

Physique aux collisionneurs

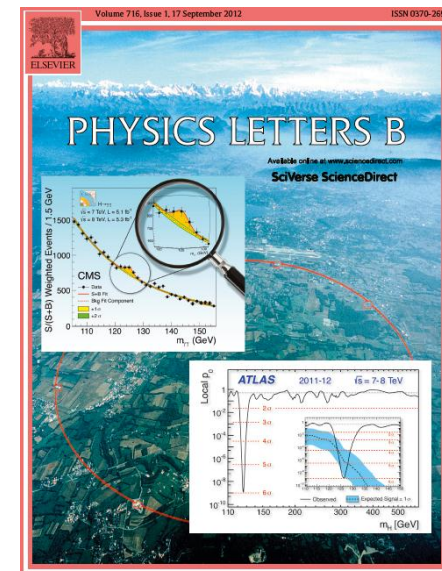
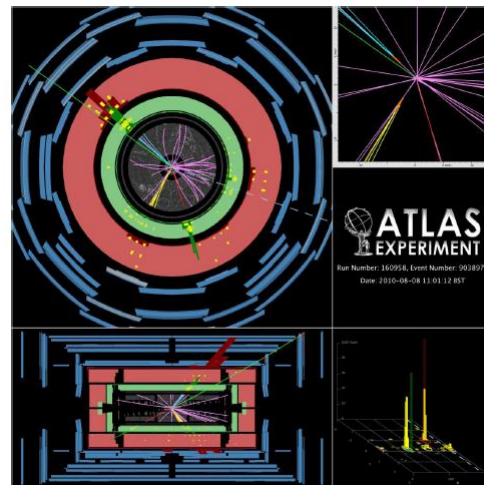
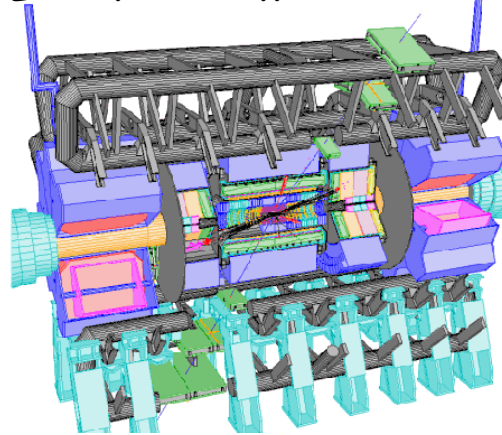
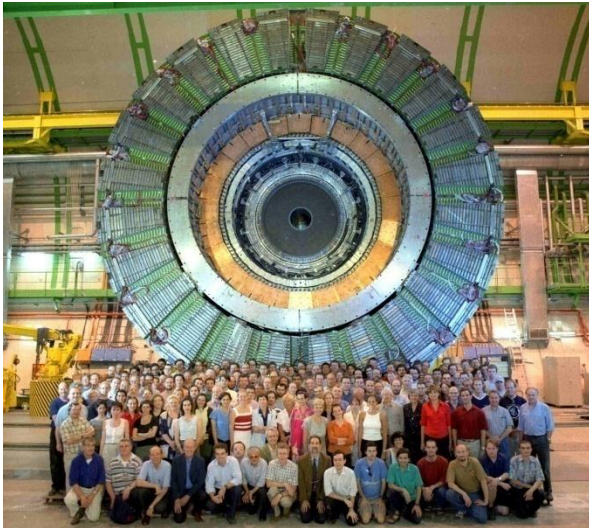
Bruno Mansoulié

Service de Physique des Particules

IRFU (Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers)

Division des Sciences de la Matière

CEA / Saclay



1) Généralités, Présentation Physique des Particules

Introduction

– Plutôt physique de « l'élémentaire ». *Structures*, plutôt que « poupées Russes »
Invariances, symétries, unification.

– Les « Eléments » modernes: *champs, cordes, énergie du vide*, etc.

Ce cours: physique des particules « traditionnelle », mais à garder en tête...

– Ambition: description « élémentaire » du monde.

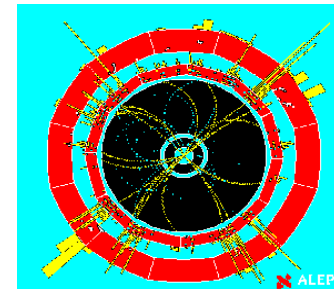
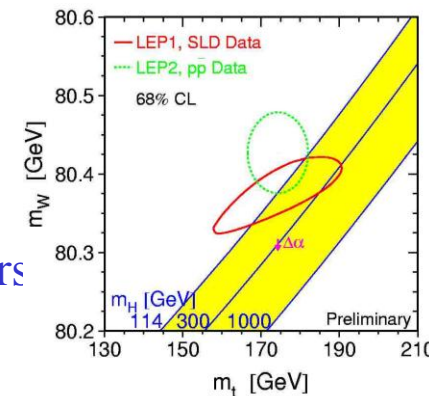
Lien (récent) avec la *cosmologie*: théorie du Big Bang, évolution de l'Univers

– Questionnements:

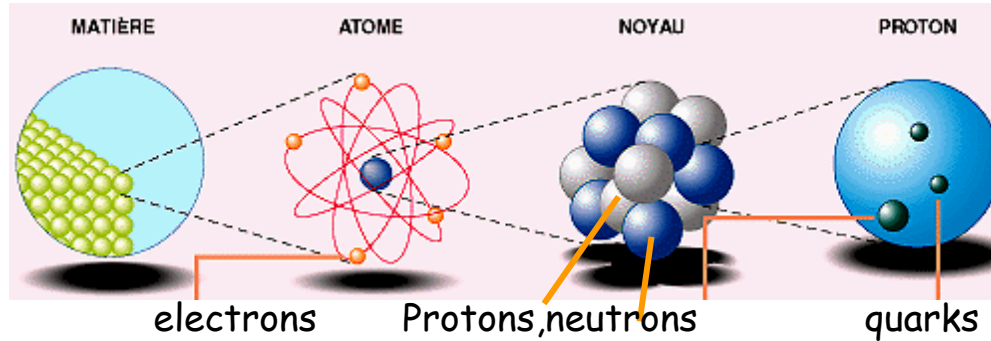
- Aujourd'hui, un modèle (le « *Modèle Standard* »)
sophisticé, très prédictif, confirmé par toutes les expériences.

- D'immenses *questions* sans réponses:

- fonctionnement interne du modèle,
- extrapolation à plus haute énergie,
- et aussi « contenu énergétique de l'Univers »...



- En commençant par la fin: (état des lieux)



<i>Nom</i>	<i>3 familles</i>		
<i>Type d'interaction</i>			
<i>Quarks</i> <i>(Forte et Electro-faible)</i>	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>
<i>Leptons</i> <i>(Electro-faible)</i>	<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>τ</i>
	<i>ν_e</i>	<i>ν_μ</i>	<i>ν_τ</i>

CONSTITUANTS:

Ces **constituants élémentaires** sont des *fermions*:
spin 1/2, statistique de Fermi

- Première colonne (« **famille** »):
constituants des particules « ordinaires »:

- . électron (et son neutrino)
- . proton (uud), neutron (udd)

- Deux autres : répliques identiques à tous points de vue *sauf la masse: plus lourd*
On ne sait pas pourquoi il y a 3 familles!
Produites dans des réactions de « haute énergie », soit naturelles (rayons cosmiques), soit artificielles (accélérateurs...)

INTERACTIONS

L'interaction

ELECTROMAGNETIQUE est la plus habituelle: charge électrique, liaison de l'atome, molécules.

L'interaction **FORTE** concerne les quarks. De nombreux états liés existent: les hadrons.

Les quarks u et d sont les constituants des protons et des neutrons. La cohésion du noyau est aussi due à l'interaction forte.

L'interaction **FAIBLE** se manifeste dans les désintégrations radioactives. C'est elle qui fait « brûler » le soleil. Les neutrinos ne connaissent qu'elle.

GRAVITATION: Concerne toutes les formes de matière et d'énergie. Mais très faible par rapport aux autres interactions au niveau de quelques particules.

Nom Type d'interaction	3 familles		
Quarks (Forte et Electro-faible)	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>
Leptons (Electro-faible)	<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>τ</i>
	<i>ν_e</i>	<i>ν_μ</i>	<i>ν_τ</i>

Charge électrique

$2/3 e$

$-1/3 e$

$-e$

0

Pour en arriver là: tout le 20^è siècle!

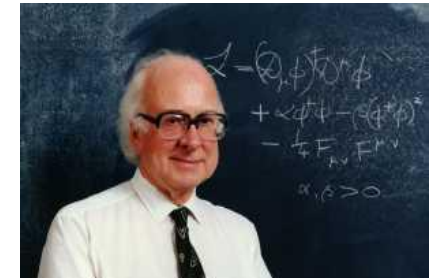
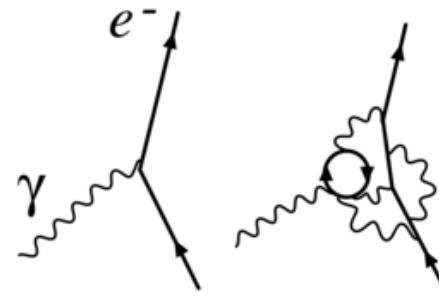


Théorie :

Mécanique quantique et relativité : ~1905

Théorie des champs: ~1950

Mécanisme de Higgs: 1964



Expérimentation :

électron J J Thomson 1897

quark top, accélérateur Fermilab 1995



Cadre théorique de la physique des particules:

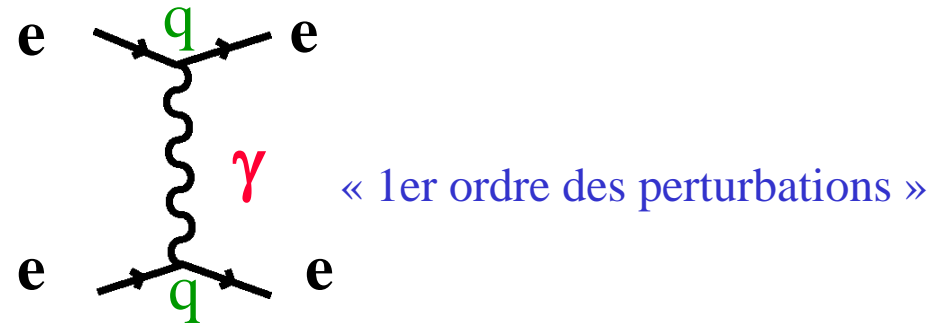
- Relativité restreinte + Mécanique quantique = **Théorie Quantique des Champs**
(le plus souvent sous la forme de « théorie des perturbations »...)
- Particule libre :
 - masse { = énergie « au repos » via $E = m c^2$; *translations* }
 - spin { = moment cinétique intrinsèque; *rotations*; unité: \hbar ;
spin 1/2 entier: fermion, spin entier bosons }
 - nombres quantiques { = charge(s), propriétés vis à vis des interactions, autres symétries)
- ex: un électron libre:
 - masse: 511 keV/c², spin 1/2 (\hbar),
 - charge électrique: $-e$, charge faible: 1/2, charge forte: 0
 - particule stable



– Interaction

ex: l'interaction coulombienne de 2 électrons:

(la banale force en $1/r^2$!)



- L'interaction est décrite par **l'échange d'une particule**; ici UN photon
A chaque « vertex », *l'énergie-impulsion n'est pas conservée !*
Mais possible en mécanique quantique à l'intérieur des relations d'incertitude:

□ $\Delta E \times \Delta t \sim \hbar$ (Constante de Planck)

- *Remarque: l'interaction n'est plus instantanée à distance (comme dans la loi de Coulomb): relativité oblige!*

- Les « **vecteurs** » des interactions sont des *bosons*:

Electromagnétique	Faible	Forte	Gravitation
<i>Photon</i>	Z^0, W^+, W^-	<i>Gluons</i>	<i>Graviton (?)</i>

- L'intensité de l'interaction: une « charge »

<i>Electrique</i>	<i>Faible</i>	<i>Couleur</i>	<i>Masse (grave)</i>
-------------------	---------------	----------------	----------------------

- Résumé
 - **Modèle relativiste ET quantique**
 - **3 familles de fermions constituants, différentes seulement par la masse.**
 - **4 interactions transmises par des bosons**
 - **Dans une famille, différentes charges pour chaque constituant vis à vis des interactions.**

- Complément 1)

Toute particule (fermion ou boson) possède son **antiparticule**:

Même masse, même spin, toutes charges opposées. Ex: $e^- \Leftrightarrow e^+$; $\nu \Leftrightarrow \bar{\nu}$; $q \Leftrightarrow \bar{q}$

- Complément 2)

Particules composites: état lié de particules élémentaires . ex : proton = {u, u, d}; ou H = { p, e⁻ } !

Tout dépend à quelle échelle de distance (d'énergie) on regarde!

Les particules du tableau sont-elles élémentaires? => oui pour le moment, expérimentalement !

- Complément 3)

Particule instable: une particule (élémentaire ou non) se désintègre => autre système de particules si $m_0 > m_1 + m_2 + \dots$, et s'il y a une interaction qui le permet.

Ex: $n \rightarrow p e^- \nu_e$

Durée de vie: τ $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$

Unités naturelles, ordres de grandeur

– Lien par c

Énergie d'une particule: **eV**; keV , MeV, GeV , TeV
 (1 eV = énergie cinétique d'un électron accéléré par un Volt)

Masse : **eV/c²** : énergie au repos : **E (eV) = m (eV/c²) c²**

Ex: m(proton) ~ 1 GeV/c² ; m(électron) = 511 keV ;

Masse des quarks: u, d : quelques MeV; s : ~ 100 MeV ; c : 1.5 GeV; b : 4.7 GeV ; t : 175 GeV

Masse des leptons chargés: électron : 511 keV; muon : 105 MeV; tau : 1.8 GeV

Neutrinos? masse non nulle, inconnue, très petite.

Masse des bosons intermédiaires: photon : 0 ; W : 81 GeV ; Z : 91 GeV

Impulsion : **eV/c** ; **E²(eV) = [P (eV/c) x c]² + [m (eV/c²) x c²]²**

Dans la pratique, on travaille toujours dans le système où **c = 1** .

Énergie, impulsion, masse en MeV, GeV...

Nom Type d'interaction	3 familles		
	Quarks (Forte et Electro-faible)	<i>u</i>	<i>c</i>
<i>d</i>		<i>s</i>	<i>b</i>
Leptons (Electro-faible)	<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>τ</i>
	<i>ν_e</i>	<i>ν_μ</i>	<i>ν_τ</i>

– Lien par \hbar

- Longueur d'onde associée à une particule: $\lambda = \hbar/p$; relie distances et impulsions

De même, relations d'incertitude: $\Delta x \cdot \Delta p_x \sim \hbar$, $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$: distance x impulsion, énergie x temps

A savoir par coeur : $\hbar c \sim 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ ($1\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

Ex: Résolution d'un “microscope électronique” : sonder la matière avec un faisceau (ou des collisions)

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

- Autre relation: portée d'une interaction (modèle de Yukawa):

Interaction transmise par un boson de masse $m \Leftrightarrow$ portée: \hbar / m (en fait $\hbar/mc\dots$)

Interaction	Electromagnétique	Faible	Forte
Boson médiateur	γ , $m = 0$	Z, W, $m = 100 \text{ GeV}$	π , $m = 100 \text{ MeV}$ (<i>dans ce modèle</i>)
Portée	infinie	$2 \cdot 10^{-4} \text{ fm}$	2 fm

Expérimentation

- Sources de particules

- **Radioactivité** : sources naturelles ou artificielles. Énergie typique: keV \rightarrow MeV

- **Provenance cosmique** (« **rayons cosmiques** »)

Particules venant de l'espace (protons, noyaux[?]). Interaction dans l'atmosphère \Rightarrow débris arrivent au sol, essentiellement des muons, E moyenne qqes GeV. Taux total $200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Spectre : typiquement E^{-3} ; on trouve des cosmiques de très haute énergie, très rares: détecteurs de plusieurs km^2 , événements à 10^{19} eV (10 PeV)!

Autres particules cosmiques: neutrinos solaires, neutrinos émis par les supernovae, etc.

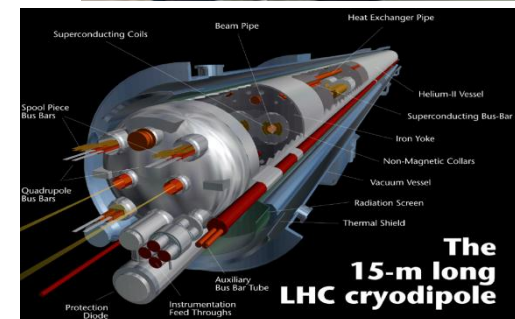
- **Accélérateurs**

toujours de particules chargées:

Accélération: champ **E** fourni par des cavités résonantes;

Courbure: champ **B** fourni par des aimants dipolaires souvent supraconducteurs aujourd'hui

Guidage: champ B quadripolaire (lentilles magnétiques)...



• Accélérateurs

Il existe une foule de types d'accélérateurs... du tube de télévision (qqes keV) au LHC (protons 7 TeV contre protons 7 TeV)

- Linéaires: tube à vide, suite de cavités accélératrices, avec éléments de guidage.

Peut accélérer des électrons, des protons, des ions...

« Gradient » typique : 10 MeV / m . Ex: SLAC (USA) : 3 km long, 50 GeV électrons, $\sim 3 \cdot 10^{14}$ e/s

- Circulaires

tube à vide, suite d'aimants de courbure (dipôles), de guidage (quadripôles), et de cavités accélératrices.

courbure dans un champ magnétique: **P (GeV) = 0,3 B (Tesla) R (m)**

- **Électrons**: perte d'énergie par rayonnement synchrotron: **ΔE (GeV) = $10^{-4} E^4$ (GeV) / R (m)** par tour!

=> énergie limitée par la puissance accélératrice des cavités.

- **Protons** : (presque) pas de rayonnement => énergie limitée par le champ magnétique des aimants

- **Ions** : idem . Intensités limitée par les sources

PS Cern: protons 28 GeV
Diamètre 72 m
1959 ==> ...
(Injecteur des autres)



LEP : $e^+ e^-$, 100 + 100 GeV
Circonférence 27 km
Tunnel à 100m sous terre
1989- 2000

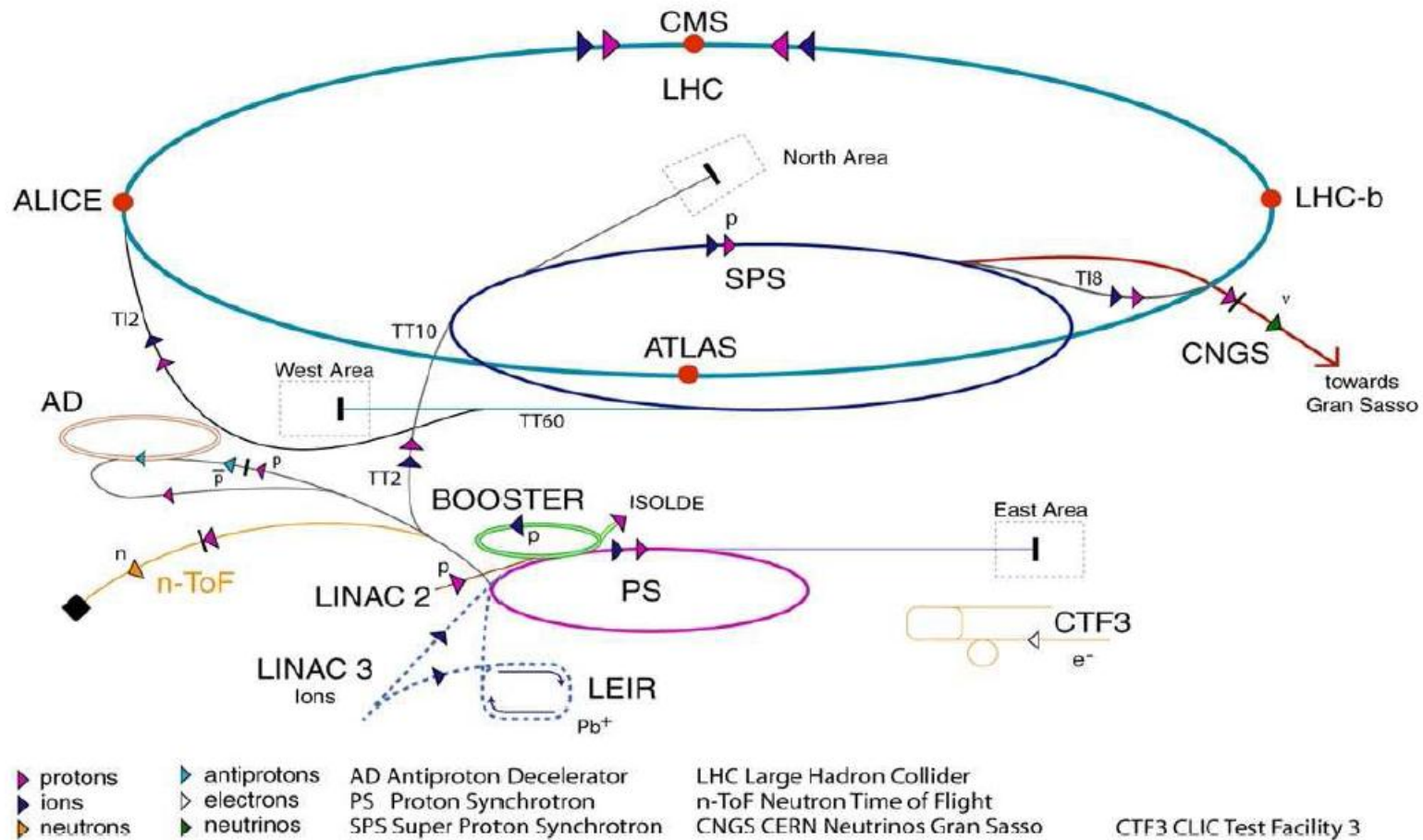
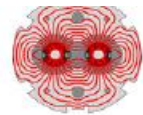


LHC $p + p$, 7 + 7 TeV
2008.....



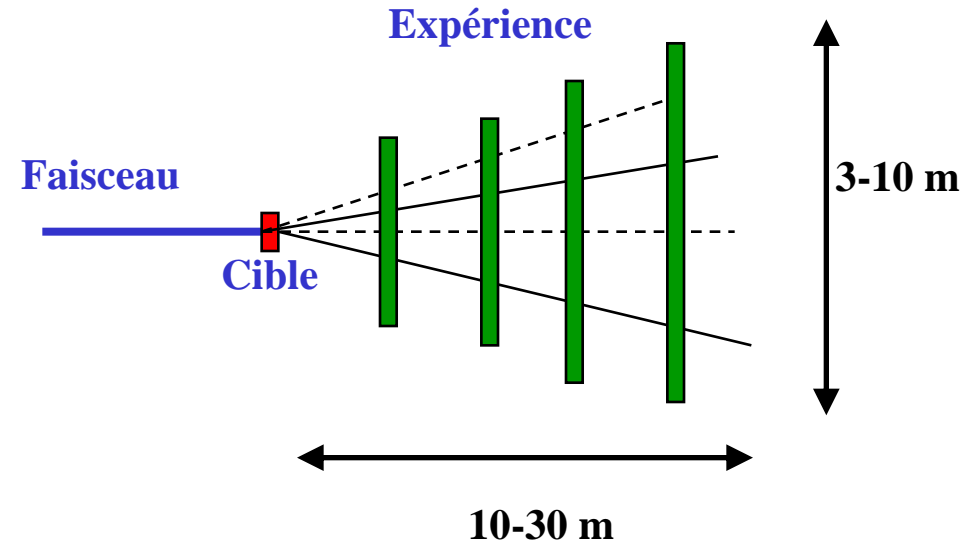
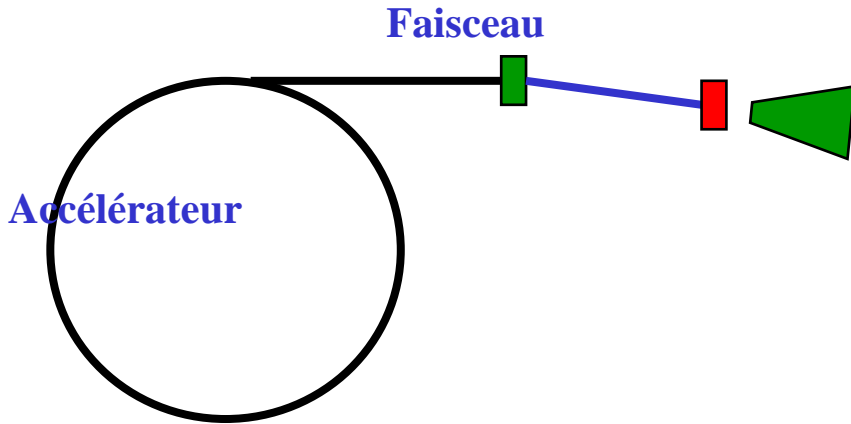


Le complexe des accélérateurs du CERN



Expériences sur accélérateurs

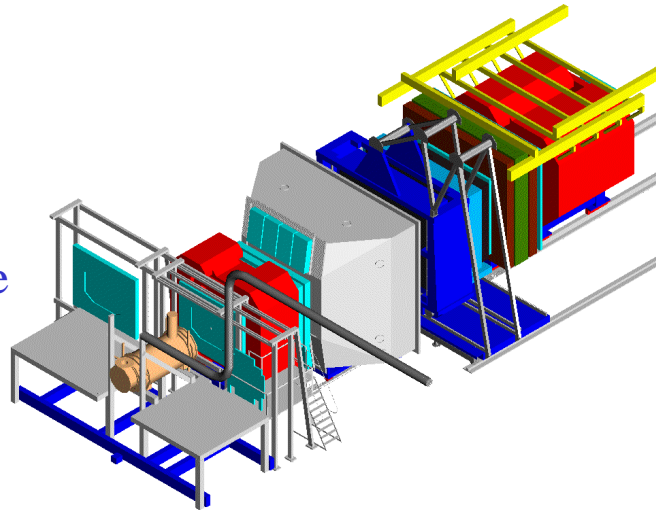
- Expériences sur « cible fixe »



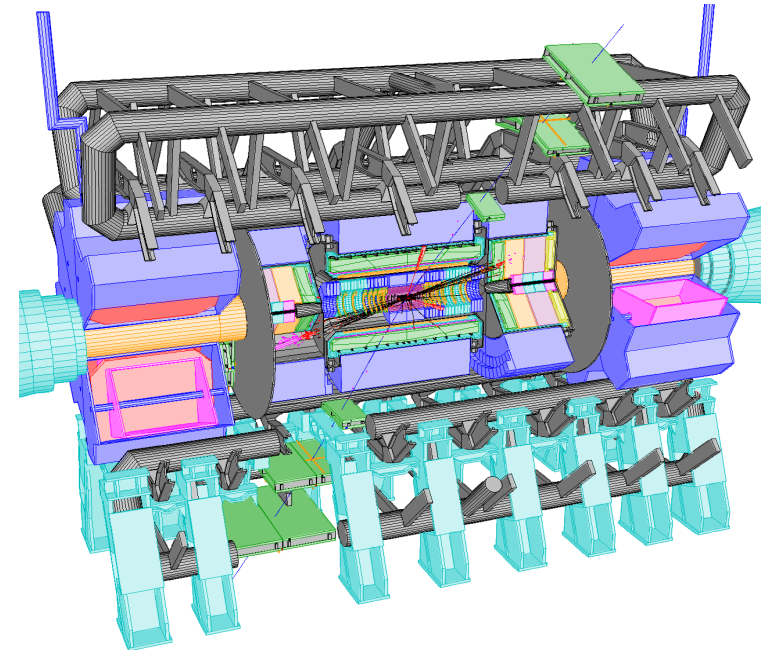
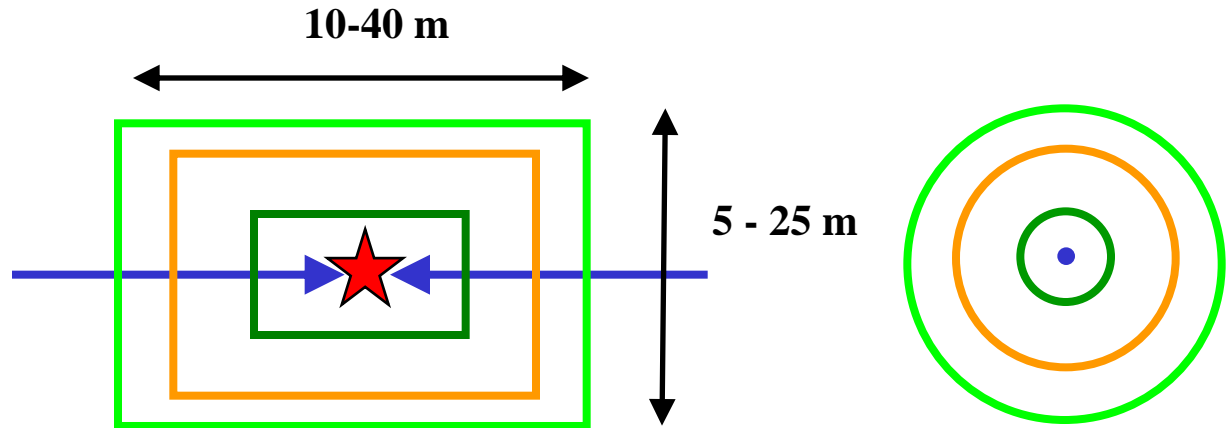
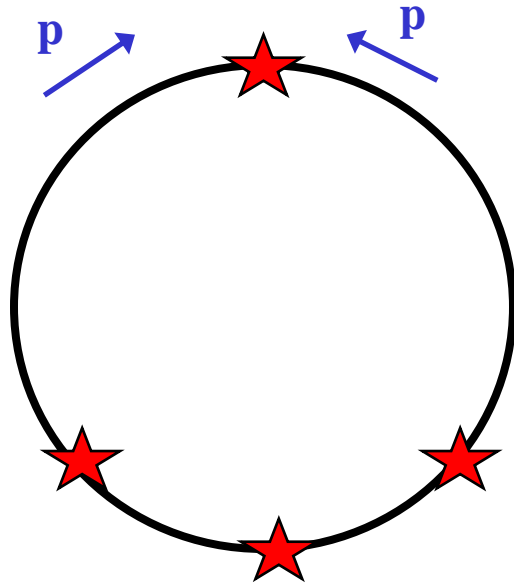
Ex: COMPASS

Expérience: faisceau de muons (à partir de protons de 450 GeV du SPS) sur cible d'hydrogène

But: recherches sur la structure du proton



- Expériences sur collisionneur



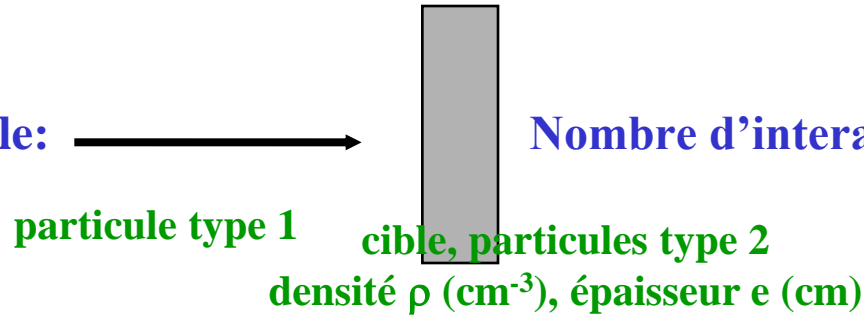
Collisionneur: 2 faisceaux en sens inverse

Même anneau : $e^+ e^-$, $p \bar{p}$

2 anneaux: $p p$, $e p$

- Section efficace

Section efficace totale:



Nombre d'interactions **moyen**: $\nu = \sigma \rho e$
(cm^2)

Quantique! => le processus est **statistique**! Si on répète l'expérience N fois, les n_i observés ont une distribution de Poisson de moyenne ν : $P(n) = e^{-\nu} \nu^n / n!$

σ peut dépendre de E_1 , du processus observé, etc...

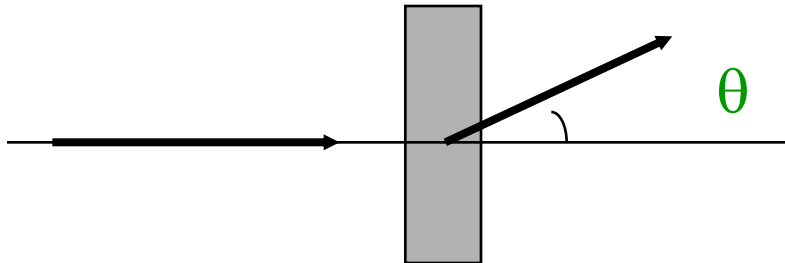
Unité habituelle: le barn = 10^{-24} cm^2 (et mb, μb , nb, pb, fb...)



Big as a barn

Section efficace différentielle: restreint à une partie des états finals

Ex:



$$dn(\theta) = d\sigma/d\theta \rho e d\theta$$

Collisionneurs: énergie et luminosité

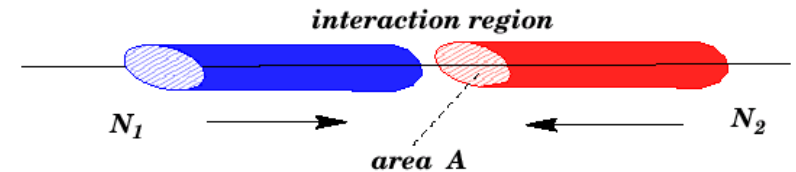
Nombre d'évts par seconde pour faisceau sur cible fixe: $dN/dt = I(s^{-1}) \sigma (cm^2) \rho (cm^{-3}) e (cm)$

Pour un collisionneur?

Luminosité: Nombre d'évts par seconde pour une section efficace σ : $dN/dt = L \sigma$, L en $cm^{-2}s^{-1}$

$L \sim$ intensité des 2 faisceaux

$L \sim 1/$ taille faisceaux au point d'interaction



$$L = \frac{n_b \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot f_{rev}}{A} \quad \underline{A = \pi \cdot \beta \cdot \epsilon}$$

Ex: LEP au Cern : $e^+ e^-$ 100 + 100 GeV (de 1989 à 2000) , $L = 10^{31} cm^{-2}s^{-1}$

HERA (Hambourg) : e 30 GeV + p 820 GeV

Fermilab : $p + pbar$ 1 TeV + 1 TeV $L = 10^{33} cm^{-2}s^{-1}$

LHC : $p-p$, prévu pour 7 + 7 TeV, $L = 10^{34} cm^{-2}s^{-1}$ Aujourd'hui 4 + 4 TeV, $L = 7 \cdot 10^{33}$

Anneaux moyenne énergie pour études particulières: PEP2 à SLAC ($e^+ e^-$, 9 + 3 GeV, $L = 10^{34} cm^{-2}s^{-1}$)

- Quelques particules courantes dans les produits de collisions

- hadrons : formés de quarks, **interactions fortes**+...

- Etats liés de **2 quarks**: « mésons »

	; nature	;	durée vie	;	vue comme...
π^+, π^-	; $u\bar{d} (\bar{u}d)$;	$2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$;	trace chargée + calorimètre hadronique
π^0	; $(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$;	$8,4 \cdot 10^{-17} \text{ s}$;	2γ : calorimètre électro-magnétique
K^+, K^-	; us	;	$1,2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$;	trace chargée + calorimètre hadronique
K^0	; ds	;	$K^0_S \rightarrow \pi \pi / K^0_L \rightarrow \pi \pi \pi$;	2 chargés / 1 hadron neutre

mésons **D**= $cu, cd, cs...$ et **B**= bu, bd, bs : « traces » très courtes (1-10mm) => « vertex déplacé »

- Etats liés de **3 quarks**: « baryons »

p (proton) :	uud	;	stable	-	;	trace chargée + calo had	
n (neutron) :	udd	;	$n \rightarrow p e^- \nu_e$;	durée : 886 s	;	impact calo had
Autres baryons... ex Λ^0 :	$uds...$	etc.		;			

- **leptons (élémentaires) : interactions faibles, électromagnétiques...**

e (électron) ; stable				; trace chargée + calo électromagnétique
μ (muon)	; $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$; $2,2 \cdot 10^{-6}$ s		; trace chargée pénétrante (spectro à mus)
τ (tauon)	; plusieurs	; $2,9 \cdot 10^{-14}$ s		; trace(s) et impact(s)

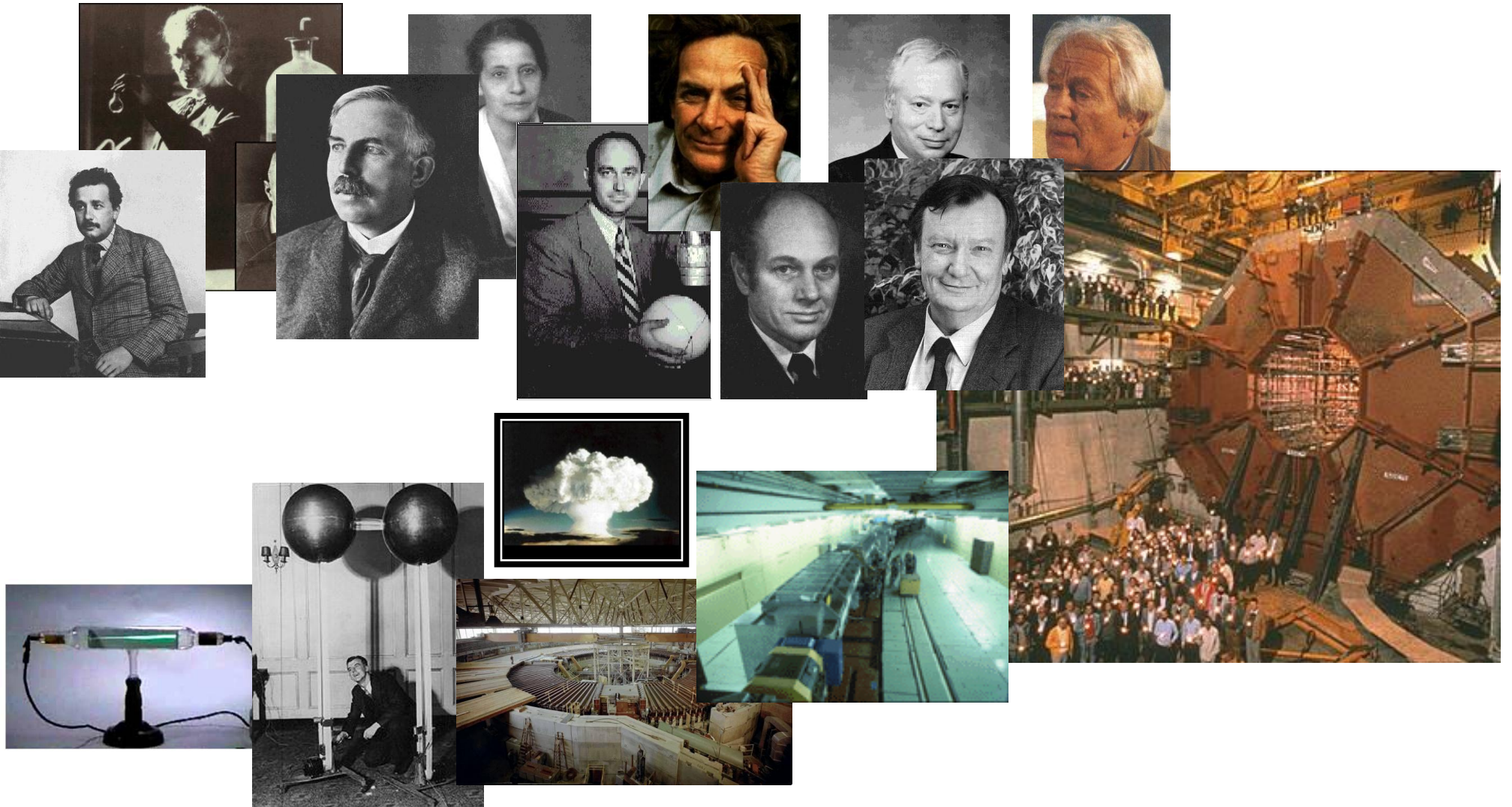
– **neutrinos**: stables. interactions très faibles: pas vus dans les détecteurs « courants » (sauf par l'énergie manquante). Mais il existe des expériences « de neutrinos »: détecteurs très massifs.

- **Photon**

– Stable. Impact calorimètre électromagnétique

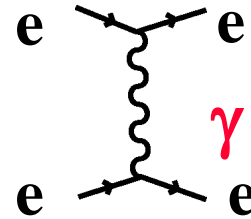
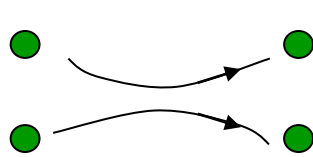
- *N'étant pas sensibles à l'interaction forte, leptons et photons sont de bonnes signatures d'événements « intéressants ».*

Le Modèle Standard



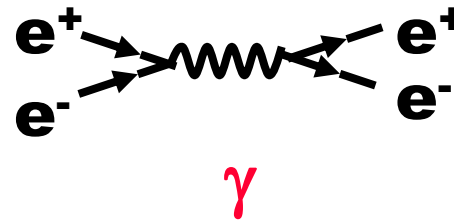
- Interaction électromagnétique : Particules « chargées », médiateur: photon

- Collision « classique »:



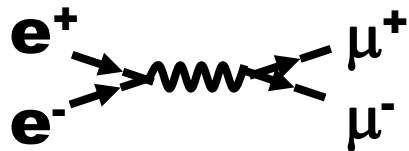
Amplitude totale

- Mais aussi (quantique relativiste!) :

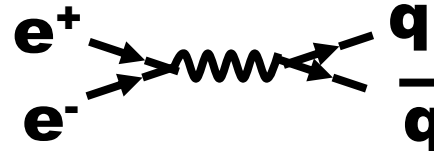


Interférence

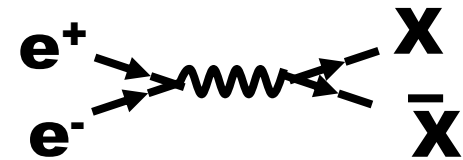
- Et



Et



- La collision e⁻e⁺ donne accès à toute la physique possible,
- pourvu que l'énergie soit suffisante! [ici 2E > 2M(X)]

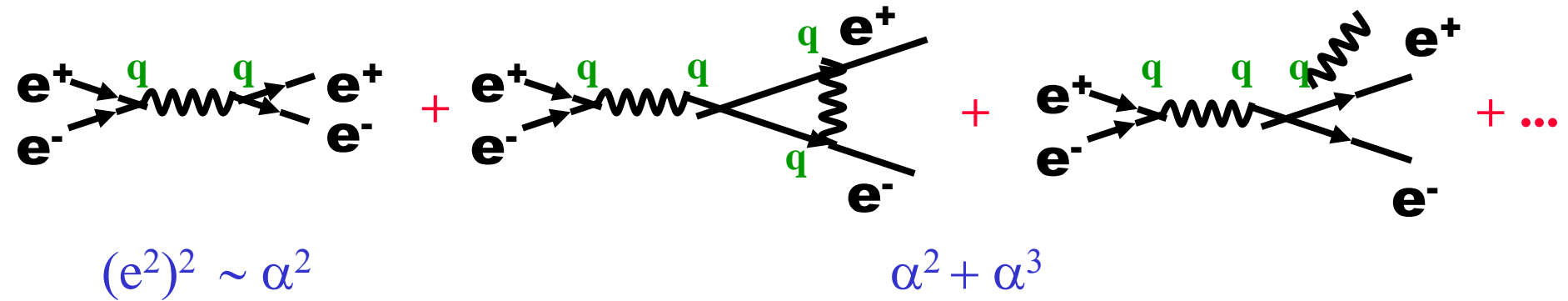


- Electrodynamique quantique (QED): électrons et photons

- Effets virtuels



- Calcul d'un processus : série de perturbation en puissance du « couplage » (ici $\alpha = 1/137$)



- QED « Renormalisable ». => extrêmement efficace pour les calculs. (*raison: symétrie « de jauge »*)

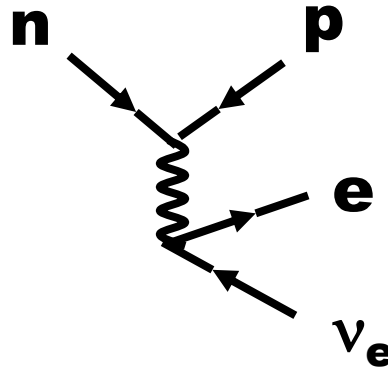
Succès: des atomes (Lamb shift, effet Casimir...) aux plus hautes énergies atteintes (LEP)

=> **QED : le modèle de théorie**

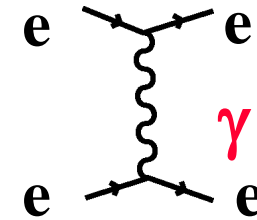
- Interaction faible

- Observation: désintégration β des noyaux atomiques : $(A,Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^- + \nu_e$

ex: neutron $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$



rappelle

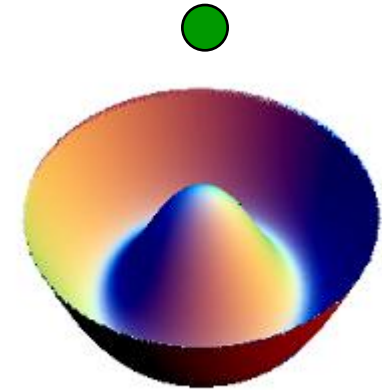


... si (n,p) sont la même particule et (e^-, ν_e) aussi pour l'interaction faible \Rightarrow « doublets »

- Noter : la particule échangée est chargée, et massive : W^+ et W^- ($m = 80 \text{ GeV}$)
- Peut-on « unifier » les interactions électromagnétique et faible ?
 - Garder les bonnes symétries (*de jauge*)
 - Trouver une bonne raison pour que $m(W) \neq m(\gamma)$

- Unification des interactions EM et faibles
- **Solution:** mécanisme de « brisure spontanée de symétrie »:

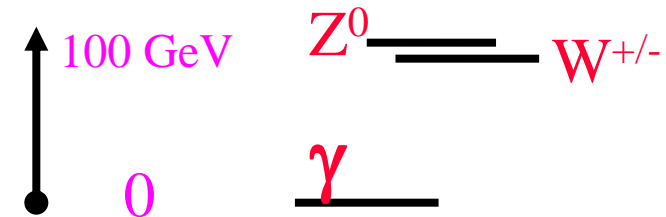
Potentiel symétrique, état fondamental non-symétrique



- **Réalisation pratique:** introduction du boson de Higgs.

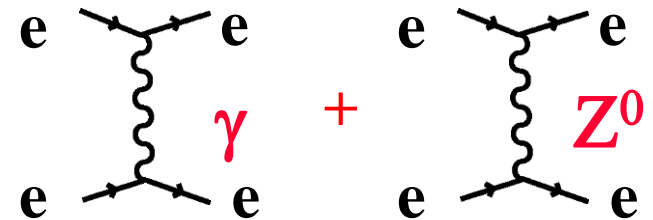
- **Conséquences:**

- Le photon reste sans masse
- Existence d'un médiateur neutre de l'interaction faible: le Z^0
- L'interaction « électrofaible » est « renormalisable »:
- On sait tout calculer!



- **La brisure de symétrie électro-faible vue du haut**

- Interactions EM et faible « indiscernables » (symétriques) à très haute énergie $E \gg 100 \text{ GeV}$
- Se séparent à plus basse énergie sous l'effet du champ de Higgs et prennent chacune leur structure et leur portée.





- Interactions fortes

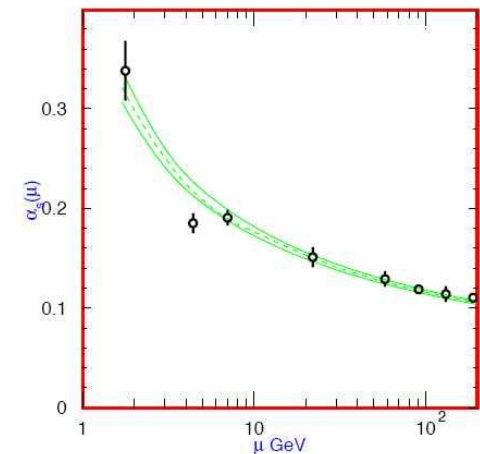
- Observations

- Cohésion des noyaux => force forte, courte portée
- Expériences $e + p$, $\mu + p$, $\nu + p$ => existence des quarks: $p = uud$, $n = udd$
- Quarks jamais libres! (charge électrique : $2/3$, $-1/3$)
 - Etats liés : mésons (2 quarks), baryons(3 quarks)
 - Quark dans l'état final d'une collision: jets de particules
- Charge forte: 3 « couleurs » (groupe)

- Théorie : Chromodynamique Quantique.(QCD)

- A nouveau copiée sur QED, « *théorie de jauge* » renormalisable
- Médiateur: gluon
- Propriété étrange: le couplage augmente avec la distance!
(diminue avec l'énergie)
- Aussi performante que QED à haute énergie
- Difficile à basse énergie

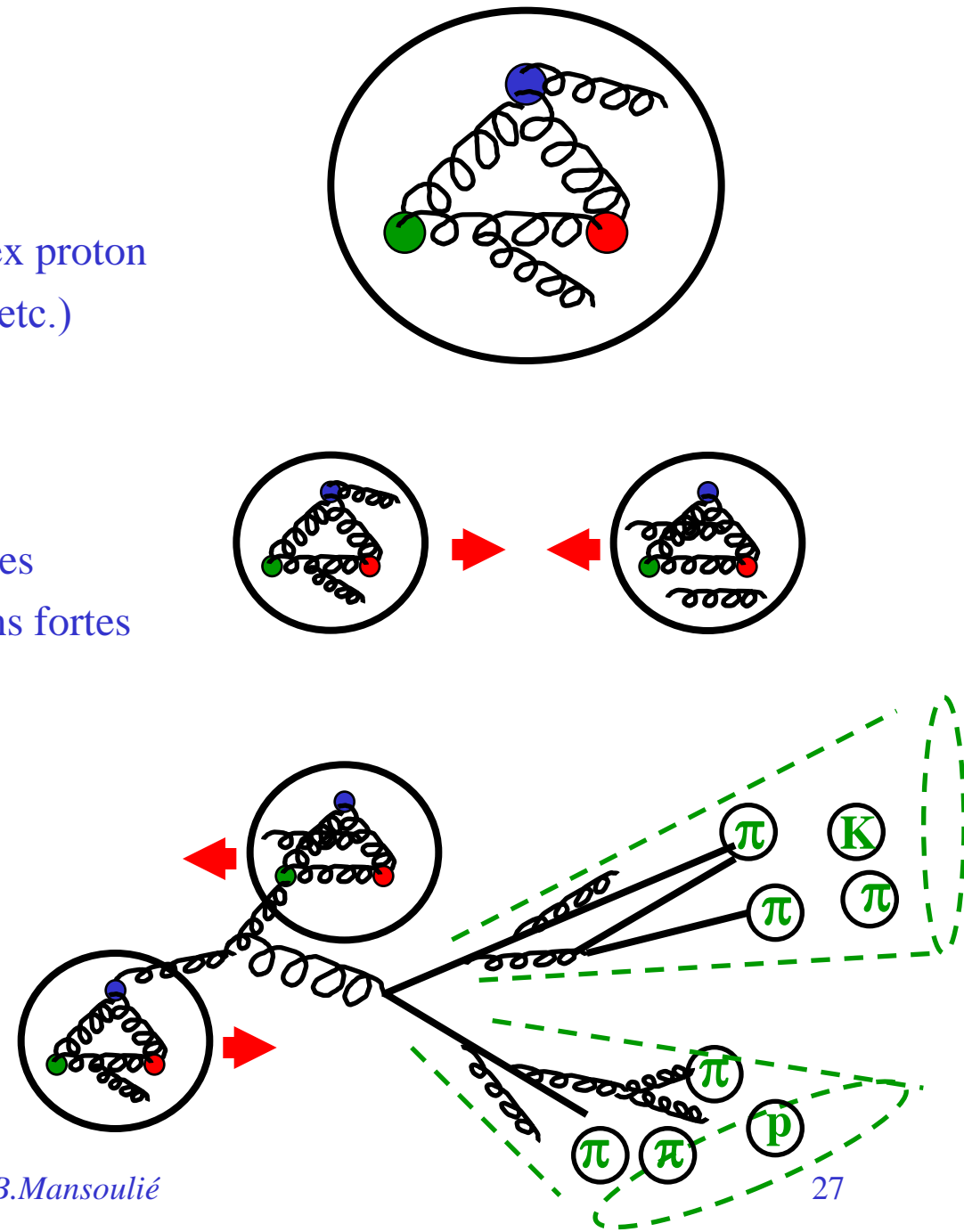
$\alpha(E)$



$E(\text{GeV})$

• **Interaction forte: phénoménologie**

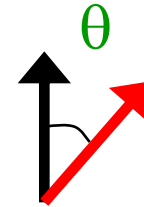
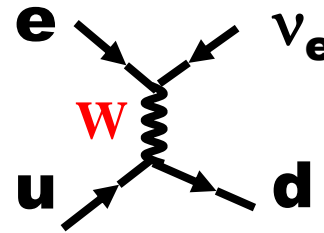
- Basse énergie:
- états liés de quarks et gluons: ex proton
(mésons π , K, D, B...; proton, neutron, etc.)
 - Fonctions de structure
 - (semi-empiriques)
- Couplages forts: sections efficaces élevées
 - Collisions proton-proton: interactions fortes = principal bruit de fond
- Haute énergie: état final = jets
 - Jets de quarks légers
 - Jets de gluons
 - Jets de quarks lourds



Mélanges de quarks

- **Interaction faible: « doublets » :**

- quarks : (u , d) ; (c , s) ; (t , b)
- Doublet: vecteur dans un « espace ».
- Mais pas forcément état propre de masses!
- Interaction faible « voit » (u , d') ; (c , s') ; (t , b')



2 familles : 1 angle θ_c (Cabibbo)

- **3 familles**

- Kobayashi + Maskawa : Nobel 2008
- (d', s', b') = V (d, s, b)
- V matrice unitaire.

$$V = \begin{pmatrix} u & \begin{matrix} d & s & b \\ 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3 \left(\rho - i\eta \left(1 - \frac{1}{2}\lambda^2 \right) \right) \end{matrix} \\ c & \begin{matrix} -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 - i\eta A^2 \lambda^4 & A\lambda^2 (1 + i\eta \lambda^2) \end{matrix} \\ t & \begin{matrix} A\lambda^3 (1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{matrix} \end{pmatrix}$$

- Structure (« η »): possibilité d'une asymétrie matière-antimatière (« violation de CP »)
- Sujet d'étude de Babar, LHCb...

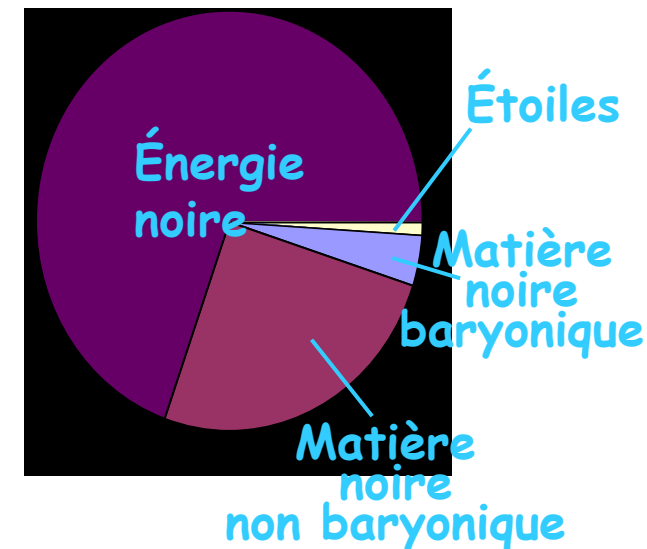
Modèle Standard et au-delà

• Résumé du MS

- Constituants : 3 familles (2 quarks, 1 lepton chargé, un neutrino)
- Interactions: Electro-faible (+ brisure), Forte; toutes: théories de jauge, renormalisables
- Toutes les masses des particules élémentaires, tous les couplages: proviennent de la brisure de symétrie électrofaible via le mécanisme de Higgs; mais leurs valeurs sont des paramètres libres (~25 paramètres)
- Efficace dans son cadre: calculs corrections quantiques, cohérence...

• Les problèmes du MS

- Pourquoi: 3 familles ? Ces symétries? Valeurs des paramètres?
- Extrapolation? Unification électrofaible-forte?
 - Si oui: $\sim 10^{16}$ GeV; et gravité: 10^{19} GeV
 - Stabilité du Higgs: « hiérarchie » 10^{16} GeV / 100 GeV ?
- Contenu énergétique de l'Univers: MS décrit seulement 4% !



- Au-delà du Modèle Standard

Théories censées englober le MS, et résoudre au moins certains des problèmes!

- **Modèles composites**

- Particules composites, Higgs composite...
- Pas de bon modèle aujourd'hui

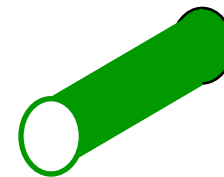


- **Super-Symétrie**

- Symétrie entre bosons et fermions
- Dernière **symétrie fondamentale** non encore observée!
- Chaque particule a un s-partenaire.
- Non observé => symétrie brisée.
- Echelle naturelle de brisure: échelle électrofaible => plein de physique à ~ 1 TeV!
- Résout (plus ou moins) le problème de hiérarchie
- **Candidat idéal pour matière noire**: LSP (lightest supersymmetric particle):
(en général: neutralino)

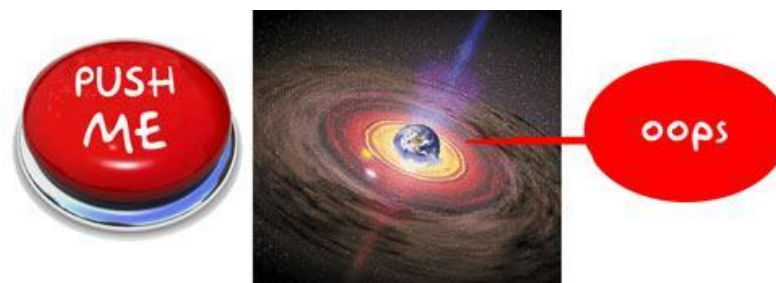


- **Dimensions supplémentaires**



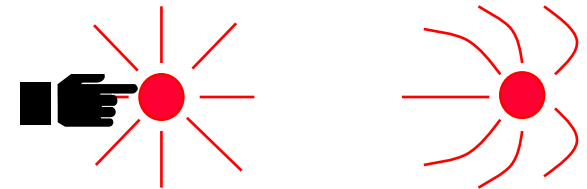
- Kaluza Klein 1919 : relativité générale en 5 dim.
dont une compacte => relativité + électromagnétisme !! ?? Dimension compacte taille R
- Années 1980: théories de cordes: théorie quantique de la gravitation.
Taille des dimensions supp: $R \sim L \text{ Planck } 10^{-33} \text{ cm } (=1/10^{19} \text{ GeV})$
- Récemment: dimensions supp “grandes” $\sim 1/(1 \text{ TeV})$: gravité quantique à $\sim 1 \text{ TeV}$!
- Résout (plus ou moins) le problème de hiérarchie: une seule échelle d'énergie pour tout!
- Phénoménologie inconnue (puisque pas de théorie quantique de la gravitation)...

Entre autres: possibilité de créer
des (*micro-*) trous noirs !



Le « boson de Higgs » et la masse des particules

- **L'origine des masses (inertielles) des particules est au cœur de beaucoup de grandes questions:**
 - Qu'est-ce qu'une particule élémentaire?
 - Pourquoi y-a-t-il de l'énergie là et pas ailleurs?
 - Pourquoi ça « résiste » ?
 - Relation avec gravitation, énergie noire,
 - etc.
- **La valeur la plus « naturelle » de masse pour une particule: 0 !**
en particulier pour avoir la symétrie électrofaible, et une théorie « renormalisable »
- **Le « mécanisme de Higgs »: comment donner une masse « naturelle » aux particules...**
 - *Tout en préservant les jolies symétries que nous avons identifiées ($u \Leftrightarrow d, e \Leftrightarrow n, Z^0 \Leftrightarrow \gamma \dots$)*



Anderson, Nambu, Schwinger Brout-Englert, Higgs Guralnik, Hagen, Kibble

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout
Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note,

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that,

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V'(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

- **2 articles essentiels**
 - Tous deux décrivent le « Mécanisme »
 - Seul Higgs décrit (assez précisément) le « boson »
- **Repris par de nombreux auteurs (en particulier Weinberg et Salam) pour créer le « Modèle Standard »**
- **Cette théorie dit tout... sauf la masse du boson de Higgs**
 - Originellement, possible de ~ 2 GeV à ~ 1000 GeV (1 GeV \sim masse du proton)

Le mécanisme de Higgs

Le défi du ministre anglais aux chercheurs: expliquez moi ça simplement !

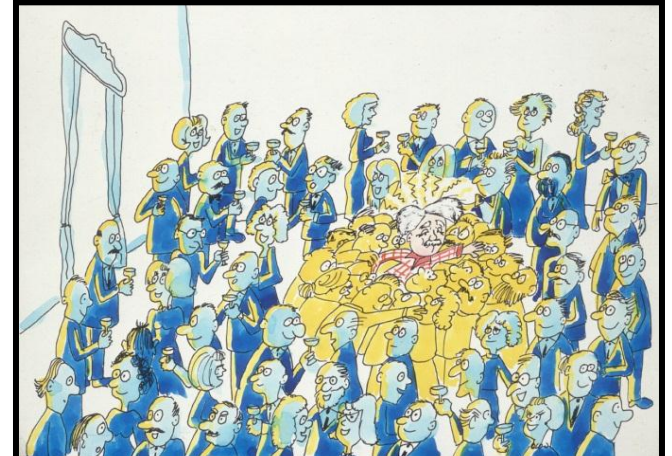
Réponse de David Miller, mise en BD : Cern.



Une assemblée de
physiciens:
le « vide quantique »



Arrive une personnalité
libre de ses mouvements



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

En termes un peu plus techniques: le vide se « condense » autour d'une particule, ce qui lui donne une masse.

Le boson de Higgs



Une rumeur est lancée
dans la pièce...



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

*Le vide (quantique) peut « s'auto-condenser » (si on injecte de l'énergie),
c'est le **boson de Higgs***

C'est ce qu'on fait au LHC dans les collisions proton-proton

Le boson de Higgs et l'évolution de l'Univers

- **t = 0 : le Big-Bang (il y a 13,7 milliards d'années...)**
 - Une période inconnue et mystérieuse... Température de ? ($> 10^{30}$ K) à 10^{16} K
- **t un peu avant 10^{-12} secondes (un millième de nanoseconde):**
 - Univers encore très chaud (10^{16} K), en refroidissement
 - particules élémentaires actuelles (quarks, électrons, neutrinos...), sans masse.
- **t $\sim 10^{-12}$ secondes : entrée en action du mécanisme de Higgs**
 - processus similaire la condensation: 'vapeur d'eau \Rightarrow eau' quand T descend
 - le vide acquiert une certaine « tension interne ».
- **t après 10^{-12} secondes , après le mécanisme de Higgs**
 - Le vide se condense autour des particules: elles ont une masse, et ne vont plus à la vitesse de la lumière (sauf la lumière elle-même!)
- **t = 2012 après JC:**
 - Des physiciens réalisent des collisions p-p assez énergétiques pour injecter de l'énergie dans le vide et en faire surgir son « auto-condensation »: des bosons de Higgs...

Physique aux collisionneurs $e^+ - e^-$: LEP

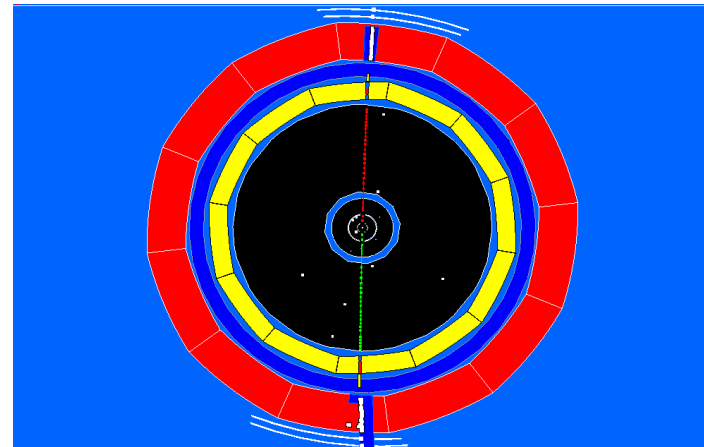
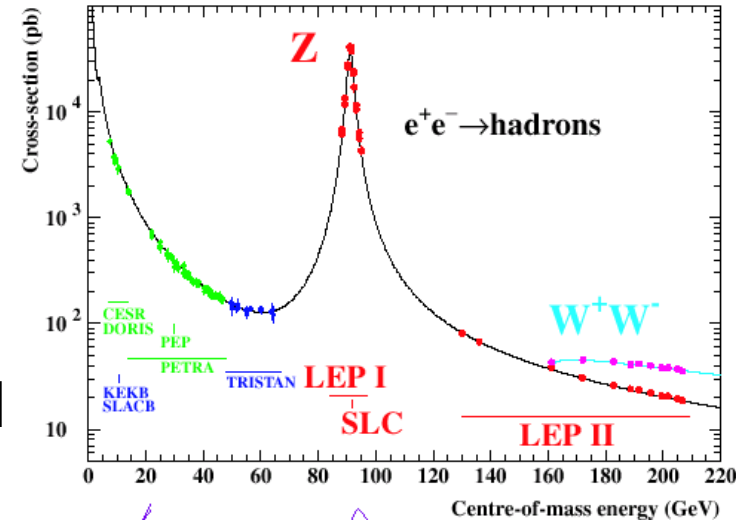
- Introduction

- $e^+ - e^-$ 27 km de circonférence
- 1989 - 1995 : 45,5 + 45,5 = 91 GeV : « pic du Z^0 »
- 1996 – 1998 : augmentation énergie
- 1998 – 2000 : de 189 à 209 GeV

- 4 grandes expériences A, D, L, O

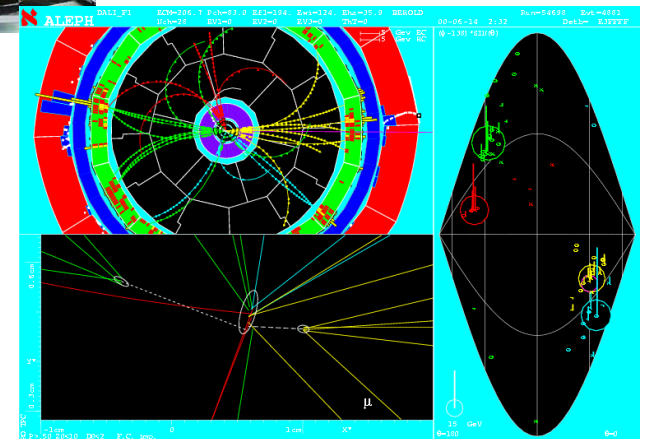
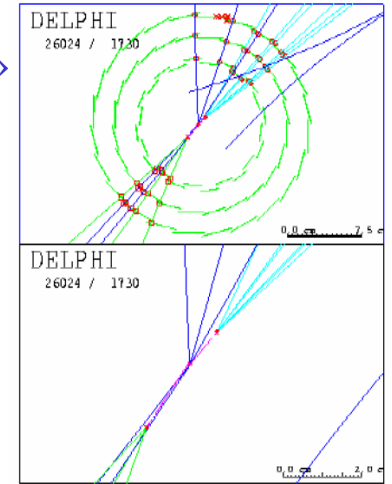
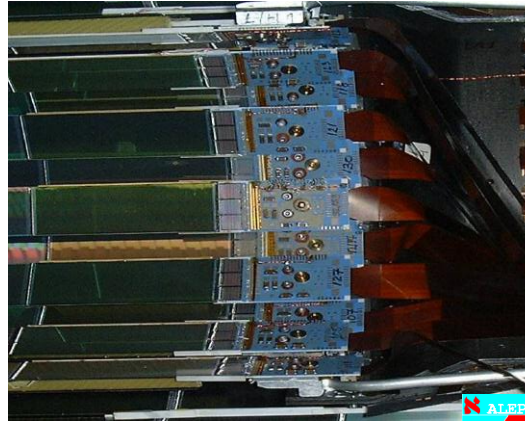
- e^+ et e^- : élémentaires.

- Événements très « propres »
- Tous les évts sont « intéressants ».
- Energie de collision: fixe
- Centre de masse collision fixe (0,0,0)



$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Expériences LEP
- Temps entre croisements: 20 μ s
- Taux d'événements : LEP 1 (pic du Z): 1 evt/s; LEP 2 (WW) : quelques evts « durs » par heure!
- Détecteurs très complets, mesures de précision. Premiers « micro-vertex »
- Peu de problèmes de radiations
- Collaborations : 300 -500 physiciens



- LEP 1 : l'usine à Z^0

Plus de 18 millions de Z^0 produits

- $m(Z) = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$ ($2 \cdot 10^{-5} \text{ !!}$)

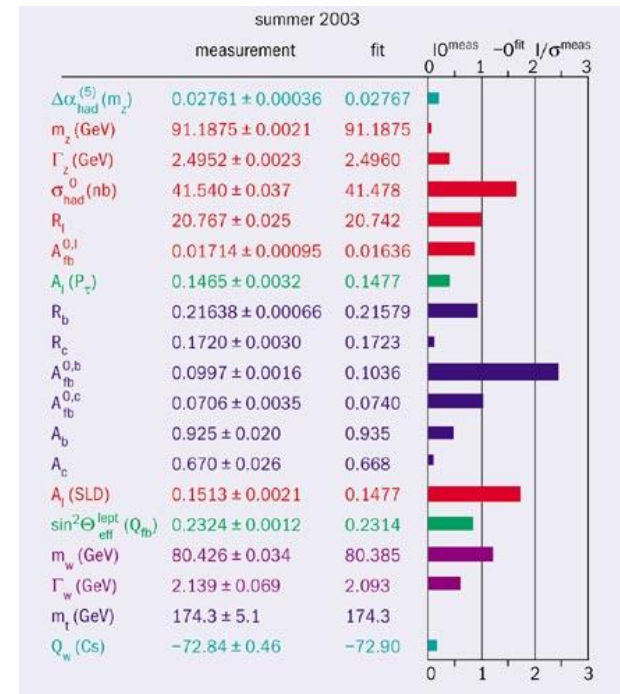
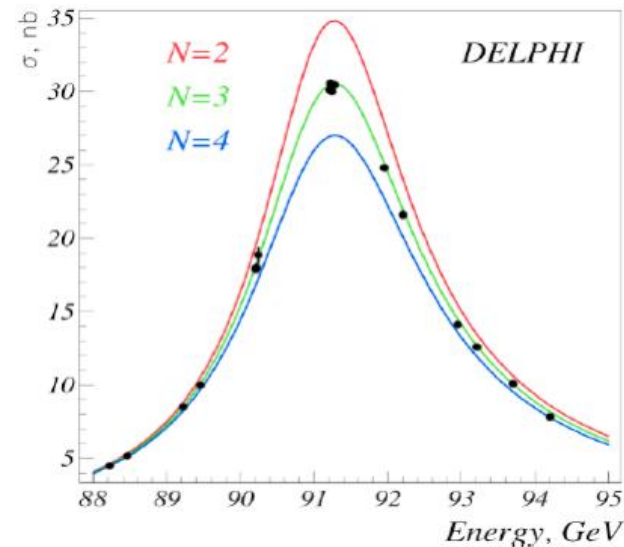
- Nombre de neutrinos [$m < m(Z)/2$] : 3
(désintégration $Z \rightarrow \bar{\nu} \nu$)

- mesure constante interactions fortes:

- $\alpha_s(m_Z) = 0.1183 \pm 0.0027$

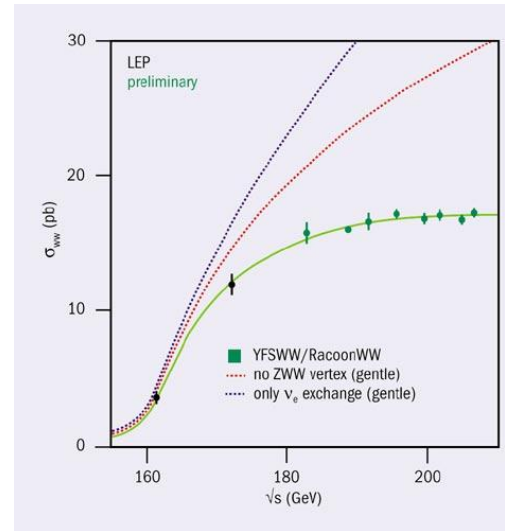
- Nombreux tests de la partie électrofaible du SM:

=> Tous le confirment!



- **LEP2 : énergie max**

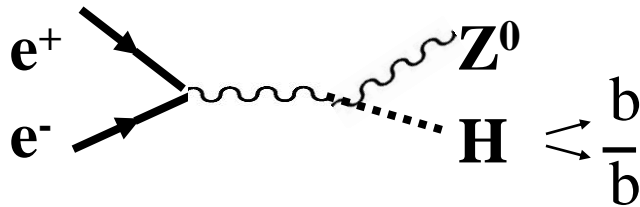
- 80 000 évts $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$
- $m(W) = 80.376 \pm 0.033 \text{ GeV} (4 \cdot 10^{-4})$



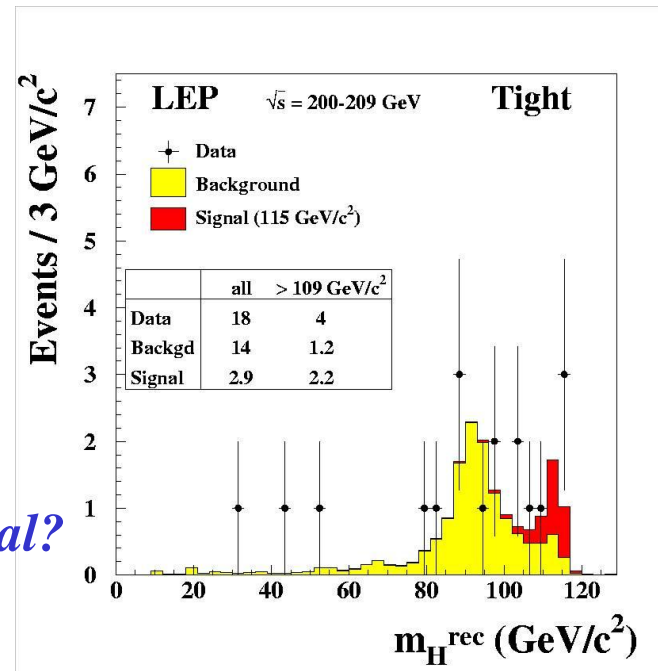
$\sigma(WW)$ en fonction de E

Dépend fortement de la structure de l'interaction

- **Recherche du Higgs**



Signal?



*En fin de compte:
 Limite
 $M(H) > 114.4 \text{ GeV}$*

Physique aux collisionneurs hadroniques

- HERA : collisions e-p (Hambourg, 1994-2007)

- Anneau électrons 28 GeV + anneau protons (supra) 920 GeV $\Rightarrow E_{CM} = 318$ GeV
- 2 grandes expériences **H1** (IN2P3, CEA) et Zeus

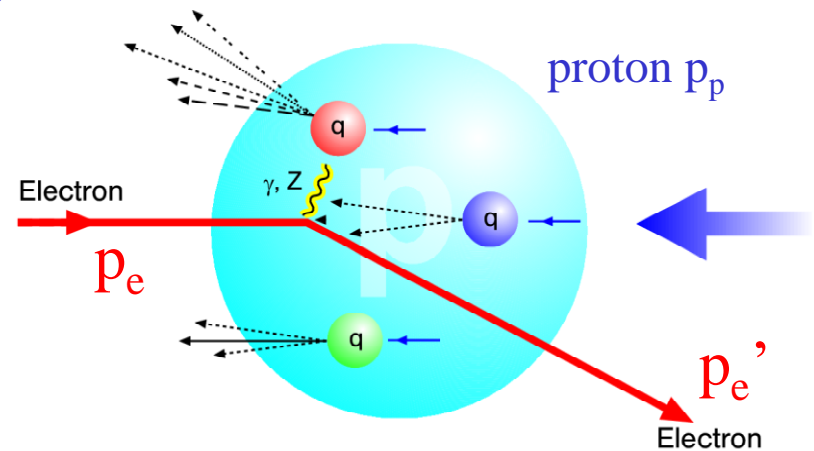
- But: structure du proton

- $q = p_e' - p_e$

- $Q^2 = (p_e' - p_e)^2$ [échelle de « dureté » de l'interaction]

- $x = Q^2/2p_p \cdot q$ [fraction de l'impulsion du proton emportée par parton]

- Diffusion profondément inélastique « DIS » : $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$



- Fonctions de Structure, évolution

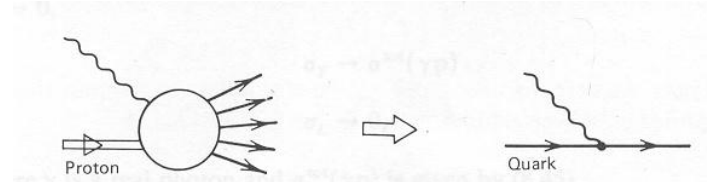
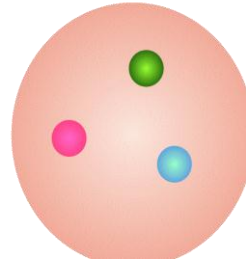
- Interaction électron- proton décrite par fonctions de probabilités $F_2(x, Q^2)$, $F_3(x, Q^2)$, $F_L(x, Q^2)$

- Plus important: F_2

- Modèle de partons simple:

$$F_2(x) = \sum e_i^2 q(x) \quad (\text{quarks de « valence »})$$

$q(x)$ = proba de trouver un parton d'impulsion x

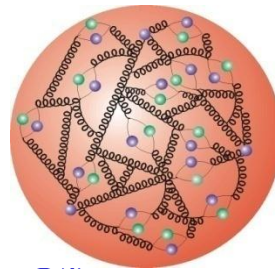


- Modèle de parton QCD:

Quarks de la « mer »

Gluons

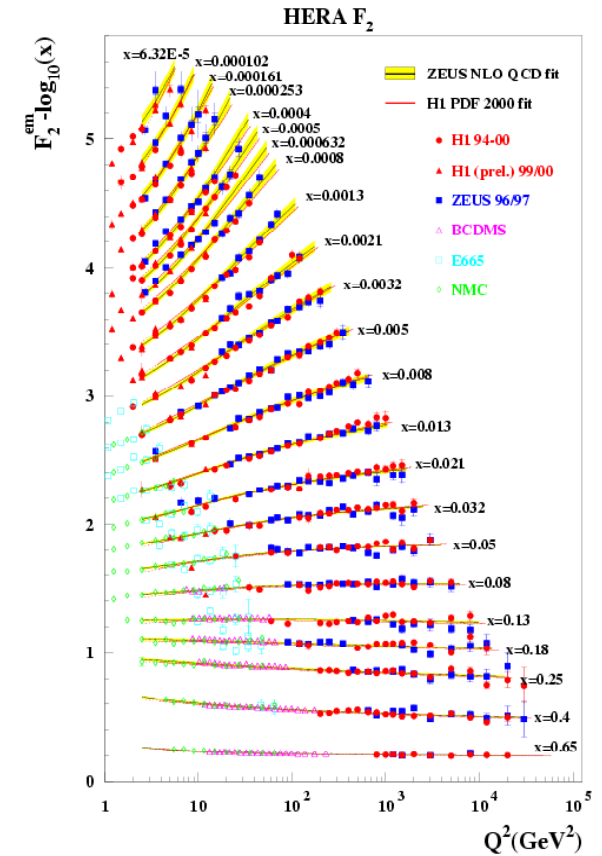
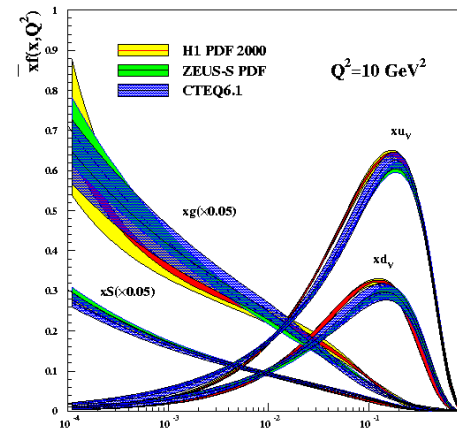
Les q dépendent de $Q^2 \Rightarrow q(x, Q^2)$



- Mesures importantes pour les prédictions à LHC!

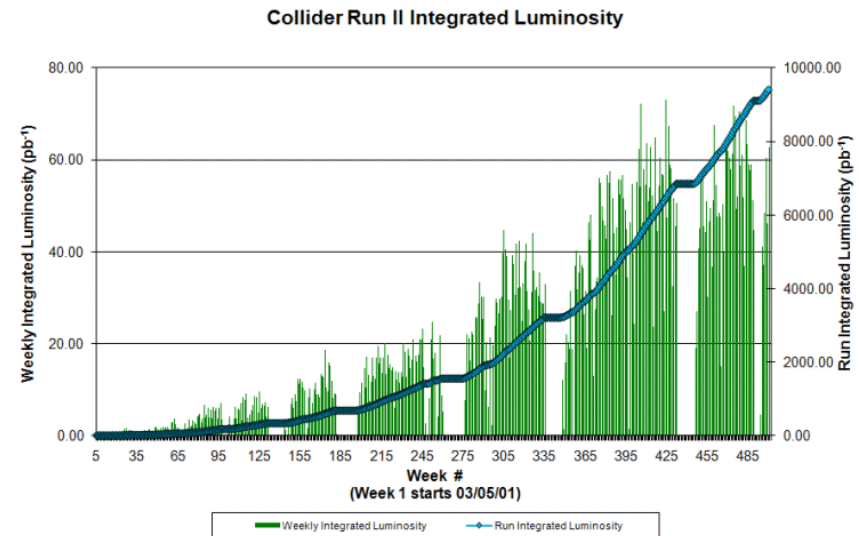
- Valeurs $q(x)$: *empiriques*

- Evolution avec Q^2 : calcul QCD parfait!



TeVatron (Chicago, USA)

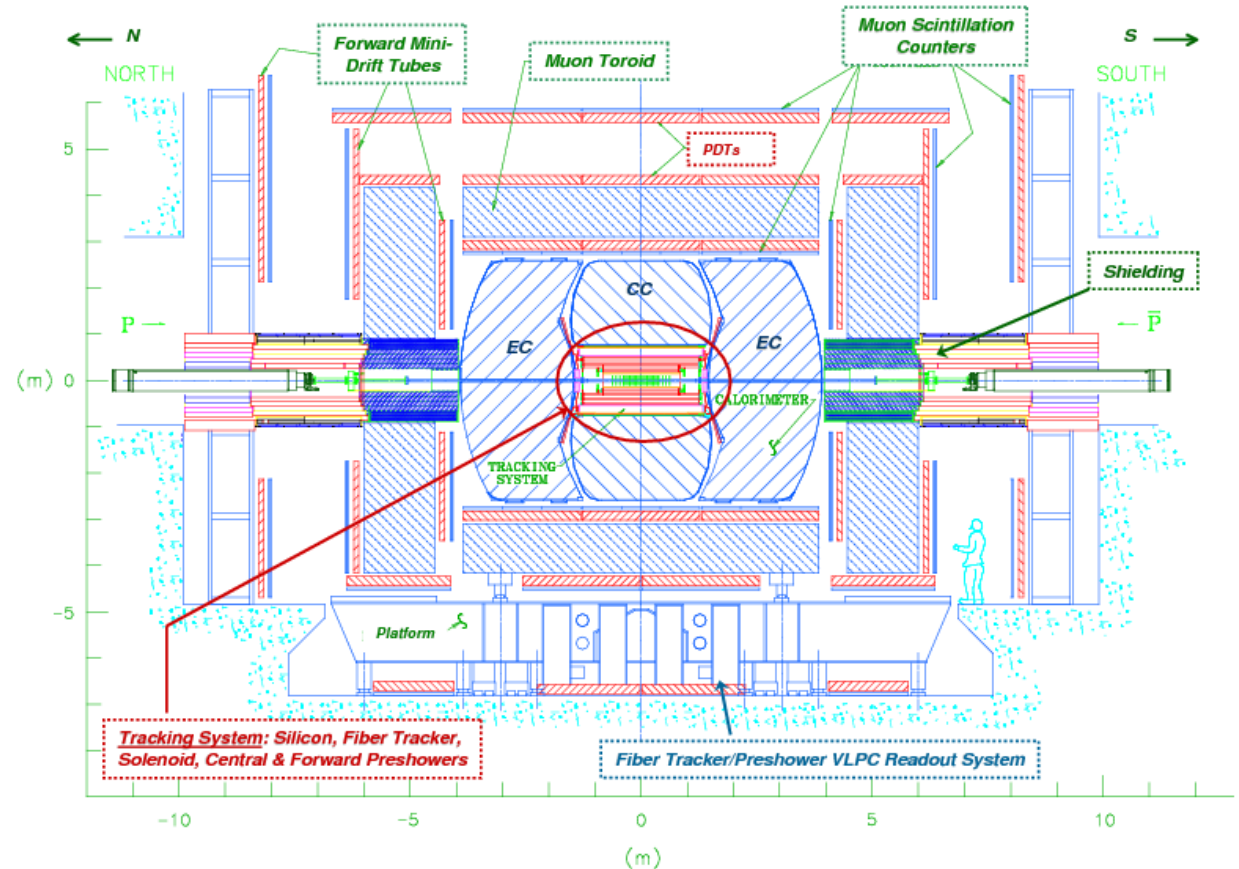
- Introduction
- Collisionneur proton-antiproton 1 TeV + 1 TeV,
luminosité max $3 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, temps entre croisements: 400 ns
Mise en service 1992, long arrêt 1998-2002, run II 2002-2011.
Luminosité intégrée finale: 10 fb^{-1} par expérience
- 2 expériences: **CDF et D0** (IN2P3 + CEA)
 - Environ 600 physiciens chacune
- Nombreux sujets de recherche, parmi lesquels:
 - QCD
 - Physique du B
 - M(W)
 - **Top: découverte (1995), mesure de masse.**
 - Recherche du Higgs



Lumi intégrée: en pb^{-1}

$$1 \text{ pb}^{-1} = \int L dt \text{ pour avoir 1 \acute{e}vt pour } \sigma = 1 \text{ pb} \\ = 10^{36} \text{ cm}^{-2}$$

- **Expérience D0**
- **Aimants:**
 - Solénoïde central supra
 - Toroïde à muons en fer
- **Détecteur central**
 - silicium,
 - fibres scintillantes
- **Calorimètres**
 - Uranium/ argon liquide
- **Détecteur à muons**
 - Scintillateurs
 - Chambres à fils



Points forts: herméticité, calorimètres, Si layer « 0 »

Point faible: faible rayon détecteur central

- Collisions hadroniques (p – p ou p – p)

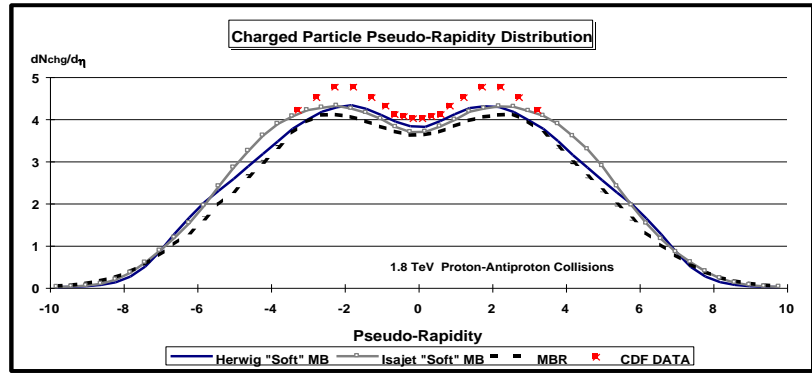
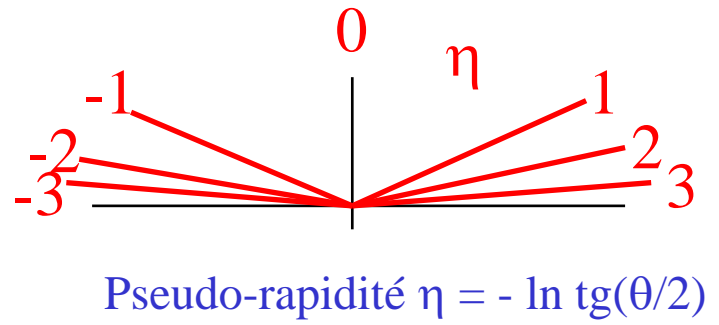
- Section efficace proton-proton (inélastique) à 2TeV: $\sim 50 \text{ mb}$ ($5 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^{-2}$)

A L=10³² cm⁻²s⁻¹: $10^{32} \times 5 \cdot 10^{-26} = 5 \cdot 10^6 \text{ interactions/s} = 5 \cdot 10^6 / 4 \cdot 10^7 = 2. \text{ int/croisement en moyenne}$

Poisson: $P(n) = e^{-\lambda} \lambda^n / n! \Rightarrow \ll \text{pile-up} \gg$

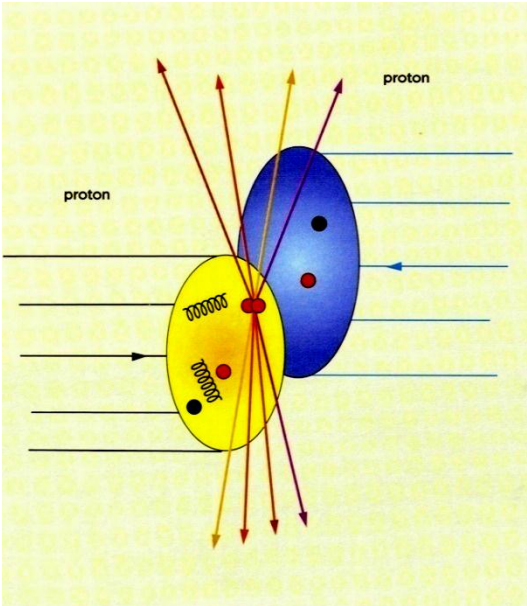
- **Interactions courantes (« minimum bias »)**

- Densité de particules par unité de η :
 - ~ 4 chargés (π^{+-} , K^{+-} , p)
 - ~ 2 neutres (π^0 , K^0 , n); $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma : 4 \gamma$
(uniforme en ϕ)
- Distribution en p_T : e^{-ap_T} , p_T moyen $\sim 1 \text{ GeV}$
- *Plusieurs quarks et gluons interagissent de façon « molle »*
- *Théorie: QCD à « bas Q^2 », très difficile à calculer.*



- **Processus « intéressant »**
 - Interaction « dure » entre constituants
 - grand transfert Q^2 ($>$ qqes GeV^2)
=> exploration « haute énergie »
 - section efficace faible
 - calculs QCD perturbatifs possibles et précis
 - Événement sous-jacent dû aux quarks et gluons « spectateurs »
 - Ressemble à un évt « minimum bias »
 - Difficile à calculer => phénoménologie

- L'événement sous-jacent et les événements « pile-up » sont des « bruits » sous l'événement intéressant



Mesure masse du W

$p+p \rightarrow W (+X) ; W \rightarrow e \nu_e \text{ ou } \mu \nu_\mu$

Sélection

- Lepton (e ou μ) de grand p_t
- P_t manquant dans le bilan : neutrino

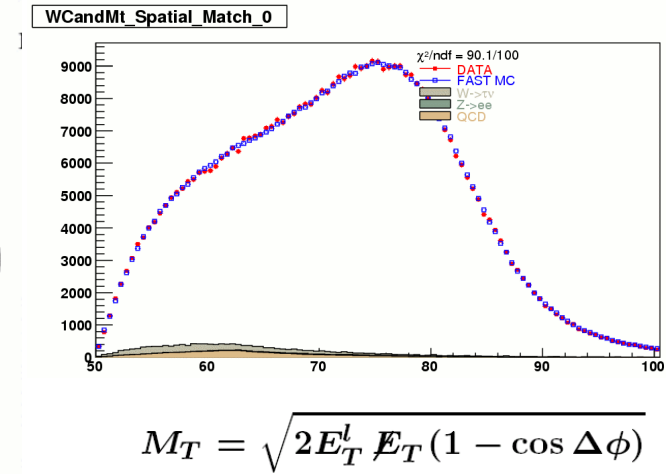
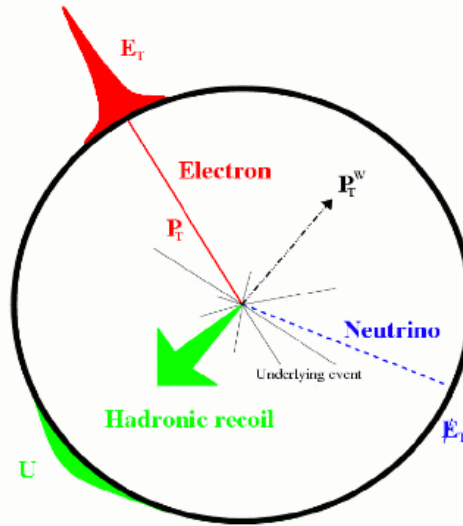
Mesure masse : $p_t(e)$ ou M_t

Principales erreurs:

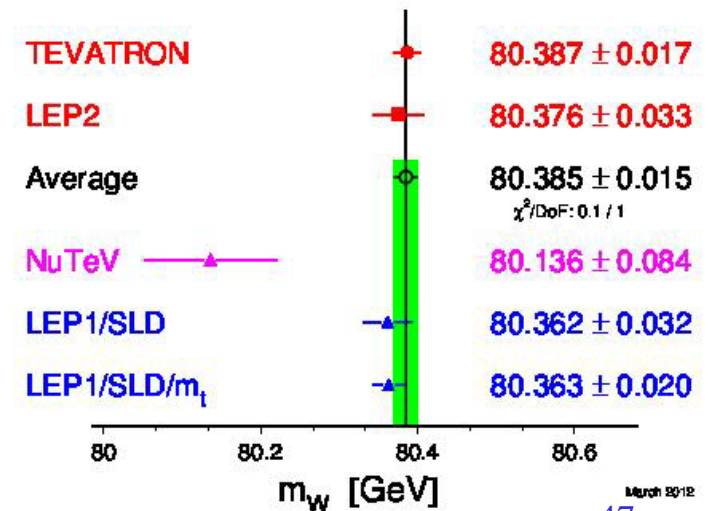
- Calibration des électrons: mesure $Z \rightarrow e e$, $m(Z)$ connue à LEP
limite: statistique de Z, interpolation $m(Z)$ à $m(W)$
- Incertitudes cinématique du W
 - fonctions de structure
 - p_t du W

Résultat combiné (avec LEP):

$$M(W) = 80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}$$

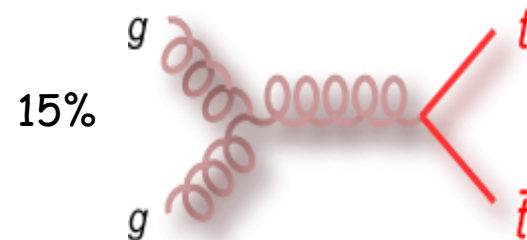
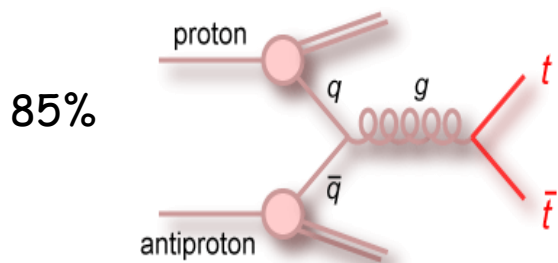


W-Boson Mass [GeV]

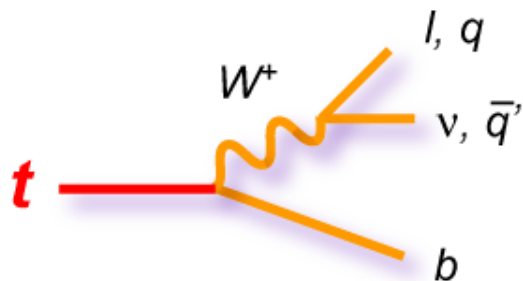
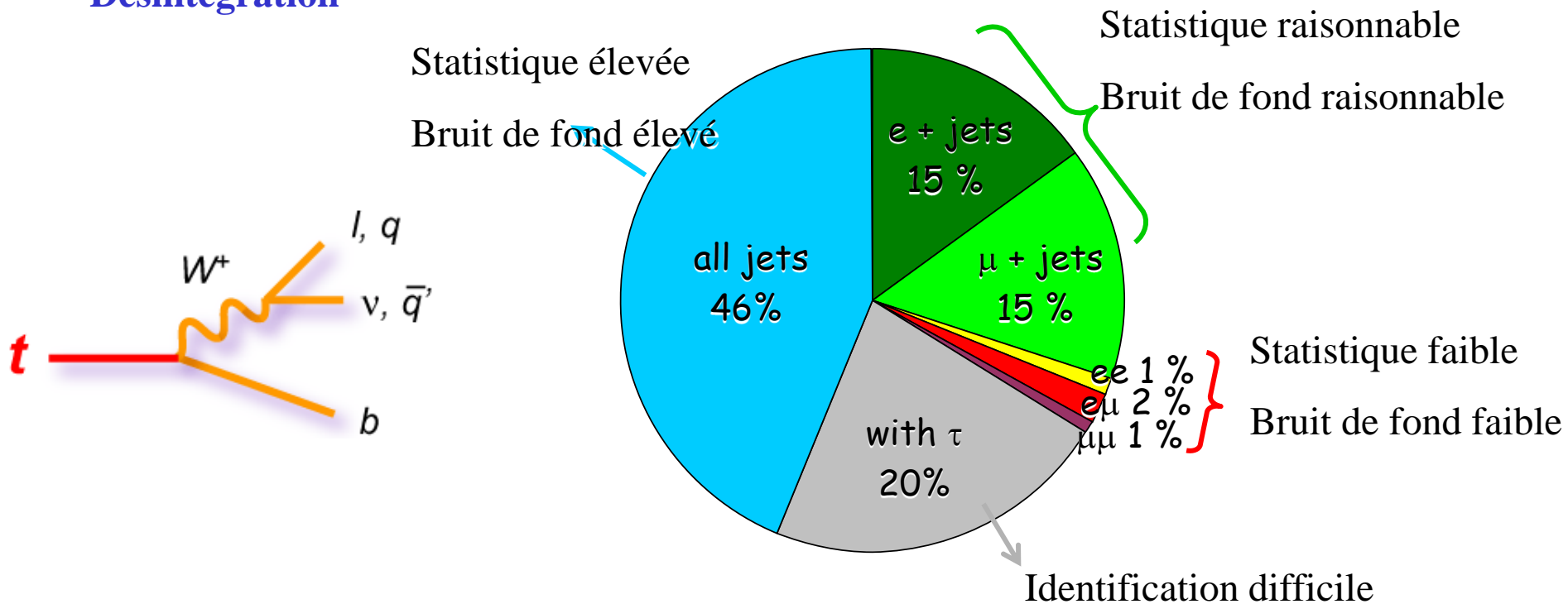


- Quark top

- Production



- Désintégration



• **Mesures quark top**

– Section efficace de production: **Canal « di-lepton »**

- 2 leptons grand p_t
- grand p_t manquant
- 2 jets de b

privilège fond faible

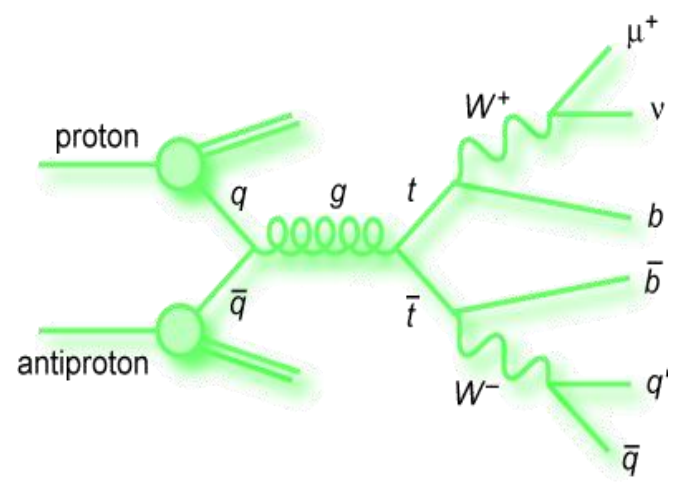
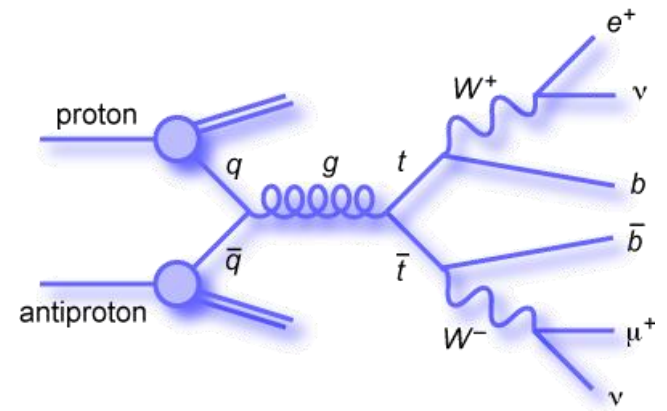
– Masse : **Canal « lepton+jet »**

- 1 lepton grand p_t , *isolé*
- grand p_t manquant
- 4 jets (2 jets de b)

privilège statistique élevée

– Analyse optimale des événements

- « Templates » (= « modèles »)
- Éléments de matrice



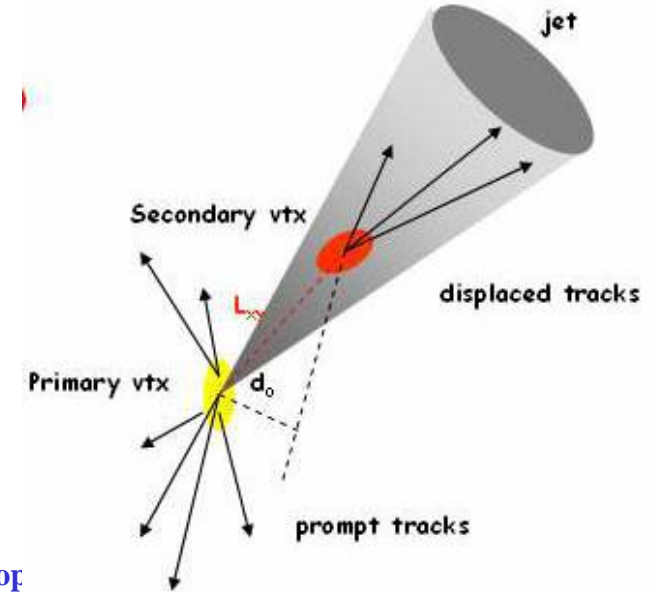
- **Analyse: identification des tops:**
 - Rôle du b-tagging: durée de vie du b $\sim 1,5$ ps \Rightarrow parcours \sim mm
 - Détecteurs Si proches du faisceau:
 - identification vertex secondaire (algorithmes sophistiqués)
 - Mesure E_T manquante
 - Mesure jets “légers”
 - Combinaison en (W, t)’s

- **Masse du top : avec événements 1 lepton + jet**

- **Méthode “Matrix element”:**

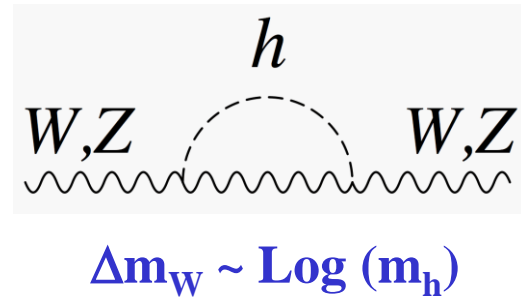
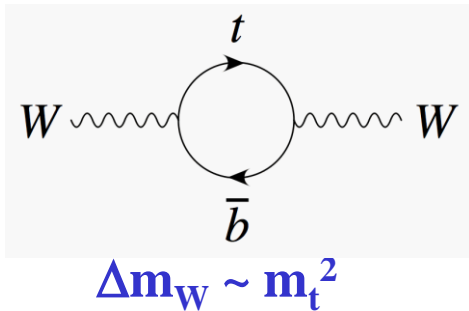
- évt par évt, calcule
 - Probabilité t t / Probabilité bruit de fond
- en fonction des caractéristiques et pour différents m_{top}**
- Multiplie toutes ces $P(\text{evt})/P(\text{bkd})$
- Maximise en fonction de m_{top}

- $m_{top} = 173.2 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 0.8(\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$
 $= 173.2 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$



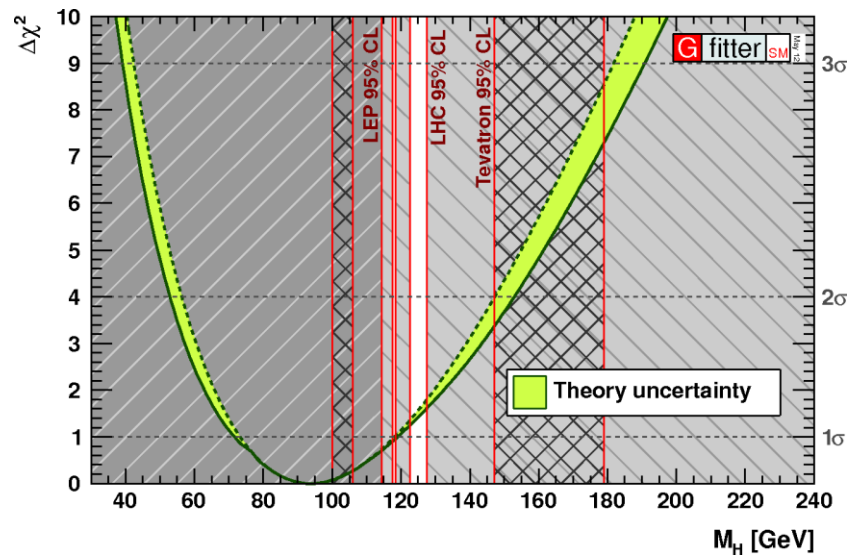
- Relation $m(t)/m(W)$ et $m(H)$
- $m(W)$ prédite dans le MS à partir de $M(Z)$ et G_F (temps de vie du muon, très précis)

- Corrections quantiques à $m(W)$



Compatible avec
un Higgs standard

$M(H) < 160 \text{ GeV}$ (95% CL)

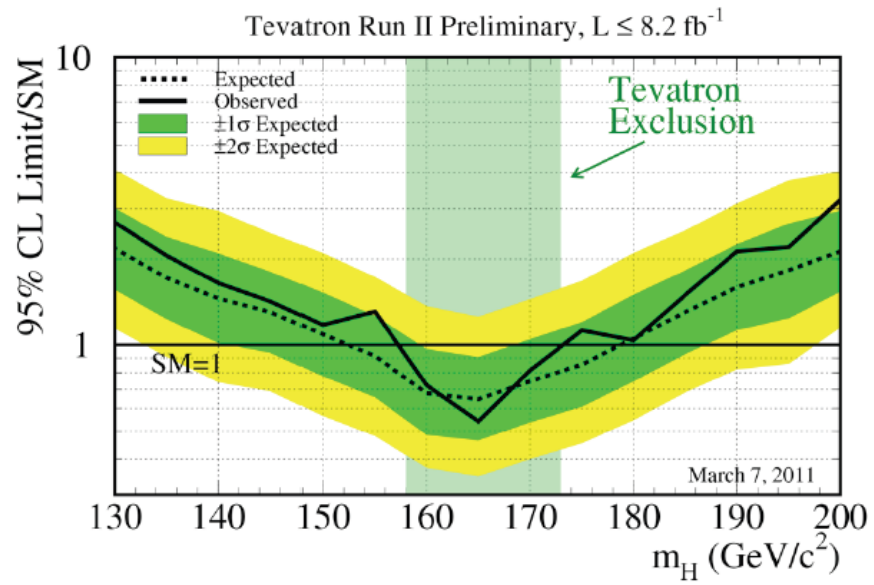


- Recherches au TeVatron

- Higgs:

Sensibilité dans une petite fenêtre de masse avant la Découverte du LHC (avec beaucoup d'efforts: combinaison dizaines de modes etc.)

⇒ « Modernisation des analyses ».



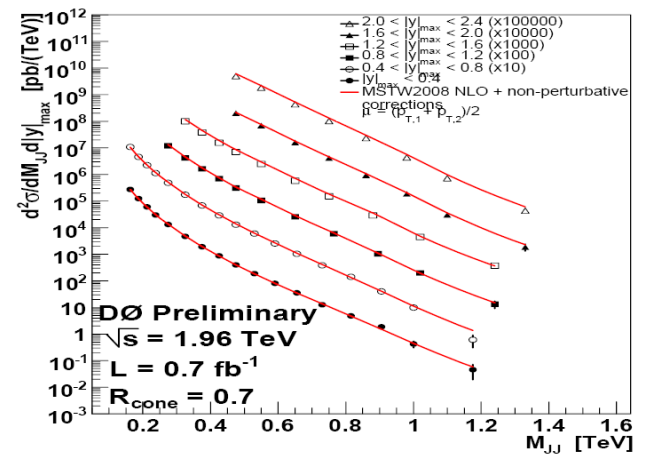
- Physique « Au-delà du Modèle Standard »

- Supersymétrie, m (squark, gluino) > 400 GeV...
- Z', W' $m > 1$ TeV

- Jets: introduction de la variable:

$$\chi = \exp(|y_1 - y_2|)$$

• Tous ces résultats sont déjà dépassés par le LHC.



Historique du projet

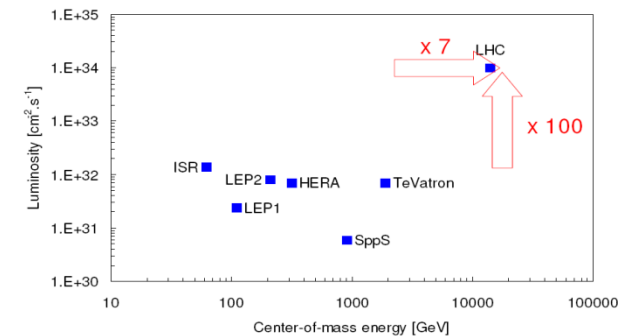
– LHC: collisionneur proton-proton dans le tunnel du LEP (circonférence 27 km).

Énergie de faisceau : 7 TeV => collisions à 14 TeV (7 fois TeVatron)

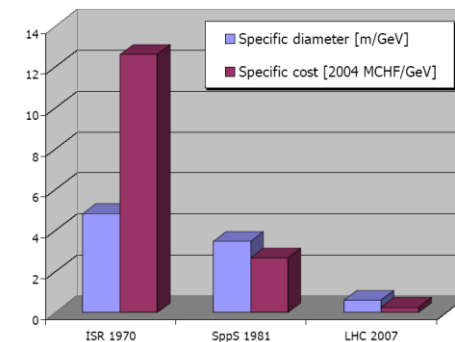
2 tubes, protons => Luminosité 100 fois TeVatron.

- 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

Luminosité & énergie des collisionneurs

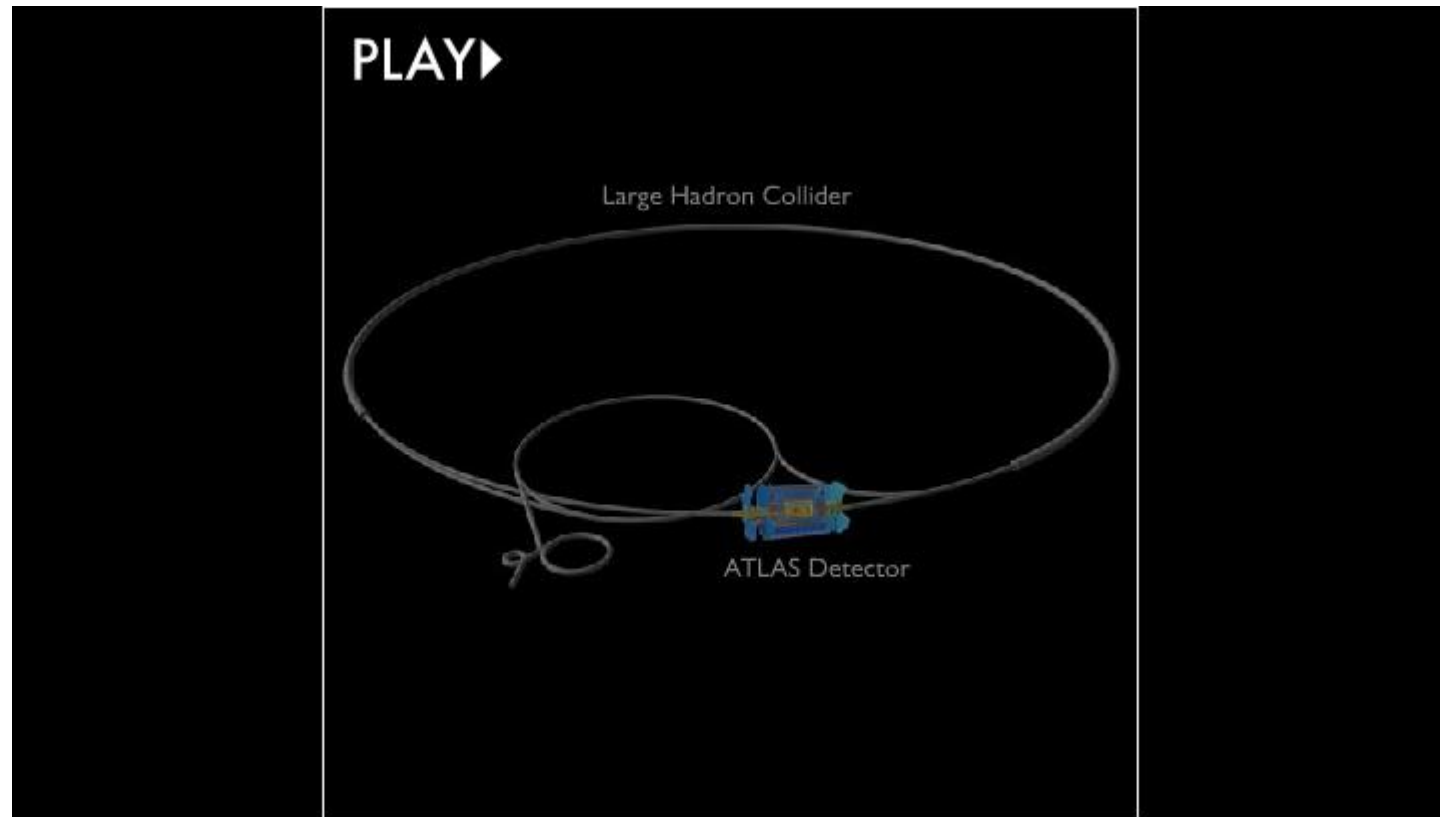


Diamètre et coût spécifiques des accélérateurs de particules



- L'accélérateur
- **LHC**: proton-proton
 $7 + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$ dans le tunnel du LEP

- 2800 (max) paquets
de protons dans
chaque sens
1400 aujourd'hui
- 4 points d'intersection:
4 expériences
- Complexe d'accélérateurs
du Cern utilisé
comme injecteurs



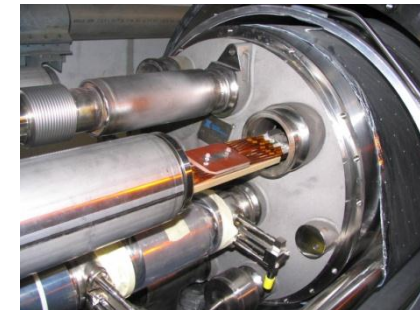
Aimants et cryogénie

- 1232 dipôles, 2-in-1, L=15 m, 8.4 T max
- >5000 autres aimants
- Supra: Hélium superfluide 1,8K
 - **Note: Amenées de courant en supra Haut TC !**
- Energie magnétique très élevée!
- Energie des faisceaux très élevée!
- => Protection!!!



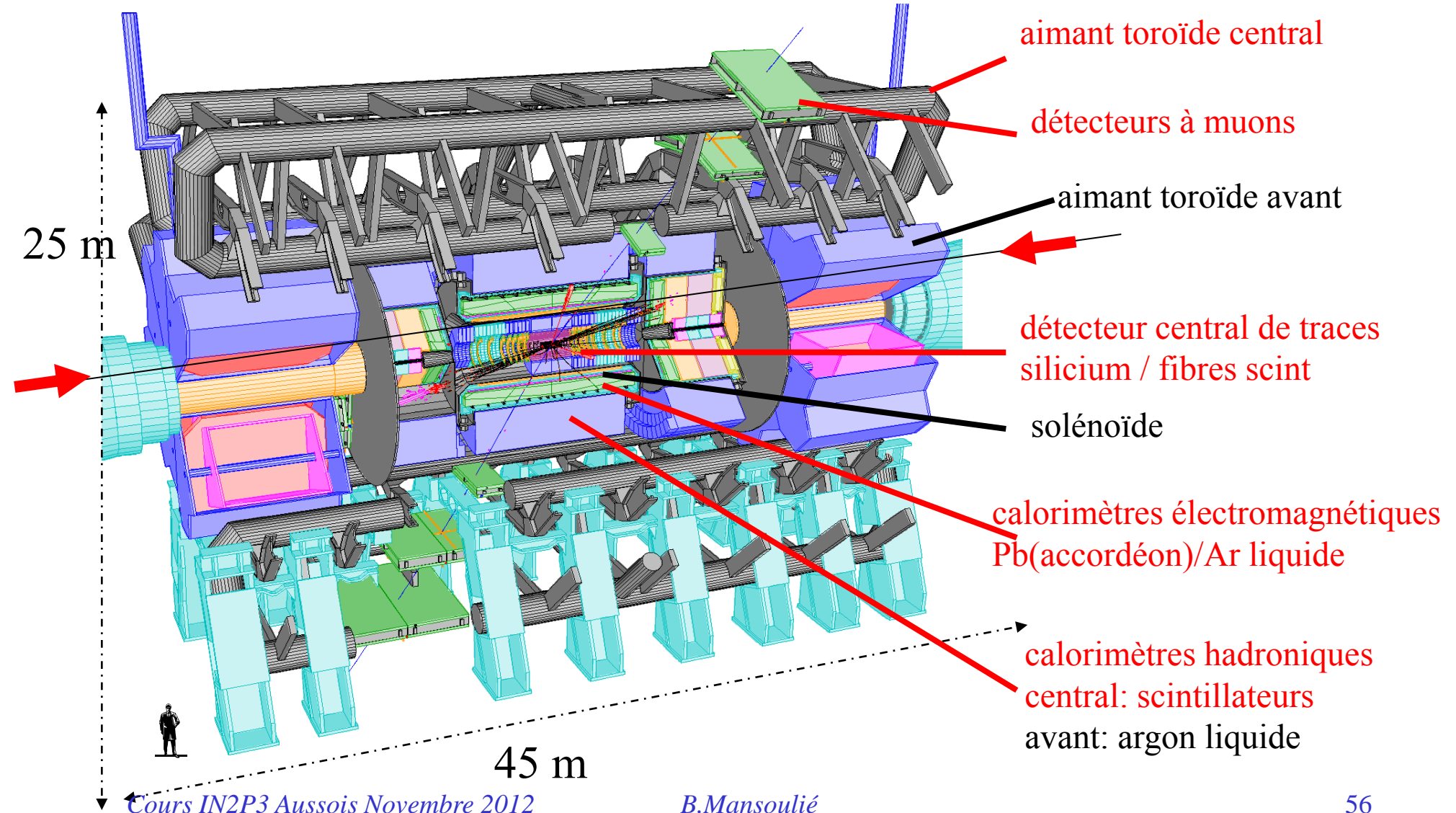
2005-2008

- **Installation**
- **Connexions**
- **Tests**
- **Refroidissement**

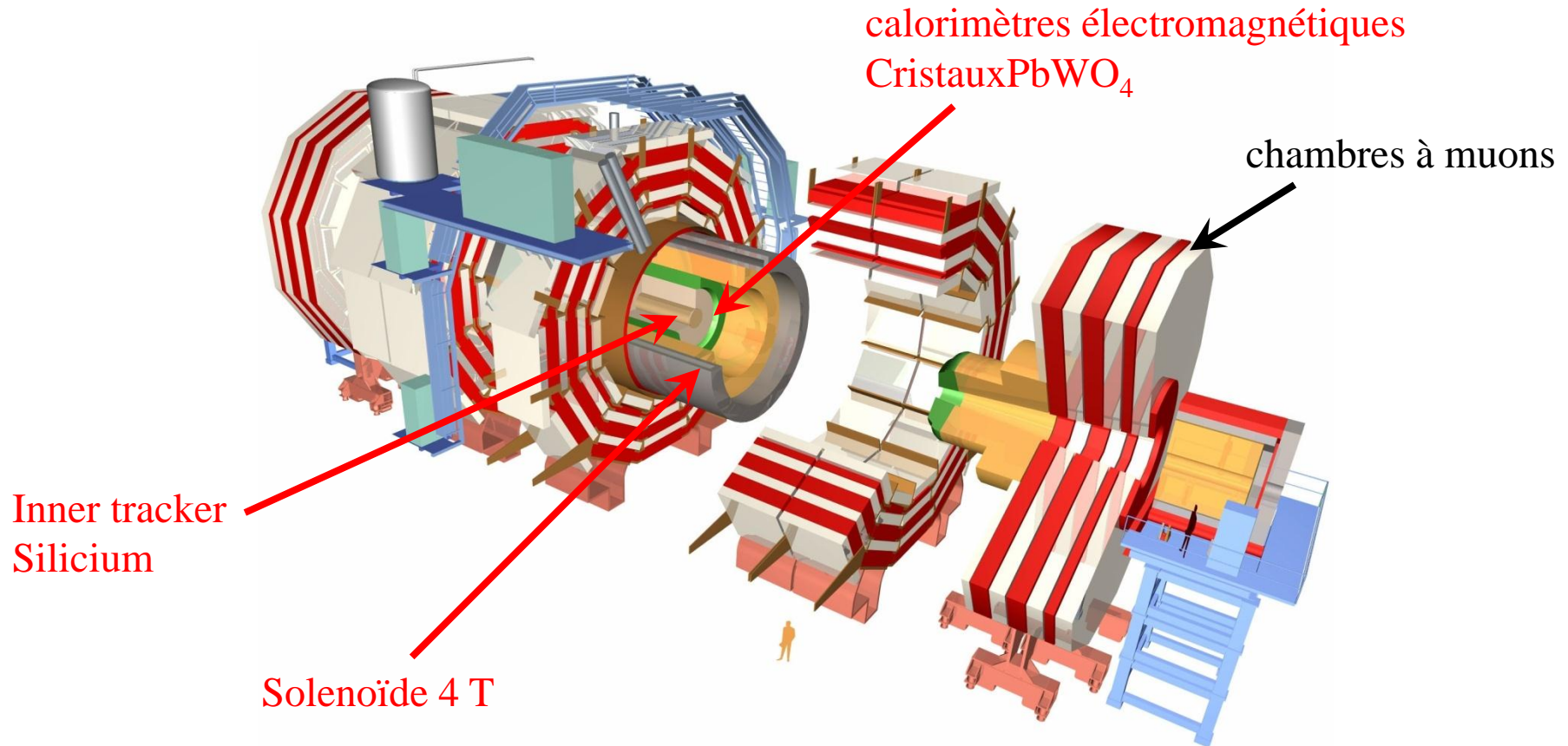


Expériences

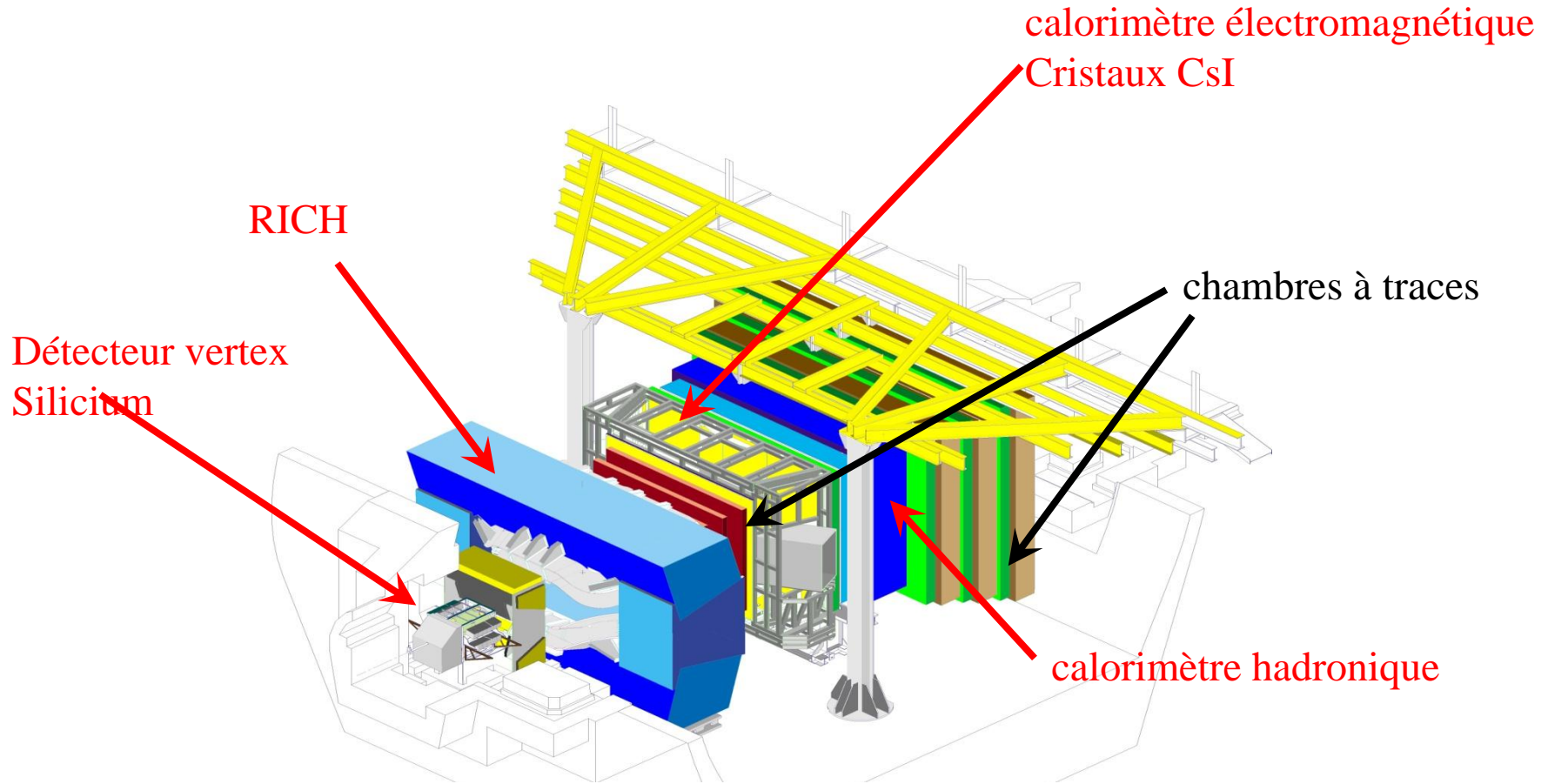
ATLAS (Généraliste)



- CMS(Généraliste)



- **LHCb** (physique du quark b)
- Détecteur « vers l'avant »



- Traitement des données

- En-ligne

- Fonctions: traitement du signal, sélection des événements.
 - Pour chacun des millions de détecteurs élémentaires (et 40 millions de fois par seconde):

Traitement du signal, Numérisation

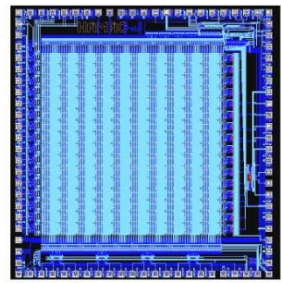
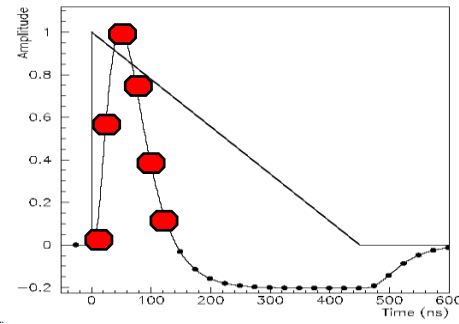
- Pour l'événement complet:

Calculs rapides => quantités physiques (E, t,...)

Sélection des événements

Sur "fermes" de PC (~2000 PC en parallèle)

=> **Enregistrement** de l'événement
(> 200/seconde)



Circuit intégré (6x6 mm)



Atlas: 750 armoires

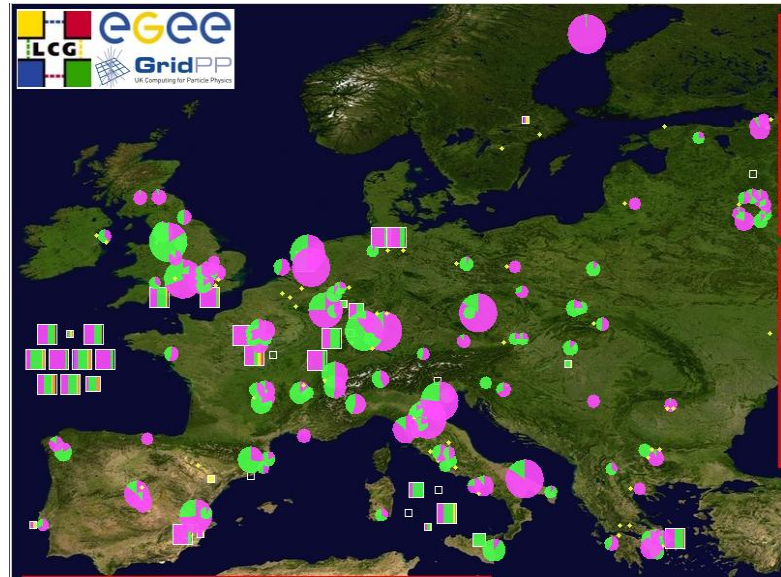
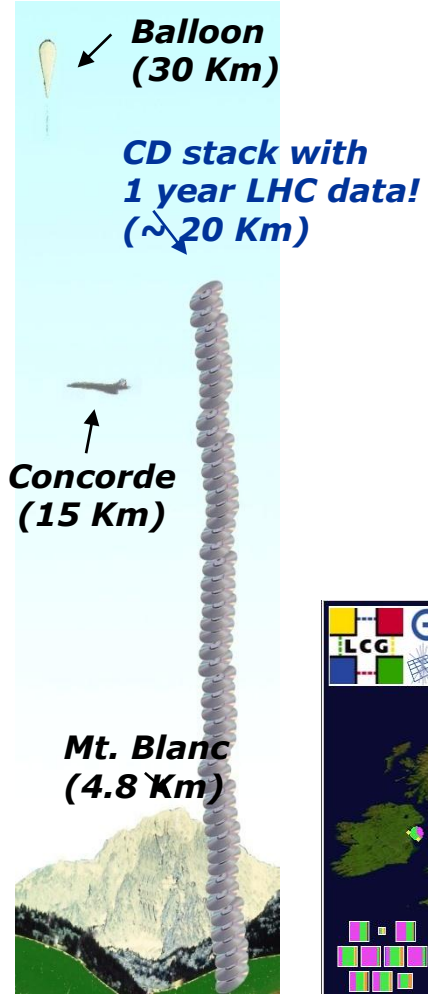
- **Hors-ligne:**
- ~100 événements/sec; 1 événement = 1,5 MB

⇒ ~10 millions GigaByte par an
à stocker et processor

- nécessite ~100 000 PC tournant 24h/24

⇒ **Grilles de calcul**

- Centres de calcul (fermes de processeurs)
- Réseaux rapides
- Software « transparent » (~ hyper Kazaa)
- Organisation « hiérarchique »
 - 1 Tier 0 = Cern
 - 10 Tier 1's : France: CC-Lyon
 - 100 Tier 2's : régionaux
 - X Tier 3's

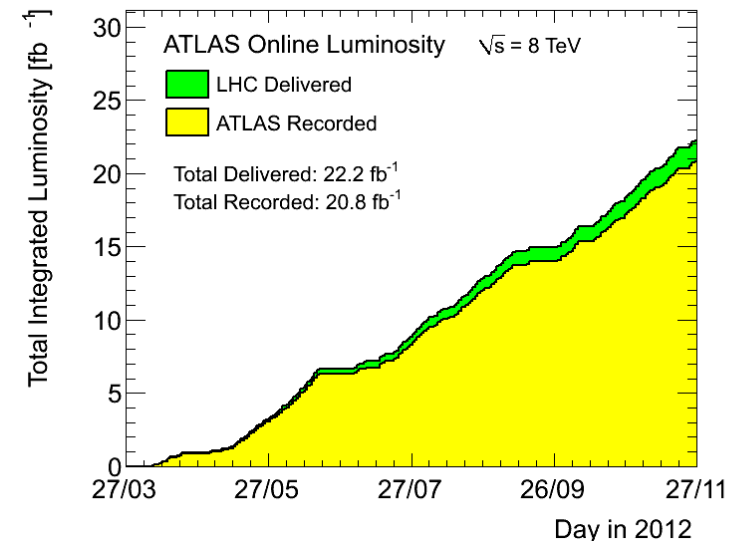


Instantané.
37682 jobs actifs sur 140 sites

Prises de données LHC

2008: mise en service (Septembre), accident 10 jours après => arrêt

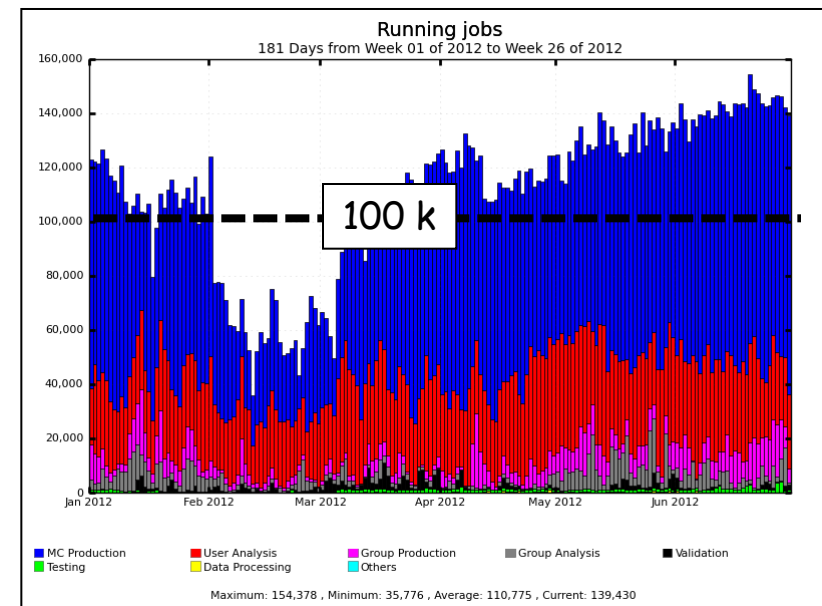
- **2009: réparations/améliorations. Décision de limiter l'énergie des faisceaux.**
 - Expériences: préparations (cosmiques, calibrations...)
- **2010: premières collisions à 7 TeV (3.5 + 3.5), de 2 à 300 paquets/faisceau**
luminosité de 10^{27} à $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, L intégrée **45 pb⁻¹** ($1 \text{ pb}^{-1} = 10^{36} \text{ cm}^{-2}$, $1 \text{ fb}^{-1} = 10^{39} \text{ cm}^{-2}$)
- **2011: Fonctionnement 7 TeV, L = 10^{33} à $3.5 \cdot 10^{33}$.**
L intégrée **~5 fb⁻¹**
 - 1400 paquets, t = 50 ns. *De 5 à 15 interactions/BC*
- **2012: Fonctionnement à 8 TeV (4+4), L = 6 à 7.7**
L intégrée **~20fb⁻¹**
 - 1400 paquets, t = 50 ns. *20 à 30 interactions/BC*



Etat des expériences

- **Détecteurs parfaitement opérationnels**
- **Données de haute qualité**
 - Enregistré/délivré ~ 95%
 - Analysé/enregistré ~95%
- **Performances aussi bonnes qu'attendu dans les spécif et les simulations**
- **Software, traitement des données sur la grille aussi très performants.**

Subdetector	Number of Channels	Approximate Operational Fraction
Pixels	80 M	97.3%
SCT Silicon Strips	6.3 M	99.2%
TRT Transition Radiation Tracker	350 k	97.1%
LAr EM Calorimeter	170 k	98.1%
Tile calorimeter	9800	96.9%
Hadronic endcap LAr calorimeter	5600	99.9%
Forward LAr calorimeter	3500	100%
LVL1 Calo trigger	7160	99.9%
LVL1 Muon RPC trigger	370 k	99.5%
LVL1 Muon TGC trigger	320 k	100%
MDT Muon Drift Tubes	350 k	99.7%
CSC Cathode Strip Chambers	31 k	98.5%
RPC Barrel Muon Chambers	370 k	97.0%
TGC Endcap Muon Chambers	320 k	98.6%



Physique à LHC

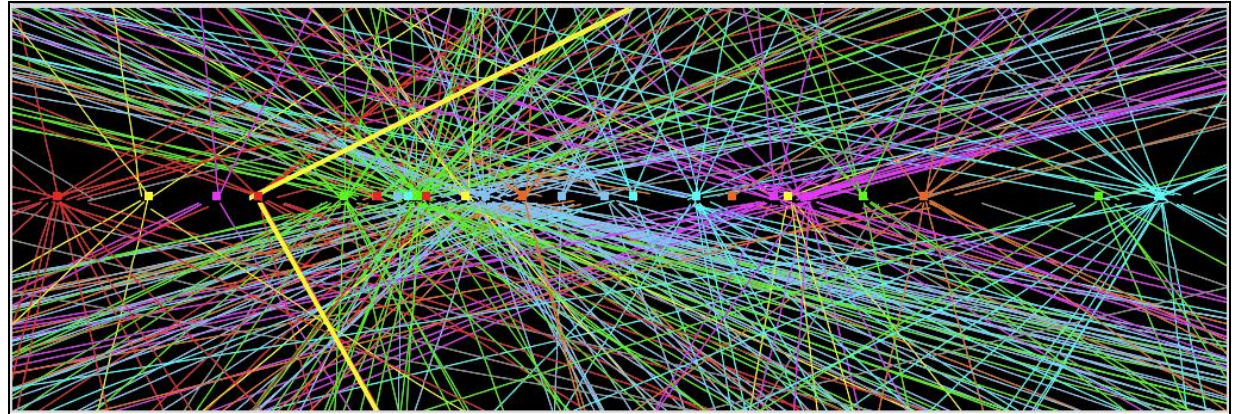
- Aperçu
- **Fonctionnement 2011-2012: croisements toutes les 50 ns , 1400 paquets**

- Section efficace proton-proton (inélastique) à 8TeV: $\sim 100 \text{ mb}$ (10^{-25} cm^{-2})

A $L=10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$: $10^{33} \times 10^{-25} = 10^8$ interactions/s = $8 \cdot 10^7 / 2 \cdot 10^7 = 4$ int/croisement en moyenne

A $L=10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 40 interactions p-p/ croisement en moyenne

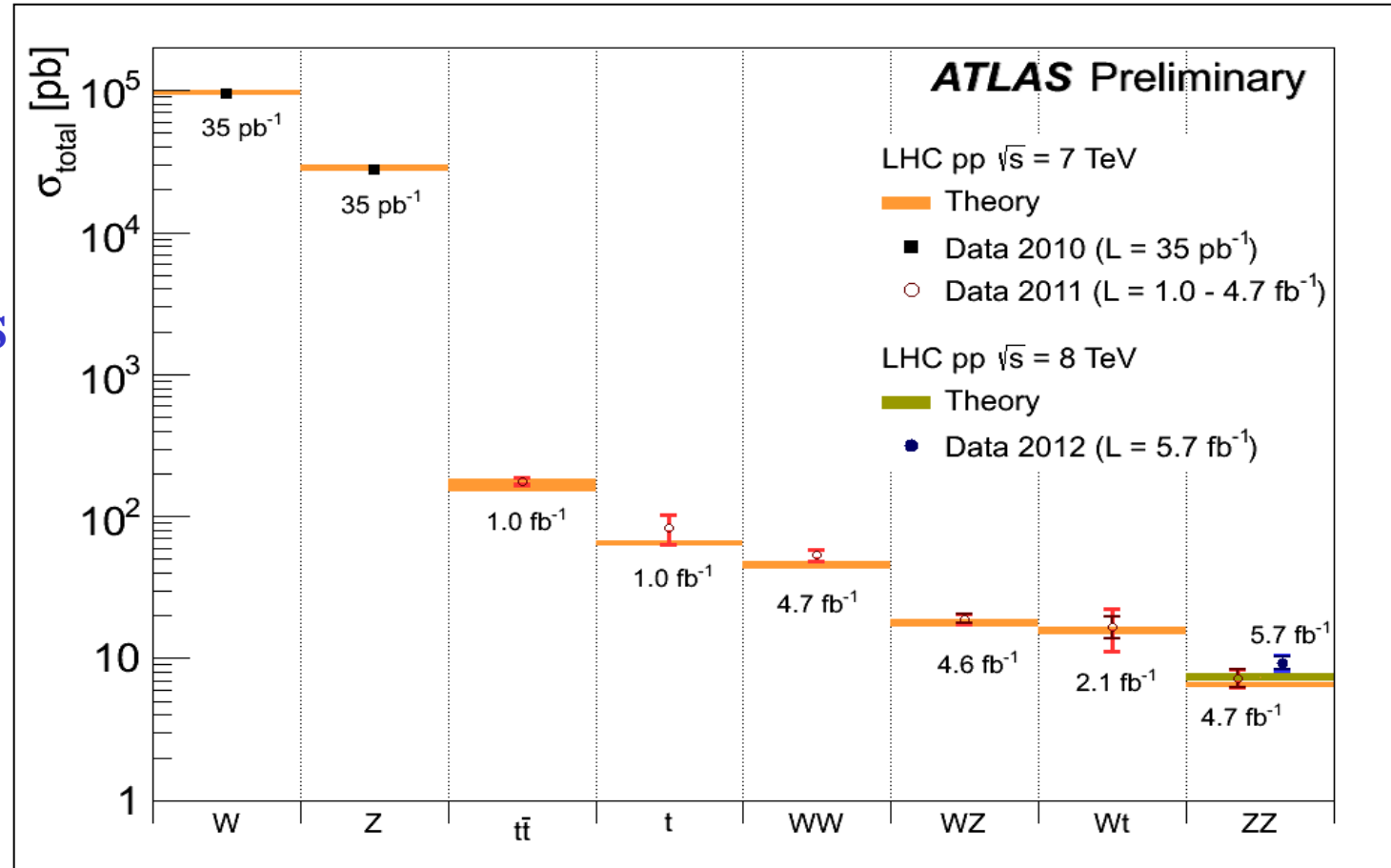
**$Z \rightarrow \mu\mu$ + 24 autres
interactions (min bias)**



- **Doit être combattu et pris en compte à tous les niveaux:**
 - *Trigger, reconstruction des objets physiques, coupures d'isolation, etc.*
 - *Data processing: temps CPU pour la reconstruction...*

Standard Model

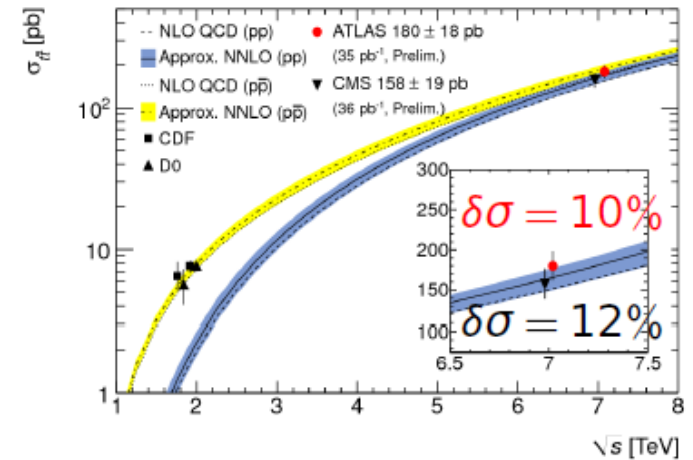
- Des W,Z jusqu'à ZZ
- Tests importants du MS
- Essentiel aussi comme b.d.f pour les recherches (Higgs, BSM)



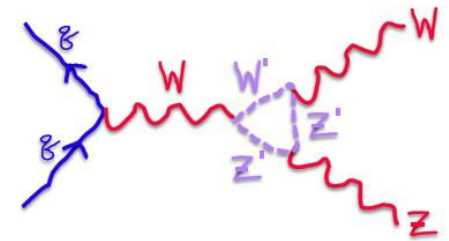
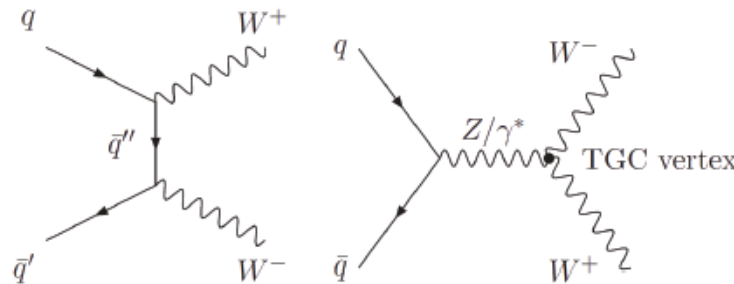
- Irréductible (ex: ZZ)
- Réductible (ex: W+ jets, t t...)

W, Z, top, Dibosons...

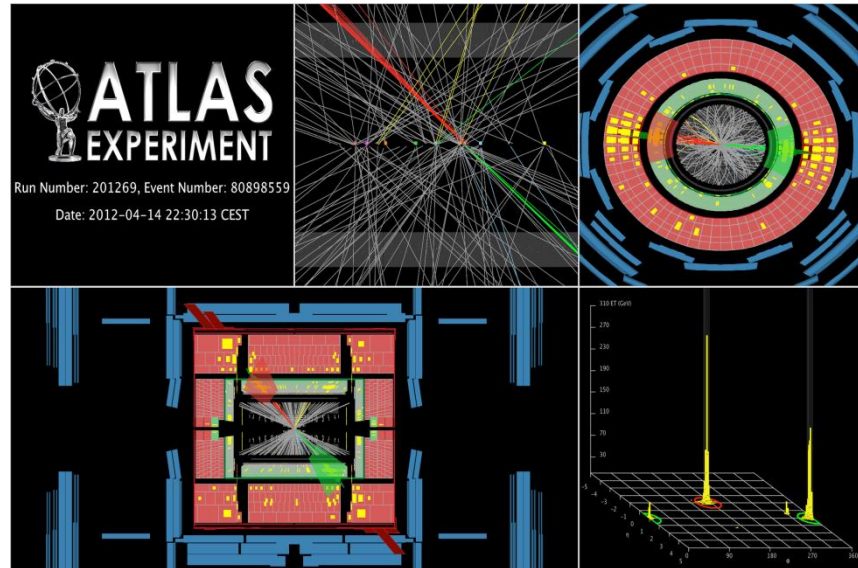
- **Quantité énorme de W ($\sim 10^8$) et de Z ($\sim 10^7$).**
 - Utilisés constamment pour les calibrations
 $Z \rightarrow ee / \mu\mu, W \rightarrow ev$ (E/p)
 - Mais aussi de la jolie physique ...
- **Top**
 - **Masse: pour l'instant dominée par systématiques**
 ~ 2 GeV (Tevatron : 1 GeV)
 - **Section efficace de production**
 - Important pour nombreux bruits de fond
 - **Propriétés**



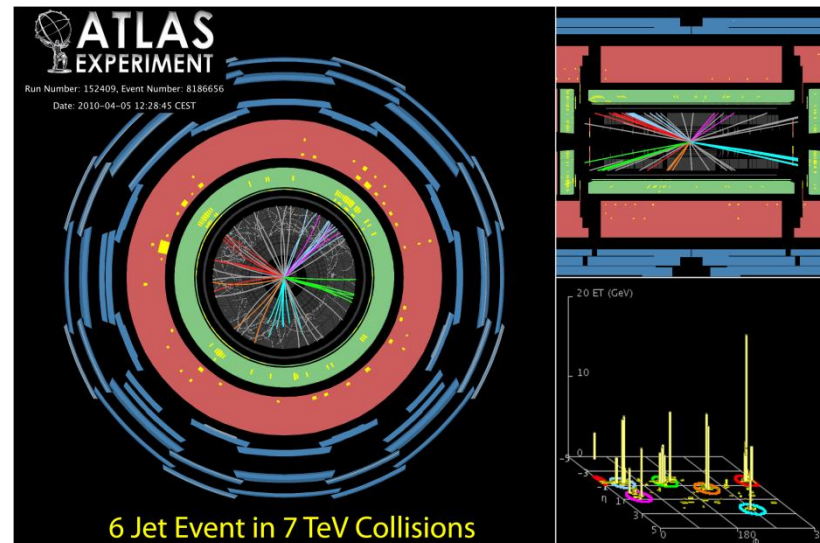
- **Dibosons: WW, WZ, ZZ**
 - Sensible à une possible “nouvelle physique”
 - Fond au Higgs



- Di-jet, $M(j-j) = 4.2 \text{ TeV}$!

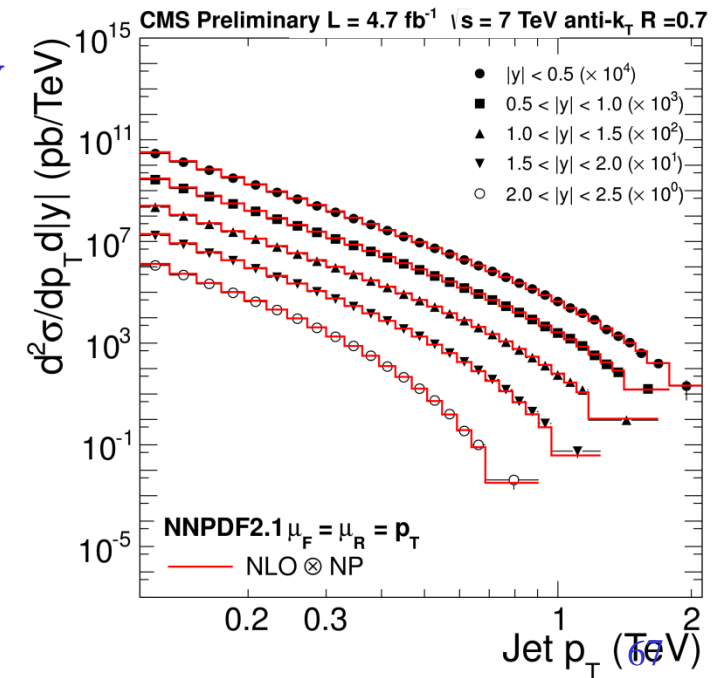
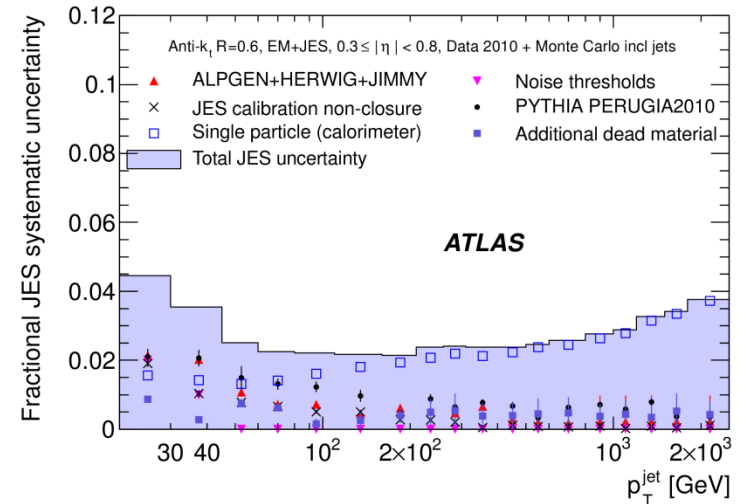


- 6 - jet



Jets

- **Jets importants dans nombreuses mesures**
 - Grands progrès dans la compréhension des jets
 - Anti- k_T $R=0.4, 0.6$
 - Jet Energy Scale essentiel $\delta \sim 3\%$
 - Beam tests, hadron isolé, jet+ γ , top, etc.
 - Calo jets, track jets, Particle flow (CMS)
- **Mesure section efficace inclusive de jets jusqu'à 2 TeV (masse di-jet jusqu'à 4.5 TeV) en accord avec QCD (7 ordres de grandeur)**
- **Distribution différentielle (η, p_T)**
Théorie NLO



Higgs

- **Recherche de 114 GeV à ~ 1 TeV**

- **M(H) < 160**

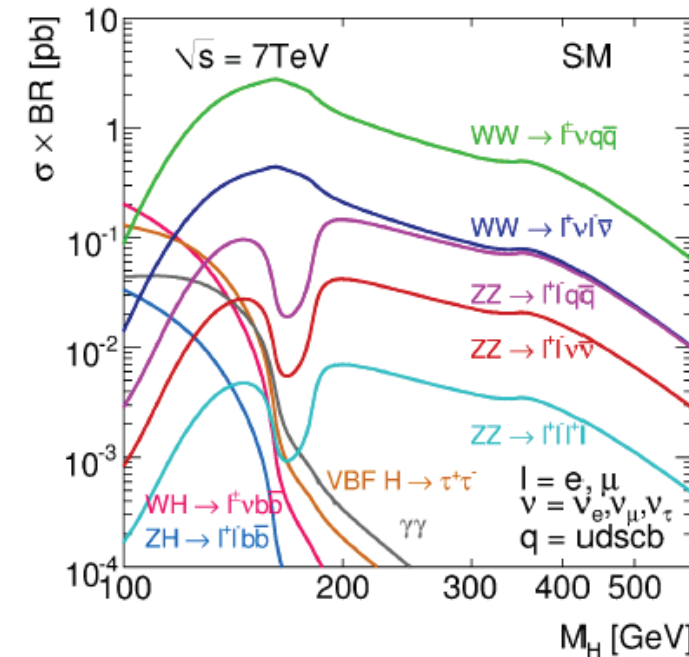
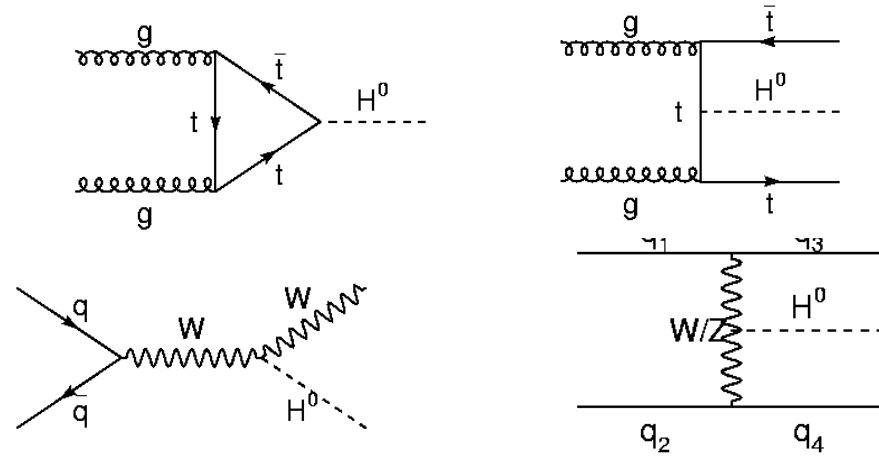
- $\gamma\gamma$
- $WW \rightarrow e\nu\mu\nu$
- $ttH, WH; H \rightarrow bb$
- **Production VBF**
 - $\gamma\gamma, WW$ (+ 2 jets)
 - $\tau\tau$ (+ 2 jets)

- **160 < M(H) < 600**

- $ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ (inclus VBF)

- **M(H) > 600**

- $ZZ \rightarrow 1l\nu\nu, ZZ \rightarrow 1ljj, WW \rightarrow 1\nu jj$



Higgs $\gamma\gamma$

$H \rightarrow \gamma\gamma$: basse masse.

Très exigeant pour la détection des photons
 \Rightarrow calorimètres électromagnétiques

• Fond **réductible**: jets QCD: $10^6 \times$ signal. **Identification** photon/jet
 rejection jets : 10^3 par jet... pas si facile...

Fragmentation d'un quark/gluon \Rightarrow 1 ou plusieurs π^0

• Fond **irréductible** $\gamma\gamma$ QCD

\Rightarrow **résolution en masse** nécessaire :

• **résolution en énergie excellente** $\delta E/E = a \oplus b/\sqrt{E} \oplus c/E$

• à 50 GeV $10\%/\sqrt{E} = 1.4\% \Rightarrow$ importance a!

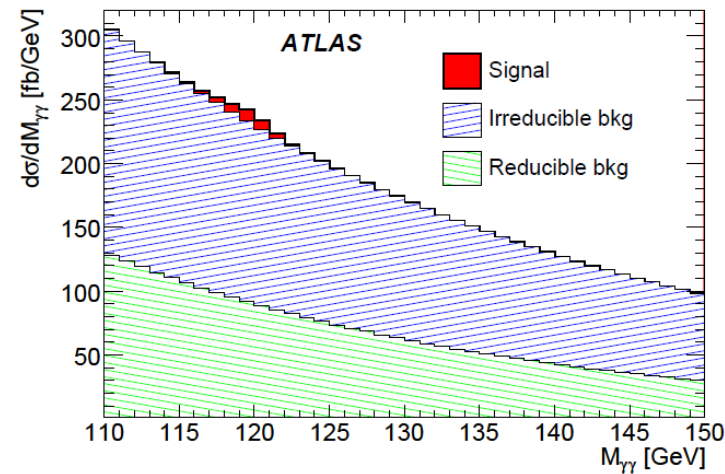
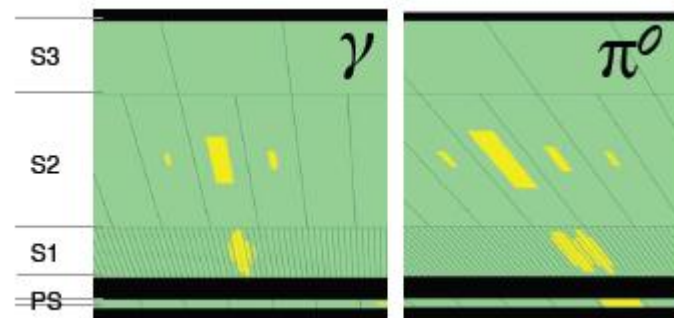
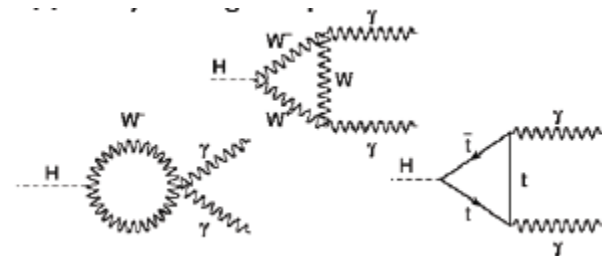
• Calibration à base de $Z \rightarrow ee$

• angle ouverture photons

• A haute lumi: pileup ~ 20 vertex ; vertex inconnu

– **résolution en direction photon** (Atlas)

– choix vertex avec traces haut p_T



Higgs $\gamma\gamma$, analyse

- **Catégories**
 - Différents types d'événements ont des efficacités/résolutions/bruit de fond différents.
⇒ Analyse optimum: séparer en plusieurs catégories (*voir cas extrêmes...*)
 - Atlas: convertis/non-convertis, central/non-central, haut pT/bas pT; VBF
 - CMS: haute/basse résolution: qualité photon, central/non-central; VBF
- **Identification photons**
 - Atlas: classique, utilise granularité calo
 - CMS: « MVA » (Multivariate analysis)
- **Extraction: fit pic de signal sur un bruit de fond lisse ('basic data driven...') dans chaque catégorie**
 - Modélisation du bruit de fond par simulations/data driven
 - Mieux comprendre sa composition
 - Etudier les biais dus au fit du bruit de fond

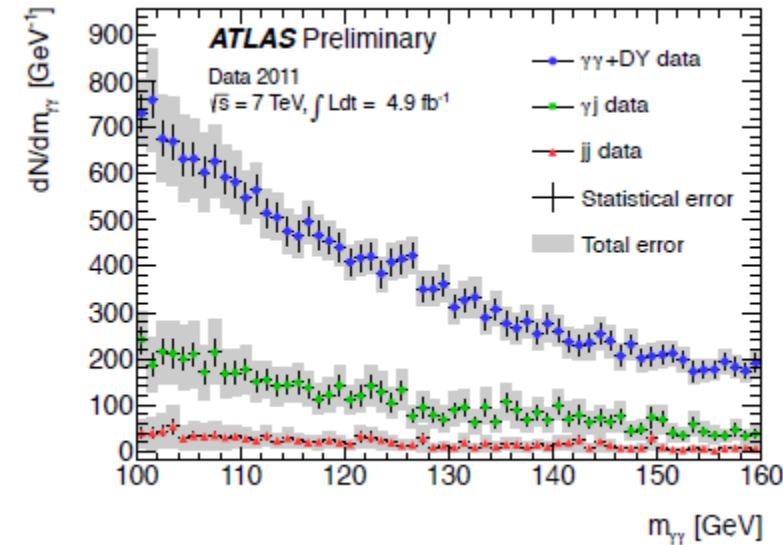
Higgs $\gamma\gamma$: bruits de fond , résolution

- **Plusieurs méthodes pour estimer les b.d.f**

- En gros, se basent sur les taux d'événements en relâchant certaines coupures (isolation, identification...) et sur des efficacités Monte-Carlo.

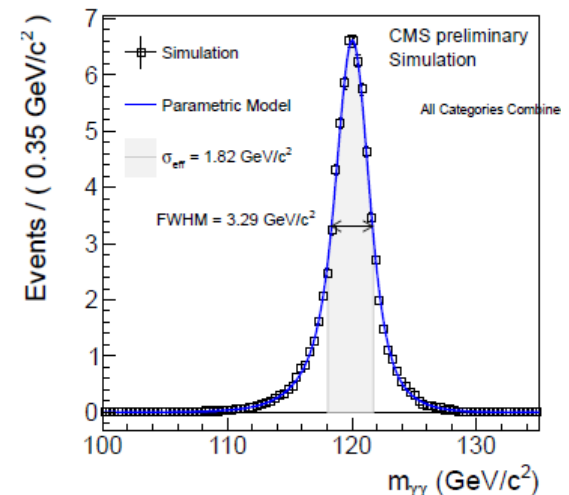
- ATLAS:

- 71% g g irréductible
- 23% g-jet , jet fakes photon
- 5% jet-jet, both jets fake photons
- 0.7 % Drell-Yan: $e^+ e^-$ pris pour photons convertis ou trace e non reconstruite.



- **La résolution en masse dépend des photons: position, énergie, conversion/non etc.**

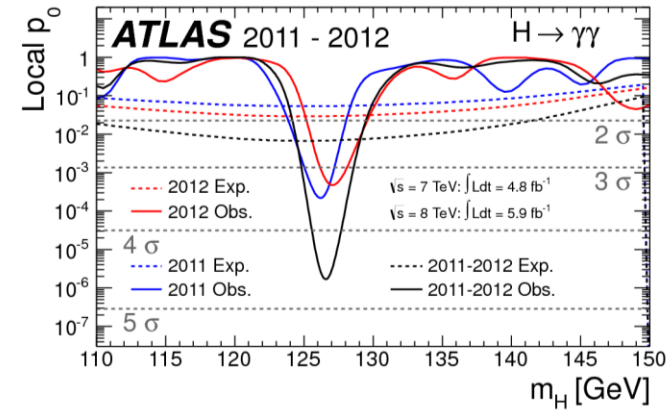
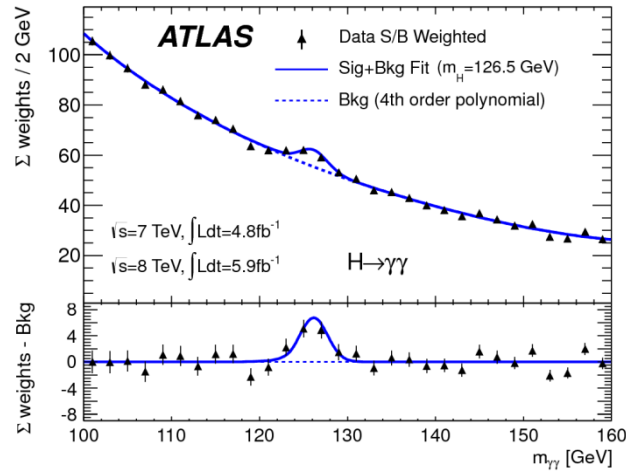
- Description du signal $m(\text{gg})$ pour chaque catégorie
Typiquement: 3.4 à 5 GeV FWHM



Higgs $\gamma\gamma$, résultats été 2012

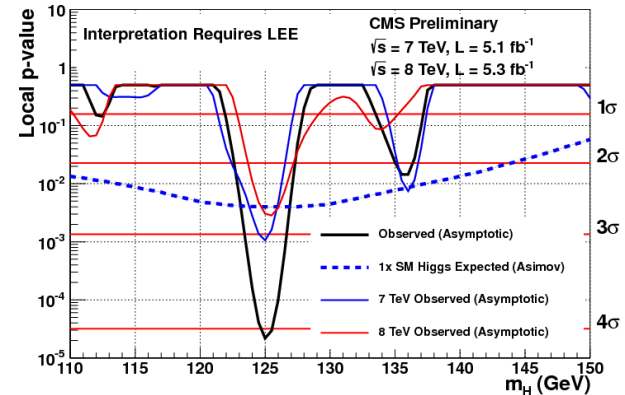
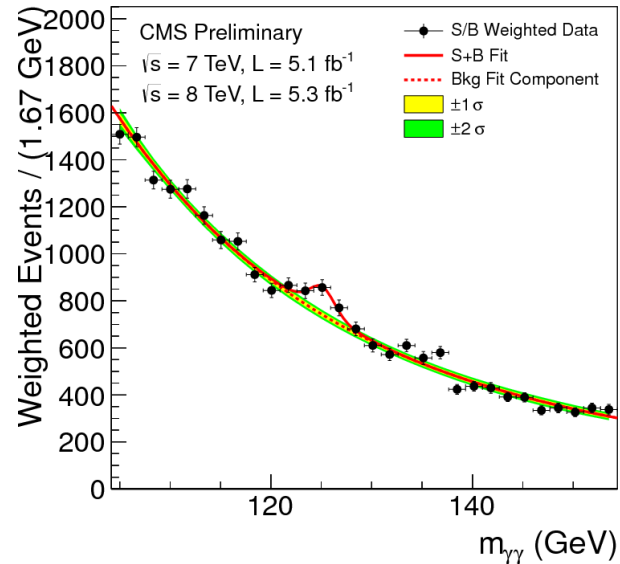
Atlas $m(\gamma\gamma)$

- Fit background: exponentielle dans chaque catégorie.
- p_0 : Probabilité (locale) que le b.d.f. ait autant ou plus d'évts que les données.
 - Excès 4.5σ à 126.5 GeV



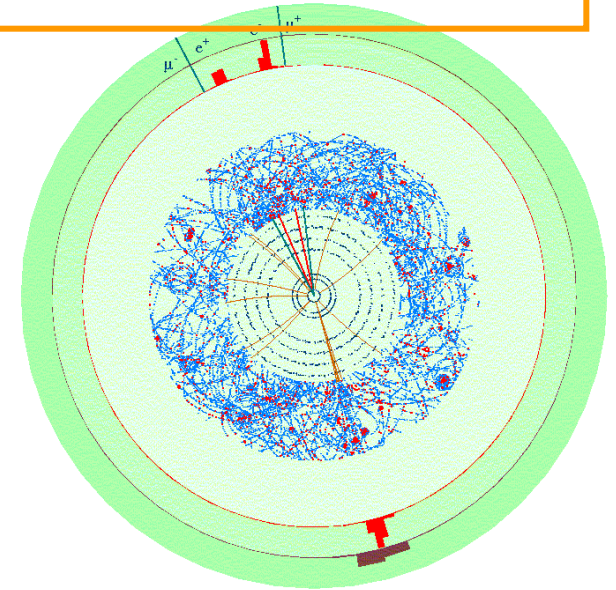
CMS

- Excès 4.1σ à 125 GeV



Higgs 4 leptons

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$ ($m_H = 130$ GeV)



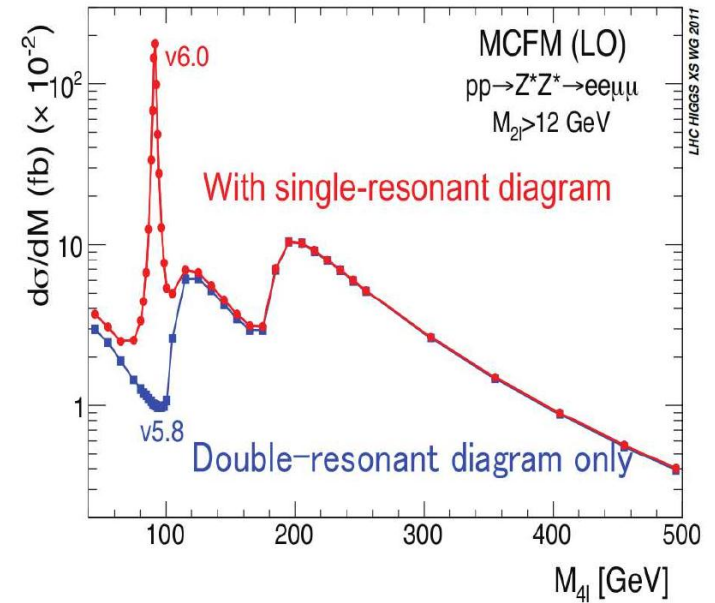
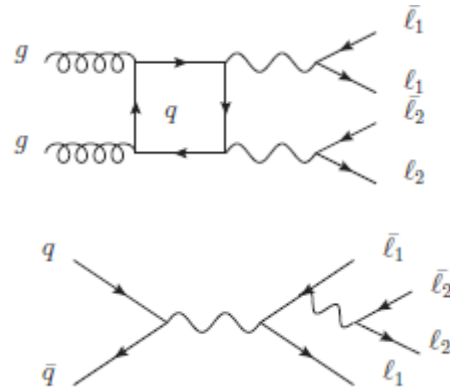
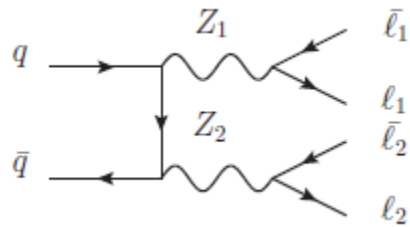
- Si $m_H > 2 m(Z^0) = 180$ GeV, $H \rightarrow W^+ W^-$ (70%) et $Z^0 Z^0$ (30%)
 - $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$ ou $\mu^+ \mu^-$ (B. R. 3% chaque)
 - Événements ‘en or’ : $p p \rightarrow H \rightarrow Z Z \rightarrow 4 e, 4 \mu, 2e 2\mu$
- Encore valide si 130 GeV $< m_H < 2 m_Z$, avec un Z virtuel
 - $H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4$ leptons
 - Mais peu de signal (sous le seuil)
- Détection relativement facile, peu de bruit de fond instrumental
- Résolution en masse: dominée par mesure pour $m_H < 250$ GeV, puis par Γ_H [(TeV) = $0.5 M_H^3$ (TeV)]

Résolutions obtenues (Atlas):		140	160	180	200	300	500
GeV	4e	2.2	2.4	2.8	3.9	8.4	33.8
	4 μ	2.0	2.2	2.7	3.7	8.4	34.4
	2e 2 μ	2.1	2.3	2.8	3.8	8.4	32.8

Higgs \rightarrow 4 leptons

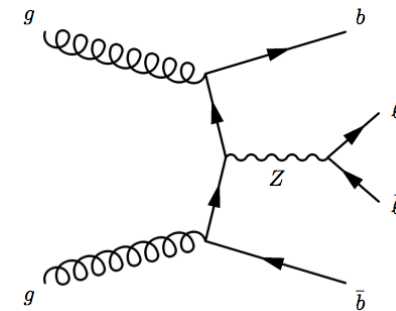
- **Fond: irréductible « continuum ZZ »**

– *Non-trivial!*



- **Fonds réductibles**

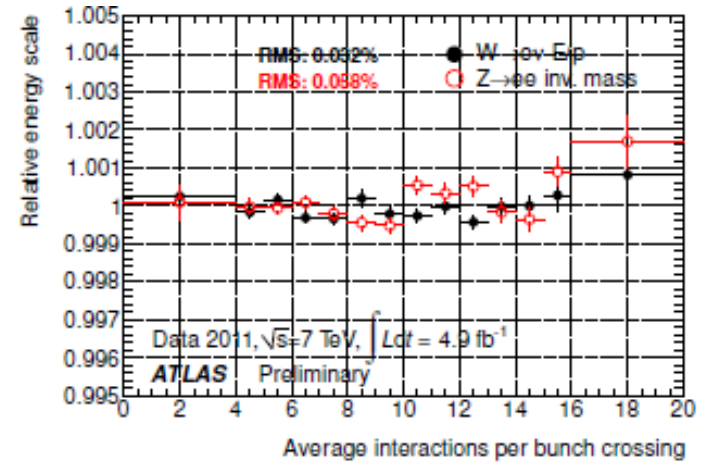
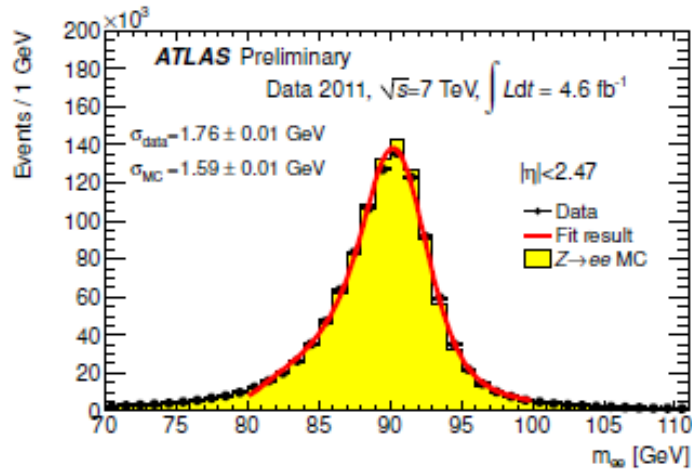
- Z bb + semileptonic decays => isolation leptons, veto b-tag
- Z jets + « fake leptons » => lepton ID, isolation
- tt => Une paire ee ou μμ proche du Z



Higgs 4 l, qualité leptons

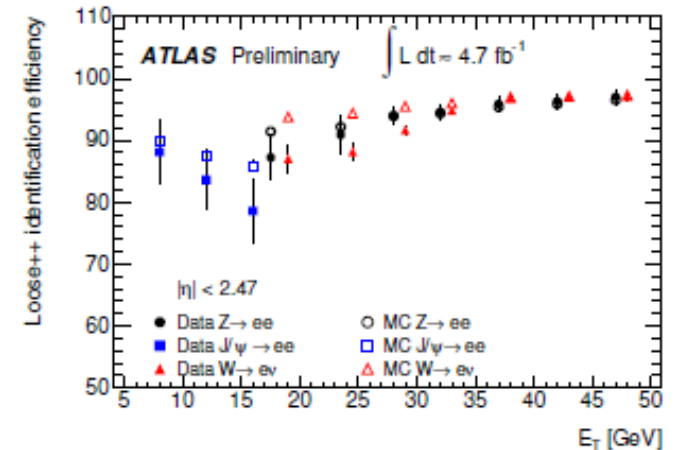
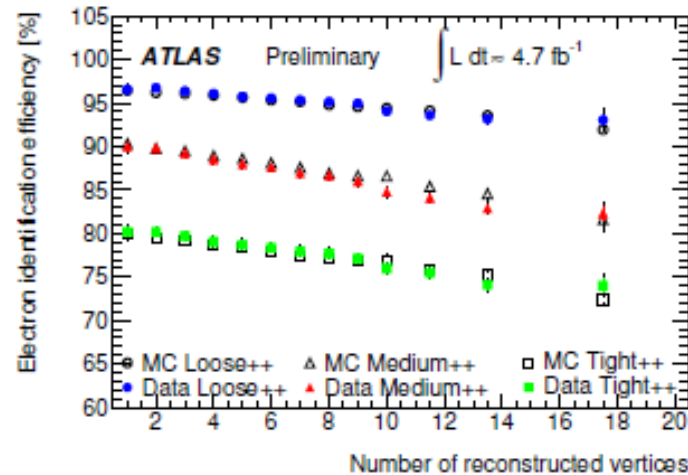
Electrons

- Calibration
- Résolution



– Efficacité

- Etude MC en fonction du nombre de vertex
- Vérifiée par « tag and probe » sur Z, J/ψ



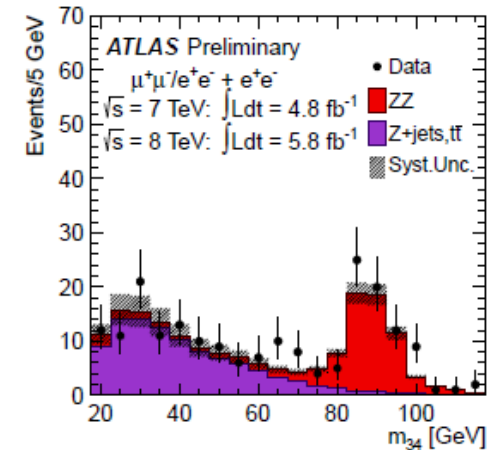
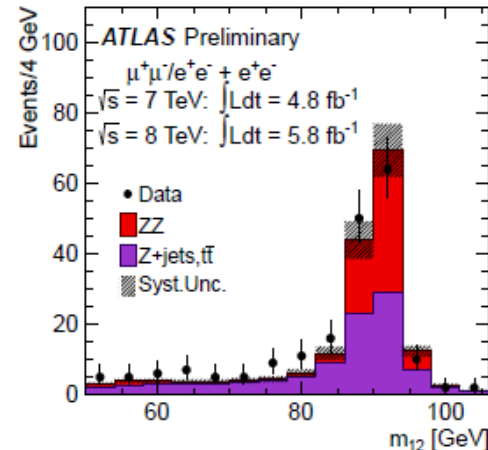
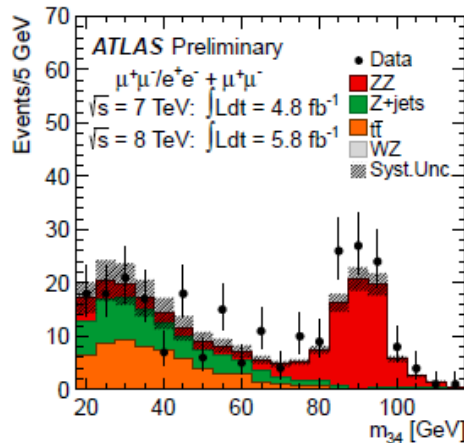
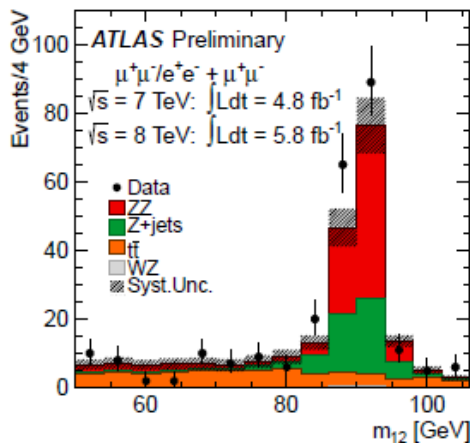
Higgs 4 leptons: bruits de fond

- **Continuum ZZ* : Monte Carlos.**

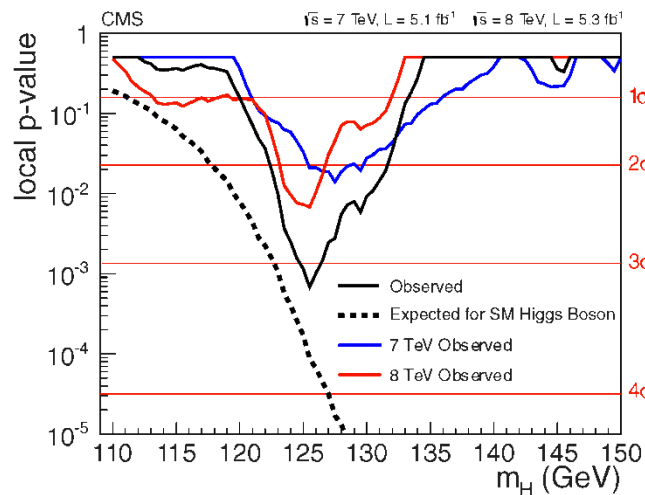
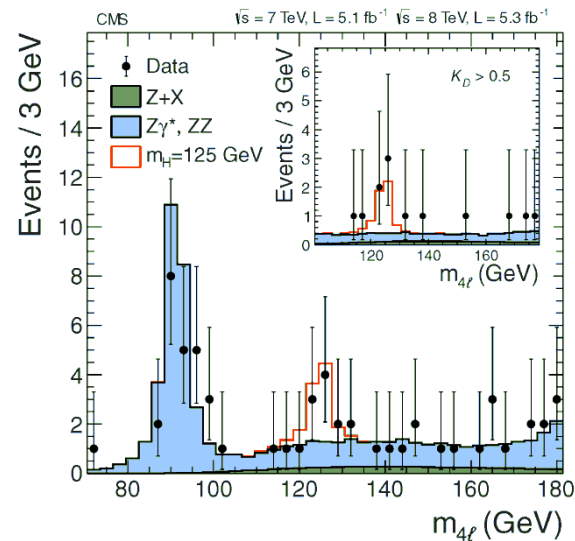
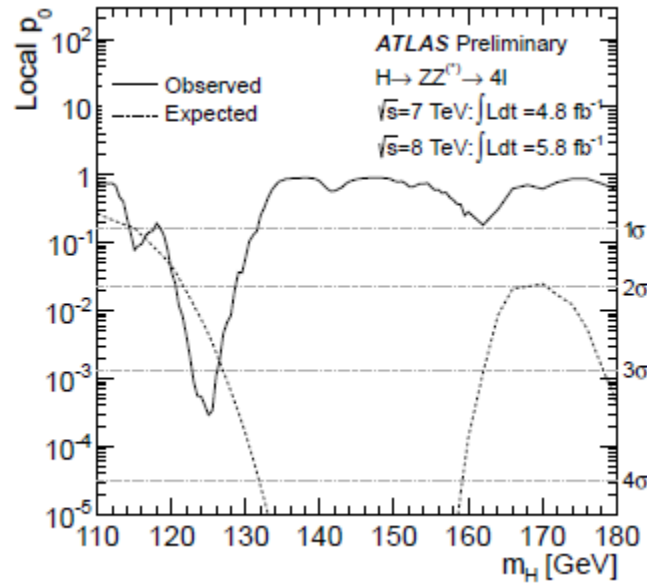
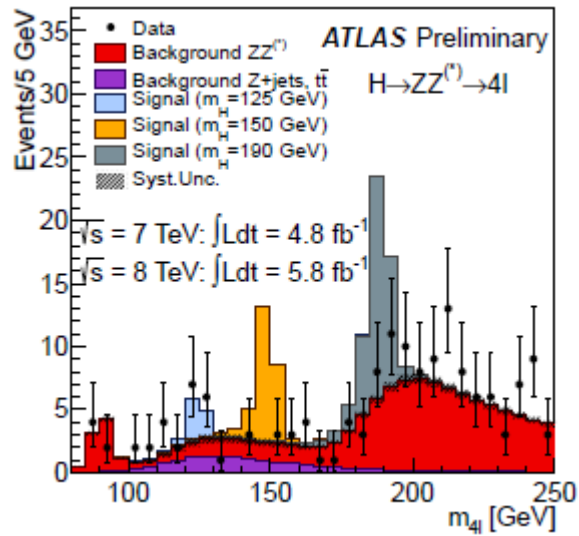
- Générateur : Pythia (LO, seulement diagrammes double-résonants)
- Normalisé à MCFM (calcul, NLO, inclut simple-résonant) sur le spectre $m(4l)$

- **Fonds réductibles:**

- tt: générateur MC@NLO, normalisé NNLO, vérifié par région de contrôle « $e^\pm \mu^\pm$ »
- Z + jets: Monte-Carlo normalisés sur régions de contrôle
 - Z bb : enlever coupure b-tag (13, 14)
 - Z jet-jet: enlever identification lepton (13,14)



Higgs 4 leptons: résultats



- p_0 : probabilité que le bruit de fond seul fluctue autant que les données

- plus p_0 est petit, plus c'est le signe qu'on a observé un signal

- estimé en probabilité ou en nombre de sigmas:

1 sigma = 32%

2 sigmas = 5%

3 = $2.7 \cdot 10^{-3}$

4 = $6 \cdot 10^{-5}$

5 = $6 \cdot 10^{-7}$

Higgs: tous les modes

- Autres modes:

$WW \rightarrow l\nu l\nu$; $ZZ \rightarrow ll \nu\nu$; $ZZ \rightarrow ll qq$; $WW \rightarrow l\nu qq$; $\tau\tau$ (3 modes) ; $ZH/WH, H(bb)$

CMS
Analyse
2011

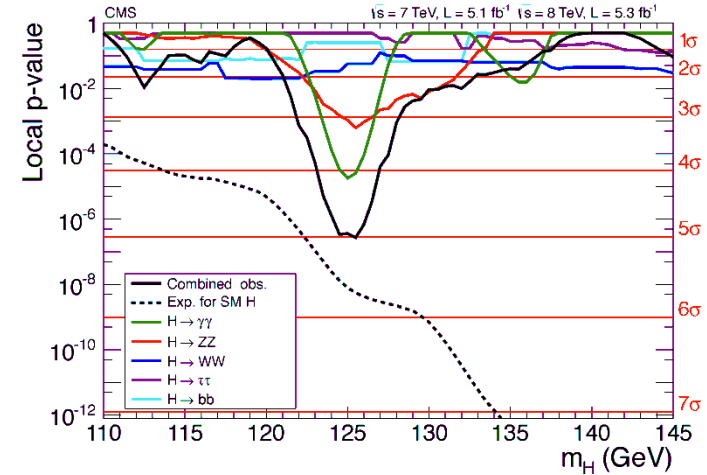
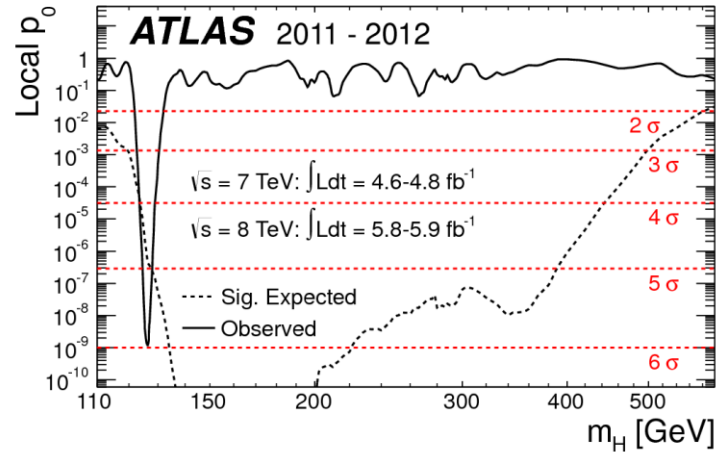
Channel (main production)	m_H range	sub-channels	m_H resolution
$H \rightarrow \gamma\gamma$ (ggH)	110–150	1	1–2%
$H \rightarrow \gamma\gamma$ (VBF)	110–150	1	1–2%
$H \rightarrow \tau\tau$ (ggH)	110–140/145	8	20%
$H \rightarrow \tau\tau$ (VBF)	110–140/145	4	20%
$H \rightarrow \tau\tau$ (VH)	100–140	2	20%
$H \rightarrow bb$ (VH)	110–135	5	10%
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ (ggH)	110–600	4	20%
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ (VBF)	110–600	1	20%
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ (WH)	110–200	1	20%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (ggH)	110–600	3	1–2%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ (ggH)	250–600	2	7%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow llqq$ (ggH)	130–164, 200–600	6	3%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\tau\tau$ (ggH)	190–600	8	10–15%

Higgs: combinaison des modes

- **Combinaison statistique de tous les modes de façon cohérente pour chaque hypothèse $m(H)$, répond aux questions:**
 - Probabilité que les données soient compatibles avec les bruits de fond (p_0)?
 - Est-ce que mon expérience est « typique » (parmi des expériences virtuelles équivalentes)?
 - Limite sur $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$ (95% CL): Analyse exclut quelles valeurs de masse?
 - Quelle est la gamme typique de telles limites?
- **Importance d'un *modèle global cohérent***
 - Régions de signal (~ 45), de contrôle (~ 100): données, fonds attendus
 - *Paramètres de nuisance* (~ 300)
 - Cohérence; ex: jet-energy-scale \Leftrightarrow Etmis etc.
 - Fit global: *marginalisation* des paramètres de nuisance
- **Pseudo-expériences (toy experiments)**
 - Approximation asymptotique beaucoup plus rapide
 - Vérification par toys sur nombre de points plus faible

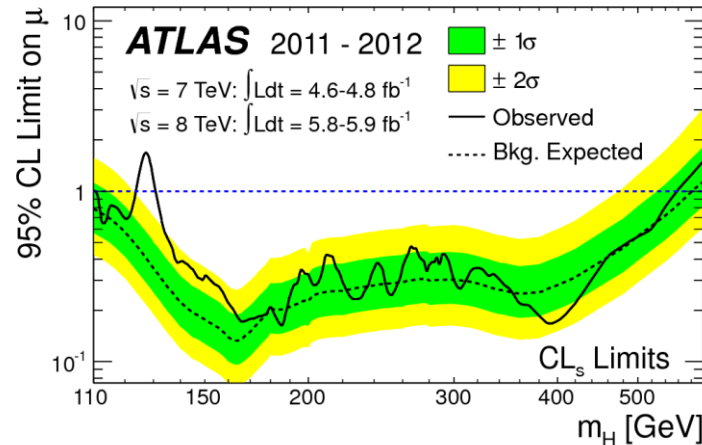
Higgs: résultats combinés

- Excès à ~125 GeV
> 5 sigmas
dans les 2 expériences



- Higgs standard exclu
à 95% CL sur
la gamme 110- 580 GeV
sauf [123-129]

- Exclusion 99% CL
111 – 560 GeV

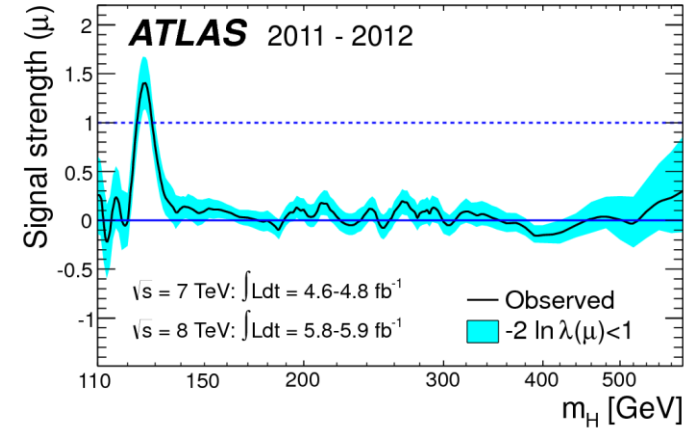


- **Caractérisation de l'excès:**
 - « signal strength » $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$

Valeur fittée de μ en fonction de m_H

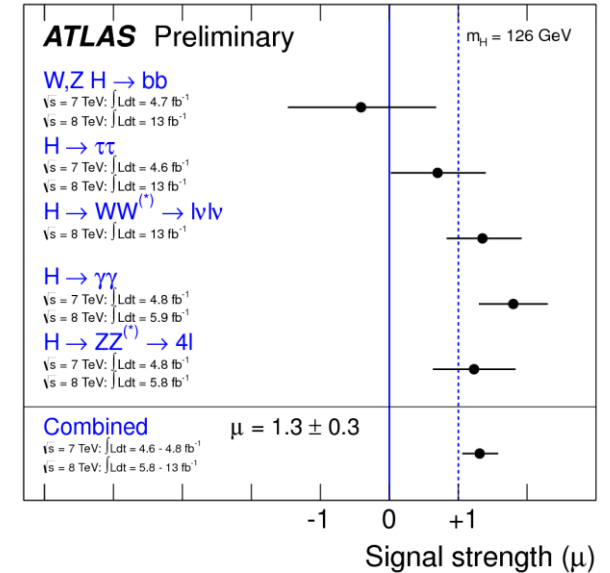
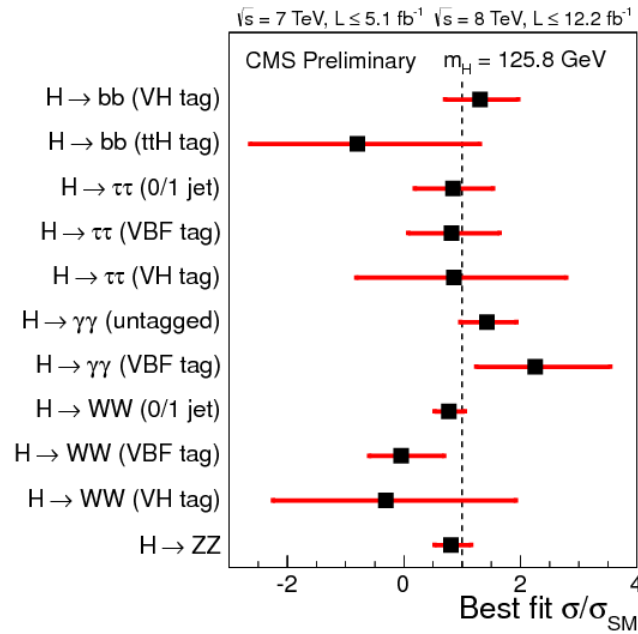
Atlas: $\mu = 1.3 \pm 0.3$

CMS: $\mu = 0.88 \pm 0.21$



- **On commence à mesurer le nombre d'évts Higgs par canal et comparer au Higgs SM**

HCP 2012 (Novembre)



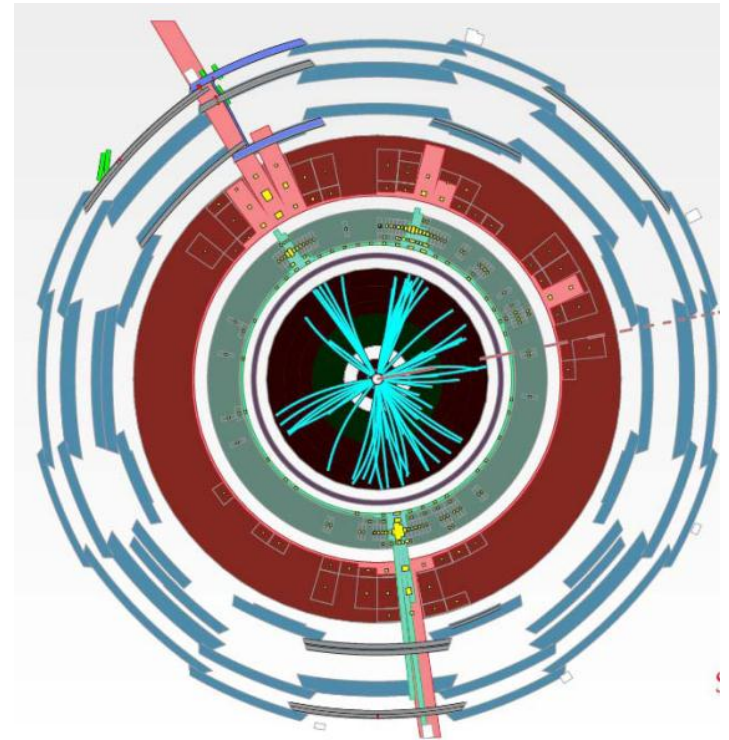
- **Autres mesures en cours: spin, couplages, etc.**

Recherches « Au-delà du Modèle Standard »

- **Deux approches possibles:**
 - **Générique: objets de grandes masse, énergie: résonance e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, jets, E_T^{miss}**
 - **Chaque recherche interprétée dans le cadre de plusieurs modèles**
 - **Orientée par un modèle**
 - **Recherche d'un ou plusieurs signes prédit(s) par un modèle**
 - **Exemple: Higgs supersymétriques: 5 Higgs dont 2 chargés, masses et couplages fixés par 2 paramètres**

Recherches Nouvelle Physique : "génériques"

- Particules chargées stables (CMS) par dE/dx
- Particules arrêtées dans le calorimètre avec désintégration retardée ($1 \mu\text{s} - 3\text{h}$)
- Résonances
 - Jet-jet
 - Photon-photon
 - Lepton-lepton (signe opposé, même signe)
 - Lepton - photon
 - $t \bar{t}$
 - $W - \text{jet}$
 - Lepton -jet
- E_T^{miss}
 - Jet(s) + E_t^{miss}
 - Lepton(s) + E_T^{miss}
 - Photon (s) + E_t^{miss}
- Multi-X



Simulation Trou Noir

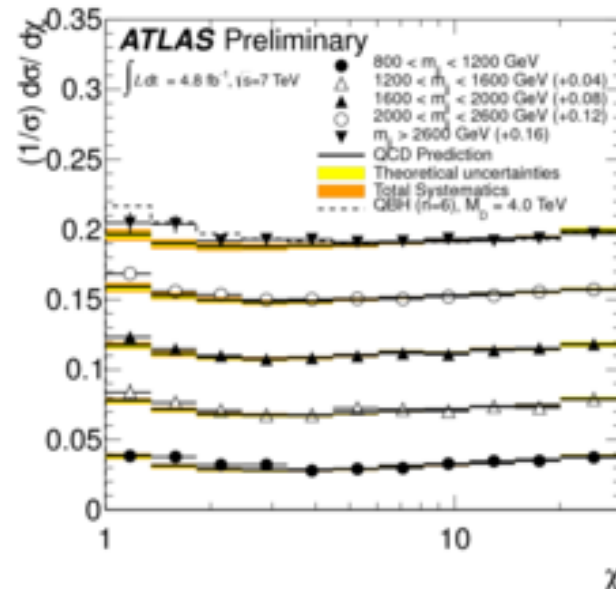
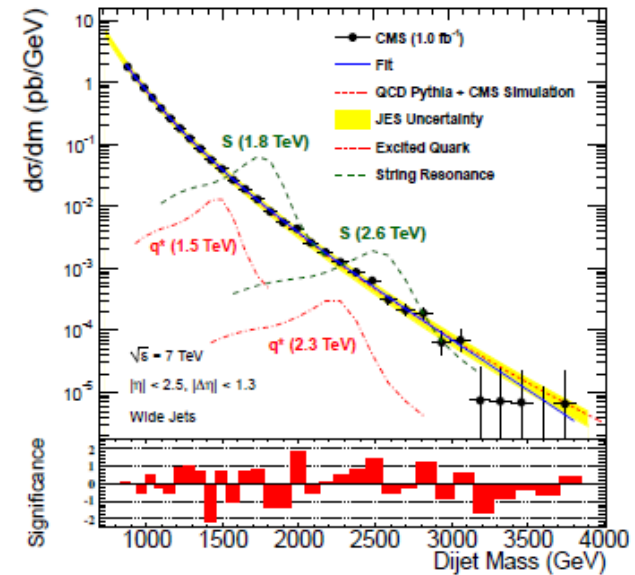
Interaction forte: résonance jet-jet, contact

Résonance di-jet?

$$m(q^*) > 3.84 \text{ TeV}$$

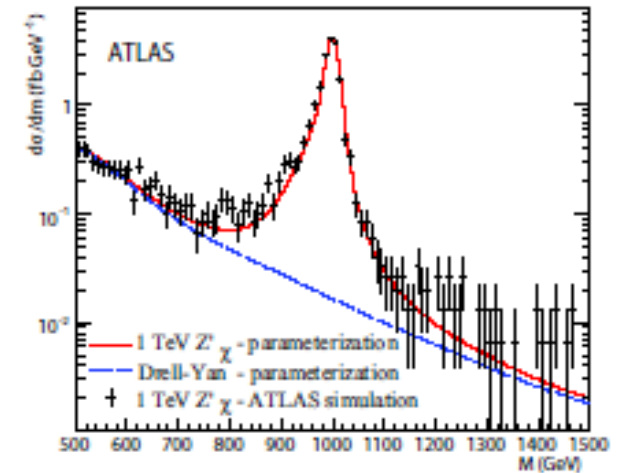
(Atlas, 13 fb^{-1} @ 8 TeV)

- Interaction de contact? (distribution angulaire)
- $\Lambda_{qqqq} > 7.8 \text{ TeV}$ (Atlas 4.8 fb^{-1} @ 7 TeV)
- (D0: 2.8 TeV)



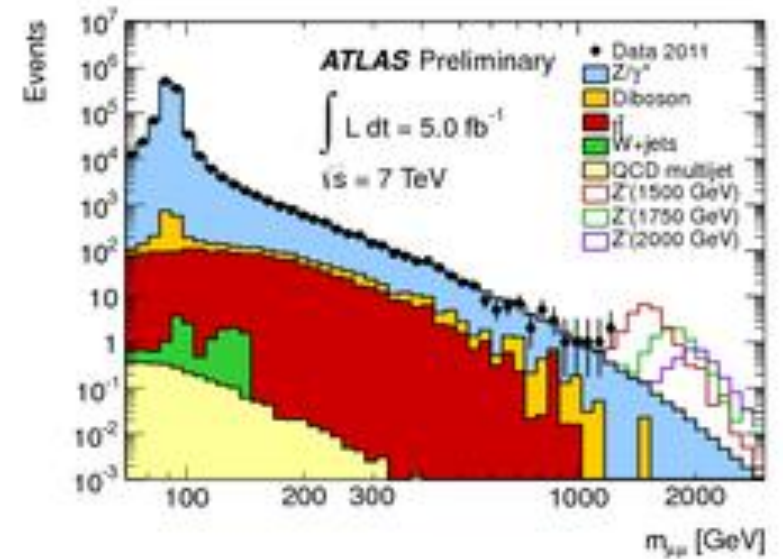
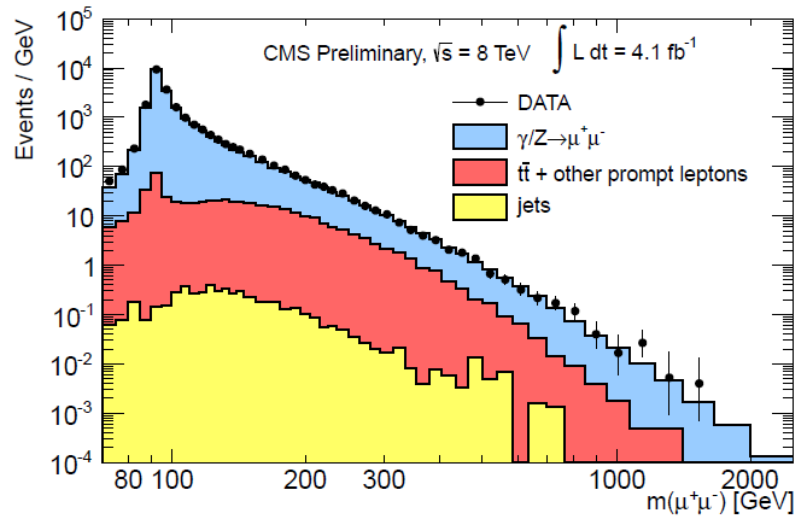
$Z' \Rightarrow$ dileptons

- **Plusieurs modèles « BSM » prédisent un Z' étroit:**
 - Reste de U(1) après « unification »: Left-Right , E6,...
 - Higgsless model (C Grojean)
 - Randall-Sundrum graviton
- **Recherche en $e^+ e^-$, $\mu^+ \mu^-$**
- **Fonds**
 - Irréductible: « Drell-Yan » = $l^+ l^-$ via γ ou Z
 - $J j$; $W j$, $Z j$, $W \gamma$, $Z \gamma$, $\gamma \gamma$: surtout pour ee ($\mu\mu$ identification excellente)
 - Mis measured e or μ
 - $\mu\mu$: mesure P difficile à grand P: on mesure $1/P$; queues de distributions non Gaussiennes?
 - ee : mesure E excellente à grand E. Signe difficile (Atlas 2T sur 1m...)



Z'

- $\mu\mu$ et $e e$



- Typiquement (dépend du modèle):

$$m(Z') > 2.5 \text{ TeV}$$

Supersymétrie

- **SUSY**
- **Rappel:** Supersymétrie: actuellement « meilleure » extension du MS
 - Résout (+ ou -) le problème de « hiérarchie »
 - LSP candidat matière noire
 - Lien (?) avec gravitation
- **Mais:**
 - Aucun signe aujourd'hui
 - Nombreuses particules prédites (partenaires, fermions \leftrightarrow bosons, [spin entier \leftrightarrow demi-entier])
 - Très nombreux paramètres
 - Nombreux modèles possibles.
 - MSSM (Minimal SuperSymmetric Model)
Avec prescription « mSugra » pour des calculs réalistes
- **Grands « secteurs »**
 - Higgs; MSSM: 5 Higgs! 3 Neutres, 2 chargés; **$m(h^0) < 130 \text{ GeV!}$**
 - Interactions fortes: squarks, gluinos. Masse élevée (1-10 TeV?)
 - Interactions faibles : sleptons, neutralinos. Masse moins élevée ?

•Higgs SuSy

MSSM : secteur des Higgs : H^+, H^-, h^0, H^0, A^0

2 paramètres: $m_A, \tan(\beta)$.

Analyse complexe!

En principe: plan $m_A, \tan(\beta)$ entièrement couvert.

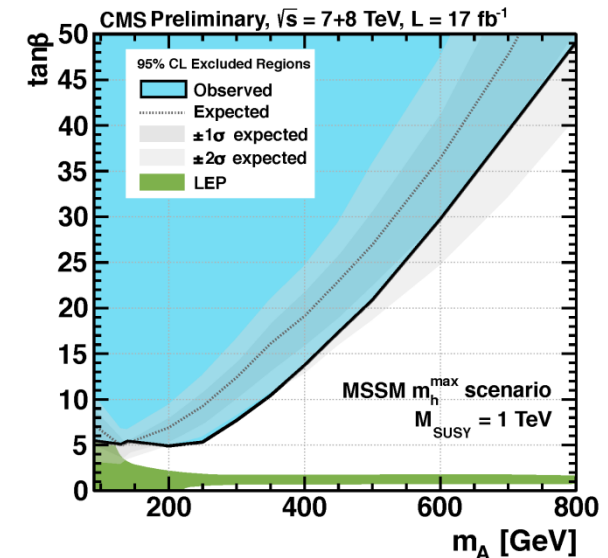
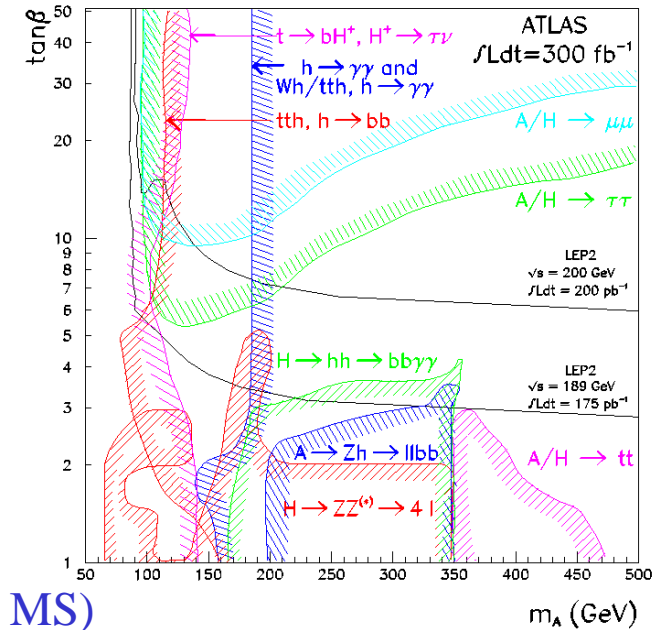
Partie de l'espace des paramètres où il existe des Higgs chargés,

et/ou plusieurs Higgs (\Rightarrow Susy se manifeste à une échelle proche du MS)

Ailleurs : h^0 seul, \sim Higgs standard! \Rightarrow comment le distinguer? autres mesures à LHC. Sinon: ILC!

Aujourd'hui:

- h^0 peut être celui découvert à 126 GeV
 - A la limite permise par le MSSM
 - Exclut une bonne partie des modèles. Contraintes sur param
- Recherches $H^{+/-} (\tau\nu), A/H^0 (\tau\tau) \Rightarrow$ limites



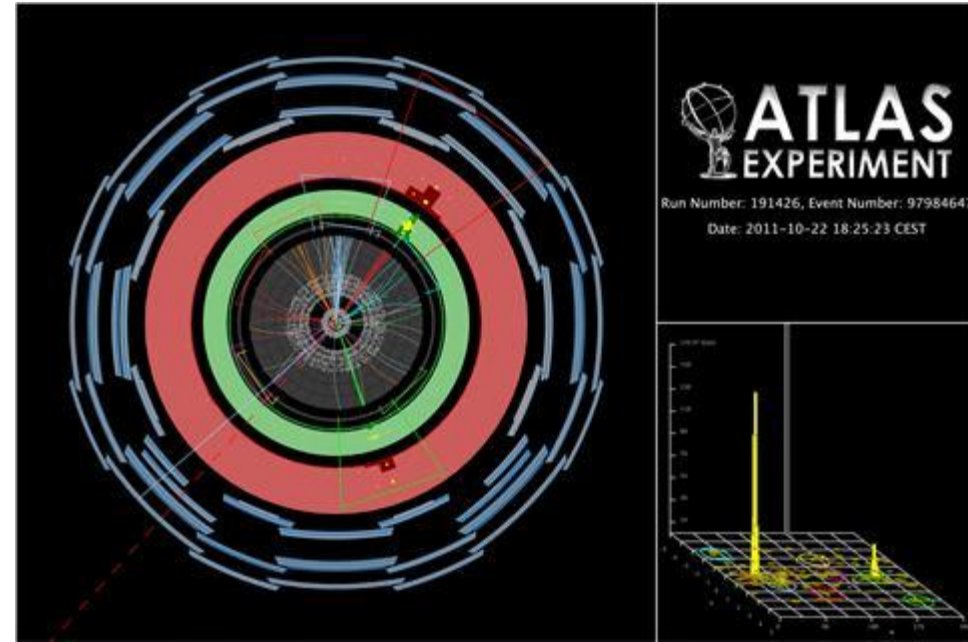
- Particules SuSy

- Le plus simple: $pp \rightarrow \tilde{q} \tilde{q} \rightarrow q + \chi^0 + q + \chi^0$
= 2 (ou plus) jets acoplanaires + rien

Evénement « spectaculaires »,

Limite actuelle (Atlas, 5.8 fb⁻¹, 8 TeV) :

squarks, gluinos $m > 1.5$ TeV

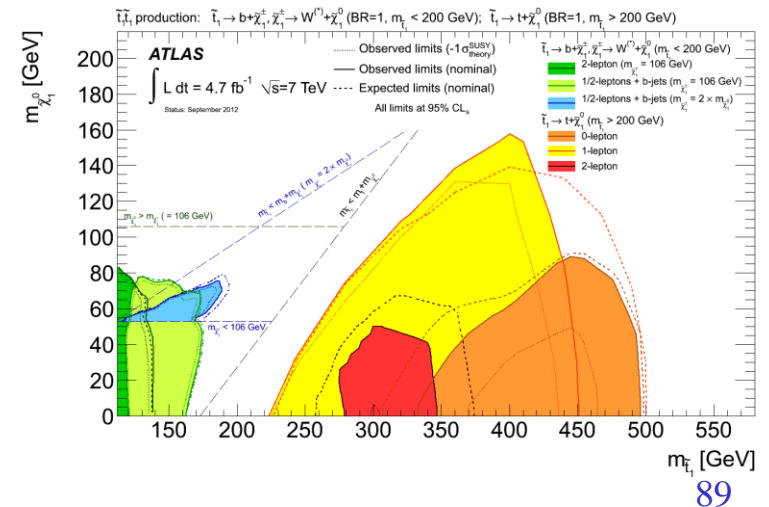


Candidat: 4 jets (974 GeV +..), E_{Tmiss} 984 GeV, $M_{eff} = 2.4$ TeV

- Nombreuses autres recherches semi-génériques

- 1, 2, 3 leptons + E_{Tmiss}
- b-jets + E_{Tmiss}

- Recherches « focalisées », ex s-top =>

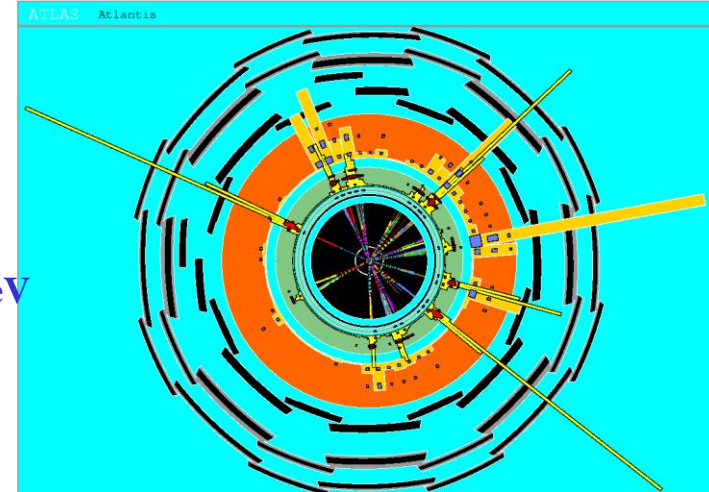


- **Extra dim**
- Principe: une ou plusieurs dimension(s) d'espace en plus des 3.
 –« compactifiée »: « enroulée sur une taille (TeV)⁻¹

Ainsi la gravitation devient « forte » à 1 TeV = échelle électrofaible

–Résout le pb de hiérarchie (?)

Trou noir 8 TeV
 -> 8 quarks de ~1TeV
 Simulation Atlas

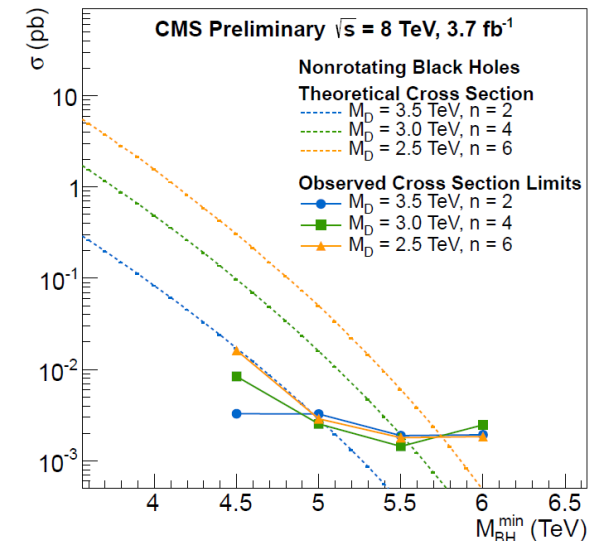


- **Plusieurs classes de modèles**

– Pas de phénoménologie poussée (trop vague)

– Possibles:

- énergie manquante (partie dans les extras dim!)
- Particules lourdes type Z', -> e⁺ e⁻, μ⁺ μ⁻
- Déviation de distributions
- Trous noirs: Évts spectaculaires!



Physique du B à LHC

- Atlas et CMS peuvent regarder la physique du B

- **Spécialiste: LHCb**

- Expérience « vers l'avant », regarde les paires $b - \bar{b}$ produites près axe faisceau

⇒ Quarks b très « boostés », parcours $\gamma c \tau$
= $\gamma \times 0.5 \text{ mm} \sim E \times 0.1 \text{ mm}$

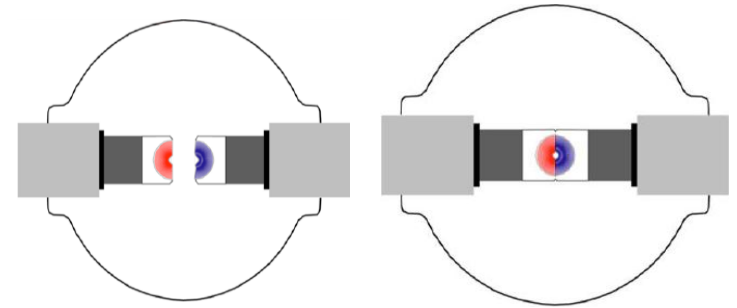
-

Détecteur de vertex (VeLo)

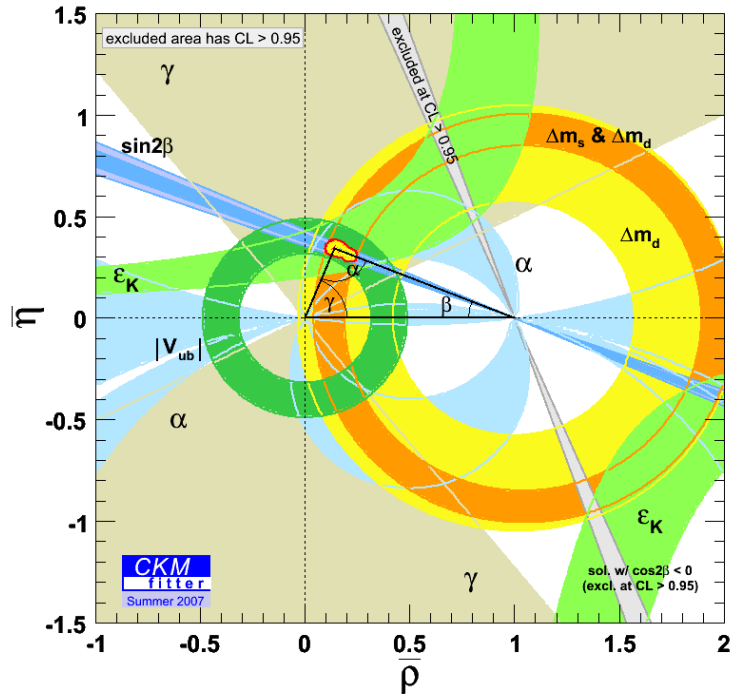
- Spectromètre:

- Aimant
- Chambres
- **2 RICH (Ring Imaging Cerenkov): identification de particules**
- Calorimètre

- **Fonctionne à une luminosité volontairement limitée à 10^{33}**



- **Principal but:**
Meilleure mesure de la matrice de mélange des quarks
Matrice « CKM ».
En particulier les éléments les moins bien connus, par ex
l'angle γ
... en cours.



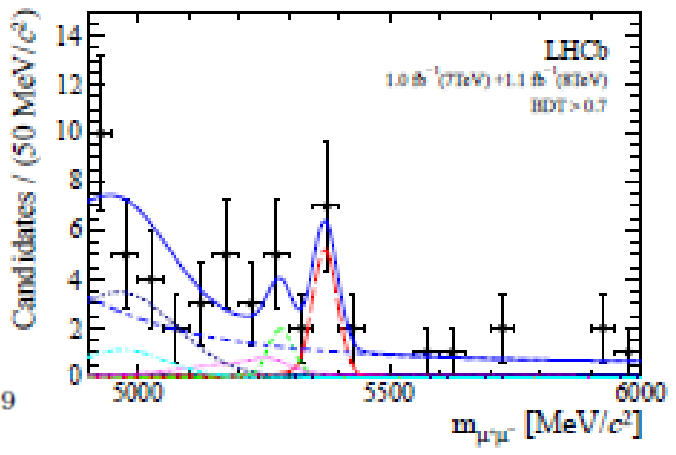
- **Aussi: Modes de désintégration rares du B**

Sensibles à une possible nouvelle physique

- Ex : $B_s \Rightarrow \mu \mu$
Prédiction MS $\sim 3 \cdot 10^{-9}$
Recherché par toutes les exp: Tevatron, CMS, Atlas

Découvert par LHCb

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.2^{+1.4}_{-1.2}(\text{stat})^{+0.5}_{-0.3}(\text{syst})) \times 10^{-9}$$



Futurs collisionneurs S-LHC

- **Upgrade LHC**

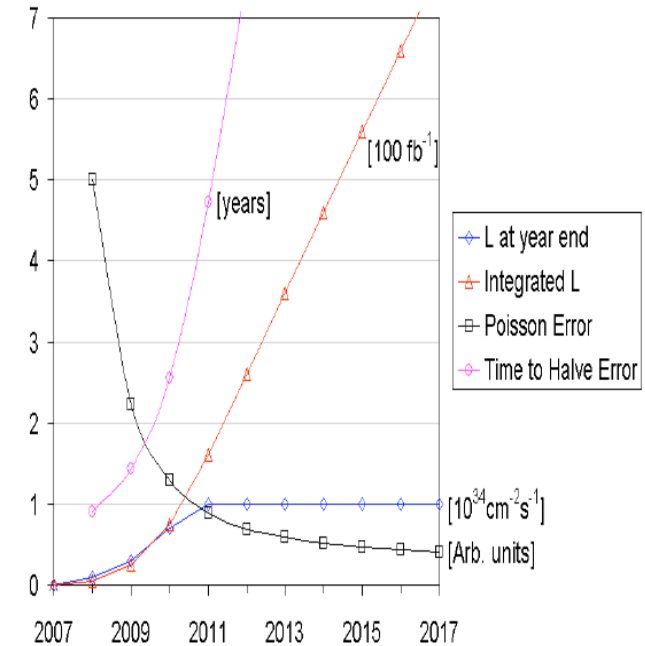
- Augmenter l'énergie? Impossible: champ max des dipôles
- Augmenter la luminosité: possible $\times 10$ ($\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

- **Physique**

- Neuts $\times 10 \Rightarrow$ accès événements plus rares
- Pile-up $\times 10 \Rightarrow$ dégrade les performances
- Total:
 - Higgs standard: accès modes rares ($H \rightarrow \mu \mu$, $H H \dots$)
 - SuSy: squarks/gluinos + 700 GeV
 - Modèles composites: échelle 30 TeV \rightarrow 60 TeV
 - Pas de Higgs: recherche interaction forte WW

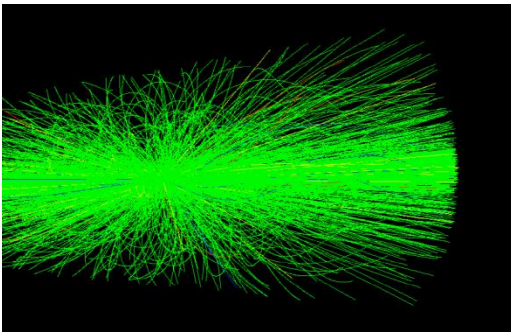
- **Machine**

- Plus de protons (bunch-crossing time? 12.5 – 75 ns?) (modifs tous les accélérateurs du Cern...)
- Focalisation plus forte (quadripoles dans les expériences)

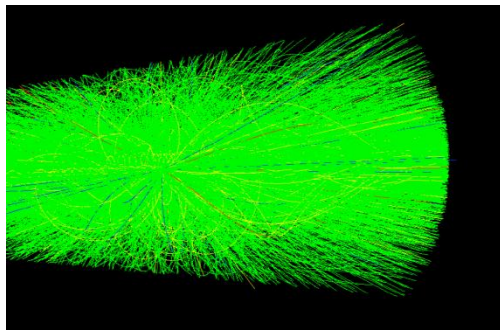


Après ~ 3 ans à $L = 10^{34}$, gain lent

- **Expériences à très haute luminosité**
 - Calorimètres
 - Atlas Ar Liquide
 - Forward: charge espace, dépôt énergie
 - Autres: électronique?
 - Atlas scintill tiles: ~OK
 - CMS cristaux PbWO4 ? (surtout End-caps?)
 - CMS HCAL scintill: changer, modif read-out.
 - Muons
 - Atlas: end-caps: changer. Micromegas
 - CMS ~OK (blindage Fer)

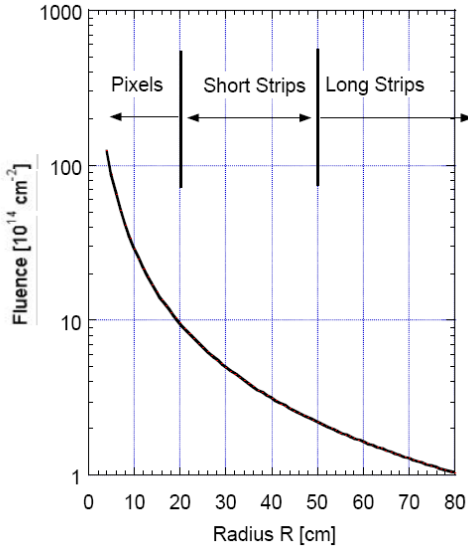


$L = 10^{34}$

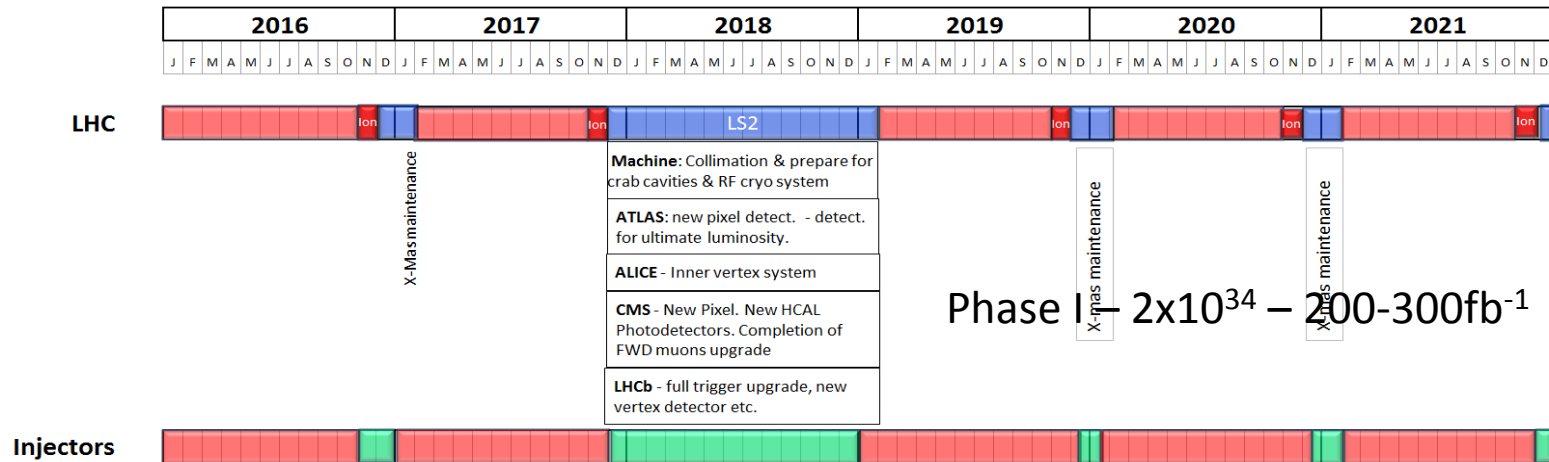
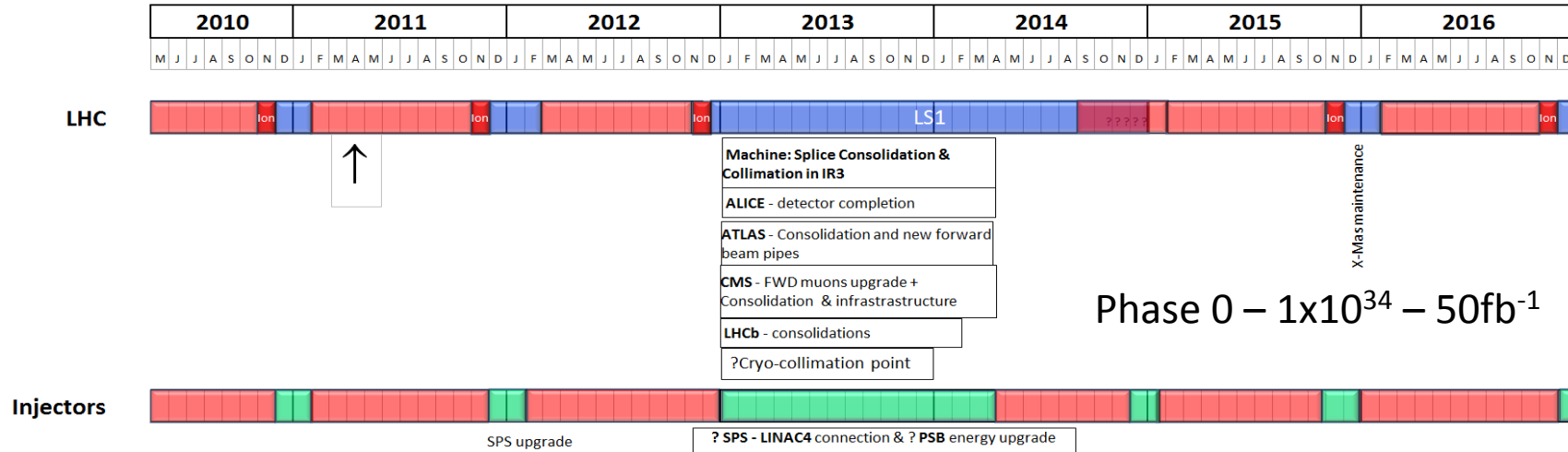


$L = 10^{35}$

- **Détecteur interne: occupation, radiations**
- ⇒ Atlas et CMS: remplacement.
- ⇒ Contraintes: détecteurs, électronique
- Si 3D? Diamant? Technos $< 0.1 \mu$?



Phases Upgrade LHC



Phase II after 2022
 long shutdown:
 5×10^{34} + levelling
 – 2 ab^{-1}

Futurs collisionneurs linéaires $e^+ - e^-$

- **Introduction**

- Collisions $e^+ - e^-$: physique de précision, exploration exhaustive du domaine *atteignable*

- Problème 1 : énergie de collision. LEP : 27 km circonfer : 200 GeV

 - Pertes par rayonnement synchrotron: $\sim E^4/R \Rightarrow$ circulaire impossible

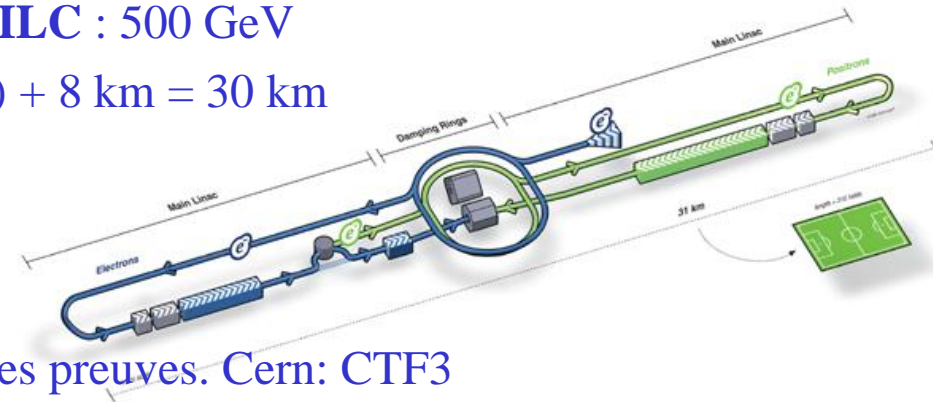
 - \Rightarrow 2 accél linéaires tête-bêche. Energie: longueur x « gradient accélérateur ».

- 2 projets:

 - Technologie « classique » (cavités RF supra) : **ILC** : 500 GeV

 - 500 GeV: gradient 32 MeV/m, 2x (11 km) + 8 km = 30 km

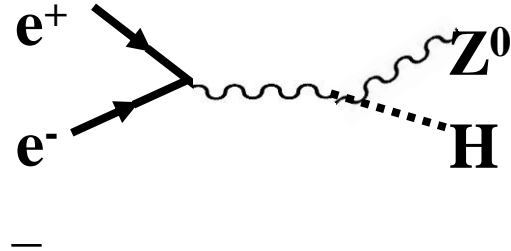
 - upgrade à 1 TeV : + 22 km



 - Techno futuriste (2-beam): **CLIC** . Doit faire ses preuves. Cern: CTF3

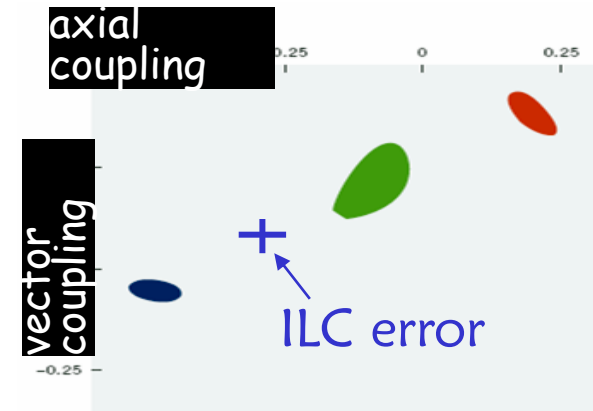
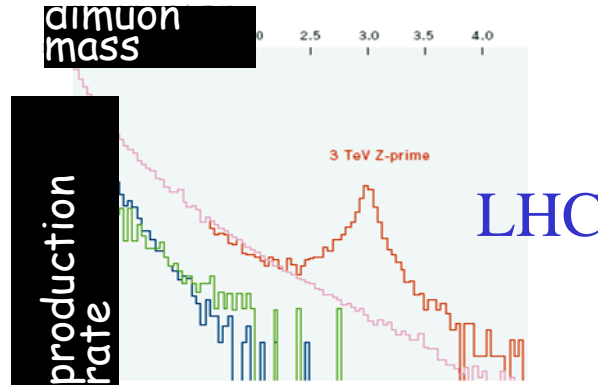
Physique aux futurs collisionneurs $e^+ - e^-$

- Gamme d'énergie explorée par LHC: 1 TeV (Higgs) , quelques TeV (SuSy, etc.)
- Higgs: comme à LEP, produit par :
 - possible si $E > m(H) + m(Z)$
 - Higgs actuel 125 GeV $\Rightarrow E > \sim 250$ GeV



- SuSy (ou autres) : S-particules produites par paire $X X$
- Possible si $m(X) < E/2$ (250 GeV pour $E = 500$ GeV)
- Si énergie insuffisante pour production directe, possibilité effets quantiques dans mesures de précision.

- Ex: Extra dim Z'



- Futurs collisionneurs e^+ - e^- : stratégie?
- ILC : techno sûre, essentiellement limitée par budget..
 - sans doute OK pour étude détaillée du Higgs standard
 - Très important: rapports de branchements, etc. => Est-il standard? Est-il SuSy?
 - Peut-être adapté à la partie « s-leptons » de SuSy (?)
 - mais problème si LHC a trouvé un squark de 1,5 TeV!
- CLIC: techno non prouvée. Calendrier inconnu. Potentiel important.
- Renouveau option circulaire
 - Tunnel LHC : limité à 240 GeV : étude du Higgs (Z h) *Peu probable*
 - Nouveau tunnel 80 km: jusqu'à ~350 GeV (> t t)
 - Puis collisionneur proton-proton à > 50 TeV?
- Choix: Pas avant 2015- 2016 (résultats LHC à 14 TeV)

- **Premières années de fonctionnement du LHC: succès total.**

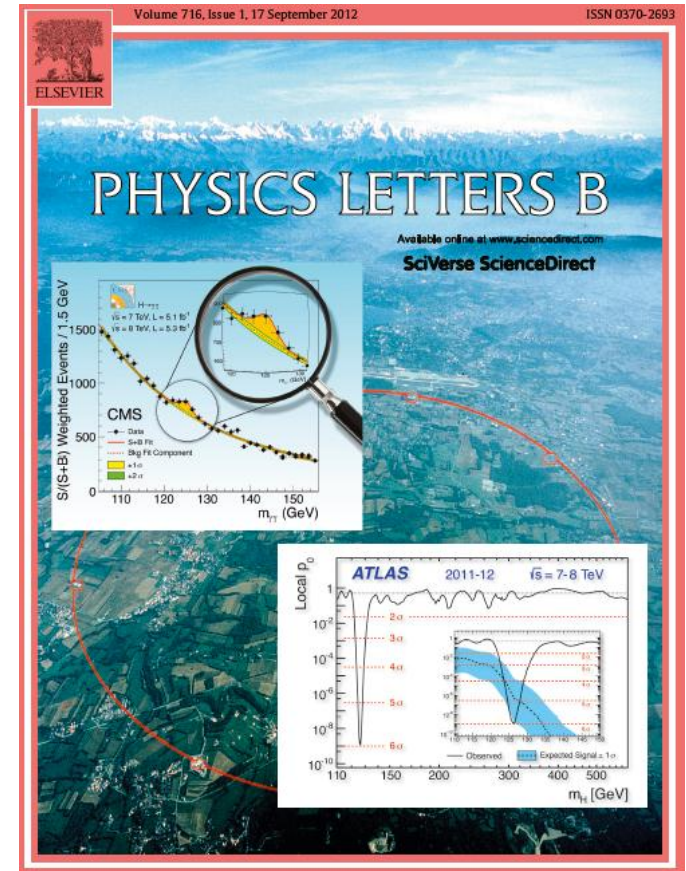
- Machine
- Expériences
- Physique

- **LHC:**

- Résultats sur 2011-2012
- Shutdown 2013-2014
- **Redémarrage 2015 @13-14 TeV**
- Très haute lumi après 2018

- **Collisionneur $e^+ e^-$**

- Lequel?
- Quand?



Merci de votre attention !

Backup

Un peu de théorie

- 1.2.1 Rappels de relativité restreinte

- Particule masse m , impulsion \mathbf{p} , énergie E :

Quadrivecteur: Position $\{ct, x, y, z\}$; Impulsion-Energie: $\{E/c, p_x, p_y, p_z\}$

- Les vitesses ne s'ajoutent pas!

- Transformation de Lorentz

- Vitesse limite : c

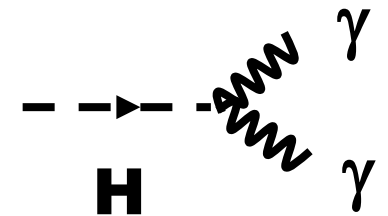
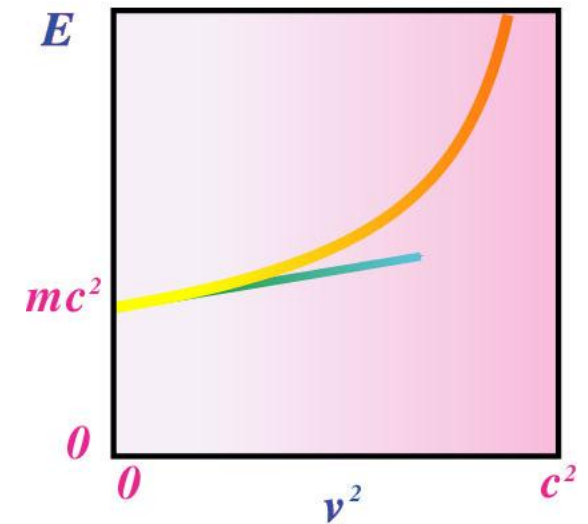
- Bonnes variables: énergie E , impulsion \mathbf{P}

- Invariants:

- Temps propre: $c^2 d\tau^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$

- Produit scalaire de 2 quadrivecteurs : $X_0 Y_0 - X_1 Y_1 - X_2 Y_2 - X_3 Y_3$

Masse effective d'un système de particules: $m^2 c^4 = (\sum E)^2 - (\sum \vec{P})^2$



- Rappels de mécanique quantique élémentaire.

- État propre: masse, spin ; nombres quantiques

Particule sans spin: fonction d'onde $\psi(\mathbf{r}) = \langle \mathbf{r} | \psi \rangle$ *Amplitude de probabilité*

Particule de spin j : $2j + 1$ fonctions d'onde $\psi_m(\mathbf{r}) = \langle \mathbf{r}, j, m | \psi \rangle$

$|j, m\rangle$ état propre des opérateurs J^2 et J_z

composition des moments cinétiques non triviale

- Durée de vie \Leftrightarrow « largeur » d'une particule

Particule instable , durée de vie t : $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$; relation d'incertitude: $\Delta E \times \Delta t \sim \hbar$

$\Rightarrow \Delta m c^2 \times \tau \sim \hbar$: durée de vie finie \Leftrightarrow incertitude sur la masse: « largeur » $\Gamma c^2 = \hbar / \tau$

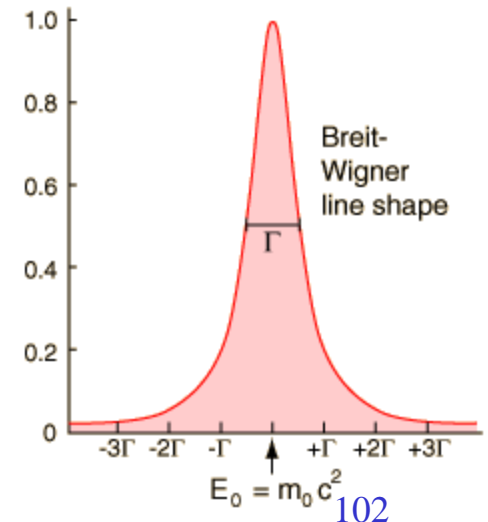
Ex: On a un grand lot de particules instables de type « 0 », qui se désintègrent en 2 particules de type 1 et 2 (stables) , avec une durée de vie τ .

Pour chaque « événement » on observe les particules produites 1 et 2

Masse invariante particules 1 et 2: $m^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$

Distribution de m : $dN/dm \sim \frac{1}{(m - m_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$ (**Breit-Wigner**);

$\frac{1}{(m^2 - m_0^2)^2 + \Gamma^2 m_0^2}$ (relativiste)



- Mécanique quantique / symétries

Symétries discrètes

- **Parité** : P : inversion d'espace $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ États propres de P ?

$P|\psi(\mathbf{r})\rangle = |\psi(-\mathbf{r})\rangle = \epsilon|\psi(\mathbf{r})\rangle$; or $P^2 = I$ donc $\epsilon = +1$ ou -1 ; $\epsilon =$ parité de $|\psi(\mathbf{r})\rangle$
(attention, il peut exister des états non propres de P ...)

Scalaires, pseudoscalaires, vecteurs, pseudovecteurs...

\mathbf{r} : vecteur (Parité -1) ; $r.p$: scalaire ($P +1$) ; $r^{\wedge}p$: pseudovecteur ($P +1$) ; $(r^{\wedge}p).r'$ pseudoscalaire ($P -1$)

- **Renversement de charge** : C ; Inversion du sens du temps : T ; valeurs propres aussi $+1$ ou -1 ...

- **Permutation de particules identiques**

État de N bosons (*resp. fermions*) identiques : *symétrique (resp. antisymétrique)* par permutation de 2 particules

Symétries continues (autres que translations et rotations)

Une partie de la théorie (« Hamiltonien ») est invariante par un certain **groupe** de transformations

ex: interaction forte voit proton et neutron comme « 2 états de la même particule »

ex : interaction faible voit électron et neutrino « e »’’’’.....

Méthode très puissante pour « structurer » la théorie.

Débuts du LHC

7.1 Etat des lieux

- **Démarrage le 10/09/2008 !**

Succès complet: en quelques heures les 2 faisceaux circulent dans les anneaux... (450 + 450 GeV)

- **Incident le 19/10/2008**

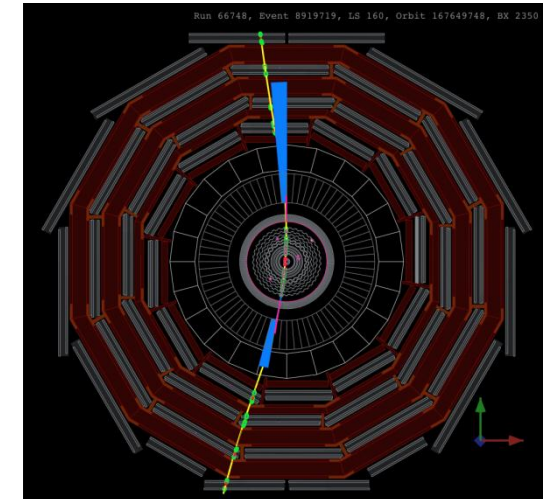
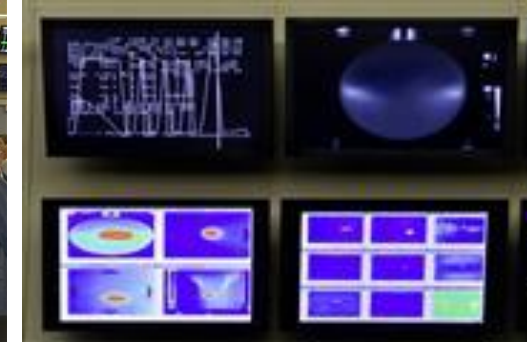
Gros dégâts matériels... Investigation => cause identifiée (jonction supra)

- **Oct 2008 – Nov 2009: pas de faisceaux**

- LHC : Réparations, ajout protections (soupapes, électronique...).

- Expériences

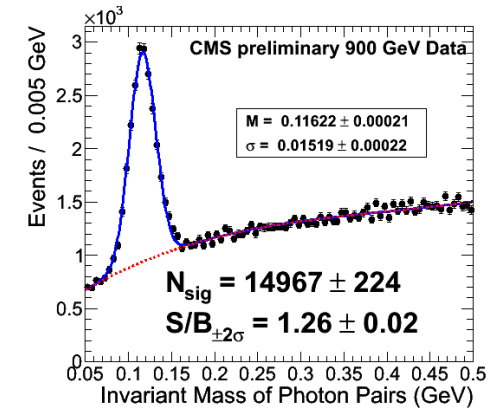
- Achèvement détecteurs, software...
- Enregistrement de millions de rayons cosmiques
 - Alignements (dét central, muons...)
 - Vérifier calibration des calorimètres
 - Tester la reconstruction
 - Tester la distribution des données



Prise de données 2009-2010

- **Analyse incident 2008:**
 - Limiter l'énergie à $3.5 + 3.5 = 7$ TeV jusqu'à la réparation de toutes les jonctions
 - Fonctionner jusqu'à avoir $\sim 1 \text{ fb}^{-1}$ enregistrés [fin 2011?]

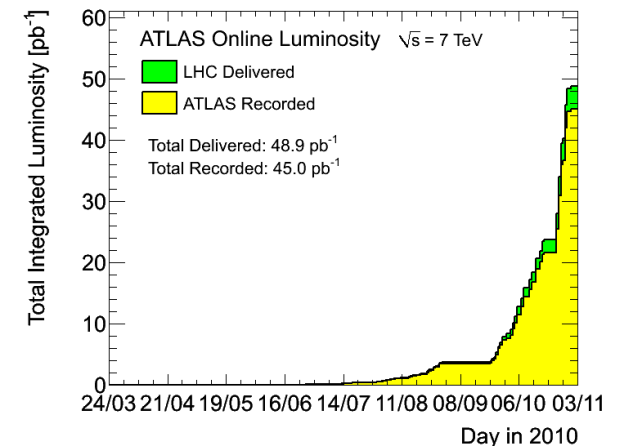
- **Nov-Dec 2009: Collisions à 900 GeV, un peu à 2.36 TeV (2 + 2 bunches)**



- **30 Mars 2010 premières coll à 7 TeV, 2 + 2 bunches, $L = 8.9 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$**

- **Augmentation progressive**
 - nbre de p par bunch $\Rightarrow 10^{11}$ (nominal)
 - nbre de bunches $\Rightarrow 348 + 348$
 - Squeeze

- **Lumi instantanée atteinte : $2 \cdot 10^{32}$. Total enregistré 45 pb^{-1}**



Etat des expériences

- **Détecteurs complétés et réparés durant 2009**

⇒ **Très bon état.**

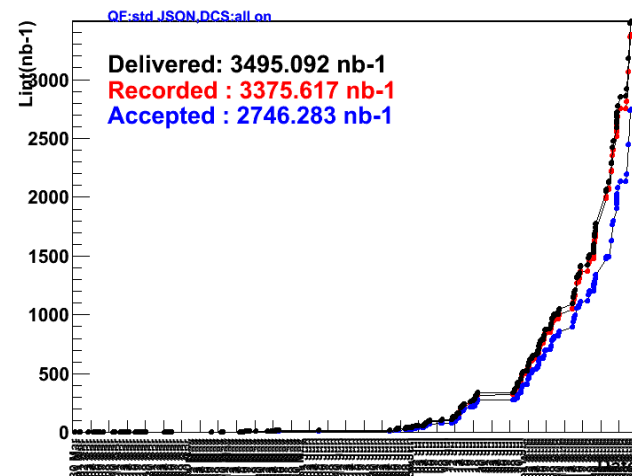
- **Nombre de canaux morts très bas (ATLAS)**

- **Efficacité de prises de données élevée (CMS: 88%)**

- **Performances des détecteurs excellentes**

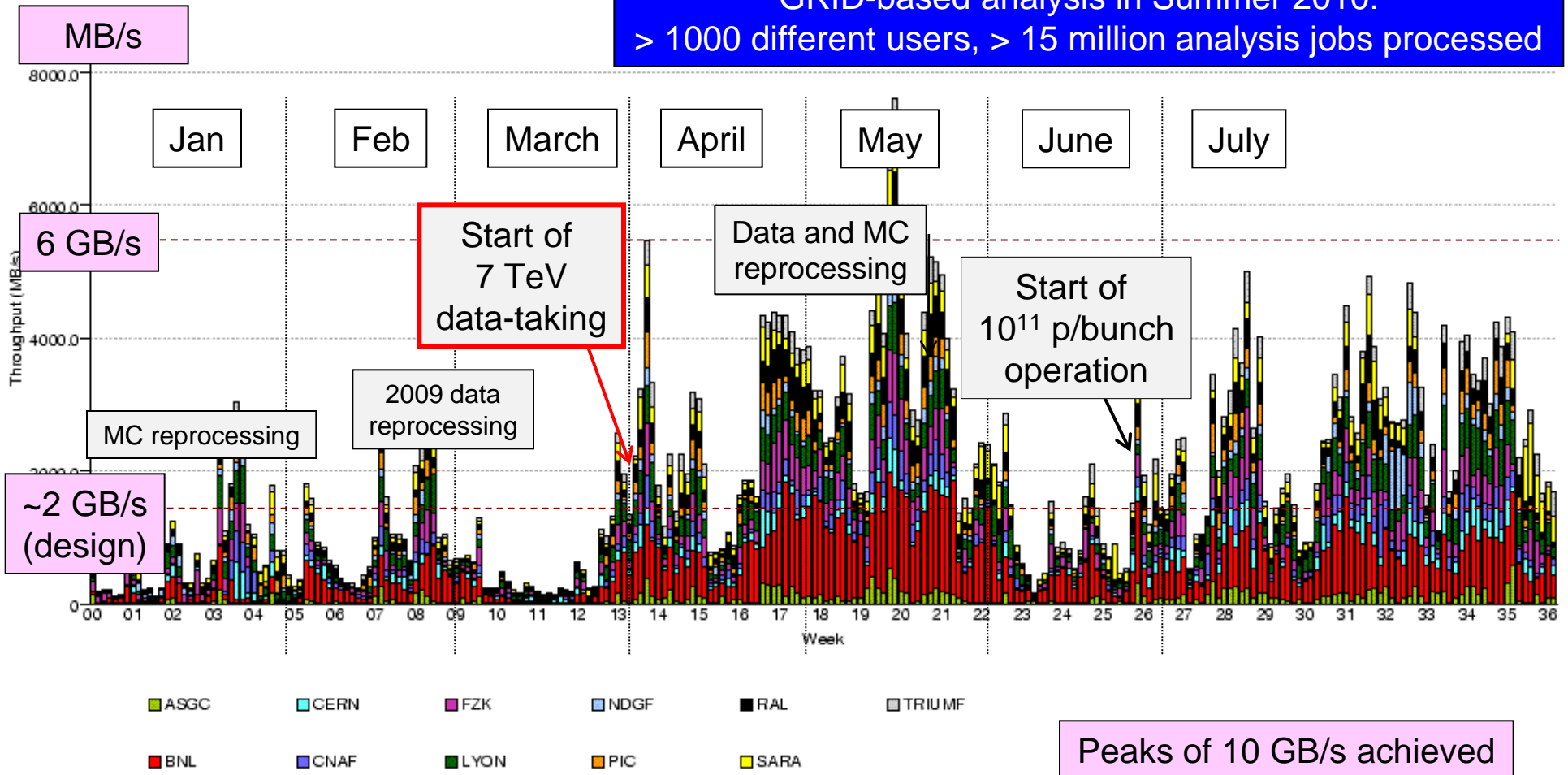
Subdetector	Number of Channels	Approximate Operational Fraction
Pixels	80 M	97.3%
SCT Silicon Strips	6.3 M	99.2%
TRT Transition Radiation Tracker	350 k	97.1%
LAr EM Calorimeter	170 k	98.1%
Tile calorimeter	9800	96.9%
Hadronic endcap LAr calorimeter	5600	99.9%
Forward LAr calorimeter	3500	100%
LVL1 Calo trigger	7160	99.9%
LVL1 Muon RPC trigger	370 k	99.5%
LVL1 Muon TGC trigger	320 k	100%
MDT Muon Drift Tubes	350 k	99.7%
CSC Cathode Strip Chambers	31 k	98.5%
RPC Barrel Muon Chambers	370 k	97.0%
TGC Endcap Muon Chambers	320 k	98.6%

Lumi



Traitement offline sur la grille de calcul

GRID-based analysis in Summer 2010:
> 1000 different users, > 15 million analysis jobs processed



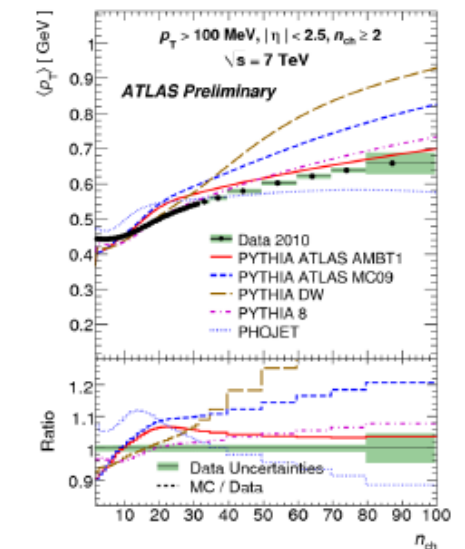
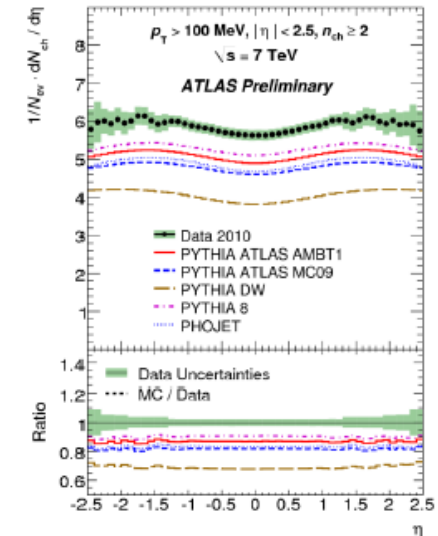
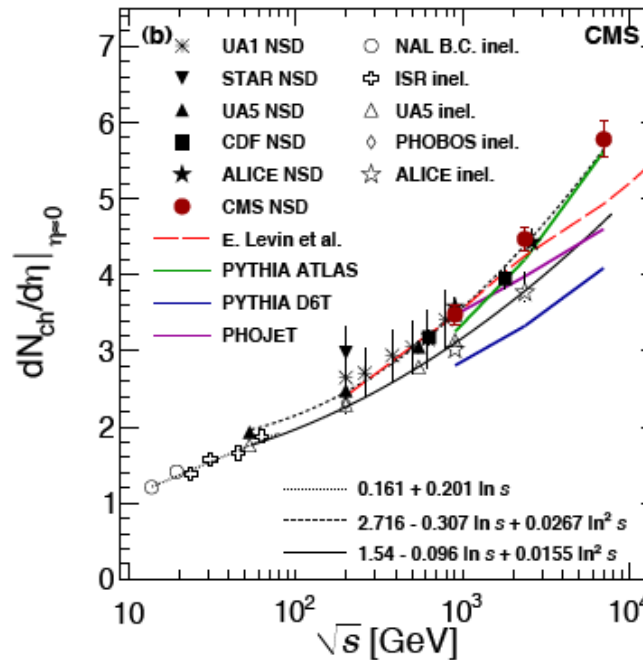
Données récentes Collisions "soft"

- **Trigger "Minimum Bias":** 1 ou 2 hits région(s) avant.
 - Voit principalement les collisions non-single-diffractive

- **Mesure: multiplicité des chargés vs η et p_T**
Multiplicité un peu plus haute qu'attendu, traces un peu plus molles.

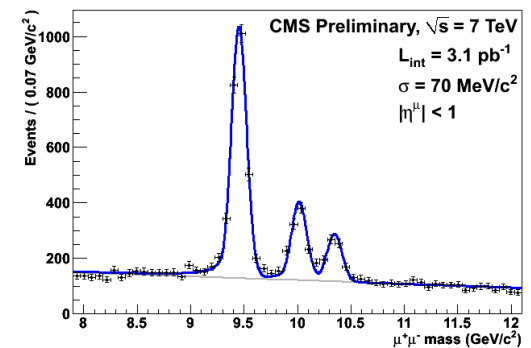
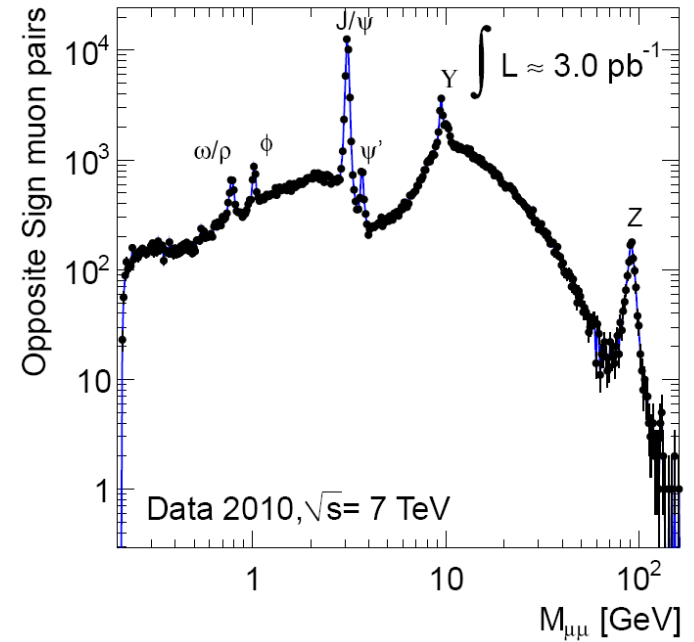
- **=> Nouveau "Tune" de Pythia (incluant les précédents \sqrt{s} ...)**

- **De même, l' "Evénement sous-jacent" a un peu plus de particules qu'attendu.**



Quarkonia

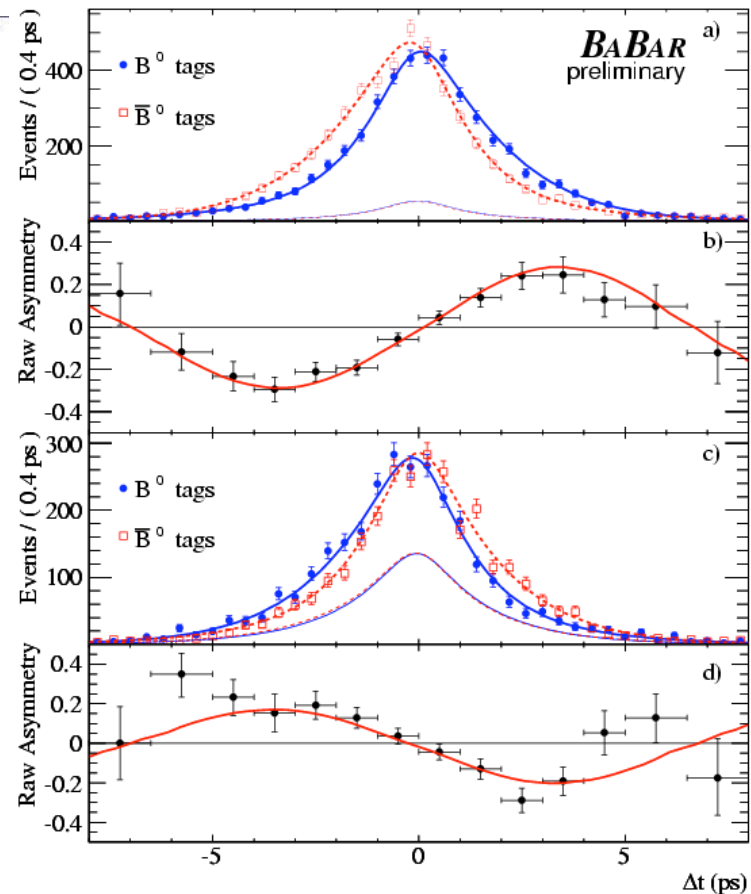
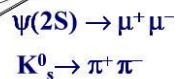
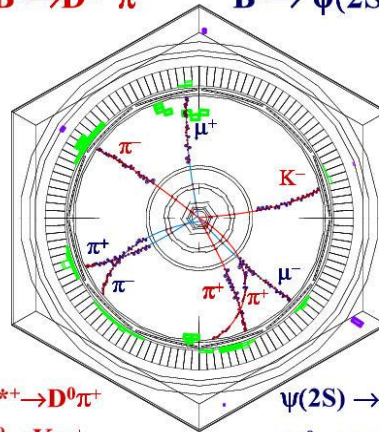
- **Spectre de masse dimuons (signes opposés)**
 - (noter le “prescale” en fonction de M)
- **Etudes de résolution des détecteurs**
- **Etudes d’efficacité: méthode “tag and probe”**
- **Quelques mesures de section efficace de J/ψ , Υ**



Collisions $e^+ - e^-$: Usines à B

- Introduction
- **But: étudier le mélange des « saveurs de quarks », et en particulier l'asymétrie matière-antimatière (« violation de CP »)**
 - Expliquer la présence de matière dans l'Univers!
 - Big bang: symétrique. Annihilation matière/antimatière => rien??
 - Légère asymétrie => reste un peu de matière ($\sim 10^{-9}$ x origine)
- Asymétrie découverte avec des mésons K^0 et \bar{K}^0 ($K^0 = d \bar{s}$) en 1964 (Nobel 1980)
- Plus forte dans le système $B^0 - \bar{B}^0$ ($B^0 = d \bar{b}$) => produire des millions de paires $B^0 - \bar{B}^0$
- masse du quark b : 4.5 GeV , du B^0 : 5.3 GeV => collisions $e^+ e^-$ à 10.6 GeV, intense
- temps de vie du B: 1.5 ps; vol: $\gamma \times 0.5$ mm => anneaux de collision asymétriques: 9 + 3.1 GeV
- Stanford (USA): Babar (1999- 2008) : ~ 500 millions B B
- KEK (Japon) : Belle (1999- 2010) : ~800 millions B B





- Mesures aux usines à B

- ‘ Basse énergie ’ = peu de particules
 Détecteurs de taille moyenne,
 mais très précis

- Reconstruction poussée
 de l'état final

- Observation de la violation de CP
 – En particulier les asymétries dépendant du temps!

- Mesure des paramètres ρ , η
 dans de nombreux canaux

- Autres mesures des systèmes quark-antiquark
 potentiel interaction forte

- **Résultat des usines à B:**

- Confirmation du MS: violation de CP compatible avec **une seule** variable complexe: (ρ, η)

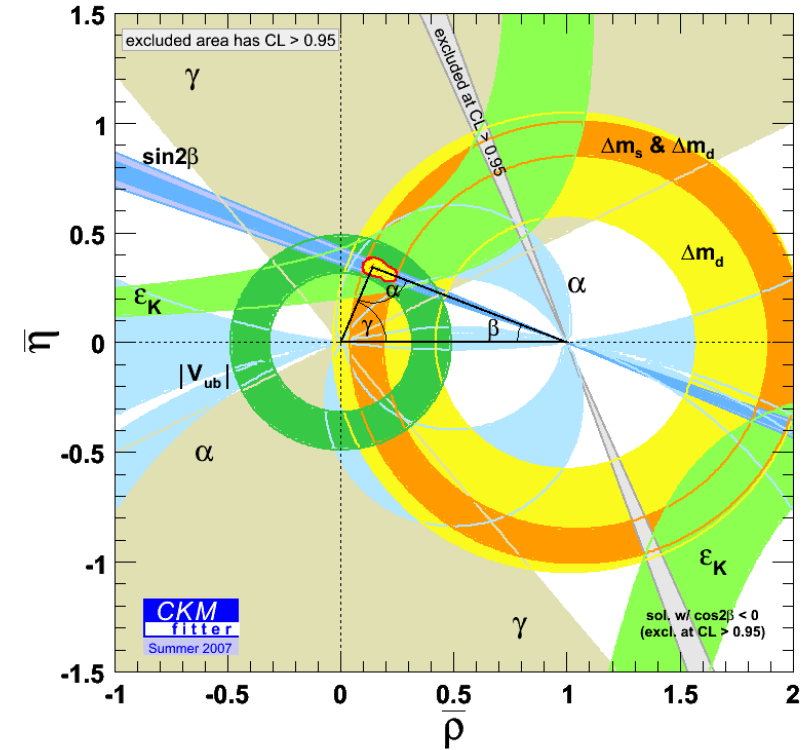
- (mais pourquoi cette valeur?)

- **Futur des usines à B?**

- Violation de CP: pourrait être sensible à « nouvelle physique » (corrections virtuelles)

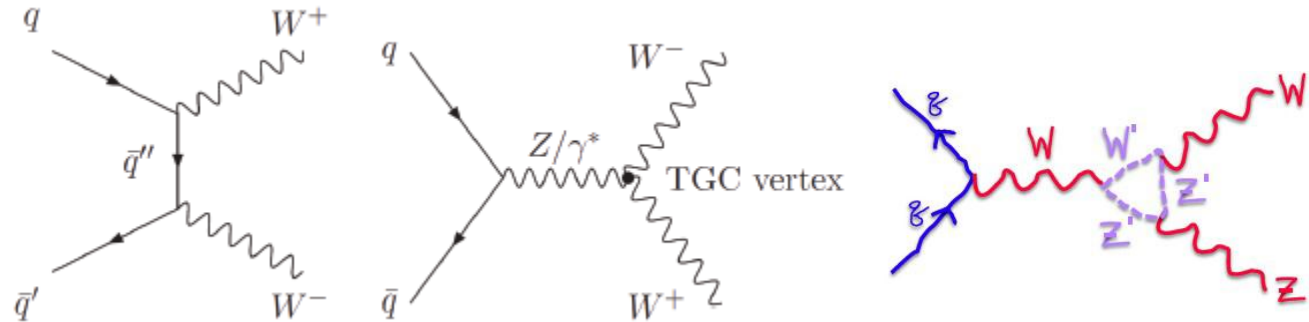
- ⇒ projet(s) de « Super-B Factory » : Japon (KEK), Frascati (?)

- ⇒ Augmenter la luminosité par x 100 ? *Machine? Détecteurs?*



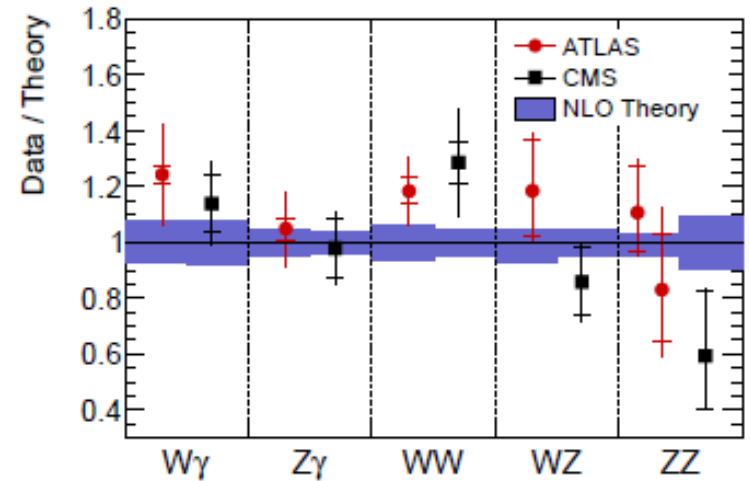
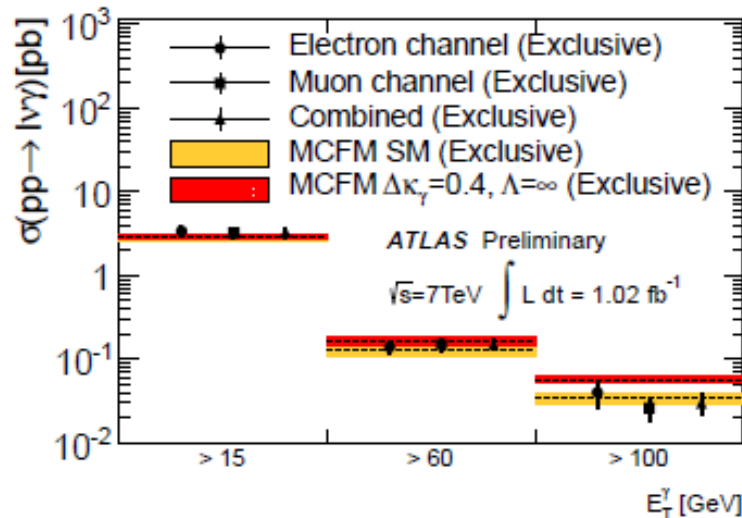
Dibosons

- Production de dibosons sensible à la structure de l'interaction de jauge: nature et valeur des couplages Triple Gauge Couplings (TGC)



- Bruit de fond (irréductible) à plusieurs modes de recherche du Higgs

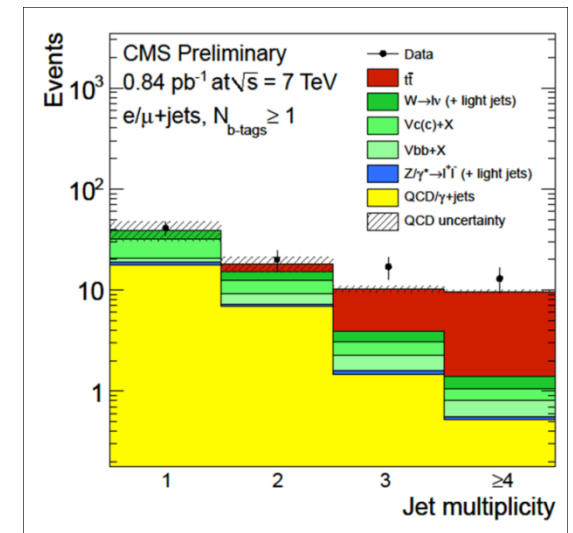
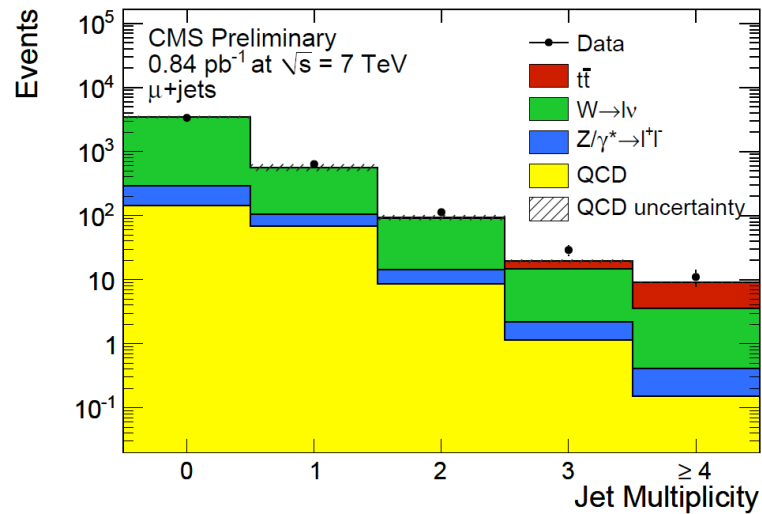
- Limites sur TGC ~ compétitives avec LEP/Tevatron



Top

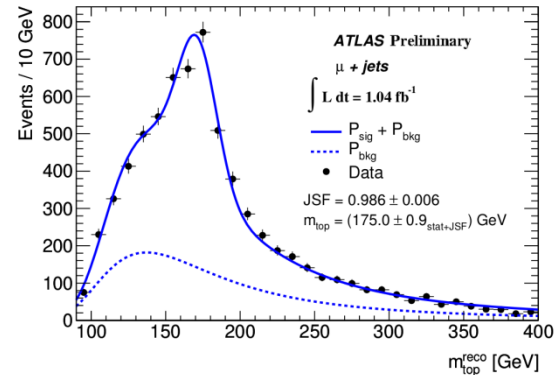
- Important pour nombreux bruits de fond => section efficace!
- Masse : confirmer Tevatron (faire mieux?)
- Propriétés: exploiter grand nombre

- *Rôle du b-tag!*
Vertex detectors
très performants
dès le début!



Top

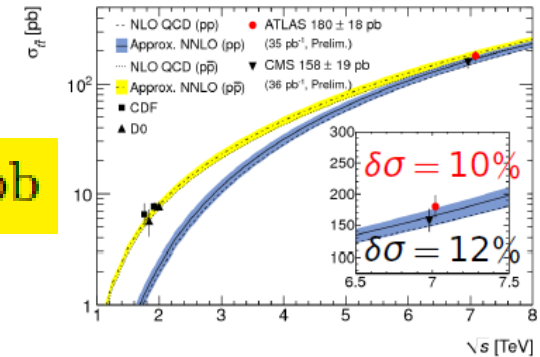
- **Masse:** pour l'instant dominée par systématiques ~ 2 GeV (Tevatron : 1 GeV)



- **Section efficace**

$$\sigma_{t\bar{t}} = 165.8 \pm 2.2(\text{stat.}) \pm 10.6(\text{syst.}) \pm 7.8(\text{lumi.}) \text{ pb}$$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 177 \pm 3(\text{stat.}) \pm 8(\text{syst.}) \pm 7(\text{lumi.}) \text{ pb}$$



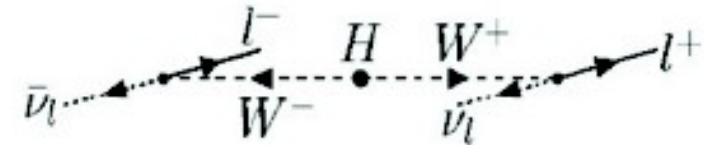
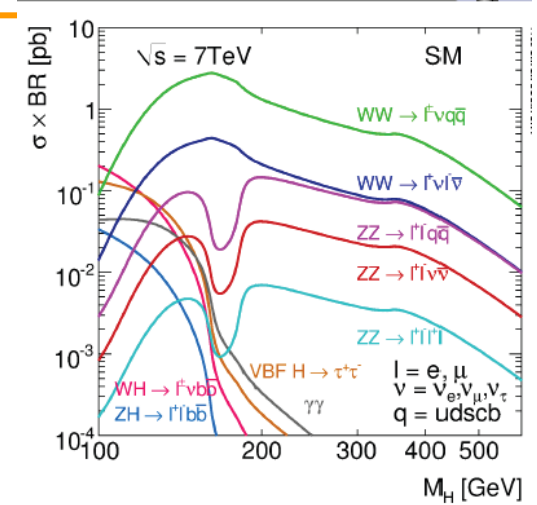
- **Propriétés: charge, spin, etc.** *Polarisation du W de $t \rightarrow Wb$*

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d \cos \theta^*} = \frac{3}{8}(1 + \cos \theta^*)^2 F_R + \frac{3}{8}(1 - \cos \theta^*)^2 F_L + \frac{3}{4}(1 - \cos^2 \theta^*) F_0$$

Polarisation	Predicted NNLO	Measured	
		ATLAS	CMS
F_R	0.0017 ± 0.0001	$0.09 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$	$0.040 \pm 0.035(\text{stat}) \pm 0.044(\text{syst})$
F_L	0.311 ± 0.005	$0.35 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst})$	$0.393 \pm 0.045(\text{stat}) \pm 0.029(\text{syst})$
F_0	0.687 ± 0.005	$0.57 \pm 0.07(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$	$0.567 \pm 0.074(\text{stat}) \pm 0.047(\text{syst})$

Higgs \rightarrow $WW \rightarrow l \nu l \nu$

- **Forte sensibilité:** BR (H \rightarrow WW), et BR (W \rightarrow l ν) = 10% chaque.
- **Mais:** 2 neutrinos \Rightarrow pas de pic de masse! \Rightarrow seulement **comptage**
- **Signature:** 2 leptons grand p_T (25, 10), grand E_t^{miss} (25-40)
corrélation $\phi(l, l')$
 - Spin Higgs = 0 \Rightarrow spins W's opposés
 - W désinteg (V-A) \Rightarrow directions l, l' proches en ϕ !
- **Bruits de fond nombreux et forts**
 - Irréd: continuum WW, Z $>$ $\tau\tau$ $>$ (l $\nu\nu$) (l $\nu\nu$)
 - Réductibles: tt, Z/DY (+ fake E_t^{miss}), W + b, W + jets, W + γ (conv)
- **Mesure E_t^{miss} délicate avec le pileup!**
- **Erreurs systématiques importantes!**
- **catégories (0, 1, 2 jets)**
- **coupures dépendantes de m(H). MVA (CMS)...**



Higgs \rightarrow WW \rightarrow $l\nu l\nu$ résultats

- **Excès, mais sans pic:**
mauvaise résolution en masse
due aux neutrinos

