The background is a complex, abstract composition of vibrant, multi-colored streaks and lines in shades of green, yellow, blue, and purple. A prominent circular structure, resembling a particle detector or a stylized atom, is visible on the right side, with a bright green beam of light passing through it. The overall effect is dynamic and scientific.

# Comment chasse-t-on le boson ?

-

Fête de la Science 2021

Luka SELEM

10/10/2021

Étude de ~~la polarisation~~ des bosons vecteurs  
dans le canal WZ  
avec le détecteur ATLAS au LHC

Étude ~~de la polarisation~~ des bosons vecteurs  
dans le canal WZ  
avec le détecteur ATLAS au LHC

# 4 Éléments ?



# 116 Éléments ?

**TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS**

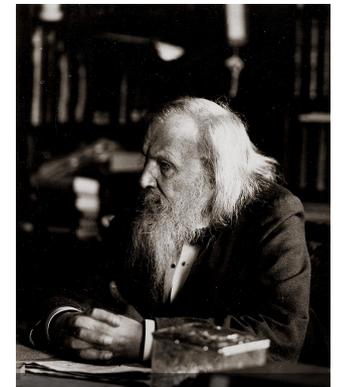
1																	18							
1	H 1.00794 hydrogène																	He 4.002602 hélium						
2	Li 6.941 lithium	Be 9.012182 béryllium																	B 10.811 bore	C 12.0107 carbone	N 14.0067 azote	O 15.9994 oxygène	F 18.998403 fluor	Ne 20.1797 néon
3	Na 22.98976 sodium	Mg 24.3050 magnésium																	Al 26.98153 aluminium	Si 28.0855 silicium	P 30.97696 phosphore	S 32.065 soufre	Cl 35.453 chlore	Ar 39.948 argon
4	K 39.0983 potassium	Ca 40.078 calcium	Sc 44.95591 scandium	Ti 47.867 titane	V 50.9415 vanadium	Cr 51.9962 chrome	Mn 54.93804 manganèse	Fe 55.845 fer	Co 58.93319 cobalt	Ni 58.6934 nickel	Cu 63.546 cuivre	Zn 65.38 zinc	Ga 69.723 galium	Ge 72.64 germanium	As 74.92160 arsenic	Se 78.96 sélénium	Br 79.904 brome	Kr 83.798 krypton						
5	Rb 85.4678 rubidium	Sr 87.62 strontium	Y 88.90585 yttrium	Zr 91.224 zirconium	Nb 92.90638 niobium	Mo 95.96 molybdène	Tc 98 technétium	Ru 101.07 ruthénium	Rh 102.9055 rhodium	Pd 106.42 palladium	Ag 107.8682 argent	Cd 112.411 cadmium	In 114.818 indium	Sn 118.710 étain	Sb 121.760 antimoine	Te 127.60 tellure	I 126.9044 iode	Xe 131.293 xénon						
6	Cs 132.9054 césium	Ba 137.327 barium	lanthanides 57-71	Hf 178.49 hafnium	Ta 180.9478 tantale	W 183.84 tungstène	Re 186.207 rénium	Os 190.23 osmium	Ir 192.217 iridium	Pt 195.084 platine	Au 196.9665 or	Hg 200.59 mercure	Tl 204.3833 thallium	Pb 207.2 plomb	Bi 208.9804 bismuth	Po 210 polonium	At 210 astate	Rn 220 radon						
7	Fr 223 francium	Ra 226 radium	actinides 89-103	Rf 261 rutherfordium	Db 262 dubnium	Sg 266 seaborgium	Bh 264 bohrium	Hs 277 hassium	Mt 268 meitnérium	Ds 271 darmstadtium	Rg 272 roentgenium	Cn 285 copernicium	Uut 284 ununtrium	Fl 289 flérovium	Uup 288 ununpentium	Lv 292 livermorium	Uus 292 ununseptium	Uuo 294 ununoctium						
				La 138.9054 lanthane	Ce 140.116 cérium	Pr 140.9076 praseodyme	Nd 144.242 néodyme	Pm 145 prométhium	Sm 150.36 samarium	Eu 151.964 europium	Gd 157.25 gadolinium	Tb 158.9253 terbium	Dy 162.500 dysprosium	Ho 164.9303 holmium	Er 167.259 erbium	Tm 168.9342 thulium	Yb 173.054 ytterbium	Lu 174.9668 lutécium						
				Ac 227 actinium	Th 232.0380 thorium	Pa 231.0358 protactinium	U 238.0289 uranium	Np 237 néptunium	Pu 244 plutonium	Am 243 américium	Cm 247 curium	Bk 247 berkelium	Cf 251 californium	Es 252 einsteinium	Fm 257 fermium	Md 258 mendelevium	No 259 nobélium	Lr 262 lawrencium						

métaux alcalins  
 alcalino-terreux  
 métaux pauvres  
 métaux de transition  
 métalloïdes  
 non-métaux  
 halogènes  
 gaz rares

Sources : IUPAC, Wikimedia Commons

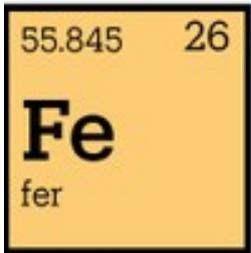


*Les Lavoisier*



*Dimitri Mendeleïev*

# L'atome

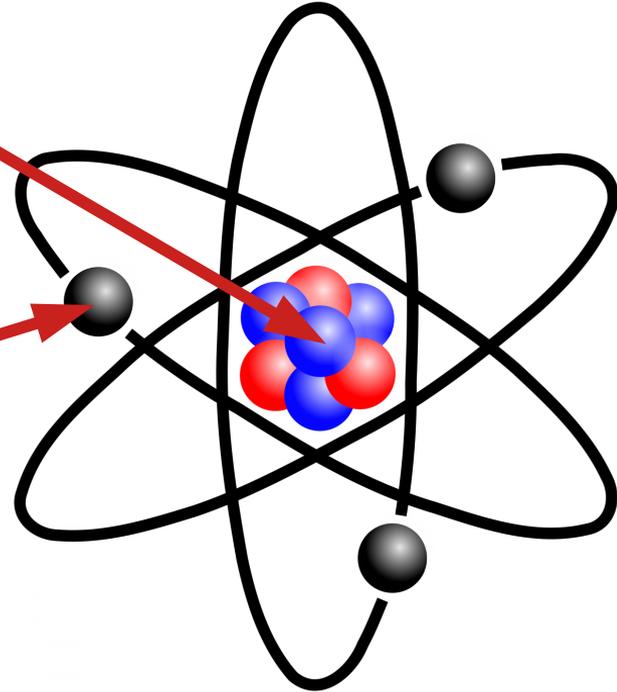


**Noyau**

→ **Protons**

→ **Neutrons**

**Électrons**



# Des quarks et des leptons

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	 up
charge →	$2/3$	
spin →	$1/2$	
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	 down
	$-1/3$	
	$1/2$	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	 électron
	$-1$	
	$1/2$	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	 neutrino électronique
	$0$	
	$1/2$	

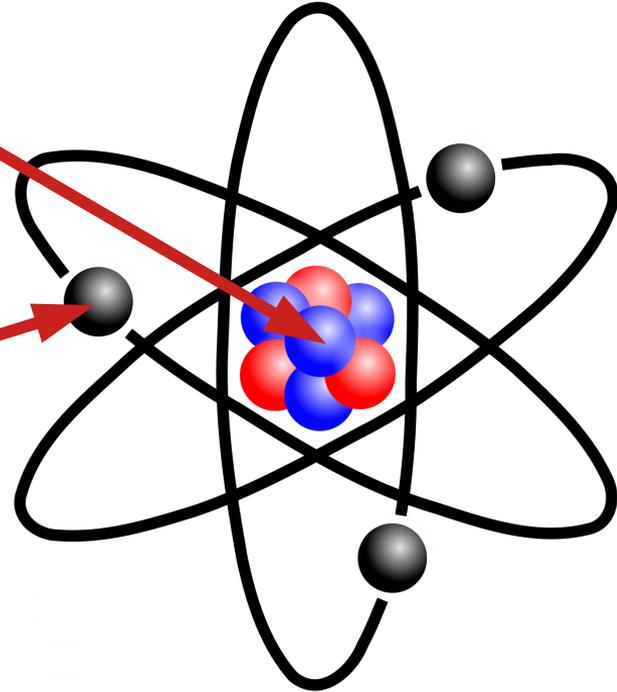
**Noyau**

→ **Protons** =  $u u d$

→ **Neutrons** =  $u d d$

**Électrons**

**Neutrino :**  
Particule  
« fantomatique »



# Et pour quelques MeV de plus...

	masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
<b>QUARKS</b>	<b>1<sup>re</sup> génération</b>	<b>2<sup>e</sup> génération</b>	<b>3<sup>e</sup> génération</b>
	$511 \text{ MeV}/c^2$	$105.66 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	$-1$	$-1$	$-1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>e</b> électron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	$0$	$0$	$0$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino électronique	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonique	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauique
<b>LEPTONS</b>			

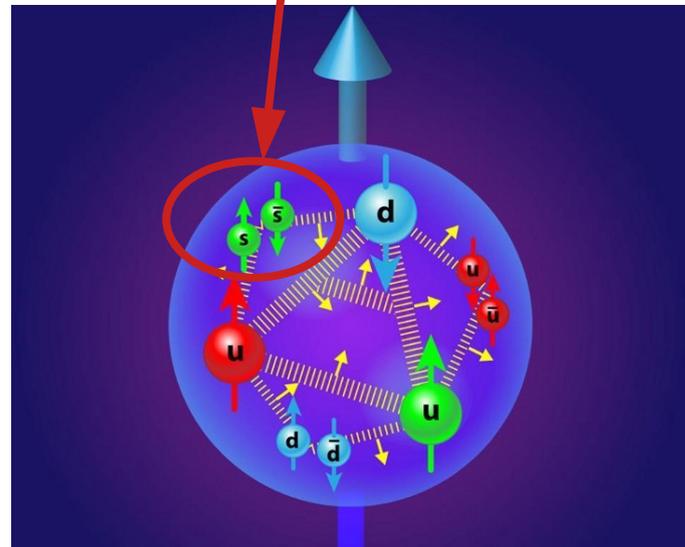
**4 x 3 générations x 2 (particules + anti-particules)**

↑  
*Plus lourd:  
Instables*

↑  
*Particule aux **nombres**  
**quantiques opposés**  
exemple: charge **+1** → **-1***

Exemple : le proton

→ **UUD** + paires **quarks-antiquark** ("mer de quarks")



# Fermions et Bosons

**FERMIONS**

*~ Matière*

QUARKS

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	$-1$	$-1$	$-1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	$0$	$0$	$0$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$

LEPTONS

	<b>g</b> gluon
	<b>γ</b> photon
	<b>Z<sup>0</sup></b> boson Z <sup>0</sup>
	<b>W<sup>±</sup></b> boson W <sup>±</sup>

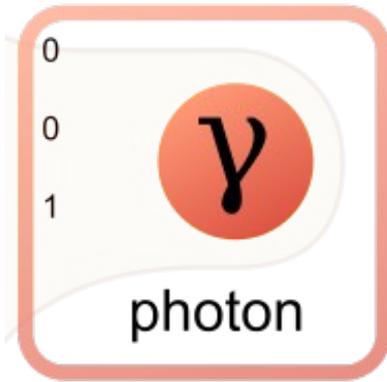
BOSONS DE JAUGE

**BOSONS**

*~ Interactions*

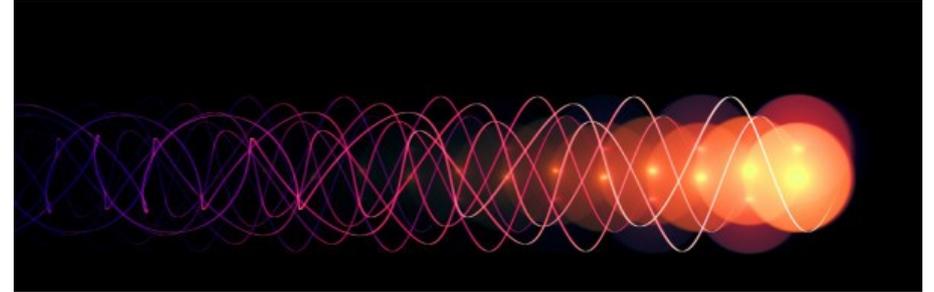
# Le photon

**Interaction électromagnétique:**  
lumière, charges électriques, chimie,...

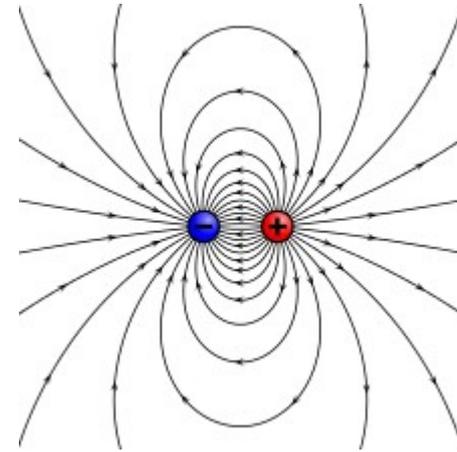


- Agit sur les fermions **chargés** (= hors neutrinos)
- Sans masse → **stables**, certains voyages dans l'univers depuis 13 milliards d'années

« Grain de lumière » ...



mais aussi ... **Champ Électrique**



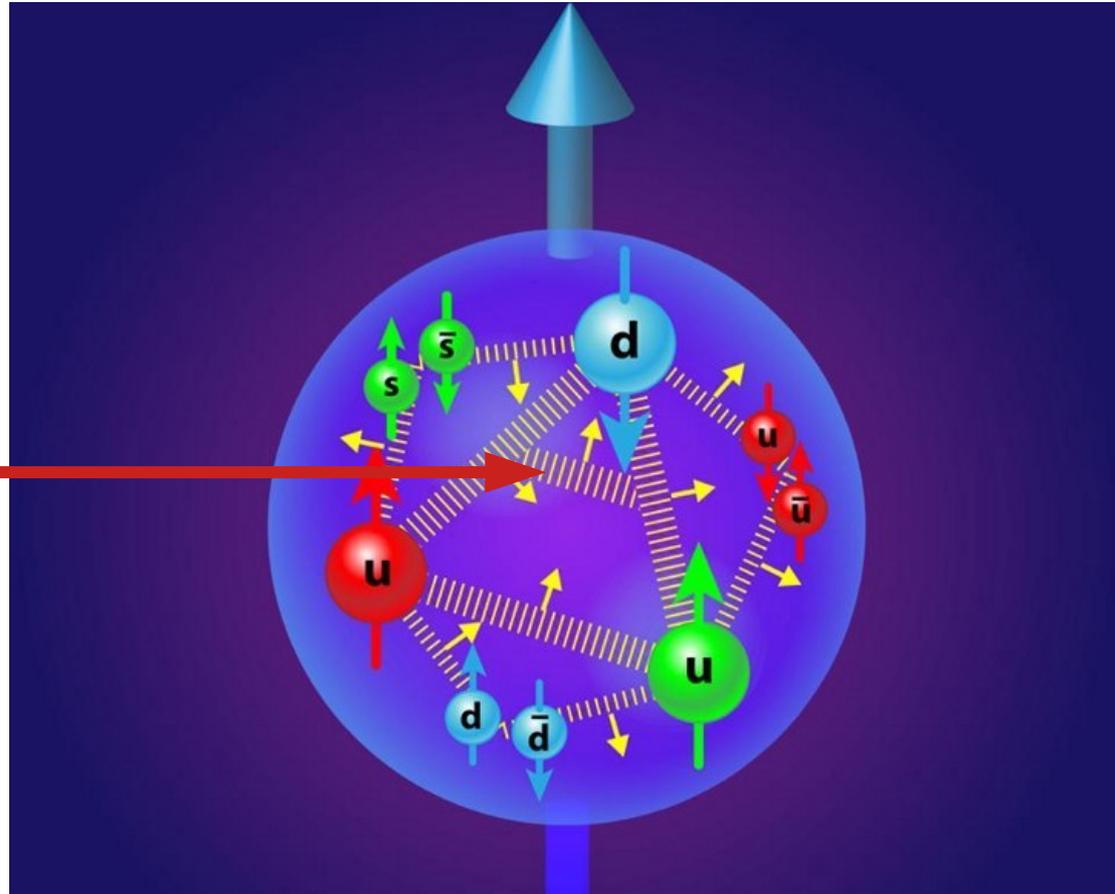
**Dualité onde-particule**

# Le gluon

**Interaction forte :**  
*cohésion des noyaux atomiques*

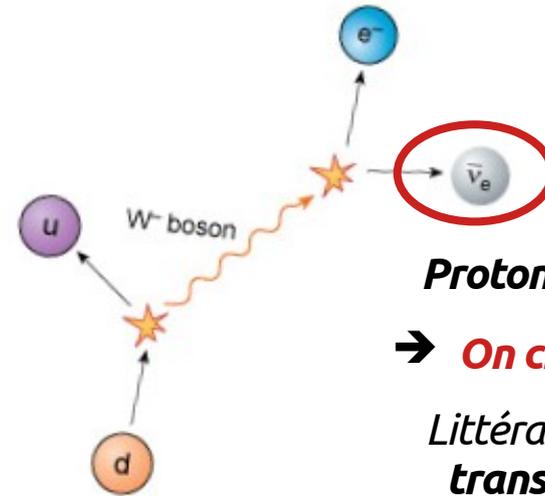


- Agit uniquement sur les **quarks**
- Sans masse
- Responsable du **confinement** des quarks :  
**un quark seul ne peut pas exister**



# La pierre philosophale

**Interaction faible :**  
radioactivité, fusion au cœur des étoiles,...



**Proton  $\leftrightarrow$  Neutron**

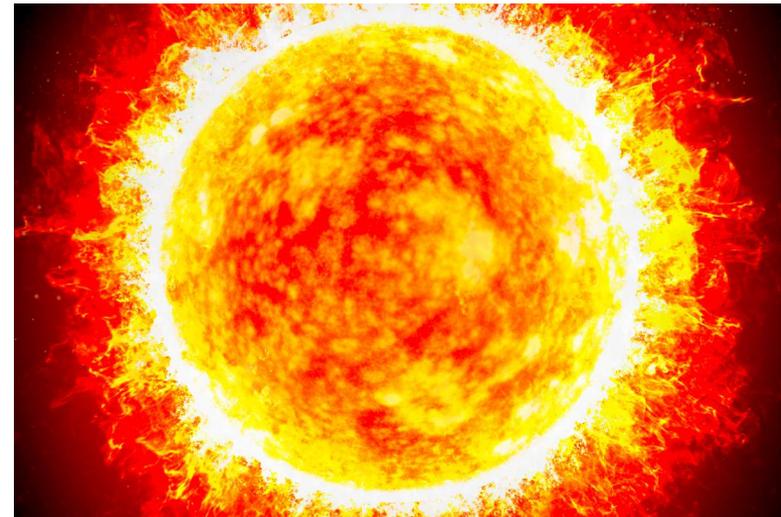
**$\rightarrow$  On change d'élément**

**Littéralement de la  
transmutation !**

80.4 GeV/c<sup>2</sup>  
 $\pm 1$   
1  
**W<sup>±</sup>**  
boson W<sup>±</sup>

91.2 GeV/c<sup>2</sup>  
0  
1  
**Z<sup>0</sup>**  
boson Z<sup>0</sup>

- Agit sur **tous les fermions**
  - $\rightarrow$  Seuls à agir sur les **neutrinos** !
- Massif  $\rightarrow$  **instable**, se désintègre



# La clef de voûte : Le boson de Higgs

Lagrangien du modèle standard = « *Règles du jeu* »

Interactions des bosons entre eux

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Interactions des bosons avec la matière

$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c.$$

Où est la *masse* des particules ??

# La clef de voûte : Le boson de Higgs

Lagrangien du modèle standard = « *Règles du jeu* »

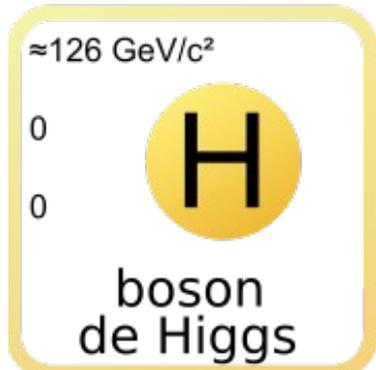
Interactions des bosons entre eux

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Interactions des bosons avec la matière

$$+ i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c.$$

Où est la **masse** des particules ??



**Mécanisme de Higgs**  
Confère leur masse aux particules  
massives

$$+ \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c.$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

# La Modèle Standard

masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> boson de Higgs
<b>QUARKS</b>					
	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z<sup>0</sup></b> boson Z <sup>0</sup>	
<b>LEPTONS</b>					
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	<b>W<sup>±</sup></b> boson W <sup>±</sup>	
					<b>BOSONS DE JAUGE</b>

« Règles du jeu »

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. + \bar{\Psi}_i y_{ij} \Psi_j \phi + h.c. + \frac{1}{2} D_\mu \phi^2 - V(\phi)$$

# La Modèle Standard

masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> boson de Higgs
<b>QUARKS</b>	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z<sup>0</sup></b> boson Z <sup>0</sup>	
<b>LEPTONS</b>	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	<b>W<sup>±</sup></b> boson W <sup>±</sup>	
				<b>BOSONS DE JAUGE</b>	

**Ma Thèse !**

« Règles du jeu »

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. + \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c. + \frac{1}{2} D_\mu \phi^2 - V(\phi)$$

Étude de la polarisation des bosons vecteurs  
dans le canal WZ  
avec le détecteur ATLAS au LHC

# Le Large Hadron Collider

« Hadron » → collisionneur de protons

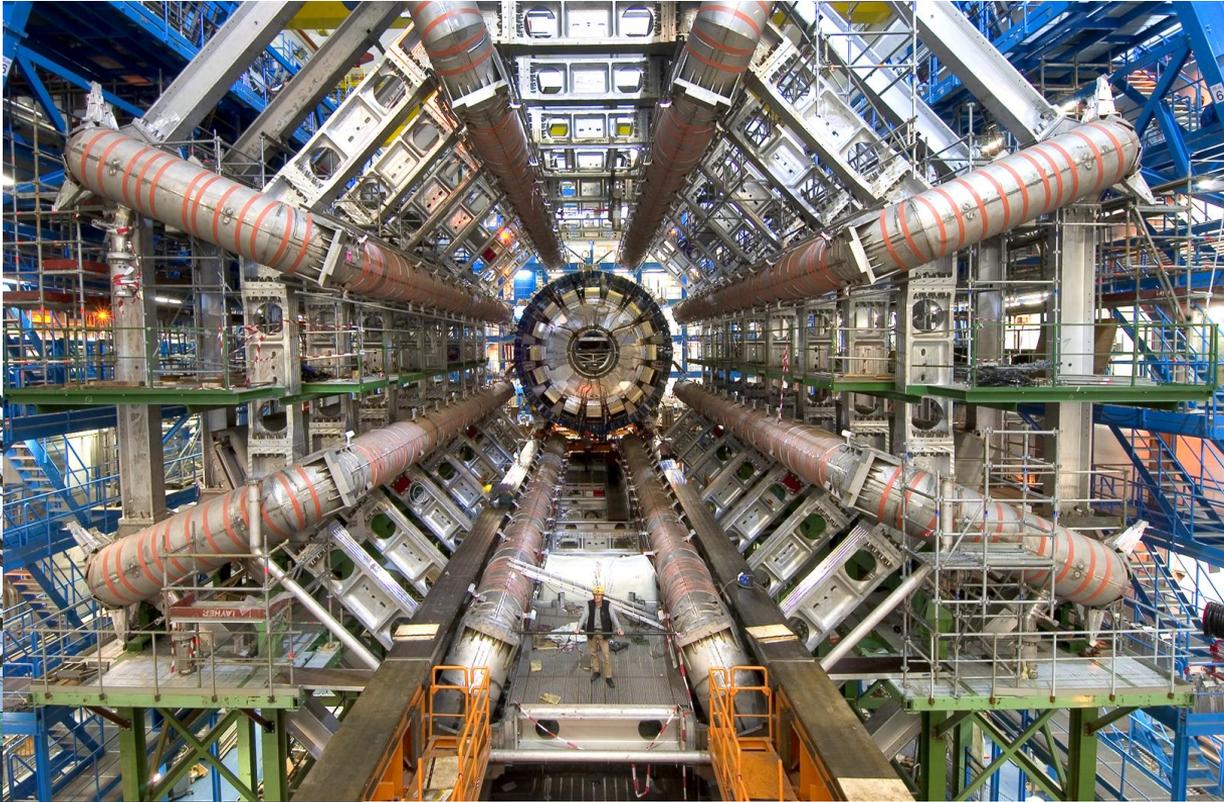
- Anneau de **27 km** de long  
→ des **aimants** pour tourner, des **cavités** pour accélérer
- Chaque proton accéléré à **7 TeV**
  - Un proton : Énergie cinétique d'un **moustique volant**
  - Faisceau total : **6 semi-remorques** à 100 km/h



# Le détecteur ATLAS

## A Toroidal LHC Apparatus

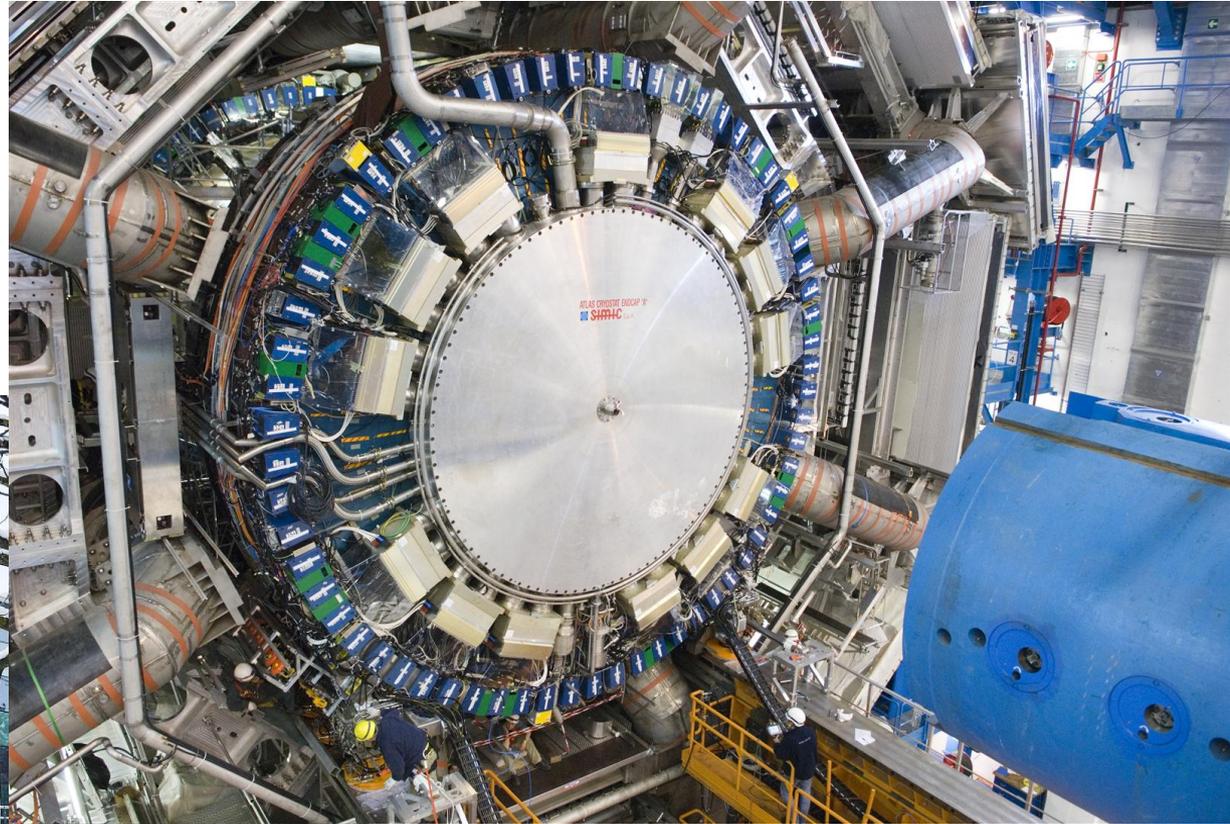
- Sur un point d'interaction du LHC, à 80 m sous terre
- Quelques chiffres :
  - **44m** de long
  - **25m** de haut (7étages)
  - **7000 tonnes**, comme... la tour Eiffel !



# Le détecteur ATLAS

## A Toroidal LHC AparatuS

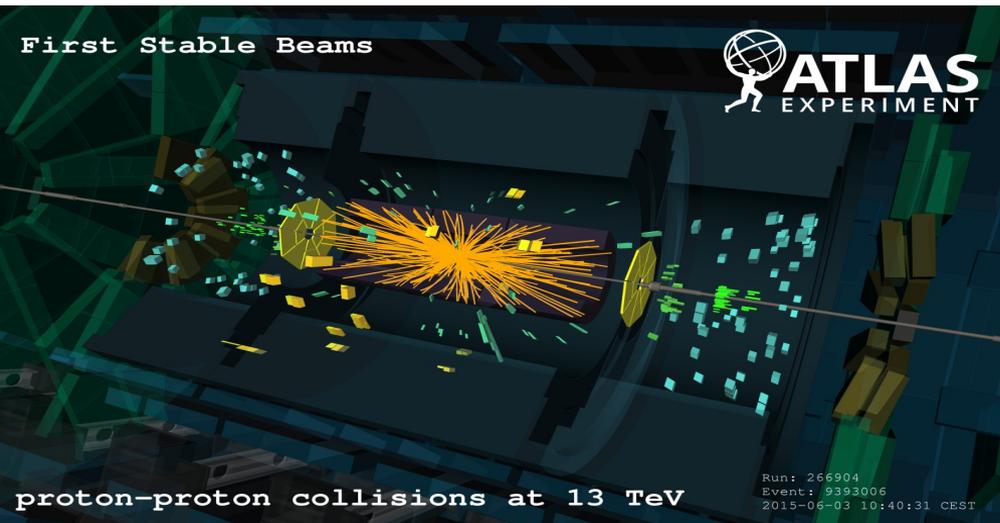
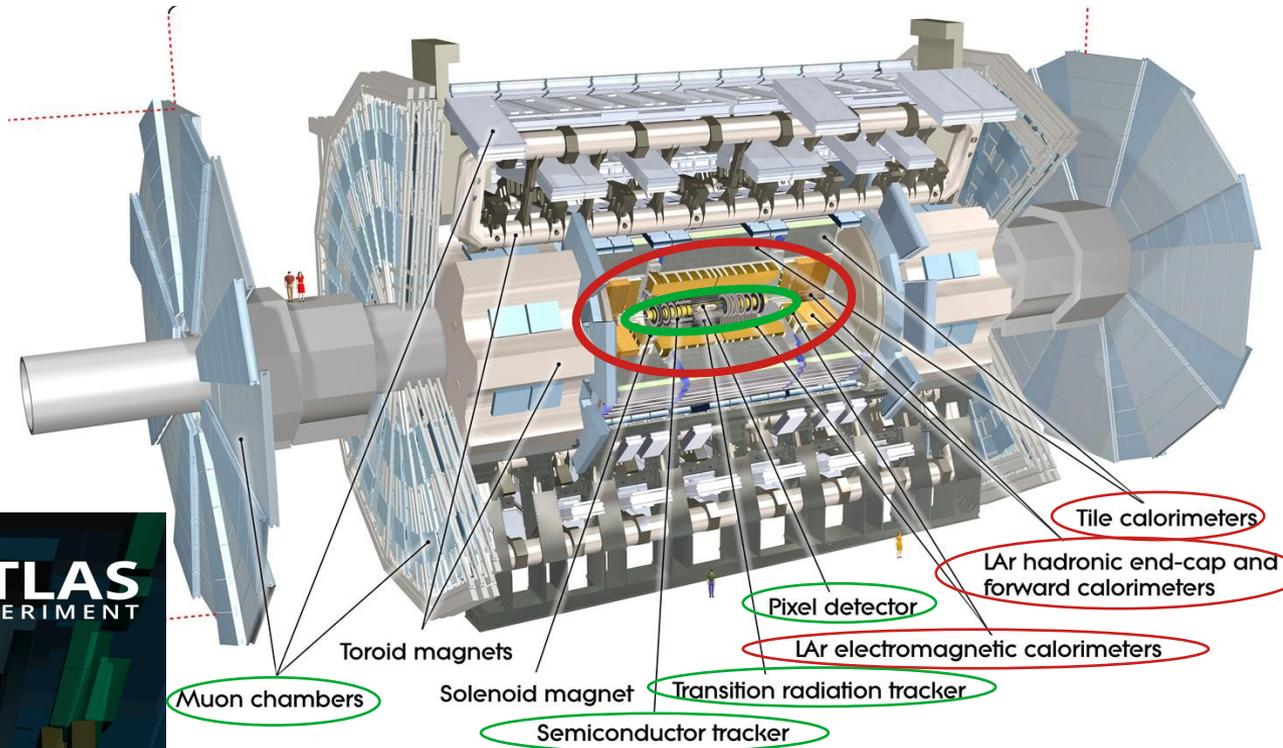
- Sur un point d'interaction du LHC, à 80 m sous terre
- Quelques chiffres :
  - **44m** de long
  - **25m** de haut (7étages)
  - **7000 tonnes**, comme... la tour Eiffel !



# Le détecteur ATLAS

## ATLAS : Détecteur généraliste

- Détecter **le plus d'information** sur les particules produites par les collisions
- Plusieurs sous-détecteurs :
  - **Trajectographes** : trajectoire des particules
  - **Calorimètres** : énergie des particules

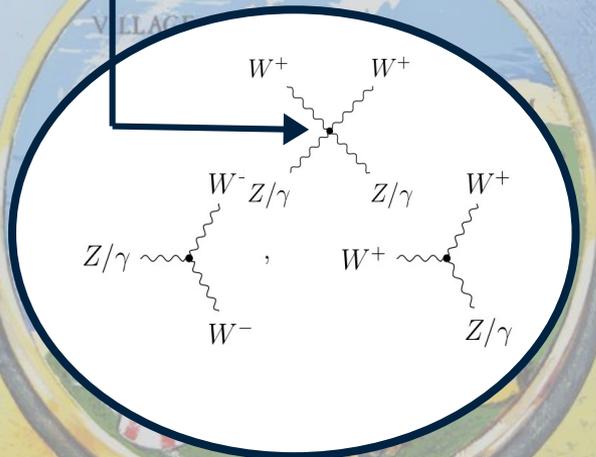


Une collision  
dans le détecteur ATLAS  
→ **1 événement**

Étude de la polarisation des bosons vecteurs  
dans le canal WZ  
avec le détecteur ATLAS au LHC

# Pour quoi faire ?

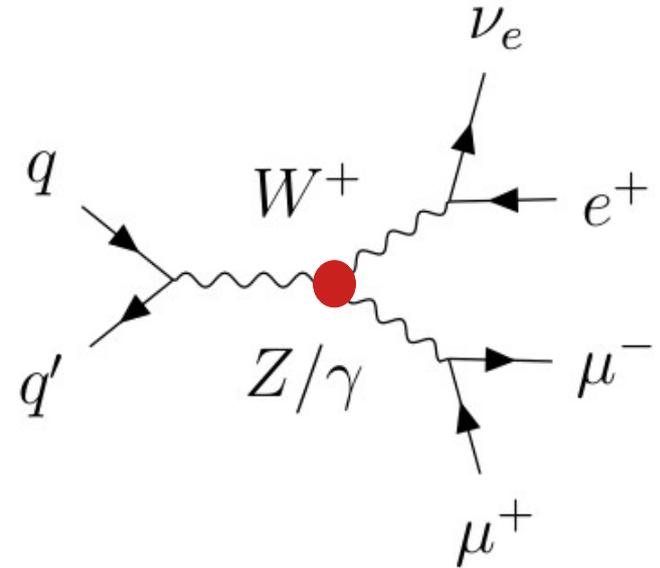
Observé pour la 1<sup>re</sup> fois en 2018 par une équipe du LAPP!



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. + \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c. + |\mathcal{D}_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Les couplages de bosons W et Z **triples** et **quartiques**, un des derniers secteurs du **modèle standard** encore non mesuré

**Canal Diboson**



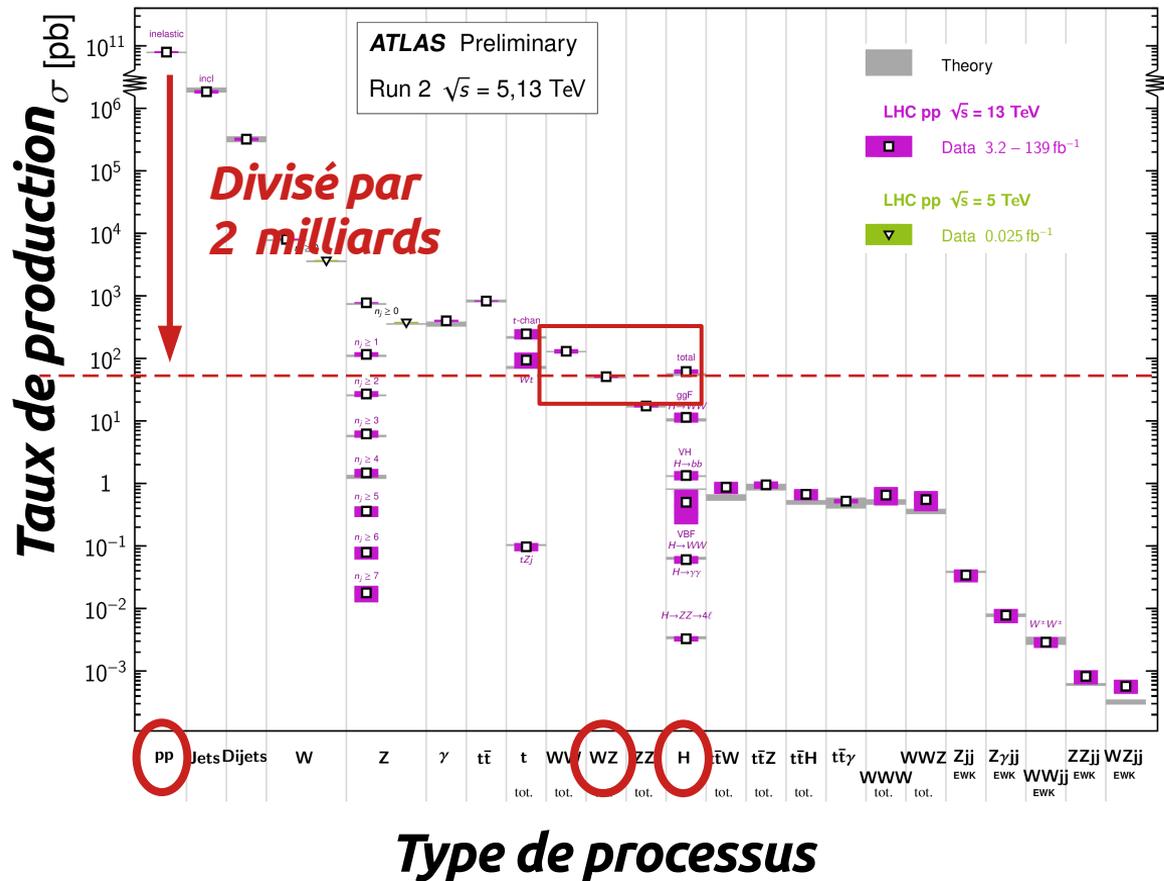
**Canal WZ** → **Test du couplage triple** (+... aspects de polarisation !)

But ici : Comparer le **taux de production** de ce type d'événements aux **prédictions de la théorie**

# Et pourquoi seulement maintenant ?

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: May 2020



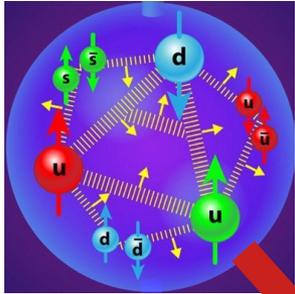
## Section efficace $\sigma$ :

- **Taux de production** d'un processus particulier
- Pour **certaines conditions** de prise de données  
 → **Nombre d'événements** attendus!

Processus	Nombre d'événements
WZ Total	7 000 000
Higgs Total	8 500 000
Proton-Proton	13 000 000 000 000

*Événements attendus avec les données 2015-2018 hors efficacité de détection du détecteur*

# Le canal WZ leptonique



$$p p \rightarrow l \bar{l} l' \nu_{l'} + X$$

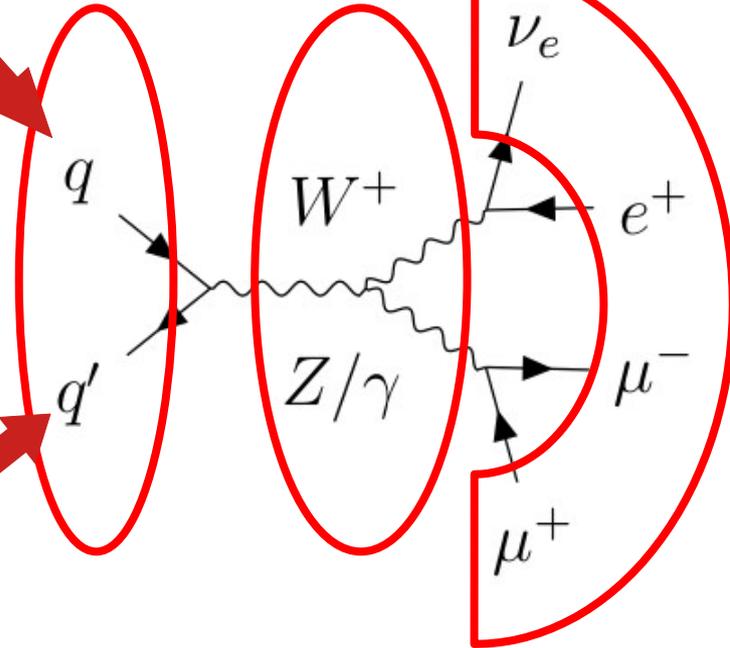
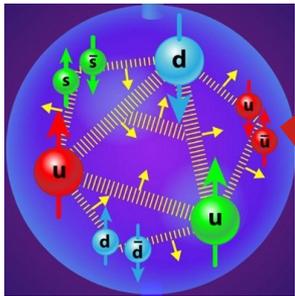
$l = \text{électron}$   
 $\text{ou muon}$

Quark  
anti-quark

Bosons  
W et Z

Désintégration  
des bosons

**Collision  
de protons**



$\sim 7\,000\,000$   
WZ produits

**Choix du canal  
d'observation**

20 %  $\rightarrow$  W en électron ou muon  
6 %  $\rightarrow$  Z en électrons ou muons

$\sim 84\,000$   
WZ dans le canal choisi

# On en perd en route...

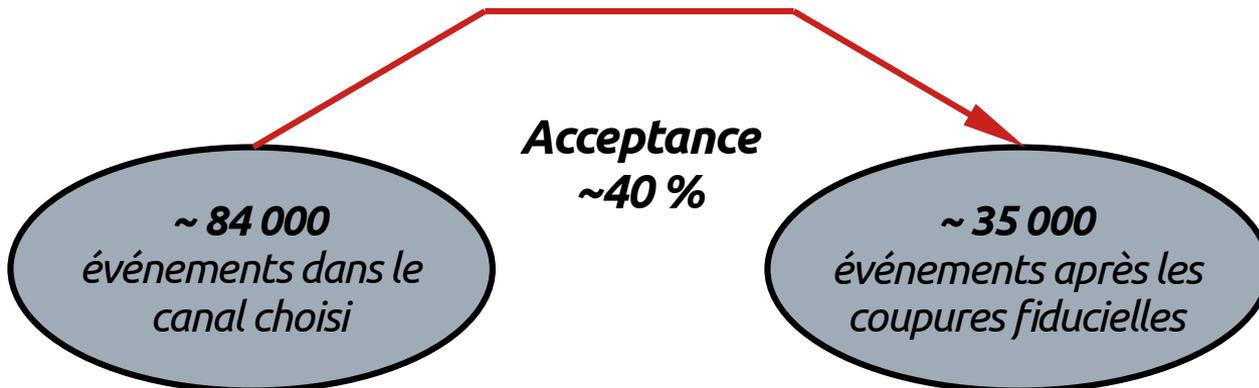
## Espace fiduciel

Dans certaines zones du détecteur :

- Moins efficace (voire pas de détecteur du tout)
- Plus de bruit de fond

Choix d'une **zone géométrique** du détecteur où faire la mesure :

→ **l'espace fiduciel**



# On en perd en route...

## Espace fiduciel

Dans certaines zones du détecteur :

- Moins efficace (voire pas de détecteur du tout)
- Plus de bruit de fond

Choix d'une **zone géométrique** du détecteur où faire la mesure :

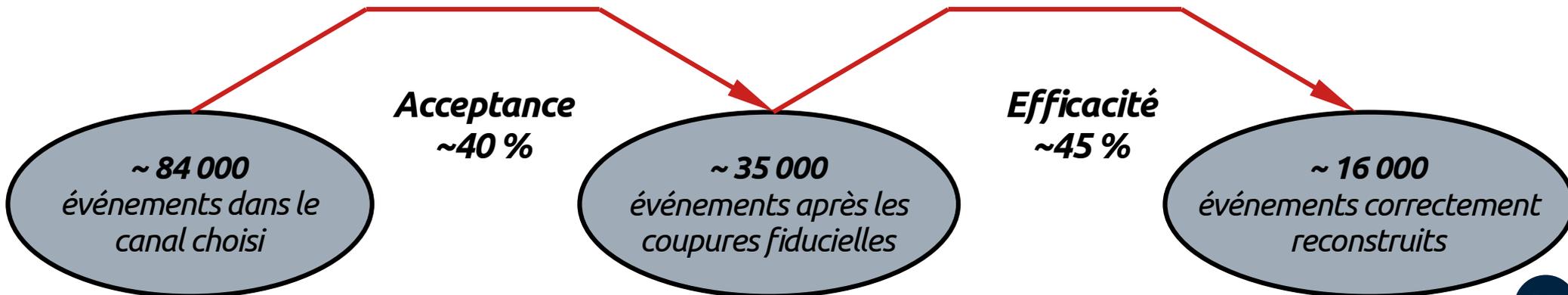
→ **l'espace fiduciel**

## Niveau reconstruit

Le **détecteur** ne parvient pas à reconstruire tout correctement

– Exemple : électron avec une trop faible énergie, noyé par le bruit électronique

→ **Efficacité du détecteur**



# Que dit la théorie ?

Échantillons « Monte Carlo » = Prédictions théoriques

**Générateur théorique**

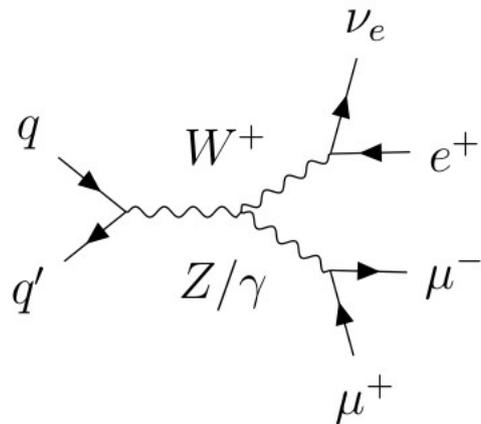
*Calcul* théorique du processus physique et *simule les particules* créées.

**Réponse du détecteur**

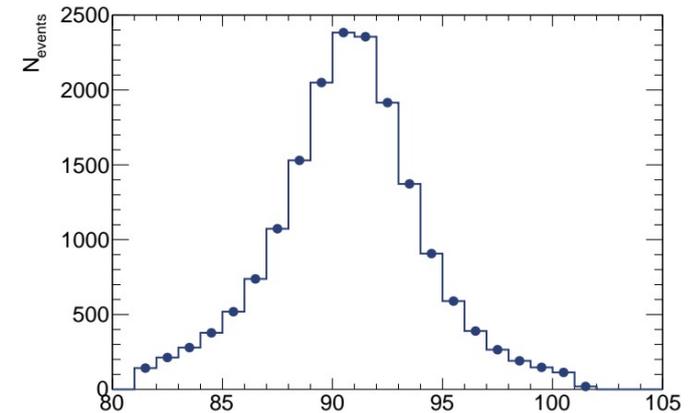
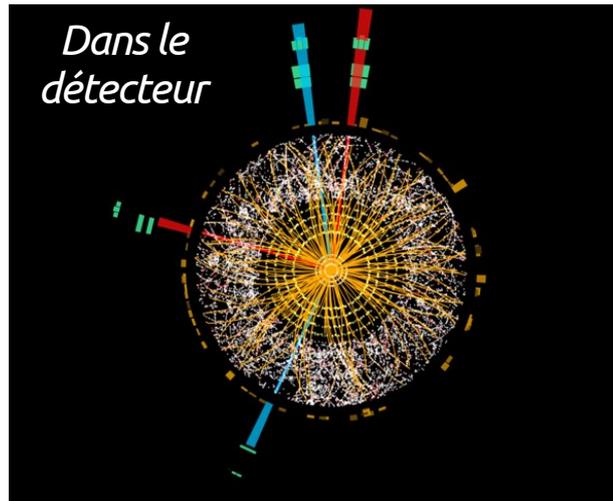
Simule la *détection* par ATLAS. Les particules deviennent *trajectoires* et *dépôts d'énergie*.

**Données du détecteur**

*Un code reconstruit de proche en proche les particules initiales : W et Z*



*Ceci est une équation.*

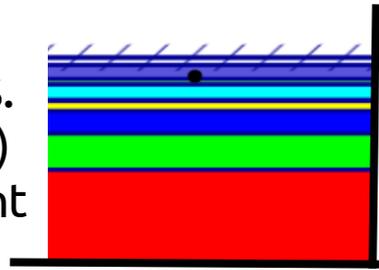


*Masse du boson Z en GeV pour un échantillon Monte Carlo*

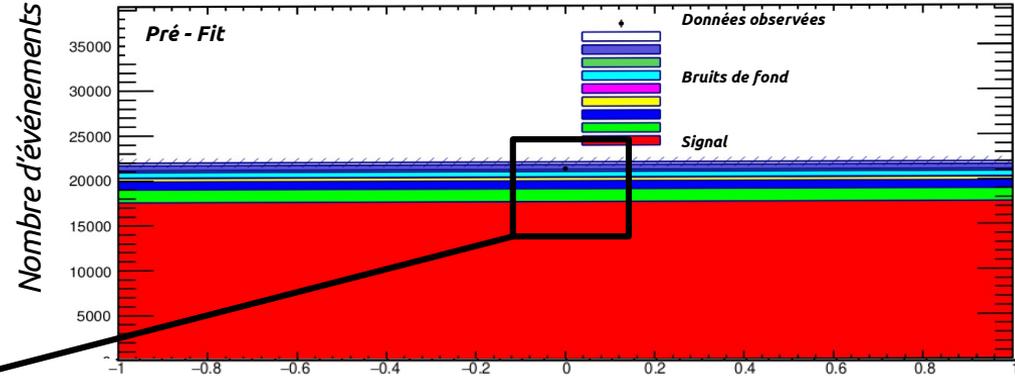
# On mesure !

1. On **empile** les prédictions de nombre d'événements du **signal** et des divers **bruits de fond**.

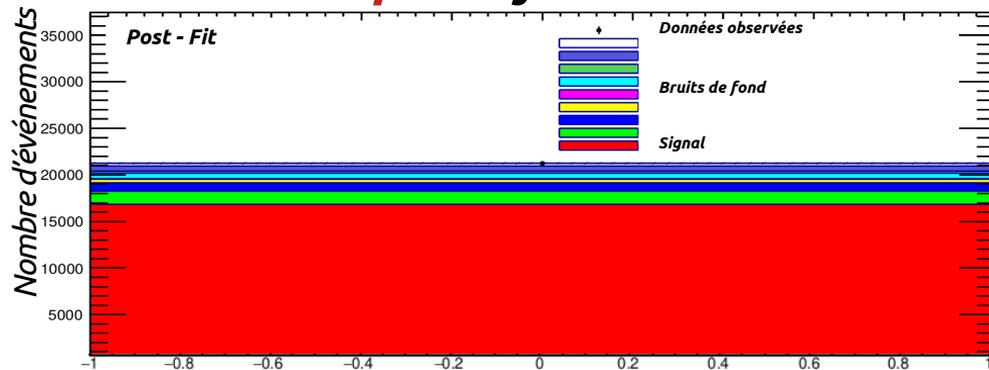
2. On superpose les données.  
→ Les **données** (points noirs) ne collent pas parfaitement aux prédictions



## Avant ajustement



## Après ajustement



3. On **ajuste la proportion totale** du signal pour qu'il colle aux données.

4. Nombre d'événements de signal après l'ajustement

→ Taux de production **mesuré** !

→ À comparer à la prédiction **théorique**,  
**avant l'ajustement**

# Résultat ?

**Résultat préliminaire :** Compatible avec la théorie

→ **Tout se passe comme prévu !**

	<b>N<sub>tot</sub></b>
<b>Attendu (Théorie)</b>	<b>35 583</b>
<b>Observé (Mesure)</b>	<b>34 200 ± 1 500</b>

**Ça se complique...**

# Résultat ?

**Résultat préliminaire :** Compatible avec la théorie

→ **Tout se passe comme prévu !**

	<b>N<sub>tot</sub></b>
<b>Attendu (Théorie)</b>	<b>35 583</b>
<b>Observé (Mesure)</b>	<b>34 200 ± 1 500</b>

**Les incertitudes :** Considérer **TOUT** ce qui peut être incertain dans ce qu'on fait

- Quelles incertitudes sur les paramètres reconstruits par le **détecteur** ?  
Calorimètre mal calibré, trajectoires imprécises, ...
- Décrit-on bien le **bruit de fond** ?
- Est-ce qu'on est bien sûr de la **théorie** ?
- ...

# Résultat ?

Résultat préliminaire : Compatible avec la théorie

→ Tout se passe comme prévu

Les

→

→

→

→ ...

	Relative Uncertainty	Absolute Uncertainty
Electrons	1.31% (+1.38% -1.24 %)	467.51725 (+491.64276 -443.39174)
Jets	0.30% (+0.32% -0.27 %)	106.08168 (+115.14294 -97.02043)
Muons	0.36% (+0.37% -0.34 %)	126.64702 (+133.25573 -120.03830)
Pile-Up	1.42% (+0.93% -1.91 %)	505.62917 (+330.72032 -680.53801)
Red. BG	1.90% (+2.00% -1.80 %)	677.21414 (+711.32592 -643.10237)
Irred. BG	1.10% (+1.10% -1.09 %)	391.03370 (+393.20953 -388.85787)
y* migr.	0.04% (+0.04% -0.04 %)	15.12059 (+15.46267 -14.77851)
PDF	0.08% (+0.09% -0.08 %)	30.09417 (+30.33834 -29.85000)
QCDscale	0.04% (+0.04% -0.04 %)	24.07804 (+24.15145 -24.00463)
Modelling	0.07% (+0.07% -0.07 %)	50.70173 (+50.33865 -51.06481)
TOTAL SYS	0.14% (+0.14% -0.14 %)	1071.21569 (+1023.21972 -1119.21166)
Luminosity	3.01% (+2.87% -3.14 %)	688.07094 (+700.73167 -675.41021)
STAT	1.93% (+1.97% -1.90 %)	296.18478 (+296.85155 -295.51801)
TOTAL	0.83% (+0.83% -0.83 %)	1307.92516 (+1275.42773 -1340.42259)
	3.67% (+3.58% -3.76 %)	

it

# Et en regardant la polarisation ?

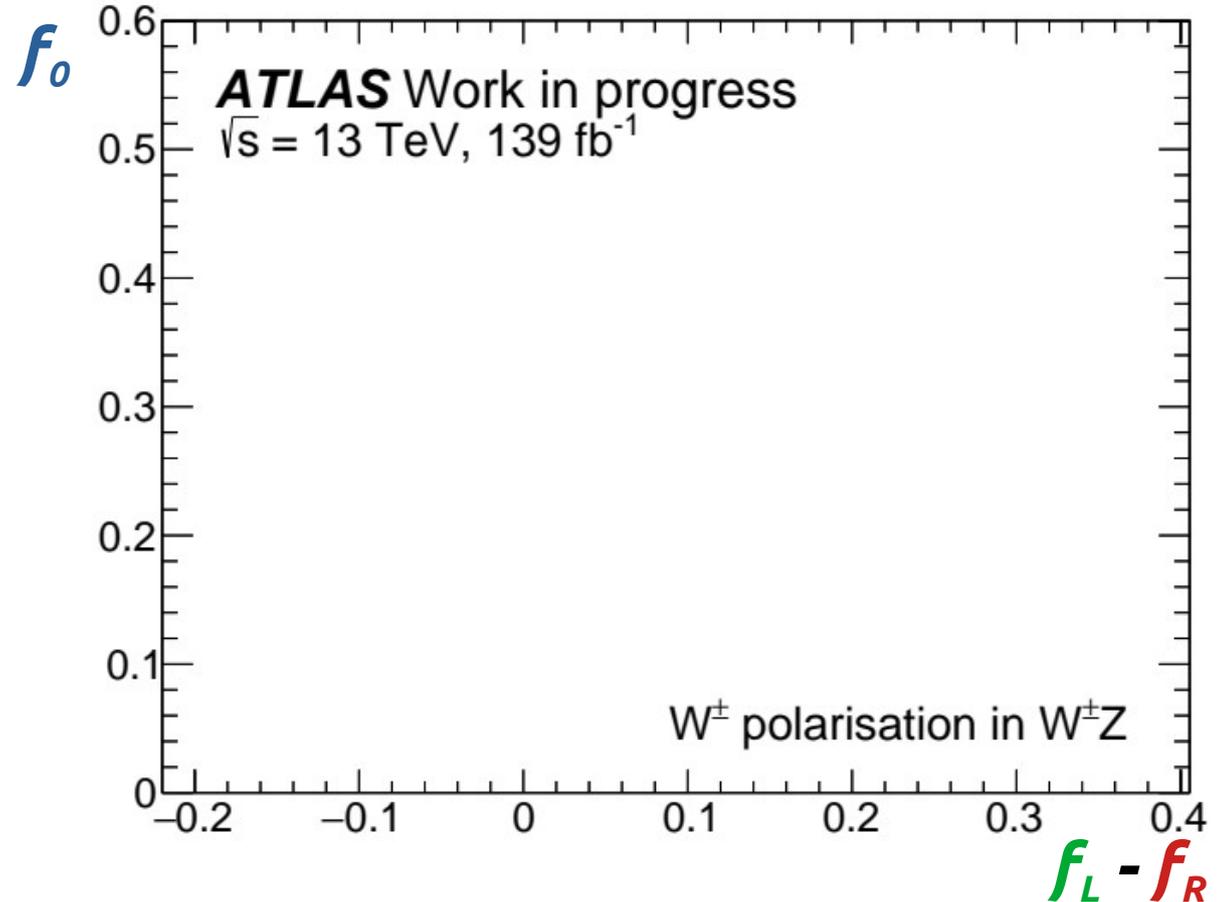
Les **bosons W et Z** possèdent chacun **3** états de **polarisations** :

→ **0**, **L** et **R**

On a compté des événements avec un W et un Z

→ Et si on regarde la **fraction**  $f_0$  de ces événements avec un W polarisé **0** ?

→ Pareil pour  $f_L$  et  $f_R$  ?



# Et en regardant la polarisation ?

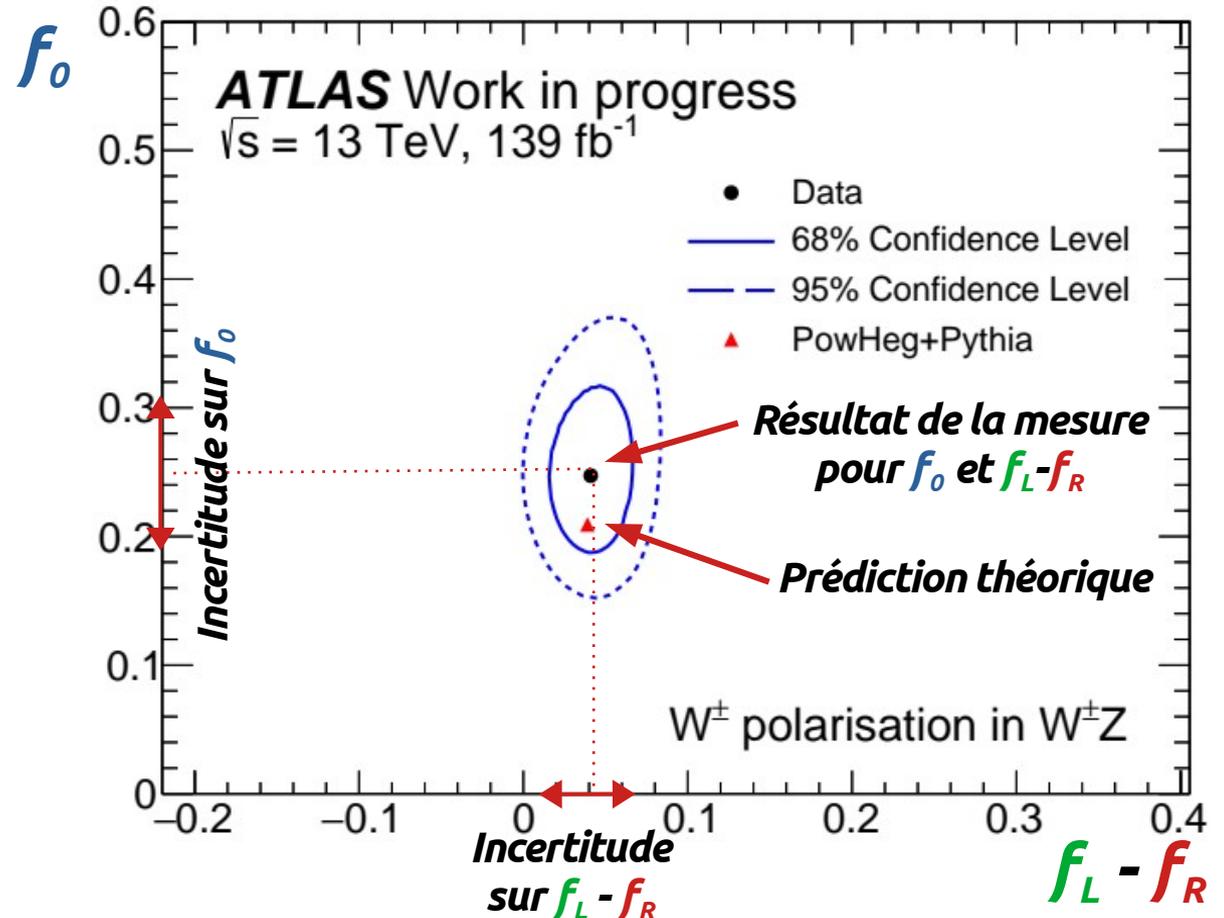
Les **bosons W et Z** possèdent chacun **3 états de polarisations** :

→ **0**, **L** et **R**

On a compté des événements avec un W et un Z

→ Et si on regarde la **fraction  $f_0$**  de ces événements avec un W polarisé **0** ?

→ Pareil pour  **$f_L$**  et  **$f_R$**  ?



Résultat préliminaire sur tout le **Run 2**

The background is a complex, abstract composition of numerous thin, overlapping lines and streaks in various colors, including green, yellow, blue, purple, and red. The lines are mostly oriented vertically and diagonally, creating a sense of motion and depth. The overall effect is that of a dynamic, multi-layered digital or scientific visualization.

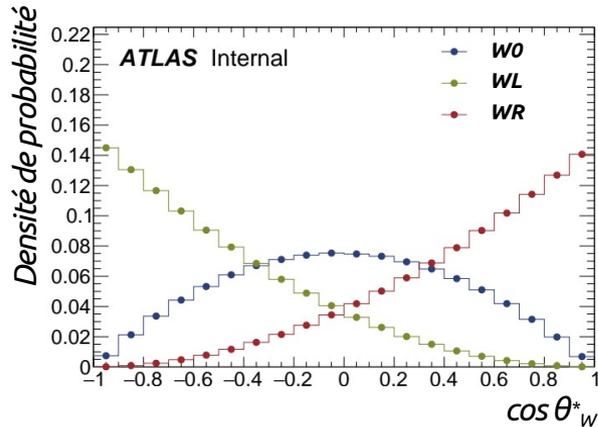
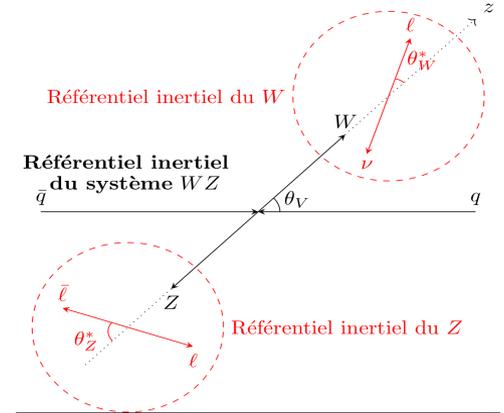
**Les grandes émotions  
se font attendre**

**En attendant, le Modèle Standard  
tient toujours !**

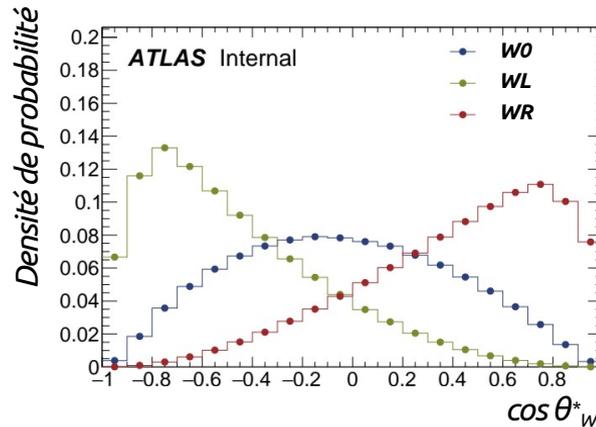
# BONUS

# Modèles polarisés reconstruits

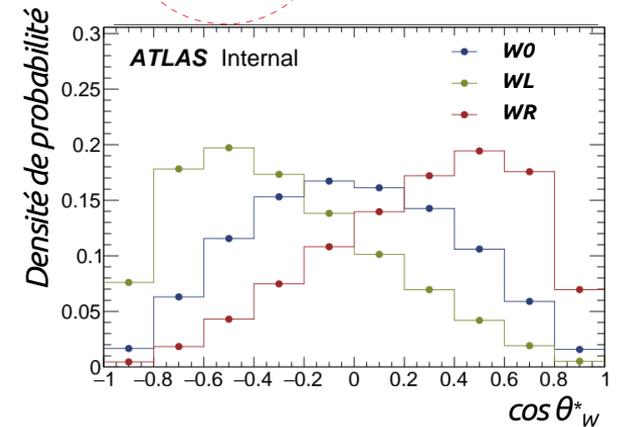
- **Variable discriminante** :  $\cos\theta^*$  défini pour chaque boson
- On **génère** avec la **théorie** la distribution de cette variable discriminante
- On fait évoluer ces distributions au **niveau reconstruit**  
➔ **Modèle de polarisation**



Modèles générés par la théorie



Modèles sans les événements hors espace fiduciel



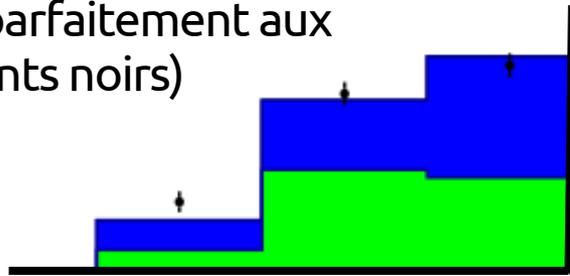
Modèles au niveau reconstruit

La discrimination entre les différentes polarisations est moins bonne

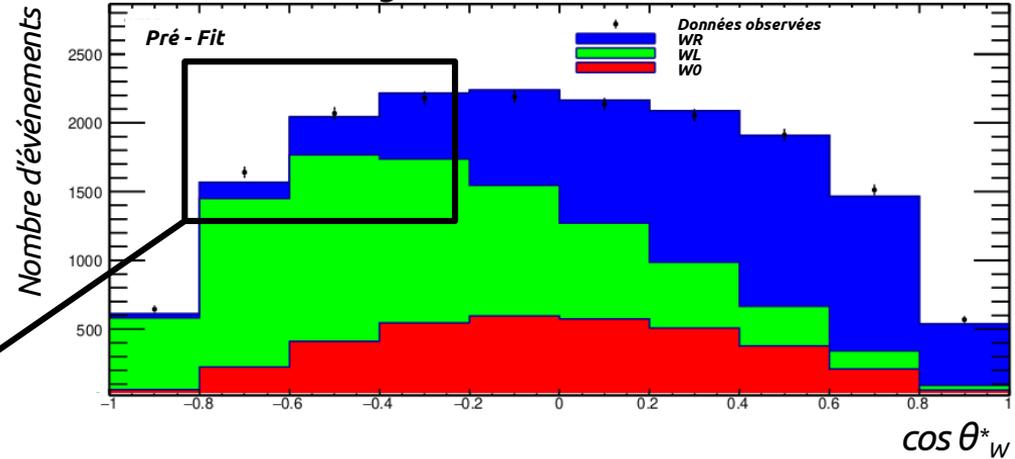
# Mesure par ajustement de modèles

1. On **empile** les modèles  $W_0$ ,  $W_L$  et  $W_R$  au niveau reconstruit les uns sur les autres

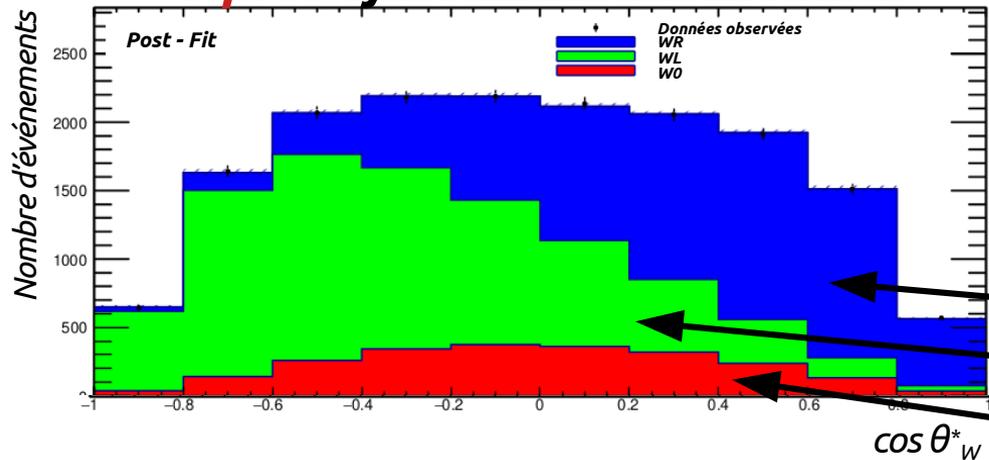
→ Ne colle pas parfaitement aux données (points noirs)



**Avant ajustement des modèles**



**Après ajustement des modèles**

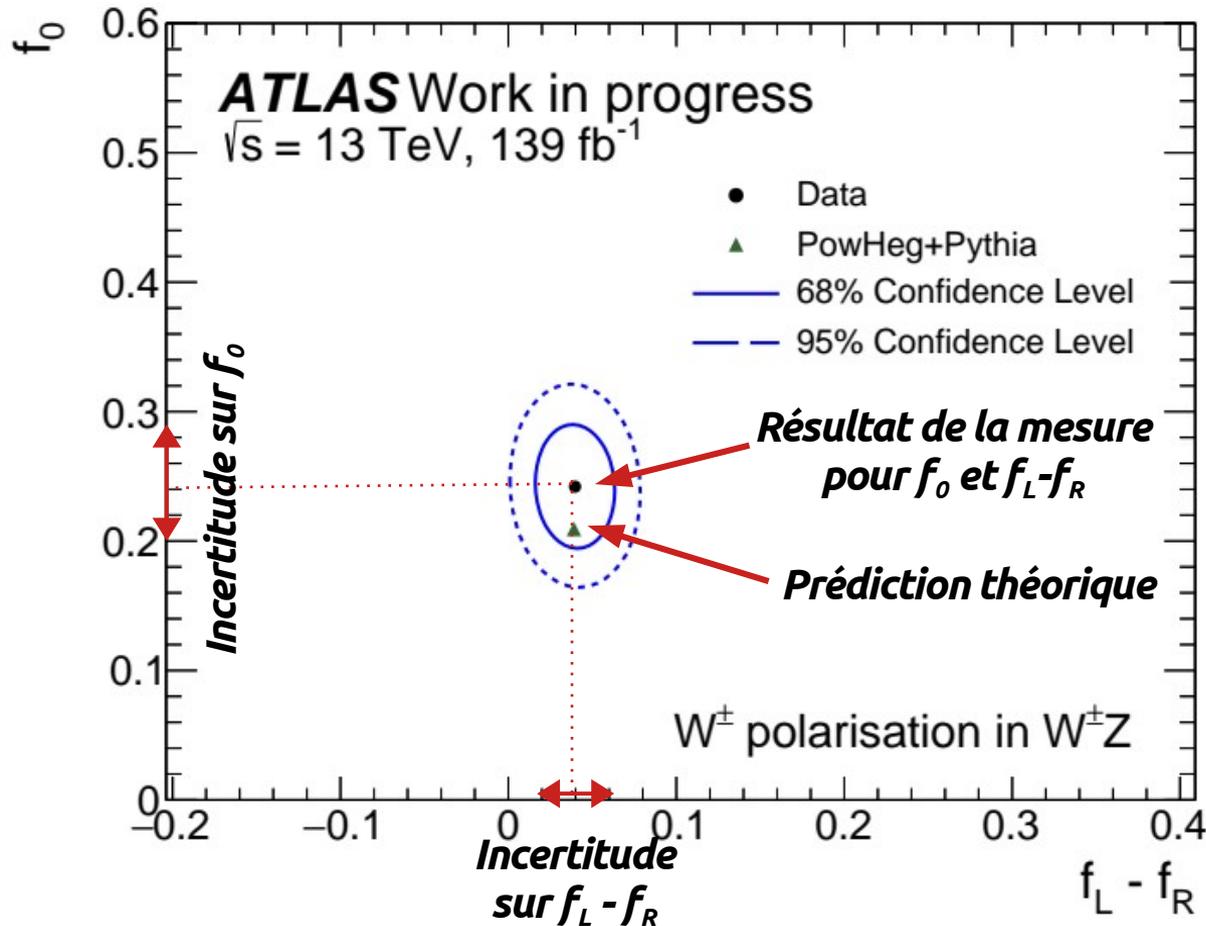


2. On **ajuste leur proportion totale** (pas leur forme) pour qu'ils collent aux données

3. Les **proportions** de chaque modèle donnent la **fraction de polarisation**

$$f_0 = 13 \% \quad f_L = 46 \% \quad f_R = 41 \%$$

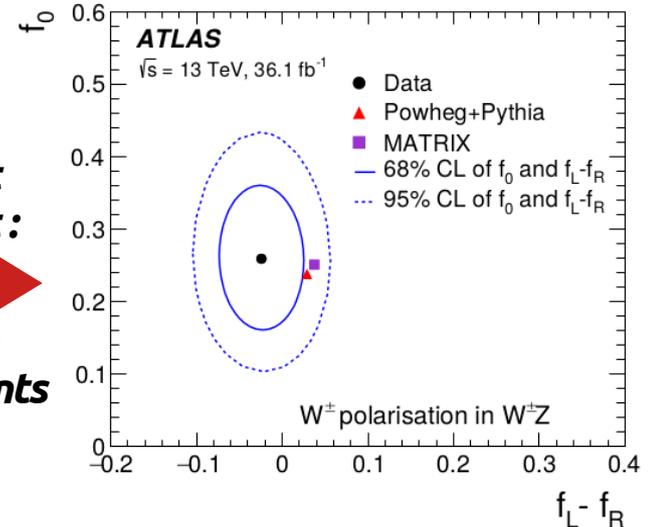
# Résultat



Résultat préliminaire sur tout le **Run 2**

**Résultat précédent :**

**Nombre d'événements**  
**/4**



Résultat sur la période **2015-2016**  
<https://arxiv.org/pdf/1902.05759.pdf>

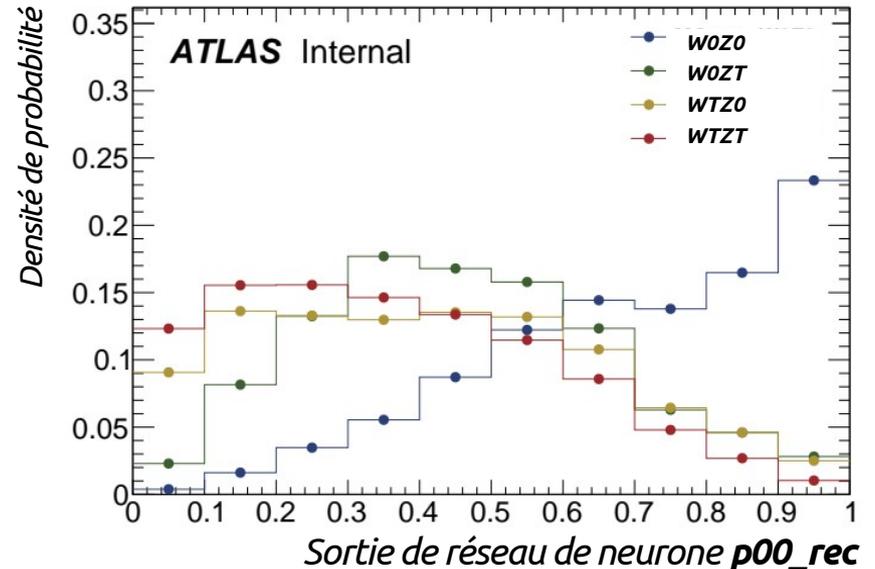
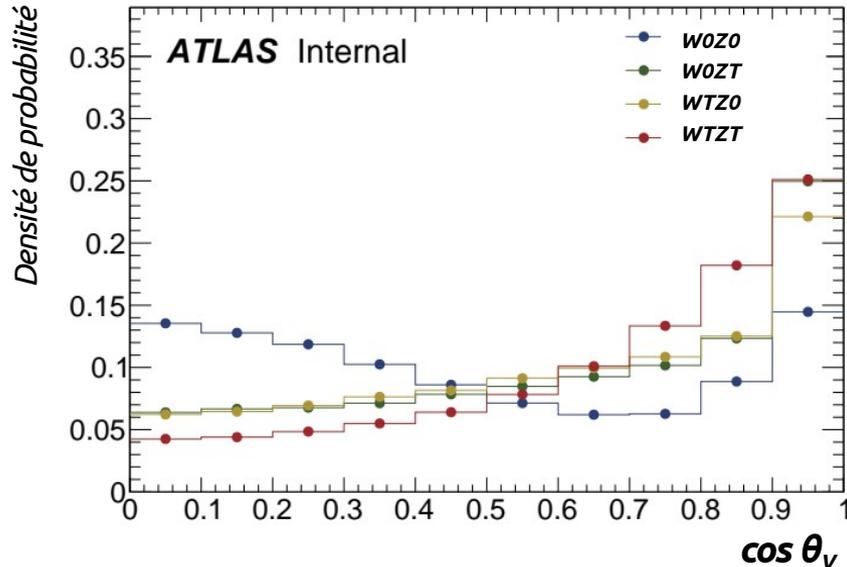
- L'ajustement permet de **mesurer les fractions** de polarisation  $f_0$  et  $f_L - f_R$  (car la somme des fractions fait 1)
- L'augmentation du nombre d'événements permet de **réduire les incertitudes**

# Double polarisation

**But :** Mesurer **simultanément** la polarisation des **deux bosons** W et Z

**Problèmes :**

- Manque de données :  $f_0 \sim 20\%$ , donc  $f_{00} \sim 4\%$
- $\sim 16\,000 \times 0,04 = \mathbf{640 \text{ événements}}$  pour le modèle  $W_0Z_0$  !
- **Quelle variable discriminante** choisir pour les 2 polarisations simultanées ?



# Étude de la polarisation

des bosons vecteurs

dans le canal WZ avec le détecteur ATLAS au LHC

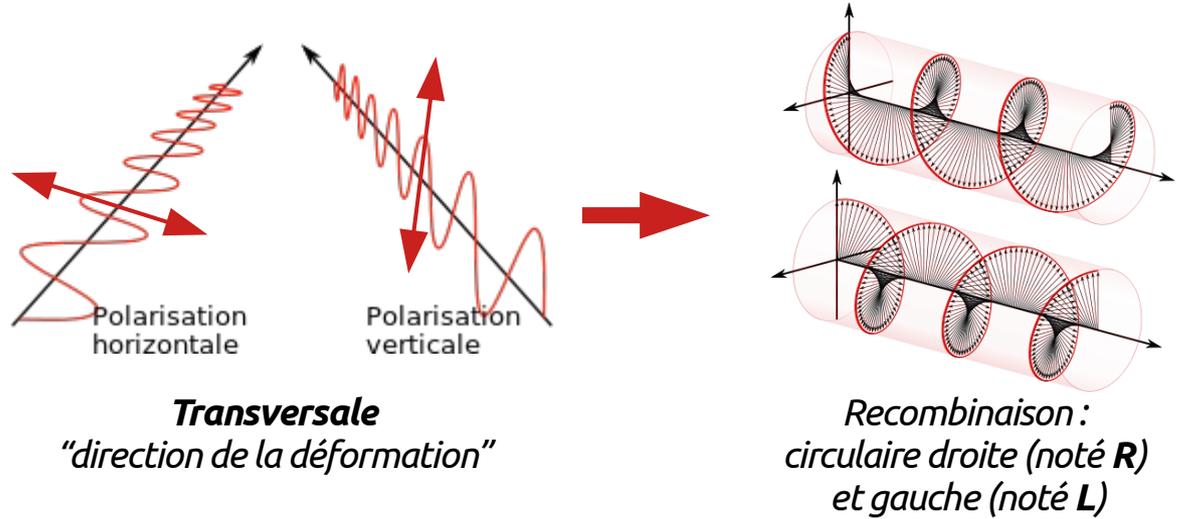
# Polarisation

## En Physique classique:

→ Caractéristique d'une onde

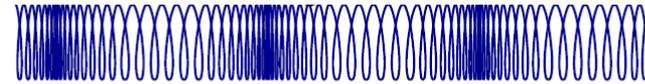
## En Physique des particules

- Dualité onde-particule
- Polarisation (spin) = nouveau degré de liberté des particules



## Bosons Vecteurs

- Photon : **pas de masse**
- Polarisations **seulement transversales**
- W et Z **massifs** :
- Polarisations **transversales ET longitudinale**



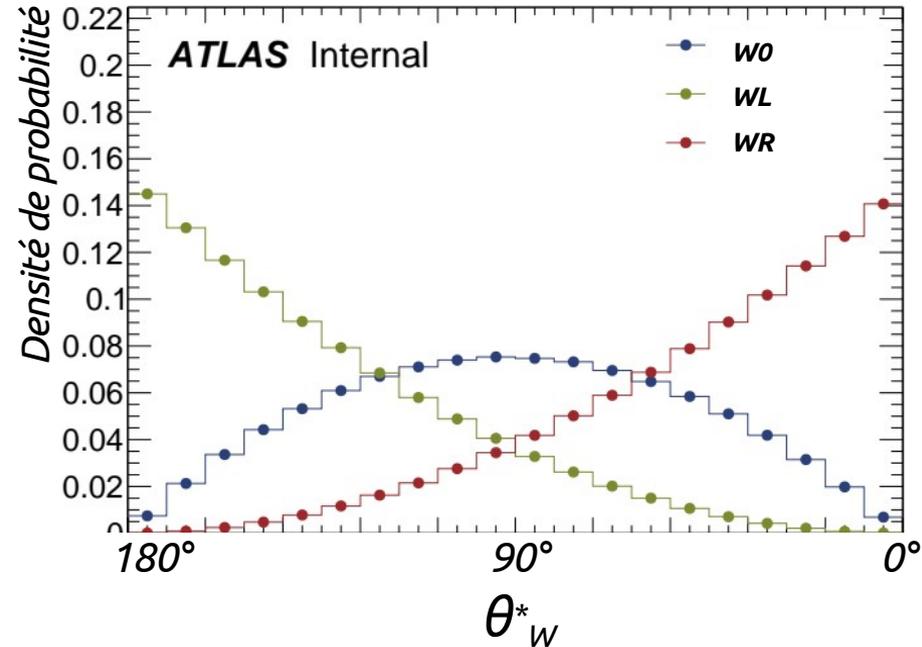
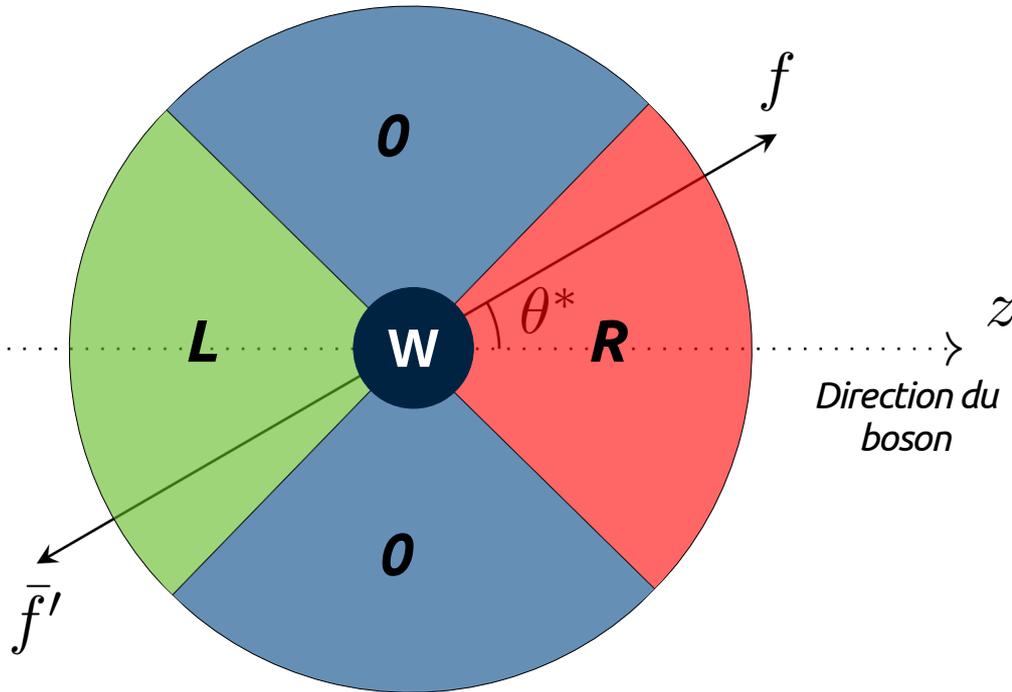
**Longitudinale**  
"compression"  
(noté 0)

*Cette différence vient de raisons compliquées à base d'invariance par symétrie de rotation, de relativité restreinte et de parité...*

# Mesurer la polarisation d'un boson W ou Z

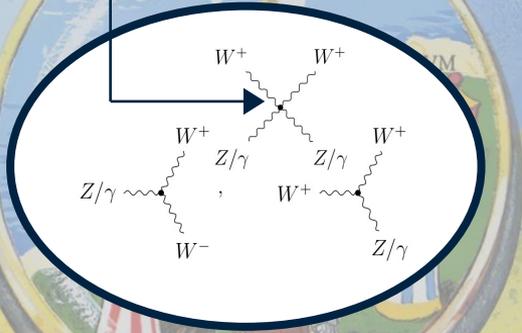
W et Z sont instables : **désintégration** en fermions

- Les variables angulaires de cette désintégration (comme  $\theta^*$ ) sont liées à la polarisation
- **Effet statistique !** Impossible pour un événement en particulier de savoir sa polarisation



# Pour quoi faire ?

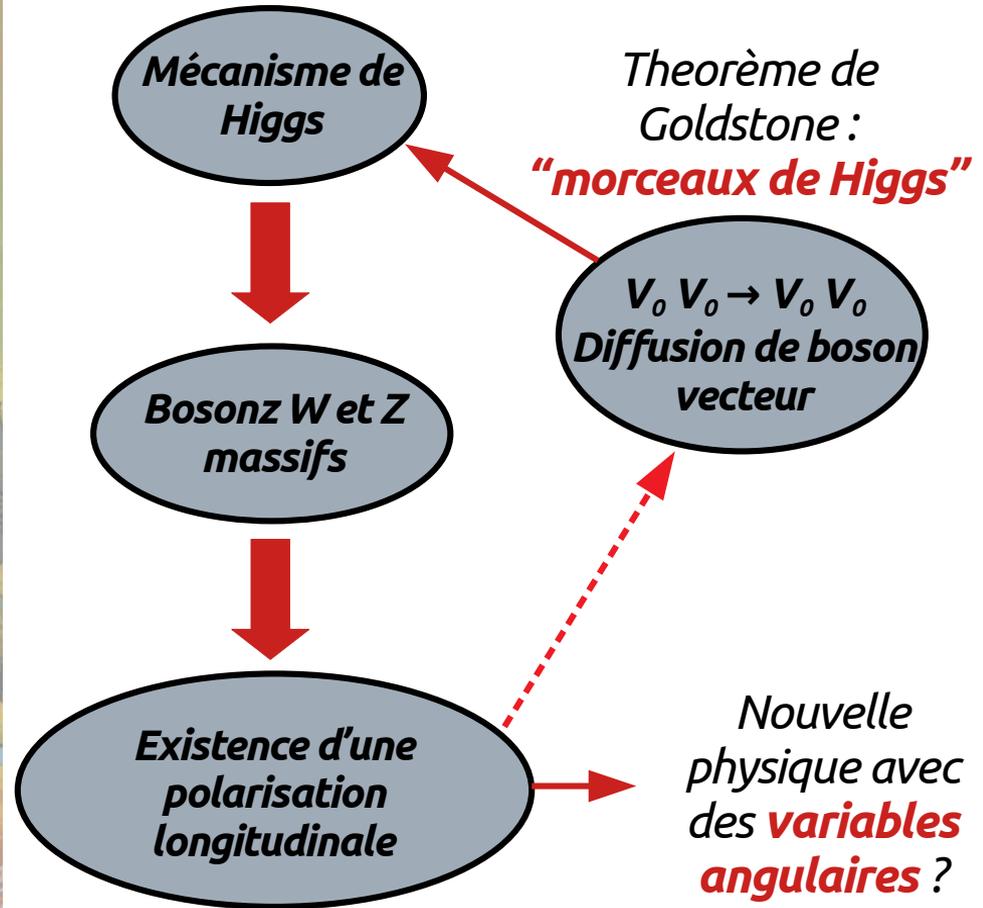
Observé pour la  
1<sup>re</sup> fois en 2018!



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. + \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + h.c. + \frac{1}{2} D_\mu \phi^\dagger D^\mu \phi - V(\phi)$$

Les couplages de bosons W et Z triples et **quartiques**, un des derniers secteurs du **modèle standard** encore non mesuré

**Canal Diboson**



**Polarisé**