



Les autres peuvent vous indiquer la voie, mais vous devez la parcourir vous-même

- I. Interaction particule/matière
- II. Détecteurs de traces
- III. Identification des particules
- IV. Conception de détecteur

Introduction

Remarques:

- **Le Diable est dans les détails.** (René Descartes)
- Tout est une question de Vocabulaire..

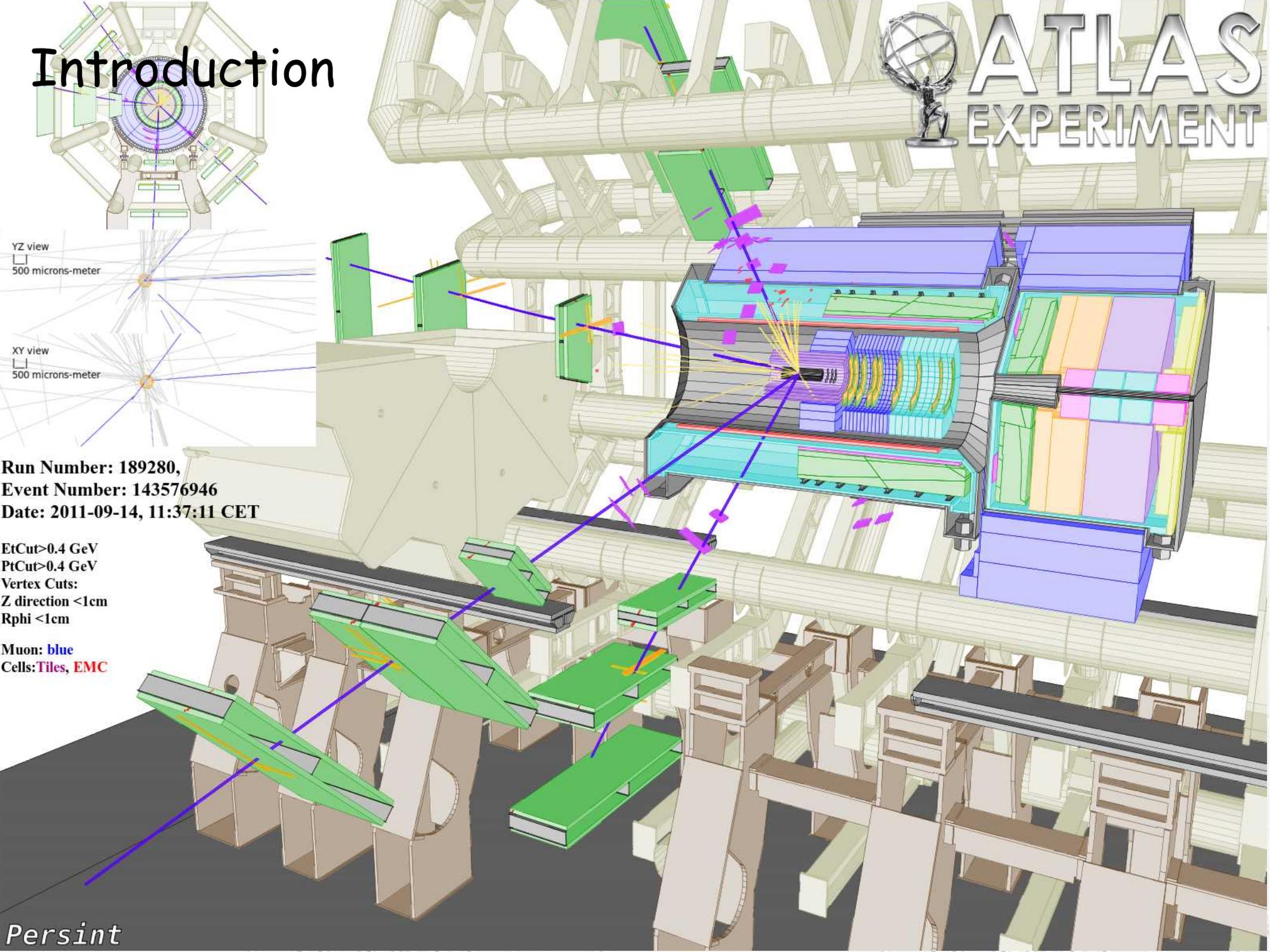
« Une rupture du continuum espace-temps a produit une nouvelle séquence chrono événementielle entraînant l'émergence de cette réalité alternative »
(Retour vers le futur II)



Introduction



ATLAS EXPERIMENT



YZ view
500 microns-meter

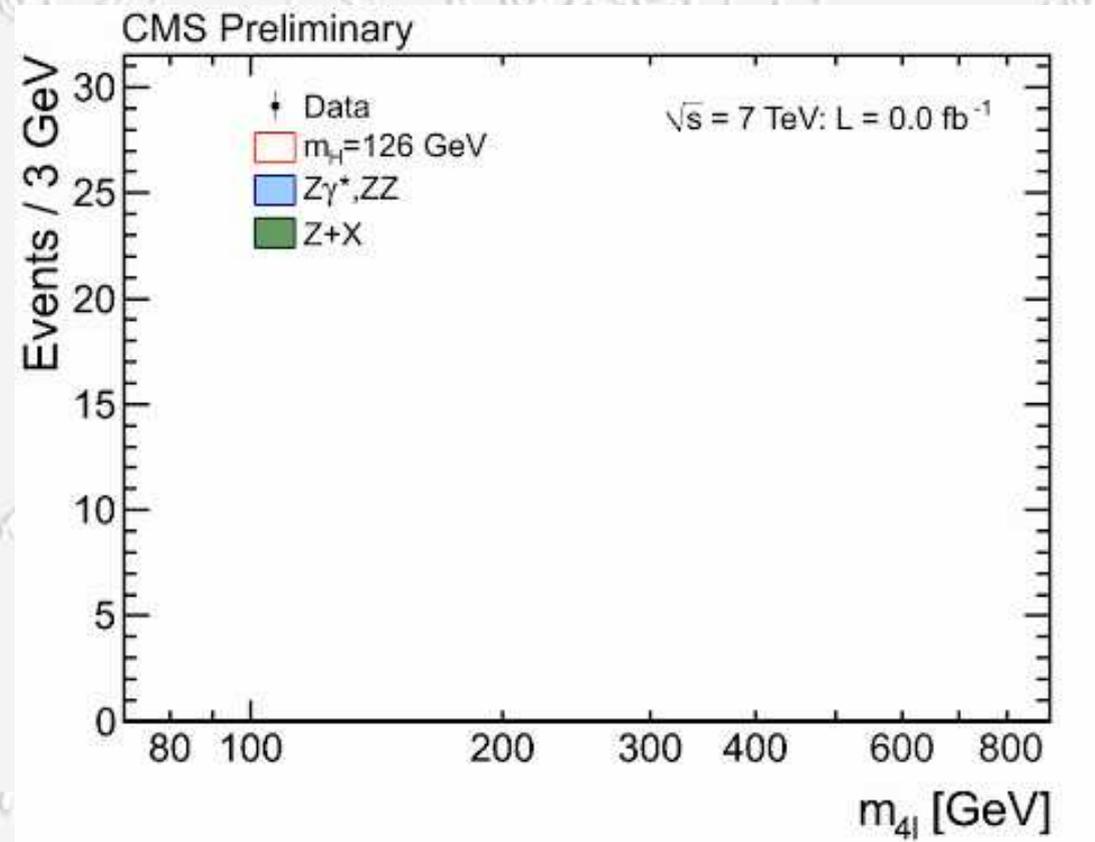
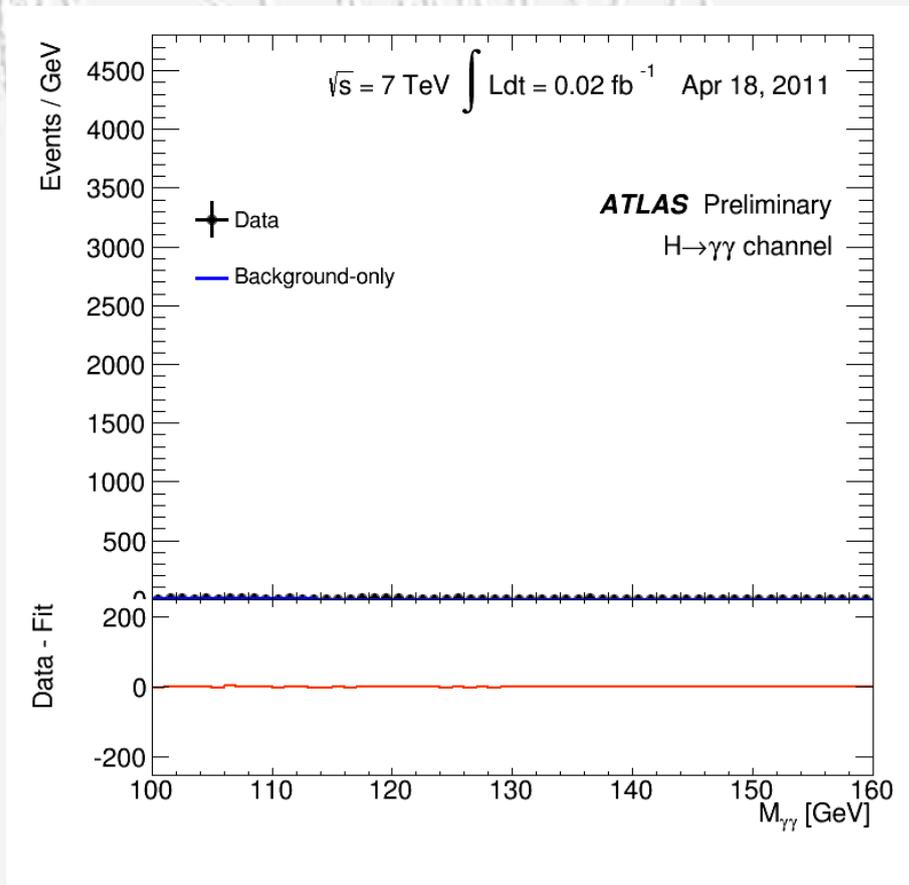
XY view
500 microns-meter

Run Number: 189280,
Event Number: 143576946
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

EtCut > 0.4 GeV
PtCut > 0.4 GeV
Vertex Cuts:
Z direction < 1cm
Rphi < 1cm

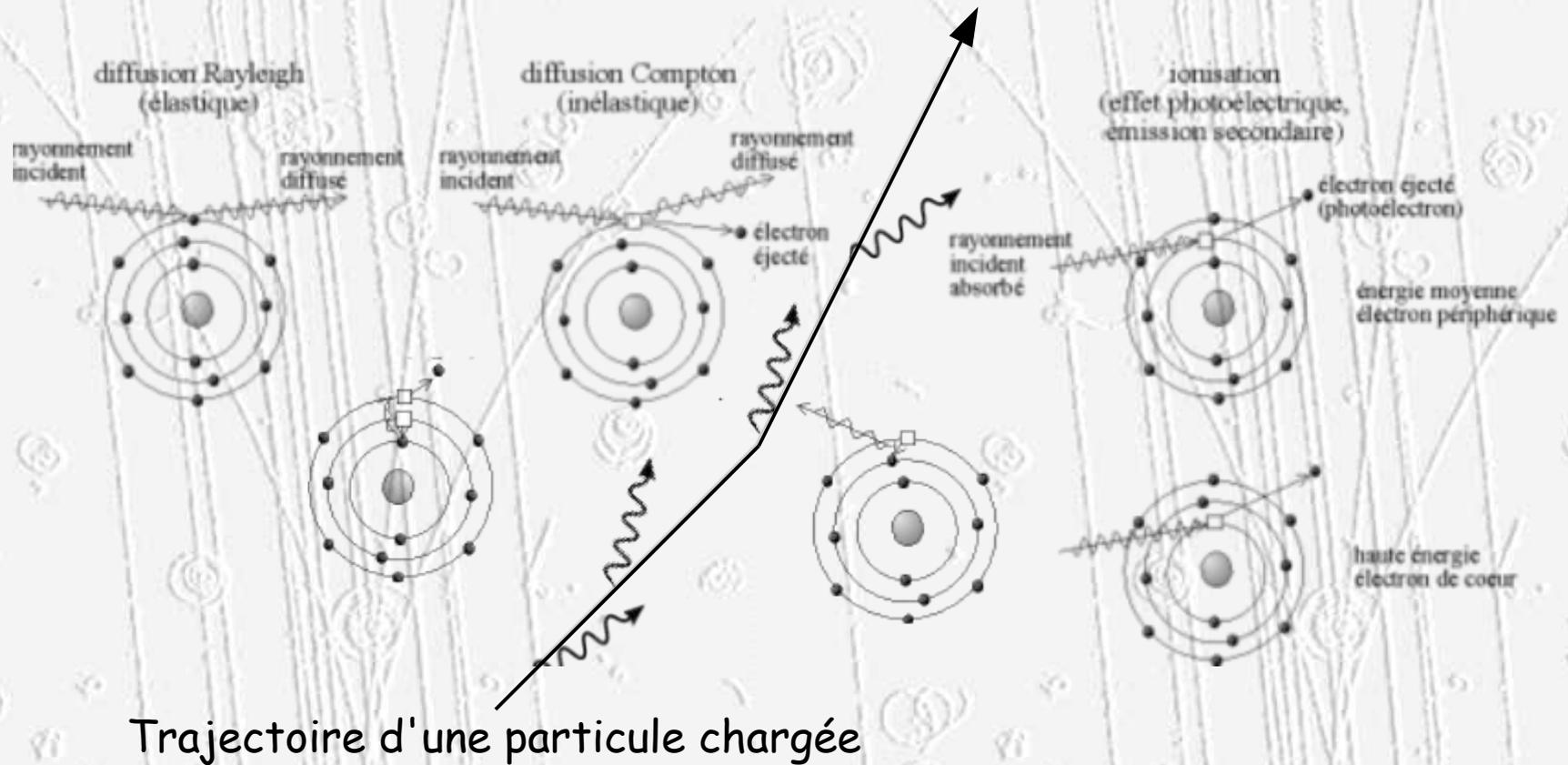
Muon: blue
Cells: Tiles, EMC

Introduction



- I. Interaction particule/matière
- II. Détecteurs de traces
- III. Identification des particules
- IV. Conception de détecteur

Interactions particules-matière (rappels)



Voir l'excellent cours de P.Puzo

http://www.in2p3.fr/actions/formation/PhyAuDet12/PUZO%20Detecteurs_HE_1.pdf

Interactions particules-matière

Particules détectables directement

- **Photon, électron, muon**, Hadron (**quarks**)
 - Hadrons($k, \pi, p, n, \Lambda \dots$) \rightarrow Jets

Matière du détecteur

- Atome (noyau et **électron**)

Interaction fonction de

- Charge, masse, énergie, ... de la particule
- A, Z des noyaux ... de la matière

Remarque: on lit (ou on parle) de collision, ce terme peut être mal interprété (ce n'est pas de la pétanque..)

Interaction est plus correcte.

Interactions particules-matière

Interactions

- Interaction électromagnétique
 - Atome (principalement les électrons du cortège):
 - Excitation ou ionisation des électrons
 - Diffusion élastique ou inélastique (=> diffusion multiple)
 - Production de paires e^+/e^- (aussi γ)
 - Rayonnent: Bremsstrahlung, Transition, Cherenkov
 - Photon : Compton, Photoélectrique (voir cours Calo)
- Interaction Forte
 - Hadrons $E > \text{GeV}$ (?)
- Interaction Faible
 - Négligeable excepté pour les neutrino
 - indirectement (muon => Cherenkov)
- Interaction Gravitationnelle
 - Négligeable (sauf pour...)



Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Čerenkov
- Rayonnement de Transition

} Rayonnement Cohérent

Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

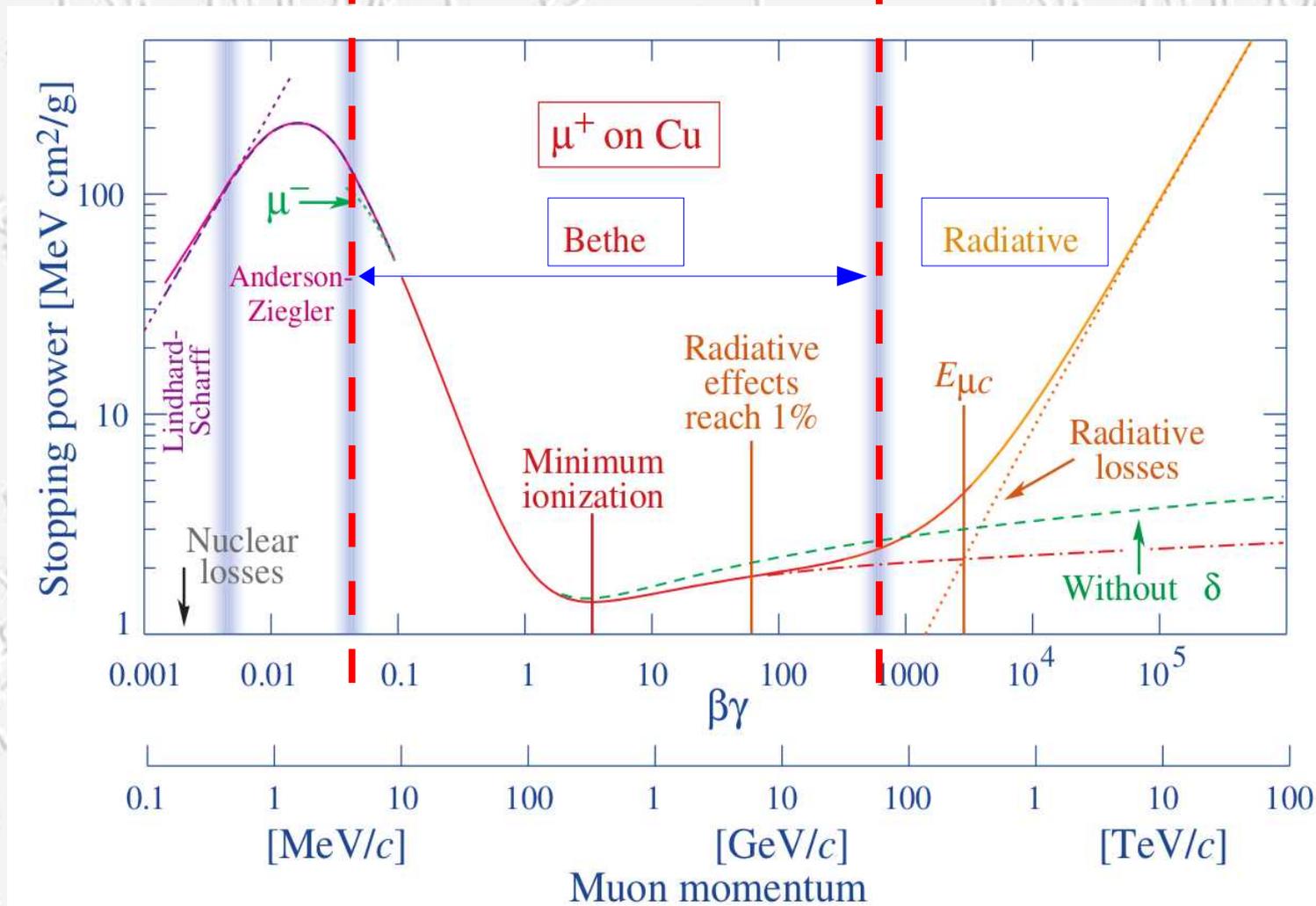
- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Čerenkov
- Rayonnement de Transition

Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

Interactions particules-matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



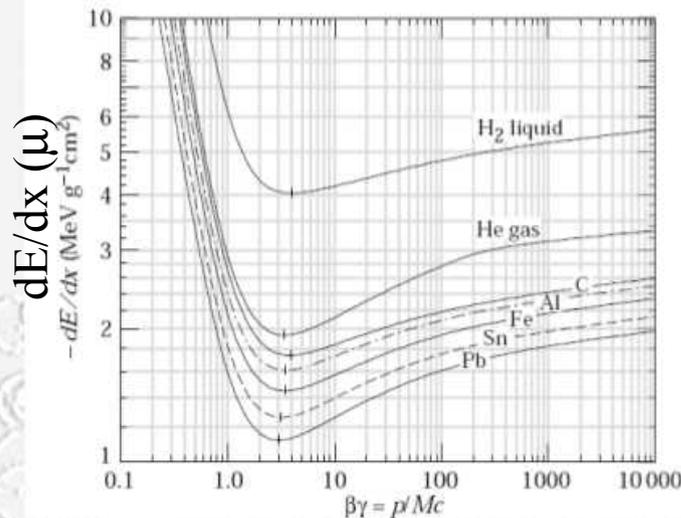
Interactions particules-matière

Formule de Bethe-Bloch : Ionisation (dE/dx)

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Avec : $\frac{K}{A} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A = 0.307075 \text{ MeV g}^{-1} \text{cm}^2$, for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2}$$



A, Z : Masse & Numéro atomique de la matière du détecteur
 N : nombre d'atome par unité de volume
 Z : Numéro atomique de la particule incidente
 I : constante Ionisation ($I=16Z^{0.9} \text{ eV } Z>1$)
 T_{max} : Énergie de transfert maximum dans une collision
 m_e : masse de l'électron
 N_A : nombre d'Avogadro
 $\delta(\beta\gamma)$: effet de densité (écranage) correction à l'énergie perdue
 \times densité de surface (g/cm^2)
remarque : on mesure ΔE sur Δx

dE/dx est en $\text{MeV cm}^2/\text{g}$

Remarques: **Hans Bethe** calcul (non- et relativiste) LO
Felix Bloch corrections d'ordre supérieur
Enrico Fermi Ecranage

Formule ok $\sim \text{MeV} \rightarrow \sim \text{TeV}$, [entre crochet] légèrement différente pour les e^- / e^+

Interactions particules-matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Remarques:

$$\frac{dE}{dx} \text{ est proportionnel } \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

Dépendances :

- 1/ **vitesse de la particule** (ok pour $\beta_{\min} = v/c \sim 1\%$)
- 2/ charge de la particule
- 3/ du milieu de propagation de la particule

Interactions particules-matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Remarques:

$$\frac{dE}{dx}$$

est proportionnel

$$\frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

$$\beta\gamma = \frac{P}{m}$$

10

100

1000

10^4

10^5

10^6

$\beta\gamma$

Interactions particules-matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

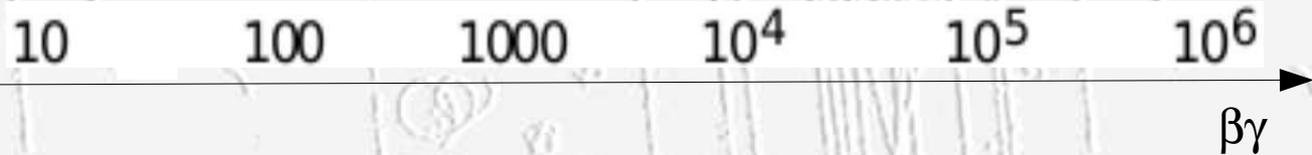
Remarques:

$$\frac{dE}{dx}$$

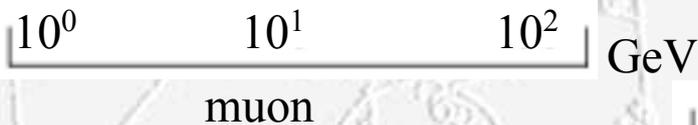
est proportionnel

$$\frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

$$\beta\gamma = \frac{P}{m}$$



$$\beta\gamma \longrightarrow \text{muon}$$

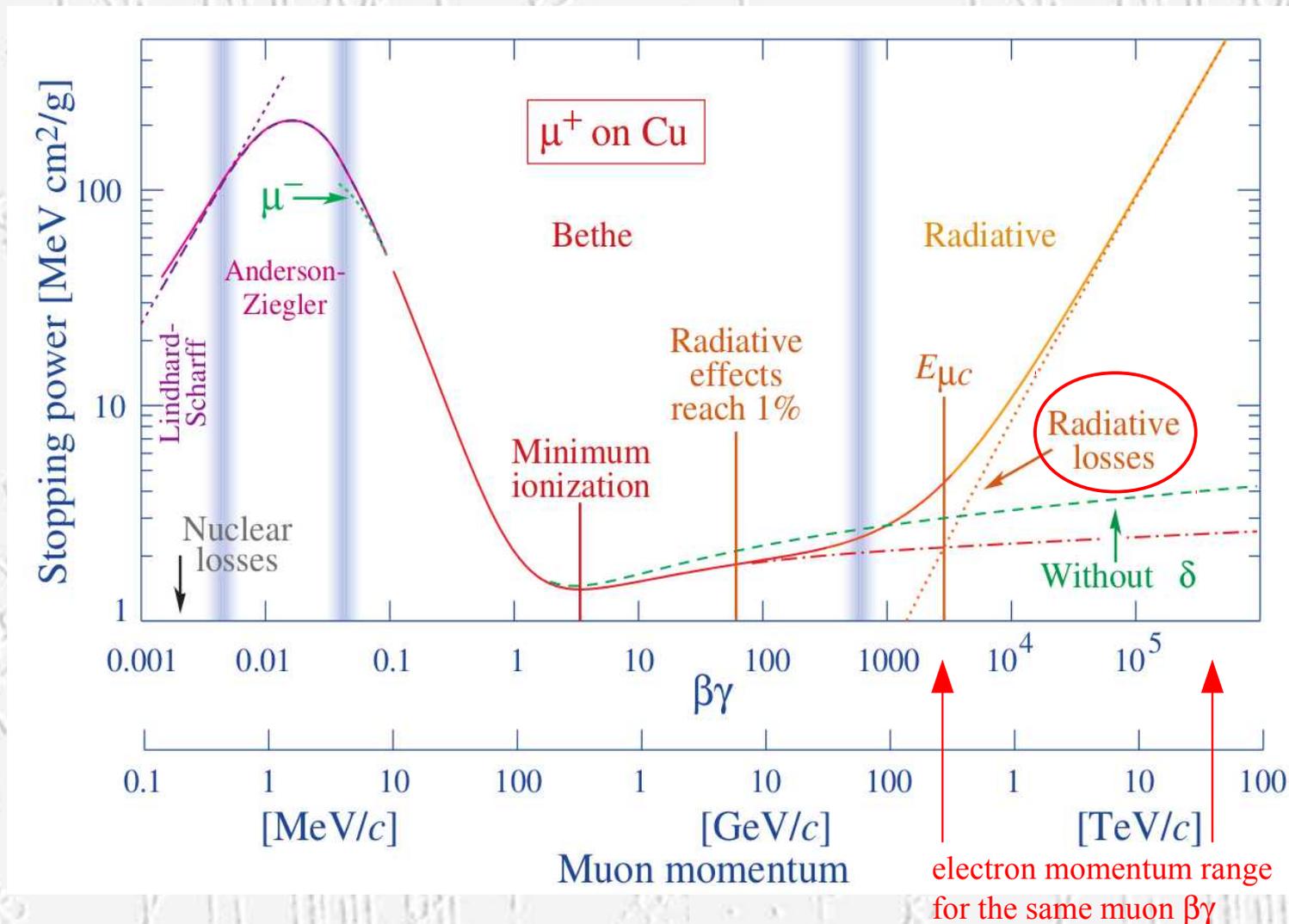


$$\frac{P}{m_\mu} * 207 = \frac{P}{m_e}$$



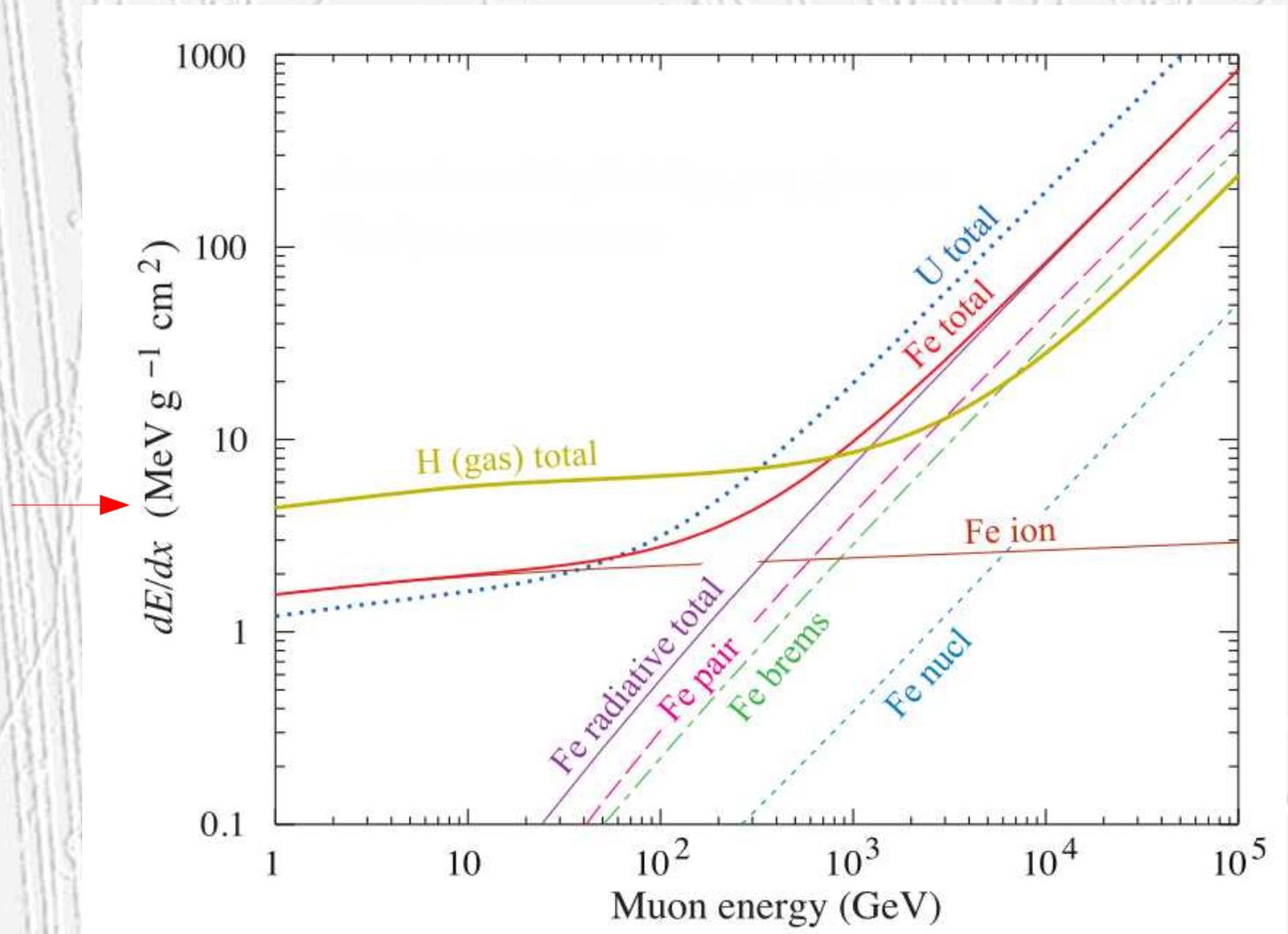
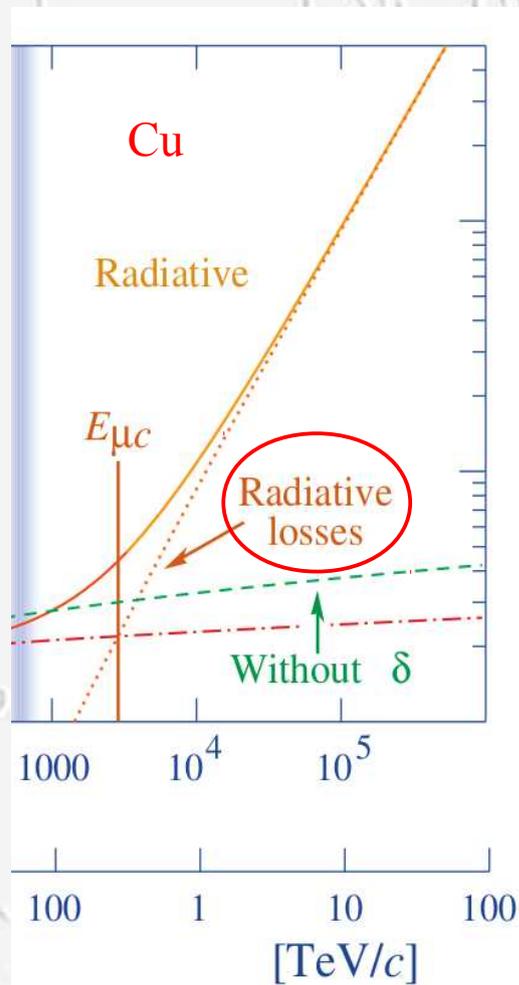
Interactions particules-matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



Interactions particules-matière

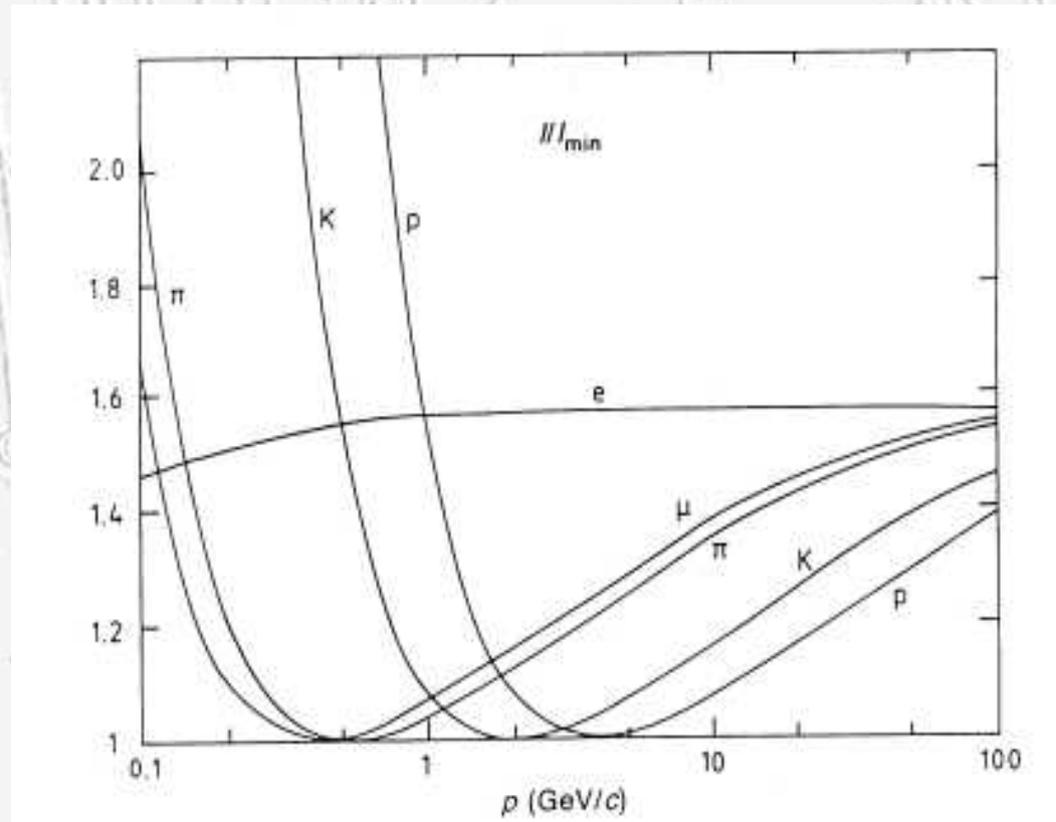
$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



Interactions particules-matière

Calcul

$$\beta\gamma = \frac{P}{m}$$



Interactions particules-matière

Il existe une énergie critique E_c

- différente selon les particules (e, μ, γ)
- $E_{c\gamma} \sim 1 \text{ MeV}$ E_{ce} de $\sim 10 \text{ MeV}$ à 300 MeV , $E_{c\mu} > 100 \text{ GeV}$
- Au dessous de E_c les pertes d'énergie des particules chargées (e, μ) se font par ionisation -formule de Bethe-Bloch
- Au dessus de E_c les pertes d'énergie se font par rayonnement

Processus : $\gamma \rightarrow e + e^-$ ou/et $e^{+/-} \rightarrow e^{+/-} \gamma$

- caractérisées par une longueur de radiation : X_0
(transparence du milieu)

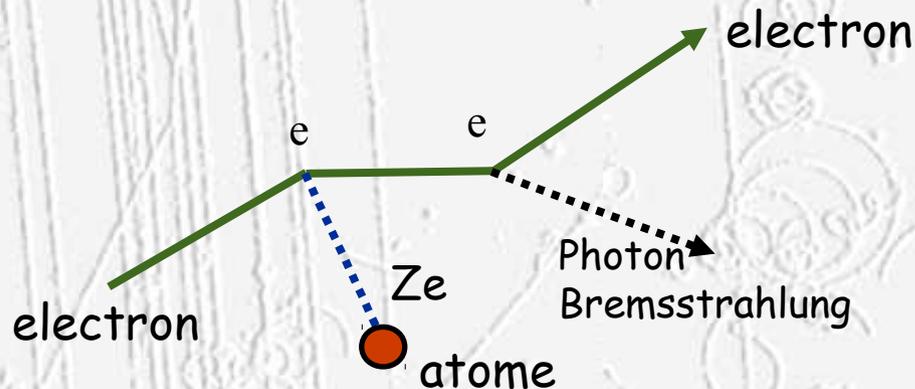
Hadrons perdent de l'énergie par Bethe-Bloch et par interactions fortes

- longueur d'interaction λ (+ grande que X_0 au delà de $Z > 6$)
(absorption du milieu)

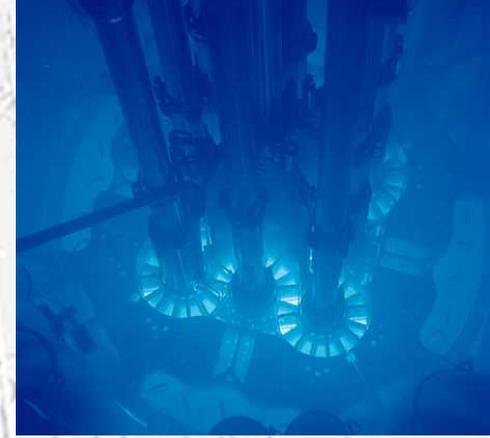
Interactions particules-matière

Bremsstrahlung

- Interaction avec le champ électrique des atomes
- Mécanisme principale de perte d'énergie pour les électrons (>10 MeV)
- Les particules chargées sont accélérées ou décélérées par le champ électrique de l'Atome et donc produisent un rayonnement
 - Important pour les électrons >100 GeV pour les muons

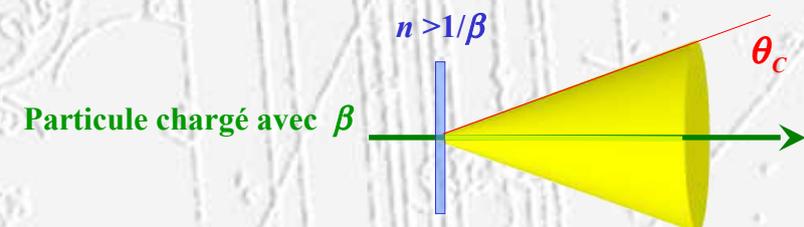
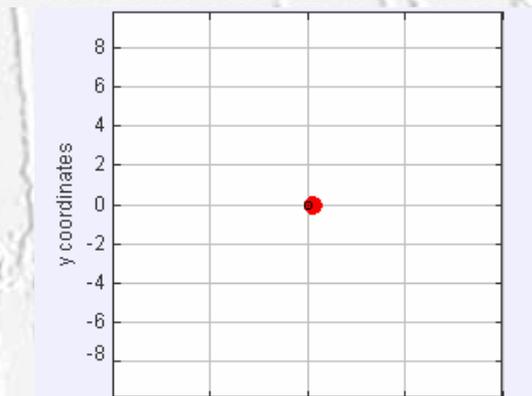
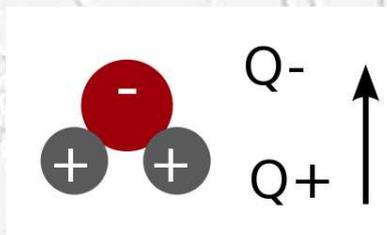


Interactions particules-matière



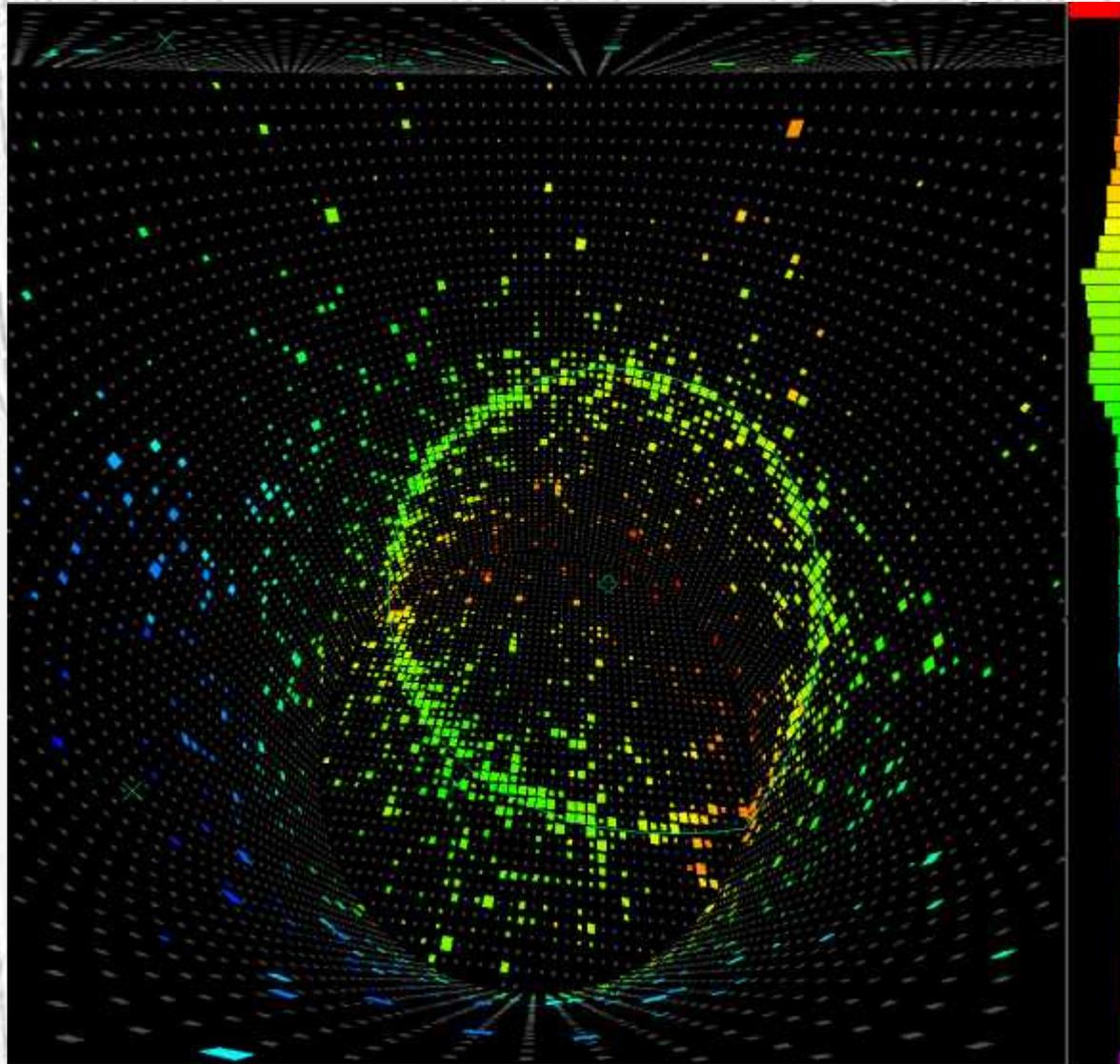
Effet Čerenkov

- Particule relativiste chargé traversant un milieu d'indice de refraction $n > 1/\beta$
 - Relativiste signifie que la particule se déplace plus vite que la lumière dans le milieu
- La Particule émettra une radiation Cherenkov tangent à cône d'angle θ_c autour de la trace: $\cos\theta_c = 1/n\beta$
 - La radiation est due à la polarisation du milieu et une variation dynamique du moment dipolaire des molécules du milieu i.e. Eau
 - nombre de photons $\# Z^2 \sin^2 \theta_c$ (Frank-Tamm)



Interactions particules-matière

Effet Čerenkov miniboon



Interactions particules-matière

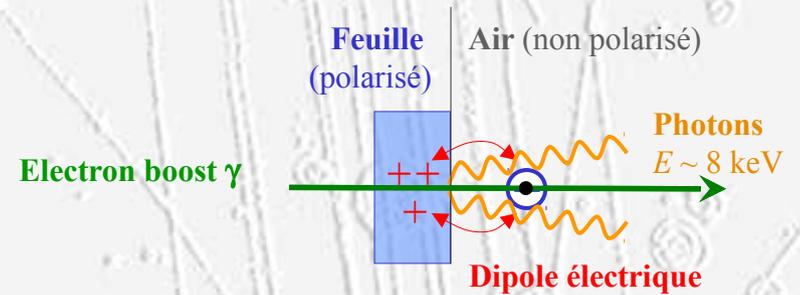
Rayonnement de transition # γ ($=1/\text{sqrt}(1-v^2/c^2)$)

- Particule chargée change de milieu
 - Discontinuité de l'indice de réfraction
 - Émission de photons (\sim KeV) à la frontière entre les milieux
 - Nombre de photons croient avec le nombre de Transitions
 - Compromis à trouver avec l'absorption
 - Rayonnement de transition + dE/dx
- En pratique
 - Identifie les électrons contre le reste du monde

Interactions particules-matière

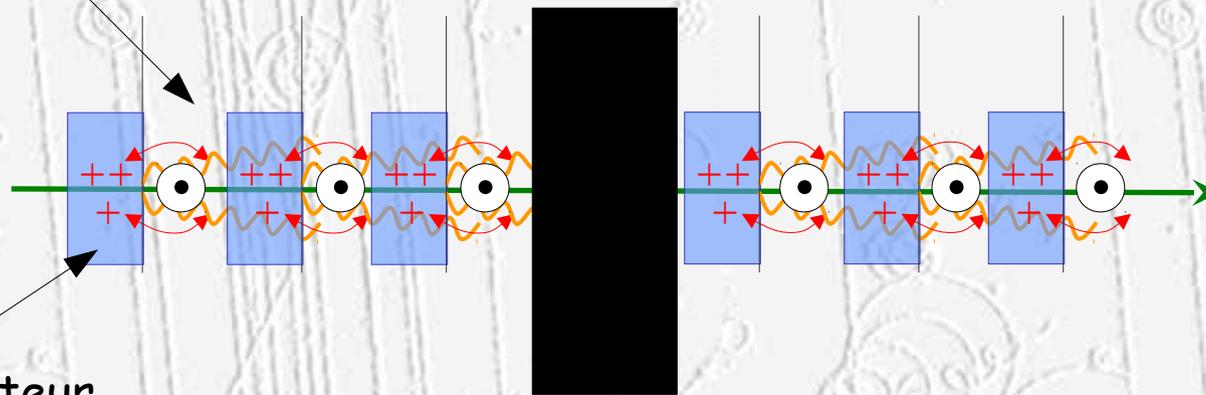
Rayonnement de transition

- Schéma de principe



Radiation si $\gamma > 1000$ & > 100 transitions

Détecteur



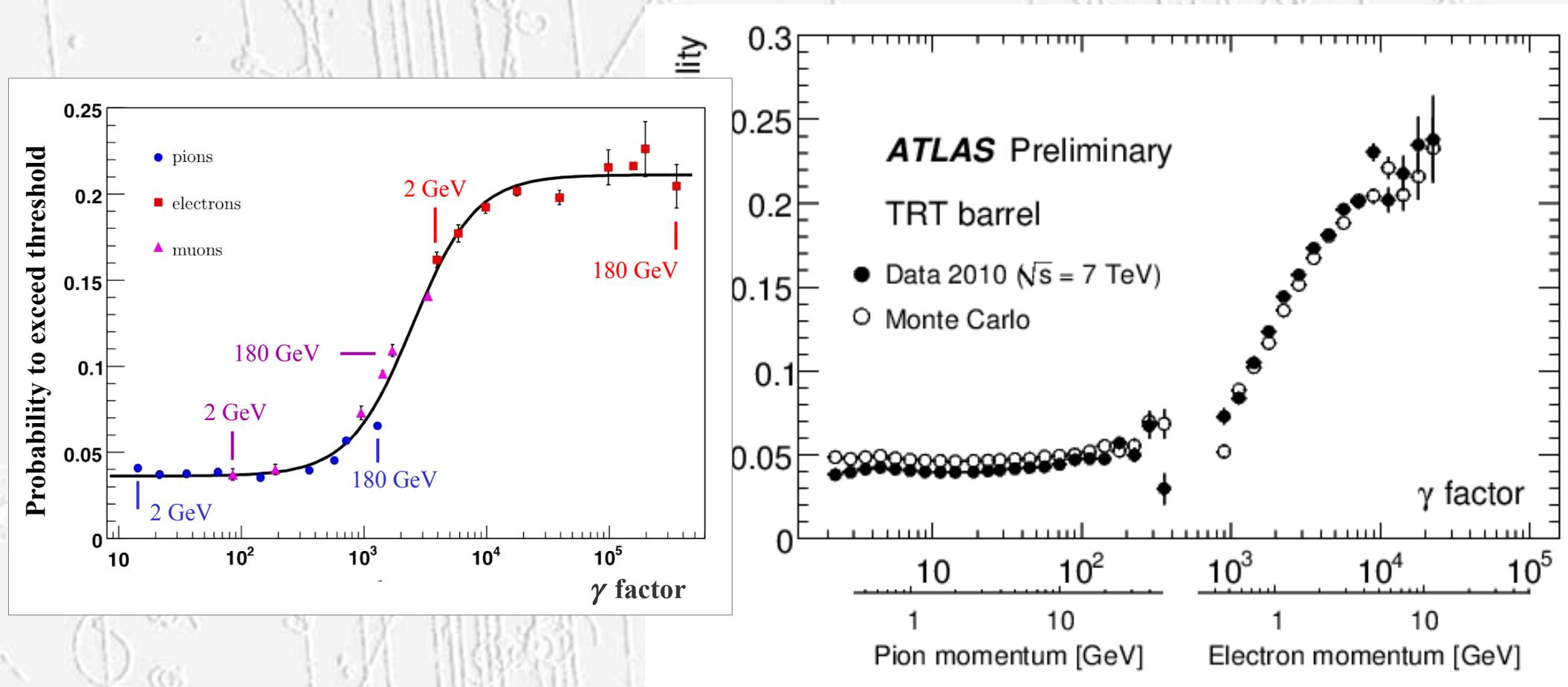
support :

tous les photons de RT sont absorbés

Interactions particules-matière

Rayonnement de transition

- Exemple : Atlas TRT *test beam & data*



Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Čerenkov
- Rayonnement de Transition

Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

Interactions particules-matière

Perturbation de la mesure (physique)

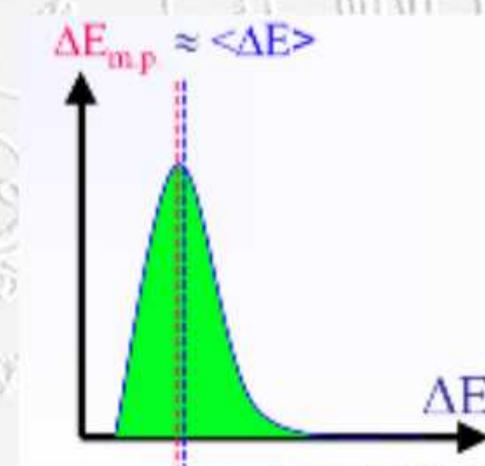
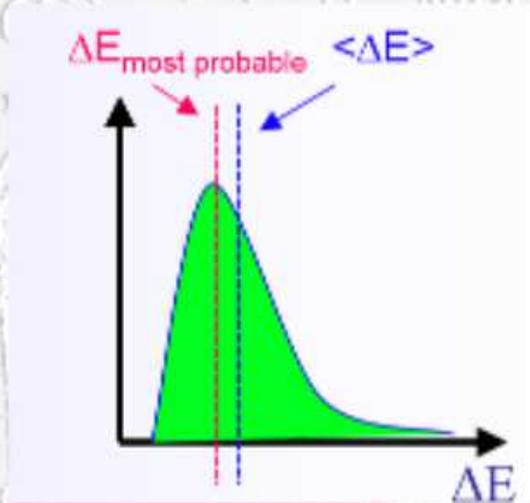
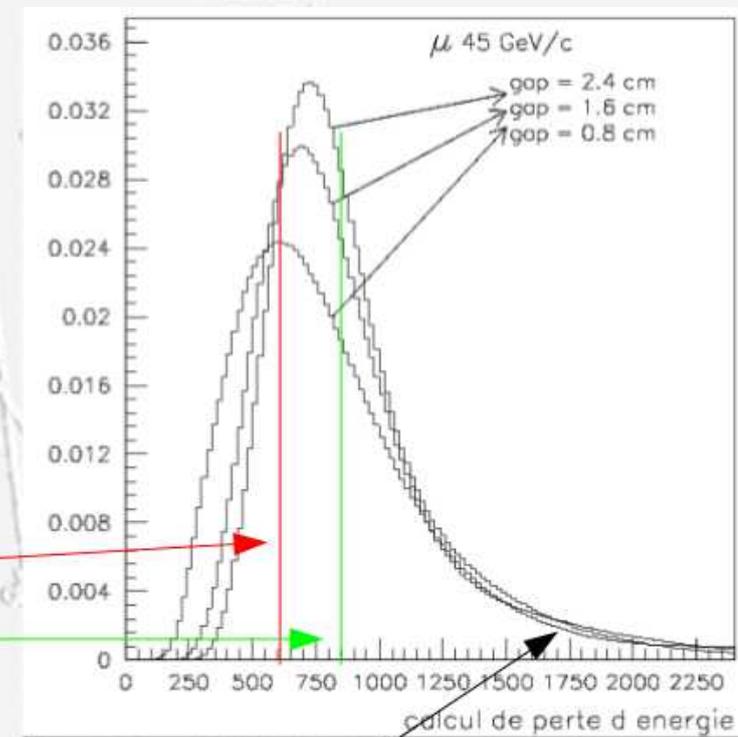
- Fluctuation de Landau

- Effet de échantillonnage

- Valeur la plus probable vs moyenne

- Épaisseur fine: ~égalité (Théorème central limite)

- Grandes Fluctuations : queues de Landau (δ ray)



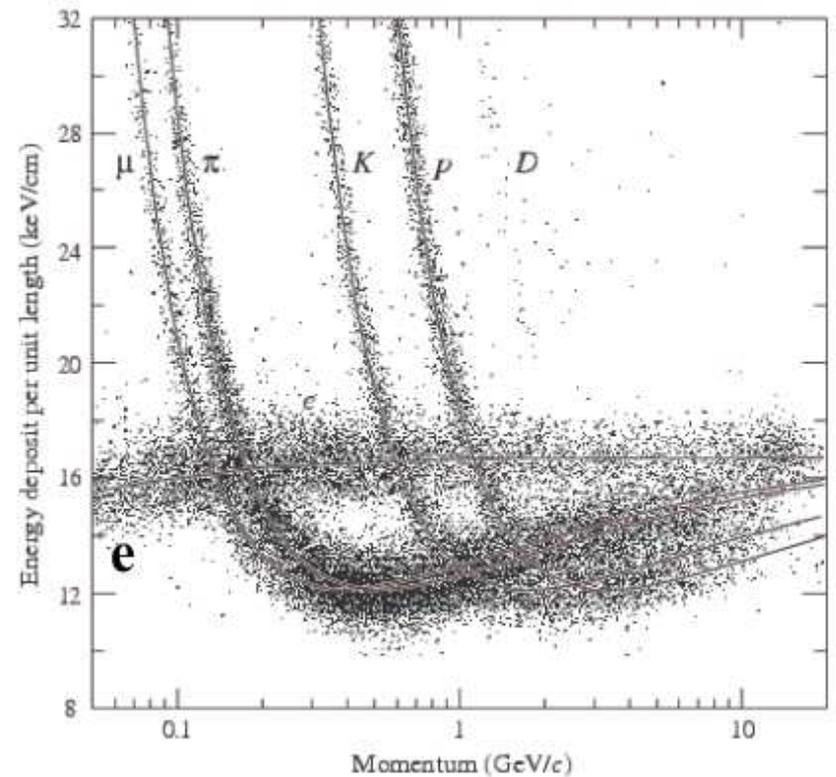
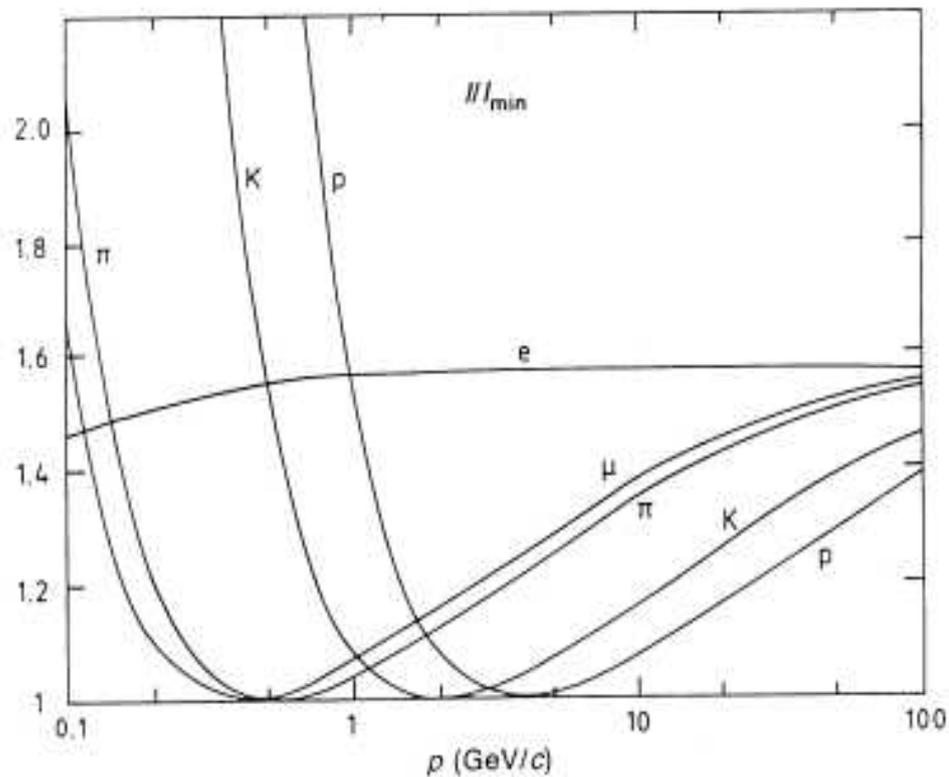
Interactions particules-matière

$$p = \gamma M \beta c$$

Calcul

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

Réalité



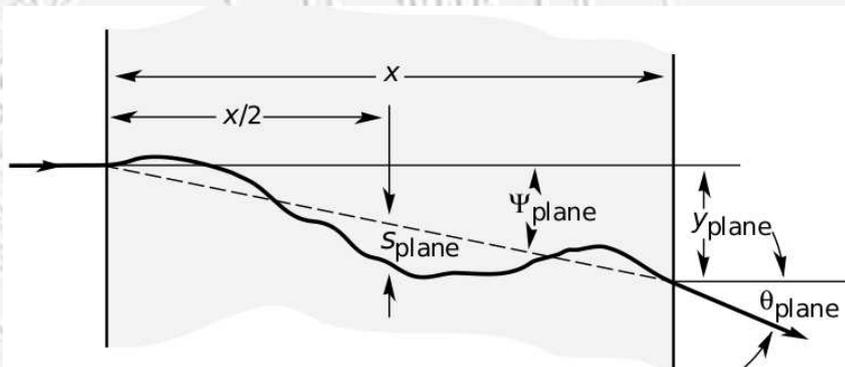
←→
Gamme d'énergie : ~0.1-->~10 GeV

Interactions particules-matière

En traversant de la matière les particules chargées subissent de la diffusion Coulombienne

- Diffusion multiple : **perturbation de la détection**
 - Déflexion de la trajectoire de la particule par le milieu
 - Minimiser la matière pour le trajectographe

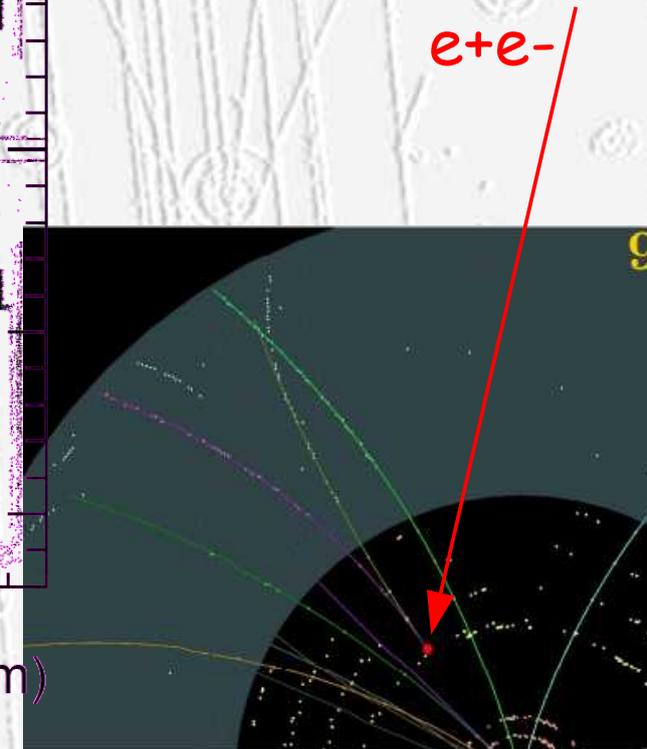
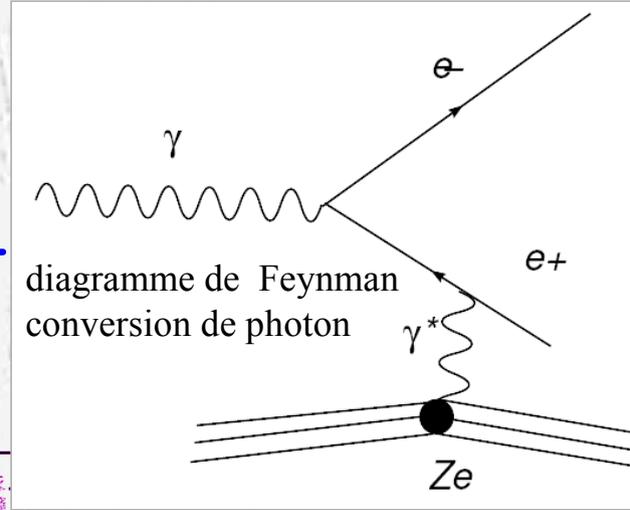
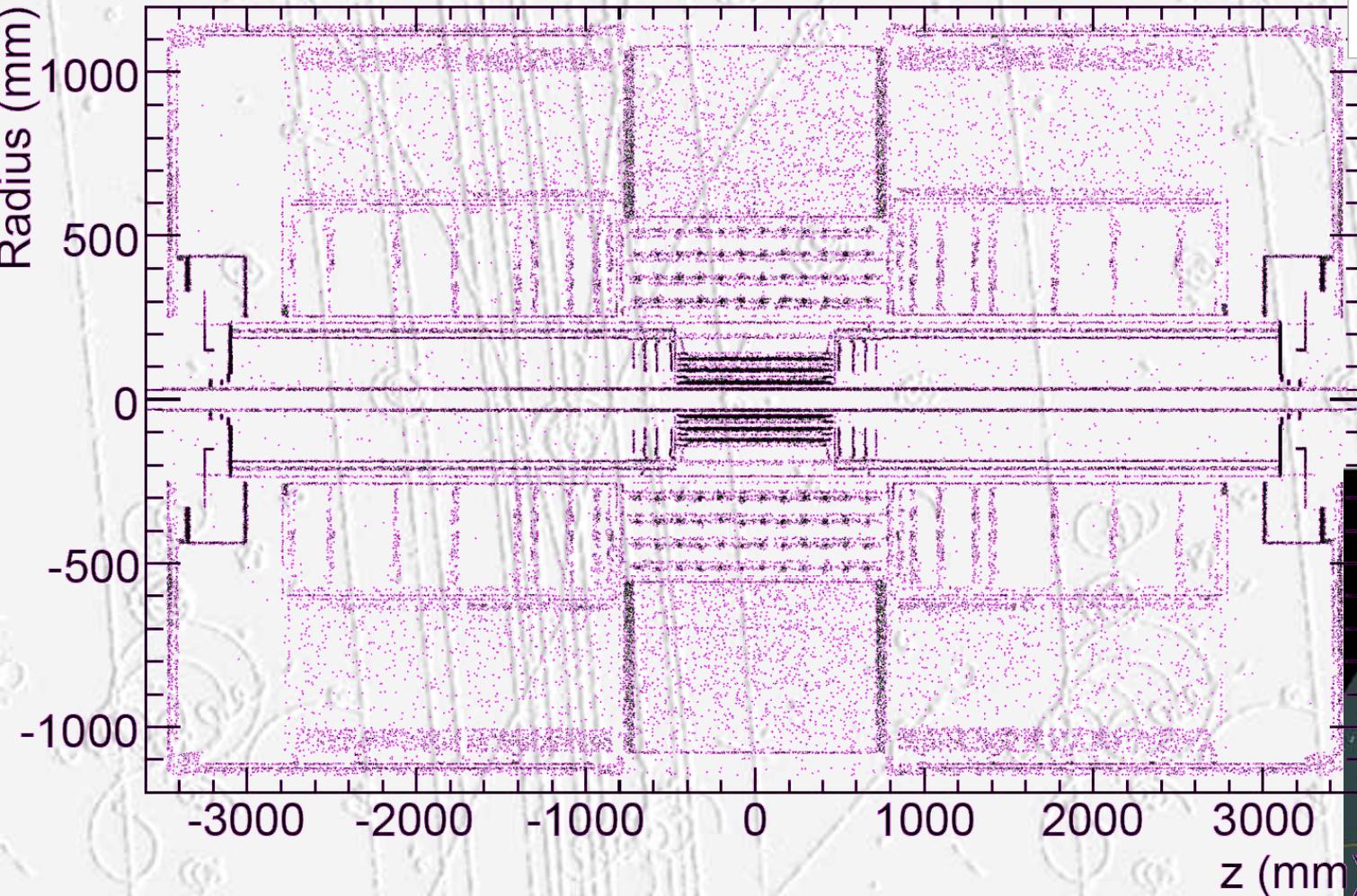
$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} \left[1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right]$$



Interactions particules-matière

Conversions (création de paires e^+e^-)

- Perturbations & Outils



- I. Interaction particule/matière
- II. Détecteurs de traces
- III. Identification des particules
- IV. Conception de détecteur

Détecteurs de traces



ceci est pion! π

ça va pas être facile d'expliquer tout ça!

Introduction

Détecteurs à Traces vs Compteurs

- Longtemps la physique des particules fut divisé en 2 groupes de physiciens
 - **Bullistes**
 - Exploratoire : on enregistre tout ce qui vient
 - Photos : compréhension de la topologie des événements
 - Développement des premiers logiciels de reconstruction de traces
 - Origine de la cernlib (mathématique/physique)
 - **Électroniciens**
 - Comptaient les particules, premières études statistiques
 - Compteurs à Scintillation, chambres à fils
 - Mise en place d'un déclenchement (« trigger ») pour ne conserver que les événements intéressants
- **Aujourd'hui on fait des photos (électroniques) et on compte les particules**



Introduction

Types de détecteurs (à traces ?)

- Liquide
 - Chambre à bulles (courant faible neutre cern)
- Gaz
 - Chambre à brouillard, compteur Geiger, chambre à fils,
 - TPC, TRT, MSGC, micromegas
- Solide
 - Silicum, Scintillateur, Plaque photographique

Principe

- Ionisation du milieu:
 - Détecter le passage d'une particule chargée en mesurant la charge totale (e^- / ions) produite par l'ionisation du milieu

1896 - 1897. Salle de travail d'Henri Becquerel et de Polonoine
Papier noir - Couche de laiton mince -
Exposé au soleil le 27. et à la lumière diffuse le 28. -
Résultat le 29. -

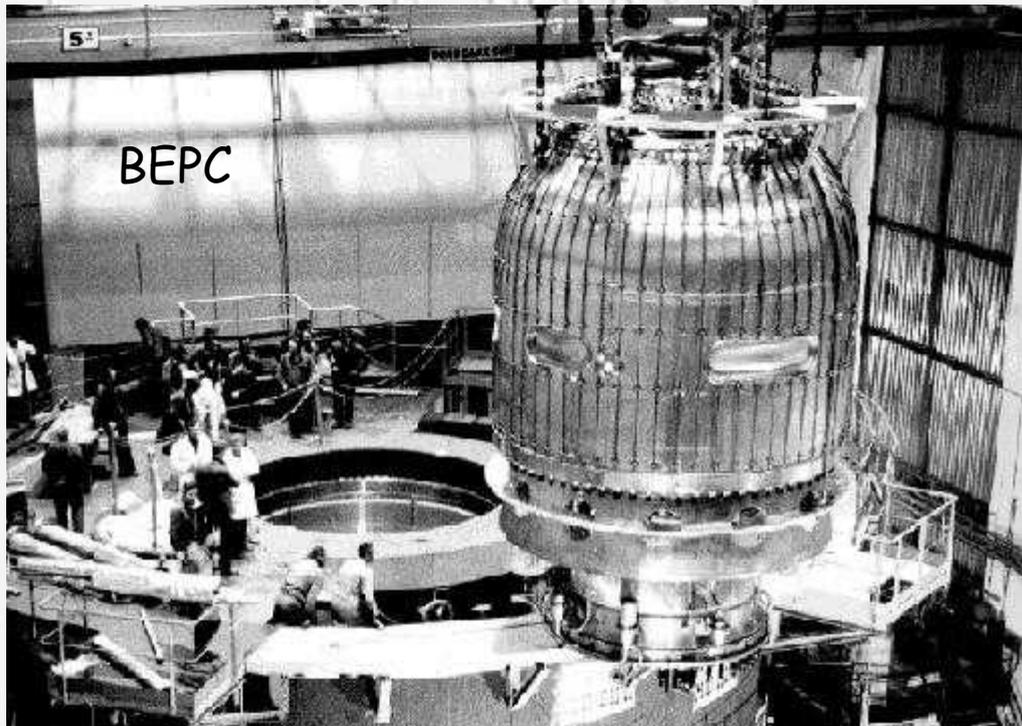


Antoine Henri Becquerel

Détecteur de traces : **Liquide**

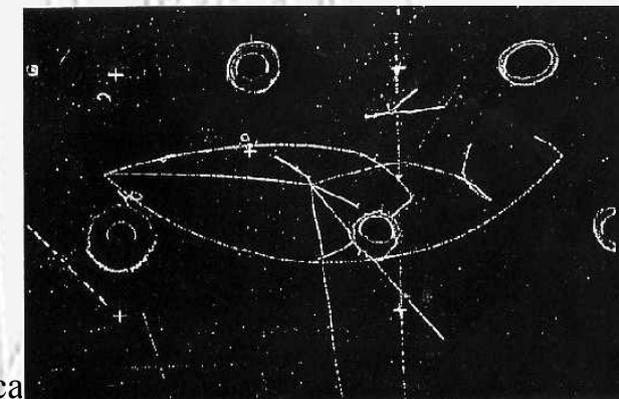
Chambre à bulles

- C.Glaser 1952
- Gargamelle: 1973 découverte des courants faibles neutres
 - Phase liquide, proche phase gazeuse
 - Pression de 1.3 à 4 atm (temp. $\sim 24\text{K}$) : détente
 - Au passage des particules des bulles se forment: photo
 - 4 m de long, diamètre de 2 m, 1000 tonnes, 18 tonnes de fréon liquide



reconstruction:3D !

-scanneuses
-programmes



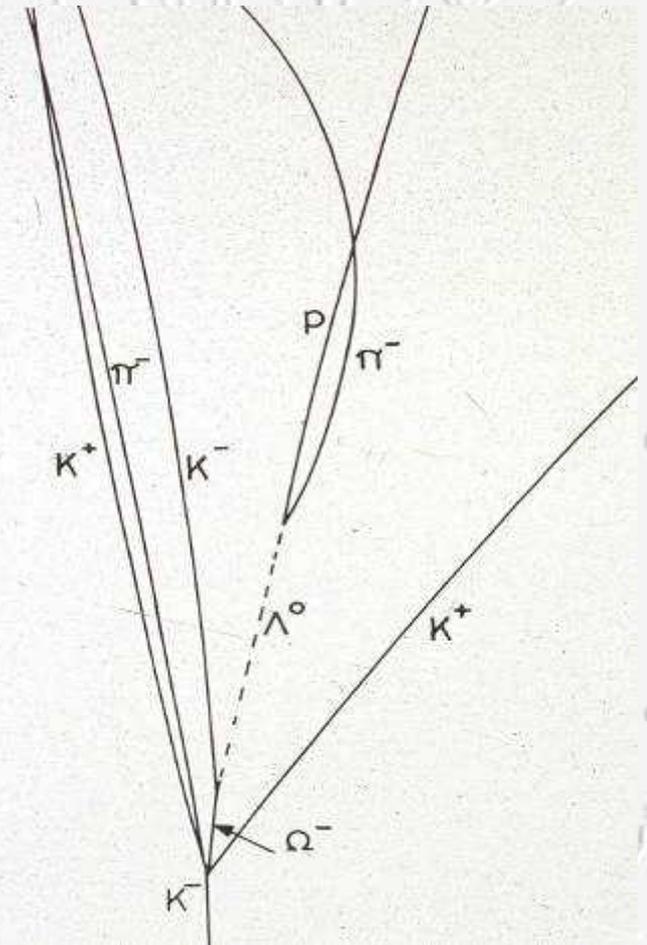
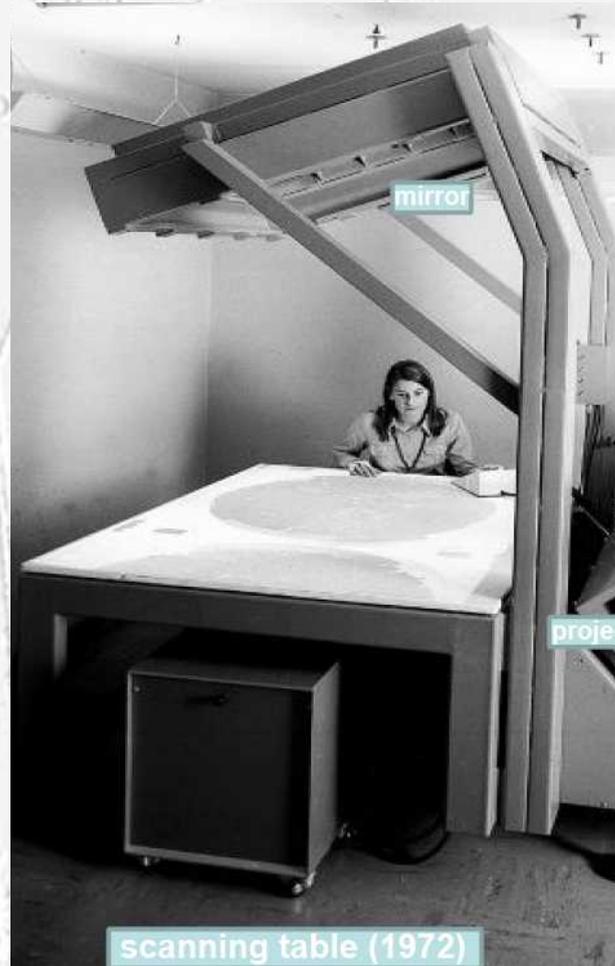
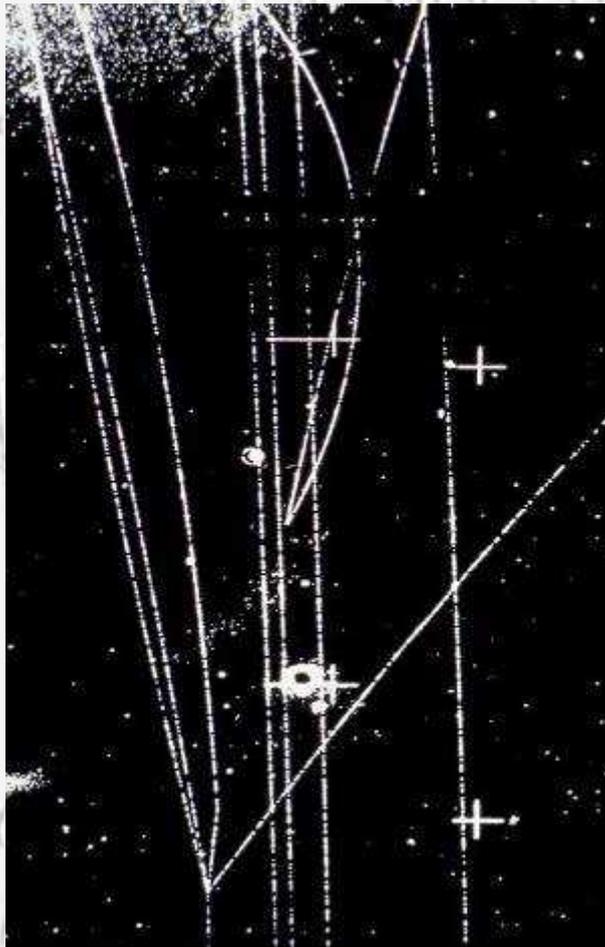
Détecteur de traces : **Liquide**

Chambre à Bulles

pictures

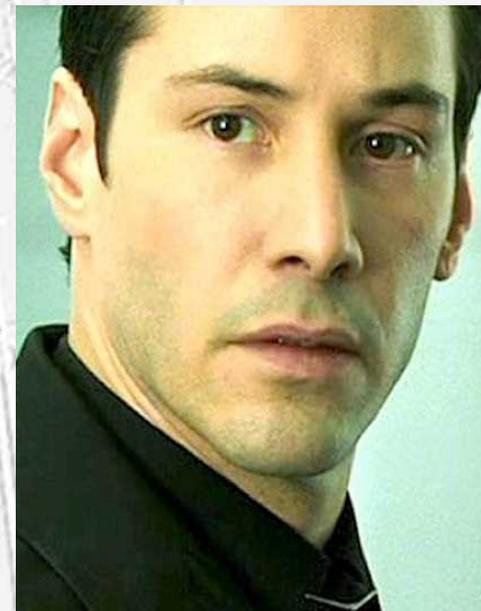
Reconstruction

Final plot

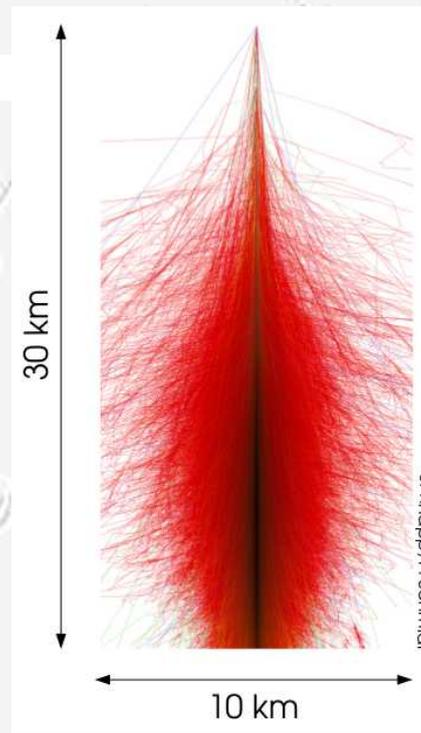
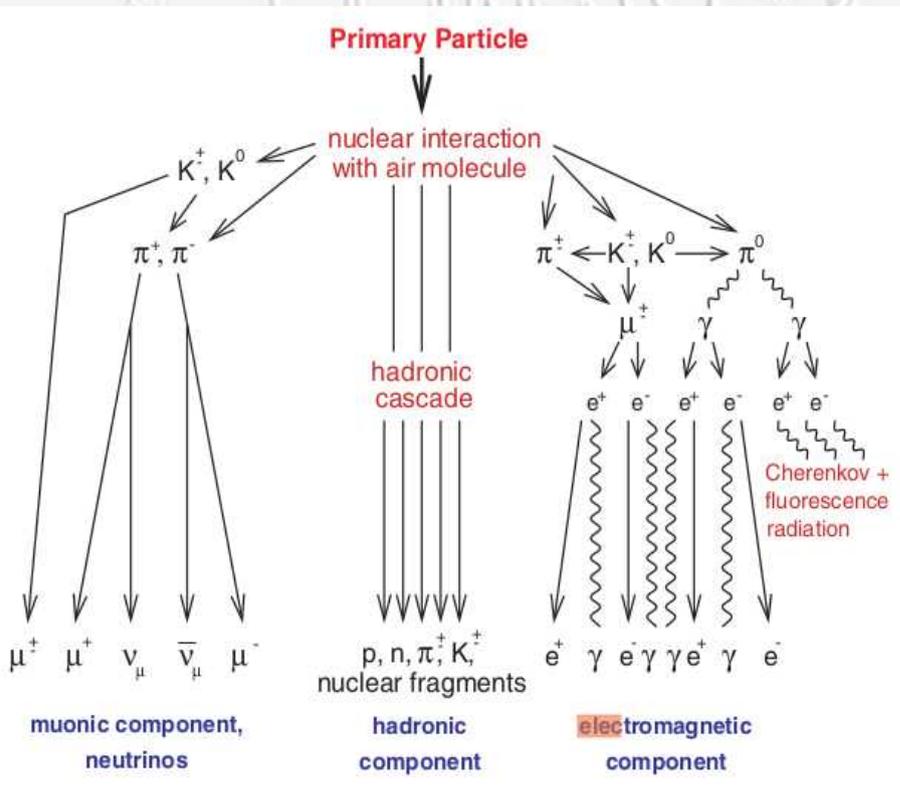


Muon discovery

Cosmic rays



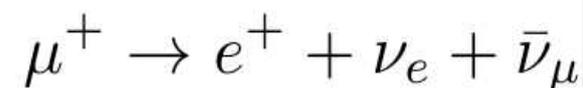
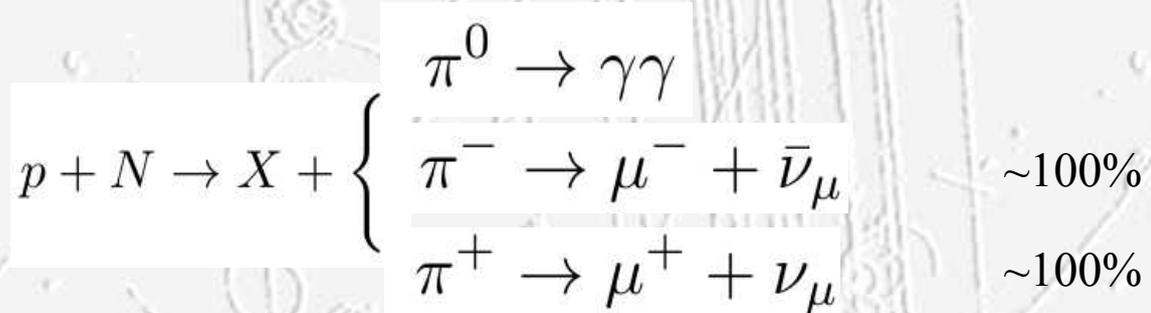
Thomas A. Anderson
(matrix 1)



Simulation proton 10^{14} eV



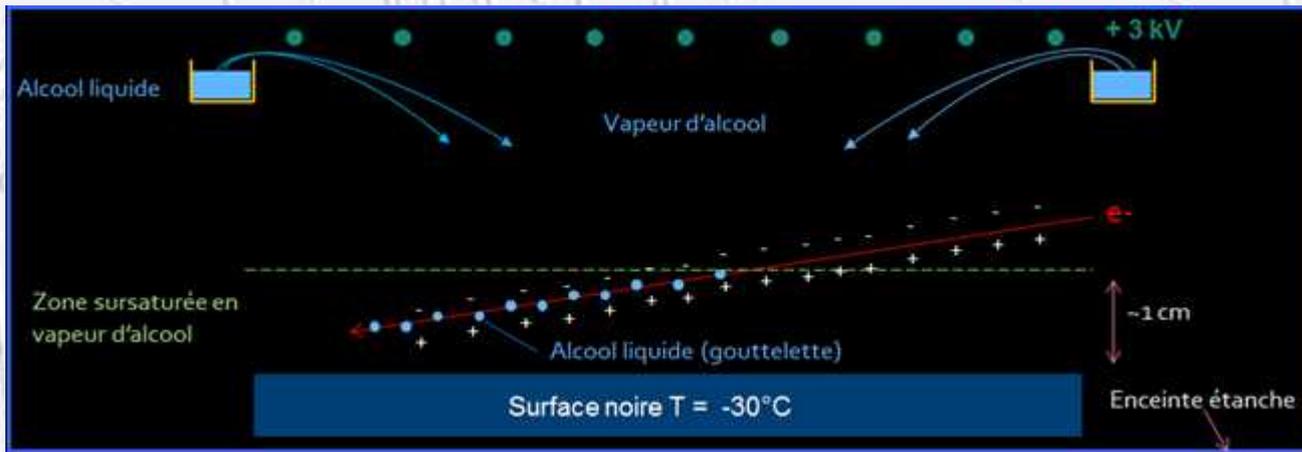
Cloud chamber



(+ $k \rightarrow \pi, \mu, \dots + \dots$)

Muon discovery

Cosmic rays

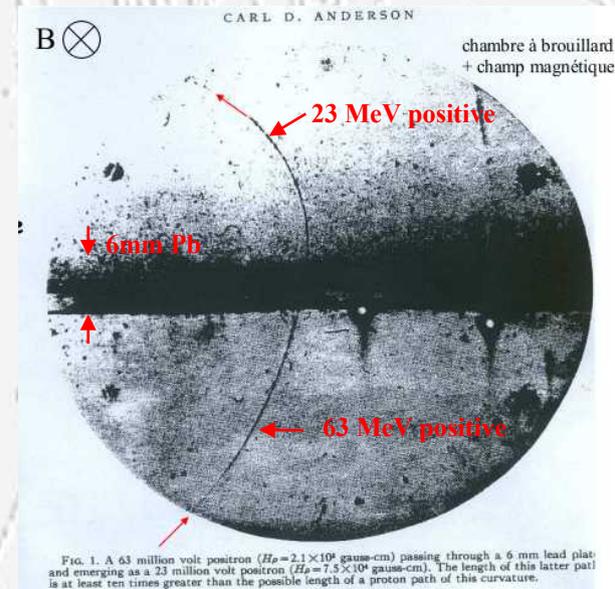


Cloud chamber

1932 Positron discovery
anti-electron, Paul Dirac's theoretical prediction

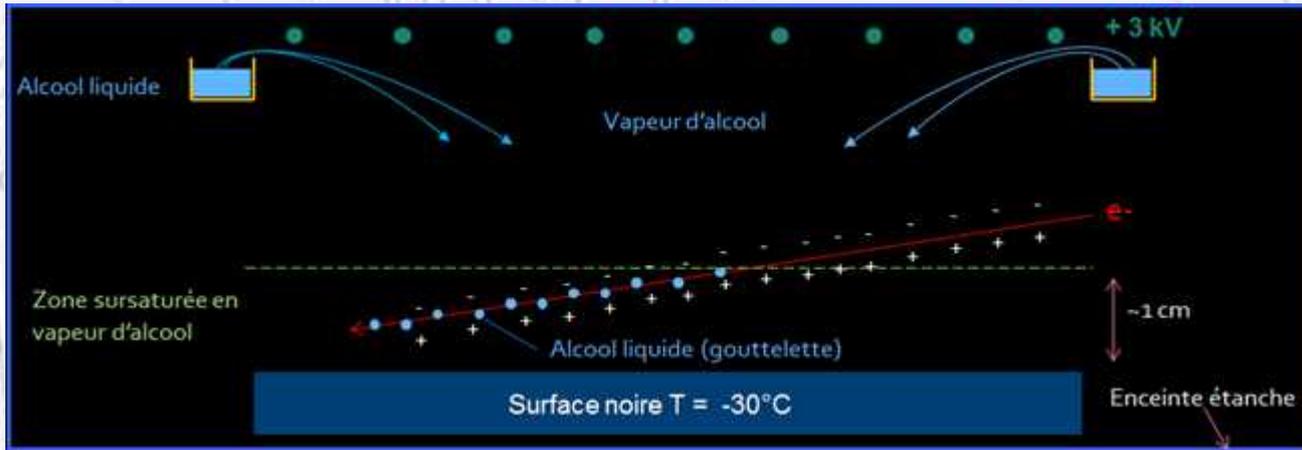


Carl David Anderson
(1905-1991)



Muon discovery

Cosmic rays

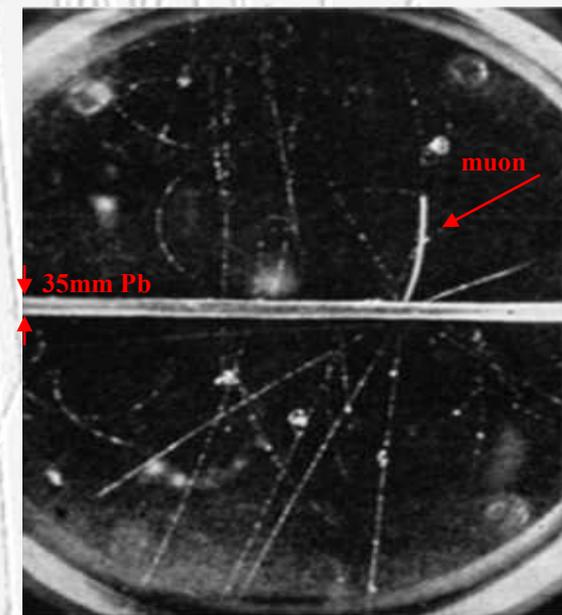


Carl David Anderson
(1905-1991)

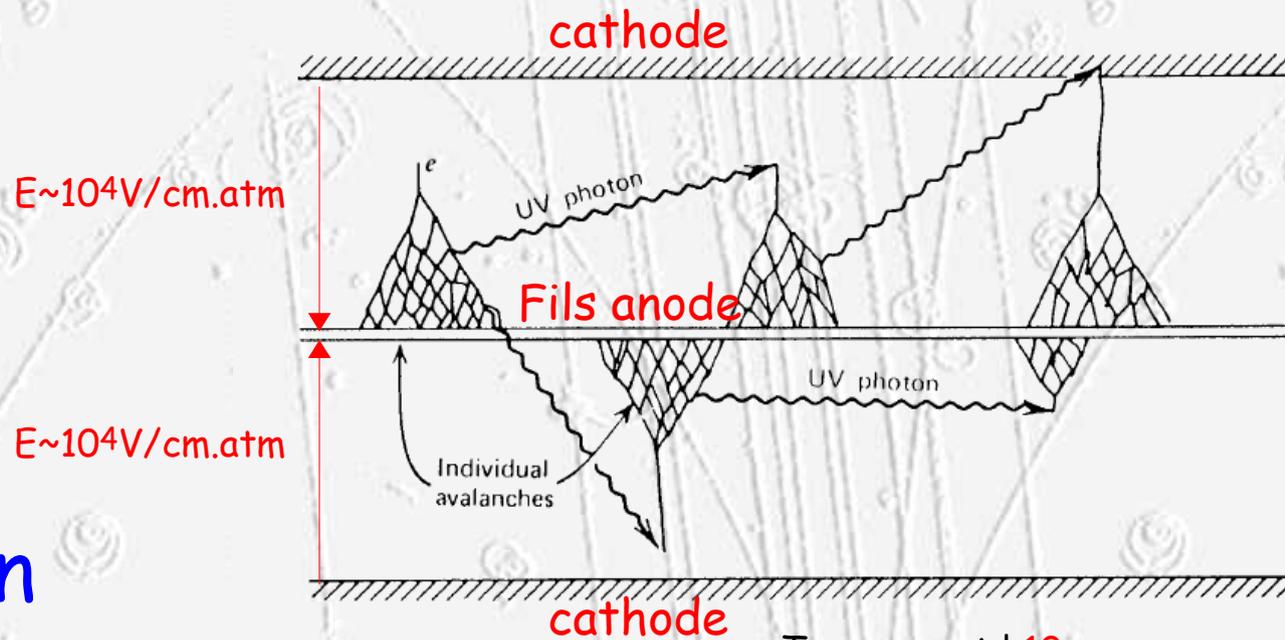
Cloud chamber

1932 Positron discovery
anti-electron, Paul Dirac's theoretical prediction

1936 Muon discovery
Mu-meson! (wrong naming)
"Who ordered that?" (I. I. Rabi)



Détecteur de traces : **Gaz**



Principe : Ionisation

- H.Geiger-Muller 1928
- Électrons supplémentaires :
 - $n = n_0 e^{\alpha(E)x}$
 - α coeff. Townsend dépend de E ou de r (inversement prop. à λ)
- Au delà de 10^8 électrons il y a étincelle
- On peut compter les particules (pas de mesure : position, énergie,...)
- Dans la suite ce principe est conservé et amélioré

Temps mort ! **10ms**,
Aucun signal ne peut être
détecté pendant ce temps

Detectors(Gaseous)

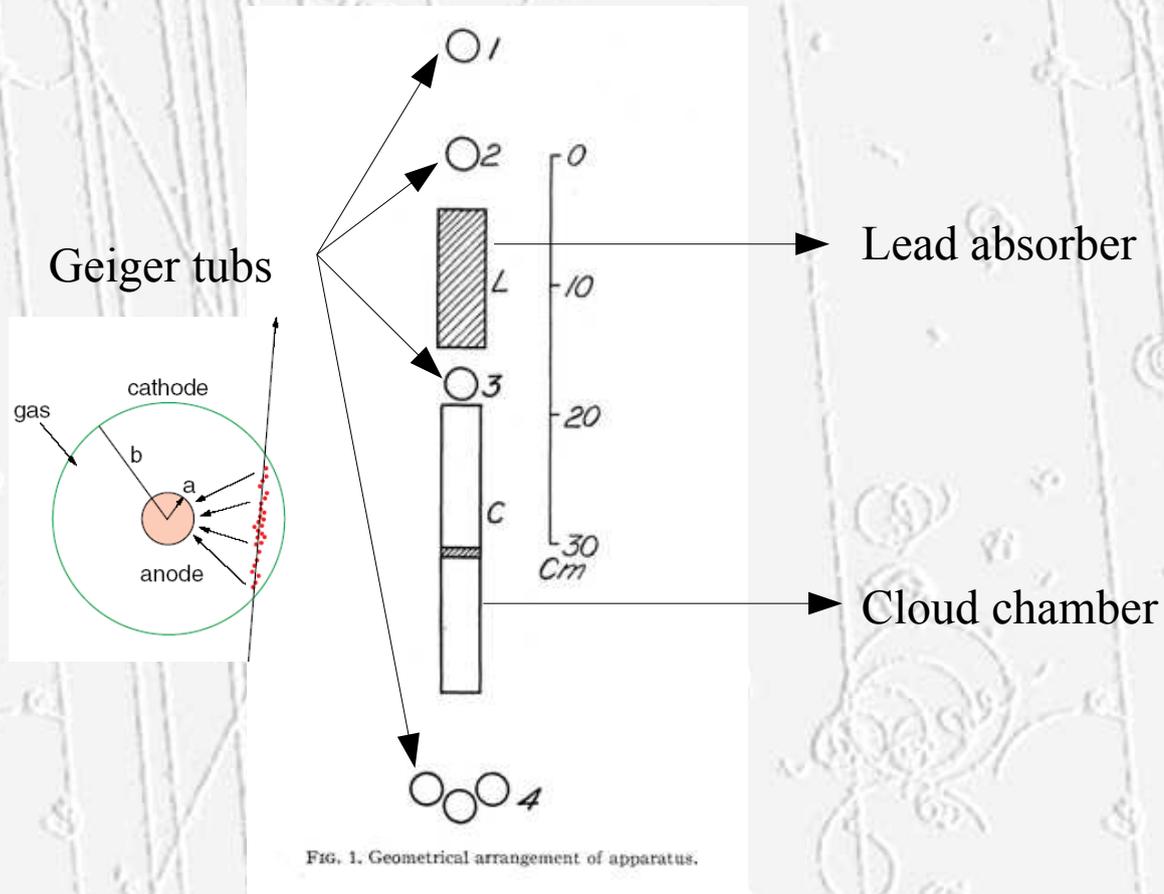
Geiger Counter

- Used as a Trigger device

New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron

Phys. Rev. 52, 1003 – Published 1 November 1937

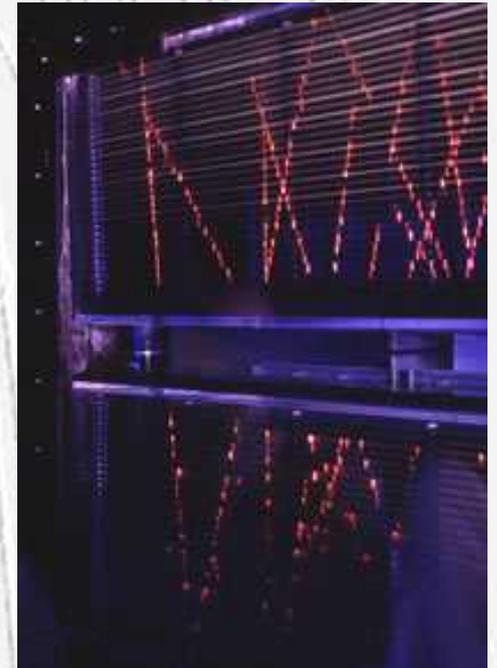
Muon



Detectors(Gaseous)

Spark Chambers

- Pairs of metal plates are connected to a HV ~ 10 kV creating a strong electrical field between the plates. Charged particles passing across the plates ionize the gas and create a conducting trace that leads to a spark between the two plates which is then photographed.



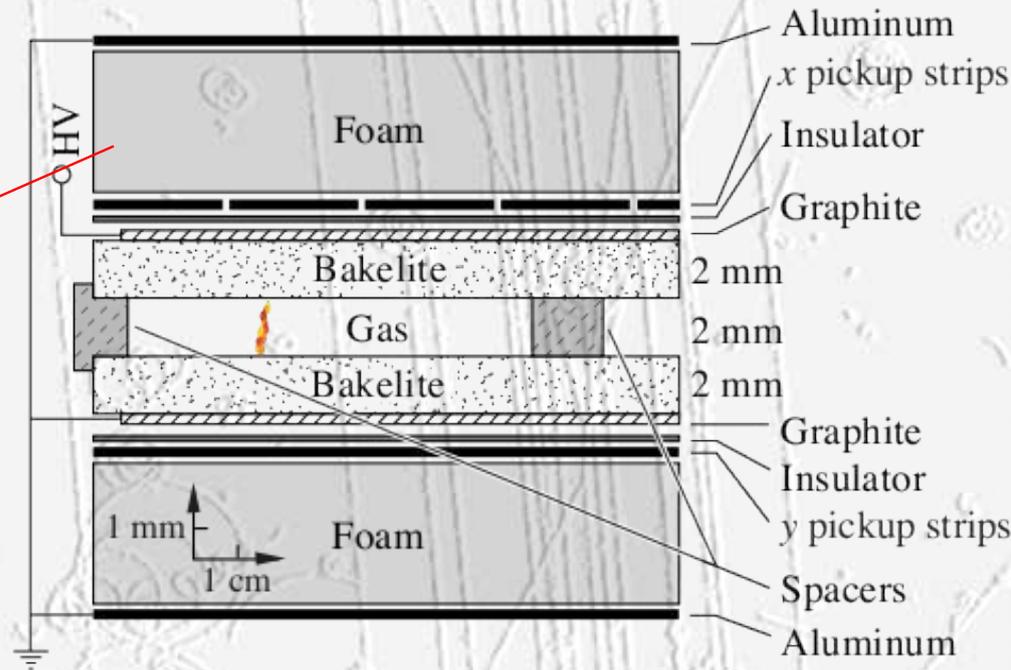
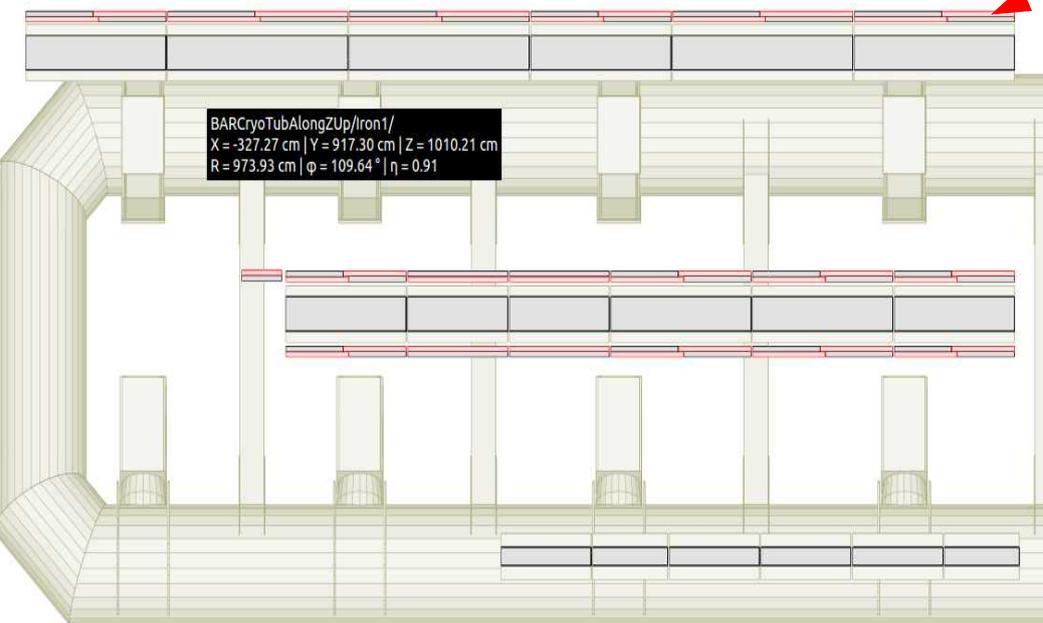
Remark:
HV applied 0,1 s à 1 μ s
to avoid saturation

A spark chamber at the physics museum of the Sapienza University of Rome

Detectors(Gaseous)

RPC: Resistive Plate Chamber

- ATLAS Muons spectrometer **Trigger**
- Time Resolution $\sim 2\text{ns}$!
- $\sim 10\text{KV}$ between Bakelite plans
- Passage of the particle induced discharge ($\sim 300\text{mV}$ signal)
- Spatial resolution $< \sim 1\text{mm}$
- No wire !!!!
- Streamer (or avalanche) mode ATLAS/CMS



Detectors(Gaseous)

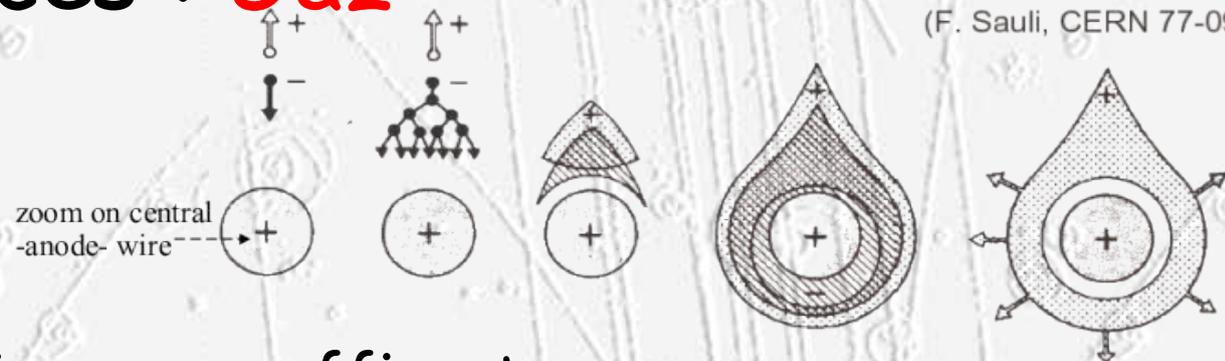
RPC: Resistive Plate Chamber

- ATLAS Muons spectrometer **Trigger**
- RPCs are robust detectors (no wire)
- The signal formation happens in the conversion gap as soon as the ionization electrons amplify and the avalanche develops. The signal is induced instantly on the readout strips placed on the outside of the resistive plates. RPCs are therefore fast detectors and achieve time resolutions in the ns range (or better)
- In standard RPCs the resistive plates are Bakelite with a bulk resistivity of $\approx 10^{10}$ Ohm/cm (CMS, ATLAS, Babar, ...)
- The weak point of the RPCs is their rate limitation owing to the high bulk resistivity in the resistive plates, leading to local charging up, followed by a loss of efficiency.
- RPCs are considered safe up to rates of about a few kHz/cm²



Détecteur de traces : **Gaz**

(F. Sauli, CERN 77-09)

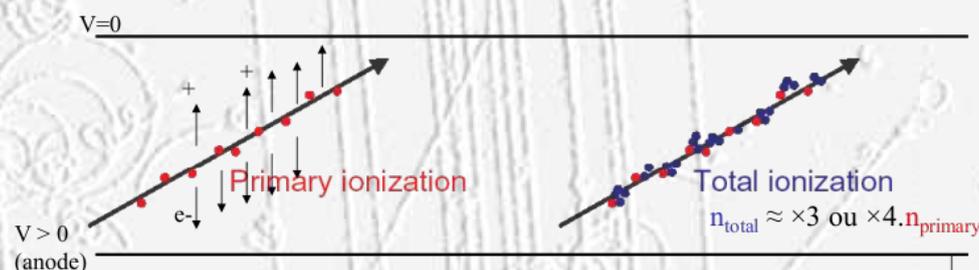


Ionisation

- Primaire, puis secondaire : pas suffisante pour une mesure
- Champ électrique => Avalanche

Avalanche

- Le champ électrique accroît le nombre d'e- arrachés au milieu
- On mesure la variation de potentiel induite par la dérive des ions

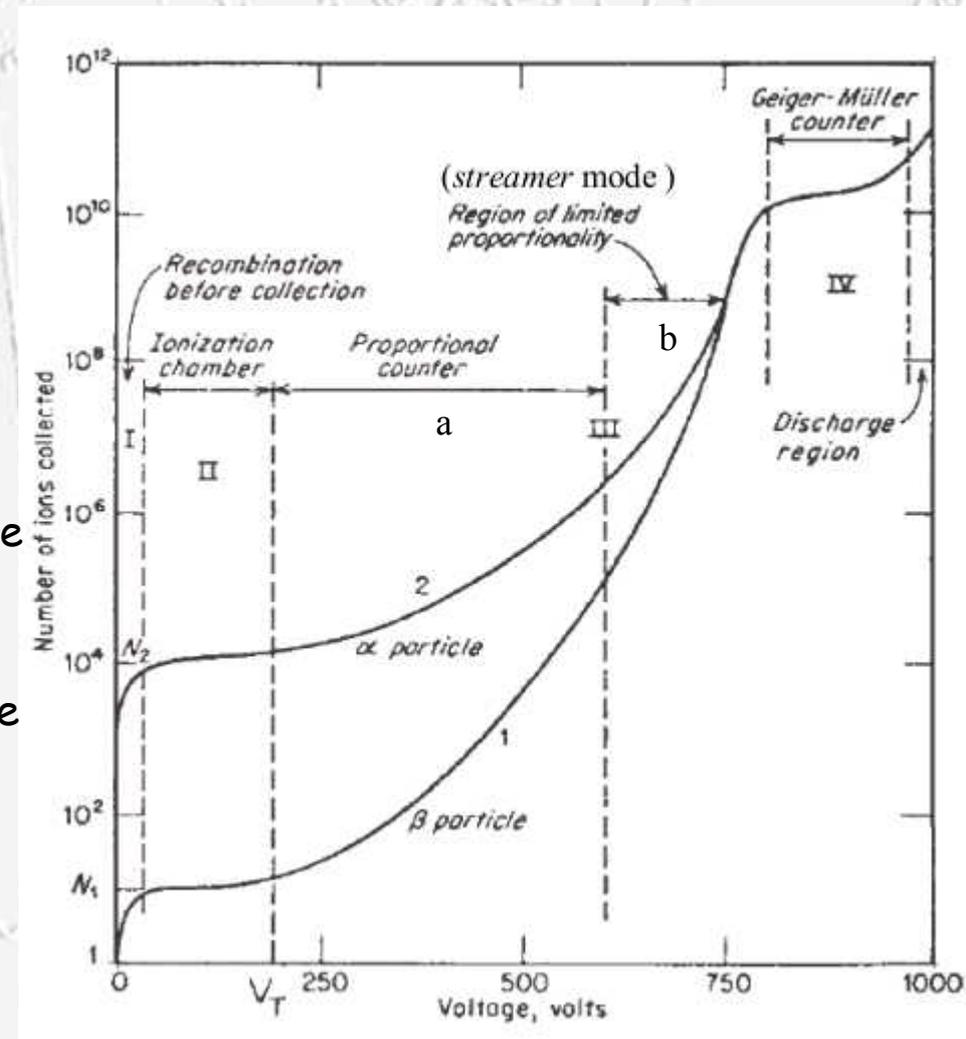


(F. Sauli, CERN 77-09)

Détecteur de traces : Gaz

Gain vs Champ Électrique

- I: Tension trop faible: ré-combinaison des paires.
- II: Chambre à ionisation . Collection des charges sans amplification.
- IIIa: mode proportionnel Signal est amplifié et proportionnel à l'ionisation. Le gain va de 10^4 à 10^5
- IIIb: mode « streamer ». Avalanches secondaires induite par l'avalanche principal besoin d'un mélange de gaz avec « Quencher » ou une tension pulsée. Gain $\sim 10^{10}$.
- IV: mode Geiger-Müller . Avalanche dans l'ensemble du détecteur.



Remarque : Pas de champ Électrique, pas d'accélération des e^- \Rightarrow recombinaison

Détecteur de traces : **Gaz**

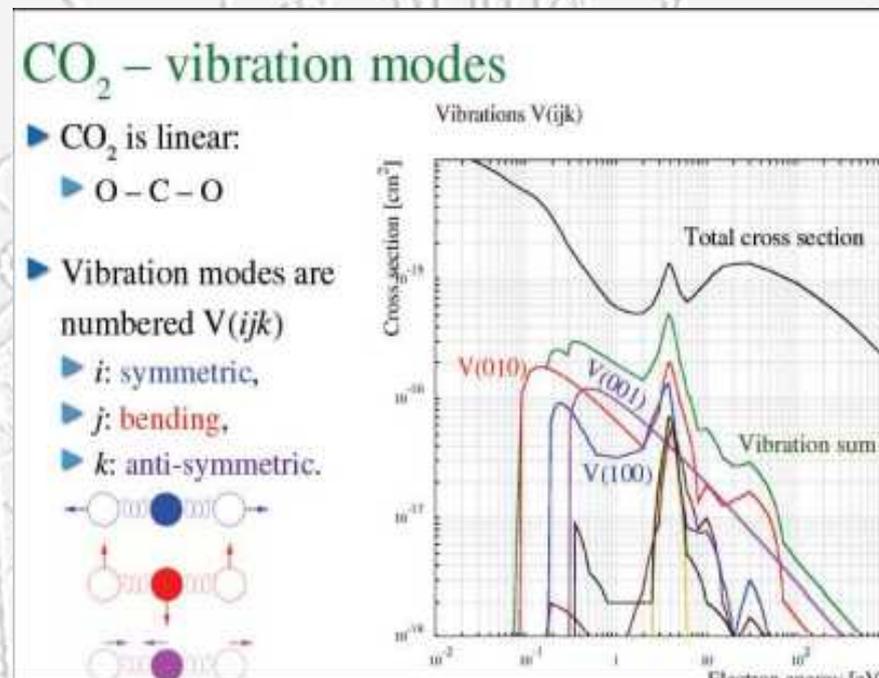
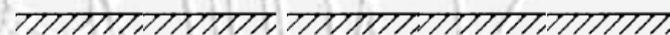
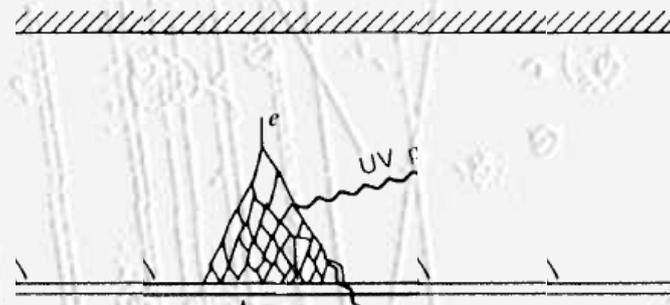
Précision spatiale

- Éviter les avalanches secondaires
- Absorption des photons
- Gaz noble : ionisation MAIS production de UV

Gaz « quencher »

- Gaz Polyatomique (les photons sont absorbés et leur énergie est dispersée par des modes par vibration ou par rotation de la molécule)
 - exemple: méthane CH_4 , isobutane C_4H_{10} , éthanol, CO_2
- Pas de solution miracle:
 - Calcul complexe...
 - Doit être testé :
 - F.Sauli, 1977 cern yellow report
- ex : 70% Ar, isobutane 29.6%, Fréon 0.4%

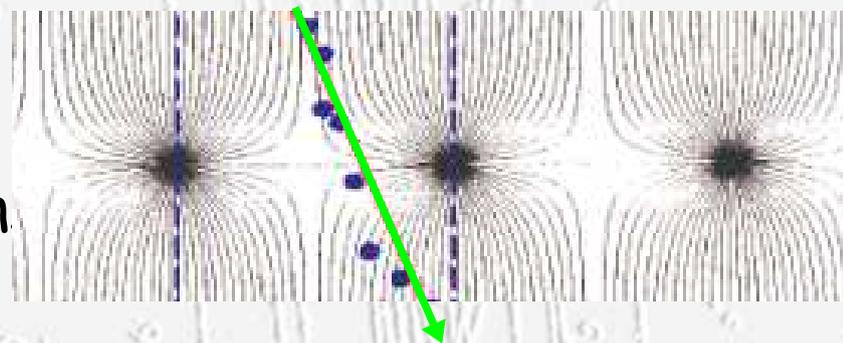
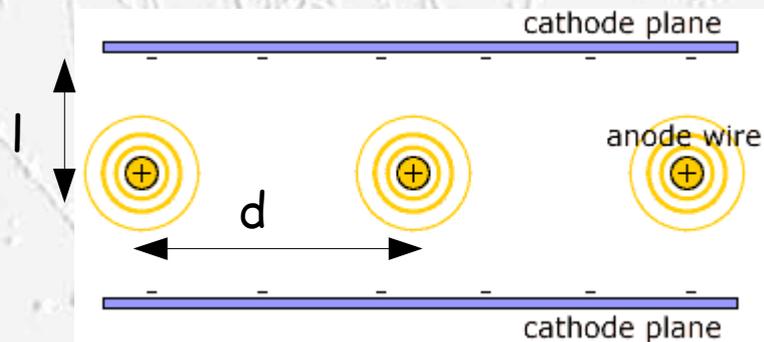
R.Veenhof (Garfield) <http://cern.ch/garfieldpp>



Détecteur de traces : **Gaz**

Chambres à fils (MWPC*)

- Charpak 1968
- Mise à plat du compteur proportionnel
- Résolution en temps : 200 ns
- Résolution spatiale $< \text{mm}$
- Mesure du signal sur le fil (rapide n)
- $l \sim 5 \text{mm}$, $d \sim 1 \text{mm}$, $E \sim 50 \text{ V/mm}$

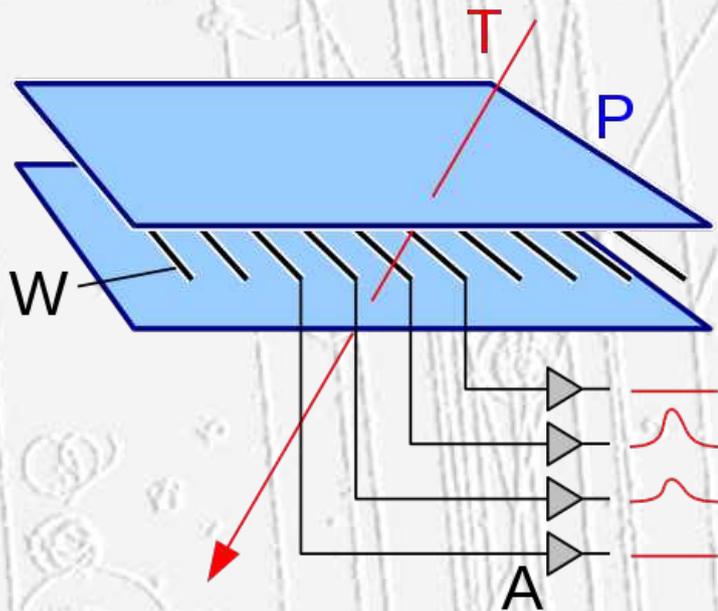


*Multi Wires Proportionnel Chamber

Detectors(Gaseous)

Wires Chamber

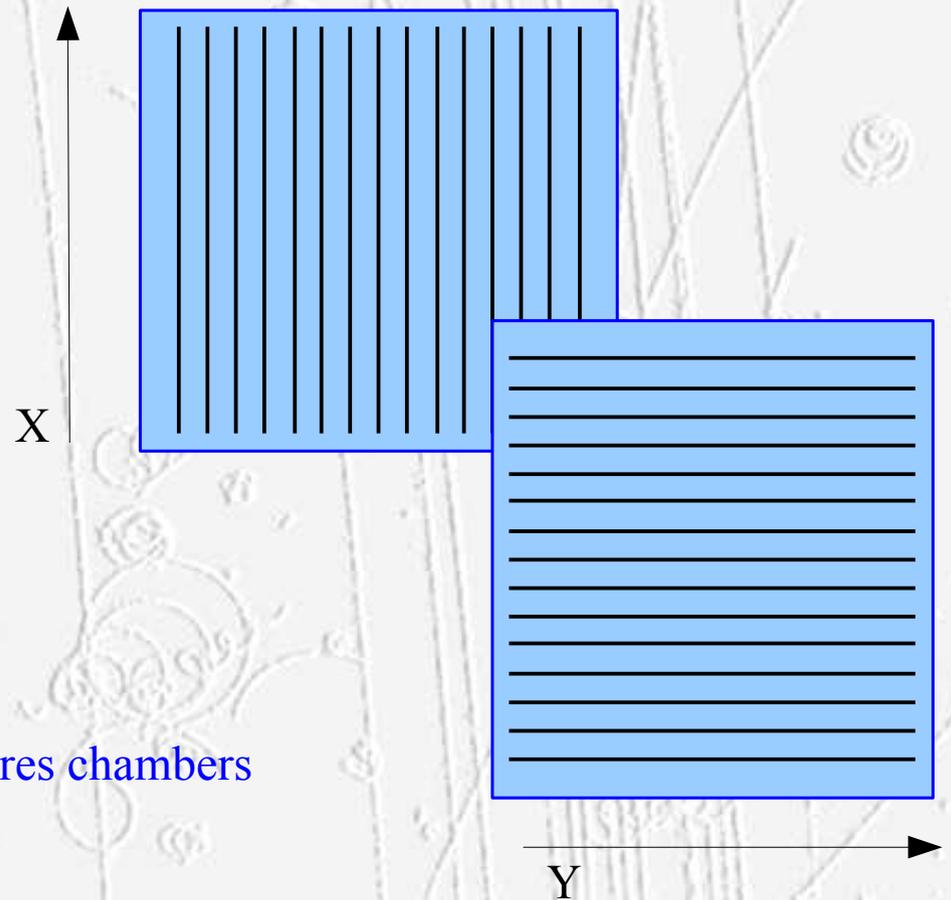
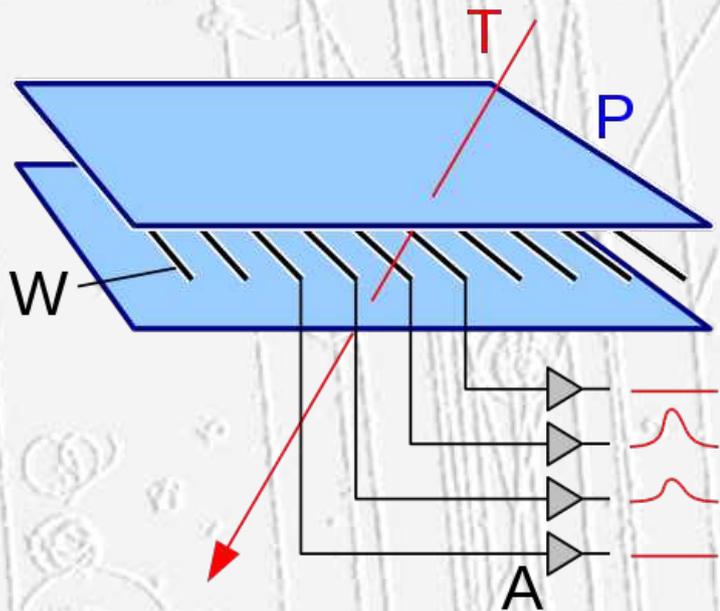
- Large area (and volume) tracking detectors
- Accuracy is function of the wire distance, ~ 1 to 2 mm
Spatial resolution = $d/\sqrt{12}$ (for $d=1$ mm, $\sigma \sim 300$ μm)
- Wires measure only one coordinate!!!



Detectors(Gaseous)

Wires Chamber

- Large area (and volume) tracking detectors
- Accuracy is function of the wire distance, ~ 1 to 2 mm
Spatial resolution = $d/\sqrt{12}$ (for $d=1$ mm, $\sigma \sim 300$ μm)
- Wires measure only one coordinate!!!



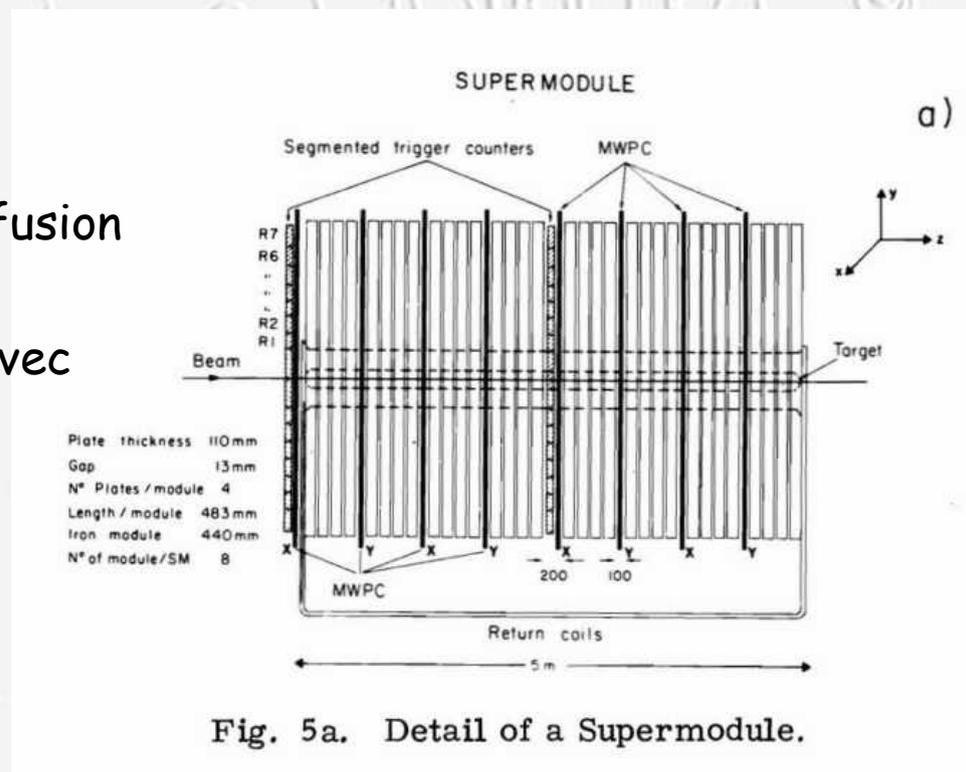
To get the second coordinate: 2 Wires chambers

Détecteur de traces : **Gaz**

Chambres à fils

Na4 : mesure de α_s (constant de structure forte)

- Spectromètre à muons :
 - chambre à fils en sandwich dans un aimant à fer
- 10 super modules de 8 (10) chambres à fils
 - soit 80 chambres à fils
 - alternativement X et Y
- Résolution spatiale $< \text{mm}$
 - MAIS le fer de l'aimant induit une diffusion multiple qui délave cette résolution.
 - On s'approche des chambres à bulles avec représentation des traces en 3D



Détecteur de traces : Gaz

Chambres à fils

X

Y

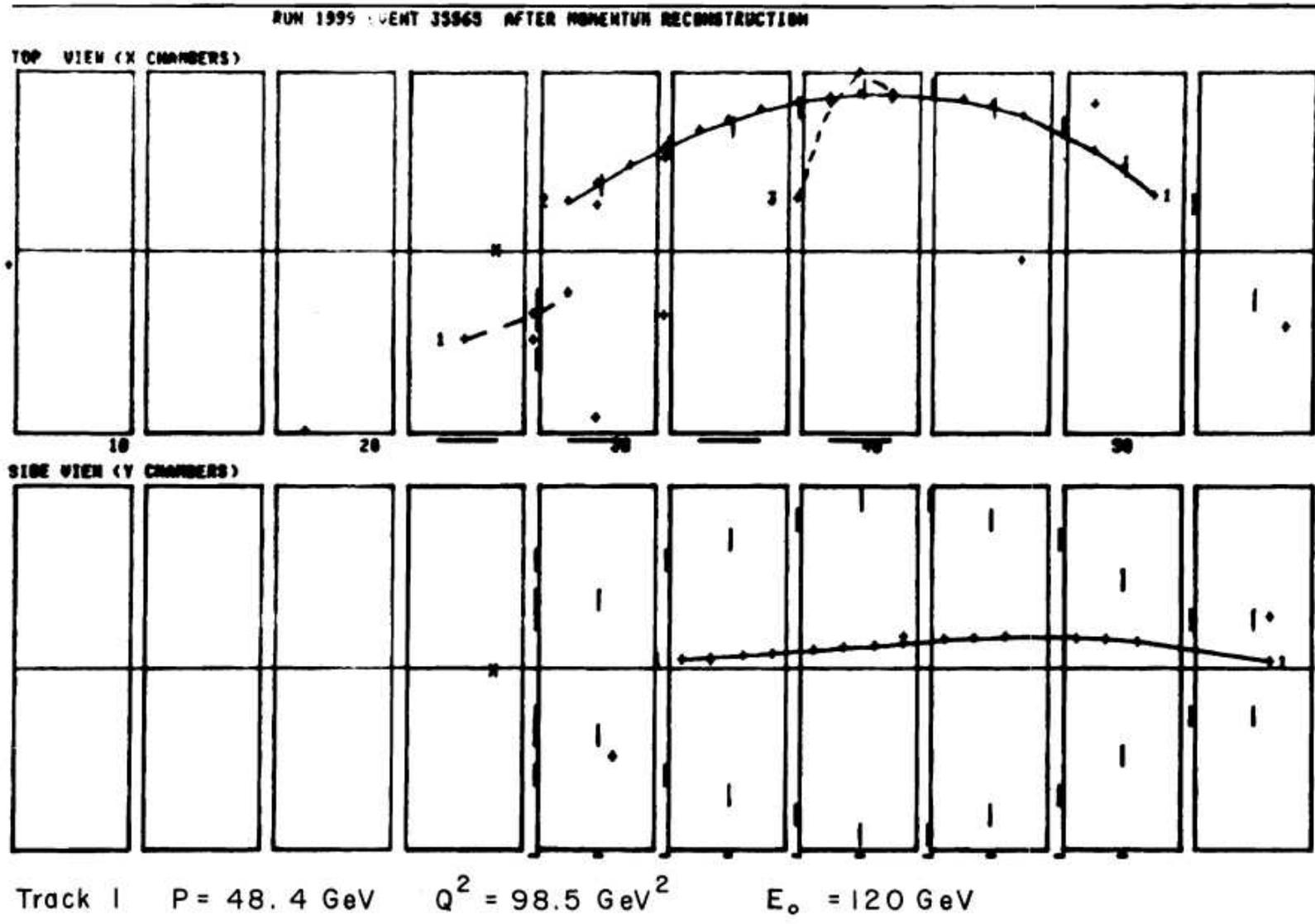
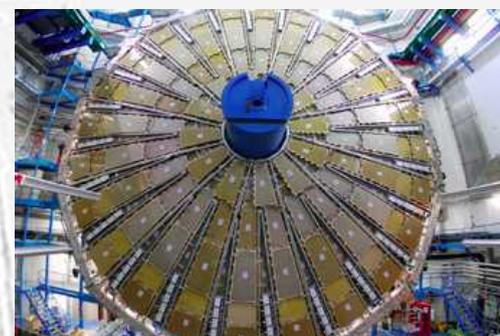


Fig. 14. Example of a deep inelastic muon scattering event at 120 GeV in the NA4 apparatus.

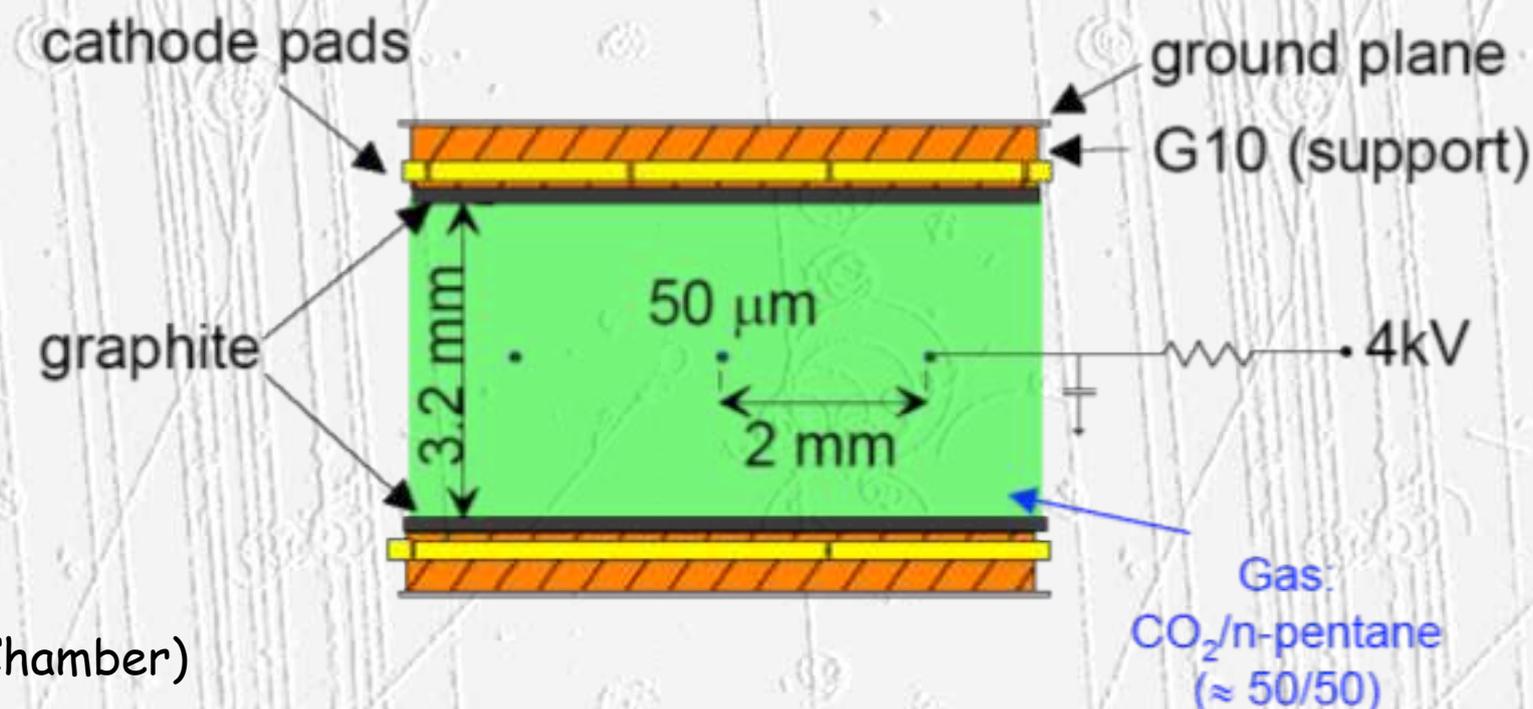
Détecteur de traces : **Gaz**



Chambres à fils

- **Atlas : TGC***

- Opération en mode saturé (Geiger)
- Temps de montée très bref (2 ns) : Déclenchement (« trigger »)
- Accepte des taux de comptage élevés (jusqu'à 10⁶ Hz)

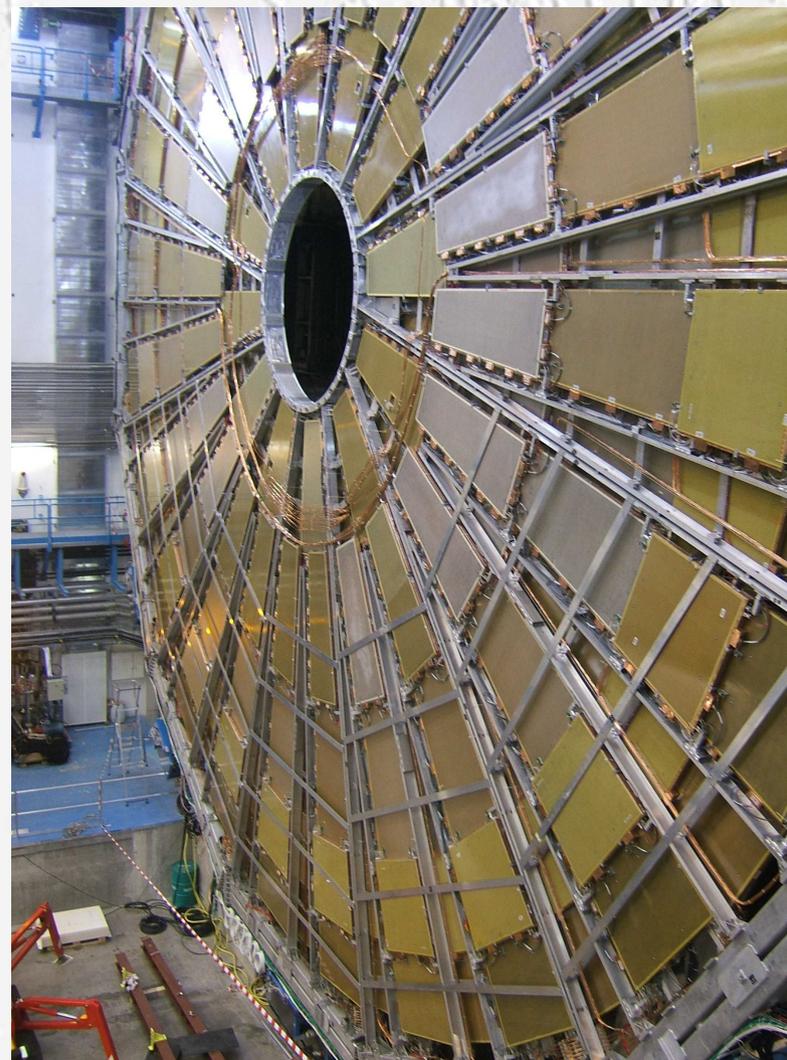
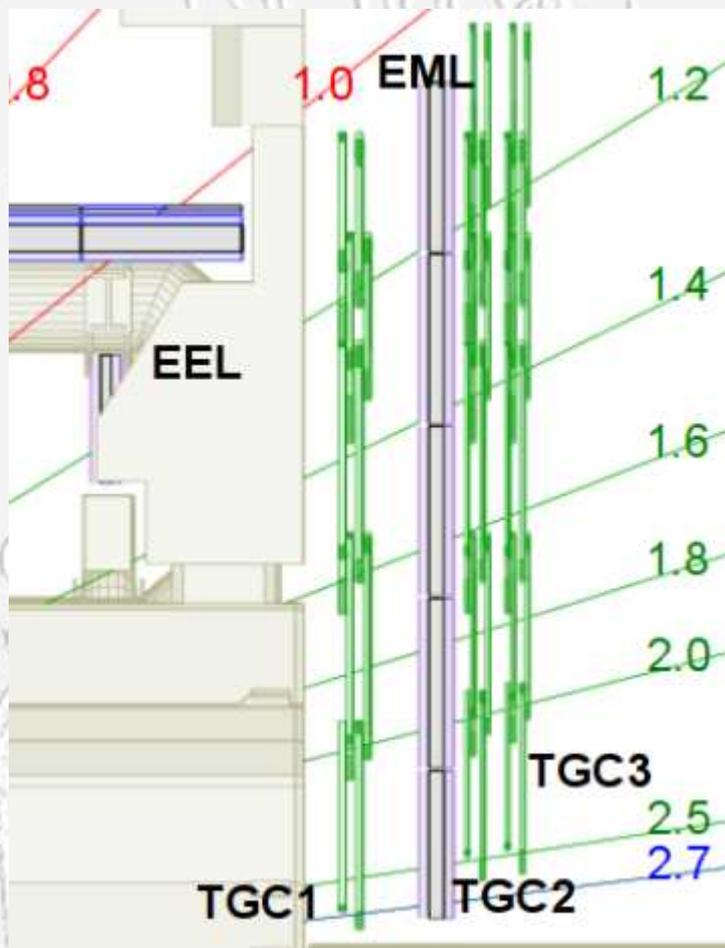
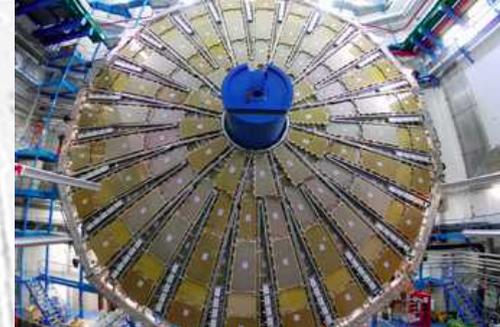


*(Thin Gaz Chamber)

Détecteur de traces : **Gaz**

Chambres à fils

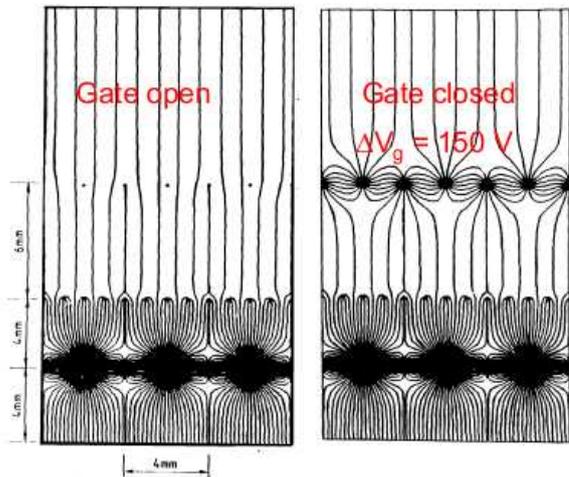
- Atlas : TGC



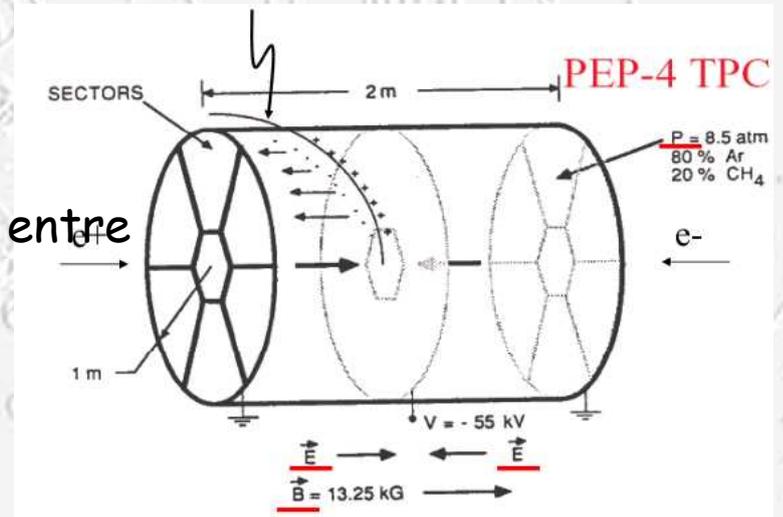
Détecteur de traces : **Gaz**

TPC (Time projection Chamber)

- 1974 LBNL **mesure en 3 dimensions** des Jets
- Mesure du signal sur le fil (donne une direction): 185 fils sur 80cm
- Mesure du signal induit sur la **cathode segmentée** (8mm) (donne une information le long du fil)
- Mesure du temps de dérive => coordonnée le long de l'axe de la TPC
- E//B :
 - Trace + champ magnétique: mesure de l'impulsion
- B=1.5 T, E=150KV/m, Ar-CH4 & P=8.5 Atm
- Contrôle de la vitesse de dérive des électrons d'ionisation ! $\sim 7\text{cm}/\mu\text{s}$
- Résolution spatiale en Z(direction des lignes de champs E & B) $\sim \text{mm}/\text{m}$
 - La dérive des électrons d'ionisation le long des lignes de champs s'élargit avec z
- **Découplage du champ électrique de dérive et du champ électrique d'avalanche**



Pour empêcher les ions de perturber la TPC :
« porte » (150V) fermée entre
2 collisions

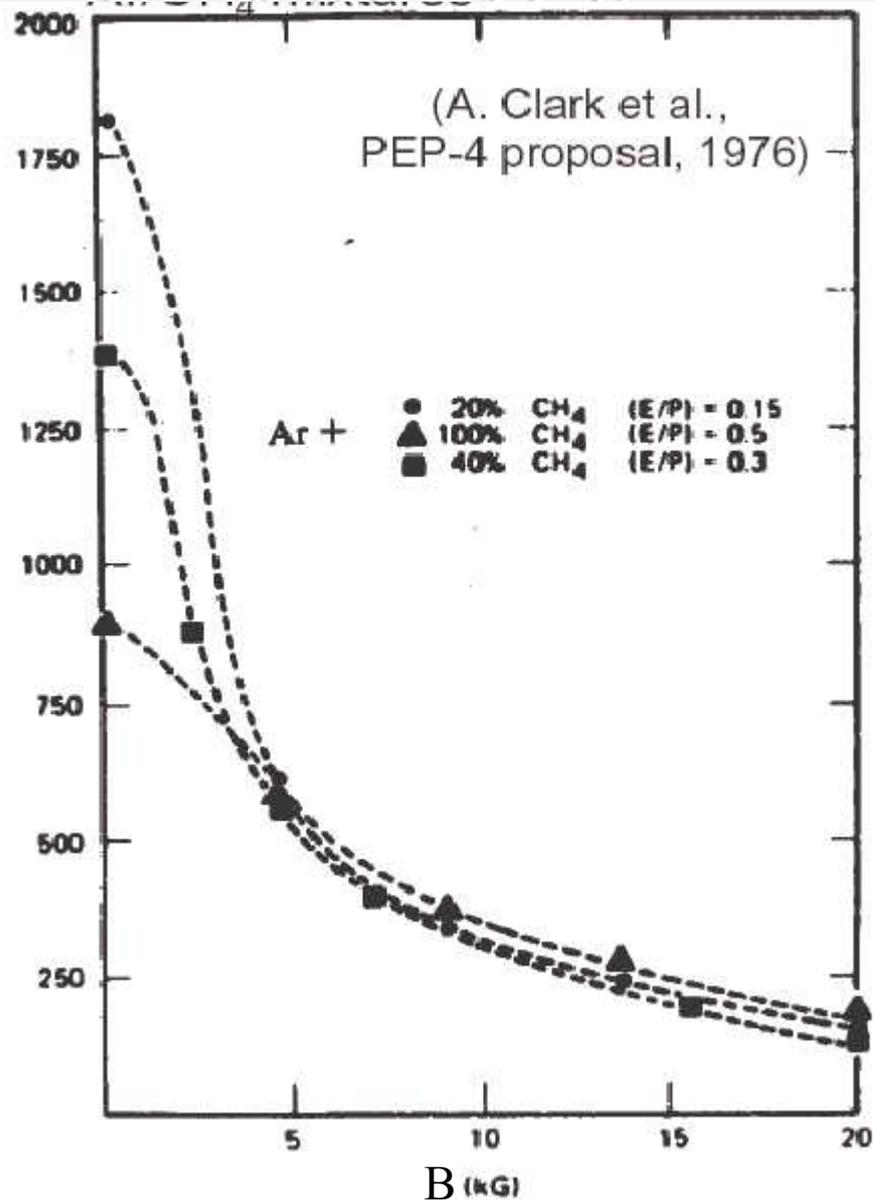


Détecteur de traces : **Gaz**

TPC

- $E//B$: diffusion transverse réduite facteur ~ 7
- Lorentz focalise les électrons
- le long des lignes de champ électrique/magnétique :
- diffusion transverse réduite

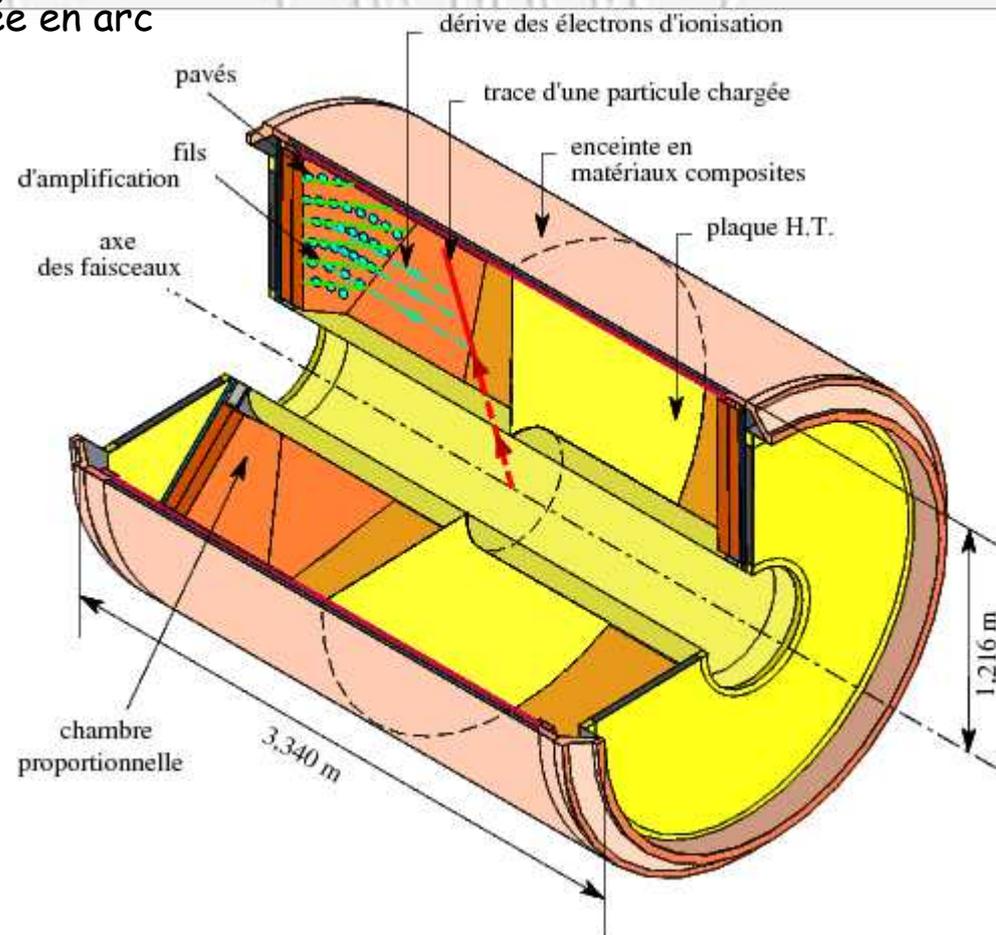
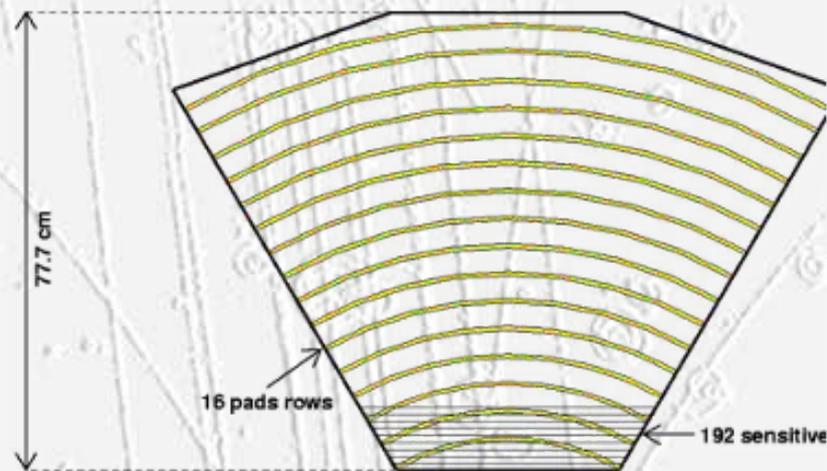
$\sigma(\mu\text{m})$



4. Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, LEP 1992

- Évolution proche, meilleure résolution spatiale
- $B=1.2\text{T}$, $E=150\text{V/cm}$, $\text{Ar}(80\%)\text{-Ch}_4(20\%)$ & $P=1\text{atm}$
- 27 électrons primaires & secondaires /cm
- $6.7\text{ cm}/\mu\text{s}$, diffusion transverse $\sim 100\ \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$
- 2x 6 secteurs, 192 fils, 16 Pad (cathode segmentée en arc de cercle)
- 16 points tridimensionnels
- $2 \times 1.34\text{ m}$, $0.325\text{m} < R < 1.16\text{m}$
- Résolution spatiale : $R_{\phi} \sim 250\ \mu\text{m}$, $Z \sim 1\text{mm}$



4. Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi vs Pep4

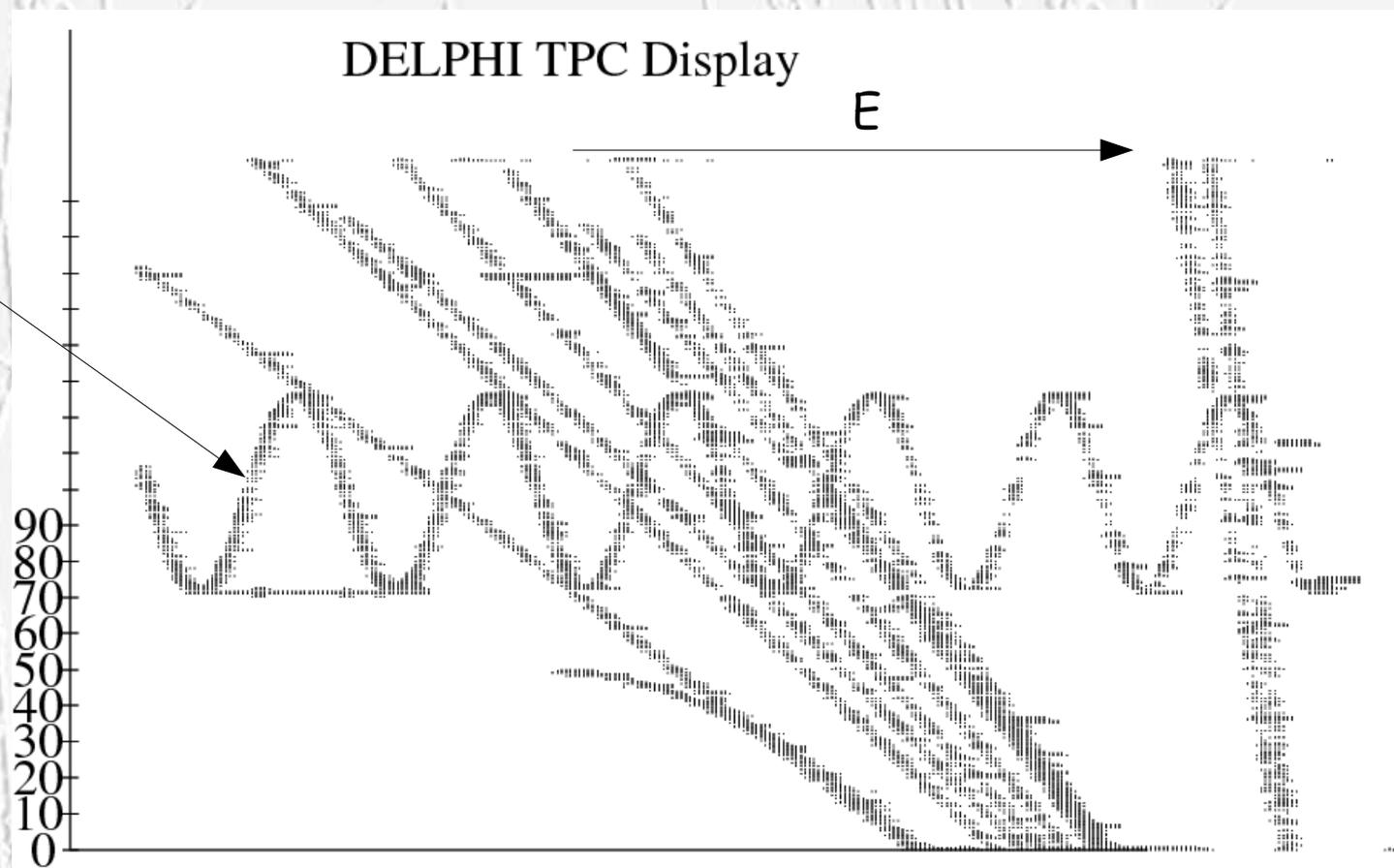
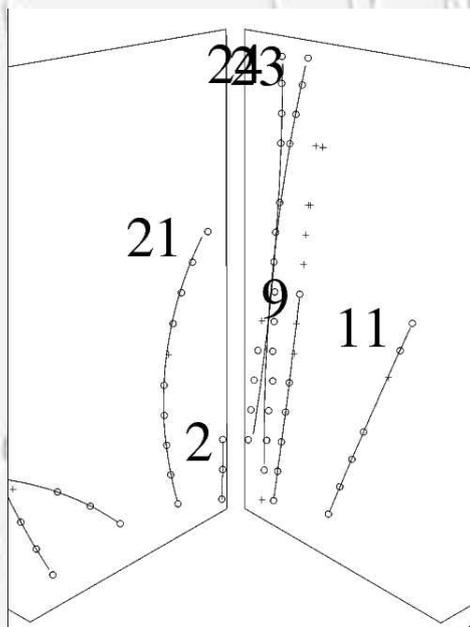
- Pas de différence conceptuelle
- Seul paramètre différent: Pression
 - 1 atm Delphi vs 8.5 atm Pep4
 - l'augmentation de pression a deux effets positifs:
 - plus d'ionisation
 - meilleure mesure de dE/dx
 - mais il y a deux contreparties négatives:
 - la séparation en dE/dx n'est qu'à peine améliorée parce que les courbes se rapprochent
 - Il faut épaissir les parois pour résister à la pression, sans augmenter le nombre de XO: impossible. Donc on ajoute de nombreuses conversions de photons et on perd de la précision sur les traces.

4. Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, Exemple d'événement

- Temps de croisement des faisceaux $22 \mu\text{s}$

Électron sous l'effet
du champ magnétique

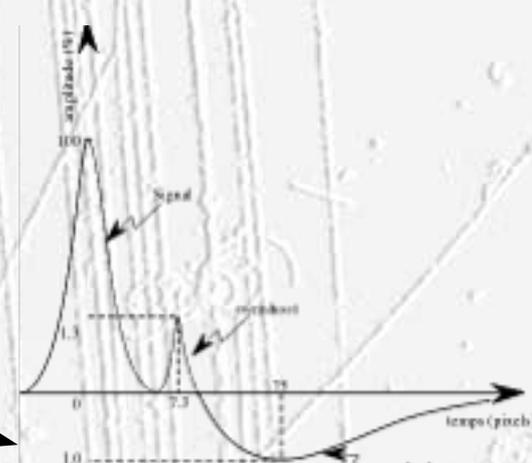
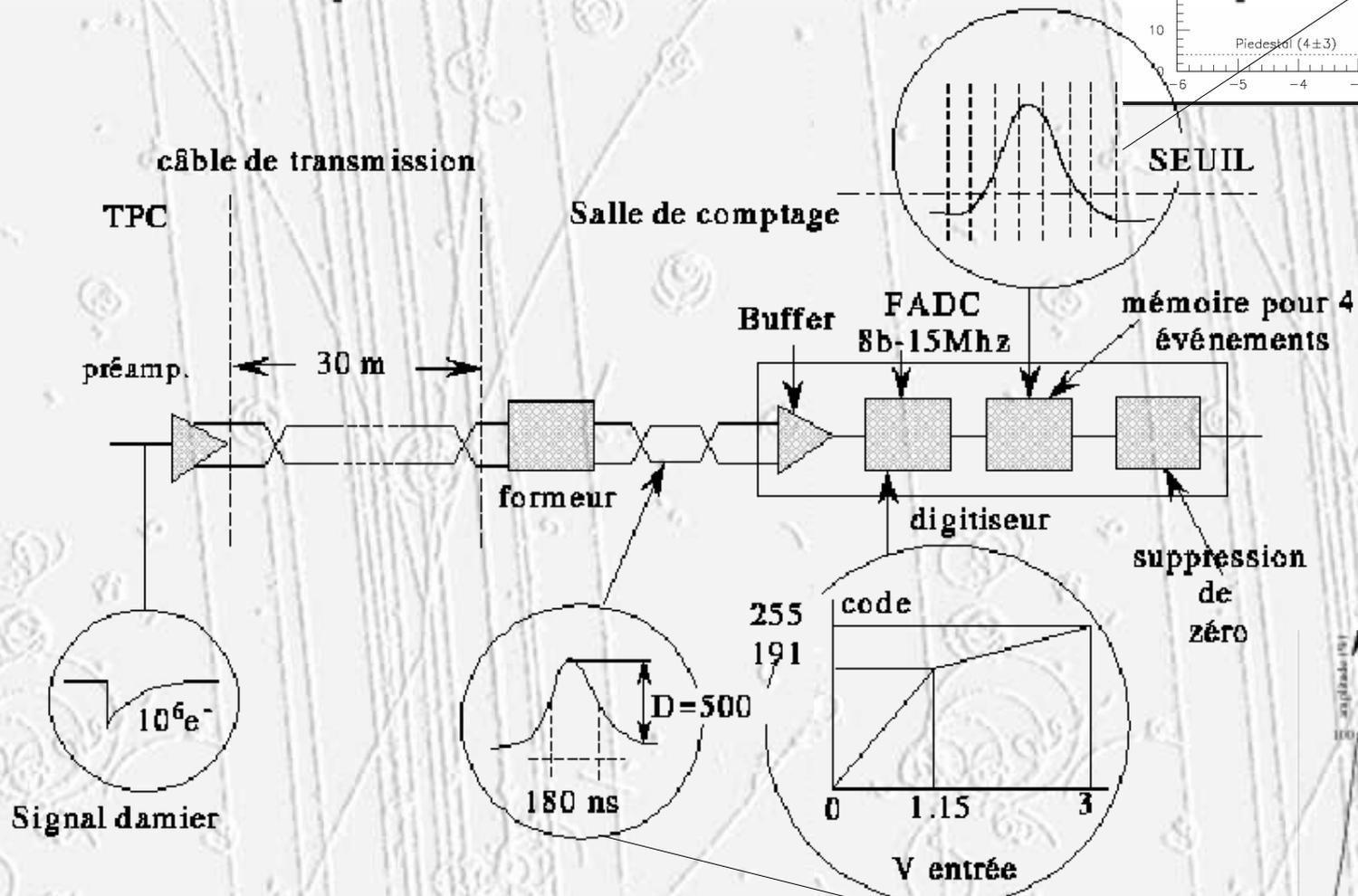
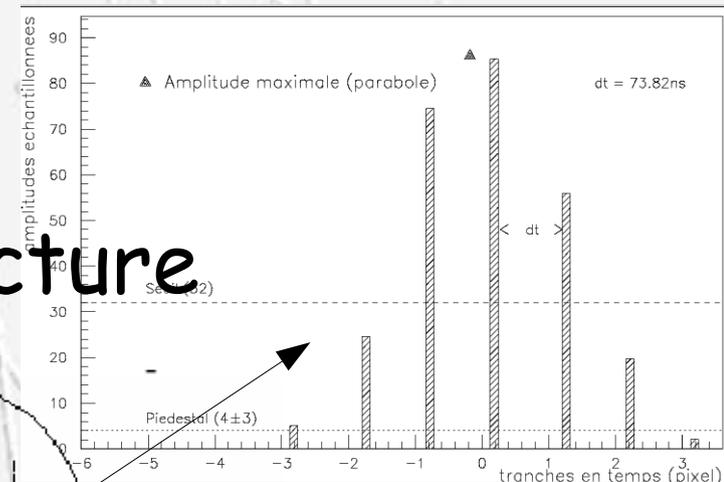


run = 22679 Sector number 4

Plan de fils

4. Détecteurs de Traces : TPC

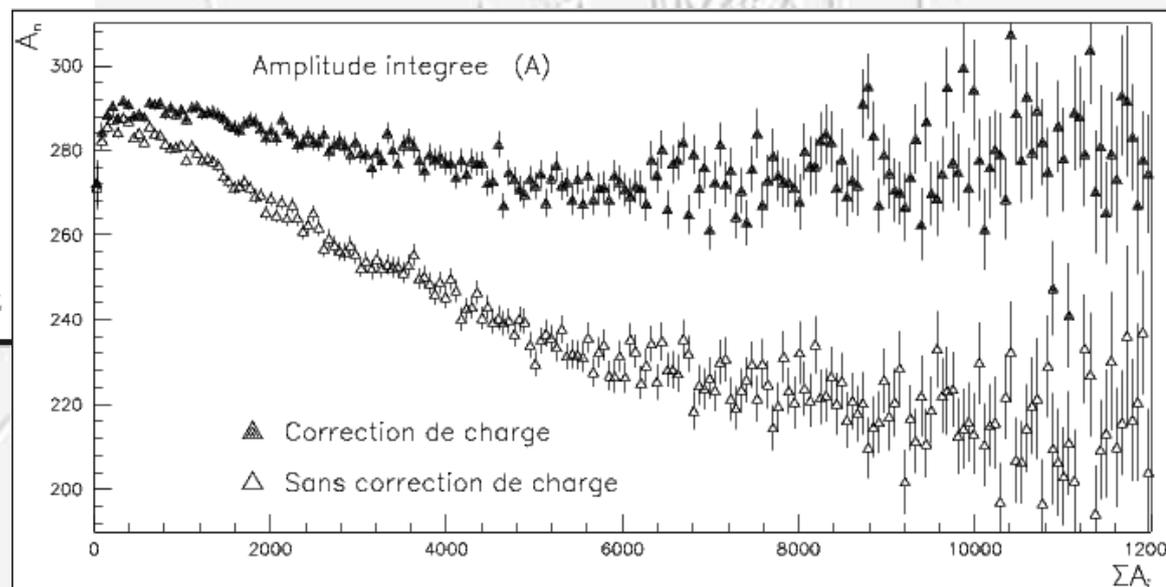
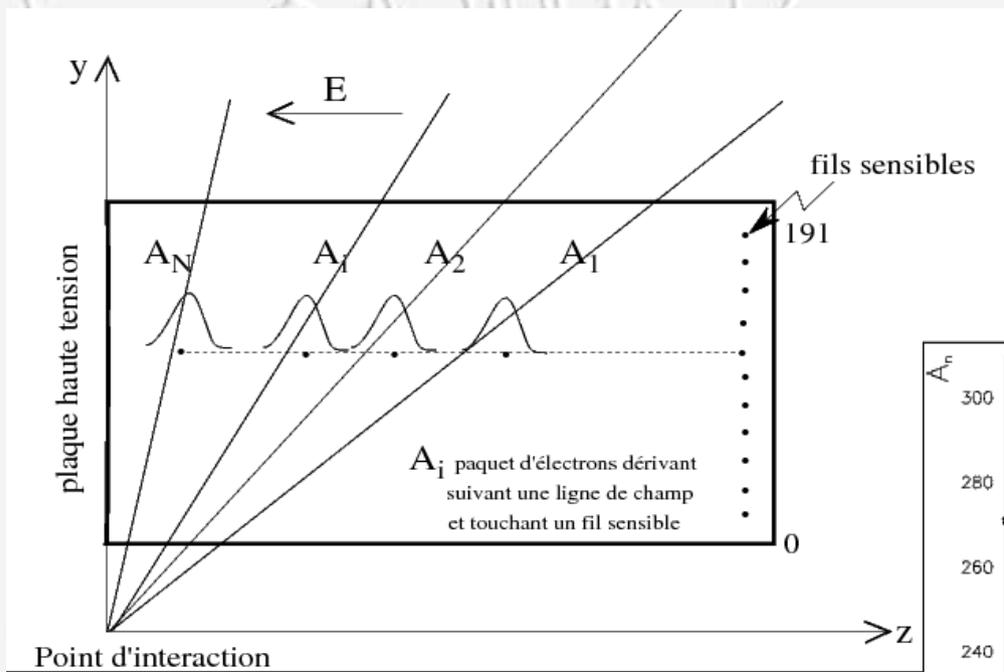
TPC: Delphi, électronique de lecture



4. Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, électronique de lecture

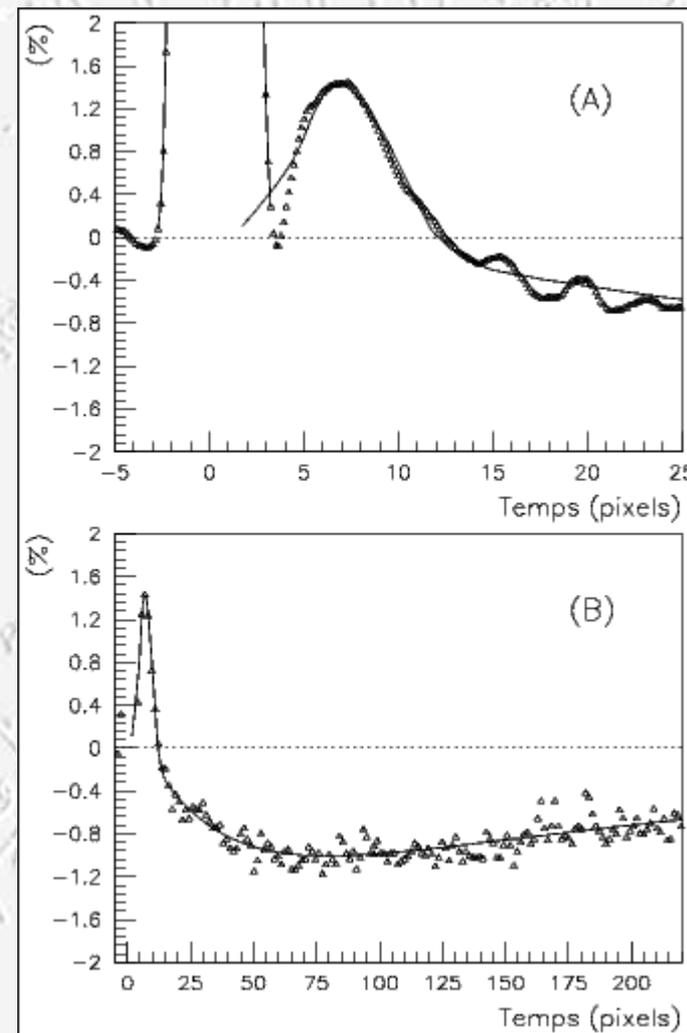
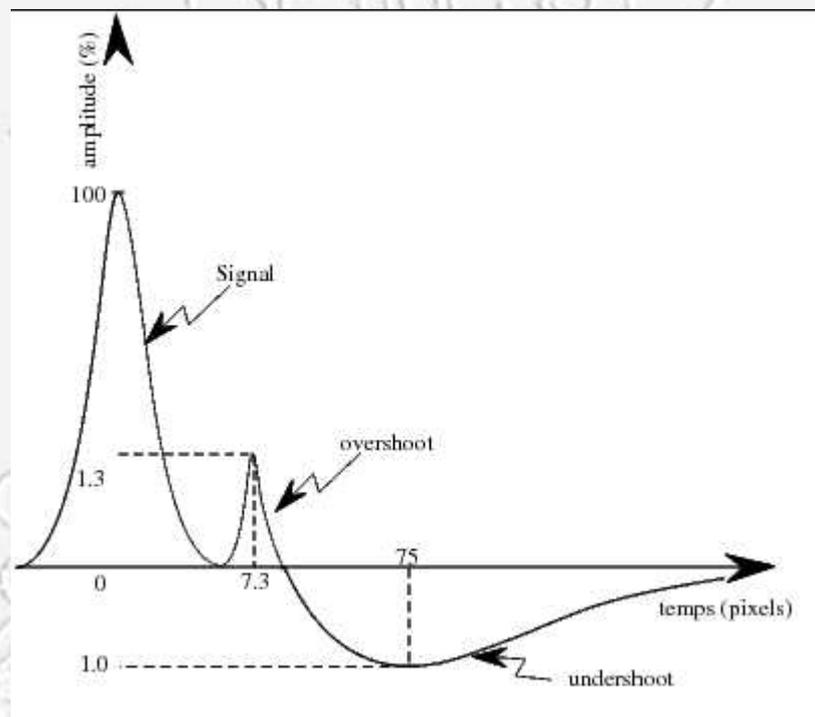
- Temps de croisement des faisceaux $22 \mu\text{s}$
- Temps de séparations des traces $\ll 22 \mu\text{s}$



4. Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, électronique de lecture

- BUG!!!!



4. Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Alice Pb-Pb (LHC)

- 5.1m de long (2x 2.5m), 18 secteurs (MWPC)
- diamètre = 5.6 m, volume = 88 m³
- Rayon interne = 0.9 m, rayon externe = 2.5 m
- Nombre de canaux : 577568 (Delphi : 20160)

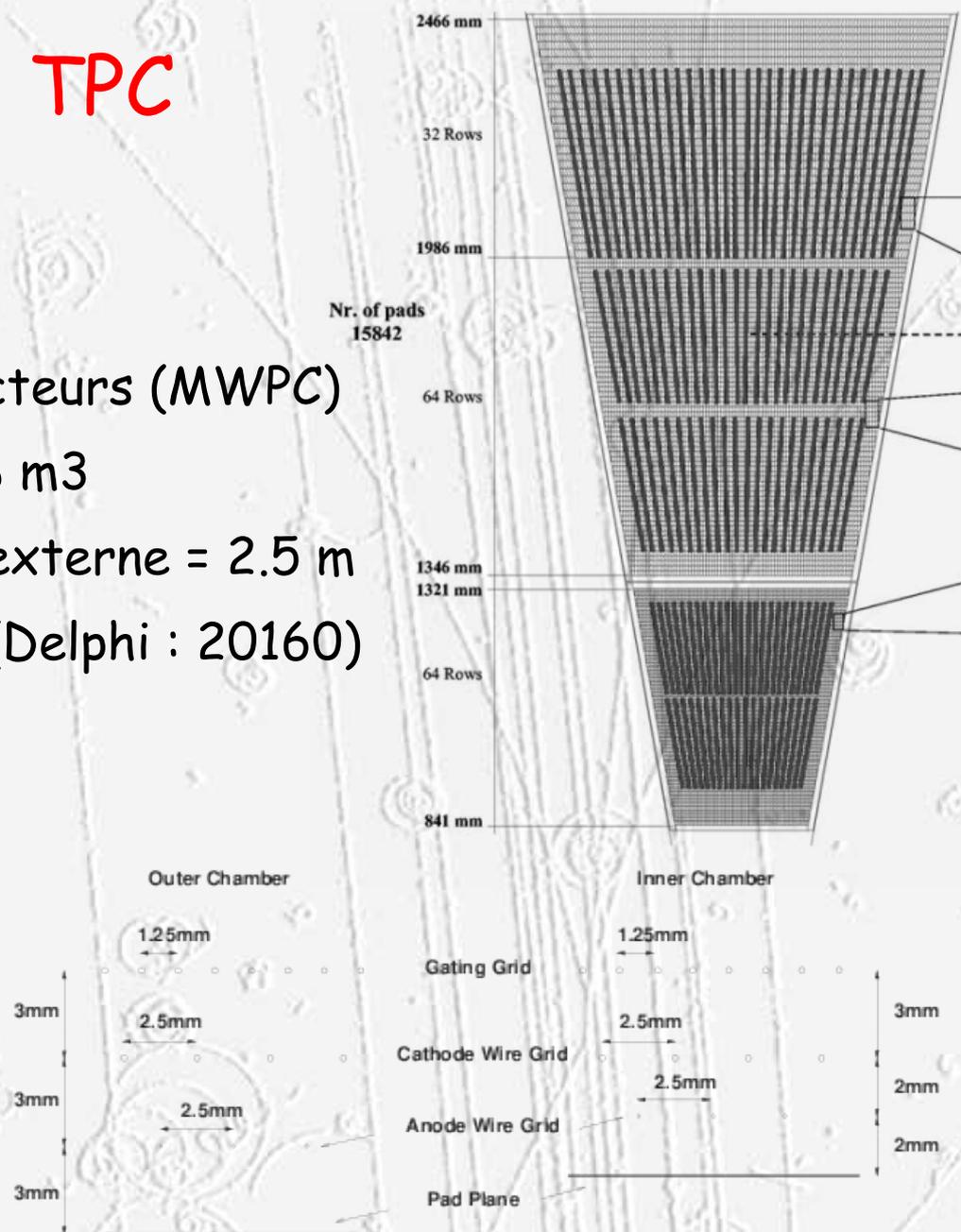
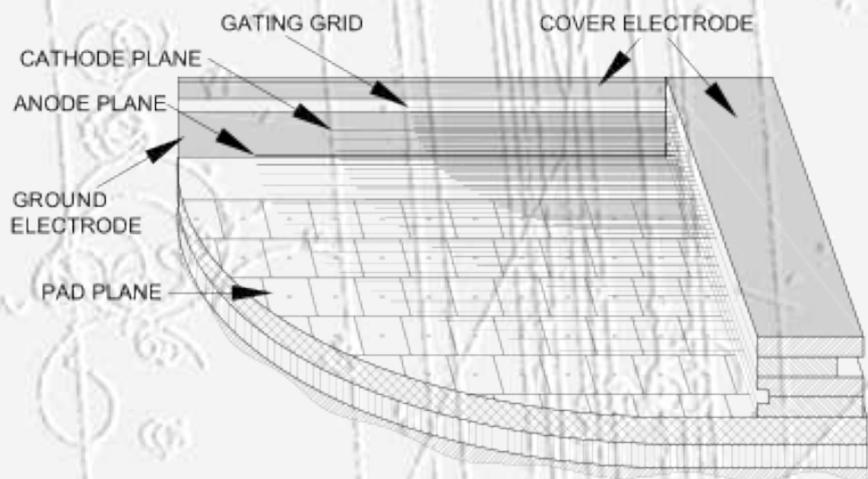
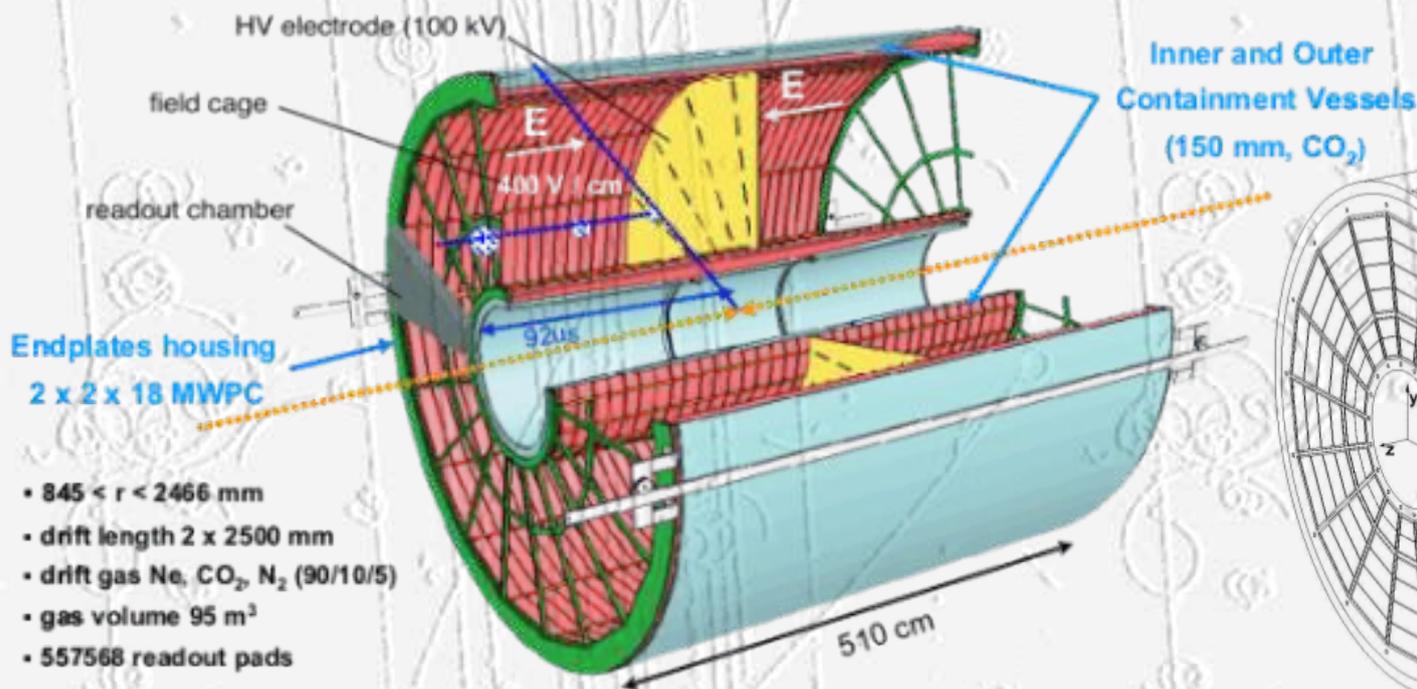
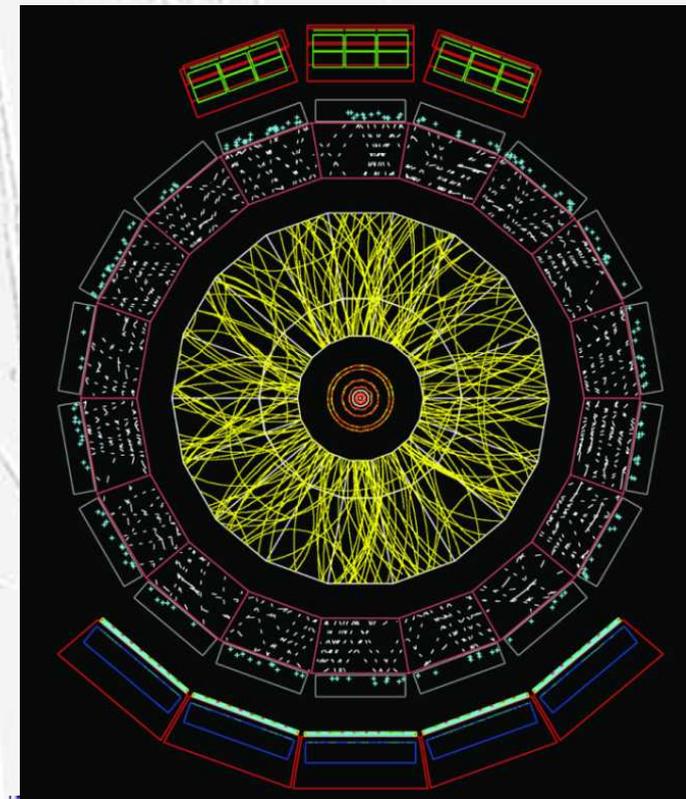


Figure 10: Wire geometries of the outer (left) and inner (right) readout chambers.

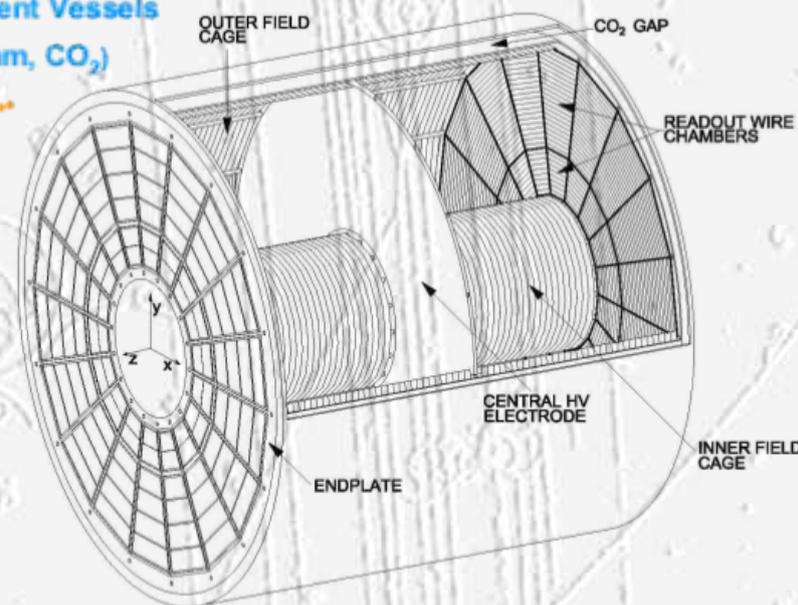
4. Détecteurs à Trace : TPC

TPC: Alice Pb-Pb (LHC)

- Plus grosse TPC jamais construite
- Principes identiques aux précédentes
 - Résolution spatiale : $500 \mu\text{m}$, trace séparation 5mm
 - Résolution en impulsion : 1% à 1 GeV , 5% à 10 GeV



- $845 < r < 2466 \text{ mm}$
- drift length $2 \times 2500 \text{ mm}$
- drift gas Ne, CO₂, N₂ (90/10/5)
- gas volume 95 m^3
- 557568 readout pads



Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Čerenkov
- Rayonnement de Transition

} Rayonnement Cohérent

Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

I

particule

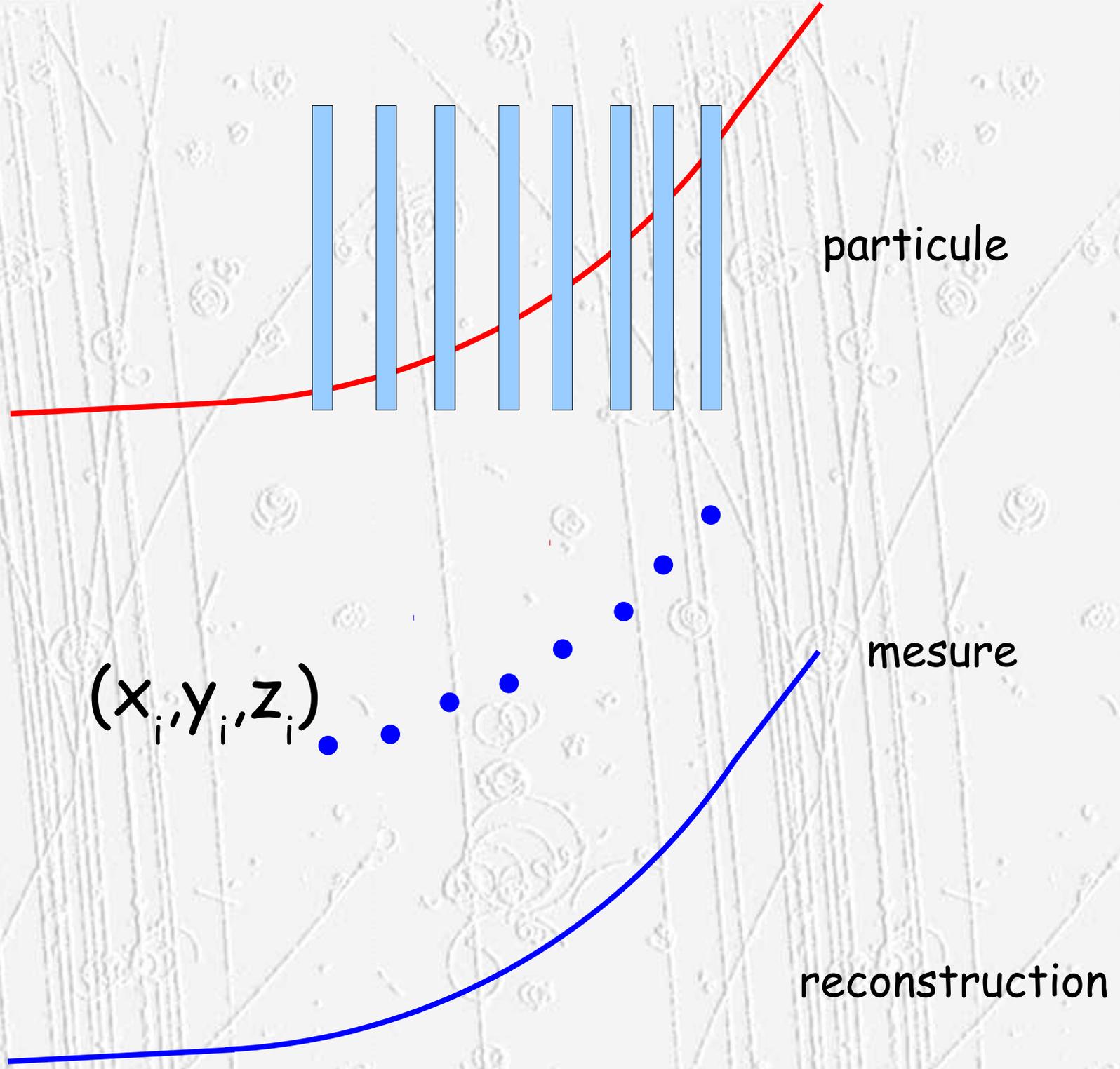
II

(x_i, y_i, z_i)

mesure

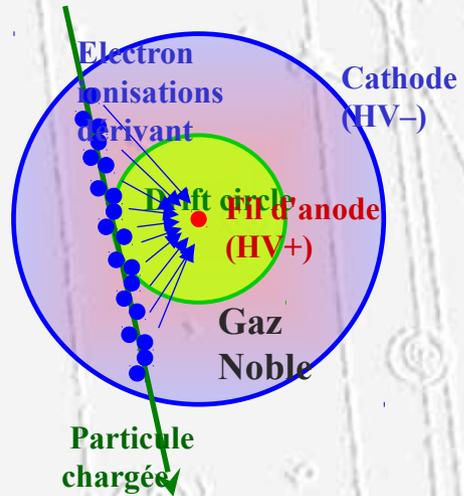
III

reconstruction

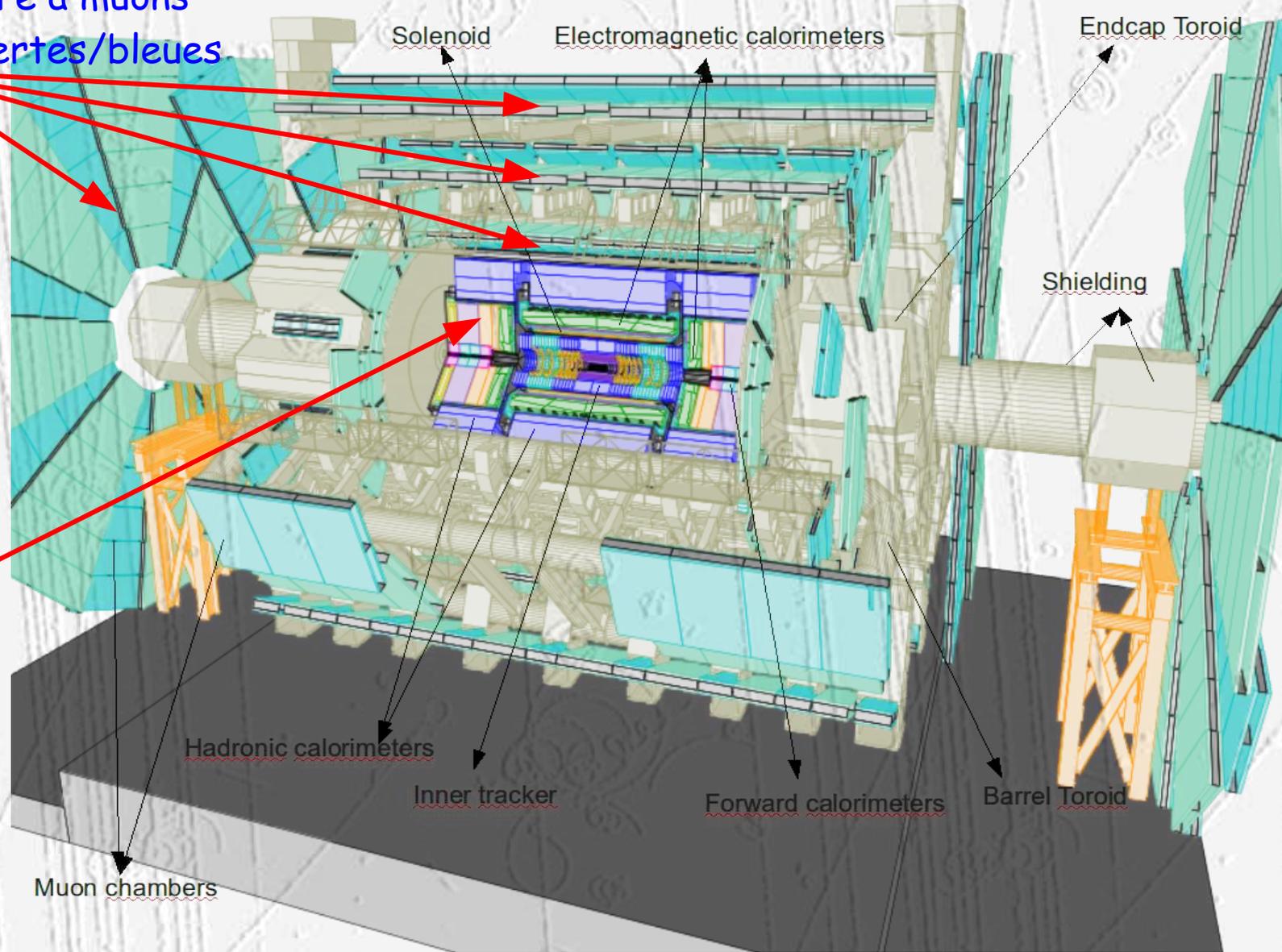


4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation dans ATLAS**

Spectromètre à muons
Chambres vertes/bleues



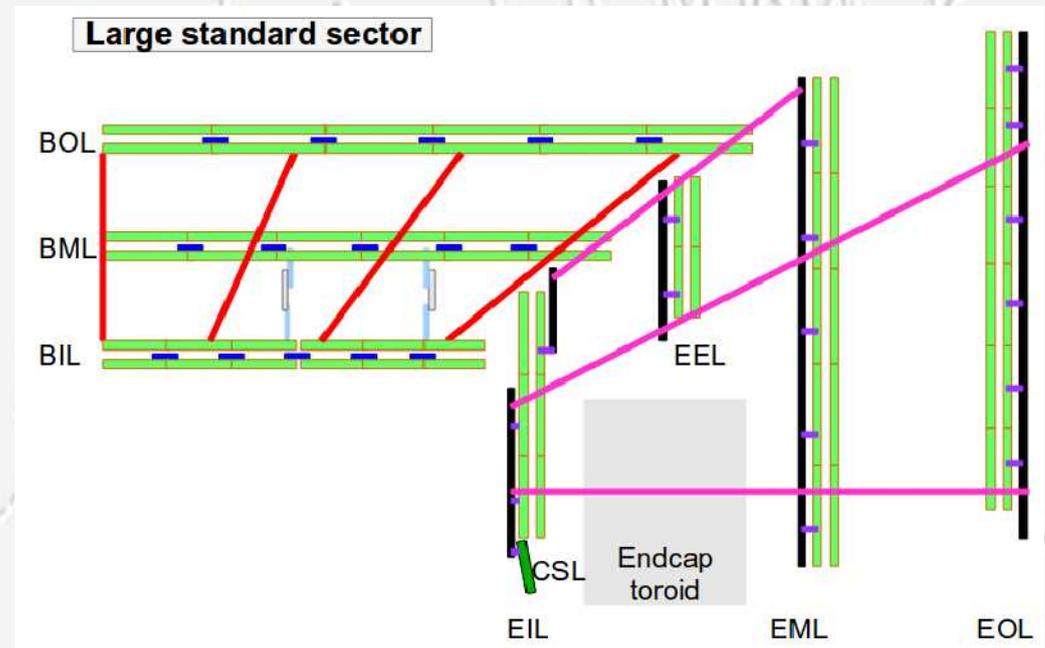
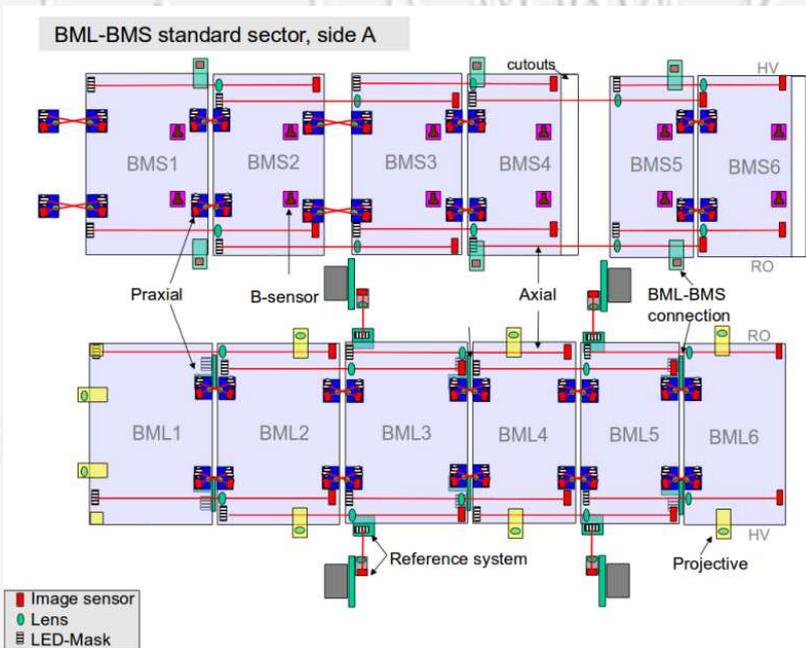
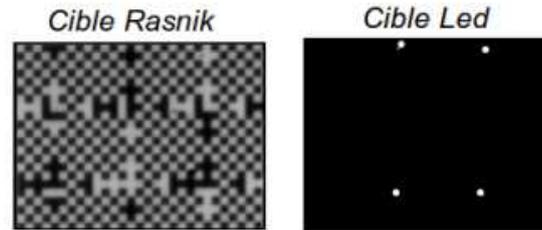
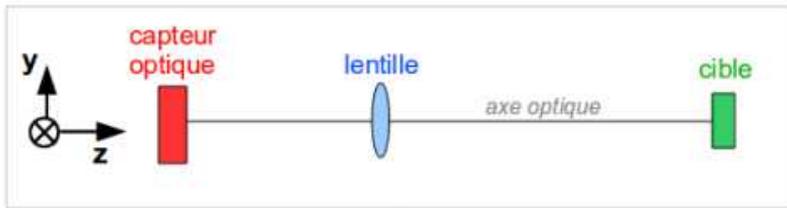
TRT



4. Détecteurs à Trace : **Chambres à dérivation**

- Atlas : spectromètre à muons**

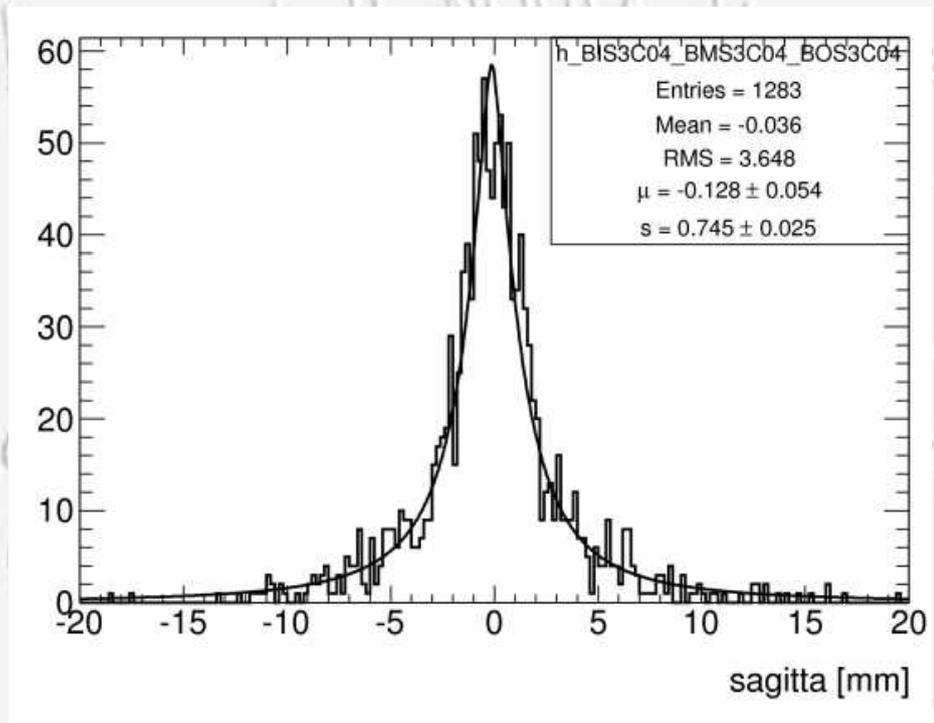
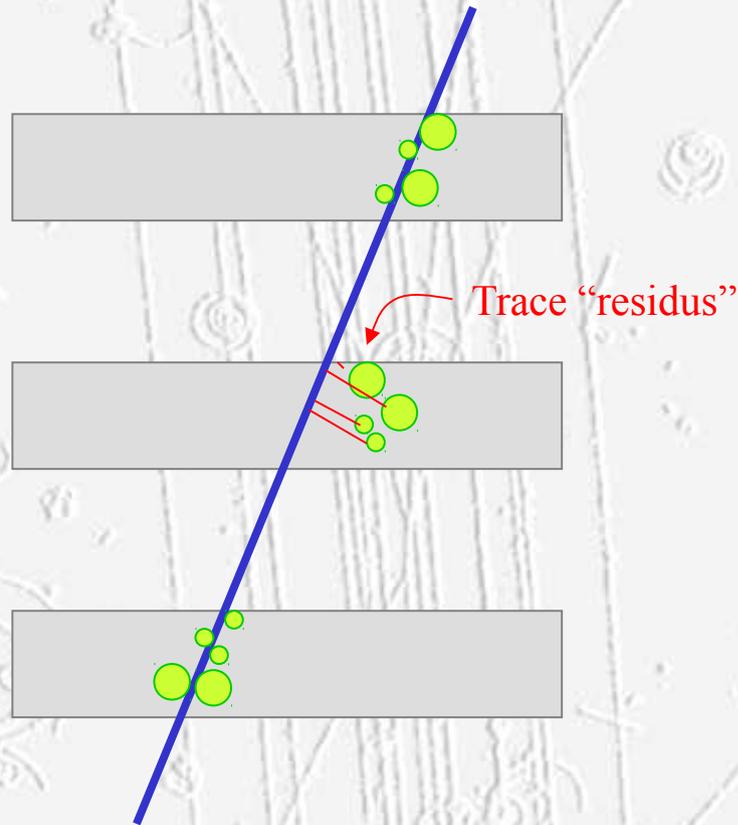
- Alignement, 50 μm (flèche), 20000 paramètres libres
= 1200 chambres * (6 translations + 11 déformations)



4. Détecteurs à Trace : **Chambres à dérivation**

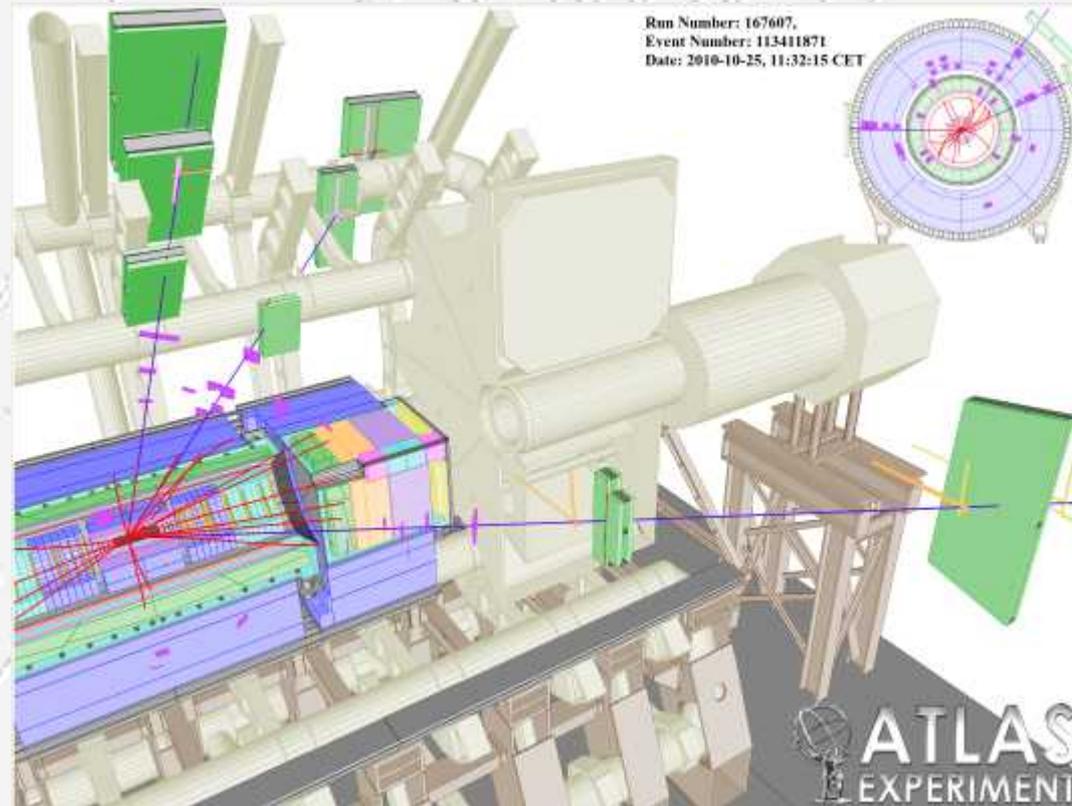
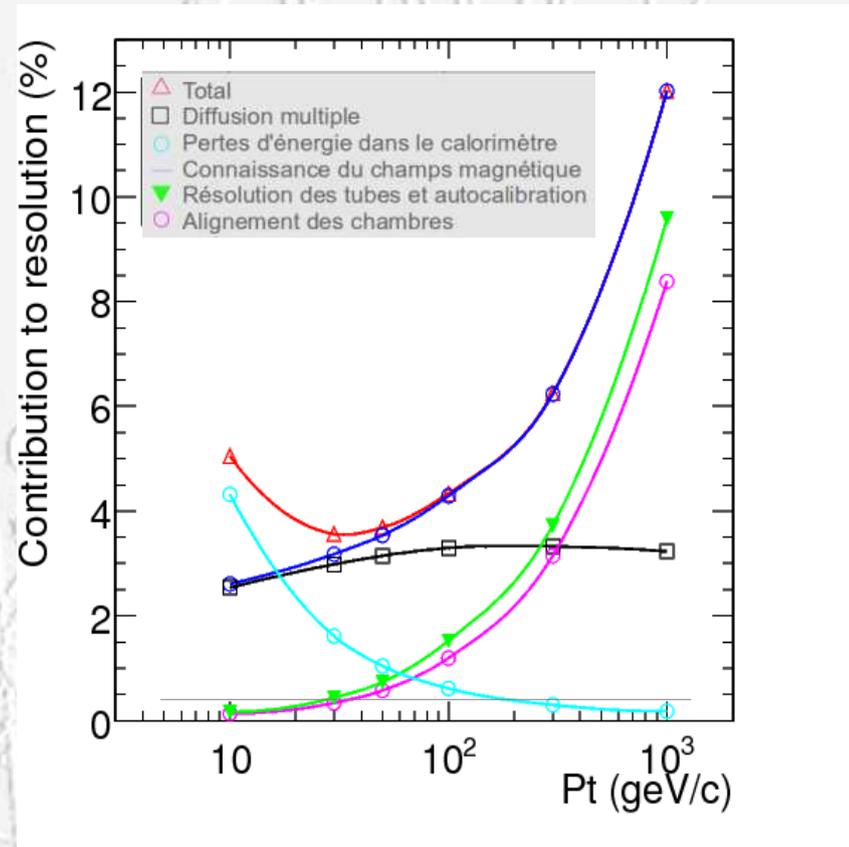
- **Atlas : spectromètre à muons**

- Alignement trace droite (sans champ toroïdale)



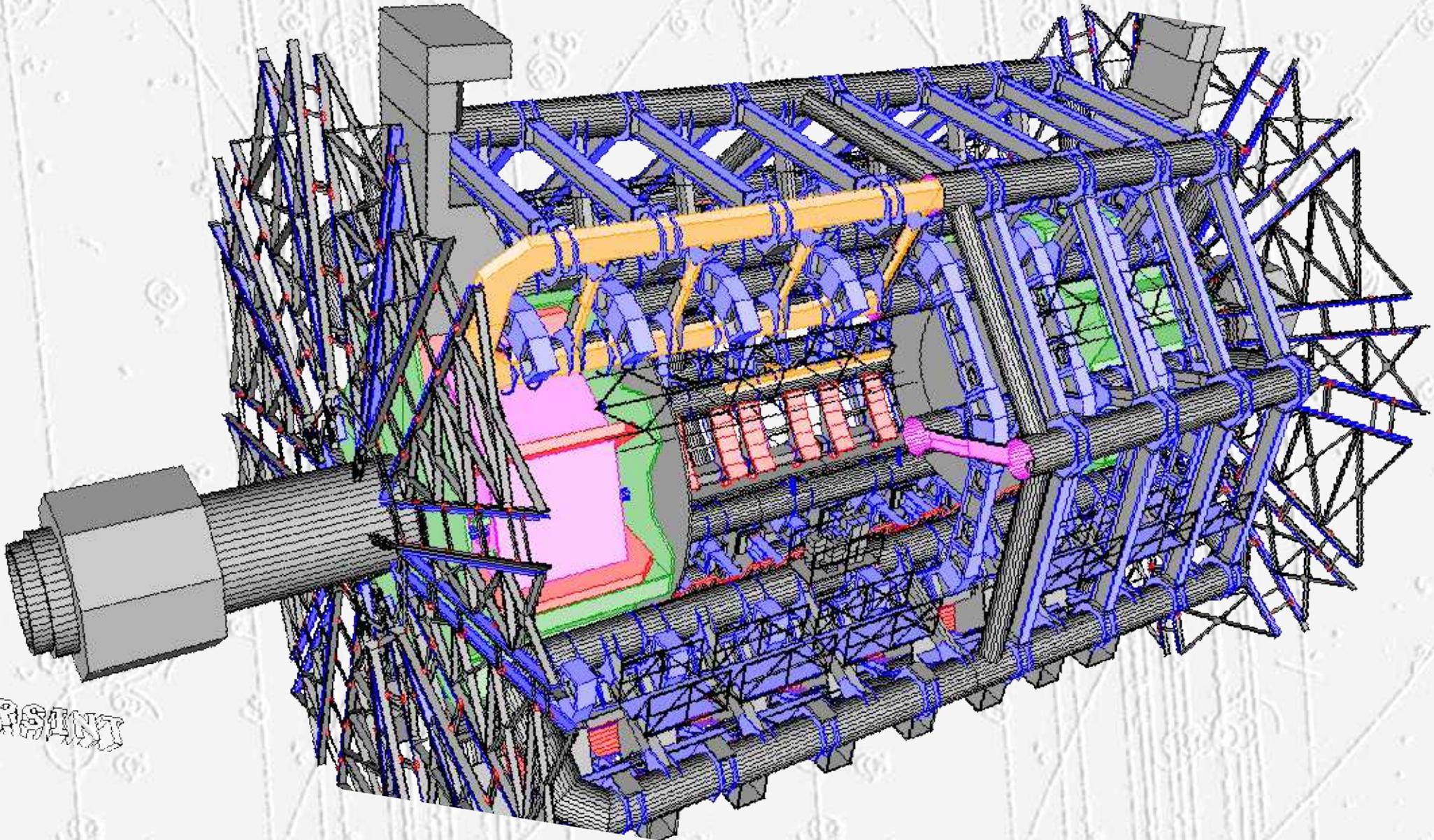
4. Détecteurs à Trace : **Chambres à dérivation**

- **Atlas : spectromètre à muons**
 - Résolution en impulsion



4. Détecteurs à Trace : **Chambres à dérivation**

- **Atlas** : spectromètre à muons



Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Čerenkov
- Rayonnement de Transition

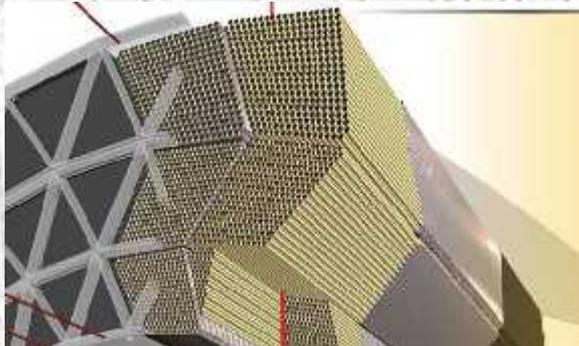
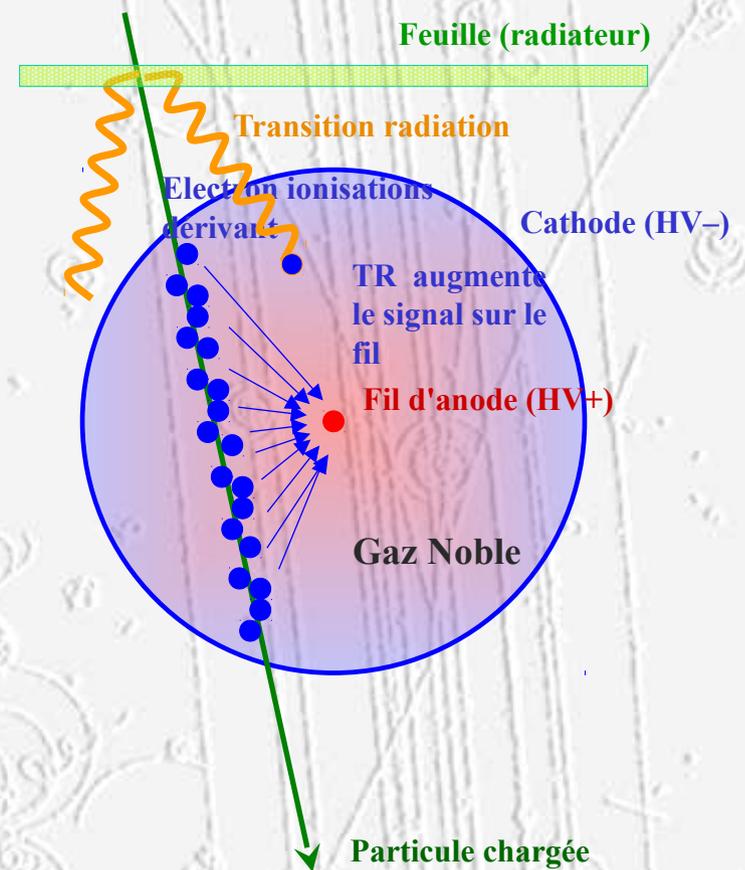
} Rayonnement Cohérent

Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

4. Détecteurs à Trace : **Chambres à dérives**

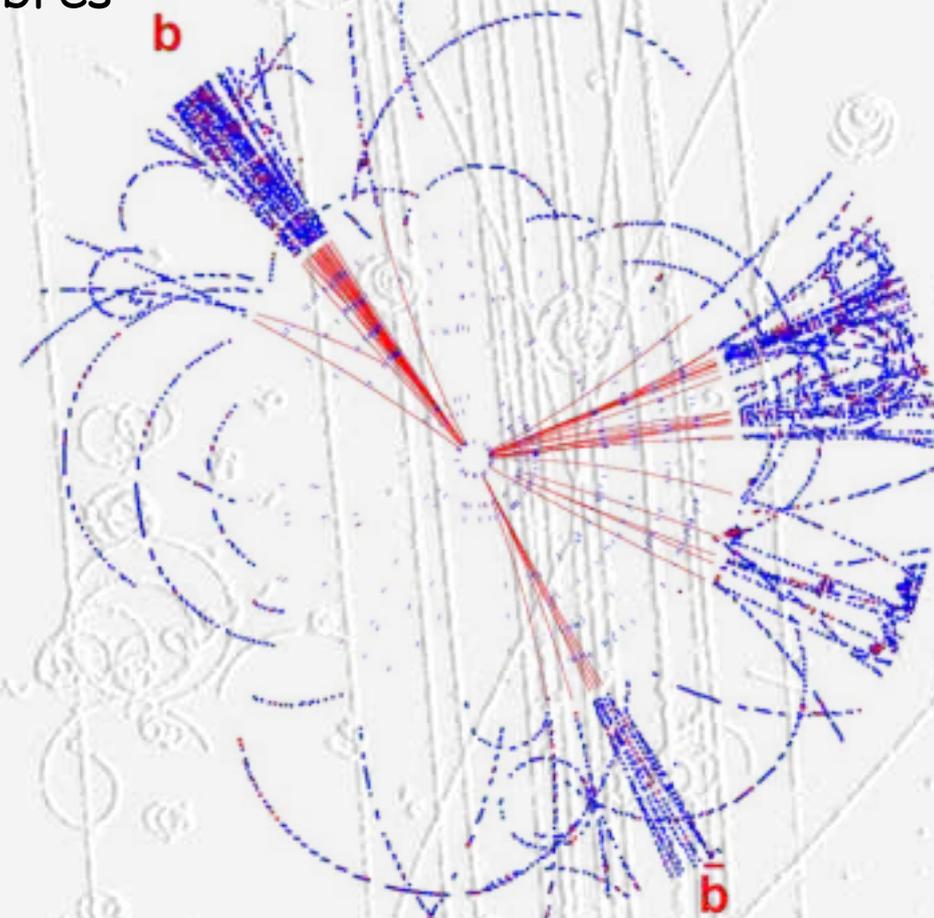
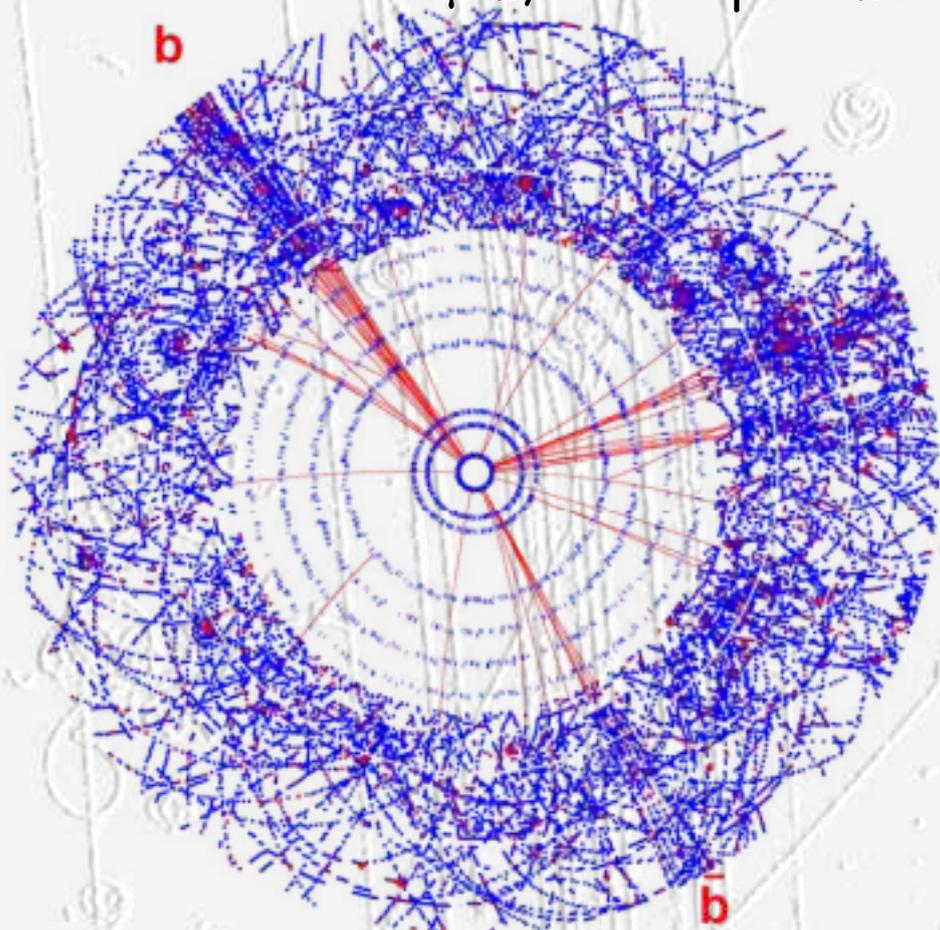
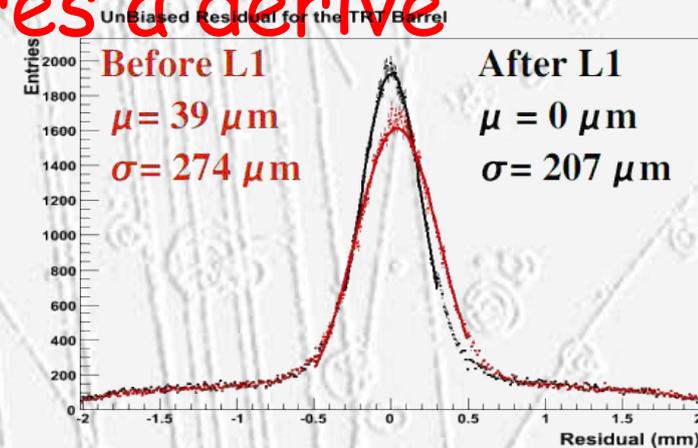
- **Atlas : TRT***
 - Chambre à dérives (0.37 à 1.44m)
 - Fil 31 μm , diamètre paille 4 mm
 - $V=1530$ Volts
 - Pression = 1 atm (+10mbar)
 - Gain : $2.5 \cdot 10^4$
 - Temps de dérives max : 48 ns
 - Résolution spatiale $\sigma \sim 130 \mu\text{m}$
 - 70% Xe, 27% CO₂, 3% O₂



* Transition Radiation Tracker

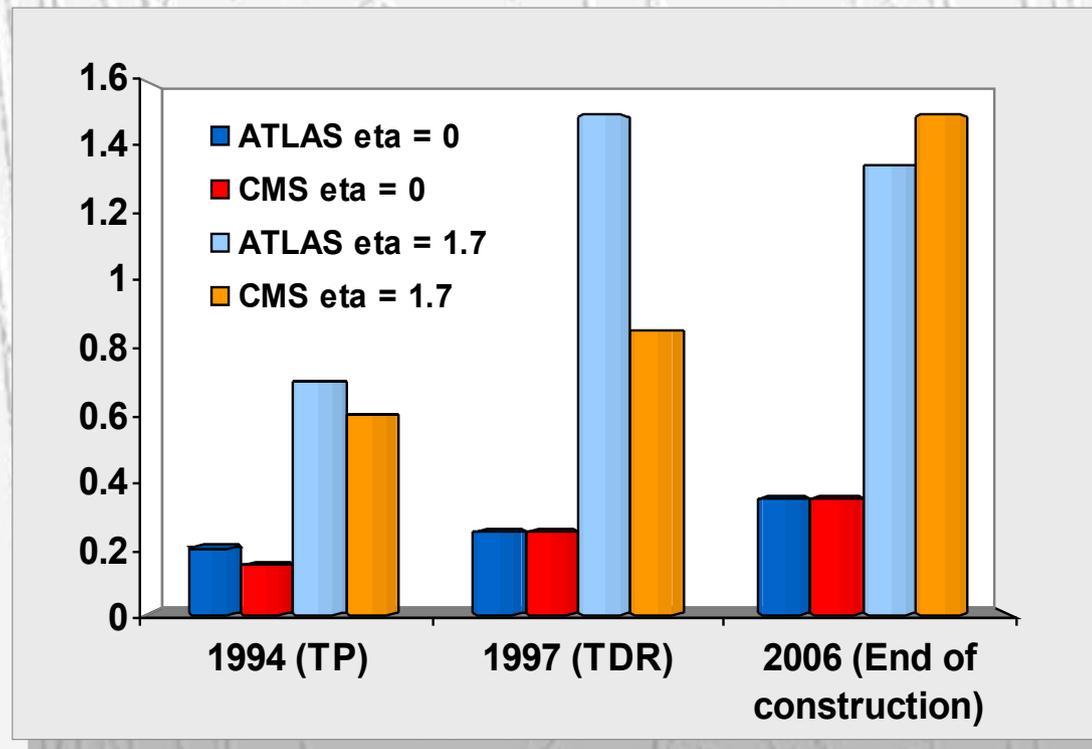
4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivate**

- **Atlas : TRT**
 - Alignement est aussi nécessaire
 - $\sim 10\mu\text{m}$, 35000 paramètres libres



4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

- **Atlas : TRT**



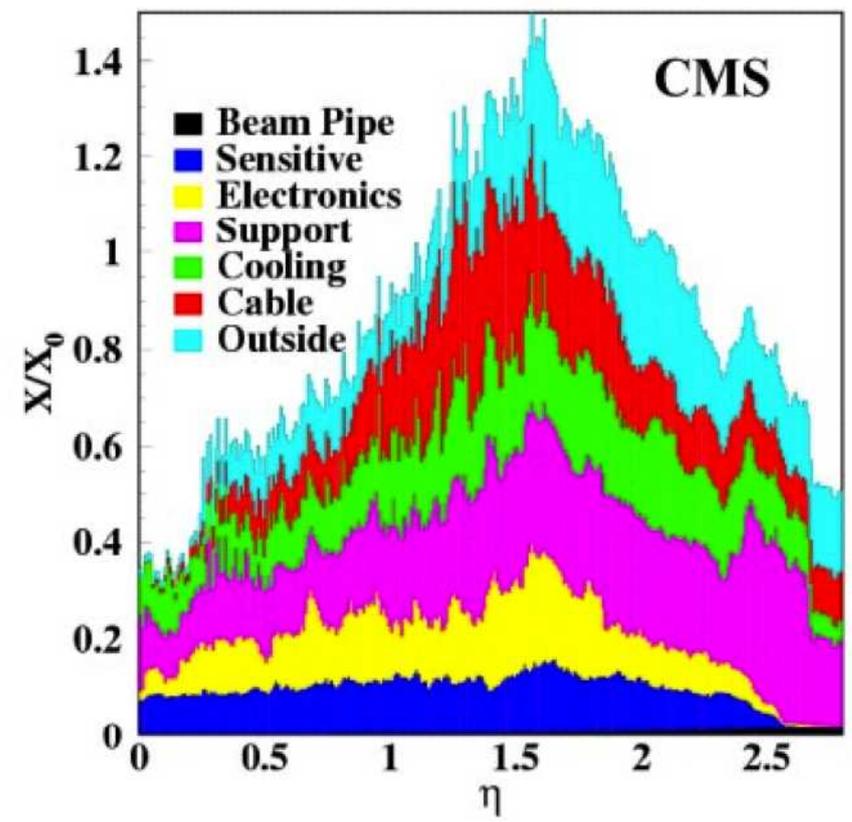
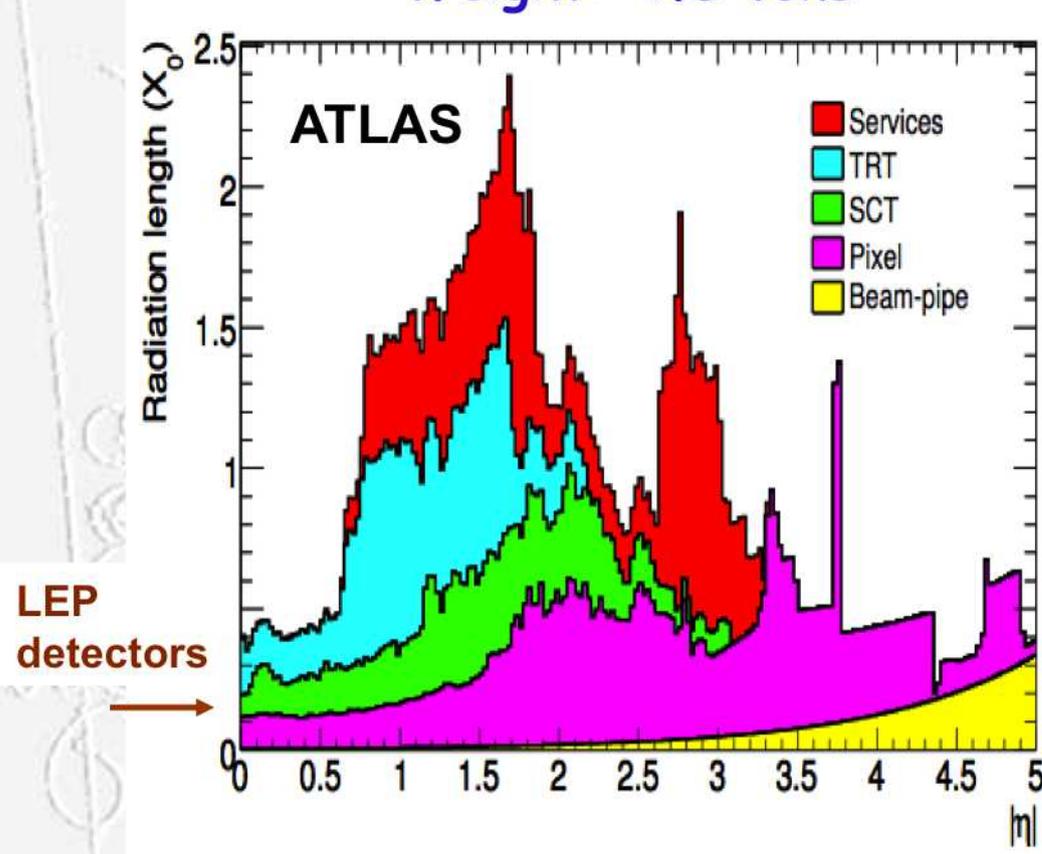
Augmentation du nombre de x0 principalement due aux services mal estimés

4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

- Atlas : TRT

Weight: 4.5 tons

Weight: 3.7 tons



Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Čerenkov
- Rayonnement de Transition

} Rayonnement Cohérent

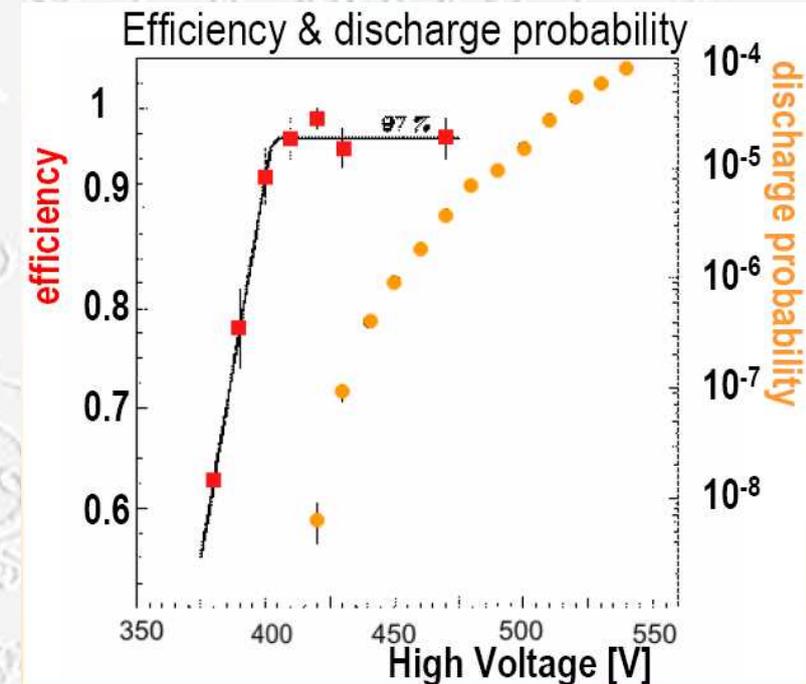
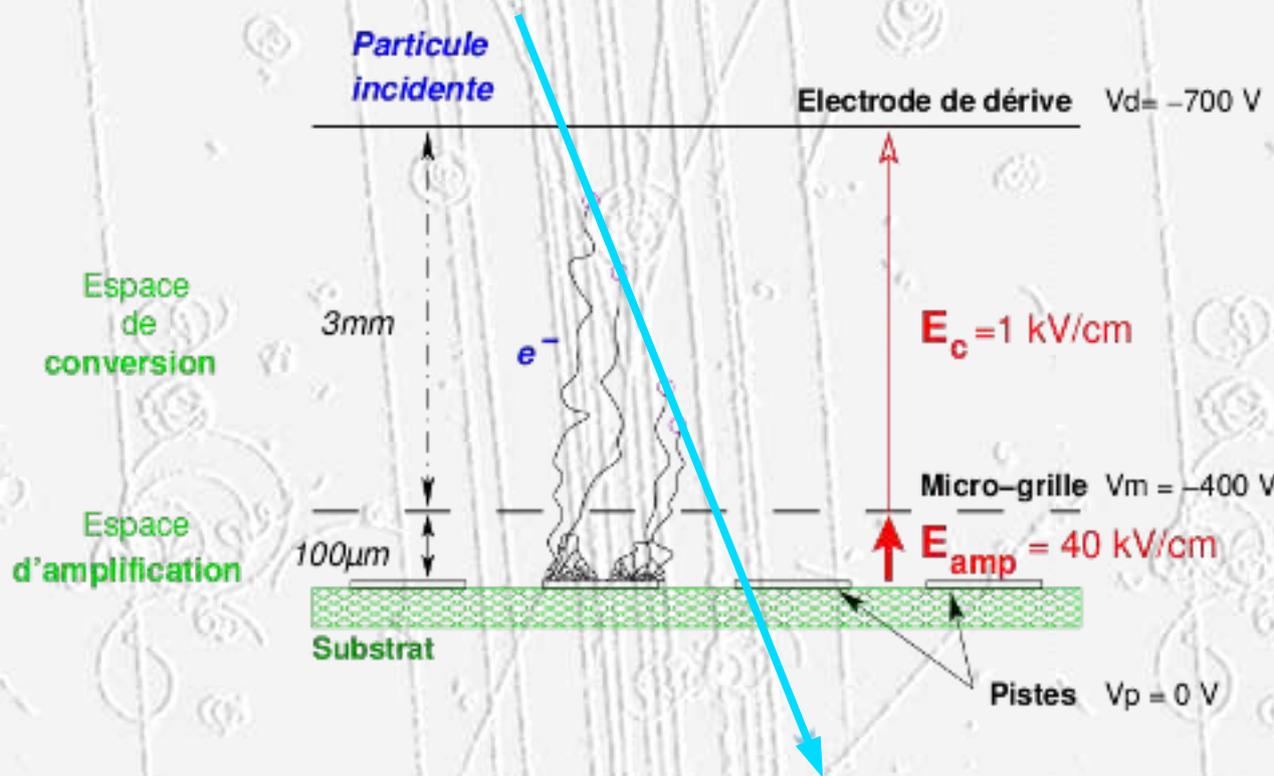
Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

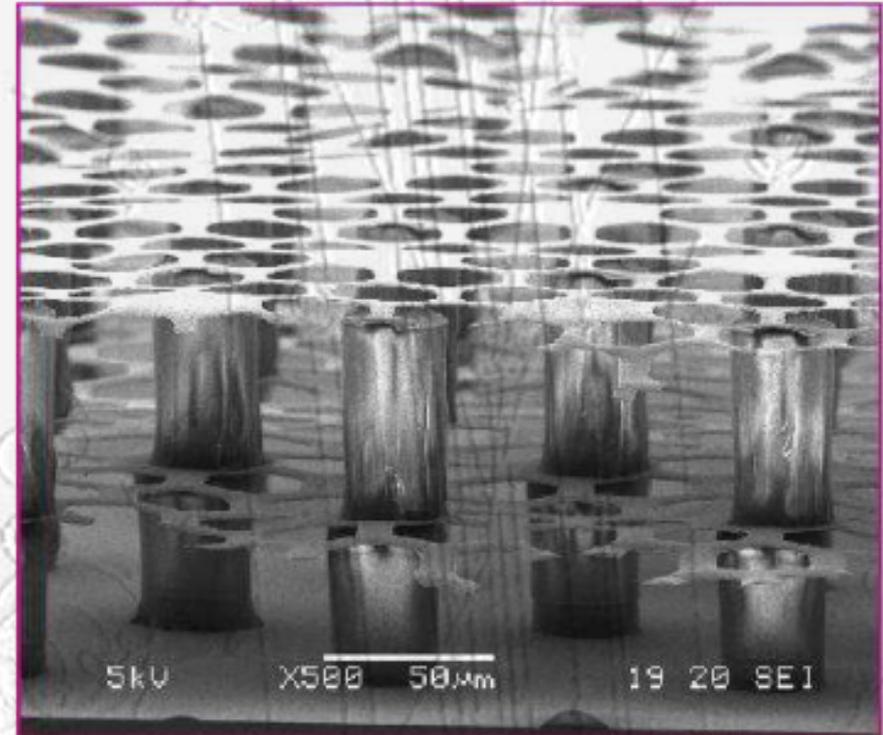
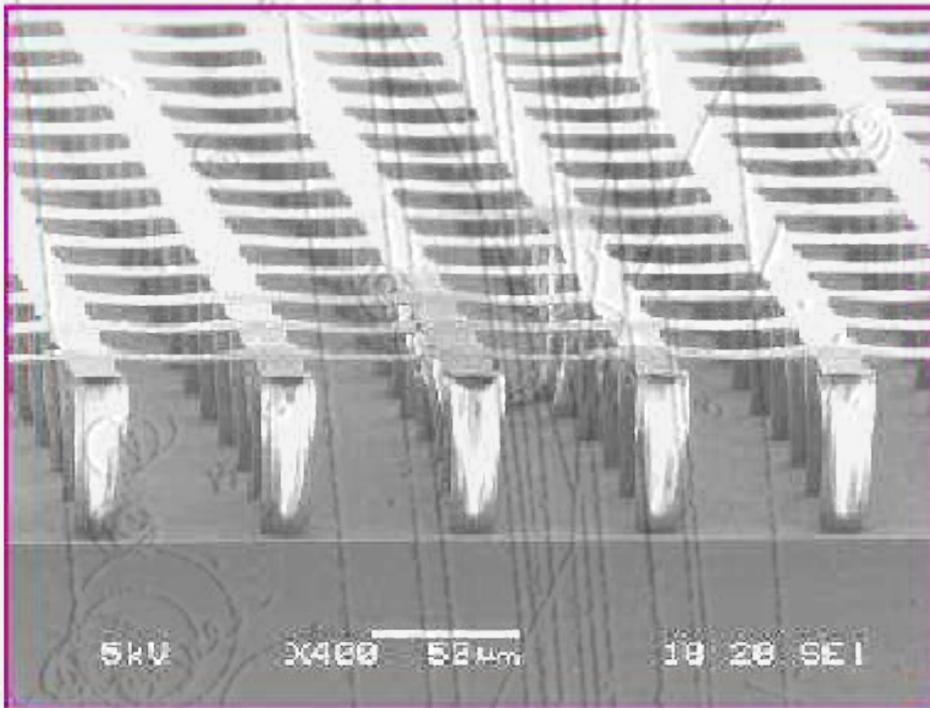
- **Micro Megas**

- Probabilité de décharge très faible
- Devrait supporter de très haut flux (sLHC)



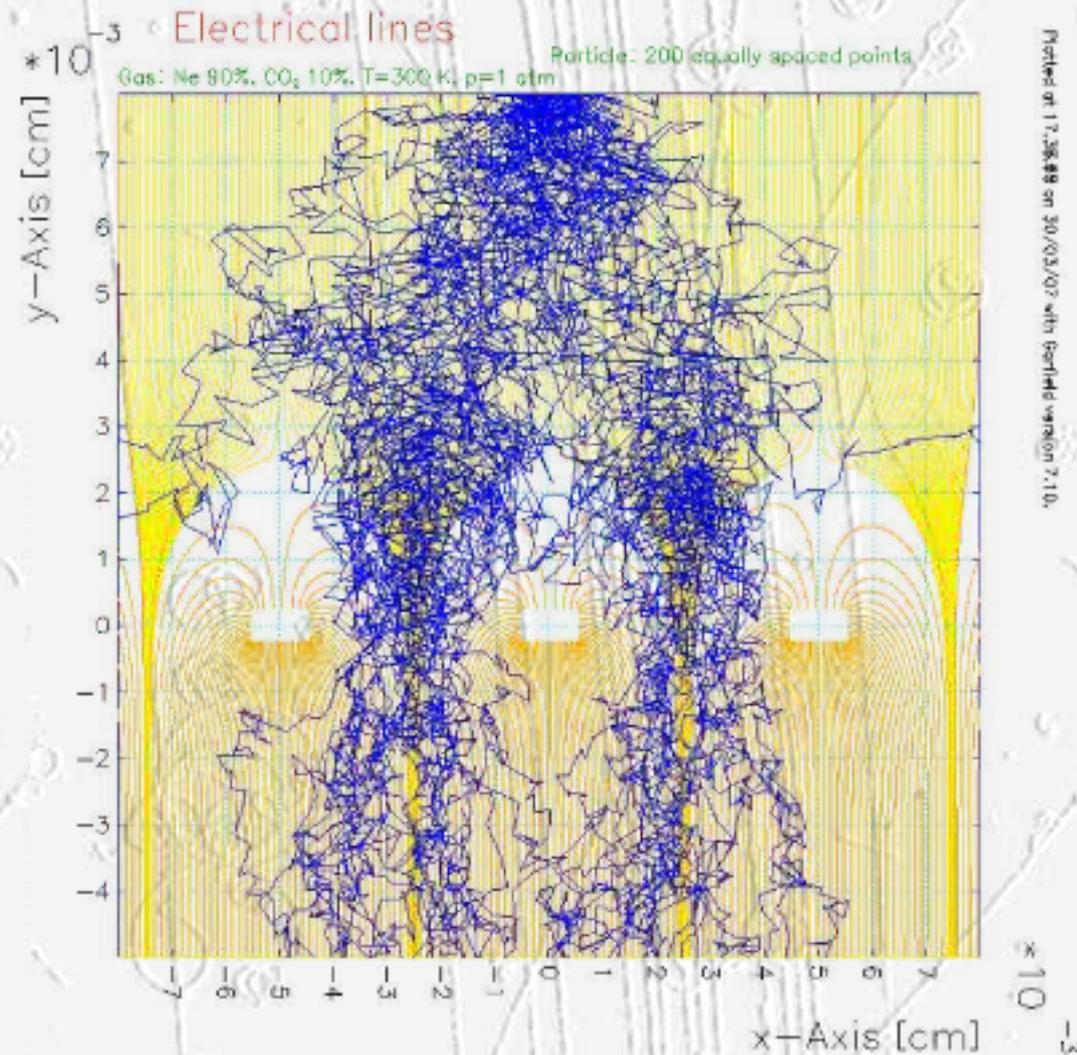
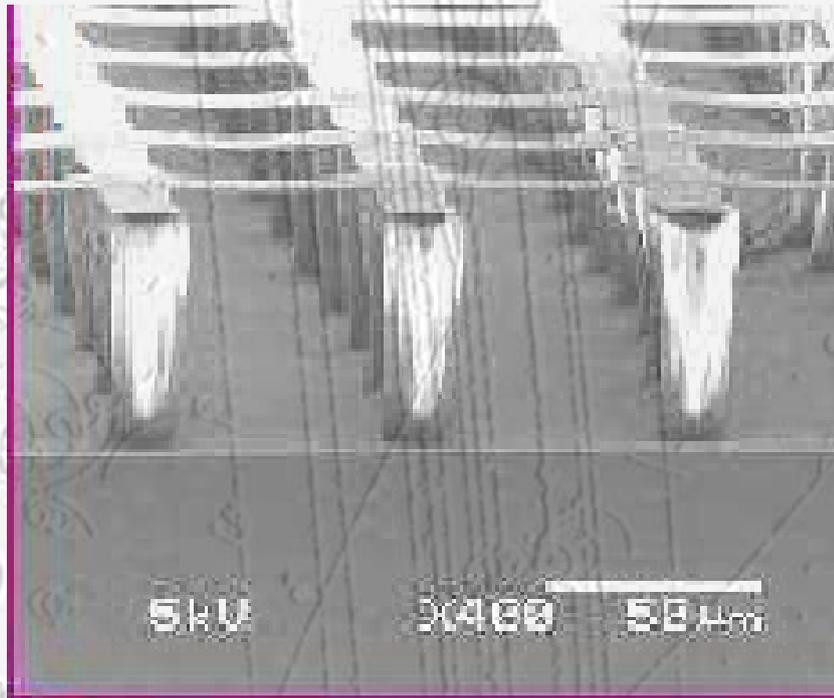
4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

- **Micro Megas**
 - Problème « piliers » acceptance & plan de la grille



4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

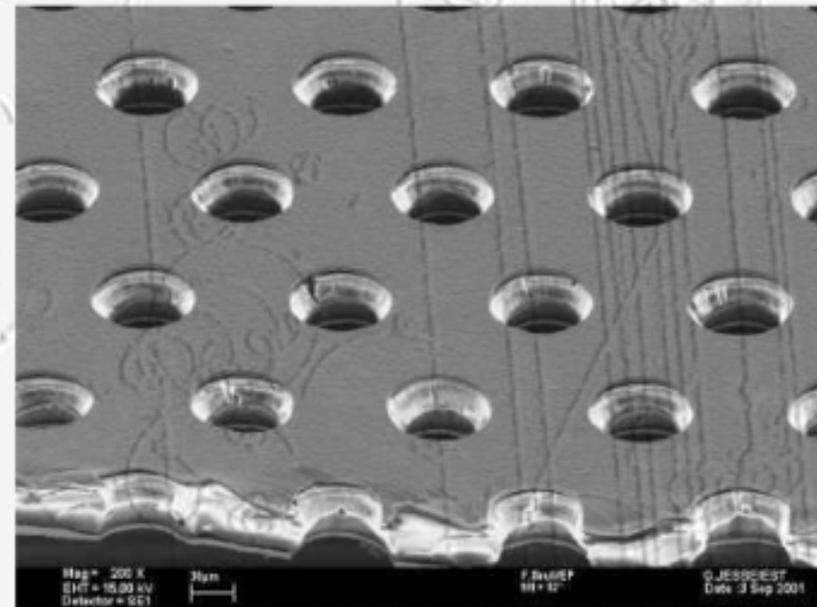
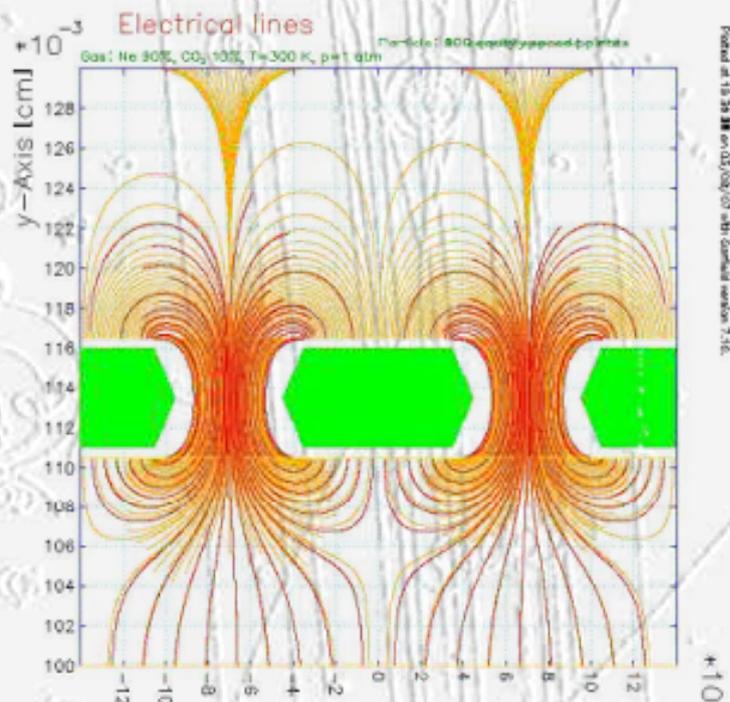
- **Micro Megas**
 - Progression des simulations:



4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

- **GEM (Gas Electron Multiplier)**

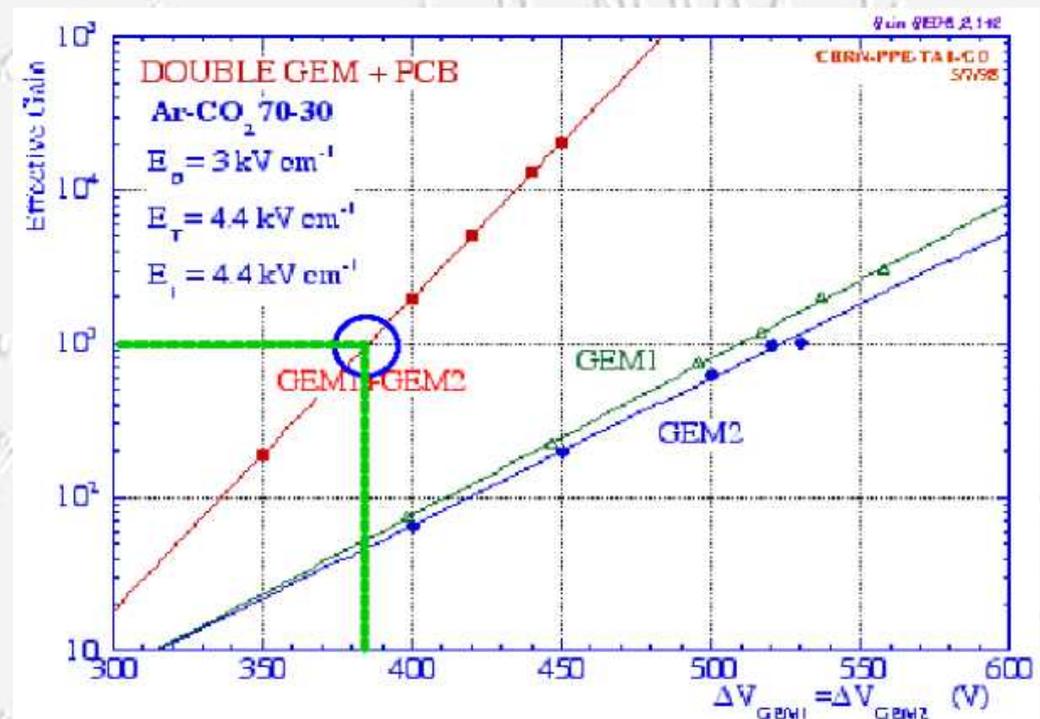
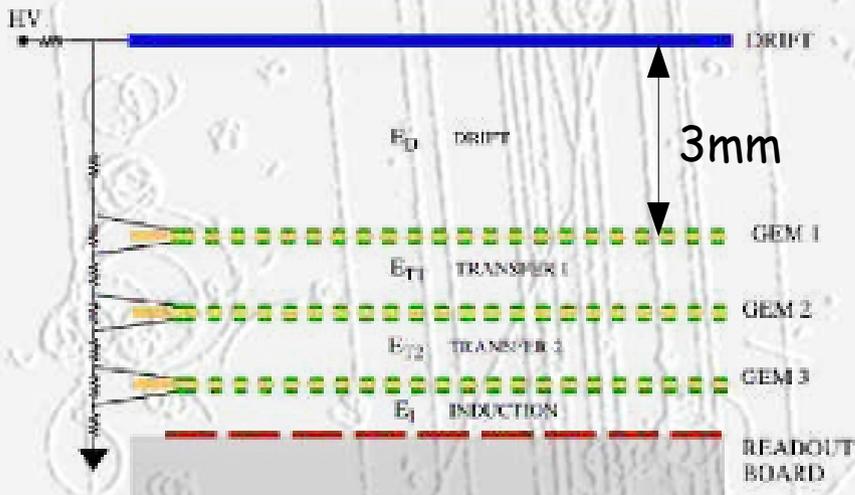
- Feuille Cu-Kapton-Cu percée
- régulièrement de trous de 30-50 μm
- 200 à 400 V entre les 2 faces
- 100 à 1000 e^- produits par un e^- unique à l'entrée d'un trou



4. Détecteurs de Traces : **Chambres à dérivation**

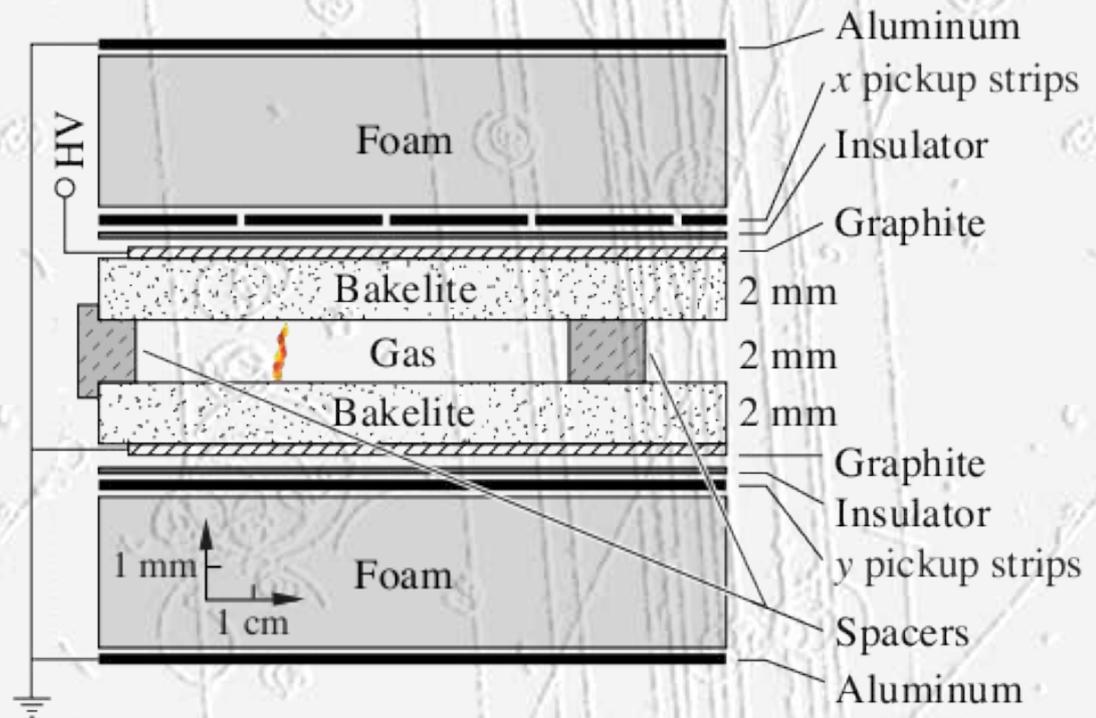
- **GEM (Gas Electron Multiplier)**

- Plusieurs étages :
 - Tension plus basse pour un même gain
 - Moins de décharges



Détecteurs de Traces

- **RPC (Resistive Plate chamber)**
 - ~10KV entre les plans de bakélite
 - Passage de la particule induit une décharge (signal ~300mV)
 - Résolution spatiale < ~1mm
 - Résolution temporel ~1ns
 - **Pas de fils!!!!**



Détecteur au Silicium

- LEP for Delphi P.Delpierre
 - Détecteur de vertex
- LHC for CMS, ATLAS, ALICE
 - Pixels & SCT
 - Nombre de voies d'électronique
 - Radiations (n,p, γ ,...) très élevées
 - Temps de croisement très court (25ns)

Détecteur au Silicium

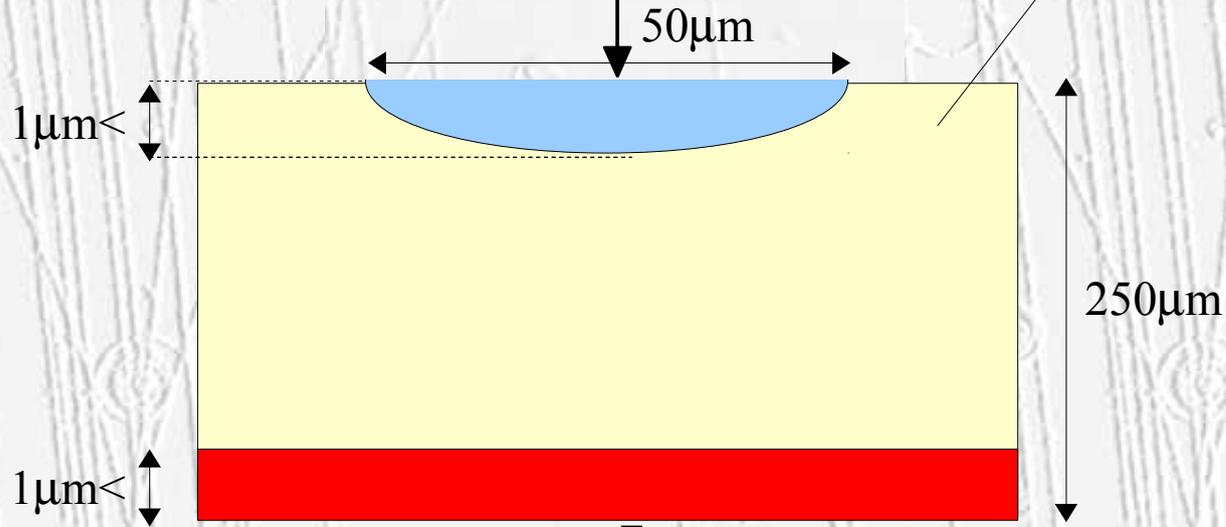
Si atome avec 4 electrons de valence

“Excess” electron

N type ($\sim 10^{10}$ more e-)

Examples: As, P

N type ($\sim K\Omega$)



P type

“Excess” hole

Examples: B, Al, In

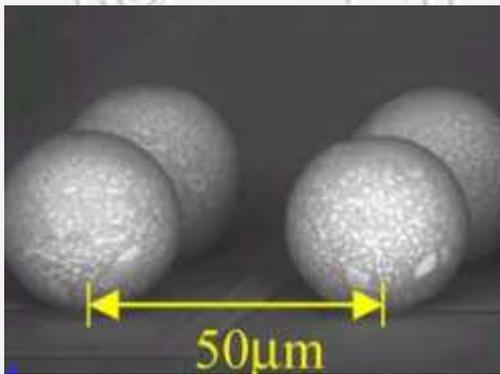
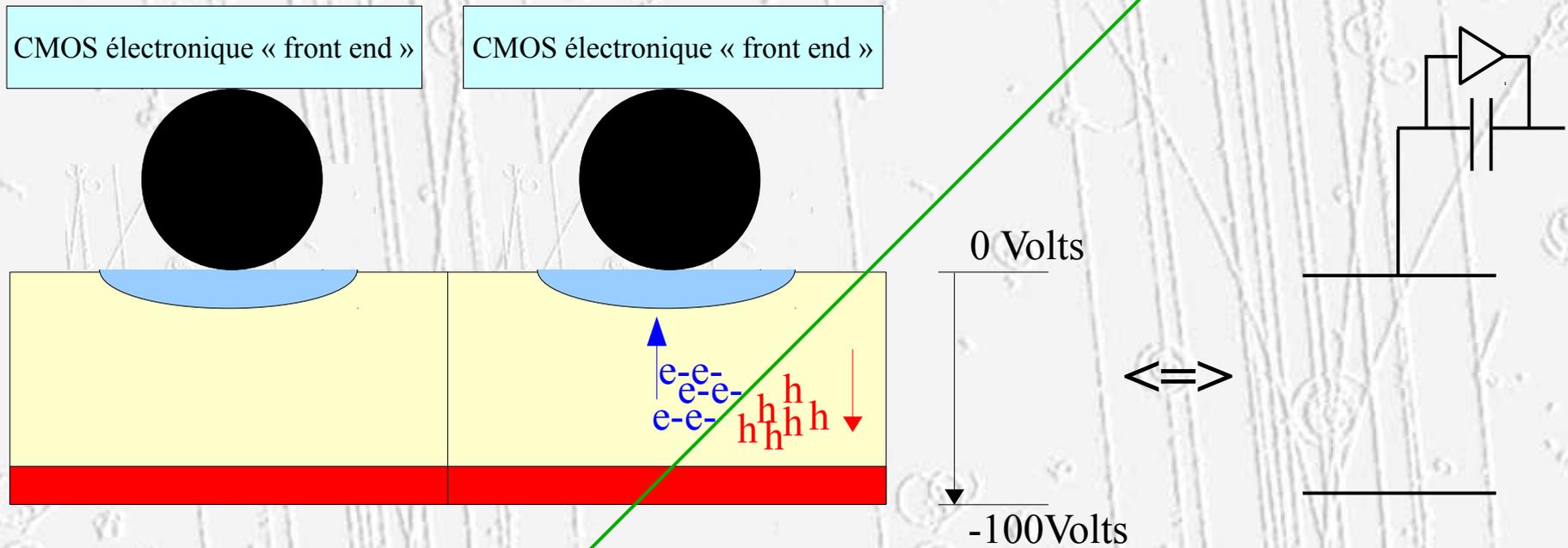
Cellule élémentaire : 250 μm x 50 μm x 400 μm

R Φ Z

Détecteur au Silicium

- ATLAS:Pixels

Trace Chargée



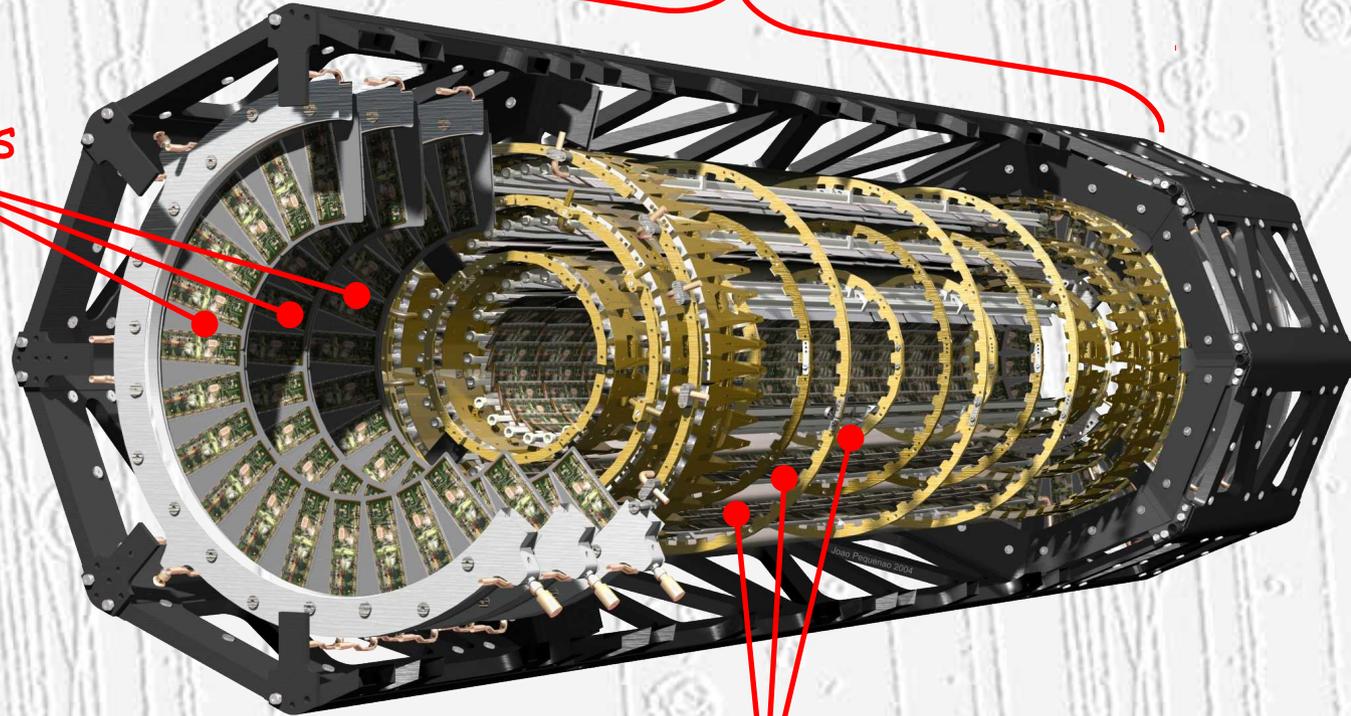
- ~20000 électrons par trace chargée
- Temps de collection des e-: ~5ns

4. Détecteurs de Traces : **Silicium**

- **Atlas : Pixels**

Long: 1.3 m, poids: ~4.4 kg, d: 34.4 cm

2x3 end-cap disks,
each with 8 sectors
and 48 modules

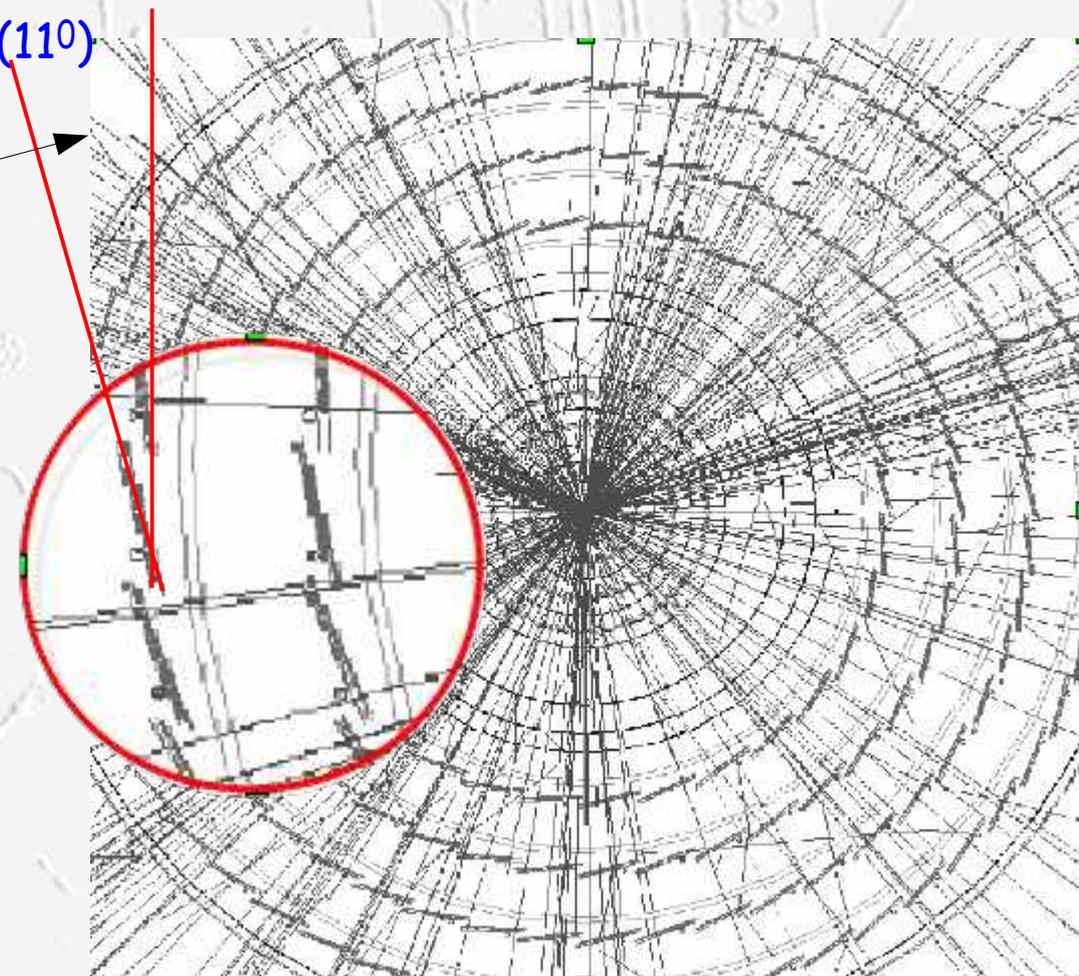
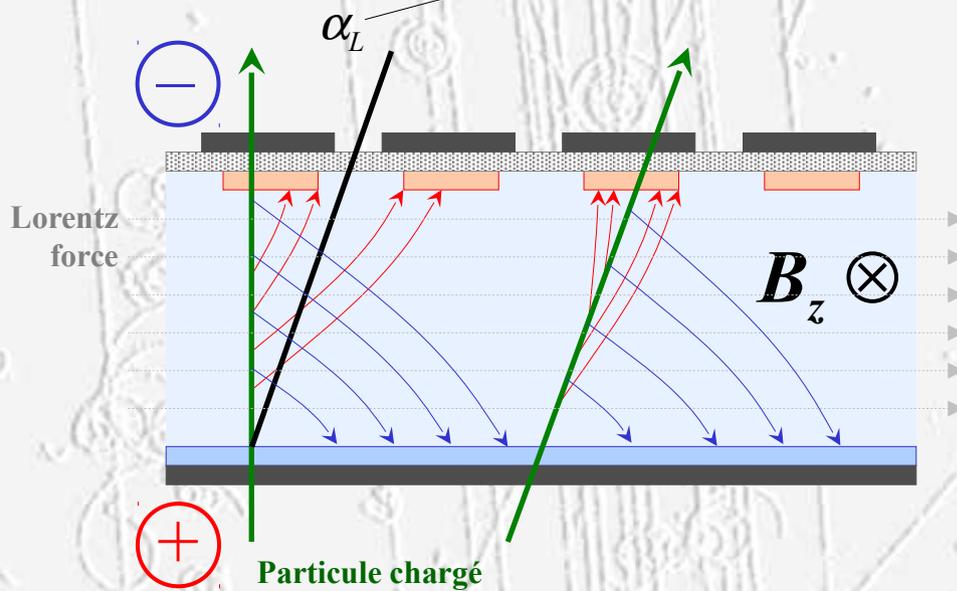
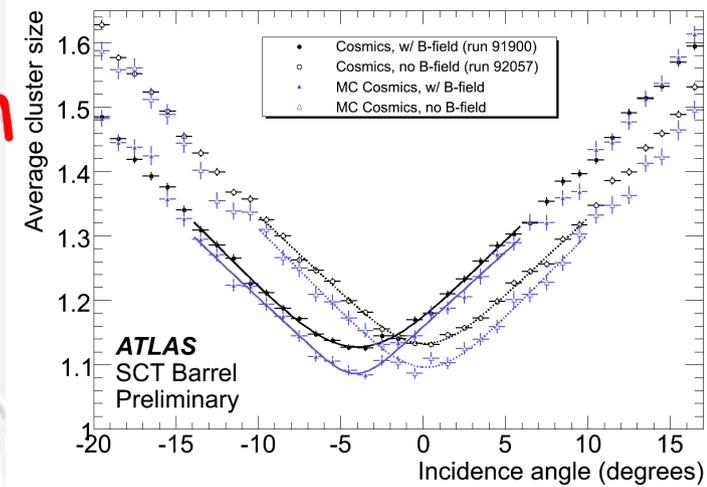


**3 Barrel layers ($R = 5, 9, 12$ cm),
 $\Sigma = 1456$ barrel modules**

4. Détecteurs de Traces : Silicium

• Atlas : Pixels & SCT

- Pour compenser l'angle de Lorentz , pour les traces radiales (effet Hall), les modules des Pixels (20°) et du SCT(11°) sont inclinés.

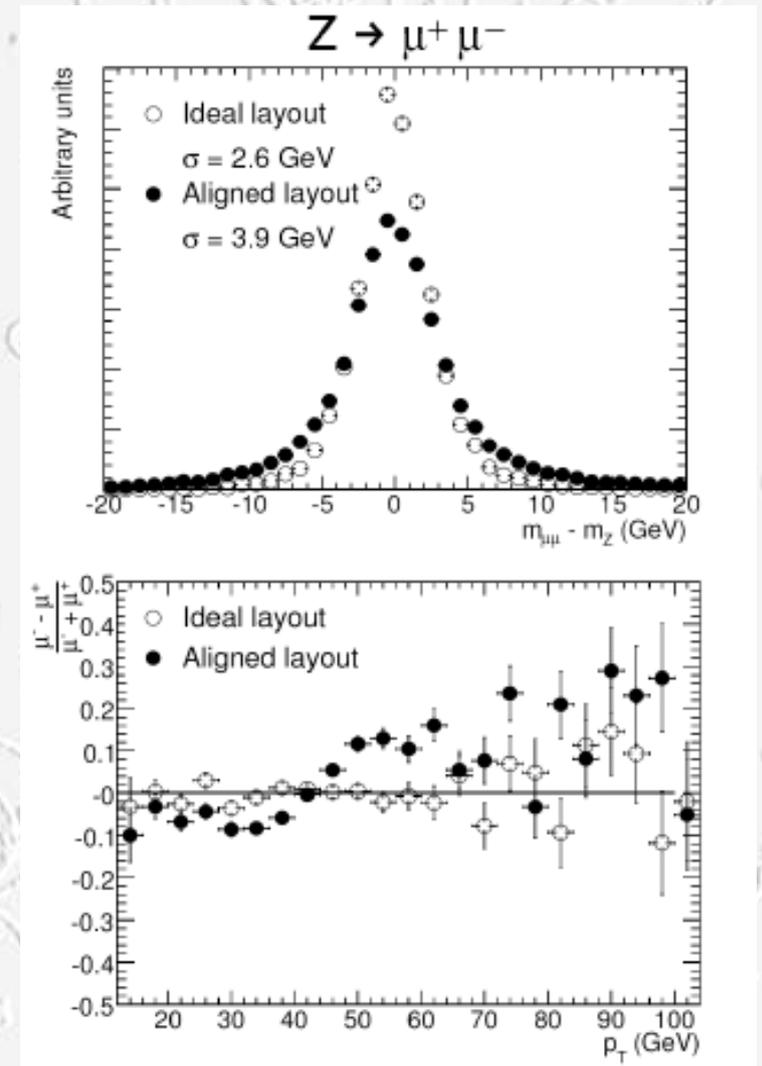
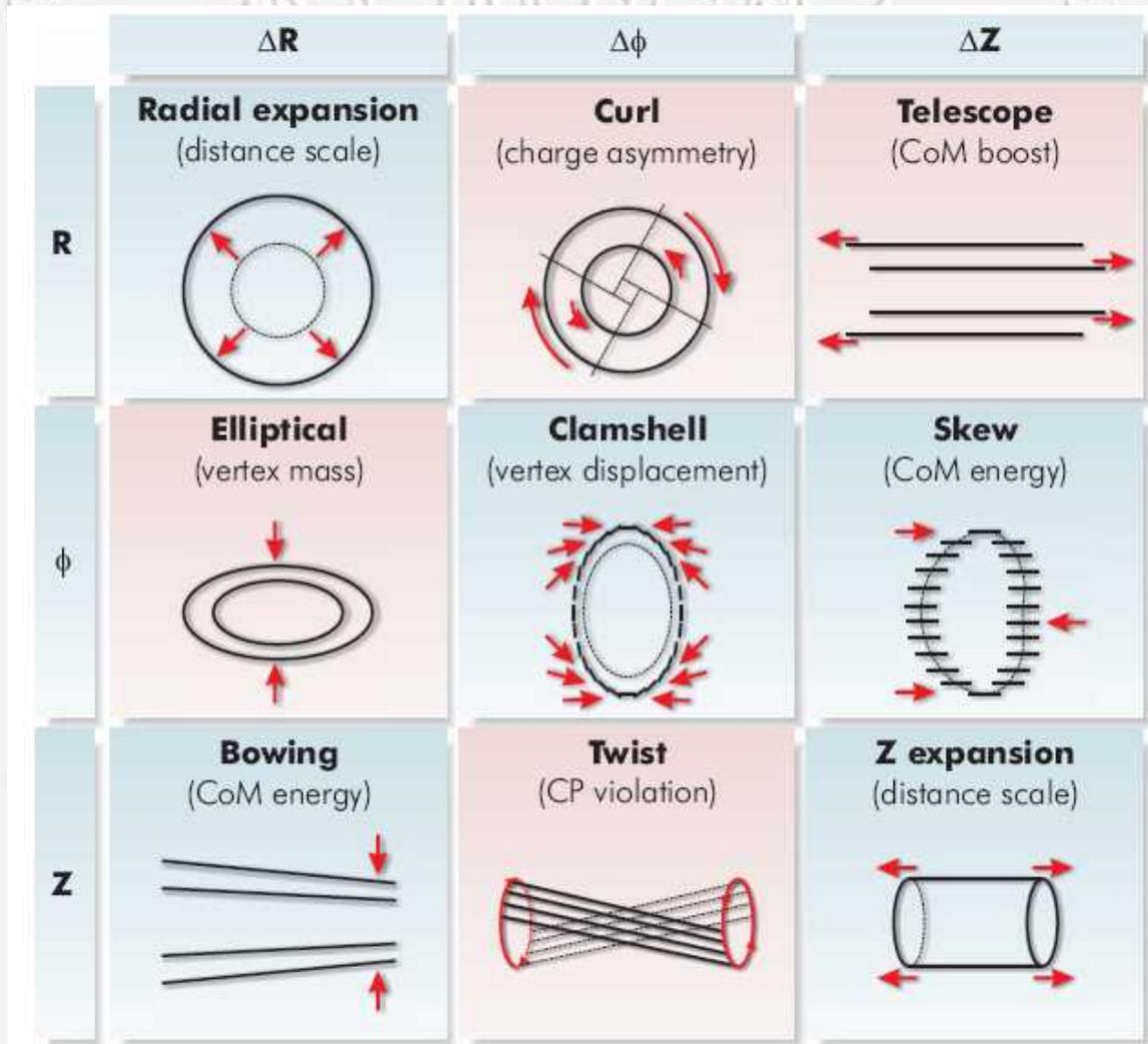


4. Détecteurs de Traces : Silicium

- **Atlas vs CMS: Pixels & SCT**
 - Cette inclinaison des modules Pixels & SCT n'existe pas dans CMS, CMS peut donc renverser son champ magnétique solénoïdal sans gros impact sur ses mesures : ce n'est pas possible pour ATLAS..
 - Pour certaines mesures de physique, le renversement du champ magnétique pourrait permettre de diminuer largement les erreurs systématiques dues à la connaissance du champ vs la géométrie des détecteurs

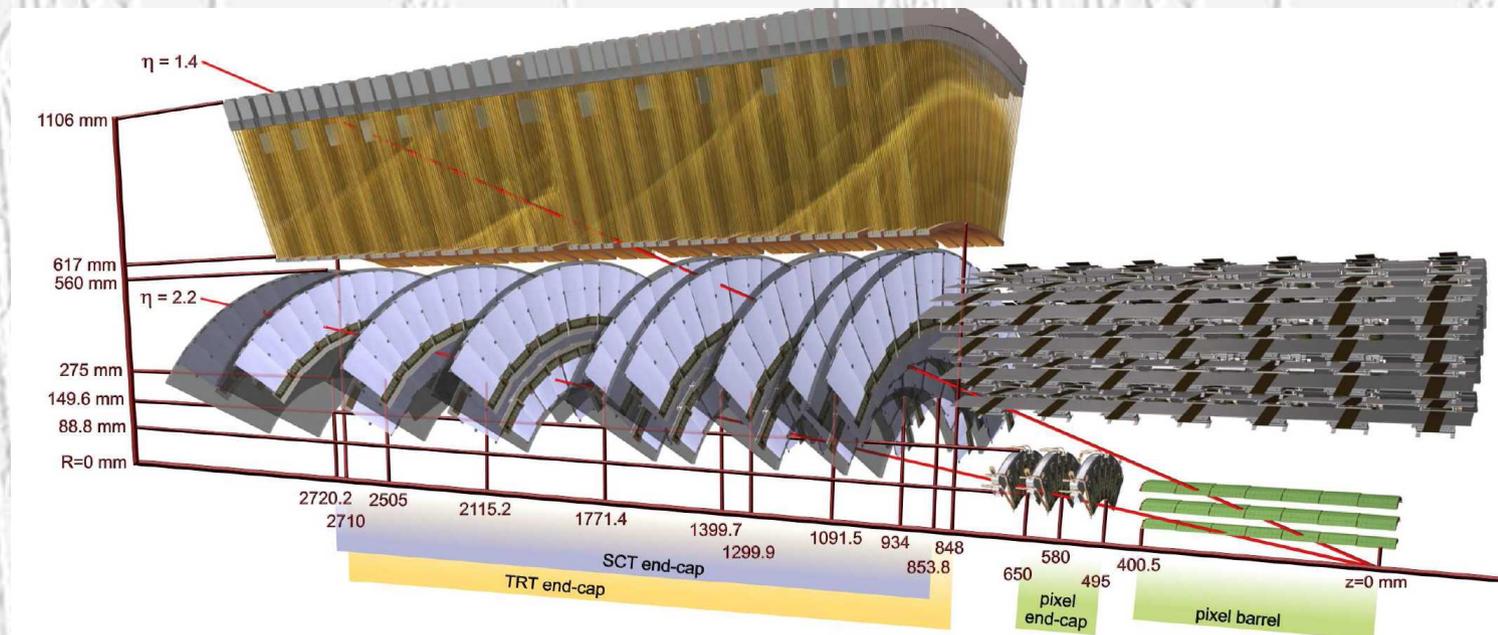
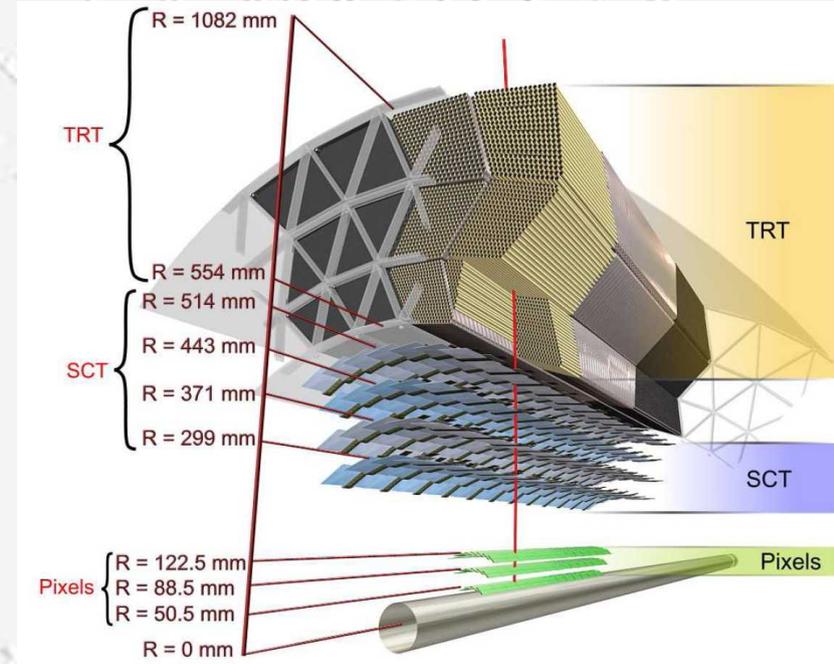
4. Détecteurs de Traces : Silicium

- Atlas: Pixels & SCT : Alignement!!



4. Détecteurs de Traces : Silicium & gaz

- Atlas : Pixels, SCT & TRT
(trajectographe interne plongé ds un champ solénoïdal 2T)
- Résolution spatiale (barrel):
 - Pixel: 10 μm [$r\phi$], 115 μm [z], 1744 modules
 - SCT: 17 μm [$r\phi$], 580 μm [z], 4088 modules
 - TRT: 130 μm [$r\phi$] / pailles!, 2688 modules



- I. Interaction particule/matière
- II. Détecteurs de traces
- III. **Identification des particules**
- IV. Conception de détecteur

Identification de ~~Suspects~~ Particules

The Usual Suspects



e^{\pm}

γ

μ^{\pm}

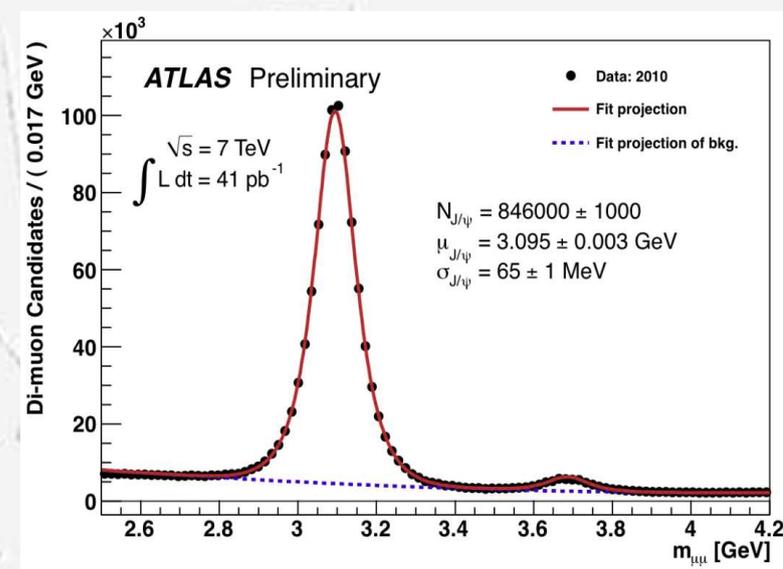
Hadrons
chargés
 $p, k^{\pm}, \pi^{\pm}, \dots$

Hadrons
neutres
 n, π^0, λ, \dots

Introduction

Identification

- Découvrir la nature , l'identité
- Masse, charge
- Ne serait ce pas une question idiote $\Delta p \Delta x > h/2\pi$?



Particules à durée de vie courte ($< \sim 10^{-10} \text{ s}$)

- $W, Z, J/\psi, \pi^0 \dots$ (Interaction em, faible, forte)
- Identification passe par la reconstruction du produits de leur désintégration
- Identification au sens **statistique** (séparation bruit de fond / particule)
 - Efficacité, pureté...

Introduction

Particules « stables »

- Particules réellement stables
- Leur durée de vie excède le temps pour traverser le détecteur

Exemples

- μ^\pm : laisse une trace dans chaque détecteur
- $\pi^\pm, K^\pm(K_s, K_l), p, n...$: calorimètre hadronique
 - Identification va dépendre de leur vitesse
- **Neutrino** : Principalement énergie manquante
 - Ou à travers un muon (Cherenkov : Antares, SK,...)
- **Électron, photon, π^0** : mesures d'énergie dans les calorimètres
 - Avec ou sans trace chargée dans le trajectographe

Identification

Charge

- Champ magnétique
- Mesure du rayon de courbure
- Précision de l'alignement +
valeur du champ limite la séparation de charge

Masse

- Mesure simultanée pour : π, K, μ, e, p, \dots
- Impulsion & énergie
- Impulsion & vitesse
- Énergie & vitesse

Identification directe

- μ, e

Identification

Principes de Physiques: Interactions électromagnétiques

- Mesure **simultanée** de l'impulsion &

- $dE dx$

- Temps de vol

- Cherenkov

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \gamma M \beta c \\ \frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2) \end{array} \right.$$

- Rayonnement de transition

- Séparation π/e

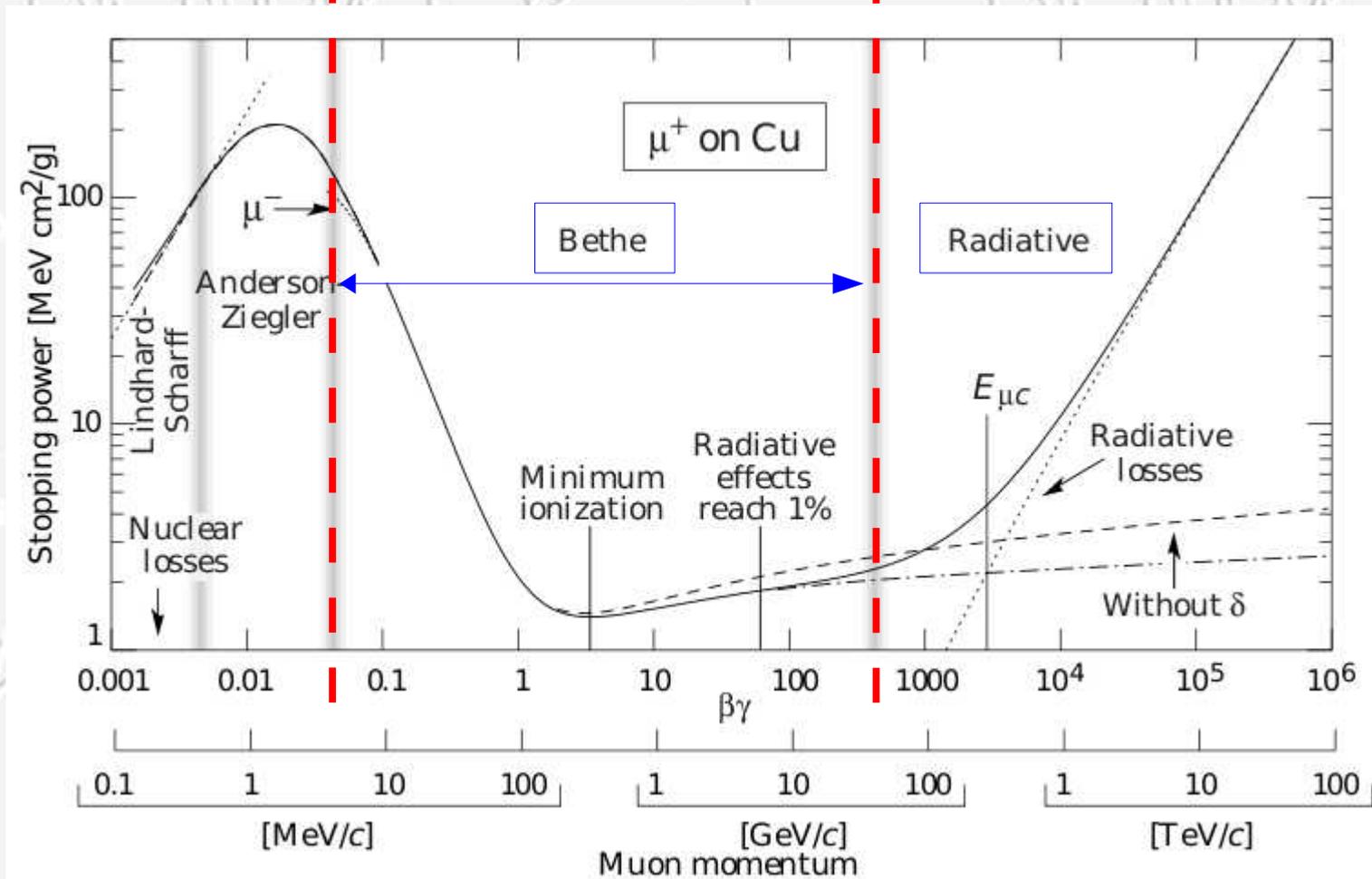
- Identification directe des **électrons**

Identification NA

dE/dx

$$\bullet \frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$$\propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

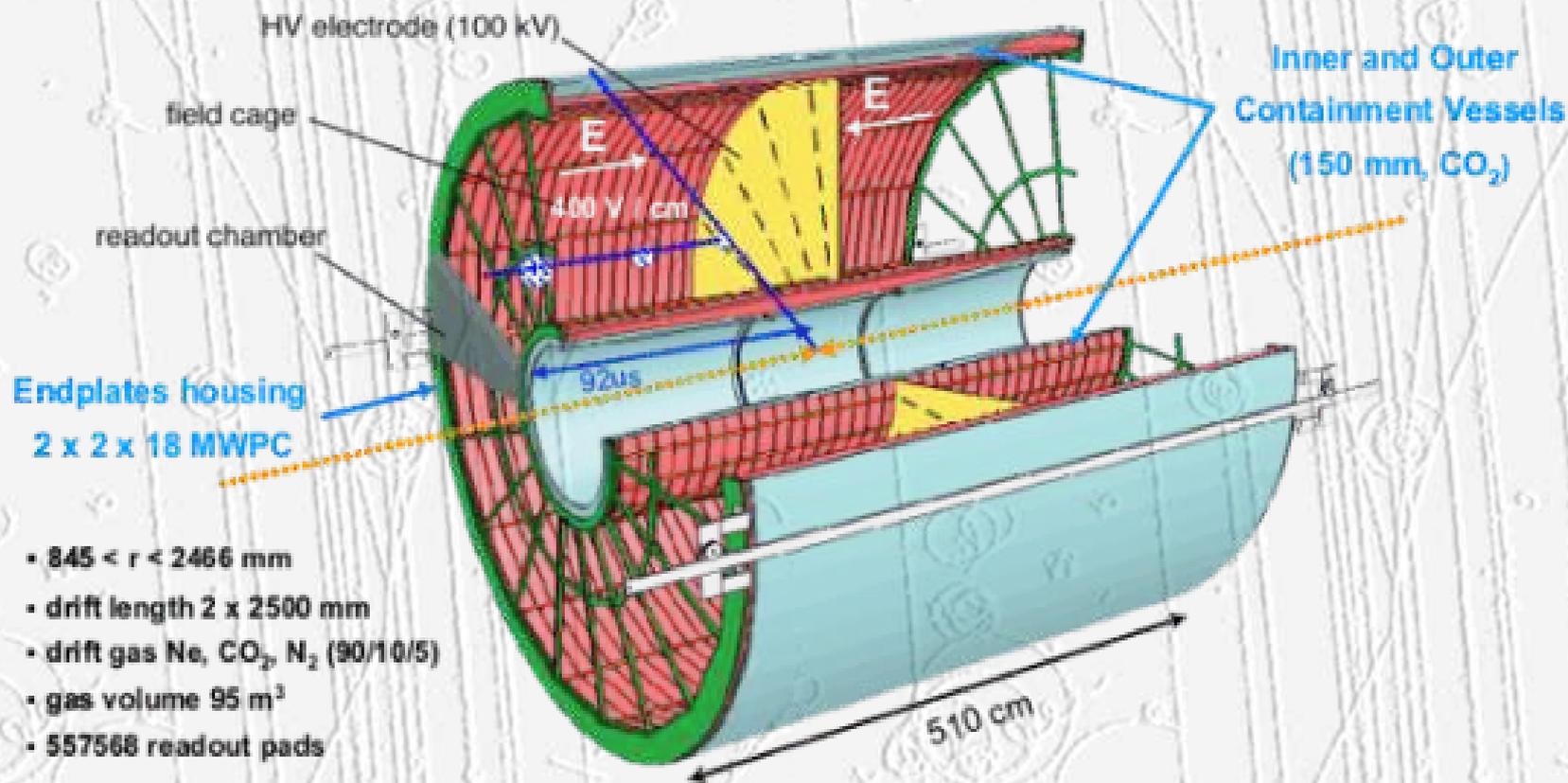


Identification NA

dE/dx

$$p = \gamma M \beta c$$

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

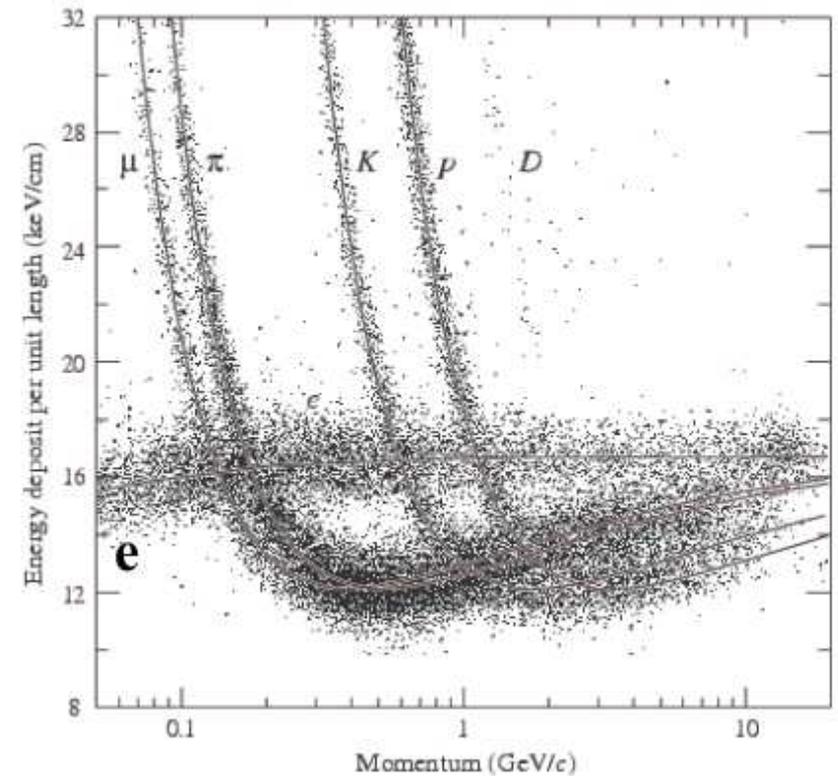
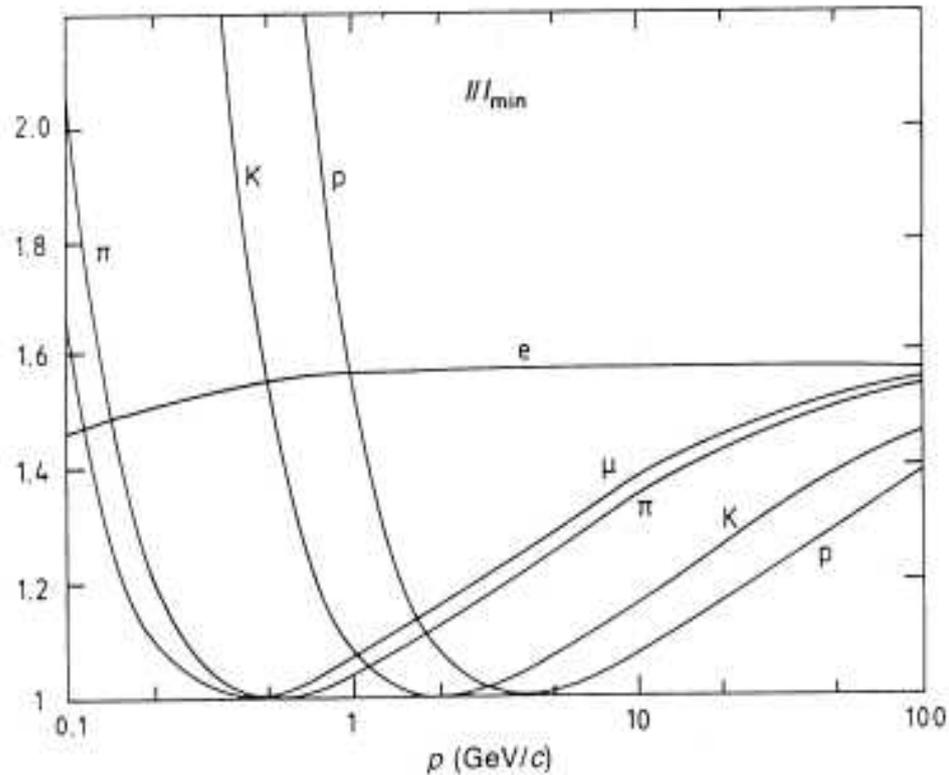


Identification NA

dE/dx

$$p = \gamma M \beta c$$

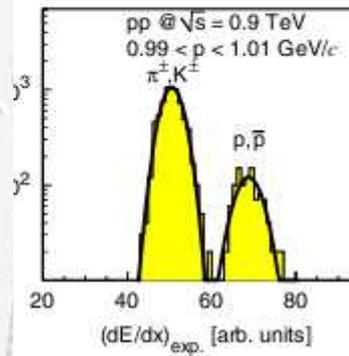
$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$



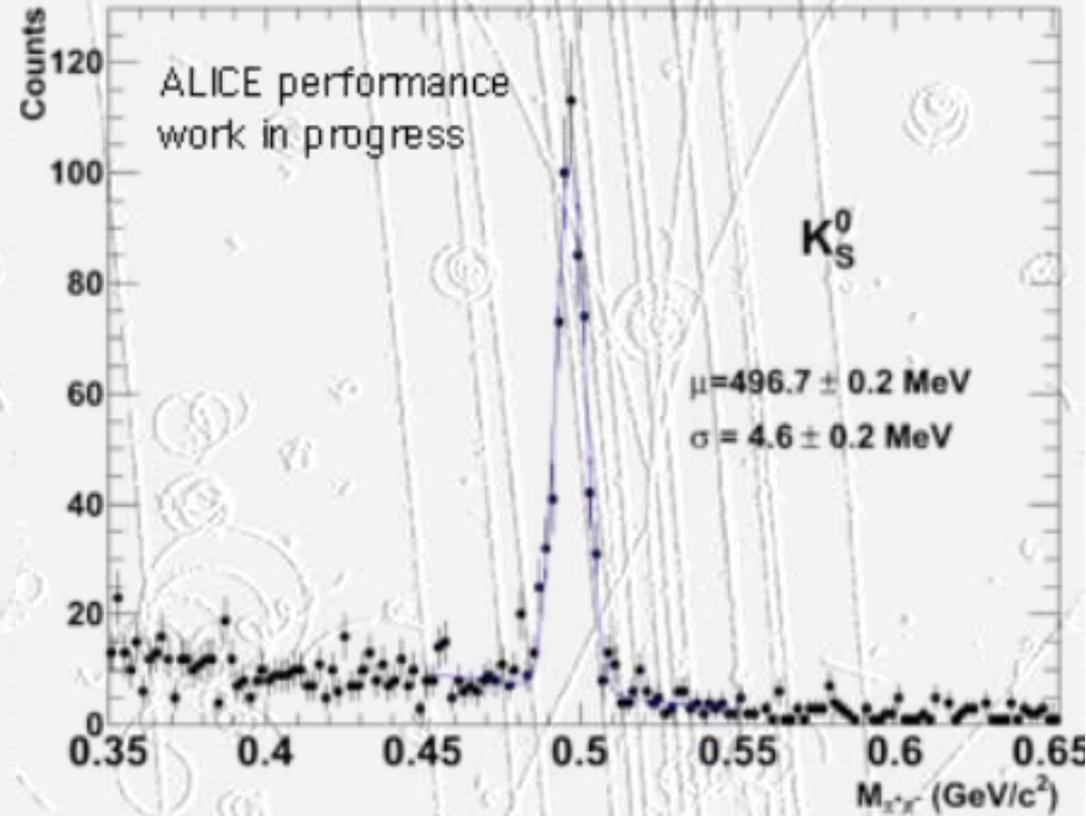
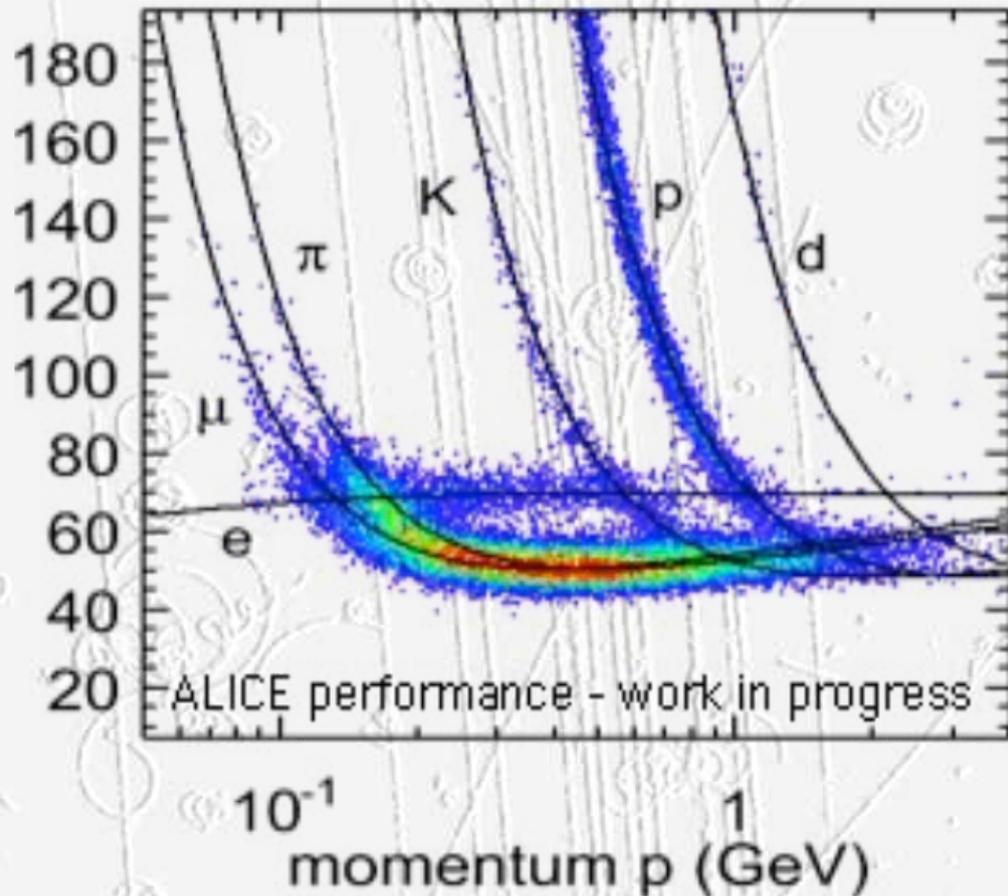
←→
Gamme d'énergie : $\sim 0.1 \rightarrow \sim 10$ GeV

Identification NA

dE/dx : Alice



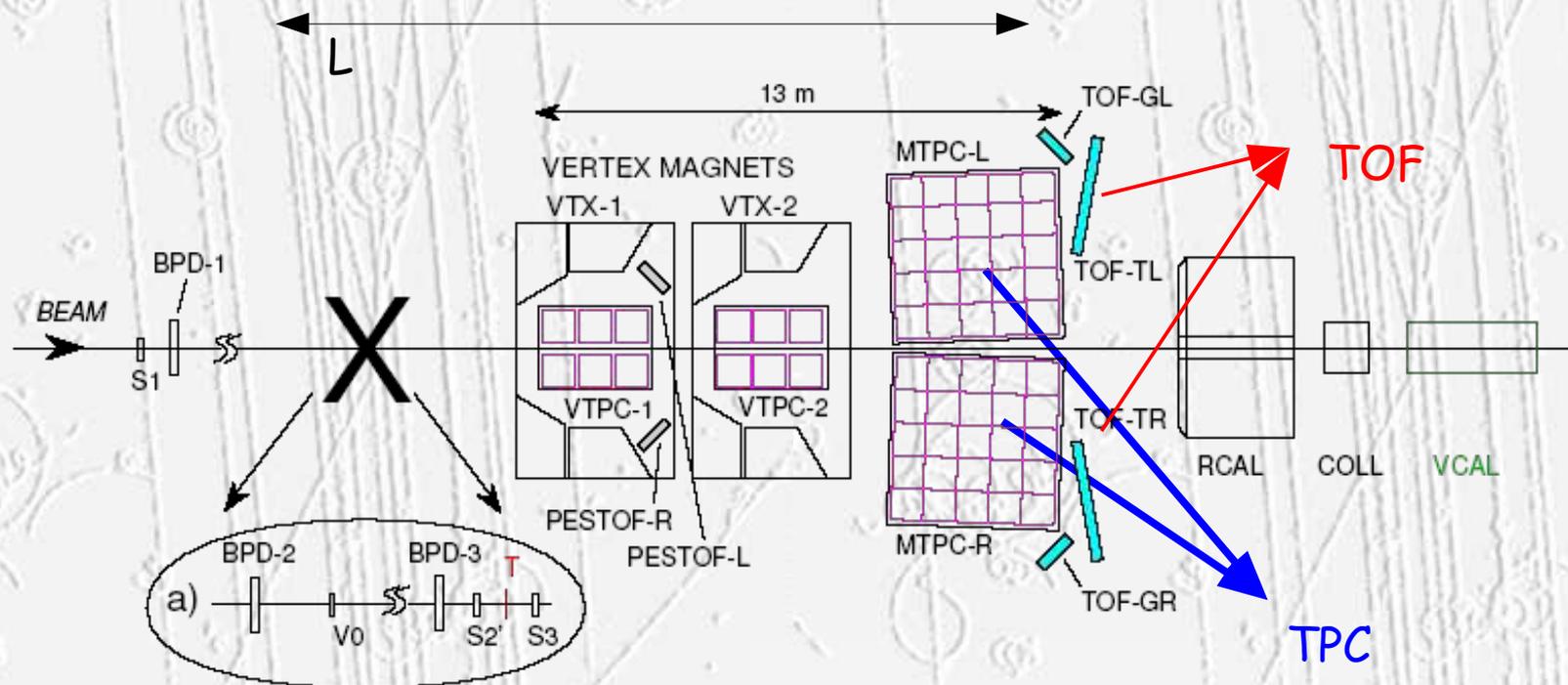
Ce n est pas le même K



Identification NA

Temps de vol

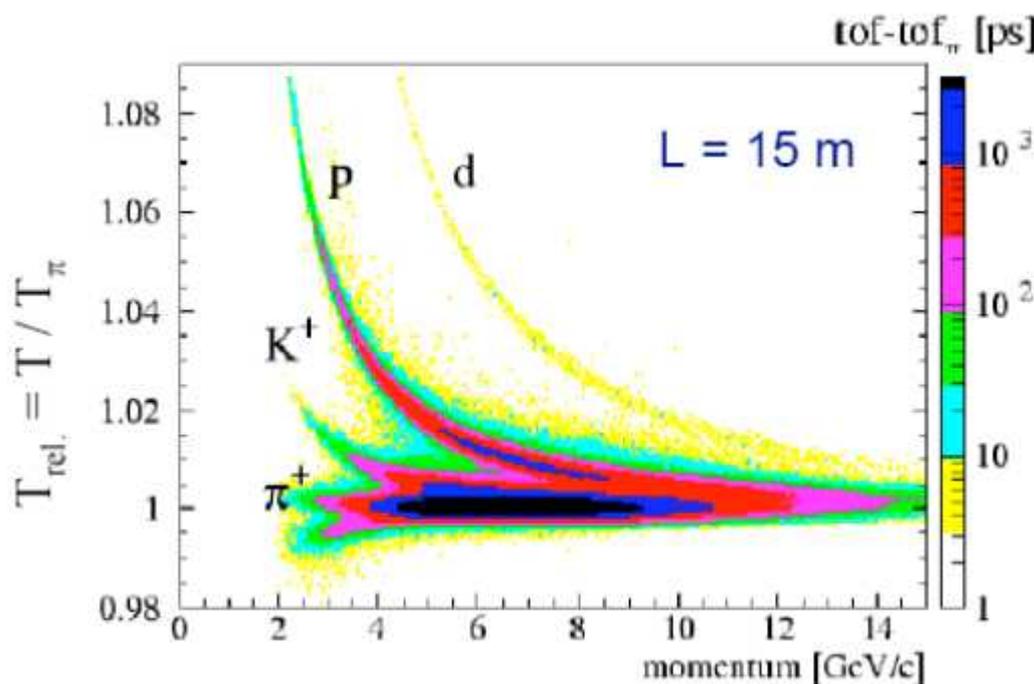
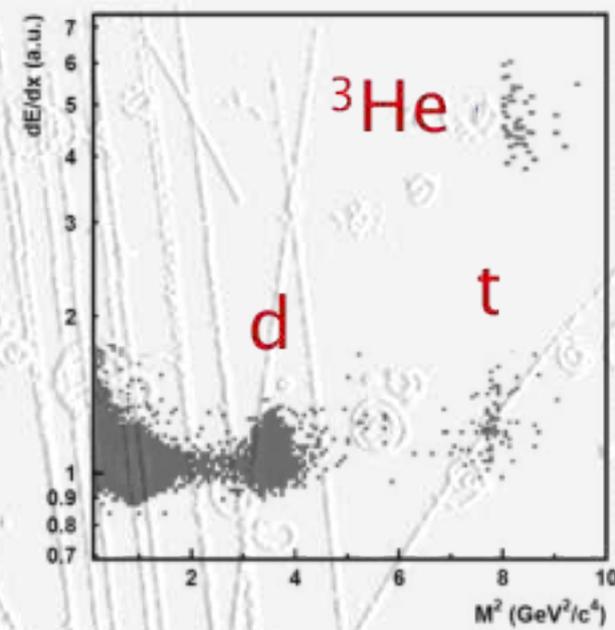
- Scintillateurs + PM:NA49
 - Entre le point d'interaction et un autre point
 - $\Delta t = L/\beta c$ et mesure de impulsion



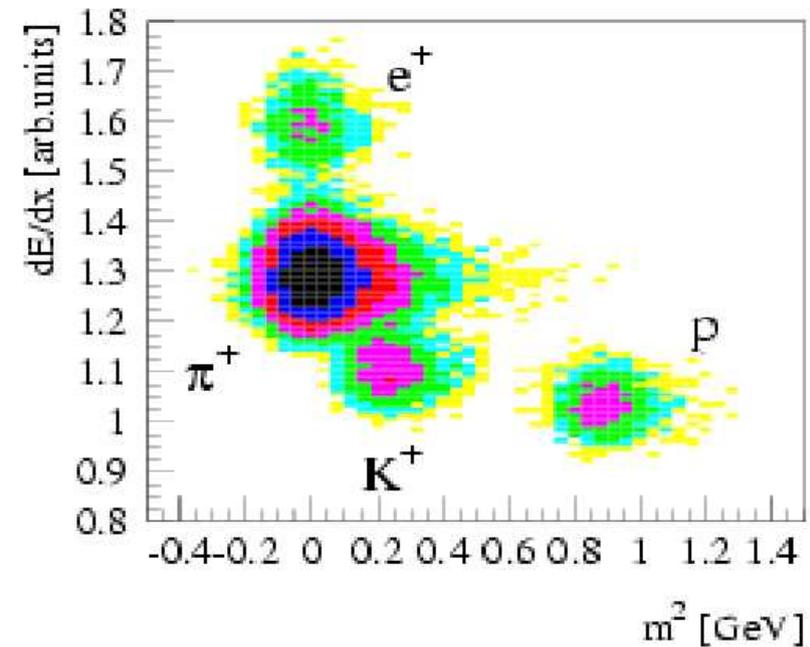
Identification NA

Temps de vol

- Scintillateurs + PM: Na 49



$+dE/dx$

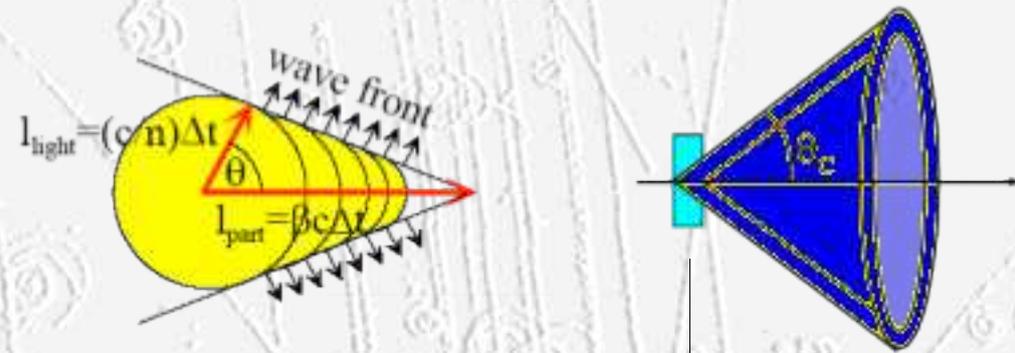


← Gamme d'énergie : $\sim 1 \rightarrow \sim 10 \text{ GeV}$ →

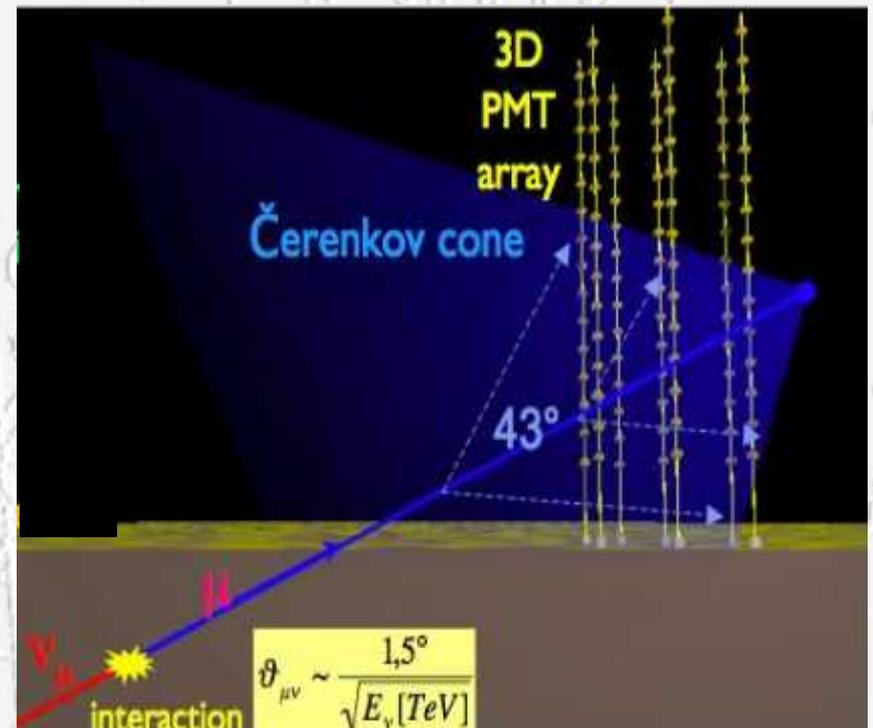
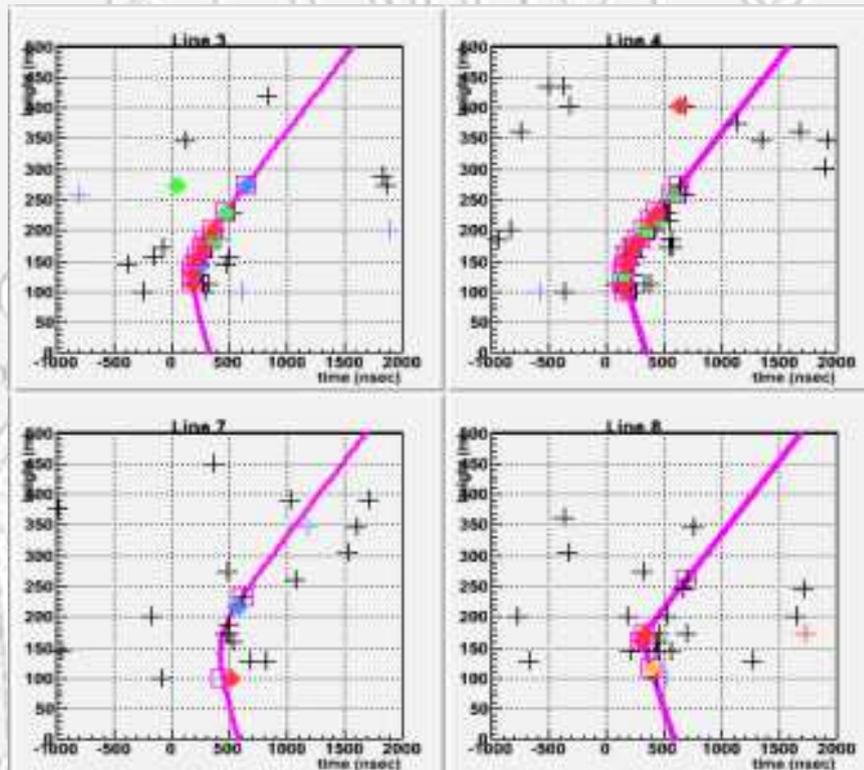
Identification

Rayonnement Cherenkov

- Radiation (photons) tangente à cône d'angle θ_c autour de la trace: $\cos\theta_c = (n\beta)^{-1}$

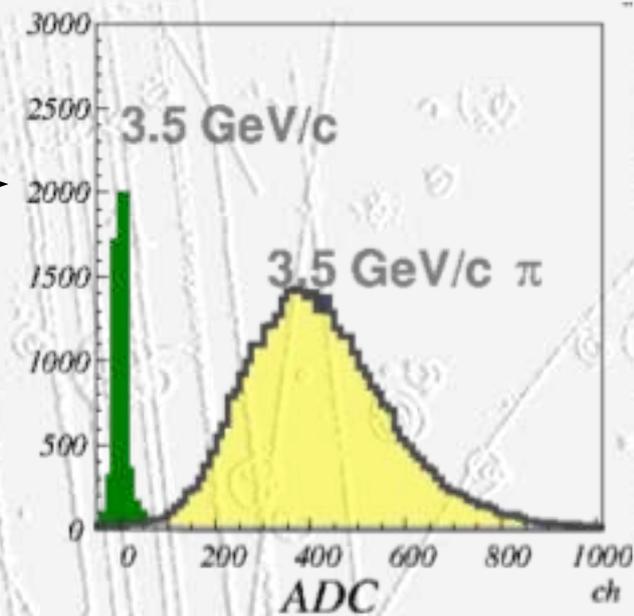


Changement d'indice



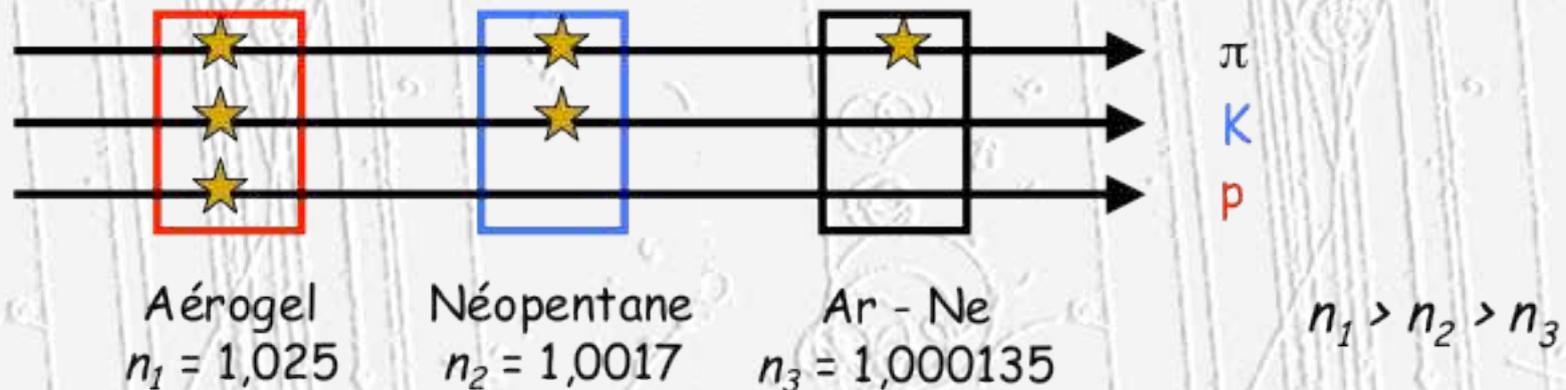
Identification

Belle : séparation π/K



Rayonnement Cherenkov

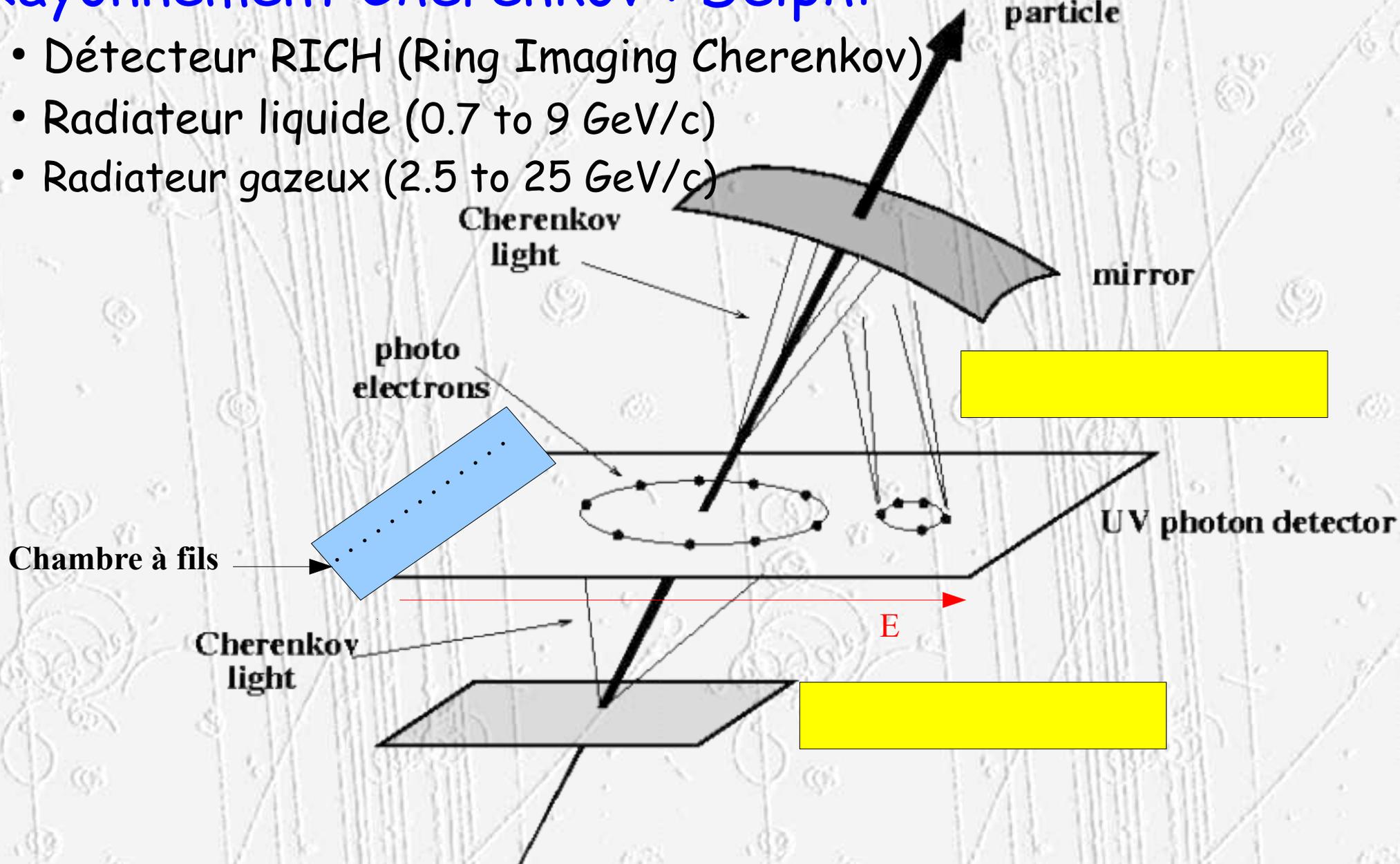
- Détecteur à seuil
- Choix astucieux du milieu va permettre de produire ou non la radiation Cherenkov $\beta > 1/n$



Identification

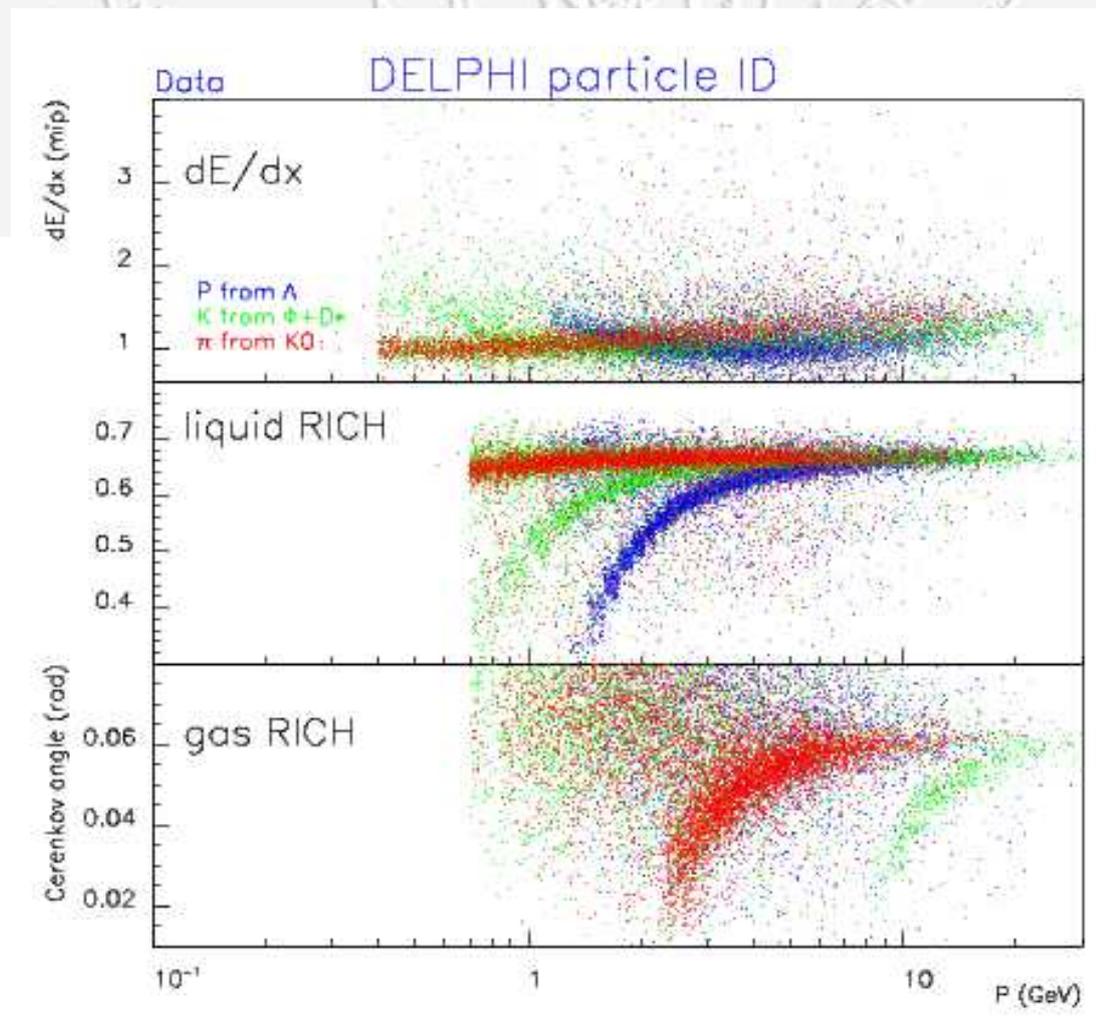
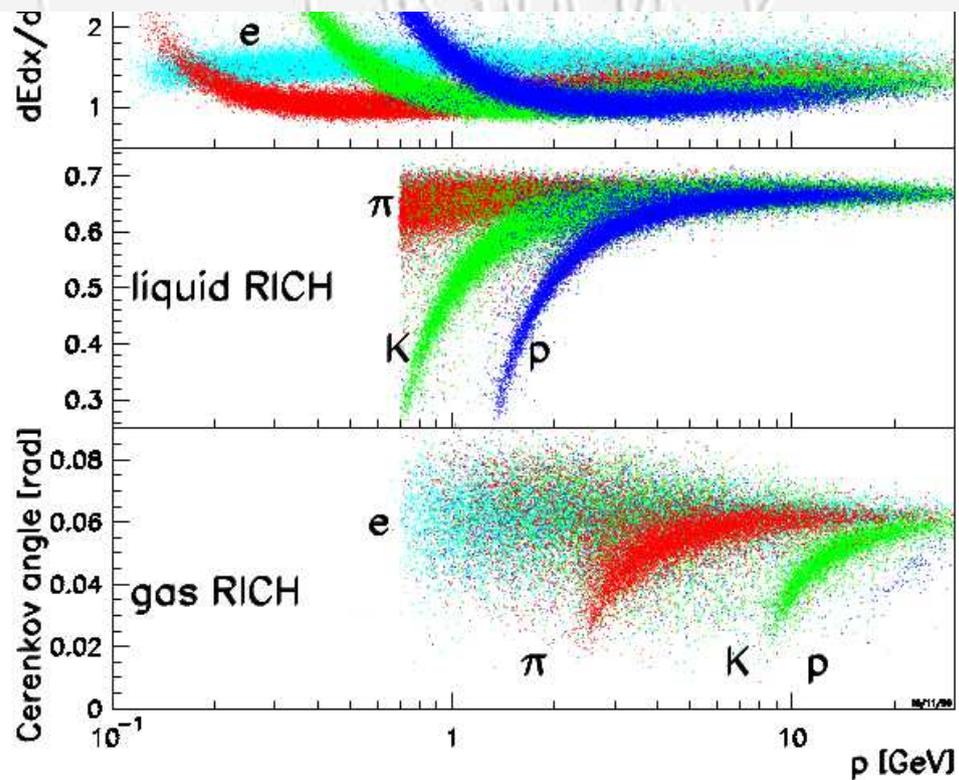
Rayonnement Cherenkov : Delphi

- Détecteur RICH (Ring Imaging Cherenkov)
- Radiateur liquide (0.7 to 9 GeV/c)
- Radiateur gazeux (2.5 to 25 GeV/c)



Identification

Rayonnement Cherenkov: Delphi

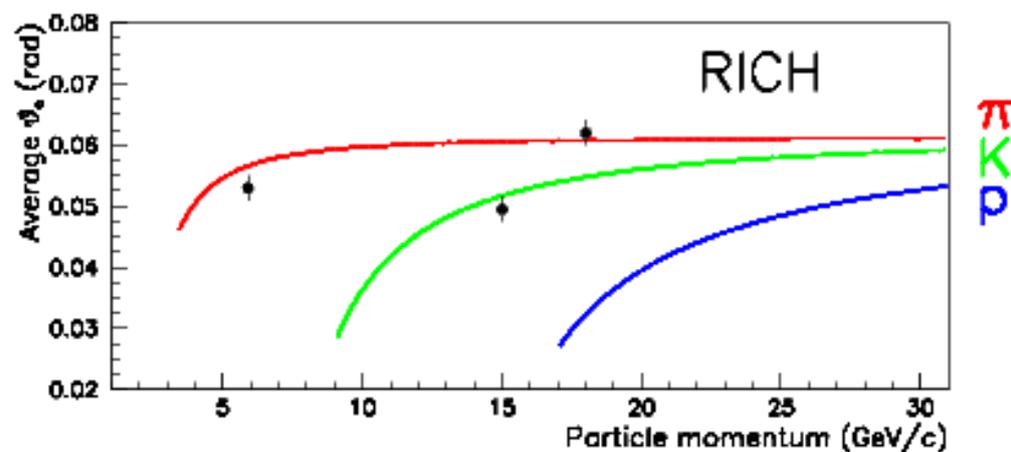
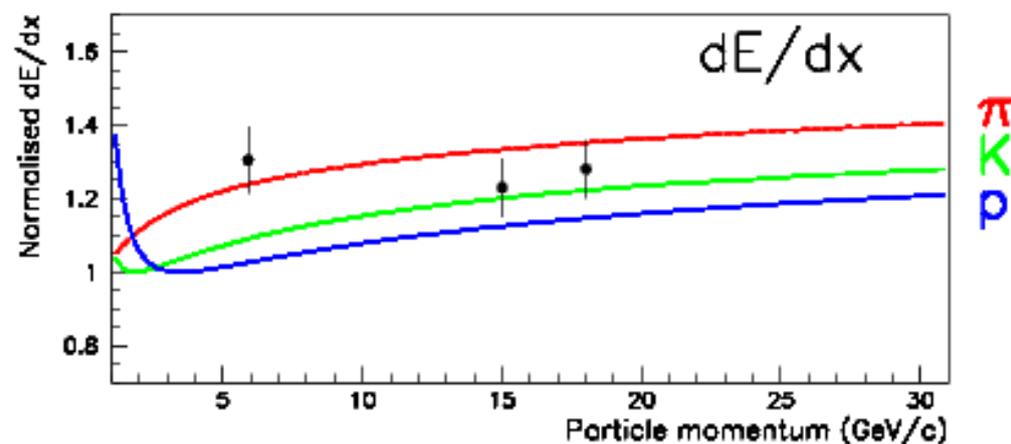
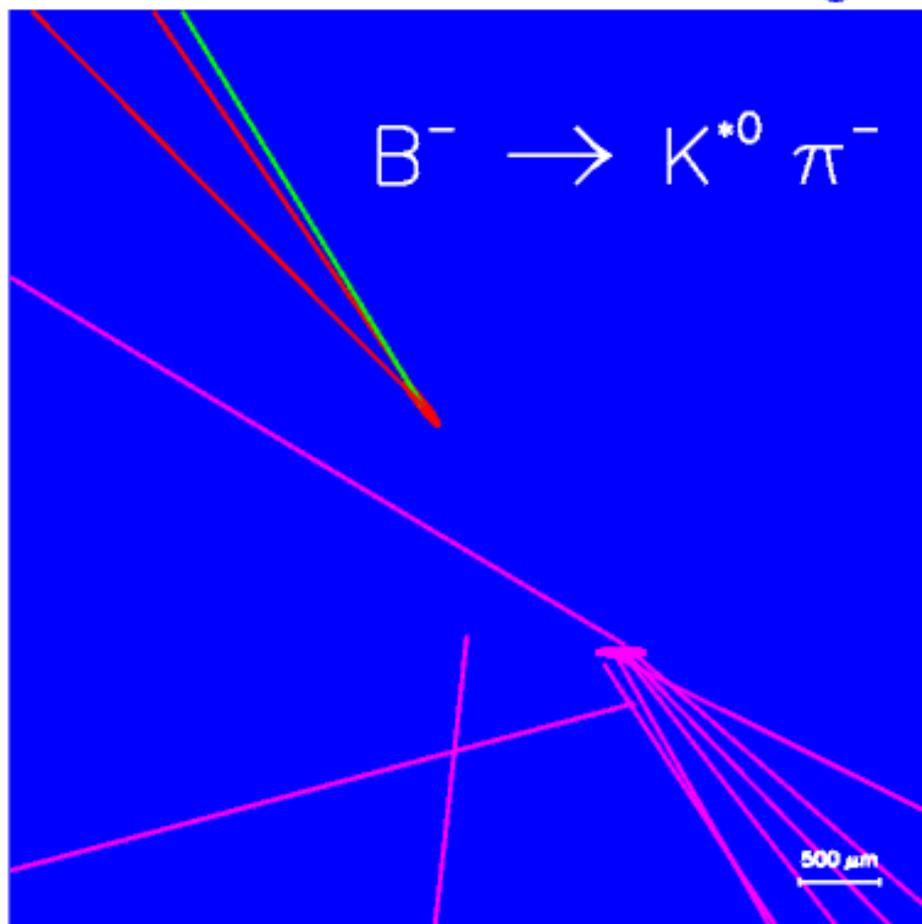


Identification

Rayonnement Cherenkov + dE/dx: Delphi

DELPHI Vertex Display

Run: 41541 Event: 1151

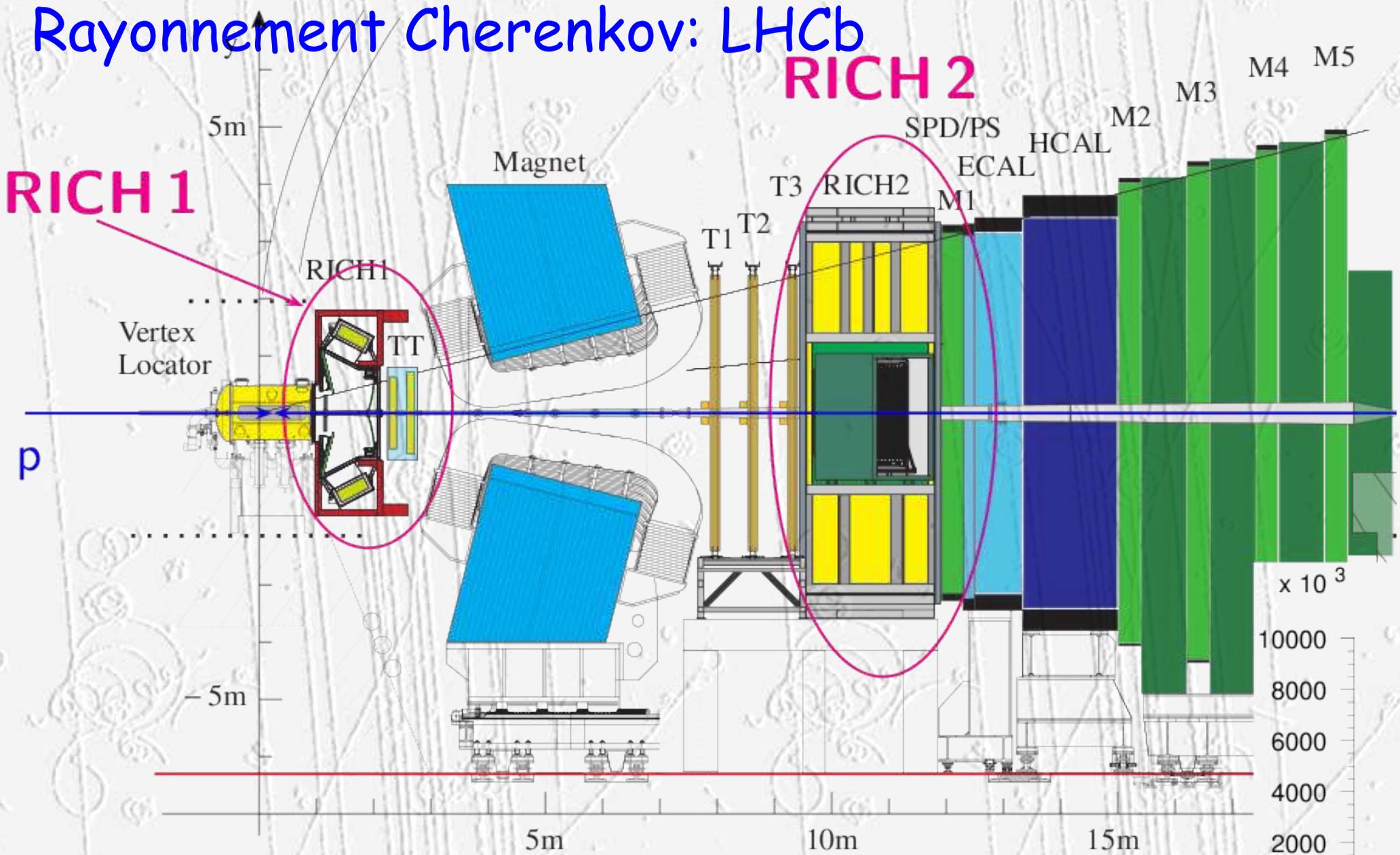


Identification

Rayonnement Cherenkov: LHCb

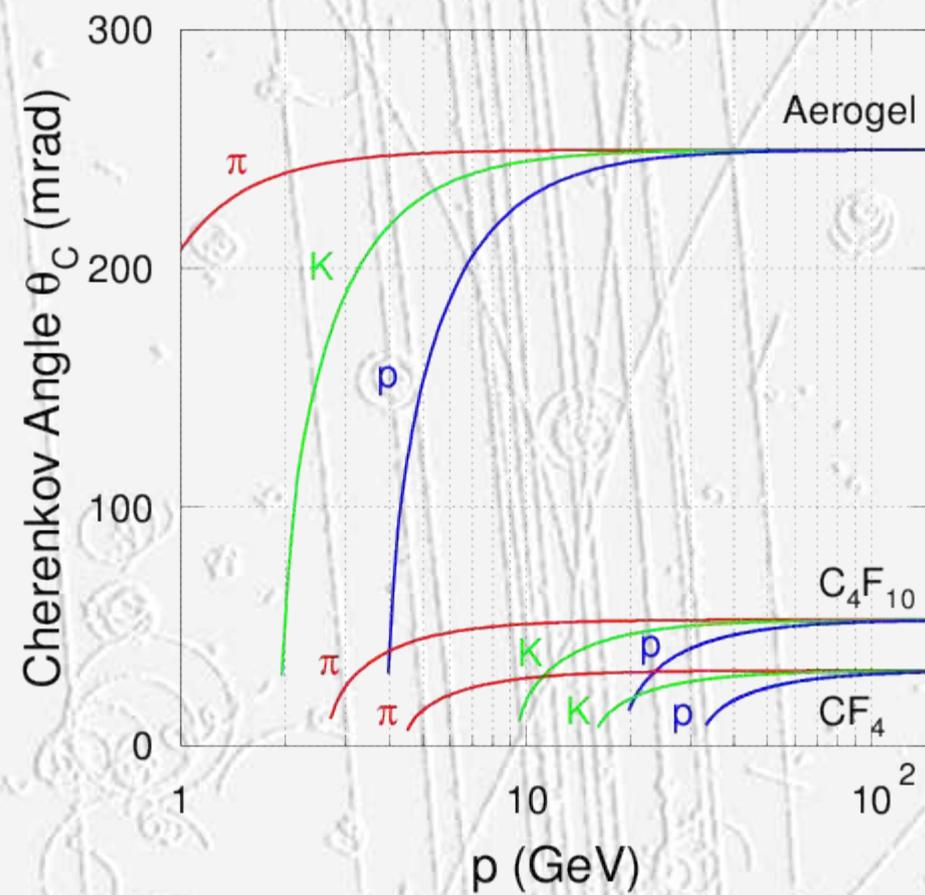
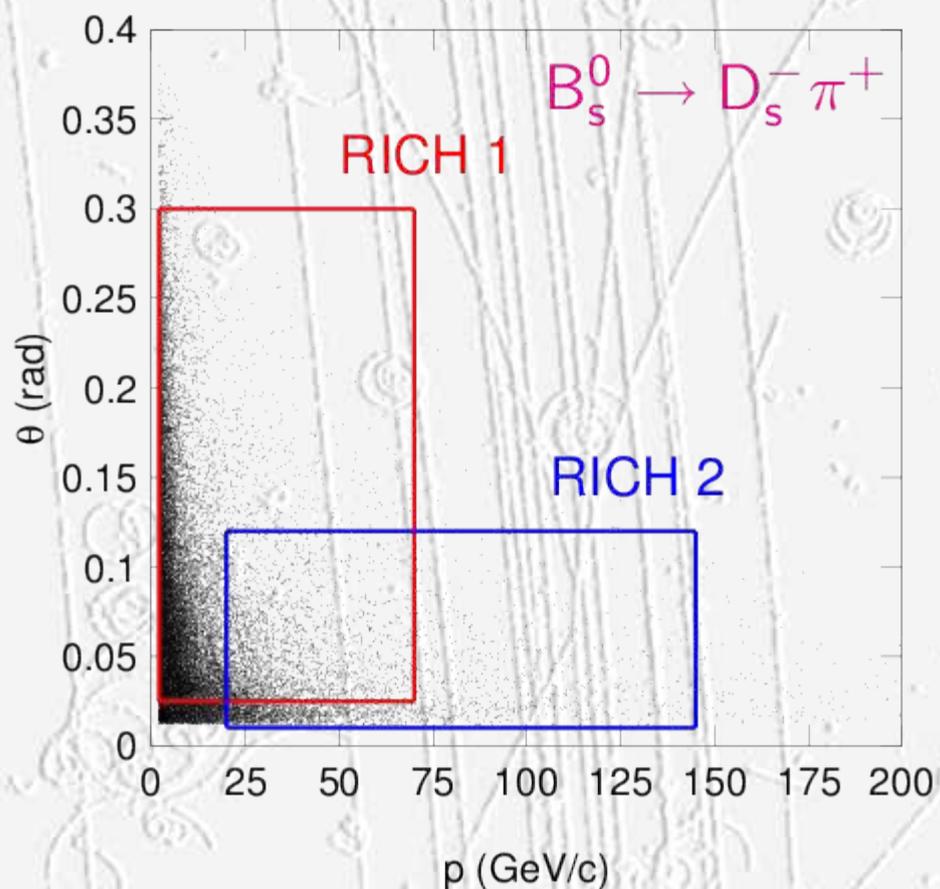
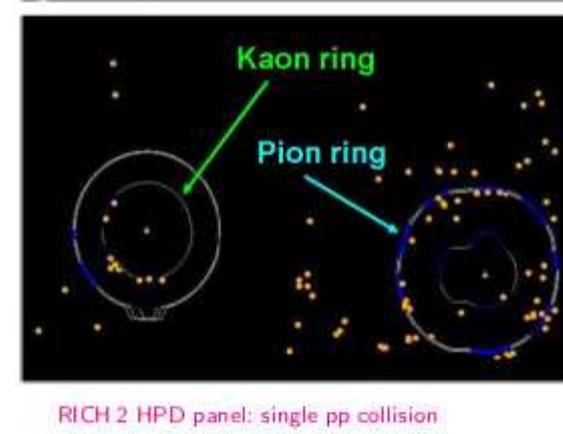
RICH 2

RICH 1



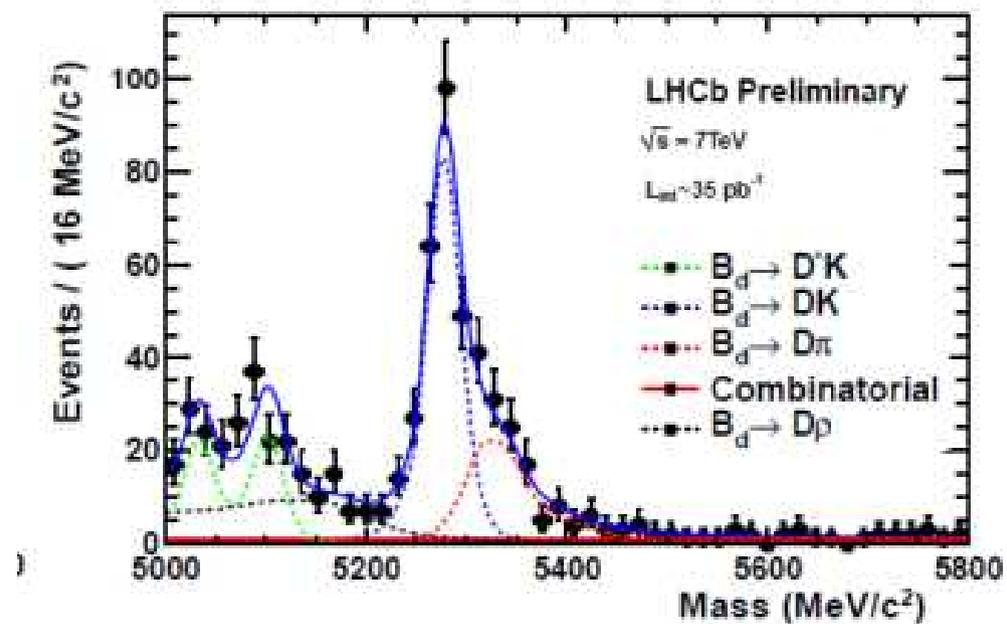
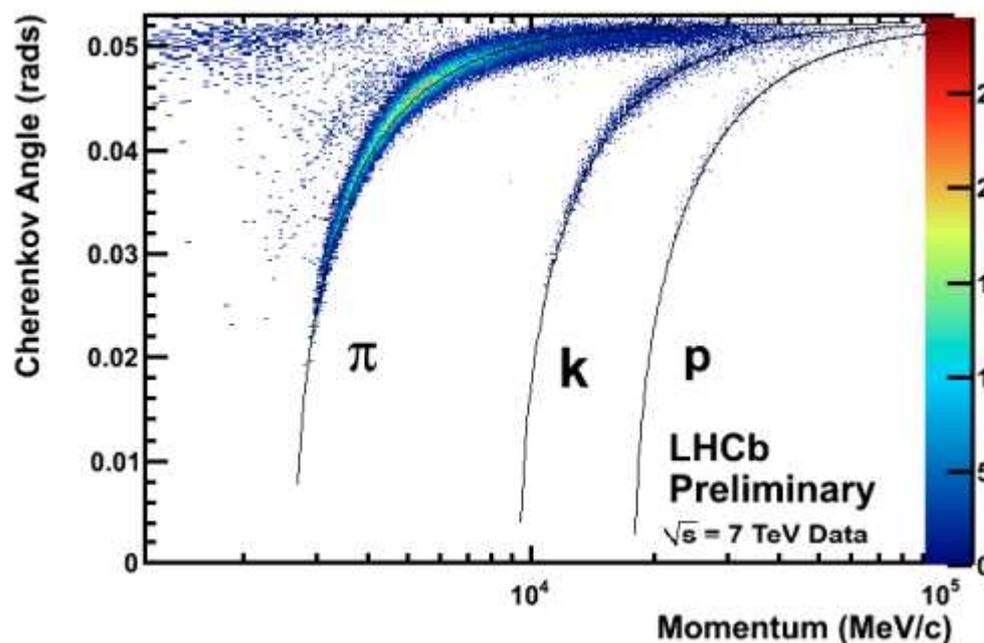
Identification

Rayonnement Cherenkov: LHCb



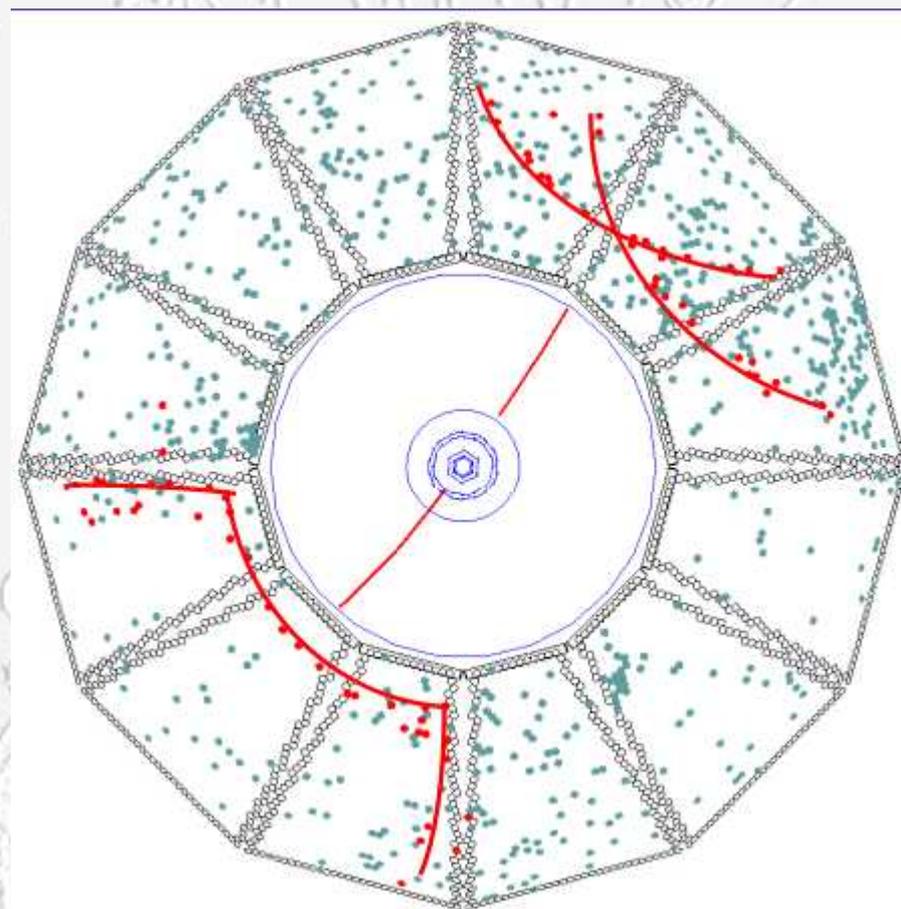
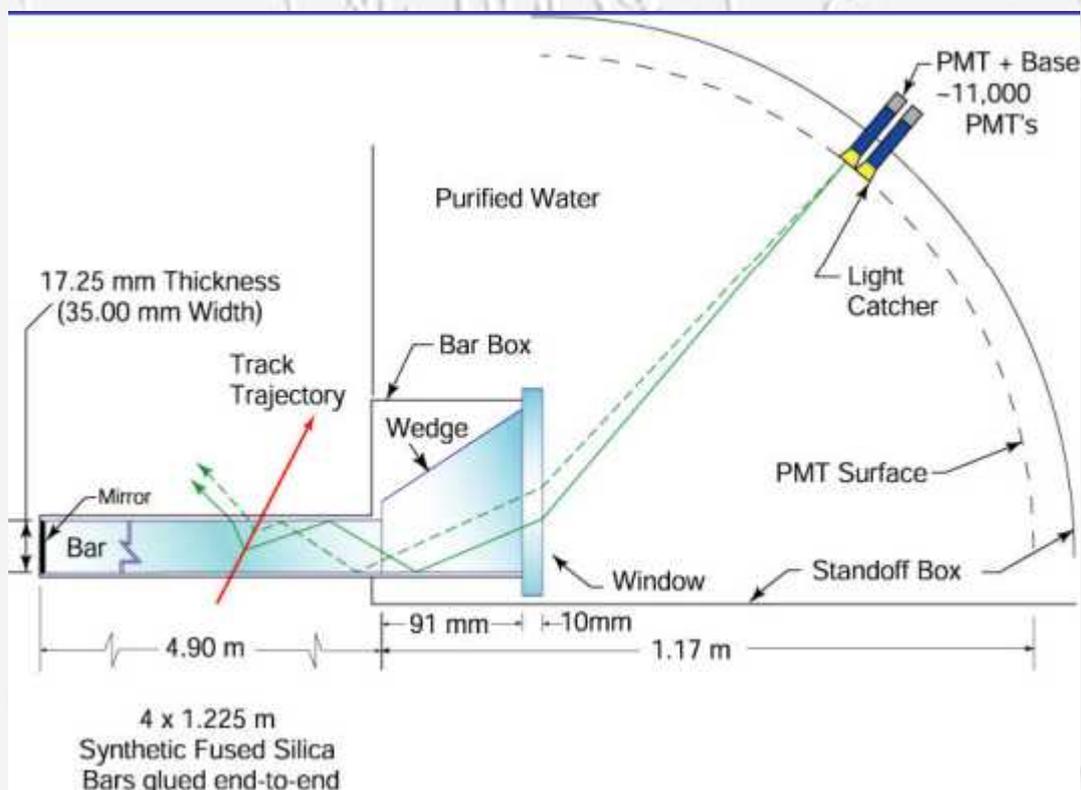
Identification

Rayonnement Cherenkov: LHCb



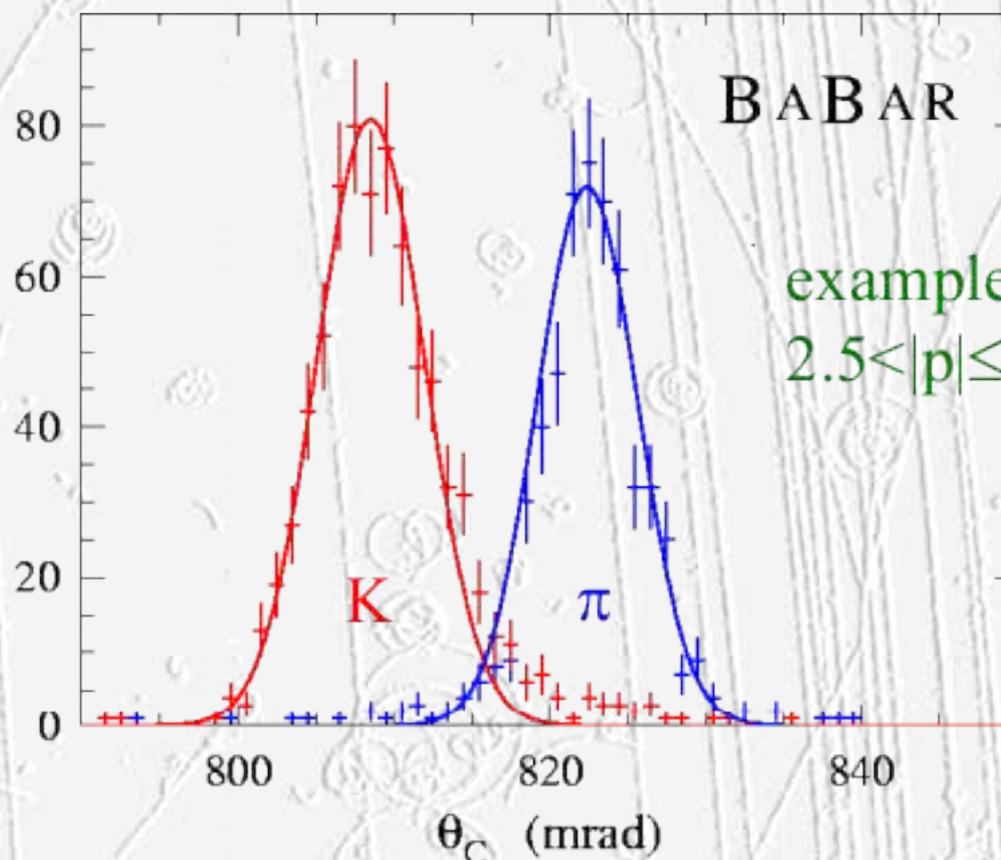
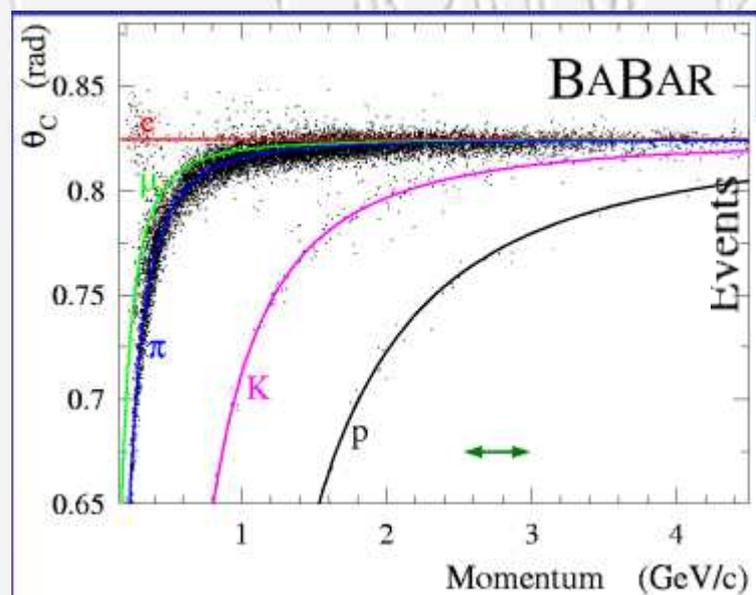
Identification

Rayonnement Cherenkov: BaBar



Identification

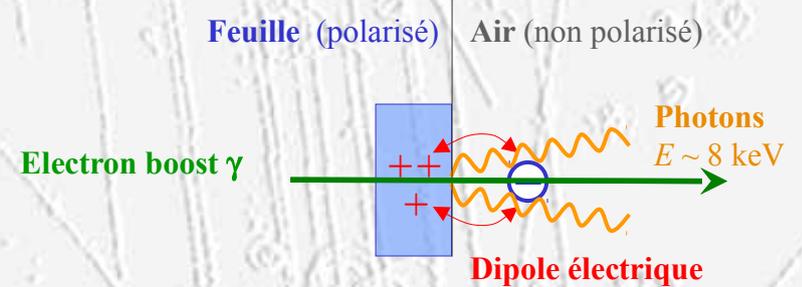
Rayonnement Cherenkov: BaBar



Identification

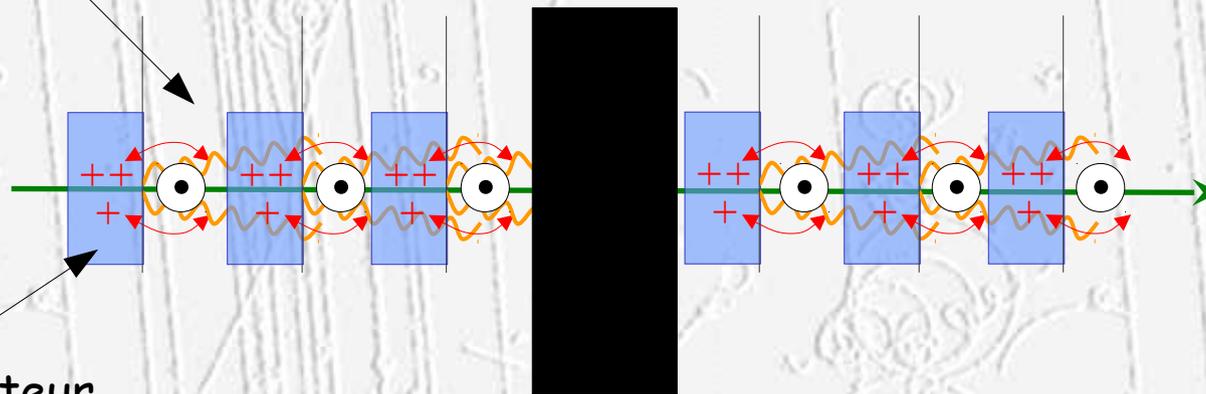
Rayonnement de Transition

- Atlas : TRT
- Radiation de transition proportionnelle à γ
- Photon est proportionnelle cste de structure fine : $\sim 1/137$
- Cohérence des photons => besoin de moins de 100 transitions



Détecteur

Radiateur

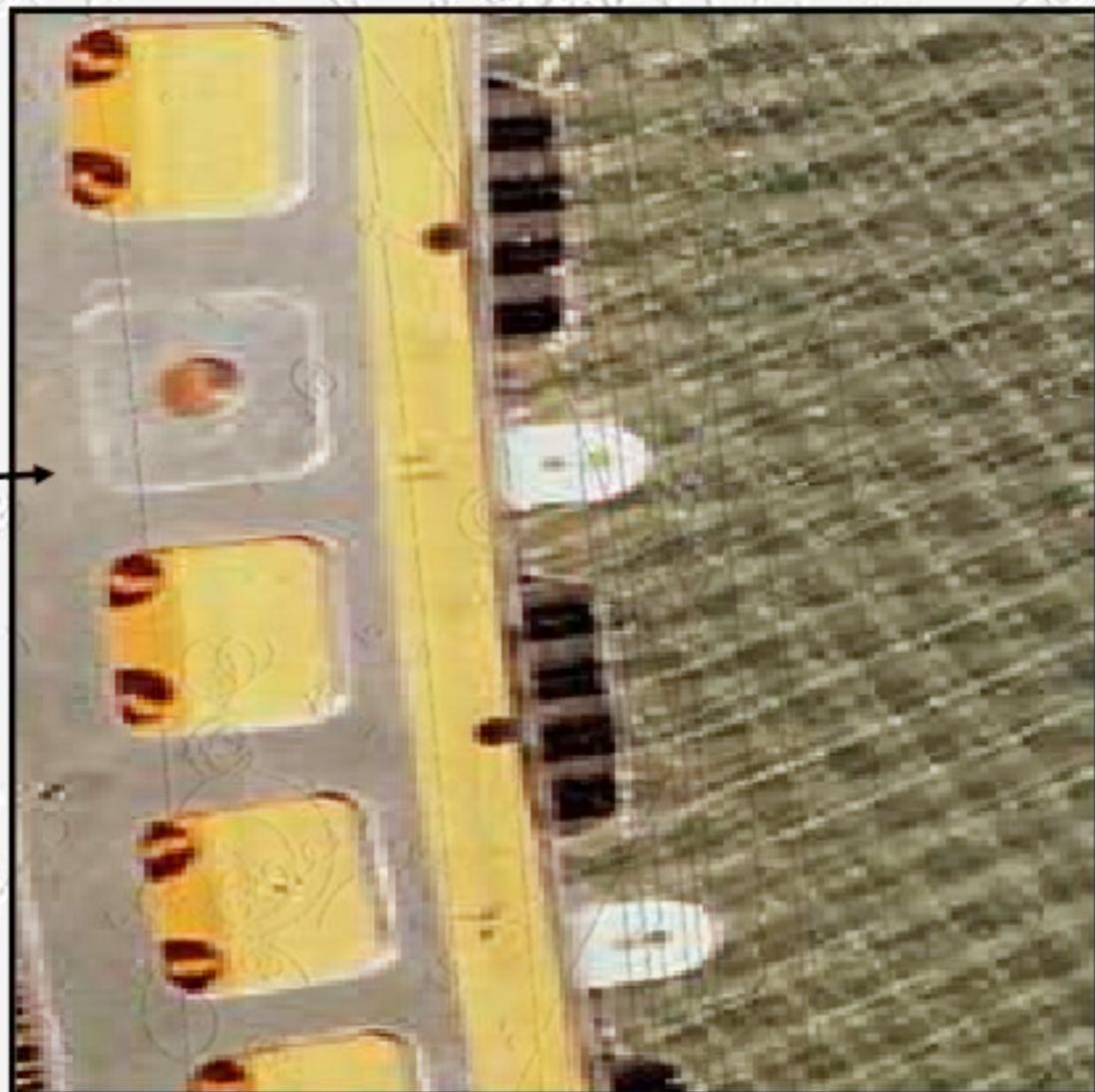
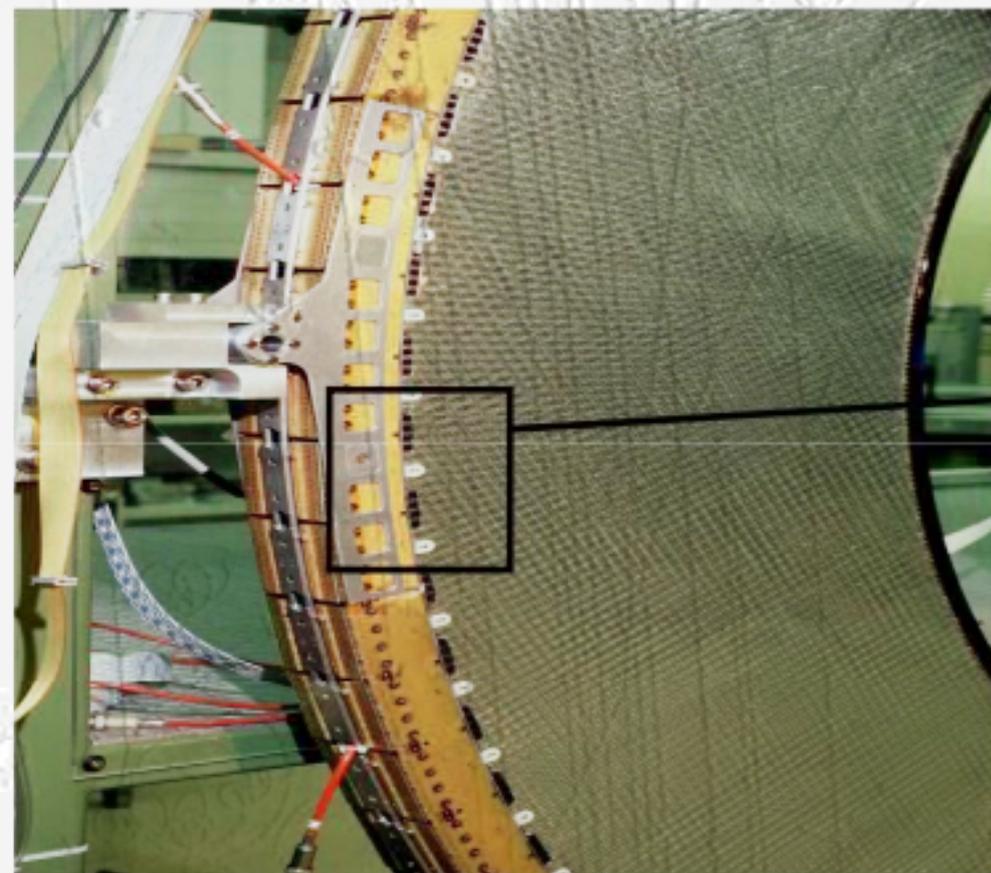


support :
tous les photons de RT sont absorbés

Identification

Rayonnement de Transition

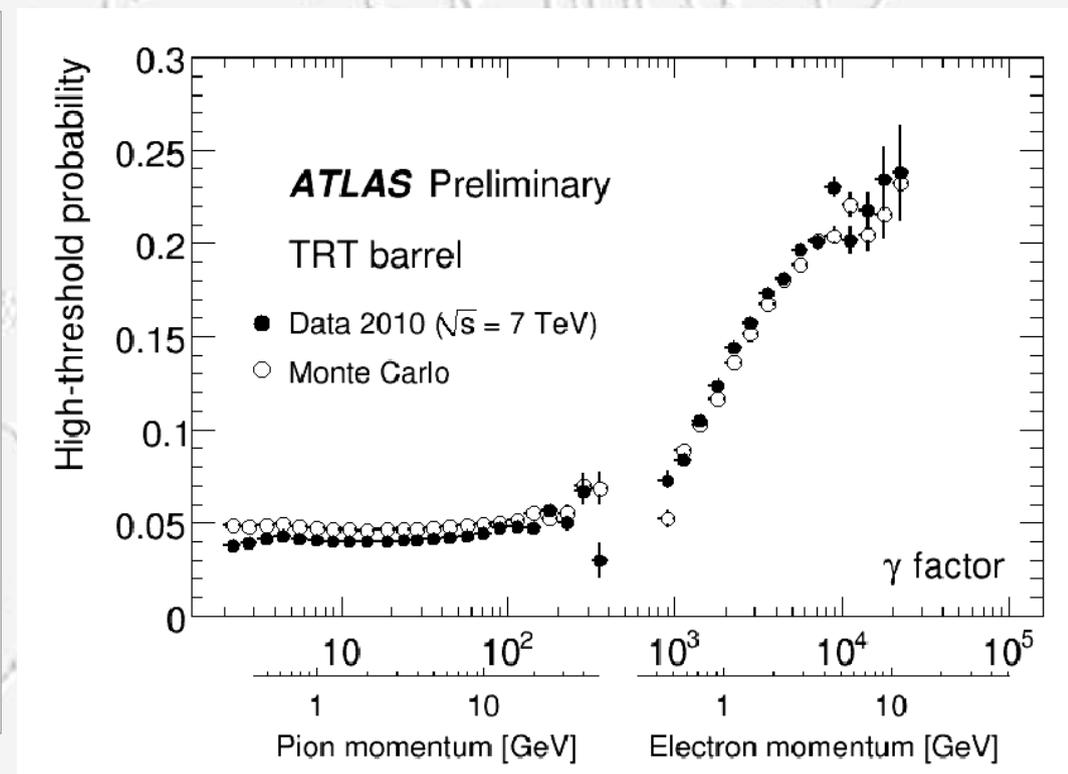
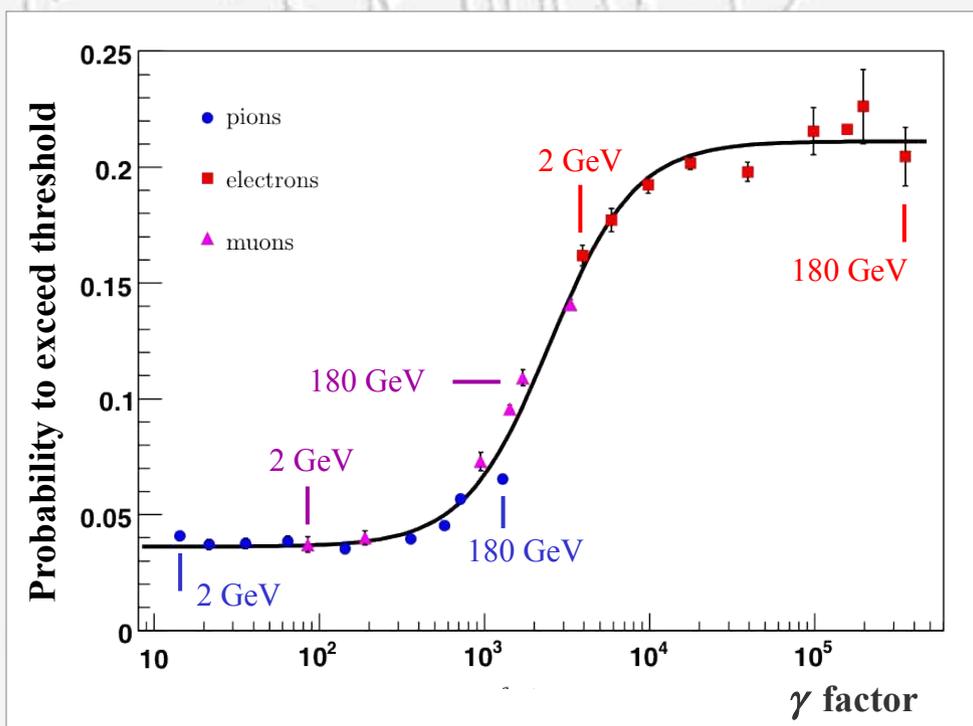
- Atlas : TRT



Identification

Rayonnement de Transition

- Atlas : TRT



Identification

TRD
Identification e^+ , e^-



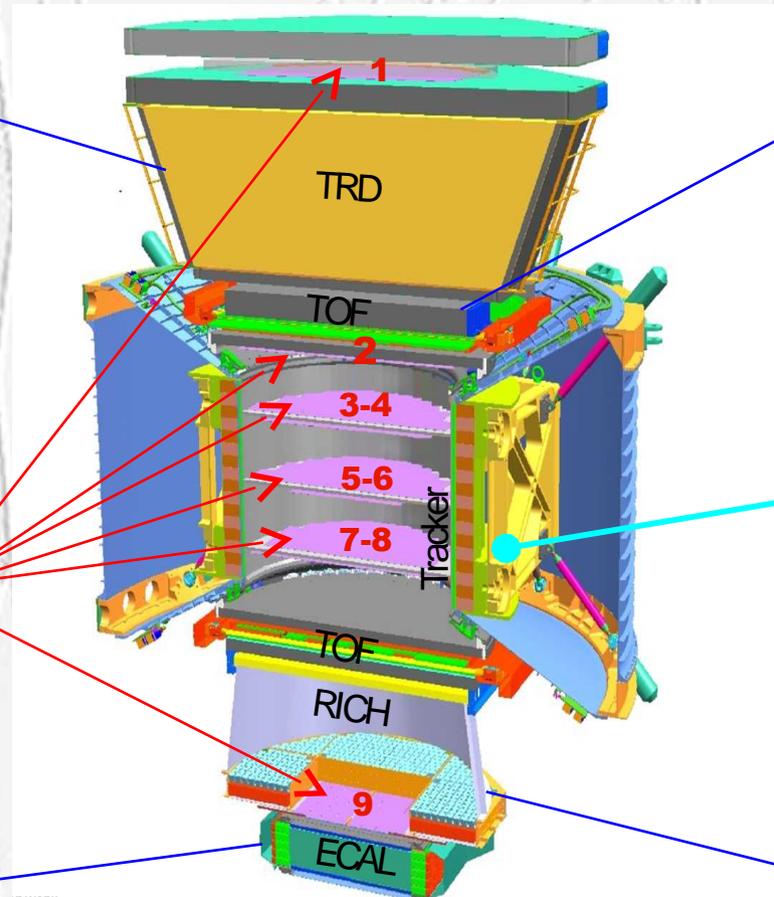
Silicium
 Z , P



ECAL
E of e^+ , e^- , γ



Exemple AMS2



TOF
 Z , E



Magnet
 $\pm Z$



RICH
 Z , E

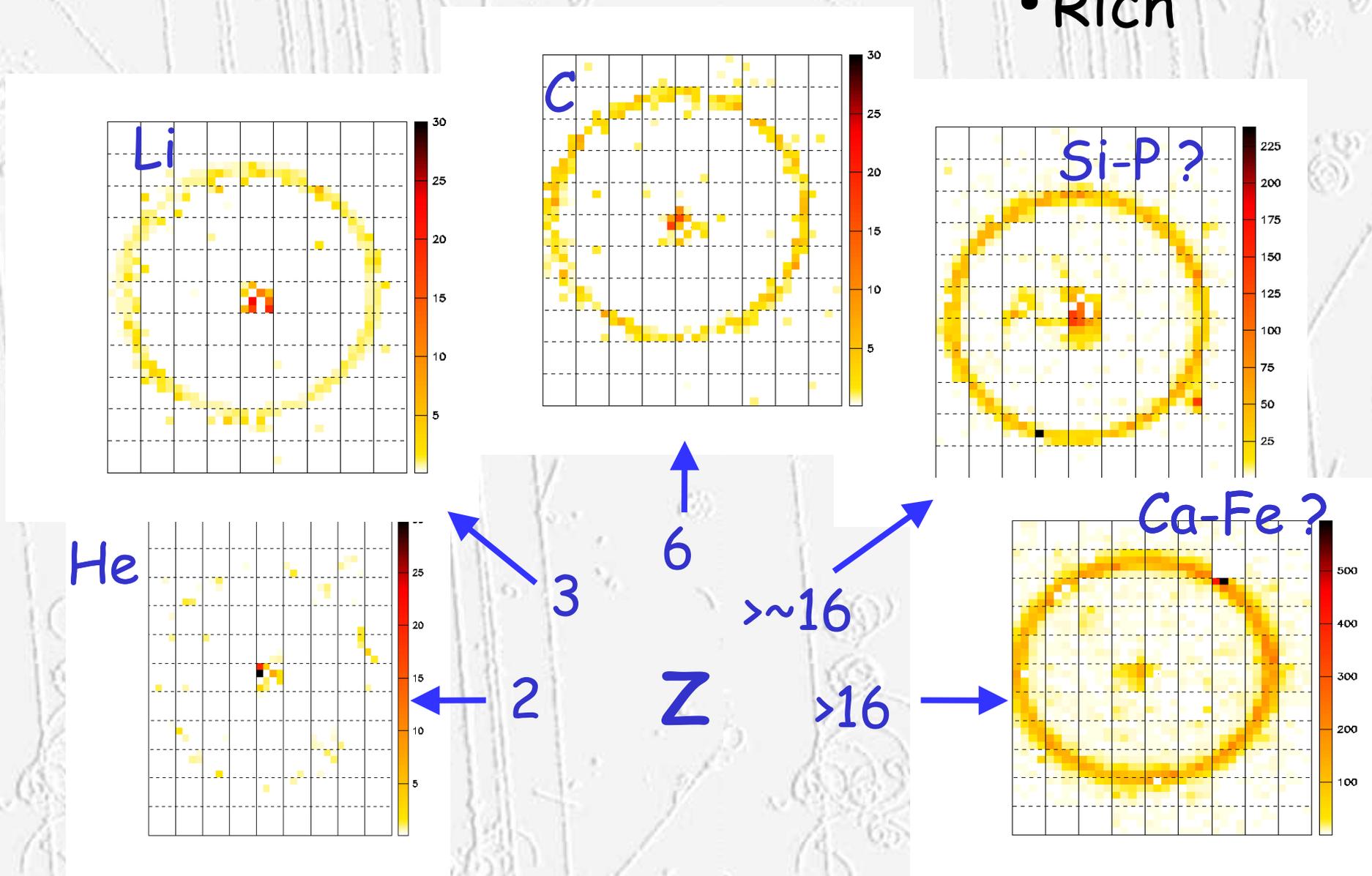


Z , P sont mesurés indépendamment par Tracker, RICH, TOF and ECAL

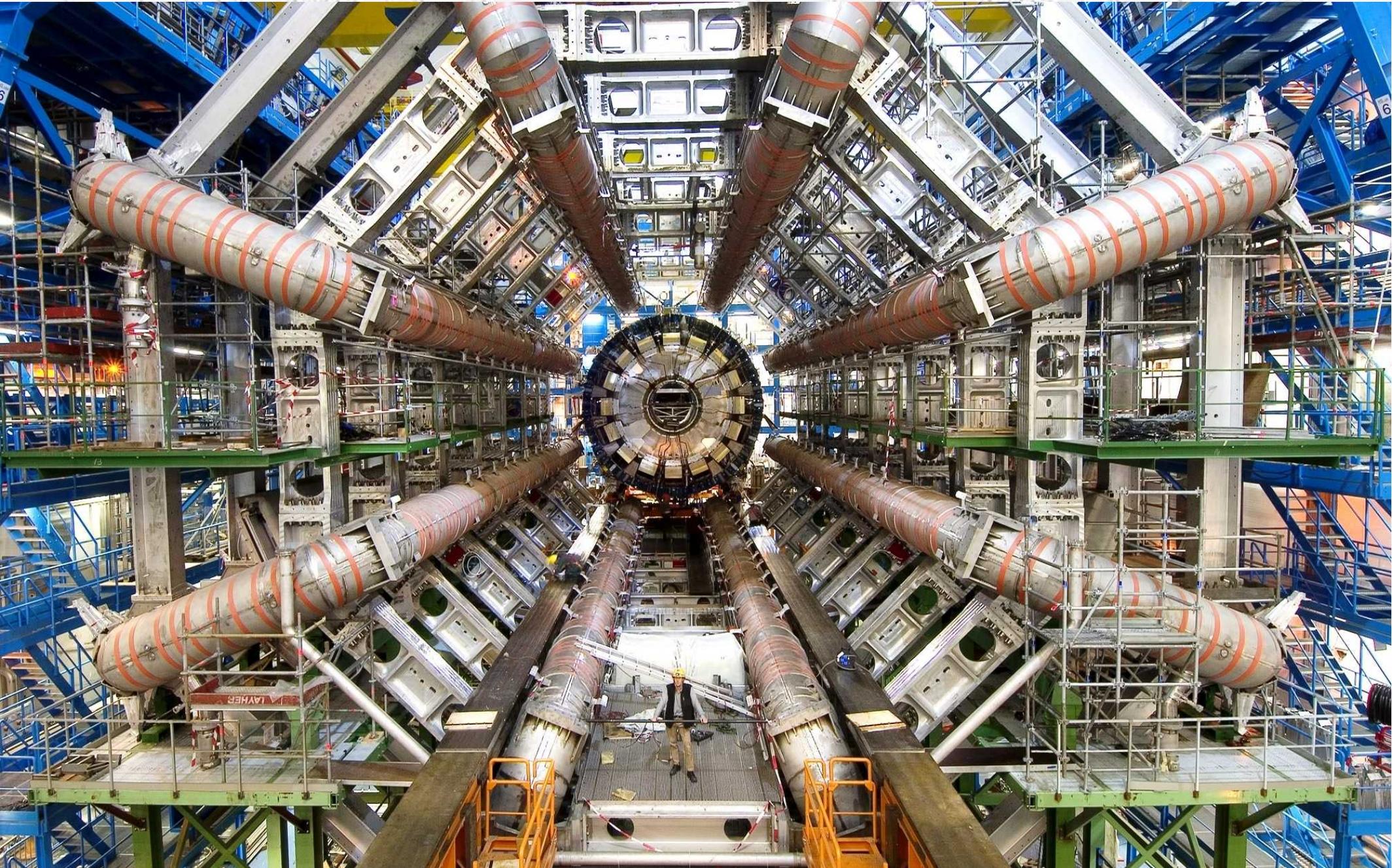
Identification

Exemple AMS2

- Rich



ATLAS



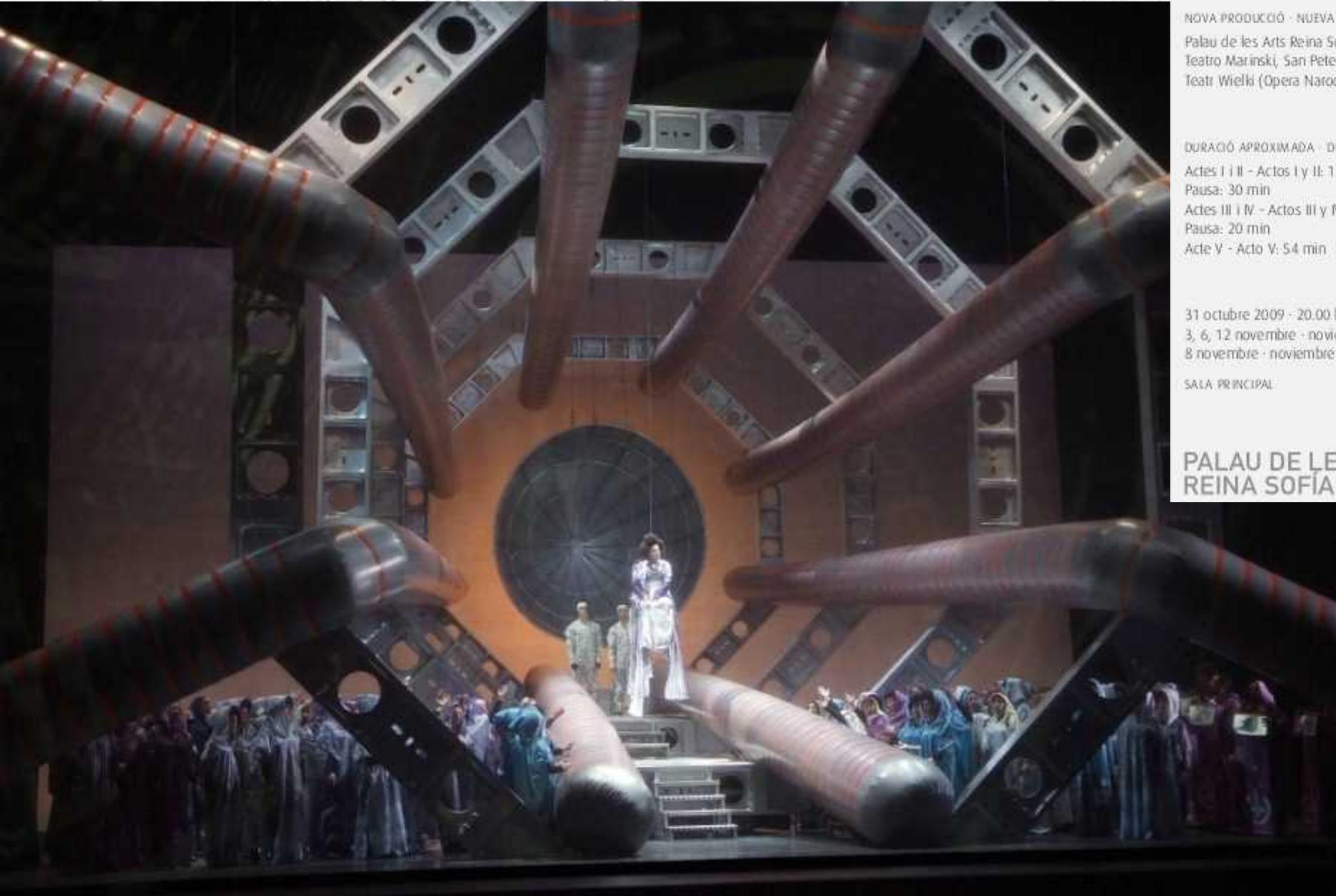
NOVA PRODUCCIÓ - NUEVA PRODUCCIÓN
Palau de les Arts Reina Sofia
Teatro Mariinski, San Petersburgo
Teatr Wielki (Opera Narodowa), Varsovia

DURACIÓ APROXIMADA - DURACIÓN APROXIMADA
Actes I i II - Actos I y II: 1 h 21 min
Pausa: 30 min
Actes III i IV - Actos III y IV: 1 h 42 min
Pausa: 20 min
Acte V - Acto V: 54 min

31 octubre 2009 - 20.00 h
3, 6, 12 novembre - noviembre 2009 - 20.00 h
8 novembre - noviembre 2009 - 19.00 h

SALA PRINCIPAL

**PALAU DE LES ARTS
REINA SOFIA** Temporada 21



- I. Interaction particule/matière
- II. Détecteurs de traces
- III. Identification des particules
- IV. **Conception de détecteur**

IV. Conception d'un détecteur

1. Introduction
2. Généralités
3. Détecteurs

1.Introduction

Biais principal : les expériences auxquels j'ai participé

- Au près de collisionneur
 - LHC (**Atlas**, CMS...), Fermilab (CDF, **D0**) , LEP (**Delphi**, Aleph,...)

les expériences auxquelles j'aurai pu participer

- Hors accélérateur
 - Super Kamiokande, Antares...
- Espace
 - Détecteur embarqué i.e. : AMS2

Les Trucs dont je ne dirai rien (à tort!)

- Médical
 - Scanner, IRM, PetScan, hadron thérapie ...
- Industriel
 - Scan conteneurs...

IV. Conception d'un détecteur

1. Introduction
2. Généralités
3. Détecteurs

2. Généralités

Définition

- Appareil destiné à déceler la présence d'un **phénomène** et éventuellement à la **mesurer**
- Un détecteur est un dispositif technique (instrument, substance, matière) qui **change d'état en présence de l'élément ou de la situation pour lequel il a été spécifiquement conçu**.
Des fonctions supplémentaires peuvent apporter des précisions **qualitatives ou quantitatives** sur la nature du phénomène observé

2. Généralités

Exemples simples:

- Sable (trace) :
 - Principe du détecteur de « trace »
 - Mesure qualitative & quantitative
- Œil (détecteur):
 - Sympa, facile à utiliser
 - Gamme d'énergie limité
 - Difficulté de récupérer l'information



L'œil était dans la tombe



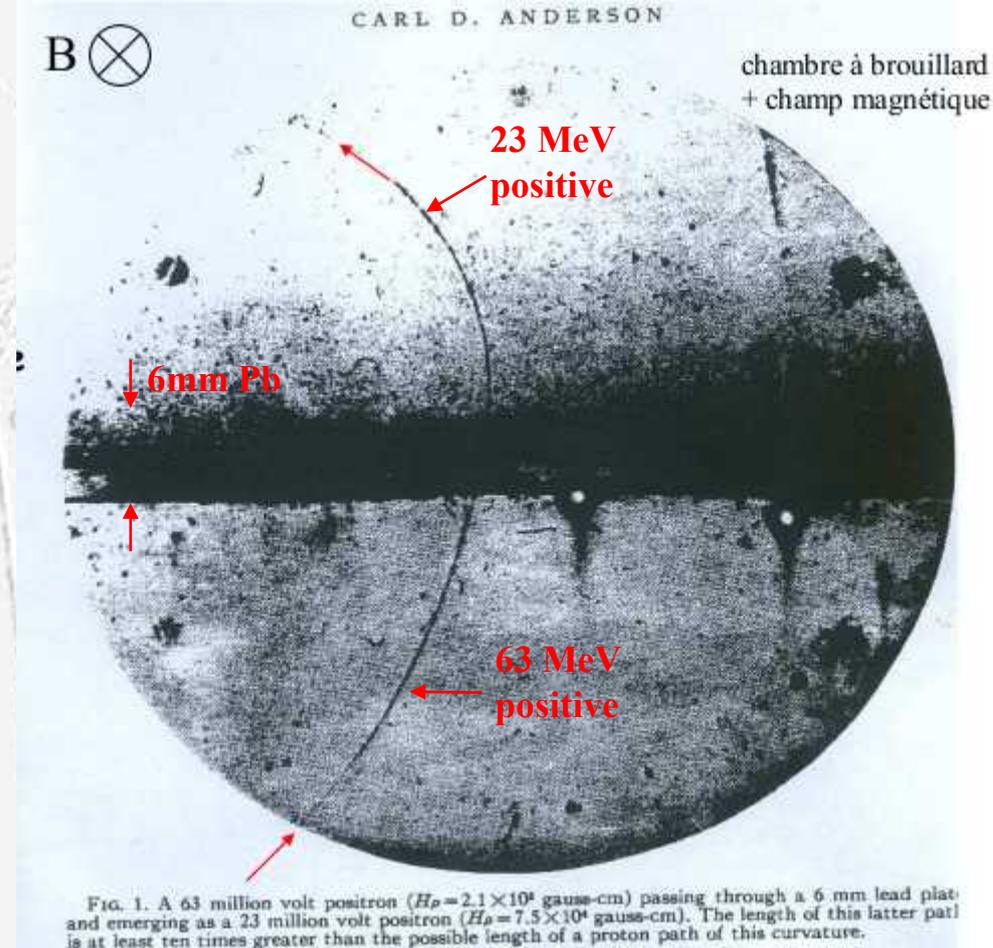
et regardait Caïn

2. Généralités

Exemple en Physique:

- Trace (sable) :
- Chambre à brouillard (bulles...)
- Photographie (œil)
- Conservation de l'information
- Remarque :
- Champ magnétique a permis l'identification

Découverte du positon C.Anderson 1932 (prédit par P.Dirac 1928)

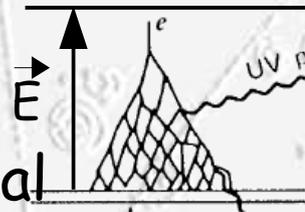


2. Généralités

- **Principes utilisés**

- Champs électriques pour accélérer les charges

- Création d'avalanche de charge : amplification du signal



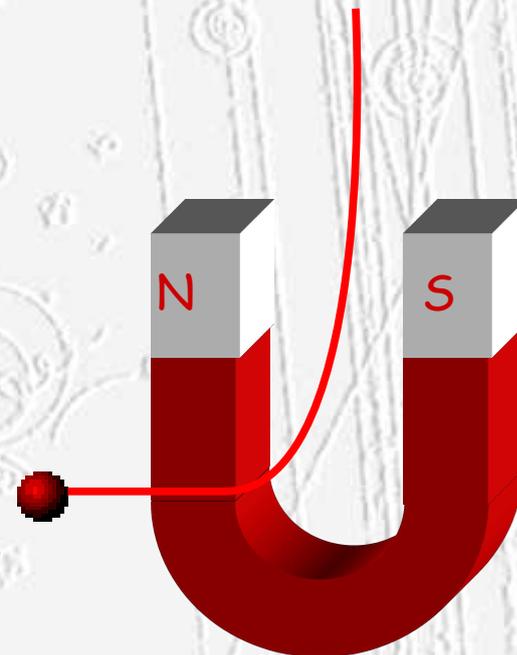
- Camps magnétiques pour courber le parcours des charges

- Séparation de charge, mesure de quantité de mouvement



$E=100 \text{ eV}$

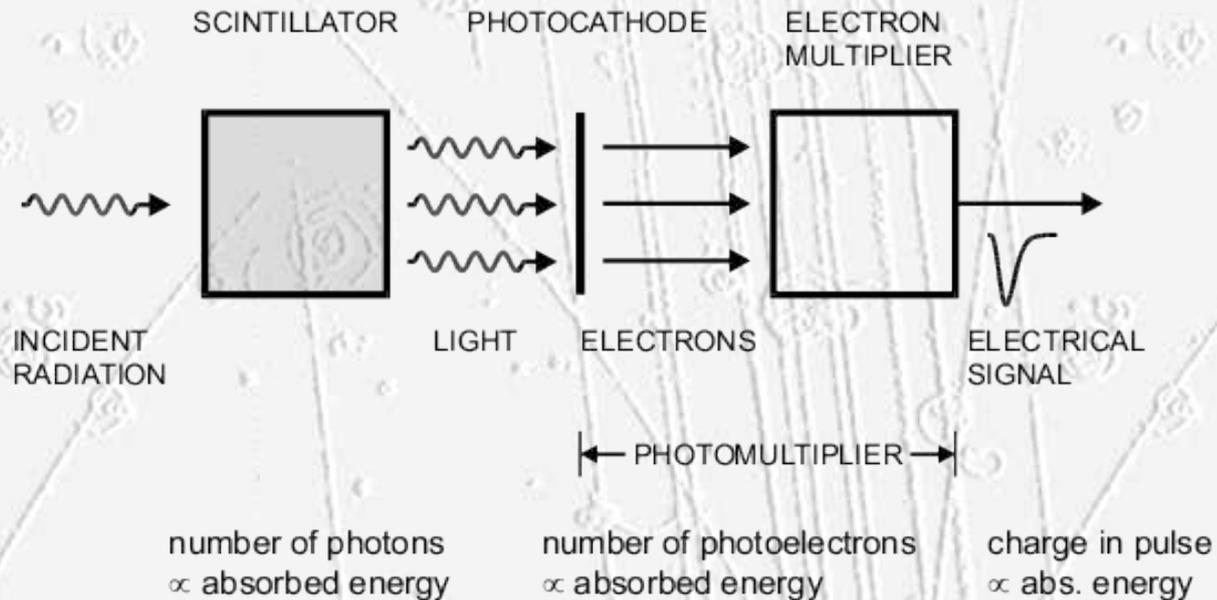
100 V



2. Généralités

Principe:

- Capteur (sable):
 - fourni un courant
 - Intégral du courant fournit la charge transférée au capteur
 - Cette charge totale est proportionnelle à l'énergie absorbée par le capteur donc à l'énergie perdue par la particule à travers le capteur.
- Système d'acquisition (œil)
 - Signal (analogique)
 - Mise en forme (*shaping*)
 - Numérisation (*digitization*)
 - Conservation (disque)



2. Généralités

Définir son domaine d'utilisation

- Pour quelles applications ?
 - Industriel, Recherche,...
- Pour quelle Physique ?
 - Particules à détecter: gamme d'énergie
 - Optique
 - Nucléaire (quelques MeV)
 - Particules du MeV (masse du neutrino) au TeV (plus?)
 - Performances en qualité de précision spatiale
 - Vitesse de réponse
 - Type de particules sur lesquelles on veut mettre l'accent
 - Chargée (champ magnétique)
 - Neutre
 - Faible interaction avec la matière => volume ?
- **Simplicité / coût**

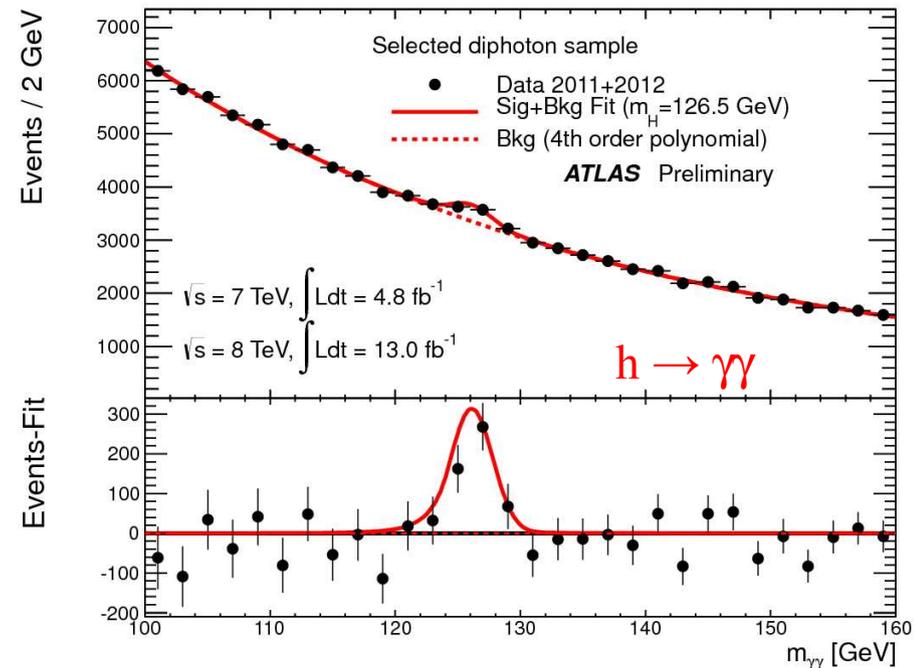
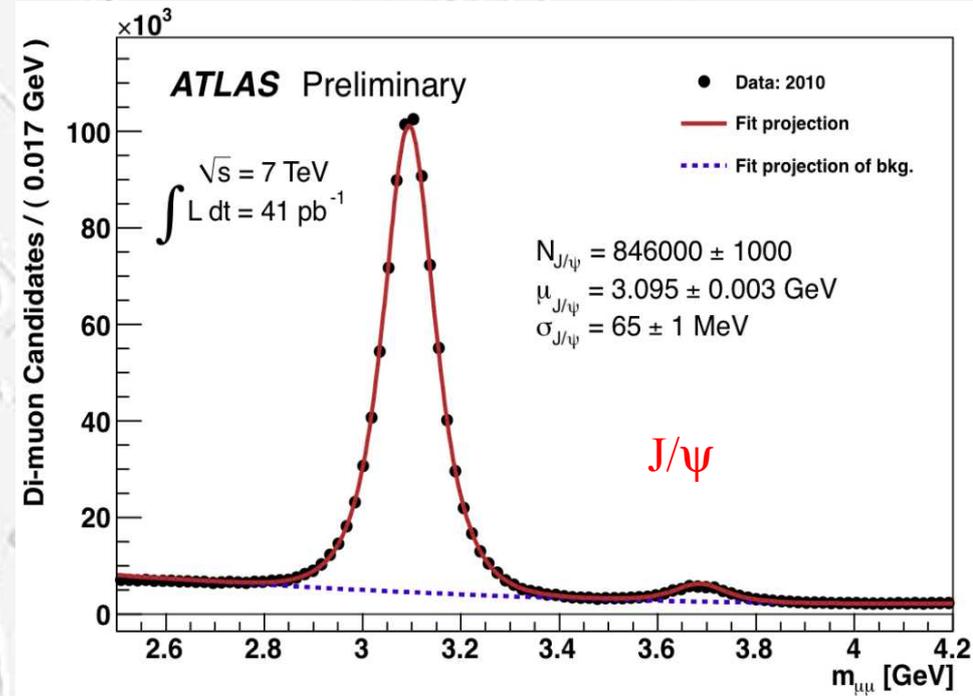
2. Généralités

Mesurer

- Énergie
- Impulsion
- Charge
- masse

Identifier

- Directe
 - Électron, muon, pion, photon...
- Indirecte
 - Masse invariante



2. Généralités

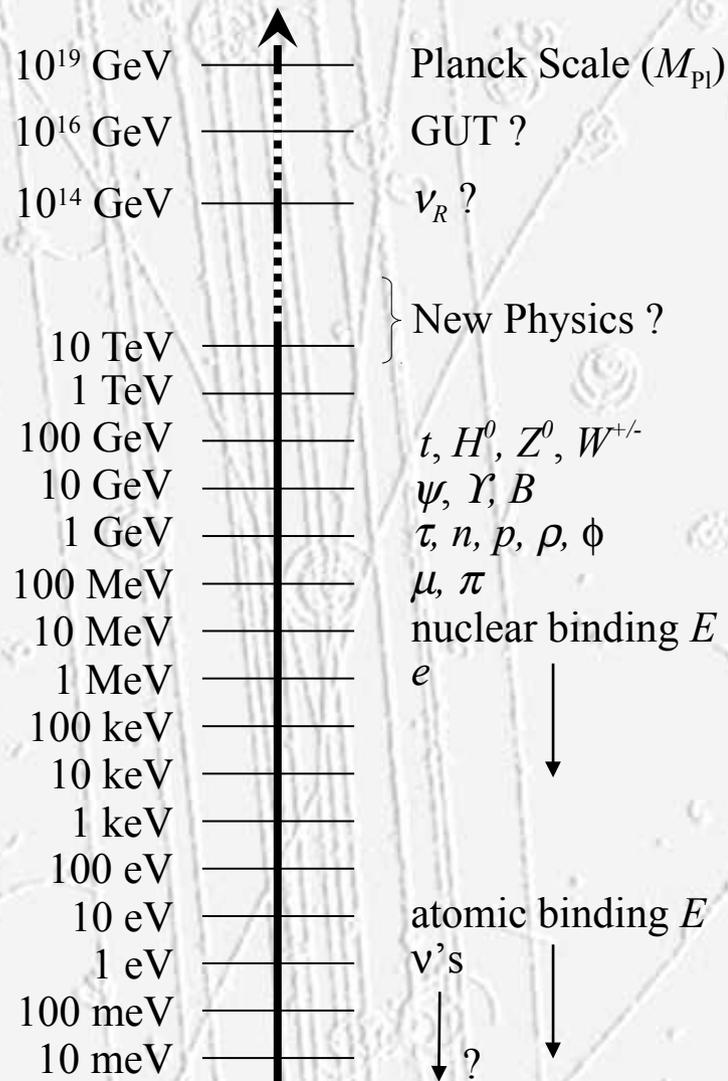
Remarques:

- Informations portent sur les particules à durée de vie «longue»
 - z, w, top, \dots ne sont pas identifiés directement
 - $t\bar{t} \rightarrow w b w \bar{b} \rightarrow 2 \text{jets} + 2l + E_{\text{miss}}$
- **Simulation Indispensable**
- **Système de déclenchement** (*trigger*)
- Mesure est destructive ! (sauf pour le muon et neutrino)
- Redondance
 - ex : énergie + trace dans champ magnétique
- Détecteurs « n'interfèrent » pas entre eux
 - ex : matière du trajectographe vs mesure d'énergie du calo
- **Bruit de fond**
 - **Physique**, Collision, détecteur (électronique), cosmiques...
 - μ cosmique = $\mu \leftarrow \pi, Z, W, \text{top}, \dots$



2. Généralités

Interlude de physique au LHC



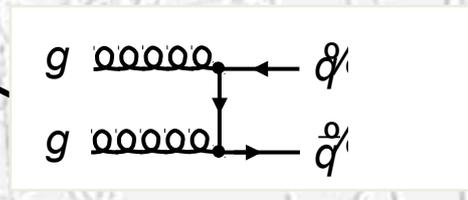
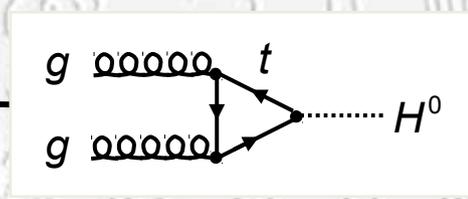
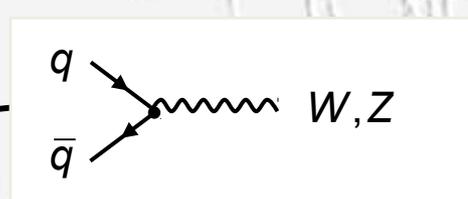
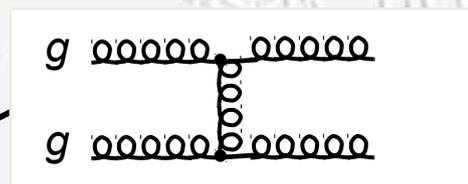
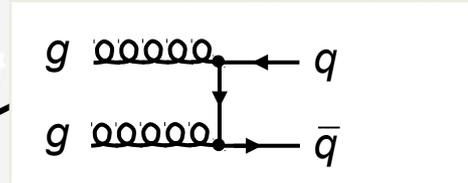
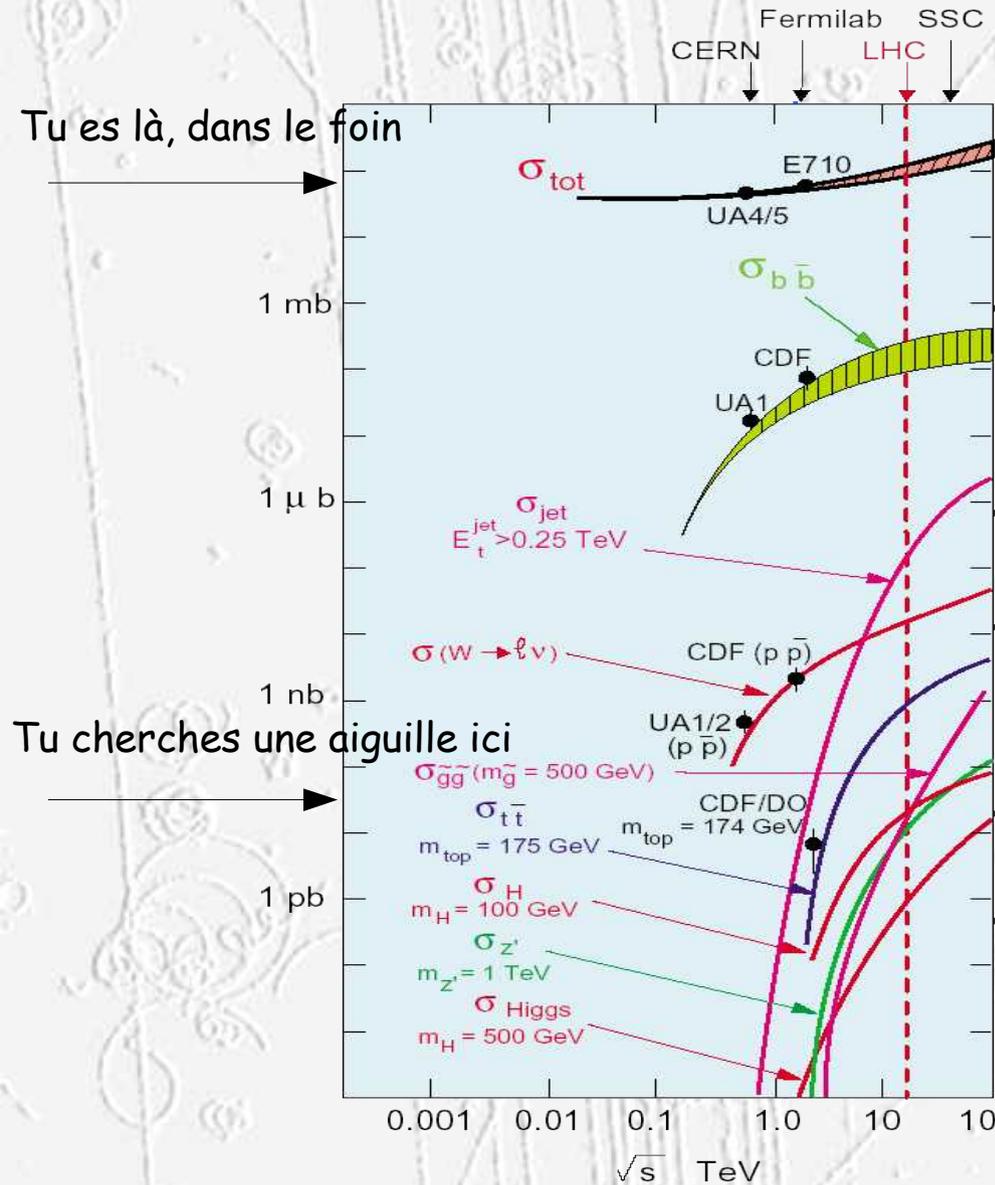
Pour comprendre cette partie

On détecte cette partie

2. Généralités

Interlude de physique au LHC

10 ordres de grandeurs



2. Généralités



2. Généralités

Interlude de physique au LHC

- Système de déclenchement : « Trigger »
 - Trier les événements
 - 2 types de détecteurs :
 - Précis (résolution spatiale) mais lent
 - 50 to 100 micron-m / micro-sec
 - Moins précis mais rapide
 - 5mm / nano-sec

IV. Conception d'un détecteur

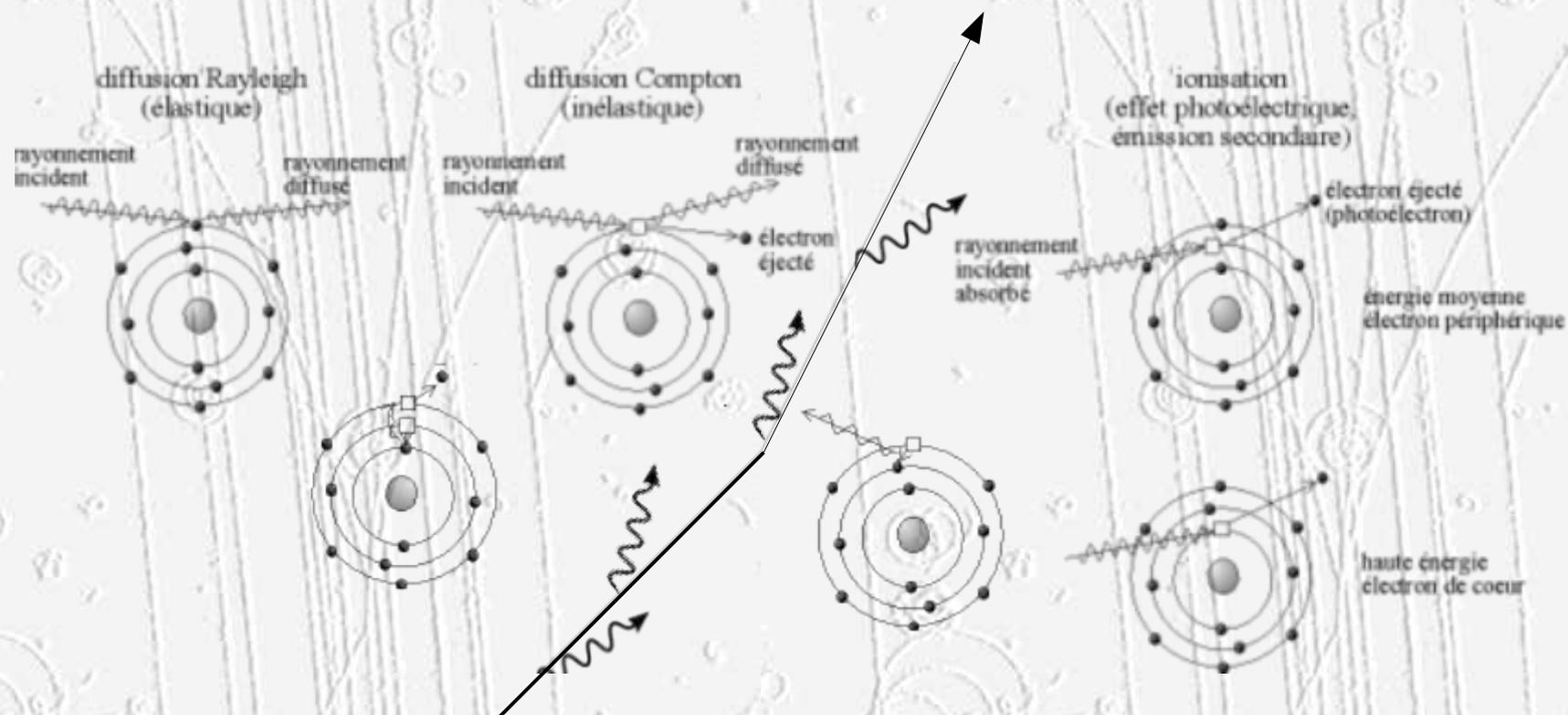
1. Introduction
2. Généralités
3. Détecteurs

Conception d'un détecteur

0. Rappels
1. Introduction
2. Généralités
3. Détecteurs



Interaction particule/matière (rappels)



Trajectoire d'une particule chargée

Interactions particules-matière

Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- Ionisation (dE/dx)
- Bremsstrahlung
- Effet Cherenkov
- Rayonnement de Transition

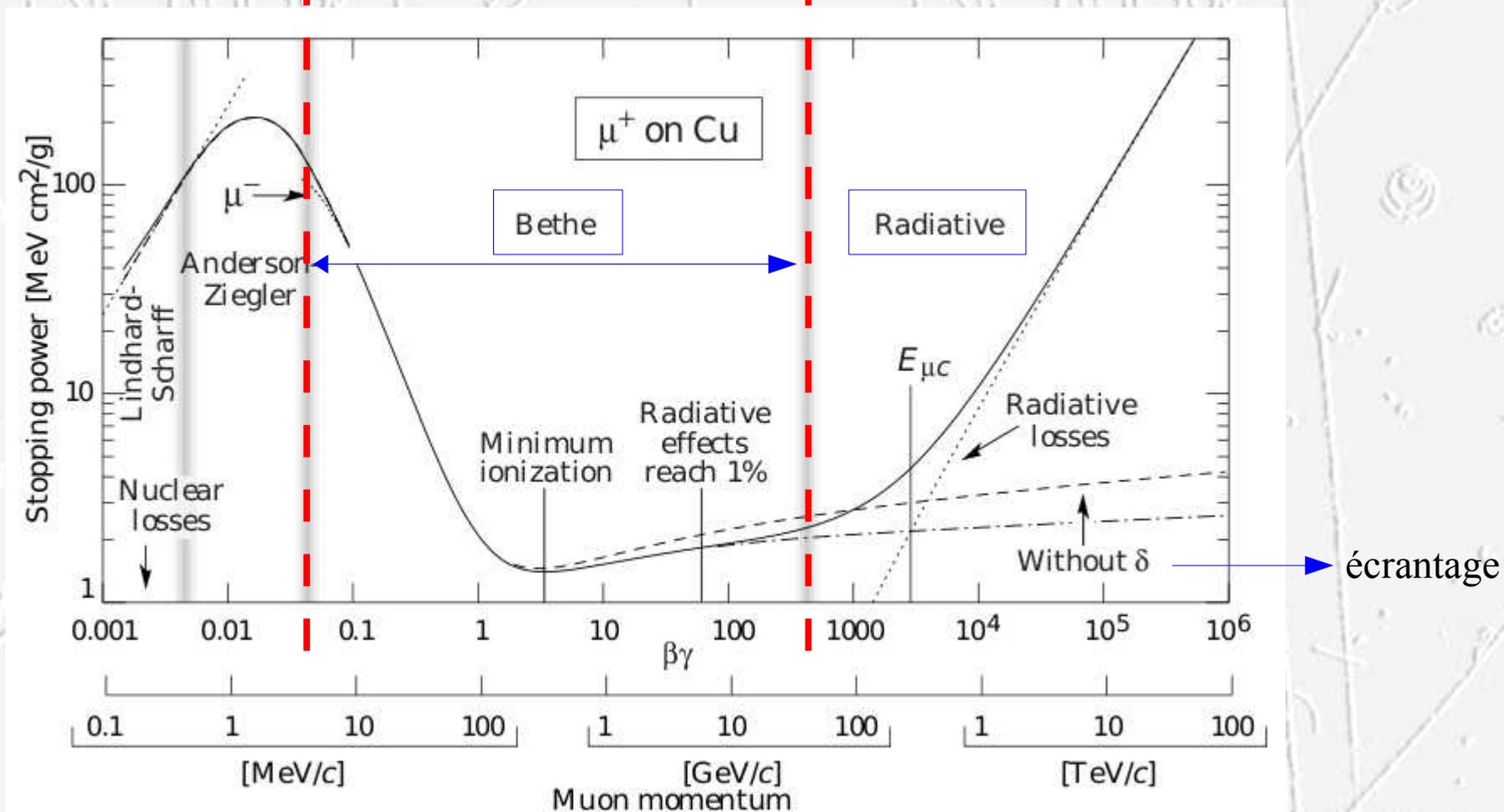
Effets perturbant la mesure

- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e^+/e^-)

Interactions particules-matière

Ionisation (dE/dx) : Formule de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$



3. Détecteurs

Cible fixe

- $e, p, \mu, \nu \dots \rightarrow$ Matière

Collisionneur

- $e+/-, pp(\text{bar})$: énergie identique \Rightarrow détecteur symétrique
- ep : particules différentes \Rightarrow détecteur asymétrique
- $e+/-$: énergie différentes \Rightarrow détecteur asymétrique

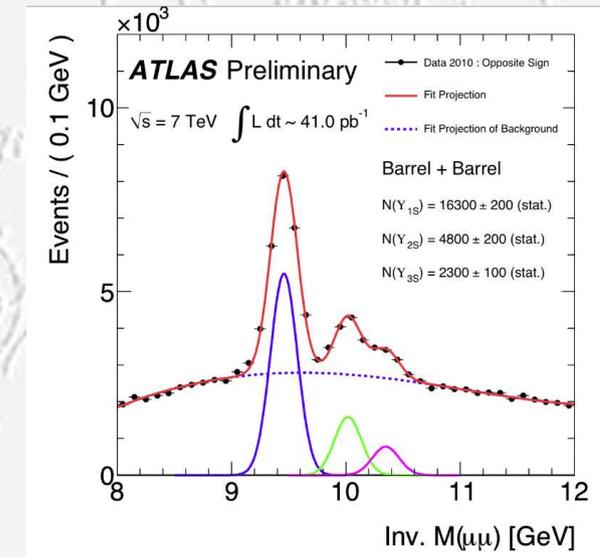
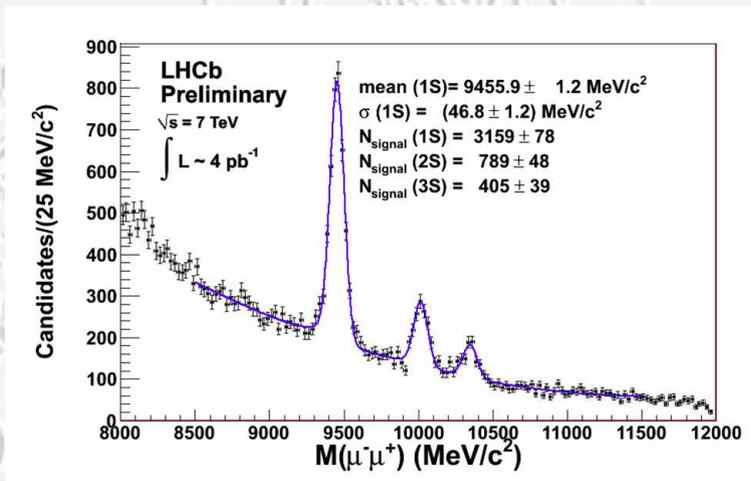
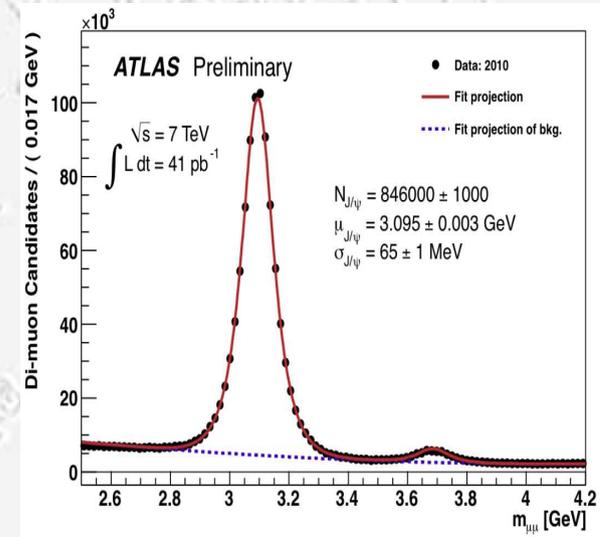
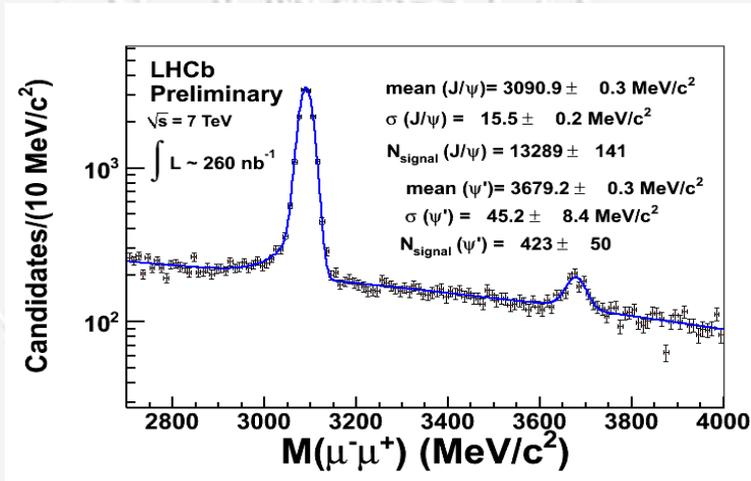
Exemples

- Symétrique
 - LHC (Atlas, cms), FNAL (DO, CDF), LEP (ADOL)
 - On veut tout mesurer (E_{miss}) \Rightarrow compromis sur la précision de mesure
- Asymétrique
 - LHC (Alice, Lhcb), SLAC (BaBar) HERA (H1, Zeus)
 - On sait ce qu'on cherche \Rightarrow mesure précise sur un angle solide donné

3. Détecteurs : *symétrique vs Asymétrique*

LHCb: *asymétrique*

ATLAS: *symétrique*



3. Détecteurs

Paramètres significatifs (?) pour la détection

- Interactions particules-matière
 - Moyen de comprendre, différencier, mesurer...
 - Trace des particules (différentes selon m, charge,...)
 - Type du milieu (détecteur)

Mesures partielles et/ou destructives (pour parties)

- Spécifiques à certaines particules (sous-détecteurs)

Séparation de charge : champ magnétique

- Mesure de l'impulsion pour les particules chargées
- +/- séparation / focalisation / nettoyage

Herméticité

- $W \rightarrow \mu\nu$: ν (neutrino), contrôle (tant que possible) de énergie manquante (E_{miss})
- Moins vrai pour SK (mesure spécifique aux neutrinos)

3. Détecteurs: paramètres significatifs (?)

Longueur de Radiation

- X_0 = Longueur caractéristique des pertes par radiation
 - Atténuation l'énergie par radiation : $E = E_0^{-x/X_0}$
 - Longueur sur la quelle un électron perd 1 / e de son énergie par bremsstrahlung

Longueur d'interaction

- λ = Longueur caractéristique d'interaction nucléaire
 - Libre parcours moyen d'un hadron entre 2 Interactions nucléaire

3. Détecteurs: paramètres significatifs (?)

Longueur de Radiation X_0

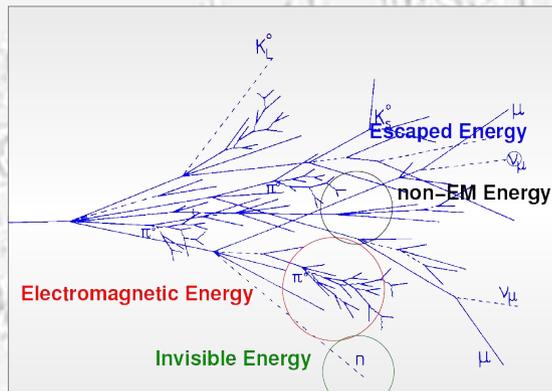
PDG : 27.24

$$X_0 \sim 716.4 A / (Z(Z + 1) \ln(287 / \sqrt{Z}))$$

« Transparence »

Matériel	X_0 [cm]
Be	35.3
Carbon-fibre	~ 25
Si	9.4
Al	8.9
Fe	1.8
PbWO ₄	0.9
Pb	0.6

Longueur d'interaction λ



« absorption »

Matériel	λ [cm]
Si	45.5
Fe	16.8
Pb	17.1

3. Détecteurs: paramètres significatifs (?)

6. ATOMIC AND NUCLEAR PROPERTIES OF MATERIALS

Table 6.1. Revised May 2002 by D.E. Groom (LBNL). Gases are evaluated at 20°C and 1 atm (in parentheses) or at STP [square brackets]. Densities and refractive indices without parentheses or brackets are for solids or liquids, or are for cryogenic liquids at the indicated boiling point (BP) at 1 atm. Refractive indices are evaluated at the sodium D line. Data for compounds and mixtures are from Refs. 1 and 2. Further materials and properties are given in Ref. 3 and at <http://pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties>.

Material	Z	A	(Z/A)	Nuclear collision length λ_T {g/cm ² }	Nuclear interaction length λ_I {g/cm ² }	$E/dx _{\min}$ { MeV / g/cm ² }	Radiation length X_0 {g/cm ² } {cm}		Density {g/cm ³ } ({g/l} for gas)	Liquid boiling point at 1 atm(K)	Refractive index n (($n-1$) $\times 10^6$ for gas)
H ₂ gas	1	1.00794	0.99212	43.3	50.8	(4.103)	61.28 ^d	(731000)	(0.0838)[0.0899]		[139.2]
H ₂ liquid	1	1.00794	0.99212	43.3	50.8	4.034	61.28 ^d	866	0.0708	20.39	1.112
D ₂	1	2.0140	0.49652	45.7	54.7	(2.052)	122.4	724	0.169[0.179]	23.65	1.128 [138]
He	2	4.002602	0.49968	49.9	65.1	(1.937)	94.32	756	0.1249[0.1786]	4.224	1.024 [34.9]
Li	3	6.941	0.43221	54.6	73.4	1.639	82.76	155	0.534		—
Be	4	9.012182	0.44384	55.8	75.2	1.594	65.19	35.28	1.848		—
C	6	12.011	0.49954	60.2	86.3	1.745	42.70	18.8	2.265 ^e		—
N ₂	7	14.00674	0.49976	61.4	87.8	(1.825)	37.99	47.1	0.8073[1.250]	77.36	1.205 [298]
O ₂	8	15.9994	0.50002	63.2	91.0	(1.801)	34.24	30.0	1.141[1.428]	90.18	1.22 [296]
F ₂	9	18.9984032	0.47372	65.5	95.3	(1.675)	32.93	21.85	1.507[1.696]	85.24	[195]
Ne	10	20.1797	0.49555	66.1	96.6	(1.724)	28.94	24.0	1.204[0.9005]	27.09	1.092 [67.1]
Al	13	26.981539	0.48181	70.6	106.4	1.615	24.01	= 8.9 X	2.70		—
Si	14	28.0855	0.49848	70.6	106.0	1.664	21.82	9.36	2.33		3.95
Ar	18	39.948	0.45059	76.4	117.2	(1.519)	19.55	14.0	1.396[1.782]	87.28	1.233 [283]
Ti	22	47.867	0.45948	79.9	124.9	1.476	16.17	3.56	4.54		—
Fe	26	55.845	0.46556	82.8	131.9	1.451	13.84	1.76	7.87		—
Cu	29	63.546	0.45636	85.6	134.9	1.403	12.86	1.43	8.96		—
Ge	32	72.61	0.44071	88.3	140.5	1.371	12.25	2.30	5.323		—
Sn	50	118.710	0.42120	100.2	163	1.264	8.82	1.21	7.31		—
Xe	54	131.29	0.41130	102.8	169	(1.255)	8.48	2.87	2.953[5.858]	165.1	[701]
W	74	183.84	0.40250	110.3	185	1.145	6.76	0.35	19.3		—
Pt	78	195.08	0.39984	113.3	189.7	1.129	6.54	0.305	21.45		—
Pb	82	207.2	0.39575	116.2	194	1.123	6.37	0.56	11.35		—
U	92	238.0289	0.38651	117.0	199	1.082	6.00	≈0.32	≈18.95		—

3. Détecteurs : remarque

Vous mesurez cela



3. Détecteurs : remarque

Vous mesurez cela



Mais la réalité est comme cela !!!

3. Détecteurs: mesure partielle, destructive

Du point d'interaction vers l'extérieur du détecteur

Trajectographie : détecteurs « Transparents »

- Mesure des particules chargées
 - mesure de la position du vertex (« peu » de perte d'énergie)
 - mesure de la trace et de l'impulsion (si champ magnétique)
 - identifier les particules : dE/dx ou rayonnement de transition ou de Cherenkov ou un temps de vol.

Calorimètres : détecteurs « massifs »

- Mesure des électrons, photons, hadrons
 - mesurer l'énergie des particules (+ id. du type)

Muons

- Identification des muons
 - Connexion avec le trajectographe : Alignement relatif des sous-détecteurs
 - Mesure de l'impulsion si champ magnétique

Remarque:

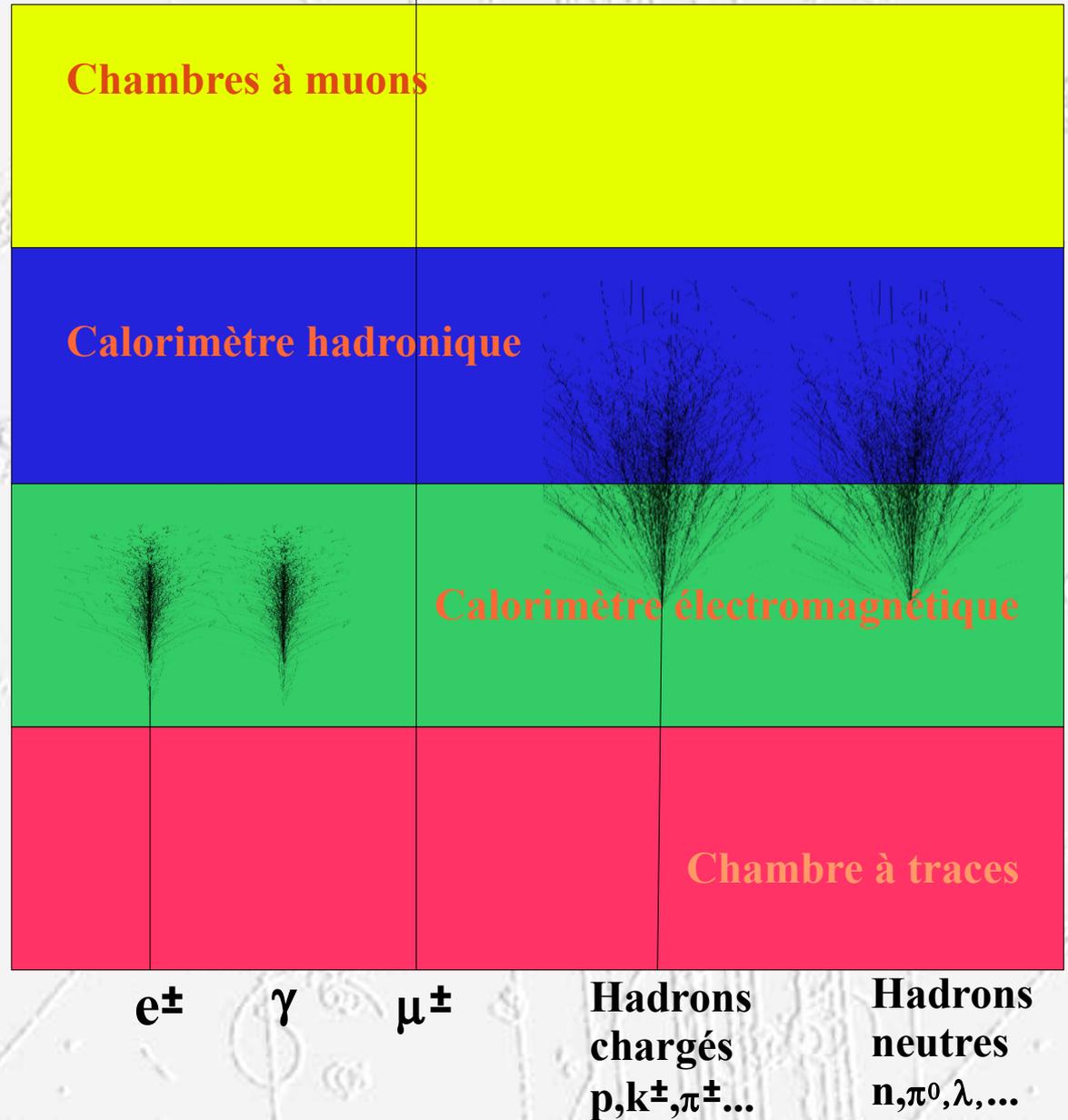
- Énergie manquante $\Rightarrow V$
- Ou mauvaise estimation de l'herméticité

3. Détecteurs: mesure partielle & destructive

Réponse schématique
d'un détecteur
(dans un collisionneur)

Trace laissée ds le détecteur

Gerbe (électromagnétique ou
hadronique)



3. Détecteurs: **champ magnétique**

- $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} = q/\gamma m P \times B$
 - $P \sim 0.3 B R$ (P en GeV, B en Tesla, R en mètre)
 - **Intégrale de champ**
- Solénoïdal
 - Constant sur une grande partie de son volume
 - trajectographie « simplifiée »
 - pp(bar): ok Plan transverse ($R\phi$) (E beam mal connu!)
 - Pouvoir diminue qd on se rapproche de l'axe
 - « Nettoyage » des traces chargées de faible impulsion
- Toroidal
 - Champ moins homogène
 - Volume potentiel plus grand
 - Intégral de champ +/- constant vers l'avant

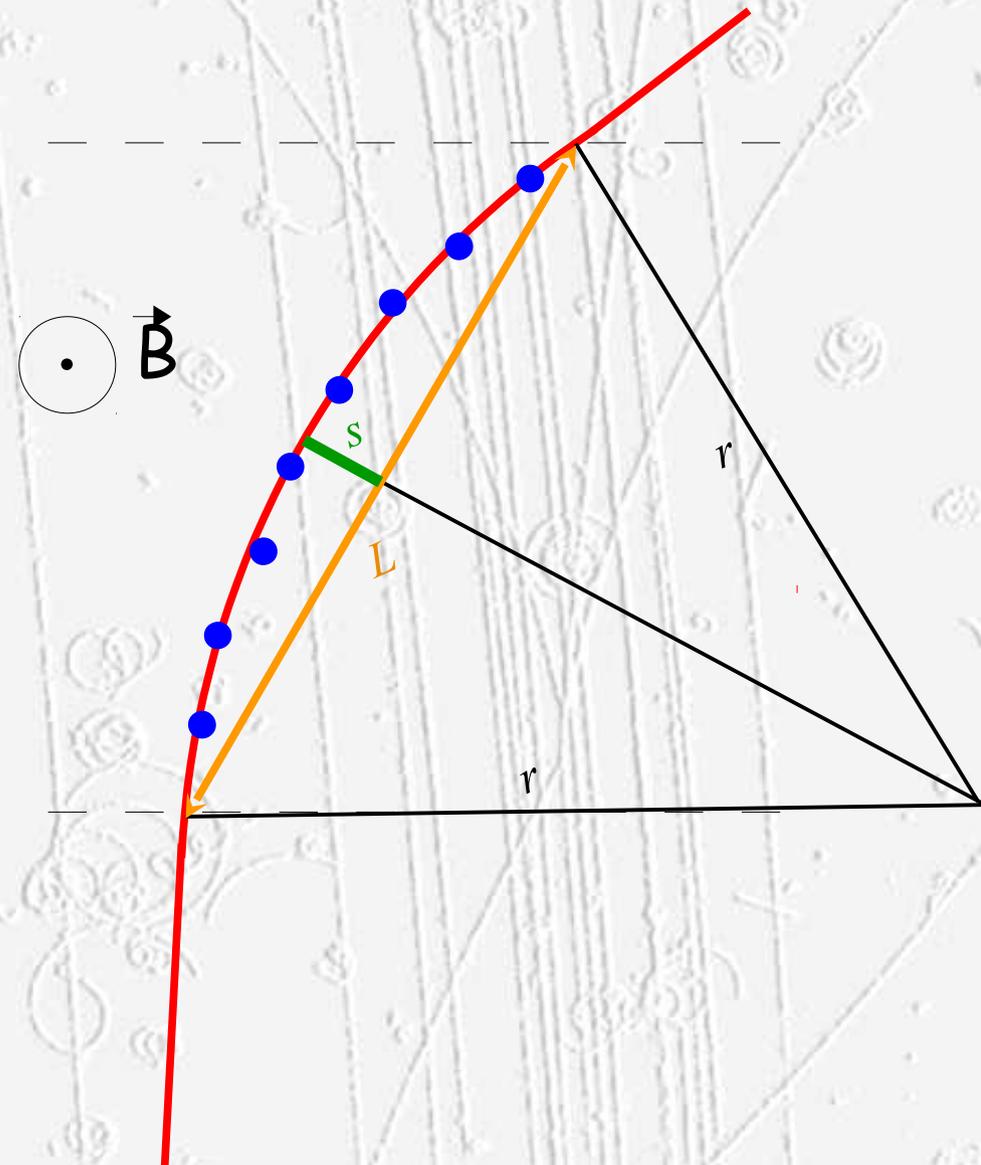
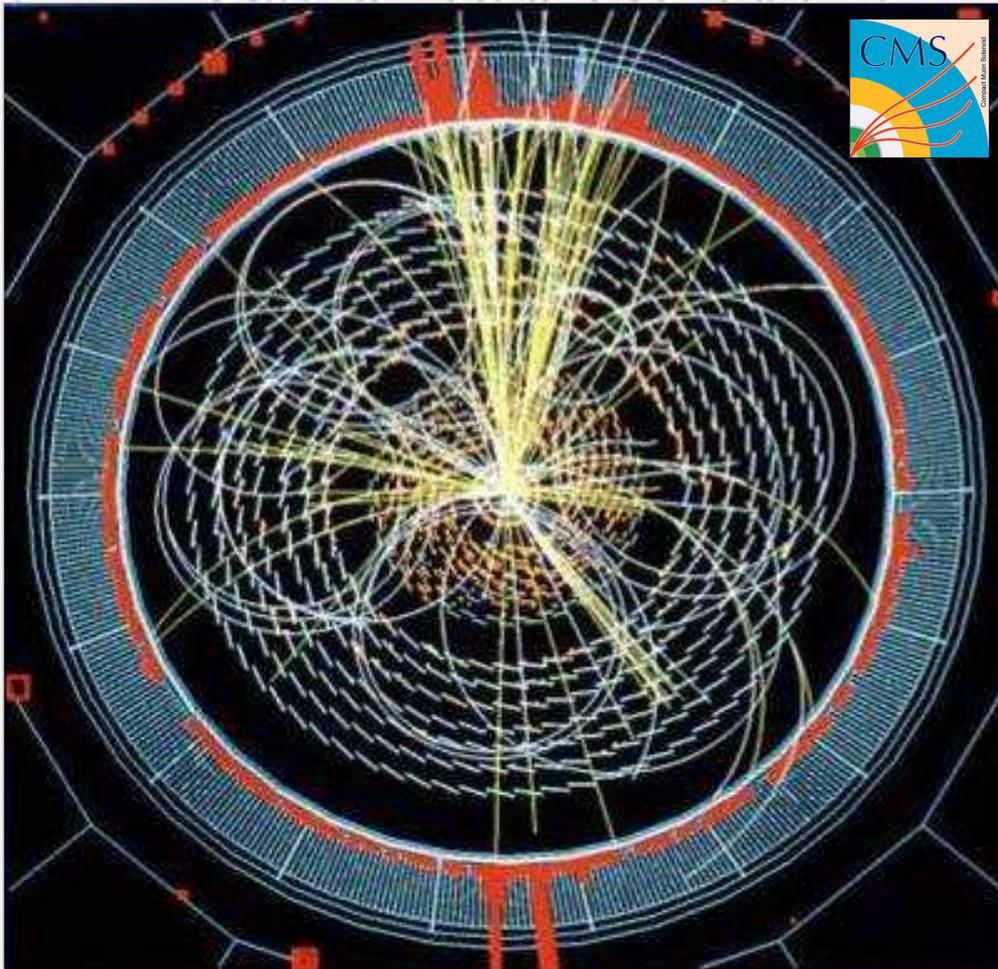
Détermination du champ

Magnetic field	OFF	ON
All Tracks	4.9 M	2.7 M
SCT Tracks	1.2 M	880 k
Pixel Tracks	230 k	190 k

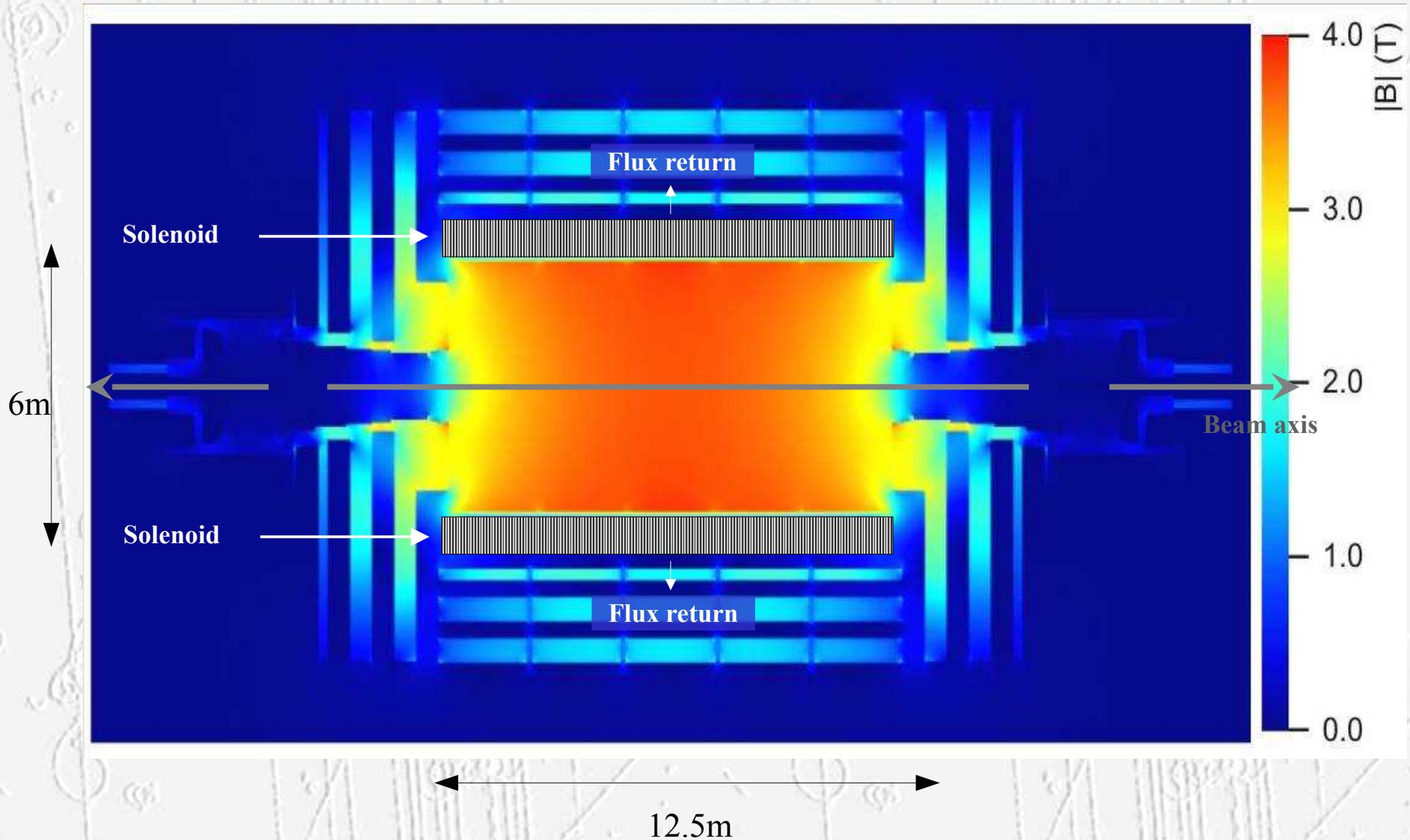
ATLAS track statistics since Sep 2008

3. Détecteurs: **champ magnétique**

- Permet la mesure de l'impulsion des trace chargées
- La comparaison +/-

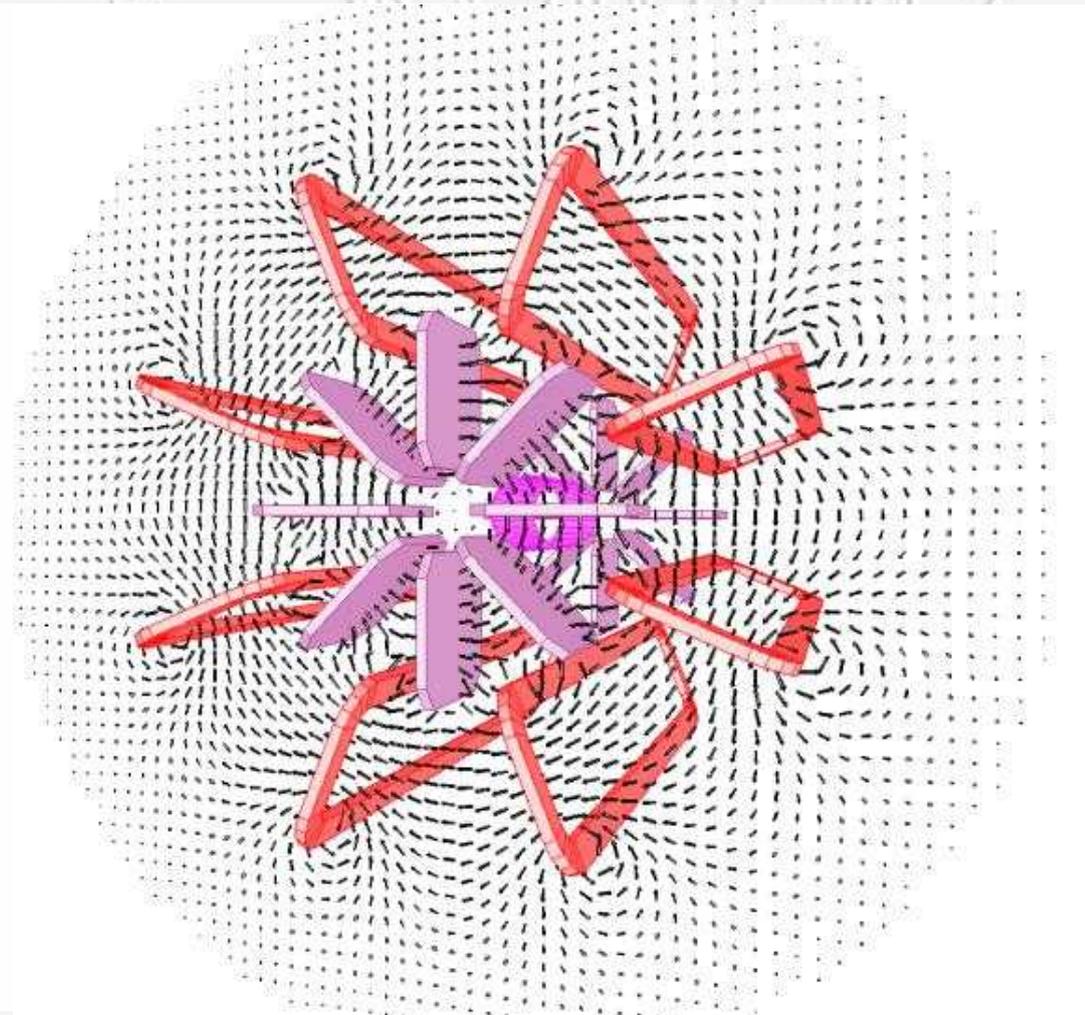
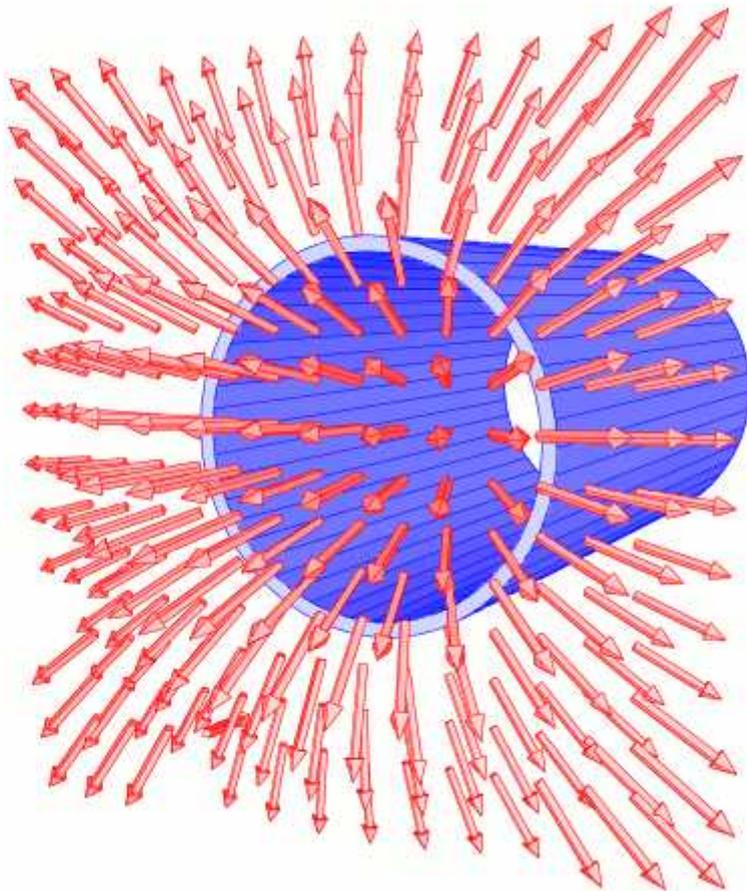


3. Détecteurs: champ magnétique Solénoïde CMS



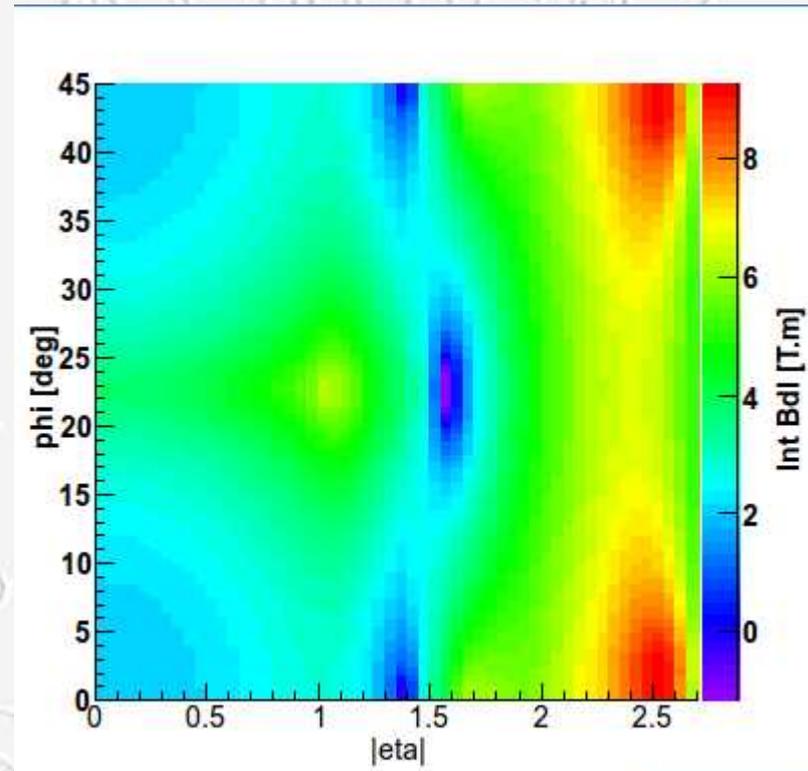
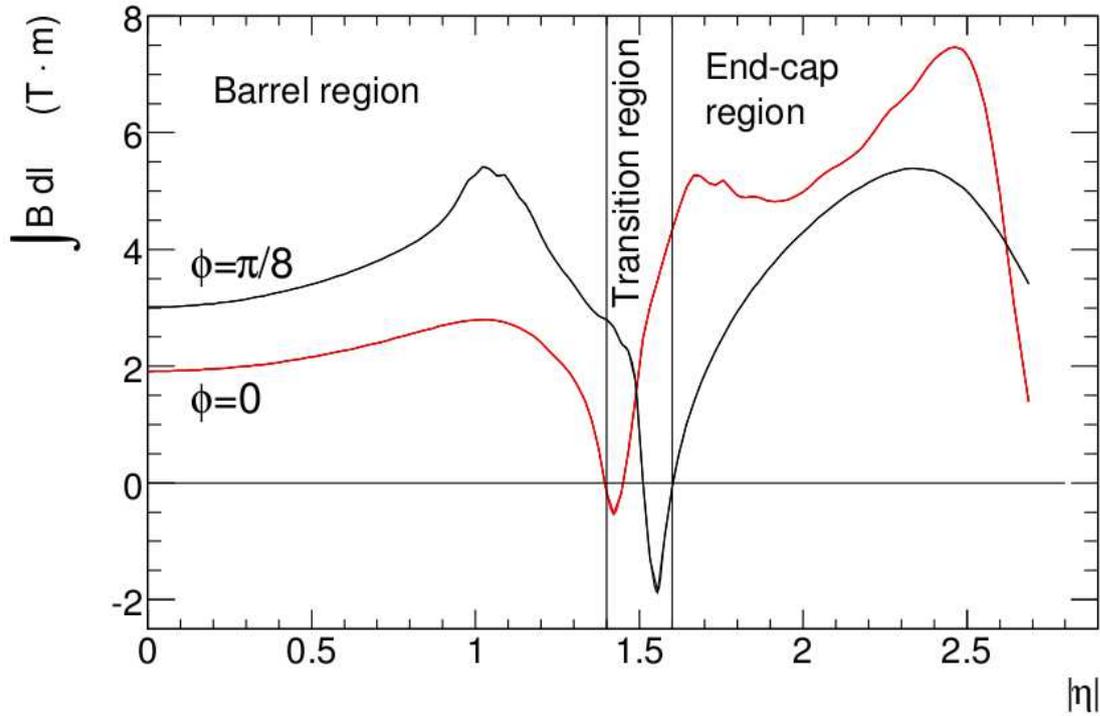
3. Détecteurs: **champ magnétique**

Solénoïde & toroïde



3. Détecteurs: champ magnétique

Intégrale de Champ



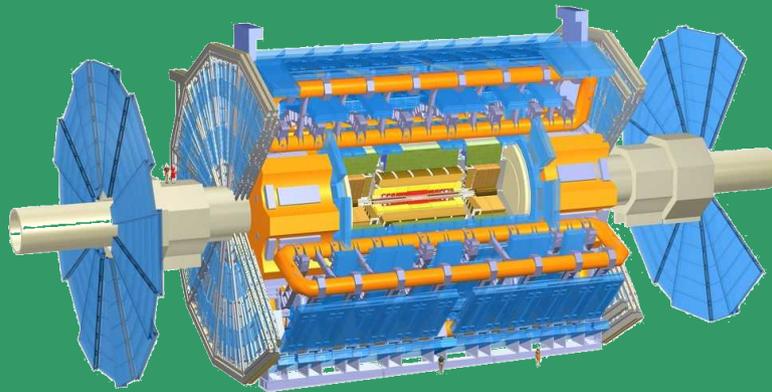
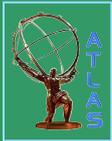
3. Détecteurs: **herméticité**

Collisionneur

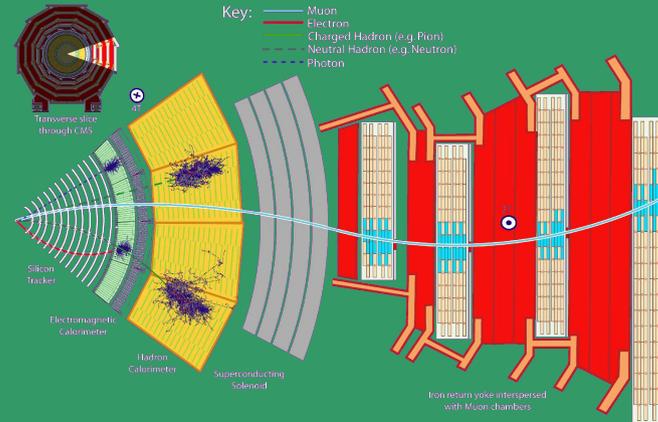
- Mesure de l'énergie totale (transverse si pp)
 - Permet la détermination de l'énergie manquante
 - $W \rightarrow \mu\nu$: le muon peut être identifié, le neutrino seulement déduit de la compréhension de l'événement et du détecteur
 - **Simulation indispensable !**
- S'approcher le plus possible de 4π
 - Cylindre + bouchon (disques)
 - Problème à la transition cylindre/bouchon : Alignement
 - Estimation précise de l'angle solide (tube faisceau!)

3. Détecteurs : **exemples**

Collisionneur



ATLAS: Jet, Énergie manquante, muon (« standalone »)



CMS: mesure électron/photon trajectographie muon

3. Détecteurs : **exemples**

Collisionneur

ATLAS (7 ktons)

CMS (12.5 ktons)

INNER TRACKER

- Silicon pixels + strips
- TRT with particle identification
- $B = 2T$
- $\sigma(p_T) \sim 3.8\%$ (at 100 GeV, $\eta = 0$)

- Silicon pixels + strips
- No dedicated particle identification
- $B = 4T$
- $\sigma(p_T) \sim 1.5\%$ (at 100 GeV, $\eta = 0$)

MAGNETS

- 4 Magnets
- Solenoid + Air-core muon toroids
- Calorimeters outside solenoid field

- 1 Magnet
- Solenoid
- Calorimeters inside field

EM CALORIMETER

- Pb / Liquid Ar sampling accordion
- $\sigma(E) \sim 10\text{--}12\%/\sqrt{E} \oplus 0.2\text{--}0.35\%$
- Longitudinal segmentation
- Saturation at ~ 3 TeV

- PbWO_4 scintillation crystals
- $\sigma(E) \sim 3\text{--}5.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\%$
- No longitudinal segmentation
- Saturation at 1.7 TeV

HAD CALORIMETER

- Fe / Scint. tiles (EC: Cu-liquid Ar)
- $\sigma(E) \sim 45\%/\sqrt{E} \oplus 1.3\%$ (Barrel)

- Cu (EC: brass) / Scint. tiles
- Tail catchers outside solenoid
- $\sigma(E) \sim 100\%/\sqrt{E} \oplus 8\%$ (Barrel)

MUON

- Drift tubes & CSC (fwd) + RPC/TGC
- $\sigma(p_T) \sim 10.5\% / 10.4\%$ (1 TeV, $\eta = 0$)
(standalone / combined with tracker)

- Drift tubes & CSC (EC) + RPC
- $\sigma(p_T) \sim 13\% / 4.5\%$ (1 TeV, $\eta = 0$)
(standalone / combined with tracker)

3. Détecteurs : **simulation**

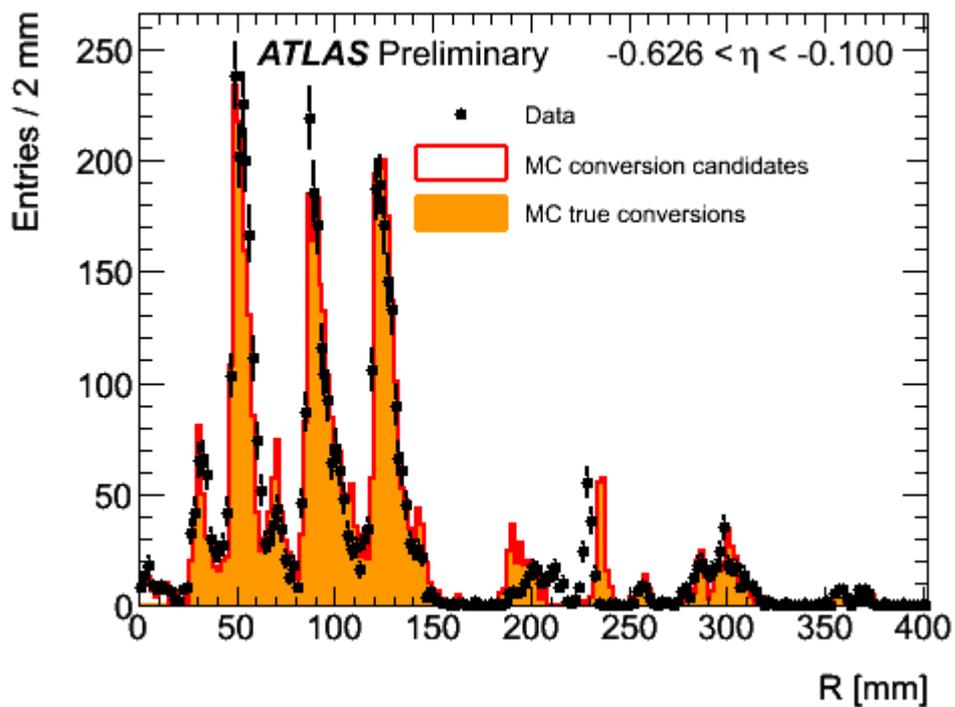
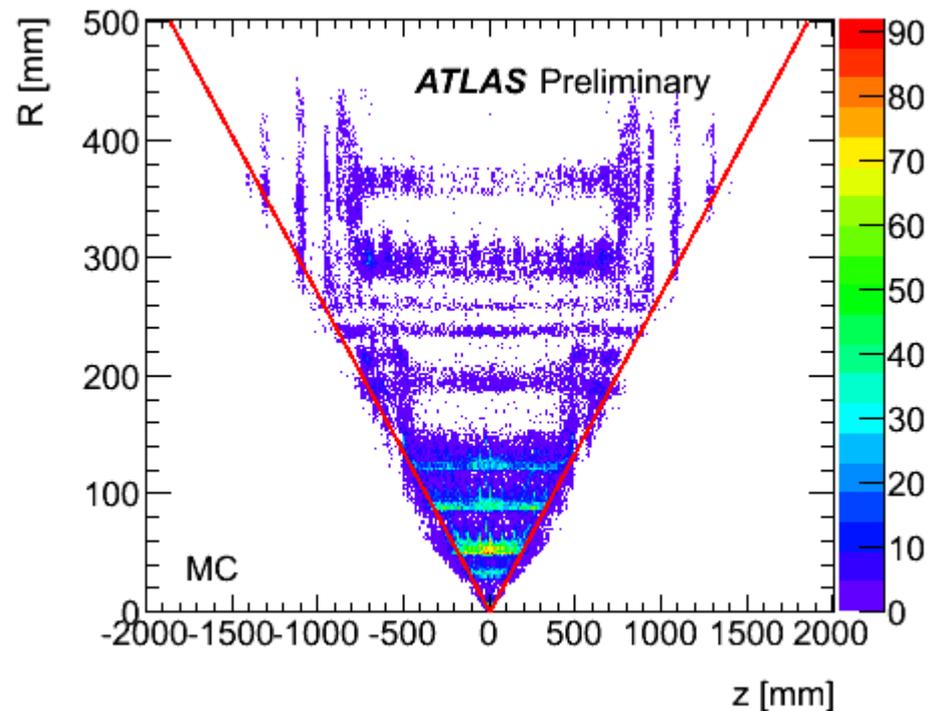
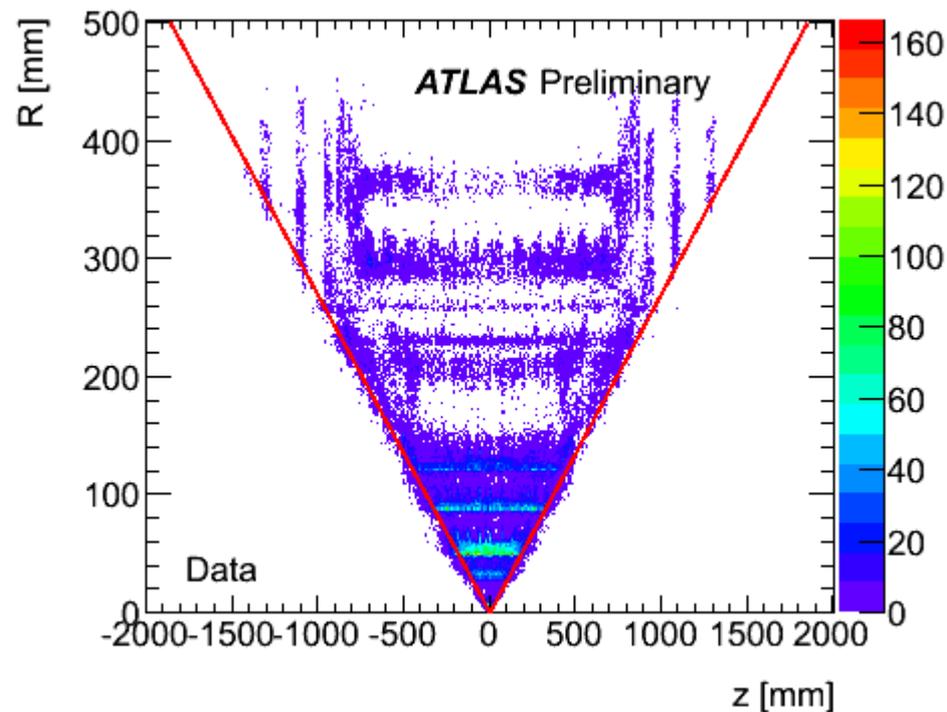
Simulation

- Pas mesure possible sans comparaison data/mc
- La plupart des phénomènes mesurés peuvent provenir
 - D'autres phénomènes physiques
 - De la mauvaise connaissance de l'appareil
 - De problèmes électroniques
 - De programme de reconstruction imparfait
- Génération , digitisation, simulation

3. Détecteurs : simulation

Data/MC

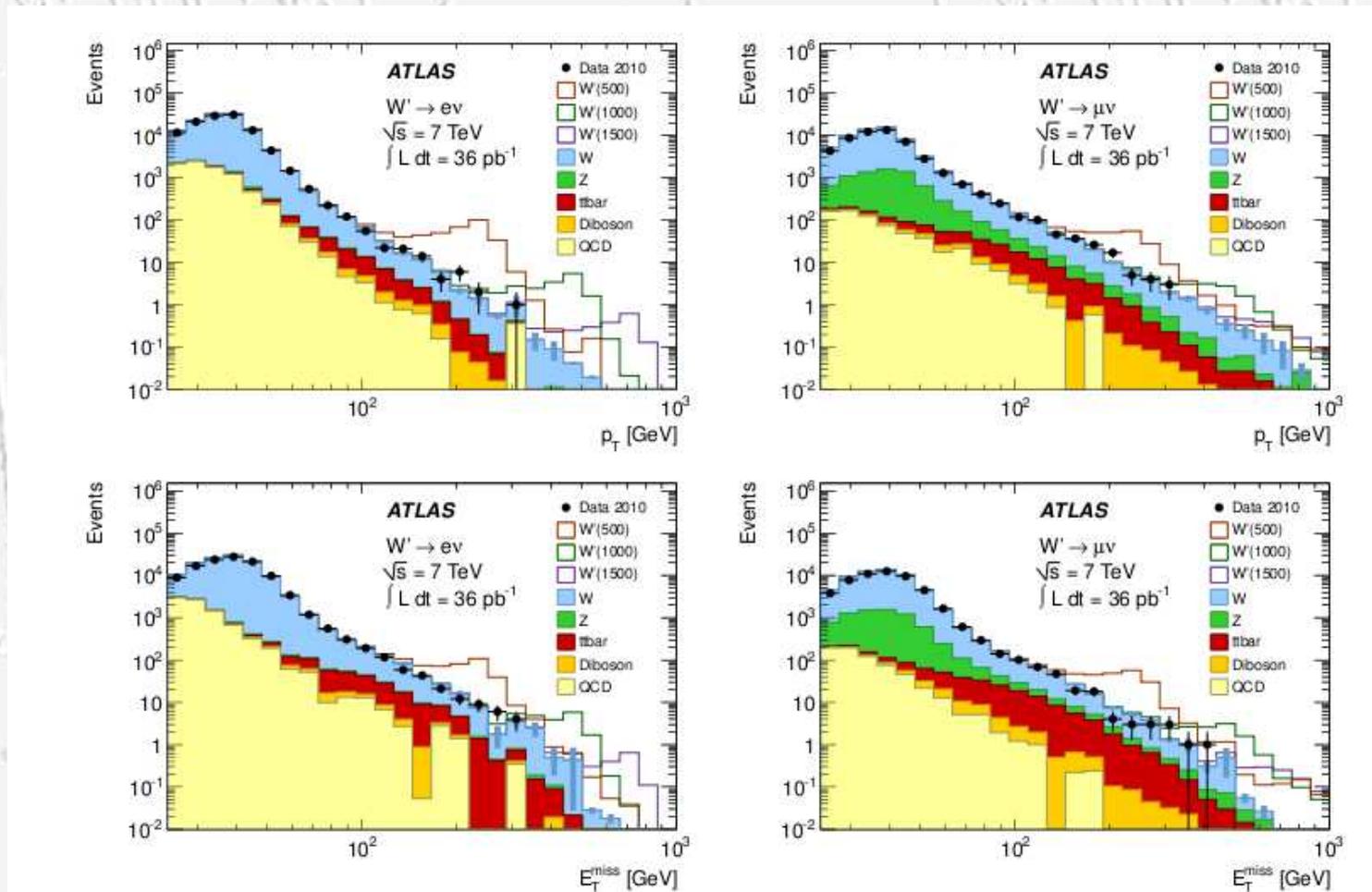
- Atlas : Pixels & SCT



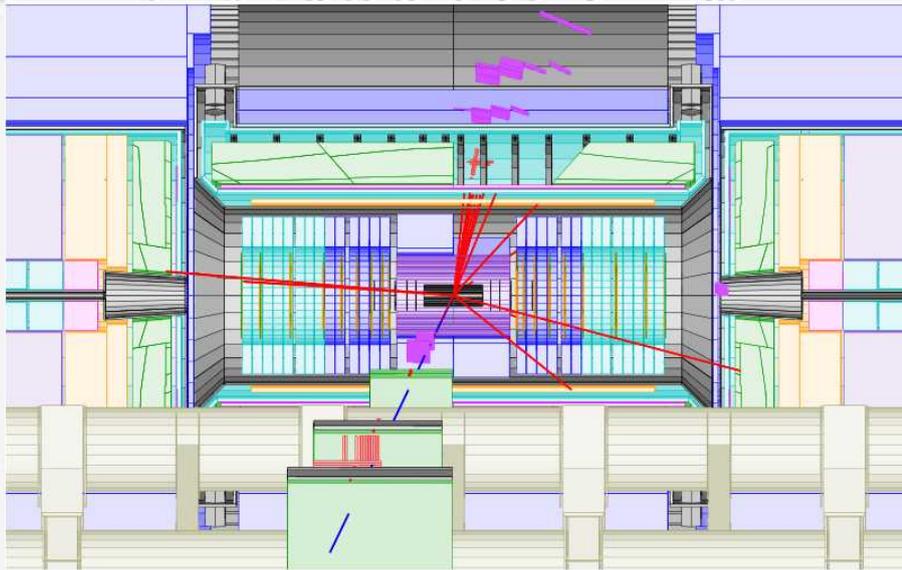
3. Détecteurs : **simulation**

Data/MC

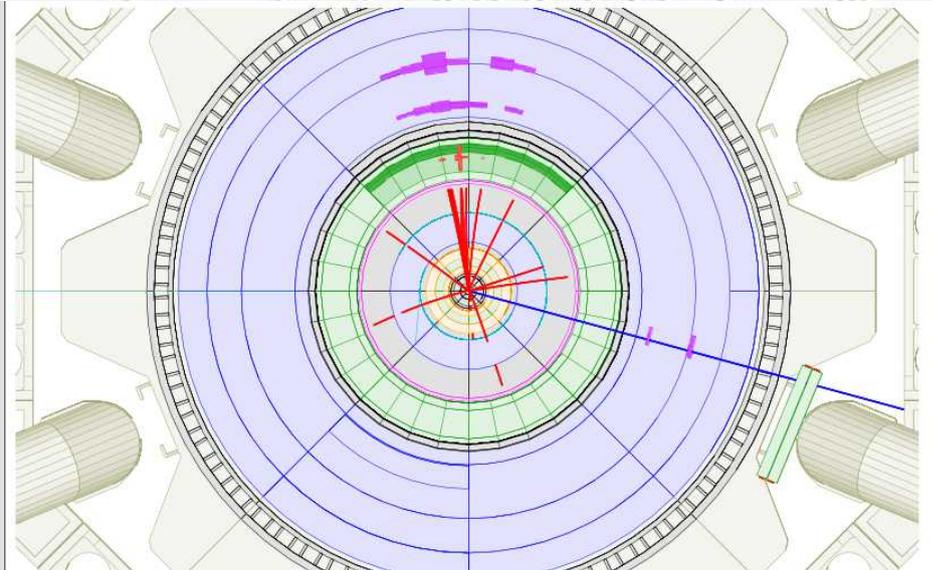
- Recherche W'



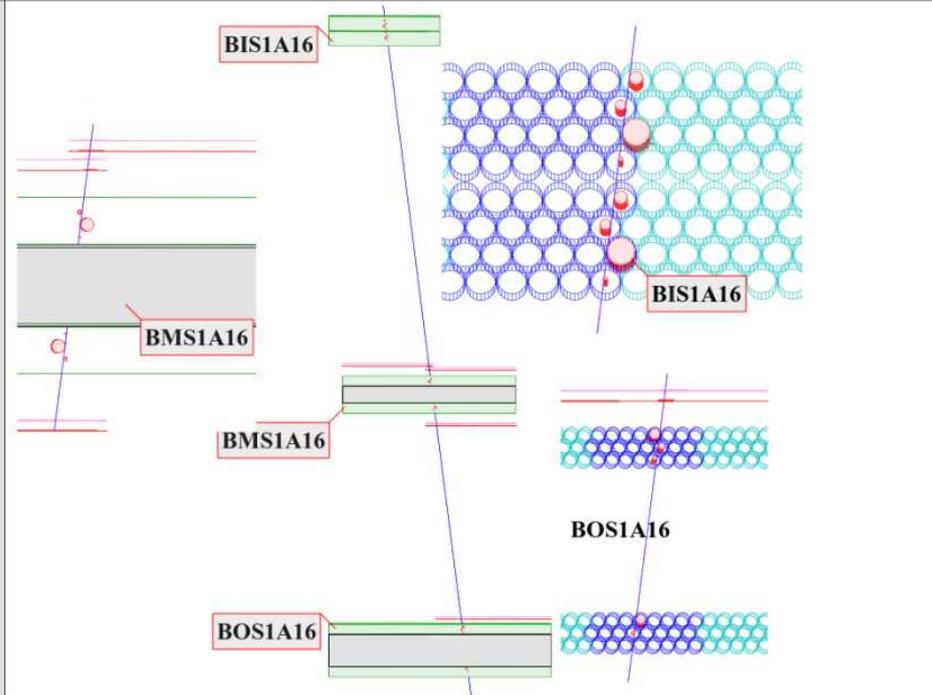
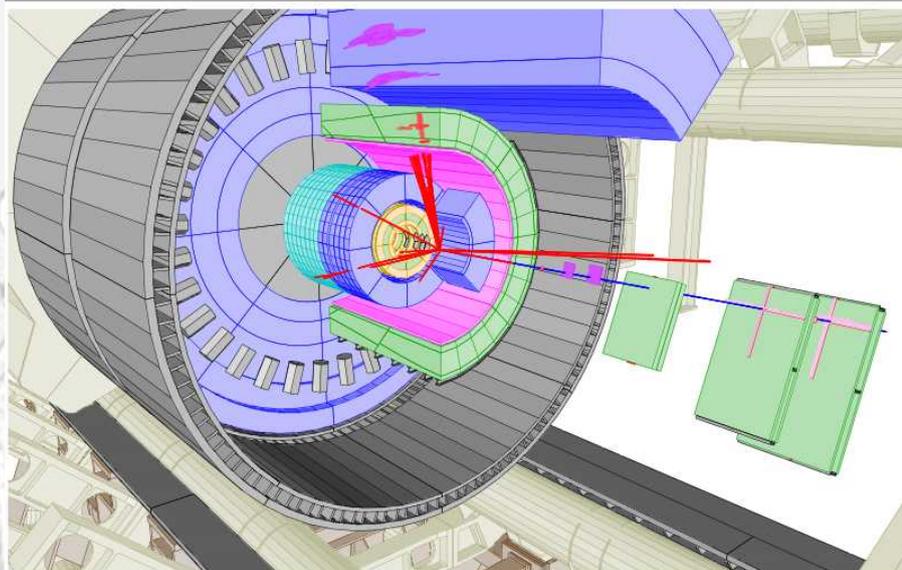
3. Détecteurs : *simulation*



YZ view



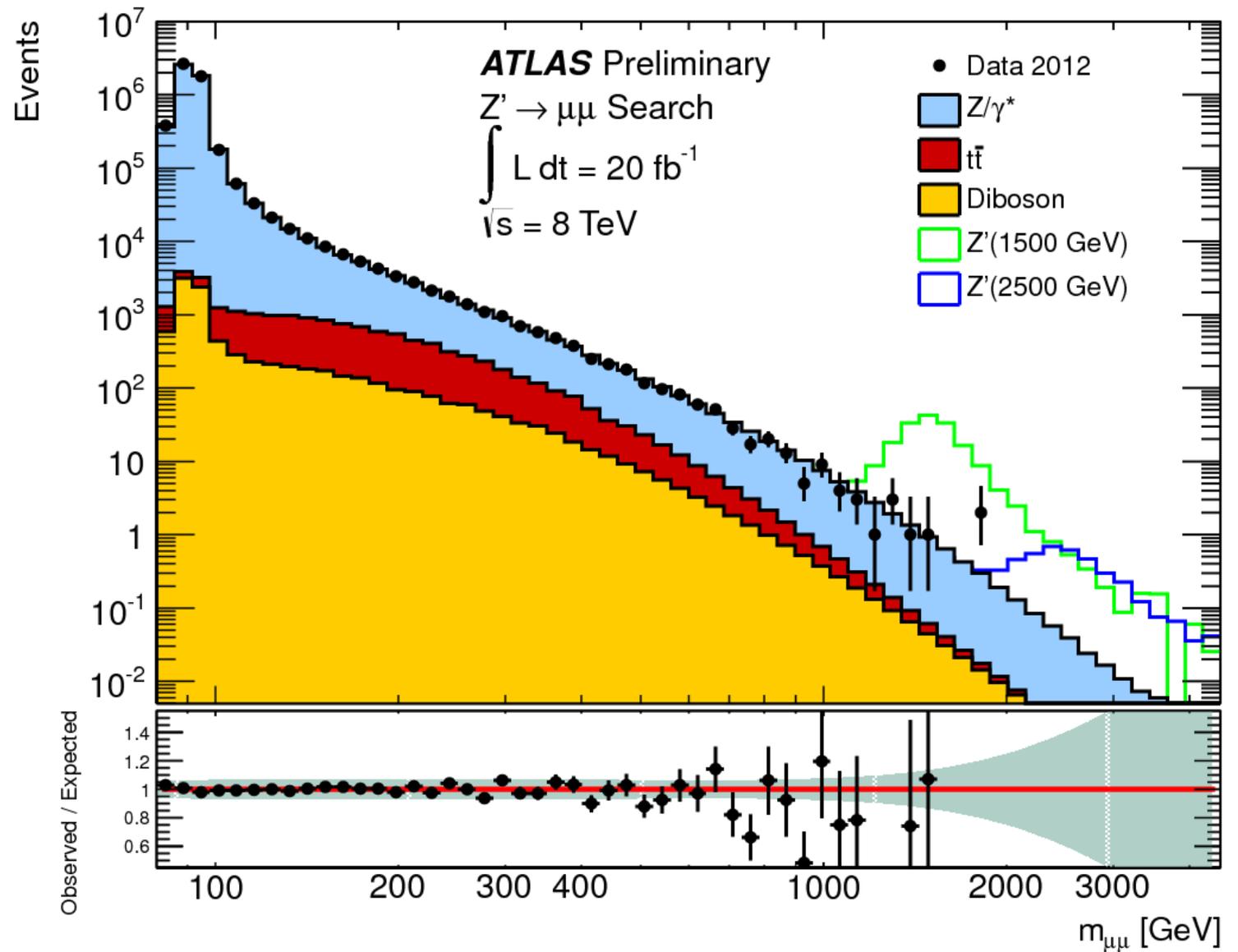
XY view



Run Number: 180149,
Event Number: 25360846
Date: 2011-04-22, 20:17:34 CET

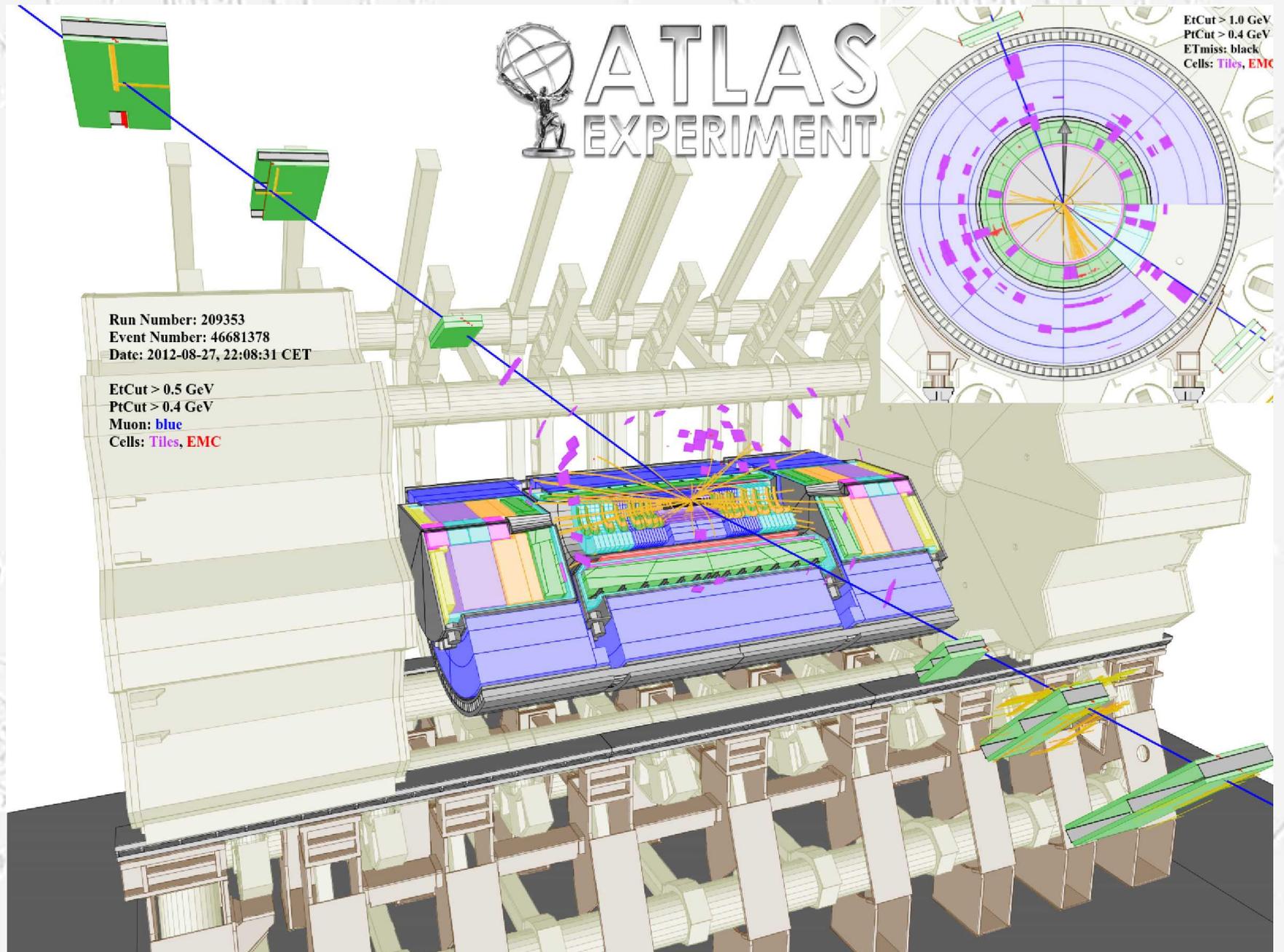
3. Détecteurs : simulation

Data/MC : Z'



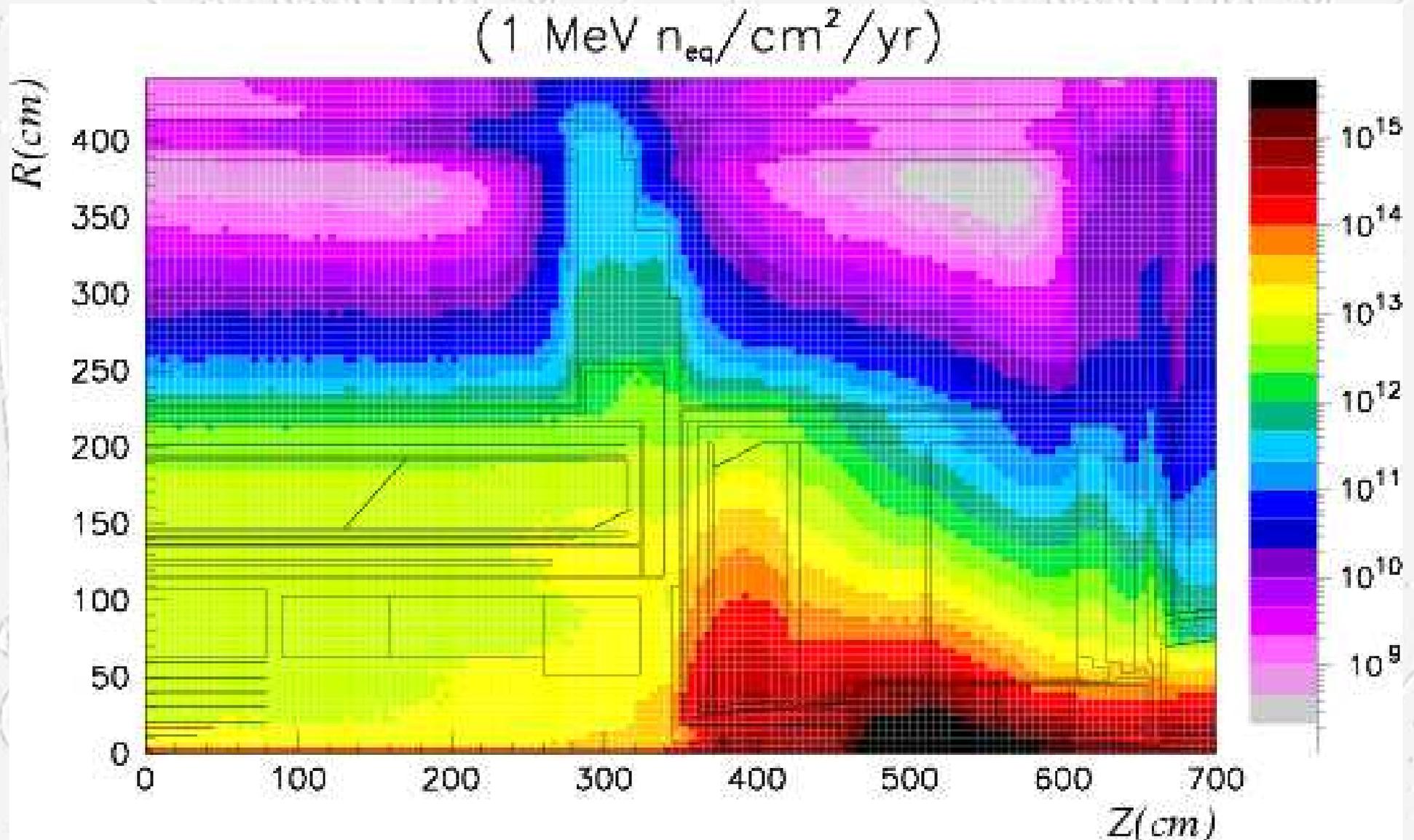
3. Détecteurs : **simulation**

The highest momentum muon has a p_T of 653 GeV and an η of 0.99.
The subleading muon has a p_T of 646 GeV and an η of -0.85.
The invariant mass of the pair is 1844 GeV



3. Détecteurs : Environnement

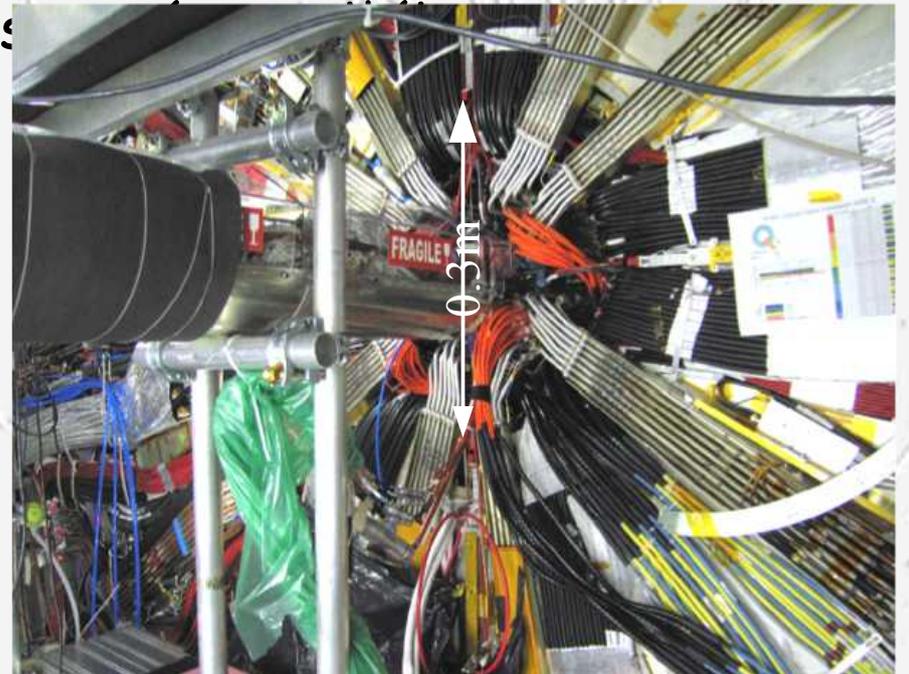
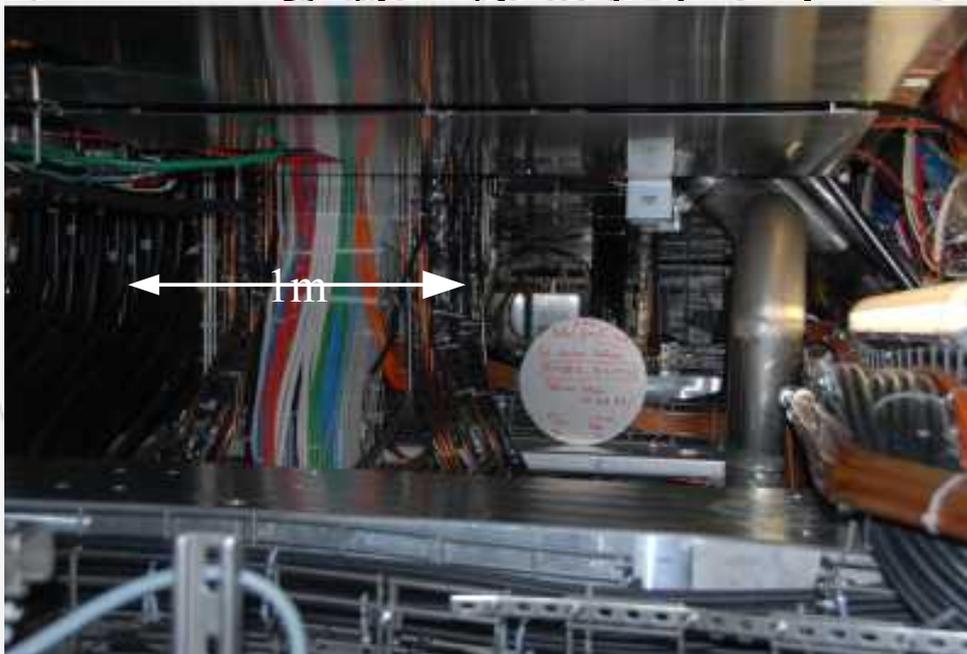
ATLAS Flux de neutrons



3. Détecteurs : **Services**

Ne pas négliger les problèmes liés aux services

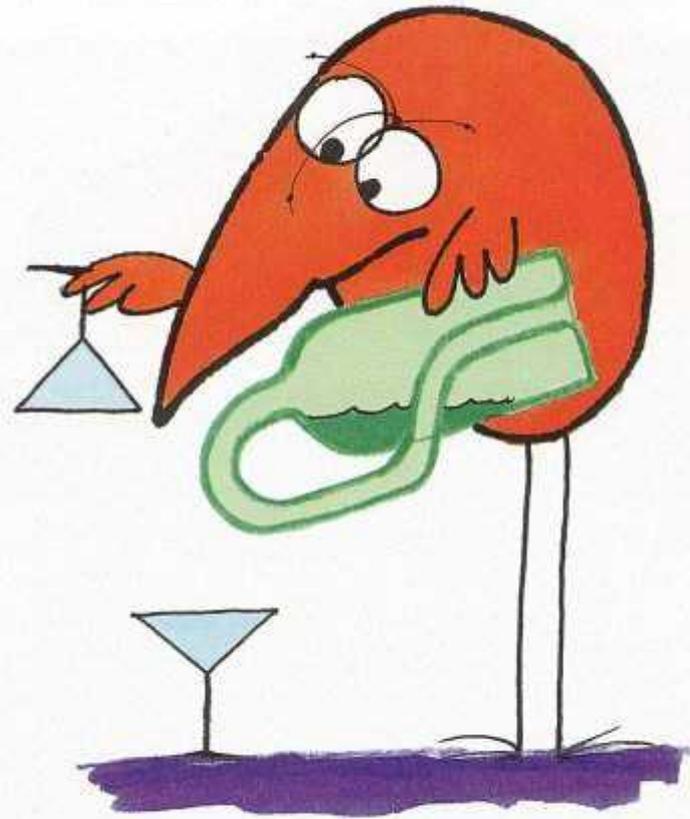
- Récupération du signal (fils, fibres,...)
- Alimentation électrique, gaz,...
- Refroidissement



• Résumé

- **Électron & γ** : Calorimètre (elec)
 - +Trajectographe pour l'électron
- **Muon** : Tracjectographe
 - +info calo
- **Hadron**(k, π, p, n, λ) : Calorimètres (elec + Hadronique)
 - Jets
- **ν** : Énergie manquante
 - Herméticité

Les devises Shadok



S'IL N'Y A PAS DE SOLUTION
C'EST QU'IL N'Y A PAS DE PROBLÈME.