

Le champ et le boson de Higgs : La masse sans masse

Johann Collot

Laboratoire de Physique Subatomique
et de Cosmologie de Grenoble

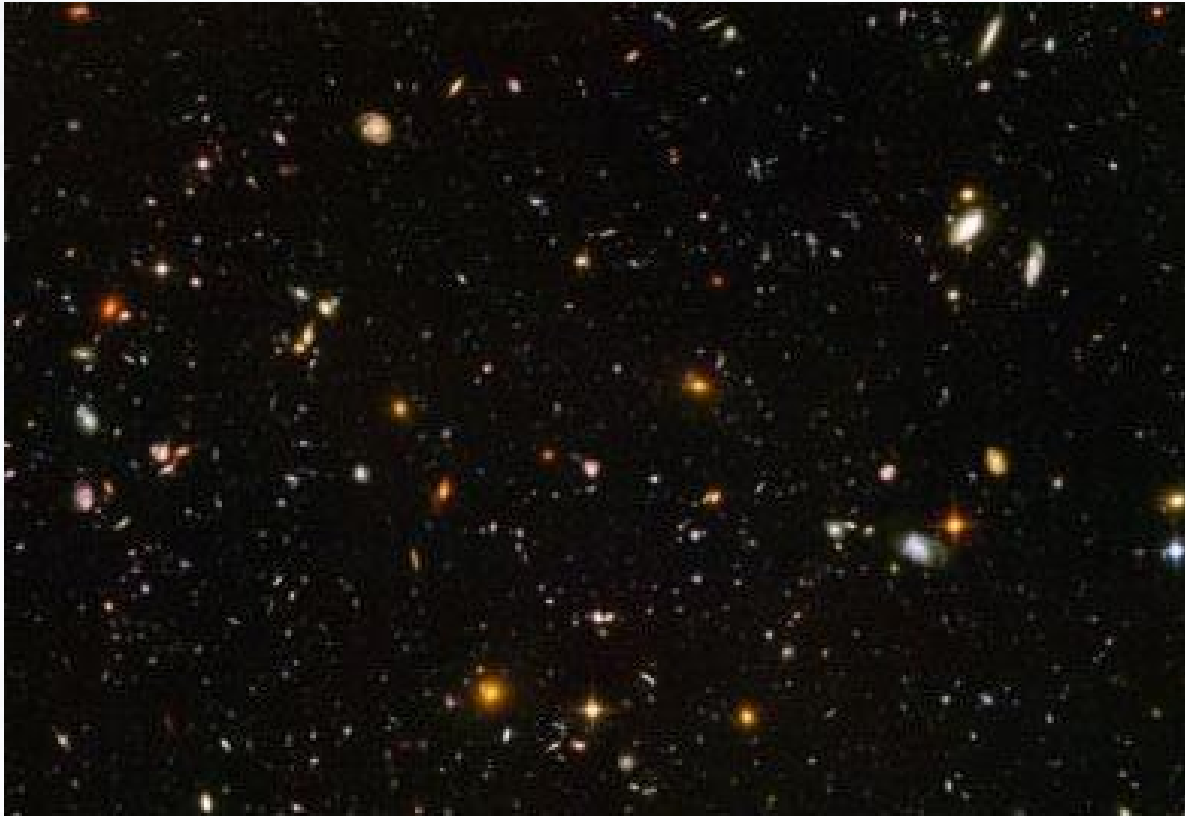
CNRS/IN2P3 - Université de Grenoble



collot@in2p3.fr

<http://lpsc.in2p3.fr/collot>

Ce dont nous sommes faits compose aussi
l'Univers visible



La connaissance des composants élémentaires est l'une des
clés de la compréhension de notre Univers.

Il suffit de peu pour faire un monde !

La musique : 7 notes et 2 altérations

- classées sur des portées selon leurs fréquences
- liées en accords

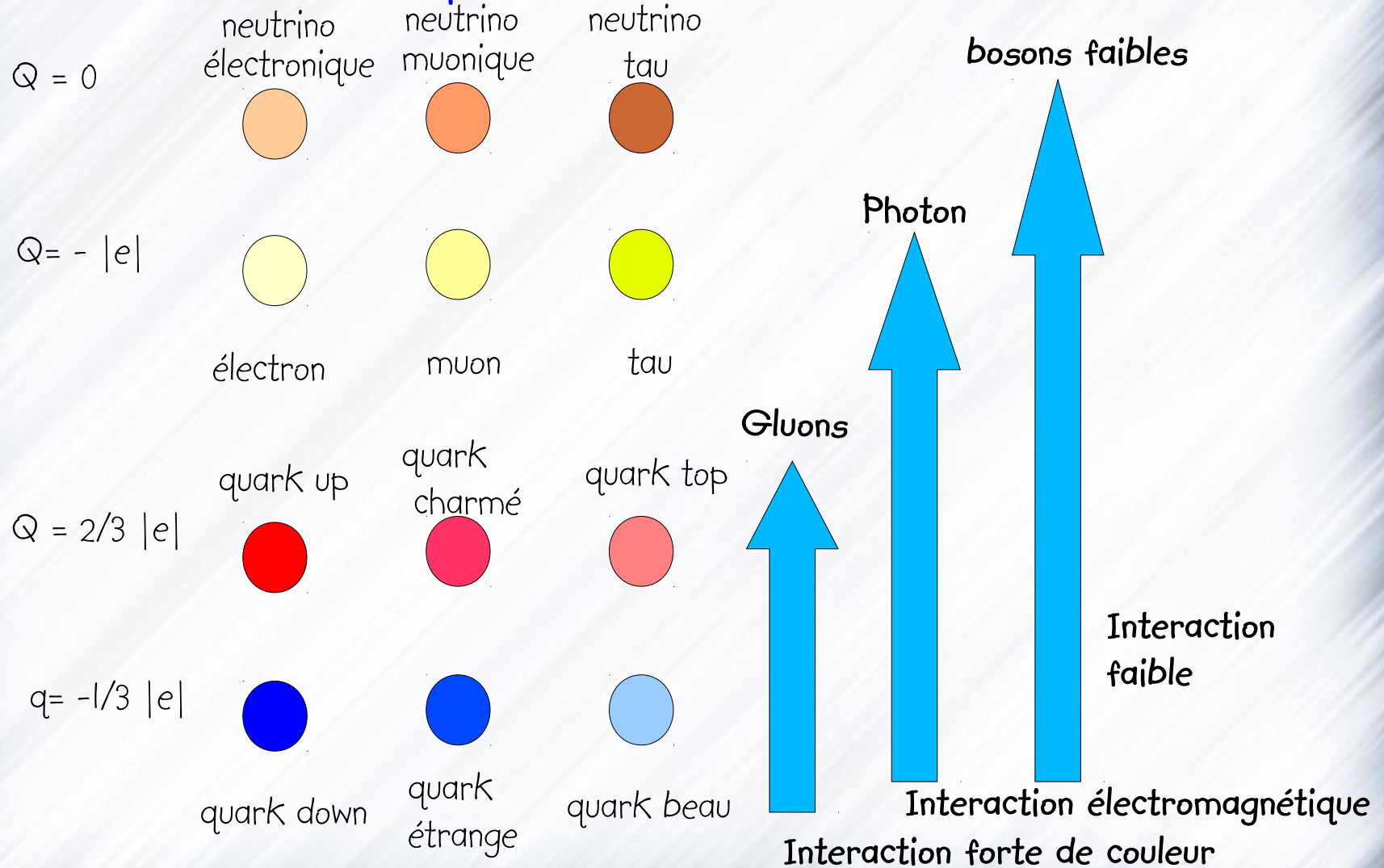
L'Univers physique : 12 particules élémentaires
et 4 interactions

- classées dans des multiplets
- systèmes liés (noyaux, atomes, molécules,
cristaux, formations cosmiques ...)

Éléments de langage

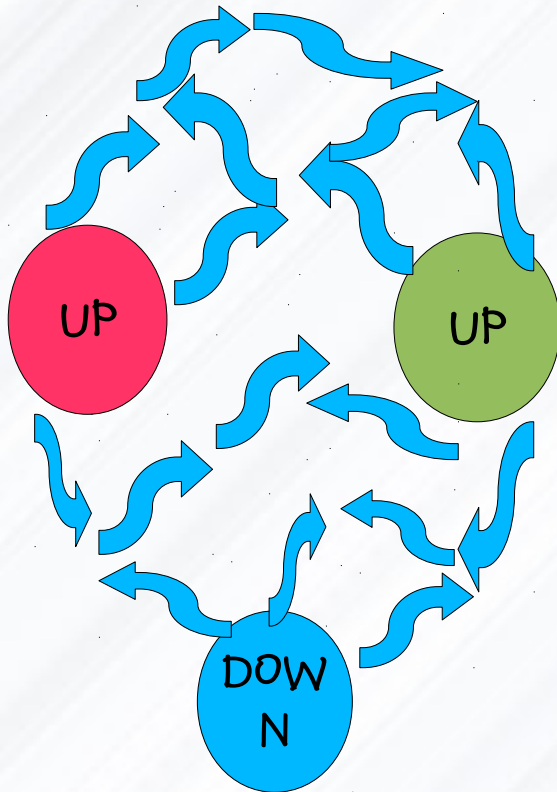
- Un champ : un fluide immatériel qui emplit l'espace physique. Il y a de nombreux champs dans l'espace (électromagnétique, gravitationnel ...)
- Une particule : une excitation quantique d'un champ
- Le spin d'une particule : la rotation « quantique » propre (sur elle-même) d'une particule
- boson : une particule de l'espèce la plus courante (le photon est un boson). Les bosons portent un spin entier ($N \hbar$). Ils peuvent être produits dans le même état quantique (laser, CBE ...).
- fermion : Toute autre particule. Les fermions incluent les principaux composants élémentaires de notre matière (électron, quarks). Ils portent un spin demi-entier ($(2N+1)/2 \hbar$). Un seul fermion de même nature par état quantique.

Les composants élémentaires

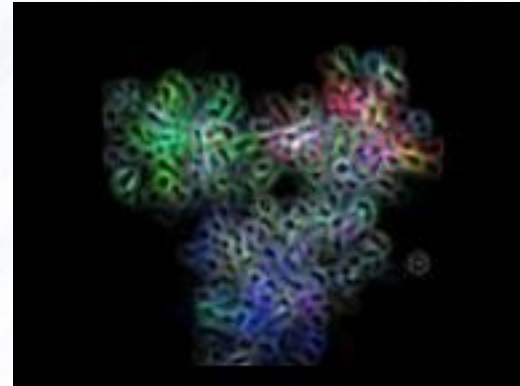


Le proton

Le proton est une sorte de bouillonnement microscopique de quarks et de gluons d'une taille cent mille fois plus faible que celle d'un atome



La structure d'un proton est plus complexe que celle d'une étoile.

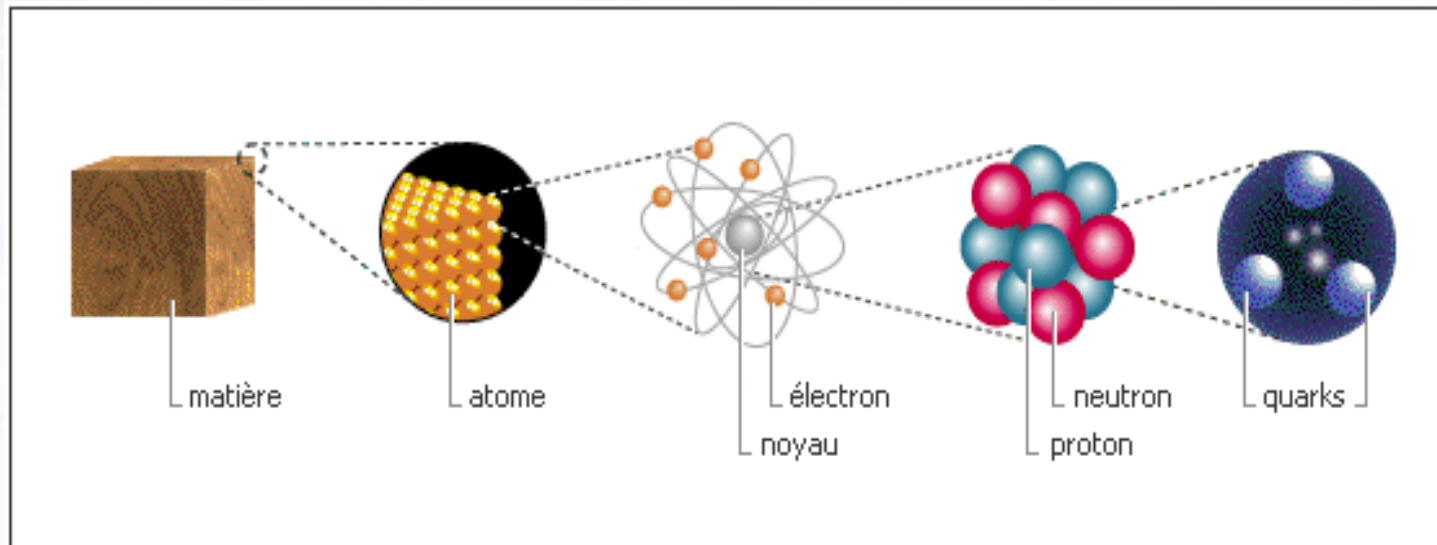


calcul sur ordinateur



oeuvre d'art de Catherine Chariot-Dayez

Et tout le reste



Masse

La masse est omniprésente en physique.

$P = m g$ masse gravitationnelle Galilée

$F = m a$ masse inertielle Newton

$E = m c^2$ équivalence masse-énergie Einstein

Toutes ces masses sont identiques.

Dans notre modélisation du monde, les particules élémentaires nues seraient de masse nulle ce qui est contraire à l'expérience.

Le mécanisme de Brout, Englert et Higgs

Le champ BEH emplit l'univers mais initialement (juste après le Big Bang) sa valeur est en moyenne nulle.

Une particule libre initialement de masse nulle interagit avec ce champ. .



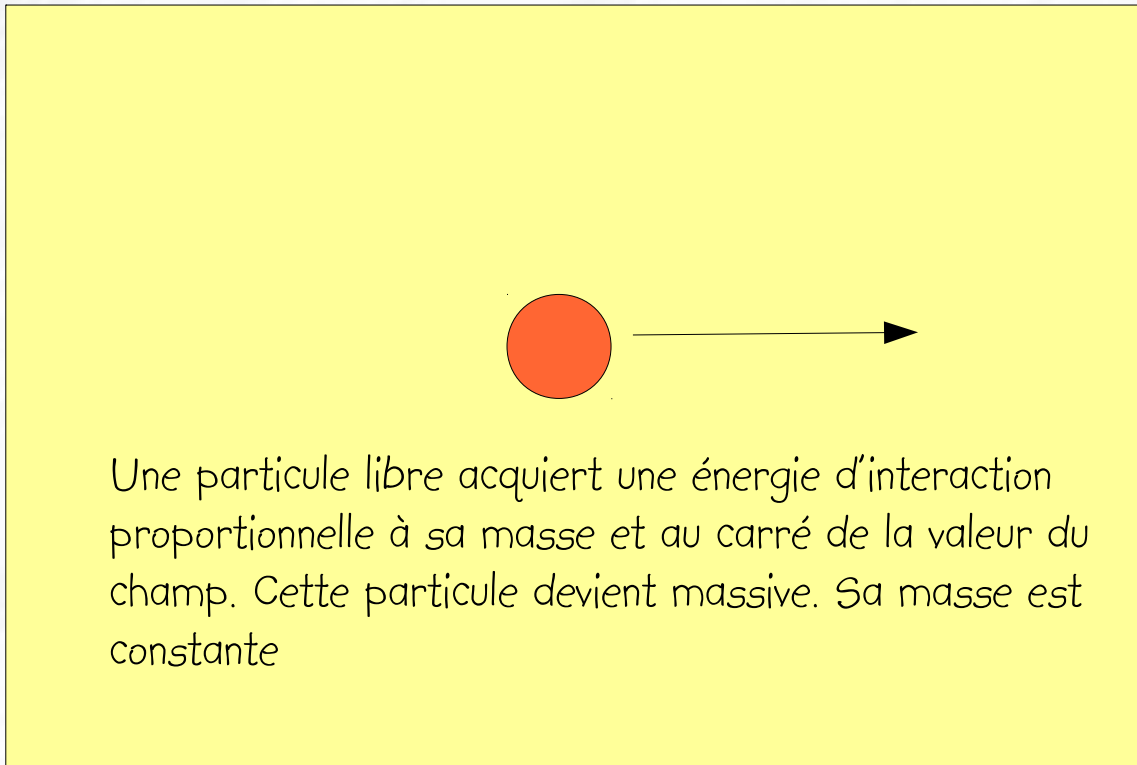
Son énergie d'interaction est proportionnelle à sa masse et au carré de la valeur du champ (ici un nombre ou encore un scalaire).

Initialement le champ est nul, par conséquent l'énergie d'interaction est nulle.

Cette particule garde alors une masse nulle.

Le mécanisme de Brout, Englert et Higgs

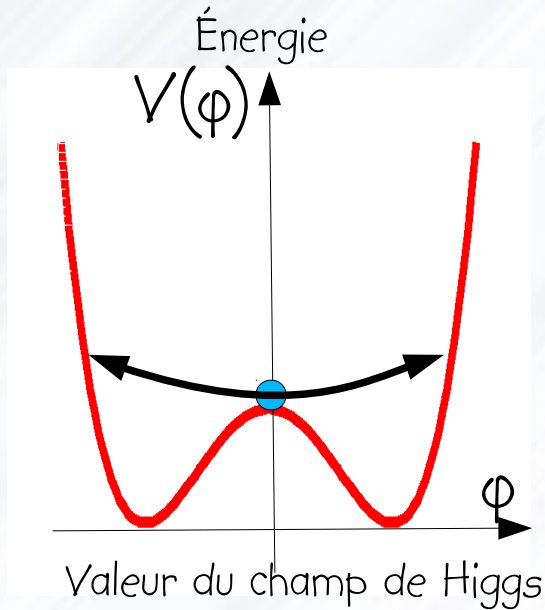
Quelques instants après le Big Bang (10^{-12} s), le champ BEH subit une transformation de phase. Sa valeur moyenne devient non nulle et constante en tout point de l'espace.



Toutes les particules élémentaires interagissent avec le champ BEH sauf les photons et les gluons qui demeurent donc de masse nulle.

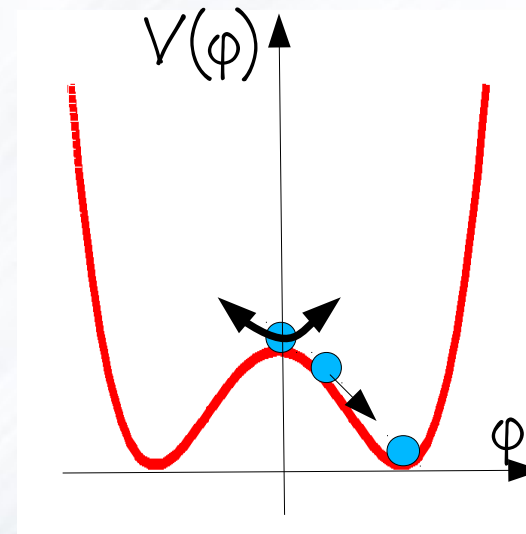
Le boson de Higgs est l'excitation du champ de Higgs. C'est Higgs qui le premier a suggéré cette possibilité. C'est une particule neutre, massive et dépourvue de spin.

Transition de phase

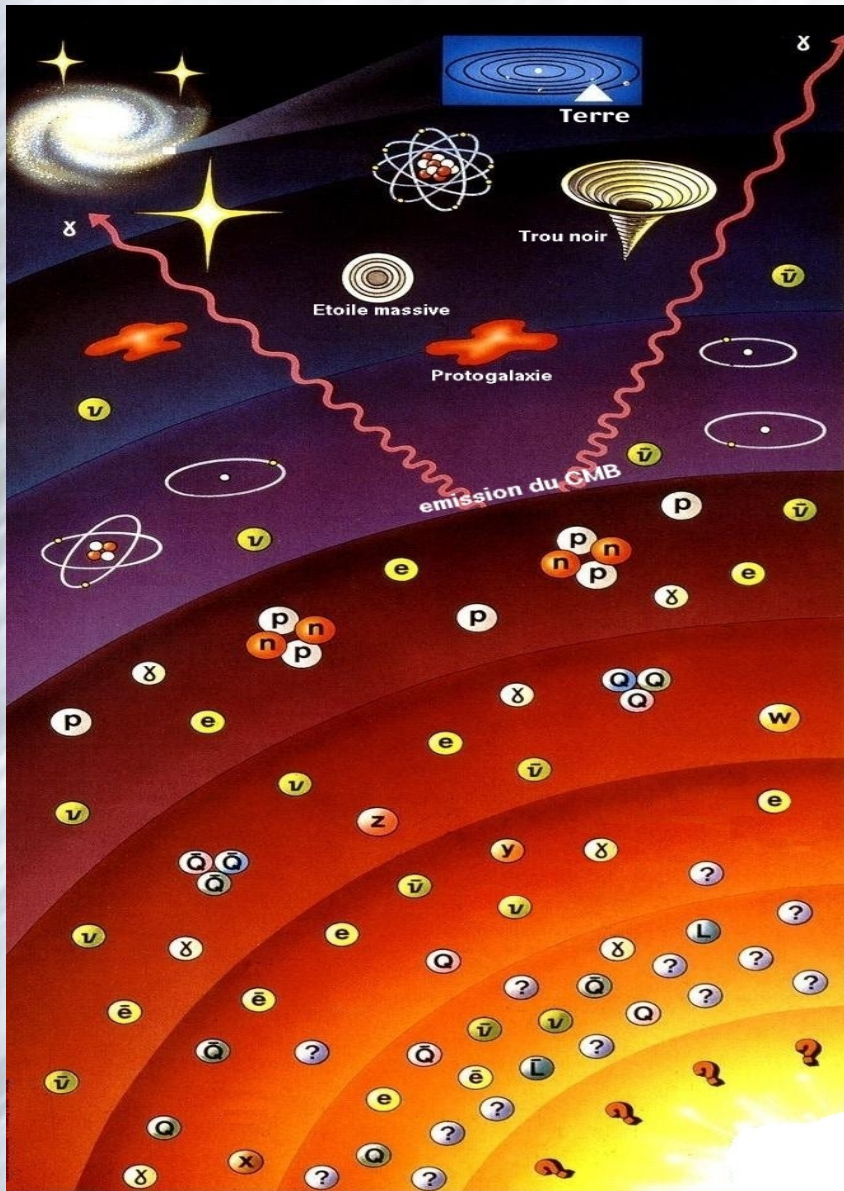


Initialement, juste après le Big Bang, la température est très forte, chaque point de l'univers voit un champ de Higgs en moyenne nul.

Un millième de milliardième de seconde après le Big Bang, la température a suffisamment décreu pour que l'univers transite vers une phase où le champ de Higgs est partout de valeur moyenne constante et non nulle. La symétrie est brisée, les particules deviennent massives.



Le Big Bang



aujourd'hui	0.2 meV	13,7 10 ⁹ ans
formation des structures		10 ⁹ ans
découplage matière/rayonnement	0.1 eV	3 10 ⁵ ans
équilibre matière/rayonnement	0.1 MeV	10 ⁴ ans
nucléosynthèse primordiale	1 MeV	10 ² s
transition électrofaible	300 GeV	10 ⁻¹⁰ s
grande unification	10 ¹⁵ GeV	10 ⁻³⁴ s
"reheating"	10 ¹⁶ GeV	

La masse des particules élémentaires



L'univers contient un champ partout présent : le champ de Higgs

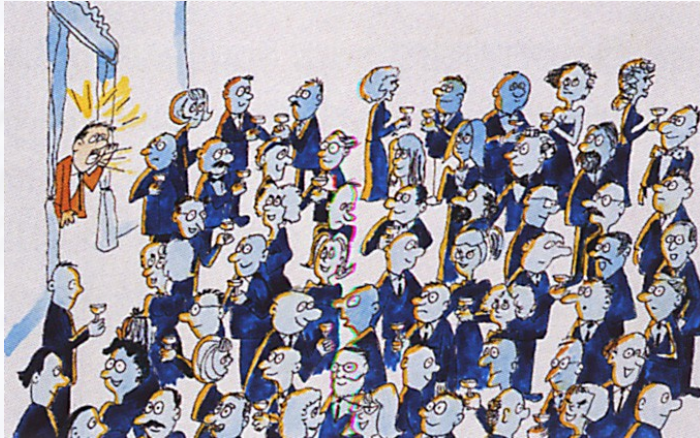
Le champ de Higgs s'agglutine sur cette particule, créant ainsi une énergie en apparence de masse



Une particule élémentaire y est immergée



Le boson de Higgs



On excite le champ de Higgs

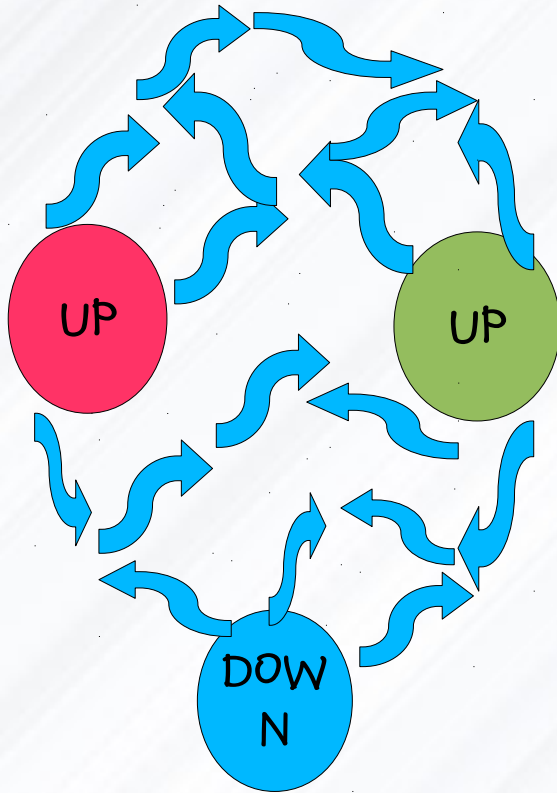
Une perturbation s'y propage, c'est le boson de Higgs, qui disparaît (se désintègre) quelques instants après

Une particule ressemblant fortement au boson de Higgs a été découverte récemment au CERN (annoncée le 4 juillet). Elle a une masse environ 130 fois plus grande que celle d'un proton.



La masse de notre matière

Elles correspondent essentiellement à la masse des noyaux.



Or la masse d'un noyau est principalement la somme des masses des neutrons et des protons qu'il contient (un peu moins).

Mais en raison de leur multitude, la masse d'un proton ou d'un neutron correspond à la somme de l'énergie portée par leurs gluons.

Conclusion : l'essentielle de la masse de notre matière provient de l'énergie portée par les gluons piégés dans nos protons et nos neutrons.

À quoi servent les accélérateurs de particules

Ce sont les microscopes les plus puissants :

microscope optique $R = 0,2 \mu\text{m}$

microscope électronique $R = 1 \text{ nm}$

LHC $R = 10^{-20} \text{ m} = 10^{-11} \text{ nm}$ (cent-milliardième de nanomètre)

Ce sont des fabriques de particules lourdes et instables

Les bosons W, Z, (1983) le quark top (1995).....

le LHC (2012) : un nouveau boson (de Higgs?) avec une masse voisine de 125 GeV (130 fois la masse d'un proton)

accélérateur de particules

Une masse accélère en chutant dans un champ de pesanteur



g

1 eV = énergie acquise par une charge $|e|$ qui descend une DDP de 1 V

LHC : 7 milliers de milliards d' eV par proton = 7 TeV

L'énergie stockée dans le LHC = énergie cinétique d'un A320 à 660 km h⁻¹

+



Une charge électrique positive accélère en descendant un champ électrique

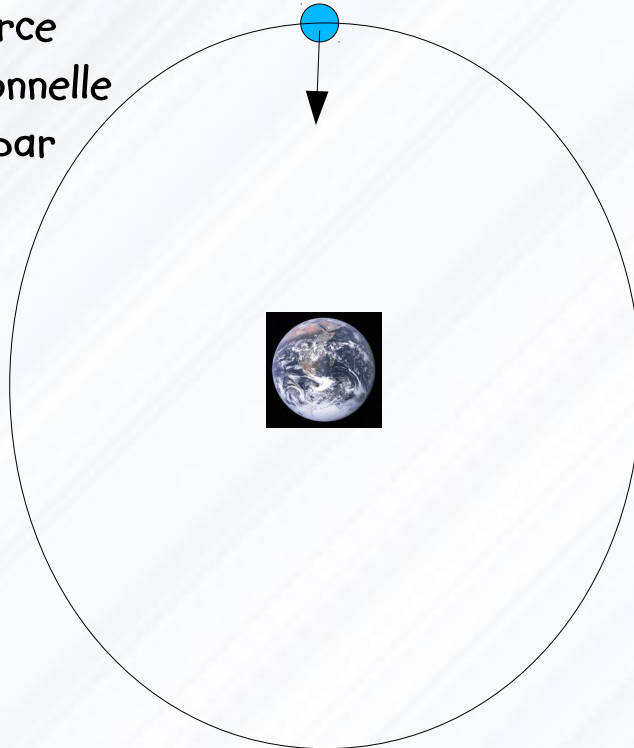
créé par une différence statique ou dynamique de potentiels

\vec{E}



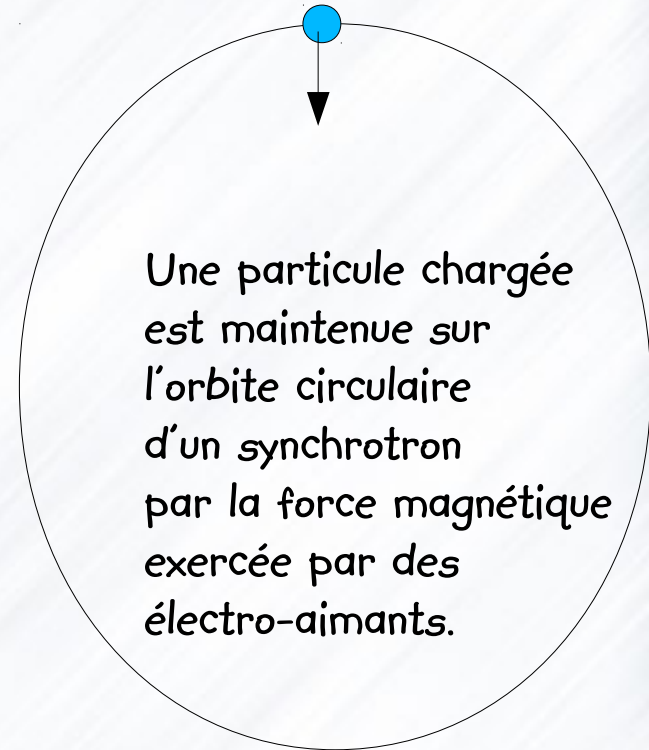
Accélérateurs

Un satellite est maintenu en orbite par la force gravitationnelle exercée par la terre.



Pour garder un proton de 7 TeV sur une orbite de 4 km de rayon il faut un champ magnétique de 8,4 T.

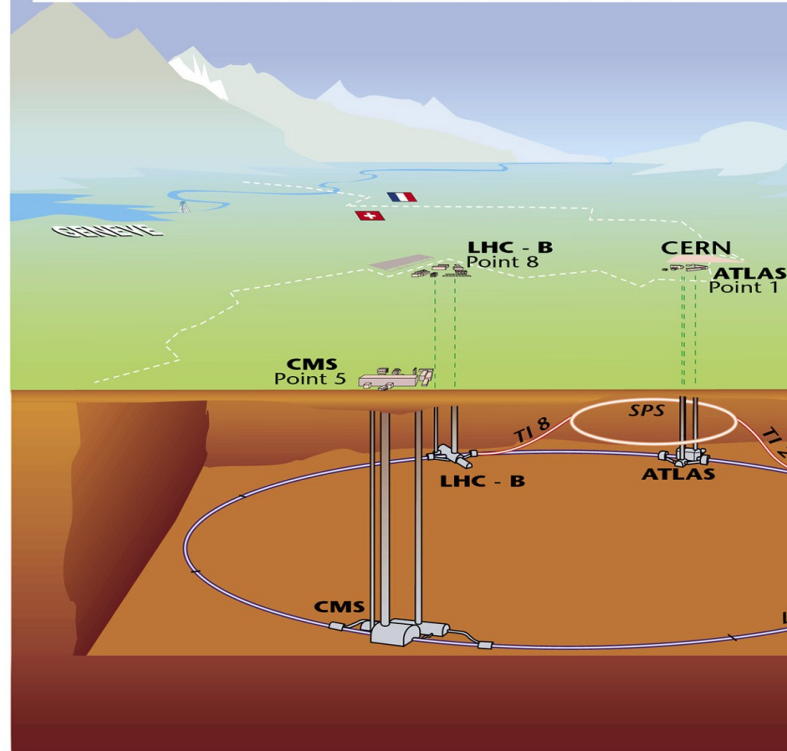
Une particule chargée est maintenue sur l'orbite circulaire d'un synchrotron par la force magnétique exercée par des électro-aimants.



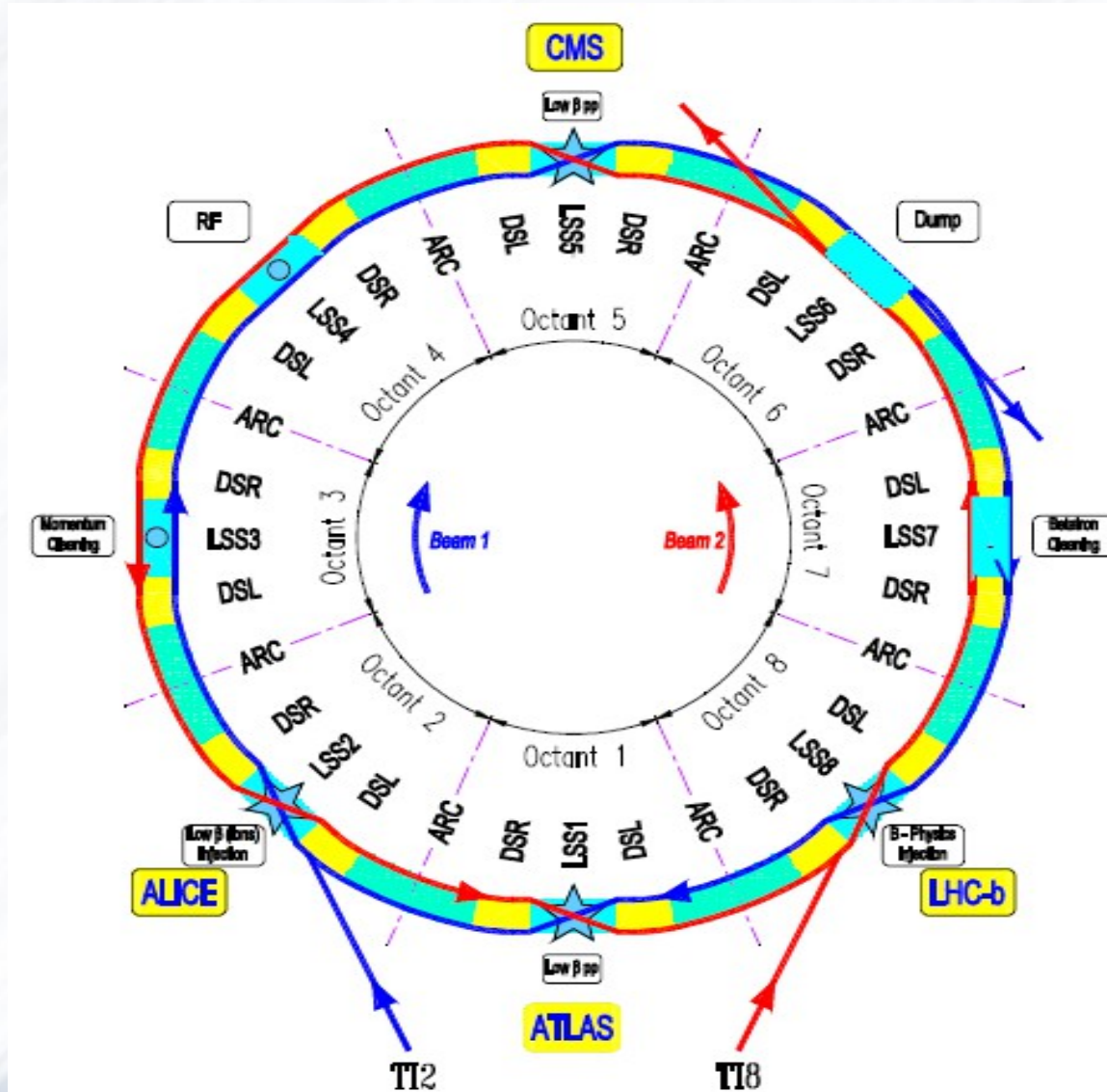
Le LHC fonctionne avec 1232 aimants supraconducteurs de 15m de long chacun, refroidis à la température de 1,8 K (-271,4 °C)

Large Hadron Collider (Grand Collisionneur Hadronique)

Overall view of the LHC experiments.



LHC



Détecter les particules instables

Technique du vase brisé : si un archéologue recueille suffisamment de fragments d'un vase brisé, il peut en reconstituer le modèle original.

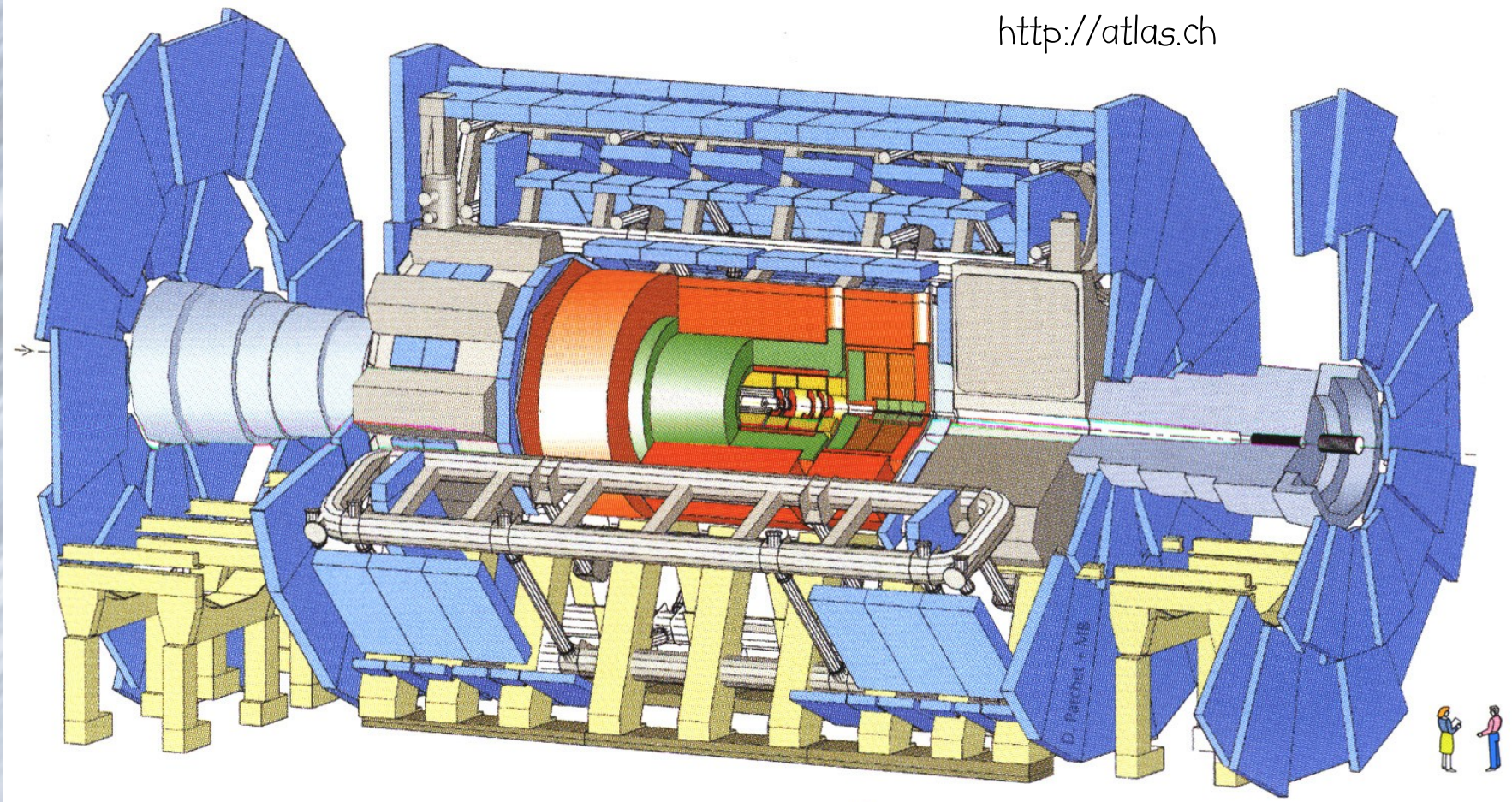
Si un physicien perspicace mesure suffisamment de produits de la désintégration d'une particule très instable, il peut par un calcul simple reconstituer la particule d'origine.

Au LHC, il peut y avoir plusieurs milliers de particules produites toutes les 25 ns, et un seul boson de Higgs toutes les 10 secondes ...

LHC : rechercher une aiguille brisée dans une meule de foin !

ATLAS

<http://atlas.ch>



Collaboration de 3000 scientifiques (dont 1000 étudiants) travaillant dans 174 universités et laboratoires répartis dans 38 pays du monde



Historique : La science c'est aussi l'école de la patience !

1964 : publication du mécanisme de Higgs par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs

1967 : théorie complète pour toutes les particules élémentaires , Steven Weinberg

1973 : première preuve expérimentale de la validité de cette théorie apportée par l'expérience GARGAMEL du CERN conduite par André Lagarrigue

1989-2000 : le boson de Higgs est recherché sur le collisionneur LEP au CERN sans succès

1992-2011 : le boson de Higgs est recherché sur le collisionneur Tevatron aux USA sans succès

1983 : premier groupe de réflexion sur l'intérêt de la construction du LHC dirigé par Carlo Rubbia

1984-1998 : phase de conception du LHC et de ses détecteurs

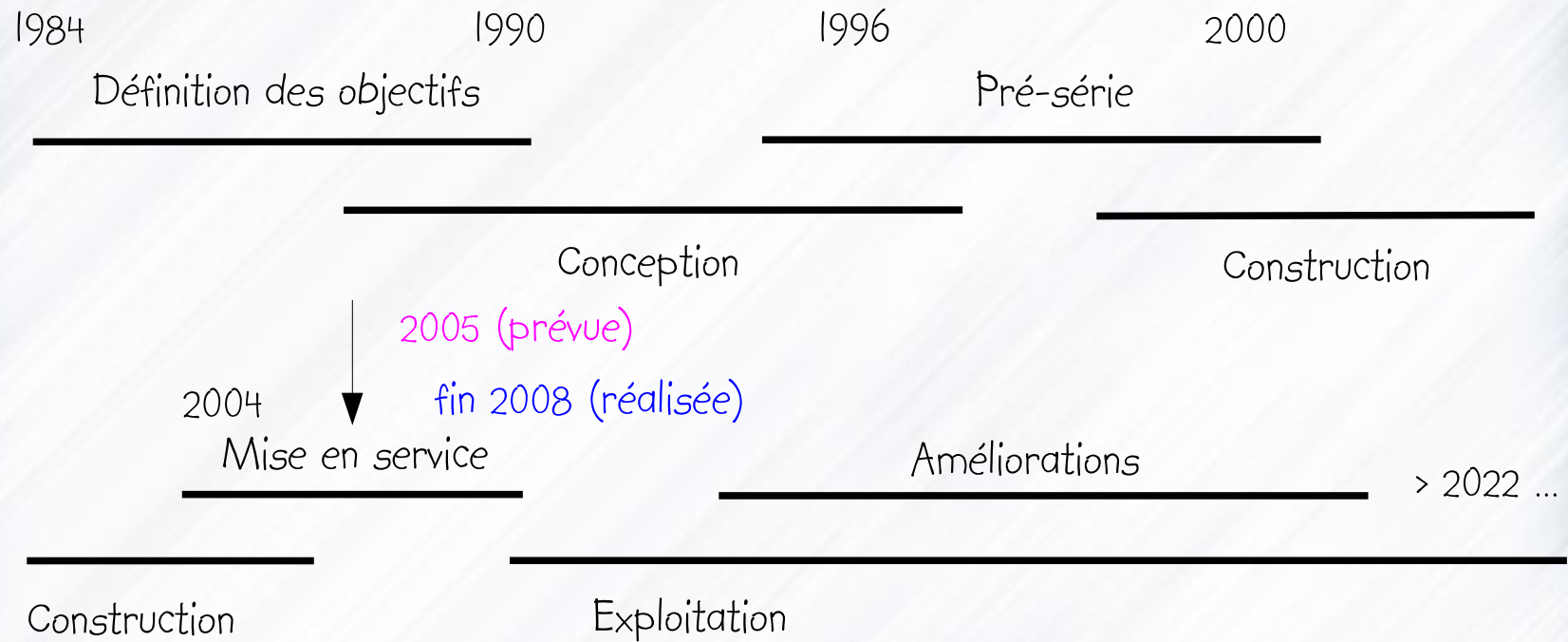
1994 : Approbation officielle de la construction du LHC

1998-2008 : phase de construction du LHC et de ses détecteurs

2012 : découverte au LHC d'une particule compatible avec le boson de Higgs

L'exploitation du LHC devrait se poursuivre bien au-delà de 2020 ...

Les phases du projet ATLAS



Coût estimé du projet

accélérateur : ~3000 MCHF , ~2500 M€

les détecteurs : ~1500 MCHF , ~1250 M€

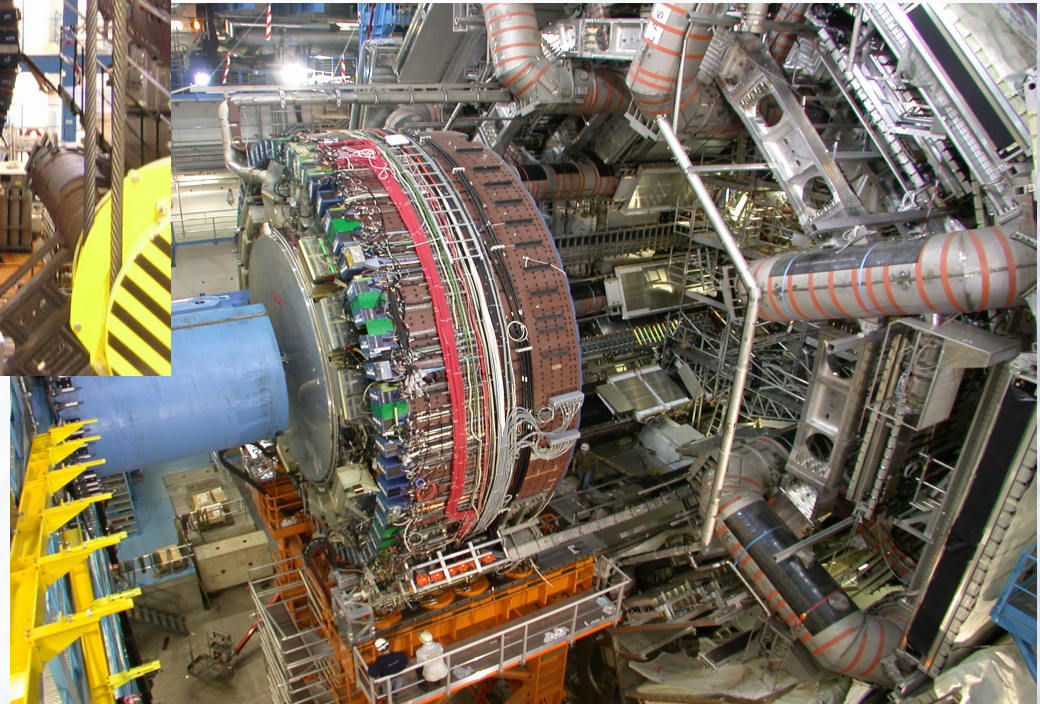
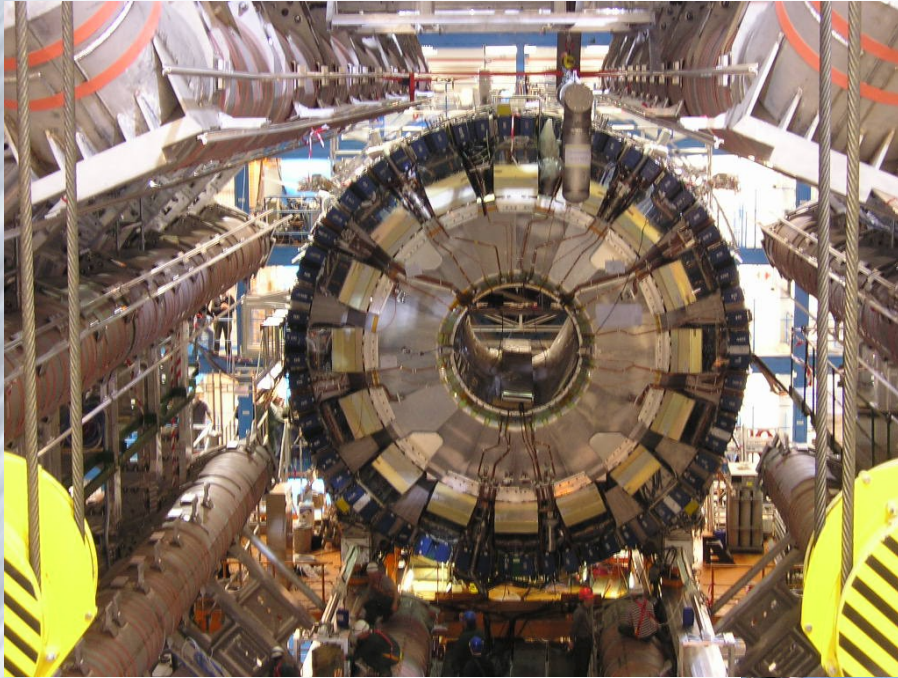
total : ~4500 MCHF , ~3750 M€

ressources humaines : ~ 70000 personne.ans

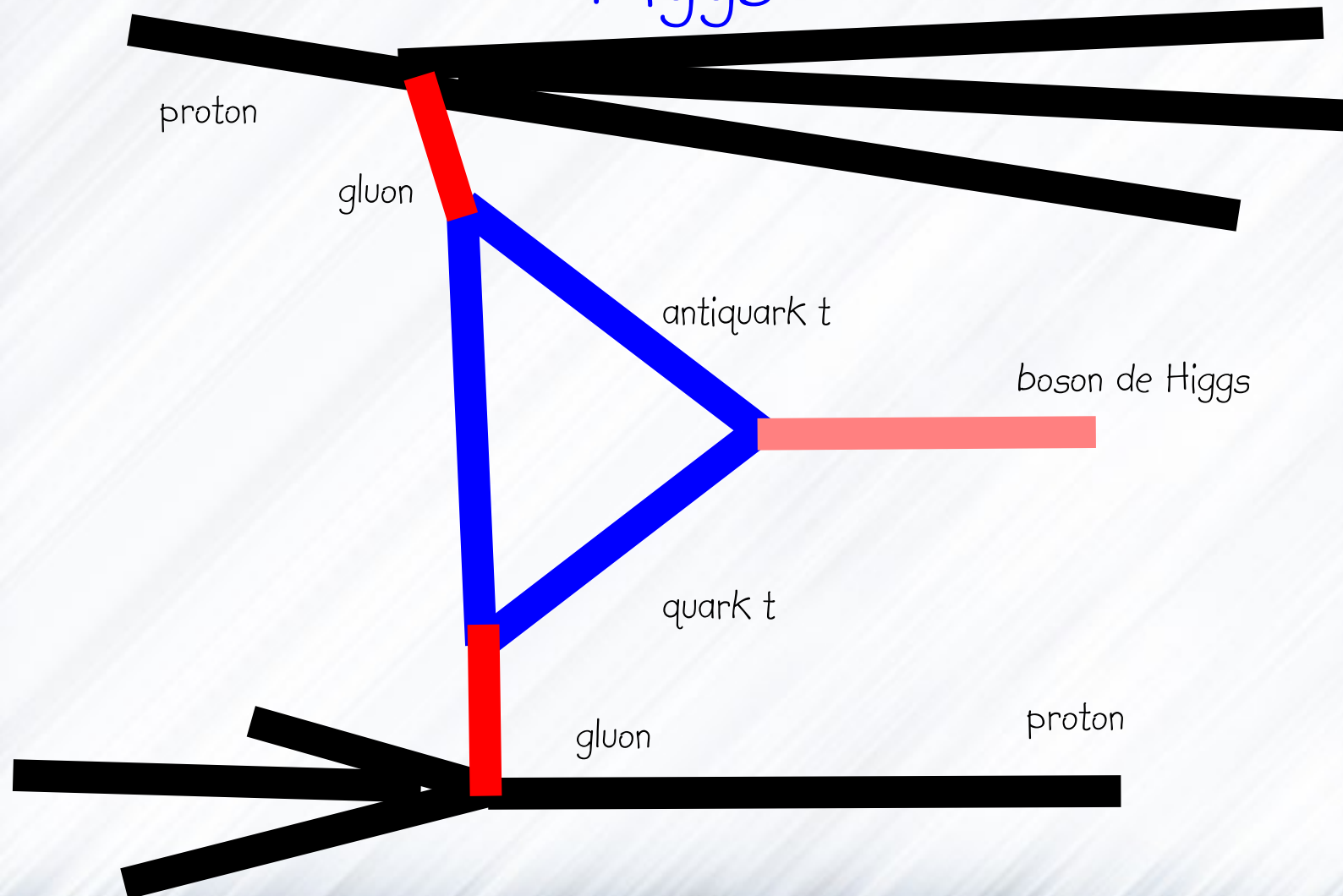
investissement de 55 k€/scientifique/an durant la phase de conception et de construction

On peut ajouter une somme comparable pour les salaires

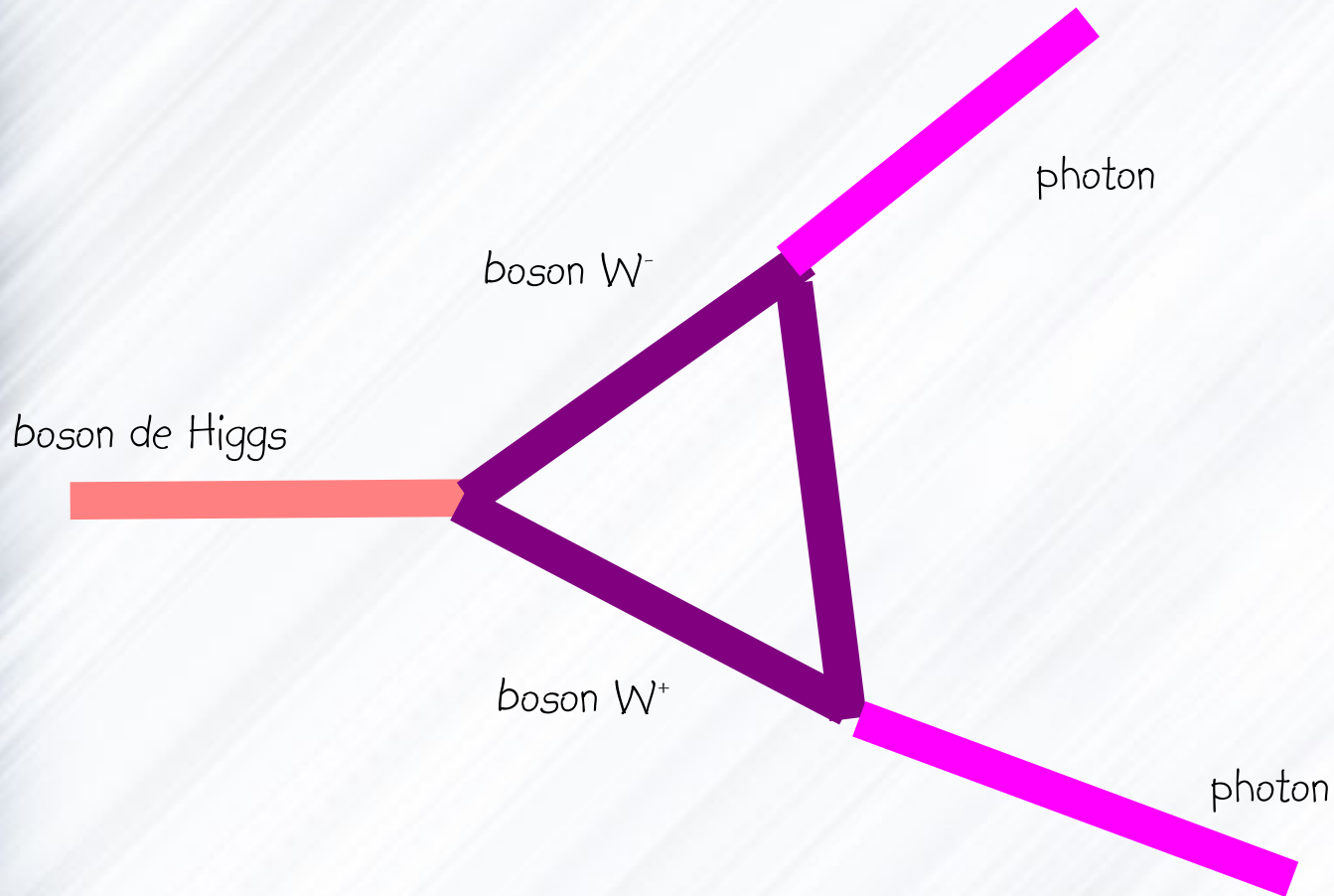
ATLAS



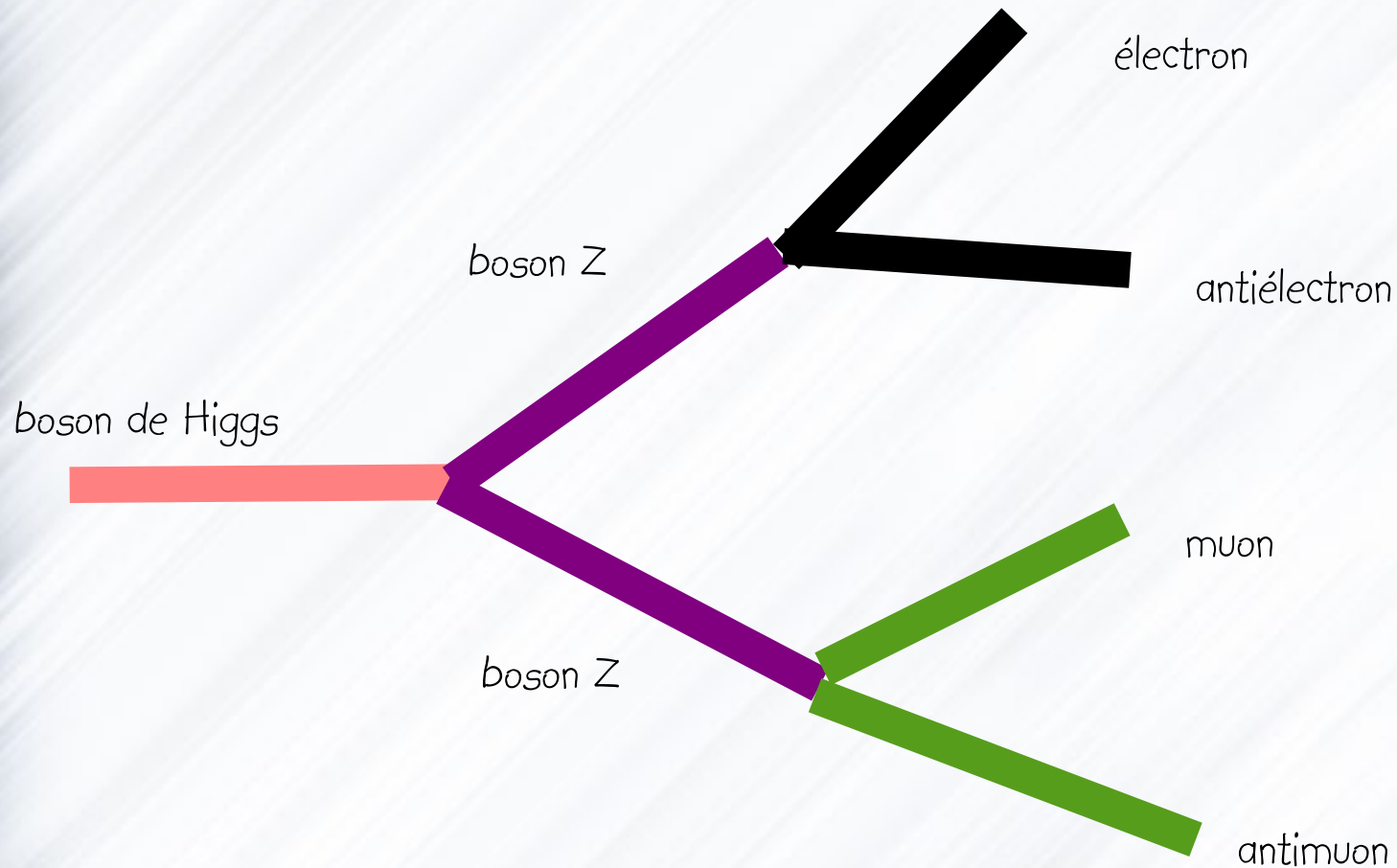
Comment exciter/produire un boson de Higgs



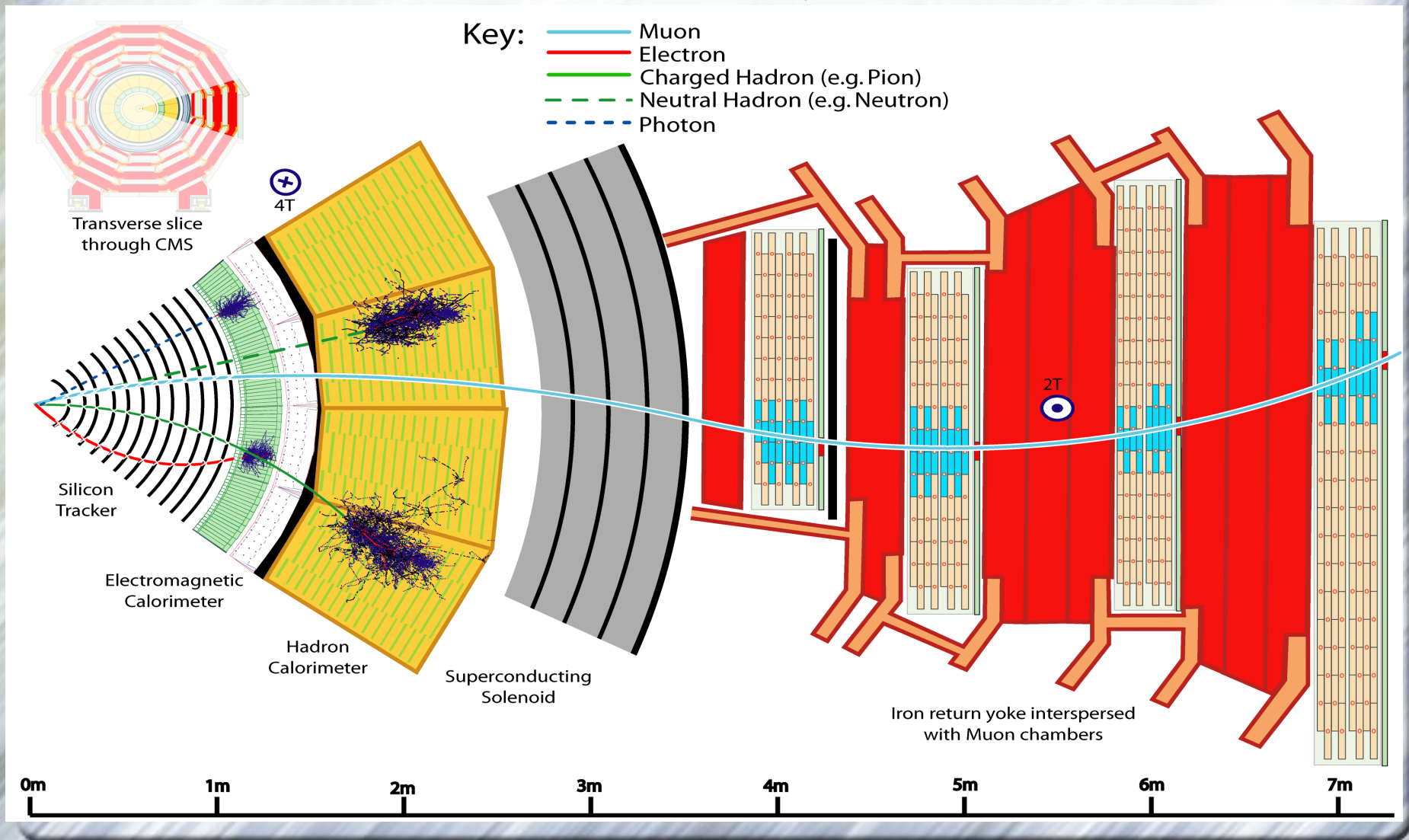
Désintégration du boson de Higgs



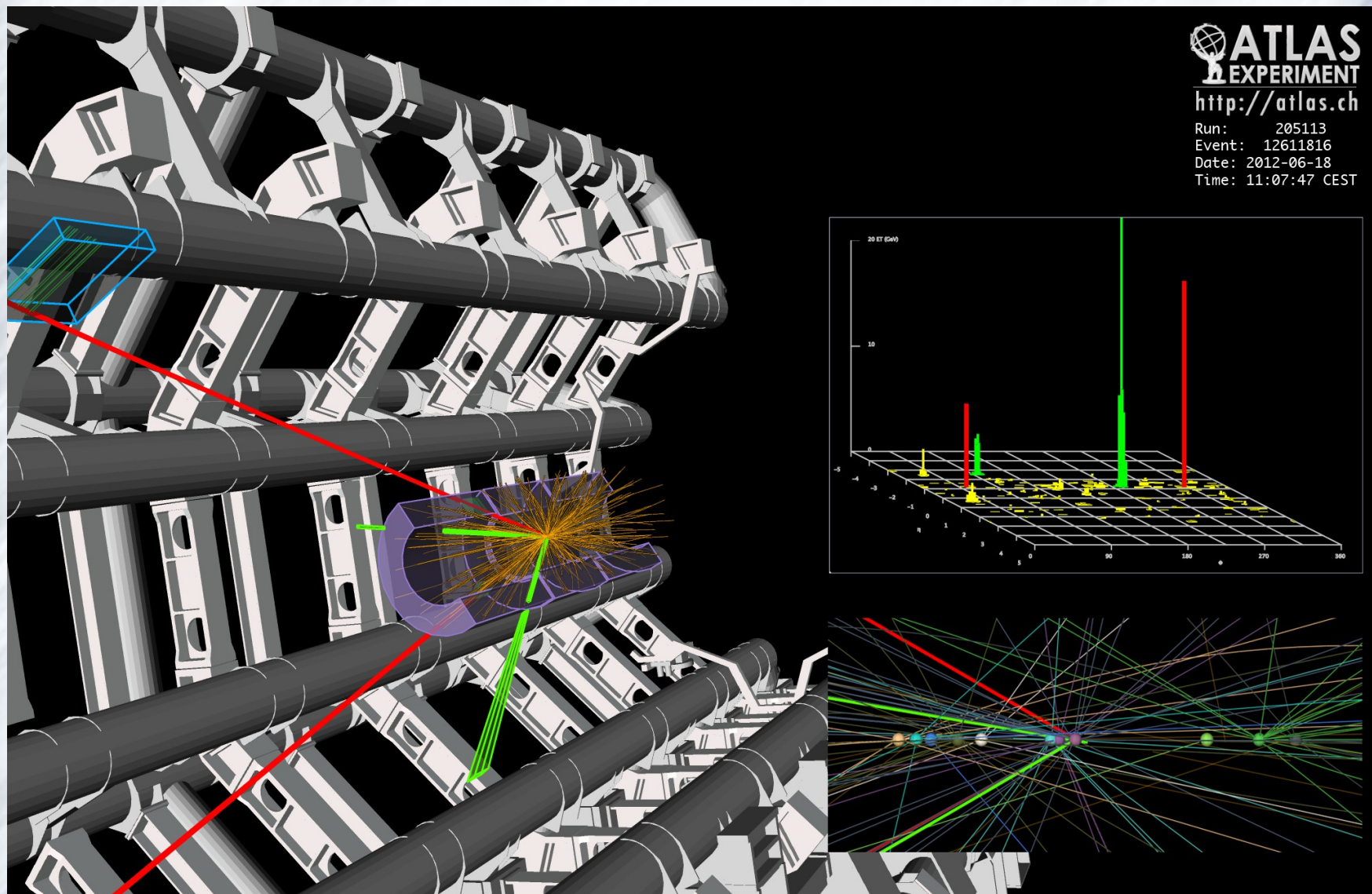
Autre désintégration du boson de Higgs



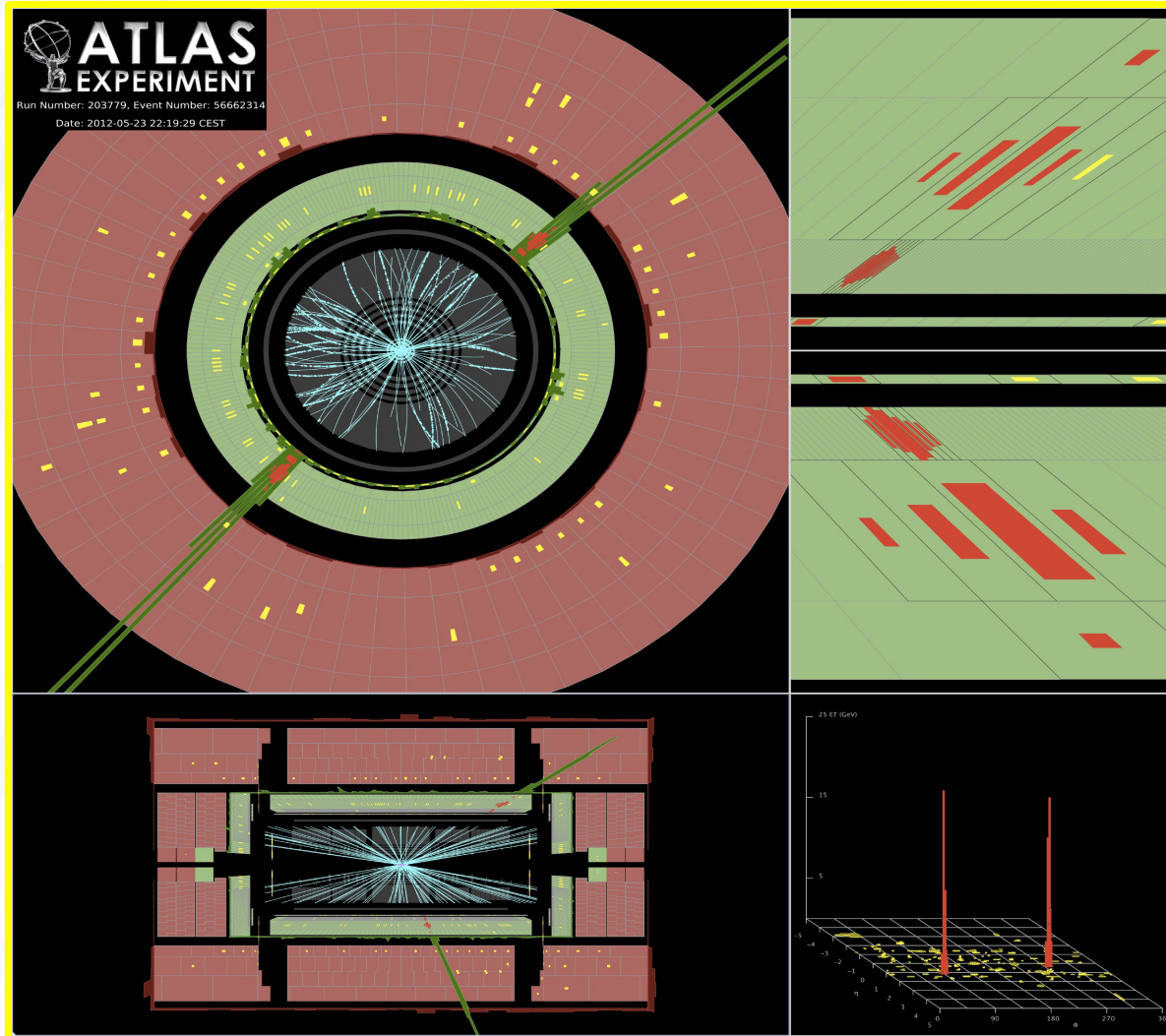
Comment détecter les particules élémentaires

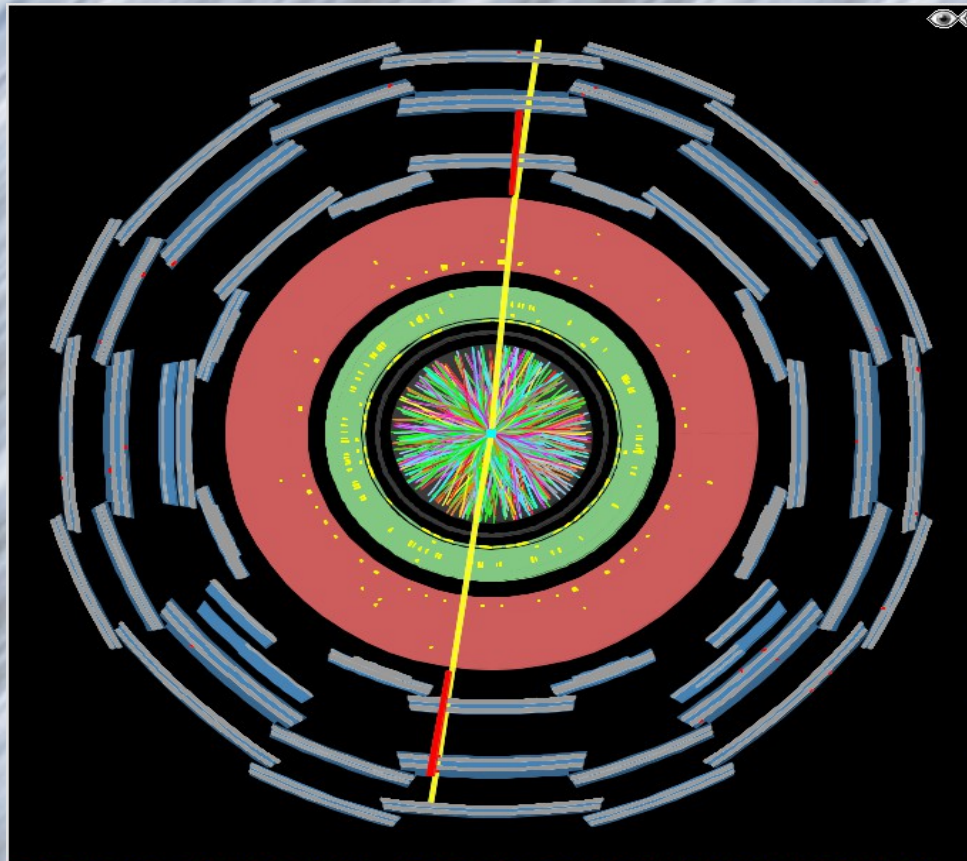


Higgs se désintégrant en un électron, un antiélectron, un muon et un antimuon



Higgs se désintégrant en deux photons

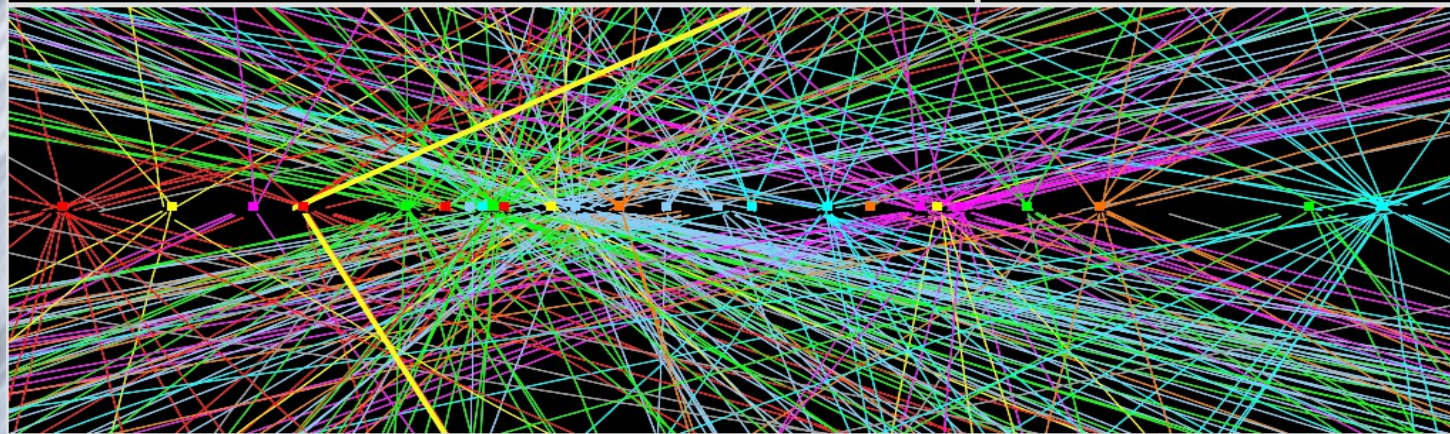
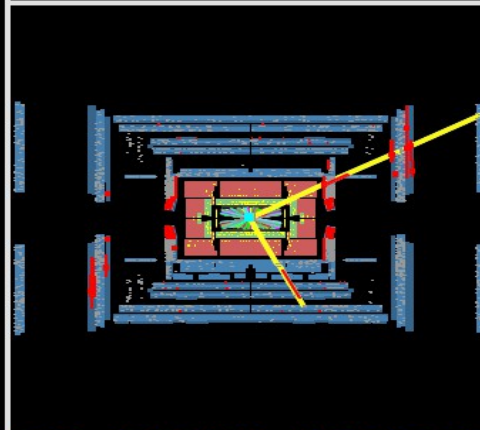




ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 201289, Event Number: 24151616

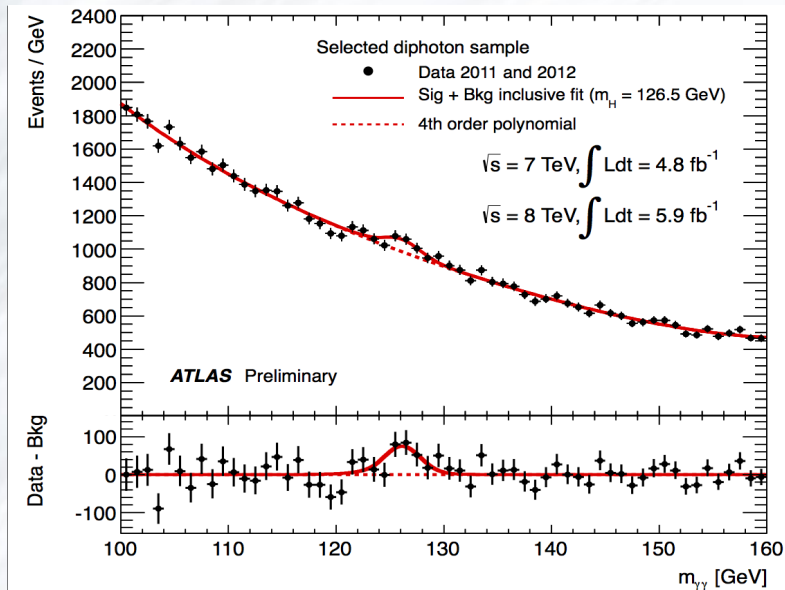
Date: 2012-04-15 16:52:58 CEST



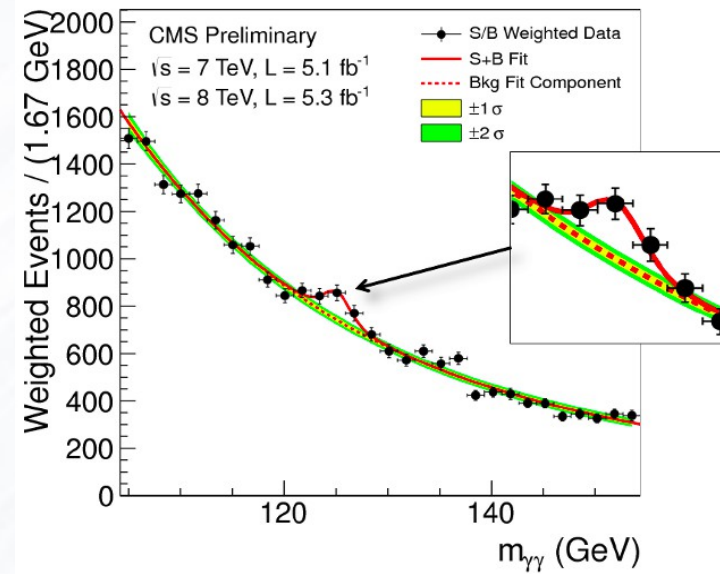
Un boson Z
parmi
25 collisions
de protons !

La découverte

Observation d'ATLAS

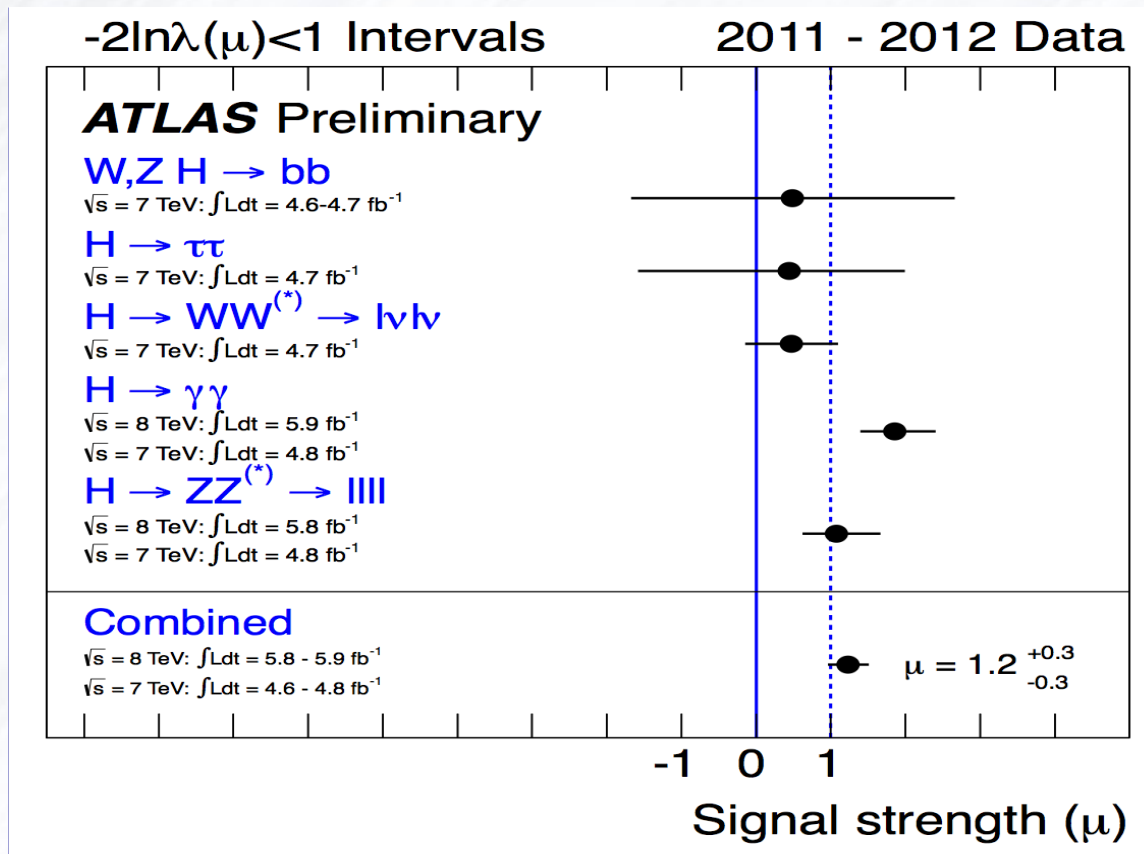


Observation de CMS



Ici, la découverte s'appuie sur le fait que la même particule est observée avec un niveau de confiance statistique élevé (plus de 5 écarts types) et par deux instruments différents exploités par deux collaborations indépendantes.

Est-ce réellement le boson de Higgs ?



C'est très probable mais pas encore certain !

La découverte

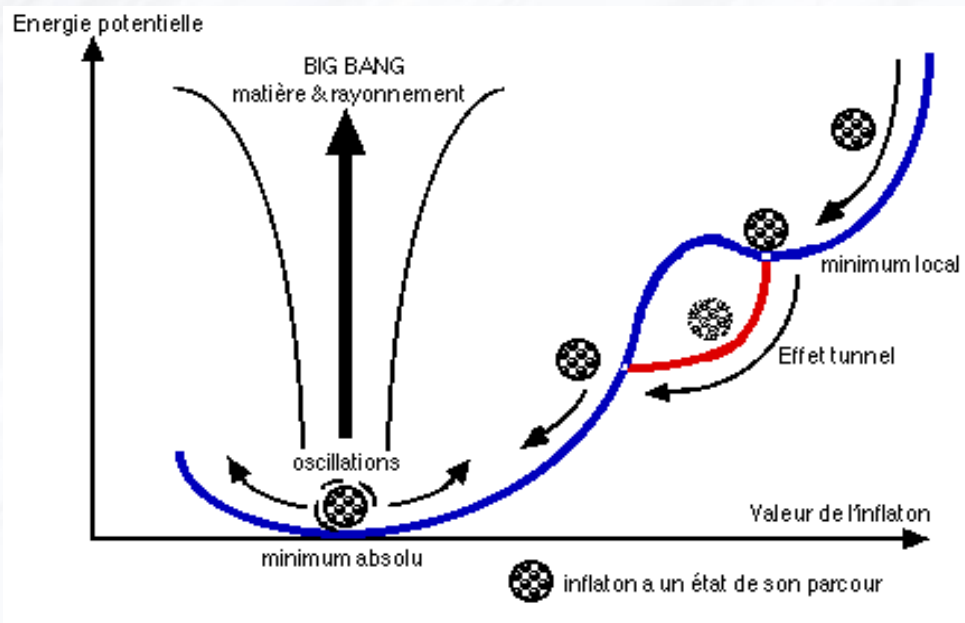
Un nouveau boson d'une masse proche de 126 GeV a été découvert au CERN.

Cette particule a été observée par ATLAS et CMS. Elle est compatible avec les données du Tevatron aux USA.

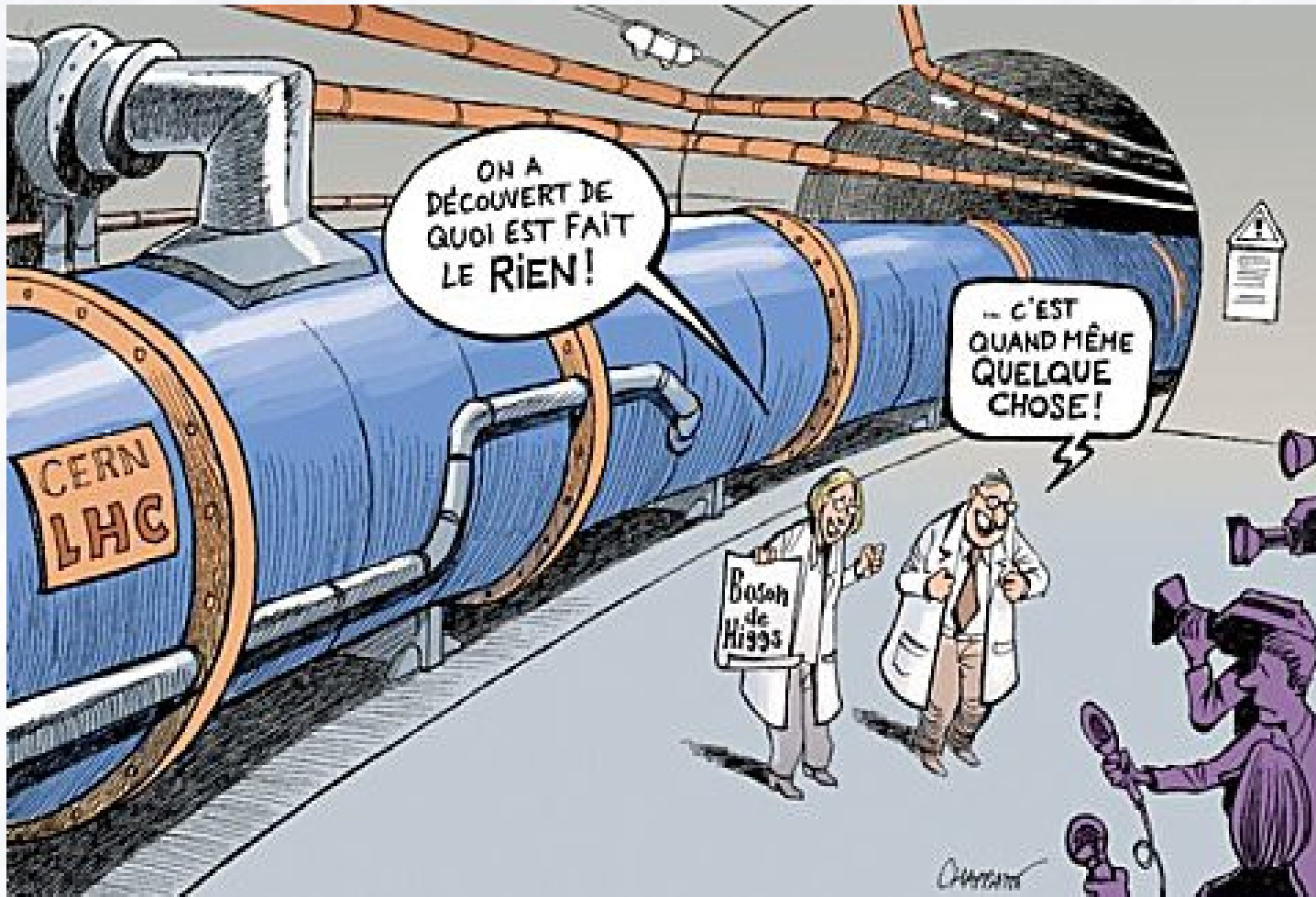
Ses propriétés mesurées sont compatibles avec celles du boson de Higgs de la théorie standard, mais plus de données sont nécessaires pour en être sûr.

Ces données devraient être acquises avant fin février 2013.

D'autres champs scalaires ?



L'Inflaton qui pourrait expliquer la phase inflationniste initiale de notre univers ...



Dessin de Chappatte