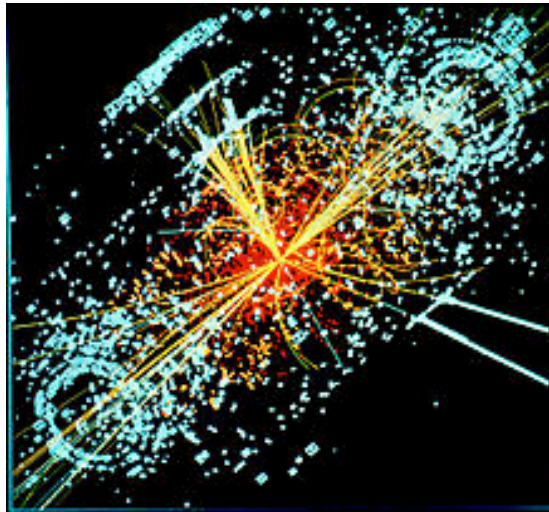


Physique des particules aux collisionneurs



Fabienne Ledroit
LPSC (Grenoble)

1989-2002 : expérience DELPHI (LEP) ; depuis 2002 : expérience ATLAS (LHC)

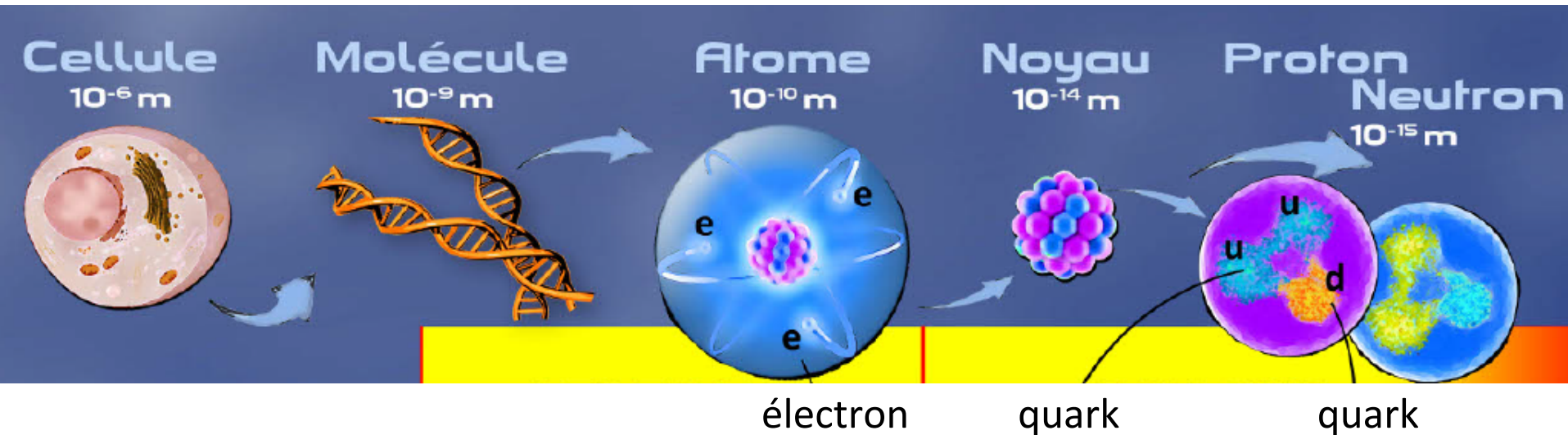
N.B. Merci à Bruno Mansoulié dont le support de cours de 2012 a servi de point de départ à celui-ci

Programme

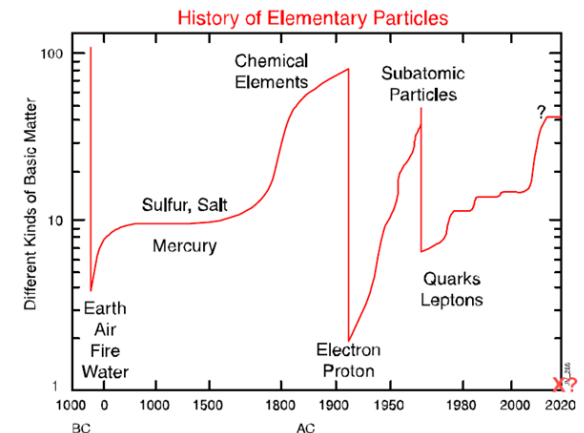
- La physique des particules
 - Notions préalables, **le Modèle Standard**
- Outils expérimentaux
 - Accélérateurs, détecteurs
- La physique (peu) avant le LHC
- **La physique au LHC**
 - Le boson de Higgs, la recherche de «nouvelle physique»
- Le futur

Introduction

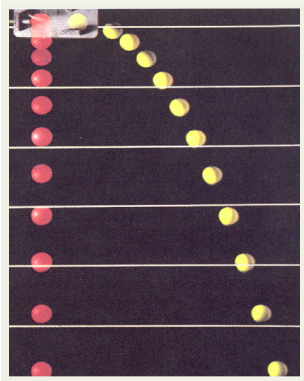
- Ambition de la physique des particules : description **élémentaire** du monde



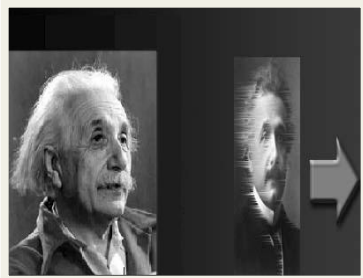
- Particules élémentaire = **constituants** fondamentaux de la matière
- Les forces basiques qui les lient = les **interactions** fondamentales



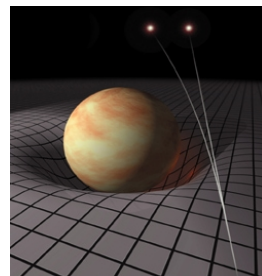
Introduction : les grandes théories de la physique



rapide



aux grandes échelles :
Relativité Générale



petit

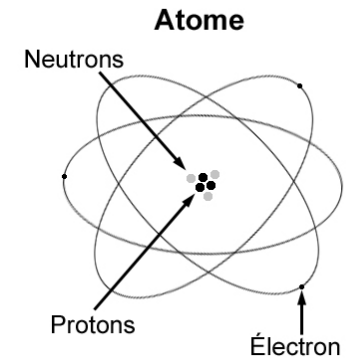


Mécanique
Classique

Mécanique
Quantique

Relativité
Restreinte

Théorie
Quantique
des Champs



Introduction : fondements du Modèle Standard

Le « Modèle Standard » = une **Théorie Quantique des Champs** = aboutissement d'un siècle (le XX^e)

- de développements théoriques :

- **Relativité restreinte** (1905, Einstein)

- Invariance de Lorentz
- Energie au repos $E=mc^2$ (c : vitesse lumière vide),
- $E^2 = (|p|c)^2 + (mc^2)^2$ (p : quantité de mouvement ou impulsion)

- **Mécanique Quantique** (~1900-1930, Planck, Heisenberg,...)

- Dualité onde-corpuscule
- Principe d'incertitude $\Delta x \Delta p_x \sim \hbar$, $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ (\hbar : constante de Planck)

- Unifiées en **Théorie Quantique des Champs** (~1927-1954, P. Dirac,...)

- Complétée plus tard par les « symétries de jauge » (théorie des groupes)

- et bien sûr de découvertes expérimentales :

- 1897 : découverte électron (Thompson et d'autres)
- 2000 : découverte neutrino tau (ν_τ)
- **2012 : découverte boson de Higgs**



Introduction : unités

Relativité restreinte

- Energie d'une particule : « électron Volt » (eV)
 - 1 eV = énergie cinétique d'un électron accéléré par une ddp de 1 V
 - eV, keV (10^3), MeV (10^6), GeV (10^9), TeV (10^{12})
 - 1 GeV = $1.6 \cdot 10^{-10}$ J
- Masse d'une particule : eV/c²
- Impulsion d'une particule : eV/c
 - en pratique: $c=1 \rightarrow E^2 = |p|^2 + m^2$, tout en eV

Mécanique
quantique

- Longueur d'onde associée à une particule $\lambda = h/p$
- Spin d'une particule (moment cinétique intrinsèque): en unité de \hbar
 - en pratique : $\hbar=1 \rightarrow$ spin = 1/2, 3/2,... : *fermion*, spin = 0, 1,... : *boson*
- $\hbar c = 200 \text{ MeV fm}$ (1 fm = 10^{-15} m)

LE MODÈLE STANDARD

Constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin

Autres *nombres quantiques* : charge électrique Q , charge faible, charge forte,...

Temps de vie t (découle des caractéristiques précédentes)

Antiparticule : même masse, même spin, même temps de vie, charges opposées

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1897 e électron $m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	μ muon $m = 0,106$ GeV $Q = -1$ $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s	c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q = 2/3$ $t = 10^{-12}$ s	s étrange / strange $m = 0,1$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10^{-10}$ s
3^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	2000 ν_τ neutrino tau $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1974 τ tau $m = 1,78$ GeV $Q = -1$ $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s	1994 t top $m = 173$ GeV $Q = 2/3$ $t = 4 \cdot 10^{-25}$ s	1977 b beau / beauty / bottom $m = 4,2$ GeV $Q = -1/3$ $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s

$Q = 0$

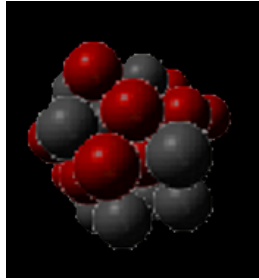
$Q = -1$

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

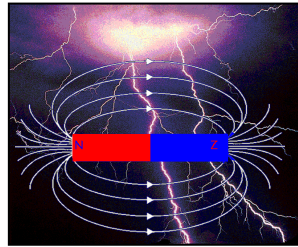
F. Ledroit : Physique des particules aux collisionneurs

Les quatre interactions fondamentales



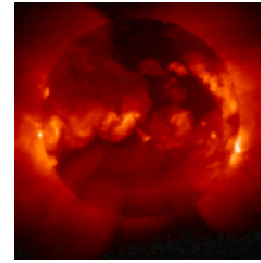
nucléaire forte

Cohésion des noyaux



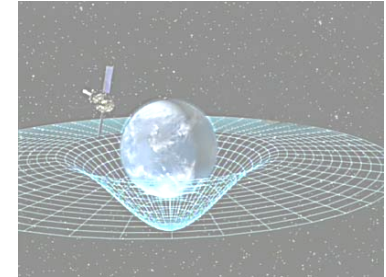
électromagnétique

Structure atomes
et molécules



nucléaire faible

Energie stellaire,
radioactivité
naturelle



gravitationnelle

Structure de l'univers,
chute des pommes

- Le Modèle Standard de la physique des particules décrit les interactions forte, électromagnétique et faible.
- La 4^e interaction, la gravitation, est négligeable à l'échelle microscopique. Elle fait partie d'un autre « modèle standard », celui de la cosmologie → voir le cours d'Olivier Perdereau

Particules d'interaction

- Constituants (quarks et leptons) = tous des *fermions* (spin $\frac{1}{2}$)
- 2^e sorte de particules élémentaires = les *bosons* (spin entier, ici 1)
 - Elles portent les interactions fondamentales !

Interaction faible

Bosons Z^0, W^+, W^-

$m = \sim 91 \text{ GeV}, \sim 80 \text{ GeV}$

Interaction EM

Photon γ

$m = 0$

Interaction forte

Gluons g

$m = 0$

Gravitation

Graviton (?)

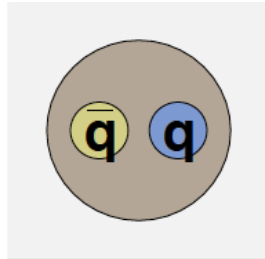
$m = 0 ?$

- Gravitation et interaction faible interagissent avec *tous* les constituants, interaction électromagnétique seulement avec les particules de $Q \neq 0$, interaction forte seulement avec les quarks.
- ces bosons dits « **intermédiaires** » ou « **vecteurs** » ou « **de jauge** » sont leur propre anti-particule

Particules composites

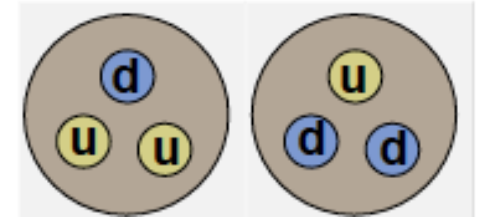
- Particule composite = état **lié** (par une interaction !) de particules élémentaires
- Avec les quarks on fait des *hadrons*, liés par interaction forte:
mésons : quark-antiquark, ou baryons : qqq ; exemples 1^{ère} famille :

★ $\pi^+ \equiv u\bar{d}$



★ Proton = (uud)

★ Neutron = (udd)



Avec un quark de la 2^{ème} famille («s») : kaons K^+ , $K^- = u\bar{s}$, $\bar{u}s$, $K^0 = d\bar{s}$

- Caractérisées de la même façon que les particules élémentaires : masse, spin, temps de vie, etc
 - Temps de vie infini = particule **stable**. Exemples : électron, proton
 - Une particule se désintègre si une interaction le permet, et si elle est plus massive que ses produits de désintégration

Caractéristiques des interactions

- **Intensité** de l'interaction entre deux particules : proportionnelle à la *constante de couplage* (« α ») de l'interaction :
ex : 2 protons à 1 fm, si $\alpha_{\text{forte}} = 1$, $\alpha_{\text{EM}} = 10^{-2}$, $\alpha_{\text{faible}} = 10^{-5}$, $\alpha_{\text{gravitation}} = 10^{-40}$
et à la « charge » des particules :
 - Interaction électromagnétique : charge électrique
 - Interaction faible : « charge faible » = *isospin faible*
 - Interaction forte : « charge forte » = *couleur*
 - Interaction gravitationnelle : masse
- **Portée** d'une interaction inversement proportionnelle à la masse du boson intermédiaire :
 - Interaction électromagnétique : infinie ; $m(\text{photon}) = 0$
 - Interaction faible : $2 \cdot 10^{-4}$ fm ; $m(Z, W^+, W^-) \sim 100$ GeV
 - Interaction forte : 2 fm ; $m(\text{gluons})=0$ mais le gluon porte une couleur
 - Interaction gravitationnelle : infinie ; $m(\text{Graviton})=0$ (?)

Boson de Higgs



BOSON DE HIGGS H

$m = 126 \text{ GeV}$ $Q = 0$ $t = 1,5 \cdot 10^{-22} \text{ s}$

Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, il est responsable de leurs masses.

Il provoque la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

The infographic features a red background with a large white puzzle piece in the lower half. The text is in yellow and white. The puzzle piece is labeled 'Champ de Higgs' in white text.

- La dernière particule élémentaire à avoir été découverte
- Spin entier (boson) mais = 0
 - la seule particule élémentaire de spin 0 connue à ce jour
- Nécessaire au « fonctionnement » de la théorie (= le Modèle Standard)
 - donne leur masse aux particules élémentaires via le « mécanisme de Higgs »

Symétries



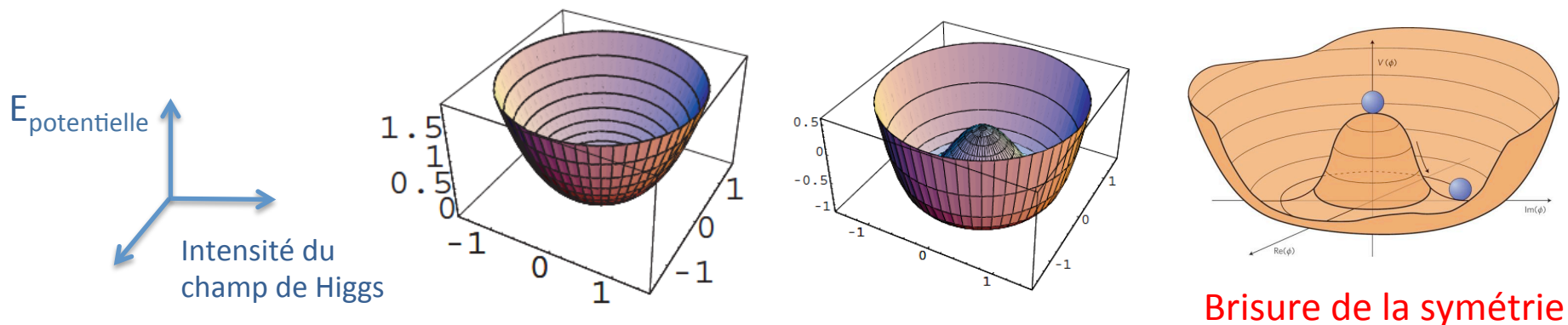
Symétrie = invariance sous une transformation

- Invariance des équations du mouvement par **translation** dans l'espace (i.e. homogénéité de l'espace) \Rightarrow **conservation de la quantité de mouvement**
- Invariance par **rotation** \Rightarrow **conservation du moment cinétique**
- Symétries « internes » : changement de phase d'une onde n'affecte pas sa probabilité de présence dans l'espace (module de la fonction d'onde complexe)
- **Transformation globale** : ses paramètres (vecteur de translation ou changement de phase) ne dépendent pas du point de l'espace(-temps)
- **Transformations locales**, ou transformations **de jauge** : les paramètres sont des fonctions arbitraires des coordonnées d'espace-temps
 - Invariance par translation *locale* : relativité générale
théorie de l'interaction **gravitationnelle**
 - Invariance par changement de phase *local* : électrodynamique quantique (QED)
théorie de l'interaction **électromagnétique**

Origine « géométrique » des interactions fondamentales ; implique des particules d'interaction de masse nulle...

Mécanisme de Higgs

- Sans le « mécanisme de Higgs », toutes les particules sont de masse nulle
le « mécanisme de Higgs » donne leur masse aux bosons Z et W de l'interaction faible.
- Rappel : dualité onde-corpuscule, toutes les particules sont aussi des champs, qui varient en intensité. Celui de Higgs est particulier : le seul à ne pas être nul dans « l'état fondamental » (niveau le plus bas en énergie)
 - forme ad-hoc du potentiel :



- L'univers est rempli d'un champ de Higgs non nul qui interagit avec tous les constituants élémentaires, plus ou moins, et leur donne plus ou moins de masse
 - Analogie avec un champ de neige
- Deux publications en 1964 : François Englert et Robert Brout en juin, Peter Higgs en août : « boson de BEH » ; seul Peter Higgs décrit le boson lui-même

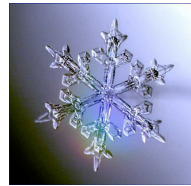


Champ de Higgs

Boson de Higgs



Particules lourdes



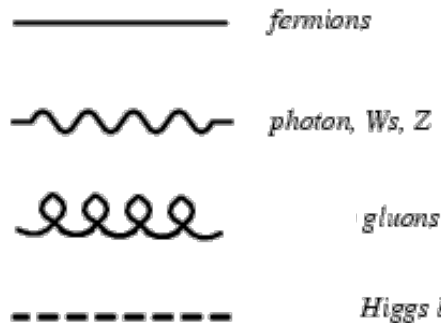
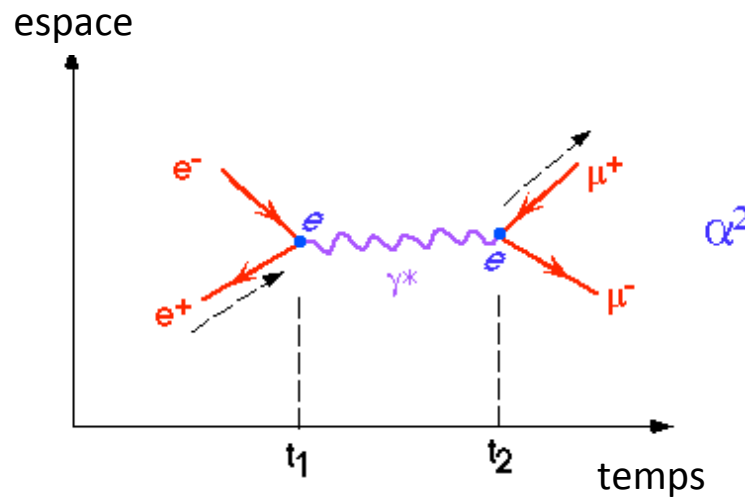
Particules légères

Particules de masse ~nulle



Intermède : diagrammes de Feynman

- Servent à décrire les processus (\neq trajectoires) et à faire les calculs correspondants
- Exemple :

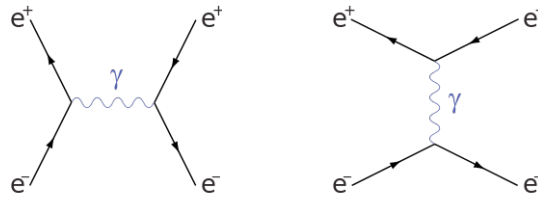


- Convention :

Interactions EM et faible

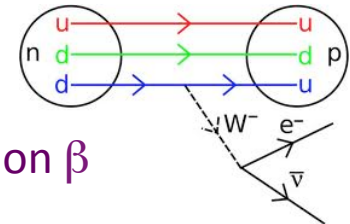
- Exemples :

Interaction EM



Diffusion Bhabha

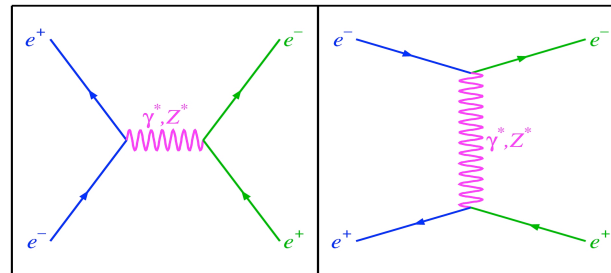
Interaction faible



Désintégration β

- A très grande énergie par rapport à $m(Z,W) \sim 100 \text{ GeV}$, les interactions EM et faible sont indiscernables : elle sont « unifiées »

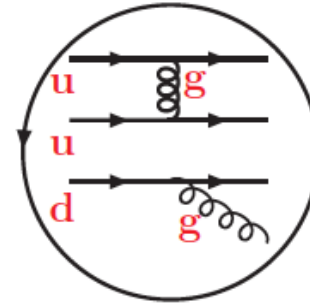
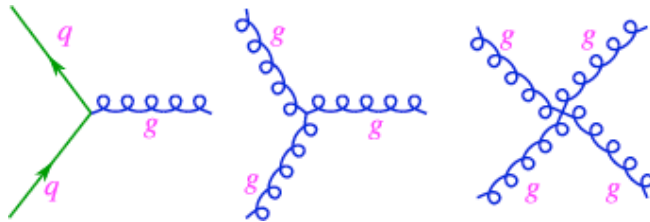
Bhabha Scattering



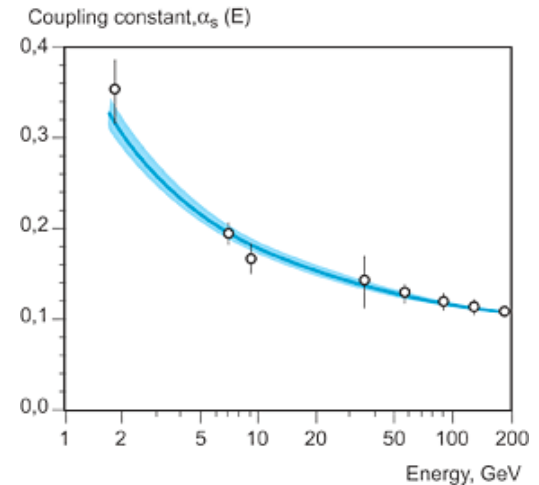
- Elles se séparent à basse énergie sous l'effet du champ de Higgs et prennent chacune leur structure et leur portée.
- Description de Glashow, Salam et Weinberg (1967) → naissance du **Modèle Standard** (prix Nobel de physique 1979)

Interaction forte

- Exemples :



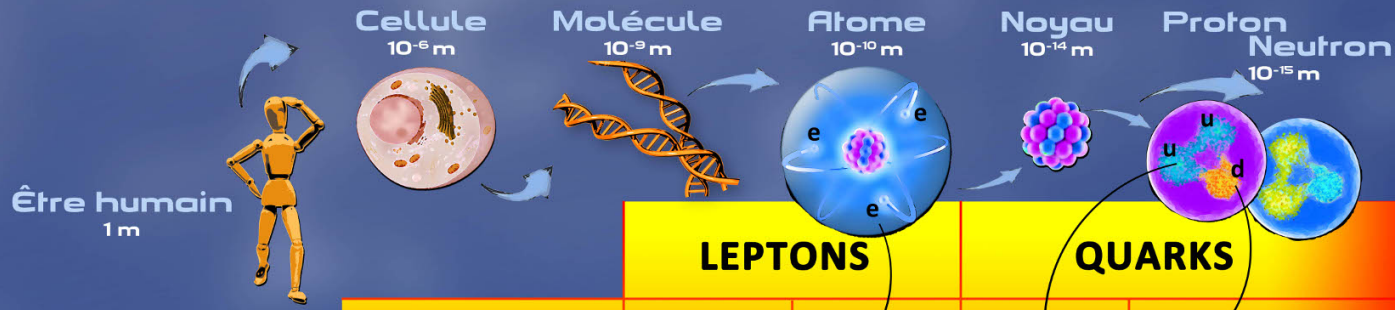
- Théorie de l'interaction forte = « QCD », copiée sur QED, mais l'intensité (couplage) *augmente* avec la distance
 - les gluons ont une charge forte (« couleur ») non nulle
 - David Gross et Frank Wilczek, David Politzer prix Nobel 2004



- Quarks jamais observés seuls/libres : toujours confinés dans des hadrons
 - charge électrique des quarks $2/3$, $-1/3$, mais charge des hadrons entières

Résumé

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON DE HIGGS H
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV $Q=0$ $t=?$	e électron $m = 0,00055$ GeV $Q=-1$ $t=\infty$	u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q=2/3$ $t=\infty$	d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q=-1/3$ $t=10$ min	BOSON DE HIGGS H $m = 126$ GeV $Q=0$ $t=1,5 \cdot 10^{-22}$ Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, il est responsable de leurs masses. Il provoque la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV $Q=0$ $t=?$	μ muon $m = 0,106$ GeV $Q=-1$ $t=2,2 \cdot 10^{-6}$ s	c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q=2/3$ $t=10^{-12}$ s	s étrange / strange $m = 0,1$ GeV $Q=-1/3$ $t=10^{-12}$ s	Champ de Higgs
3^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	ν_τ neutrino tau $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV $Q=0$ $t=?$	τ tau $m = 1,78$ GeV $Q=-1$ $t=2,9 \cdot 10^{-13}$ s	t top $m = 173$ GeV $Q=2/3$ $t=4 \cdot 10^{-25}$ s	b beau / beauty / bottom $m = 4,2$ GeV $Q=-1/3$ $t=1,5 \cdot 10^{-12}$ s	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

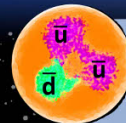


Bosons Z^0, W^+, W^-	Désintégrations radioactives β^- et β^+ de certains noyaux instables
Photon γ	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction est transmise par des particules associées

Les quatre interactions fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil et des étoiles

- formation des étoiles sous l'effet de la gravitation
- réactions de fusion nucléaire grâce aux interactions forte et faible
- production de lumière par interaction électromagnétique



ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. Elles ont la même masse, mais des charges opposées.

OUTILS EXPÉRIMENTAUX

Méthodes expérimentales

1) Sources de particules naturelles : découverte, étude

- Radioactivité : énergies typiques keV - MeV
- rayons cosmiques :
 - Protons,... : en moyenne qq GeV, mais spectre s'étend jusqu'à 10^{19} eV !
Au sol (après interaction avec l'atmosphère) : surtout des muons
 - Neutrinos solaires

2) Source artificielle: **accélérateurs**

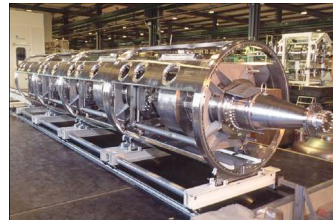
- permettent de *sonder* des particules : principe du microscope

Energie du faisceau	0,5 eV	10 keV	100 MeV	100 GeV
Longueur d'onde	0,4 μ	0,2 A	2 fm	$2 \cdot 10^{-3}$ fm
Echelle	Visible	Atome	Noyau	

- permettent de *produire* de nouvelles particules : $E = mc^2$
- cible fixe ou collisionneur

Accélérateurs

- Particules **chargées** uniquement (stables de préférence) : électrons, (muons), protons, ions,...
 - Remarque : on peut obtenir des faisceaux de particules secondaires, par ex. neutrinos
- Accélérateurs linéaires → accélérer : champ électrostatique ou champ radiofréquence (E)

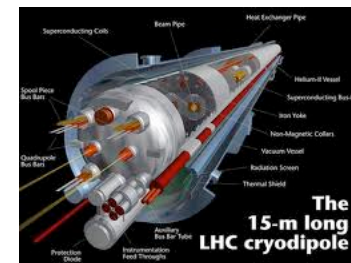


- Circulaires → accélérer + courber : dipôles (champ magnétique B)

Rayonnement synchrotron :

ΔE proportionnel à γ^4/ρ^2 ,

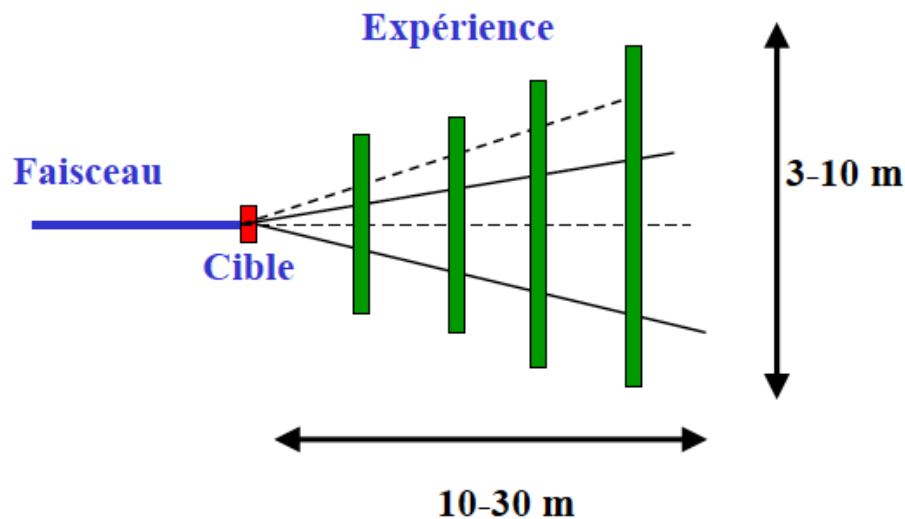
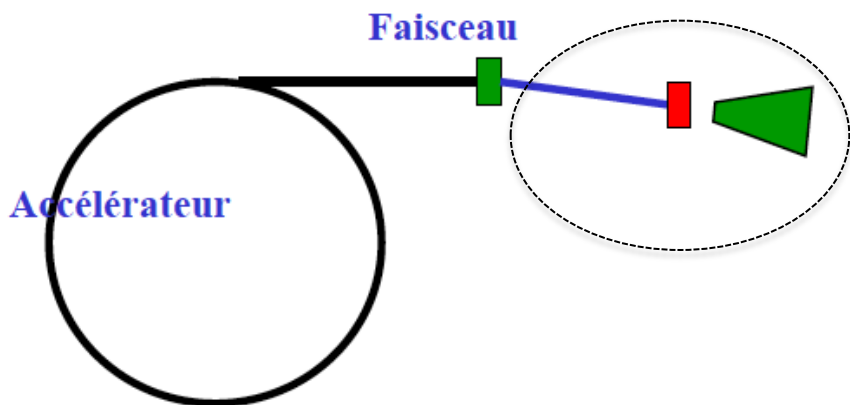
avec $\gamma = E/m$ et $\rho =$ rayon de courbure



- Dans tous les cas : tube à vide + focaliser : quadrupôles (B)

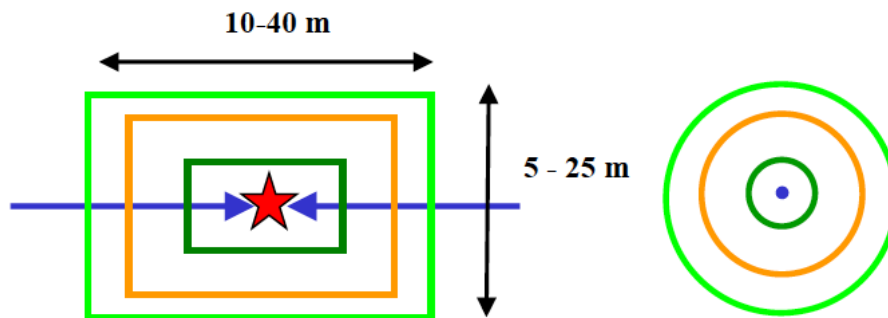
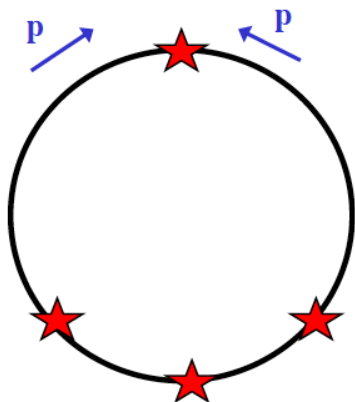
Expériences sur accélérateurs

- **Expériences sur « cible fixe »**



Exemple : faisceau de muon sur cible hydrogène, expérience COMPASS. Etude de la structure du proton

- **Expériences sur collisionneur**

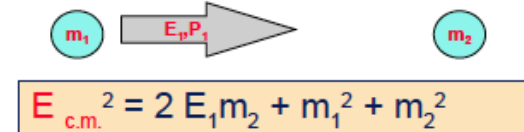
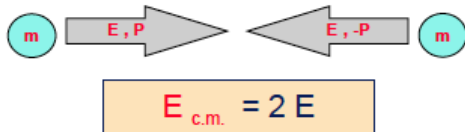


Exemples : expériences LEP : ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL, expériences LHC : ATLAS, CMS, ALICE et LHCb*

Collisionneurs : paramètres importants

- **Energie**

- $E=mc^2 \rightarrow$ créer des particules très massives
- Collisionneur \rightarrow plus d'énergie dans le «centre de masse*» que cible fixe



- **Luminosité**

- **Nombre d'interactions par seconde $dN/dt = L \sigma$**

- $\sigma =$ **section efficace** = probabilité de la réaction

Unité = cm^2 , ou barn (b) : $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, ou pb (10^{-12} b)

- $L =$ luminosité instantanée $L = f \cdot N_1 N_2 / (4\pi\sigma_x \sigma_y)$ Unité = $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

f =fréquence de croisement, N_i =nombre de particules par faisceau, $\sigma_{x,y}$ =taille des faisceaux au point d'interaction

- Luminosité intégrée sur le temps en cm^{-2} ou en fb^{-1} ($1 \text{ fb}^{-1} = 10^{15} \text{ b}^{-1}$)

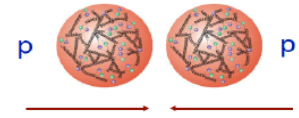
*Référentiel du « centre de masse » : la somme des impulsions des particules est nulle. L'énergie dans ce référentiel est l'énergie utile à la collision. $E_{c.m.}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$

Collisionneurs : paramètres importants (suite)

• « Leptonique »

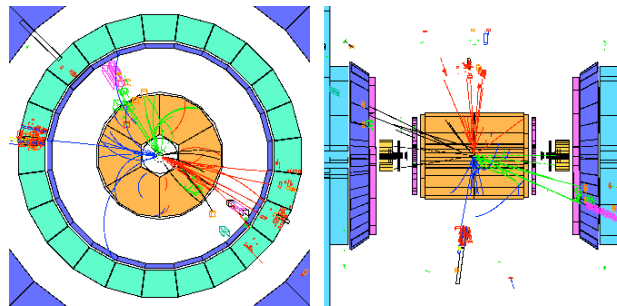
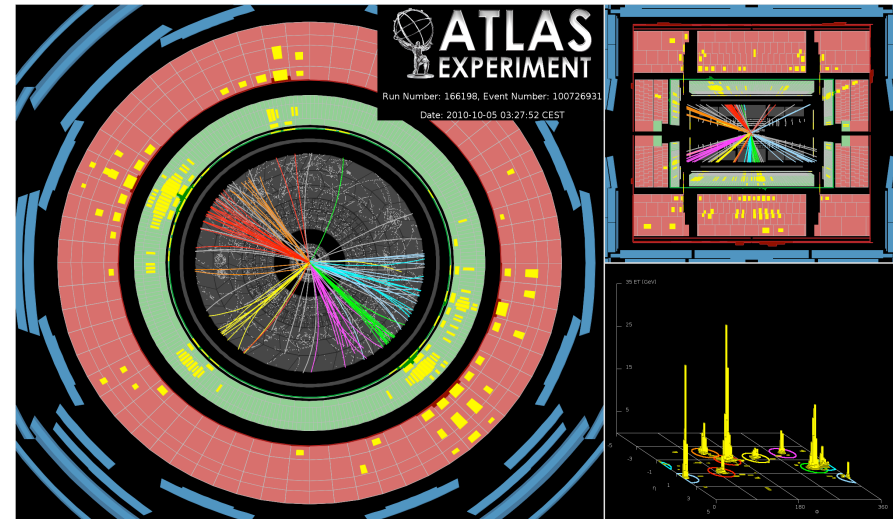
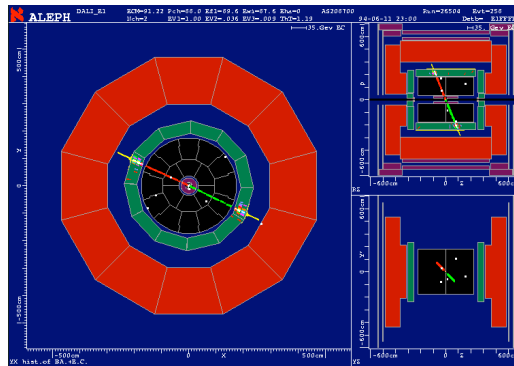


ou « hadronique »



- Energie collision = E_{CM}
- Événements « propres »

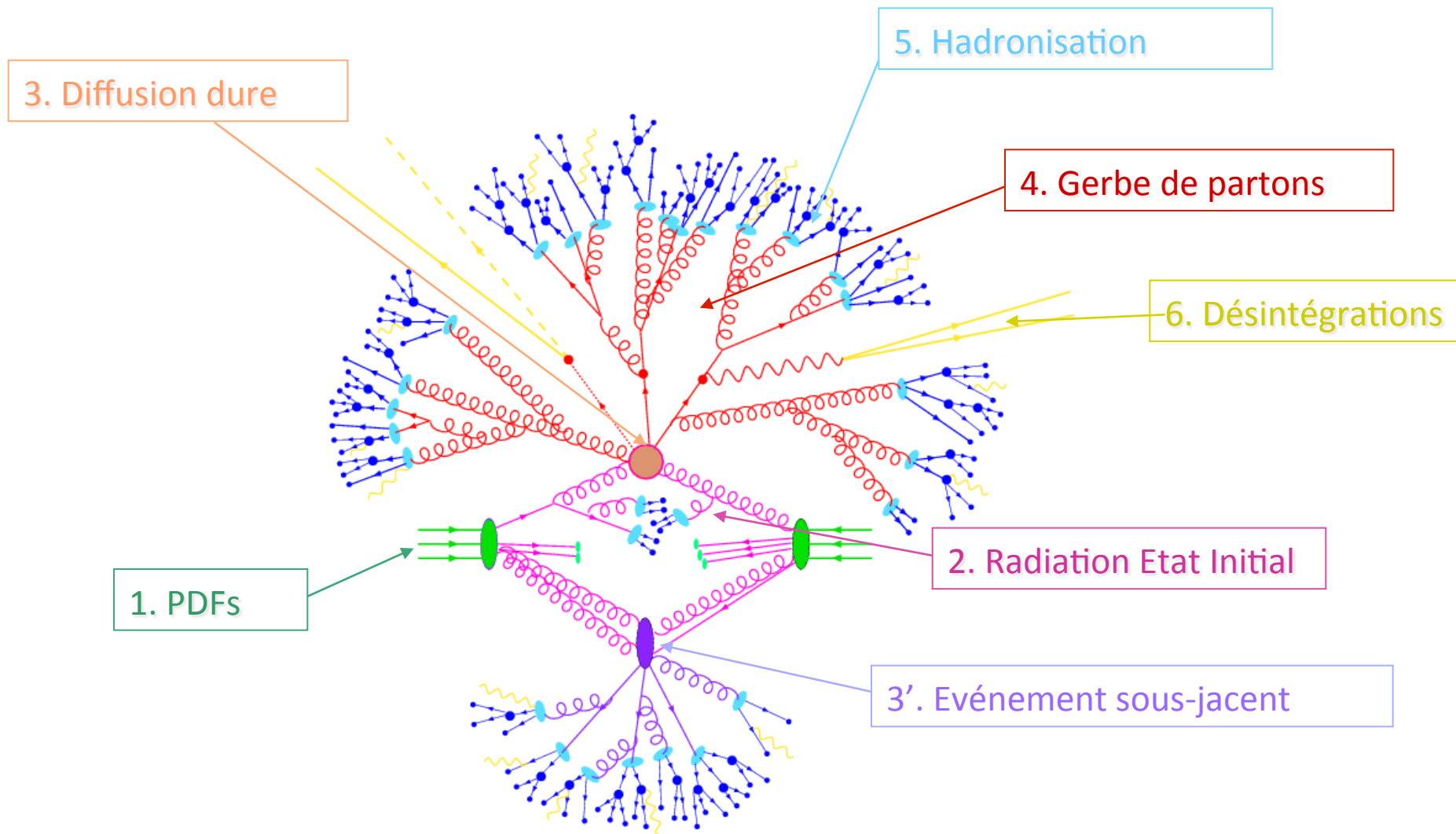
- Energie collision $E'_{CM} < E_{CM}$
 - Energie totale processus inconnue
- ⇒ utilisation de l'énergie-impulsion *transverse*
- Événements compliqués



DELPHI

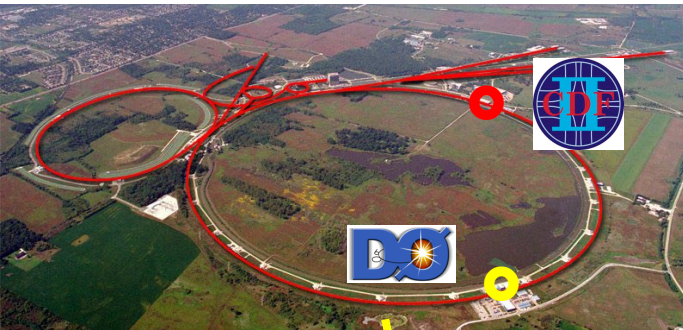
- Complication supplémentaire avec « l'empilement »

Collision hadronique

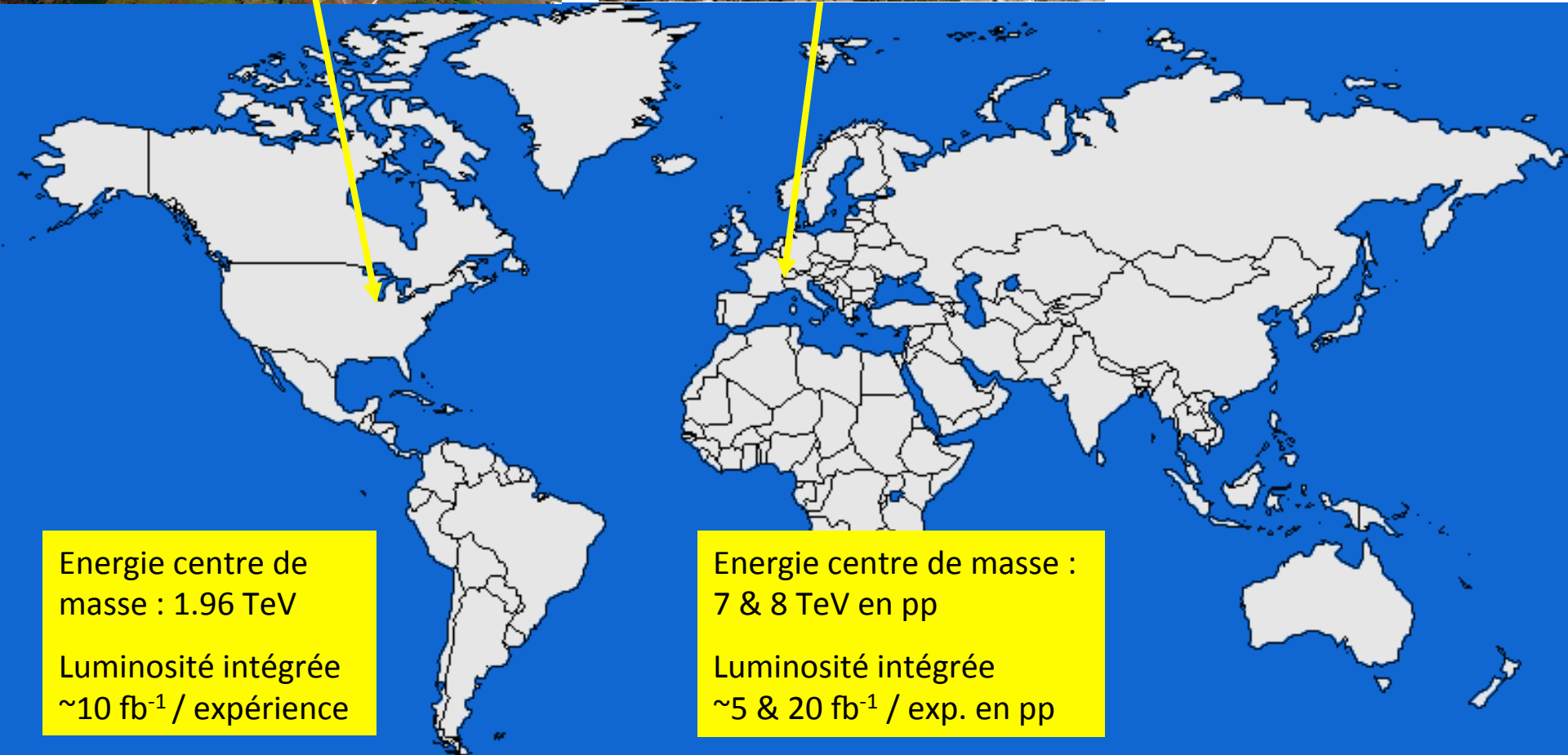
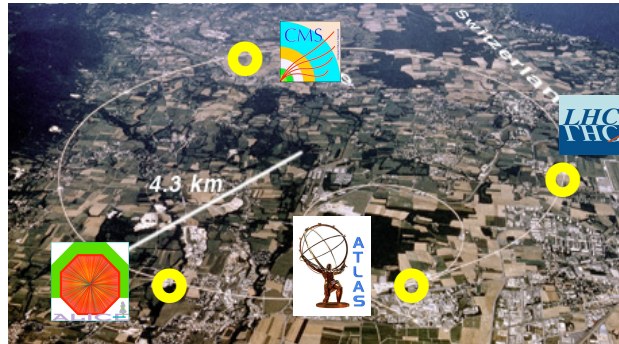


Collisionneurs hadroniques

Tevatron @ Fermilab ($p\bar{p}$)



LHC @ CERN ($pp, pPb, PbPb$)



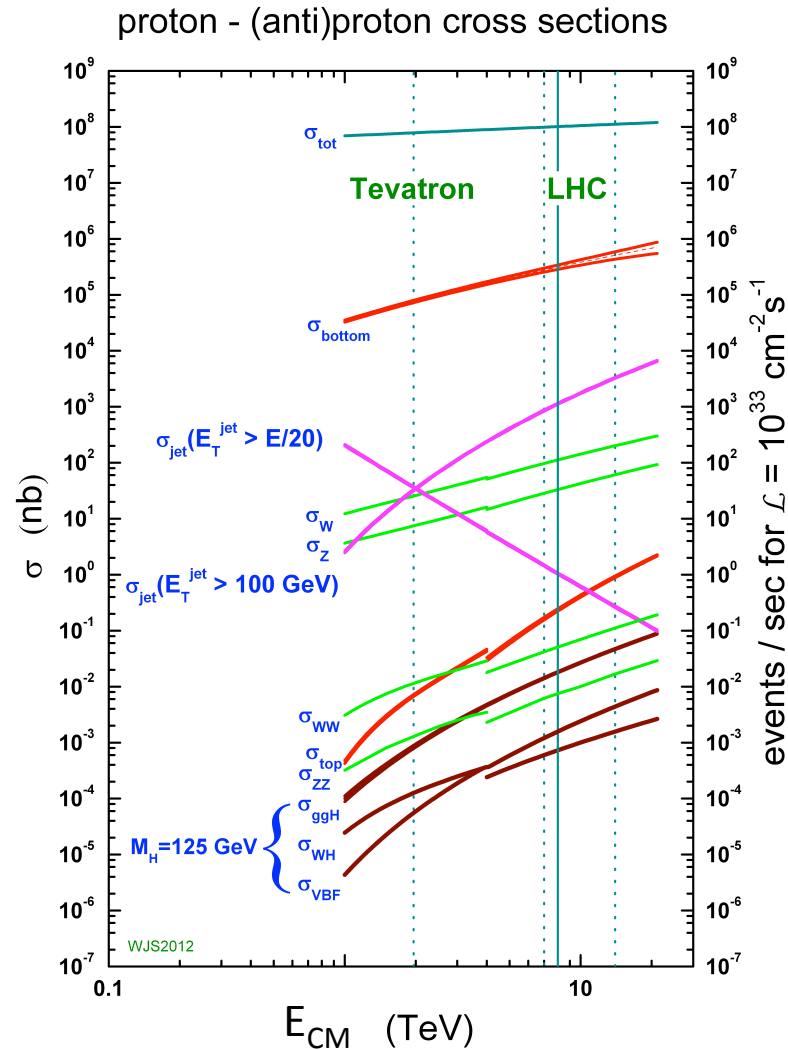
Energie centre de masse : 1.96 TeV

Luminosité intégrée
 $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ / expérience

Energie centre de masse :
7 & 8 TeV en pp

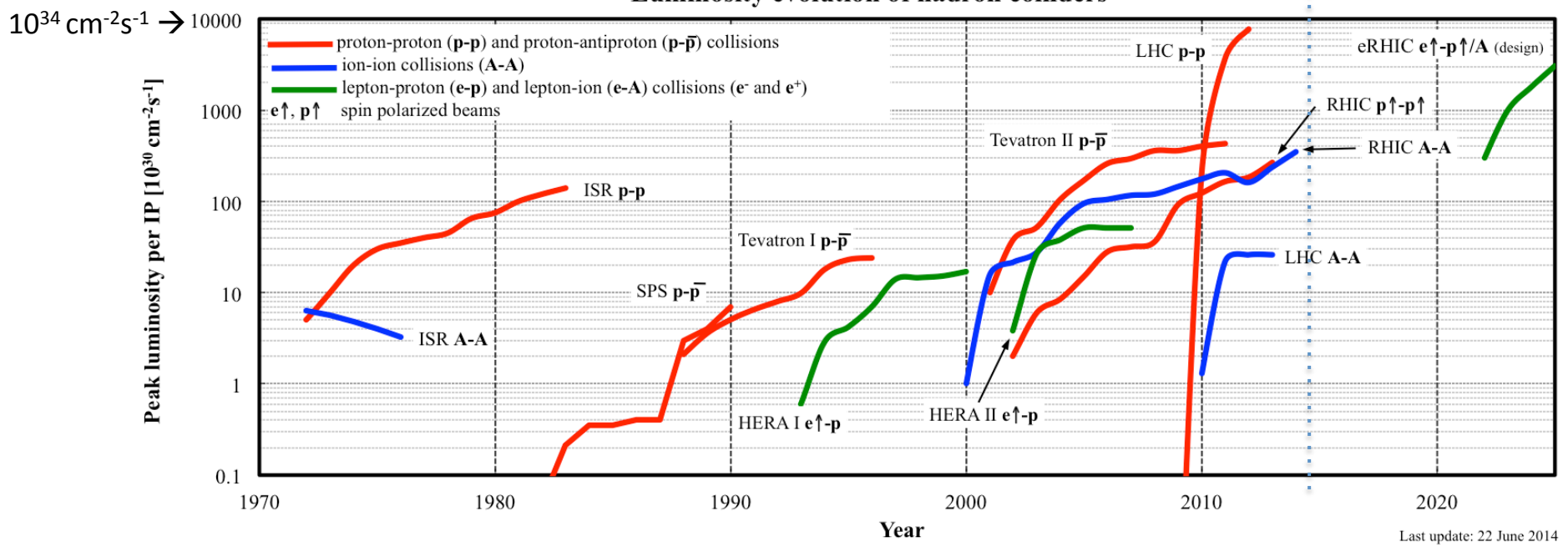
Luminosité intégrée
 $\sim 5 \text{ & } 20 \text{ fb}^{-1}$ / exp. en pp

Section efficace proton-(anti)proton



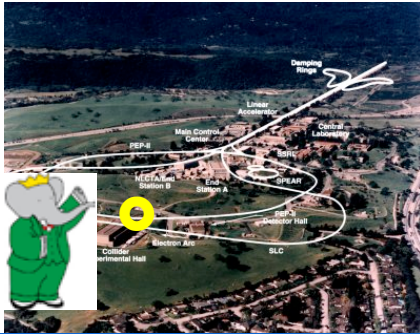
Collisionneurs hadroniques: luminosité

Aujourd'hui

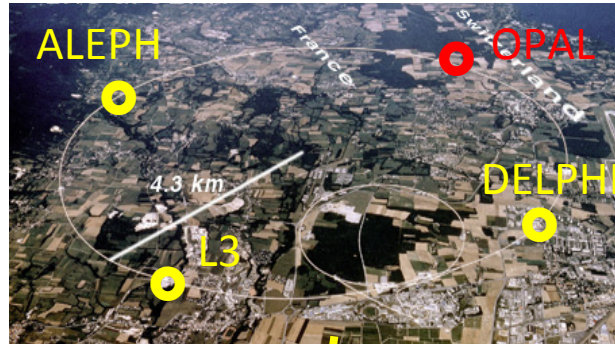


Collisionneurs électron-positron

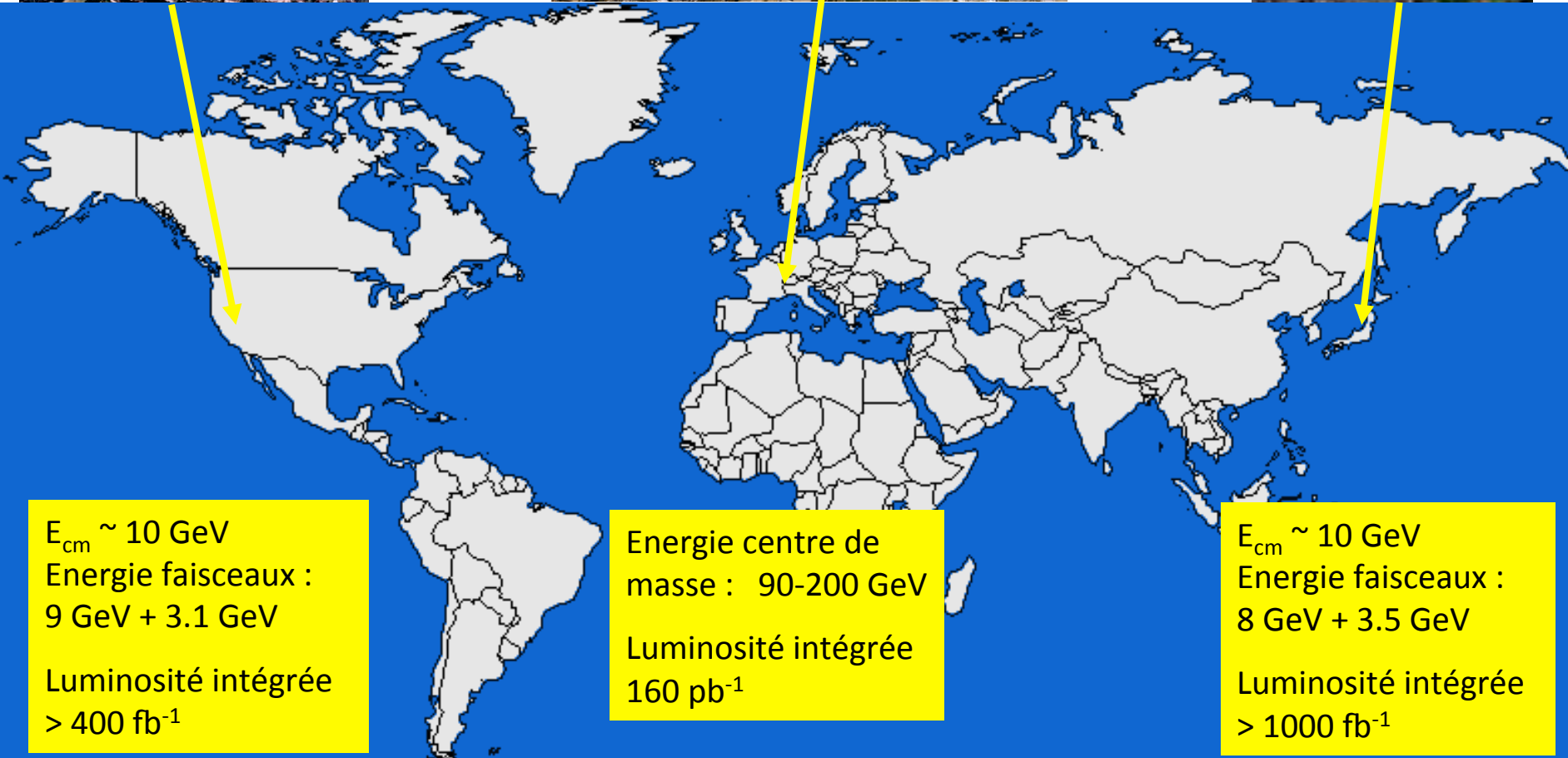
PEP II @ SLAC



LEP @ CERN



KEKB @ KEK

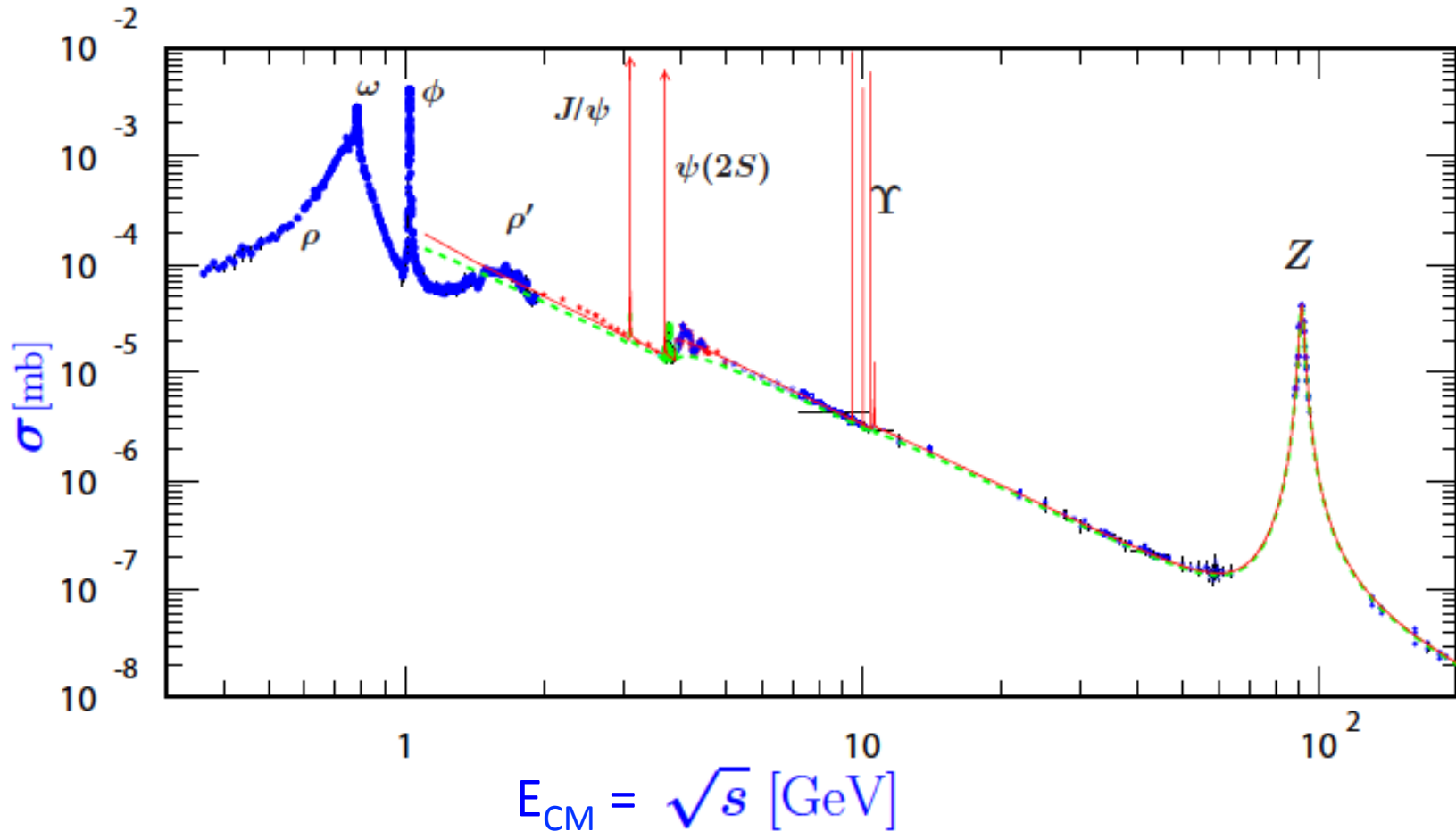


$E_{cm} \sim 10 \text{ GeV}$
Energie faisceaux :
9 GeV + 3.1 GeV
Luminosité intégrée
> 400 fb⁻¹

Energie centre de
masse : 90-200 GeV
Luminosité intégrée
160 pb⁻¹

$E_{cm} \sim 10 \text{ GeV}$
Energie faisceaux :
8 GeV + 3.5 GeV
Luminosité intégrée
> 1000 fb⁻¹

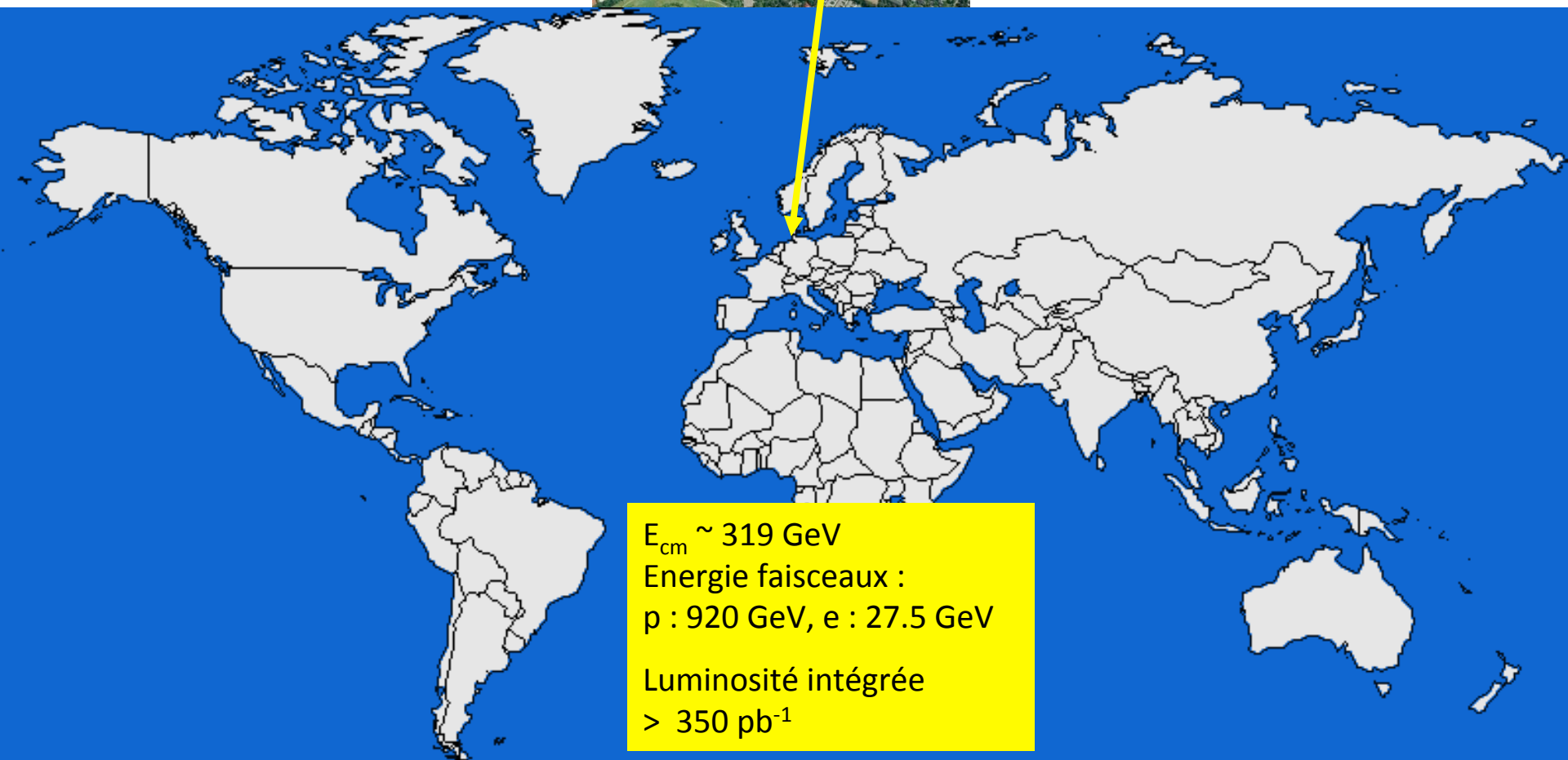
Section efficace e^+e^-



Il faut faire varier l'énergie des faisceaux pour mesurer cette courbe

Collisionneur ep

HERA @ DESY (e^-p , e^+p)



$E_{cm} \sim 319 \text{ GeV}$

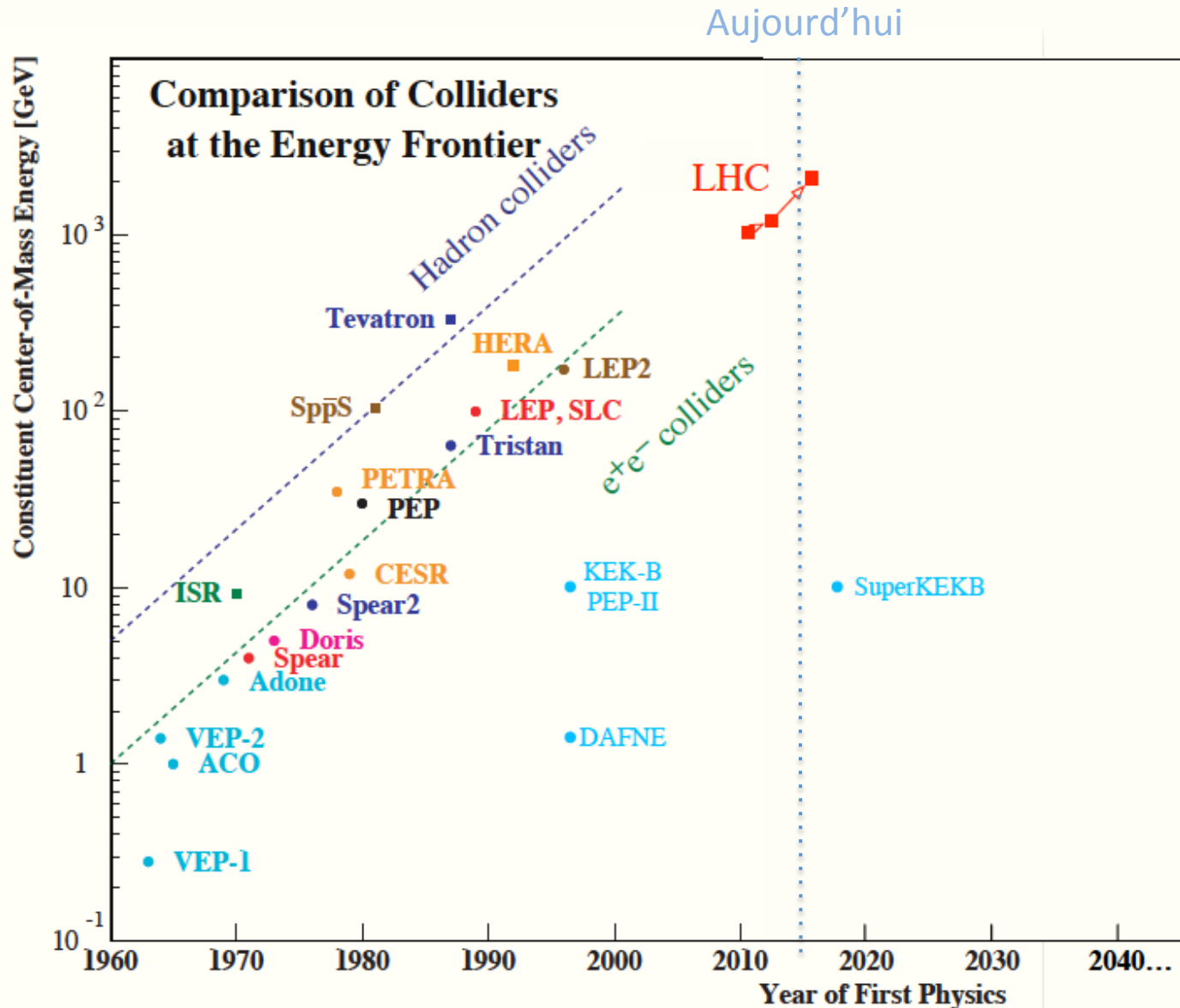
Energie faisceaux :

$p : 920 \text{ GeV}$, $e : 27.5 \text{ GeV}$

Luminosité intégrée

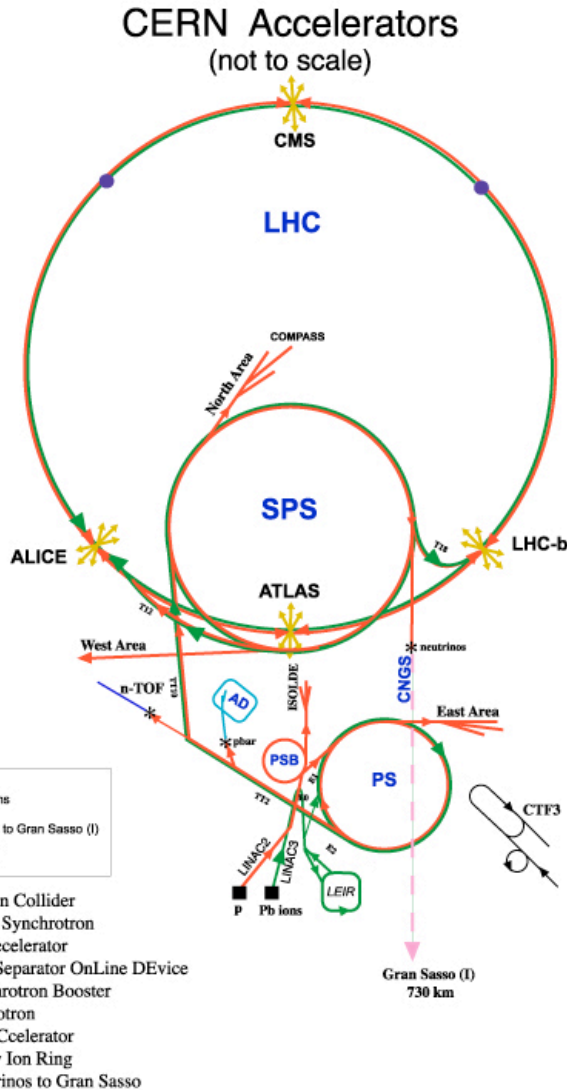
$> 350 \text{ pb}^{-1}$

Collisionneurs: énergie



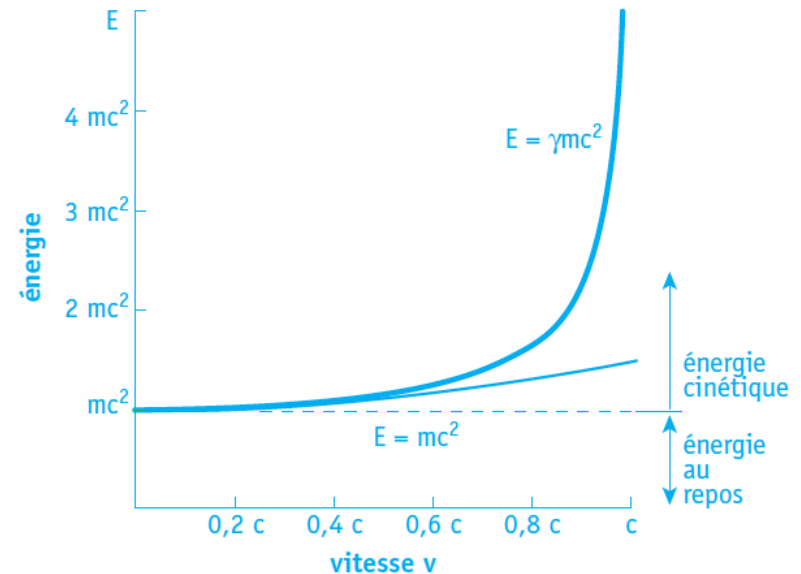
Attention à l'échelle logarithmique !

Accélérateurs du CERN



Énergie cinétique d'un proton (K)	Vitesse (%c)	Accélérateur
50 MeV	31.4	Linac 2
1.4 GeV	91.6	Booster PS
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV	99.9999991	LHC

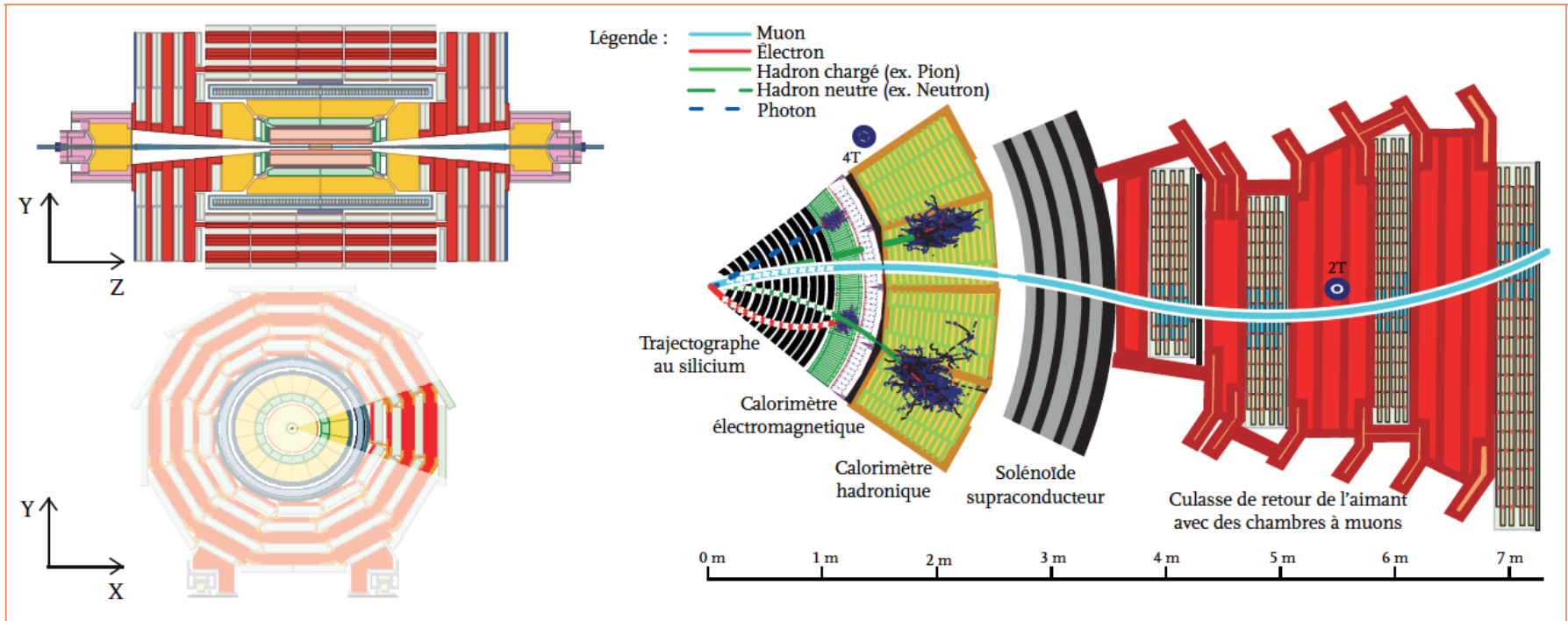
Relation entre l'énergie cinétique et la vitesse d'un proton dans les accélérateurs du CERN. La masse au repos du proton est $0.938 \text{ GeV}/c^2$



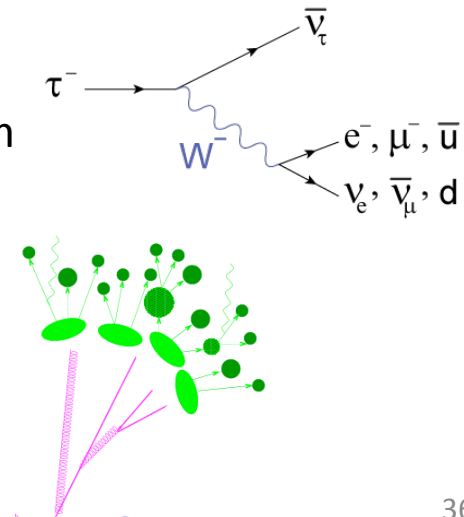
© CERN 2004

Détection

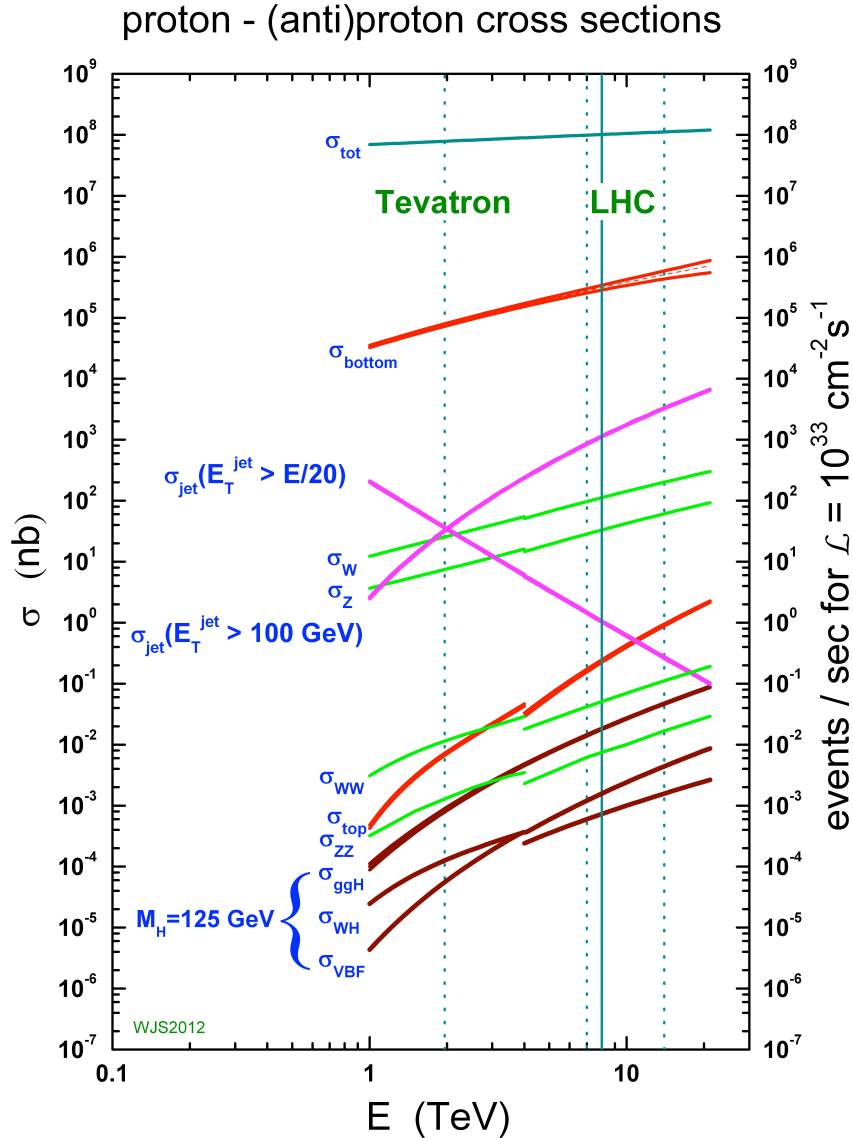
Voir le cours
de P. Puzo



- Temps de vie du muon $\tau_\mu \sim 2 \mu\text{s}$, longueur de vol moyenne $c\tau \sim 660 \text{ m}$
- Temps de vie du tau $\tau_\tau \sim 300 \text{ fs}$, $c\tau \sim 90 \mu\text{m}$
détection des $\tau =$ via leur produits de désintégration
- Temps de vie des hadrons : π^\pm : 26 ns ($\sim 8 \text{ m}$), K^\pm : 12 ns ($\sim 4 \text{ m}$)
- Quarks et gluons : « jets »
- Neutrinos : impulsion (p) ou impulsion transverse (p_T) manquante



Déclenchement expériences sur collisionneur hadronique



détecteur

40 MHz

Niveau 1
(hardware)

75 kHz

Niveau 2
(software)

3 kHz

Niveau 3
(software)

400 Hz

1 collision
toutes les
25 ns

(chiffres ATLAS
approximatifs)



La grille de calcul

Grâce au déclenchement : $\sim 200\text{-}400$ collisions /s enregistrées par expérience

- 1 à 10 Mo numérisés pour chaque collision
- > 300 Mo/s soit > 25 To/jour ($1\text{T} = 10^{12}$)
- $\sim 10^{10}$ collisions enregistrées par an, soit 15 Po/an ($1\text{P} = 10^{15}$)

Le logiciel des détecteurs est à la hauteur de leur complexité

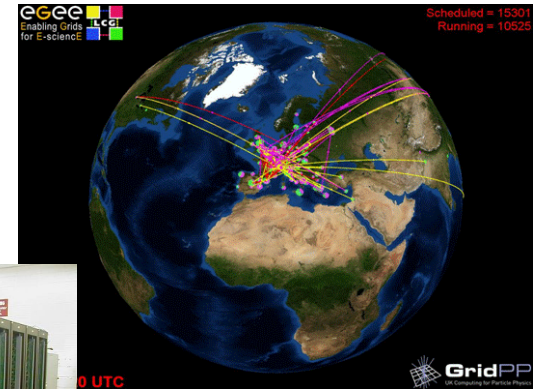
Exemple pour ATLAS ≈ 5 millions de lignes de code, 30 millions d'objets

Les expériences LHC utilisent une grille de calcul

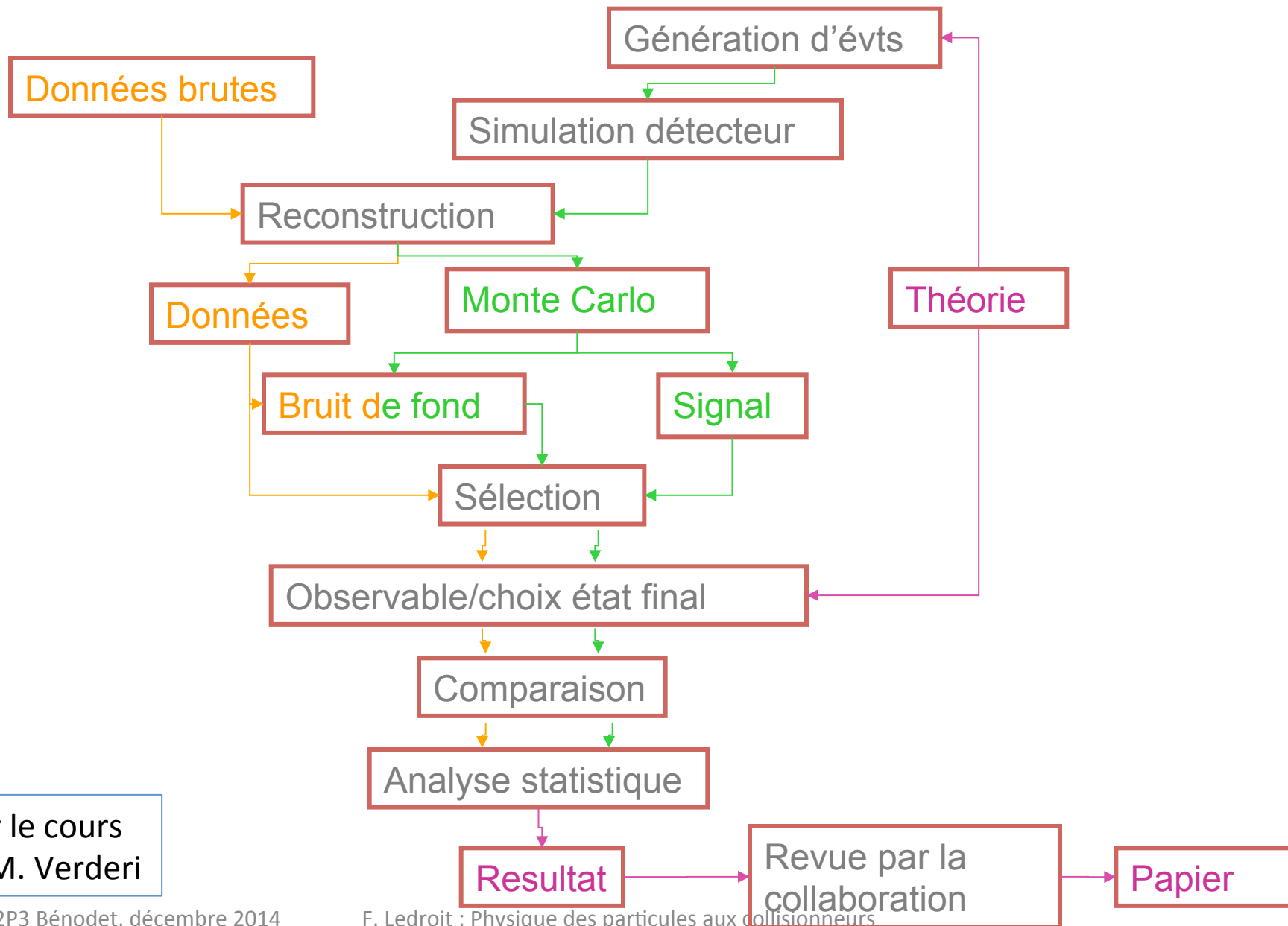
8 000 physiciens répartis dans le monde : accès aux données et analyse

Réseau mondial d'ordinateurs

- 200 sites
- Réseau : jusqu'à 10 GB/s
- Processeurs : $\sim 200\ 000$
- Stockage sur bande et sur disque



Déroulement analyse



Voir le cours
de M. Verderi

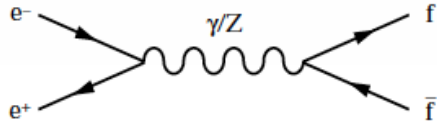
LA PHYSIQUE AVANT LE LHC : L'HÉRITAGE DU LEP ET DU TEVATRON

Physique au LEP

Collaborations de
300-500 physiciens

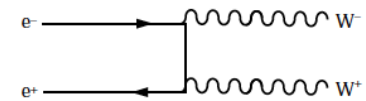
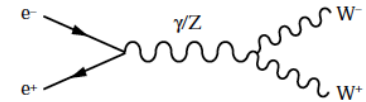
- Bosons Z et W⁺/W⁻ découverts au SppS en 1983 par UA1 et UA2 (prix Nobel 1984, Carlo Rubbia et Simon Van der Meer) : qq dizaines, précision insuffisante pour vérifier la cohérence de la théorie
- Collisions e⁺e⁻ à E_{cm} ~ m(Z) = 91 GeV → « usine à Z » : 17 10⁶ collisions enregistrées de 1989 à 1995

• LEP 1 :



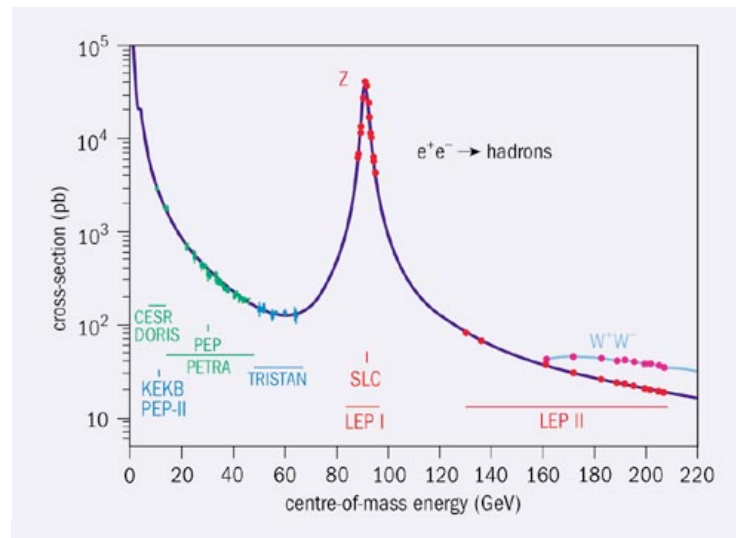
f = e, μ, τ, ν_e, ν_μ, ν_τ, u, d, s, c, b

LEP 2 (1996-2000) :
E_{cm} = 135, 160-209 GeV



- Largeur d'une particule : faible durée de vie du Z (Δt) ⇒ grande incertitude sur E de production (ΔE) puisque ΔE Δt ~ ħ

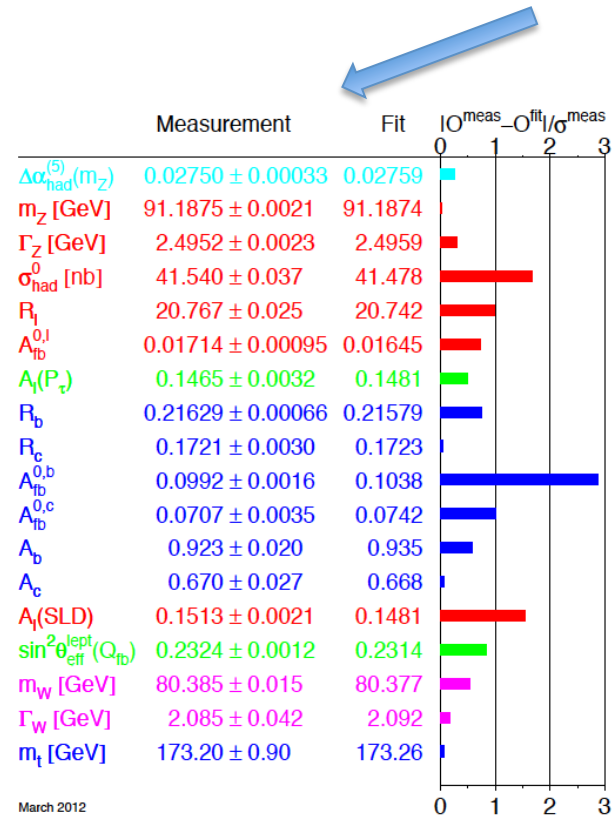
- Courbe de « résonance » :



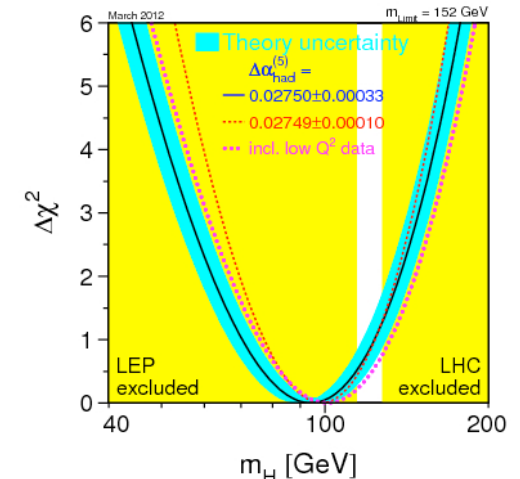
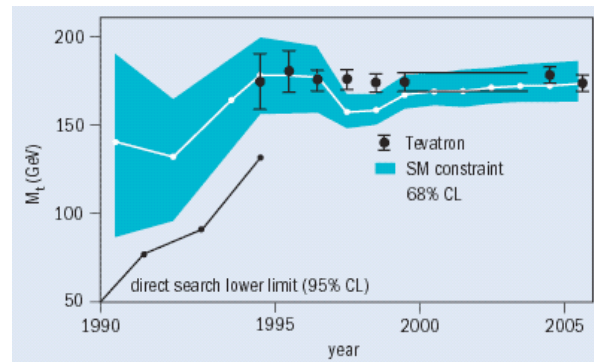
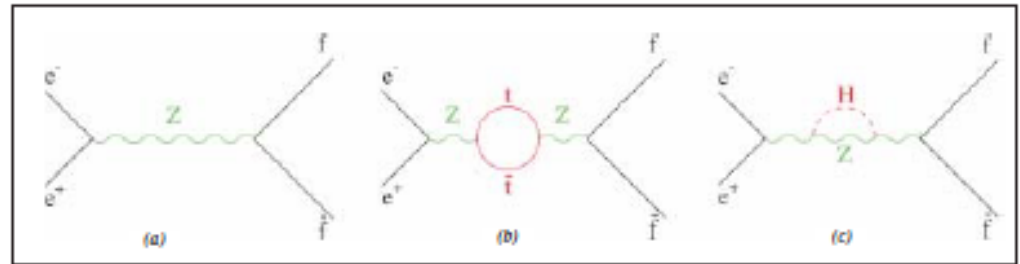
Echelle logarithmique

Physique de précision au LEP

- Seulement 4 paramètres libres (*à l'ordre le plus bas*) dans la théorie électrofaible : 2 constantes de couplage α_{EM} et α_{faible} et 2 paramètres du potentiel de Higgs
- La mesure de **nombreuses observables** permet de tester la cohérence du Modèle Standard

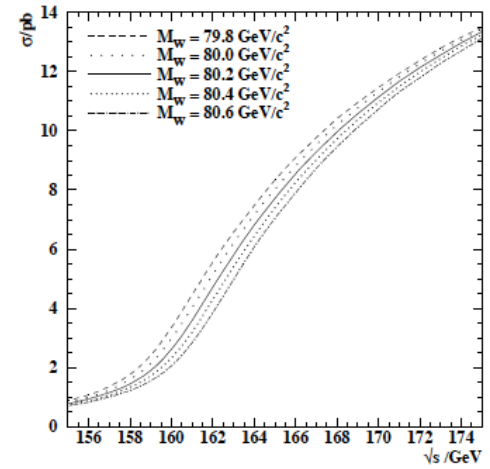
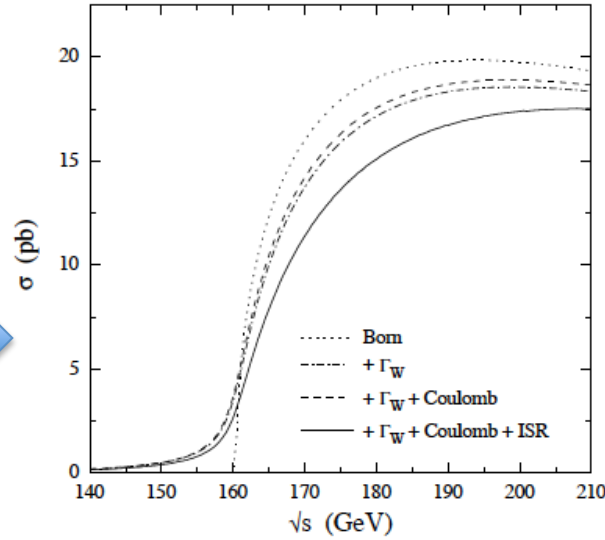
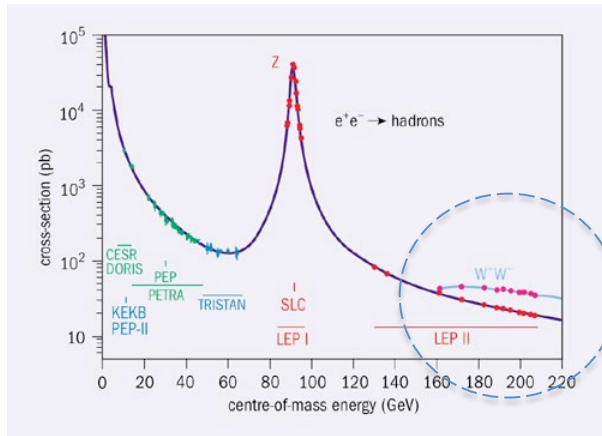


- Effets quantiques du quark top et du boson de Higgs
- Exemples :

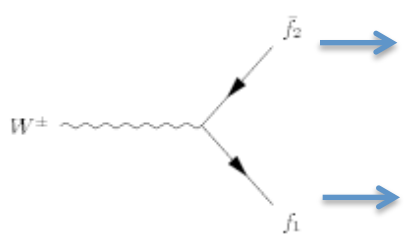


Mesure de $m(W)$ au LEP

- Seuil de production WW : $E_{CM} = 2 m(W)$
- Mesure section efficace dans cette région \rightarrow mesure de la masse



- Désintégration d'un W:

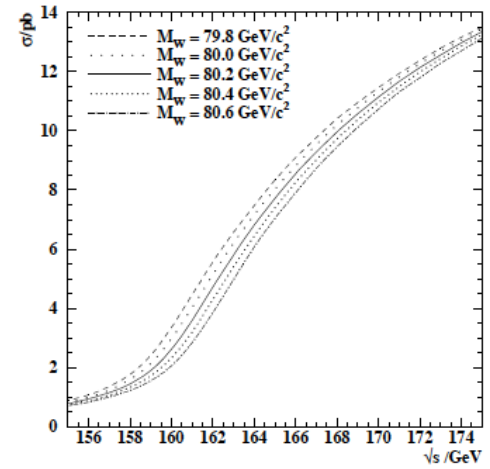
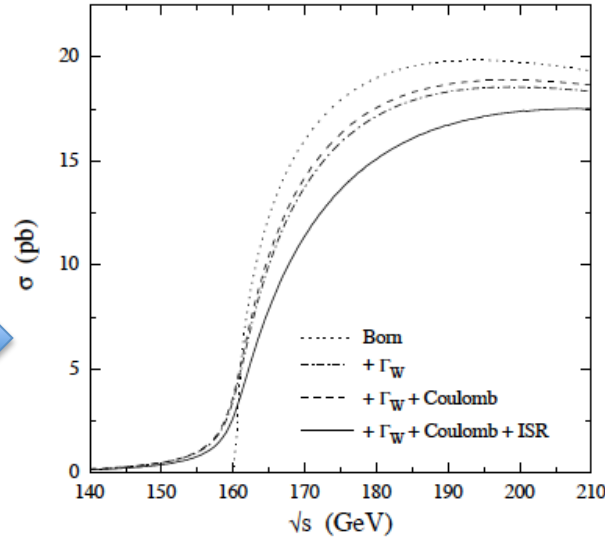
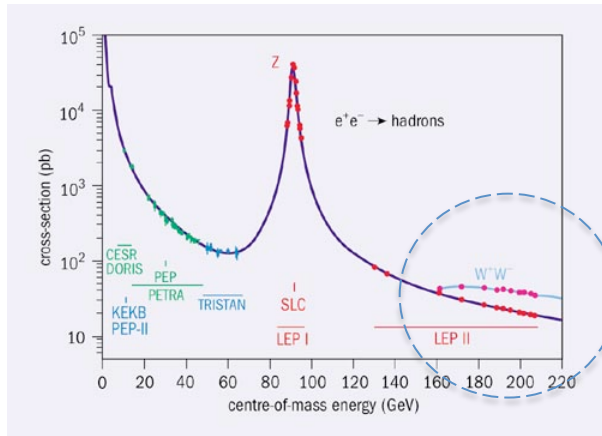


neutrino e	neutrino μ	neutrino τ
ν_e	ν_μ	ν_τ
0	0	0
↑	↑	↑
électron	muon	tau
e	μ	τ
-1	-1	-1

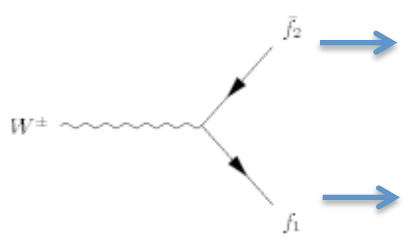
quark up	quark charm	quark top
u	c	t
$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$
↑	↑	↑
quark down	quark strange	quark bottom
d	s	b
$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

Mesure de $m(W)$ au LEP

- Seuil de production WW : $E_{CM} = 2 m(W)$
- Mesure section efficace dans cette région \rightarrow mesure de la masse



- Désintégration d'un W:

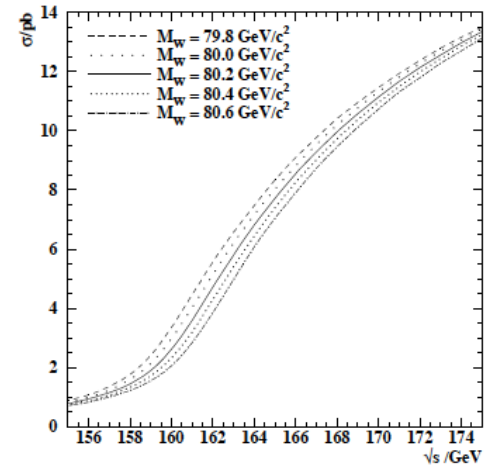
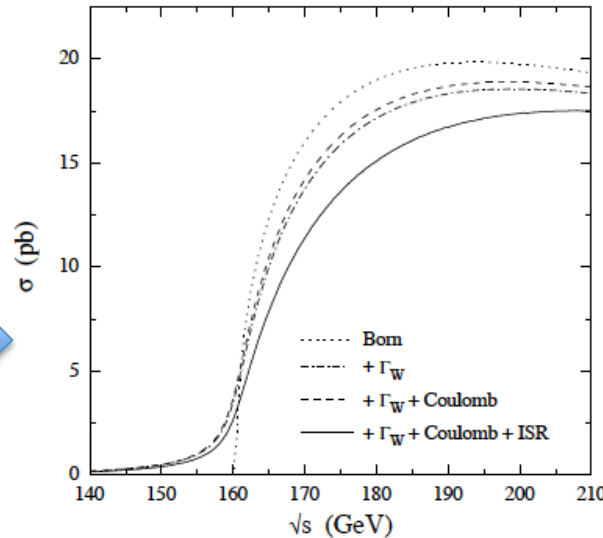
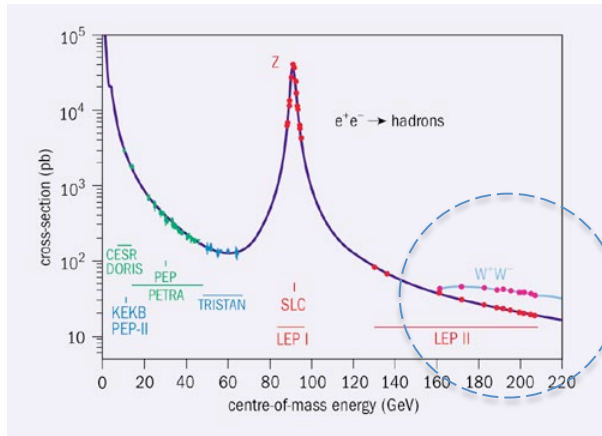


neutrino e	neutrino μ	neutrino τ
V_e	V_μ	V_τ
0	0	0
électron	muon	tau
e	μ	τ
-1	-1	-1

quark up	quark charm	quark top
u	c	t
$+2/3$	$+2/3$	$+2/3$
quark down	quark strange	quark bottom
d	s	b
$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$

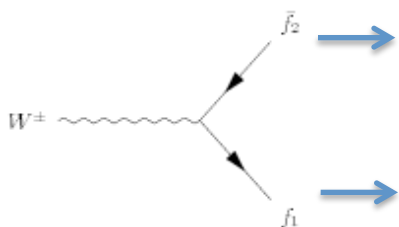
Mesure de $m(W)$ au LEP

- Seuil de production WW : $E_{CM} = 2 m(W)$
- Mesure section efficace dans cette région \rightarrow mesure de la masse



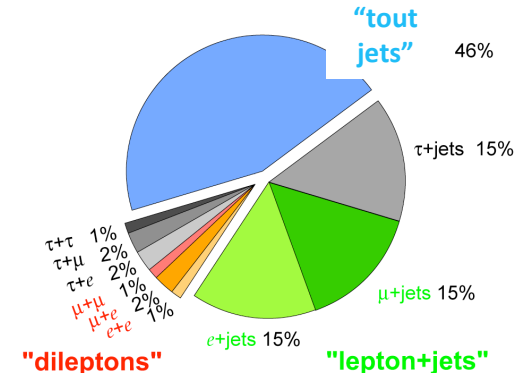
- Désintégration d'un W :

- Désintégration de deux W :



neutrino e	neutrino μ	neutrino τ
V_e	V_μ	V_τ
0	0	0
électron	muon	tau
e	μ	τ
-1	-1	-1

quark up	quark charm	quark top
u	c	t
$+2/3$	$+2/3$	$+2/3$
quark down	quark strange	quark bottom
d	s	b
$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$



Notion de masse invariante

- Quadrivecteur $P = (E, \mathbf{p})$, $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$
« métrique » spéciale : $P^2 = |\mathbf{P}|^2 = E^2 - \mathbf{p}^2$

attention ! toutes les flèches sur les 3-vecteurs sont omises (trop pénible avec PowerPoint)

Ce qui se conserve dans une transformation de Lorentz : $|\mathbf{P}|$

- **Collision** : particule A + particule B \rightarrow particule C

$$P_C^2 = (P_A + P_B)^2 = (E_A + E_B)^2 - (\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B)^2$$

Remarque si $\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B = 0$, $P_C^2 = (E_A + E_B)^2$: on retrouve $E_{CM} = E_A + E_B = 2E$

- **Désintégration** : Particule C \rightarrow particule A + particule B

c'est la même chose dans l'autre sens !

$$P_C^2 = (P_A + P_B)^2 = (E_A + E_B)^2 - (\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B)^2$$

Comme on a aussi $P_C^2 = E_C^2 - \mathbf{p}_C^2 = m_C^2$

$\rightarrow m_C^2 = (E_A + E_B)^2 - (\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_B)^2$ « masse invariante » des deux particules A et B

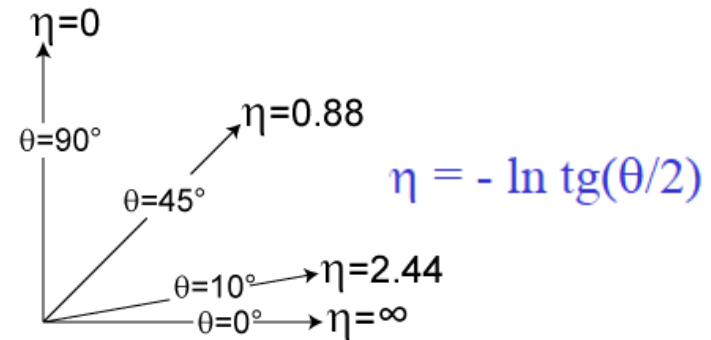
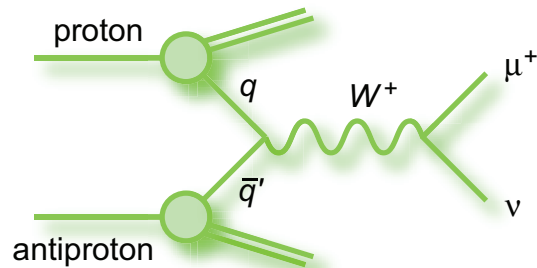
$$m_C^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2(E_A E_B - \mathbf{p}_A \mathbf{p}_B), \quad \mathbf{p}_A \mathbf{p}_B = |\mathbf{p}_A| |\mathbf{p}_B| \cos \alpha.$$

Si on néglige les masses : $m_C^2 = 2 |\mathbf{p}_A| |\mathbf{p}_B| (1 - \cos \alpha)$.

On peut connaître la masse d'une particule si on connaît celle de ses produit de désintégration et leur impulsion

Mesure de $m(W)$ au Tevatron

Collaborations de
~ 600 physiciens



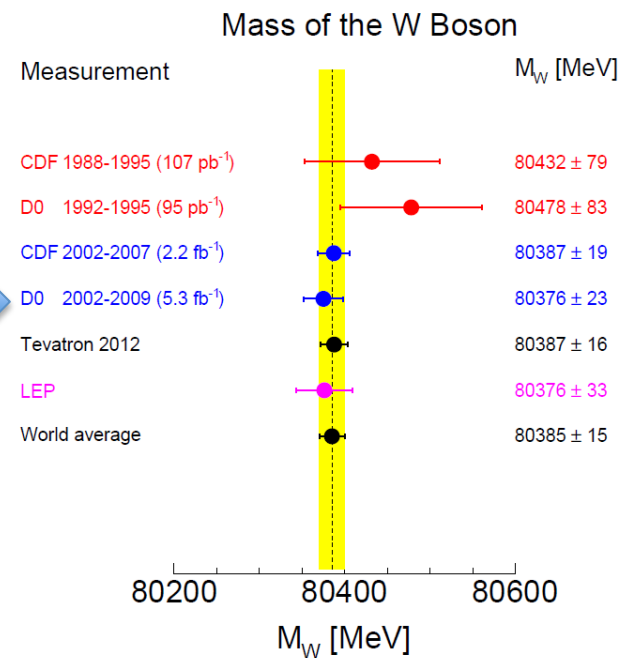
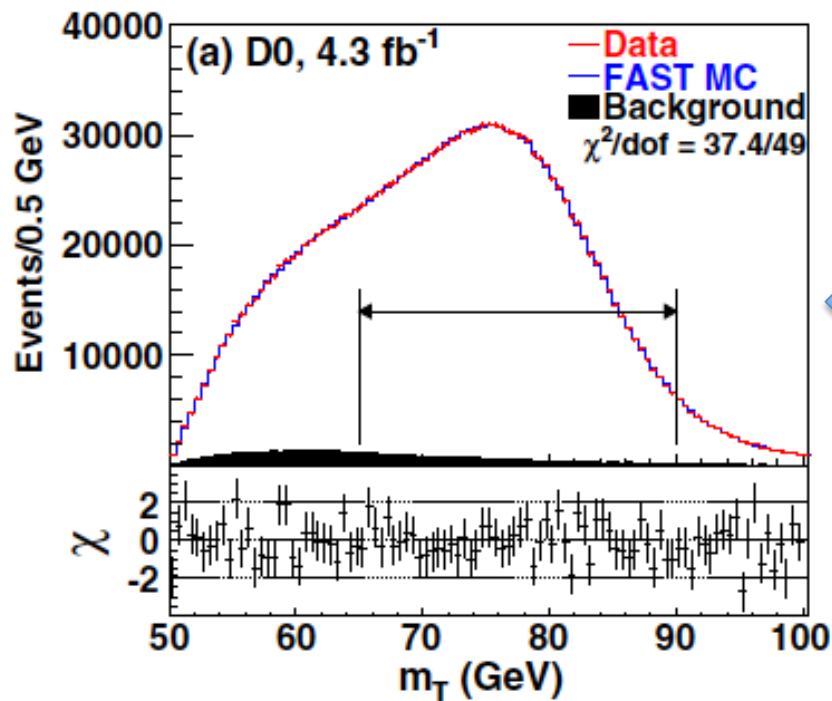
Sélection des événements $p+p \rightarrow W+X$, $W \rightarrow l \nu_l$. Exemple $l=e$:

- 1 électron d'énergie transverse $E_T > 25$ GeV et de pseudo-rapidité $\eta < 1.05$
- Nombreux critères de *qualité* sur la trace et l'amas de l'électron
- Sélection simultanée d'un lot d'événements $Z \rightarrow e^+e^-$ pour calibration
- Détection du ν_e via « l'impulsion transverse manquante »

→ masse invariante *transverse* :

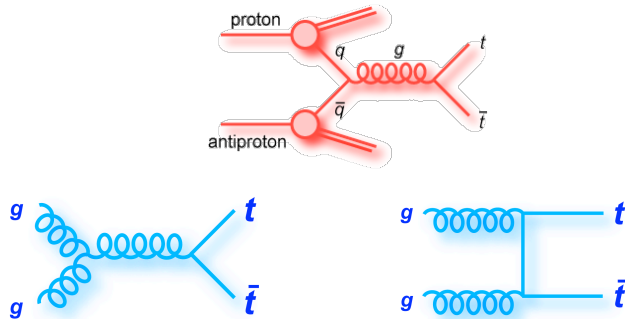
$$m_C^2 = 2 |p_A| |p_B| (1 - \cos \alpha) \rightarrow m_T^2 = 2 |p_T^e| |p_T^\nu| (1 - \cos \phi)$$

Mesure de $m(W)$ au Tevatron

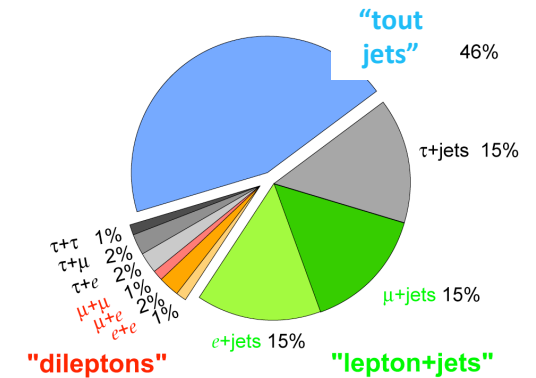
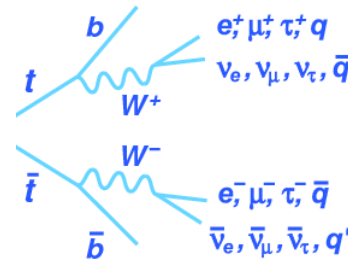


Mesure de $m(\text{top})$ au Tevatron

Production



Désintégration



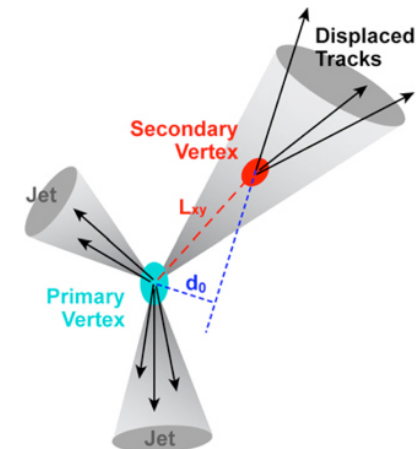
Identification des événements top-antitop :

- Lepton et impulsion transverse manquante, 2 jets de masse invariante $\sim m(W)$
- Jets identifiés comme provenant d'un quark b :
 $\tau_b \sim 2 \mu\text{s}$, $c\tau \sim 500 \mu\text{m}$

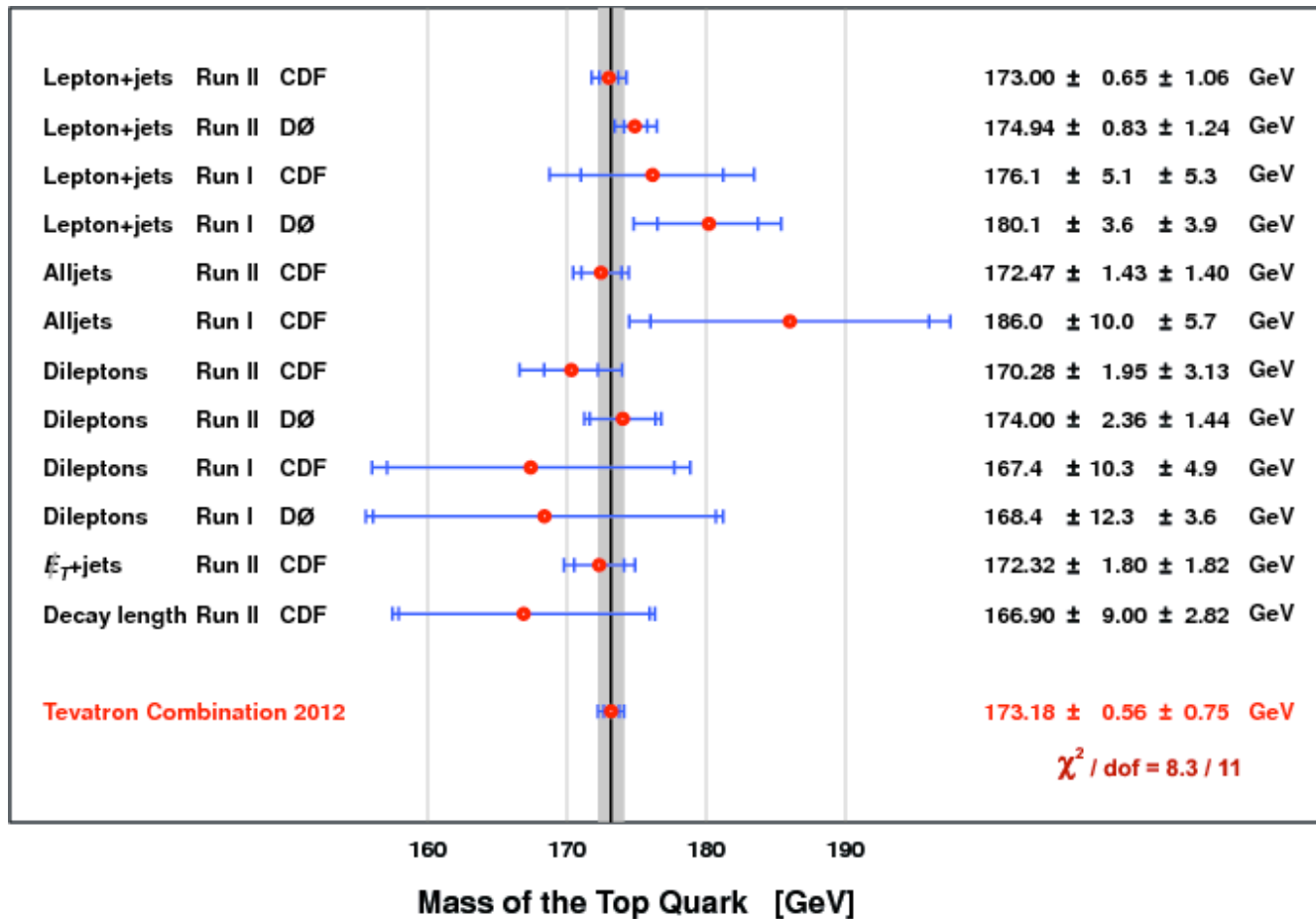
Mesure de la masse :

- méthode des gabarits
- méthode des éléments de matrice :

Pour chaque évt : calcul de $\text{Proba}(t\bar{t}b\bar{b})/\text{Proba}(b\bar{d}f)$ en fonction de $m(t)$ et des caractéristiques de l'événement
 Produit de toutes les probabilités en fonction de $m(\text{top})$: maximisation

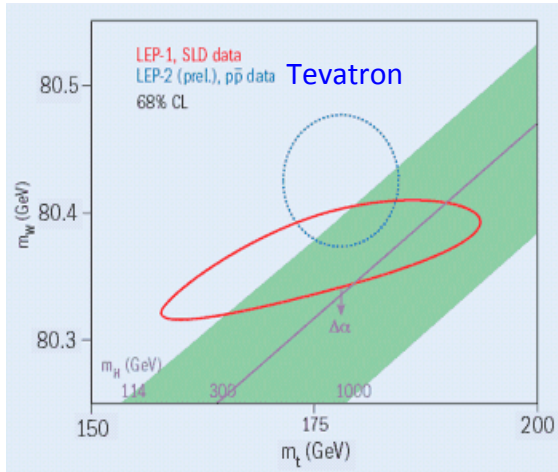


Mesure de $m(\text{top})$ au Tevatron

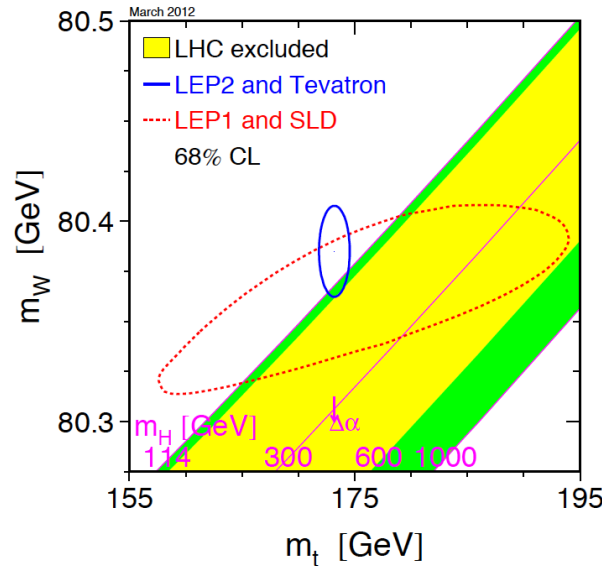


Héritage du LEP et du Tevatron

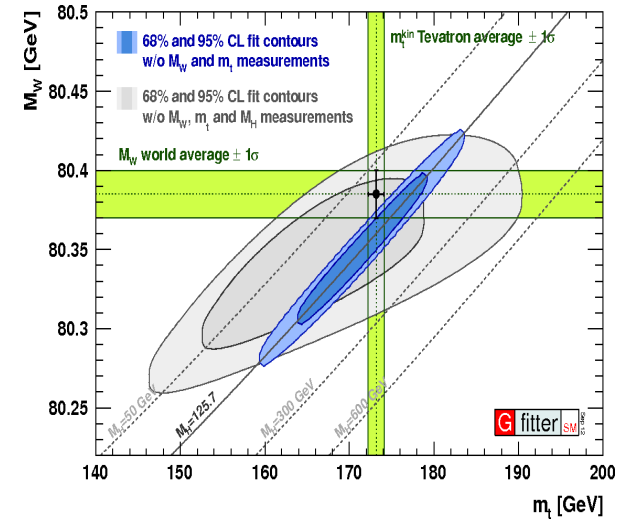
Découverte du top



Juste avant la découverte du Higgs



Après la découverte du Higgs



masse du quark top, m_t [GeV]

masse du boson W, m_W [GeV]

LE LHC ET SES DÉTECTEURS

Le LHC vu du ciel

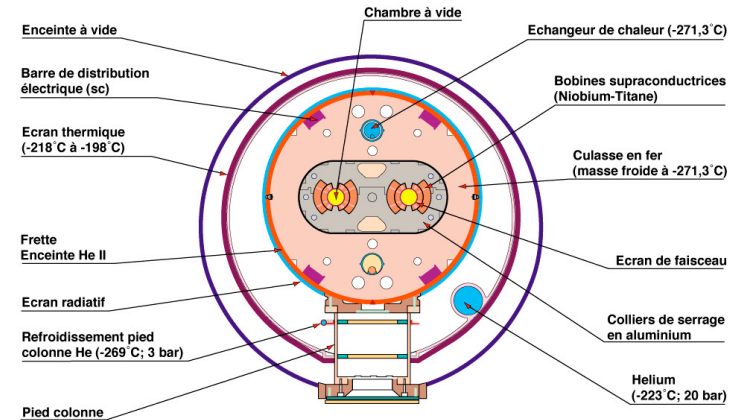


LHC : chronologie

- 1984 Premier workshop à Lausanne
- 1991 Résolution de principe sur LHC
- 1993 Abandon du SSC aux US
- 1994 Accord pour LHC
- 1995 Approbation ATLAS et CMS
- 1997 US, Japon, Inde rejoignent LHC
- 1998 Début génie civil
- 1999 Approbation Alice et LHCb

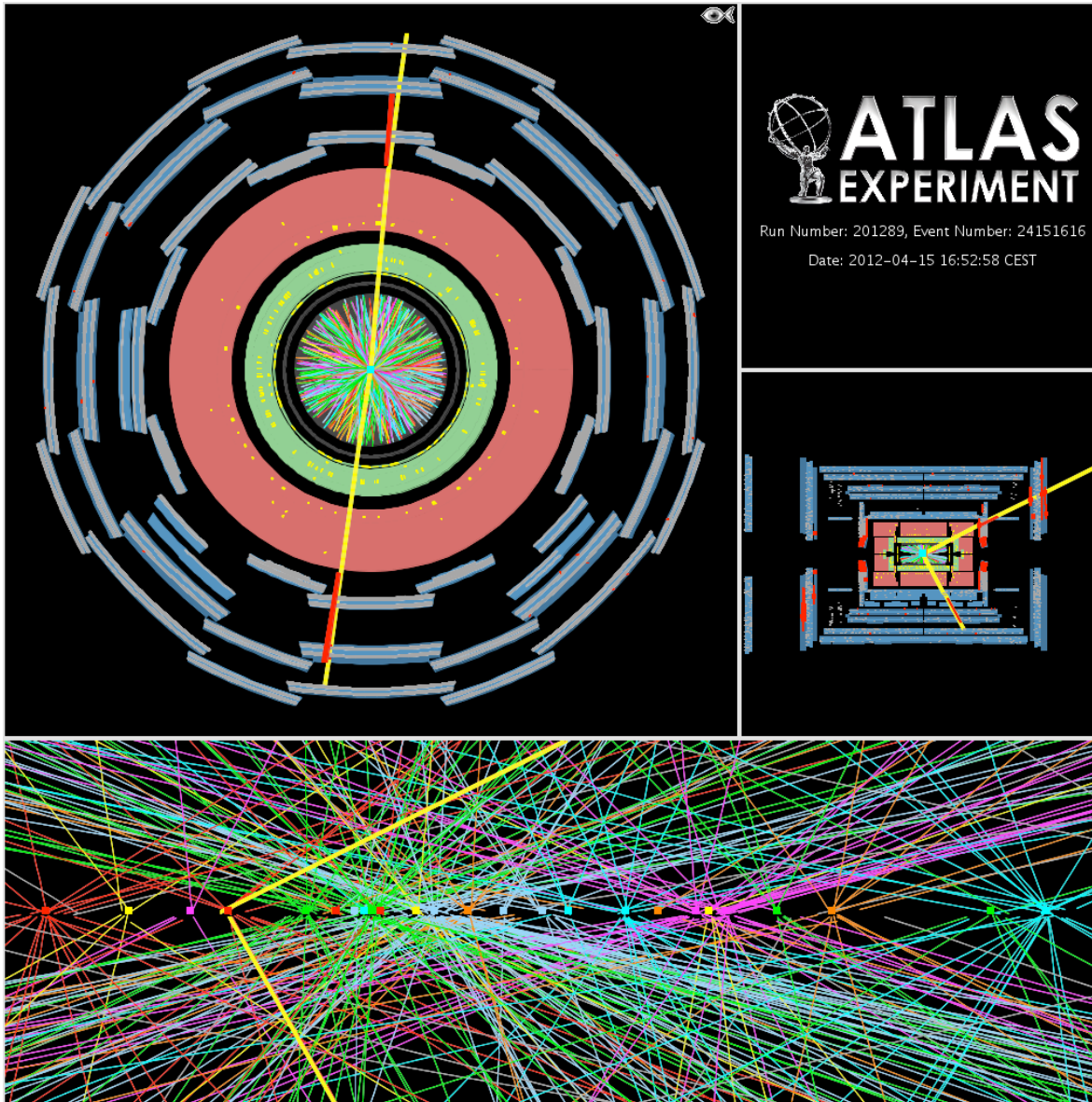
- 2005-2008 Installation, connexions, tests, refroidissement
- 2008 Accident 10 jours après la mise en service
- 2009 Réparations, améliorations. Décision limiter énergie faisceaux
- 2010 Premières collisions à 7 TeV. $L = 10^{27}$ à $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$; $L_{\text{int}} = 45 \text{ pb}^{-1}$
Jusqu'à 300 paquets/faisceau
- 2011 $L = 10^{33}$ à $3.5 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$; $L_{\text{int}} = 5 \text{ fb}^{-1}$ à **7 TeV**
1400 paquets/faisceau, 5-15 interactions par croisement
- 2012 $L = 6 \cdot 10^{33}$ à $7.7 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$; $L_{\text{int}} = 20 \text{ fb}^{-1}$ à **8 TeV**
1400 paquets/faisceau, 20-30 interactions par croisement
- 2013-2014 Premier arrêt long pour construire le LHC nominal

Dipole LHC: Coupe transversale



CERN AC - HE107

Candidat $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ avec 25 interaction



1400 paquets
= 1 croisement/50 ns
= 20×10^6 croisements/s

Section efficace
 $\sigma = 100 \text{ mb} = 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$
 $L = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $\rightarrow N_{\text{interactions}}/\text{s} = 10^8$

$\rightarrow N_{\text{interactions}}/\text{croisement}$
 $= 10^8 / 20 \times 10^6 \sim 5$

Paramètres nominaux du LHC

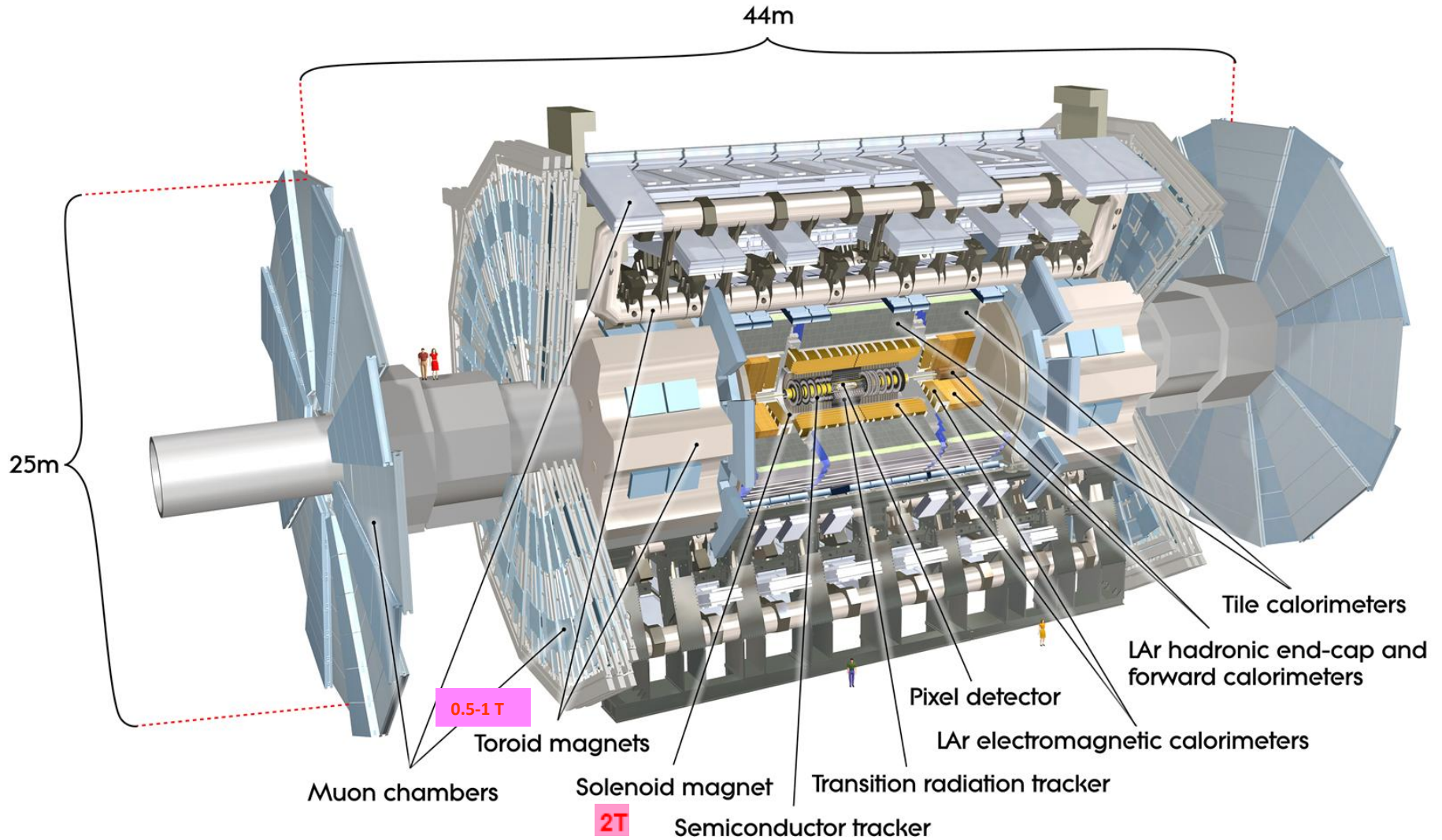
Caractéristique	Valeur
Circonférence	26 659 m
Température d'exploitation des dipôles	1,9 K (-271.3°C)
Nombre d'aimants	9593
Nombre de dipôles principaux	1232
Nombre de quadripôles principaux	392
Nombre de cavités radiofréquence	8 par faisceau
Énergie nominale, mode protons	7 TeV
Énergie nominale, mode ions	2,76 TeV/u (*)
Champ magnétique dipolaire maximal	8.33 T
Distance min. entre les paquets	~7 m
Luminosité nominale	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Nombre de paquets par faisceau de protons	2808
Protons par paquet (au départ)	$1,1 \times 10^{11}$
Nombre de tours par seconde	11 245
Nombre de collisions par seconde	600 millions

(*) Énergie par nucléon

ATLAS

Collaboration de
~ 3000 physiciens

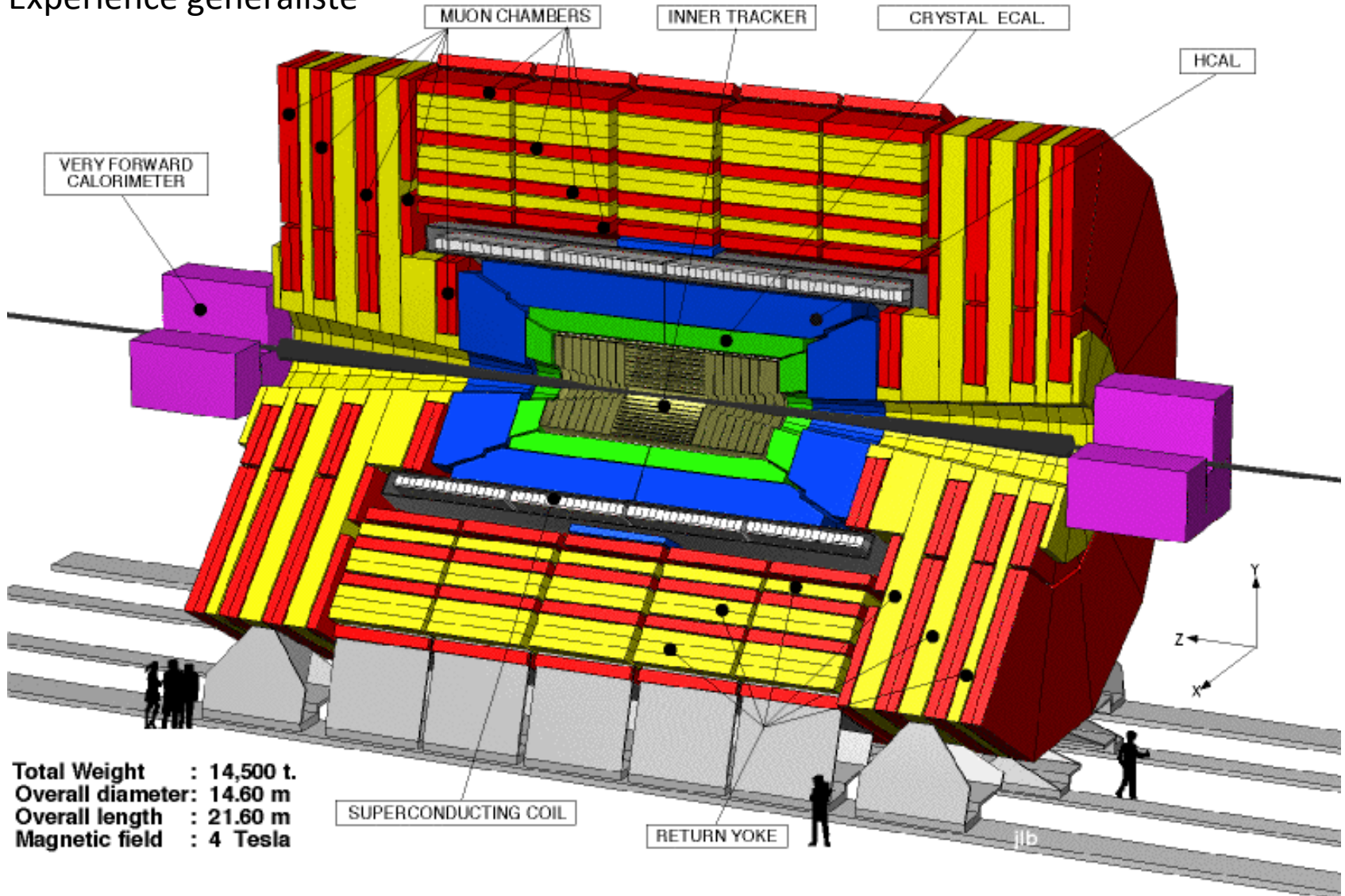
Expérience généraliste



CMS

Collaboration de
~ 26s00 physiciens

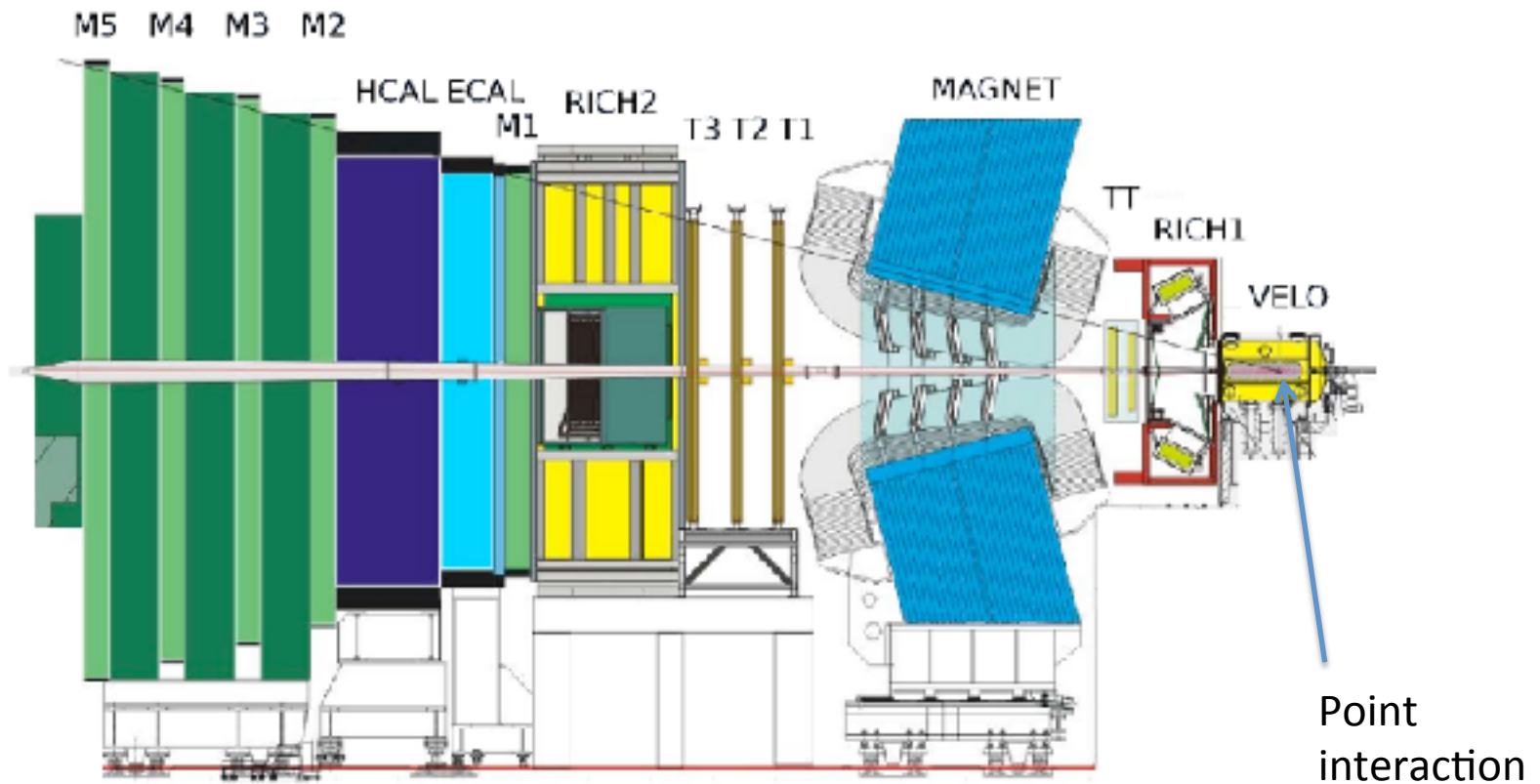
Expérience généraliste



LHCb

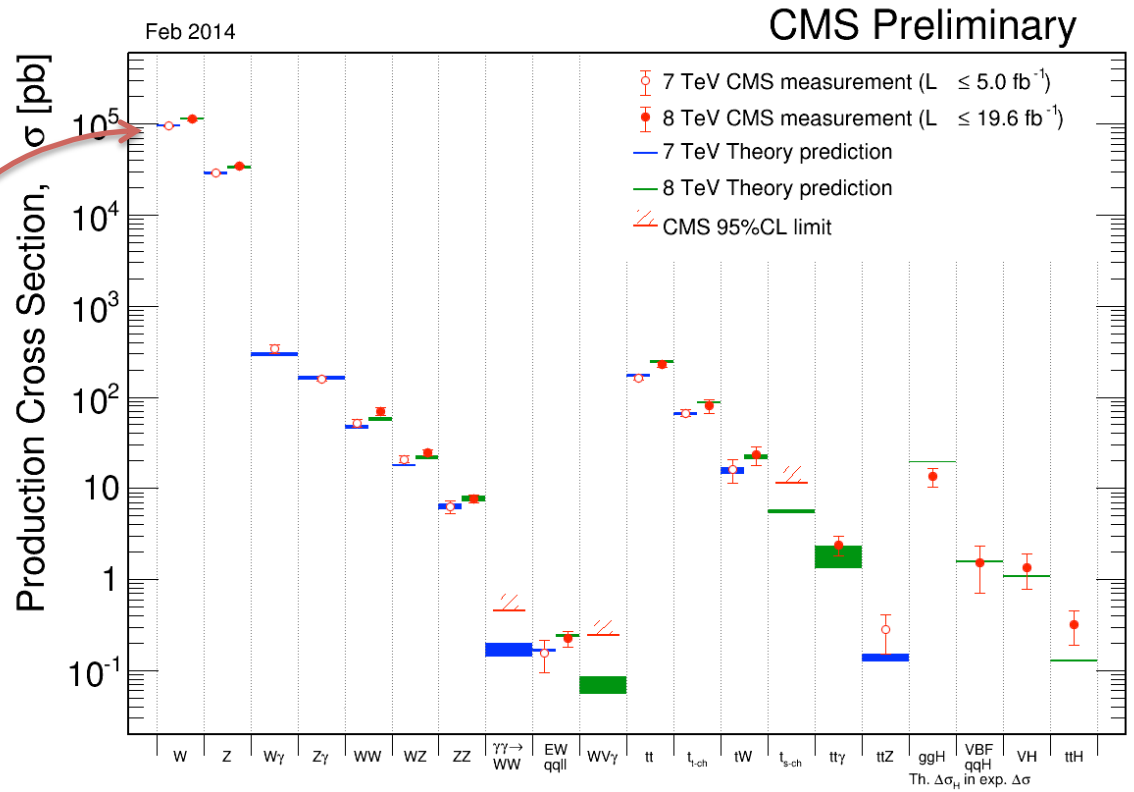
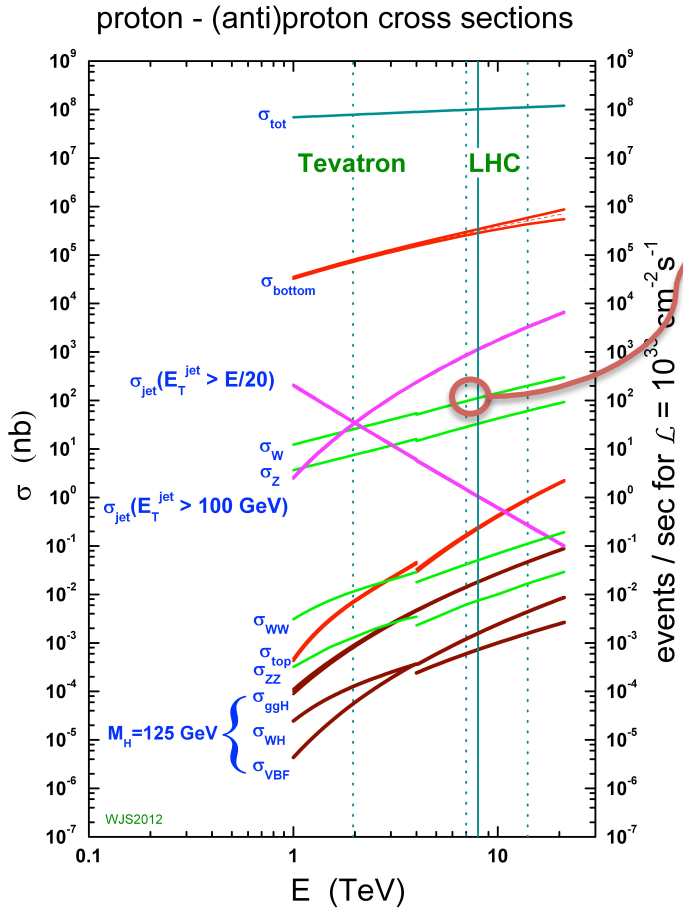
Collaboration de
~ 800 physiciens

Expérience spécialisée : physique du quark b



LA PHYSIQUE AU LHC

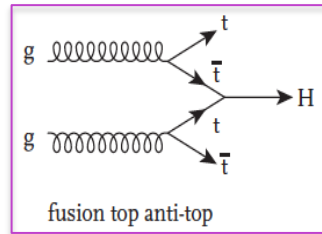
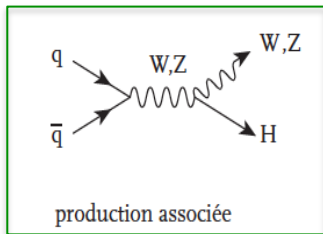
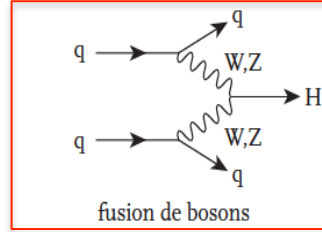
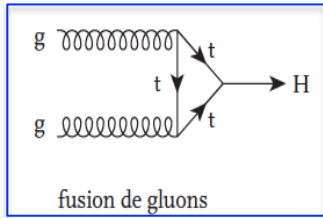
Cohérence du Modèle Standard



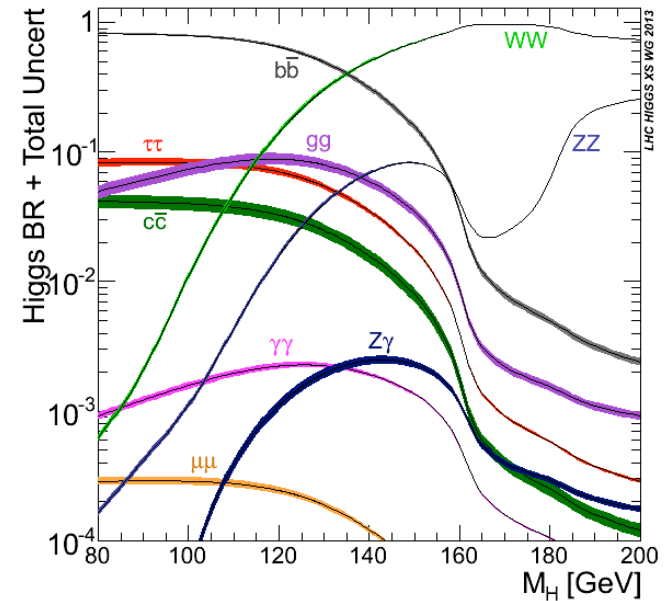
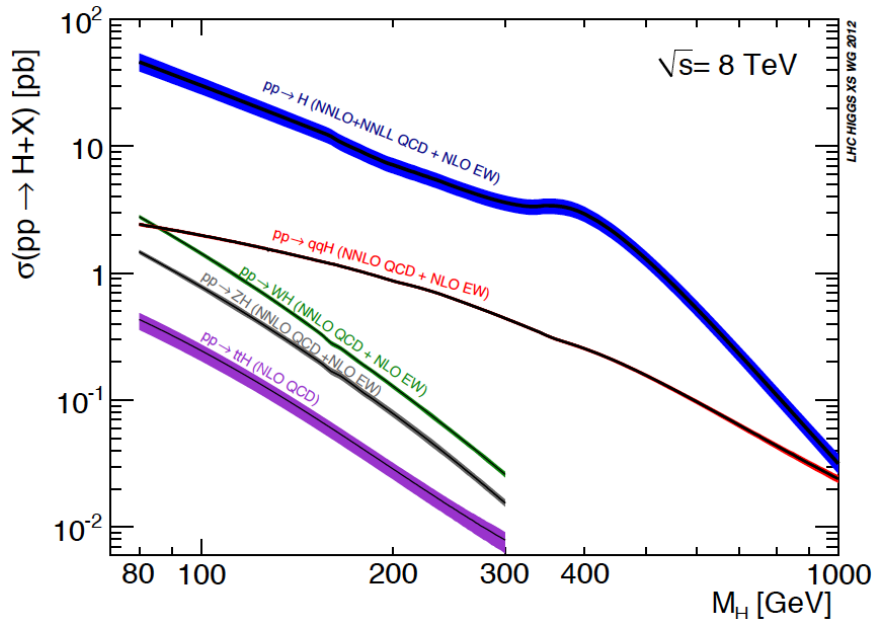
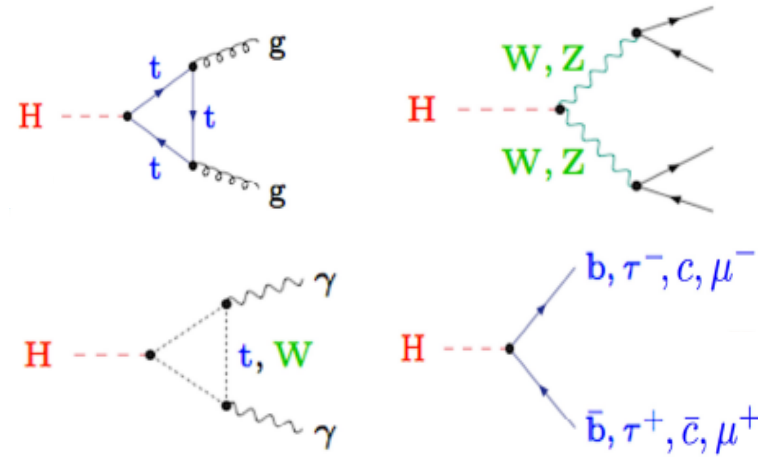
Higgs

Recherche du Higgs à 8 TeV

Production

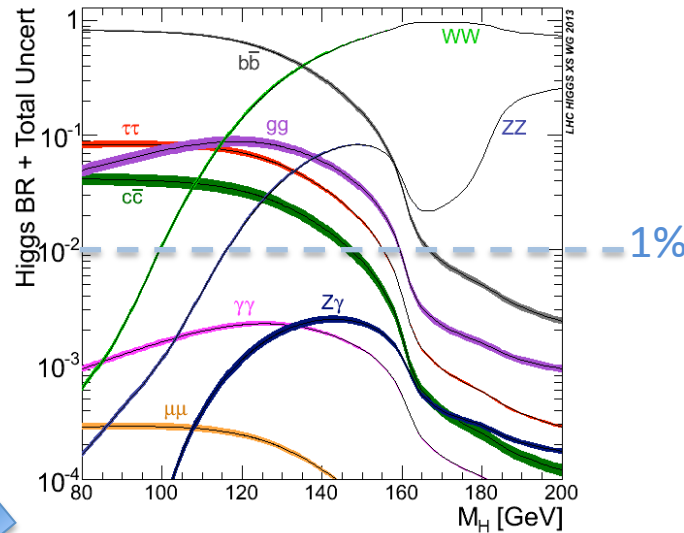


Désintégration



Recherche du Higgs à 8 TeV

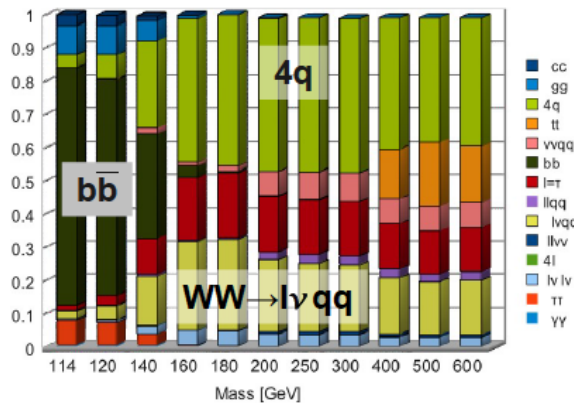
Désintégration



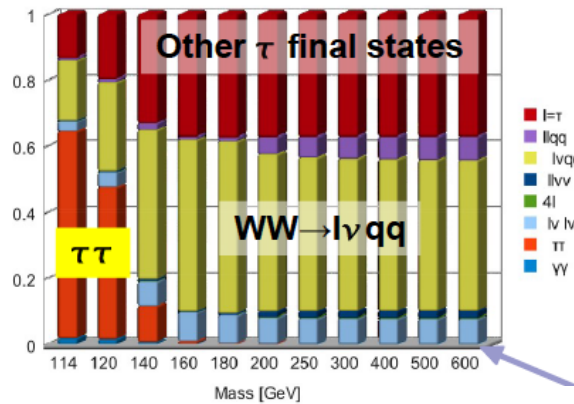
Rappel : avant de le découvrir, on ne connaît pas la masse du boson de Higgs, qui n'est pas prédite par le Modèle Standard

Détection

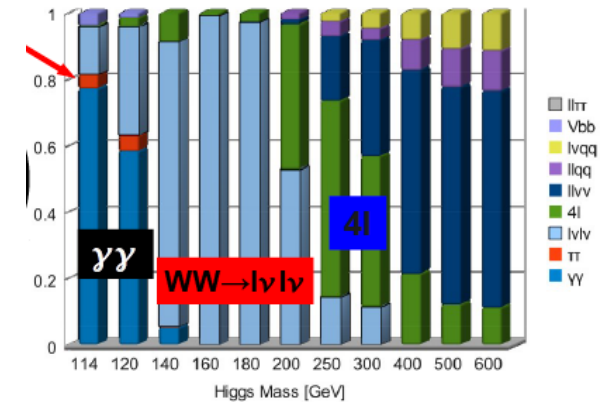
1) après désintégration des « filles » du Higgs

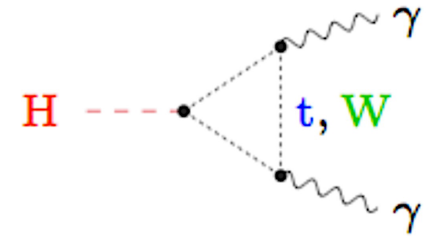


2) avec le déclenchement



3) En prenant en compte les bruits de fond





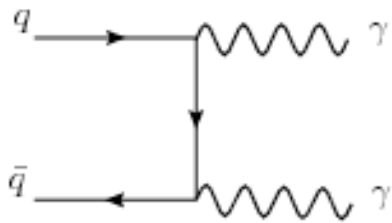
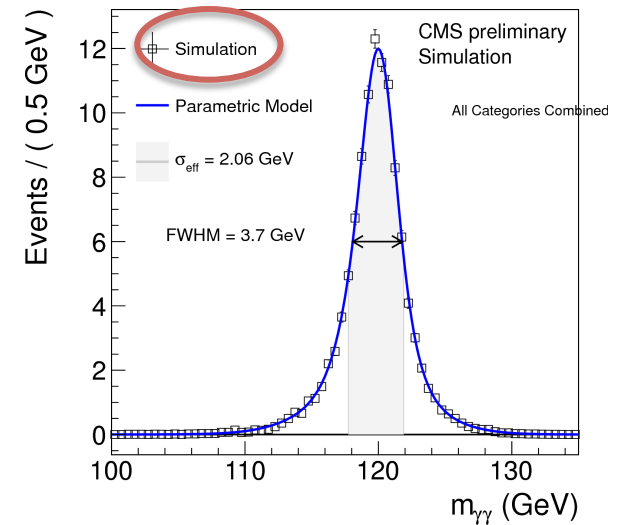
Canal pour lequel les détecteurs ont été optimisés...

Masse invariante : $m^2 = 2 |p_1| |p_2| (1 - \cos \alpha)$

- $|p_i|$ mesurés dans le calorimètre
- pas de trace pour mesurer l'angle !

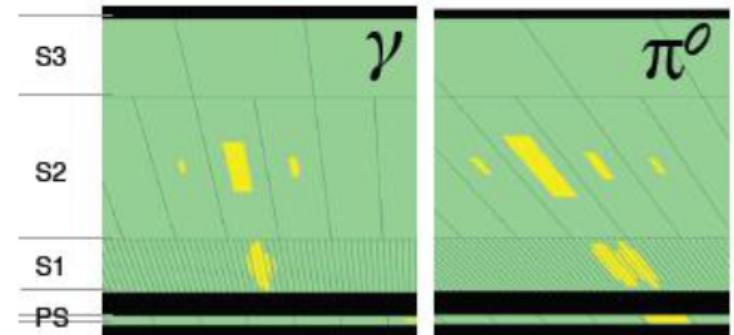
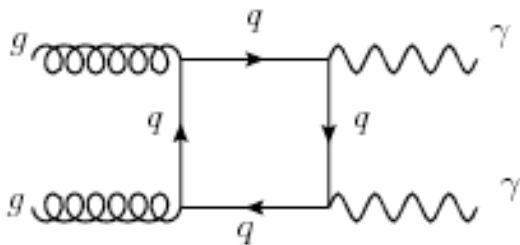
On utilise le vertex de l'interaction
(problème quand il y en a 20...)

Excellente **résolution** 1-5% nécessaire à cause du...

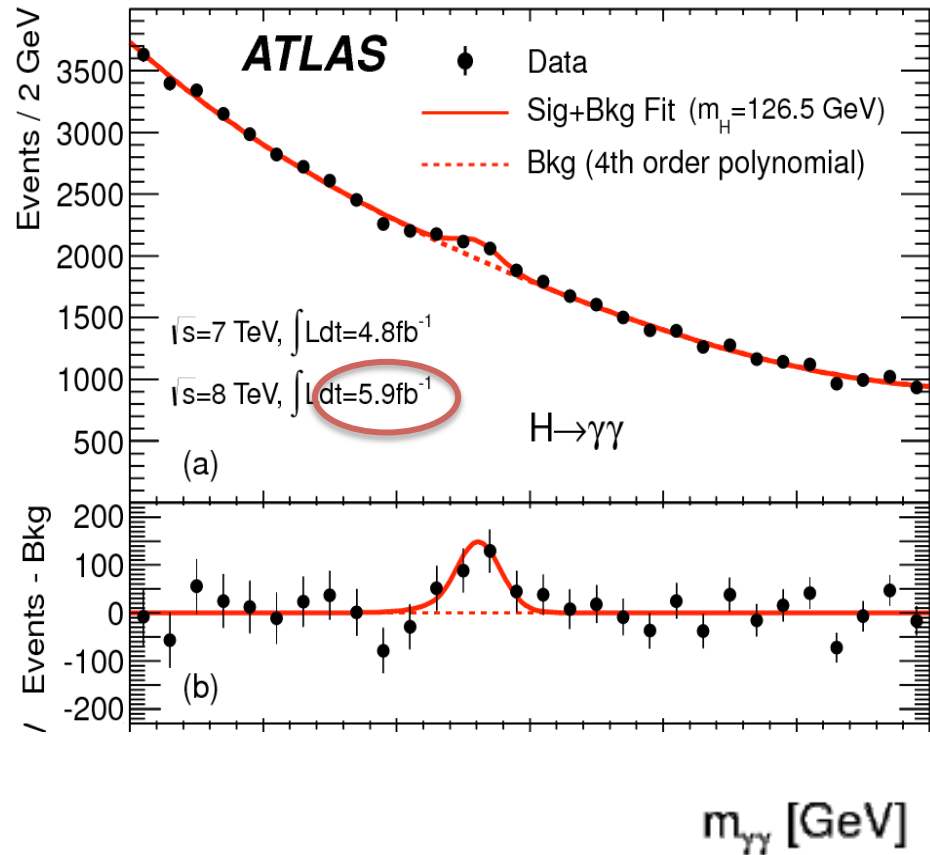
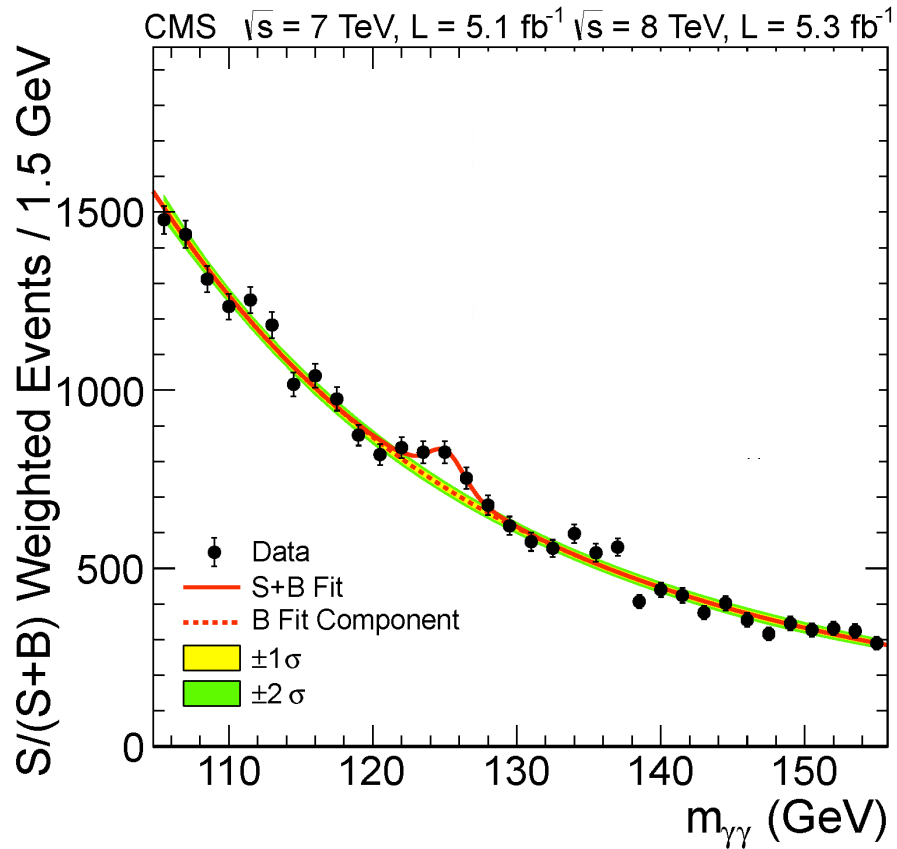


...bruit de fond !

- ~70% « irréductible » : production d'évts diphoton standard
- ~30% « réductible » : jets mal identifiés comme photons
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (~100%)



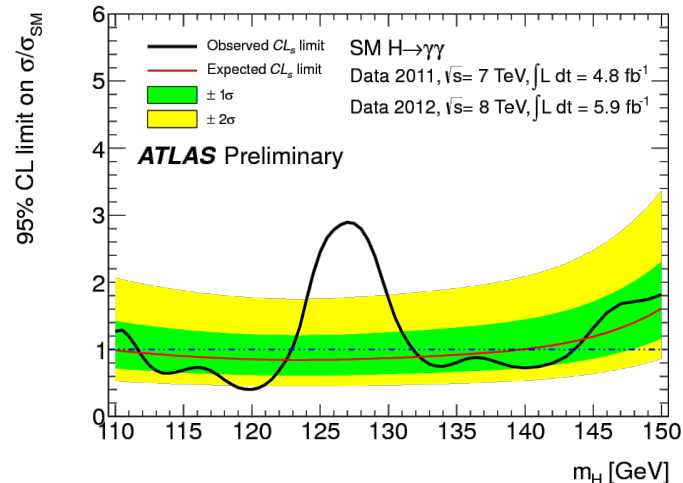
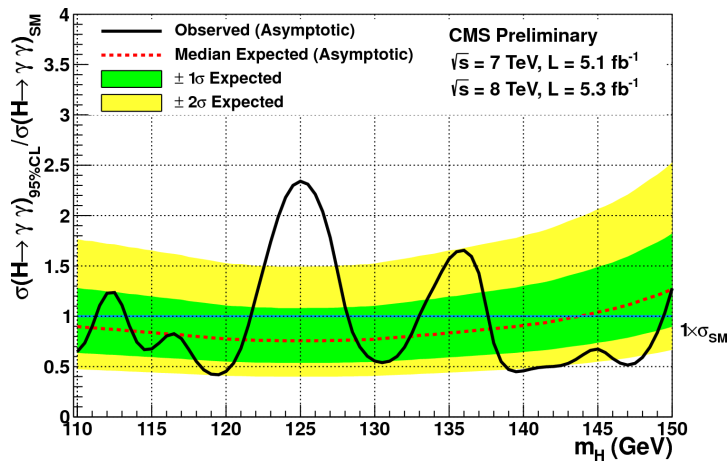
H \rightarrow $\gamma\gamma$: résultats 2012



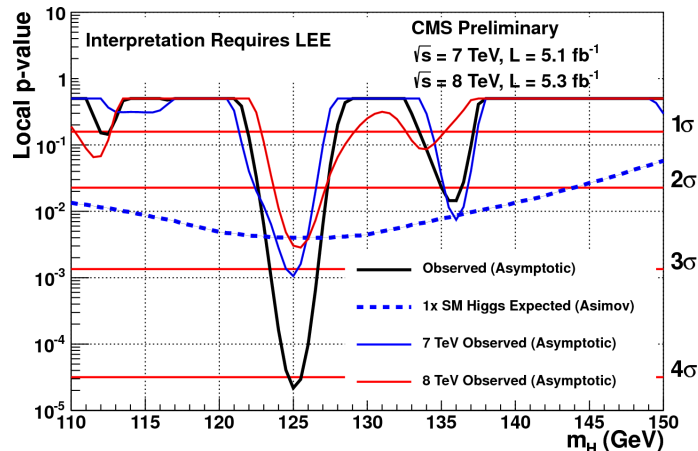
Remarque : plusieurs catégories de signaux : photons (non-)convertis, baril/bouchon, avec/sans dijets,...

H → γγ : résultats 2012

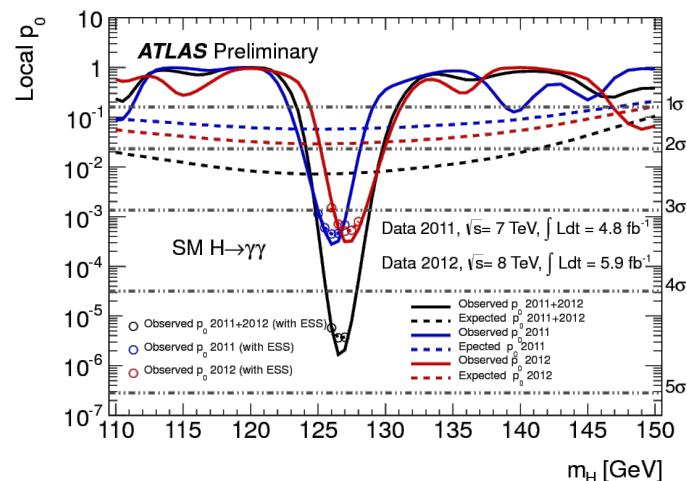
Pour la dernière fois (dans ce canal), on a calculé les résultats en termes de limites :



Mais on a aussi montré les résultats d'une façon plus orientée vers la découverte :
 $p_0 = p\text{-value} = \text{probabilité pour que le bruit de fond seul fluctue autant que les données} :$

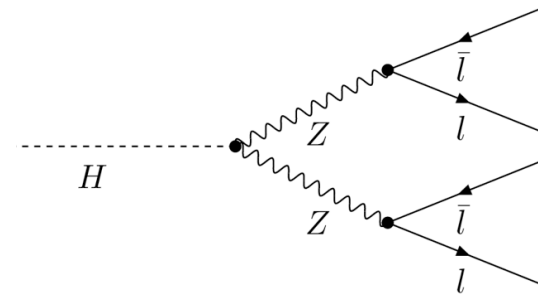


Excès local à 4.1 σ à 125 GeV



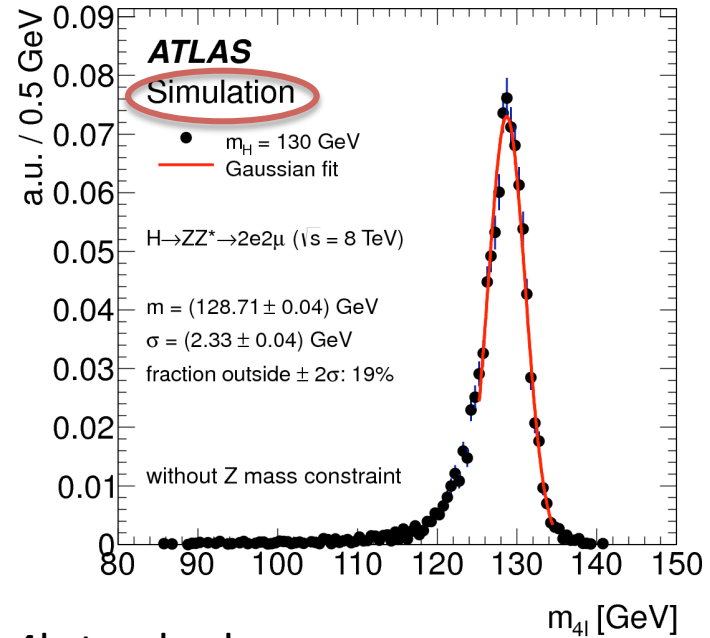
Excès local à 4.7 σ à 126.5 GeV

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$



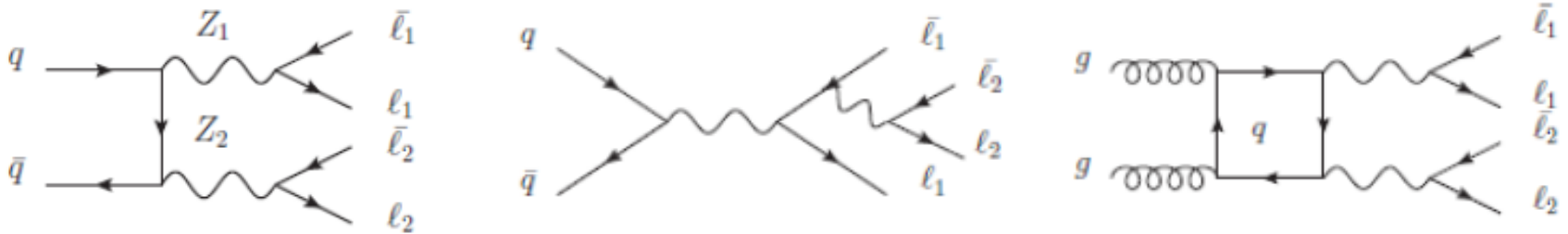
Meilleur canal ZZ : $ZZ \rightarrow 4l$ avec $4l = eeee, ee\mu\mu, \mu\mu\mu\mu$

- rare ($Z \rightarrow ll = 3\%$ chaque), mais
- très peu de bruit de fond
- **bonne résolution en masse**



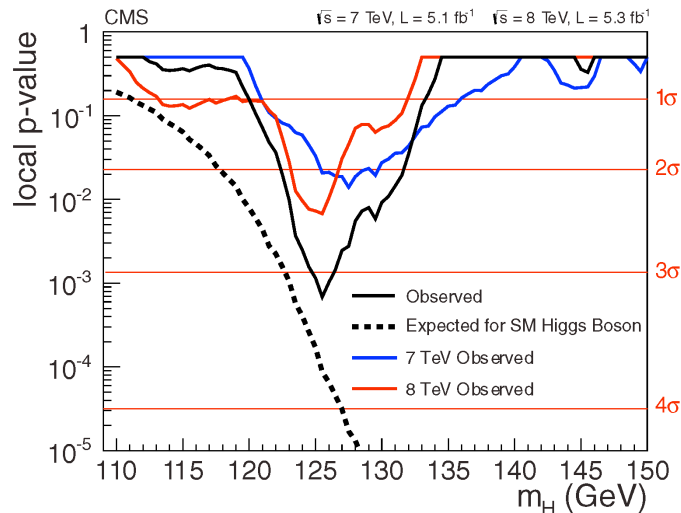
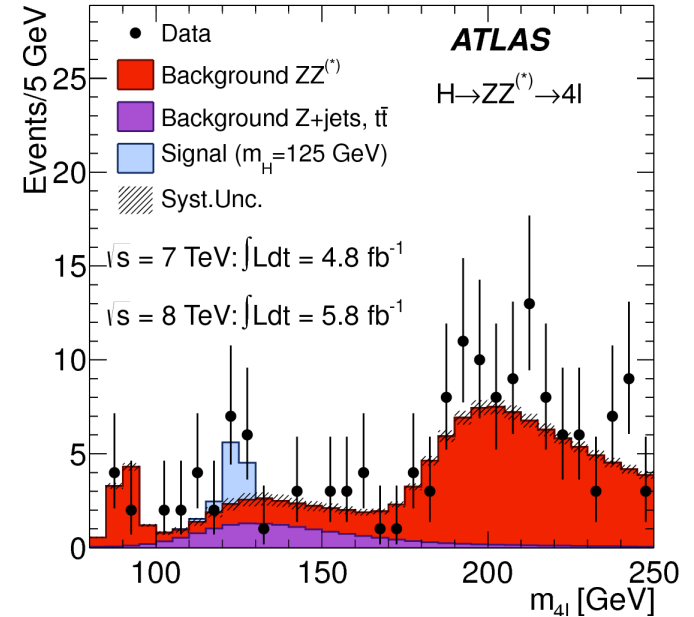
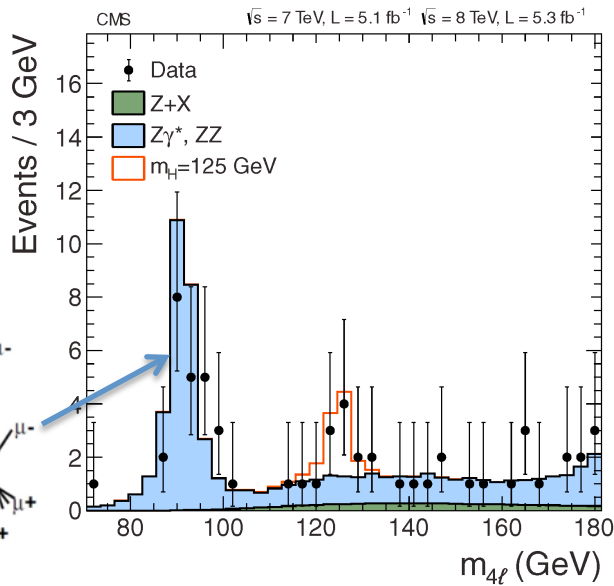
Bruit de fond

- irréductible : production d'événements $4l$ standard

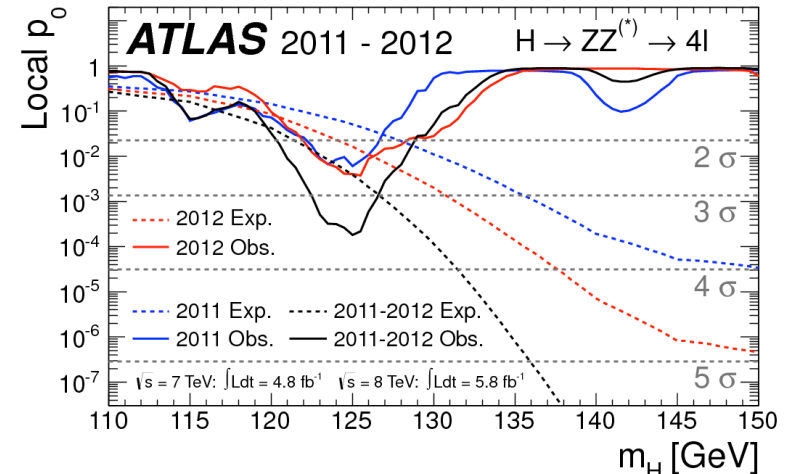


- réductible : Z+2 jets, jets mal identifiés comme leptons

H → ZZ* → 4l : résultats 2012



Excès local à 3.2σ à 125.5 GeV

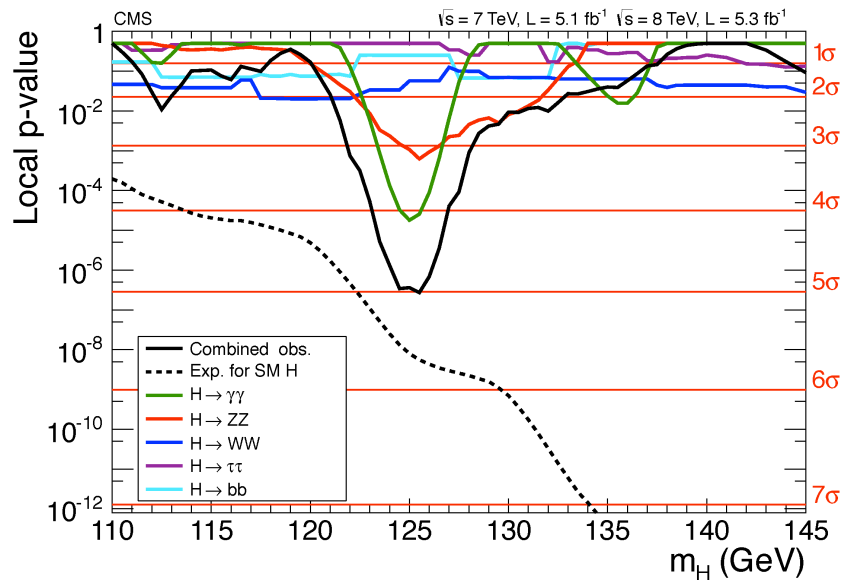


Excès local à 3.4σ à 125 GeV

Résultats combinés

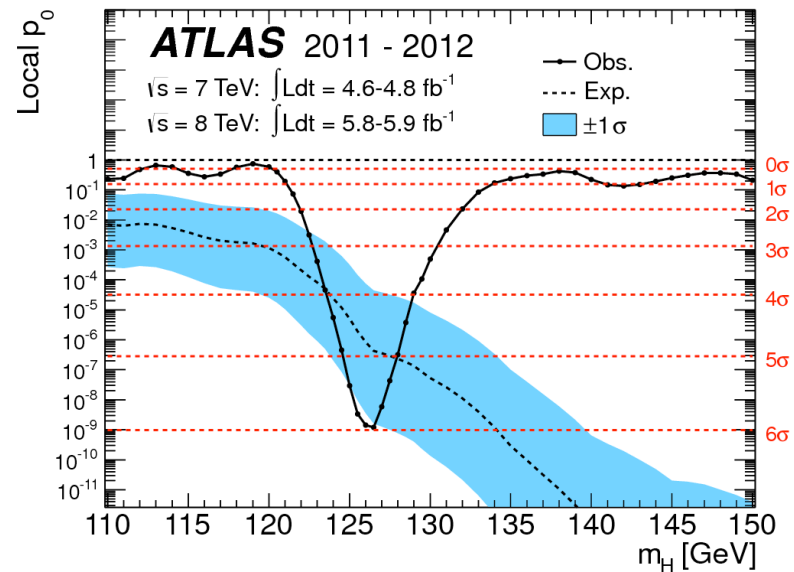
Autres canaux : WW , $\tau\tau$, bb : L_{int} insuffisante en juillet 2012 pour montrer un signal séparément

$\gamma\gamma$, ZZ , WW , $\tau\tau$, bb



Excès local à **4.9 σ** à 125.3 GeV

$\gamma\gamma$, ZZ , WW



Excès local à **5.1 σ** à 126.5 GeV

C'est une découverte !

Prix Nobel de physique 2013



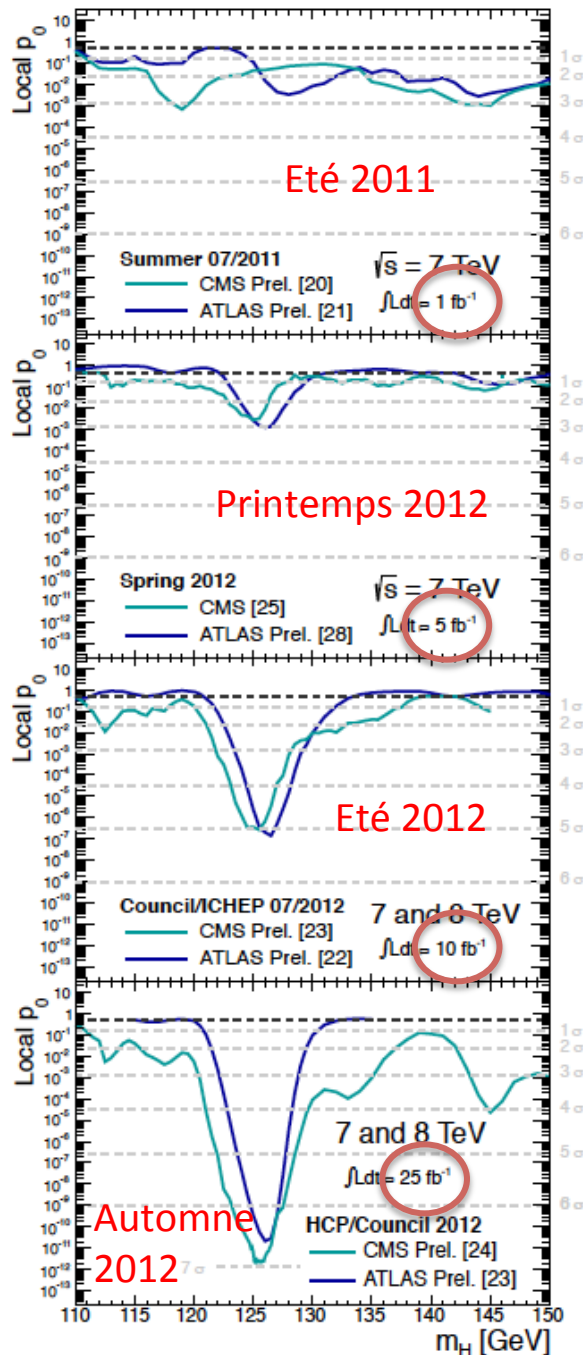
Robert Brout



François Englert

Peter Higgs

Et depuis 2012 ?



Avant 2012 : limites

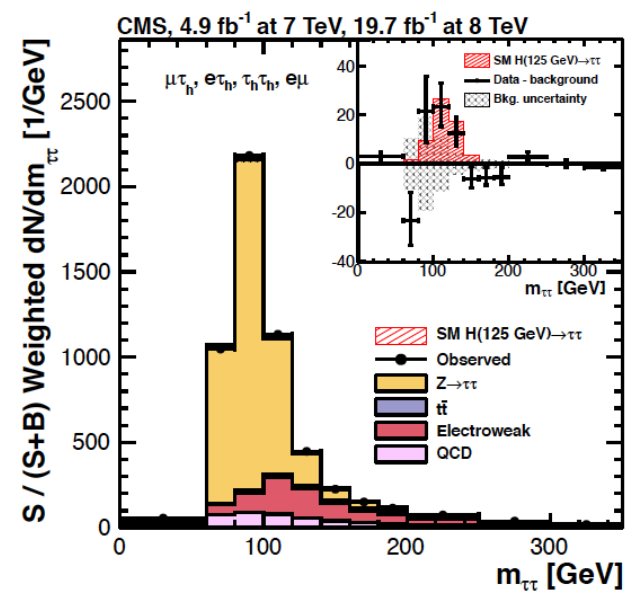
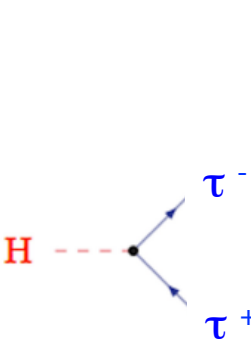
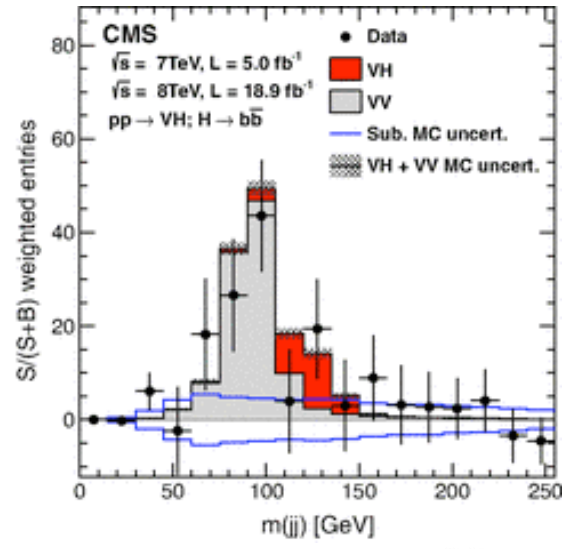
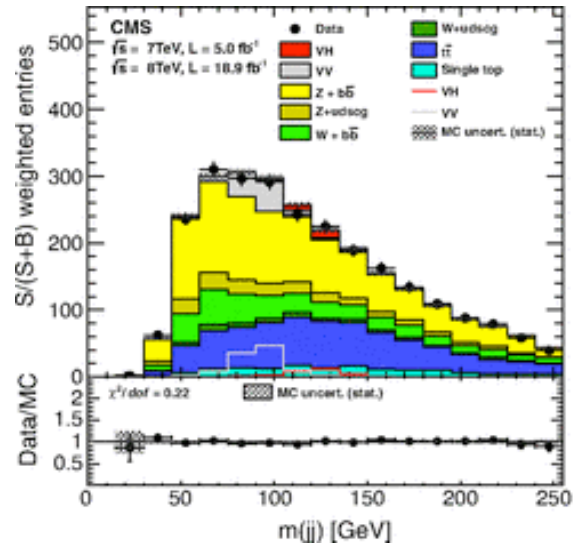
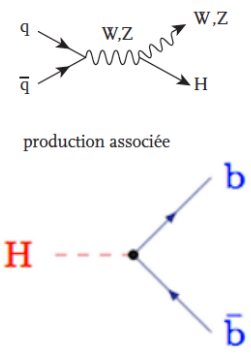
En juillet 2012 : découverte

Après 2012 : le signal se renforce et le programme de recherche sur le Higgs s'étend !

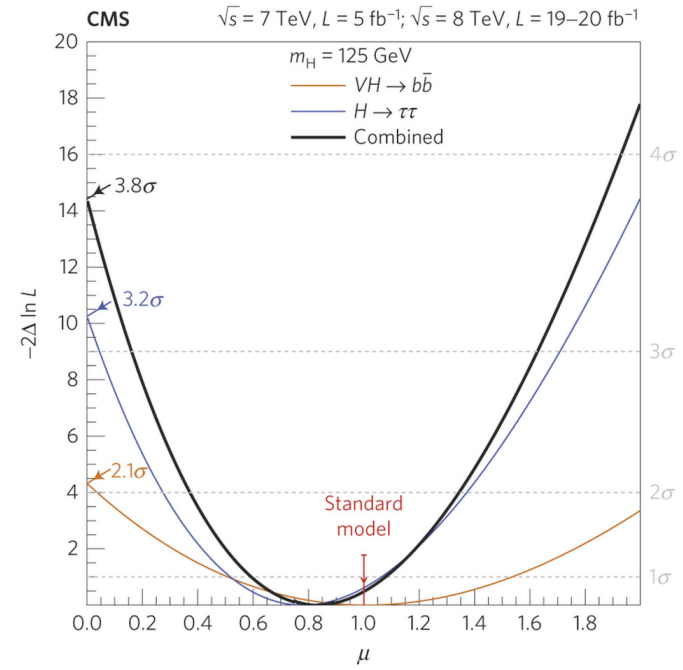
- Mesures de précision : masse et largeur, nombres quantiques (spin,...), couplages : cette nouvelle particule est-elle bien LE boson de Higgs du Modèle Standard ?
- *Y a-t-il d'autres bosons de Higgs ?*
On continue de chercher à d'autres masses

Désintégration directe en fermions

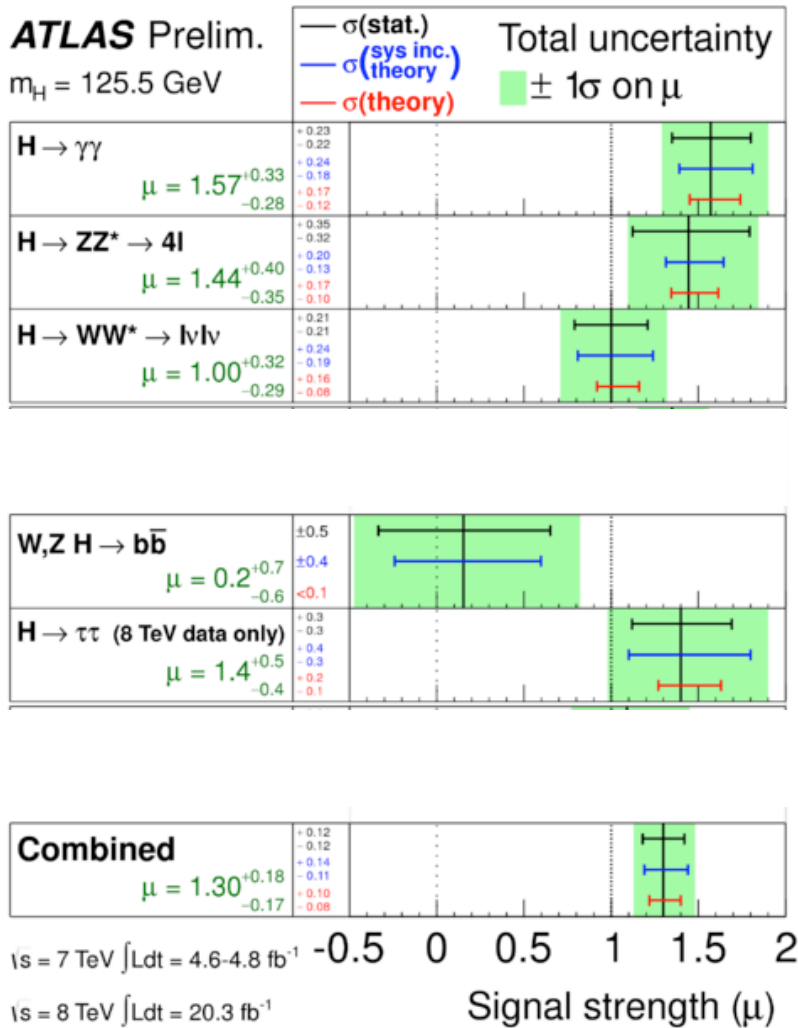
Janvier 2014



Mise en évidence de la désintégration en $\tau\tau$



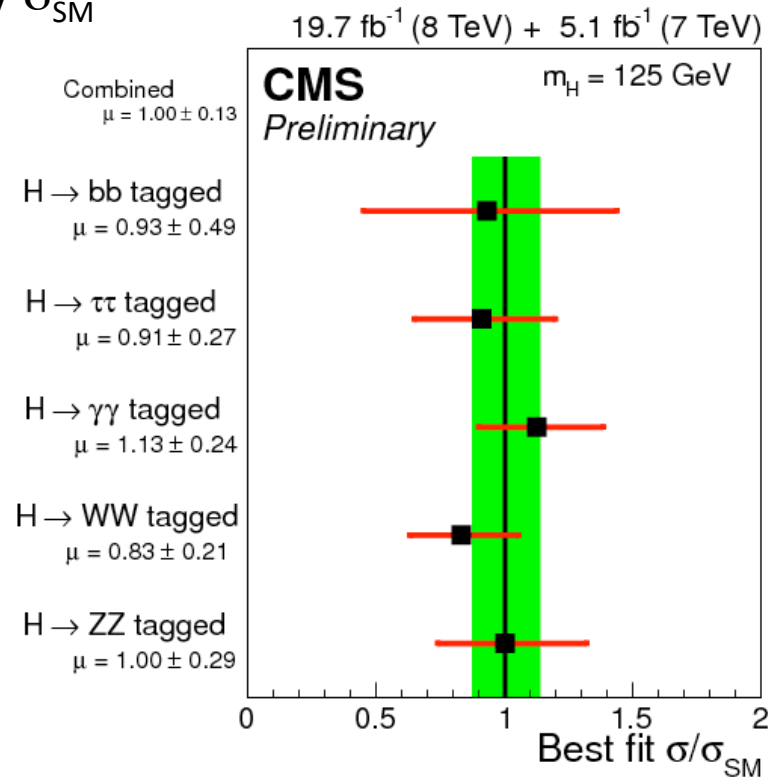
Force du signal dans les différents canaux



$$\mu = 1.30 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.10 \text{ (th)} \pm 0.09 \text{ (syst)}$$

(résultat ATLAS pas encore mis à jour ; $\mu(\gamma\gamma)$ a diminué)

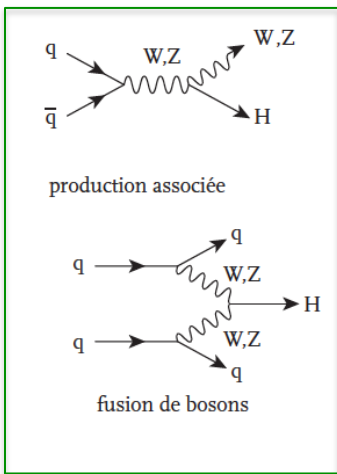
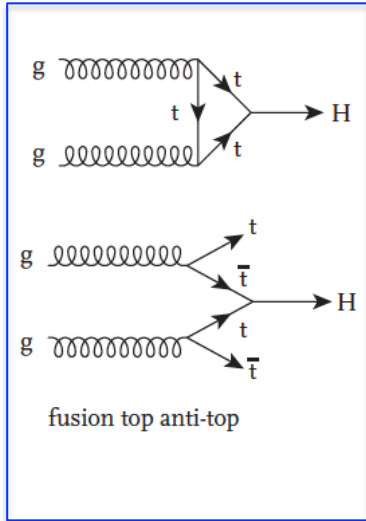
$$\mu = \sigma / \sigma_{SM}$$



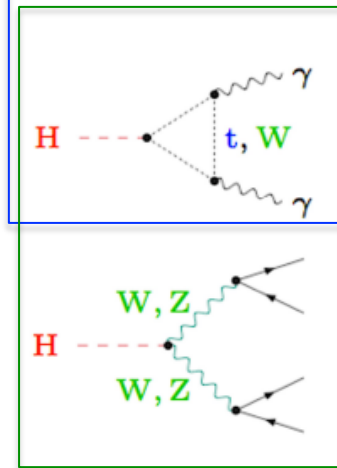
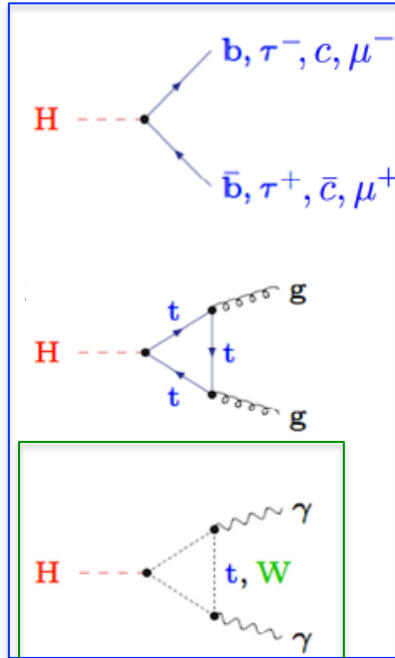
$$\sigma/\sigma_{SM} = 1.00 \pm 0.13 \left[\pm 0.09(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.07}(\text{theo.}) \pm 0.07(\text{syst.}) \right]$$

Vers la mesure des couplages

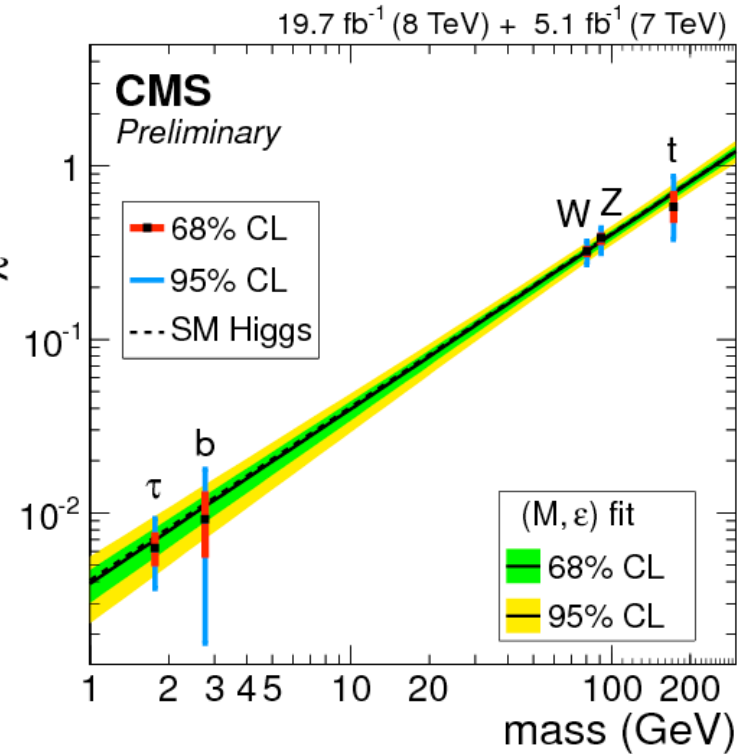
Production



Désintégration



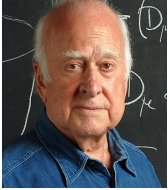
Couplage



PHYSIQUE AU LHC : RECHERCHE DE NOUVELLE PHYSIQUE

Fin de la discipline ??

NON !!!



Higgs standard



Higgs non standard

Questions ouvertes :

- **Nombre de familles**
- **Hiérarchies**
- **Neutrinos**
- **Antimatière**
- **Matière sombre**
- **Unification de la gravité**
- **...**

Quelle théorie plus large ?

**Physique au-delà du
Modèle Standard**

≡ « nouvelle physique »

**Quelle que soit la nature du boson de Higgs découvert,
il faut chercher autre chose !**

Comment rechercher la nouvelle physique

2 méthodes



Indirecte

Mesures précision,
tests de cohérence

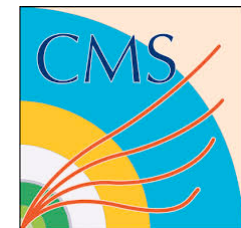
☞ **luminosité**

Directe

Recherche de nouvelles
particules lourdes, réelles

☞ **énergie**

Le LHC a les deux !



La matrice de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa

quark up u $+2/3$	quark charm c $+2/3$	quark top t $+2/3$
quark down d $-1/3$	quark strange s $-1/3$	quark bottom b $-1/3$

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

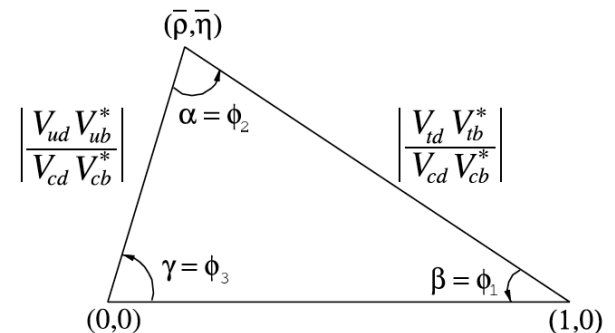
3+1 paramètres libres : A, λ , ρ et η

$$\lambda = 0.22537 \pm 0.00061, \quad A = 0.814^{+0.023}_{-0.024},$$

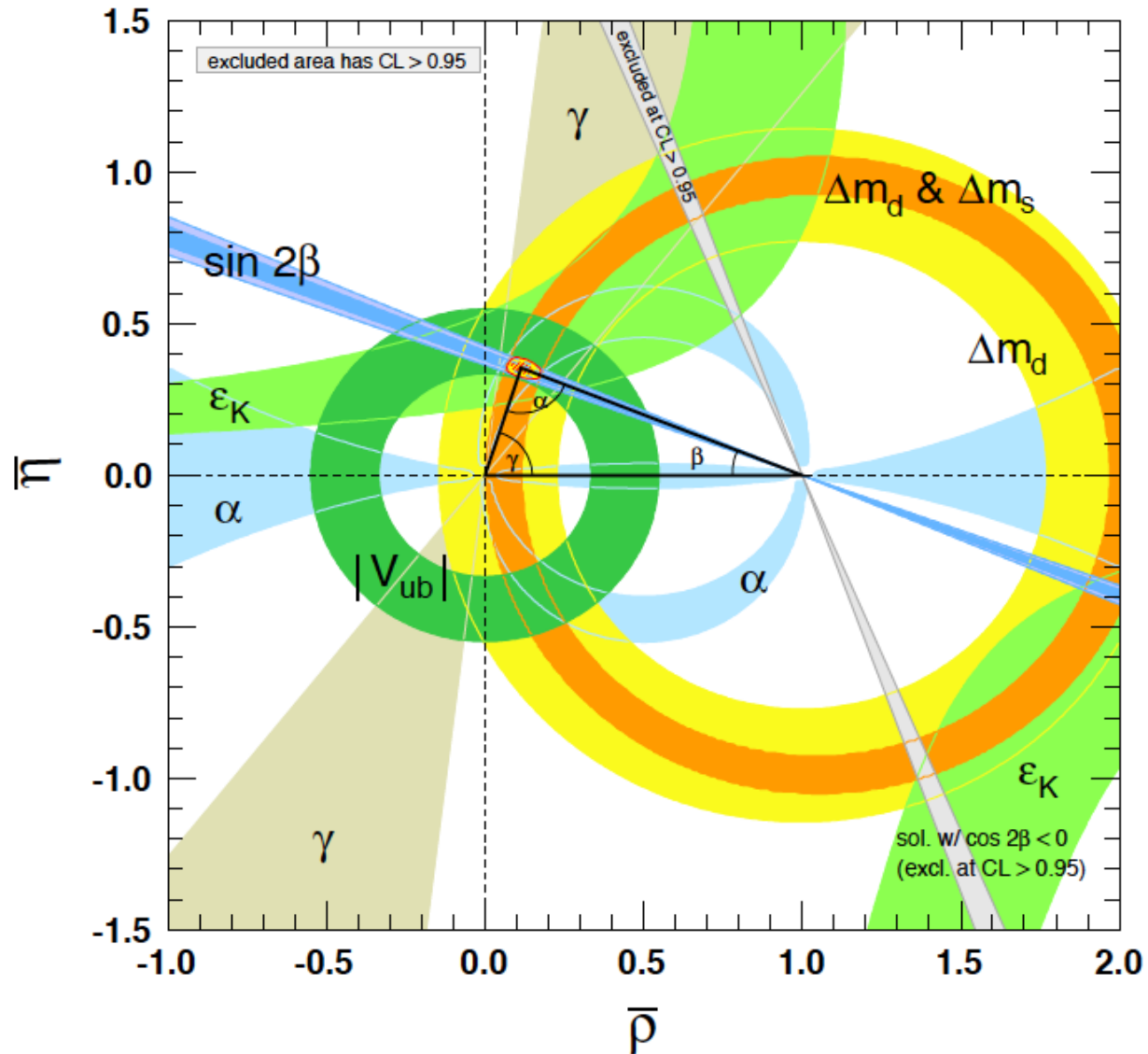
$$\bar{\rho} = 0.117 \pm 0.021, \quad \bar{\eta} = 0.353 \pm 0.013$$

- Kobayashi et Maskawa : prix Nobel 2008 pour cette matrice
- Sa structure explique la « violation de CP » (paramètre η), qui elle même pourrait expliquer **l'asymétrie matière-antimatière**
- De même que le LEP a testé extensivement les paramètres du « secteur électrofaible », **LHCb** (et avant cela **Babar**) teste extensivement cette matrice (« secteur des saveurs »)

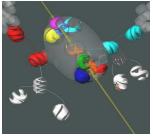
Triangle d'unitarité



Triangle d'unitarité

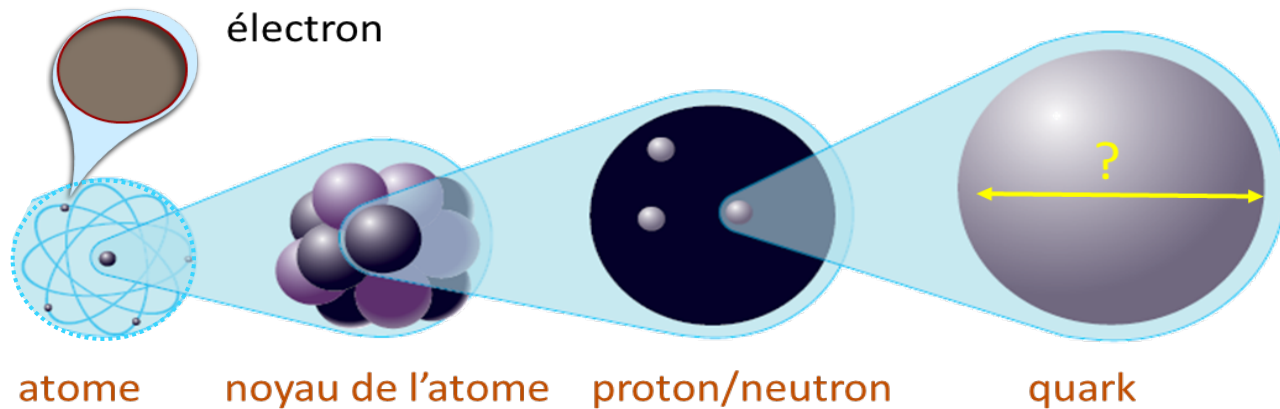


Quelle nouvelle physique ?



Particules composites

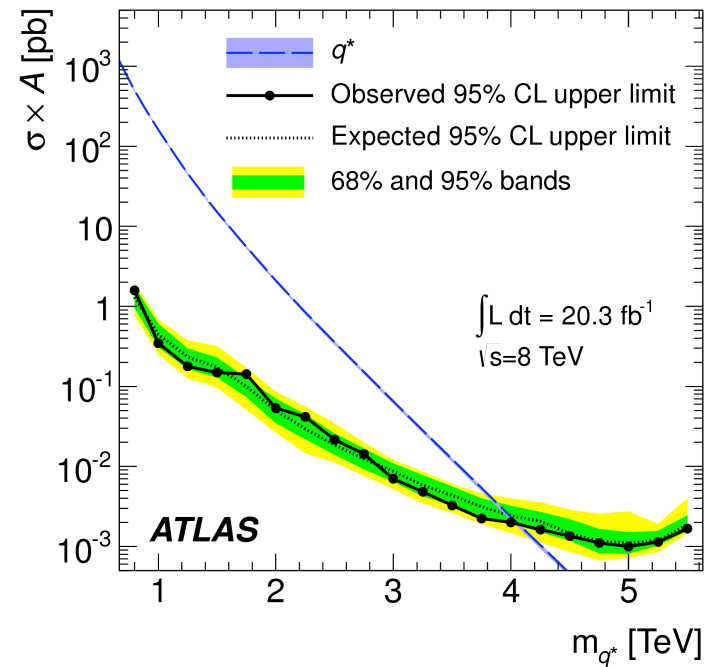
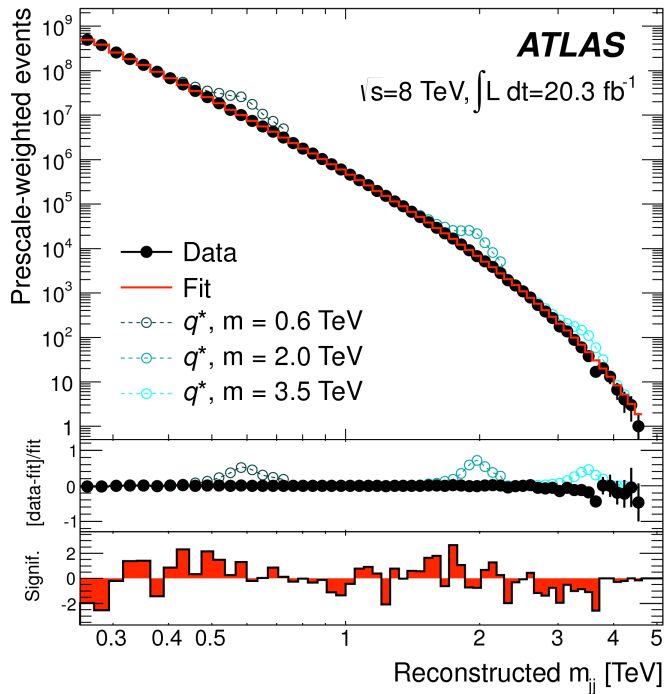
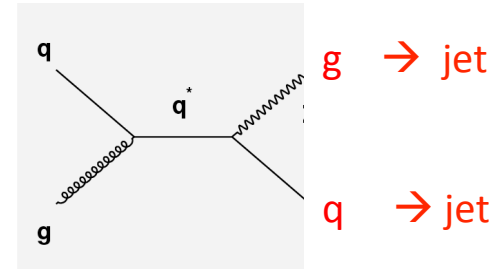
J. Pati, A. Salam 1974



- Les particules standard ne seraient pas élémentaires mais auraient des **constituants** (appelés par ex. préons)
- Peut expliquer la réplication des familles et la quantification de la charge

Spectre de masse invariante jet-jet

Etat excité d'un quark : q^*



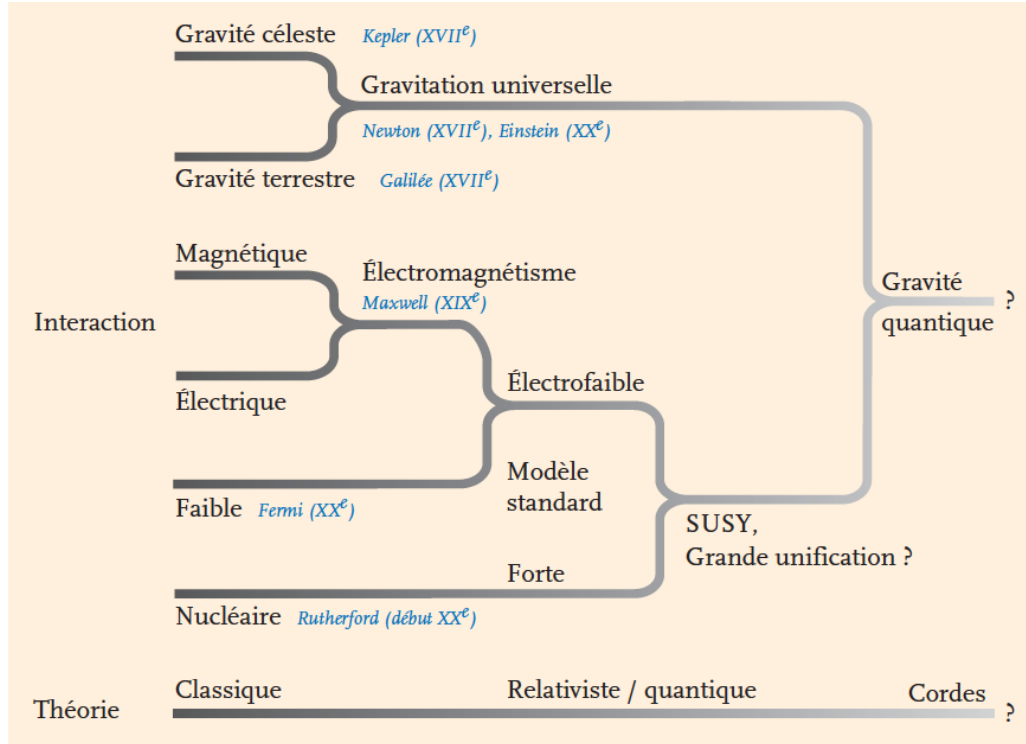
La structure des quarks est testée jusqu'à 4 TeV ! ($3 \cdot 10^{-5} \text{ fm}$)

Remarque : on fait la même chose avec les leptons : on recherche $l^* \rightarrow l \gamma$

Quelle nouvelle physique ?

Théorie de la Grande Unification

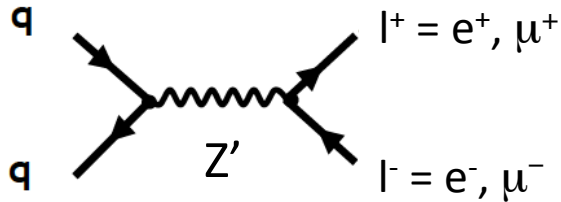
H. Georgi, S. Glashow 1974
J. Pati, A. Salam 1974



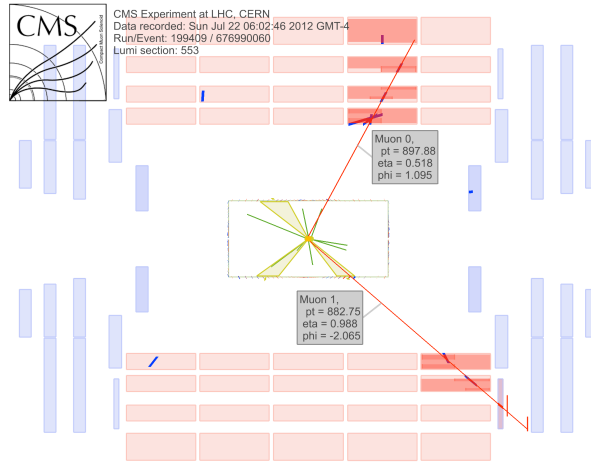
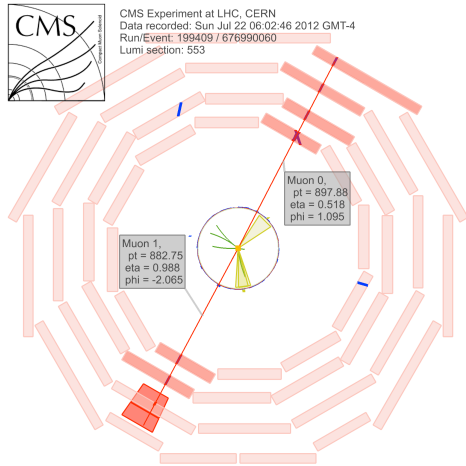
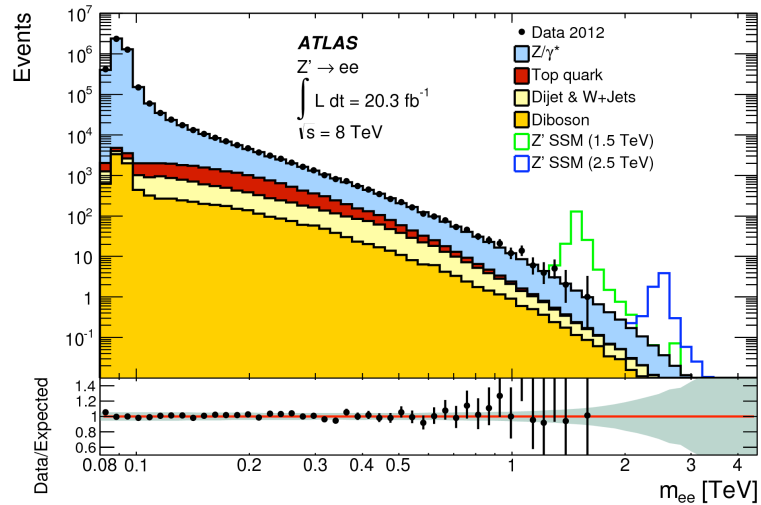
- Unifie les interactions
- Prédit de **nouvelles particules** : nouveaux bosons (Z' , W' , ...), nouveaux fermions, plusieurs bosons de Higgs, ...

Remarque : l'existence d'un Z' et ou d'un W' impliquerait celle d'une « 5^{ème} force »

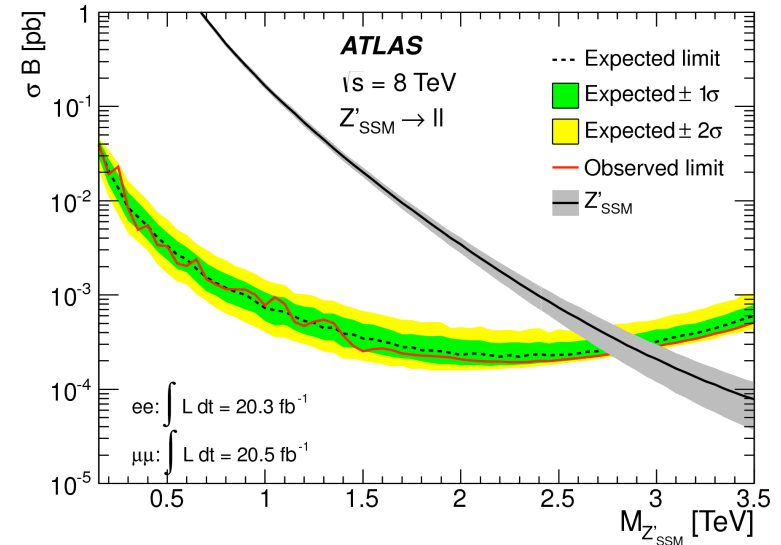
Spectre de masse invariante dilepton



$Z' = Z$ en plus lourd



$M(\mu+\mu-) = 1824 \text{ GeV}$



Remarque : on recherche de même $W' \rightarrow l\nu$

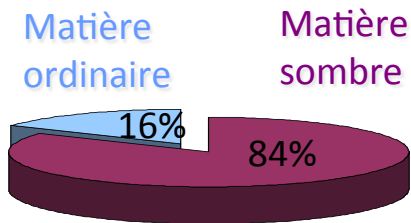
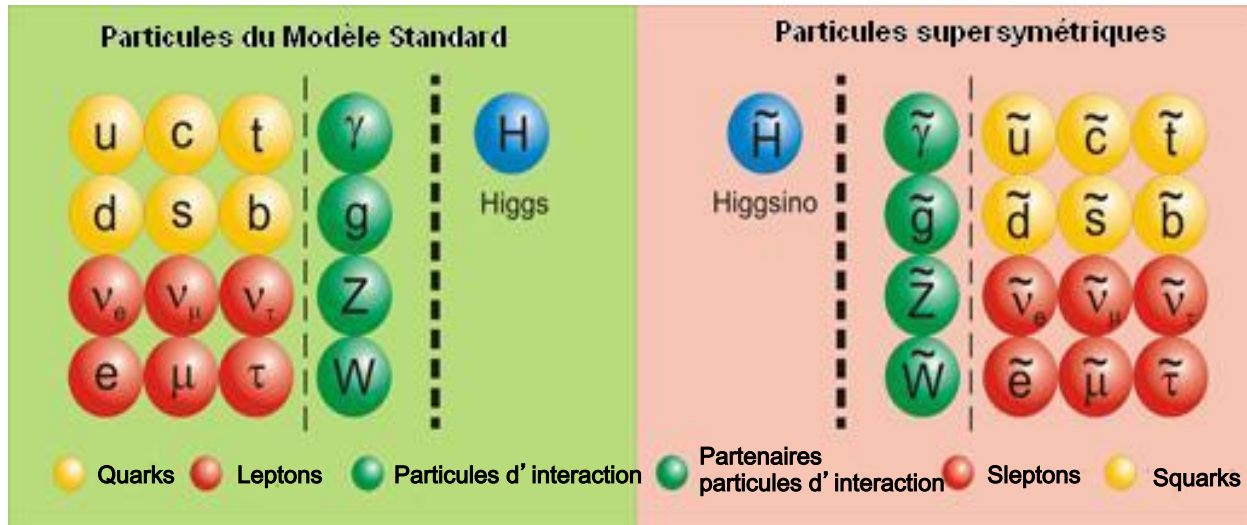
Quelle nouvelle physique ?

Supersymétrie

Y. Golfand, E. Likhtman 1971

Nouvelle classe de symétries de la nature : transformations de **spin**

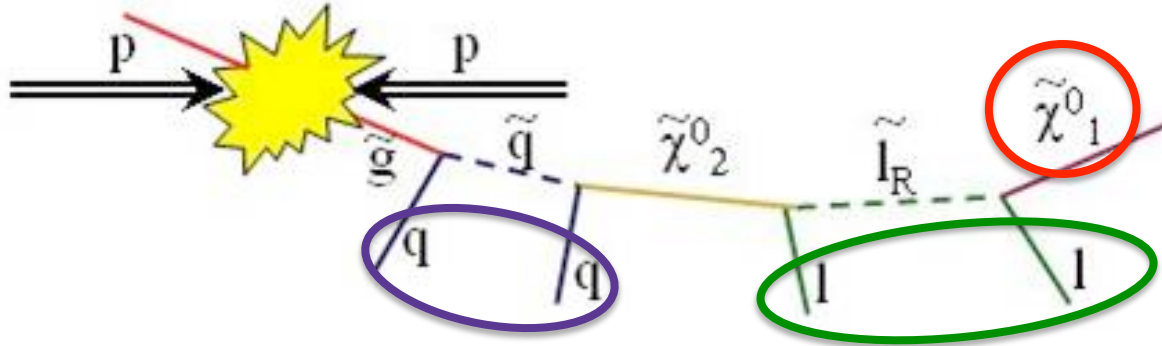
A chaque **fermion** standard est associé un **boson**, et inversement :



- Peut résoudre le problème de hiérarchie
- Permet d'unifier les intensités des interactions
- Prédit un candidat crédible de **matière sombre**

Matière = 31% contenu univers

Recherche de SUSY



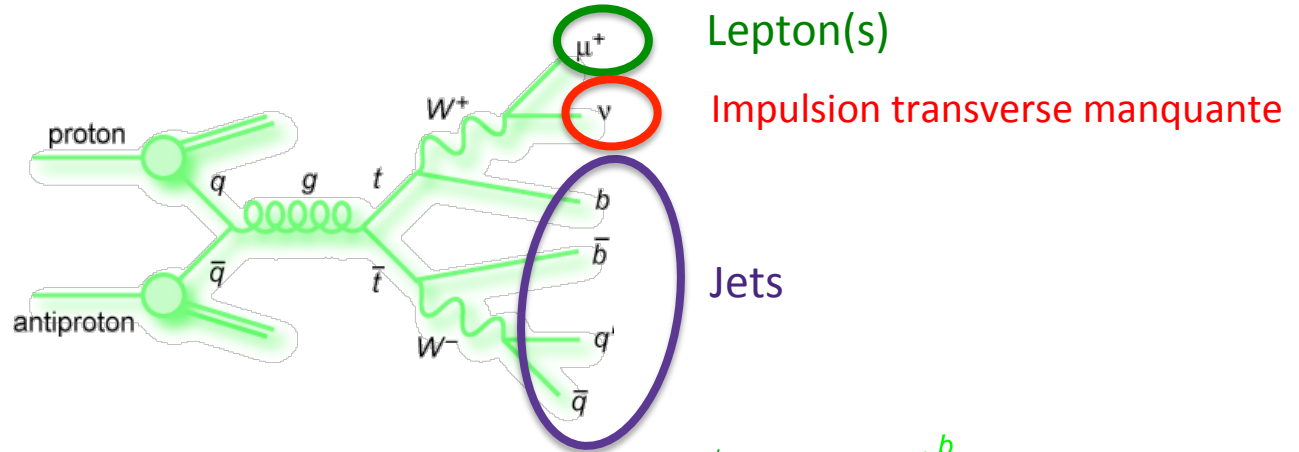
Signature typique :

- Production en **paires** de **squarks** ou **gluino** (interaction forte) encore une symétrie (« R-parité) qui protège le proton de la désintégration également ce qui fournit un candidat de matière sombre (Lightest Supersymmetric Particle)
- Pas encore observés \Rightarrow lourds \Rightarrow produits de désintégration à grand p_T
- Désintégrations des *neutralinos* et *charginos* peuvent donner des leptons
- **La chaîne de désintégration s'arrête à la « LSP »**
- Les deux LSPs s'échappent sans être détectées (neutres, interaction faible) \Rightarrow impulsion transverse manquante !

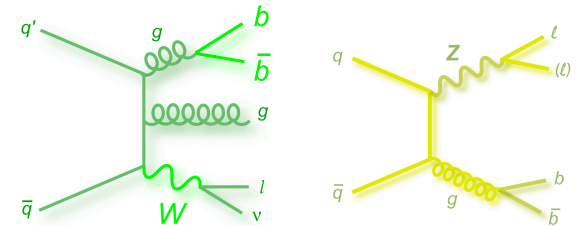
multi-Jets + n leptons + E_T manquante

Bruits de fond à la recherche de SUSY

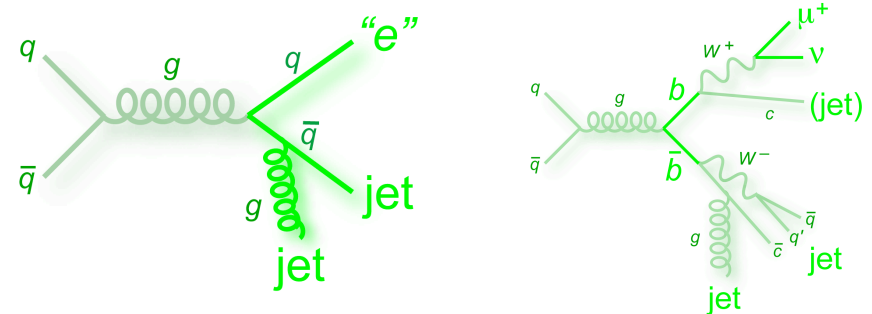
- Top-antitop :



- mais aussi : $W + \text{jets}, Z + \text{jets}, W, Z \rightarrow \text{lepton(s)}$



- ou encore : « QCD » (multi-jets)



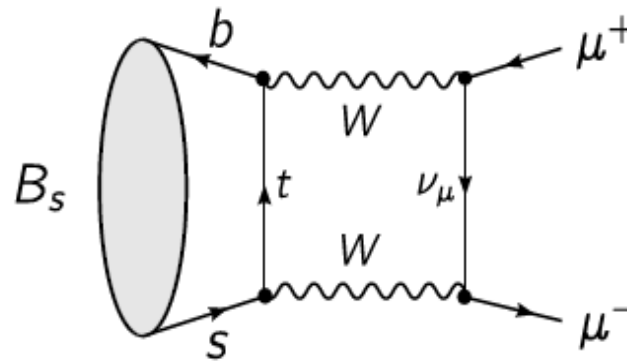
Bruit de fond QCD doit être considéré a cause de sa section efficace énorme et parce que les jets peuvent être mal identifiés comme leptons (\rightarrow faux leptons) ou mal mesurés (\rightarrow fausse impulsion transverse manquante)

Méson $b\bar{s}$: $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$

Désintégration très rare

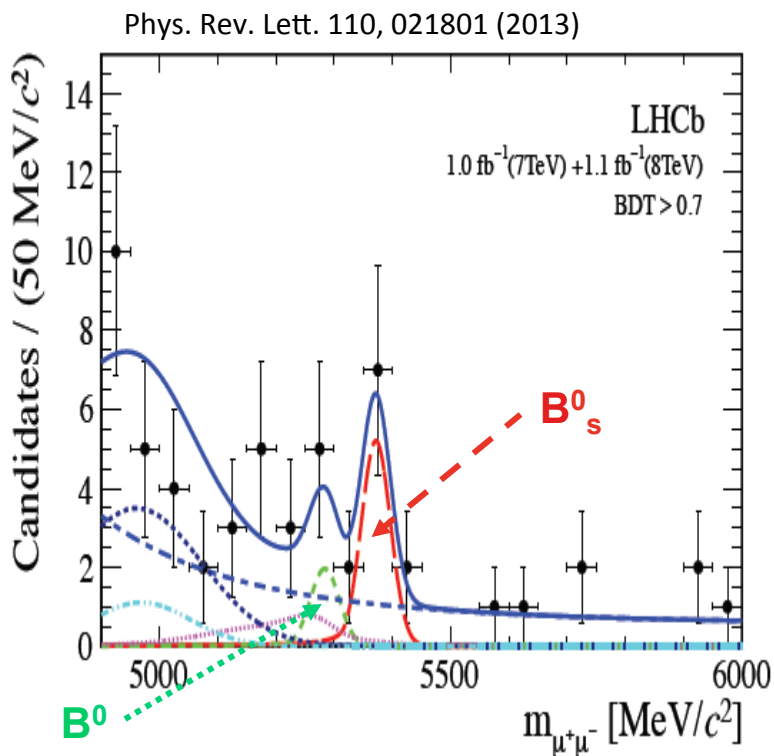
Taux de désintégration prédit par le Modèle Standard :

$$\mathbf{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3,2 \pm 0,3) \times 10^{-9}$$



Désintégration observée en novembre 2012 !

$$\mathbf{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3,2 \pm 1,5) \times 10^{-9}$$

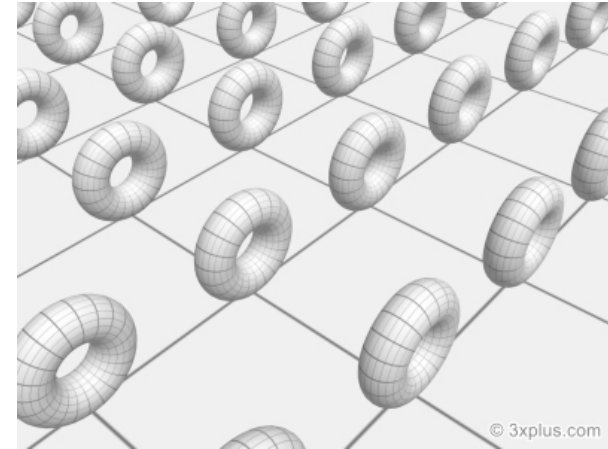
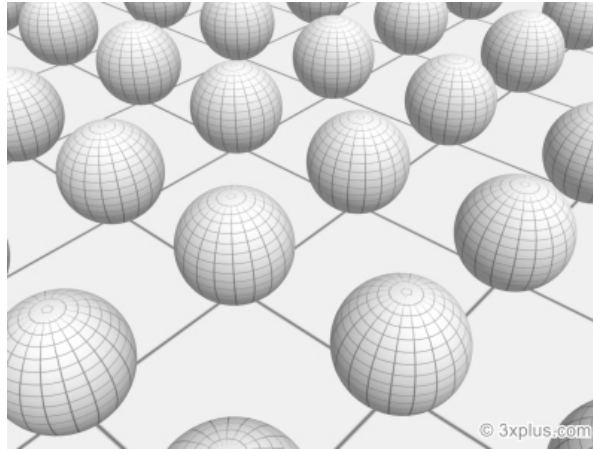
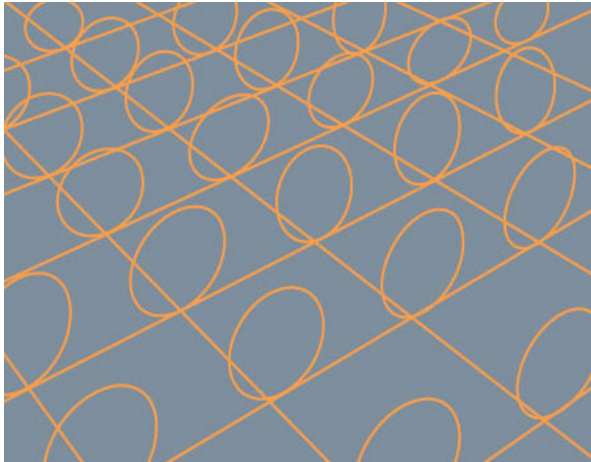


Stephen Martin

Quelle nouvelle physique ?

Dimensions supplémentaires

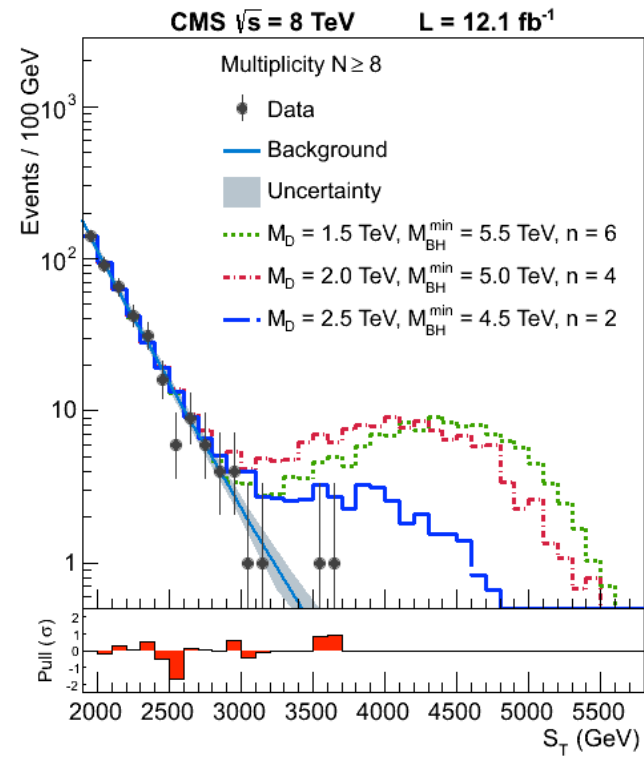
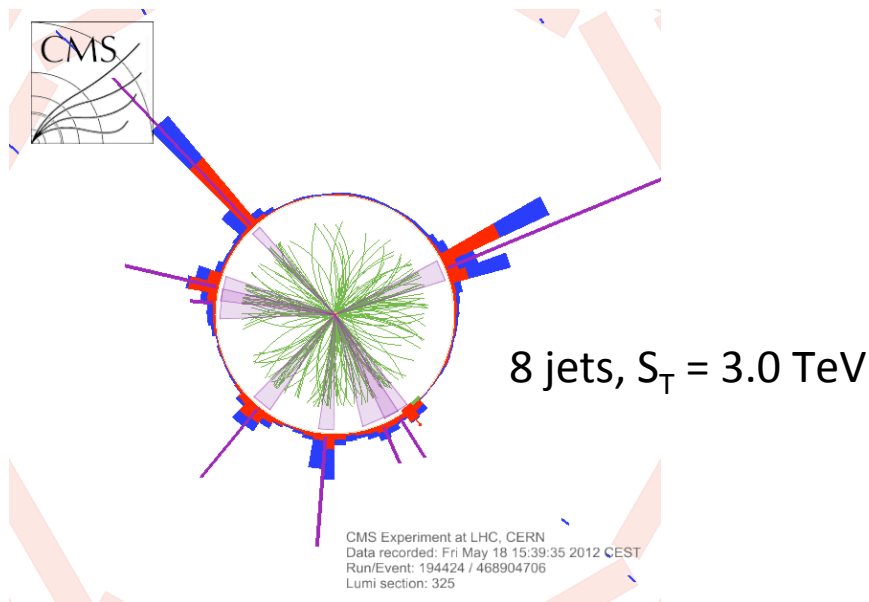
T. Kaluza, O. Klein 1921



- Gravitation « diluée » dans un espace plus grand
- Résout le problème de hiérarchie
- Peut fournir des candidats de **matière sombre**

Recherche de trous noirs microscopiques

- Dimensions supplémentaires doivent être **petites** et **enroulées** sur elles-mêmes
- A très petite distance (donc très grande énergie) : particules sont soumises à l'intensité totale de la gravité
- ➔ suffisant pour former un **trou noir microscopique**
- temps de vie $\sim 10^{-27}$ s ; se désintègre « démocratiquement »



S_T = somme des énergies transverses de tous les objets énergétiques détectés : jets, leptons, photons, E_T manquante

LE FUTUR

Chronologie du LHC



	Énergie totale (TeV)	Nombre (x 10 ¹⁴)* de collisions pp
Run 1	7 et 8	~25
Run 2	13 ou 14	~50
Run 3		200 à 500
Run 4		3000

luminosité et énergie x 2

luminosité x 5 à 10

luminosité x 10

[* fb⁻¹]

Au delà du LHC : collisionneurs linéaires

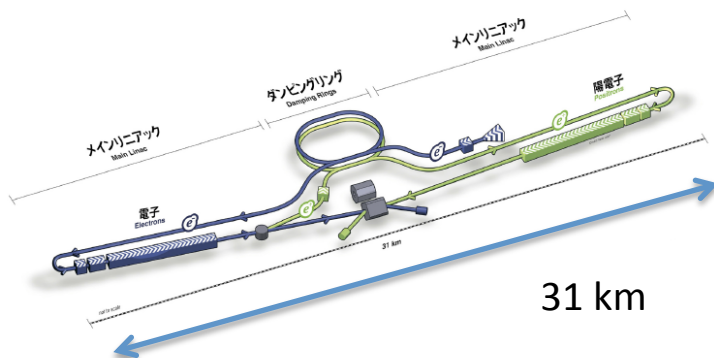
Au Japon : **ILC**
(Collisionneur Linéaire International)

- Japanese Mountainous Sites -

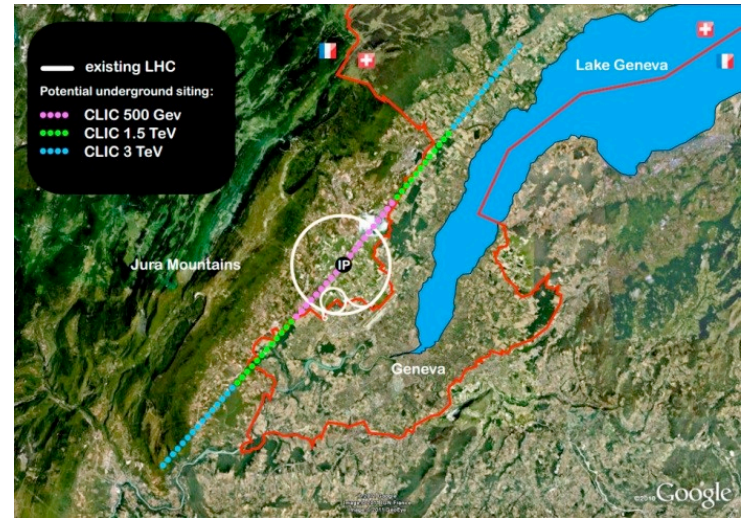


Technologie classique (cavités RF supra)

$$E_{CM} = 200 - 500 \text{ GeV}$$

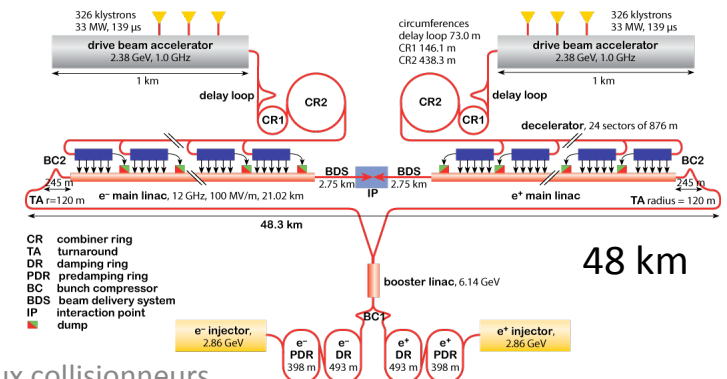


Au CERN : **CLIC**
(Collisionneur Linéaire Compact)



Technologie futuriste non prouvée :
concept d'accélération à deux faisceaux

$$E_{CM} = 500 \text{ GeV} - 3 \text{ TeV}$$



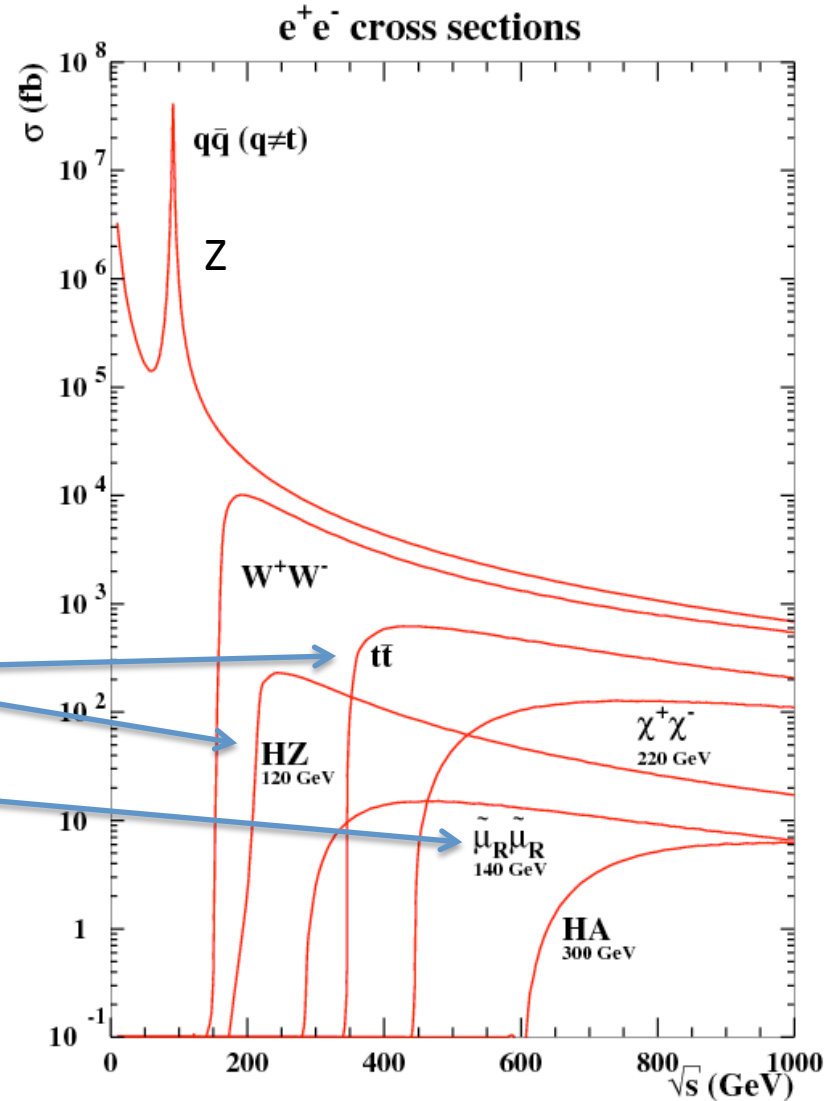
Physique aux futurs collisionneurs linéaires

Mesures de précision :

Higgs

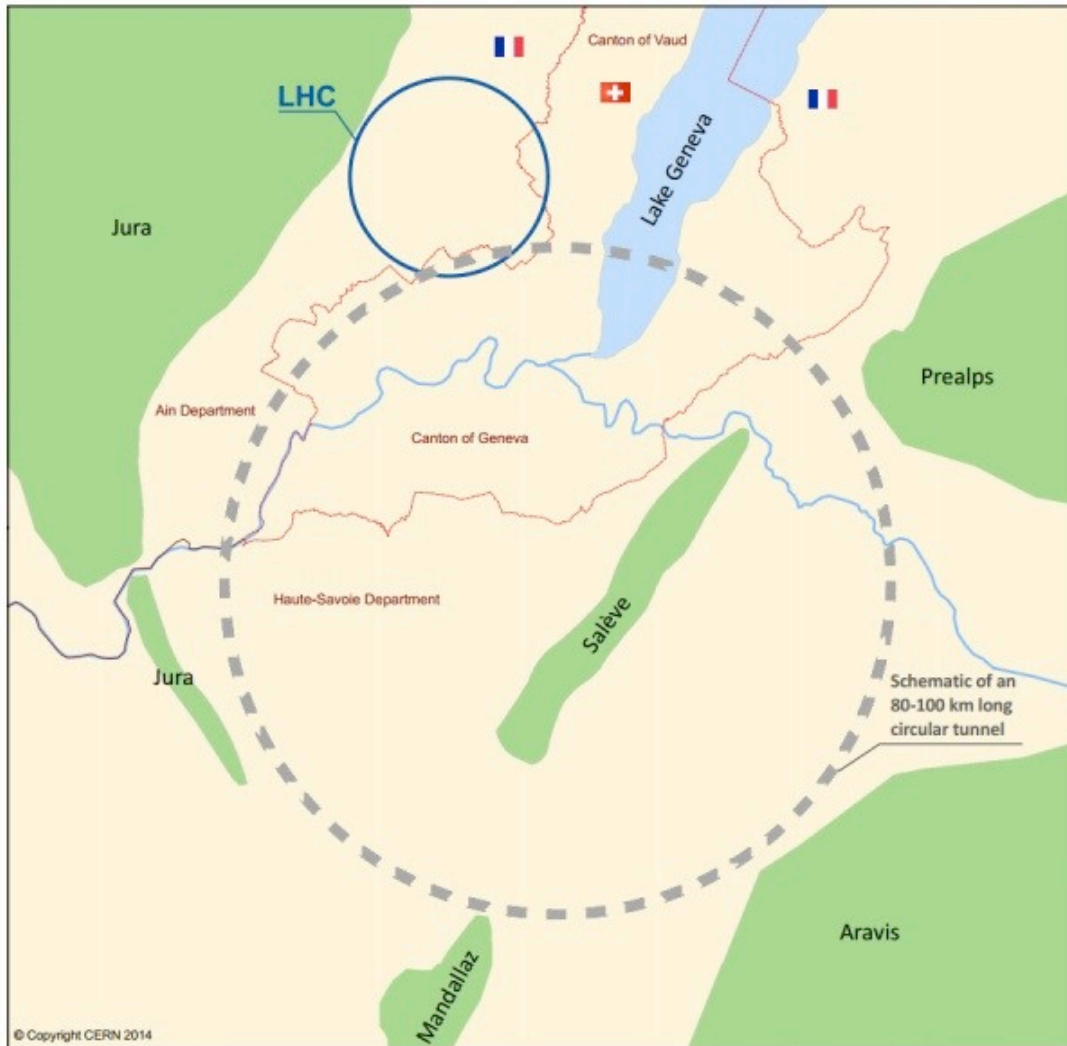
Top

SUSY* ???



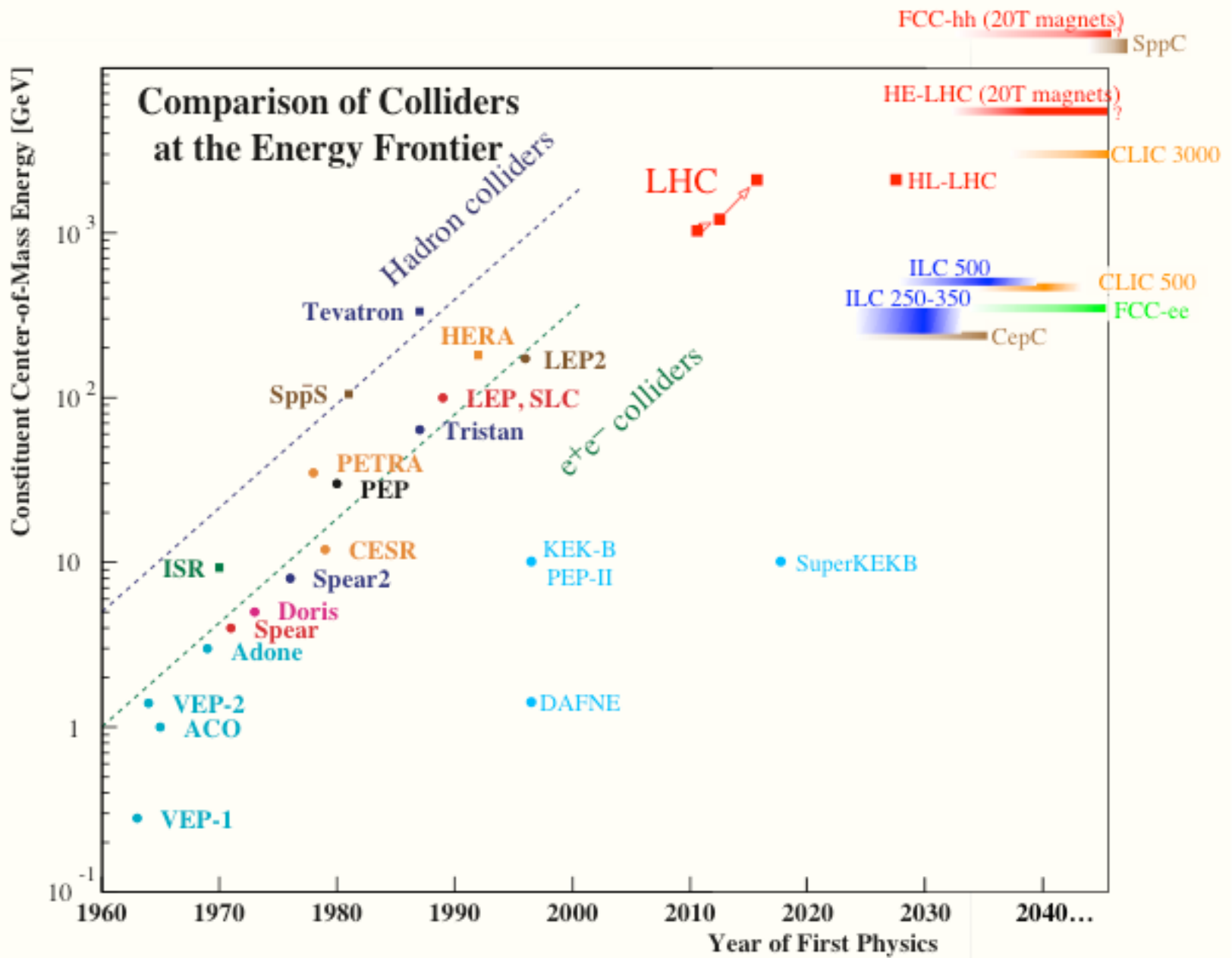
*si pas trop « lourde » !!

Au delà du LHC : collisionneurs circulaires futurs (FCC)



80-100 km circonférence
pourrait accélérer pp, ep, ee

- pp
 - prioritaire pour l’instant
 - 50-100 TeV ?
- ee circulaire ??
 - tunnel LHC : max 240 GeV
 - tunnel FCC : 350 GeV



Epilogue

- **Succès** total des premières années du LHC :
 - Accélérateur, expériences, grille de calcul
- La découverte du **boson de Higgs** a bouleversé le paysage de la discipline
- Pour la première fois depuis 40 ans, on ne sait plus précisément ce que l'on doit chercher
 - le prochain accélérateur n'est pas fixé !
 - il faut attendre au moins les résultats du LHC à 14 TeV pour décider...

MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

Les paramètres libres du MS

- Le MS possède 19 paramètres libres:
 - 3 constantes de couplage : EM, faible et forte
 - 2 dans le potentiel de Higgs
 - 9 couplages de Yukawa
 - 3 angles de mélange et 1 phase dans la matrice CKM
 - 1 paramètre de QCD

Unités de Planck

- Echelle de Planck = échelle d'énergie (ou de temps ou de longueur) au delà (ou en deçà) de laquelle les effets quantiques de la gravité ne sont plus négligeables
- Avec des dimensions supplémentaires, cette échelle d'énergie pourrait être beaucoup plus basse (ou les échelles de temps et de longueur beaucoup plus grandes)

$$M_p = (\hbar c/G)^{1/2} = 22 \mu\text{g} = 1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$$

$$l_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

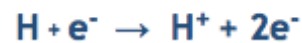
$$t_p = (\hbar G/c^5)^{1/2} = 5.4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

Sources de protons du LHC

"To make the protons", physicists inject hydrogen gas into the metal cylinder -*Duoplasmatron*- then surround it with an electrical field to break down the gas into its constituent protons and electrons. This process yields about 70 percent protons.



We can simplify the process as follows:



Rayonnement synchrotron

Des particules chargées en mouvement accéléré émettent toujours un rayonnement électromagnétique à spectre continu.

Lorsque l'accélération est **parallèle** à la trajectoire, ce rayonnement constitue le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung); lorsqu'elle est **perpendiculaire**, il est appelé rayonnement synchrotron.

Dans un synchrotron, la vitesse atteinte est proche de c , la perte d'énergie par tour qui en résulte est :

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha h c}{\rho} \gamma^4$$

avec $\gamma = \frac{E}{Mc^2}$ { En comparant électron et proton : $(M_p/M_e)^4 \sim 10^{13}$
les synchrotrons à électrons rayonnent ainsi 10^{13}
fois plus que les synchrotrons à protons:

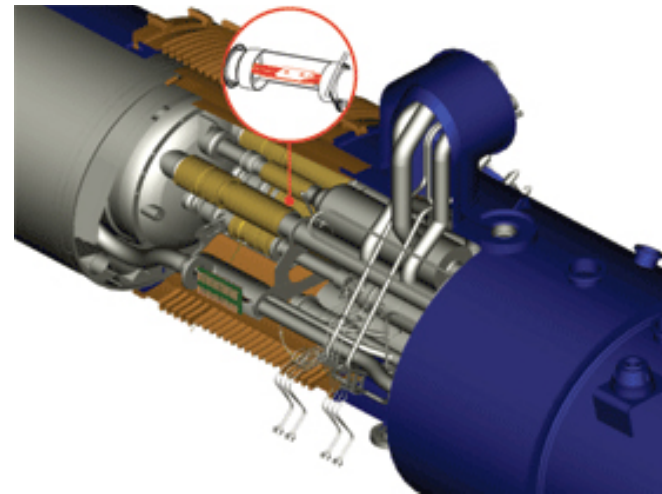
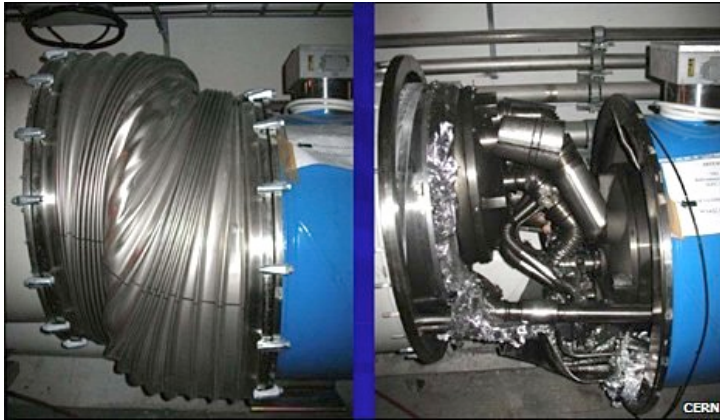
r rayon de courbure

ΔE varie comme M^{-4} et E^4

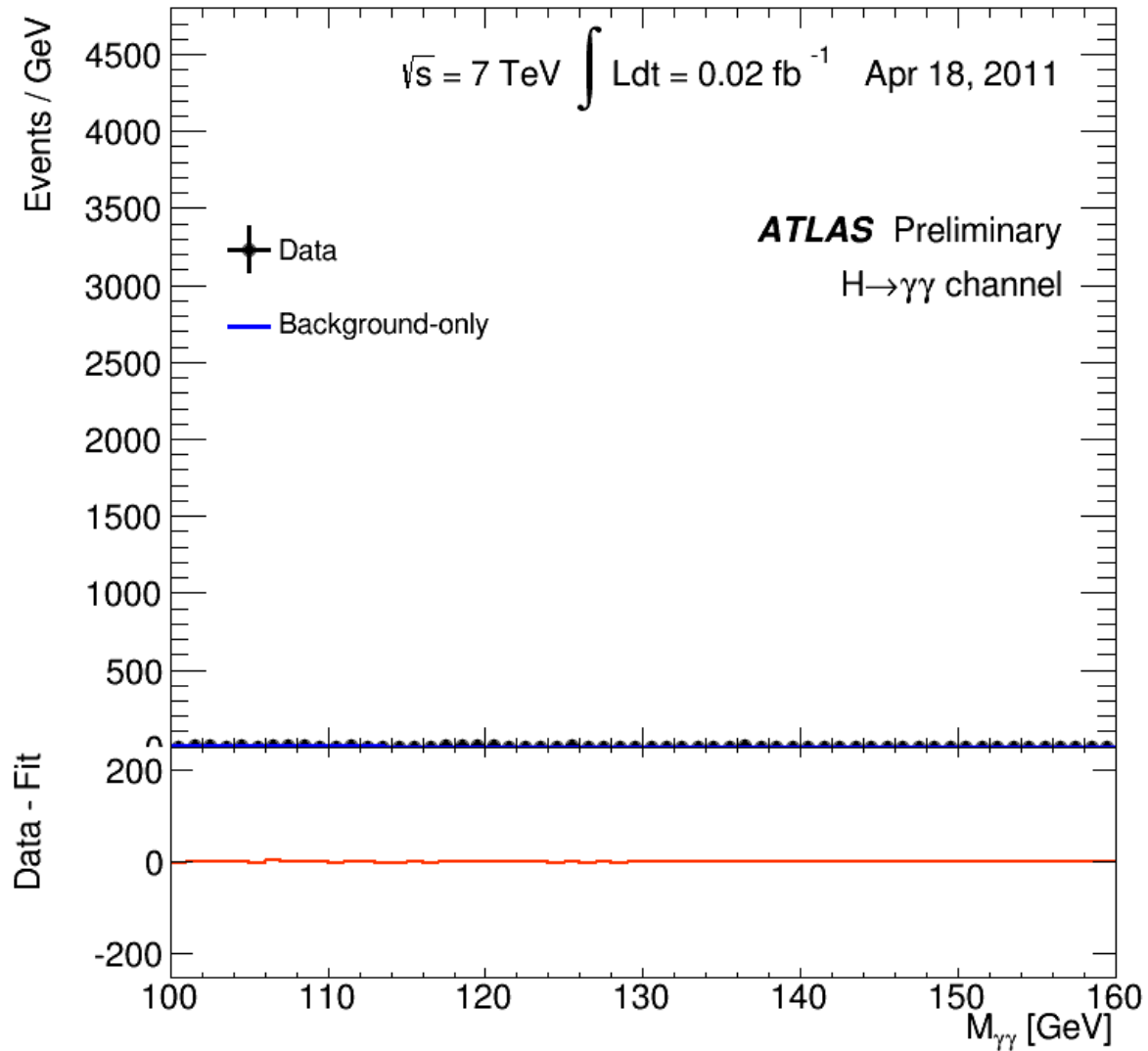
Les synchrotrons à électrons perdent 16 MeV/tour à 20 MeV.

Incident du LHC du 19 septembre 2008

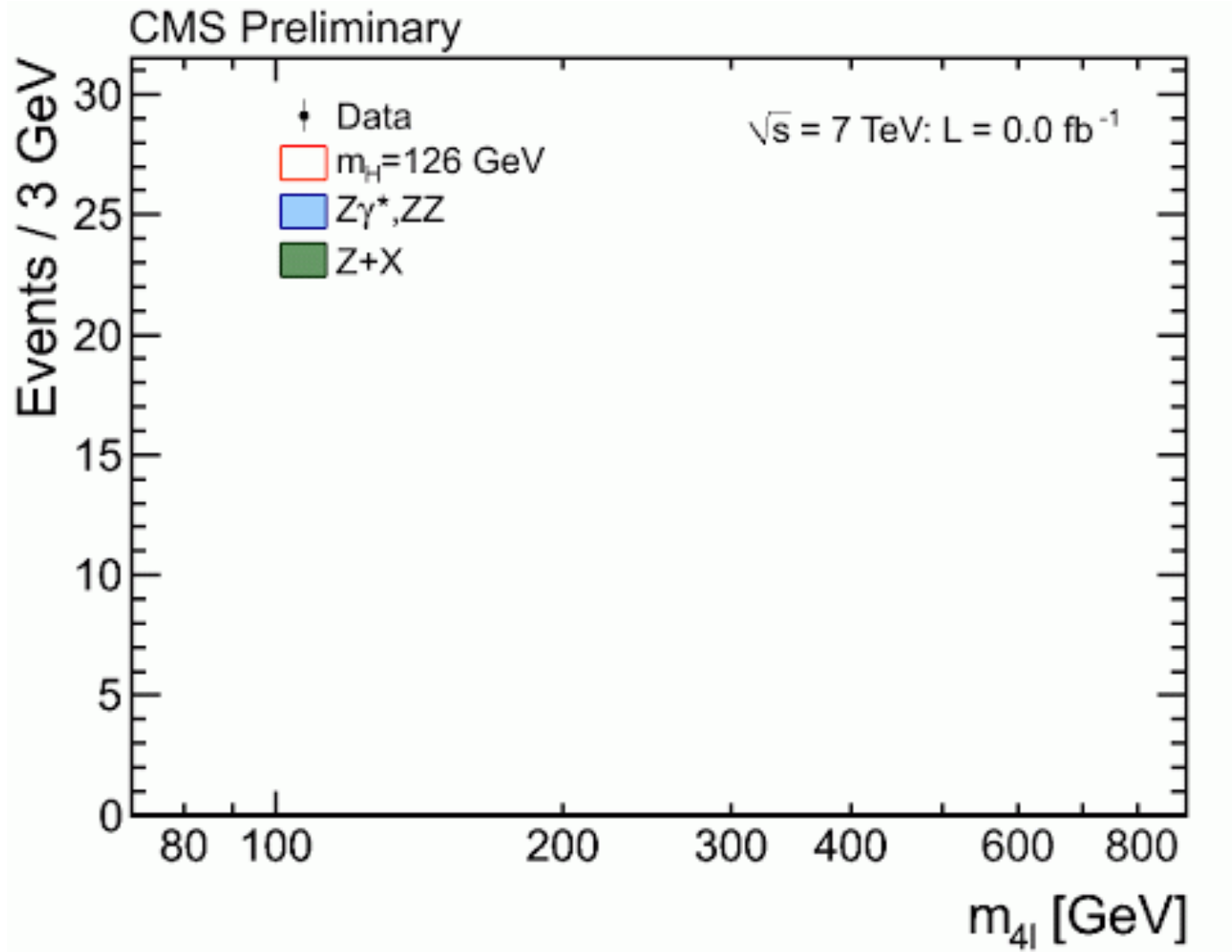
- Démarrage 10 septembre 2008 : 450 + 450 GeV
- Incident 9 jours plus tard : connexion électrique défectueuse entre un dipôle et un quadripôle → arc électrique → détérioration mécanique → fuite d'hélium brutale → gros dégâts matériels



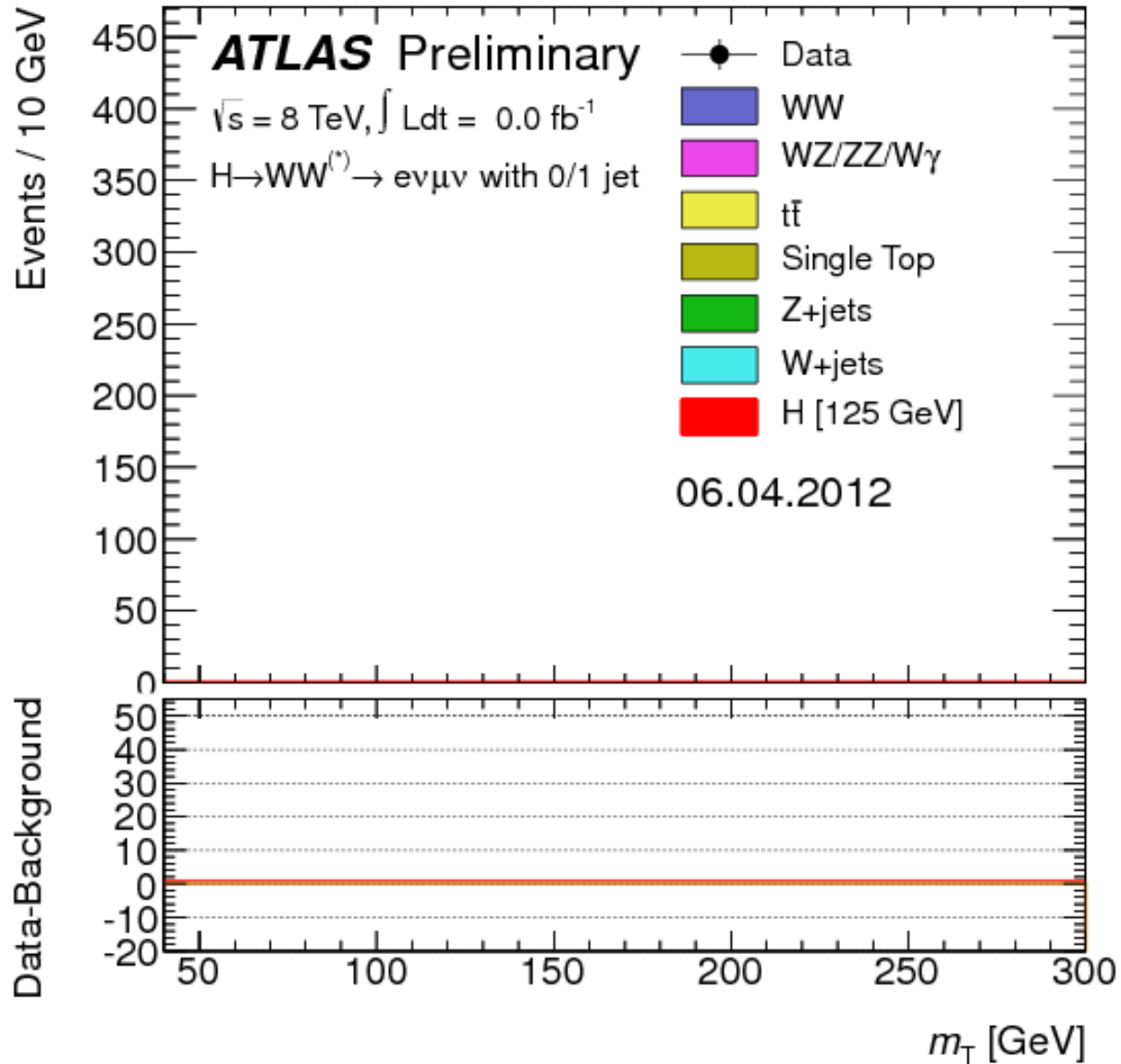
- Réparation, nettoyage, ajout de protections jusqu'en décembre 2008
+ décision de ne pas monter à l'énergie nominale avant le premier arrêt long
- Collisions à 900 GeV et 2.36 TeV en décembre 2008



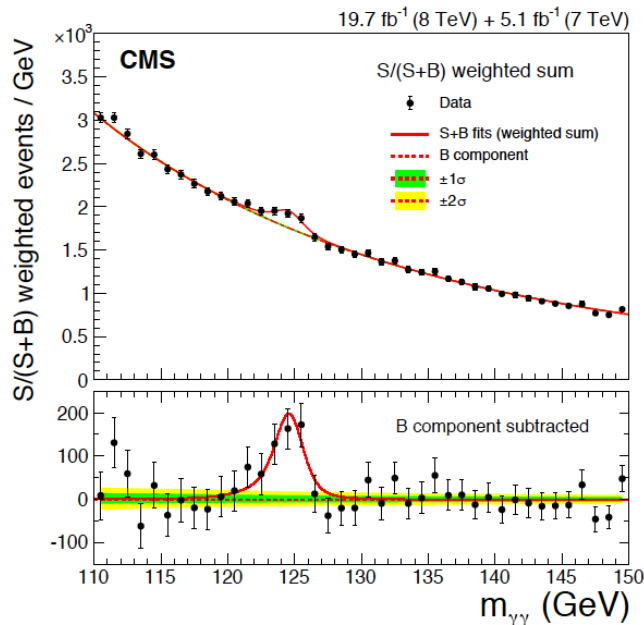
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$



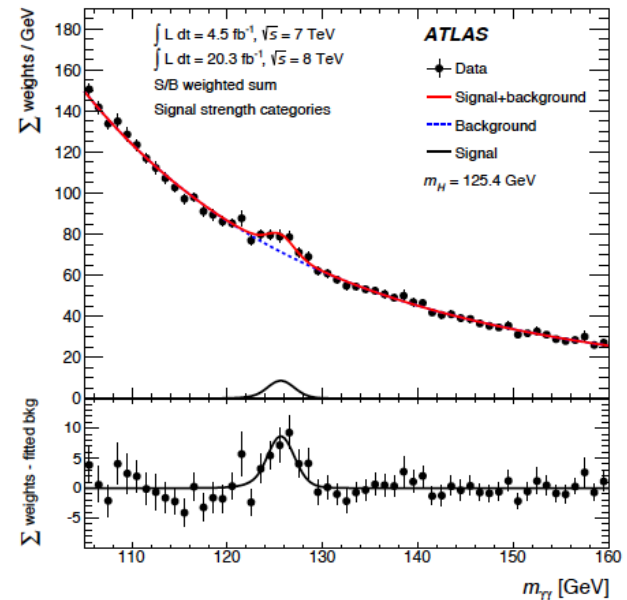
H \rightarrow WW



H $\rightarrow \gamma\gamma$: résultats 2014

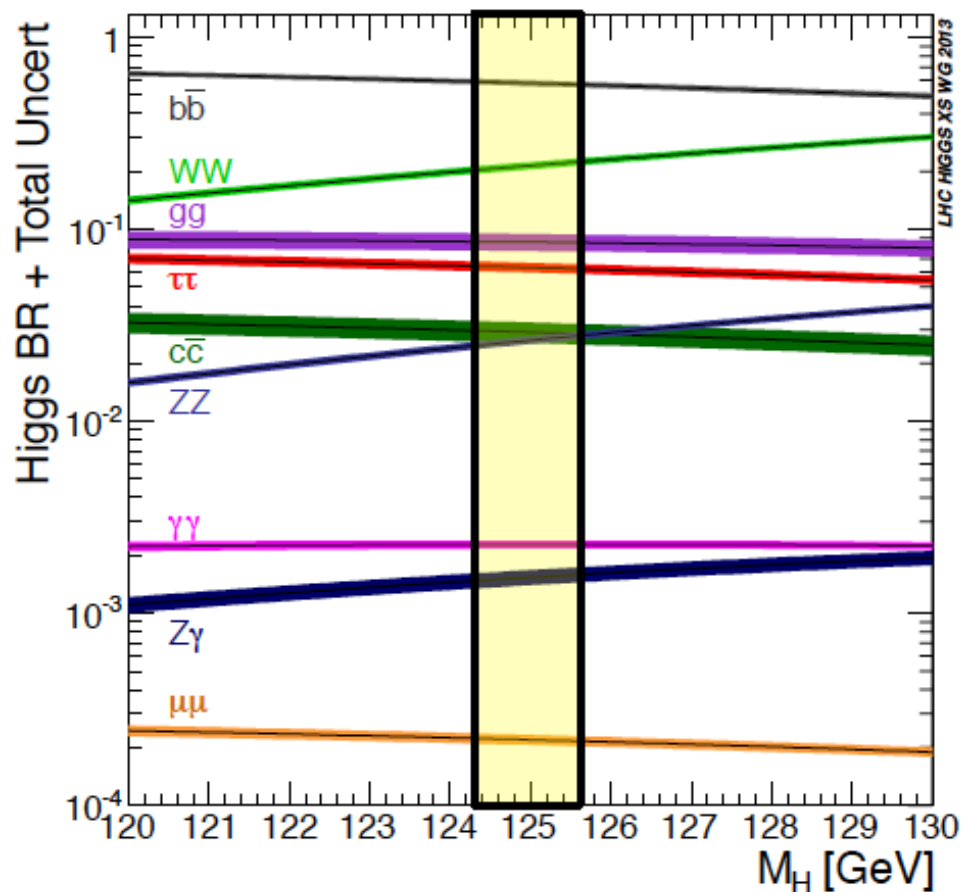


Excès local à 5.7 σ à 124.7 GeV



Excès local à 5.2 σ à 125.4 GeV

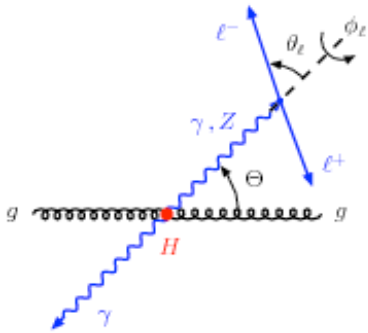
Désintégrations du Higgs



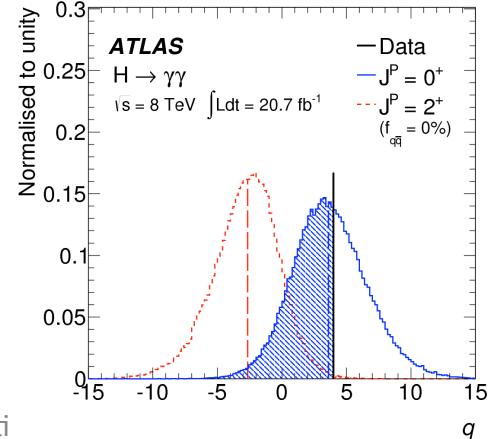
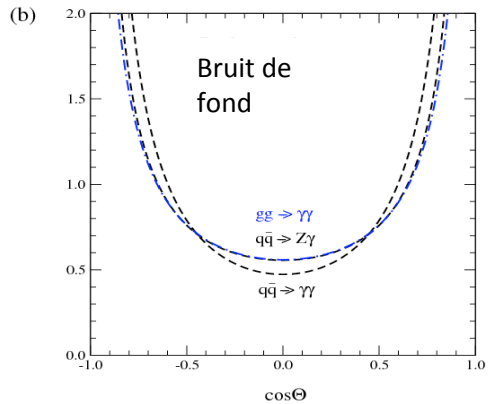
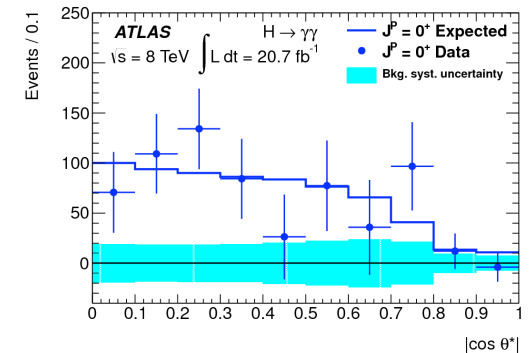
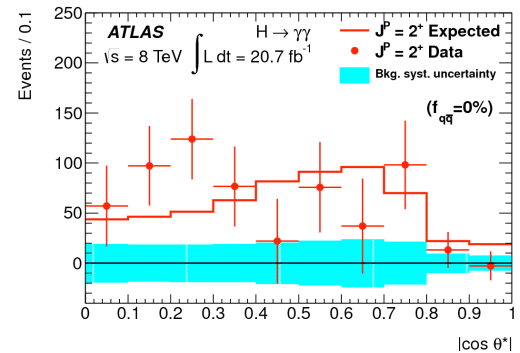
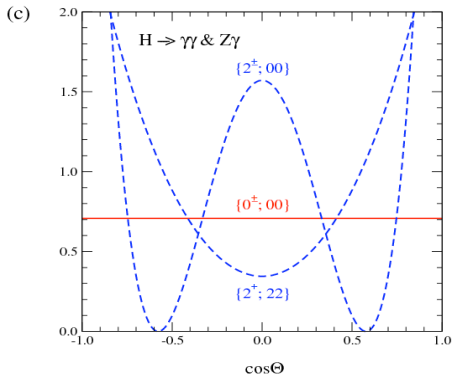
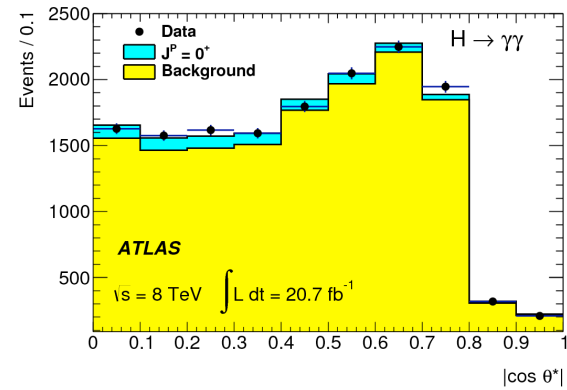
- Dominant: bb (57%)
- WW channel (22%)
- $\tau\tau$ channel (6.3%)
- ZZ channel (3%)
- cc channel (3%)
Extremely difficult
- The $\gamma\gamma$ channel (0.2%)

Spin dans le canal $\gamma\gamma$

(a)

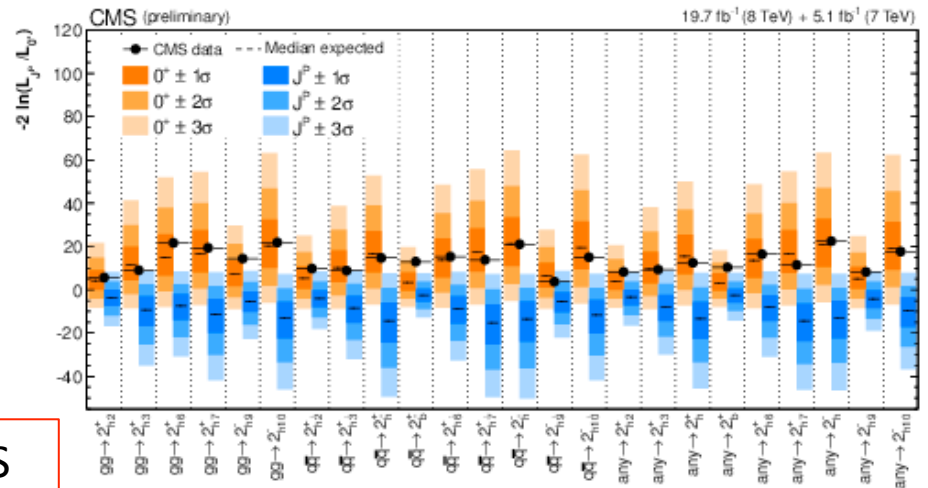
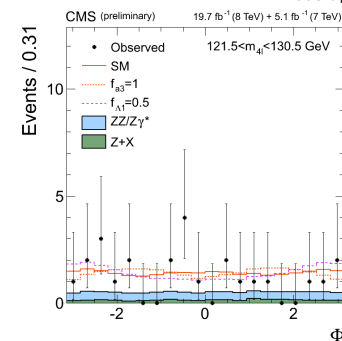
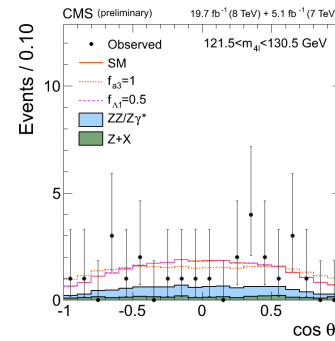
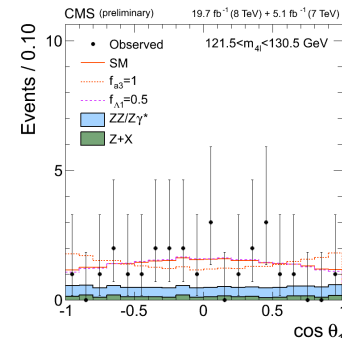
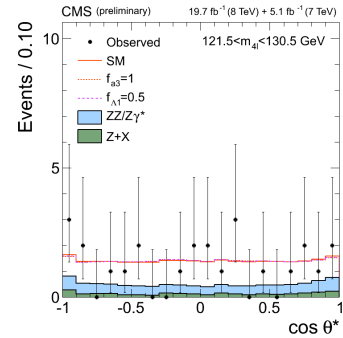
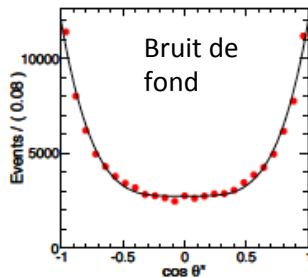
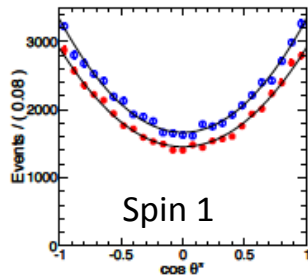
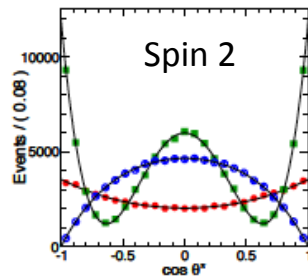
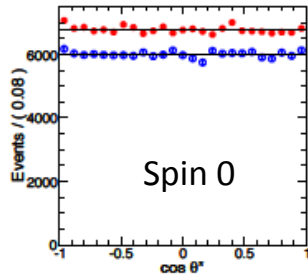
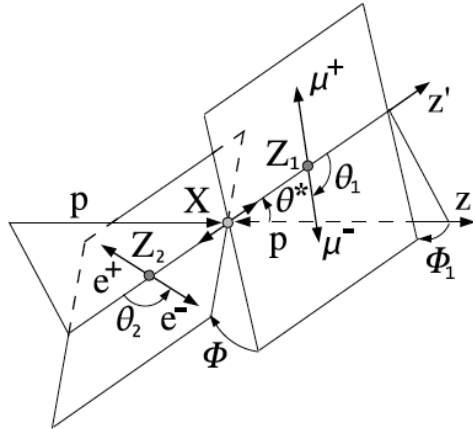


Distributions angulaires



Premiers résultats Moriond 2013

Spin dans le canal ZZ*



Spin 0⁺ conformément à la prédiction du MS

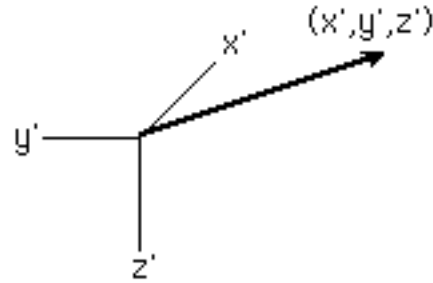
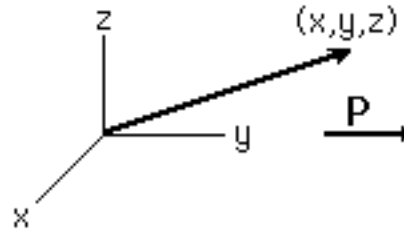
Parité

Système de coordonnées

orienté à droite

orienté à gauche

$$\begin{aligned}x' &= -x \\ y' &= -y \\ z' &= -z\end{aligned}$$



Parité = passage d'un système à l'autre (inversion spatiale)

Les particules ont une parité intrinsèque : elles sont inversées ou non par cette transformation

- Parité antifermion = - parité fermion

Parité des quarks et leptons = +1, parité des antiquarks et antileptons = -1

- Parité antiboson = parité boson

Parité des bosons de jauge = -1

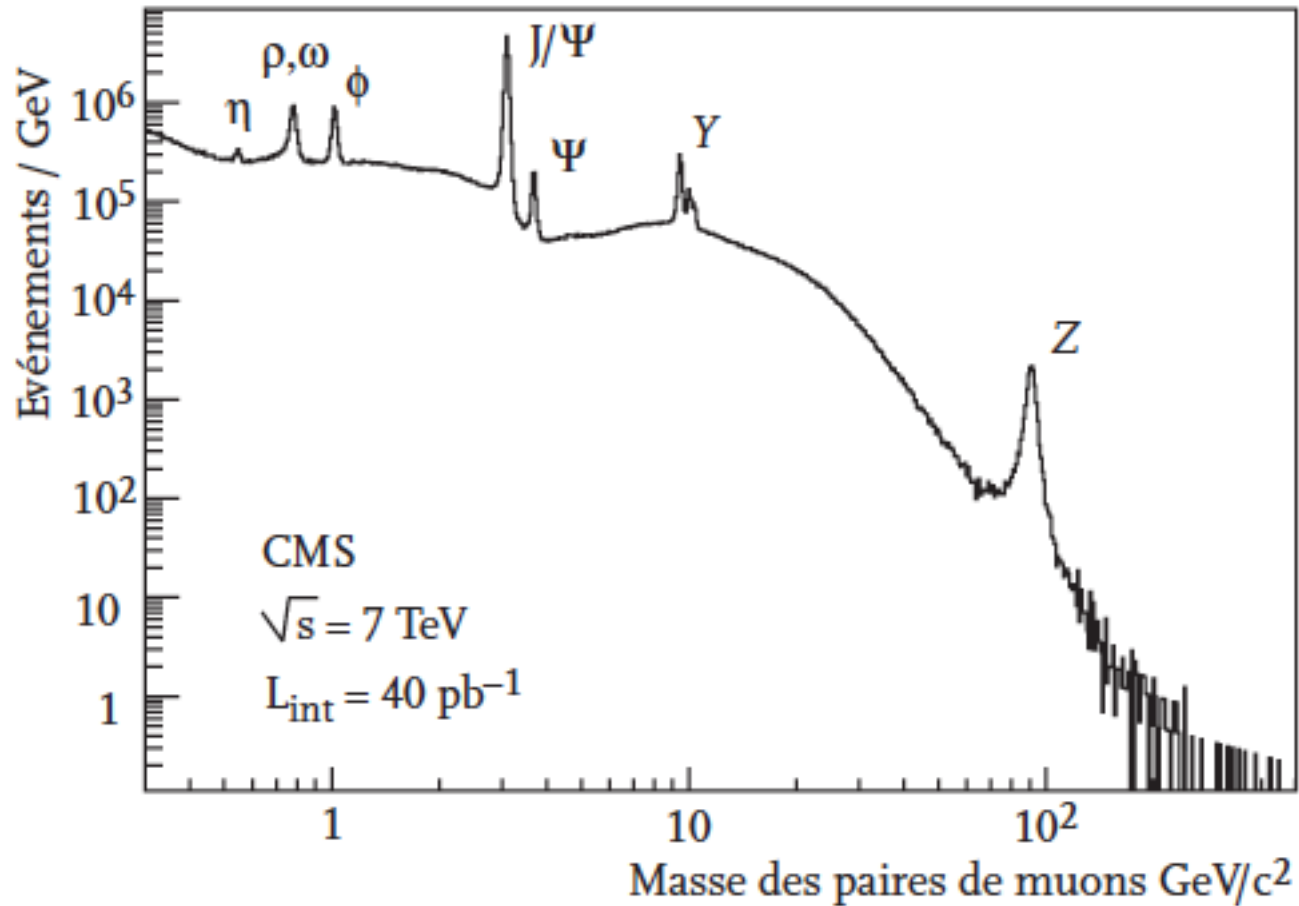
Toutes les interactions fondamentales conservent la parité sauf l'interaction faible, qui la viole de façon maximale

Scalaire : spin = 0, parité = +1, pseudo-scalaire : spin = 0, parité = -1

Vecteur : spin = 1, parité = , pseudo-vecteur (axial vecteur axial) : spin = 1, parité = -1

Le boson de Higgs est une particule scalaire

Exemple de pseudo-scalaire = K^0



Symétries (suite)

- La symétrie complète de la relativité restreinte est le groupe de Poincaré ; invariance relativiste donnée par invariance par
 - translation dans l'espace-temps
 - rotation dans l'espace
 - changement de référentiel de Lorentz
- Il y a aussi des symétries « internes » (dans des espaces abstraits) ; exemple : l'interaction faible est invariante par rotation dans l'espace de l'isospin faible (exemple : lepton \leftrightarrow neutrino)
- Peut-on ajouter autant de symétries qu'on veut ?
 - Nombreuses tentatives dans les années soixante de combiner des symétries et internes et des symétries d'espace-temps
 - Prouvé impossible en 1967 par Coleman et Mandula

« In a theory with non-trivial scattering in more than 1+1 dimensions, the only possible conserved quantities that transform as tensors under the Lorentz group are the energy-momentum P_μ , Lorentz transformations $M_{\mu\nu}$, and scalar quantum numbers (electric charge, lepton number,...). »

- Mais ceci supposait que les nouvelles charges soient de spin entier ! En réalité, on peut ajouter une symétrie de charge spinorielle
- Seule possibilité de symétrie et seule extension possible du groupe de Poincaré

Les particules supersymétriques

Constat : impossible de relier particules existantes (e.g. $\tilde{\gamma} \neq \nu$)

⇒ on postule l'existence de *nouvelles* particules avec tous les mêmes nombres quantiques (sauf S !)

□ Bosons de jauge / Jauginos

Bosons (Standard)	Partenaires supersymétriques
$W^\pm \quad H^\pm$	Charginos $\tilde{\chi}_1^\pm \quad \tilde{\chi}_2^\pm$
$\gamma \quad Z$ $h \quad (H \quad A)$	Neutralinos $\tilde{\chi}_1^0 \quad \tilde{\chi}_2^0 \quad \tilde{\chi}_3^0 \quad \tilde{\chi}_4^0$
g_i	Gluinos \tilde{g}_i

[2 doublets de Higgs]

[Tous spin 1/2]

Et aussi

Graviton G	Gravitino \tilde{G}
--------------	-----------------------

□ Particules / Sparticules

Particules standard	Partenaires supersymétriques
Leptons l	Sleptons $\tilde{l}_{R,L}$
Neutrinos ν_l	Sneutrinos $\tilde{\nu}_l$
Quarks q	Squarks $\tilde{q}_{R,L}$

[Tous scalaires]

Terminologie :

- partenaires des fermions (= scalaires) → *s-fermions*
- partenaires des bosons : *bos-ino*

Pourquoi SUSY ?



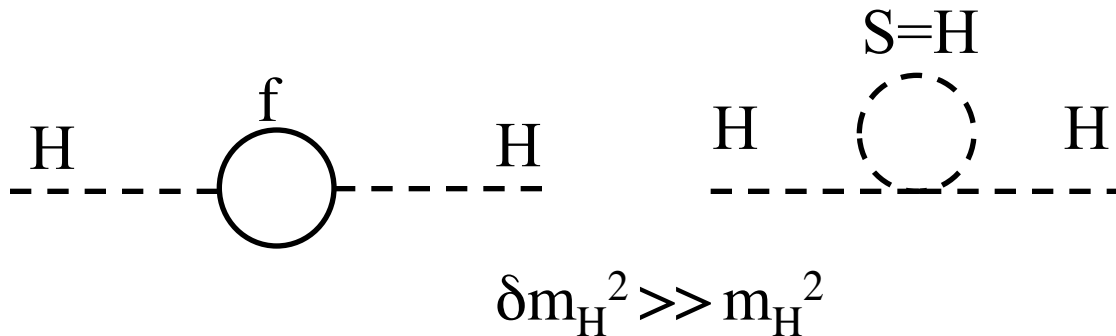
- Le MS est hautement prédictif
- Il n' a jamais été mis en défaut

...MAIS

Le MS n' est pas parfait !



- Boson de Higgs = seule particule *scalaire* du spectre
- *Naturalité* : corrections radiatives à m_H^2



- *Non-convergence* des constantes de couplage
- ...

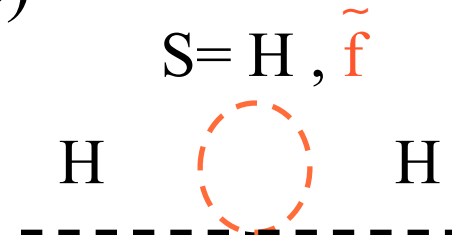
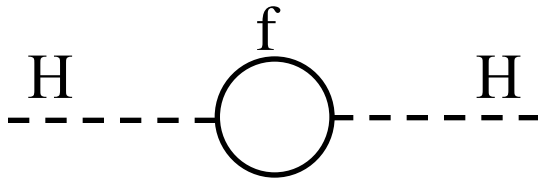
Pourquoi SUSY (suite)



- Premier point faible MS résolu :
nombreux scalaires, brisure électrofaible radiative



- Deuxième point (*naturalité*)

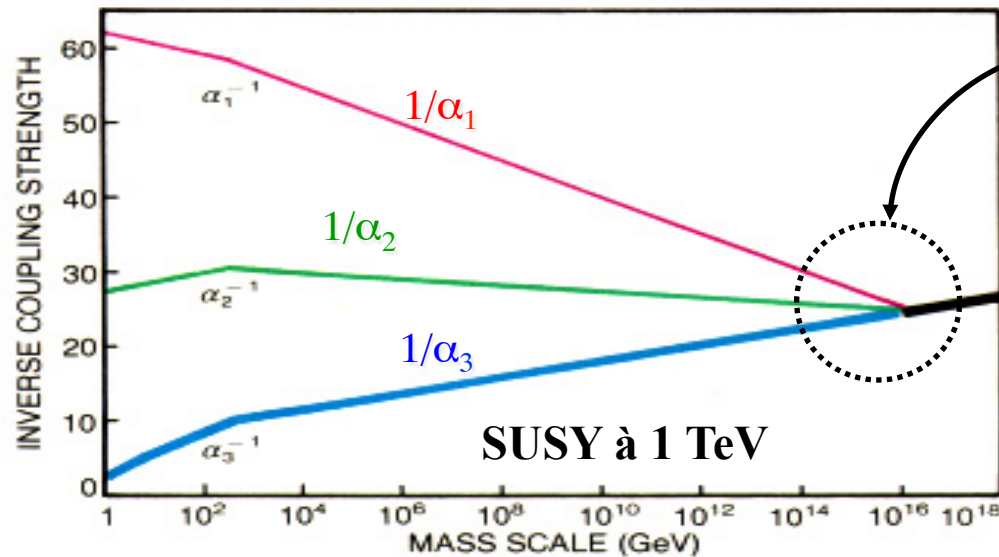
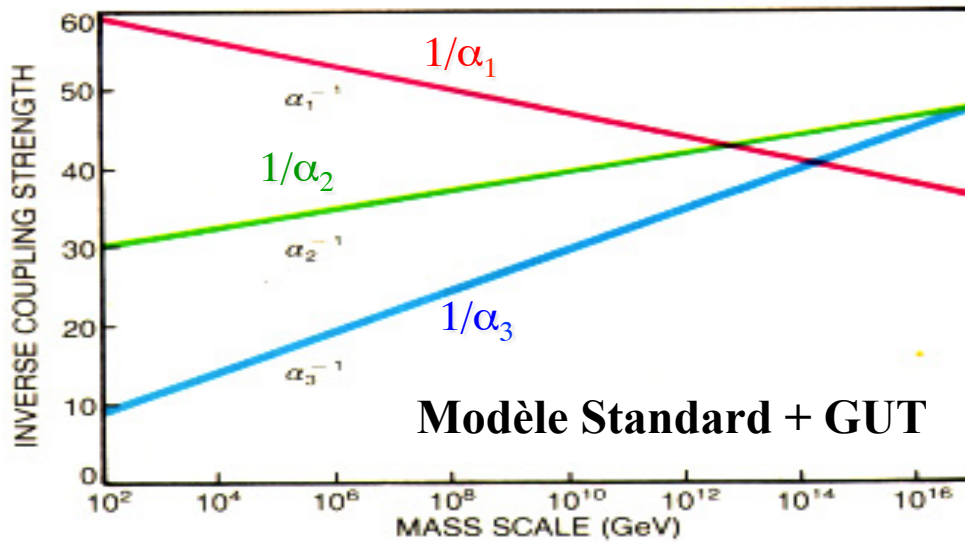


- et troisième point (*convergence*)

résolus si $M_{\text{susy}} < 1 \text{ TeV}$



« bonus » : introduction naturelle gravité dans la théorie des champs
+ ouverture vers les modèles de cordes



Convergence
des constantes
de couplage

Construire SUSY (I)

...MAIS



- pas de sélectron \tilde{e} avec $m(\tilde{e})=m_e$
- nombre de paramètres + +
- nouvelles sources de FCNC et de violation de CP

⇒ **Nécessité de briser la SUSY**

- en préservant les avantages acquis
- en évitant les nouveaux problèmes

COMMENT ?

Lagrangien *effectif* à « basse » énergie

Plusieurs modèles possibles : **mSUGRA**, GMSB, AMSB,...

Construire SUSY (II) : le MSSM

- ➔ pas plus de nouvelles particules que nécessaire
- ➔ pas de nouvelle interaction

+ « **R-parité** » : $R_p = (-1)^{3B+L+2S}$ *nombre quantique multiplicatif*

$$R_p = \begin{cases} 1 & \text{particules standard} \\ -1 & \text{particules SUSY} \end{cases}$$

R_p conservée \Rightarrow $\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ conservation de B, L} \\ \bullet \text{ production des sparticules en paires} \\ \bullet \text{ LSP stable} \end{array} \right\}$

Bonus !

+ conditions aux limites (à l'échelle d'unification)

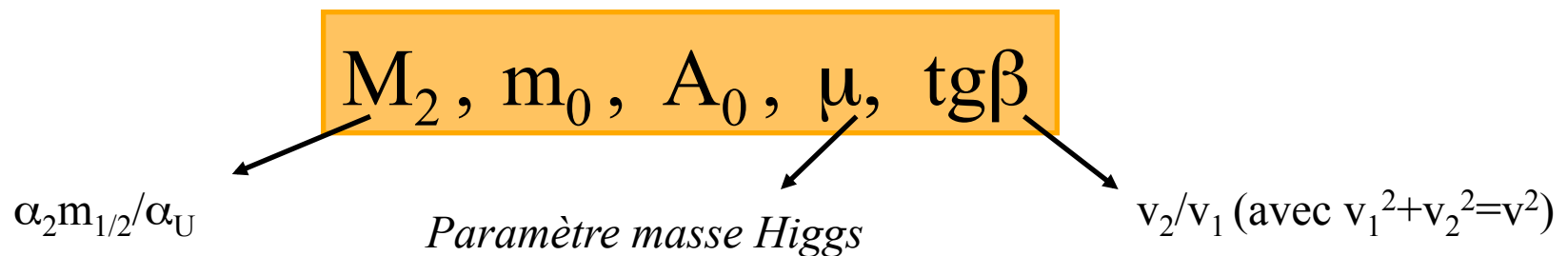
\Rightarrow nombre de paramètres $\searrow\searrow \Rightarrow$ prédictivité $\nearrow\nearrow$

Construire SUSY (III) : les paramètres libres

MSSM « contraint », brisure type **mSUGRA** :
égalité à l'échelle d'unification

- des *masses* des jauginos (\tilde{B} , \tilde{W} , \tilde{g}) : $m_{1/2}$
- des *masses* des scalaires (sfermions et Higgs) : m_0
- des *couplages* du Higgs aux sfermions : A_0

⇓
5 paramètres au lieu de 124

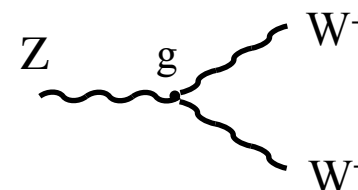
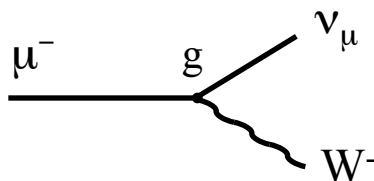
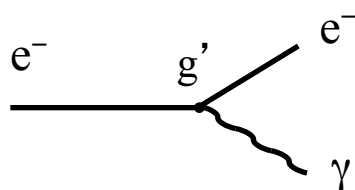


Construire un vertex SUSY (Rp conservée)

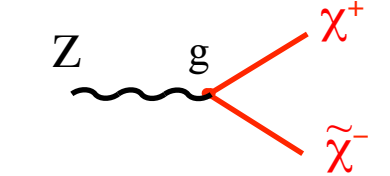
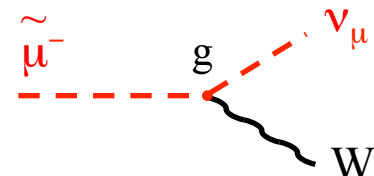
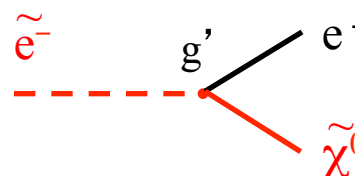
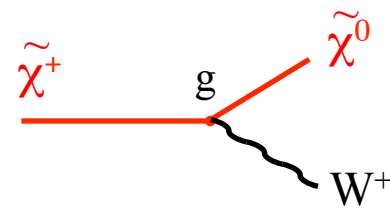
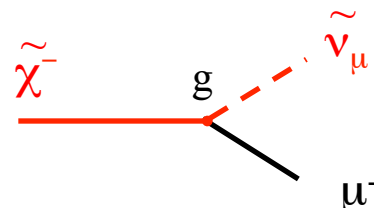
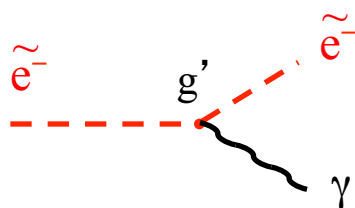
Rappel : fermion scalaire vecteur

————— - - - - - ~~~~~

① Partir d'un vertex de jauge standard



② Prendre le partenaire SUSY de 2 branches ; garder le couplage:



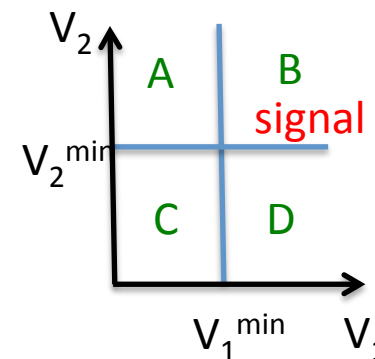
Eléments de l'analyse

Voir le cours
de M. Verderi

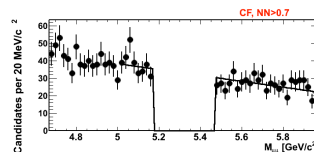
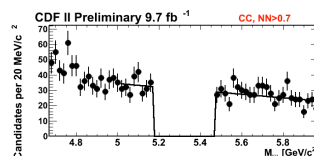
- Définition d'une ou plusieurs « **régions de signal** » (peuvent être optimisées séparément)
- Définition d'une ou plusieurs **variables discriminantes**, exemples :
 - masse effective m_{eff} : somme scalaire des p_T des tous les objets (jets, leptons, énergie manquante), m_T , $\Delta\phi$ (jet, $E_T^{\text{manquante}}$),...
- Première évaluation des bruits de fond par la simulation Monte Carlo (MC)
- Nécessaire de vérifier les prédictions MC dans les données :
utilisation de **régions de contrôle**

- Exemple : bruit de fond Z+jets, $Z \rightarrow \nu\nu$ (impulsion transverse manquante)
 - Région de contrôle : on sélectionne événements avec exactement les même critère sauf 2 leptons au lieu de 0

- Exemple : méthode ABCD. 2 variables **indépendantes** V_1 et V_2
 - BruitDeFond $\text{bdf}(B) = \text{bdf}(A) \times \text{bdf}(D)/\text{bdf}(C)$



- Exemple : « bandes sur les cotés »



Résultats SUSY (exemple)

