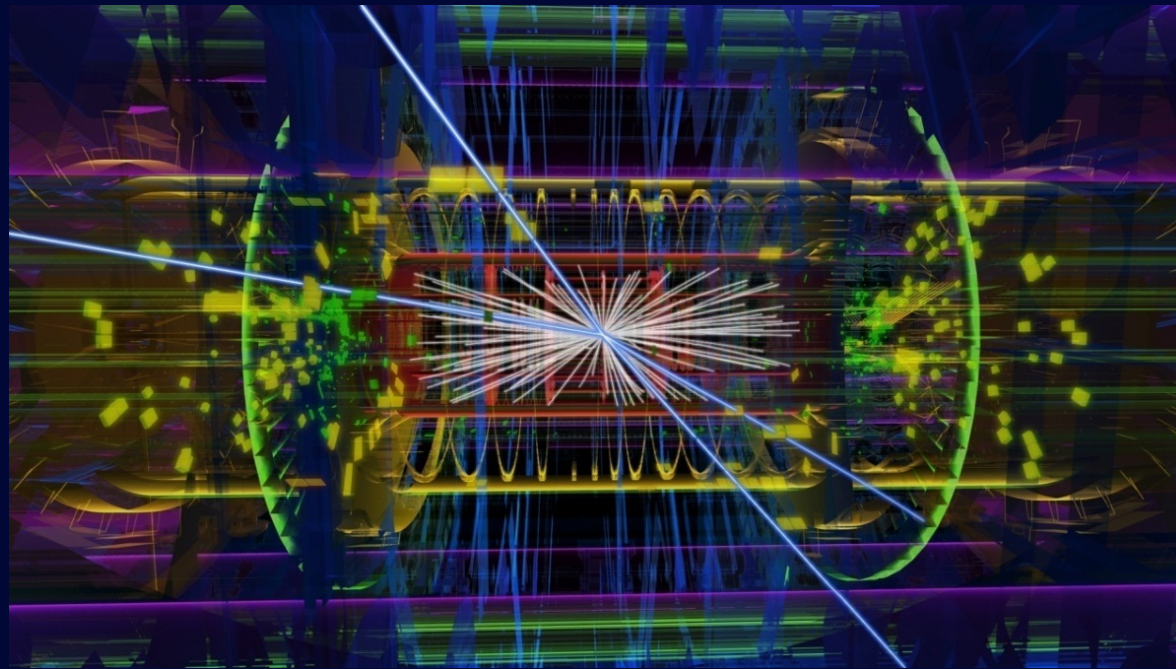


Le LHC et la quête du boson de Higgs: une aventure hors du commun



Irena Nikolic, Lpnhe et Université Paris Diderot,
8 fev 2013, Lycée Janson de Sailly

Physique des particules élémentaires

Particules élémentaires : blocs fondamentaux = sans sous structure

Interactions: ce qui les fait tenir ensemble

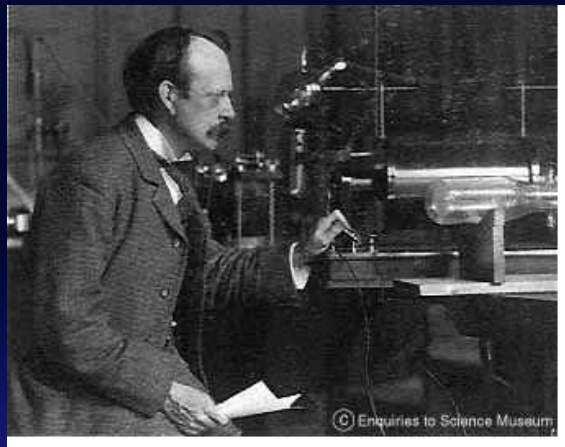
La physique des particules décrit la matière qui nous entoure, mais aussi celle qui a été créée au **Big Bang**

appelée aussi **physique des hautes énergies** car nécessite des **accélérateurs**

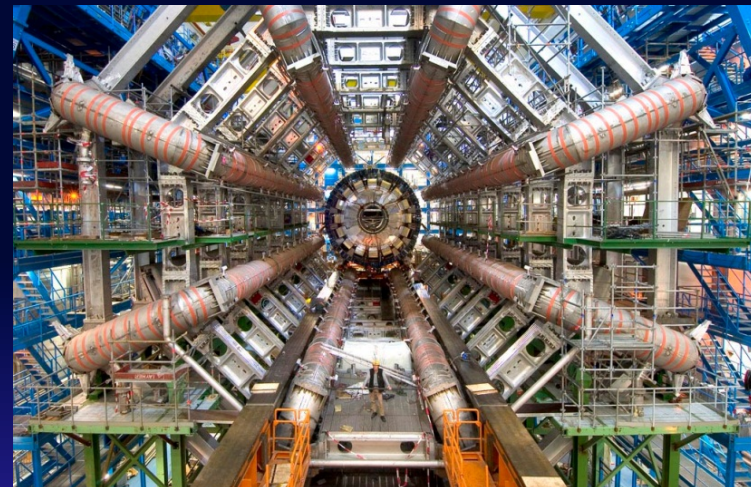


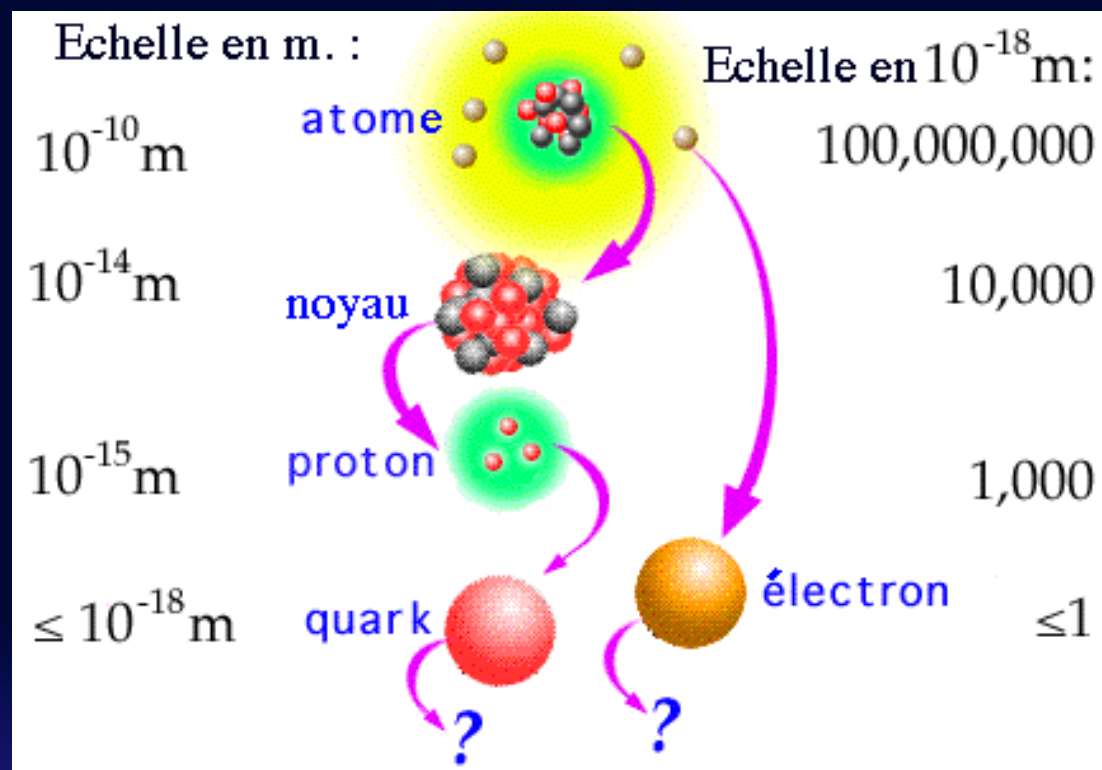
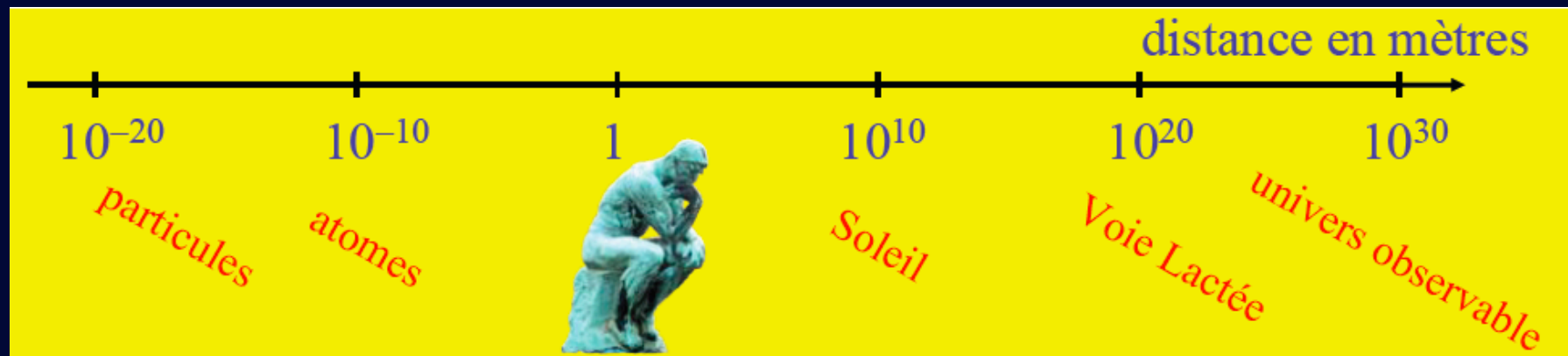
La physique des particules : une discipline très jeune

- ✓ 1897: **électron**
- ✓ 1918: **proton**
- ✓ 1932: **neutron** (1932), **anti-électron** (1932) et postulat de l'existence du **neutrino**
- ✓ Entre 1937 et 1948 : nouvelles particules dans les **rayons cosmiques** (production non contrôlée)
- ✓ A partir de 1948 : ère des **accélérateurs** ⇒ nombreuses particules découvertes

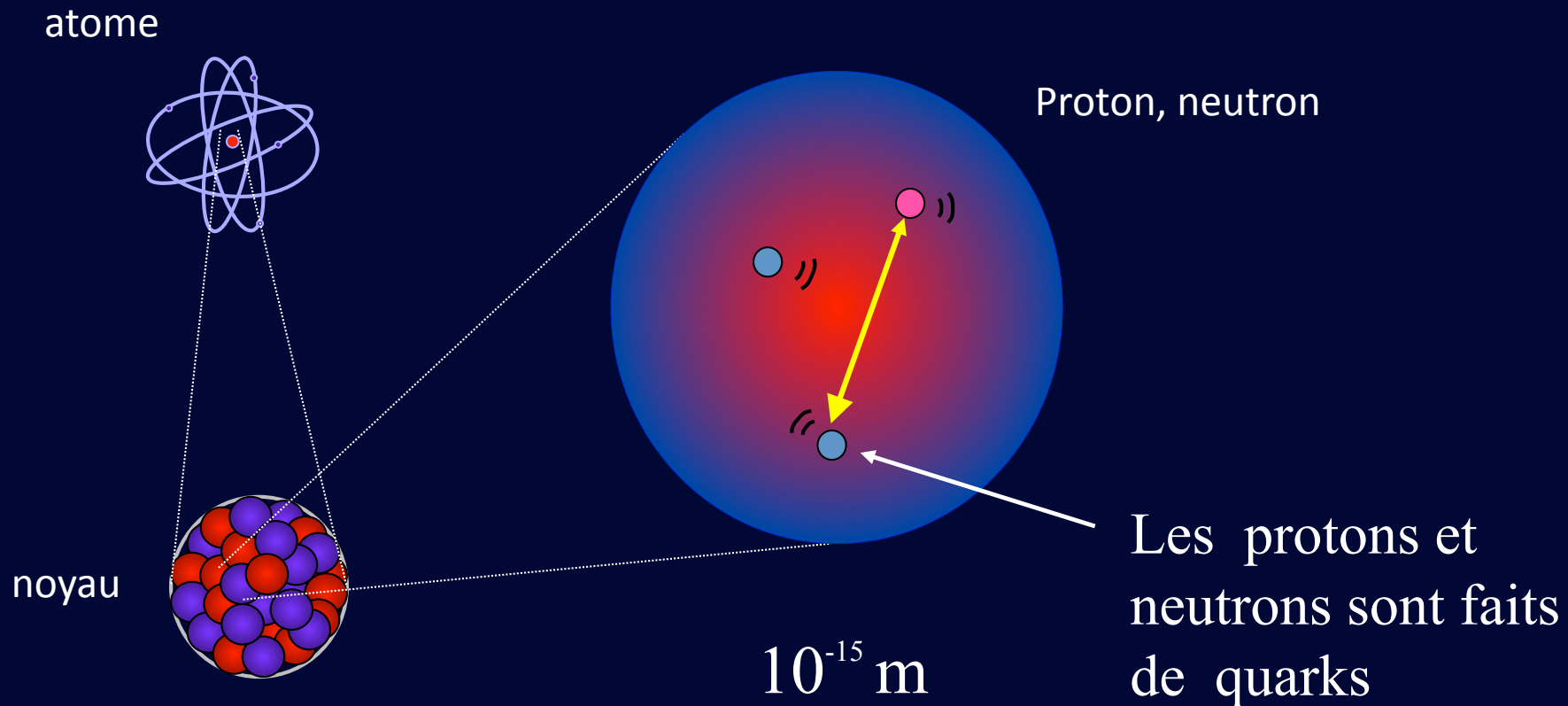


100 ans





Découverte des quarks (~1960)

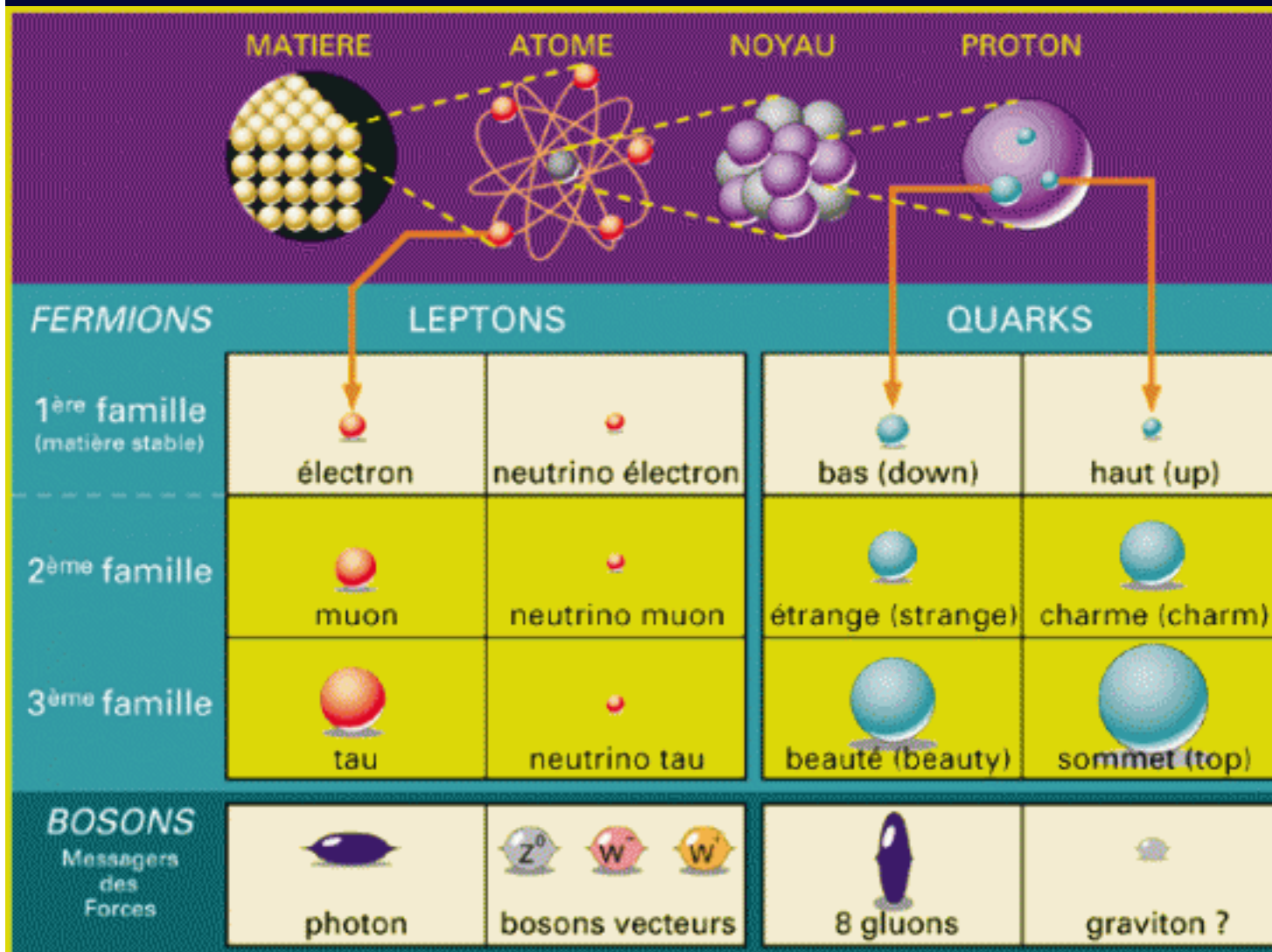


Quarks légers : u (up) et d (down) forment la matière ordinaire.

proton = uud, **neutron** = udd. On n'observe jamais un quark seul.

Hadrons: particules faites de quarks

Particules élémentaires (sans sous-structure)



Matière ordinaire
= famille 1

Particules des
familles 2 et 3:

- Très instables → Disparition une fraction de seconde après le Big Bang.
- Produites dans collisions à très haute énergie

Accomplissement du 19^{ème} siècle

Tableau périodique des éléments
de **Mendeleïev**

Accomplissement du 20^{ème}

Le Modèle Standard de la
Physique des particules

Legend:

- Alkali Metals (Red)
- Alkaline Earth Metals (Orange)
- Transition Metals (Yellow)
- Other Metals (Light Green)
- Nonmetals (Dark Green)
- Noble Gases (Blue)
- Inner Transition Metals (Purple)
- Gaseous State (E)
- Liquid State (E)
- Solid State (E)
- Synthetically Prepared (E)

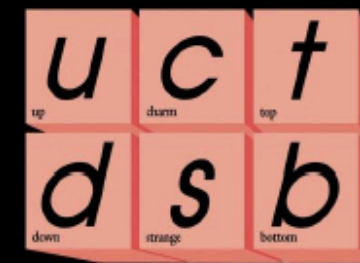
Table Structure:

- Groups:** IA, IIA, IIIB, IVB, VB, VIB, VIIB, VIIIB, IIB, IIIA, IVA, VA, VIA, VIIA, VIIIA.
- Periods:** 1 to 7.
- Atomic Numbers:** 1 to 118.
- Atomic Weights:** Provided for many elements.
- Lanthanide Series:** La (57) to Lu (71).
- Actinide Series:** Ac (89) to No (102).

*Name Not Officially Assigned

Standard Model

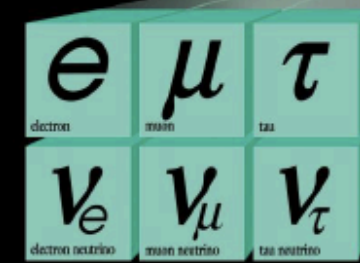
Quarks



Forces



Higgs



Leptons

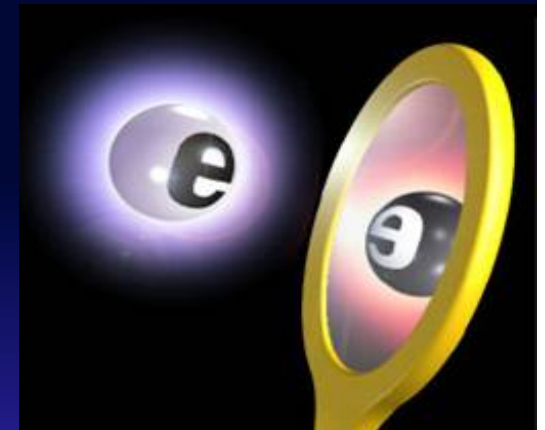
Particules et antiparticules

- A toute **particule** est associée une **antiparticule**
 - Masse, temps de vie, spin identique
 - Charge et nombres quantiques opposés

- L'électron e^-
 - Charge négative
 - e^- : plus ancienne particule élémentaire

- Le positron e^+
 - Charge positive
 - e^+ : Existence prédite par Dirac (1928), découverte par Anderson (1932)

- Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, elles **s'annihilent et donnent de l'énergie**.
- De cette énergie peuvent à nouveau **émerger d'autres particules** grâce à $E=mc^2$.



Remarque sur les unités

- Nouvelle unité pour l'énergie:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \text{ et ses multiples MeV, GeV}(10^9), \text{ TeV } (10^{12})$$

- équivalence entre l'énergie (au repos) et la masse de la particule

$$E = m c^2$$

Masses des particules élémentaires en énergie/ c^2

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1 \text{ GeV}/c^2, \text{ fait de quarks uud}$$

$$m(\text{up}) \sim 2,4 \text{ MeV}/c^2, m(\text{down}) \sim 4,8 \text{ MeV}/c^2 \dots \text{ il y a autre chose}$$

dans le proton

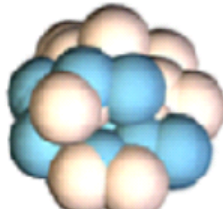
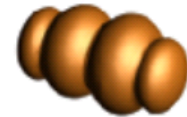
Les 4 interactions

FORTE

Gluons (8)

Quarks

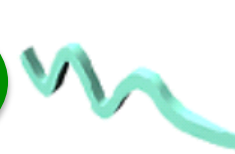
Mesons
Baryons



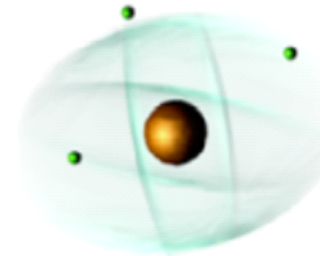
Nuclei

Electromagnetic

Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics



Gravitational

Graviton ?

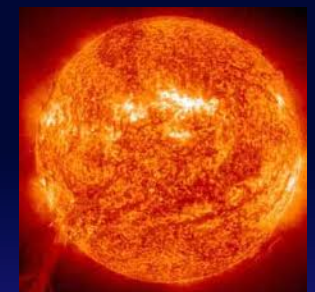
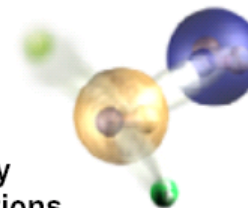
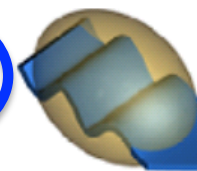
Solar system
Galaxies
Black holes



FAIBLE

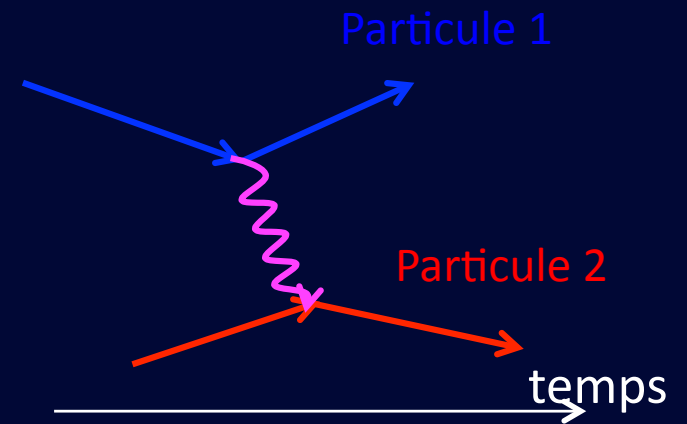
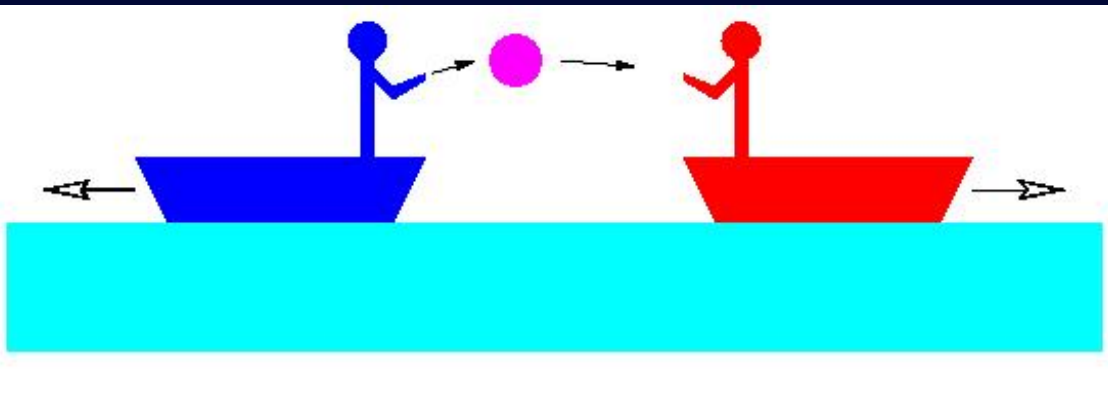
Bosons (W,Z)

Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun



Dans la physique de l'infiniment petit les interactions se font via **l'échange de particules** appelées les bosons d'interaction ou « messagers »

Interagir = échanger



Représentation d'une interaction:
Graphe de Feynman

- Les **ballons** sont les **médiateurs** de la force qui écarte les 2 bateaux.
- **Photon**: médiateur de l'interaction électromagnétique
- **Bosons W, Z**: pour l'interaction faible
- **gluons**: pour l'interaction forte

Le Modèle Standard

- Décrit dans un même cadre **les particules élémentaires** et **leurs interactions** :

Électromagnétique (le photon)

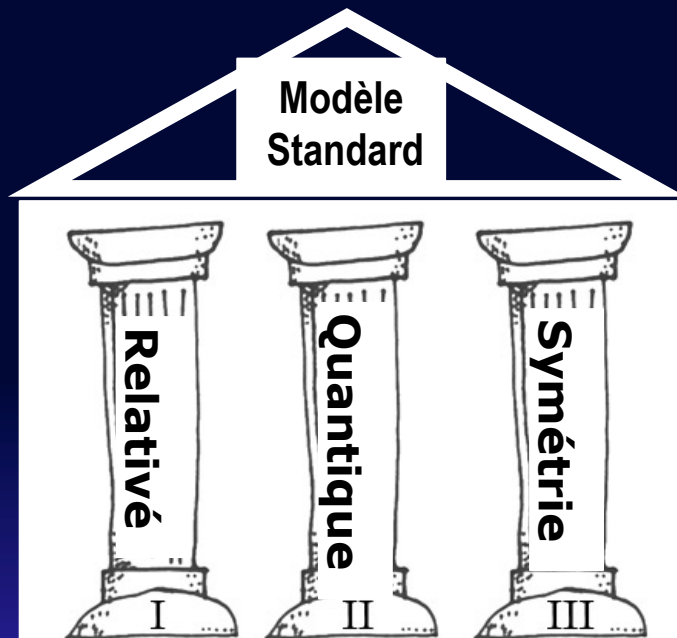
Faible (W et Z)

Forte (les gluons)

unifiés en électrofaible

mais pas la gravitation ☹

- Elaboré dans les années 1960-70 et testé avec une **très grande précision** aux accélérateurs de particules depuis 30 ans.
- **Basé sur 3 grands piliers**:



- **Relativité**: $E = m c^2$

- **Mécanique Quantique**: description du monde microscopique

- **Symétries**

- ✓ Liés aux lois de conservation (énergie...)
- ✓ liés aux interactions (dites symétries de Jauge)

Le Modèle Standard et la masse

- Le Modèle Standard inclut une description de **l'origine de la masse des particules** à travers un mécanisme, appelé **mécanisme de Higgs**
- La masse n'est pas une propriété intrinsèque des particules, mais le résultat de **l'interaction de la particule avec un nouveau champ: champ de Higgs**

Notion de champ

- Ensemble de valeurs prises par un paramètre physique en différents points de l'espace $M(x, y, z)$.

- Si on associe à chaque point de l'espace:

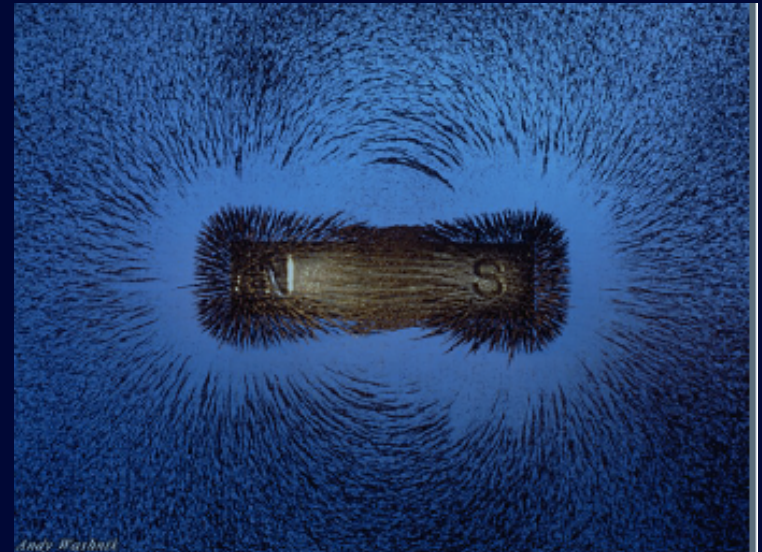
✓ **Un vecteur** (ex: champ magnétique)

- Champ vectoriel $B(x, y, z)$

✓ **Une valeur** (ex: Temperature, Pression, **champ de Higgs**:

- Champ scalaire $\phi(x, y, z)$

- Modèle Standard = Théorie quantique des champs
 - Particules = excitations du champ associé



Le mécanisme de Higgs

- Les W^- , W^+ et Z^0 devraient avoir une **masse nulle** (comme le photon),
or les W^- , W^+ et Z^0 sont **très massifs** (80 M_{Proton})!
- Dans le Modèle Standard, le problème peut être contourné grâce au

« mécanisme de Higgs »

Ce mécanisme de Higgs entraîne l'existence d'un nouveau **champ de Higgs**, qui **donne la masse à toutes les particules existantes** et d'une particule nouvelle: **le boson de Higgs**.

- Mais, cette particule indispensable à la cohérence
du Modèle Standard, restait **introuvable depuis 1964 !!**
- Construction **du collisionneur LHC** au CERN pour le trouver

Le mécanisme de Higgs: une analogie

Le photon: masse nulle car n'interagit pas avec le de champ Higgs



L'électron: petite masse



Le boson W: grande masse car interagit beaucoup



Les conséquences du mécanisme de Higgs

- les bosons vecteurs W^+ W^- et Z^0 acquièrent leur masse, mais pas les photons γ : tout rentre dans l'ordre.
- Ce n'est pas fini: toutes les particules "massives" (leptons et quarks) acquièrent également une masse.
- Et puis, il y a une autre prédiction: une nouvelle particule doit apparaître qui est une "excitation" du champ scalaire:

C'est le boson de "Higgs" !

Mécanisme décrit par Higgs, Brout, Englert, Guralnik, Kibble et Hagen en 1964

Pour la validité du modèle Standard, il fallait absolument découvrir (expérimentalement) ce boson. Recherches depuis 1970

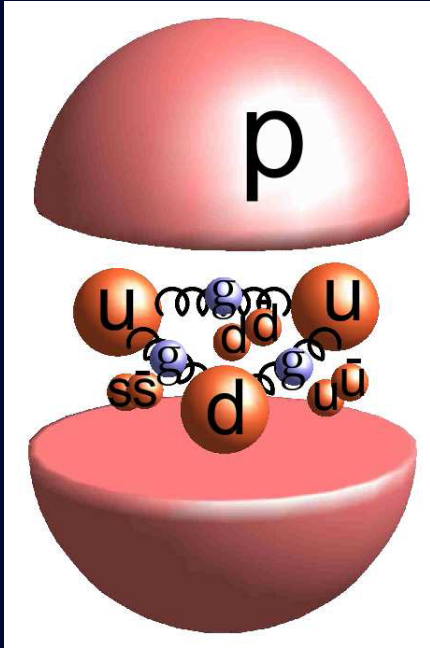
Montage Photo



Higgs Kibble Guralnik Hagen Englert Brout[†]

Higgs n'était pas le seul théoricien à travailler sur ce problème.

Le champ de Higgs & nous



Nous sommes constitués d'atomes, donc de protons & neutrons.

- $m(\text{proton}) \sim 1 \text{ GeV}$
- quarks u, d : quelques MeV (1% de la masse du proton !)

➤ L'essentiel de la masse du proton provient de l'énergie des gluons qui tiennent les quarks entre eux.

➤ Le boson de Higgs n'est pas (directement) responsable (de notre masse !)

Mais le Higgs est fondamental pour notre existence:

- Le Soleil "brûle" lentement en raison de la masse élevée des bosons W .



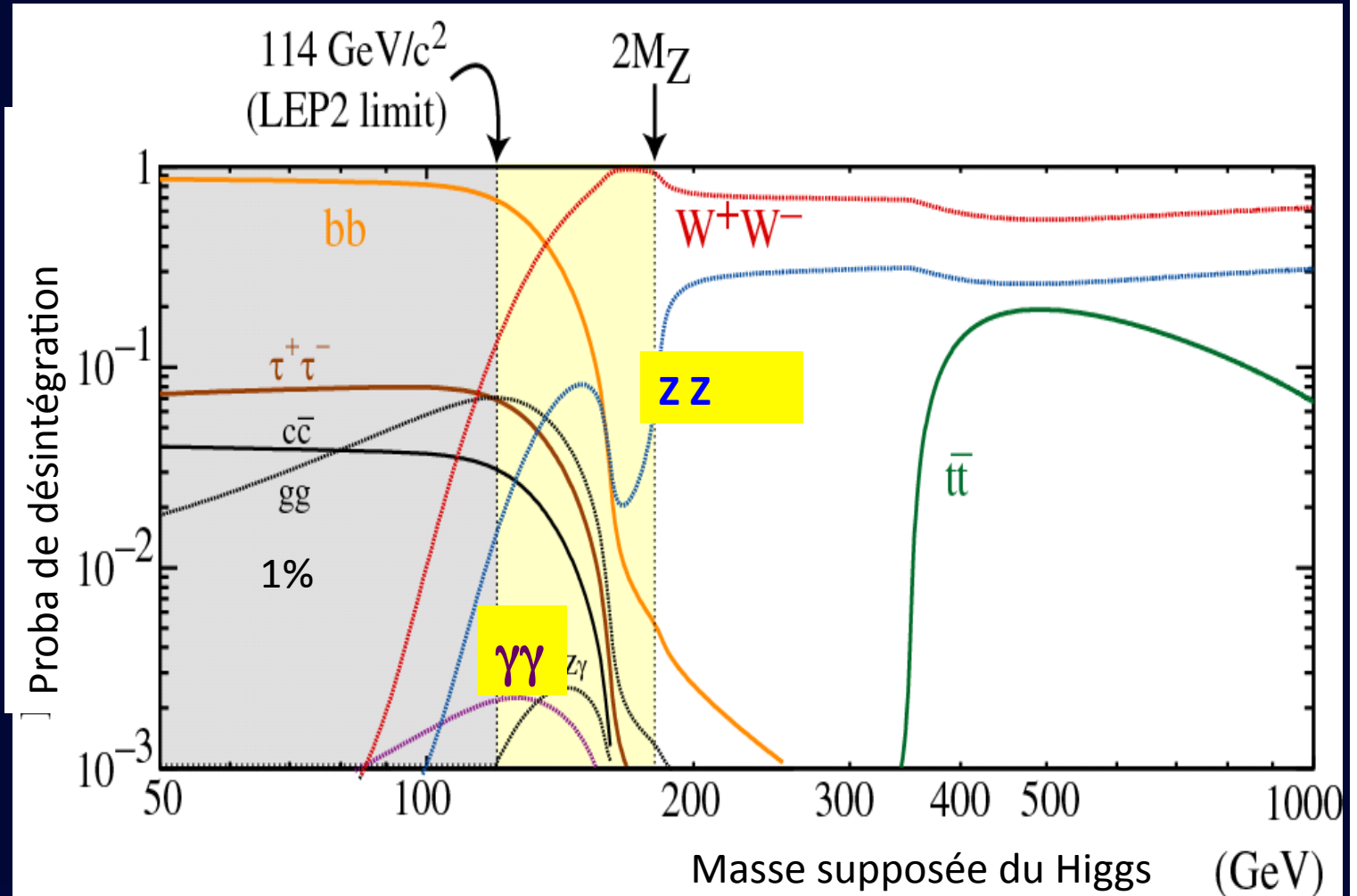
Sans Higgs, $m_W=0 \Rightarrow$ plus de Soleil de nos jours !

Désintégration (quasi immédiate) du Higgs

Désintégration du Higgs en 10^{-22} sec en une paire particule-antiparticule

- Si $m = 126 \text{ GeV}$
57 fois sur 100 en $b\bar{b}$
3 fois sur 100 en $Z Z$
2 fois sur 1000 en $\gamma\gamma$

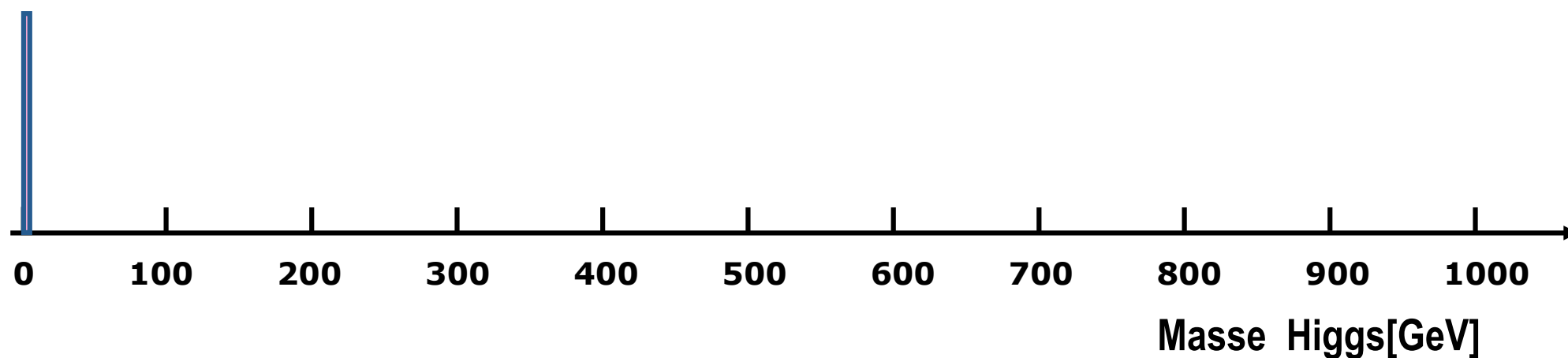
- On cherche des canaux de désintégration différents en fonction de la masse supposée du Higgs



Privilégier des canaux avec un **état final simple** même si ils sont rares: Higgs en 2 photons ou Higgs en ZZ

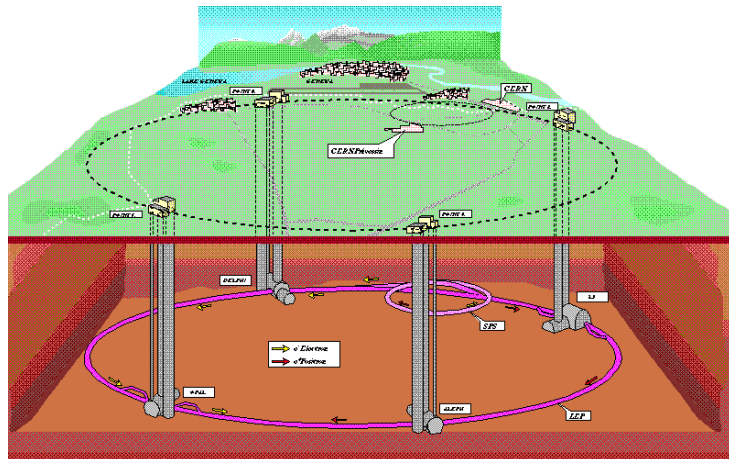
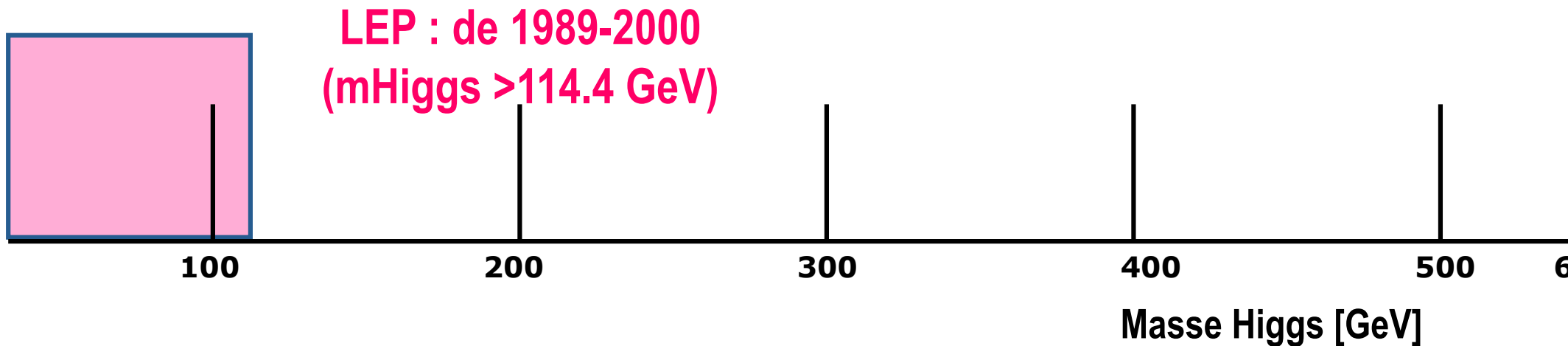
Le boson de Higgs : une longue traque...

$M_H > 18 \text{ MeV}$
(Kohler, Watson & Becker, 1974)



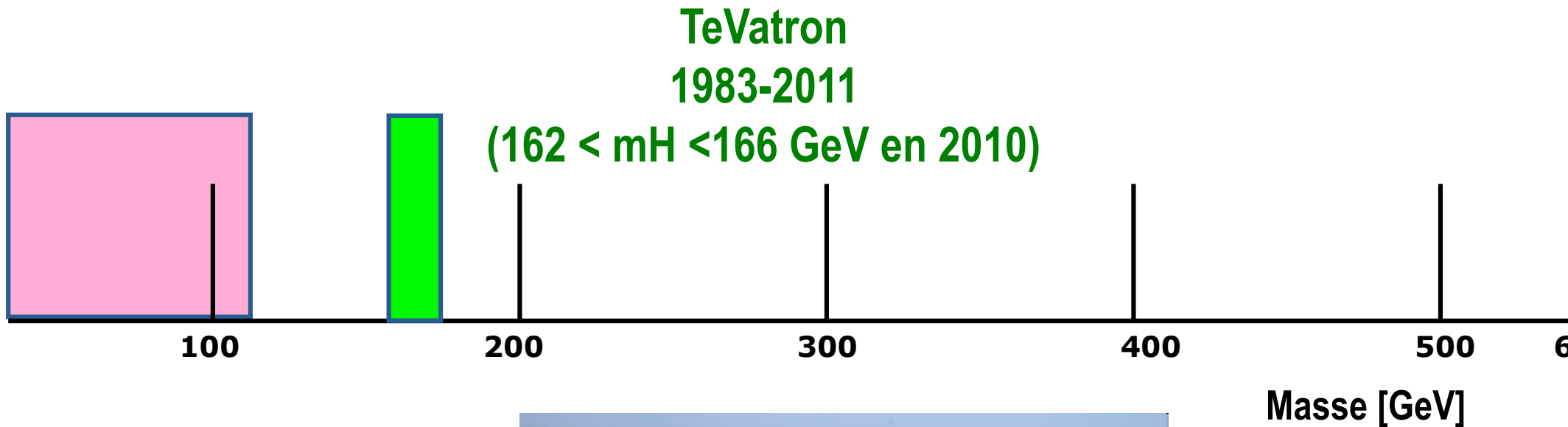
- Seule contrainte théorique : masse Higgs < 1000 GeV

Le boson de Higgs : une longue traque...



Le LEP au CERN
(pres de Genève)
On a utilisé le tunnel
pour le LHC

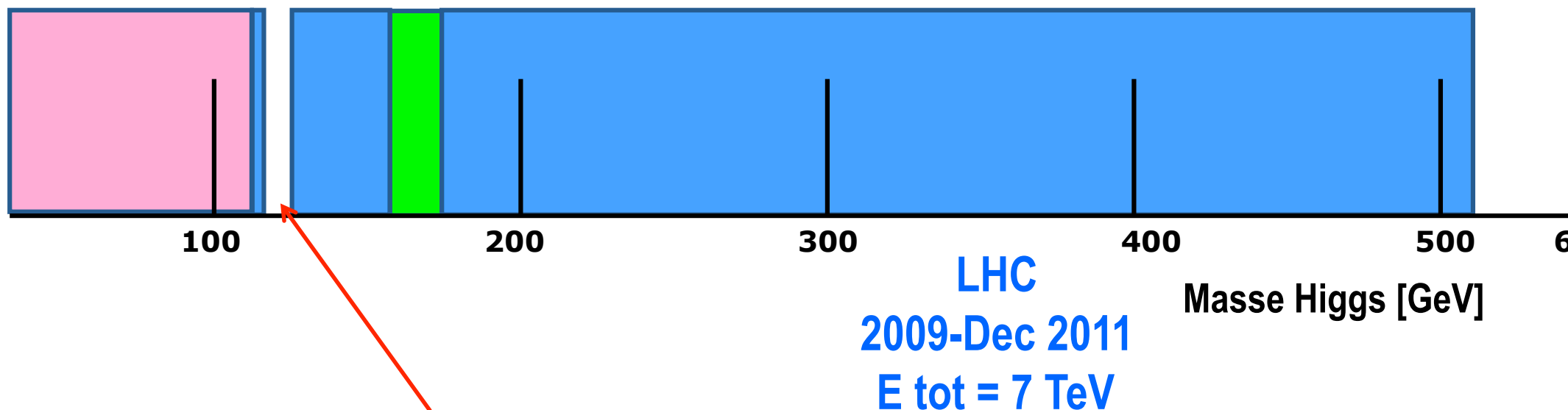
Le boson de Higgs : une longue traque...



Le TeVatron à Fermilab
(pres de Chicago),
 $E_{\text{tot}} = 2 \text{ TeV}$



Le boson de Higgs : une longue traque...



Seule une fenêtre d'une dizaine de GeV était encore permise fin 2011...

L'endroit où le (candidat) Higgs
a été découvert:
au **CERN** (laboratoire),
grâce au **LHC** (machine)
et dans **ATLAS** et **CMS** (détecteurs)

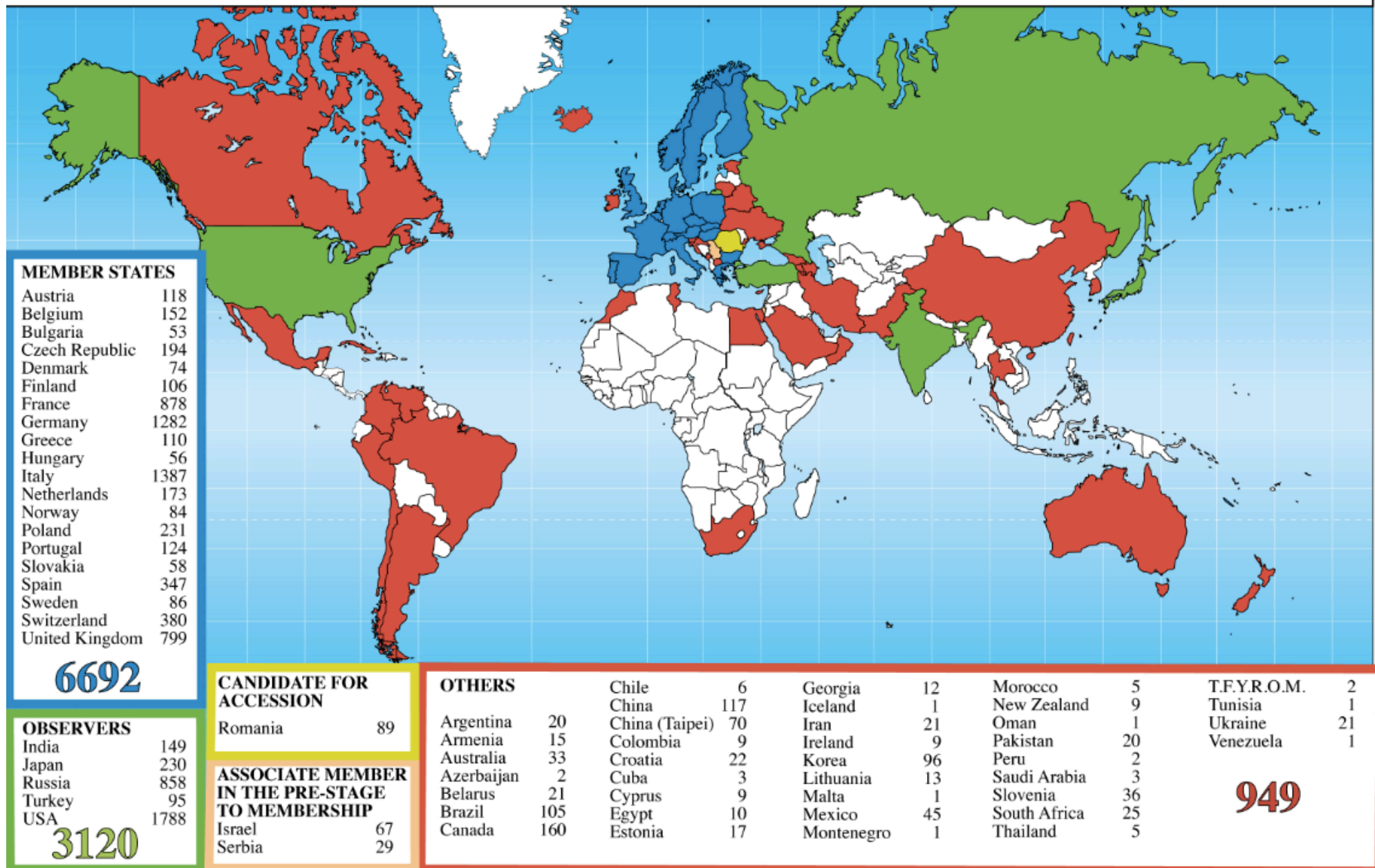
Le LHC au CERN

- Le CERN est l'un des plus grands et prestigieux laboratoires scientifiques du monde
 - Fondé en 1954, situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse (à Genève).
 - Une des premières organisations à l'échelle européenne (20 États membres).
- Environ la moitié des physiciens de particules du globe travaillent sur des expériences basées au CERN (~10000 personnes)



La dernière réalisation au CERN : le **Large Hadron Collider** , **LHC** collisionneur proton-proton, énergie et nombre d'événements par seconde encore jamais atteints

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



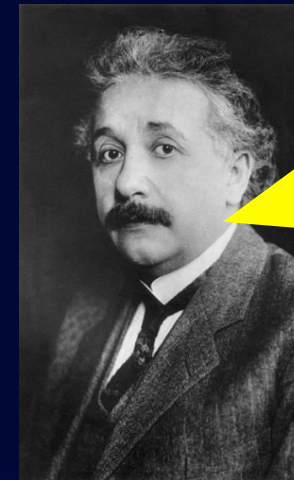
Accélérateur/collisionneur de particules

- ❖ Augmenter l'énergie des particules initiales (électrons, positrons, protons..) en les accélérant.

Donner beaucoup d'énergie cinétique

- Particules chargées accélérées par un champ électrique
- Particules chargées courbées par un champ magnétique

- ❖ Provoquer des collisions entre particules



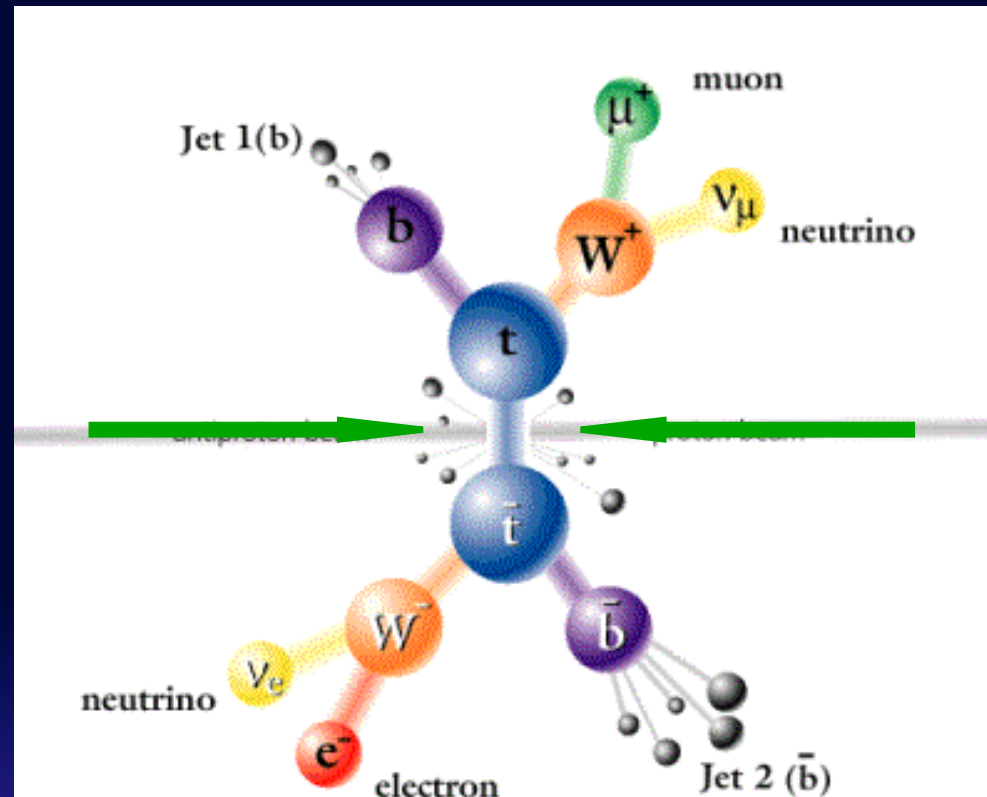
La masse est juste une forme d'énergie!!

- ❖ Durant cette collision, l'énergie cinétique des particules est convertie en énergie de masse pour former de nouvelles particules massives

$$E=Mc^2$$

Détecteurs de particules

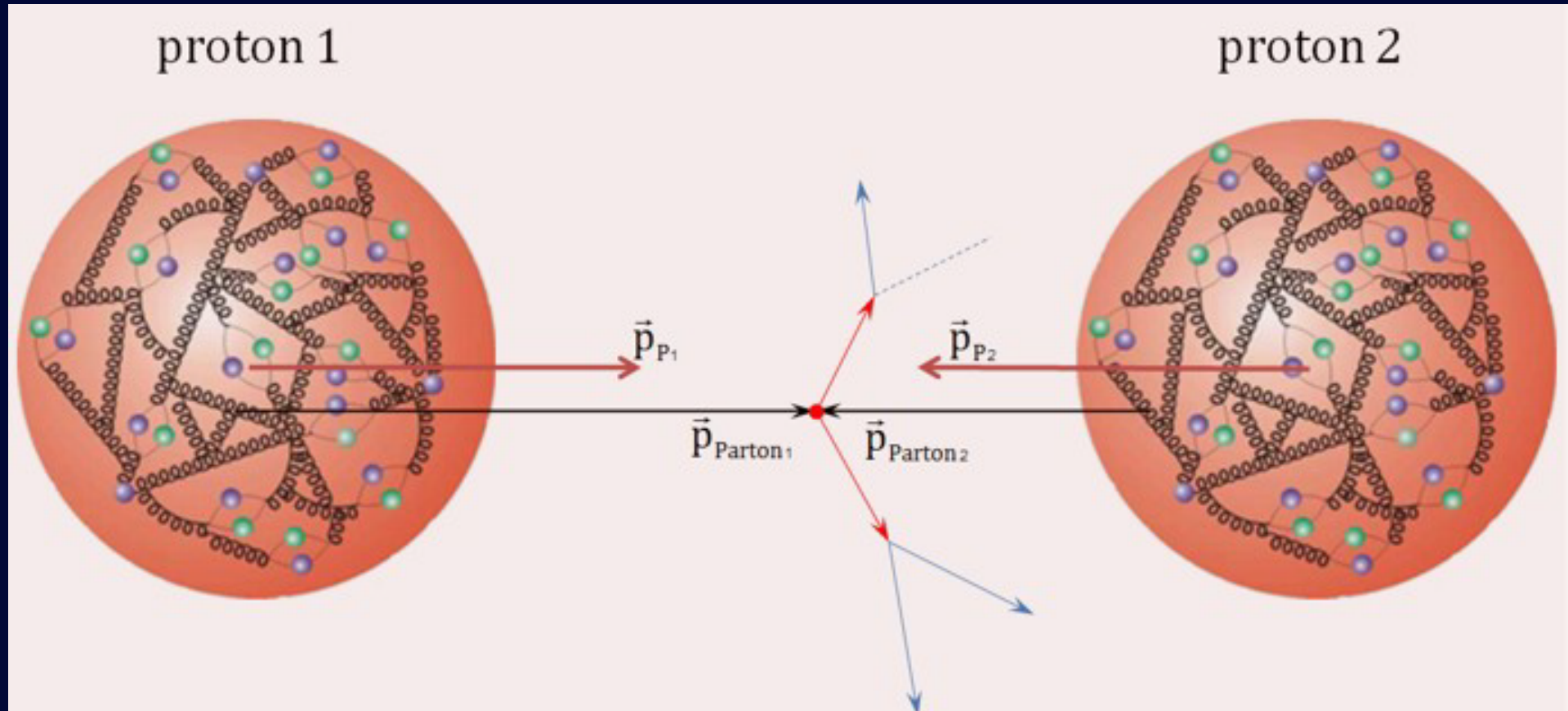
- Ces particules issues de la collision se **désintègrent** presque aussitôt en particules plus légères : **les produits de désintégrations**. Ces produits de désintégrations (électrons, photons, muons ...) ont une **durée de vie suffisamment importante pour pouvoir être détectés**.



Faisceau de protons

Faisceau de proton

Collision au LHC



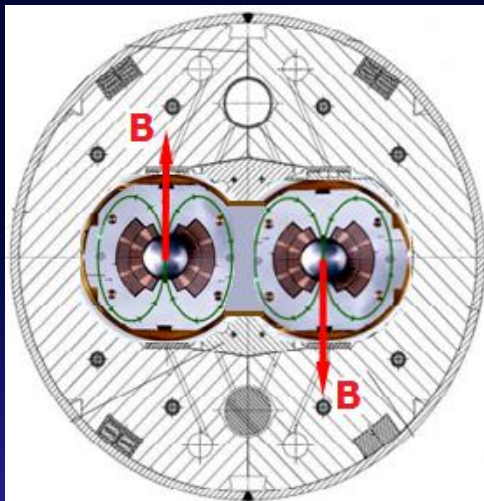
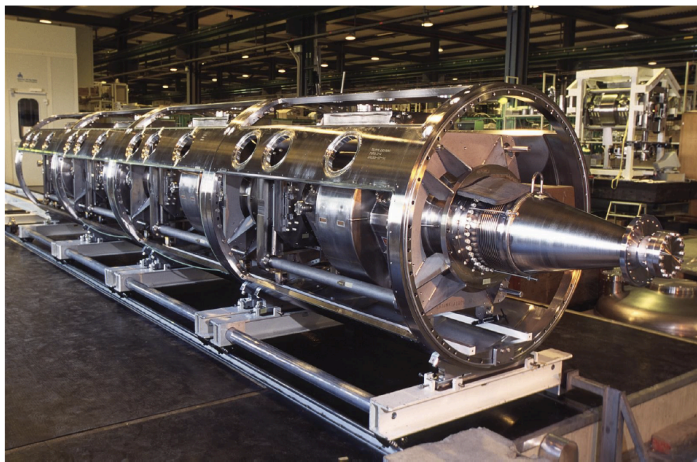
C'est une collision entre les constituants des deux protons: quarks, gluons, antiquarks...

Les accélérateurs: LHC

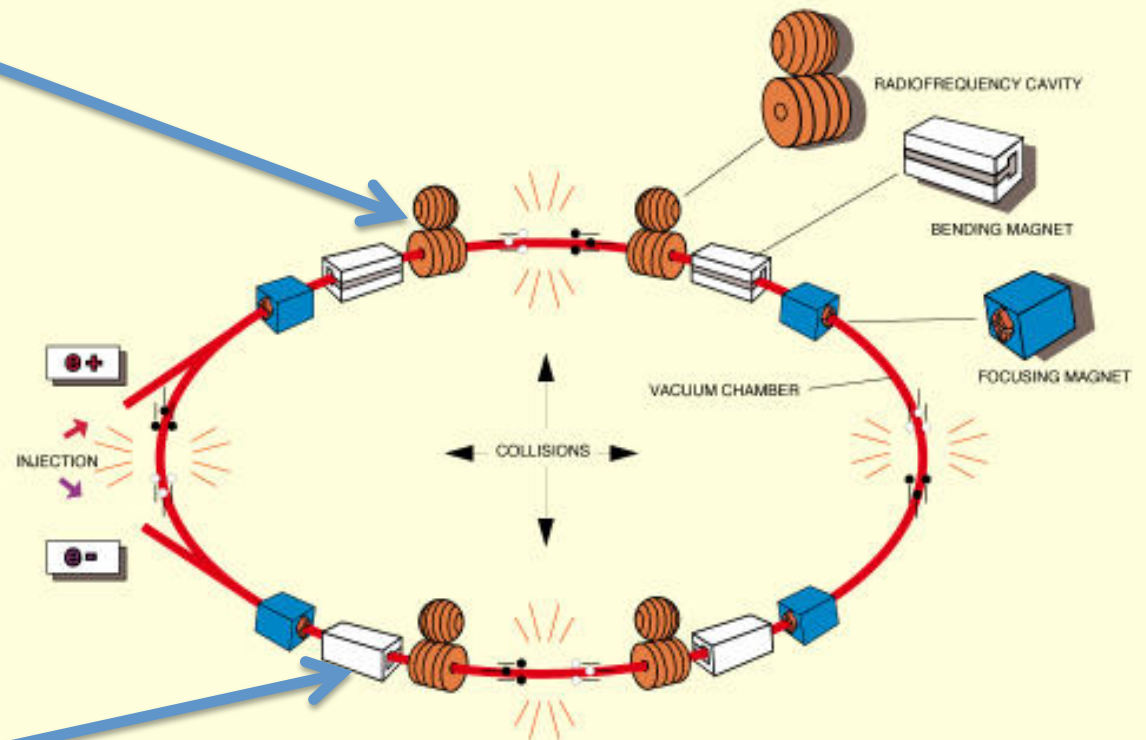
Le **champ électrique** accélère les particules chargées: cavités Radio Fréquence

Le **champ magnétique** fait tourner les particules chargées

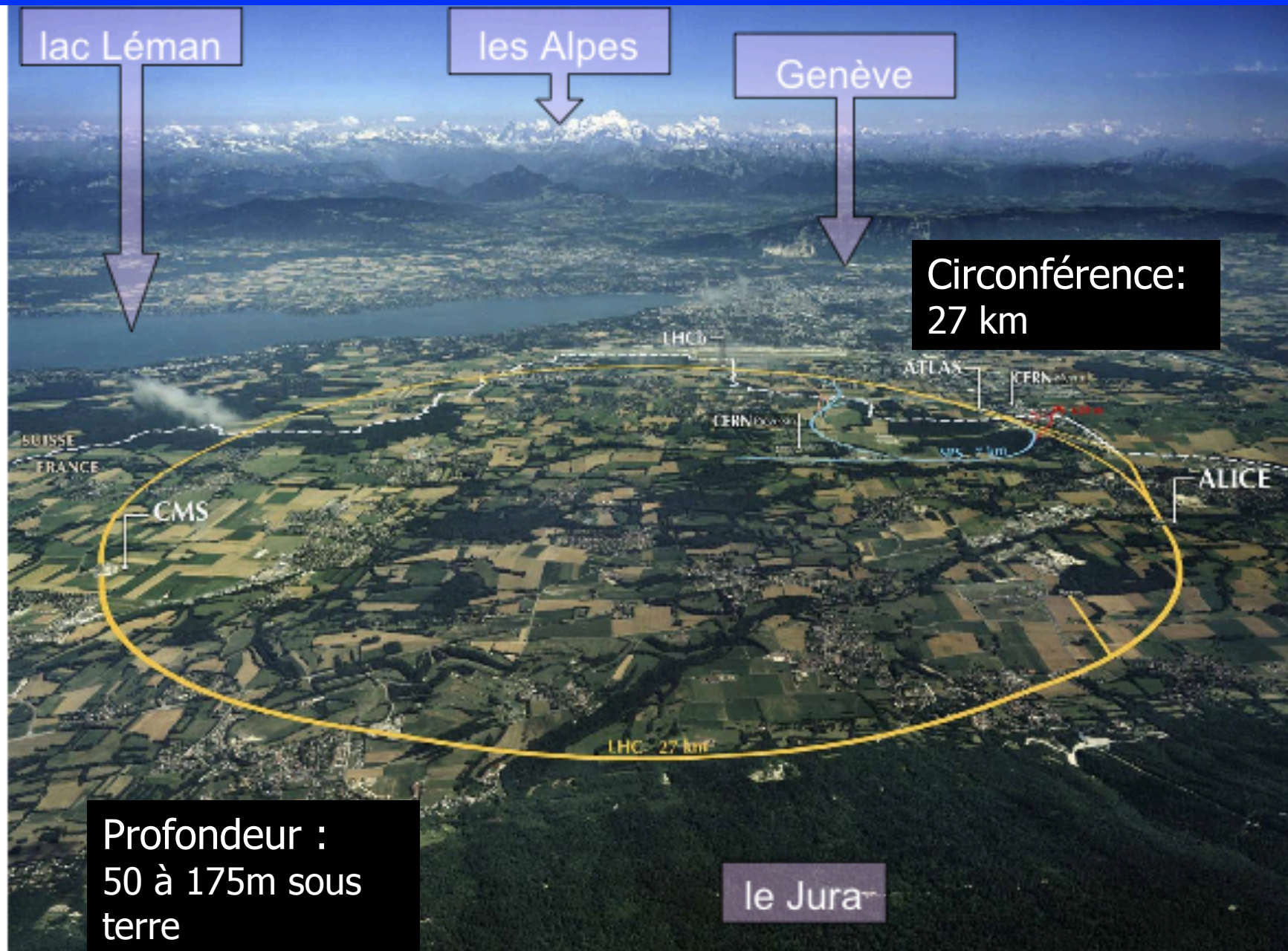
LHC: Super-Conducting RF Cavities



THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



Le Large Hadron Collider: LHC vu du ciel



.. et vu sous terre !

Aimants
supraconducteurs à 9
Tesla pour courber
les protons

Température
~2K (-271 C) :
plus froid que
l'espace inter
galactique

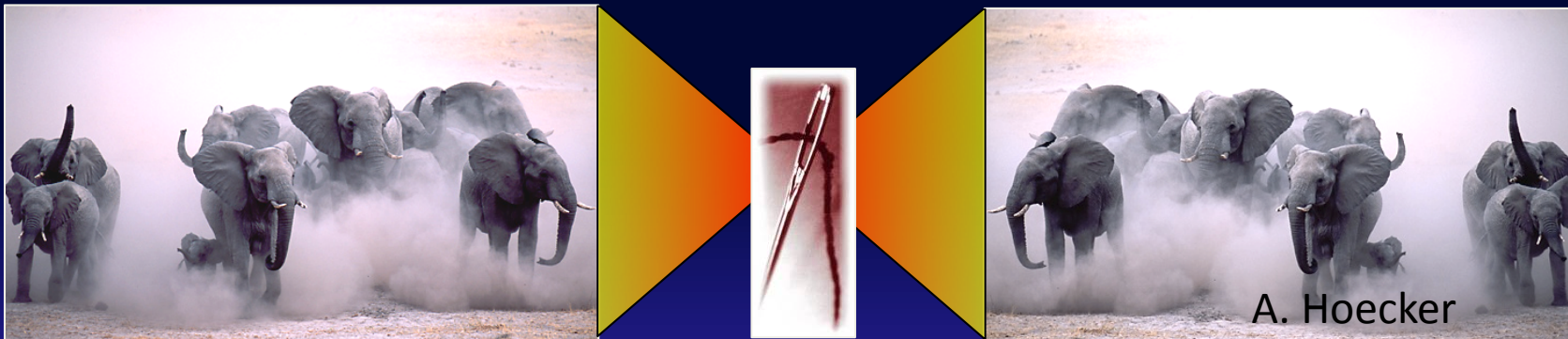
700 000 litres
Hélium liquide

12 Millions litres
d'Azote liquide



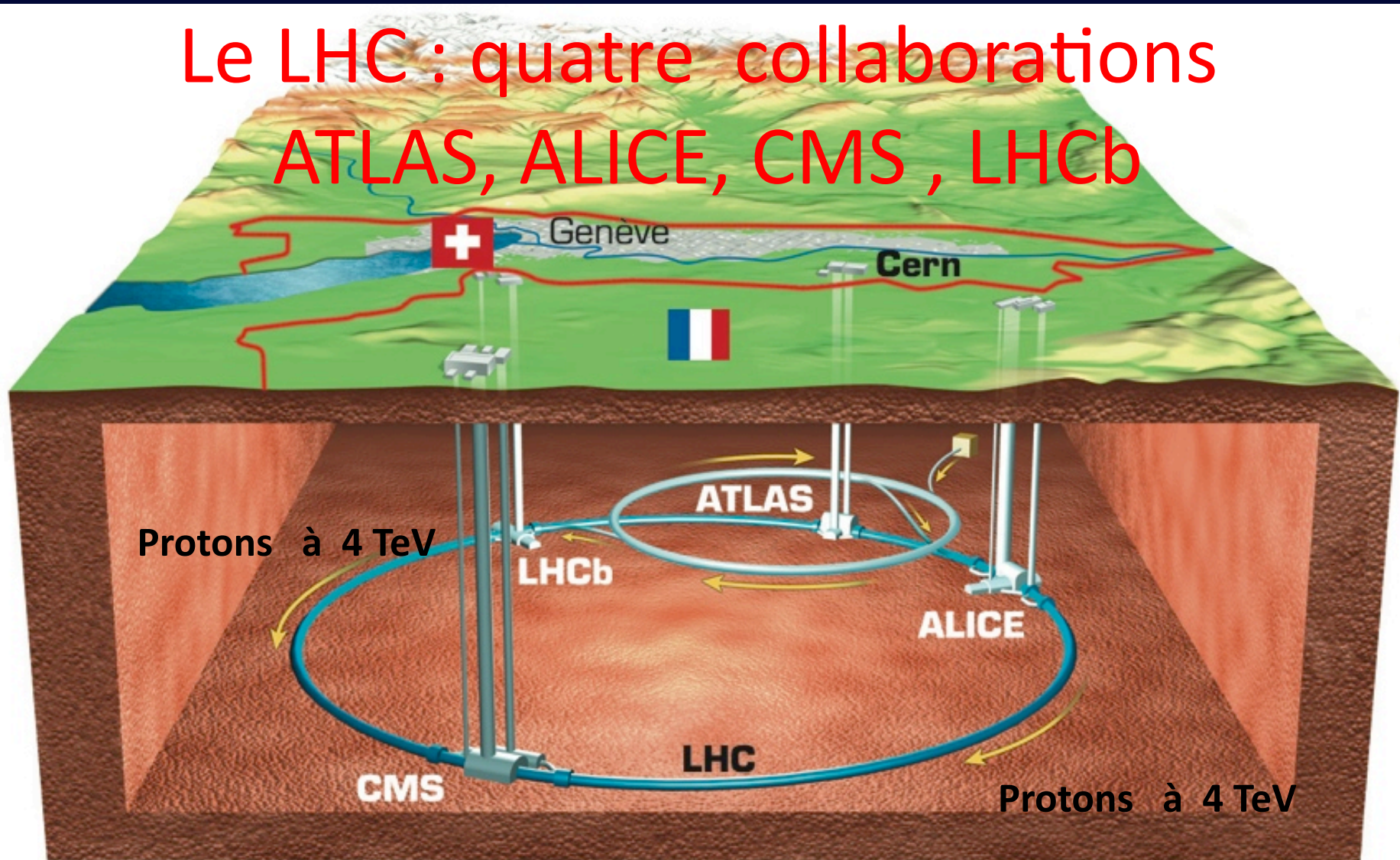
LHC: la machine de tous les records

- Genèse du projet en 1984 - démarrage en 2009 $\Rightarrow$ 25 ans !
- Le **plus grand** accélérateur du monde: Circonférence : 27 km
- Le circuit **le plus rapide** de la planète
 - Protons: **99.9999% de la vitesse de la lumière**
 - **600 millions collisions par secondes, 11000 tours par seconde**
- L'espace **le plus vide** du système solaire: Pression = P Lune / 10
- Le **plus froid** de l'Univers: aimants refroidis à **-271°C**, plus froid que celle de l'espace intersidéral
- **350 MJ d'énergie par faisceau**: un TGV à 150 km/h à faire passer par une ouverture de **16 microns de diamètre au point de collision**



A. Hoecker

Le LHC : quatre collaborations ATLAS, ALICE, CMS, LHCb



- Quatre détecteurs pour observer les collisions

La collaboration ATLAS



38 pays

175 instituts

>3000 physiciens et ingénieurs

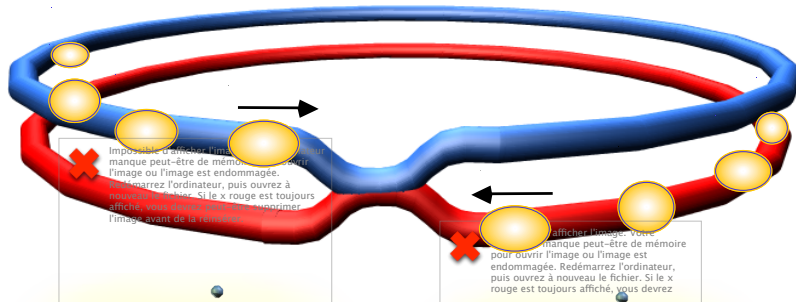
~2900 auteurs

~1000 étudiants



Collisions au LHC: résumé

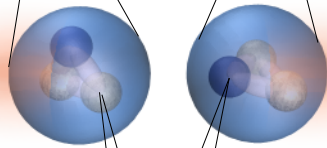
Faisceaux **Proton** **Proton**



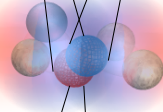
Paquet



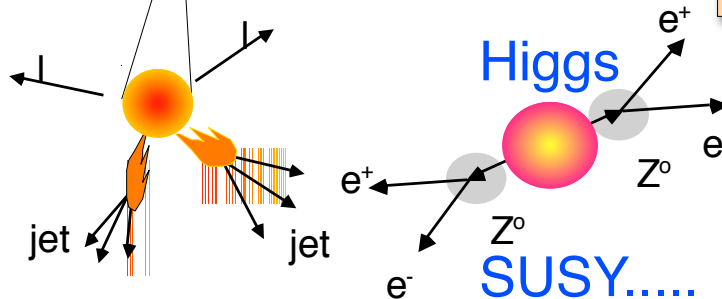
Proton



quark, gluon



Particules finales



2835 paquets de protons

Protons/paquets : 10^{11}

Energie Totale $2 \times 4 \text{ TeV} = 8 \text{ TeV}$
plus haute au monde produite sur Terre

Tous les évènements ne sont pas intéressants pour recherche de nouvelle physique:

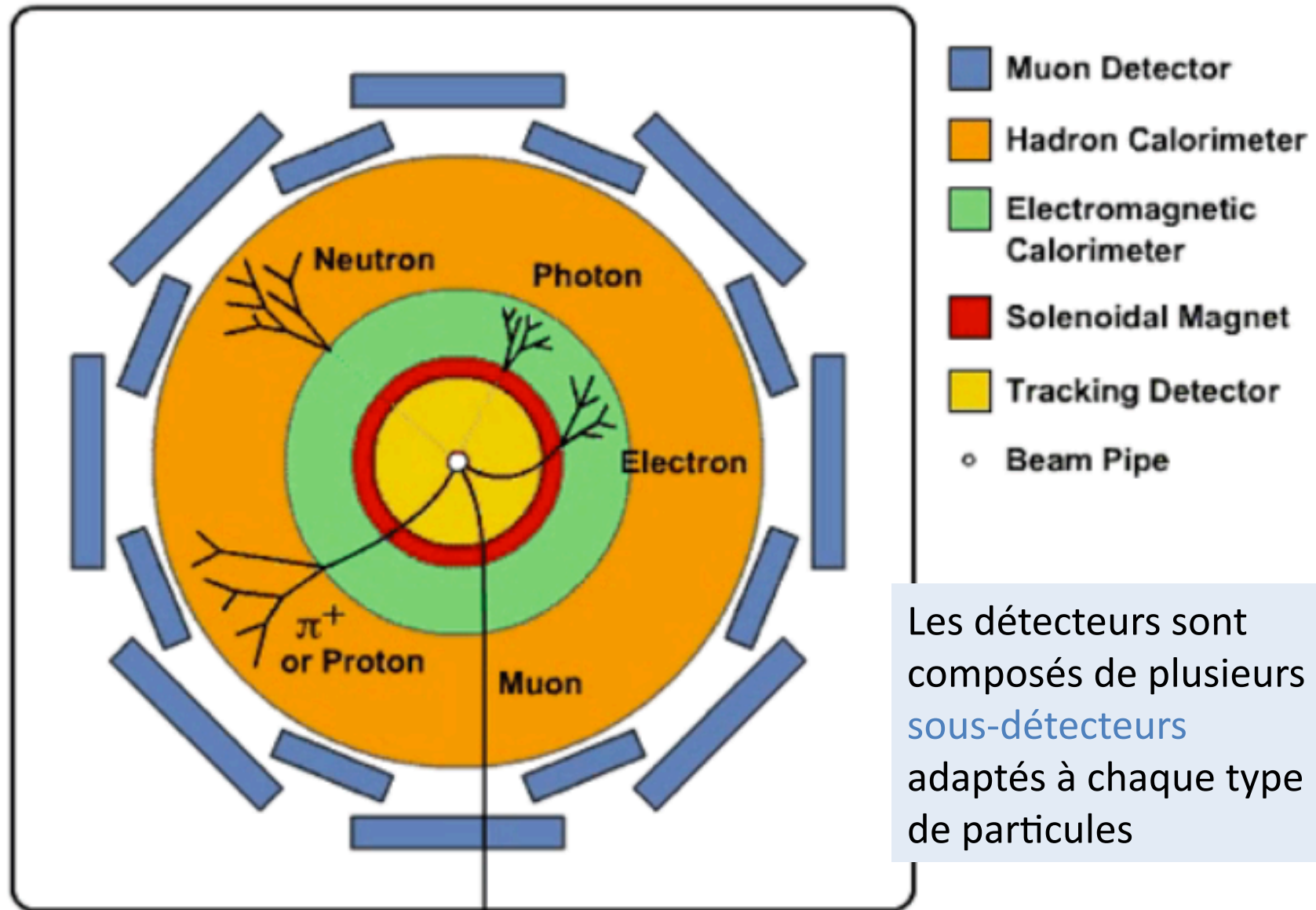
Selection d'événements intéressants:

$1 / 10,000,000,000,000$

Comment voit-on les particules ?

- On ne voit pas les particules...
- On détecte le **résultat de leurs interactions avec la matière qu'elles traversent**
- En traversant la matière elles **perdent un peu (ou tout) de leur énergie** que le détecteur doit récupérer et transformer en **signal « visible »** (un signal électronique).
- Le détecteur doit donc mesurer cette perte d'énergie, localiser l'endroit et le moment où cela a eu lieu Et tout numériser pour en faire un « événement » qui sera analysé par le physicien.
- On veut mesurer **la trajectoire, la charge, l'énergie initiale...** de toutes les particules produites dans une collision

Signatures différentes des différentes particules



Les détecteurs sont composés de plusieurs sous-détecteurs adaptés à chaque type de particules

ATLAS

Longueur : ~ 46 m

Diamètre : ~ 25 m

Poids : ~ 7000 tonnes

Cout : ~ 310 MEuros

Chambres
à muons

Toroïde
supraconducteur

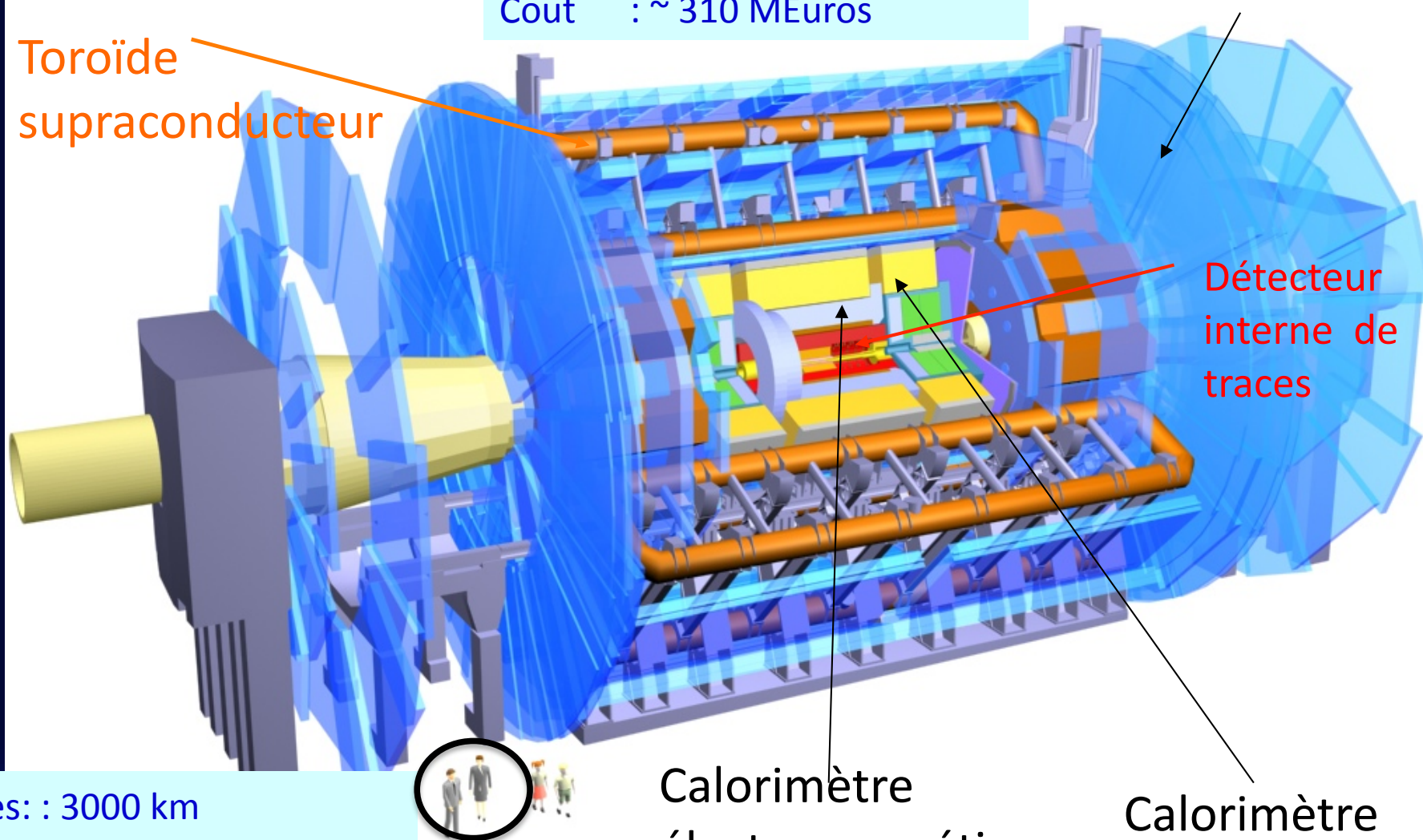
Détecteur
interne de
traces

Câbles : 3000 km

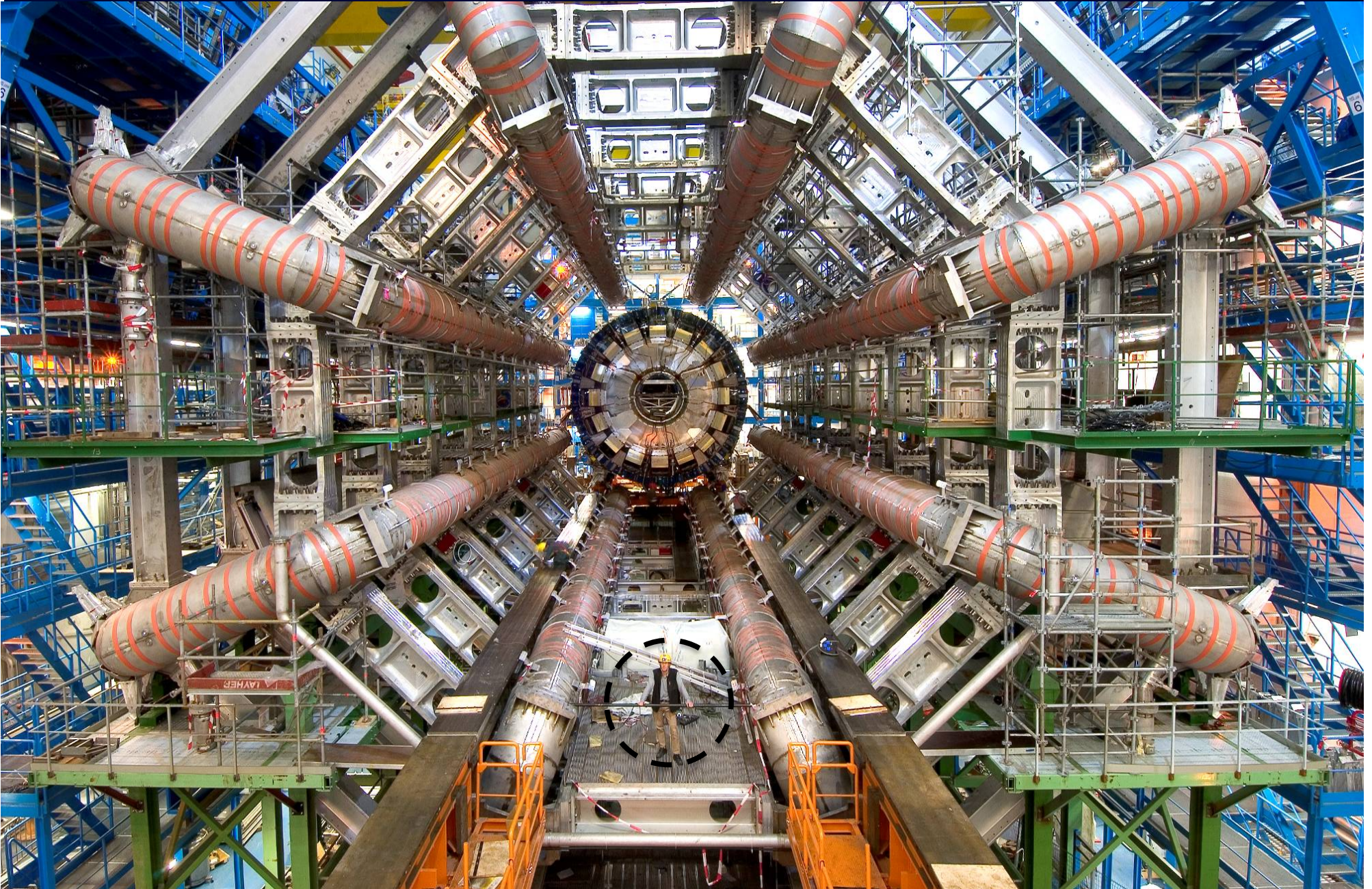
Voies électronique : 10^8

Calorimètre
électromagnétique

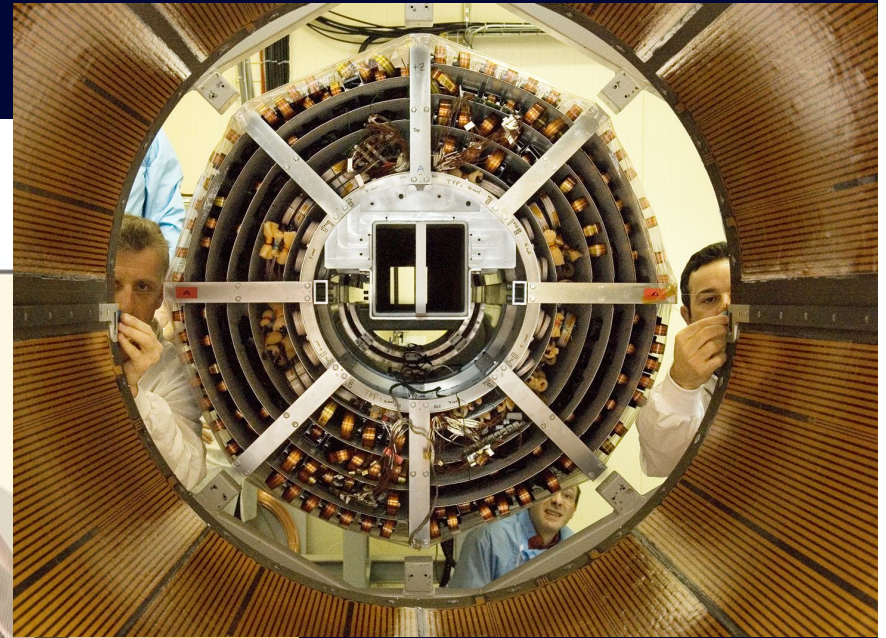
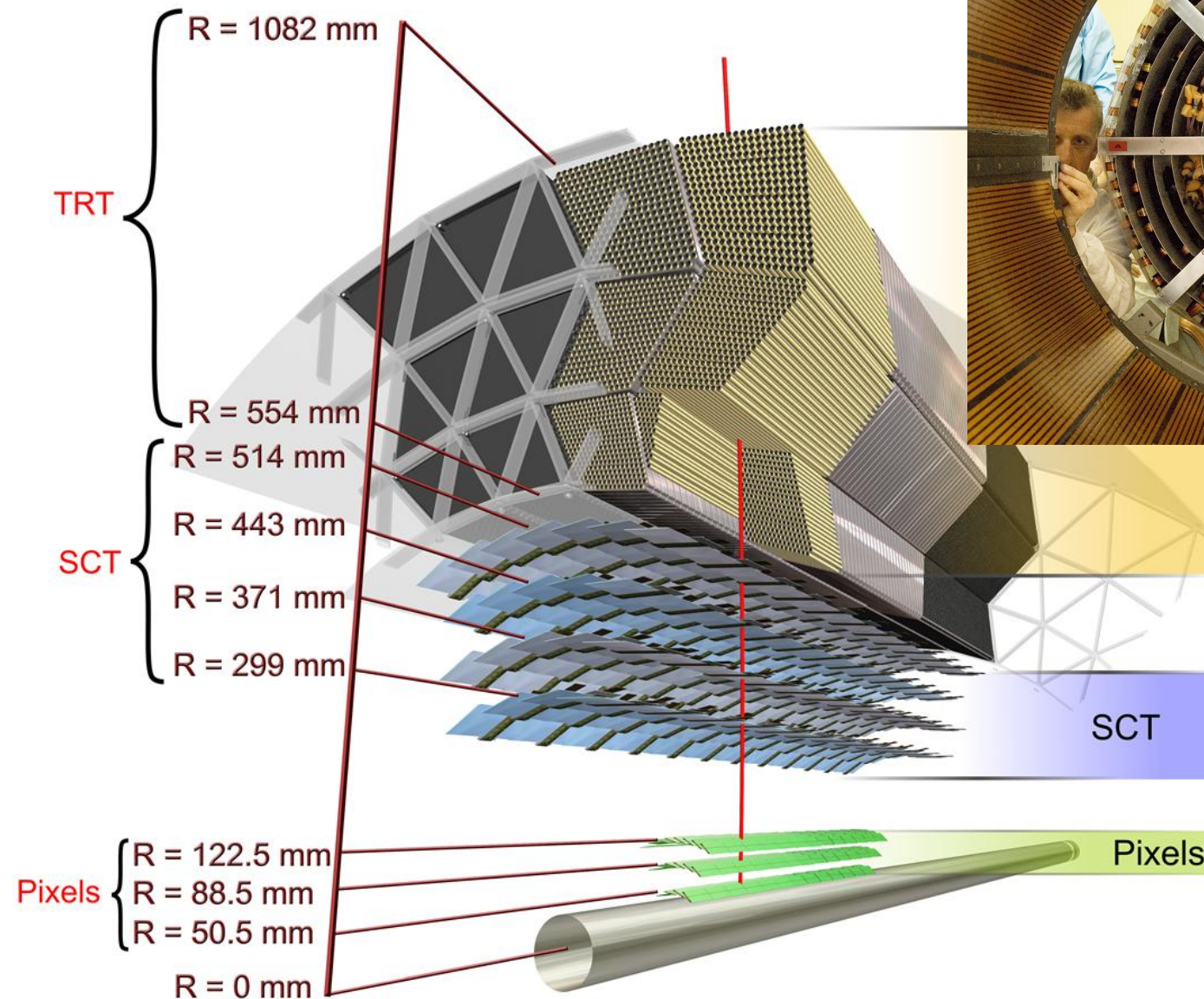
Calorimètre
hadronique



Oct. 2005

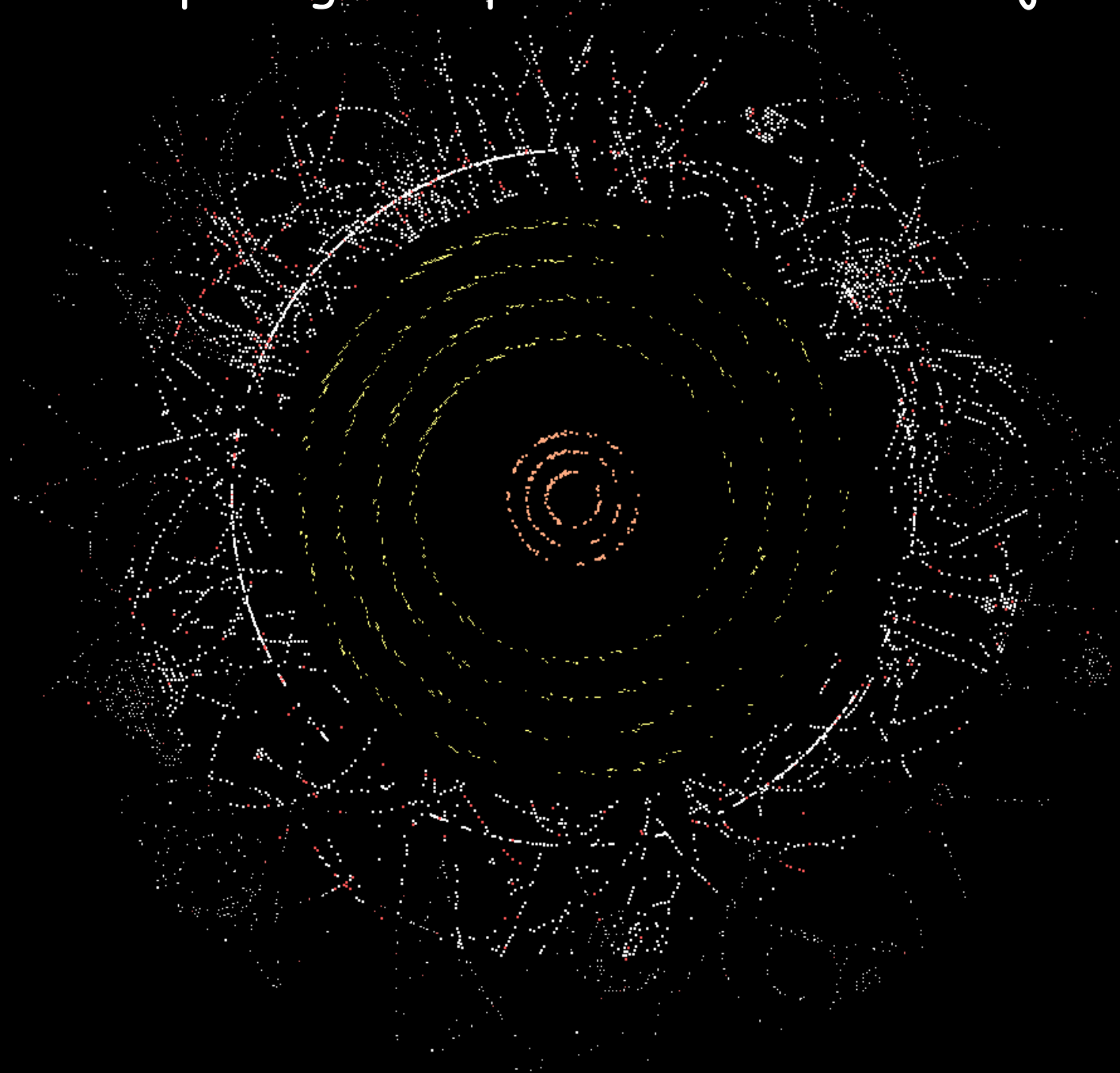


Les trajectographes d'ATLAS

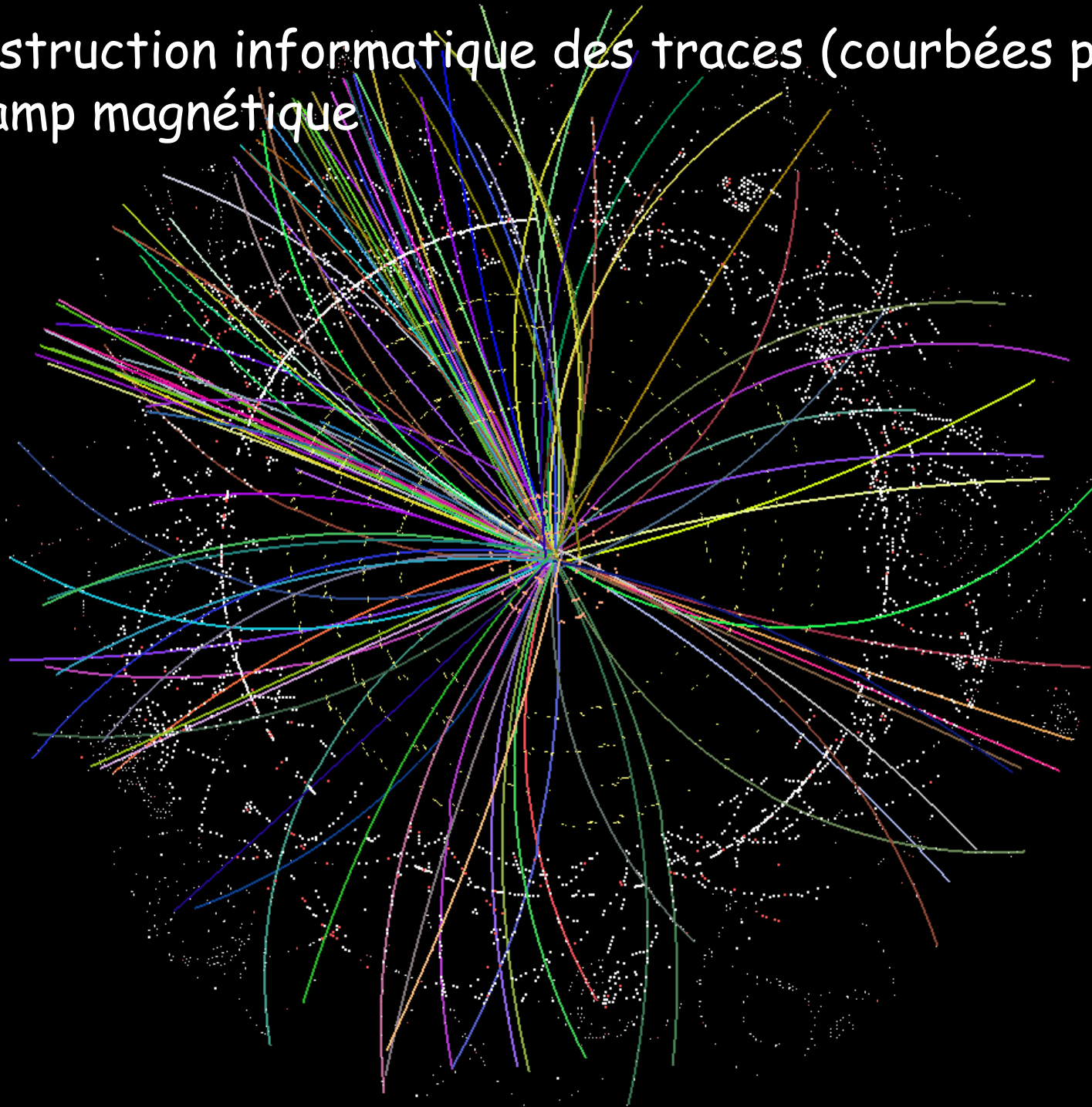


140 millions de cellules sensibles, résolution sur la position $\sim 15 \mu\text{m}$!

Détection du passage des particules dans le trajectographe



Reconstruction informatique des traces (courbées par un champ magnétique)



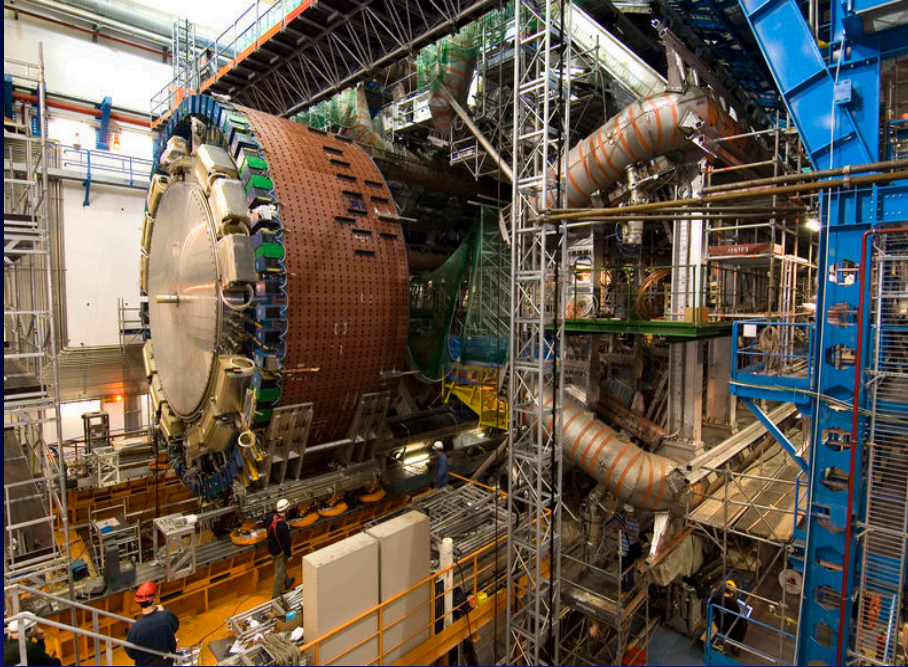
Torroide descendant dans la caverne



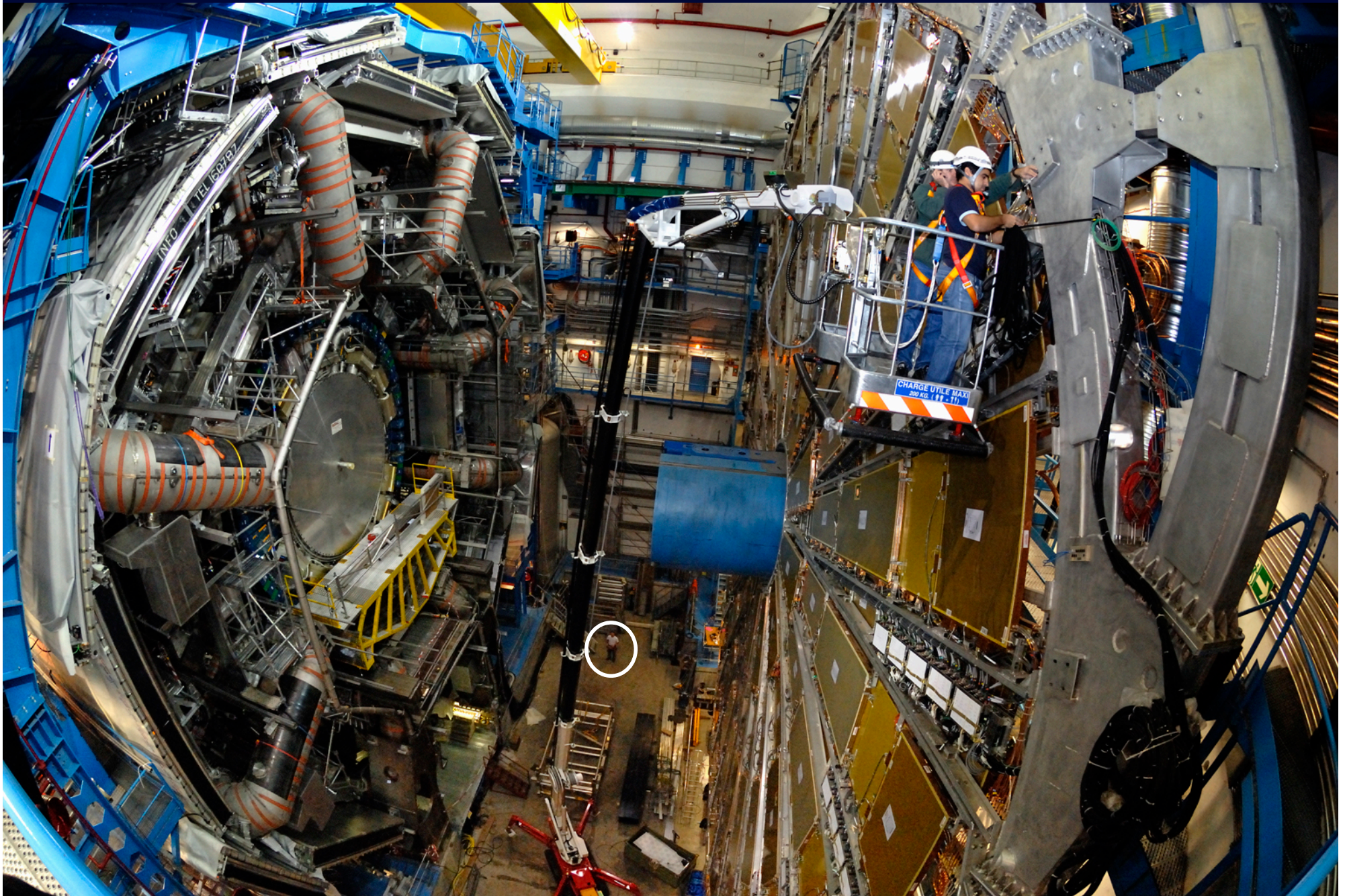
Installation des calorimètres



Calo. EM: 170 tonnes

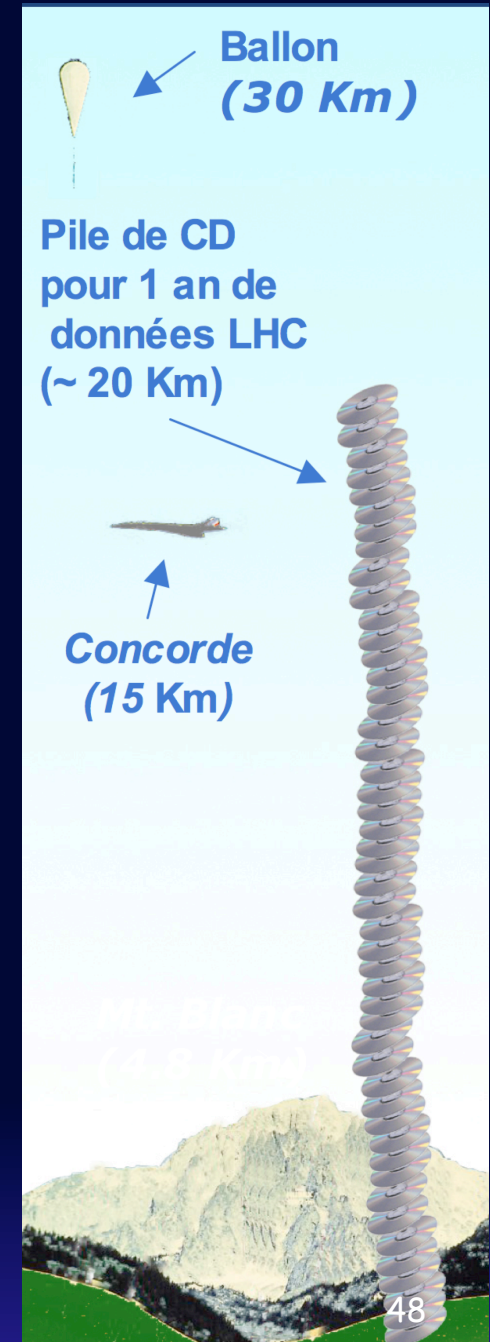


ATLAS: partie avant



Les filtres rapides

- Le volume de données des mesures
 - 250 Tb/sec. par détecteur
- Un premier tri est indispensable
 - Système de sélection propre à chaque sous détecteur
 - Par exemple : autorise l'enregistrement de la collision s'il existe au moins une particule de haute énergie
 - A partir de **600 millions collisions/sec.** on sélectionne **200 collisions/sec.**
 - Volume 300 Mb/sec.
 - **Correspond à 15 Pb/an**
(1000 fois les livres de la terre...)



Journée historique: au CERN, le 04.07.2012.
transmis en direct dans les laboratoires du monde entier

Fabiola
Gianotti, porte
parole ATLAS

Rolf Heuer
DG du CERN

Joe Incandela,
porte parole
CMS



Découverte d'un boson
de masse voisine de 126 GeV

de 1964 ... à aujourd'hui

F. Englert



P. 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 interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² 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 note¹ 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 phenom-

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

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



Détection
des
particules

Détermination :
Nature,
Trajectoire,
Energie

muon

Quark ou
gluon

électron

Instable, le Higgs
se désintègre
immédiatement
(par ex en $2e + 2$
muons)

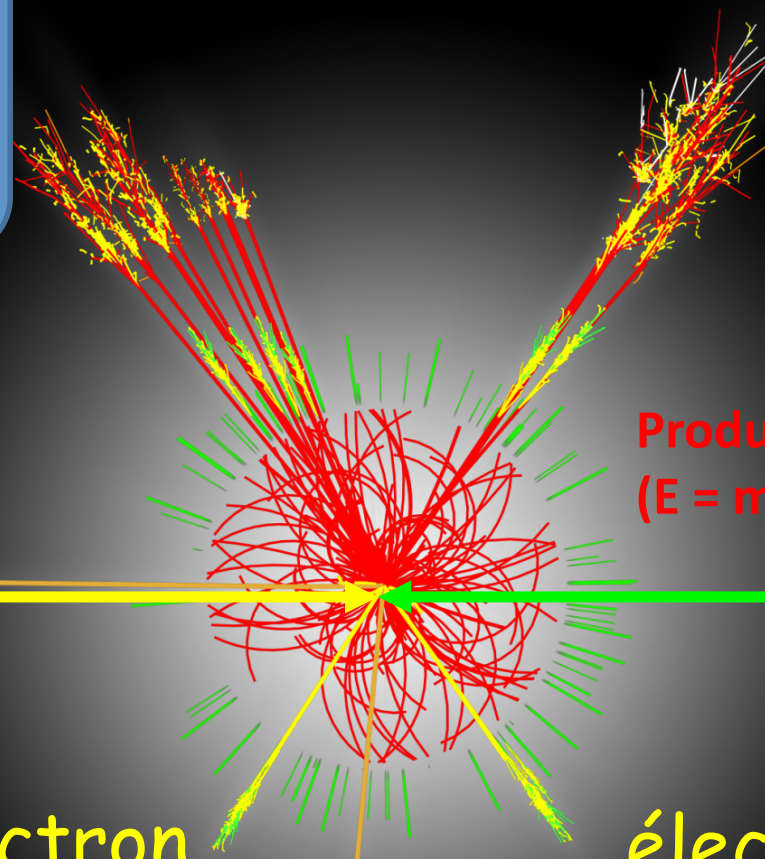
Produits de collision
($E = mc^2$)

quark ou
gluon

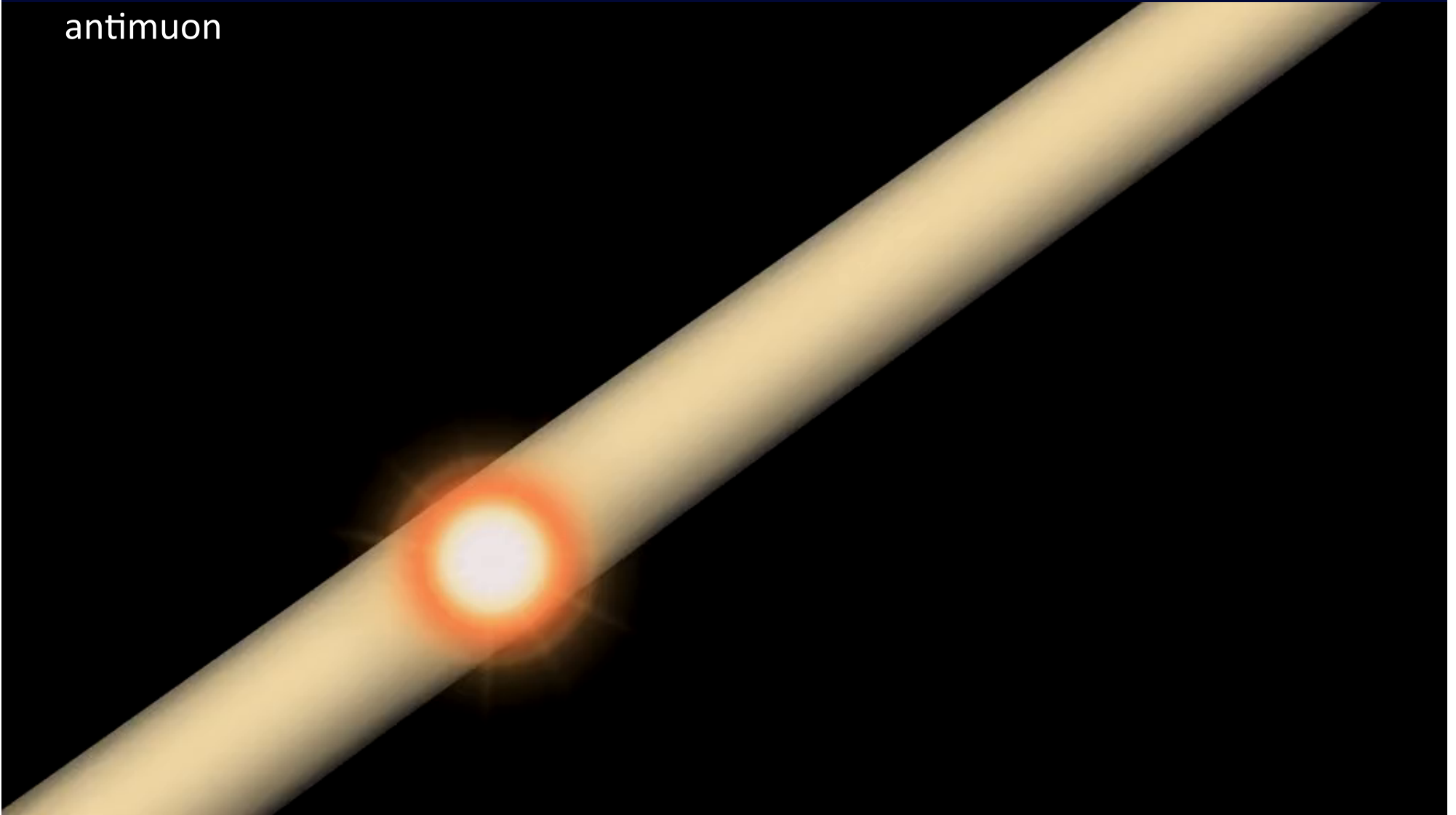
électron

muon

Il y a du
"bruit de fond"
et des "sosies" de
cette réaction



Désintégration du Higgs en $Z Z$, chaque Z se désintègre en une paire muon - antimuon



Valeurs cumulées (2011 + 2012 → mi-juillet) pour chaque expérience :

- 1 million de milliards de collisions: 10^{15}

- Nombre de bosons Higgs attendus $\approx 200\,000$

(si sa masse est 125 GeV)

- Nombres d'événements attendus par canal :

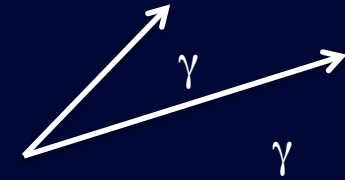
$\gamma\gamma \approx \text{environ } 200$

$ZZ, Z \text{ en } ee \text{ ou } \mu\mu \approx \text{environ } 10$

dans un bruit de fond conséquent....

Chercher une aiguille dans une botte de foin !

Higgs en 2 photons



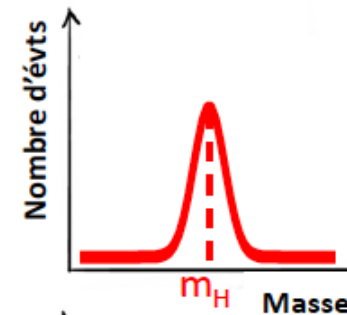
Avec la masse diphoton:

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2} E_1 E_2 [1 - \cos(\theta)]$$

Avec E_1 et E_2 les énergies des photons et θ l'angle entre les photons

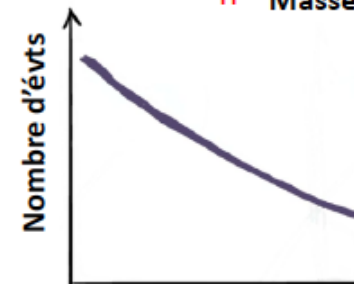
➔ Si les deux photons proviennent de la désintégration d'un boson de Higgs, cette masse sera égale à la masse du Higgs

➔ Sinon, cette masse peut prendre des valeurs variées



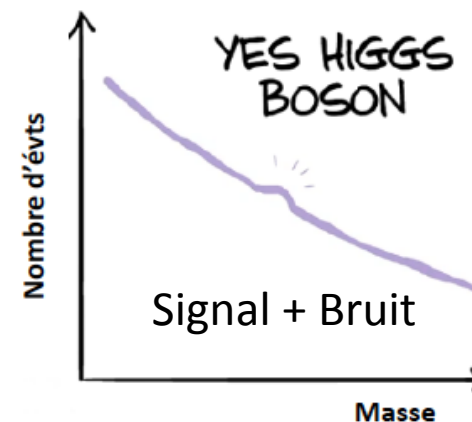
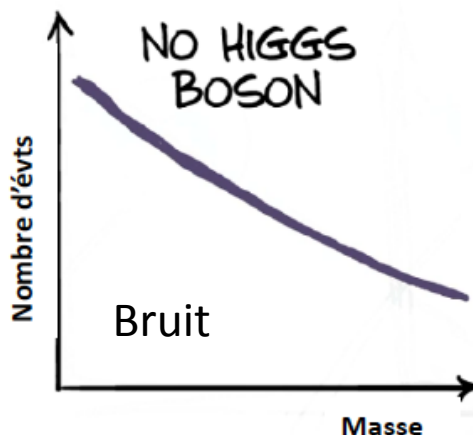
environ 200 événements

Signal



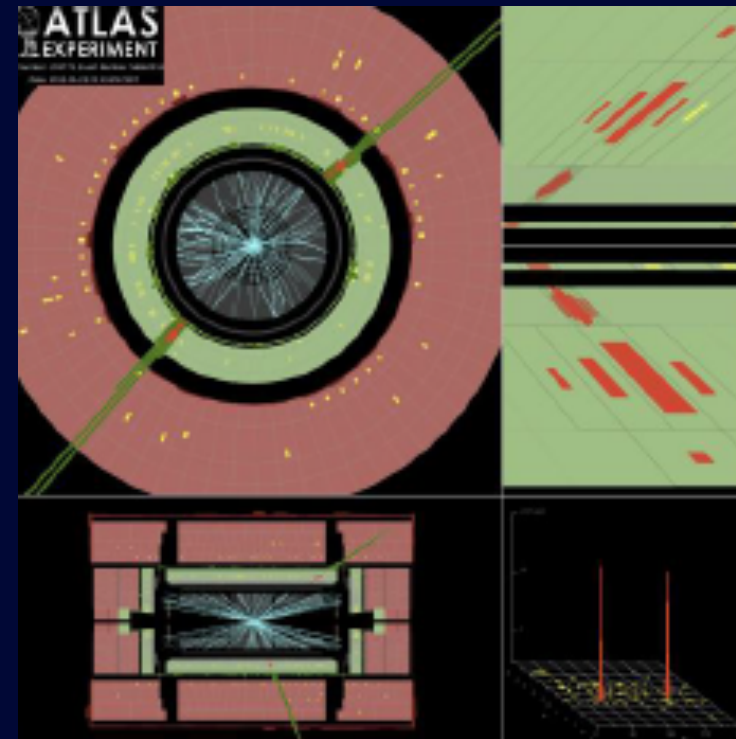
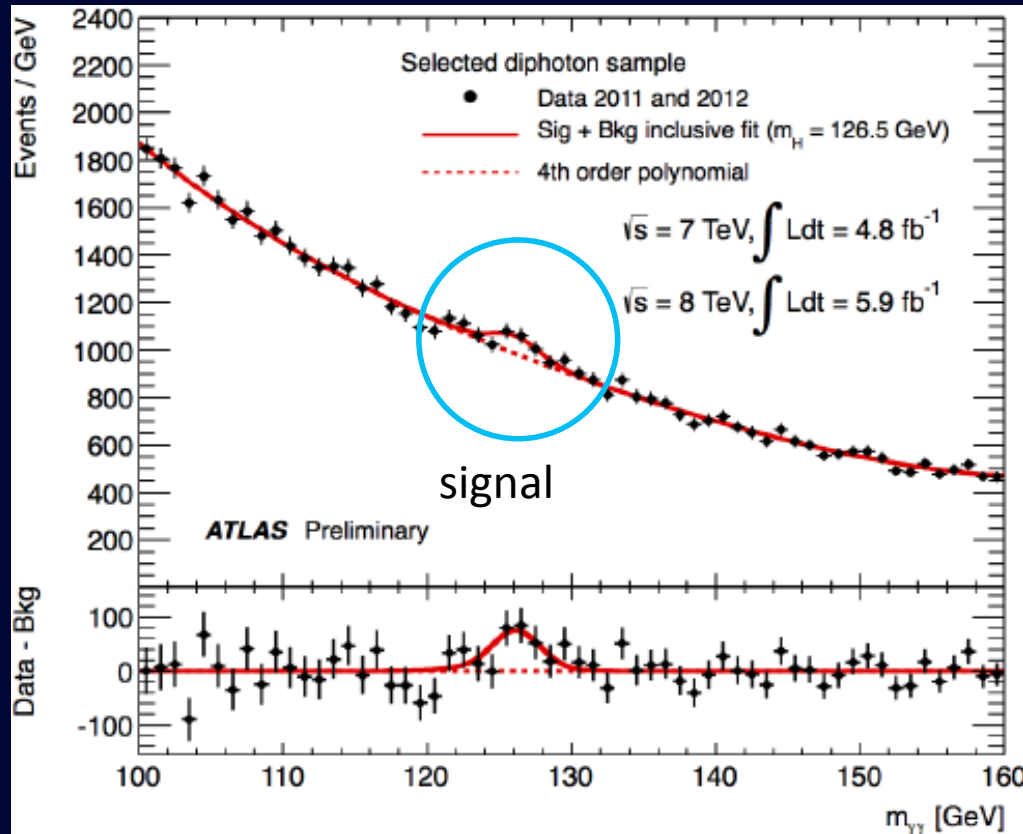
des milliers d'événements

Bruit



Recherche de candidats Higgs en 2 photons

Nombre d'événements



Un événement candidat

Masse

Le signal est faible par rapport au bruit de fond
⇒ Analyses statistiques complexes.

Certitude au sens physique, non mathématique:

On évalue la probabilité pour que les événements de **bruit de fond** produisent quelque chose qui ressemble autant au **signal recherché**. Quantifié en termes d'écart standard ou σ

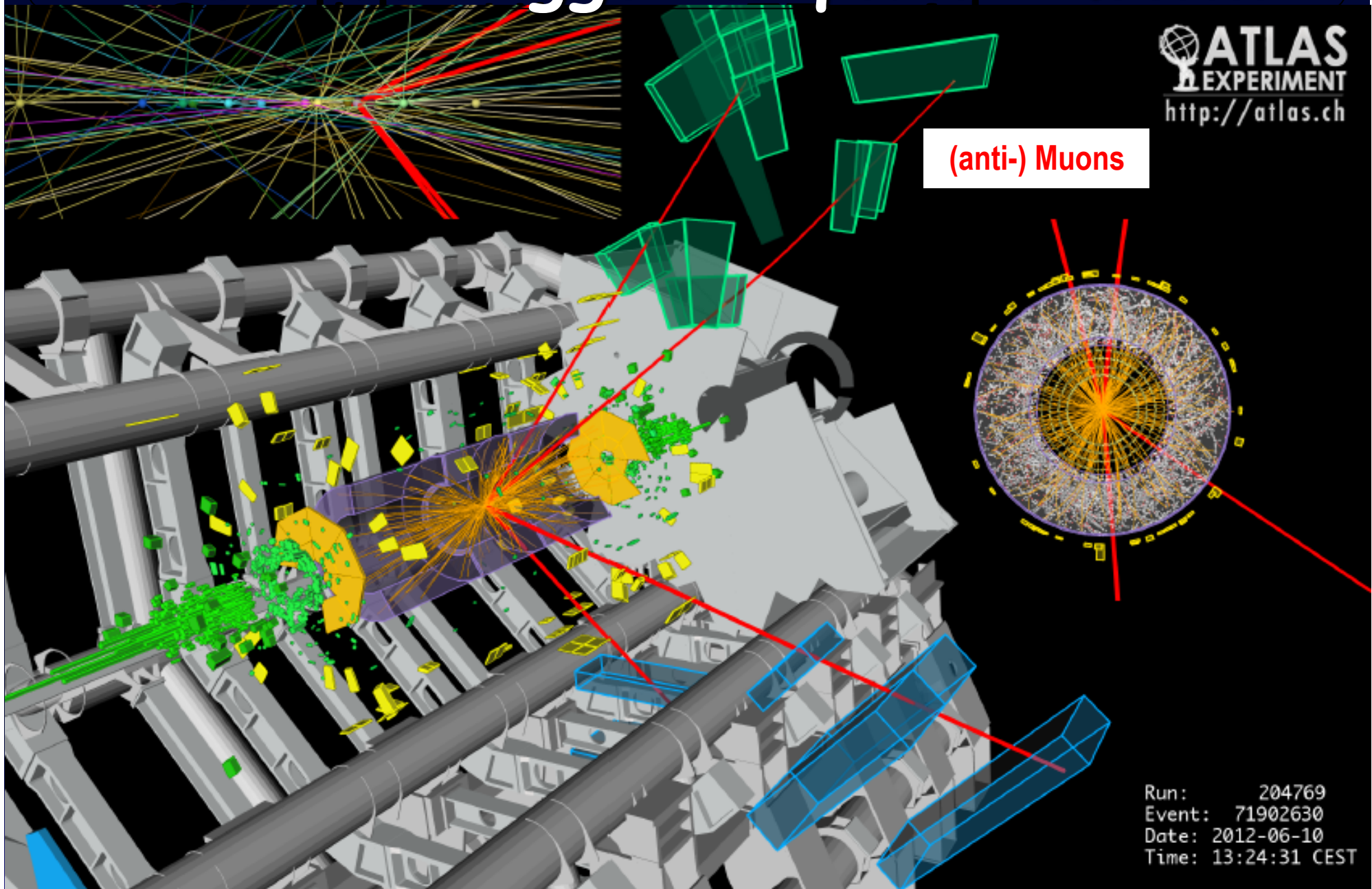
Si cette probabilité est meilleure **que 5 écart standard**, on peut parler de **découverte**.

5 écarts standards :

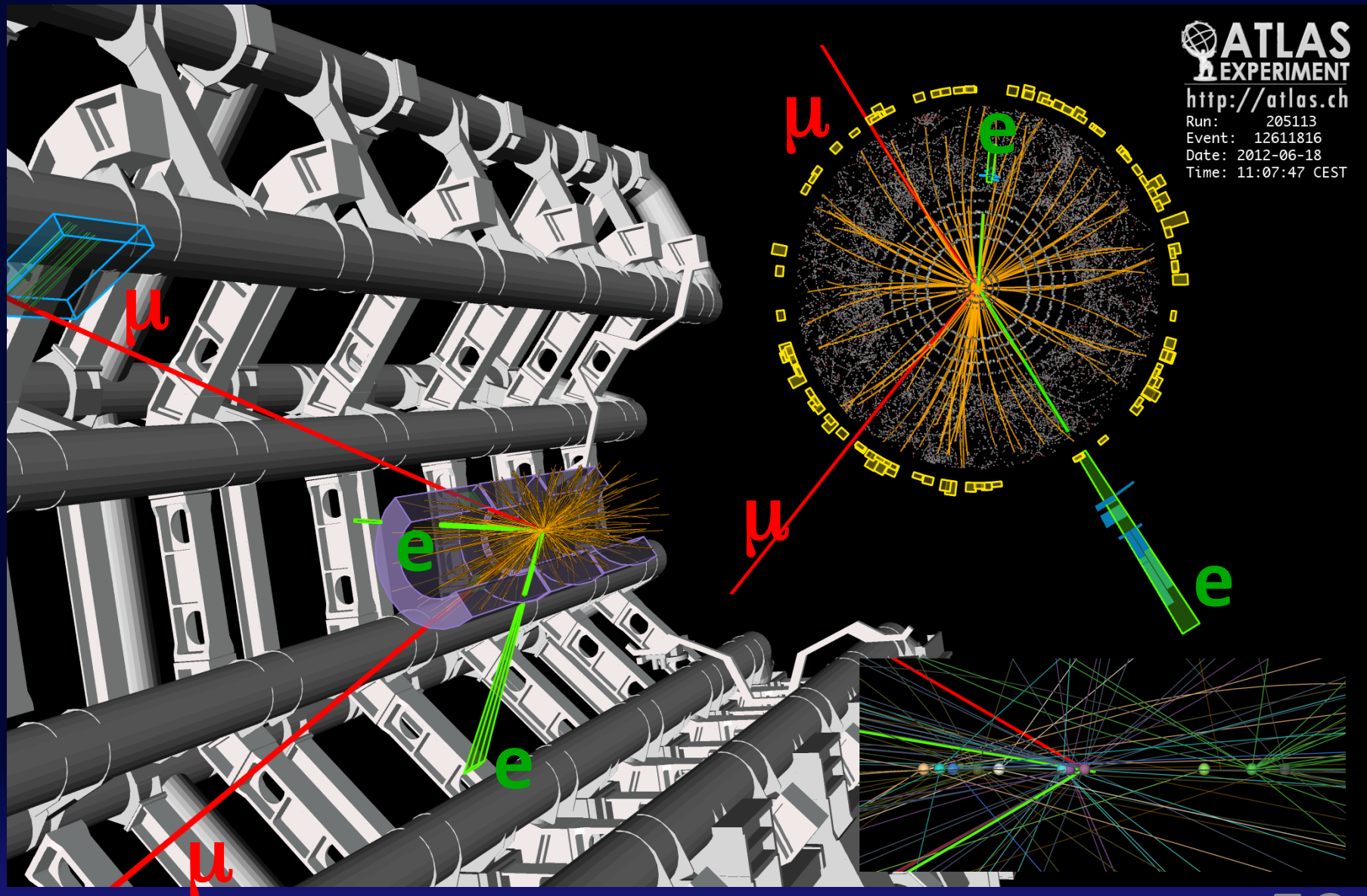
- **une erreur sur 3 millions**,
- ou bien ~ la probabilité d'avoir 21 « faces » de suite dans un lancé de pièces



Candidat Higgs en quatre muons



Candidat Higgs en quatre leptons



candidat $H \rightarrow ZZ$ dans le détecteur Atlas, avec un $Z \rightarrow ee$ et l'autre $Z \rightarrow \mu\mu$

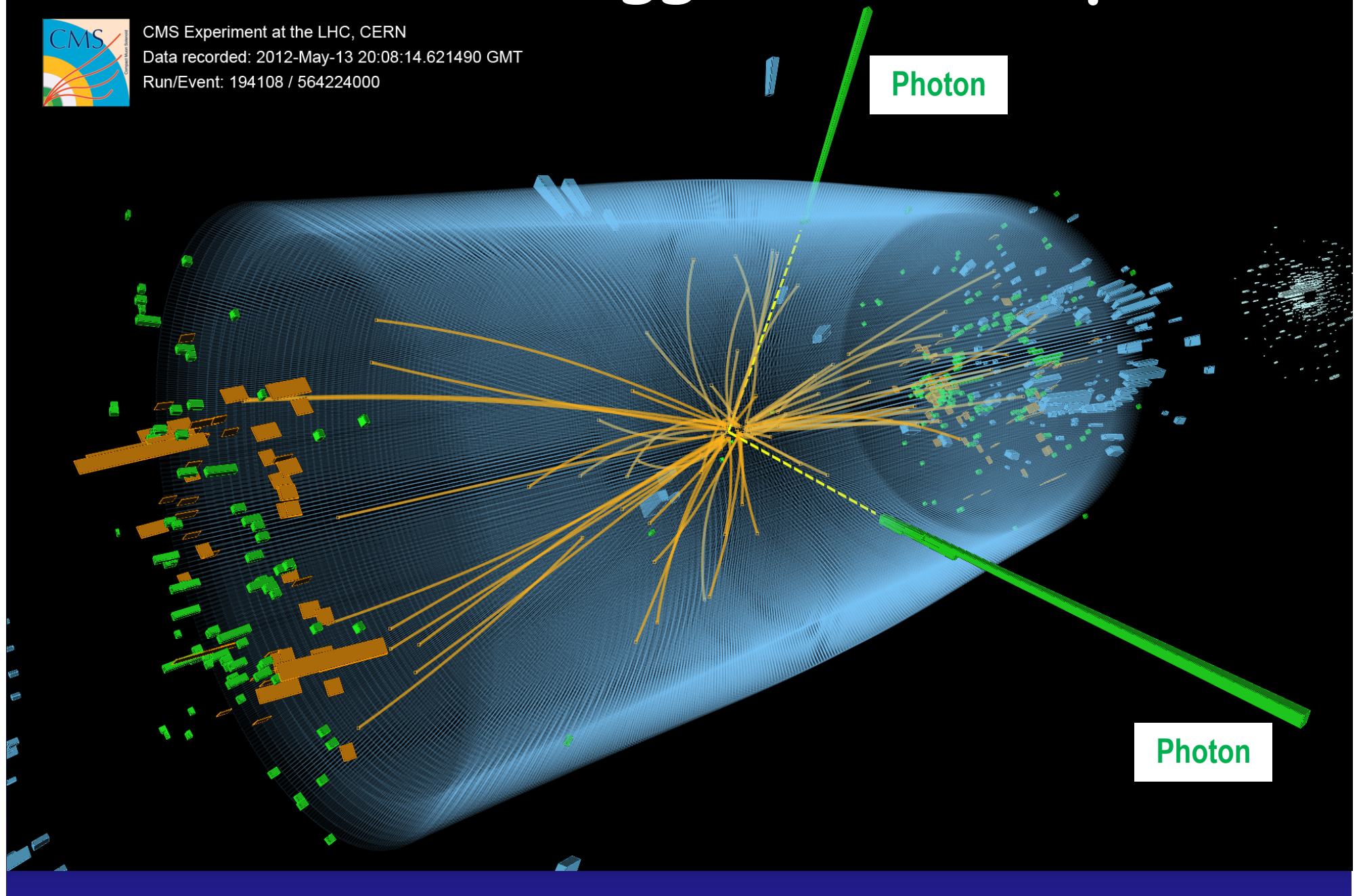
CMS: Candidat Higgs en deux photons



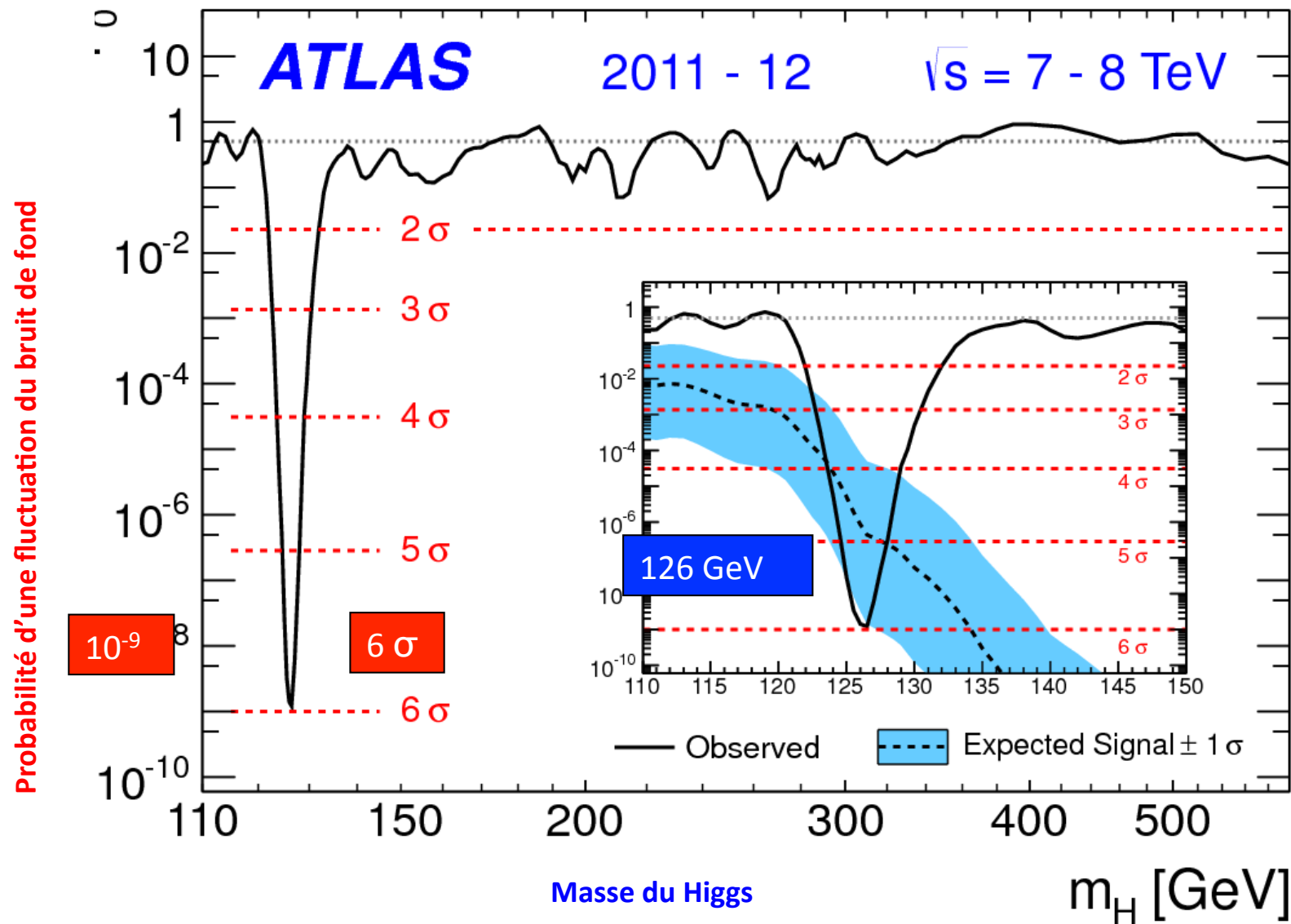
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000



Observation d'un nouveau boson



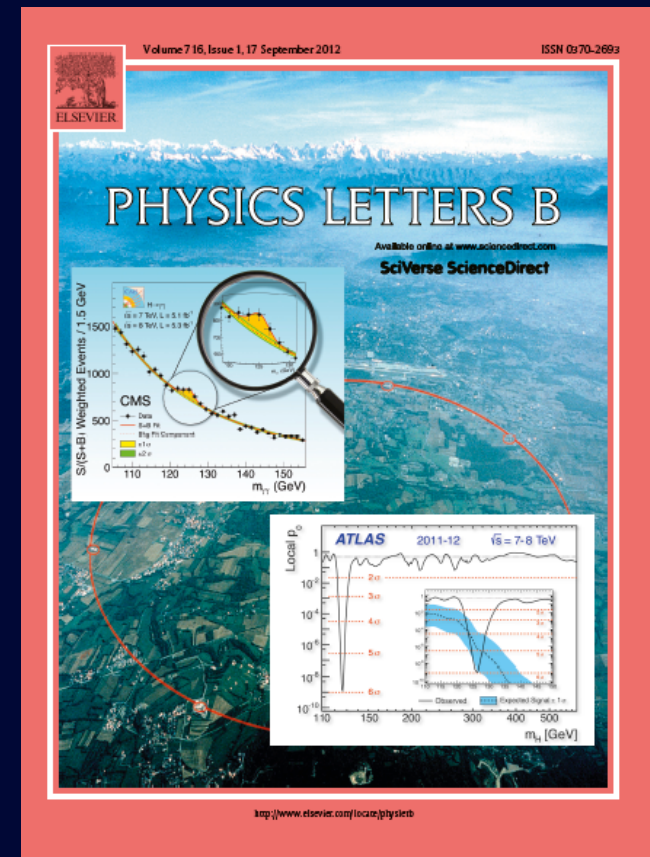
Qu'a-t-on découvert ?

- On a découvert... une nouvelle particule !
 - Probabilité de moins de 2×10^{-9} que ce soit du à une fluctuation du bruit de fond...

Découverte faite par ATLAS et CMS.
Technologies complètement différentes, conçues et exploitées par des équipes différentes, sans se concerter.

Découverte du même excès d'événements à la même masse.

- C'est un boson: son spin est entier.
- Sa masse est $\sim 126 \text{ GeV}$.
- Il se désintègre en paire de bosons ($\gamma\gamma$, ZZ , WW)
- Les premières mesures sont compatibles, au vu des erreurs de mesure actuelles, avec ce qui est attendu par les calculs du **Modèle Standard pour un boson de Higgs** mais..



Grandes questions de la Physique des Particules

- Est ce que c'est le Higgs Standard qui a été découvert? Higgs Supersymétrique? Autre chose?
- Pourquoi l'anti-matière a disparu ?
- Pourquoi 3 familles ? Y'en-t-il d'autres ?
- Hiérarchie des masses
- Peut-on unifier la gravitation et les autres interactions?
 - Mariage Relativité Générale + Mécanique Quantique
 - Indispensable pour comprendre l'origine de l'Univers.
- Origine de la matière noire? De l'énergie noire?

Les réponses à ces questions impliquent (peut-être) une Nouvelle Physique, au-delà du Modèle Standard (dimensions supplémentaires, Supersymétrie, etc...)

Métier de Physicien des particules

Un métier à multiples facettes:

- Conception et réalisation des détecteurs
 - Électronique, mécanique,...
- Simulation
- Acquisition, prise de données
- Analyse des données
 - Software, analyse statistique,...
- Phénoménologie
 - Lien avec la théorie
- Réunions, conférences
 - Beaucoup de temps en réunions
 - Communauté très internationale
- Communication des résultats
 - Journaux scientifiques, grand public,...





Surveillance/maintenance
Prises de données jours et nuits
24h/24, 7j/7

http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration/

Login

European Organization for Nuclear Research



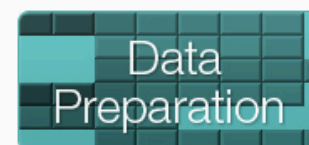
Collaboration

ATLAS Now

ATLAS Public

CERN

MEETINGS



GENERAL

ATLAS Organization

General Information

Secretariat

Newcomers: Registration & Access

Newcomers: Additional Info

Authorship Qualification

Shifts /OTP

Visa Requirements for Visitors

Housing & Local Info

Forms & Services

CERN Ombuds Office

ATLAS Visits

Safety

Job Vacancies

Documentation & Links

ATLAS e-News

GENERAL NEWS



ATLAS RESULTS

Public Results

ATLAS Event Displays

Conferences & Talks

Analysis Tracking - Papers

Analysis Tracking - Conference Notes

DETECTOR ACTIVITIES



SEARCH & PHONES

Search



Name



SERVICES & TOOLS



Une matinée typique...

09:00	Technical Co-ordination	LS1 shut down	LS1 preparation : Inner Detector	3150-R-003
09:30	Operation	Operation/Run Coordination/Daily Meeting	ATLAS daily run meeting	3162-1-K01
09:30	Trigger & Data Acquisition & DCS	DAQ and High-Level Trigger	Configuration&Conrtols WG	40-R-C10
10:00	Muon Spectrometer	Software & Performance	Muon Reconstruction Meeting	40-R-D10
10:00	Outreach & Education	ATLAS Virtual Visits	Virtual Visit: Greece	ATLAS Control Room
11:00	Operation	Operation/Operation Management	OPM Weekly Meeting	3162-1-K01
11:00	Physics	E/gamma combined	Photon Identification	40-R-D10
11:00	TOB (Trigger & Offline Board)		Fortnightly TOB meeting	40/4-C01
11:00	Upgrades for High Luminosity	Insertable B-layer (IBL)	Pixel SR1 Weekly Meeting	2175 - SR1
12:00	Upgrades for High Luminosity	Working Groups and R&D projects	NSW Micromegas analisi IT	
13:00	Physics	Higgs/HSGx Informal Meetings	HSG3 Top Background	
13:00	Physics	Higgs/HSGx Informal Meetings	ttH	40-R-D10
13:00	Physics	Physics and Performance Weeks; Workshops	MC Request Meeting for Common Samples II	Room Georges Charpak (Room F)
13:00	Physics	SUSY/Informal direct stop meetings	Informal direct stop meeting	Vidyo only
13:50	Physics	Higgs/HSGx Informal Meetings	Invisible Higgs	
14:00	Muon Spectrometer	Management	Muon Steering Group	54-E-037
14:00	Physics	Higgs/Higgs Conveners Meetings	Higgs Coordination	42-3-002
14:00	Physics	Standard Model/Informal Electroweak	Wgamma(gamma) analysis 8 TeV	14-4-030
14:00	Physics	Standard Model/Informal Soft QCD	Diffraction with ALFA and pPb	
14:00	Physics	Standard Model/Plenaries	SM W/Z-Physics group Meeting	40-4-C01
14:00	Trigger Meetings	Trigger Coordination	Trigger Coordination	40-R-C10
14:00	Trigger Meetings	Trigger Signatures and Rates/Jet Signature Group	Jet Trigger Signature Group Meeting	304-1-001
14:00	Trigger Meetings	Trigger Signatures and Rates/Tau Signature Group	Tau Trigger Silce Meeting	2-R-030

Déroulement dans le temps

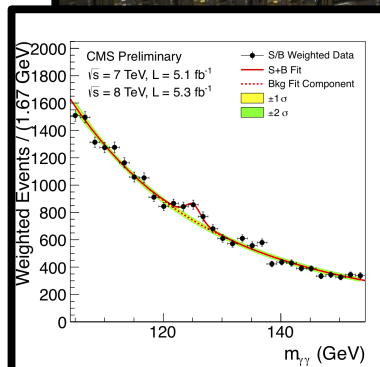
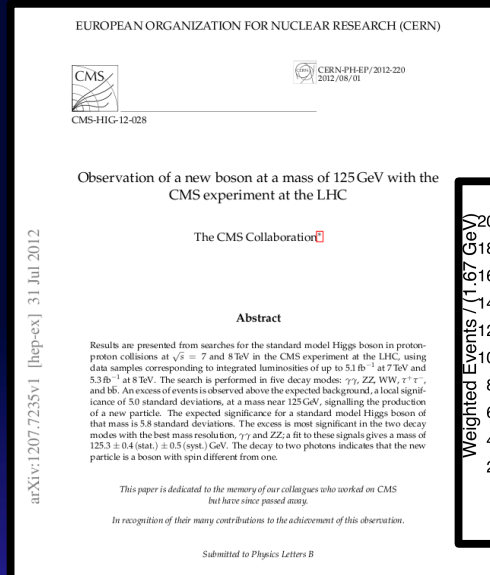
Conception des détecteurs + R&D (1989-1996)

Construction des détecteurs (1996-2008)

Opération & prises de données (2008-2020?)

Ressources informatiques

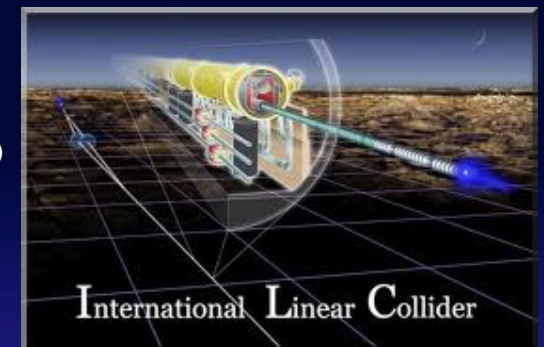
Publications scientifiques



Unique dans
l'histoire de la
science

Le Futur

- La suite du programme du LHC : jusqu' en ~2020
 - 2013 - 2014 : arrêt technique long
 - 2015 - 2018 : reprise avec une énergie de 13 TeV
 - 2022 - ?? : phase à plus haute intensité (luminosité).
 - 10 à 100 fois plus de données qu' actuellement
 - propriétés du nouveau boson et recherche de signatures de "Nouvelle Physique"
- Un nouvel accélérateur ? (horizon 2025-2030 ?)
 - International Linear Collider [ILC] (e^+e^-) ?
 - Collider hadronique à plus haute énergie [LHC-HE] ?
 - ...



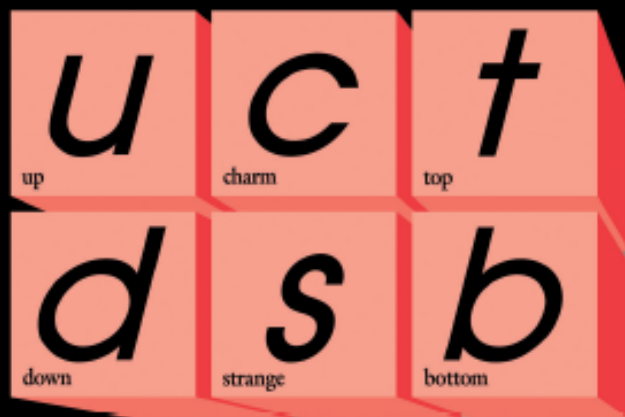
Conclusion

- Le LHC est une machine extraordinaire pour étudier l'infiniment petit
- Le LHC a permis la découverte en juil 2012 d'une nouvelle particule compatible avec le tant attendu boson de Higgs
- S'agit-il bien du boson de Higgs du Modèle Standard?
- Signaux de nouvelle physique au LHC? L'histoire n'est pas finie... Beaucoup d'autres questions restent ouvertes.

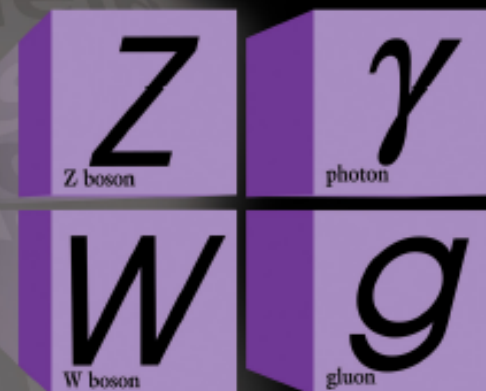
Pour plus d'information

- L'aventure des particules
<http://cpep.lal.in2p3.fr/adventure.html>
- CERN/LHC
<http://public.web.cern.ch/public/fr/LHC/LHC-fr.html>
- LHC France
<http://www.lhc-france.fr/>
- Atlas
[http:// atlas.ch](http://atlas.ch)

Matière



Forces

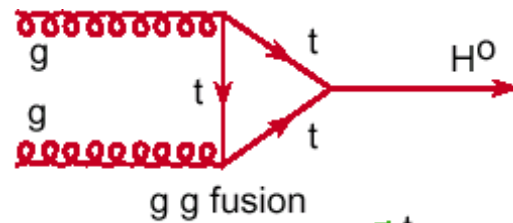


4 % Visible Matter

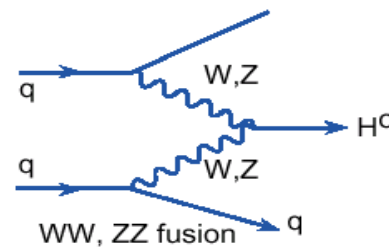


Production du Higgs: dépend de l'énergie

(i) Fusion de gluons



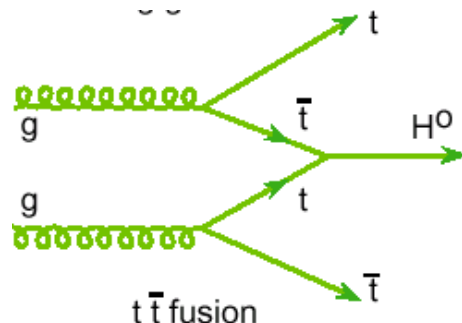
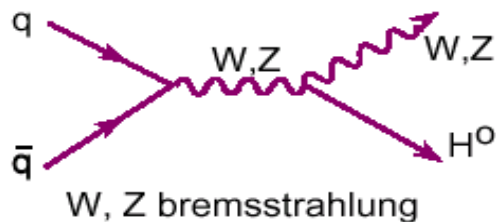
(ii) Fusion de Bosons Vecteurs (W,Z)



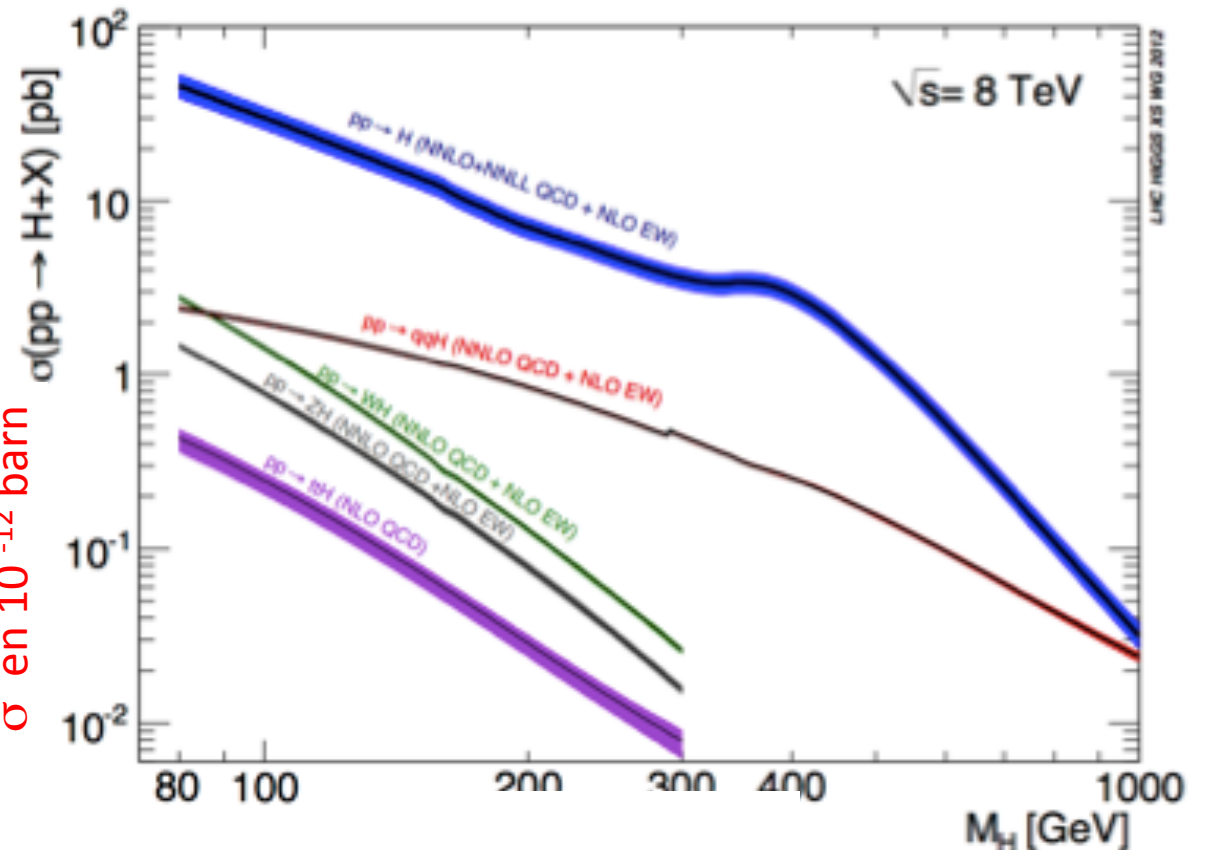
$\sigma_{\text{Tot inel}} = 70 \text{ mbarn}$

10^9 ordres de grandeur en dessous!

(iii) Production associée (W/Z, tt)

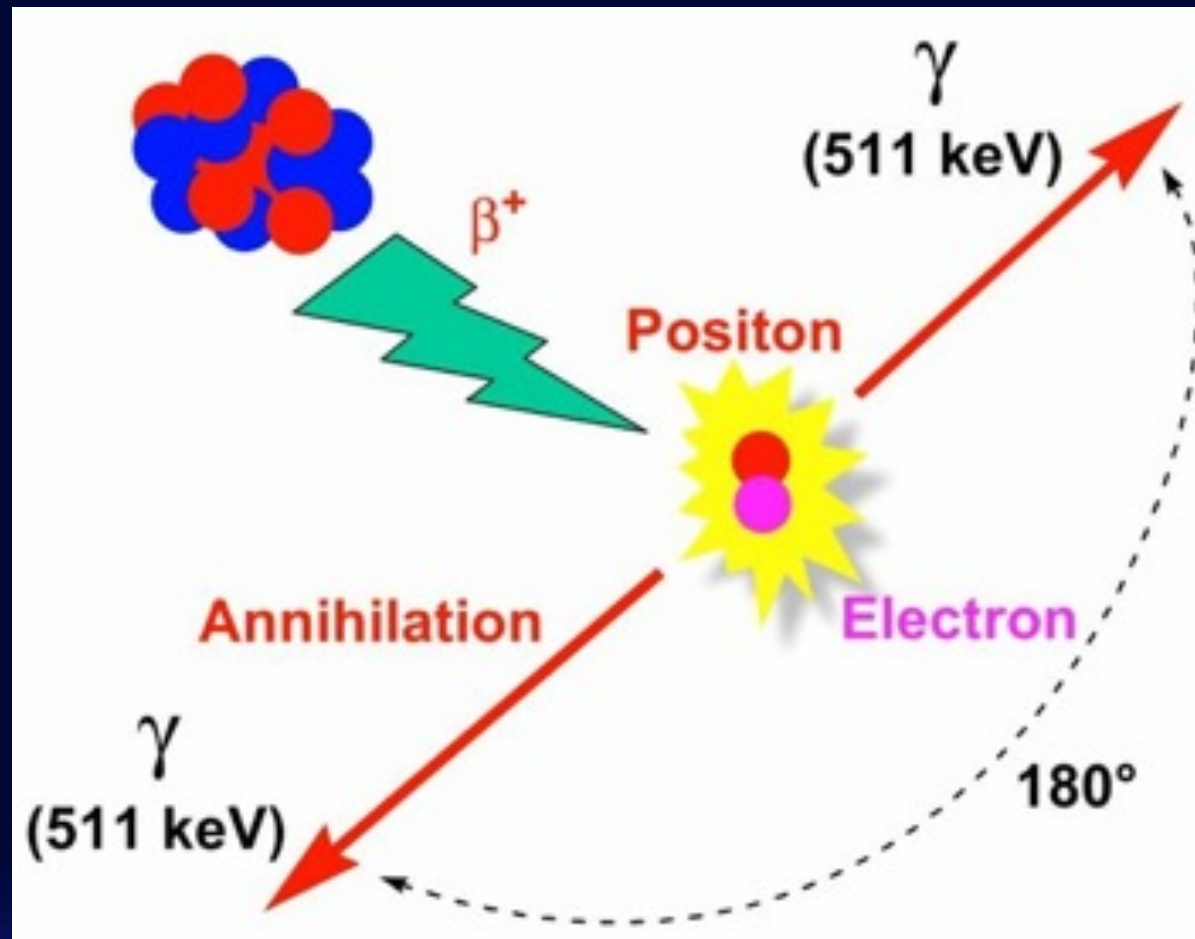


σ en 10^{-12} barn



Très faible probabilité des processus intéressants

Tomographie par Emission de Positrons : Imagerie médicale par Camera TEP



Mécanisme de Higgs : une analogie



Champ de Higgs $\leftrightarrow$ la foule

Particule $\leftrightarrow$ célébrité

Interaction $\rightarrow$ ralentissement

($\sim$ viscosité du milieu)

Particule de masse nulle (photon) : $v = c$

Particule massive : $v < c$

Champ de Higgs :

Champ scalaire

Boson de Higgs :

Particule de spin 0, massive

La masse des particules est la résultante des interactions entre celles-ci et le champ de Higgs

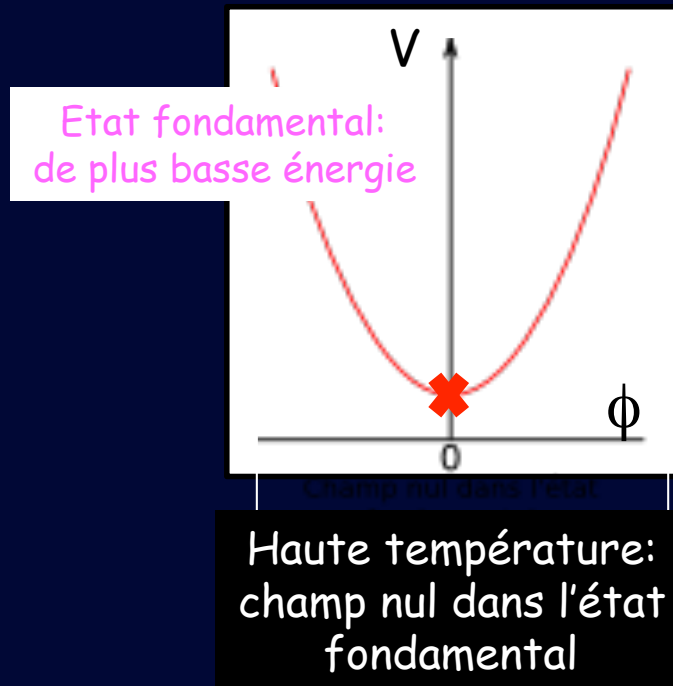
Excitation du milieu

Observer un boson de Higgs permettrait de valider ce mécanisme

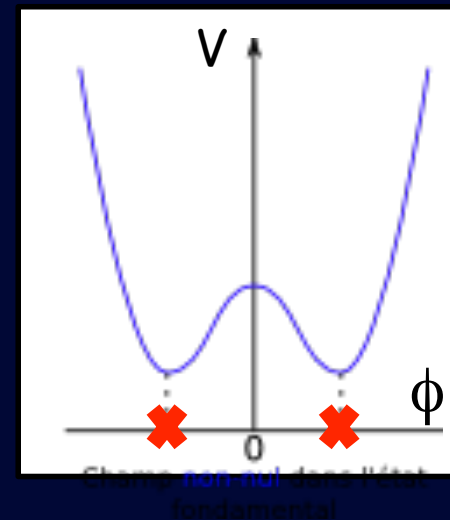
Création d'un boson $\leftrightarrow$ propagation de la rumeur de la rumeur

Mécanisme de "Higgs"

- Brisure Spontanée de Symétrie créant un nouveau champ:
un champ scalaire non nul à l'état fondamental.

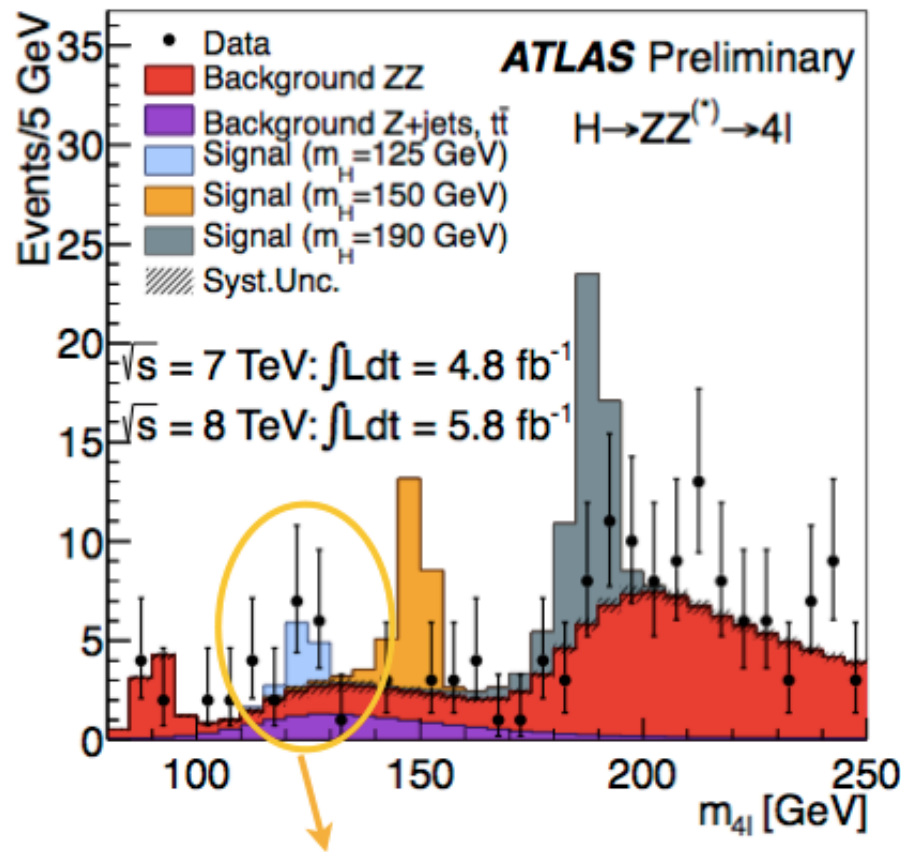


Particules dans un **champ nul**
→ elles n'interagissent pas:
elles restent **sans masse**.



Baisse de température: 10^{-12} s après le Big Bang
champ non nul dans l'état
fondamental

Particules dans **un champ non nul**
→ elles interagissent:
elles acquièrent une **masse apparente**.



Expected Background	5.1 ± 0.8
Expected Signal	5.3 ± 0.8
Obs.	13

Higgs en 4 leptons:
 peu d'événements de signal,
 mais très peu de bruit de
 fond

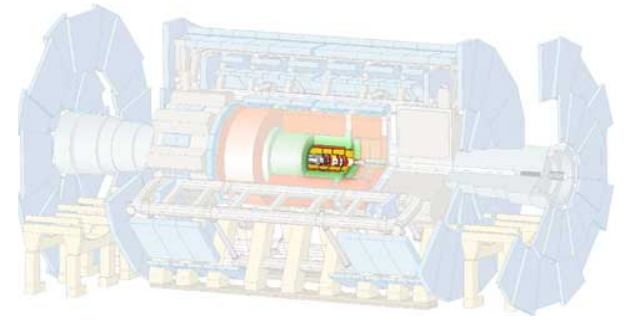
Significativité statistique 3.4
 sigma : ~ 1 chance sur 1000 de
 se tromper

13 Évènements observés

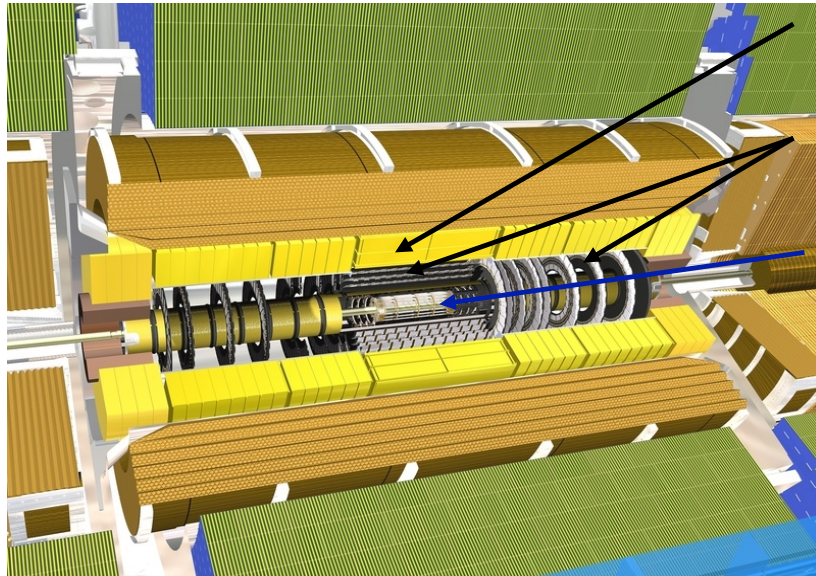
Contraintes sur les détecteurs au LHC

- survivre à plus de 10 ans de fonctionnement
- **Détecteurs rapides** (~20-50ns) : ne pas sommer des réponses de plusieurs croisements de faisceaux (25ns) : contraintes sur électronique!
- **Très granulaires**: minimiser la probabilité que les **particules issues d'événements intéressants** (Higgs..) soient dans le même endroit que les événements de "bruit": nombreuses voies d'électronique
- Détecteurs **résistants au rayonnements** jusqu' à 10^{16} neutrons/cm²/an!
- Quantité de données: $\sim 10^9$ événements (1 Mbyte) / an
1CD toutes les 2 secondes

Détecteur Interne



3 Sous-détecteurs de traces chargés dans un champ de 2 T

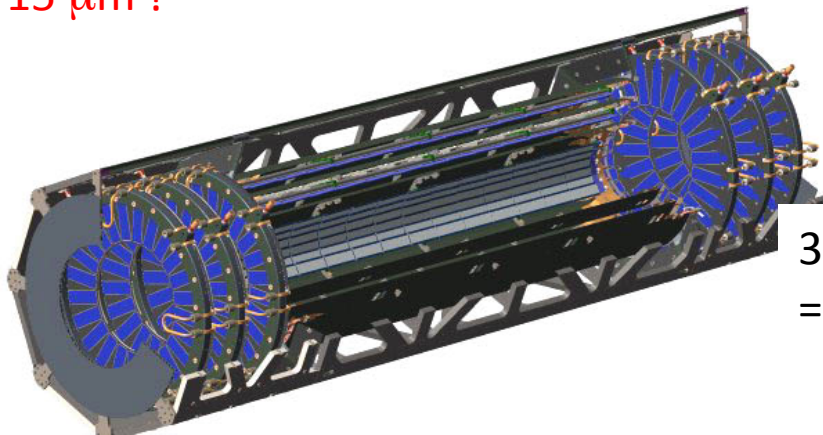


Rayonnement de transition

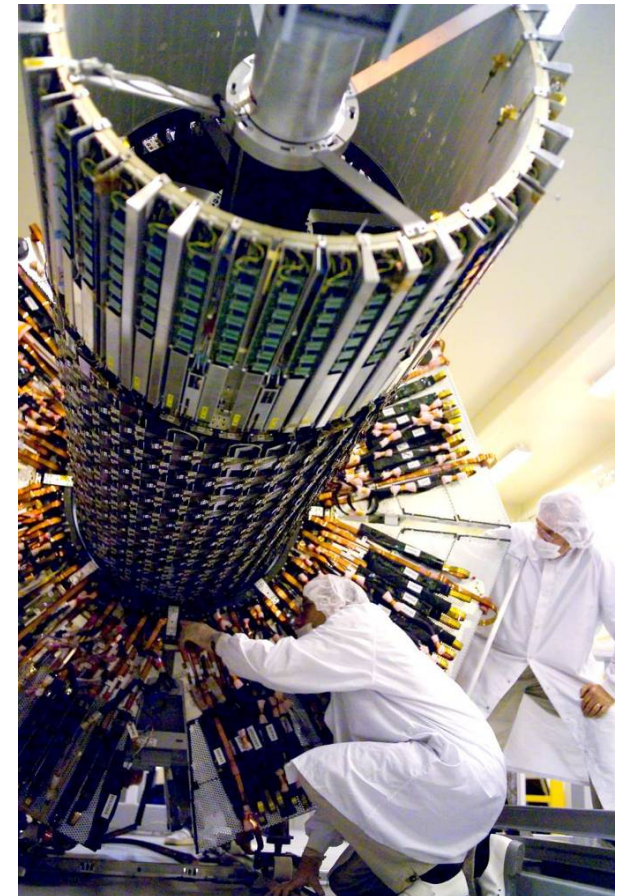
Strips Silicium

Détecteur de Pixel

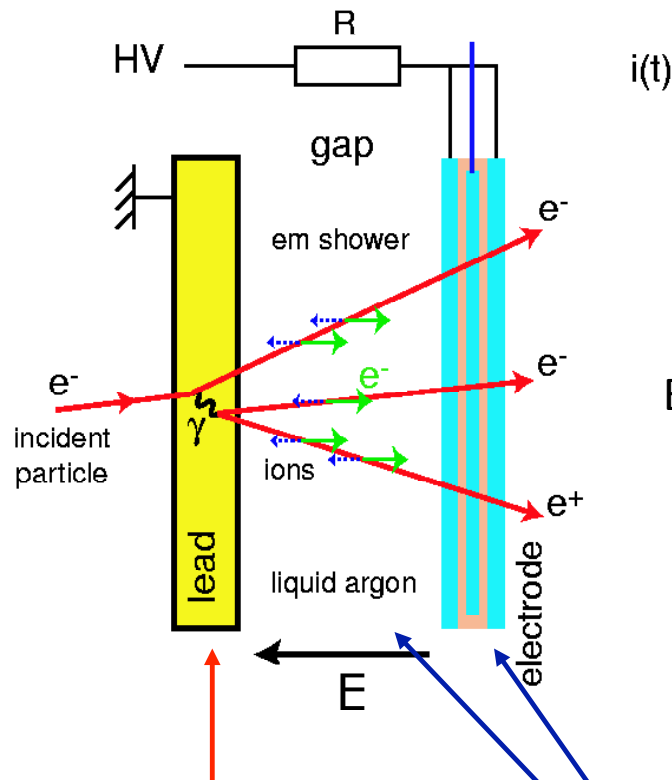
140 millions de cellules sensibles, résolution sur la position
 $\sim 15 \mu\text{m}$!



3 couches de silicium à r
 $= 4.7, 10.6$ et 13.7 cm



Mesure d'énergie



Principe: on veut arrêter la particule pour mesurer toute son énergie

Exemple: calorimètre EM à **échantillonnage** dans ATLAS:
succession de milieu **dense**
de milieu **actif**

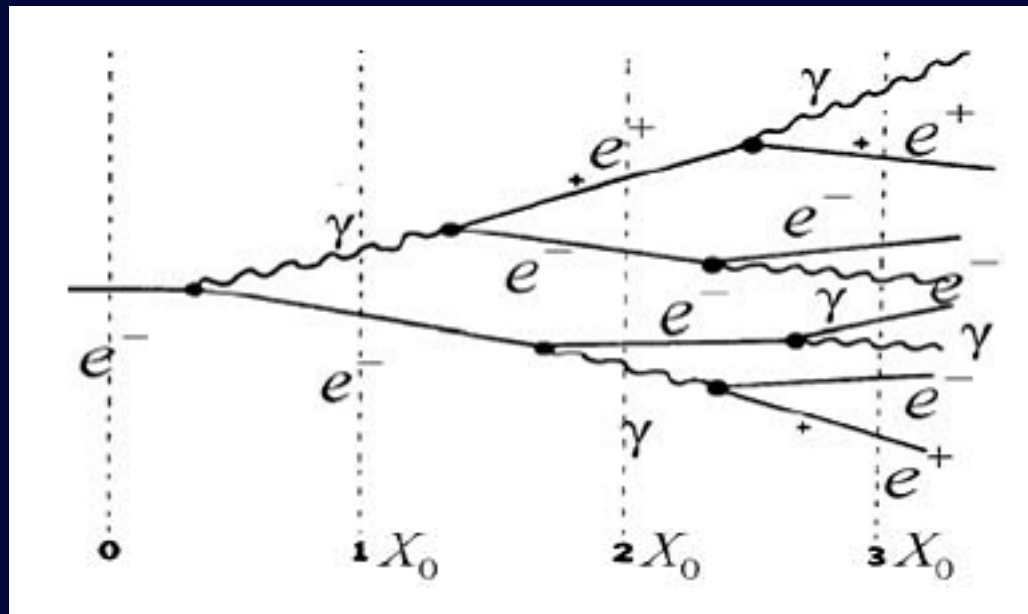
- milieu **dense** (Pb) pour le développement de la gerbe

- milieu **actif** pour mesurer le **dépôt d'énergie** à partir du courant I détecté: **Argon liquide + électrodes**.

L'amplitude du signal proportionnelle à l'énergie déposée.

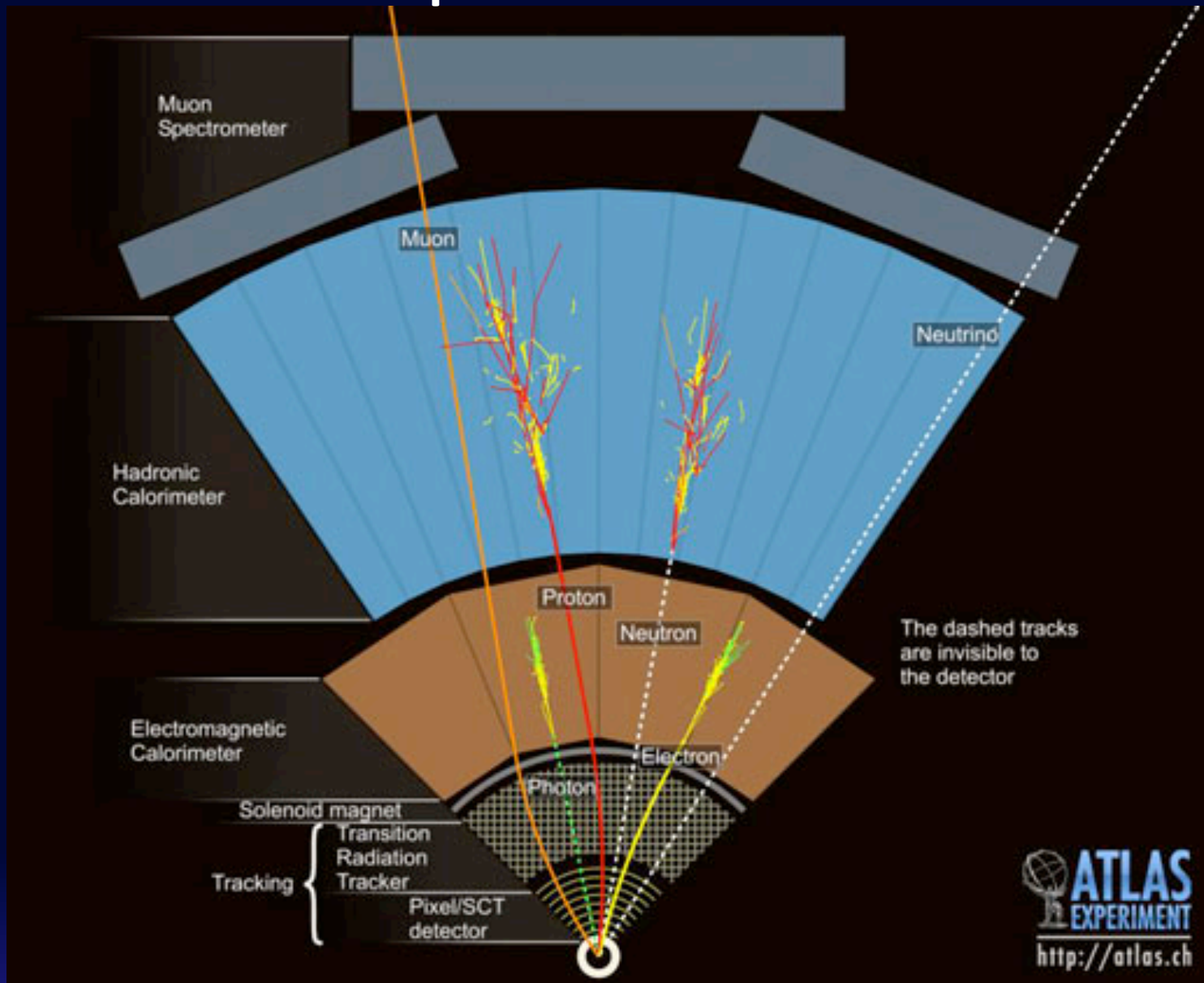
Fonctionnement d'un calorimètre

- Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière
→ détecteur dense

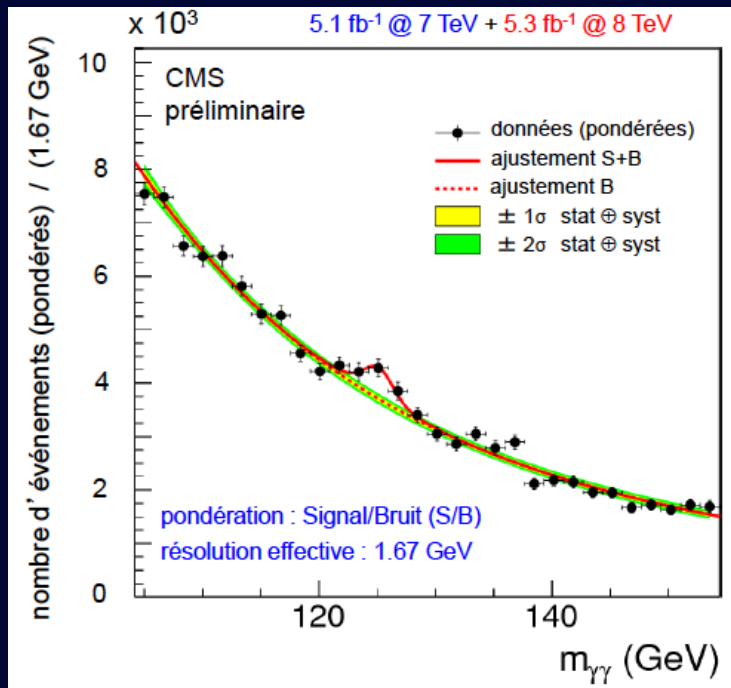


- Les particules “filles” ainsi produites vont laisser un signal dans les parties actives du calorimètre
 - par ionisation par exemple
 - Production d'une cascade de particules

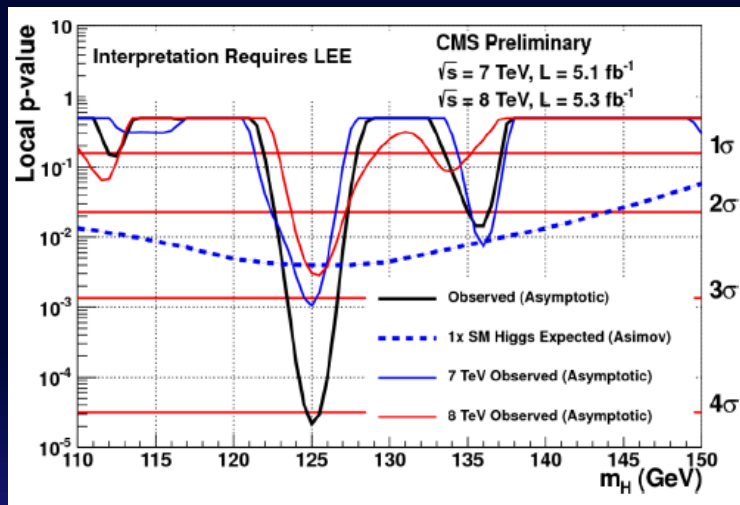
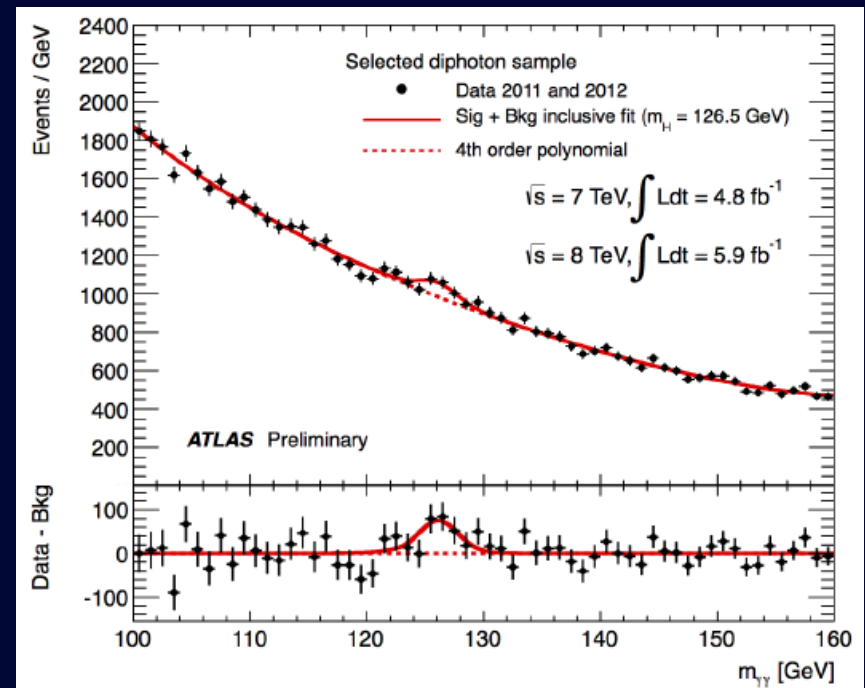
Concept de détecteur



Higgs en 2 photons

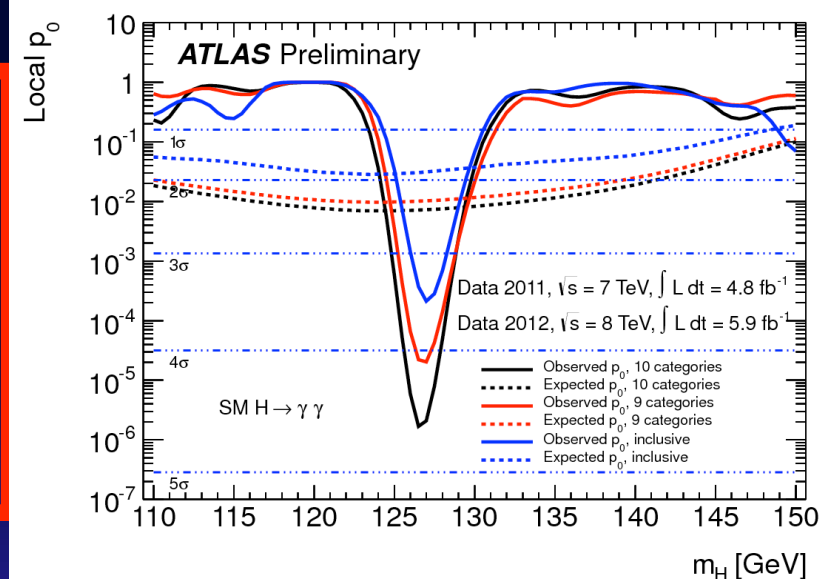


Probabilité
que le fond
fluctue
autant ou
plus que ce
que l'on
observe est
 3.10^{-7} pour
 5σ



CMS
4.1 σ
@125 GeV

ATLAS
4.5 σ
@126.5 GeV

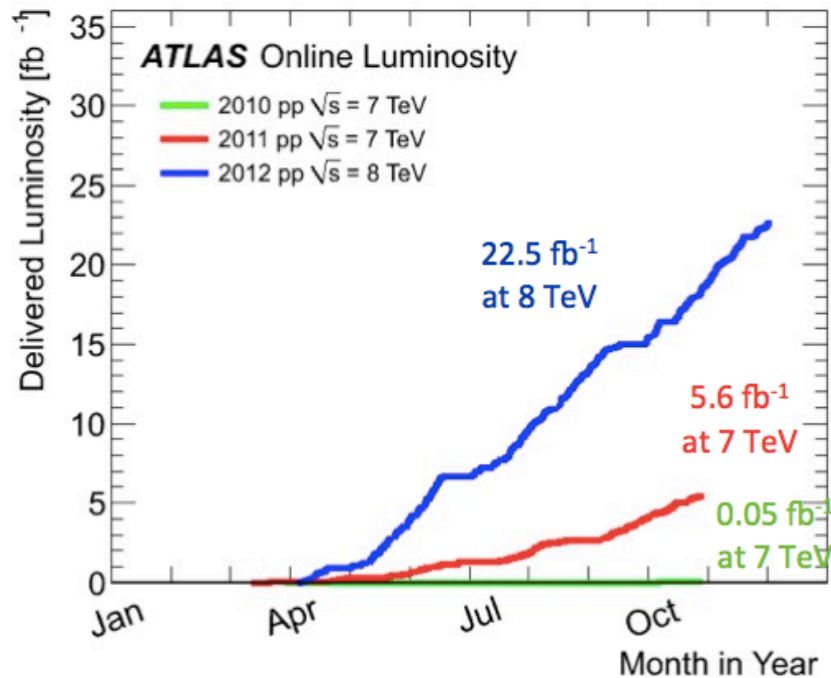


Résumé: les particules

La matière

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z⁰ weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ±1 1 W[±] weak force
Leptons				Bosons (Forces)

Les Interactions



- The experiments typically use more than 90% of these delivered data

- Select only 400 events / s over the 600 millions produced: trigger must be 100% efficient on our preferred signatures...
- For comparison: the LHC produces
 - 1 Higgs every 10 s
 - 1 $\text{H} \rightarrow \gamma\gamma$ every 10 min
 - 1 $\text{H} \rightarrow 4\text{l}$ every 3 hours...
- Data are exploited using a gigantic world-wide computing grid: no Higgs boson without this...



Disposition du détecteur

