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

Laurent chevalier (56 ans)

- Delphi $e^+ \leftrightarrow e^-$ au LEP,CERN
- D0 p ↔ pbar au Tevatron, Fnal
- ATLAS p ↔ p au LHC, CERN

- Shuket Axions dans ma cave

Introduction

Remarques:

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

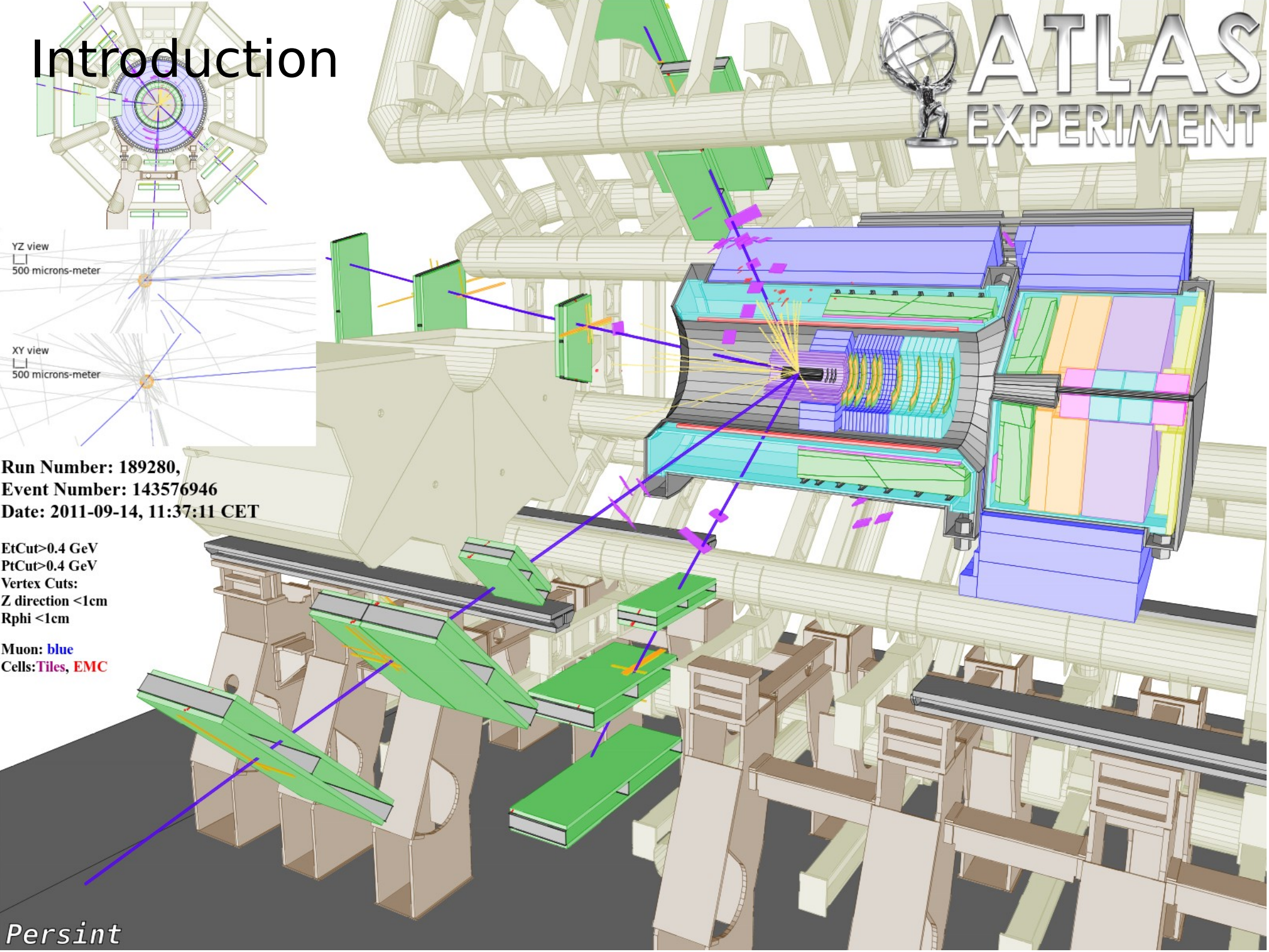
« Une rupture du continuum espace-temps a produit une nouvelle séquence chrono événementielle entraînant l'émergence de cette réalité alternative »
(Retour vers le futur II)

Introduction

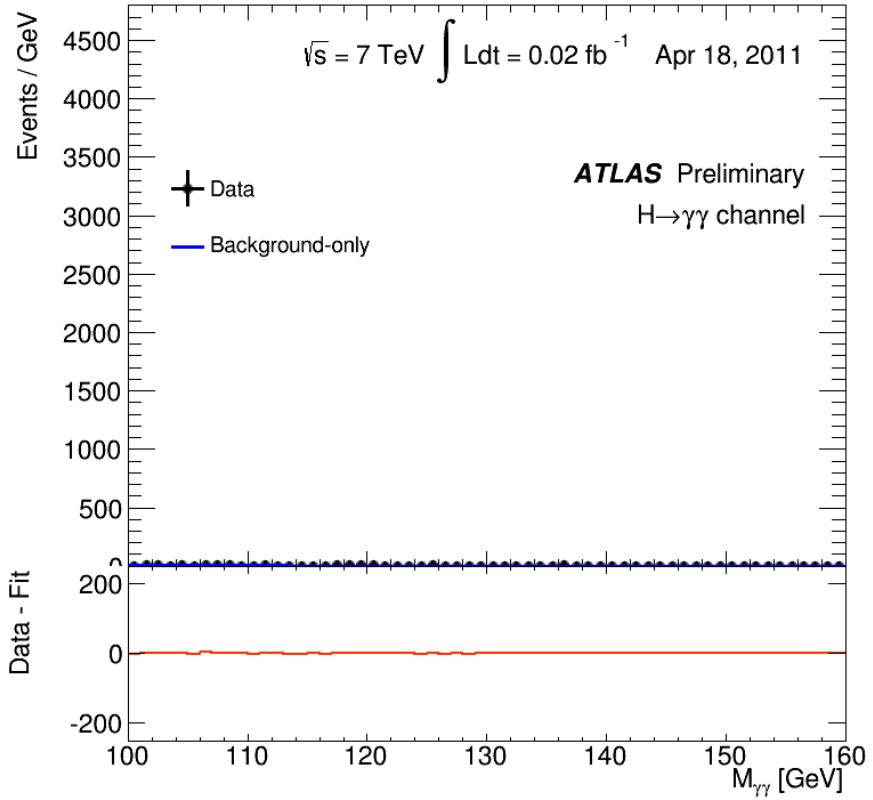
Remarques (suite):

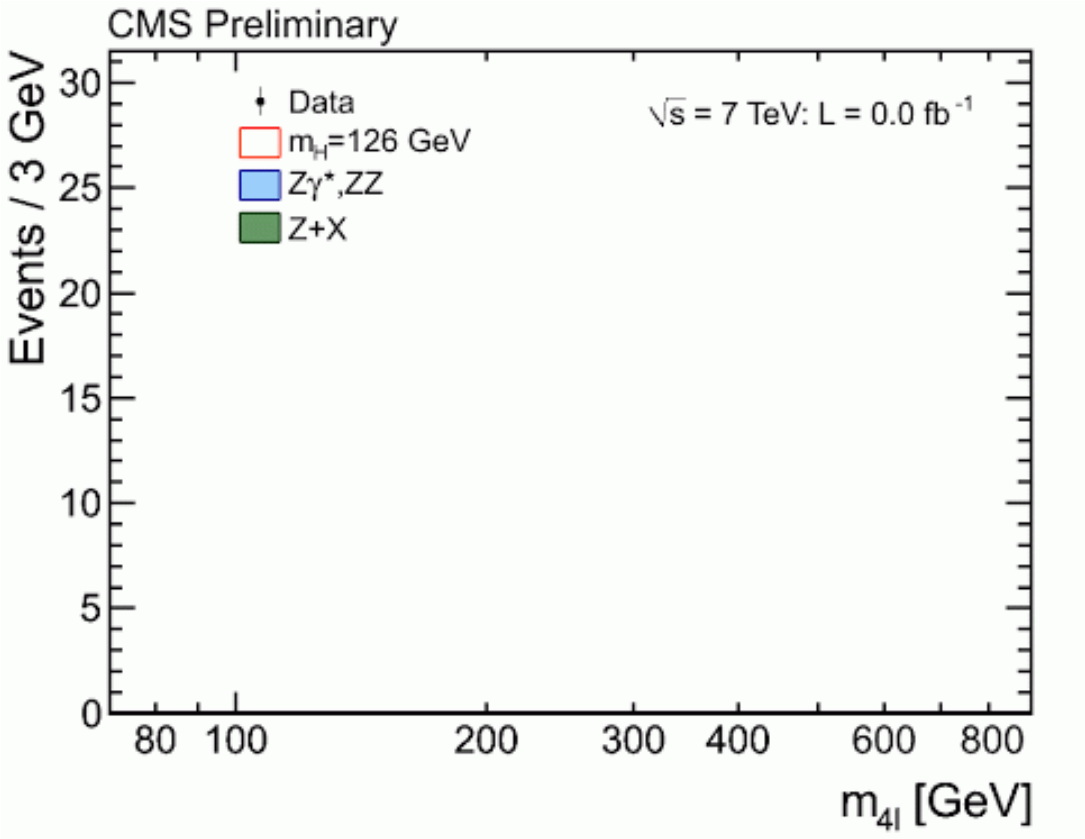
- Détecteurs de trace

Introduction



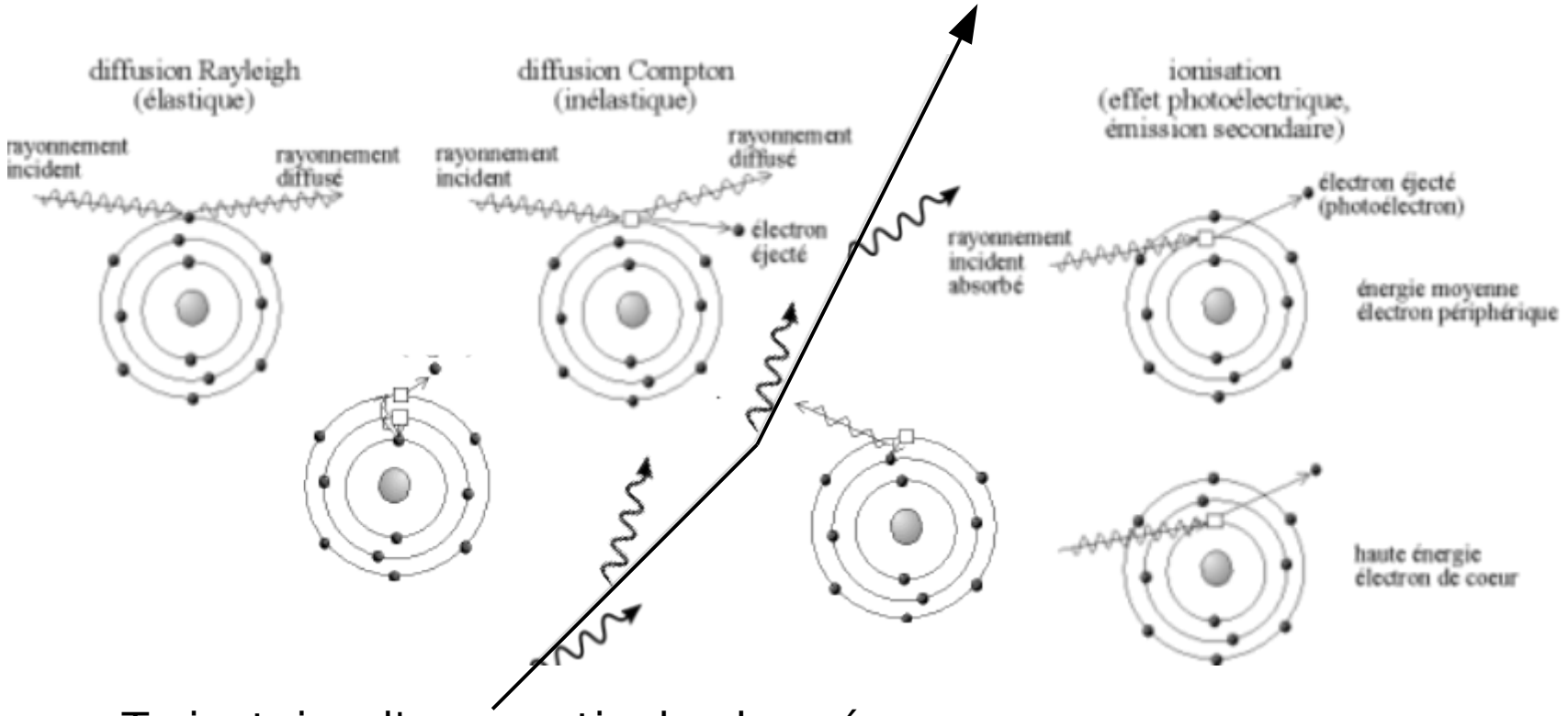
Introduction





I. Interaction particule/matière
II. Détecteurs de traces
III. Identification des particules

Interactions particules-matière (rappels)



Voir l'excellent cours de ??? (mais celui de P.Puzo est bien)

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,π,p,n,Λ...) → 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 > GeV (?)
- Interaction Faible
  - Négligeable excepté pour les neutrino
    - indirectement (muon => Cherenkov)
- Interaction Gravitationnelle
  - Négligeable (sauf pour...)

Interactions particules-matière

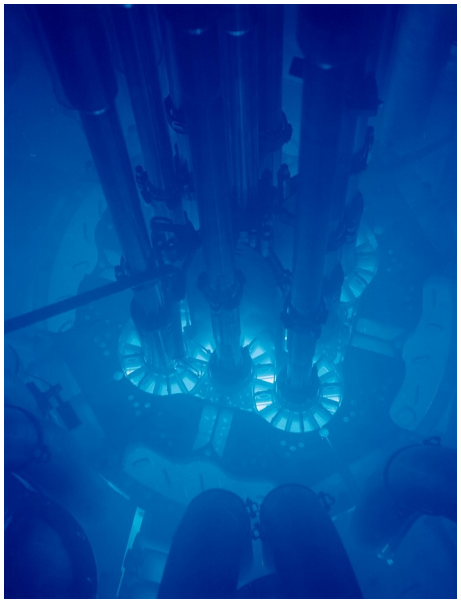
Particules sont détectées à travers
leurs interactions avec la matière du détecteur

- 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

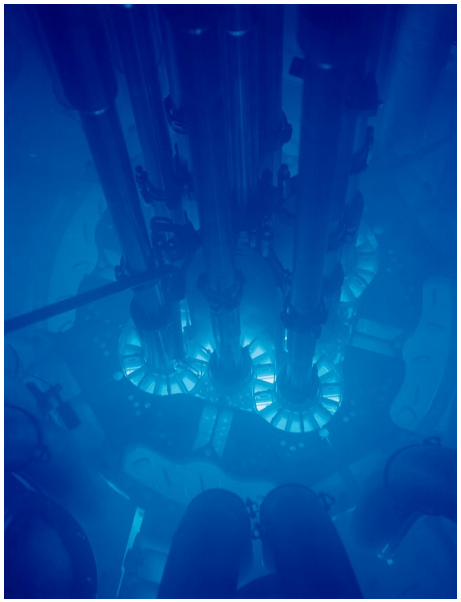
Particules sont détectées à travers
leurs interactions avec la matière du détecteur

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

} Rayonnement Cohérent

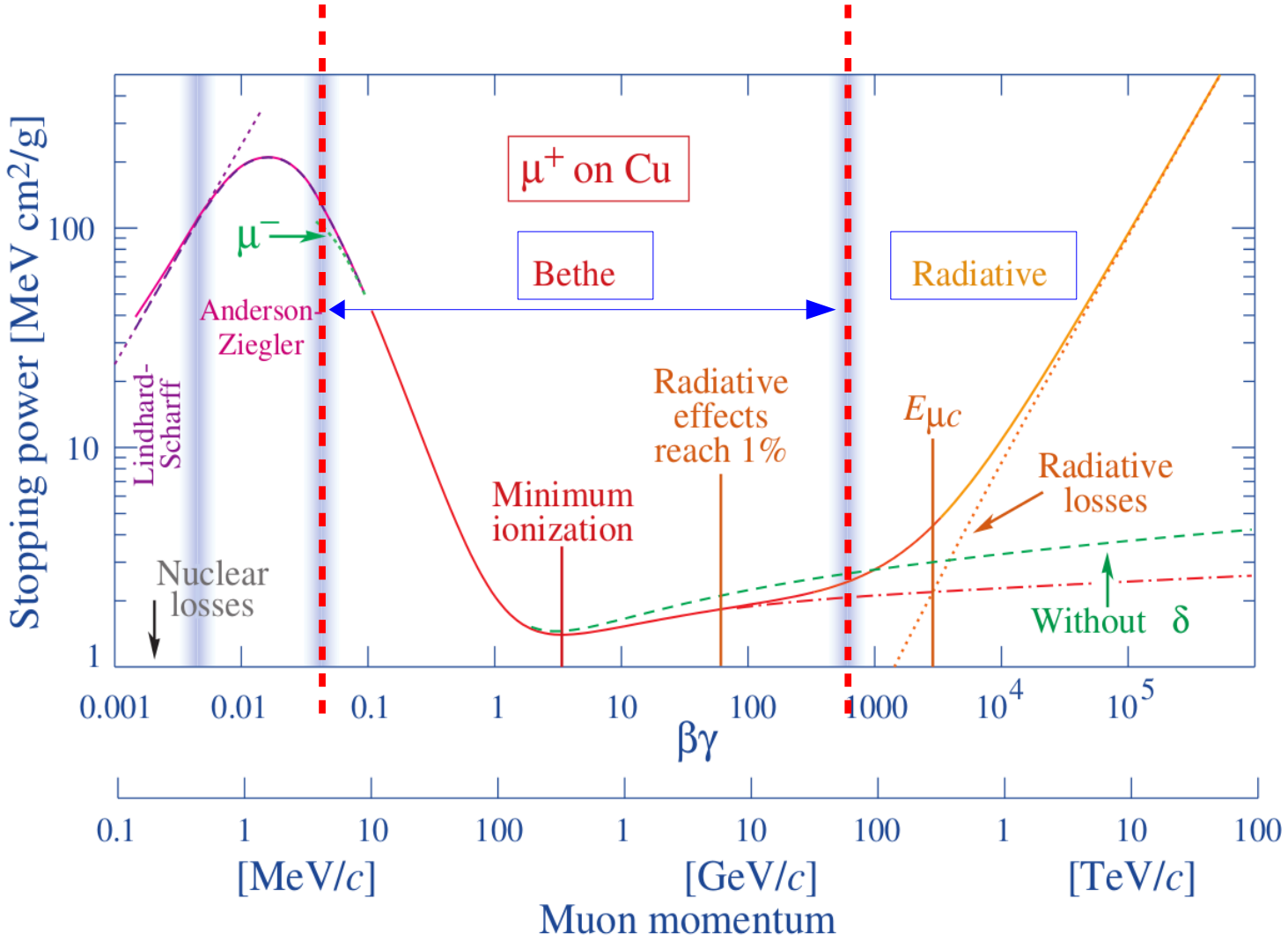
Effets perturbant la mesure

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



Interactions particules-matière

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



PDG : 30. Passage of particles through matter

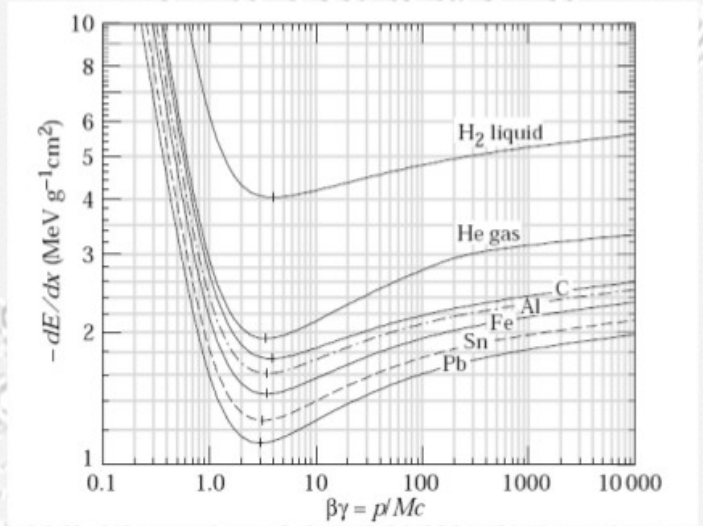
Interactions particules-matière

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

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

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

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



A,Z: Masse & Numéro atomique de la matière du détecteur
N : nombre d'atome par unité de volume
Z: Numero atomique de la particule incidente
I : constant Ionisation ($I=16Z^{0.9}$ 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 (écrantage) correction à l'énergie perdue
x densité de surface (g/cm^2)
remarque : on mesure ΔE sur Δx

dE/dx est en MeV cm^2/g

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

Formule ok ~MeV → ~TeV, [entre crochet] légèrement différente pour les e^+/e^-

Interactions particules-matière

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

Remarques:

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

Dépendances :

1/ vitesse de la particule (ok pour β_{min}=v/c~1%)

2/ charge de la particule

3/ milieu de propagation de la particule

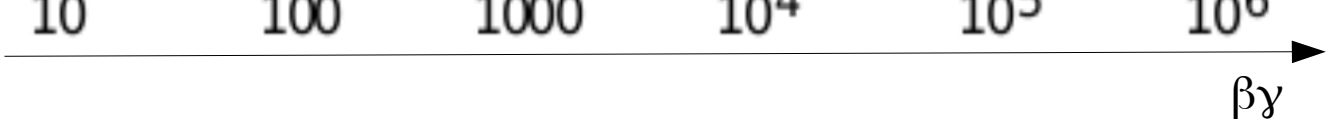
Interactions particules-matière

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

Remarques:

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

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



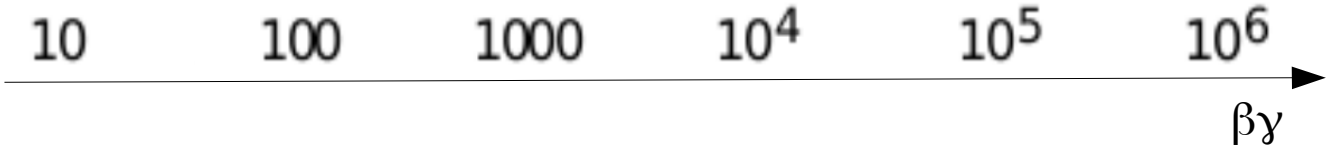
Interactions particules-matière

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

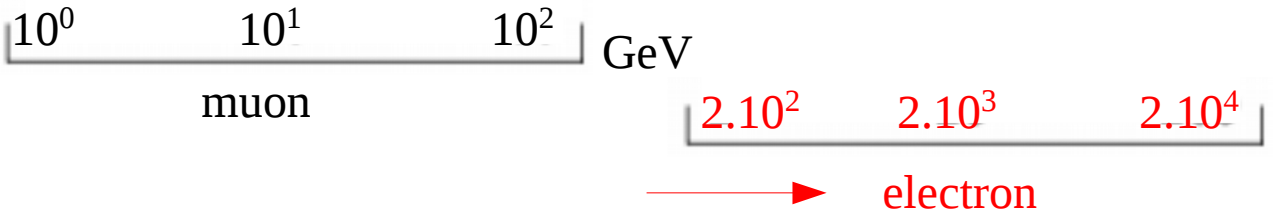
Remarques:

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

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



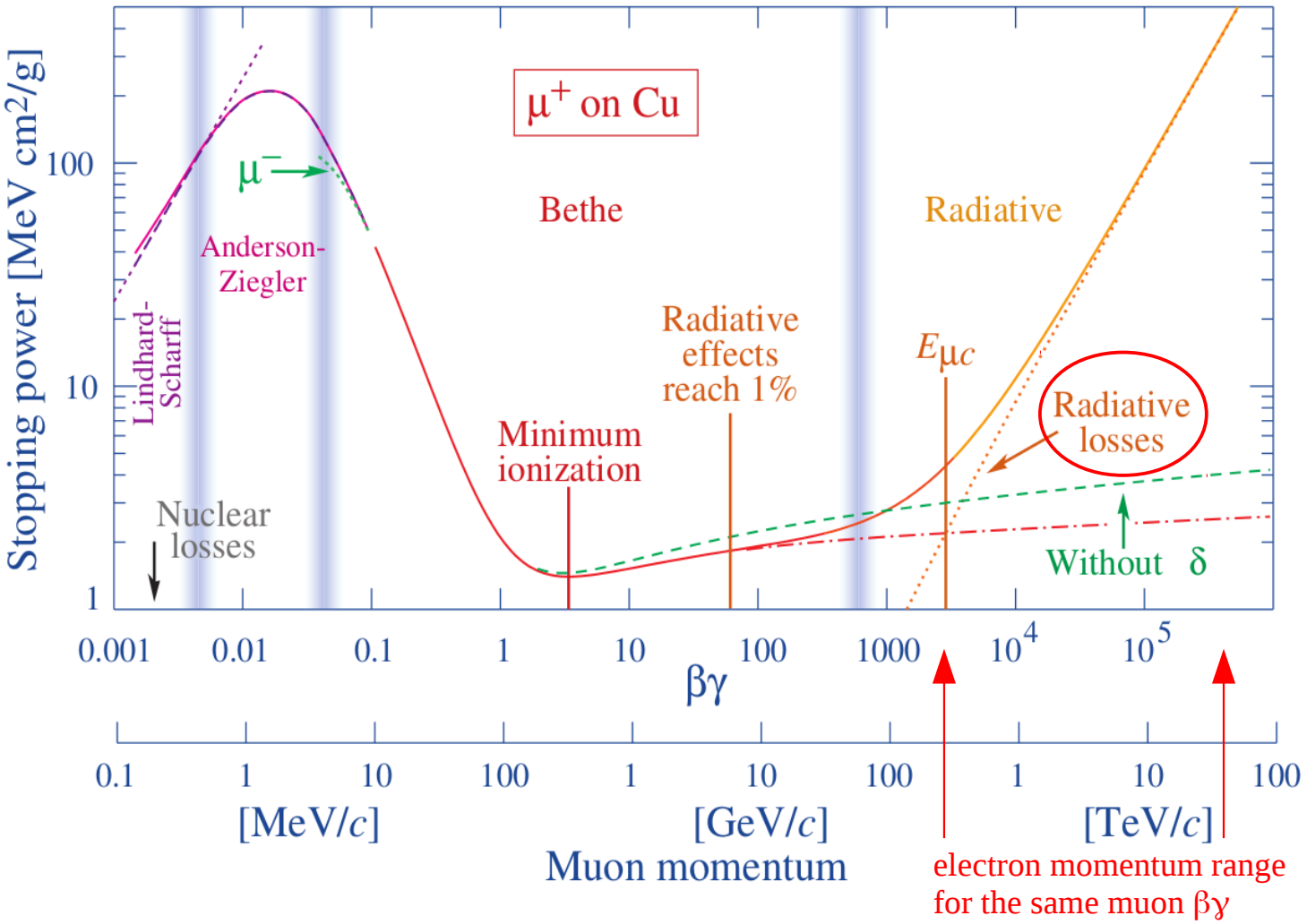
$\beta\gamma \longrightarrow$ muon



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

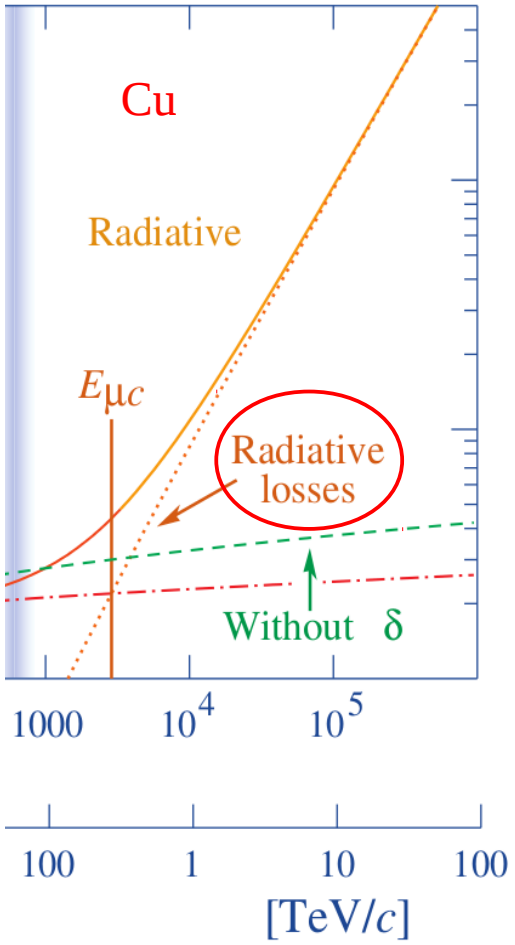
Interactions particules-matière

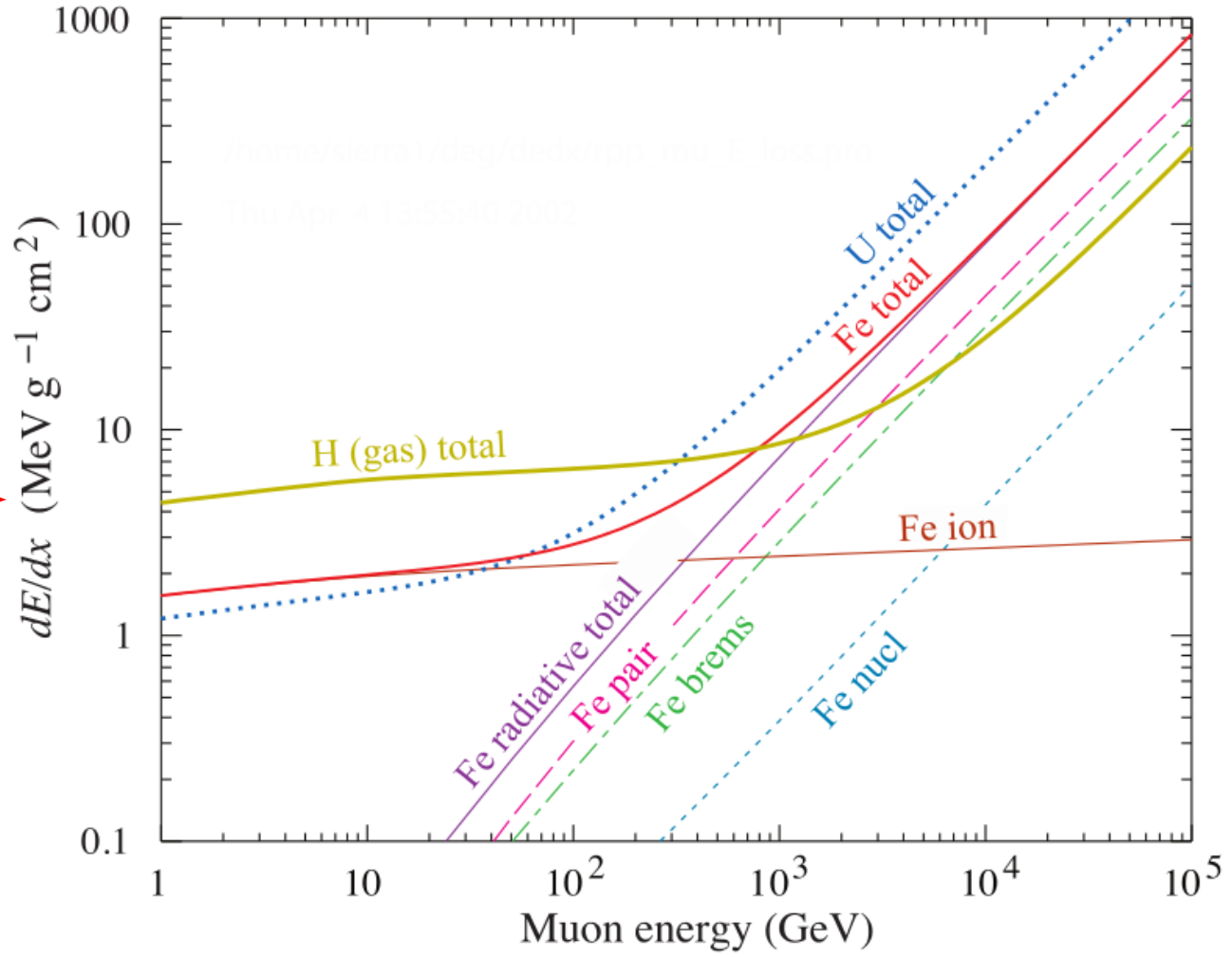
$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



Interactions particules-matière

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

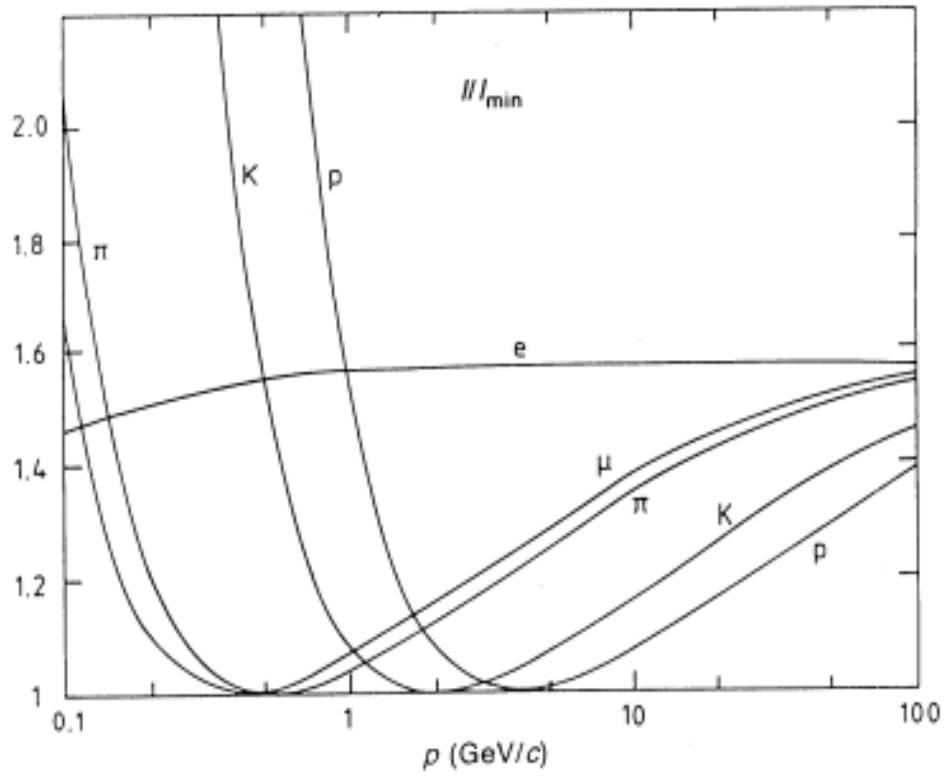




Interactions particules-matière

Calcul

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



Interactions particules-matière

Il existe une énergie critique Ec

- différente selon les particules (e, μ, γ)
- E_c**γ** ~1 MeV E_c**e** de ~10 MeV à 300 MeV, E_c**μ** > 100 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 : $\gamma \rightarrow e^{+/-}$ et/ou $e^{+/-} \rightarrow e^{+/-}\gamma$

- 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 X0 au delà de Z>6) (absorption du milieu)

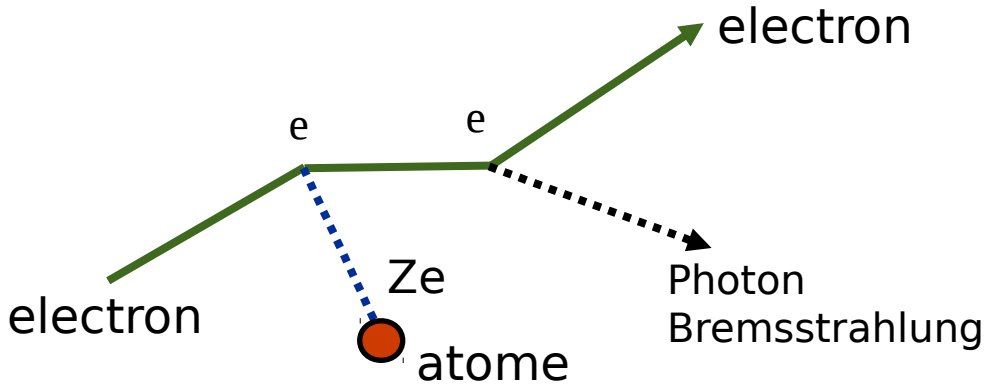
Interactions particules-matière

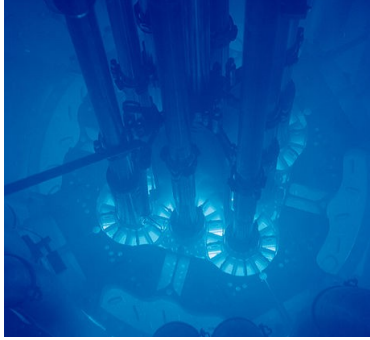
Bremsstrahlung

- Interaction avec le champ électrique des atomes
- Mécanisme principale de perte d'énergie pour les électrons

  à paritr ~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



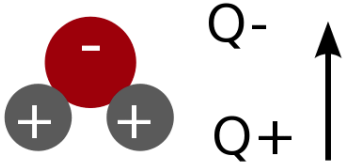


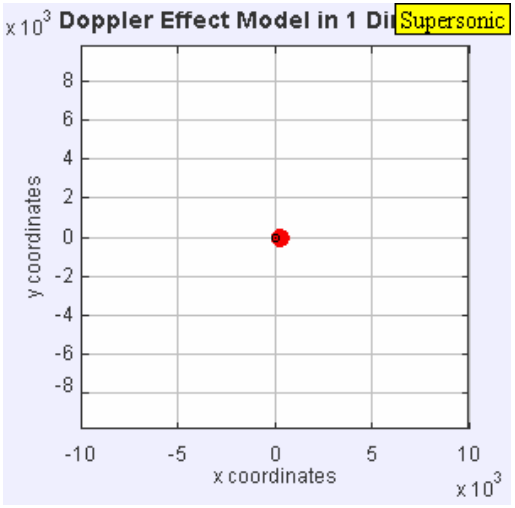
Effet Čerenkov

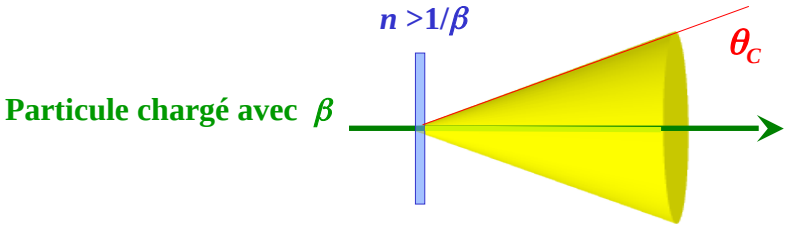
- Particule relativiste chargé traversant un milieu d'indice de refraction $n > 1/\beta$

  Relativiste signifie que la particule se déplace plus vite que la lumière dans le milieu

- La Particule émettra une radiation Čerenkov 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)



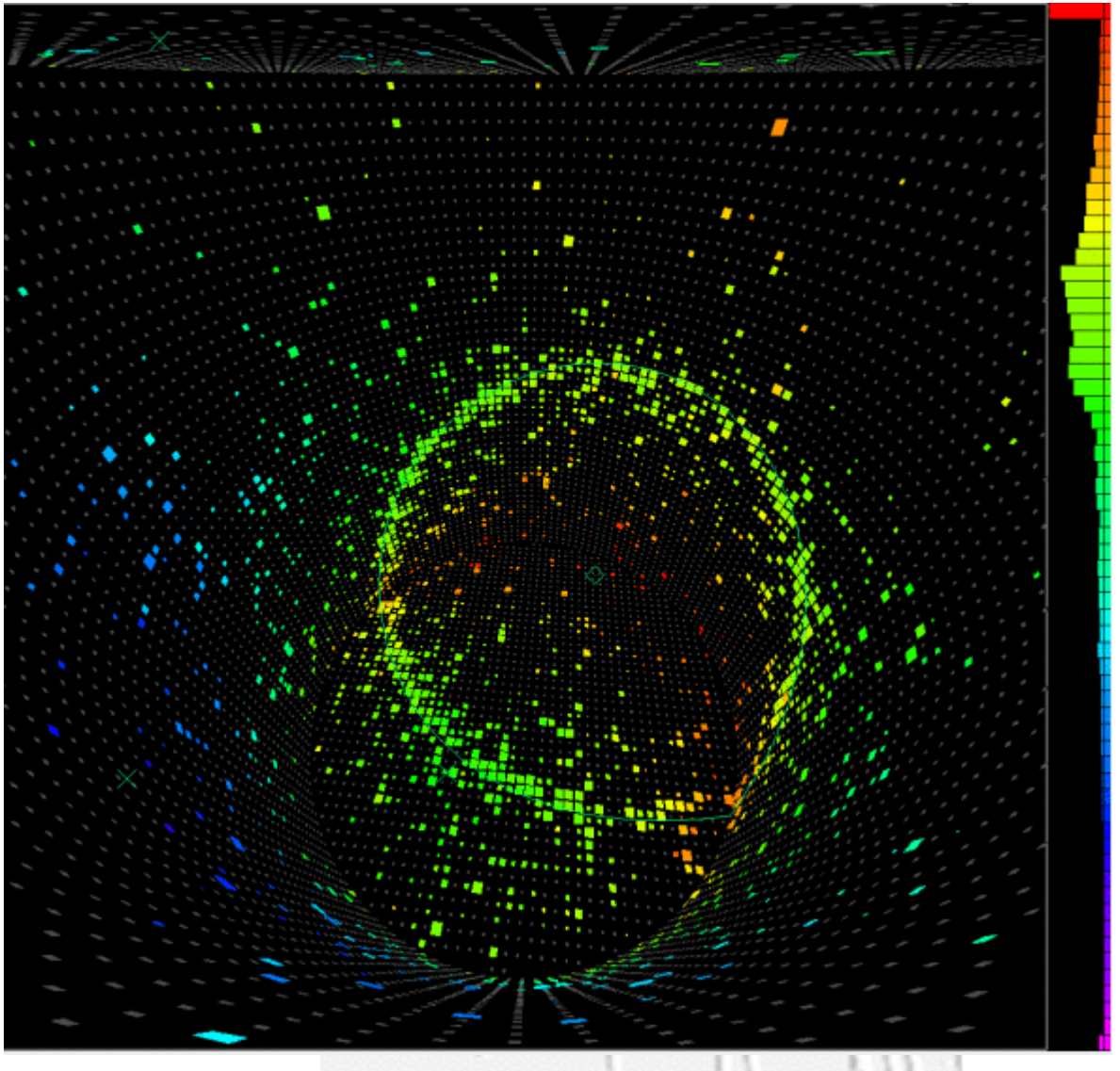




Interactions particules-matière

Effet čerenkov

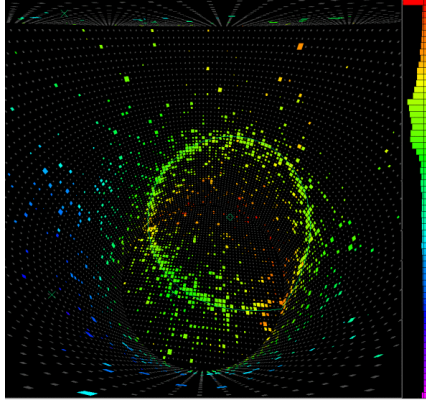
MiniBooNE



Interactions particules-matière

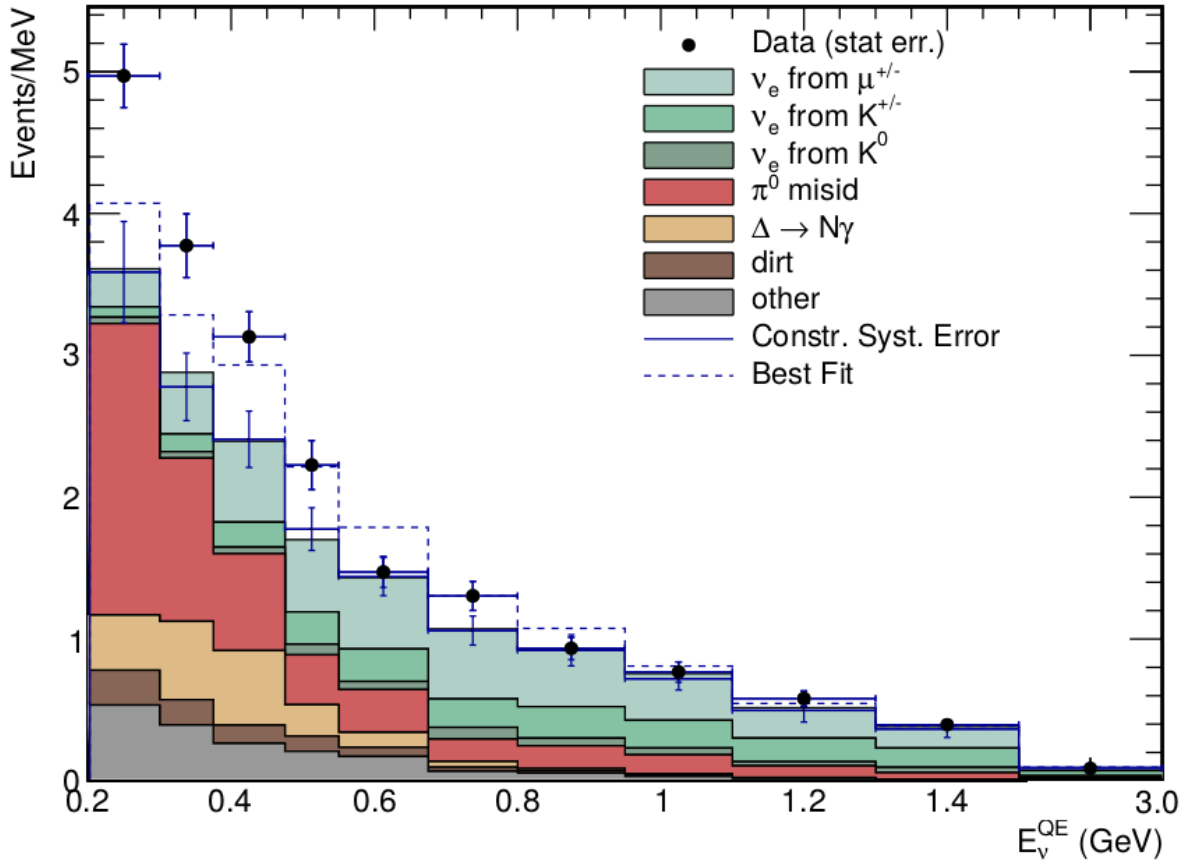
Effet čerenkov

MiniBooNE



Observation of a Significant Excess of Electron-Like Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment

A. A. Agu
R. Dharma
J. Grange[7], F
T. Kobilar
C. D. Moore[6],
B. P. Roe
M. Tzano
. L. Cooper[10,15],
, G. T. Garvey[10],
orgi[5], T. Katori[12,16],
ul[10], J. Monroe[18],
Perevalov[6], H. Ray[7],
. T. Thornton[10],
D. Zimmerman[4]



30 May 2018

Interactions particules-matière

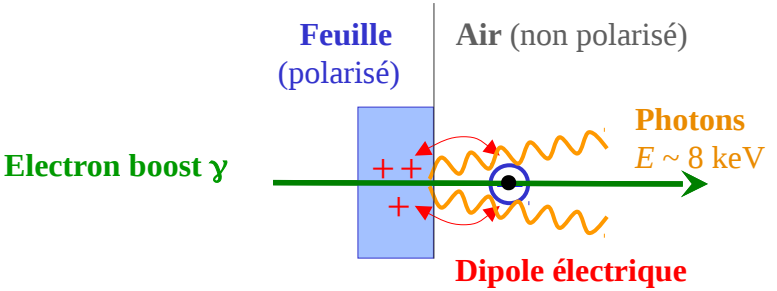
$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Rayonnement de transition est proportionnel

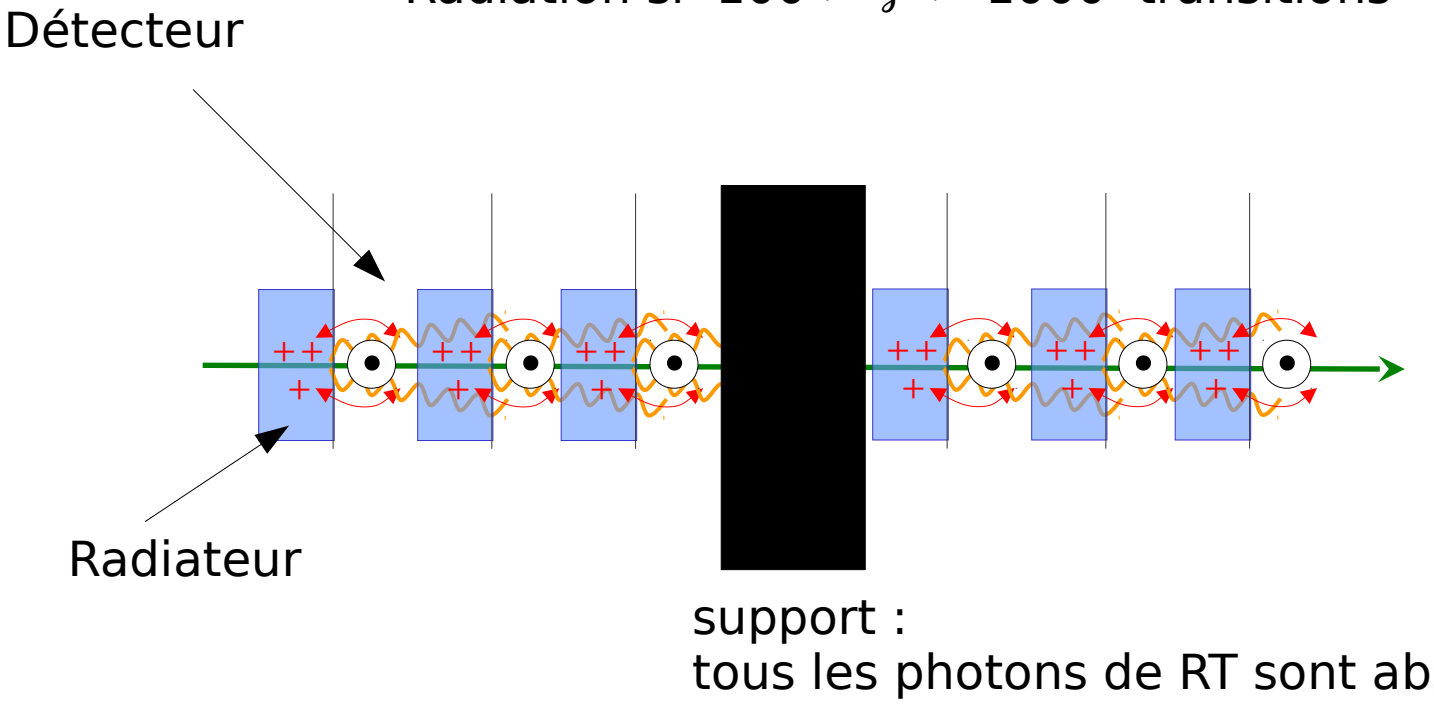
- Particule chargée change de milieu
  - Discontinuité de l'indice de réfraction
  - Émission de photons (~KeV) à la frontière entre les milieux
  - Nombre de photons croient avec le nombre de Transitions
    - Compromis à trouver avec l’absorption
  - Rayonnement de transition + dE/dx
- En pratique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

Rayonnement de transition

- Schéma de principe



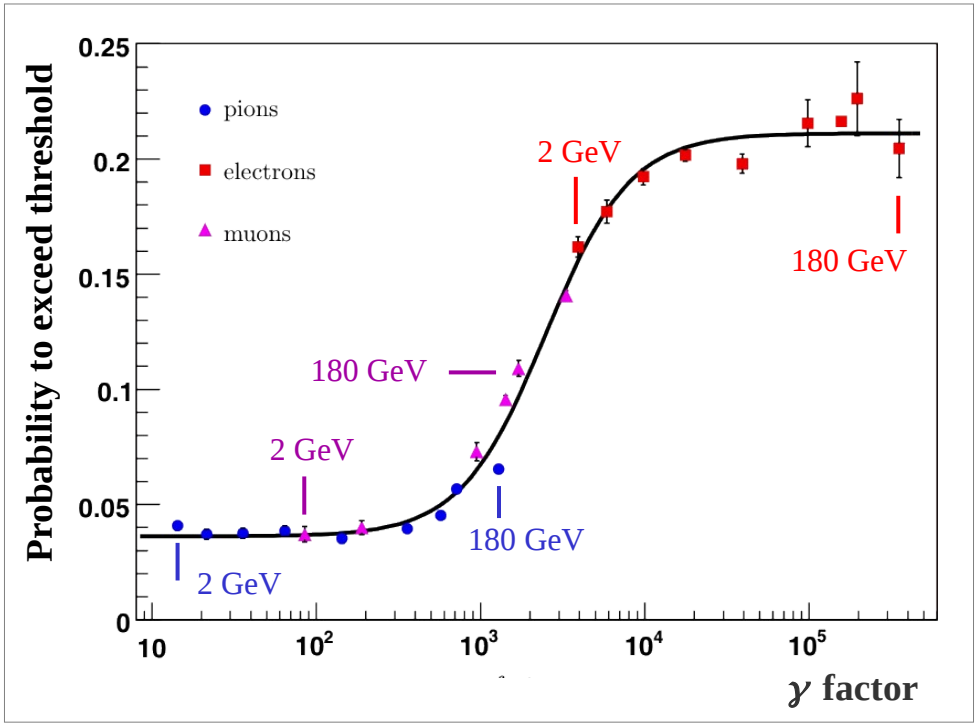
Radiation si $100 > \gamma > 1000$ transitions

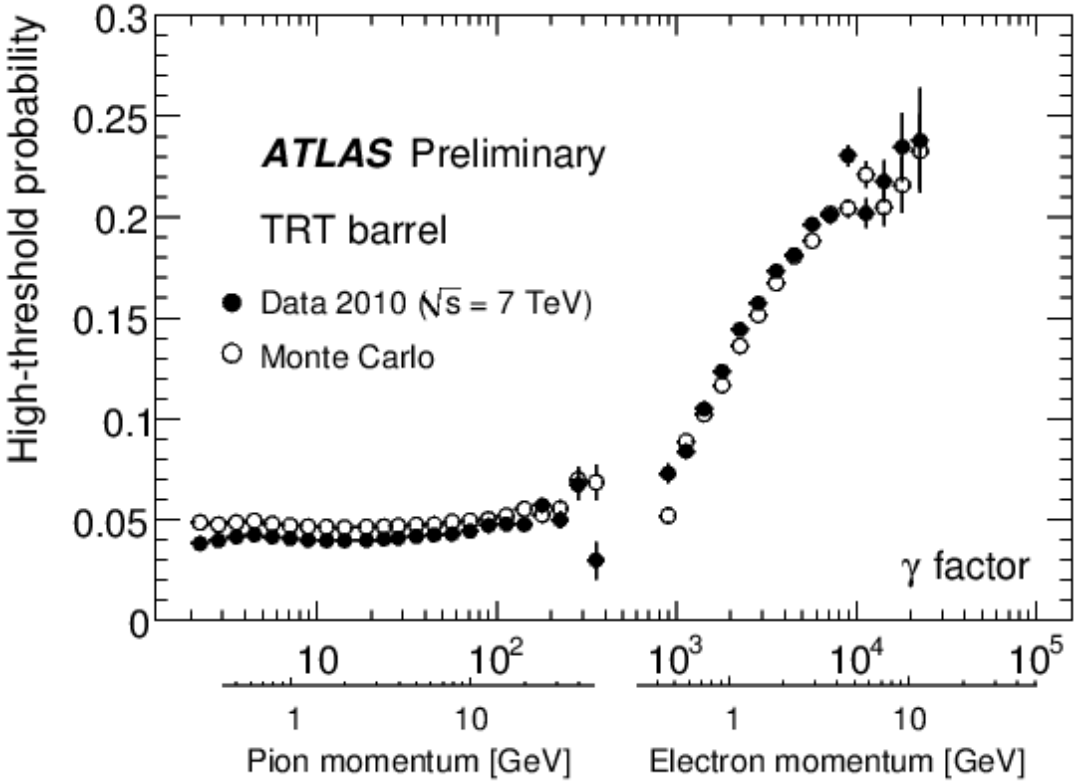


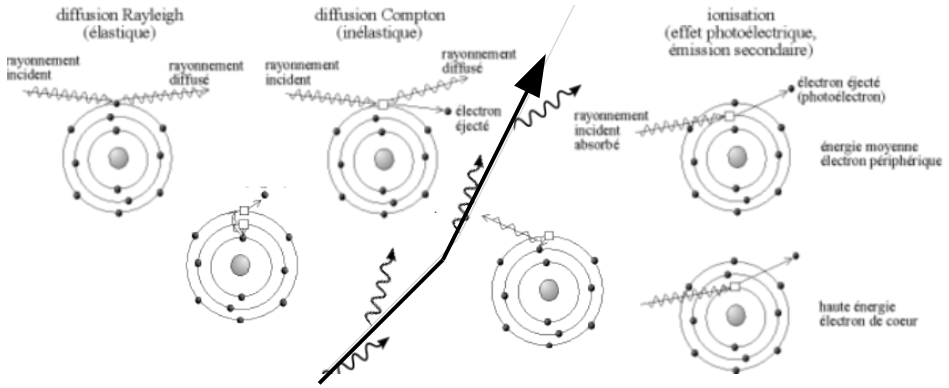
Interactions particules-matière

Rayonnement de transition

- Exemple : Atlas TRT *test beam & data*



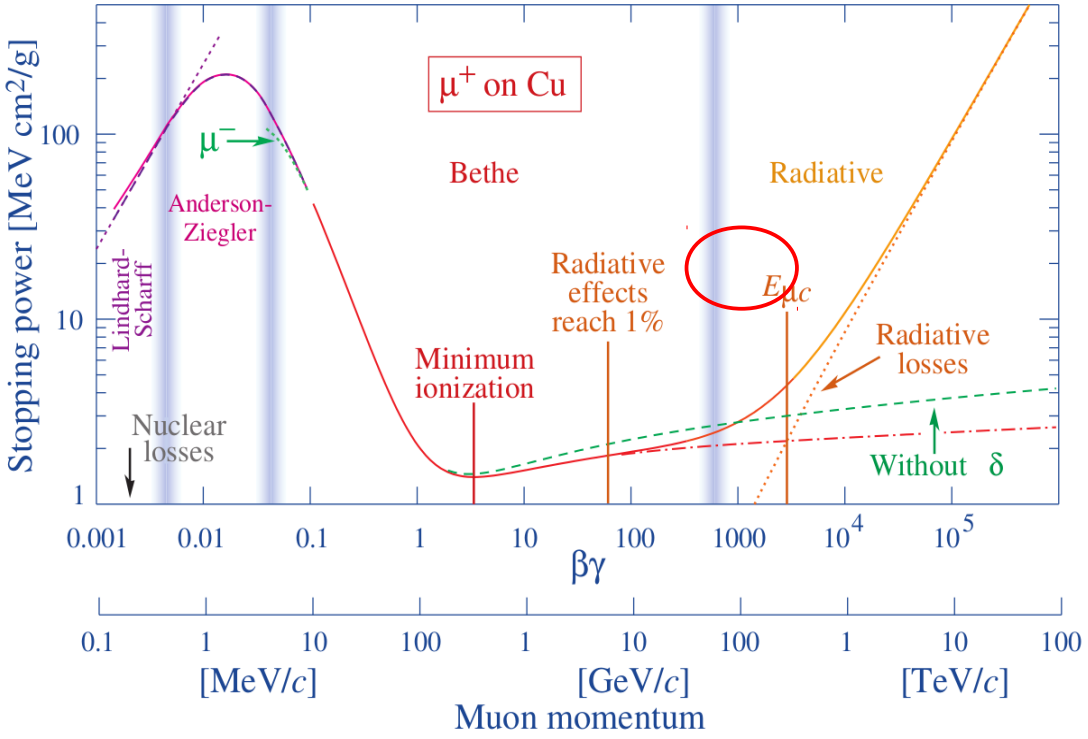


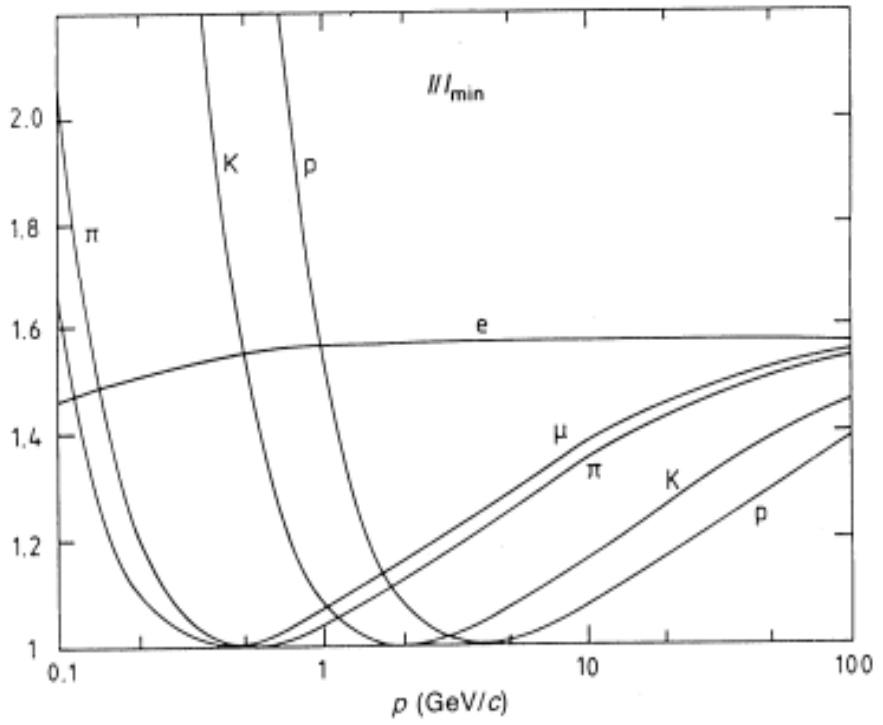


Trajectoire d'une particule chargée dans la matière

Interactions avec la matière du détecteur

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





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

Interactions particules-matière

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

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

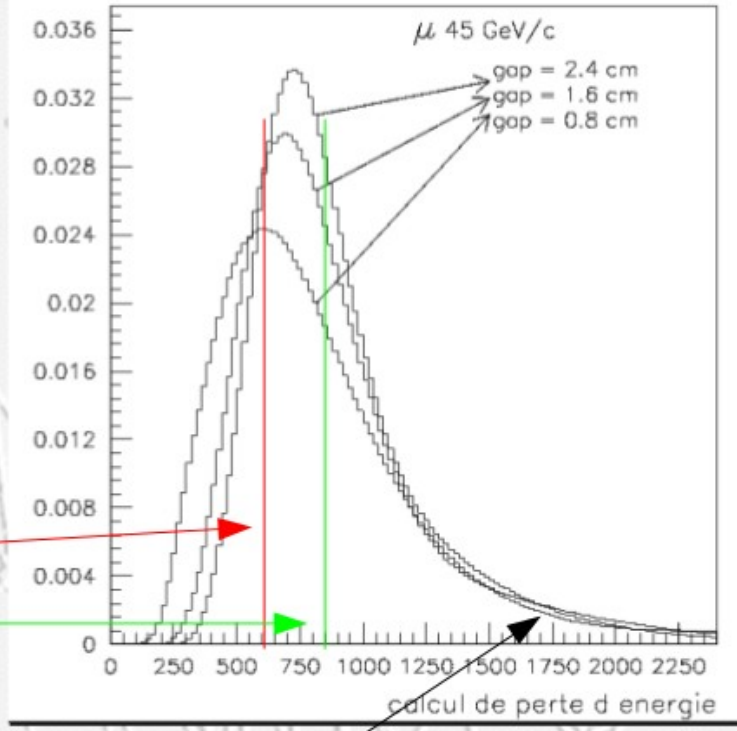
Effets perturbant la mesure

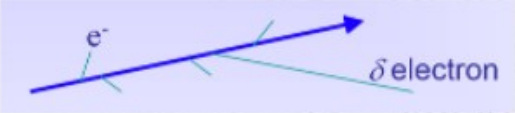
- Fluctuations de Landau
- Diffusion multiple
- Création de paires (e+/e-)

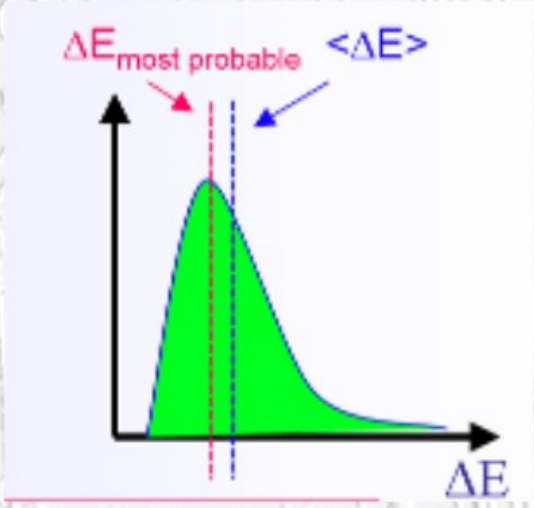
Interactions particules-matière

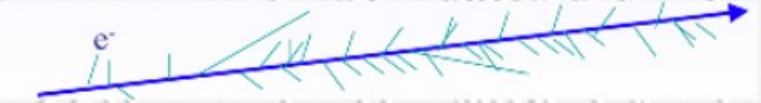
Perturbation de la mesure (physique)

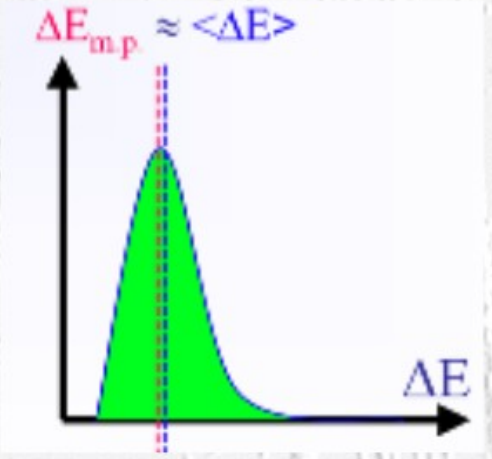
- Fluctuation de Landau
  - Effet de échantillonnage
  - Valeur la plus probable vs moyenne
    - Épaisseur fine: ~égalité (Théorème central limite)
  - Grandes Fluctuations : queues de Landau (δ ray)









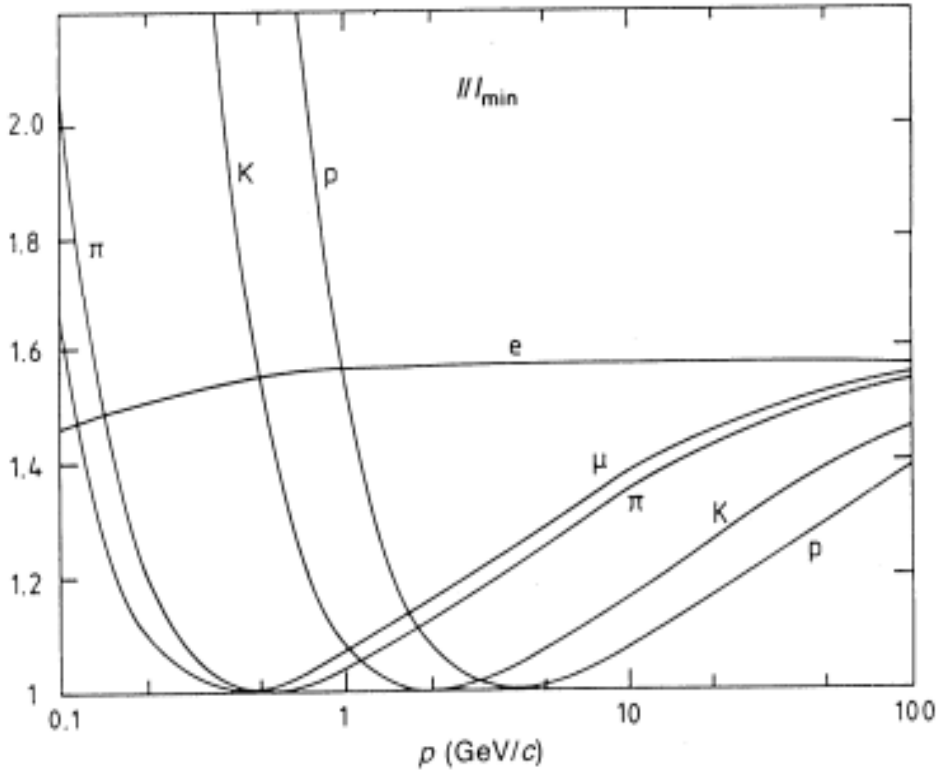


Interactions particules-matière

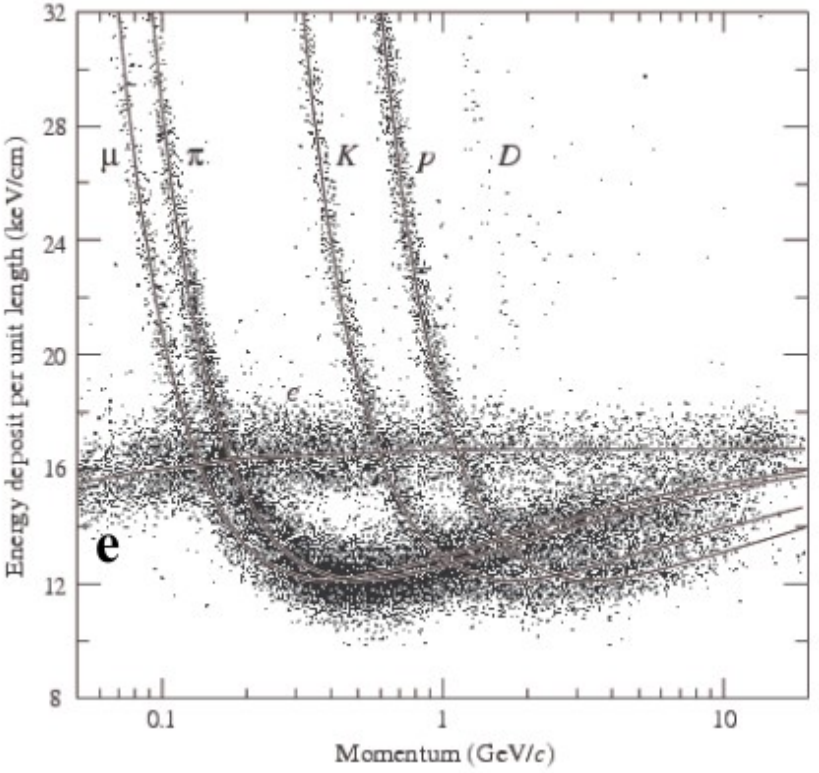
$$p = \gamma M \beta c$$

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

Calcul



Réalité



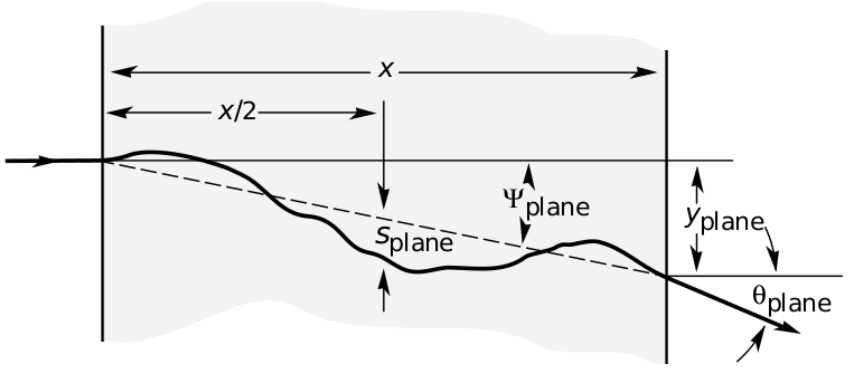
Gamme d'énergie : ~0.1-->~10 GeV

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

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



Interactions particules-matière

Conversions (création de paires $e^{+/-}$)

- Perturbations & Outils

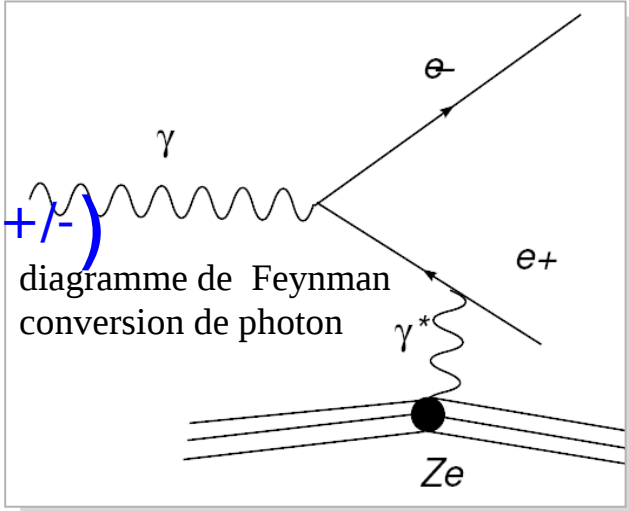
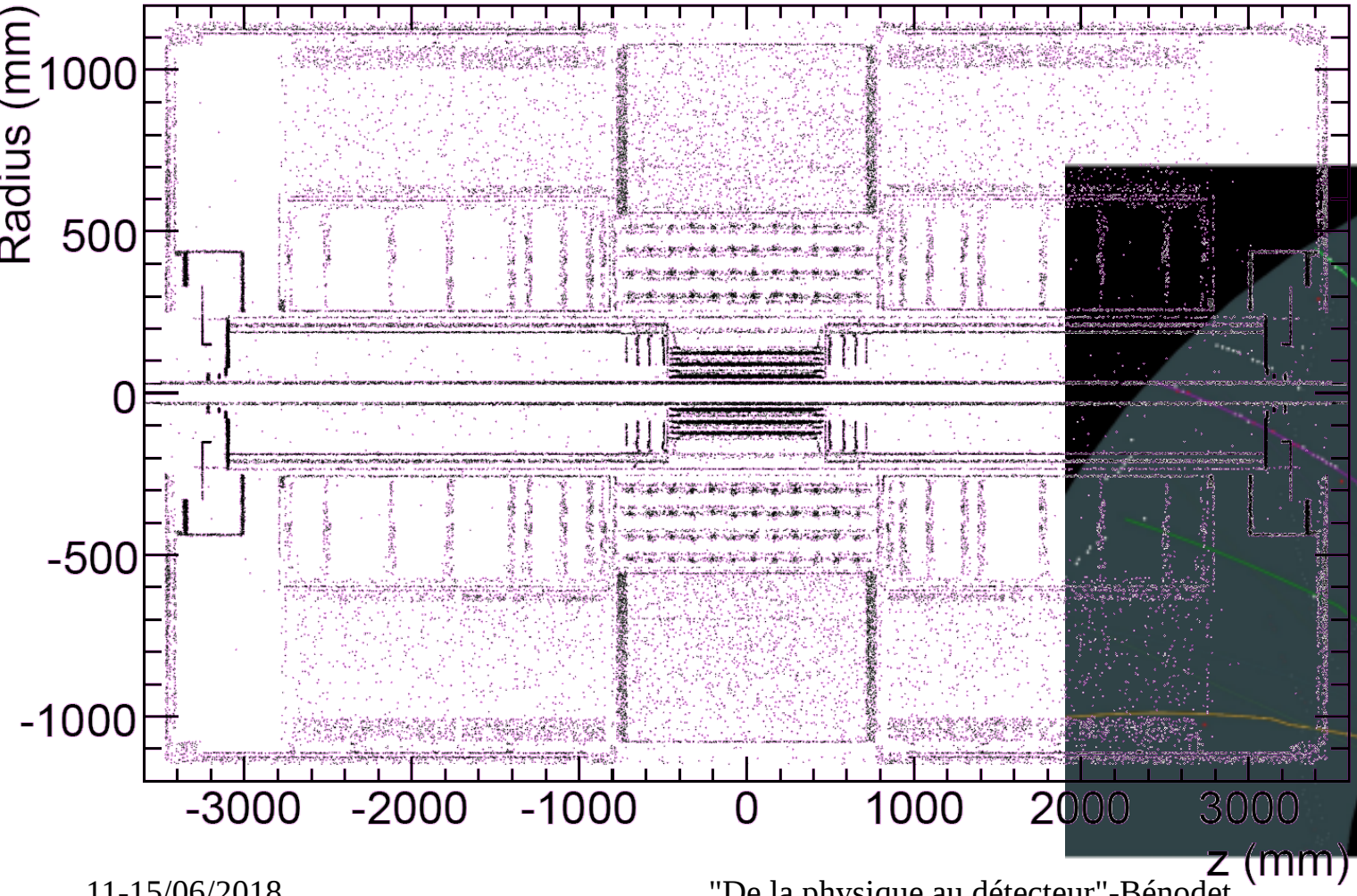
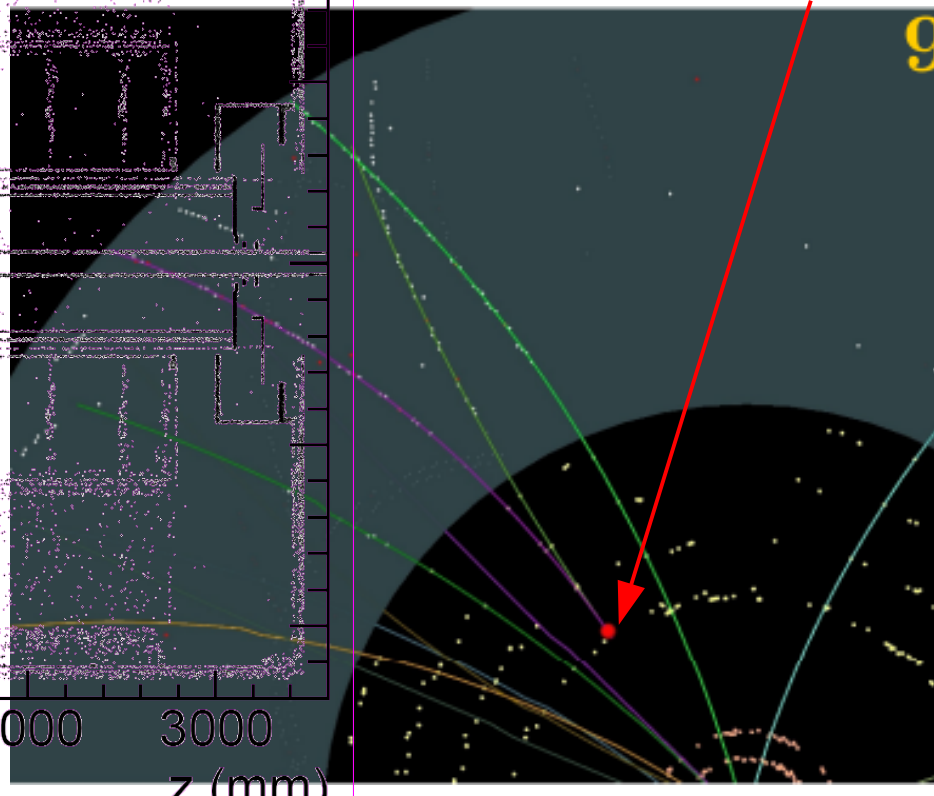


diagramme de Feynman
conversion de photon





I. Interaction particule/matière
II. Détecteurs de traces
III. Identification des particules

Détecteurs de traces

Ceci est pion! π

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

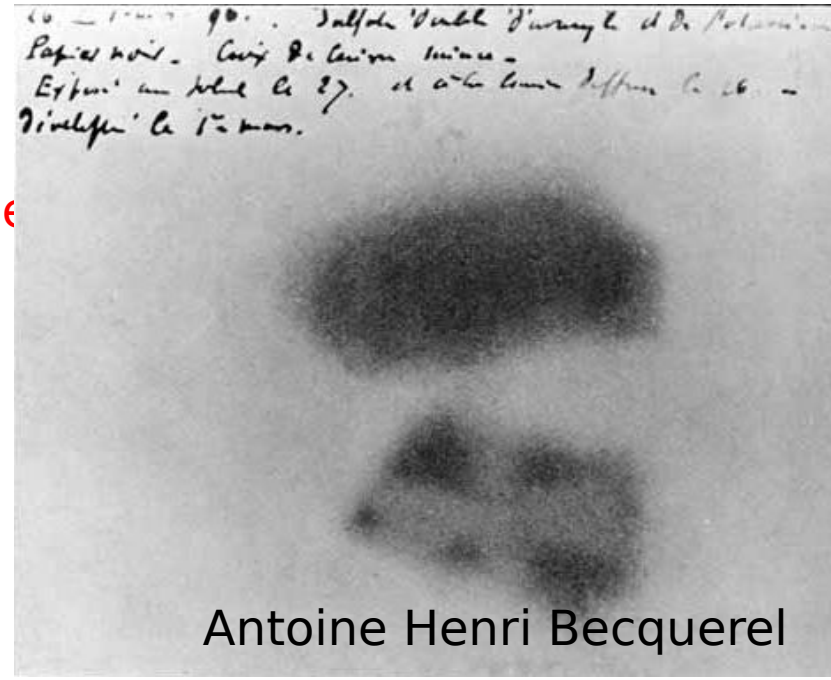
Introduction

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

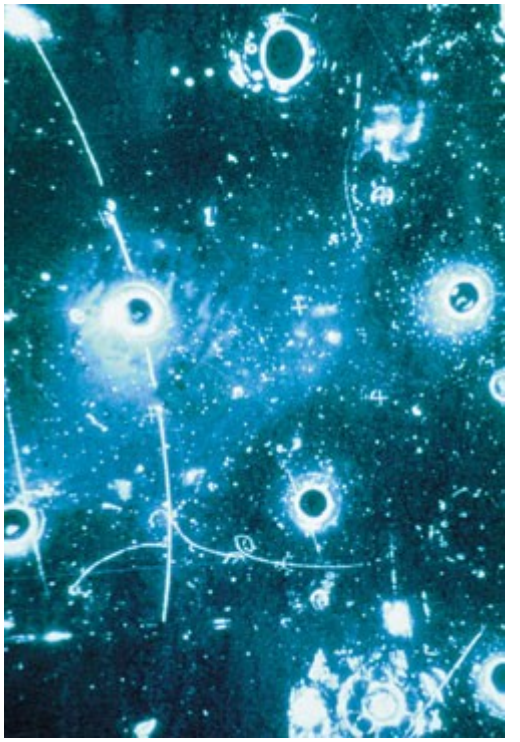
- Ionisation du milieu:
  - Détecter le passage d'une particule chargée en mesurant la charge totale (e-+ / ions) produite par l'ionisation du milieu

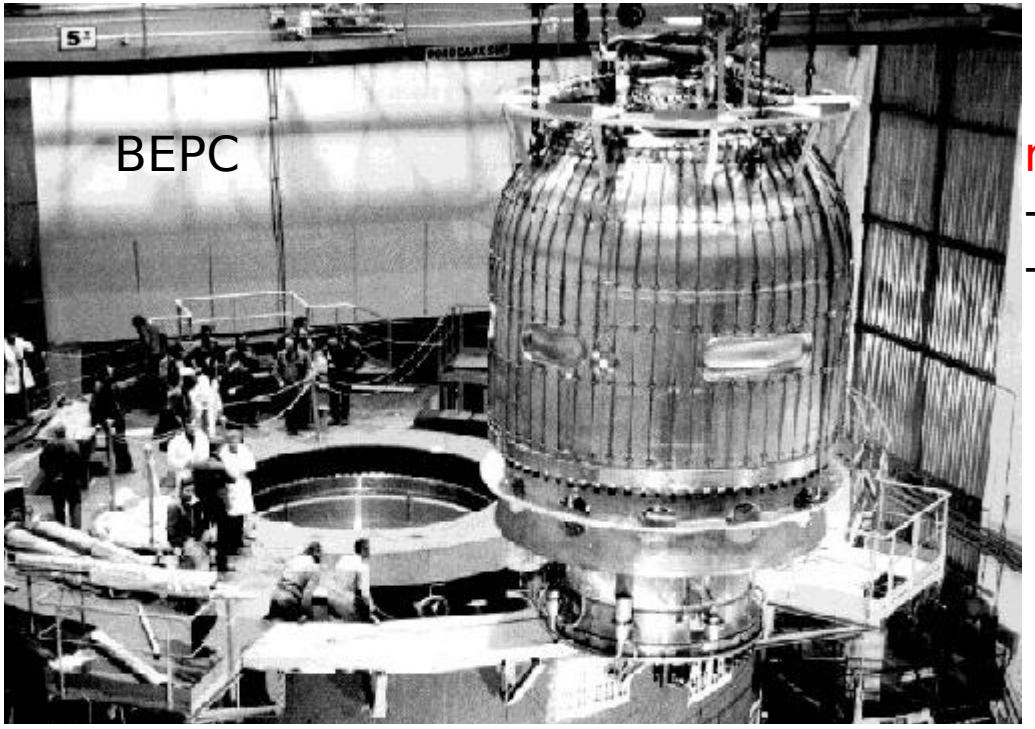

Antoine Henri Becquerel

Détecteur de traces : Liquide

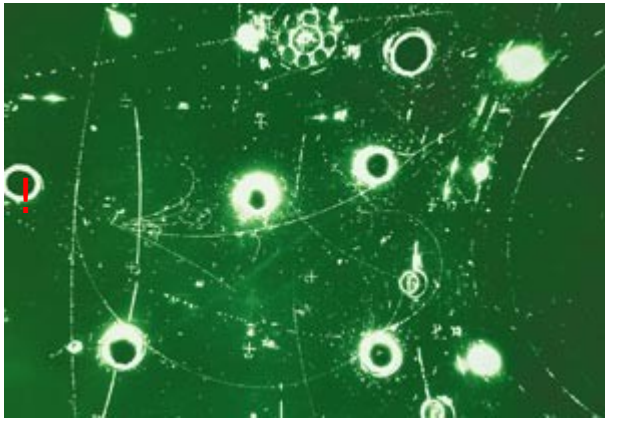
Chambre à bulles

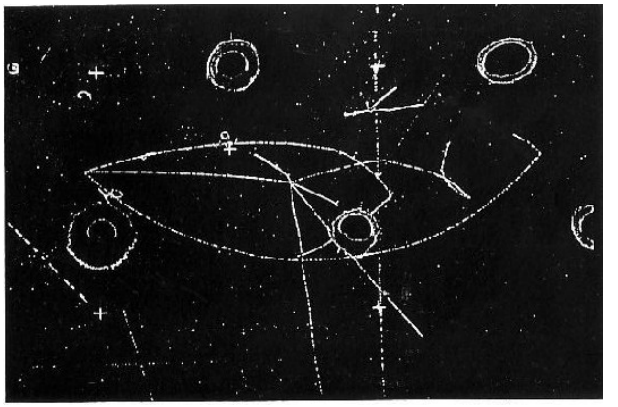
- C.Glaser 1952
- Gargamelle: 1973 découverte des courants faibles neutres
  - Phase liquide, proche phase gazeuse
  - Pression de 1.3 à 4 atm (temp. ~24K) : détente
  - Au passage des particules des bulles se forment: photo
  - 4 m de long, diamètre de 2 m, 1000 tonnes,
    18 tonnes de fréon liquide





reconstruction:3D !
-scanneuses
-programmes

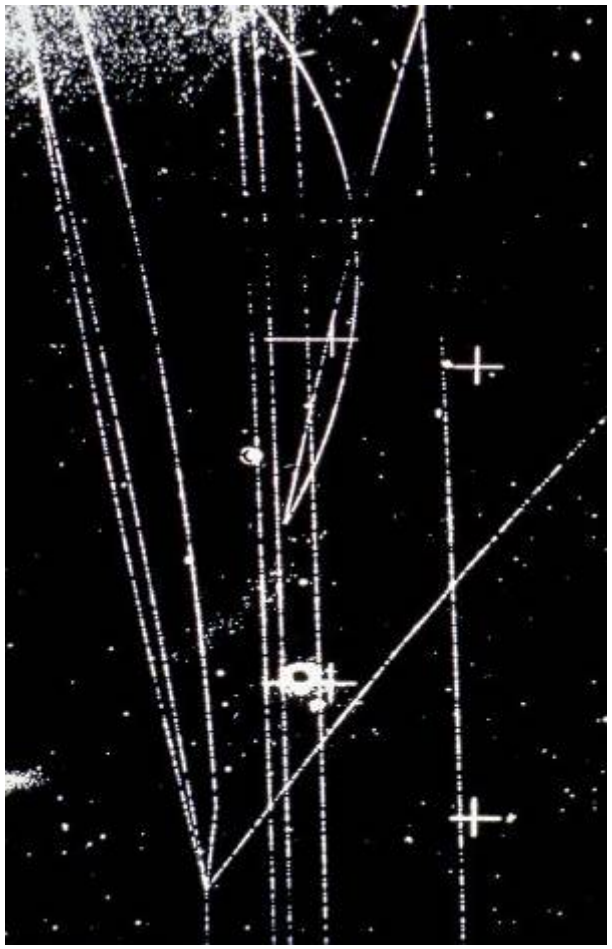




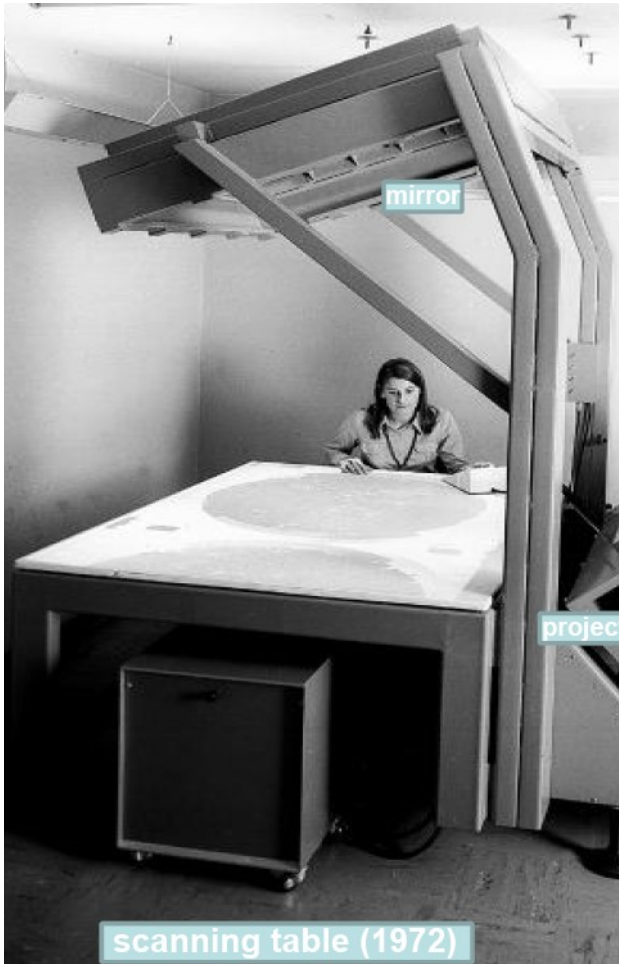
Détecteur de traces : Liquide

Chambre à Bulles

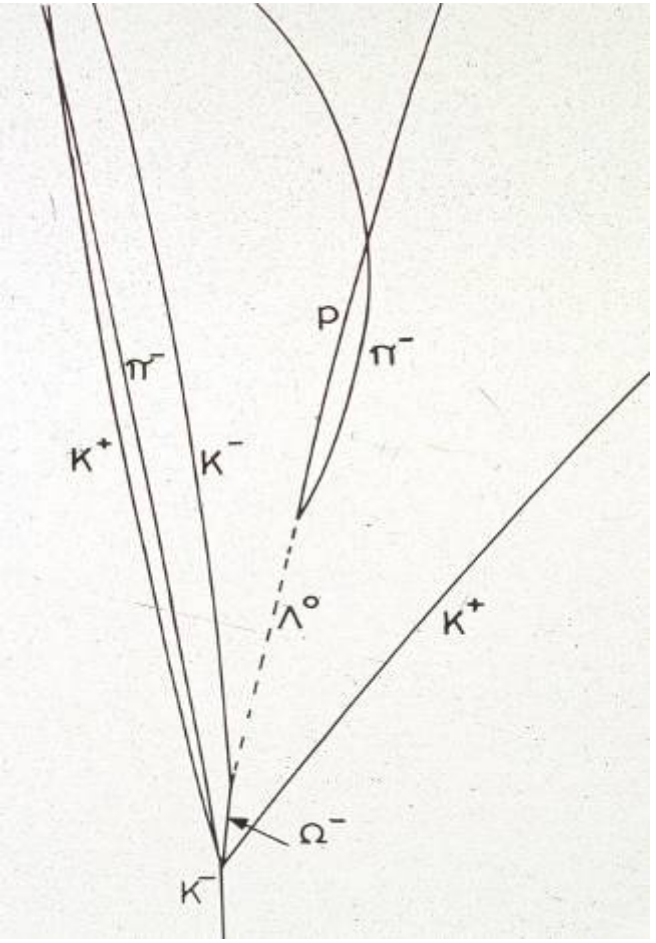
pictures



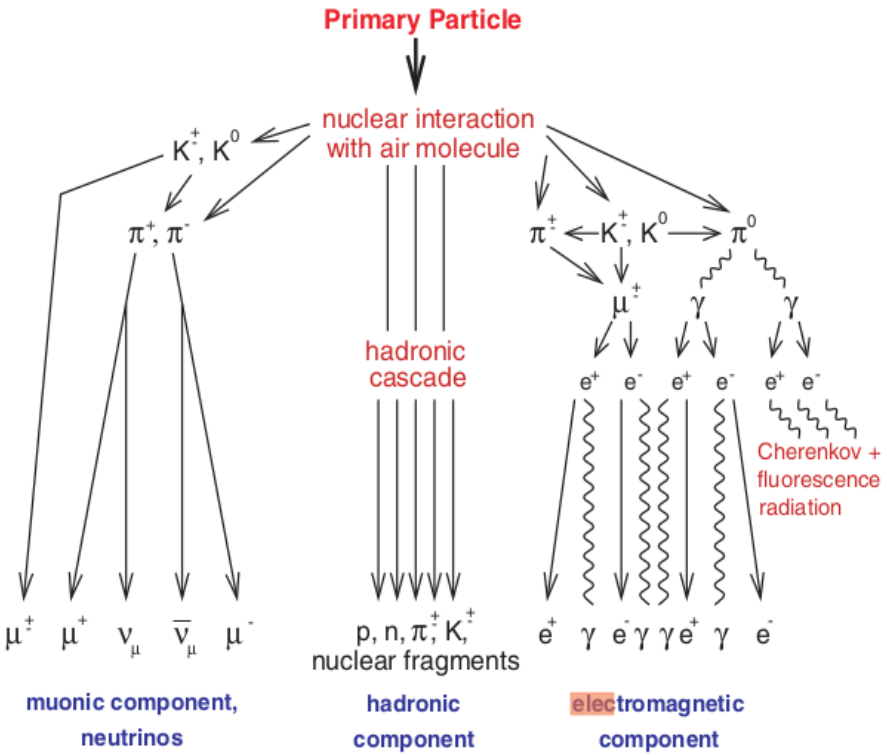
Reconstruction



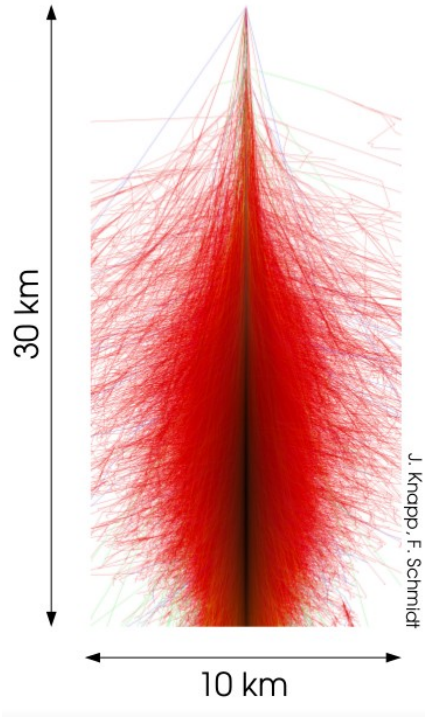
Final plot



Muon discovery



Cosmic rays



Simulation proton 10^{14} eV

Thomas A. Anderson
(matrix 1)

Cloud chamber

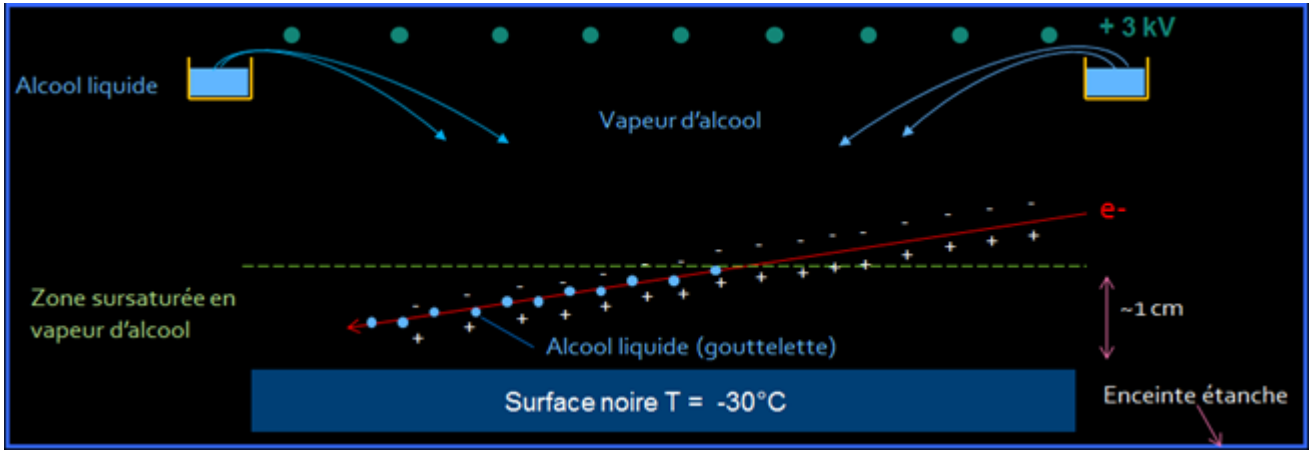
$$p + N \rightarrow X + \begin{cases} \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma & \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu & \sim 100\% \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & \sim 100\% \end{cases}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

(+ k→ π,μ,... +...)

Muon discovery

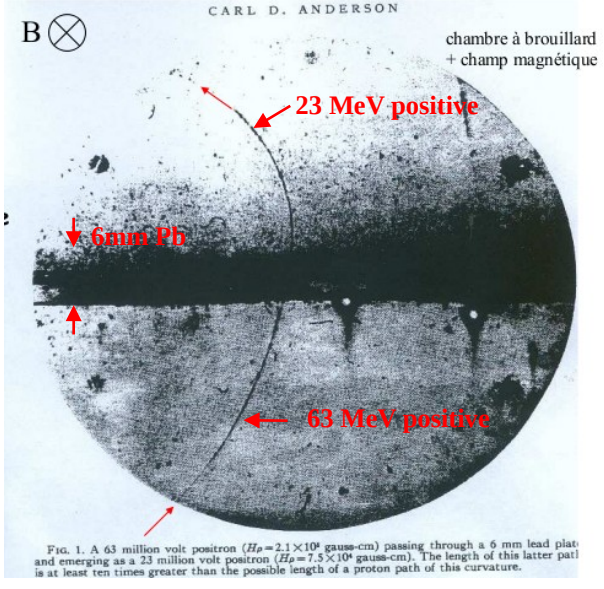
Cosmic rays



Cloud chamber

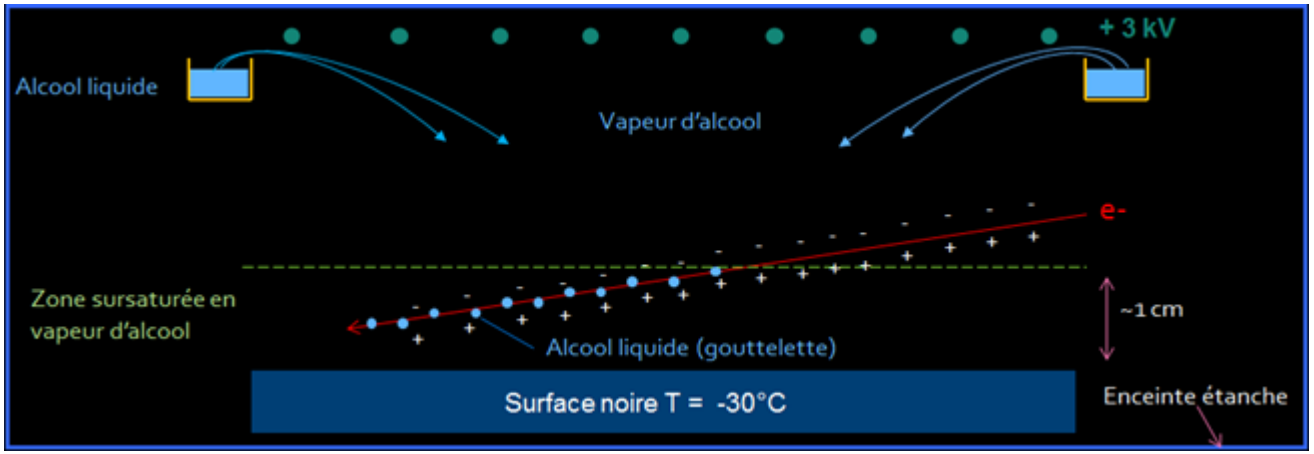
Carl David Anderson
(1905-1991)

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



Muon discovery

Cosmic rays

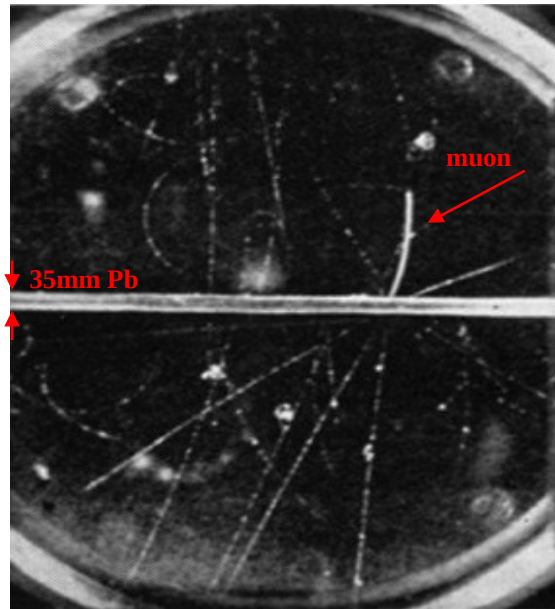


Cloud chamber

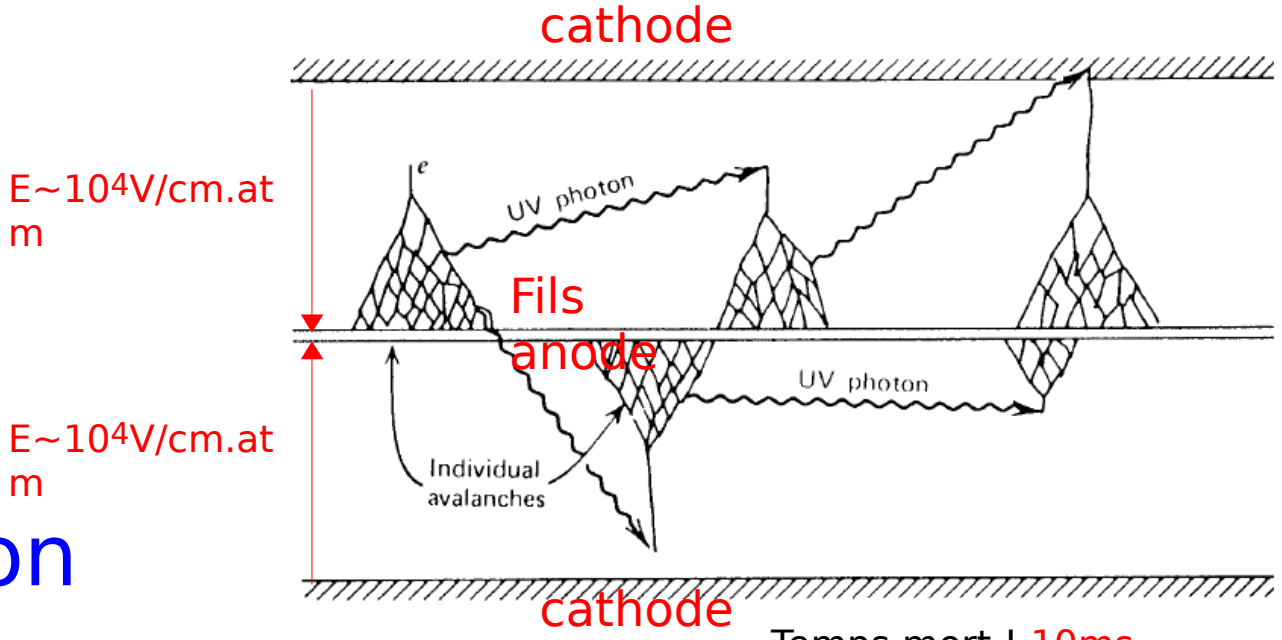
Carl David Anderson
(1905-1991)

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



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

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

Detectors(Gaseous)

Muon

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

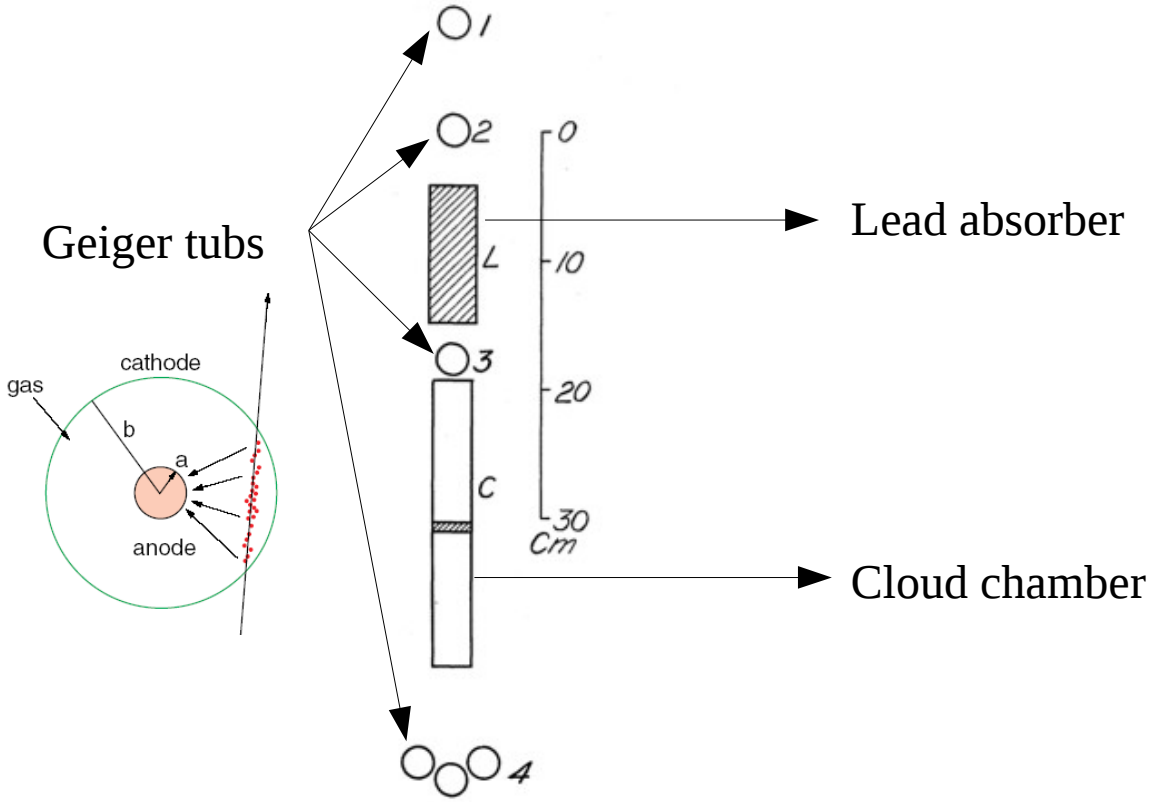
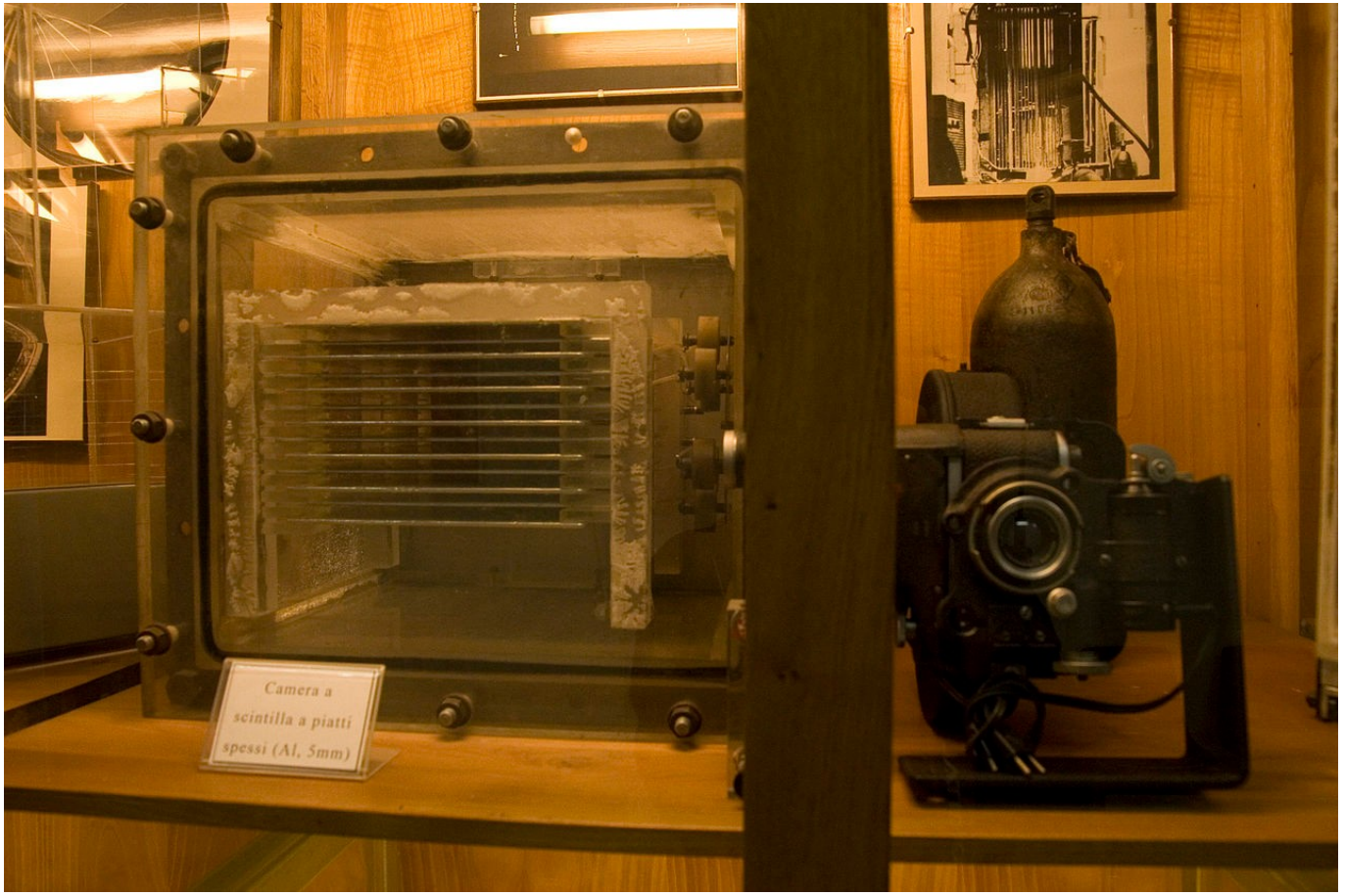


FIG. 1. Geometrical arrangement of apparatus.

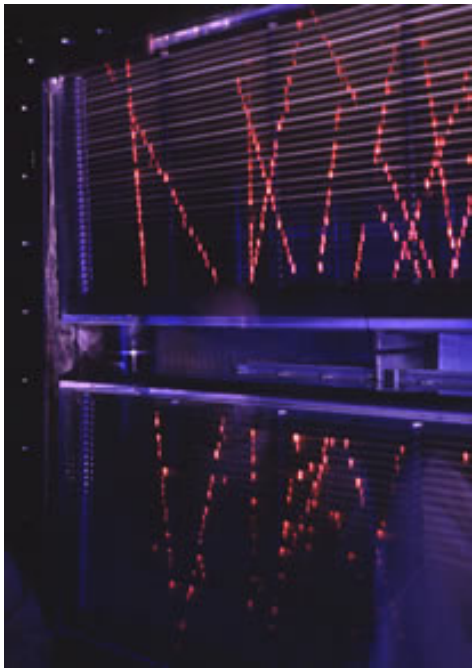
Detectors(Gaseous) (parenthèse!)

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.



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

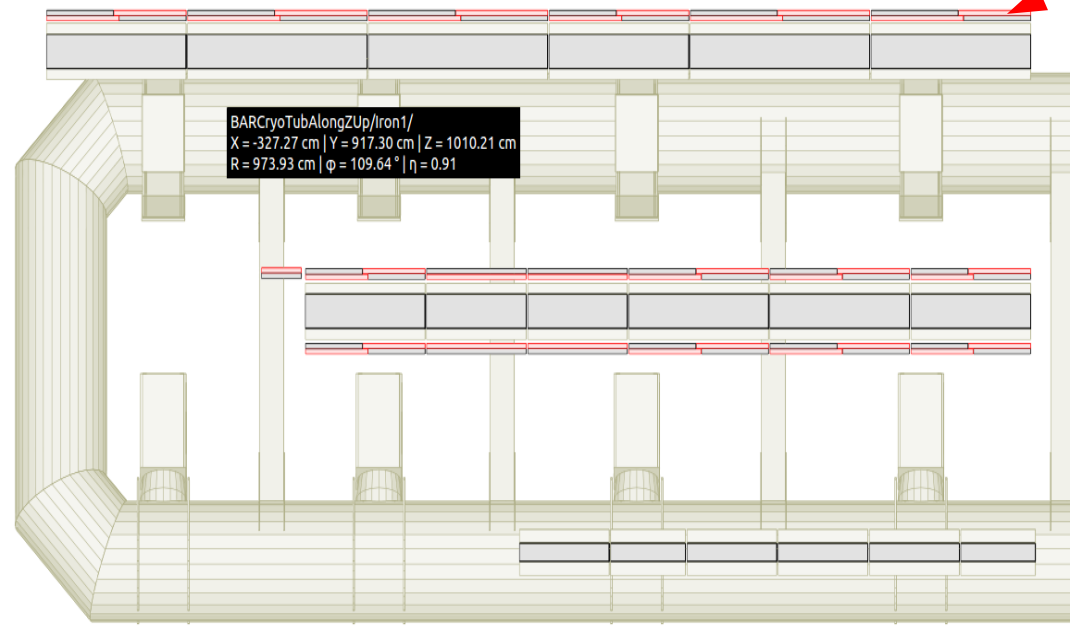


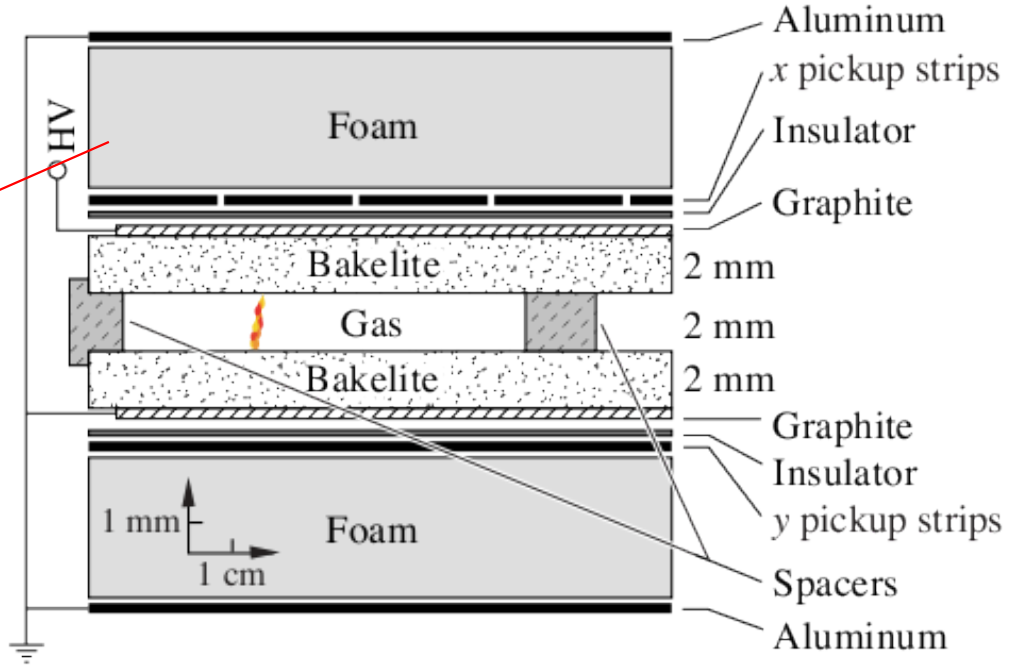
Remark:
HV applied 0,1 s à 1 µs
to avoid saturation

Detectors(Gaseous) (parenthèse!)

RPC: Resistive Plate Chamber

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





Persint

RPC: Resistive Plate Chamber

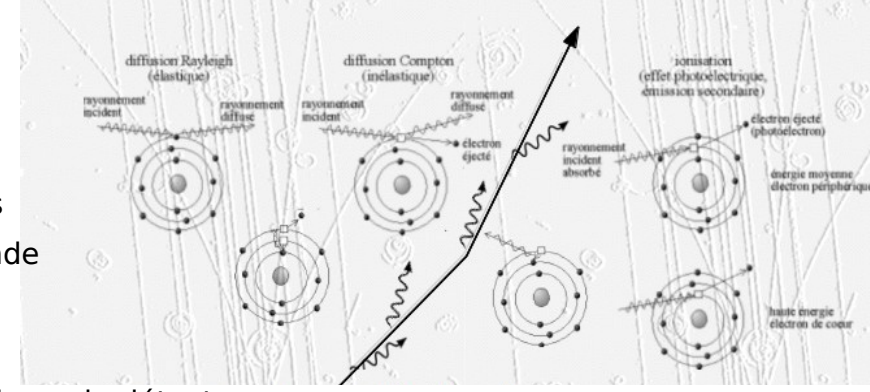
- ATLAS Muons spectrometer Trigger
- RPCs are robust detectors (no wire)
- The signal formation happens in the conversion gap as soon as the ionization electrons amplify and the avalanche develops. The signal is induced instantly on the readout strips placed on the outside of the resistive plates. RPCs 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 ≈1010 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.

CMS

- RPCs are considered safe up to rates of about a few kHZ/cm2

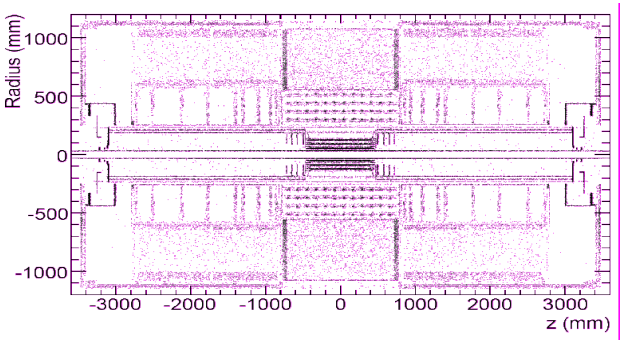
Mécanisme physique de détection

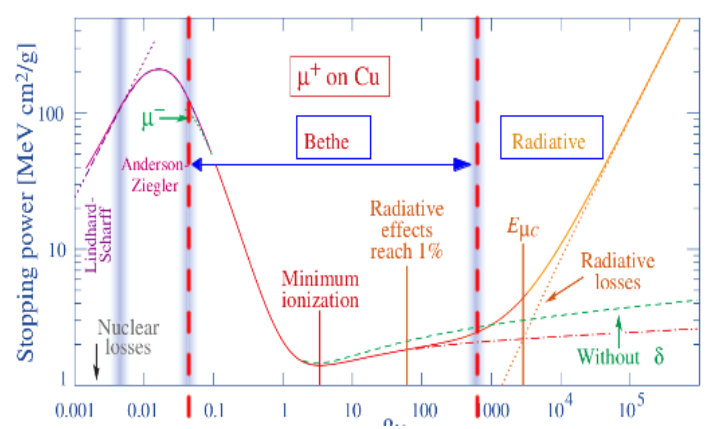
- Ionisation (dE/dx) — vitesse de la particule
- Bremsstrahlung — Soleil ! (à Saclay pas dans le ciel)
- Effet Čerenkov — bleu dans les centrales nucléaires
- Rayonnement de Transition — Séparation électron/reste du monde



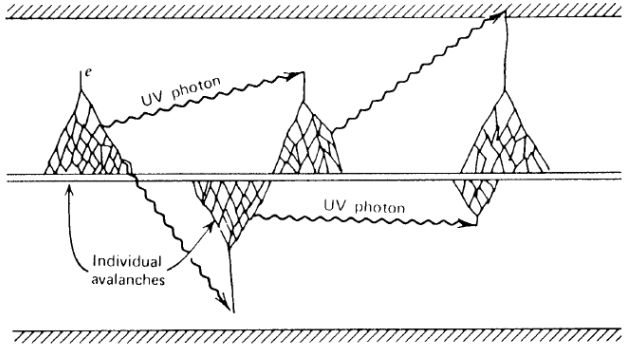
Effets perturbant la mesure

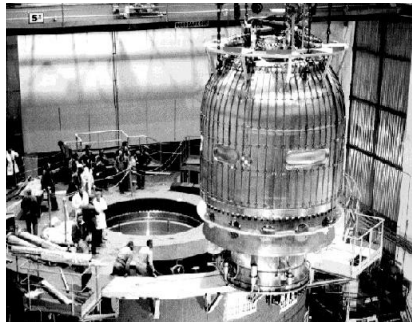
- Fluctuations de Landau — identification des particules
- Création de paires (e+/e-) — perturbe la mesure et « radiographies » du détecteur
- Diffusion multiple — perturbe la mesure

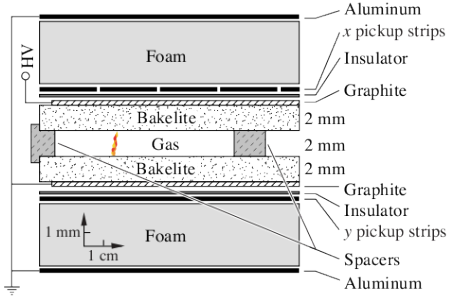


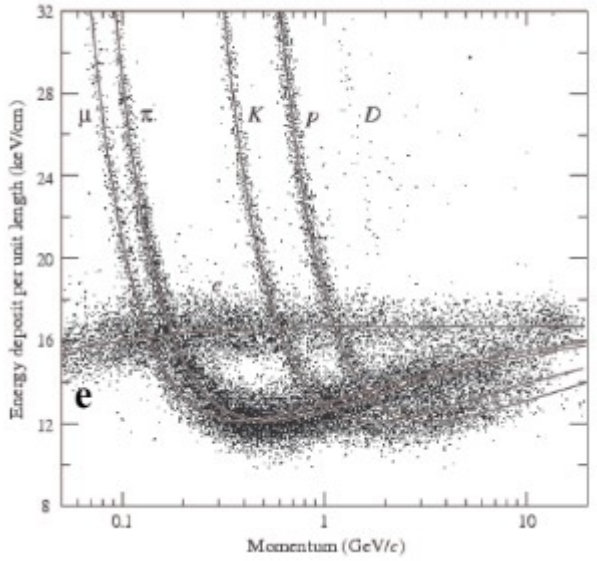


Détecteur



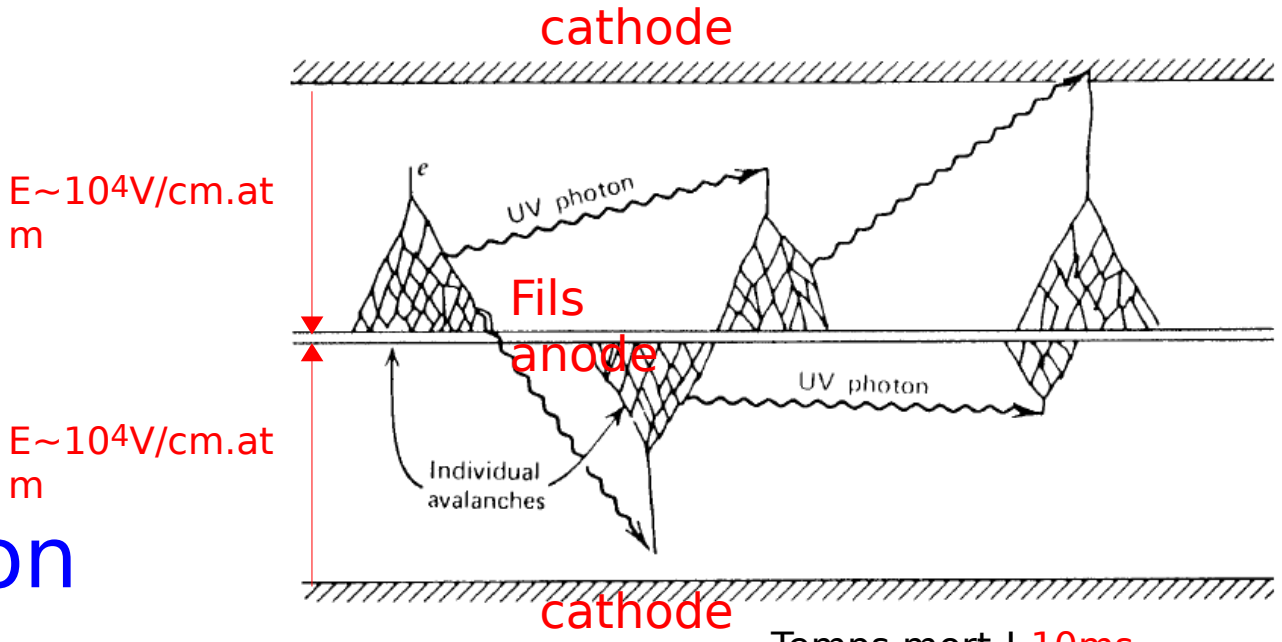






Identification des particules

Détecteur de traces : Gaz

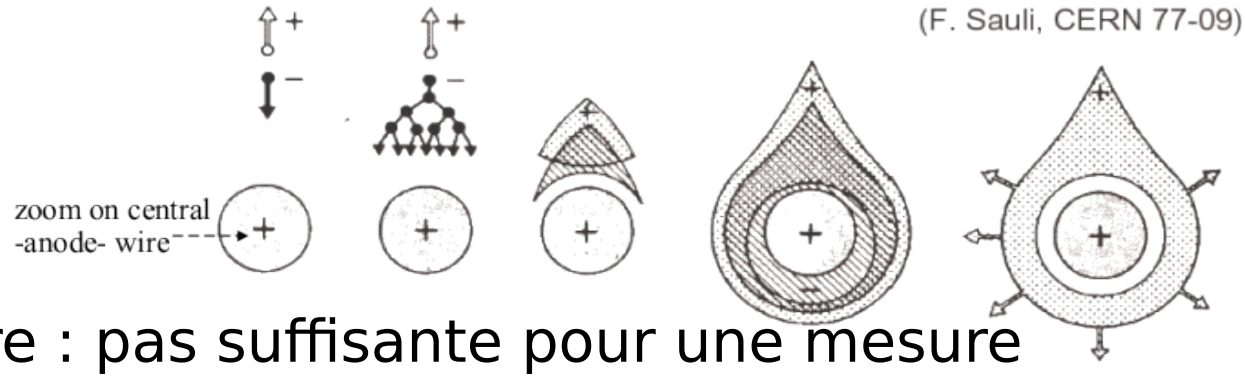


Temps mort ! 10ms,
Aucun signal ne peut être détecté pendant ce temps

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

Détecteur de traces : Gaz



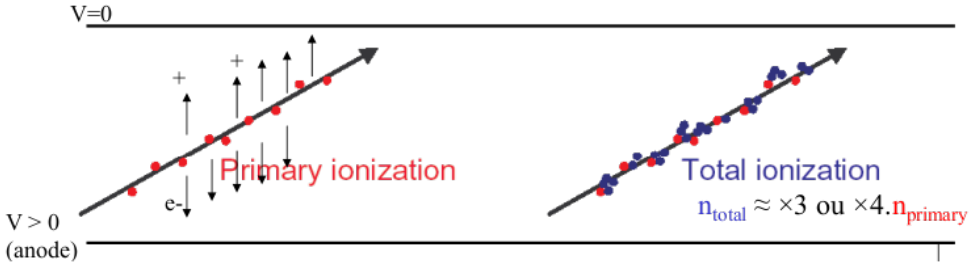
(F. Sauli, CERN 77-09)

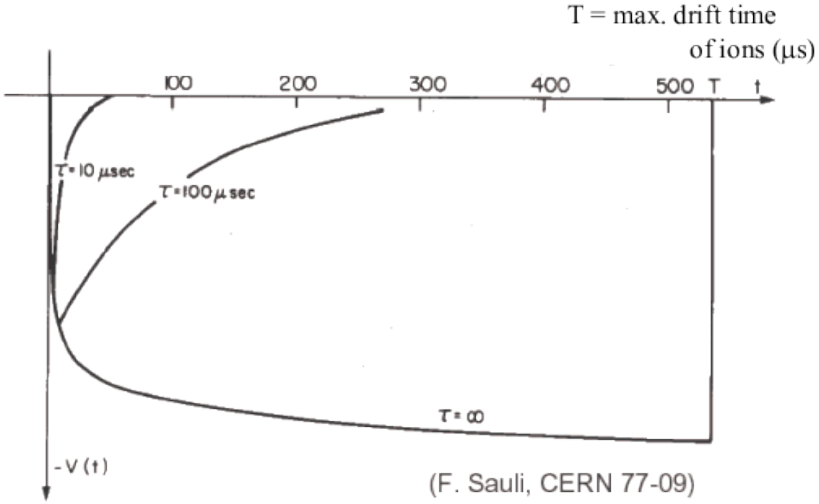
Ionisation

- 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



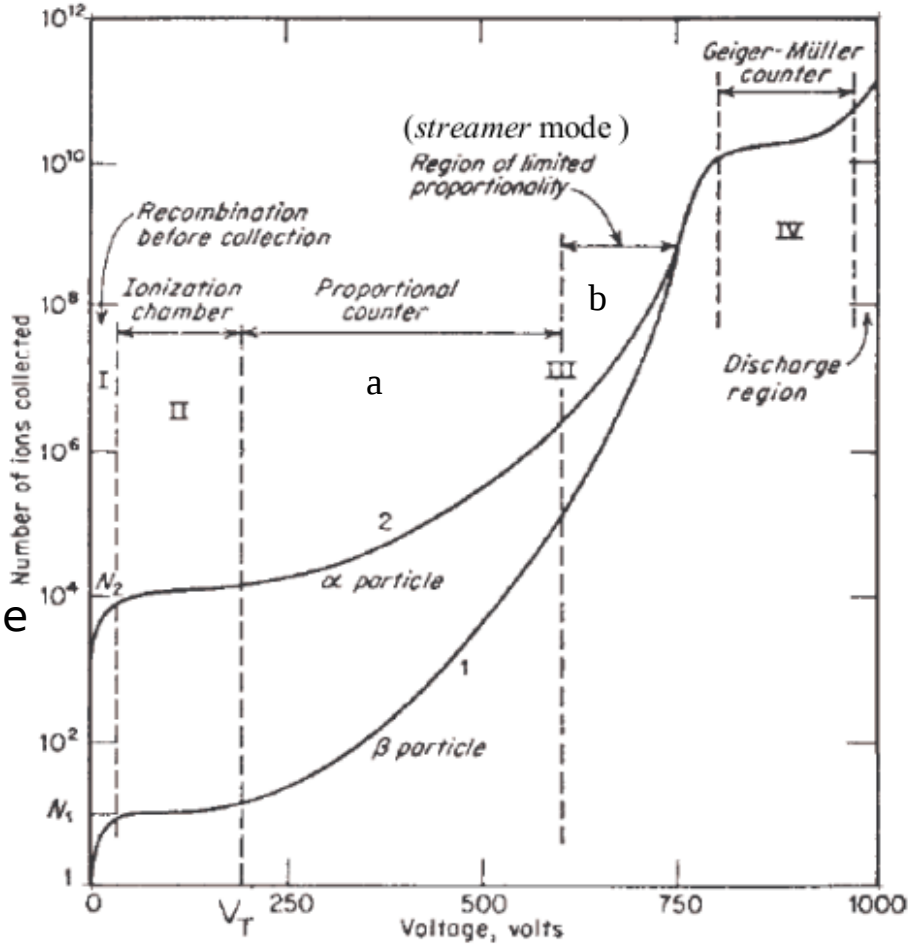


(F. Sauli, CERN 77-09)

Détecteur de traces : Gaz

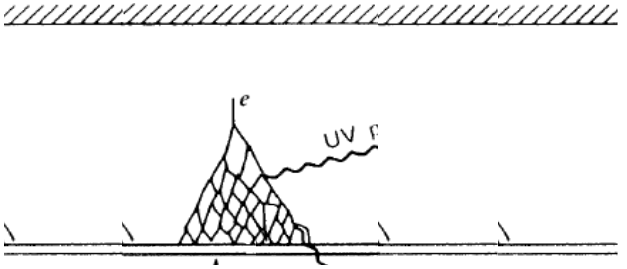
Gain vs Champ Électrique

- 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 → gain 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 → qain ~10^{10}.
- IV: mode Geiger-Müller . Avalanche dans l'ensemble du détecteur.



Remarque : Pas de champ Électrique, pas d'accélération des e- => recombinaison

Détecteur de traces : Gaz

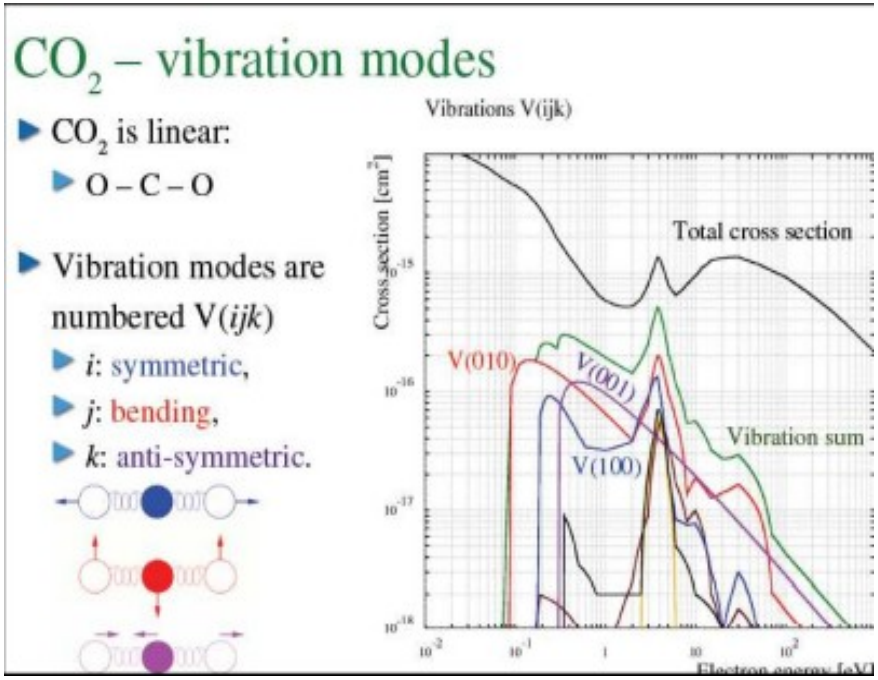


Précision spatiale

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

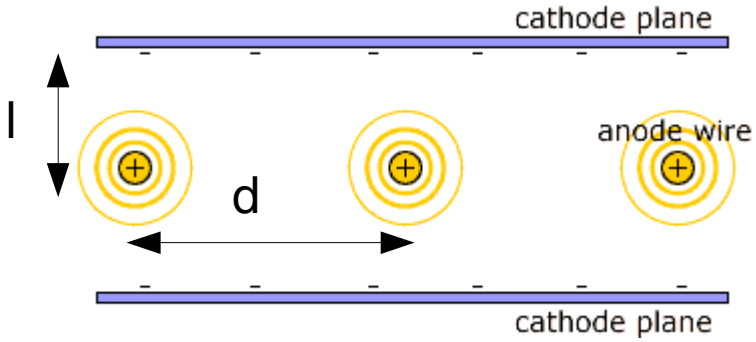
Gaz « quencher »

- Gaz Polyatomique (les photons sont absorbés et leur énergie est dispersée par des modes par vibration ou par rotation de la molécule)
  - exemple: méthane CH4, isobutane C4H10, éthanol, CO2
- Pas de solution miracle:
  - Calcul complexe...
  - Doit être testé :
    - F.Sauli, 1977 cern yellow report
- ex : 70% Ar, isobutane 29.6%, Fréon 0.4%



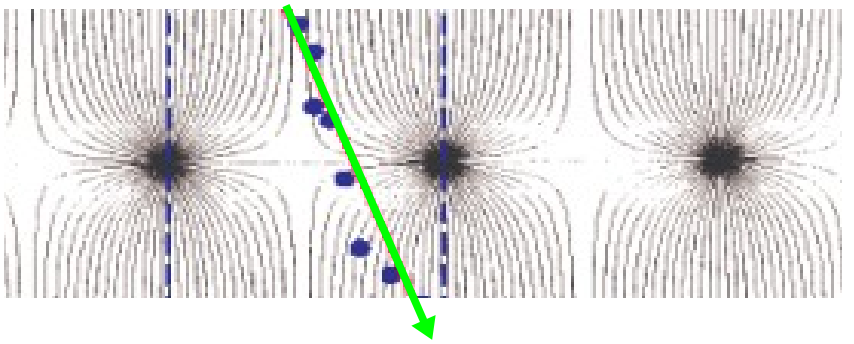
R.Veenhof (Garfield) http://cern.ch/garfieldpp

Détecteur de traces : Gaz



Chambres à fils (MWPC*)

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



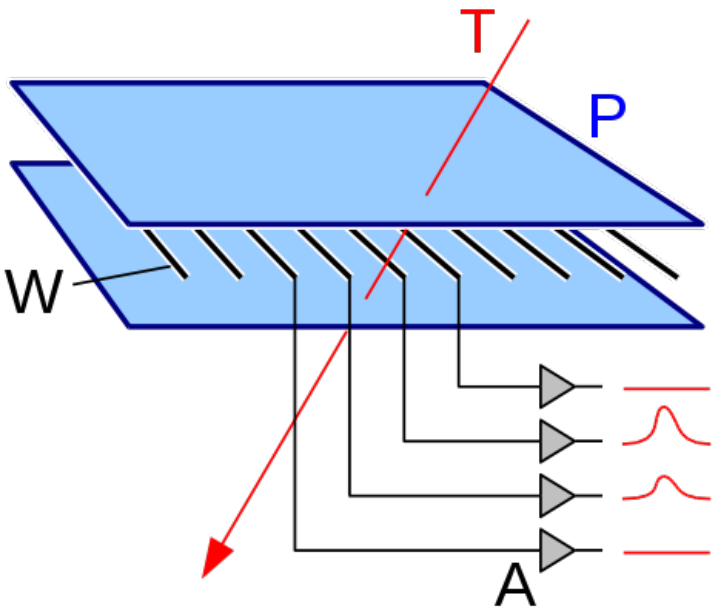
*Multi Wires Proportionnel Chamber

Detectors(Gaseous)

Wires Chamber

- Large area (and volume) tracking detectors
- Accuracy is function of the wire distance, ~1 to 2 mm

  Spatial resolution = d/√12 (for d=1 mm, σ~300 μm)
- Wires measure only one coordinate!!!

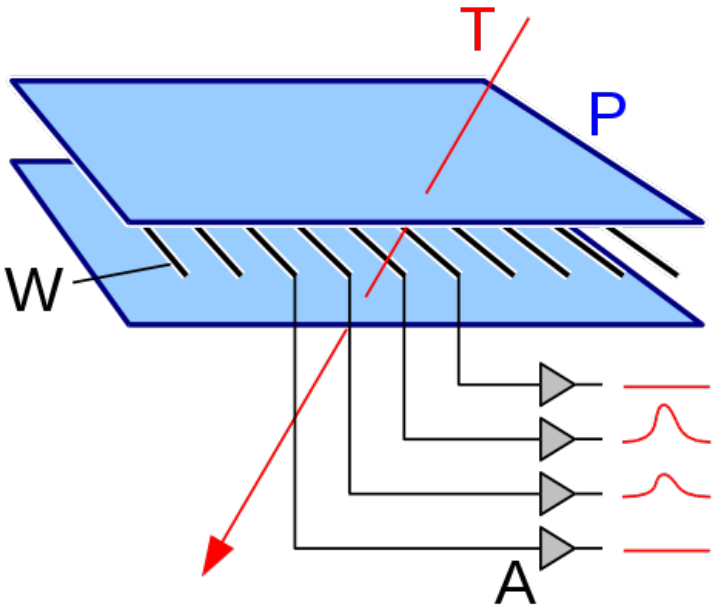


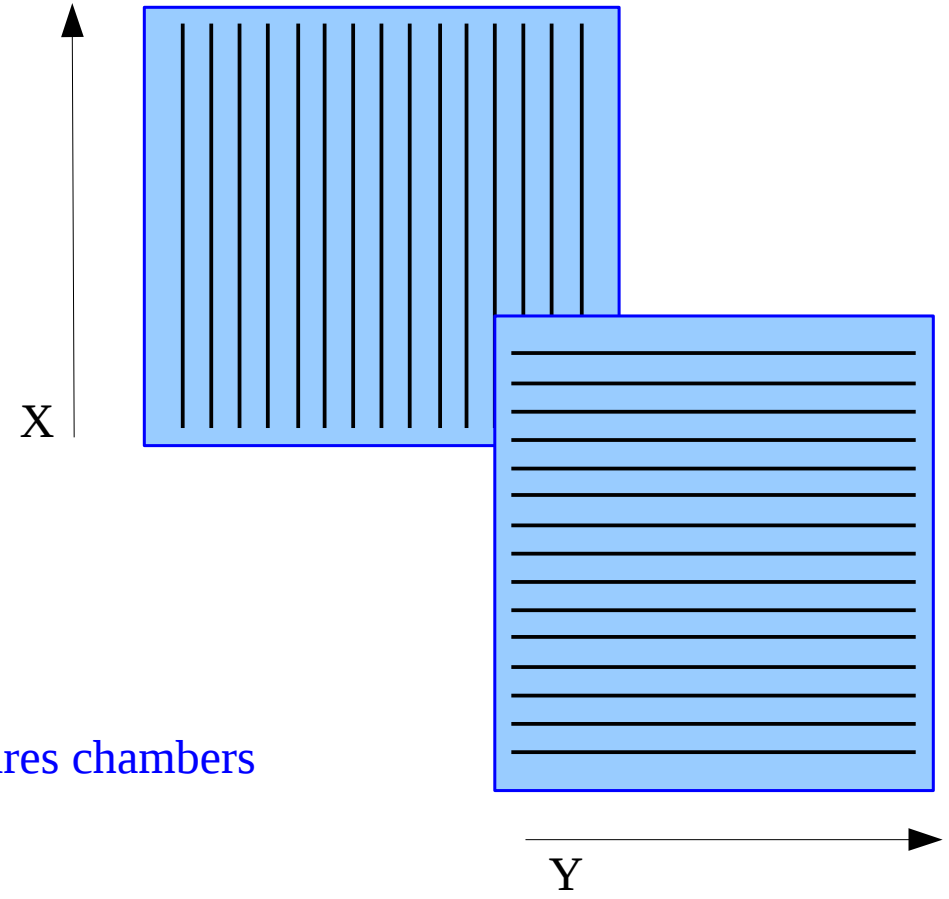
Detectors(Gaseous)

Wires Chamber

- Large area (and volume) tracking detectors
- Accuracy is function of the wire distance, ~1 to 2 mm

  Spatial resolution = d/√12 (for d=1 mm, σ~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 < 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

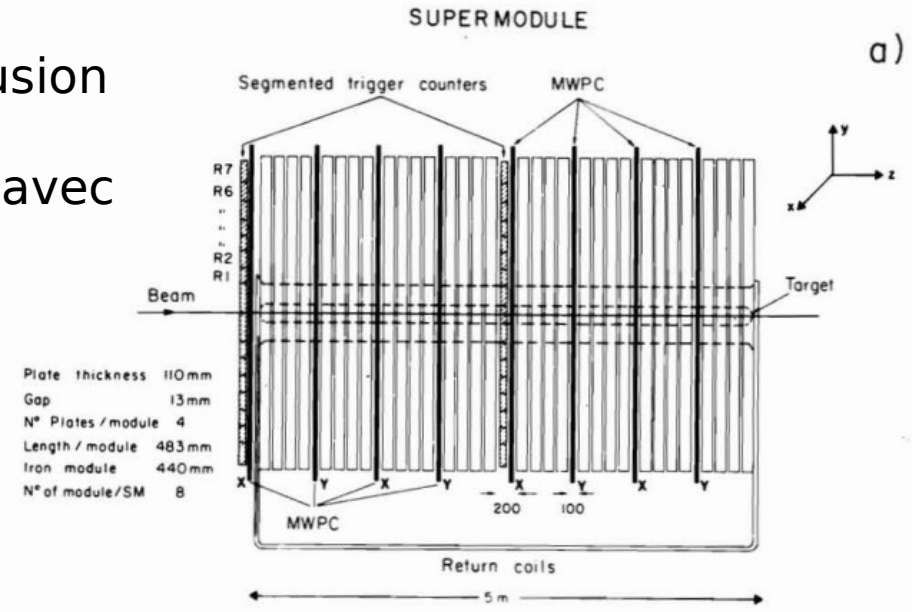


Fig. 5a. Detail of a Supermodule.

Détecteur de traces : Gaz Chambres à fils

X

Y

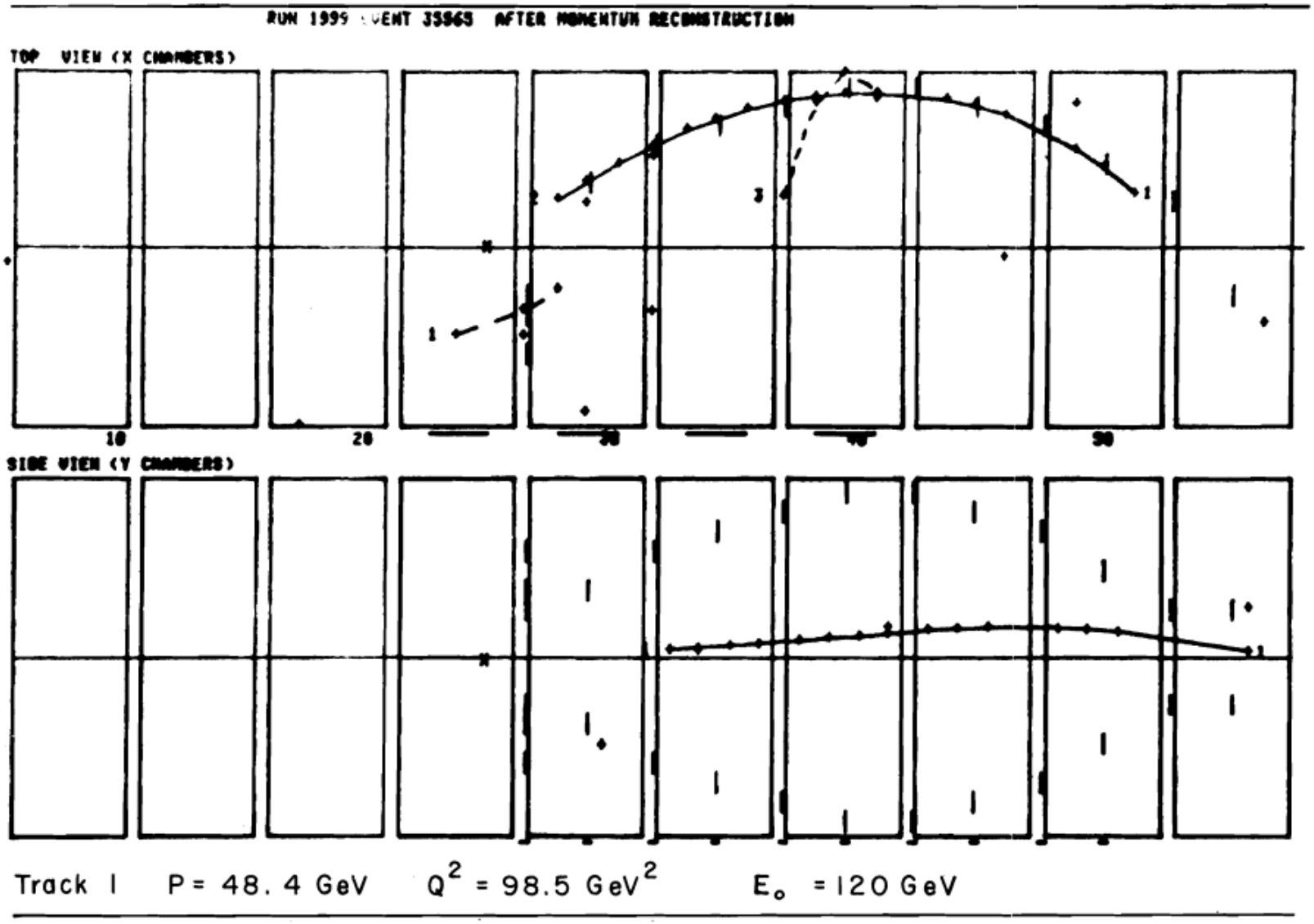
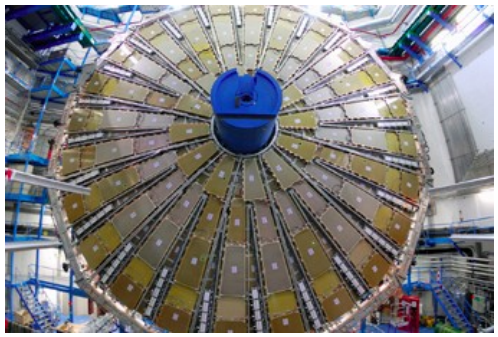


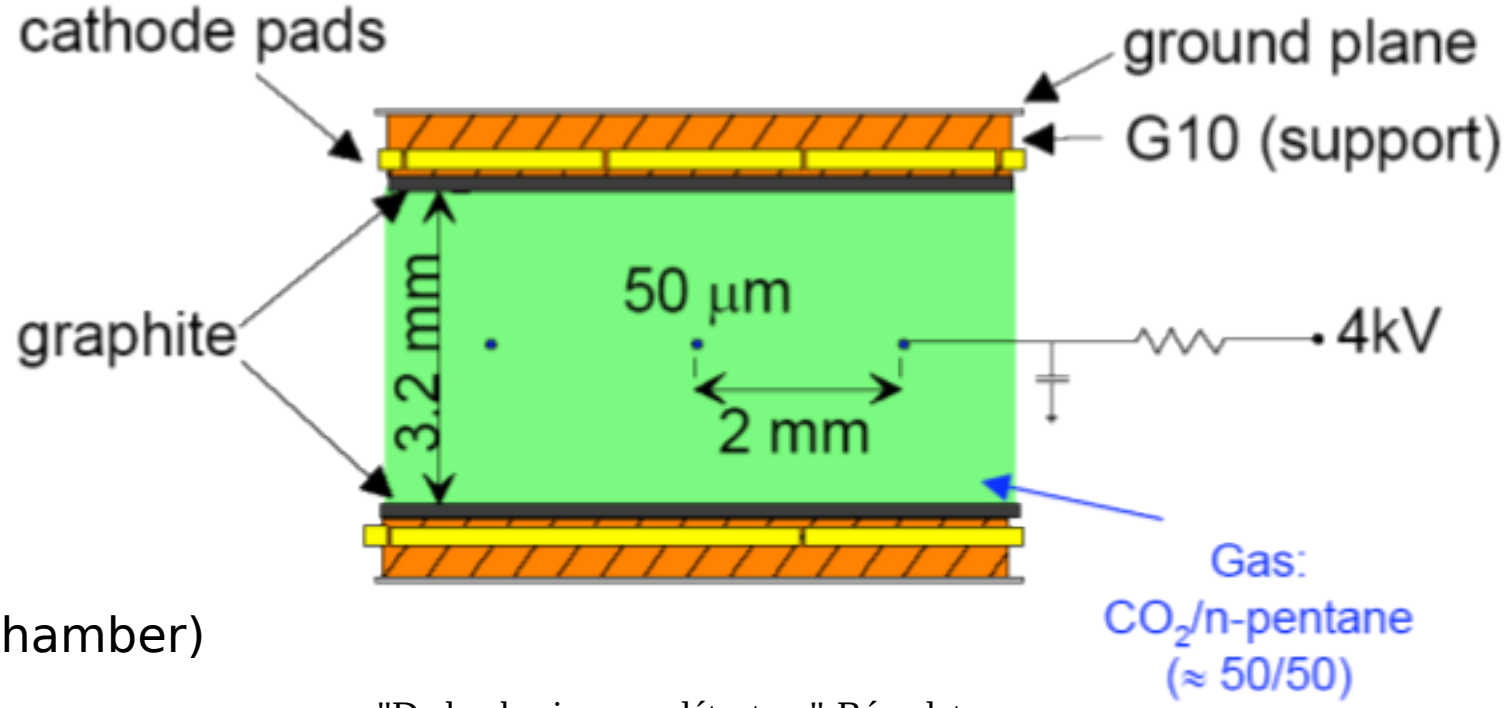
Fig. 14. Example of a deep inelastic muon scattering event at 120 GeV in the NA4 apparatus.

Détecteur de traces : Gaz



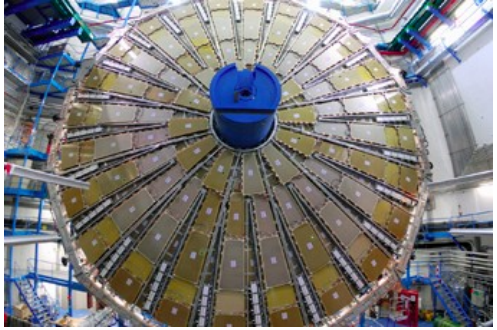
Chambres à fils

- Atlas : TGC*
  - Opération en mode saturé (Geiger)
  - Temps de montée très bref (2 ns) : Déclenchement (« trigge
  - Accepte des taux de comptage élevés (jusqu'à ~10^3 Hz)



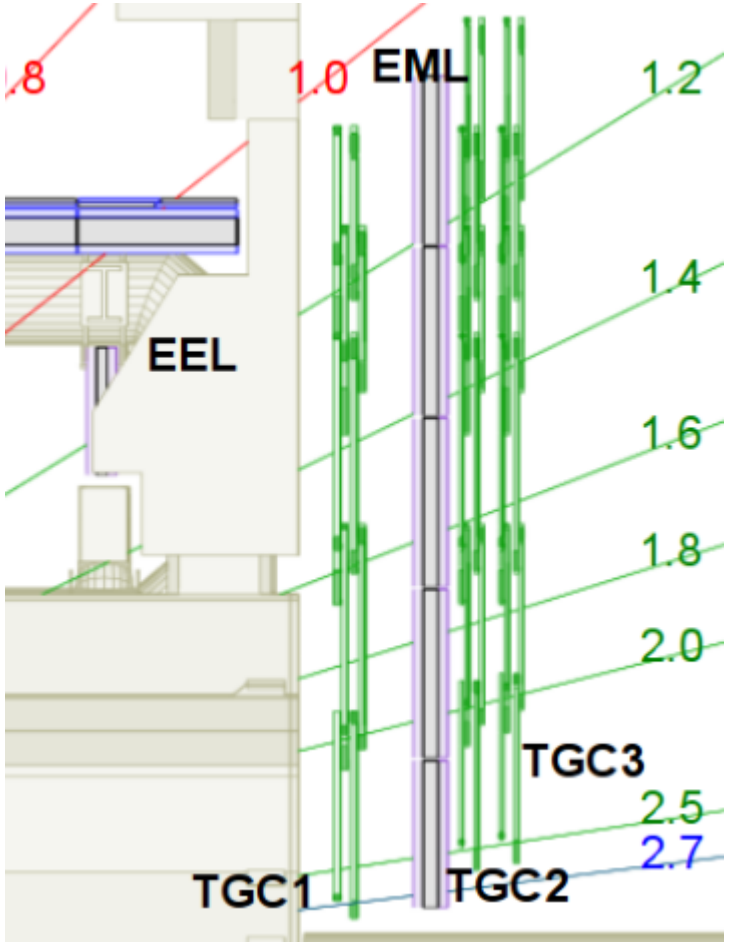
*(Thin Gaz Chamber)

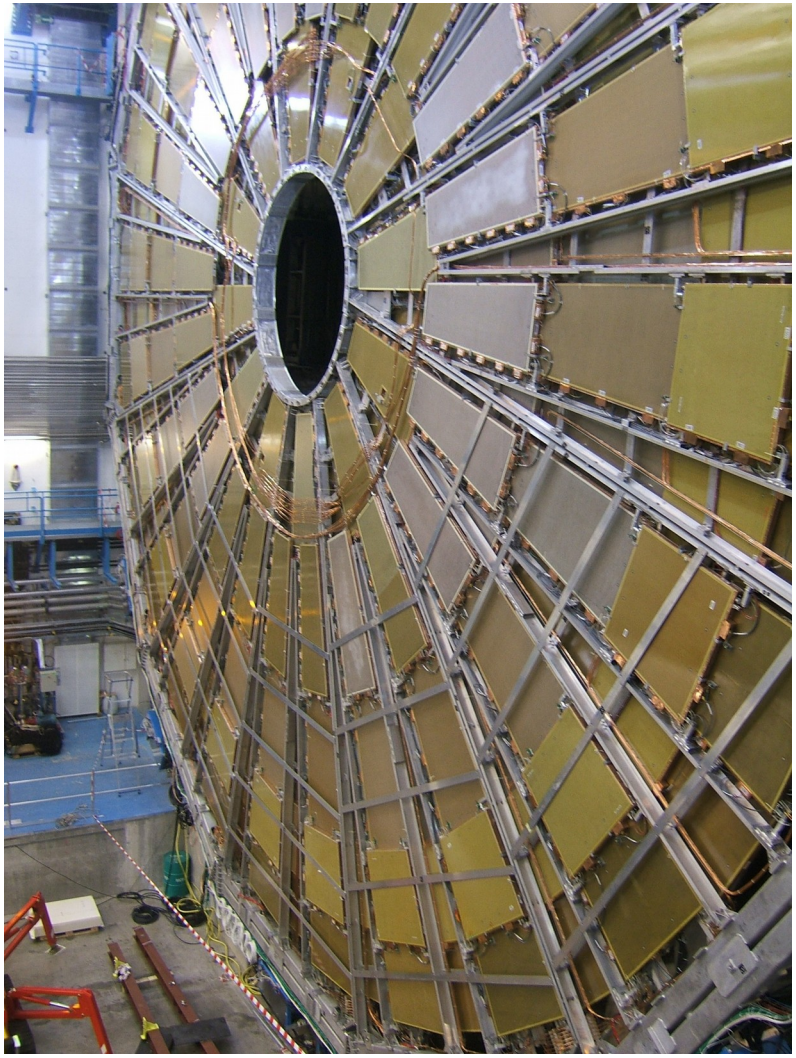
Détecteur de traces : Gaz



Chambres à fils

- Atlas : TGC

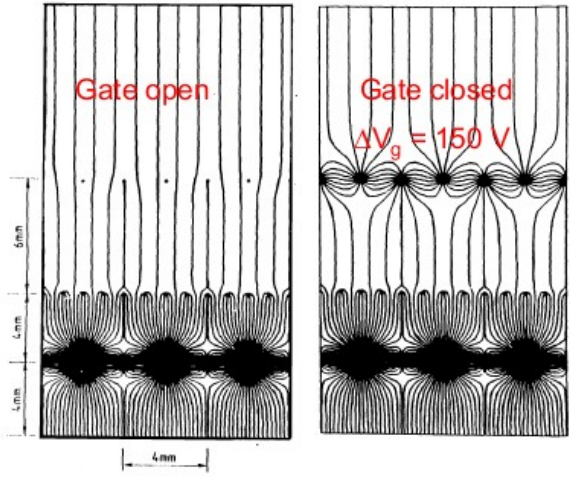




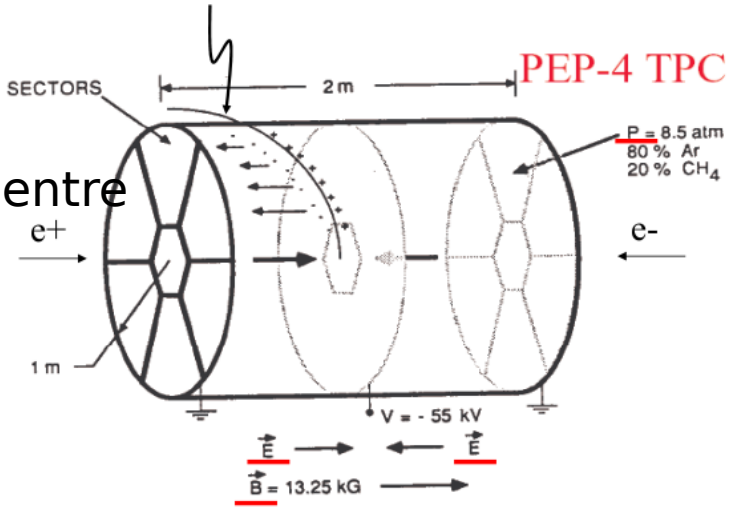
Détecteur de traces : Gaz

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
  - 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 ! ~7cm/μs
- Résolution spatiale en Z(direction des lignes de champs E & B) ~mm/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



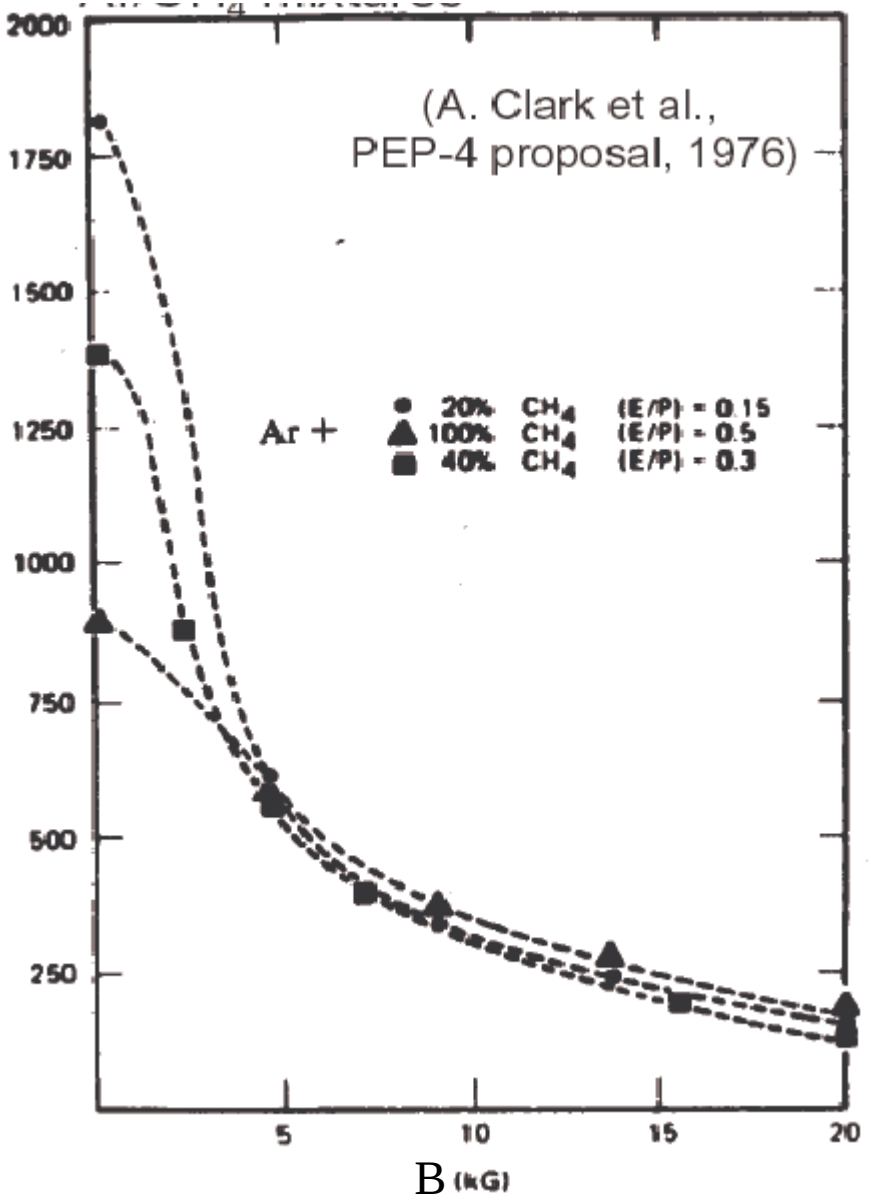
Pour empêcher les ions de perturber la TPC :
« porte » (150V) fermée entre 2 collisions



Détecteur de traces : Gaz

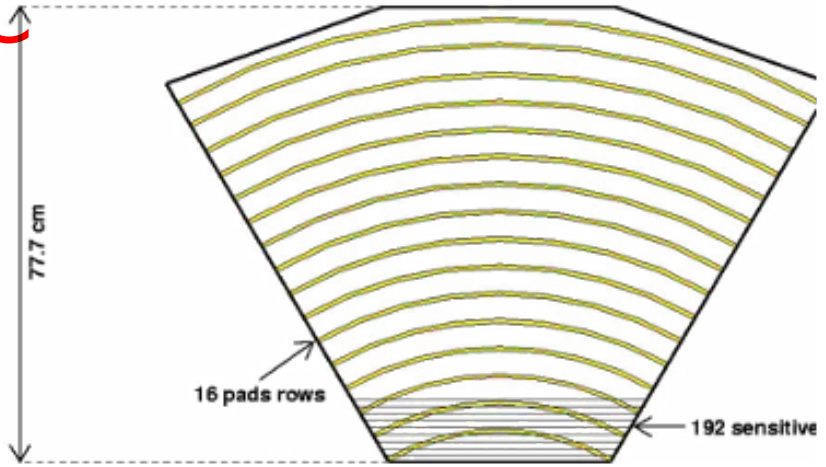
TPC

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

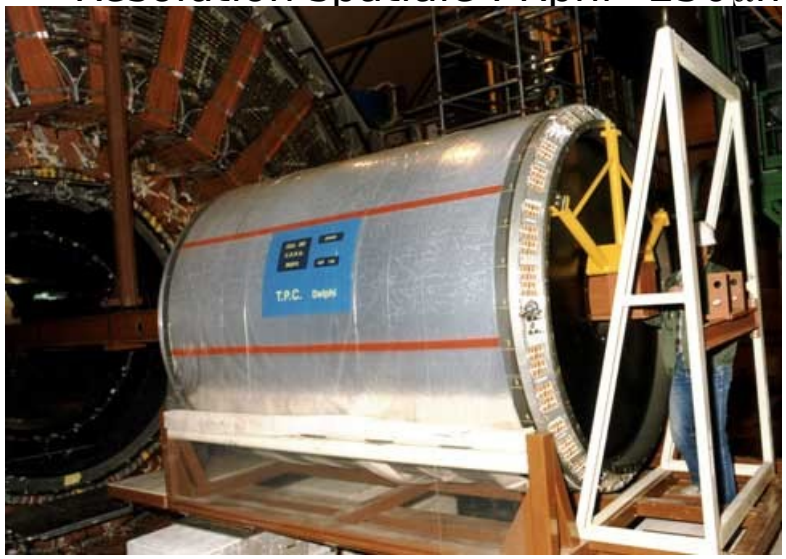


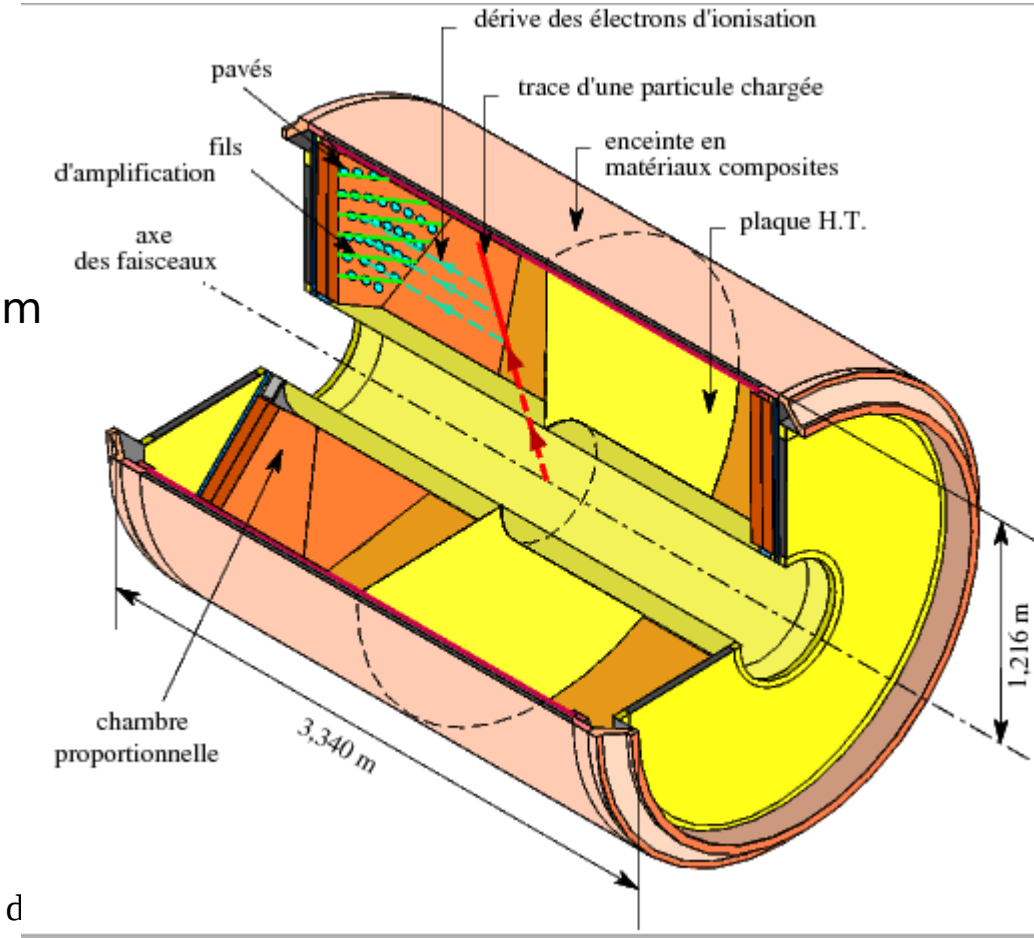
4.Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, LEP 1992



- Évolution proche, meilleure résolution spatiale
- B=1.2T,E= 150V/cm, Ar(80%)-Ch4(20%) & P=1atm
- 27 électrons primaires & secondaires /cm
- 6.7 cm/μs, diffusion transverse ~100 μm/sqrt(cm)
- 2x 6 secteurs, 192 fils, 16 Pad (cathode segmentée en arc de cercle)
- 16 points tridimensionnels
- 2 x 1.34 m, 0.325m < R < 1.16m
- Résolution spatiale : Rphi~250μm,Z~1mm





4.Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi vs Pep4

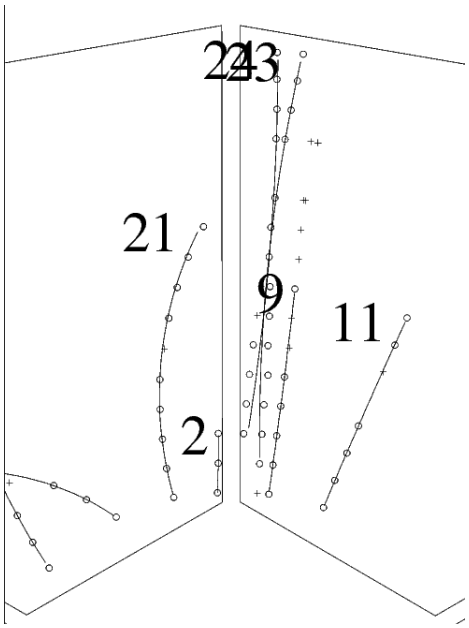
- Pas de différence conceptuelle
- Seul paramètre diffèrent: Pression
  - 1 atm Delphi vs 8.5 atm Pep4
  - l'augmentation de pression a deux effets positifs:
    - plus d'ionisation
    - meilleure mesure de dE/dx
  - mais il y a deux contreparties négatives:
    - -la séparation en dE/dx n'est qu'à peine améliorée parce que les
      courbes se rapprochent
    - Il faut épaissir les parois pour résister à la pression, sans augmenter
      le nombre de X0: impossible. Donc on ajoute de nombreuses conversions
      de photons et on perd de la précision sur les traces.

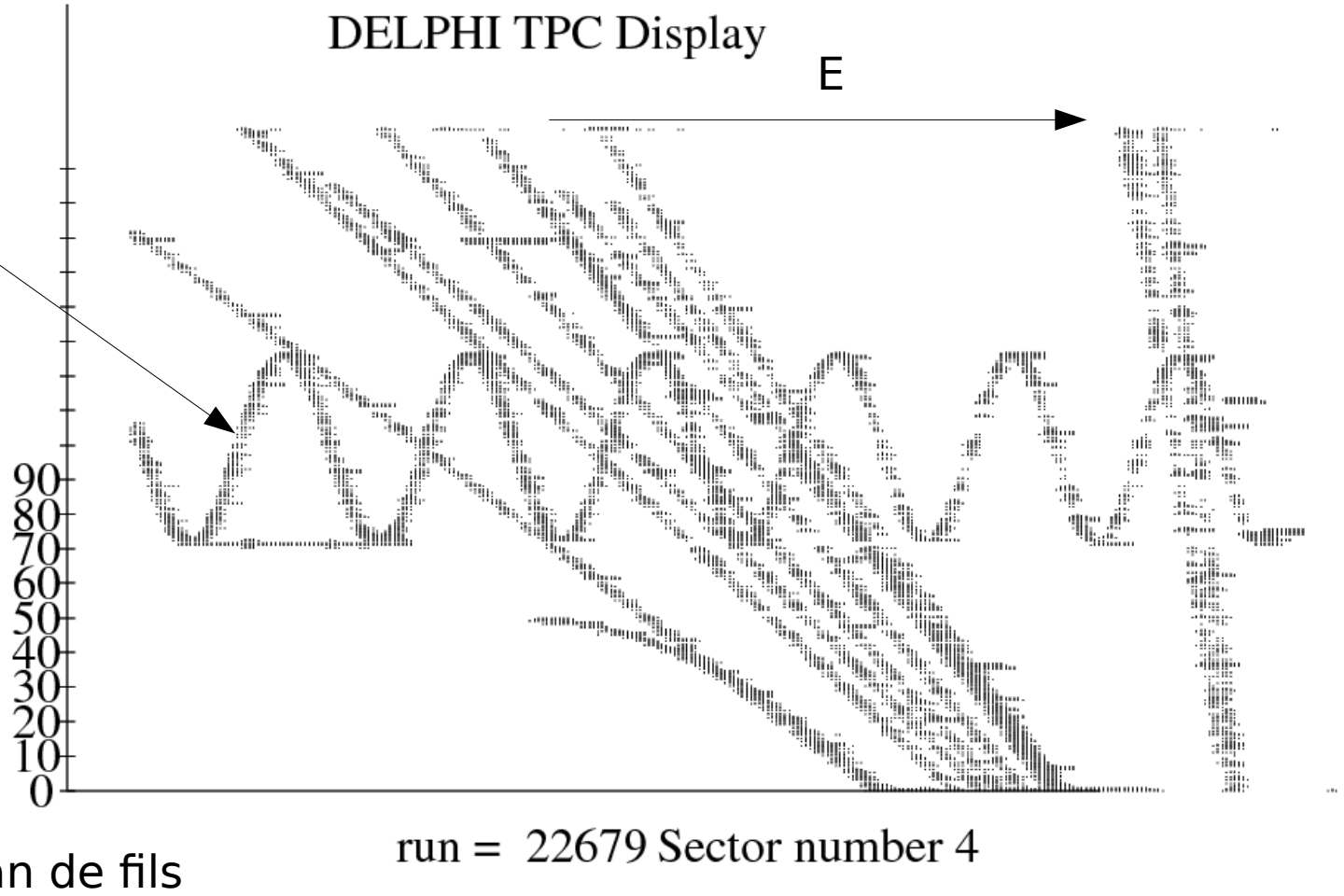
4.Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, Exemple d'événement

- Temps de croisement des faisceaux 22 μs

Électron sous l'effet
du champ magnétique

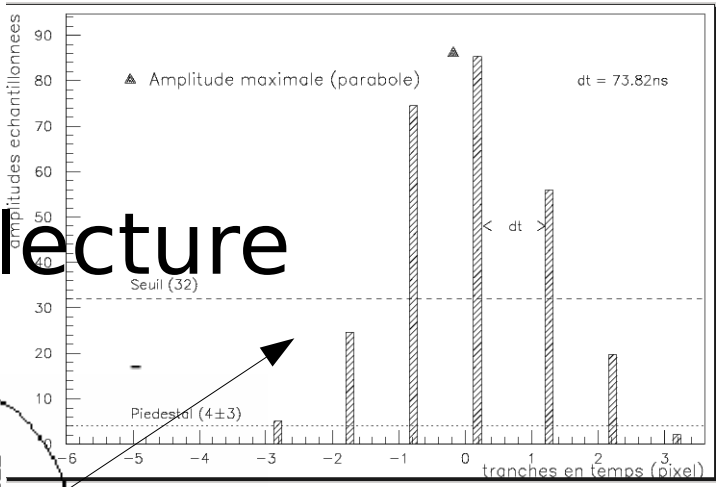


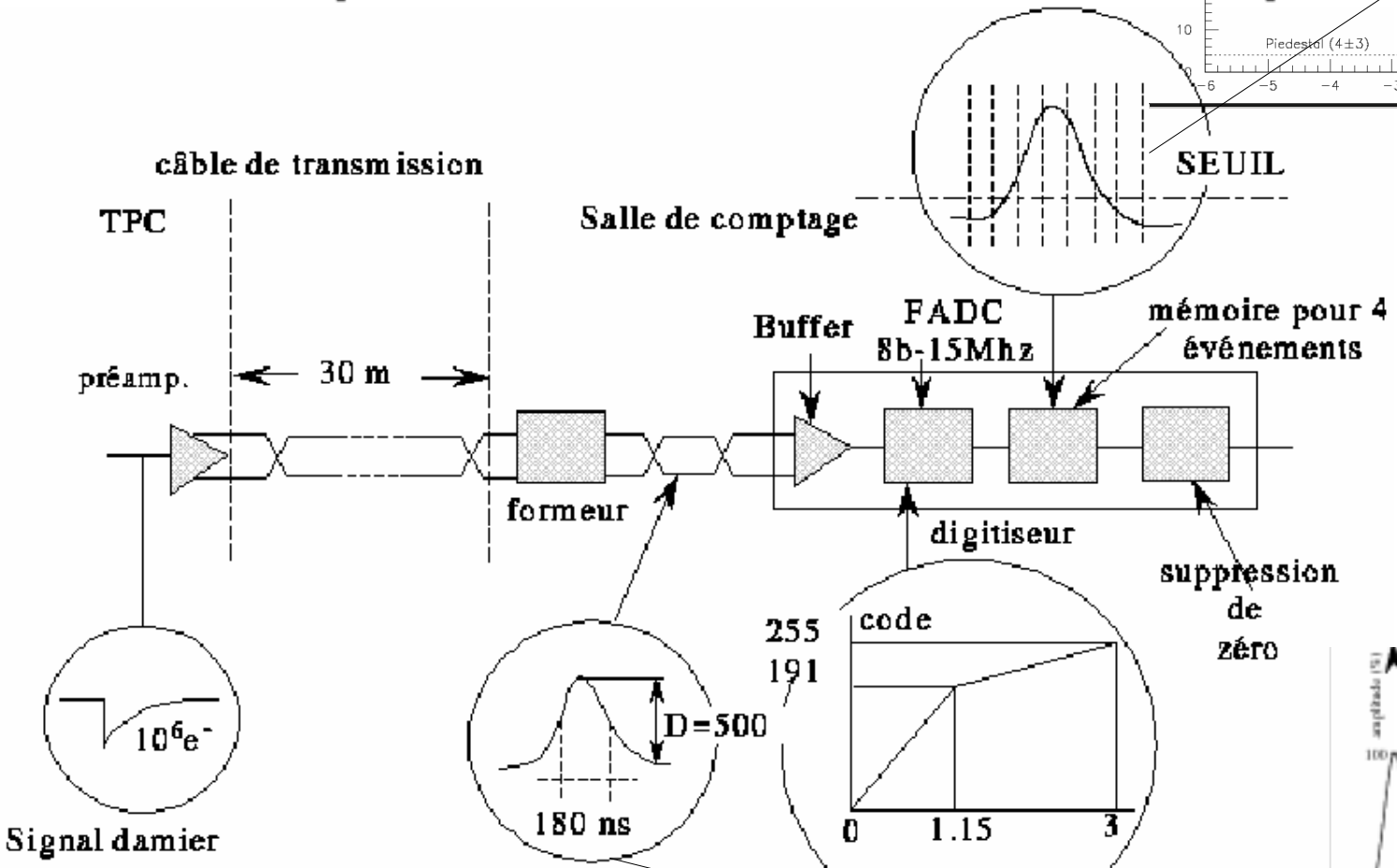


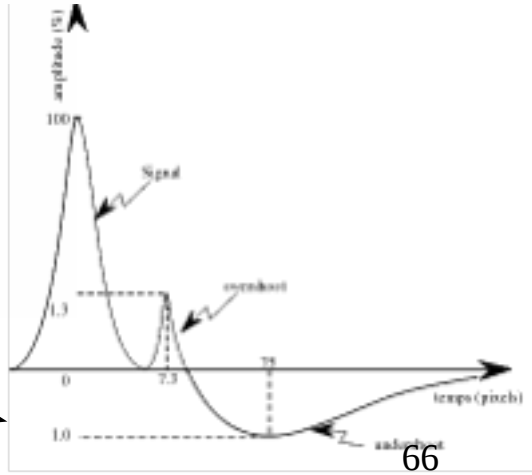
Plan de fils

4.Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, électronique de lecture



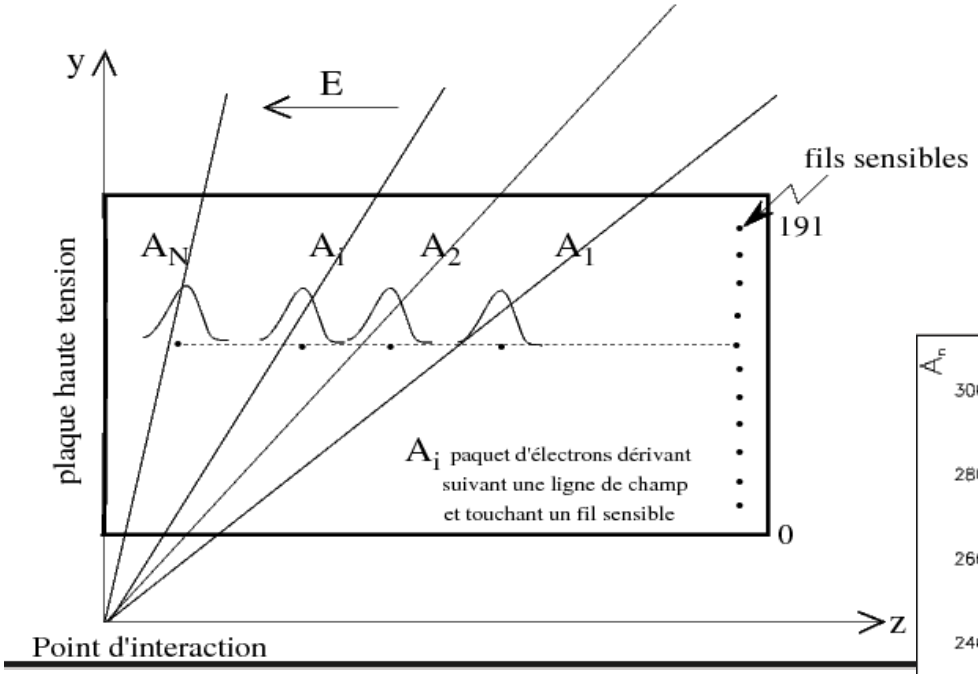


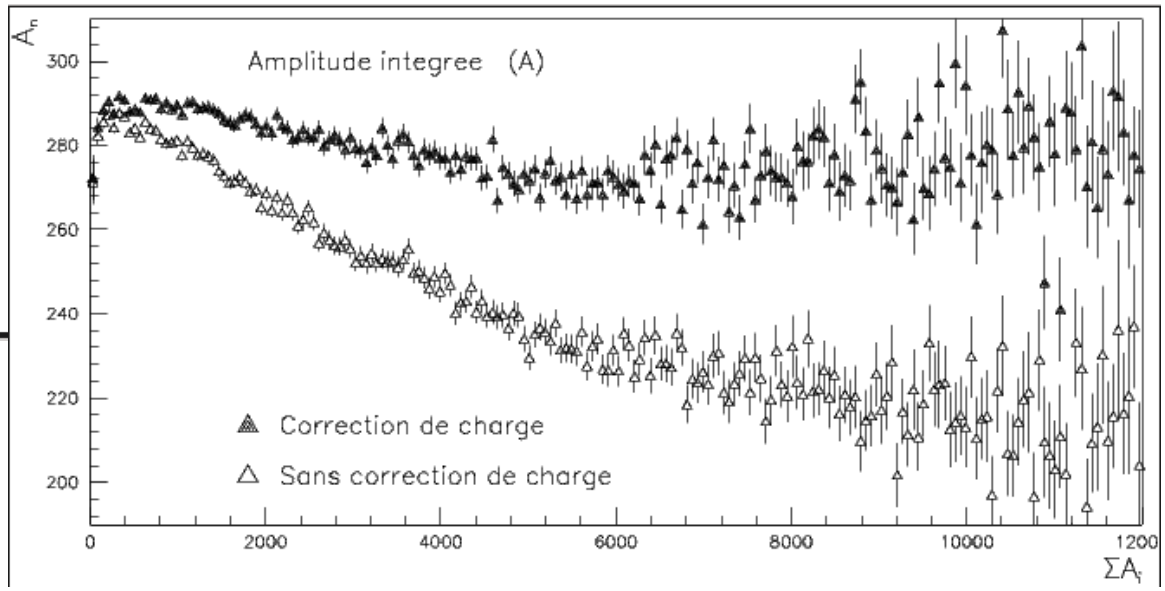


4.Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, électronique de lecture

- Temps de croisement des faisceaux 22 μs
- Temps de séparations des traces << 22μs

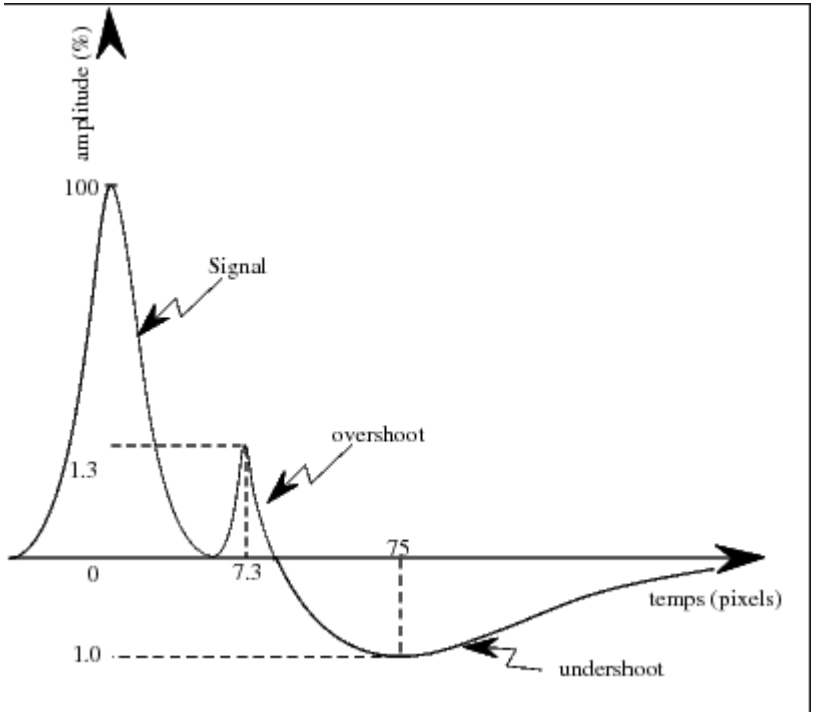


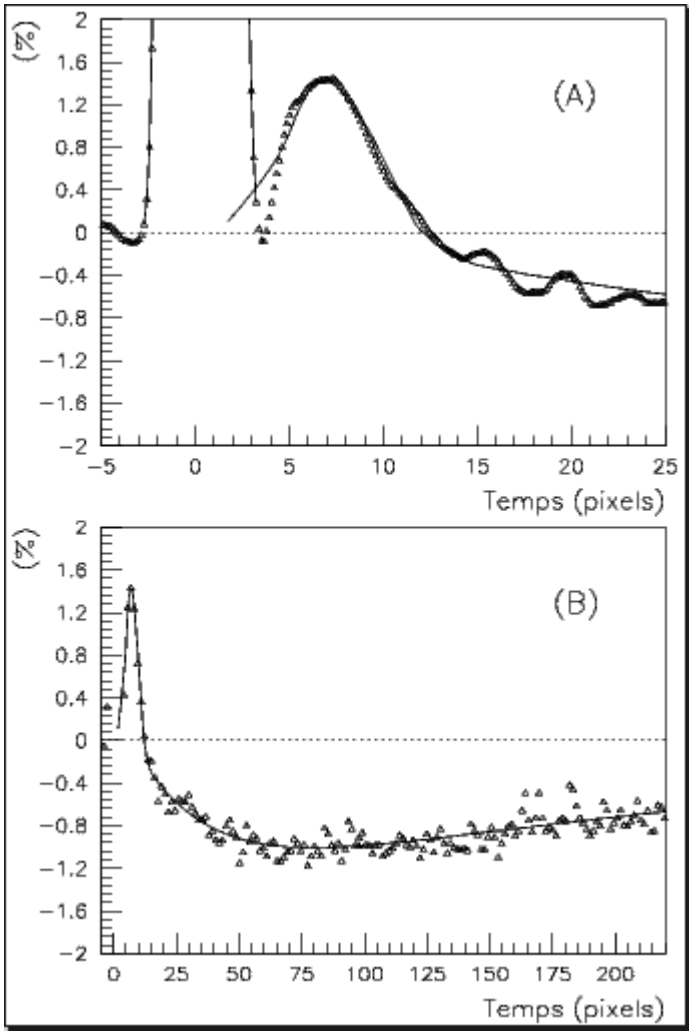


4.Détecteurs de Traces : TPC

TPC: Delphi, électronique de lecture

- BUG!!!!

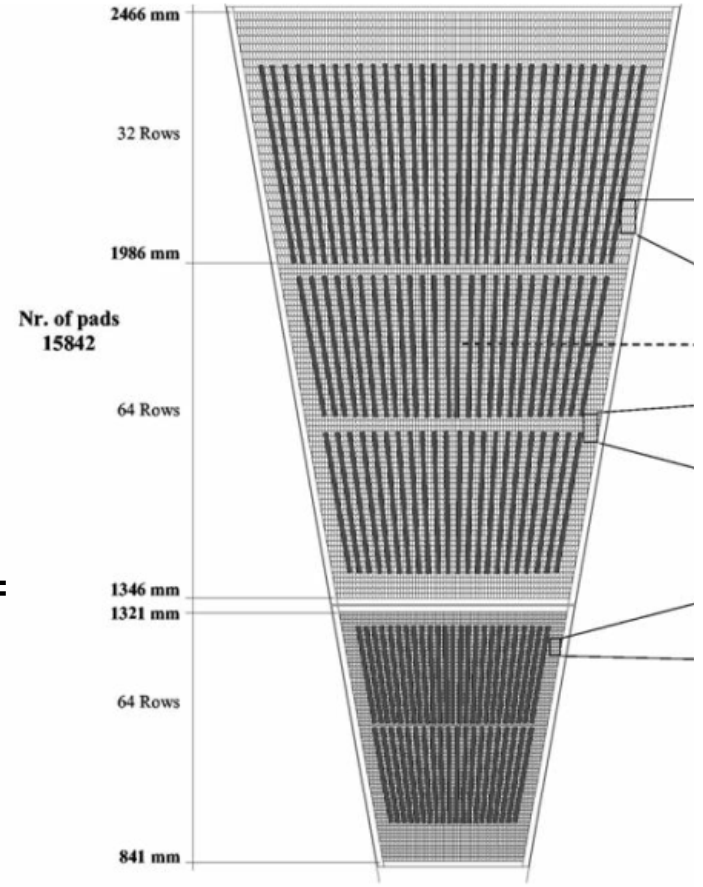


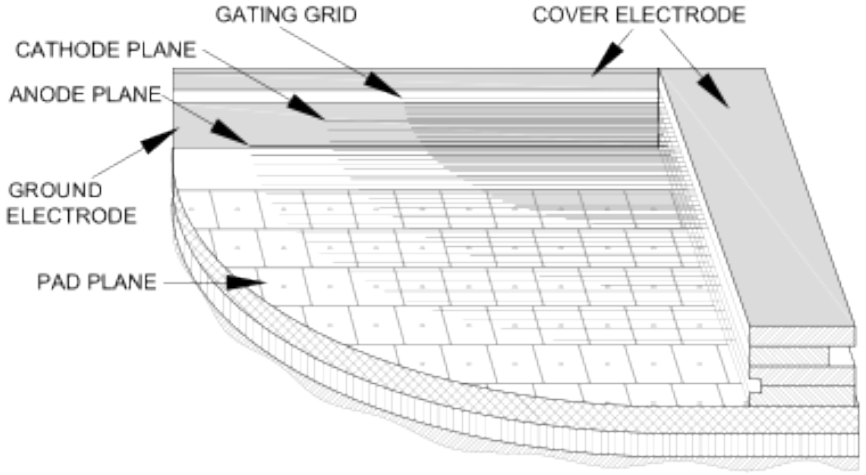


4.Détecteurs de Traces : TPC

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)





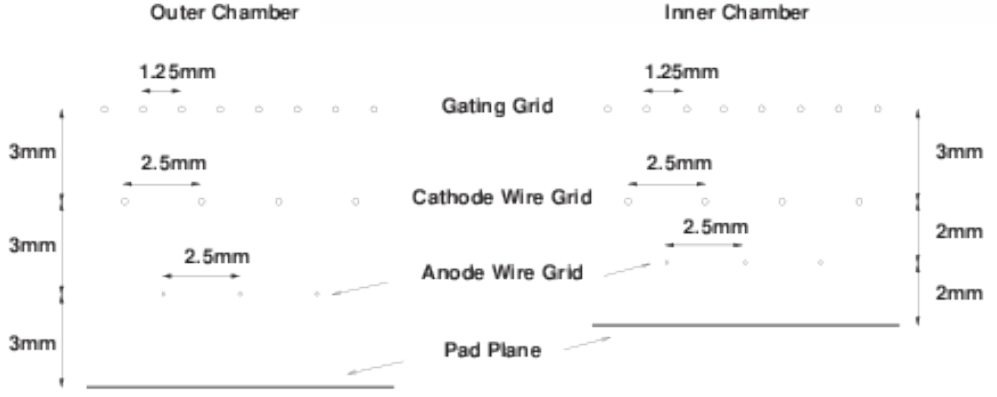
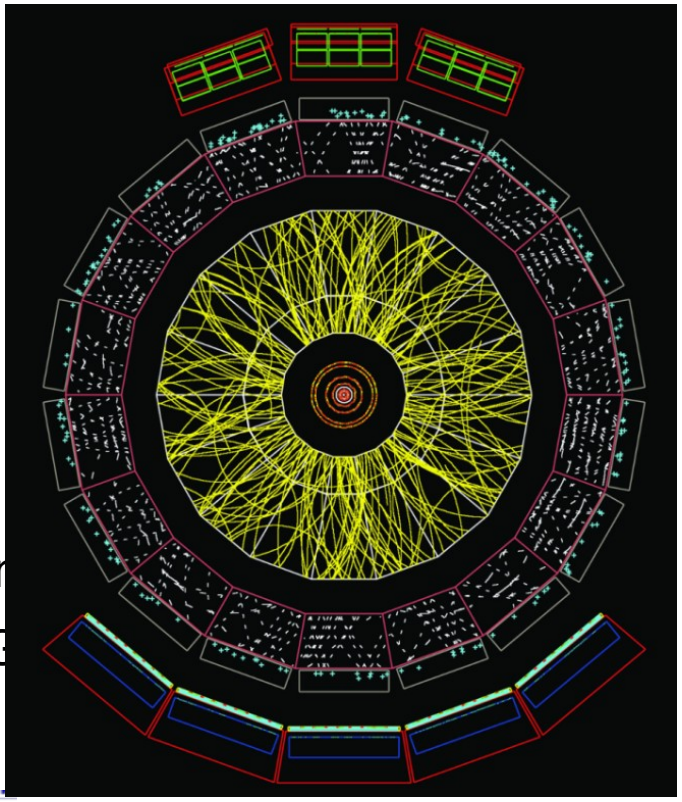


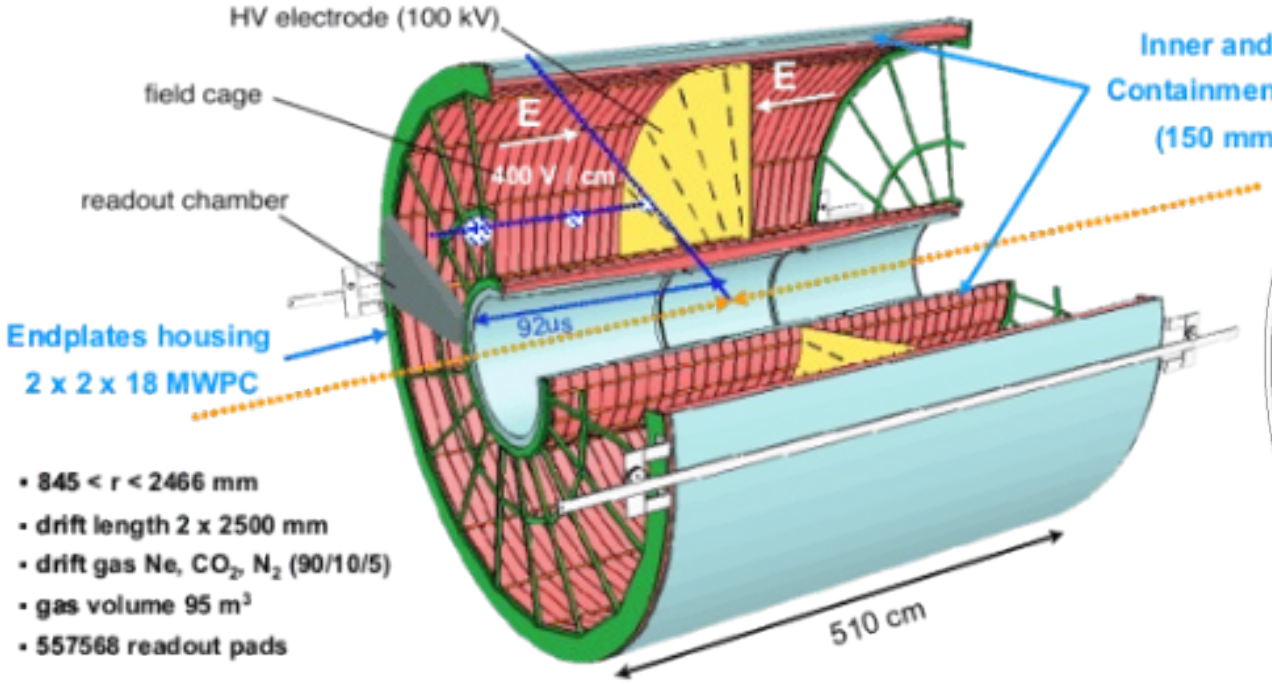
Figure 10: Wire geometries of the outer (left) and inner (right) readout chambers.

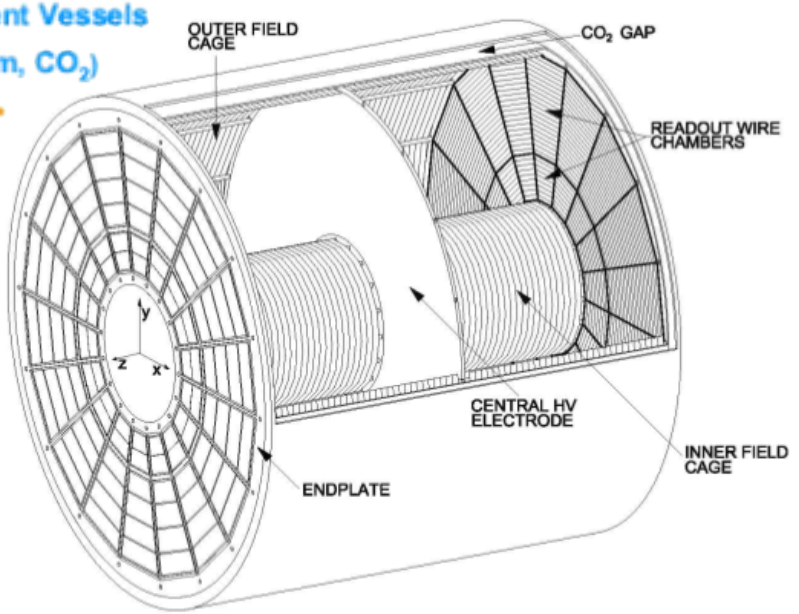
4.Détecteurs à Trace : TPC



TPC: Alice Pb-Pb (LHC)

- Plus grosse TPC jamais construite
- Principes identiques aux précédentes
  - Résolution spatiale : 500 μm, trace séparation 5r
  - Résolution en impulsion : 1% à 1 GeV, 5% à 10 G





Interactions particules-matière

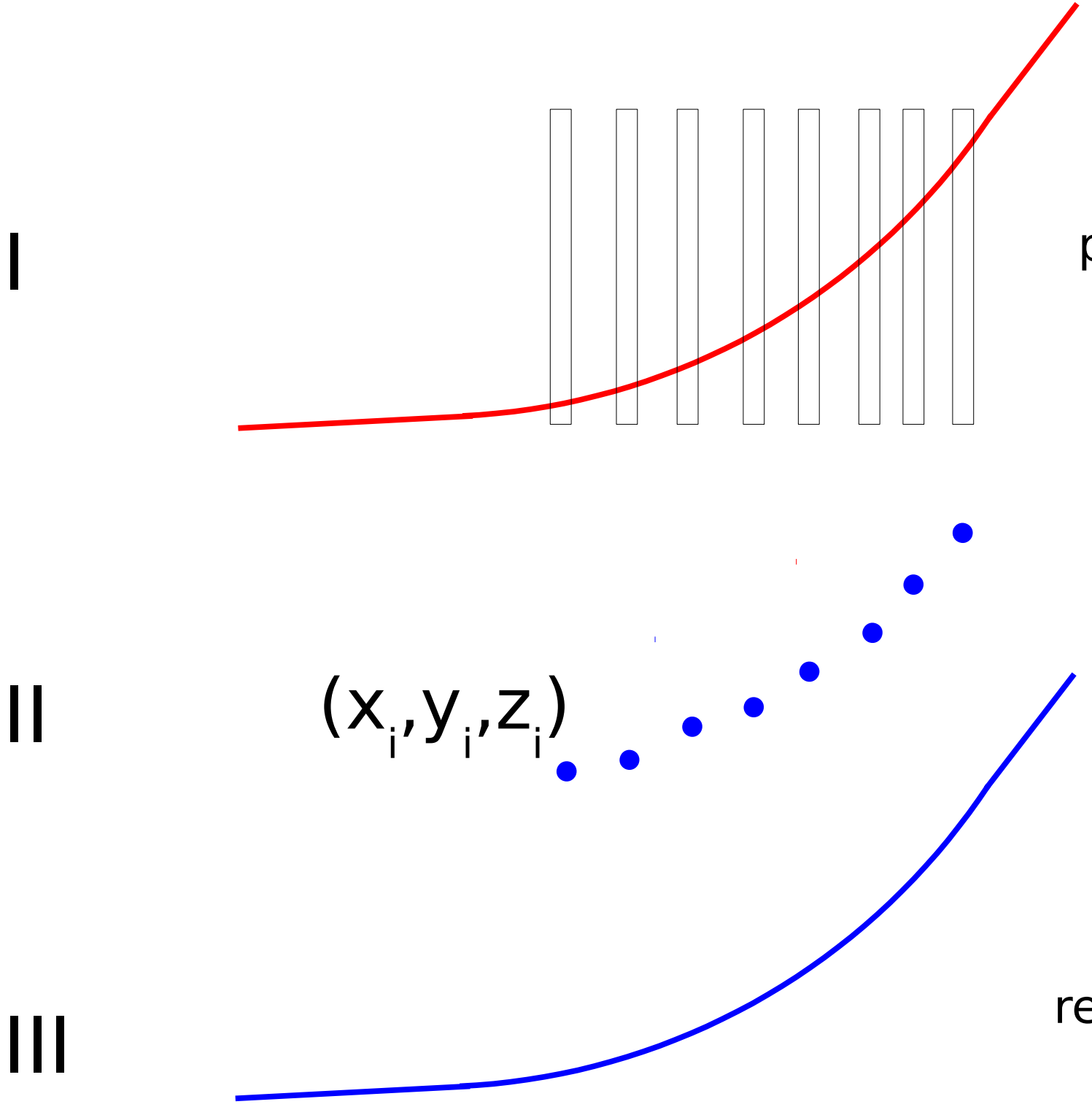
Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

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

} Rayonnement Cohérent

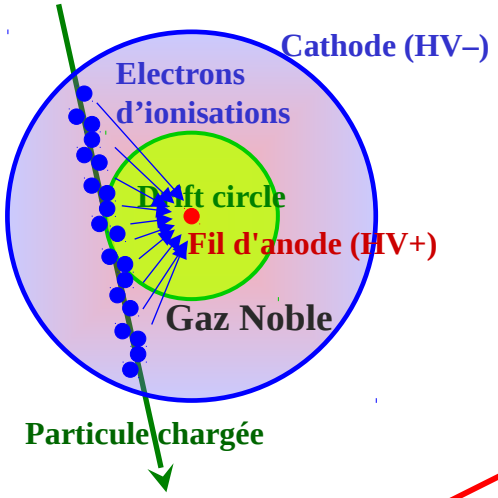
Effets perturbant la mesure

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

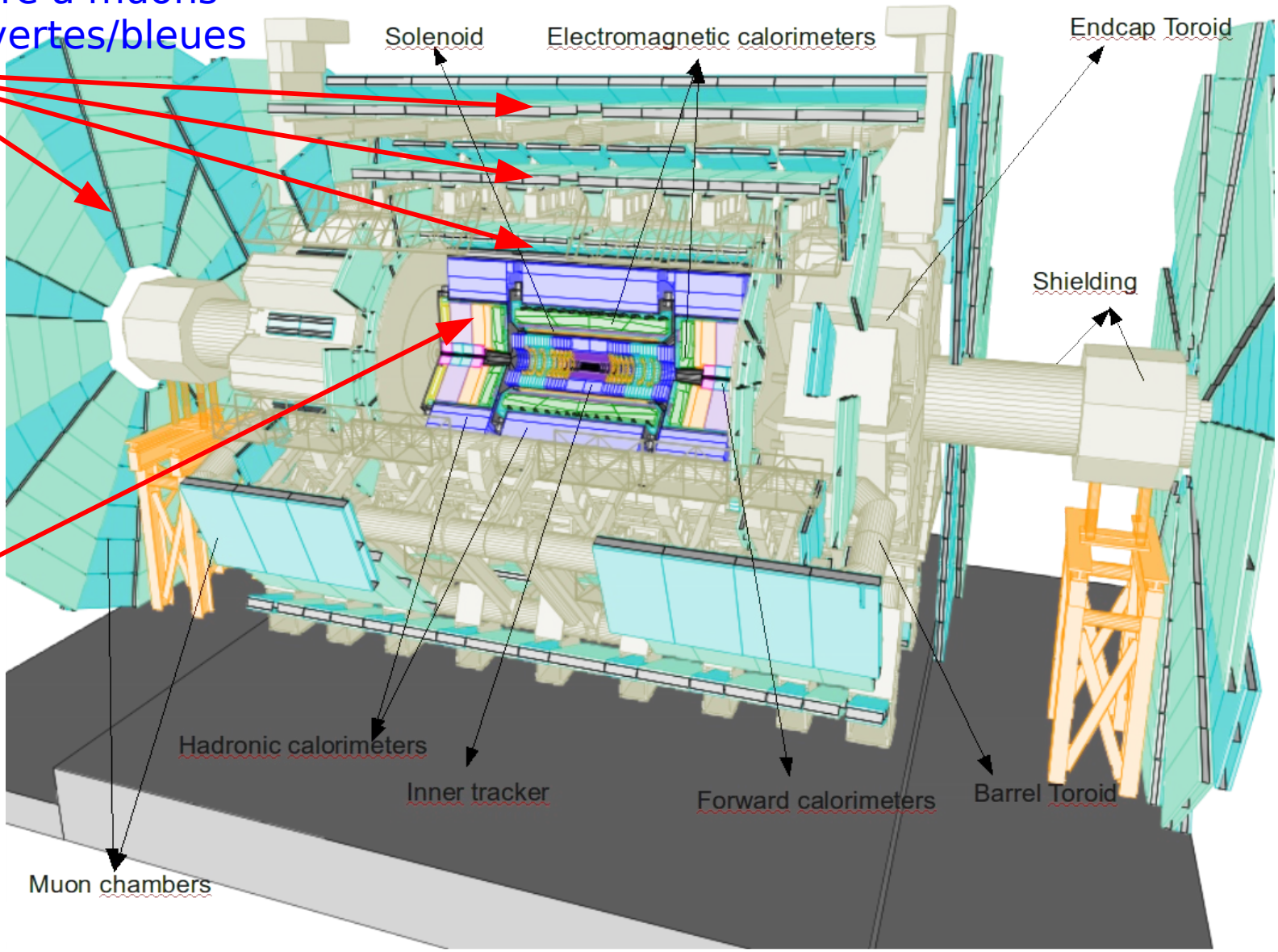

I
particule
II
(x_i,y_i,z_i)
mesure
III
reconstruction

4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive dans ATLAS

Spectromètre à muons
Chambres vertes/bleues

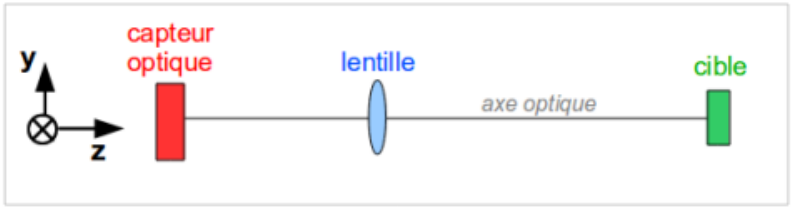


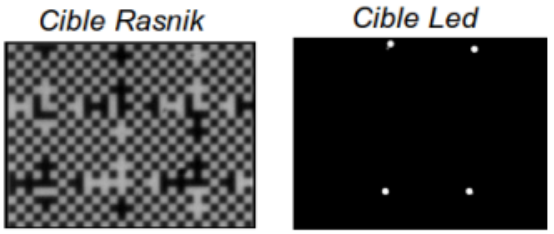
TRT

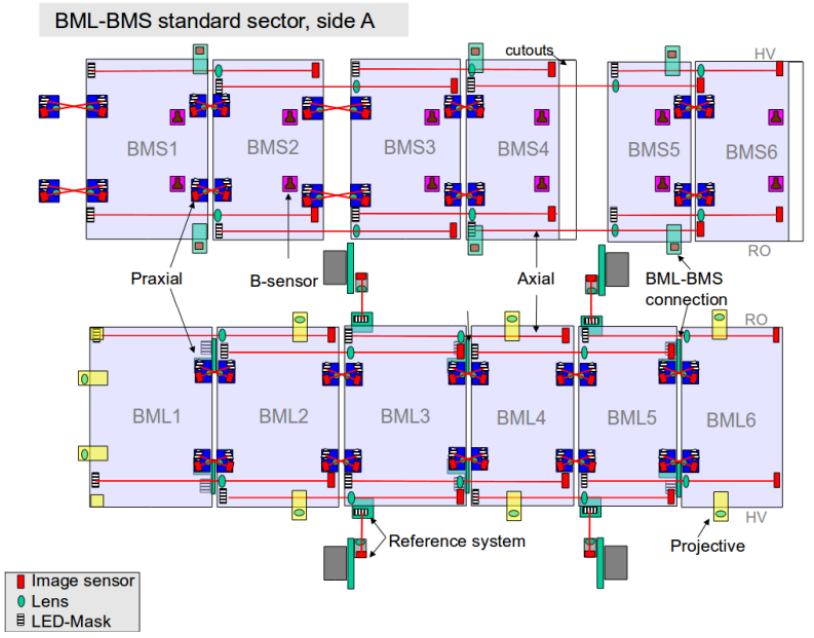


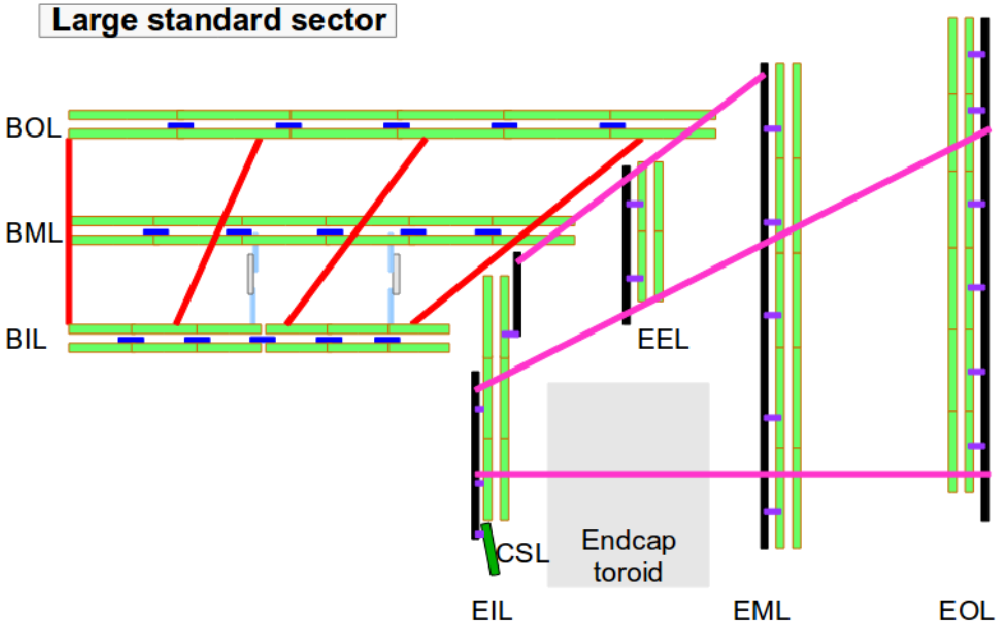
4.Détecteurs à Trace : Chambres à dérive

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



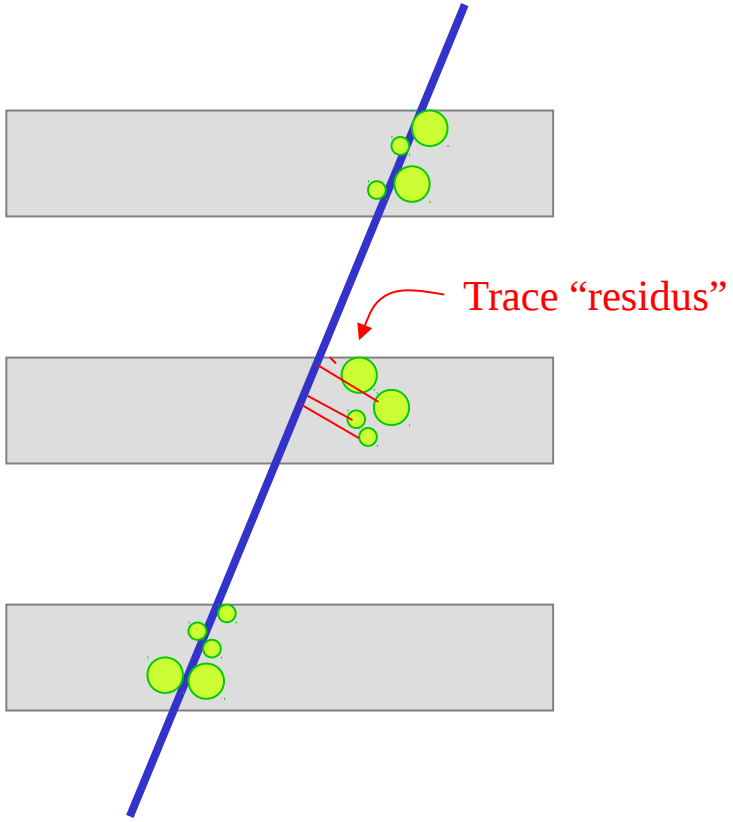


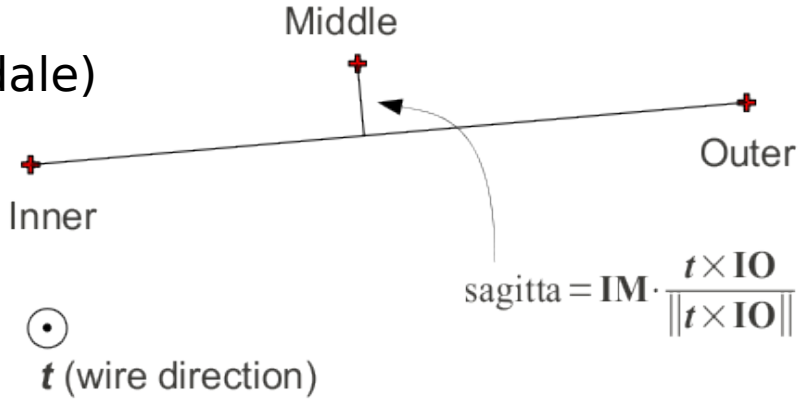


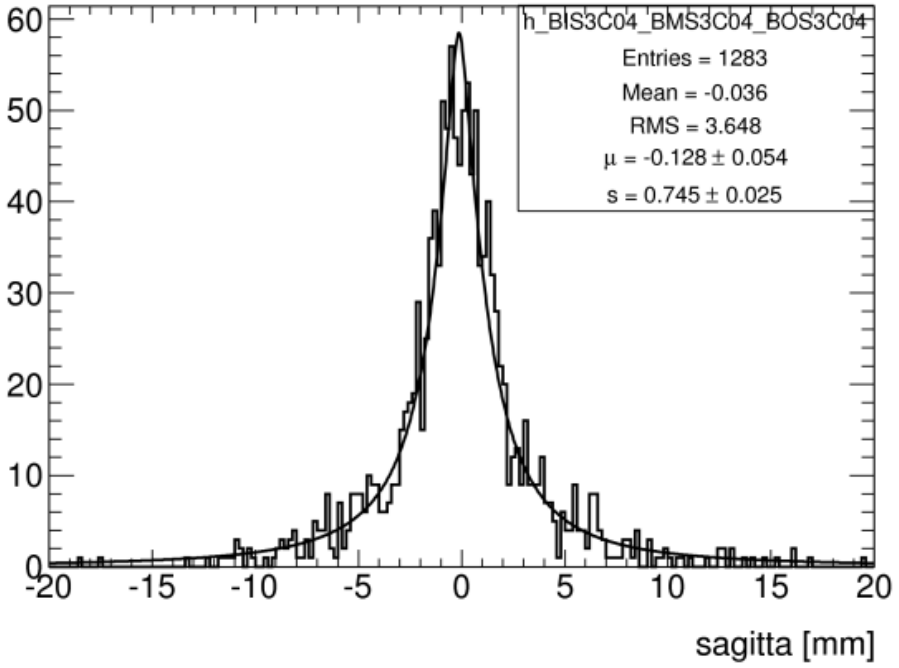


4.Détecteurs à Trace : Chambres à dérive

- Atlas : spectromètre à muons
  - Alignement trace droite (sans champ toroïdale)

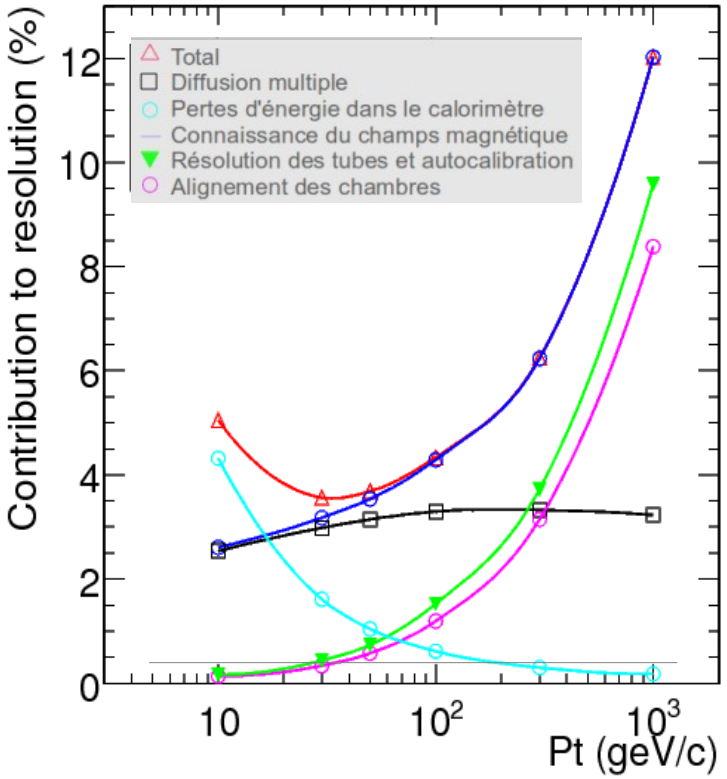


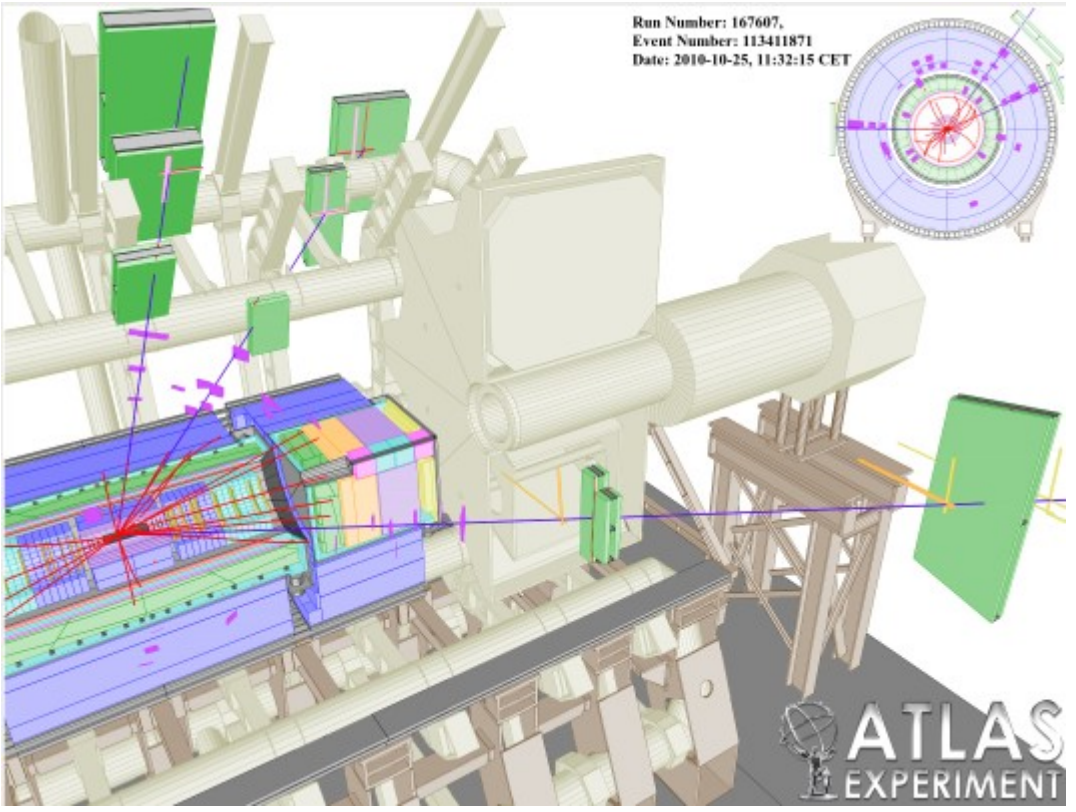




4.Détecteurs à Trace : Chambres à dérive

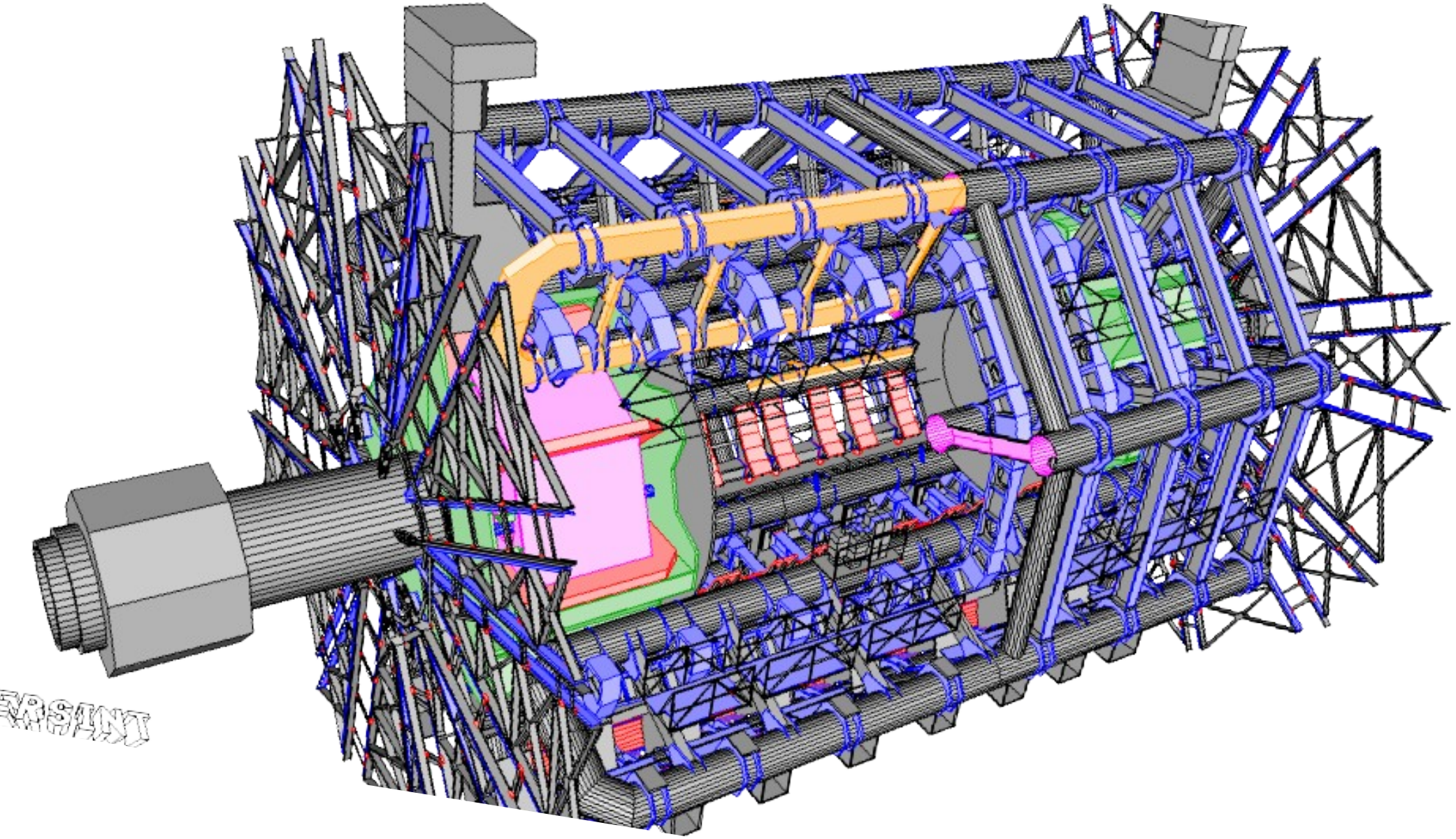
- Atlas : spectromètre à muons
  - Résolution en impulsion





4.Détecteurs à Trace : Chambres à dérive

- 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

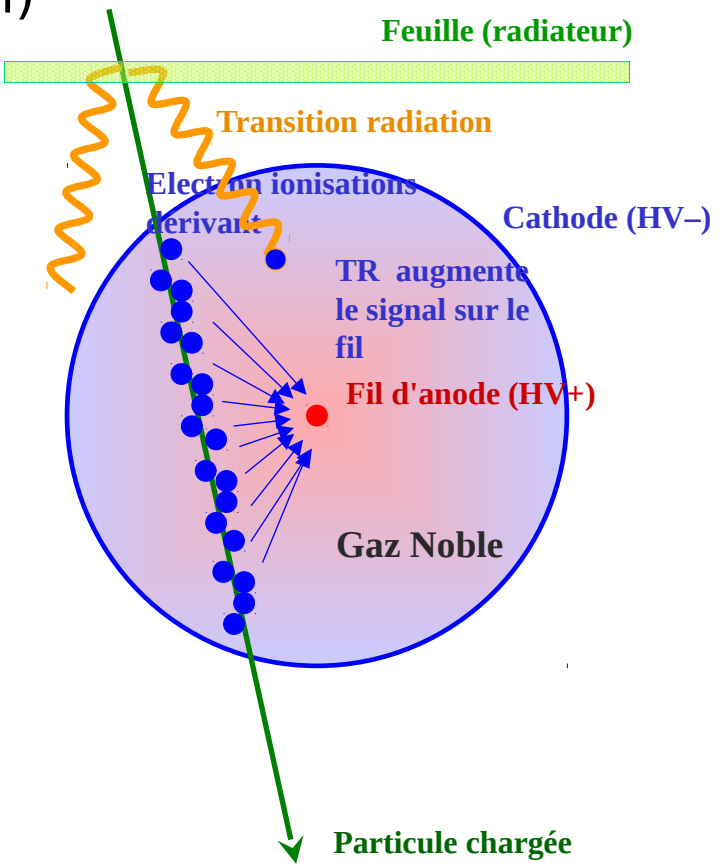
} Rayonnement Cohérent

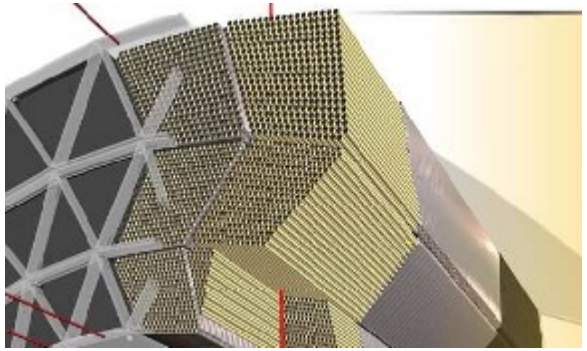
Effets perturbant la mesure

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

4.Détecteurs à Trace : Chambres à dérive

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

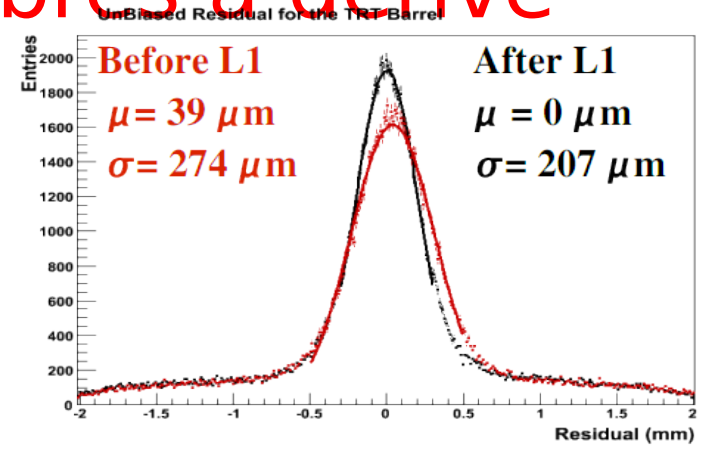


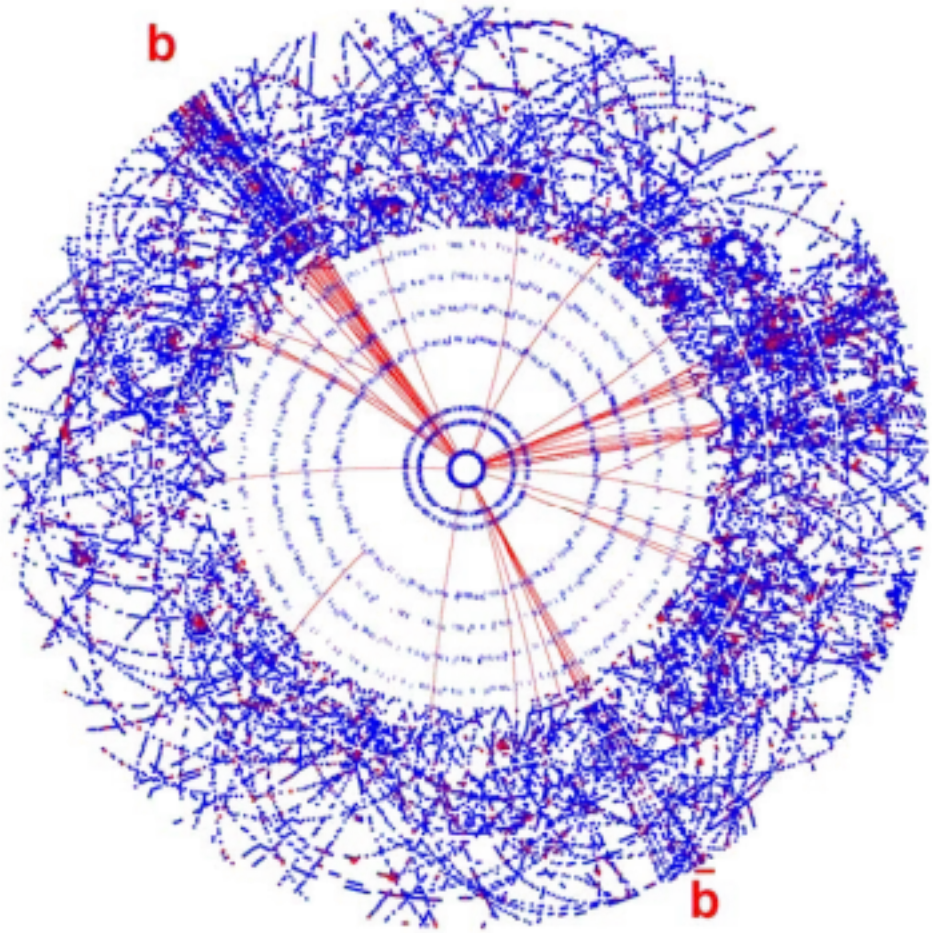


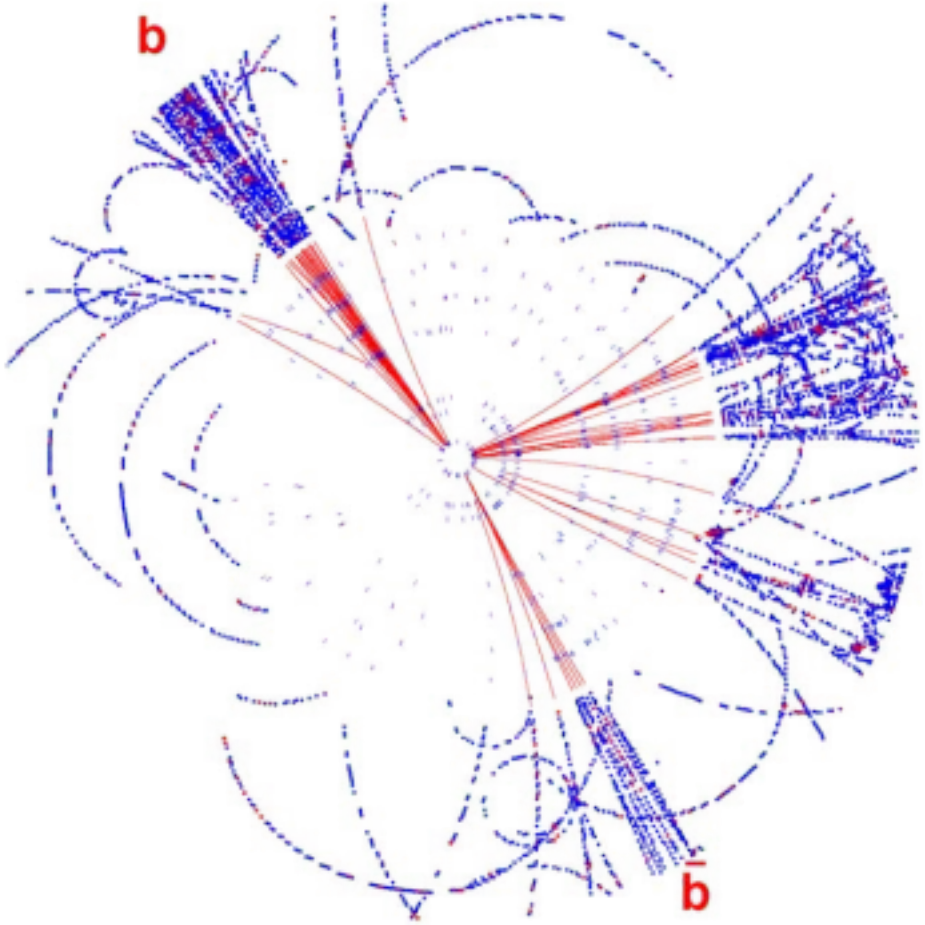
* Transition Radiation Tracker

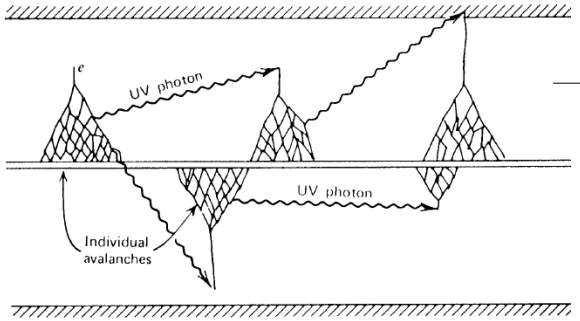
4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

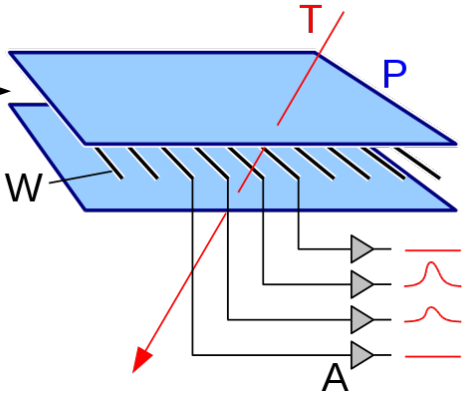
- Atlas : TRT
  - Alignement est aussi nécessaire
  - ~10μm, 35000 paramètres libres

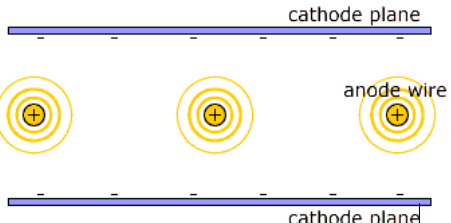


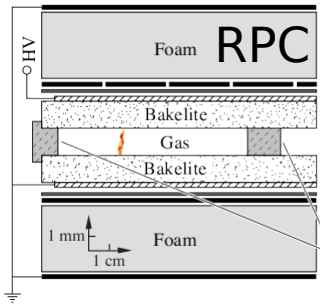


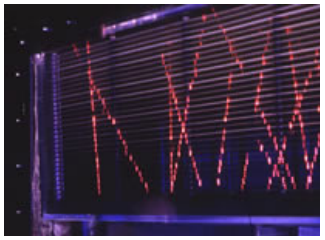


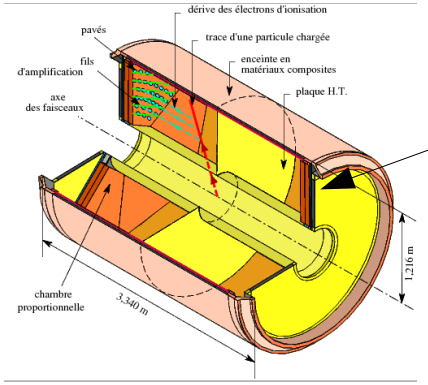

e
UV photon
UV photon
Individual
avalanches

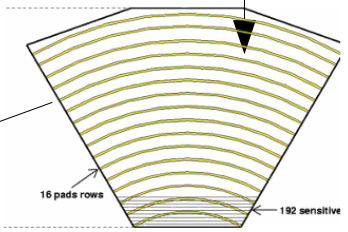

T
P
W
A

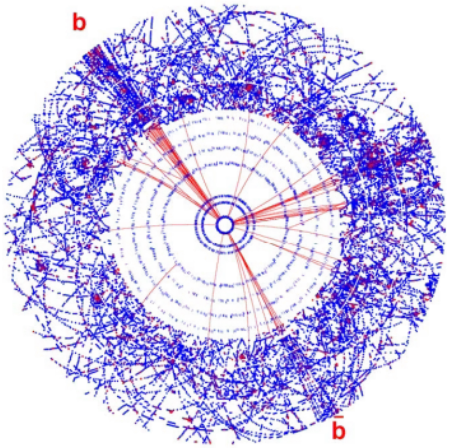

cathode plane
anode wire
cathode plane

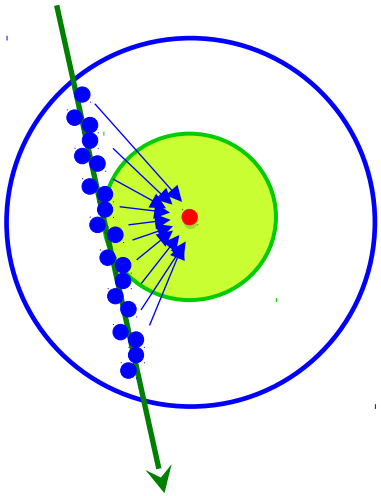

HV
Foam
RPC
Bakelite
Gas
Bakelite
1 mm
1 cm
Foam

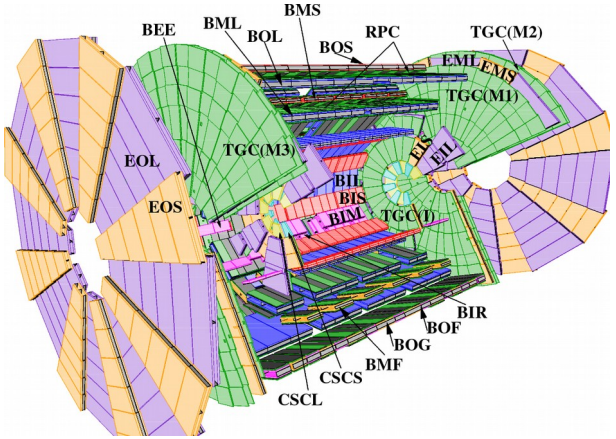


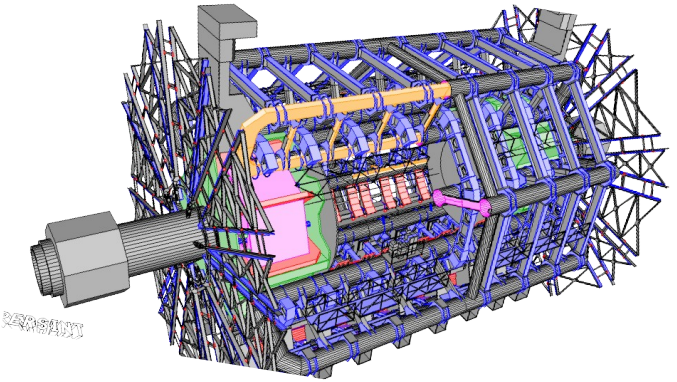

dérive des électrons d'ionisation
pavés
trace d'une particule chargée
fils
d'amplification
enceinte en
matériaux composites
axe
des faisceaux
plaque H.T.
chambre
proportionnelle
3,340 m
1,216 m


16 pads rows
192 sensitive


b
b

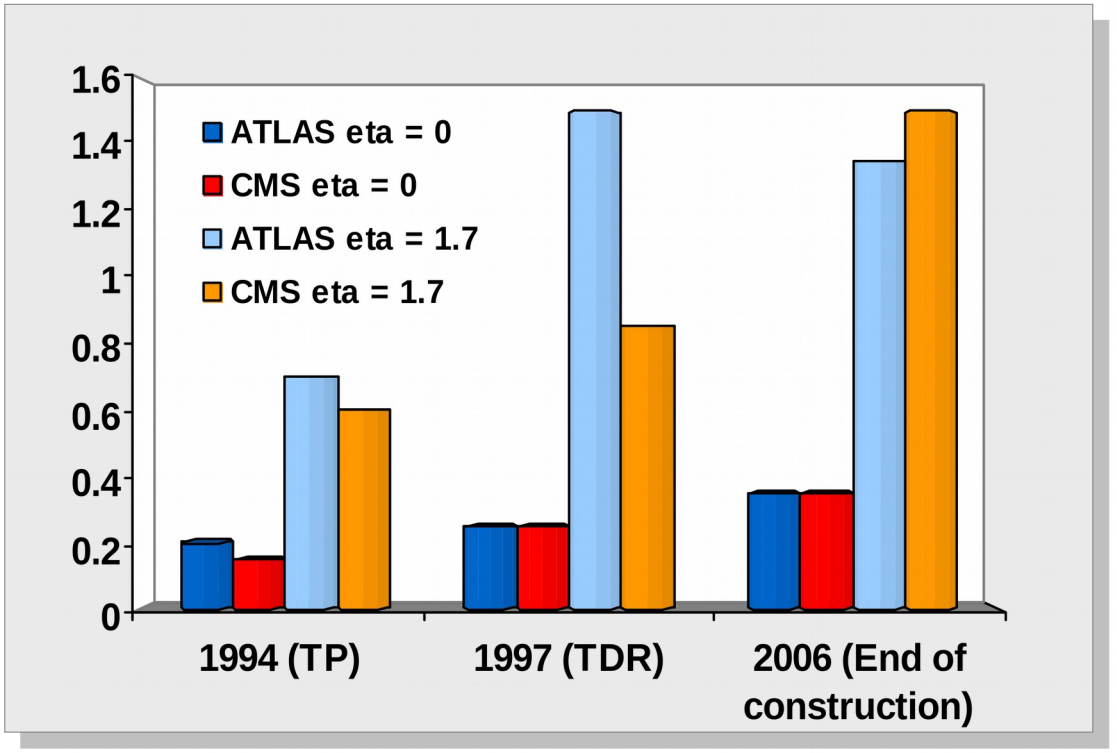



BEE
BML
BOL
BMS
BOS
RPC
TGC(M2)
EML
EMS
TGC(M1)
EOL
TGC(M3)
EIS
EIL
BIL
BIS
BIM
TGC(I)
EOS
BIR
BOF
BOG
BMF
CSCS
CSCL



4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

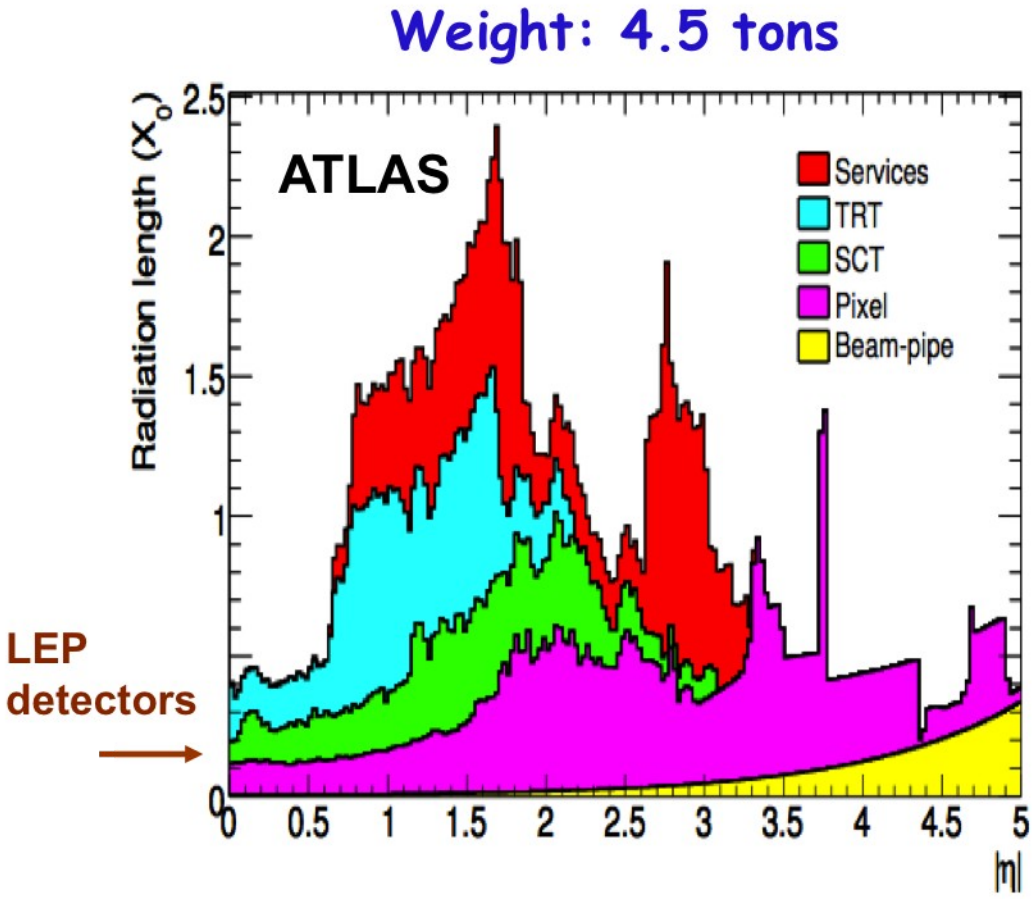
- Atlas : TRT

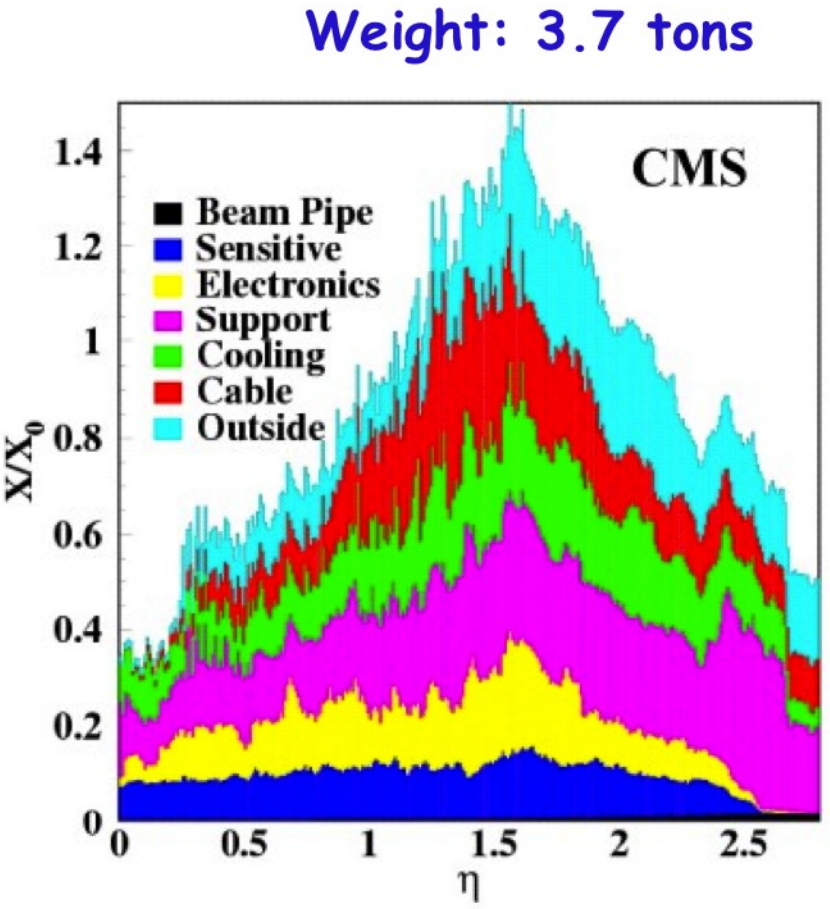


Augmentation du nombre de x0 principalement due aux services mal estimés

4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

- Atlas : TRT





Interactions particules-matière

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

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

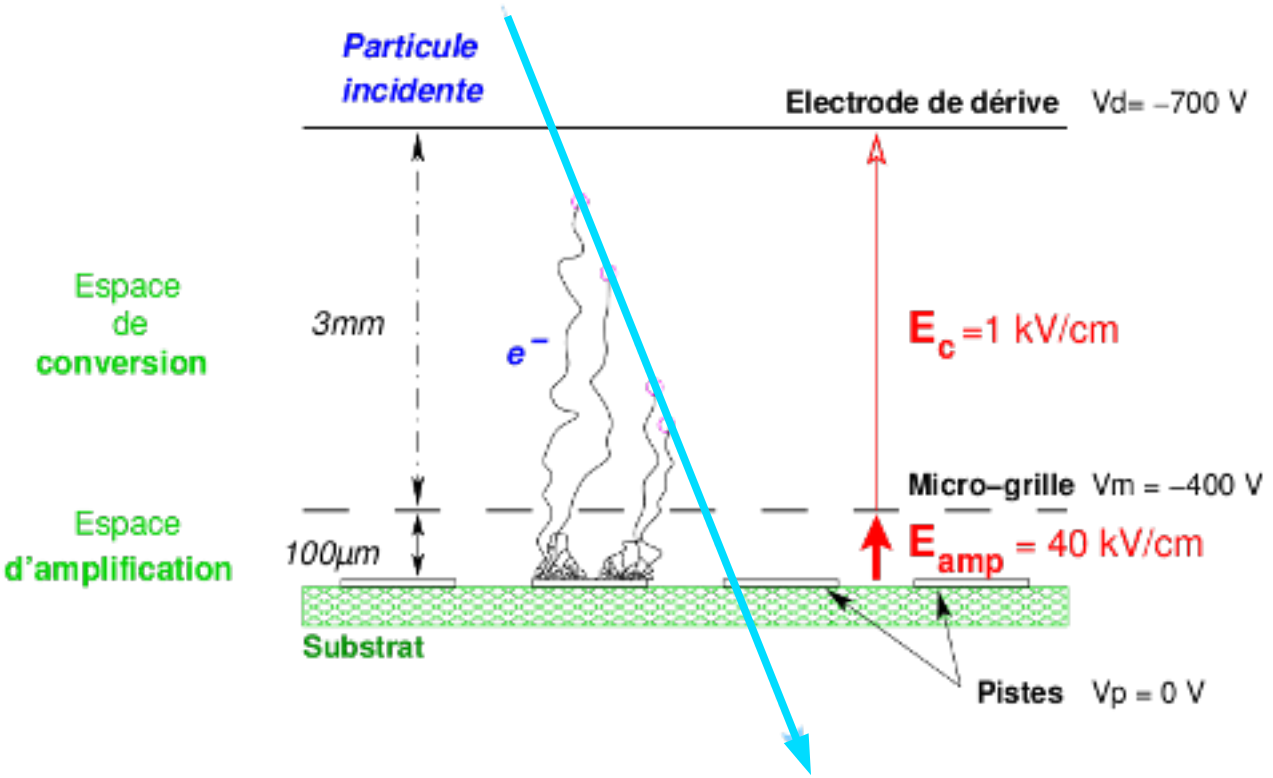
} Rayonnement Cohérent

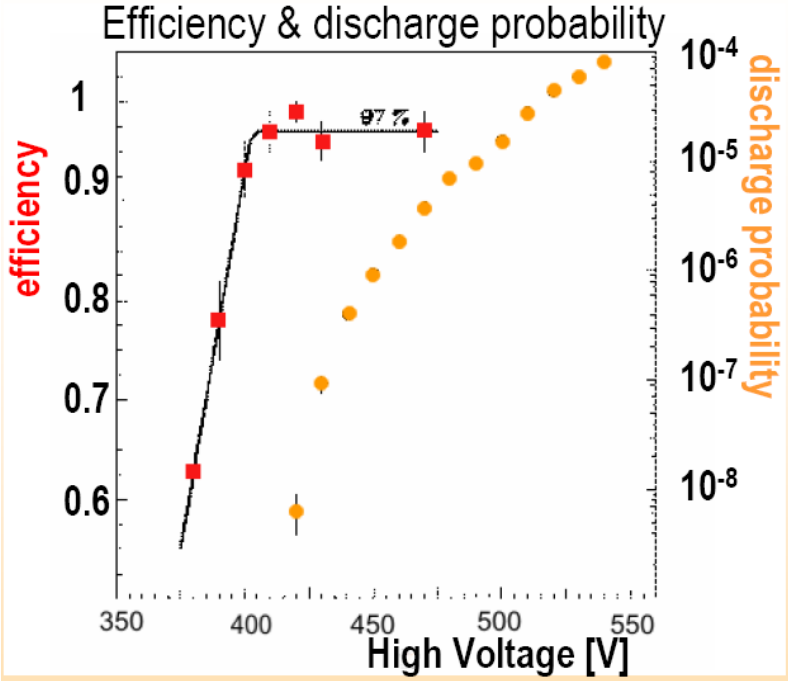
Effets perturbant la mesure

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

4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

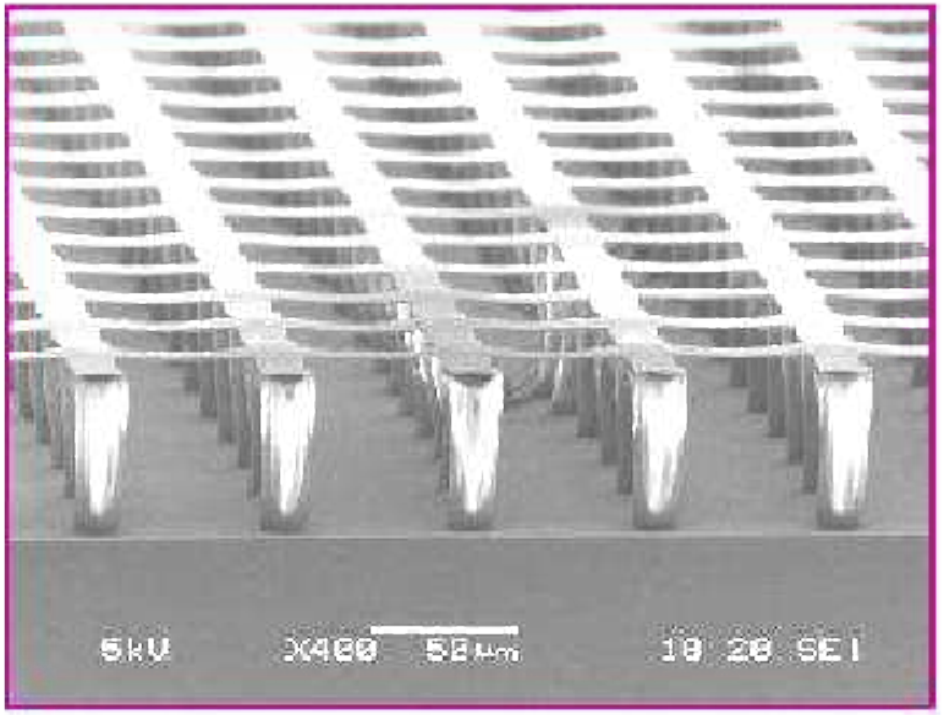
- Micro Megas
  - Probabilité de décharge très faible
  - Devrait supporter de très haut flux (sLHC)

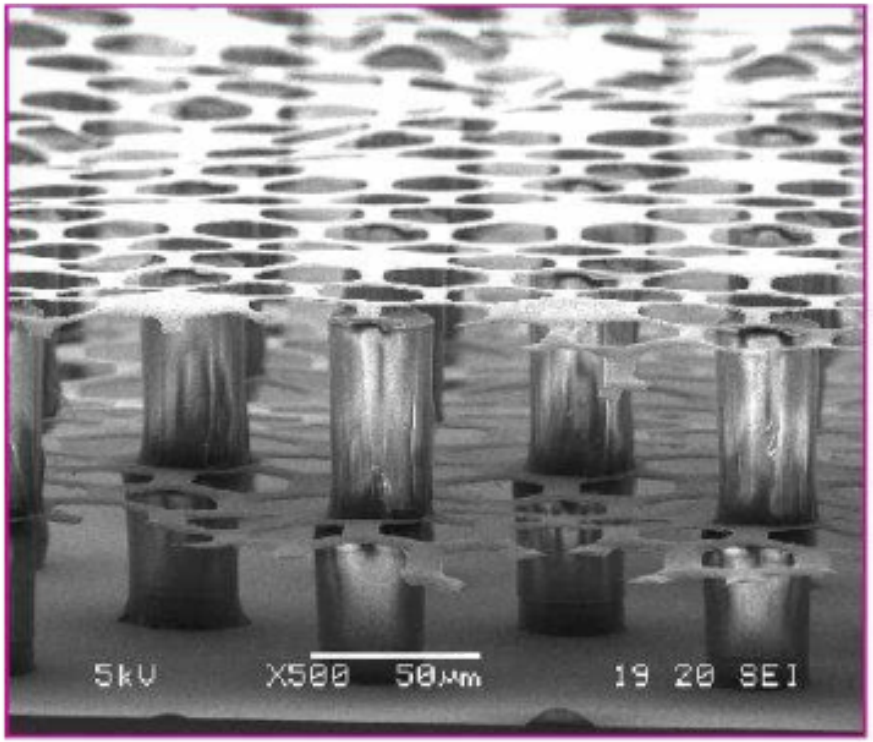




4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

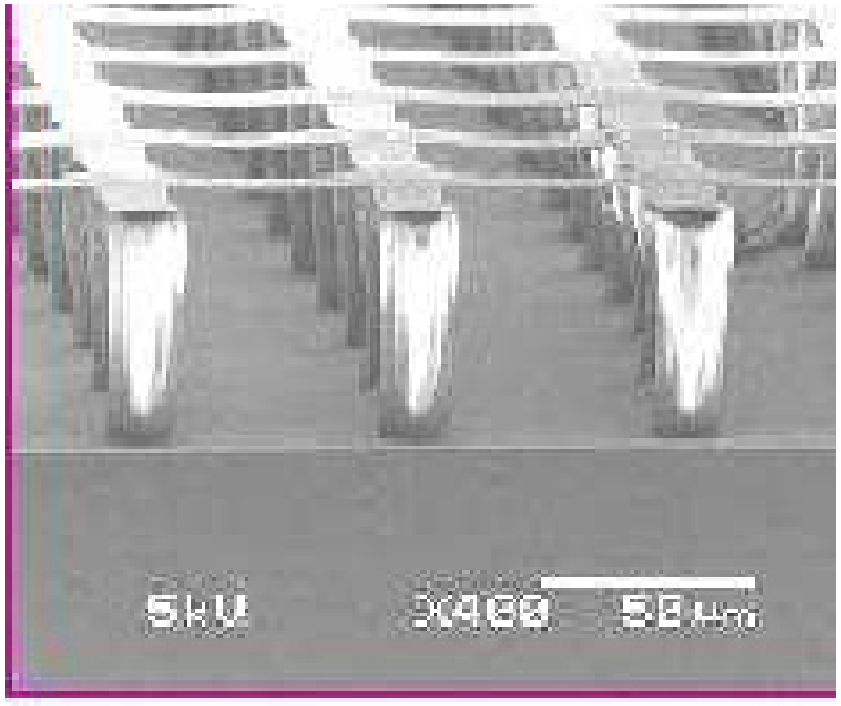
- Micro Megas
  - Problème « piliers » acceptance & plan de la grille

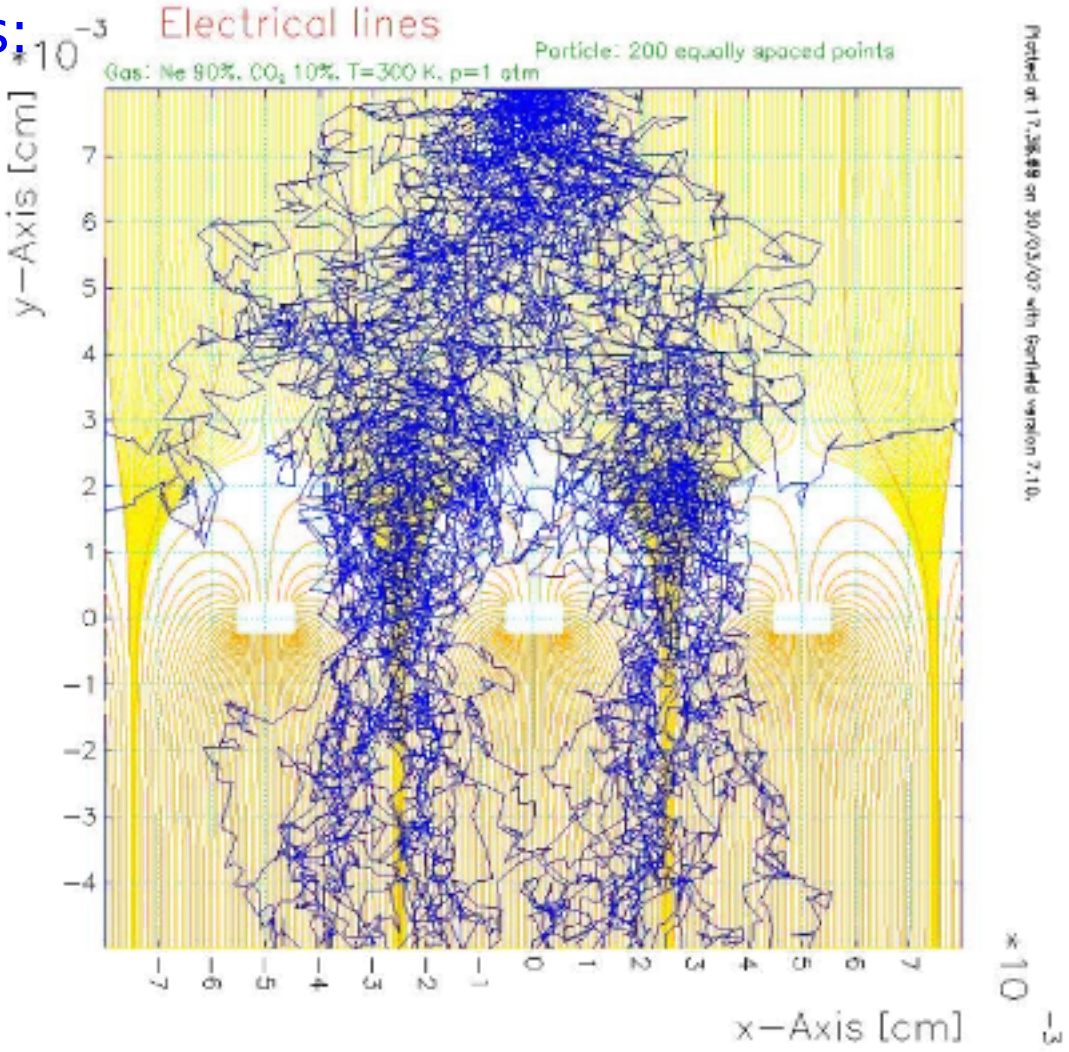




4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

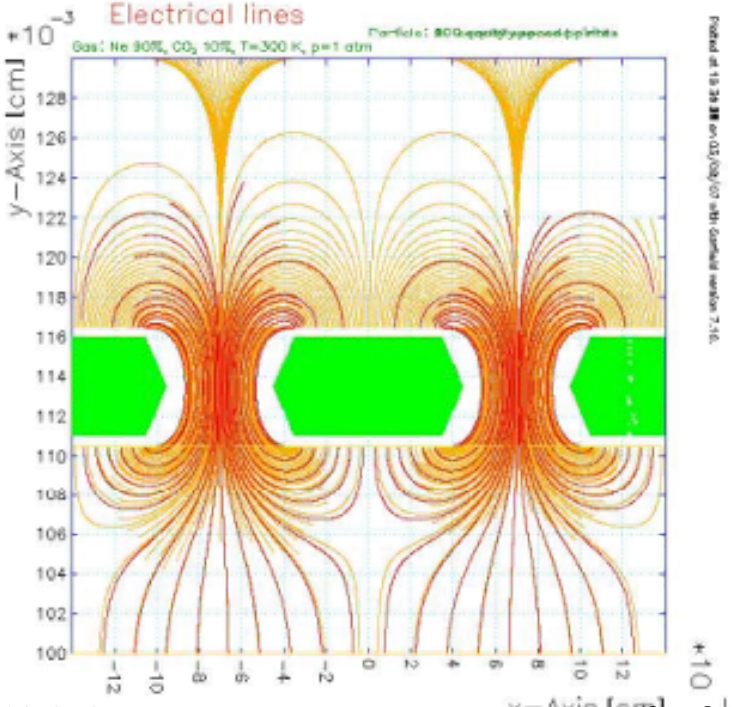
- Micro Megas
  - Progression des simulations:

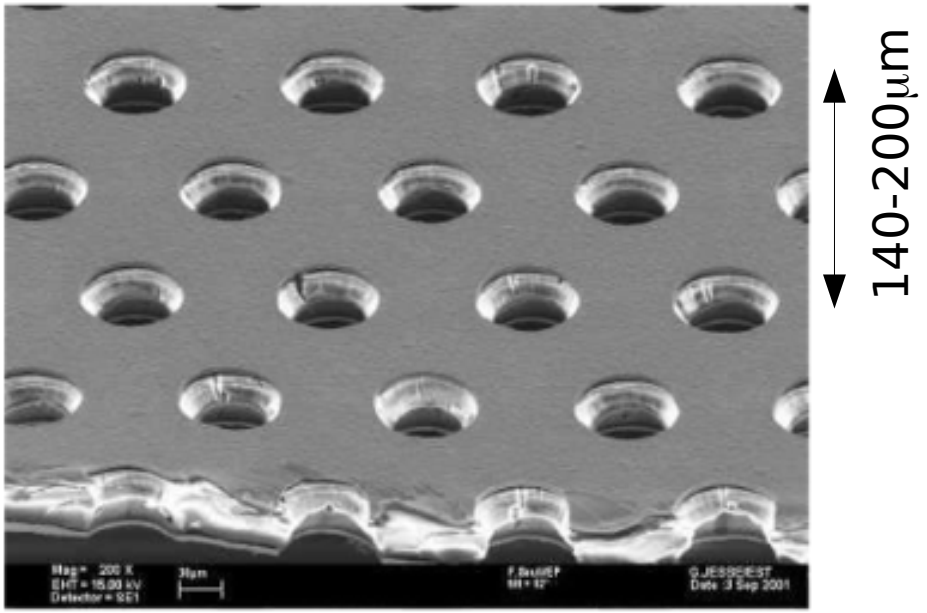




4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

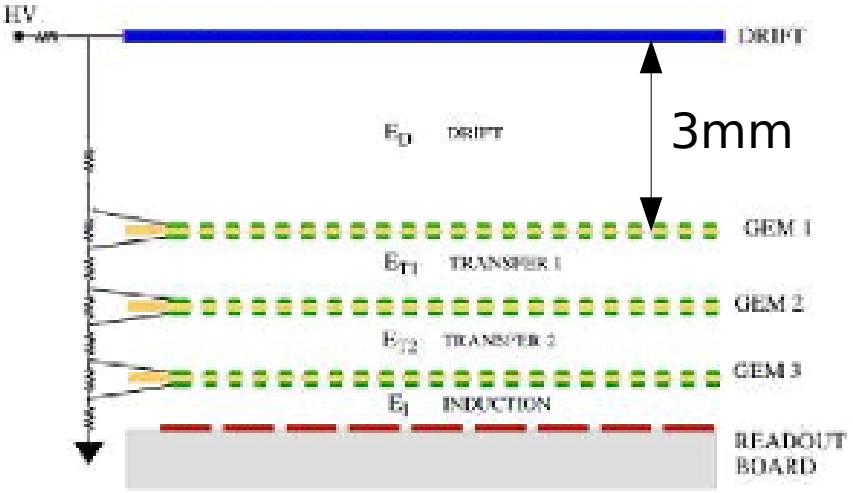
- GEM (Gas Electron Multiplier)
  - Feuille Cu-Kapton-Cu percée
  - régulièrement de trous de 30-50 µm
  - 200 à 400 V entre les 2 faces
  - 100 à 1000 e- produits par un e- unique à l'entrée d'un trou

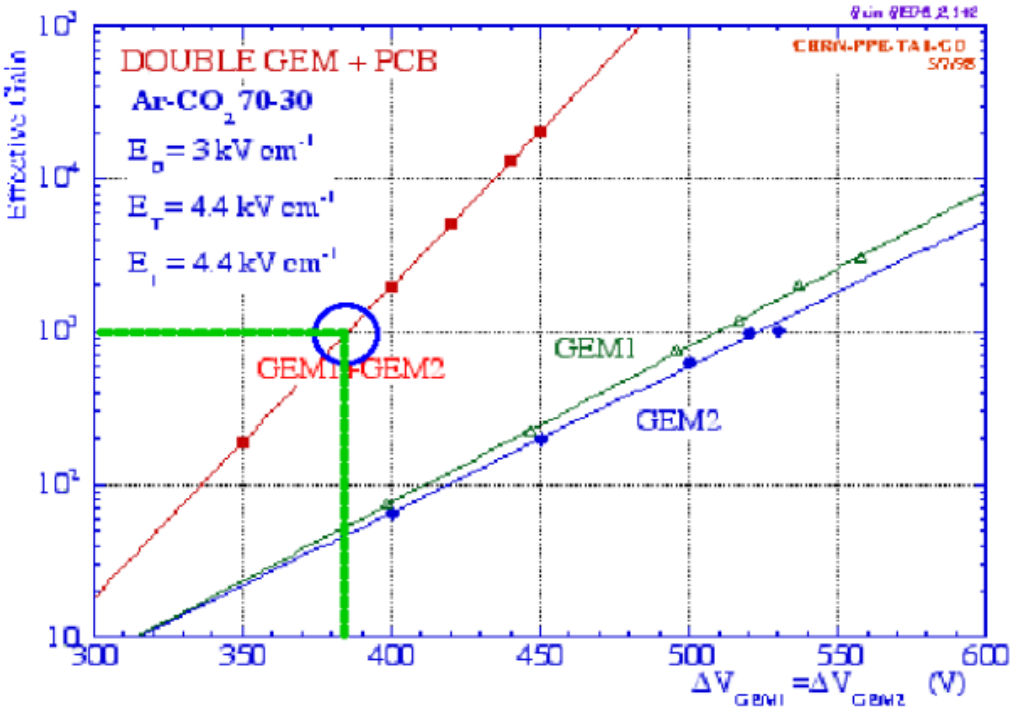




4.Détecteurs de Traces : Chambres à dérive

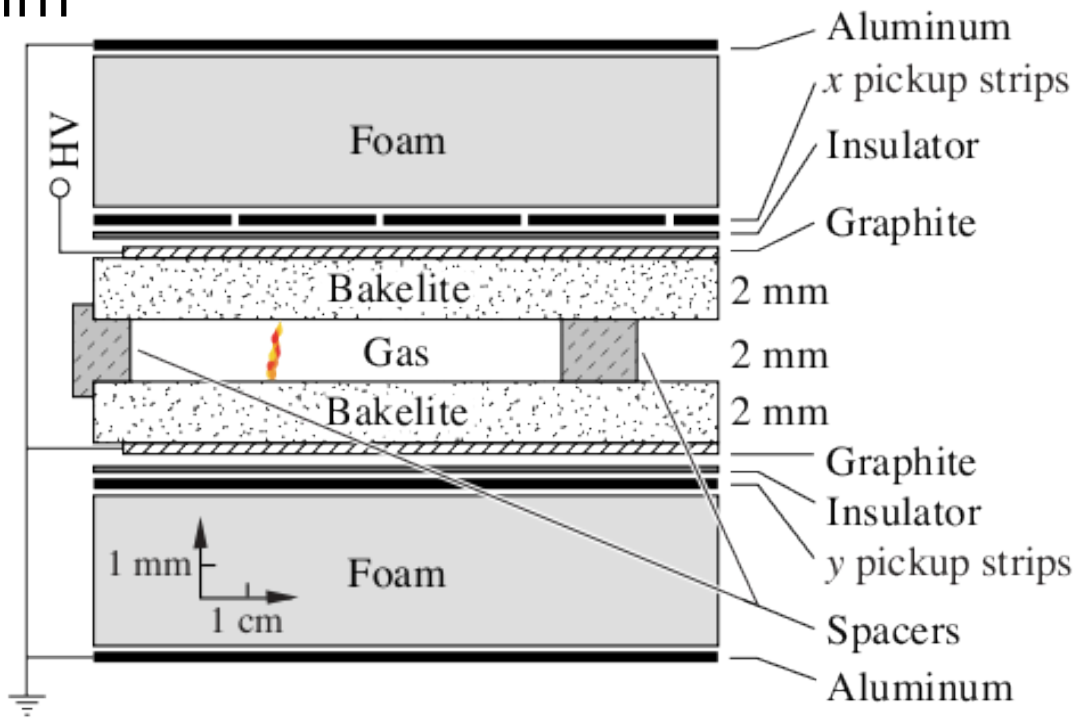
- GEM (Gas Electron Multiplier)
  - Plusieurs étages :
    - Tension plus basse pour un même gain
    - Moins de décharges





Détecteurs de Traces

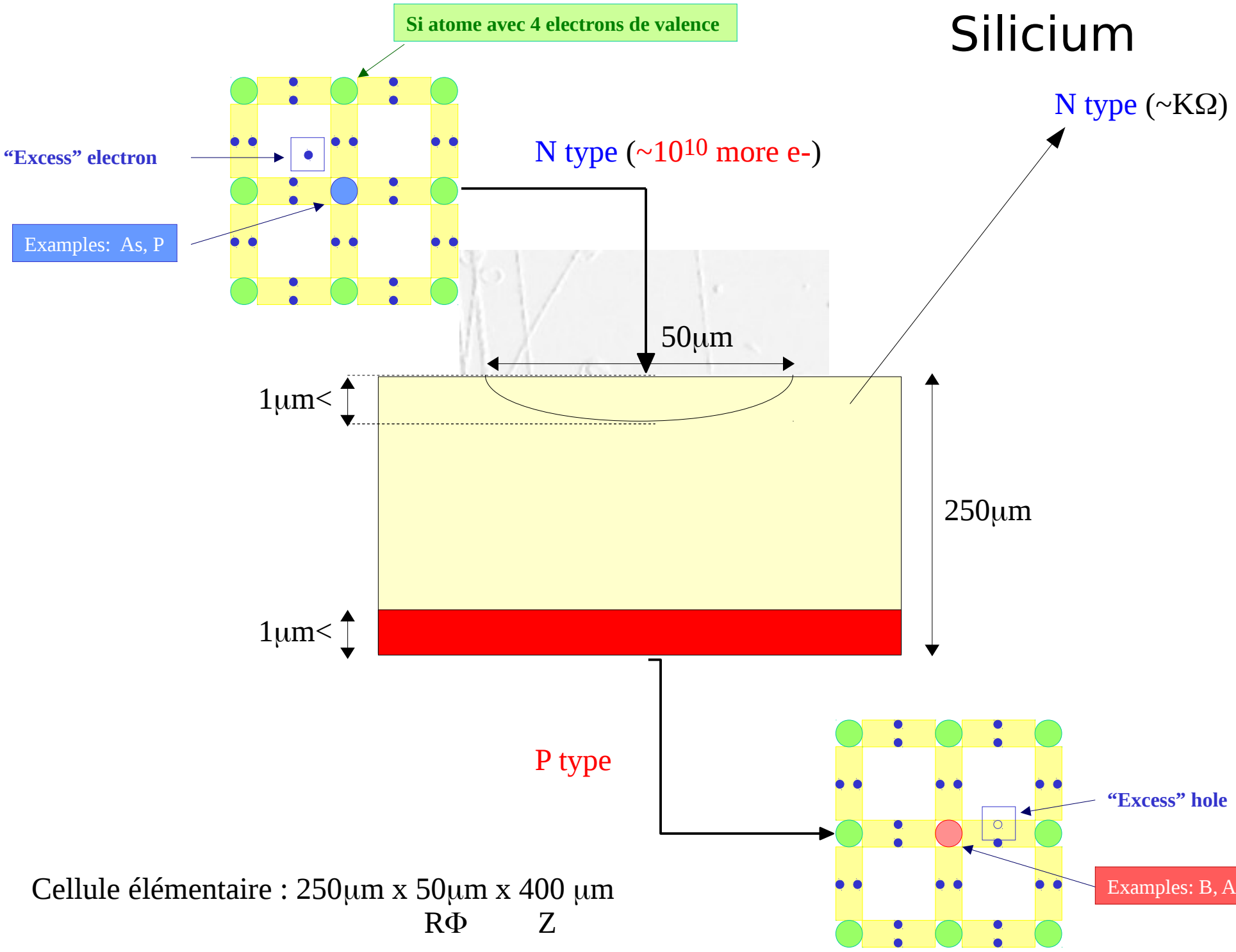
- RPC (Resistive Plate chamber)
  - ~10KV entre les plans de bakélite
  - Passage de la particule induit une décharge (signal ~300mV)
  - Résolution spatiale < ~1mm
  - Résolution temporel ~1ns
  - Pas de fils!!!!



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

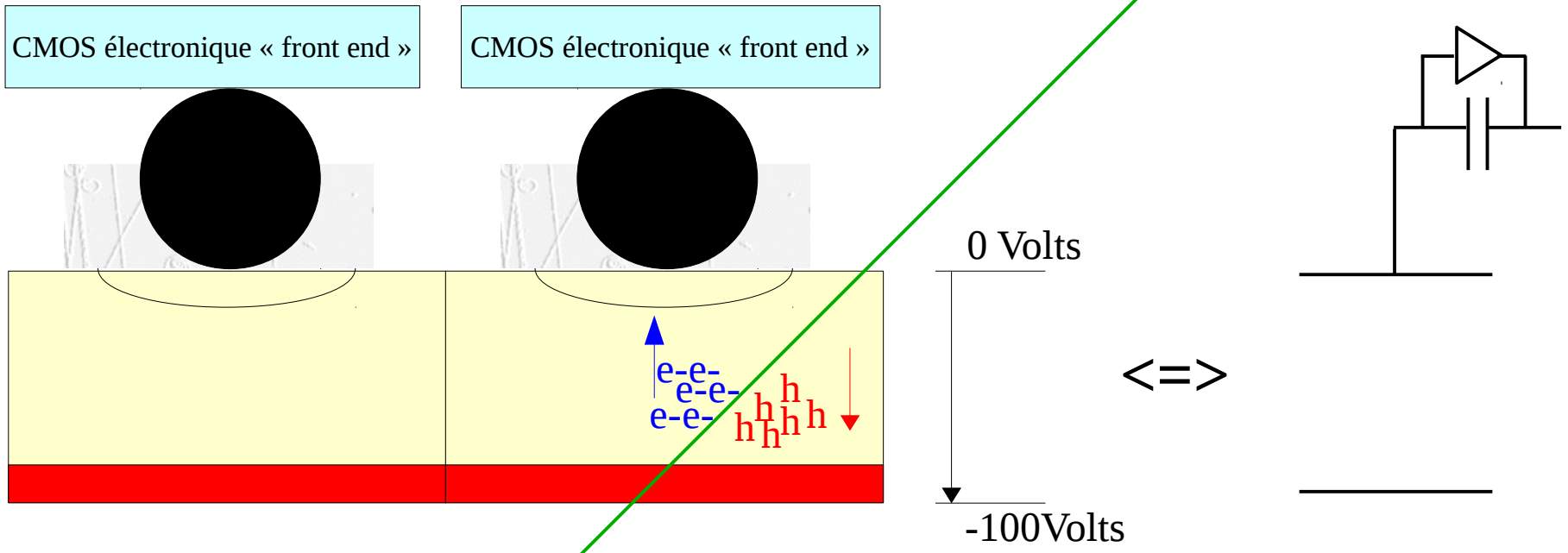


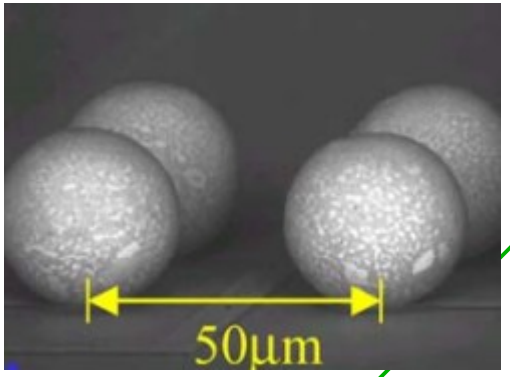
Cellule élémentaire : 250μm x 50μm x 400 μm
RΦ Z

Détecteur au Silicium

- ATLAS:Pixels

Trace Chargée





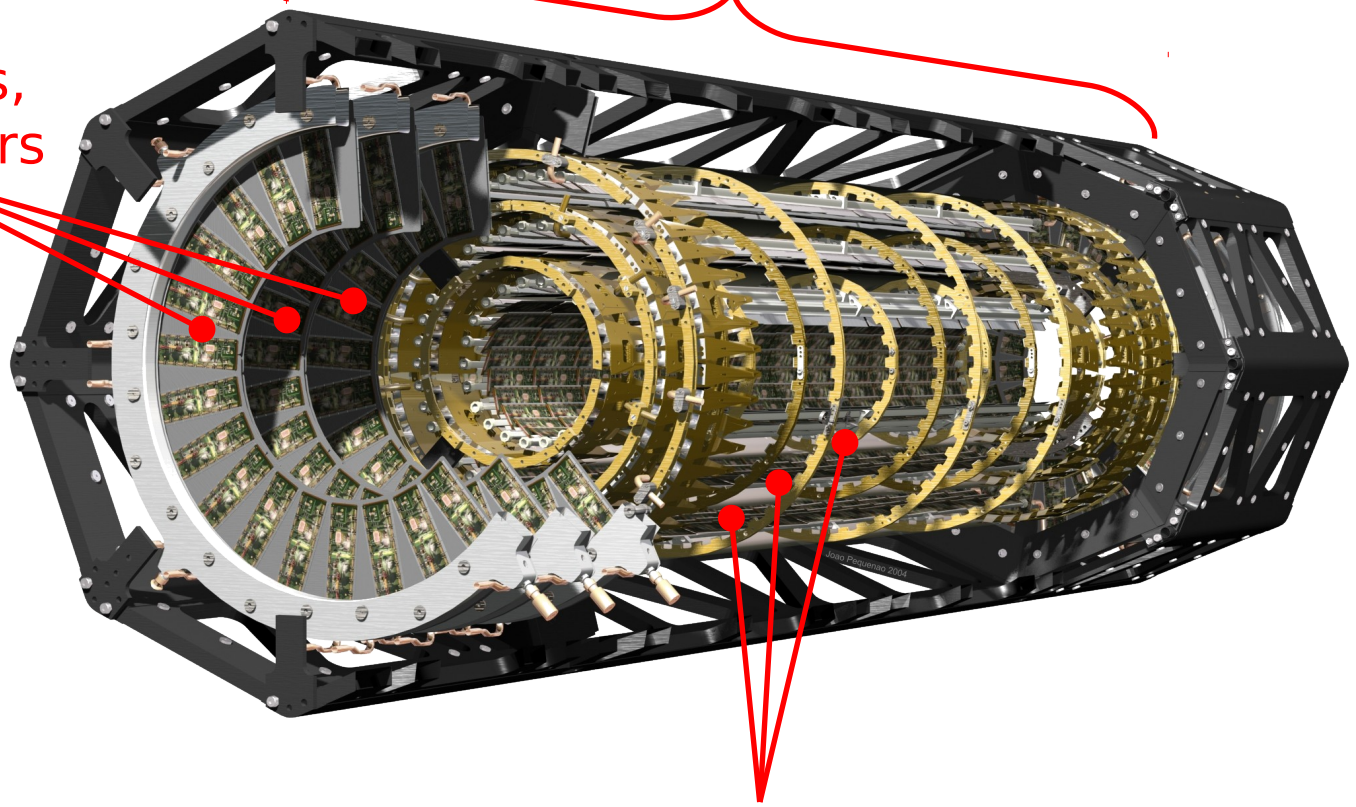
- ~20000 électrons par trace chargée
- Temps de collection des e-: ~5ns

4.Détecteurs de Traces : Silicium

- Atlas : Pixels

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

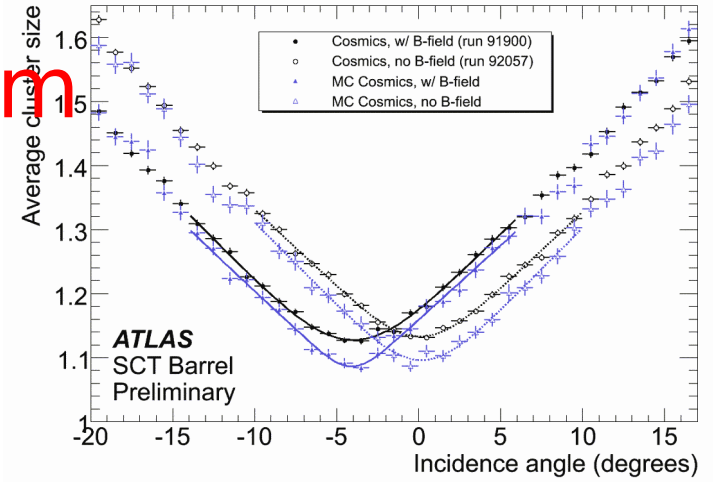
2x3 end-cap disks,
each with 8 sectors
and 48 modules

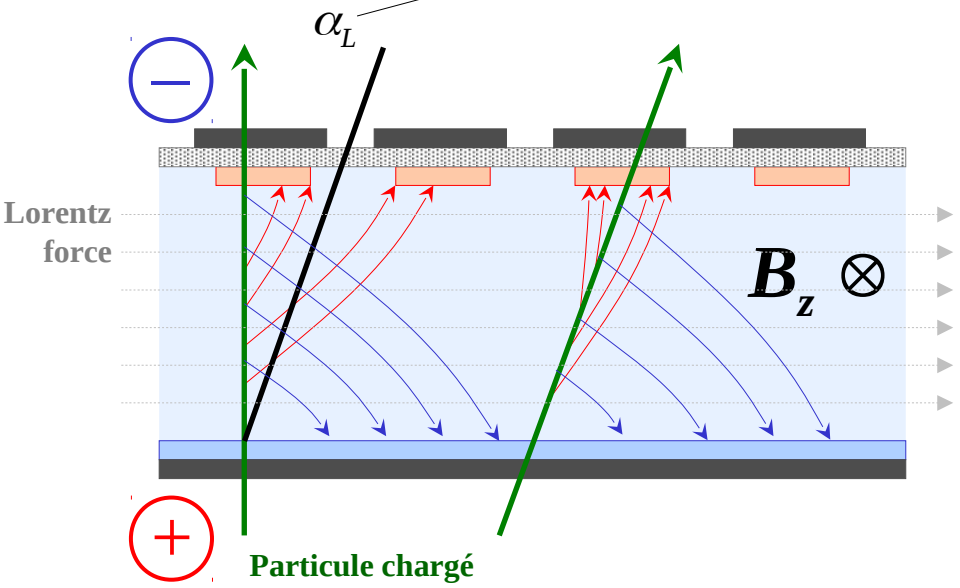


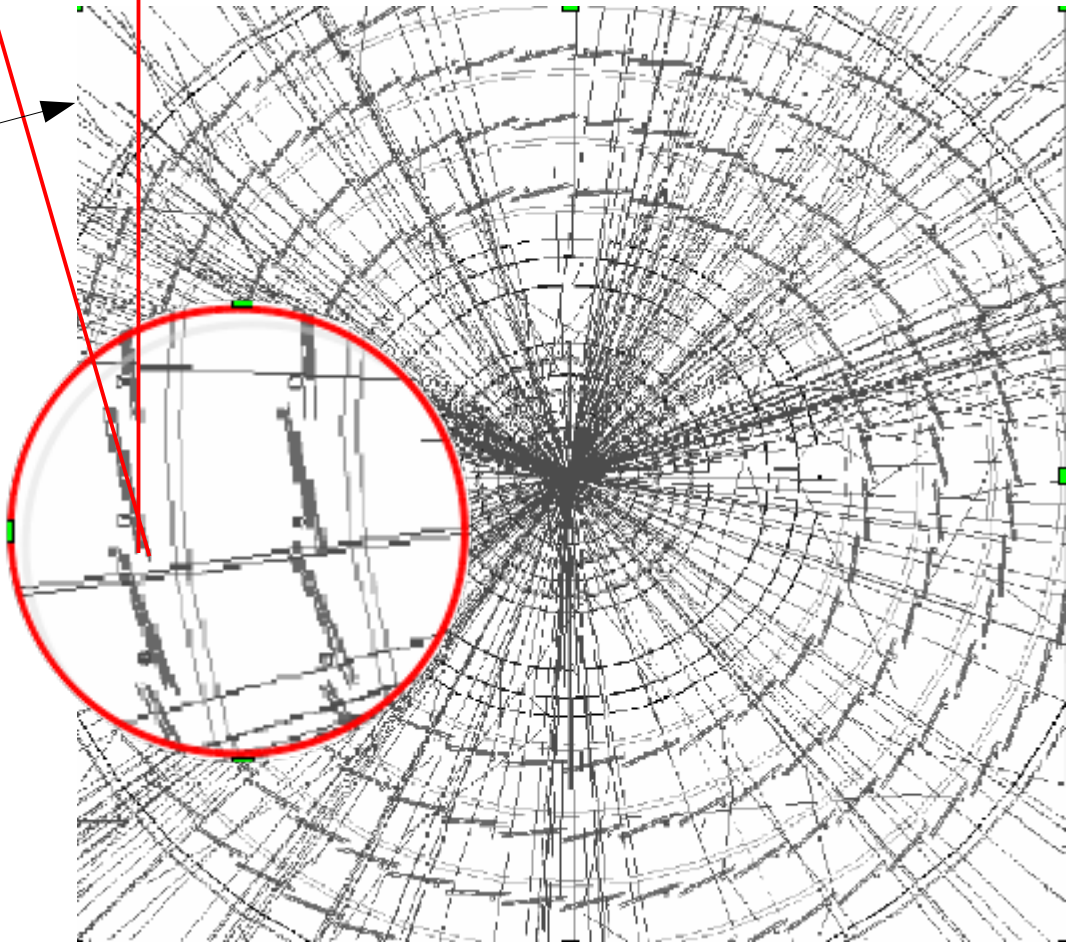
3 Barrel layers (R = 5, 9, 12 cm),
Σ = 1456 barrel modules

4.Détecteurs de Traces : Silicium

- Atlas : Pixels & SCT
  - Pour compenser l'angle de Lorentz , pour les traces radiales (effet Hall), les modules des Pixels (20^0) et du SCT(11^0) sont inclinés.





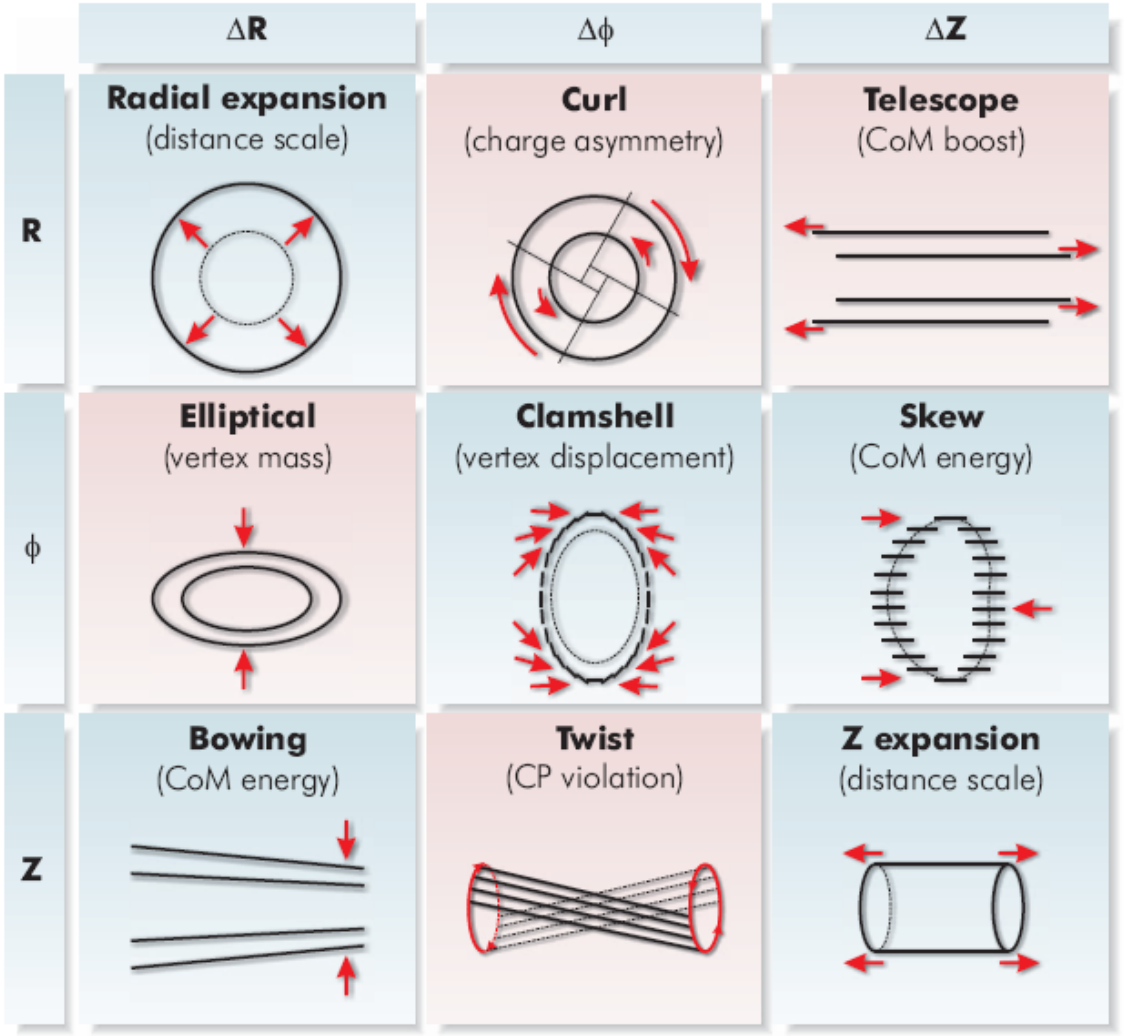


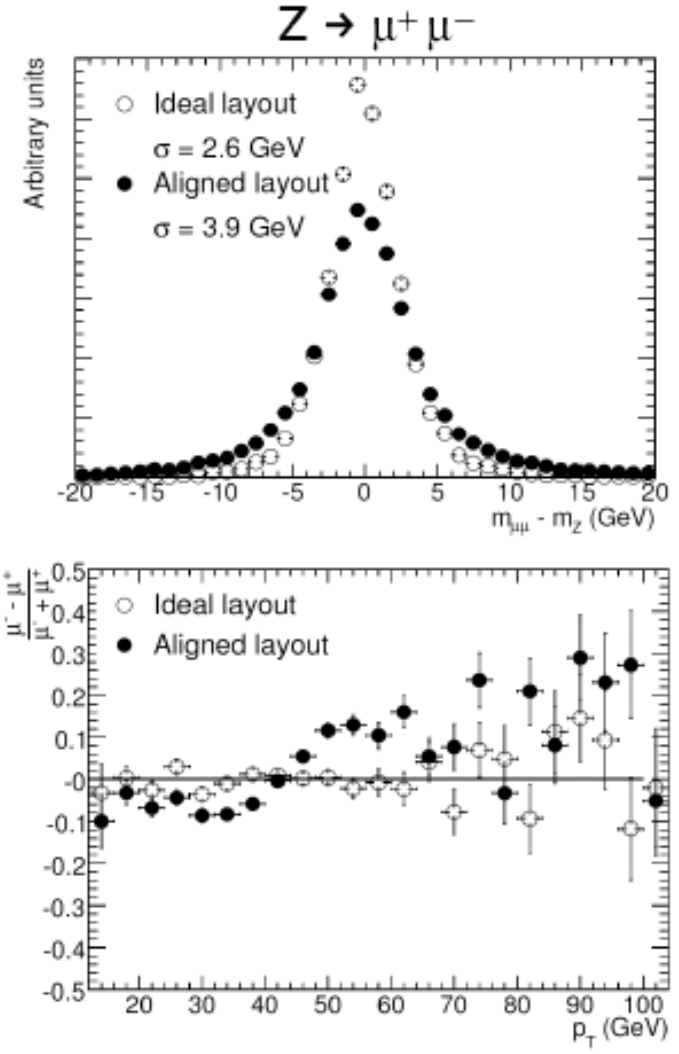
4.Détecteurs de Traces : Silicium

- 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

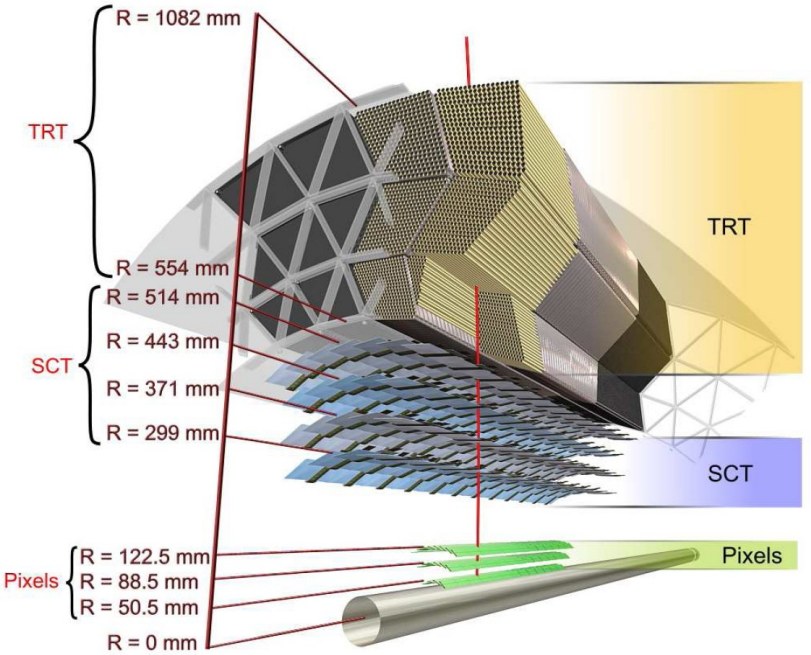
- Atlas: Pixels & SCT : Alignement!!

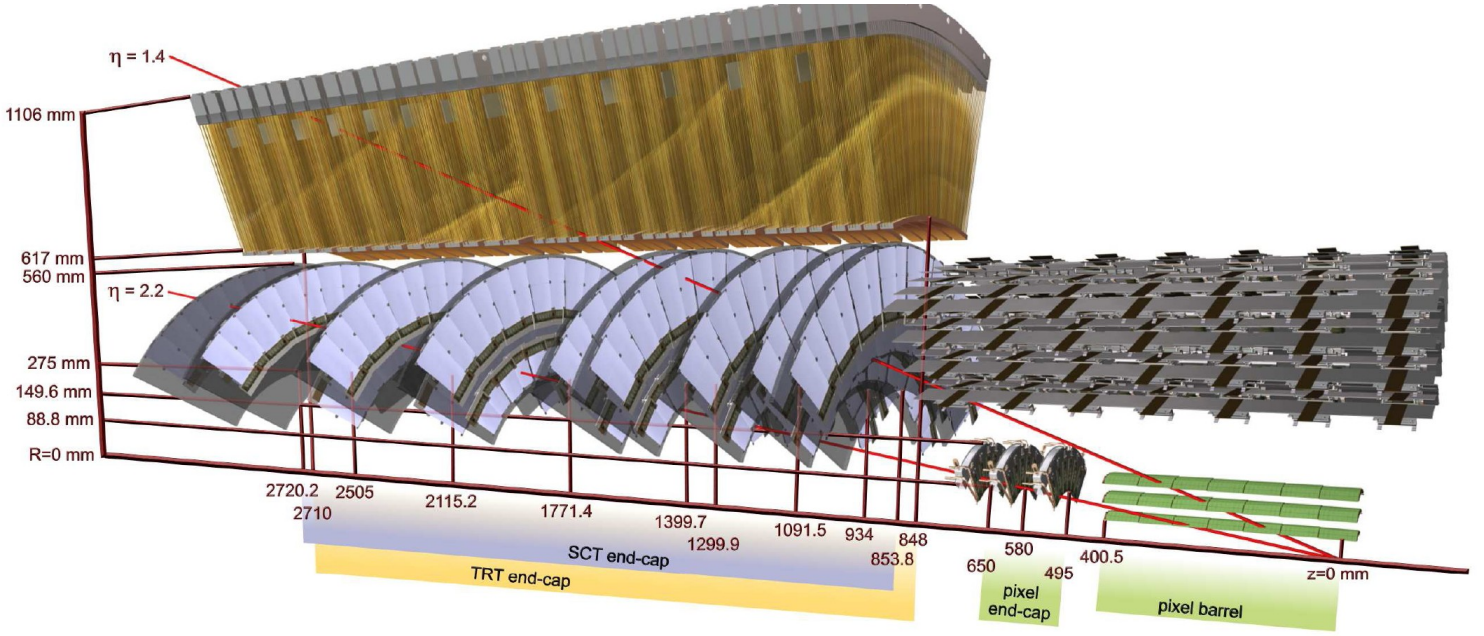




4.Détecteurs de Traces : Silicium & gaz

- 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





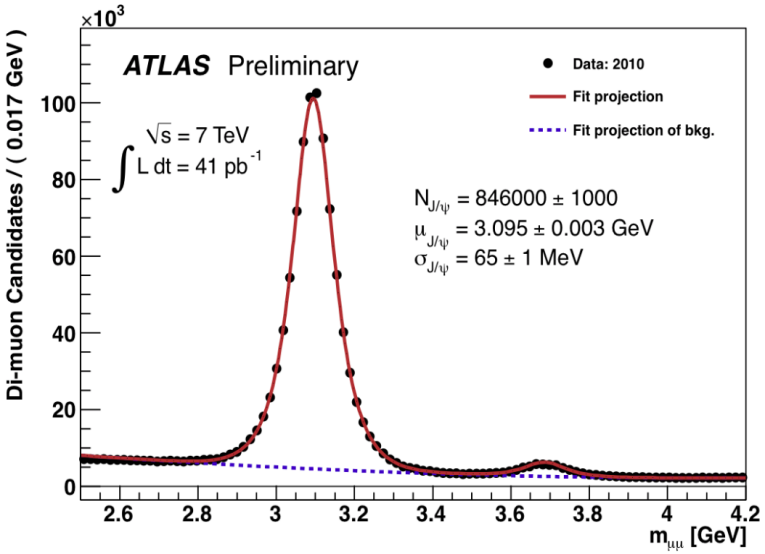
I. Interaction particule/matière
II. Détecteurs de traces
III. Identification des particules

Identification de Suspects Particules

The Usual Suspects

$e^{\pm}$ γ $\mu^{\pm}$ Hadrons chargés $p, k^{\pm}, \pi^{\pm}$... Hadrons neutres n, π^0, λ,...

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 ($<\sim 10^{-10}$s)

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

Introduction

Particules « stables »

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

Exemples

- **$\mu^{\pm}$**: 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...
  - Impulsion & énergie
  - Impulsion & vitesse
  - Énergie & vitesse

Identification directe

- μ,e

Identification

Principes de Physiques:
Interactions électromagnétiques

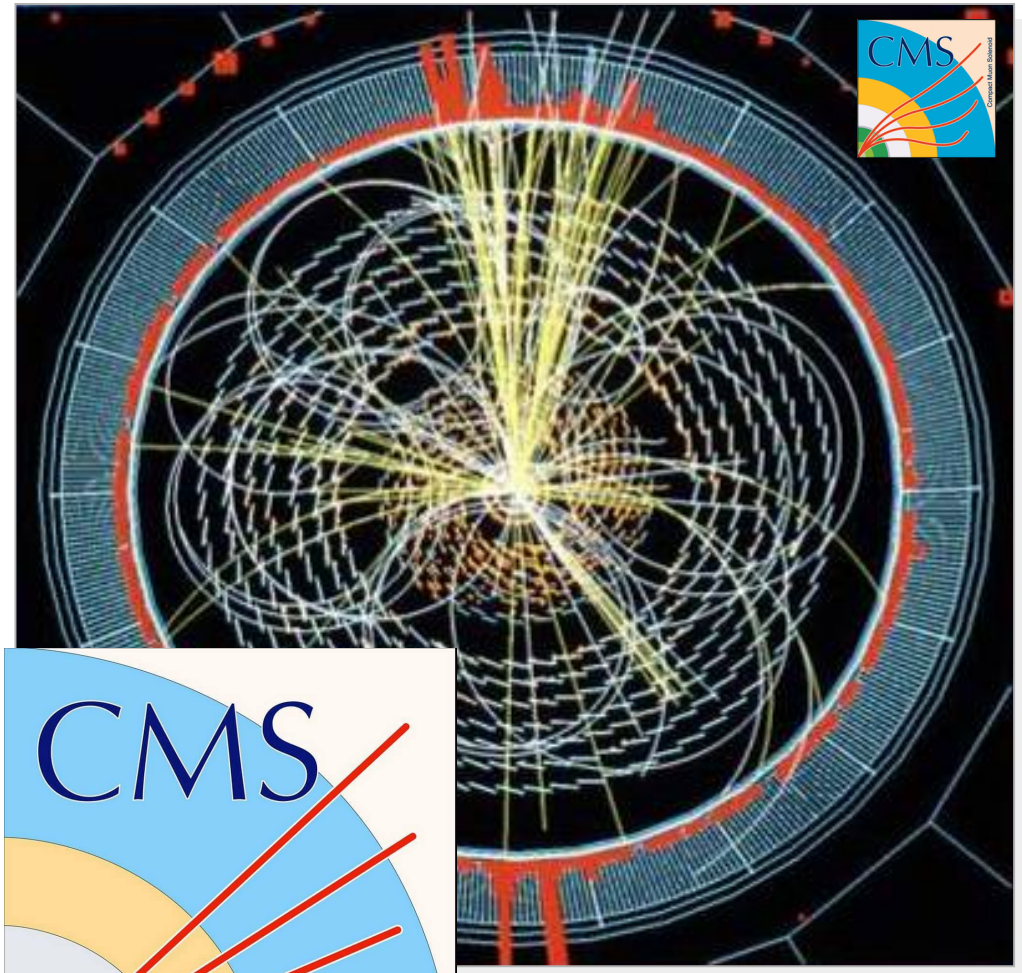
- Mesure simultanée de l'impulsion &
  - dEdx
  - Temps de vol
  - Cerenkov

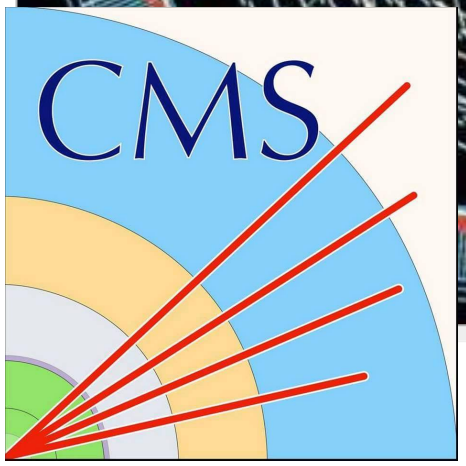
$$\begin{cases} p = \gamma M \beta c \\ \dfrac{dE}{dx} \propto \dfrac{1}{\beta^2} \ln\left(\beta^2 \gamma^2\right) \end{cases}$$

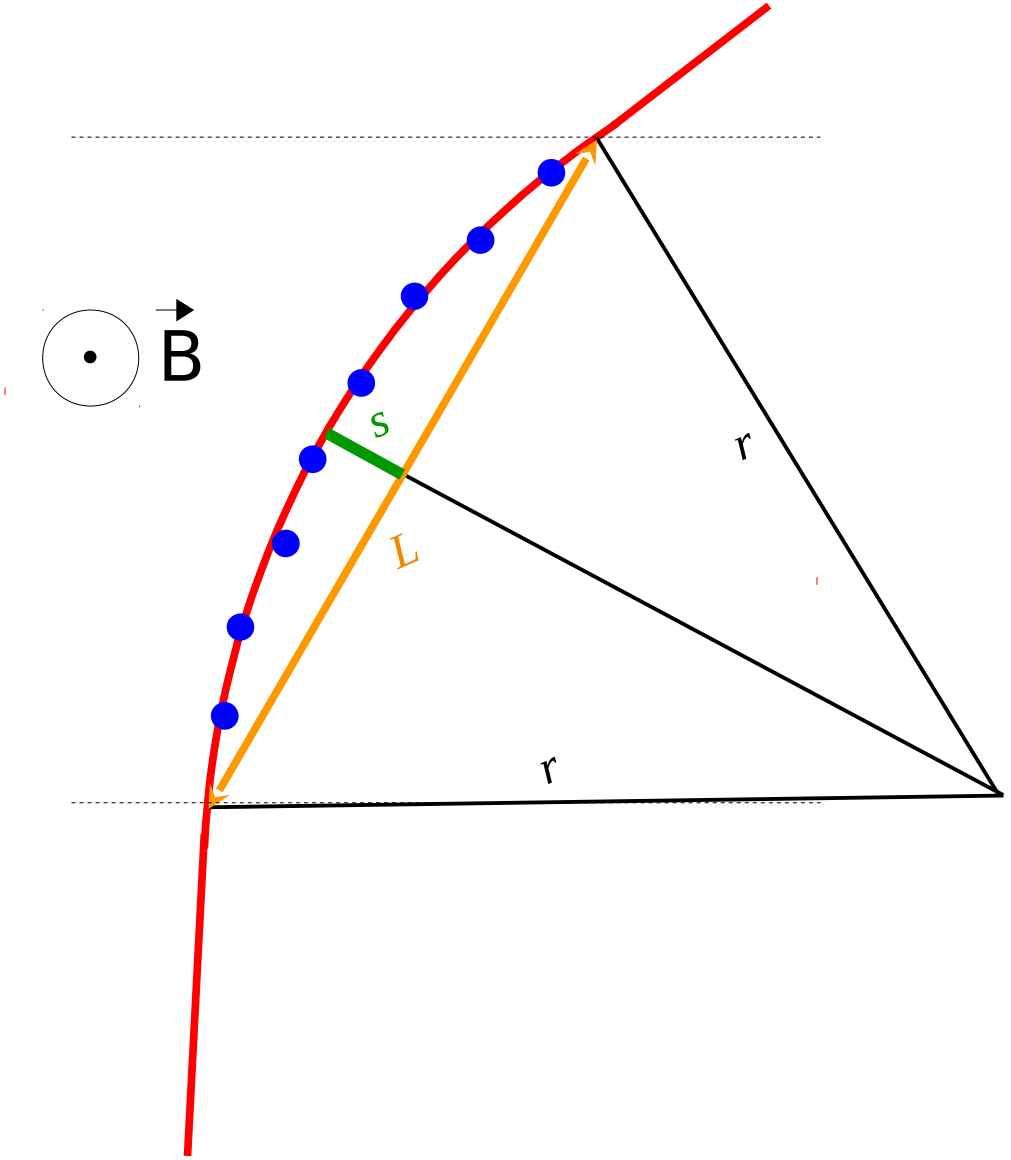
- Rayonnement de transition
  - Séparation π/e
  - Identification directe des électrons

champ magnétique

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





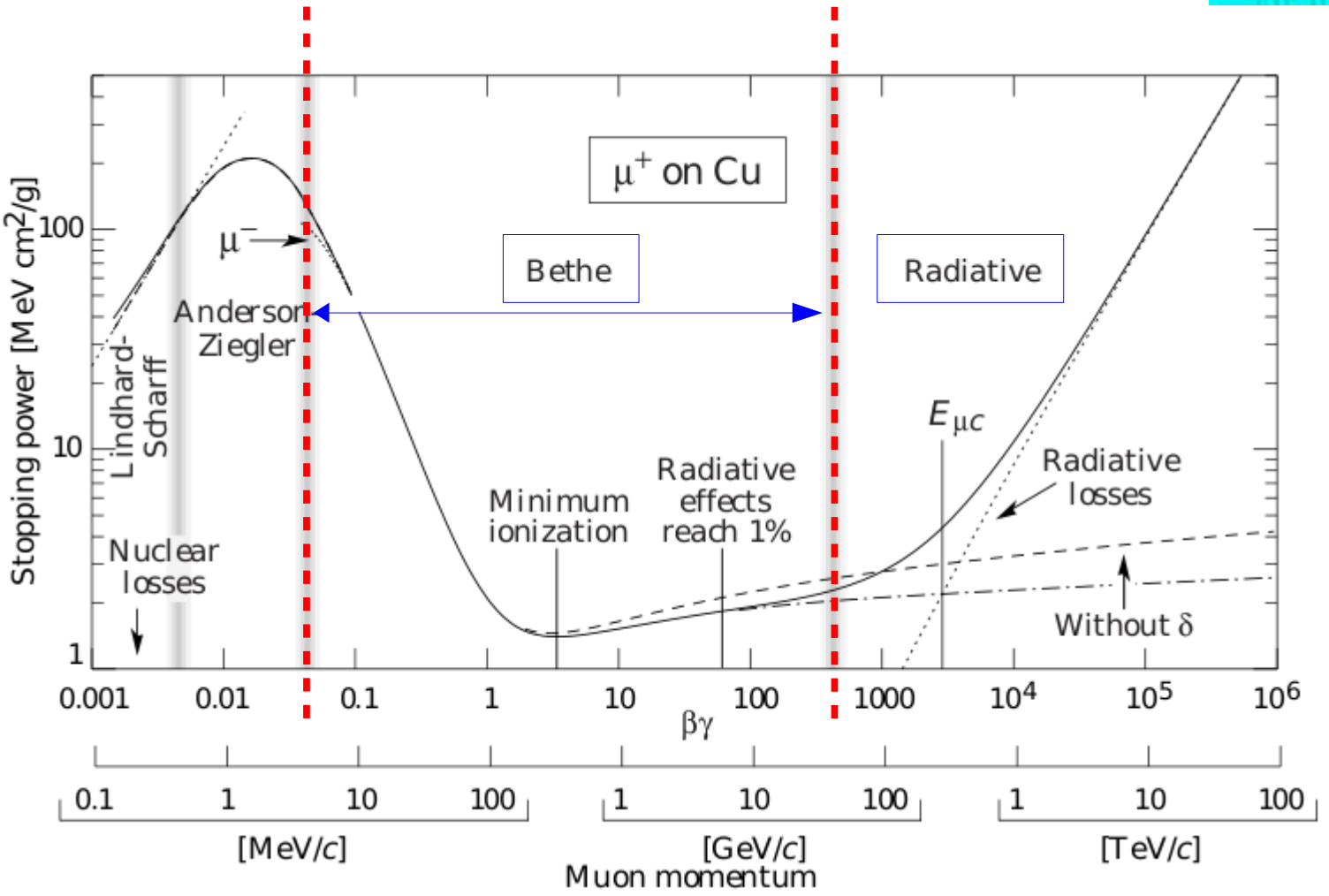


Identification

dE/dx

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

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

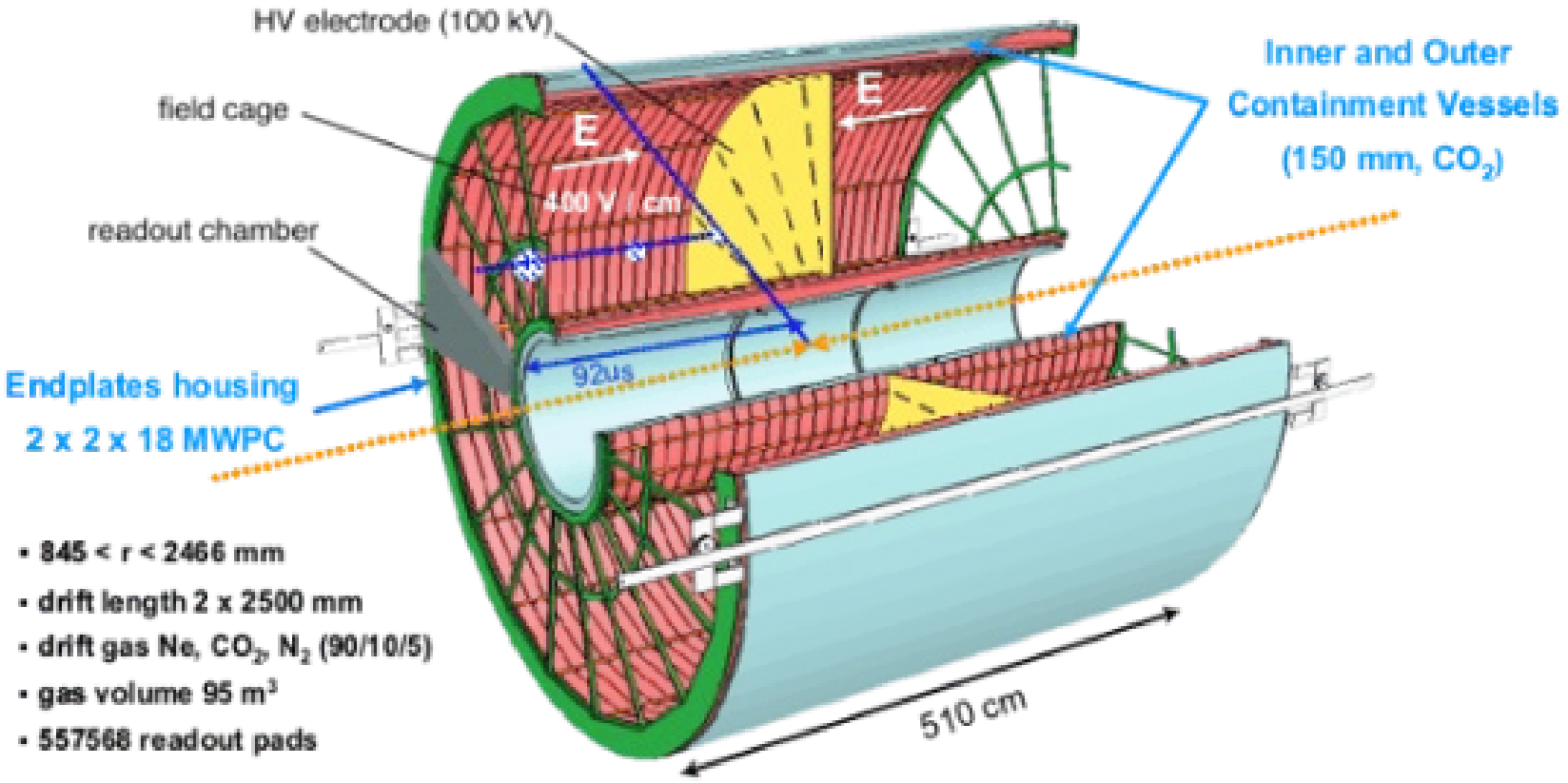


Identification

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

dE/dx

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

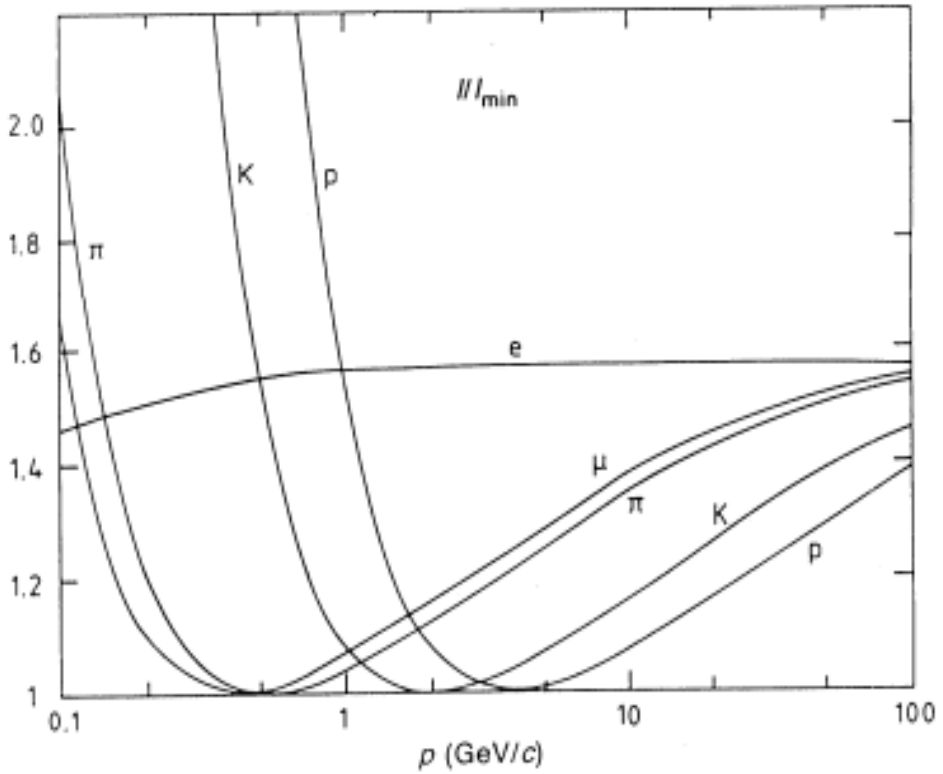


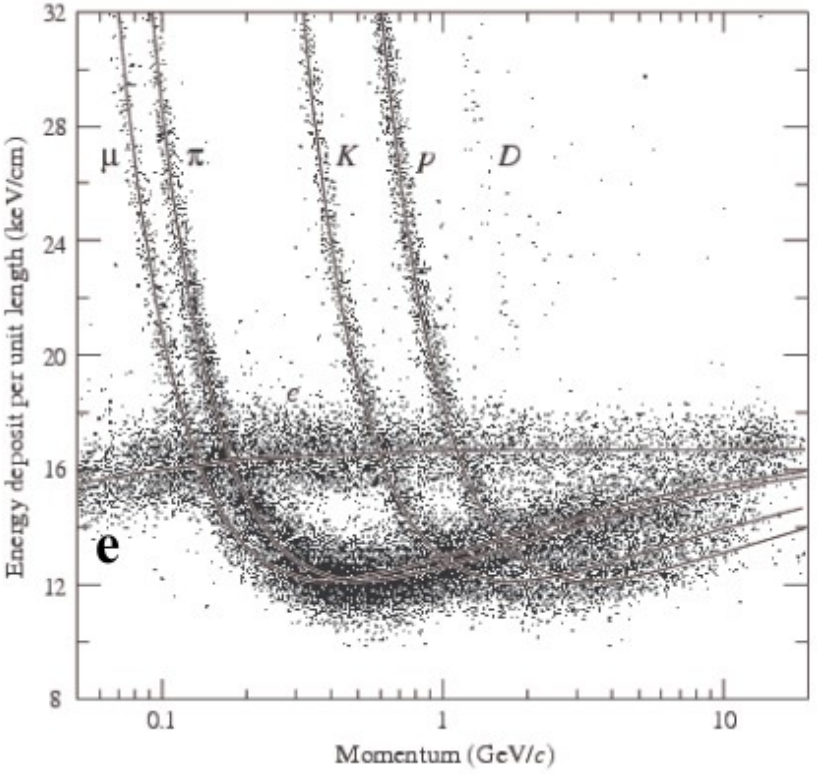
Identification

dE/dx

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

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

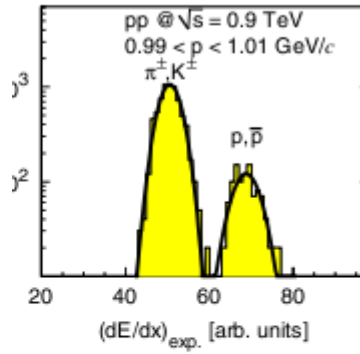




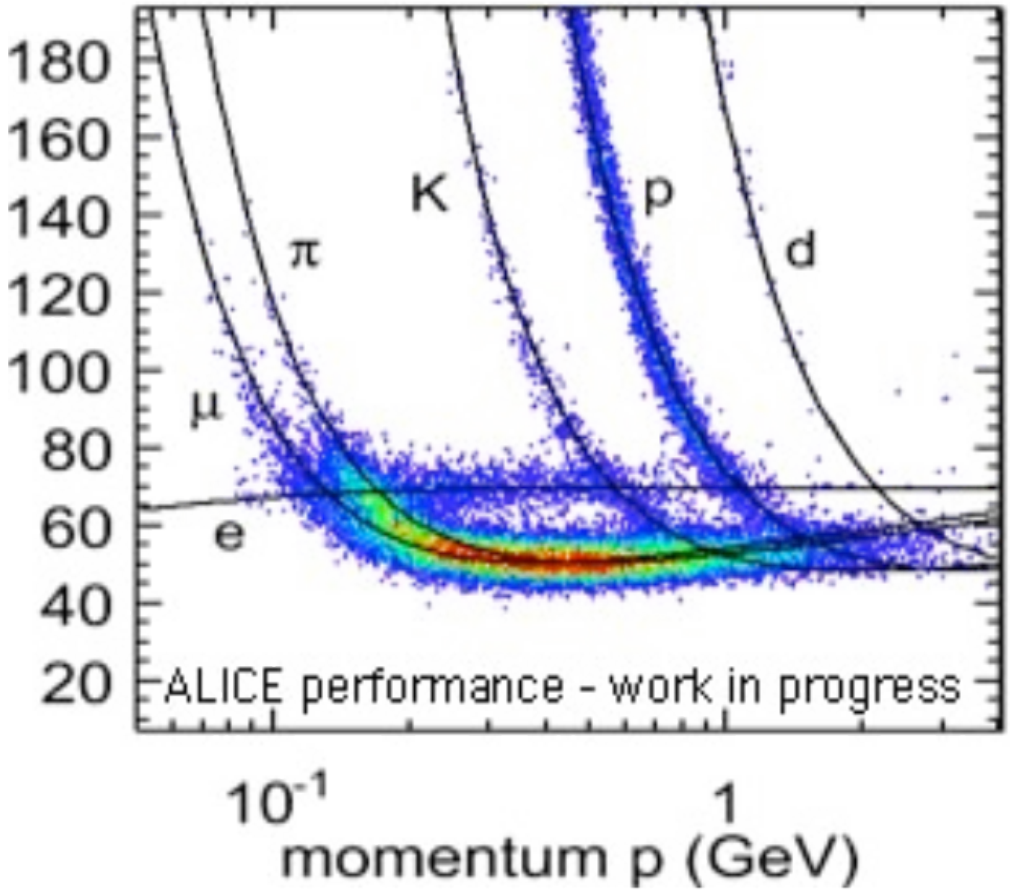
Gamme d'énergie : ~0.1-->~10 GeV

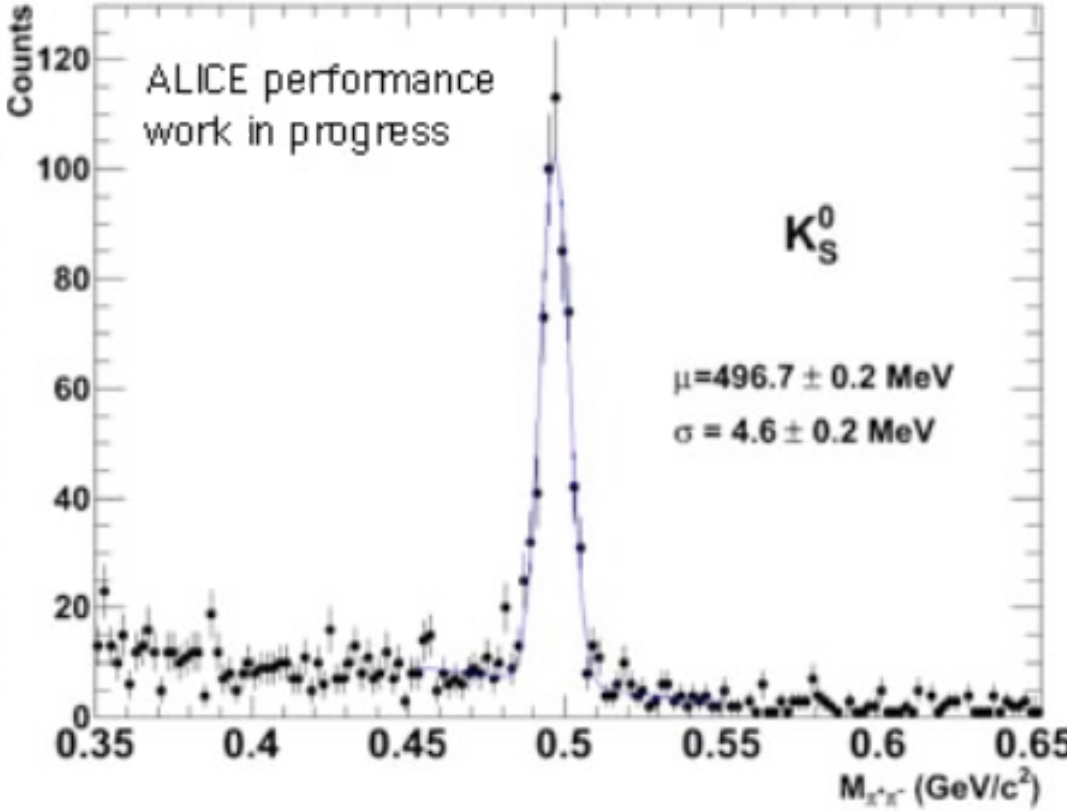
Identification

dE/dx:Alice



Ce n est pas le même K → $K^0_s \rightarrow \pi\pi$

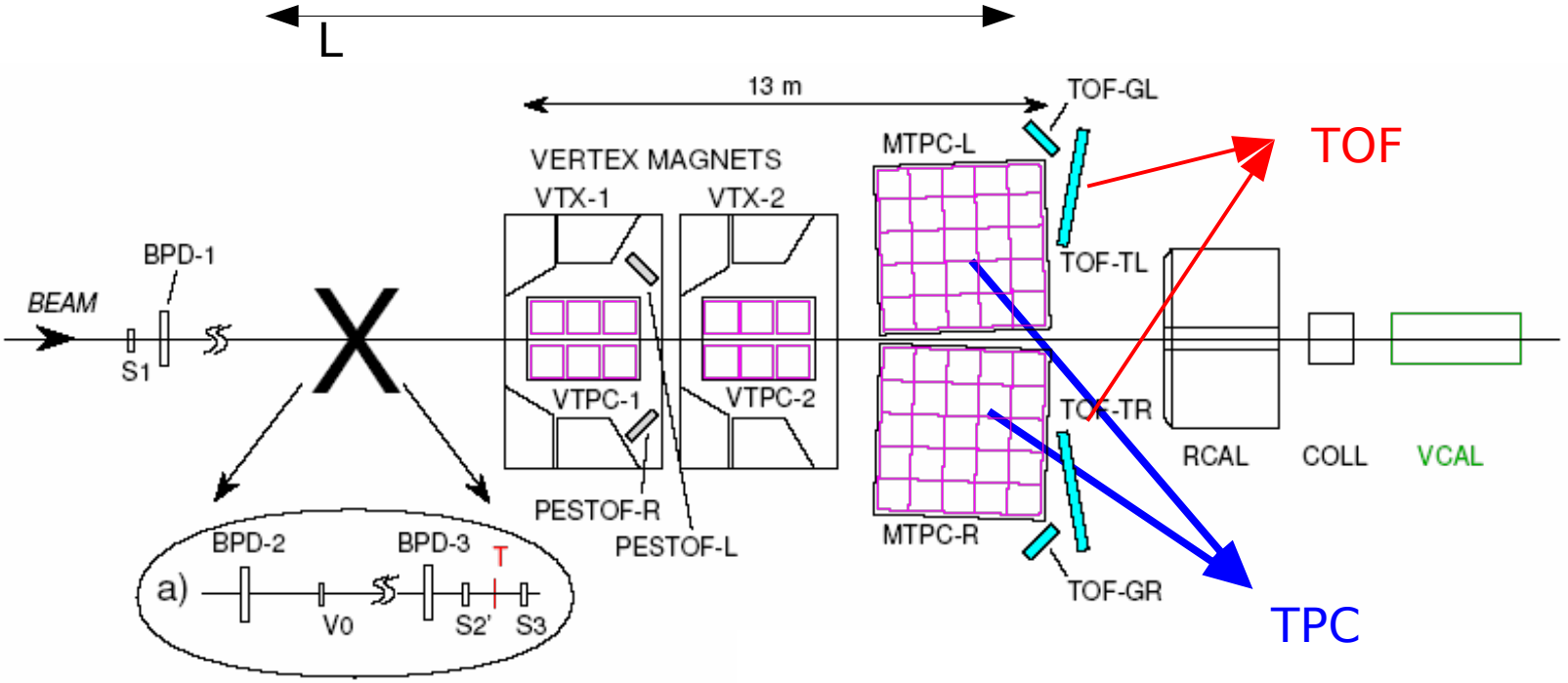




Identification

Temps de vol

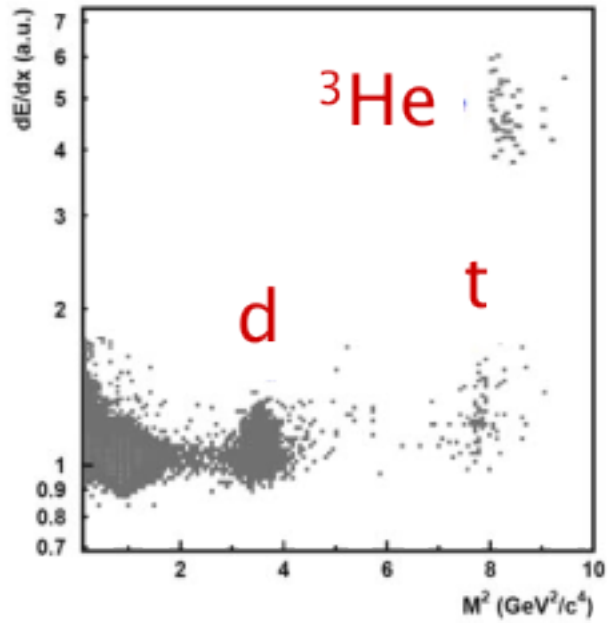
- Scintillateurs + PM:NA49
  - Entre le point d'interaction et un autre point
  - $\Delta t = L/\beta\ c$ et mesure de impulsion

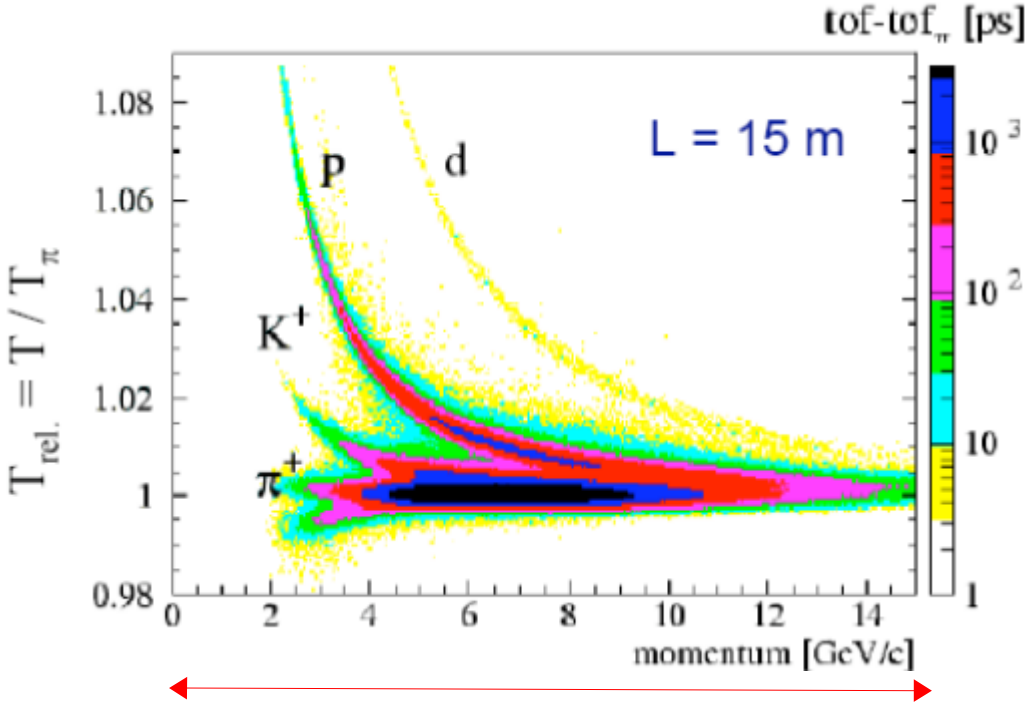


Identification

Temps de vol

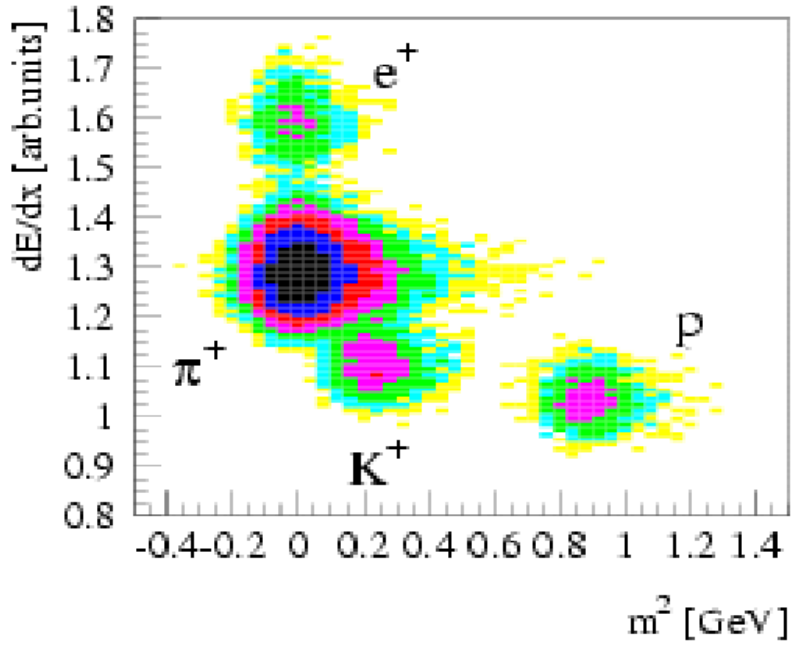
- Scintillateurs + PM: Na 49



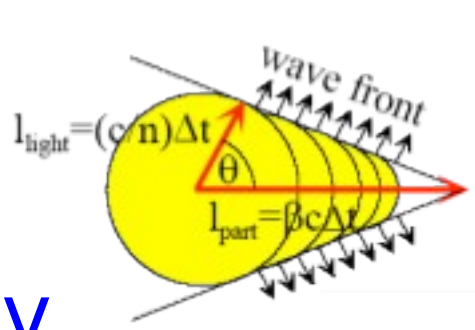


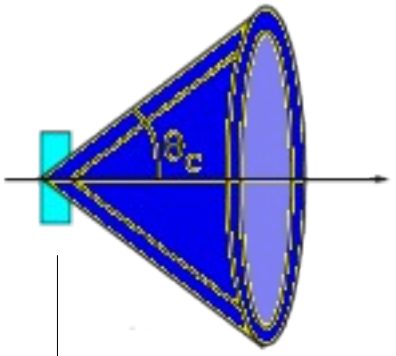
Gamme d'énergie : ~1-->~10 GeV

+dEdx



Identification

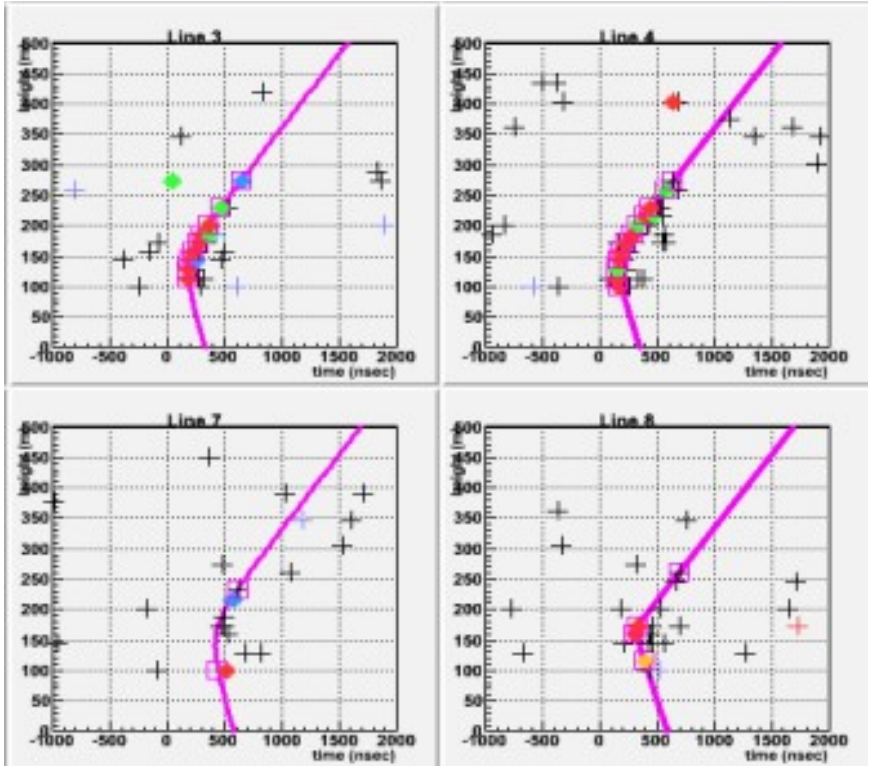


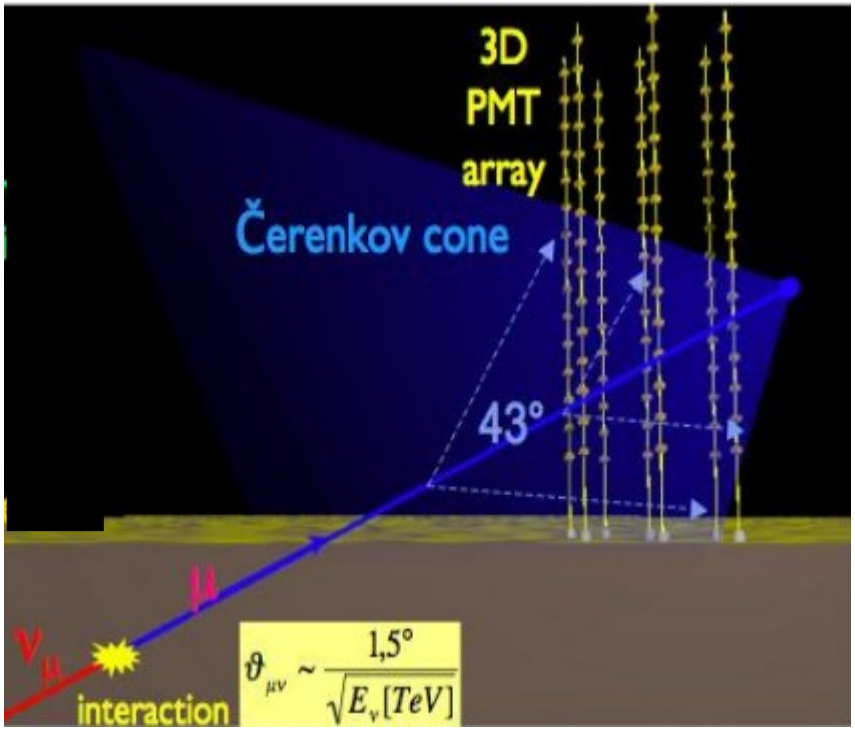


Rayonnement Cherenkov

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

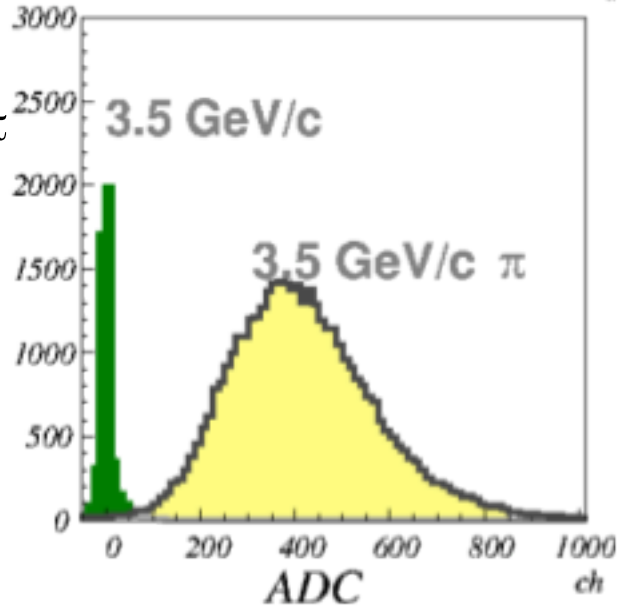
Changement d'indice





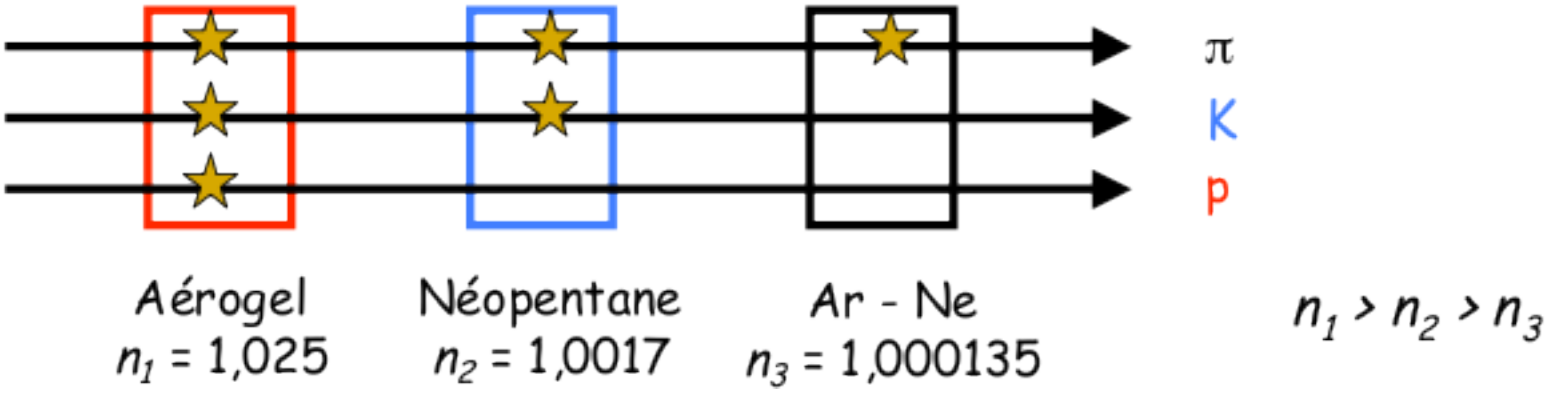
Identification

Belle : séparation ?/π



Rayonnement Cherenkov

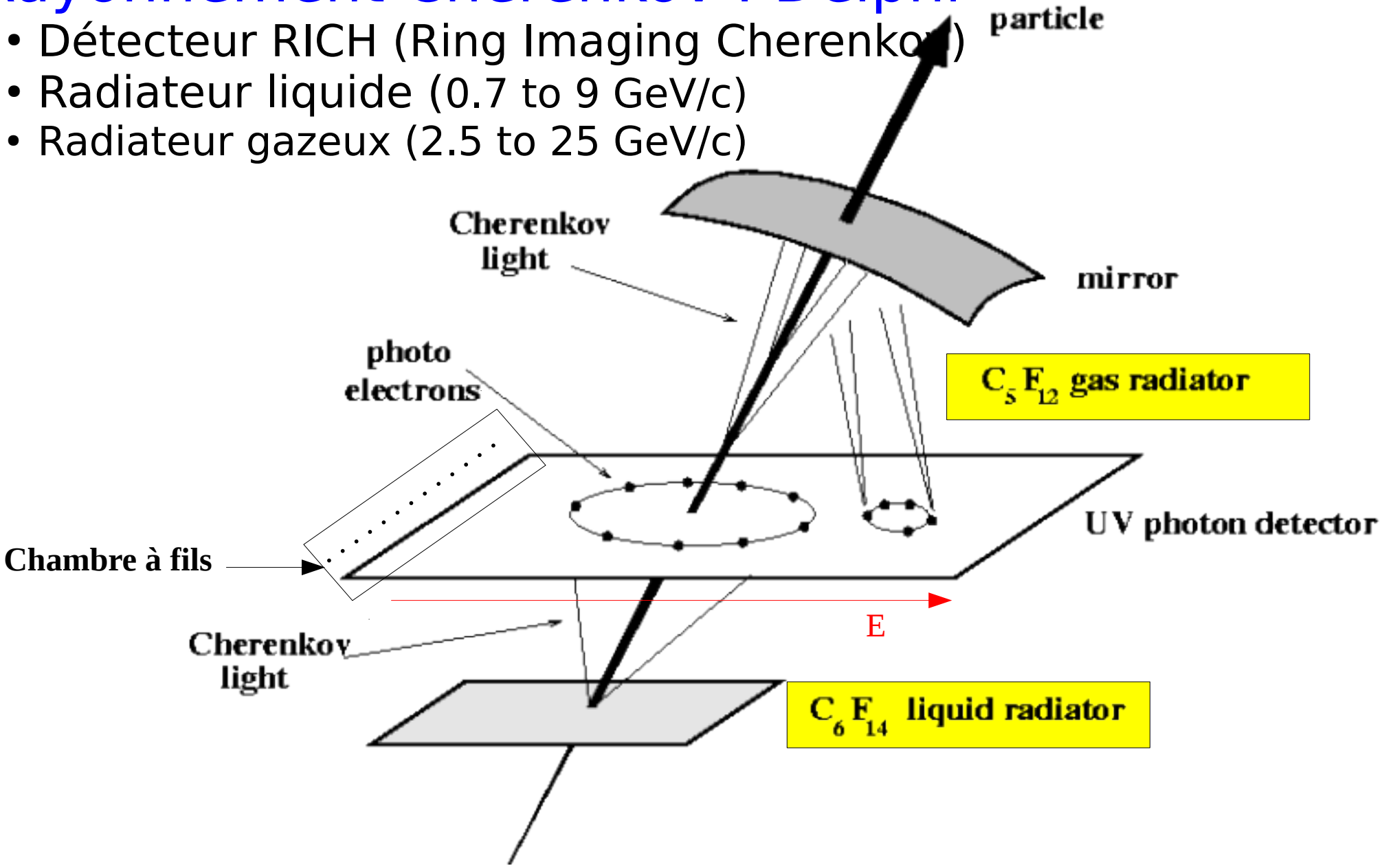
- Détecteur à seuil
- Choix astucieux du milieu va permettre de produire ou non la radiation Cherenkov $\beta=1/n$



Identification

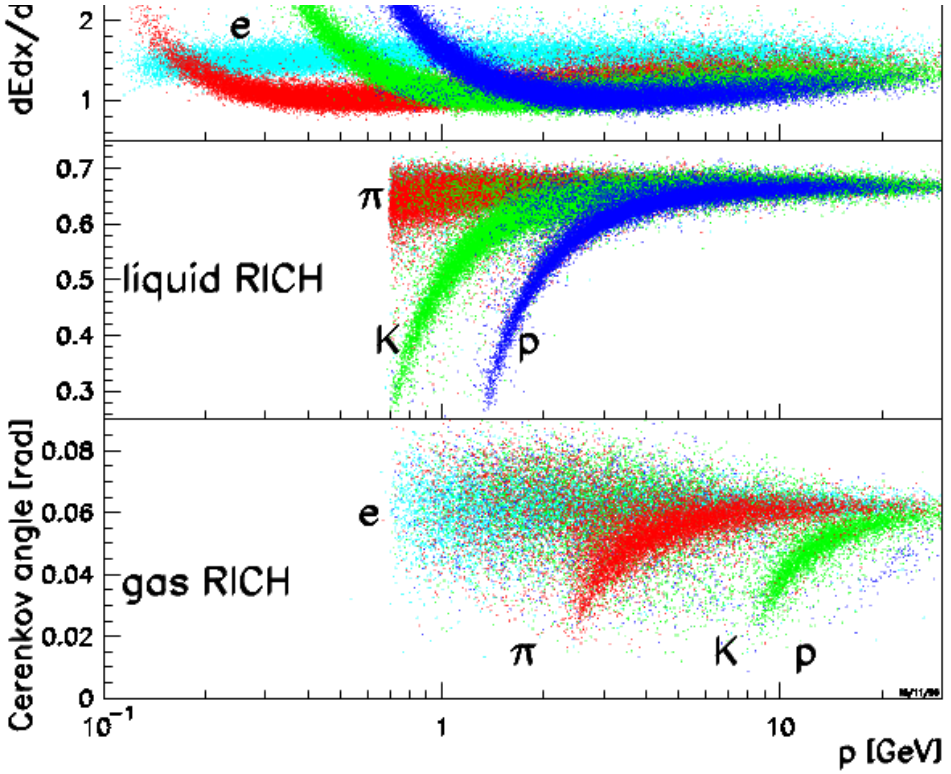
Rayonnement Cherenkov : Delphi

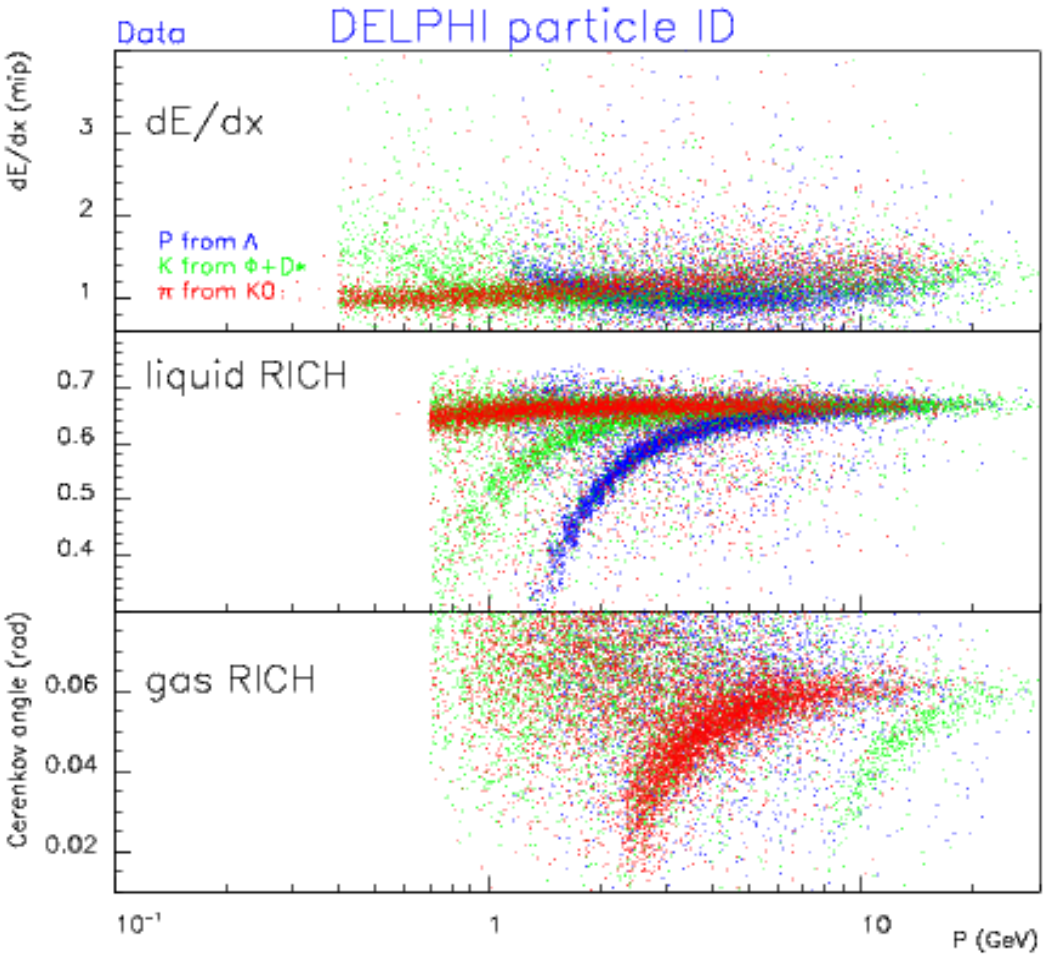
- Détecteur RICH (Ring Imaging Cherenkov)
- Radiateur liquide (0.7 to 9 GeV/c)
- Radiateur gazeux (2.5 to 25 GeV/c)



Identification

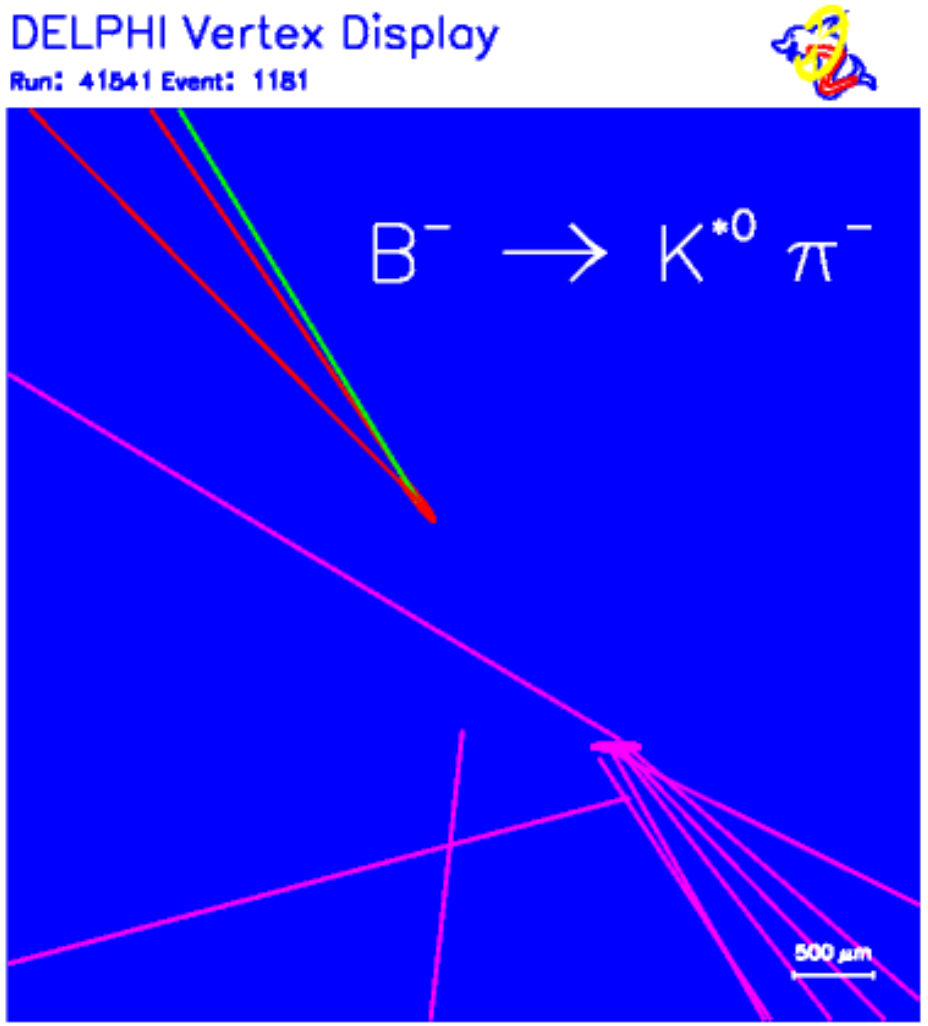
Rayonnement Cherenkov: Delphi

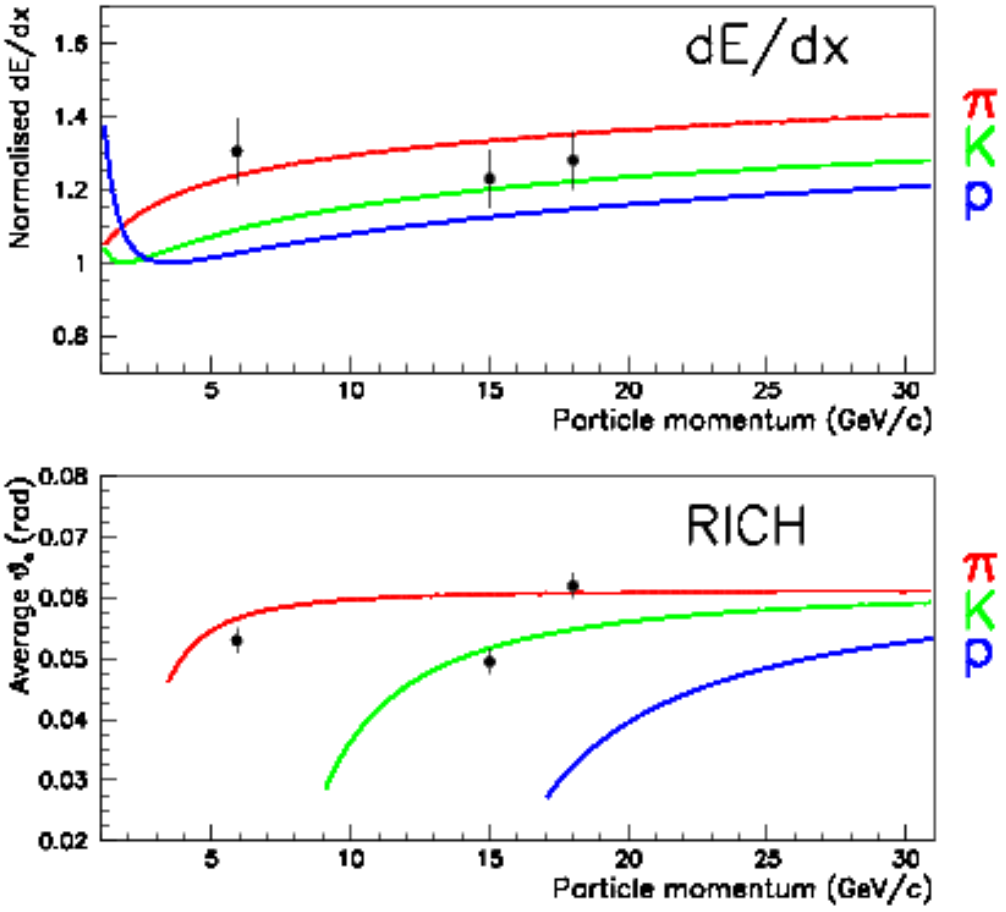




Identification

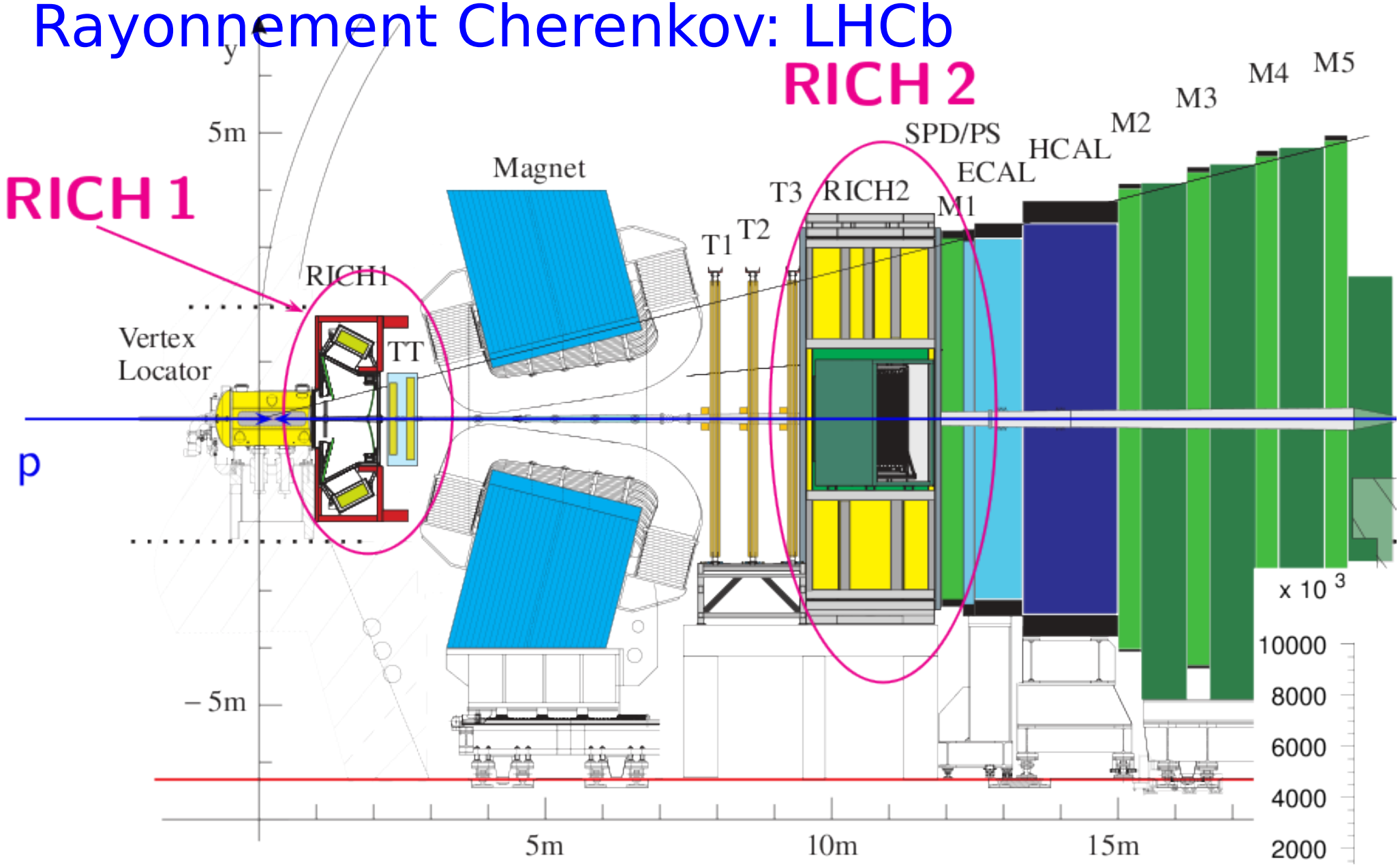
Rayonnement Cherenkov + dE/dx: Delphi





Identification

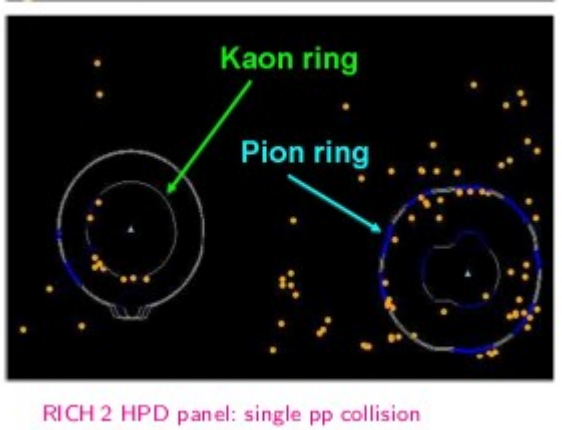
Rayonnement Cherenkov: LHCb



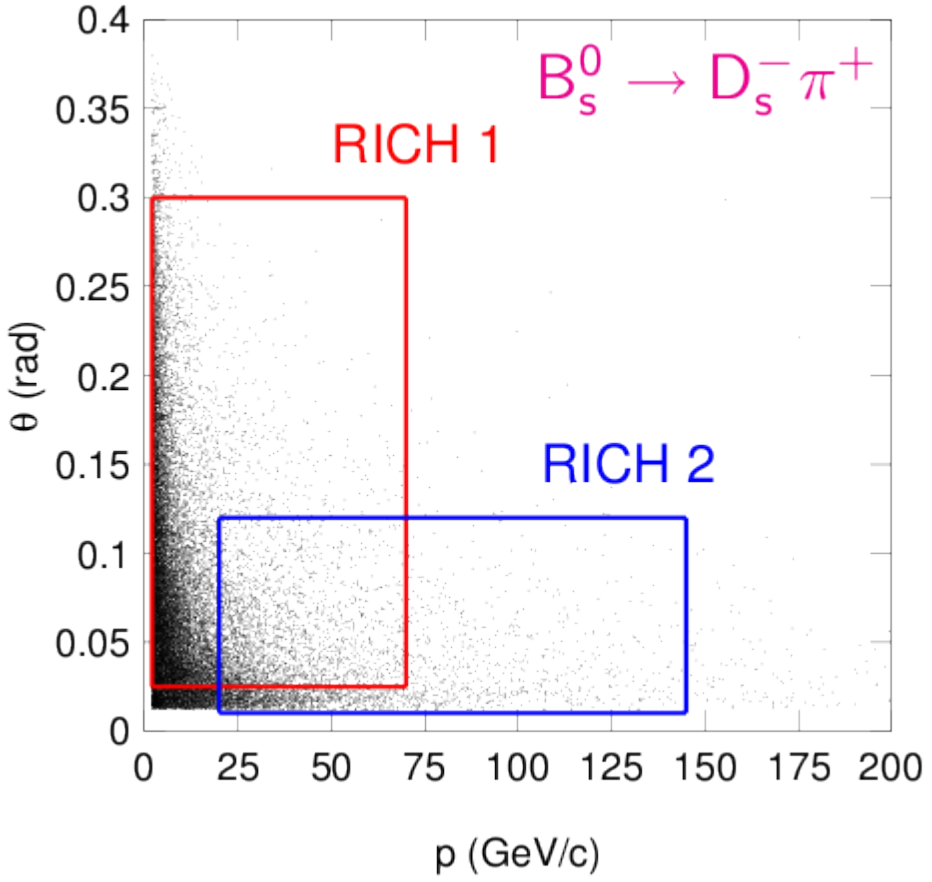
SUSY, UNE THÉORIE SÉDUISANTE, EN VOL DEPUIS 40 ANS

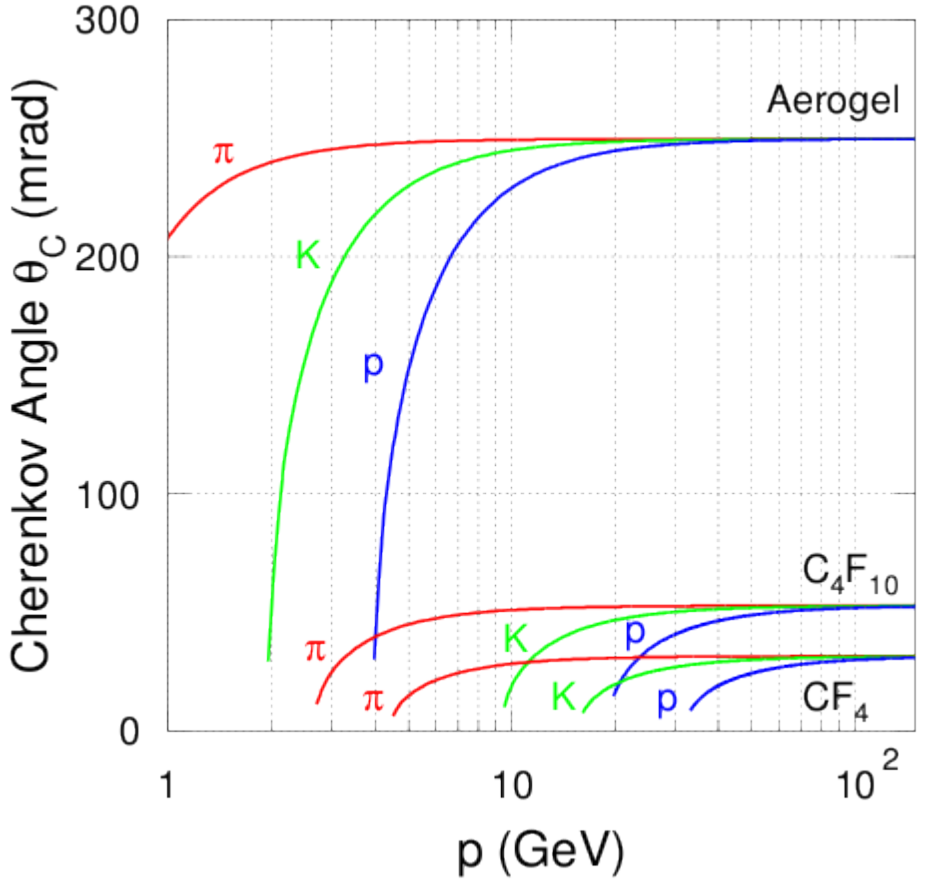
Identification

Rayonnement Cherenkov: LHCb



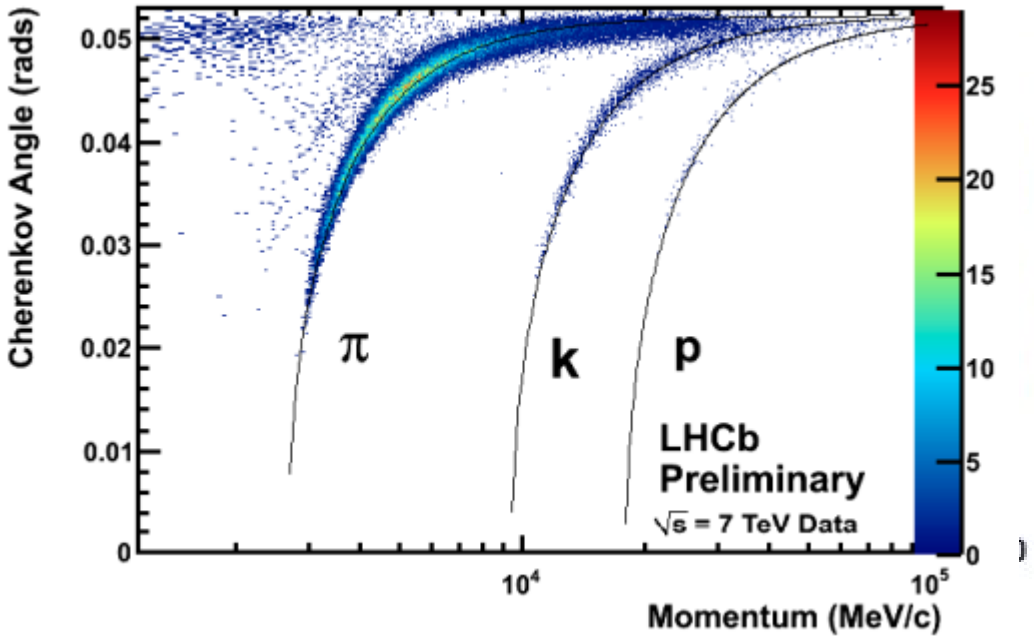
RICH 2 HPD panel: single pp collision

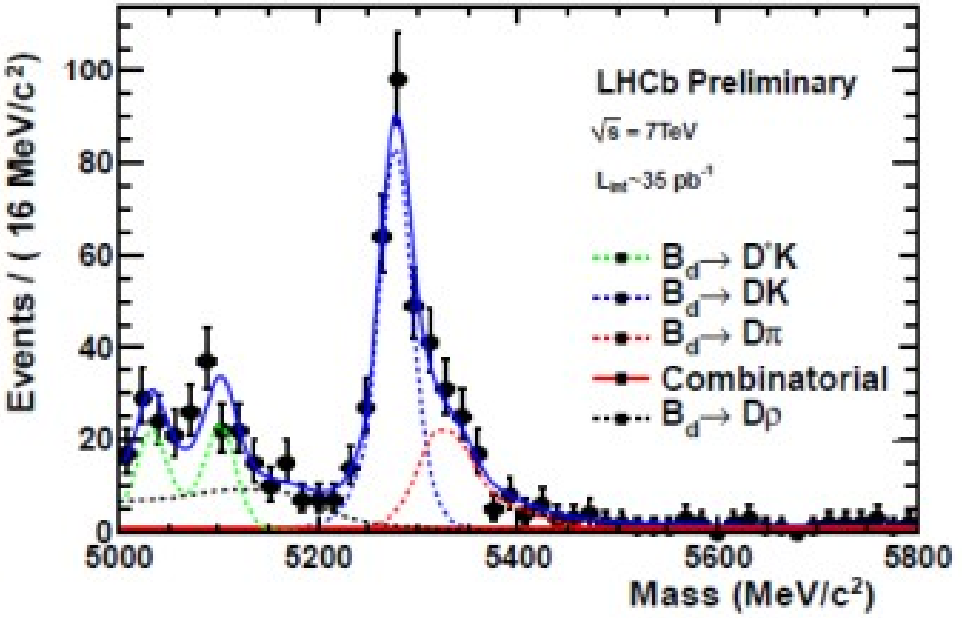




Identification

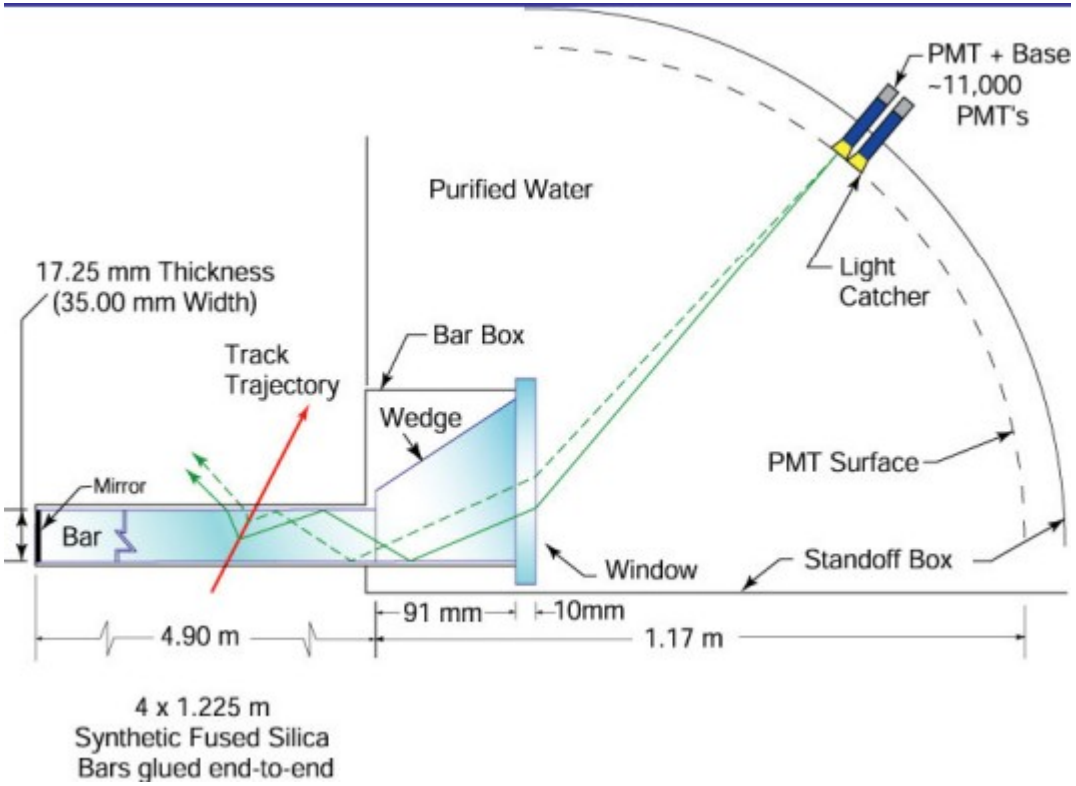
Rayonnement Cherenkov: LHCb

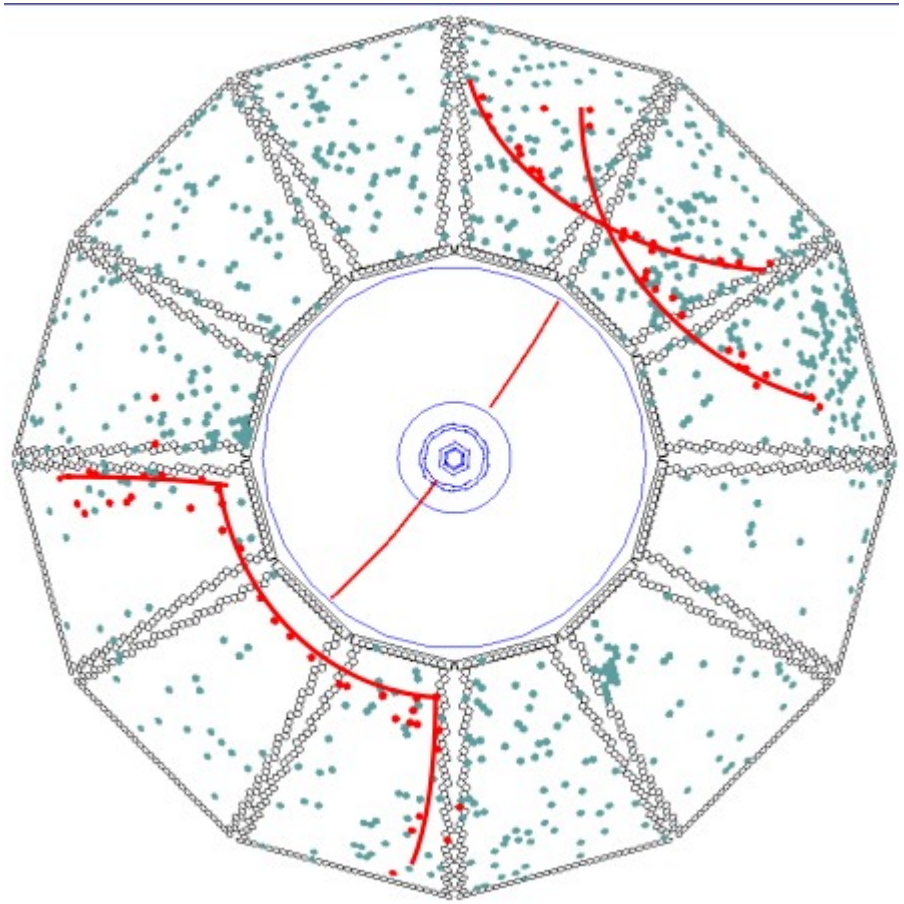




Identification

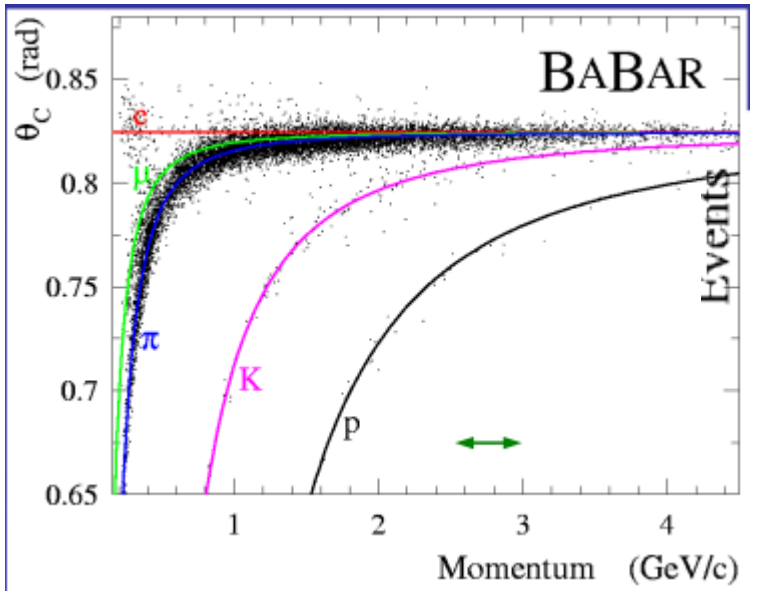
Rayonnement Cherenkov: BaBar

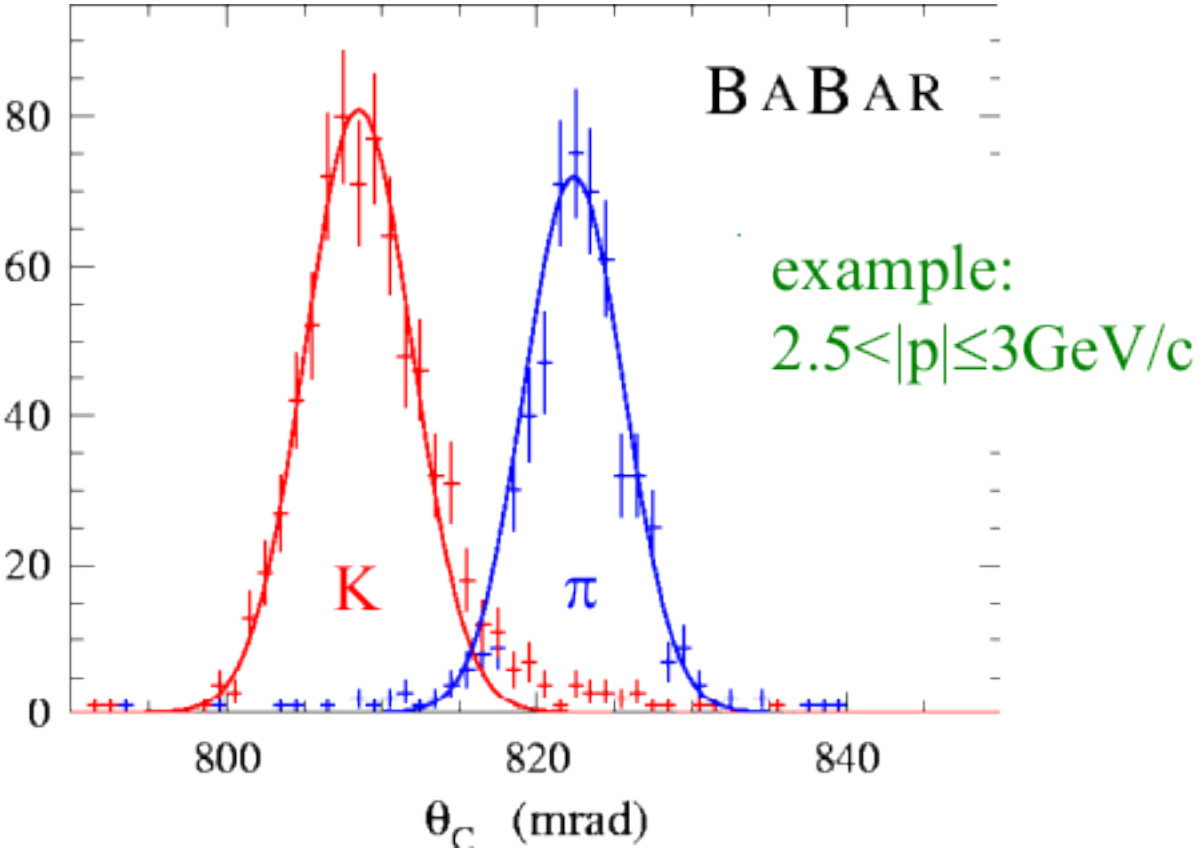




Identification

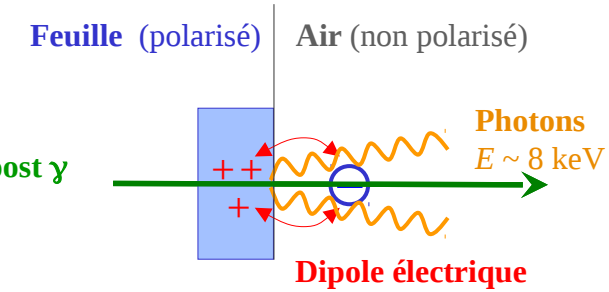
Rayonnement Cherenkov: BaBar



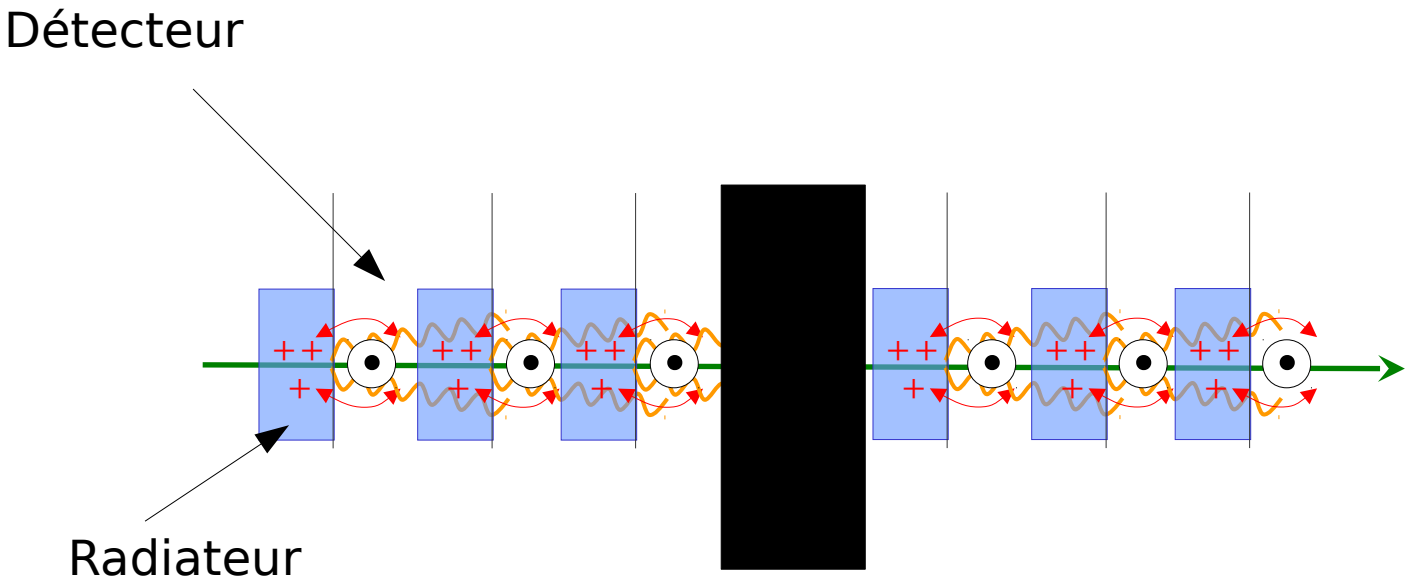


Identification

Rayonnement de Transition



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

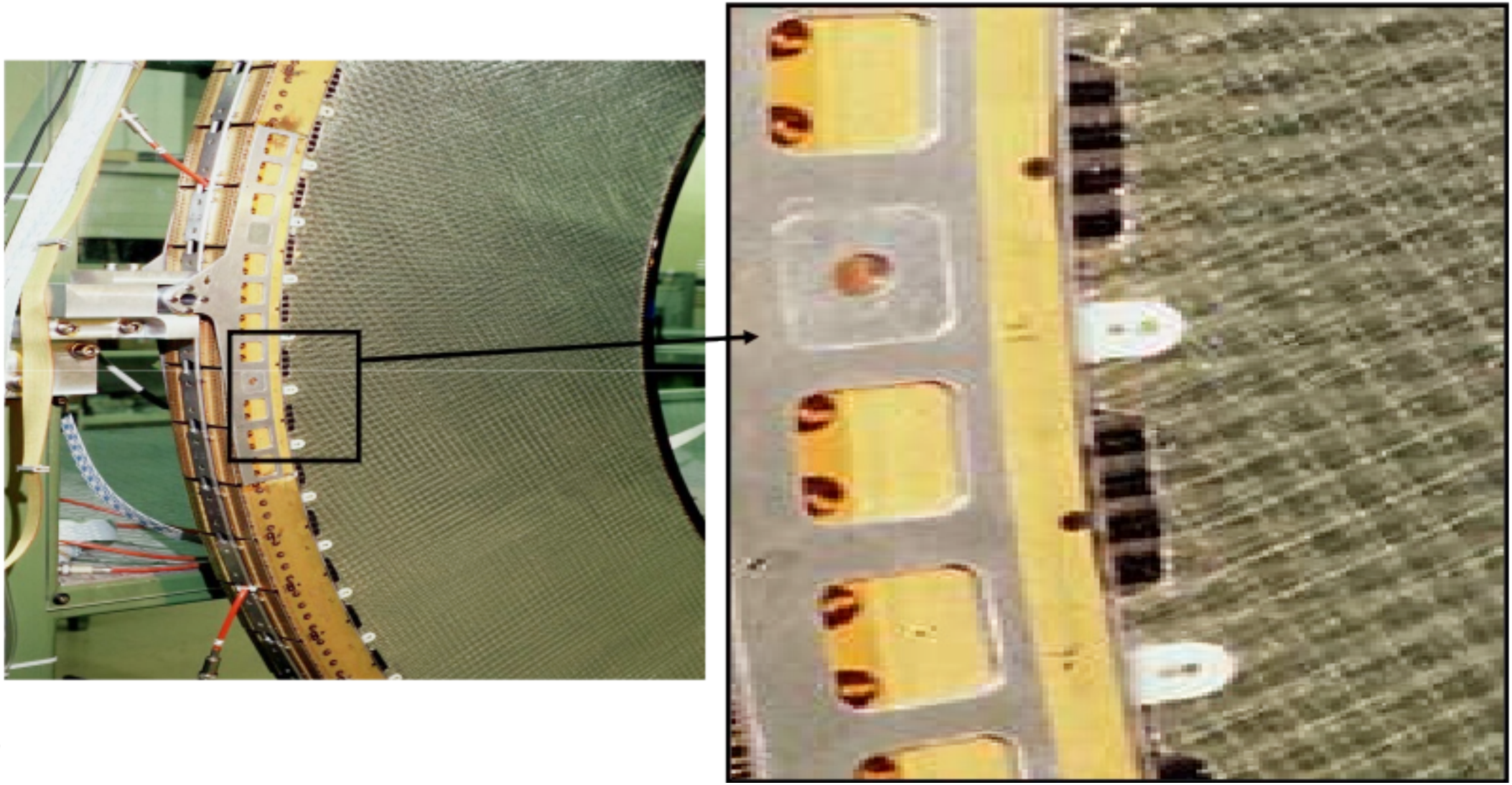


support :
tous les photons de RT sont absorbés

Identification

Rayonnement de Transition

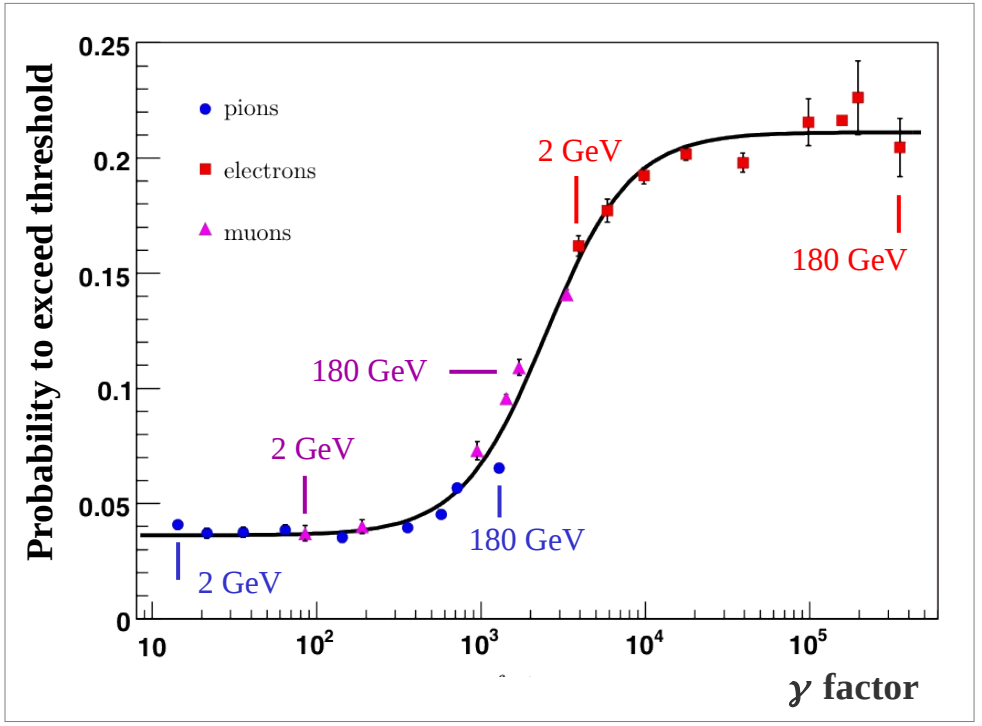
- Atlas : TRT

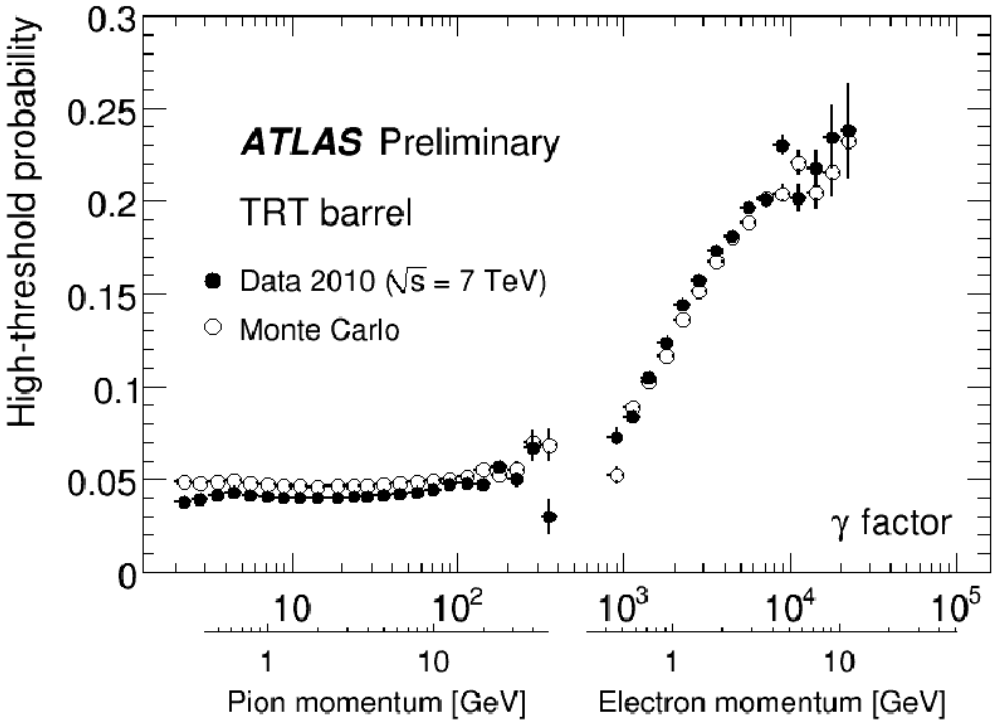


Identification

Rayonnement de Transition

- Atlas : TRT

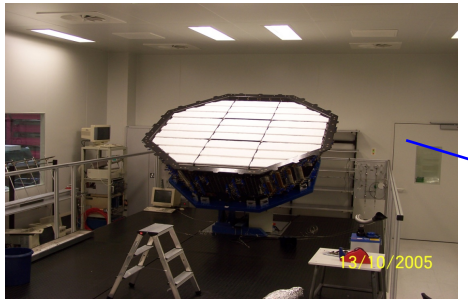




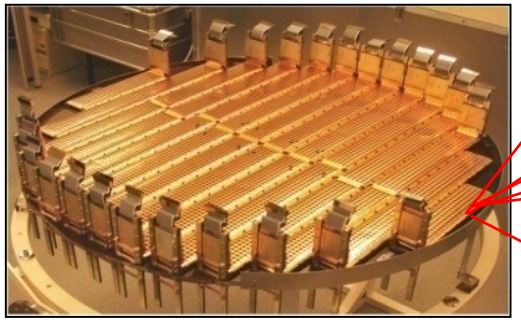
Identification

Exemple AMS2

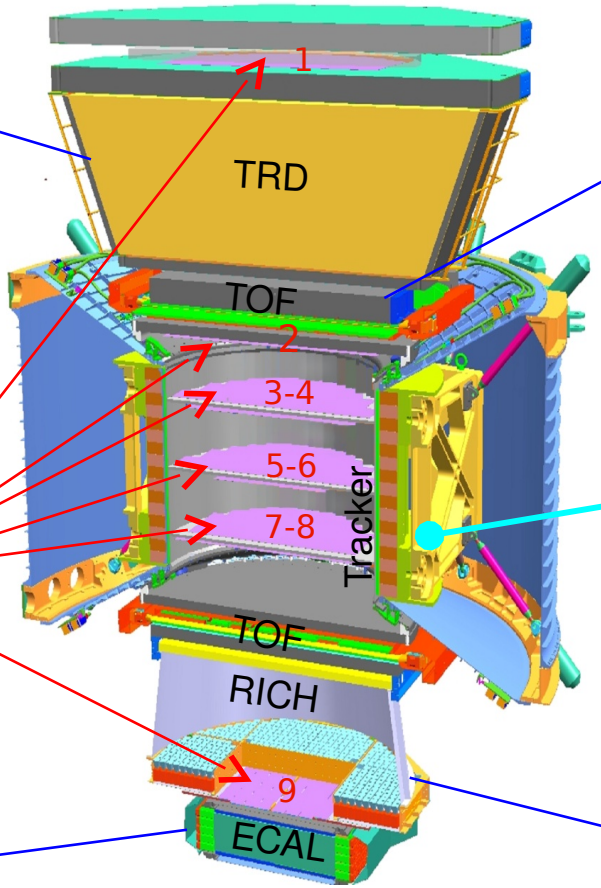
TRD
Identification e+, e-



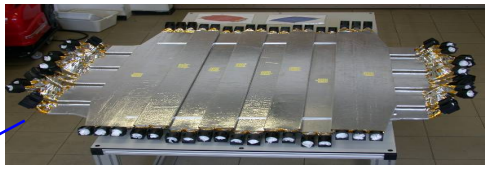
Silicium
Z, P



ECAL
E of e+, e-, γ

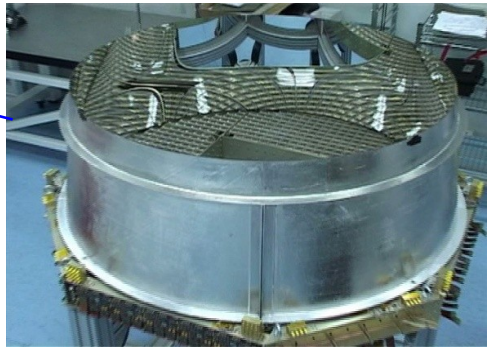


TOF
Z, E



Magnet
±Z

RICH
Z, E

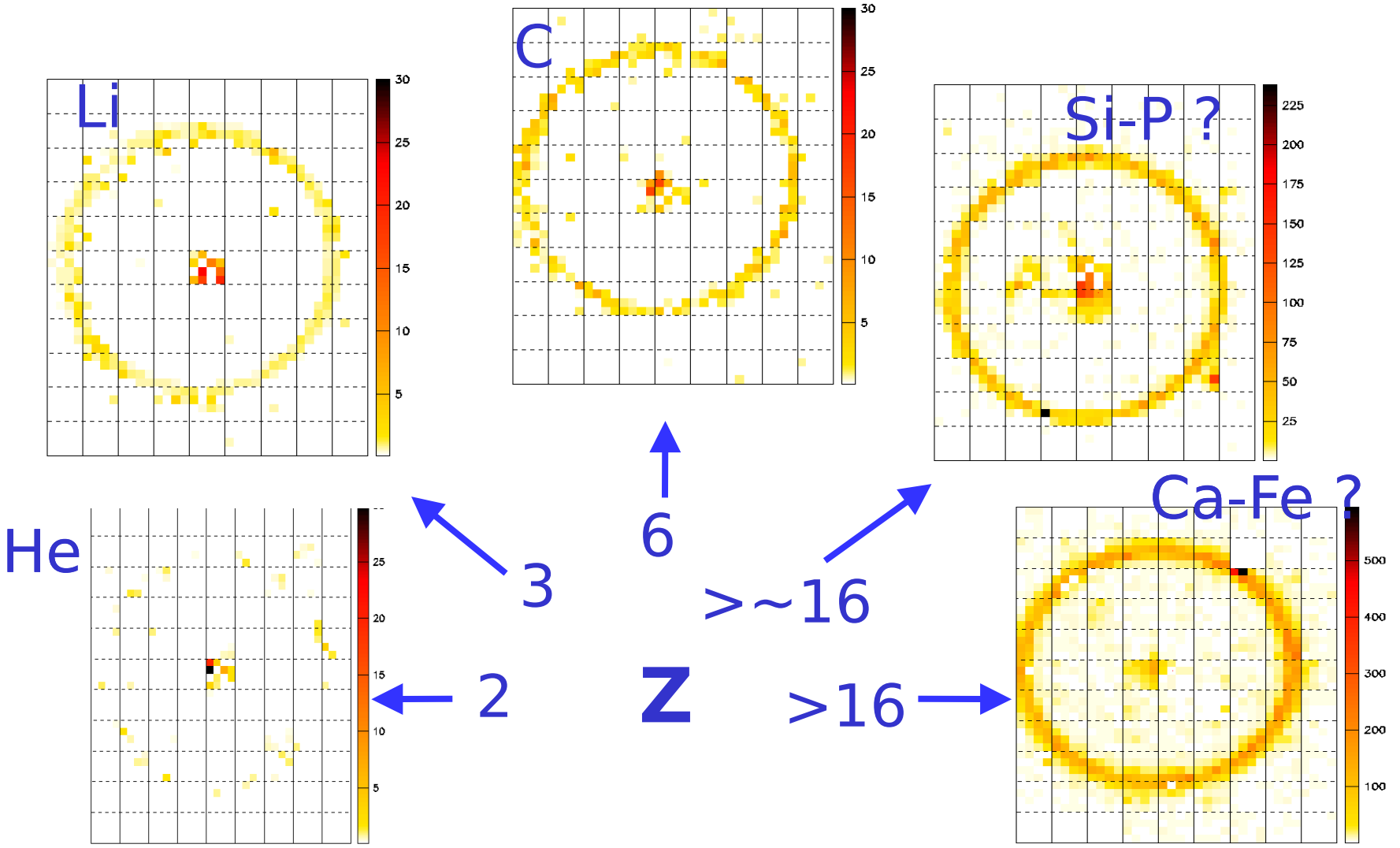


Z, P sont mesurés indépendamment par Tracker, RICH, TOF and ECAL

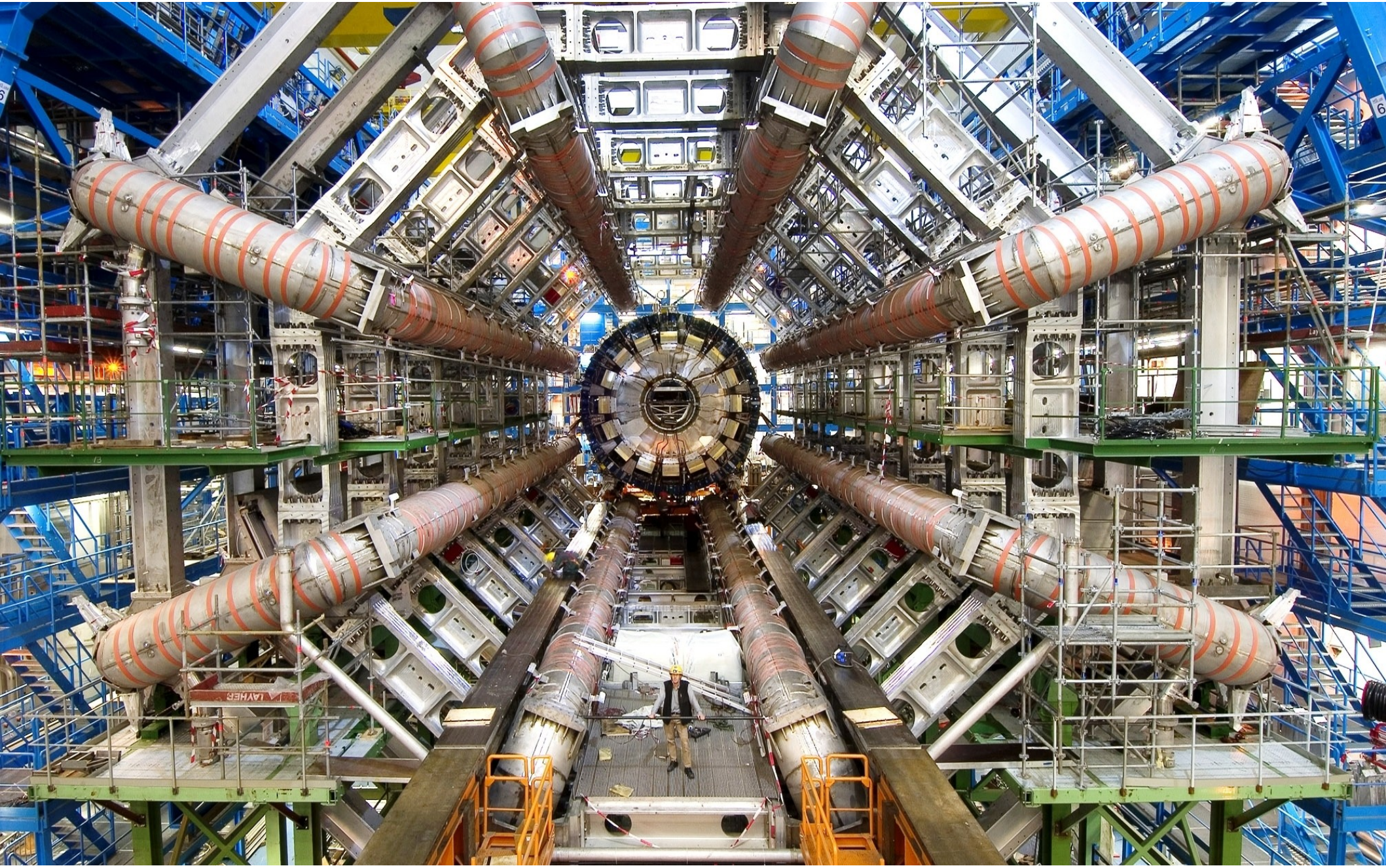
Identification

Exemple AMS2

- Rich

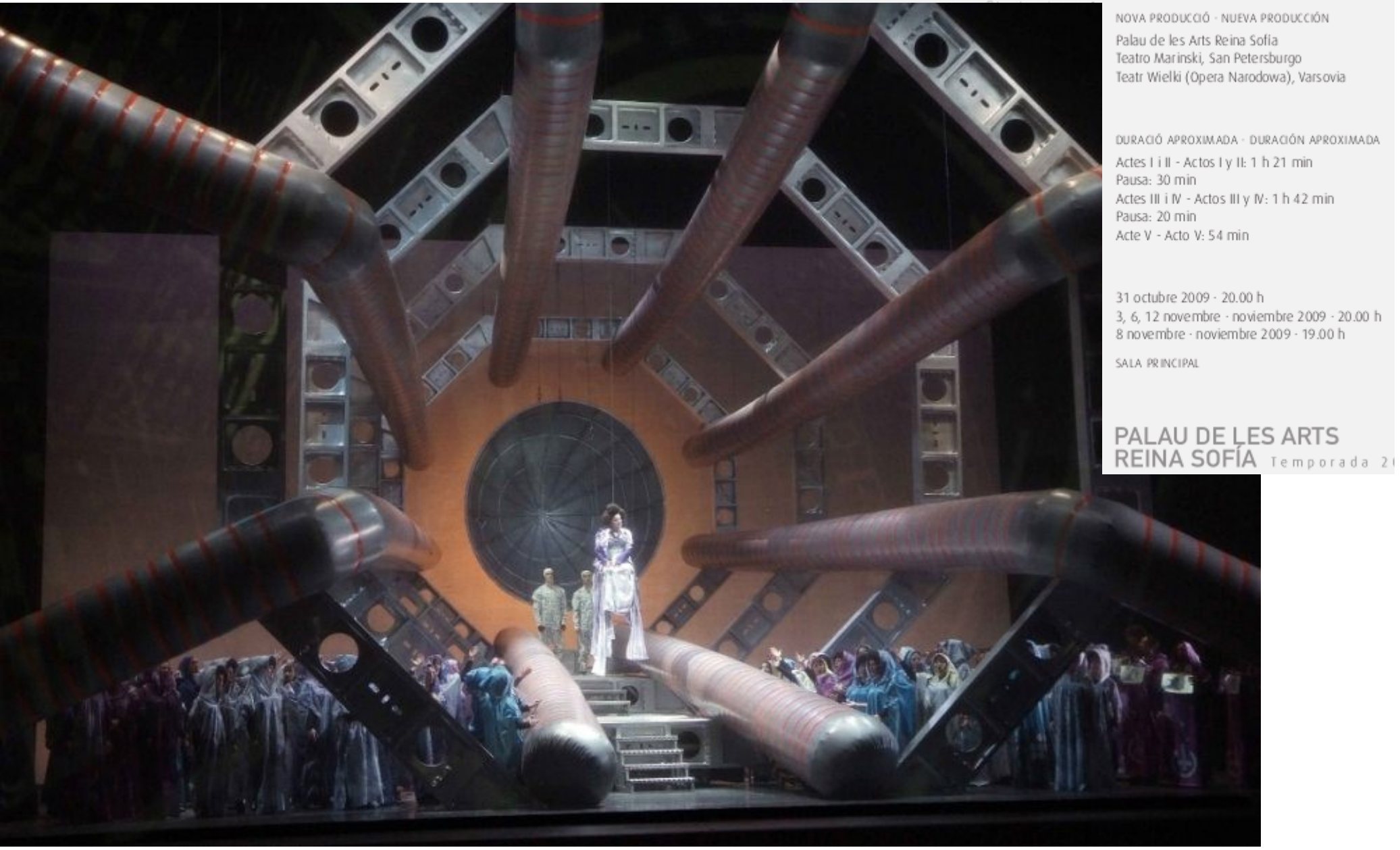


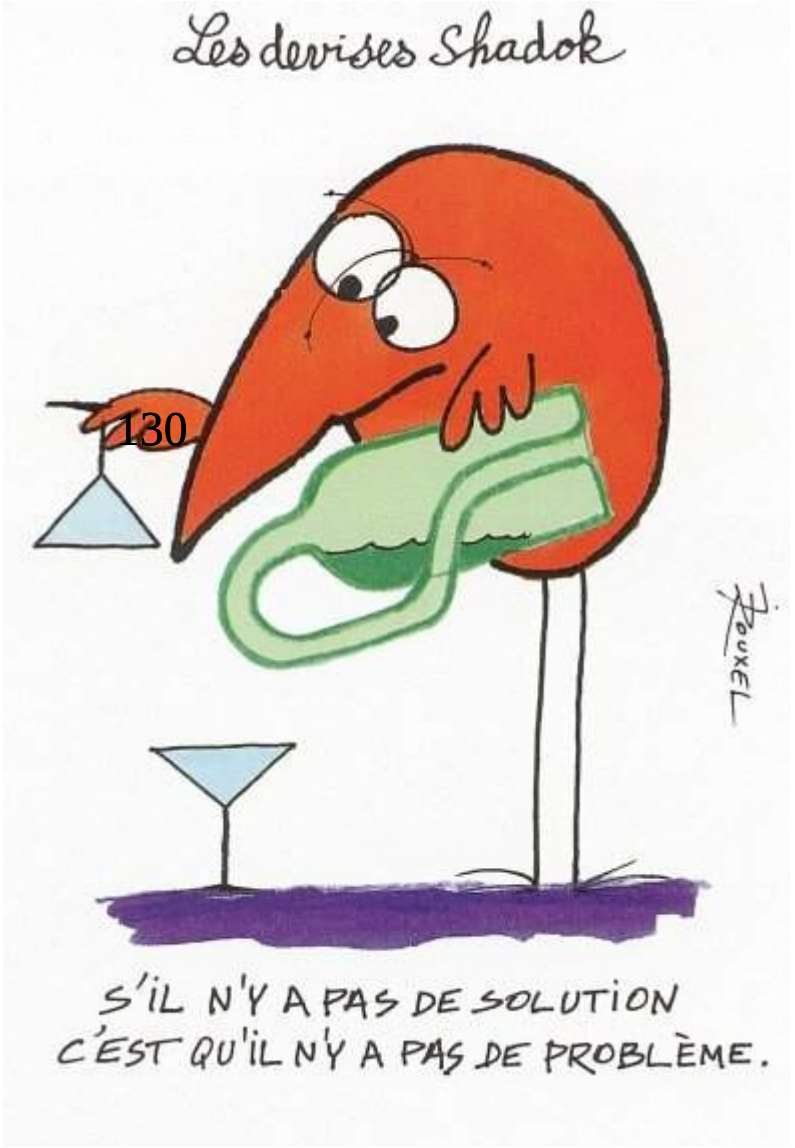
ATLAS



ATLAS

Valence, Espagne




Les devises Shadok
130
S'IL N'Y A PAS DE SOLUTION
C'EST QU'IL N'Y A PAS DE PROBLÈME.