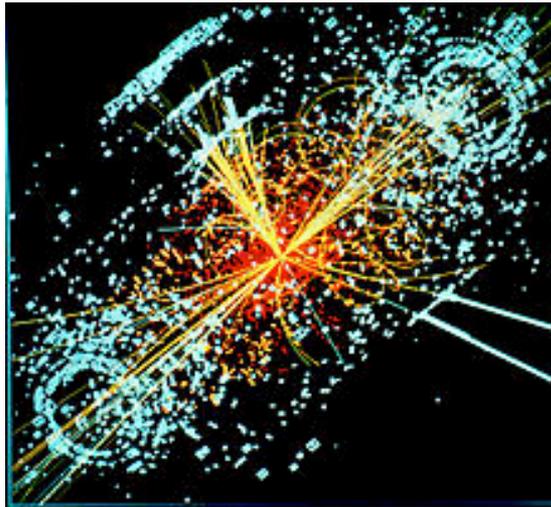


Physique des particules aux collisionneurs



Fabienne Ledroit
LPSC (Grenoble)

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

Programme

- Introduction
- **Le Modèle Standard** de la physique des particules
- Outils expérimentaux
 - accélérateurs, détecteurs, grille de calcul
- État des lieux avant le LHC
- **La physique au LHC**
 - le boson de Higgs
 - la recherche de «nouvelle physique»
- Le futur

Programme

Ce que l'on sait aujourd'hui

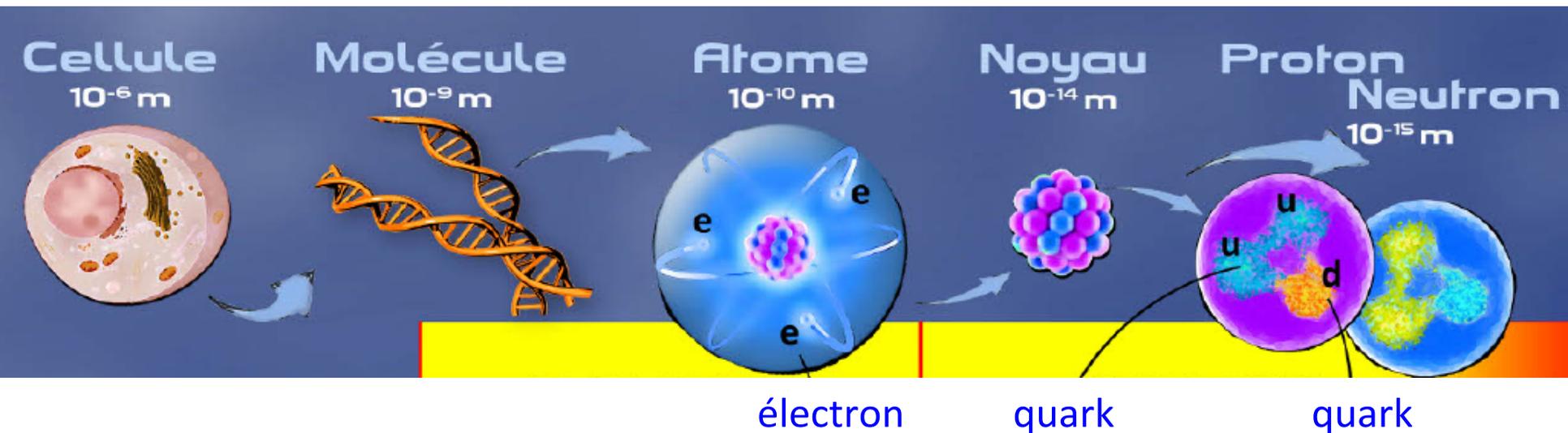
- Introduction
- **Le Modèle Standard** de la physique des particules
- Outils expérimentaux
 - accélérateurs, détecteurs, grille de calcul
- État des lieux avant le LHC
- **La physique au LHC**
 - le boson de Higgs
 - la recherche de «nouvelle physique»
- Le futur

Programme

- Introduction Ce que l'on sait aujourd'hui
- **Le Modèle Standard** de la physique des particules
- Outils expérimentaux
 - accélérateurs, détecteurs, grille de calcul
- État des lieux avant le LHC
- **La physique au LHC** Ce que l'on fait aujourd'hui
 - le boson de Higgs
 - la recherche de «nouvelle physique»
- Le futur

Introduction

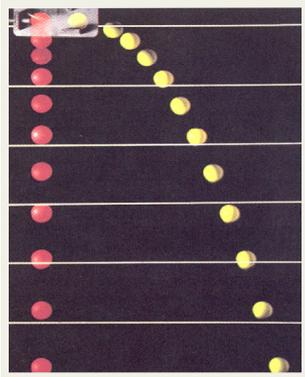
Ambition de la physique des particules : description **élémentaire** du monde



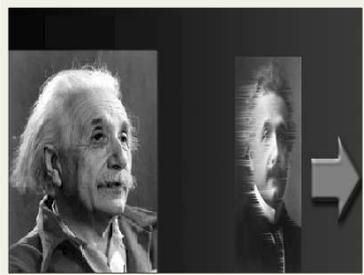
- Particules élémentaire = **constituants** fondamentaux de la matière
- Les forces basiques qui les lient = les **interactions** fondamentales

Tout cela est aujourd'hui décrit par le **Modèle Standard** de la physique des particules

Introduction : les grandes théories de la physique



rapide



aux grandes échelles :
Relativité Générale

voir le cours de R. Taillet

petit

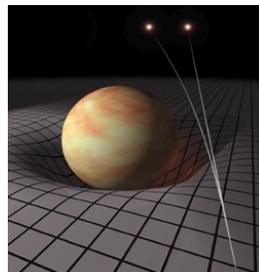
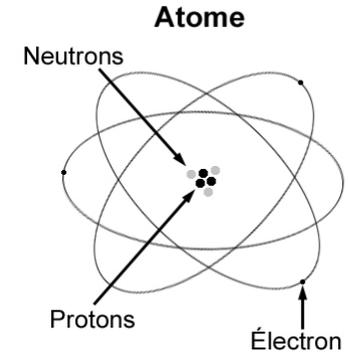


Mécanique
Classique

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 dans le 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 ...



Prix Nobel 1921



Prix Nobel 1902



Prix Nobel 1918



Prix Nobel 1932



Prix Nobel 1933

Paul Adrien Maurice Dirac

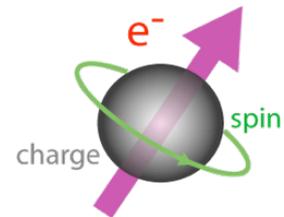
Unités

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 : on n'écrit pas c (c=1) → $E^2 = |\mathbf{p}|^2 + m^2$, 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 $\hbar = h/2\pi$
 - en pratique : on n'écrit pas \hbar ($\hbar=1$)
 - spin = 1/2, 3/2, ... : *fermion*, spin = 0, 1, ... : *boson*

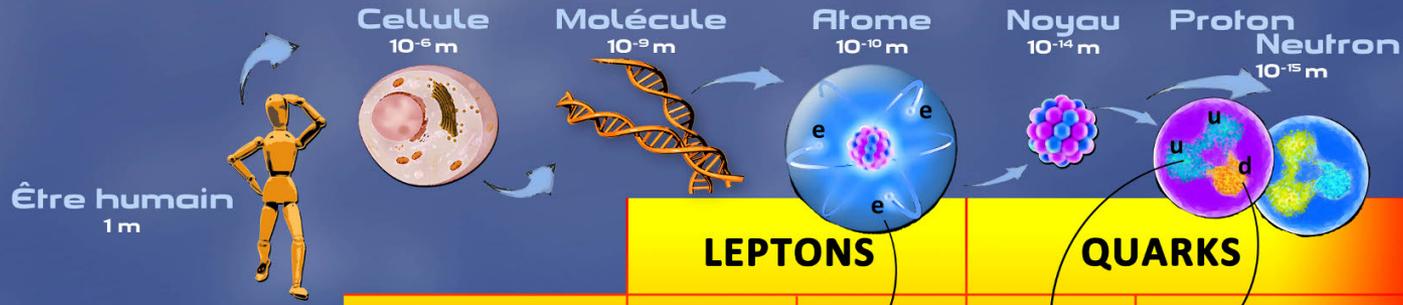


- $\hbar c = 200 \text{ MeV fm}$ (1 fm = 10^{-15} m)

LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

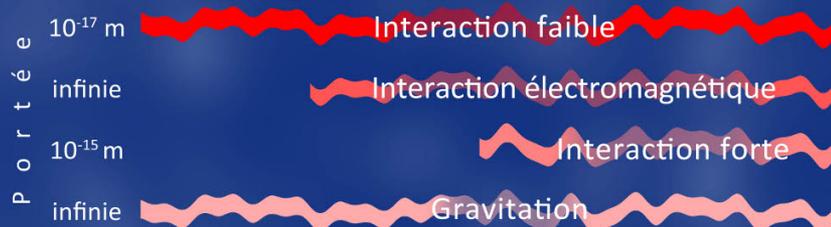
Résumé

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON DE HIGGS H
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e <small>m < 2 · 10⁻³⁶ GeV Q = 0 t = ?</small>	e électron <small>m = 0,00055 GeV Q = -1 t = ∞</small>	u haut / up <small>m = 0,002 GeV Q = 2/3 t = ∞</small>	d bas / down <small>m = 0,005 GeV Q = -1/3 t = 10 min</small>	BOSON DE HIGGS H <small>m = 126 GeV Q = 0 t = 1,5 · 10⁻²² s</small> 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 <small>m < 2 · 10⁻³⁶ GeV Q = 0 t = ?</small>	μ muon <small>m = 0,106 GeV Q = -1 t = 2,2 · 10⁻⁶ s</small>	c charme / charm <small>m = 1,3 GeV Q = 2/3 t = 10⁻¹² s</small>	s étrange / strange <small>m = 0,1 GeV Q = -1/3 t = 10⁻¹² s</small>	Champ de Higgs
3^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	ν_τ neutrino tau <small>m < 2 · 10⁻³⁶ GeV Q = 0 t = ?</small>	τ tau <small>m = 1,78 GeV Q = -1 t = 2,9 · 10⁻¹³ s</small>	t top <small>m = 173 GeV Q = 2/3 t = 4 · 10⁻²⁵ s</small>	b beau / beauty / bottom <small>m = 4,2 GeV Q = -1/3 t = 1,5 · 10⁻¹² s</small>	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

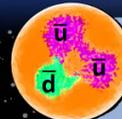


Bosons Z^0, W^+, W^-	Désintégrations radioactives β^- et β^+ de certains noyaux instables
Photon γ	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

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.

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

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

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e	e électron	u haut / up	d bas / down
	$m < 2 \cdot 10^{-19}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	$m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	$m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	$m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min

$$Q = 0$$

$$Q = -1$$

$$Q = 2/3$$

$$Q = -1/3$$

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

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

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-10}$ 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
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

$Q = 0$

$Q = -1$

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

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

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-10}$ 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
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	ν_τ neutrino tau $m < 2 \cdot 10^{-10}$ 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

$Q = 0$

$Q = -1$

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

F. Ledroit : Physique des particules aux collisionneurs

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

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

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	1956 ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1897 e 1932 électron $m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	1968 u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	1968 d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	1962 ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1936 μ muon $m = 0,106$ GeV $Q = -1$ $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s	1974 c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q = 2/3$ $t = 10^{-12}$ s	1968 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 constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

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

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

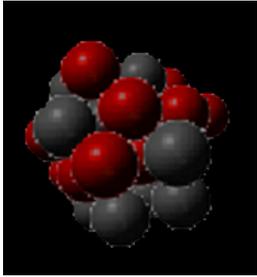


$Q = 0$

$Q = 2/3$

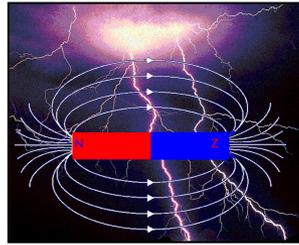
$Q = -1/3$

Les quatre interactions fondamentales



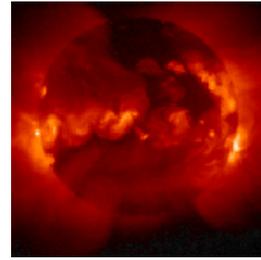
nucléaire forte

Cohésion des noyaux



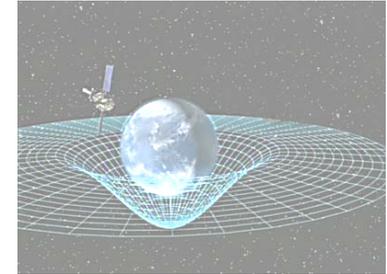
électromagnétique

Structure atomes
et molécules



nucléaire faible

Energie stellaire,
radioactivité
naturelle



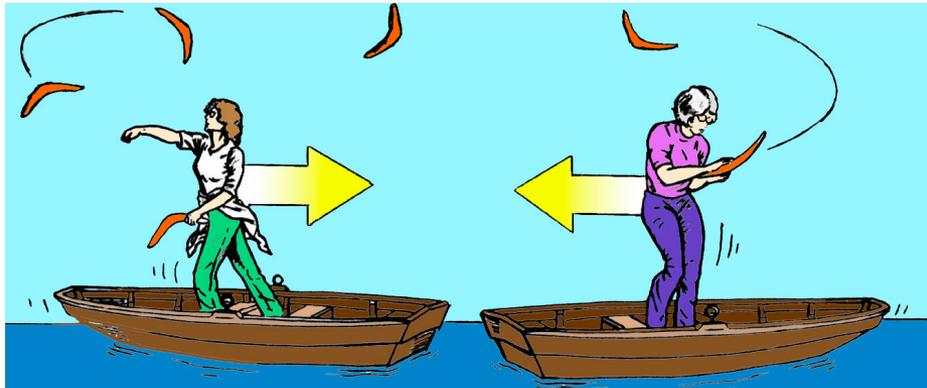
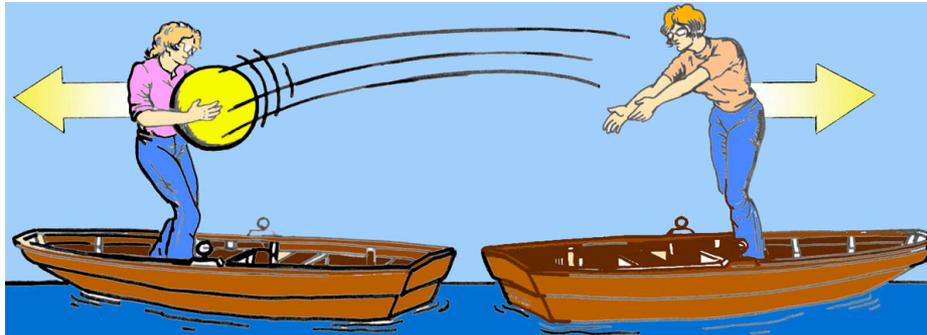
gravitationnelle

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 de R. Taillet*

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 !



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 (?)

$m = 0 ?$

- ces bosons dits « **intermédiaires** » ou « **vecteurs** » ou « **de jauge** » sont leur propre antiparticule

Particules d'interaction

- Constituants (quarks et leptons) = tous des *fermions*
- 2^e sorte de particules élémentaires = les *bosons* (s)
 - Elles portent les interactions fondamentales !

Interaction faible

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

1983

Interaction EM

Photon γ

1923

Interaction forte

Gluons g

1978

Gravitation

Graviton (?)

...

Prix Nobel 1984



Carlo Rubbia



Simon van der Meer

Prix Nobel 1927



Arthur Compton

- ces bosons dits « **intermédiaires** » ou « **vecteurs** » ou « **de jauge** » sont leur propre antiparticule

Caractéristiques des interactions

- **Intensité** de l'interaction entre deux particules est proportionnelle à la *constante de couplage* (« α ») de l'interaction :
ex : 2 protons distants de 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 » de chaque particule :
 - Interaction électromagnétique : charge électrique
 - Interaction faible : « charge faible » = *isospin faible*
 - Interaction forte : « charge forte » = *couleur*
- **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

Quelles particules sont sensibles à quelles interactions

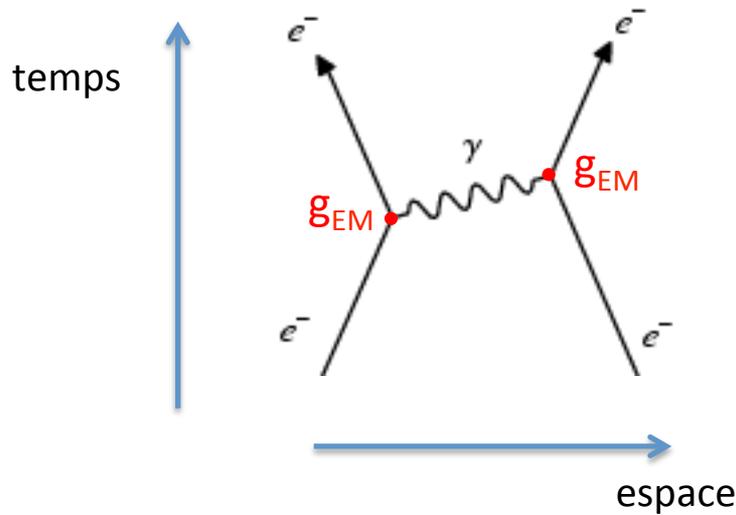
ν_e neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	e électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051 \text{ GeV}/c^2$	u haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002 \text{ GeV}/c^2$	d bas / down $t = 15 \text{ min}$ $Q = -e/3$ $m = 0,005 \text{ GeV}/c^2$
ν_μ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-8} \text{ GeV}/c^2$	μ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 0,106 \text{ GeV}/c^2$	c charme / charm $t = 10^{-12} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 1,3 \text{ GeV}/c^2$	s étrange / strange $t = 10^{-12} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 0,1 \text{ GeV}/c^2$
ν_τ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-8} \text{ GeV}/c^2$	τ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 1,78 \text{ GeV}/c^2$	t top $t = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 173 \text{ GeV}/c^2$	b beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 4,2 \text{ GeV}/c^2$

FONDAIMENTALES			
Interaction faible			
Interaction électromagnétique			
Interaction forte			
Gravitation			

Interaction faible et gravitation interagissent avec **tous** les constituants, interaction électromagnétique seulement avec les particules de $Q_{el} \neq 0$, interaction forte seulement avec les **quarks**.

Intermède : diagrammes de Feynman

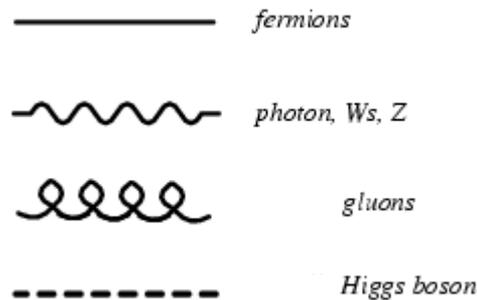
- Servent à décrire les processus (\neq trajectoires) et à faire les calculs correspondants
- Exemple :



Prix Nobel 1965

amplitude de diffusion proportionnelle à $(g_{EM})^2$ et donc à α_{EM}
avec g_{EM} proportionnel à e (charge élémentaire)

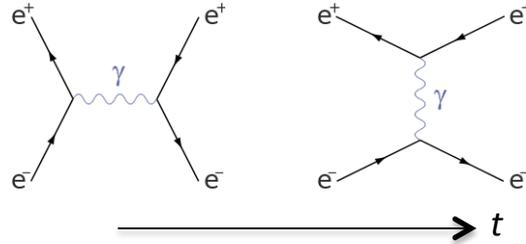
- Convention :



Interactions EM et faible

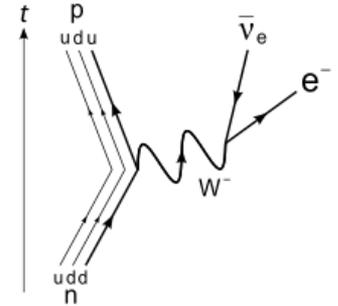
- Exemples : Interaction électromagnétique (théorie « QED »)

Diffusion Bhabha



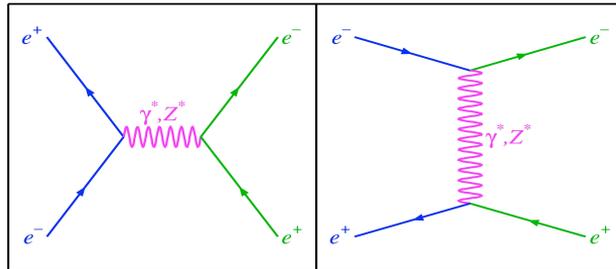
Interaction faible

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 » : **interaction électrofaible** (« EW »)

Bhabha Scattering



Prix Nobel 1979



Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam

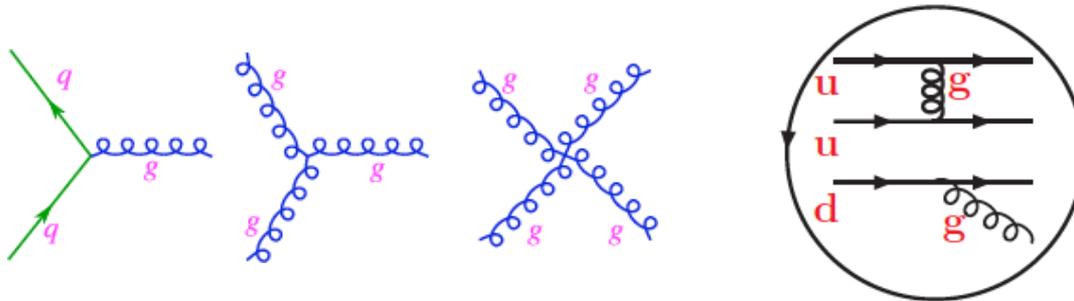


Steven Weinberg

- Description de Glashow, Salam et Weinberg (1967) \rightarrow naissance du **Modèle Standard**
- Les interactions EM et faible se séparent à basse énergie sous l'effet du **champ de Higgs** et prennent chacune leur structure et leur portée.

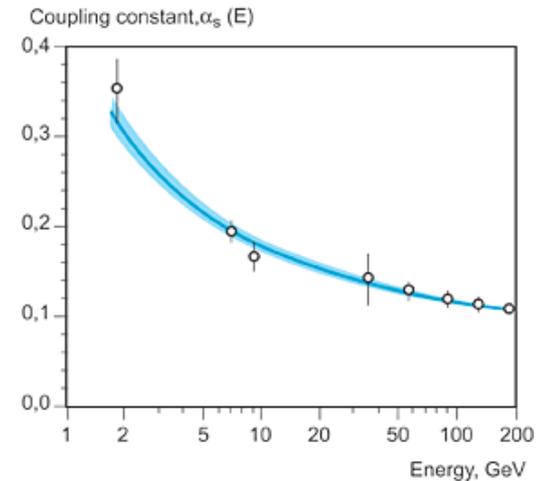
Interaction forte

- Exemples :



quarks et gluons = « partons »

- 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

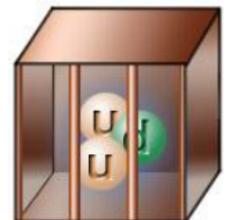


Prix Nobel 2004



D Gross, D Politzer, F Wilczek

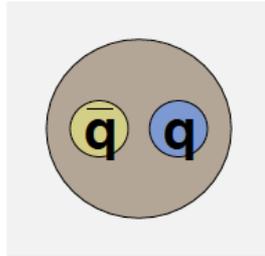
- Quarks jamais observés seuls/libres : toujours confinés dans des *hadrons*
 - charge électrique des quarks $2/3, -1/3$, mais charge des hadrons entières



Particules composites

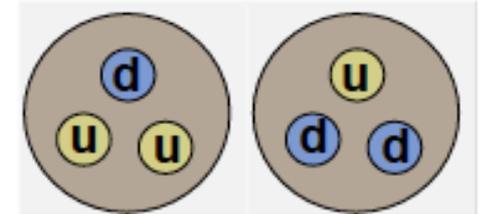
- Particule composite = état **lié** (par une interaction !) de particules élémentaires
- Avec les quarks on fait des *hadrons*, liés par interaction forte:
mésons : quark-antiquark, ou **baryons** : qqq ; exemples 1^{ère} famille :

★ $\pi^+ \equiv u\bar{d}$



★ 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

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

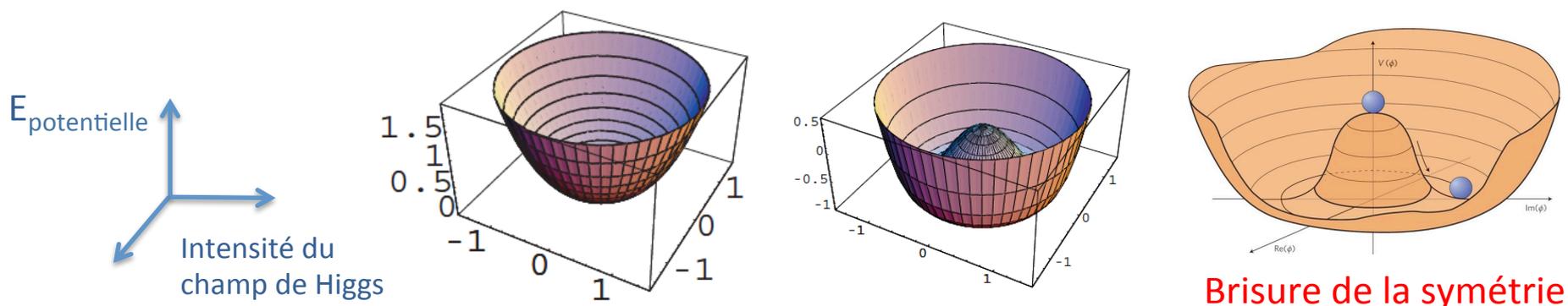
The infographic features a red background with a large white puzzle piece in the lower half. The puzzle piece is outlined in blue and contains the text 'Champ de Higgs'. Above the puzzle piece, the text 'BOSON DE HIGGS H' is written in large, bold, yellow letters. Below this, the mass, charge, and lifetime are listed in smaller yellow text. Two paragraphs of yellow text describe the boson's role in giving mass to matter and separating electromagnetic and weak interactions.

- La dernière particule élémentaire à avoir été découverte (en 2012)
- 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)
 - séparation des interactions électromagnétique et faible
 - donne leur masse aux bosons Z et W via le « **mécanisme de Higgs** »
 - donne aussi leur masse aux autres particules

Mécanisme de Higgs

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 de Higgs :



Sans cette astuce, toutes les particules sont de masse nulle dans la théorie !

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

Mécanisme de Higgs

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



Boson de Higgs



$E=mc^2$: les particules sont des points de l'espace-temps dans lesquels il y a une concentration d'énergie. Avec le champ de Higgs, le vide se condense autour d'une particule, ce qui lui donne une masse. Le vide peut s'auto-condenser : c'est le boson de Higgs.

OUTILS EXPÉRIMENTAUX

Méthodes expérimentales

1) Sources de particules naturelles : découverte, étude

- Radioactivité : énergies typiques keV – MeV
- Rayons cosmiques (*voir le cours de N. Palanque-Delabrouille*):
 - 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)

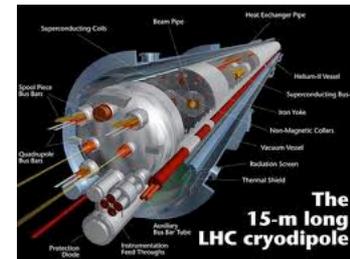


- Circulaires → accélérer + courber : dipôles (champ magnétique B)

Rayonnement synchrotron :

ΔE proportionnel à γ^4/ρ^2 ,

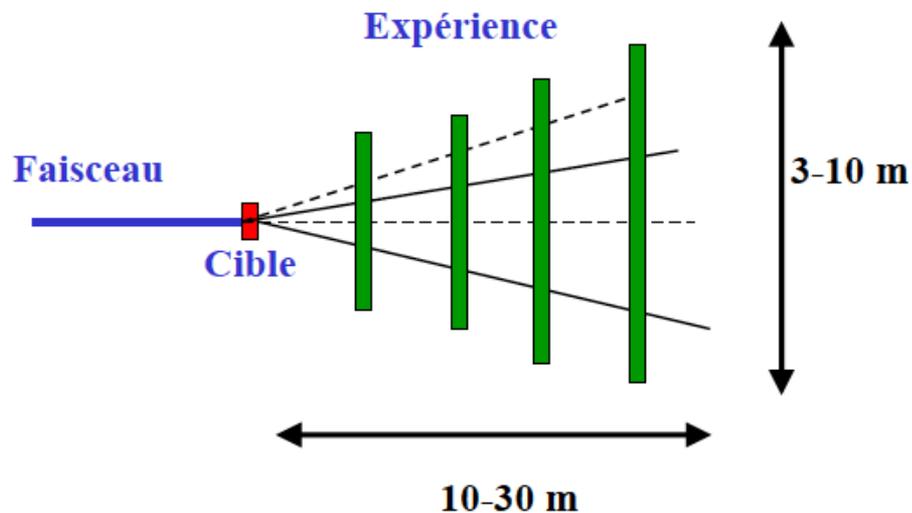
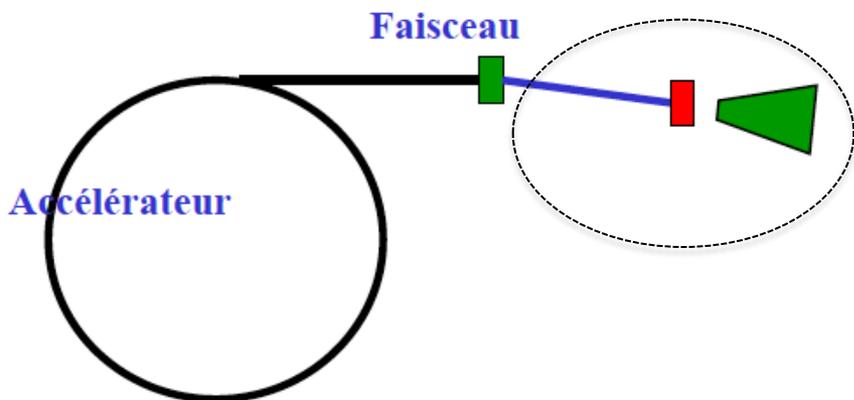
avec $\gamma = E/m$ et $\rho =$ rayon de courbure



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

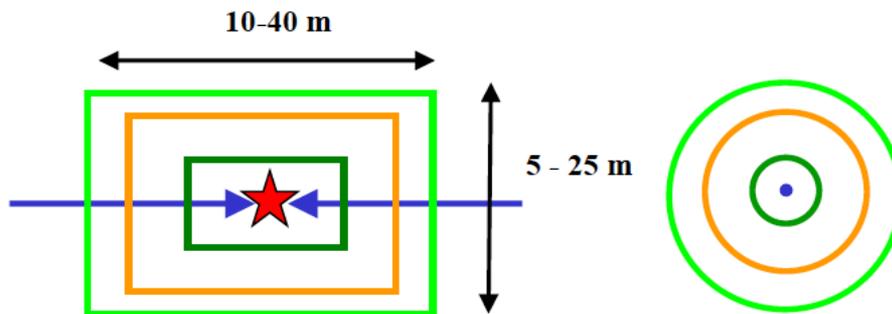
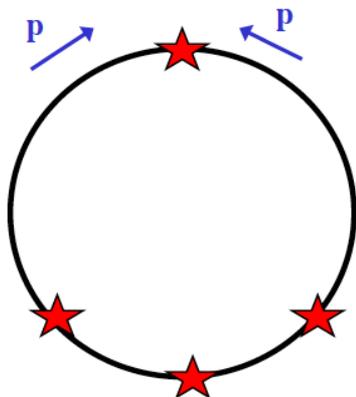
Expériences sur accélérateurs

- Expériences sur « cible fixe »



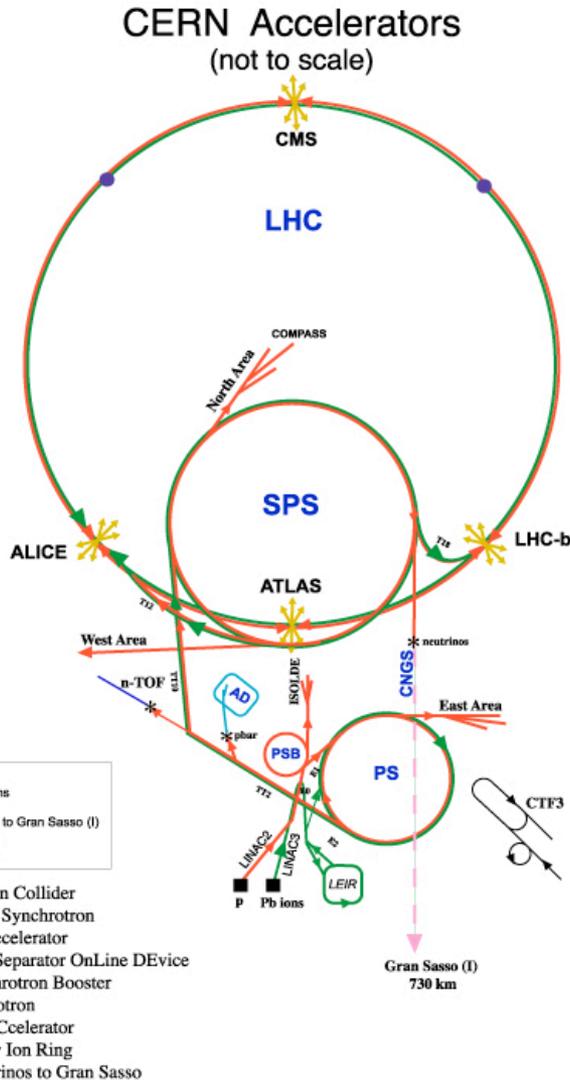
Exemple : faisceau de muon sur cible hydrogène, expérience COMPASS. Etude de la structure du proton

- Expériences sur collisionneur



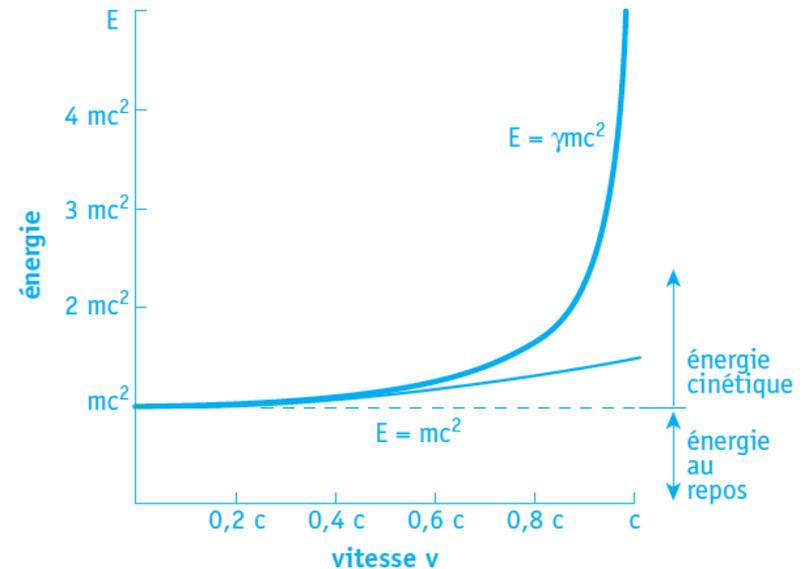
Exemples : expériences LEP : ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL, expériences LHC : ATLAS, CMS, ALICE et LHCb*

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 $0.938 \text{ GeV}/c^2$

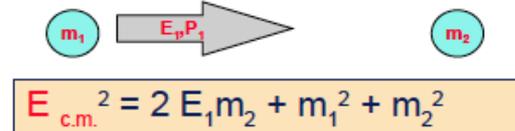
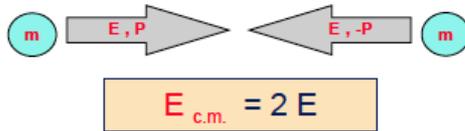


© CERN 2004

Collisionneurs : paramètres importants

- **Energie**

- $\Delta E = \Delta mc^2 \rightarrow$ 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) ou fb (10^{-15} 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

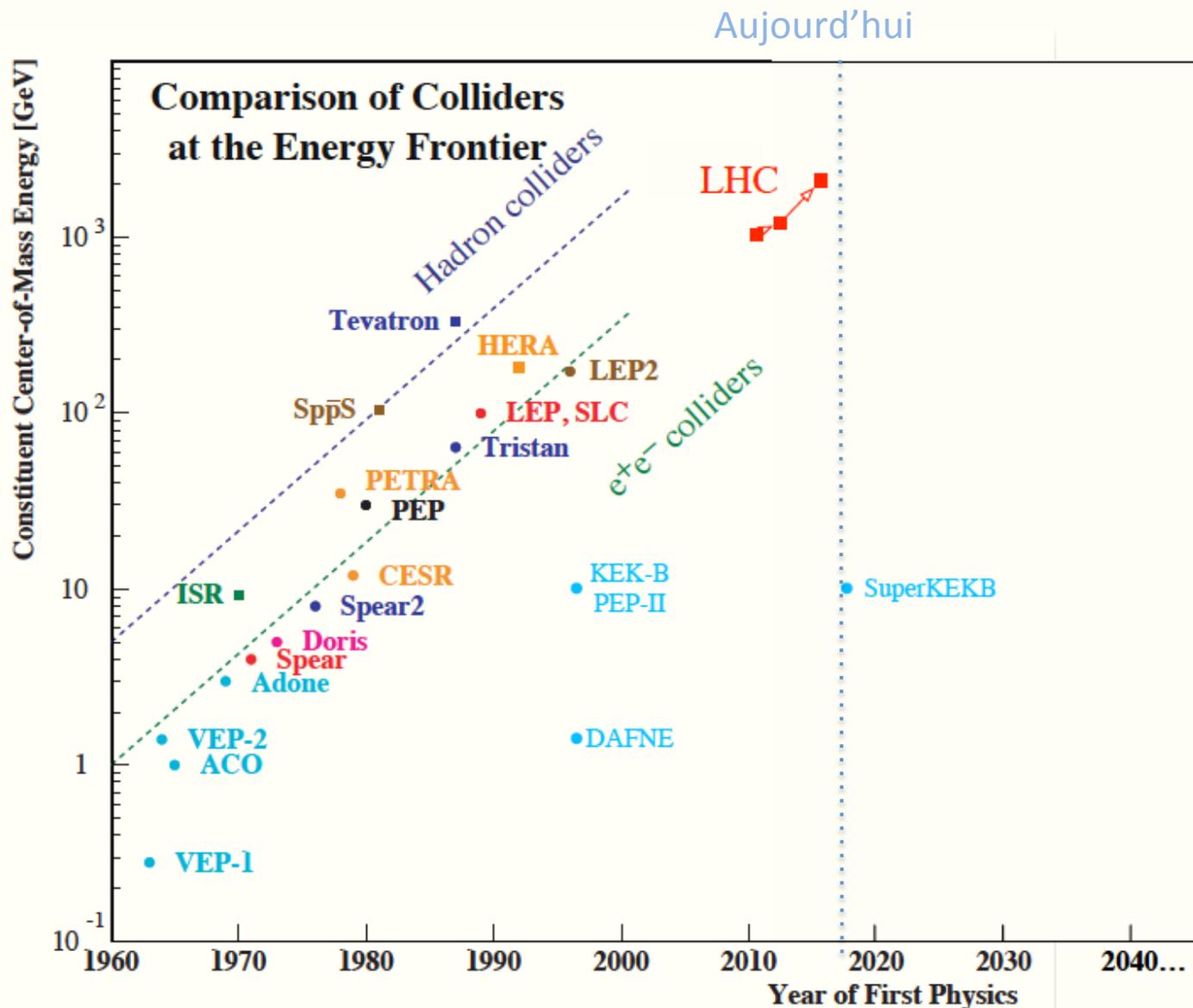
- Luminosité intégrée sur le temps en cm^{-2} ou en fb^{-1} ($1 \text{ fb}^{-1} = 10^{15} \text{ b}^{-1}$)

Attention : même notation (σ) pour 2 grandeurs différentes !

*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. $E_{c.m.}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$

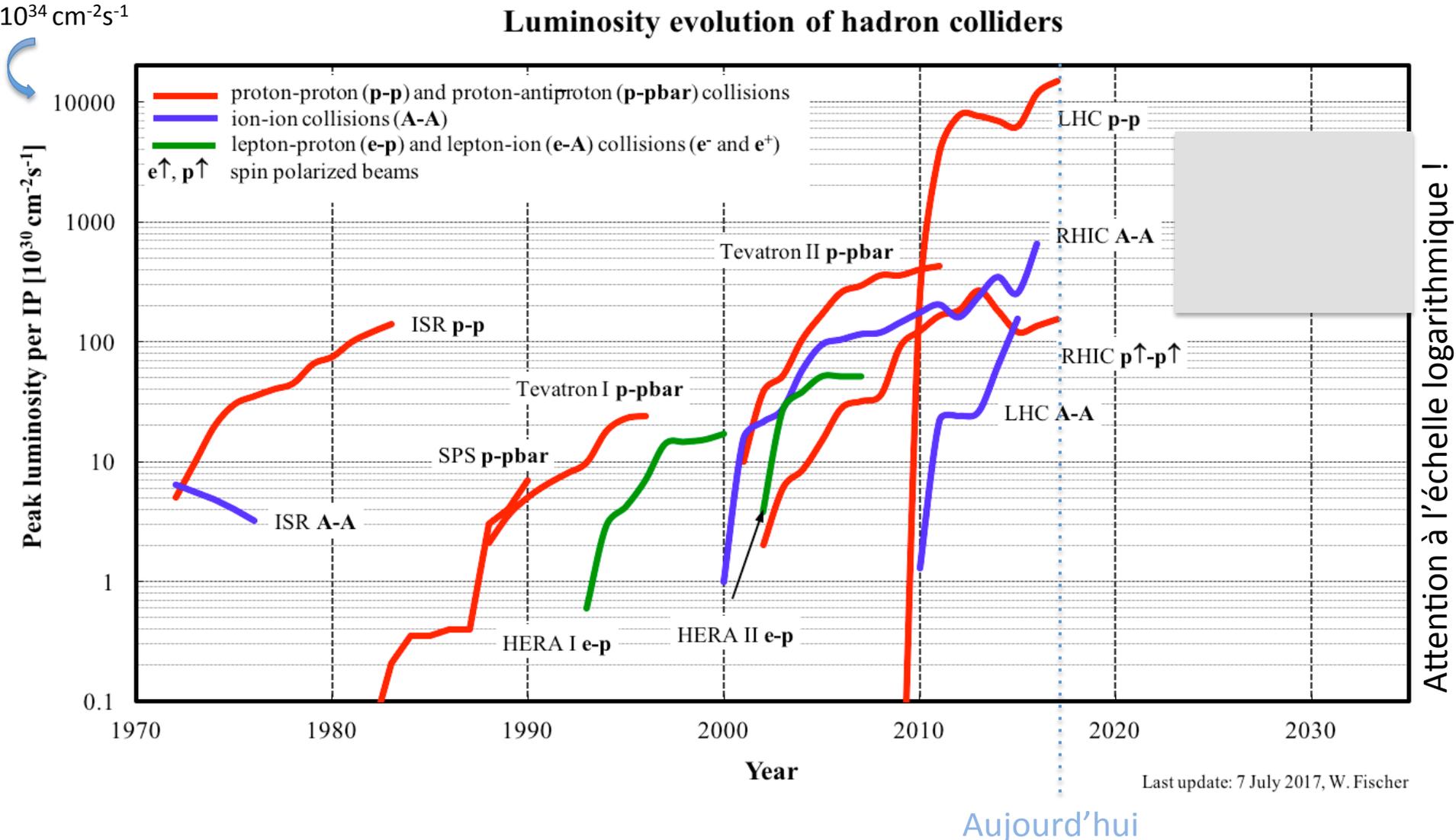
Collisionneurs: énergie



Attention à l'échelle logarithmique !

Collisionneurs (hadroniques) : luminosité

Luminosity evolution of hadron colliders

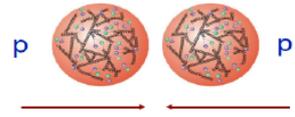


Collisionneurs : paramètres importants (suite)

• « Leptonique »

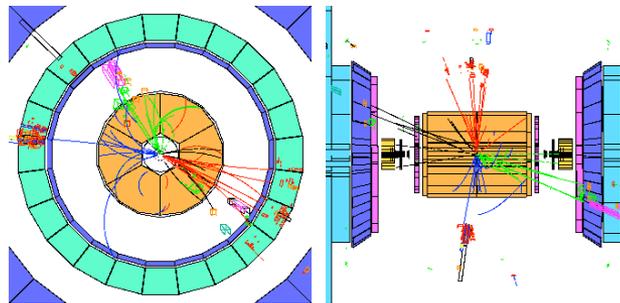
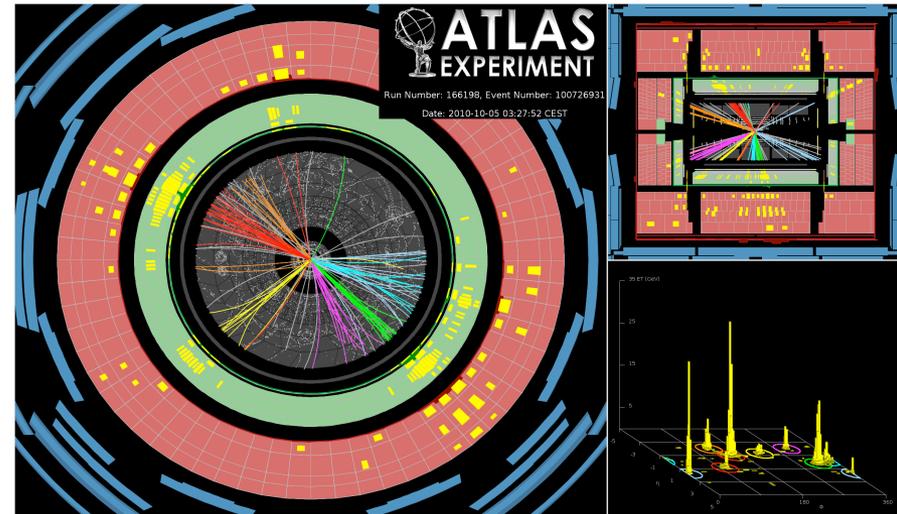
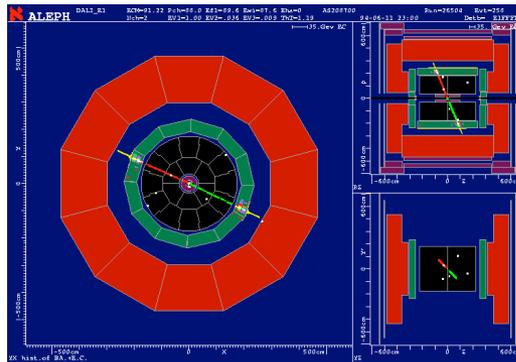


ou « hadronique »



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

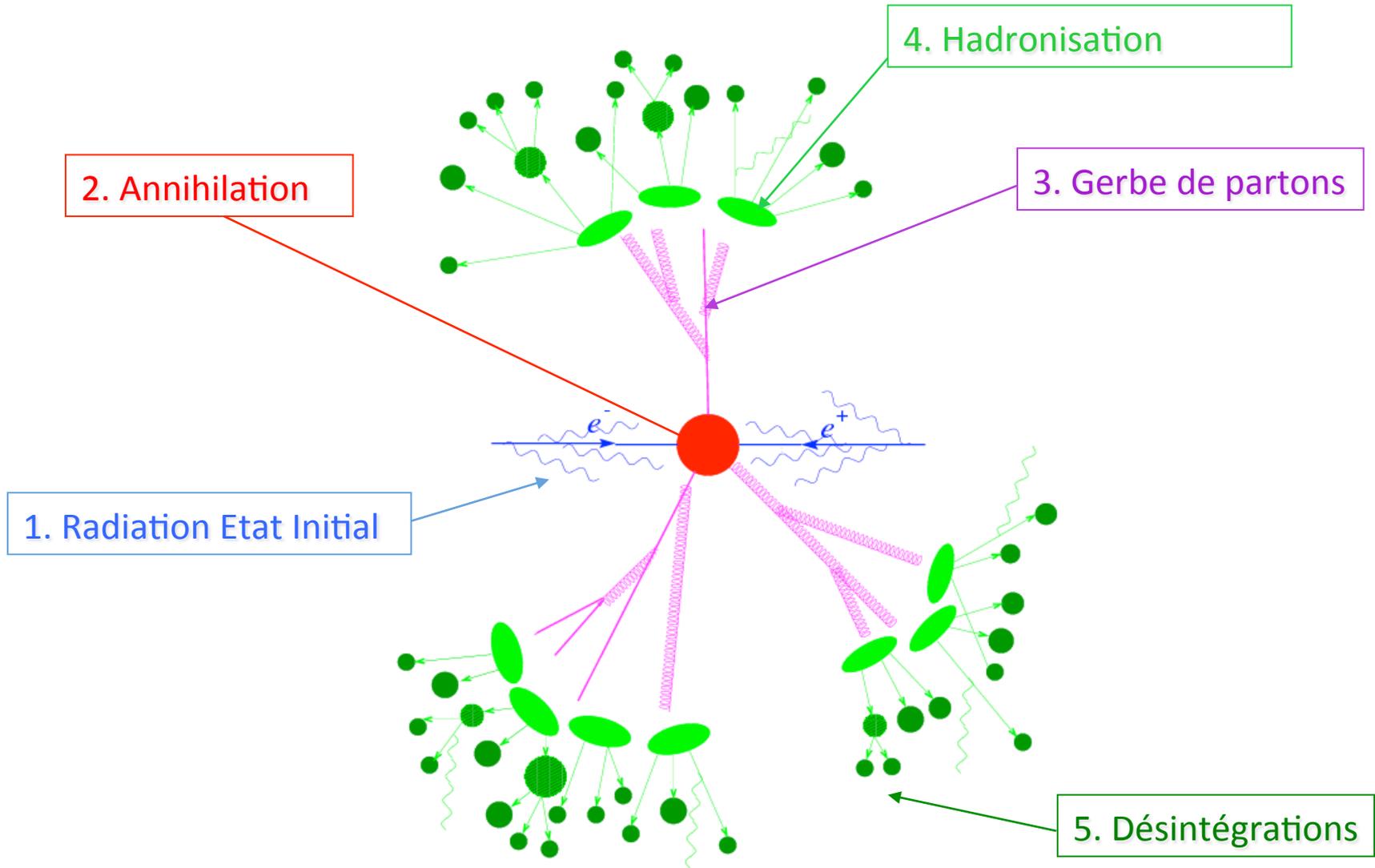
- Energie collision $E'_{CM} < E_{CM}$
- Energie totale processus inconnue
- ⇒ utilisation de l'énergie-impulsion *transverse*
- Événements compliqués



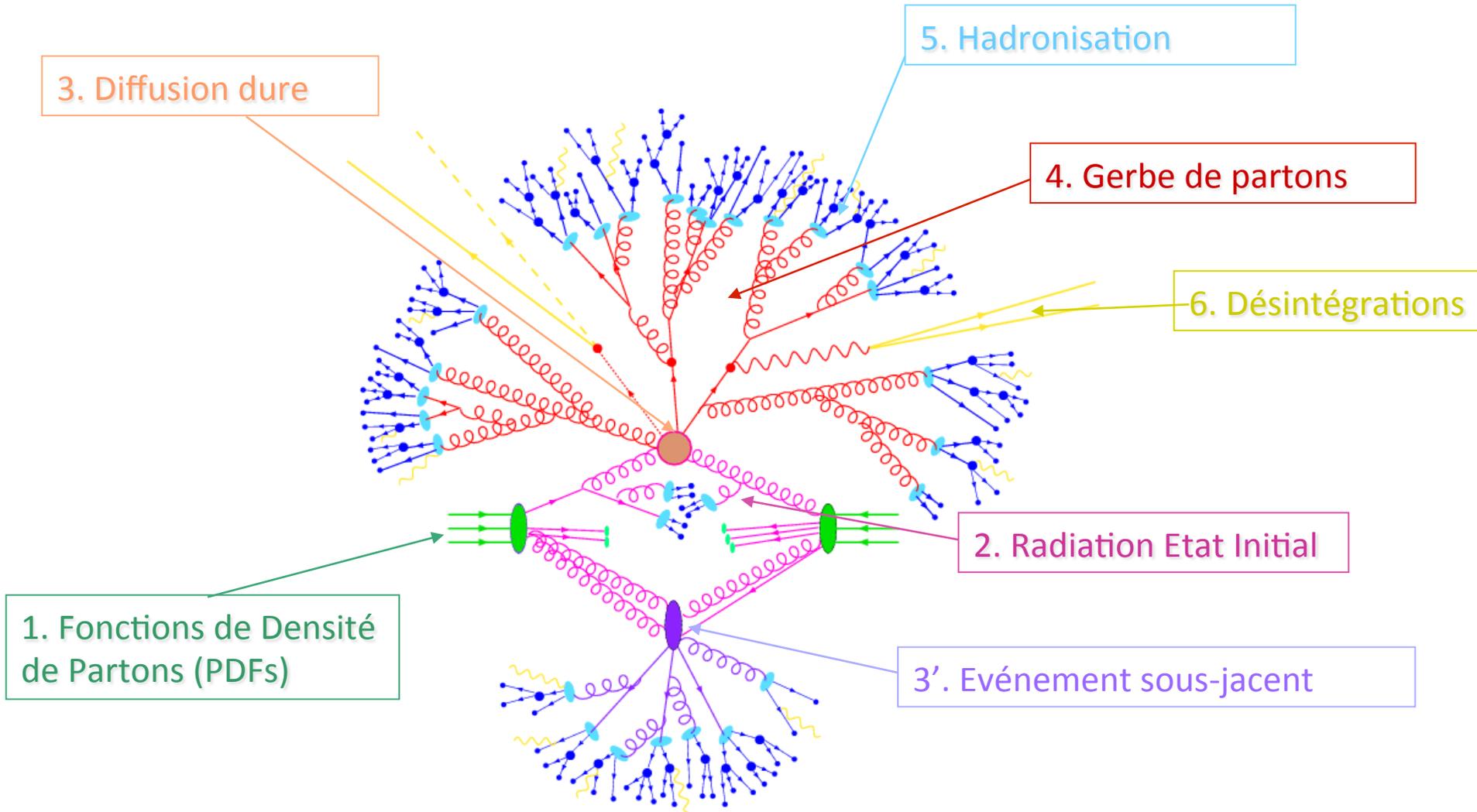
DELPHI

- Complication supplémentaire avec « l'empilement »

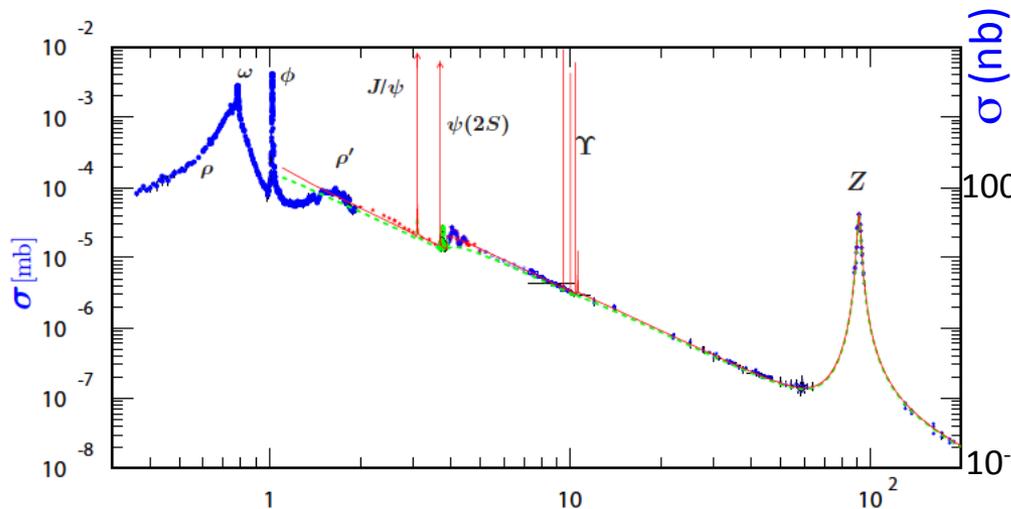
Collision leptonique



Collision hadronique



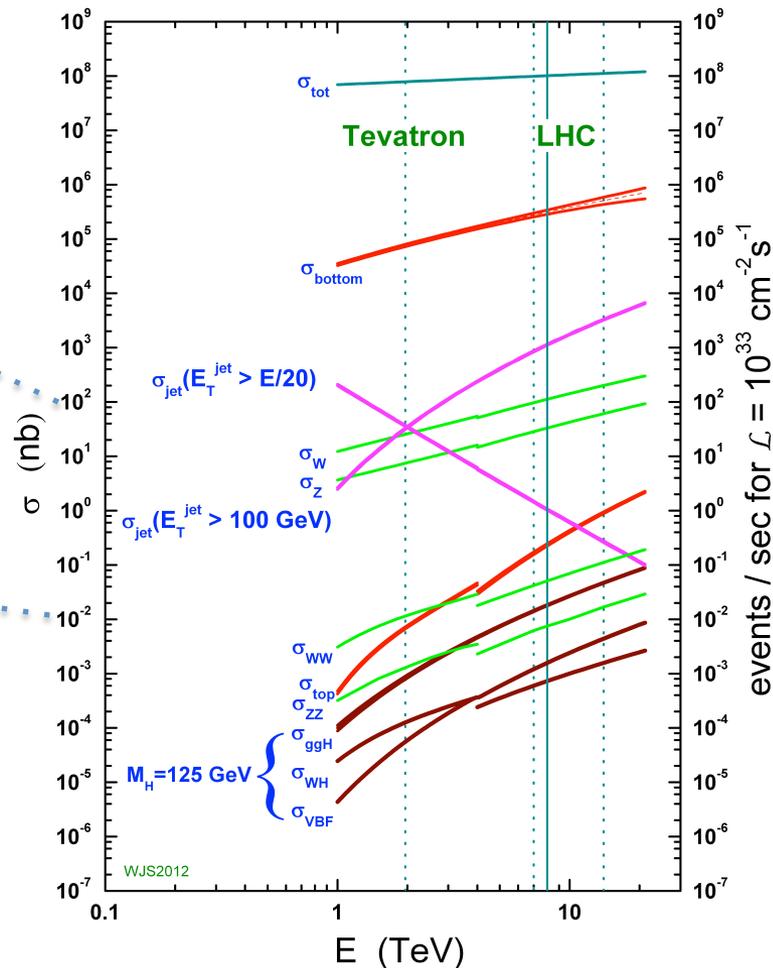
Sections efficaces e^+e^- et pp



$$E_{\text{CM}} = \sqrt{s} \text{ [GeV]}$$

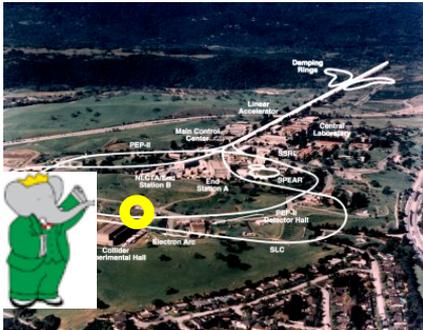
Il faut faire varier l'énergie des faisceaux pour mesurer cette courbe

proton - (anti)proton cross sections

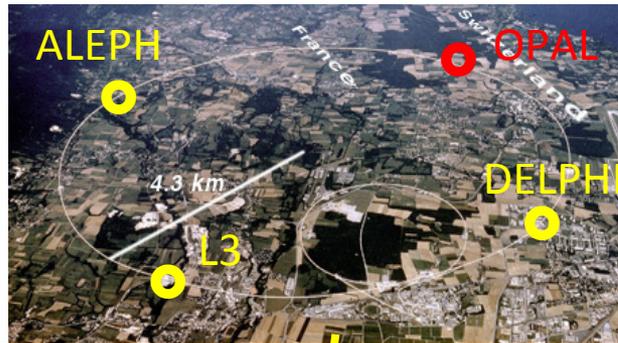


Collisionneurs électron-positron récents

PEP II @ SLAC



LEP @ CERN



KEKB @ KEK



$E_{cm} \sim 10$ GeV, énergie faisceaux : 9 GeV + 3.1 GeV
Luminosité intégrée > 400 fb⁻¹
Dernier run avril 2008

Energie centre de masse : 90-200 GeV
Luminosité intégrée 160 pb⁻¹
Dernier run novembre 2000

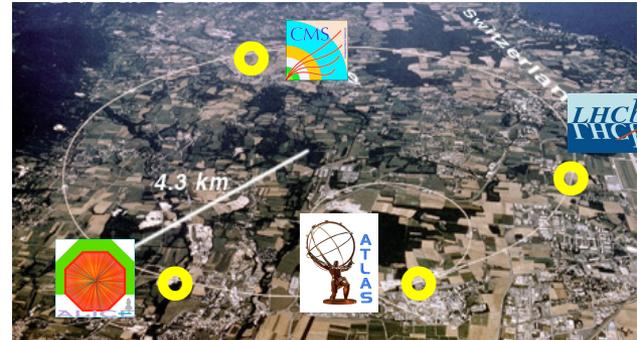
$E_{cm} \sim 10$ GeV, énergie faisceaux : 8 GeV + 3.5 GeV
Luminosité intégrée > 1000 fb⁻¹
Dernier run en 2010 ***

Collisionneurs hadroniques récents

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



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

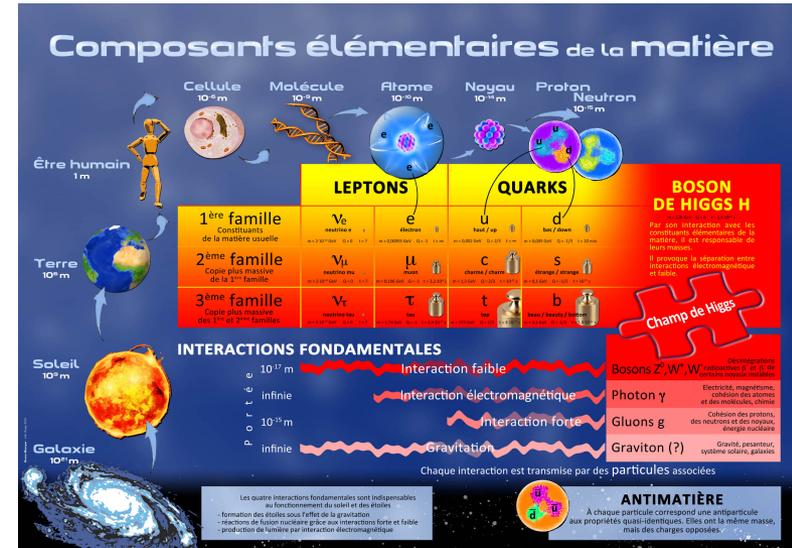


Energie centre de masse : 1.96 TeV
Luminosité intégrée $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ / exp.
Dernier run 2011

Energie centre de masse : 7, 8, 13 TeV (en pp)
Premier run 2009

Résumé de l'épisode précédent

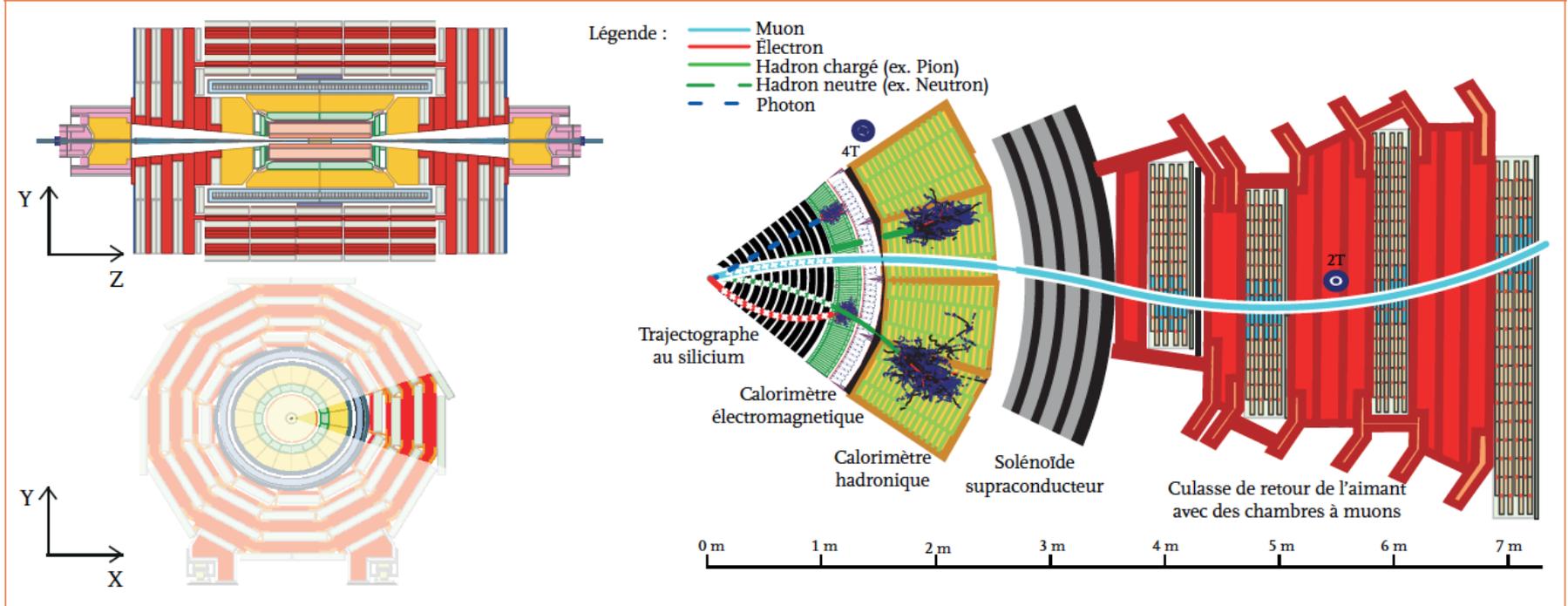
- **Modèle Standard**
 - Contenu en particules
 - Interactions fondamentales
 - Mécanisme de Higgs



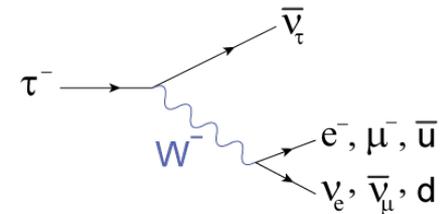
- **Outils** pour l'étudier : accélérateurs, principe des détecteurs, grille de calcul
- L'héritage du LEP et du Tevatron
- Le LHC et ses détecteurs

Détection

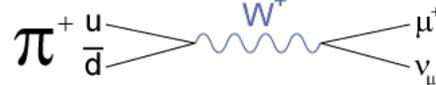
Voir le cours
de P. Puzo



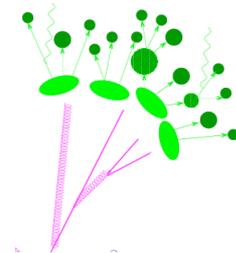
- Temps de vie du muon $\tau_\mu \sim 2 \mu\text{s}$, longueur de vol moyenne $c\tau \sim 660 \text{ m}$
- Temps de vie du tau $\tau_\tau \sim 300 \text{ fs}$, $c\tau \sim 90 \mu\text{m}$
détection des $\tau =$ via leur produits de désintégration



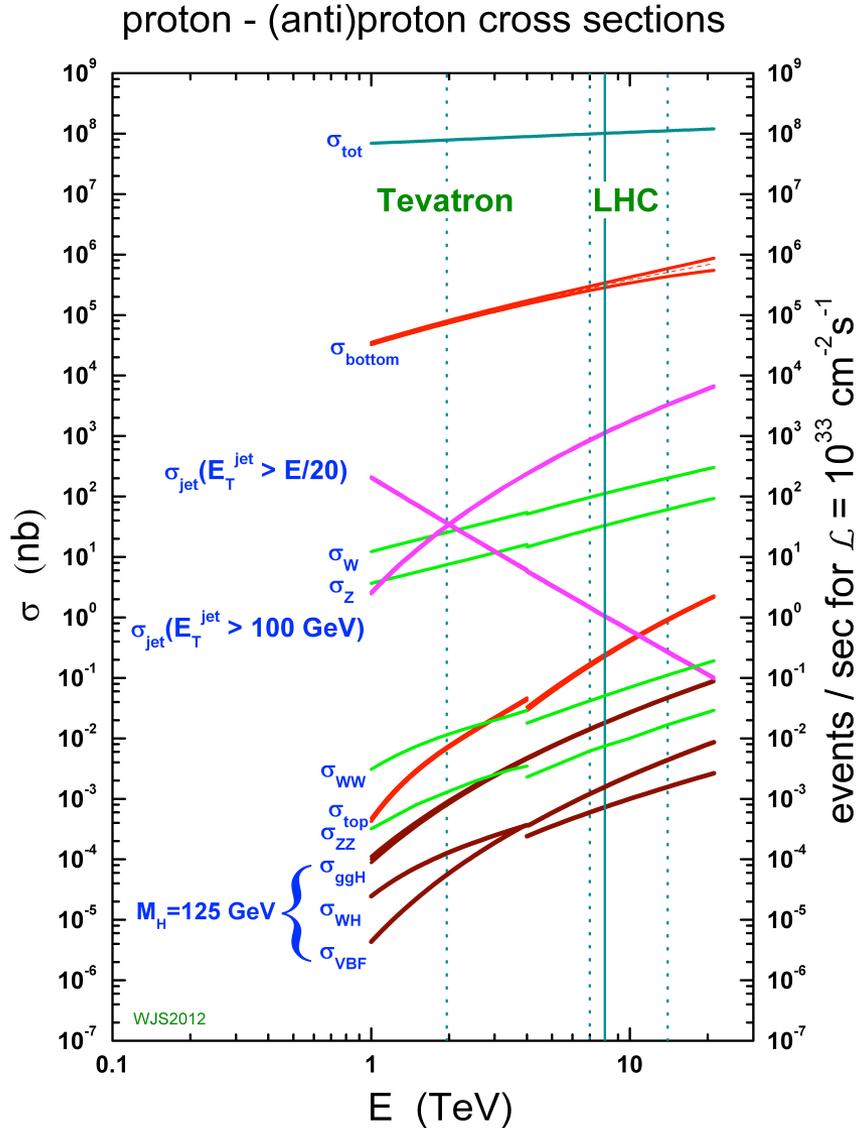
- Temps de vie des hadrons : π^\pm : 26 ns ($\sim 8 \text{ m}$), K^\pm : 12 ns ($\sim 4 \text{ m}$)



- Quarks et gluons : « jets »
- Neutrinos : impulsion (p) ou impulsion transverse (p_T) manquante



Déclenchement expériences sur collisionneur hadronique



détecteur

40 MHz

Niveau 1
(électronique)

75 kHz

Niveau 2
(informatique)

3 kHz

Niveau 3
(informatique)

400 Hz

1 collision
toutes les
25 ns

(chiffres ATLAS
approximatifs)



La grille de calcul

Grâce au déclenchement : $\sim 300 - 1000$ (run 1 – run 2) collisions /s enregistrées par expérience

- 1 à 10 Mo numérisés pour chaque collision
- > 300 Mo/s soit > 25 To/jour ($1T = 10^{12}$)
- $> 10^{10}$ collisions enregistrées par an, soit 50 Po/an ($1P = 10^{15}$)

Le logiciel des détecteurs est à la hauteur de leur complexité

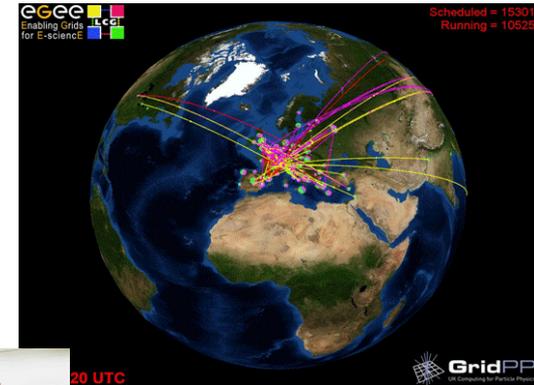
Exemple pour ATLAS ≈ 5 millions de lignes de code, 30 millions d'objets

Les expériences LHC utilisent une grille de calcul

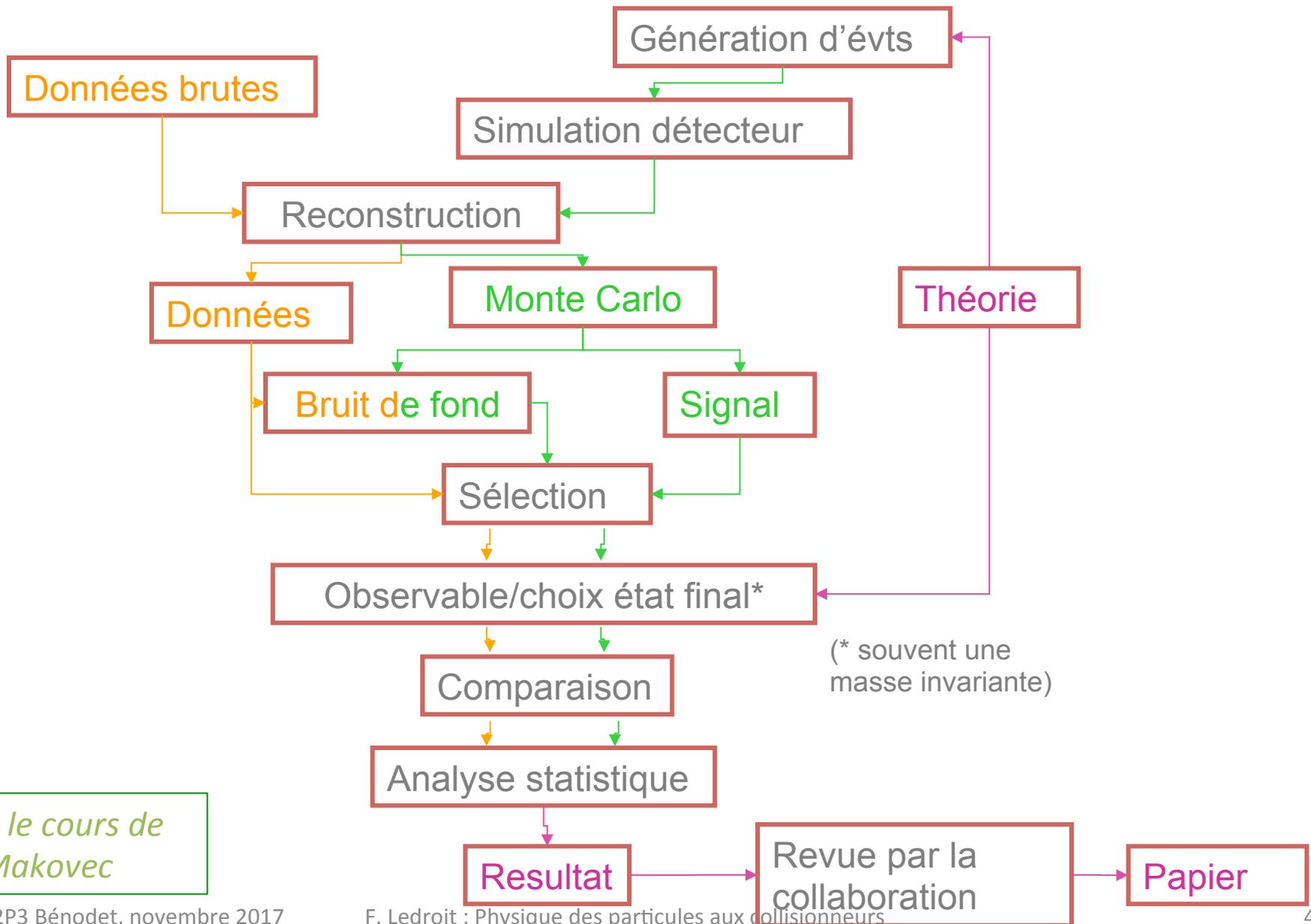
8 000 physiciens répartis dans le monde :
accès aux données et analyse

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 N. Makovec

Courtesy Sabine Crépe-Renaudin

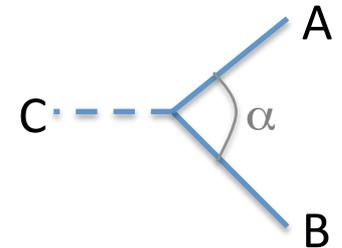
Notion de masse invariante

attention ! toutes les flèches sur les 3-vecteurs sont omises (trop pénible avec PowerPoint) et remplacées par du « gras »

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

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

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



mais aussi

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

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

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

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

Remarque si on néglige les masses de A et B : $m_C^2 = 2 |\mathbf{p}_A| |\mathbf{p}_B| (1 - \cos \alpha)$.

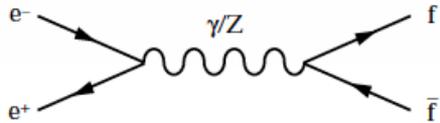
ÉTAT DES LIEUX AVANT LE LHC : L'HÉRITAGE DU LEP ET DU TEVATRON

Physique au LEP

Collaborations de
300-500 physiciens

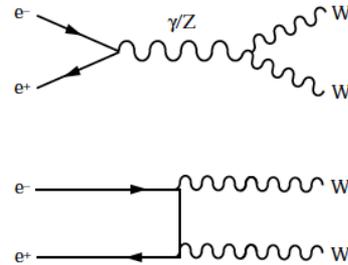
- LEP 1 : collisions e^+e^- à $E_{cm} \sim m(Z) = 91 \text{ GeV} \rightarrow$ « usine à Z » :
17 10^6 collisions enregistrées de 1989 à 1995
- LEP 2 : collisions e^+e^- à $E_{cm} = 135, 160\text{-}209 \text{ GeV} \rightarrow$ production de paires de W

LEP 1 :



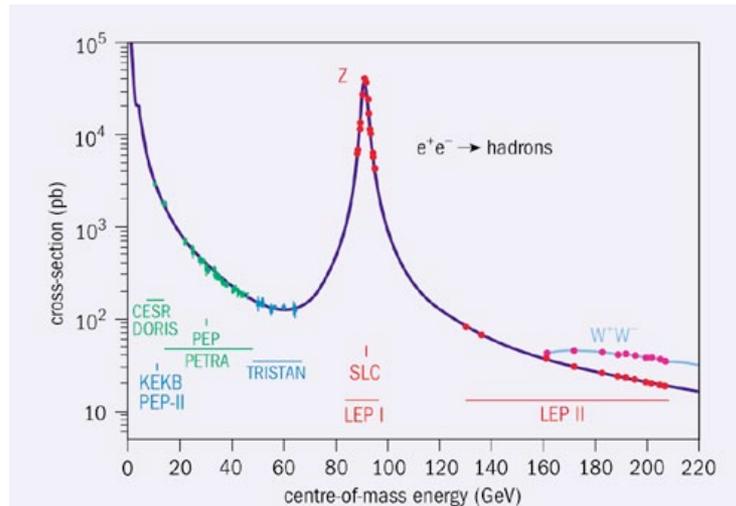
$f = e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, u, d, s, c, b$

LEP 2 :



- Faible durée de vie du Z (Δt) \Rightarrow grande incertitude sur E de production (ΔE)
puisque $\Delta E \Delta t \sim \hbar \rightarrow$ largeur naturelle d'une particule :

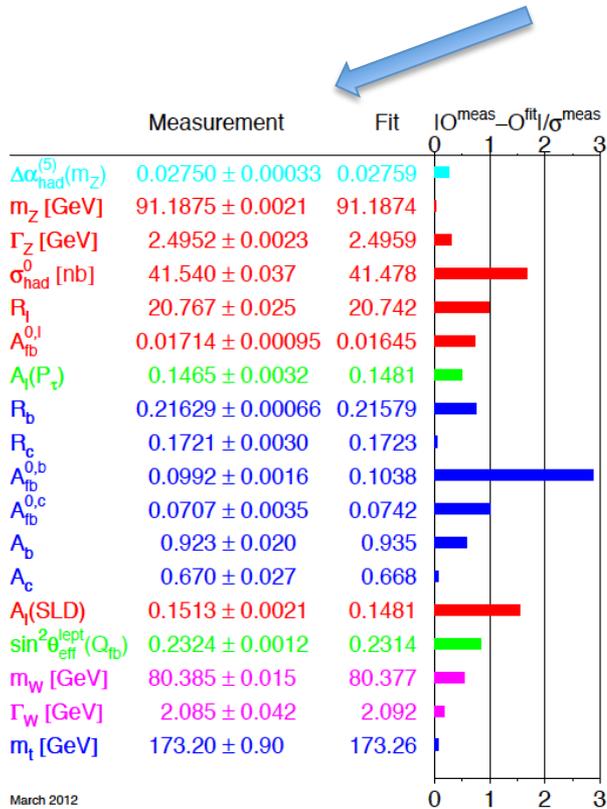
- Courbe de « résonance » :



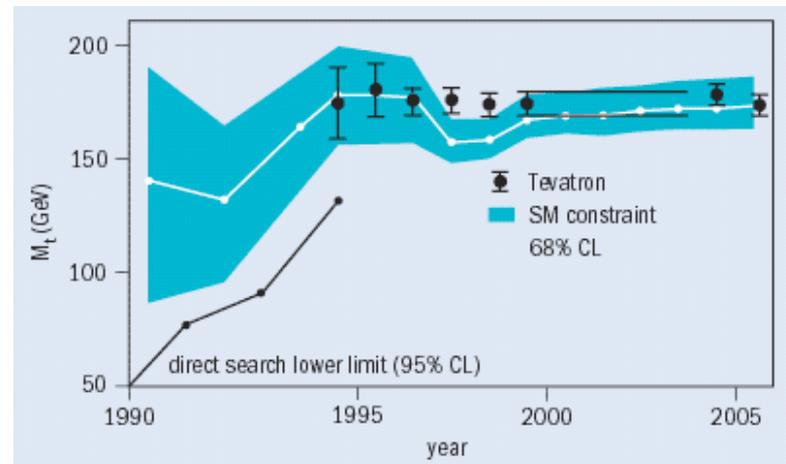
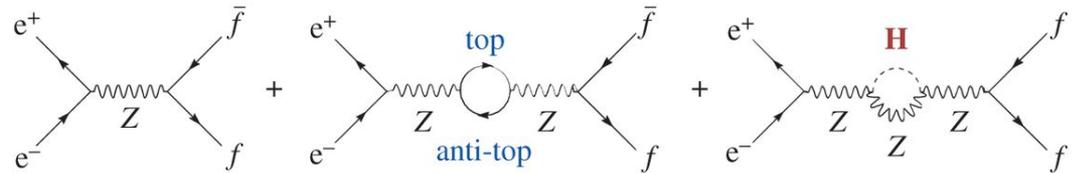
Echelle logarithmique

Physique « de précision »

- Dans la théorie électrofaible, seulement 4 paramètres libres (à l'ordre le plus bas) : 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 :



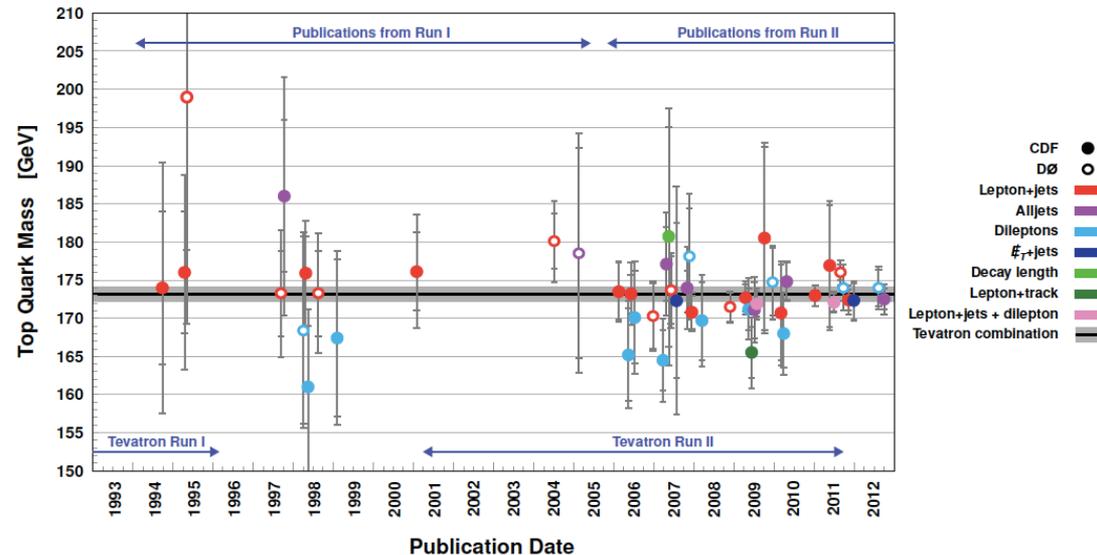
- ÉGALEMENT : mesure directe de la masse du boson W (LEP 2)

Physique au TeVatron

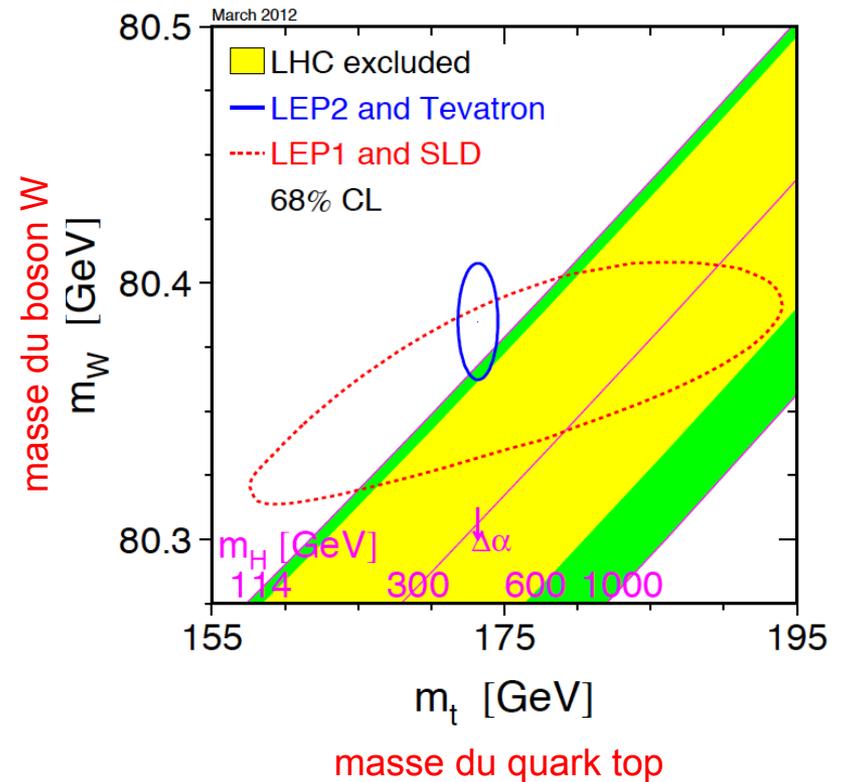
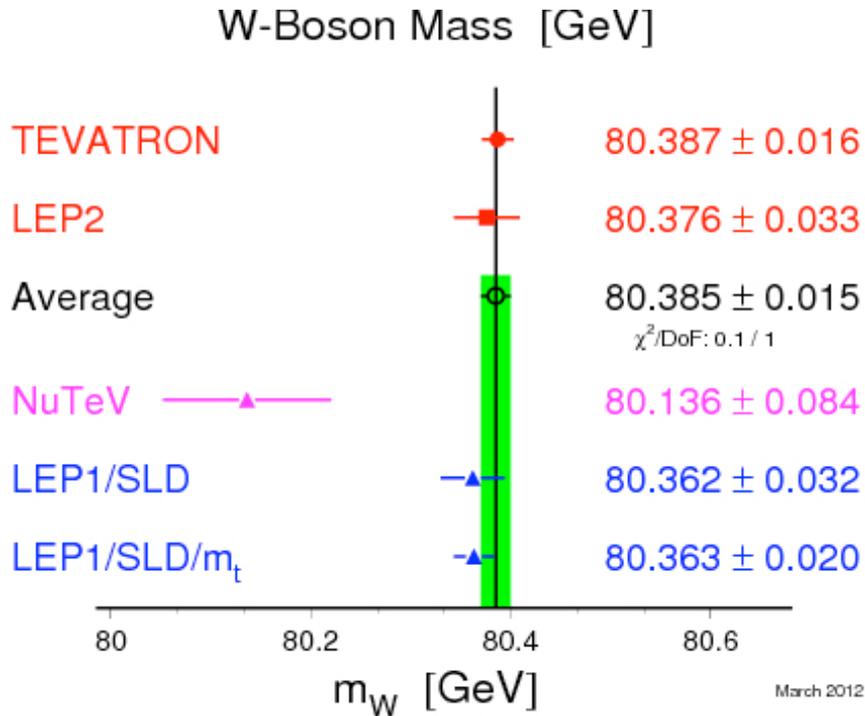
Collaborations de
550-600 physiciens

- Run I (1992-1996) : $E_{\text{CM}}=1.8$ TeV ; run II (2001-2011) : $E_{\text{CM}}=1.96$ TeV
- Programme :
 - Etude des hadrons B
 - Recherche du quark top \rightarrow **découvert en 1994 !!**
 - Recherche du boson de Higgs
 - Recherche de particules non standard

Combinaison D0+CDF :
 $M(\text{top}) = 173.18 \pm 0.94$ GeV



Héritage du LEP et du Tevatron



LE LHC ET SES DÉTECTEURS

Le LHC vu du ciel



Le LHC vu du ciel

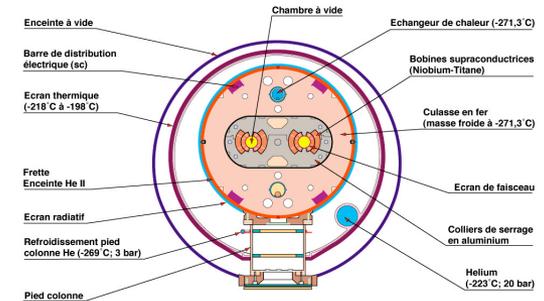


Voir le cours de B. Espagnon



Paramètres nominaux du LHC

Dipole LHC: Coupe transversale

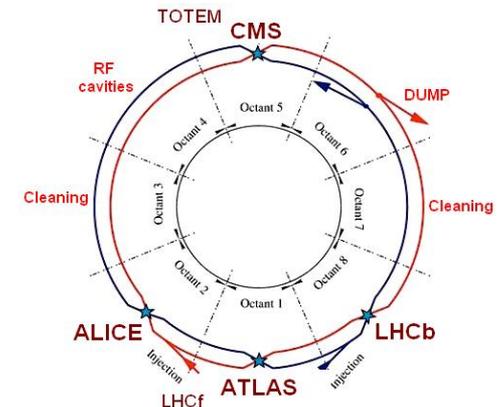


CERN AC - HEIST



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
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*

* avec l'empilement !



LHC : chronologie

- 1984 Premier workshop à Lausanne
- 1992-1993 Lettre d'intention des expériences ATLAS, CMS puis ALICE
- 1994 Approbation du LHC
- 1995 Approbation ATLAS et CMS + lettre intention LHCb
- 1998 Début génie civil (cavernes !)
- 1999 Approbation ALICE et LHCb
- 2005-2008 Installation, connexions, tests, refroidissement

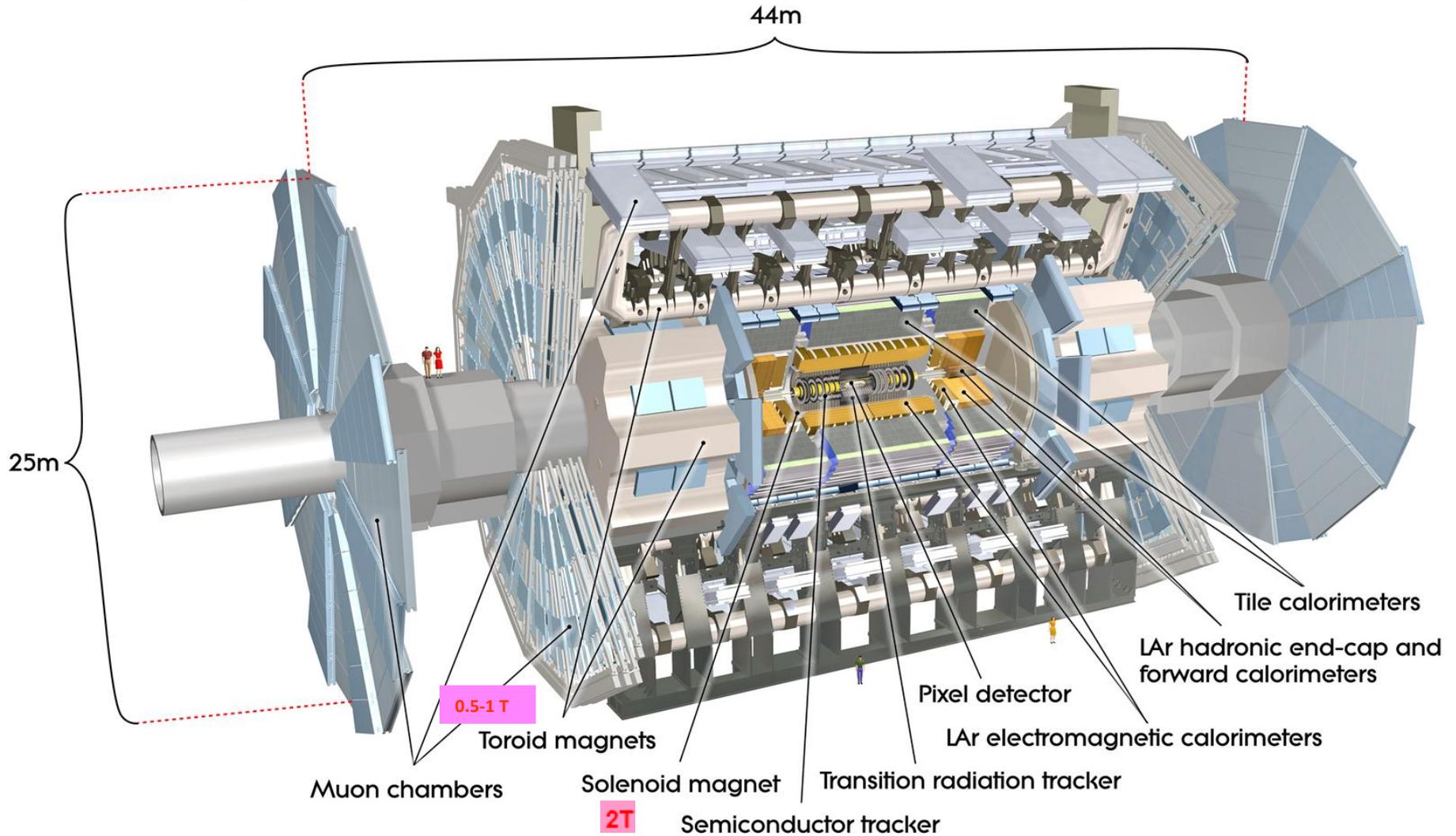
- 2008 Accident 10 jours après la mise en service (septembre)
- 2009 Réparations, améliorations. Décision limiter énergie faisceaux
- 2010 Premières collisions à **7 TeV**. Jusqu'à 300 paquets/faisceau
- 2011 1400 paquets/faisceau, 5-15 interactions par croisement
- 2012 Collisions à **8 TeV**. 1400 paquets/faisceau, 20-30 interactions par croisement
- 2013-2014 Premier arrêt long pour construire le LHC nominal
- 2015-2017 Redémarrage à **13 TeV**. 1916-2556 paquets/faisceau, jusqu'à 70 interactions/croisement !



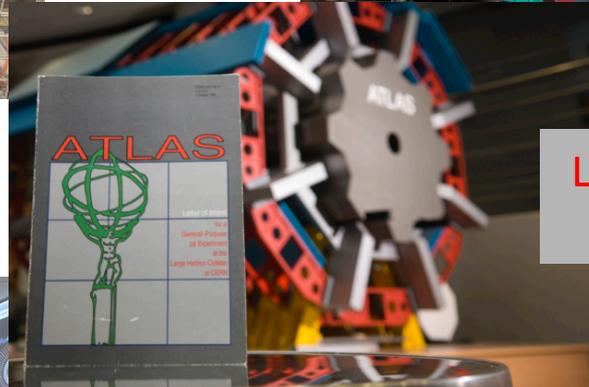
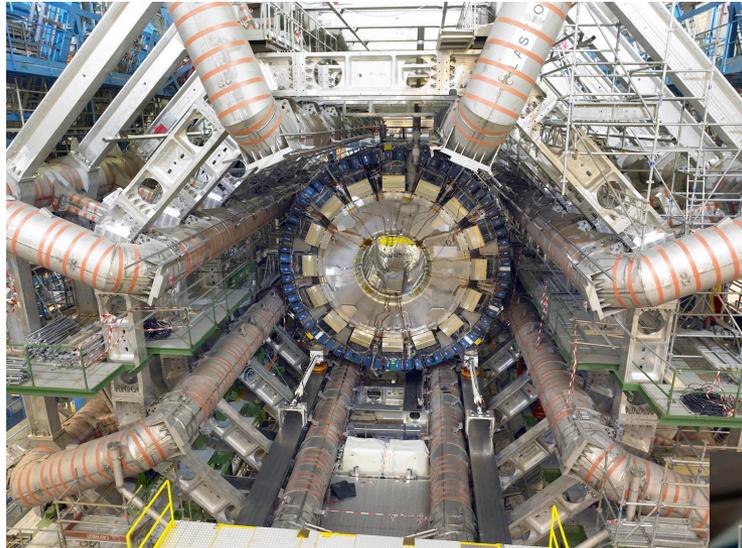
ATLAS

Collaboration de
~ 3000 physiciens

Expérience généraliste



ATLAS



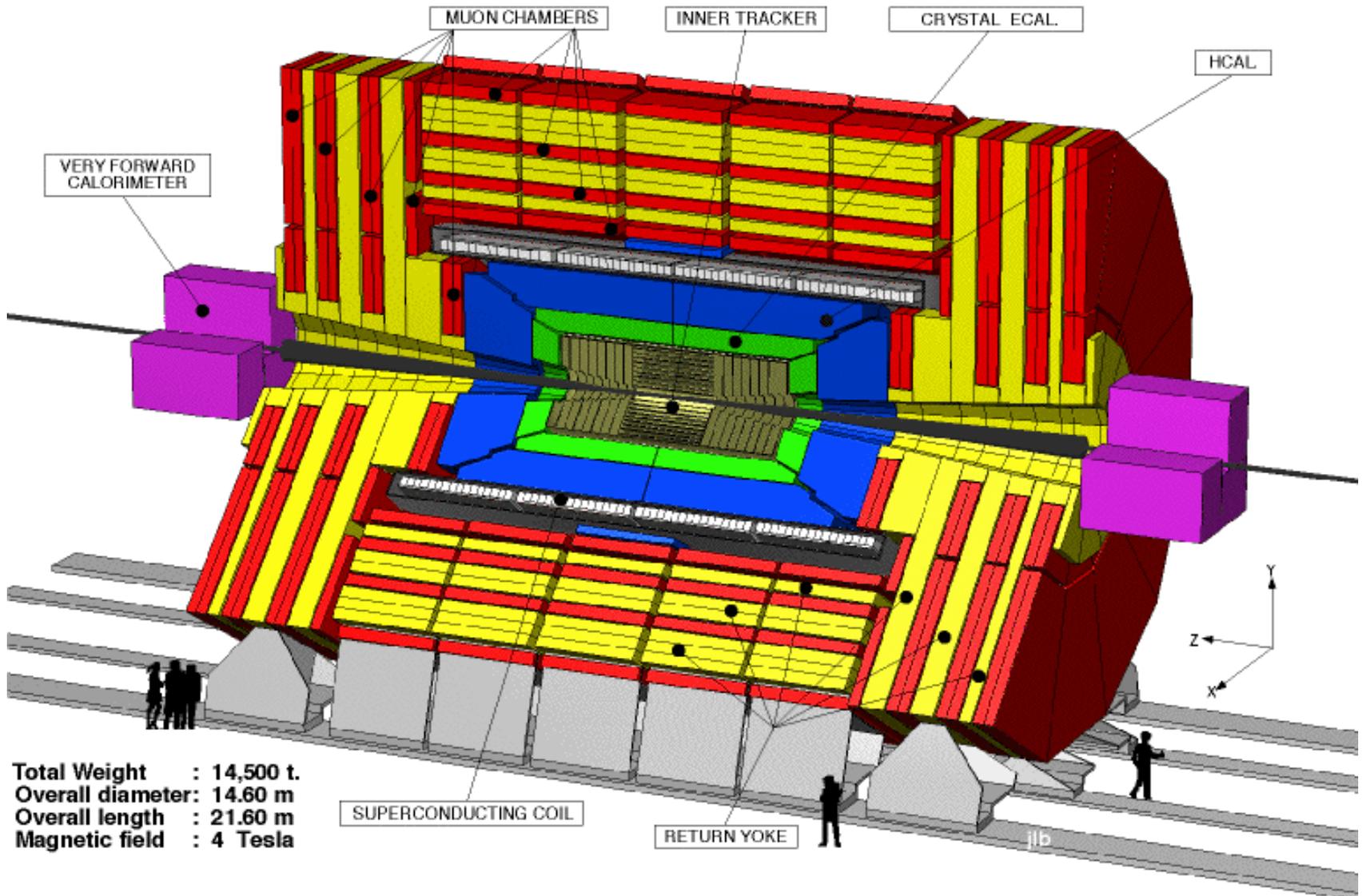
LOI (Lettre d'intention)
1 octobre 1992



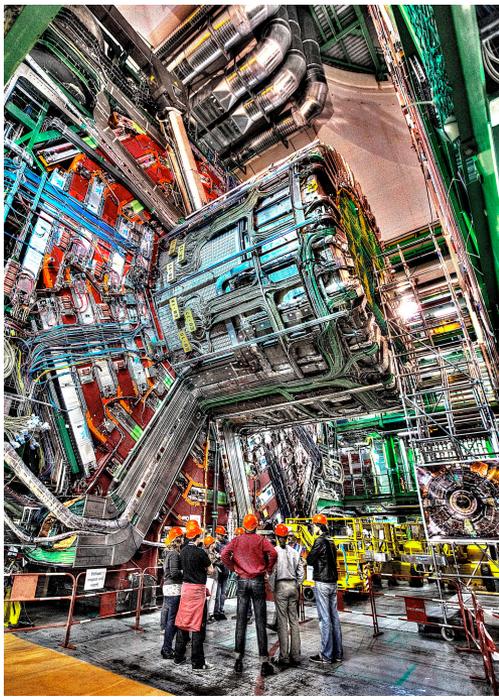
CMS

Expérience généraliste

Collaboration de
~ 3000 physiciens



CMS



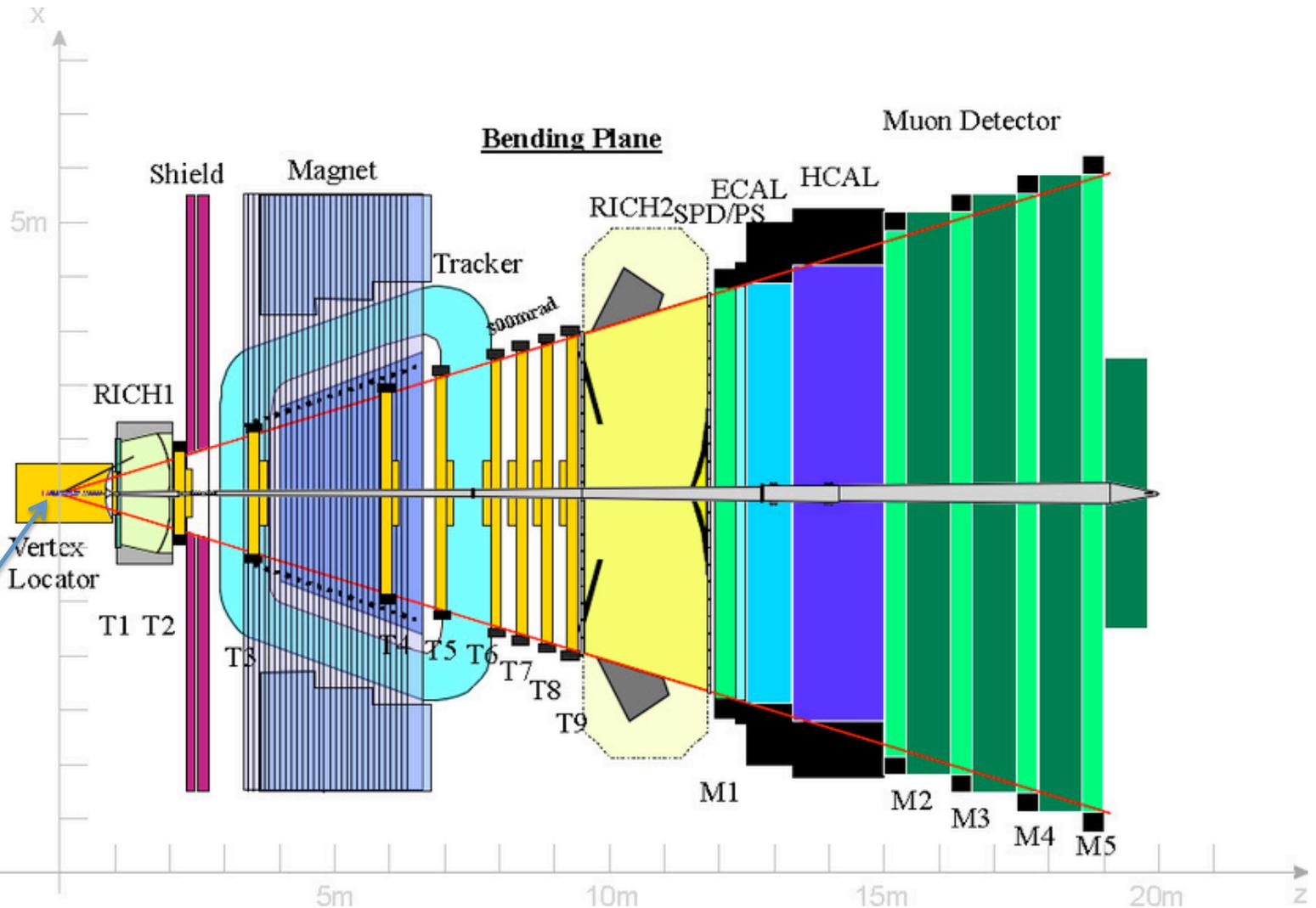
LOI (Lettre d'intention)
1 octobre 1992



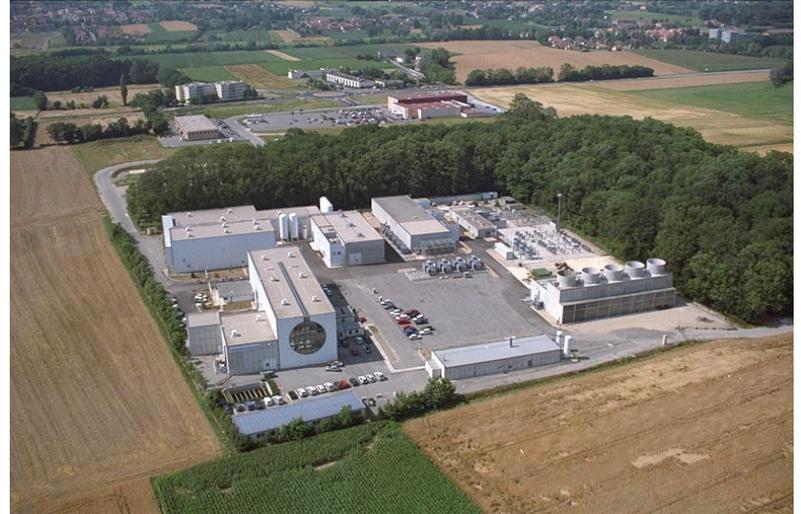
LHCb

Collaboration de
~ 800 physiciens

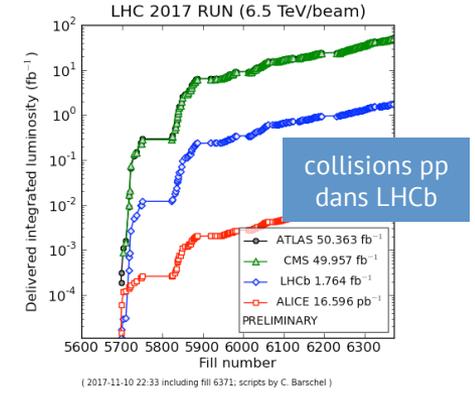
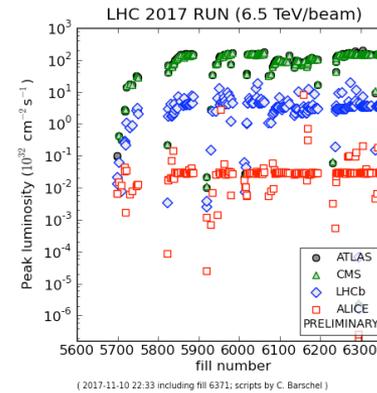
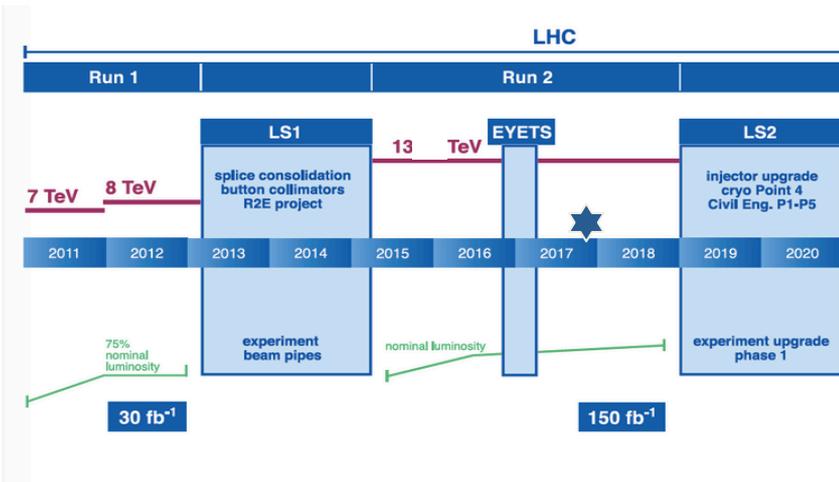
Expérience spécialisée : physique du quark b



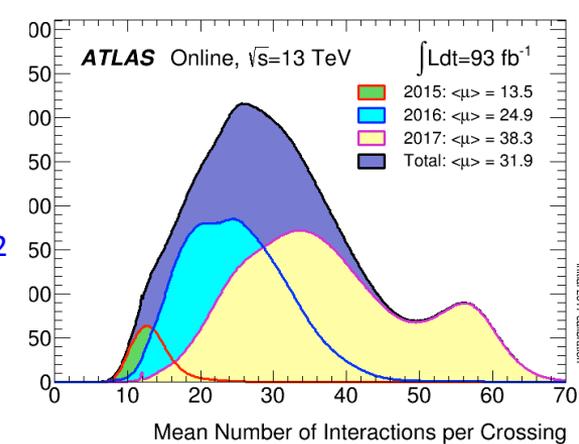
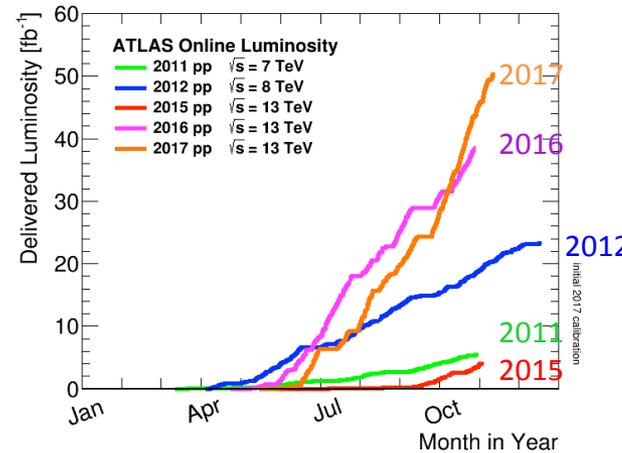
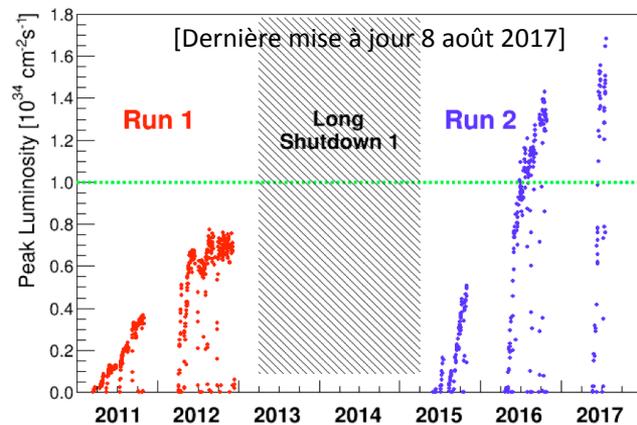
LHCb



LHC : performances

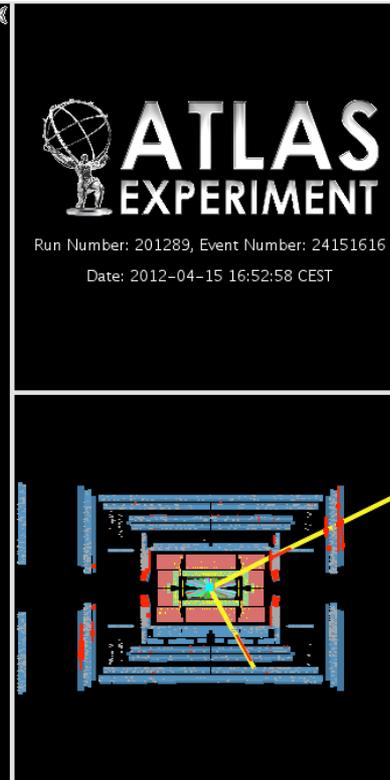
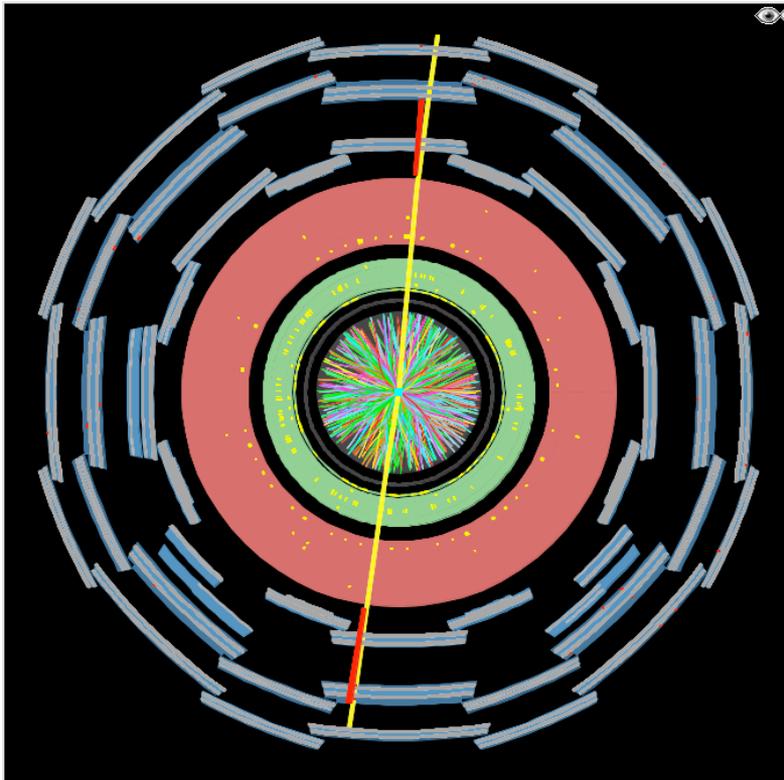


collisions pp dans ATLAS et CMS



La prise de données pp de 2017 s'est terminée le 10 novembre

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

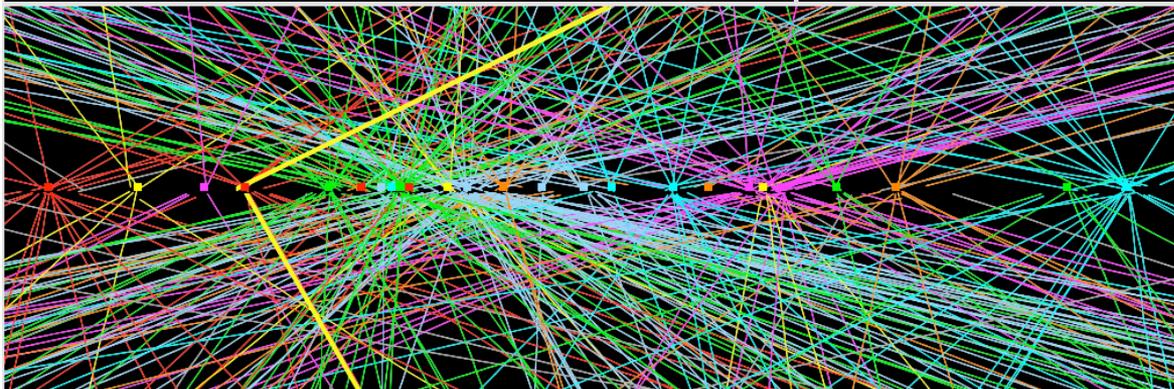


2012

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

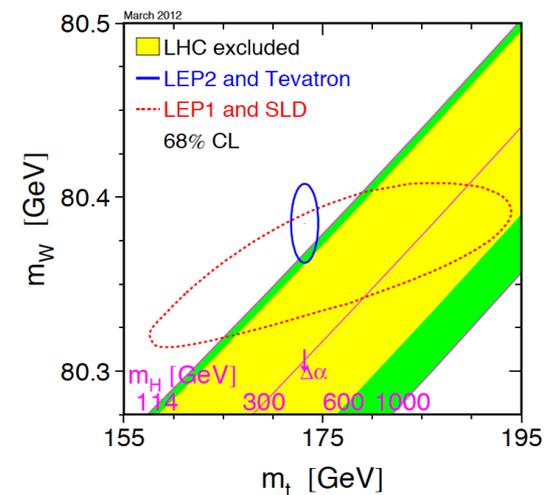
Section efficace
 $\sigma = 100 \text{ mb} = 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$
 $L = 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 $\rightarrow N_{\text{interactions}}/\text{s} = 10^8$

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



Résumé et suite du programme

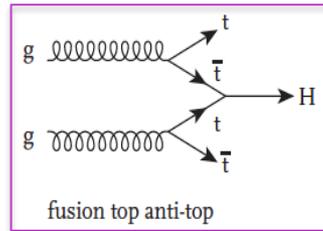
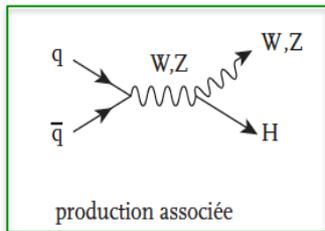
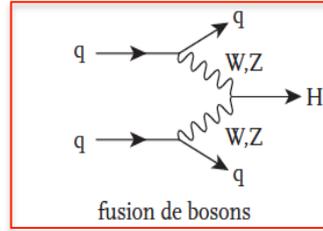
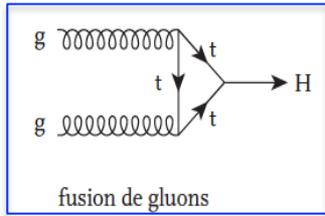
- Le Modèle Standard
- Outils pour l'étudier : accélérateurs, détecteurs, grille de calcul
- L'héritage du LEP et du Tevatron
- Le LHC et ses détecteurs
- **La physique au LHC**
 - le boson de Higgs
 - recherche de nouvelle physique



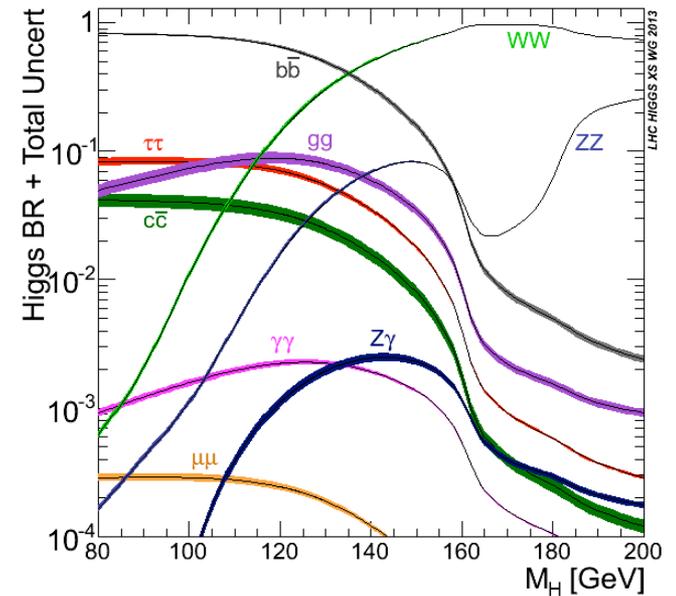
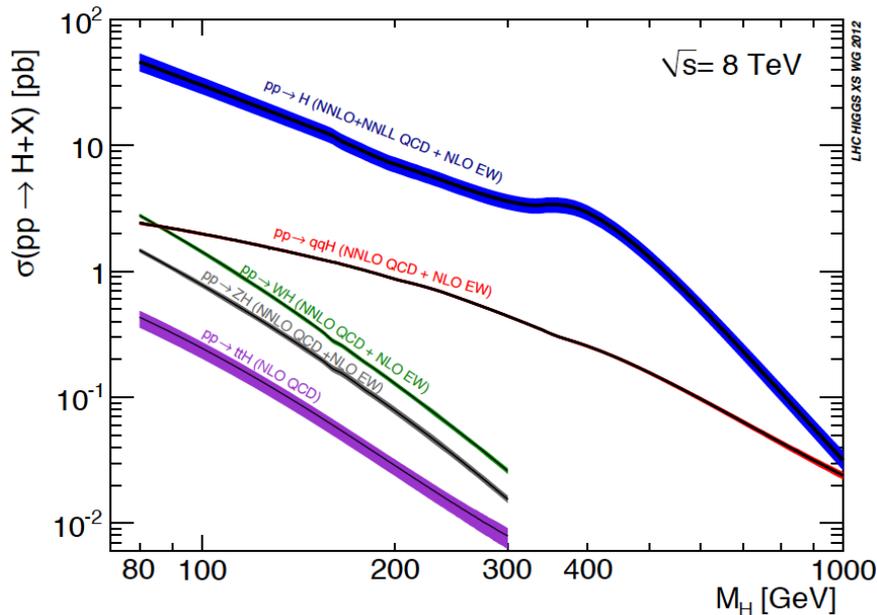
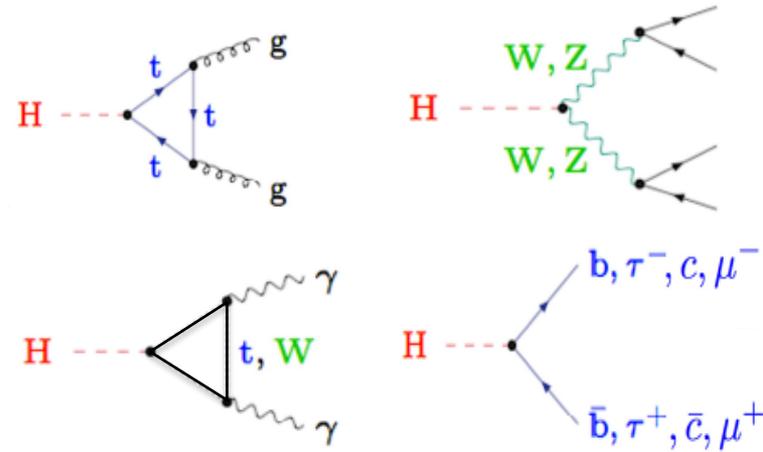
LA PHYSIQUE AU LHC : DÉCOUVERTE DU BOSON DE HIGGS

Recherche du Higgs au Run 1

Production

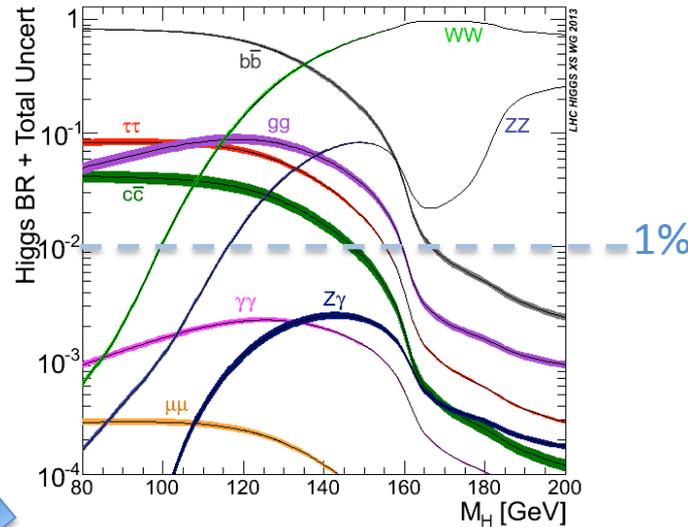


Désintégration



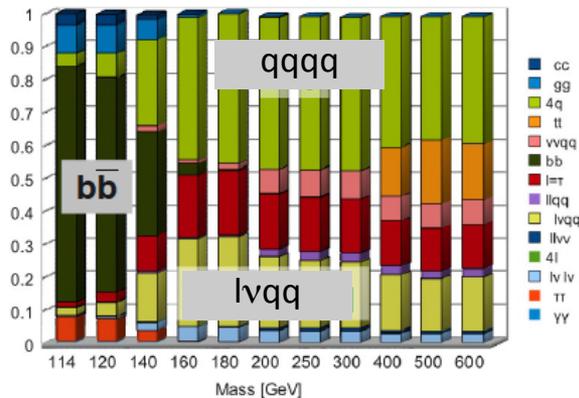
Recherche du Higgs au Run 1

Désintégration

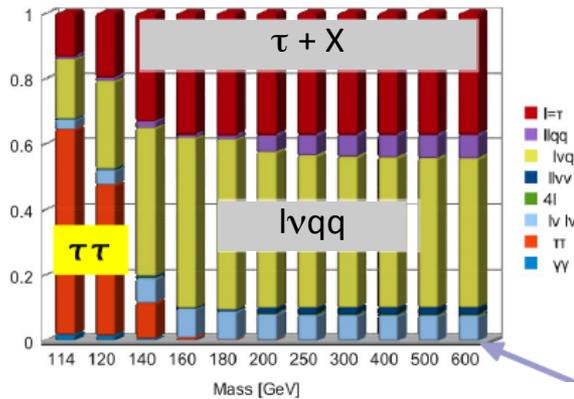


Rappel : avant de le découvrir, on ne connaît pas la masse du boson de Higgs, qui n'est pas prédite par le Modèle Standard

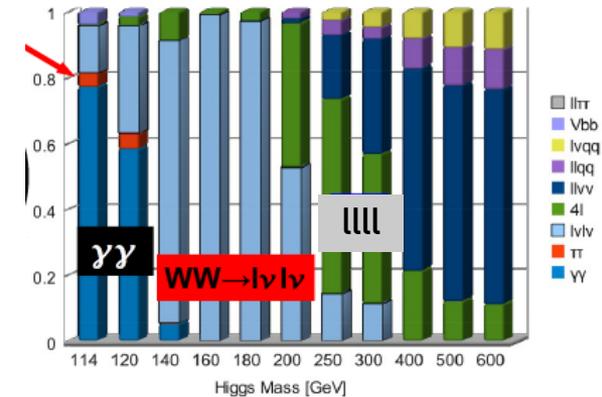
1) après désintégration des « filles » du Higgs



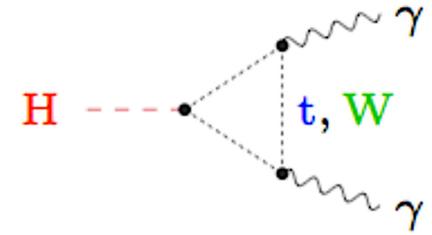
2) avec le déclenchement



3) En prenant en compte les bruits de fond



Détection



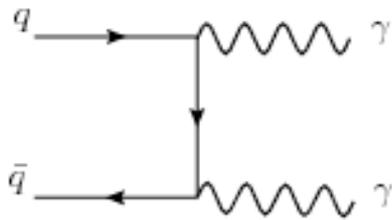
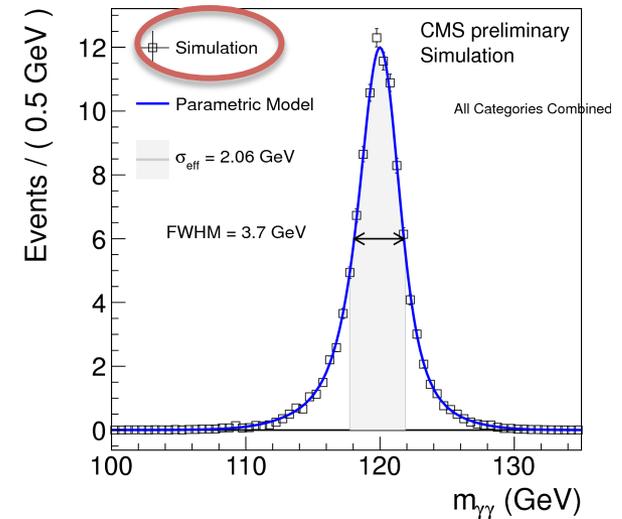
Canal pour lequel les détecteurs ont été optimisés...

Masse invariante : $m^2 = 2 |\mathbf{p}_1| |\mathbf{p}_2| (1 - \cos \alpha)$

- $|\mathbf{p}_i|$ mesurés dans le calorimètre
- pas de trace pour mesurer l'angle !

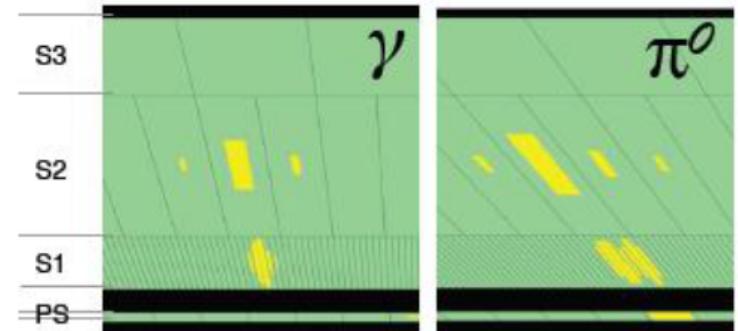
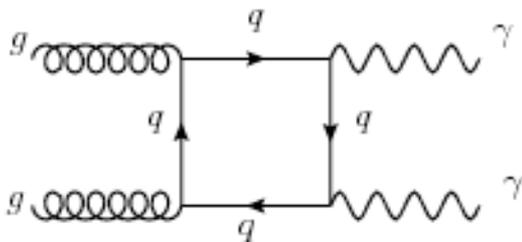
On utilise le vertex de l'interaction
(problème quand il y en a 20 ou plus...)

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

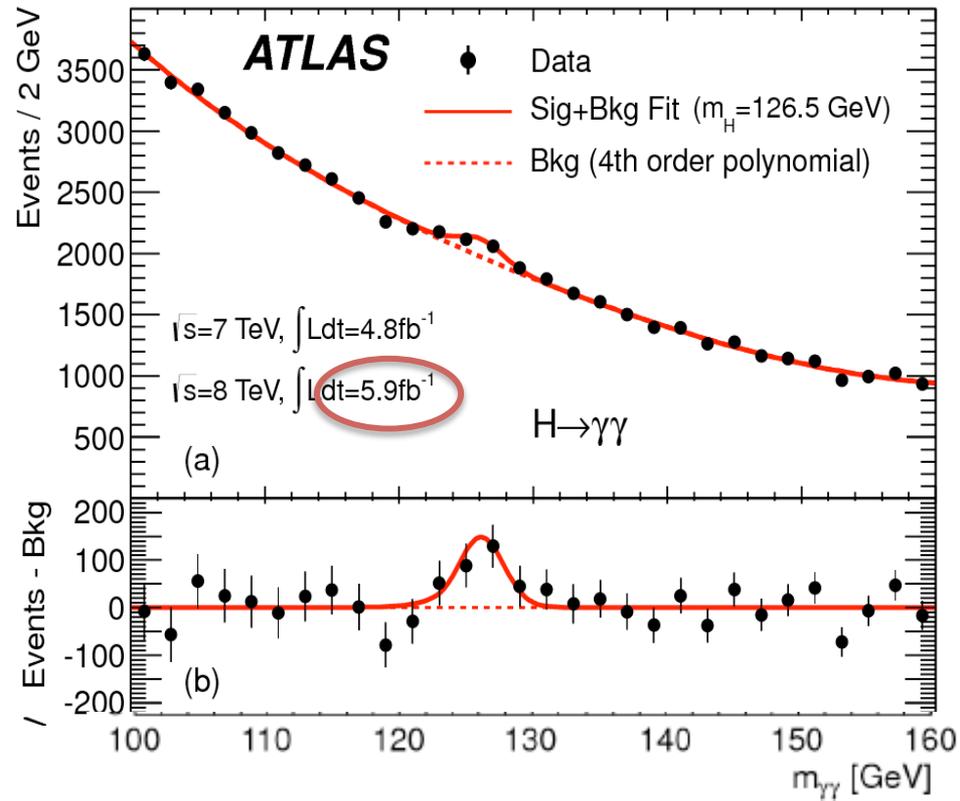
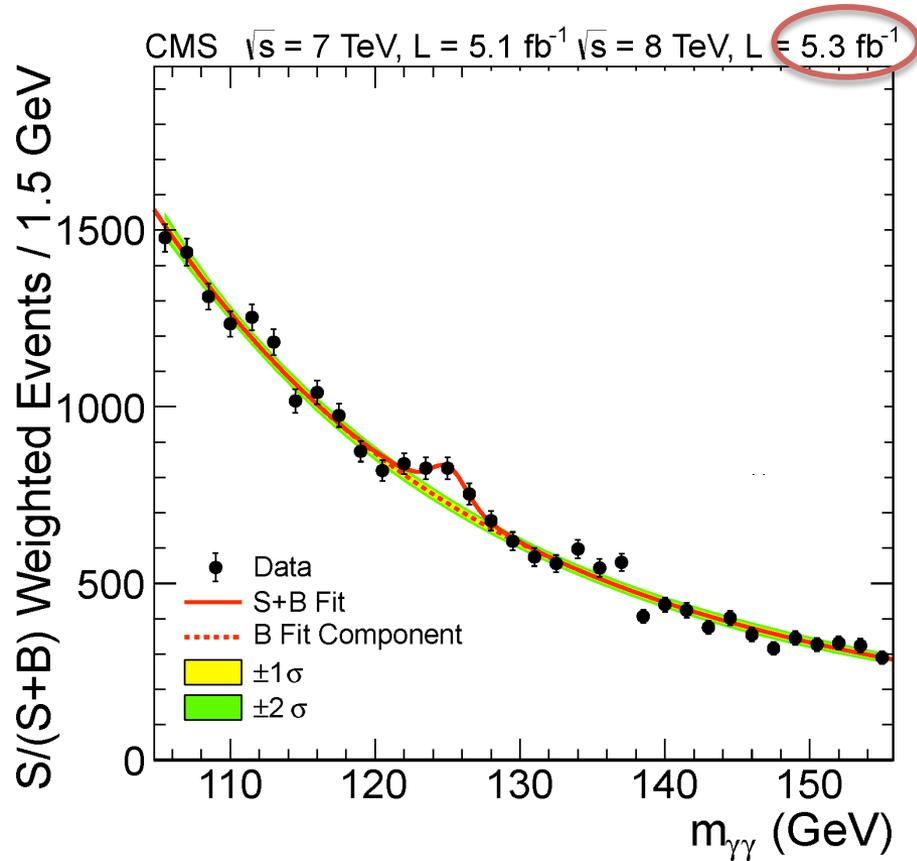


...bruit de fond !

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



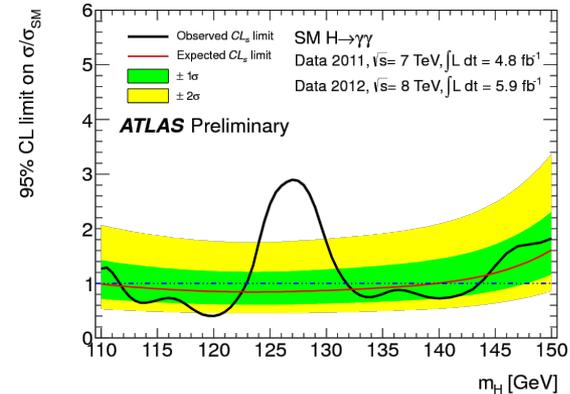
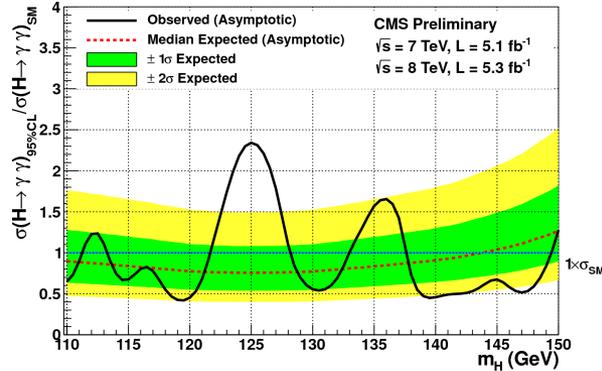
H \rightarrow $\gamma\gamma$: résultats mi 2012



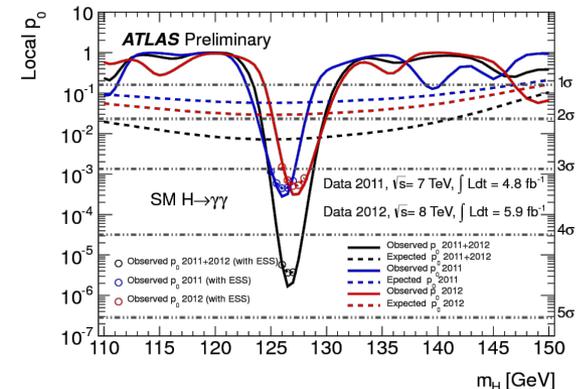
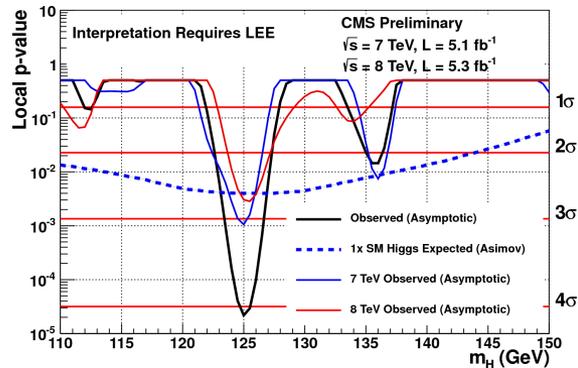
Remarque : plusieurs catégories de signaux : photons (non-)convertis, baril/bouchon,...

H \rightarrow $\gamma\gamma$: résultats mi 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
 $p_0 = p$ -value = probabilité pour que le bruit de fond seul fluctue autant que les données :

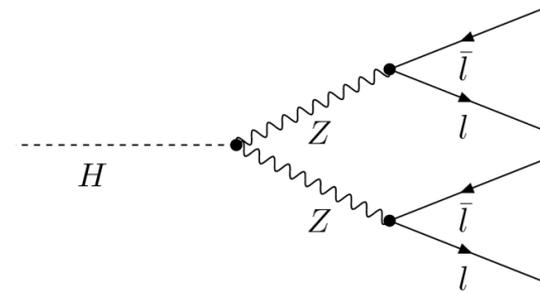


Excès local à $4.1 \sigma^*$ à 125 GeV

Excès local à $4.7 \sigma^*$ à 126.5 GeV

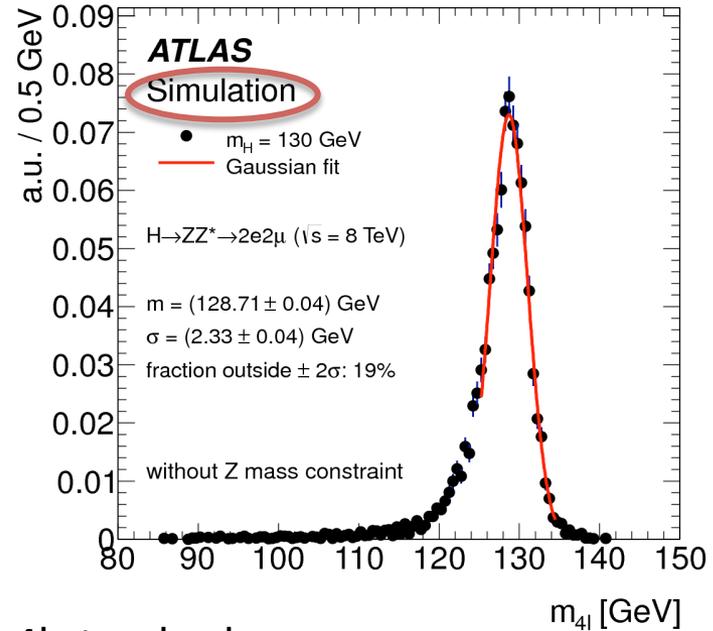
* voir le cours de N. Makovec

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



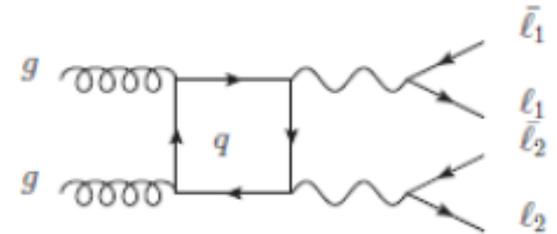
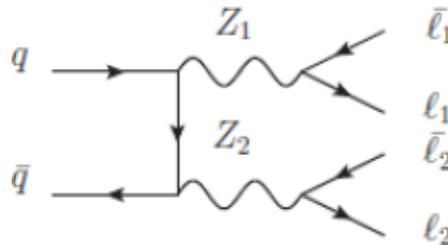
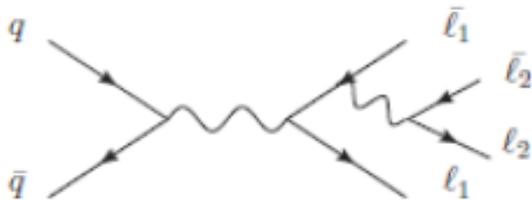
Meilleur canal ZZ : $ZZ \rightarrow 4l$ avec $4l = eeee, ee\mu\mu, \mu\mu\mu\mu$

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



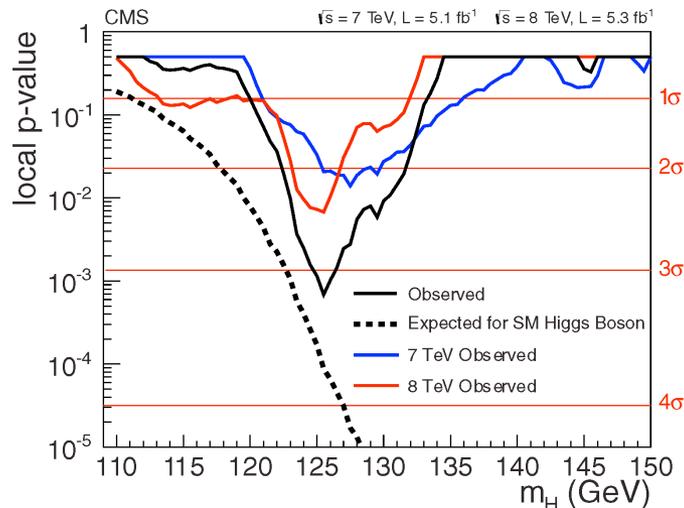
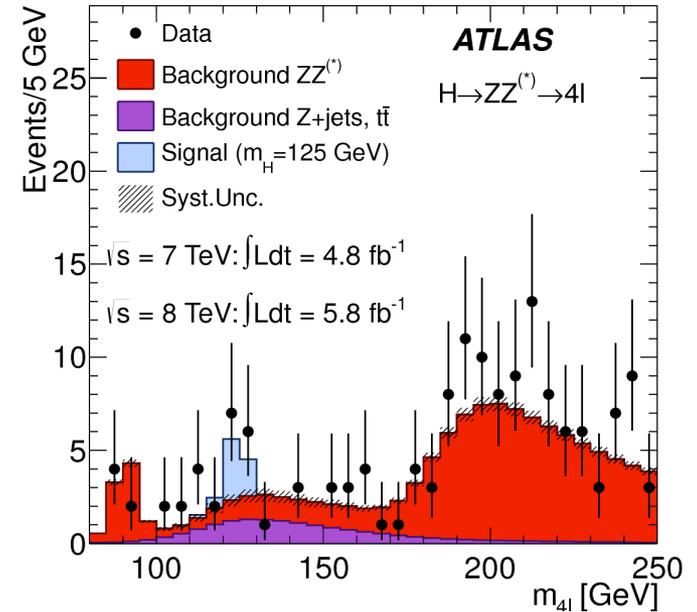
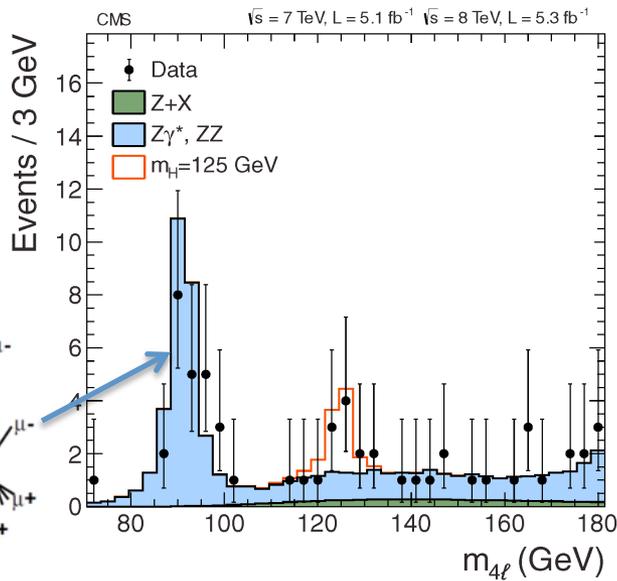
Bruit de fond

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

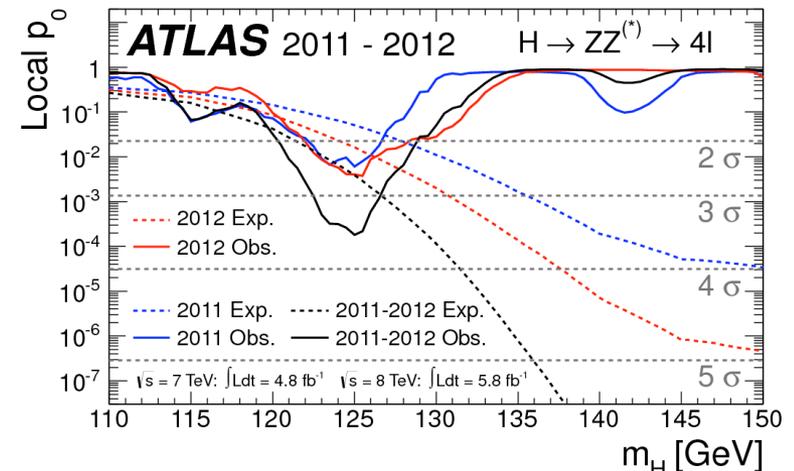


- **réductible** : Z+2 jets, jets mal identifiés comme leptons

H → ZZ* → 4l : résultats mi 2012



Excès local à 3.2σ à 125.5 GeV

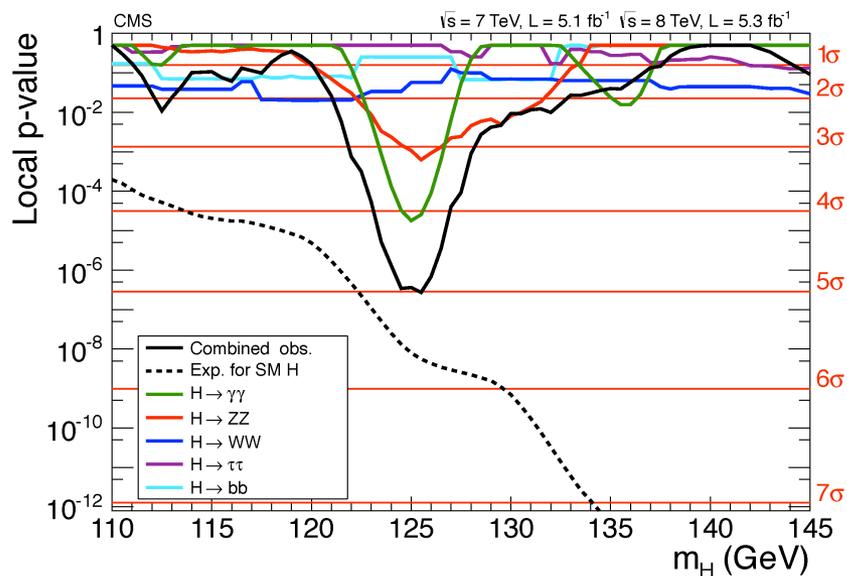


Excès local à 3.4σ à 125 GeV

Résultats combinés

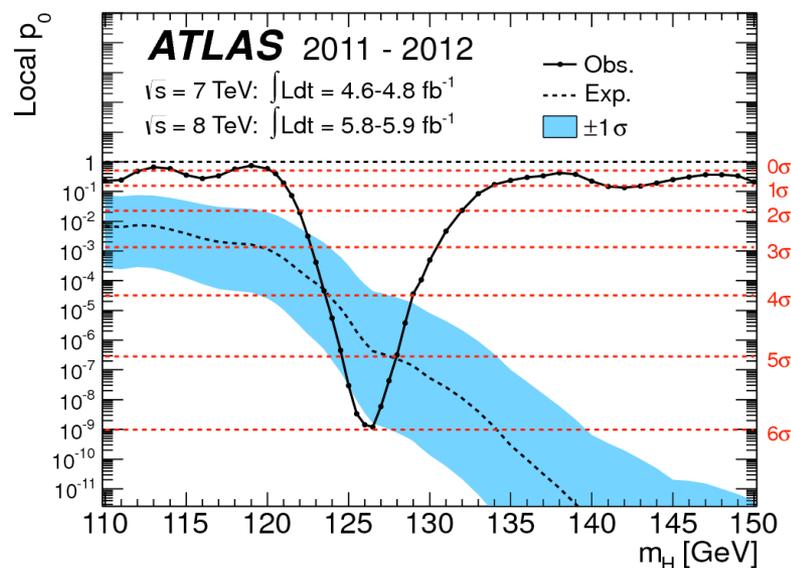
Autres canaux : WW , $\tau\tau$, bb : L_{int} insuffisante en juillet 2012 pour montrer un signal séparément

$\gamma\gamma$, 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



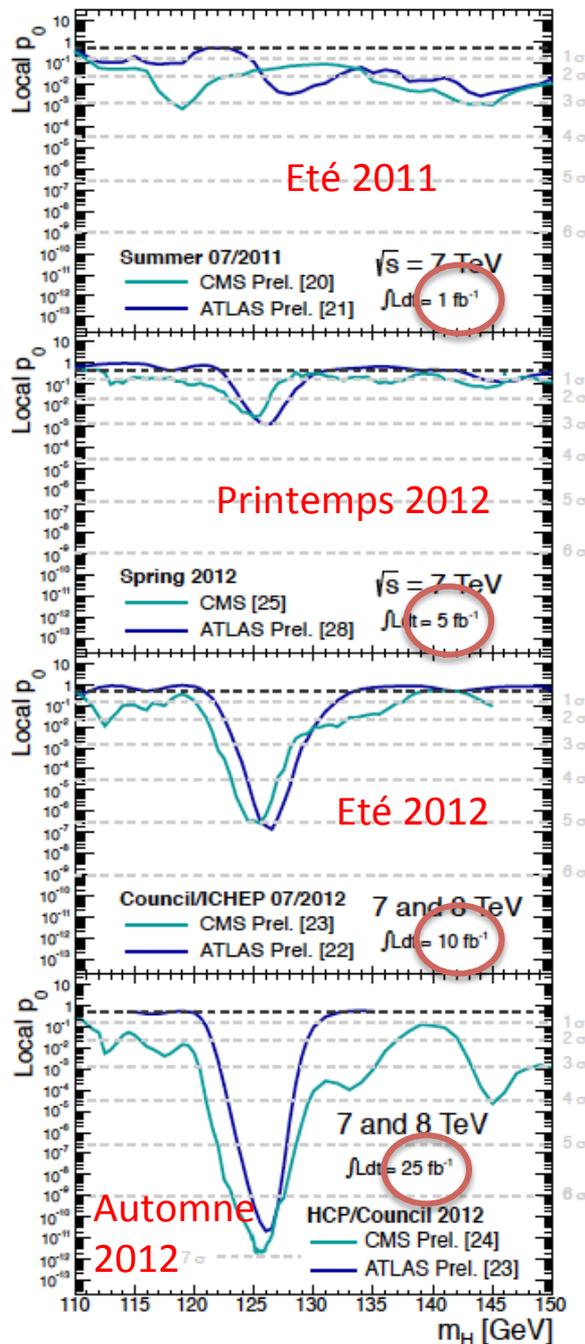
Robert Brout



François Englert

Peter Higgs

Et depuis 2012 ?



Avant 2012 : limites

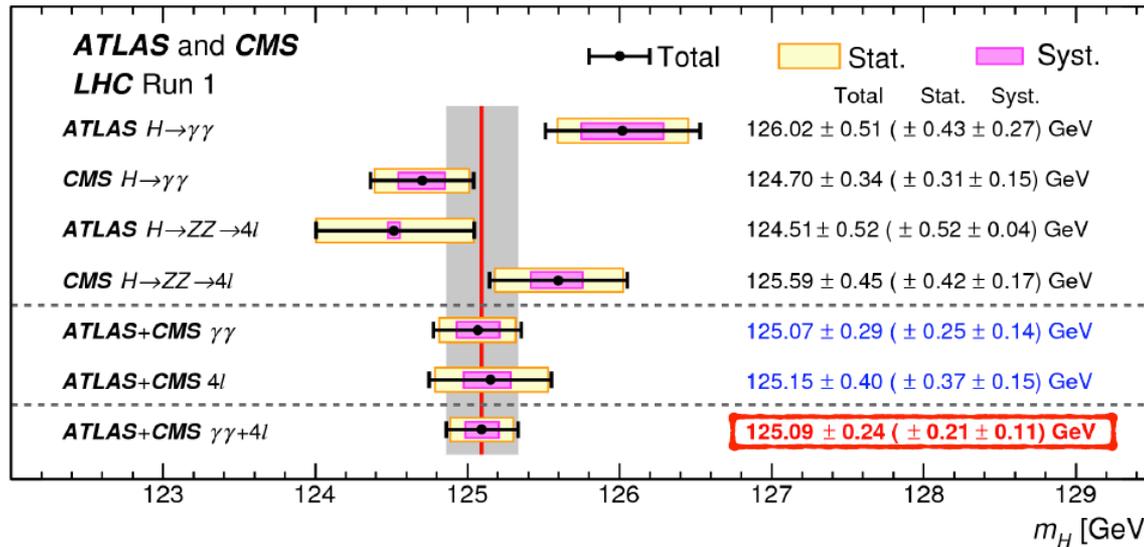
En juillet 2012 : découverte

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

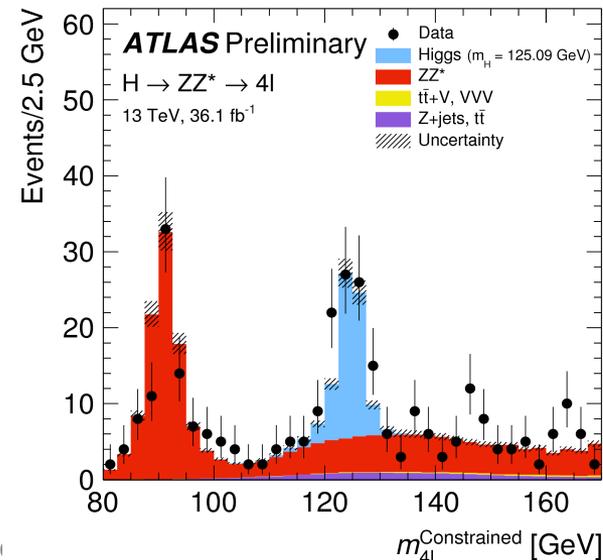
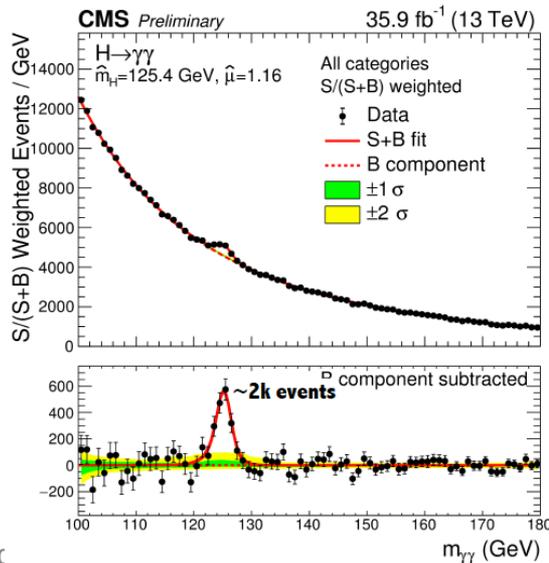
Mesure de la masse au run 1

ATLAS+CMS PRL 114 (2015) 191803

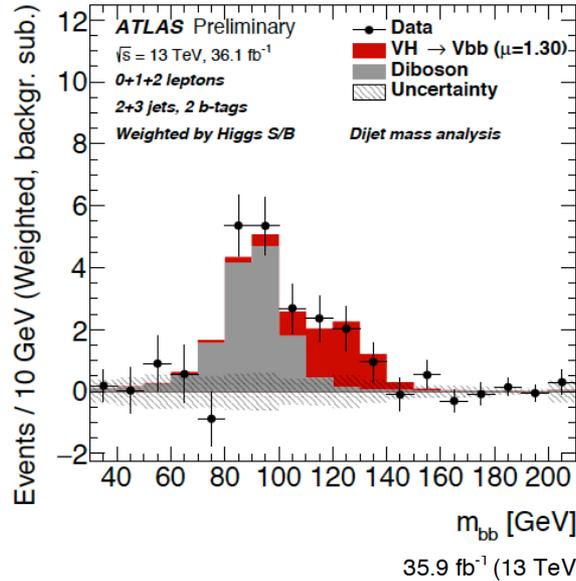
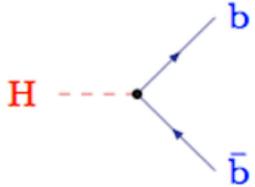
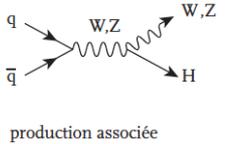


Précision :
0.2% !

$H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$: résultats été 2017 (run 2)



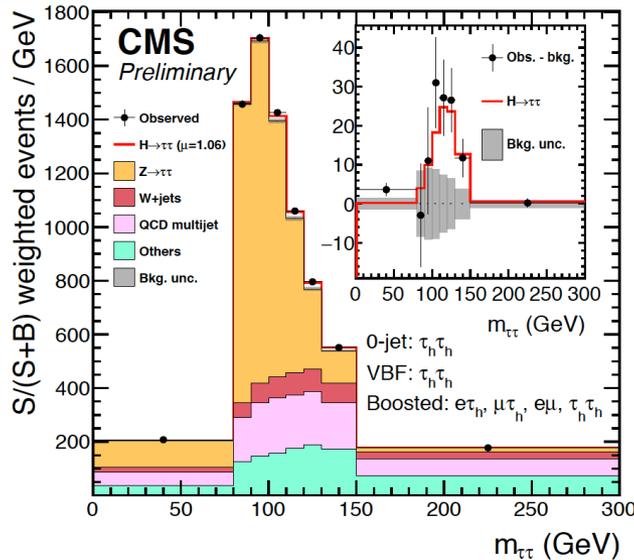
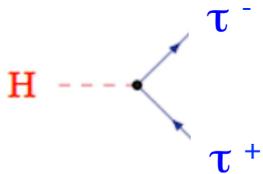
Désintégration directe du Higgs en fermions (run 2)



ATLAS-CONF-2017-041

3.5 σ

3.6 σ si combiné avec les données du run 1



CMS HIG-16-043

4.9 σ

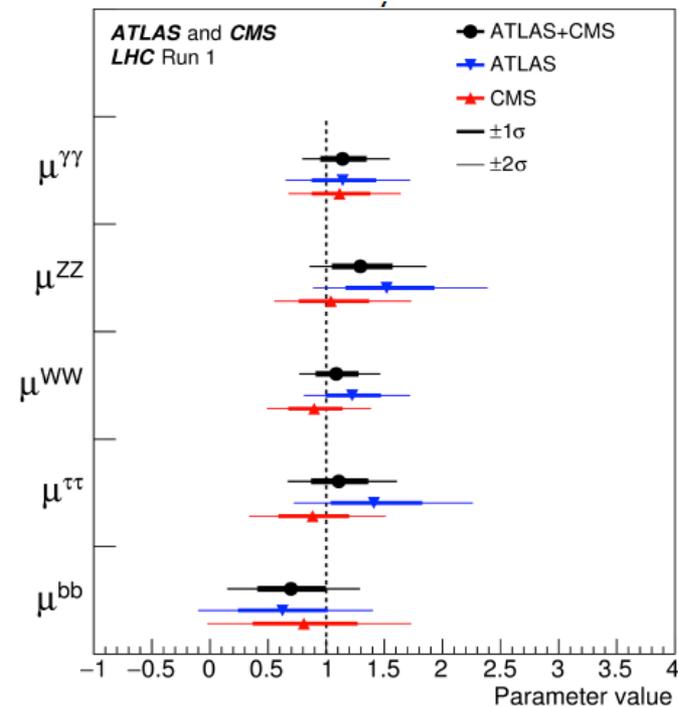
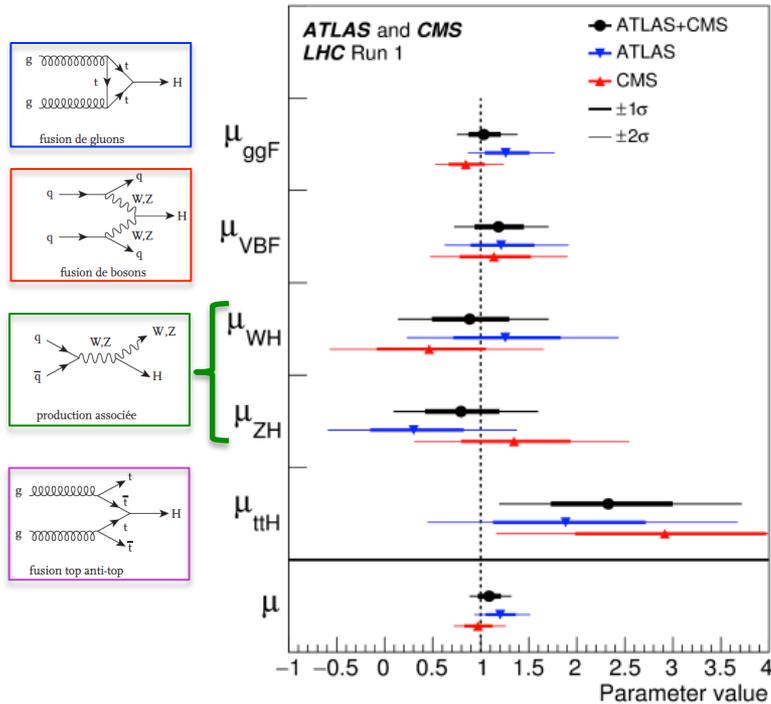
5.9 σ si combiné avec les données du run 1

Mesure de la force du signal au run 1

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

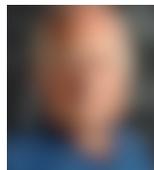
Production

Désintégration



La production et la désintégration **sont compatibles avec le Modèle Standard**
(précision : 20-60%)

Découverte en 2012

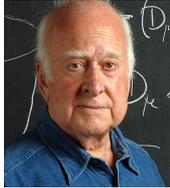


5 ans plus tard



Fin de la discipline ??

NON !!!



Higgs standard



Higgs non standard

Questions ouvertes sur la *matière* :

- nombre de familles, hiérarchie des masses, masse des neutrinos
- où est l'antimatière ?
- qu'est-ce que la matière sombre ?

Questions ouvertes sur les *interactions* :

- unification de toutes les interactions
- faiblesse de l'intensité de la gravité
- ...

Quelle théorie plus large pour le prédire ?

Physique au-delà du
Modèle Standard

≡ « nouvelle physique »

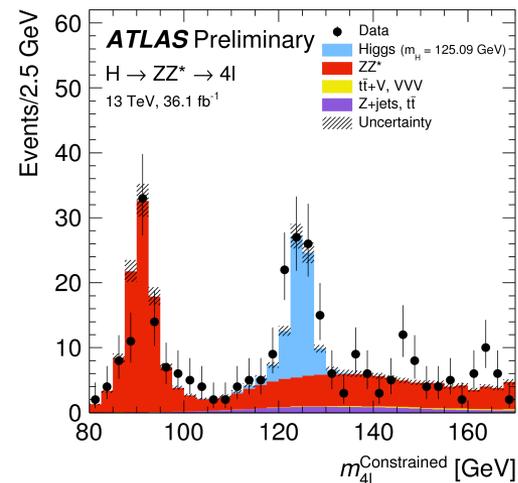
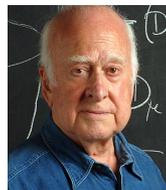
Quelle que soit la nature du boson de Higgs découvert,
il faut chercher autre chose !

Résumé des épisodes précédents

- Le Modèle Standard
- Outils pour l'étudier : accélérateurs, détecteurs, grille de calcul
- L'héritage du LEP et du Tevatron
- Le LHC et ses détecteurs

- **La physique au LHC**

- le boson de Higgs
- recherche de nouvelle physique



PHYSIQUE AU LHC : RECHERCHE DE « NOUVELLE PHYSIQUE »

Comment rechercher la nouvelle physique

2 méthodes



Directe

Recherche de nouvelles
particules lourdes, réelles

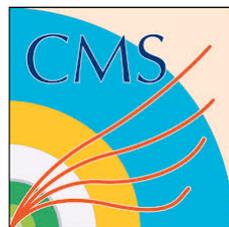
☞ énergie

Indirecte

Mesures précision,
tests de cohérence

☞ luminosité

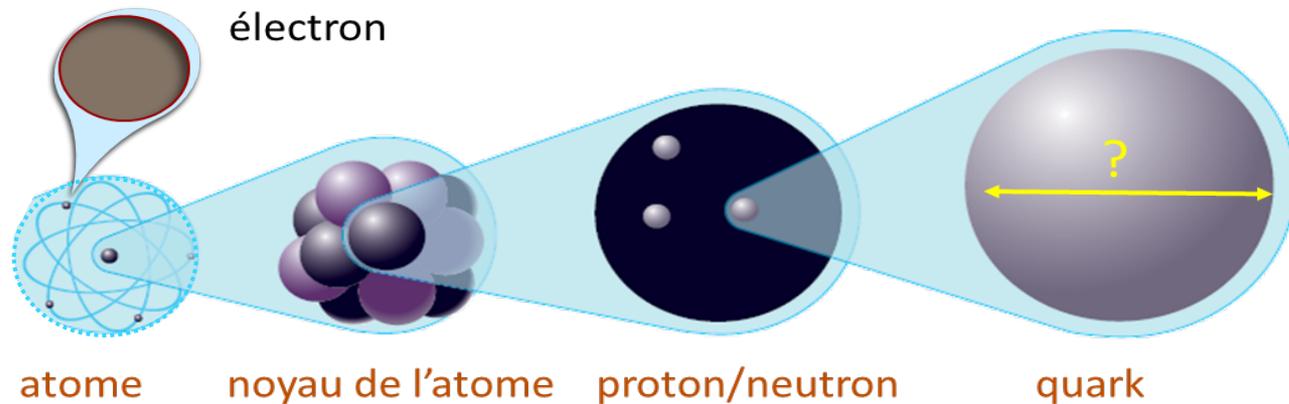
Le LHC a les deux !



Quelle nouvelle physique ?

Particules composites

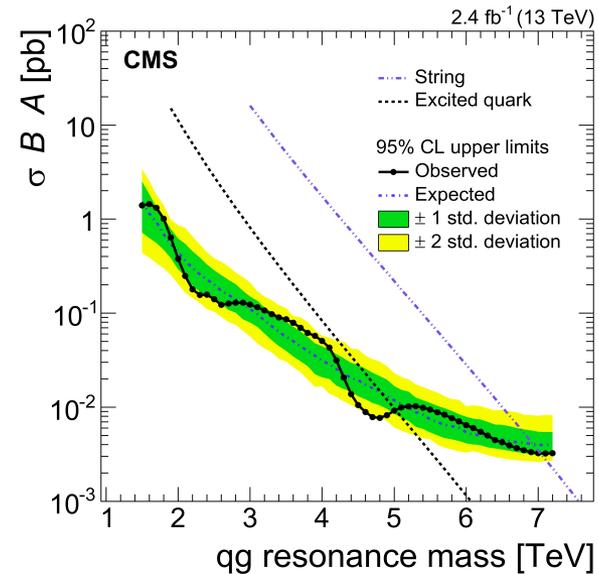
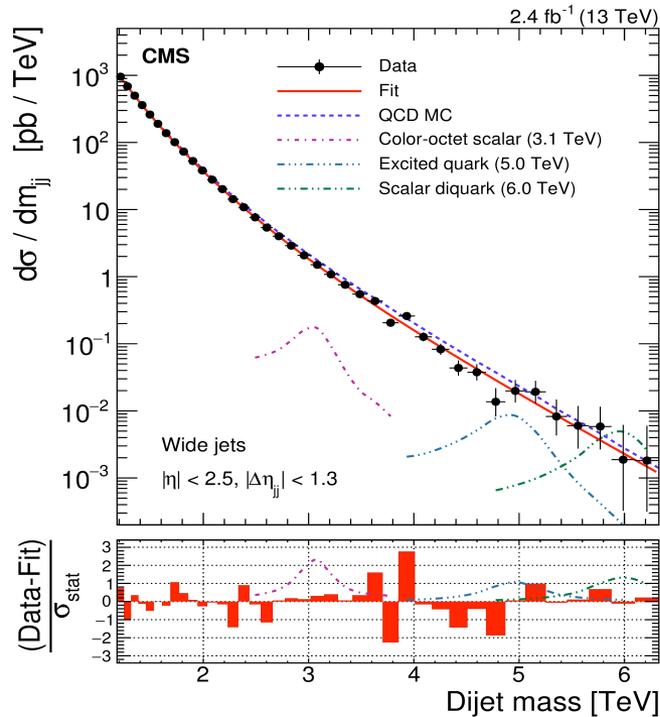
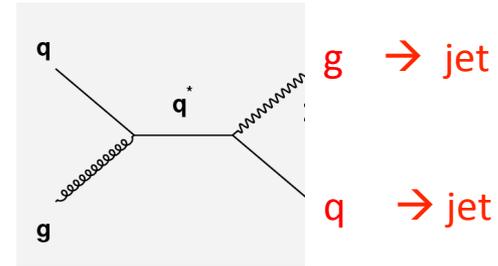
J. Pati, A. Salam 1974



- 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
- Prédit **états excités** des particules considérées comme élémentaires aujourd'hui, des « leptoquarks »,...

Spectre de masse invariante jet-jet

Etat excité d'un quark : q^*



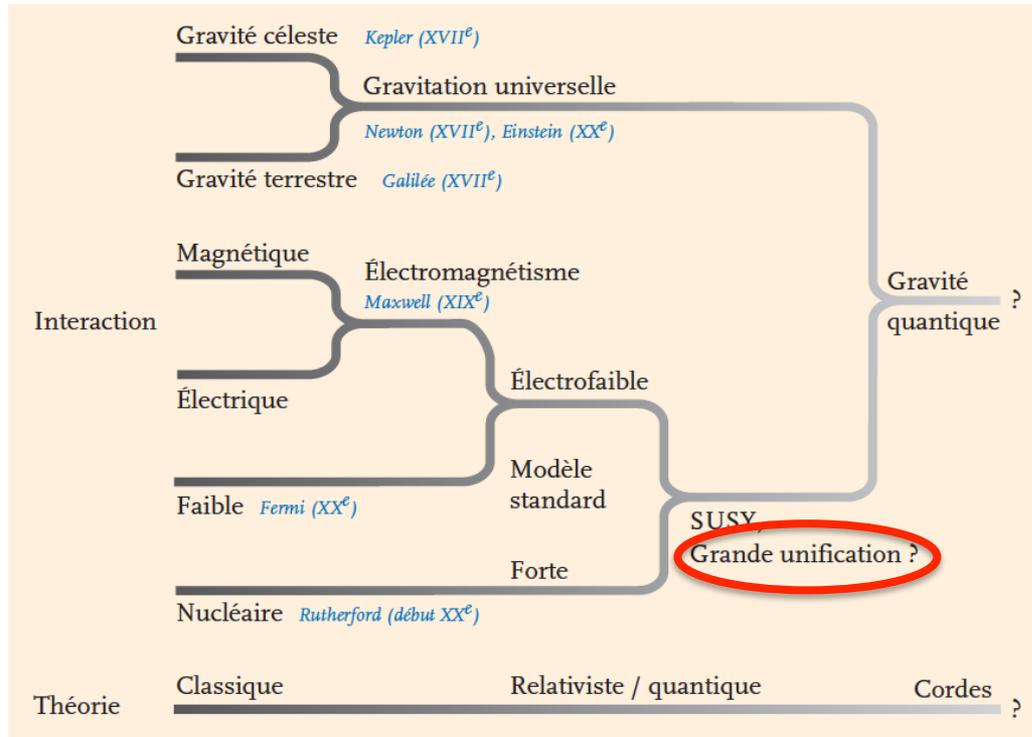
La structure des quarks est testée jusqu'à 5 TeV ! ($4 \cdot 10^{-5}$ fm)

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

Quelle nouvelle physique ?

Théorie de la Grande Unification

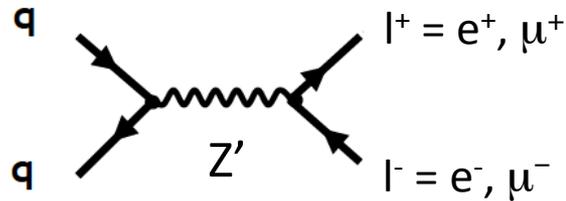
H. Georgi, S. Glashow 1974
J. Pati, A. Salam 1974



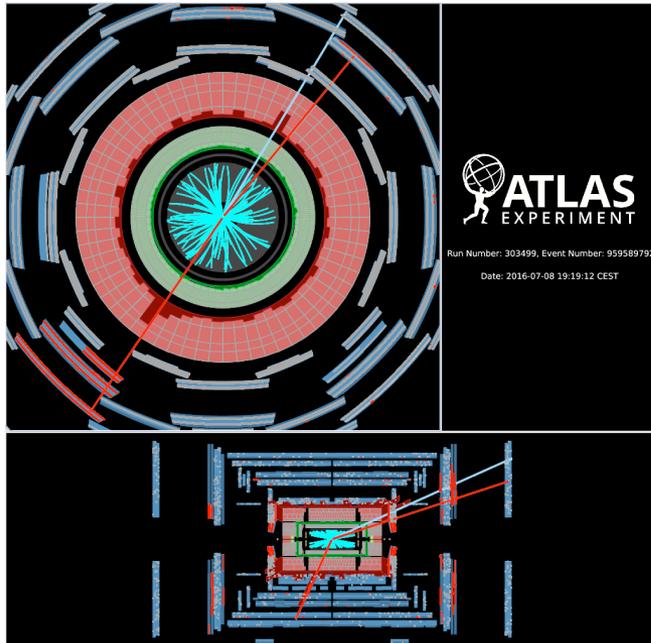
- Unifie les **constantes de couplage** des interactions
- Prédit de **nouvelles particules** : nouveaux bosons (Z' , W' , ...), nouveaux fermions, plusieurs bosons de Higgs,...

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

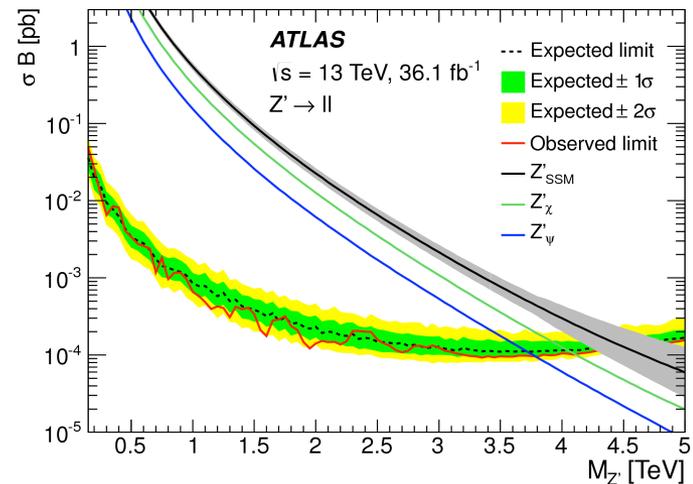
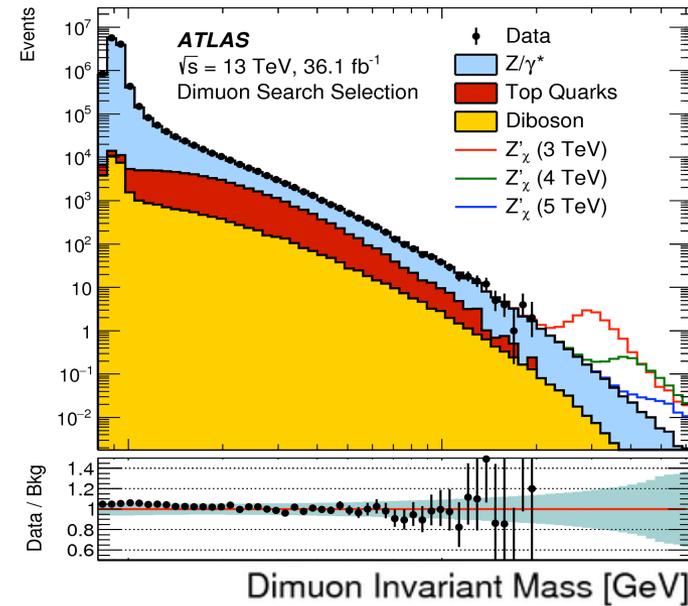
Spectre de masse invariante dilepton



$Z' = Z$ en plus lourd



$M(\mu^+\mu^-) = 1,99 \text{ TeV}$

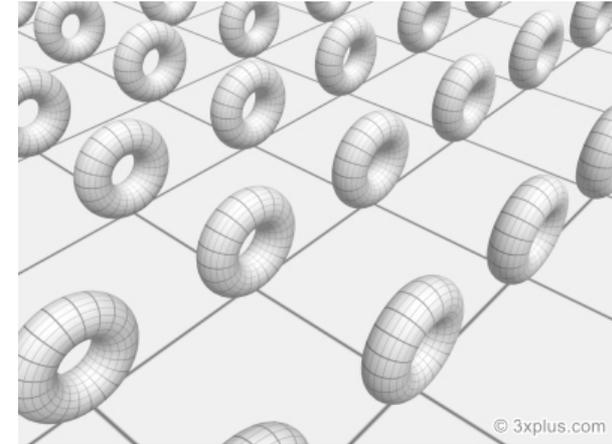
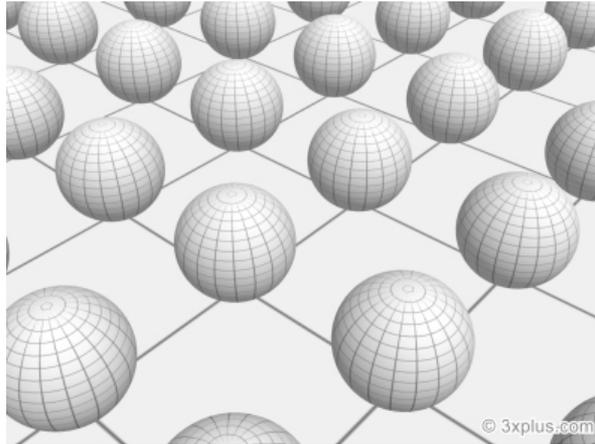
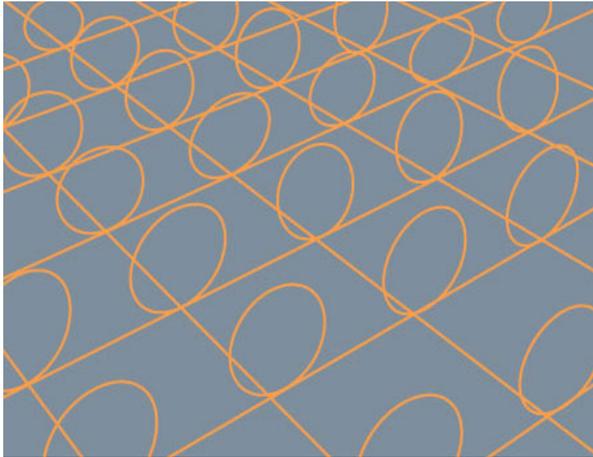


Remarque : on recherche de même $W' \rightarrow l\nu$

Quelle nouvelle physique ?

Dimensions supplémentaires

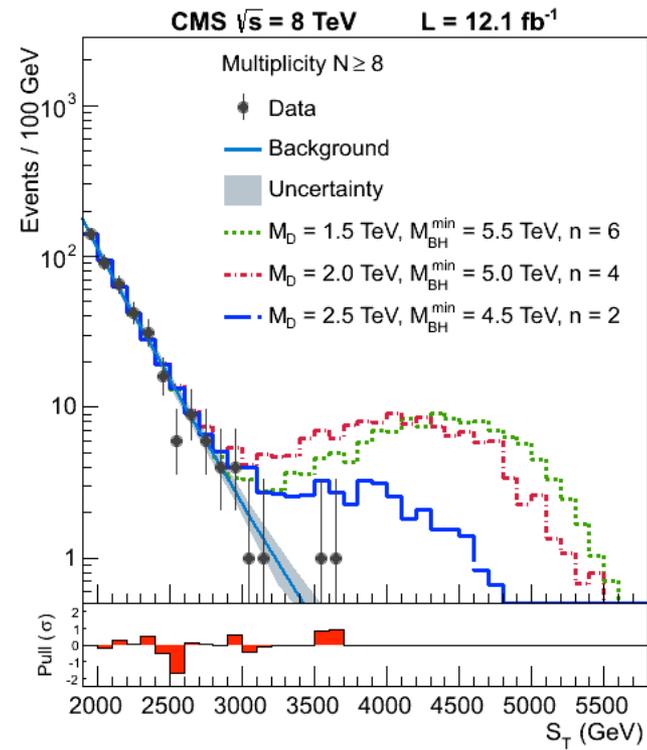
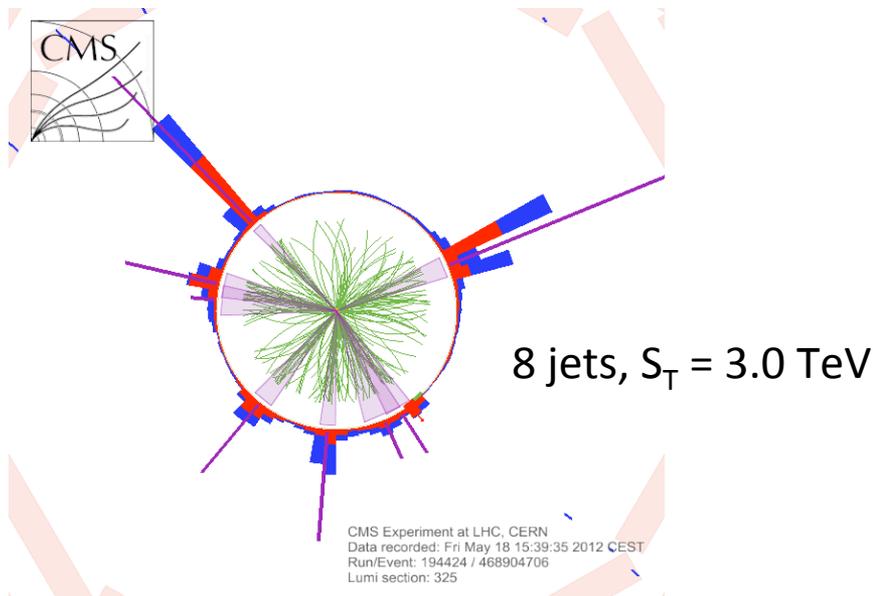
T. Kaluza, O. Klein 1921
ADD 1998, RS 1999



- Gravitation « diluée » dans un espace plus grand
- Résout le problème de la faiblesse de la gravitation
- Prédit des « excitations » des particules standard et des **micro trous noirs**
- 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 » (il « s'évapore »)



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

Quelle nouvelle physique ?

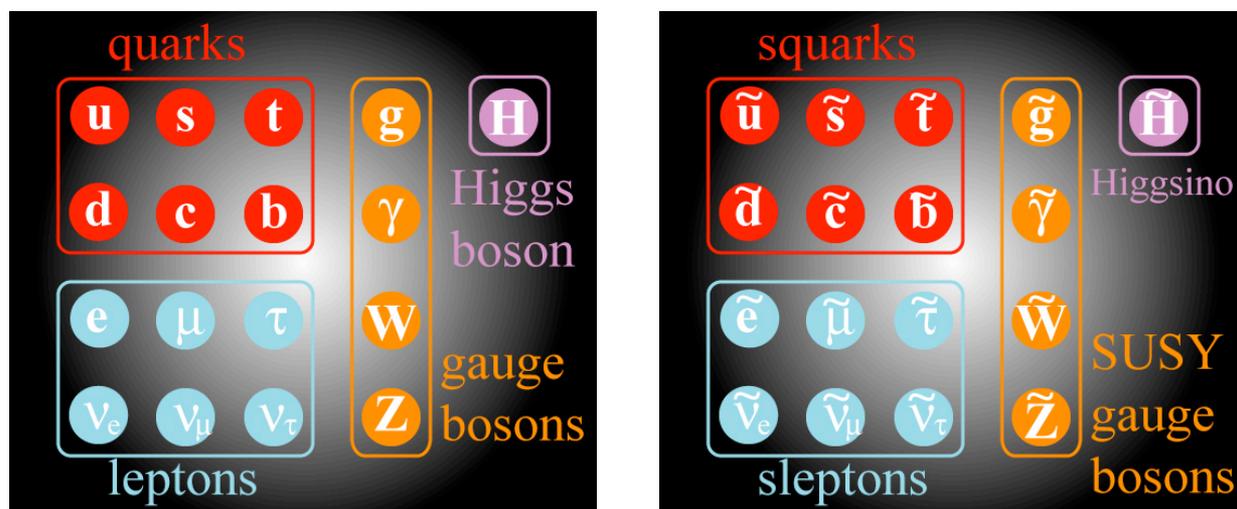
Supersymétrie

Y. Golfand, E. Likhtman 1971

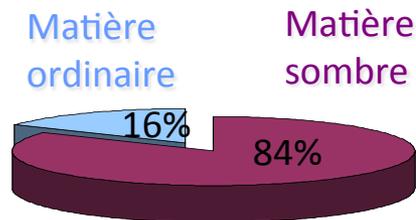
A chaque **fermion** standard est associé un **boson**, et inversement

→ transformations de **spin**

chaque « super partenaire » a exactement les mêmes nombres quantiques, sauf le spin



Bosinos (photino, gluino,...) et sfermions (squarks, sleptons, sélectron, stop, ...)

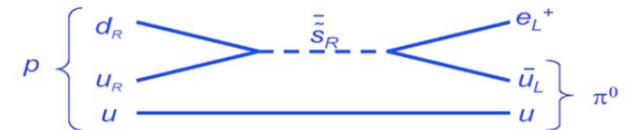
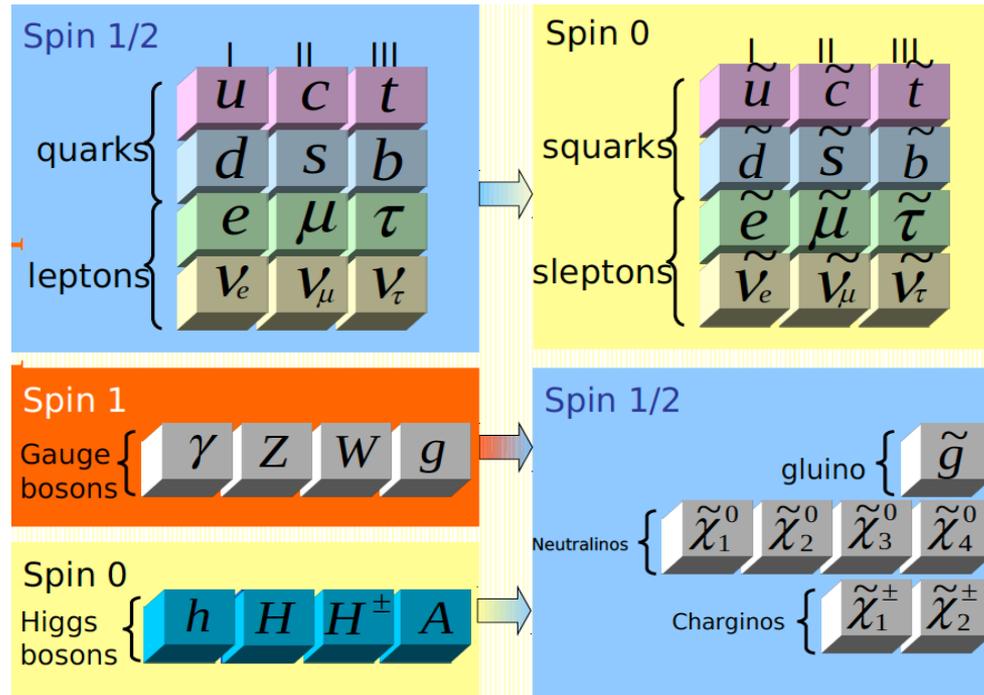


- Peut résoudre le problème de *hiérarchie*
- Permet d'unifier les intensités des interactions
- Prédit un candidat crédible de **matière sombre**

Matière = 31% contenu univers

Quelle nouvelle physique ?

Supersymétrie (suite)



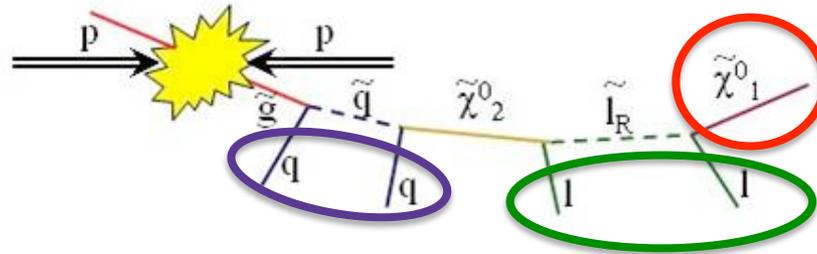
Un nombre quantique additionnel, la « **R-parité** », introduit pour protéger le proton de la désintégration.

$R_p = +1$ pour les particules standard, -1 pour les particules supersymétriques

→ production en **paire**

→ sparticule la plus légère est **stable** → candidat pour la **matière sombre**

Recherche de SUSY



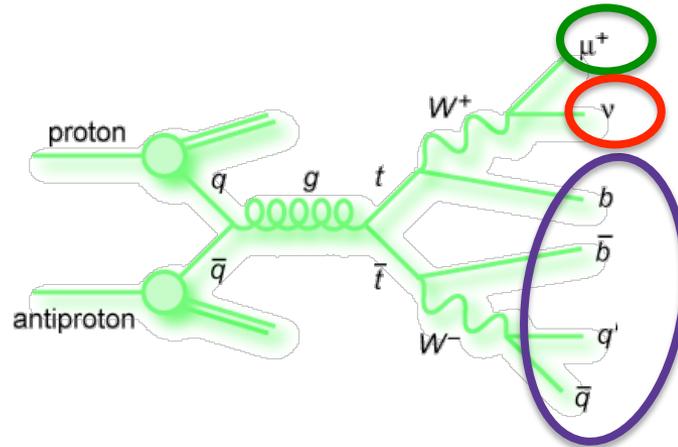
« Signature » typique :

- Production en **paires** de **squarks** ou **gluino** (interaction forte)
- 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 sparticule la plus légère**
- qui s'échappe sans être détectée (neutres, interaction faible)
 \Rightarrow impulsion transverse manquante !

multi-Jets + n leptons + $E_T^{\text{manquante}}$

Bruits de fond à la recherche de SUSY

- Top-antitop :

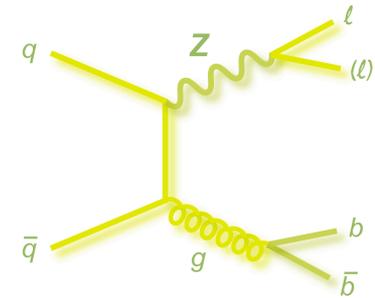


Lepton(s)

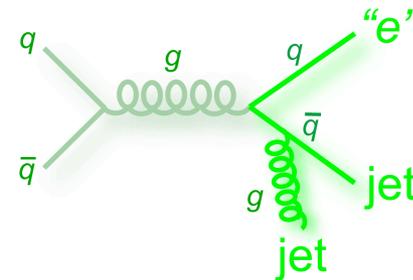
Impulsion transverse manquante

Jets

- mais aussi : W + jets, Z + jets, W, Z \rightarrow lepton(s), ex :



- ou encore : « QCD » (multi-jets), ex :



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)

Exemple : première publication SUSY par ATLAS

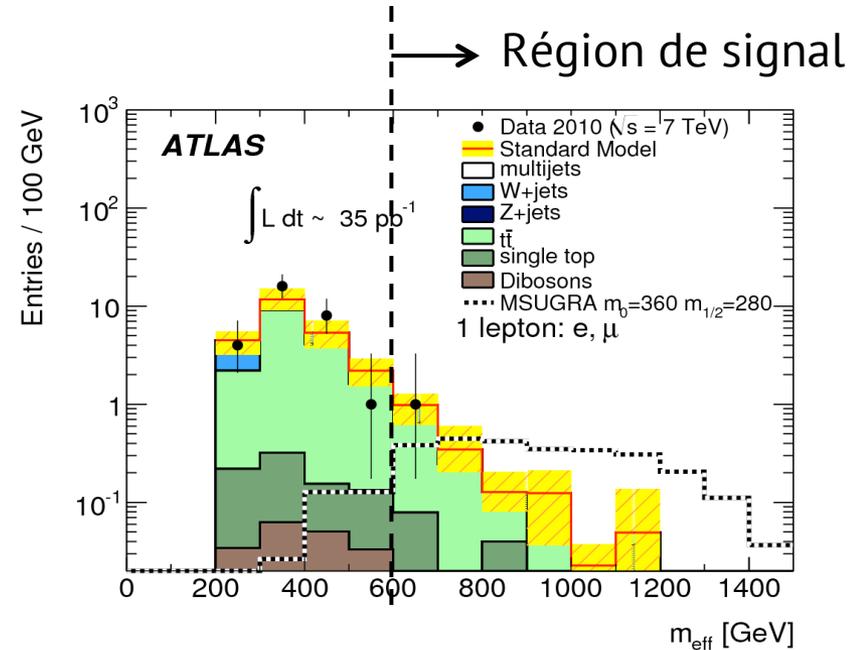
Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions

Phys.Rev.Lett.106
(2011)131802

Sélection:

- **1 lepton** $p_T > 20$ GeV
- **≥ 3 jets**, $p_T > 30$ GeV (≥ 1 jets, $p_T > 60$ GeV)
- $\Delta\phi(\text{jet}_i, \vec{E}_T^{\text{miss}}) > 0.2$ ($i = 1, 2, 3$)
- transverse mass $m_T(\text{lepton}, E_{T,\text{miss}}) > 100$ GeV
- **$E_{T,\text{miss}} > 125$ GeV**
- $E_{T,\text{miss}} > 0.25 M_{\text{eff}}$
- $m_{\text{eff}} > 600$ GeV

$m(\text{gluino}) > 500$ GeV @ 95% CL



Publication la plus récente de cette analyse :

Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector

[arXiv:1708.08232](https://arxiv.org/abs/1708.08232)

$m(\text{gluino}) > 2000$ GeV @ 95% CL

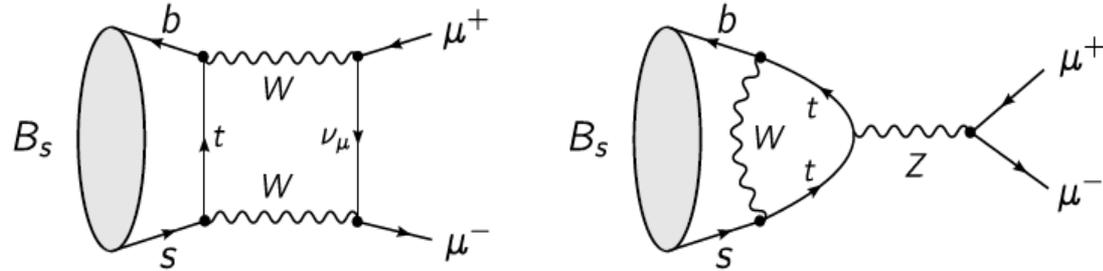
(masse du neutralino = 0)

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

Désintégration très rare

Taux de désintégration prédit par le Modèle Standard :

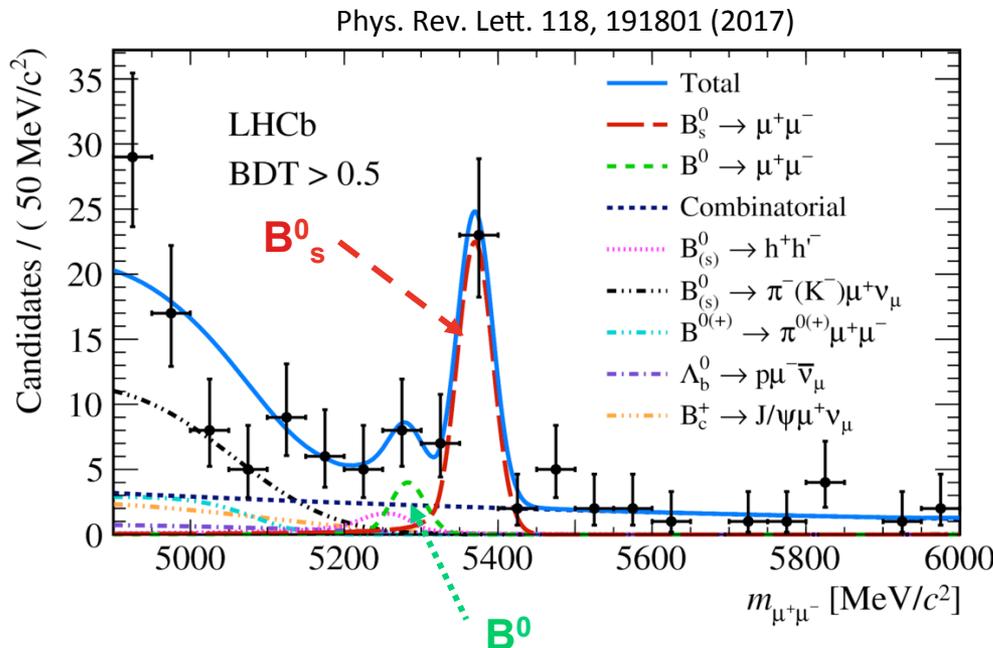
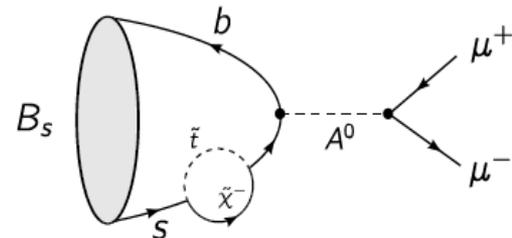
$$\mathbf{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3,2 \pm 0,3) \times 10^{-9}$$



Désintégration observée pour la 1^{ère} fois en novembre 2012 ! Aujourd'hui :

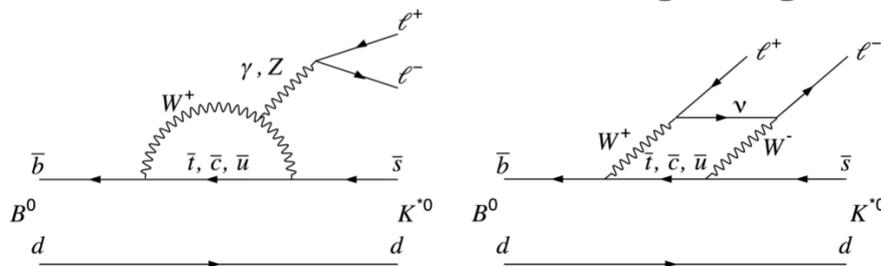
$$\mathbf{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3,2 \pm 0,6 \pm 0,3) \times 10^{-9}$$

une façon indirecte d'éliminer de nombreux scénarios de SUSY...



Un indice de nouvelle physique ???

2014



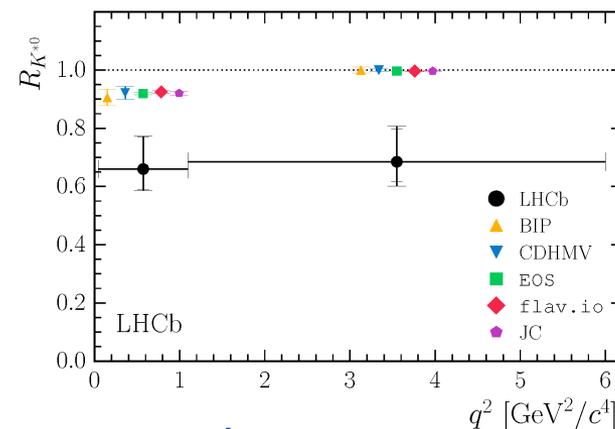
$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)} = 0.745_{-0.074}^{+0.090} \text{ (stat)} \pm 0.036 \text{ (syst)}$$

$$R_K^{\text{SM}} = 1 + \mathcal{O}(10^{-2})$$

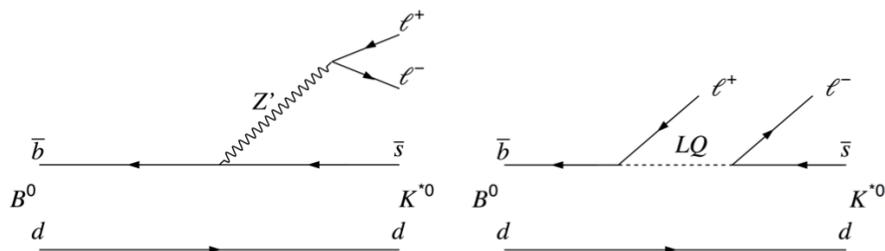
2017

$$R_{K^*} = \frac{\text{BR}(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)}{\text{BR}(B \rightarrow K^* e^+ e^-)}$$

Violation de "l'universalité leptonique"



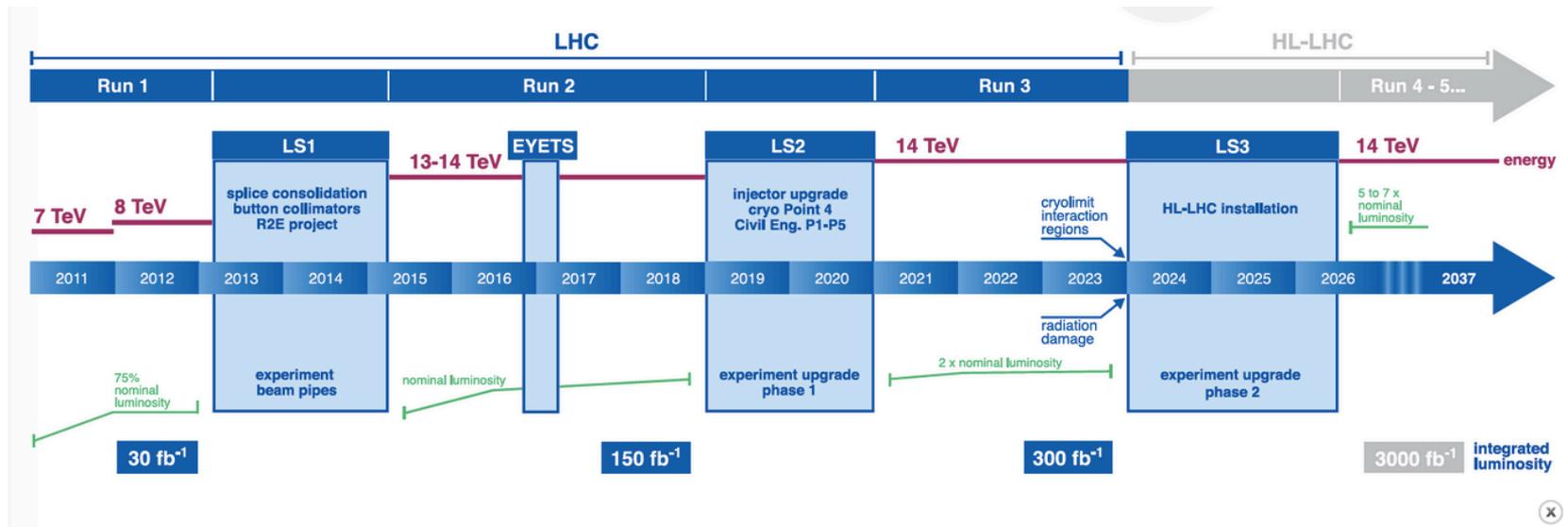
Depuis 2014 : > 400 publications soumises pour expliquer cet écart



Nombreuses interprétations possibles:
Z', leptoquark, sneutrino,...

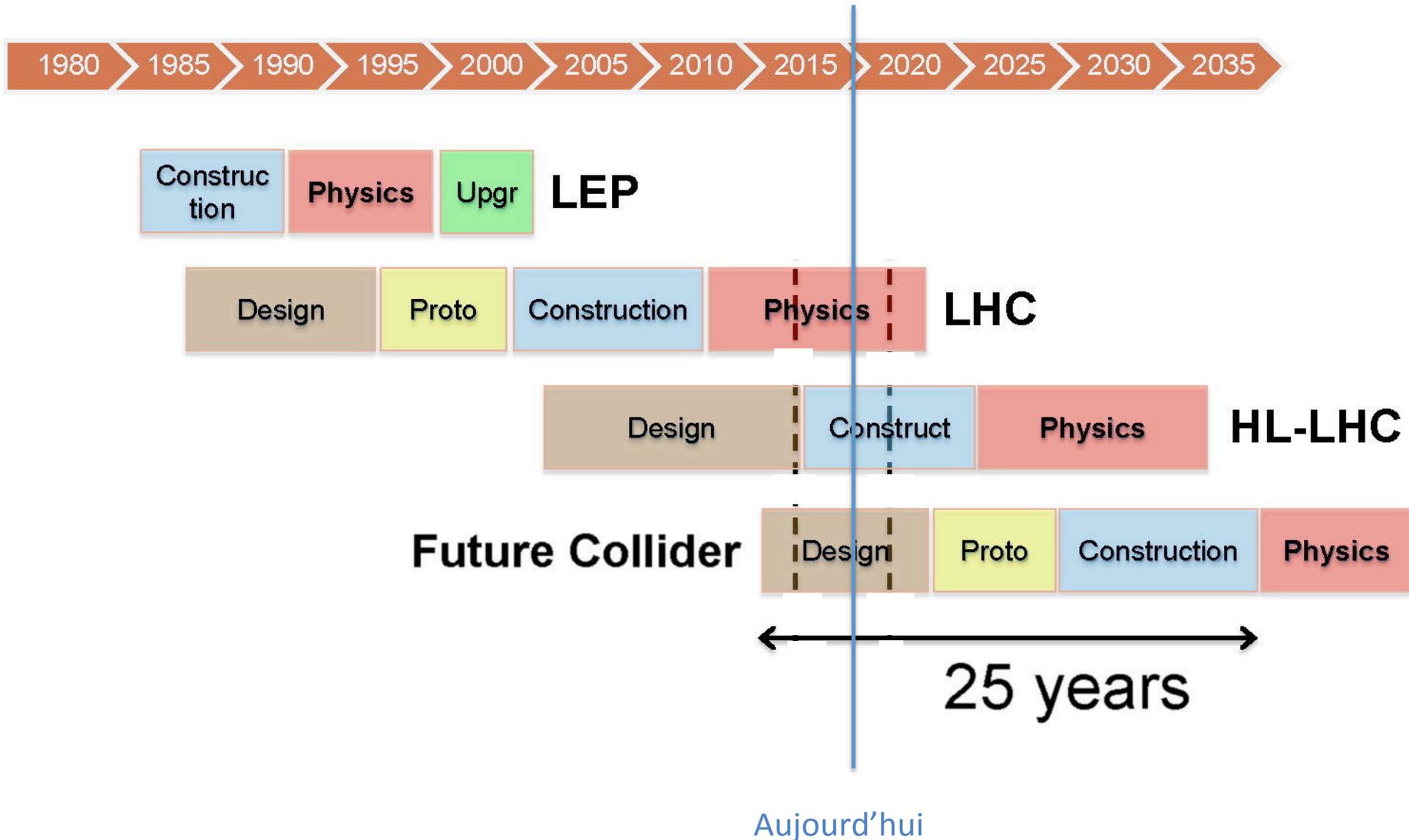
LE FUTUR

Au-delà du LHC : HL-LHC



(x)

Pourquoi il faut déjà penser à la suite



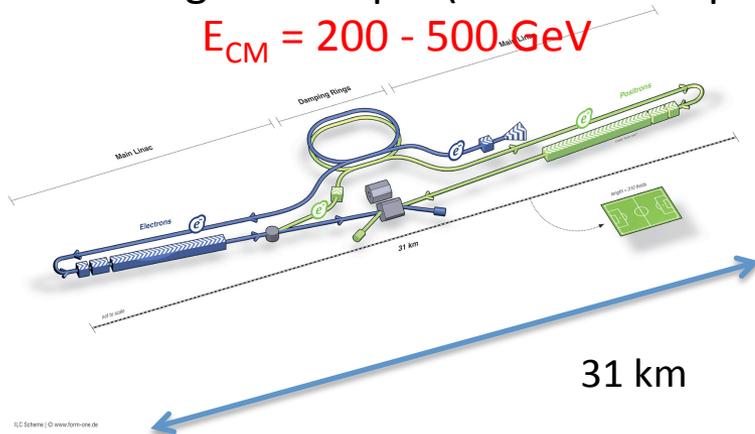
Au delà du LHC : collisionneurs linéaires

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

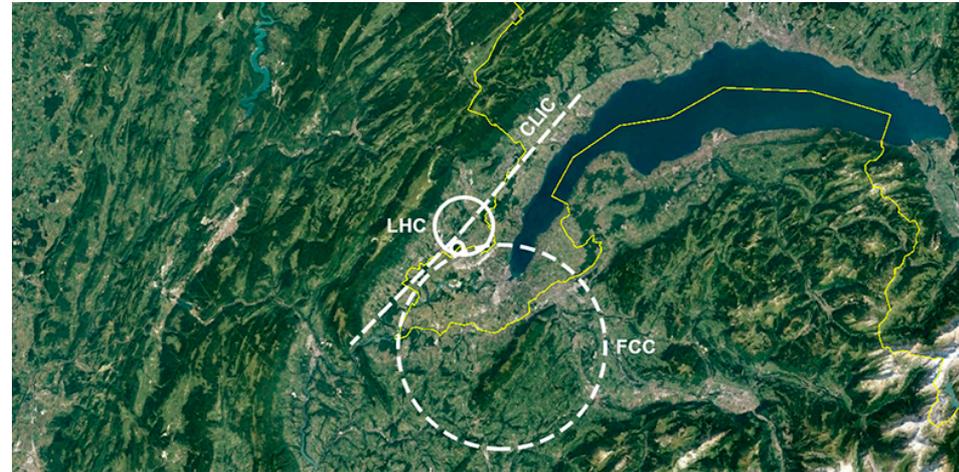


Technologie classique (cavités RF supra)

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

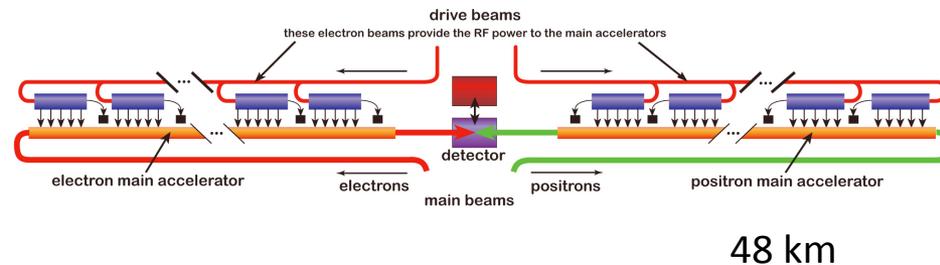


Au CERN : **CLIC**
(Collisionneur Linéaire Compact)

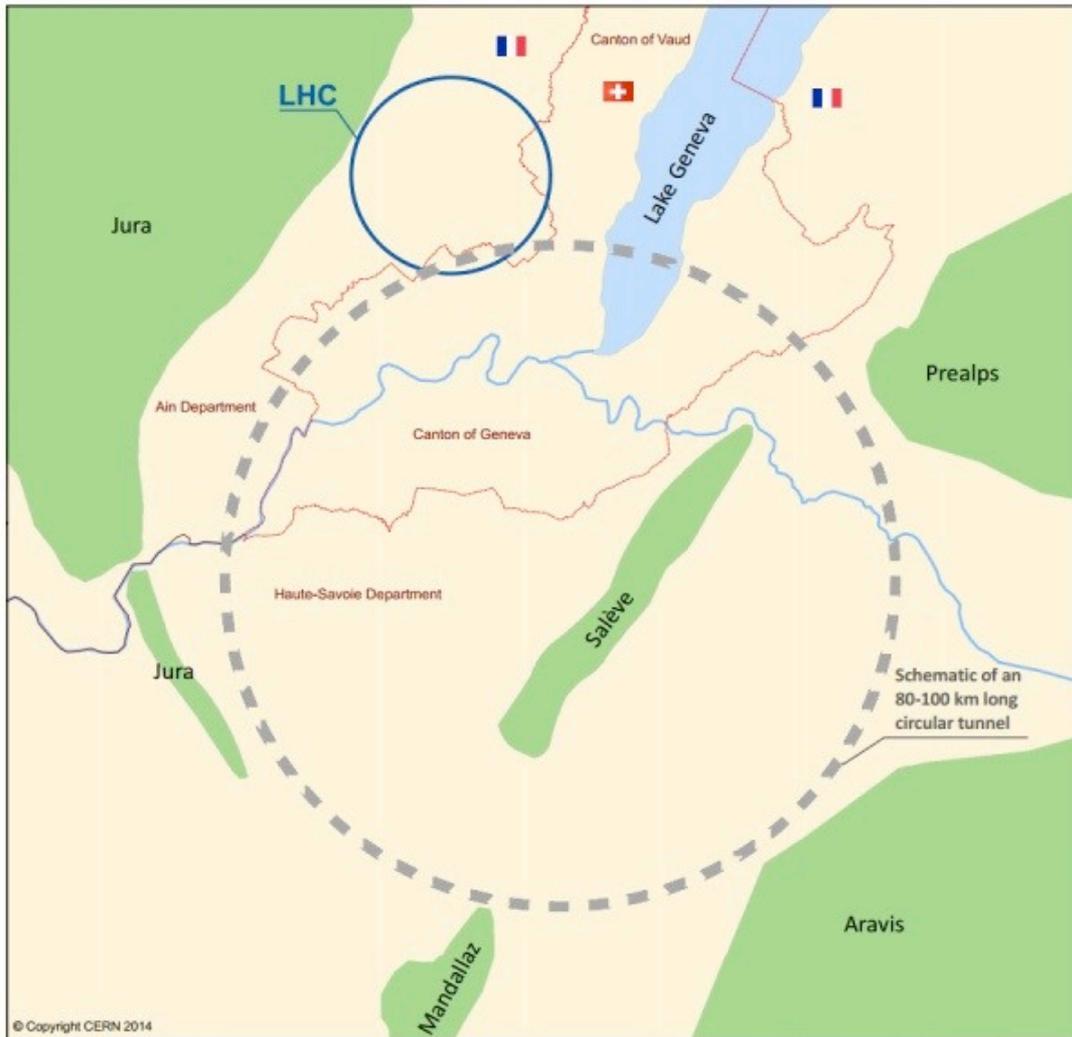


Technologie futuriste non prouvée :
concept d'accélération à deux faisceaux

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



Au delà du LHC : collisionneurs circulaires futurs (FCC)



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

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

Physique aux futurs collisionneurs

Découverte directe de nouvelles particules

SUSY, ...

→ HL-LHC, FCC-pp

Mesures de précision

Top, Higgs

→ HL-LHC, ILC/CLIC, FCC-ee

Epilogue

- **Succès** du projet LHC jusqu'à présent :
 - 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 collisionneur n'est pas fixé !
 - les expériences **hors collisionneurs** ont aussi leur mot à dire