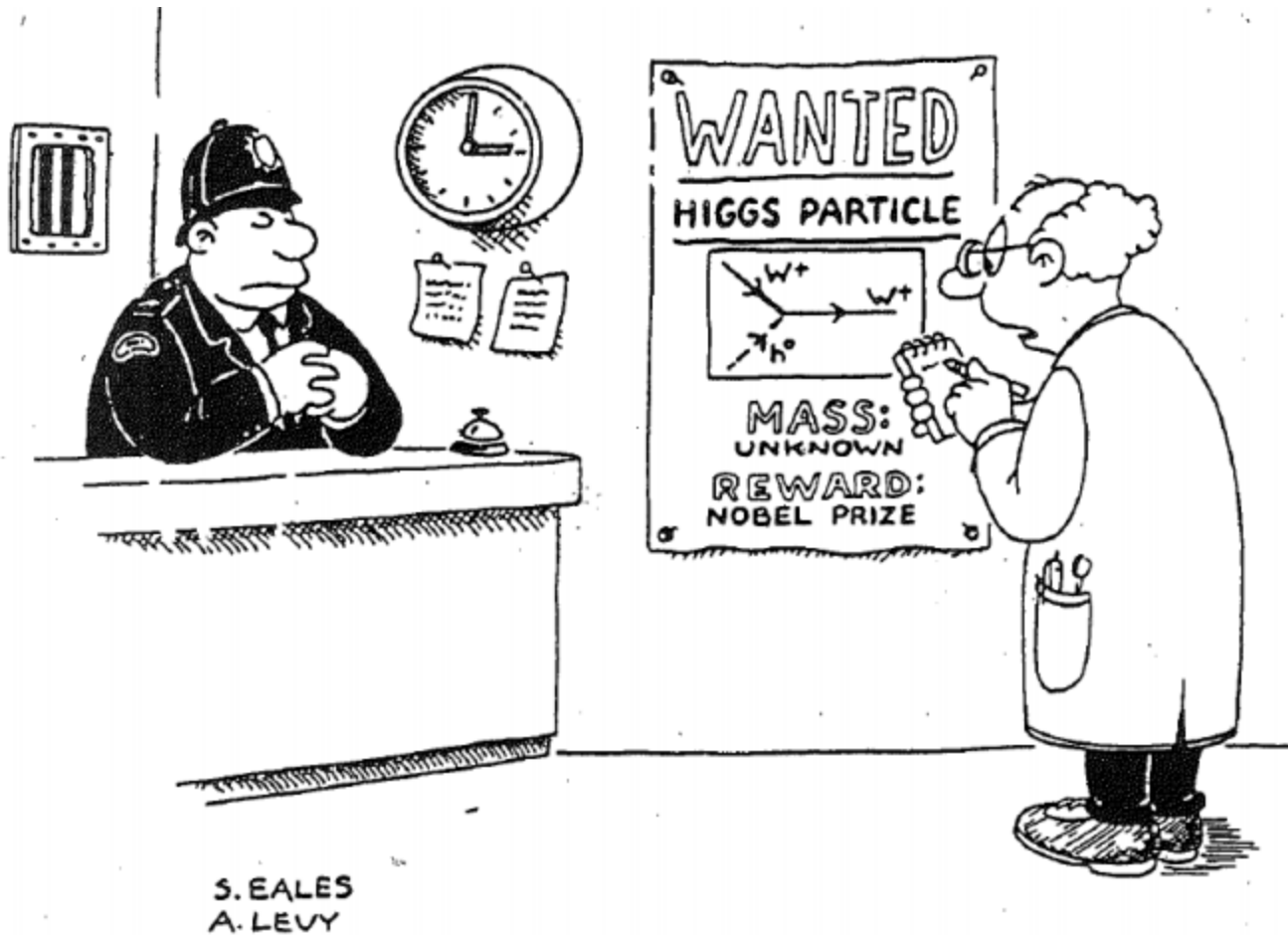


Physique des particules

MASTER 1 de physique fondamentale
Université Joseph Fourier – Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M1Particules/>



Reconstruction et Analyse

Géométrie

3 systèmes de coordonnées :

- cartésiennes : $\mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z)$

- sphériques : $\mathbf{P} = (P, \theta, \varphi)$

- sphériques modifiées : $\mathbf{P} = (P_T, \eta, \varphi)$

z = axe du faisceau (x, y) = plan transverse

θ = angle azimuthal (par rapport à z) $\rightarrow [0, \pi[$

φ = angle polaire (dans le plan transverse) $[0, 2\pi[$

P = impulsion ($P^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2$) P_T = impulsion transverse ($P_T^2 = P_x^2 + P_y^2$)

η = pseudorapidité

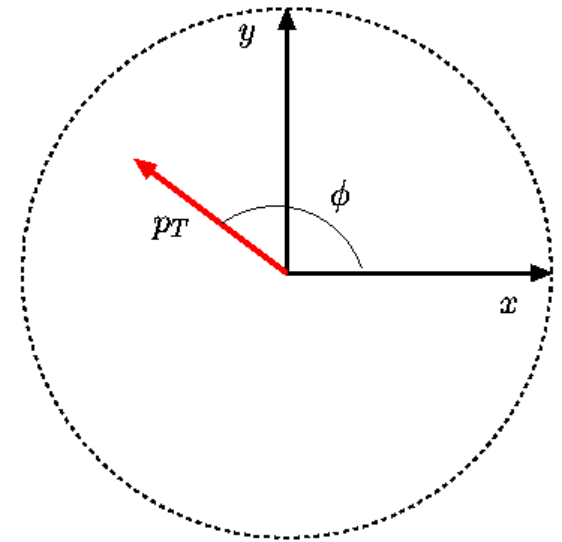
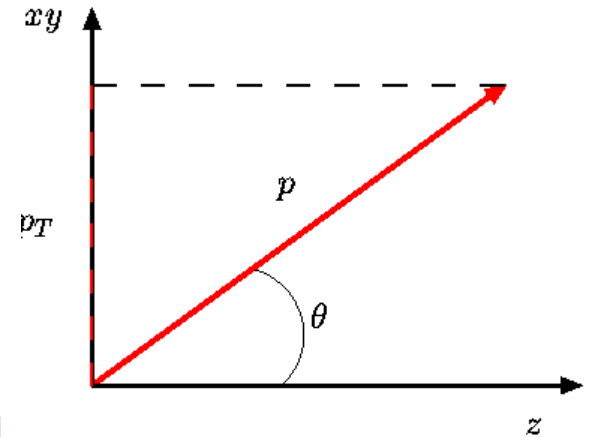
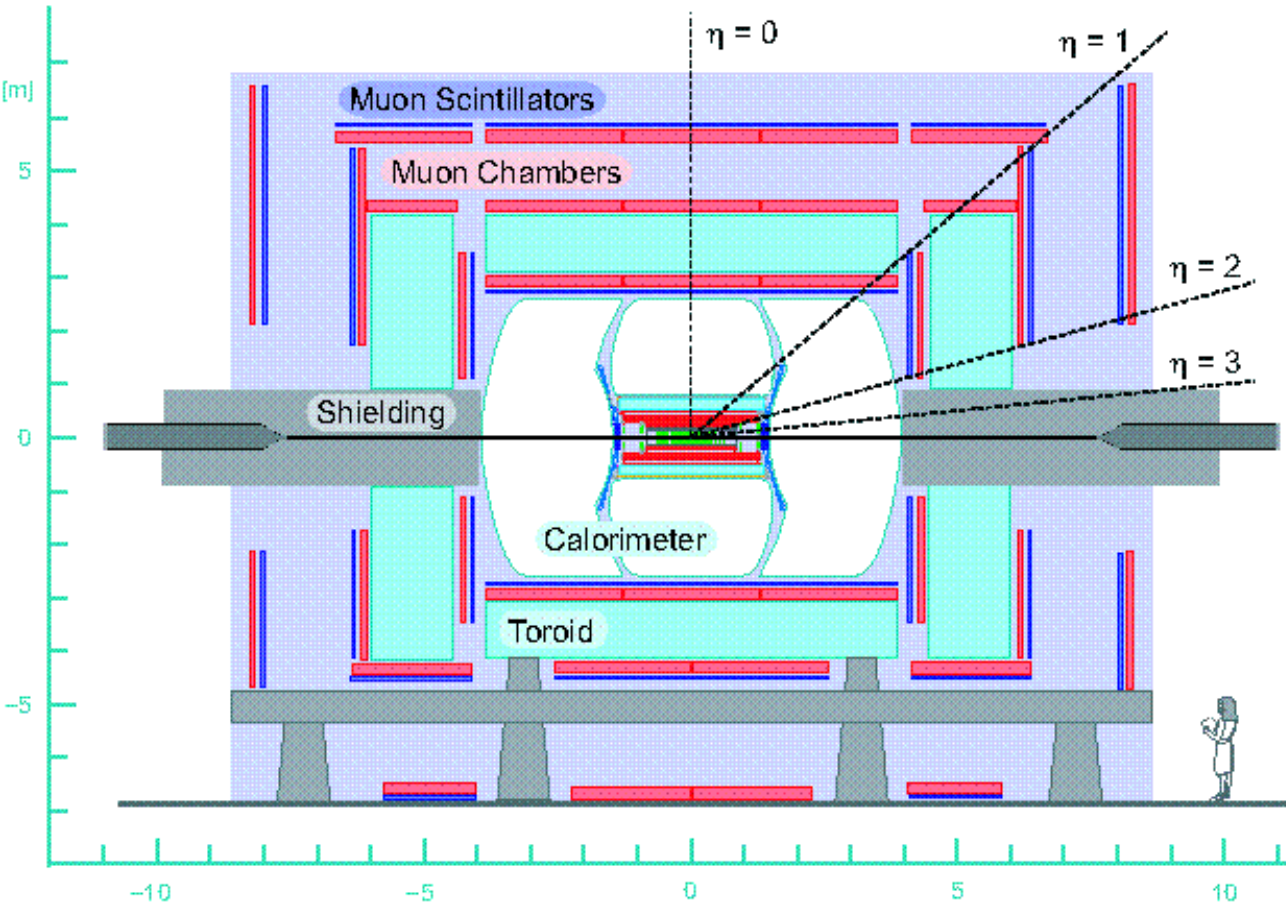
\rightarrow géométrie
$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{P + P_z}{P - P_z}\right)$$

Pour une particule sans-masse ou ultra-relativiste : $P = E$ et $\eta = y$ (rapidité)

$$\eta = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{E + P_z}{E - P_z}\right) = y$$

**Rappel : les écarts de rapidité
sont invariants de Lorentz**

Géométrie



$\eta=0$: plan transverse $P_z=0$

$\eta=\infty$: axe du faisceau $P_x=P_y=0$

Reconstruction

Sortie du détecteur :

- “coups” dans le(s) trajectographe(s)
- dépôts d'énergie dans les cellules des calorimètres

A partir de ces information on veut reconstruire:

- les traces (trajectoire) et l'impulsion des particules chargées
- les électrons et les photons
- les muons
- les jets hadroniques
- l'énergie manquante

Reconstruire = Déterminer la quadri-impulsion des particules.

4 ou 3 paramètres pour objets de grande énergie/impulsion ($m \approx 0$)

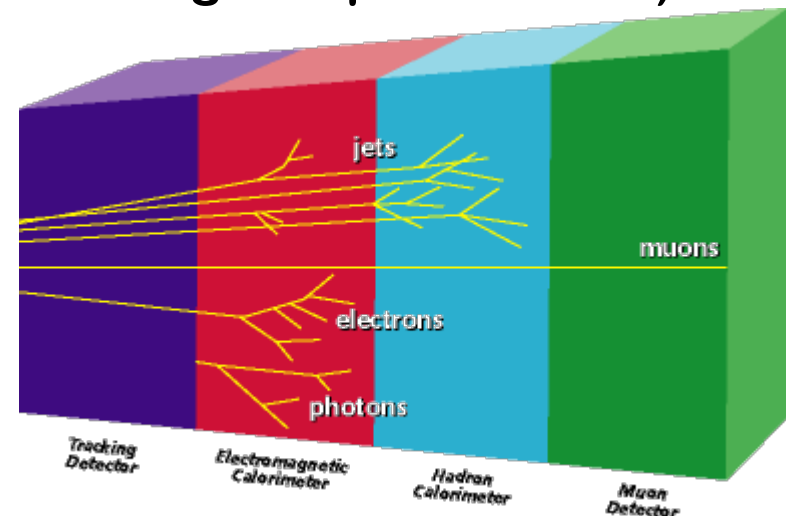
Détecteur :

Trajectographe : particules chargées

Calorimètre EM : électrons, photons, jets

Calorimètre HAD : jets

Système à muons : muons



Reconstruction

Algorithmes de reconstruction :

- Regrouper les coups / cellules provenant d'un même objet.
- Déterminer les caractéristiques de l'objet reconstruit

Caractéristiques des algorithmes:

- Nombreux événements, nombreux canaux -> algorithmes rapides.
- Efficacité de l'algorithme : **Combien d'objets ne sont pas identifiés ?**
- Mauvaise identification : **Combien d'objets sont reconstruit à tort ?**

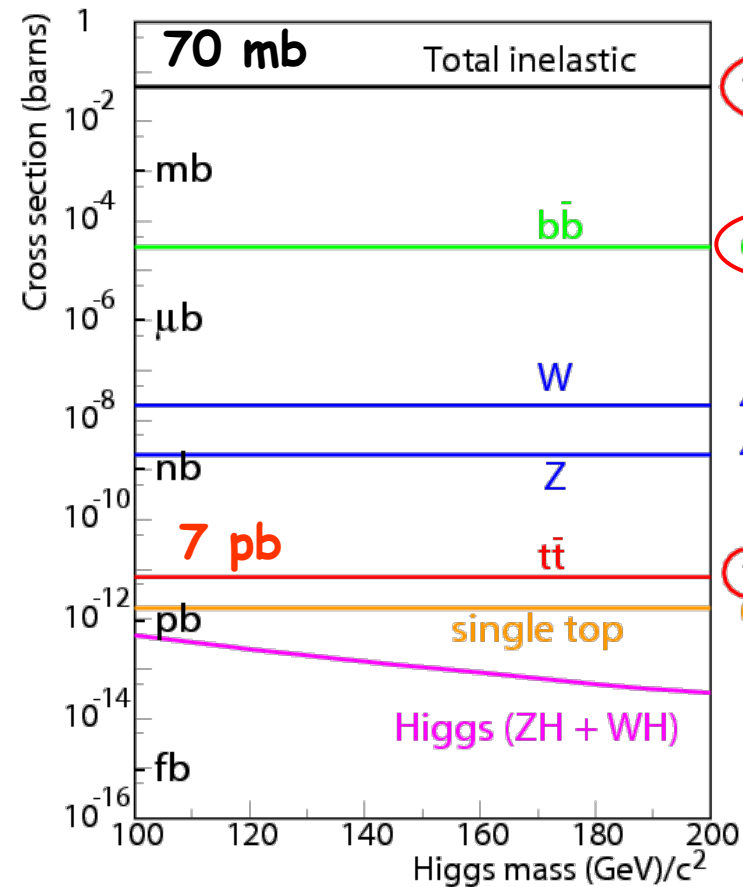
Ces 2 critères sont souvent opposés :

- **identification de très bonne qualité mais de faible efficacité.**
- **identification de très bonne efficacité mais de mauvaise pureté.**

Calibration des algorithmes:

- Correction des valeurs mesurées -> valeur vraie
- Précision sur la mesure d'énergie/impulsion

Déclenchement



Au Tevatron, pour $L=10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$\sim 7 \cdot 10^6$ événements / seconde

$20 \cdot 10^6$ $b\bar{b}$ / heure

3 $t\bar{t}$ / heure

Majorité des événements

-Production de jets

Evénements intéressants

-Quarks lourds (b, top)

-Bosons EW : W,H

-Boson de Higgs

-Physique au-delà du Modèle standard

Déclenchement

Impossible d'enregistrer en continu -> **déclenchement de l'aquisition**

- 1) savoir qu'il y a quelque chose à enregistrer.
- 2) décider si ce qui est enregistrable est interessant.

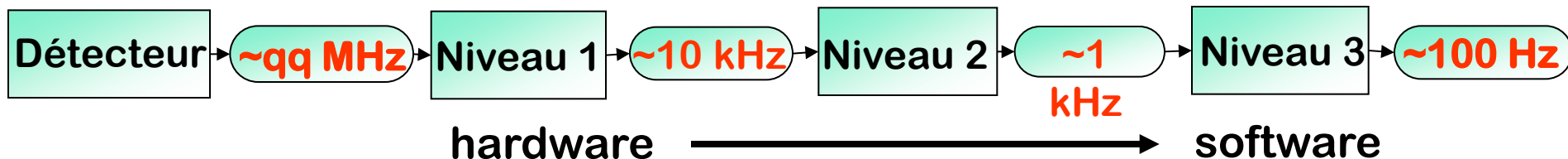
Pour une expérience type LHC/TeVatron (ATLAS, CMS, D0, CDF)

- 1) savoir quand une collision se produit
-> **information de la machine, temps de croisement des faisceaux**

- 2) faire le tri : ne garder que les événements pertinents
-> **jets de haute énergie**
-> **leptons de haute énergie (électrons, muons -> W/Z)**

Selection "en_ligne" : rapide mais performante

- **premier niveau : purement électronique, assez grossier**
- **niveaux supérieurs : algorithmes de reconstruction basiques**



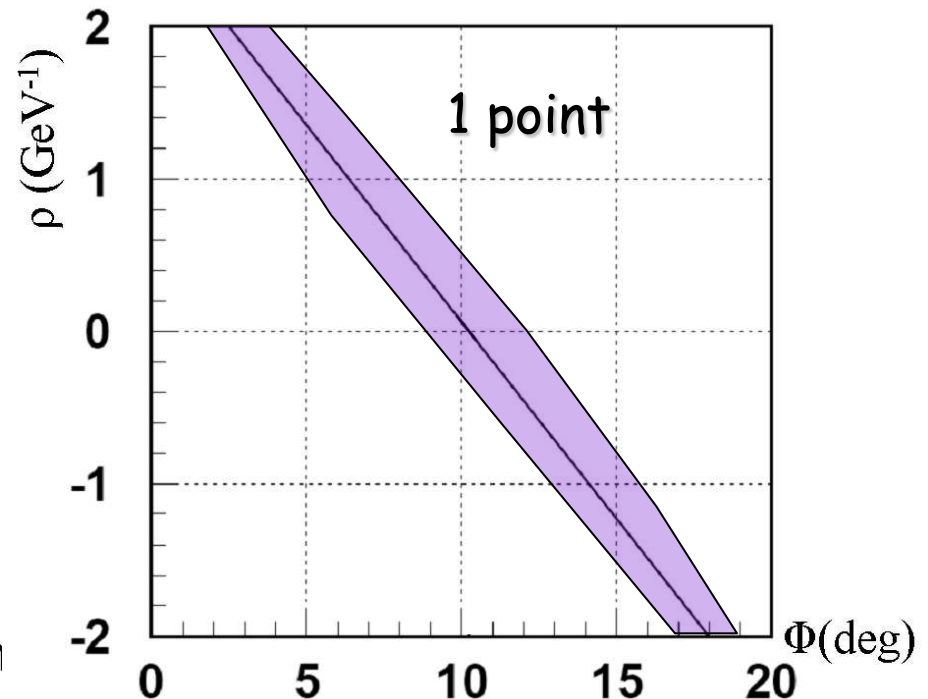
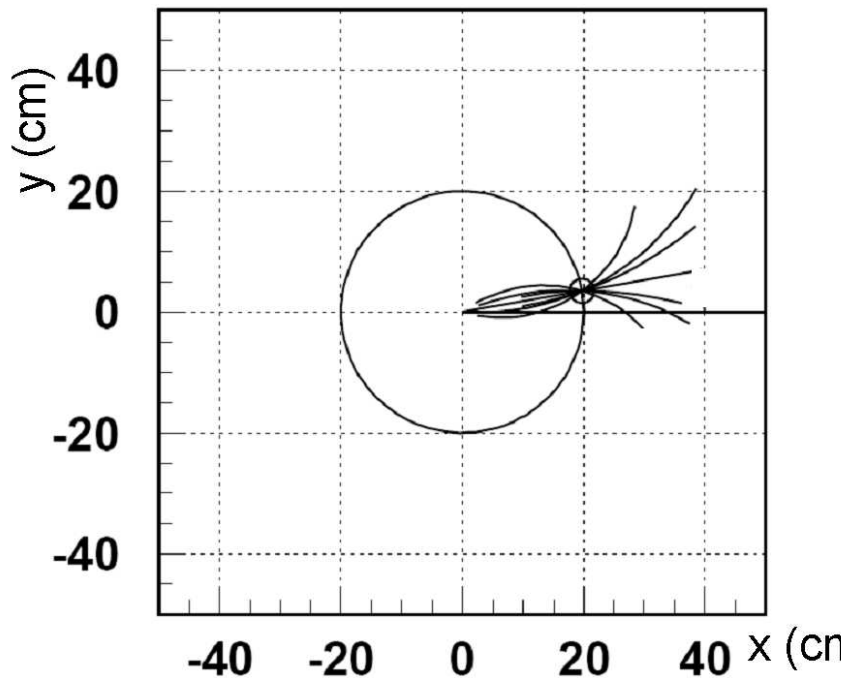
Trajectographie

Trajectographe : Points de la trajectoire des particules chargées.

Première étape : identifier des “candidats trace”

Transformation de Hough :

1 point (x,y) \rightarrow infinité de couples : (courbure : ρ , azimuth : φ) : courbe



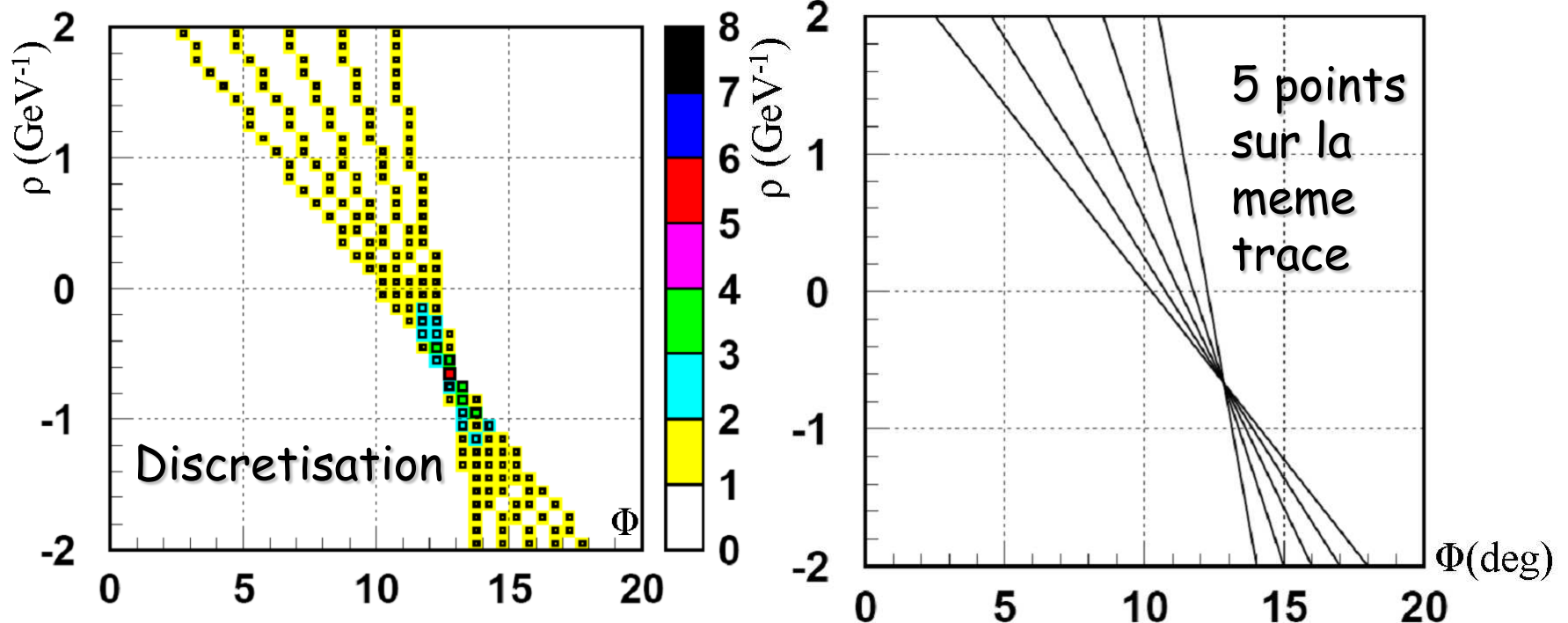
Trajectographie

Trajectographe : Points de la trajectoire des particules chargées.

Première étape : identifier des “candidats trace”

Transformation de Hough :

5 point (x,y) -> 5 courbes dans l'espace de Hough : se coupent si ils appartiennent à la même trace



Trajectographie et vertexing

Amélioration des traces reconstruites : Filtrage de Kalman

- méthode de χ^2 .
- ajout de points tant que le χ^2 diminue.

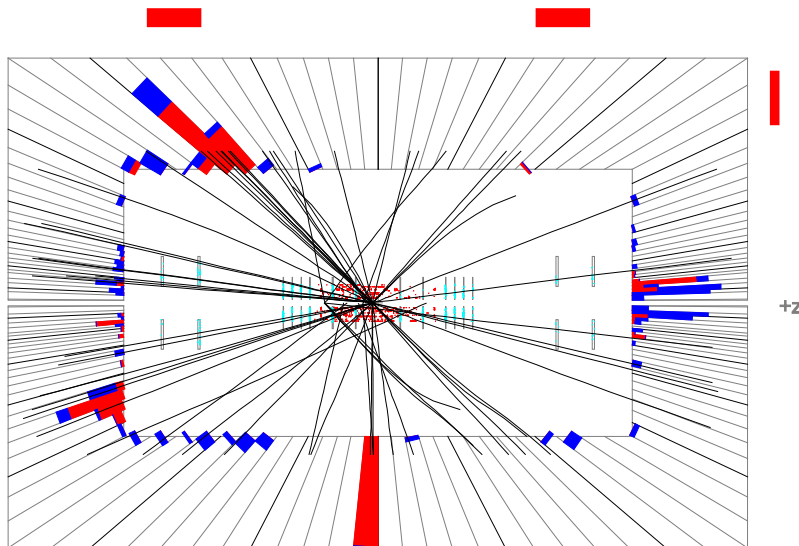
Reconstruction des vertex : "Point" de convergence des traces


- Memes type d'algorithmes appliqués aux traces

Vertex primaire(s) de l'interaction + Vertex secondaires

Run 174426 Evt 7077298 Tue Mar 18 10:24:29 2003

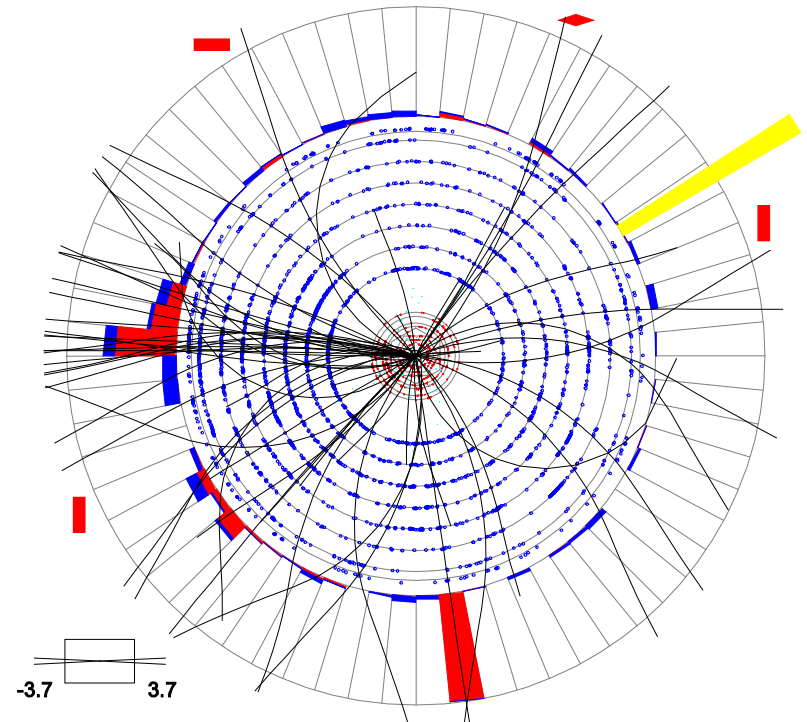
E scale: 26 GeV



180  0

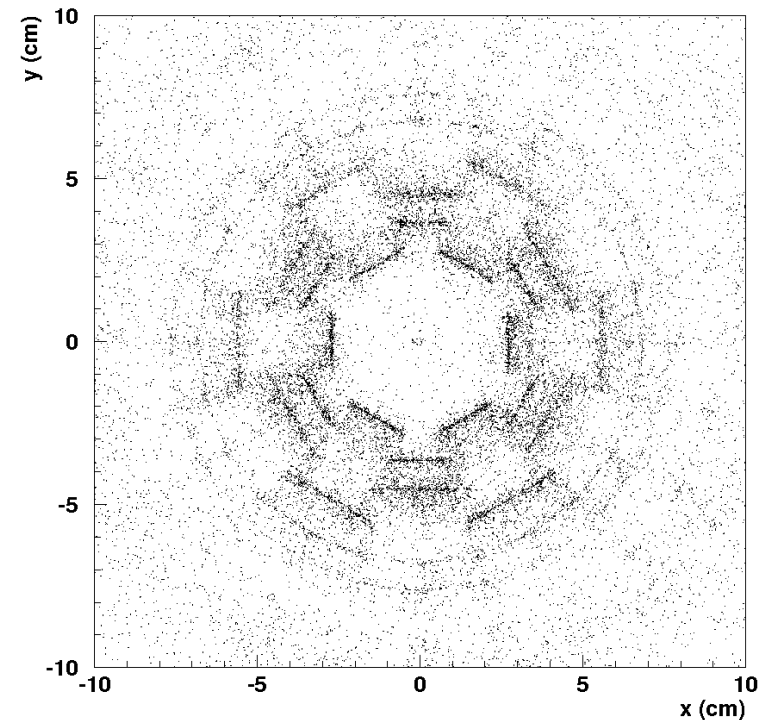
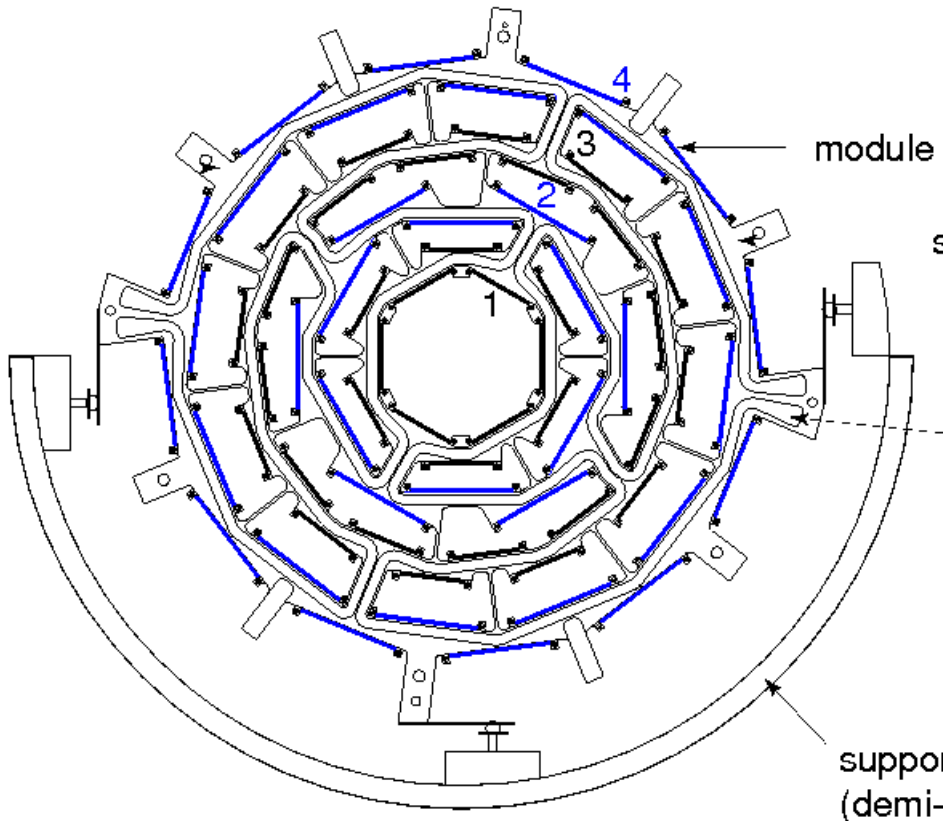
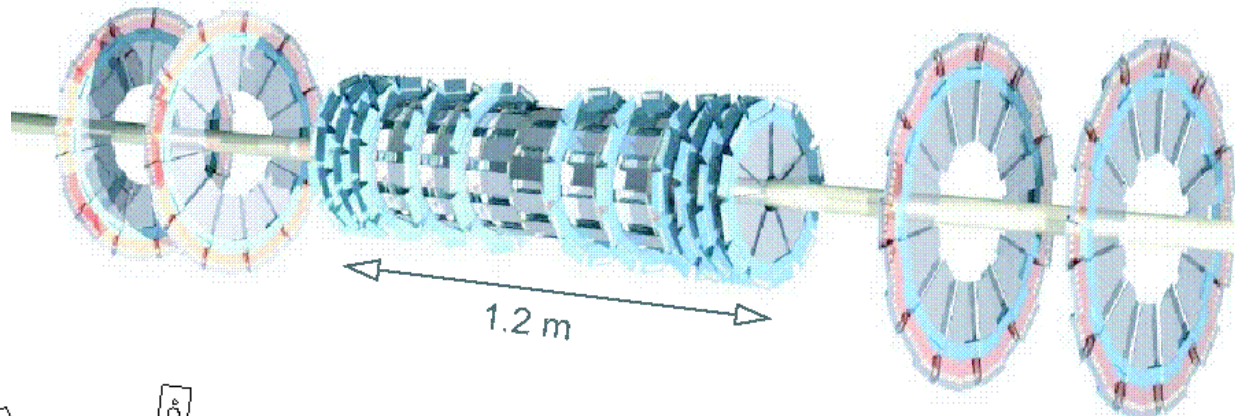
Run 174426 Evt 7077298 Tue Mar 18 10:24:29 2003

ET scale: 26 GeV



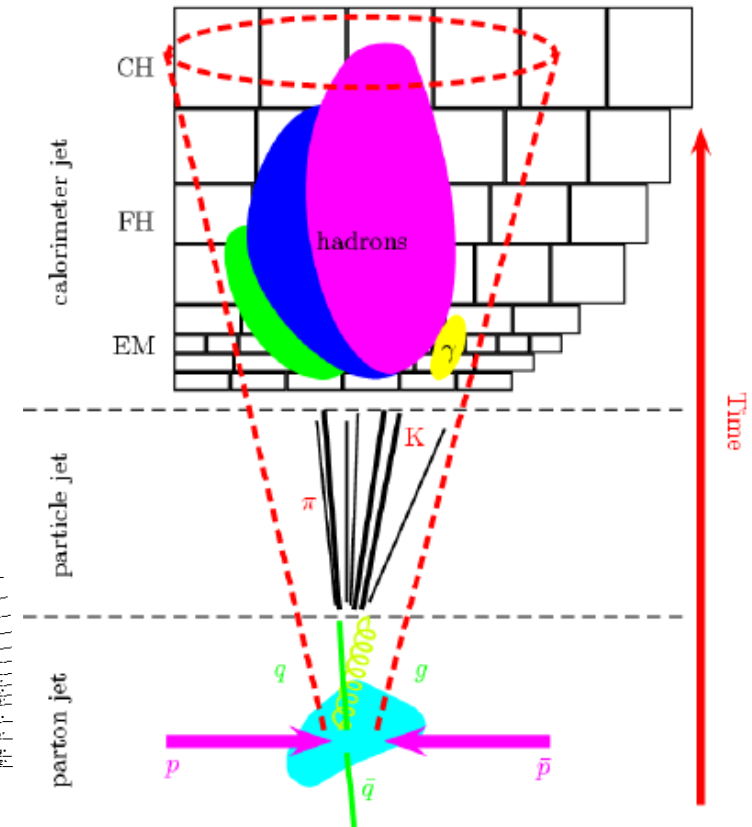
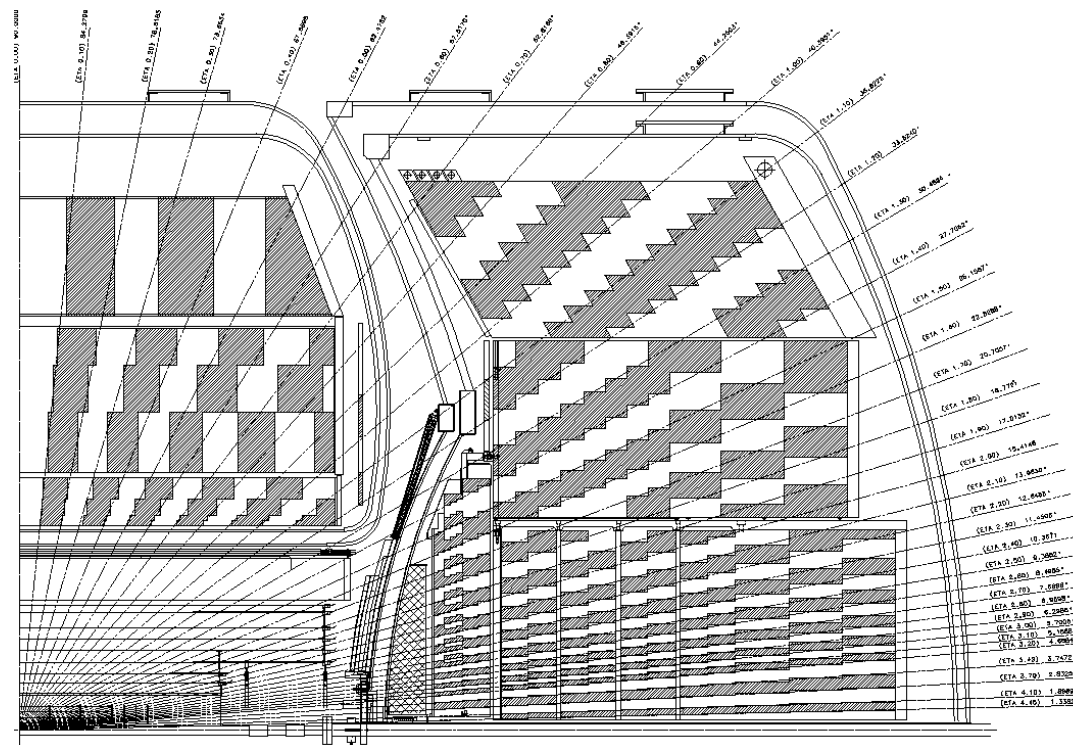
Exemples de vertex secondaires

Photoconversion (gamma \rightarrow e^+e^-) dans le trajectographe de D0



Calorimétrie : Jets, Electrons, Photons

Calorimètre (Electromagnétique et hadronique) organisé en tours pseudoprojectives (η, φ constant)



On forme les jets et les électrons en regroupant des tours voisines

- point de départ : tours contenant une grande énergie (qq GeV)
- on regarde les tours voisines \rightarrow distance dans l'espace (η, φ)

$$\Delta R^2 = \Delta\eta^2 + \Delta\varphi^2$$

$\Delta R < r_0$: cercle dans espace (η, φ), « cône » dans espace physique

Algorithmes de cônes de rayon r_0

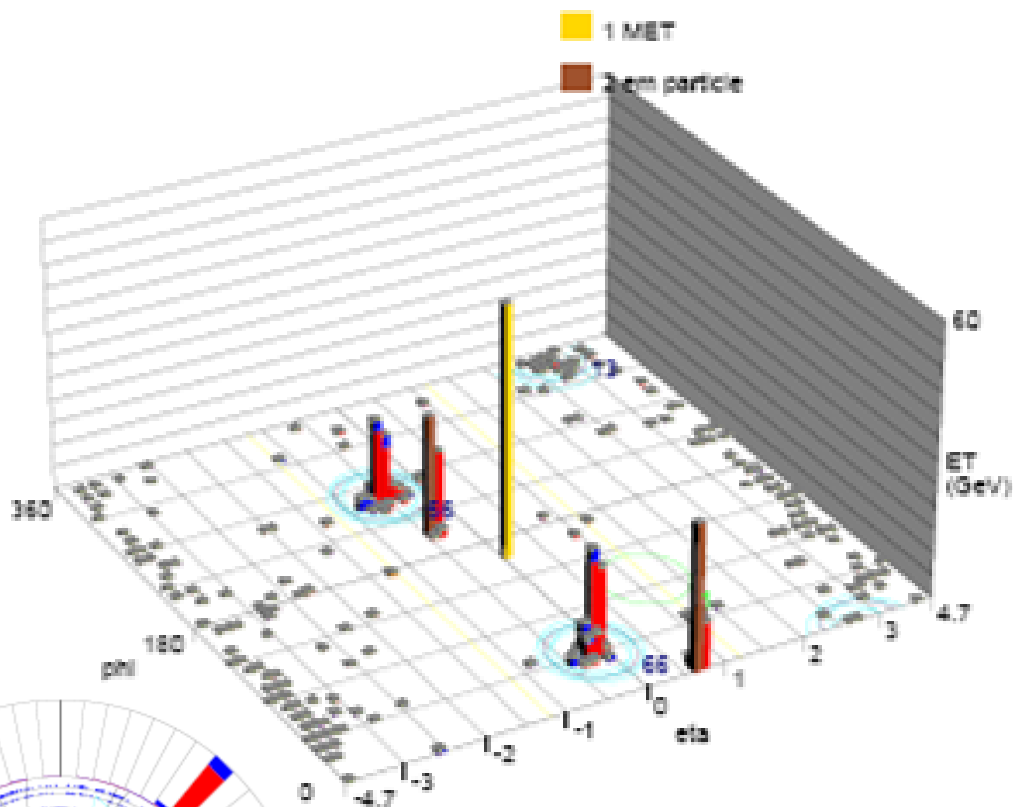
Calorimétrie : Jets, Electrons, Photons

Séparation électrons/jets

- forme de la gerbe
- profondeur du calorimètre (EM/Had)

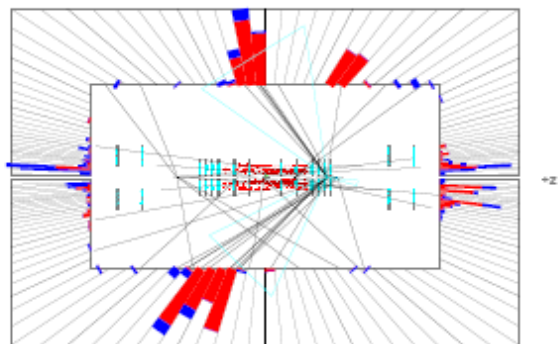
Séparation électron/photon

- chercher un trace pointant vers l'objet reconstruit

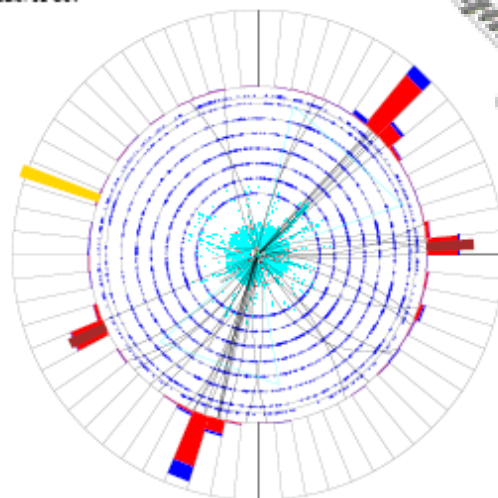


Run 211648 Evt 25509265

E scale: 30 GeV



(a) Vue en coupe RZ.



(b) Vue en projection XY.

En bleu : énergie dans le calo hadronique

En rouge : énergie dans le calo EM

Jets de quarks B

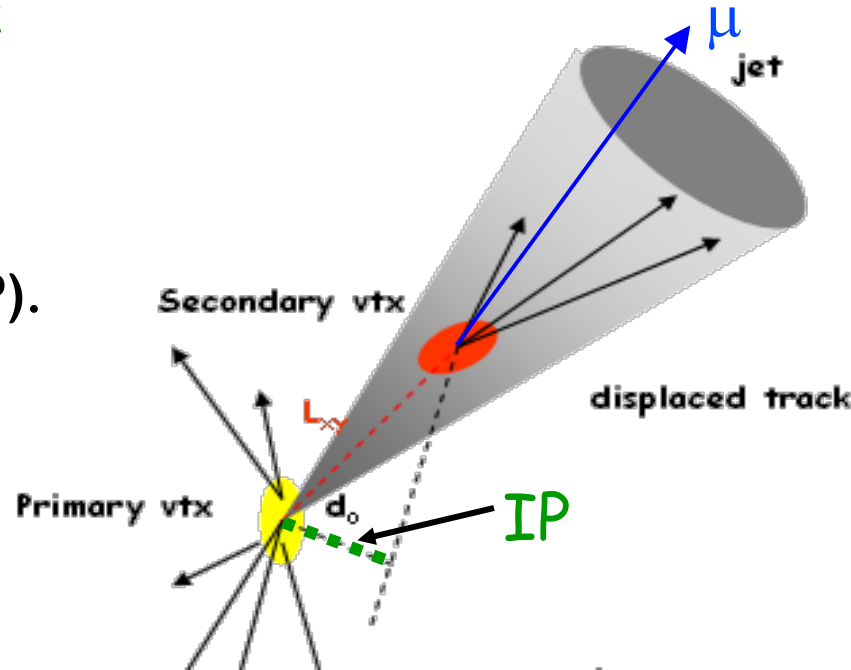
Caractéristiques des hadrons beaux

Désintégration par interaction faible,
grande durée de vie ($\sim 10^{-12}$ s) :

- traces à grand paramètre d'impact (IP).
- vertex secondaire déplacé

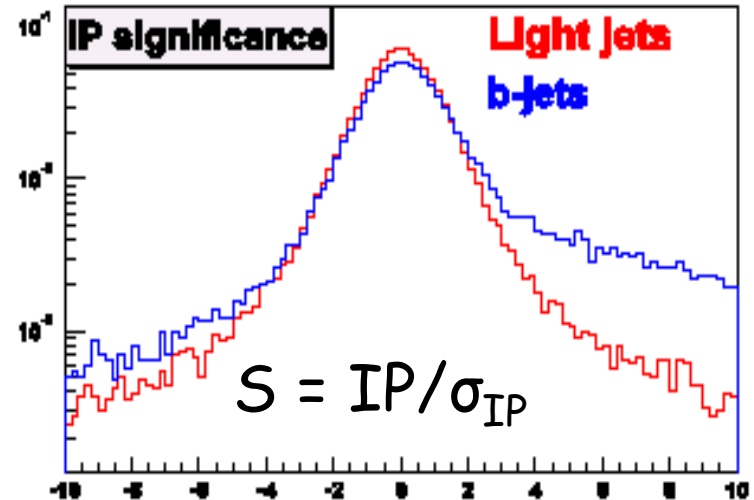
Taux de désintégration semi-leptonique
important ($\sim 20\%$) :

- Muons ou électrons dans les jets.



Méthodes d'indentification

- associations traces/jet calorimétrique
- recherche de trace à grand IP ou reconstruction d'un vertex secondaire
- association muon/jet



Identification difficile : eff = 50% , rej=0.5%

Reconstruction des muons

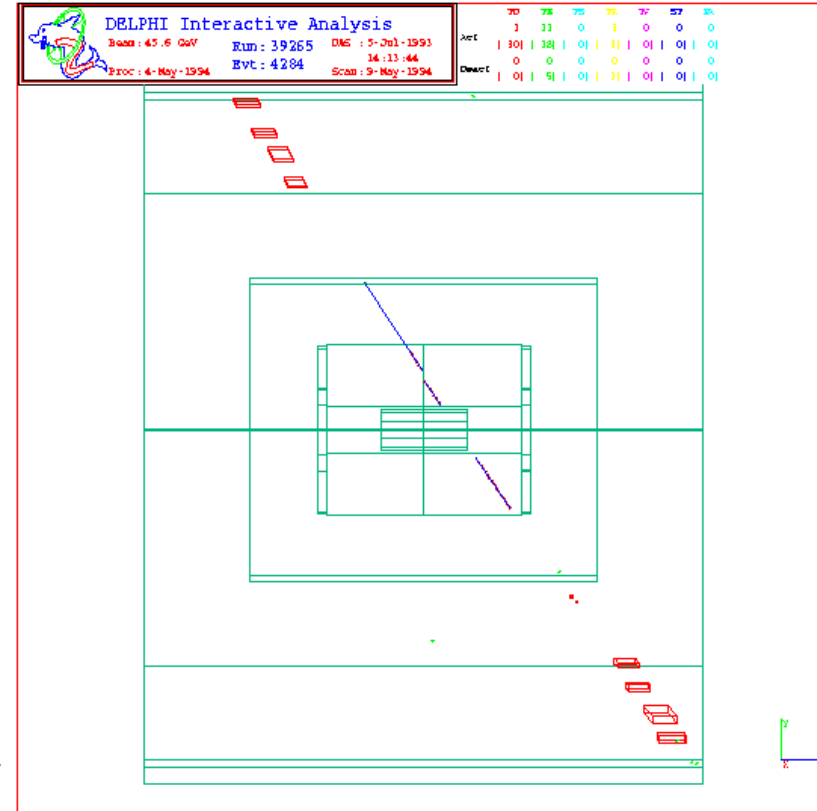
Spectromètre externe + champ B

- reconstruction de traces
- moins “bruyant” que la trajectographe central (seuls les muons sortent du calorimètre)
- mesure d’impulsion peu précise (~20%)
- mesure indépendante du reste du détecteur

Association avec le trajectographe central

- propagation de la trajectoire du muon vers le vertex d’interaction
- association muon/trace (coupure sur le ΔR)
- améliore la précision sur l’impulsion. (qq %)

Muon cosmique dans DELPHI



Energie transverse manquante

Conservation de l'impulsion

$$\sum \mathbf{p}_x^{\text{finale}} = \sum \mathbf{p}_x^{\text{initiale}} = 0 \quad \sum \mathbf{p}_y^{\text{finale}} = \sum \mathbf{p}_y^{\text{initiale}} = 0$$

$$\sum \mathbf{p}_z^{\text{finale}} = \sum \mathbf{p}_z^{\text{initiale}} = \text{inconnu, à cause des densités de partons}$$

Si on mesure l'impulsion transverse de toutes les particules détectées

$$0 = \sum \mathbf{p}_x^{\text{finale}} = \sum \mathbf{p}_x^{\text{détectée}} + \sum \mathbf{p}_x^{\text{non-détectée}} \quad \sum \mathbf{p}_x^{\text{non-détectée}} = \cancel{E}_{Tx}$$

Même chose selon y, finalement $\cancel{E}_T : \sqrt{\cancel{E}_{Tx}^2 + \cancel{E}_{Ty}^2}$

Interpretation du déséquilibre en impulsion:

neutrinos. Si un seul neutrino, $\cancel{E}_T = p_T$

bruit instrumental, mauvaise calibration : sensible à tous les effets de résolution associé à la reconstruction de tous les objets (jets, electrons, muons...)

Analyse de physique

rechercher une nouvelle particule

mesurer une section efficace

mesurer des propriétés d'une particule connue

1ere étape :

- identifier les processus pertinents (diagrammes de Feynman)
- en déduire le ou les états finaux à reconstruire (ex: 2 électrons, 1 muon, 3 jet et de l'énergie manquante...)
- identifier les autres processus aboutissant au même état final (bruit de fond)

2nde étape :

- sélectionner parmi tout les événements enregistrés ceux pertinents pour l'analyse.
- estimer l'efficacité de sélection du signal
- estimer la quantité de fond présents dans les données sélectionnées
 - > Simulation des processus et du détecteurs.
 - > Calculs théoriques des section efficaces.

Choix de l'état final

Dans un collisionneur hadronique (LHC, TeVatron) :

- production massive de jets (interaction forte)
- électrons, muons, photons sont plus rares

Analyses contenant un ou plusieurs lepton/photons sont plus « propres » : moins de bruit de fond

Facteur limitant :

- leptons viennent généralement d'un W ou d'un Z
 - > faible rapport d'embranchement
 - $BR(W \rightarrow l\nu_l) = 10\%$ par lepton
 - $BR(Z \rightarrow ll) = 3\%$ par lepton
- pénalisant si le processus est rare.

Analyse statistique

Après la reconstruction : listes de 4-vecteur pour différents « objets » (électrons, muons, photons, jets, traces,...)

Pour remonter au **processus initial (diagramme de Feynman)**

- Déconvoluer les effets de détection : inefficacités de reconstruction, de détection, résolution des détecteurs
- Déconvoluer les effets physique : formation des jets, interactions parasites

IMPOSSIBLE A REALISER CONCRETEMENT

Approche statistique

- Simuler complètement le signal et des bruits de fond : données simulées
- Utiliser ces simulations pour déterminer les efficacités de reconstruction et de sélection
- Comparer le nombre d'événements entre données et simulation

Simulation : nombre moyen d'événements attendu

nombre observé -> Loi de Poisson

On n'identifie pas chaque événement individuellement mais les proportions des différents processus : c'est un analyse statistique

Production du boson de Higgs (au LHC)

Seule particule non-observé du MS :

Seul boson scalaire du MS

Lié à la brisure EW :

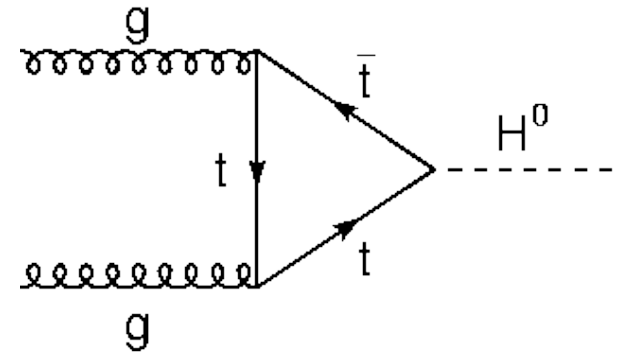
Clé de voute du Modèle Standard

Masse inconnue :

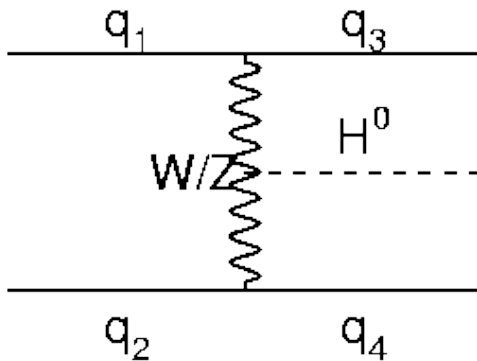
$114 < m_{\text{Higgs}} @ 95\% \text{ CL (LEP)}$

$m_{\text{Higgs}} < 1 \text{ TeV}$: contraintes théoriques

(a)



(b)



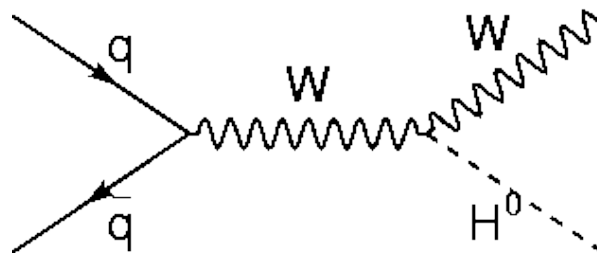
Couplage aux fermions:

$$L = -\lambda_f \psi (v+H) \psi$$

$$m_f = \lambda_f v$$

$$\text{BR(fermions)} \sim m^2$$

(c)



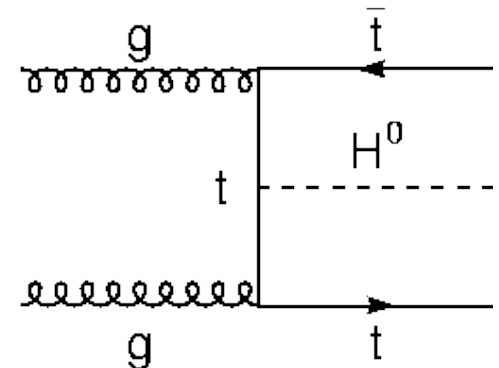
Couplage aux bosons:

$$L = -\frac{1}{2} (gv)^2 A_\mu (v+H) A^\mu$$

$$m_b = gv/\sqrt{2}$$

$$\text{BR(bosons)} \sim m^4$$

(d)



Choix des canaux d'analyse

Mode de production dominant: fusion de gluons $gg \rightarrow H$

- on a besoin de leptons/photons dans l'état final

$H \rightarrow WW, H \rightarrow ZZ$: avec au moins un $W/Z \rightarrow$ leptons

$H \rightarrow \tau\tau$ (identification de tau compliquée)

$H \rightarrow \gamma\gamma$ (propre mais faible rapport d'embranchement)

Autres modes : $WH, ZH, ttH(->WbWbH)$ (10 à 100 fois moins)

- désintégration leptonique de Z/W (qq %).

- $H \rightarrow bb$ besoin d'identifier les jets b .

Exemple : $H \rightarrow \gamma\gamma$

Selection :

2 photons bien identifiés, de grande impulsion ($p_T > 25$ GeV)

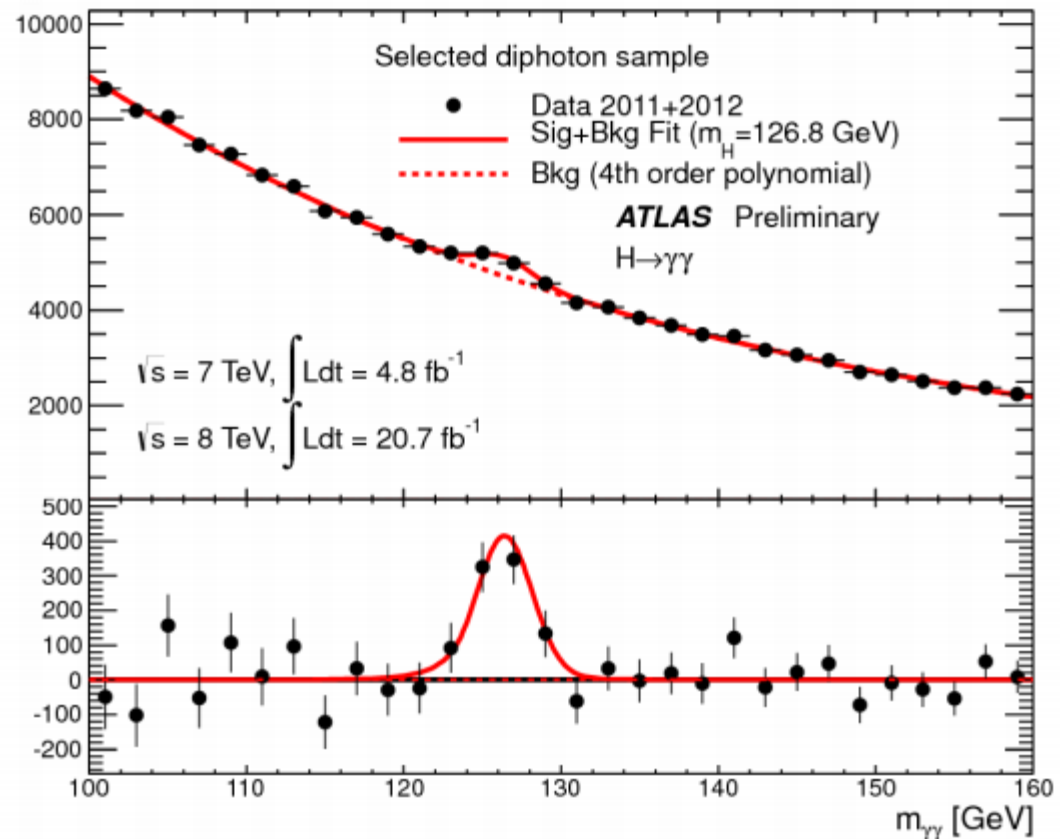
Principaux fonds :

- Physiques : di-photons $qq \rightarrow \gamma\gamma$
- Instrumentaux : deux mauvaises identifications

di-electrons ($Z \rightarrow ee$)

di-jets (qq, gg)

On utilise la masse invariante des 2 photons pour séparer le signal du fond



Exemple : $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Selection :

4 muons ou 4 electrons ou 2 muons et 2 electrons
de grand p_T ($> 25 \text{ GeV}$)

Masse invariante de 2 leptons
identiques compatible avec m_Z

Principaux fonds :

- Physiques : ZZ, ZZ^*
 $qq^- \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$
- Instrumentaux : $Z+\text{jets}$

On utilise la masse invariante
des 4 leptons pour séparer le
signal du fond

