

RÉSULTATS DU RUN 1 ET PERSPECTIVES POUR LE RUN 2

Camilla Maiani
cmaiani@cern.ch

IPPOG, LAL Orsay
25.01.2016

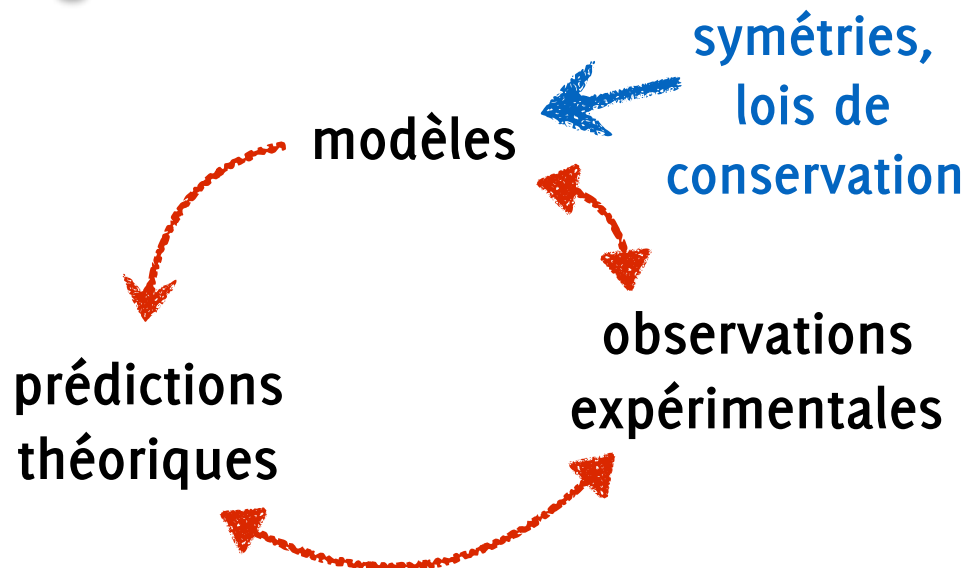


LA PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES EN (TRÈS) BREF

 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

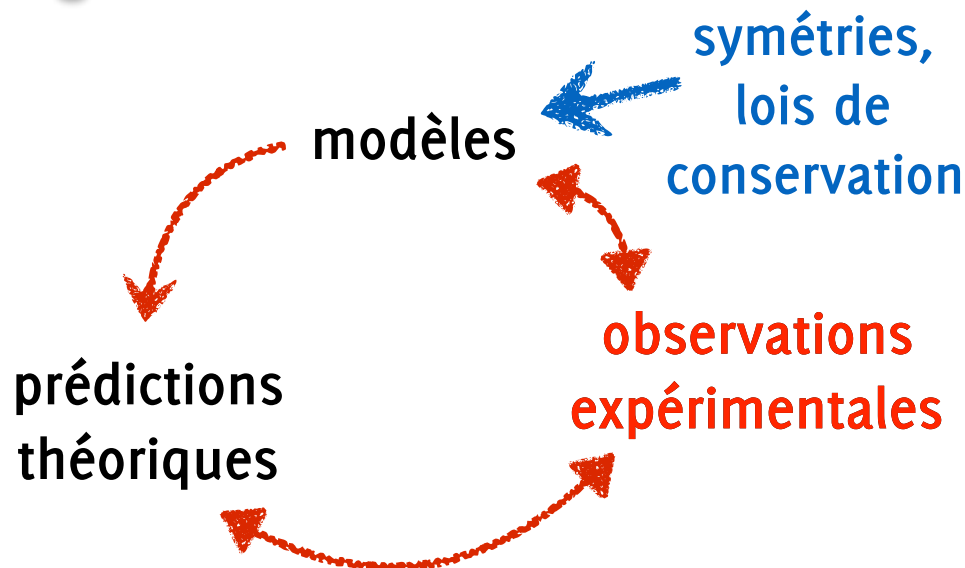


LA PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES EN (TRÈS) BREF

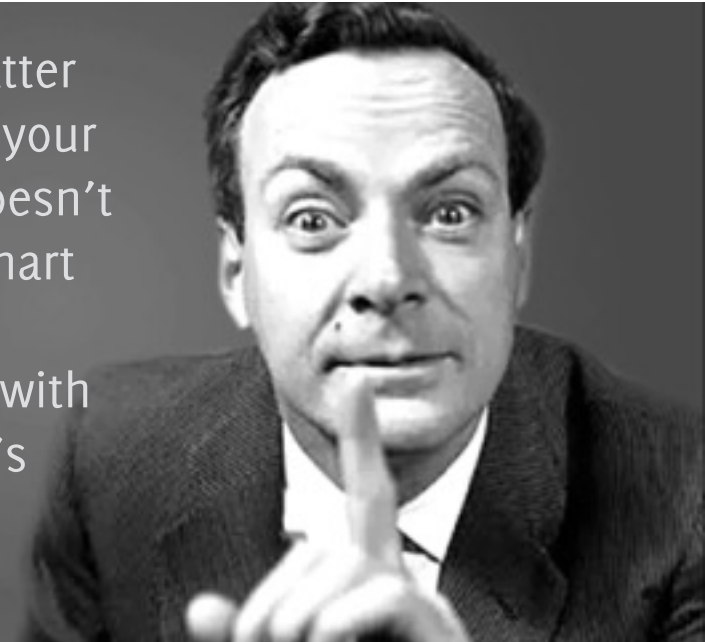
 Physique des particules élémentaires
étude de la nature petite partie qui constitue l'élément

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

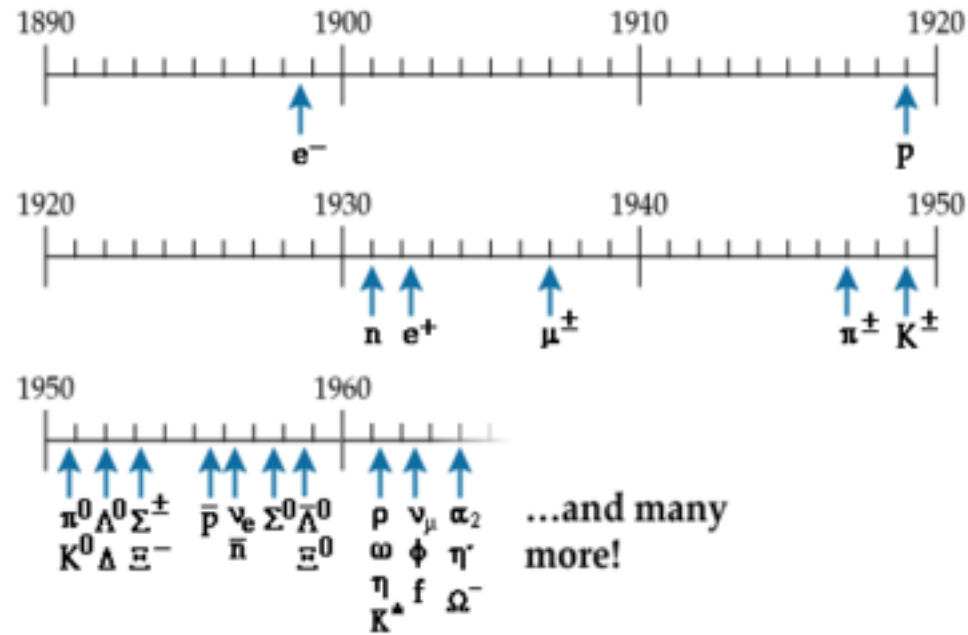
 Notre démarche



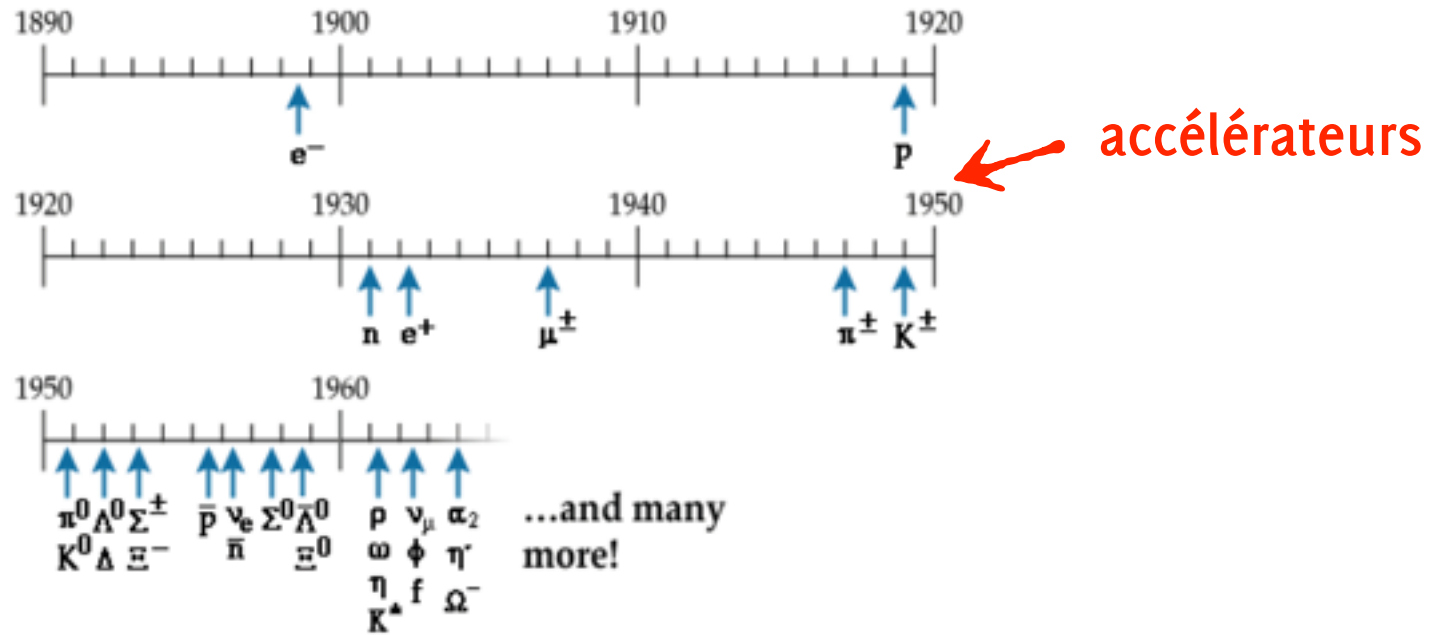
“It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong.”
R. Feynman



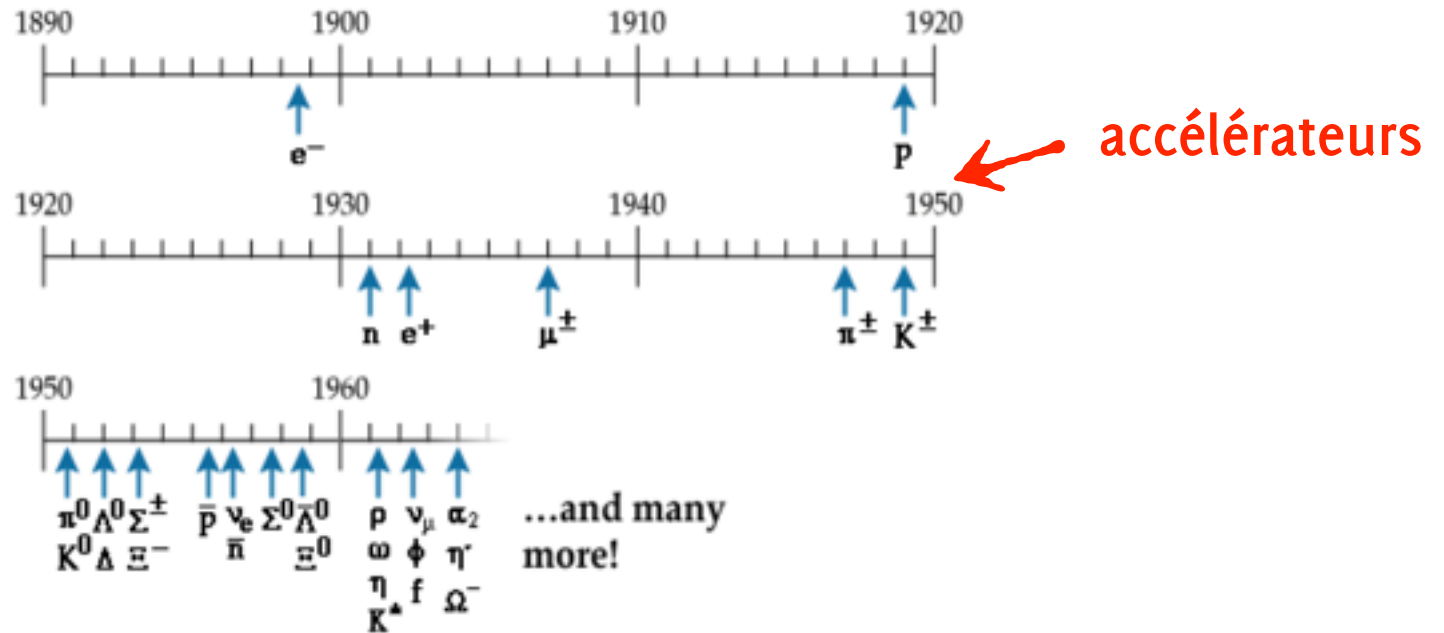
LE RÔLE DES ACCELERATEURS



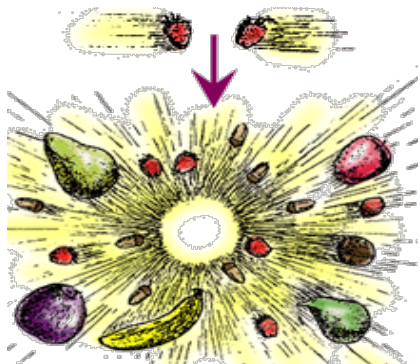
LE RÔLE DES ACCELERATEURS



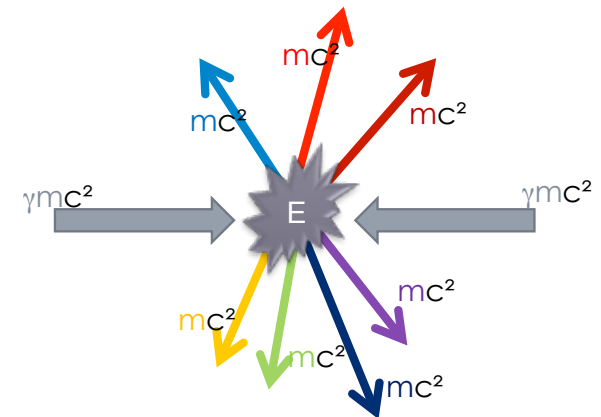
LE RÔLE DES ACCELERATEURS



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



$$E = mc^2$$



LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI: LA 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



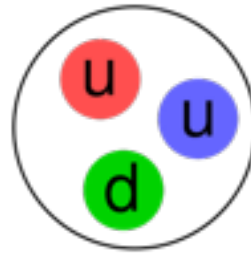
→ fermions (spin semi-entier)

→ ils ont tous été observés expérimentalement

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

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI: LES INTERACTIONS

Forte ↔ gluons



Intensité 1

Electromagnétique ↔ photon



Intensité ~ 0.01 [10⁻²]

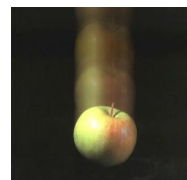
Faible ↔ bosons W[±], Z⁰



Intensité ~ 0.0000001 [10⁻⁷]

théorie quantique des champs

Gravitationnelle ↔ graviton?



Intensité ~ beaucoup de zéros [10⁻⁴²]

avant le LHC

LE PROBLÈME DE LA MASSE ET LE BOSON DE HIGGS

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

pourtant nous on les mesure !

En 1964, Brout-Englert-Higgs proposent l'existence d'un mécanisme de brisure spontanée de cette symétrie, qui (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via leur interaction avec un champ: **le champ dit de Higgs**

LE PROBLÈME DE LA MASSE ET LE BOSON DE HIGGS

avant le LHC

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

pourtant nous on les mesure !

En 1964, Brout-Englert-Higgs proposent l'existence d'un mécanisme de brisure spontanée de cette symétrie, qui (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via leur interaction avec un champ: **le champ dit de Higgs**

- ★ 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 !

avant le LHC

LE PROBLÈME DE LA MASSE ET LE BOSON DE HIGGS

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

pourtant nous on les mesure !

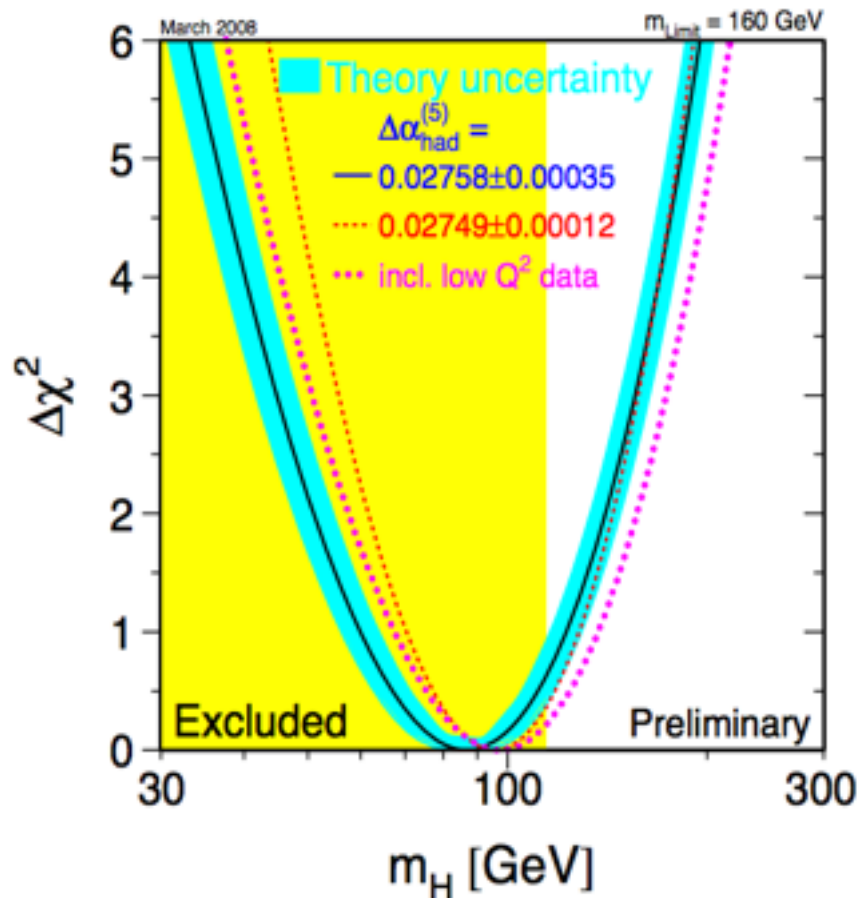
En 1964, Brout-Englert-Higgs proposent l'existence d'un mécanisme de brisure spontanée de cette symétrie, qui (par construction) donne masse aux bosons et aux fermions via leur interaction avec un champ: **le champ dit de Higgs**

- ★ 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

CONTRAINTES EXPÉRIMENTALES SUR LA MASSE DU BOSON DE HIGGS

les mesures de précision des paramètres du MS
indiquent la voie à suivre...!



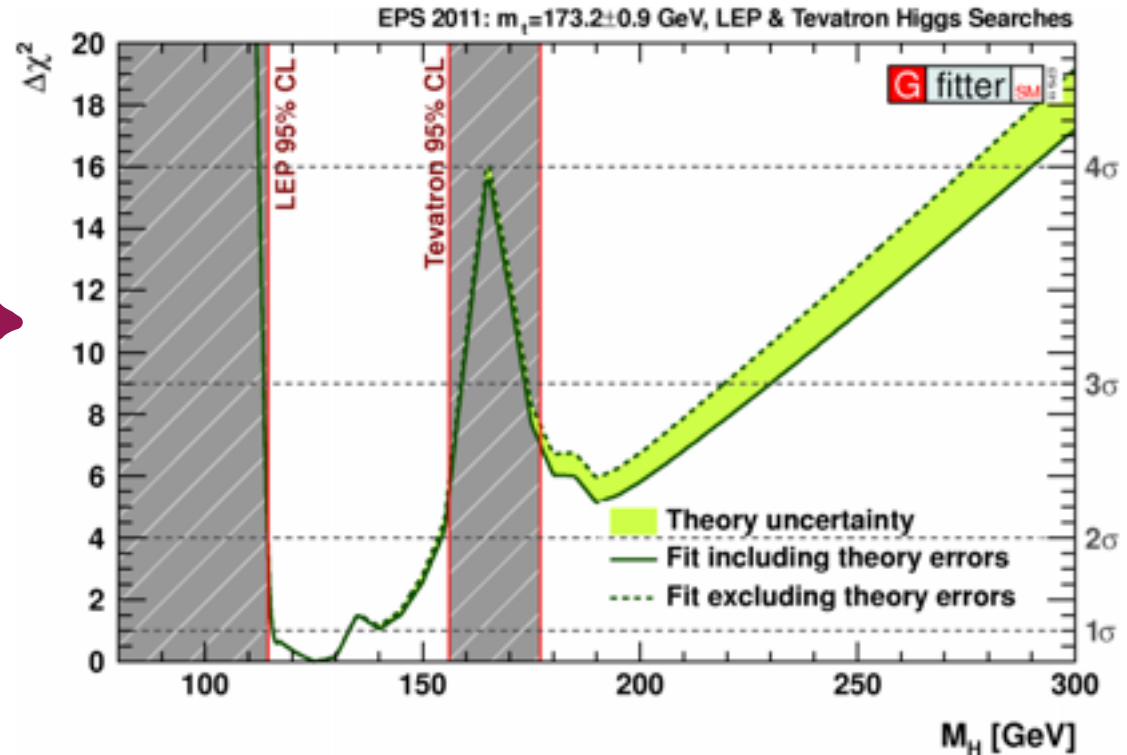
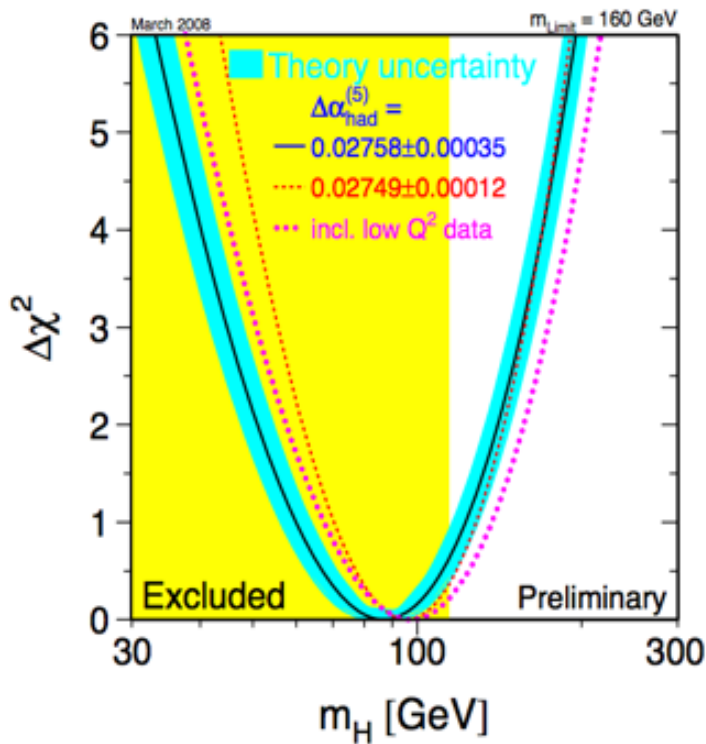
$$\chi^2 = \sum (\mathbf{x}_i - \langle \mathbf{x}_i \rangle)^2 / \sigma_i^2$$

x_i : paramètres du MS que l'on
mesure (ex: m_W , m_Z)

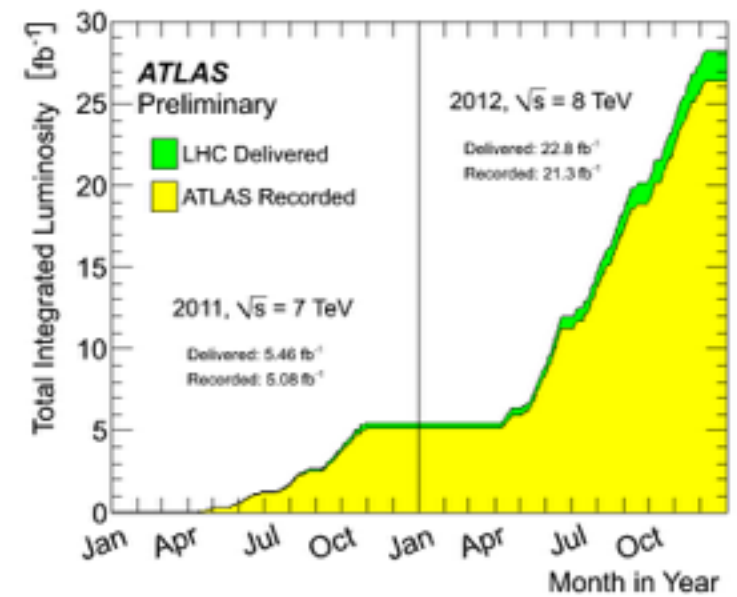
→ le minimum du χ^2 'semble préférer'
des bosons de Higgs d'une centaine de
GeV...à vérifier !

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 LHC a été construit (principalement) pour le trouver !



LHC EPISODE 1: LA CHASSE AU BOSON (MAIS PAS QUE)

2010-2012

- 7 à 8 TeV d'énergie dans le centre de masse
- 25 fb⁻¹ de luminosité intégrée
 - ~500 Higgs par manip
 - 1M de Z/manip/fb⁻¹ en leptons
 - 10M de W/manip/fb⁻¹ en leptons





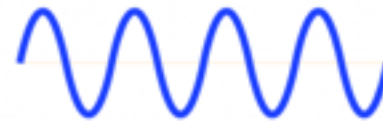
PARENTHÈSE SUR LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN

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

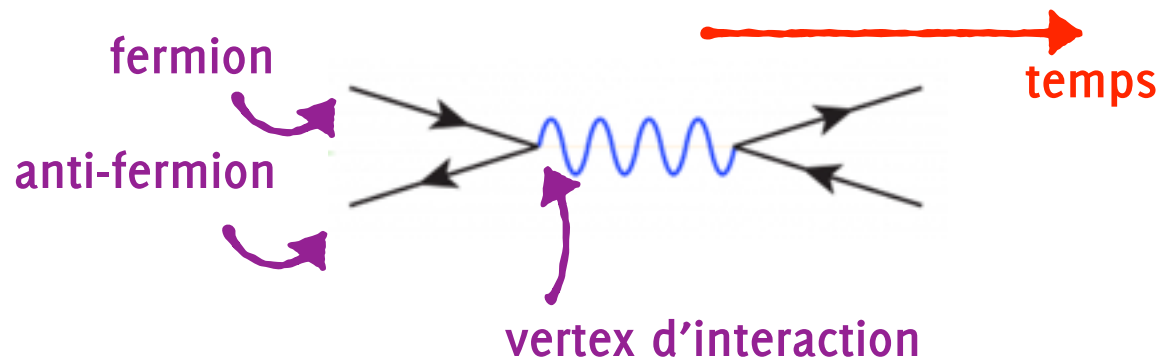


fermions



bosons

On peut connecter les lignes: attention au sens des flèches

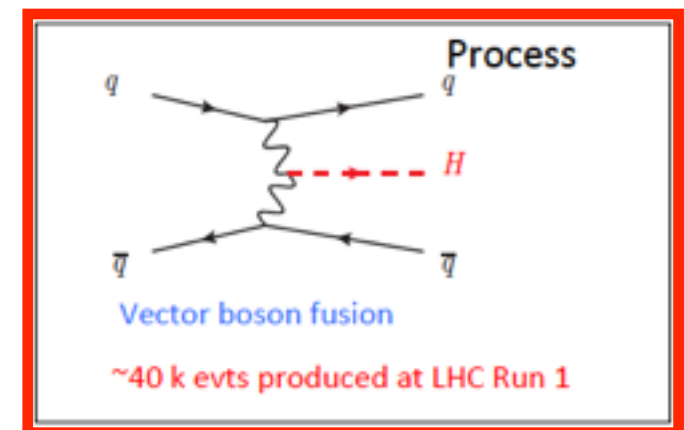
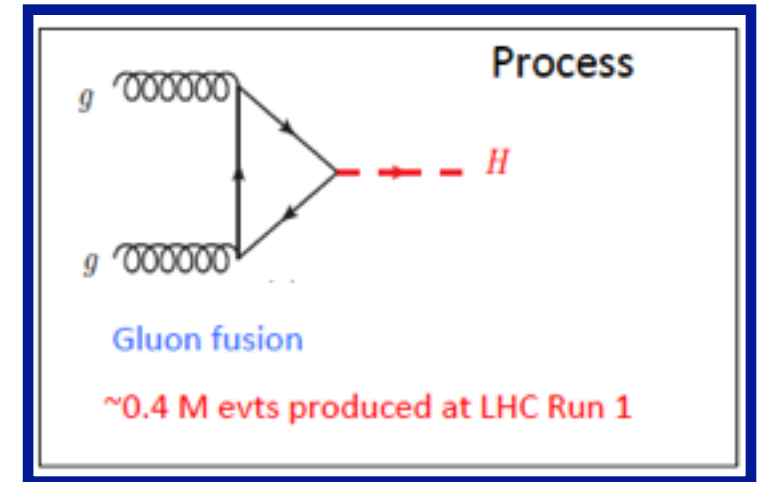
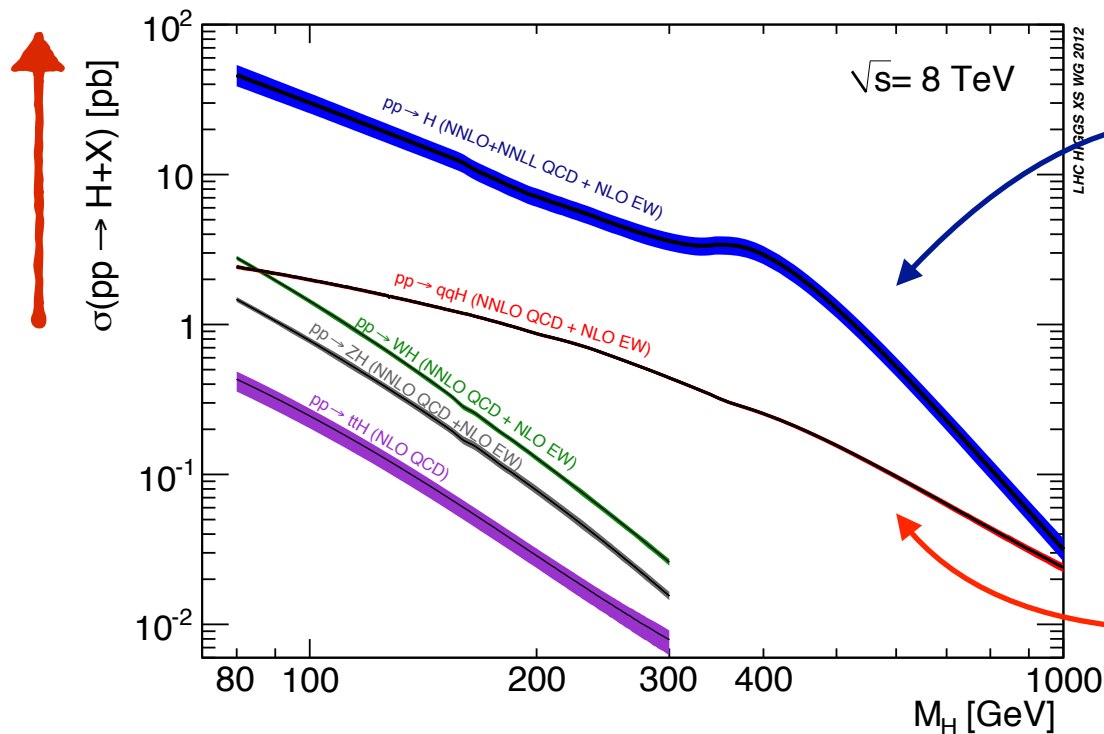


Ceci nous permet de représenter les concepts de “production” et “désintégration” d'une particule

IDENTIKIT DU BOSON DE HIGGS: PRODUCTION (AU LHC)

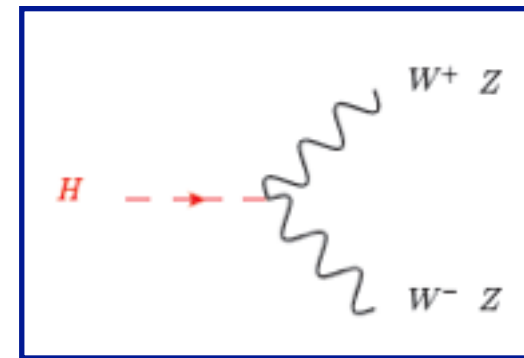
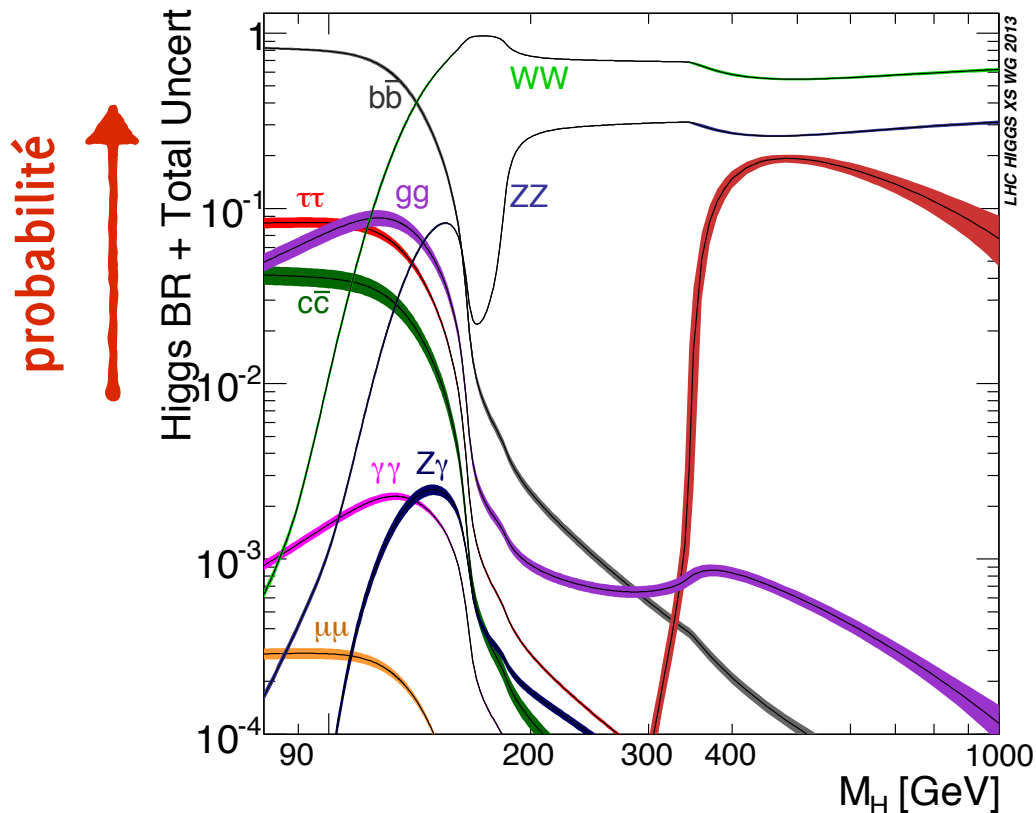
Un boson de Higgs peut être le produit de différentes interactions

~ probabilité/volume



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

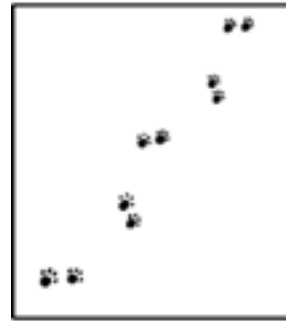
DÉTECTION DE PARTICULES: LE PRINCIPE

DÉTECTION DE PARTICULES: LE PRINCIPE

on ne voit que leur traces..

BACKYARD SNOW TRACKING GUIDE

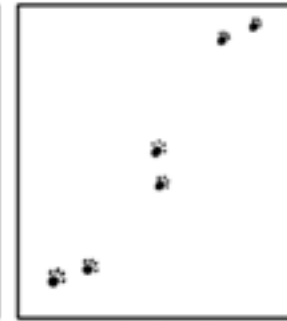
<http://xkcd.com/702/>



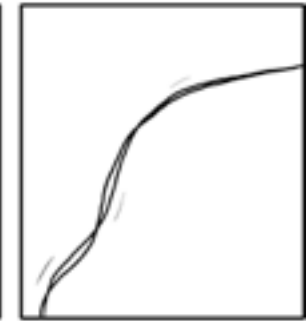
CAT



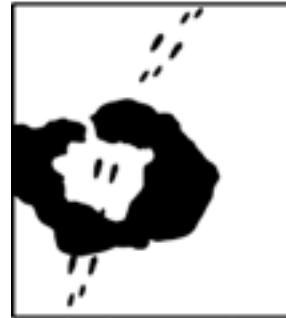
MOOSE AND SQUIRREL



LONGCAT



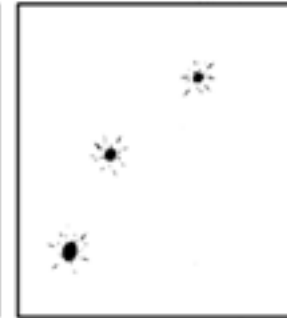
MOUSE RIDING BICYCLE



RABBIT STOPPING
TO USE HAIR DRYER



LEGOLAS



BOBCAT ON POGO STICK



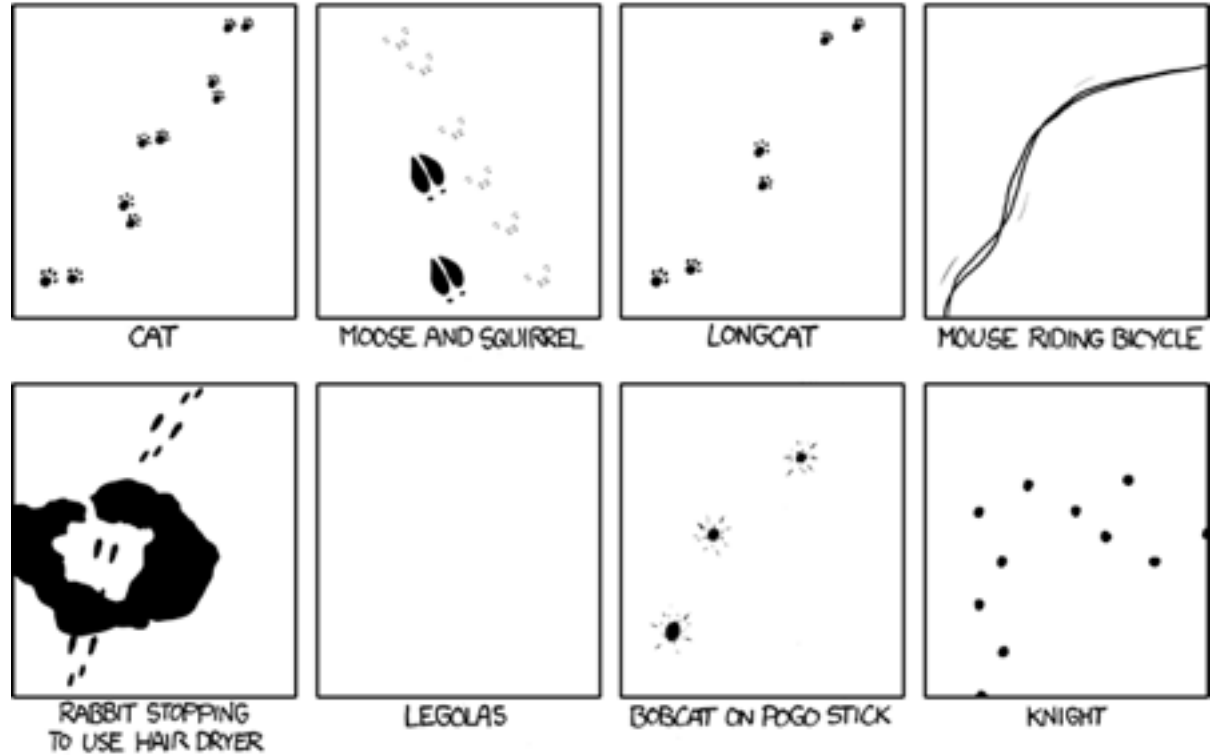
KNIGHT

DÉTECTION DE PARTICULES: LE PRINCIPE

on ne voit que leur traces..

BACKYARD SNOW TRACKING GUIDE

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



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



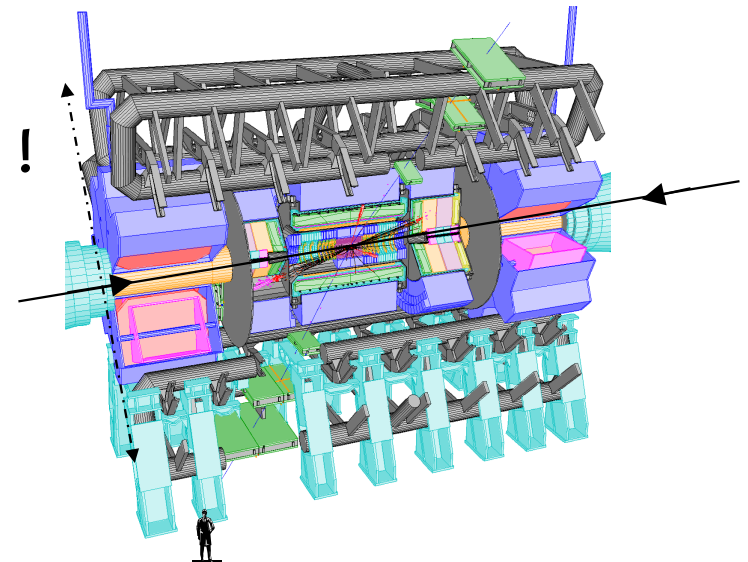
~ 2 cm



~ 10 cm



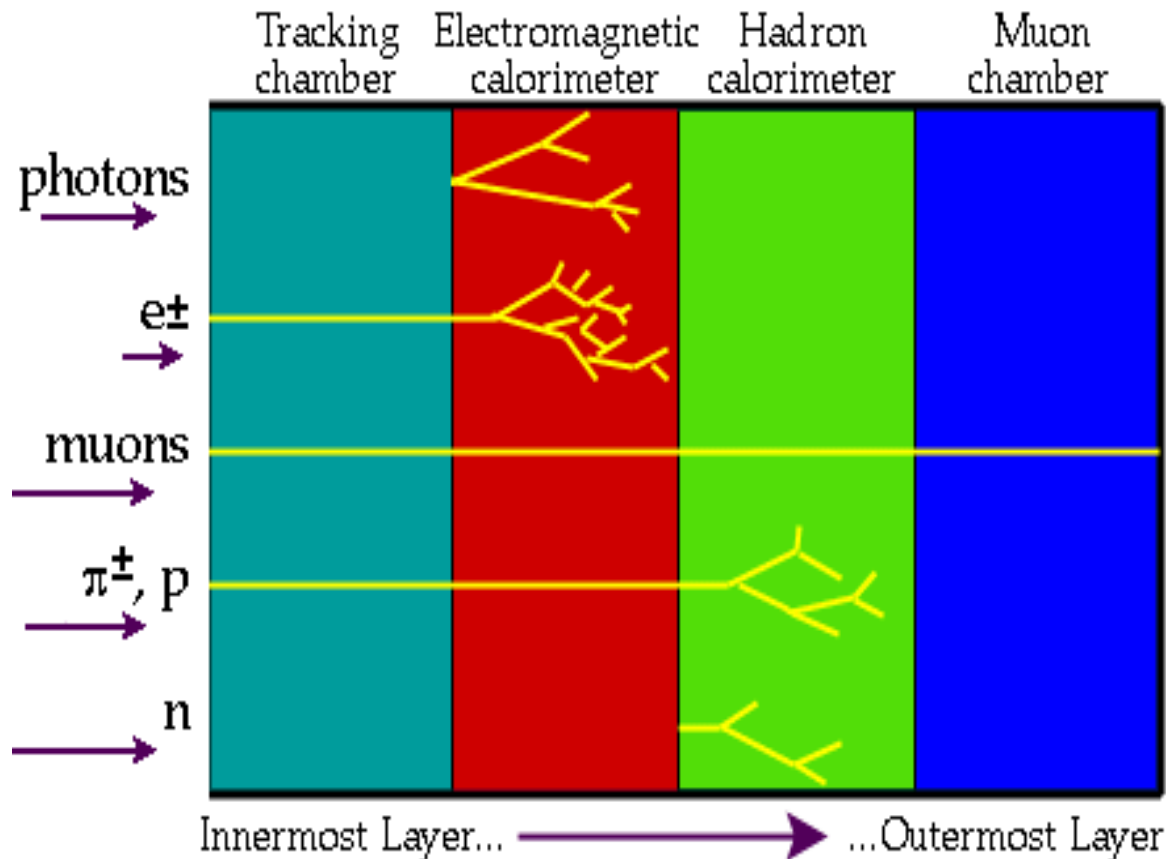
~ 50 cm



~ 4000 cm

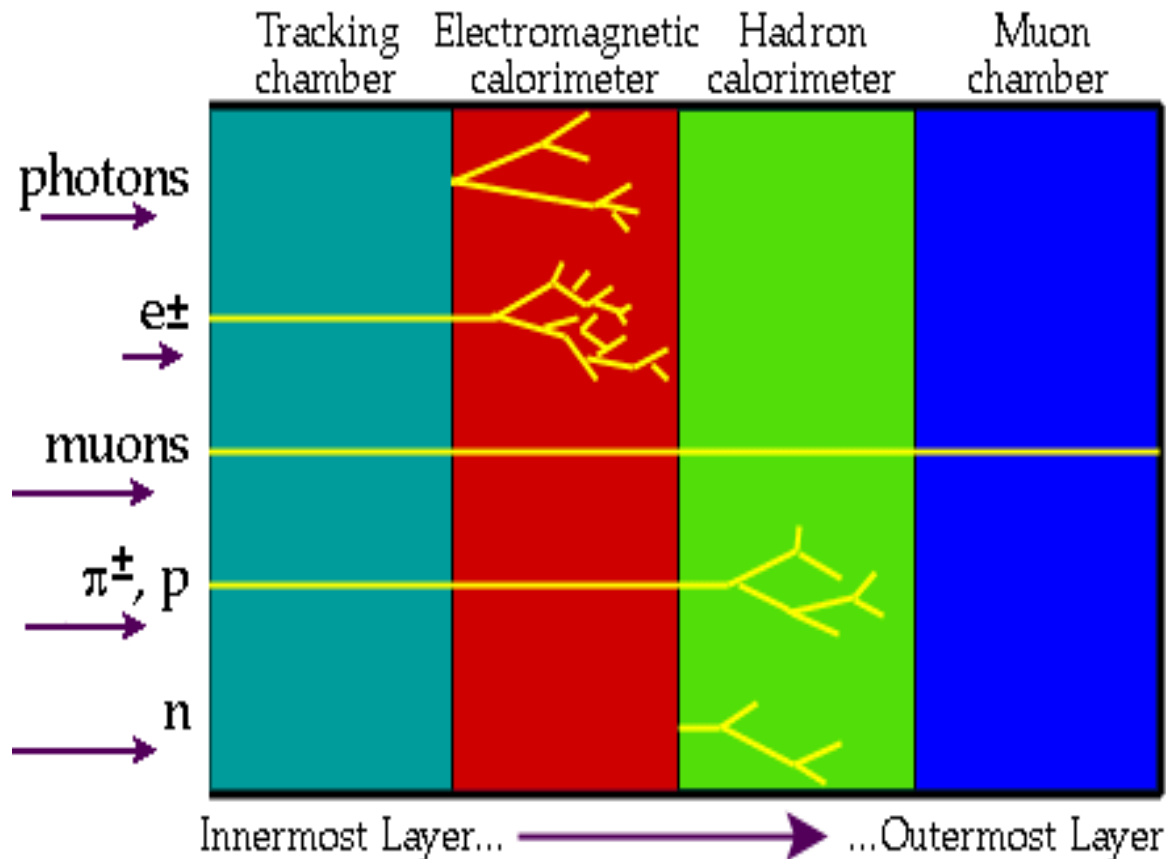
DÉTECTION DE PARTICULES: EN VRAI

- ▶ 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



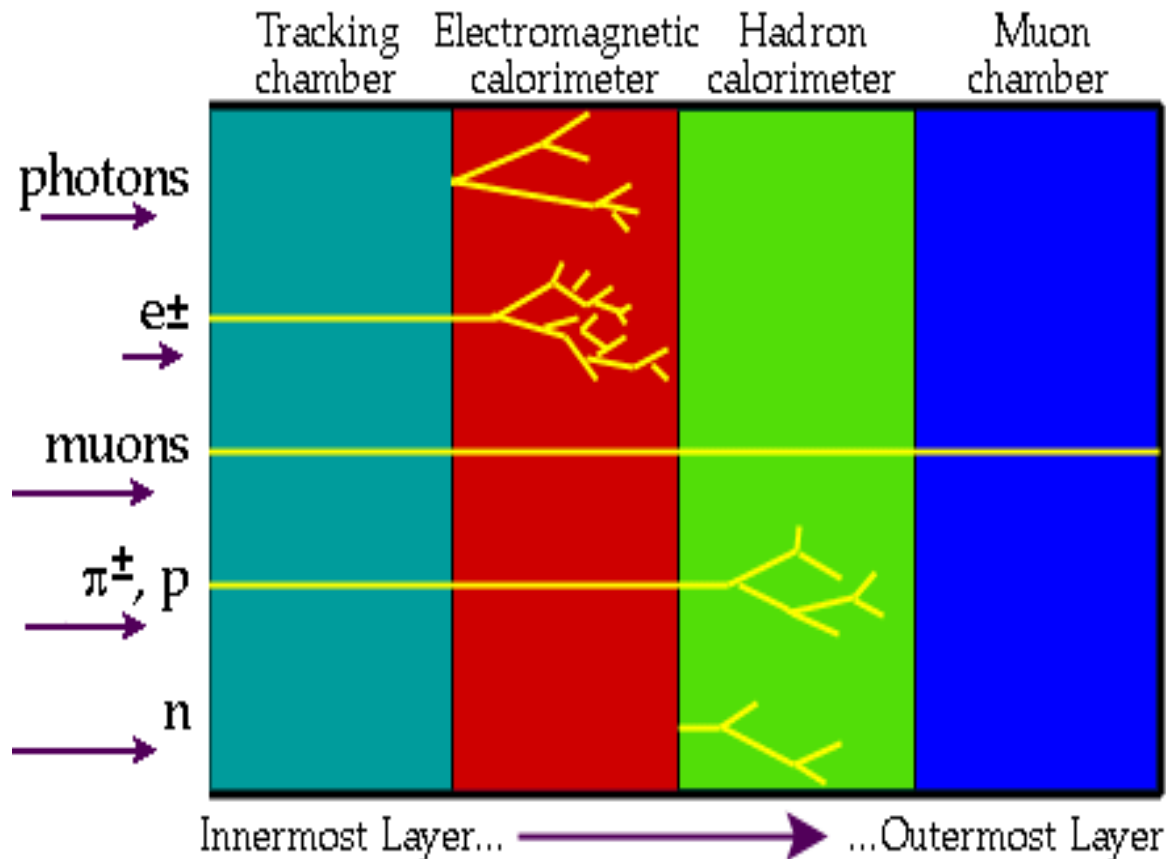
DÉTECTION DE PARTICULES: EN VRAI

- ▶ 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



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



On produit un boson de Higgs chaque 1 milliard d'événements !



Wissens de données Informatiques au LHC Olivier Bernabé



Découverte annoncée le 04/07/2012



Les promesses d'une nouvelle pilule tout en un contre le VIH 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.

PHYSIQUE Au terme de deux présentations simultanées effectuées hier matin au Cern, à Genève, le directeur de l'organisation, Rolf Heuer, se tourne vers l'assistance, un grand sourire aux lèvres : « Je pense qu'on l'a. Qu'il est ce que vous en dites ? » Dans une grande clameur et un tonnerre d'applaudissements, les dizaines de physiciens réunis dans la salle jubilent en vibrant : « Oui ! » 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



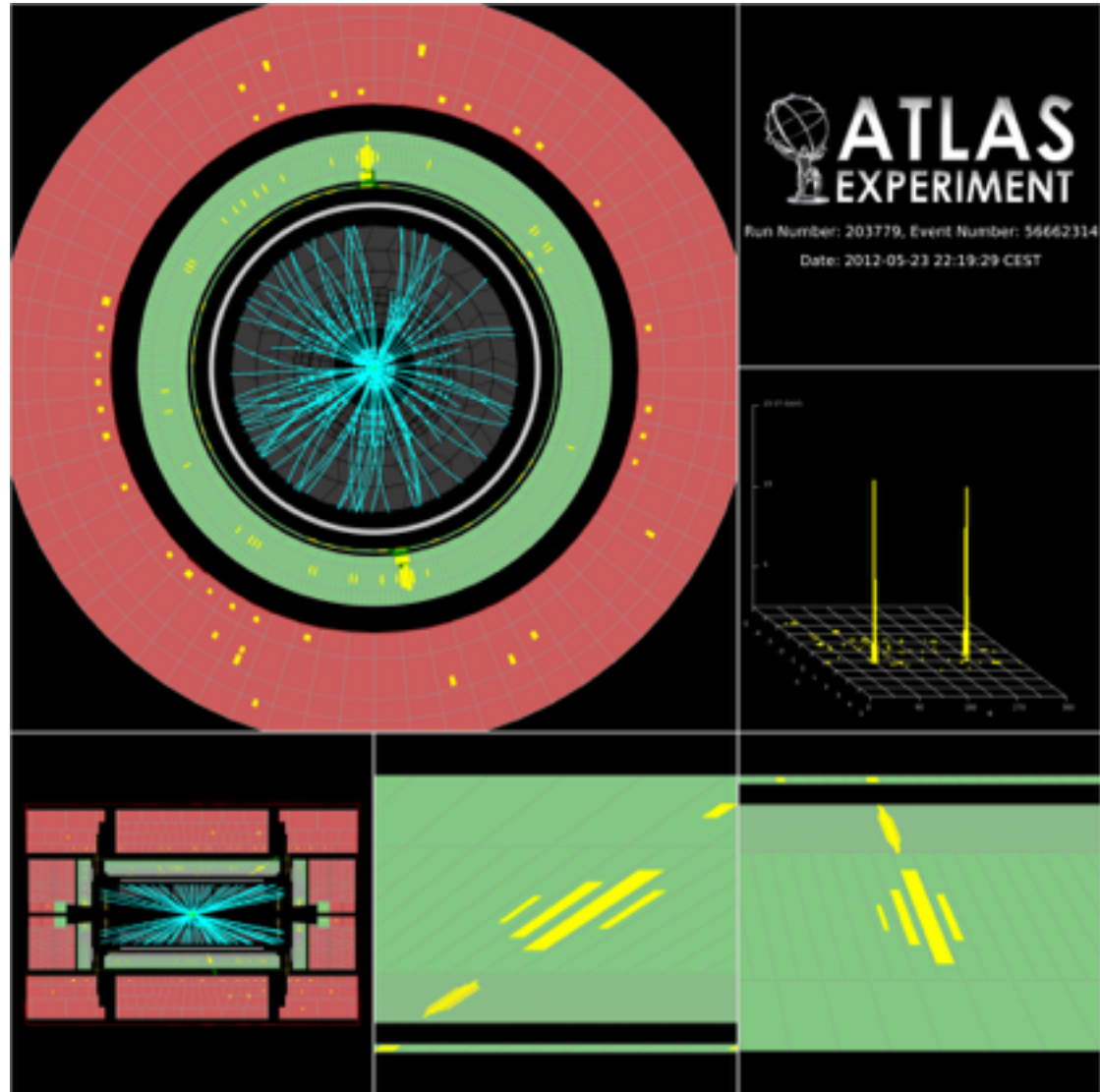
"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

JE VOUS PRÉSENTE...



'M. Higgs'

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



'candidat Higgs'

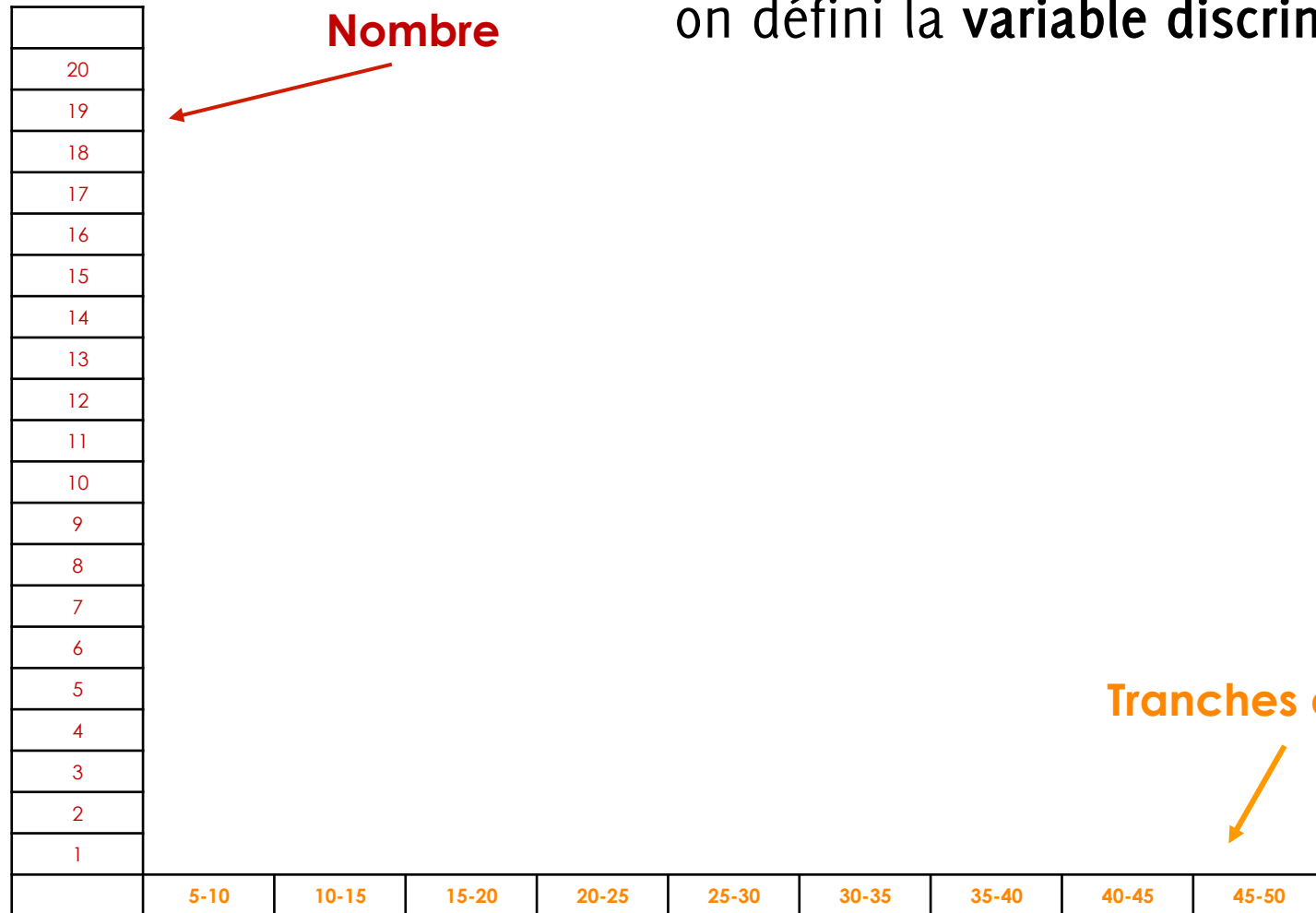
L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

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

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

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

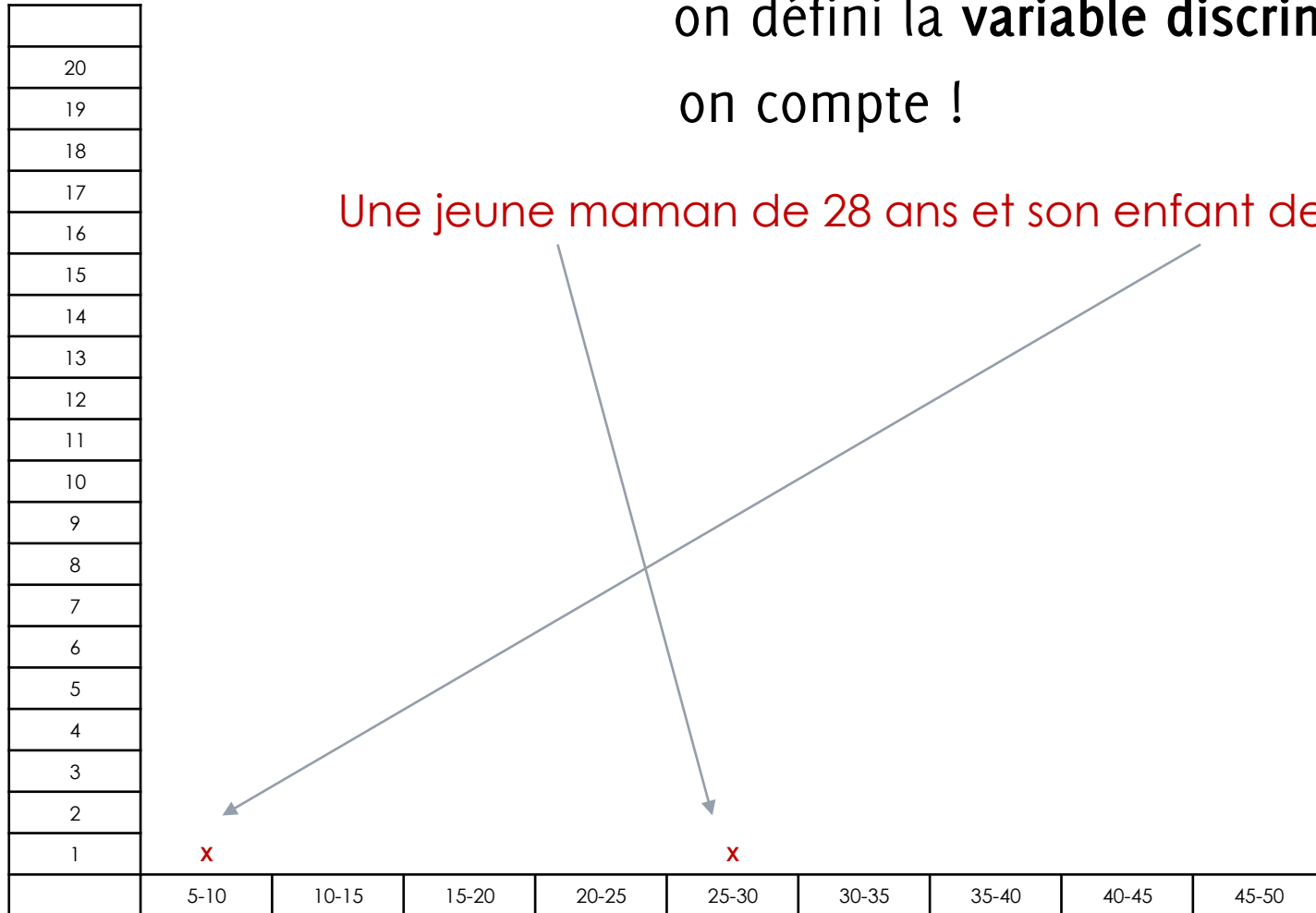
on définit la **variable discriminante**



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

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

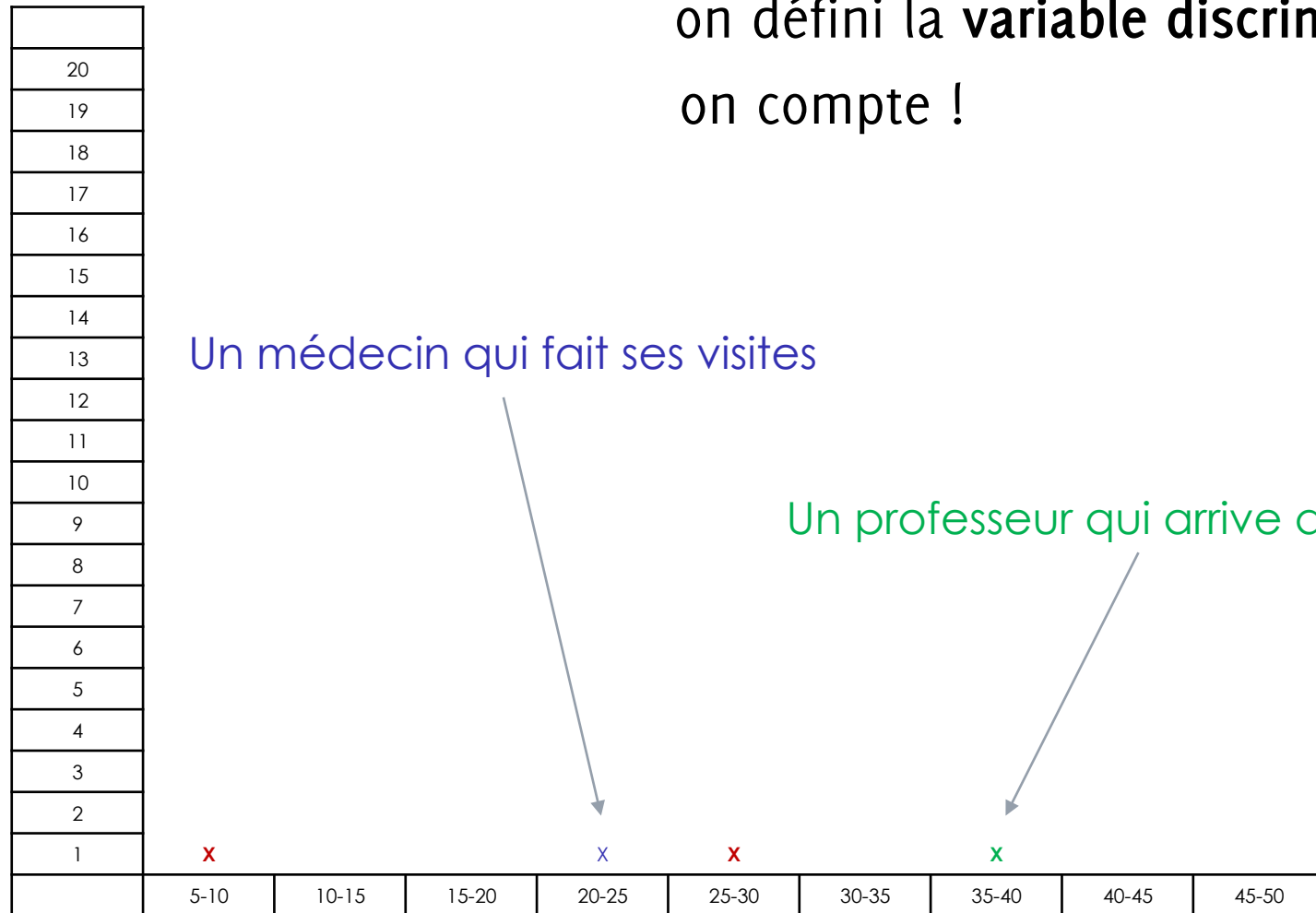
on définit la **variable discriminante**
on compte !



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

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

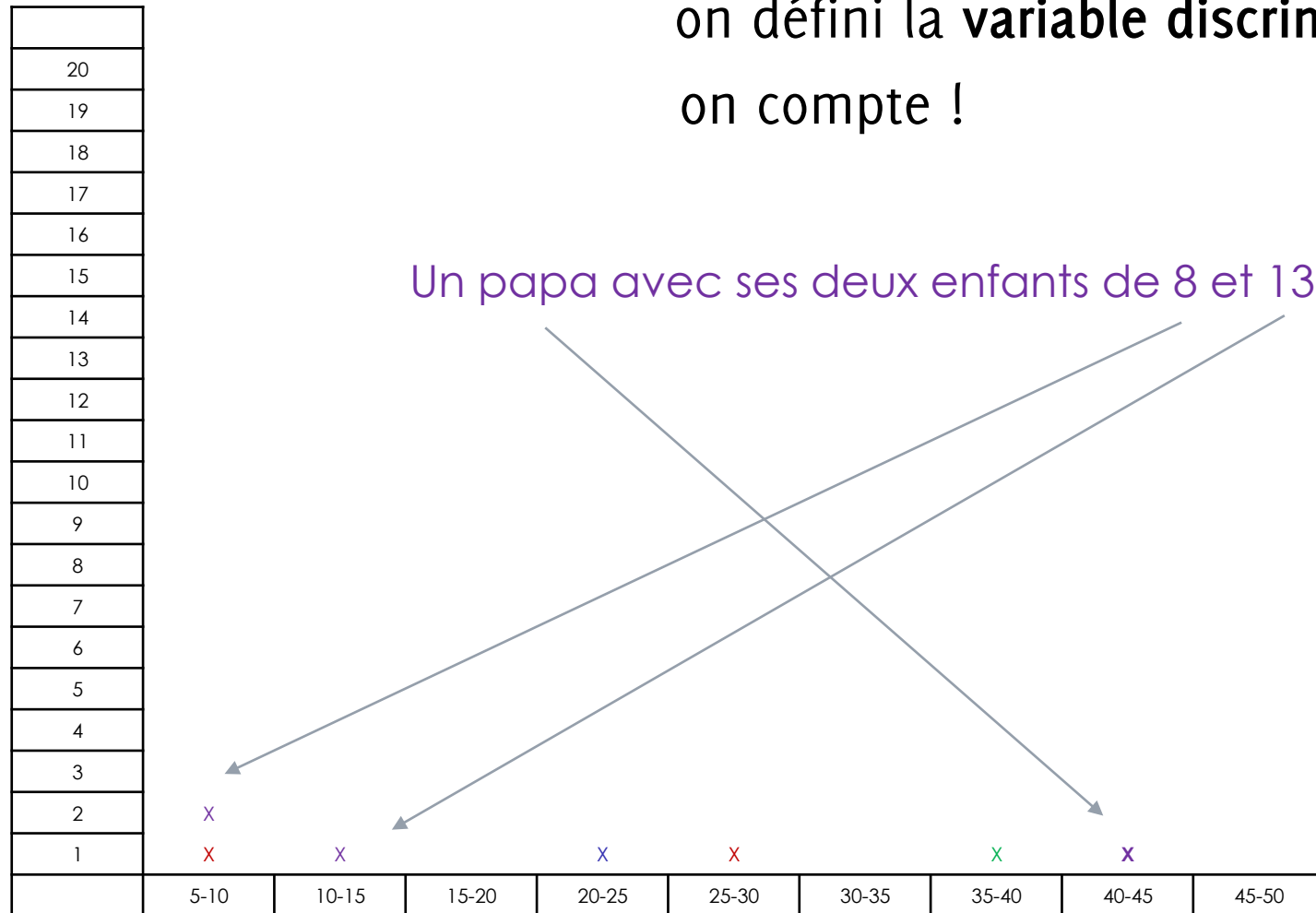
on définit la **variable discriminante**
on compte !



L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

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

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



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 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 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 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				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 définit 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 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	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			
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 !

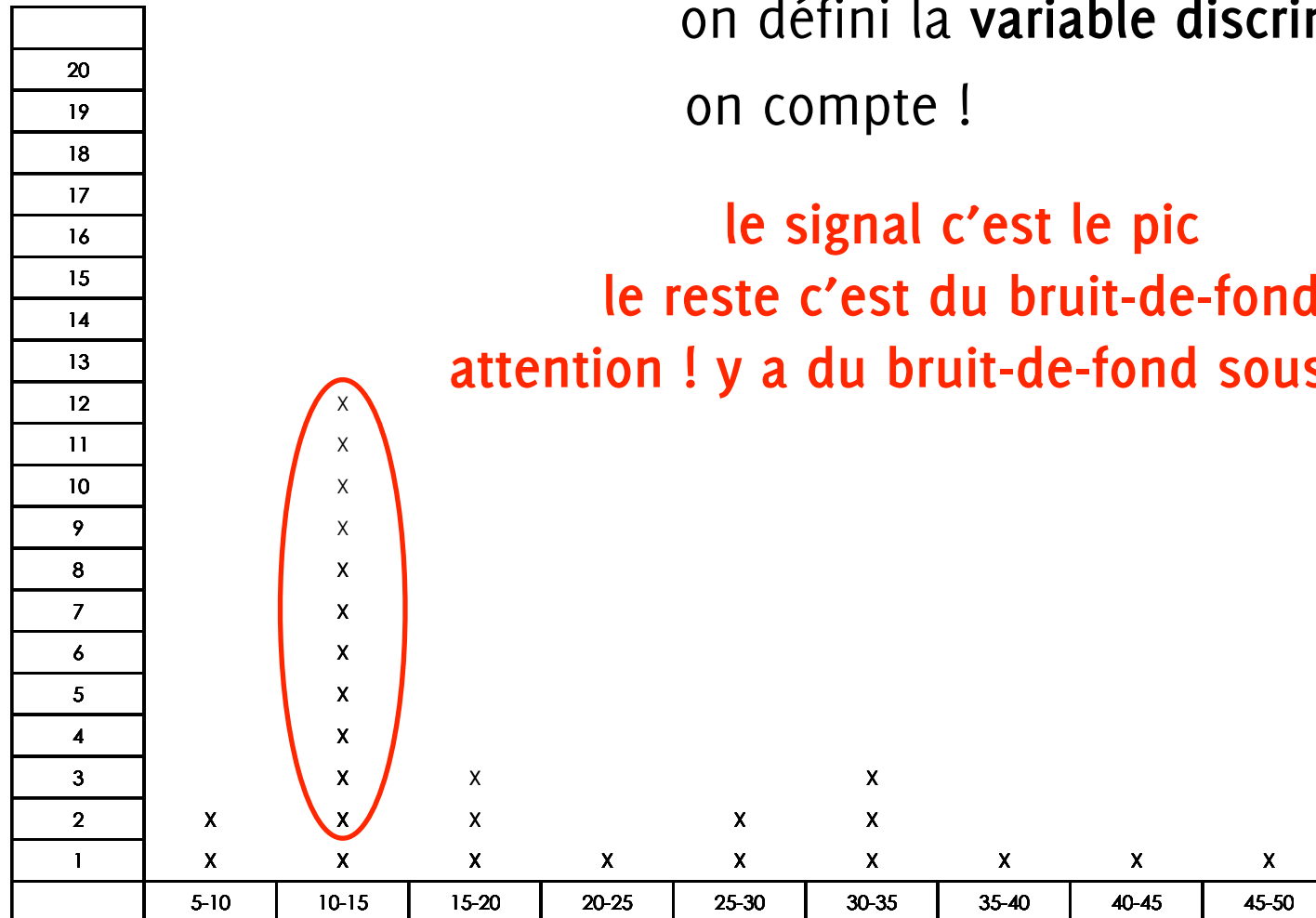
20									
19									
18									
17									
16									
15									
14									
13									
12		X							
11		X							
10		X							
9		X							
8		X							
7		X							
6		X							
5		X							
4		X							
3		X	X			X			
2	X	X	X		X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45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

L'IMPORTANCE DE LA STATISTIQUE

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

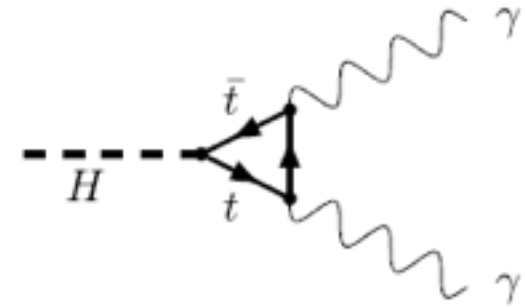
on définit la **variable discriminante**
on compte !

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



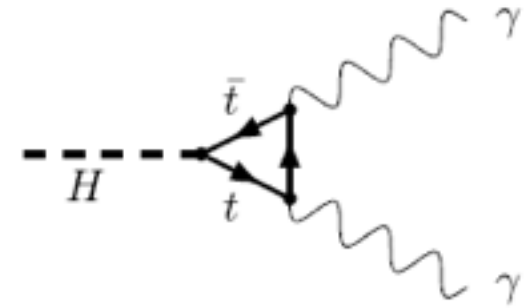
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

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



RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (1)

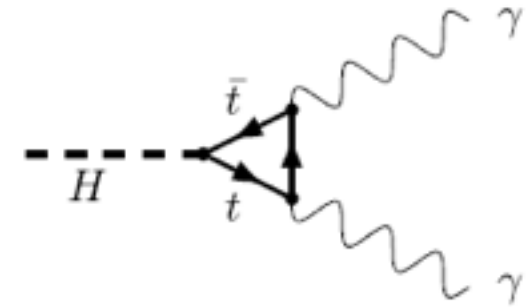
- ★ On choisit le **signal** qu'on recherche
 - Ex: les événements qui contiennent 2 photons



- ★ 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
 $\pi \rightarrow \gamma\gamma$

γ

π⁰

forme des dépôts
dans le calorimètre
électromagnétique
différente

RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

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

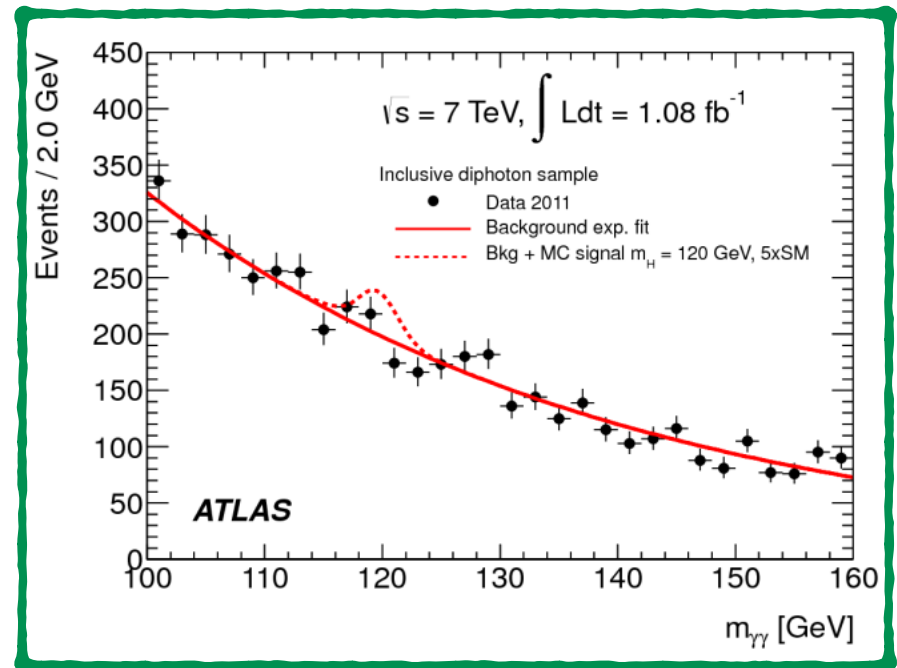
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

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



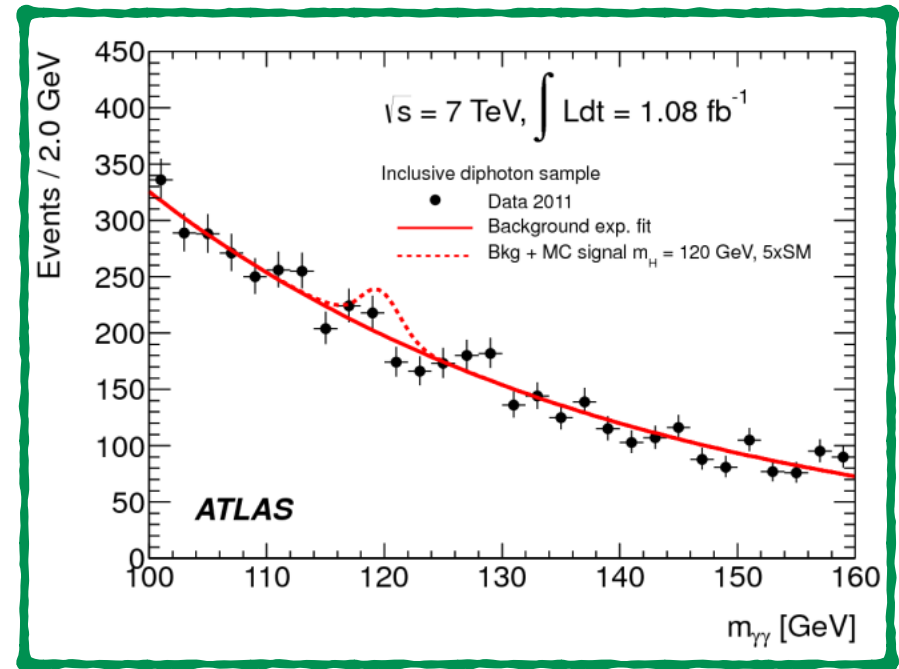
RECETTE POUR TROUVER UN BOSON DE HIGGS (2)

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

somme des 4-moments des photons:

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

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

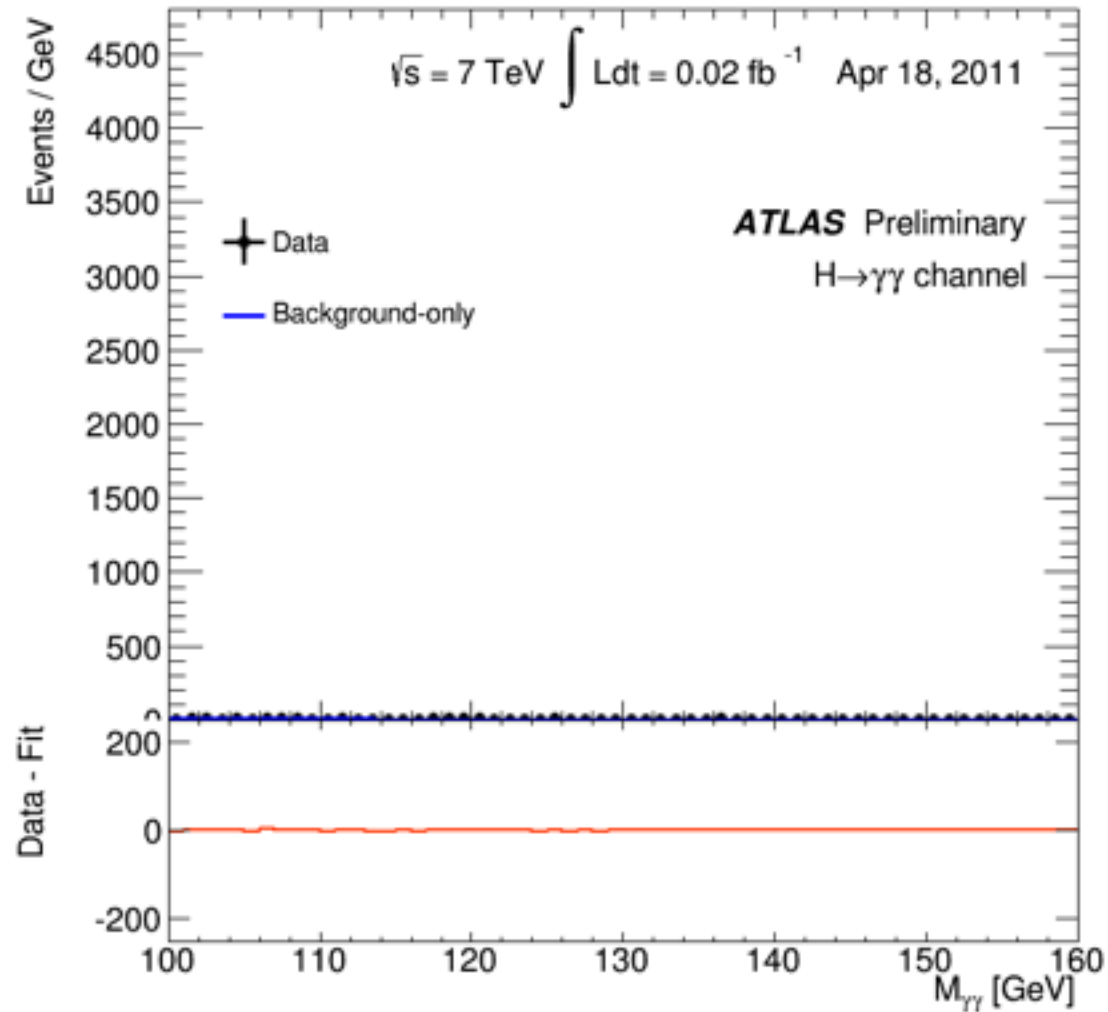


- ★ Interpretation: utilisation d'outils statistiques sophistiqués
 - on calcule la probabilité (p) d'obtenir ce résultat si on a du **bruit-de fond seul**

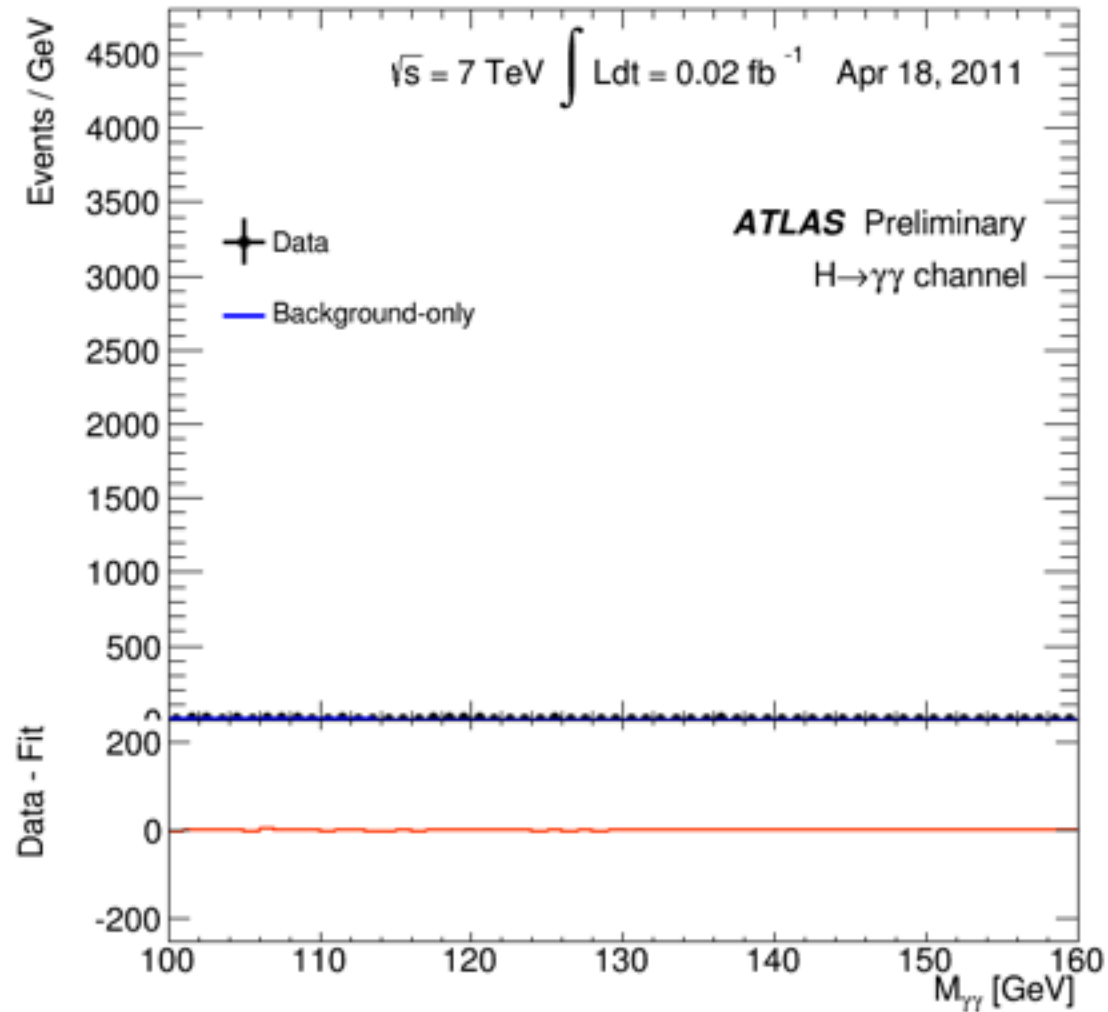
$$p \sim 1 \text{ en } 350 (3\sigma) \rightarrow \text{évidence}$$

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

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



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



EST-ON CONVAINCU(E)S QUE CA EXISTE?

maintenant, oui !

Mais il aura fallu:

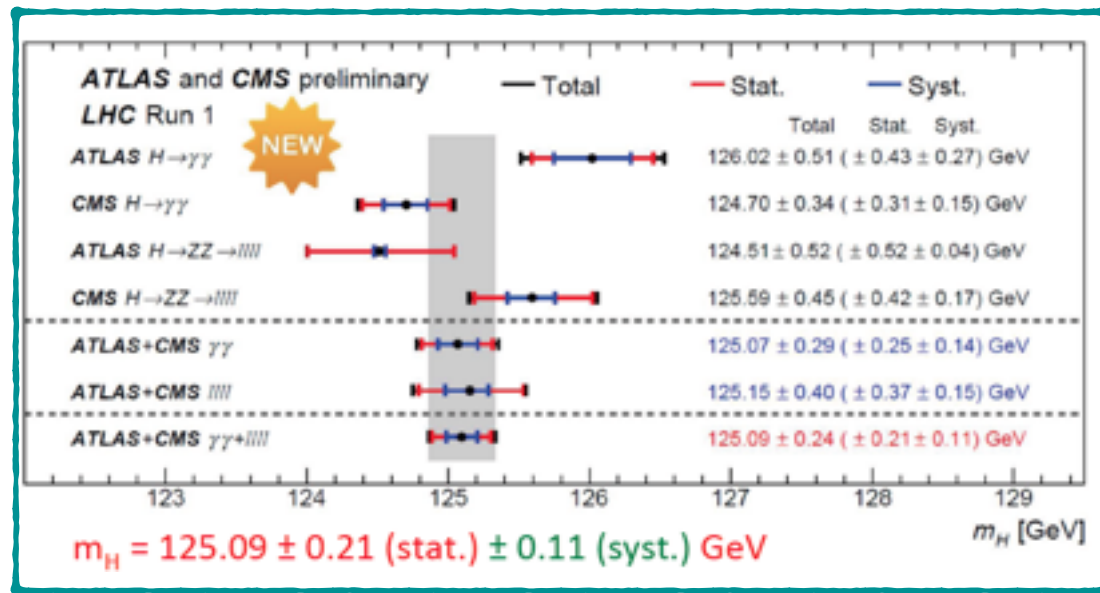
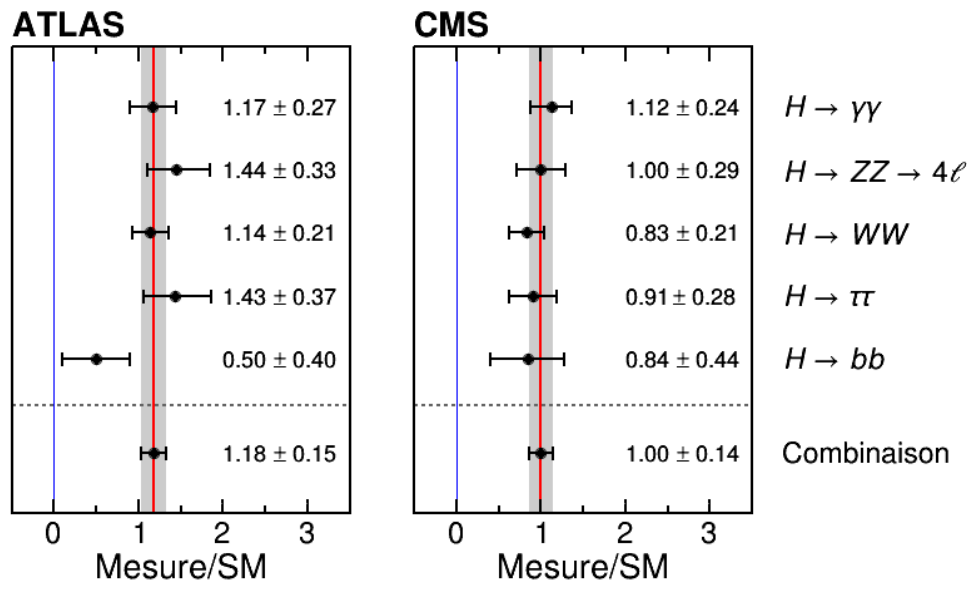
- ▶ Beaucoup d'interactions p-p → excès statistiquement significatif
- ▶ Beaucoup d'équipes différentes et de stratégies d'analyse différentes → vu dans 4 canaux de désintégration indépendants
- ▶ Deux expériences différentes, et le secret professionnel avec → vu par 2 collaborations indépendantes

Donc, quelqu'un d'(in)attendu était bien là !
Mais était-ce le boson de Higgs?



EST-CE UN BOSON DE HIGGS? MESURES DES PARAMÈTRES

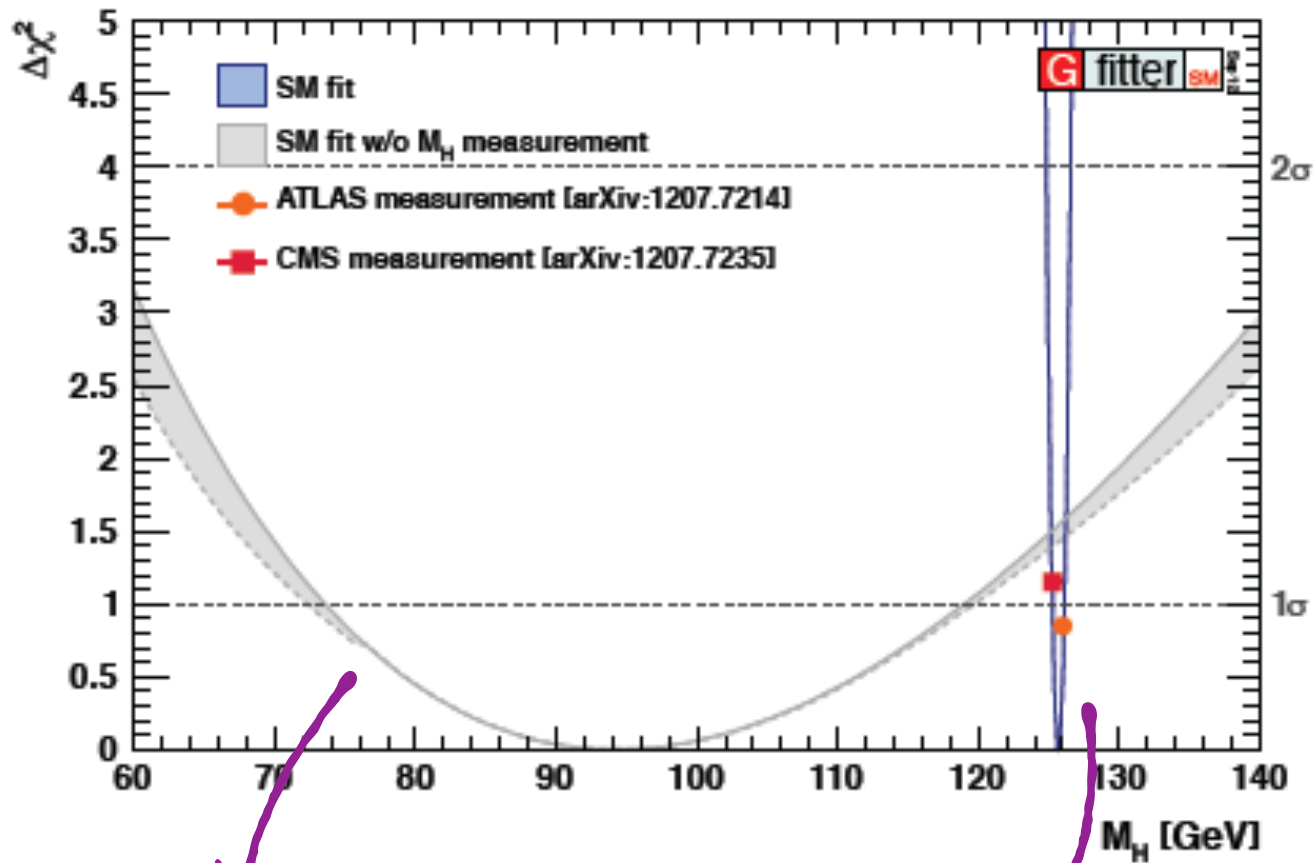
→ mesure des paramètres (couplages, masse, spin...)



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



LA MASSE DU BOSON DE HIGGS: AVANT/APRÈS

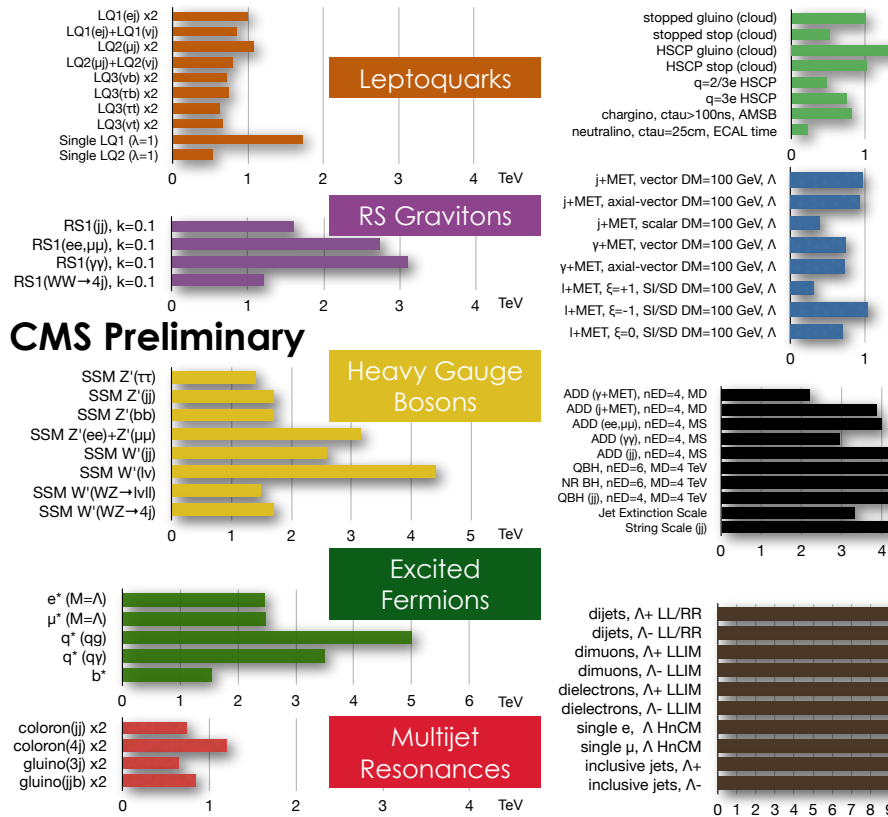


fit sans le boson de Higgs

fit avec le boson de Higgs

on n'est pas tombés très loin...

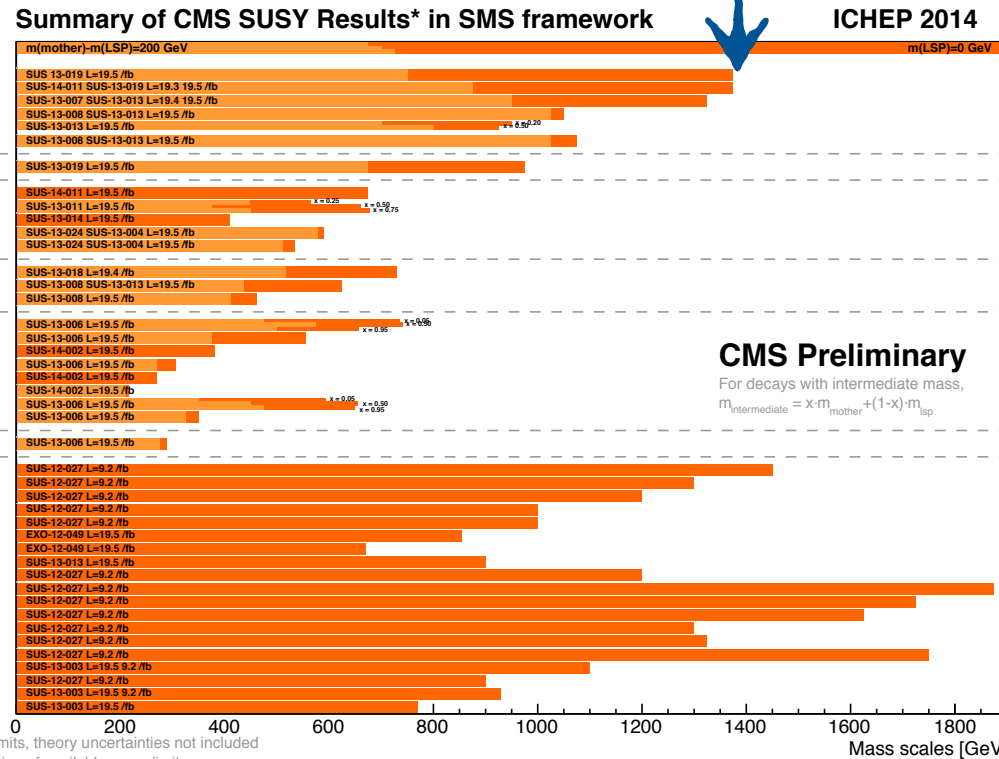
PAS QUE LE BOSON DE HIGGS: AUTRES RECHERCHES



CMS Exotica Physics Group Summary – Dec Jamboree, 2015

masse de la particule hypothétique

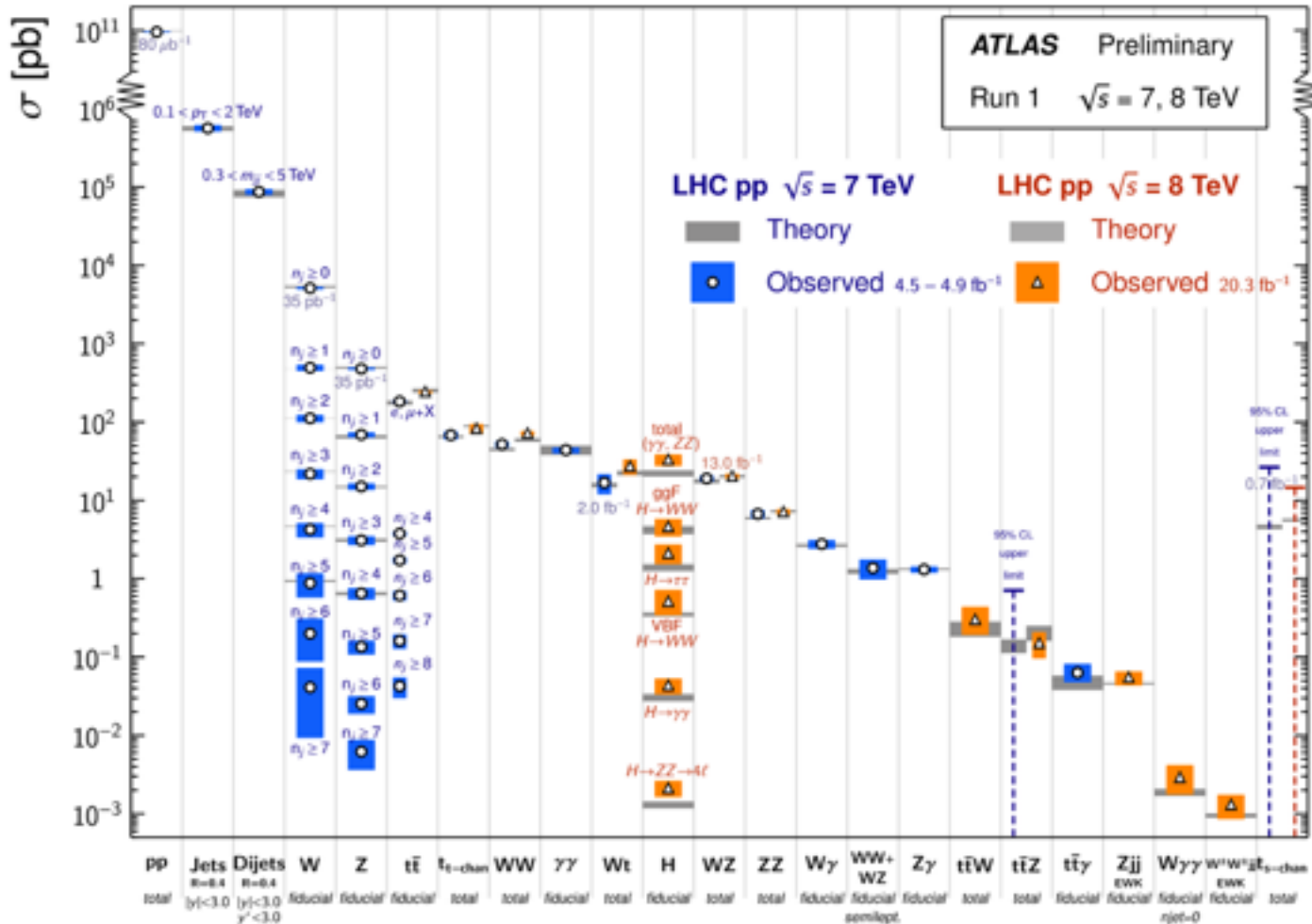
limite = jusqu'ici on n'a rien vu



→ pas de déviations du Modèle Standard

PAS QUE LE BOSON DE HIGGS: MESURES DE PRÉCISION AU RUN 1

~ probabilité/volume



phénomènes de physique étudiés

ABC DES MESURES DE PRÉCISION

Motivations:

- ▶ Connaissance des bruits-de-fond pour les recherches de nouvelle physique
- ▶ Comparaison toujours plus précise avec les calculs théoriques → recherches **indirectes** de nouvelle physique !
- ▶ Comparaison avec les générateurs Monte Carlo → correction des générateurs Monte Carlo

Les enjeux sont différents de ceux des “recherches directes”:

- ▶ Réduire les incertitudes théoriques !
- ▶ Beaucoup de statistique → l'estimation des biais de mesure (incertitudes systématiques) devient encore plus fondamentale

→ **pour l'instant on est en très bon accord avec le MS !**

RÉCAPITULATIF

★ Pendant le Run 1:

- On a trouvé une nouvelle particule ! Probablement c'est un boson de Higgs
- On a fait des mesures à des énergies jamais vues de procès de physique connus → **tout est en accord avec les prédictions du MS**
- On a cherché des nouvelles particules, attendues ou pas → **on n'a rien trouvé**

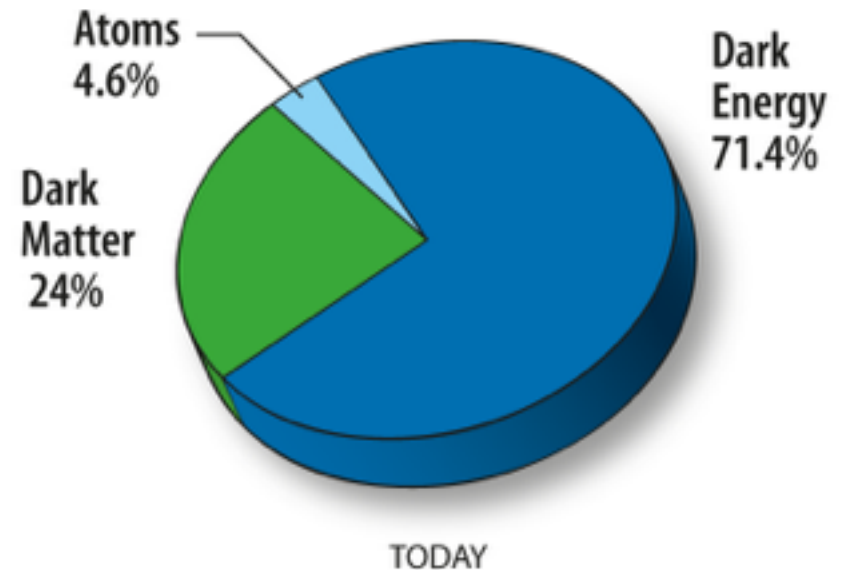
→ **mais alors que va-t-on faire avec le LHC?**

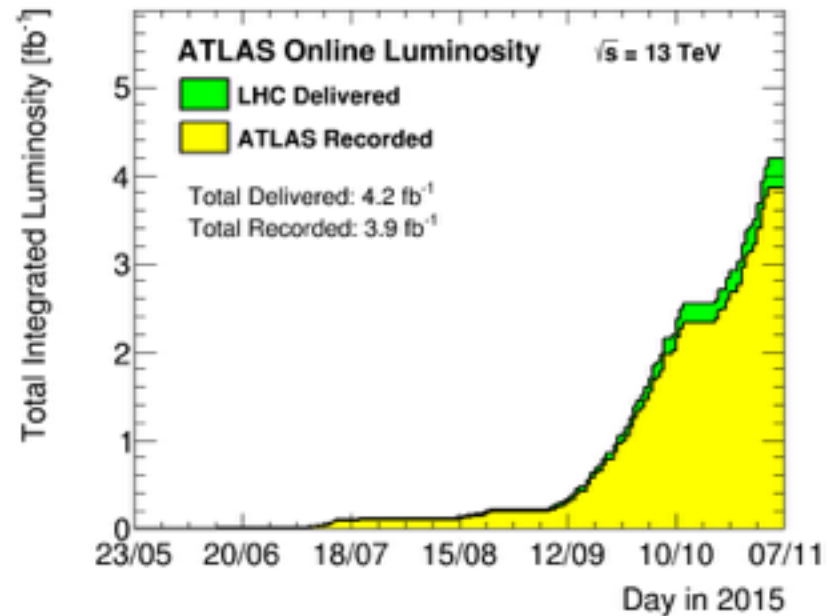


[<https://xkcd.com/1437/>]

QUESTIONS OUVERTES À LA FIN DU RUN 1

- ★ 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 !
 - Quelque chose d'inattendu?

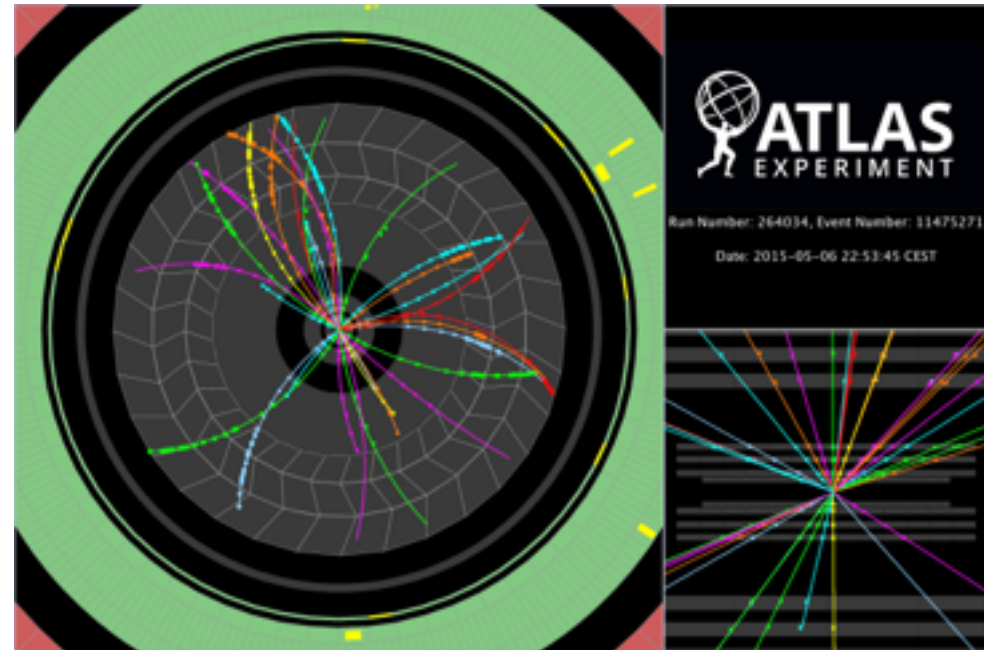




LHC EPISODE 2: PREMIERS RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

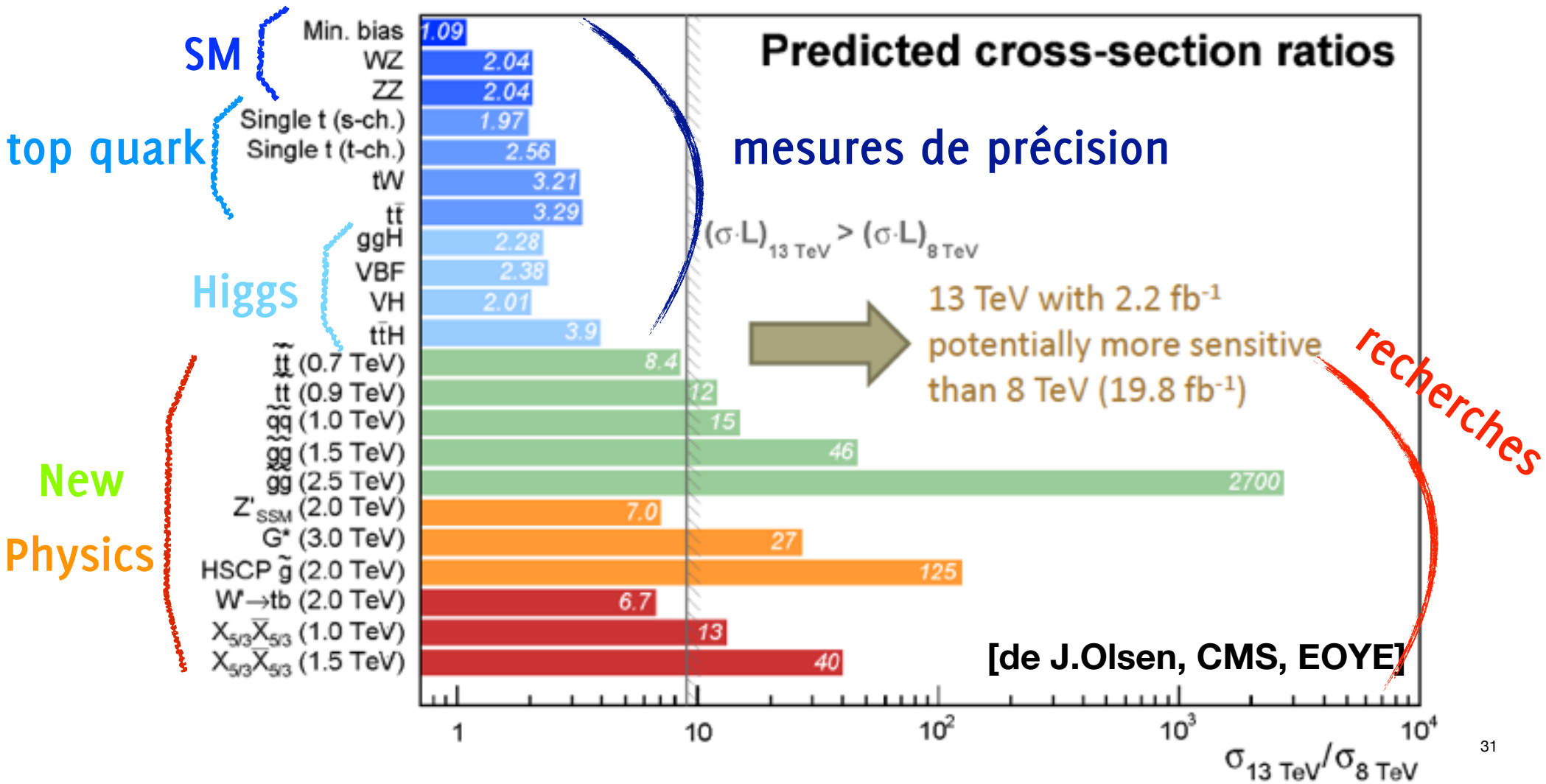
2015 - 2019?

- 13 TeV d'énergie dans le centre de masse
- $< 4 \text{ fb}^{-1}$ de luminosité intégrée (à aujourd'hui)

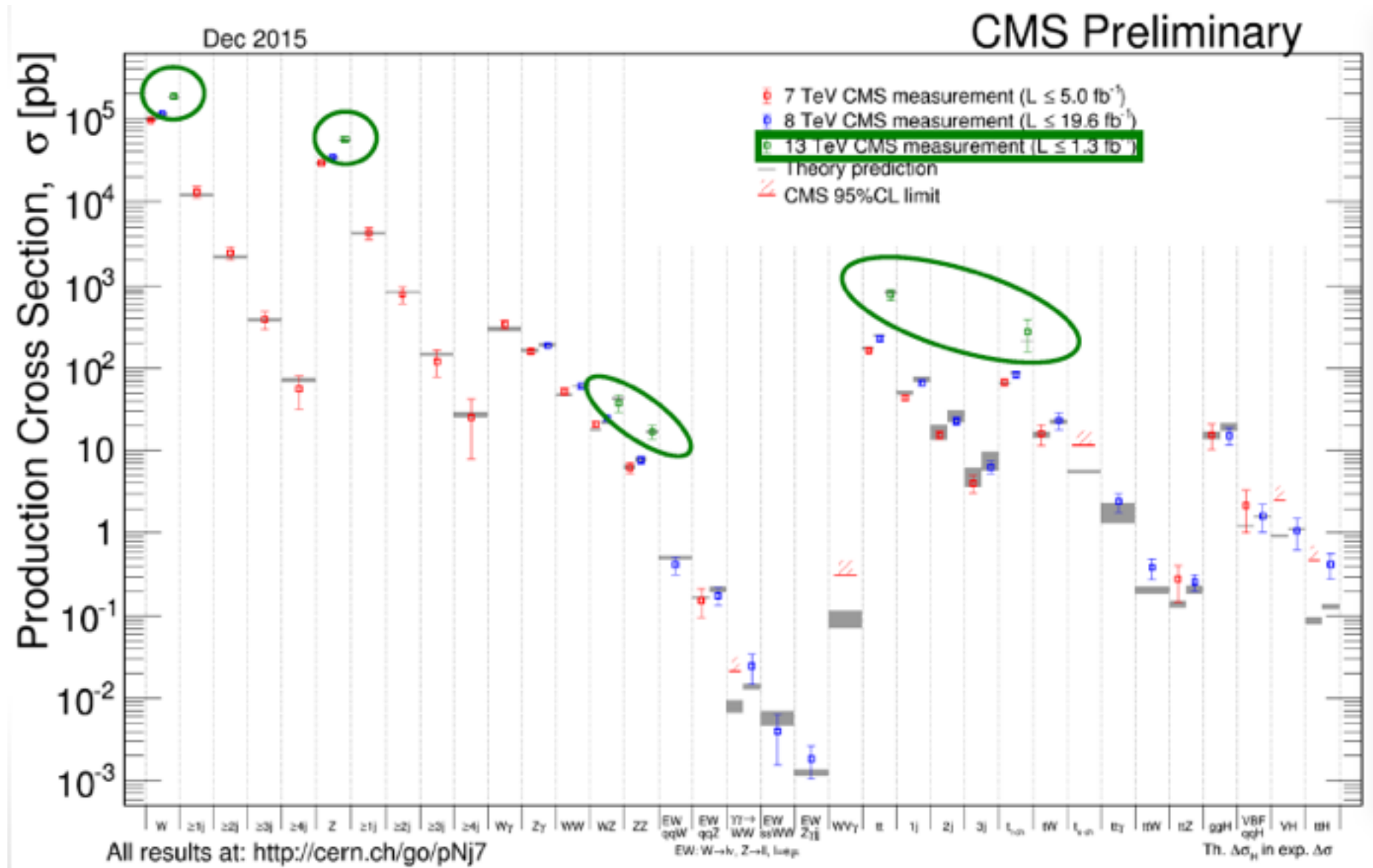


QUE VA-T-ON EN FAIRE DE TOUTE CETTE ENERGIE?

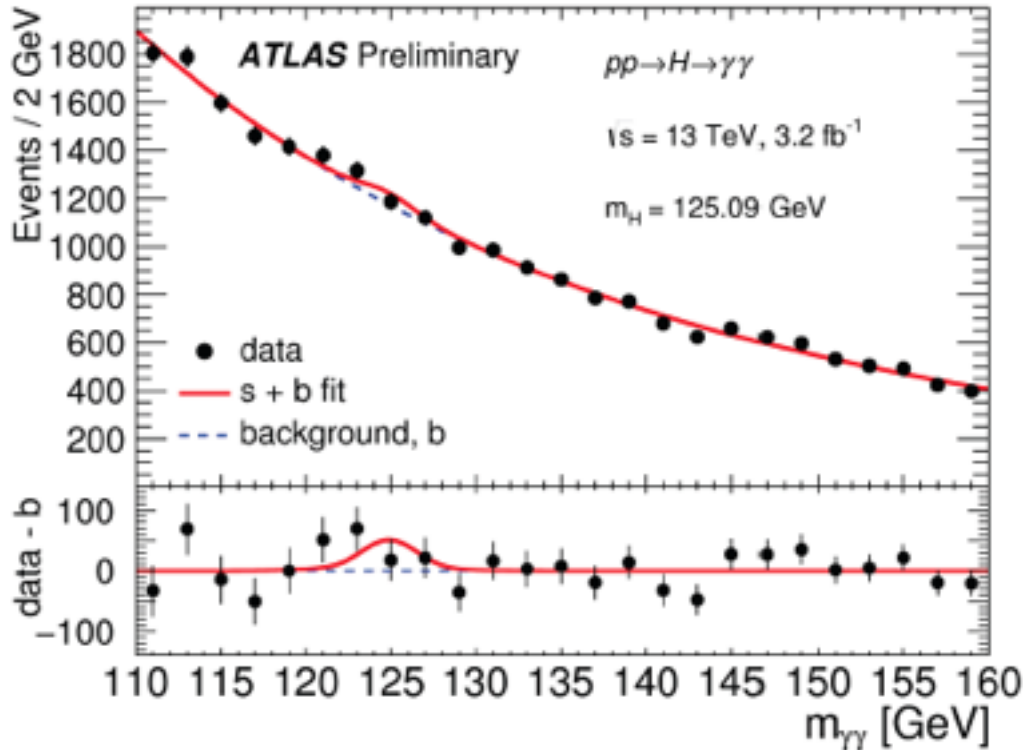
aujourd'hui on a ~10% de la luminosité intégrée au LHC pendant le Run 1
MAIS à 13 TeV d'énergie dans le centre-de-masse des protons...



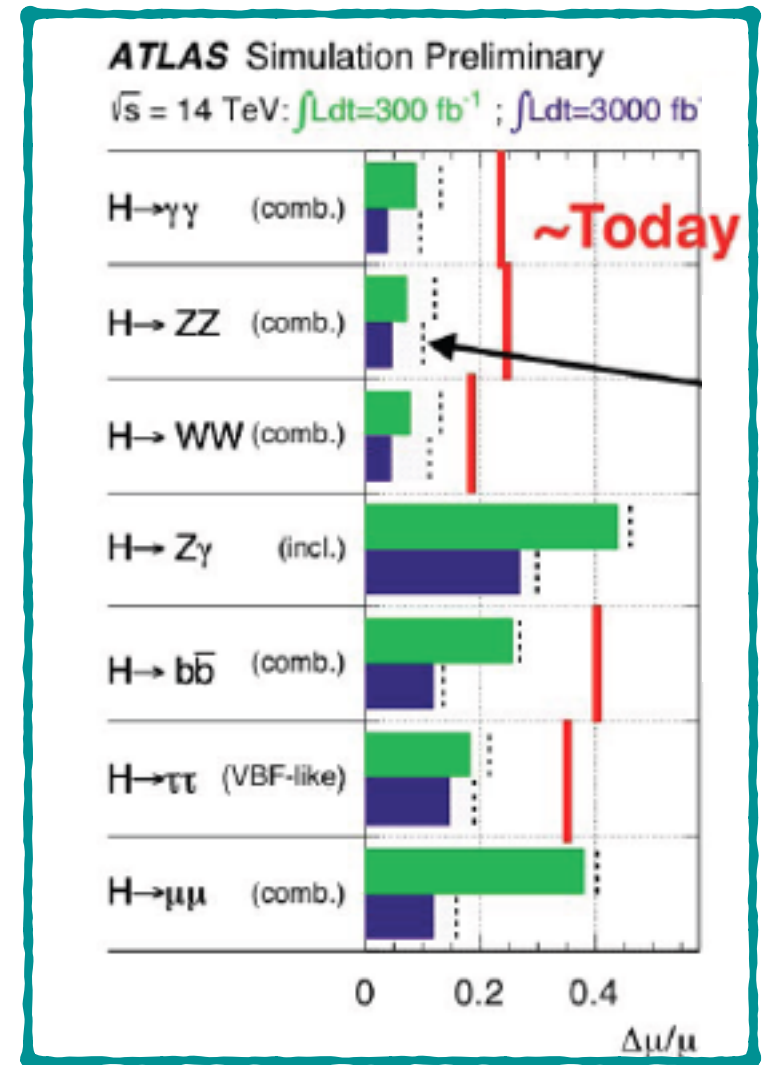
MODÈLE STANDARD REVISITED



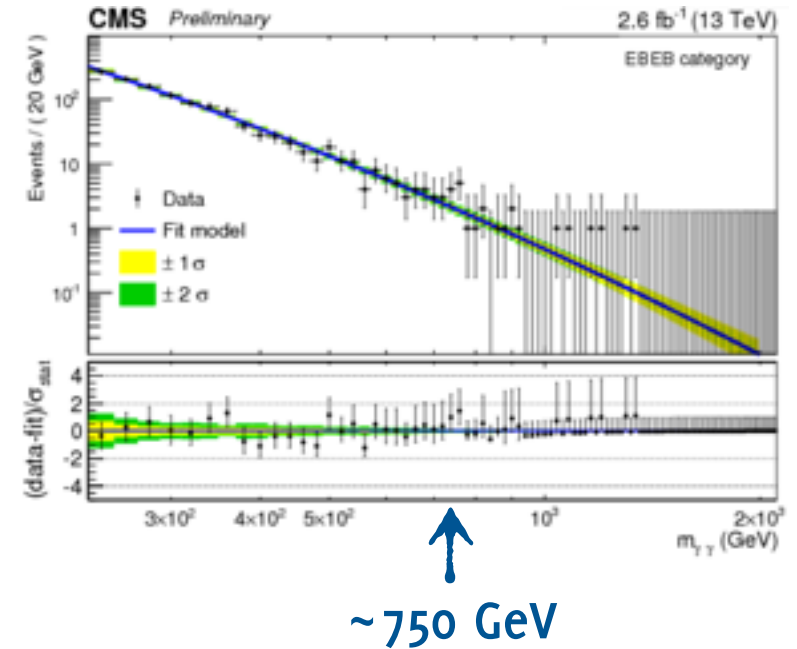
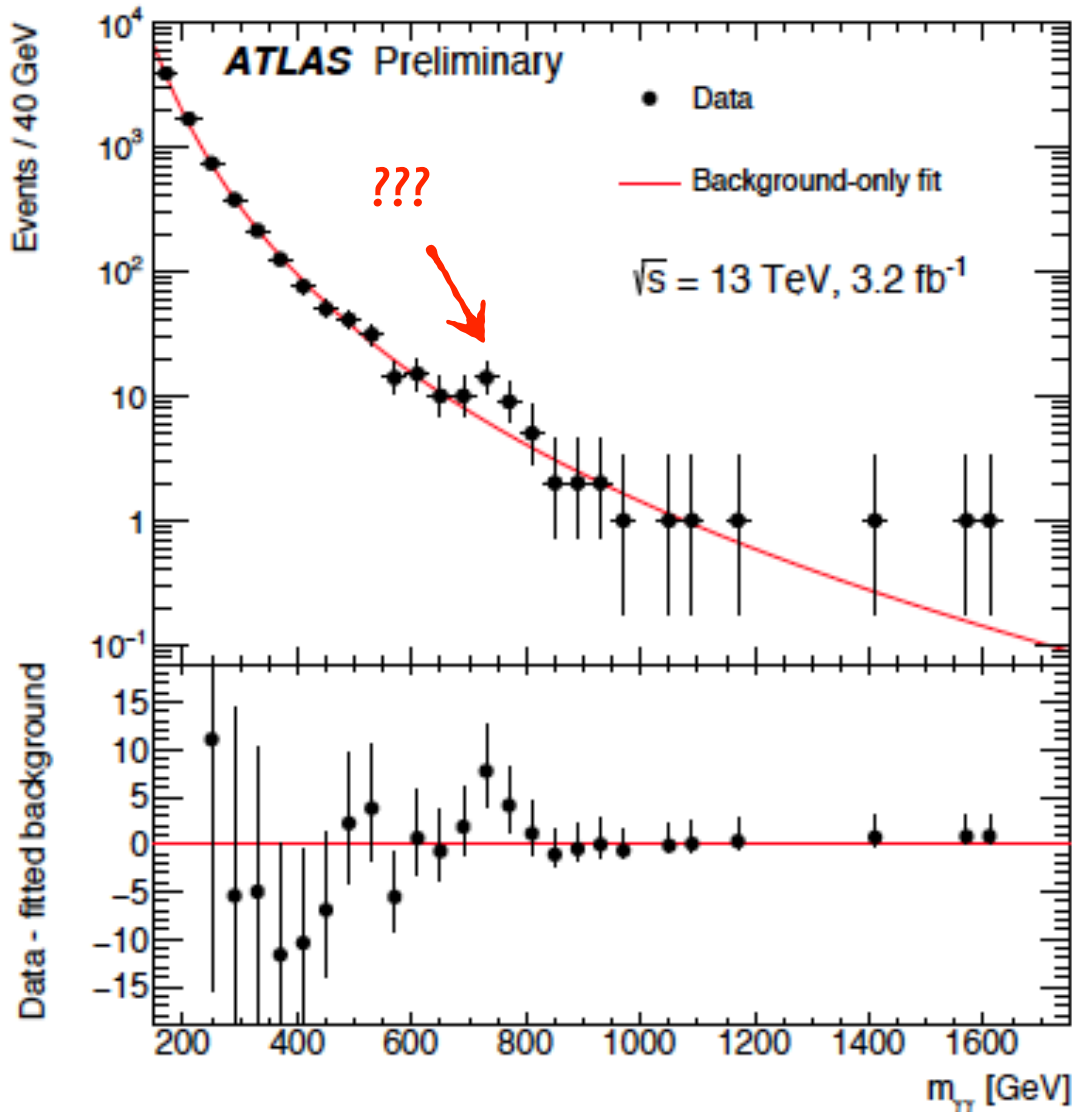
LE BOSON DE HIGGS AU RUN 2: VERS DES MESURES DE PRÉCISION



- ▶ Statistique encore trop faible pour répéter les mesures du Run 1
- ▶ Il faudra attendre la prochaine prise de données pour améliorer ces résultats..



CHASSE À LA NOUVELLE PHYSIQUE



► Excès vu par ATLAS en di-photons à une masse invariante de 750 GeV

► >40 papiers théoriques en quelques semaines !

→ **fluctuation statistique ou nouvelle résonance?**

CONCLUSIONS

★ Le Run 1 nous a amené

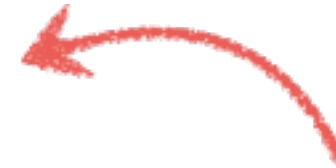
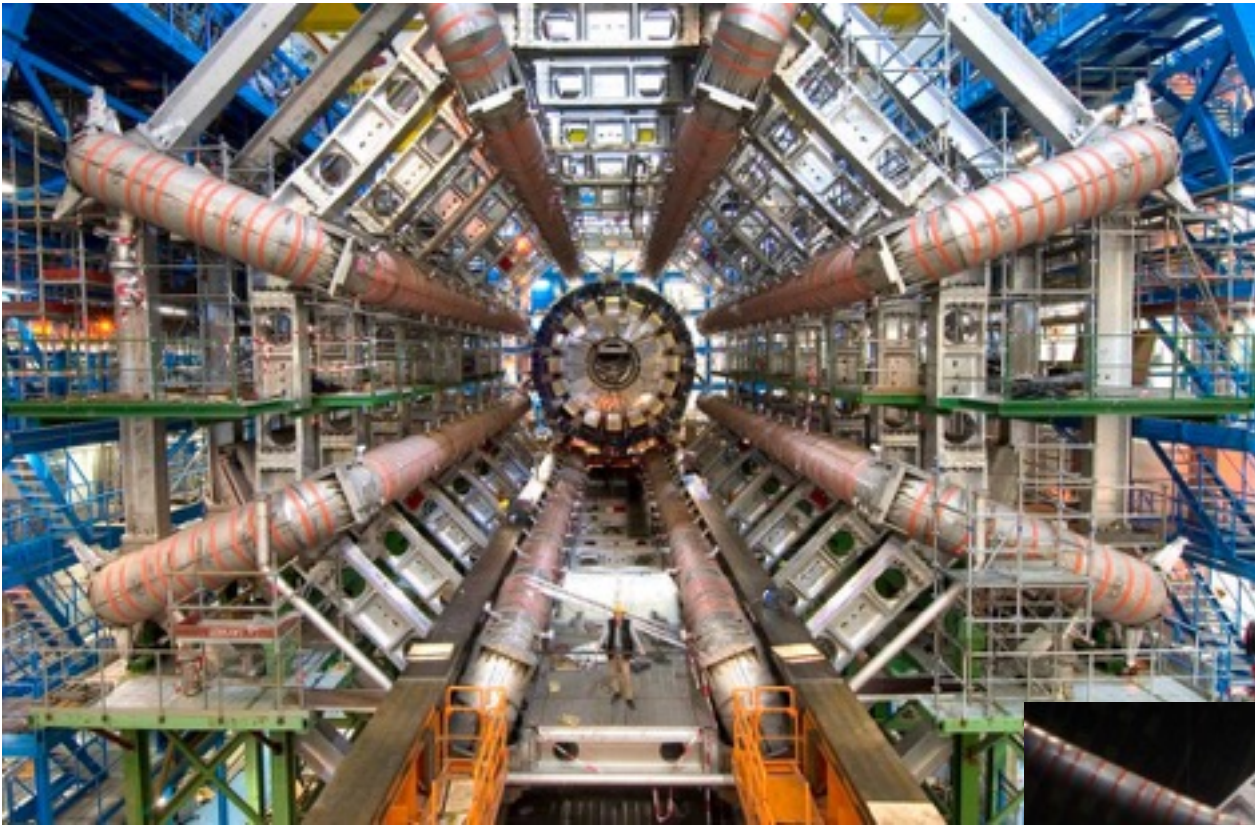
- Une nouvelle particule ! Le boson de Higgs (?)
- Beaucoup de confiance que le MS décrit bien le monde subatomique en dessous de l'échelle du TeV

★ Le Run 2 a déjà commencé avec

- Une mise en route très rapide !
- Quelques premiers résultats confirmant le Run 1
- Une fluctuation intéressante...

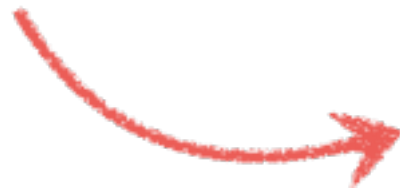
→ ceci n'est que le début ! Il nous faudra beaucoup plus de statistique pour explorer cette nouvelle région d'énergie !

Merci pour votre attention !



Magnets system, ATLAS
experiment, CERN

“Les Troyens”, H. Berlioz
Palau de les Arts Reina Sofia, Valencia



BACKUP

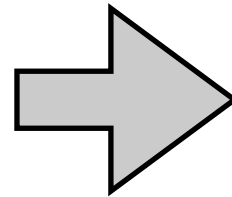
LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS EN 3 LIGNES

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 \longleftrightarrow conservation

translation spatiale \longleftrightarrow impulsion

translation temporelle \longleftrightarrow énergie

phase \longleftrightarrow charge électrique

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

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

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

transformation globale

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie \longleftrightarrow conservation

translation spatiale \longleftrightarrow impulsion

translation temporelle \longleftrightarrow énergie

phase \longleftrightarrow charge électrique

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

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

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

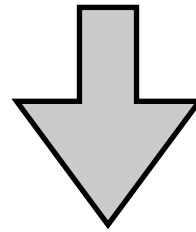
transformation globale

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

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

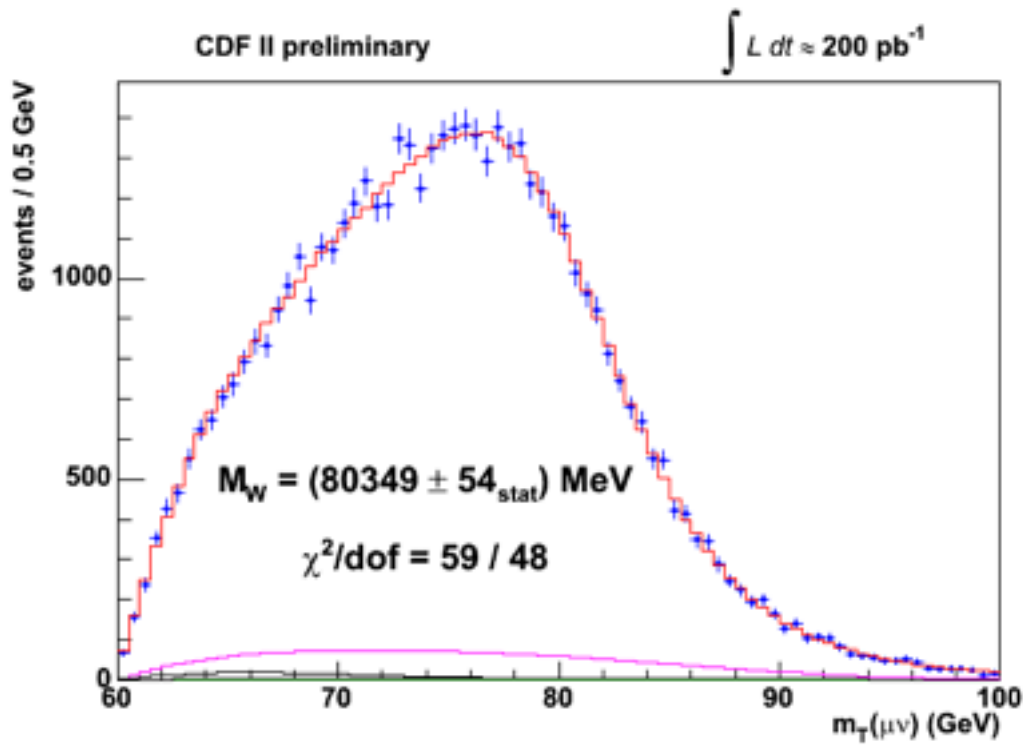
Les symétries constitutives du Modèle Standard ne prévoient pas de masse
pour les bosons et fermions

pourtant...

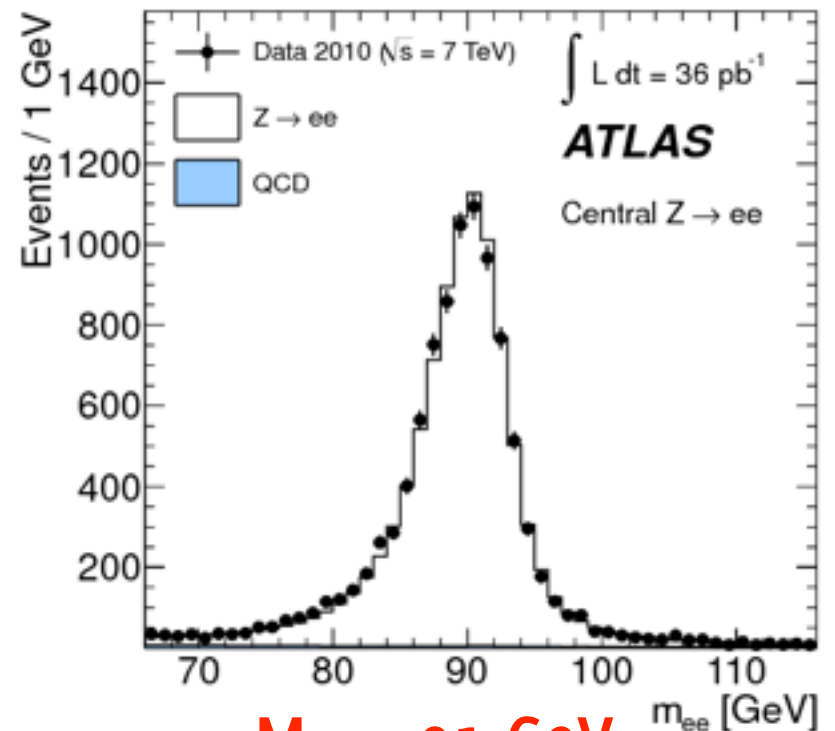
LE PROBLÈME DE LA MASSE DES PARTICULES

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...

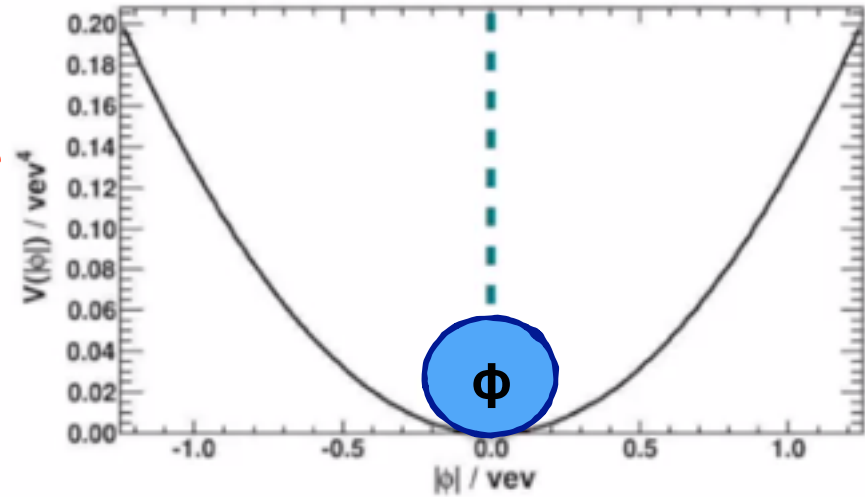


Il faut un mécanisme qui génère dynamiquement la masse de toutes les particules tout en conservant l'invariance de jauge

le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

LE MÉCANISME DE BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

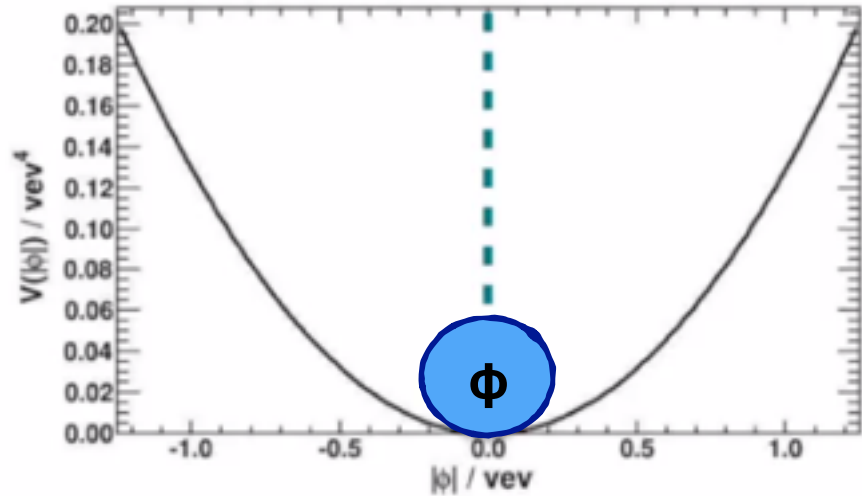
$V(\varphi) \sim \varphi^2$
 la symétrie autour de l'axe
 de rotation est respectée



LE MÉCANISME DE BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

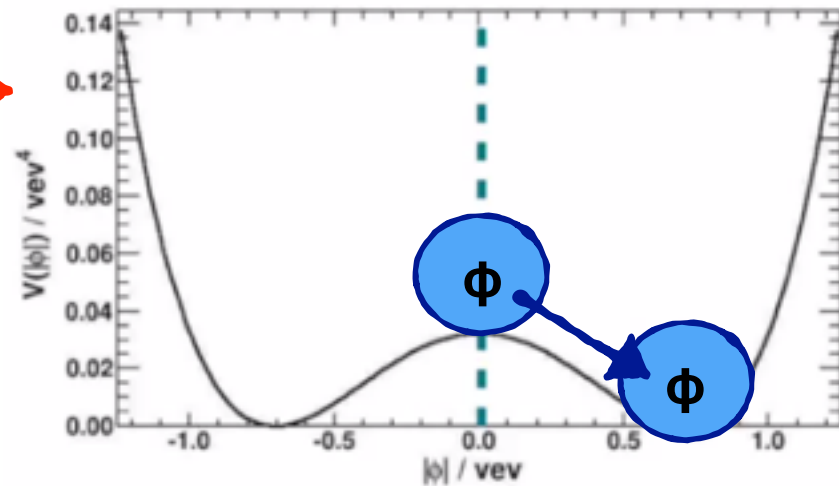
$$V(\varphi) \sim \varphi^2$$

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

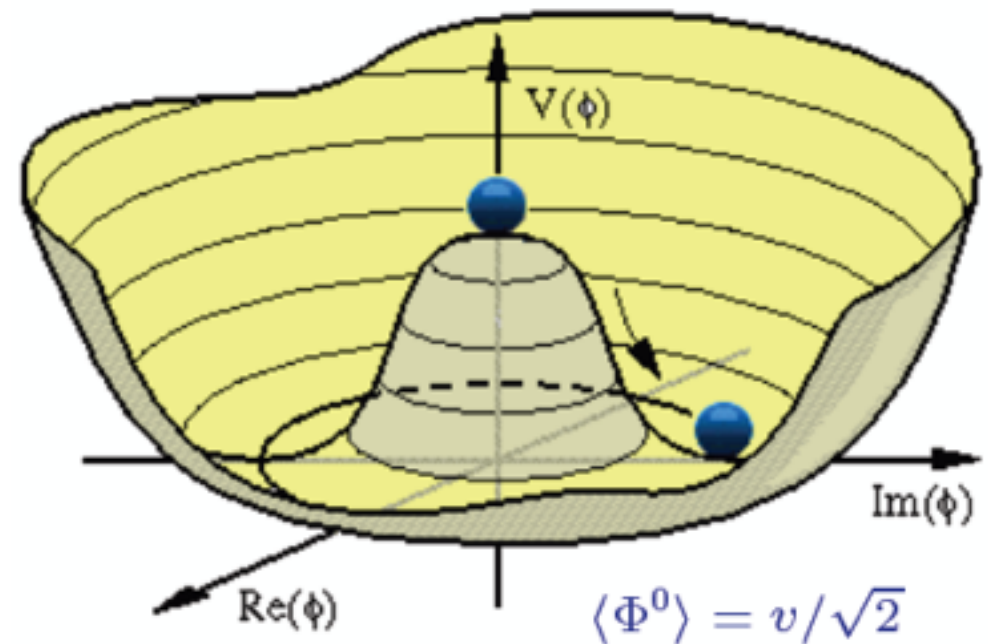


LE MÉCANISME DE BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

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

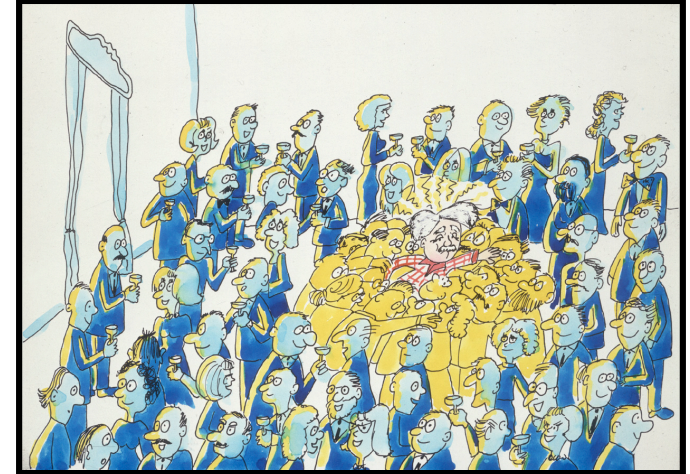
Le défi du ministre anglais aux chercheurs: expliquez moi ça simplement !
Réponse de David Miller, mise en BD : Cern.



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

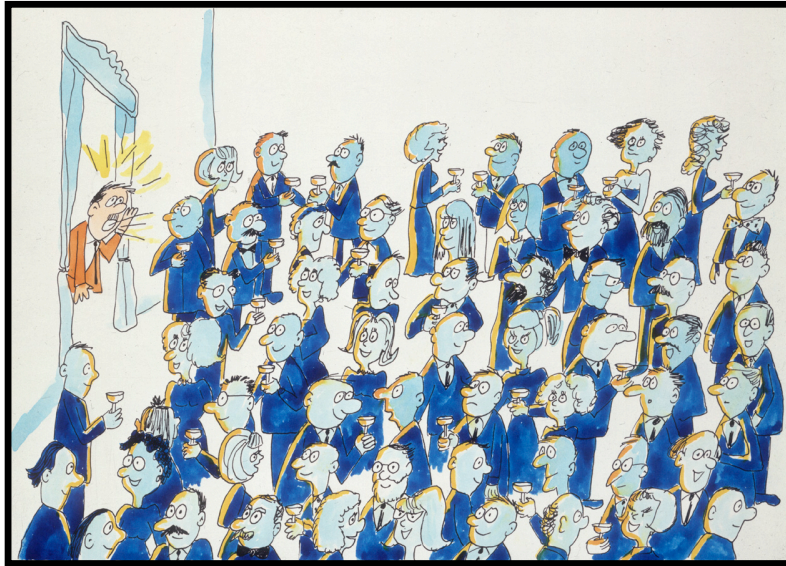


Arrive une personnalité
libre de ses mouvements
(«particule sans masse »)



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 !

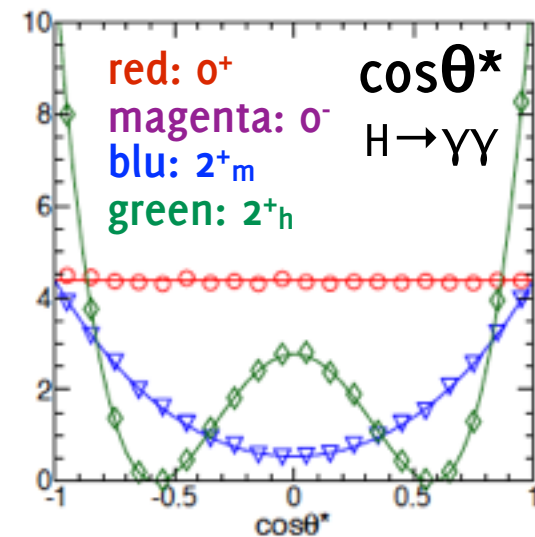
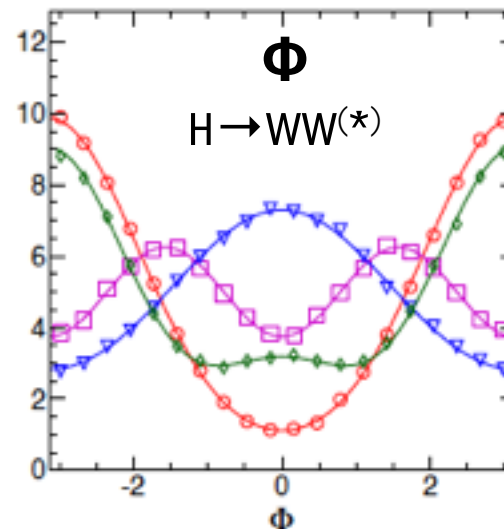
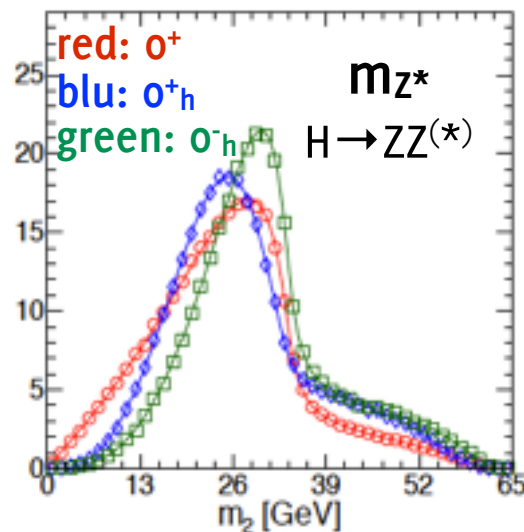
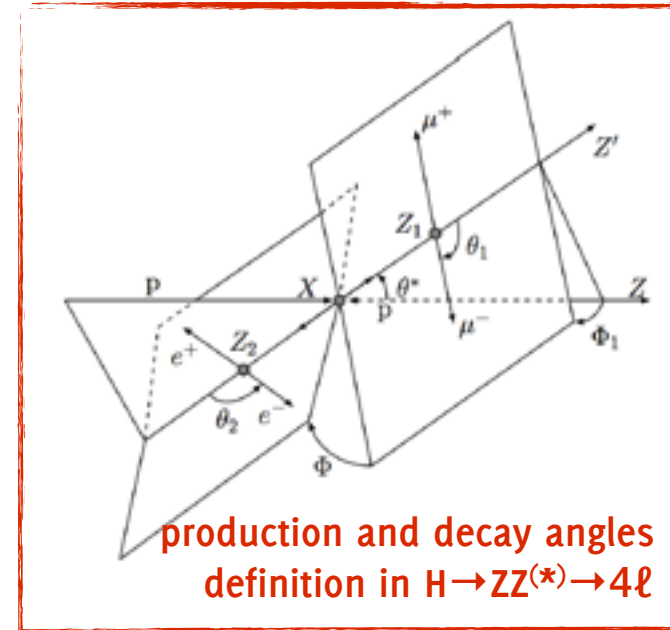
pour valider ce modèle, et le MS dans son ensemble, on doit trouver une particule de masse ?? avec des caractéristiques bien précises

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

OBSERVABLES AND SEPARATION POWER

Theoretical predictions: final state observables $\rightarrow J^P$ boson
Experimentally this means we study

$m_1, m_2, \cos\theta^*, \phi_1, \cos\theta_1, \cos\theta_2, \phi$
to say something on J^{PC}



OBSERVABLES AND SEPARATION POWER

Theoretical predictions: final state observables $\rightarrow J^P$ boson
Experimentally this means we study

$m_1, m_2, \cos\theta^*, \phi_1, \cos\theta_1, \cos\theta_2, \phi$
to say something on J^{PC}

Separation power is altered by background presence and selection effects

