

FIL NOIR: LE BOSON THE HIGGS

Camilla Maiani

09.08.2015

Festival d'Astronomie de Fleurance

Merci à Nathalie Besson et Laurent Chevalier !!

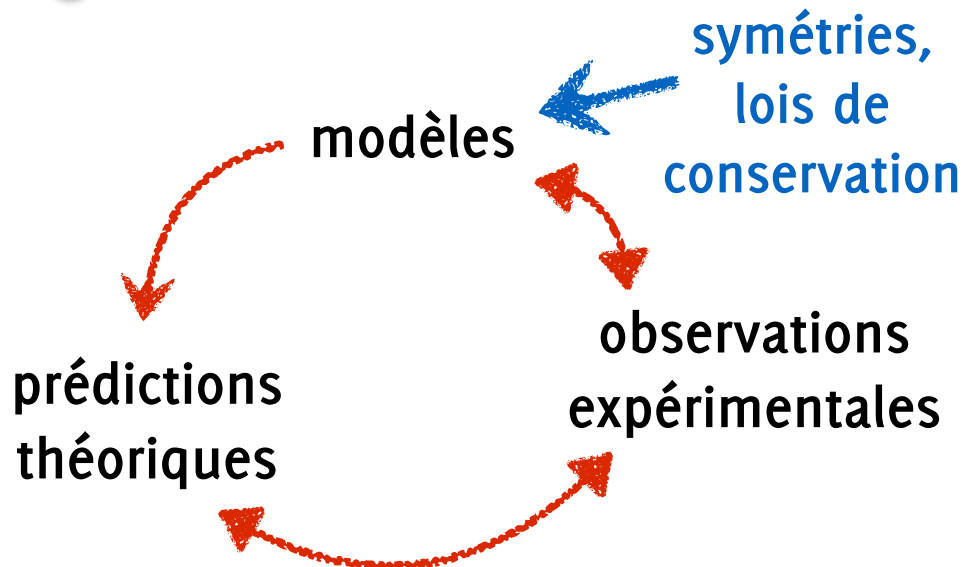


LA PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES EN (TRÈS) BREF

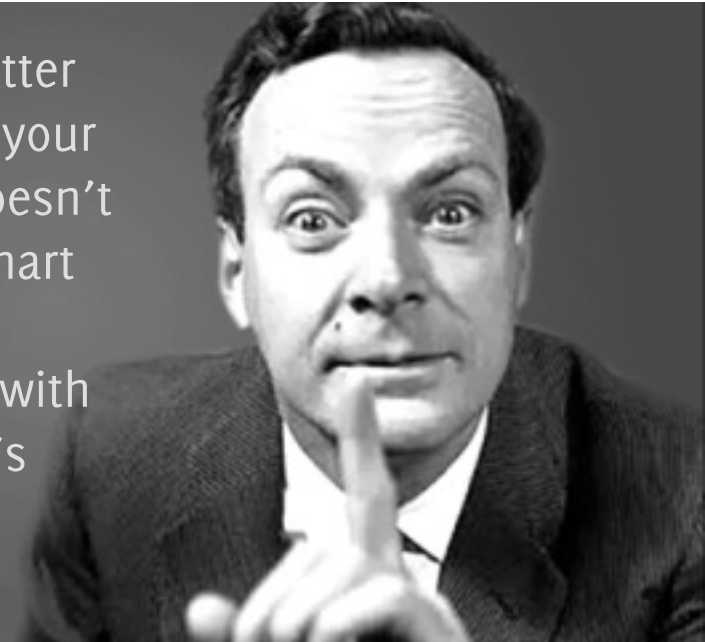
 Physique des particules élémentaires
étude de la nature petite partie qui constitue l'élément

- de quoi l'Univers est-il composé ?
- comment interagissent ses composants ?

 Notre démarche

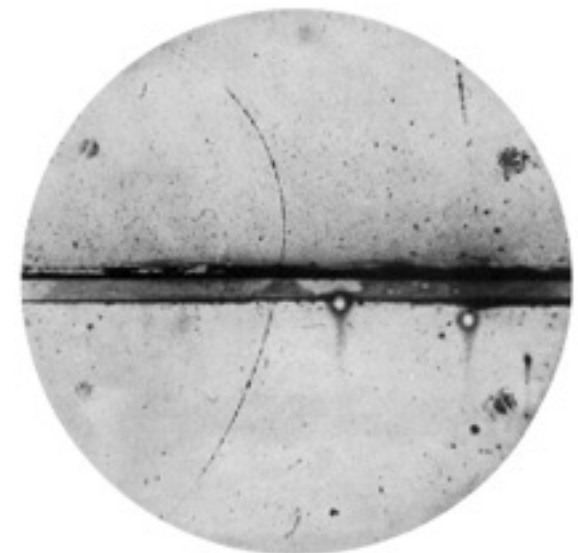
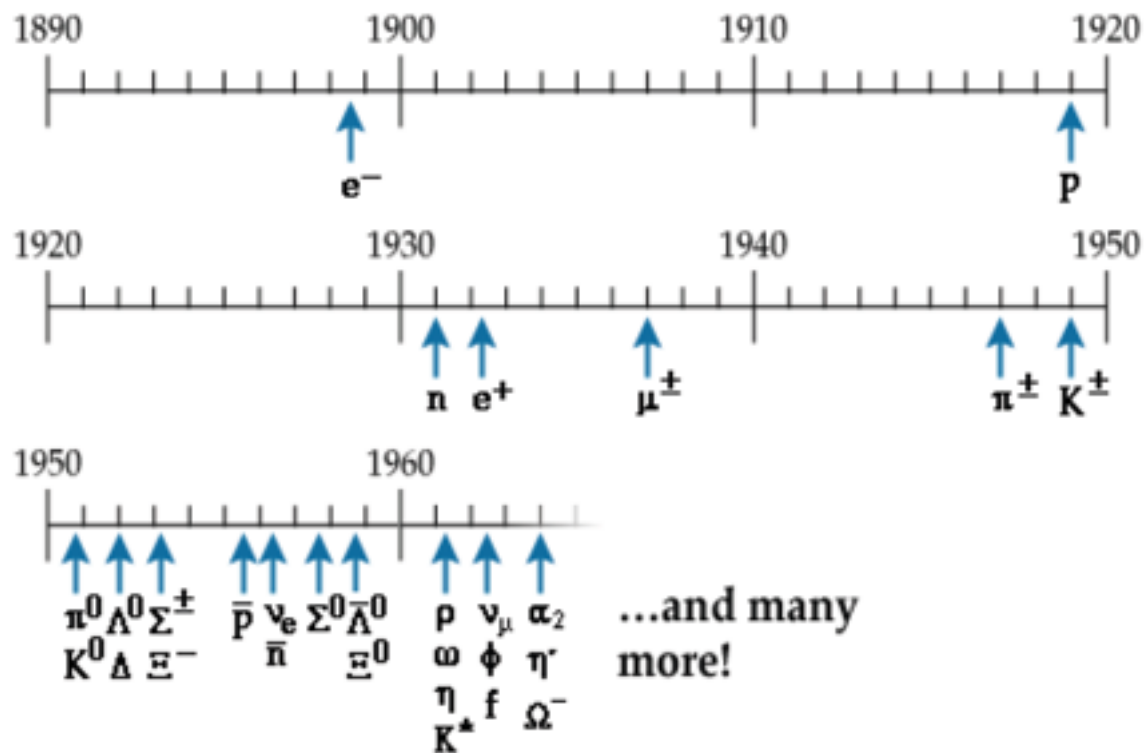


“It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong.”
R. Feynman



PHYSIQUE DES PARTICULES À SES DÉBUTS

Le “zoo” des particules découvertes entre 1898 et 1964...



premier portrait d'un positron
[Anderson, 1932]

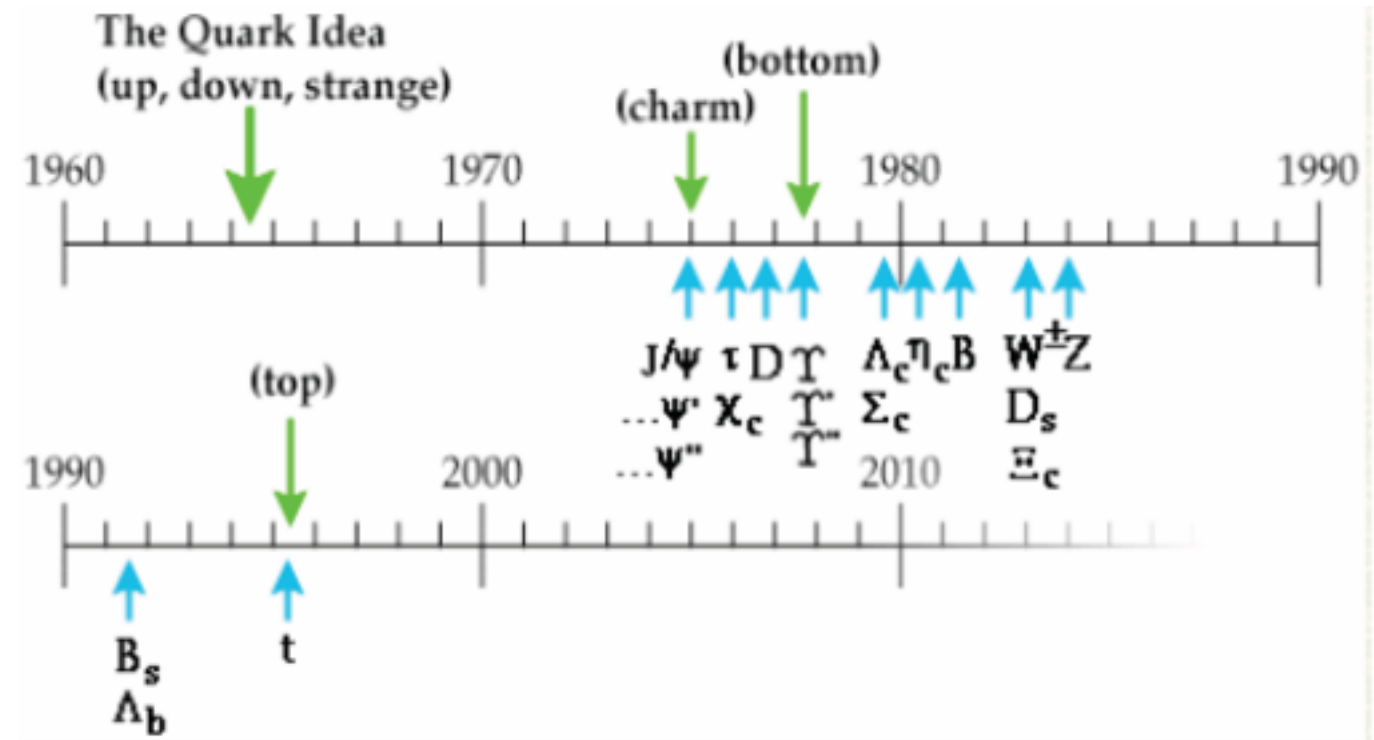
→ nécessité de mettre de l'ordre en cherchant des “régularités”
comme pour la table des éléments de Mendeleev !

PHYSIQUE DES PARTICULES À SES DÉBUTS

Les particules découvertes après l'idée des quarks de Gell-Man



portrait de M. Gell-Man



→ brillants débuts d'un modèle décrivant les composants de la matière basé sur les concepts de **symétries** et **lois de conservation**

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI

Matière

12 constituants élémentaires

→ et leur anti-particules !

	I	II	III
Quarks	u	c	t
	d	s	b
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

Three Generations of Matter

→ masse



→ fermions (spin semi-entier)

→ on ne sait pas pourquoi il y a 3 générations !

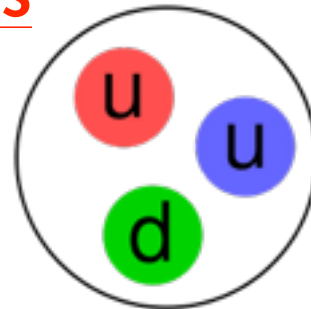
→ ils ont tous été observés expérimentalement

+ un boson de Higgs qui donne la masse aux particules

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI

Interactions fondamentales

Forte ↔ gluons



Intensité 1

Electromagnétique ↔ photon



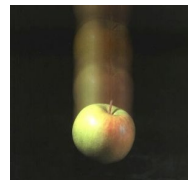
Intensité ~ 0.01 [10⁻²]

Faible ↔ bosons W[±] Z⁰



Intensité ~ 0.0000001 [10⁻⁷]

Gravitationnelle ↔ graviton?



Intensité ~ beaucoup de zéros [10⁻⁴²]

le monde des particules sub-nucléaires obéit à la théorie quantique des champs

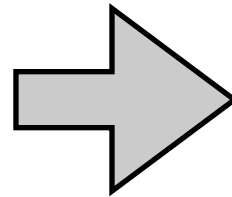
LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS EN 3 LIGNES

Mécanique Classique

particule (discret)

$$q(t)$$

$$L(q, \dot{q})$$



Théorie des Champs

champ (continu)

$$\varphi(t)$$

← particule
de spin 0

$$\int \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi) d^3x$$

dualité onde-corpuscule !

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie ↔ conservation

translation spatiale ↔ impulsion

translation temporelle ↔ énergie

phase ↔ charge électrique

$$\begin{aligned}\varphi &\rightarrow e^{+i\alpha}\varphi \\ \varphi^* &\rightarrow e^{-i\alpha}\varphi^*\end{aligned}$$

$$\mathcal{L}(\varphi, \varphi^*) = \mathcal{L}(e^{+i\alpha}\varphi, e^{-i\alpha}\varphi^*)$$

transformation globale

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

$$\varphi \rightarrow e^{+i\alpha}\varphi$$

$$\varphi^* \rightarrow e^{-i\alpha}\varphi^*$$

$$\mathcal{L}(\varphi, \varphi^*) = \mathcal{L}(e^{+i\alpha}\varphi, e^{-i\alpha}\varphi^*)$$

si $\alpha = \alpha(x)$ ceci n'est plus vrai !

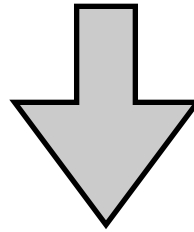
transformation locale

transformation globale

DES PARTICULES QUI INTERAGISSENT

L'invariance de jauge (i.e. sous $\varphi \rightarrow e^{i\alpha(x)}\varphi$) est restaurée si on introduit un champs vectoriel A_μ

spin 1



interaction entre φ et $A_\mu \rightarrow$ les particules interagissent via A_μ !
ex: W, Z, γ

NB: la symétrie locale est brisée si on donne une masse à A_μ

LE PROBLÈME DE LA MASSE DES PARTICULES

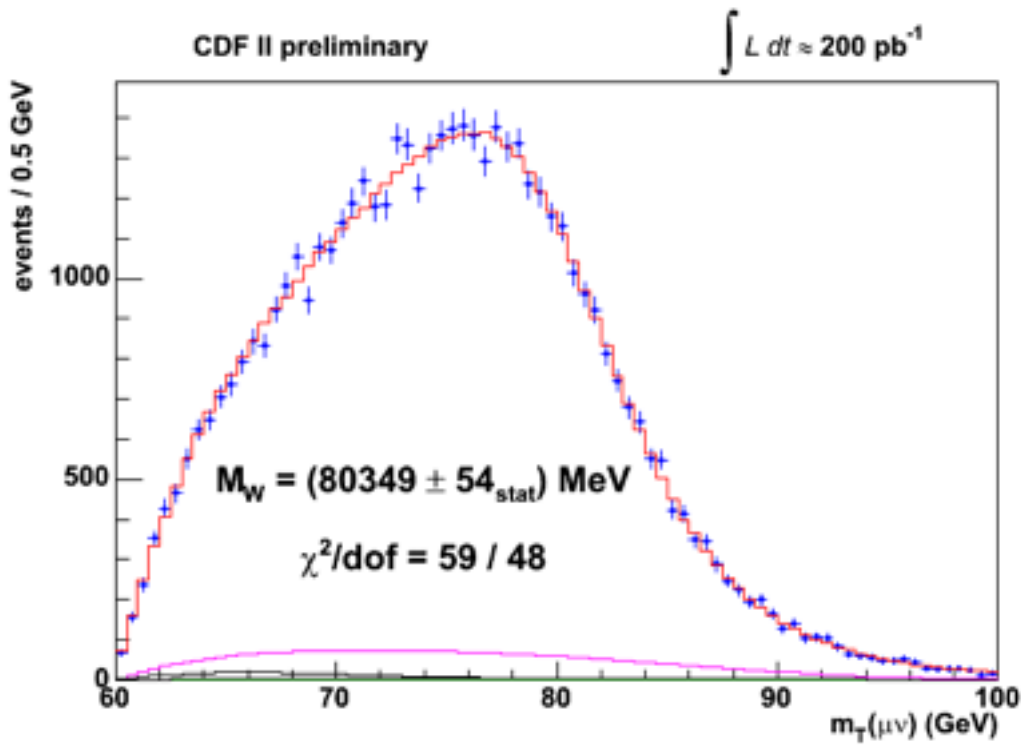
Les symétries constitutives du Modèle Standard ne prévoient pas de masse
pour les bosons et fermions

pourtant...

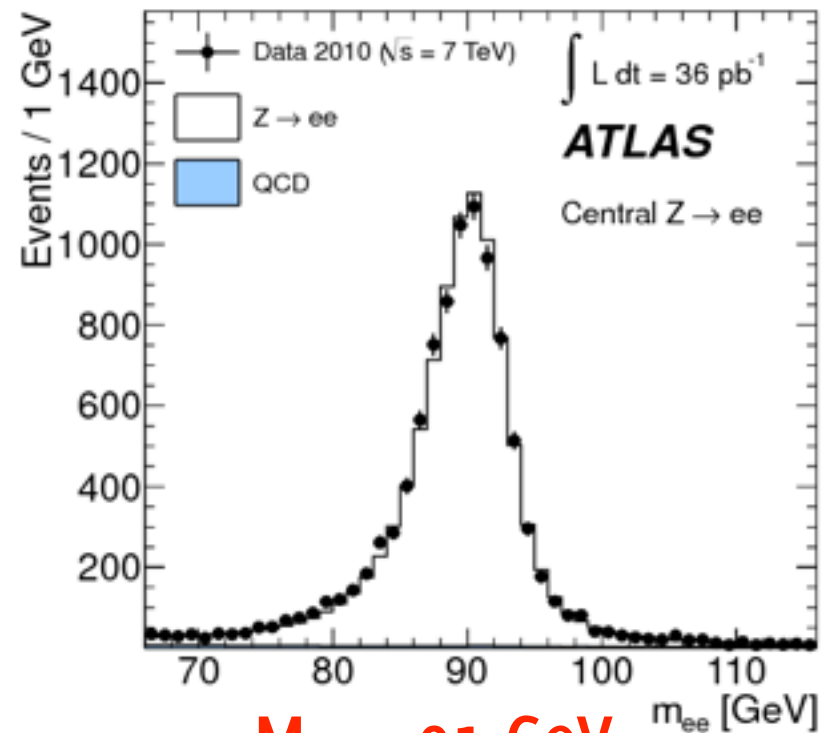
LE PROBLÈME DE LA MASSE DES PARTICULES

Les symétries constitutives du Modèle Standard ne prévoient pas de masse pour les bosons et fermions

pourtant...



$M_W \sim 80 \text{ GeV}$



$M_Z \sim 91 \text{ GeV}$

PARENTHÈSE SUR LE SYSTÈME D'UNITÉS NATURELLES

Les unités du SI (m, Kg, s) sont adaptées à notre échelle, pas aux particules relativistes → **très petites, très rapides !**

recette pour un nouveau système d'unités

- ★ Deux grandeurs fondamentales en physique des particules:
 - vitesse de la lumière dans le vide c
 - constante de Planck \hbar
- ★ On choisit une troisième quantité indépendante: l'électron-Volt (eV)
 - 1 eV = énergie cinétique d'un électron accéléré par un Volt
- ★ Si on veut revenir aux anciennes unités:

$$\hbar c = 197.3269631(49) \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\hbar = 6.58211899(16) \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

$$1/c^2 = 1.782661758(44) \times 10^{-36} \text{ kg/eV}$$

- ★ Petit rappel: $E = mc^2$, donc $E \sim \text{eV}$, $m \sim \text{eV} / c^2$
- ★ Souvent on impose $\hbar = c = 1$

UN PROBLÈME DU MODÈLE STANDARD: LA MASSE !

si vous continuez à préférer les Kg...

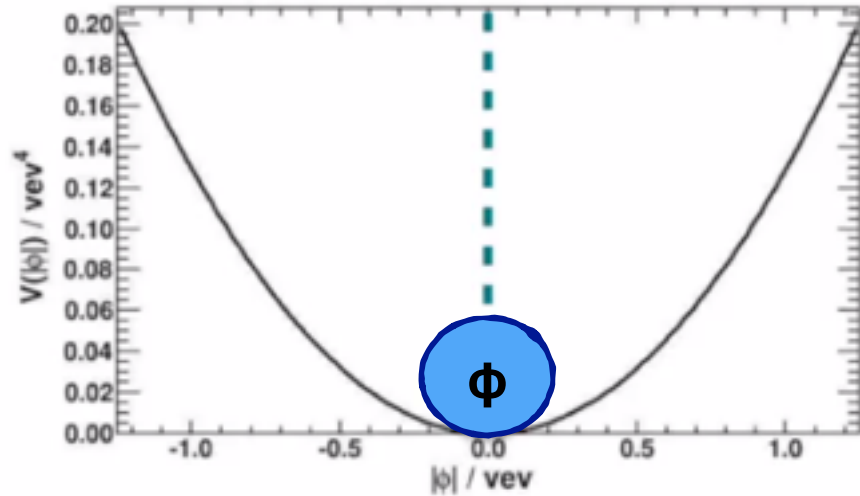


Il faut un mécanisme qui génère dynamiquement la masse de toutes les particules tout en conservant l'invariance de jauge

le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

LE MÉCANISME DE BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

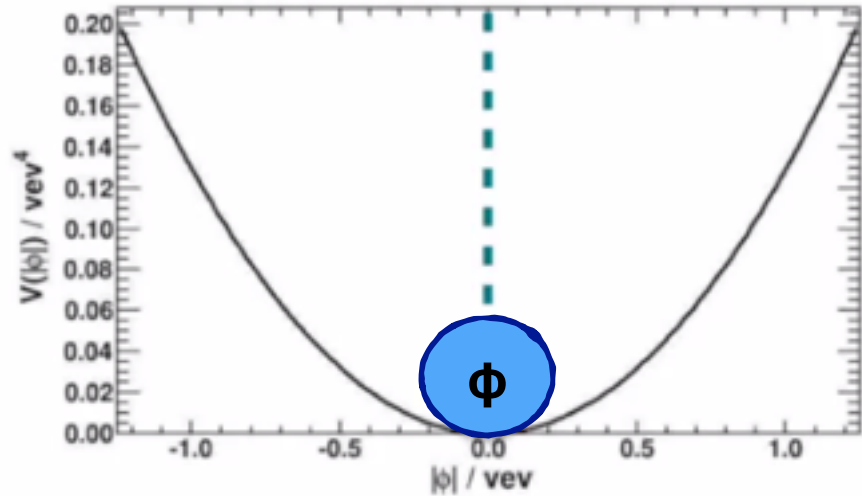
$V(\varphi) \sim \varphi^2$
la symétrie autour de l'axe
de rotation est respectée



LE MÉCANISME DE BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

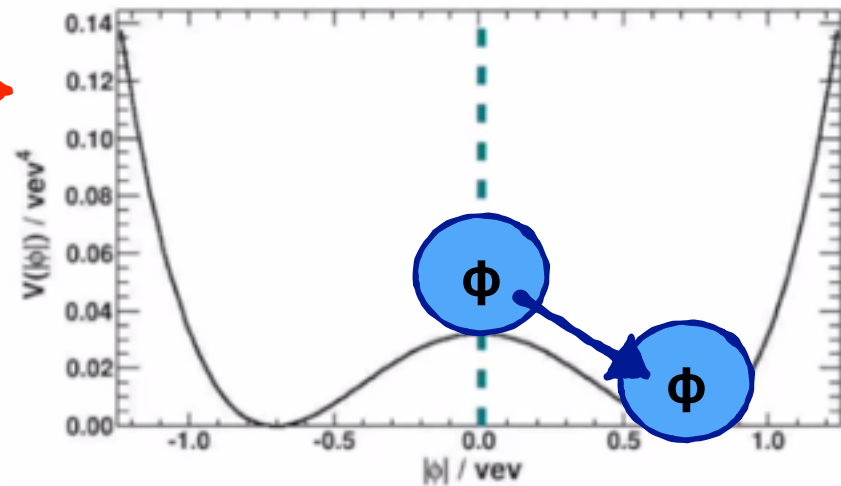
$$V(\varphi) \sim \varphi^2$$

la symétrie autour de l'axe de rotation est respectée



si on rajoute un terme en φ^4

la symétrie autour de l'axe de rotation est "spontanément" brisée

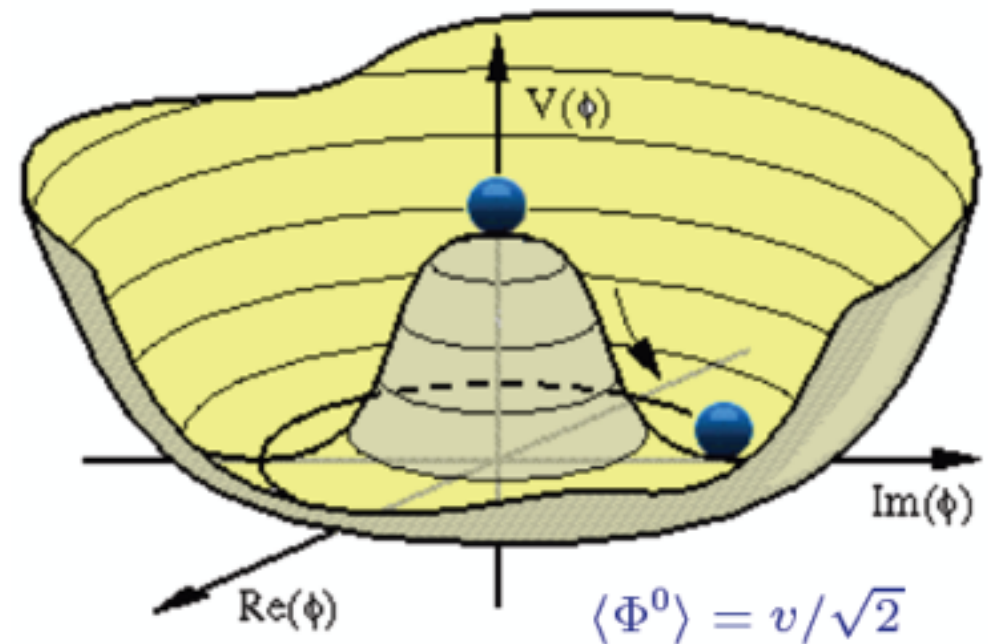


LE MÉCANISME DE BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

L'introduction d'un potentiel en "chapeau mexicain"

brise spontanément la symétrie de jauge tout en:

- 1) gardant les propriétés fondamentales dues à la symétrie
- 2) donnant des masses aux bosons W et Z
- 3) prédisant une nouvelle particule: **le boson de Higgs**



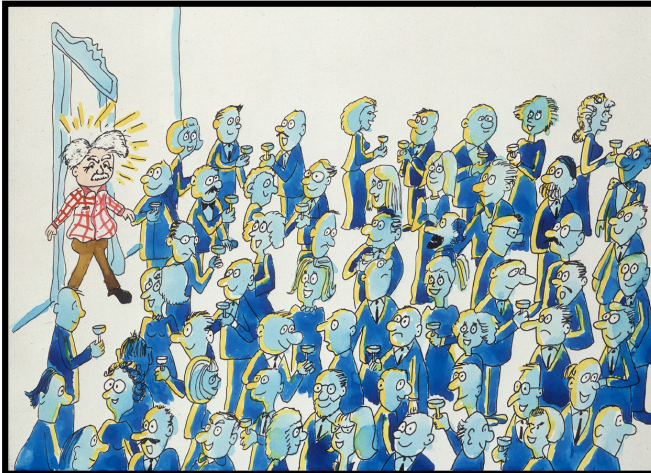
on procède de même pour donner masse aux **fermions**

LE MÉCANISME...EN BD: LA MASSE AUX PARTICULES

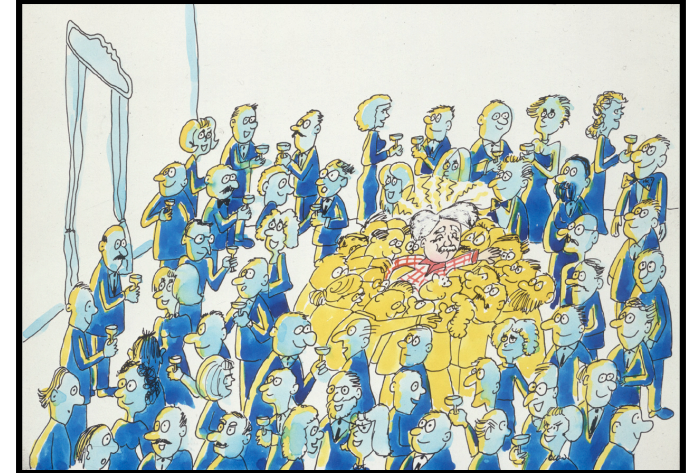
Le défi du ministre anglais aux chercheurs: expliquez moi ça simplement !
Réponse de David Miller, mise en BD : Cern.



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

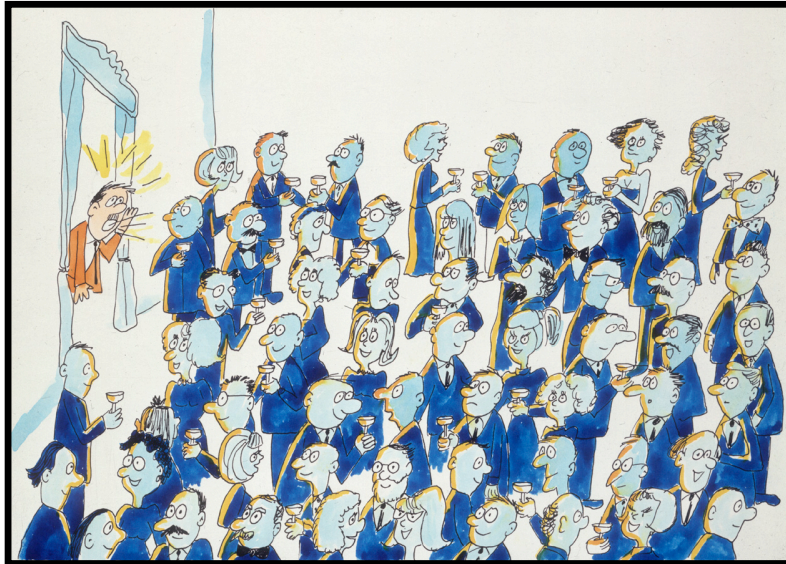


Arrive une personnalité
libre de ses mouvements
(«particule sans masse »)



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

LE MÉCANISME...EN BD: LA MASSE DU BOSON DE HIGGS



Une rumeur est lancée
dans la pièce...



Un amas se forme, c'est
une nouvelle particule!

spoiler alert: pour commencer, on va faire semblant de ne pas savoir que le boson de Higgs a été découvert en 2012...

RÉCAPITULATIF

spoiler alert: pour commencer, on va faire semblant de ne pas savoir que le boson de Higgs a été découvert en 2012...

RÉCAPITULATIF

- ★ La brisure spontanée de symétrie (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via l'interaction avec le boson de Higgs

spoiler alert: pour commencer, on va faire semblant de ne pas savoir que le boson de Higgs a été découvert en 2012...

RÉCAPITULATIF

- ★ La brisure spontanée de symétrie (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via l'interaction avec le boson de Higgs


Ceci n'est qu'un (très joli) modèle théorique parmi d'autres → il faut le tester expérimentalement

spoiler alert: pour commencer, on va faire semblant de ne pas savoir que le boson de Higgs a été découvert en 2012...

RÉCAPITULATIF

- ★ La brisure spontanée de symétrie (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via l'interaction avec le boson de Higgs

Ceci n'est qu'un (très joli) modèle théorique parmi d'autres → il faut le tester expérimentalement


- ★ Ce modèle prédit l'existence d'une nouvelle particule 
 - couplages aux autres particules connus proportionnels à leur masse
 - paramètres connus, sauf la **masse** → paramètre libre de la théorie !

spoiler alert: pour commencer, on va faire semblant de ne pas savoir que le boson de Higgs a été découvert en 2012...

RÉCAPITULATIF

- ★ La brisure spontanée de symétrie (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via l'interaction avec le boson de Higgs

Ceci n'est qu'un (très joli) modèle théorique parmi d'autres → il faut le tester expérimentalement

- ★ Ce modèle prédit l'existence d'une nouvelle particule 
 - couplages aux autres particules connus proportionnels à leur masse
 - paramètres connus, sauf la **masse** → paramètre libre de la théorie !


pour valider ce modèle, et le MS dans son ensemble, on doit trouver une particule de masse ?? avec des caractéristiques bien précises

spoiler alert: pour commencer, on va faire semblant de ne pas savoir que le boson de Higgs a été découvert en 2012...

RÉCAPITULATIF

- ★ La brisure spontanée de symétrie (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via l'interaction avec le boson de Higgs

Ceci n'est qu'un (très joli) modèle théorique parmi d'autres → il faut le tester expérimentalement

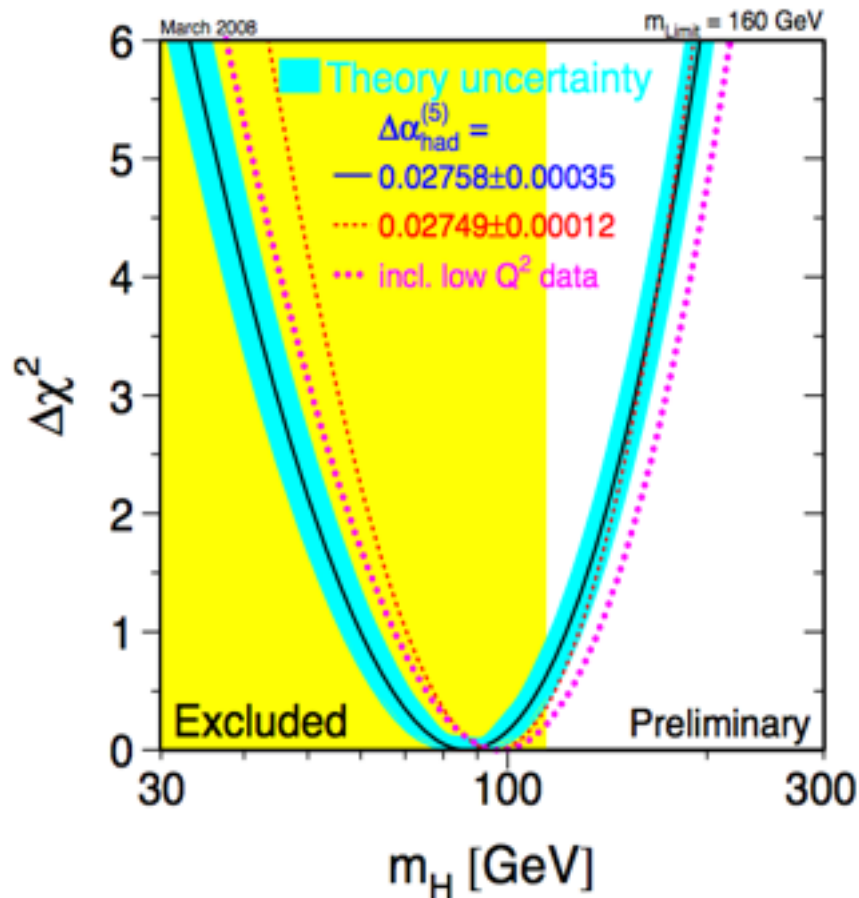
- ★ Ce modèle prédit l'existence d'une nouvelle particule 
 - couplages aux autres particules connus proportionnels à leur masse
 - paramètres connus, sauf la **masse** → paramètre libre de la théorie !

pour valider ce modèle, et le MS dans son ensemble, on doit trouver une particule de masse ?? avec des caractéristiques bien précises

on ne sais pas vraiment où regarder...ou bien?

CONTRAINTES EXPÉRIMENTALES SUR LA MASSE DU HIGGS

les mesures de précision indiquent la voie à suivre...!



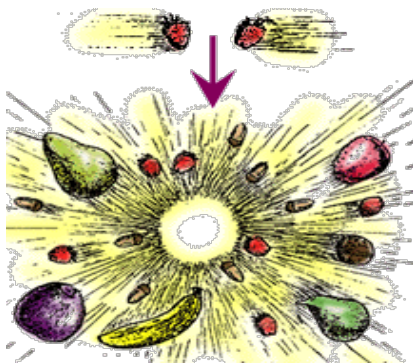
$$\chi^2 = \sum (\mathbf{x}_i - \langle \mathbf{x}_i \rangle)^2 / \sigma_i^2$$


x_i : paramètres du MS que l'on mesure (ex: m_w , m_z)

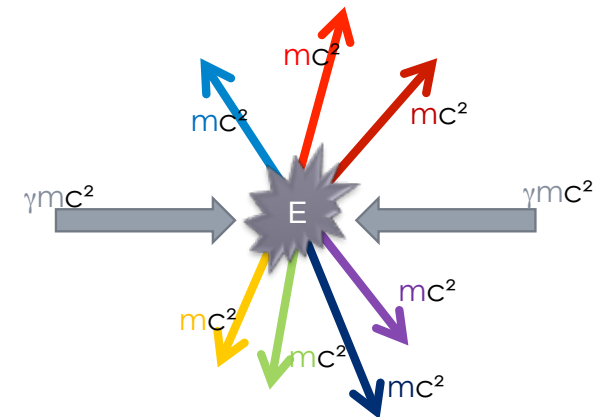
→ le minimum du χ^2 'semble préférer' des bosons de Higgs d'une centaine de GeV...à vérifier !

COMMENT PRODUIRE UN BOSON DE HIGGS...

👤 Pour produire des particules (connues ou inconnues!) on utilise les collisionneurs de particules



$$E = mc^2$$




pour créer une particule d'une certaine masse, il faut y mettre l'énergie correspondante

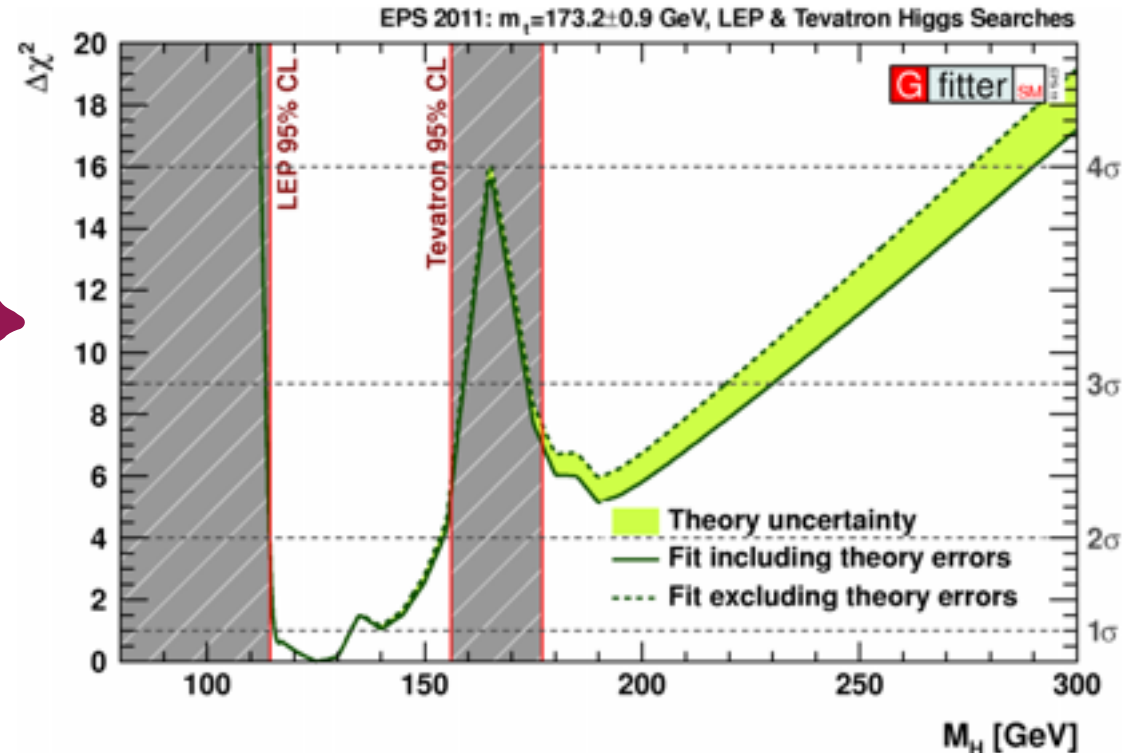
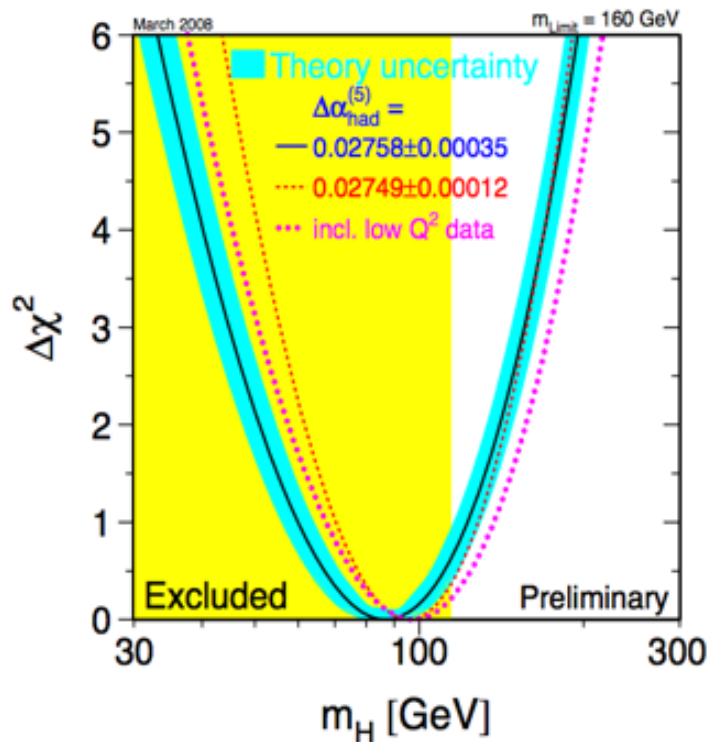


Au LHC on produit un boson de Higgs
chaque 1 milliard d'événements !

[pour plus de détails voir le cours fil rouge de Yann Coadou]

60 ANS DE CHASSE AUX BOSON DE HIGGS

Les physiciens des particules ont cherché le boson de Higgs au LEP (CERN) et au TeVatron (Fermilab) en testant les valeurs de masse expérimentalement accessibles

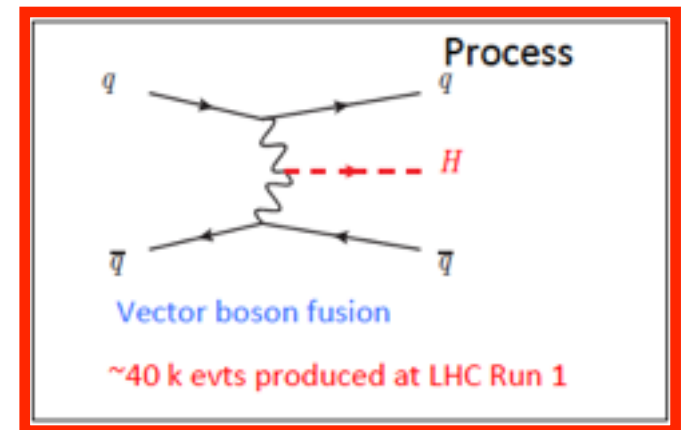
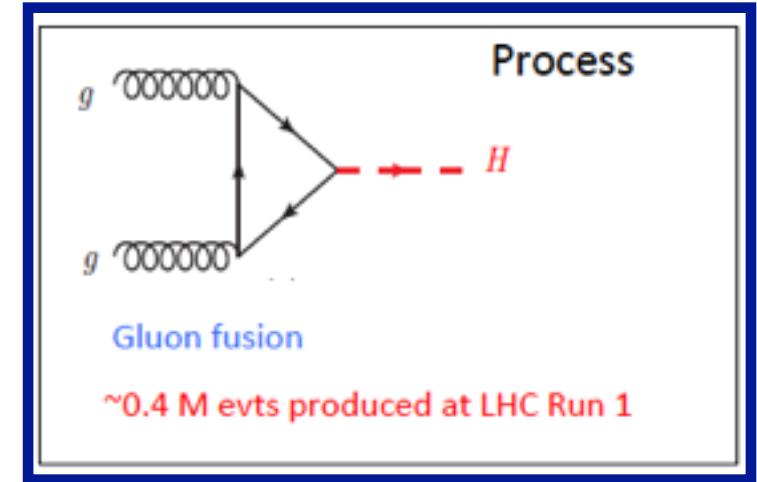
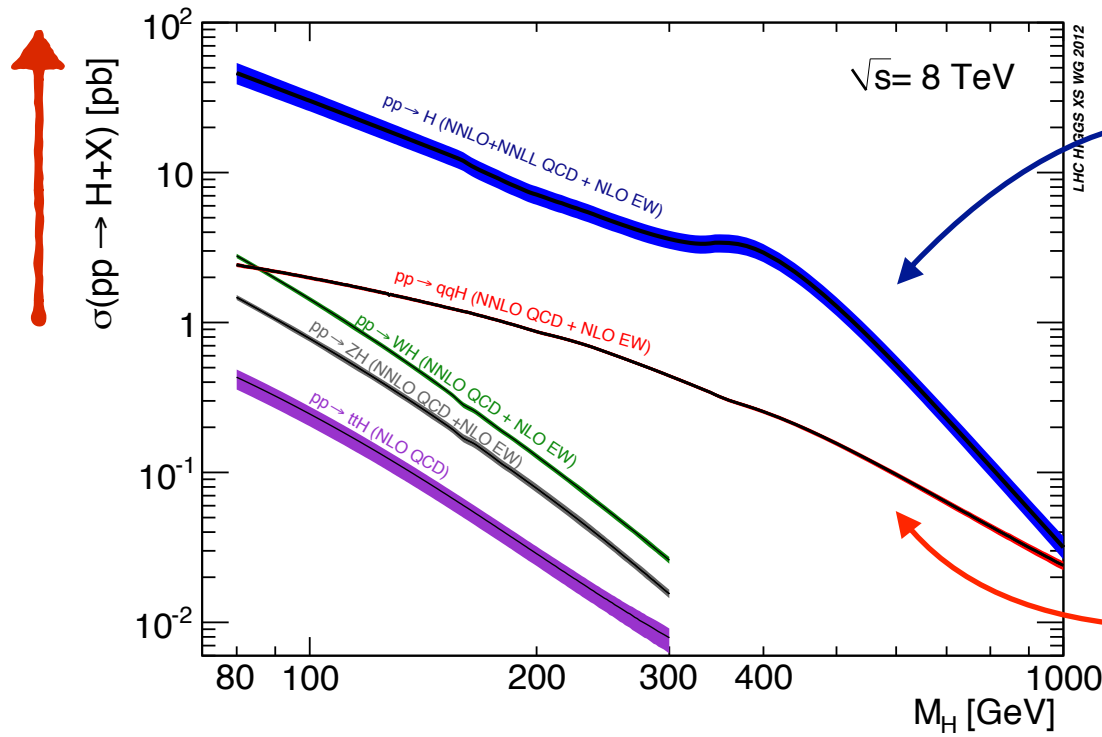


Le Large Hadron Collider (LHC), le collisionneur de protons du CERN, a été construit pour le trouver !

IDENTIKIT DU BOSON DE HIGGS: PRODUCTION (AU LHC)

Un boson de Higgs peut être le produit de différentes interactions

~ probabilité/volume





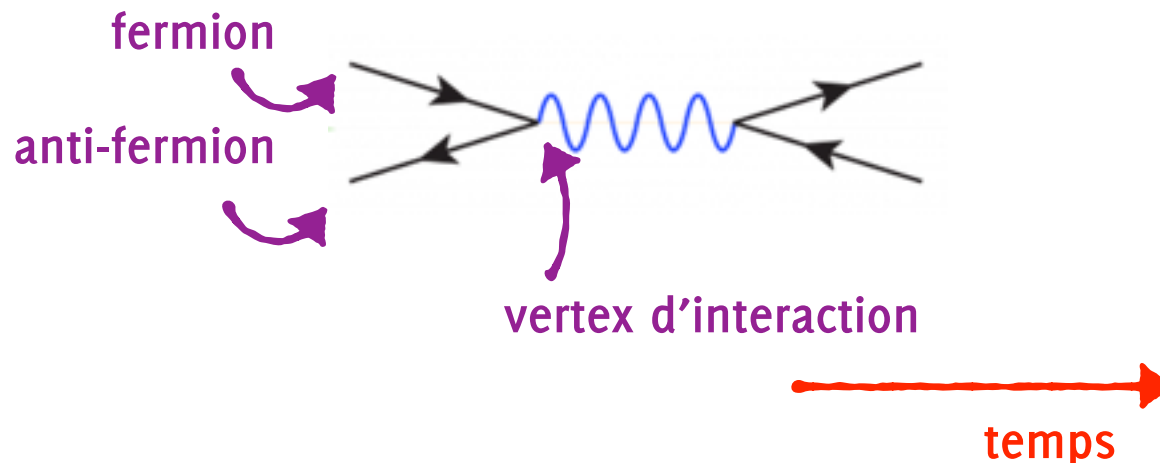
PARENTHÈSE SUR LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN

Méthode très pratique pour représenter les interactions en physique: ce n'est pas que illustratif ! C'est un puissant outil de calcul !

Deux types de lignes

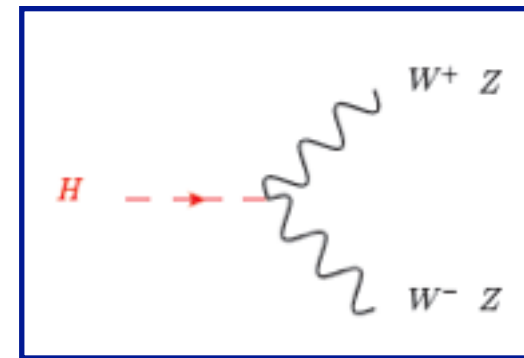
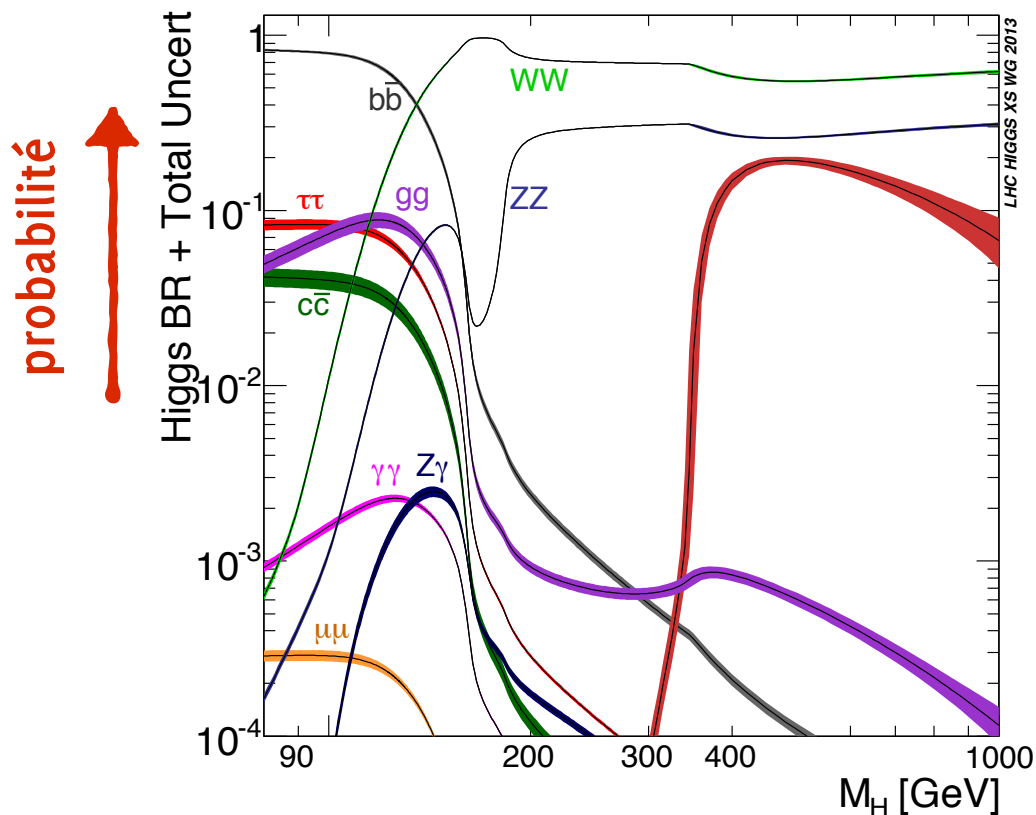


On peut connecter les lignes: attention au sens des flèches



IDENTIKIT DU BOSON DE HIGGS: DÉSINTÉGRATION (AU LHC)

Un boson de Higgs est **lourd** → on mesure les particules produites dans sa désintégration



NB: ce n'est pas que la quantité d'événements produits qui compte, mais aussi la "clarté" du signal → optimisation de N_s/N_b

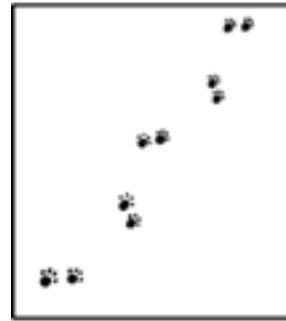
DÉTECTION DE PARTICULES: LE PRINCIPE

DÉTECTION DE PARTICULES: LE PRINCIPE

on ne voit que leur traces..

BACKYARD SNOW TRACKING GUIDE

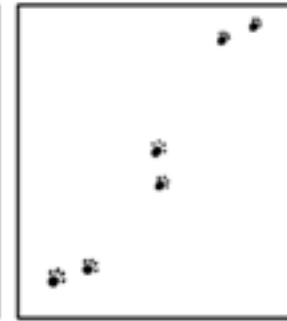
<http://xkcd.com/702/>



CAT



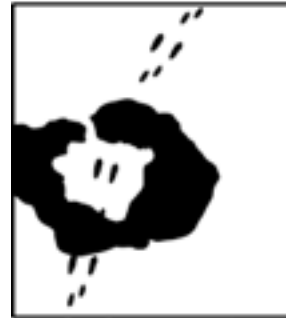
MOOSE AND SQUIRREL



LONGCAT



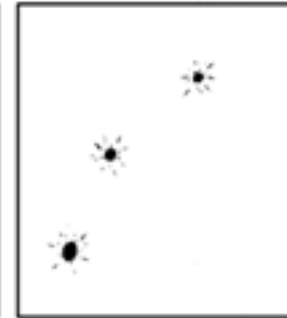
MOUSE RIDING BICYCLE



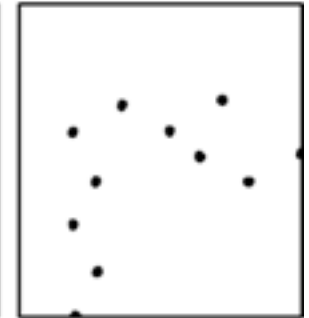
RABBIT STOPPING TO USE HAIR DRYER



LEGOLAS



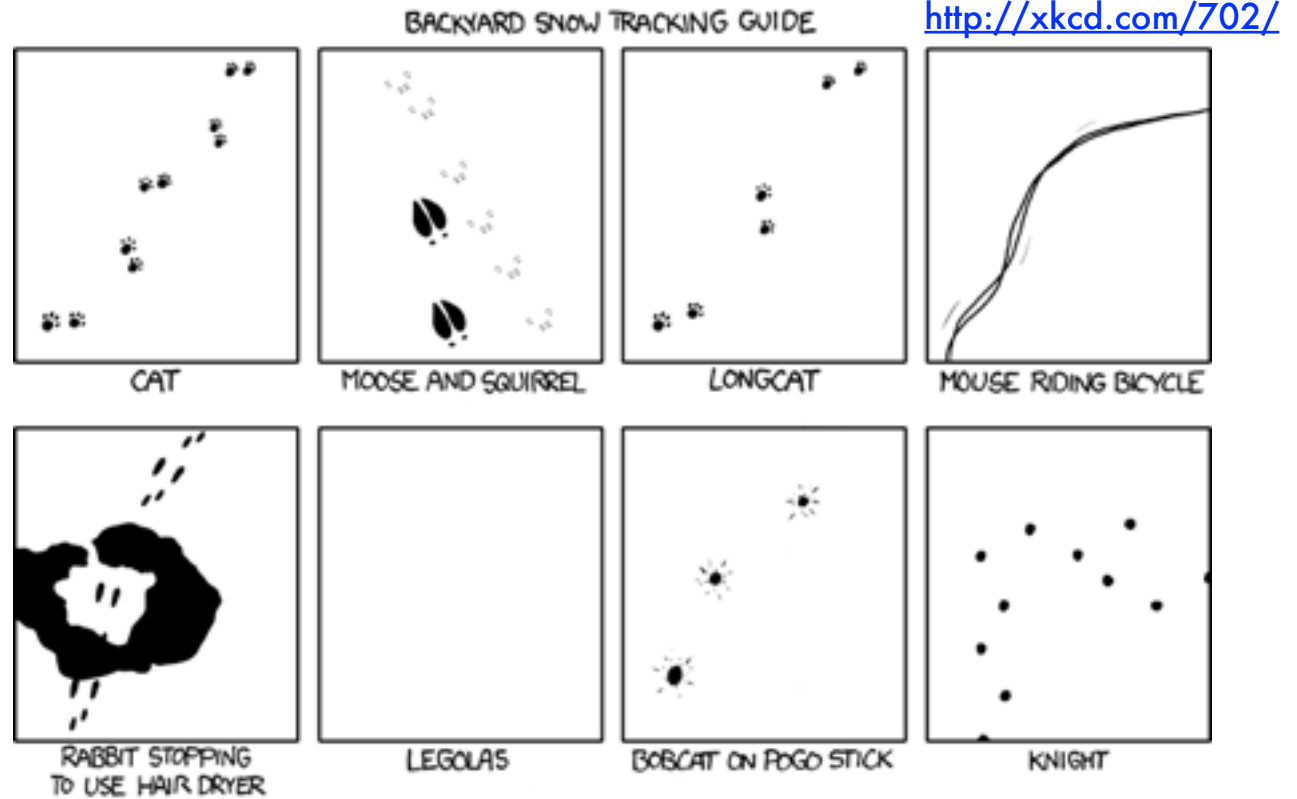
BOBCAT ON POGO STICK



KNIGHT

DÉTECTION DE PARTICULES: LE PRINCIPE

on ne voit que leur traces..



...laissées dans des détecteurs colossaux
→ ATLAS: 44m de long, 22m de haut, 7000 tonnes !



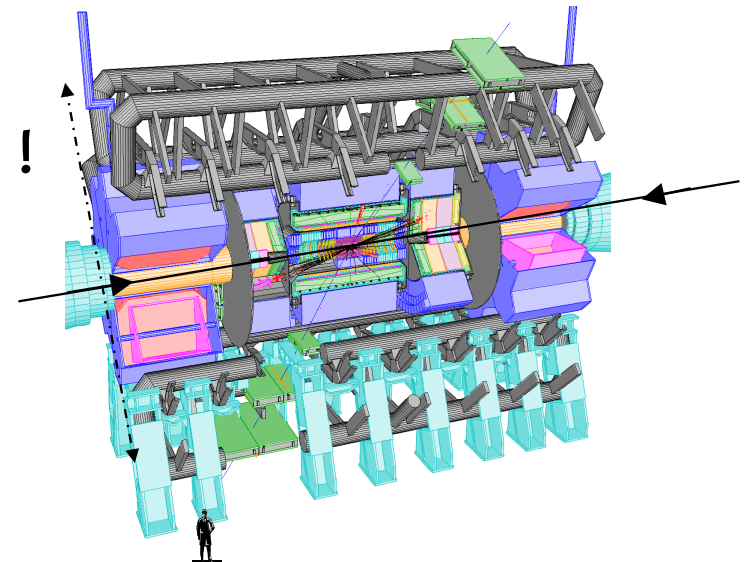
~ 2 cm



~ 10 cm



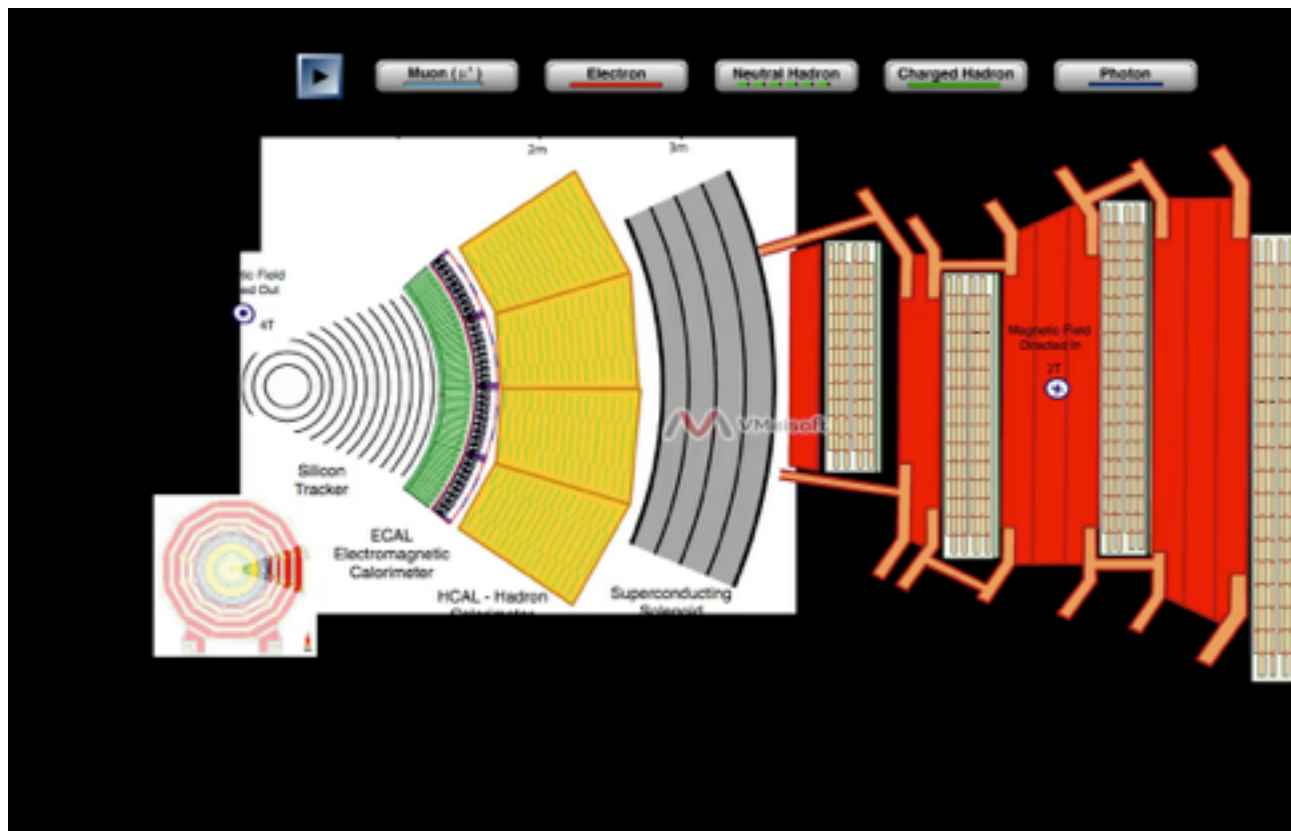
~ 50 cm



~ 4000 cm

DÉTECTION DE PARTICULES: EN VRAI

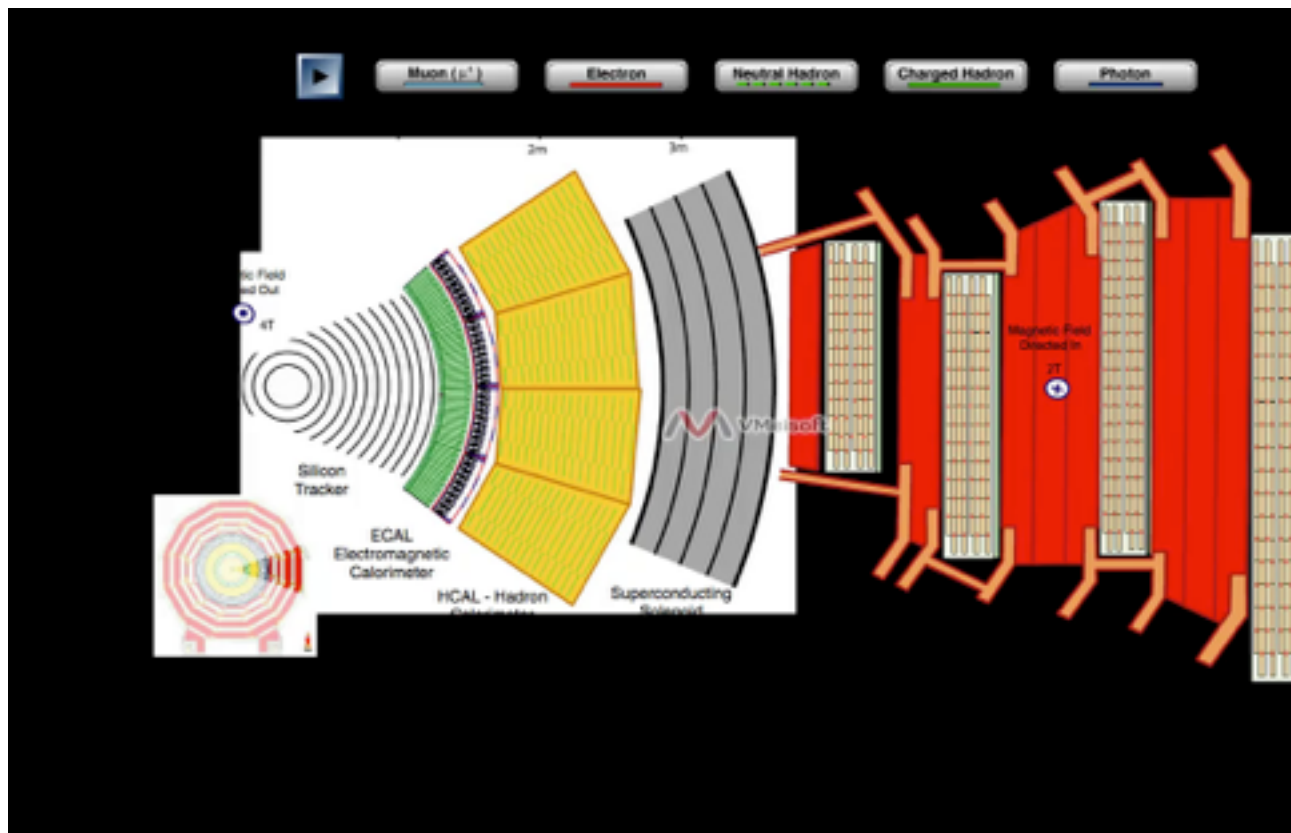
- ▶ Trajectographe → traces en 3D
- ▶ Champ magnétique pour courber les particules chargées
- ▶ Mesures du rayon de courbure → impulsion
- ▶ Calorimétrie pour mesurer l'énergie d'une particule



pour plus de détails
voir le cours fil
rouge de Yann
Coadou

DÉTECTION DE PARTICULES: EN VRAI

- ▶ Trajectographe → traces en 3D
- ▶ Champ magnétique pour courber les particules chargées
- ▶ Mesures du rayon de courbure → impulsion
- ▶ Calorimétrie pour mesurer l'énergie d'une particule



pour plus de détails
voir le cours fil
rouge de Yann
Coadou



Découverte annoncée le 04/07/2012



sciences 11

Le Cern a mis la main sur le boson de Higgs

Les capteurs de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire ont détecté le nouveau Graal de la physique.

TRISTAN VEY
 PHYSIQUE Au terme de deux présentations les plus importantes de l'année au Cern, à Genève, le directeur de l'organisation, Rolf Heuer, se tourne vers l'assistance, un grand sourire aux lèvres : « le premier qui l'a. Qui est ce que vous en dites ? » Dans une grande clameur et un tonnerre d'applaudissements, les dizaines de physiciens réunis dans la salle battent un vibrant « Yes ! ». L'explosion de joie est à la mesure de la découverte, l'une des



Rolf Heuer (2^e à droite) lors d'une présentation, mercredi, à des dizaines de physiciens au Cern, à Genève. (PHOTO: J. H. H. / AFP)

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.



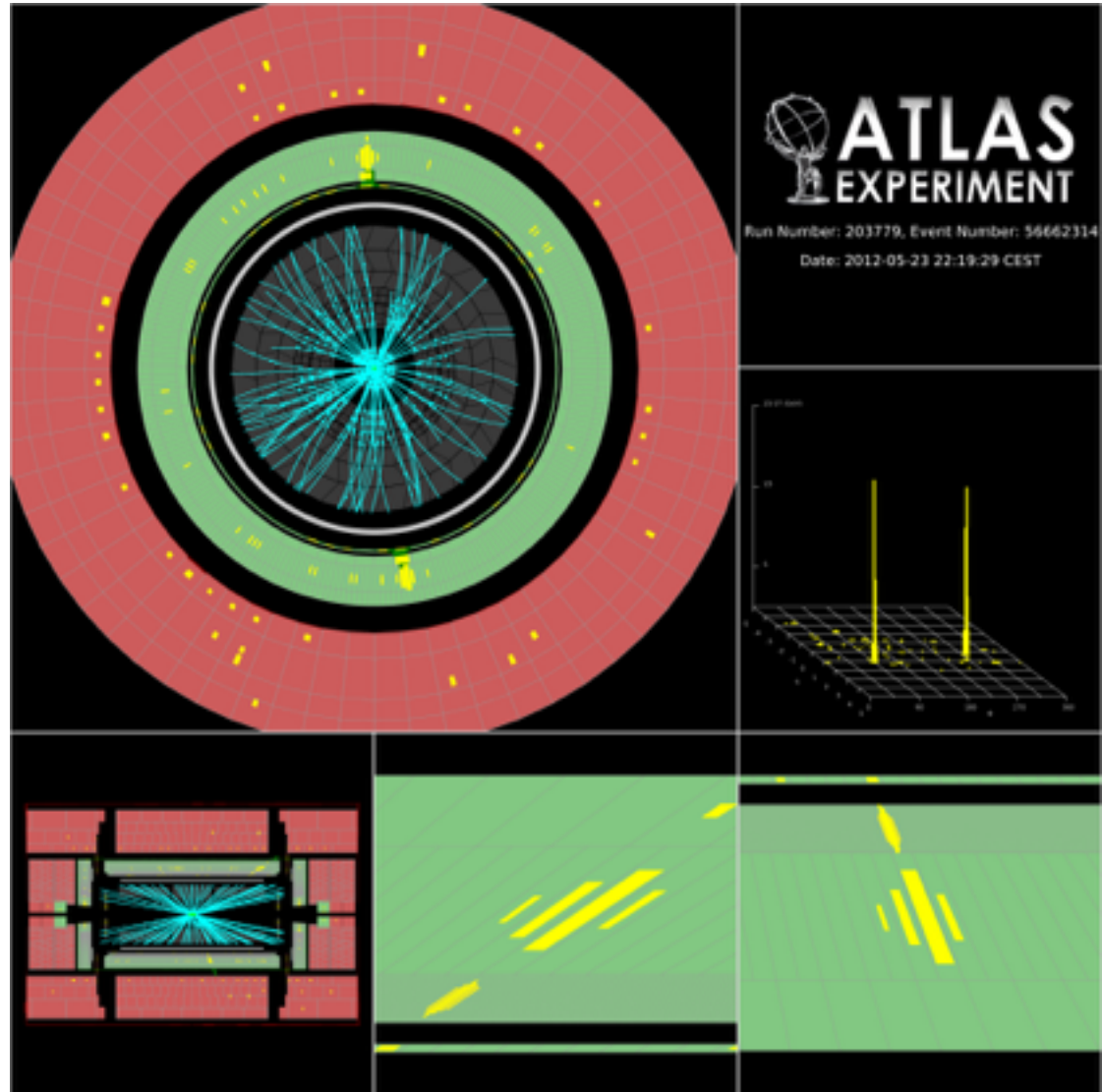
"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

JE VOUS PRÉSENTE...



'M. Higgs'

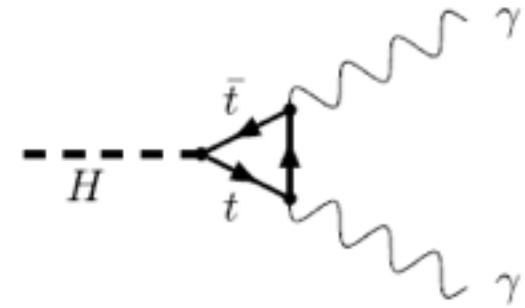
événement $H \rightarrow \gamma\gamma$
 $M_{inv} \sim 126.9 \text{ GeV}$



'candidat Higgs'

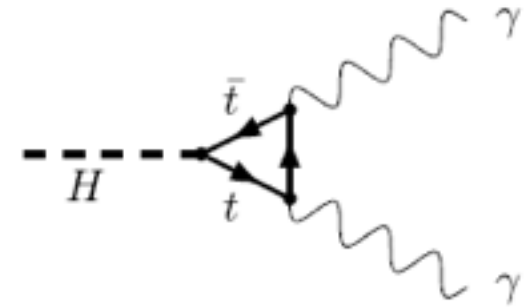
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

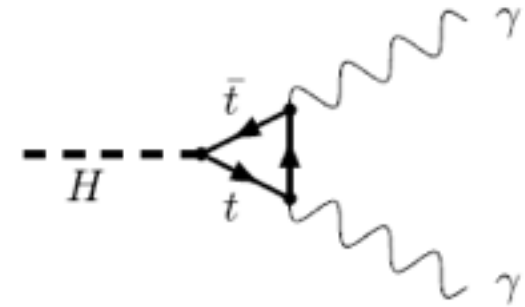
- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



- ★ On développe une stratégie pour séparer le signal du bruit-de-fond
 - bruit-de-fond: ce qui pourrait produire des “traces” dans le détecteur identiques ou similaires à celles laissées par du signal
 - Ex: γ vs π

RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

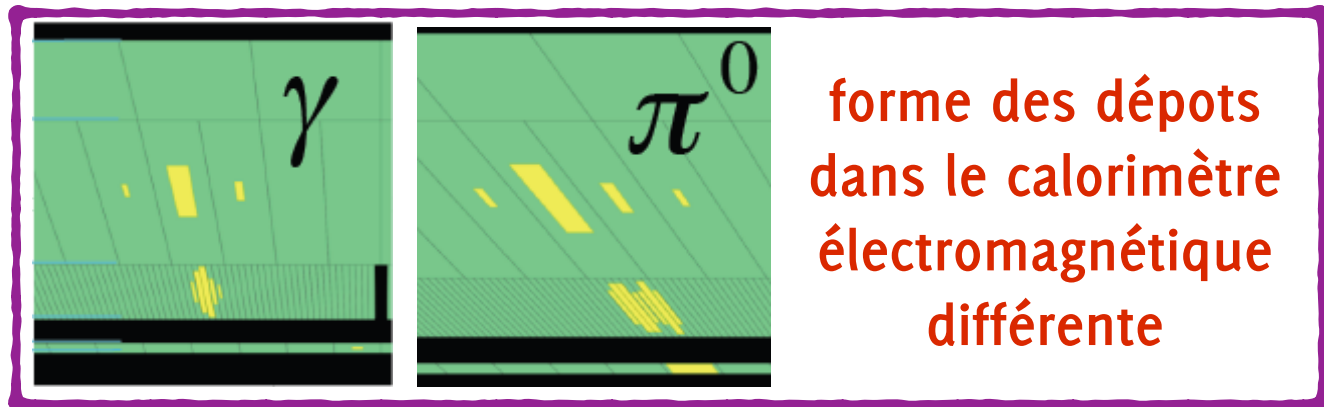
- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



- ★ On développe une stratégie pour séparer le signal du bruit-de-fond
 - bruit-de-fond: ce qui pourrait produire des “traces” dans le détecteur identiques ou similaires à celles laissées par du signal

▸ Ex: γ vs π

en sachant que
 $\pi \rightarrow \gamma\gamma$



forme des dépôts
dans le calorimètre
électromagnétique
différente

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2									
1									
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

Nombre



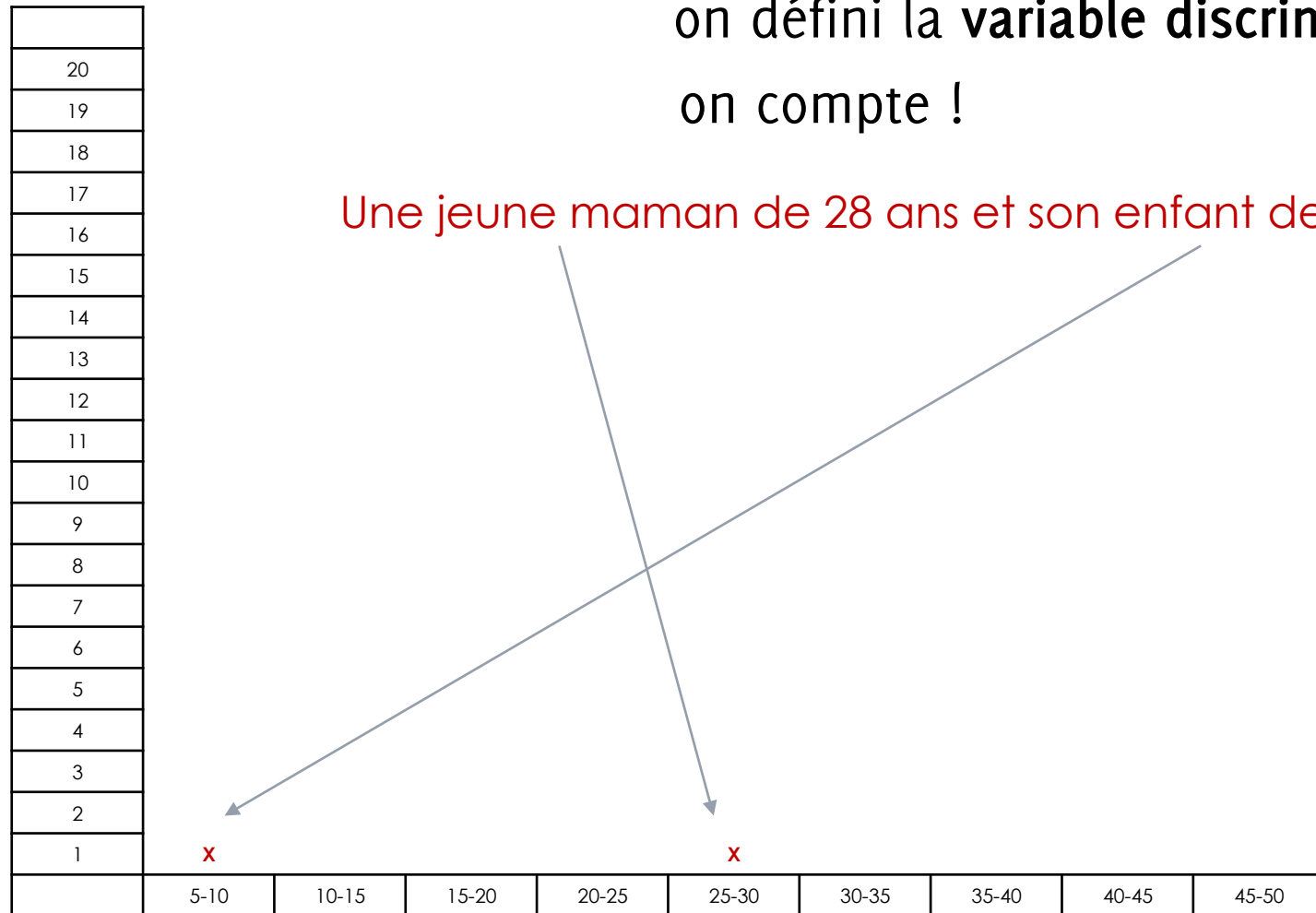
Tranches d'âge



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

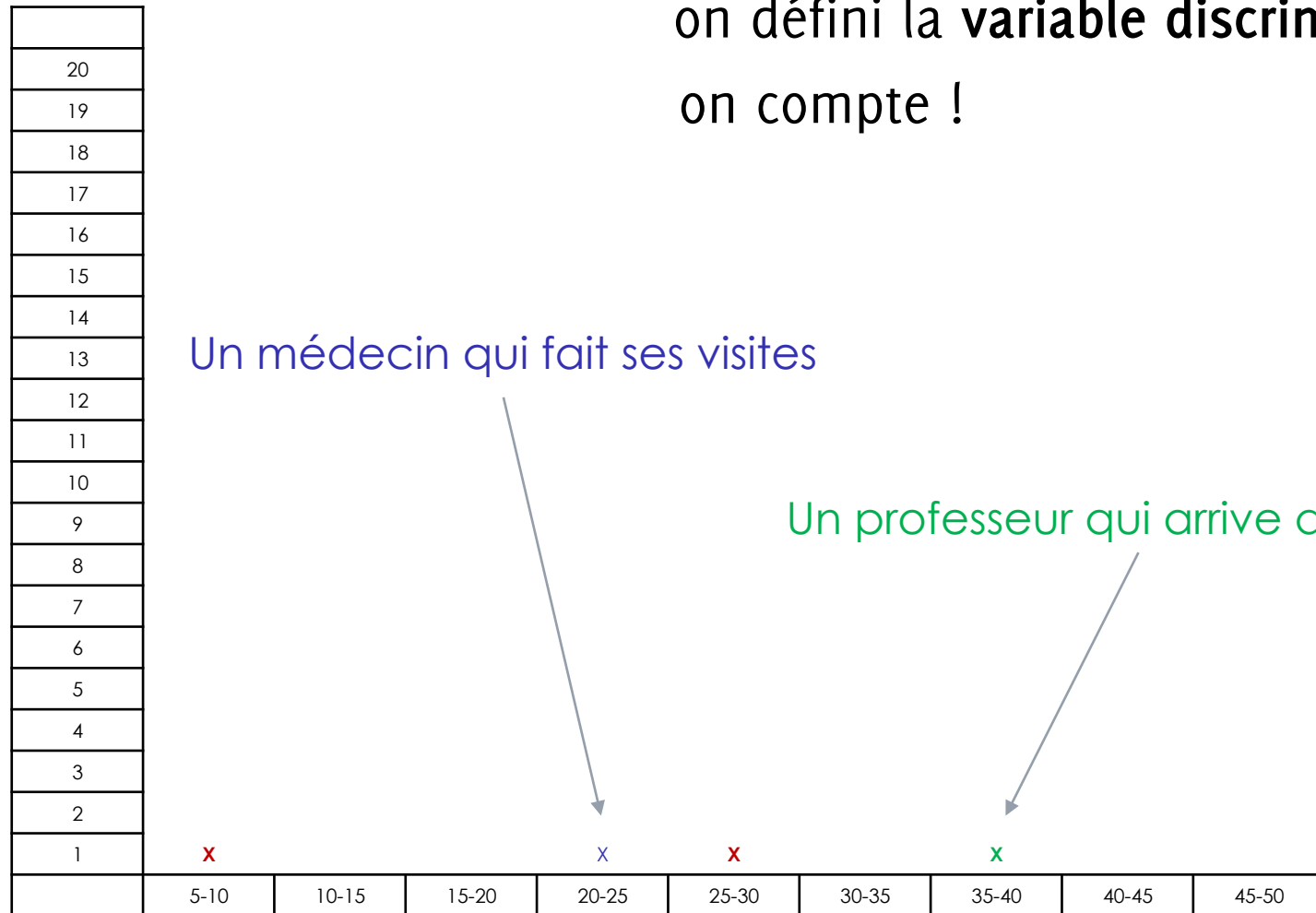
on définit la **variable discriminante**
on compte !



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

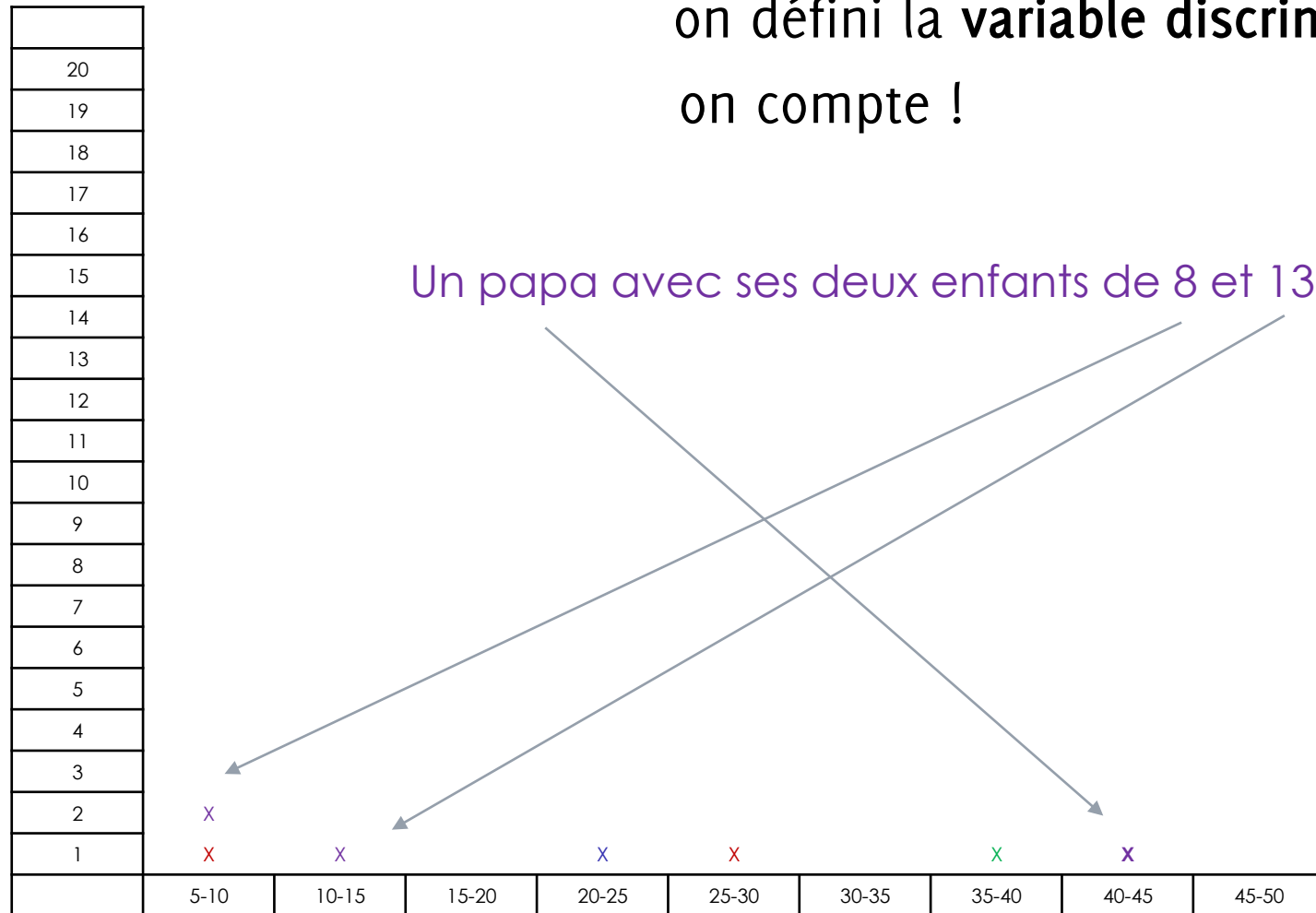
on définit la **variable discriminante**
on compte !



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !



Un papa avec ses deux enfants de 8 et 13 ans

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X								
1	X	X	X	X	X		X	X	
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X								
1	X	X	X	X	X		X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X								
1	X	X	X	X	X		X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X							
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X			X				
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on défini la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4									
3									
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4		X							
3		X							
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on défini la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5									
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6									
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on défini la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7									
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X			X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on défini la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8									
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on défini la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X				X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12									
11									
10									
9									
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X	X			X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

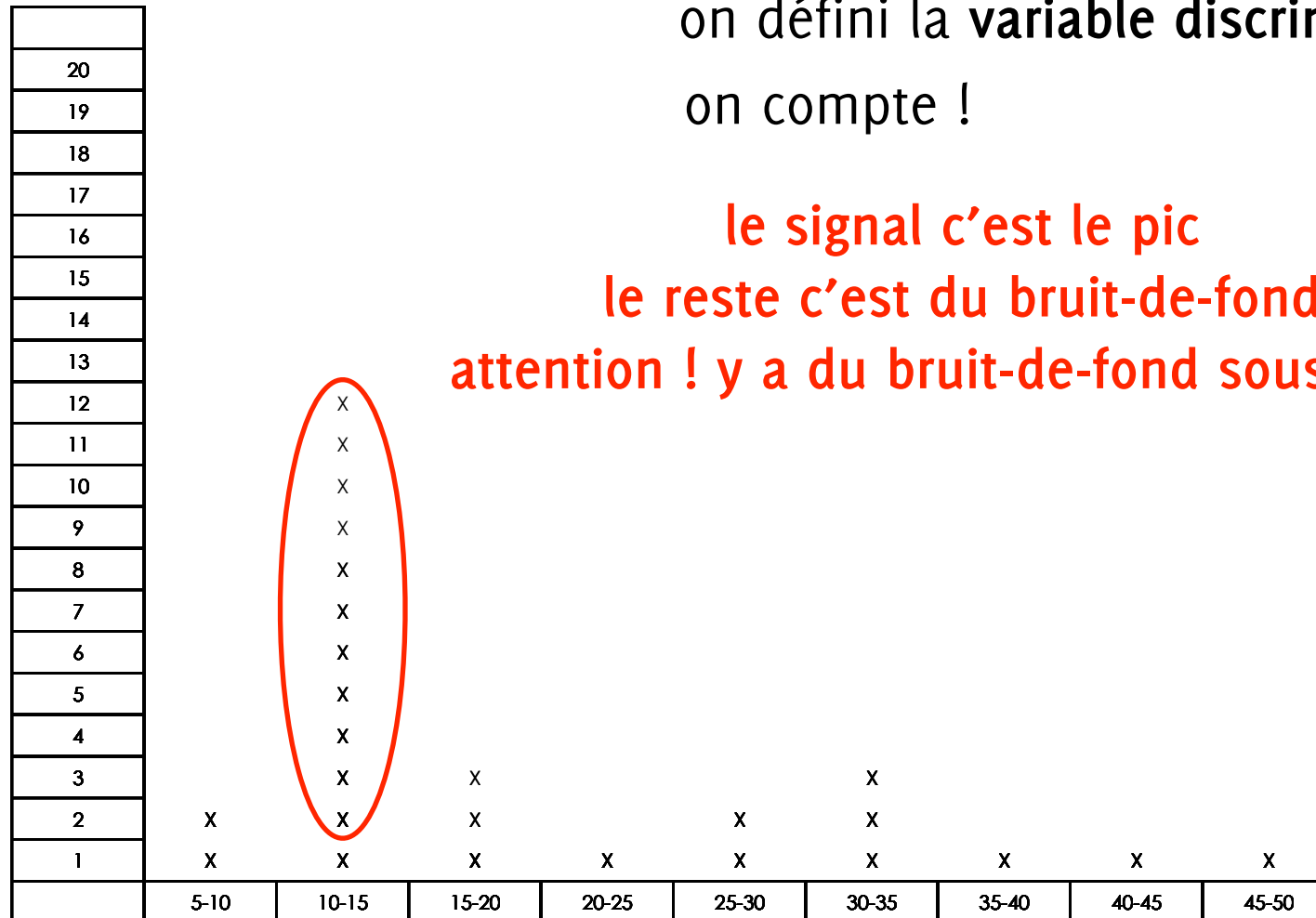
20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12		X							
11		X							
10		X							
9		X							
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X	X			X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

► **But:** compter les élèves d'une classe de collège

on définit la **variable discriminante**
on compte !

le signal c'est le pic
le reste c'est du bruit-de-fond
attention ! y a du bruit-de-fond sous le pic



RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

- ★ On choisit un observable et on 'compte'
 - Ex: masse invariante des deux photons

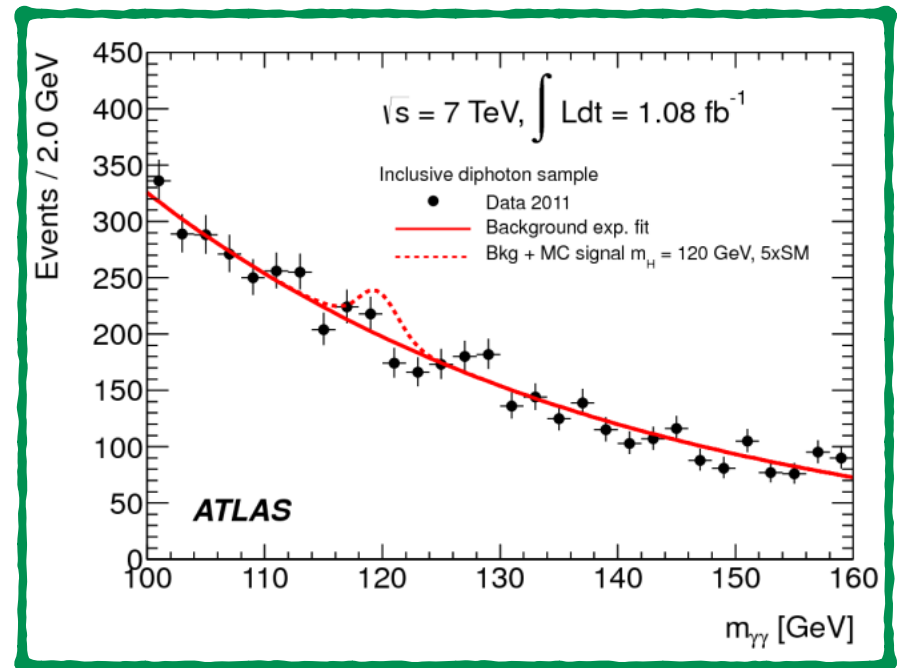
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

- ★ On choisit un observable et on 'compte'
- Ex: masse invariante des deux photons

somme des 4-moments des photons:

$$M_{\text{inv}} \sim (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

si $H \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow M_{\text{inv}} \sim M_{\text{Higgs}}$



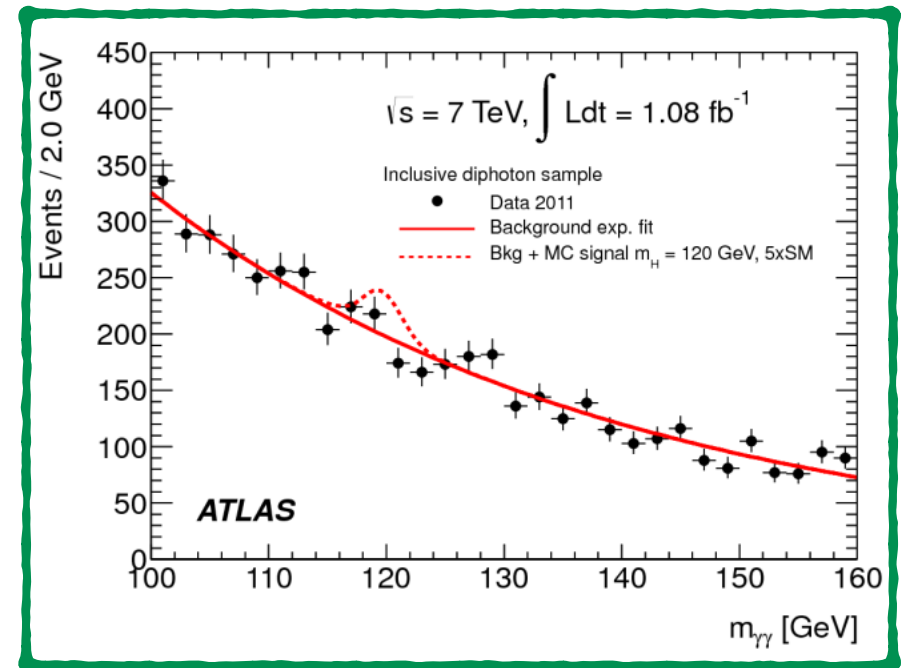
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

- ★ On choisit un observable et on 'compte'
 - Ex: masse invariante des deux photons

somme des 4-moments des photons:

$$M_{\text{inv}} \sim (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

si $H \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow M_{\text{inv}} \sim M_{\text{Higgs}}$

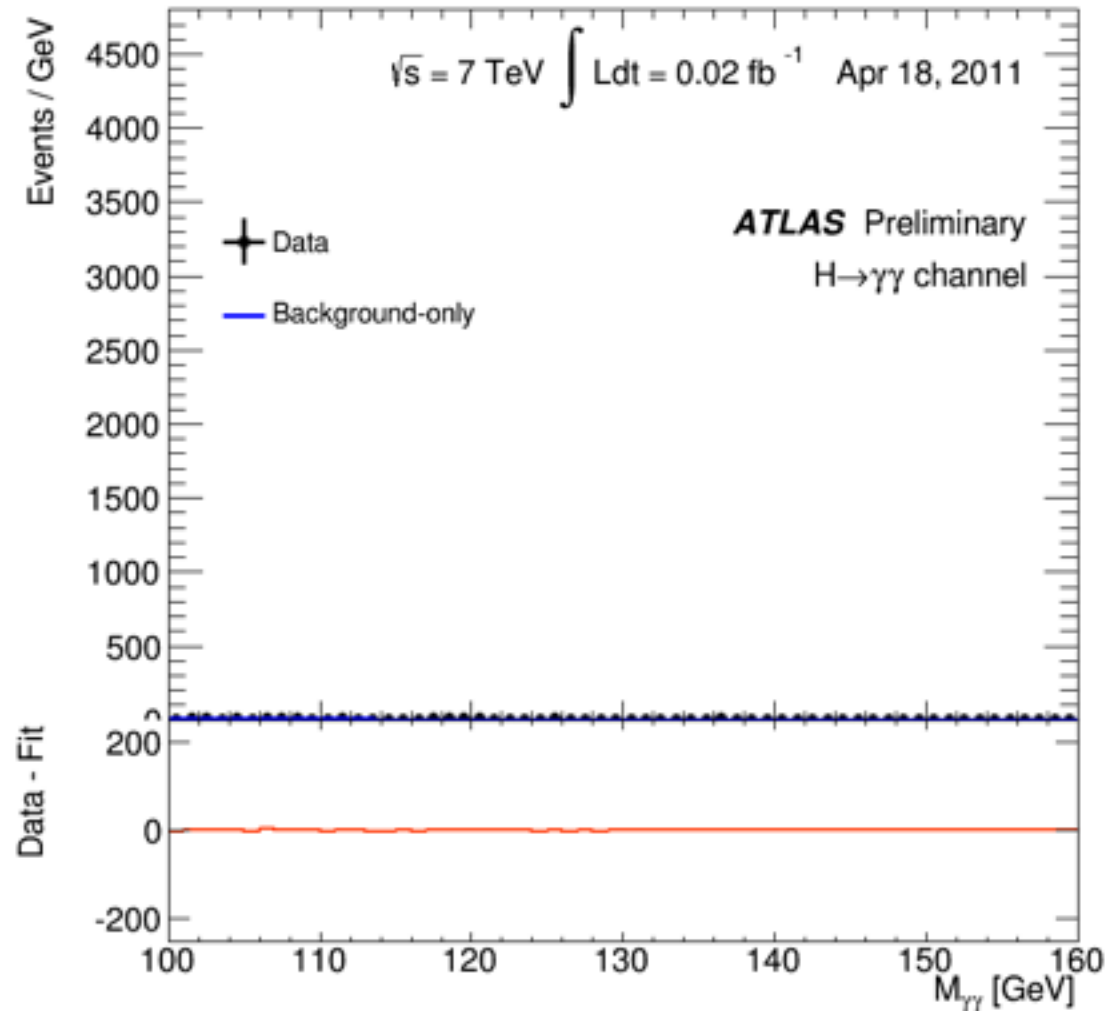


- ★ Interpretation: utilisation d'outils statistiques sophistiqués
 - on calcule la probabilité (p) d'obtenir ce résultat si on a du **bruit-de fond seul**

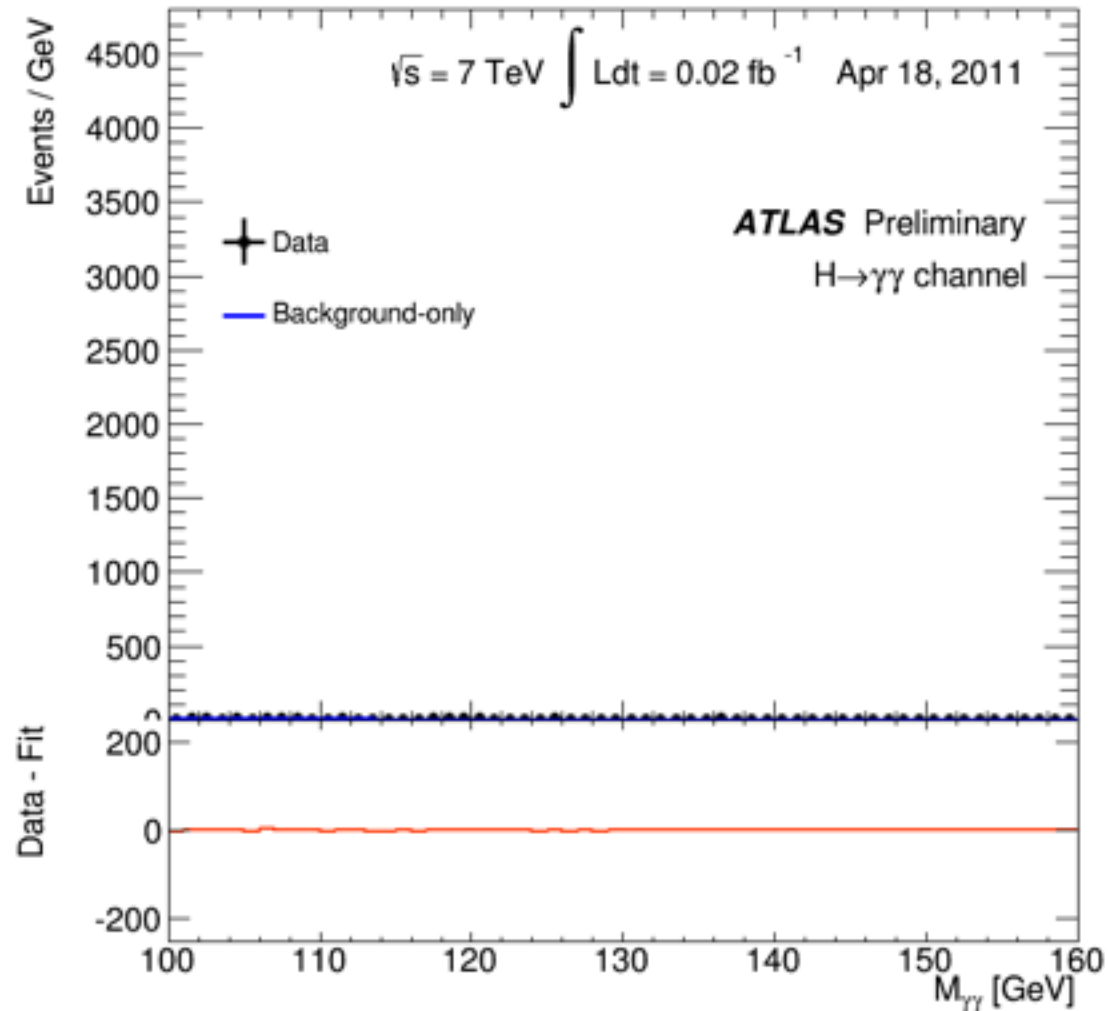
$p \sim 1 \text{ en } 350 (3\sigma) \rightarrow \text{évidence}$

$p \sim 1 \text{ en } 3.5M (5\sigma) \rightarrow \text{découverte}$

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE: $H \rightarrow \gamma\gamma$



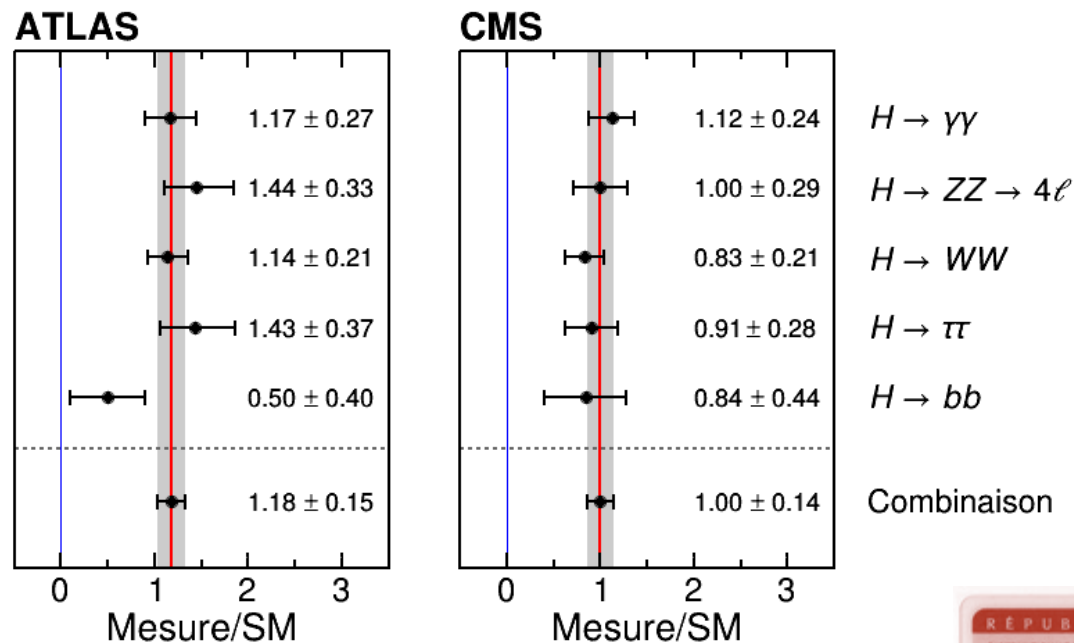
L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE: $H \rightarrow \gamma\gamma$



MESURES DES PARAMÈTRES: EST-CE UN BOSON DE HIGGS?

Il est important de vérifier que cette nouvelle particule est bien un boson de Higgs comme prévu du MS !

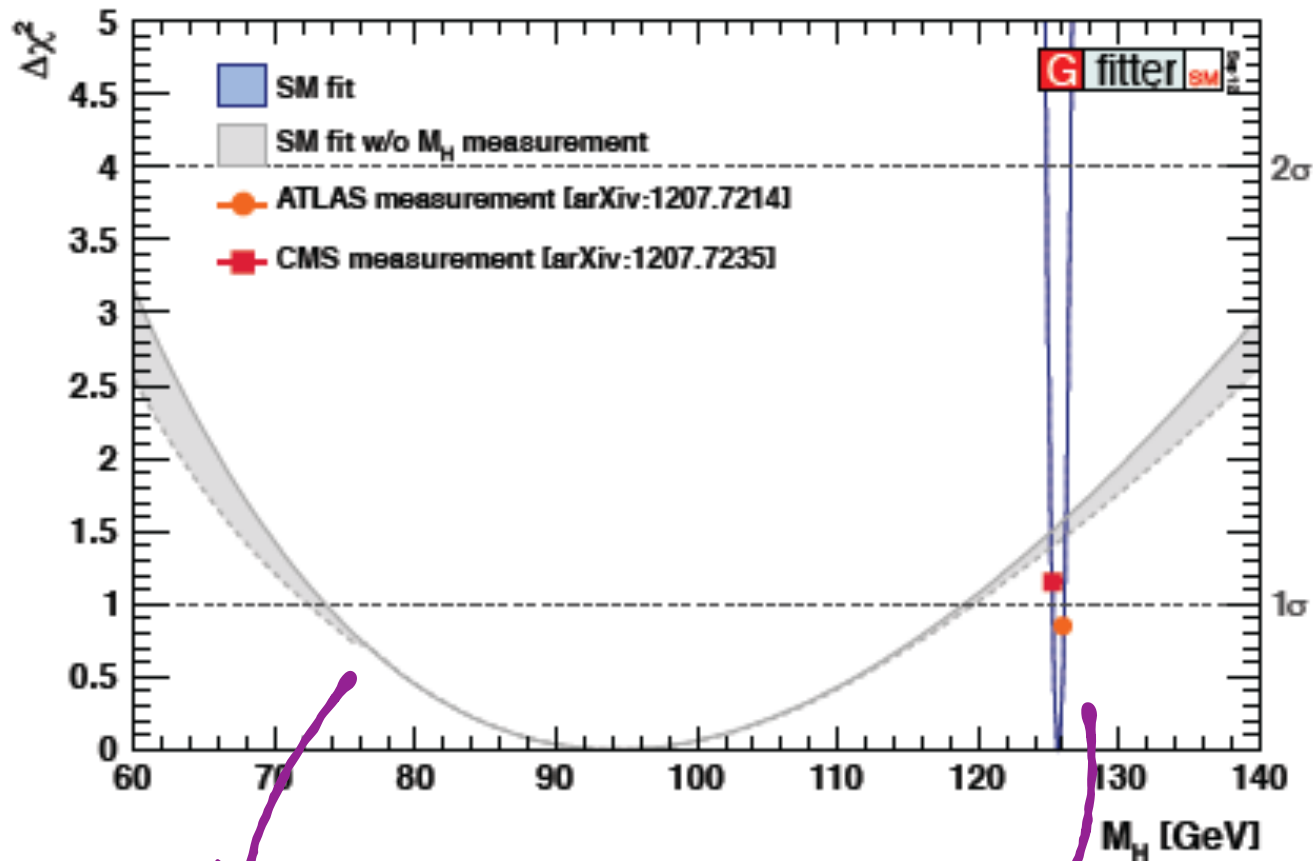
→ mesure des paramètres (couplages, masse, ...)



pour l'instant: mesures en accord avec les attentes, mais incertitudes statistiques encore très grandes !



LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI



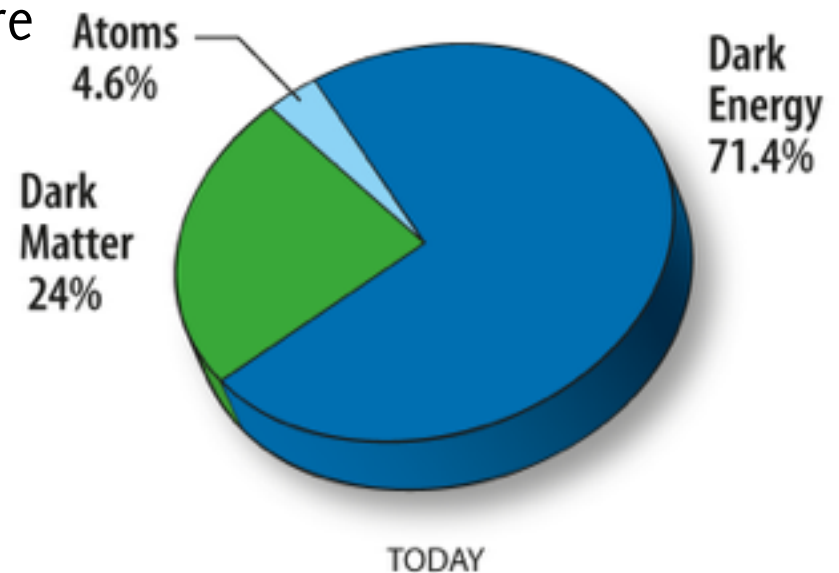
fit sans le boson de Higgs

fit avec le boson de Higgs

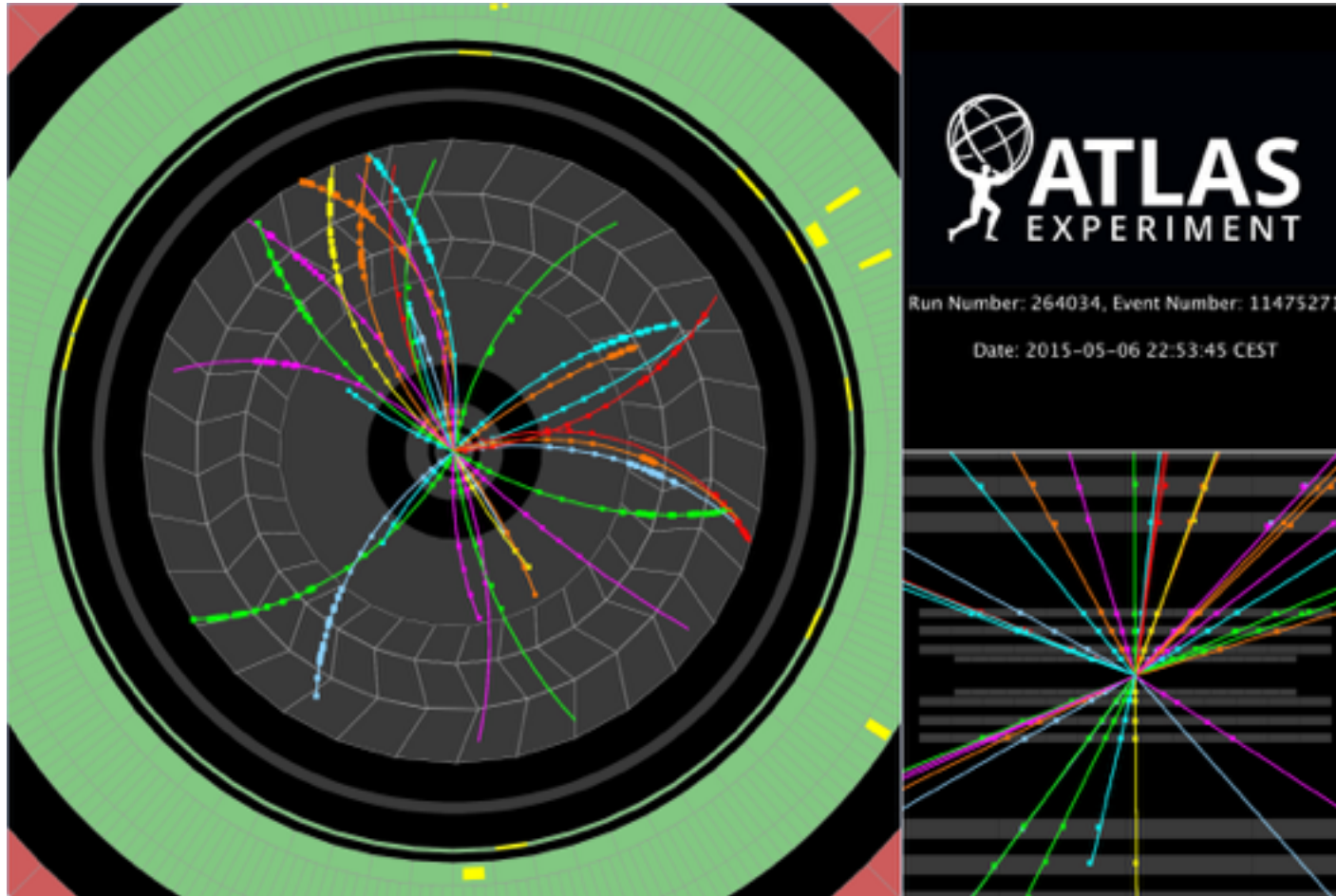
on n'est pas tombés très loin...

PERSPECTIVES

- ★ Mesures de précision → secteur du boson de Higgs
 - Cette nouvelle particule est bien un boson de Higgs?
 - Le Modèle Standard est-il encore aussi 'bon' à l'échelle du TeV?
- ★ Recherches de nouvelle physique
 - Notre connaissance de l'Univers est encore très incomplète: matière noire, asymétrie matière-antimatière, ...
 - Des théories plus amples que le MS prévoient l'existence de nouvelles particules à l'échelle du TeV → Higgs lourds ! Supersymétrie !



PERSPECTIVES



Une nouvelle phase de prise de données à plus haute énergie, plus haute luminosité (= échantillon plus grand) a commencé !!