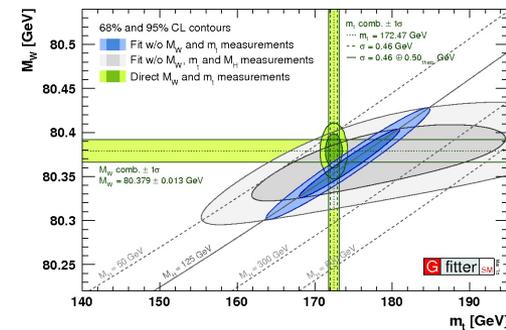
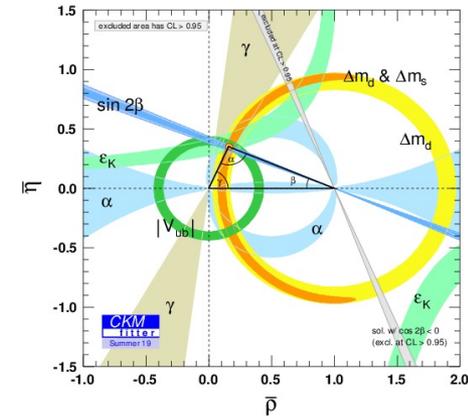


# Résumé et suite du programme

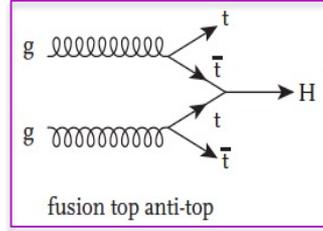
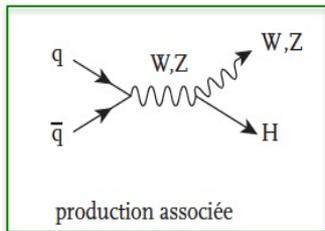
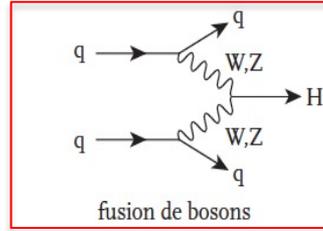
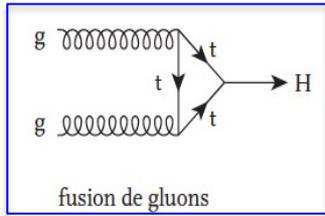
- **Modèle Standard**
- **Outils** pour l'étudier : accélérateurs, principe des détecteurs
- Retour sur le Modèle Standard
- Complémentarité des collisionneurs
- Le LHC et ses détecteurs
- **La physique au LHC**
  - cohérence du Modèle Standard
  - le boson de Higgs
  - recherche de nouvelle physique
- Le futur



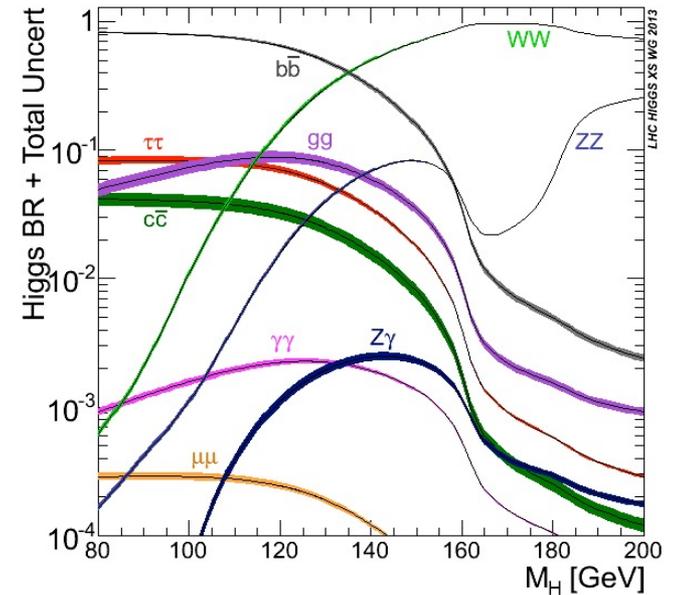
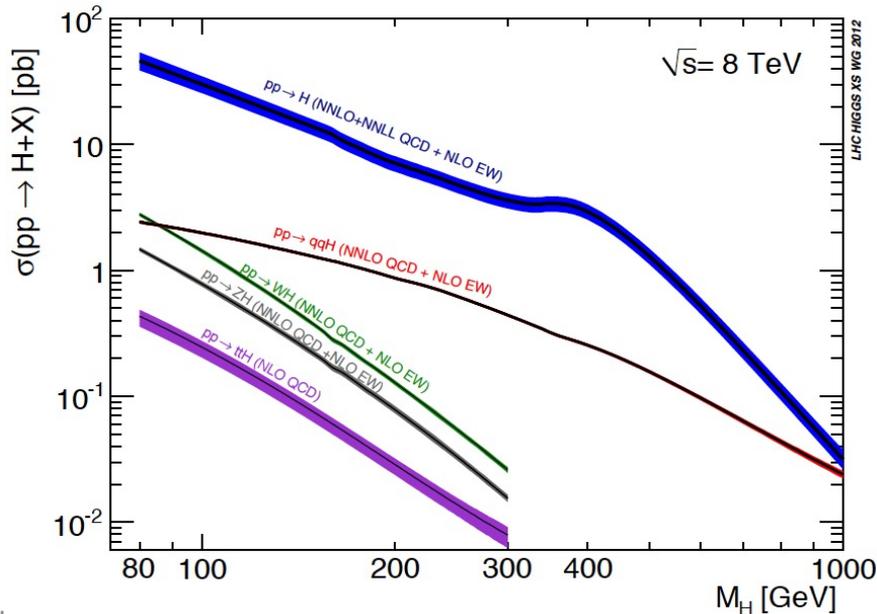
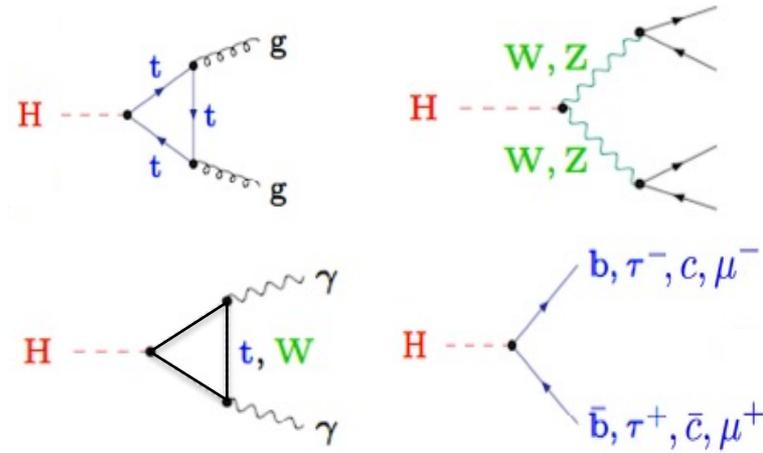
# LE BOSON DE HIGGS

# Recherche du Higgs au Run 1

## Production

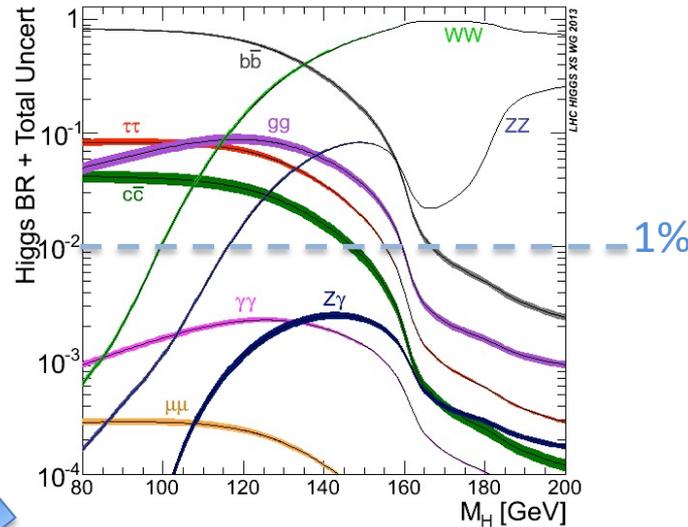


## Désintégration



# Recherche du Higgs au Run 1

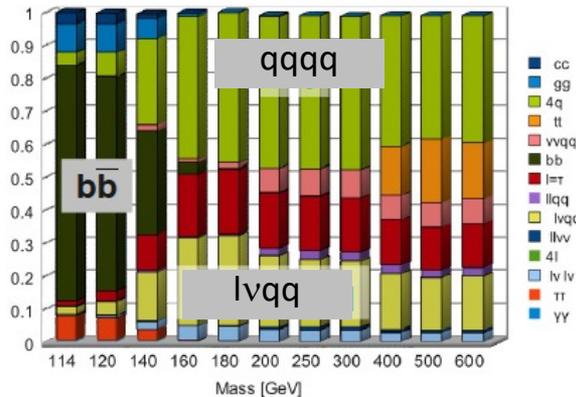
## Désintégration



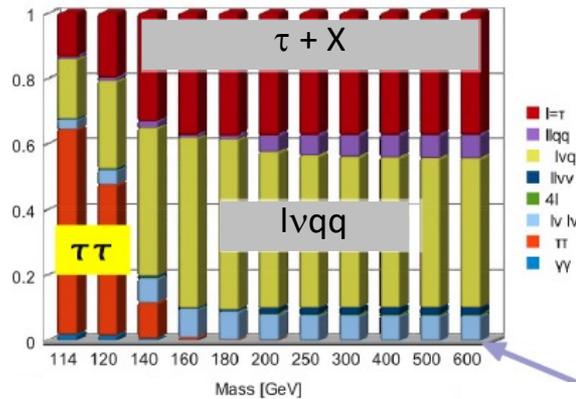
Rappel : avant de le découvrir, on ne connaît pas la masse du boson de Higgs, qui n'est pas prédite par le Modèle Standard

## Détection

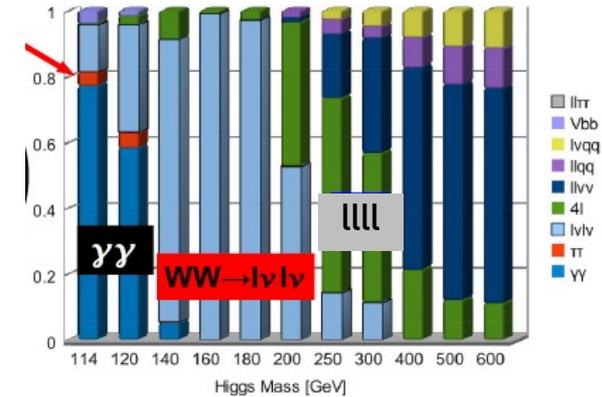
1) après désintégration des « filles » du Higgs



2) avec le déclenchement



3) en prenant en compte les bruits de fond



# Notion de masse invariante

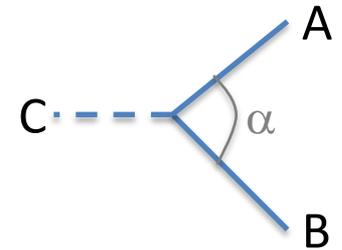
attention ! toutes les flèches sur les 3-vecteurs sont omises (trop pénible avec PowerPoint) et remplacées par du « gras »

- Quadrivecteur particule de masse  $m$  :  $P = (E, \mathbf{p})$ ,  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$

« métrique » spéciale :  $P^2 = |\mathbf{P}|^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$

Ce qui se conserve dans une transformation de Lorentz :  $|\mathbf{P}|$

- **Désintégration** : Particule C  $\rightarrow$  particule A + particule B



$$P_C^2 = (P_A + P_B)^2 = (E_A + E_B)^2 - (\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B)^2$$

mais aussi

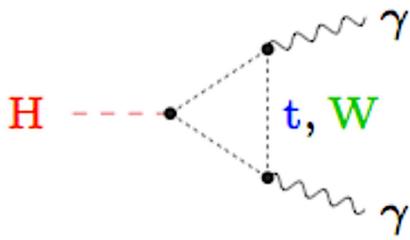
$$P_C^2 = E_C^2 - \mathbf{p}_C^2 = m_C^2$$

$\rightarrow m_C^2 = (E_A + E_B)^2 - (\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B)^2$  « masse invariante » des deux particules A et B

$$m_C^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2(E_A E_B - \mathbf{p}_A \mathbf{p}_B), \quad \mathbf{p}_A \mathbf{p}_B = |\mathbf{p}_A| |\mathbf{p}_B| \cos \alpha.$$

*On peut connaître la masse d'une particule  
si on connaît celle de ses produits de désintégration et leur impulsion*

Remarque ça marche aussi pour les désintégrations en plus de 2 corps

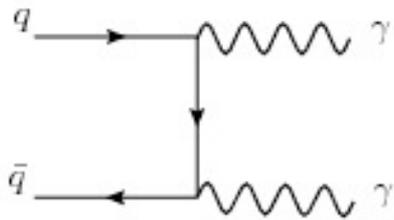
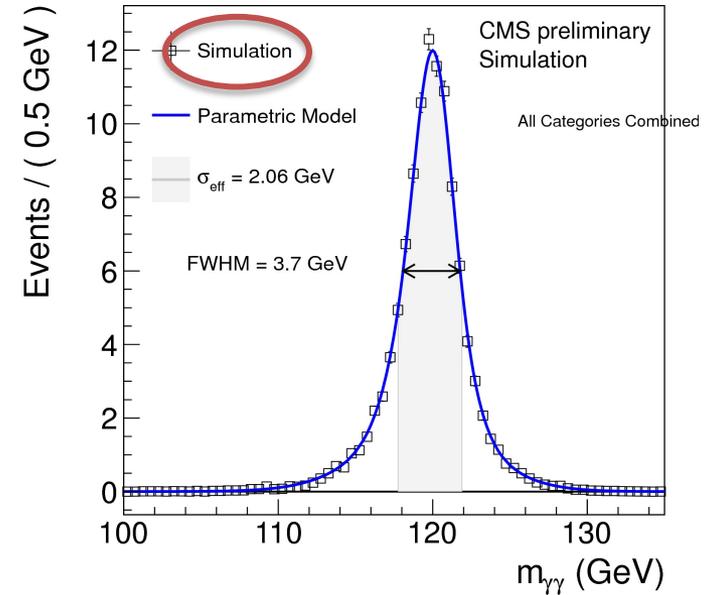


Canal pour lequel les détecteurs ont été optimisés

Masse invariante :  $m^2 = 2 |\mathbf{p}_1| |\mathbf{p}_2| (1 - \cos \alpha)$

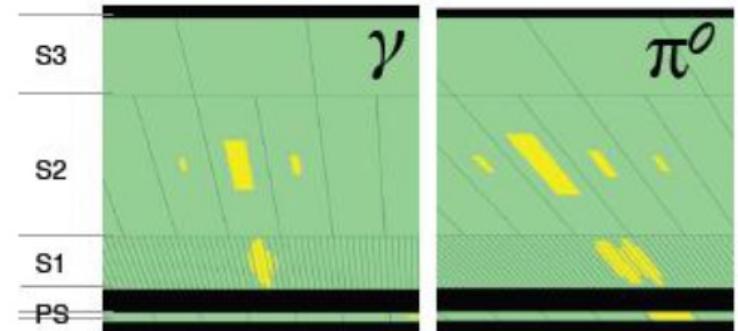
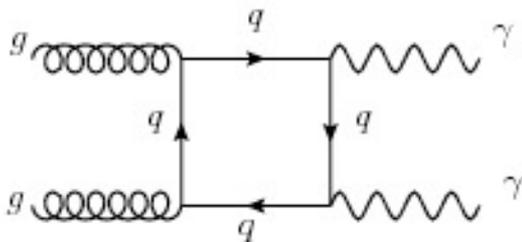
- $|\mathbf{p}_i|$  mesurés dans le calorimètre
- pas de trace pour mesurer l'angle !  
On utilise le vertex de l'interaction  
(problème quand il y en a 20 ou plus...)

Excellente **résolution** 1-5% nécessaire à cause du...



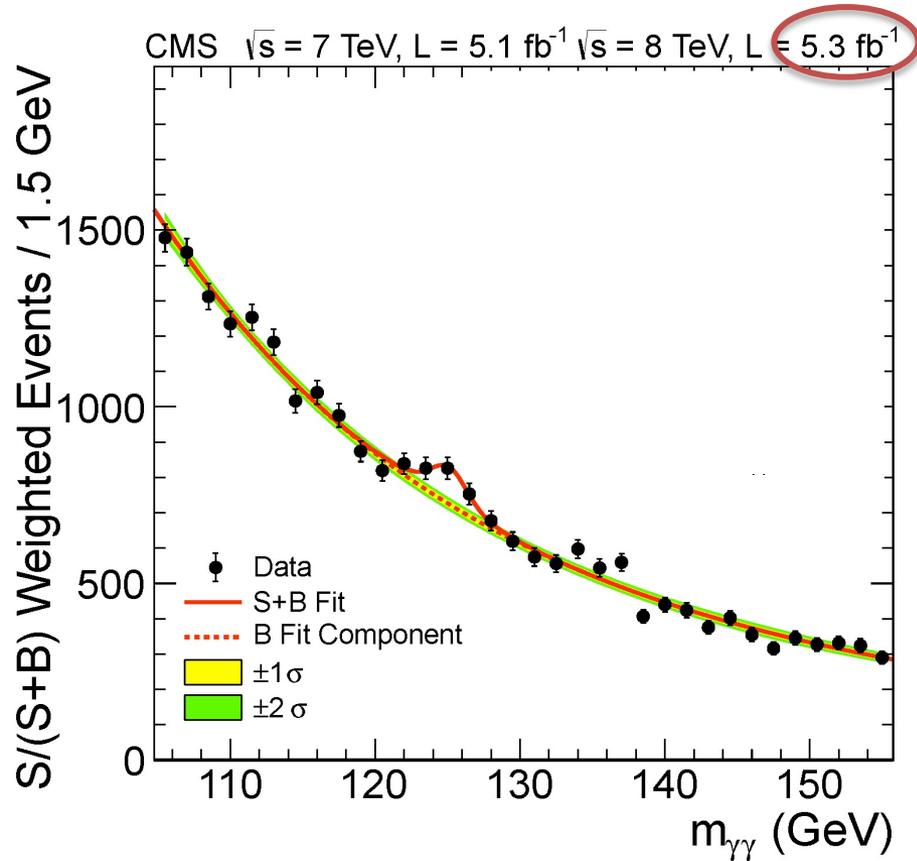
...bruit de fond !

- ~70% « irréductible » : production d'évts diphoton standard
- ~30% « réductible » : jets mal identifiés comme photons  
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (~100%)

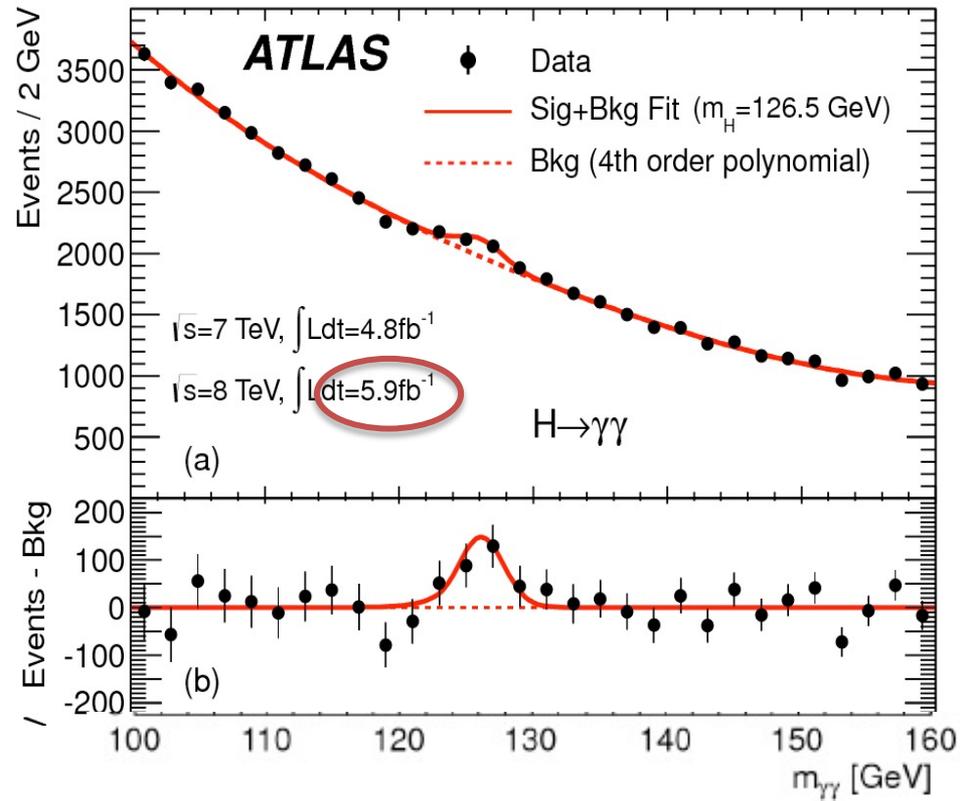


# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$ : résultats mi 2012

CMS



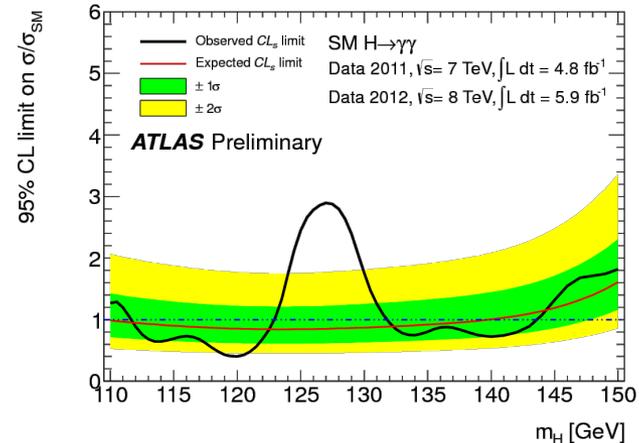
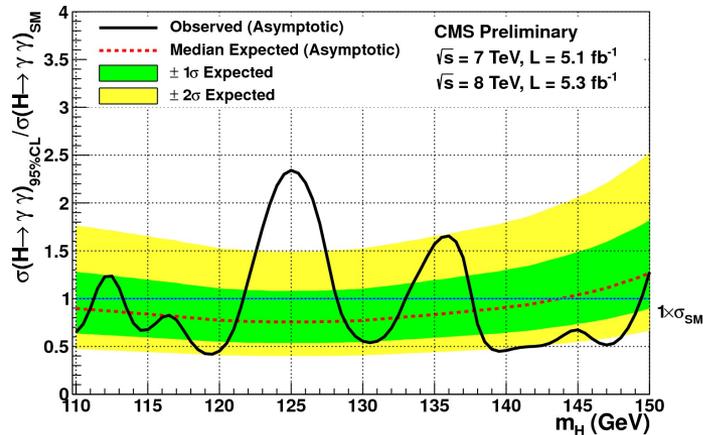
ATLAS



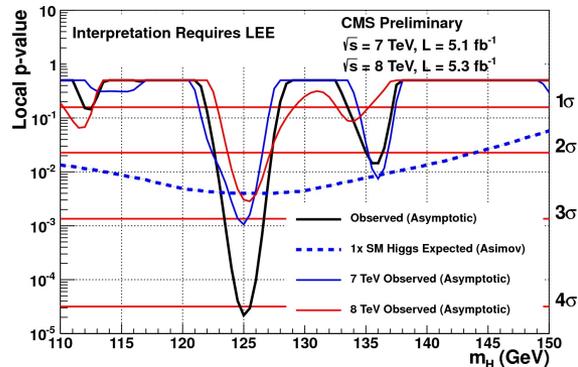
Remarque : plusieurs catégories de signaux : photons (non-)convertis, baril/bouchon,...

# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$ : résultats mi 2012

Pour la dernière fois (dans ce canal), on a calculé les résultats en termes de limites :

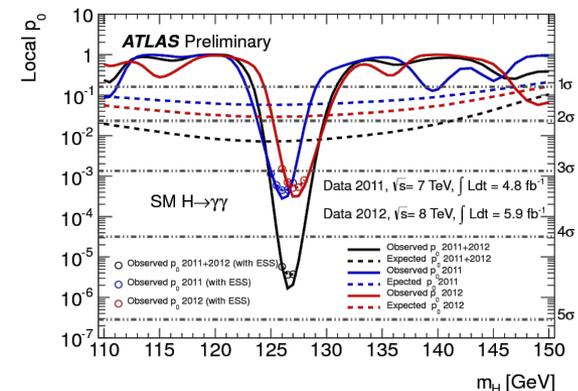


Mais on a aussi montré les résultats d'une façon plus orientée vers la découverte  
 $p_0 = p\text{-value} = \text{probabilité pour que le bruit de fond seul fluctue autant que les données} :$



Excès local à  $4.1\sigma$  à 125 GeV

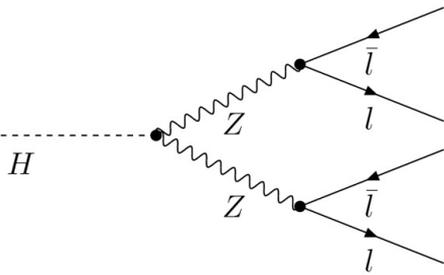
CMS



Excès local à  $4.7\sigma$  à 126.5 GeV

ATLAS

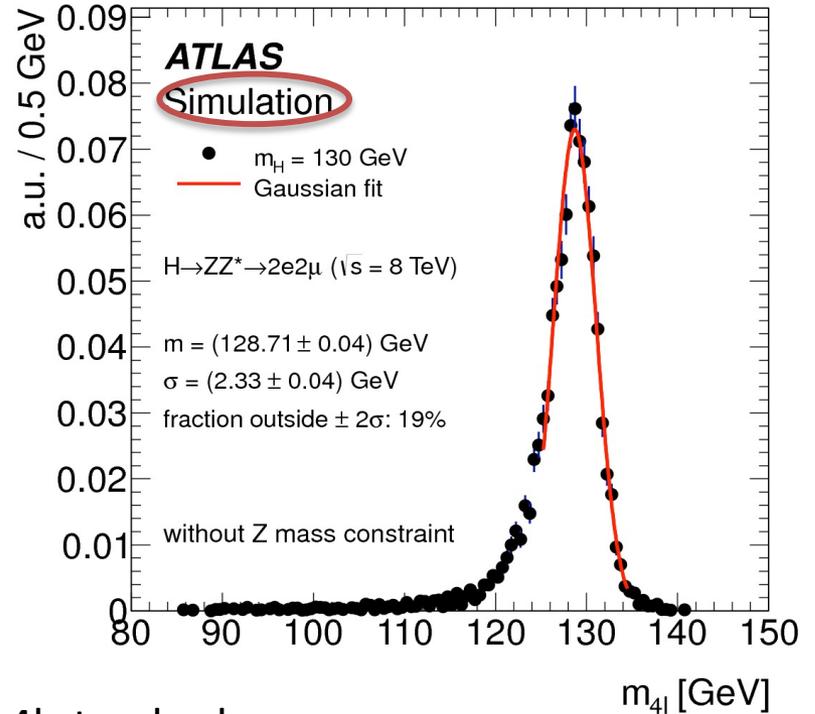
# H $\rightarrow$ ZZ\* $\rightarrow$ 4l



Meilleur canal ZZ : ZZ  $\rightarrow$  4l

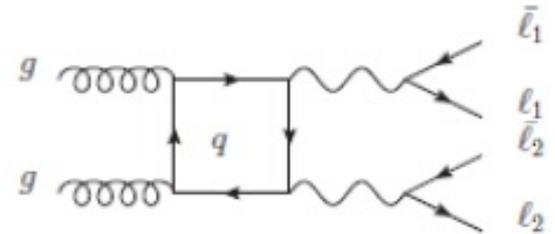
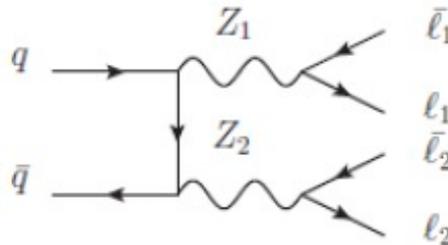
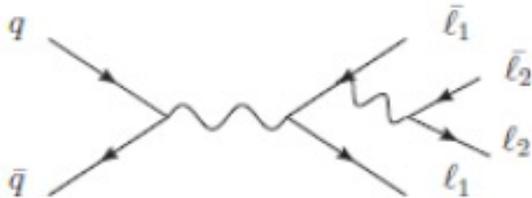
avec 4l = eeee, eeμμ, μμμμ

- rare (Z  $\rightarrow$  ll = 3% chaque), mais
- très peu de bruit de fond
- **bonne résolution en masse (1-2%)**



Bruit de fond

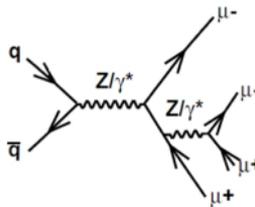
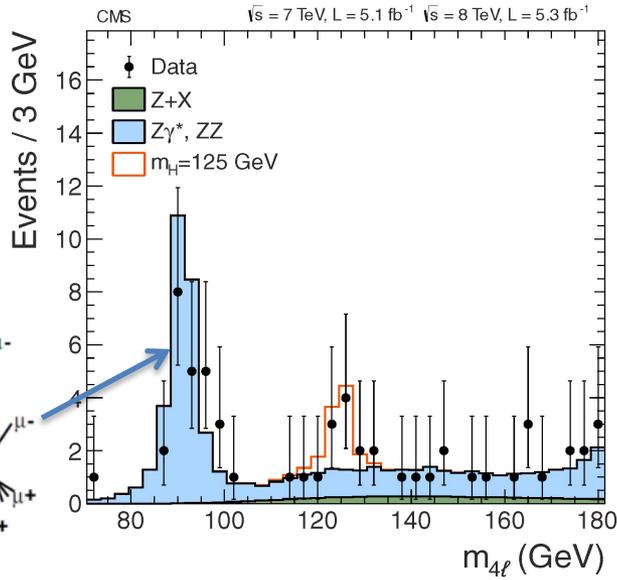
- **irréductible** : production d'événements 4l standard



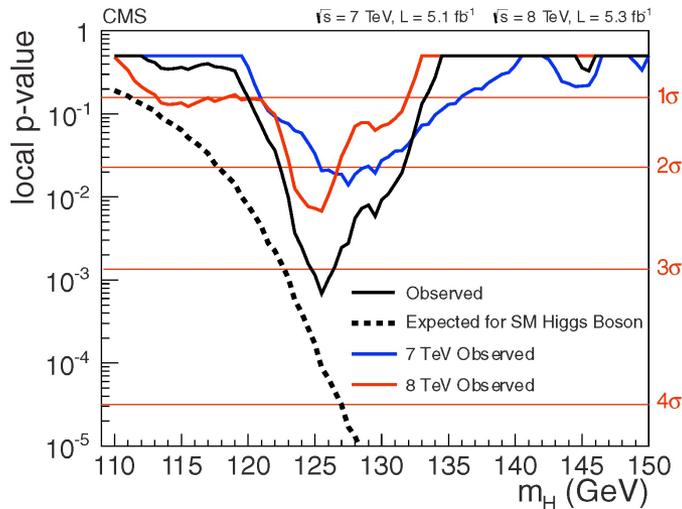
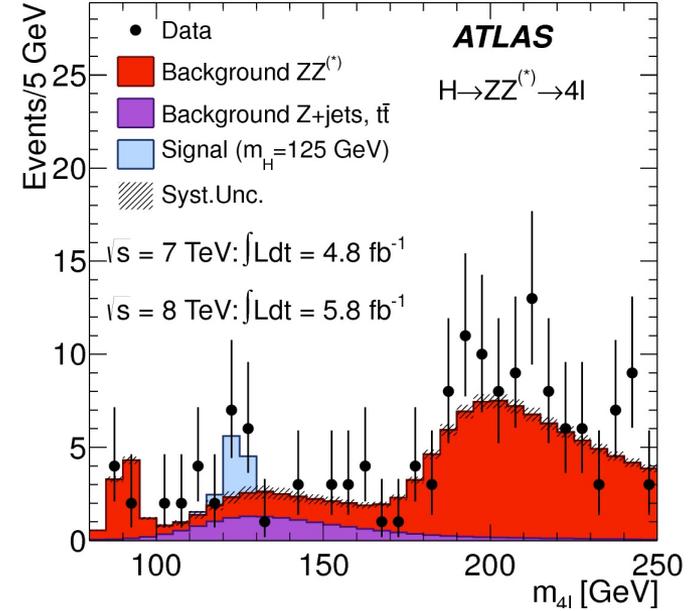
- **réductible** : Z+2 jets, jets mal identifiés comme leptons

# H $\rightarrow$ ZZ\* $\rightarrow$ 4l : résultats mi 2012

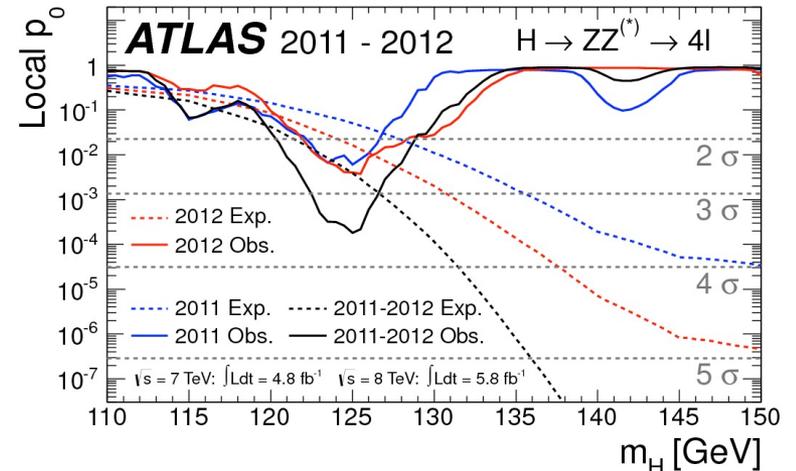
CMS



ATLAS



Excès local à  $3.2 \sigma$  à 125.5 GeV

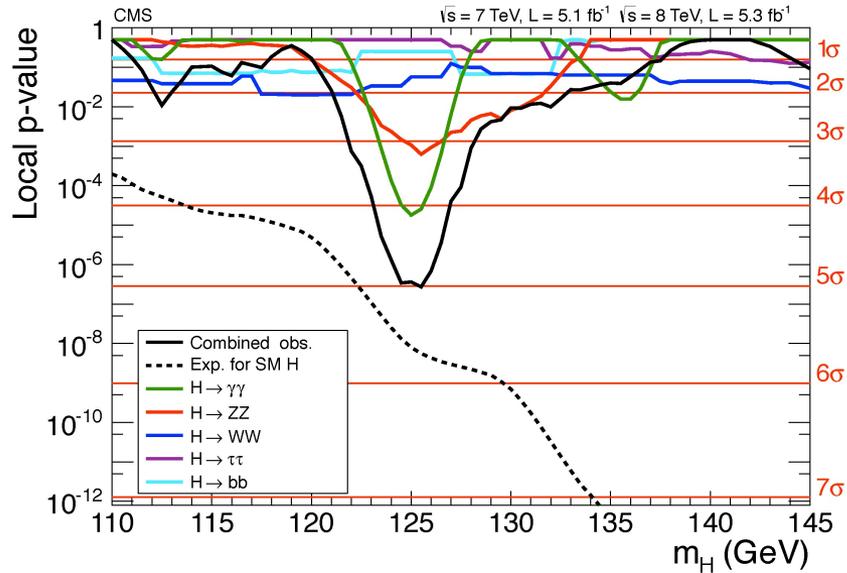


Excès local à  $3.4 \sigma$  à 125 GeV

# Résultats combinés

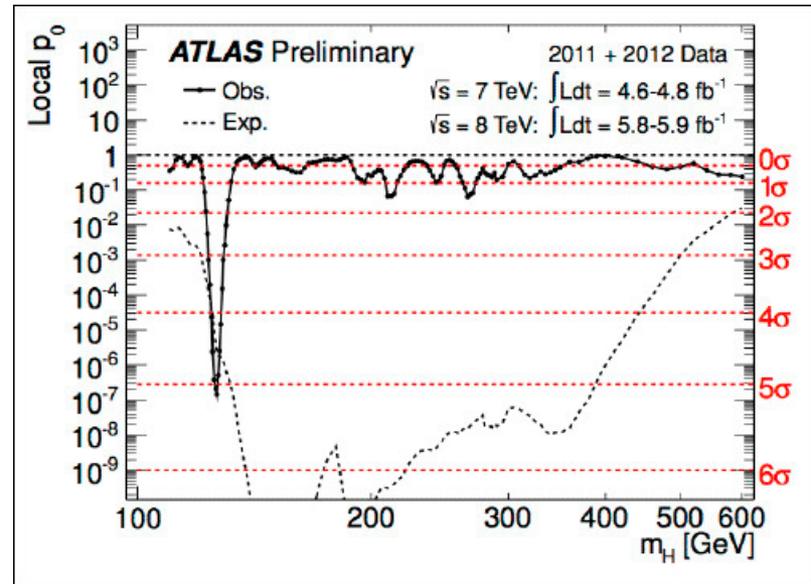
Autres canaux :  $WW$ ,  $\tau\tau$ ,  $bb$  :  $L_{\text{int}}$  insuffisante le 4 juillet 2012 pour montrer un signal séparément

$\gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $WW$ ,  $\tau\tau$ ,  $bb$



Excès local à **4.9  $\sigma$**  à 125.3 GeV

$\gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $WW$



Excès local à **5.1  $\sigma$**  à 126.5 GeV



Fabiola Gianotti, Joe Incandela

**C'est une découverte !**



*R Aymar , L Maiani, H Schopper, Lyn Evans, C Llewellyn-Smith*



# Prix Nobel de physique 2013



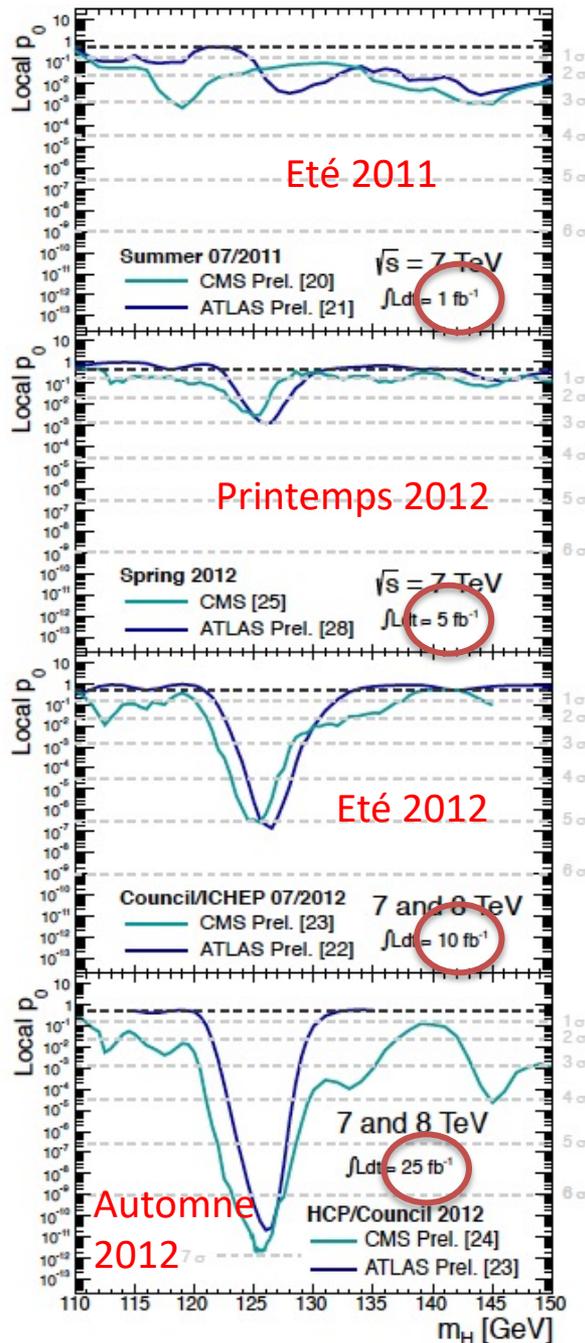
*Robert Brout*



**François Englert**

**Peter Higgs**

# Et depuis 2012 ?



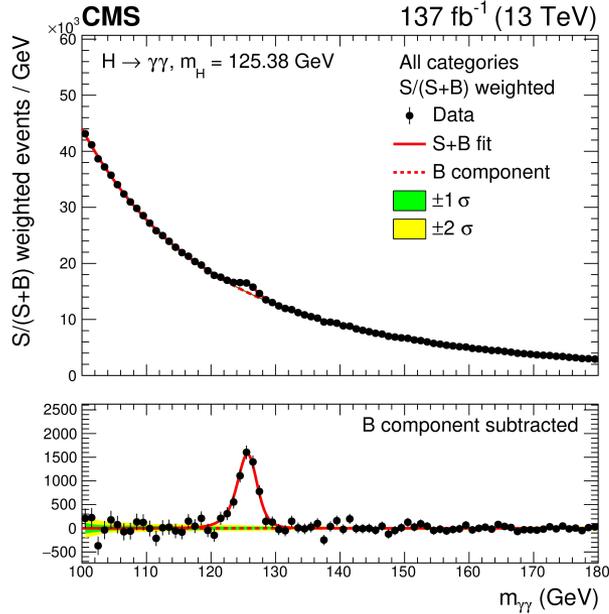
Avant 2012 : limites

En juillet 2012 : découverte

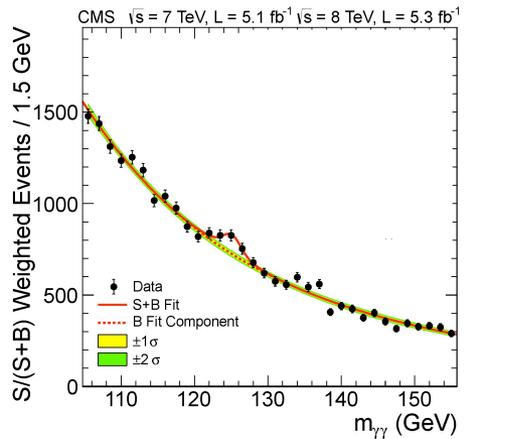
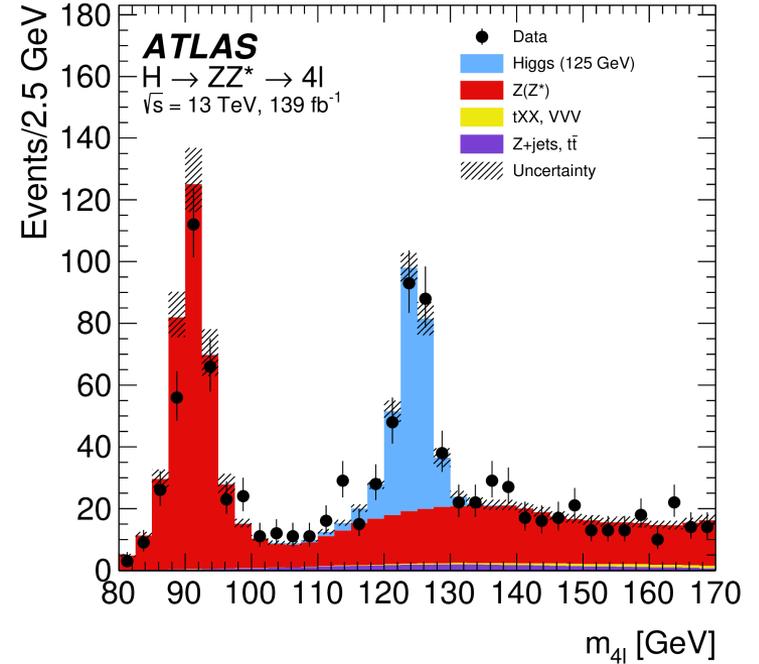
Après 2012 : le signal se renforce et le programme de recherche sur le Higgs s'étend !

- Mesures «de précision» : masse et largeur, nombres quantiques (spin,...), couplages : cette nouvelle particule est-elle bien LE boson de Higgs du Modèle Standard ?
- *Y a-t-il d'autres bosons de Higgs ?*  
On continue de chercher à d'autres masses

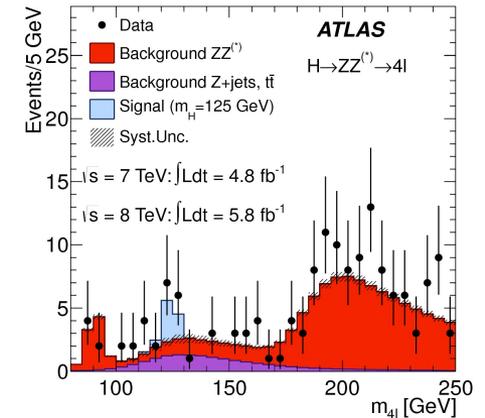
# H → γγ et H → ZZ\* → 4l au run 2



Run 2 complet  
 ~140 fb<sup>-1</sup>



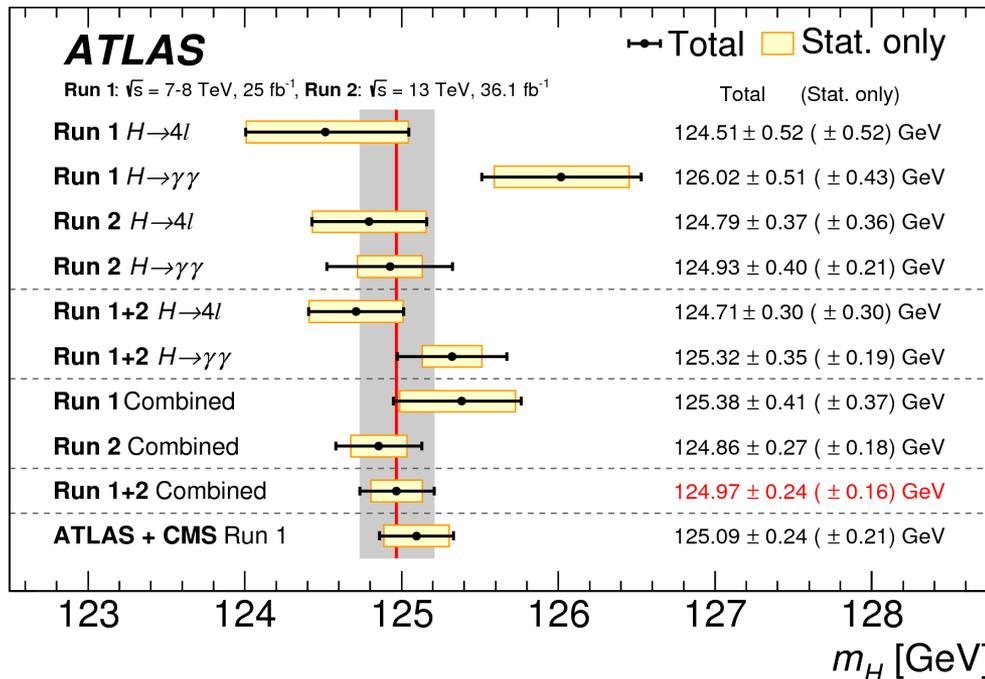
Découverte  
 7 TeV, 5 fb<sup>-1</sup>  
 8 TeV, 5 fb<sup>-1</sup>



# Mesure de la masse

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

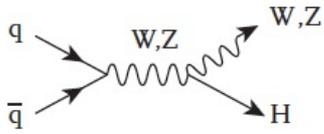
7 TeV, 5 fb<sup>-1</sup>  
 8 TeV, 20 fb<sup>-1</sup>  
 13 TeV, 36 fb<sup>-1</sup>



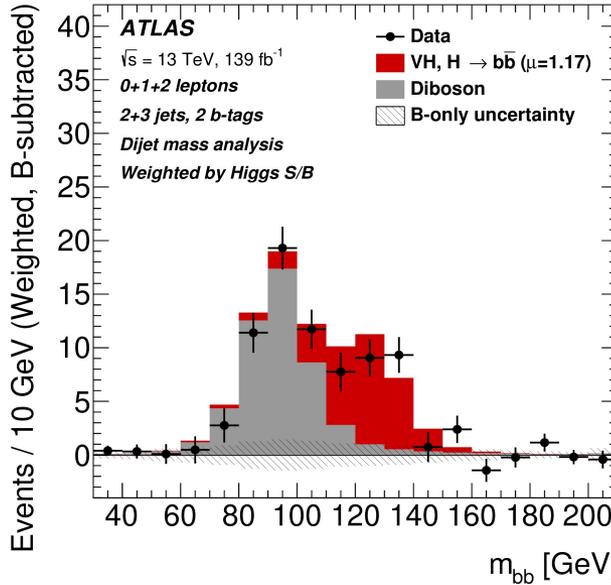
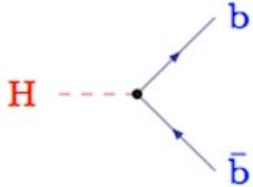
**125.09 ± 0.24 GeV**  
 précision = 0.2%  
 par expérience !

(run 1 : 0.2%  
 en combinant  
 ATLAS + CMS)

# Désintégration directe du Higgs en fermions (run 2)



production associée

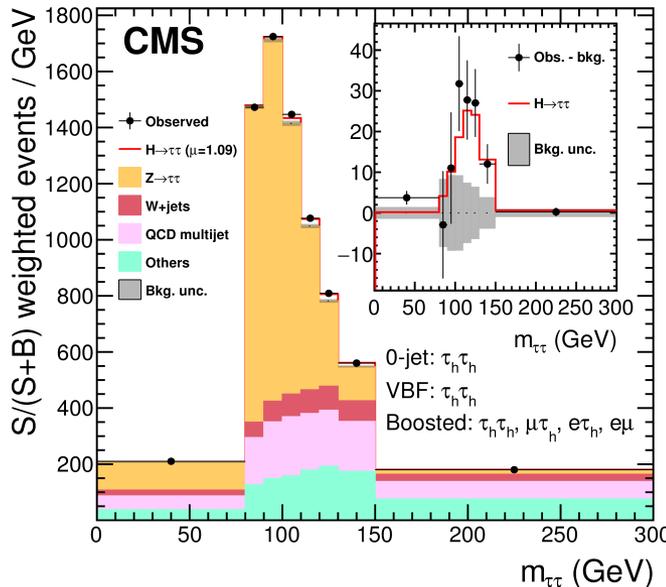
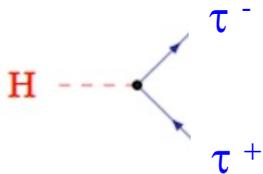


canal W: **5.3  $\sigma$**

canal Z : **4.0  $\sigma$**

3<sup>e</sup> famille

35.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)

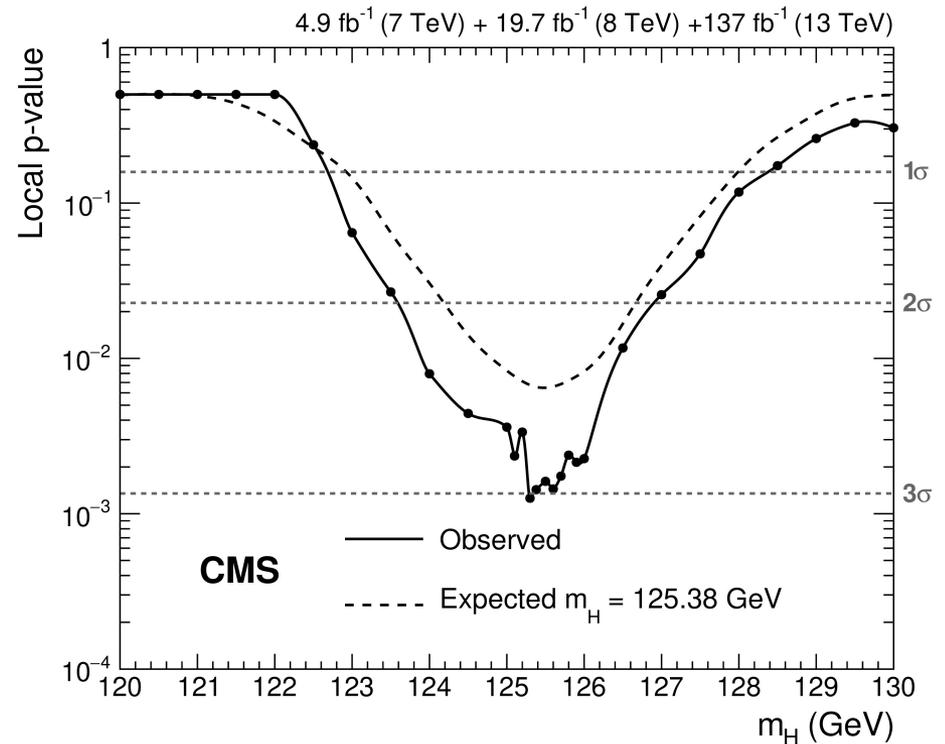
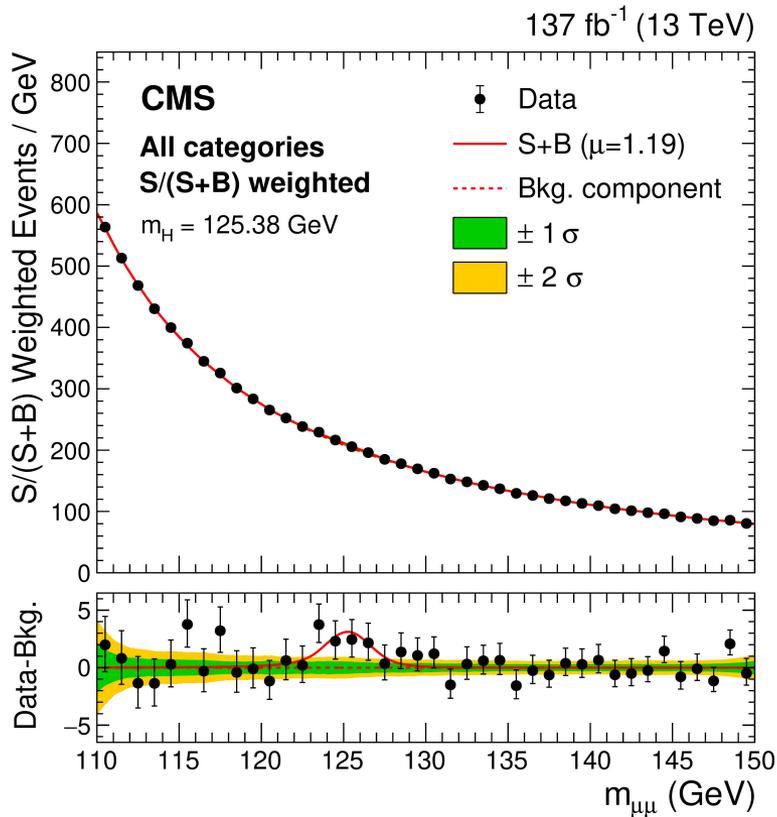


**4.9  $\sigma$**

5.9  $\sigma$  si combiné  
 avec les données du run 1

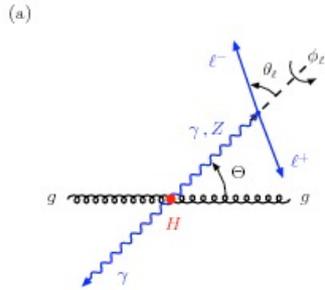
# Observation $H \rightarrow \mu\mu$

2<sup>e</sup> famille !



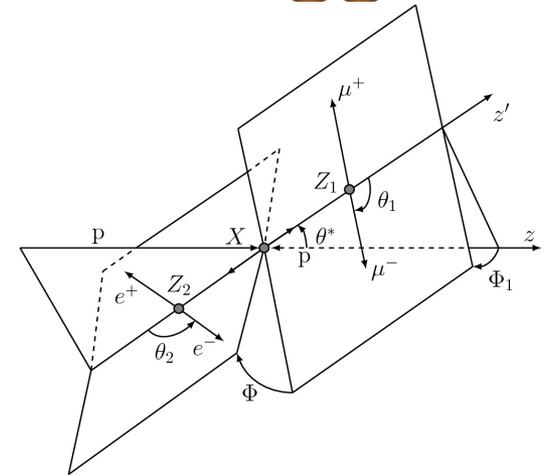
[JHEP 01 \(2021\) 148](#)

# Spin et parité du boson de Higgs

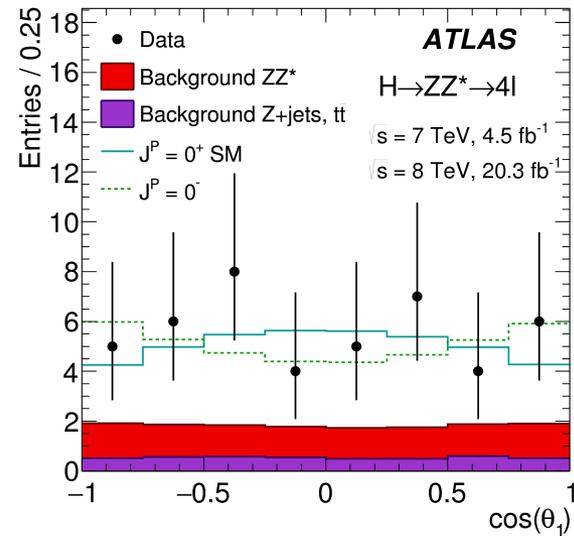
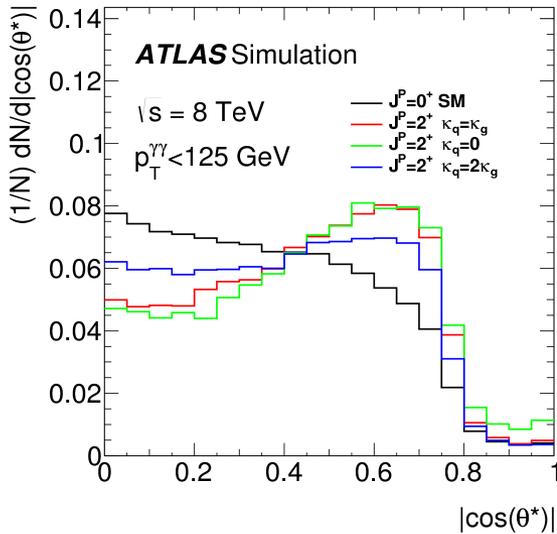


Canal  $\gamma\gamma$

Distributions angulaires



Canal  $ZZ^*$



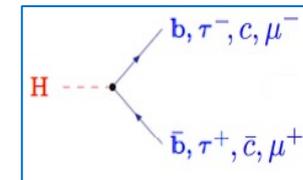
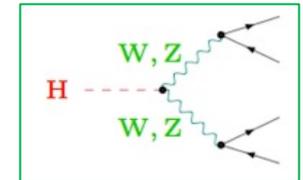
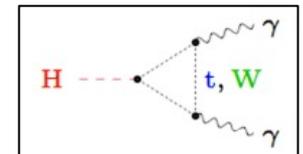
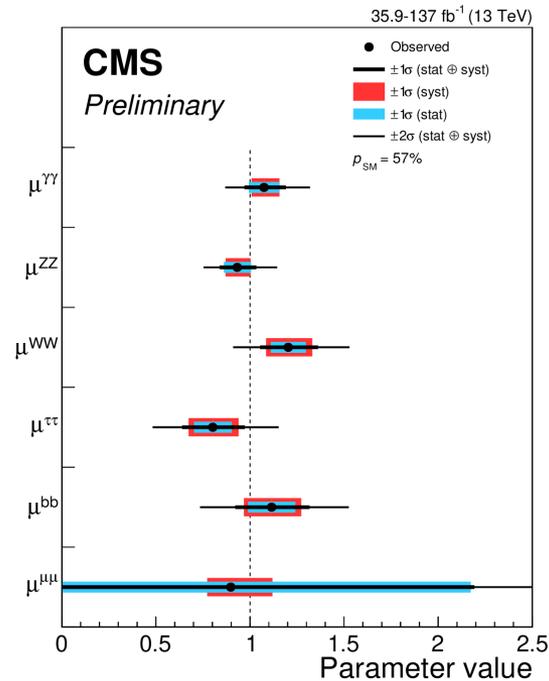
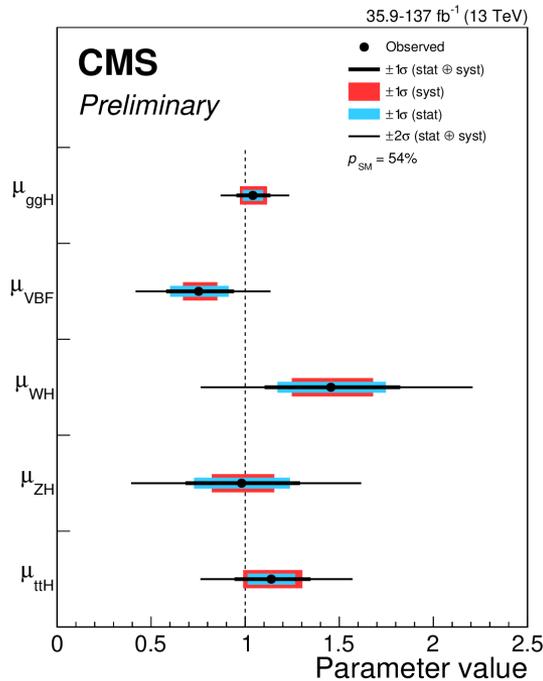
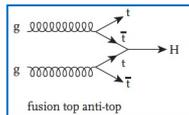
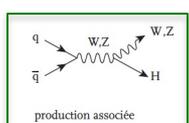
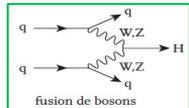
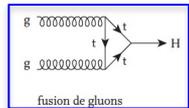
Spin<sup>parité</sup> =  $0^+$  conformément à la prédiction du MS

# Mesure de la force du signal

$$\mu = \sigma / \sigma_{SM}$$

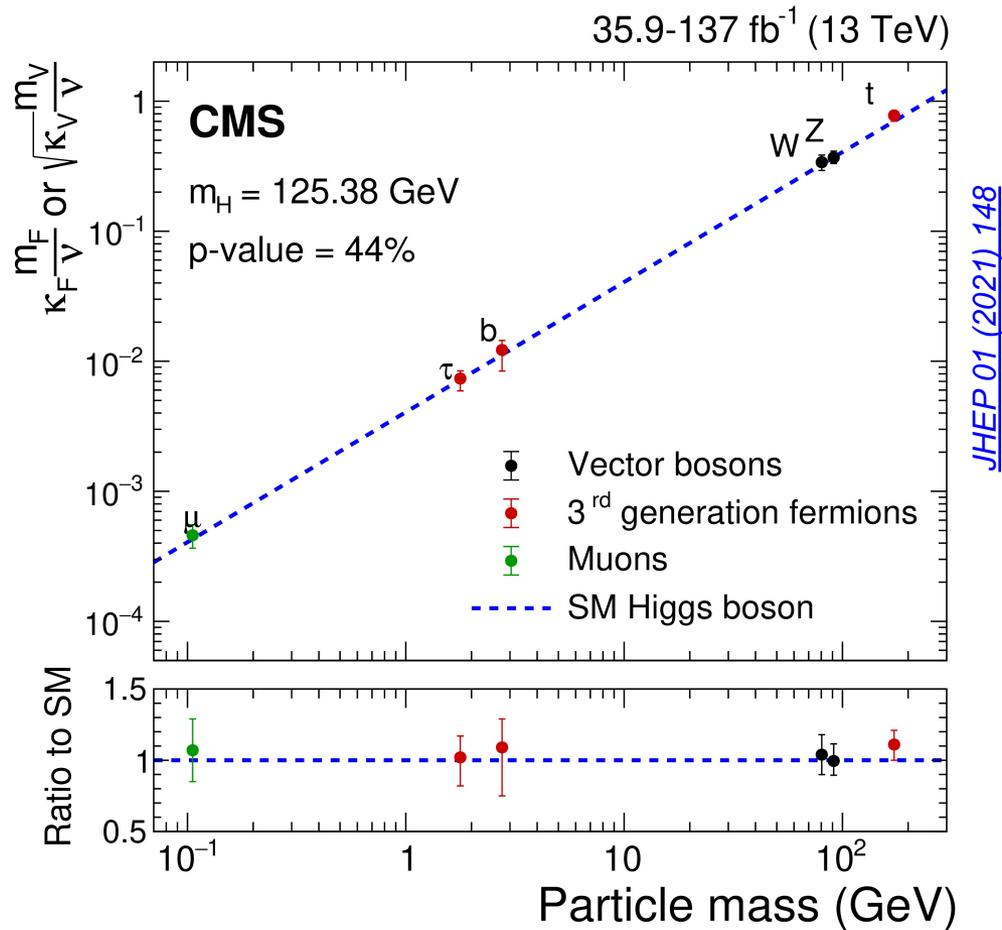
Production

Désintégration



La production et la désintégration **sont compatibles avec le Modèle Standard**

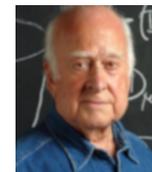
# Résumé



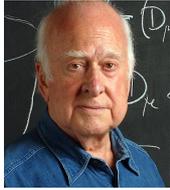
Découverte en 2012 :



9 ans plus tard :



# Fin de la discipline ??



Higgs standard

NON !!!



Higgs non standard

Questions ouvertes sur la *matière* :

- nombre de familles, hiérarchie des masses, masse des neutrinos
- où est l'antimatière ?
- qu'est-ce que la matière sombre ?
- ...

Questions ouvertes sur les *interactions* :

- unification de toutes les interactions
- faiblesse de l'intensité de la gravité
- ...

Quelle théorie plus large pour le prédire ?

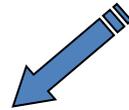
Physique au-delà du Modèle Standard

≡ « nouvelle physique »

Quelle que soit la nature du boson de Higgs découvert, il faut chercher autre chose !

# Comment rechercher la nouvelle physique

## 2 méthodes



### Directe

Recherche de nouvelles  
particules lourdes, réelles

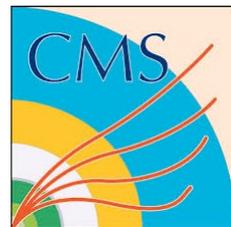
☞ énergie

### Indirecte

Mesures précision,  
tests de cohérence

☞ luminosité

**Le LHC a les deux !**

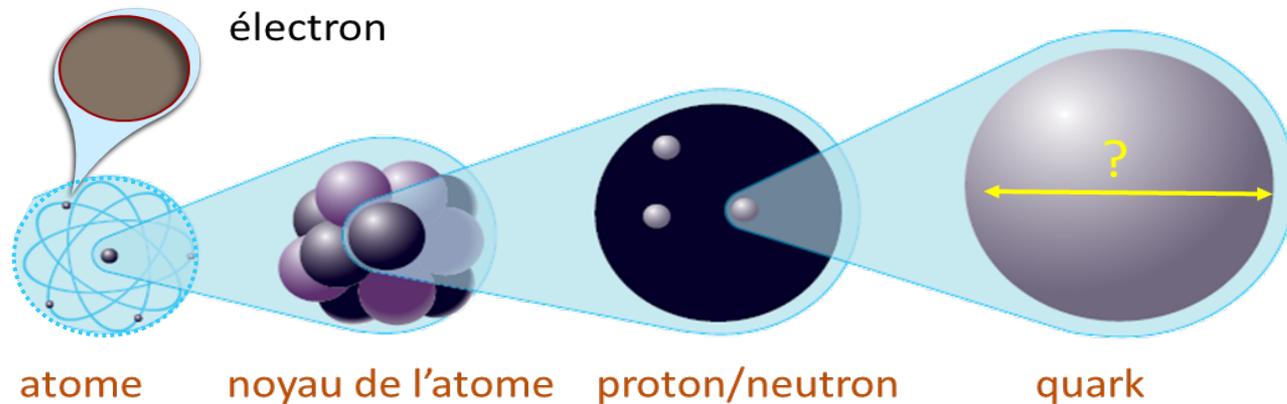


# PHYSIQUE AU LHC : RECHERCHE DE « NOUVELLE PHYSIQUE »

# Quelle nouvelle physique ?

## Particules composites

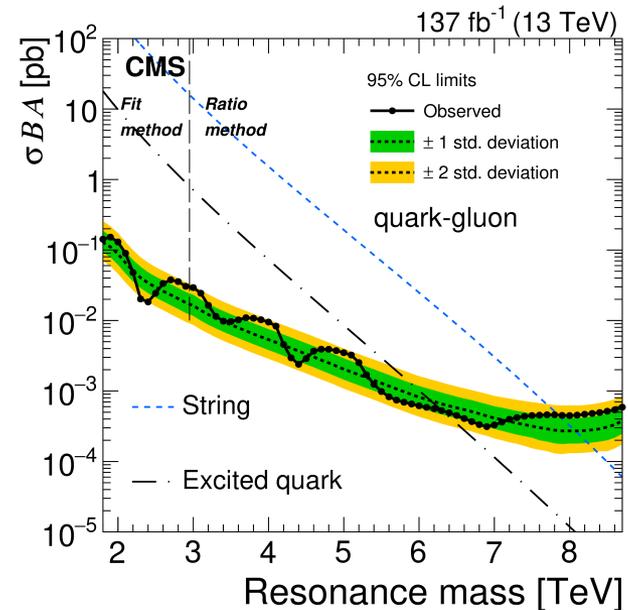
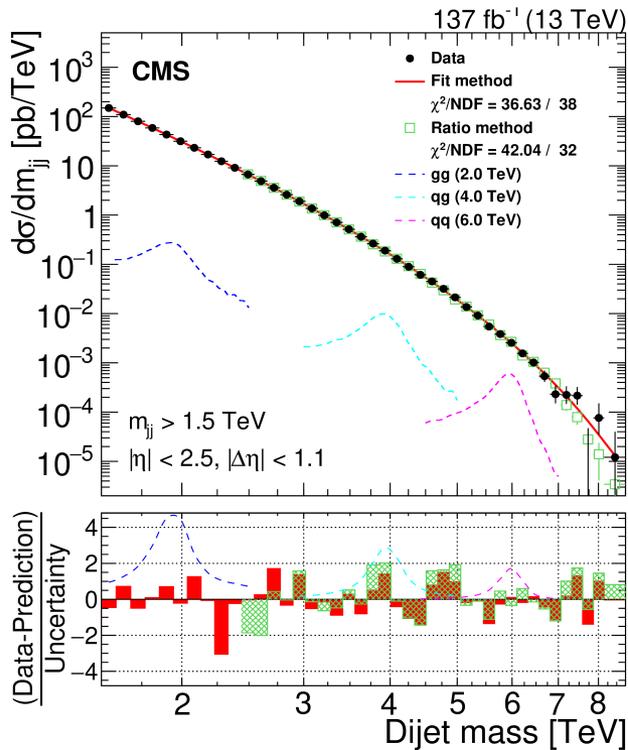
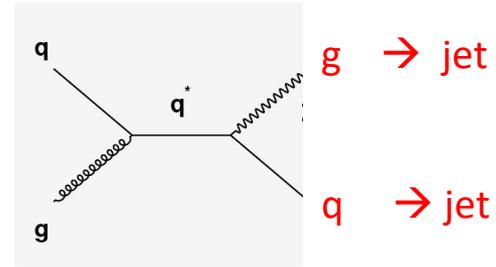
J. Pati, A. Salam 1974



- Particules standard ne seraient pas élémentaires mais auraient des **constituants** (appelés par ex. préons)
- Peut expliquer la réplication des familles et la quantification de la charge
- Prédit **états excités** des particules considérées comme élémentaires aujourd'hui, des « leptoquarks » (LQ), ...

# Spectre de masse invariante jet-jet

Etat excité d'un quark :  $q^*$



JHEP 05 (2020) 033

La structure des quarks est testée jusqu'à 6.5 TeV ! ( $3 \times 10^{-5}$  fm)

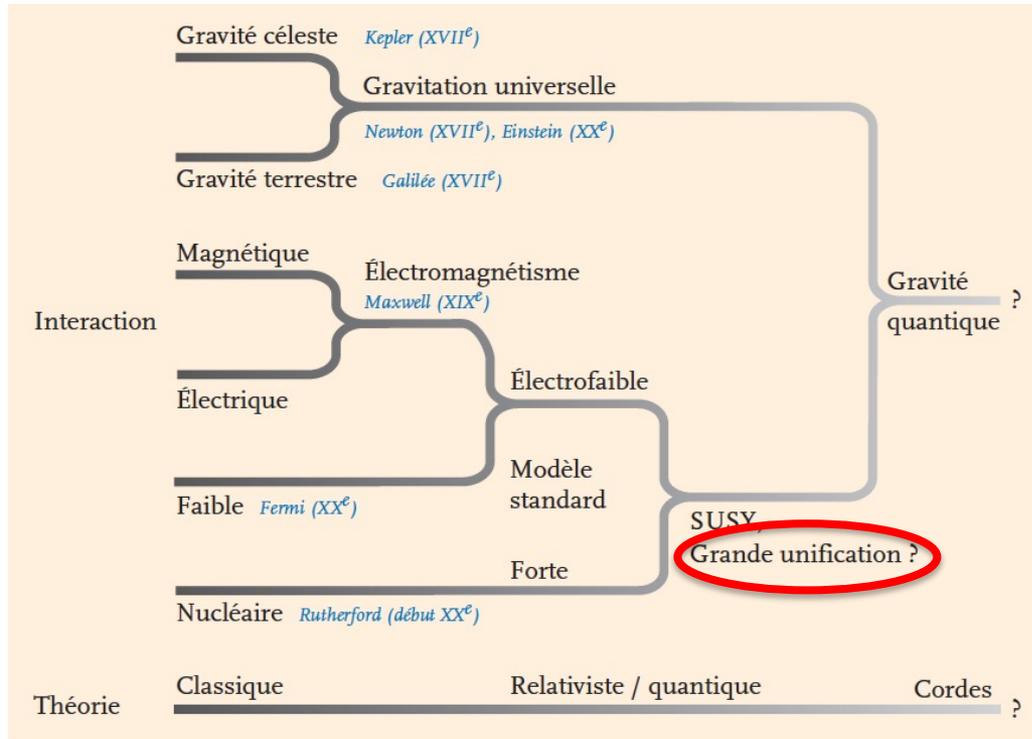
Remarque : on fait la même chose avec les leptons : on recherche  $l^* \rightarrow l \gamma$

# Quelle nouvelle physique ?

## Théorie de la Grande Unification

H. Georgi, S. Glashow 1974

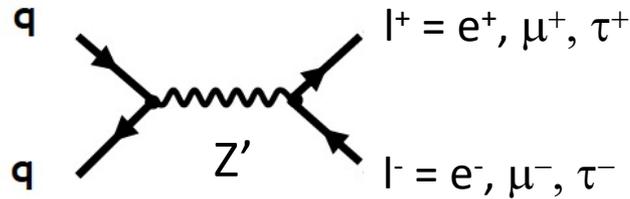
J. Pati, A. Salam 1974



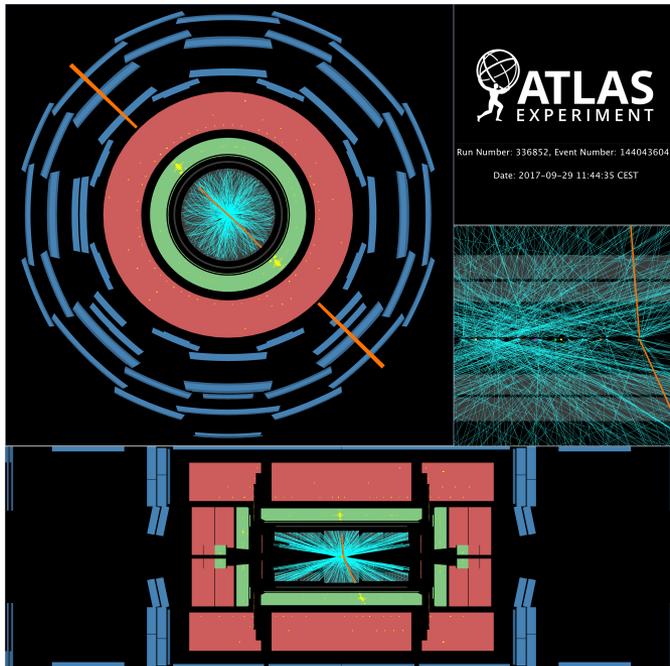
- Unifie les **constantes de couplage** des interactions
- Prédit de **nouvelles particules** : nouveaux bosons ( $Z'$ ,  $W'$ , LQ, ...), nouveaux fermions, plusieurs bosons de Higgs,...

Remarque : l'existence d'un  $Z'$  et ou d'un  $W'$  impliquerait celle d'une « 5<sup>ème</sup> force »

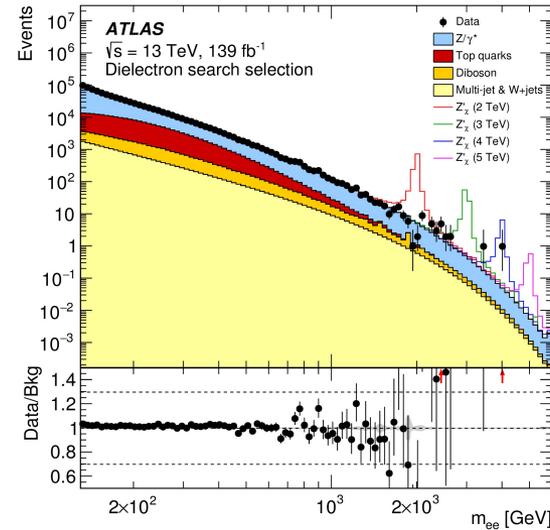
# Spectre de masse invariante dilepton



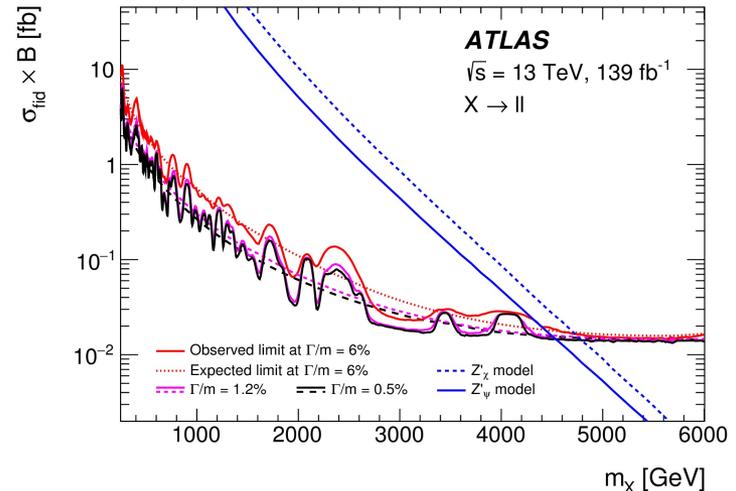
$Z' = Z$  en plus lourd



$M(e^+e^-) = 4.06 \text{ TeV}$



Dielectron invariant mass [GeV]



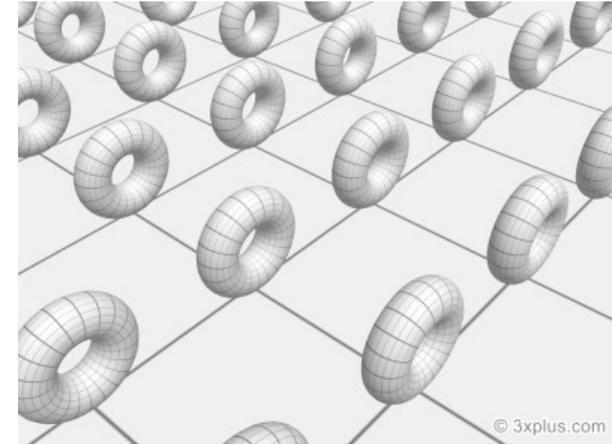
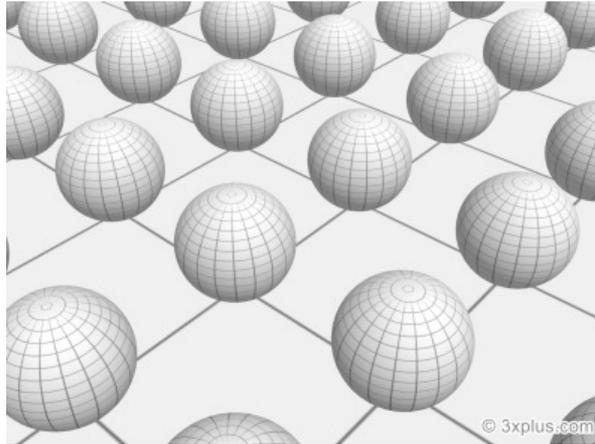
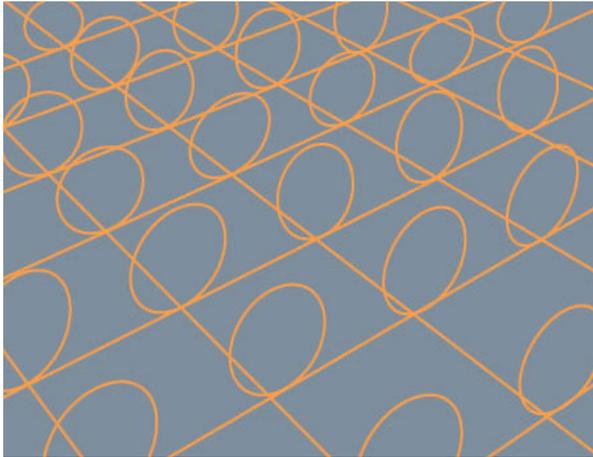
Remarque : on recherche de même  $W' \rightarrow l \nu$

# Quelle nouvelle physique ?

## Dimensions supplémentaires

T. Kaluza, O. Klein 1921

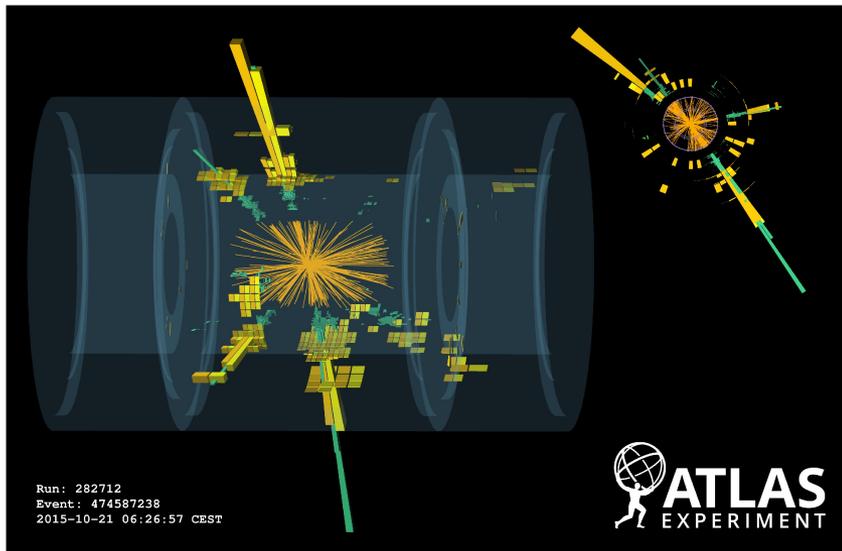
ADD 1998, RS 1999



- Gravitation « diluée » dans un espace plus grand
- Résout le problème de la faiblesse de la gravitation
- Prédit des « excitations » des particules standard et des **micro trous noirs**
- Peut fournir des candidats de **matière sombre**

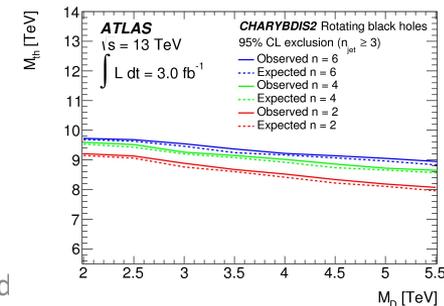
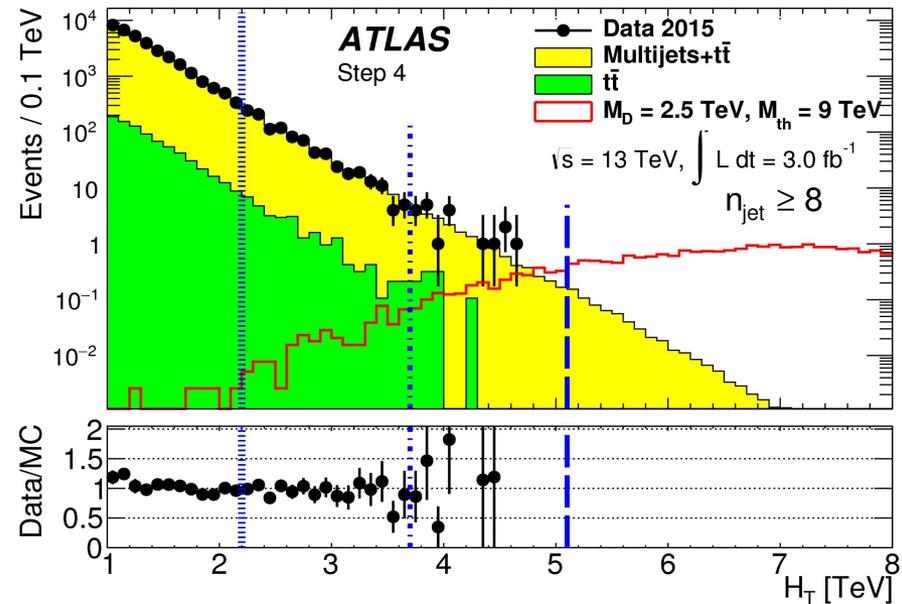
# Recherche de trous noirs microscopiques

- Dimensions supplémentaires doivent être **petites** et **enroulées** sur elles-mêmes
- A très petite distance (donc très grande énergie) : particules sont soumises à l'intensité totale de la gravité
- ➔ suffisant pour former un **trou noir microscopique**
- temps de vie  $\sim 10^{-27}$  s ; se « désintègre démocratiquement » (il « s'évapore »)



10 jets,  $H_T = 4.4$  TeV

$H_T$  = somme des énergies transverses de tous les objets énergétiques détectés : jets, leptons, photons,  $E_T$  manquante



# Quelle nouvelle physique ?

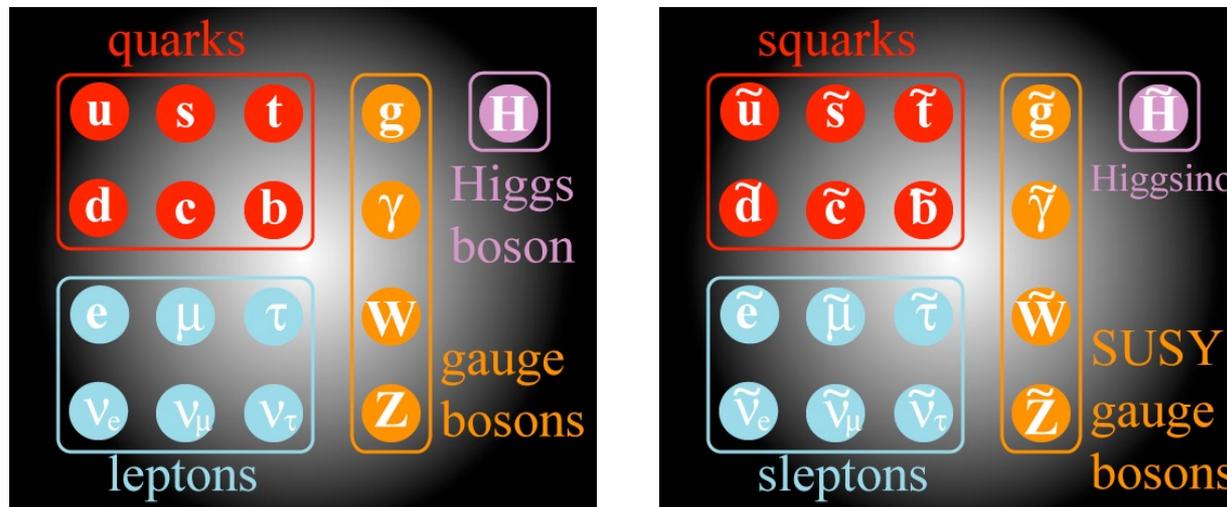
## Supersymétrie

Y. Golfand, E. Likhtman 1971

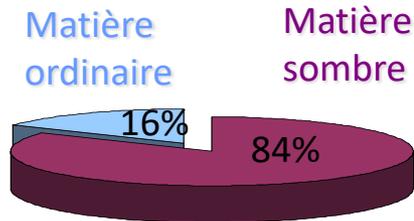
A chaque **fermion** standard est associé un **boson**, et inversement

→ transformations de **spin**

chaque « super partenaire » a exactement les mêmes nombres quantiques, sauf le spin



Bosinos (photino, gluino,...) et sfermions (squarks, sleptons, sélectron, stop, ...)

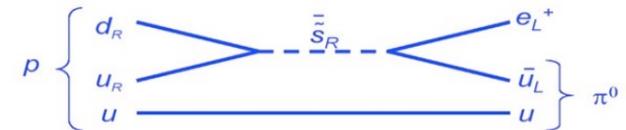
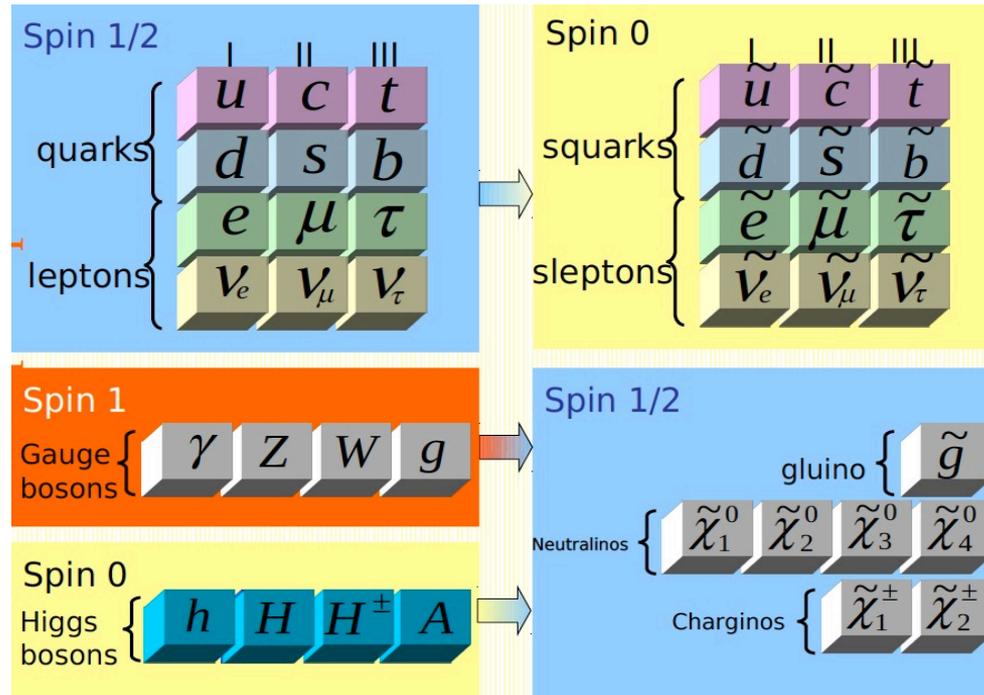


- Peut résoudre le problème de *hiérarchie*
- Permet d'unifier les intensités des interactions
- Prédit un candidat crédible de **matière sombre**

Matière ~ 32% contenu univers

# Quelle nouvelle physique ?

## Supersymétrie (suite)



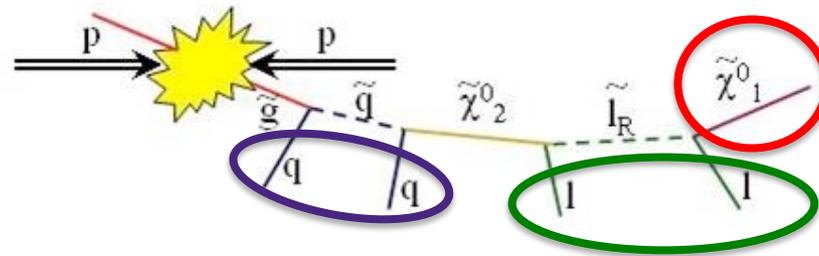
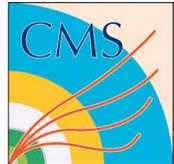
Un nombre quantique additionnel, la « **R-parité** », introduit pour protéger le proton de la désintégration.

$R_p = +1$  pour les particules standard,  $-1$  pour les particules supersymétriques

→ production en **paire**

→ sparticule la plus légère est **stable** → candidat pour la **matière sombre**

# Recherche de SUSY



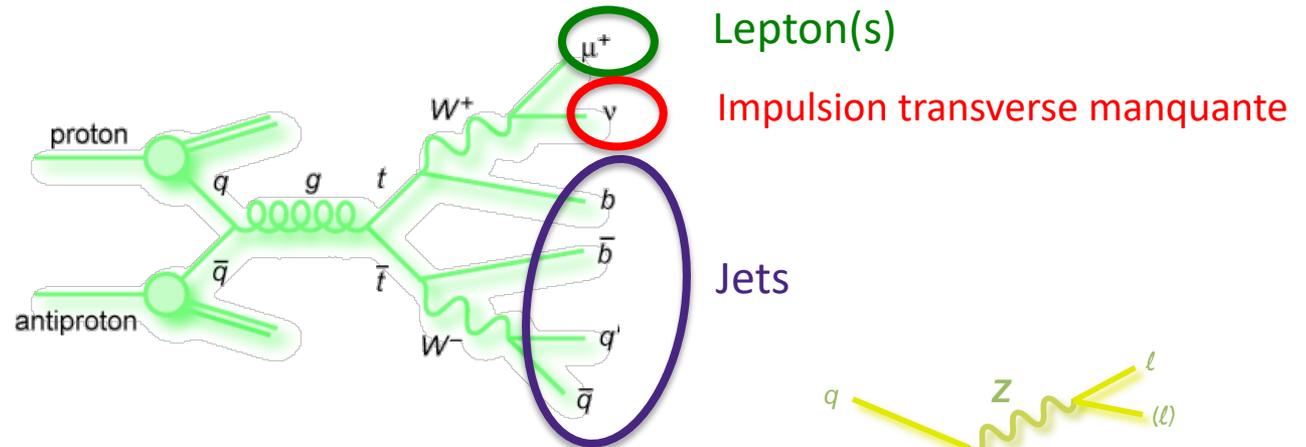
« Signature » typique :

- Production en **paires** de **squarks** ou **gluino** (interaction forte)
- Pas encore observés  $\Rightarrow$  lourds  $\rightarrow$  produits de désintégration à grand  $p_T$
- Désintégrations des *neutralinos* et *charginos* peuvent donner des leptons
- **La chaîne de désintégration s'arrête à la particule la plus légère**
- qui s'échappe sans être détectée (neutres, interaction faible)  
 $\rightarrow$  impulsion transverse manquante !

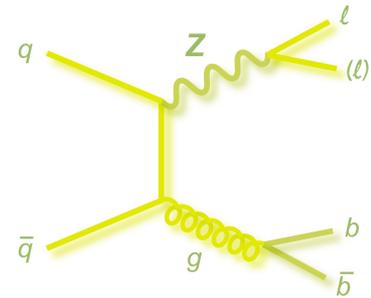
multi-Jets + n leptons +  $E_T^{\text{manquante}}$

# Bruits de fond à la recherche de SUSY

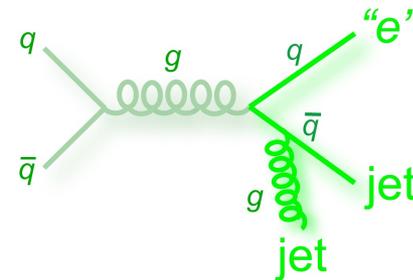
- Top-antitop :



- mais aussi : W + jets, Z + jets, W, Z  $\rightarrow$  lepton(s), ex :



- ou encore : « QCD » (multi-jets), ex :



Bruit de fond QCD doit être considéré a cause de sa section efficace énorme et parce que les jets peuvent être mal identifiés comme leptons ( $\rightarrow$  faux leptons) ou mal mesurés ( $\rightarrow$  fausse impulsion transverse manquante)

# Exemple : première publication SUSY par ATLAS

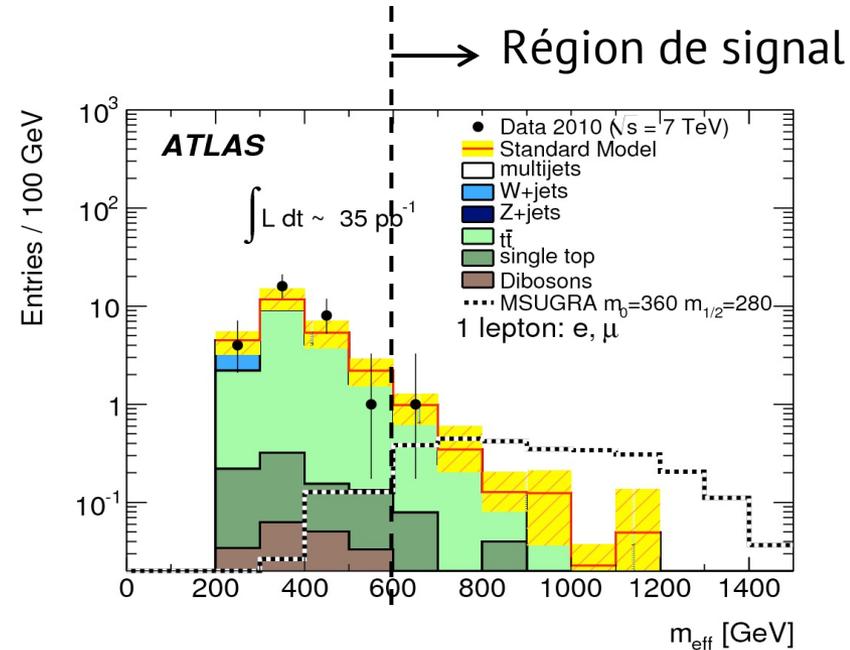
Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in  $\sqrt{s} = 7$  TeV pp collisions

Phys.Rev.Lett.106  
(2011)131802

## Sélection:

- **1 lepton**  $p_T > 20$  GeV
- **$\geq 3$  jets**,  $p_T > 30$  GeV ( $\geq 1$  jets,  $p_T > 60$  GeV)
- $\Delta\phi(\text{jet}_i, \vec{E}_T^{\text{miss}}) > 0.2$  ( $i = 1, 2, 3$ )
- transverse mass  $m_T(\text{lepton}, E_T^{\text{miss}}) > 100$  GeV
- **$E_T^{\text{miss}} > 125$  GeV**
- $E_T^{\text{miss}} > 0.25 M_{\text{eff}}$
- $m_{\text{eff}} > 600$  GeV

$m(\text{gluino}) > 500$  GeV @ 95% CL



Publication la plus récente de cette analyse :

Search for squarks and gluinos in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector

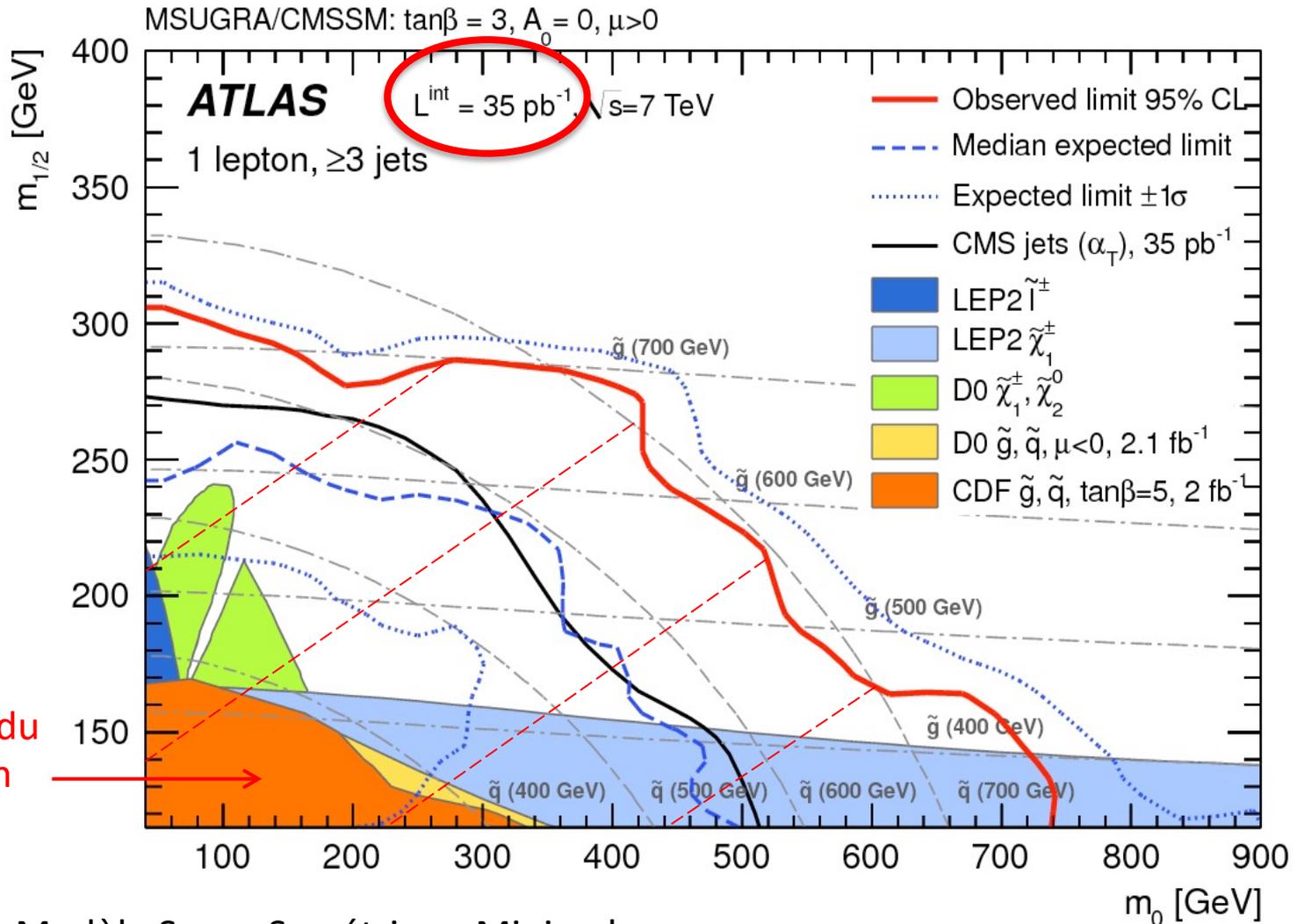
[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 600](#)

$m(\text{gluino}) > 2200$  GeV @ 95% CL

(masse du neutralino = 0)

# Interprétation dans le MSSM contraint

Limites dans le plan (masse des jauginos) versus (masse des scalaires)



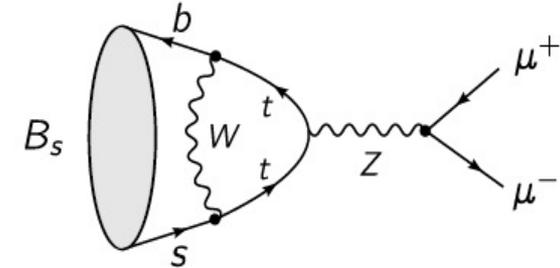
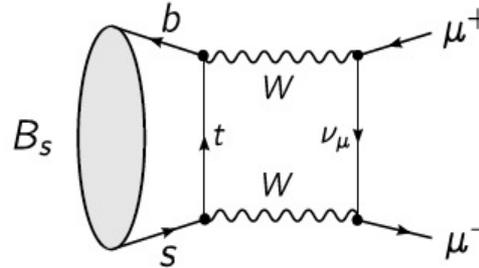
MSSM = Modèle Super Symétrique Minimal

# Méson $b\bar{s}$ : $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$

## Désintégration très rare

Taux de désintégration prédit par le Modèle Standard :

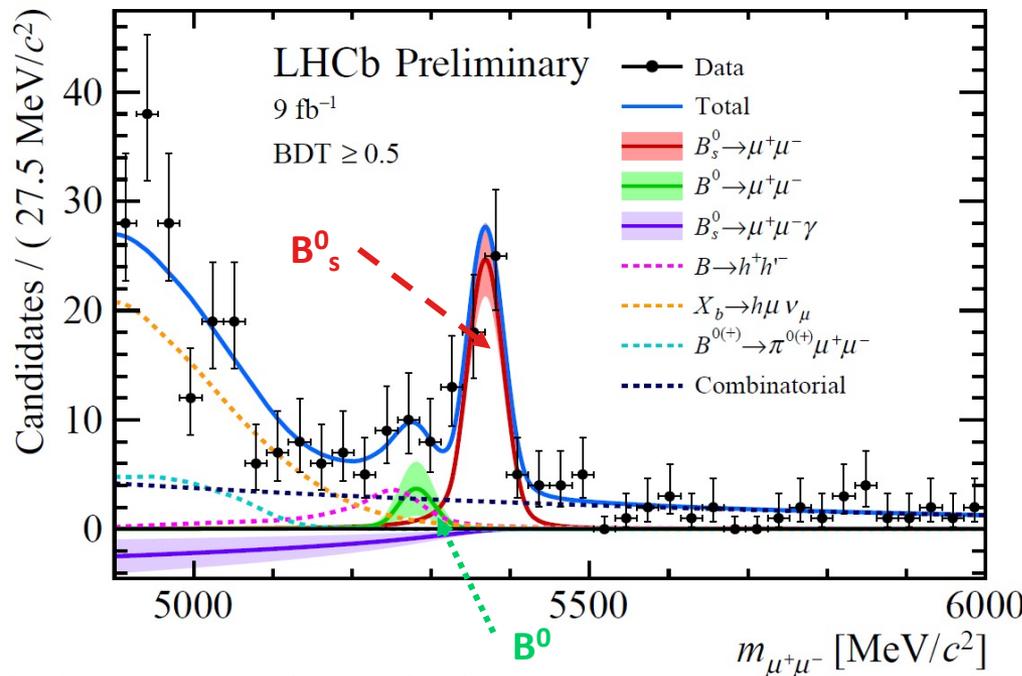
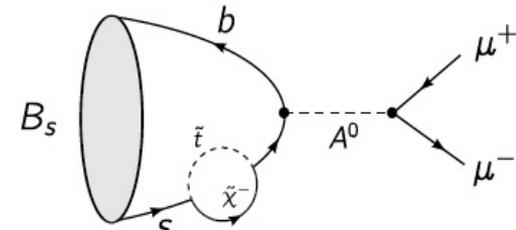
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3.66 \pm 0.14) \times 10^{-9}$$



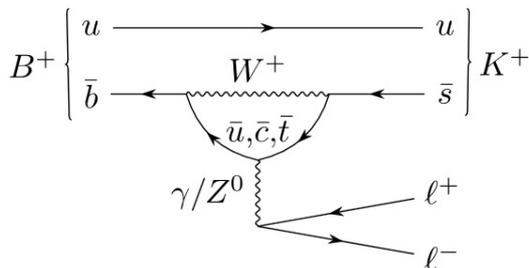
Désintégration observée pour la 1<sup>ère</sup> fois en novembre 2012 ! Aujourd'hui :

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3.09^{+0.46}_{-0.43} {}^{+0.15}_{-0.11}) \times 10^{-9}$$

une façon *indirecte* d'éliminer de nombreux scénarios de SUSY...



# Un indice de nouvelle physique ??



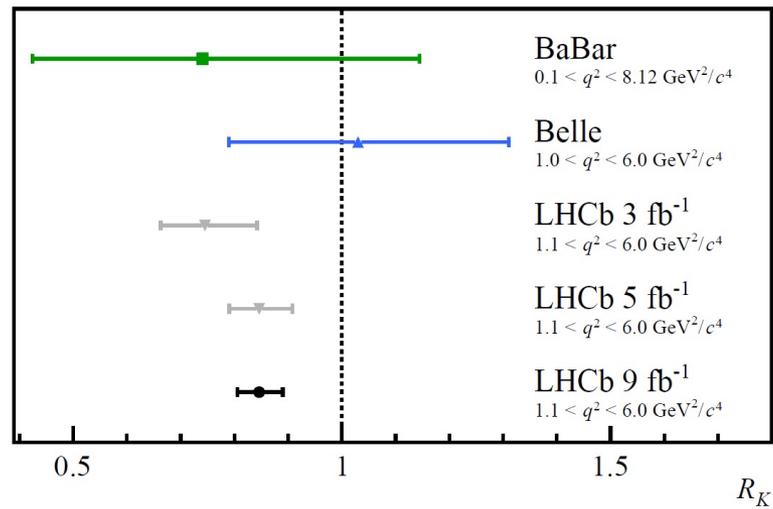
2014

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)} = 0.745_{-0.074}^{+0.090} \text{ (stat)} \pm 0.036 \text{ (syst)}$$

$$R_K^{\text{SM}} = 1 + \mathcal{O}(10^{-2})$$

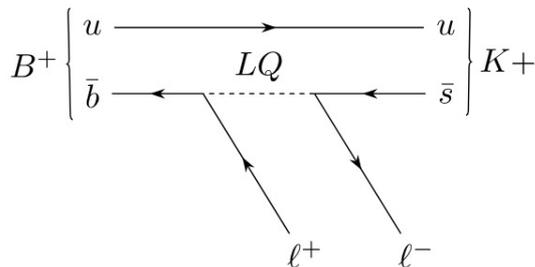
2021

$$R_K = 0.846_{-0.041}^{+0.044}$$



Violation de “l’universalité leptonique”

Depuis 2014 : des centaines de publications soumisees pour expliquer cet ecart



Nombreuses interpretations possibles:  
Z', sneutrino, **leptoquark** ...

# LE FUTUR

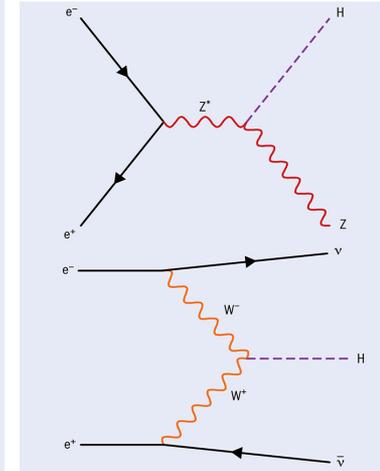
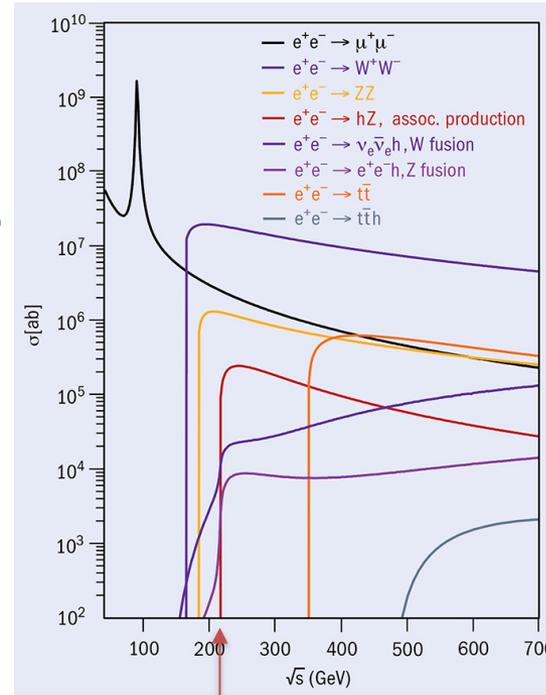
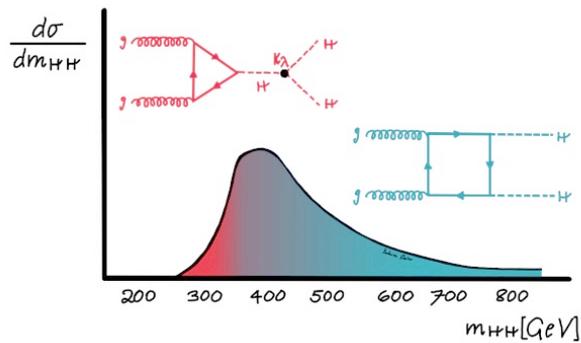
# Physique du futur (sur collisionneurs)

## Mesures de précision

Top, Higgs

→ collisionneur  $e^+e^-$  haute énergie

→ HL-LHC



$m_H+m_Z$  usine à Higgs !!

## Recherche directe de nouvelles particules

SUSY, LQ, ...

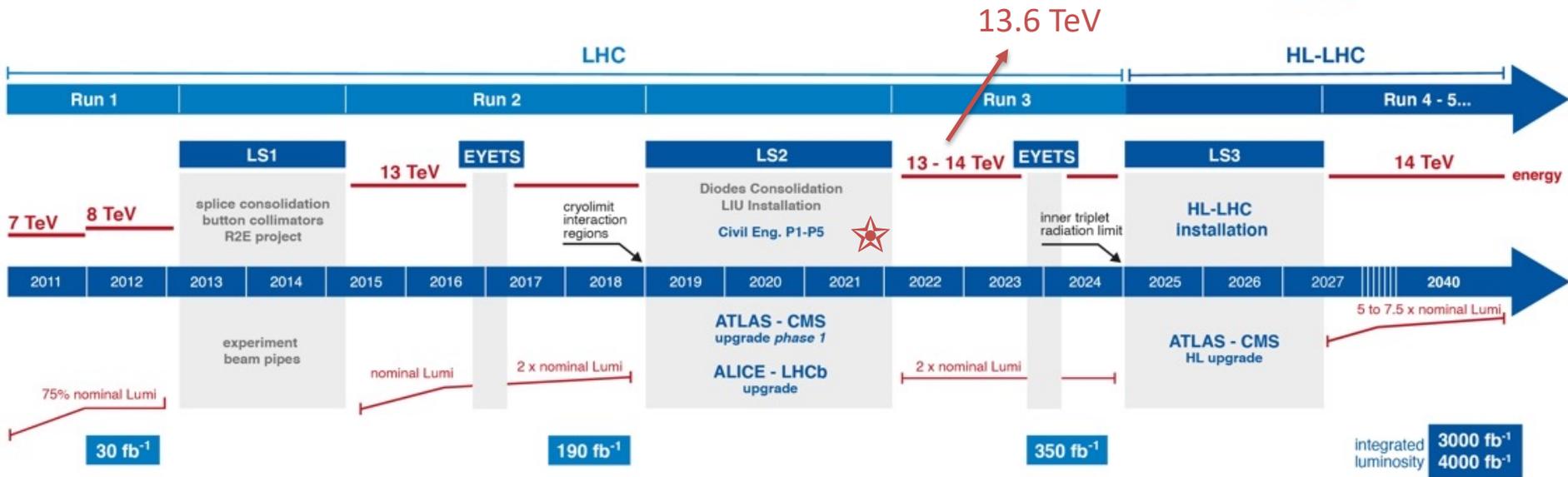
→ HL-LHC

→ collisionneur hadronique à haute énergie

# Au-delà du LHC : HL-LHC



## LHC / HL-LHC Plan



### HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:



### HL-LHC CIVIL ENGINEERING:



# Collisionneurs linéaires e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>

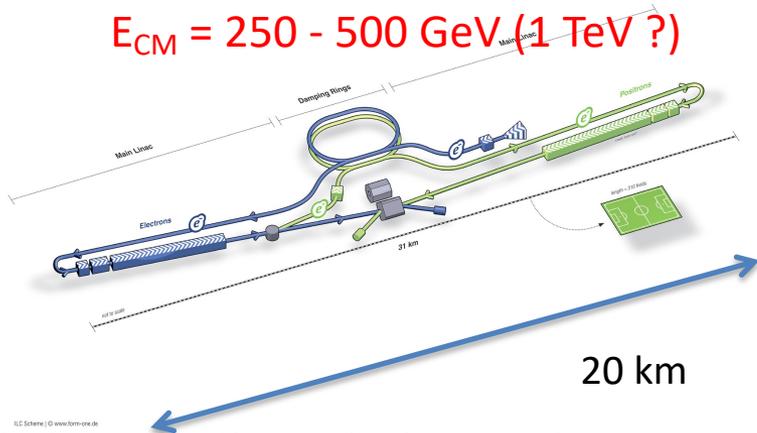
Au Japon : **ILC**  
(Collisionneur  
Linéaire  
International)



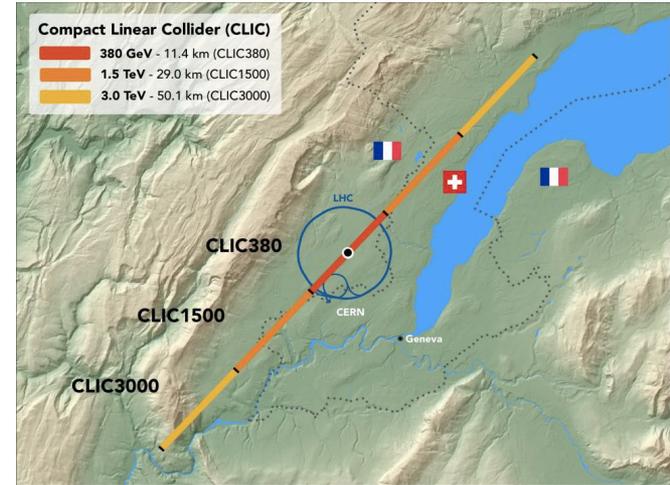
Démarrage  
vers 2035 ??

Technologie classique (cavités RF supra)

$$E_{CM} = 250 - 500 \text{ GeV (1 TeV ?)}$$

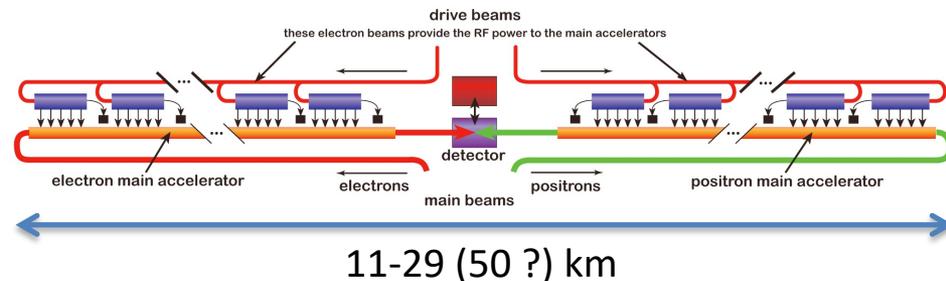


Au CERN : **CLIC**  
(Collisionneur Linéaire Compact)



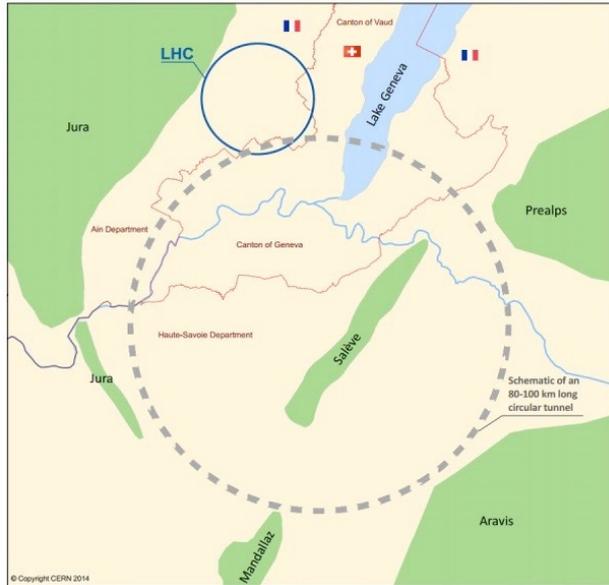
Technologie innovante :  
concept d'accélération à deux faisceaux

$$E_{CM} = 380 \text{ GeV} - 1.5 \text{ (3 ?) TeV}$$



# Collisionneurs circulaires

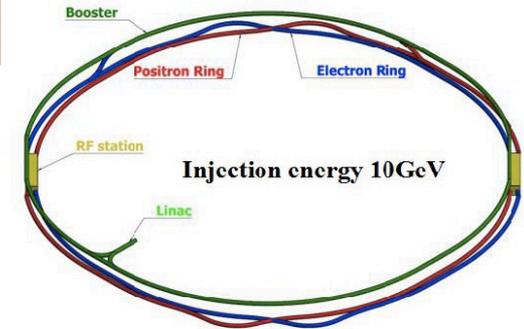
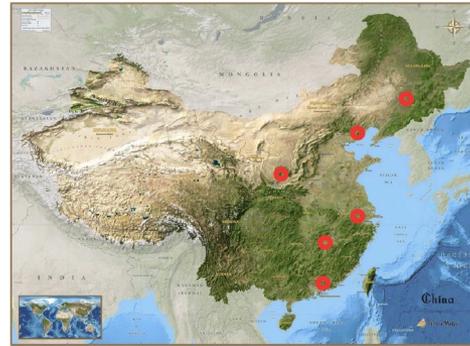
Au CERN : **FCC**  
(Futur Collisionneur Circulaire)



80-100 km circonférence

- $e^+e^-$  (prioritaire)
  - 350 GeV
  - démarrage vers 2040 ??
- pp
  - 50-100 TeV ?

En Chine : **CEPC + SppC**  
(Collisionneur Electron Positron Circulaire  
+ Super Proton Proton Collider)



50-70 km circonférence

- $e^+e^-$ 
  - 240 GeV
  - démarrage vers 2030 ??
- pp
  - 50-100 TeV ?

# Epilogue

- **Succès** du projet LHC :
  - accélérateur, expériences, grille de calcul
- La découverte du **boson de Higgs** a bouleversé le paysage de la discipline
- On ne sait plus précisément ce que l'on doit chercher
  - le prochain collisionneur devrait être une « usine à Higgs » mais n'est pas fixé !
  - les expériences **hors collisionneurs** ont aussi leur mot à dire