

# Le boson de Brout-Englert-Higgs

## Du concept à la découverte

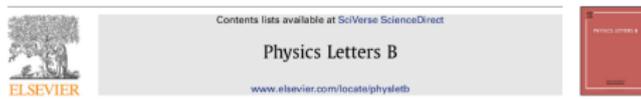
**Romain Madar**

<http://romain-madar.com>

Laboratoire de **P**hysique de **C**lermont-Ferrand  
Clermont-Ferrand – France

**Séminaire au Lycée Chateaubriand**

2 Mars 2017 – Rennes, 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>

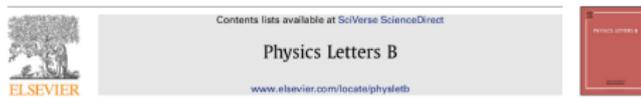
#### CMS Collaboration \*

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**"*

## Après 40 années de recherche, un engouement dans la communauté scientifique ... Mais pas seulement !



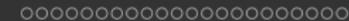
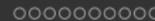


# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

La matière, un jeu de construction



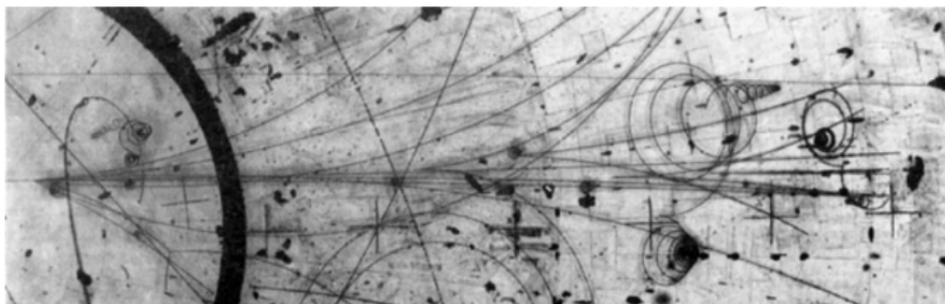
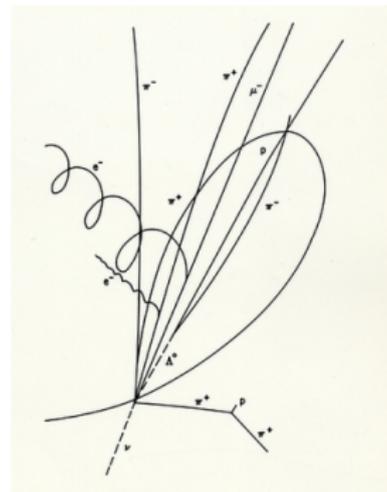
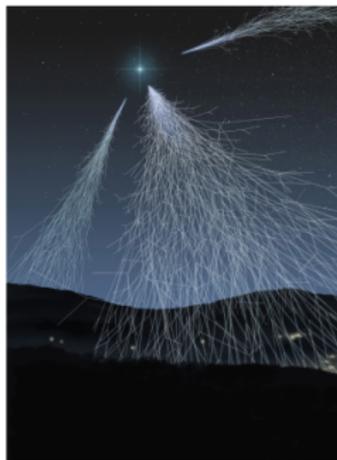


La matière, un jeu de construction

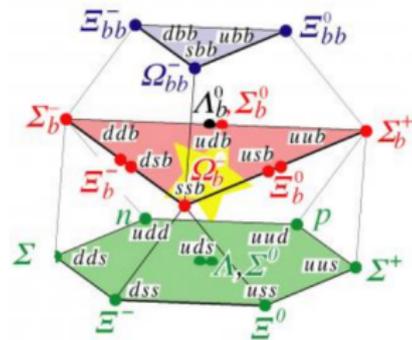
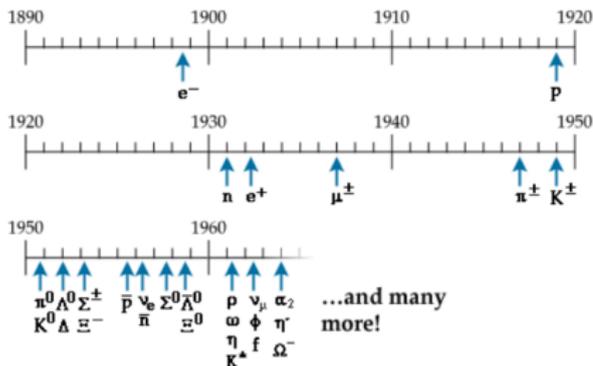
1 1,0 <b>H</b> Hydrogène	Numéro atomique → <b>1</b> ← Masse atomique ← <b>H</b> ← Symbole atomique Nom → Hydrogène																2 4,0 <b>He</b> Hélium	
3 6,9 <b>Li</b> Lithium	4 9,0 <b>Be</b> Béryllium																	10 20,2 <b>Ne</b> Néon
11 23,0 <b>Na</b> Sodium	12 24,3 <b>Mg</b> Magnésium																	18 39,9 <b>Ar</b> Argon
19 39,1 <b>K</b> Potassium	20 40,1 <b>Ca</b> Calcium	21 45,0 <b>Sc</b> Scandium	22 47,9 <b>Ti</b> Titane	23 50,9 <b>V</b> Vanadium	24 51,0 <b>Cr</b> Chrome	25 54,9 <b>Mn</b> Manganèse	26 55,8 <b>Fe</b> Fer	27 58,9 <b>Co</b> Cobalt	28 63,5 <b>Ni</b> Nickel	29 63,5 <b>Cu</b> Cuivre	30 65,4 <b>Zn</b> Zinc	31 69,7 <b>Ga</b> Gallium	32 72,6 <b>Ge</b> Germanium	33 74,5 <b>As</b> Arsenic	34 79,0 <b>Se</b> Sélénium	35 79,9 <b>Br</b> Brome	36 83,8 <b>Kr</b> Krypton	
37 85,5 <b>Rb</b> Rubidium	38 87,6 <b>Sr</b> Strontium	39 88,9 <b>Y</b> Yttrium	40 91,3 <b>Zr</b> Zirconium	41 92,9 <b>Nb</b> Niobium	42 95,9 <b>Mo</b> Molybdène	43 99,0 <b>Tc</b> Technétium	44 101,1 <b>Ru</b> Ruthénium	45 102,9 <b>Rh</b> Rhodium	46 106,4 <b>Pd</b> Palladium	47 107,9 <b>Ag</b> Argent	48 112,4 <b>Cd</b> Cadmium	49 114,8 <b>In</b> Indium	50 118,7 <b>Sn</b> Étain	51 121,8 <b>Sb</b> Antimoine	52 127,6 <b>Te</b> Tellure	53 166,9 <b>I</b> Iode	54 131,3 <b>Xe</b> Xénon	
55 132,9 <b>Cs</b> Césium	56 137,3 <b>Ba</b> Baryum		72 178,5 <b>Hf</b> Hafnium	73 180,9 <b>Ta</b> Tantale	74 183,9 <b>W</b> Tungstène	75 186,2 <b>Re</b> Rhénium	76 190,2 <b>Os</b> Osmium	77 192,2 <b>Ir</b> Iridium	78 195,1 <b>Pt</b> Platine	79 197,0 <b>Au</b> Or	80 200,6 <b>Hg</b> Mercure	81 204,4 <b>Tl</b> Thallium	82 207,2 <b>Pb</b> Plomb	83 209,0 <b>Bi</b> Bismuth	84 210 <b>Po</b> Polonium	85 210 <b>At</b> Astaté	86 222 <b>Rn</b> Radon	
87 223 <b>Fr</b> Francium	88 226 <b>Ra</b> Radium		104 267 <b>Rf</b> Rutherfordium	105 268 <b>Db</b> Dubnium	106 271 <b>Sg</b> Seaborgium	107 272 <b>Bh</b> Bohrium	108 270 <b>Hs</b> Hassium	109 276 <b>Mt</b> Meitnerium	110 281 <b>Ds</b> Darmstadtium	111 280 <b>Rg</b> Roentgenium	112 285 <b>Cn</b> Copernicium	113 284 <b>Uut</b> Ununtrium	114 289 <b>Uuq</b> Ununquadium	115 288 <b>Uup</b> Ununpentium	116 293 <b>Uuh</b> Ununhexium	117 294 <b>Uus</b> Ununseptium	118 294 <b>Uuo</b> Ununoctium	
		↑																
57 138,9 <b>La</b> Lanthane	58 140,1 <b>Ce</b> Cérium	59 140,9 <b>Pr</b> Praséodyme	60 144,2 <b>Nd</b> Néodyme	61 145 <b>Pm</b> Prométhium	62 150,4 <b>Sm</b> Samarium	63 152,0 <b>Eu</b> Europium	64 157,3 <b>Gd</b> Gadolinium	65 158,9 <b>Tb</b> Terbium	66 162,9 <b>Dy</b> Dyprosium	67 164,9 <b>Ho</b> Holmium	68 167,3 <b>Er</b> Erbium	69 168,9 <b>Tm</b> Thulium	70 173,0 <b>Yb</b> Ytterbium	71 175,0 <b>Lu</b> Lutécium				
89 227 <b>Ac</b> Actinium	90 232 <b>Th</b> Thorium	91 231 <b>Pa</b> Protactinium	92 238 <b>U</b> Uranium	93 237 <b>Np</b> Neptunium	94 244 <b>Pu</b> Plutonium	95 243 <b>Am</b> Américium	96 247 <b>Cm</b> Curium	97 247 <b>Bk</b> Berkélium	98 251 <b>Cf</b> Californium	99 254 <b>Es</b> Einsteinium	100 253 <b>Fm</b> Fermium	101 256 <b>Md</b> Mendélévium	102 254 <b>No</b> Nobélium	103 257 <b>Lw</b> Lawrencium				



La matière, un jeu de construction



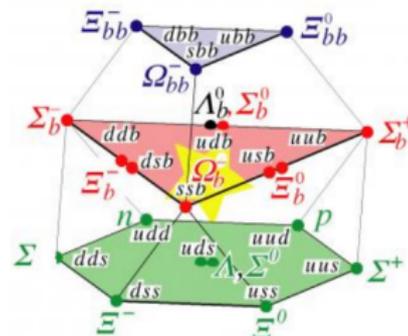
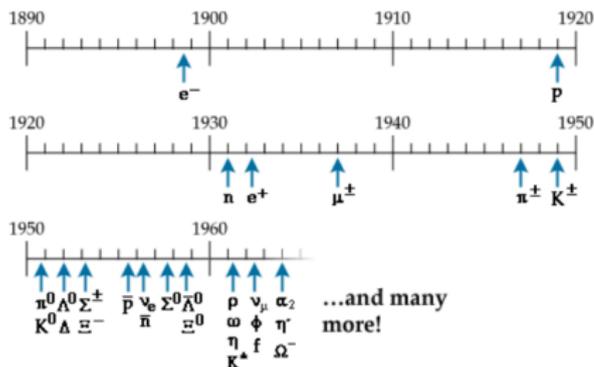
La matière, un jeu de construction



**Les régularités, une manifestation de structure interne**

- Des dizaines de *hadrons* découverts dans les années 50
- Leurs propriétés semblent suivre un schéma précis

## La matière, un jeu de construction

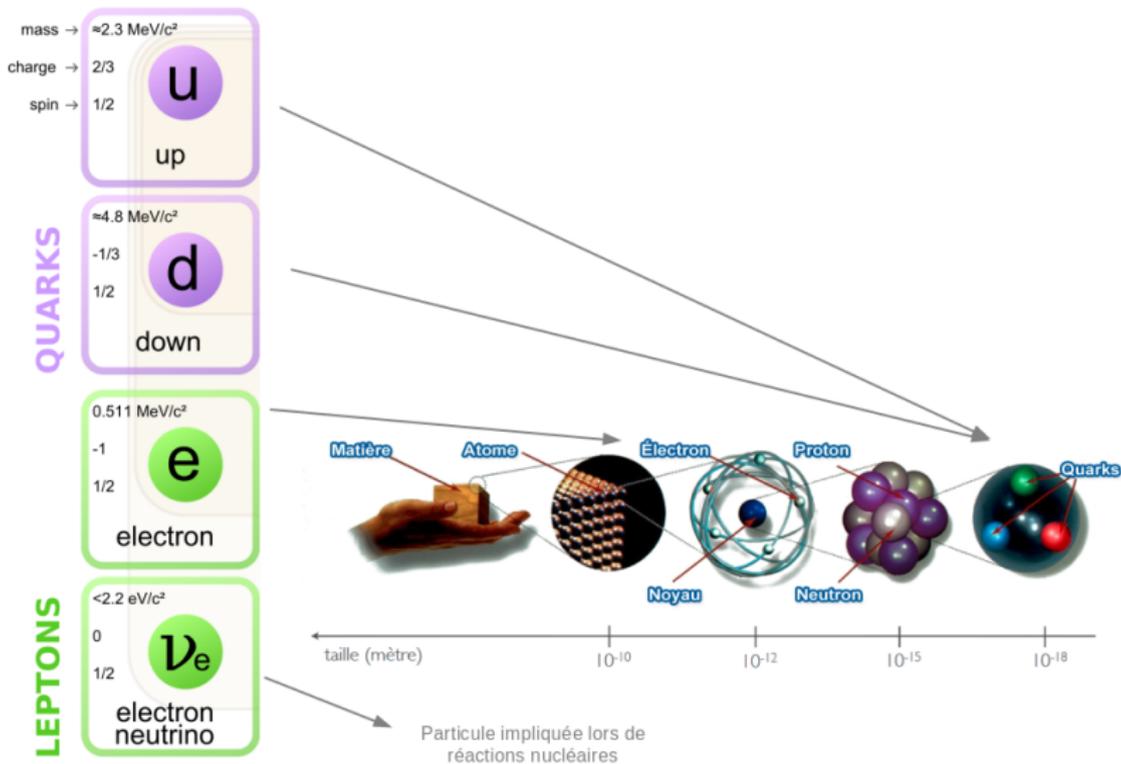


## Les régularités, une manifestation de structure interne

- Des dizaines de *hadrons* découverts dans les années 50
- Leurs propriétés semblent suivre un schéma précis

Cette multitude de nouvelles "particules" ainsi que cette régularité deviennent *naturelles* si on suppose que ces systèmes sont composés de particules élémentaires. Elles seront appelées **quarks** par la suite.

La matière, un jeu de construction



La matière, un jeu de construction

	<p>mass → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>mass → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>mass → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>
<b>QUARKS</b>	<p>mass → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>mass → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>mass → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>
	<p>mass → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>e</b></p> <p>electron</p>	<p>mass → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p>	<p>mass → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p>
<b>LEPTONS</b>	<p>mass → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>electron neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>muon neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>tau neutrino</p>

# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

# Les quatre interactions fondamentales

## 1 La gravitation









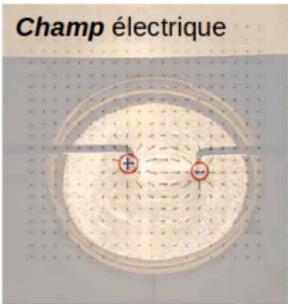
*Apparte*: champ et/ou particule (?)

# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

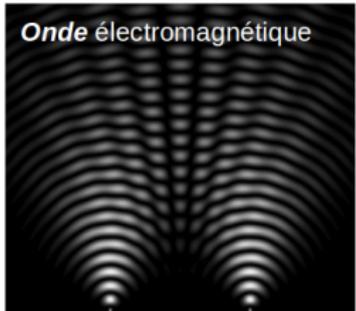
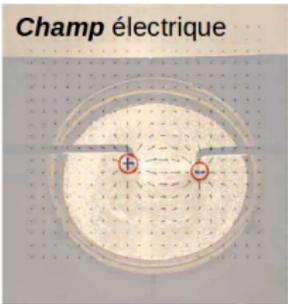
Apparte: champ et/ou particule (?)

# Matière et interaction: une nature commune



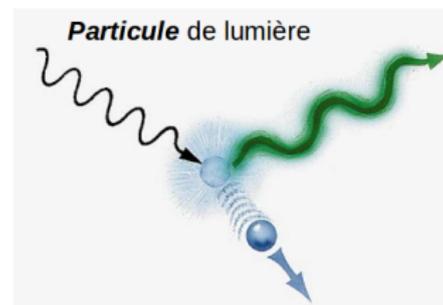
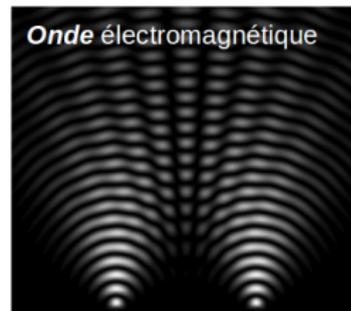
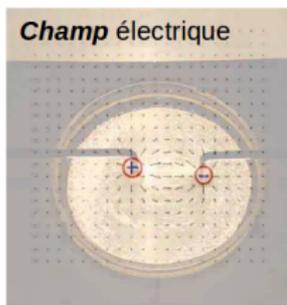
Appartenance: champ et/ou particule (?)

# Matière et interaction: une nature commune



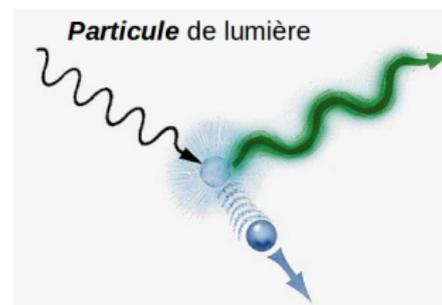
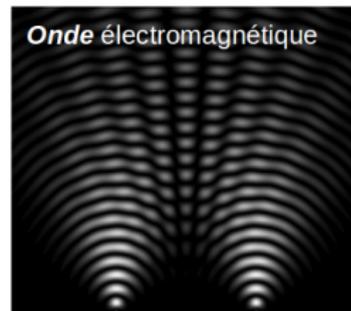
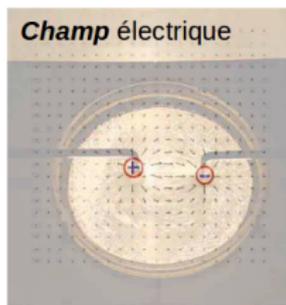
Appartenance: champ et/ou particule (?)

## Matière et interaction: une nature commune



Apparte: champ et/ou particule (?)

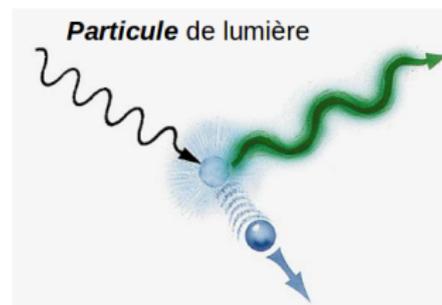
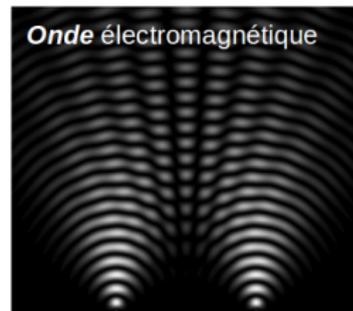
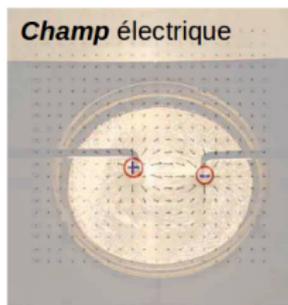
## Matière et interaction: une nature commune



Vidéo de <https://toutestquantique.fr> sur la "dualité" onde particule

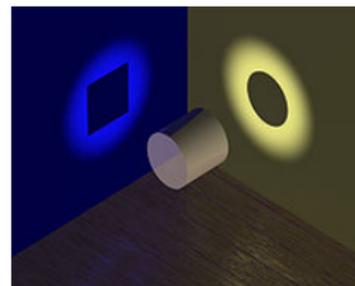
Apparte: champ et/ou particule (?)

## Matière et interaction: une nature commune



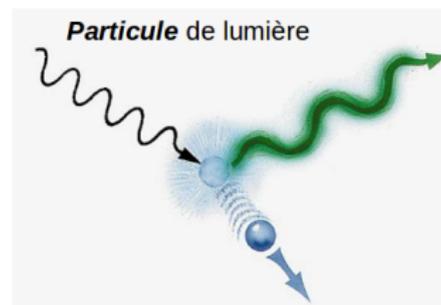
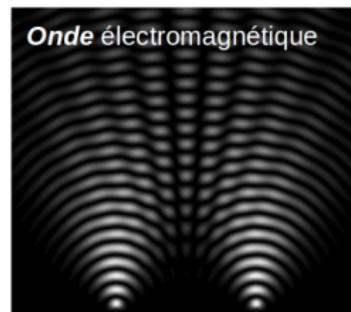
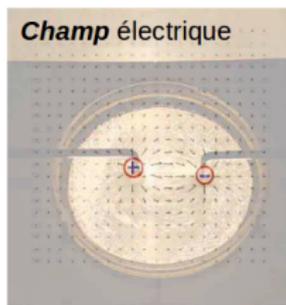
Vidéo de <https://toutestquantique.fr> sur la "dualité" onde particule

**Message à retenir:** Interaction et matière sont de même nature. Ce ne sont ni des ondes, ni des "grains". On a un objet quantique qui n'a pas d'équivalent à notre échelle.



Apparte: champ et/ou particule (?)

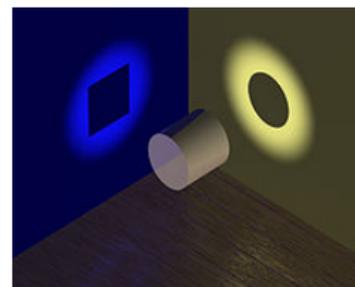
## Matière et interaction: une nature commune



Vidéo de <https://toutestquantique.fr> sur la "dualité" onde particule

**Message à retenir:** Interaction et matière sont de même nature. Ce ne sont ni des ondes, ni des "grains". On a un objet quantique qui n'a pas d'équivalent à notre échelle.

On parlera du champ de l'interaction ou de la particule *médiatrice* associée



Apparte: champ et/ou particule (?)

## Interaction vue comme l'échange de particules



masse de la particule médiatrice  $\iff$  la portée du champ:  $d \propto 1/M$

Apparte: champ et/ou particule (?)

# Interaction vue comme l'échange de particules



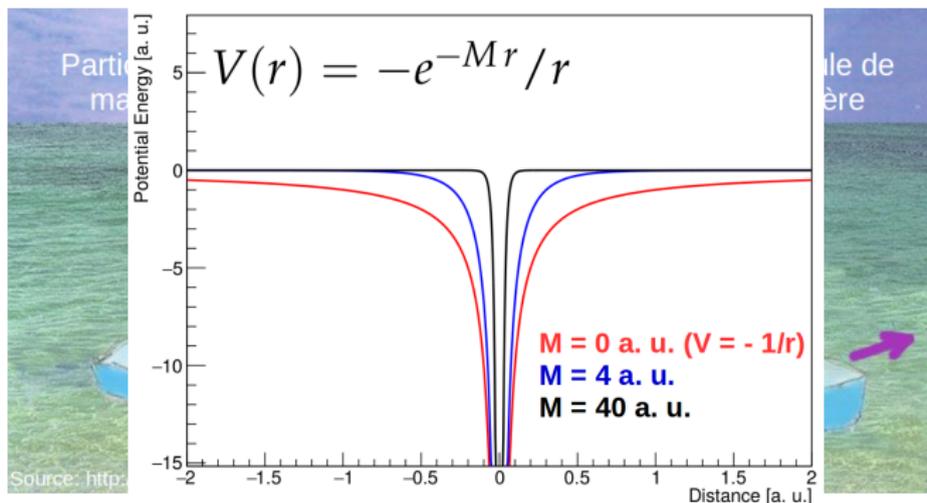
masse de la particule médiatrice  $\iff$  la portée du champ:  $d \propto 1/M$

## Deux exemples importants:

- électromagnétisme:  $m_{\text{photon}} = 0 \rightarrow V(r) \propto \frac{1}{r}$  portée infinie
- faible:  $m_{W,Z} \sim 100 \text{ GeV} \rightarrow V(r) \propto \frac{\exp(r/10^{-3} \text{ Fm})}{r}$  portée  $\sim 10^{-3} d_{\text{proton}}$

Appartenance: champ et/ou particule (?)

# Interaction vue comme l'échange de particules

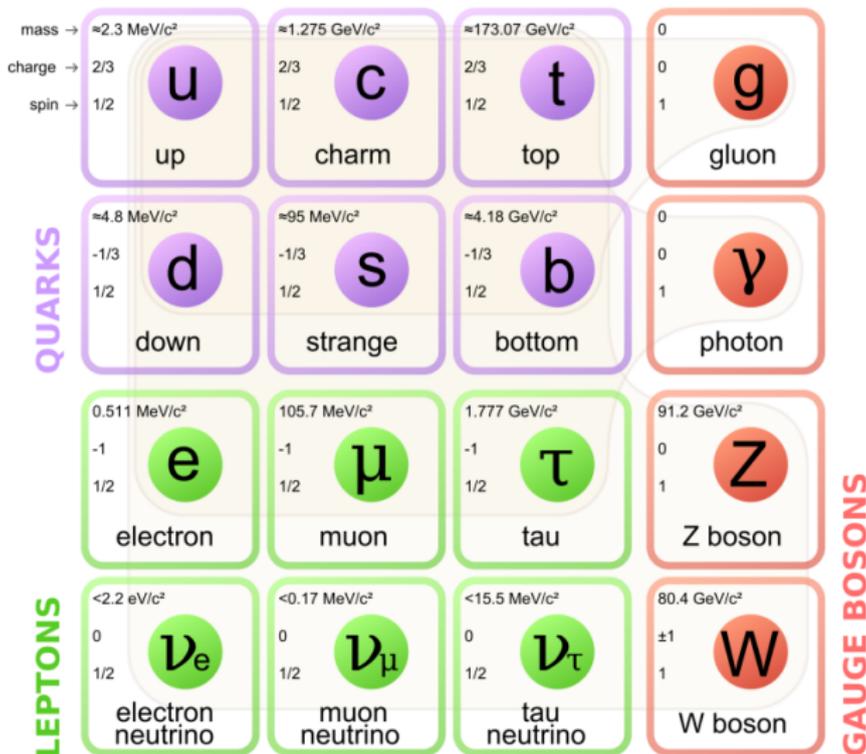


masse de la particule médiatrice  $\iff$  la portée du champ:  $d \propto 1/M$

## Deux exemples importants:

- électromagnétisme:  $m_{\text{photon}} = 0 \rightarrow V(r) \propto \frac{1}{r}$  portée infinie
- faible:  $m_{W,Z} \sim 100 \text{ GeV} \rightarrow V(r) \propto \frac{\exp(-r/10^{-3} \text{ Fm})}{r}$  portée  $\sim 10^{-3} d_{\text{proton}}$

Et si on se résume un peu ...



# Plan du séminaire

- 1 **Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 **Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 **Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

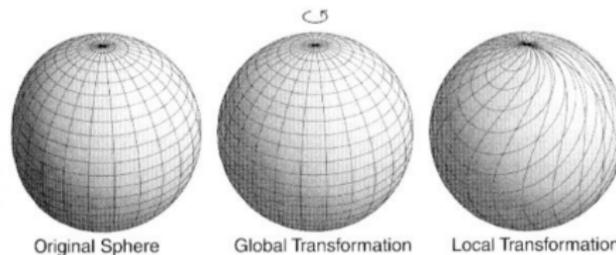
L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée** *a posteriori*

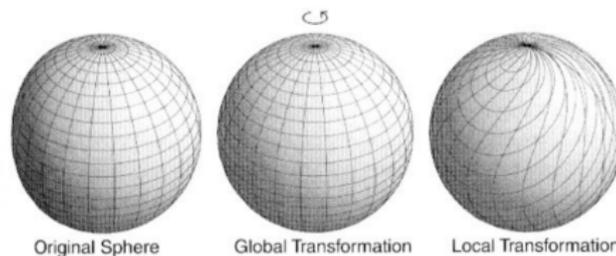
L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée** *a posteriori*

Il existe une infinité de potentiels  $(\vec{A}, V)$  qui décrivent la même physique. Le passage entre deux situations se fait par **une fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  de l'espace et du temps** (et pas un simple nombre). **Invariance locale**: extrêmement contraignante !

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

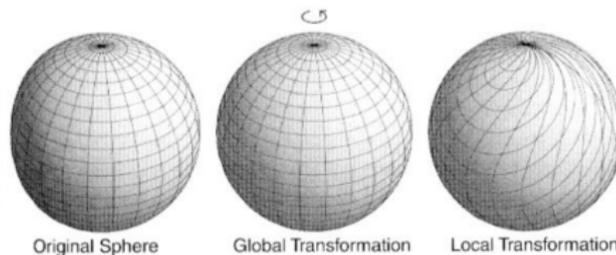
## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée a posteriori**



Il existe une infinité de potentiels  $(\vec{A}, V)$  qui décrivent la même physique. Le passage entre deux situations se fait par **une fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  de l'espace et du temps** (et pas un simple nombre). **Invariance locale: extrêmement contraignante !**

## 2. Imposer l'invariance de jauge locale: l'origine des forces?

- Théorie qui décrit un électron libre  $\psi(\vec{r}, t)$  fonction d'onde *complexe*  $\rightarrow$  observable  $\sim |\psi(\vec{r}, t)|^2$

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

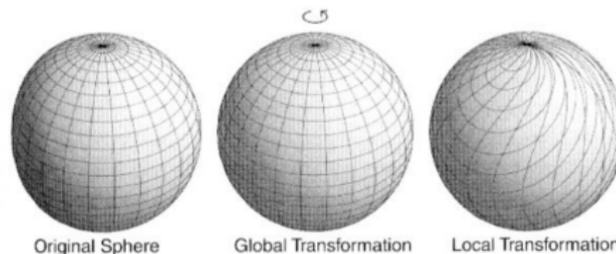
## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée a posteriori**



Il existe une infinité de potentiels  $(\vec{A}, V)$  qui décrivent la même physique. Le passage entre deux situations se fait par **une fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  de l'espace et du temps** (et pas un simple nombre). **Invariance locale: extrêmement contraignante !**

## 2. Imposer l'invariance de jauge locale: l'origine des forces?

- Théorie qui décrit un électron libre  $\psi(\vec{r}, t)$  fonction d'onde *complexe*  $\rightarrow$  observable  $\sim |\psi(\vec{r}, t)|^2$ 
  - $e^{i\varphi} \psi(\vec{r}, t)$  donne les même prédictions
  - $e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t)$  ne donne **pas** les mêmes prédictions (propagation  $\leftrightarrow$  dérivées)

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

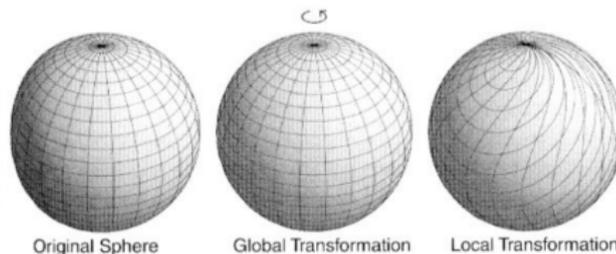
## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée a posteriori**



Il existe une infinité de potentiels  $(\vec{A}, V)$  qui décrivent la même physique. Le passage entre deux situations se fait par **une fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  de l'espace et du temps** (et pas un simple nombre). **Invariance locale: extrêmement contraignante !**

## 2. Imposer l'invariance de jauge locale: l'origine des forces?

- Théorie qui décrit un électron libre  $\psi(\vec{r}, t)$  fonction d'onde *complexe*  $\rightarrow$  observable  $\sim |\psi(\vec{r}, t)|^2$ 
  - $e^{i\varphi} \psi(\vec{r}, t)$  donne les mêmes prédictions
  - $e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t)$  ne donne **pas** les mêmes prédictions (propagation  $\leftrightarrow$  dérivées)

$$\partial_{\vec{r}, t} \left( e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t) \right) = e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \left( \partial_{\vec{r}, t} \psi(\vec{r}, t) \right) + \left( \partial_{\vec{r}, t} \varphi(\vec{r}, t) \right) \psi(\vec{r}, t)$$

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

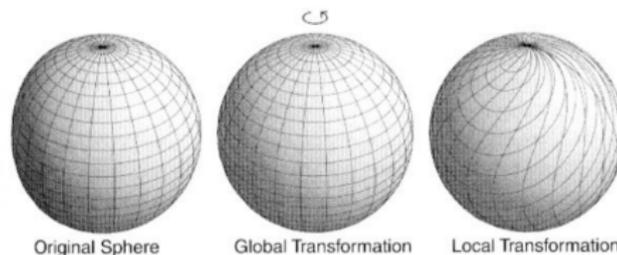
## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée a posteriori**



Il existe une infinité de potentiels  $(\vec{A}, V)$  qui décrivent la même physique. Le passage entre deux situations se fait par **une fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  de l'espace et du temps** (et pas un simple nombre). **Invariance locale: extrêmement contraignante !**

## 2. Imposer l'invariance de jauge locale: l'origine des forces?

- Théorie qui décrit un électron libre  $\psi(\vec{r}, t)$  fonction d'onde *complexe*  $\rightarrow$  observable  $\sim |\psi(\vec{r}, t)|^2$ 
  - $e^{i\varphi} \psi(\vec{r}, t)$  donne les mêmes prédictions
  - $e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t)$  ne donne **pas** les mêmes prédictions (propagation  $\leftrightarrow$  dérivées)

$$\partial_{\vec{r}, t} \left( e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t) \right) = e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \left( \partial_{\vec{r}, t} \psi(\vec{r}, t) \right) + \left( \partial_{\vec{r}, t} \varphi(\vec{r}, t) \right) \psi(\vec{r}, t)$$

- Que faut-il faire pour que  $e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t)$  reste équivalent à  $\psi(\vec{r}, t)$ ?

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

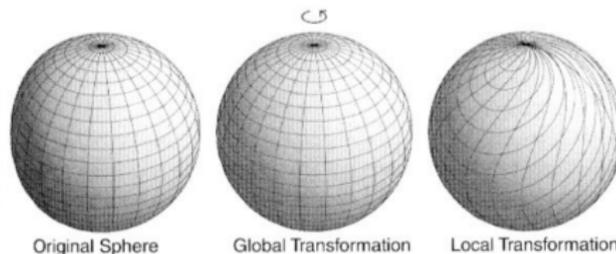
## 1. Équations de Maxwell: le constat

$$(\mathbf{A}, V) \leftrightarrow (\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

$$\vec{A}'(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t)$$

$$V'(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t) - \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Propriété **constatée a posteriori**



Il existe une infinité de potentiels  $(\vec{A}, V)$  qui décrivent la même physique. Le passage entre deux situations se fait par **une fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  de l'espace et du temps** (et pas un simple nombre). **Invariance locale: extrêmement contraignante !**

## 2. Imposer l'invariance de jauge locale: l'origine des forces?

- Théorie qui décrit un électron libre  $\psi(\vec{r}, t)$  fonction d'onde *complexe*  $\rightarrow$  observable  $\sim |\psi(\vec{r}, t)|^2$ 
  - $e^{i\varphi} \psi(\vec{r}, t)$  donne les mêmes prédictions
  - $e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t)$  ne donne **pas** les mêmes prédictions (propagation  $\leftrightarrow$  dérivées)

$$\partial_{\vec{r}, t} \left( e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t) \right) = e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \left( \partial_{\vec{r}, t} \psi(\vec{r}, t) \right) + \left( \partial_{\vec{r}, t} \varphi(\vec{r}, t) \right) \psi(\vec{r}, t)$$

- Que faut-il faire pour que  $e^{i\varphi(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t)$  reste équivalent à  $\psi(\vec{r}, t)$ ?
- **Ajouter deux champs qui se comportent exactement comme  $(\vec{A}, V)$  !**

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

## Ce qu'il faut retenir

- 1 L'invariance de jauge *locale* est constatée dans les équations de Maxwell
- 2 La théorie de l'électron *libre* n'est pas invariante de jauge *locale*
- 3 **Imposer l'invariance *locale*** conduit à introduire l'**interaction**  $(\vec{E}, \vec{B})$

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

## Ce qu'il faut retenir

- ❶ L'invariance de jauge *locale* est constatée dans les équations de Maxwell
- ❷ La théorie de l'électron *libre* n'est pas invariante de jauge *locale*
- ❸ **Imposer l'invariance *locale*** conduit à introduire l'**interaction**  $(\vec{E}, \vec{B})$

Toutes les propriétés de l'interaction  $(\vec{E}, \vec{B})$  **semblent découler de l'invariance de jauge** : **aucune autre hypothèse n'est nécessaire** (à part la valeur de la charge élémentaire)

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

## Ce qu'il faut retenir

- ❶ L'invariance de jauge *locale* est constatée dans les équations de Maxwell
- ❷ La théorie de l'électron *libre* n'est pas invariante de jauge *locale*
- ❸ **Imposer l'invariance *locale*** conduit à introduire l'**interaction**  $(\vec{E}, \vec{B})$

Toutes les propriétés de l'interaction  $(\vec{E}, \vec{B})$  **semblent découler de l'invariance de jauge** : aucune autre hypothèse n'est nécessaire (à part la valeur de la charge élémentaire)

### **Puissant et problématique à la fois ...**

- Potentiel d'*expliquer* toutes les interactions fondamentales (!)
- Interactions induites: longue portée  $\Leftrightarrow$  **médiateur de masse nulle**

L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait

## Ce qu'il faut retenir

- ❶ L'invariance de jauge *locale* est constatée dans les équations de Maxwell
- ❷ La théorie de l'électron *libre* n'est pas invariante de jauge *locale*
- ❸ **Imposer l'invariance *locale*** conduit à introduire l'interaction  $(\vec{E}, \vec{B})$

Toutes les propriétés de l'interaction  $(\vec{E}, \vec{B})$  **semblent découler de l'invariance de jauge** : aucune autre hypothèse n'est nécessaire (à part la valeur de la charge élémentaire)

### Puissant et problématique à la fois ...

- Potentiel d'*expliquer* toutes les interactions fondamentales (!)
- Interactions induites: longue portée  $\Leftrightarrow$  médiateur de masse nulle

Les interactions faibles ont une courte portée. **Comment réconcilier la prédictivité de l'invariance de jauge et les courtes portées?**

# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

# Médiateurs massifs et interaction de jauge

## Générer la masse de manière dynamique

- Ajouter un **nouveau champ**  $\phi_{\text{BEH}}$  dans un monde de **particules sans masse**
- **Dynamique choisie** telle que sa position d'équilibre soit **constante**  $\phi_{\text{BEH}} = v$
- **La masse émerge de l'interaction avec ce champ**

# Médiateurs massifs et interaction de jauge

## Générer la masse de manière dynamique

- Ajouter un **nouveau champ**  $\phi_{\text{BEH}}$  dans un monde de **particules sans masse**
- **Dynamique choisie** telle que sa position d'équilibre soit **constante**  $\phi_{\text{BEH}} = v$
- **La masse émerge de l'interaction avec ce champ**

### Phénomène général en physique

C'est une **brisure spontanée de symétrie** (ou invariance). Ici:  
l'invariance de jauge locale

Cette procédure porte le nom de **mécanisme de Brout-Englert-Higgs**

La particule associée est le **boson BEH**

Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection

# Médiateurs massifs et interaction de jauge

## Générer la masse de manière dynamique

- Ajouter un **nouveau champ**  $\phi_{\text{BEH}}$  dans un monde de **particules sans masse**
- **Dynamique choisie** telle que sa position d'équilibre soit **constante**  $\phi_{\text{BEH}} = v$
- **La masse émerge de l'interaction avec ce champ**

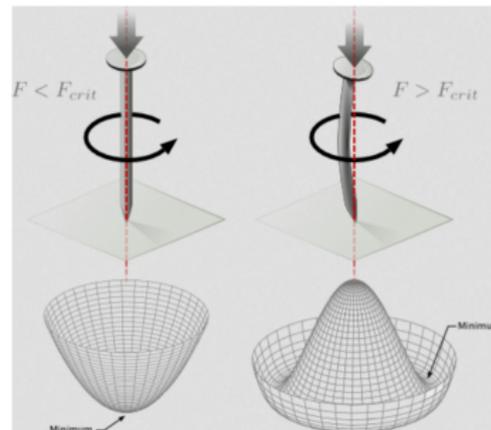
### Phénomène général en physique

C'est une **brisure spontanée de symétrie** (ou invariance). Ici: l'invariance de jauge locale

Cette procédure porte le nom de **mécanisme de Brout-Englert-Higgs**

La particule associée est le **boson BEH**

### Analogie: brisure spontanée de l'invariance par rotation



# Les conséquences conceptuelles

## 1. La nouvelle nature de la masse

- la masse n'est plus une propriété intrinsèque de la particule
- *émerge* d'une propriété du **milieu** & d'une propriété de la **particule**

# Les conséquences conceptuelles

## 1. La nouvelle nature de la masse

- la masse n'est plus une propriété intrinsèque de la particule
- *émerge* d'une propriété du **milieu** & d'une propriété de la **particule**

$$\Rightarrow m_{\text{particule}} \equiv \lambda_{\text{particule}} \times v_{\text{BEH}}$$

# Les conséquences conceptuelles

## 1. La nouvelle nature de la masse

- la masse n'est plus une propriété intrinsèque de la particule
- *émerge* d'une propriété du **milieu** & d'une propriété de la **particule**

$$\Rightarrow m_{\text{particule}} \equiv \lambda_{\text{particule}} \times v_{\text{BEH}}$$



# Les conséquences conceptuelles

## 1. La nouvelle nature de la masse

- la masse n'est plus une propriété intrinsèque de la particule
- *émerge* d'une propriété du **milieu** & d'une propriété de la **particule**

$$\Rightarrow m_{\text{particule}} \equiv \lambda_{\text{particule}} \times v_{\text{BEH}}$$



## 2. Un nouveau champ ... Partout, tout le temps!

L'espace tout entier est rempli d'un nouveau champ (dont la valeur est uniforme et stationnaire). Peut-on voir ce champ en le "secouant" et produire une excitation élémentaire - le boson BEH? **Réponse bientôt ...**

# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

# 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"

# 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**

# La théorie électrofaible

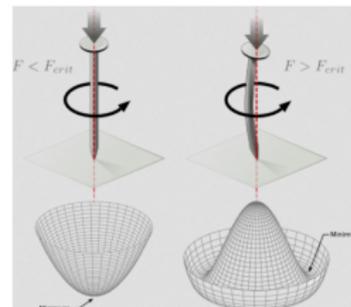
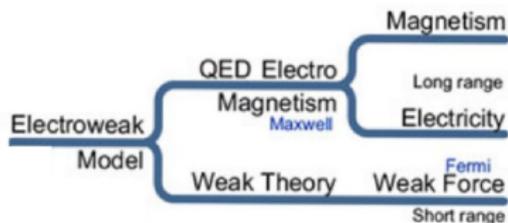
Le **Modèle Standard** décrit l'ensemble des particules élémentaires et leurs interactions électromagnétique, faible et forte.

## 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**



# 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 →  $(\vec{E}, \vec{B})$  (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 →  $(\vec{E}, \vec{B})$  (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 **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 →  $(\vec{E}, \vec{B})$  (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

# 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

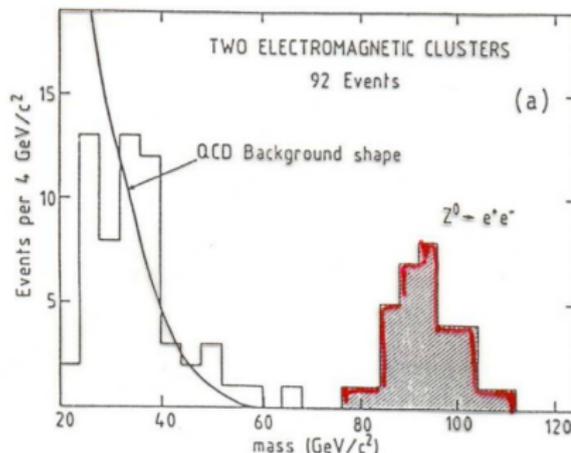
## Le modèle standard, par l'expérience (1/2)

**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)

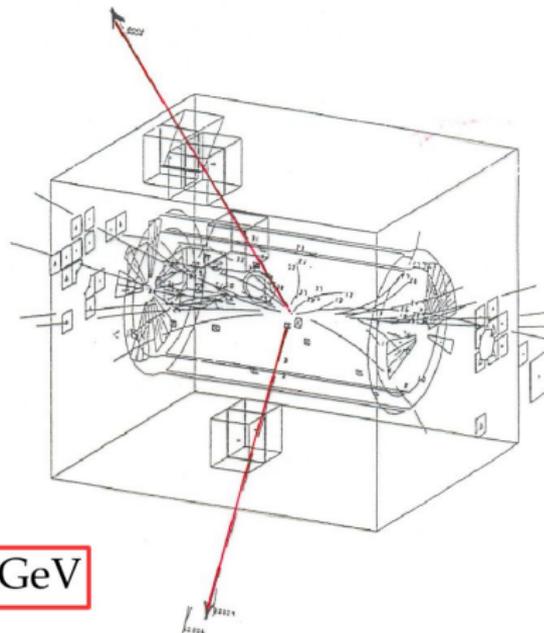
# Le modèle standard, par l'expérience (1/2)

**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)

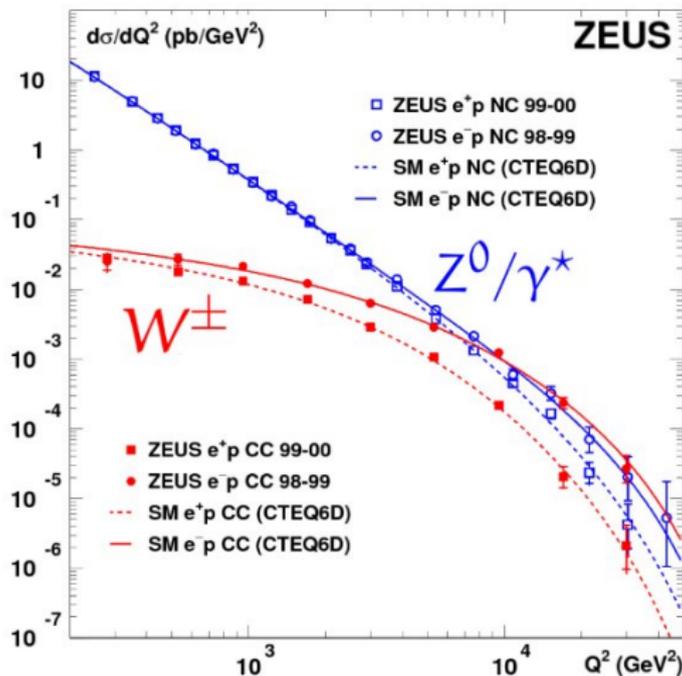
$$Z^0 \rightarrow e^+e^-$$



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



# Le modèle standard, par l'expérience (2/2)



Le modèle Standard décrit la réalité et le boson BEH assure la cohérence de la théorie.

**Mais le boson BEH existe-t-il vraiment?**

# Plan du séminaire

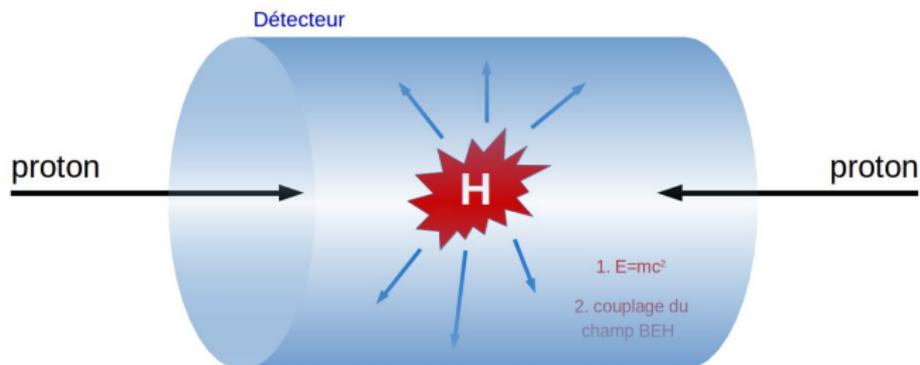
- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

## Le principe de base

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

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



Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# 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)



Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

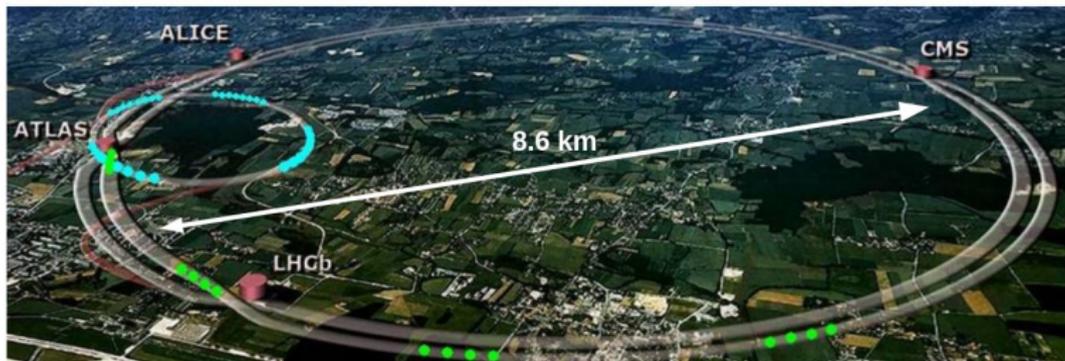
**LHC** : Large Hadron Collider (hadron  $\equiv$  état lié de l'interaction forte)

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

Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

## 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



Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

## 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

Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

## 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 ?**

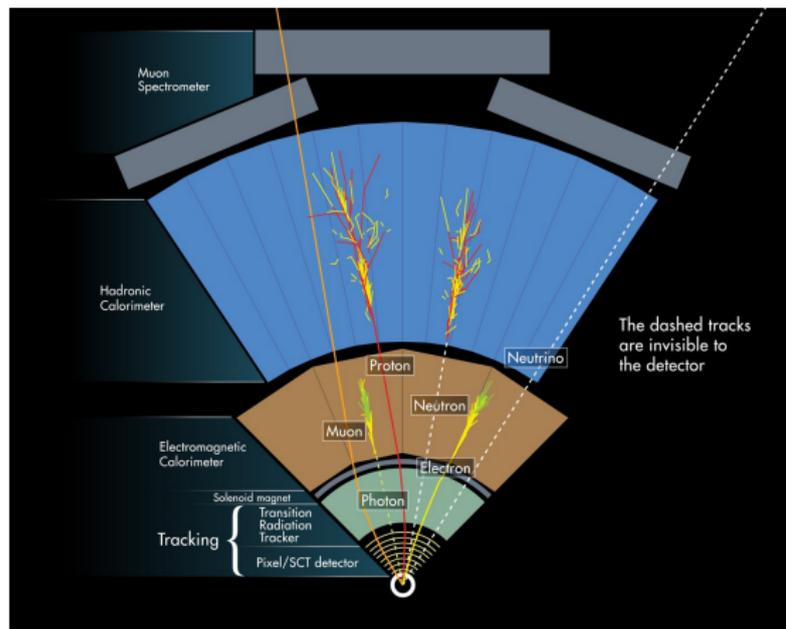
- perte d'énergie d'une particule incidente dans la matière
- deux grandes classes de détecteurs:
  - **trajectographe** : peu de matière, perturbe peu la particule, mesure des positions de passage. Avec champ  $\vec{B}$ , pour les particules chargée uniquement
  - **calorimètre** : beaucoup de matière,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

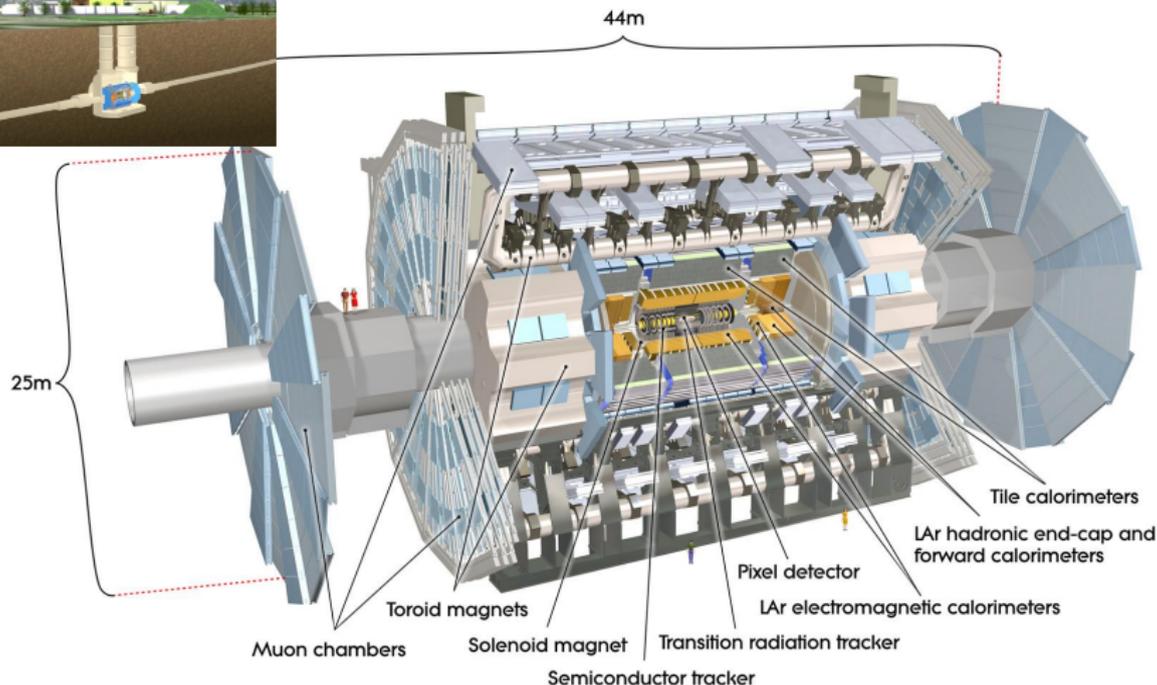
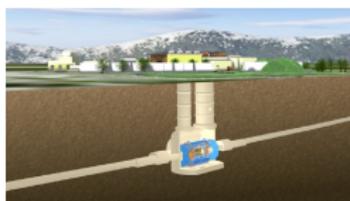
trop peu d'interaction → ce qui manque au bilan d'impulsion

### Les quarks

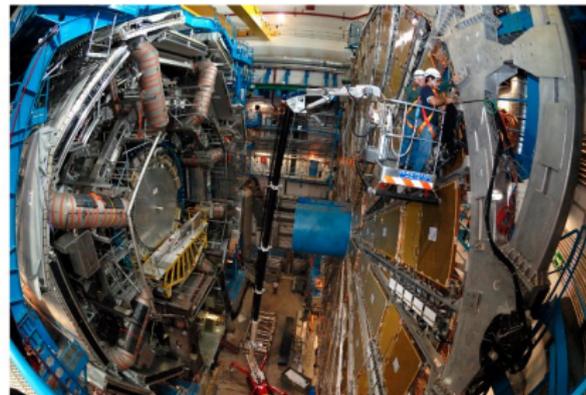
n'existent pas à l'état libre → produit un jet de hadrons

Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# Un des détecteurs : ATLAS

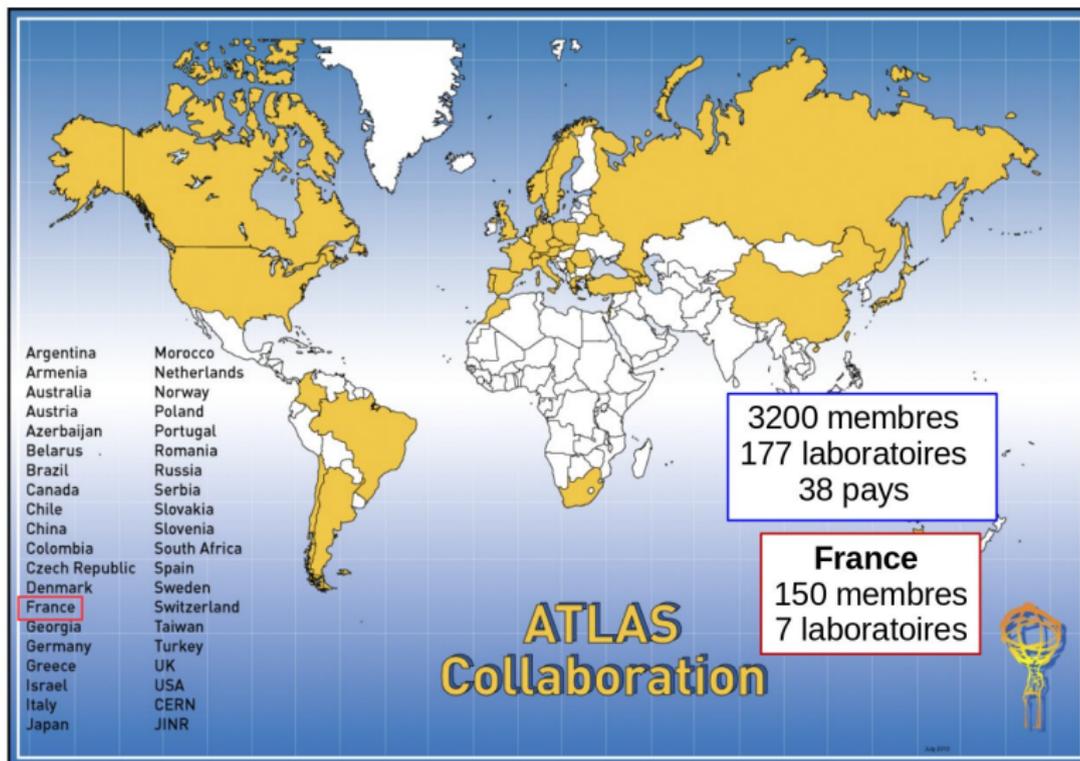


Les collisions de haute énergie, un microscope puissant



Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# La collaboration ATLAS



Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# Simulation animée d'une collision

Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

## Toujours plus de collisions ...

### Recherche de phénomènes rares :

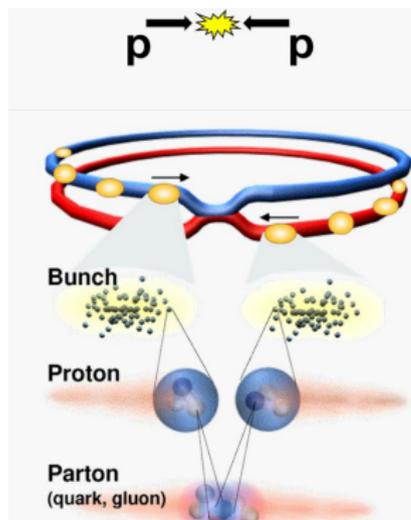
- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# Toujours plus de collisions ...

## Recherche de phénomènes rares :

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



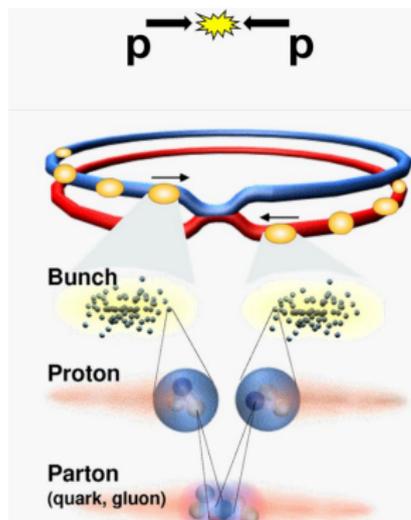
Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# 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

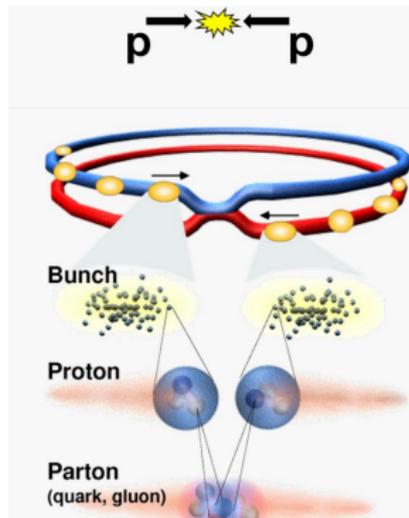
Les collisions de haute énergie, un microscope puissant

# 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 ...

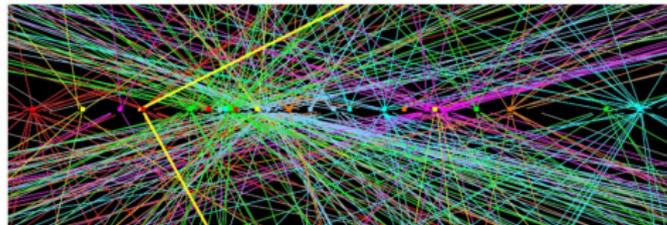


Fréquence de croisement de paquets : **20 - 40 MHz**

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

Selection rapide des collisions intéressantes basée  
sur une reconstruction simplifiée

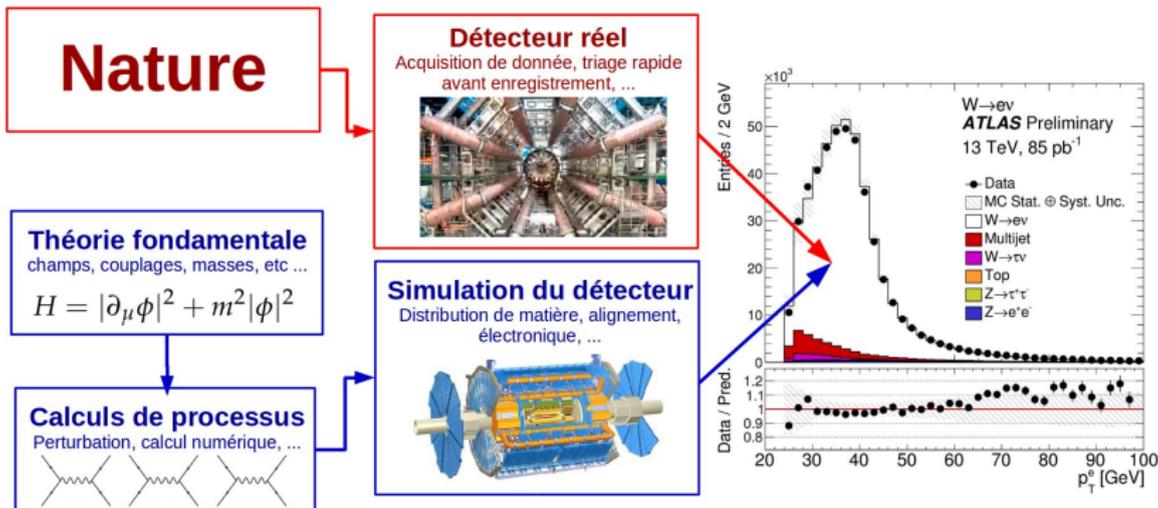
**20 a 50 interactions p-p** par croisement de paquets



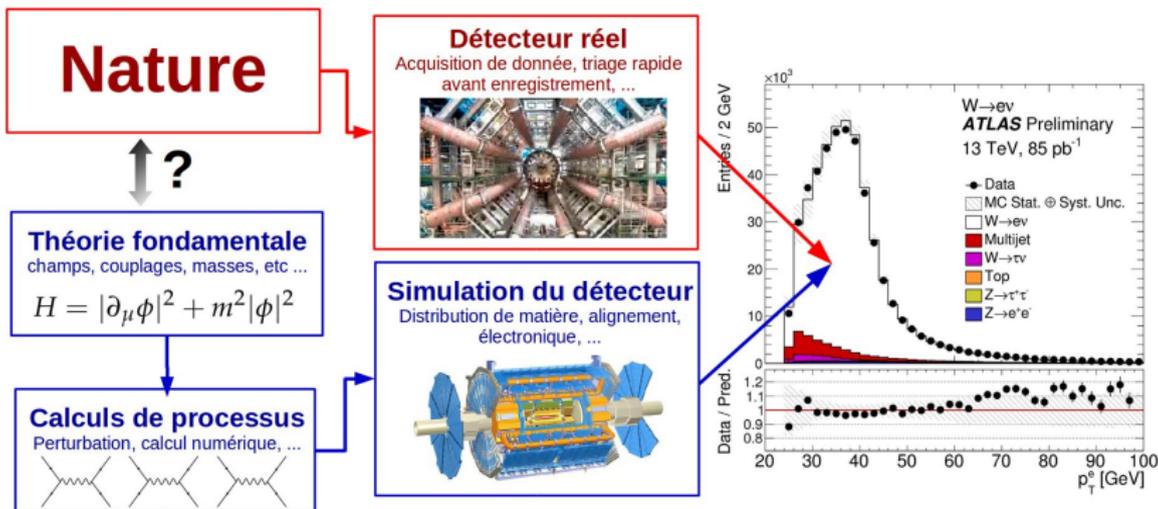
# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

# Stratégie générale



# 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

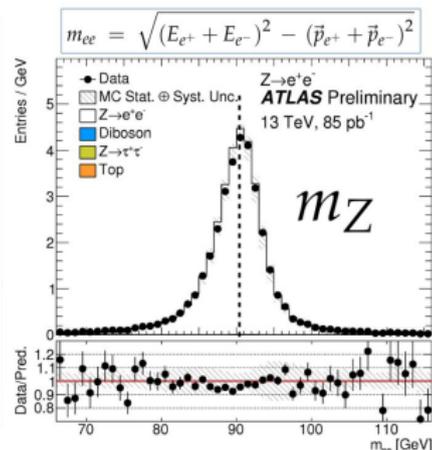
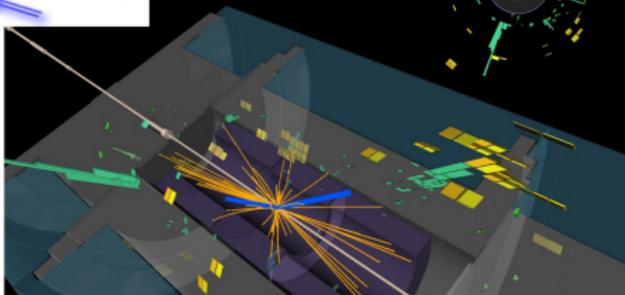
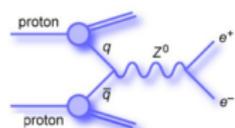
Faire le lien entre le **mécanisme de production** (*microscopique*) et l'**aspect de la collision** (*macroscopique*)

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



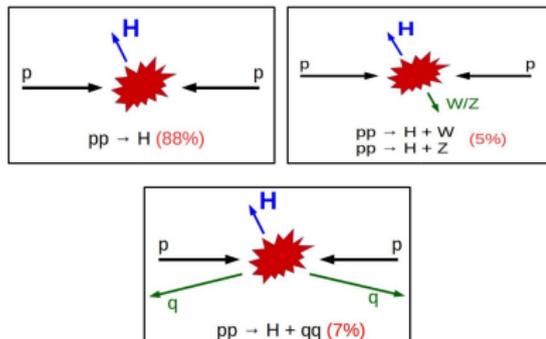
# Plan du séminaire

- 1 Le monde des particules avant le boson BEH**
  - La matière, un jeu de construction
  - Les interactions entre briques élémentaires
  - *Apparte*: champ et/ou particule (?)
- 2 Le boson BEH: pour quoi faire?**
  - L'invariance de jauge: un truc *presque* parfait
  - Le mécanisme BEH: un pas vers la perfection
  - L'unification des forces
- 3 Comment voit-on le boson BEH?**
  - Les collisions de haute énergie, un microscope puissant
  - De la théorie aux observables
  - Recherche du boson BEH dans les collisions

# Signature du boson BEH

## Que connaissons-nous du boson BEH ?

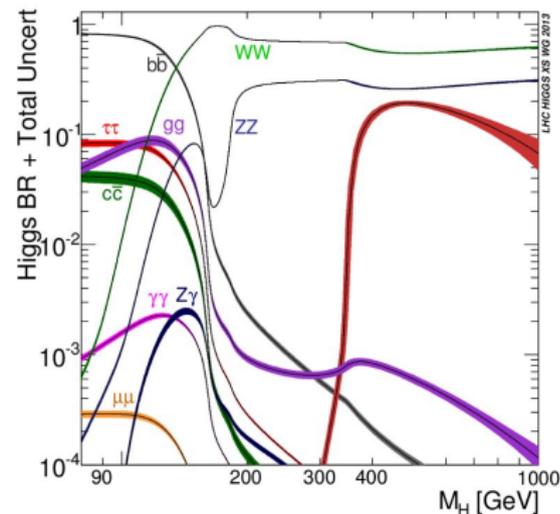
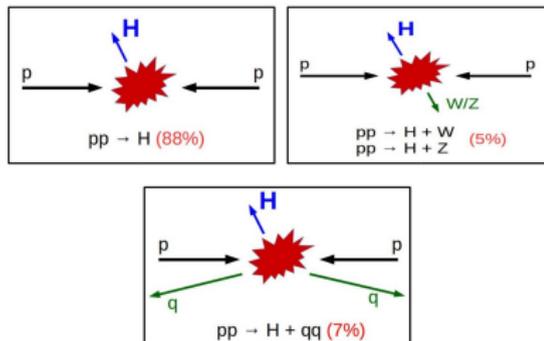
- **prédit par la théorie** : couplages aux médiateurs  
 ⇒ production et désintégration connues ! **Crucial pour sa recherche**



# Signature du boson BEH

## Que connaissons-nous du boson BEH ?

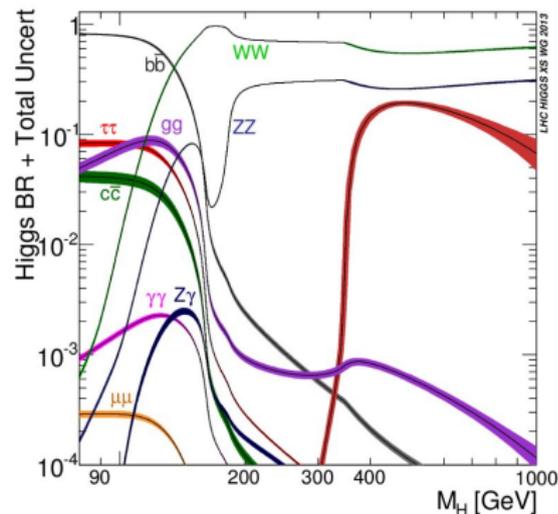
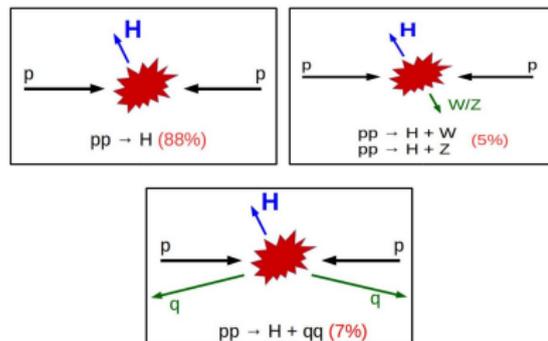
- **prédit par la théorie** : couplages aux médiateurs  
 ⇒ production et désintégration connues ! **Crucial pour sa recherche**



# 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  $ZZ^{(*)}$

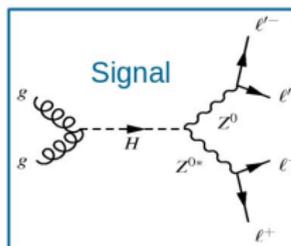
( $\ell \equiv e$  ou  $\mu$  ; "4 $\ell$ " inclut toutes les combinaisons possibles)

# Les canaux en or

**Découverte grâce à :**

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

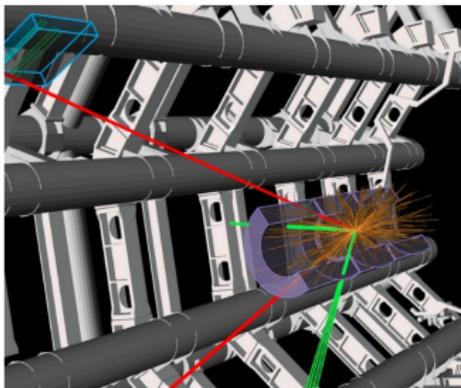
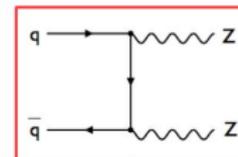
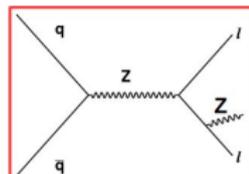
$$H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$$



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

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

Bruit de fond = même signature



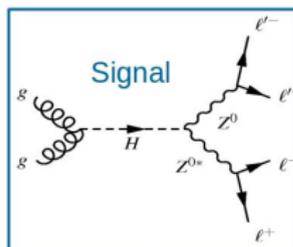
Recherche du boson BEH dans les collisions

# Les canaux en or

Découverte grâce à :

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

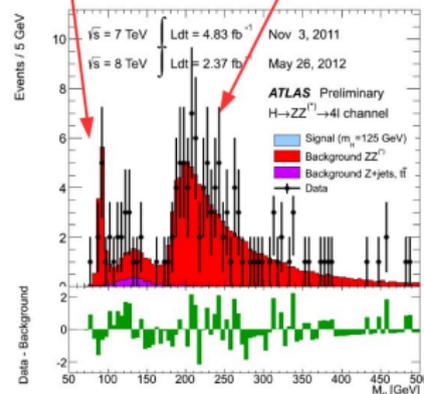
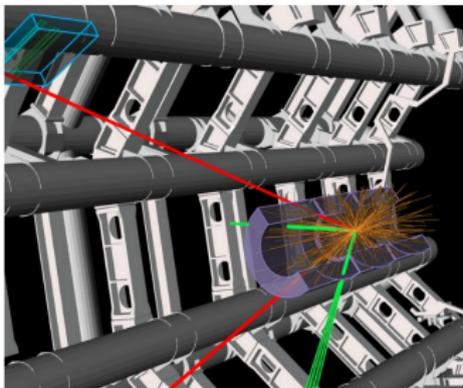
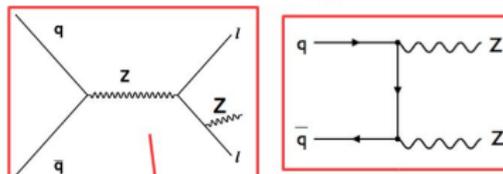
$$H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$$



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

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

Bruit de fond = même signature

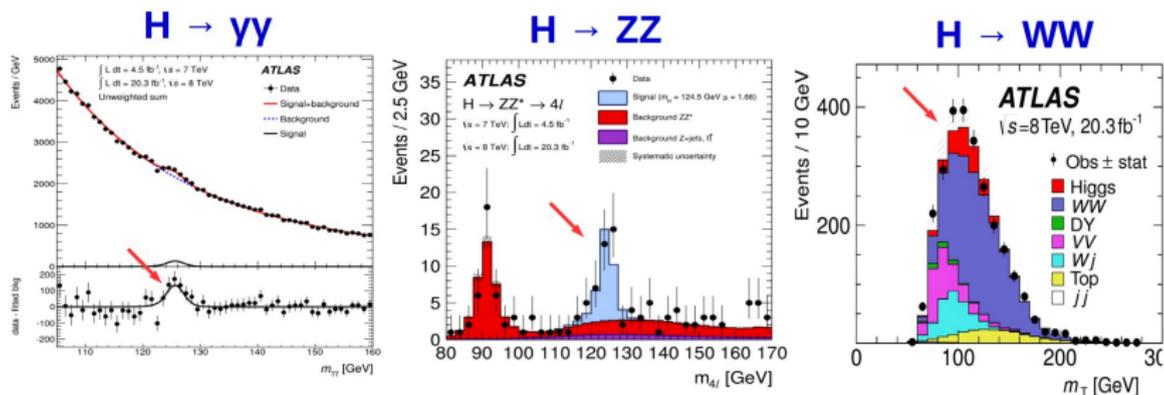


Recherche du boson BEH dans les collisions

# 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  
⇒ structure interne de la théorie

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

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, ~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) :

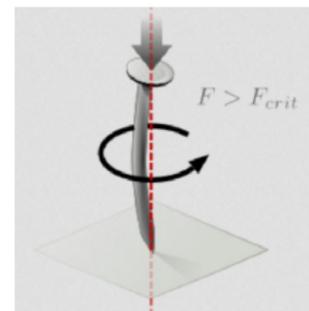
- dernière pièce : le **Modèle Standard** est, pour la **première fois, complet**
- prix **Nobel de physique**

Est-ce la fin de l'histoire ?

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

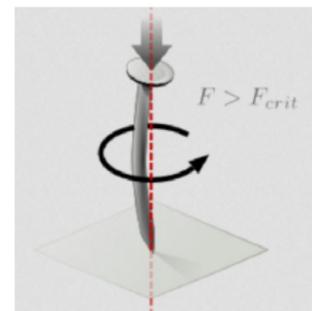
D'où vient la "force" qui induit la transition de phase? Tout ça a été introduit à la main ...



## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la "force" qui induit la transition de phase? Tout ça a été introduit à la main ...



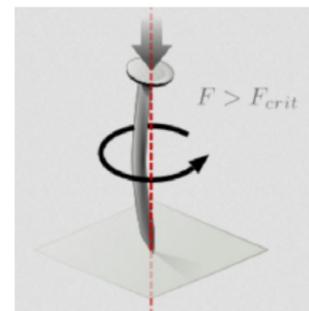
### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- **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 "force" qui induit la transition de phase? Tout ça a été introduit à la main ...



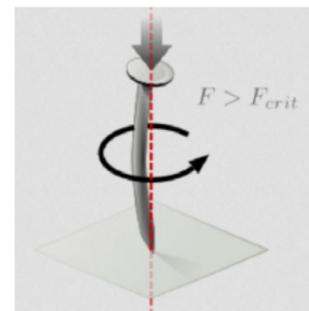
### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- **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 "force" qui induit la transition de phase? Tout ça a été introduit à la main ...



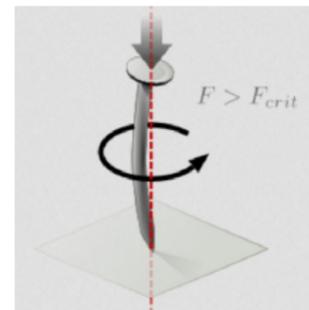
### Quelques observations expérimentales non décrites ...

- **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 "force" qui induit la transition de phase? Tout ça a été introduit à la main ...



### Quelques observations expérimentales non décrites ...

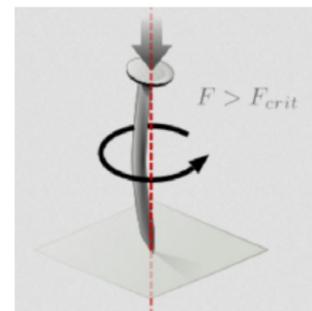
- oscillations des neutrinos : observées mais non prédit par le MS
- matière noire : preuves indirectes, pas de candidat dans le MS
- asymétrie matière-antimatière : insuffisante dans le MS

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

## Que reste-t-il à découvrir ?

### Retour sur le mécanisme de BEH :

D'où vient la "force" qui induit la transition de phase? Tout ça a été introduit 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 ...**

Recherche du boson BEH dans les collisions

# Pour raconter le boson BEH ...

University press conference picture



Newspaper article



UBP tweet during a book exhibition



## Merci pour votre attention !