

L'histoire et les dernières nouvelles du LHC

Gaëlle Boudoul

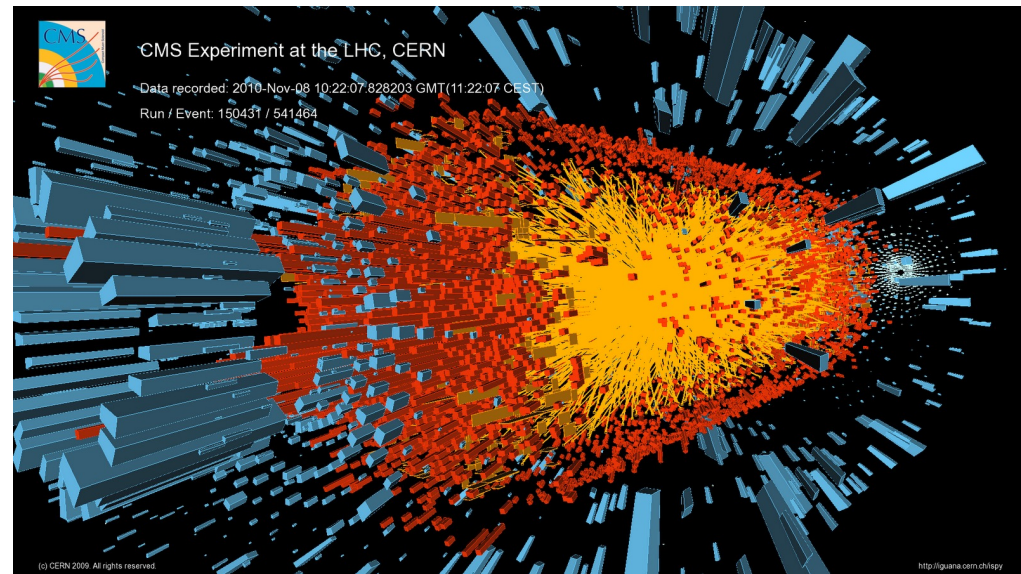
IP2I-Lyon, CNRS/IN2P3

AICP, CNRS/IN2P3

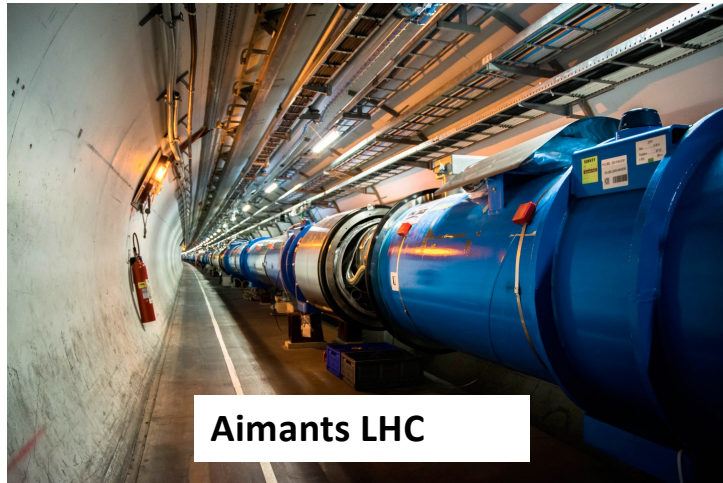
Gaëlle.Boudoul@cern.ch

Les grands enjeux du LHC

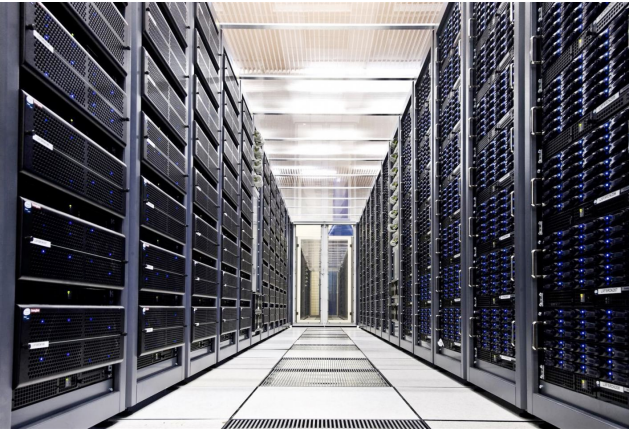
- Projet officiellement approuvé en décembre 1994
- Tester vérifier le modèle standard de la physique des particules , en particulier **l'existence du Boson de Higgs**
- La mise en évidence de la supersymétrie est le second enjeu du LHC ainsi que le tri entre les modèles supersymétriques viables
- Identifier les constituants de la matière noire en concordance avec les observations cosmologiques
- Tester d'autres modèles de physique des hautes énergies, notamment la théorie des cordes, et l'existence de dimensions supplémentaires
- Mesure de l'asymétrie matière-antimatière
- Plasma de quark et gluon
- Etc !



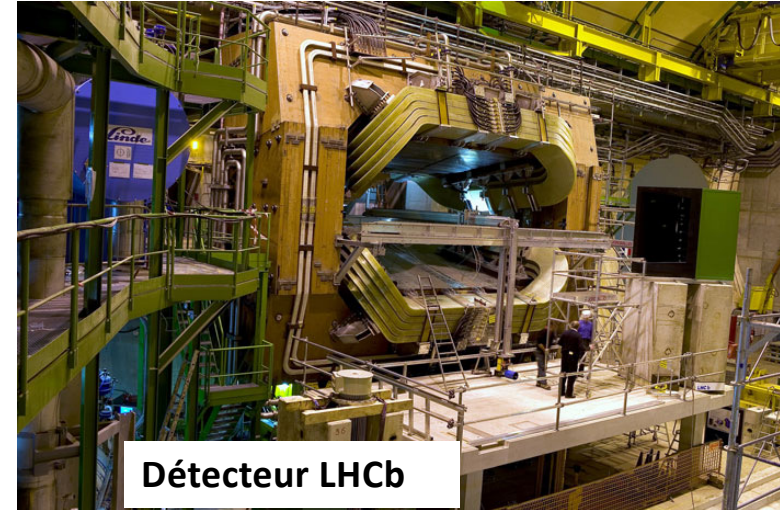
Depuis l'accord du projet , Le Gigantisme en marche ..



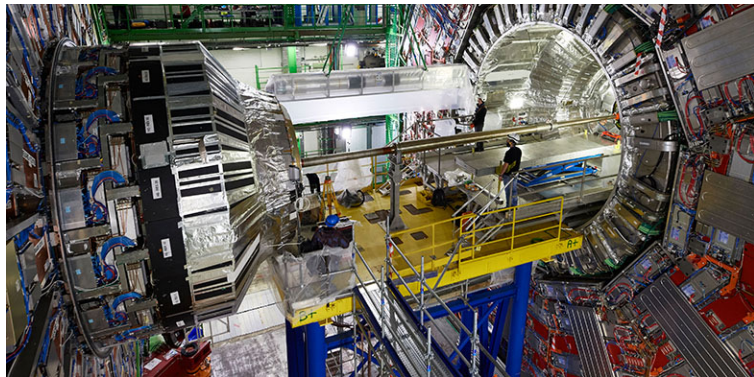
Aimants LHC



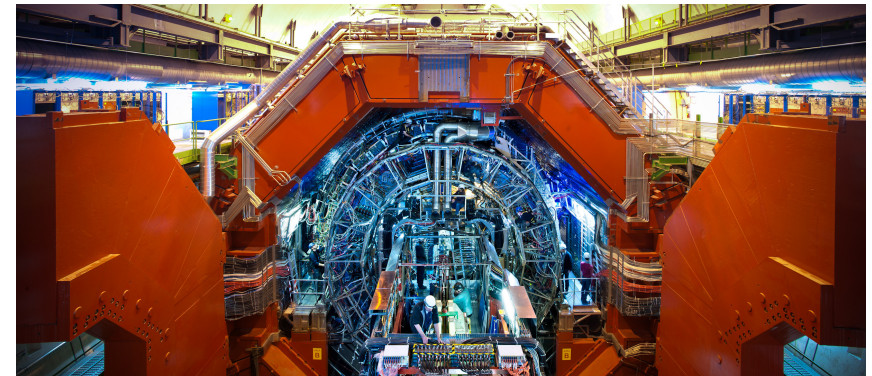
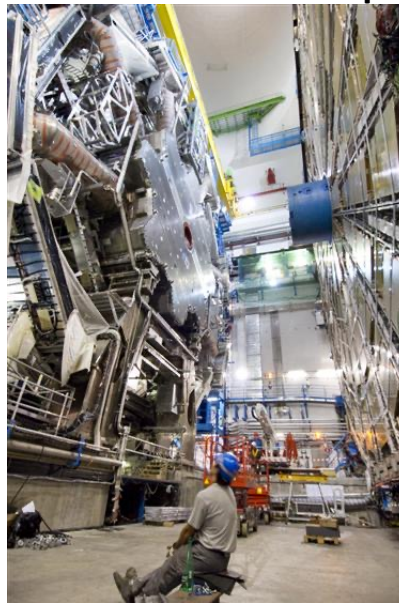
LHC Computing Grid



Détecteur LHCb



Détecteur CMS & Atlas (construction)



Détecteur ALICE (construction)



*Run 1 :
Premières
collisions 2009*



4 Juillet 2012 ...



J. Incandela (CMS)



F. Gianotti (Atlas)

- L'annonce au monde entier...

MM Englert-Higgs



Publication
Sept 2012

Volume 716, Issue 1, 17 September 2012 ISSN 0370-2693

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect

The cover features two physics plots. The top plot, from CMS, shows the ratio of signal to signal plus background, $S/(S+B)$, weighted events per 1.5 GeV bin, as a function of the transverse mass m_T in GeV. The data points (black dots) are fitted with a signal plus background fit (red line) and a background fit (dotted line). The plot includes a magnified view of the region around 130-140 GeV. The bottom plot, from ATLAS, shows the local P_0 probability as a function of m_T in GeV for data collected in 2011-12 at a center-of-mass energy $\sqrt{s} = 7-8$ TeV. The plot shows the observed data (black line) and the expected signal for a 1-sigma discovery (blue shaded area). The y-axis is logarithmic, ranging from 10^{-10} to 1. The x-axis ranges from 110 to 500 GeV.

$S/(S+B)$ Weighted Events / 1.5 GeV

m_T (GeV)

CMS

• Data
— S+B Fit
... Bkg Fit Component
■ $\pm 1\sigma$
■ $\pm 2\sigma$

ATLAS 2011-12 $\sqrt{s} = 7-8$ TeV

Local P_0

m_T [GeV]

— Observed
... Expected Signal = 1σ

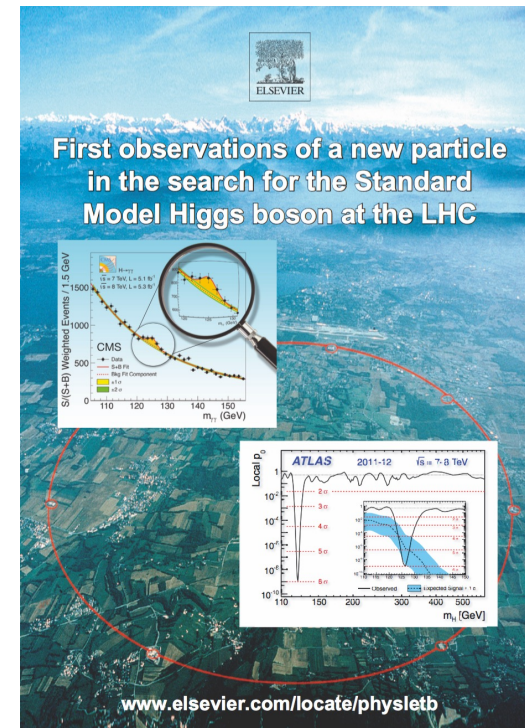
2 σ
3 σ
4 σ
5 σ
6 σ

<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

8 Octobre 2013 – Prix Nobel

Le 8 octobre 2013, le prix Nobel de Physique a été attribué conjointement à **François Englert et Peter Higgs** pour

« *la découverte théorique du mécanisme contribuant à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques et récemment confirmée par la découverte, par les expériences ATLAS et CMS auprès du LHC du CERN, de la particule fondamentale prédite par cette théorie* ».



Des prédictions aux mesures

- "Histoire" du modèle Standard:
 - Années 30, 40: premières formulations de QED,
 - Années 50: formulation covariante de la théorie QED et Yang-Mills, interaction électrofaible,
 - 1964: SSB et le boson de Higgs,
 - 1968: découverte du quark étrange (SLAC),
 - 1974: découverte du quark de charme (SLAC),
 - 1977: découverte du quark bottom (E288, Fermilab),
 - 1983: découverte des bosons W, Z par les expériences UA1 et UA2 (SPS, CERN),
 - 1995: découverte du quark top par les collaborations D0 et CDF (Fermilab),
 - 2012: découverte du boson de Higgs par les collaborations ATLAS et CMS (CERN).
- Le Modèle Standard a été construit et confirmé expérimentalement au cours des 80 dernières années. Il a fallu 50 ans pour découvrir le Higgs. !

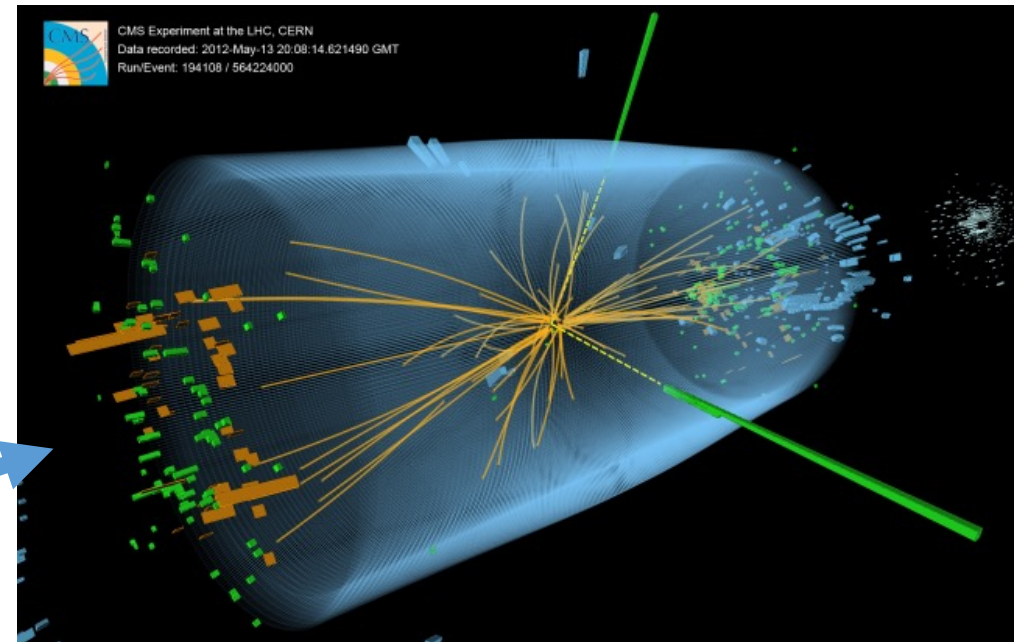


Les détecteurs du LHC ne détecte pas le Higgs directement

- Particule très instable (10^{-22} s), se désintégrant immédiatement en paire d'autres particules, de façon imprévisible (sauf en moyenne)
- L'énergie (ou la rumeur de l'analogie précédente) introduite par le LEP avait permis d'exclure un Boson de masse <114 GeV
- Taux de production (pour une masse of 125 GeV) : **1 boson de Higgs produit tous les 5 milliards de collisions ...**

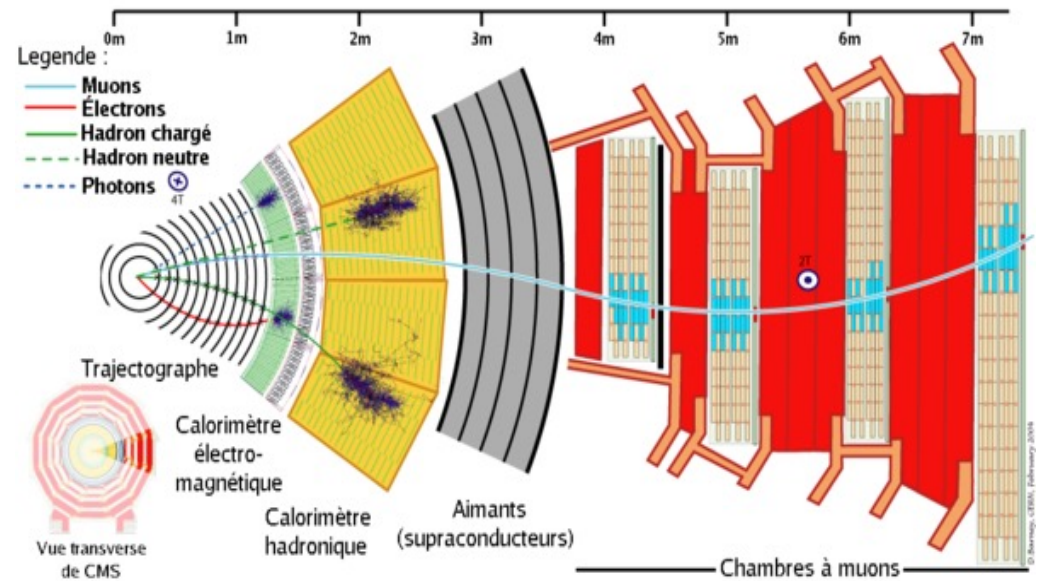
Probabilités de désintégration prédites pour une masse de 125 GeV

$H \rightarrow b\bar{b}$	58%
$H \rightarrow W\bar{W}^*$	21%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.4%
$H \rightarrow Z\bar{Z}^*$	2.7%
$H \rightarrow \gamma\gamma$	0.2%



Détecter les particules

- Pour chaque collision (1 tous les 25 ns), il faut déterminer les particules produites.
- Différents types de particules (objets) peuvent être reconstruits (détectés):
 - Trajectoires de particules chargées (traces),
 - Jets de hadrons de calorimètre hadronique,
 - Photons du calorimètre électromagnétique.
 - Leptons chargés:
 - Muons, combinaison de traces et d'informations provenant des chambres à muons.
 - Electrons, combinaison de traces et informations provenant du calorimètre électromagnétique



Aventure scientifique et humaine



- Dizaines de milliers de chercheurs du monde entier.
- Nécessité d'une étroite collaboration au sein même des laboratoires.
- Convergence de compétences
 - Administratifs, chercheurs, techniciens, ingénieurs ...
- L'enseignement et la formation des futurs chercheurs, ingénieurs, techniciens... sont décisifs dans leur choix, leur compétence et en particulier ici dans la contribution à **cette quête mondiale.**

2013 Fin du Run1 : Long Shutdown

- LS1 : Long Shutdown #1 (arret prolongé numero 1)

SHUTDOWN: NO BEAM				
Comments (16-Feb-2013 08:25:13) *** END OF RUN 1 *** No beam for a while. Access required time estimate: ~2 years	BIS status and SMP flags	B1	B2	
	Link Status of Beam Permits	false	false	
	Global Beam Permit	false	false	
	Setup Beam	true	true	
	Beam Presence	false	false	
	Moveable Devices Allowed In	false	false	
	Stable Beams	false	false	
AFS: Single_36b_4_16_16_4bpl9inj	PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED

- l'énergie des collisions de particules sera de 13 TeV (soit 6,5 TeV par faisceau) contre 8 TeV (4 TeV par faisceau) en 2012.
 - plus l'énergie est grande, plus la masse des particules produites est importante. En augmentant la puissance, nous pouvons donc créer des particules plus lourdes
- Les détecteurs ont été peaufinés, améliorés , juste quelques exemples:
 - Le détecteur à pixels d'ATLAS a été doté, au plus près du centre, d'une quatrième couche permettant une meilleure identification de vertex, essentielle pour distinguer des collisions intéressantes.
 - CMS a ajouté une quatrième station de mesure à chaque bouchon du système pour muons, pour distinguer les muons à faible impulsion du bruit de fond, compte tenu d'une intensité de faisceau accrue

2015 : Démarrage du Run 2

- Le LHC s'est arrêté près de 2 ans pour redémarrer en 2015 avec une énergie encore plus élevée, passant de 8 à 13 TeV, ouvrant de nombreuses perspectives de découvertes.
- Tout recommence !



2015 : On découvre, on mesure!

- *Pentaquark découvert par LHCb (Juillet 2015):*
 - « Nouvelle particule, qui, en plus de cinquante ans de recherches expérimentales, n'avait encore jamais été observée. L'étude de ses propriétés pourrait nous permettre de mieux comprendre comment est constituée la matière ordinaire, c'est-à-dire les protons et les neutrons dont nous sommes tous composés. » Guy Wilkinson, porte-parole de LHCb.

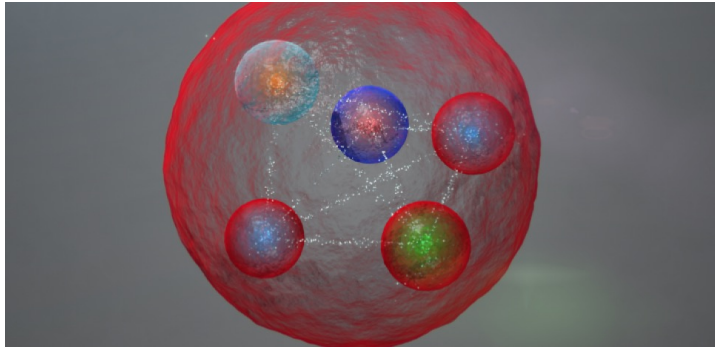
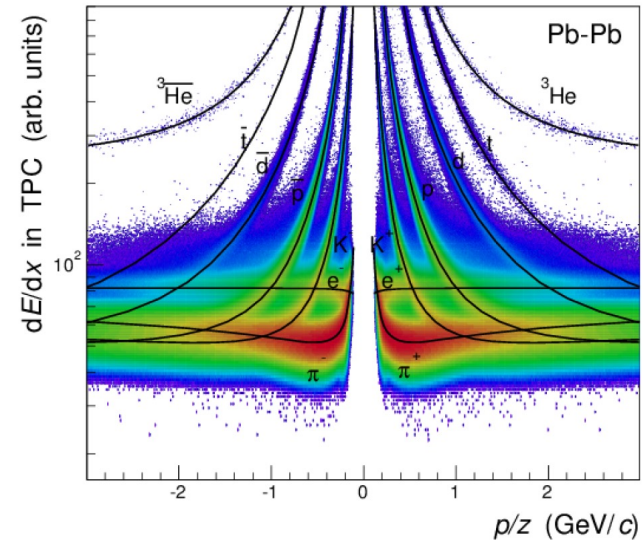


Illustration de l'agencement possible des quarks dans une particule pentaquark

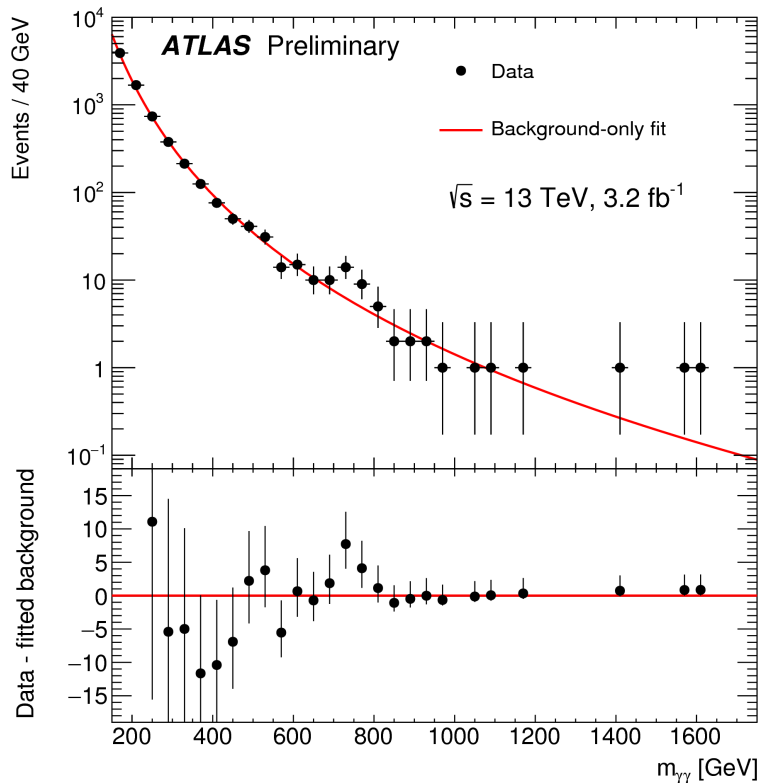


mesure précise de la différence entre les rapports masse sur charge électrique de noyaux légers et des antinoyaux correspondants
Par ALICE (aout 2015)

Et ce ne sont que quelques exemples .. Au cours de cette année plusieurs centaines de publications pour les quatre expériences du CERN!

Décembre 2015 : The 'thing'

- Décembre 2015 : Nouvelle particule... ou fluctuation statistique
 - Excès en deux photons mesuré par CMS et Atlas
 - Non prédite....
- 2016 devait nous donner la réponse ...



→ 2016 : No - 'thing'

- 2016 nous a en effet donné la réponse
 - Etudes poussées, indépendantes, ont été menées avec des données beaucoup plus volumineuses
- “No excess of events observed in the region around 750GeV”
- les analyses des données menées depuis décembre 2015 ayant révélé que la fluctuation était une fluctuation statistique et non pas le signe de l'existence d'une nouvelle particule élémentaire

Mesure de précision

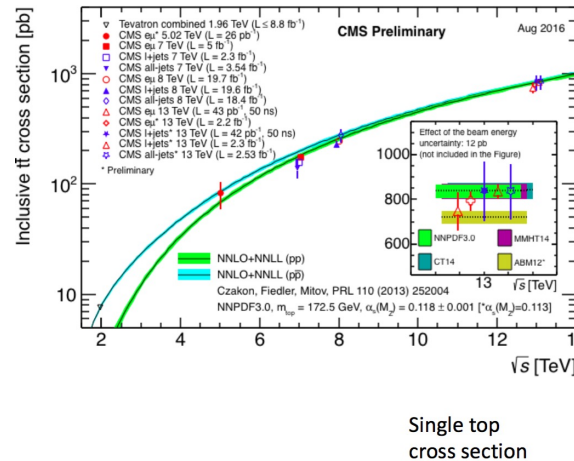
- Le quark TOP , ‘dernière’ particule de l’assemblage du modèle standard (a été découvert en 1995 par l’accélérateur américain du Tevatron (près de Chicago))
- Aujourd’hui on mesure précisément sa section efficace en explorant plus loin en énergie



LHC : a Top quark factory

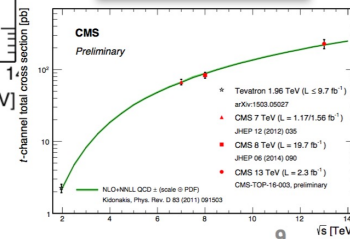


CMS PAS TOP-16-006

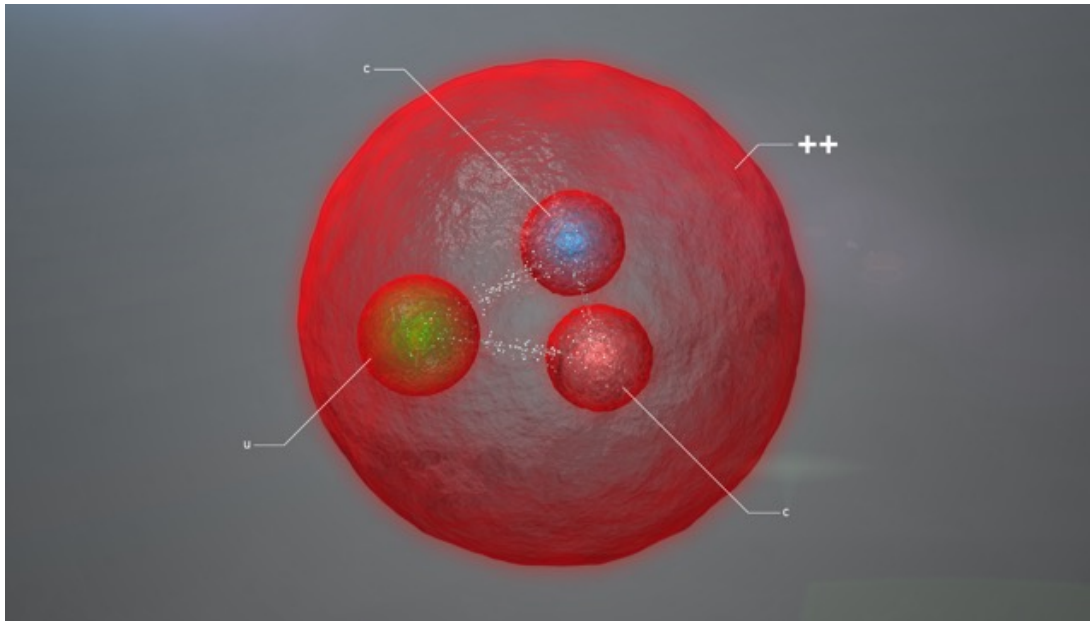


ttbar cross section
Measured at 4
different
energies

CMS PAS TOP-16-003

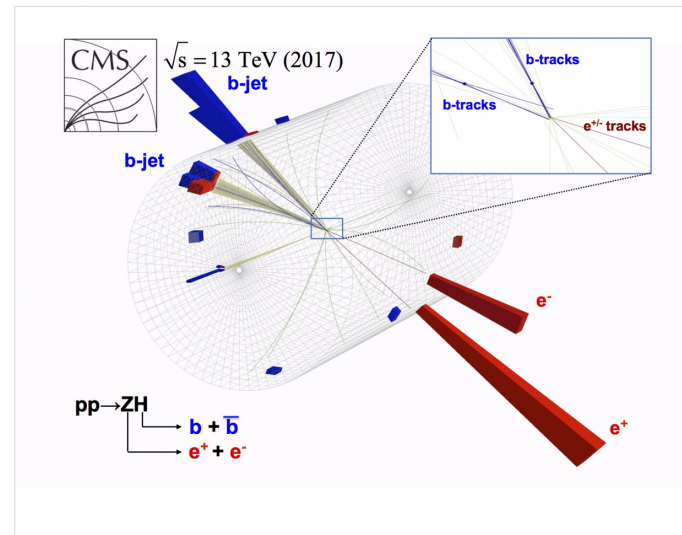
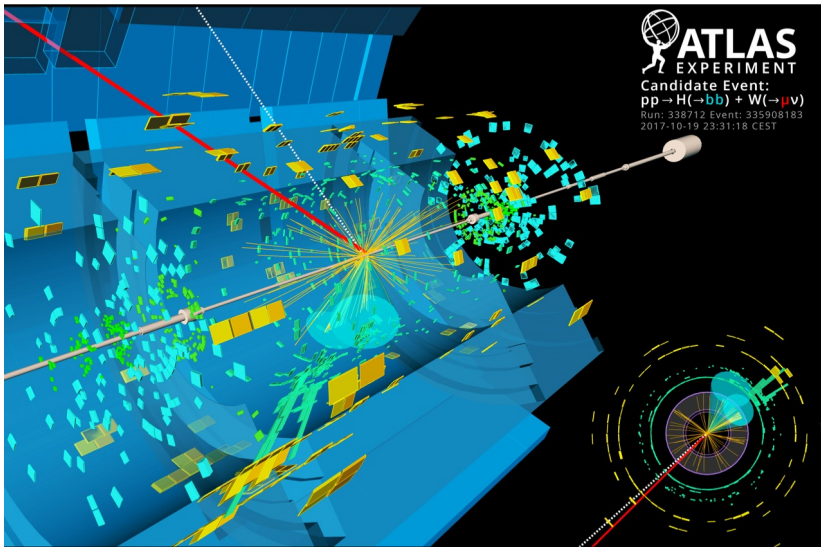


2017 : LHCb: nouvelle particule : Ξ_{cc}^{++}



- nouvelle particule contenant deux quarks charmés et un quark up
 - Prédite mais jamais observé
- La masse de la nouvelle particule identifiée est d'environ 3621 MeV, soit près de quatre fois celle du proton (le baryon le plus connu)
- *Le fait d'avoir trouvé un nouveau baryon, contenant deux quarks lourds, présente un grand intérêt car celui-ci nous offre un outil exceptionnel pour sonder plus avant la chromodynamique quantique, à savoir la théorie décrivant l'interaction forte*

2018 Higgs again

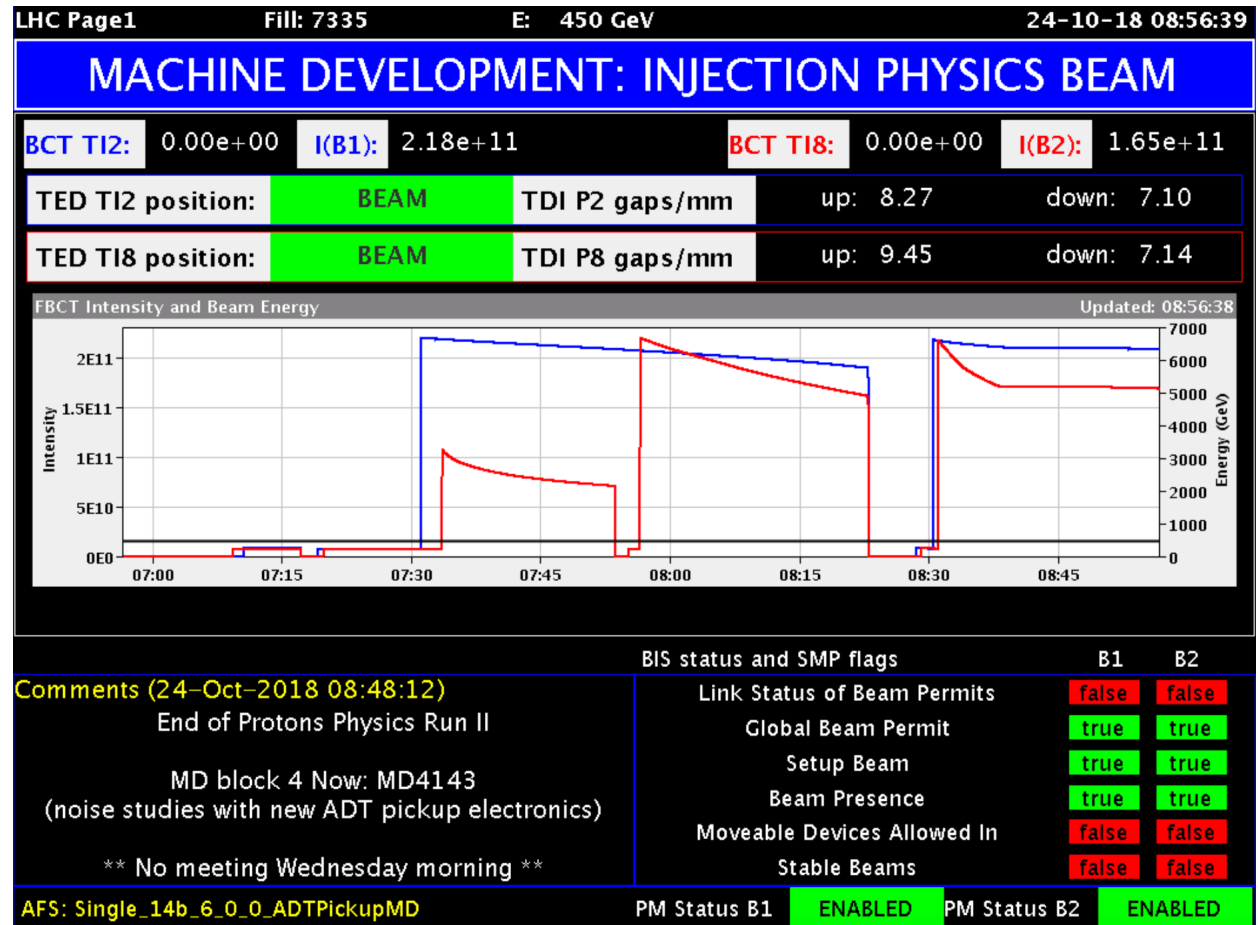


Événement candidat enregistré par CMS pour une désintégration du boson de Higgs (H) en deux quarks b, associée à une désintégration d'un boson Z en un électron (e⁻) et un antiélectron (e⁺). (Image : CMS/CERN)

- Genève, le 28 août 2018. Six ans après la découverte du boson de Higgs la désintégration de cette particule en d'autres particules fondamentales, les quarks b, a enfin été observée.

2018 : End of Protons Physics Run II

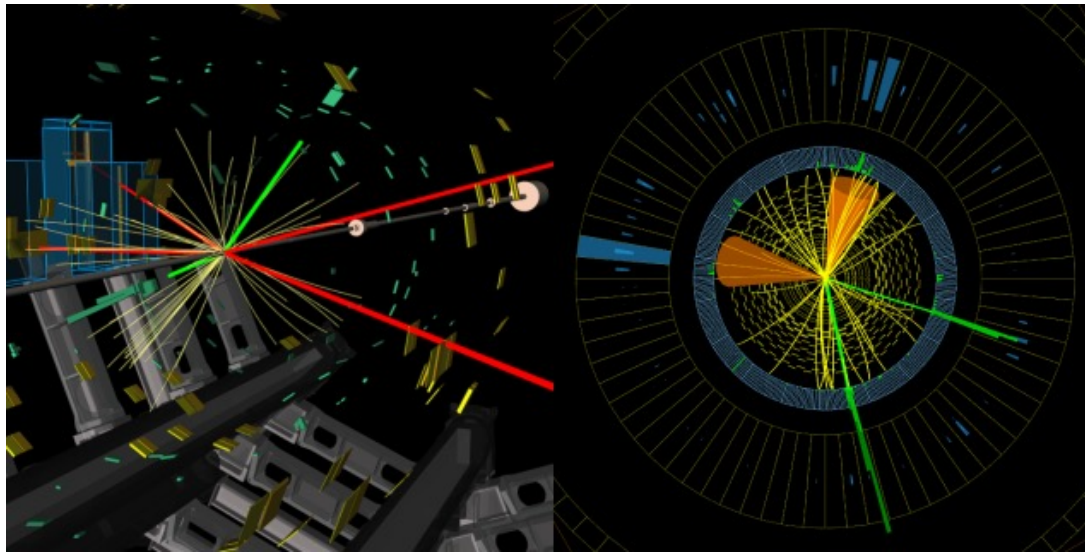
- 24 Octobre 2018 @ 8am
 - 4 an déjà !
- Redémarrage at 13.6TeV en 2021 2022 (COVID...)
 - Plus haute énergie
 - Cure de jouvence pour les détecteurs !



<https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php>

2019 : Higgs toujours

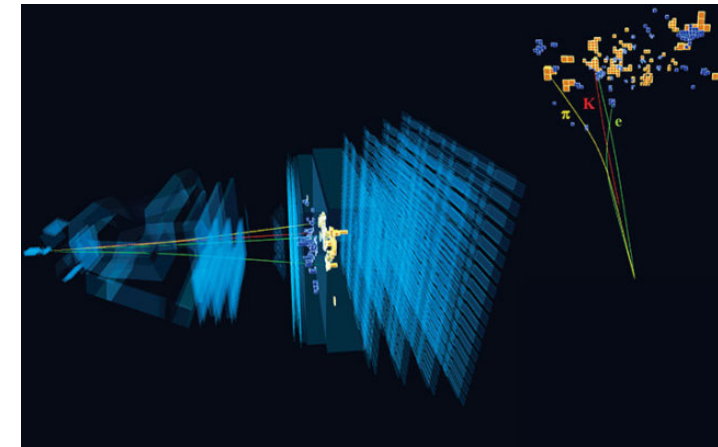
- Au cours des deux dernières années, CMS a observé une production de Hbb , $H\tau\tau$ et ttH . Nous nous dirigeons maintenant **vers la 2e génération: $H\mu\mu$, Hcc**
 - Difficile en raison de la faible probabilité et de la nécessité d'un marquage en C
 - Utilisation de Machine Learning et de la sous-structure à jet pour le marquage et la classification



Candidats Higgs produit avec un Z. ATLAS (gauche) : les deux se désintègrent laissant à la fin 2 électrons (vert) et 4 muons (rouge). CMS (droite) : le Higgs se désintègre en 2 quarks c, générant des jets (cônes) ; le Z se désintègre en 2 électrons (vert) (Image: ATLAS/CMS/CERN)

2021 : Universalité de la saveur leptonique (LHCb)

- Comparaison de deux types de désintégration des « quarks beauté ». La première désintégration concerne l'électron ; l'autre le muon
- Le Modèle standard prévoit que les désintégrations impliquant différentes saveurs de leptons, devraient se produire avec la même probabilité, une propriété appelée l'universalité de la saveur des leptons, qui est généralement mesurée par le rapport entre les probabilités de désintégration. Dans le modèle standard de la physique des particules, ce rapport devrait être très proche de 1.
- Le nouveau résultat fournit des indices pour une déviation par rapport à un, la signification statistique du résultat étant de 3,1 écarts types. Ceci implique une probabilité d'environ 0,1 % que les données soient compatibles avec les prédictions du Modèle standard.
- Besoin de plus de données !
 - hélas...



Désintégration d'un méson B^0 en K^{*0} et une paire électron-positon dans le détecteur LHCb, qui permet de sonder l'universalité leptonique dans le modèle standard.

Start of Run 3 on July 5th

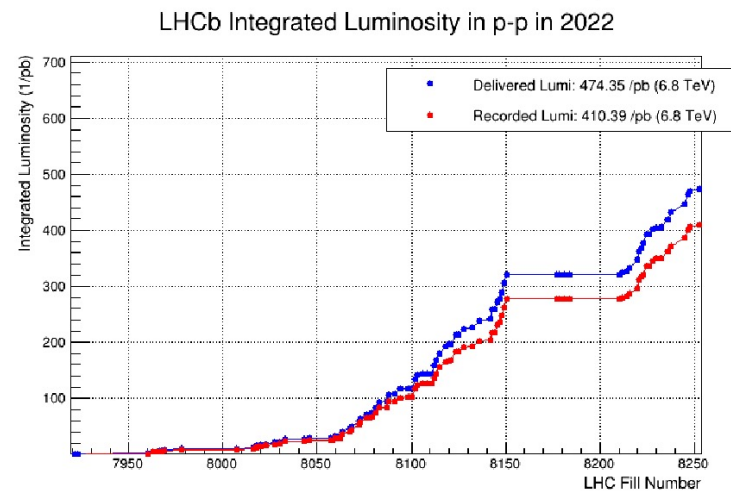
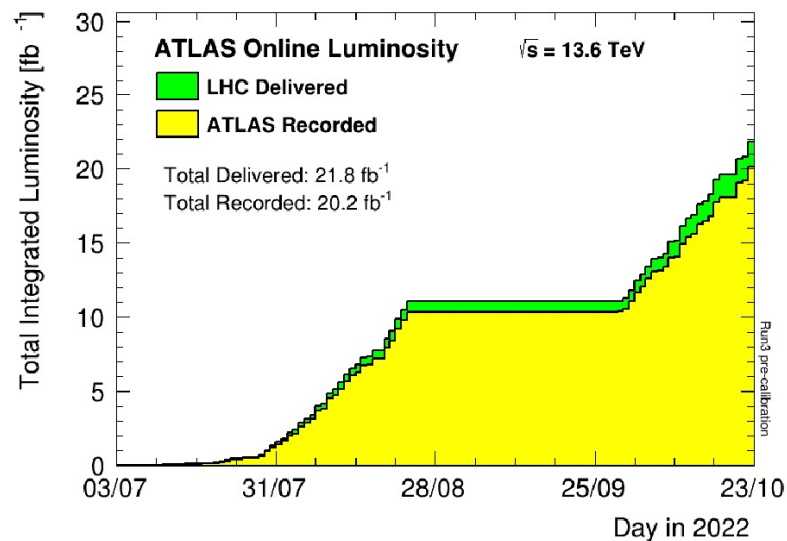
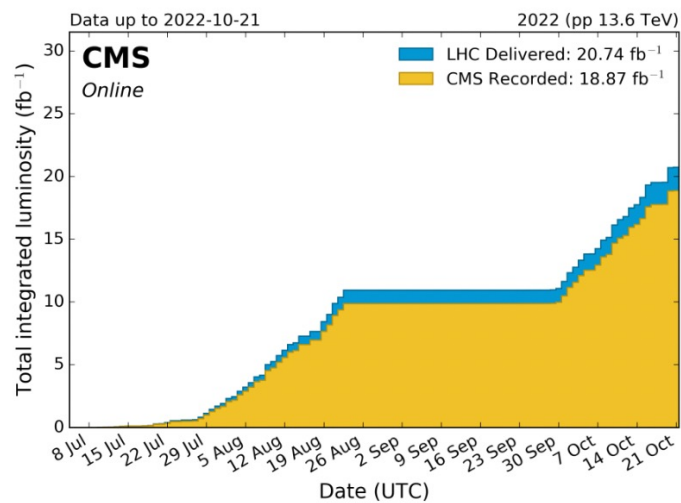
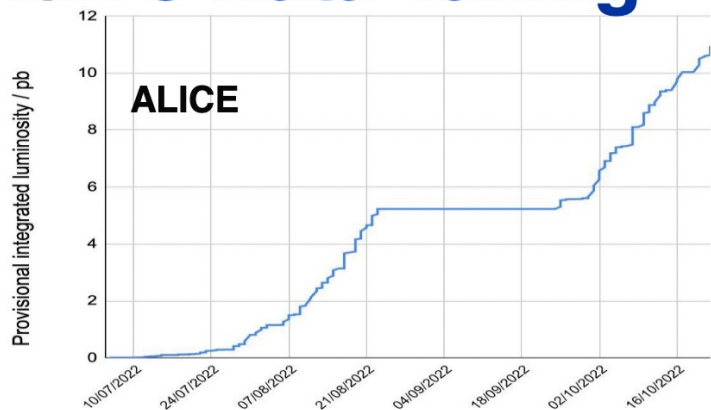
2022



24.10.2022

J. Mnich | CERN Status and News

Run 3 Data Taking



24.10.2022

J. Mnich | Status of the Experiments

2

17th July event 2023 : Electrical glitch

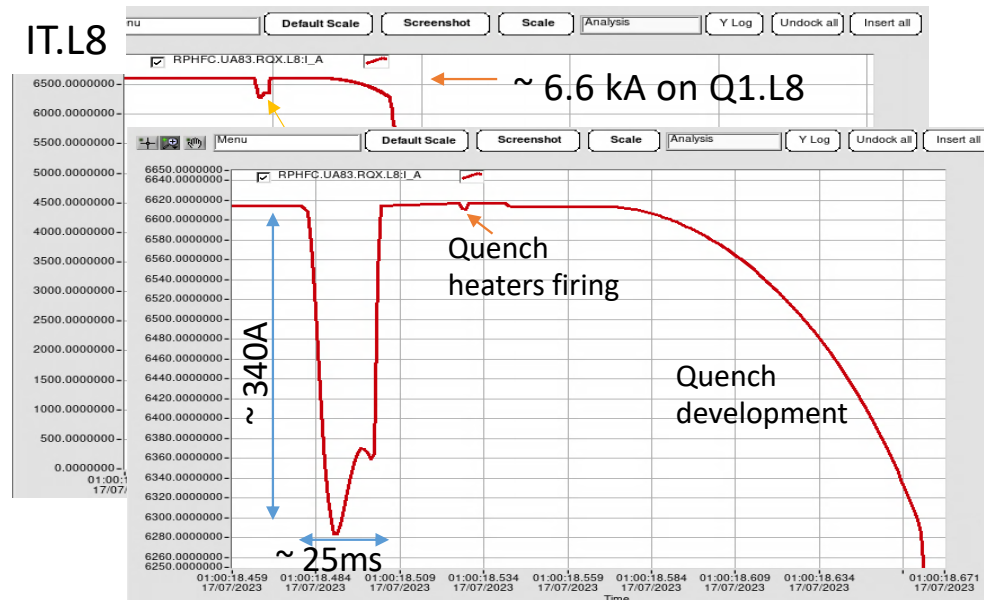
- 1 am : At stable beam in the LHC since 9 min, an electrical glitch occurred on the RF and magnet circuits, dumping the beam and triggering the protection system of a few LHC circuits, which IT.L8.



Photo by courtesy of Romande Energie

Monday, 17 July, 1 a.m.: ROOT CAUSE

The reason for the electrical glitch that caused the safety systems in the LHC to dump the beam and several magnets to quench was found: a tree on the Swiss side (about 55 km from CERN in the Canton of Vaud) fell on the power lines and disrupted the power system.



Signals measured by the quench detection system (QDS) are similar for a large current variation or a symmetrical quench (quench development in two adjacent coils). For the magnet protection, the quench heaters are triggered.

Similar event occurred in Aug 22, without damage.

17th July event 2023 : Electrical glitch and consequence

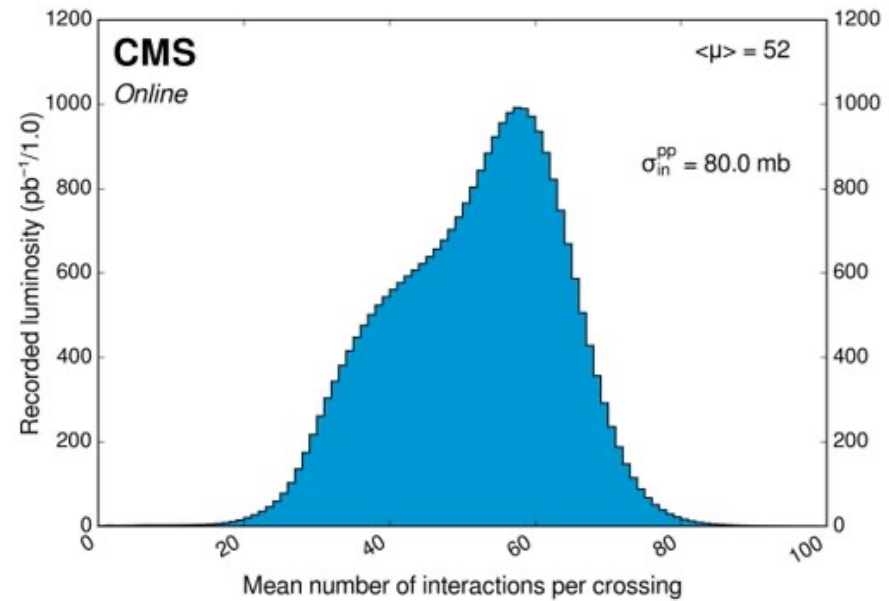
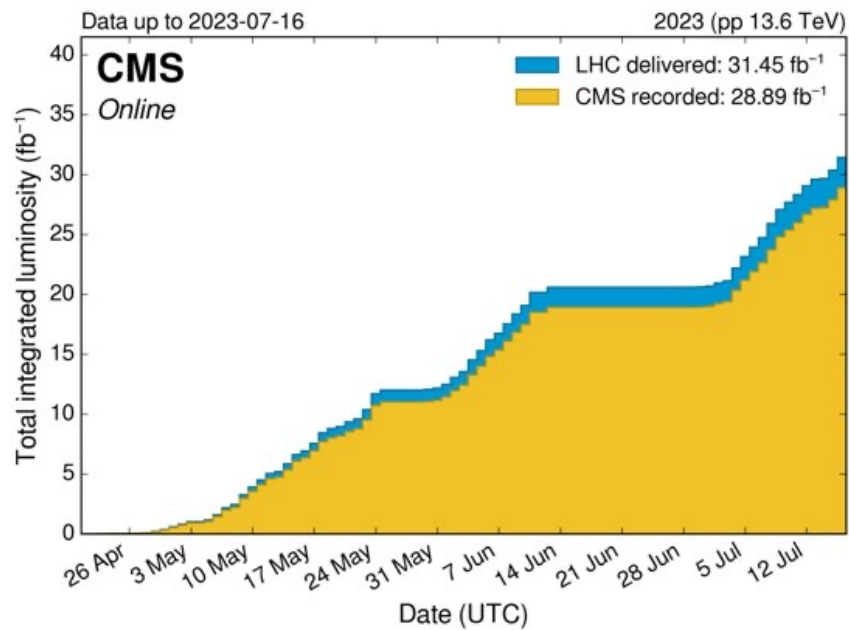


30s after the quench, a significant leak appears in the vacuum vessels of IT.L8 assembly.



8 hours after the quench, the pressure in the vacuum vessels is at **1bar** and the average temperature of the cold masses is **150K**

2023 .. Tronquée, mais ps si mal tout de même !

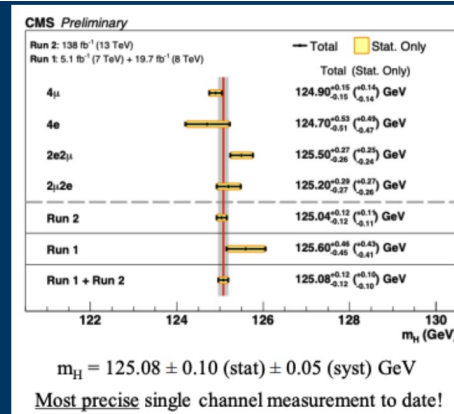
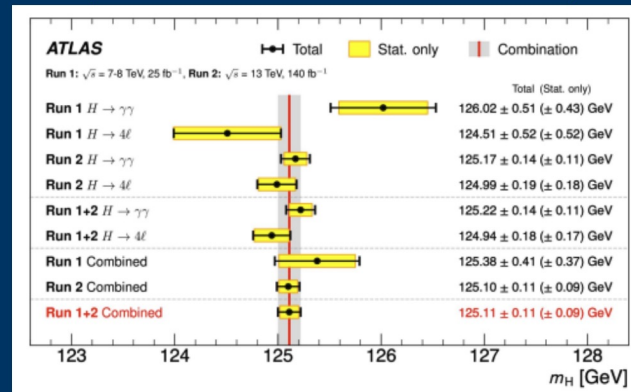


Physics Results - LHCC 155

Publications since last LHCC

- **ATLAS**: 31 new publications
 - 1200 publications in total, 272 on full Run 2 data
- **ALICE** : 22 new publications
 - 464 publications in total
- **CMS** : 17 new publications
 - 1211 publications in total
- **LHCb**: 11 new publications
 - 684 publications in total

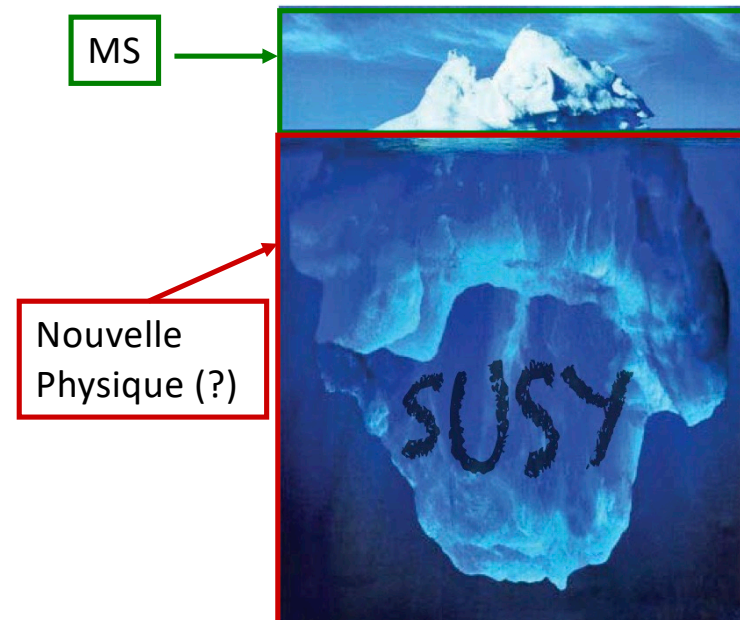
Higgs boson mass measurements



I. Efthymiopoulos - LMC#474, 18.10.2023

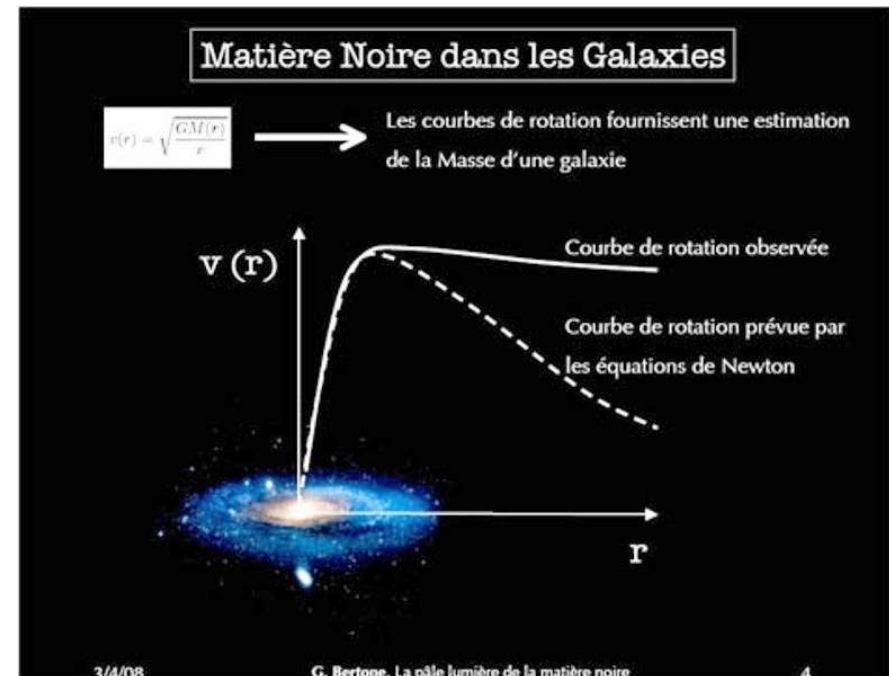
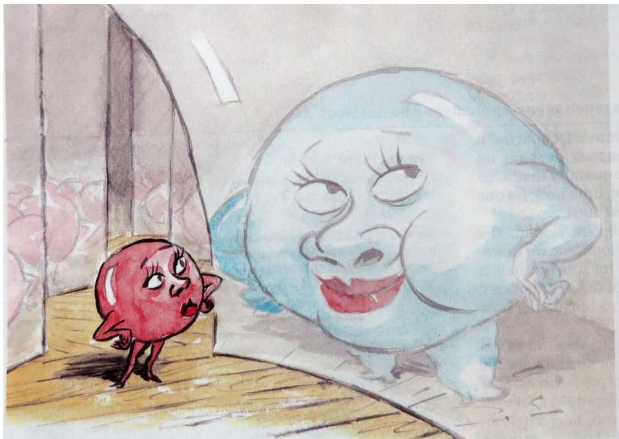
Au delà du Modèle Standard

- Mais est-ce la réponse finale de la nature?
- Le modèle standard est imparfait / incomplet:
 - Ne décrit pas la gravitation ... Nature de la matière noire (énergie) inexpliquée.
 - Pourquoi seulement 3 générations de particules?
 - Comment expliquer la hiérarchie de la masse?
 - Stabilité de la masse de Higgs.
 - Grande Unification des interactions (convergence des constantes de couplage)
- Le modèle standard est considéré comme une «théorie efficace», la manifestation d'une théorie plus fondamentale, qui pourrait être observée à des énergies plus élevées.
- Quelques solutions fournies par la SuperSymmetry (Susy).



Le LHC explore aussi les mystères de notre Univers

- Les galaxies ne 'tournent pas rond'
- Un mystère qui ne date pas d'hier, premiers 'doutes' en 1933, par F. Zwicky !
- Confirmé dans les années 70
 - Et plus tard par les mirages gravitationnels
- Il y a de la matière, mais ... quelle matière ?
 - Rien dans le modèle standard peut expliquer cette abondance de matière.



La Supersymétrie , un enjeu fondamental du LHC

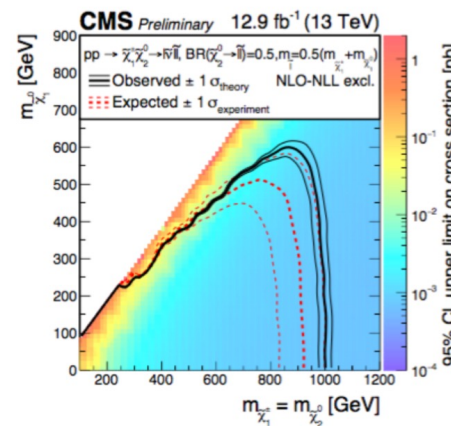
- Prolongement du Modèle standard qui vise à combler certaines de ses lacunes. Elle prédit une particule partenaire pour chacune des particules du Modèle standard
- Mais aussi proposant un ‘candidat’ à la matière noire



SUSY Multileptons: some results



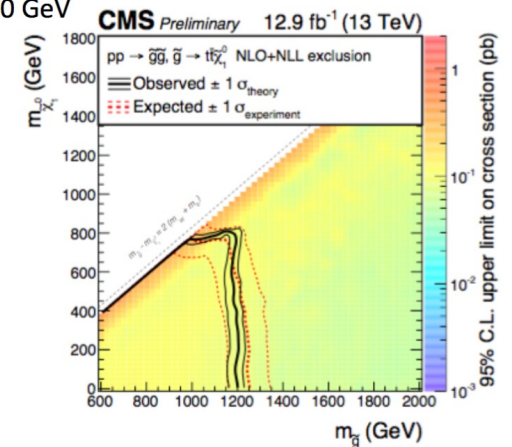
None of the search regions has shown significant deviations from the expected SM background : largest deviation 2.5σ for same sign di-leptons, $N_{jet}=1, M_T < 100 \text{ GeV}, E_t^{miss} > 150 \text{ GeV}$ and $pt(l\bar{l}) \geq 50 \text{ GeV}$



Electroweak production: In flavor democratic scenario we exclude Chargino masses up to 1 TeV (previous Run1 limit was 750 GeV)

CMS PAS SUS-16-022

CMS PAS SUS-16-024



Strong production: we exclude gluino masses up to 1250 GeV and LSP masses up to 750 GeV for simplified model of T1tttt

26

Le Futur se prépare ...



Vous êtes ici

- Les détecteurs en opération aujourd'hui devront subir des changements majeurs afin de soutenir le programme de montée en luminosité du LHC
- Très importantes phases de R&D détecteurs en cours pour les collisions du futur!

European Strategy for Particle Physics update 2020

... an **electron-positron Higgs factory is the highest-priority next collider** for the field, followed by a **hadron collider at the energy frontier** in the longer term

should investigate the technical and financial feasibility of a **future hadron collider at CERN with a centre-of-mass energy of at least 100 TeV and with an electron-positron Higgs and electroweak factory as a possible first stage.**

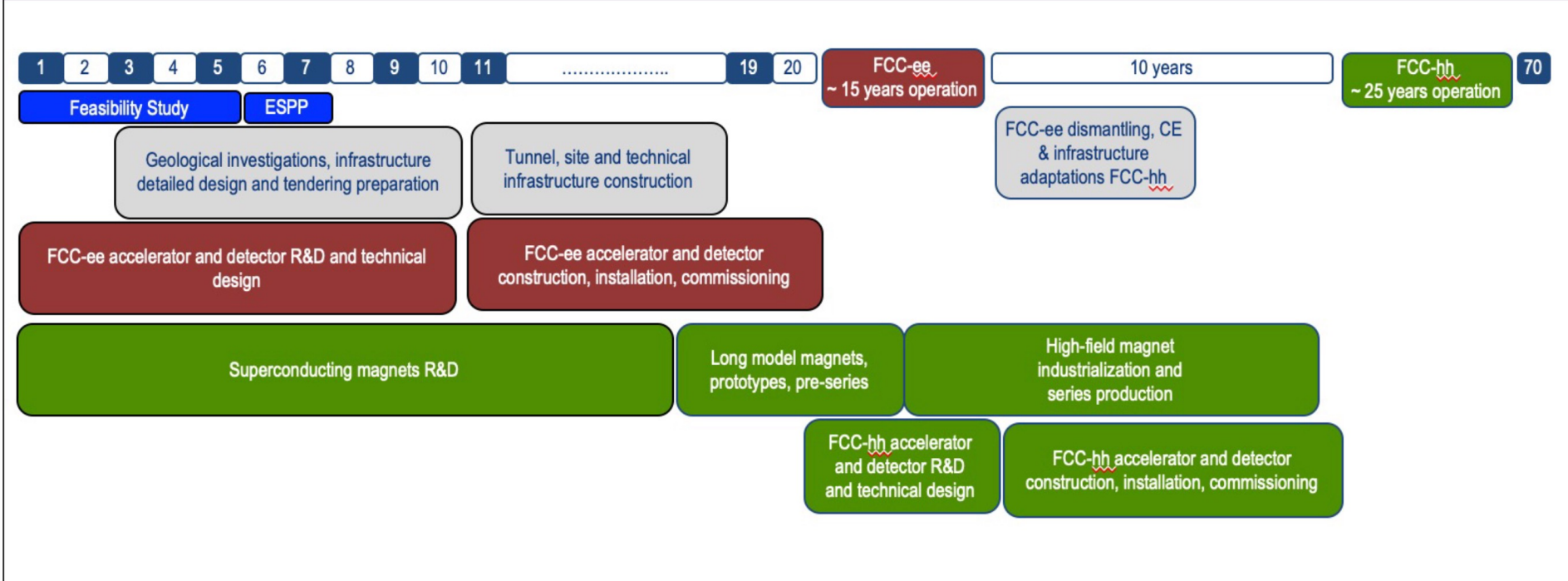
The timely realisation of the **electron-positron International Linear Collider (ILC)** in Japan would be compatible with this strategy

Two possible energy-frontier colliders have been studied for implementation at CERN, namely **CLIC and FCC...**

In addition to the high field magnets the **accelerator R&D roadmap** could contain: **an international design study for a muon collider, as it represents a unique opportunity to achieve a multi-TeV energy domain** beyond the reach of e⁺e⁻ colliders, and potentially within a more compact circular tunnel than for a hadron collider.

Timeline of the FCC integrated programme

Technical
schedule



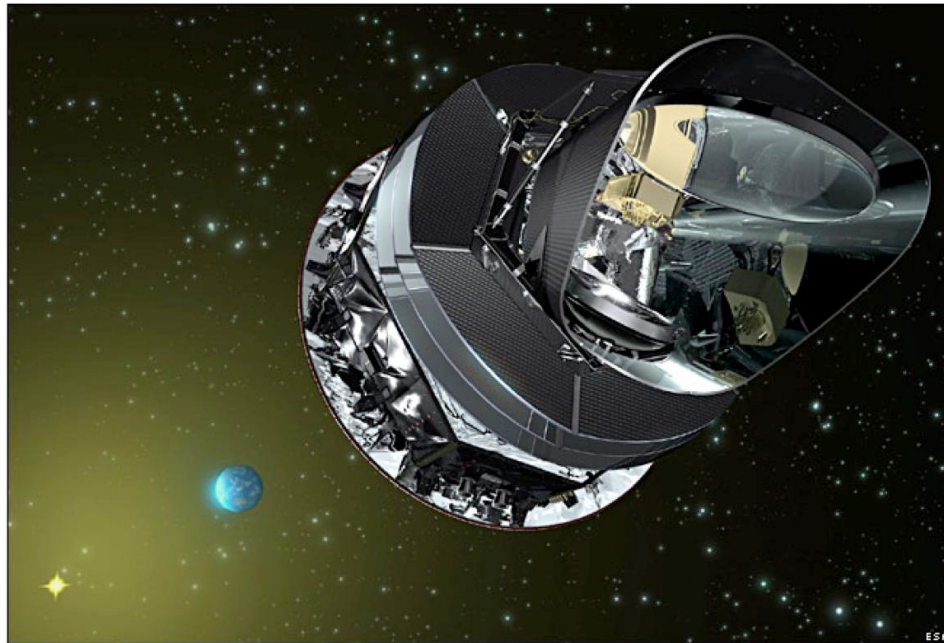
- Feasibility Study: 2021-2025
- If project approved before end of decade → construction can start beginning 2030s
- FCC-ee operation ~2045-2060
- FCC-hh operation 2070-2090++

Retour sur Les grands enjeux du LHC

- Tester vérifier le modèle standard de la physique des particules , en particulier l'existence du Boson de Higgs
- La mise en évidence de la supersymétrie est le second enjeu du LHC ainsi que le tri entre les modèles supersymétriques viables
- Identifier les constituants de la matière noire en concordance avec les observations cosmologiques
- Tester d'autres modèles de physique des hautes énergies, notamment la théorie des cordes, et l'existence de dimensions supplémentaires
- Mesure de l'asymétrie matière-antimatière (but..)
- Plasma de quark et gluon (still ongoing..)
- Etc !

Terra Incognita

- Le monde selon le satellite Planck :
 - 4,8 % de matière ordinaire
 - 26,1 % de matière sombre
 - 69,1 % d'énergie noire



- Les avancées du LHC se joignent à celles provenant de l'astrophysique et de la cosmologie
- *Les contraintes sur la possible contribution de particules supersymétriques à la matière noire sont désormais plus fortes*
- *Tout reste à découvrir, à comprendre...*

Backup

Le Boson de Higgs

- Les origines de la masse , problème central de la physique des particules
 - Comment admettre que des bosons de jauge W^{+-} et Z (par ailleurs découverts et mesurés par la génération précédente de l'accélérateur du CERN) soient massifs
 - Toutes les symétries du modèles sont prévus par le modèle mais sans introduction de la masse
 - ...
- Higgs-Englert-Brout (1964) ont permis de compléter le Modèle Standard
 - Introduction du mécanisme de Higgs
 - Couplage des particules pour leur donner une masse
 - Condensation du 'vide' autour des particules
 - Introduction du Boson de Higgs, mais sans indication de sa masse...
 - Fenêtre de recherche très large (typiquement 2Gev au Tev.. d'ou la difficulté de le détecter...)
- Longue quête...

Le mécanisme ..

- .. expliqué a M. Thatcher par David Miller
- Condensation du vide quantique autour des particules
- Et peut s'autocondenser (si on injecte de l'énergie ou une rumeur dans l'analogie)
 - → boson de Higgs



1. The universe with its Higgs field corresponds to a room full of physicists



2. Now Albert Einstein (as elementary particle) and attracts a couple of admirers as he crosses the room.



3. Thereby he experiences a resistance in his movement that can be interpreted as inertia - in other words, he acquires mass. In a similar way an elementary particle acquires mass as it passes through the Higgs field.



4. But it could happen as well that a rumour is spread in the room.



5. As the rumour moves through the room, a group of physicists clumps together - this group corresponds to a Higgs particle.

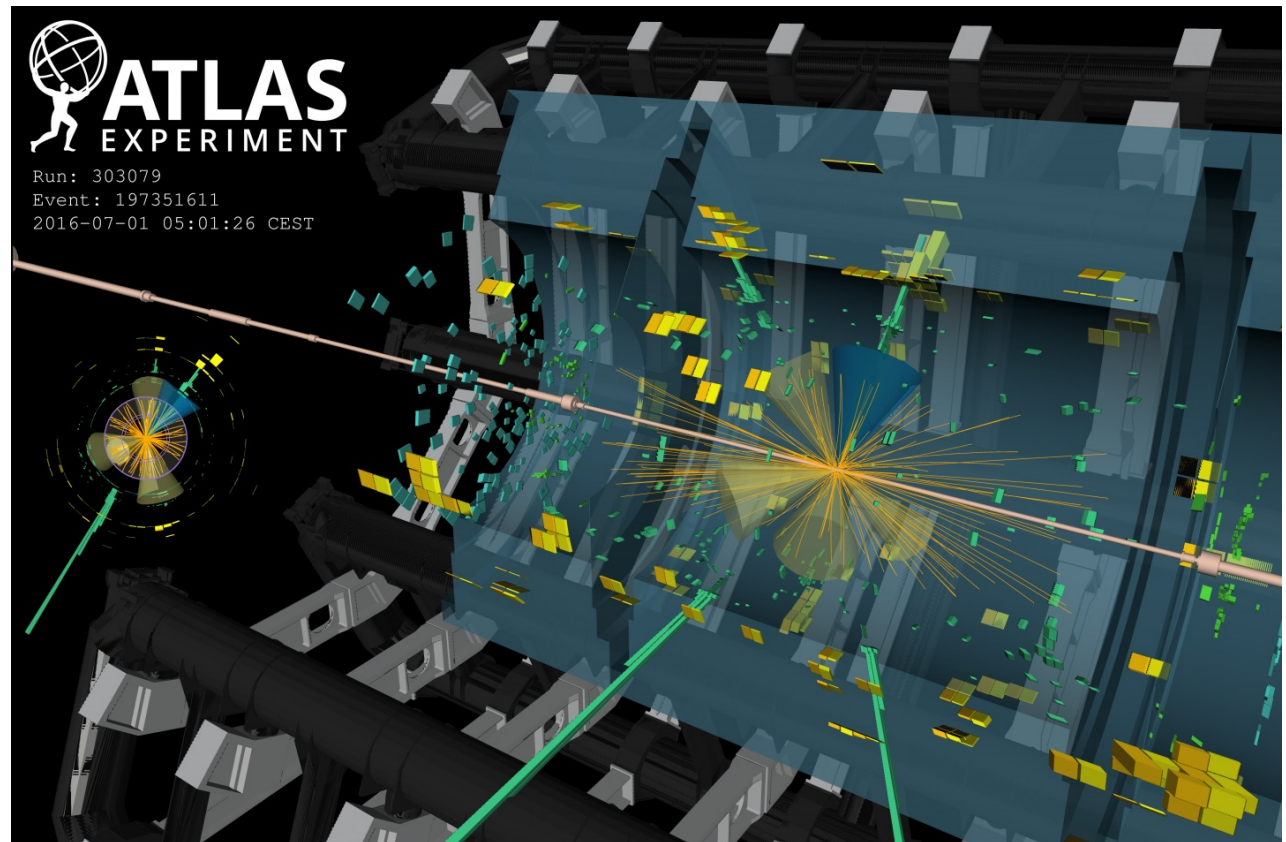
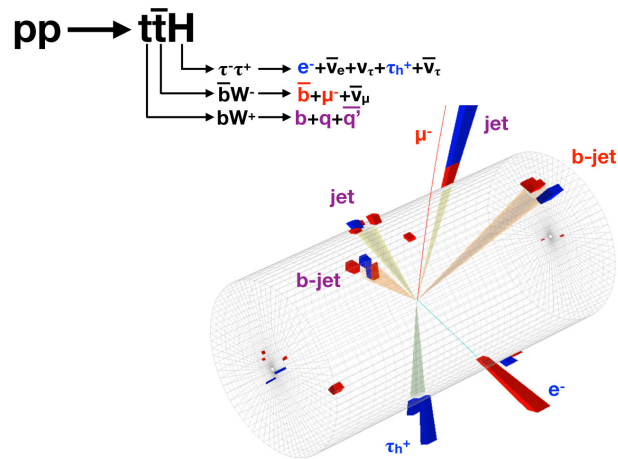
Le mécanisme et L'Univers

- A environ 10^{-12} sec, l'Univers descend sous une température de 10^{16} K
 - Le vide acquiert une certaine tension , c'est le mécanisme qui entre en action
 - Sa valeur moyenne devient non nulle et constante en tout point de l'univers
 - → transition de phase
- Les particules acquièrent alors la masse que l'on connaît et mesure
 - Les photons et les gluons s'interagissent pas avec champ de Higgs, et donc ont une masse nulle

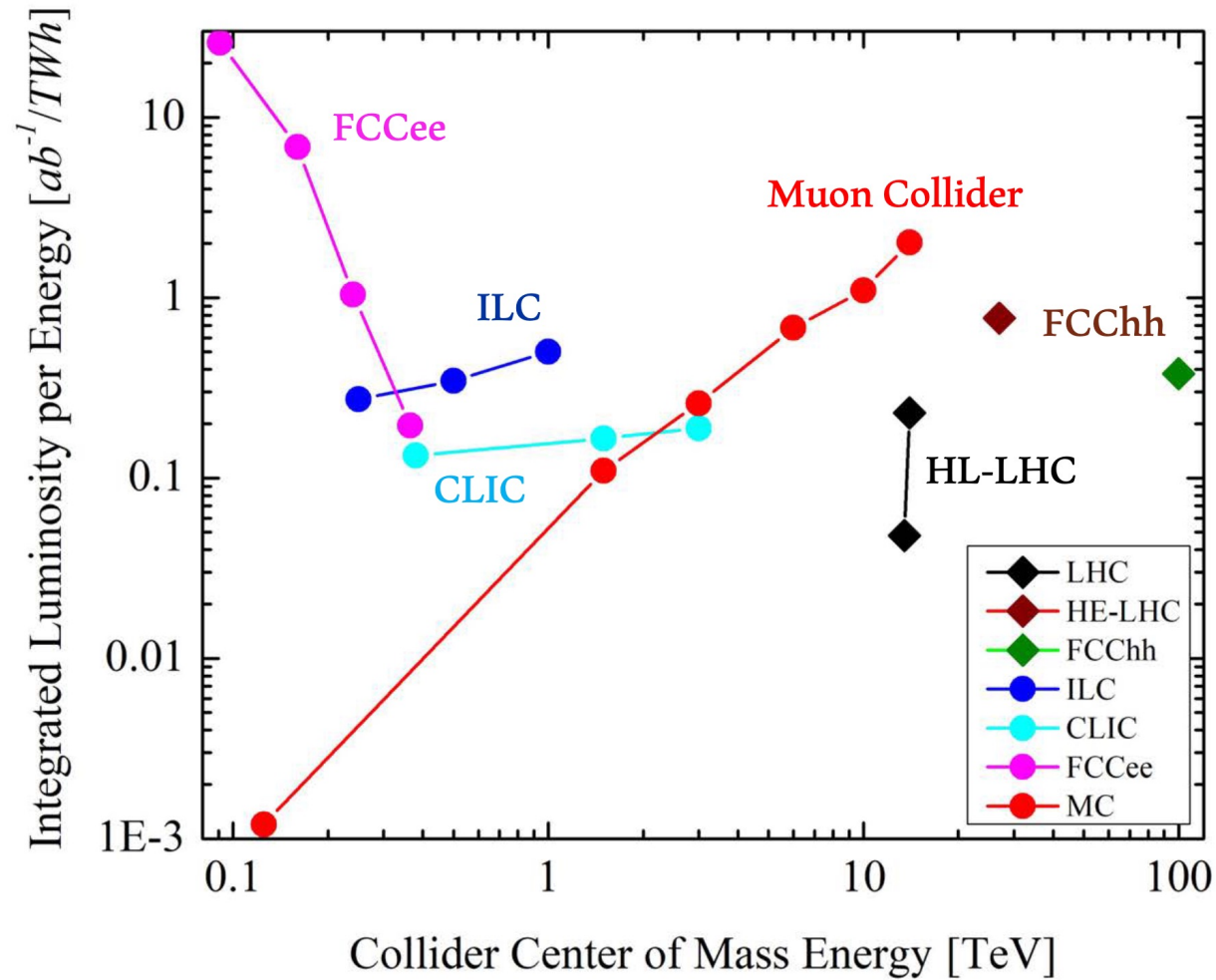
Champ/Boson de Higgs

- Prenons l'exemple d'une piscine qui représente le champ.
 - Si une excitation (un caillou) est jeté dans l'eau , des ondes (énergies) se propagent
 - Mais l'eau existent même sans ces ondes !
- Tout comme pour des vagues dans une piscine, il faut des chocs entre des particules **pour exciter le champ de Higgs et donc fabriquer des bosons de Higgs.**
 - Collisions du LHC !
- La découverte du Boson de Higgs est donc la mise en évidence de ce champ de Higgs
 - Et le production du boson nécessite l'énergie des collisions du LHC !
- Ce champ scalaire est l'objet des études au LHC, le boson de Higgs est son messenger !
 - Très mystérieux encore, quel est son rôle (en particulier sur les premiers instants de l'Univers ..)
 - Lien Energie noire ?

Higgs et le quark top



Energy Efficiency of Future Colliders



arXiv:2007.15684