

**Qu'est-ce que le
boson de Higgs et
comment le détecter?**

Le Modèle Standard de la physique des particules

- **Succès:**

- ✓ *Observations confirmant la théorie*

- 12 constituants élémentaires observés
- Bosons vecteurs (W,Z) observés à la masse prédite
- Modèle des quarks

- **Mais incomplet:**

- ✓ *Pourquoi 3 familles?*

- ✓ *Mécanisme à l'origine de la masse des particules connues?*

- une possibilité : interaction avec le boson de Higgs

- ✓ *Extrapolation délicate à plus haute énergie*

- → *physique nouvelle à l'échelle du TeV: supersymétrie,...*

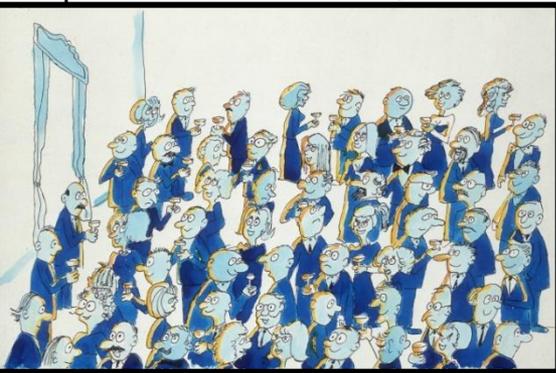
- ✓ *Incomplet : n'incorpore pas la gravité*

Le Modèle Standard de la physique des particules

• Origine de la masse des particules

- ✓ *Symétrie* → *particules de masse nulle*
- ✓ *Or particules massives (de 0 à 100 GeV/c²)*
- ✓ *Symétrie électrofaible* : *la symétrie est brisée à basse énergie*
- ✓ *Mécanisme possible* : *interaction entre les particules et le boson de Higgs*

En 1993, le défi du ministre britannique des sciences aux chercheurs: expliquez le mécanisme de Higgs simplement!
Réponse de David Miller, mise en BD : Cern.



Une assemblée de physiciens:
le « vide quantique »
(avec un champ de Higgs)



Arrive une personnalité
libre de ses mouvements
(«particule sans masse »)

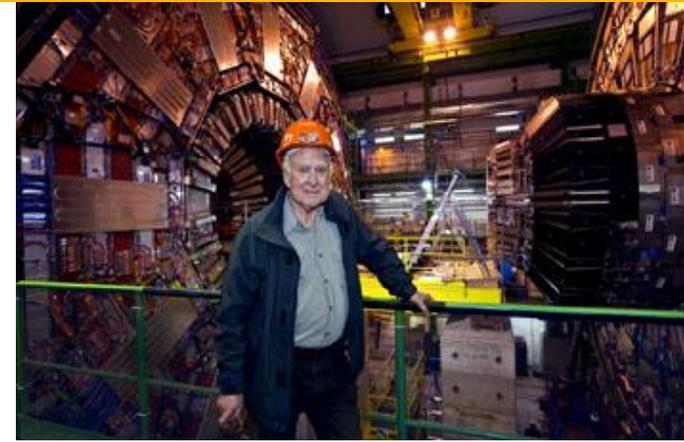


Un amas s'accumule
autour: la personnalité a
« acquis » une masse !

Le Modèle Standard de la physique des particules

- **Mécanisme de Higgs (1964)**

- ✓ *R. Brout, F. Englert, P. Higgs*
- ✓ *Prédit l'existence d'un boson, de spin 0, dont la masse est peu contrainte*
- ✓ *Interactions avec les particules*



⇒ **génération des masses** des particules:

$M_\gamma = 0$ (\Leftrightarrow portée infinie de l'interaction électromagnétique)

$M_Z \sim 91 \text{ GeV}$, $M_W \sim 80 \text{ GeV}$ (\Leftrightarrow portée finie de l'interaction faible)

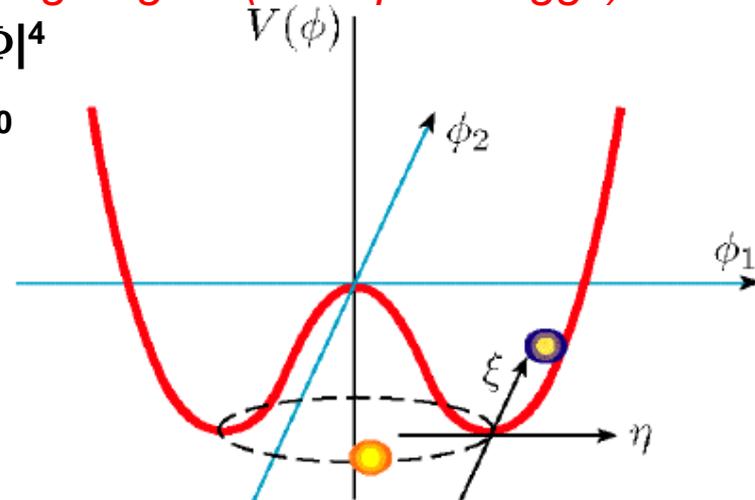
valeurs confirmées
expérimentalement lors de la découverte
des W et Z au CERN (années 80)

Le boson de Higgs

- **A l'origine de la masse des particules: la brisure spontanée de la symétrie**

- ✓ *Introduction d'un champ Φ dans le lagrangien (champ de Higgs)*

- **Potentiel** $V(\Phi) = -\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$
- **Minimum** pour $|\Phi| = v/\sqrt{2} = \Phi_0$
- **Fluctuations quantiques**
autour du minimum : $\Phi_0 + h$
- $m_W^2 = g^2 v^2 / 4 \rightarrow v = 246 \text{ GeV}$
- $m_H^2 = 2 \lambda v^2$



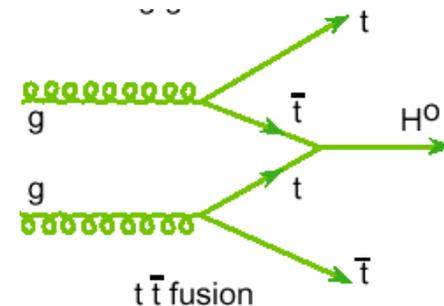
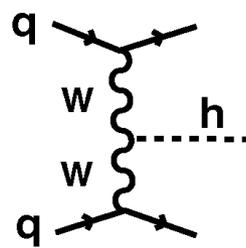
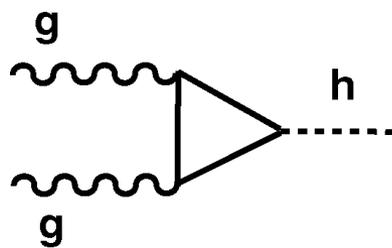
- ✓ *La masse du boson de Higgs est un paramètre libre du Modèle*

Le boson de Higgs

- **Ce que nous prédit la théorie**

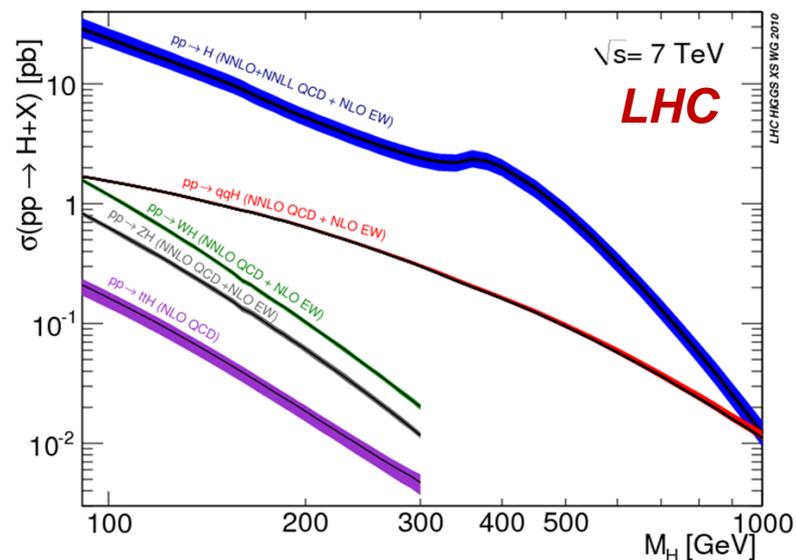
- ✓ Mécanisme de production:

- Boson de Higgs produit seul ou associé à une particule lourde



- La probabilité de ces différents modes de production:

- Est prédite
 - Dépend de la masse du boson de Higgs



Le boson de Higgs

Ce que nous prédit la théorie

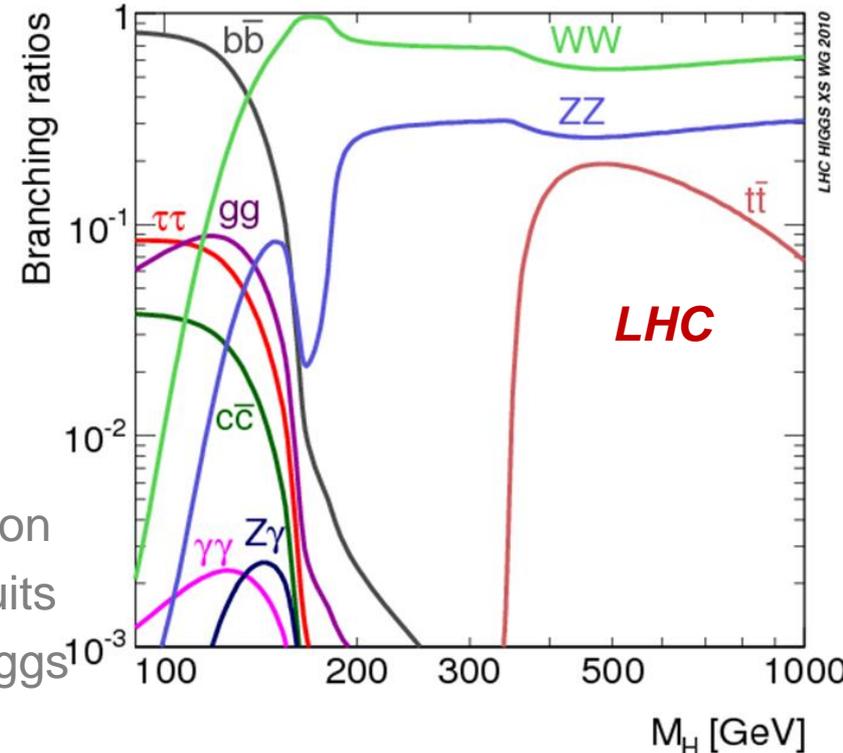
✓ Mécanismes de désintégration

- Suivant sa masse, le boson de Higgs se désintègre préférentiellement en différentes paires de particules

Mode	Mass range, GeV
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110 - 140
$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	120 - 200
$H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu qq$	220 - 600
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell\ell\ell\ell$	120 - 600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$	200 - 600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell qq$	200 - 600

- Seules les particules stables sont observables:

- Expérimentalement, reconstruction de la masse invariante des produits de désintégration = masse du Higgs



Le boson de Higgs

- **Ce que l'on sait de lui aujourd'hui:**

- ✓ *Contraintes expérimentales sur sa masse:*

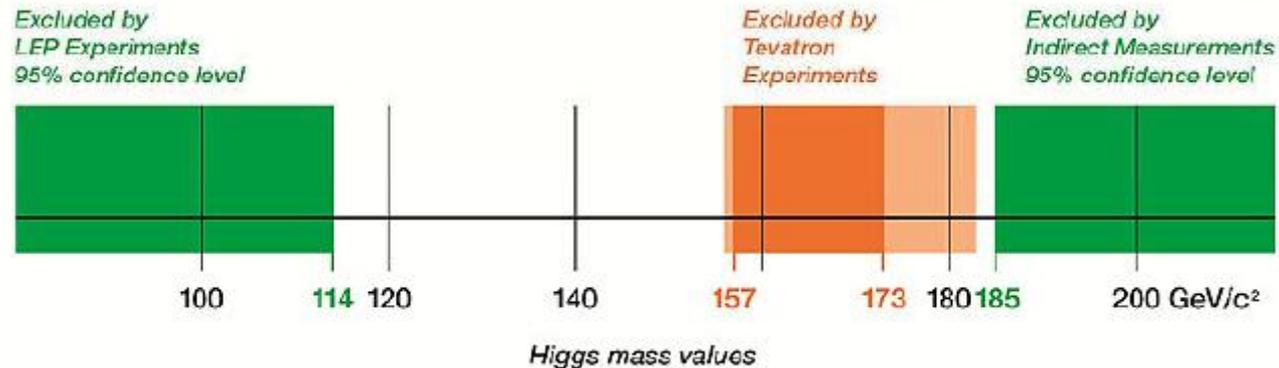
- Contraintes directes (recherche via ses produits de désintégration):

- LEP (accélérateur e+e-, arrêt 2000): $m_H > 114 \text{ GeV}/c^2$

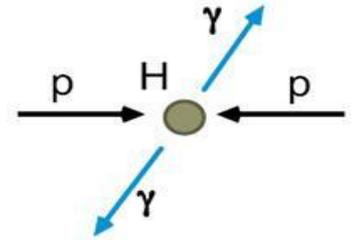
- Tevatron (accélérateur proton-antiproton, arrêt 2011):

- » Masses exclues: $158 < m_H < 173 \text{ GeV}/c^2$

- Théorie : $m_H < 1 \text{ TeV}/c^2$



Le boson de Higgs



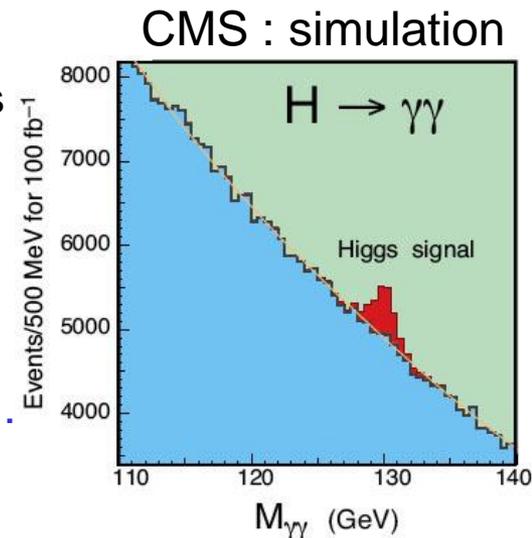
• Une illustration : désintégration en 2 photons ($H \rightarrow \gamma\gamma$)

✓ *Ce que la théorie nous dit:*

- A basse masse, la désintégration $H \rightarrow \gamma\gamma$ est favorisée (compromis détectabilité/production)
- C'est un processus rare (0.2% pour $m_{\text{Higgs}} = 120 \text{ GeV}$)
- Le bruit de fond physique (production de deux photons) est maîtrisable

✓ *Ce que la simulation nous montre:*

- Observable choisie : masse invariante des deux photons détectés \rightarrow recherche d'un excès
- Pour observer un pic ténu de signal (Higgs) au-dessus d'un continuum de fond très élevé, il est nécessaire d'avoir un calorimètre électromagnétique très précis
 - Cahier des charges: résolution en énergie de 1%,...





**Contexte
expérimental**

Les accélérateurs

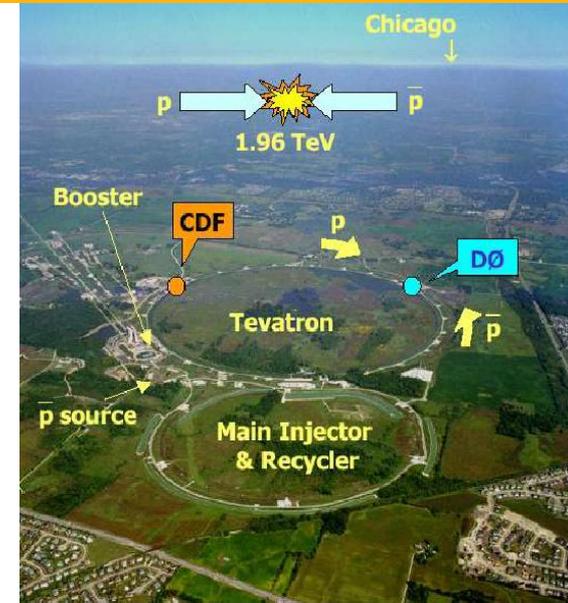
- **Le Tevatron (Chicago)**

- ✓ *Collisionneur proton-antiproton*

- Énergie disponible : 2 TeV
- 2 détecteurs analysent les particules issues des collisions: CDF, D0
- Arrêt prévu en septembre 2011

- ✓ *Recherche active du boson de Higgs:*

- Exclusion d'un domaine de masse



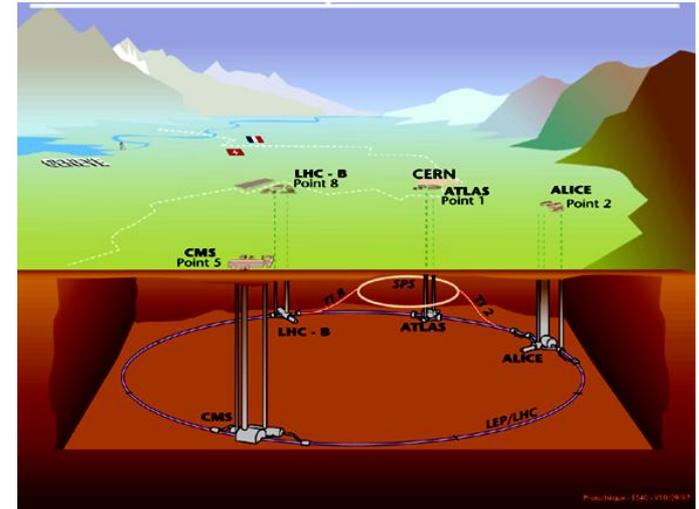
Les accélérateurs

Le LHC (CERN)

✓ Collisionneur proton-proton

- Énergie disponible : 7 TeV, puis 14 TeV dans une seconde phase
- Un détecteur à chacun des 4 points de collision des protons
- 2 permettront la recherche du boson de Higgs: ATLAS et CMS

ATLAS



Contexte expérimental

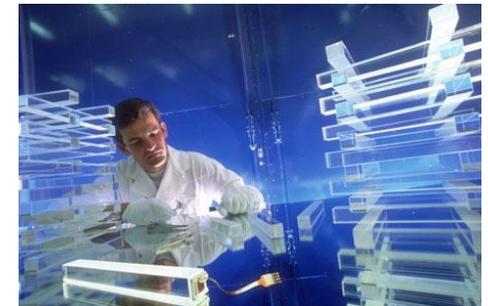
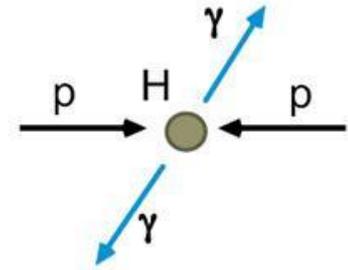
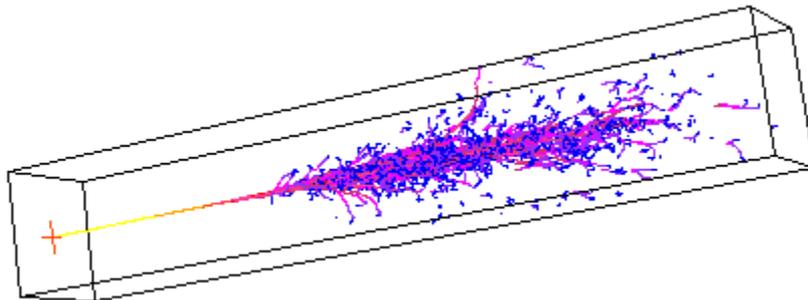
- **Notre illustration: $H \rightarrow \gamma\gamma$**

- ✓ *Pré-requis pour détecter un potentiel boson de Higgs se désintégrant en 2 photons:*

- Calorimètre électromagnétique de pointe
 - Mesurer précisément l'énergie et l'impulsion des photons
- Collaboration étroite entre communautés:
 - Physiciens des particules/ingénieurs détecteurs
 - Simulations/prototypes → optimisation

- ✓ *Exemple: CMS*

- Cristal scintillant: particules chargées => lumière (+ photodiode + électronique)
- 80 000 cristaux → 10 ans!



Bilan des recherches actuelles du boson de Higgs du Modèle Standard

Analyse des spectres de masse

• Hypothèse 1:

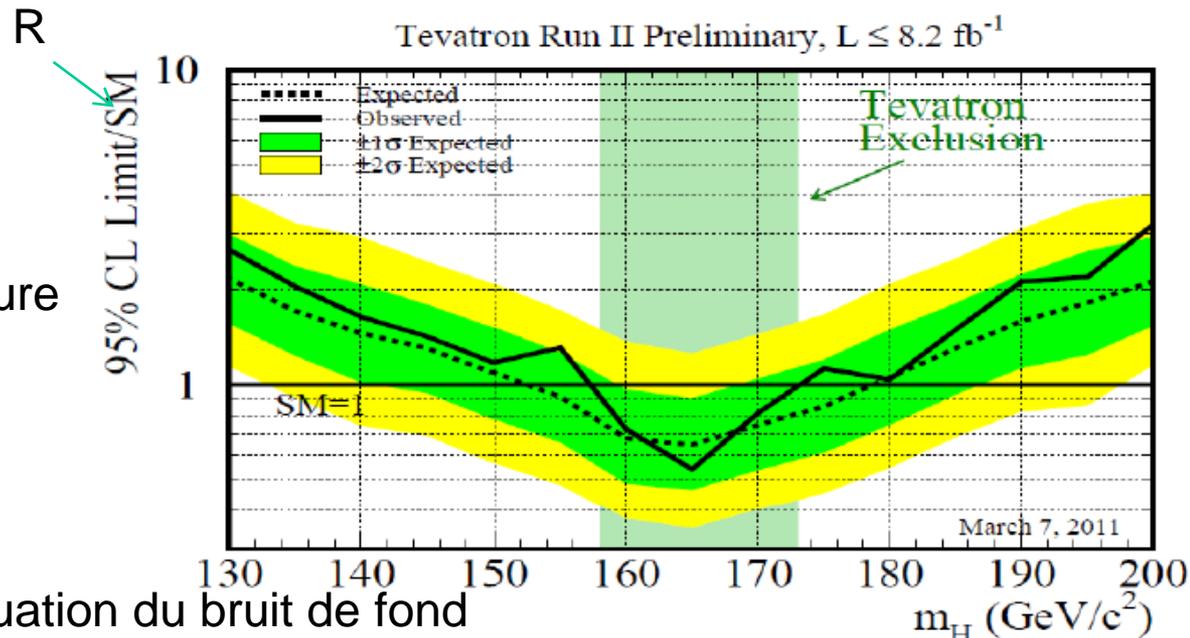
✓ *Pas d'excès observé → pas de découverte:*

• Scan du spectre de masse:

- Comparaison du nombre d'événements attendus de (fond +Higgs) au nombre d'événements observés → observable R dont on teste la compatibilité avec l'existence d'un Higgs

$R < 1 \rightarrow$ masse exclue

$R > 1$: on ne peut pas conclure



Bandes verte et jaune: fluctuation du bruit de fond

Analyse des spectres de masse

- **Hypothèse 2:**

- ✓ *Excès observé: est-ce une découverte?*

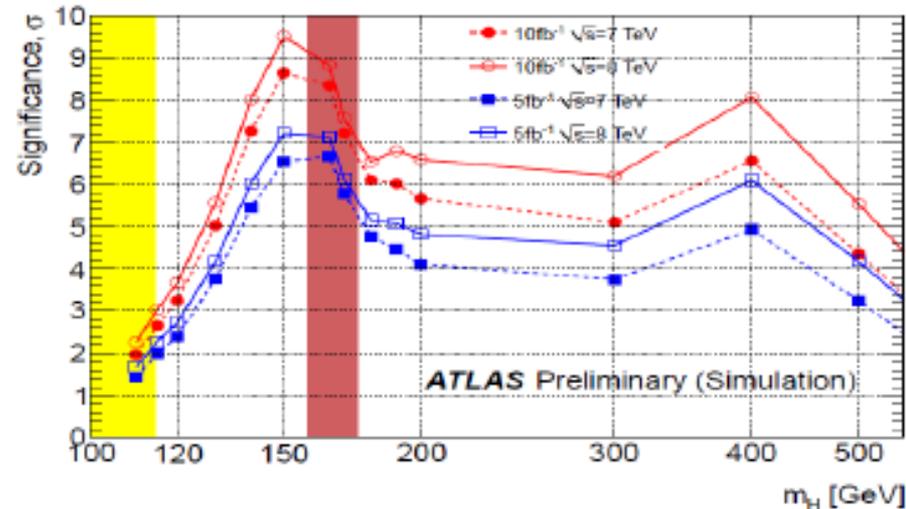
- Outil statistique = significance

$$S = \frac{N_s}{\sqrt{N_B}}$$

- Si $S > 5$ x erreur sur la connaissance du bruit de fond (σ):

- la probabilité (gaussienne) que le bruit de fond fluctue au-delà de 5σ est de 10^{-7}

- **DECOUVERTE!**

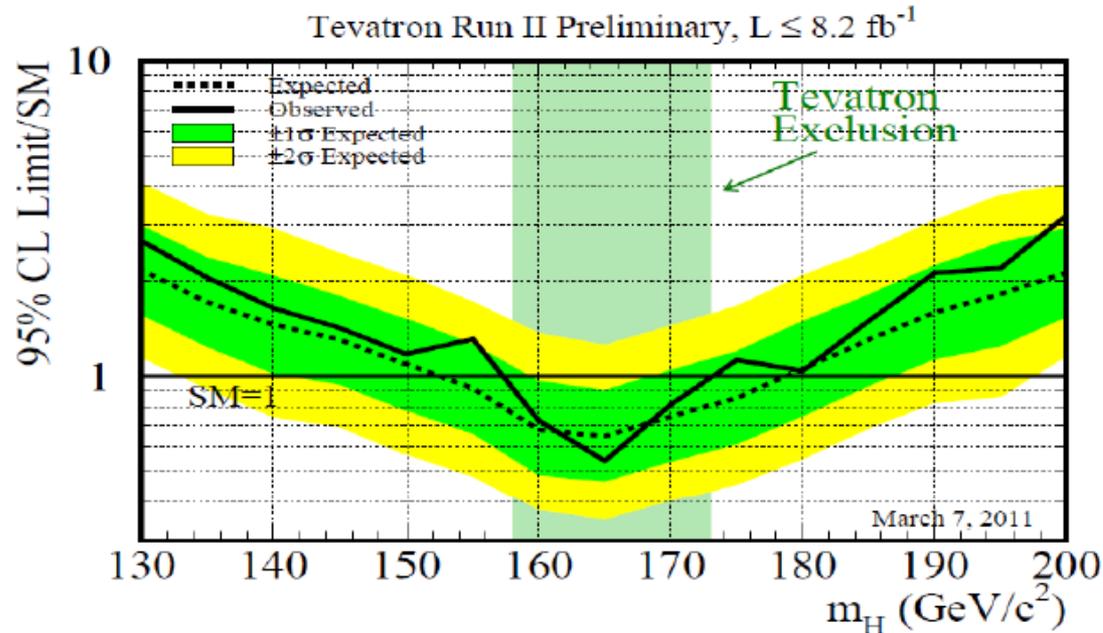


Tevatron

- **Pas d'observation**

- ✓ *Pas d'excès → pas de découverte*
- ✓ *Exclusion d'une partie du spectre de masse:*

$$158 < m_H < 173 \text{ GeV}/c^2$$



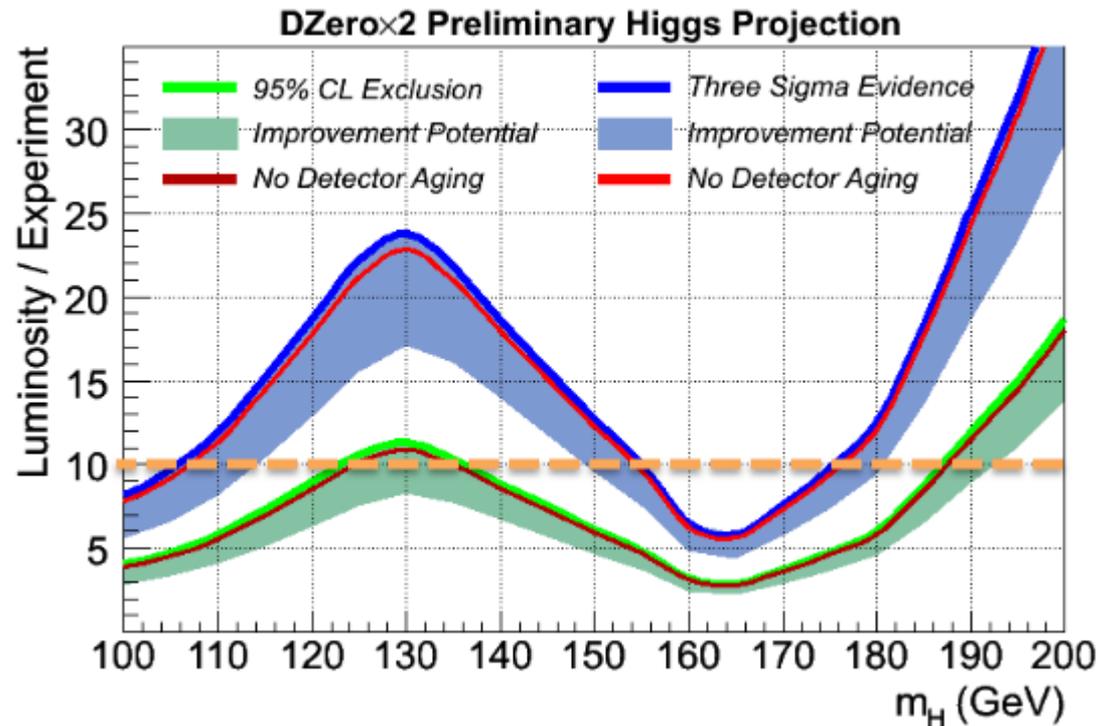
Tevatron

- **Perspectives:**

- ✓ *Augmentation de la quantité de données, amélioration des techniques d'analyse:*

- Erreurs statistiques réduites
- Compréhension du fond améliorée

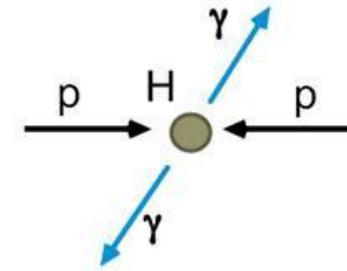
→ résultats sur une zone du spectre en masse élargie



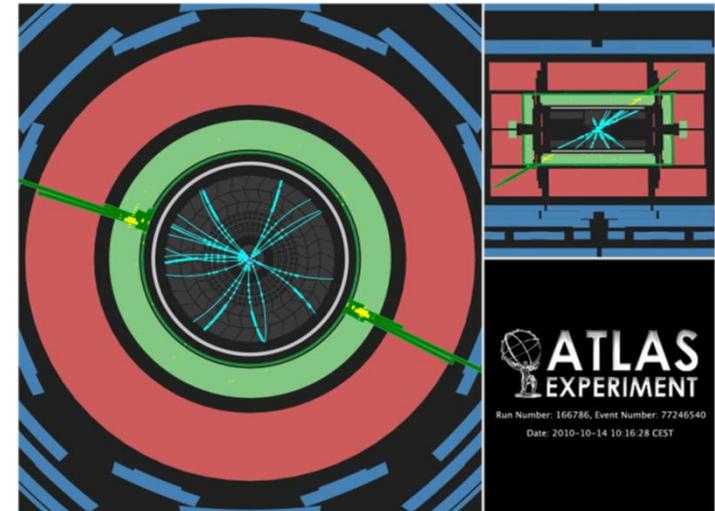
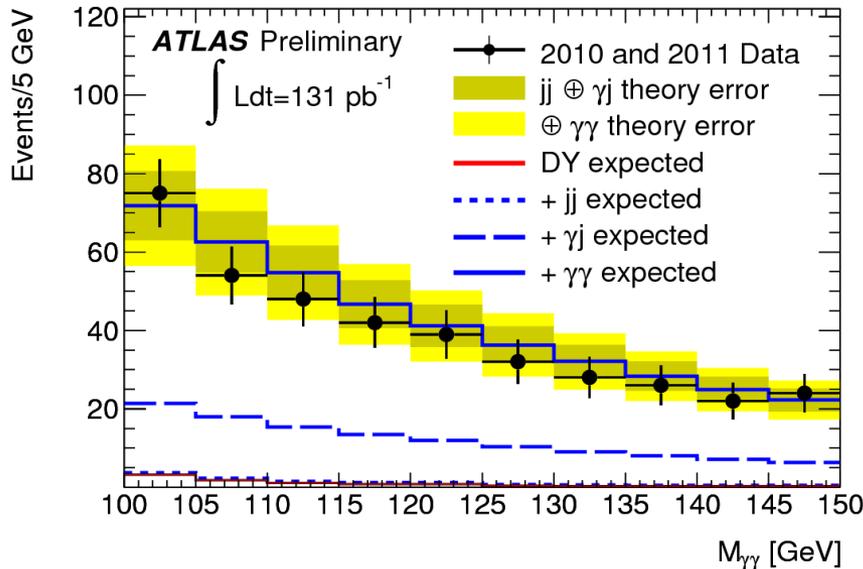
LHC

• **Notre exemple : $H \rightarrow \gamma\gamma$**

✓ *Analyse du spectre de masse $m_{\gamma\gamma}$*



- Sélection d'événements avec 2 photons bien identifiés
- Comparaison données / Monte Carlo

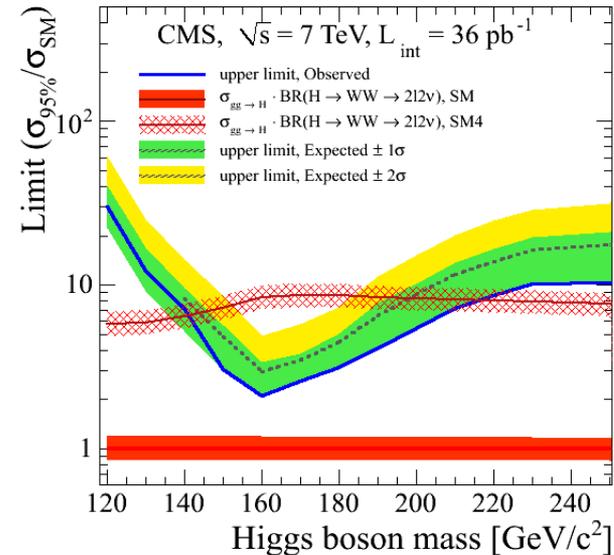
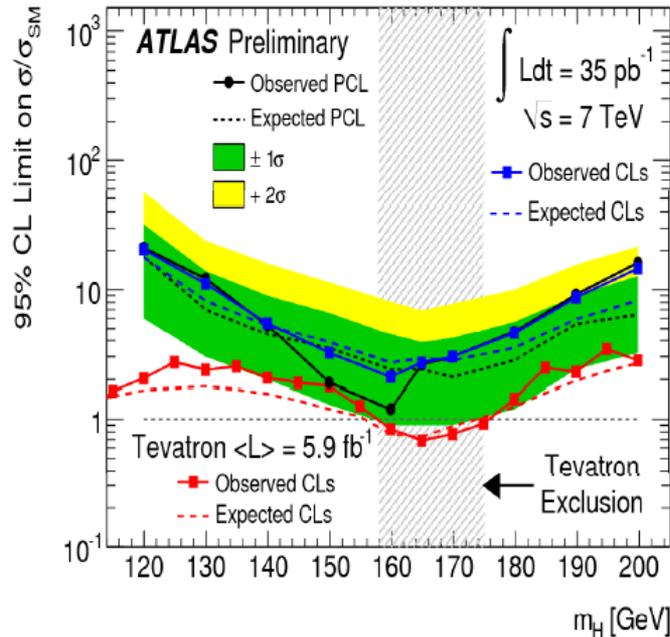


ATLAS EXPERIMENT
 Run Number: 166786, Event Number: 77246540
 Date: 2010-10-14 10:10:28 CEST

• Résultats actuels

✓ Recherche d'un excès dans les différents modes de désintégration du boson de Higgs

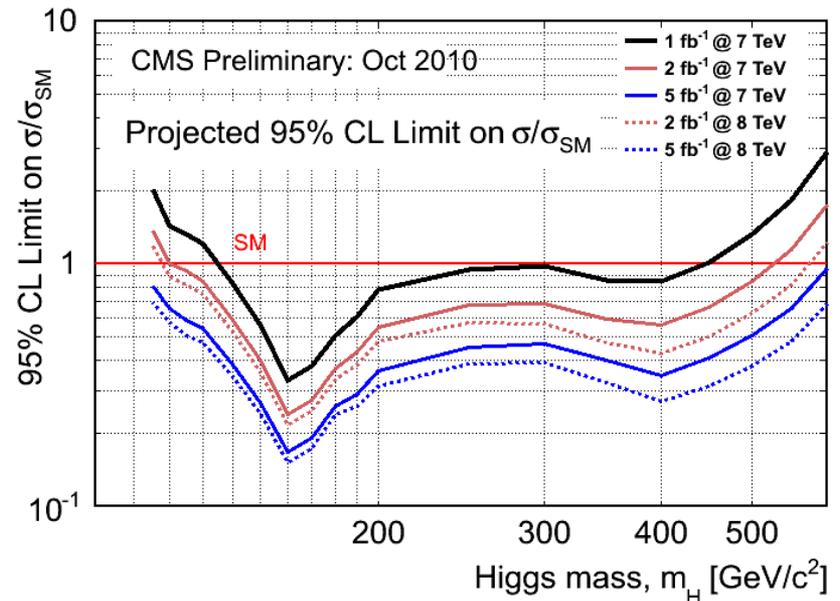
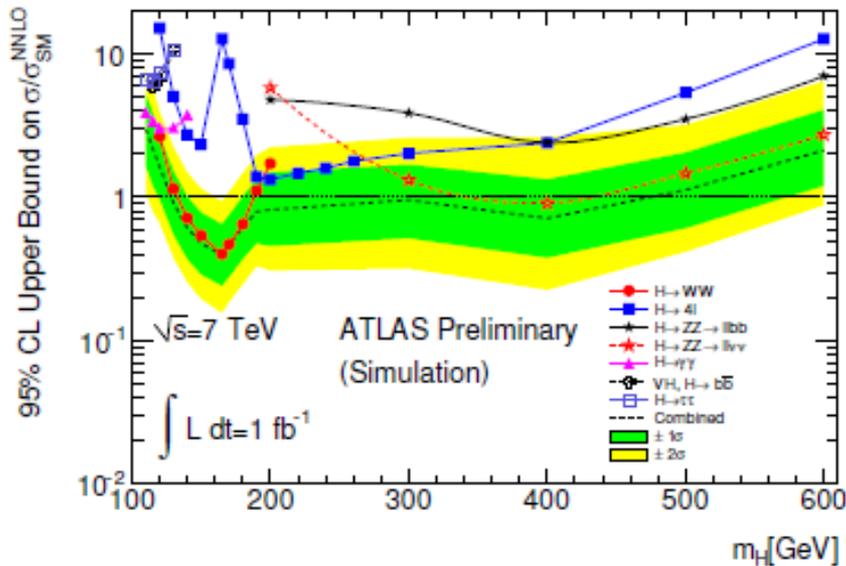
- Dans chacune des expériences



- **Perspectives (phase 1 du LHC)**

- ✓ *Les expériences ATLAS et CMS:*

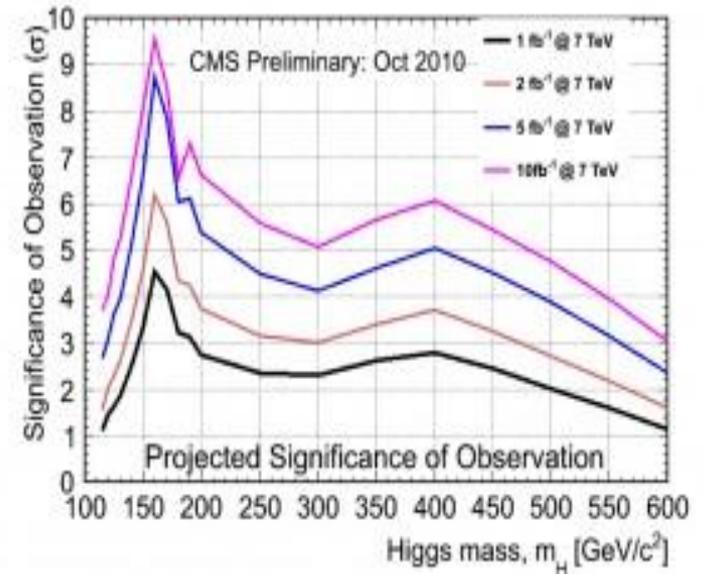
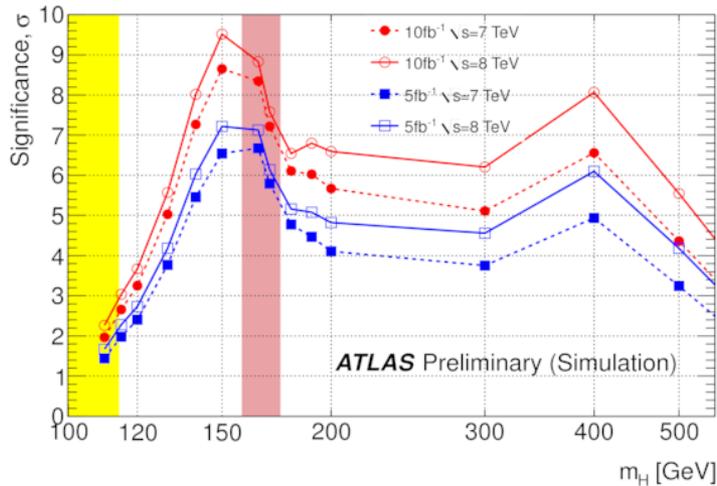
- Scanneront un large spectre en masse du boson de Higgs:
 - 115 -- 600 GeV s'il n'existe pas
 - Si le boson de Higgs prédit par le Modèle Standard n'existe pas, nous le saurons rapidement!



- **Perspectives (phase 1 du LHC):**

- ✓ *Les expériences ATLAS et CMS :*

- Scanneront un large spectre de masse du boson de Higgs
 - Découverte possible entre 115 – 500 GeV si le boson de Higgs existe



Et si le boson de Higgs du Modèle Standard n'existait pas?



Courtesy K.Jacobs

Alternatives au Higgs du Modèle Standard

- **Les alternatives proposées par les théoriciens englobent le Modèle Standard dans une théorie plus vaste:**
 - ✓ *Qui comprend plus de particules*
 - ✓ *Ou plus de dimensions spatiales*
 - ✓ *Ou...*
- **Ces extensions:**
 - ✓ *Doivent être en accord avec ce qui a été observé depuis de nombreuses années*
 - ✓ *Et en accord avec ce que l'on observera!*
- **Une illustration ici : supersymétrie**

Alternatives au Higgs du Modèle Standard

- **La supersymétrie**

- ✓ *Symétrie reliant bosons et fermions*

- À chaque particule du Modèle Standard est associée un partenaire supersymétrique de spin qui diffère par $\frac{1}{2}$

- ✓ *Non mise en évidence expérimentalement*

- Particules plus lourdes que celles du Modèle Standard
- Si elle existe, devrait être observée au LHC

- ✓ *Brisée*

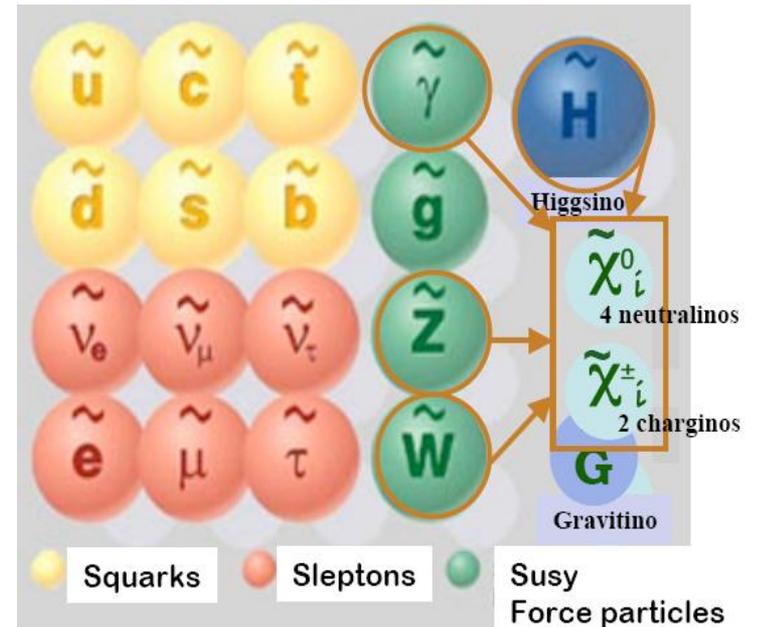
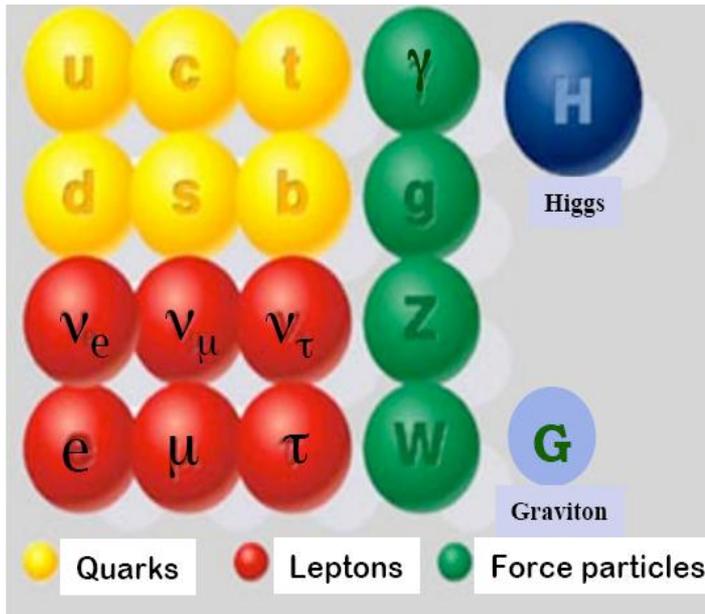
- Sinon, les masses des particules du Modèle Standard seraient égales à celles de leurs partenaires supersymétriques
- Un boson de Higgs Modèle Standard \rightarrow 5 bosons de Higgs supersymétriques

- ✓ *100 paramètres supplémentaires*

- ✓ *Fournit des candidats naturels à la matière noire*

Alternatives

- Supersymétrie



Supersymétrie

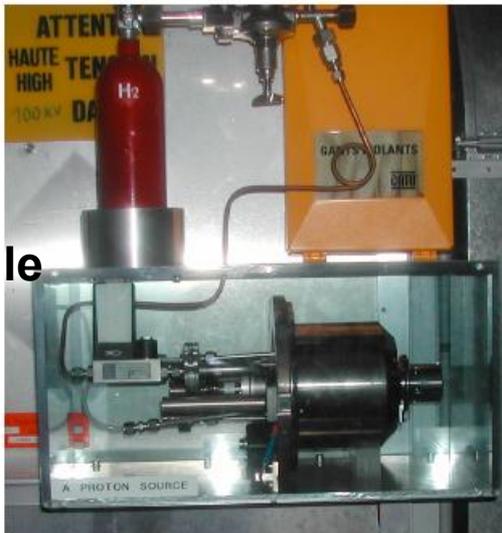
- **Recherche au LHC**

- ✓ *Recherche de déviation % Modèle Standard*
- ✓ *Les particules supersymétriques se désintègrent en paires jusqu'à la plus légère d'entre elles (Lightest Supersymmetric Particle)*
- ✓ *Un candidat pour la LSP = neutralino, qui échappe à la détection*
- ✓ *Signature = énergie manquante*

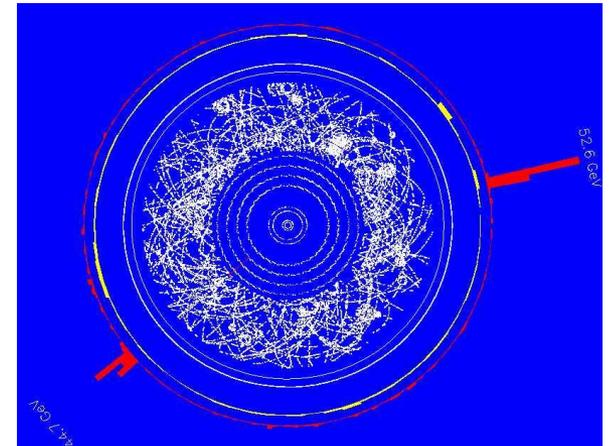
- **La supersymétrie, si elle existe à l'échelle du TeV, devrait être vue au LHC**

Conclusion

- **Le boson de Higgs est une particule:**
 - ✓ *Prédite par le Modèle Standard, socle de ce Modèle*
 - ✓ *Recherchée ardemment depuis de nombreuses années*
- **Le LHC:**
 - ✓ *Prend des données depuis un an*
 - ✓ *Nous dira si le boson de Higgs du Modèle Standard existe*
 - ✓ *Ou s'il faut penser à d'autres théories*



D'une bouteille
de H₂



...À un Higgs!

(ou bien d'autres surprises!)