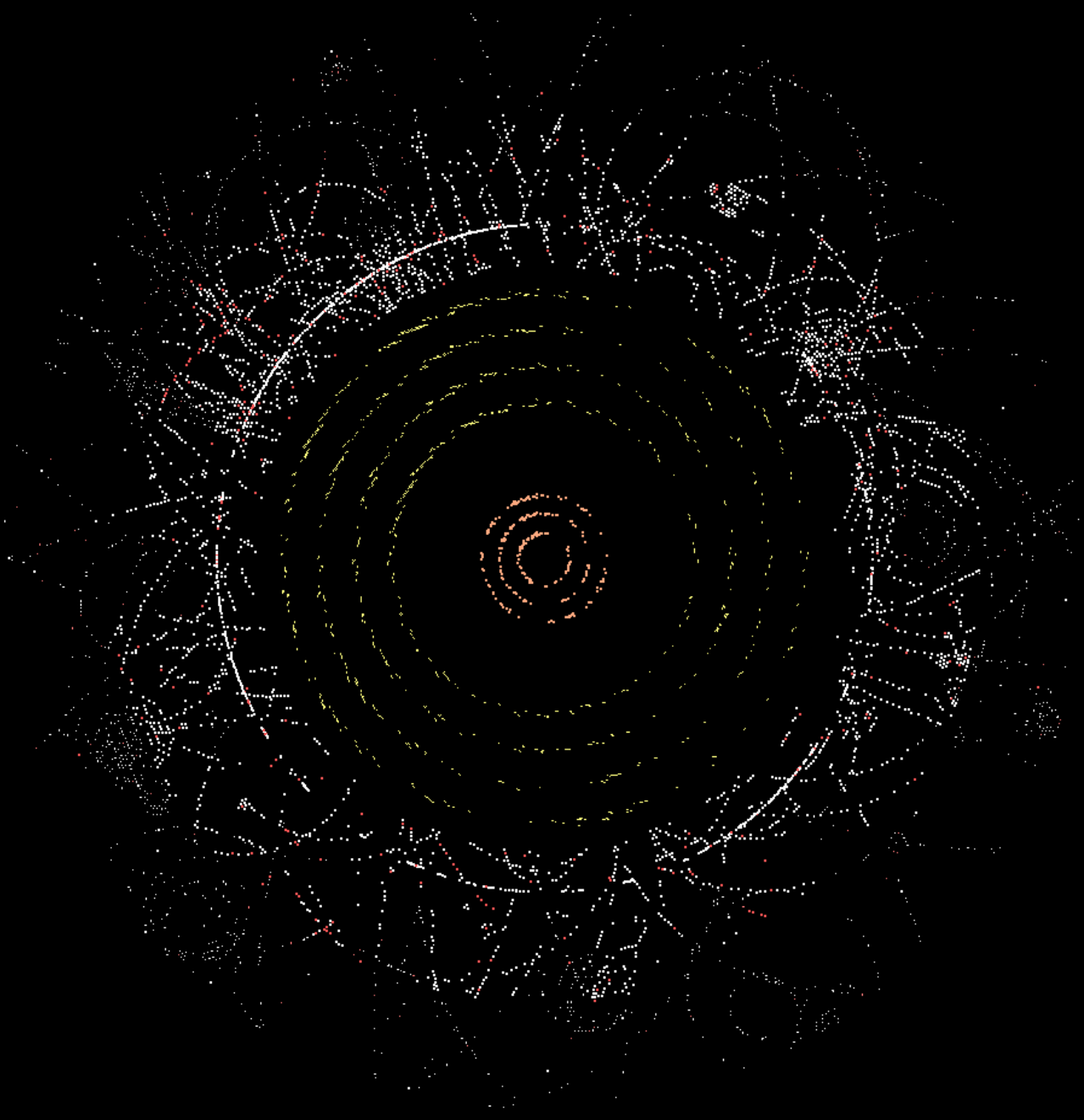
En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

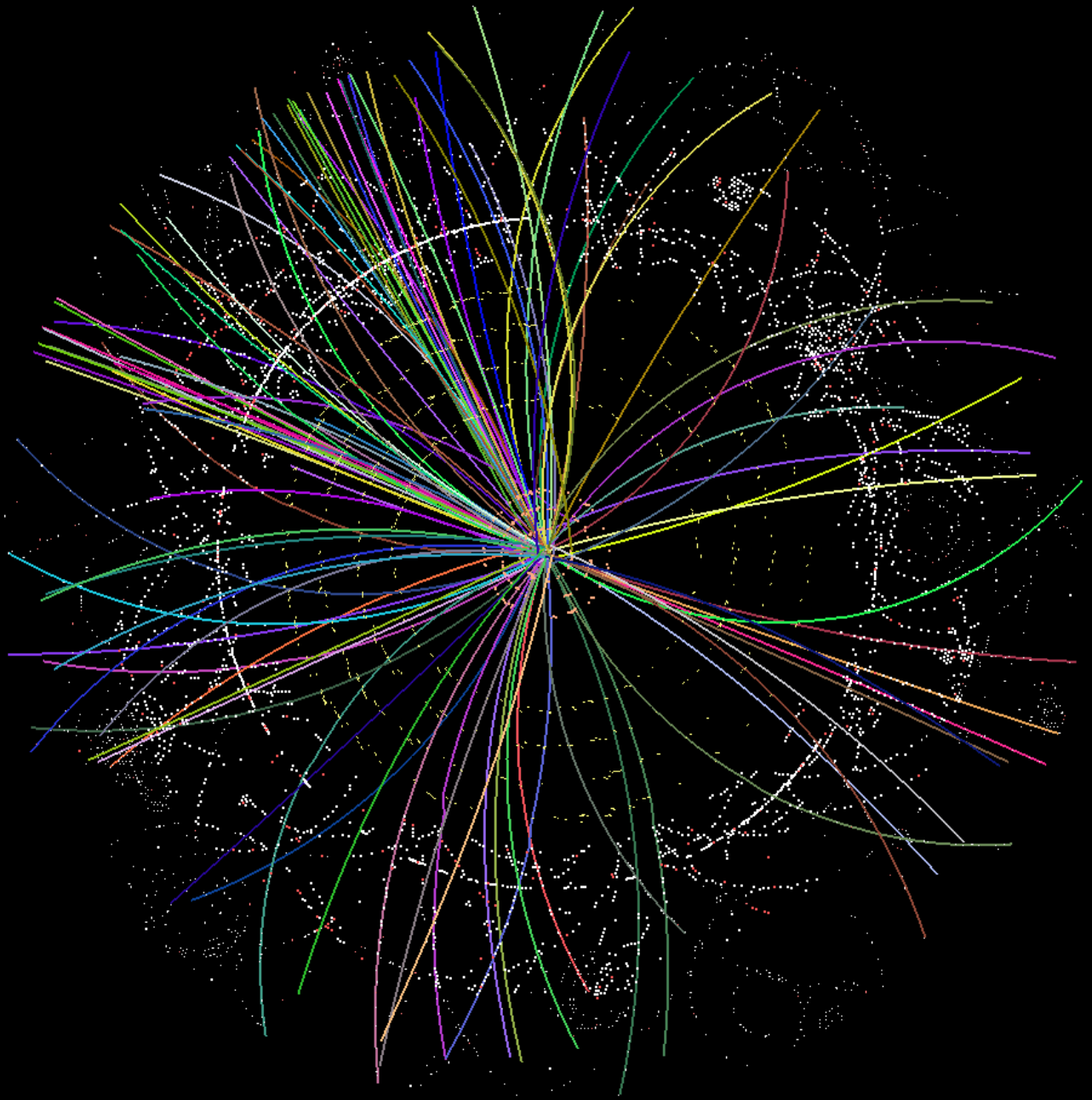
Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux

Passage des particules

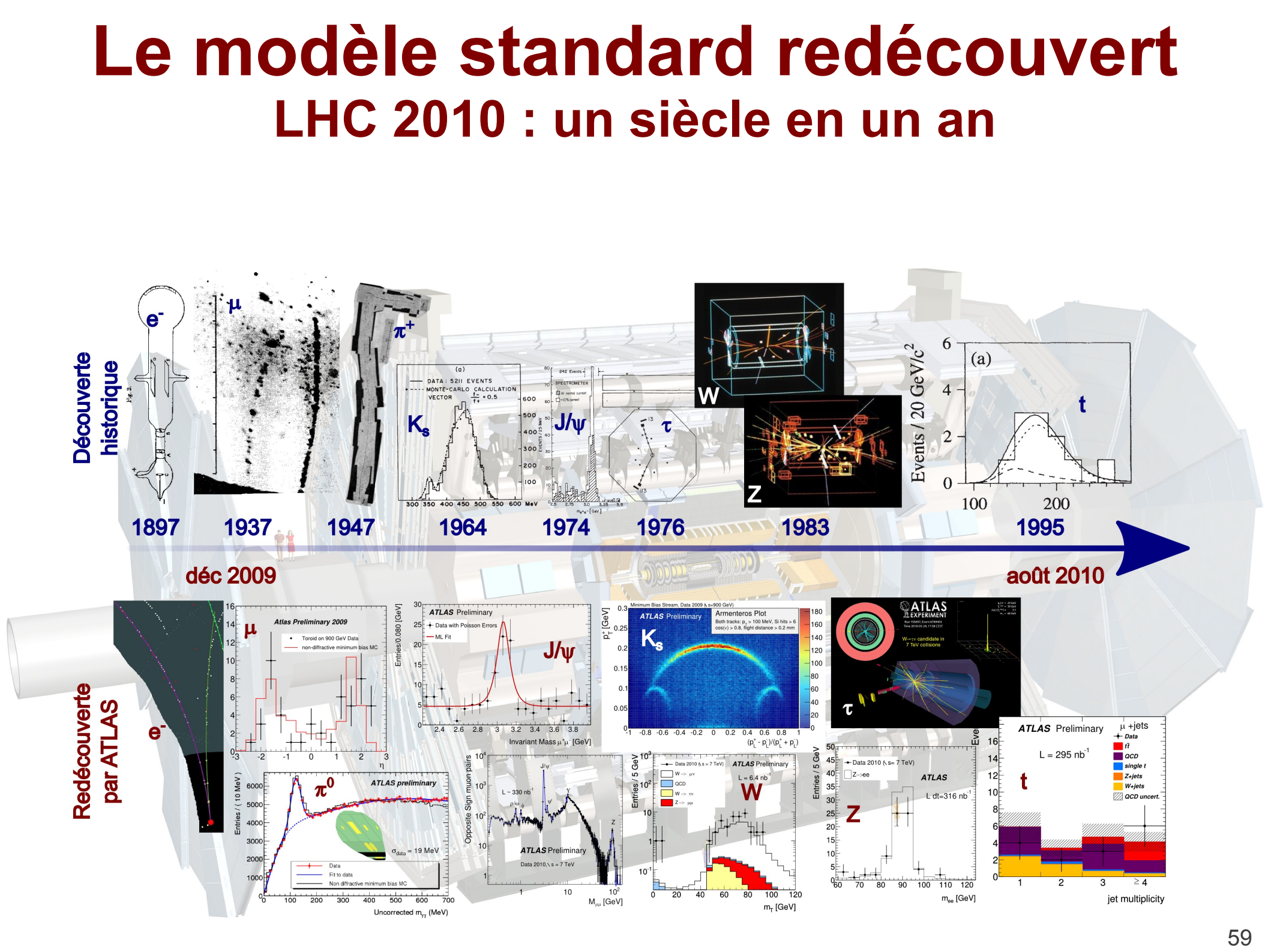


Reconstruction des trajectoires

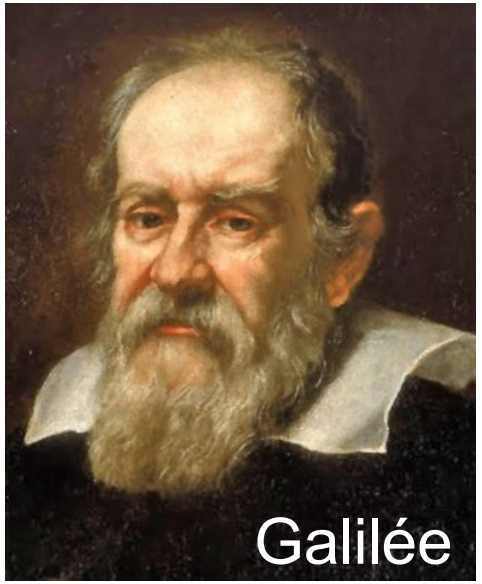


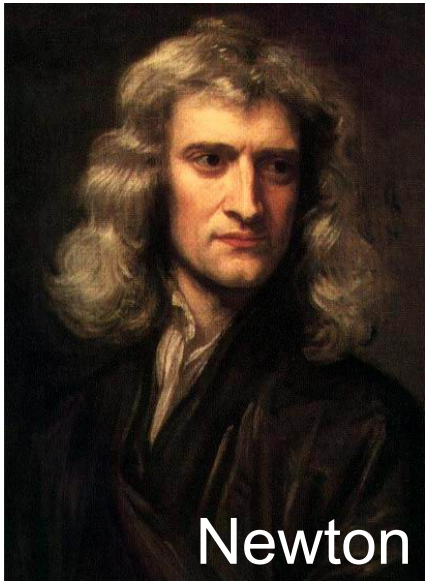
Le modèle standard redécouvert

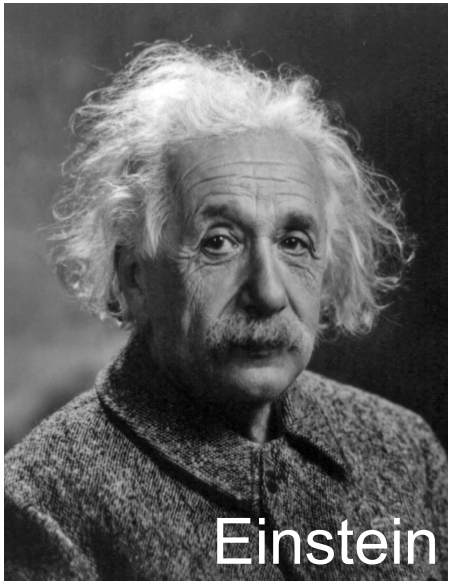
LHC 2010 : un siècle en un an



La masse







- Masse gravitationnelle

$$P = mg$$

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$

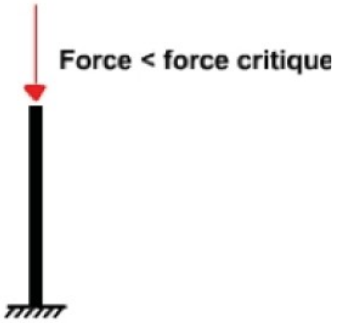
- Équivalence masse/énergie

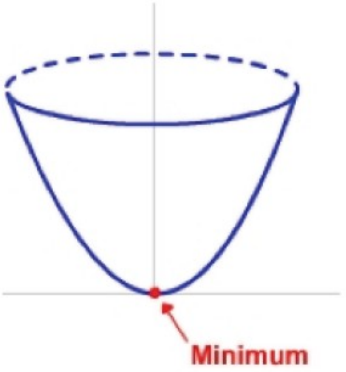
$$E = mc^2$$

- 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

Brisure spontanée de symétrie

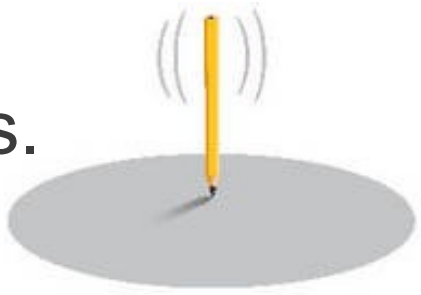
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :
  - du crayon qui tourne sur lui-même
  - d'une barre en compression

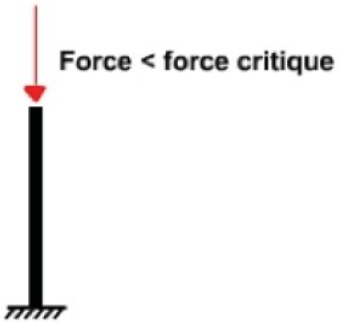


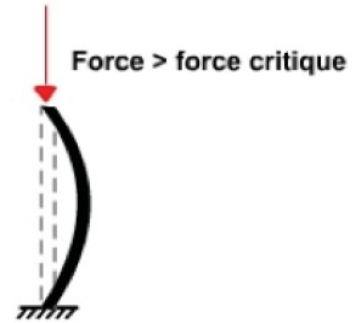


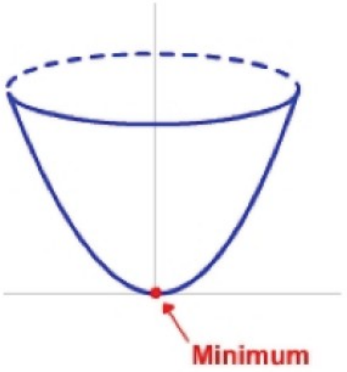
Brisure spontanée de symétrie

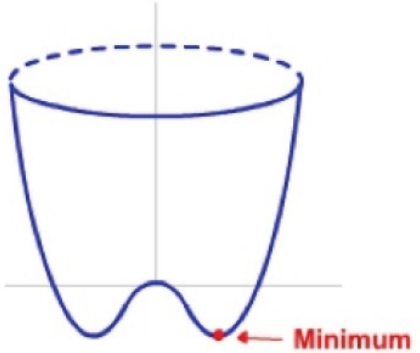
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :
  - du crayon qui tourne sur lui-même
  - d'une barre en compression
- Les solutions ne respectent pas forcément les mêmes symétries :
  - chute du crayon
  - flambage de la barre dans une direction donnée







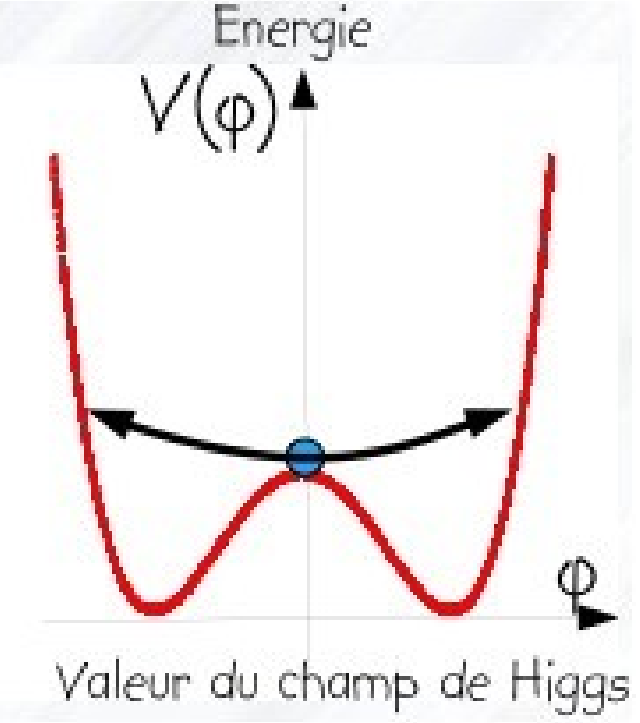




© 3xplus.com

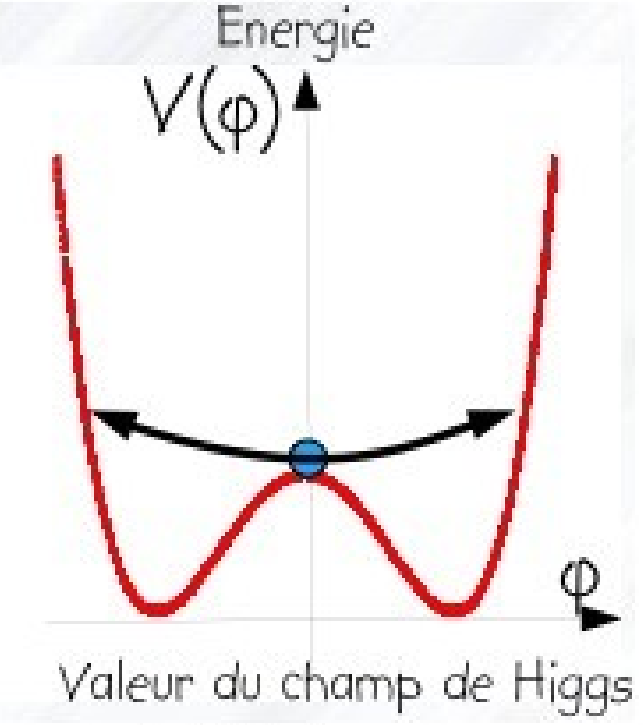
Brisure de la symétrie électrofaible

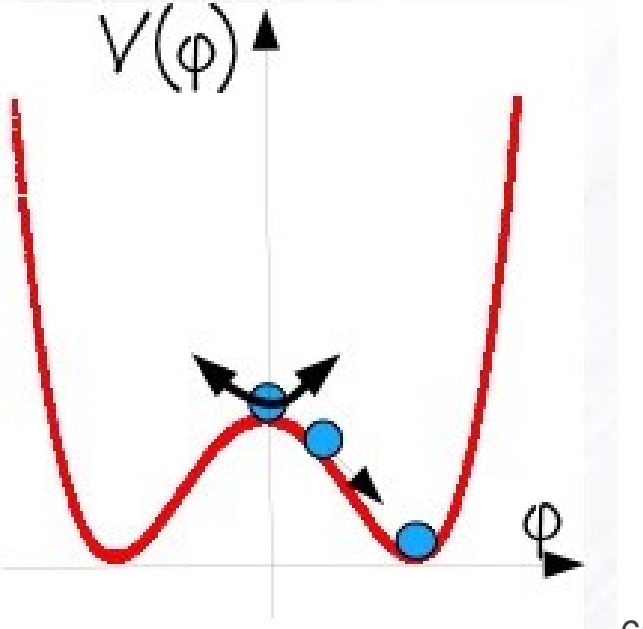
- A haute température, juste après le Big Bang :
  - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - les particules restent sans masse



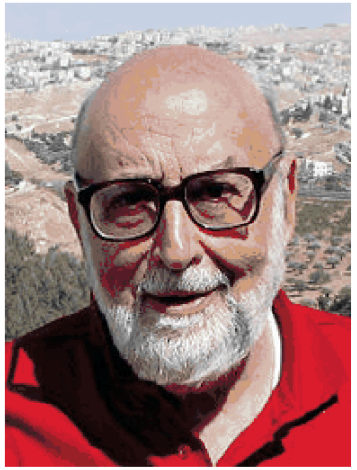
Brisure de la symétrie électrofaible

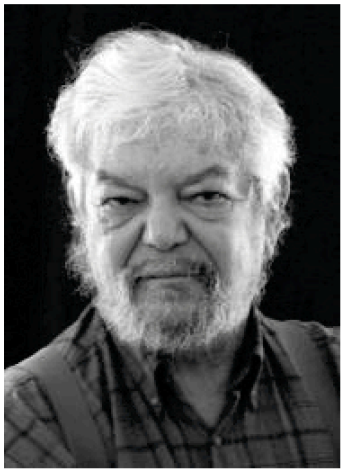
- A haute température, juste après le Big Bang :
  - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - les particules restent sans masse
- Réduction de la température (10^{-12} s après le Big Bang) :
  - brisure de symétrie
  - champ non nul
  - les particules élémentaires acquièrent une masse non nulle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

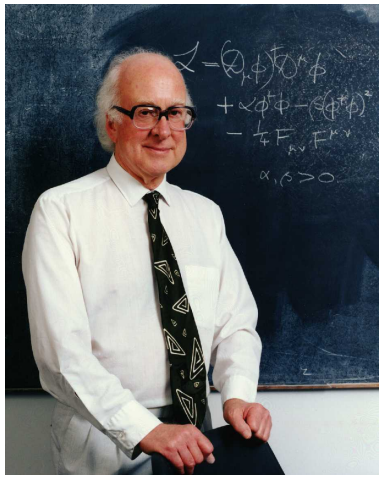
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction[1]; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field[2] associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.[3] 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.[4-6] 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 γ_5-phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_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[1] it was shown that the Goldstone theorem,[2] 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 phenome-

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

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

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

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

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

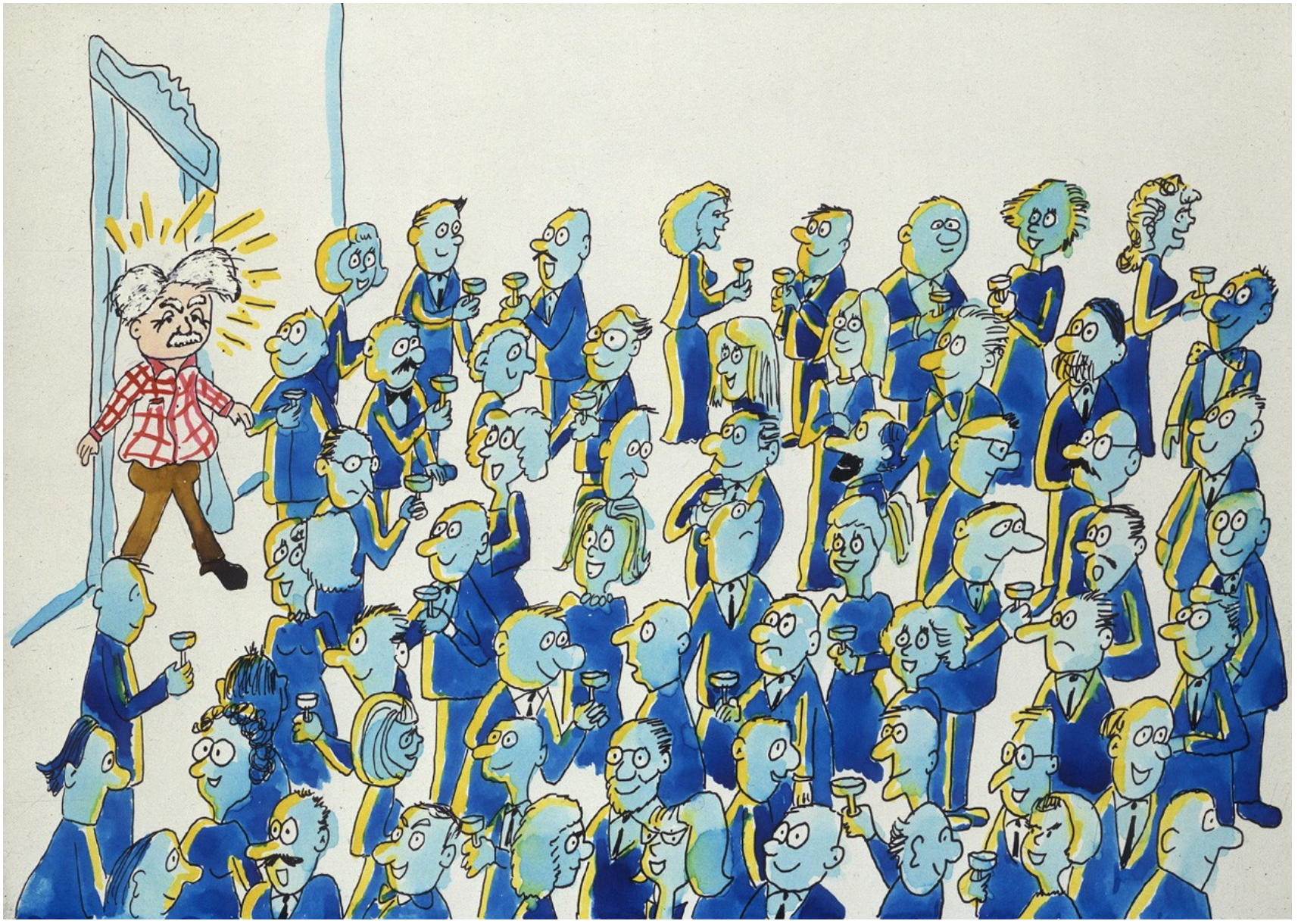
$$B_\mu=A_\mu-(e\varphi_0)^{-1}\partial_\mu(\Delta\varphi_1),$$

- 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

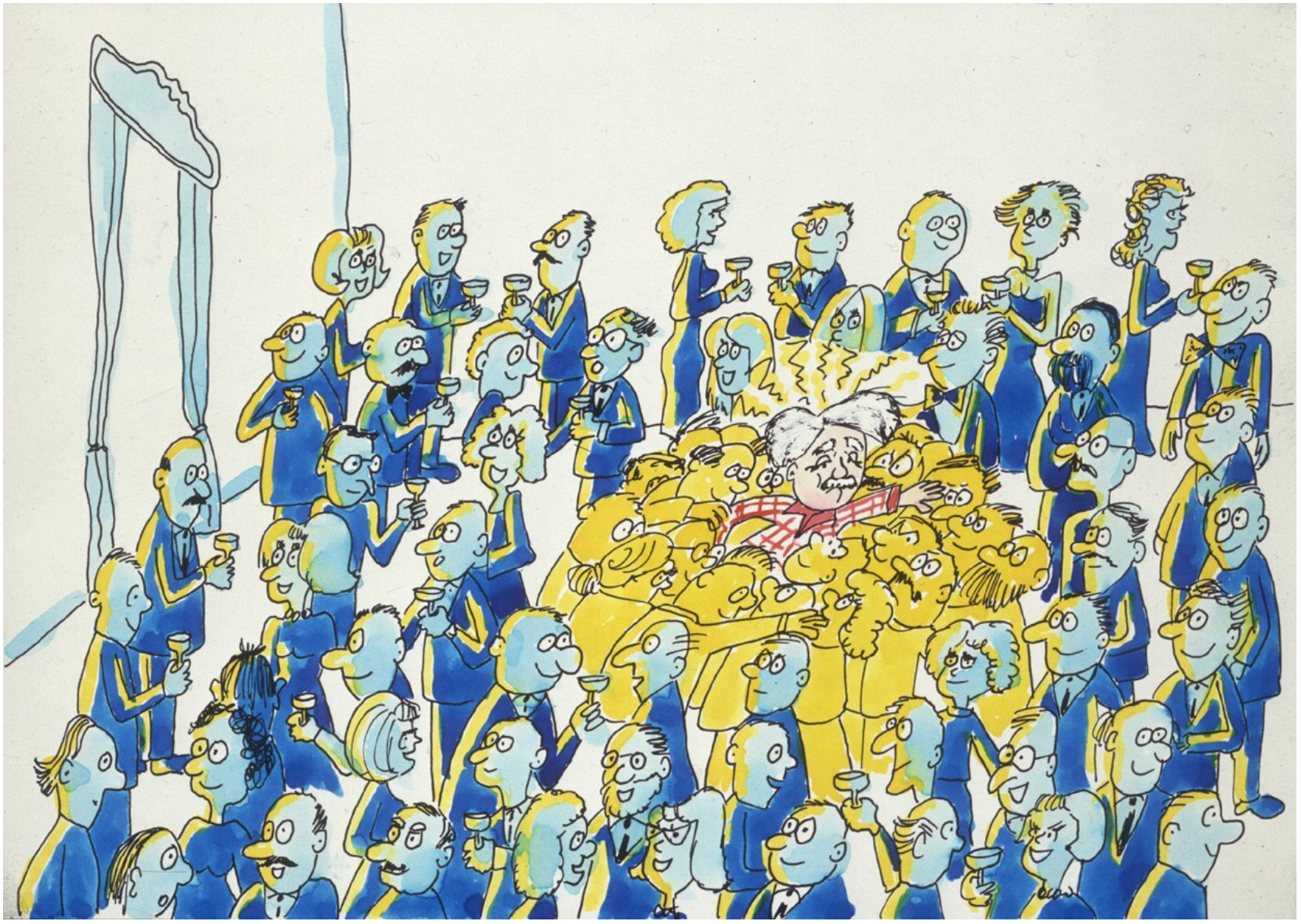
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

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 ...

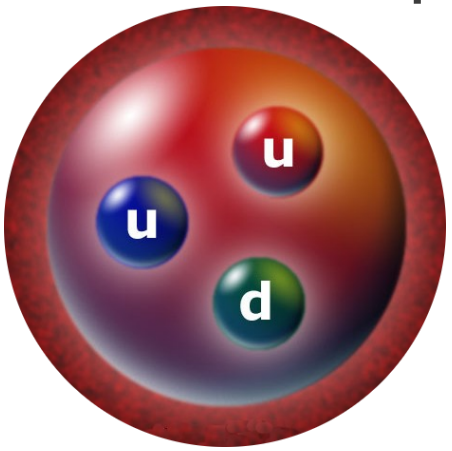
Mécanisme de Higgs en images

... 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

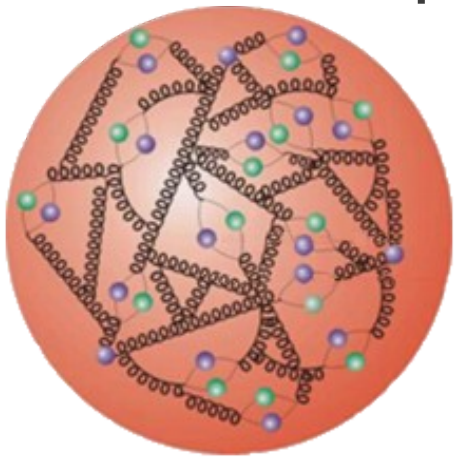
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~1 GeV



- Proton, neutron : 3 quarks, masse ~10 MeV

La masse

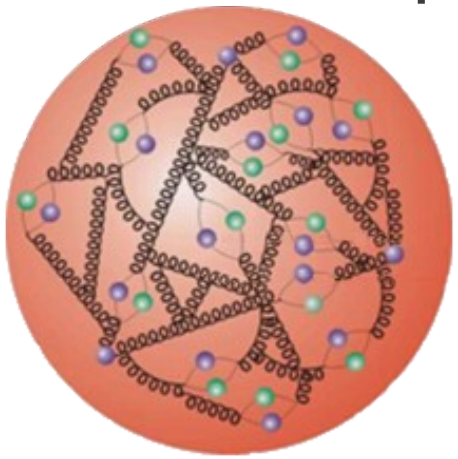
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~1 GeV



  - 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 ~1 GeV

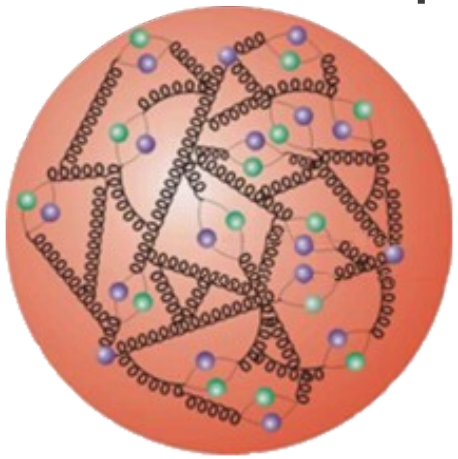


  - En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ($E=mc^2$)

- 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 ~1 GeV

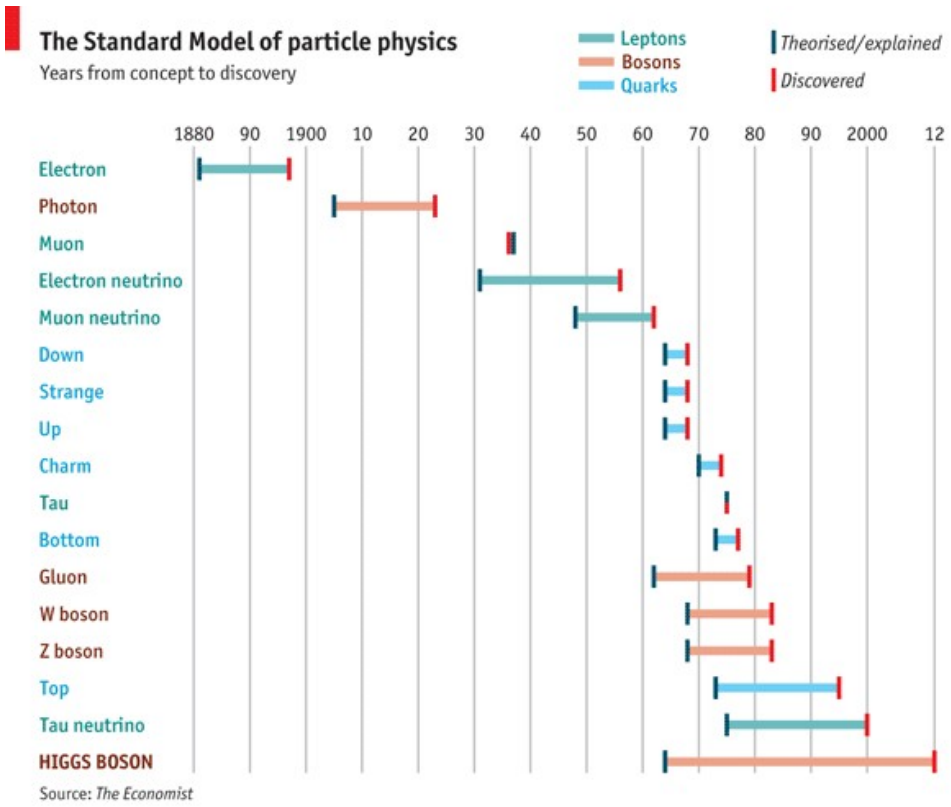


  - En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ($E=mc^2$)

- 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



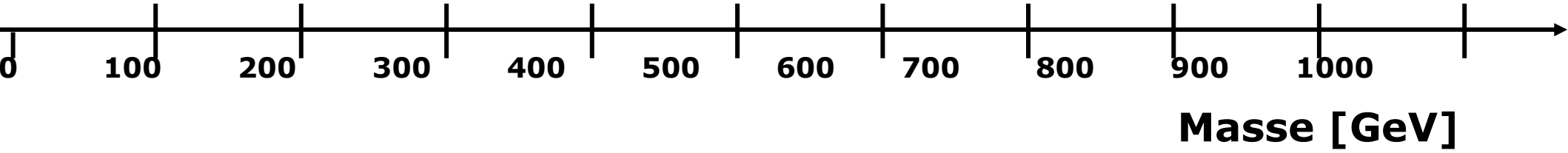
© The Economist

- 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

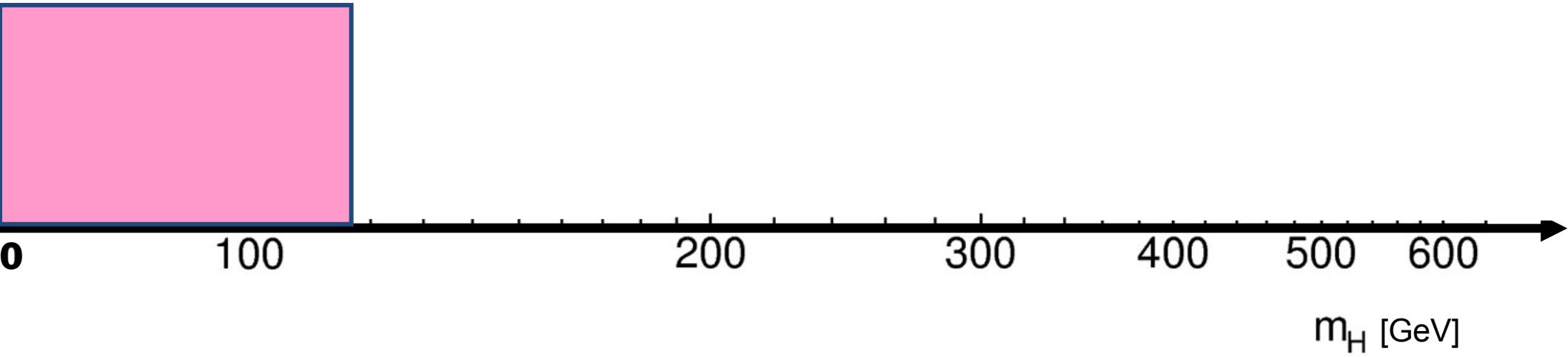
?

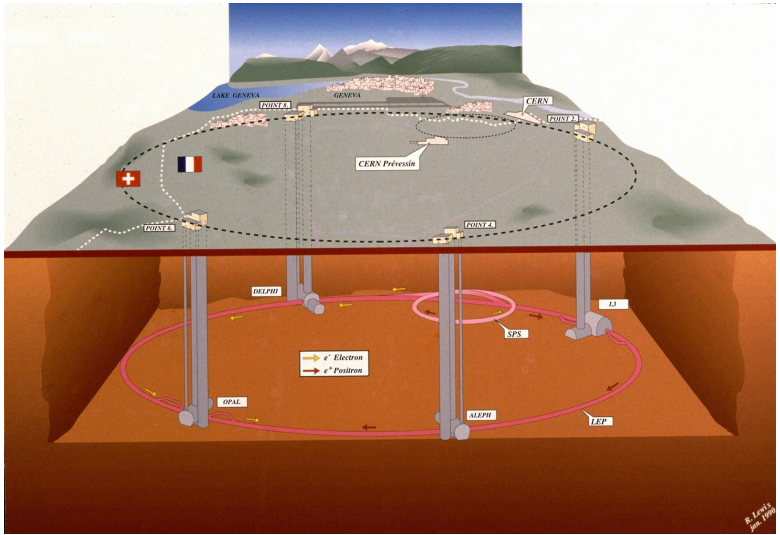


- Seule contrainte théorique : masse < 1000 GeV

La chasse au boson de Higgs

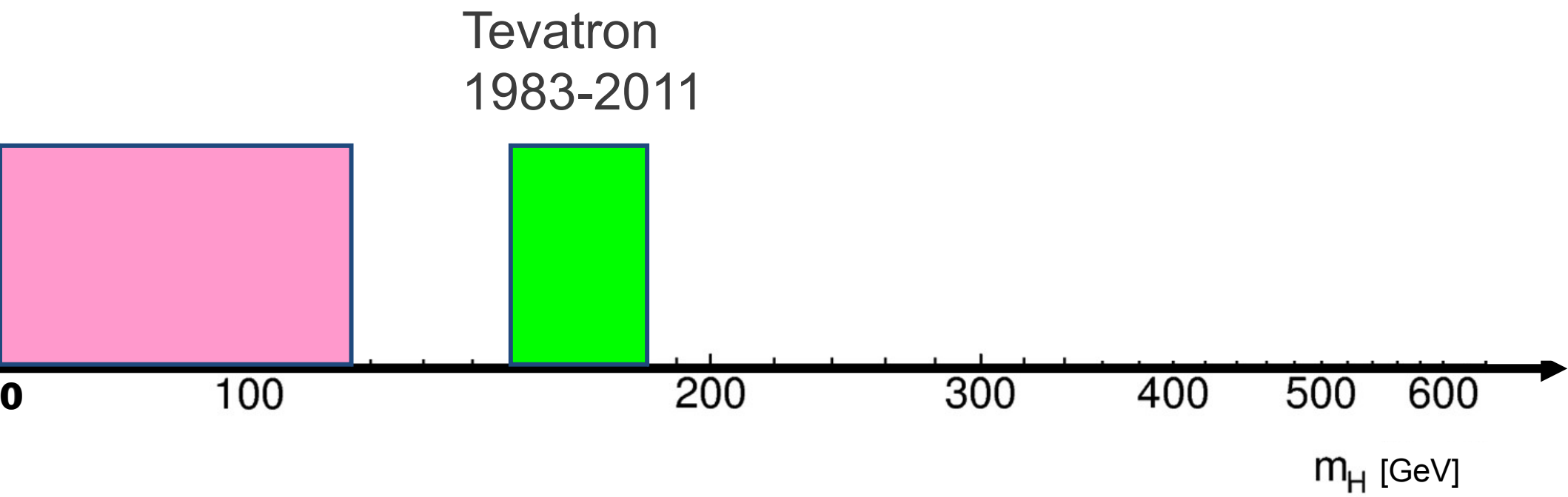
LEP
1989-2000





© N. Makovec

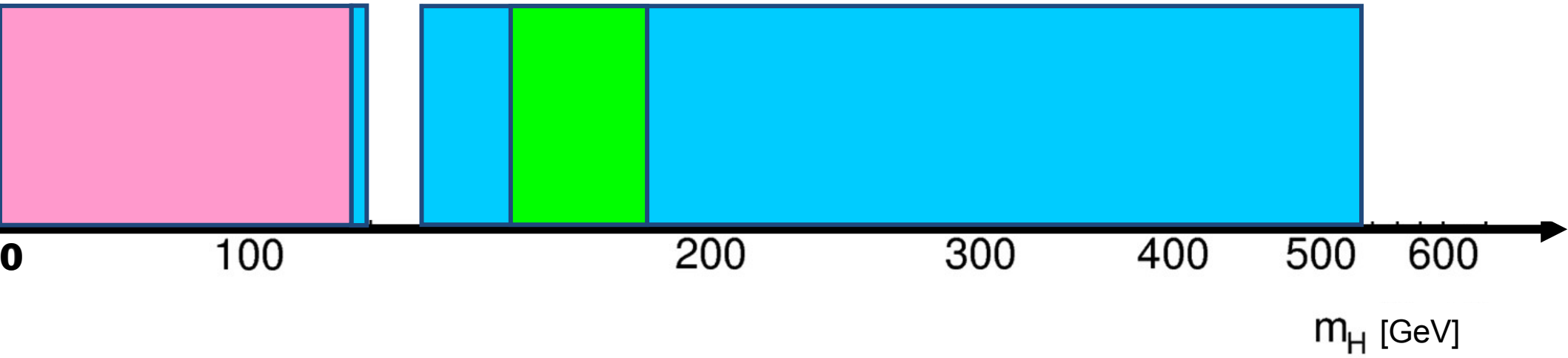
La chasse au boson de Higgs



© N. Makovec

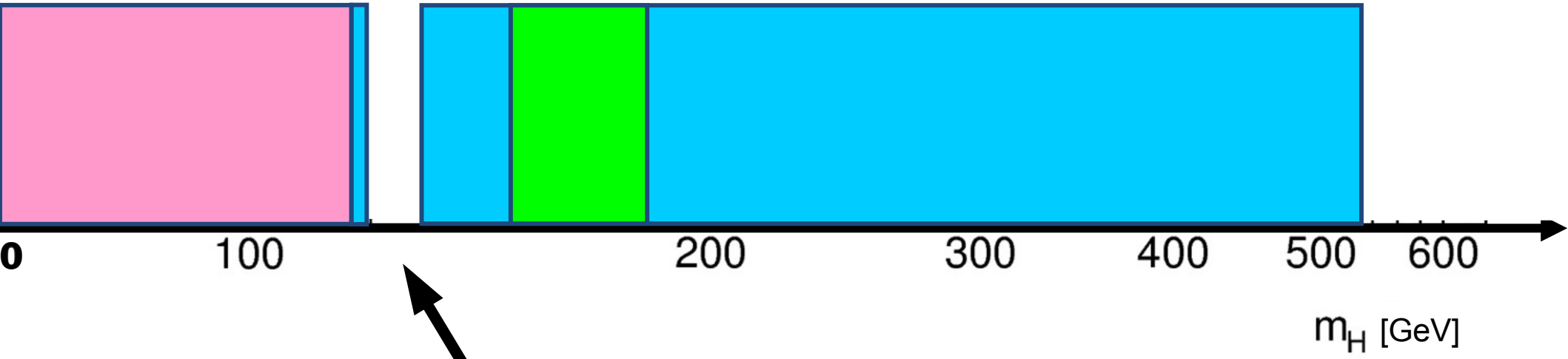
La chasse au boson de Higgs

LHC
2009-2011



© N. Makovec

La chasse au boson de Higgs



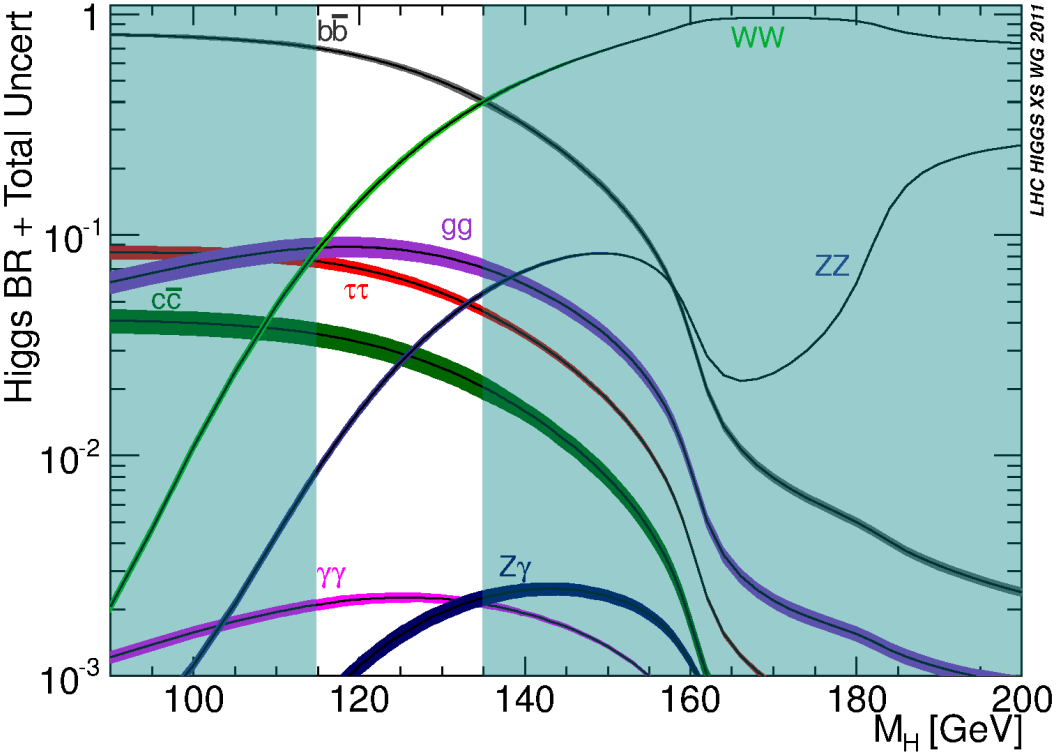
?

© N. Makovec

Comment s'y prend-on ?

- Collision de protons $\longrightarrow$ ($E = mc^2$) $\longrightarrow$ 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

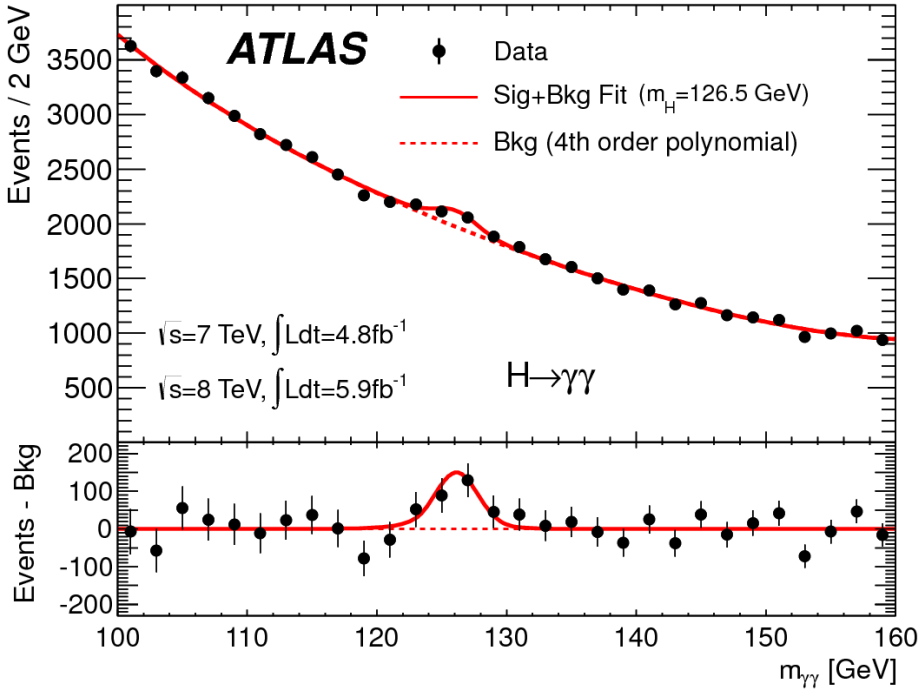
Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

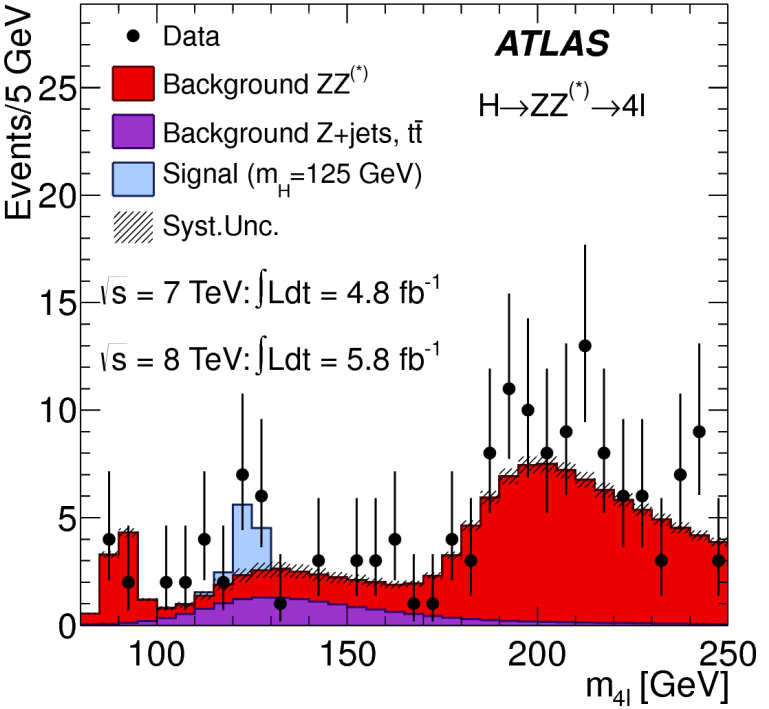
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, c'est le bruit de fond

Boson de Higgs dans ATLAS

Mesure

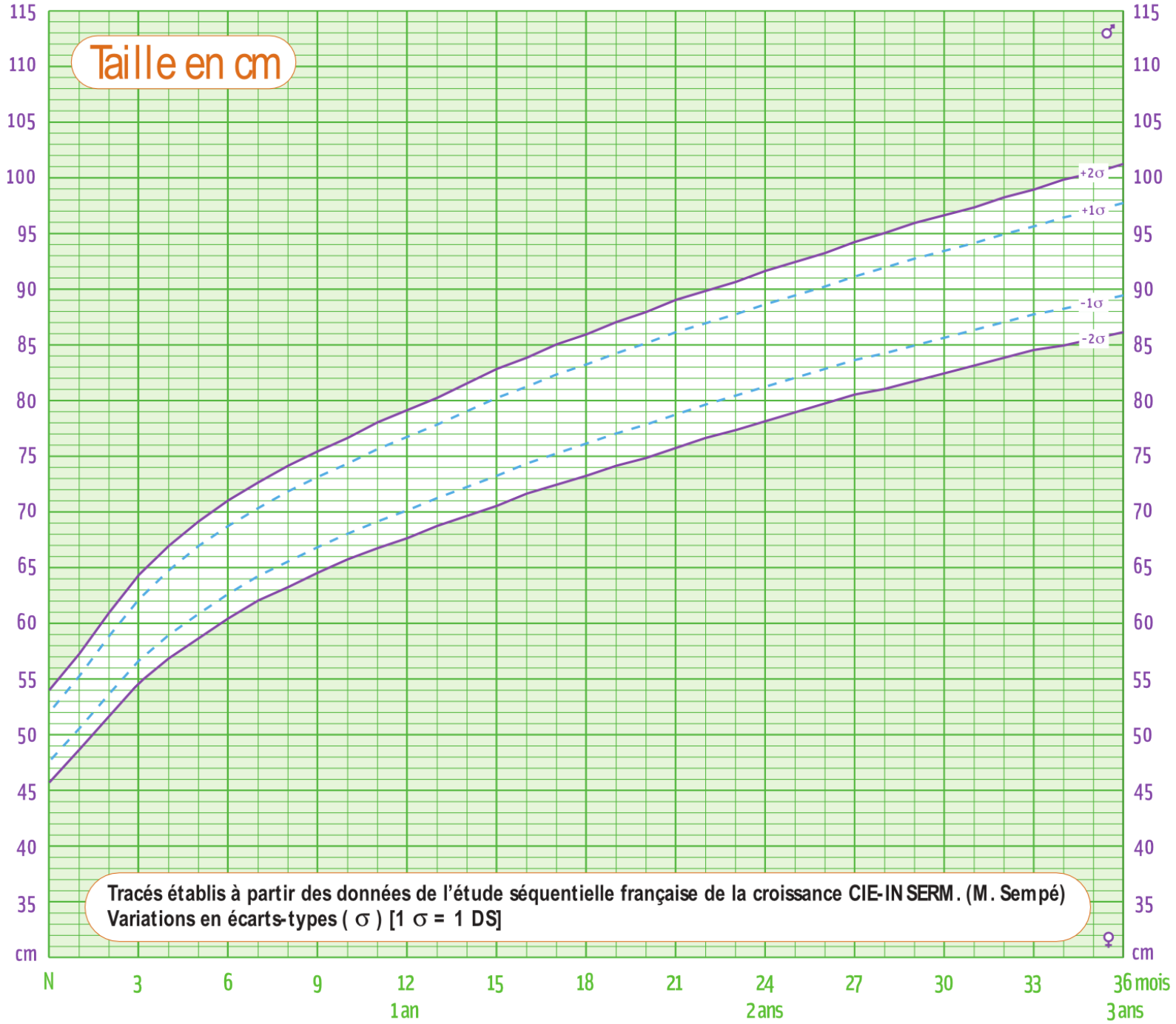
- Higgs en 2 photons
  - Bruit de fond important
  - Petit pic avec « beaucoup » de signal
- Higgs en ZZ
  - Très peu de bruit de fond
  - Très peu d'événements



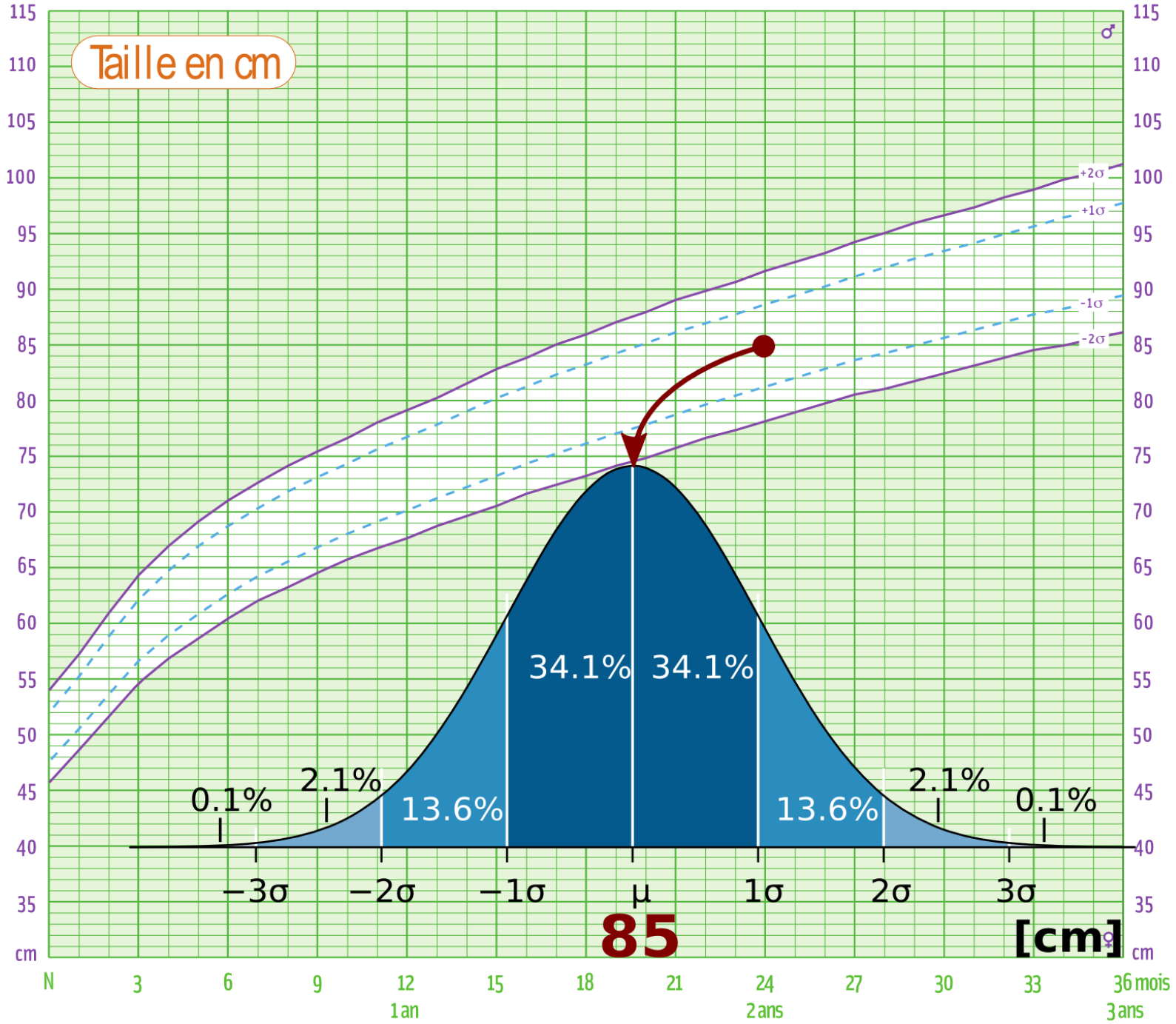


- Est-ce que cela est significatif ?
- Outils statistiques pour répondre

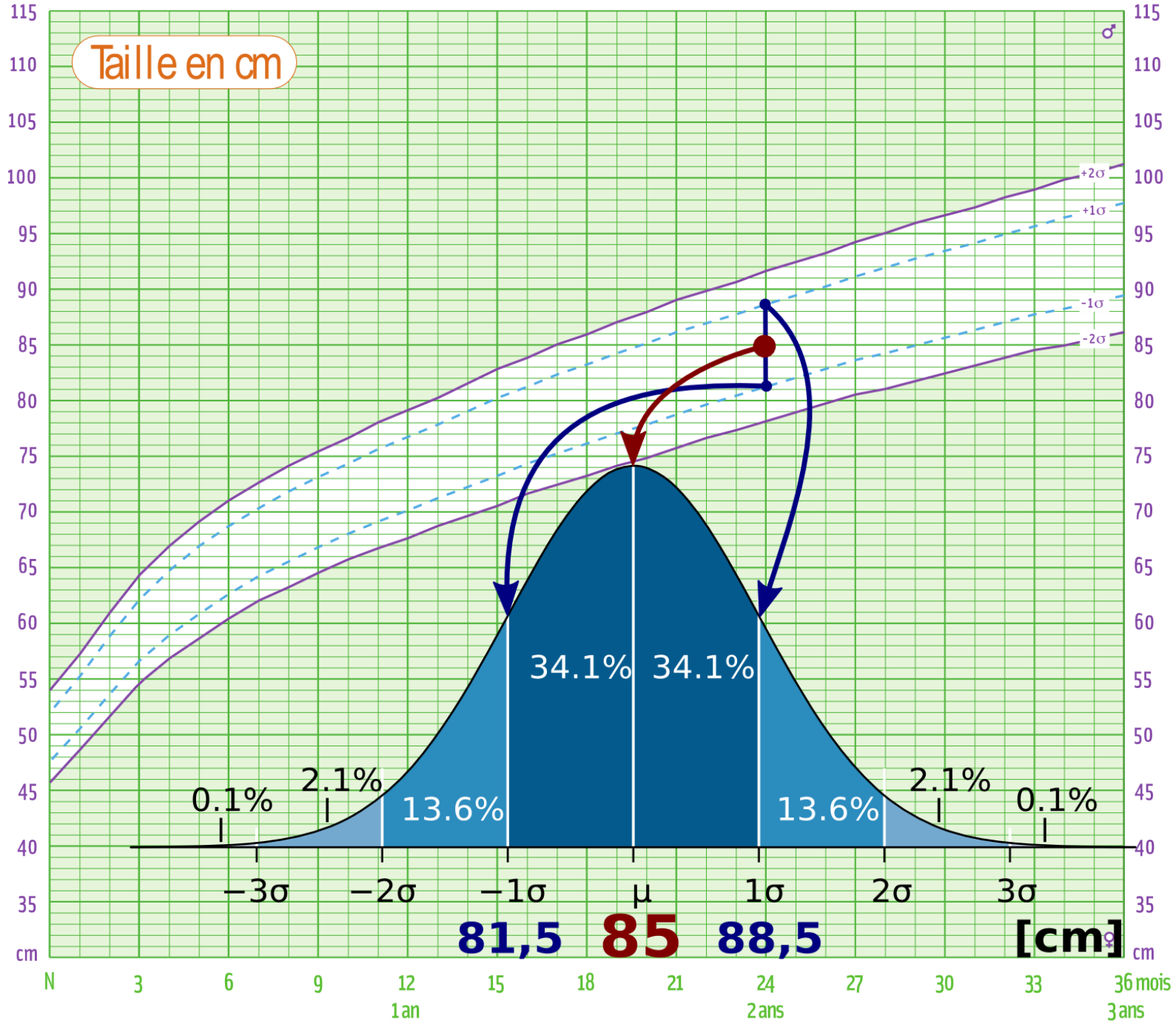
La Gaussienne



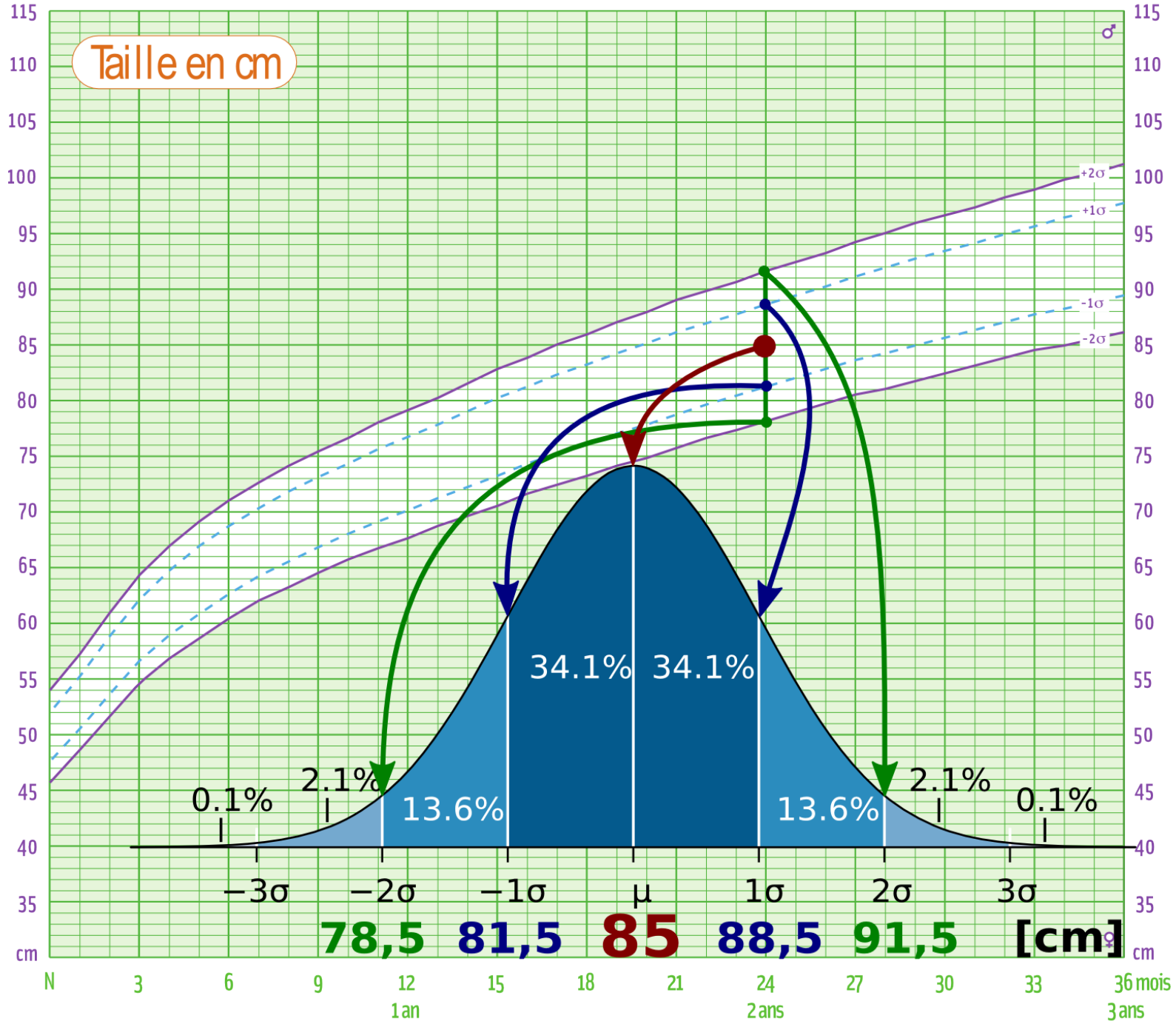
La Gaussienne



La Gaussienne

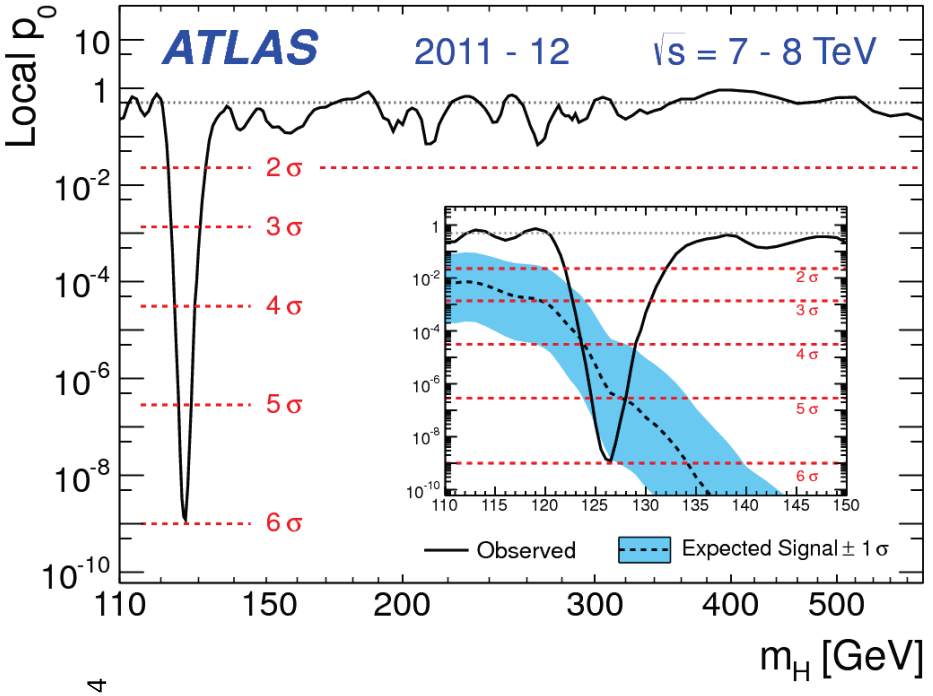


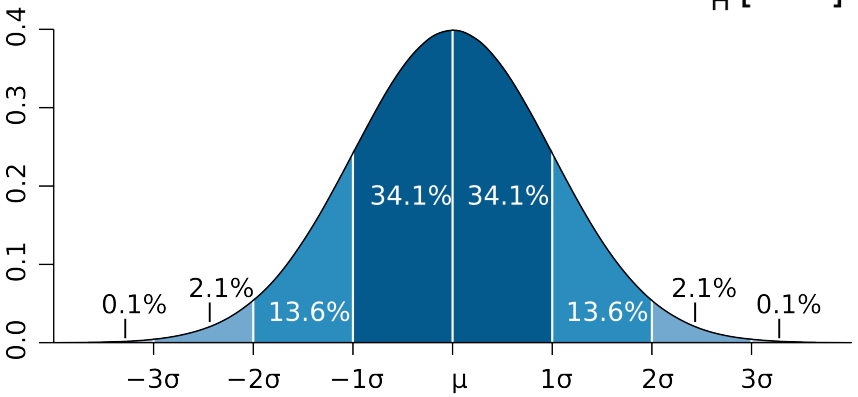
La Gaussienne



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

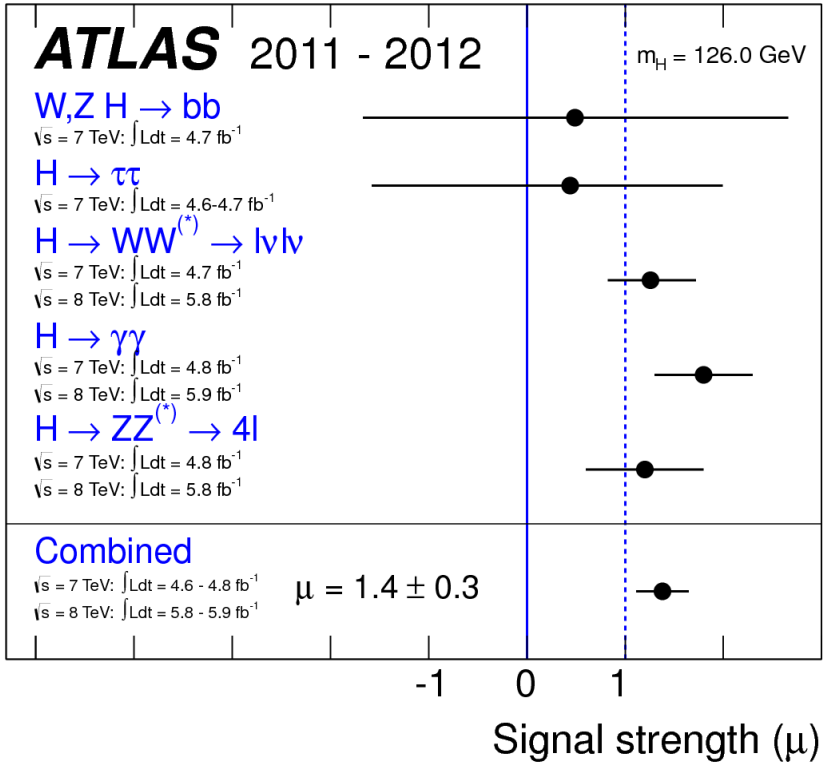


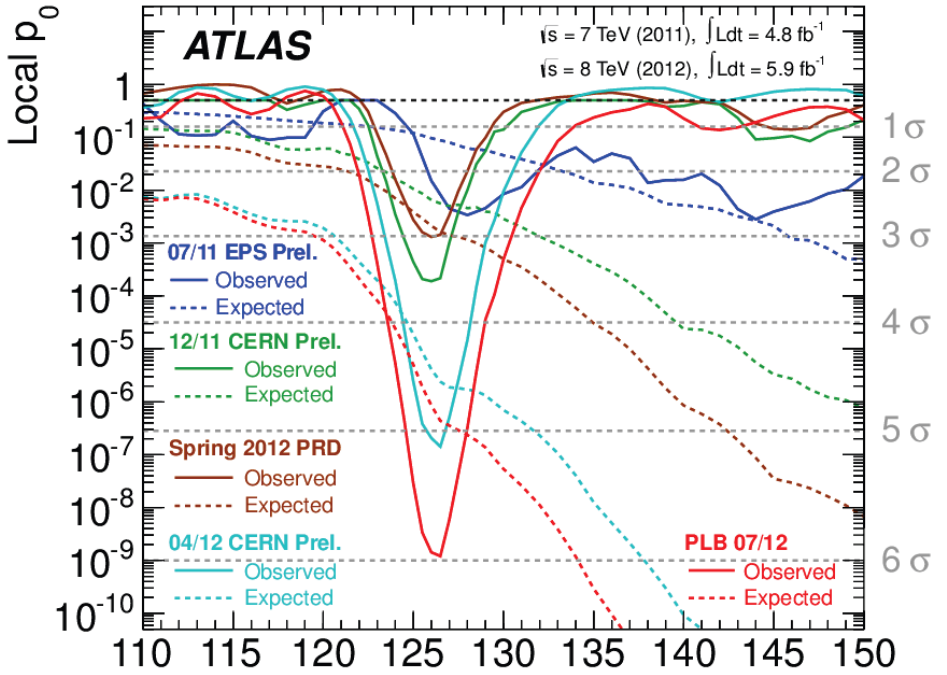


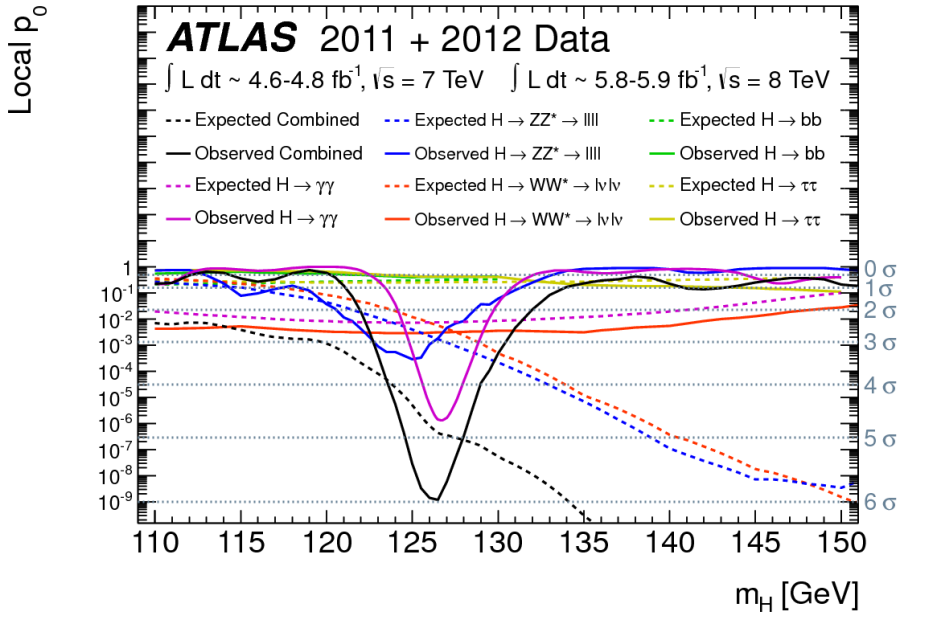
- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose

Est-ce consistent ?

- 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

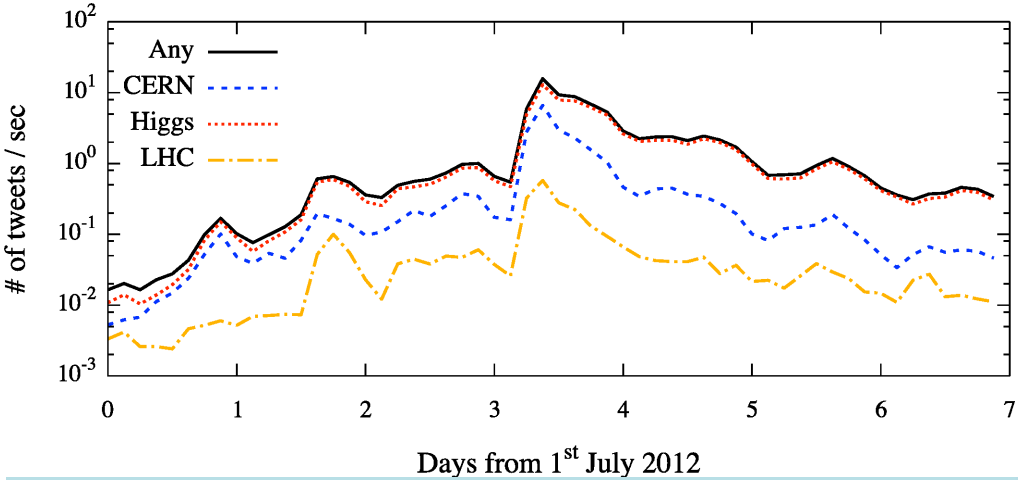


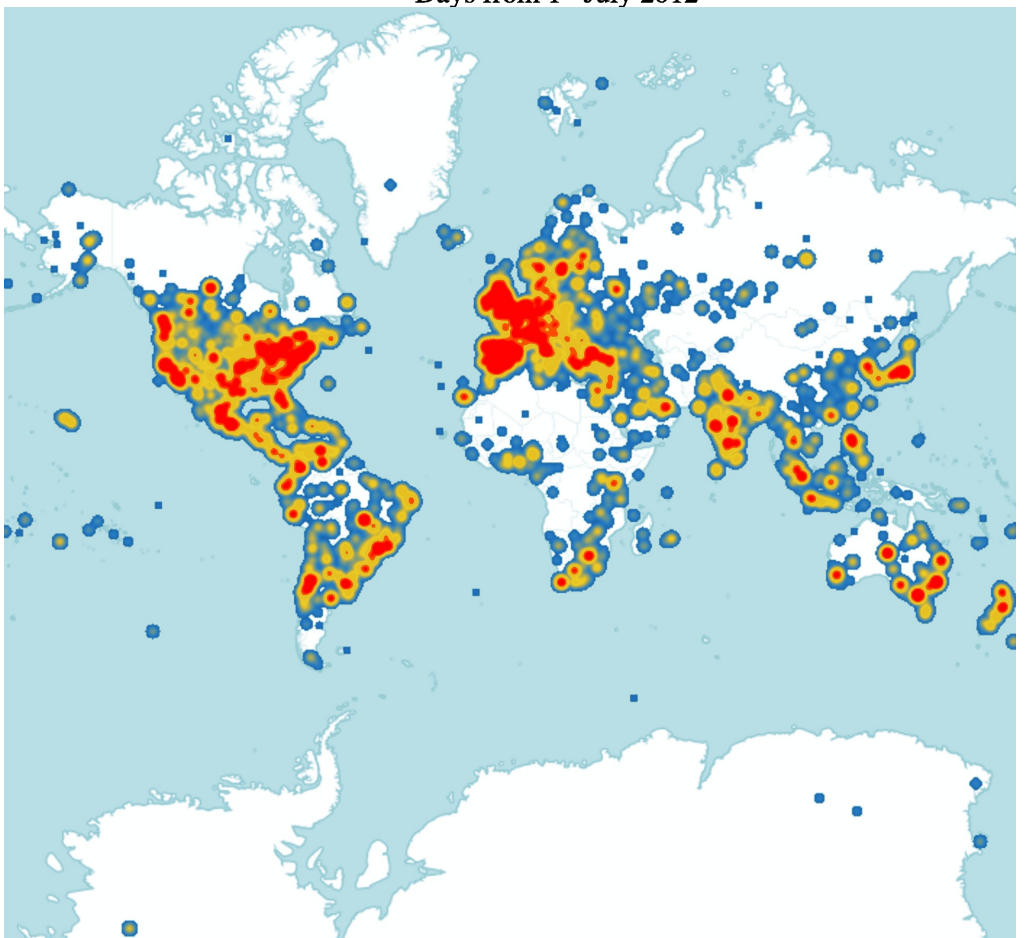




Résultats

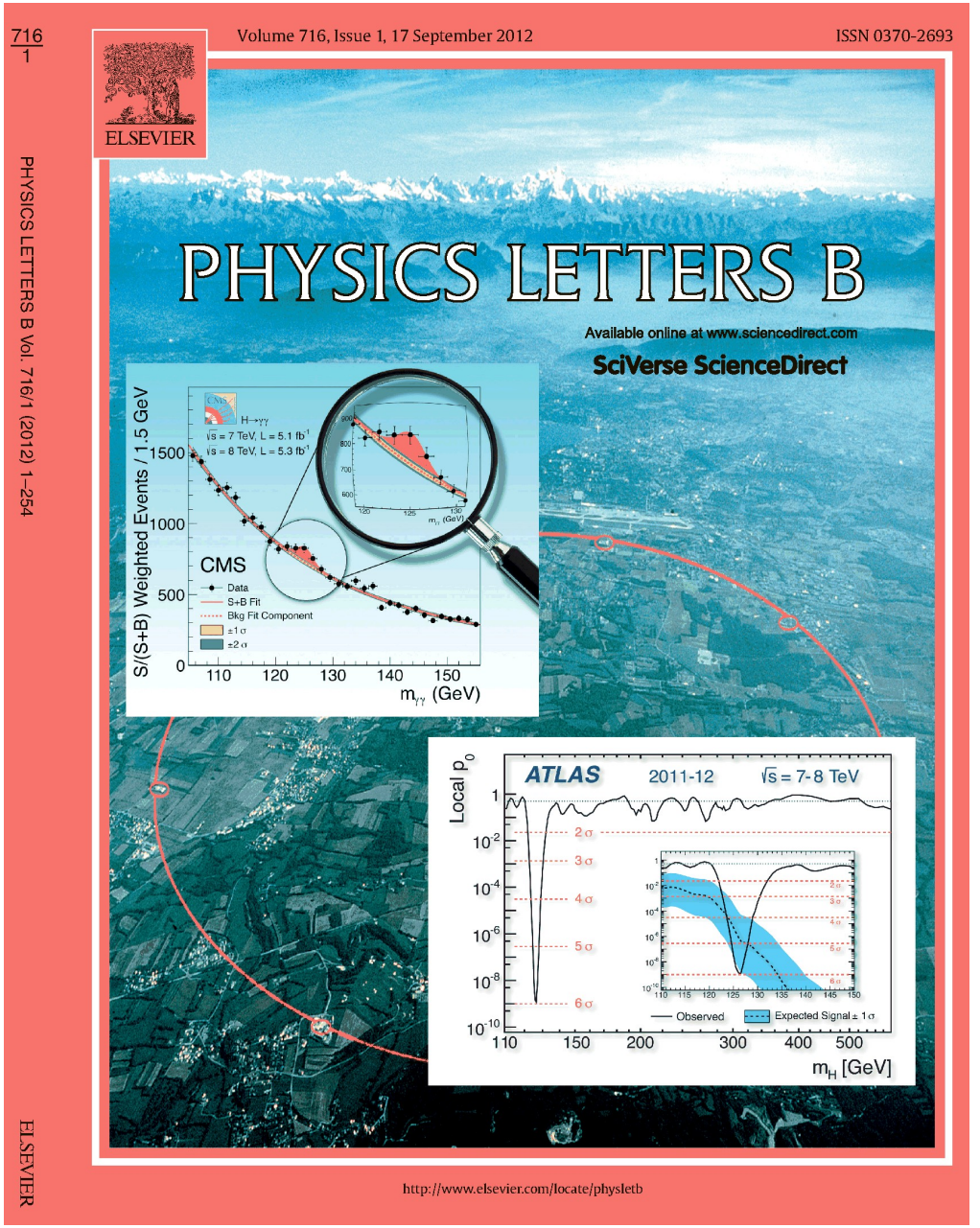
- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN
  - 55 médias sur place
  - 500 000 connexions webcast
  - Vu sur >1000 chaînes de télévision
  - Plus d'un million de tweets (gazouillis)





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, ~126 GeV (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés au mois de mars 2013)
- La significance 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, ~126 GeV (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés au mois de mars 2013)
- La significance 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.)

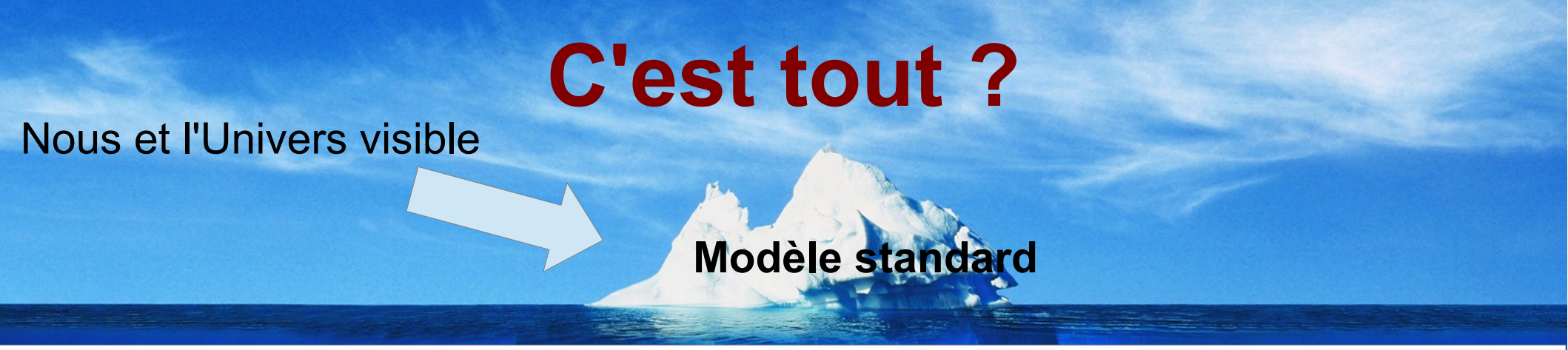
Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard, ~126 GeV (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés au mois de mars 2013)
- La significance 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

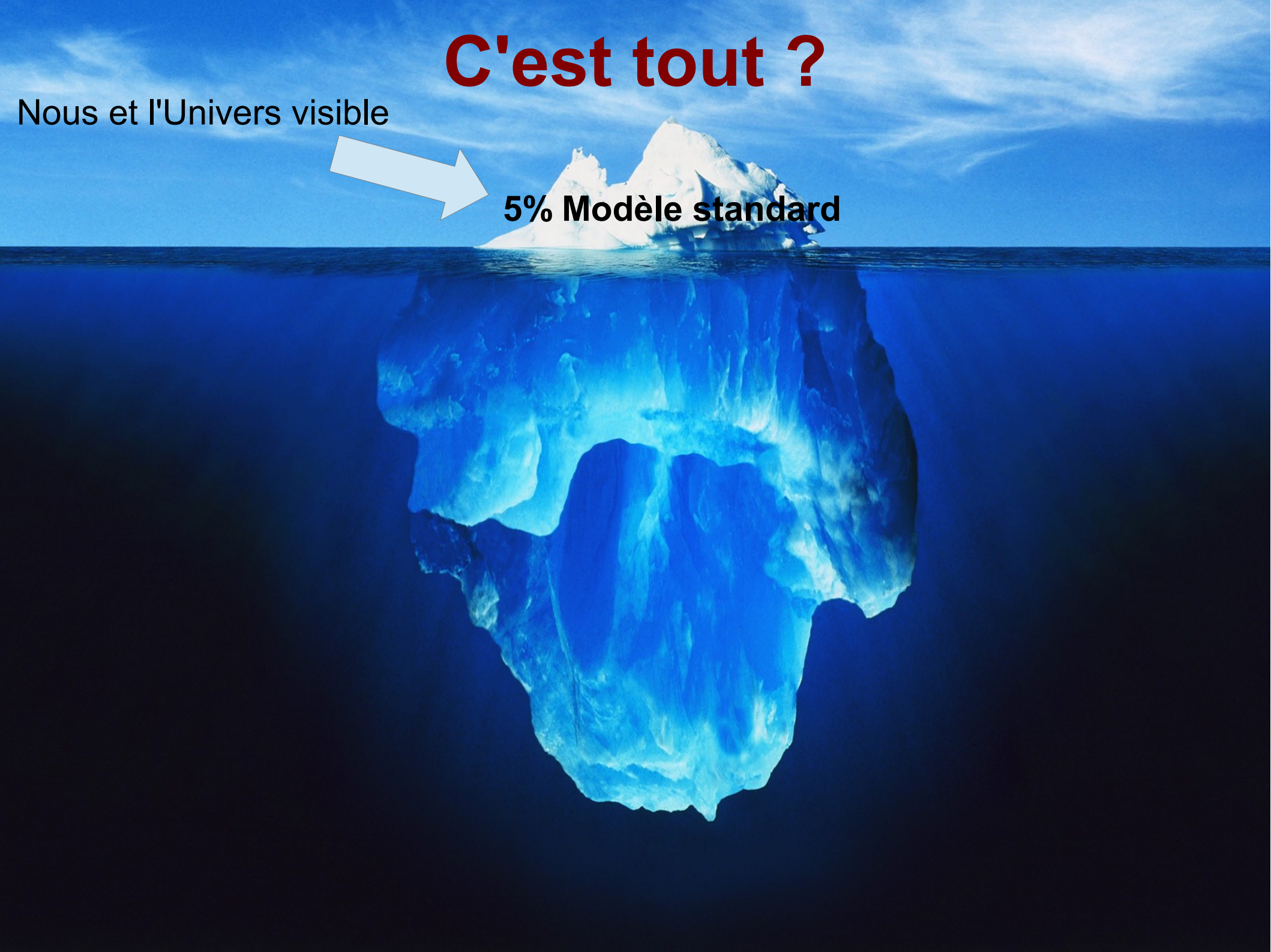
C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

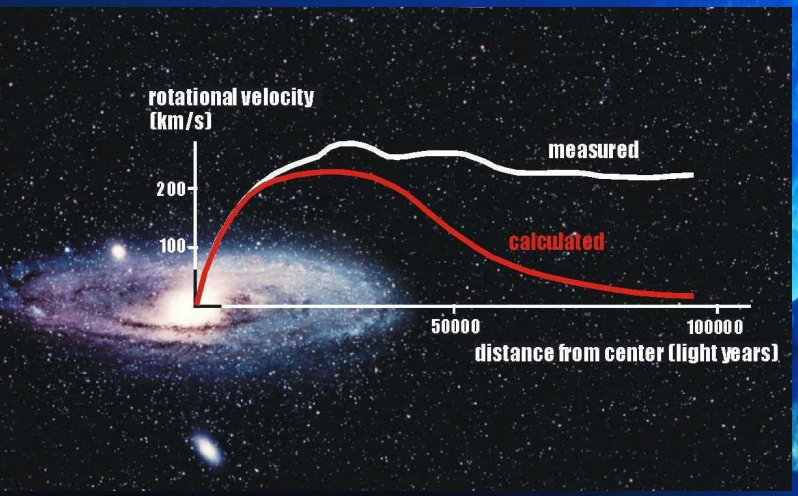


C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

5% Modèle standard

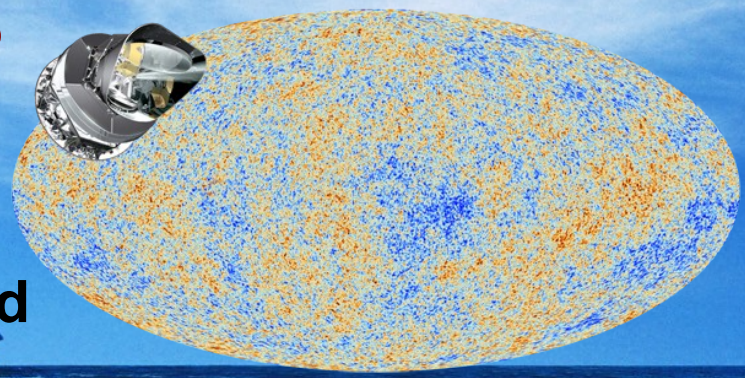
27% Matière noire



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

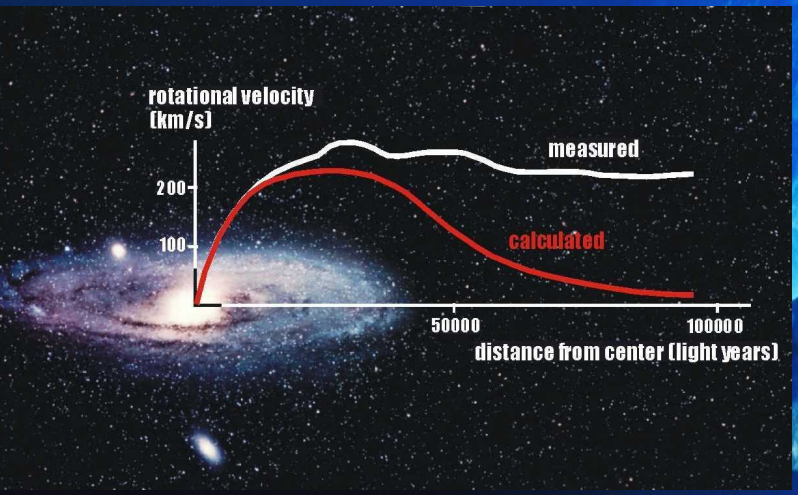
C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



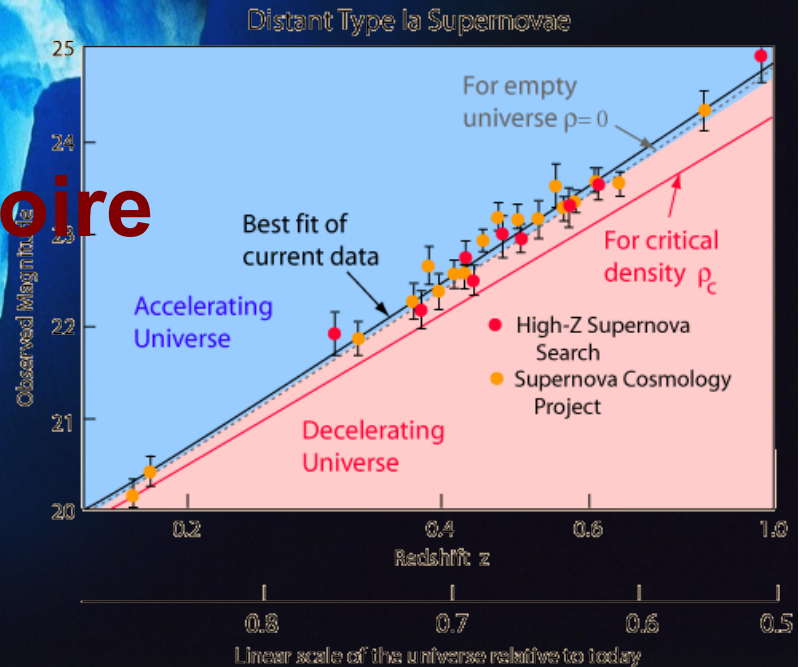
5% Modèle standard

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

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 !

Liens

Cette présentation :
indico.in2p3.fr/event/YannCoadou_BosonDeHiggs_Andromede2013

ATLAS grand public	atlas.ch
ATLAS en direct	atlas-live.cern.ch
ATLAS sur	twitter.com/ATLASexperiment
ATLAS sur	www.facebook.com/ATLASexperiment
ATLAS sur	www.google.com/+ATLASexperiment
ATLAS sur	www.youtube.com/theATLASExperiment
Site français du	www.lhc-france.fr
Le CPPM	marwww.in2p3.fr
Le CERN	cern.ch
Le CERN sur	twitter.com/cern