

Physique aux collisionneurs

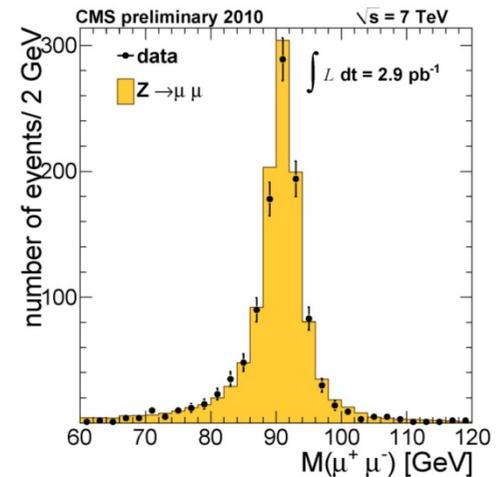
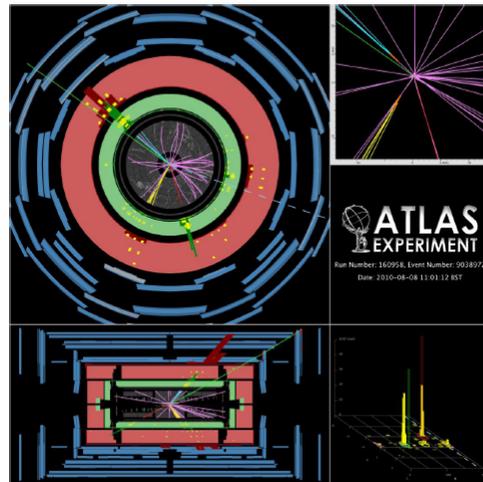
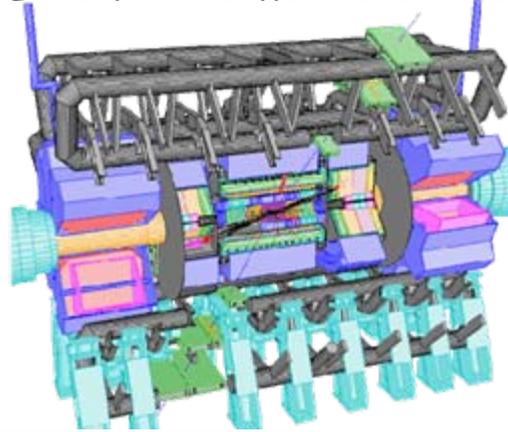
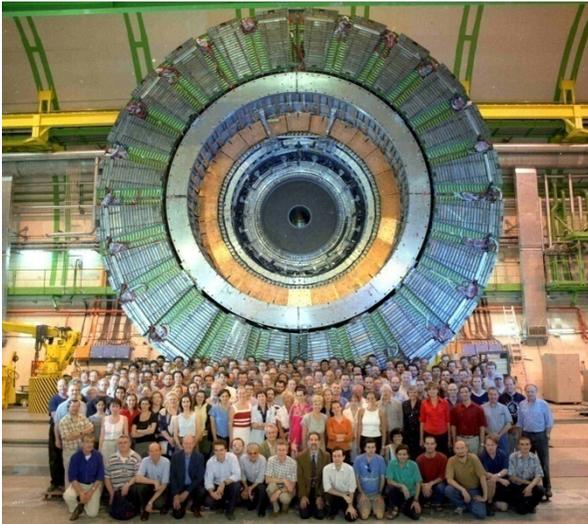
Bruno Mansoulié

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

1.1 Présentation Physique des Particules

1.1.1 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.

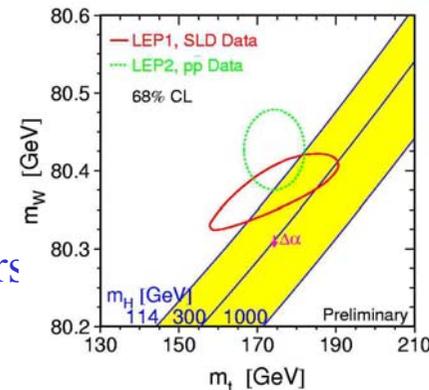
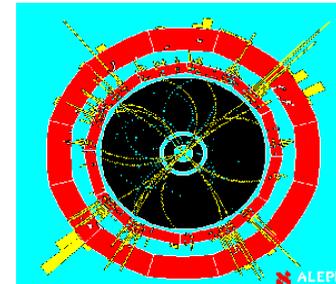
Lien (récent) avec la *cosmologie*: théorie du Big Bang, évolution de l'Univers

– Questionnements:

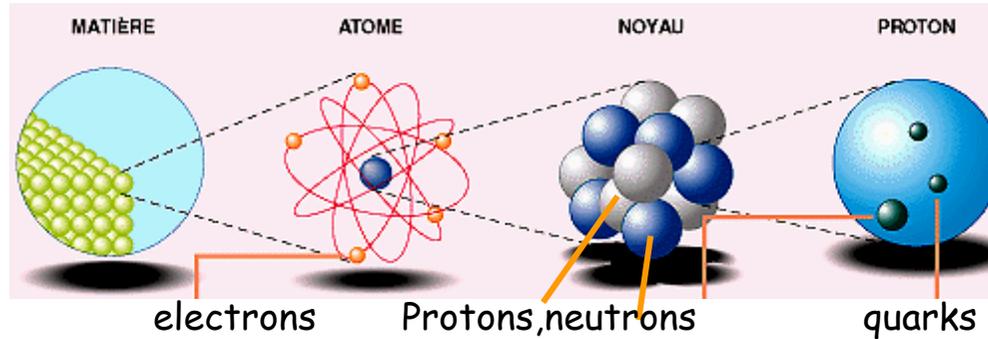
- Aujourd'hui, un modèle (le « *Modèle Standard* »)
sophisticé, très prédictif, confirmé par toutes les expériences.

- D'immenses *questions* sans réponses:

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



- 1.1.2 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 $\frac{1}{2}$, 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.

<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>

Charge électrique

$2/3 e$

$-1/3 e$

$-e$

0

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

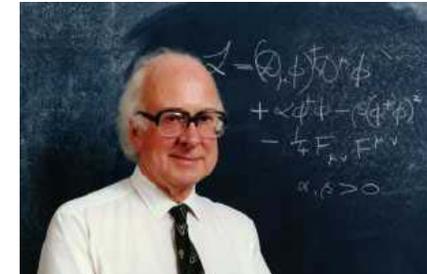
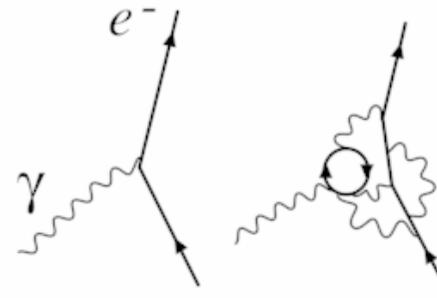


Théorie :

Mécanique quantique et relativité : ~1905

Théorie des champs: ~1950

Mécanisme de Higgs: 1964



Expérimentation :

électron J J Thomson 1897

quark top, accélérateur Fermilab 1995



• 1.1.3 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 $\frac{1}{2}$ entier: fermion, spin entier bosons }
 - nombres quantiques { = charge(s), propriétés vis à vis des interactions, autres symétries)
- ex: un électron libre:

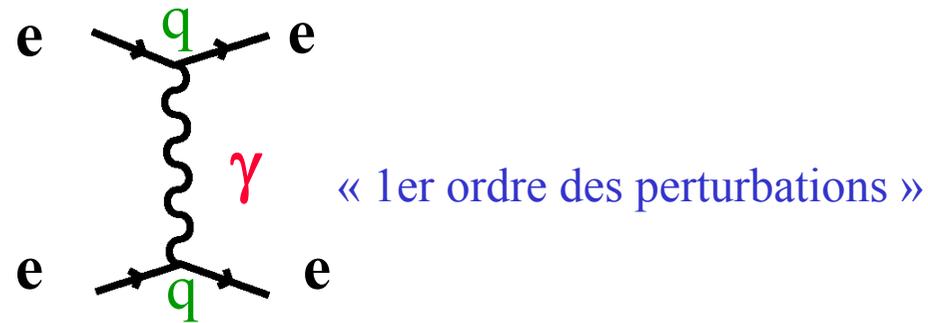
- masse: $511 \text{ keV}/c^2$, spin $\frac{1}{2}$ (\hbar),
- charge électrique: $-e$, charge faible: $\frac{1}{2}$, charge forte: 0
- particule stable



– 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: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

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

1.2 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: $\{E/c, p_x, p_y, p_z\}$

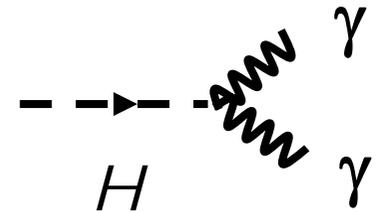
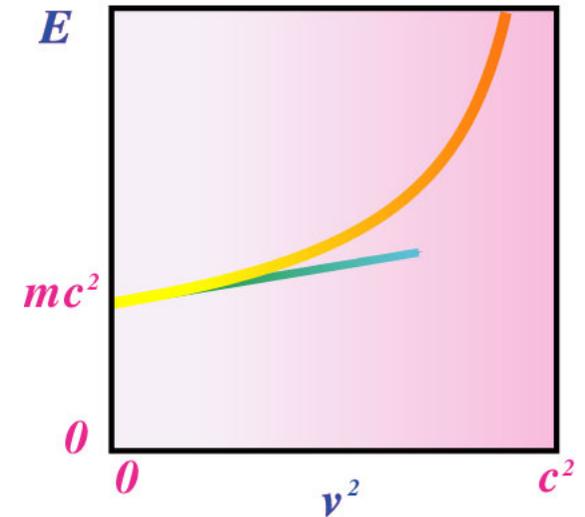
- Les **vitesse**s ne s'ajoutent pas!

- 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: $m^2 c^4 = (\Sigma E)^2 - (\Sigma \vec{P})^2$



- 1.2.2 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 » $\Gamma c^2 = \hbar / \tau$

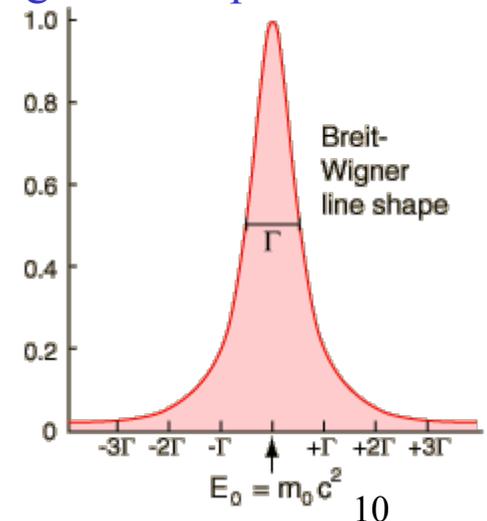
Ex: On a un grand lot de particules instables de type « 0 », qui se désintègrent en 2 particules de type 1 et 2 (stables) , avec une durée de vie τ .

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)



1.2.3 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)	u	c
d		s	b
Leptons (Electro-faible)	e	μ	τ
	ν _e	ν _μ	ν _τ

– Lien par \hbar

- Longueur d'onde associée à une particule: $\lambda = h/p$; 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 \AA	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

1.3 Expérimentation

• 1.3.1 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.

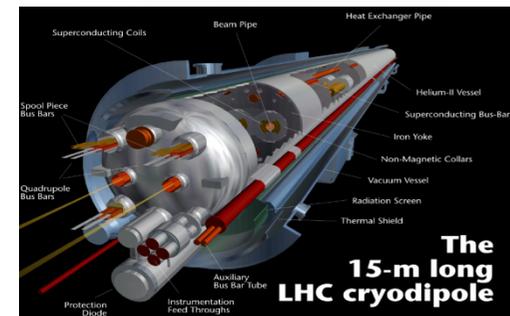
- **Accélérateurs**

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: $P \text{ (GeV)} = 0,3 B \text{ (Tesla)} R \text{ (m)}$

- Électrons: perte d'énergie par rayonnement synchrotron: $\Delta E \text{ (GeV)} = 10^{-4} E^4 \text{ (GeV)} / R \text{ (m)}$ 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

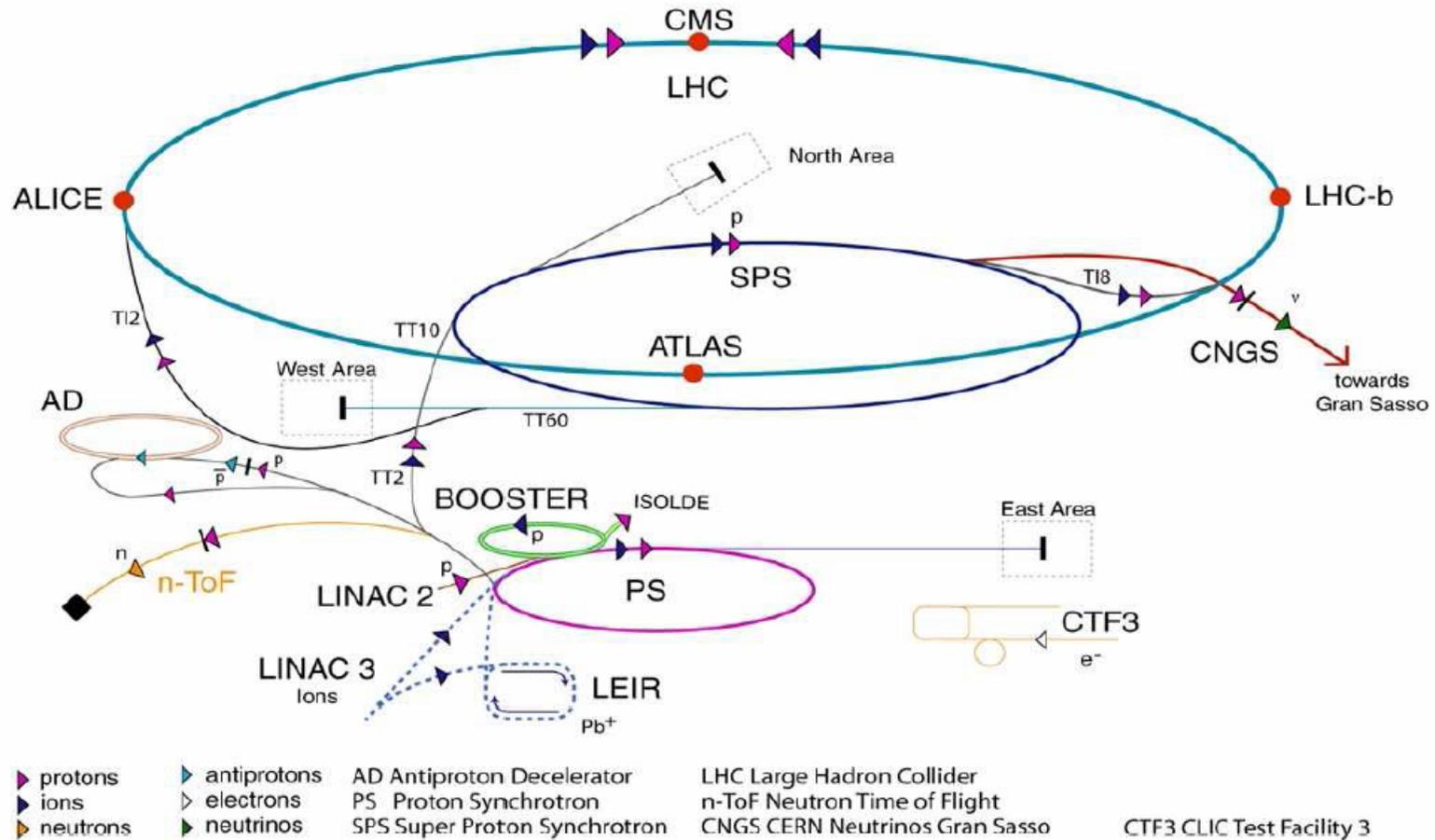
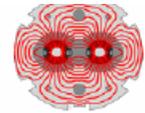


LHC p + p , 7 + 7 TeV
2008.....



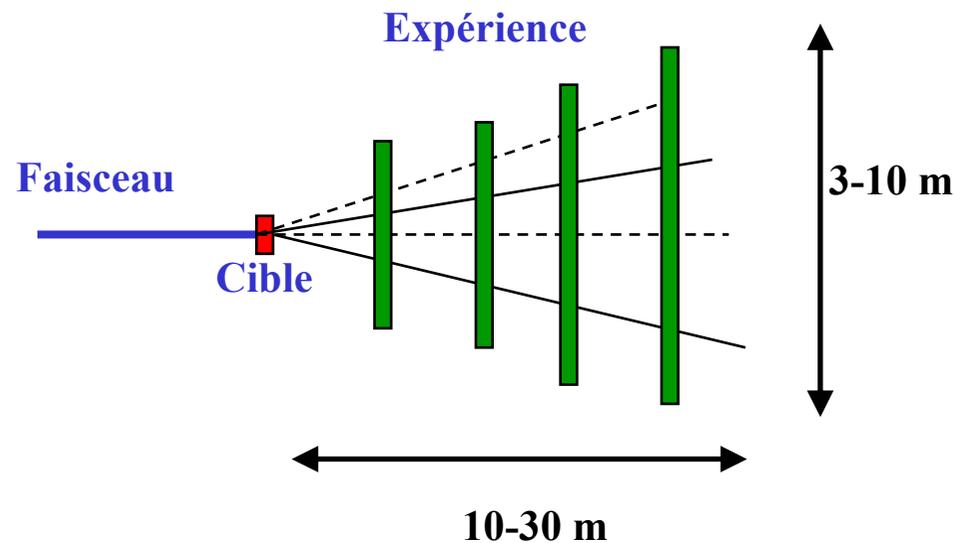
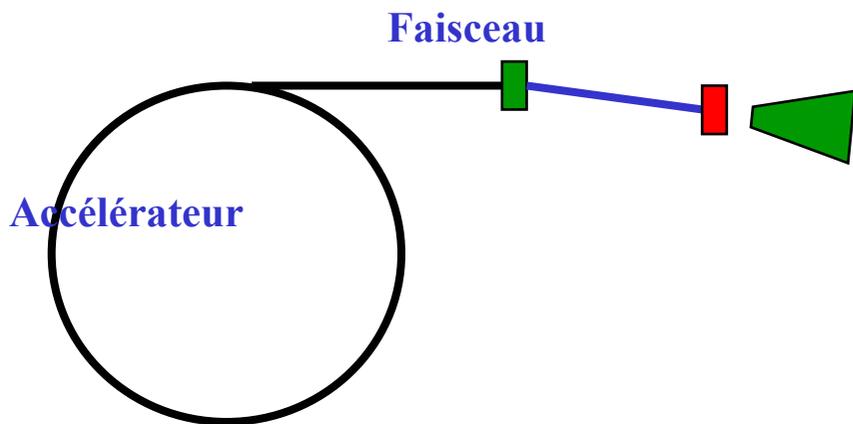


Le complexe des accélérateurs du CERN



Expériences sur accélérateurs

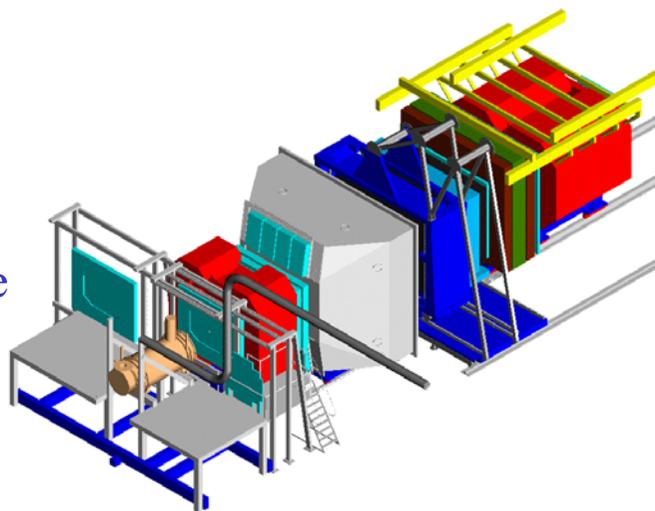
- Expériences sur « cible fixe »



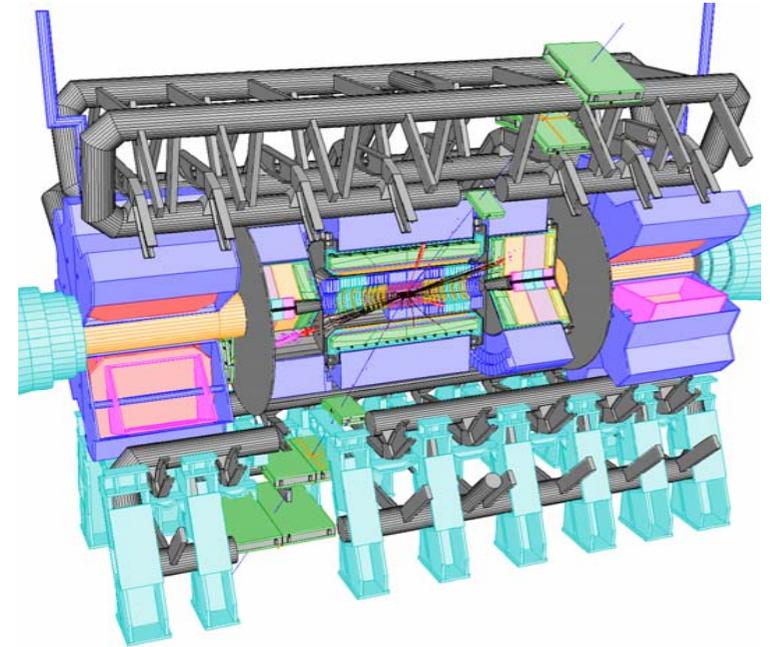
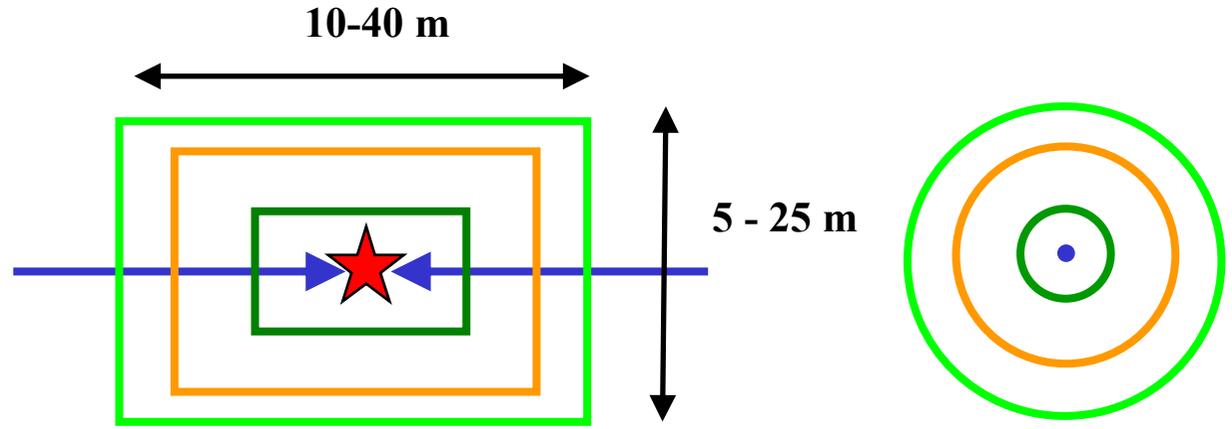
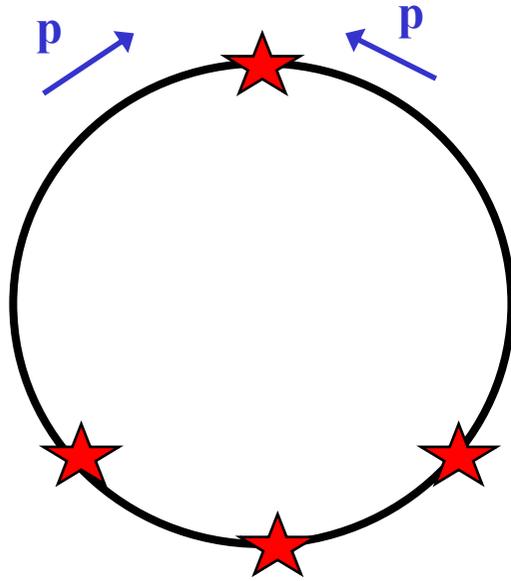
Ex: COMPASS

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



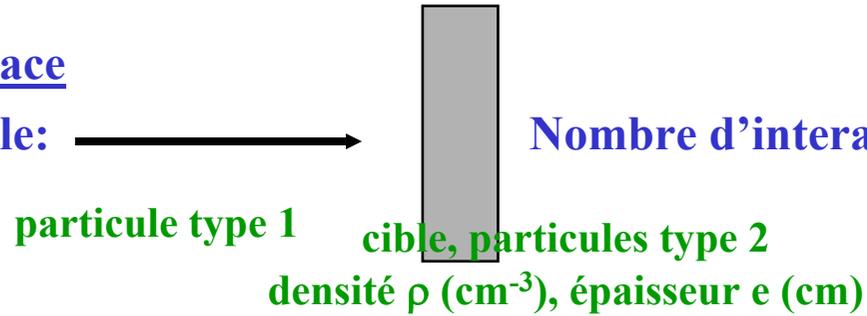
Collisionneur: 2 faisceaux en sens inverse

Même anneau : $e^+ e^-$, $p \bar{p}$

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

- 1.3.2 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...

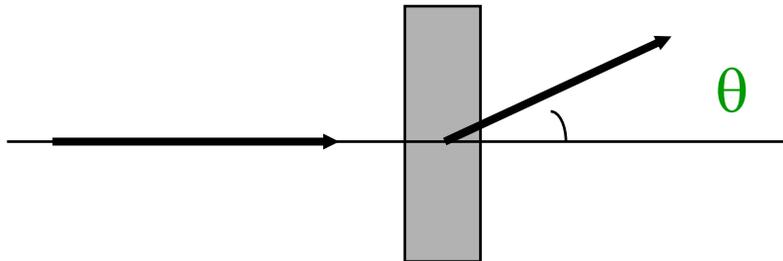
Unité habituelle: le barn = 10^{-24}cm^2 (et mb, μb , nb, pb, fb...)



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

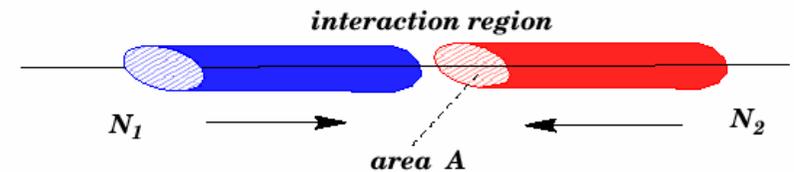
Nombre d'évts par seconde pour faisceau sur cible fixe: $dN/dt = I(s^{-1}) \sigma (cm^2) \rho (cm^{-3}) e (cm)$

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 : $p-p 7 + 7$ TeV prévu pour $L = 10^{34} cm^{-2}s^{-1}$ Aujourd'hui $3.5 + 3.5$ TeV, $L = 2 \cdot 10^{32}$

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

- 1.3.3 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^- ; $u\bar{d}$ ($\bar{u}d$) ; $2,6 \cdot 10^{-8}$ s ; trace chargée + calorimètre hadronique

π^0 ; $(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$; $8,4 \cdot 10^{-17}$ s ; 2γ : calorimètre électro-magnétique

K^+, K^- ; us ; $1,2 \cdot 10^{-8}$ s ; trace chargée + calorimètre hadronique

K^0 ; ds ; $K_S^0 \rightarrow \pi\pi / K_L^0 \rightarrow \pi\pi\pi$; 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)

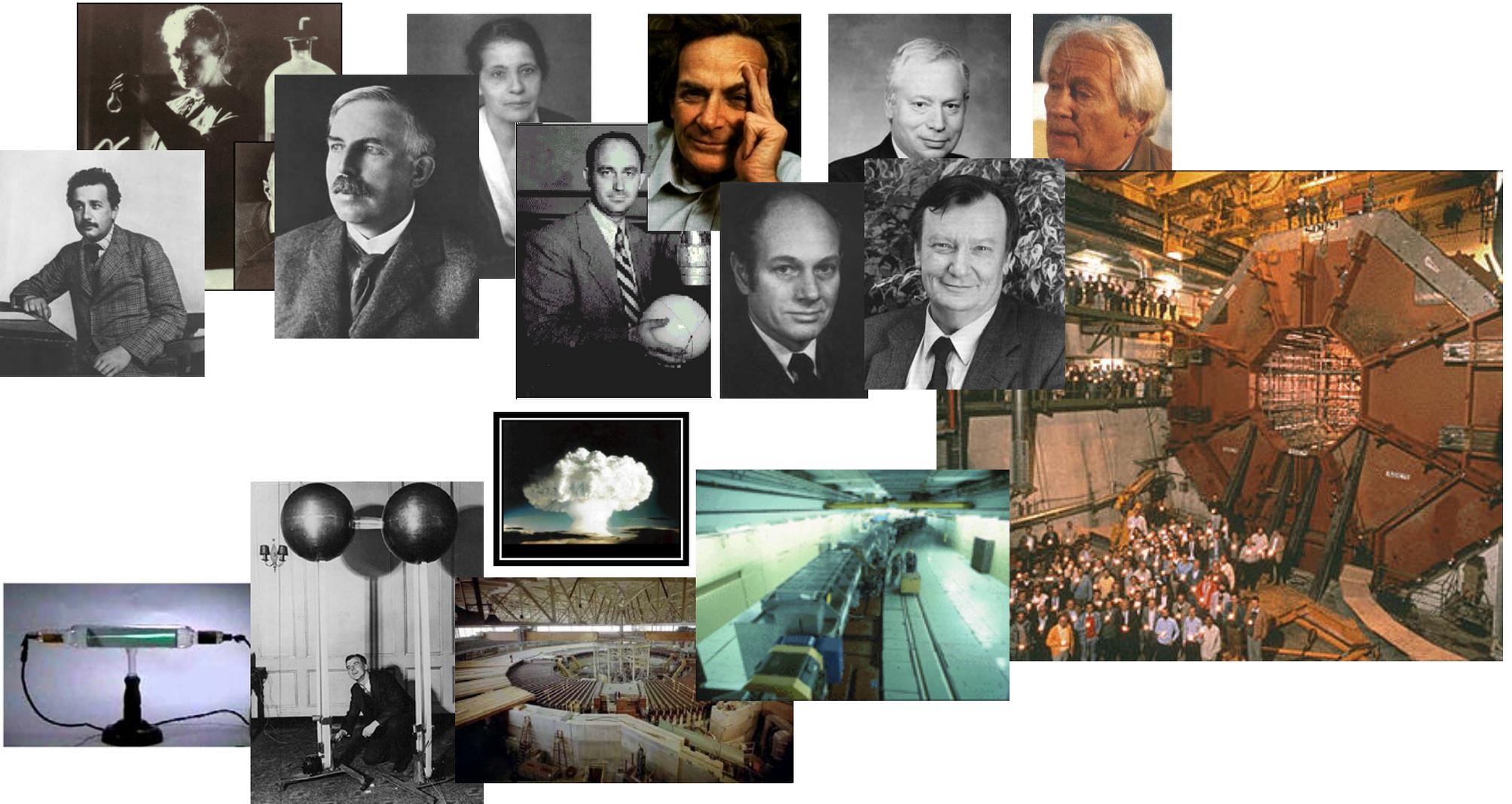
– **neutrinos**: stables. interactions très faibles: pas vus dans les détecteurs « courants » (sauf par l'énergie manquante). Mais il existe des expériences « de neutrinos »: détecteurs très massifs.

- **Photon**

– Stable. Impact calorimètre électromagnétique

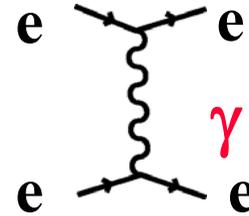
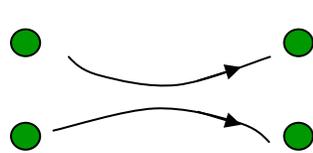
- *N'étant pas sensibles à l'interaction forte, leptons et photons sont de bonnes signatures d'événements « intéressants ».*

2.1 Le Modèle Standard



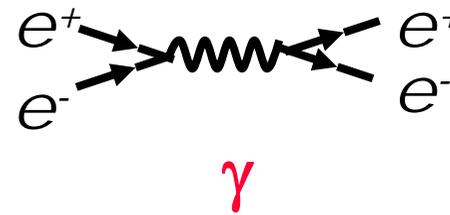
- 2.1.1 Interaction électromagnétique : Particules « chargées », médiateur: photon

- Collision « classique »:



Amplitude totale

- Mais aussi (quantique relativiste!) :

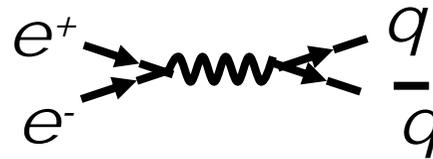


Interférence

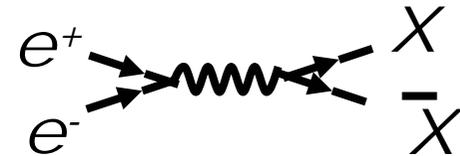
- Et



Et



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

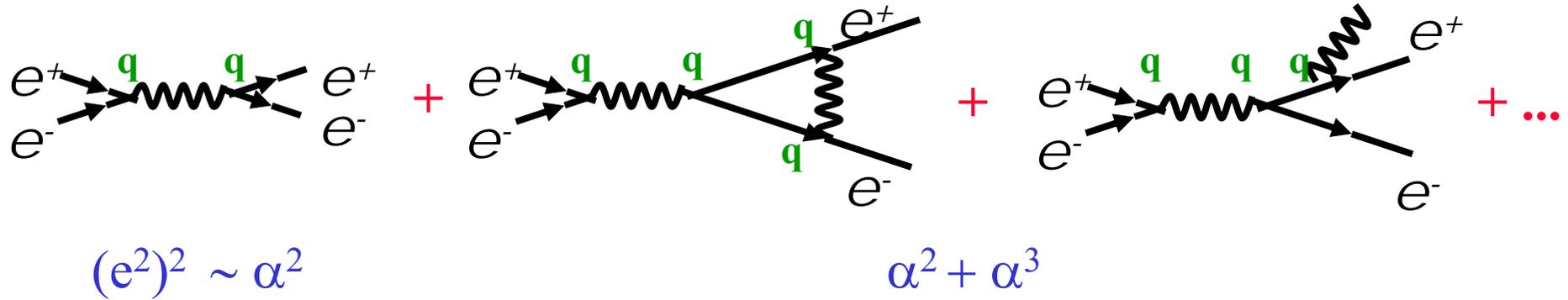


- Electrodynamique quantique (QED): électrons et photons

- 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 »*)

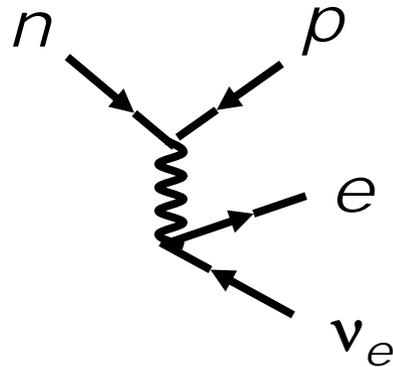
Succès: des atomes (Lamb shift, effet Casimir...) aux plus hautes énergies atteintes (LEP)

=> **QED : le modèle de théorie**

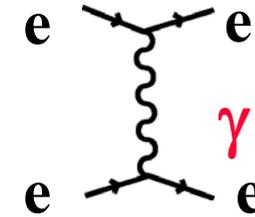
- **2.1.2 Interaction faible**

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

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



rappelle



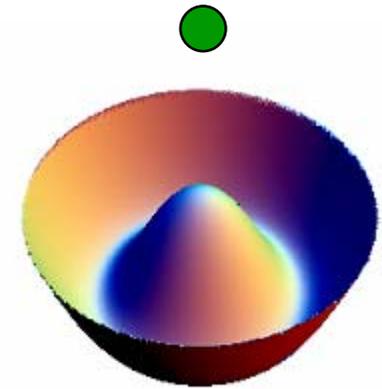
... si (n,p) sont la même particule et (e^-, ν_e) aussi pour l'interaction faible \Rightarrow « doublets »

- 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 $m(W) \neq m(\gamma)$

- 2.1.3 Unification des interactions EM et faibles

- **Solution: mécanisme de « brisure spontanée de symétrie »:**

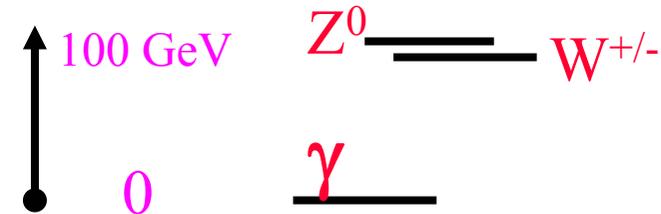
Potentiel symétrique, état fondamental non-symétrique



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

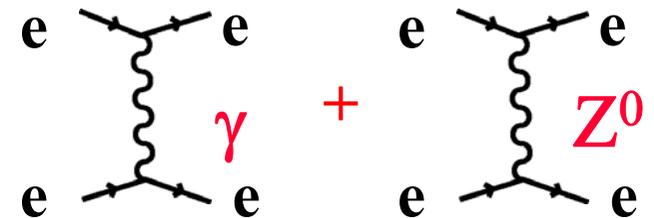
- **Conséquences:**

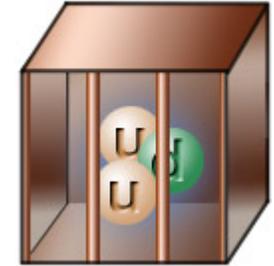
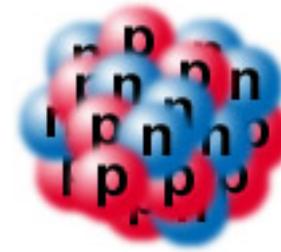
- Le photon reste sans masse
- Existence d'un médiateur neutre de l'interaction faible: le Z^0
- L'interaction « électrofaible » est « renormalisable »:
- On sait tout calculer!



- **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.



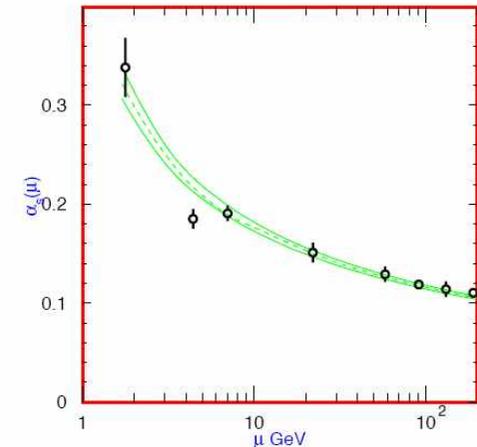


- 2.1.4 Interactions fortes
- Observations
 - Cohésion des noyaux => force forte, courte portée
 - Expériences $e + p$, $\mu + p$, $\nu + p$ => existence des quarks: $p = uud$, $n = udd$
 - Quarks jamais libres! (charge électrique : $2/3$, $-1/3$)
 - Etats liés : mésons (2 quarks), baryons(3 quarks)
 - 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

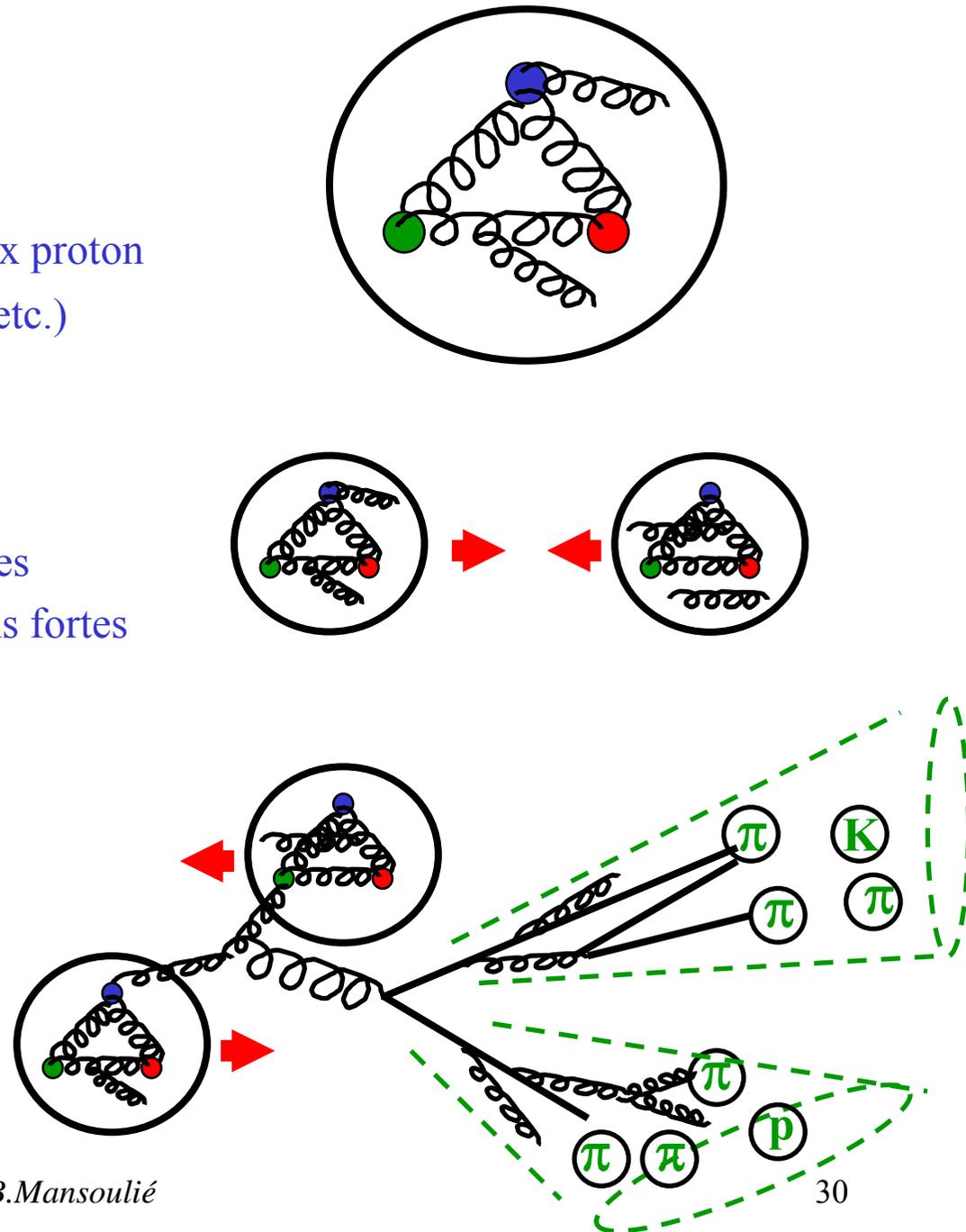
$\alpha(E)$



$E(\text{GeV})$

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



2.2 Mélanges de quarks

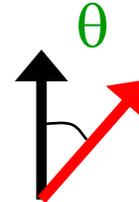
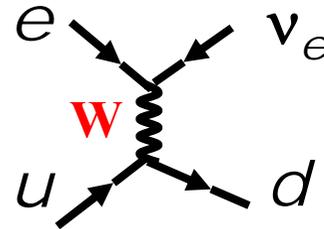
- **Interaction faible: « doublets » :**

- 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...

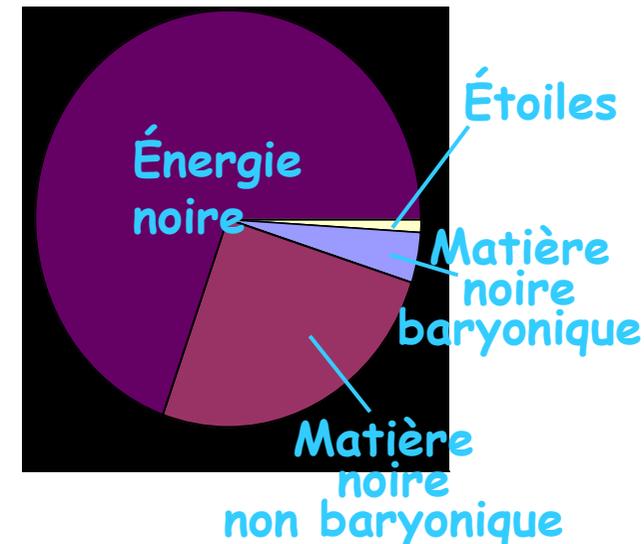
2.3 Modèle Standard et au-delà

2.3.1 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...

2.3.2 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% !



- **2.3.3 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 !

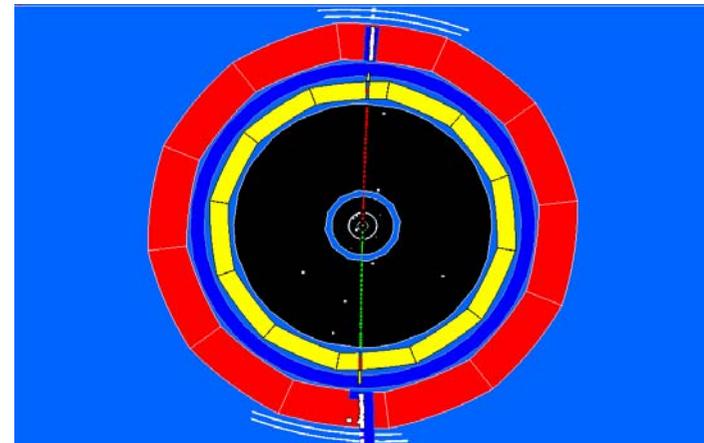
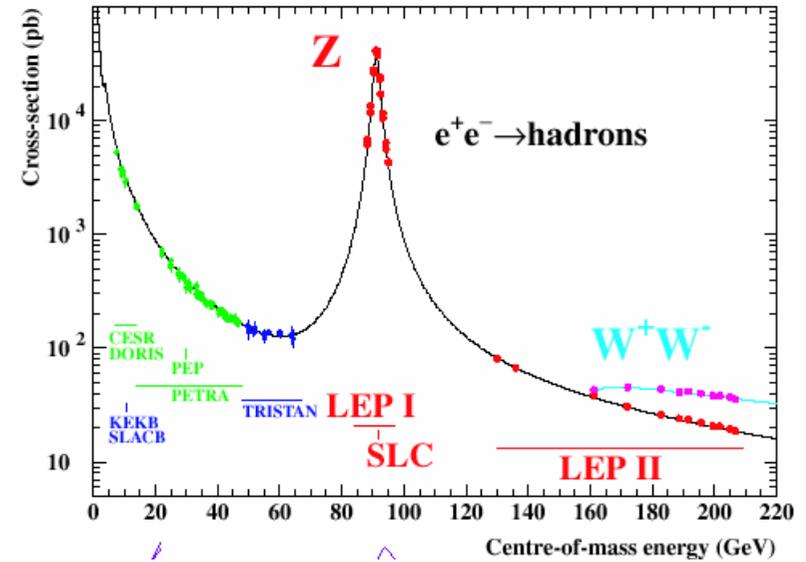


3. Physique aux collisionneurs e^+e^-

3.1 LEP

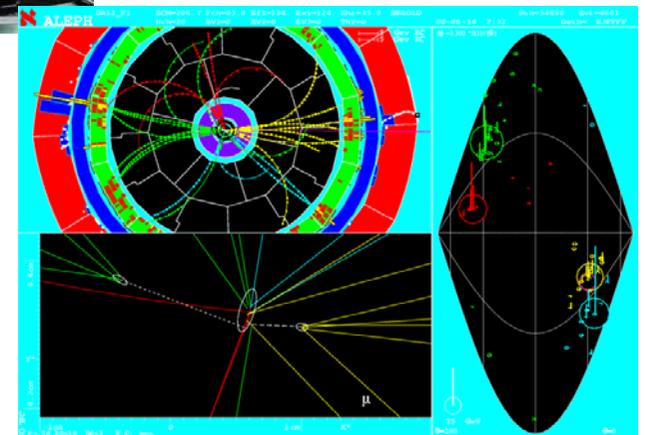
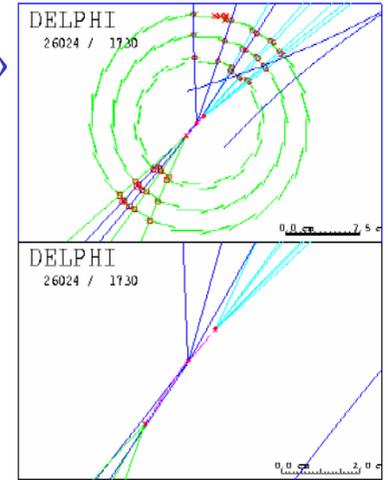
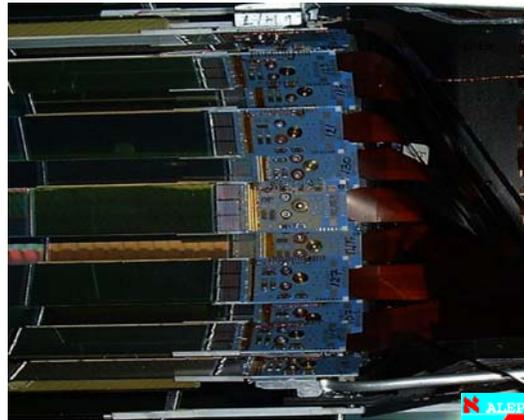
3.1.1 Introduction

- 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)



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

- **3.1.2 Expériences LEP**
- Temps entre croisements: 20 μs
- 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



- 3.1.3 LEP 1 : l'usine à Z^0

Plus de 18 millions de Z^0 produits

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

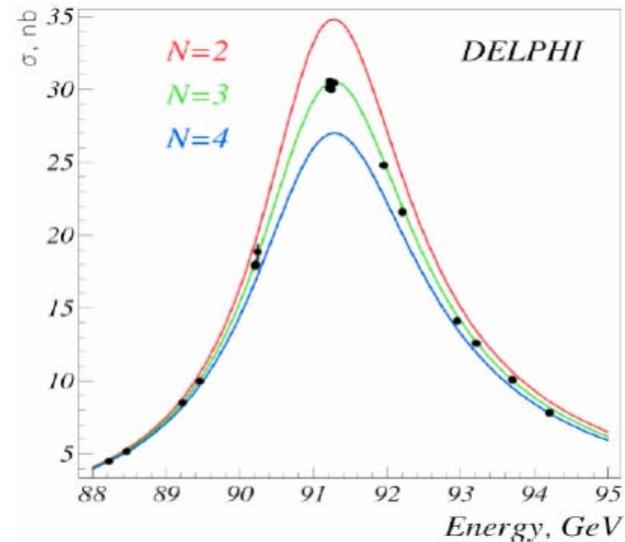
- Nombre de neutrinos [$m < m(Z)/2$] : 3
(désintégration $Z \rightarrow \bar{\nu} \nu$)

- mesure constante interactions fortes:

□ $\alpha_s(m_Z) = 0.1183 \pm 0.0027$

- Nombreux tests de la partie électrofaible du SM:

=> Tous le confirment!

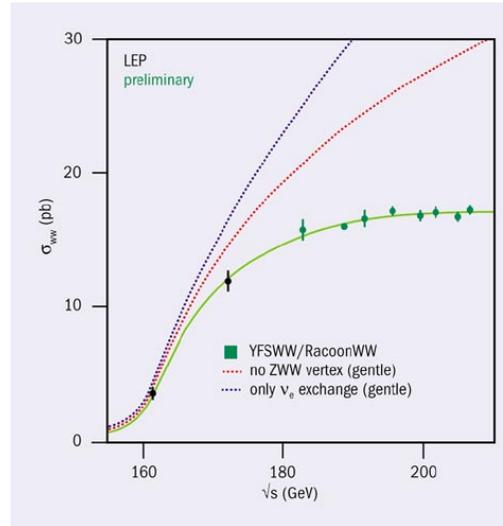


summer 2003

	measurement	fit	10^{meas}	-0^{fit}	$1/\sigma^{\text{meas}}$
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02761 ± 0.00036	0.02767	0	1	3
m_Z (GeV)	91.1875 ± 0.0021	91.1875	0	1	3
Γ_Z (GeV)	2.4952 ± 0.0023	2.4960	0	1	3
σ_{had}^0 (nb)	41.540 ± 0.037	41.478	0	1	3
R_l	20.767 ± 0.025	20.742	0	1	3
$A_{\text{fb}}^{0,l}$	0.01714 ± 0.00095	0.01636	0	1	3
$A_l(P_\tau)$	0.1465 ± 0.0032	0.1477	0	1	3
R_b	0.21638 ± 0.00066	0.21579	0	1	3
R_c	0.1720 ± 0.0030	0.1723	0	1	3
$A_{\text{fb}}^{0,b}$	0.0997 ± 0.0016	0.1036	0	1	3
$A_{\text{fb}}^{0,c}$	0.0706 ± 0.0035	0.0740	0	1	3
A_b	0.925 ± 0.020	0.935	0	1	3
A_c	0.670 ± 0.026	0.668	0	1	3
A_l (SLD)	0.1513 ± 0.0021	0.1477	0	1	3
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}(Q_{\text{fb}})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314	0	1	3
m_W (GeV)	80.426 ± 0.034	80.385	0	1	3
Γ_W (GeV)	2.139 ± 0.069	2.093	0	1	3
m_t (GeV)	174.3 ± 5.1	174.3	0	1	3
Q_w (Cs)	-72.84 ± 0.46	-72.90	0	1	3

- 3.1.4 LEP2 : énergie max

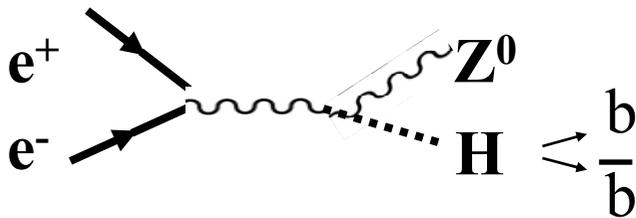
- $m(W) = 80.376 \pm 0.033 \text{ GeV} (4 \cdot 10^{-4})$
 [80 000 évts $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$]



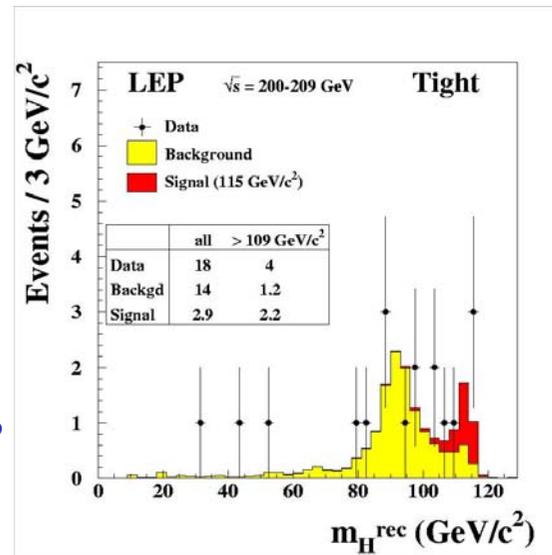
$\sigma(WW)$ en fonction de E

Dépend fortement de la structure de l'interaction

- Recherche du Higgs



Signal?

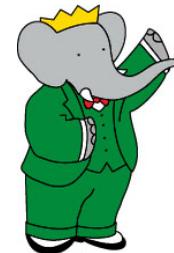


*En fin de compte:
 Limite
 $M(H) > 114.4 \text{ GeV}$*

3.2 Collisions $e^+ - e^-$: Usines à B

• 3.2.1 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- ...) : ~ 700 millions B B



3.2.2 Mesures aux usines à B

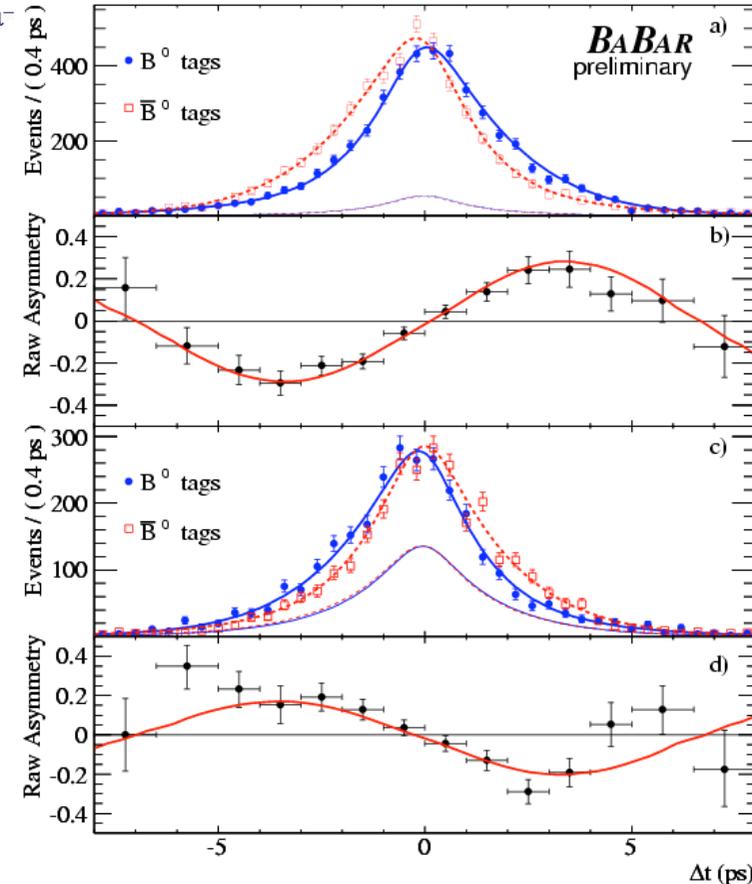
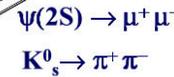
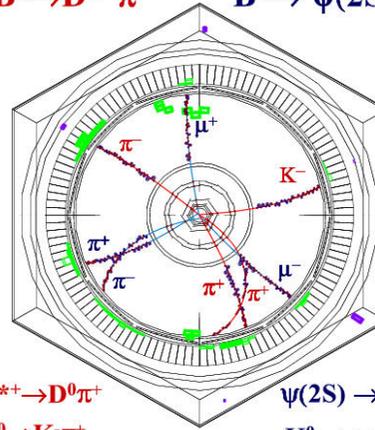
‘ Basse énergie ’ = peu de particules
 Détecteurs de taille moyenne,
 mais très précis

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)

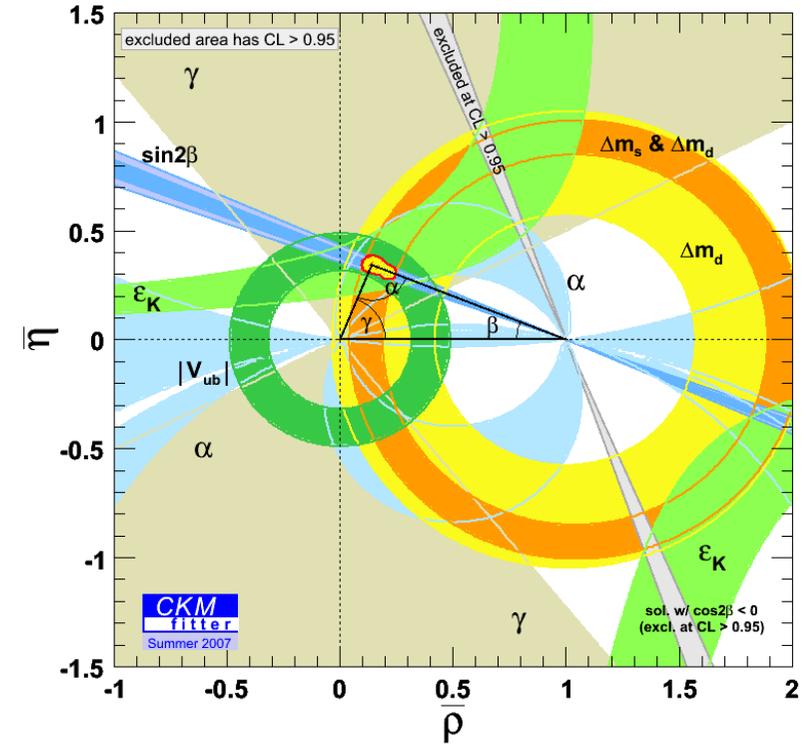
- (mais pourquoi cette valeur?)

- **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?*



4. Physique aux collisionneurs hadroniques

- 4.1 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**

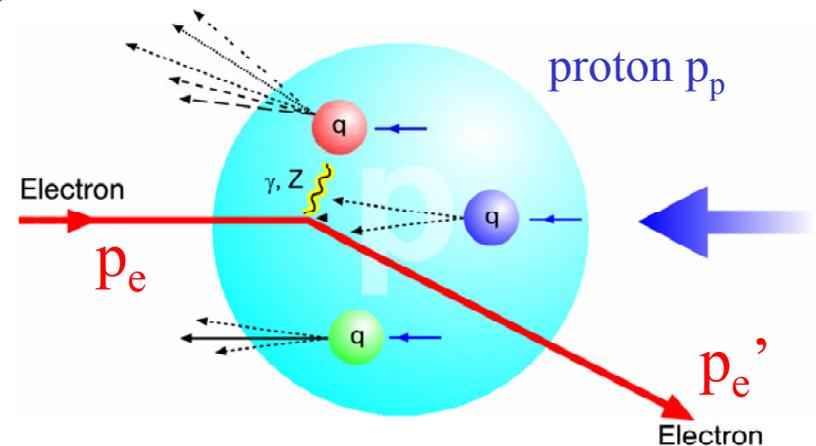
- But: structure du proton

- $q = p_e' - p_e$

- $Q^2 = (p_e' - p_e)^2$ [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 » : $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$



- 4.1.2 Fonctions de Structure, évolution

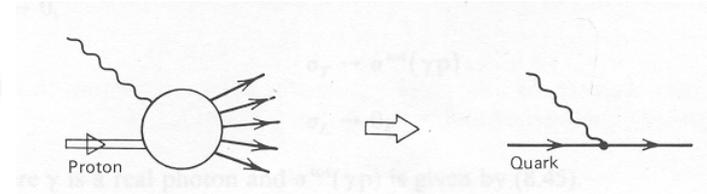
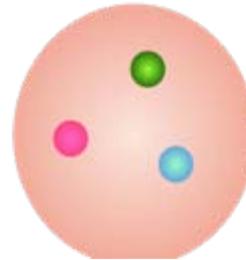
- Interaction électron- proton décrite par fonctions de probabilités $F_2(x, Q^2)$, $F_3(x, Q^2)$, $F_L(x, Q^2)$

- 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

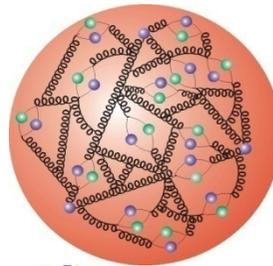


- Modèle de parton QCD:

Quarks de la « mer »

Gluons

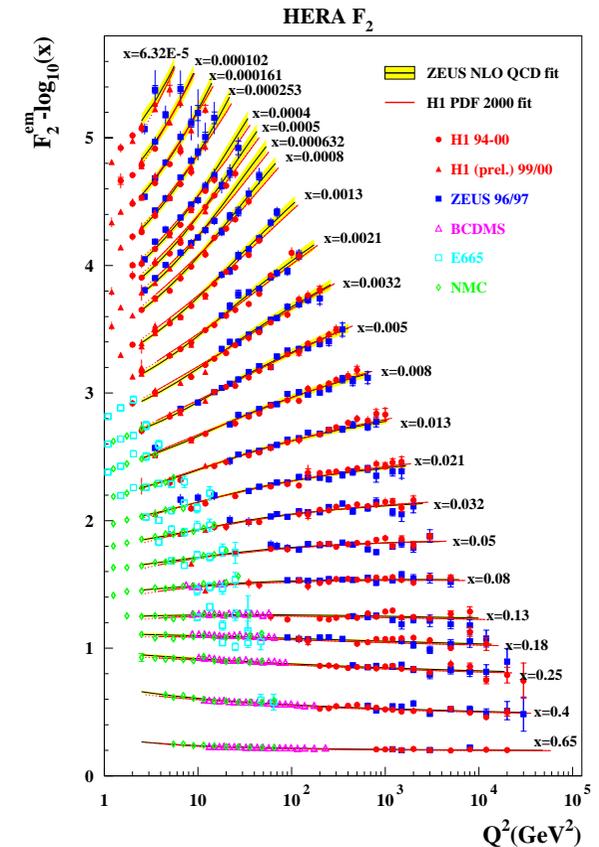
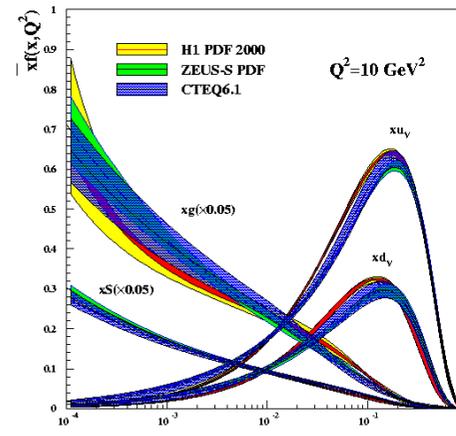
Les q dépendent de $Q^2 \Rightarrow q(x, Q^2)$



- Mesures importantes pour les prédictions à LHC!

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

- Evolution avec Q^2 : calcul QCD parfait!

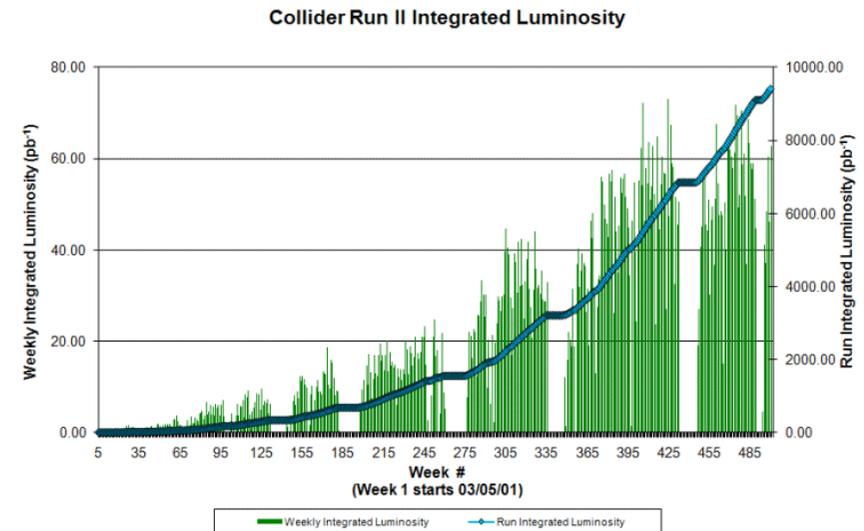


4.2 TeVatron (Chicago, USA)

• 4.2.1 Introduction

- Collisionneur proton-antiproton 1 TeV + 1 TeV,
luminosité actuelle $3 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, temps entre croisements: 400 ns
Mise en service 1992, long arrêt 1998-2002, reprise et excellent fonctionnement actuel.
Luminosité intégrée actuelle: 8 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 pb⁻¹ = ∫ L dt pour avoir 1 év pour σ = 1 pb
= 10³⁶ cm⁻²*

• 4.2.2 Expérience D0

• Aimants:

- Solénoïde central supra
- Toroïde à muons en fer

• Détecteur central

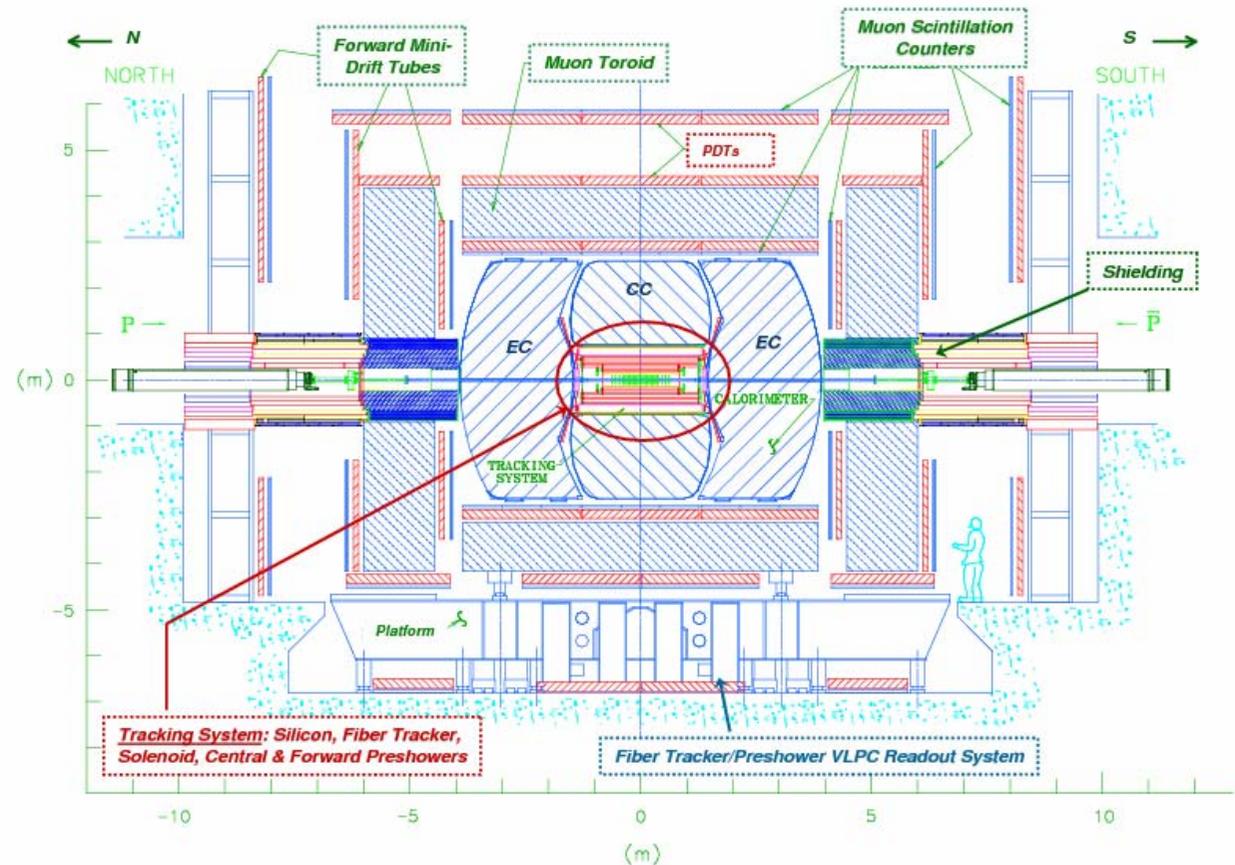
- silicium,
- fibres scintillantes

• Calorimètres

- Uranium/ argon liquide

• Détecteur à muons

- Scintillateurs
- Chambres à fils



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

Point faible: faible rayon détecteur central

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

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

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

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 :

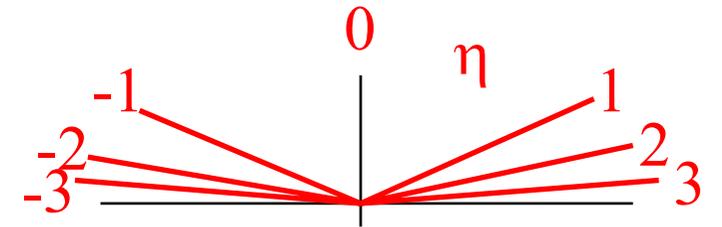
- ~ 4 chargés (π^{+-} , K^{+-} , p)

- ~ 2 neutres (π^0 , K^0 , n); $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma : 4 \gamma$
(uniforme en ϕ)

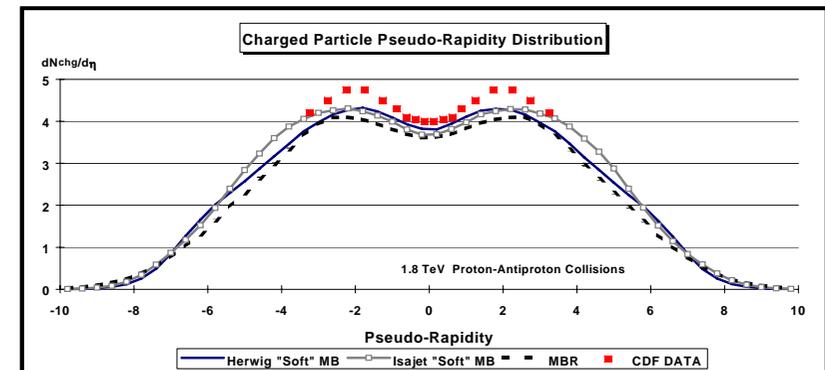
- Distribution en p_T : e^{-ap_T} , p_T moyen $\sim 1 \text{ GeV}$

- *Plusieurs quarks et gluons interagissent de façon « molle »*

- *Théorie: QCD à « bas Q^2 », très difficile à calculer.*



Pseudo-rapidité $\eta = - \ln \text{tg}(\theta/2)$



- **Processus « intéressant »**

- Interaction « dure » entre constituants

- grand transfert Q^2 ($>$ qqes GeV^2)

- ⇒ exploration « haute énergie »

- section efficace faible

- calculs perturbatifs possibles et précis

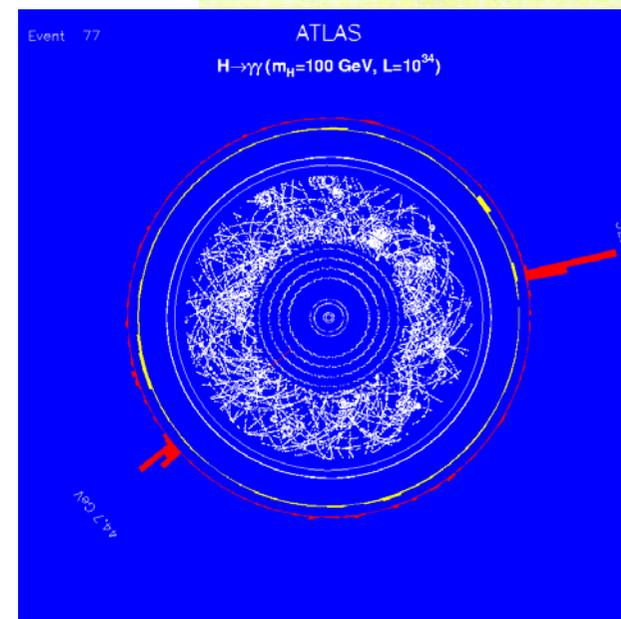
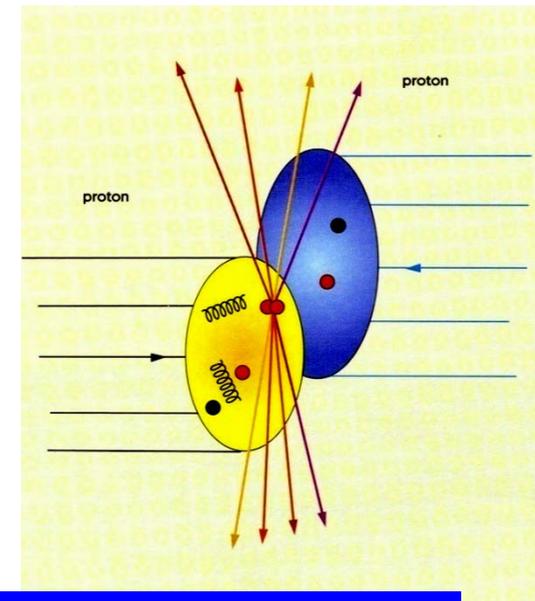
- Événement sous-jacent dû aux quarks et gluons « spectateurs »

- 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



4.2.4 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

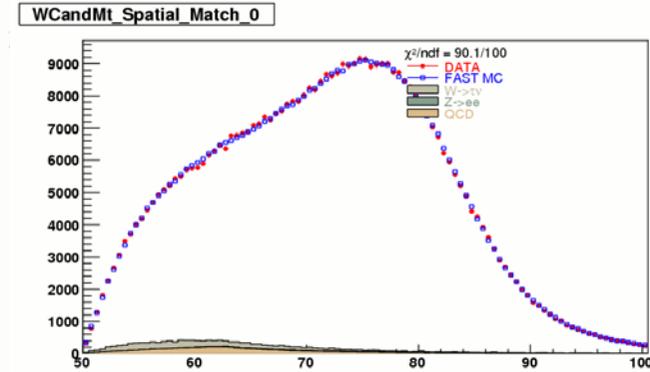
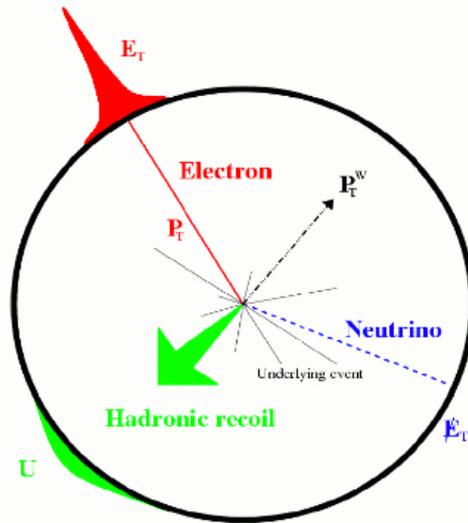
Mesure masse : $p_t(e)$ ou M_t

Principales erreurs:

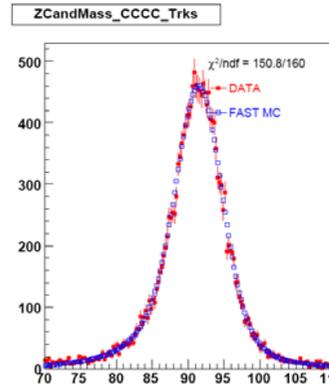
- Calibration des électrons: mesure $Z \rightarrow e e$, $m(Z)$ connue à LEP
limite: statistique de Z, interpolation $m(Z)$ à $m(W)$
- Incertitudes cinématique du W
 - fonctions de structure
 - p_t du W

Résultat (D0 électrons, 1 fb^{-1})

$$m_W = 80401 \pm 21(\text{stat}) \pm 38(\text{syst}) \text{ MeV}$$



$$M_T = \sqrt{2E_T^l E_T (1 - \cos \Delta\phi)}$$

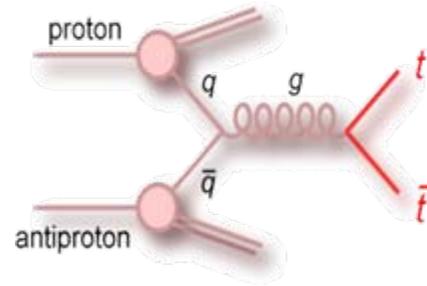


SystematicSource	$\delta m_W (\text{MeV})$
Electron energy scale	34
Electron energy resolution model	2
Electron energy nonlinearity	4
W and Z electron energy loss differences	4
Recoil model	6
Electron efficiencies	5
Backgrounds	2
PDF	9
QED	7
Boson p_t	2
Total	37

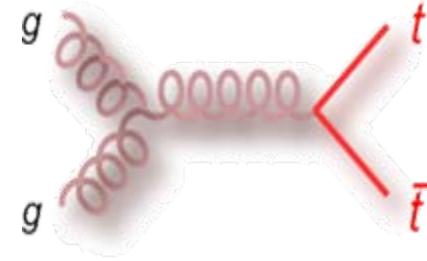
- 4.2.5 Quark top

- Production

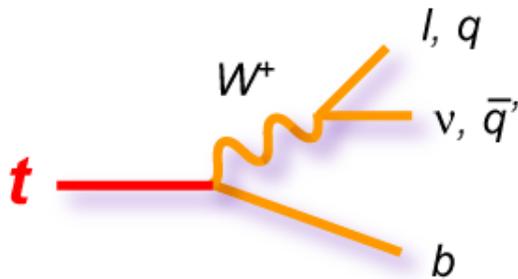
85%



15%

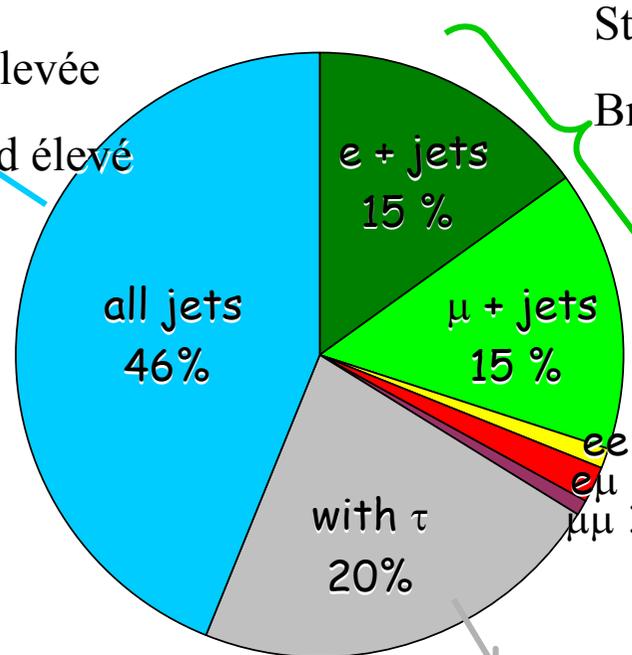


- Désintégration



Statistique élevée

Bruit de fond élevé



Statistique raisonnable

Bruit de fond raisonnable

Statistique faible

Bruit de fond faible

Identification difficile

- **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

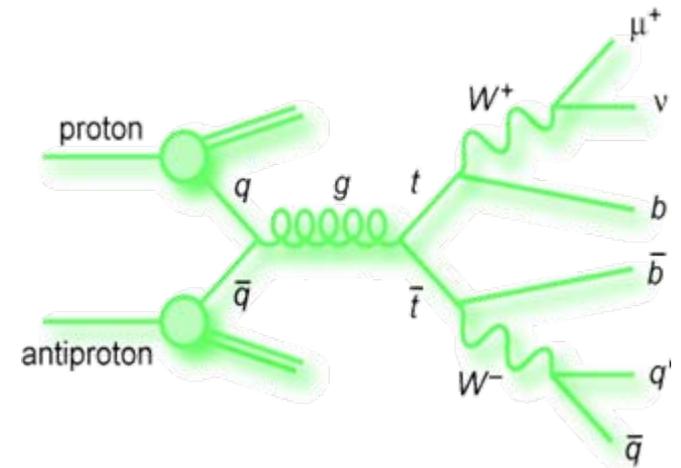
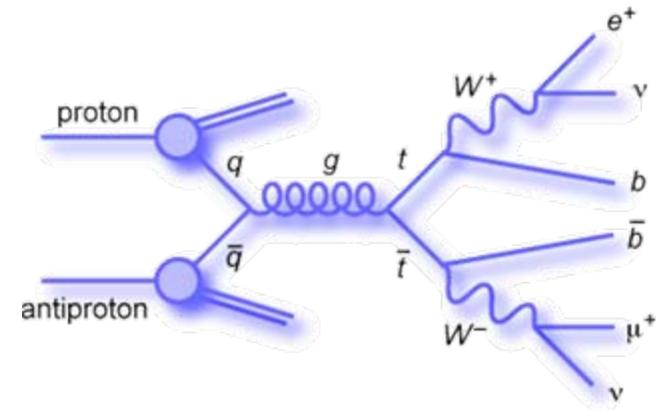
- Masse : **Canal « lepton+jet »**

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

privilège statistique élevée

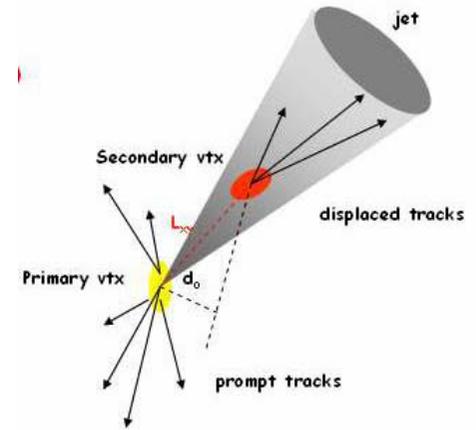
- Analyse optimale des événements

- « 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 ET manquante
- Mesure jets “légers”
- Combinaison en (W, t)’s

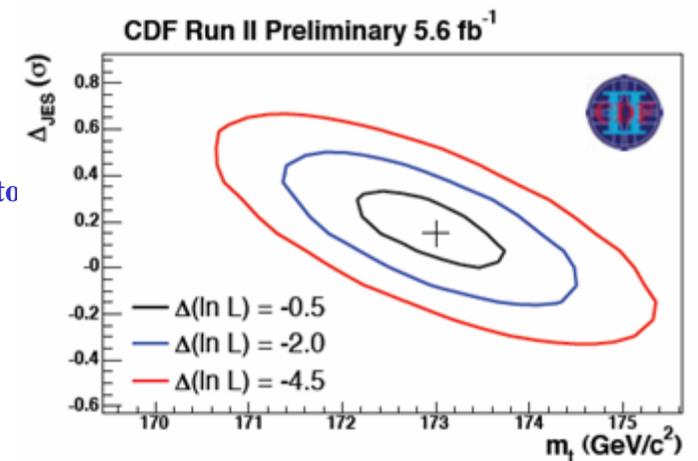


- **Masse du top :avec événements 1 lepton + jet**

- **Méthode “Matrix element”:**

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

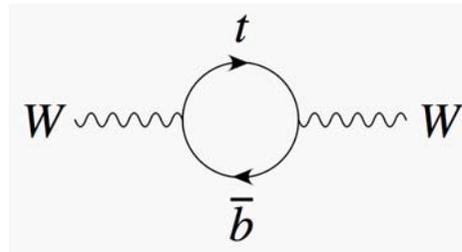
- $m_{\text{top}} = 173.0 \pm 0.9 \text{ stat} + \text{JES} \pm 0.9 \text{ sys GeV}/c^2$



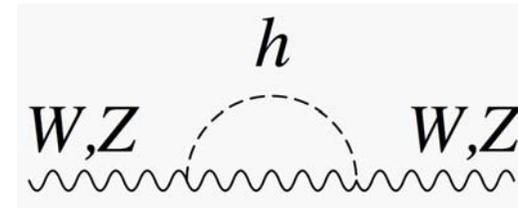
4.2.6 Relation $m(t)/m(W)$ et $m(H)$

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

Corrections quantiques à $m(W)$



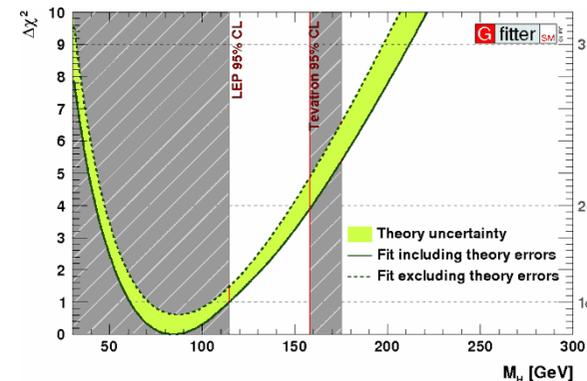
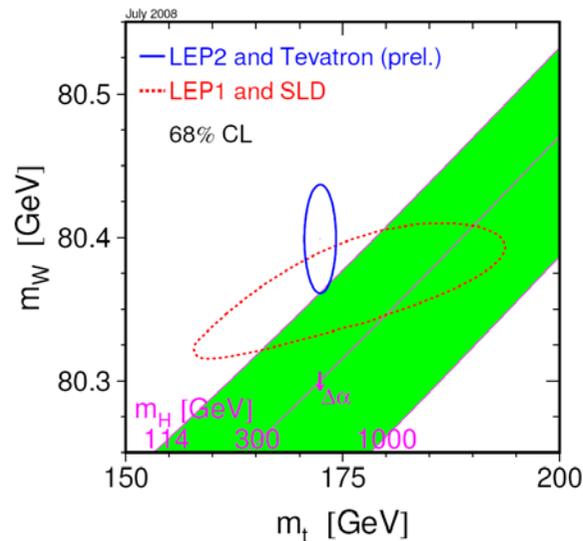
$$\Delta m_W \sim m_t^2$$



$$\Delta m_W \sim \text{Log}(m_h)$$

Compatible avec un Higgs standard

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



4.2.7 Recherche du Higgs au TeVatron

Recherche à basse masse : désintégration principale Higgs: $b\bar{b}$

Production dominante: $g + g \rightarrow H$

Impossible à observer (trop de fond QCD)

Configurations recherchées Higgs « associé »:

$$q + q' \rightarrow W + H \rightarrow l \nu b \bar{b}$$

$$q + q \rightarrow Z + H \rightarrow l^+ l^- b \bar{b}$$

Aucun canal ne permet l'exclusion à lui seul!

Méthodes statistiques sophistiquées pour séparer signal

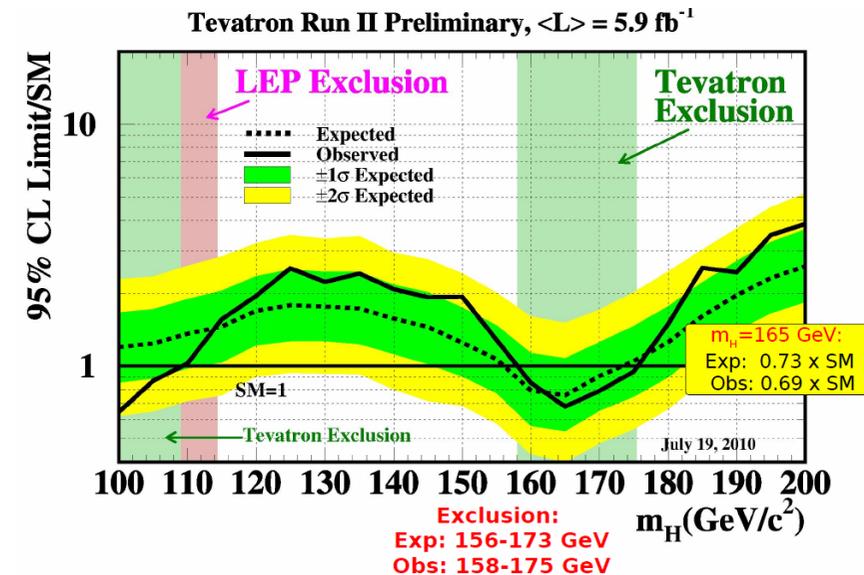
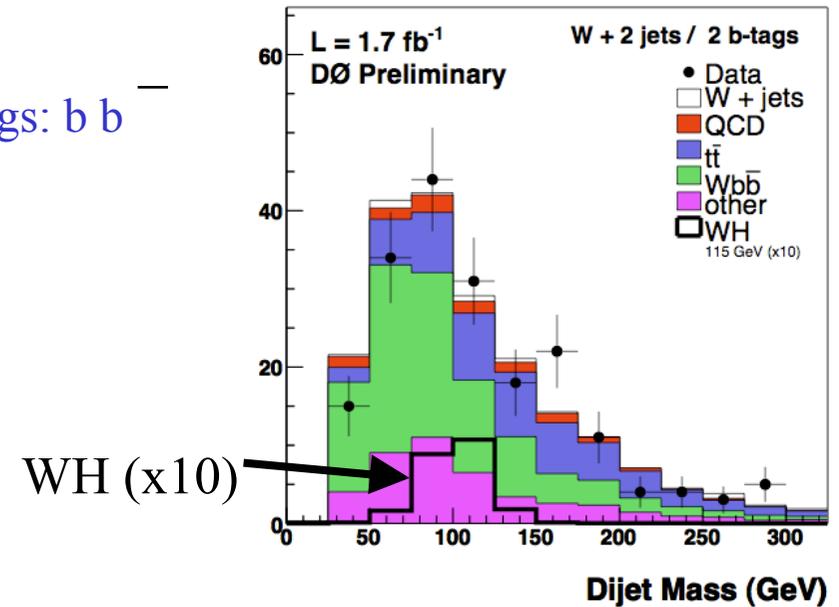
–Réseaux de neurones

–Boosted decision trees

Combinaison ($L = 5.9 \text{ fb}^{-1}$): 158-175 GeV exclu 95% CL

TeVatron peut exclure [115,200] à 95% CL avec 8-10 fb^{-1}

Ne peut pas faire une découverte à « 5 sigmas »



5. LHC

5.1 Présentation

5.1.1 Historique du projet

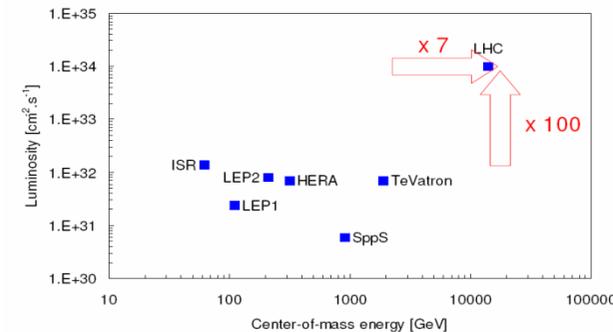
– LHC: collisionneur proton-proton dans le tunnel du LEP (circonférence 27 km).

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

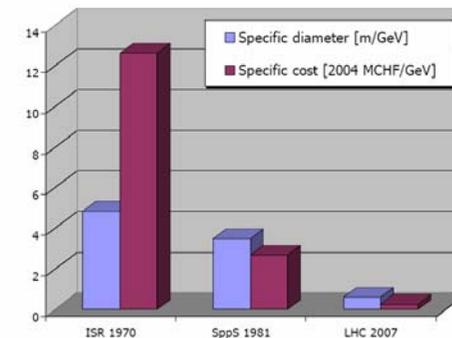
2 tubes, protons => Luminosité 100 fois TeVatron.

- 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



- 5.1.2 L'accélérateur

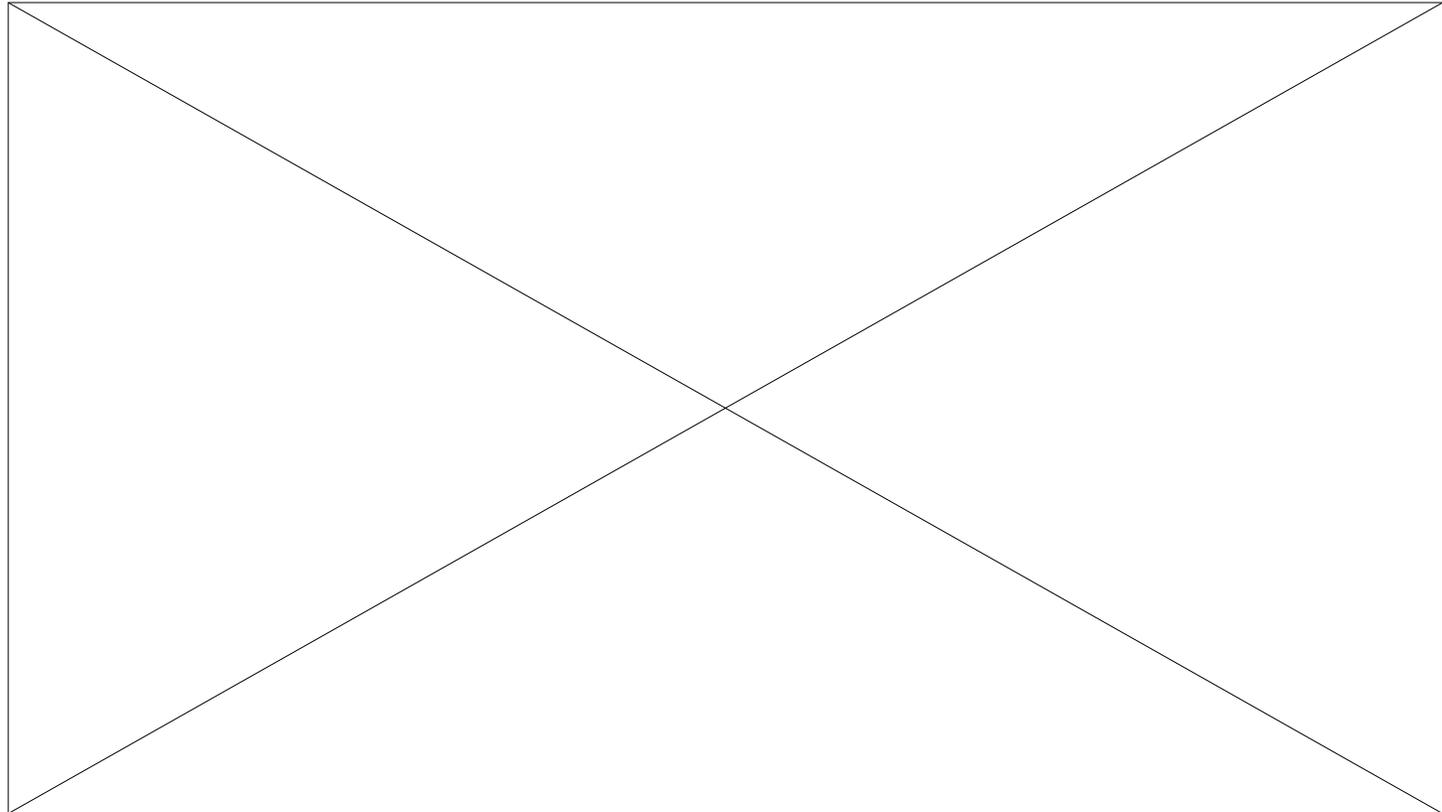
- LHC: proton-proton

$7 + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$ dans le tunnel du LEP

- 2800 paquets de protons dans chaque sens

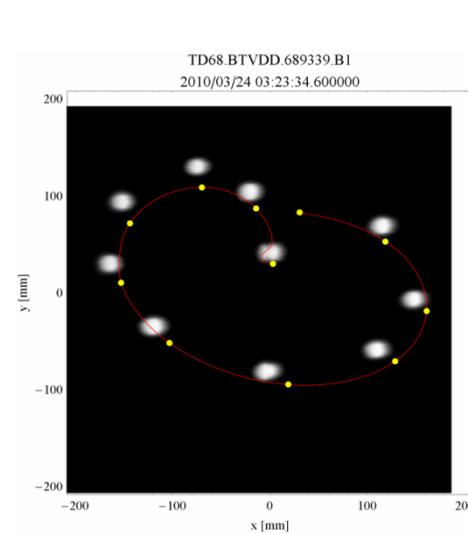
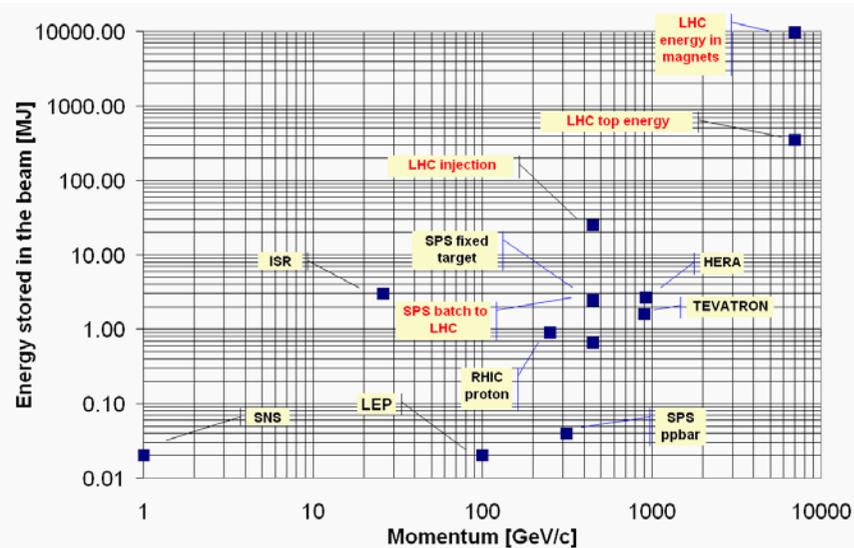
- 4 points d'intersection: 4 expériences

- Complexe d'accélérateurs du Cern utilisé comme injecteurs



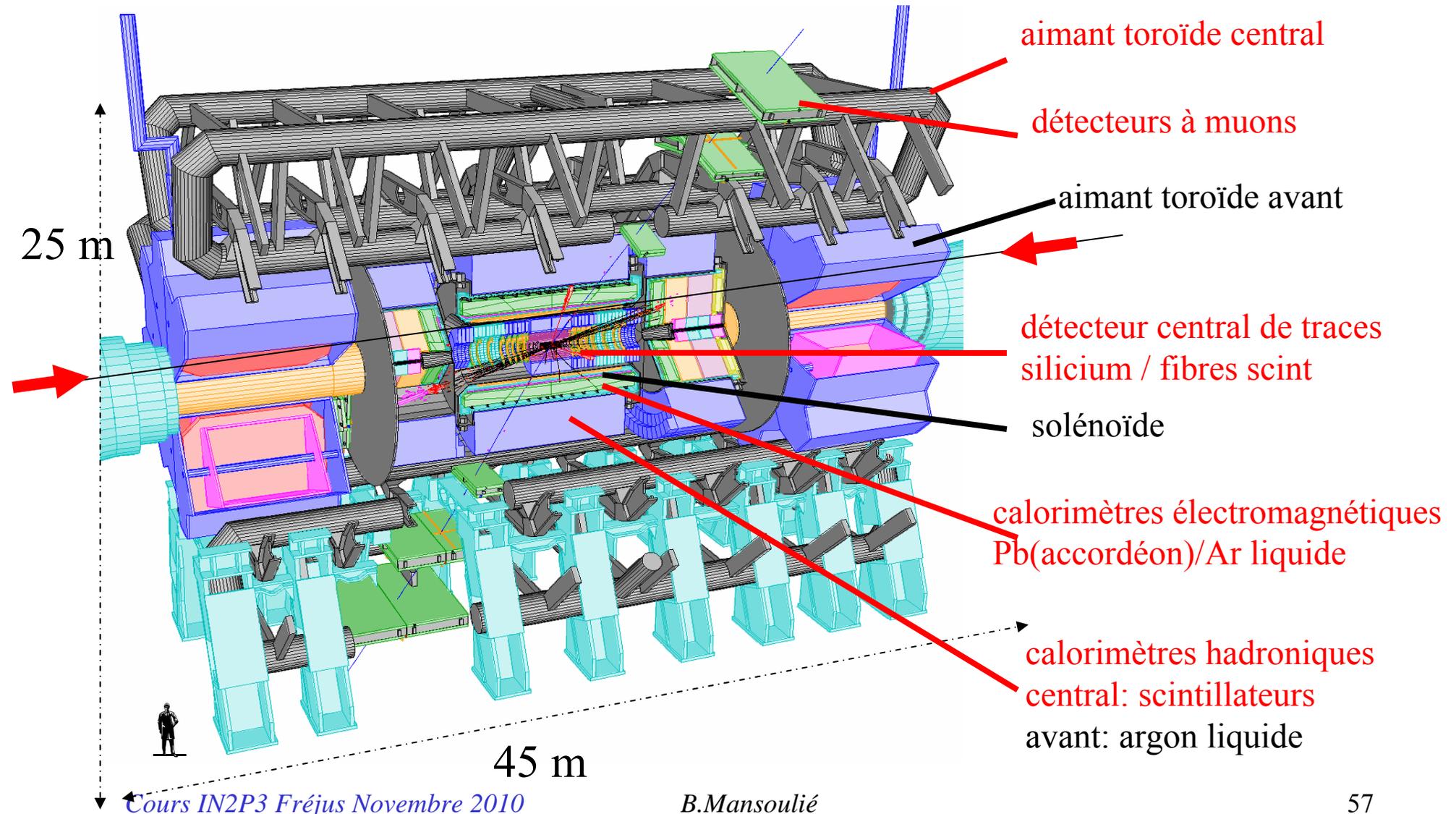
5.1.3 Aimants et cryogénie

- 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!!!

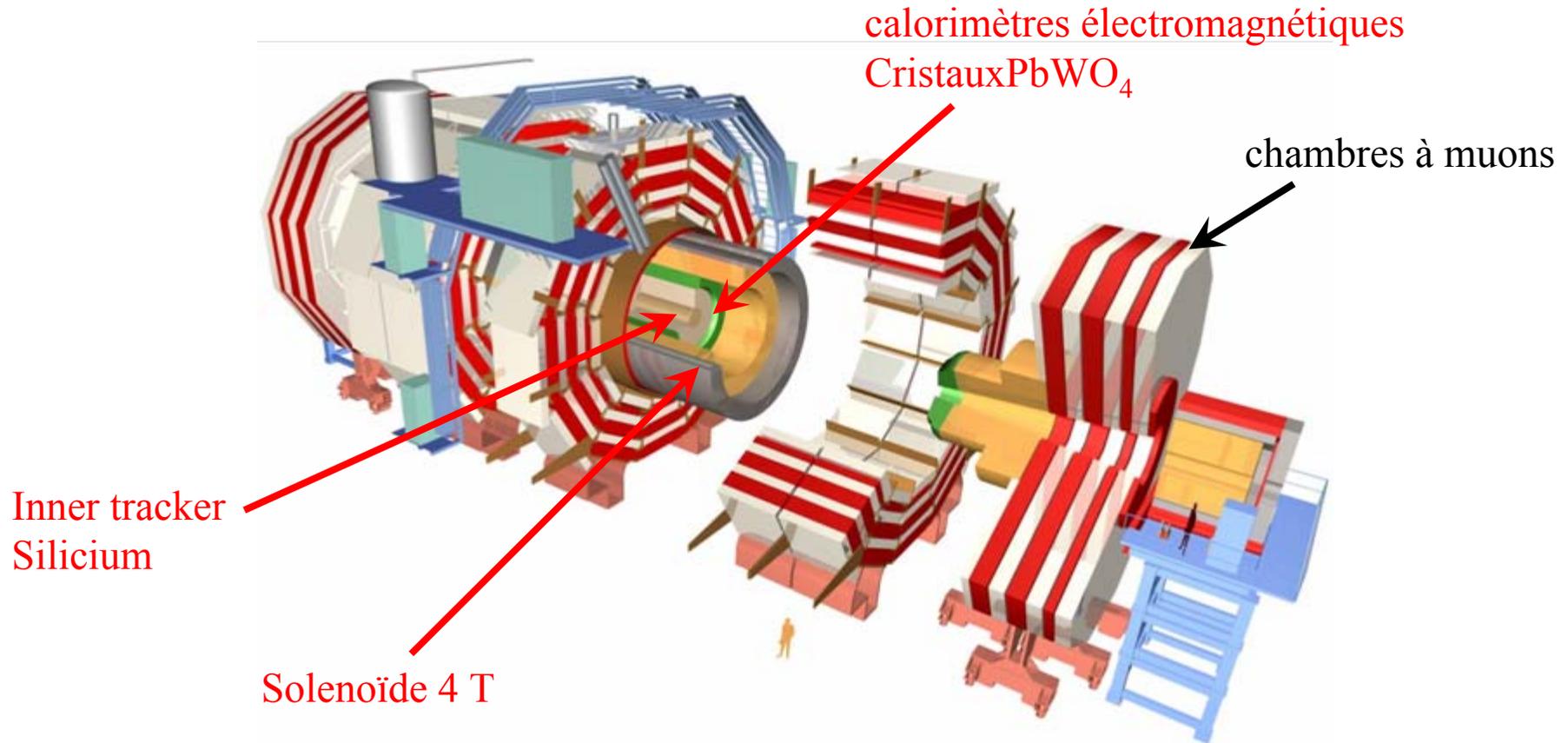


5.2 Expériences

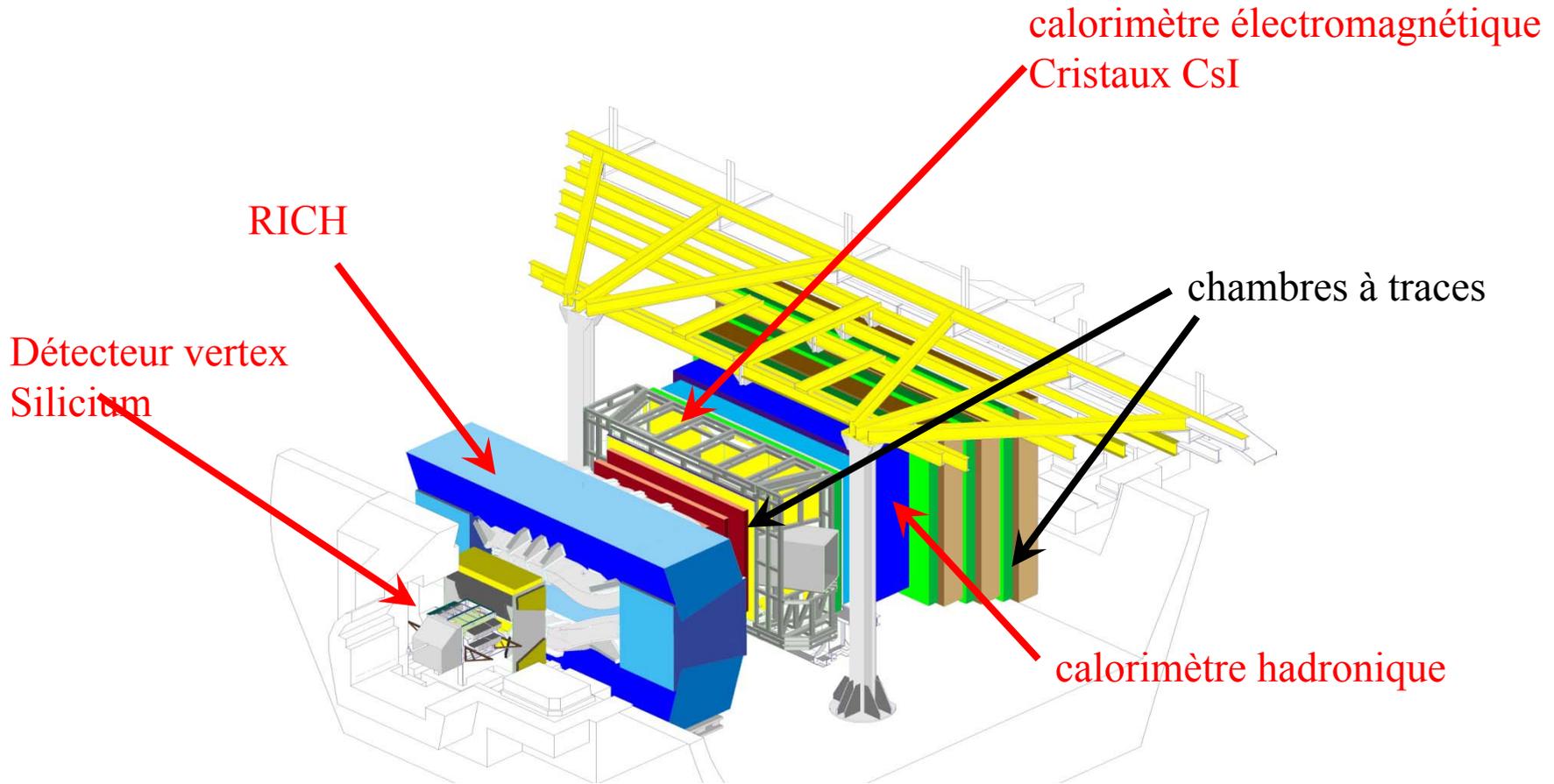
5.2.1 ATLAS (Généraliste)



- 5.2.2 CMS(Généraliste)



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



5.2.4 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

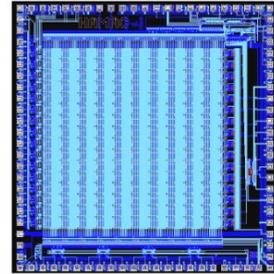
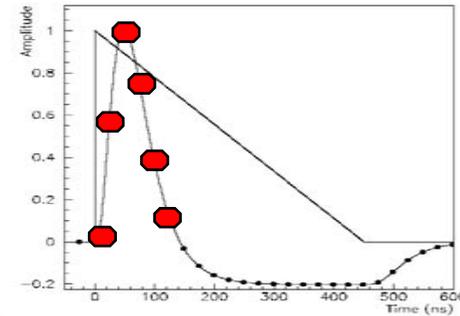
- Pour l'événement complet:

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

Sélection des événements

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

=> **Enregistrement** de l'événement
(100 à 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

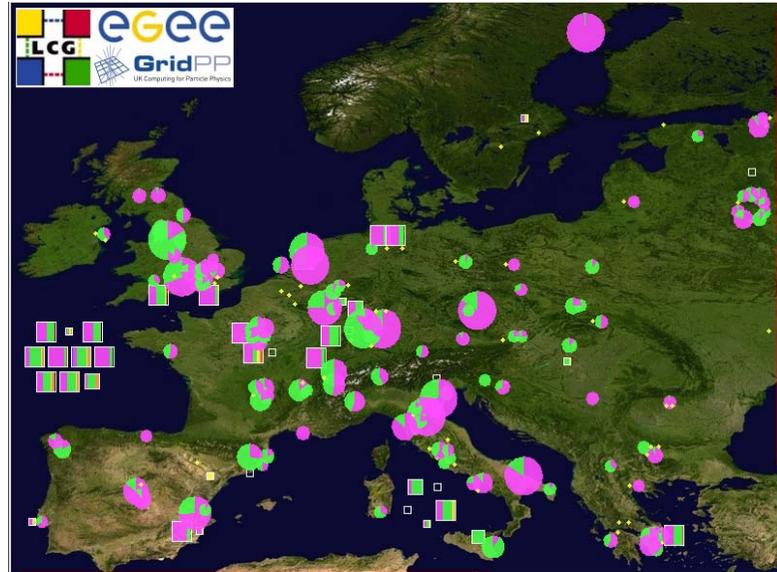
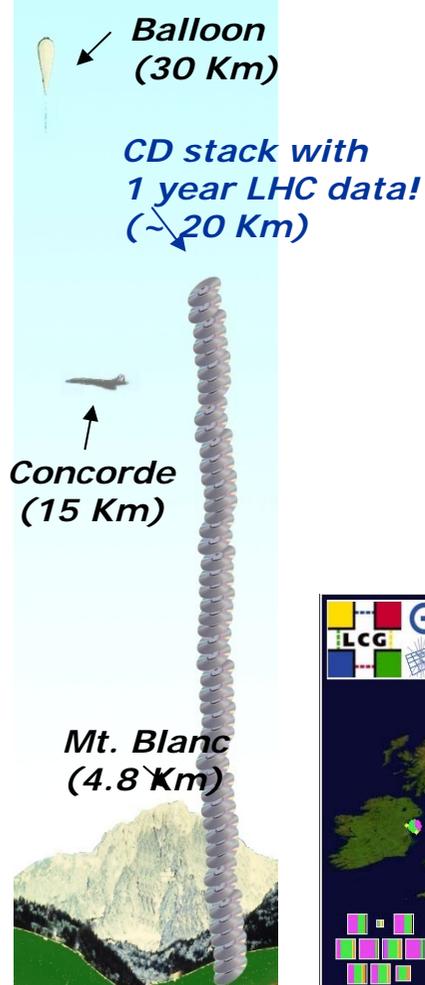
- nécessite ~100 000 PC tournant 24h/24

⇒ **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



Mardi, 17:21.
37682 jobs actifs sur 140 sites

6 Physique à LHC: Simulations

• 6.1 Aperçu

- **Fonctionnement nominal: croisements toutes les 25 ns , 2808 paquets**

- Section efficace proton-proton (inélastique) à 14TeV: $\sim 80 \text{ mb}$ ($8 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^{-2}$)

A $L=10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$: $10^{33} \times 8 \cdot 10^{-26} = 8 \cdot 10^7 \text{ interactions/s} = 8 \cdot 10^7 / 4 \cdot 10^7 = 2 \text{ int/croisement en moyenne}$

A $L=10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 20 interactions p-p/ croisement en moyenne

- **Interaction « minimum bias » à LHC:**

- Par unité de η :

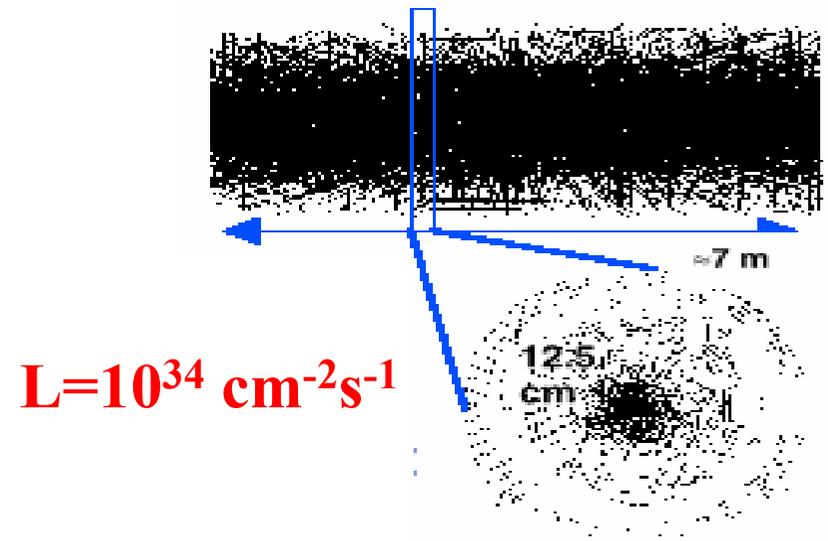
- ~ 6 chargés (π^{+-} , K^{+-} , p)
- ~ 3 neutres (π^0 , K^0 , n); $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma : 6 \gamma$

- **A $L=10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, dans $\Delta\eta = \pm 3$:**

$20 \times 6 \times 6 \sim 700$ chargés

+ autant de neutres = **1500 impacts**

=> Détecteurs: occupation, radiations.



6.2 Recherche du Higgs

• 6.2.1 Higgs $\rightarrow \gamma \gamma$

Zone « basse masse » : 114 \rightarrow 140 GeV

Modes: bb, cc, $\tau \tau$, inobservables. **H** $\rightarrow \gamma \gamma$: petit rapport de branchement ($\sim 10^{-3}$ mais \sim bonne signature)

Très exigeant pour la détection des photons
(calorimètres électromagnétiques)

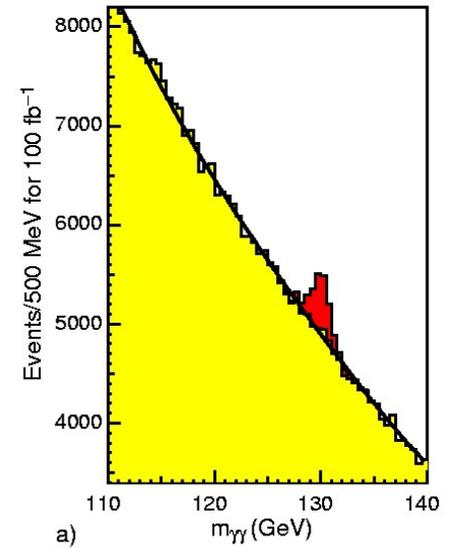
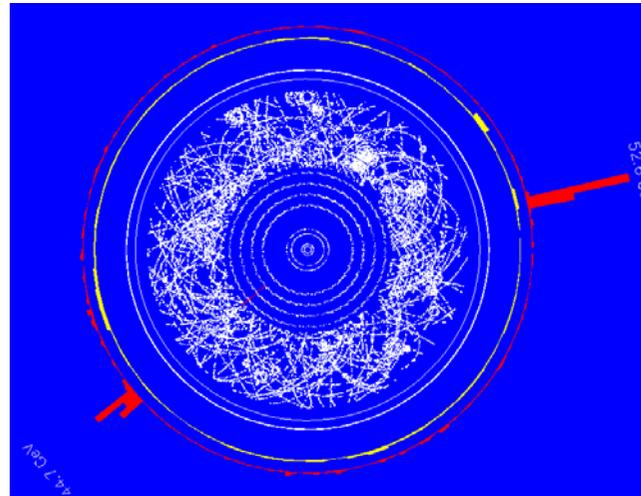
- Identifier les 2 photons/ bruit de fond:
evts jets QCD: $10^6 \times$ signal
rejection jets : 10^3 par jet... pas si facile...
 \Rightarrow détecteurs spéciaux juste pour ce cas!

- bruit de fond vrais $\gamma \gamma$ QCD

\Rightarrow résolution en masse nécessaire :

- résolution en énergie excellente
- Vertex inconnu (parmi ~ 20 vertex) \Rightarrow angle photon?
 \Rightarrow résolution en direction

(aussi possible $pp \rightarrow W + H$, $H \rightarrow bb$)



6.2.2 Higgs -> 4 leptons

Si $m_H > 2 m(Z^0) = 180 \text{ GeV}$, $H \rightarrow W^+ W^-$ (70%) et $Z^0 Z^0$ (30%)

– $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$ ou $\mu^+ \mu^-$ (B. R. 3% chaque)

– Événements ‘en or’ : $p p \rightarrow H \rightarrow Z Z \rightarrow 4 e, 4 \mu, 2e 2\mu$

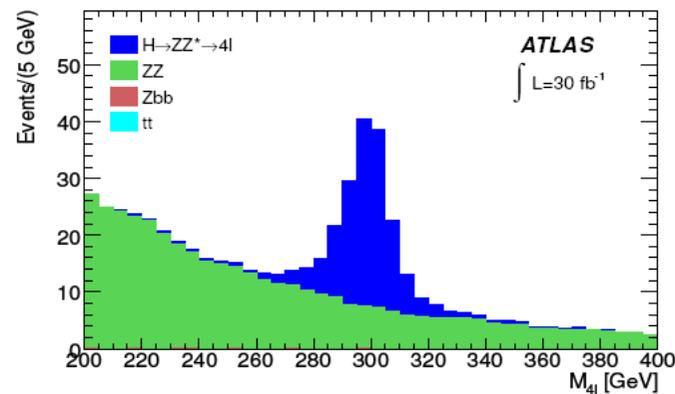
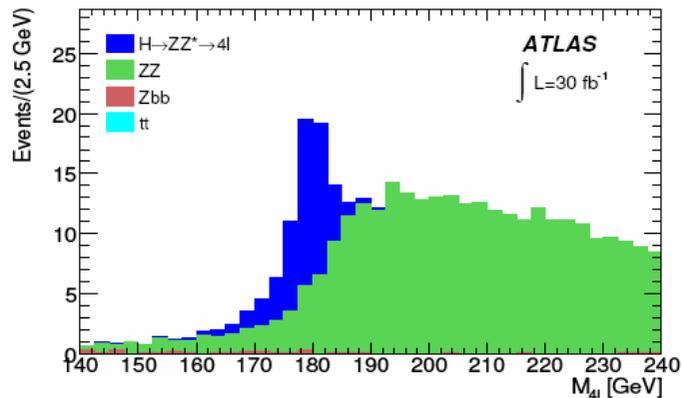
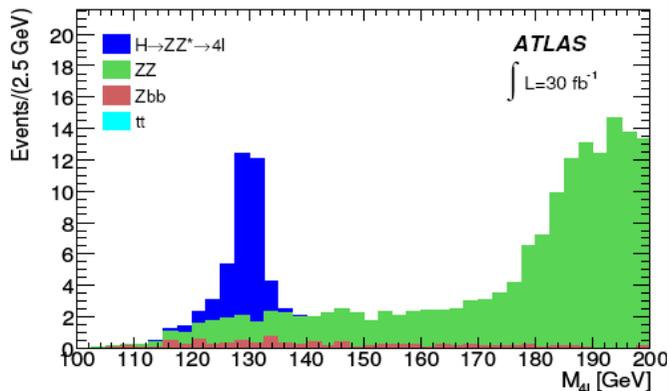
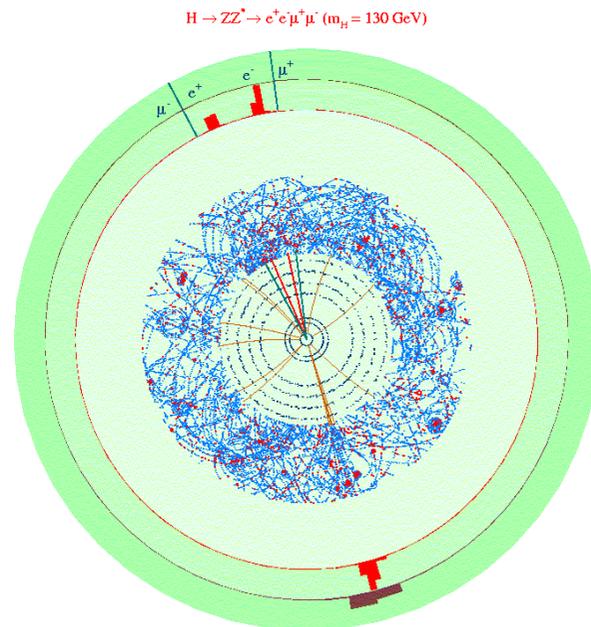
Encore valide si $140 \text{ GeV} < m_H < 2 m_Z$, avec un Z virtuel

– $H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$

– Mais peu de signal (sous le seuil)

Détection relativement facile, peu de bruit de fond instrumental

Fonds physiques: dominé par « continuum ZZ »



- **6.2.3 Higgs: Analyse statistique**

- **Découverte** : excès de signal $> \ll 5 \sigma \gg$;

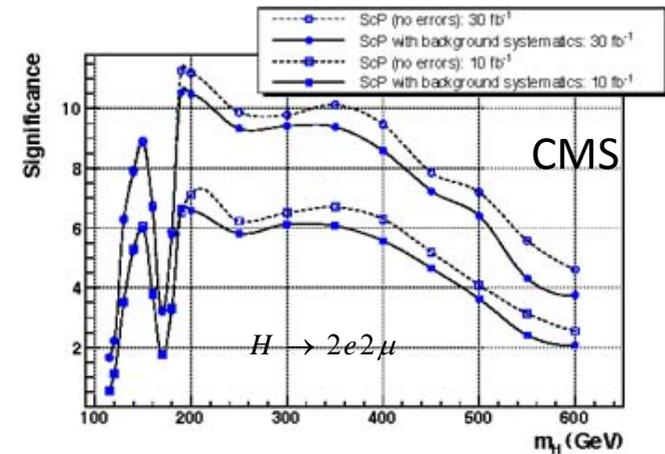
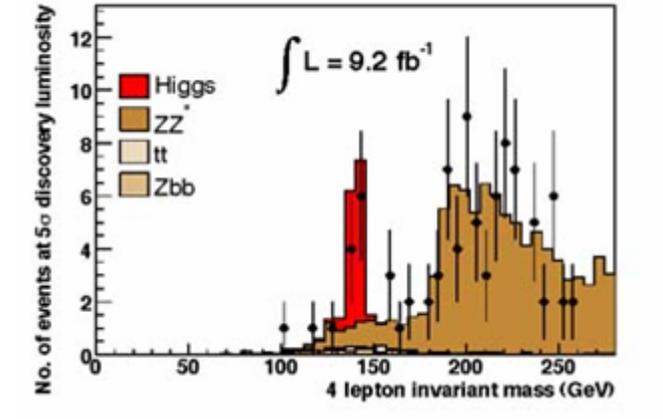
- Prob(fluctuation $> 5 \sigma$) = $3 \cdot 10^{-7}$
- Bruit de fond N_f (Poisson): fluctuation $\sqrt{N_f}$
- Exemple N_s (175-185 GeV) = 41; $N_f = 37$
 - $\sqrt{37} = 6 \Rightarrow$ excès à $41/6 = 7 \sigma$
- Pour un fond parfaitement connu!
- Pour un signal attendu à cet endroit là

- **Exclusion**: limite sur le signal à 95% CL

Valeur max du signal pour laquelle 95 expériences sur 100 seraient encore compatibles avec les données.

- « Look elsewhere » effect:

- si on cherche « n'importe où » : augmente la probabilité d'une fluctuation
- Typiquement: proba fluct totale \Rightarrow proba fluct locale x (intervalle où on cherche) / résolution



- **Evaluation du fond?**

- **Simulation Monte-Carlo**

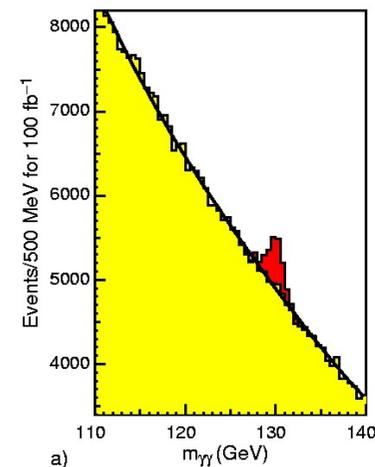
- physique connue: fonctions de structure x processus élémentaire x désintégrations x réponse du détecteur x analyse
 - Difficultés:
 - Incertitudes « théoriques »: fonctions de structure, ordres supérieurs...
 - Ex $H \rightarrow 4l$: forme du seuil $Z Z$
 - Nombre d'événements de fond de départ énorme X réjection énorme
 - Ex $H \rightarrow \gamma \gamma$, fond 2 jets = 10^6 x signal, réjection chaque jet > 1000
Impossible simuler $\gg 10^6$ evts, et même: sens d'une telle simulation?

- **A partir des données elles-mêmes**

- Le plus simple: « side-bands »
 - Plus sophistiqué: « control samples »

Echantillons de données \sim signal, mais en relaxant un ou plusieurs critères de sélection..

(attention aux corrélations!)



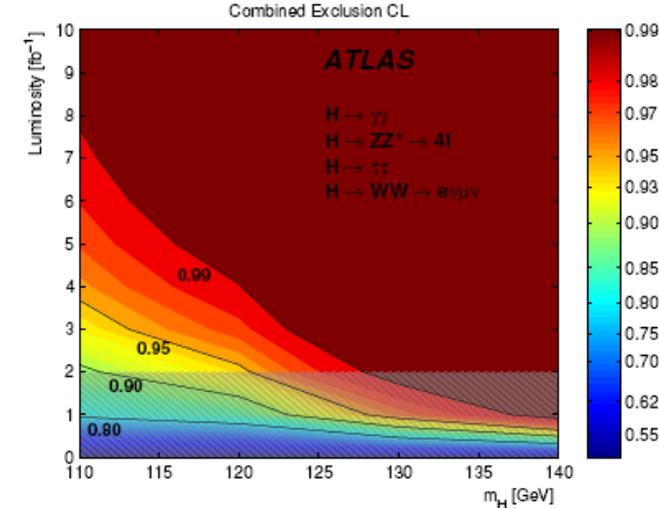
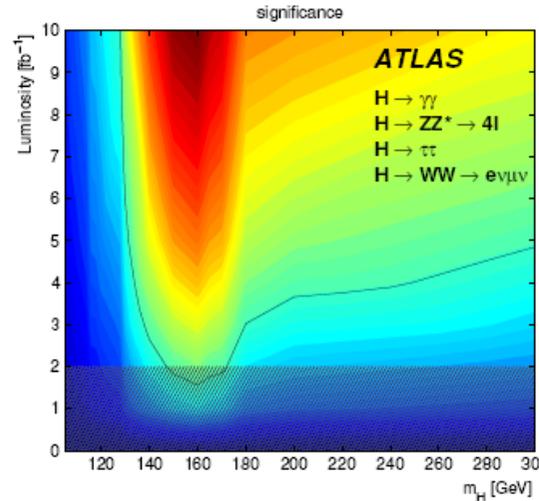
- 6.2.4 Higgs: Combinaison

A basse masse (115 – 200 GeV) : nécessaire combiner analyses.
(vrai aussi TeVatron actuellement).

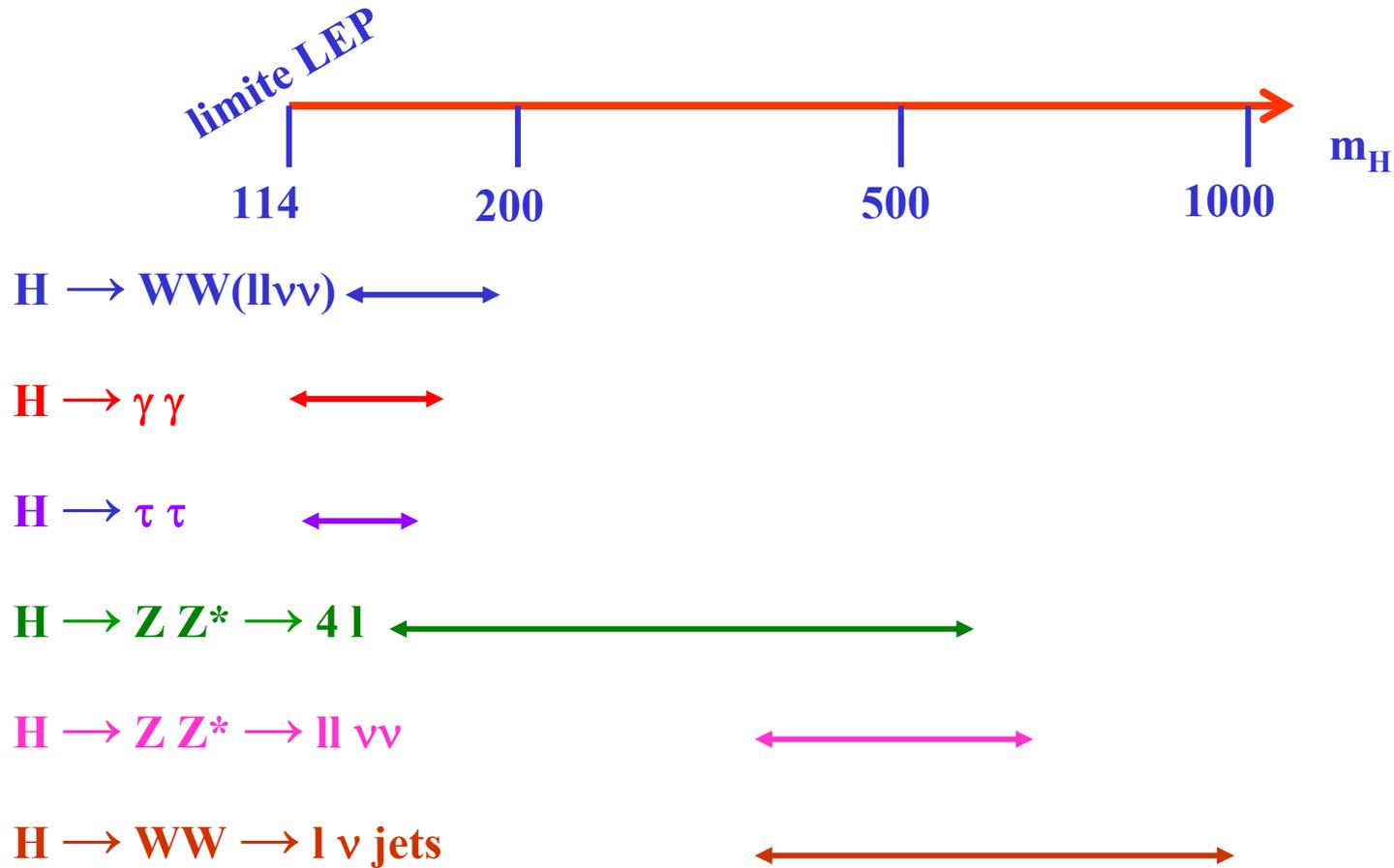
- **Procédure difficile**, surtout si les fonds estimés à partir des données.
 - Tenir compte des corrélations? Ajustements vite très lourds.
 - « Pseudo-expériences »
 - distributions signal et fond obtenues par M-C complet
 - Simulations nombreuses « expériences » chacune avec N (événements)
⇒ Evaluer nombre de fluctuations
 - Mais $P(5\sigma) \approx 3 \cdot 10^{-7}$: difficile à générer; confiance dans les extrapolations?

- Simulation ATLAS 2008
- Combinaison modes:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$
- $H \rightarrow \tau\tau$
- $H \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$



- Résumé des simulations : potentiel de découverte du Higgs standard (Atlas et CMS)



Après ~ 3 ans de fonctionnement toute la gamme est couverte.

6.3 Recherches « Exotiques »

• 6.3.1 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; $m(h^0) < 130 \text{ GeV}$!
- Int fortes: squarks, gluinos. Masse élevée (1-10 TeV?)
- Int faibles : sleptons, neutralinos. Masse moins élevée ?

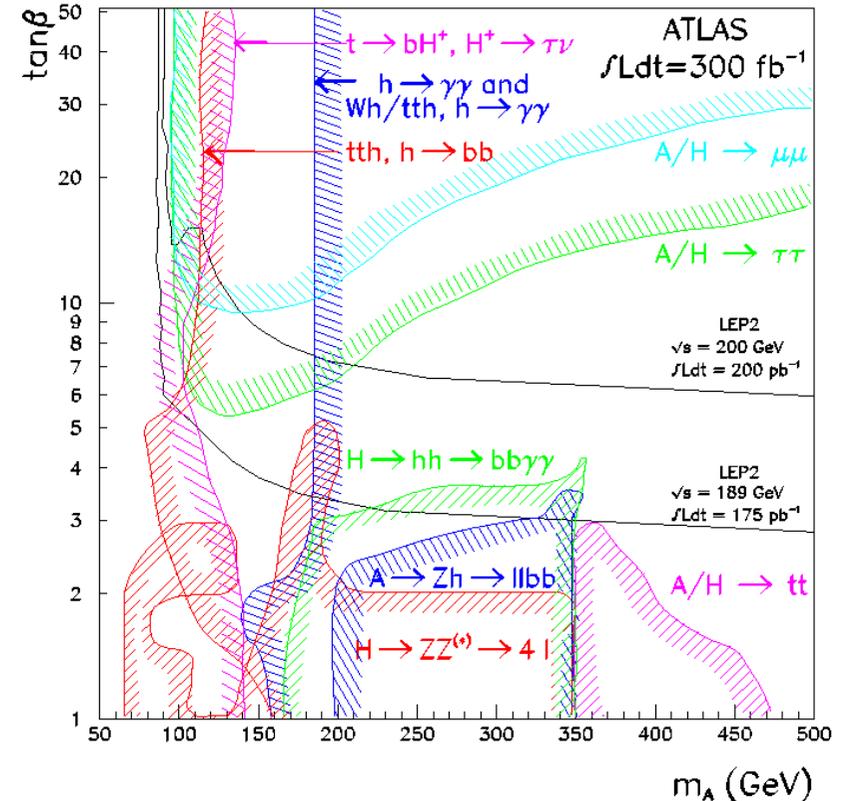
• 6.3.1.1 Higgs SuSy

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

2 paramètres: m_A , $\tan(\beta)$.

Analyse très complexe!

Plan m_A , $\tan(\beta)$ entièrement couvert.



Partie de l'espace des paramètres où Higgs chargés, plusieurs Higgs

(=> Susy se manifeste à une échelle proche du MS)

Ailleurs : h^0 seul, = Higgs standard! => comment le distinguer?

autres mesures à LHC. Sinon: ILC!

- 6.3.1.2 Particules SuSy

- Premières études: $pp \rightarrow \tilde{q} \tilde{q} \rightarrow q + \chi^0 + q + \chi^0$
= 2 jets acoplanaires + rien

Evénement « spectaculaires »,

Limites possibles: squarks, gluinos $m > 2\sim 3$ TeV

- Par la suite, modèles précis (Ex: m SUGRA)
avec tout le spectre de s-particules.

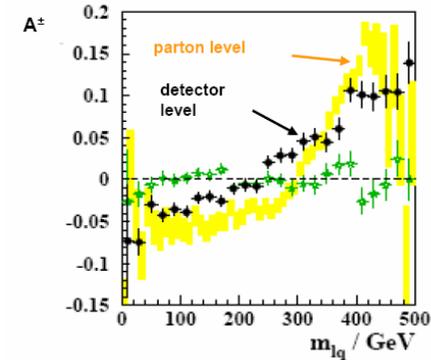
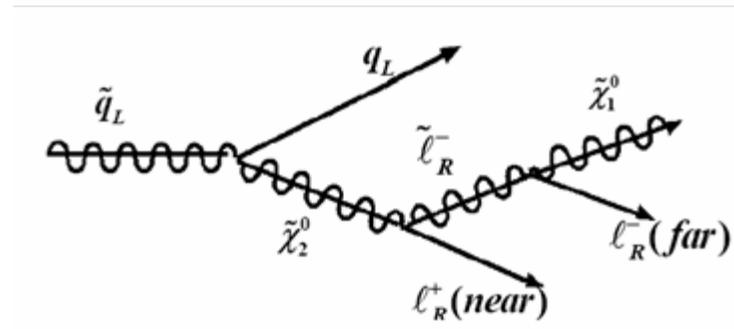
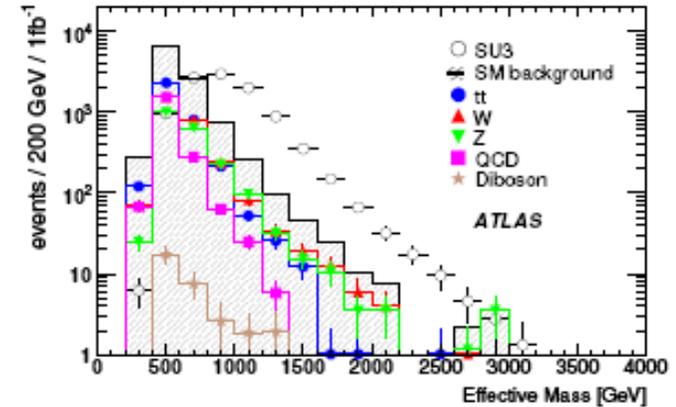
– Evénements complexes mais riches

$$pp \rightarrow qq$$

$$\rightarrow \chi^0_2 q \rightarrow l^+ l^- q \rightarrow \chi^0 l^+ l^- q$$

Permettant par exemple la mesure de la masse du LSP (neutralino)

Et des mesures de spin (caractéristique de SuSy)



- **6.3.2 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

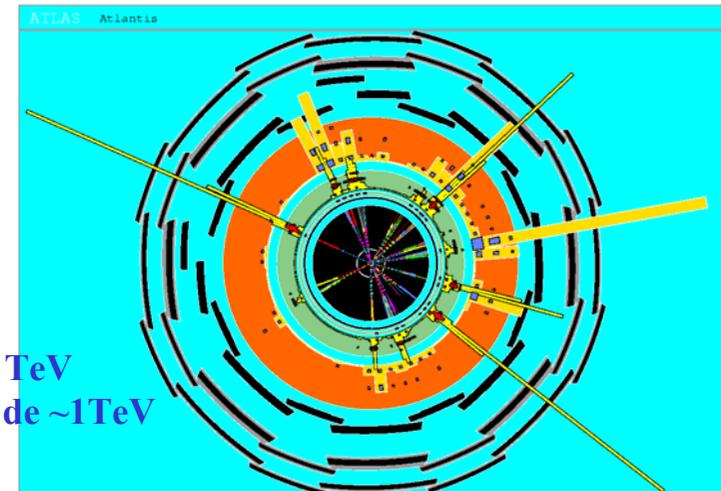
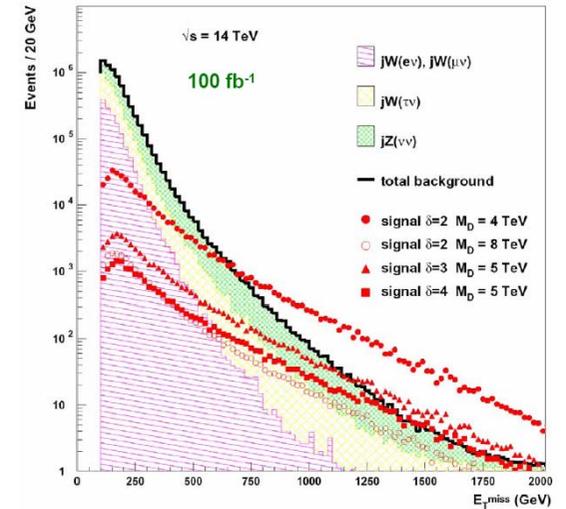
–Résout le pb de hiérarchie (?)

- **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⁻
 – résolution en énergie/impulsion
- Trous noirs: Évts spectaculaires!



**Trou noir 8 TeV
 -> 8 quarks de ~1TeV
 dans Atlas**

6.4 Physique du B à LHC

- Atlas et CMS peuvent regarder la physique du B

- **Spécialiste: LHCb**

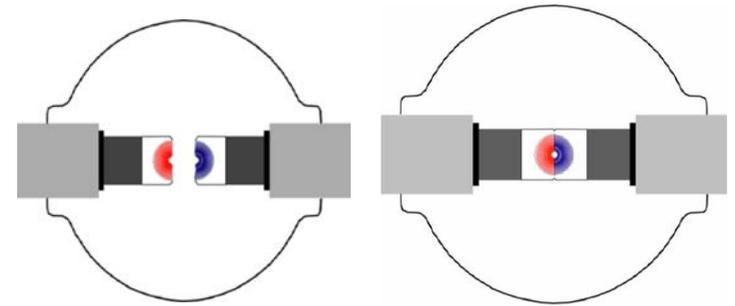
- Expérience « vers l'avant », regarde les paires $b - \bar{b}$ produites près axe faisceau

⇒ 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)**

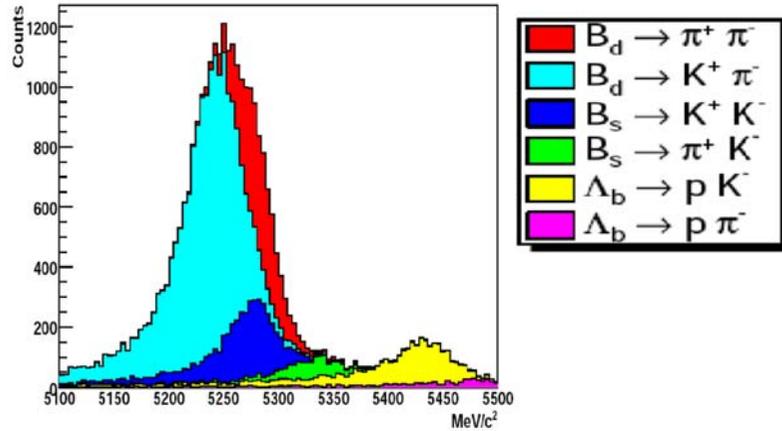
- Spectromètre:

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

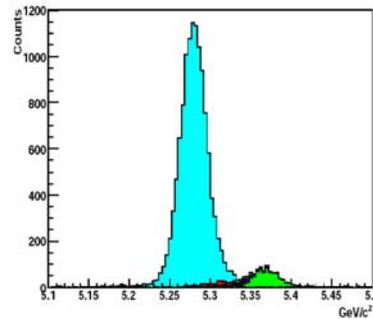
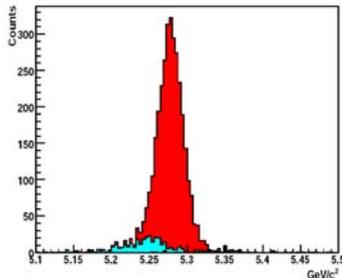


Exemple de mesure: angle gamma (γ)

– Une des méthodes: $B \rightarrow \pi \pi, \pi K, K K$

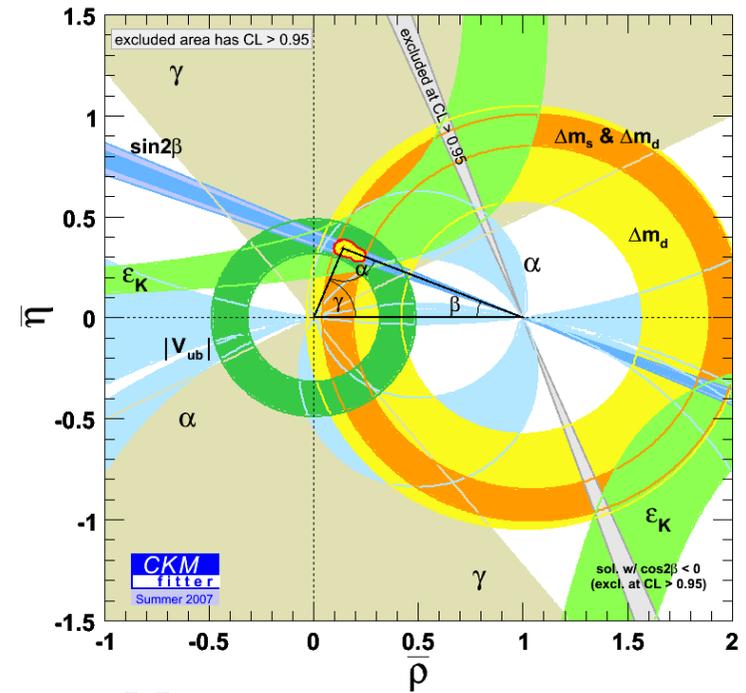


– Identification $\pi / K / p$



$B_d \rightarrow \pi \pi$

$B_d \rightarrow \pi K, B_s \rightarrow K, \pi$



Mesure γ :

-Contrainte modèle

-Possibilité « nouvelle physique »

7. 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**

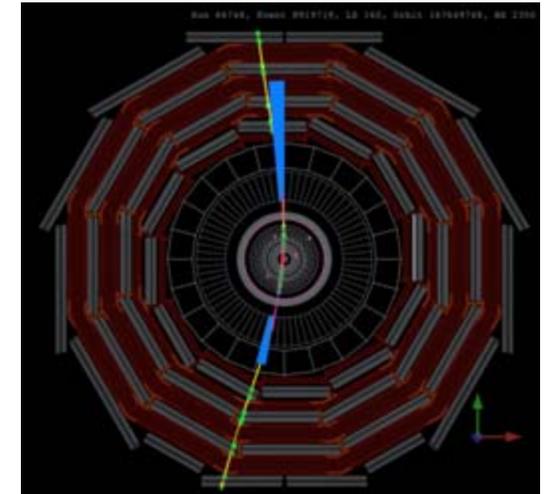
Gros dégâts matériels... Investigation => cause identifiée (jonction supra)

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

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

- Expériences

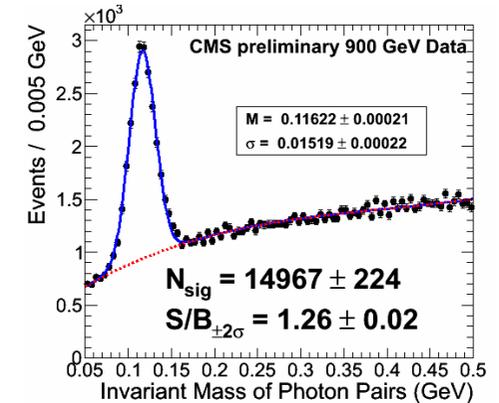
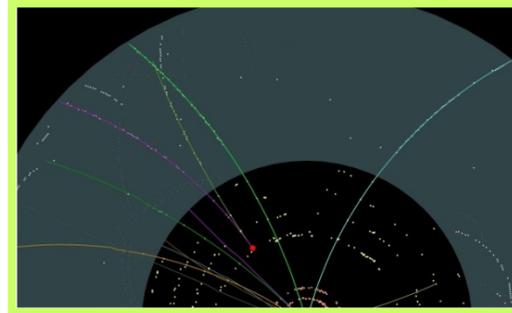
- Achèvement détecteurs, software...
- Enregistrement de millions de rayons cosmiques
 - Alignements (dét central, muons...)
 - Vérifier calibration des calorimètres
 - Tester la reconstruction
 - Tester la distribution des données



7.2 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?]

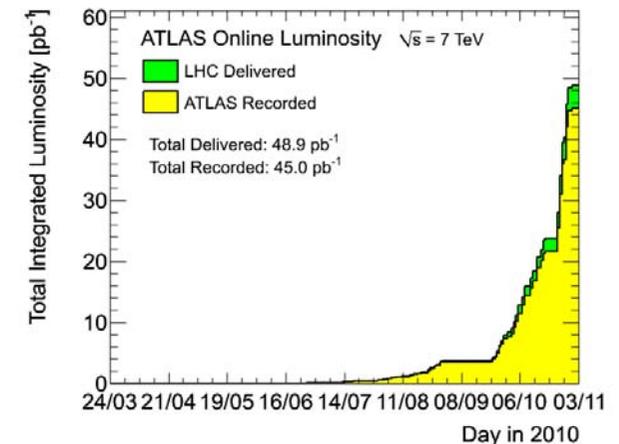
- **Nov-Dec 2009: Collisions à 900 GeV, un peu à 2.36 TeV (2 + 2 bunches)**



- **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**

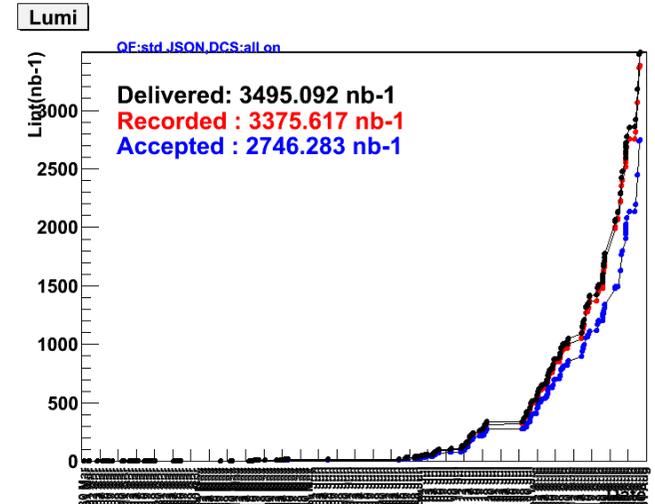
⇒ **Très bon état.**

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

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

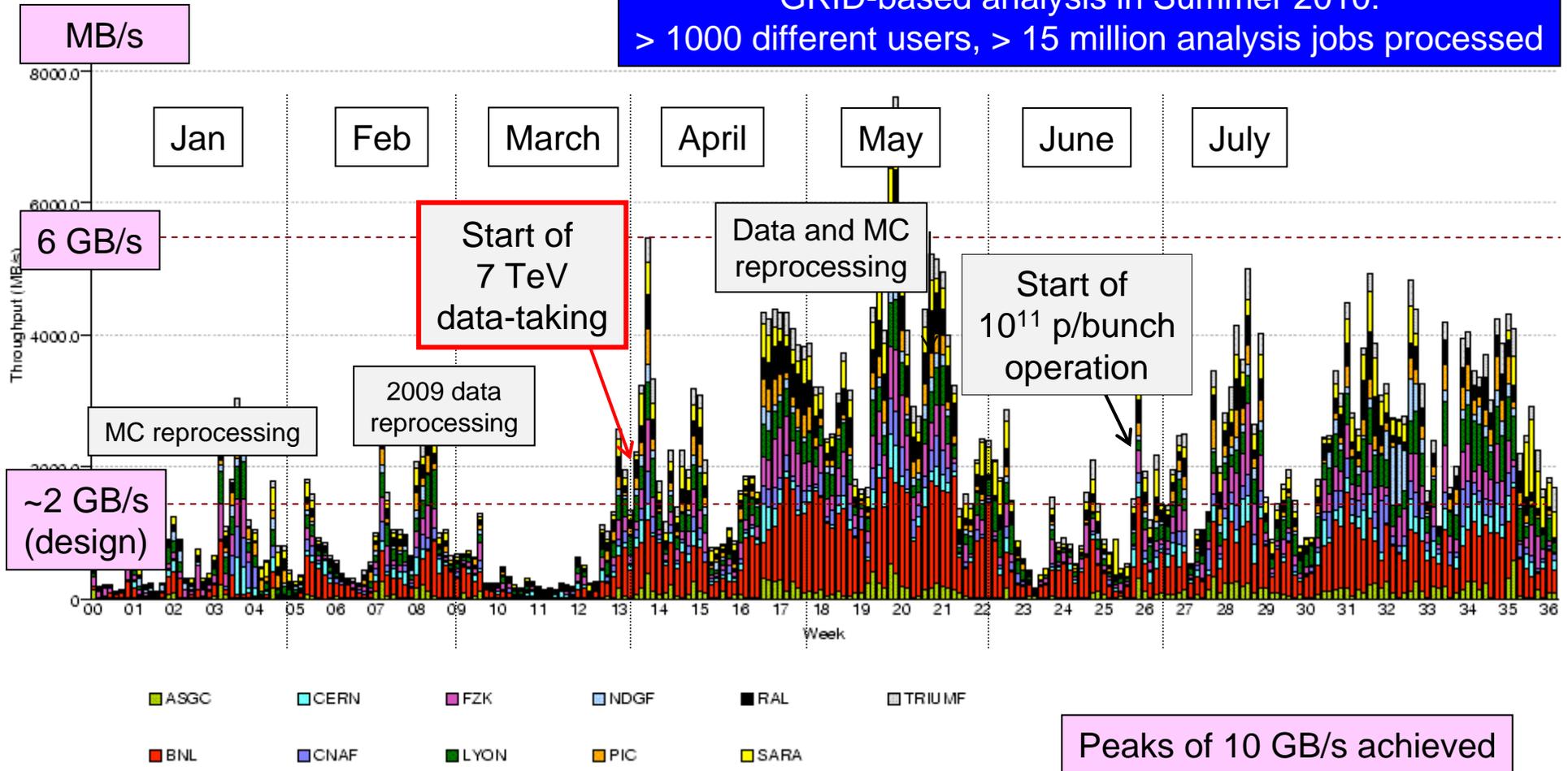
- **Performances des détecteurs excellentes**

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%



Traitement offline sur la grille de calcul

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



7.3 Données récentes

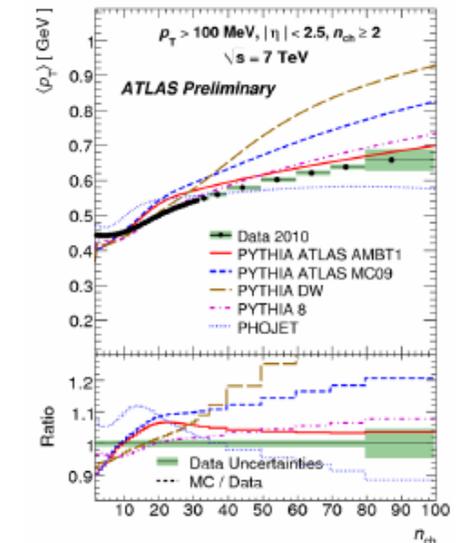
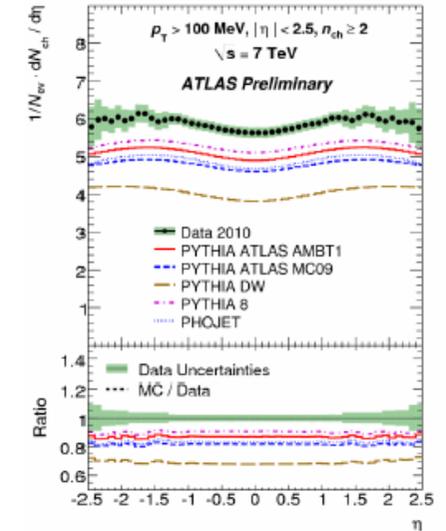
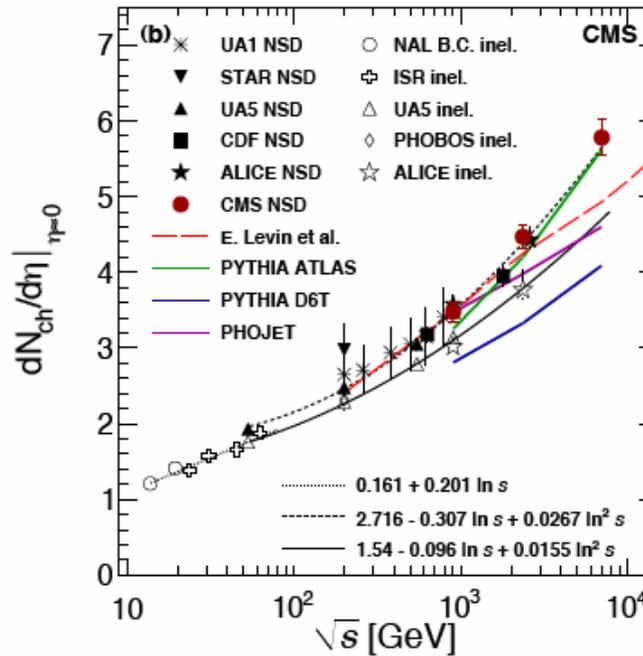
7.3.1 Collisions "soft"

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

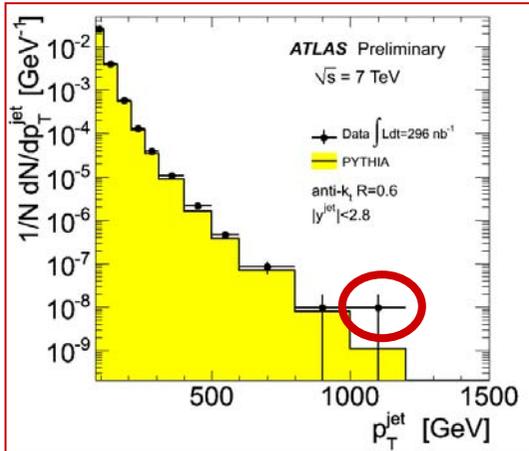
- **Mesure: multiplicité des chargés vs η et p_T**
Multiplicité un peu plus haute qu'attendu, traces un peu plus molles.

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

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



7.3.2 Jets QCD

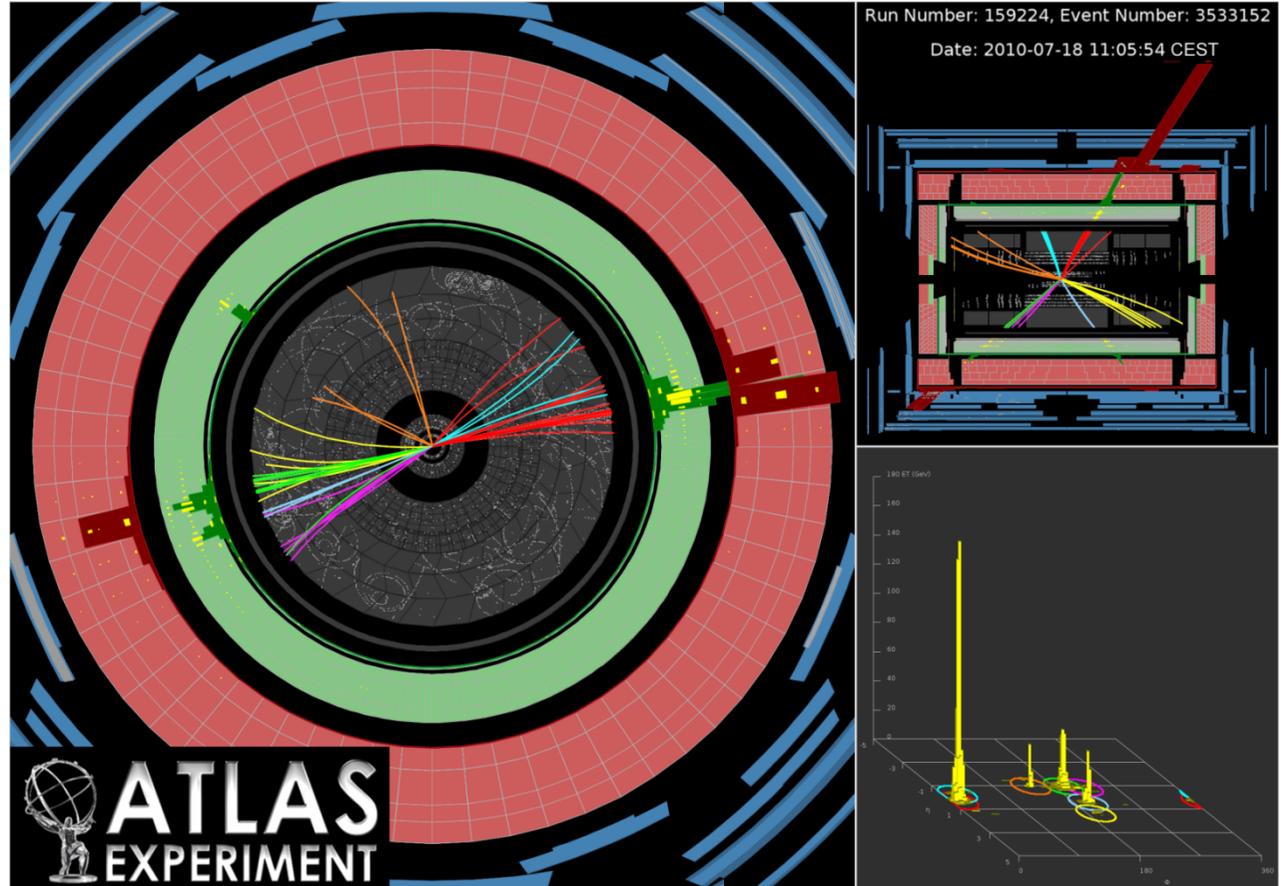


$$p_T(j_1) = 1.12 \text{ TeV}$$

$$p_T(j_2) = 480 \text{ GeV}$$

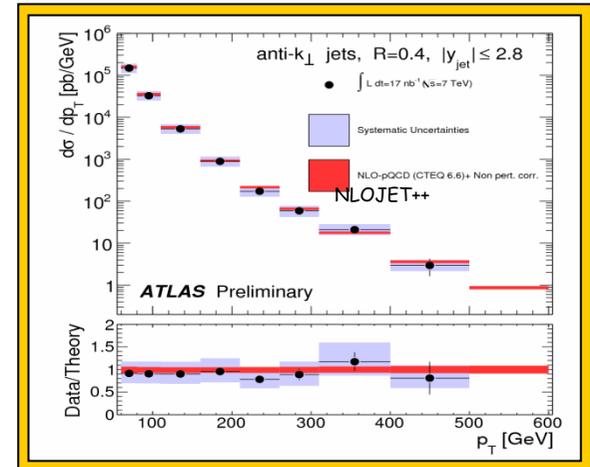
$$p_T(j_3) = 155 \text{ GeV}$$

$$p_T(j_4) = 95 \text{ GeV}$$

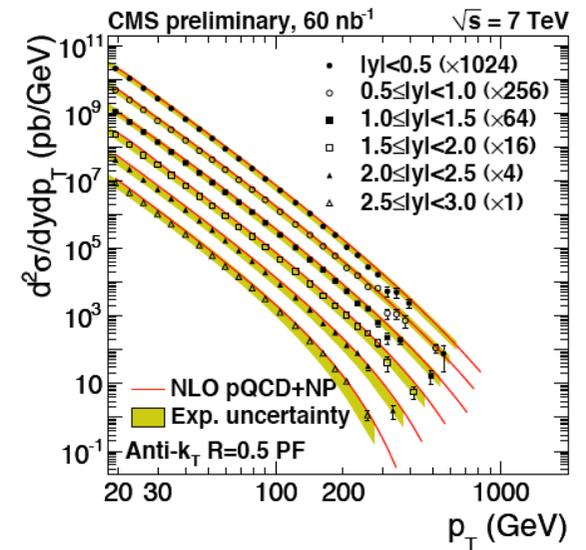


Premières mesures avec jets

- **Mesure section efficace inclusive de jets jusqu'à 500 GeV en accord avec QCD (5 ordres de grandeur)**
Jet Energy Scale à 7% (Atlas), de tests faisceaux + MC

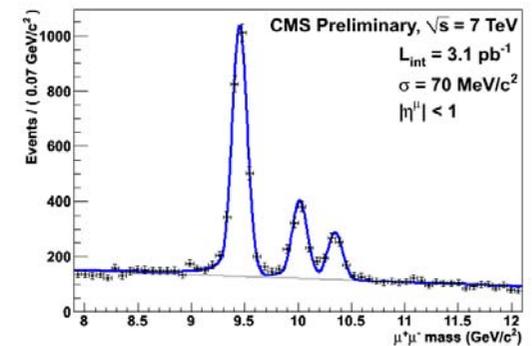
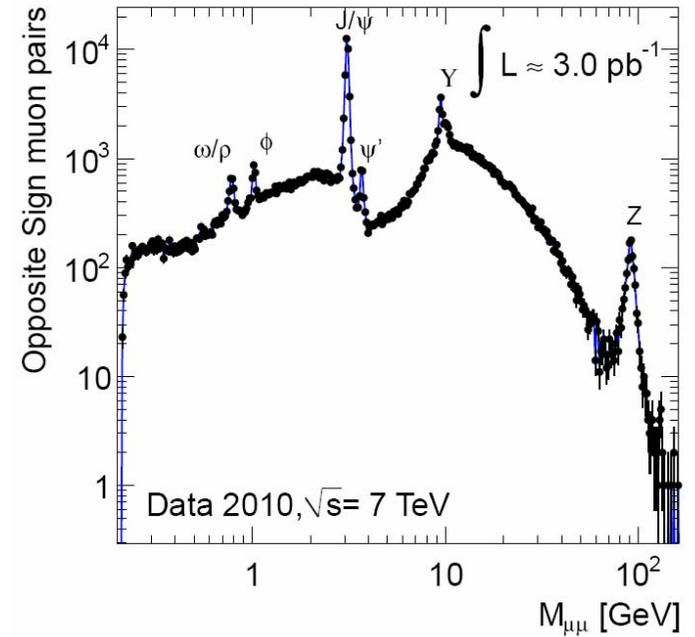


- **Distribution différentielle (η , p_T) avec “Particle Flow” jets (CMS)**



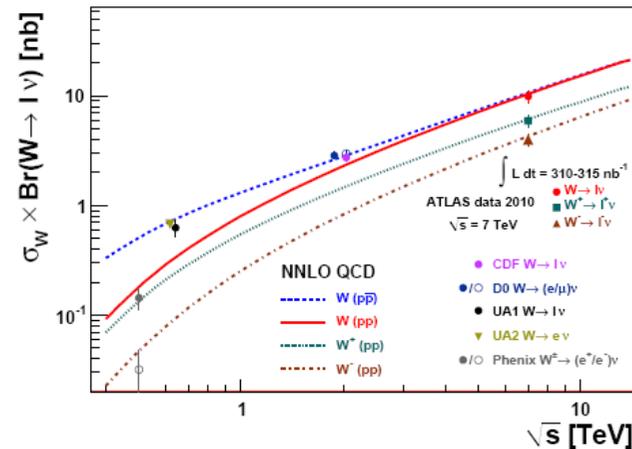
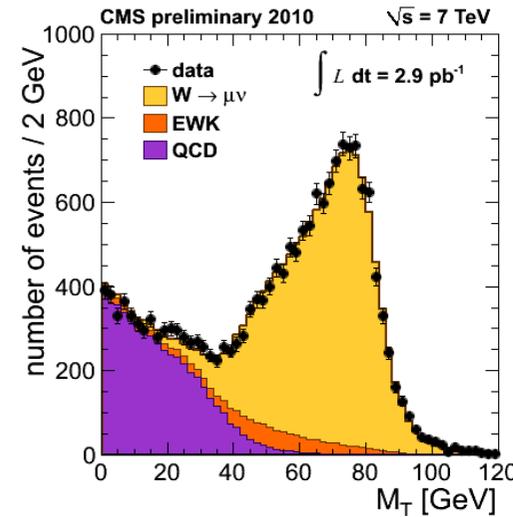
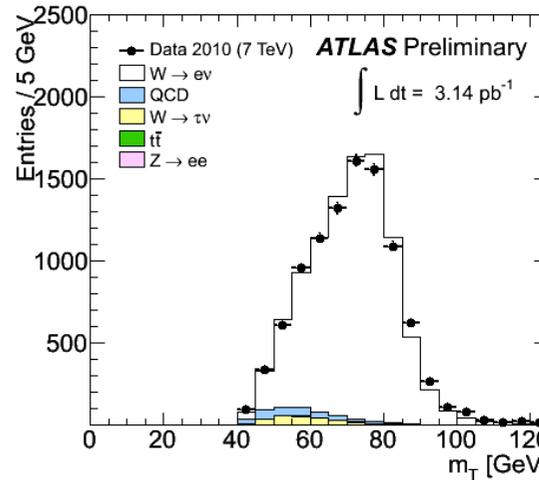
7.3.3 Quarkonia

- **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**



7.3.4 W

- Pour 3 pb^{-1} , environ 10000 W (e, ν) et par expérience.
- Bruit de fond très bas, très bien compris à partir des données elles-mêmes (+ Monte-Carlo).
- Mesure sections efficaces de production W^+ , W^-
- Possibilité de mesurer M_W avec grande précision ($< 10 \text{ MeV}$)... mais dans le futur!



7.3.5 Z

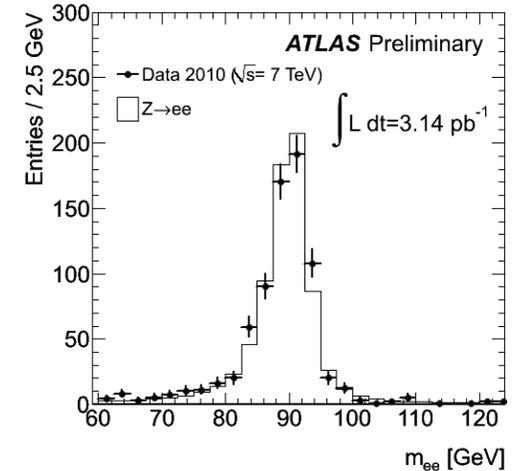
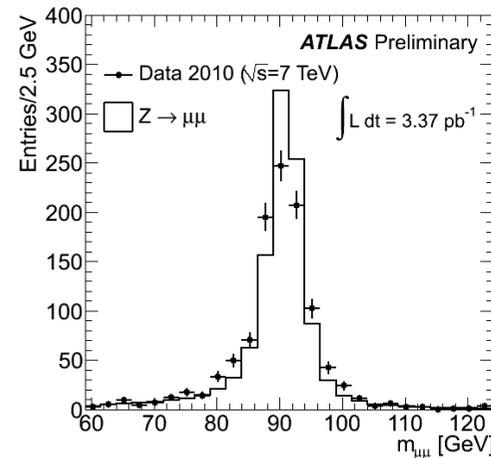
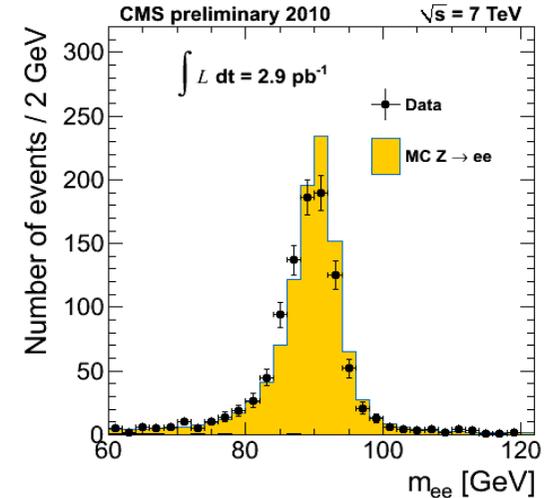
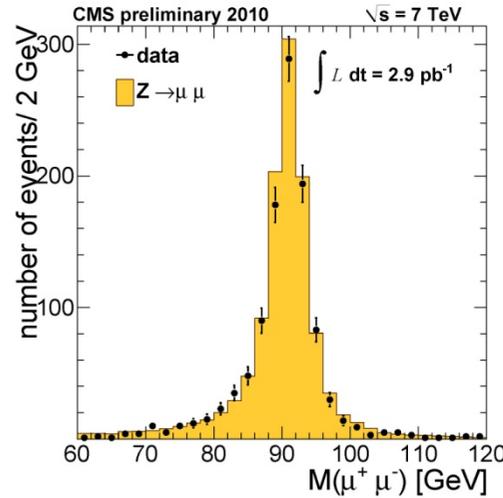
- Z très important pour fixer les échelles d'énergie et d'impulsion

- CMS:

- Z → $\mu\mu$: biais < 0.15 %
- Z → ee bias 1% barrel
3% end cap

- ATLAS

- Z → $\mu\mu$
 - Echelle OK; résolution ?
- Z → ee
 - Echelle OK; résolution OK
(possible amélioration < 10%)



7.3.6 Top

- CMS

- $\mu + \text{jets}$:

- Rôle du b-tag!*

- Vertex detectors déjà très performants!

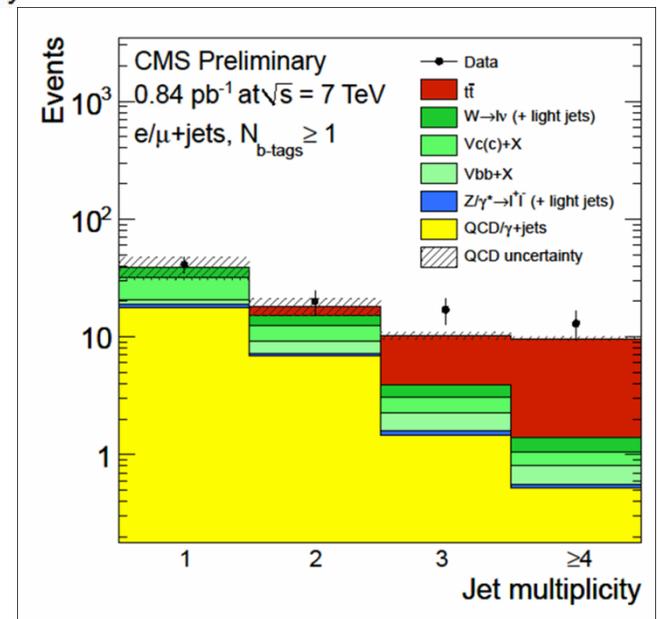
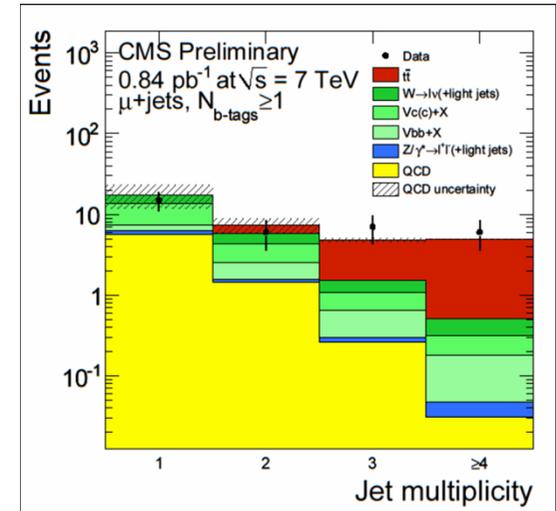
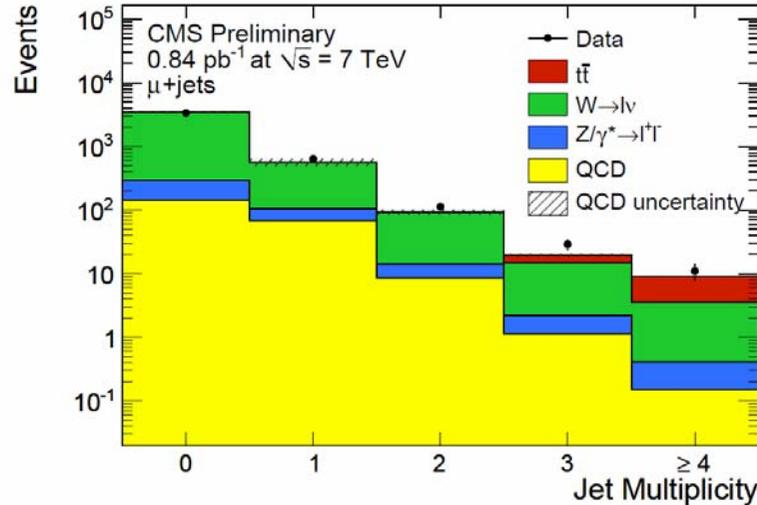
- e and μ

- Pour $N(\text{jets}) \geq 3$: $N(\text{data})=30$
 - Bruit de fond prédit: 5.3
 - Signal prédit: 15

- ATLAS voit un nombre comparable d'événements

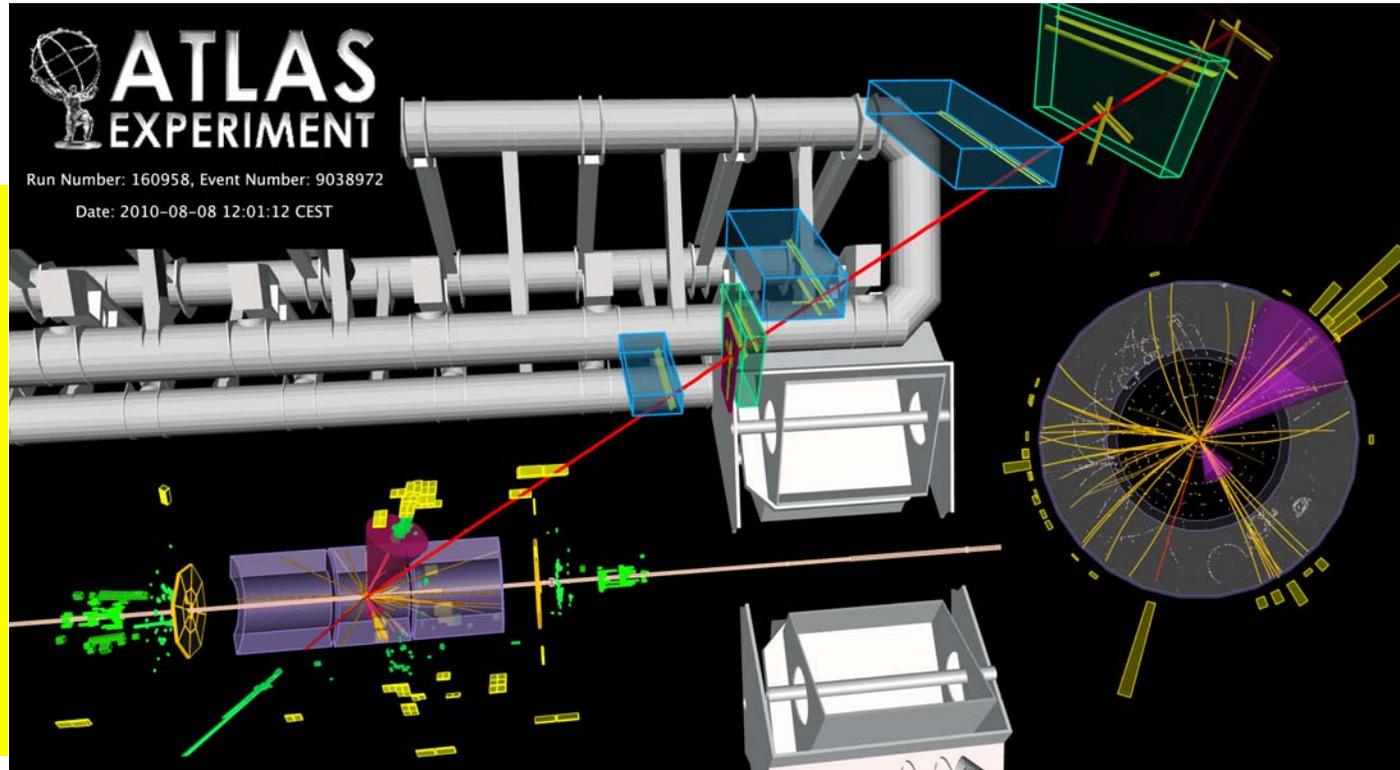
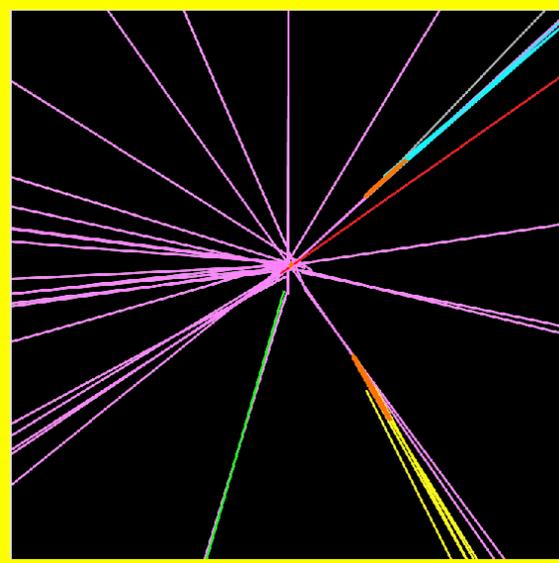
- Section efficace t t sous presse...

- M(t) mieux que TeVatron (~1 GeV): difficile et long...



Top : dileptons

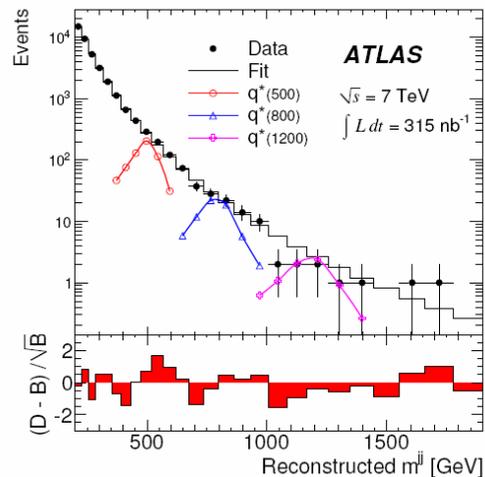
- **Evenement ATLAS**
 $e \mu + 2$ jets taggés b



- **CMS a aussi qqes événements (4 in $.84 \text{ pb}^{-1}$)**
- **Bruit de fond négligeable: top à LHC confirmé.**

7.3.8 Recherches Nouvelle Physique

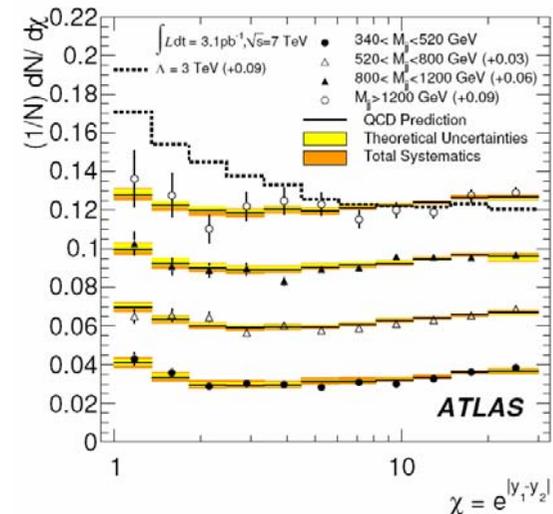
- Recherche de particules chargées stables (CMS) par dE/dx
- Recherche de particules arrêtées dans le calorimètre avec désintégration retardée ($1 \mu\text{s} - 3\text{h}$)
- Recherche de sous-structure des partons à l'aide des jets (Atlas)



Résonance di-jet?

$m(q^*) > 1.26 \text{ TeV}$ (published)

> 1.53 (21 Sept)



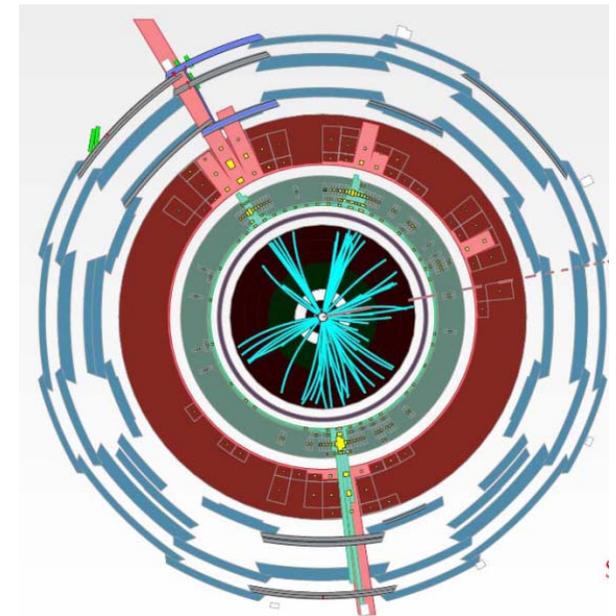
Interaction de contact?
 (distribution angulaire)

$\Lambda_{qqqq} > 3.4 \text{ TeV}$ (D0: 2.8 TeV)

7.4 Prospectives LHC court terme

- **7.4.1 Nouvelle Physique**
 - **W'**: améliorer limite TeVatron (1.0 TeV): 5 pb^{-1}
découverte : $10\text{-}20 \text{ pb}^{-1}$
 - **Z'**: améliorer limite TeVatron (0.7 – 1.0 TeV):
 30 pb^{-1} ; découverte : 100 pb^{-1}
 - **SuSy (gluino, squarks) : améliorer limite ($\sim 300 \text{ GeV}$):**
 $20\text{-}100 \text{ pb}^{-1}$
 - **Top Philic Z', Leptoquarks , Trous Noirs,**
- **Très nombreux signaux simulés et recherchés**
- **Bruit de fond \sim attendus**

ATLAS
simulation trou noir

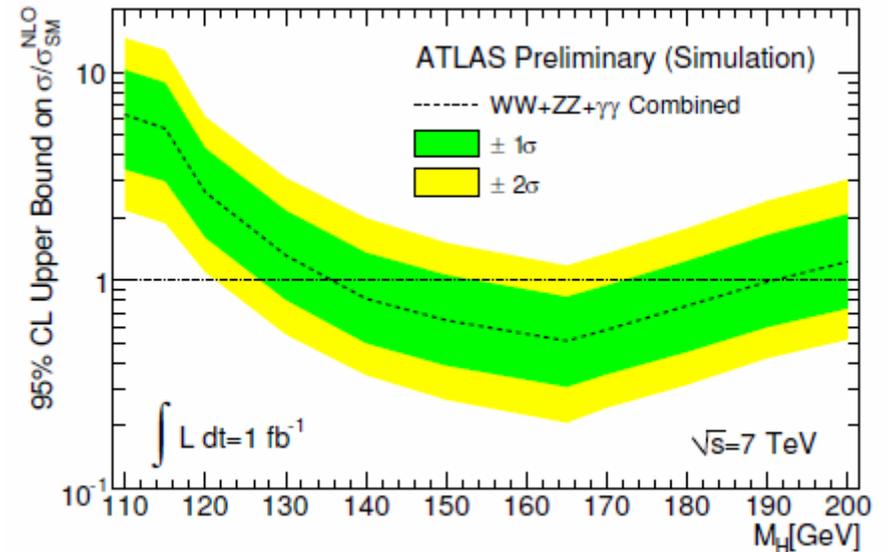


7.4.2 Prospective recherche du Higgs

- **Estimations publiées début 2010:**
combiner WW, ZZ, $\gamma\gamma$

Avec 1 fb^{-1} (fin 2011) par expérience
exclut 135 – 188 GeV (1 exp)

- **Simulations récentes**
 - Incluant tous les modes
 - Analyse plus performante*Nettement plus encourageant.*
- **En discussion: 8 TeV, run 2010 => plusieurs fb^{-1}**
Decision (s) : Chamonix workshop Janvier 2011



8 Futurs collisionneurs

8.1 S-LHC

Upgrade LHC

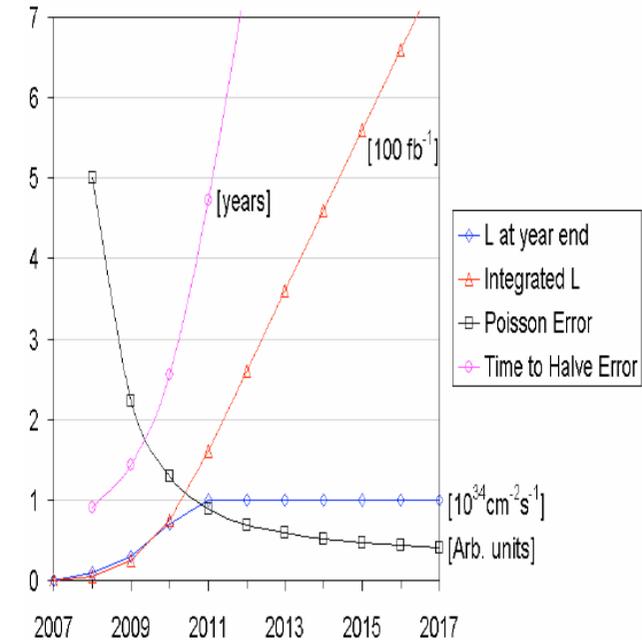
- Augmenter l'énergie? Impossible: champ max des dipôles
- Augmenter la luminosité: possible $\times 10$ ($\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Physique

- Nevt's $\times 10 \Rightarrow$ accès événements plus rares
- Pile-up $\times 10 \Rightarrow$ dégrade les performances
- Total:
 - Higgs standard: accès modes rares ($H \rightarrow Z + \gamma$, $H \rightarrow \mu \mu$)
 - 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 (quads dans les expériences)
- Planning: ~ 2017 (?)



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

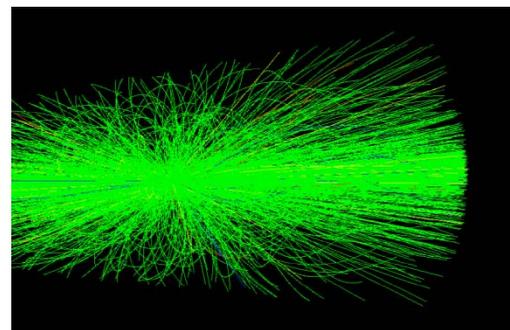
- Atlas: end-caps: changer. Micromegas?
- CMS ~OK (blindage Fer)

– Détecteur interne: occupation, radiations

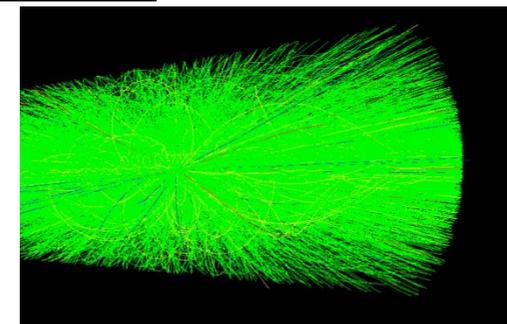
⇒Atlas et CMS: remplacement.

⇒Contraintes: détecteurs, électronique

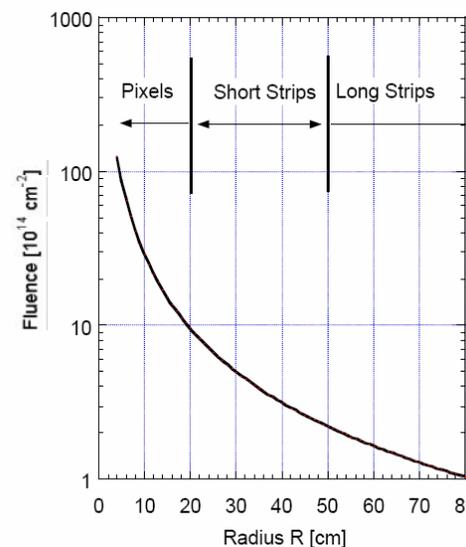
Si 3D? Diamant? Technos $< 0.1 \mu$?



$L = 10^{34}$



$L = 10^{35}$



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

• 8.2.1 Introduction

- Collisions $e^+ - e^-$: physique de précision, exploration exhaustive du domaine *atteignable*
 - Même si (surtout si) LHC découvre Higgs, SuSy, etc... => futur

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

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

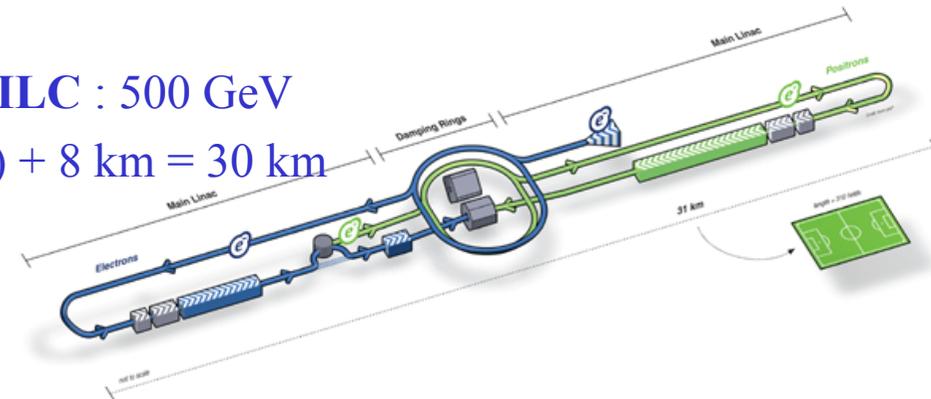
- \Rightarrow 2 accél linéaires tête-bêche. Energie: longueur x « gradient accélérateur ».

- 2 projets:

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

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

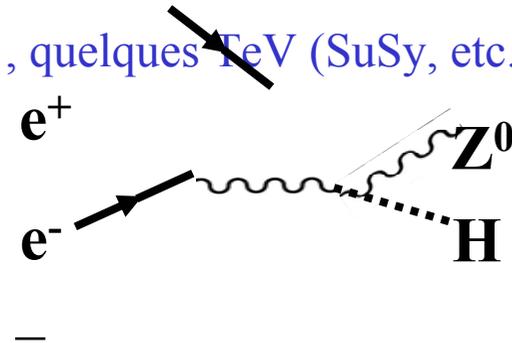
- upgrade à 1 TeV : + 22 km



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

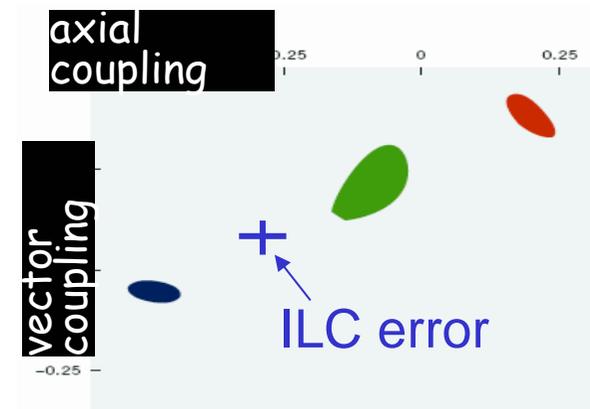
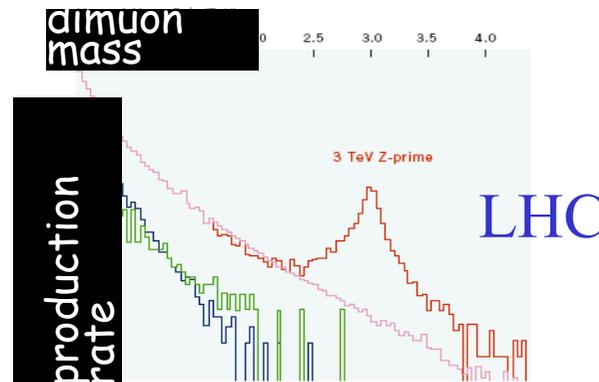
8.2.2 Physique aux futurs collisionneurs $e^+ - e^-$

- Gamme d'énergie explorée par LHC: 1 TeV (Higgs) , quelques ~~TeV~~ (SuSy, etc.)
- Higgs: comme à LEP, produit par :
 - possible si $E > m(H) + m(Z)$
 - Avec 500 GeV, couvre $m(H) < 350$ GeV



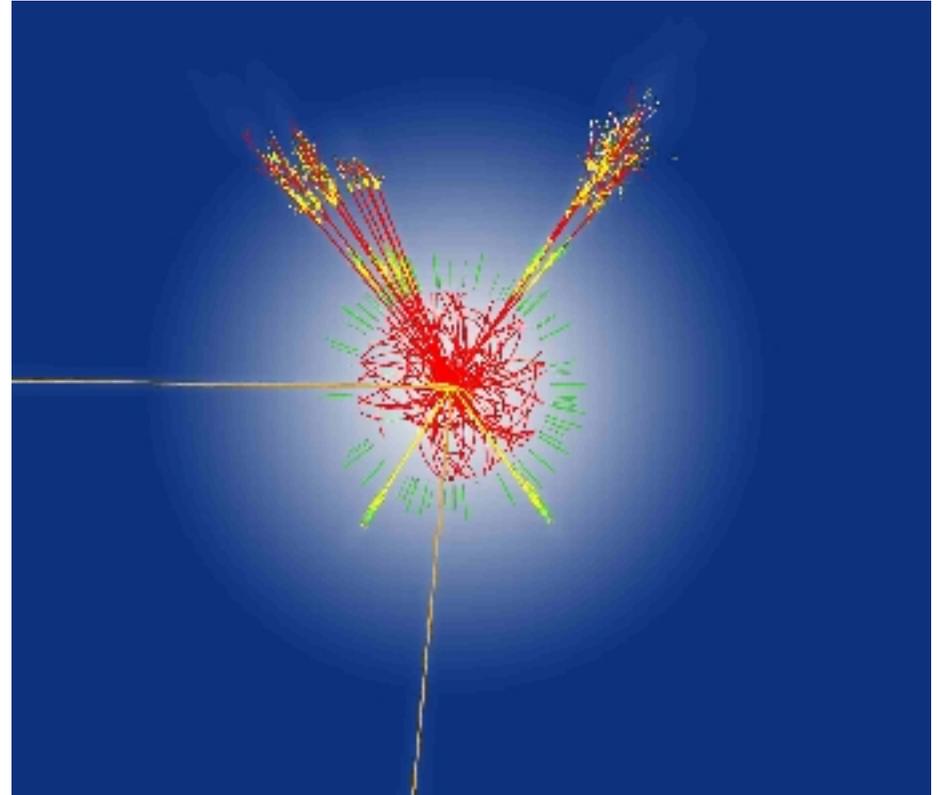
- SuSy (ou autres) : S-particules produites par paire $X X$
- Possible si $m(X) < E/2$ (250 GeV pour $E = 500$ GeV)
- Si énergie insuffisante pour production directe, possibilité effets quantiques dans mesures de précision.

- Ex: Extra dim Z'



- **8.2.3 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.
- **~ 2012 : Orientation ?**
 - premiers résultats du LHC
 - résultats de CTF3
 - *coût et site ILC*

- **Actualité brillante avec le démarrage du LHC!**
- **Suivez l'info au TeVatron...**



- *Merci de votre attention !*