

# Le boson de Brout-Englert-Higgs

## Du concept à la découverte

**Romain Madar**

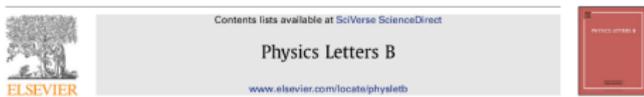
<http://romain-madar.com>

Laboratoire de **Physique Corpusculaire**  
Clermont-Ferrand – France

**Séminaire à l'ENS Cachan**

13 Décembre 2016 – Cachan, France

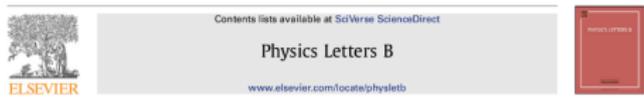




Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC <sup>☆</sup>

ATLAS Collaboration \*

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.



Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC <sup>☆</sup>

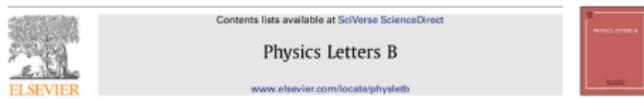
CMS Collaboration \*

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.



NB : R. Brout est décédé en 2011



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the **ATLAS** detector at the LHC <sup>☆</sup>

**ATLAS Collaboration**\*

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.



Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the **CMS** experiment at the LHC <sup>☆</sup>

**CMS Collaboration**\*

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.



NB : R. Brout est décédé en 2011

## Intitulé du prix Nobel:

*The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a **mechanism** that contributes to our understanding of **the origin of mass of subatomic particles**, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted **fundamental particle**, by the **ATLAS and CMS experiments** at CERN's **Large Hadron Collider**"*





# Plan de l'exposé

- 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?**
  - Le contexte de la physique des particules
  - Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
  - Un succès du Modèle Standard
- 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH**
  - Principe et dispositif expérimental
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions
- 3 Et après ?**

# Le contexte de la physique des particules

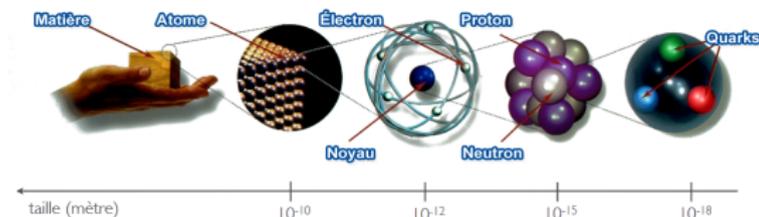
## La course aux petites distances ...

- Une longue histoire pleine de rebondissements (ce qui était "élémentaire" hier ne l'est pas forcément aujourd'hui)
- La majeure partie des phénomènes subatomiques ont peu d'influence sur le monde qui nous entoure (physique un peu à part dans la communauté)

# Le contexte de la physique des particules

## La course aux petites distances ...

- Une longue histoire pleine de rebondissements (ce qui était "élémentaire" hier ne l'est pas forcément aujourd'hui)
- La majeure partie des phénomènes subatomiques ont peu d'influence sur le monde qui nous entoure (physique un peu à part dans la communauté)



## Interactions

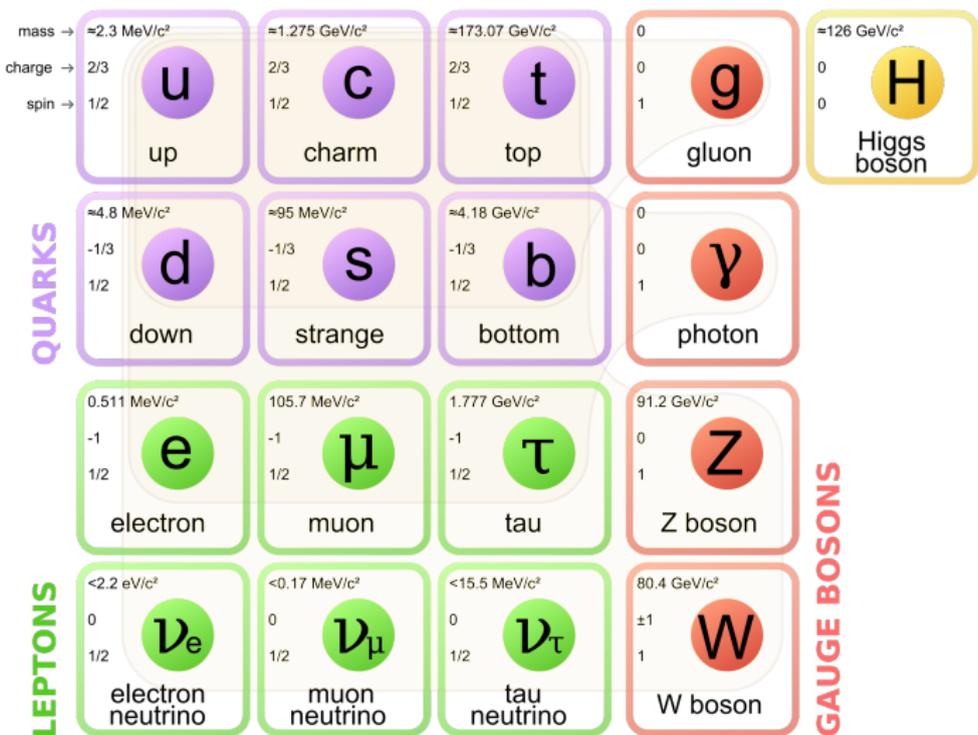
- faible
- électromagnétique
- forte

## Notre compréhension actuelle:

- 12 fermions dont 3 forment la matière existante
- 4 bosons (spin 1) véhiculant les 3 interactions fondamentales
- 1 boson (spin 0) générant la masse

Le contexte de la physique des particules

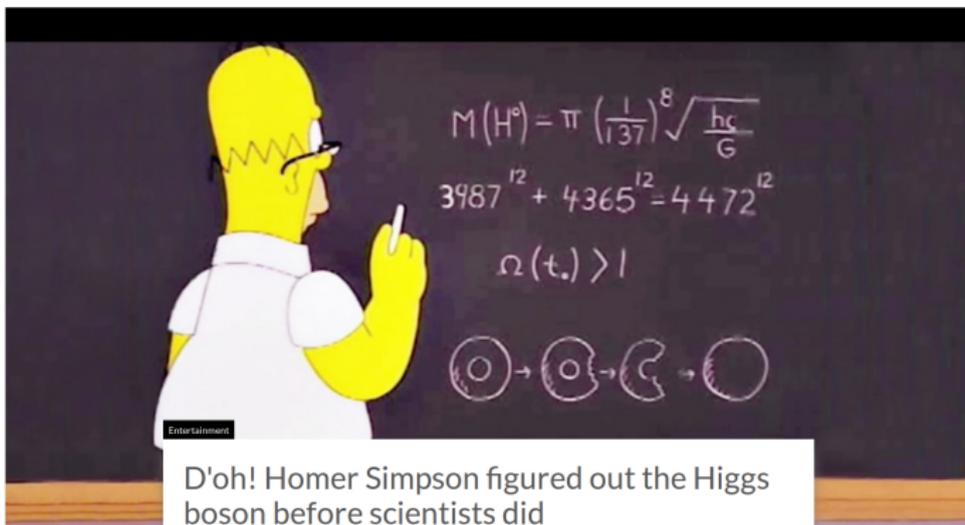
# Le contexte de la physique des particules



Le contexte de la physique des particules

# Pour les quelques prochains transparents

Un peu de formalisme est nécessaire ...



**Note :** le but de ce qui suit est de donner une idée du formalisme décrivant les particules et leurs interactions. Par soucis de simplicité, certains détails sont volontairement omis dans les quelques équations présentées.

## Qu'est-ce qu'une particule ?

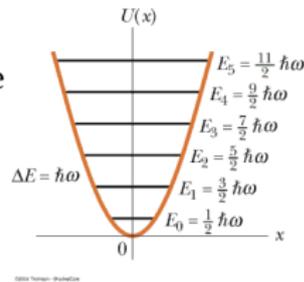
Un **champ**  $\phi(\vec{x}, t)$  se décrit par **une infinité de modes**  $\phi_k$ . Chaque mode a la même dynamique qu'un **oscillateur harmonique** de pulsation  $\omega_k \equiv f(k)$

# Qu'est-ce qu'une particule ?

Un champ  $\phi(\vec{x}, t)$  se décrit par une infinité de modes  $\phi_k$ . Chaque mode a la même dynamique qu'un oscillateur harmonique de pulsation  $\omega_k \equiv f(k)$

**Dynamique quantique du champ:** chaque mode  $\phi_k$  ne peut voir son énergie varier que par quantum  $\hbar\omega_k$

$$\omega_k \equiv f(k) \xrightarrow{\text{bonne dynamique}} \omega = \sqrt{m^2 + k^2}$$

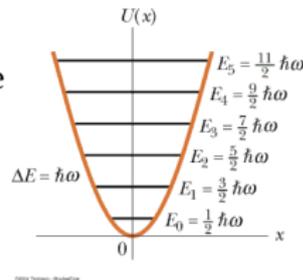


# Qu'est-ce qu'une particule ?

Un **champ**  $\phi(\vec{x}, t)$  se décrit par **une infinité de modes**  $\phi_k$ . Chaque mode a la même dynamique qu'un **oscillateur harmonique** de pulsation  $\omega_k \equiv f(k)$

**Dynamique quantique du champ:** chaque mode  $\phi_k$  ne peut voir son énergie varier que par **quantum**  $\hbar\omega_k$

$$\omega_k \equiv f(k) \xrightarrow{\text{bonne dynamique}} \omega = \sqrt{m^2 + k^2}$$



## Champs et particules : la Théorie Quantique des Champs (TQC)

- **particule**  $\equiv$  **quantum du champ** (pas de "demi quantum", au repos  $E = m$ , etc ...)
- **nombre de particules**  $\rightarrow$  variable **dynamique** (nécessité en relativité)
- TQC = relativité (champ  $\equiv$  propagation à vitesse finie) + mécanique quantique
- "dualité onde-corpuscule" **émerge** de la TQC (boson/fermion  $\equiv$  champ/matière)

Le contexte de la physique des particules

## Couplage entre particules

Classiquement, un **transfert d'énergie** entre deux oscillateurs sera induit par **couplage non quadratique**

$$V(\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2) = \kappa_1 \frac{\tilde{\xi}_1^2}{2} + \kappa_2 \frac{\tilde{\xi}_2^2}{2} + g \tilde{\xi}_1^2 \tilde{\xi}_2$$

# Couplage entre particules

Classiquement, un **transfert d'énergie** entre deux oscillateurs sera induit par **couplage non quadratique**

$$V(\xi_1, \xi_2) = \kappa_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \kappa_2 \frac{\xi_2^2}{2} + g \xi_1^2 \xi_2$$

**Pour des champs quantiques:**

- Par exemple :  $V_{\text{couplage}} \propto \phi^2 A \rightarrow$  transfert d'énergie entre  $\phi$  et  $A$

# Couplage entre particules

Classiquement, un **transfert d'énergie** entre deux oscillateurs sera induit par **couplage non quadratique**

$$V(\xi_1, \xi_2) = \kappa_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \kappa_2 \frac{\xi_2^2}{2} + g \xi_1^2 \xi_2$$

**Pour des champs quantiques:**

- Par exemple :  $V_{\text{couplage}} \propto \phi^2 A \rightarrow$  transfert d'énergie entre  $\phi$  et  $A$
- En terme de particule :  $A \rightarrow \phi\phi$ , *i.e.* une *désintégration*

# Couplage entre particules

Classiquement, un **transfert d'énergie** entre deux oscillateurs sera induit par **couplage non quadratique**

$$V(\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2) = \kappa_1 \frac{\tilde{\xi}_1^2}{2} + \kappa_2 \frac{\tilde{\xi}_2^2}{2} + g \tilde{\xi}_1^2 \tilde{\xi}_2$$

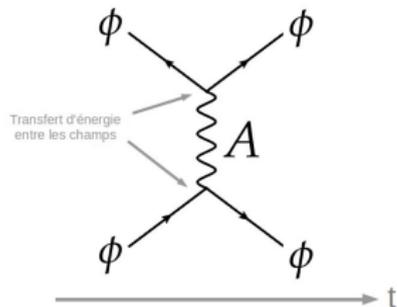
## Pour des champs quantiques:

- Par exemple :  $V_{\text{couplage}} \propto \phi^2 A \rightarrow$  transfert d'énergie entre  $\phi$  et  $A$
- En terme de particule :  $A \rightarrow \phi\phi$ , i.e. une *désintégration*

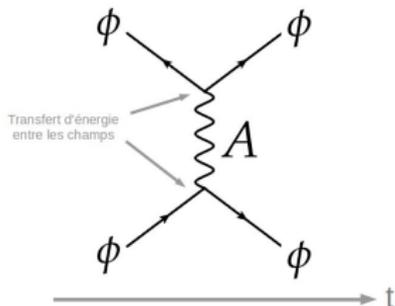
## Bilan : les termes qui déterminent la dynamique d'un champ

- Énergie cinétique  $T \sim |\partial_\mu \phi|^2$  avec  $\mu = \{0, 1, 2, 3\}$ . Champs de spin 1/2 :  $T \sim |\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi|$
- Énergie de masse  $V_{\text{mass}} \sim m^2 |\phi|^2$  potentiel harmonique dont la courbure fixe la masse
- Énergie d'interaction  $V_{\text{int}} \sim \phi^a A^b$  avec  $a + b \geq 3$

## Interaction : échange de particules virtuelles



## Interaction : échange de particules virtuelles



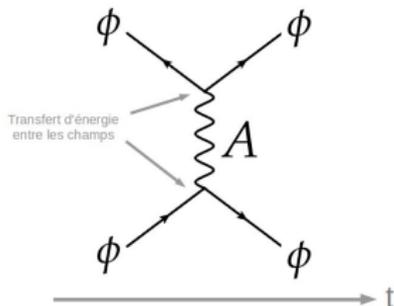
$$E_A^2 - \vec{p}_A^2 \neq M_A^2 \quad \text{Particule virtuelle}$$

$$E \Delta t \sim \hbar$$

$$d \sim c \Delta t \Rightarrow \boxed{d \sim \hbar c / M}$$

Relation masse-portée

## Interaction : échange de particules virtuelles



$$E_A^2 - \vec{p}_A^2 \neq M_A^2 \quad \text{Particule virtuelle}$$

$$E \Delta t \sim \hbar$$

$$d \sim c \Delta t \Rightarrow d \sim \hbar c / M$$

Relation masse-portée

## En route pour le voyage ...



# Plan de l'exposé

- 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?**
  - Le contexte de la physique des particules
  - Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
  - Un succès du Modèle Standard
- 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH**
  - Principe et dispositif expérimental
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions
- 3 Et après ?**

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

## Le fondement : les symétries

Comment choisir les champs et leur équation d'évolution, parmi toutes les possibilités mathématiques ? Réponse: les symétries

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le fondement : les symétries

Comment choisir les champs et leur équation d'évolution, parmi toutes les possibilités mathématiques ? Réponse: les symétries

**1. Particules libres :** invariances d'espace-temps (translations, boosts, rotations)

# Le fondement : les symétries

Comment choisir les champs et leur équation d'évolution, parmi toutes les possibilités mathématiques ? Réponse: les symétries

- 1. Particules libres :** invariances d'espace-temps (translations, boosts, rotations)
- 2. Interactions :** imposer l'invariance de jauge locale génère une interaction

$$H = \frac{1}{2} |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{1}{2} m^2 |\phi|^2$$

- $H$  n'est pas invariant sous la transformation  $\phi' = e^{ig\alpha(\vec{x},t)}\phi$

# Le fondement : les symétries

Comment choisir les champs et leur équation d'évolution, parmi toutes les possibilités mathématiques ? Réponse: les symétries

- 1. Particules libres :** invariances d'espace-temps (translations, boosts, rotations)
- 2. Interactions :** imposer l'invariance de jauge locale génère une interaction

$$H = \frac{1}{2} |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{1}{2} m^2 |\phi|^2$$

- $H$  n'est pas invariant sous la transformation  $\phi' = e^{ig\alpha(\vec{x},t)}\phi$
- $H$  devient invariant si on ajoute un champ  $A_\mu$  tel que :

$$\begin{cases} \partial_\mu \phi & \rightarrow & D_\mu \phi \equiv (\partial_\mu - ig A_\mu) \phi \\ A'_\mu & = & A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha \end{cases}$$

# Le fondement : les symétries

Comment choisir les champs et leur équation d'évolution, parmi toutes les possibilités mathématiques ? Réponse: les symétries

**1. Particules libres :** invariances d'espace-temps (translations, boosts, rotations)

**2. Interactions :** imposer l'invariance de jauge locale génère une interaction

$$H = \frac{1}{2} |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{1}{2} m^2 |\phi|^2$$

- $H$  n'est pas invariant sous la transformation  $\phi' = e^{ig\alpha(\vec{x},t)} \phi$
- $H$  devient invariant si on ajoute un champ  $A_\mu$  tel que :

$$\begin{cases} \partial_\mu \phi & \rightarrow & D_\mu \phi \equiv (\partial_\mu - ig A_\mu) \phi \\ A'_\mu & = & A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha \end{cases} \quad |D_\mu \phi|^2 \text{ contient des termes d'interaction !}$$

# Le fondement : les symétries

Comment choisir les champs et leur équation d'évolution, parmi toutes les possibilités mathématiques ? Réponse: les symétries

**1. Particules libres :** invariances d'espace-temps (translations, boosts, rotations)

**2. Interactions :** imposer l'invariance de jauge locale génère une interaction

$$H = \frac{1}{2} |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{1}{2} m^2 |\phi|^2$$

- $H$  n'est pas invariant sous la transformation  $\phi' = e^{ig\alpha(\vec{x},t)} \phi$
- $H$  devient invariant si on ajoute un champ  $A_\mu$  tel que :

$$\begin{cases} \partial_\mu \phi & \rightarrow & D_\mu \phi \equiv (\partial_\mu - ig A_\mu) \phi & |D_\mu \phi|^2 \text{ contient des termes} \\ A'_\mu & = & A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha & \text{d'interaction !} \end{cases}$$

Le choix du groupe de jauge (i.e. nature de  $\alpha(\vec{x},t)$  - scalaire, vecteur, tenseur) et la constante de couplage  $g$  définissent la structure complète de l'interaction

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

## Le problème des courtes portées ...

**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction

# Le problème des courtes portées ...

**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction

**Symétries (continues)  $\Leftrightarrow$  conservations**

$E \Rightarrow$  pas d'instant particulier  $t_0$

$\vec{p} \Rightarrow$  pas de point d'espace particulier  $\vec{x}_0$

$\vec{J} \Rightarrow$  pas de direction particulière  $\vec{\theta}_0$

**QED :** invariance de jauge  $\Rightarrow$  structure de la force électromagnétique

$$\vec{F} = e (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$$

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

## Le problème des courtes portées ...

**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction
- ✓ potentiellement : **un seul** principe pour **plusieurs** interactions (?)

# Le problème des courtes portées ...

**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction
- ✓ potentiellement : **un seul** principe pour **plusieurs** interactions (?)
- ☒ un **terme de masse** pour le médiateur **brise l'invariance** :

$$M_A^2 |A'_\mu|^2 = M_A^2 |A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha|^2 \neq M_A^2 |A_\mu|^2$$

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

## Le problème des courtes portées ...

**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction
- ✓ potentiellement : **un seul** principe pour **plusieurs** interactions (?)
- ☒ un **terme de masse** pour le médiateur **brise l'invariance** :

$$M_A^2 |A'_\mu|^2 = M_A^2 |A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha|^2 \neq M_A^2 |A_\mu|^2$$

Théories de jauge  $\Rightarrow$  interactions de **longue portée uniquement** ( $M = 0$ )

# Le problème des courtes portées ...

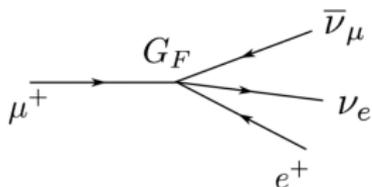
**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction
- ✓ potentiellement : **un seul** principe pour **plusieurs** interactions (?)
- ☒ un **terme de masse** pour le médiateur **brise l'invariance** :

$$M_A^2 |A'_\mu|^2 = M_A^2 |A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha|^2 \neq M_A^2 |A_\mu|^2$$

Théories de jauge  $\Rightarrow$  interactions de **longue portée uniquement** ( $M = 0$ )

**Une interaction de courte portée connue depuis longtemps ...**



- 1<sup>ère</sup> théorie de l'interaction faible (Fermi)
- très courte portée puisque ... **ponctuelle** !

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le problème des courtes portées ...

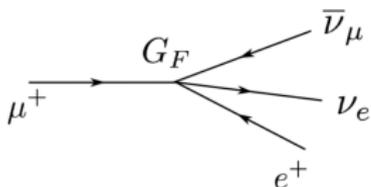
**Théories de jauge :** pour (✓) et contre (☒)

- ✓ rôle central de la notion de symétrie
- ✓ grande prédictivité symétrie + constante  $g \equiv$  structure totale de l'interaction
- ✓ potentiellement : **un seul** principe pour **plusieurs** interactions (?)
- ☒ un **terme de masse** pour le médiateur **brise l'invariance** :

$$M_A^2 |A'_\mu|^2 = M_A^2 |A_\mu + \frac{1}{g} \partial_\mu \alpha|^2 \neq M_A^2 |A_\mu|^2$$

Théories de jauge  $\Rightarrow$  interactions de **longue portée uniquement** ( $M = 0$ )

**Une interaction de courte portée connue depuis longtemps ...**



- 1<sup>ère</sup> théorie de l'interaction faible (Fermi)
- très courte portée puisque ... **ponctuelle** !

Ceci semble invalider le principe de jauge, pourtant tellement prédictif

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Pour obtenir des interactions de courte portée et garder le pouvoir prédictif de la symétrie de jauge : **brisure spontanée**

## **Brisure spontanée de la symétrie jauge :**

- la **dynamique** reste **invariante** mais l'état fondamental ne l'est pas
- ajout d'un **champ**  $\phi$  ayant une dynamique propre **invariante de jauge**

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Pour obtenir des interactions de courte portée et garder le pouvoir prédictif de la symétrie de jauge : **brisure spontanée**

## Brisure spontanée de la symétrie jauge :

- la **dynamique** reste **invariante** mais l'état fondamental ne l'est pas
- ajout d'un **champ**  $\varphi$  ayant une dynamique propre **invariante de jauge**

Dynamique de  $\varphi(\vec{x}, t)$  :

$$\begin{cases} H_\varphi &= \frac{1}{2} |\mathbf{D}_\mu \varphi|^2 + V_\varphi \\ V_\varphi &= \mu^2 |\varphi|^2 + \lambda |\varphi|^4 \end{cases}$$

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

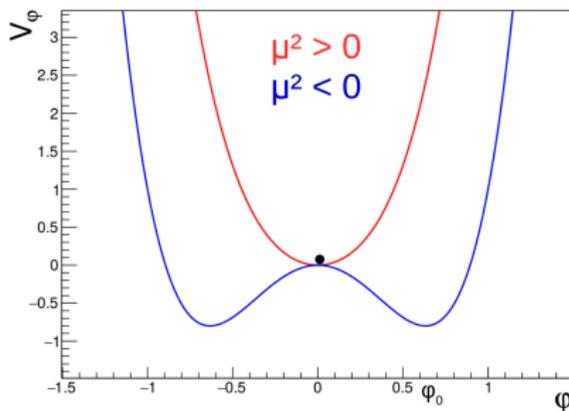
Pour obtenir des interactions de courte portée et garder le pouvoir prédictif de la symétrie de jauge : **brisure spontanée**

## Brisure spontanée de la symétrie jauge :

- la **dynamique** reste invariante mais l'état fondamental ne l'est pas
- ajout d'un **champ**  $\varphi$  ayant une dynamique propre **invariante de jauge**

Dynamique de  $\varphi(\vec{x}, t)$  :

$$\begin{cases} H_\varphi &= \frac{1}{2} |D_\mu \varphi|^2 + V_\varphi \\ V_\varphi &= \mu^2 |\varphi|^2 + \lambda |\varphi|^4 \end{cases}$$



Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Pour obtenir des interactions de courte portée et garder le pouvoir prédictif de la symétrie de jauge : **brisure spontanée**

## Brisure spontanée de la symétrie jauge :

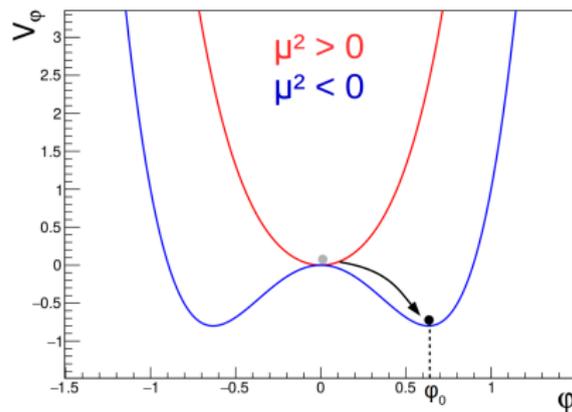
- la **dynamique** reste invariante mais l'état fondamental ne l'est pas
- ajout d'un **champ**  $\phi$  ayant une dynamique propre **invariante de jauge**

Dynamique de  $\phi(\vec{x}, t)$  :

$$\begin{cases} H_\phi &= \frac{1}{2} |D_\mu \phi|^2 + V_\phi \\ V_\phi &= \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4 \end{cases}$$

Brisure de la symétrie :

$$\phi_0 \equiv v = \sqrt{\frac{-\mu^2}{2\lambda}}, \text{ uniforme et constant}$$



Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Pour obtenir des interactions de courte portée et garder le pouvoir prédictif de la symétrie de jauge : **brisure spontanée**

## Brisure spontanée de la symétrie jauge :

- la **dynamique** reste invariante mais l'état fondamental ne l'est pas
- ajout d'un **champ**  $\varphi$  ayant une dynamique propre **invariante de jauge**

Dynamique de  $\varphi(\vec{x}, t)$  :

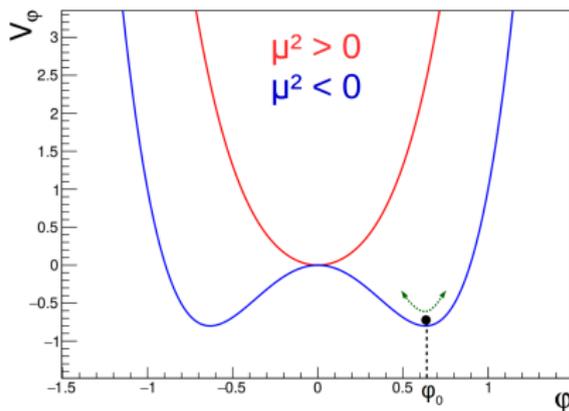
$$\begin{cases} H_\varphi &= \frac{1}{2} |D_\mu \varphi|^2 + V_\varphi \\ V_\varphi &= \mu^2 |\varphi|^2 + \lambda |\varphi|^4 \end{cases}$$

Brisure de la symétrie :

$$\varphi_0 \equiv v = \sqrt{\frac{-\mu^2}{2\lambda}}, \text{ uniforme et constant}$$

Introduction du **champ de Higgs** :

$$\varphi(\vec{x}, t) = v + h(\vec{x}, t)$$

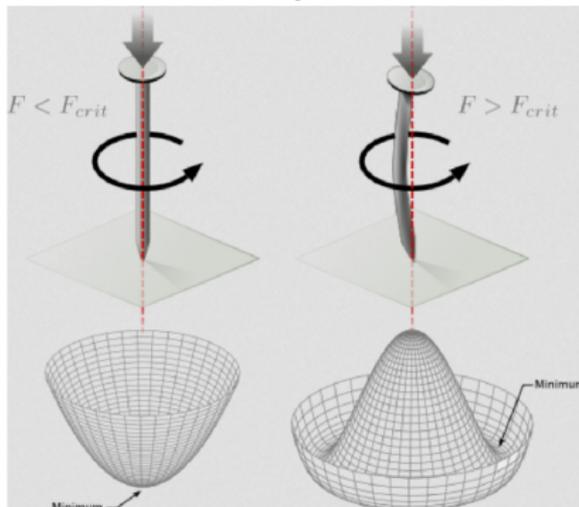


Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

## Brisure spontanée VS brisure "explicite"

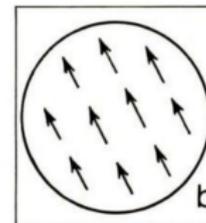
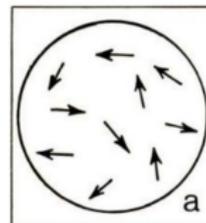
### Brisure spontanée



### Brisure explicite

les équations de la dynamique ne sont plus invariantes

$B = 0$



Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

**Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?**

$$|D_\mu \varphi|^2 = |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2$$

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

**Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?**

$$\begin{aligned}
 |D_\mu \varphi|^2 &= |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2 \\
 &= |\partial_\mu h|^2 + v^2 g^2 |A_\mu|^2 \\
 &+ g^2 |A_\mu h|^2 + \dots
 \end{aligned}$$

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

**Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?**

$$\begin{aligned}
 |D_\mu \varphi|^2 &= |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2 && \blacktriangleright \text{cinétique du boson de Higgs} \\
 &= |\partial_\mu h|^2 + v^2 g^2 |A_\mu|^2 \\
 &+ g^2 |A_\mu h|^2 + \dots
 \end{aligned}$$

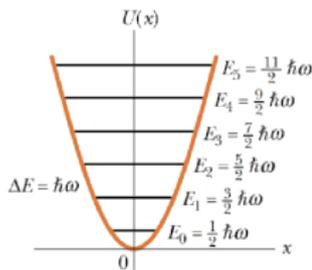
Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?

$$\begin{aligned}
 |D_\mu \varphi|^2 &= |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2 && \blacktriangleright \text{cinétique du boson de Higgs} \\
 &= |\partial_\mu h|^2 + v^2 g^2 |A_\mu|^2 && \blacktriangleright \text{terme quadratique en } A_\mu \\
 &+ g^2 |A_\mu h|^2 + \dots && \Rightarrow \text{masse} \propto v g \Rightarrow \text{courte portée}
 \end{aligned}$$

Rappel:



$$V_{\text{mass}} \sim m^2 |A_\mu|^2$$

$$d \sim \hbar c / M$$

Relation masse-portée

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

## Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?

$$\begin{aligned}
 |D_\mu \varphi|^2 &= |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2 && \blacktriangleright \text{cinétique du boson de Higgs} \\
 &= |\partial_\mu h|^2 + v^2 g^2 |A_\mu|^2 && \blacktriangleright \text{terme quadratique en } A_\mu \\
 &+ g^2 |A_\mu h|^2 + \dots && \Rightarrow \text{masse } \propto v g \Rightarrow \text{courte portée} \\
 & && \blacktriangleright \text{termes d'interaction entre } A_\mu \text{ et } h
 \end{aligned}$$

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

## Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?

$$\begin{aligned}
 |D_\mu \varphi|^2 &= |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2 && \blacktriangleright \text{cinétique du boson de Higgs} \\
 &= |\partial_\mu h|^2 + v^2 g^2 |A_\mu|^2 && \blacktriangleright \text{terme quadratique en } A_\mu \\
 &+ g^2 |A_\mu h|^2 + \dots && \Rightarrow \text{masse } \propto v g \Rightarrow \text{courte portée} \\
 & && \blacktriangleright \text{termes d'interaction entre } A_\mu \text{ et } h
 \end{aligned}$$

VOLUME 13, NUMBER 9

PHYSICAL REVIEW LETTERS

31 AUGUST 1964

---

### 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)

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)

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

**Comment cette brisure confère une courte portée à l'interaction ?**

$$\begin{aligned}
 |D_\mu \varphi|^2 &= |(\partial_\mu - igA_\mu) [v + h(\vec{x}, t)]|^2 && \blacktriangleright \text{cinétique du boson de Higgs} \\
 &= |\partial_\mu h|^2 + v^2 g^2 |A_\mu|^2 && \blacktriangleright \text{terme quadratique en } A_\mu \\
 &+ g^2 |A_\mu h|^2 + \dots && \Rightarrow \text{masse } \propto v g \Rightarrow \text{courte portée} \\
 & && \blacktriangleright \text{termes d'interaction entre } A_\mu \text{ et } h
 \end{aligned}$$

## L'essentiel

Le **mécanisme BEH** permet d'exploiter le **pouvoir prédictif de l'invariance de jauge** pour une interaction à **courte portée** en ajoutant un champ :

- état fondamental  $v \neq 0$  et **masse**  $\propto$  **couplage**  $\times v$
- **Boson BEH**  $\equiv$  oscillations du champ autour de  $v$ 
  - interactions avec le médiateur **totale**ment déterminées
  - deux paramètres **non prédits** ( $v, M_H$ ) (ou  $(\mu, \lambda)$  puisque  $M_H = \sqrt{2\lambda} v$ )

(Received 31 August 1964)

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# La théorie électrofaible

Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs interactions électromagnétique, faible et forte.

## Ingrédients du modèle électrofaible :

- Une symétrie de **jaug**e (groupe  $SU(2) \times U(1)_Y$ , plus complexe que  $U(1)_Q$  de l'EM)
- **Brisure** spontanée de la symétrie (BEH), appelée "électrofaible"

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# La théorie électrofaible

Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs interactions électromagnétique, faible et forte.

## Ingrédients du modèle électrofaible :

- Une symétrie de **jaug**e (groupe  $SU(2) \times U(1)_Y$ , plus complexe que  $U(1)_Q$  de l'EM)
- **Brisure** spontanée de la symétrie (BEH), appelée "électrofaible"

## Ce que décrit/prédit le modèle :

- Avant brisure : une seule interaction **électrofaible** → **unification**

# La théorie électrofaible

Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs interactions électromagnétique, faible et forte.

## Ingrédients du modèle électrofaible :

- Une symétrie de **jaug**e (groupe  $SU(2) \times U(1)_Y$ , plus complexe que  $U(1)_Q$  de l'EM)
- **Brisure** spontanée de la symétrie (BEH), appelée "électrofaible"

## Ce que décrit/prédit le modèle :

- Avant brisure : une seule interaction **électrofaible** → **unification**
- Après brisure :
  - interaction de longue portée → **QED** (photon,  $M_\gamma = 0$ )
  - interaction de courte portée → **force faible** ( $W^\pm$  et  $Z^0$ , massifs)
  - une particule associée à la brisure : **le boson BEH**

# La théorie électrofaible

Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs interactions électromagnétique, faible et forte.

## Ingrédients du modèle électrofaible :

- Une symétrie de **jaugé** (groupe  $SU(2) \times U(1)_Y$ , plus complexe que  $U(1)_Q$  de l'EM)
- **Brisure** spontanée de la symétrie (BEH), appelée "électrofaible"

## Ce que décrit/prédit le modèle :

- Avant brisure : une seule interaction **électrofaible** → **unification**
- Après brisure :
  - interaction de longue portée → **QED** (photon,  $M_\gamma = 0$ )
  - interaction de courte portée → **force faible** ( $W^\pm$  et  $Z^0$ , massifs)
  - une particule associée à la brisure : **le boson BEH**
- **mécanisme** de brisure → **contraintes** fortes sur la **structure des forces**

# La théorie électrofaible

Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs interactions électromagnétique, faible et forte.

## Ingrédients du modèle électrofaible :

- Une symétrie de **jaug**e (groupe  $SU(2) \times U(1)_Y$ , plus complexe que  $U(1)_Q$  de l'EM)
- **Brisure** spontanée de la symétrie (BEH), appelée "électrofaible"

## Ce que décrit/prédit le modèle :

- Avant brisure : une seule interaction **électrofaible** → **unification**
- Après brisure :
  - interaction de longue portée → **QED** (photon,  $M_\gamma = 0$ )
  - interaction de courte portée → **force faible** ( $W^\pm$  et  $Z^0$ , massifs)
  - une particule associée à la brisure : **le boson BEH**
- **mécanisme** de brisure → **contraintes** fortes sur la **structure des forces**
- **Nouvelle conception de la masse** des particules

Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard

# La théorie électrofaible

Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs



**Nobel 1979**



The Nobel Prize in Physics 1979 was awarded jointly to Sheldon Lee **Glashow**, Abdus **Salam** and Steven **Weinberg** "for their contributions to the theory of the unified weak and electromagnetic interaction between elementary particles, including, inter alia, the prediction of the weak neutral current".

- Nouvelle conception de la masse des particules

# Plan de l'exposé

## 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?

- Le contexte de la physique des particules
- Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
- Un succès du Modèle Standard

## 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH

- Principe et dispositif experimental
- De la théorie aux observables
- Recherche du boson BEH dans les collisions

## 3 Et après ?

# La découverte du $Z^0$

**Le boson  $Z^0$  : LA nouveauté** prédite par la théorie électrofaible, car non nécessaire pour expliquer des observations (au contraire du  $W^\pm$  justifiant la théorie de Fermi)

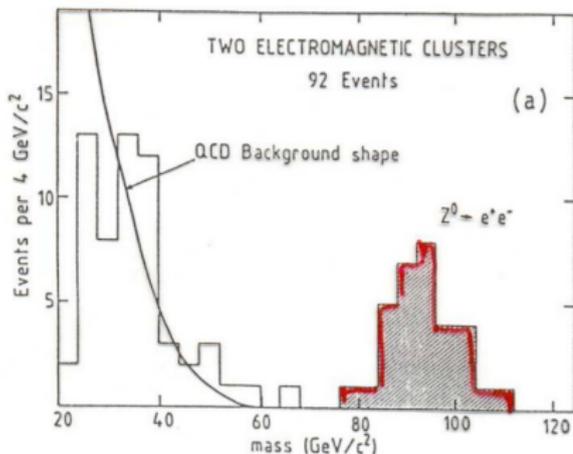
$$Z^0 \rightarrow e^+e^-$$

Un succès du Modèle Standard

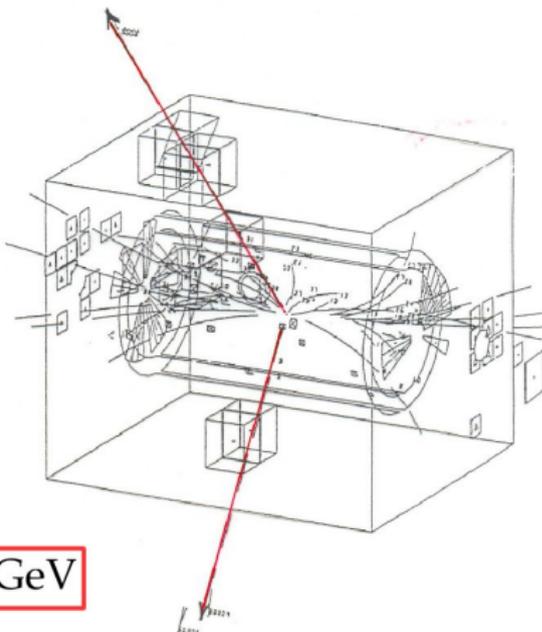
# La découverte du $Z^0$

**Le boson  $Z^0$  : LA nouveauté** prédite par la théorie électrofaible, car non nécessaire pour expliquer des observations (au contraire du  $W^\pm$  justifiant la théorie de Fermi)

$$Z^0 \rightarrow e^+e^-$$



$$M_Z \sim 91 \text{ GeV}$$



# Plan de l'explosé

## 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?

- Le contexte de la physique des particules
- Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
- Un succès du Modèle Standard

## 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH

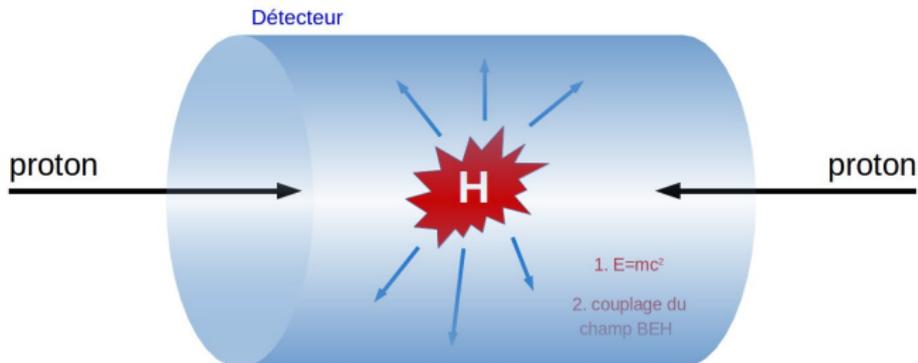
- Principe et dispositif expérimental
- De la théorie aux observables
- Recherche du boson BEH dans les collisions

## 3 Et après ?

# Le principe de base

## Pour (in)valider l'existence du champ BEH :

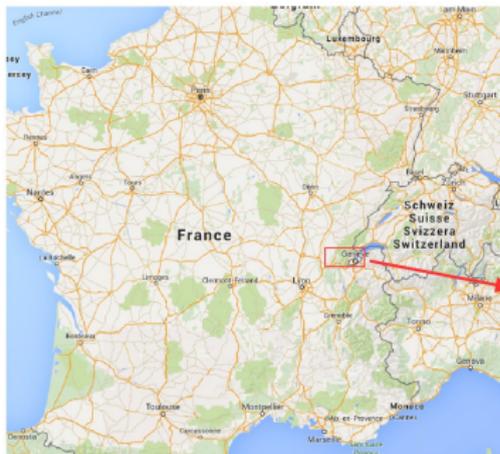
- exciter le champ BEH → collisions
- caractériser sa présence → détection des particules



# Le CERN et le LHC

## CERN : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

- fondé en 1954 (contexte d'après guerre) par 12 états membres pour relancer la physique nucléaire en Europe
- aujourd'hui : 21 états membres, 10000 "utilisateurs" à travers le monde
- Plusieurs accélérateurs, plusieurs découvertes (et prix Nobel), retombées technologiques majeures (ex: web)



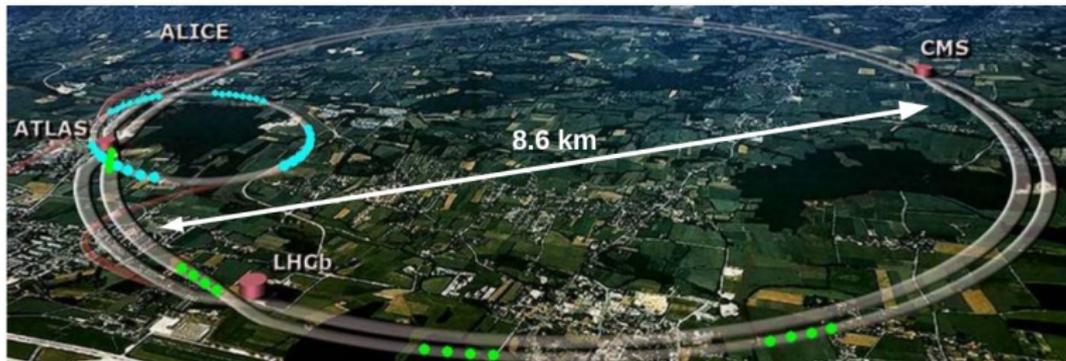
## Principe et dispositif expérimental

**LHC** : Large Hadron Collider (hadron  $\equiv$  état lié de l'interaction forte)

- Collisionneur de proton-proton à une énergie de 13 TeV
- la plus grande énergie (courte distance) sondée sur terre

## LHC : Large Hadron Collider (hadron $\equiv$ état lié de l'interaction forte)

- Collisionneur de proton-proton à une énergie de 13 TeV
- la plus grande énergie (courte distance) sondée sur terre



### Le LHC en chiffres:

- premières idées: 1984 → premières collisions : 2009
- 9.6 milliard d'Euros
- 100 mètre sous terre
- 1500 aimants supraconducteurs (8.4 T, 11 850 A)
- énergie totale d'un faisceau : 350 MJ
  - énergie d'un TGV roulant à 150 km/h

Le LHC est le dernier maillon d'une chaîne complexe d'accélérateurs



# La détection des collisions

**Que détecte-t-on ?** toutes particules stables à l'échelle du détecteur ( $\sim 10$  m)

- électrons, muons, photons
- pions (abondamment produits en collision hadroniques), protons, neutrons

# La détection des collisions

**Que détecte-t-on ?** toutes particules stables à l'échelle du détecteur ( $\sim 10$  m)

- électrons, muons, photons
- pions (abondamment produits en collision hadroniques), protons, neutrons

**Comment détecte-t-on ?**

- perte d'énergie d'une particule incidente dans la matière
- deux grandes classes de détecteurs:
  - **trajectographe** : peu de matière, perturbe peu la particule, mesure des positions de passage. Avec champ  $\vec{B}$ , pour les particules chargée uniquement
  - **calorimètre** : beaucoup de matière, stoppe la particule, mesure l'énergie

# La détection des collisions

**Que détecte-t-on ?** toutes particules stables à l'échelle du détecteur ( $\sim 10$  m)

- électrons, muons, photons
- pions (abondamment produits en collision hadroniques), protons, neutrons

**Comment détecte-t-on ?**

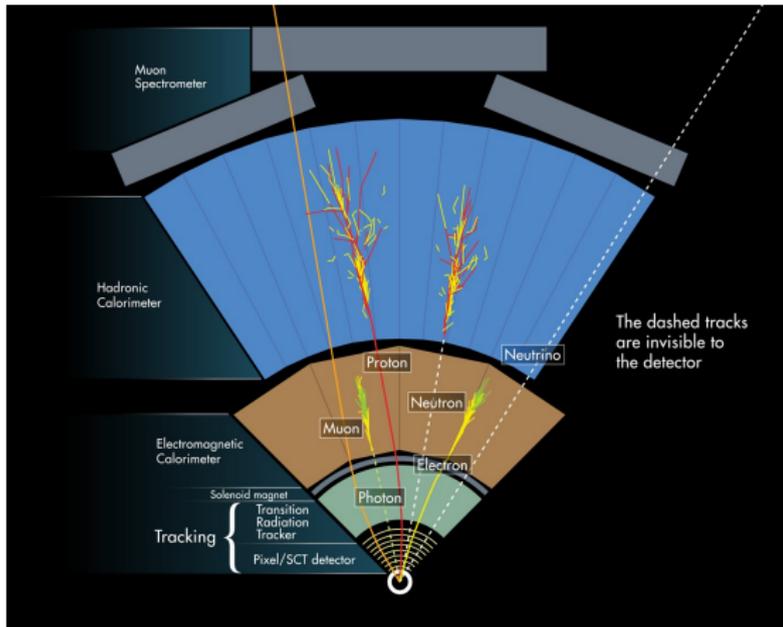
- perte d'énergie d'une particule incidente dans la matière
- deux grandes classes de détecteurs:
  - **trajectographe** : peu de matière, perturbe peu la particule, mesure des positions de passage. Avec champ  $\vec{B}$ , pour les particules chargée uniquement
  - **calorimètre** : beaucoup de matière, stoppe la particule, mesure l'énergie

**Les observables mesurées :**

- 1 signaux électriques  $\Leftrightarrow$  énergie déposée / point de passage
  - 2 algorithmes : **reconstruction des traces** à partir des points de passage
  - 3 algorithmes : reconnaître des **groupes de dépôts d'énergie** localisés
- **en définitive** :  $Q, \vec{p}, E$  pour chaque particule

## L'union fait la force ...

Seule l'utilisation conjointe de ces différents détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision



## "Couche d'oignon"

- trajectographe (+ $\vec{B}$ )
- calorimètre
- trajectographe (+ $\vec{B}$ )

### Les neutrinos

trop peu d'interaction → ce qui manque au bilan d'impulsion

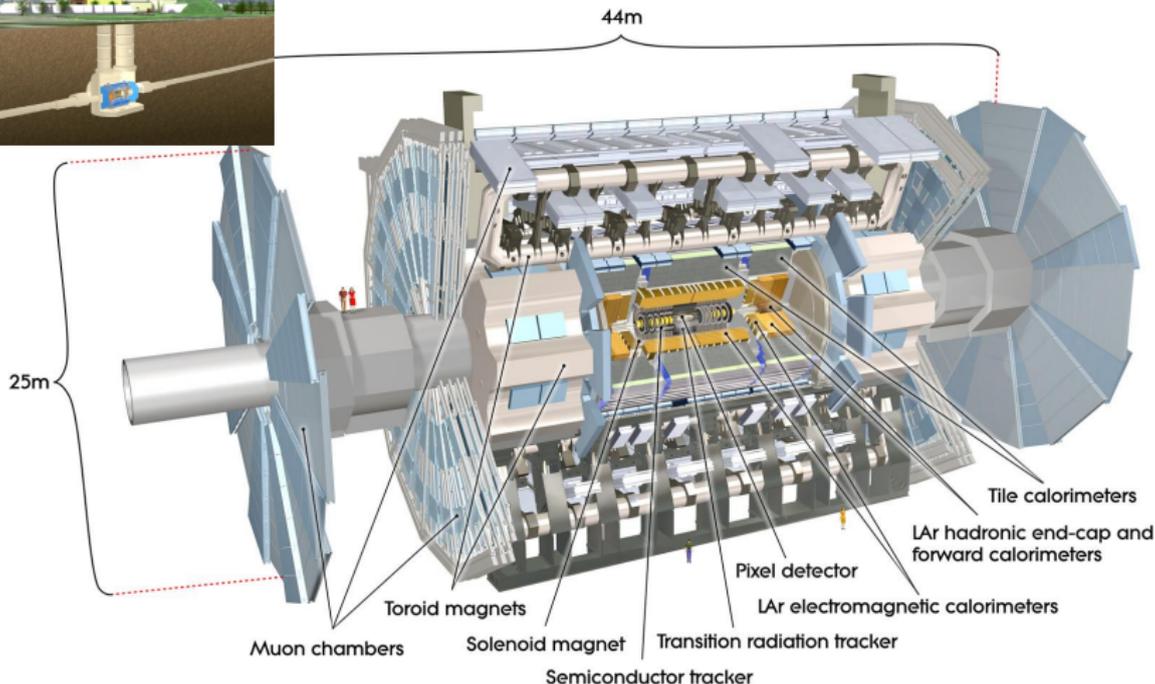
### Les quarks

n'existent pas à l'état libre → produit un jet de hadrons

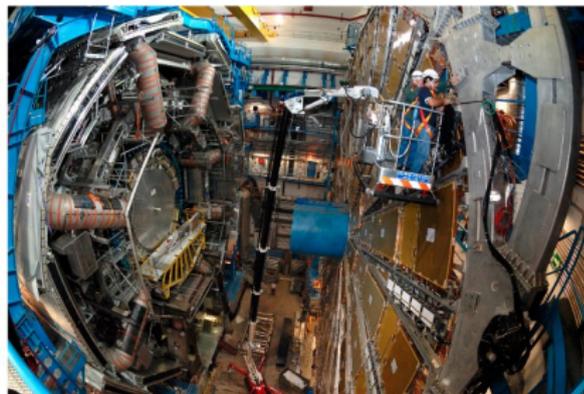
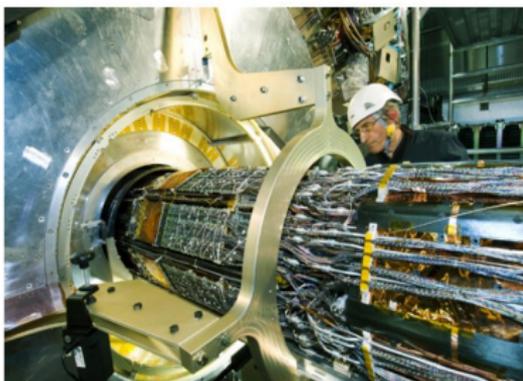


Principe et dispositif expérimental

# Un des détecteurs : ATLAS



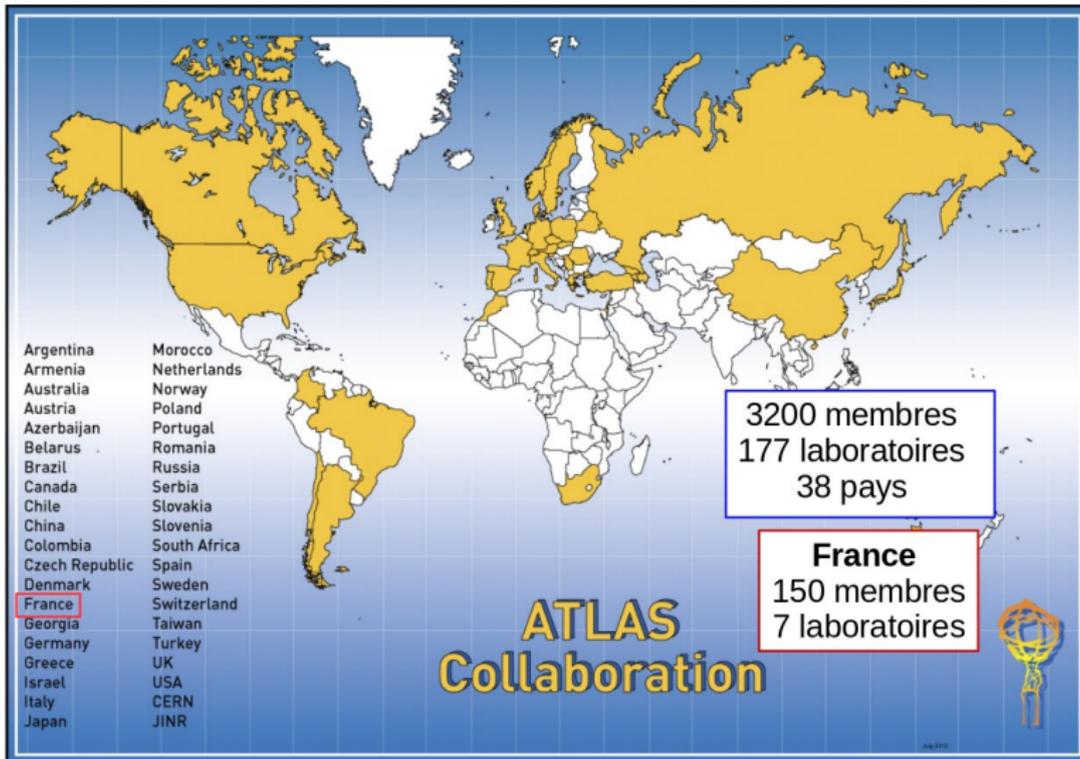
## Principe et dispositif expérimental





Principe et dispositif expérimental

# La collaboration ATLAS



Principe et dispositif expérimental

# Simulation animée d'une collision

## Toujours plus de collisions ...

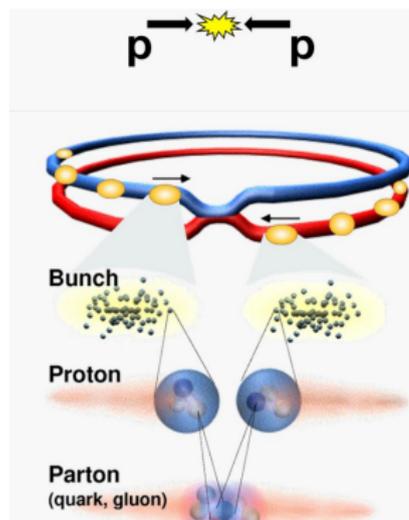
### Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

# Toujours plus de collisions ...

## Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

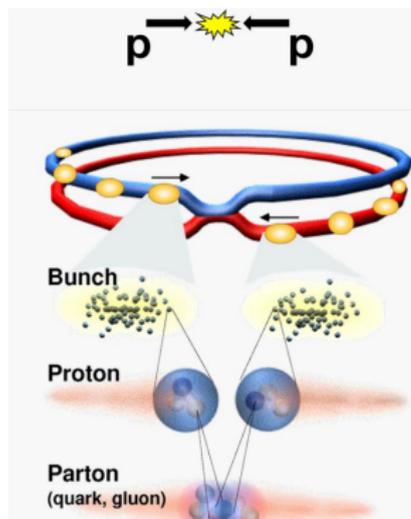


# Toujours plus de collisions ...

## Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

## Contre partie : difficultés expérimentales ...



Fréquence de croisement de paquets : **20 - 40 MHz**

→ capacité de stockage impose l'enregistrement de  
**100 collisions / s**

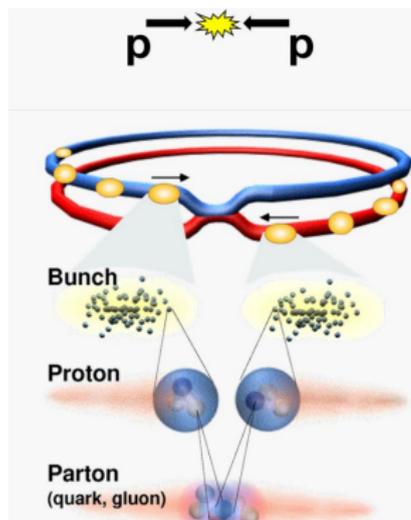
**Selection rapide** des **collisions intéressantes** basée  
sur une **reconstruction simplifiée**

# Toujours plus de collisions ...

## Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester la théorie

## Contre partie : difficultés expérimentales ...

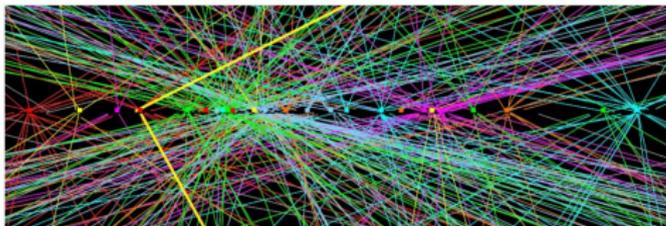


Fréquence de croisement de paquets : **20 - 40 MHz**

→ capacité de stockage impose l'enregistrement de  
**100 collisions / s**

Selection rapide des collisions intéressantes basée  
sur une reconstruction simplifiée

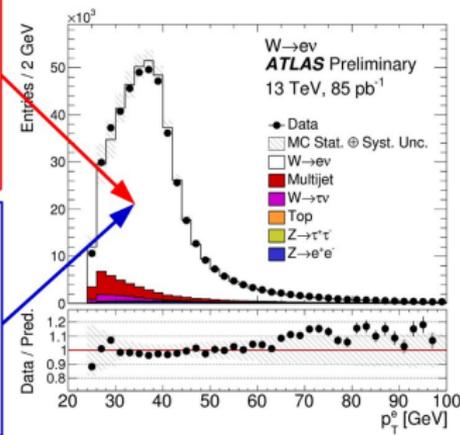
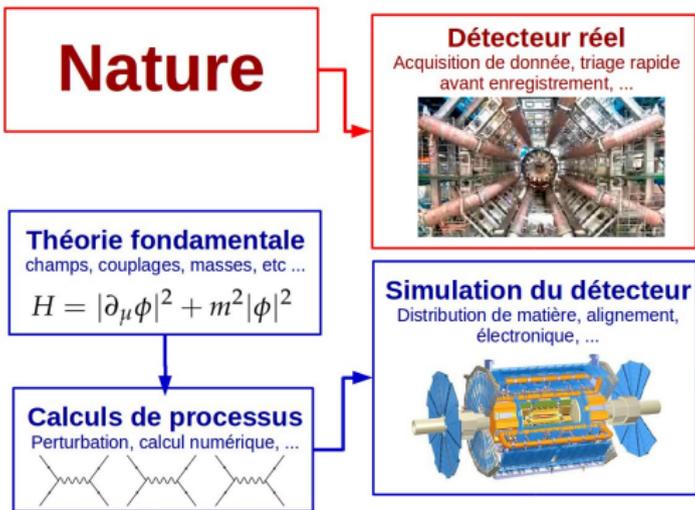
**20 a 50 interactions p-p** par croisement de paquets



# Plan de l'exposé

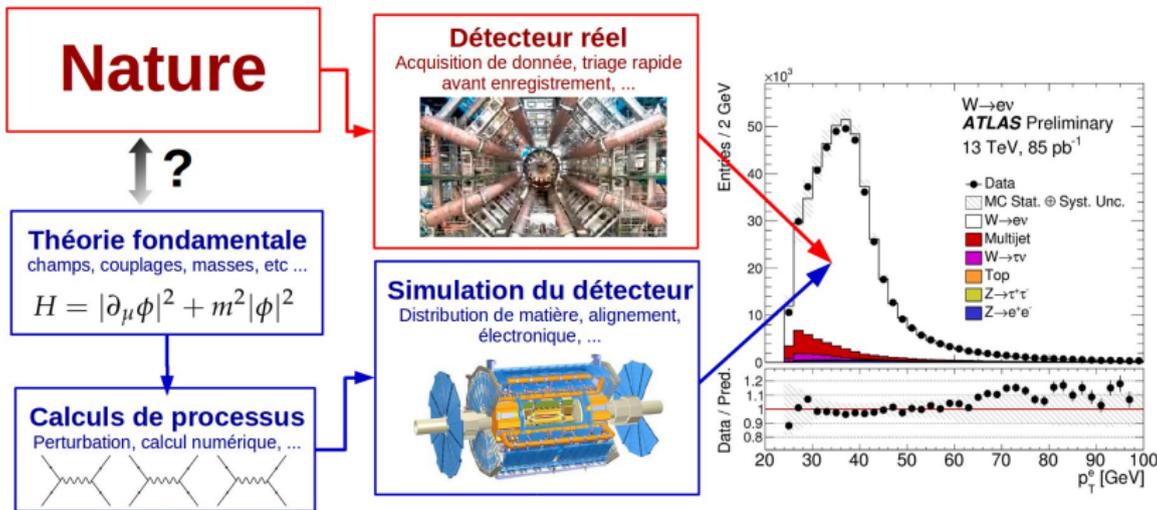
- 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?**
  - Le contexte de la physique des particules
  - Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
  - Un succès du Modèle Standard
- 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH**
  - Principe et dispositif experimental
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions
- 3 Et après ?**

# Stratégie générale



De la théorie aux observables

# Stratégie générale



**La question à \$1000 :** notre théorie fondamentale décrit-elle la Nature ?

# La sélection des collisions

## Pourquoi sélectionner les collisions ?

- un grand nombre de processus est possible dans des collisions  $pp$
- recherche le boson BEH → tris des collisions compatibles avec sa production

# La sélection des collisions

## Pourquoi sélectionner les collisions ?

- un grand nombre de processus est possible dans des collisions  $pp$
- recherche le boson BEH → tris des collisions compatibles avec sa production

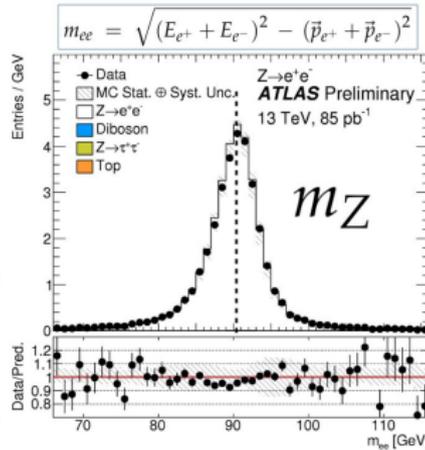
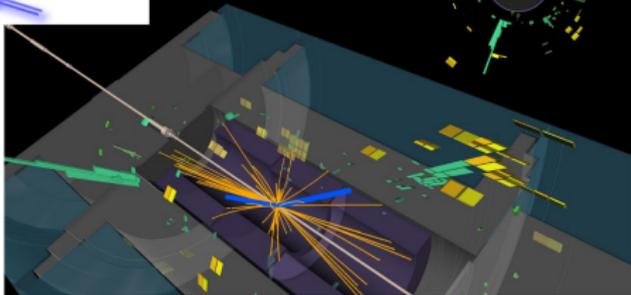
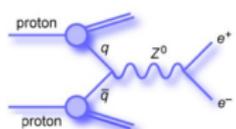
Faire le lien entre le **mécanisme de production** (*microscopique*) et l'**aspect de la collision** (*macroscopique*)

# La sélection des collisions

## Pourquoi sélectionner les collisions ?

- un grand nombre de processus est possible dans des collisions  $pp$
- recherche le boson BEH → tris des collisions compatibles avec sa production

**Exemple pour un cas simple :** la production d'un boson  $Z^0 \rightarrow e^+e^-$



# Plan de l'exposé

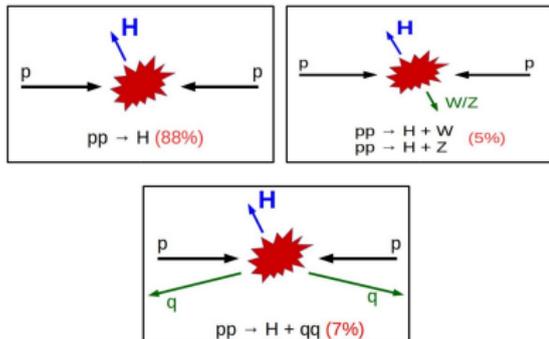
- 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?**
  - Le contexte de la physique des particules
  - Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
  - Un succès du Modèle Standard
- 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH**
  - Principe et dispositif expérimental
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions
- 3 Et après ?**

# Signature du boson BEH

## Que connaissons-nous du boson BEH ?

- **prédit par la théorie** : couplages aux médiateurs

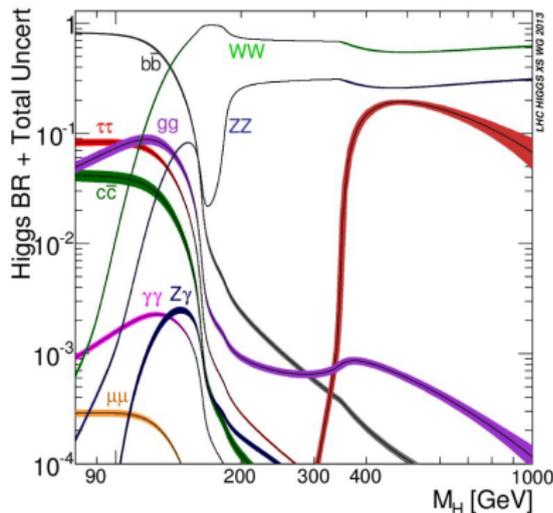
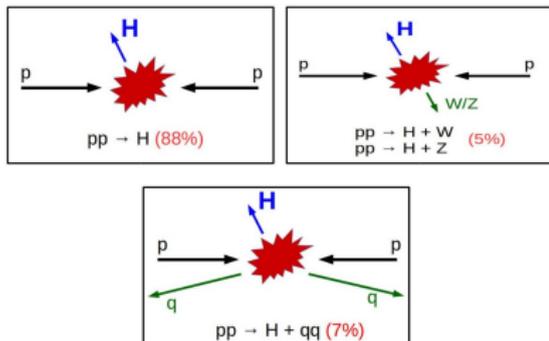
⇒ production et désintégration connues ! **Crucial pour sa recherche**



# Signature du boson BEH

## Que connaissons-nous du boson BEH ?

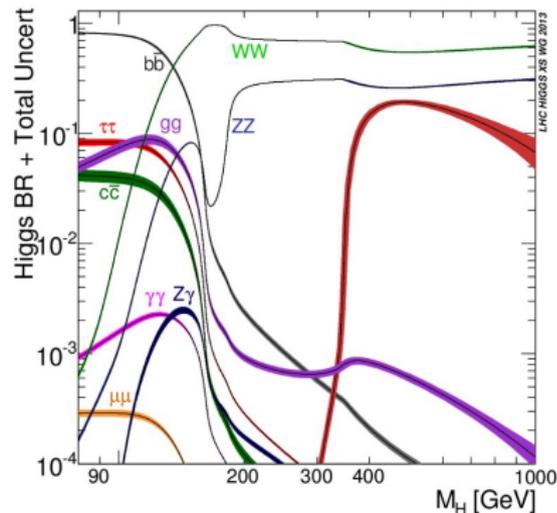
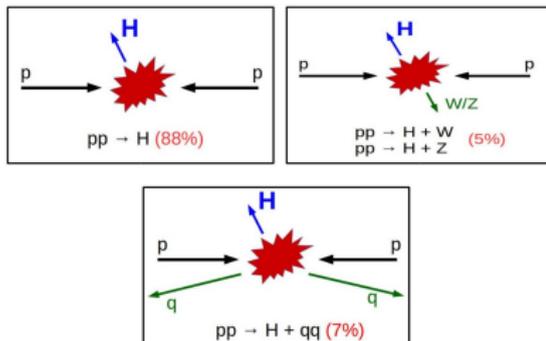
- **prédit par la théorie** : couplages aux médiateurs  
 ⇒ production et désintégration connues ! **Crucial pour sa recherche**



# Signature du boson BEH

## Que connaissons-nous du boson BEH ?

- **prédit par la théorie** : couplages aux médiateurs  
 ⇒ production et désintégration connues ! **Crucial pour sa recherche**
- **non prédit par la théorie** :
  - $M_H$  ... *inconnu* ! **Crucial pour sa recherche**



## Les canaux en or

**Découverte grâce à :**

$$H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell,$$

$$H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$$

Exemple de la désintégration en  $ZZ^{(*)}$

( $\ell \equiv e$  ou  $\mu$  ; "4 $\ell$ " inclut toutes les combinaisons possibles)



Recherche du boson BEH dans les collisions

# Les canaux en or

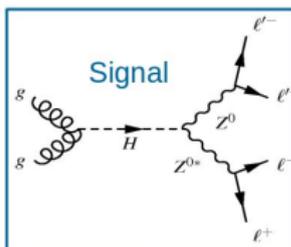
**Découverte grâce à :**

$$H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell,$$

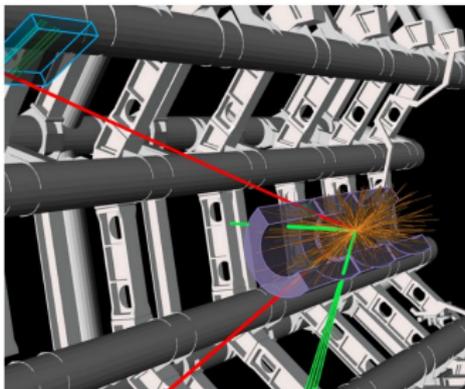
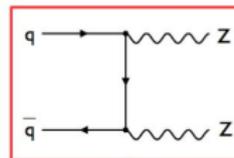
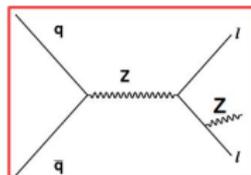
$$H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$$

Exemple de la désintégration en  $ZZ^{(*)}$

( $\ell \equiv e$  ou  $\mu$  ; "4 $\ell$ " inclut toutes les combinaisons possibles)



Bruit de fond = même signature



Recherche du boson BEH dans les collisions

# Les canaux en or

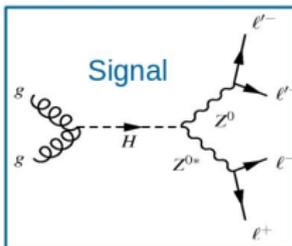
**Découverte grâce à :**

$$H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell,$$

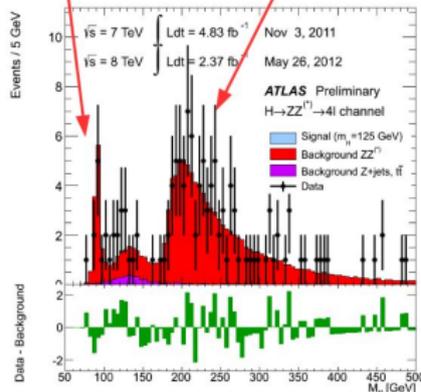
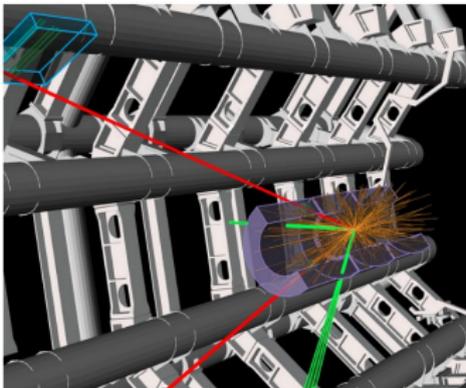
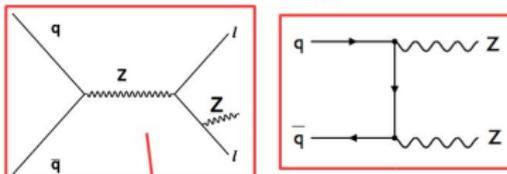
$$H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$$

Exemple de la désintégration en  $ZZ^{(*)}$

( $\ell \equiv e$  ou  $\mu$  ; "4 $\ell$ " inclut toutes les combinaisons possibles)



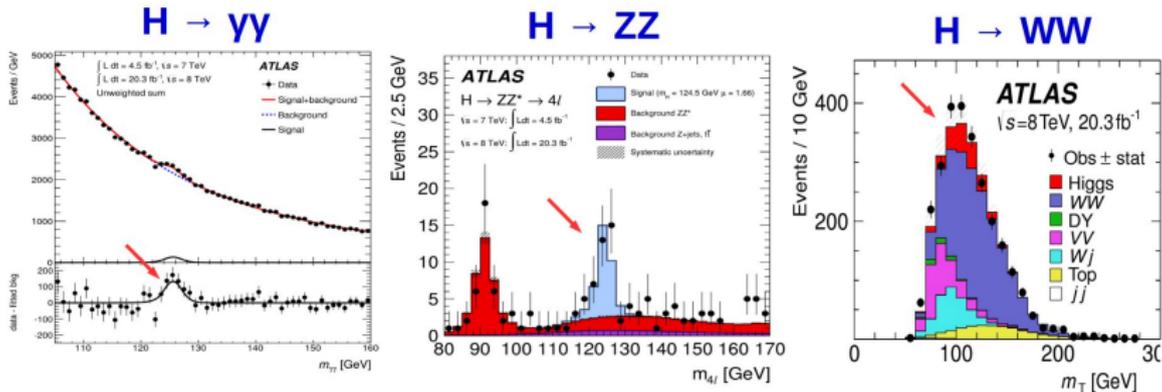
Bruit de fond = même signature



# Accumuler de la statistique, c'est important !

Recherche du boson BEH dans les collisions

# Les désintégrations en bosons



## Commentaires:

- apparaît dans 3 canaux différents : en accord avec le mécanisme de BEH
- même masse dans les 3 canaux
- taux de production / fraction dans chaque canal  
 $\Rightarrow$  structure interne de la théorie

L'observation est conforme au mécanisme de Brout-Englert-Higgs

# Plan de l'exposé

- 1 Pourquoi le boson BEH est-t-il nécessaire ?**
  - Le contexte de la physique des particules
  - Le boson BEH, la pierre angulaire du Modèle Standard
  - Un succès du Modèle Standard
- 2 Les aspects expérimentaux du boson BEH**
  - Principe et dispositif experimental
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions
- 3 Et après ?**

# La longue quête du boson BEH : résumé

## Les origines (1964) :

- prédiction : mécanisme générant la masse et sa **particule associée**
- conséquence : **nouvelle conception de la masse**

# La longue quête du boson BEH : résumé

## Les origines (1964) :

- prédiction : mécanisme générant la masse et sa **particule associée**
- conséquence : **nouvelle conception de la masse**

## Les recherches (1980 - 2012) :

- des générations de physiciens
- 3 accélérateurs,  $\sim 10$  détecteurs, des **milliers** de chercheurs
- **des progrès expérimentaux mais aussi théoriques**

# La longue quête du boson BEH : résumé

## Les origines (1964) :

- prédiction : mécanisme générant la masse et sa **particule associée**
- conséquence : **nouvelle conception de la masse**

## Les recherches (1980 - 2012) :

- des générations de physiciens
- 3 accélérateurs,  $\sim 10$  détecteurs, des **milliers** de chercheurs
- **des progrès expérimentaux mais aussi théoriques**

## La découverte (2012) :

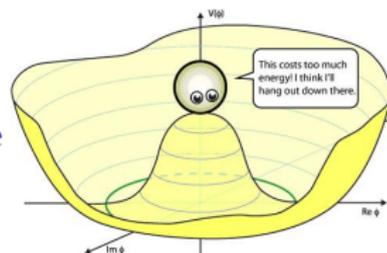
- dernière pièce : le **Modèle Standard** est, pour **la première fois, complet**
- prix **Nobel de physique**

Est-ce la fin de l'histoire ?

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

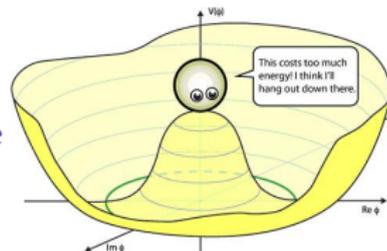
D'où vient la forme du potentiel et la transition de phase ? Ingrédients introduits à la main ...



## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la forme du potentiel et la transition de phase ? Ingrédients introduits à la main ...



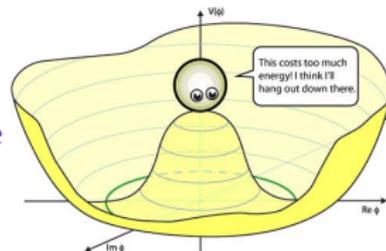
### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- **oscillations des neutrinos** : observées mais non prédit par le MS

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la forme du potentiel et la transition de phase ? Ingrédients introduits à la main ...



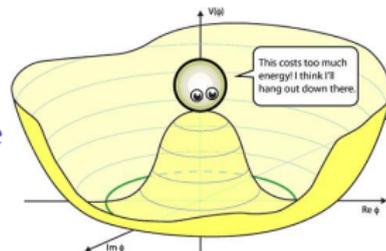
### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- oscillations des neutrinos : observées mais non prédit par le MS
- matière noire : preuves indirectes, pas de candidat dans le MS

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la forme du potentiel et la transition de phase ? Ingrédients introduits à la main ...



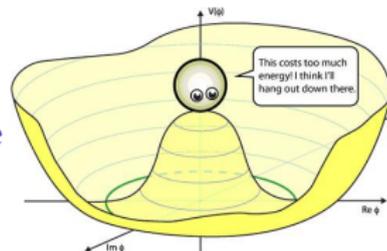
### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- oscillations des neutrinos : observées mais non prédit par le MS
- matière noire : preuves indirectes, pas de candidat dans le MS
- asymétrie matière-antimatière : insuffisante dans le MS

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la forme du potentiel et la transition de phase ? Ingrédients introduits à la main ...



### Quelques observations expérimentales non décrites ...

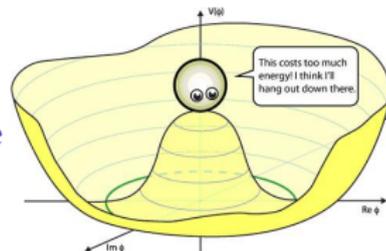
- oscillations des neutrinos : observées mais non prédit par le MS
- matière noire : preuves indirectes, pas de candidat dans le MS
- asymétrie matière-antimatière : insuffisante dans le MS

**Un problème conceptuel de taille :** la gravitation

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la forme du potentiel et la transition de phase ? Ingrédients introduits à la main ...



### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- oscillations des neutrinos : observées mais non prédit par le MS
- matière noire : preuves indirectes, pas de candidat dans le MS
- asymétrie matière-antimatière : insuffisante dans le MS

Un problème conceptuel de taille : la gravitation

Est-ce la fin de l'histoire ? Ce n'est que le début ...

# Pour raconter le boson BEH ...

University press conference picture



Newspaper article



UBP tweet during a book exhibition



**Merci pour votre attention !**

# Backup

# Le boson BEH et le concept de masse

## Avant le boson BEH

masse  $\equiv$  propriété intrinsèque

## Après le boson BEH

masse  $\propto$  couplage  $\times v$

**La masse émerge** d'un couplage avec un champ environnant

- le **couplage** est intrinsèque à la particule (ne peut être changé)
- la **valeur du champ** est le même pour toutes les particules

# Le boson BEH et le concept de masse

## Avant le boson BEH

masse  $\equiv$  propriété intrinsèque

## Après le boson BEH

masse  $\propto$  couplage  $\times v$

**La masse émerge** d'un couplage avec un champ environnant

- le **couplage** est intrinsèque à la particule (ne peut être changé)
- la **valeur du champ** est le même pour toutes les particules

## Analogie avec le poid $P$ :

- avant Newton :  $P$  est une quantité intrinsèque à chaque objets
- après Newton :  $P =$  masse grave  $\times$  champ gravitationnel
  - masse grave : intrinsèque, ne peut être changé
  - champ gravitationnel : le même pour tous les objets

# Le boson BEH et le concept de masse

## Avant le boson BEH

masse  $\equiv$  propriété intrinsèque

## Après le boson BEH

masse  $\propto$  couplage  $\times v$

**La masse émerge** d'un couplage avec un champ environnant

- le **couplage** est intrinsèque à la particule (ne peut être changé)
- la **valeur du champ** est le même pour toutes les particules

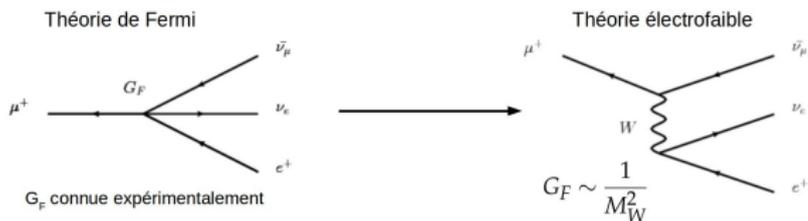
## Analogie avec le poid $P$ :

- avant Newton :  $P$  est une quantité intrinsèque à chaque objets
- après Newton :  $P =$  masse grave  $\times$  champ gravitationnel
  - masse grave : intrinsèque, ne peut être changé
  - champ gravitationnel : le même pour tous les objets

changer la valeur de  $v$   $\overset{\text{analogie}}{\iff}$  changer la gravité (ex : aller sur la Lune !)



# La découverte du $W^\pm$



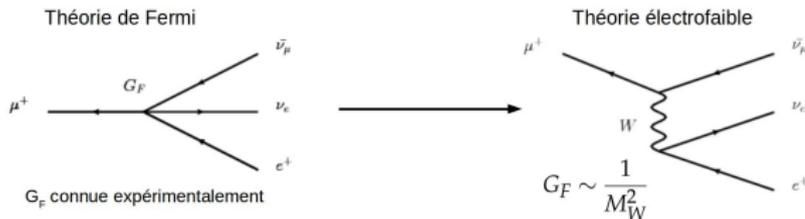
$$M_W \sim 50 - 100 \text{ GeV}$$

La théorie prédit donc une nouvelle particule ayant une masse autour de 100 GeV

$$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$



# La découverte du $W^\pm$



La théorie prédit donc une nouvelle particule ayant une masse autour de 100 GeV

$$M_W \sim 50 - 100 \text{ GeV}$$

$$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$



PRESSE

Laboratoire Européen pour la Physique des Particules  
European Laboratory for Particle Physics

PR 03/83  
25.01.1983

CERN LIBRARIES, GENEVA



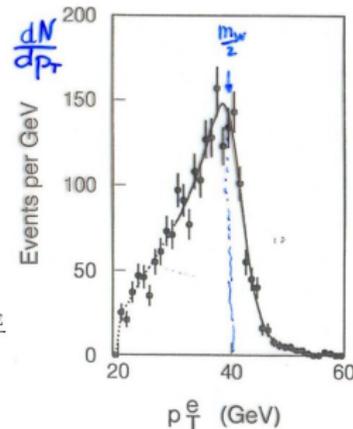
CM-P00053948

UNE TOUTE GRANDE AVANCE EN PHYSIQUE :

$$M_W \sim 80 \text{ GeV}$$

LA DÉCOUVERTE DU BOSON VECTEUR W

Cette publication (titre ci-dessous) confirme la découverte du boson vecteur intermédiaire W postulé par la théorie unifiée des interactions faible et forte. CECI CONSTITUE EN FAIT UNE PERCEE EXTREMEMENT IMPORTANTE pour la physique contemporaine.



## Fiabilité des prédictions 30 ans après ...

### Un ajustement global, pourquoi ?

- $N(\text{paramètres}) < N(\text{observables})$
- tester la **cohérence de la théorie**
- décrire des situations différentes
- corrélations entre observables

## Fiabilité des prédictions 30 ans après ...

### Un ajustement global, pourquoi ?

- $N(\text{paramètres}) < N(\text{observables})$
- tester la **cohérence de la théorie**
- décrire des situations différentes
- corrélations entre observables

### Un ajustement global, comment ?

- prediction  $\mathcal{O}_i^{\text{theo}}(\vec{p})$

## Fiabilité des prédictions 30 ans après ...

### Un ajustement global, pourquoi ?

- $N(\text{paramètres}) < N(\text{observables})$
- tester la **cohérence de la théorie**
- décrire des situations différentes
- corrélations entre observables

### Un ajustement global, comment ?

- prediction  $\mathcal{O}_i^{\text{theo}}(\vec{p})$
- $\vec{p}_{\text{best}}$  : **meilleure** description de **toutes les mesures** simultanément

# Fiabilité des prédictions 30 ans après ...

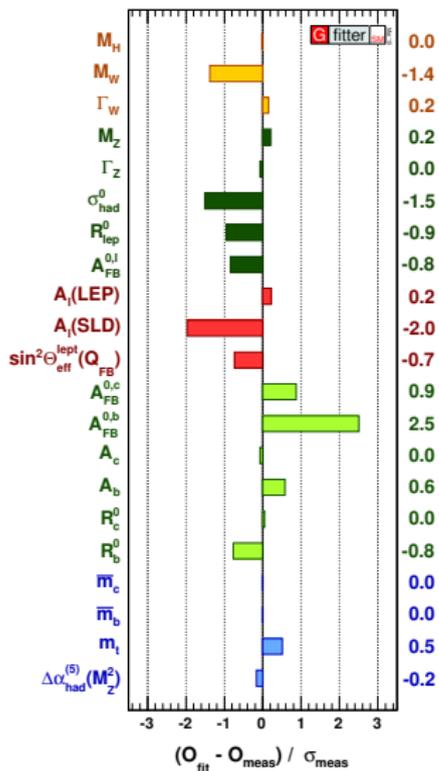
## Un ajustement global, pourquoi ?

- $N(\text{paramètres}) < N(\text{observables})$
- tester la **cohérence de la théorie**
- décrire des situations différentes
- corrélations entre observables

## Un ajustement global, comment ?

- prediction  $\mathcal{O}_i^{\text{theo}}(\vec{p})$
- $\vec{p}_{\text{best}}$  : **meilleure** description de **toutes les mesures** simultanément
- question :  $\mathcal{O}_i^{\text{exp}} \stackrel{?}{=} \mathcal{O}_i^{\text{theo}}(\vec{p}_{\text{best}})$  ?

# Fiabilité des prédictions 30 ans après ...



## Un ajustement global, pourquoi ?

- $N(\text{paramètres}) < N(\text{observables})$
- tester la **cohérence de la théorie**
- décrire des situations différentes
- corrélations entre observables

## Un ajustement global, comment ?

- prediction  $\mathcal{O}_i^{\text{theo}}(\vec{p})$
- $\vec{p}_{\text{best}}$  : **meilleure** description de **toutes les mesures** simultanément
- question :  $\mathcal{O}_i^{\text{exp}} \stackrel{?}{=} \mathcal{O}_i^{\text{theo}}(\vec{p}_{\text{best}})$  ?

## Et pourtant ...

**Le boson BEH nous a échappé pendant 40 ans :** l'origine de la brisure de symétrie, nécessaire pour rendre le modèle valide, était **inconnue** ...

## Et pourtant ...

**Le boson BEH nous a échappé pendant 40 ans :** l'origine de la brisure de symétrie, nécessaire pour rendre le modèle valide, était **inconnue** ...

### **Comment (in)valider l'existante du champ BEH ?**

Concentrer **assez d'énergie** pour exciter le champ et **créer un quantum**, dont on peut espérer **détecter les produits de désintégration**

## Et pourtant ...

**Le boson BEH nous a échappé pendant 40 ans** : l'origine de la brisure de symétrie, nécessaire pour rendre le modèle valide, était **inconnue** ...

### Comment (in)valider l'existante du champ BEH ?

Concentrer **assez d'énergie** pour exciter le champ et **créer un quantum**, dont on peut espérer **détecter les produits de désintégration**

### Que connaissons-nous du boson BEH ?

- **prédit par la théorie** : couplages aux médiateurs  
⇒ production et désintégration connues ! **Crucial pour sa recherche**
- **non prédit par la théorie** :  $(v, M_H)$ 
  - $v$  donne la masse aux  $W$  et  $Z$  : connu !
  - $M_H$  ... **inconnu** ! **Crucial pour sa recherche**

# Les désintégrations en fermions

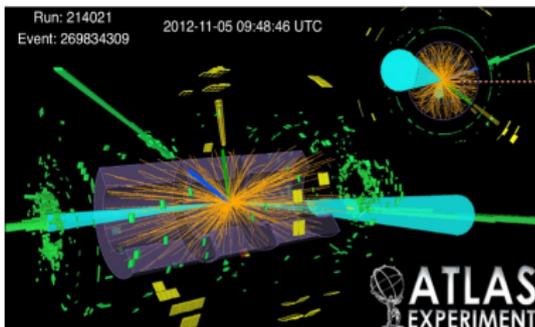
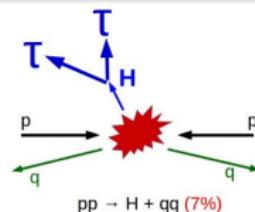
Pour les fermions, le terme de couplage avec le boson BEH n'est fixée par aucune symétrie et est ajouté de manière *ad hoc* → crucial de le sonder expérimentalement

# Les désintégrations en fermions

Pour les fermions, le terme de couplage avec le boson BEH n'est fixée par aucune symétrie et est ajouté de manière *ad hoc* → crucial de le sonder expérimentalement

Nécessité de prendre un fermion lourd (couplage  $\sim$  masse) : lepton de 3<sup>ème</sup> génération, le tau

Expérimentalement difficile à identifier : seul lepton à se désintégrer avant d'atteindre le détecteur.

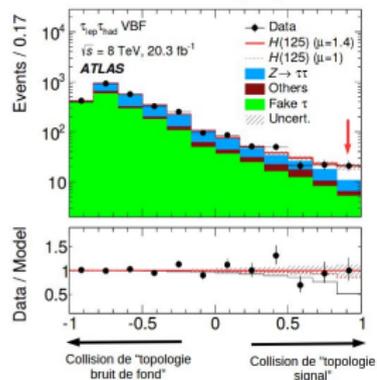
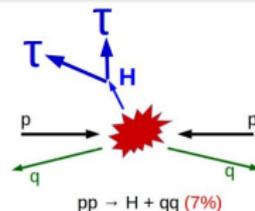
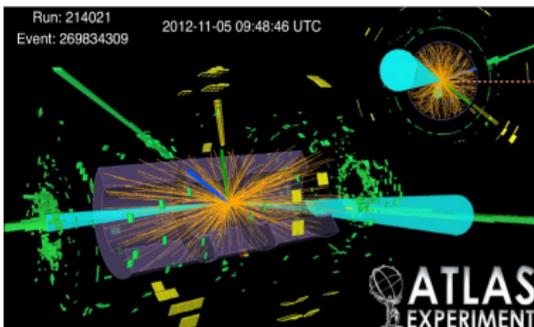


# Les désintégrations en fermions

Pour les fermions, le terme de couplage avec le boson BEH n'est fixée par aucune symétrie et est ajouté de manière *ad hoc* → crucial de le sonder expérimentalement

Nécessité de prendre un fermion lourd (couplage ~ masse) : lepton de 3<sup>ème</sup> génération, le tau

Expérimentalement difficile à identifier : seul lepton à se désintégrer avant d'atteindre le détecteur.



## Et le spin de cette nouvelle particule ?

### Important de le mesurer :

Le boson BEH est la seule particule élémentaire de spin 0 connue à ce jour.

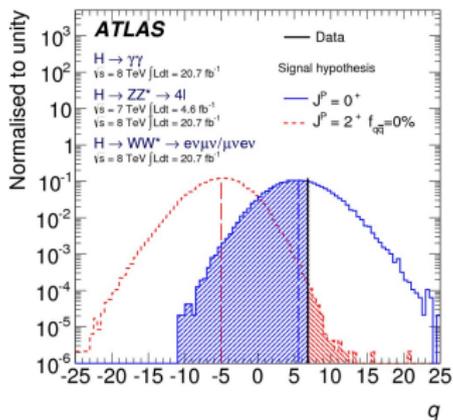
**Comment le mesurer ?** en mesurant les distributions angulaires des produits de désintégration du boson BEH

# Et le spin de cette nouvelle particule ?

## Important de le mesurer :

Le boson BEH est la seule particule élémentaire de spin 0 connue à ce jour.

**Comment le mesurer ?** en mesurant les distributions angulaires des produits de désintégration du boson BEH



## Methodologie :

- ❶ trier les collisions avec un boson BEH
- ❷ analyse des distributions angulaires
- ❸ comparer avec la prédiction de spin  $\neq 0$
- ❹ effectuer un test d'hypothèse

# Et le spin de cette nouvelle particule ?

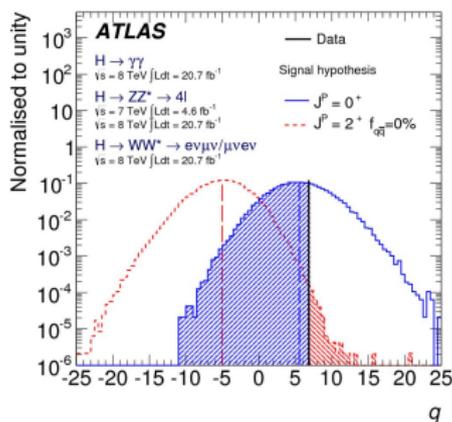
## Important de le mesurer :

Le boson BEH est la seule particule élémentaire de spin 0 connue à ce jour.

Comment le mesurer ? en mesurant les distributions angulaires des produits de désintégration du boson BEH

## Methodologie :

- ❶ trier les collisions avec un boson BEH
- ❷ analyse des distributions angulaires
- ❸ comparer avec la prédiction de spin  $\neq 0$
- ❹ effectuer un test d'hypothèse



Physics Letters B 726 (2013) 120–144

Contents lists available at ScienceDirect



Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data <sup>†</sup>

ATLAS Collaboration \*

