

# Détection de particules dans l'expérience ATLAS

Dirk Hoffmann

CPPM Marseille

Lycée Thiers, Marseille  
20 mars 2012



hands on particle physics





## Collisionneur de grande énergie

- Particules accélérables : suffisamment stables  
électron/positron, proton/antiproton, ions, muons ( $2\mu s$ )
- Sonder des longueurs plus courtes  $\Leftrightarrow$  “voir” des objets plus petits
- Produire des particules plus lourdes ( $E = mc^2$ )



## Collisionneur de grande énergie

- Particules accélérables : suffisamment stables  
électron/positron, proton/antiproton, ions, muons ( $2\mu s$ )
- Sonder des longueurs plus courtes  $\Leftrightarrow$  “voir” des objets plus petits
- Produire des particules plus lourdes ( $E = mc^2$ )

## Collisions

- Interactions entre particules accélérées (ou leurs constituants)
- Se produisent au centre d'un détecteur
- Etat final : particules suffisamment stables pour atteindre le détecteur



## Collisionneur de grande énergie

- Particules accélérables : suffisamment stables  
électron/positron, proton/antiproton, ions, muons ( $2\mu s$ )
- Sonder des longueurs plus courtes  $\Leftrightarrow$  “voir” des objets plus petits
- Produire des particules plus lourdes ( $E = mc^2$ )

## Collisions

- Interactions entre particules accélérées (ou leurs constituants)
- Se produisent au centre d'un détecteur
- Etat final : particules suffisamment stables pour atteindre le détecteur

## Interprétation

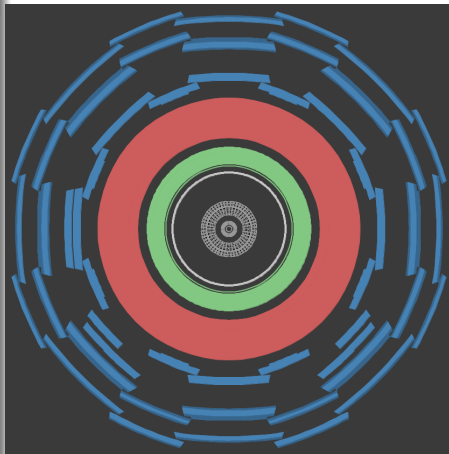
- Combiner les informations du détecteur pour former des objets
- Identifier les objets, mesurer leurs propriétés
- A partir de ces objets, inférer ce qu'il s'est passé dans la collision
- Comparer avec les prédictions théoriques



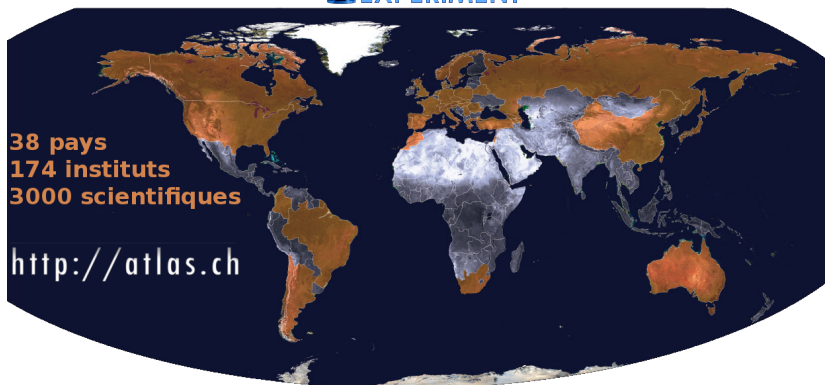


## Un oignon

- **Détecteur interne (trajectographe)** Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- **Calorimètre électromagnétique** Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- **Calorimètre hadronique** Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme les protons, neutrons, pions, etc.
- **Détecteur à muons** Mesure la charge et l'impulsion des muons



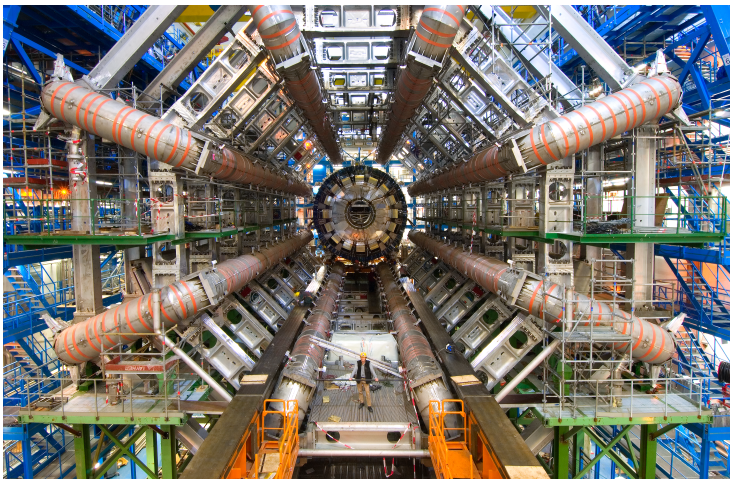
coupe transversale d'ATLAS



## Quelques chiffres

► <http://atlas.ch>

- 25 m de diamètre, 46 m de long
- 7000 tonnes ( $\simeq$  tour Eiffel)
- 3000 km de câbles
- 5 millions de lignes de code
- Données par an  $\simeq$  600 ans de musique ( $\sim$  10 km de CDs)

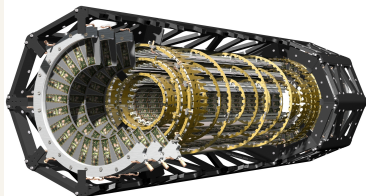


► Episode I : a New Hope

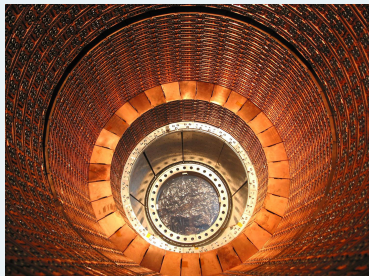
## Détecteur à pixels



► Détection dans le silicium



## Calorimètre électromagnétique



► Détection dans l'argon liquide

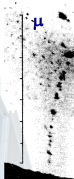
# Le modèle standard redécouvert : LHC 2010 !



Découverte historique



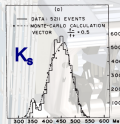
1897



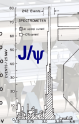
1937



1947



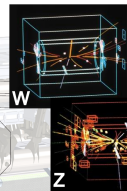
1964



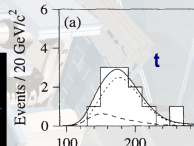
1974



1976



1983

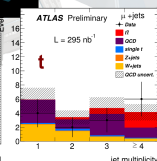
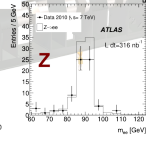
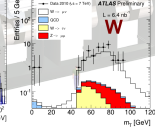
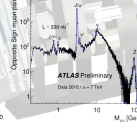
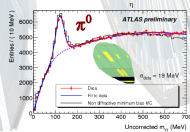
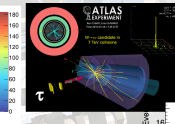
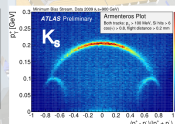
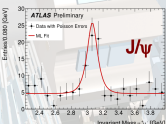
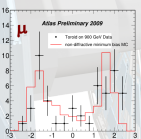
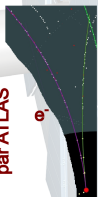


1995

déc 2009

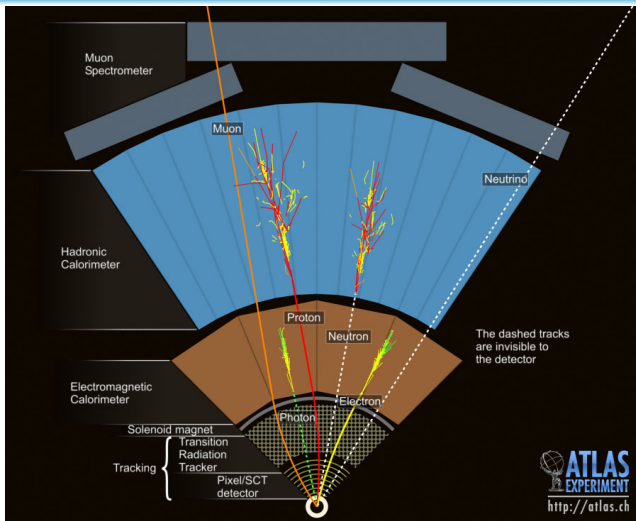
août 2010

Redécouverte par ATLAS





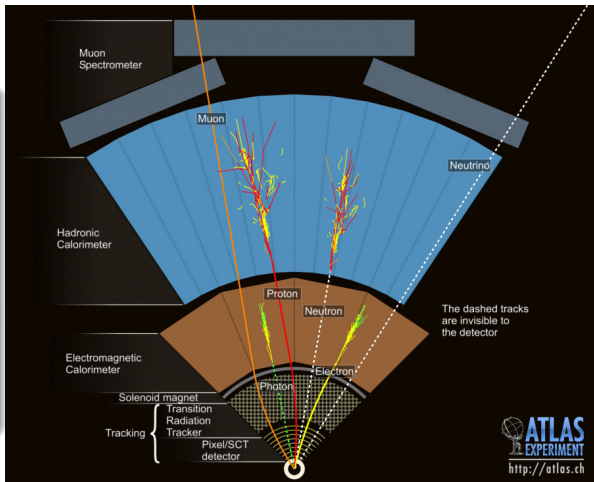
# Interaction des particules avec le détecteur



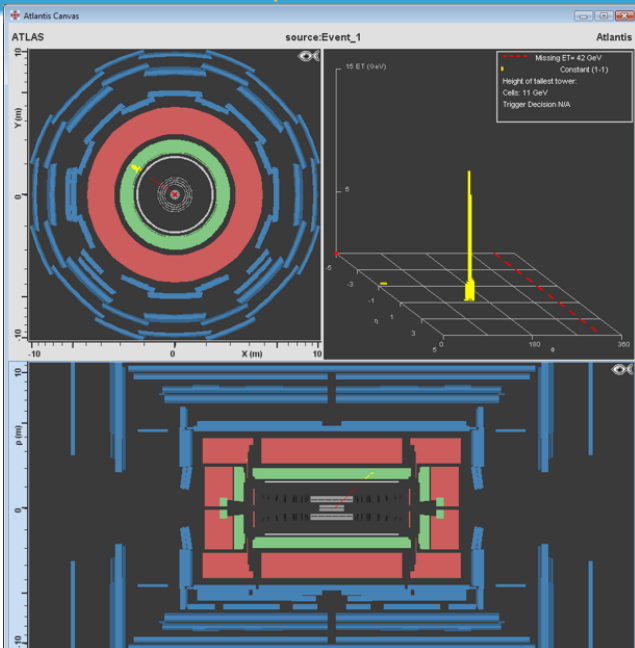
► Particules dans le détecteur

## Electron et positron

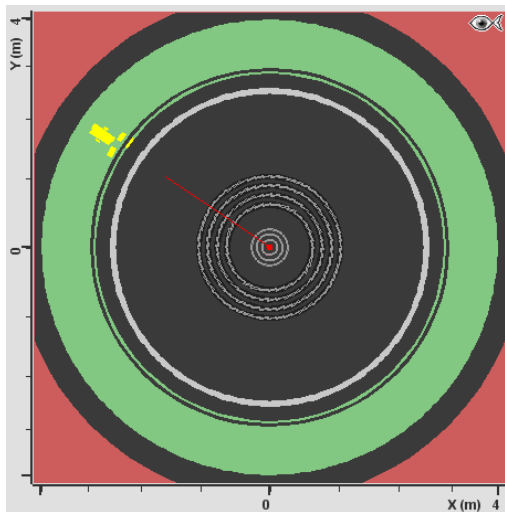
- Particule chargée : trace dans le trajectographe
- $\ominus$  = électron,  $\oplus$  = positron
- Gerbe dans le calorimètre électromagnétique



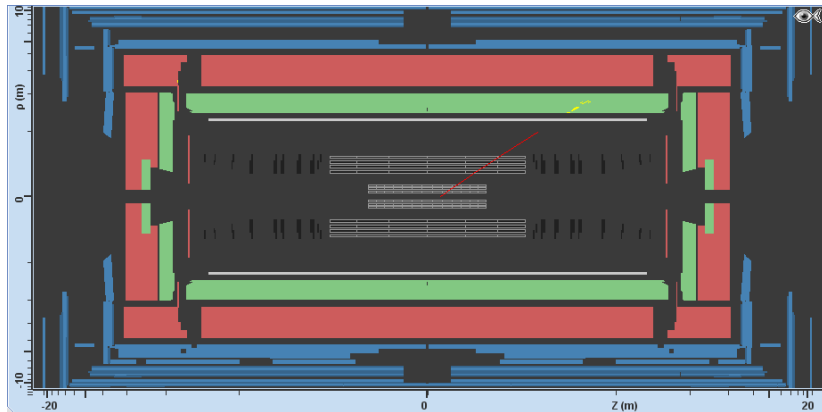
# Identifier un electron/positron avec Hypatia





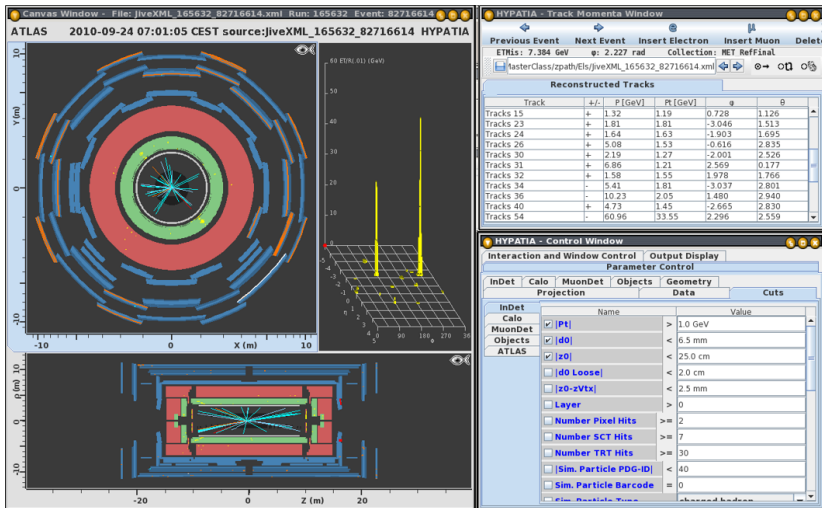


- Trace dans le trajectographe
- Energie dans le calorimètre électromagnétique



- Trace dans le trajectographe
- Energie dans le calorimètre électromagnétique

# Identifier un electron/positron avec Hypatia



- Cliquer sur la trace
- La ligne correspondante apparaît dans la fenêtre en haut à droite

# Identifier un electron/positron avec Hypatia



HYPATIA - Track Momenta Window

Previous Event Next Event Insert Electron Insert Muon Delete Track Reset Can

ETHis: 0.663 GeV  $\phi$ : -0.317 rad Collection: MET\_RefFinal

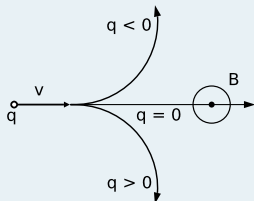
Reconstructed Tracks

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\phi$	$\theta$
Tracks 1	+	61.94	46.66	2.336	2.288
Tracks 72	-	33.25	31.18	-0.642	1.216

InDetTrack (id: 1 index: 1)  
storegate key: Tracks  
numHits = 28  
 $d0 = -0.081 \pm 0.001$  cm  
 $z0 = -7.900 \pm 0.007$  cm  
 $|z0 - zVtx| = 0.059$  cm  
 $\phi_{i0} = 133.834 \pm 0.008^{\circ}$  (2.336  $\pm$  0.000 rad)  
 $\eta = -0.789 \pm 0.001$   
 $\eta = -0.873 \pm 0.001$   
 **$pT = 46.66$  GeV  $\pm$  1.642 GeV**  
 $p = 61.94$  GeV  
 $\chi^2/\text{numDoF} = 1.9070545$   
numPixelHits = 3  
numSCTHits = 9  
numTRTHits = 12

InDetTrack (id: 72 index: 72)  
storegate key: Tracks  
numHits = 45  
 $d0 = 0.092 \pm 0.001$  cm  
 $z0 = -7.926 \pm 0.009$  cm  
 $|z0 - zVtx| = 0.033$  cm  
 $\phi_{i0} = 323.239 \pm 0.009^{\circ}$  (5.642  $\pm$  0.000 rad)  
 $\eta = 0.363 \pm 0.001$   
 $\eta = 0.371 \pm 0.001$   
 **$pT = -31.18$  GeV  $\pm$  0.539 GeV**  
 $p = -33.25$  GeV  
 $\chi^2/\text{numDoF} = 1.4227675$   
numPixelHits = 3  
numSCTHits = 6  
numTRTHits = 36

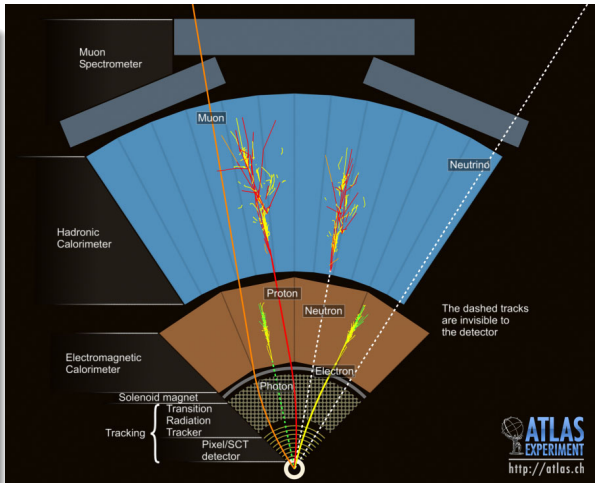
- $p_T$  = impulsion transverse
- Le signe donne la charge de la particule
- Impulsion et charge sont mesurées grâce au champ magnétique qui enveloppe le détecteur interne :
  - force de Lorentz
  - rayon de courbure
  - sens de déflexion



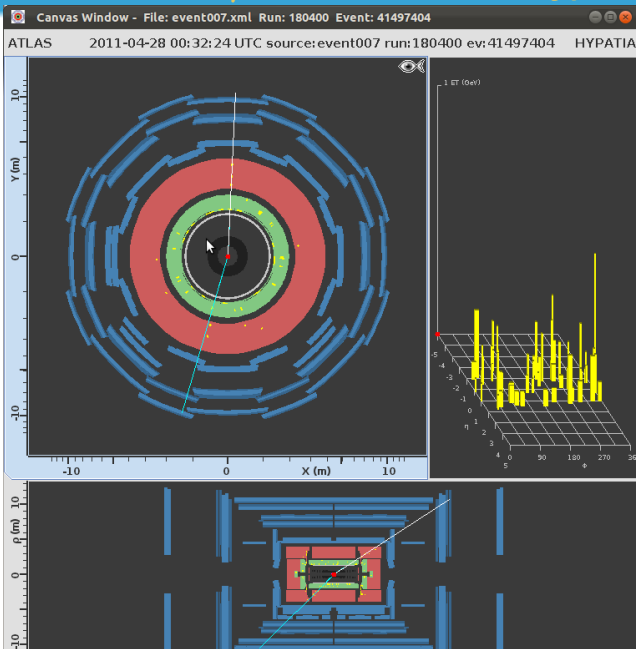
• Ici :  $\ominus \Rightarrow$  c'est un électron,  $\oplus \Rightarrow$  c'est un positron

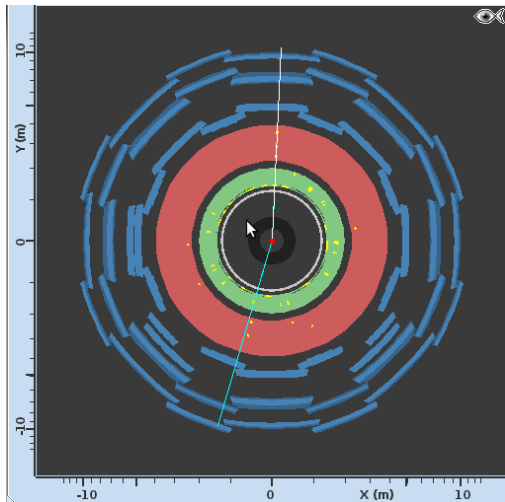
## Muon et antimuon

- Particule chargée : trace dans le trajectographe
- $\ominus$  = muon,  
 $\oplus$  = antimuon
- Peu d'énergie dans les calorimètres
- Trace dans le détecteur à muons
- Continue sa course à l'extérieur d'ATLAS

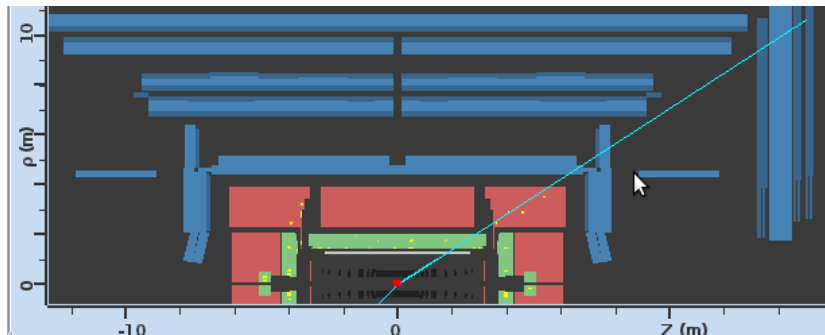


# Identifier un muon/antimuon avec Hypatia





- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Peu d'énergie dans les calorimètres



- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Un peu d'énergie dans les calorimètres



# Identifier un muon/antimuon avec Hypatia

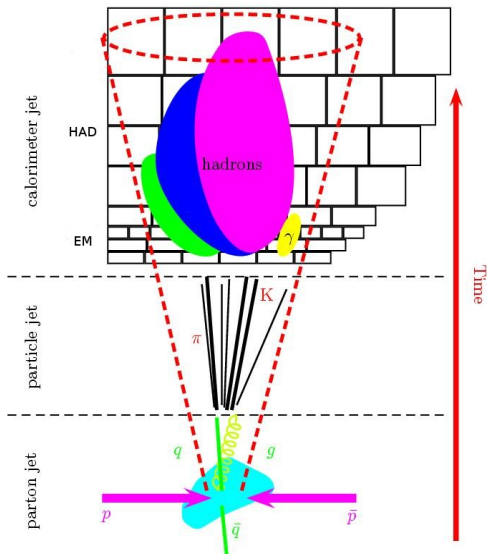


Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\phi$	$\theta$
Tracks 1	+	38.92	28.59	-1.832	2.317
Tracks 55	-	47.39	27.19	1.504	0.611

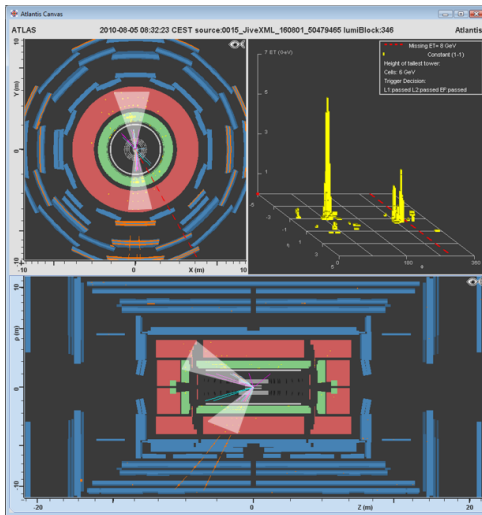
- Ici :  $\ominus \Rightarrow$  c'est un muon,  $\oplus \Rightarrow$  c'est un antimuon

## Quarks, antiquarks et gluons

- Forment plusieurs hadrons  
⇒ jets
- Particules chargées : traces dans le trajectographe
- Gerbes dans le calorimètre électromagnétique et surtout dans le calorimètre hadronique

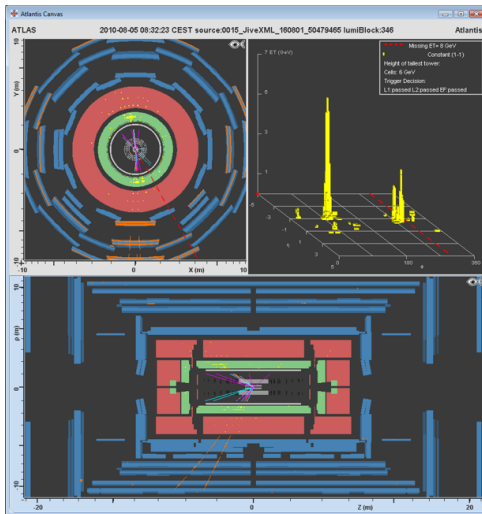


# Identifier un jet avec Hypatia



- De nombreuses particules  $\Rightarrow$  de nombreuses traces
- Dépôts d'énergie dans les calorimètres (surtout hadronique)

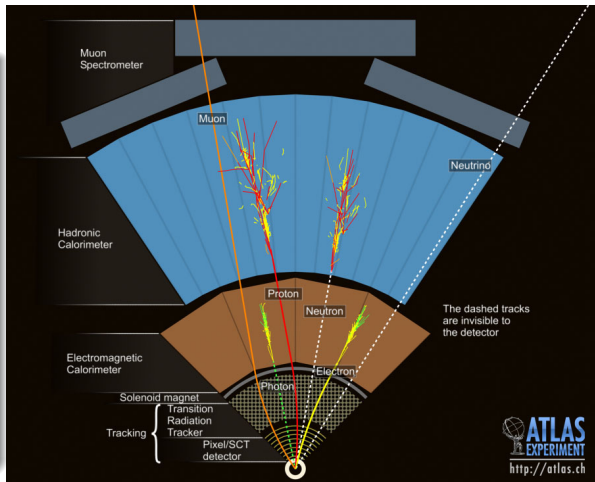
# Identifier un jet avec Hypatia



- De nombreuses particules  $\Rightarrow$  de nombreuses traces
- Dépôts d'énergie dans les calorimètres (surtout hadronique)

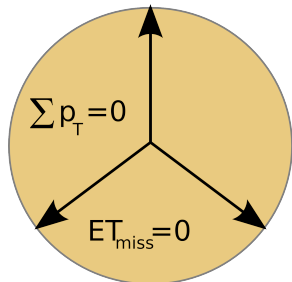
## Neutrino

- Particule neutre qui n'interagit presque pas avec la matière
- $\Rightarrow$  aucune trace dans le détecteur !
- Identifié par induction, par le principe de conservation de l'impulsion



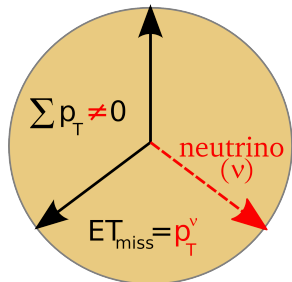
## Sans neutrino

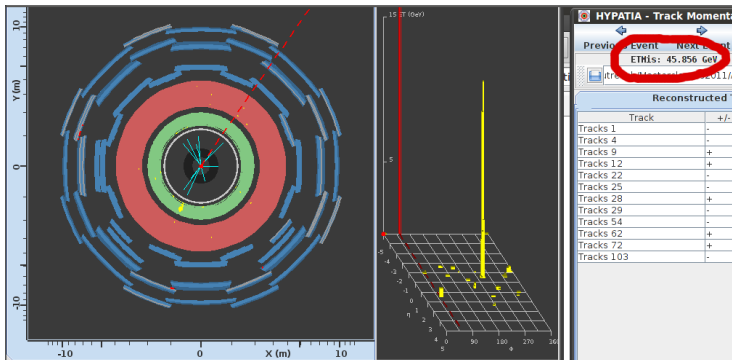
- Trois particules reconstruites
- Somme des impulsions dans le plan transverse : 0
- Donc  $ET_{\text{miss}} = 0$



## Avec neutrino

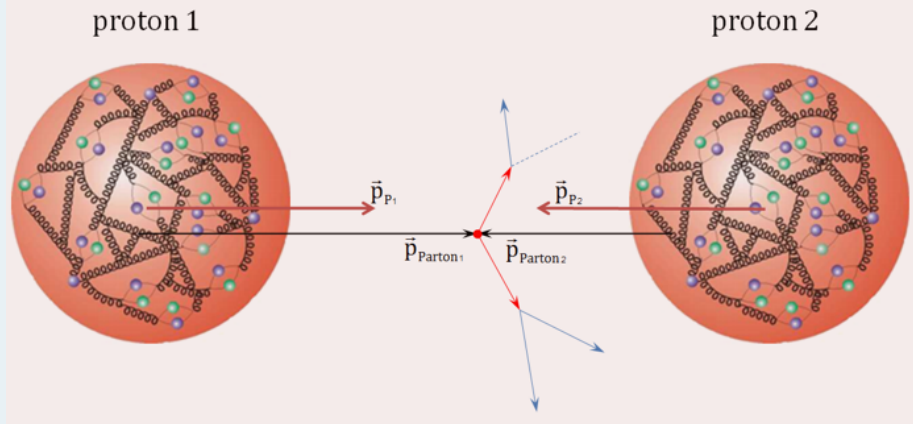
- On “voit” seulement une partie de l'événement
- La somme des impulsions n'est pas nulle
- La différence est  $ET_{\text{miss}}$ , associée au neutrino





- Par conservation, la somme des impulsions dans le plan transversal vaut 0
- Sinon, “énergie transverse manquante (Missing  $E_T$ , ETMis)” : particules indétectables (comme les neutrinos), non détectées ou mal mesurées (personne n’est parfait)
- Représenté par la ligne pointillée rouge, valeur en haut à droite

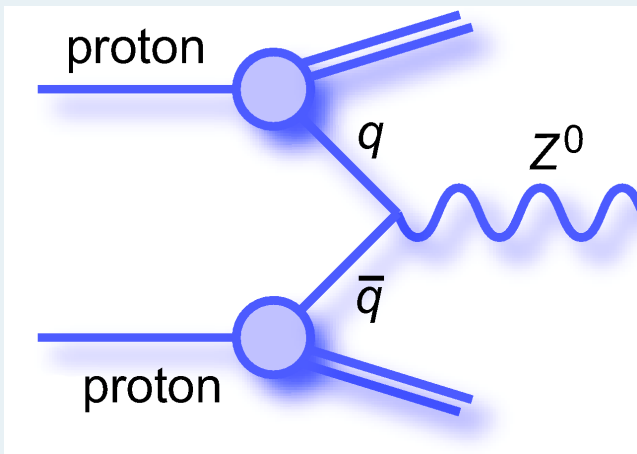
...et eurent beaucoup d'enfants !



- Fluctuation du “vide”
- Collision entre constituants (quarks/gluons) des protons
- Jamais deux fois la même collision  $\Rightarrow$  mesures statistiques

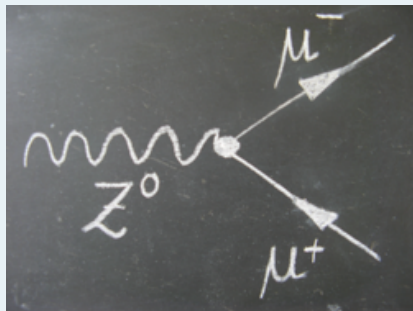
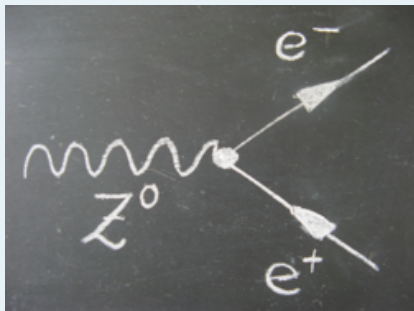


## Comment sont-ils produits ?



- Fusion d'un quark et d'un antiquark
- Antiquark dans la "soupe" à l'intérieur du proton

Que leur arrive-t-il (après  $3 \cdot 10^{25}$ s) ?

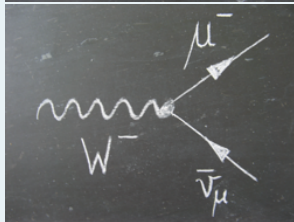
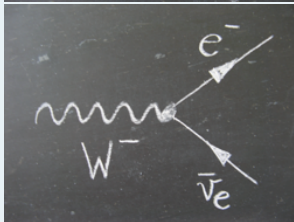
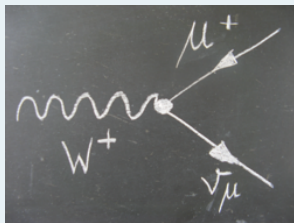
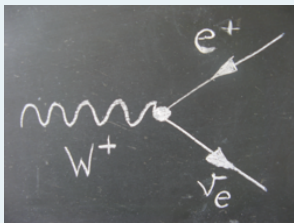


- Donne aussi souvent des leptons tau, plus difficiles à identifier
- Se désintègre aussi en paires quark-antiquark (70% des cas, plus difficile à identifier) ou en paires de neutrinos (20%)

## Qu'est-ce que c'est ?

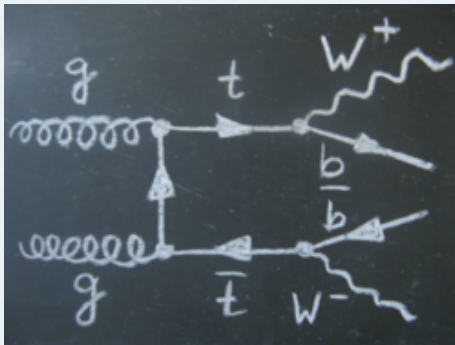
- Signature similaire à ce que l'on cherche, mais venant d'une source différente
- Peut être un vrai processus qui fournit le même état final
- Ou bien dû au fait qu'une particule n'est pas vue dans le détecteur
  - par exemple s'échappe le long du faisceau
- Ou bien à une mauvaise reconstruction dans le détecteur
  - il y a un jet et je crois que c'est un électron...
- Ou encore à la présence d'autres particules dans l'événement
  - chaque événement contient plusieurs collisions

## Production de W



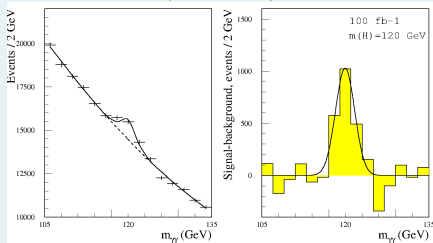
- Si un jet supplémentaire est pris pour un électron ou un muon, cela peut ressembler à un Z
- Si on cherche des événements  $W$ , alors les  $Z$  peuvent être un bruit de fond !

## Production de $t\bar{t}$



- $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow e\nu b e\nu \bar{b} : \text{deux électrons} \Rightarrow Z \rightarrow ee ?$
- $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow \mu\nu b \mu\nu \bar{b} : \text{deux muons} \Rightarrow Z \rightarrow \mu\mu ?$

Masse invariante  $\gamma\gamma$  avec beaucoup de données  
(simulation)

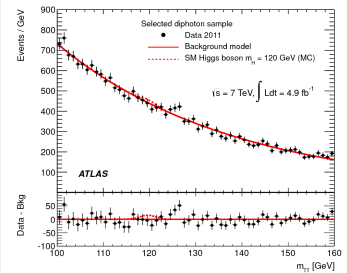
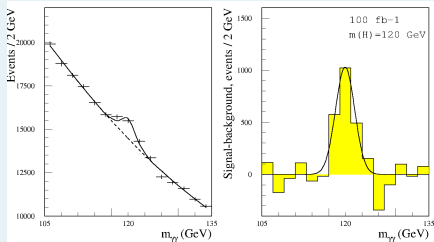


- Si les deux photons ( $\gamma$ ) proviennent de la désintégration d'une particule, on obtient la masse de cette particule
- Les mesures ne sont pas parfaites  
⇒ petites variations autour d'une moyenne
- Ici : boson de Higgs de masse 120 GeV
- Le continuum sous le pic est du bruit de fond, où les deux particules combinées ne sont pas des paires  $\gamma\gamma$  ou ne proviennent pas de la même désintégration.

# Une analyse : observer des bosons de Higgs



Masse invariante  $\gamma\gamma$  avec beaucoup de données  
(simulation)



$m(\gamma\gamma)$  avec 20 fois moins de données  
(dernier résultat d'ATLAS, mars 2012)

- Si les deux photons ( $\gamma$ ) proviennent de la désintégration d'une particule, on obtient la masse de cette particule
- Les mesures ne sont pas parfaites  
⇒ petites variations autour d'une moyenne
- Ici : boson de Higgs de masse 120 GeV
- Le continuum sous le pic est du bruit de fond, où les deux particules combinées ne sont pas des paires  $\gamma\gamma$  ou ne proviennent pas de la même désintégration.

Nos présentations

Les Masterclasses



ATLAS grand public



ATLAS en direct

ATLAS sur 

ATLAS sur 

Le site français du LHC

Le CPPM



Le CERN



Le CERN sur 

▶ <http://indico.in2p3.fr/event/6705>

▶ <http://physicsmasterclasses.org>

▶ <http://atlas.ch>

▶ <http://atlas-live.cern.ch>

▶ <http://twitter.com/ATLASExperiment>

▶ <http://www.youtube.com/theATLASExperiment>

▶ <http://www.lhc-france.fr>

▶ <http://marwww.in2p3.fr>

▶ <http://cern.ch>

▶ <http://twitter.com/cern>





**Amusez-vous bien**  
cet après-midi !