



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

# I. Interaction particule/matière & Conception d'un détecteur

# II. Détecteurs de traces & Identification des particules

**I. Interaction particule/matière  
&  
Conception d'un détecteur**

**II. Détecteurs de traces  
&  
Identification des particules**

# Introduction

## Remarques:

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

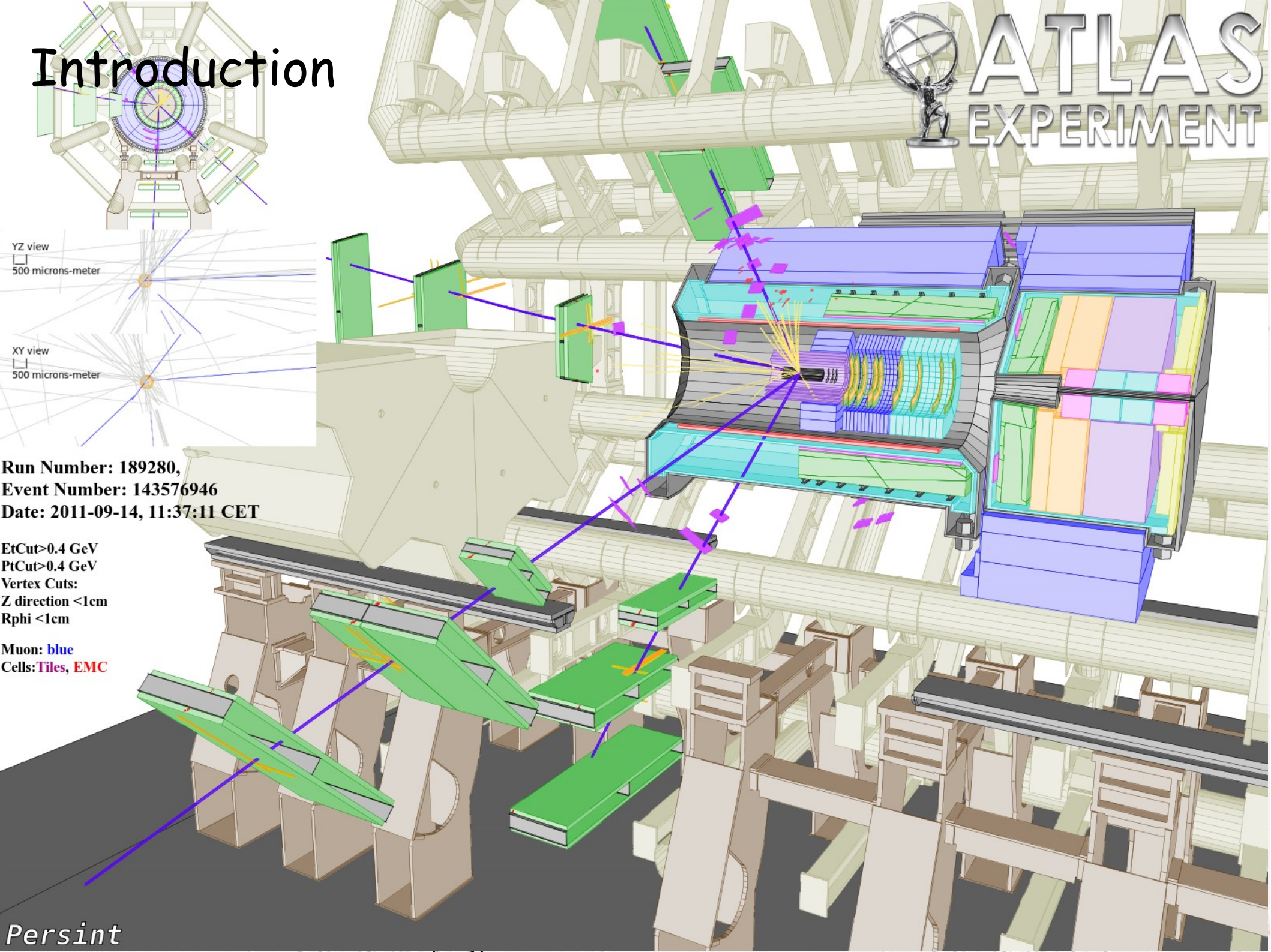
« Une rupture du continuum espace-temps a produit une nouvelle séquence chrono événementielle entraînant l'émergence de cette réalité alternative »  
(Retour vers le futur II)



# Introduction



# ATLAS EXPERIMENT

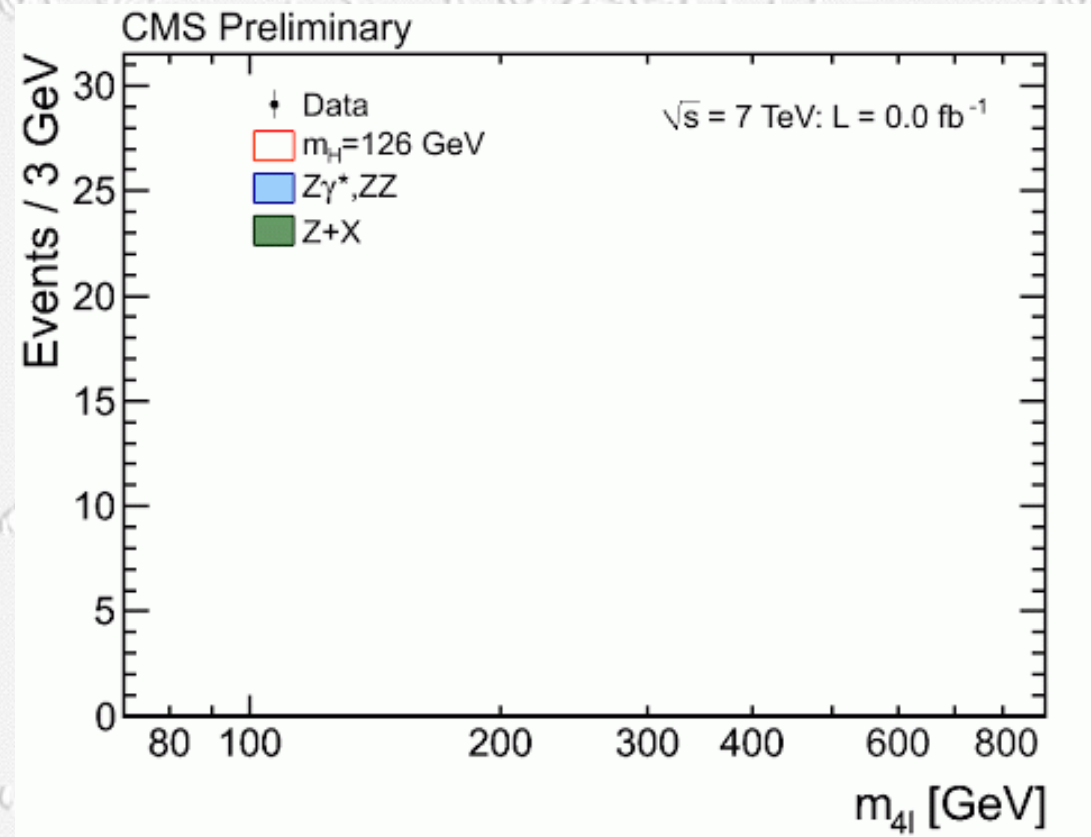
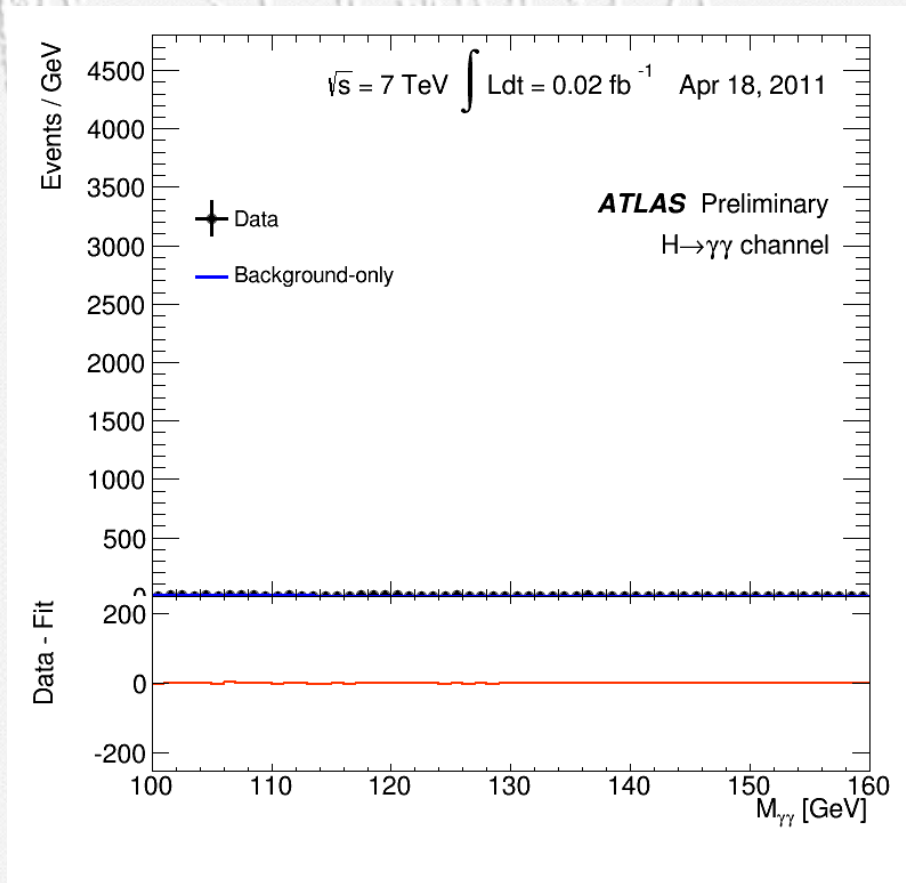


Run Number: 189280,  
Event Number: 143576946  
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

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

Muon: blue  
Cells: Tiles, EMC

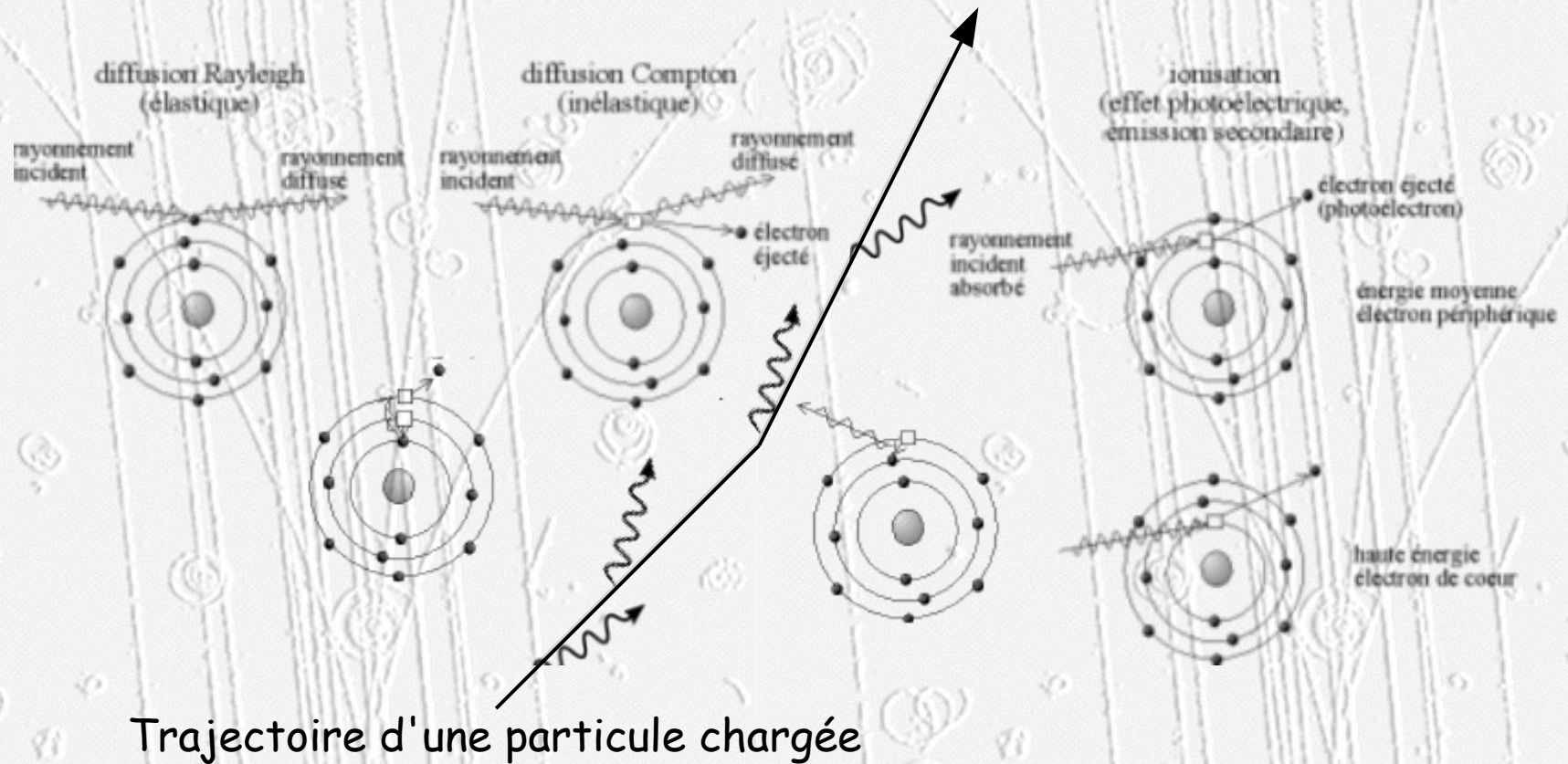
# Introduction



The background of the slide features a complex, repeating pattern of particle tracks and interaction vertices, rendered in a light, textured style. The tracks are represented by thin, parallel lines that intersect at various points, creating a network of paths. At these intersection points, there are small, circular or spiral-like structures, suggesting the formation of secondary particles or the detection of interaction events. The overall appearance is that of a microscopic or particle-level view of a detector's internal structure or the paths of particles within it.

# I. Interaction particule/matière & Conception d'un détecteur

# Interactions particules-matière (rappels)



Voir l'excellent cours de P.Puzo

[http://www.in2p3.fr/actions/formation/PhyAuDet12/PUZO%20Detecteurs\\_HE\\_1.pdf](http://www.in2p3.fr/actions/formation/PhyAuDet12/PUZO%20Detecteurs_HE_1.pdf)

# Interactions particules-matière

## Particules détectables directement

- **Photon, électron, muon, Hadron (quarks)**
  - Hadrons( $k, \pi, p, n, \lambda \dots$ ) → 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  $\gamma$ )
    - 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

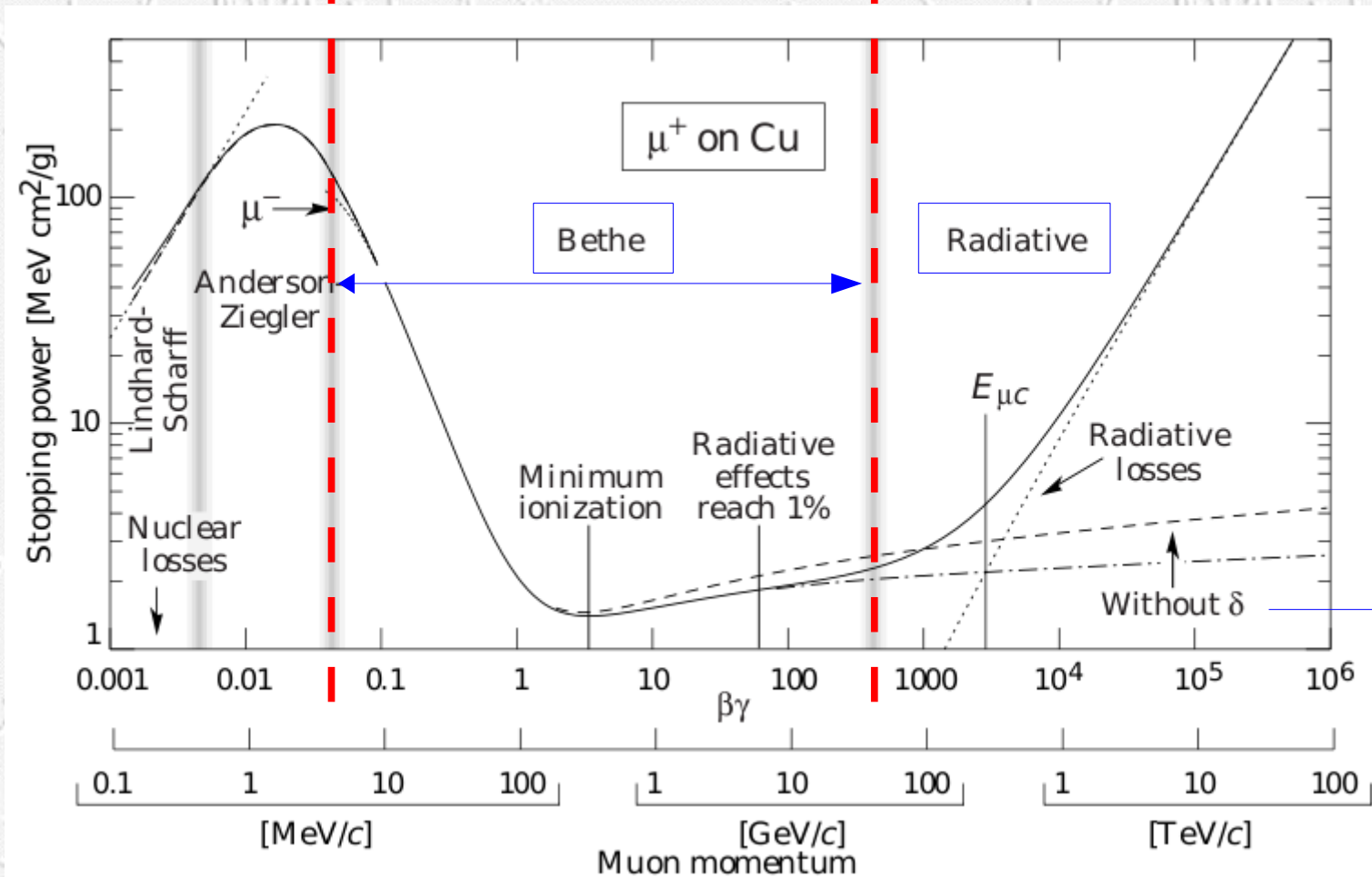
Particules sont détectées à travers leurs interactions avec la matière du détecteur

- 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



PDG 2012 : 30. Passage of particles through matter fig 30.1 page 324

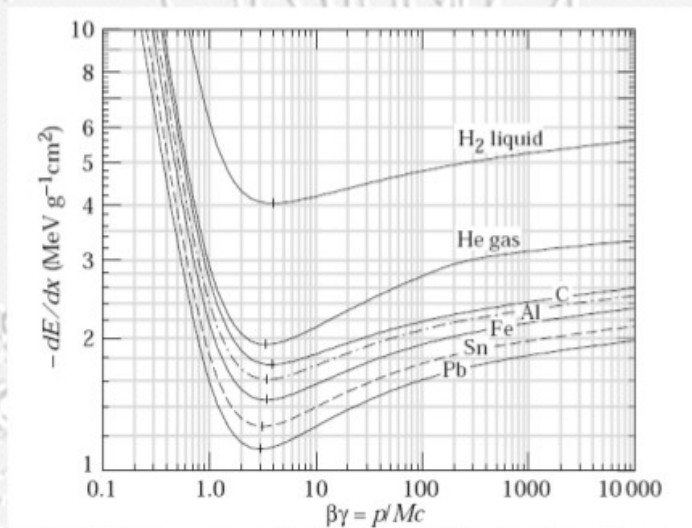
# Interactions particules-matière

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

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

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 : constant 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  
 $x$  densité de surface ( $\text{g/cm}^2$ )  
 remarque : on mesure  $\Delta E$  sur  $\Delta x$

**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

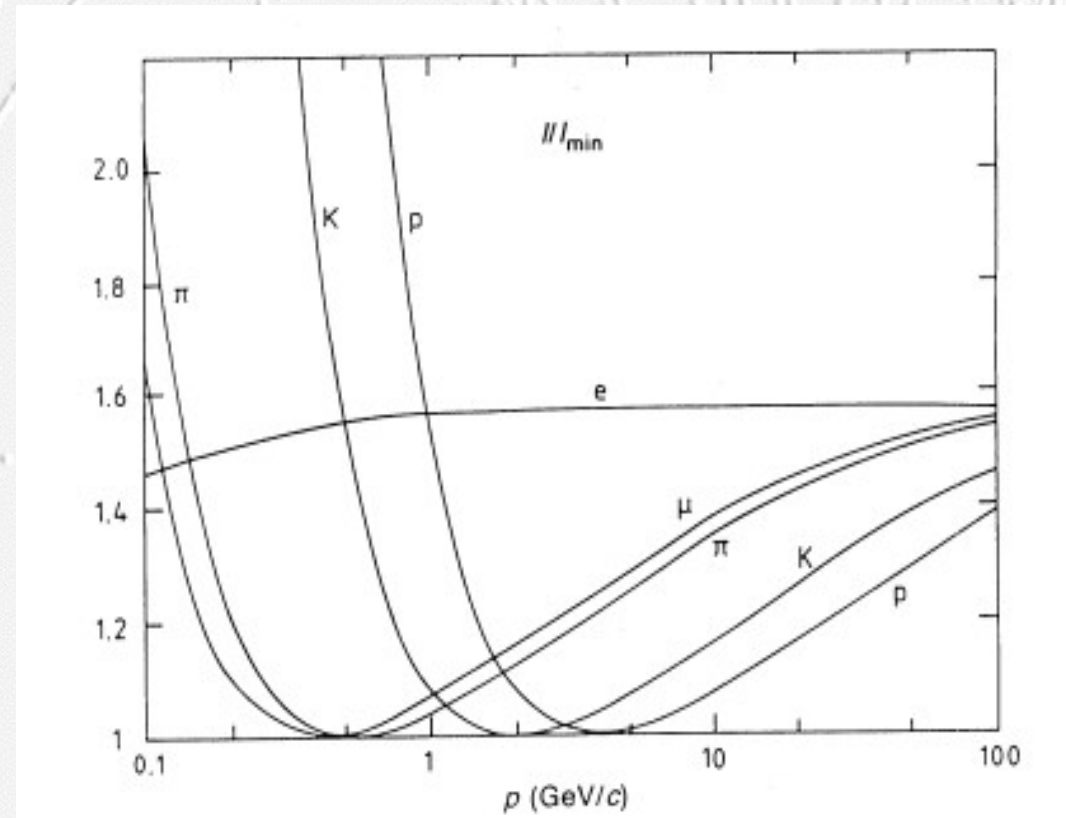
Formule ok  $\sim \text{MeV} \rightarrow \sim \text{TeV}$ , [entre crochet] légèrement différente pour les  $e^- / e^+$

# Interactions particules-matière

## Calcul

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

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



# Interactions particules-matière

## Il existe une énergie critique $E_c$

- différente selon les particules ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$ )
- $E_{c\gamma} \sim 1 \text{ MeV}$   $E_{ce}$  de  $\sim 10 \text{ MeV}$  à  $300 \text{ MeV}$ ,  $E_{c\mu} > 100 \text{ GeV}$
- Au dessous de  $E_c$  les pertes d'énergie des particules chargées ( $e$ ,  $\mu$ ) 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)

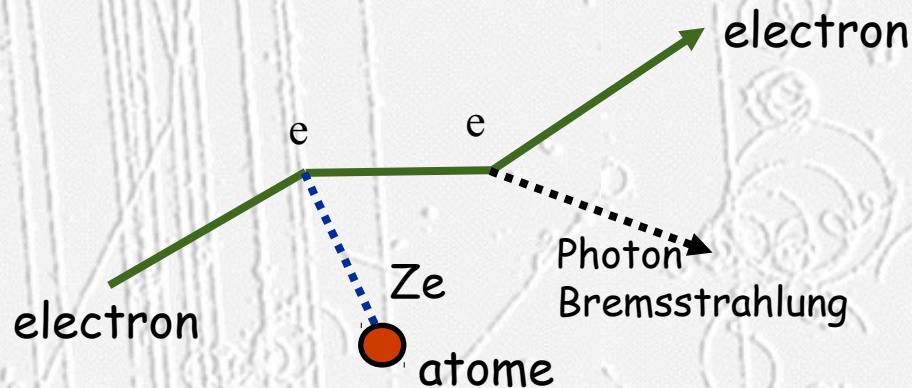
## Hadrons perdent de l'énergie par Bethe-Bloch et par interactions fortes

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

# Interactions particules-matière

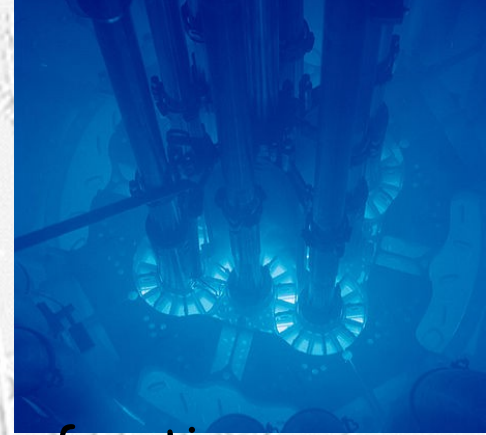
## Bremsstrahlung

- 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



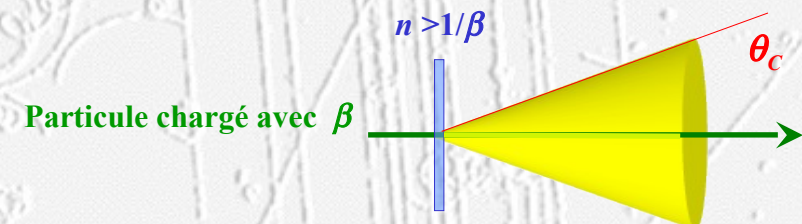
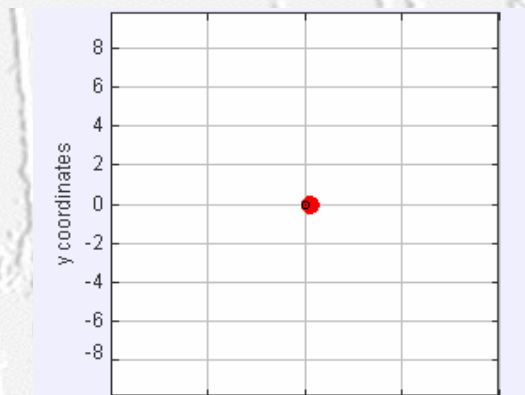
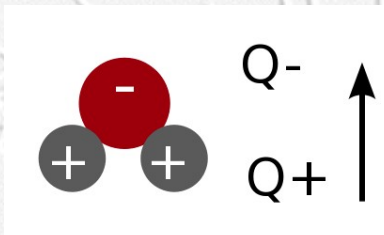


# Interactions particules-matière



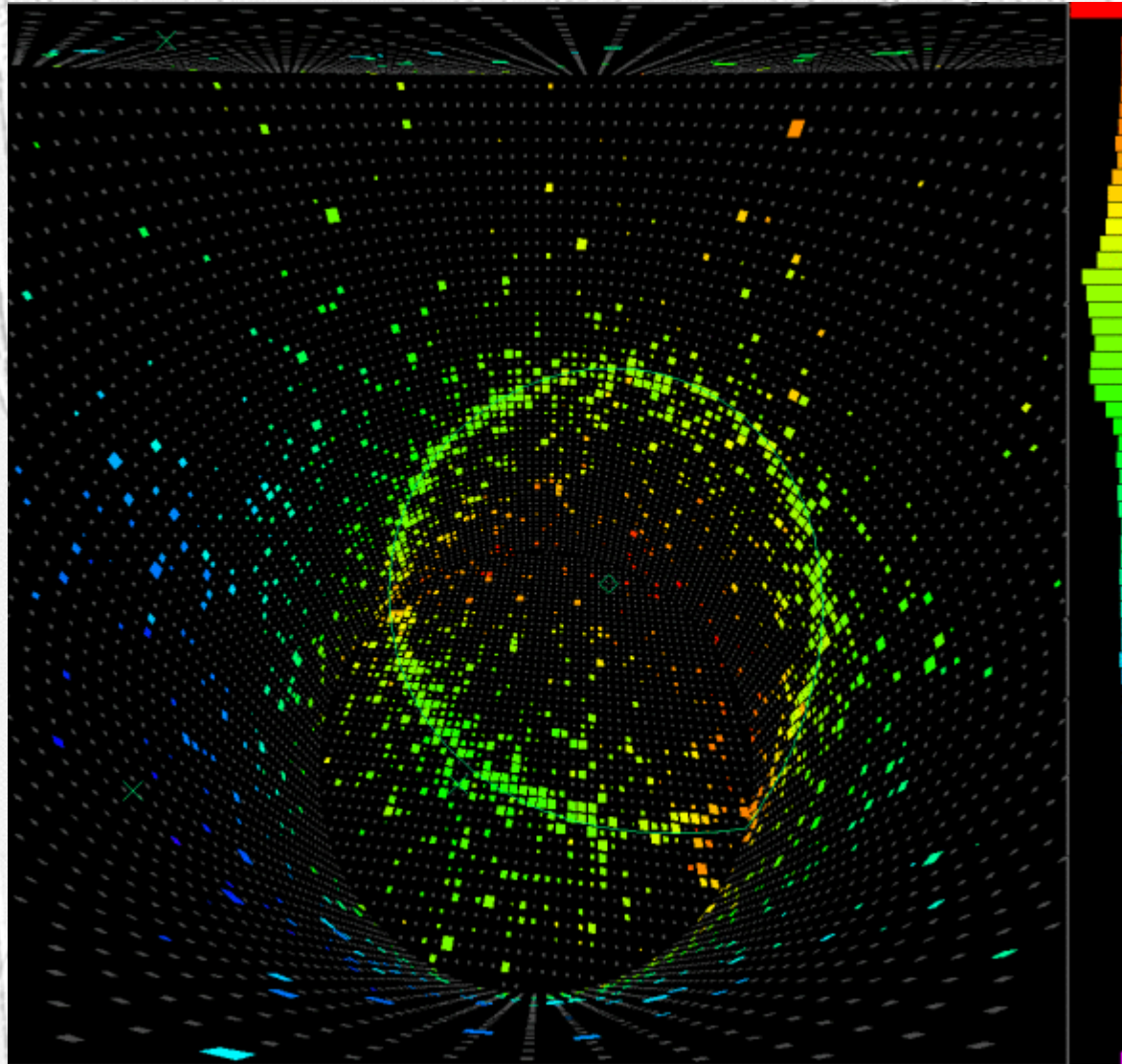
## Effet Čerenkov

- 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  $\theta_c$  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  $\propto Z^2 \sin^2 \theta_c$  (Frank-Tamm)



# Interactions particules-matière

## Effet Čerenkov miniboon



# Interactions particules-matière

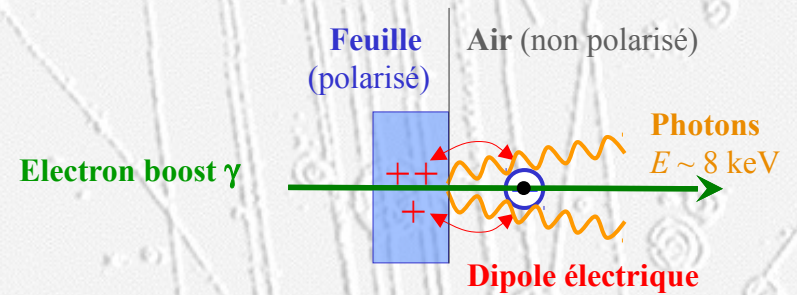
Rayonnement de transition #  $\gamma$  ( $=1/\text{sqrt}(1-v^2/c^2)$ )

- Particule chargée change de milieu
  - Discontinuité de l'indice de réfraction
  - Émission de photons ( $\sim \text{KeV}$ ) 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

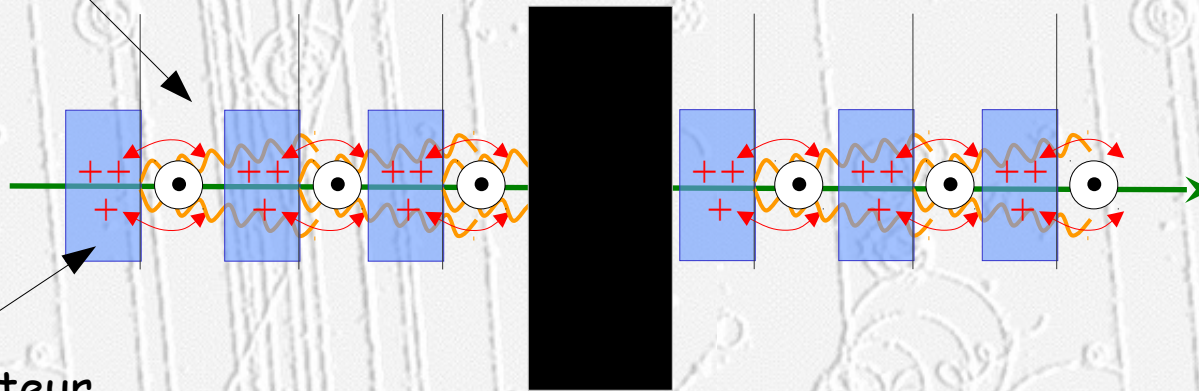
## Rayonnement de transition

- Schéma de principe



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

Détecteur



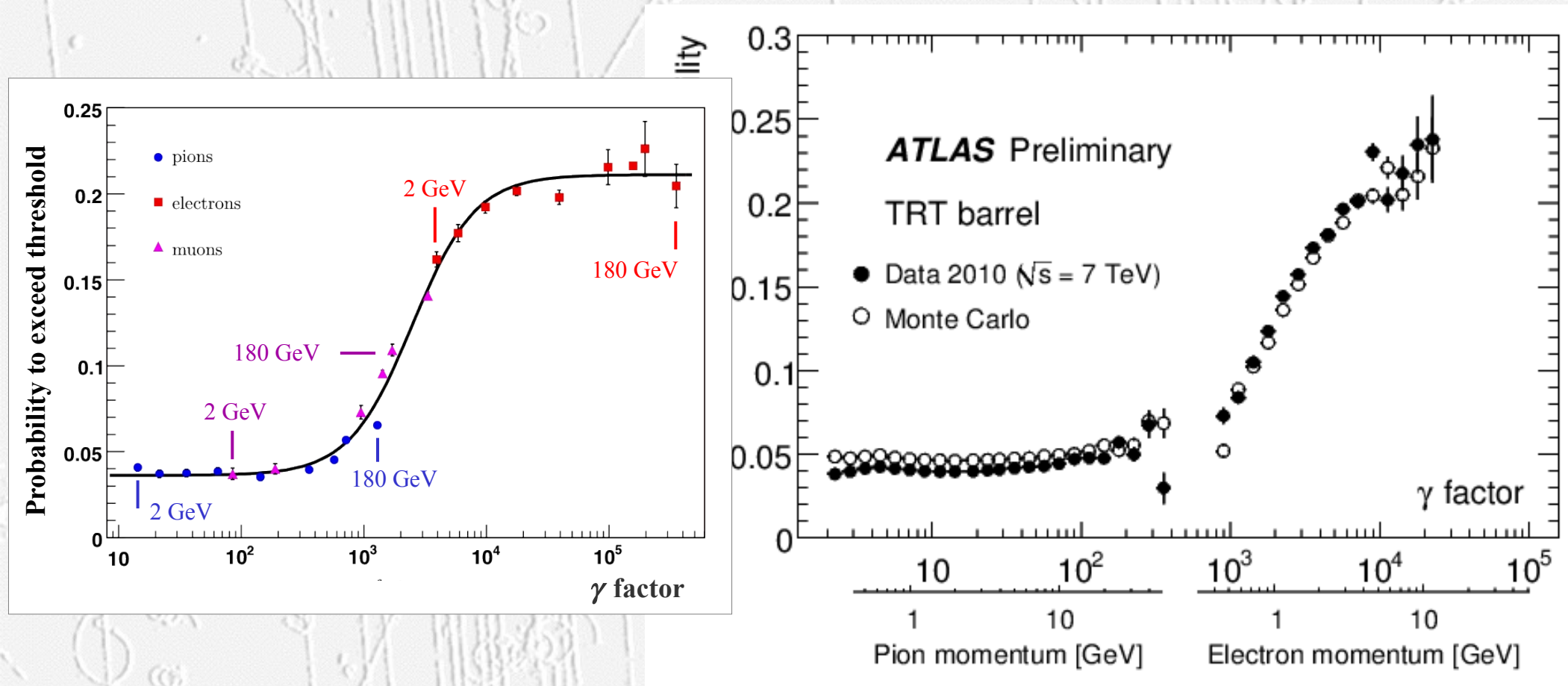
Radiateur

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)

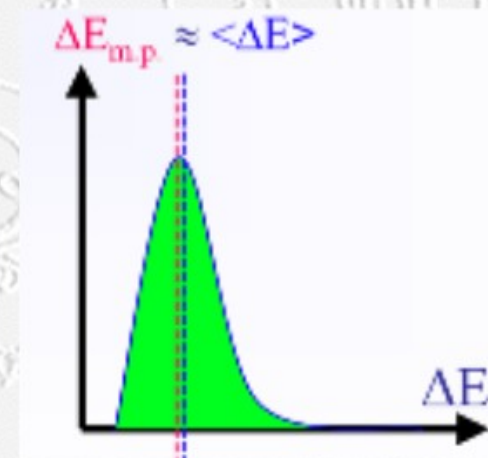
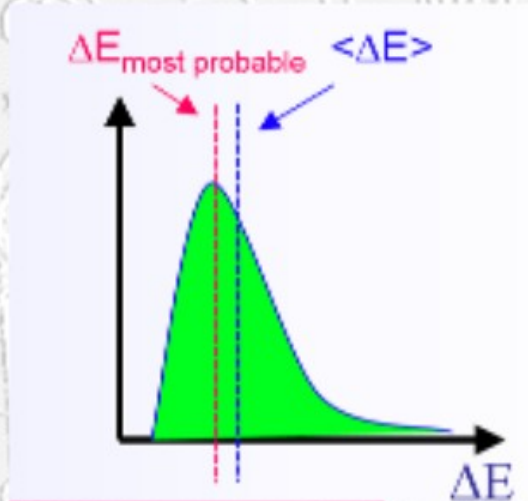
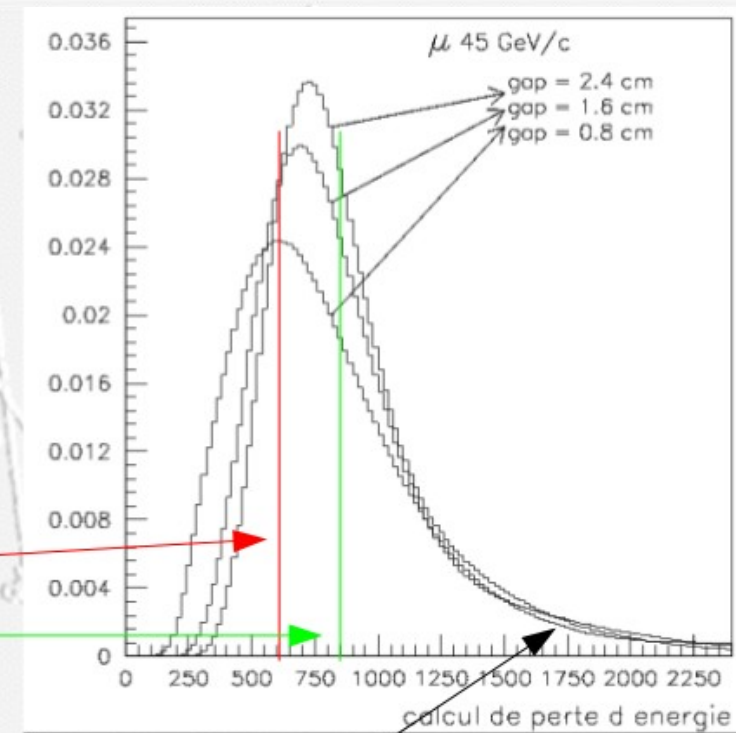
- Fluctuation de Landau

- Effet de échantillonnage

- Valeur la plus probable vs moyenne

- Épaisseur fine: ~égalité (Théorème central limite)

- Grandes Fluctuations : queues de Landau ( $\delta$  ray)



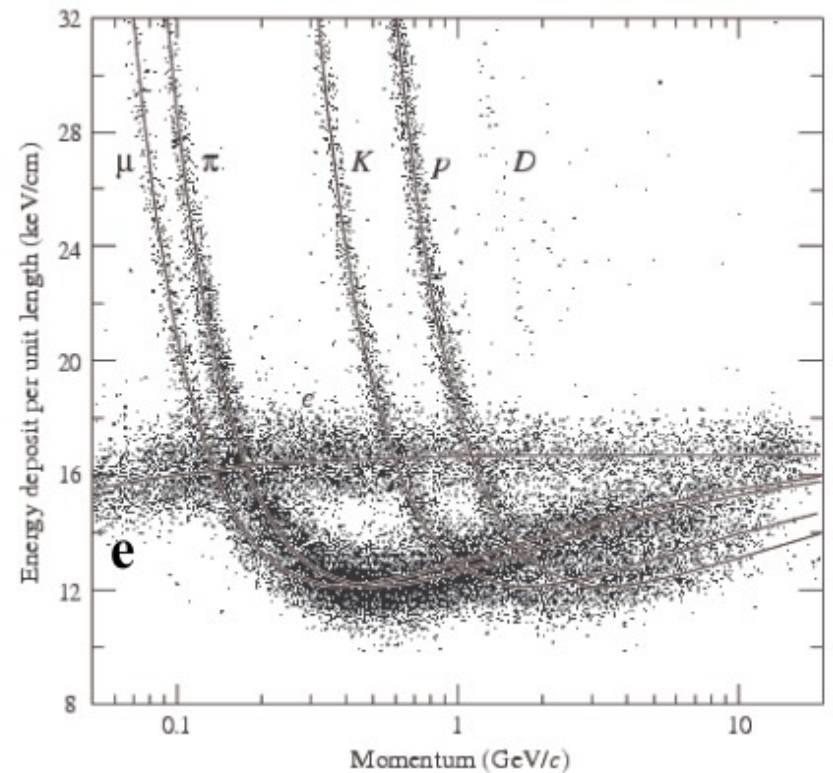
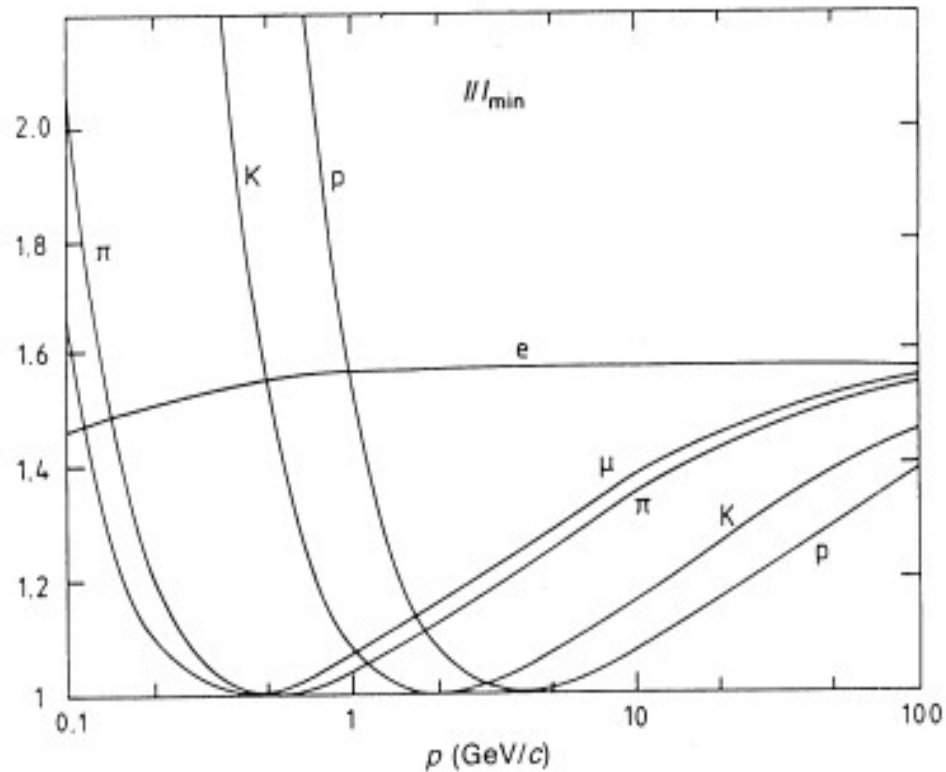
# Interactions particules-matière

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

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

Calcul

Réalité



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

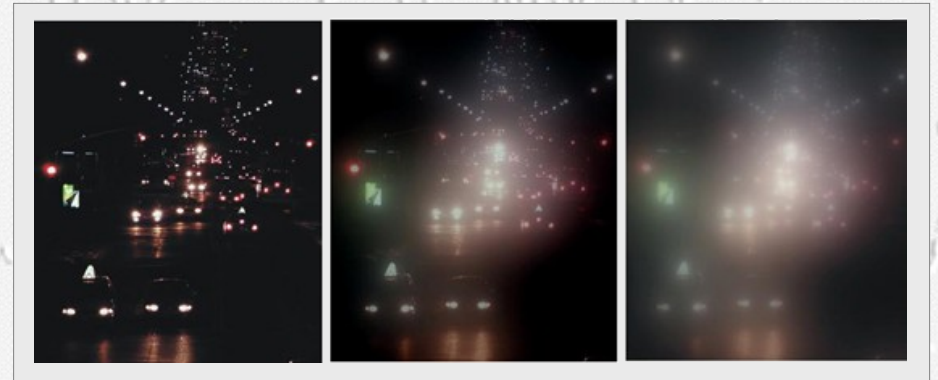
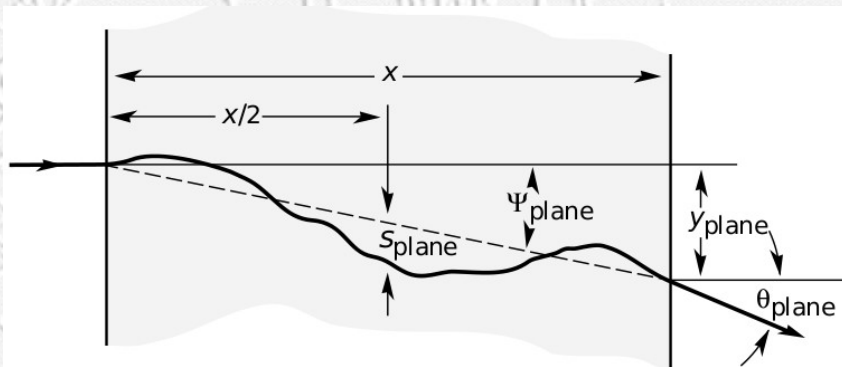


# Interactions particules-matière

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

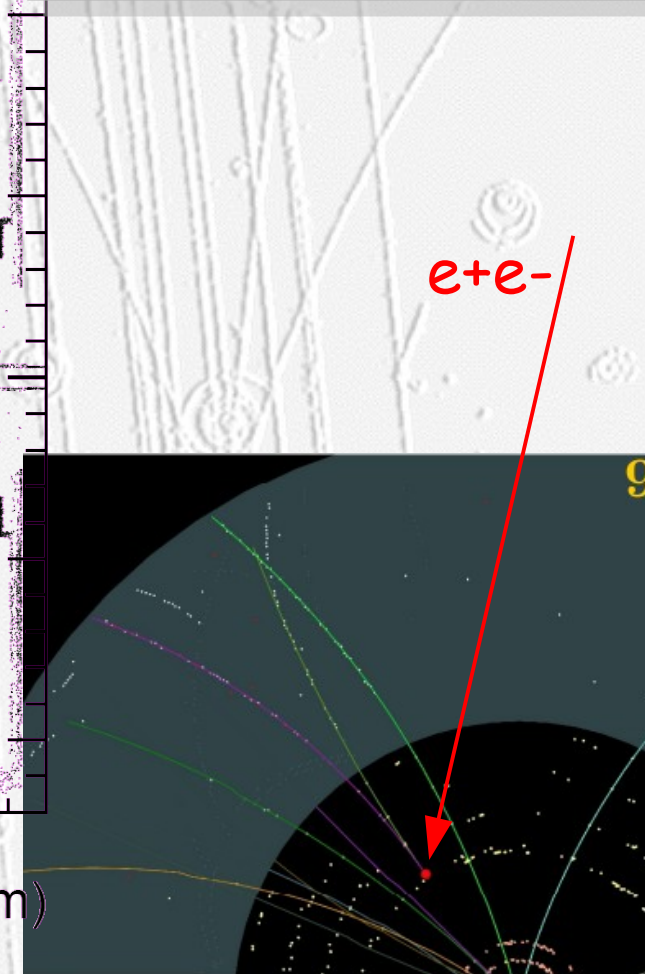
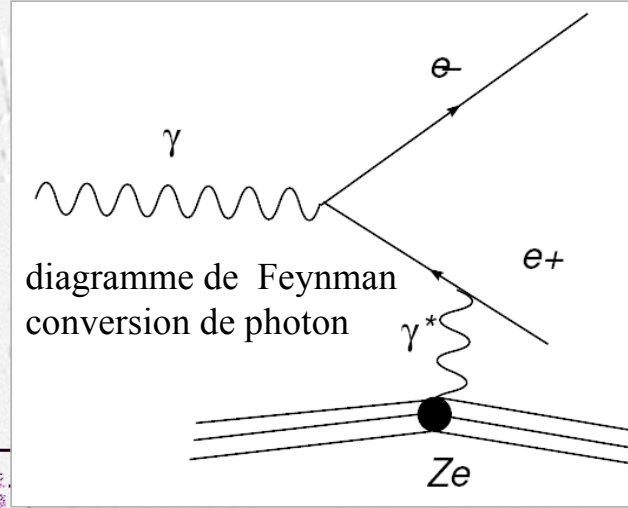
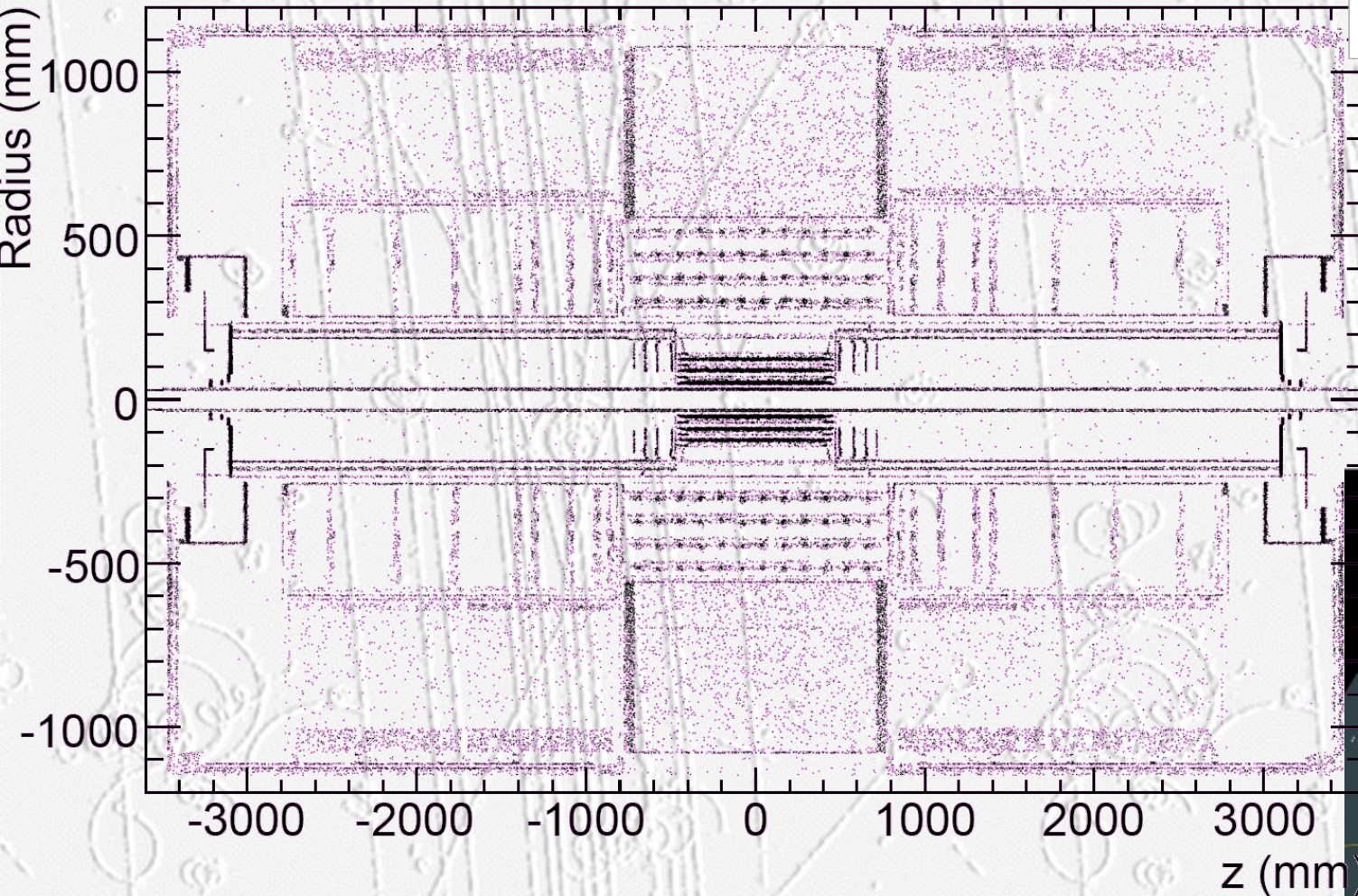
$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} \left[ 1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right]$$



# Interactions particules-matière

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

- Perturbations & Outils



# I. Interaction particule/matière & 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...

# 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



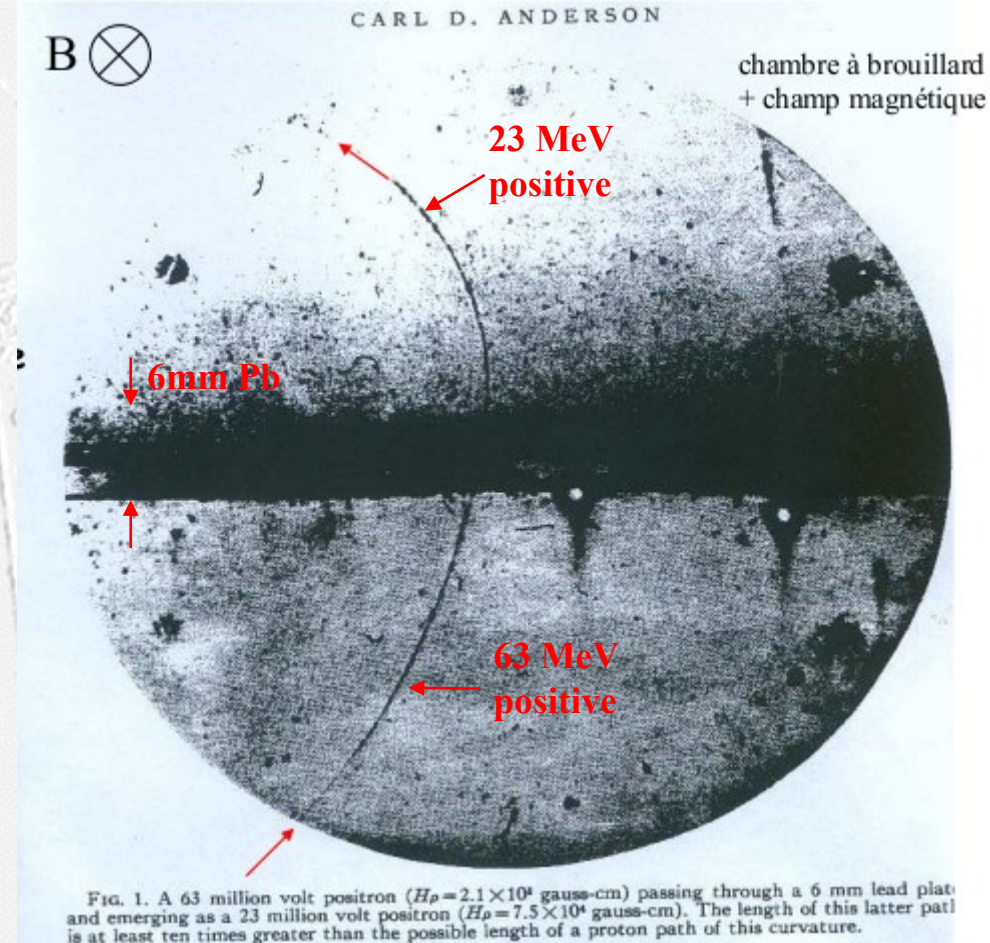
et regardait Caïn

## 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)

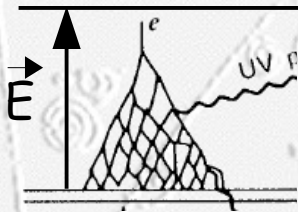




## 2. Généralités

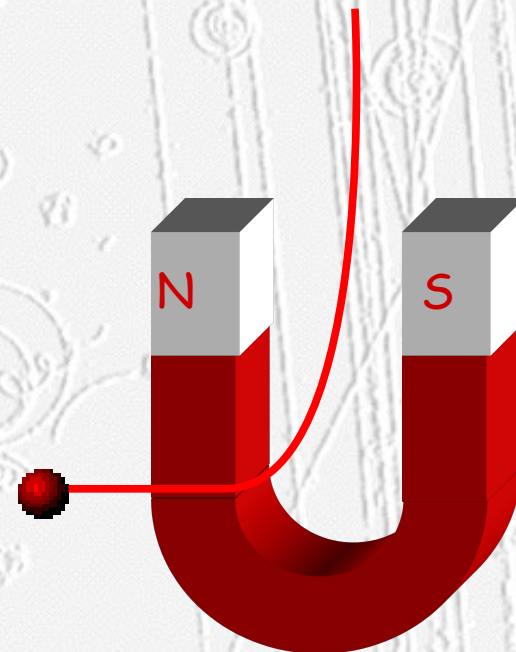
### • Principes utilisés

- 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



$E=100 \text{ eV}$

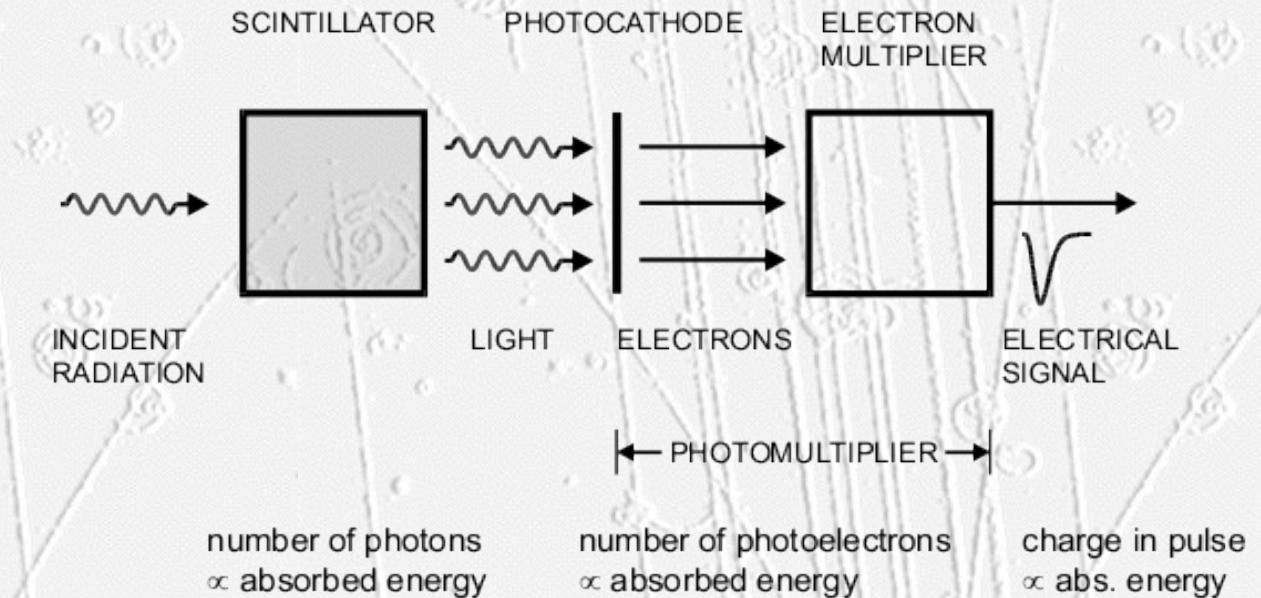
100 V



## 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**

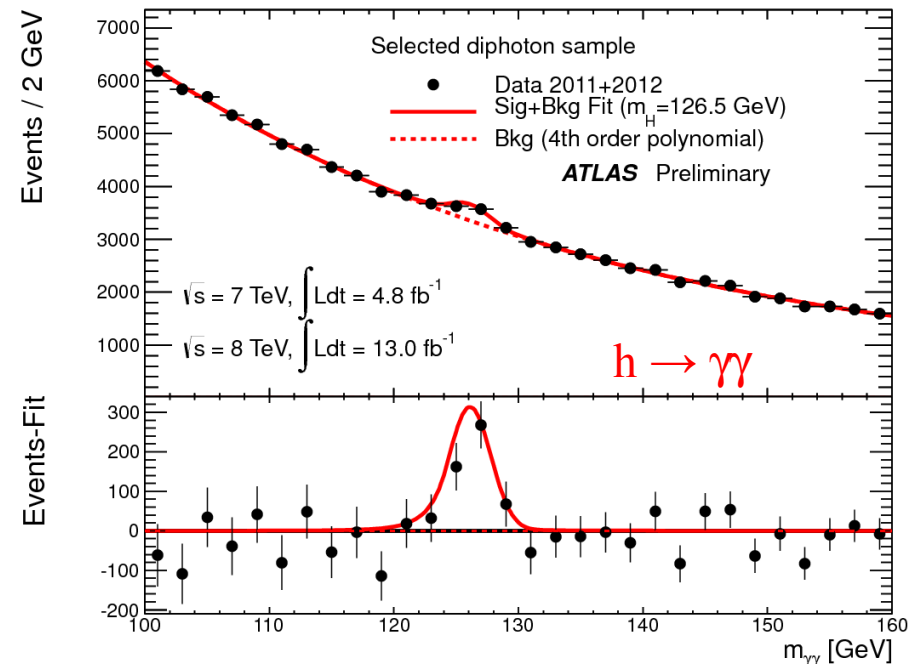
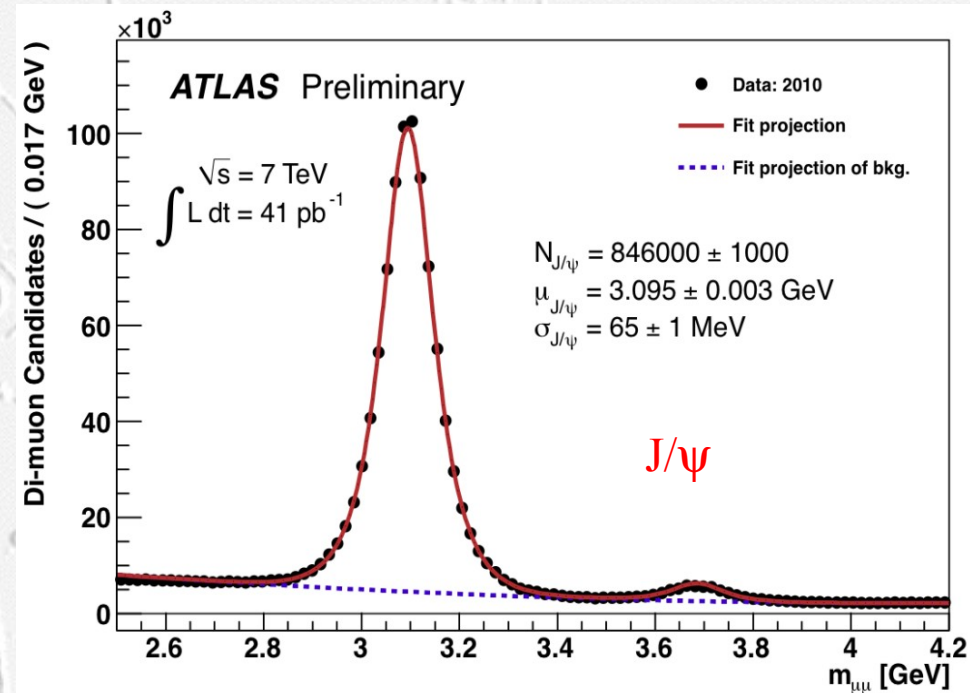
## 2. Généralités

### Mesurer

- Énergie
- Impulsion
- Charge
- masse

### Identifier

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



## 2. Généralités

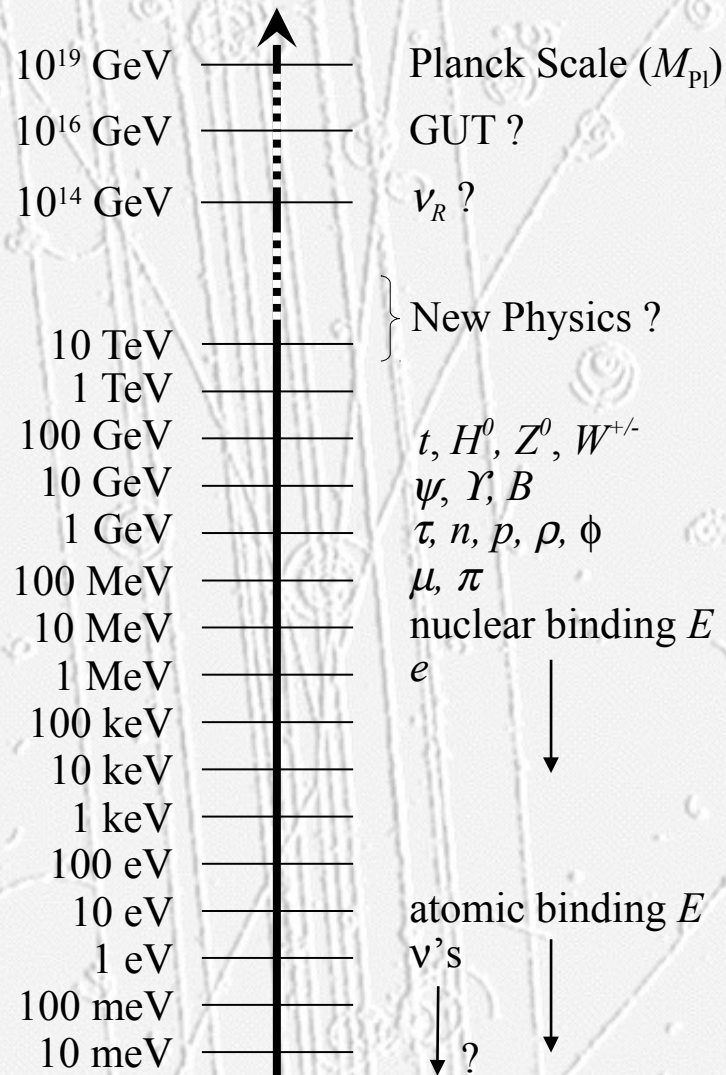
### Remarques:

- Informations portent sur les particules à durée de vie «longue»
  - $z, w, \text{top}, \dots$  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...
  - $\mu$  cosmique =  $\mu \leftarrow \pi, Z, W, \text{top}, \dots$



# 2. Généralités

## Interlude de physique au LHC



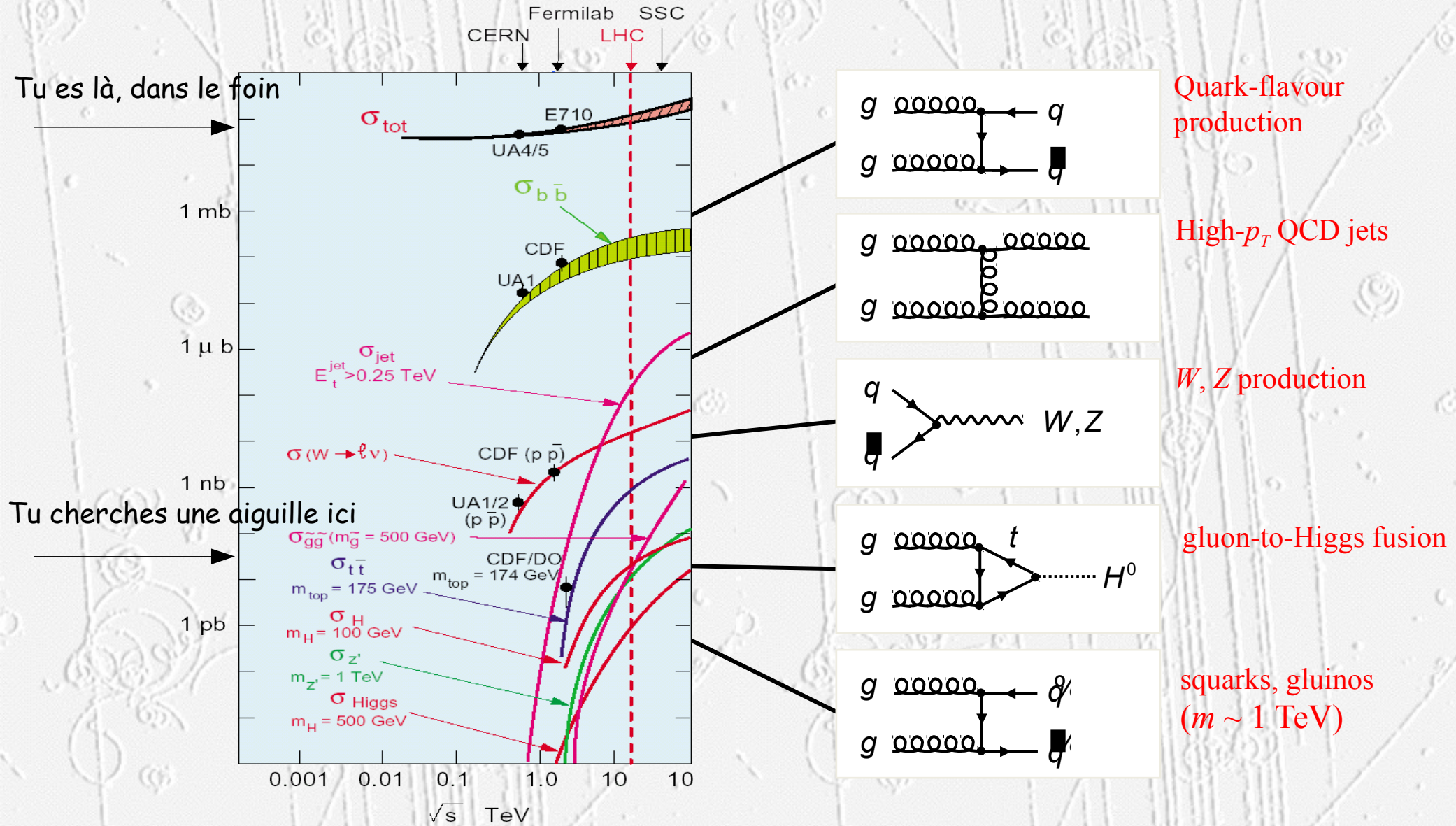
Pour comprendre cette partie

On détecte cette partie

# 2. Généralités

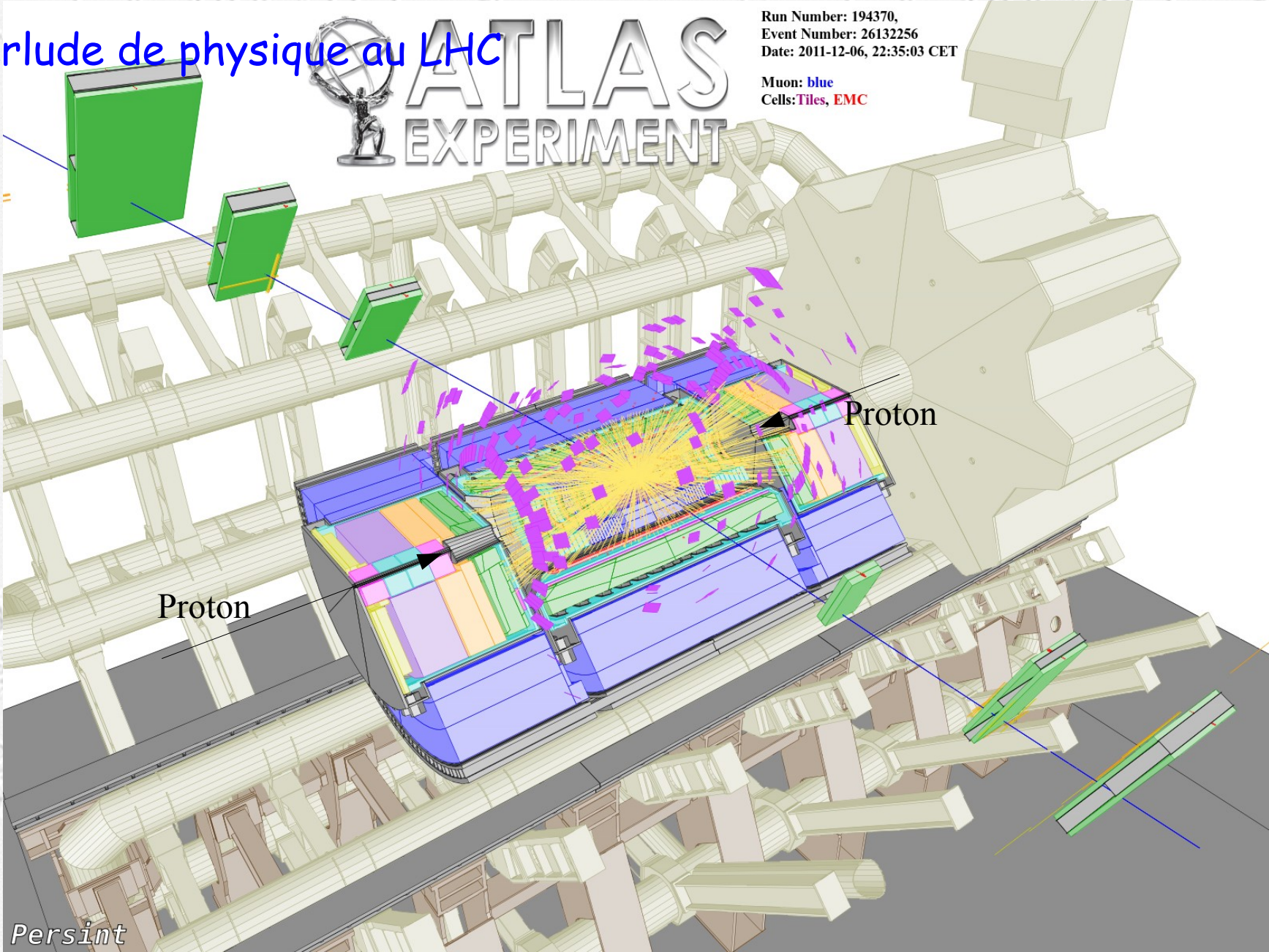
10 ordres de grandeurs

## Interlude de physique au LHC



# 2. Généralités

Interlude de physique au LHC





## 2. Généralités

### Interlude de physique au LHC

- Système de déclenchement : « Trigger »
  - Trier les événements
  - 2 types de détecteurs :
    - Précis (résolution spatiale) mais lent
    - Moins précis mais rapide

# Conception d'un détecteur

1. Introduction
2. Généralités
3. Détecteurs