

Introduction à la détection de particules

▷ Introduction

- ▶ Principes
- ▶ Interactions particule - matière

▷ Les détecteurs et illustration avec AMS

- ▶ Trajectomètre
- ▶ Temps de vol
- ▶ Identification de particules (RICH, TRD)
- ▶ Calorimétrie

S.Rosier Lees (LAPP-IN2P3/CNRS)

Bibliographie: P.Puzo Ecole de Joliot Curie, L.Serin et C.Joram (Ecole du Cern 2002); +ref internes, Daniel Decamp, Conférence Amhi pout tous, 2012

Introduction - Principes

▷ Mesurer de manière complémentaire leurs caractéristiques:

▶ Charge Ze et signe

▶ Energie E (eV)

$$E = m_0 \gamma c^2$$

▶ Impulsion \mathbf{p} (eV/c)

$$p = m_0 \gamma \beta c$$

▶ Vitesse (β) ou facteur de Lorentz (γ)

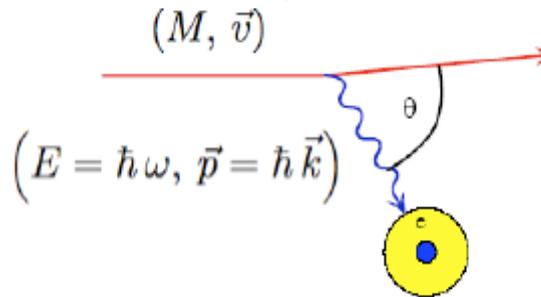
$$\beta = \frac{v}{c} \quad (0 \leq \beta < 1) \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1 \leq \gamma < \infty)$$

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

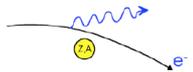
Intéraction particule-matière

▷ Particules chargées

Energie cinétique de **la particule** incidente est perdue par interaction électromagnétique avec **les électrons** ou le **noyaux** du détecteur traversé



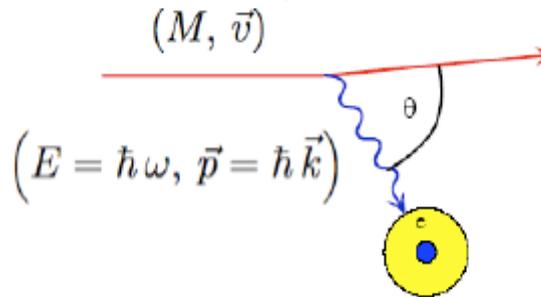
- ▶ **Ionisation**: si l'énergie de la particule incidente est élevée, les électrons de l'atome peuvent être arrachés \Rightarrow **détection de charge électrique**
- ▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **+ Rayonnement de freinage**, une particule (légère) va rayonner un **photon** dans le champ coulombien du noyau \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **Emission de Photon** pour les particules très relativistes (ex effet Tcherenkov, rayonnement de transition) \Rightarrow **détection de lumière**



Intéraction particule-matière

▷ Particules chargées

Energie cinétique de **la particule** incidente est perdue par interaction électromagnétique avec **les électrons** ou le **noyaux** du détecteur traversé

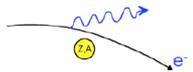


▶ **Ionisation**: si l'énergie de la particule incidente est élevée, les électrons de l'atome peuvent être arrachés \Rightarrow **détection de charge électrique**

▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière \Rightarrow **détection de lumière**

▶ **+ Rayonnement de freinage**, une particule (légère) va rayonner un **photon** dans le champ coulombien du noyau \Rightarrow **détection de lumière**

▶ **Emission de Photon** pour les particules très relativistes (ex effet Tcherenkov, rayonnement de transition) \Rightarrow **détection de lumière**



Energie perdue par ionisation

- ▷ Formule de Bethe – Bloch énergie moyenne perdue par unité de longueur (dE) sur une épaisseur dx, par ionisation

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} T^{\max} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

- ▷ dE/dx en MeVg⁻¹cm²
- ▷ Proportionnel à **z²(charge de la particule)** et **Z/A(détecteur)**
- ▷ dE/dx dépend essentiellement de β

Perte d'énergie par ionisation

- ▷ I) dE/dx décroissante
 - ▶ $\beta^{-3/5}$
- ▷ II) Minimale pour
 - ▶ $\beta\gamma \approx 3-4$
 - ▶ $dE/dx \approx 1-2 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$
- ▷ III) remontée relativiste : contributions de plus d'interactions
 - ▶ $2\log(\gamma)$
- ▷ IV) remontée relativiste limitée par un terme d'écrantage (δ) propre au milieu

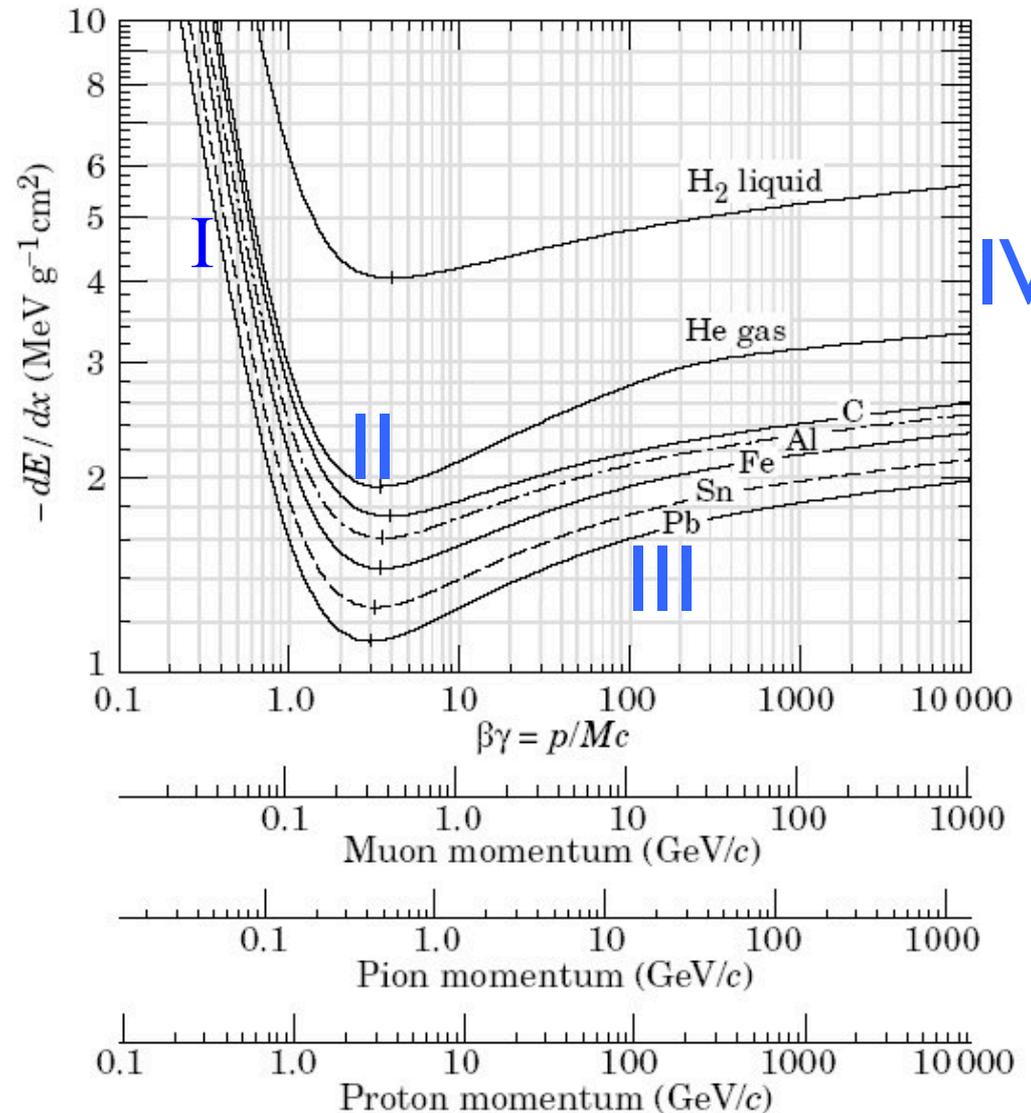
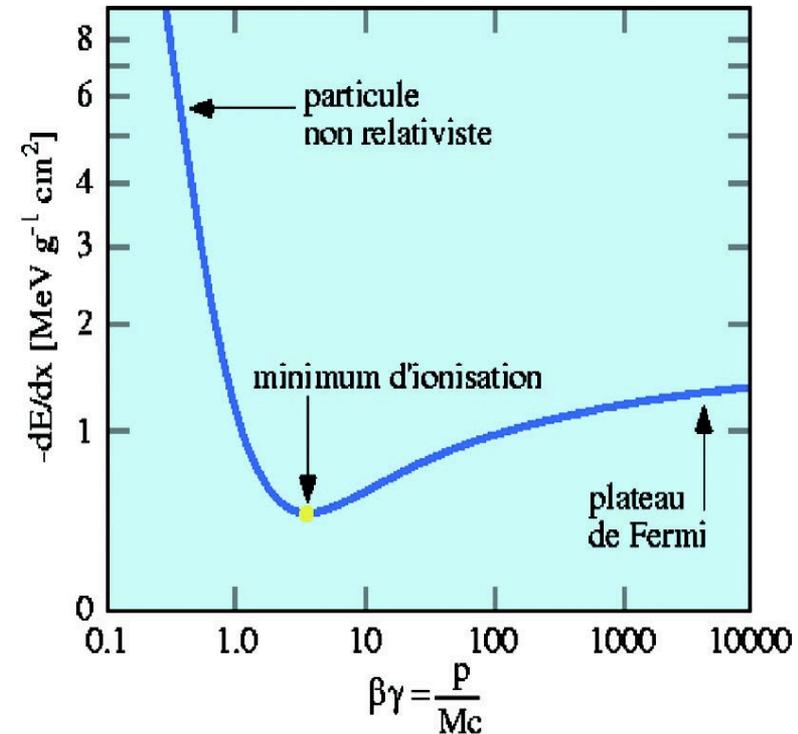
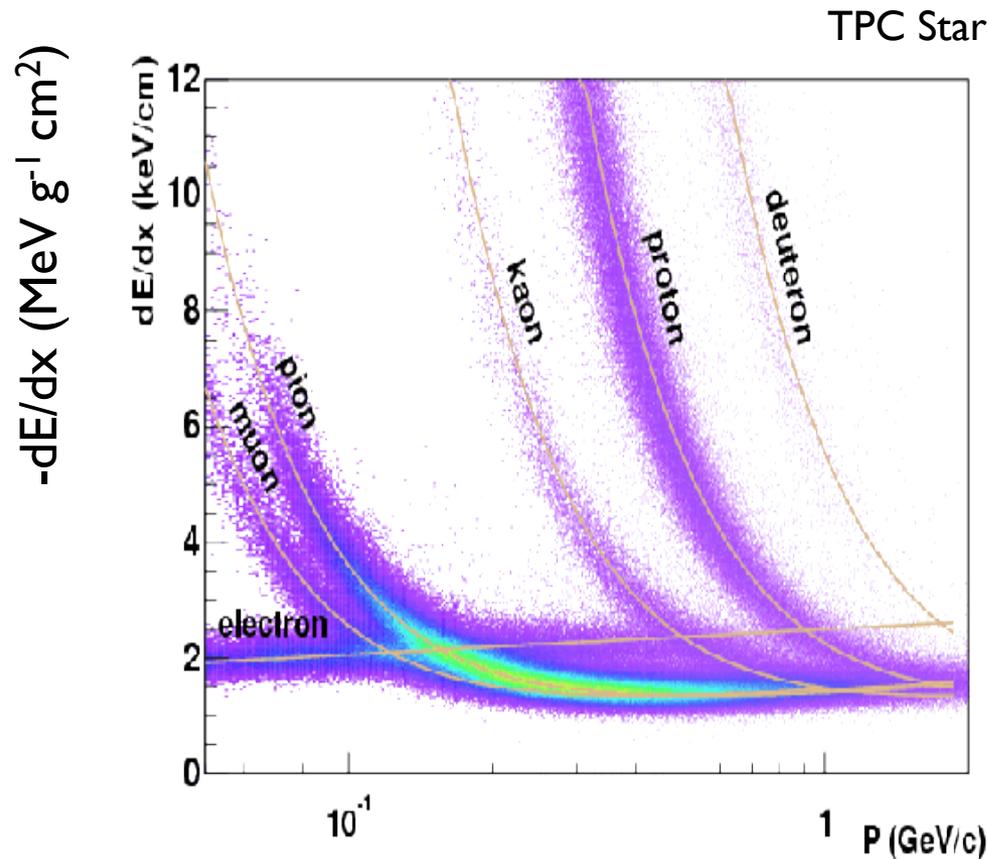


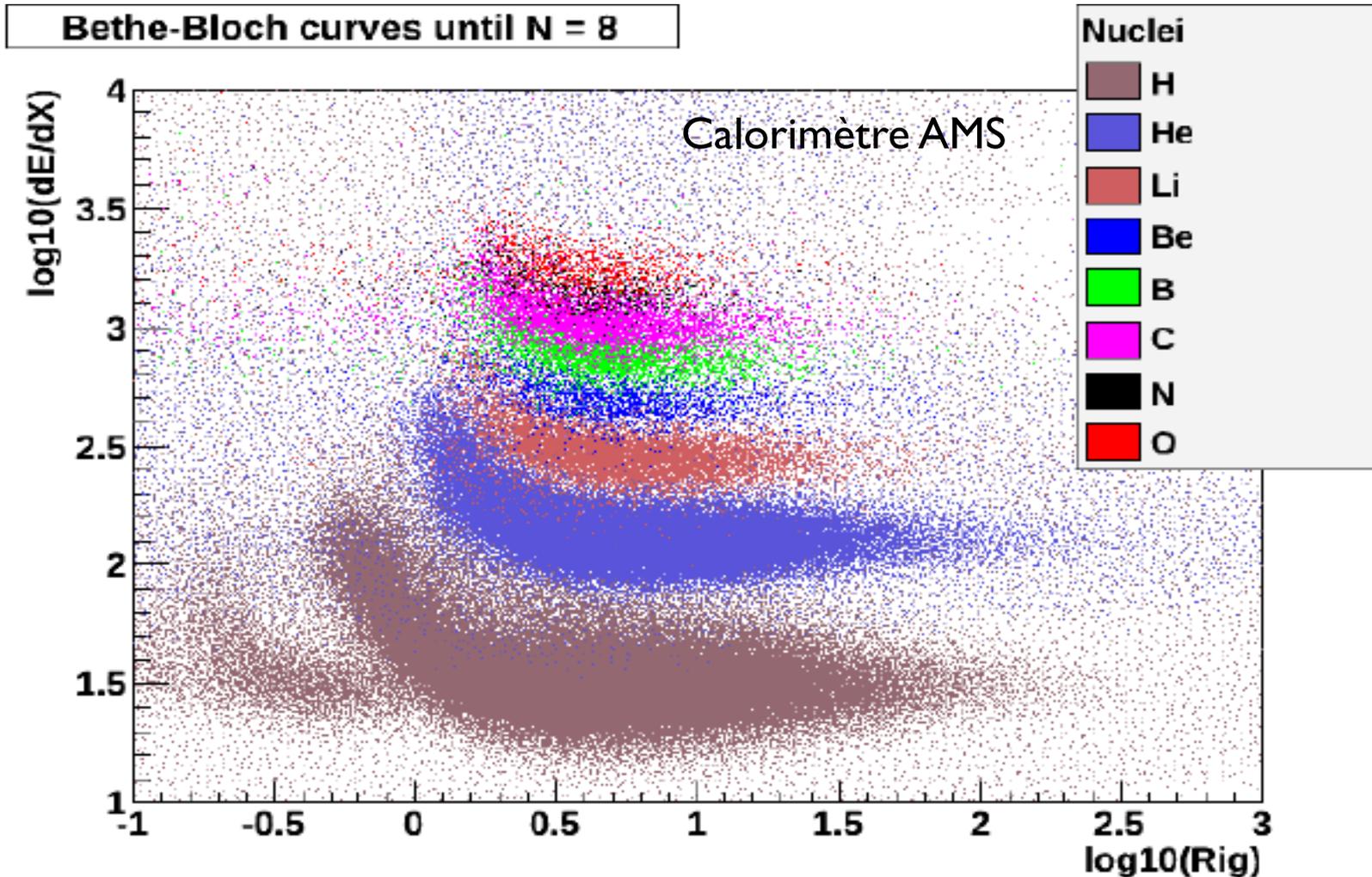
Illustration: Identification de particules

Mesures croisées de l'énergie d'ionisation et de l'impulsion
=> Separation et identification des particules (Masse) à basse impulsion



P (Impulsion) MeV/c

Illustration: Identification des noyaux

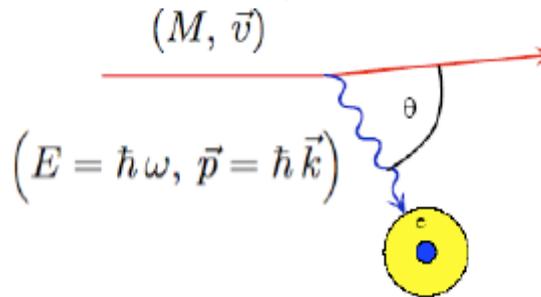


L'énergie perdue par ionisation est proportionnelle à z^2

Intéraction particule-matière

▷ Particules chargées

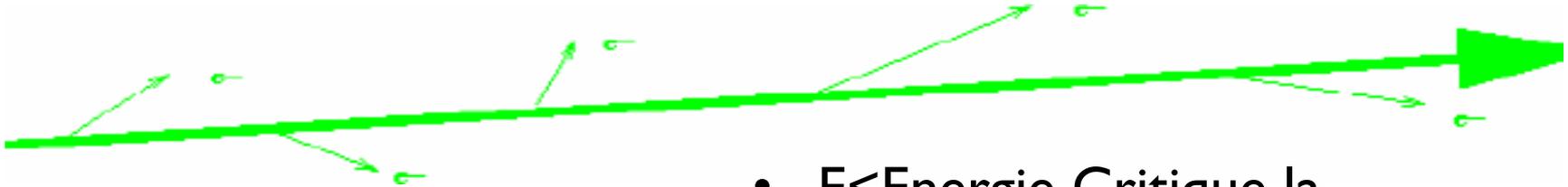
Energie cinétique de **la particule** incidente est perdue par interaction électromagnétique avec **les électrons** ou le **noyaux** du détecteur traversé



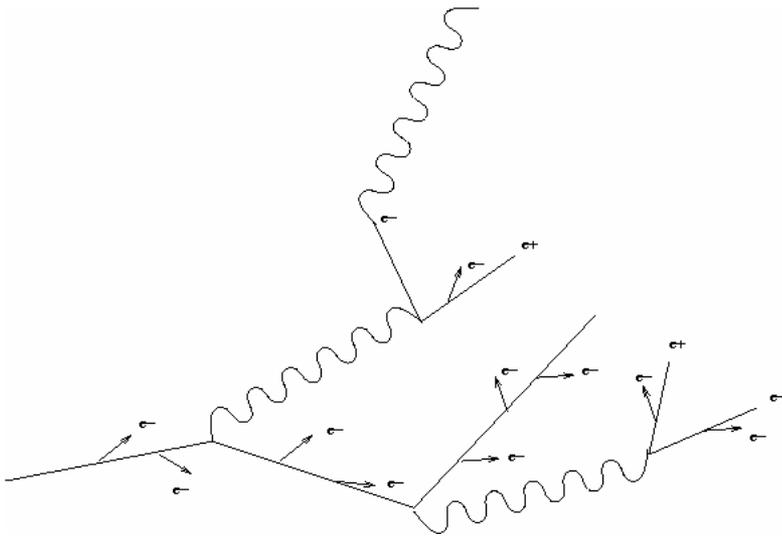
- ▶ **Ionisation**: si l'énergie de la particule incidente est élevée, les électrons de l'atome peuvent être arrachés \Rightarrow **détection de charge électrique**
- ▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **+ Rayonnement de freinage**, une particule (légère) va rayonner un **photon** dans le champ coulombien du noyau \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **Emission de Photon** pour les particules très relativistes (ex effet Tcherenkov, rayonnement de transition) \Rightarrow **détection de lumière**

Intéraction particule-matière

▷ Particules « légères » chargées (e^+ , e^-)



- $E < \text{Energie Critique}$ la particule incidente laisse un sillage d'ionisation



- $E > \text{Energie Critique}$ la particule "génère" une gerbe de particule par rayonnement de freinage et perd son identité

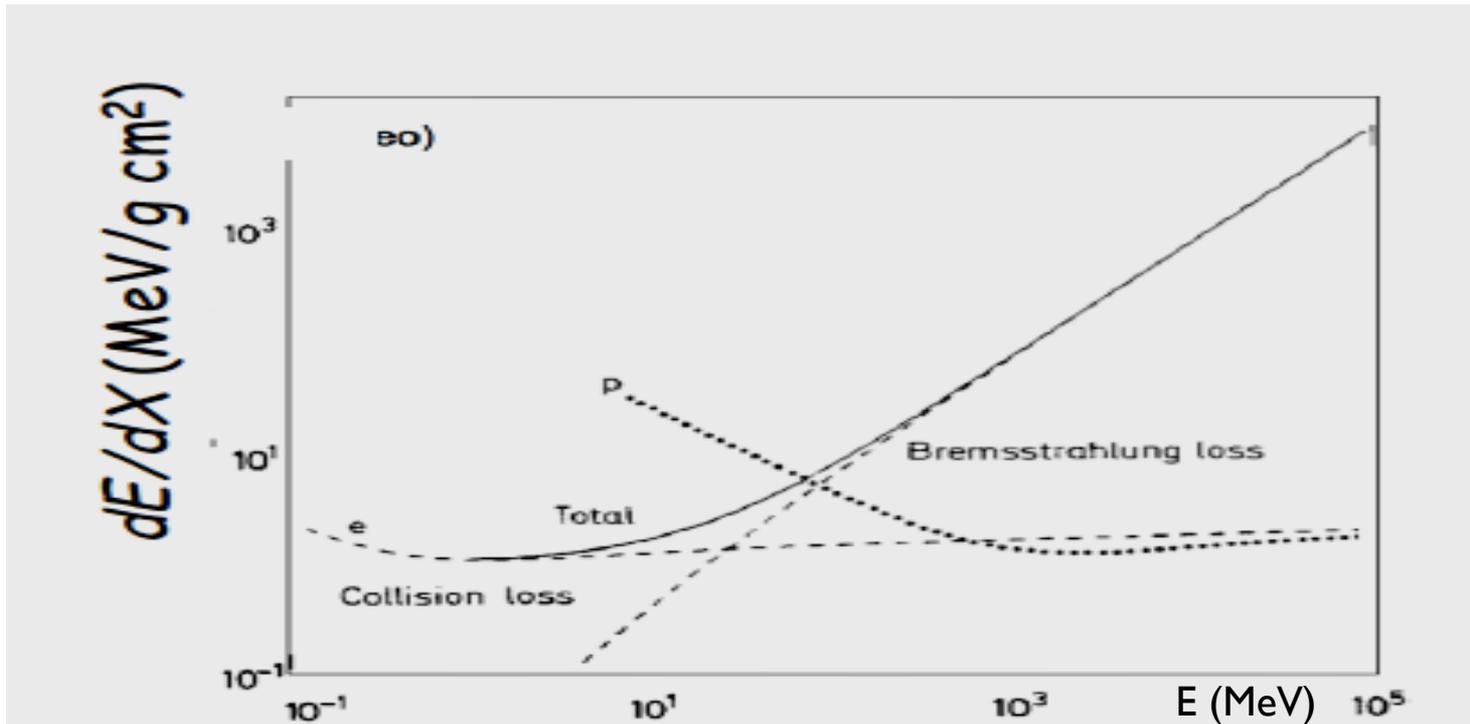
Intéraction particule-matière

▷ Particules « légères » chargées (e+,e-)

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{Total} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{Collision} + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{Rayonnement}$$

$$-\frac{dE}{dx}(\text{rad}) = \left(4N_A \frac{Z^2 \alpha^3 (\hbar c)^2}{m_e^2 c^4} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right) E$$

Proportional to E and 1/m² so relevant only for electrons or ultra-relativistic muons (> TeV)

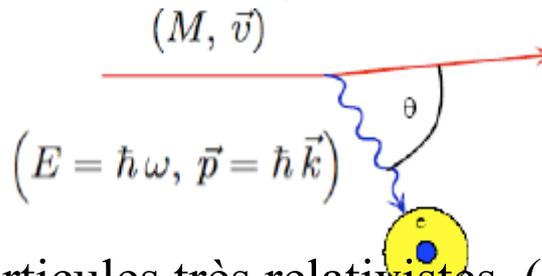


Longueur de radiation X_0 (g/cm^2) distance au bout de laquelle l'énergie est diminuée d'un facteur e

Intéraction particule-matière

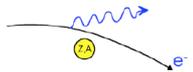
▷ Particules chargées

Energie cinétique de **la particule** incidente est perdue par interaction électromagnétique avec **les électrons** ou le **noyaux** du détecteur traversé



Emission de Photon pour les particules très relativistes (ex effet Tcherenkov, rayonnement de transition) \Rightarrow **détection de lumière**

- ▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ + **Rayonnement de freinage**, une particule (légère) va rayonner un **photon** dans le champ coulombien du noyau \Rightarrow **détection de lumière**

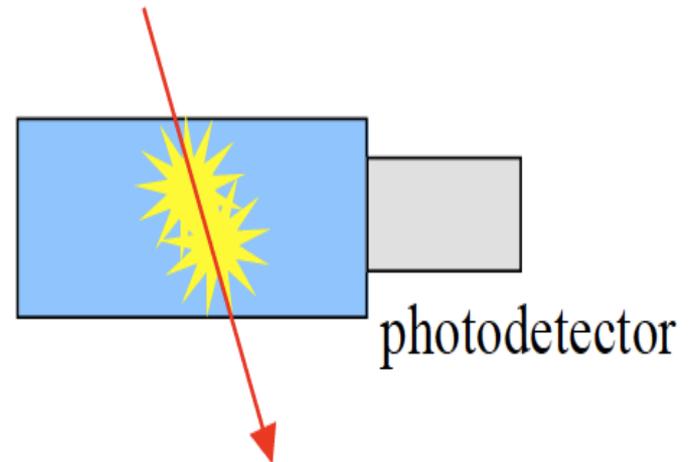


Scintillation



- ▷ Emission d'un photon dans l'UV
- ▷ Les inorganiques
 - ▶ Cristaux ou Gaz rares (Liquide)
 - ▶ Grande amplitude mais lents
 - => **Calorimétrie**
- ▷ Les organiques
 - ▶ Liquide (toluene) ou scintillateurs plastiques
 - ▶ Faible amplitude (petit Z, C ou H) mais rapide
 - => **système de déclenchement**

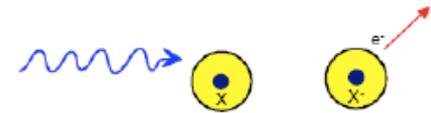
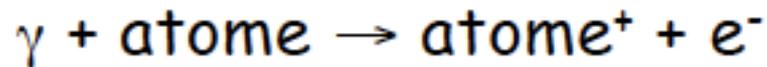
Scintillation



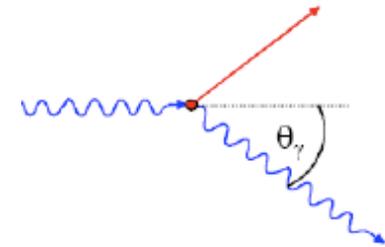
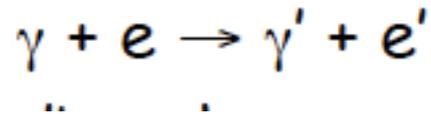
Intéraction photon (γ)-matière

Pour être détecté, le photon doit créer des particules chargées et/ou transférer de l'énergie à des particules

- Effet photoélectrique (electrons de la couche k)

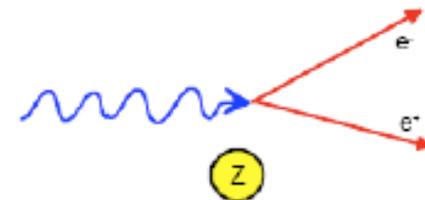
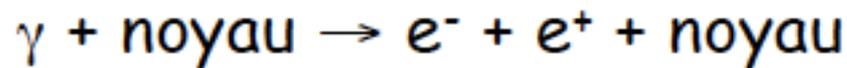


- Diffusion Compton (diffusion d'un photon sur un e^-)



- Création de paires

Champ coulombien du noyau ou e^-



Intéraction photon (γ)-matière

Pour être détecté, le photon doit créer des particules chargées et/ou transférer de l'énergie à des particules

- ▶ Effet photoélectrique

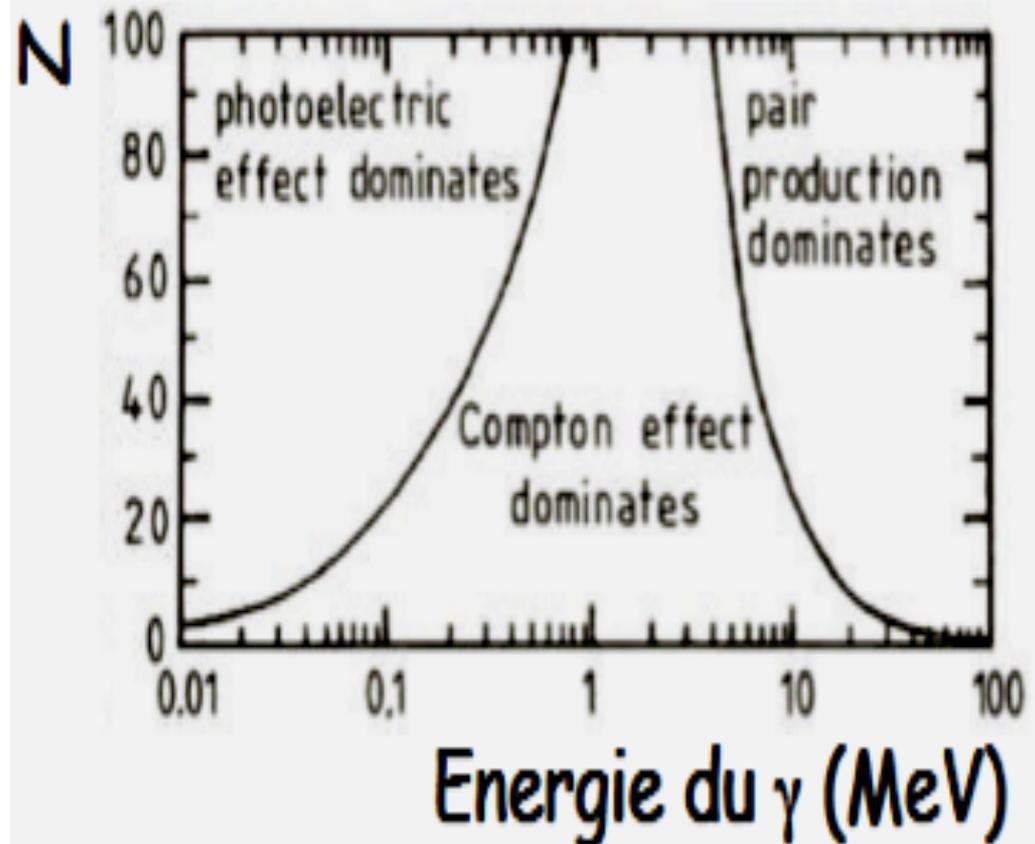
$$E_{\gamma} < 100 \text{ KeV}$$

- ▶ Diffusion Compton

$$E_{\gamma} \approx 1 \text{ MeV}$$

- ▶ Création de paires

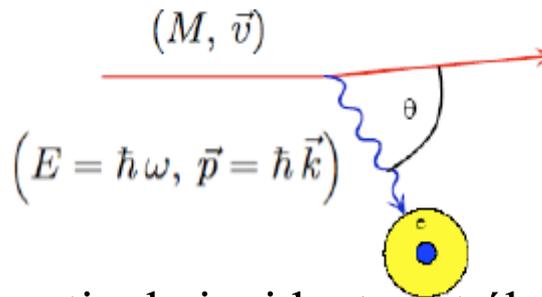
$$E_{\gamma} > 1 \text{ MeV}$$



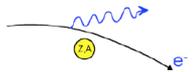
Interaction particule-matière

▷ Particules chargées

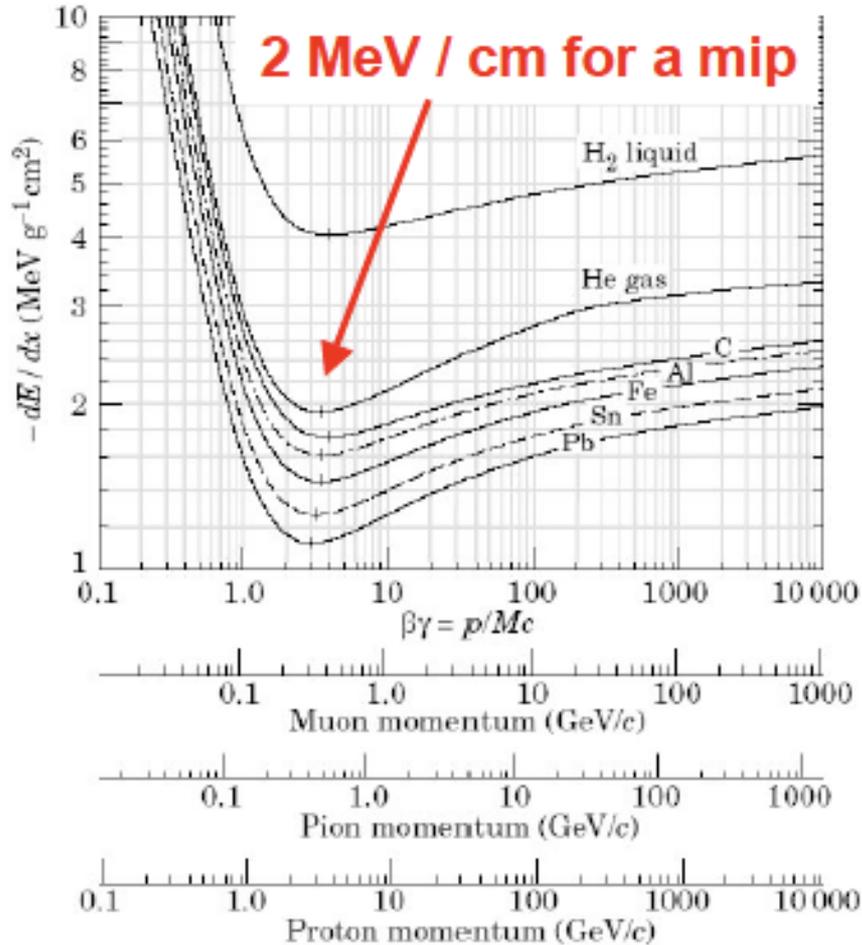
Energie cinétique de **la particule** incidente est perdue par interaction électromagnétique avec **les électrons** ou le **noyaux** du détecteur traversé



- ▶ **Ionisation**: si l'énergie de la particule incidente est élevée, les électrons de l'atome peuvent être arrachés \Rightarrow **détection de charge électrique**
- ▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **+ Rayonnement de freinage**, une particule (légère) va rayonner un **photon** dans le champ coulombien du noyau \Rightarrow **détection de lumière**
- ▶ **Emission de Photon** pour les particules très relativistes (ex effet Tcherenkov, rayonnement de transition) \Rightarrow **détection de lumière**



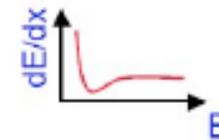
Résumé des interactions avec la matière



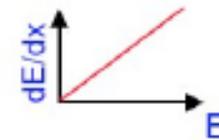
Radiation length X_0

e^+ / e^-

- Ionisation



- Bremsstrahlung



γ

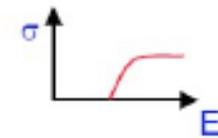
- Photoelectric effect



- Compton effect



- Pair production



Interaction des hadrons- de nombreuses cascades de particules produites, longueur d'absorption λ

Imagerie Cherenkov (anneau)

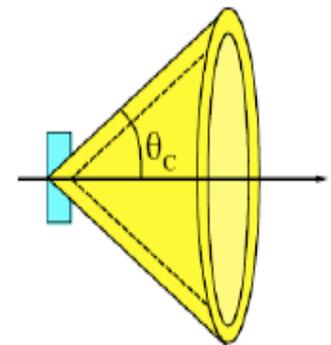
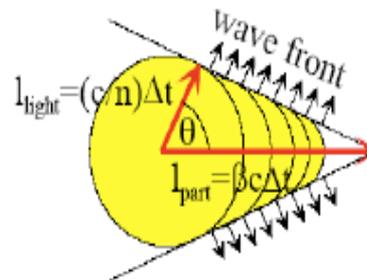
- Un **rayonnement Cherenkov** est émis quand une particule chargée traverse un milieu diélectrique avec une vitesse β supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu :

$$\frac{v}{c} > \frac{1}{n} \implies \beta > \beta_{seuil} = \frac{1}{n}$$

n : indice du milieu ($n > 1$)

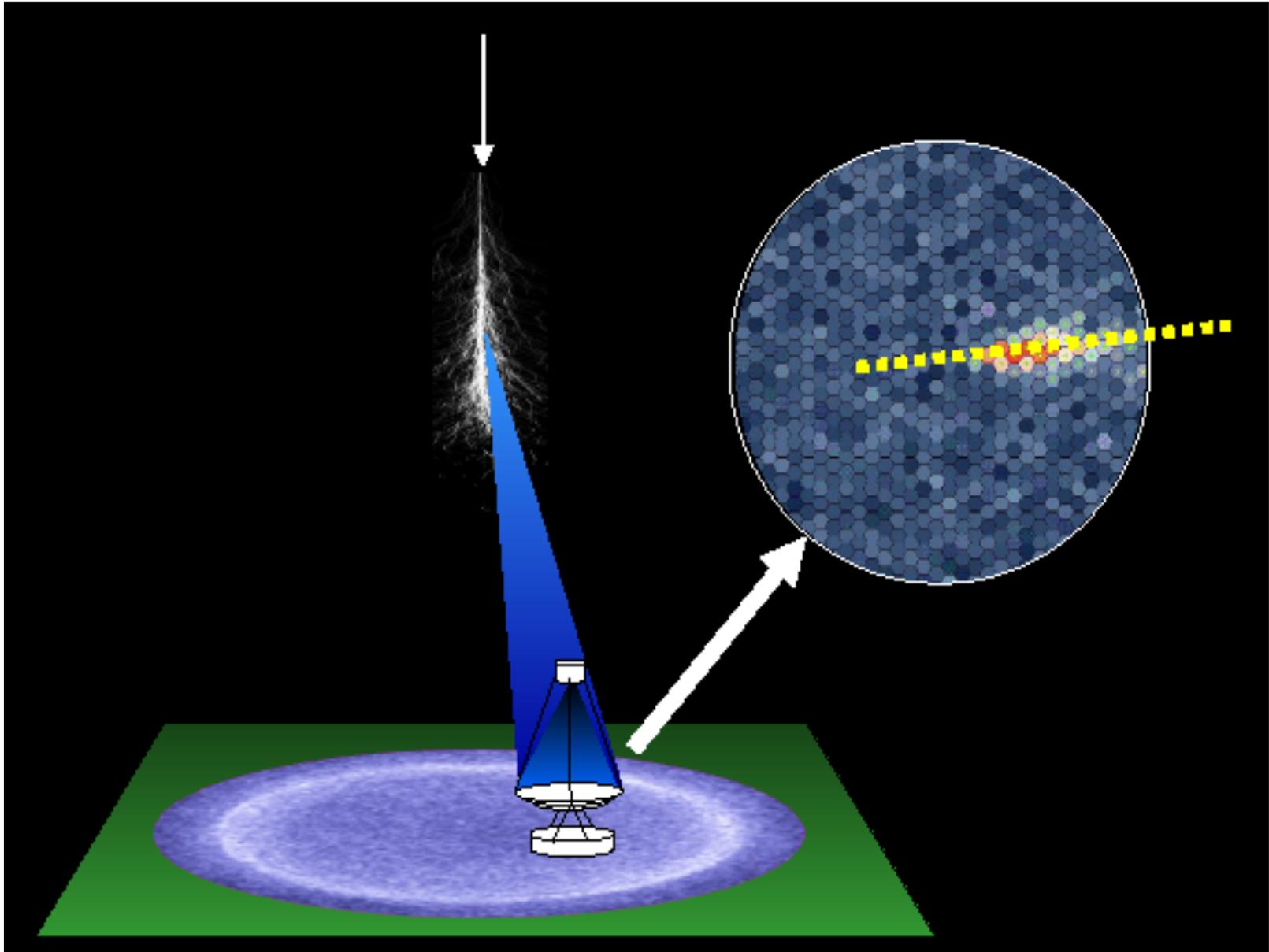
- L'émission a lieu sur un cône d'angle au sommet θ_c tel que :

$$\cos(\theta_c) = \frac{1}{n\beta}$$



- Se produit dans tous les milieux transparents, y compris les scintillateurs, mais 100 fois plus faible que la scintillation

Lumière Cherenkov des gerbes atmosphériques



Gamma rays on ground: Imaging Air Cerenkov Telescopes

Energy range 50 GeV- 50 TeV



MAGIC 2 :
2 telescopes $\text{Ø}17(3.5^\circ)$
Threshold ~ 60 GeV
Operating since 2004
(stereo) 2009



Veritas:
4 télescopes
 $\text{Ø} 12\text{m} (3.5^\circ)$
Threshold ~ 150 GeV
Operating since 2007



H.E.S.S. :
4 telescopes $\text{Ø} 13\text{m}(5^\circ)$ (2004)
1 telescope $\text{Ø} 28$ (09/2012)
Threshold ~ 150 GeV-30 GeV



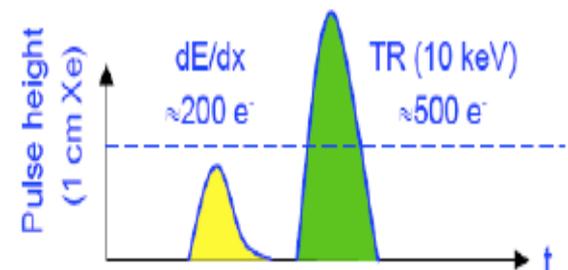
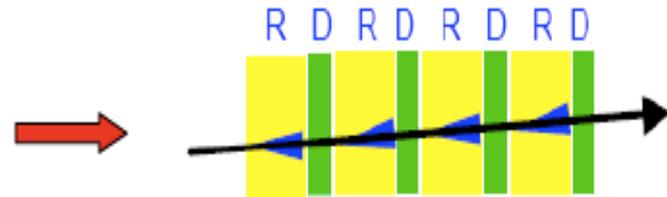
Complete coverage of the sky: galactic and extragalactic sources

Rayonnement de transition – particule relativiste

- Un « **rayonnement de transition** » est émis lorsqu'une particule chargée traverse un milieu présentant une discontinuité de l'indice de réfraction (ex : vide - diélectrique)
- Quelques calculs complexes d'électromagnétisme montrent que :
 - L'énergie W émise à chaque transition est $\propto \gamma$
 - ⇒ Dans la pratique, les e^\pm sont les seules particules qui vont émettre un rayonnement de transition (⇒ identification !!)
 - Le nombre de photons émis à chaque transition est très faible ($\approx 1/137$)
 - ⇒ Il faut de nombreuses transitions d'où une « **structure en sandwich** »
 - Le rayonnement est émis dans un angle $\theta \approx 1 / \gamma$
 - Les photons sont typiquement de l'ordre du keV

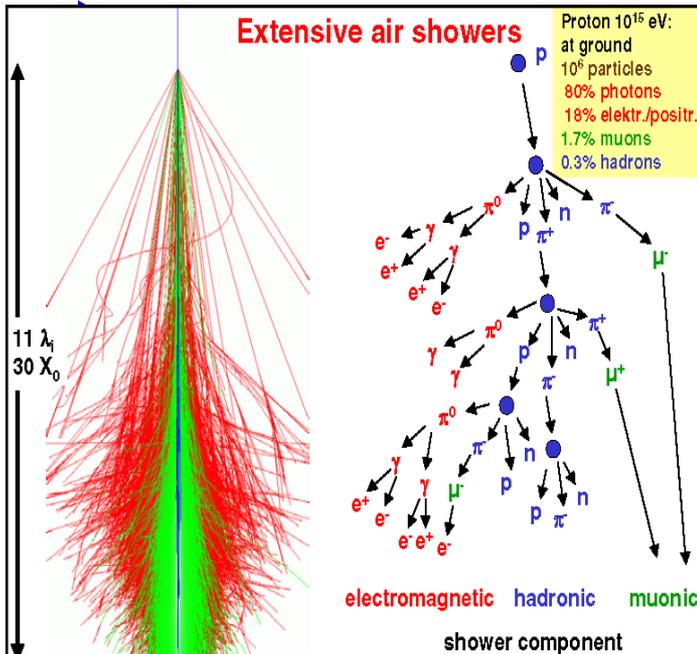
TRD - Rayonnement de transition

- Sandwich de radiateurs et de détecteurs alternés
- Les radiateurs sont souvent des feuilles de CH_2 (faible Z car la réabsorption est $\propto Z^5$)
- Les détecteurs sont généralement gazeux (MWPC, straw tubes, ..) et utilisent des gaz lourds (Z élevé car le nombre de photo-électrons est $\propto Z^5$)
- Problème intrinsèque au détecteur
⇒ Mettre un seuil élevé

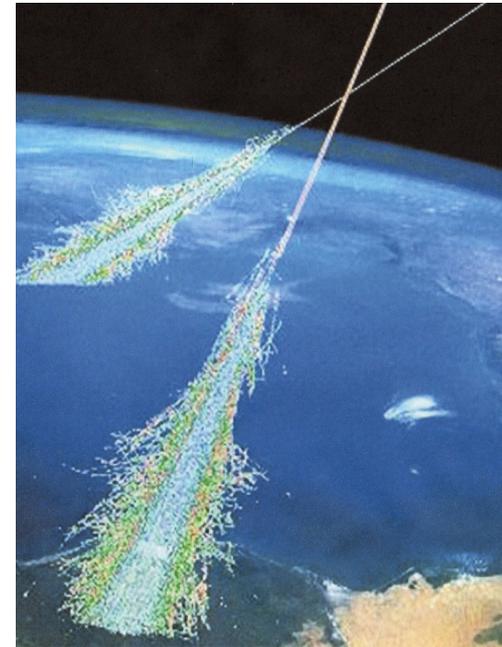


Autres interactions

- ▷ **Hadrons** : interaction forte, entre les hadrons et les noyaux de la cible => production de fragments ($\propto \log(E)$), on définira alors une **longueur d'interaction** λ_I (g/cm^2)



L'atmosphère détecteur : une particule **primaire** commune engendre sur sa trajectoire dans l'atmosphère une **myriade de particules secondaires** qui atteignent le sol en un laps de temps très bref pour apparaître comme **simultanées** dans les détecteurs.



Interaction des protons dans l'atmosphère

Une pluie de particules secondaires...

Les grandes gerbes atmosphériques se forment dans les hautes couches de l'atmosphère, à plus de 20 km d'altitude

Les interactions dans la gerbe produisent:

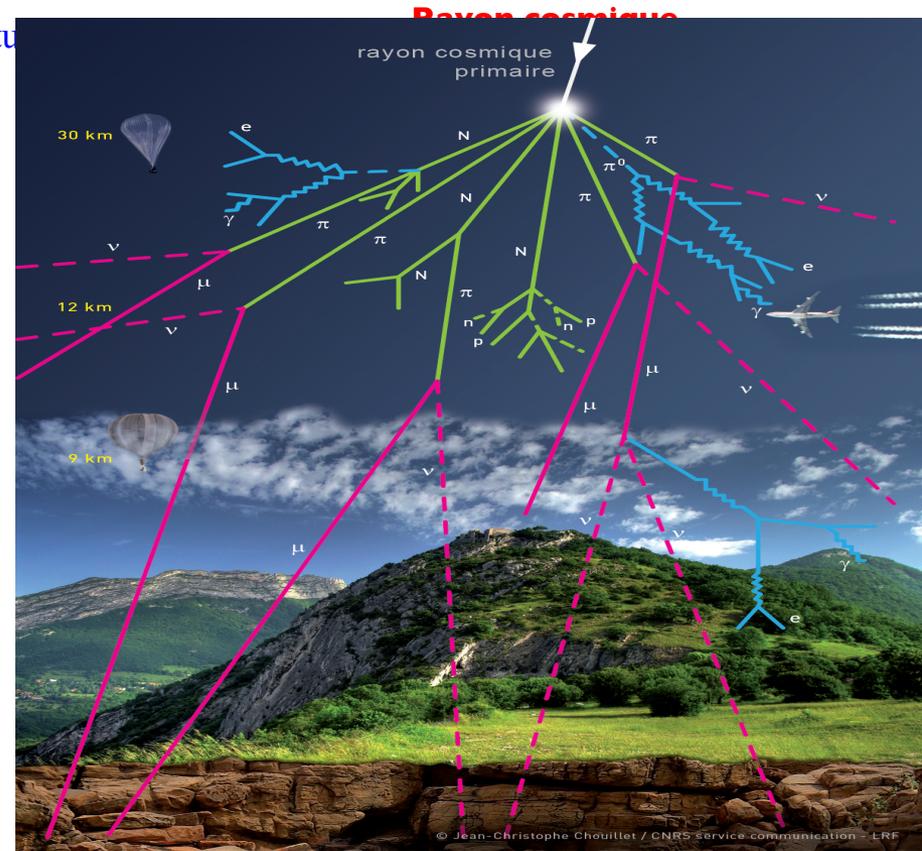
- Des fragments de noyaux
- Des pions neutres → **2 gamma**
- Des pions chargés → **muon + neutrino**

Au niveau de la mer, la pluie cosmique est constituée:

- **principalement de muons** d'énergie environ 1 GeV
- **2% de nucléons** (proton ou neutron) résultant de la fragmentation des noyaux.
- **0,2% d'électrons et de positrons** provenant de muons qui se sont désintégrés
- **0,04% de pions**

Au niveau de la mer, une pluie d'environ 150 particules par m² et par seconde, Essentiellement des muons.

Cf exposé C.Bérat



Gerbe électromagnétique (e^+ , e^- , γ)

Gerbe hadronique; (principalement μ et neutrinos au niveau du sol)

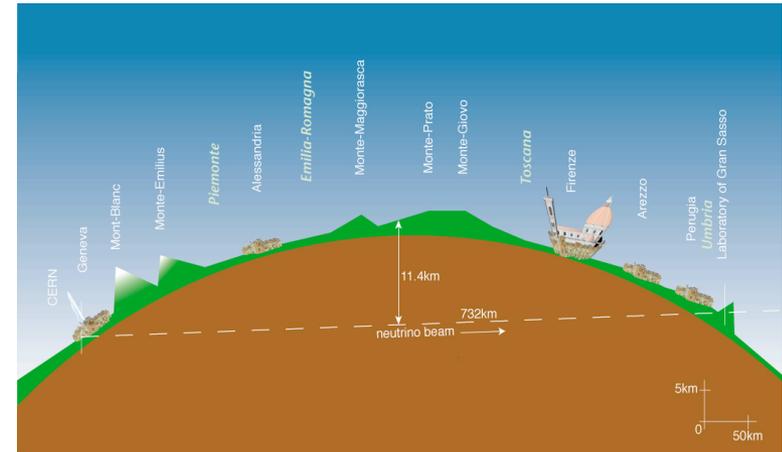
Autres interactions

▷ Neutrinos : interaction faible, généralement énergie manquante

Pour les détecter, il faut les faire interagir :

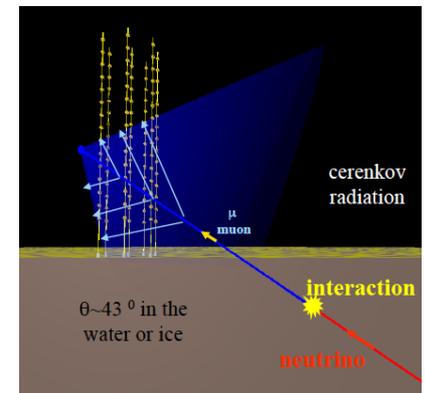
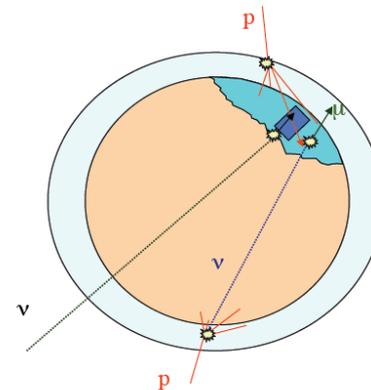
$$\nu_\ell + n \longrightarrow \ell^- + p \quad \text{avec} \quad \ell^- = e^-, \mu^-, \tau^-$$

$$\bar{\nu}_\ell + p \longrightarrow \ell^+ + n \quad \text{avec} \quad \ell^+ = e^+, \mu^+, \tau^+$$



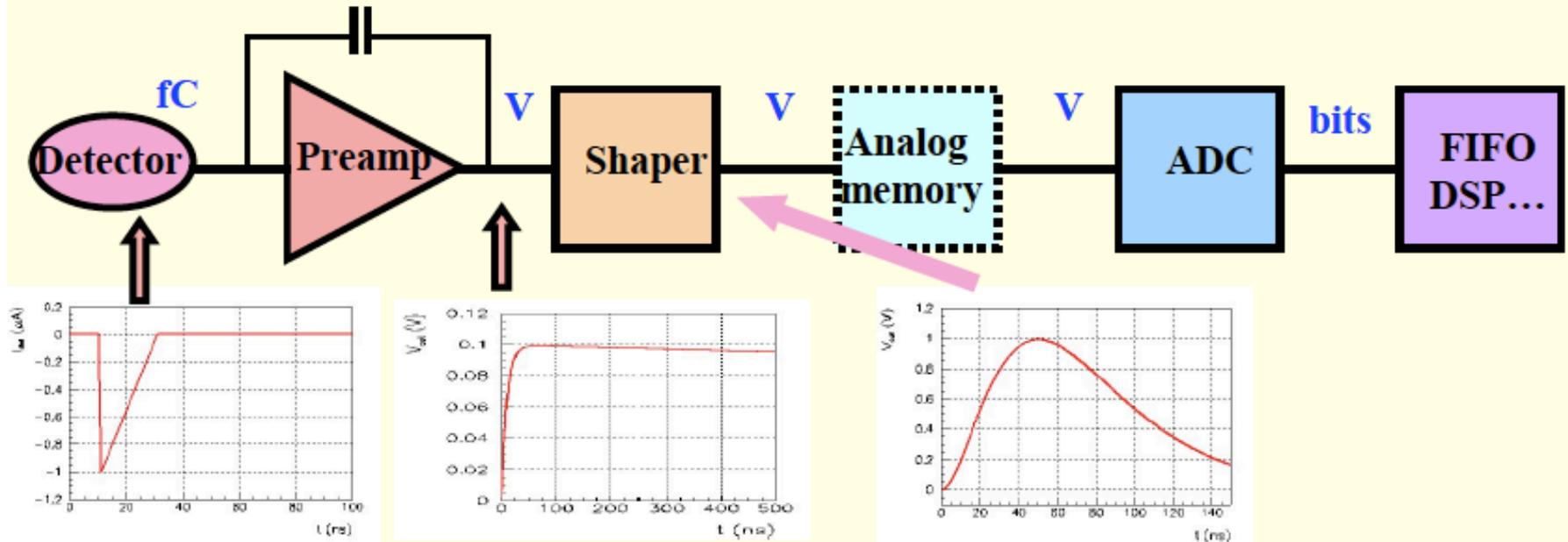
Typiquement, les efficacités de détection sont de l'ordre de 10^{-17} dans 1 m de fer

- Les détecteurs spécialisés pour les neutrinos doivent être énormes et accepter de très haut flux



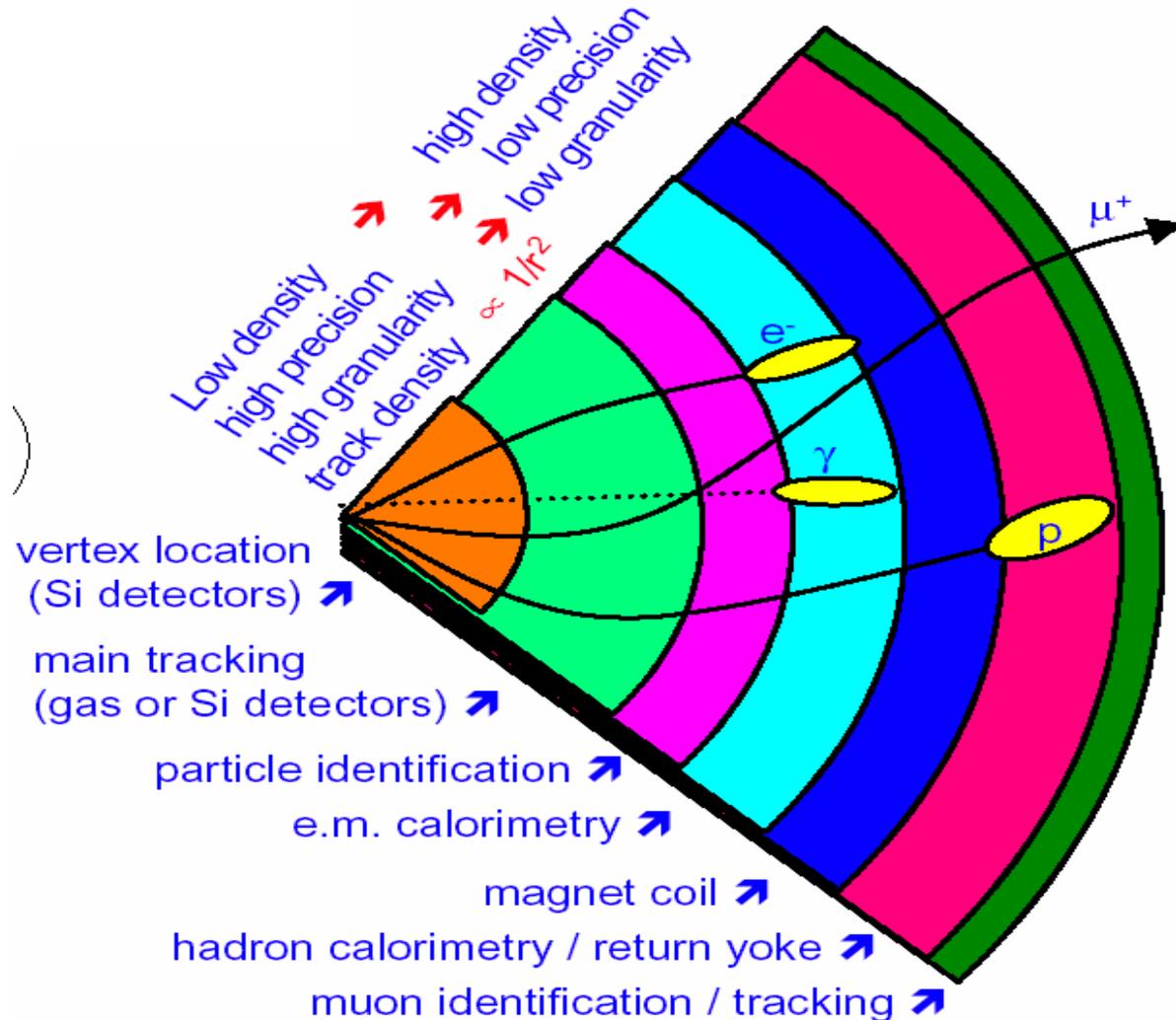
Overview of readout electronics

➤ Most front-ends follow a similar architecture



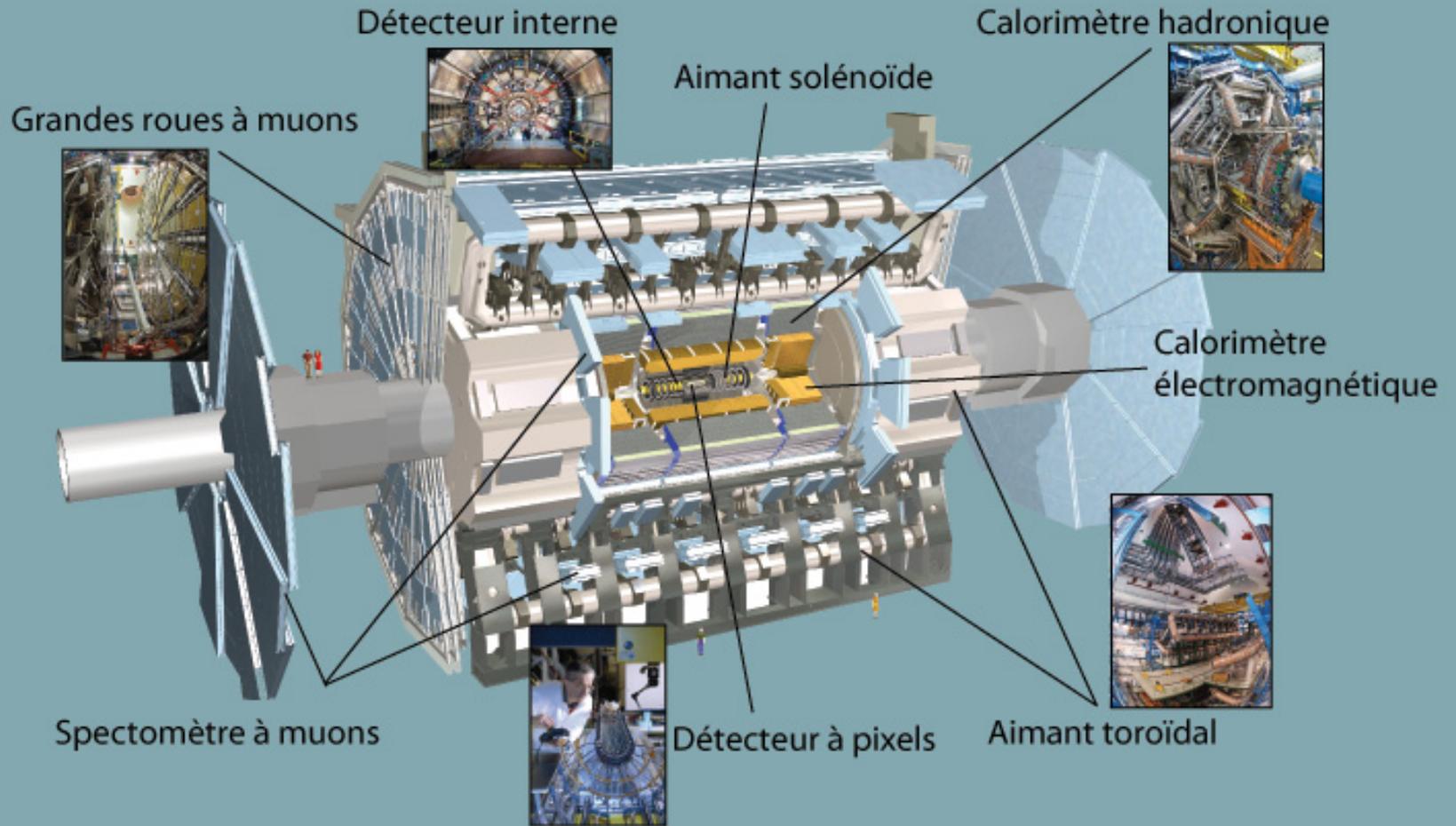
- Very small signals (fC) -> need **amplification** and **optimisation of S/N (filter)**
- Measurement of **amplitude** and/or **time** (ADCs, discris, TDCs)
- Several thousands to millions of channels
- Needs time to decide to keep or not the event : memory

Structure globale d'un détecteur de physique des particules



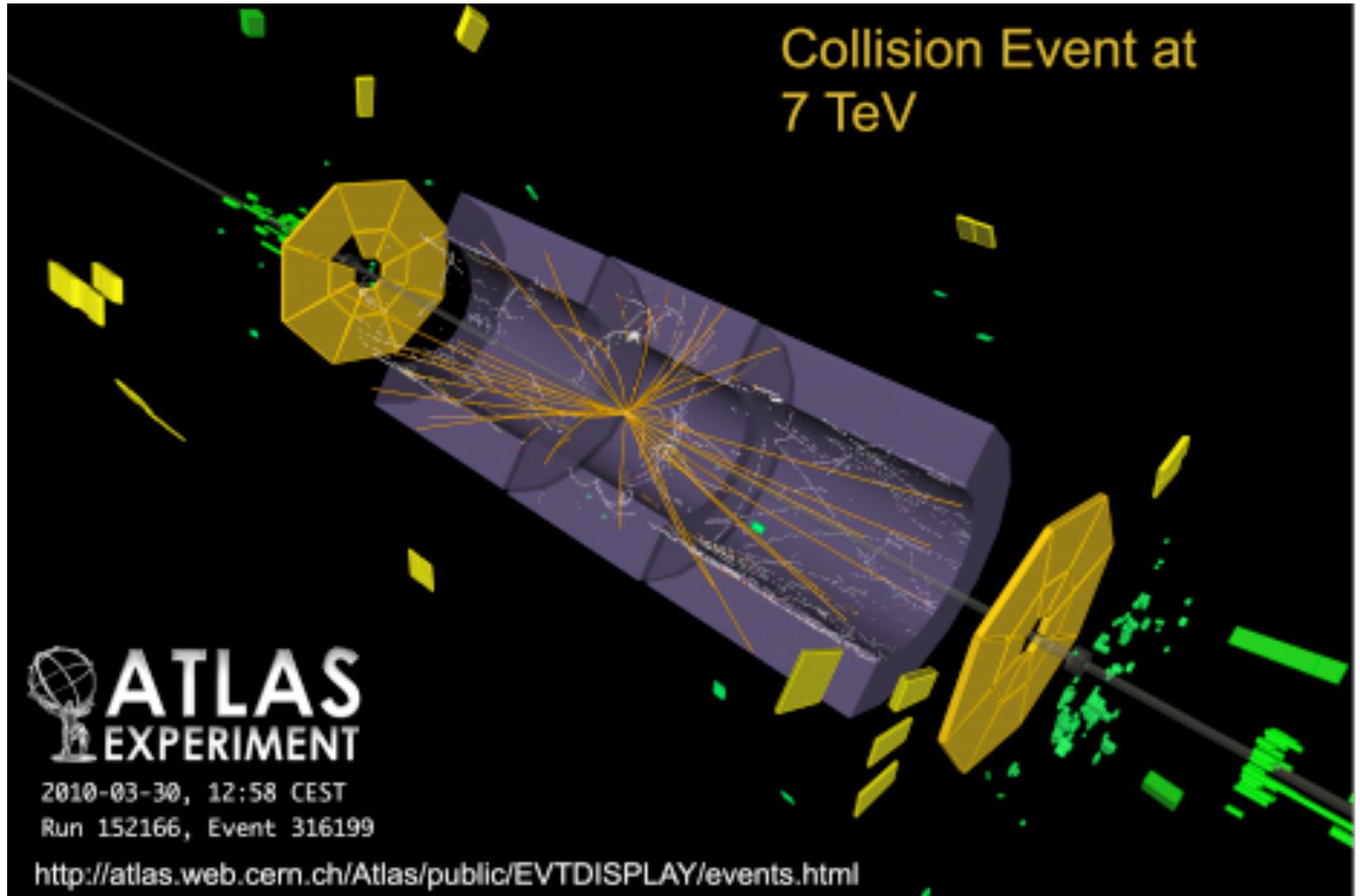
Selon leur nature, les particules ont différentes signatures

Le détecteur Atlas

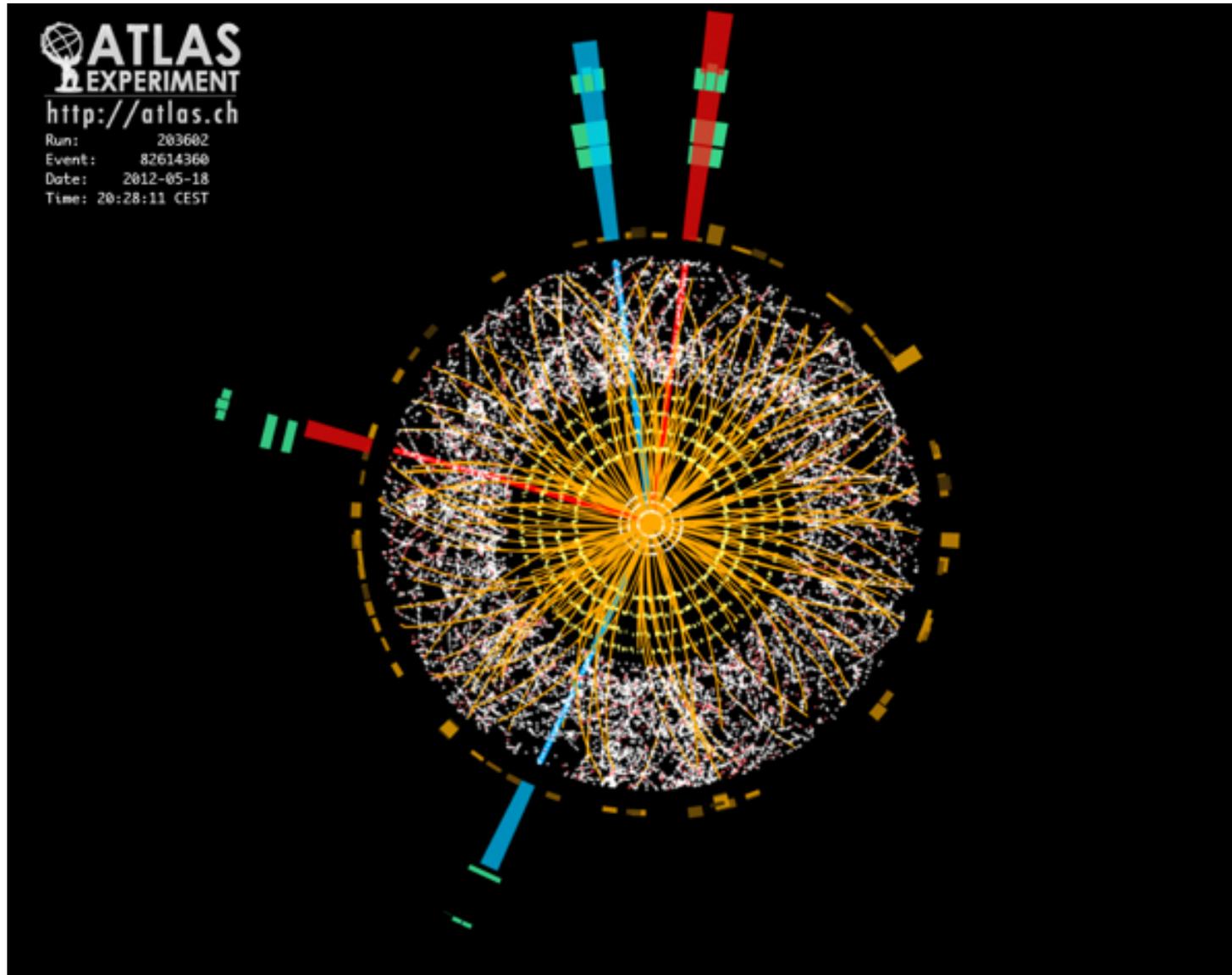


Construit autour du point de collision

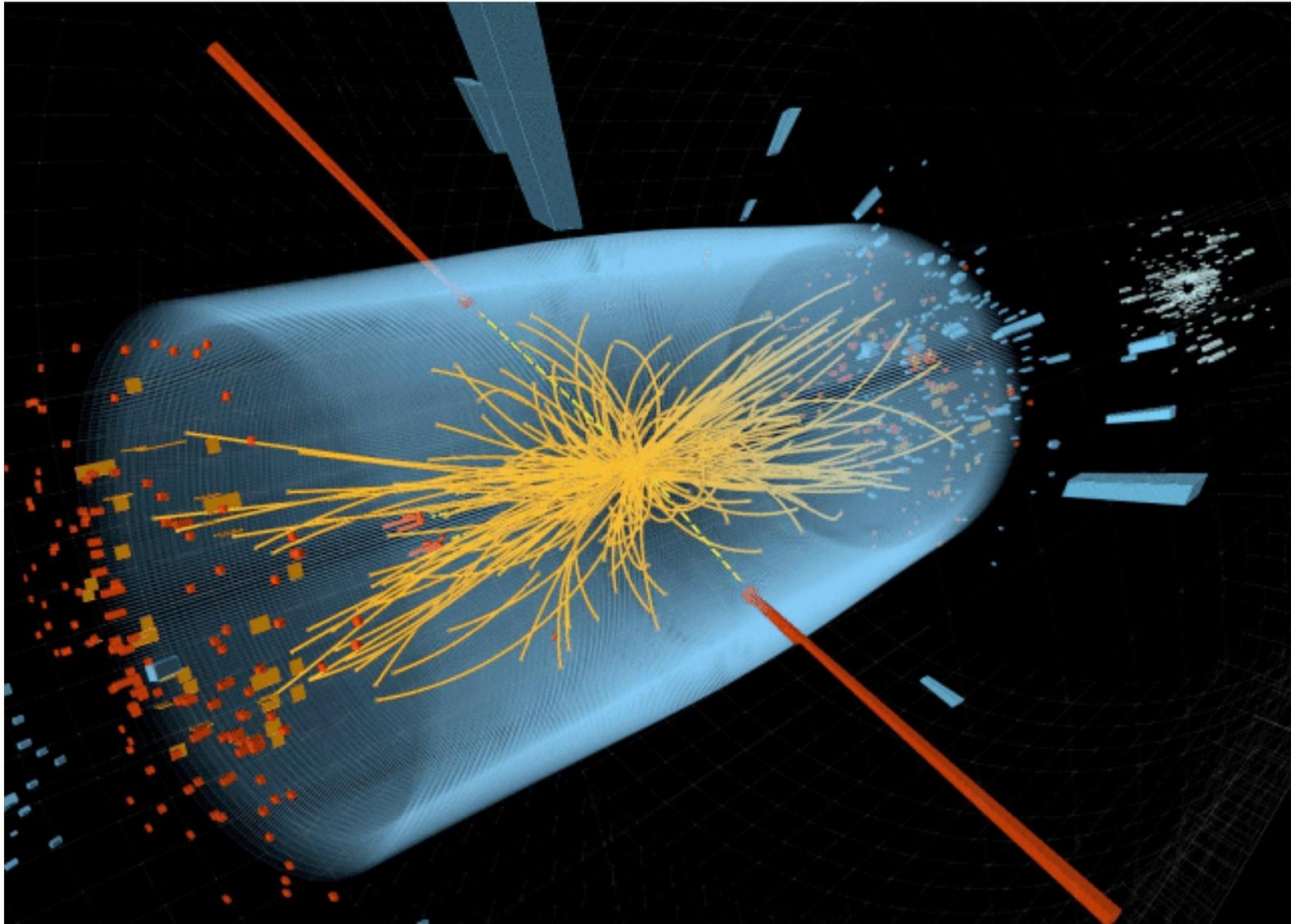
Le détecteur Atlas



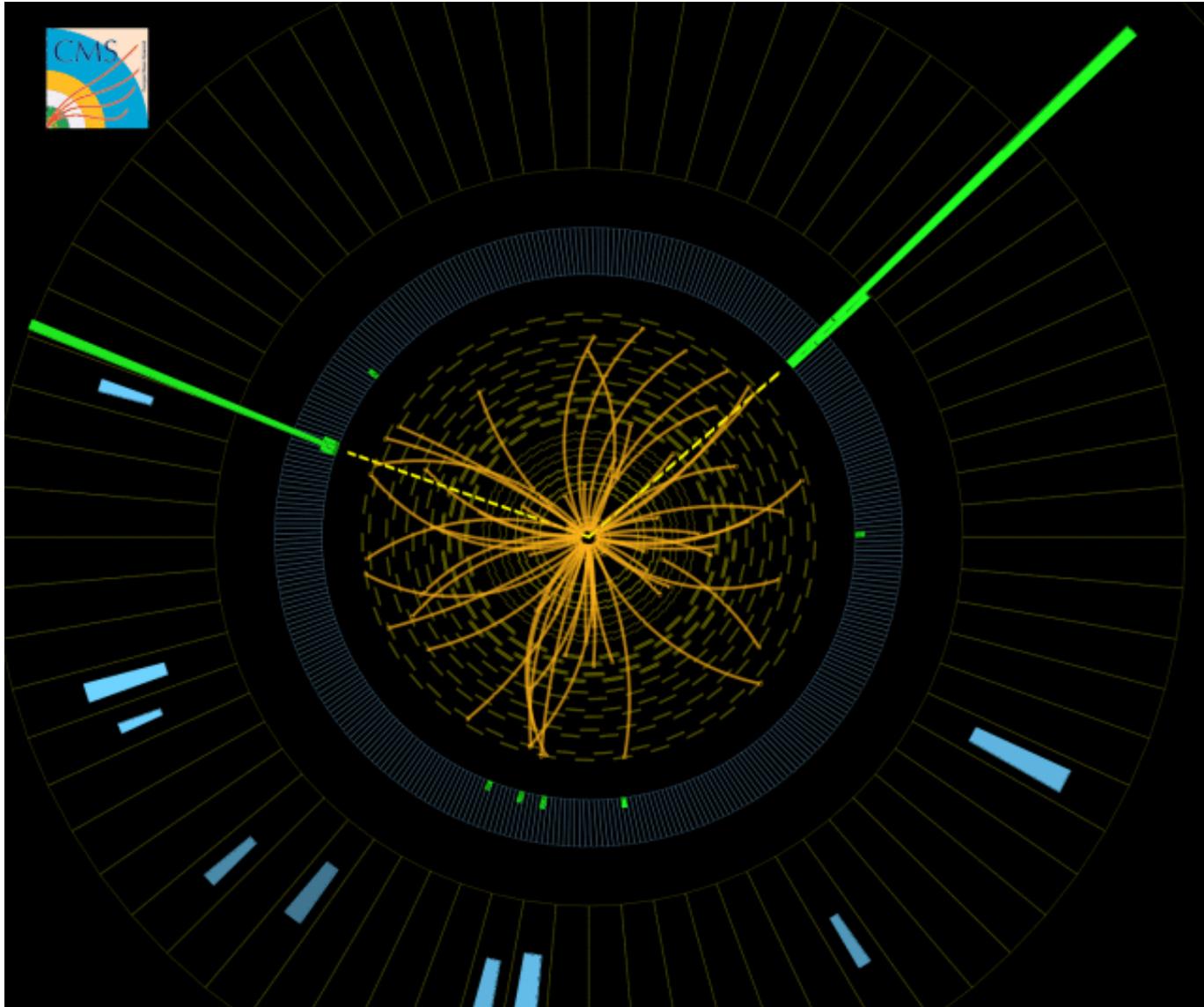
Le détecteur Atlas – Candidat Higgs



Le détecteur CMS – Candidat Higgs

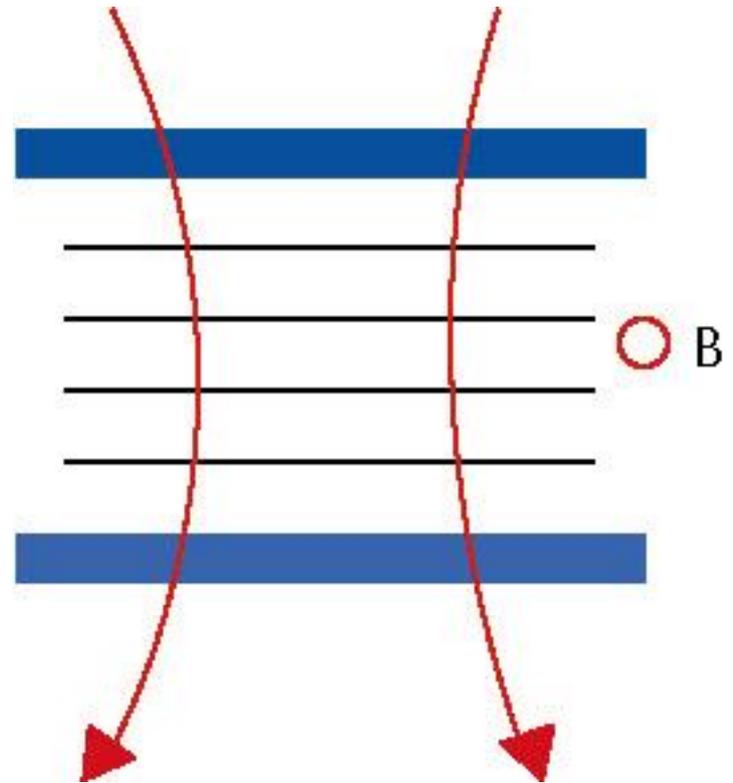


Le détecteur CMS – Candidat Higgs



AMS- Principes

- ▷ Interaction des particules chargées avec la matière
 - ▶ Aimant + trajectometre
 - ▶ $mv/Z \propto R$ Rigidité
 - ▶ Z^2
 - ▶ Signe de la charge
- ▷ Déclenchement et sens de passage de la particule
 - ▶ Mesure de temps
- ▷ Identification des particules
 - ▶ Noyaux (Z, M)
 - ▶ Particule électromagnétique
 - ▶ Séparation e/p



Un détecteur de physique des particules dans l'espace

16th of May Launch + 8 s – KSC Cape Canaveral

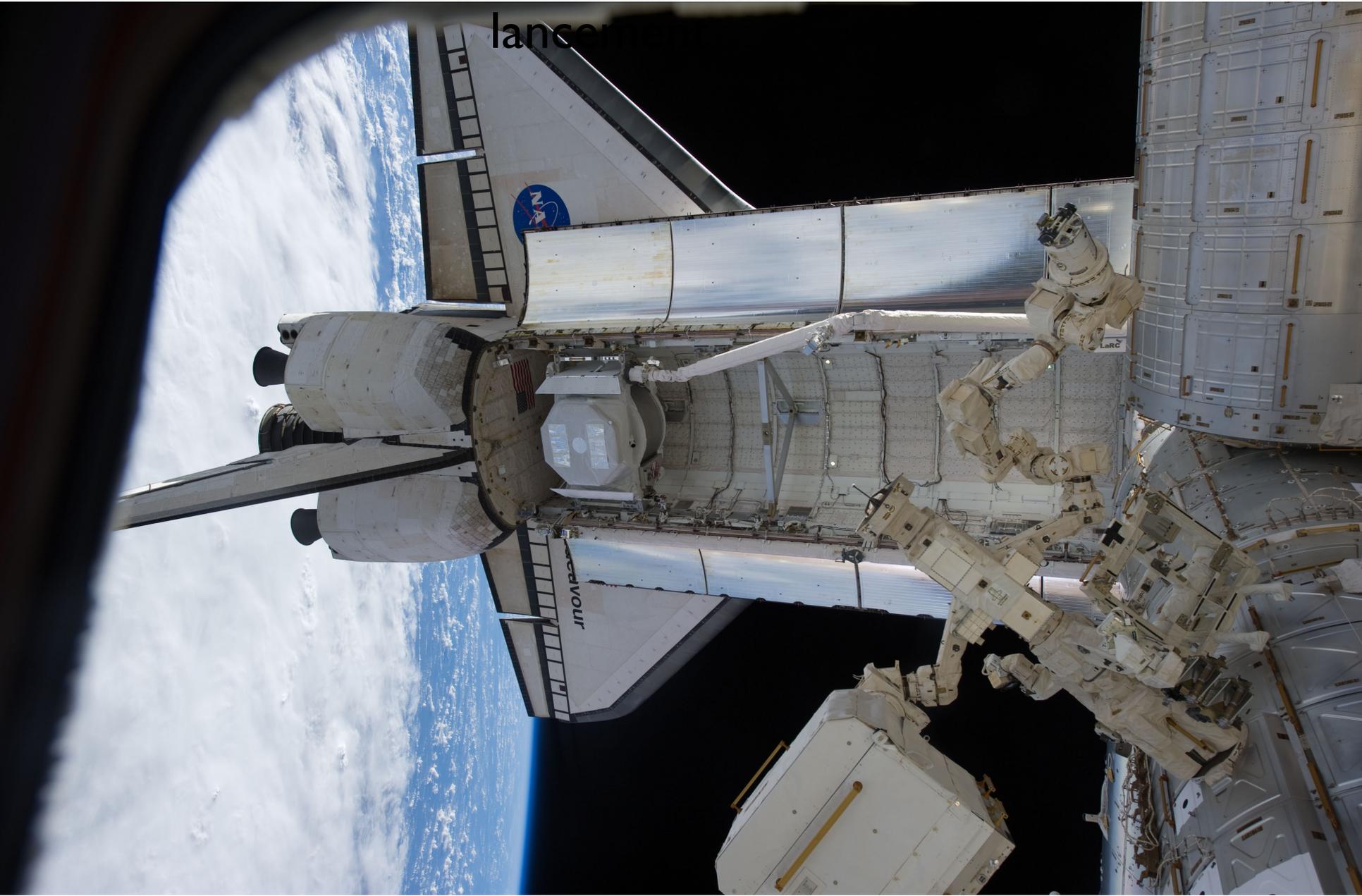


16 Mai 2011 1.5 après le lancement



19 Mai 2011 AMS va etre installé sur l'ISS

lancer



AMS Activation – 19 mai , 5:15



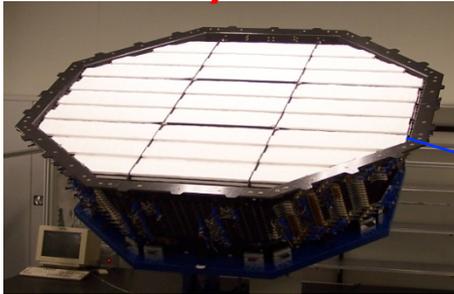
AMS sur la station spatiale internationale



AMS: A TeV precision, multipurpose spectrometer

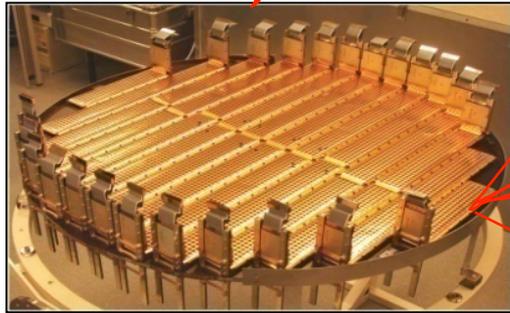
TRD

Identify e^+ , e^-



Silicon Tracker

Z, P

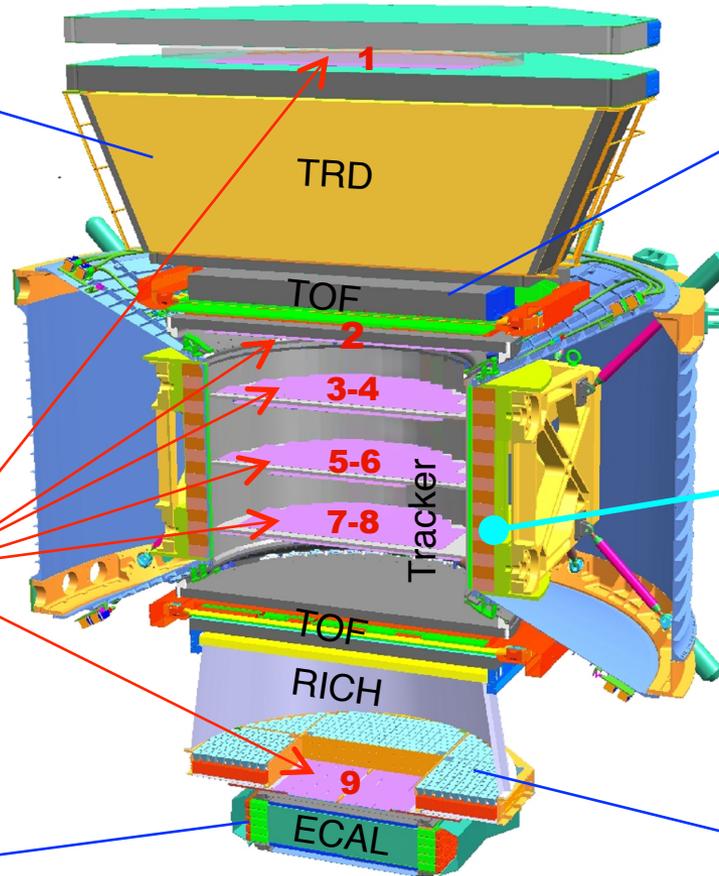


ECAL

E of e^+ , e^- , γ



Particles and nuclei are defined by their charge (Z) and energy ($E \sim P$)



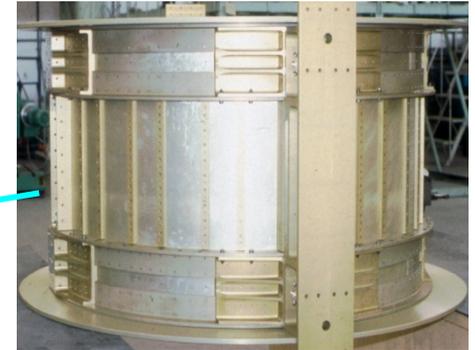
TOF

Z, E



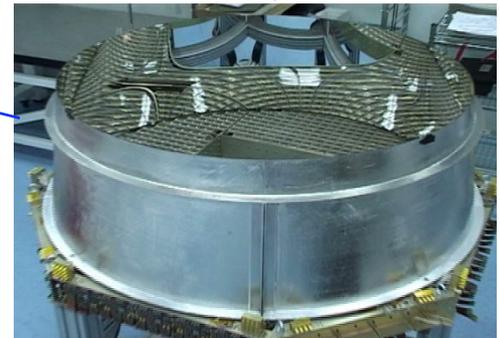
Magnet

$\pm Z$



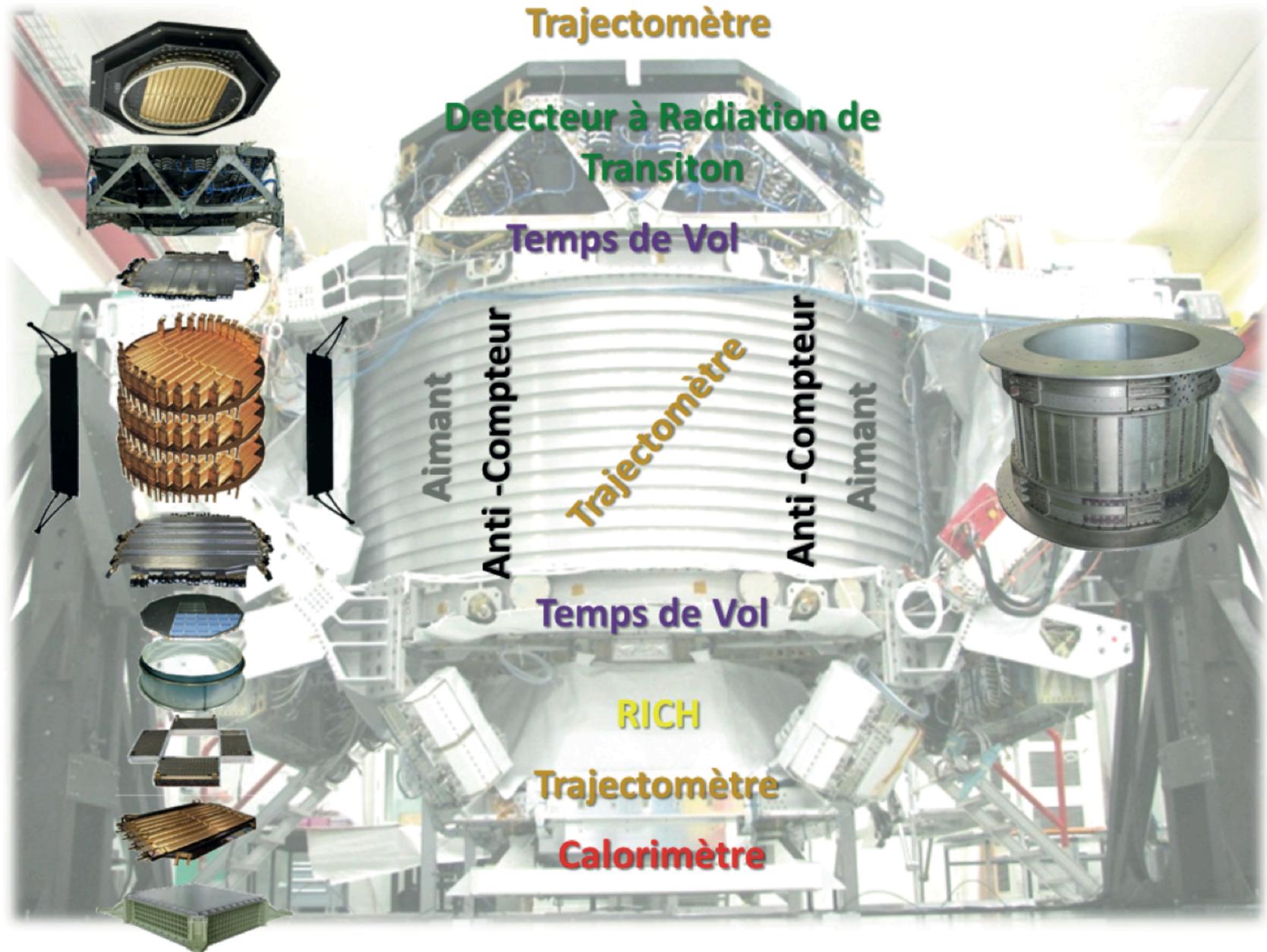
RICH

Z, E

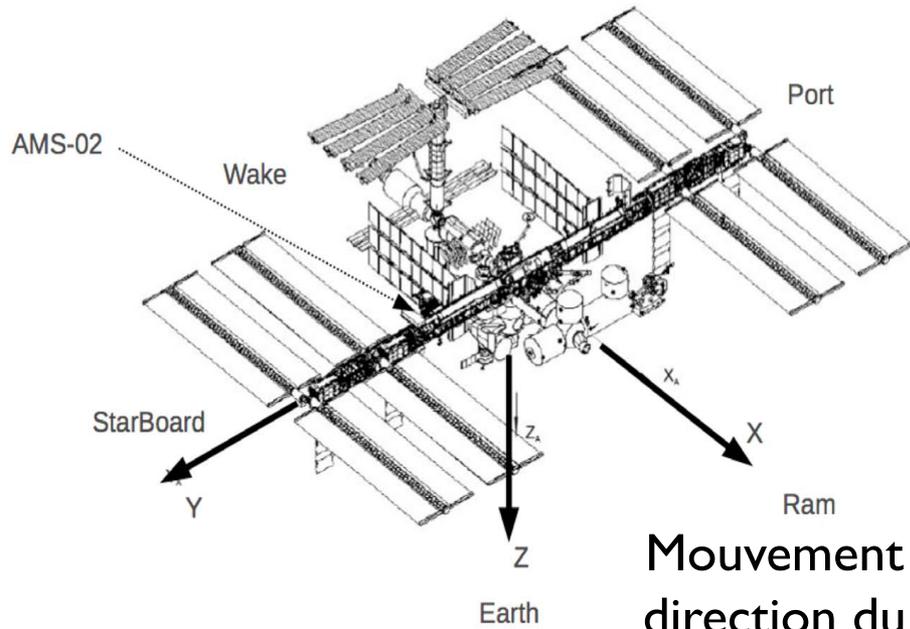


Z, P are measured independently from Tracker, RICH, TOF and ECAL

Le détecteur AMS



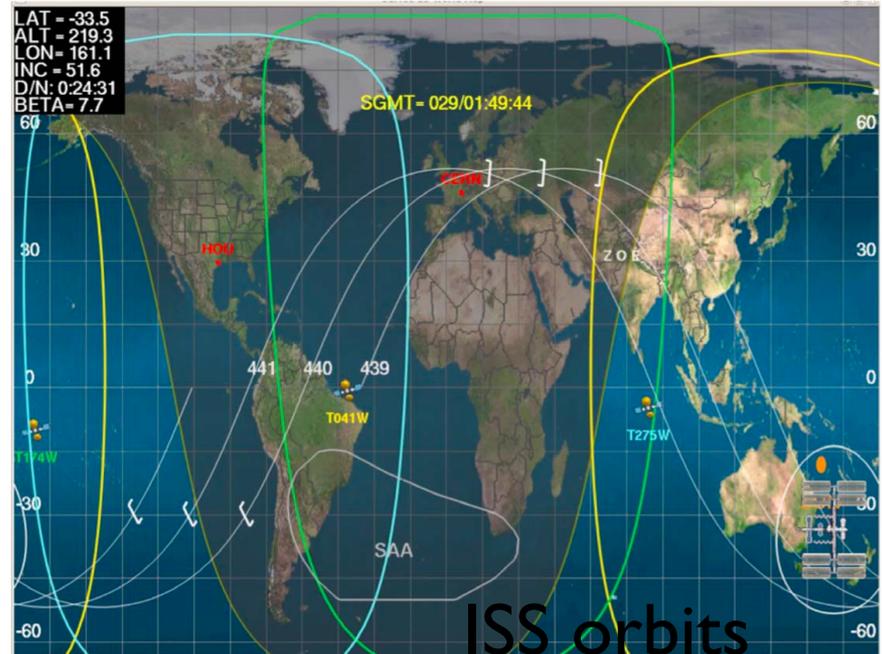
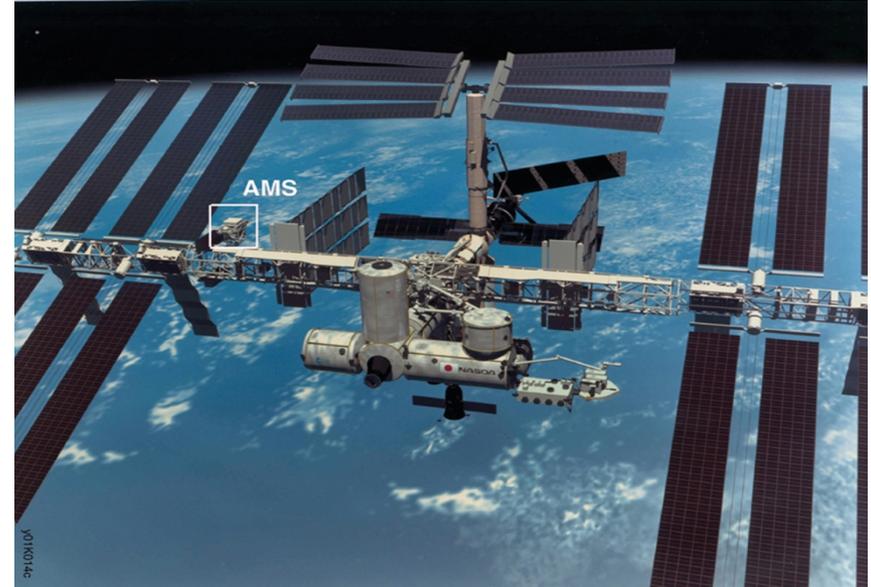
Orbites ISS



Mouvement direction du poupe(wake) à proue(ram)

ISS vitesse: 8km/s, une orbite en 90 mn

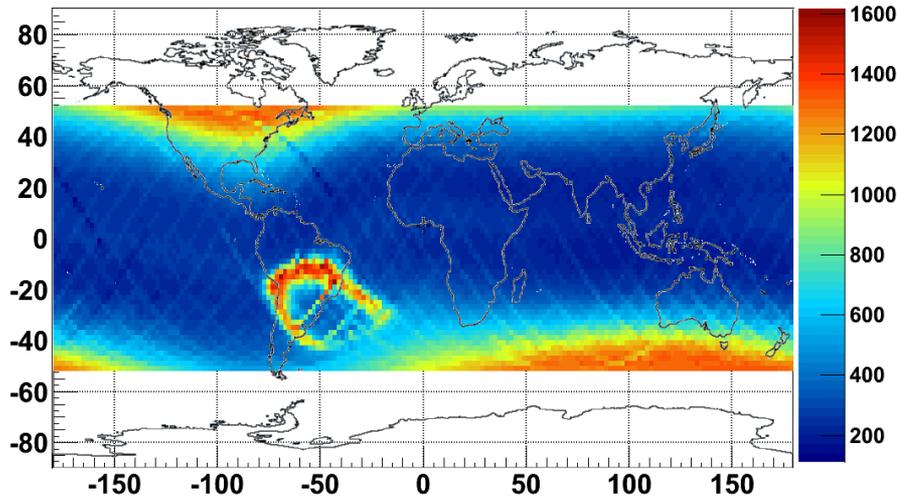
Altitude 340-400 km



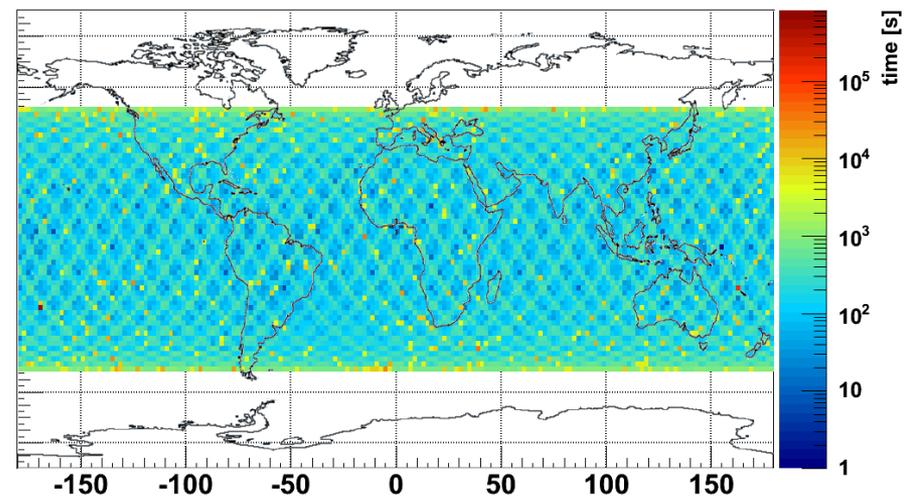
ISS orbits

Paramètres de l'acquisition des données

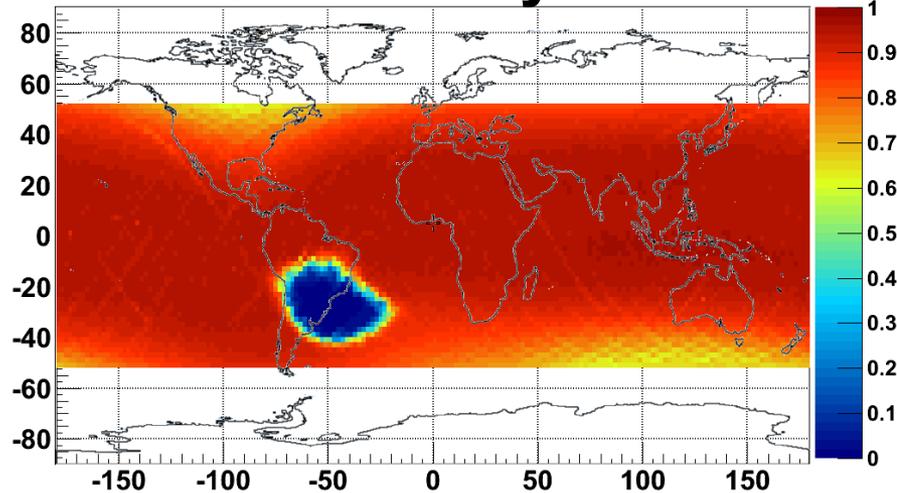
Acquisition Taux [Hz]



temps d'exposition [s]



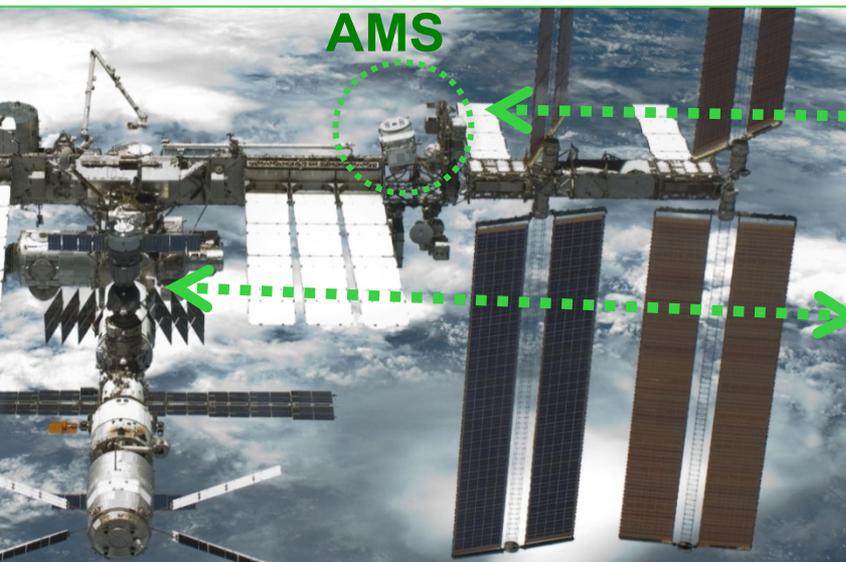
DAQ efficiency



**Taux de Particules varie de
200 à 2000 Hz par orbite**

**En moyenne:
DAQ efficacité 85%
DAQ taux ~700Hz**

AMS Flot de données



AMS



TDRS Satellites



Astronaut at ISS AMS Laptop

Ku-Band
High Rate (down):
Events <10Mbit/s>

S-Band
Low Rate (up & down):
Commanding: 1 Kbit/s
Monitoring: 30 Kbit/s



AMS Payload Operations Control and Science Operations Centers (POCC, SOC) at CERN since June 2011



AMS Computers at MSFC, AL



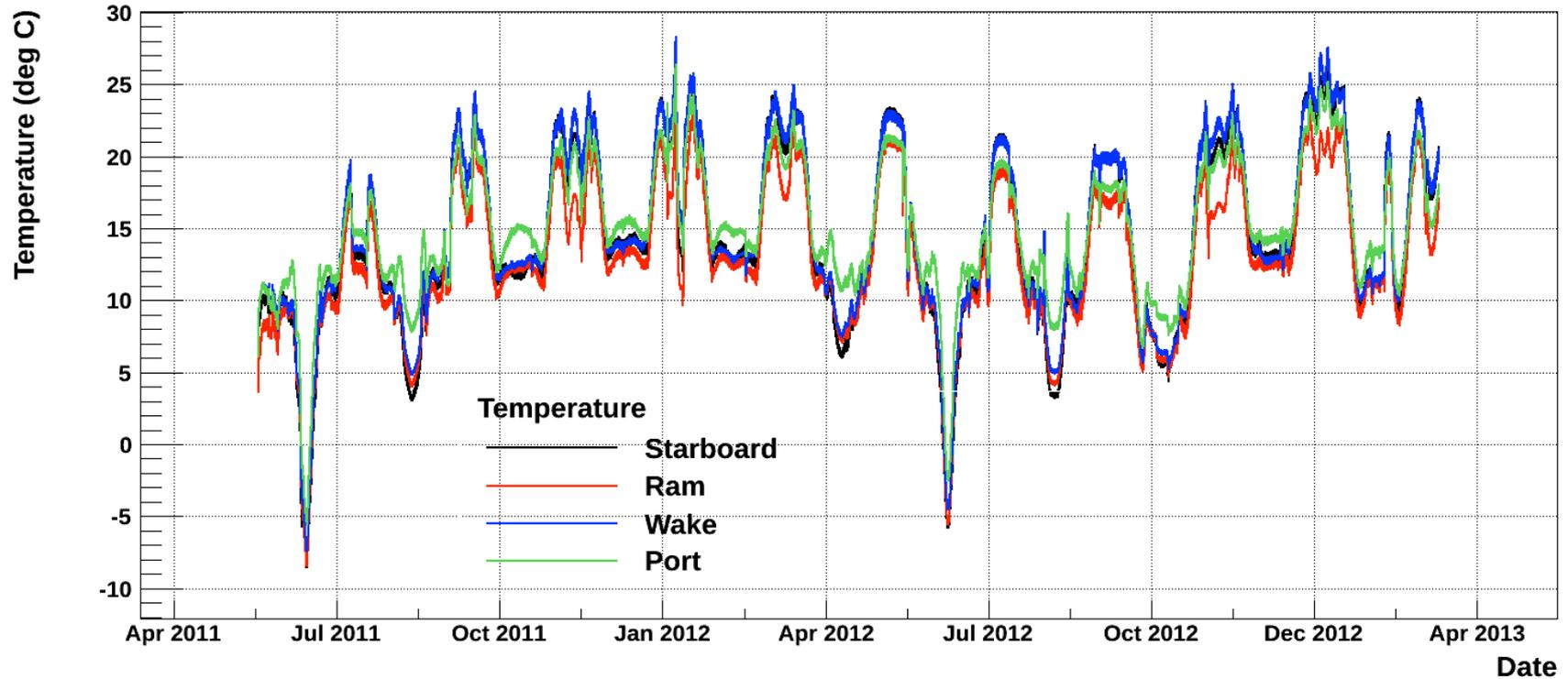
White Sands Ground Terminal, NM

Contraintes de l'espace

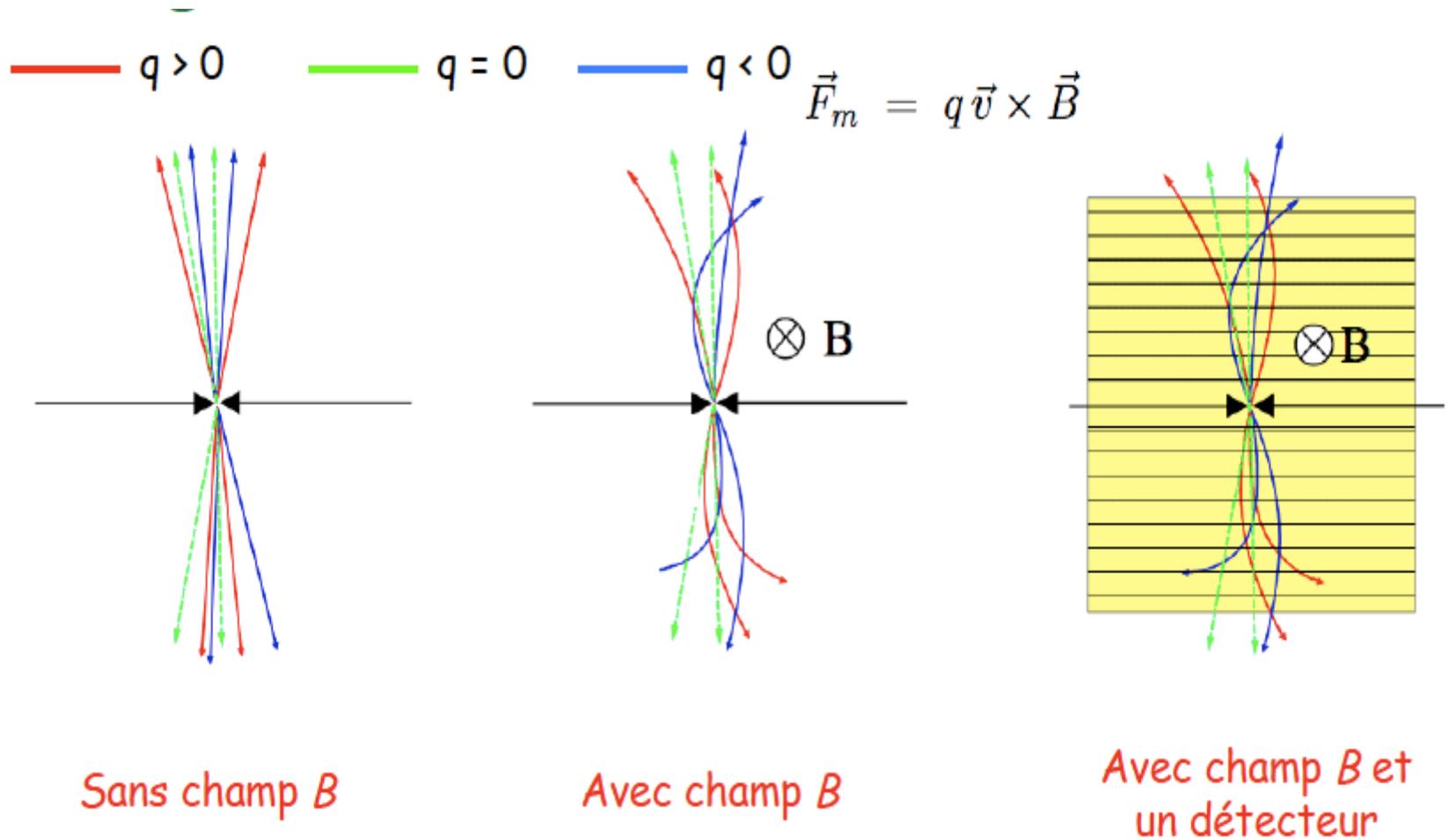
- ▷ Poids: 7 tonnes maximum (exp. LHC ~ 1000 tonnes)
- ▷ Faible consommation électrique: 2.4 kW
- ▷ Température: ± 50 °C, variation
- ▷ Aucune assistance humaine redondance
- ▷ Vide
- ▷ Resister aux vibrations pendant le lancement
=> tests (radiation, thermique and vibration)

Variations de température calorimètre

Evolution of temperatures on each face of the calorimeter



La mesure de la charge électrique des particules



⇒ Le signe de la charge est obtenu par le sens de courbure dans un champ B

La mesure de la charge électrique des particules

- Pour une particule non relativiste :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} = \frac{q}{m}\vec{p} \times \vec{B}$$

- La particule tourne autour de B à la **fréquence cyclotron** ($\omega_B = qB/m$)

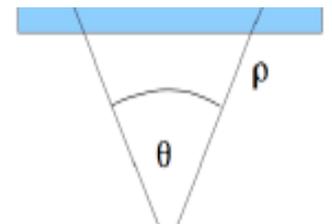
- Pour une particule relativiste :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} = \frac{q}{\gamma m}\vec{p} \times \vec{B}$$

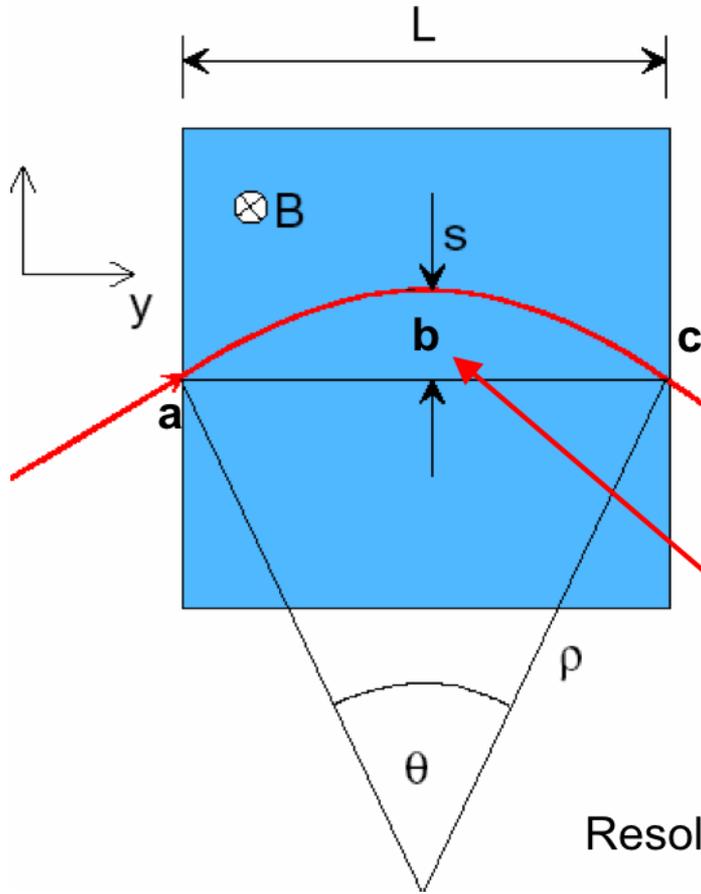
- La particule tourne autour de B à la fréquence ($\omega_B = qB/\gamma m$)

Tr ■ Dans le plan transverse au champ B , la trajectoire est circulaire

- Le sens de la courbure donne la charge



La mesure de la charge électrique des particules



$$p_T = qB\rho$$

$$p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3B\rho \text{ (T} \cdot \text{m)}$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \theta/2 \approx \theta/2 \rightarrow \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$s = \rho(1 - \cos \theta/2) \approx \rho \frac{\theta^2}{8} \approx \frac{0.3 L^2 B}{8 p_T}$$

Resolution of momentum is given by resolution on sagitta

Ex : $s=3.75$ cm for $p_T=1\text{GeV/C}$, $L=1\text{m}$ and $B=1\text{T}$

Effets du champ magnétique terrestre

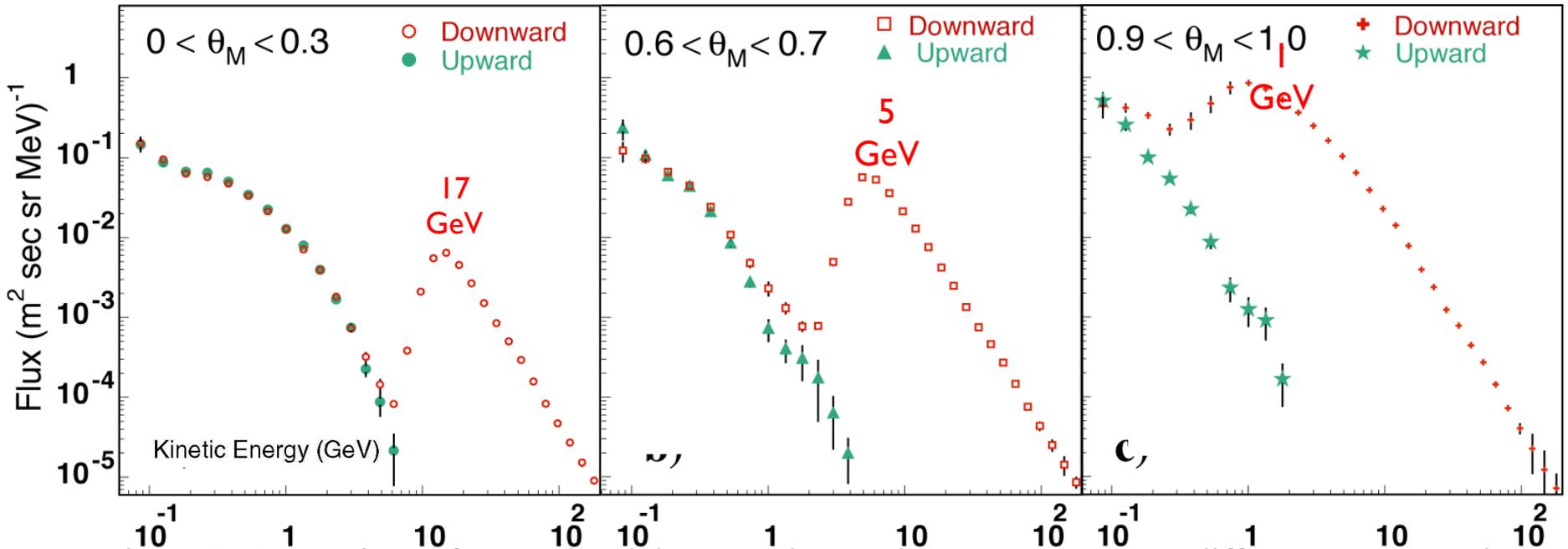
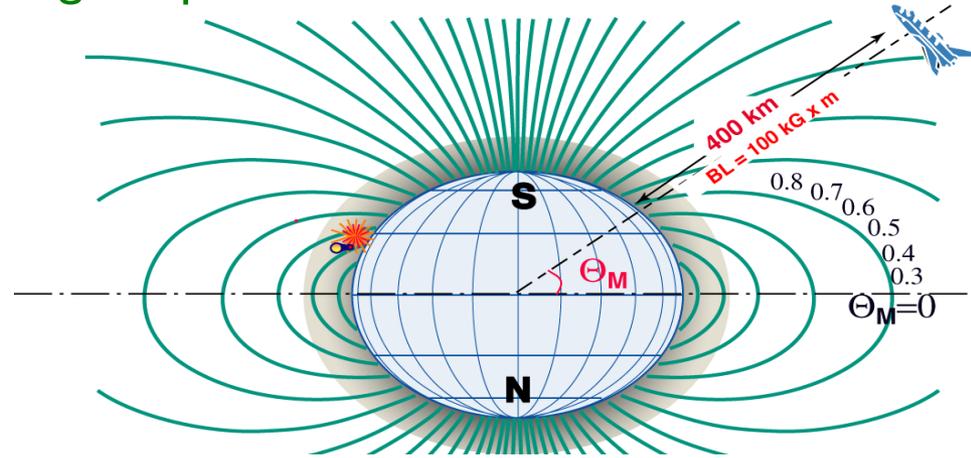
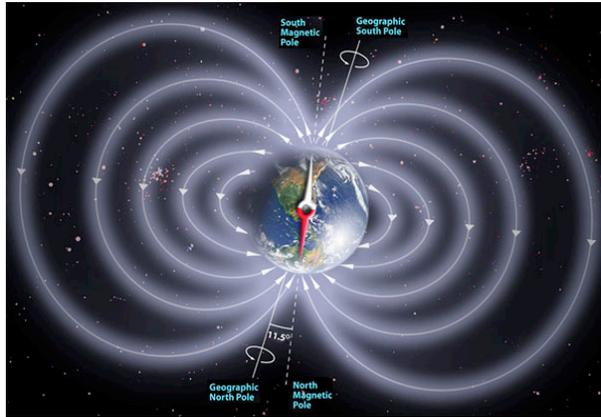
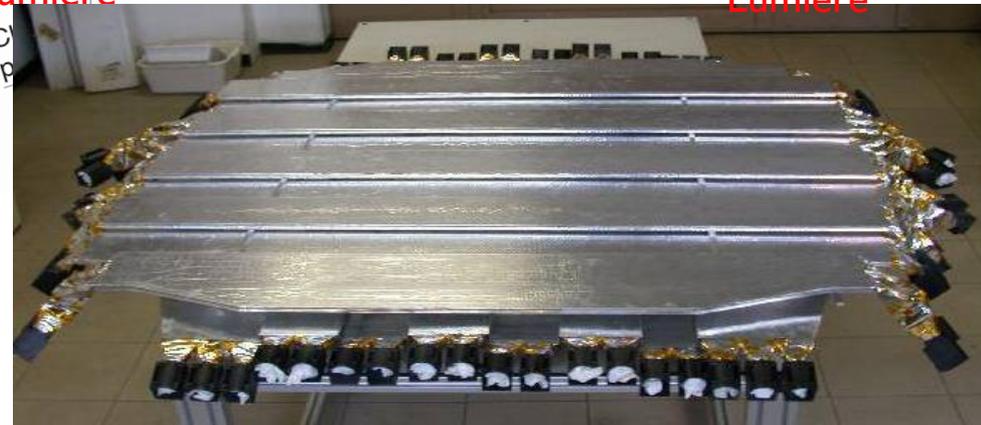
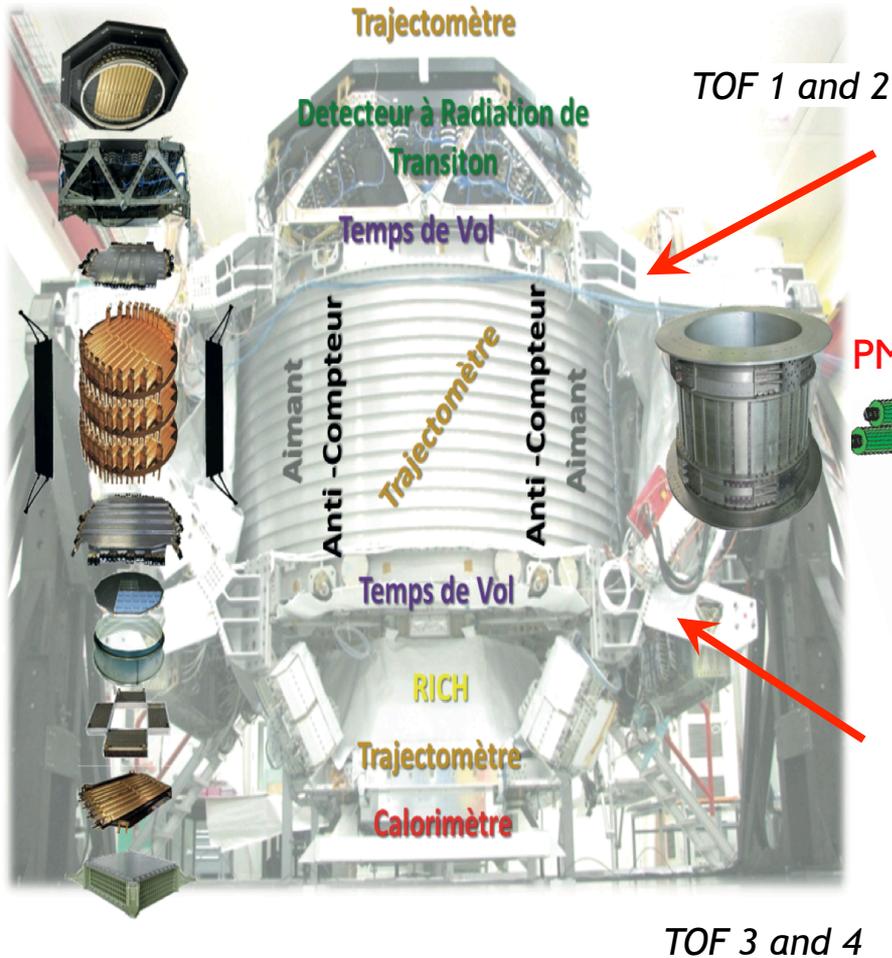


Figure 3: Comparison of upward and downward second spectrum proton at different geomagnetic latitudes. As seen, below cutoff, the upward and downward fluxes agree in the range $0 < \Theta_M < 0.8$

Temps de vol (scintillation et ionisation)

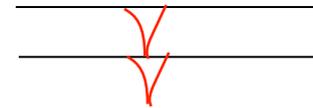


Temps de Vol

- ▷ Mesure de la vitesse $v = \text{distance} / \Delta t$
 $\Delta\beta/\beta \approx 3\%$
- ▷ Mesure de la charge (Z^2), ionisation
- ▷ Trigger- déclenchement



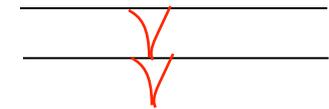
TOF 1 and 2



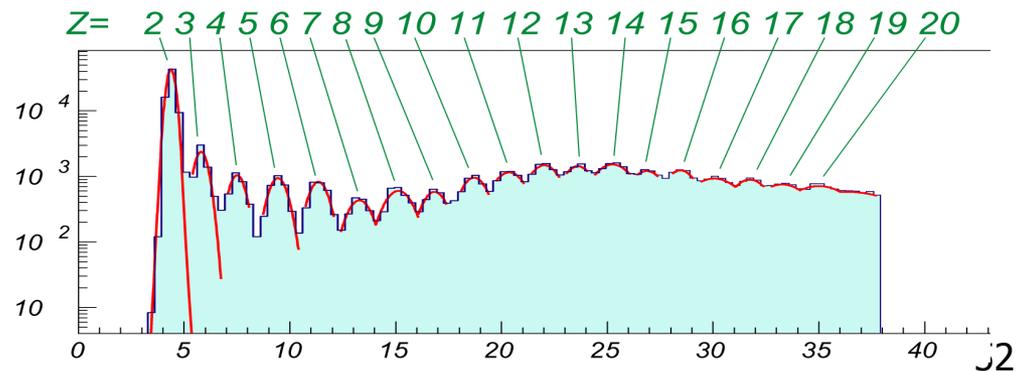
$$t = \frac{L}{\beta c}$$

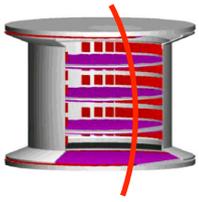
$\Delta t > 0$

Précision de 100 ps



TOF 3 and 4



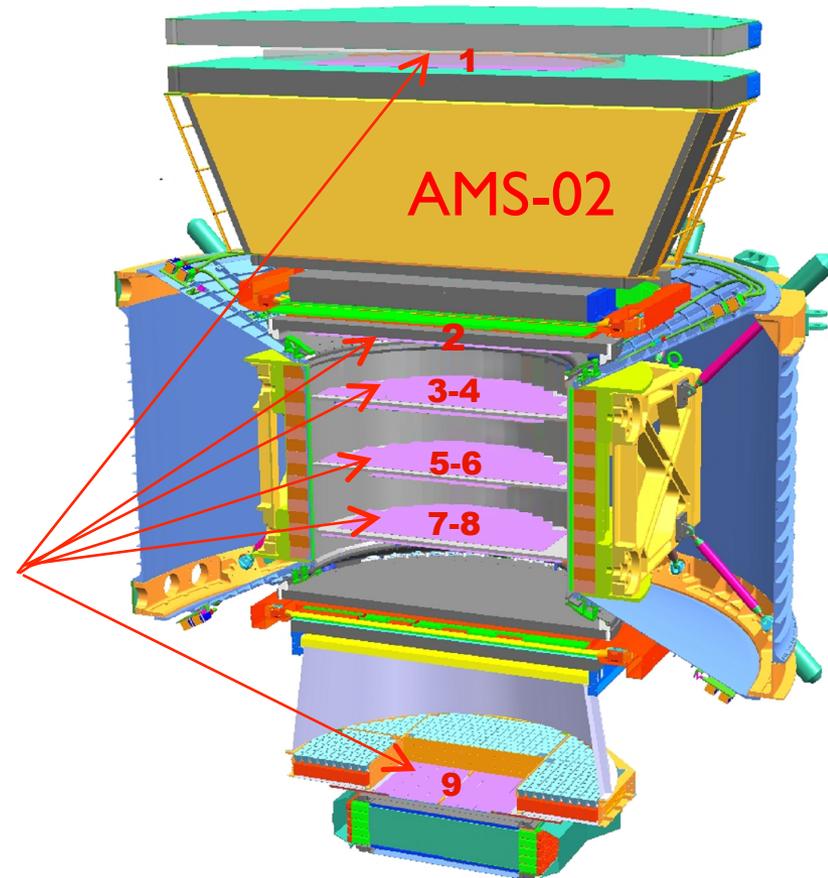


Trajectomètre

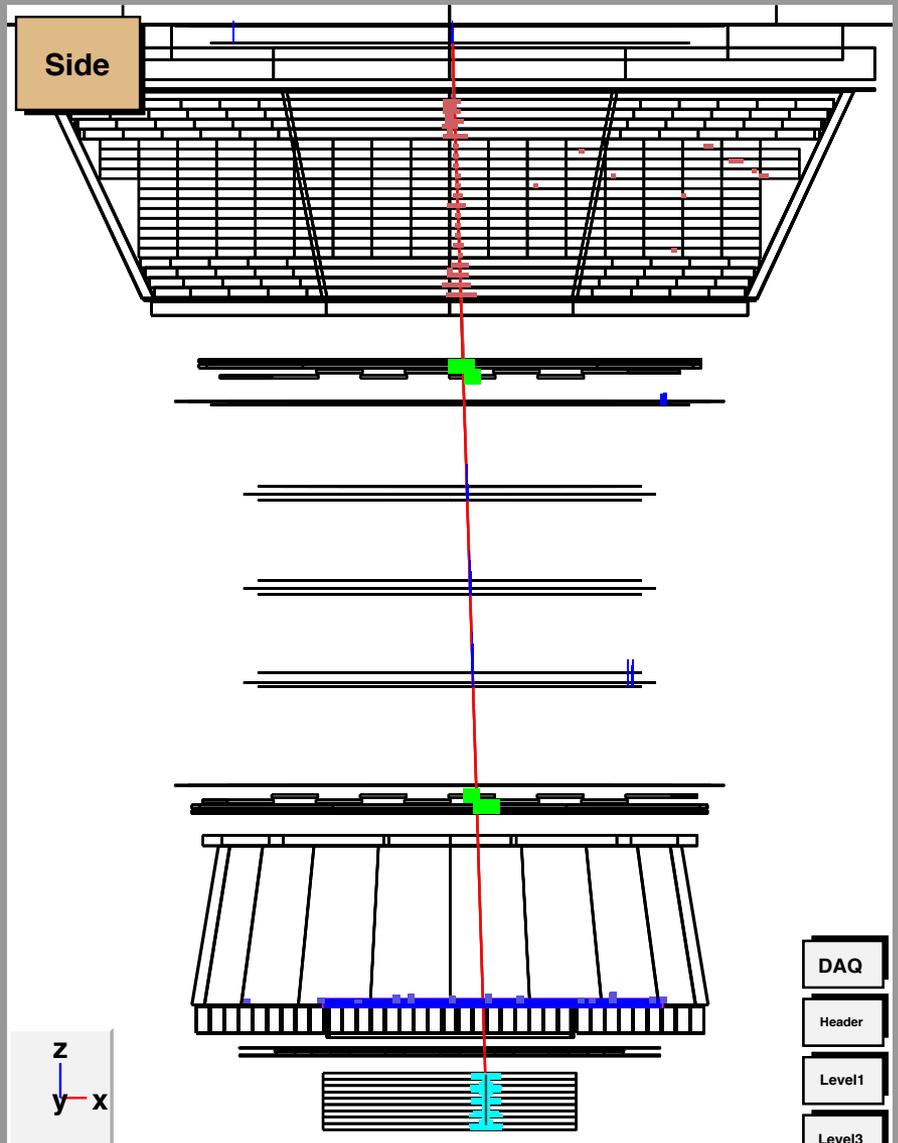
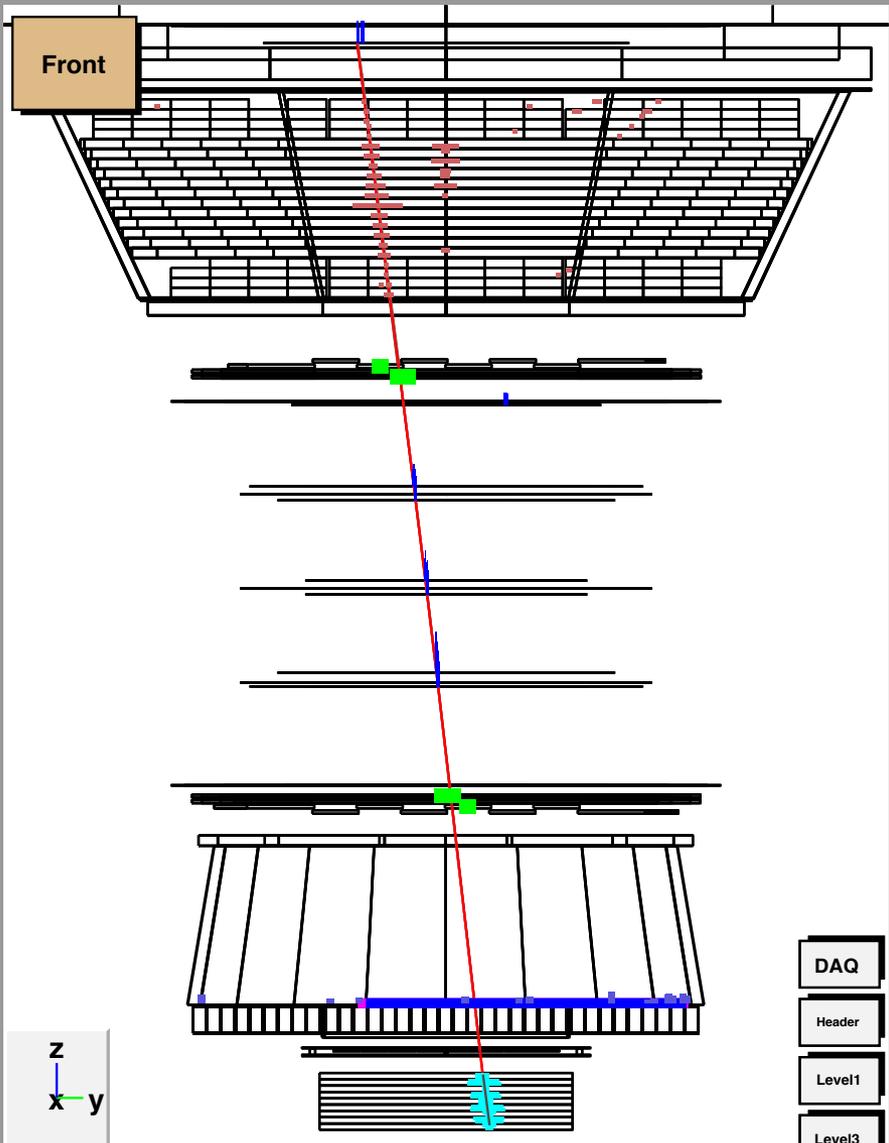
Mesure:

- ▷ Reconstruction de la trace en 9 points
- ▷ Rigidité P/Z jusqu'à qq TV
- ▷ $dE/dx \propto Z^2$
- ▷ Direction and energie des photons convertis

Détecteur de silicium

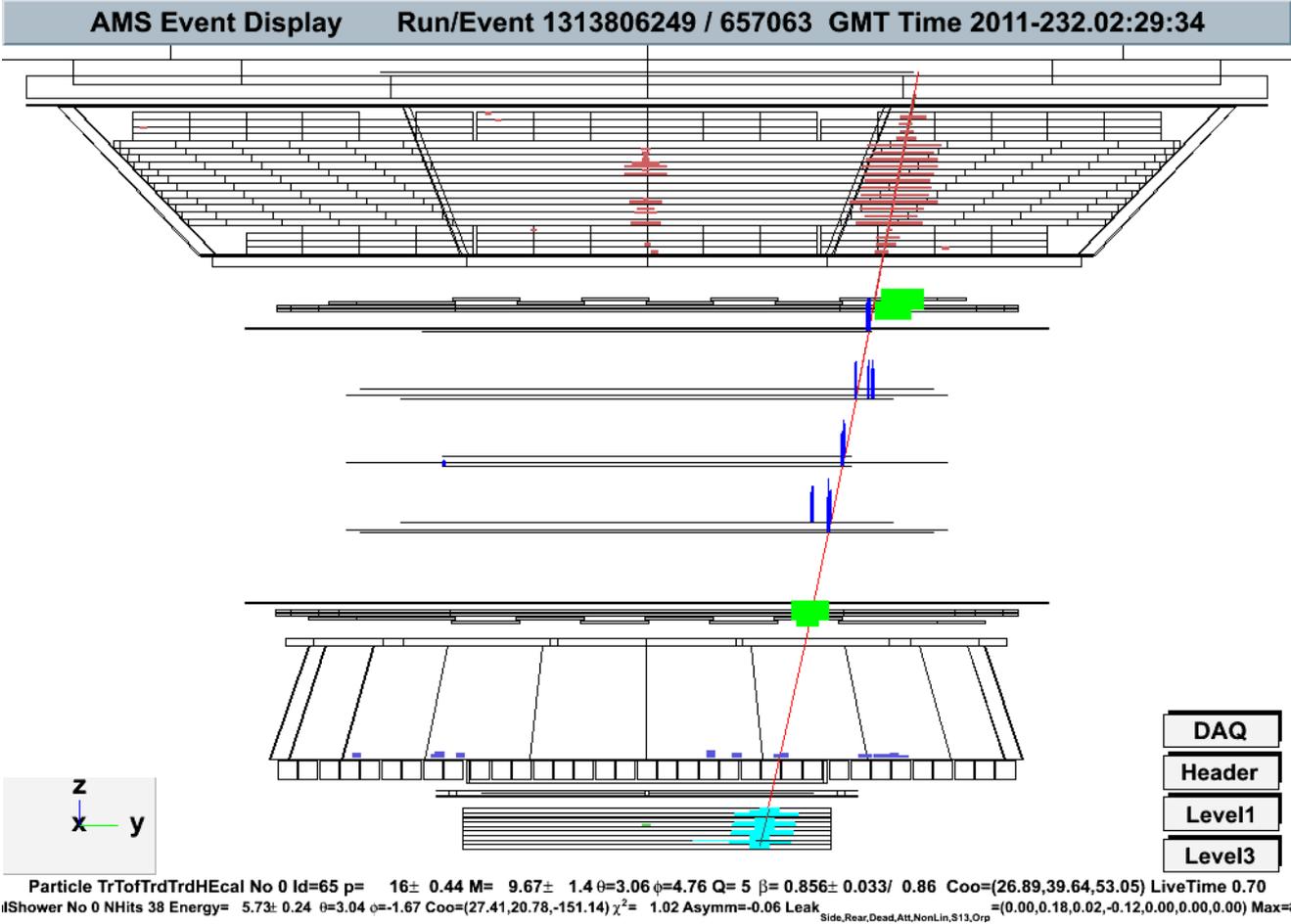


Plans 1 et 9 sont hors champ magnétique

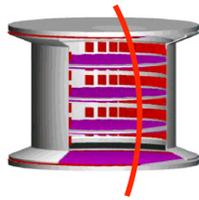


Noyau d'Hélium

Candidat Bore

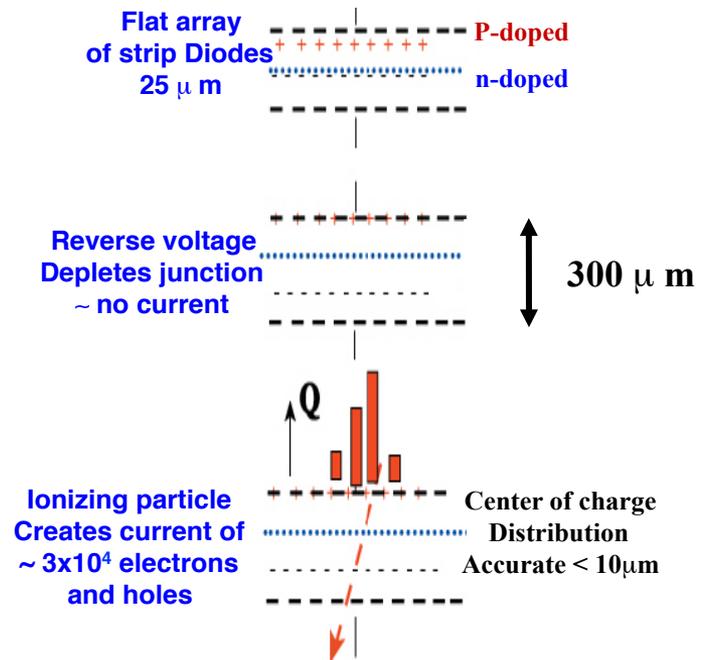
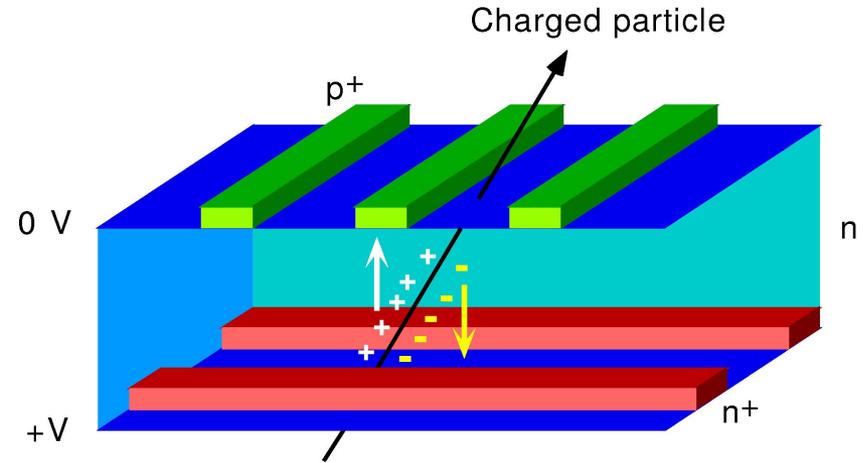
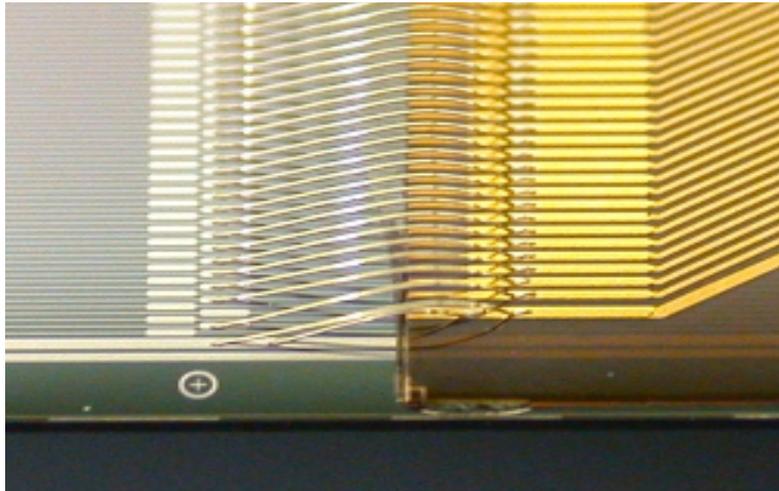


Trajectomètre (ionisation)

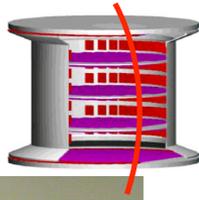


▷ Principe

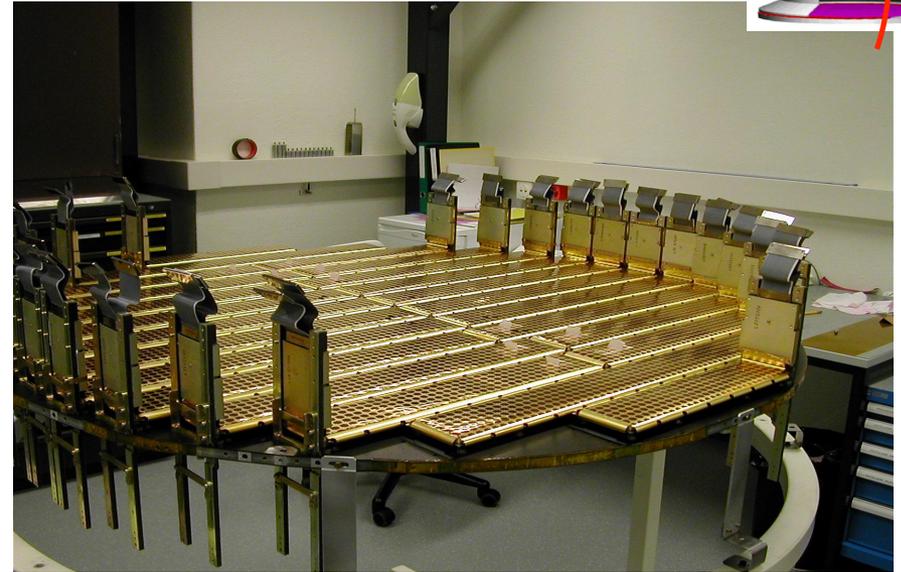
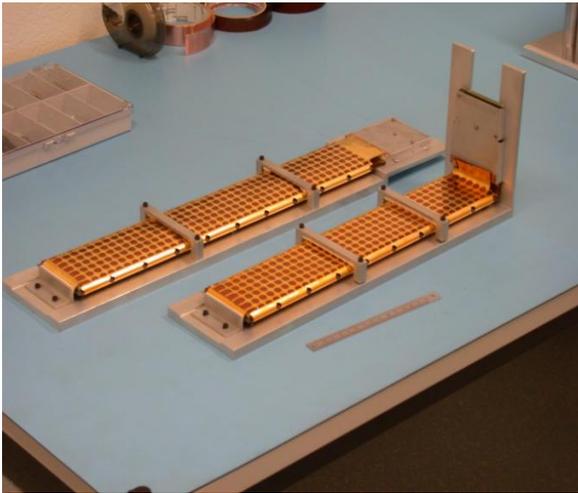
- ▶ 2500 senseurs microstrip en silicium double face,
- ▶ Mesure des deux coordonnées avec un seul detecteur et en minimisant la matière en amont du calorimètre avec une précision de qq microns



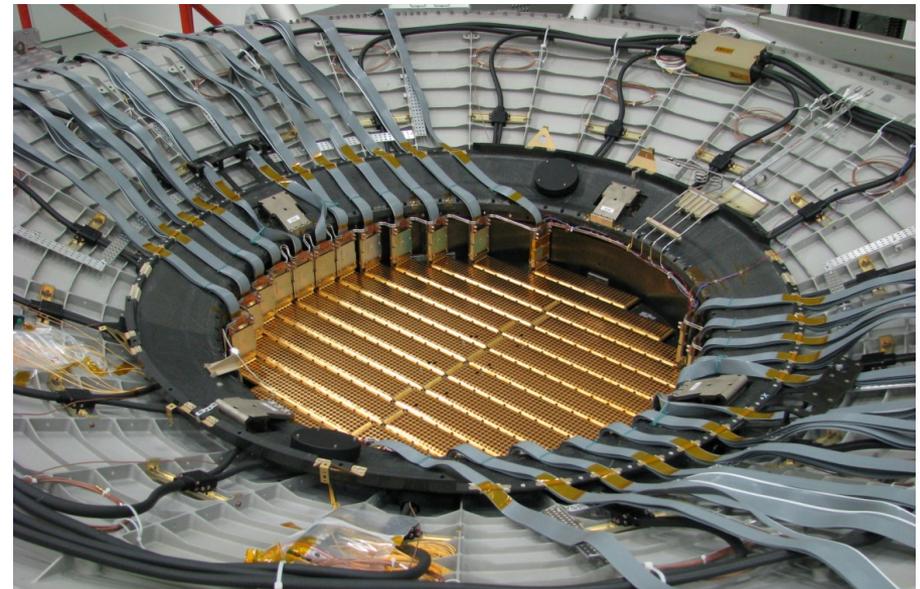
Trajectomètre



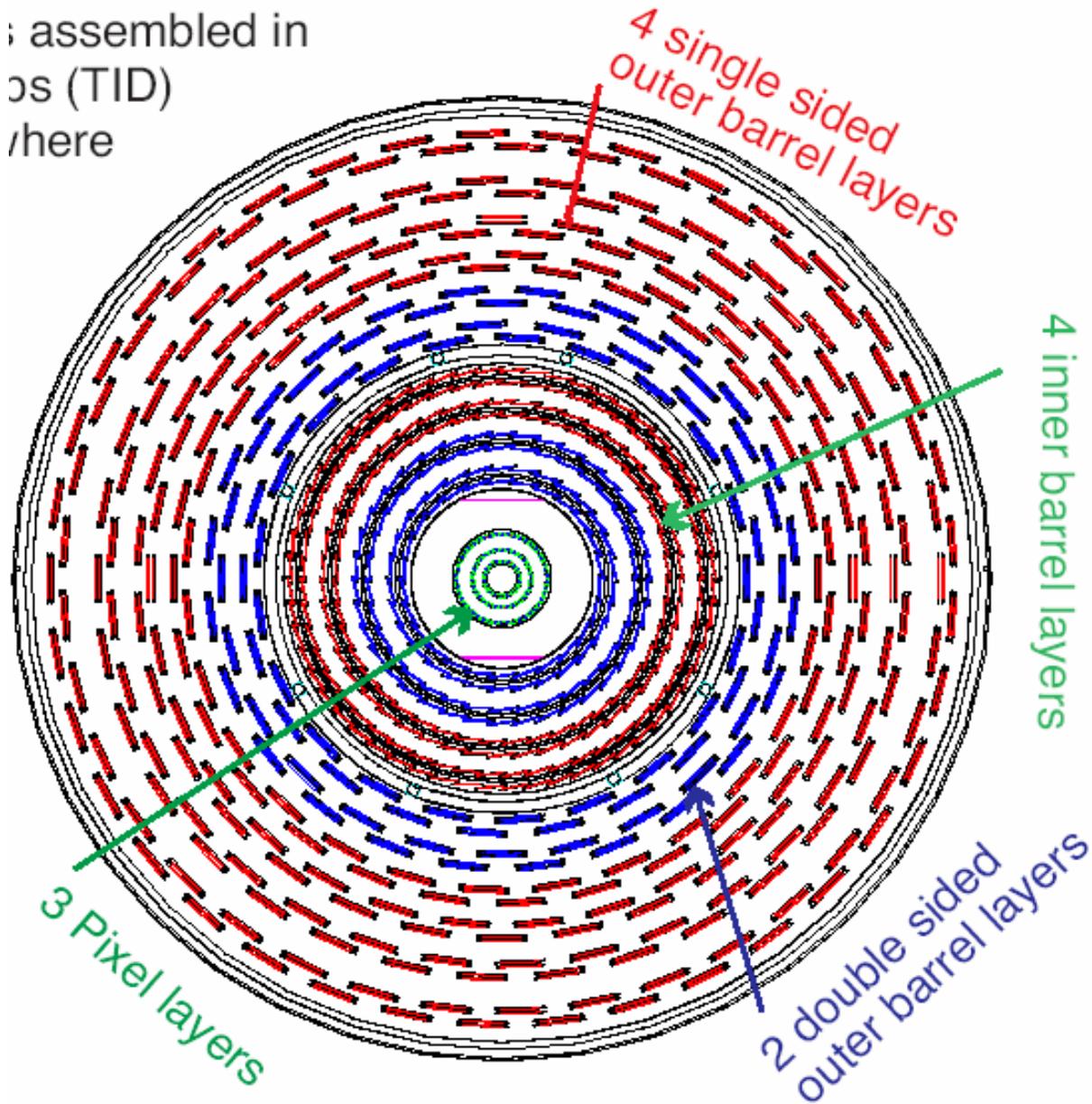
▷ 2 échelles



▷ 9 plans, 200 000 canaux

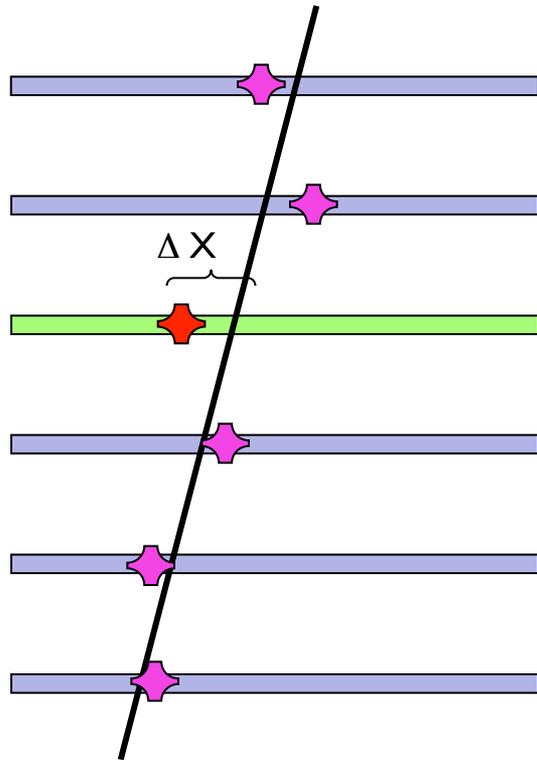
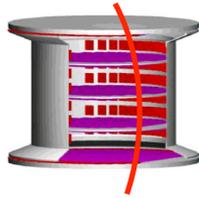


assembled in
os (TID)
/here



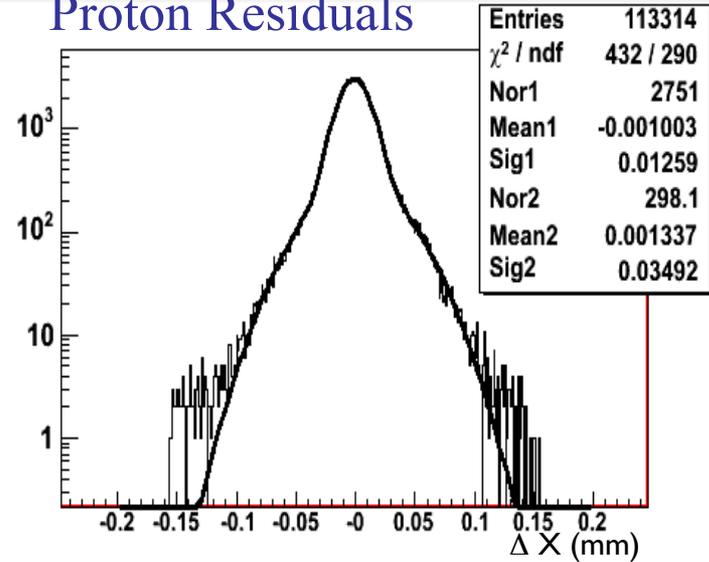
CMS,
beaucoup
plus
gros !

Trajectometre – reconstruction



La distribution de ΔX est ajustée avec une double gaussienne
Resolution = 10 μm

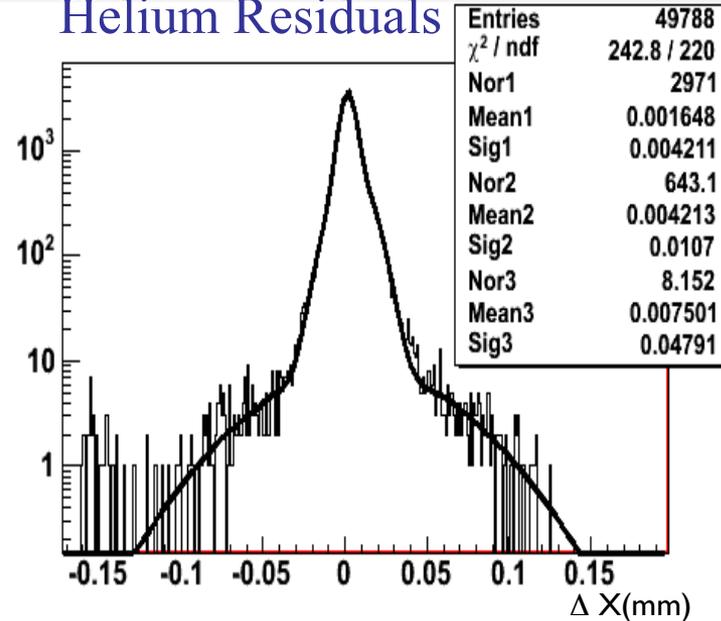
Proton Residuals



70% of events

30% of events

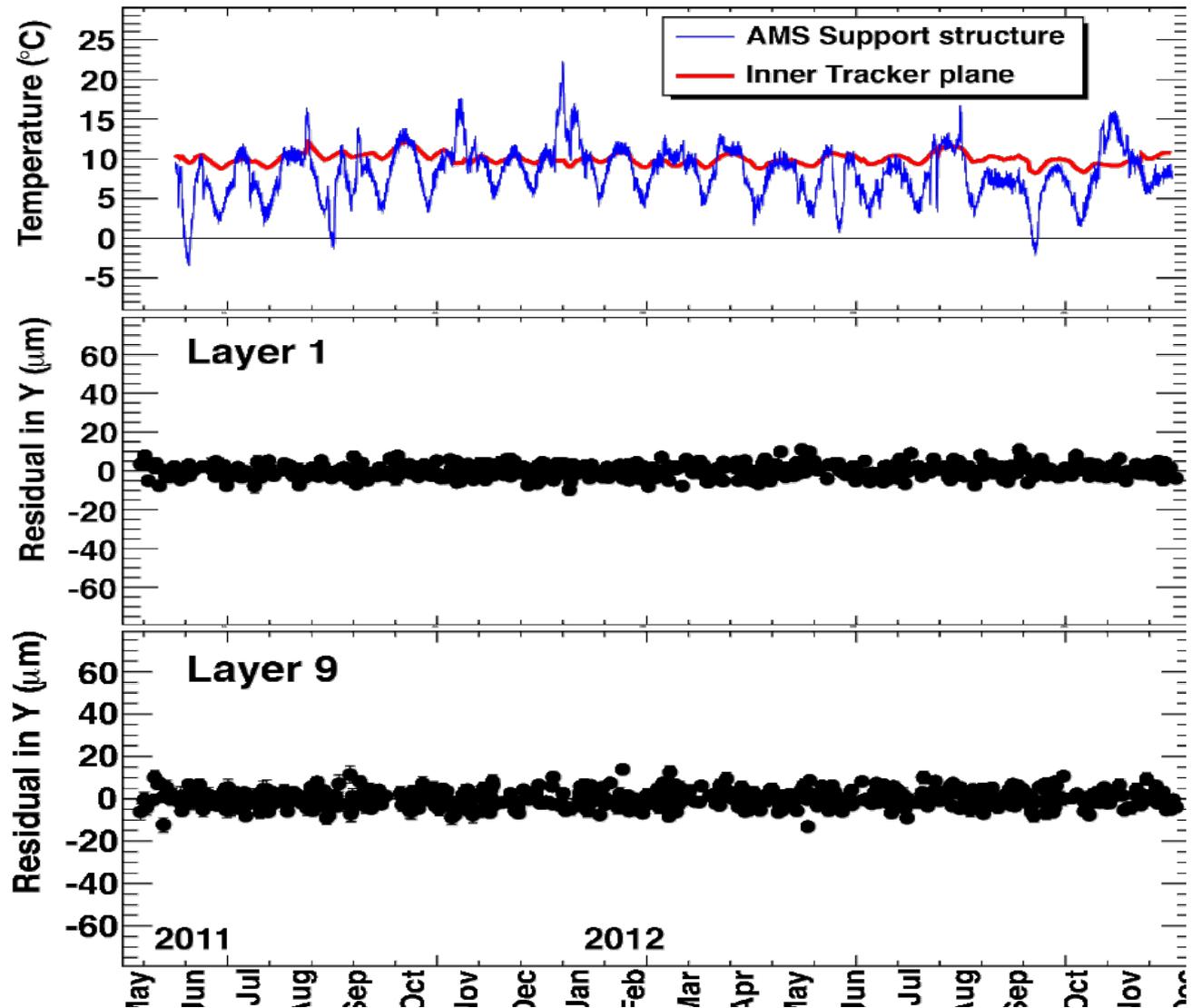
Helium Residuals



63% of events

34% of events

Précision sur l'alignement



Variation des températures peuvent induire des déformations des structures et déplacements de 100 microns !

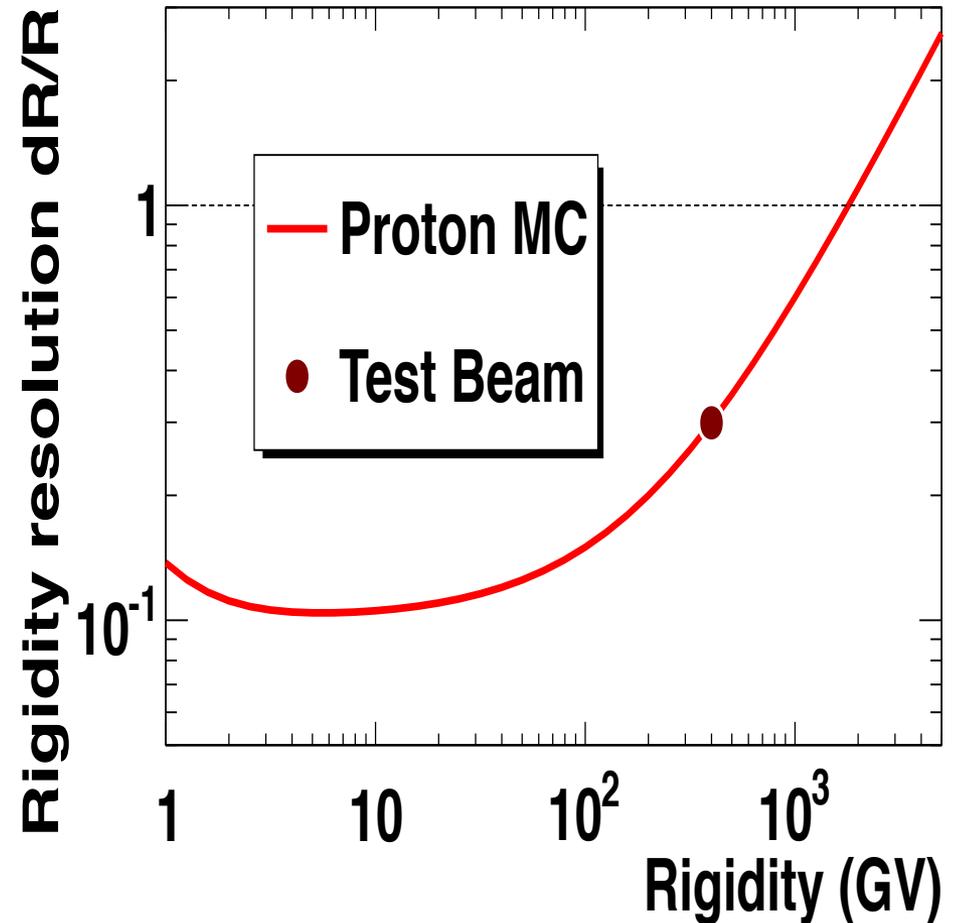
Procédure d'alignement se fait avec les données (protons) pour les plans externes

Mesure de la Rigidité = Impulsion/Z

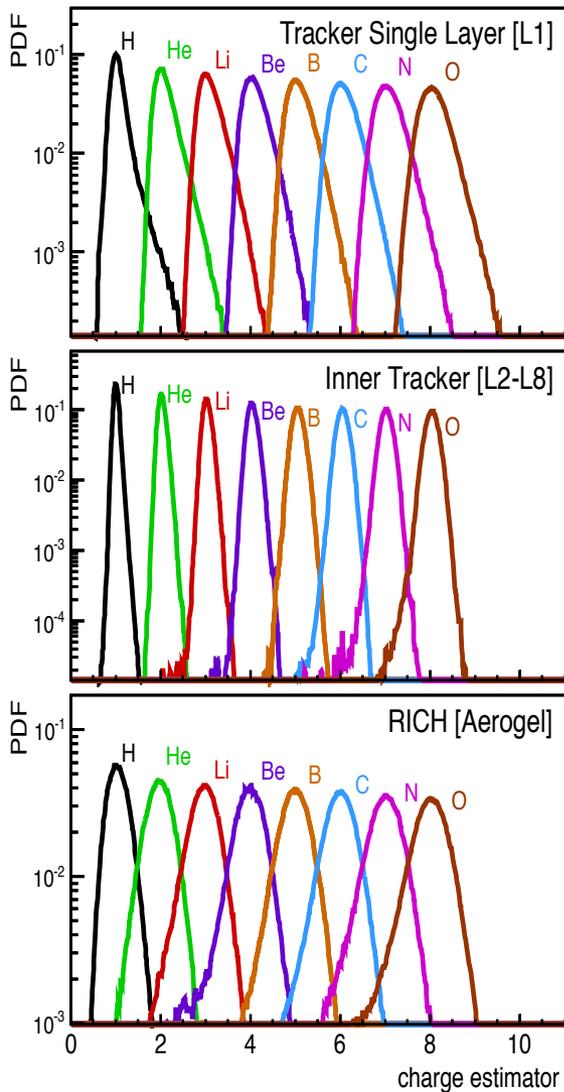
	Inner	L1	L9	L19
p	240 GV	540 GV	750 GV	2000 GV
He	400 GV	1100 GV	1600 GV	3200 GV

Valeur de la rigidité avec 100%
d'erreur relative sur la mesure
Appelée : *maximum detectable rigidity*
(MDR)

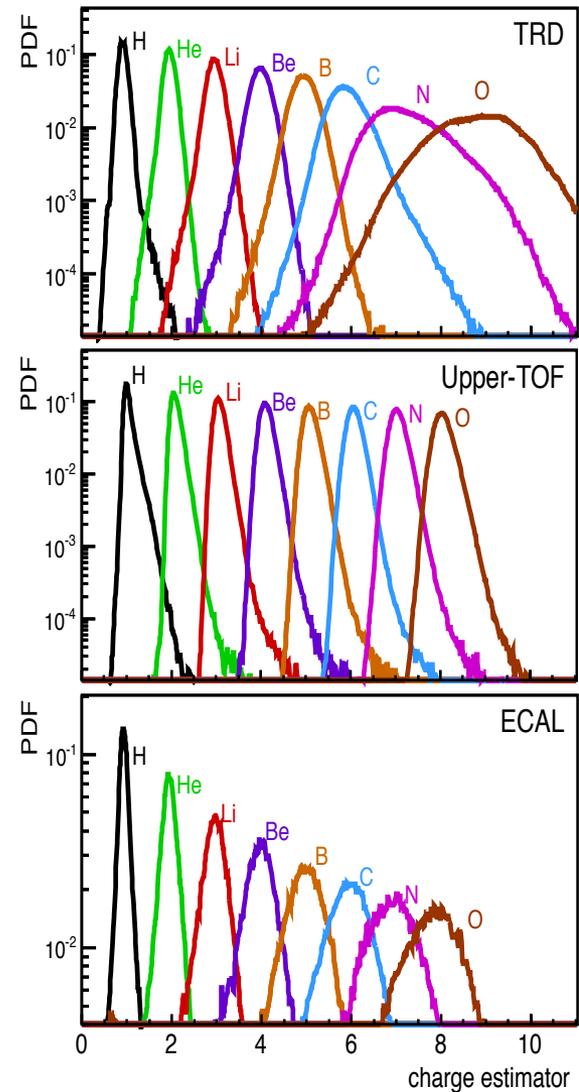
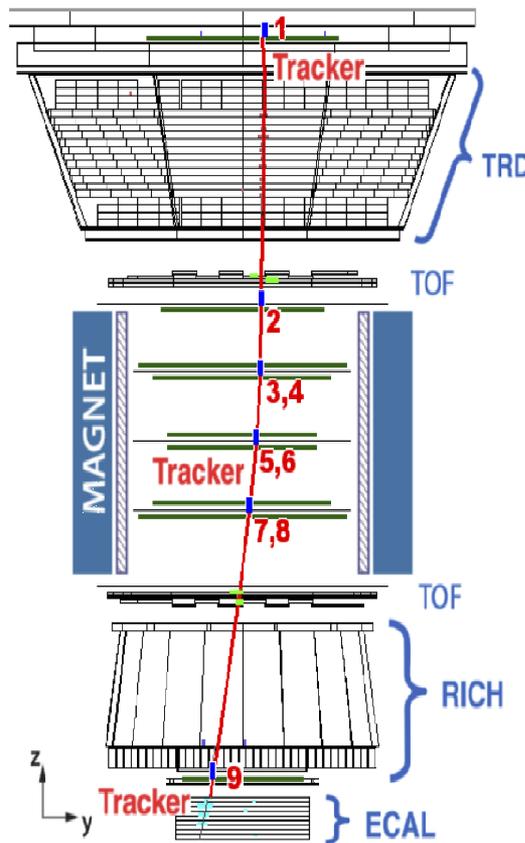
Protons



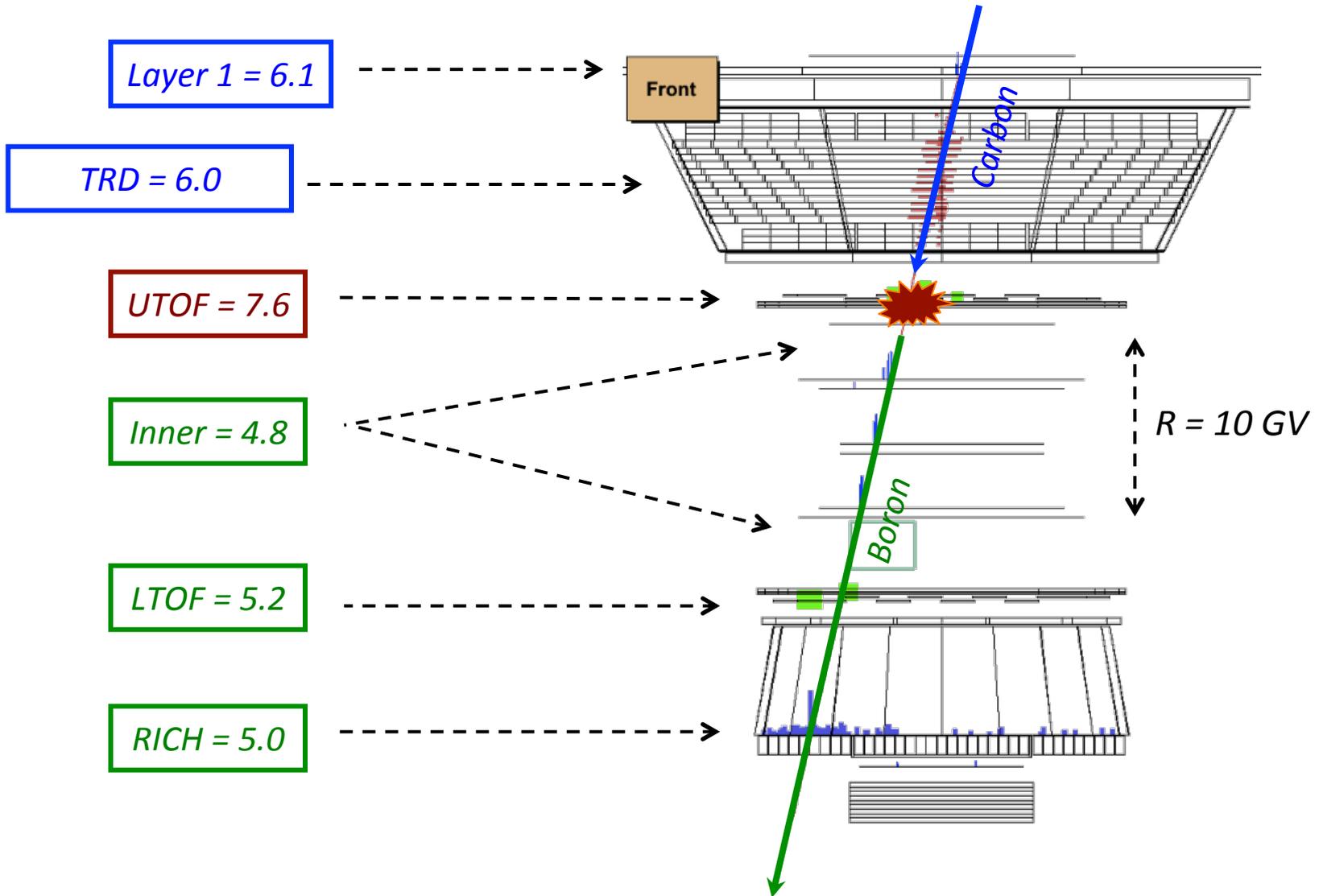
Mesure de la charge avec AMS



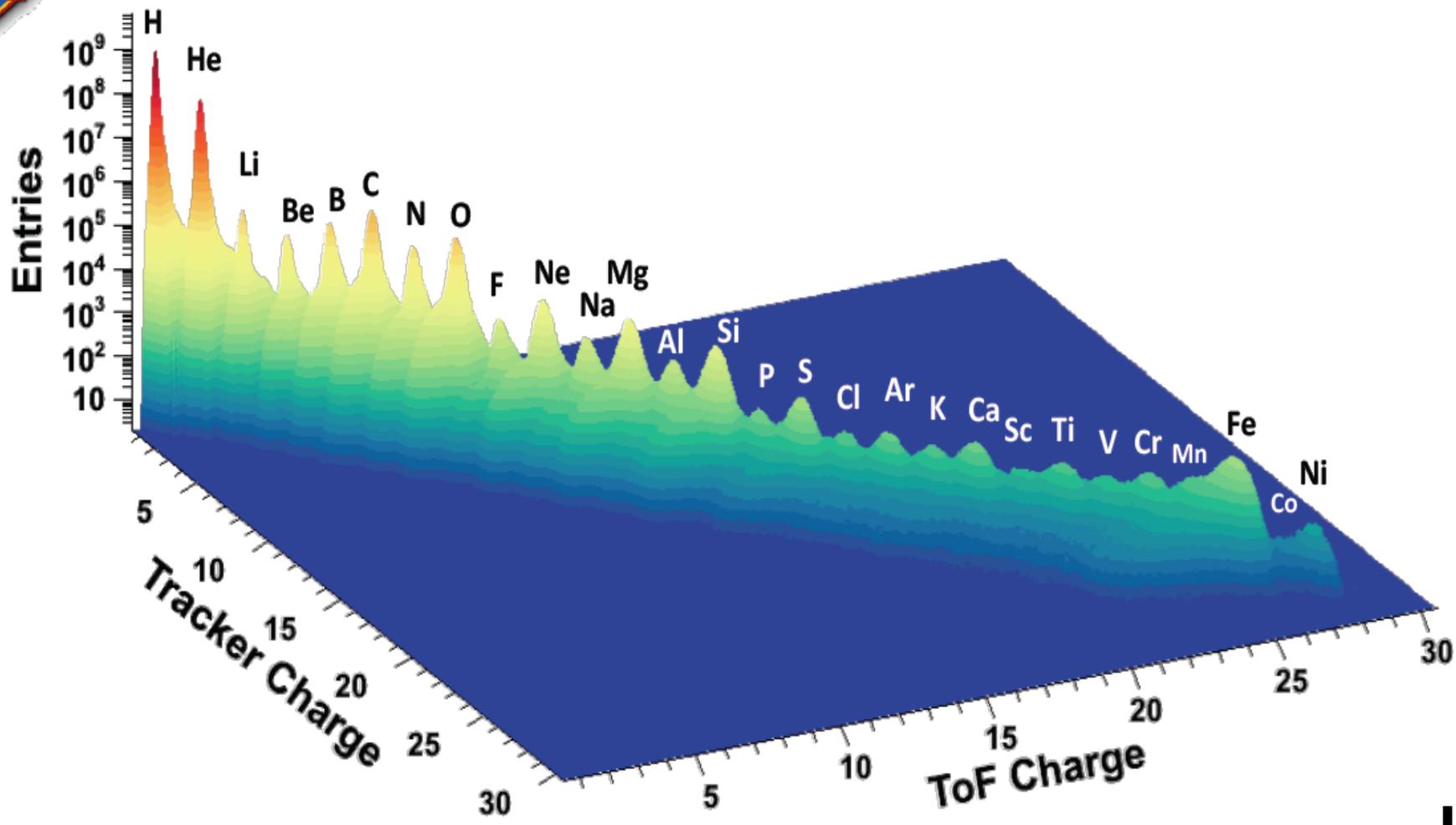
AMS-02 Charge Measurements of Light Cosmic-Ray Nuclei



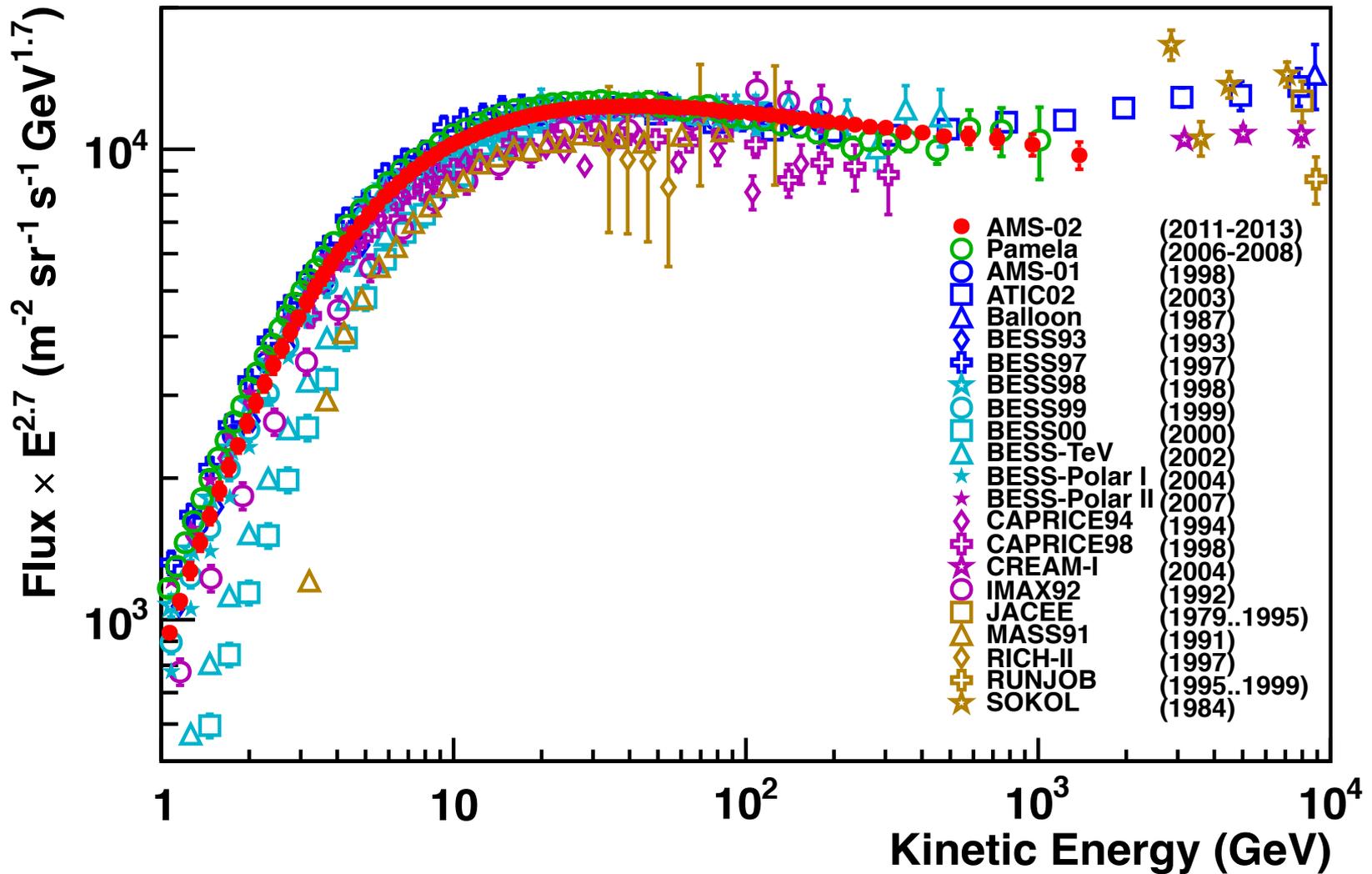
Mesure du rapport B/C – Fragmentation mesurée dans le détecteur



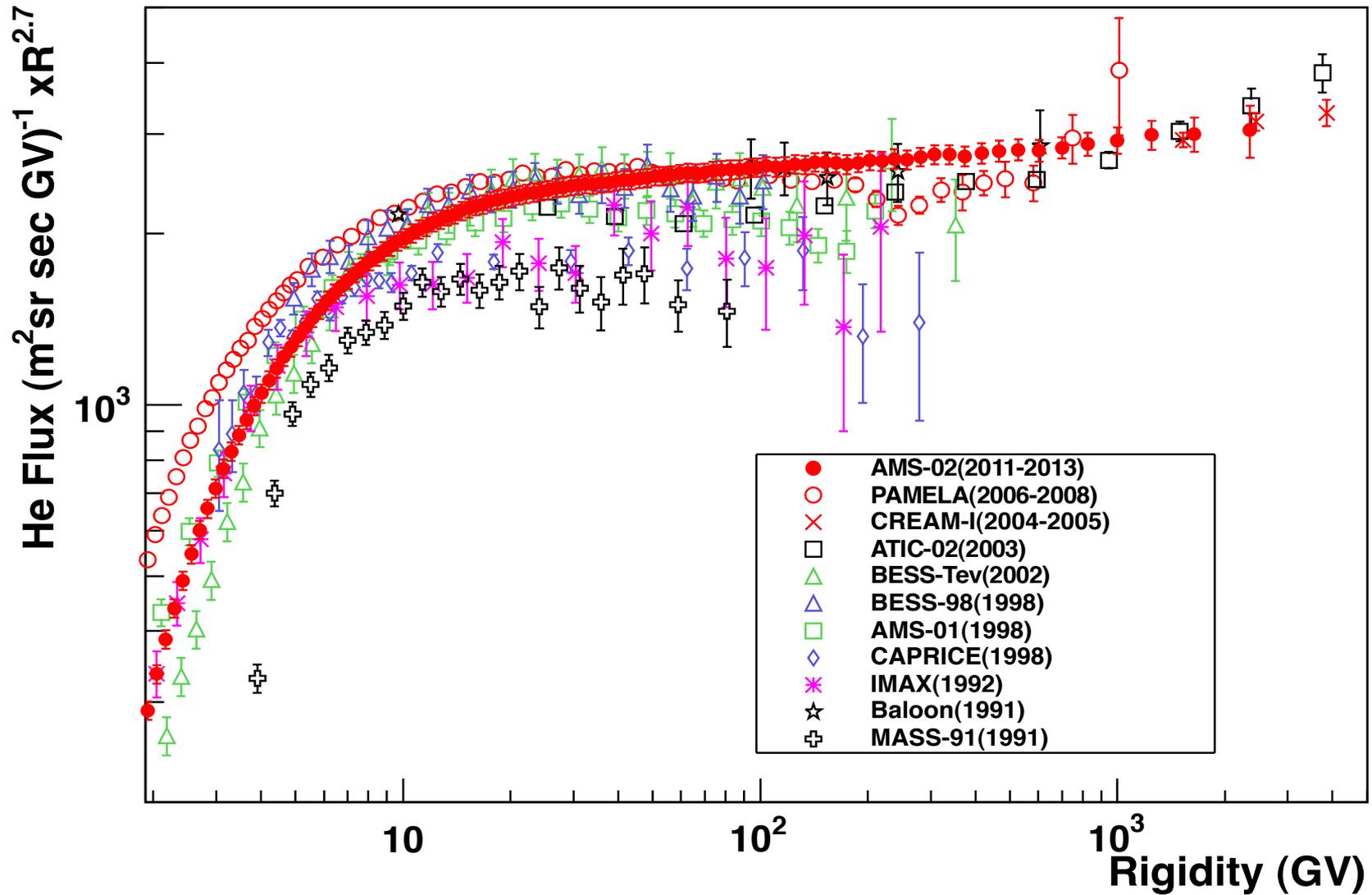
Identification de la charge avec ToF, Tracker

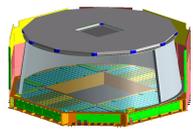


Protons- Comparaison avec les mesures précédentes



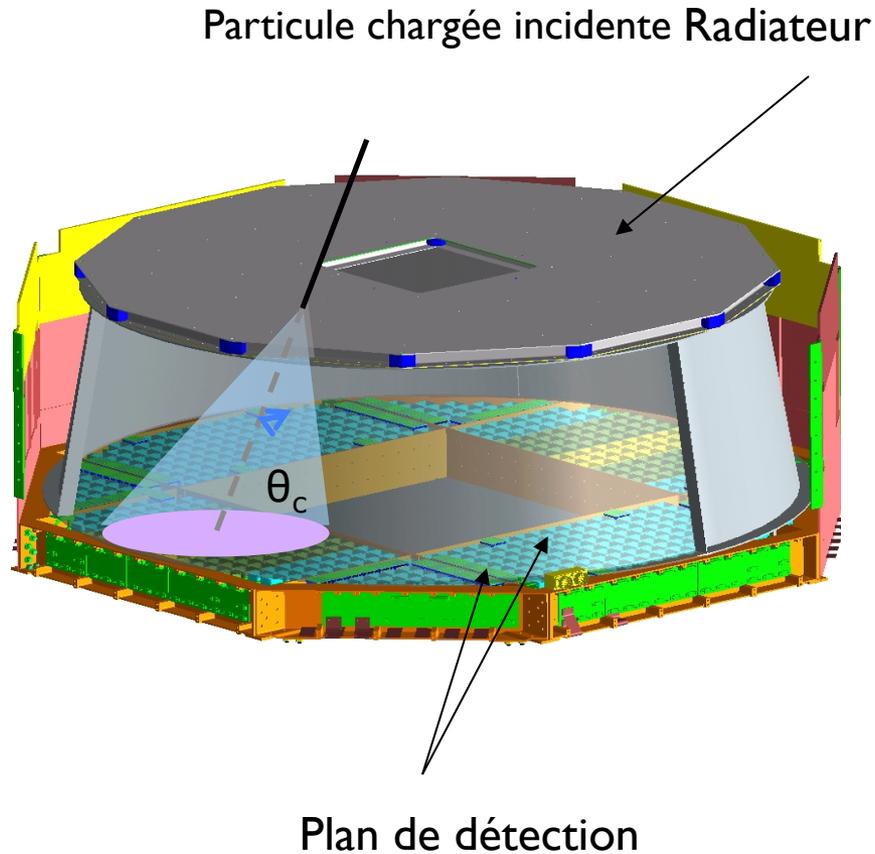
Ams-02 Helium flux Comparaison avec les mesures précédentes



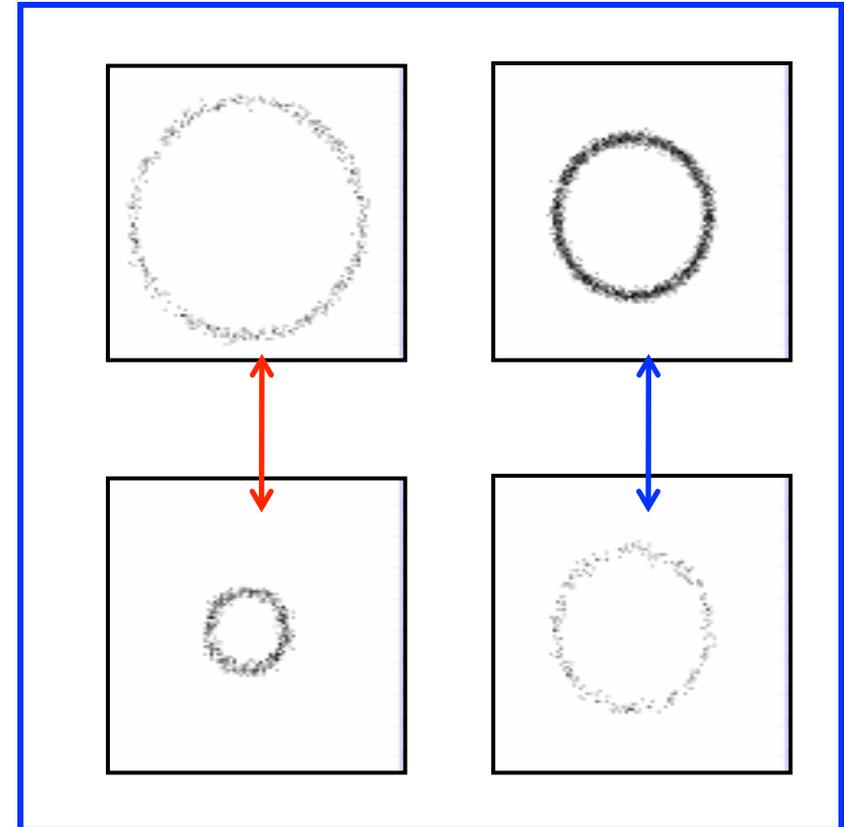


Imagerie Cherenkov (anneau)

▷ Vitesse et mesure de la charge



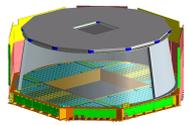
Anneaux



Mesure de β vitesse
(rayon)

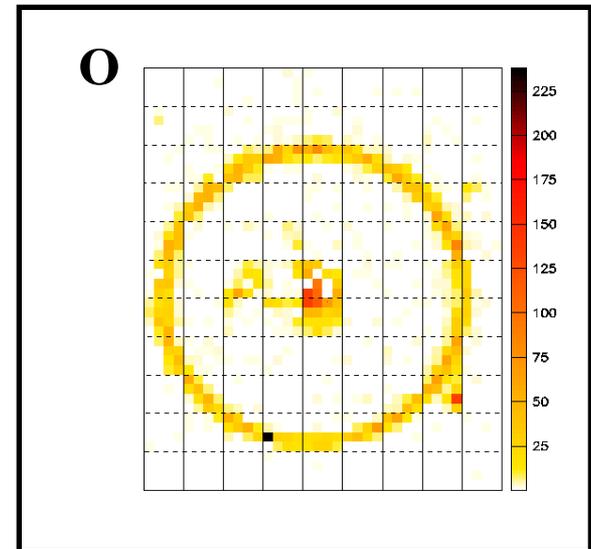
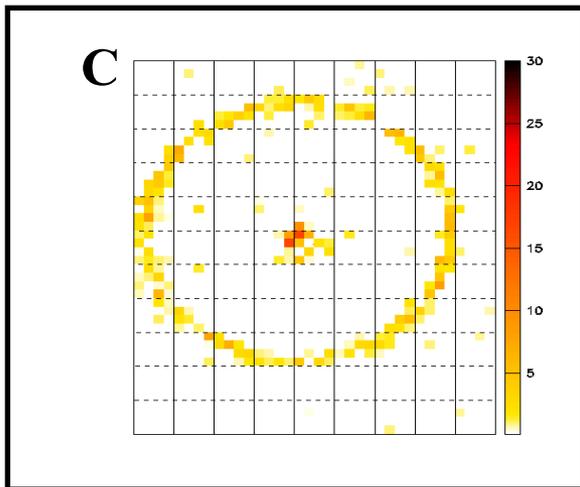
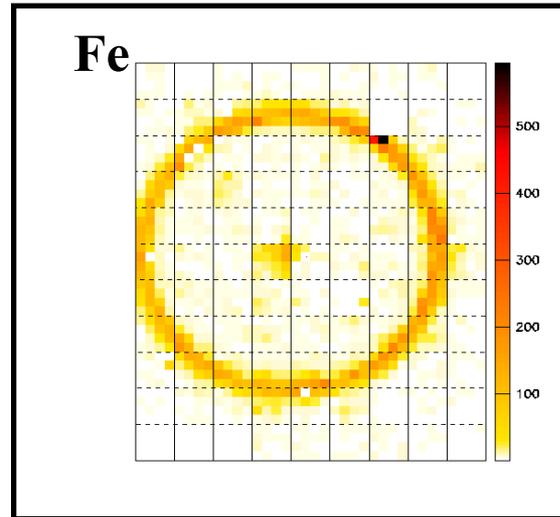
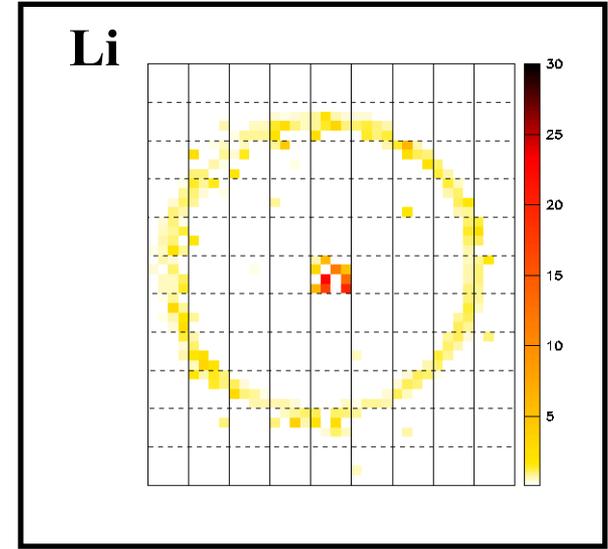
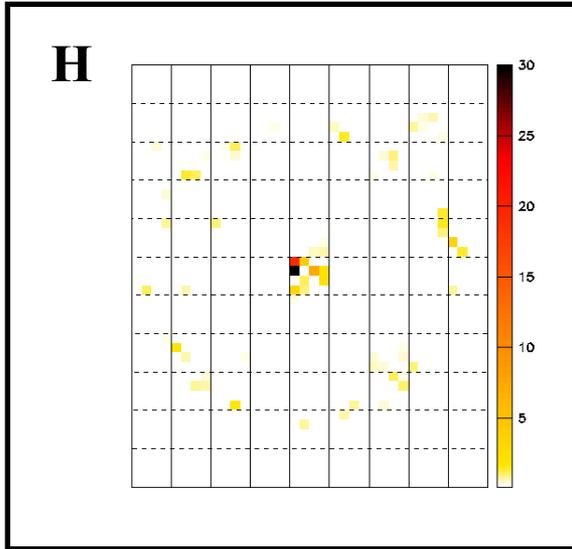
$$\beta * n * \cos(\theta_c) = 1$$

Z Charge électrique
Signal $\propto Z^2$



RICH – Mesure de la charge

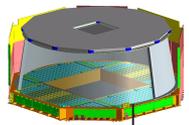
$E_k/n=158 \text{ GeV/n}$



Collision products:

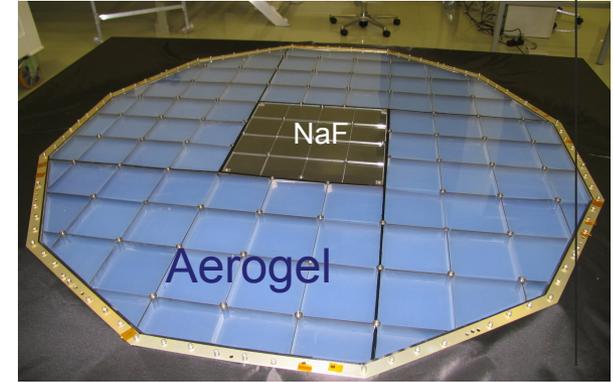
p, D, He⁴, Li⁶,...

Ring Imaging Cerenkov -RICH

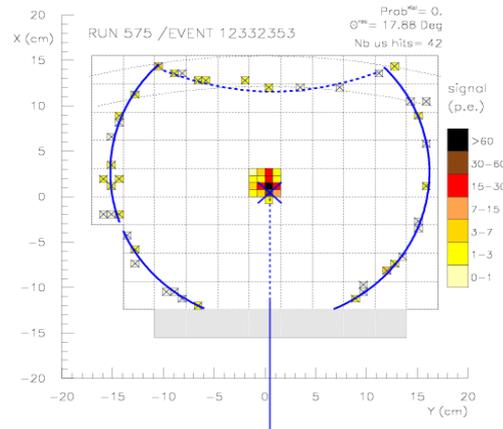


► Dual solid radiator configuration

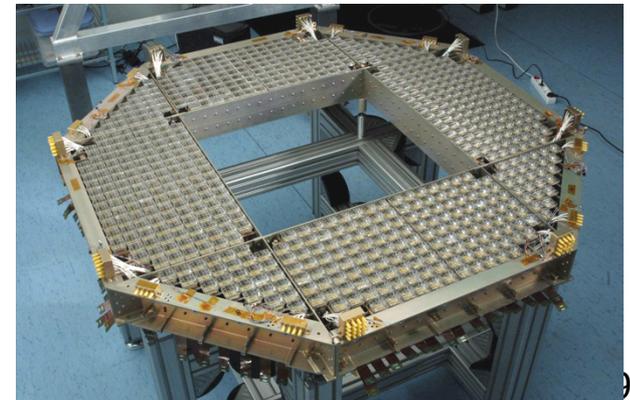
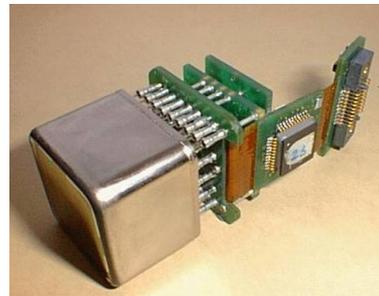
	Aerogel	NaF
Refraction Index	1.05	1.33
Opening angle (deg)	17.8	41.5
Velocity threshold	0.952	0.752



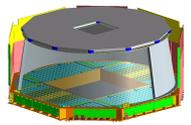
► Conical Reflector



► Photomultiplier matrix 10880 pixels



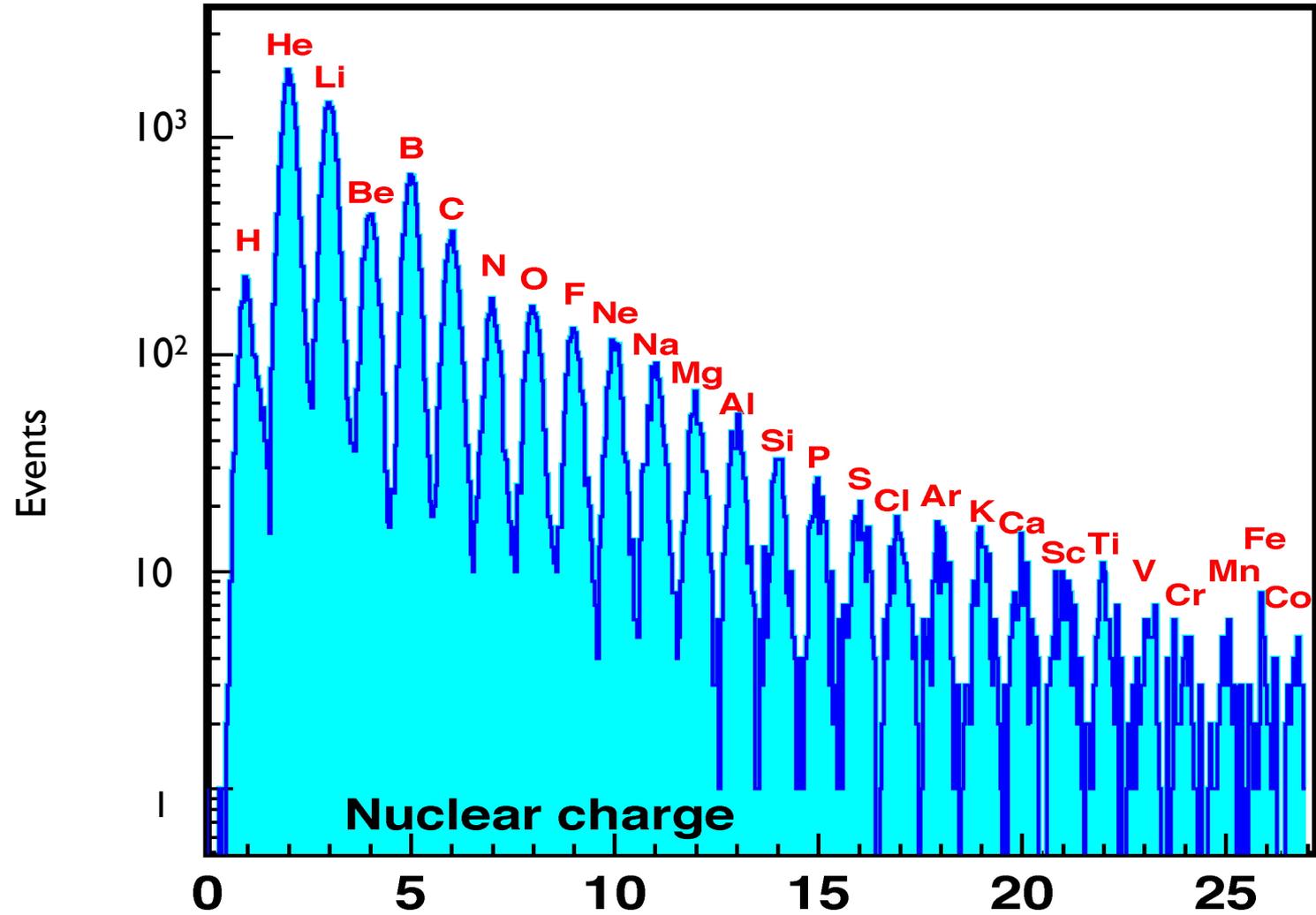
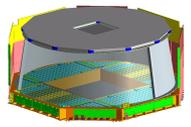
Ring Imaging Cerenkov

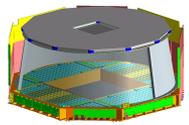


▷ Integration at Cern



RICH – Mesure de la charge (z^2)

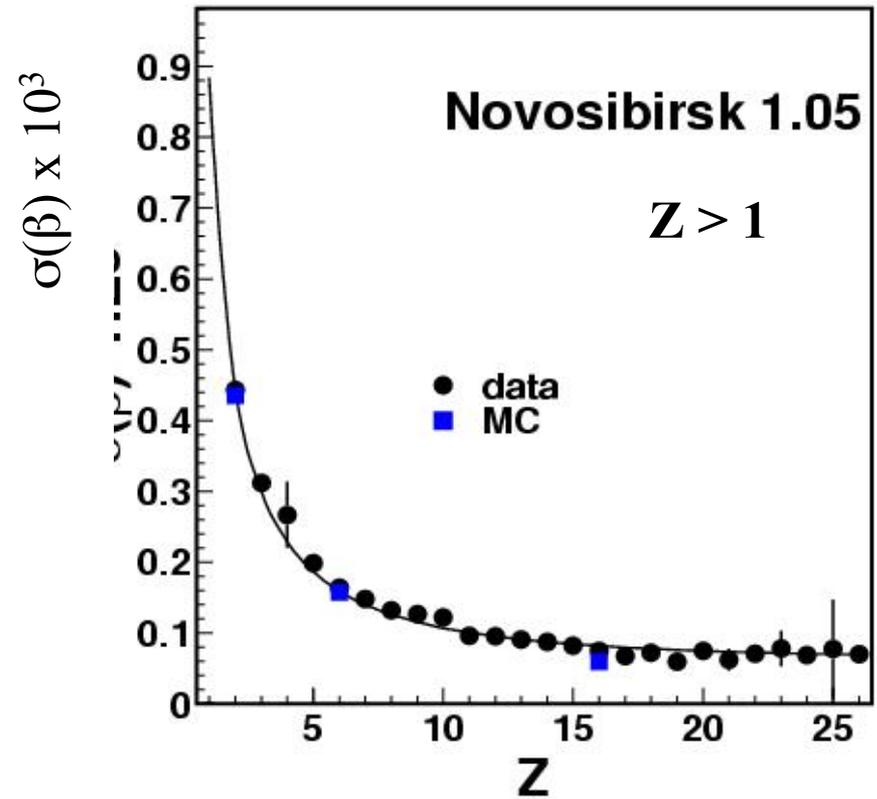
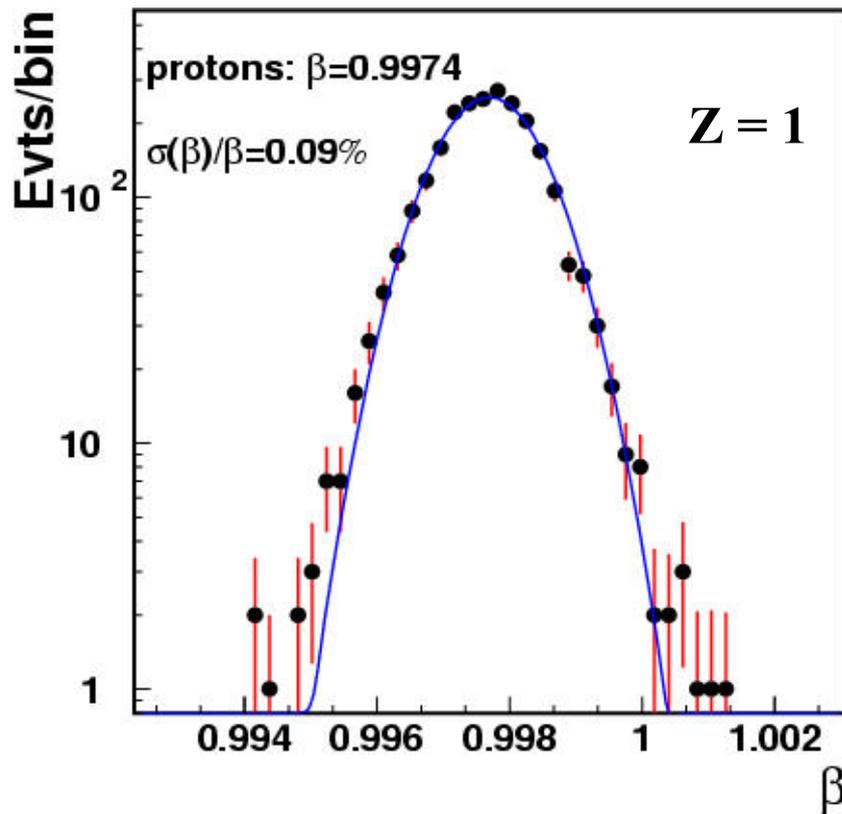




RICH – mesure de la vitesse (β)

▷ Aerogel radiator (Beam test)

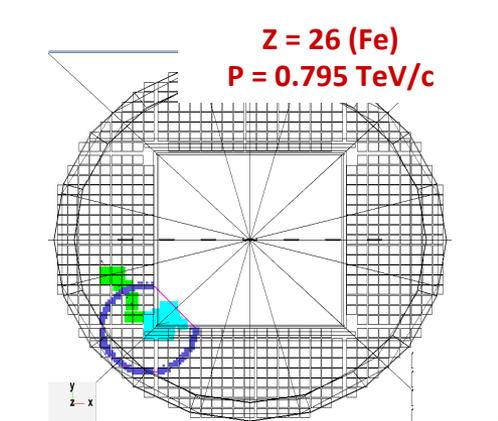
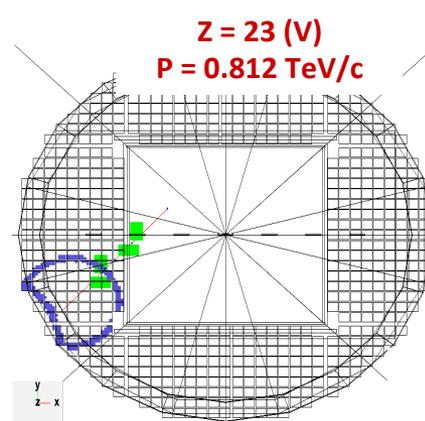
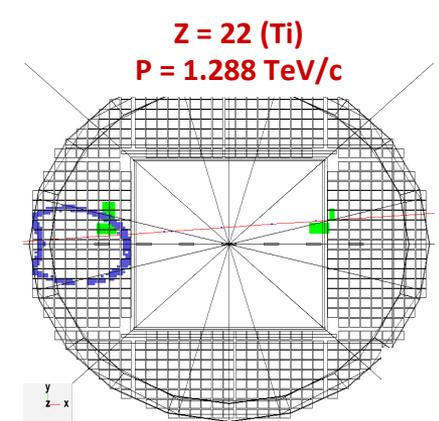
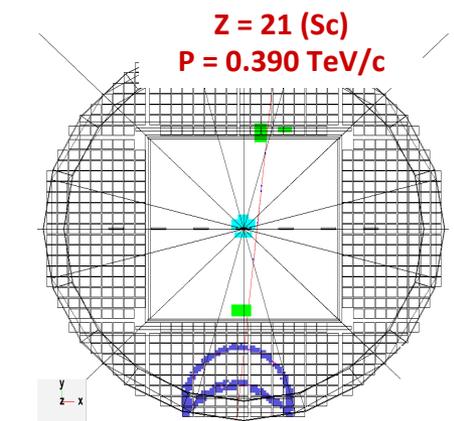
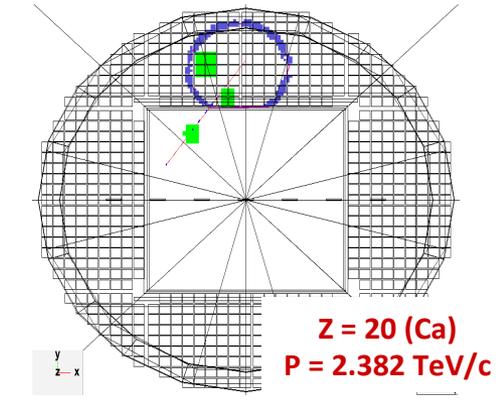
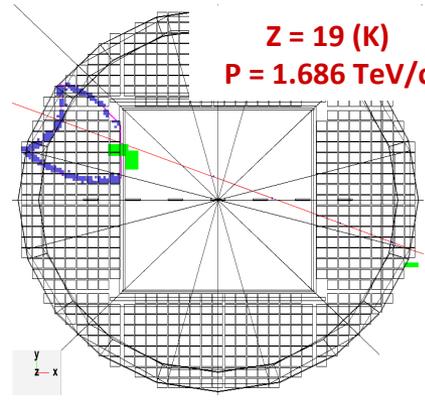
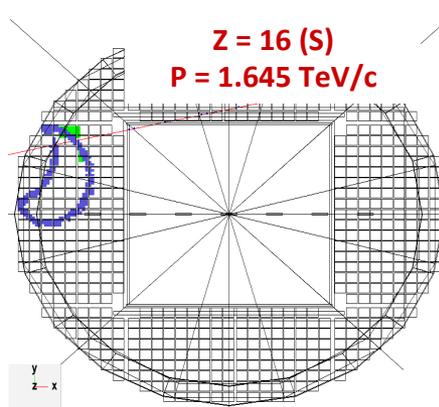
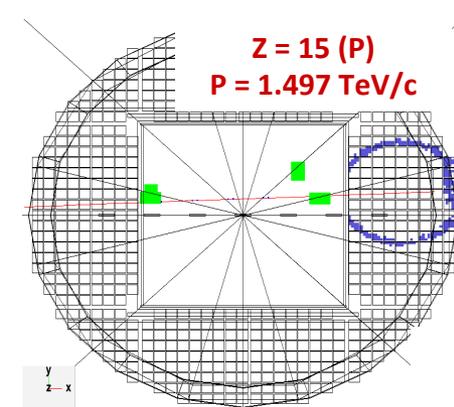
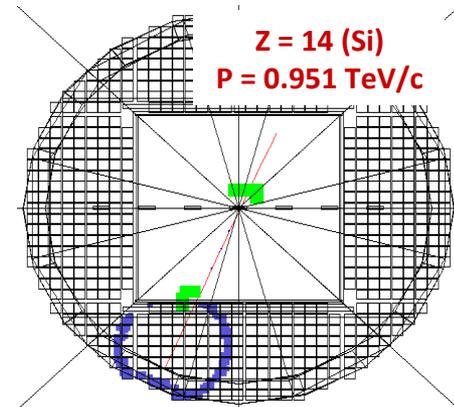
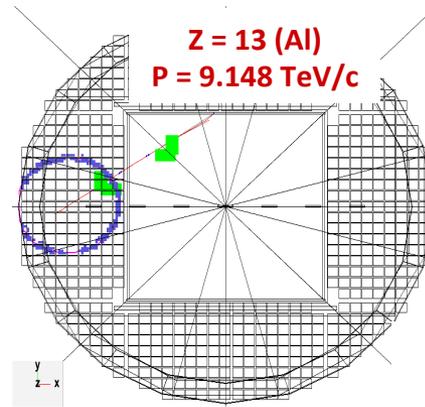
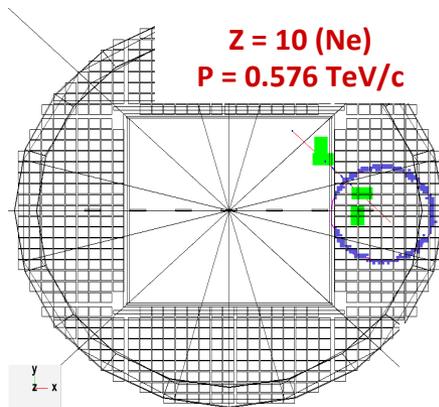
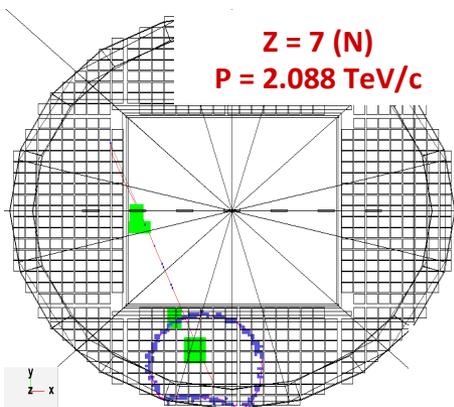
$E_k/n=158 \text{ GeV}/n$

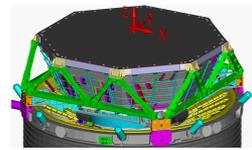


Resolution per hit is the same for direct and reflected hits

$$\left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)_Z \approx \frac{1}{Z} \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)_{Z-1}$$

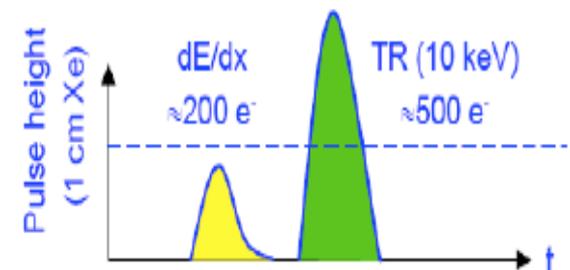
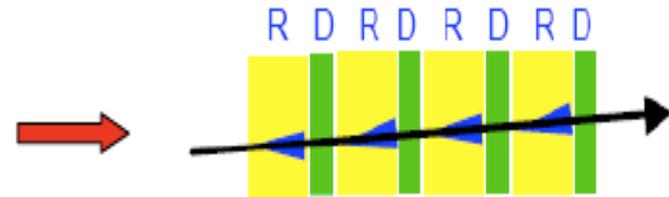
AMS data: Noyaux domaine du TeV



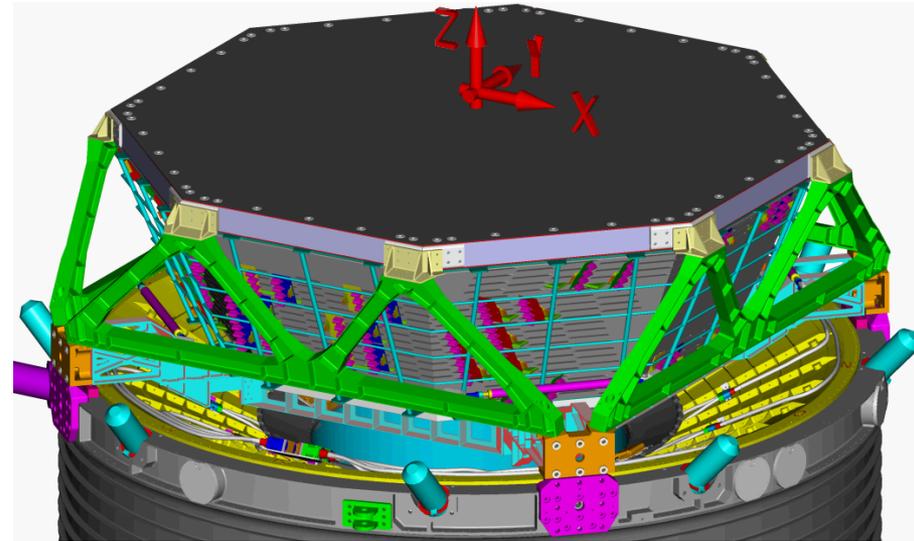
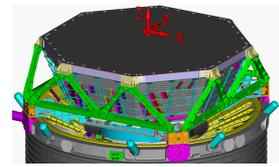


TRD - Rayonnement de transition

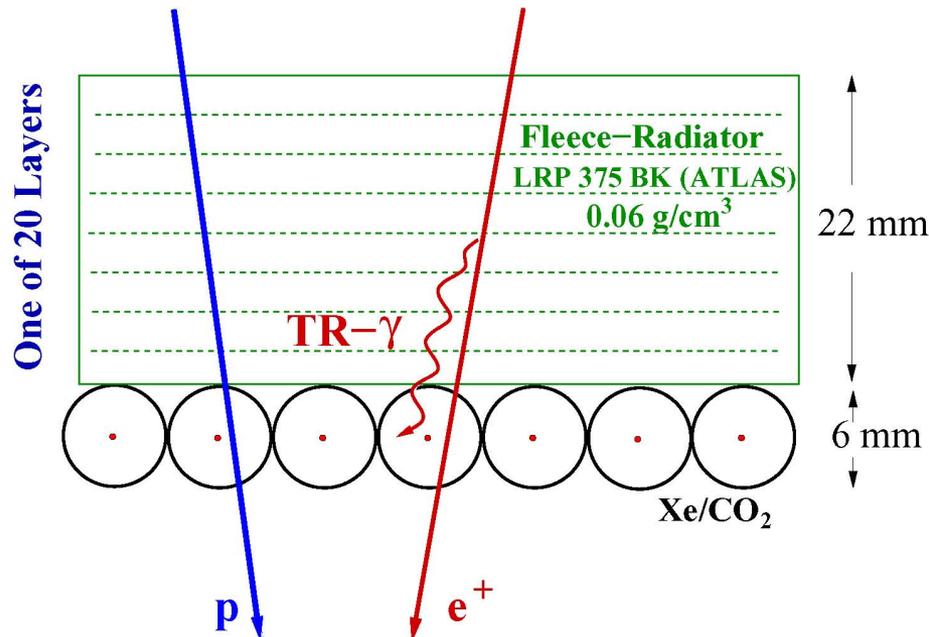
- Sandwich de radiateurs et de détecteurs alternés
- Les radiateurs sont souvent des feuilles de CH_2 (faible Z car la réabsorption est $\propto Z^5$)
- Les détecteurs sont généralement gazeux (MWPC, straw tubes, ..) et utilisent des gaz lourds (Z élevé car le nombre de photo-électrons est $\propto Z^5$)
- Problème intrinsèque au détecteur
⇒ Mettre un seuil élevé



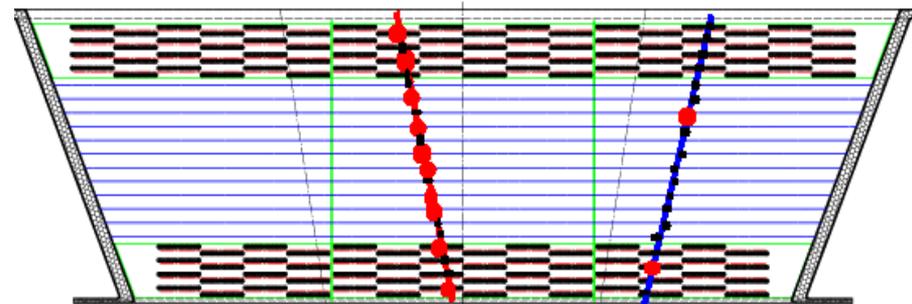
Détecteur à radiation de transition



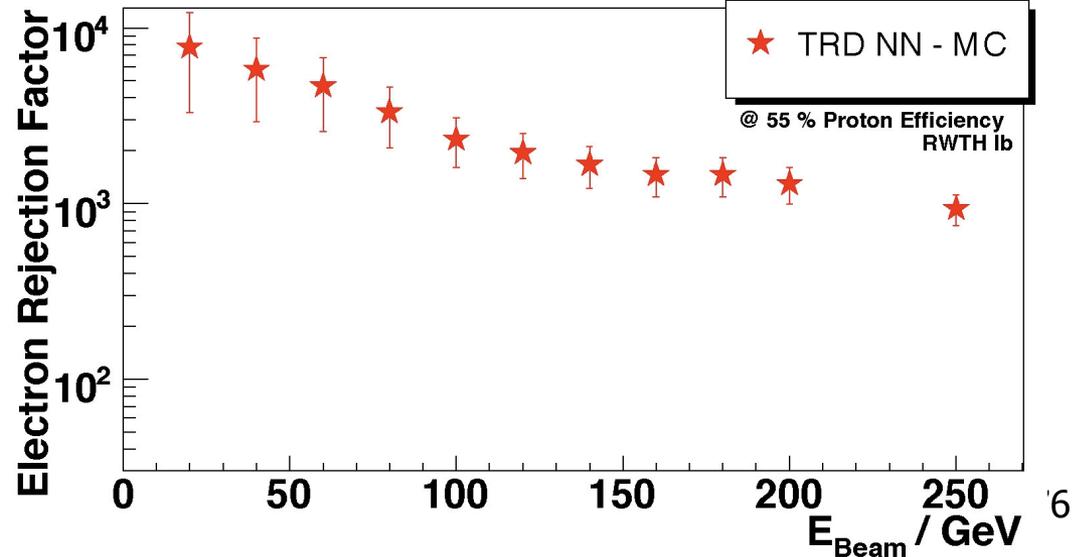
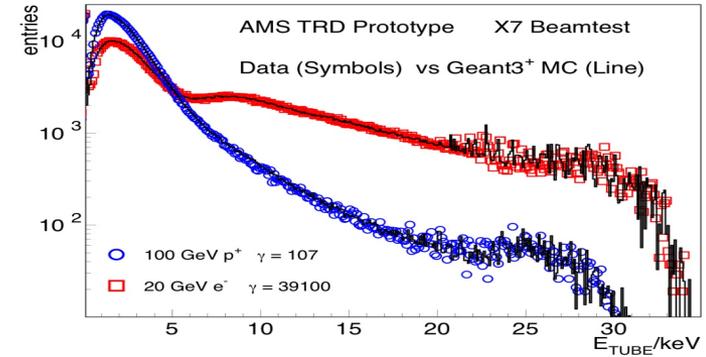
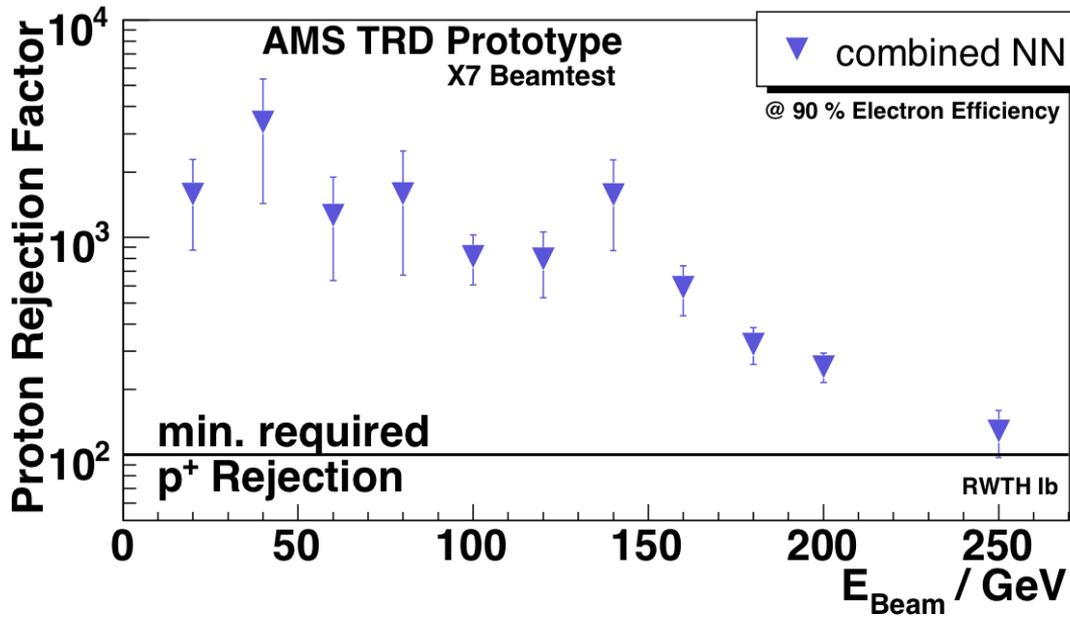
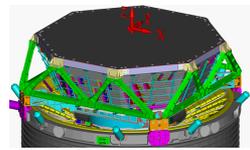
Configuration pour 60 cm de hauteur:
 20 couches : 22 mm mousse fibre
 Ø 6 mm straw tubes
 remplie Xe/CO₂ 80%/20%

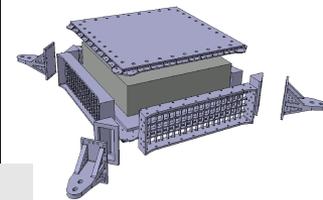


12 couches dans le plan de courbure
 2 x 4 couches dans l'autre vue

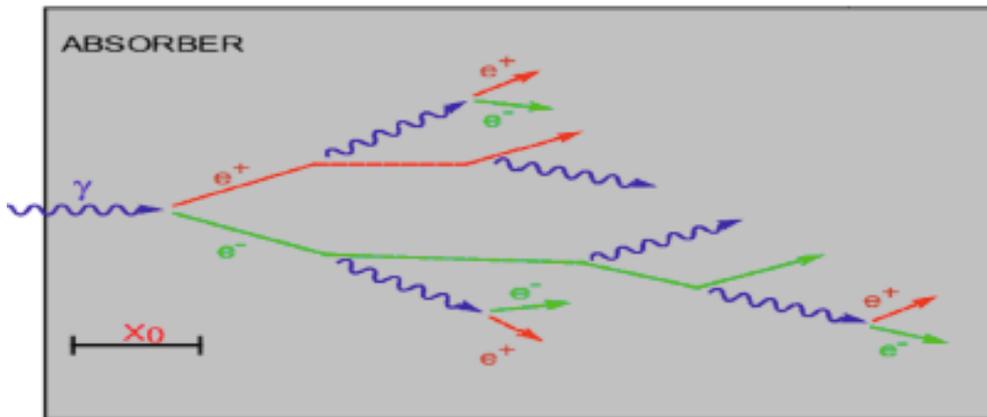
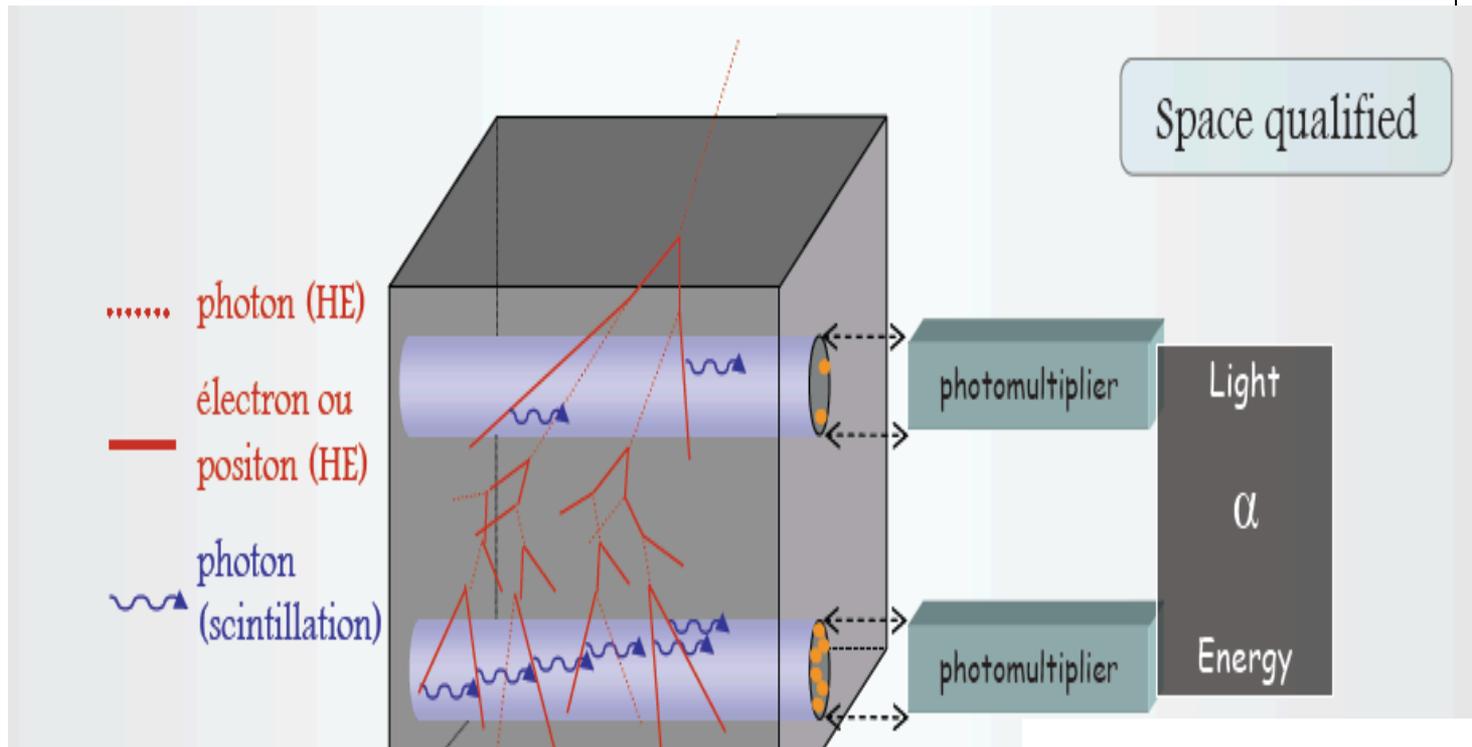


TDR – résultats Tests Faisceaux





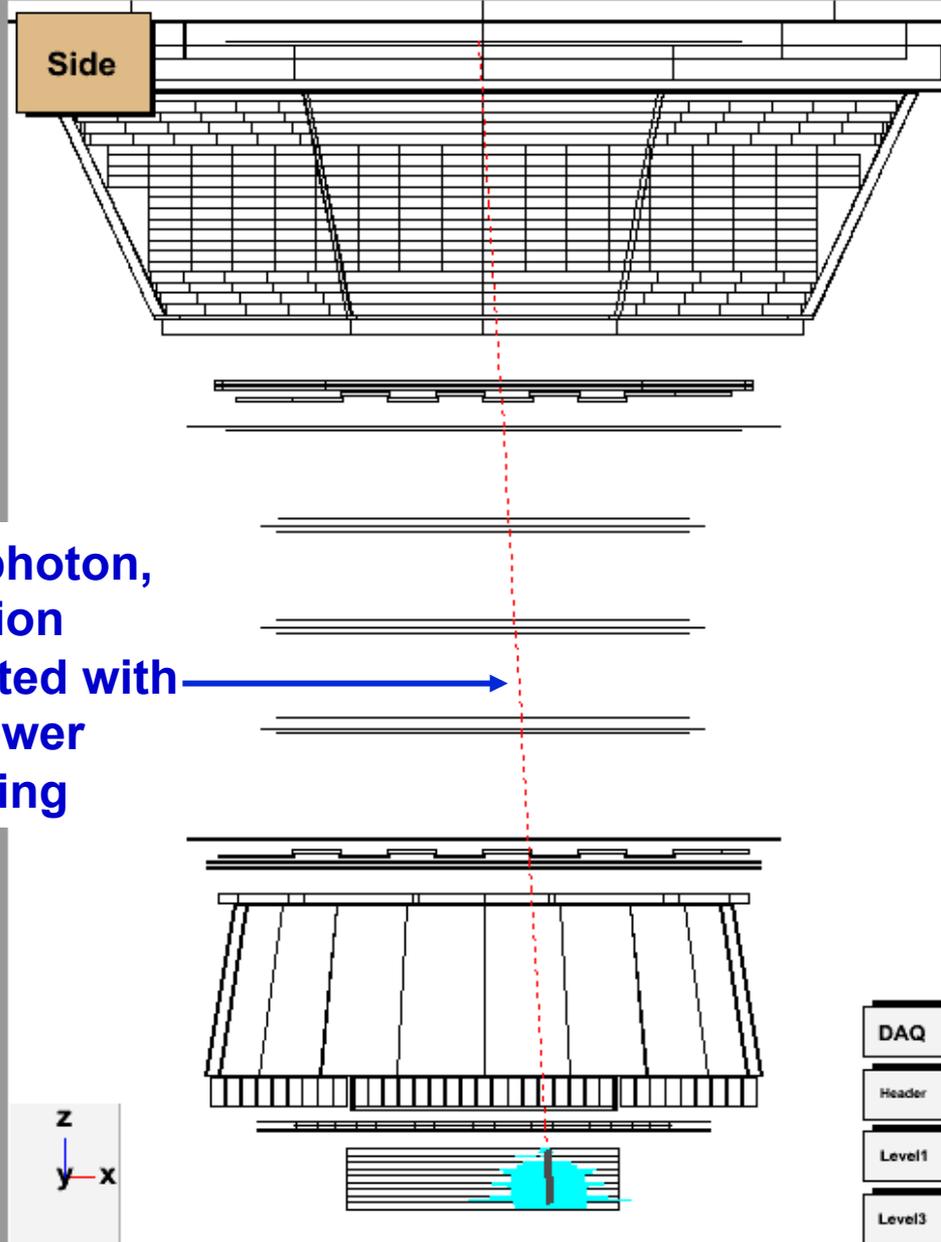
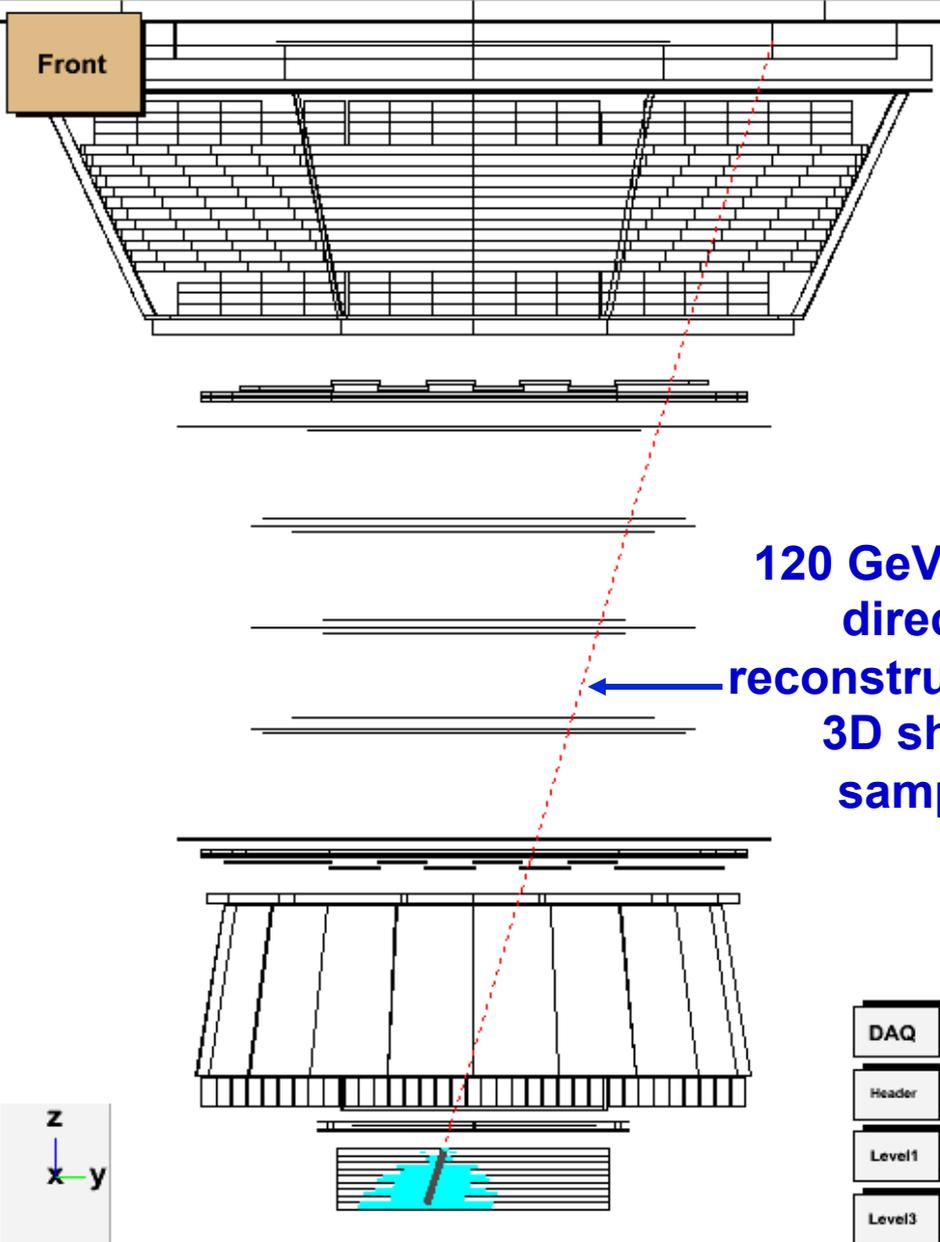
Calorimètre Electromagnétique



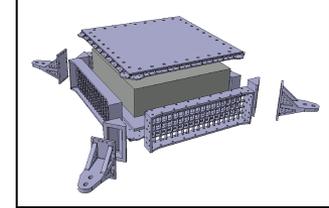
- Méthode destructive de mesure de l'énergie totale par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie
 - ⇒ formation de **gerbes électromagnétiques** ou **hadroniques**
 - L'énergie est convertie en excitation de la matière ou ionisation
 - Réponse du détecteur liée à l'énergie E
- On appellera **absorbeur** le milieu qui déclenche la gerbe

120 GeV photon

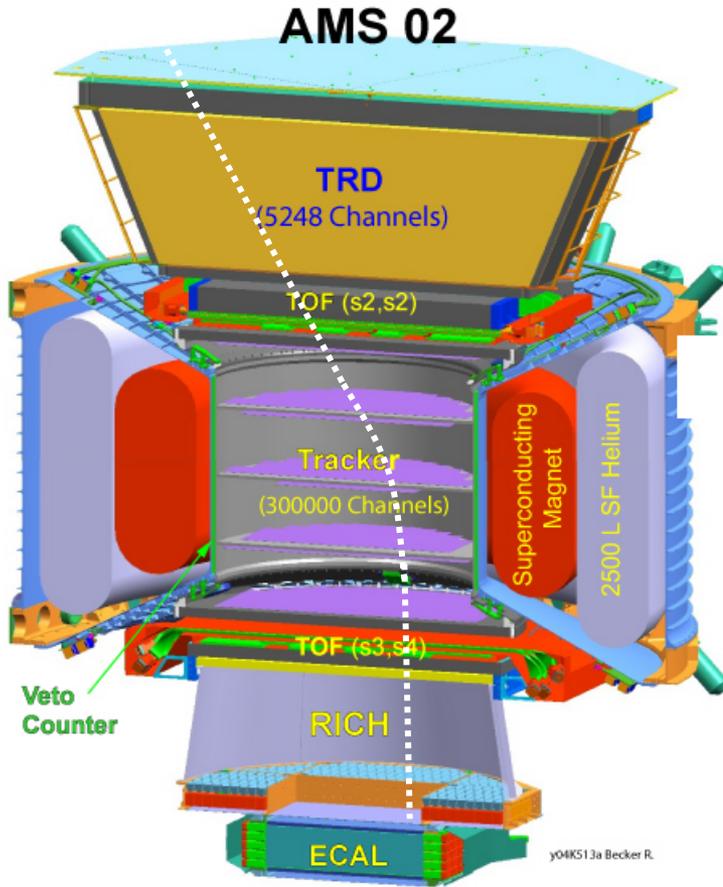
Unique Features: $17 X_0$, 3D ECAL, measure γ to 1 TeV, time resolution of $1\mu\text{sec}$



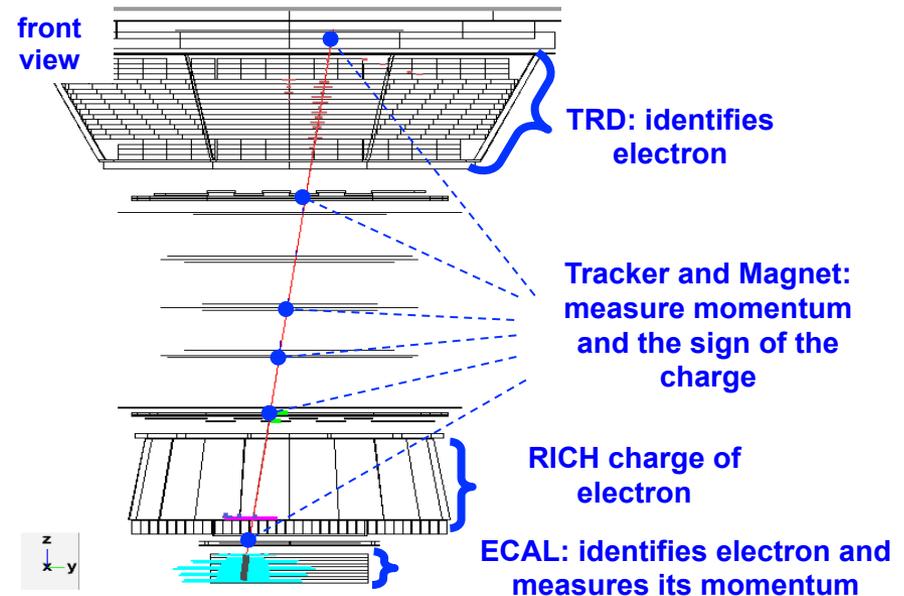
Calorimetre electromagnetique



3D imaging calorimeter

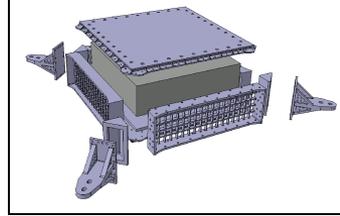


Particle ID (e.m gerbes vs. cascades de hadrons)
Mesure de l'énergie (e^+, e^-, γ) (\Rightarrow 1TeV)
systeme de déclenchement



ECAL: le dernier des détecteurs où les particules e.m vont “mourir”

Calorimètre Electromagnétique



3D reconstruction de la gerbe en 3 dimensions

- Calorimetre à échantillonnage: absorbeur et detecteur sont differents
- Pb/ fibres scintillantes structure

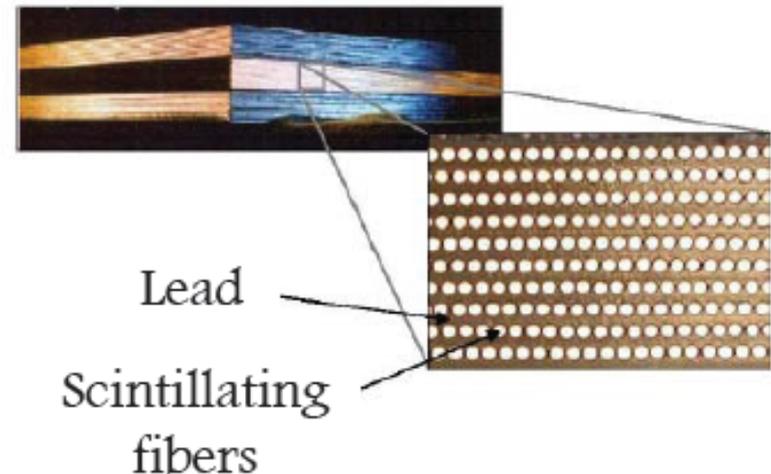
volume ratio Pb:fibres:glue : 60:34:6

dimensions : $658 \times 658 \times 166.5 \text{ mm}^3$

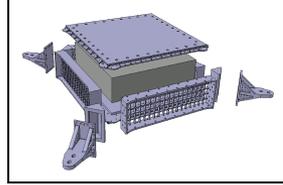
poids : 498 kg

- 9 “Supercouches” ($>16 X_0$, 1 lambdaI)

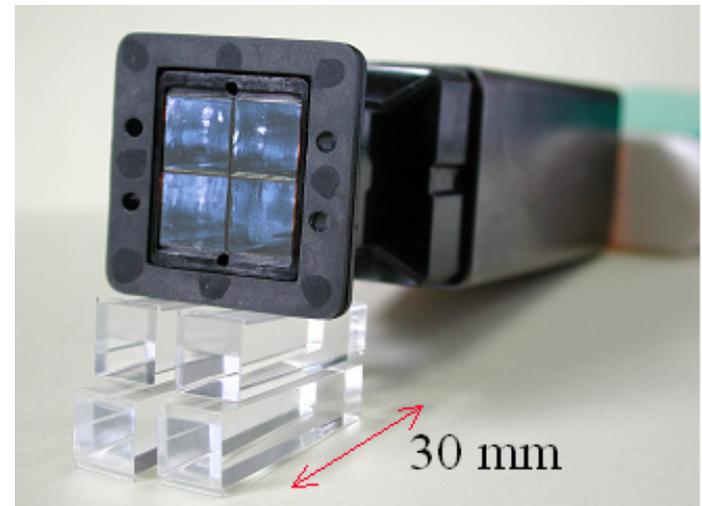
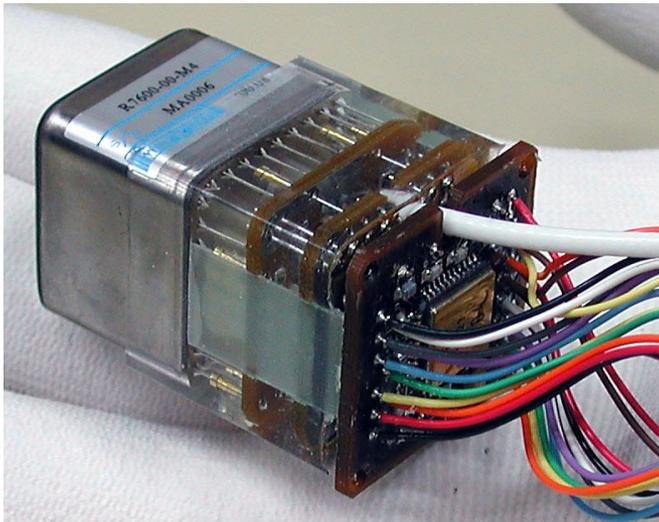
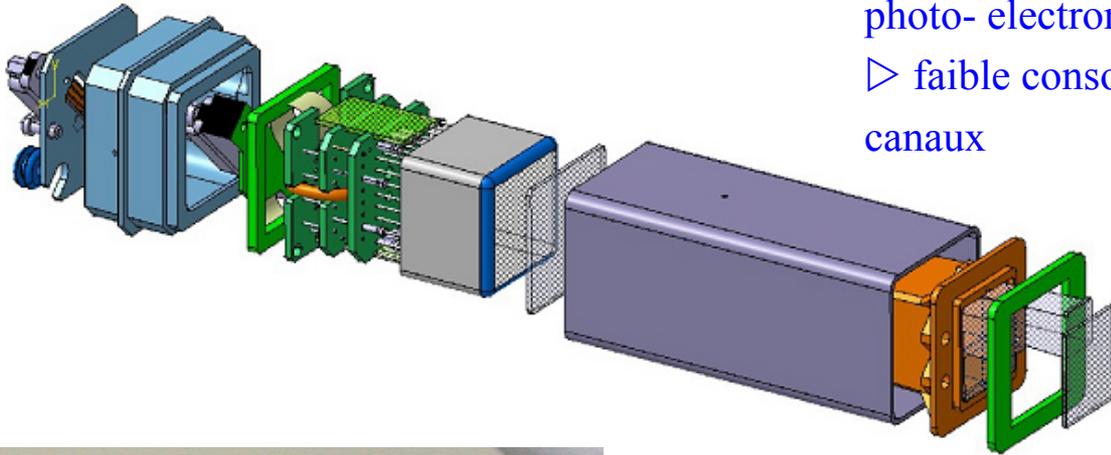
10 000 fibres



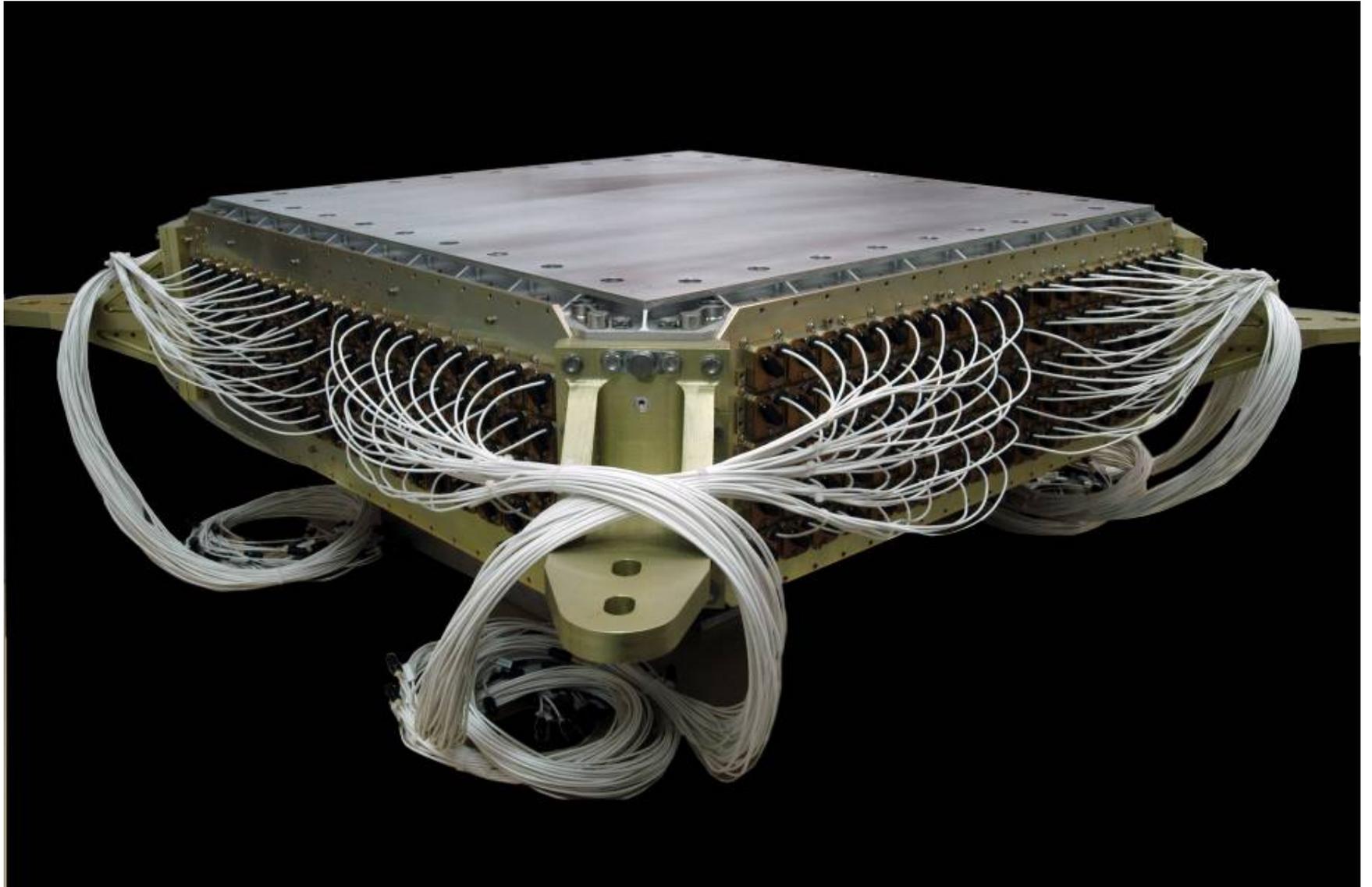
Systeme de collection de lumiere



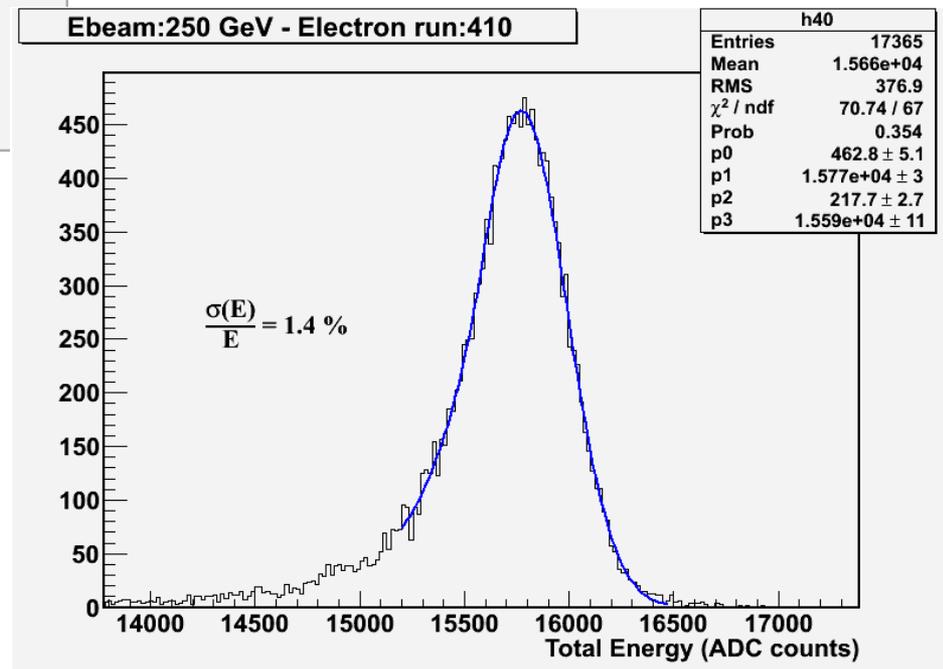
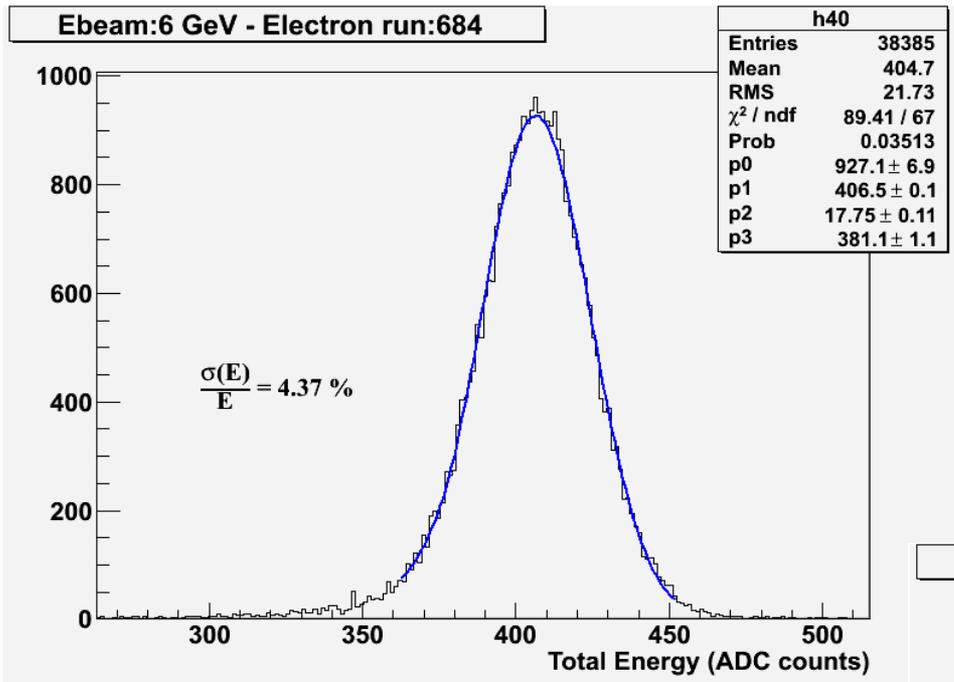
- ▷ Detecte le MIP (~8 photo electrons)
- ▷ Detecte le maximum de la gerbe ~1 TeV(90 000 photo- electrons)
- ▷ faible consommation electrique 20 mW par canaux



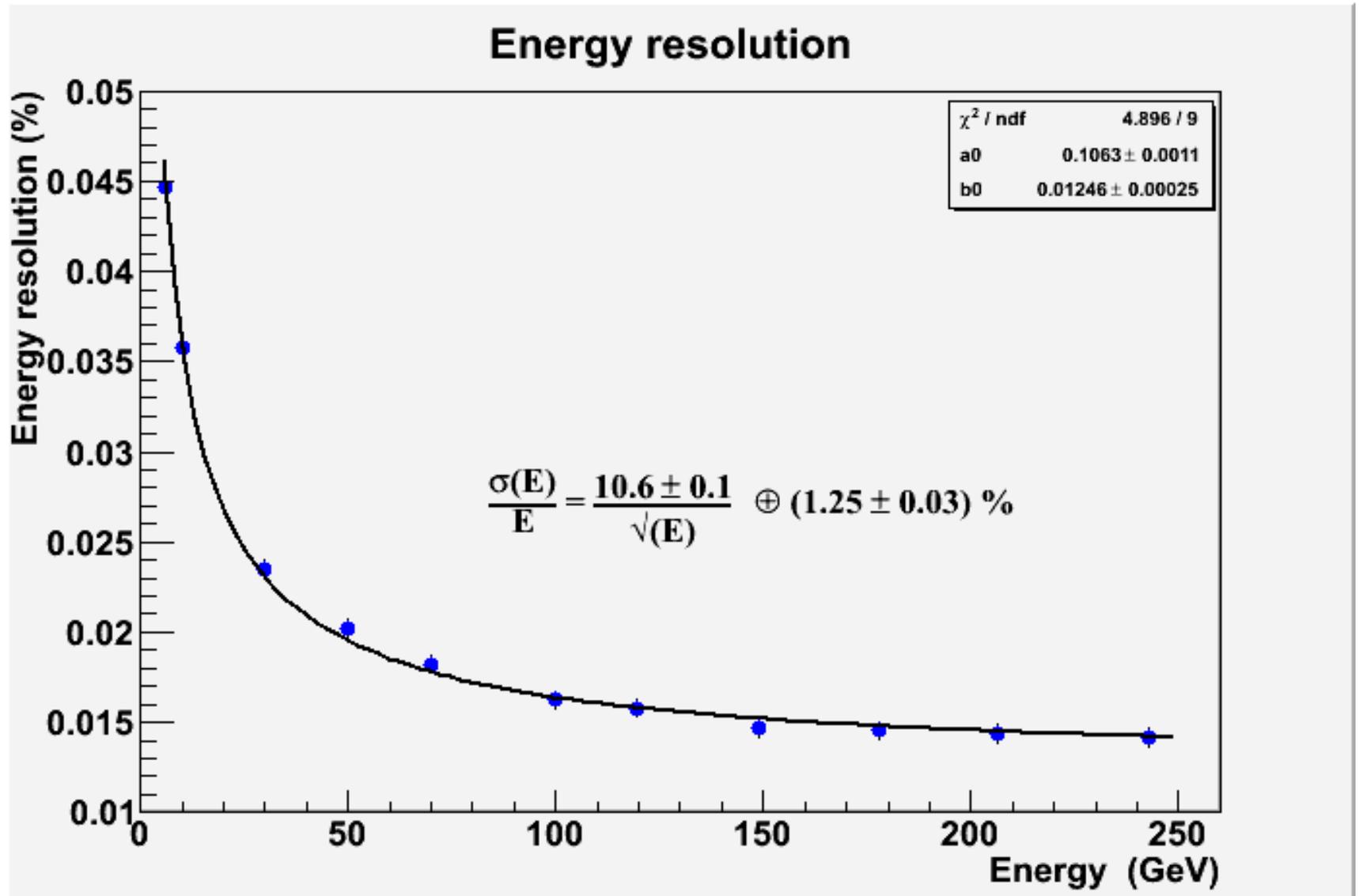
ECAL Construction



performance



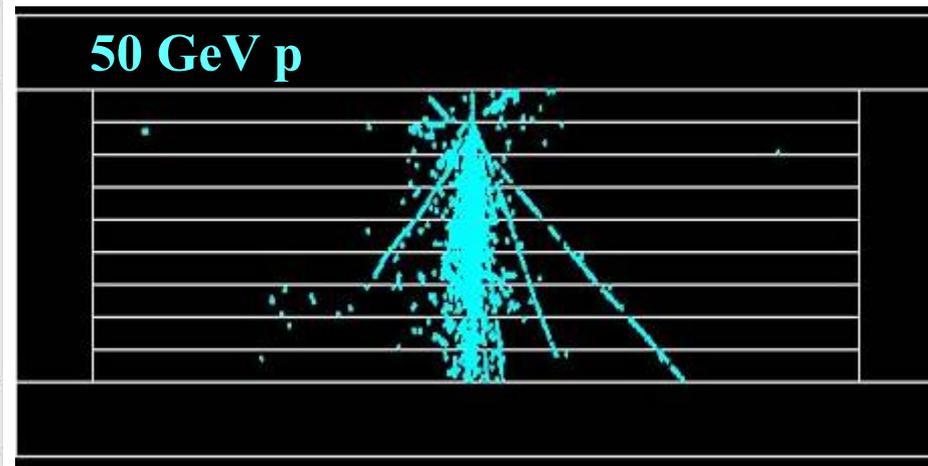
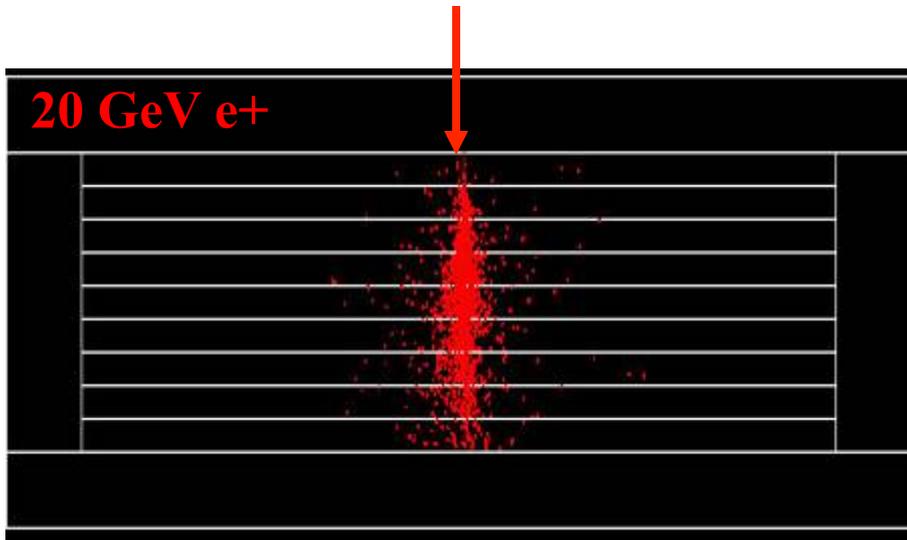
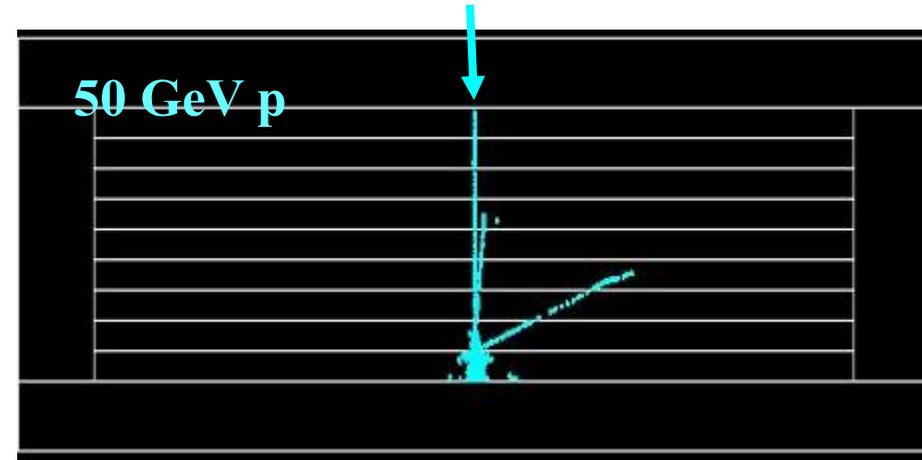
Précision sur la mesure de l'énergie



e/P rejection

- Sans notre galaxie, il y a au moins 10000 fois plus de protons qu'il y a d'électrons
- Pour la mesure des positrons il faut donc rejeter les protons qui simulerait un positron

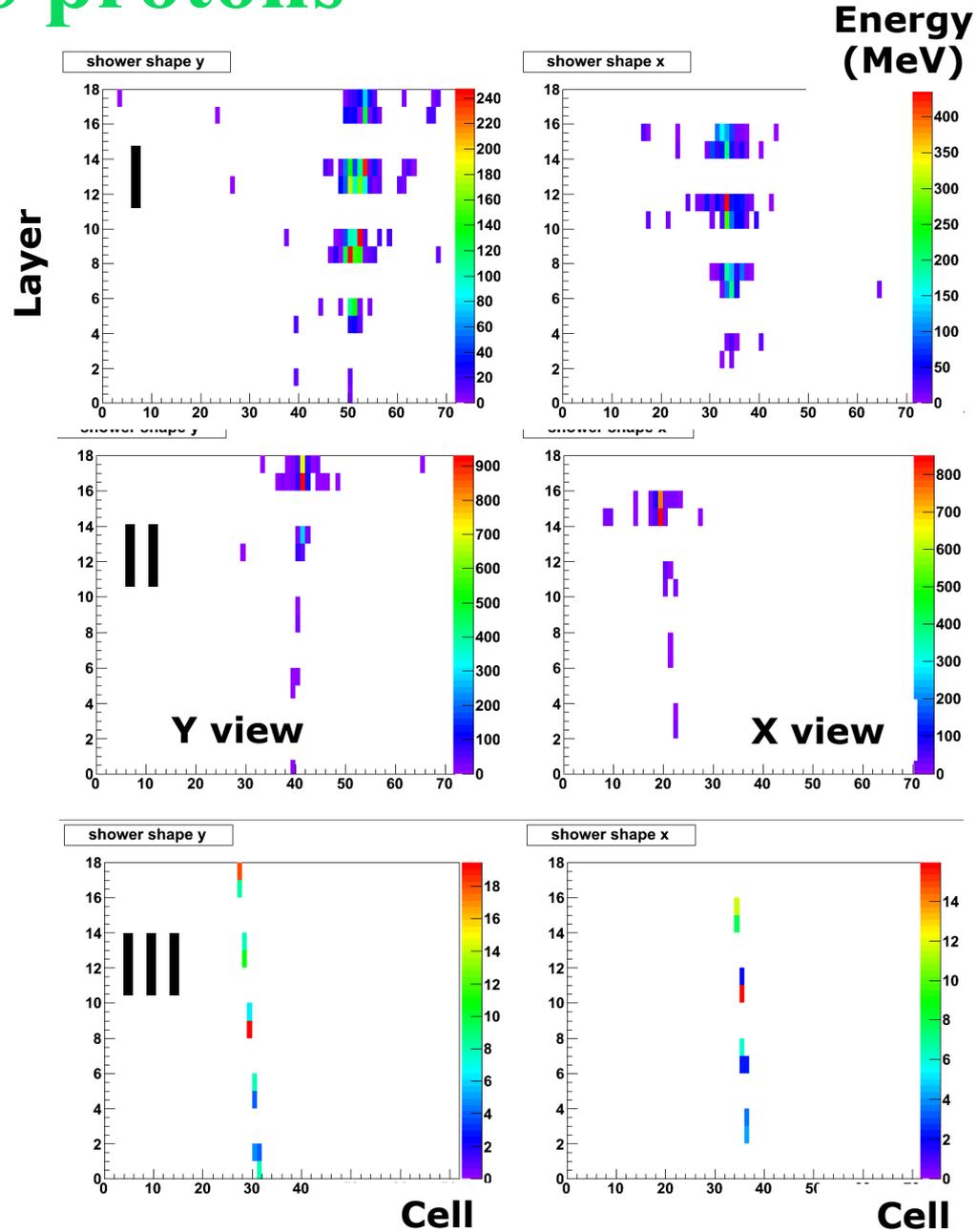
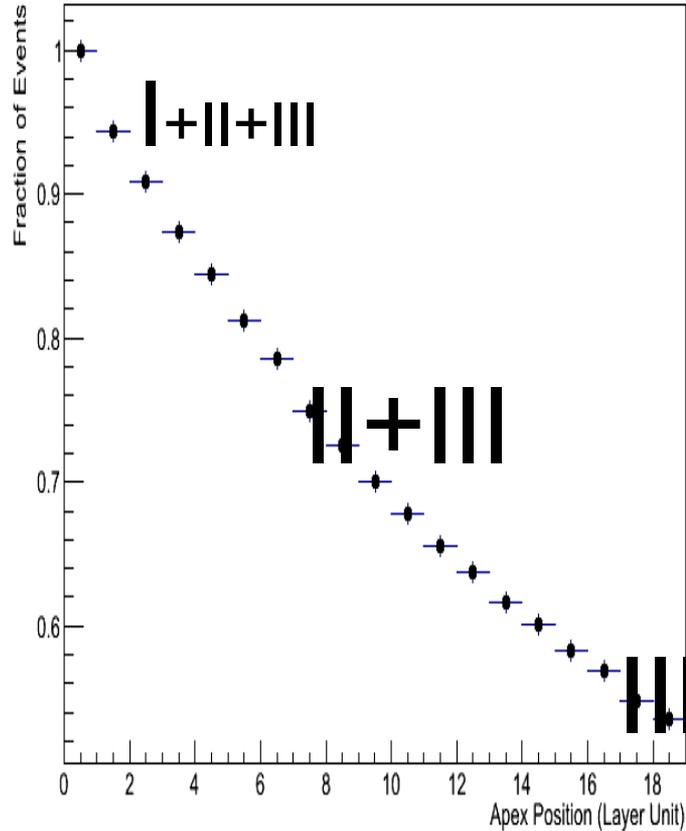
Simulation in Geant4



e/P rejection - ISS protons

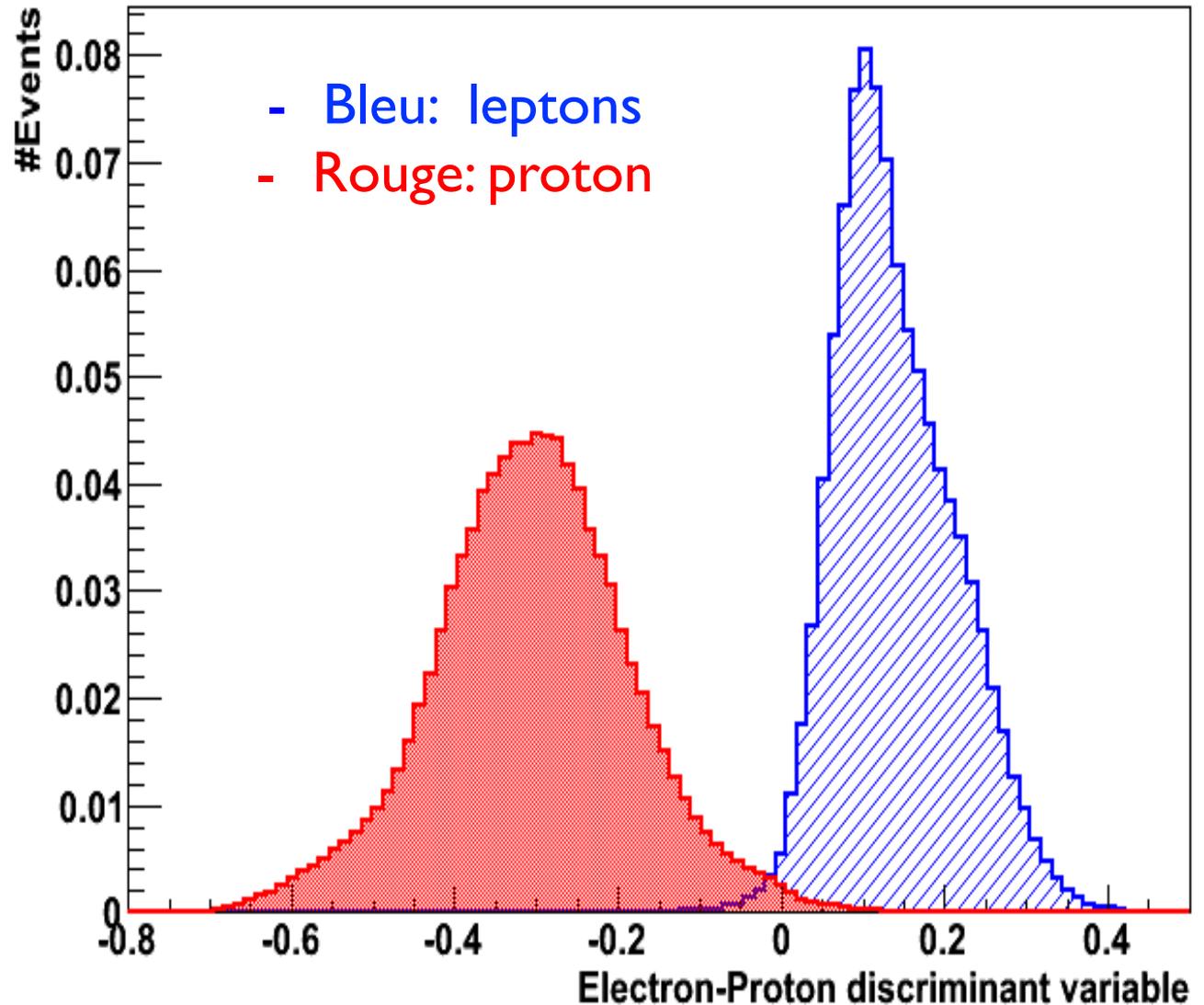
3 Signatures de l'interaction des protons dans le calorimetre

- I: Nuclear Interaction dans les premieres couches (~ 10-15 %)
- II: Nuclear interaction in les couches intermediaires zone (3:17)
- III: au minimum ionisant sur tout le calorimetre, 47-53 % of the proton events



e-/P rejection with ECAL

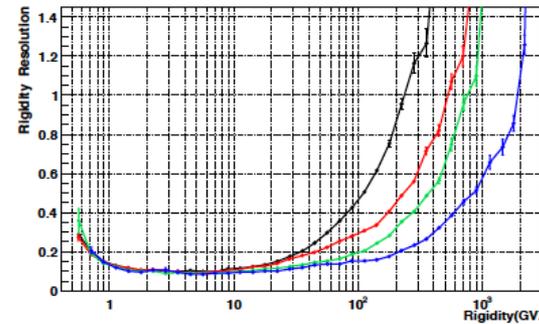
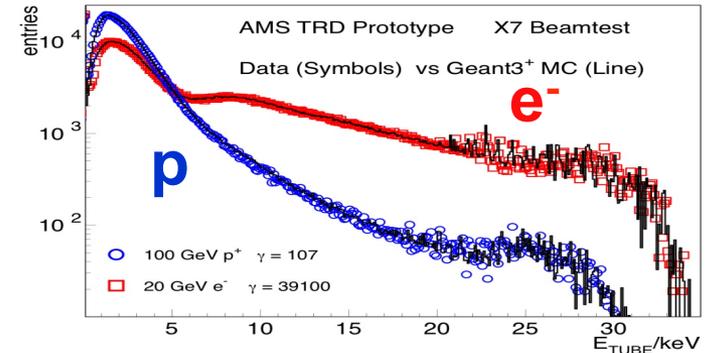
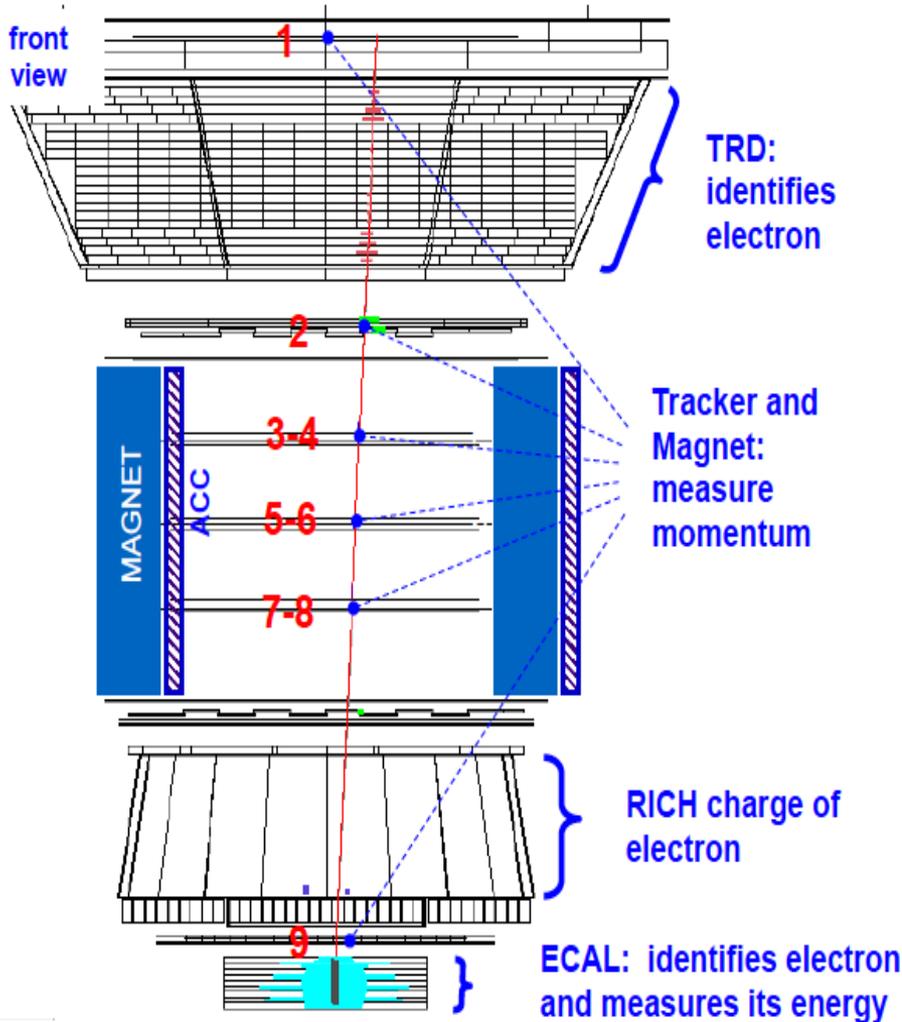
ISS Data



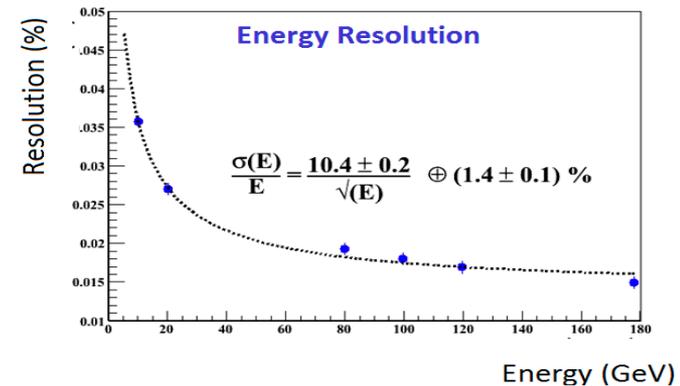
- Méthode statistique qui permet de séparer les protons des positrons

e+,e- Identification avec AMS

Proton rejection $> 1/100000 \Rightarrow 3$ détecteurs complémentaires



MDR=2 TV

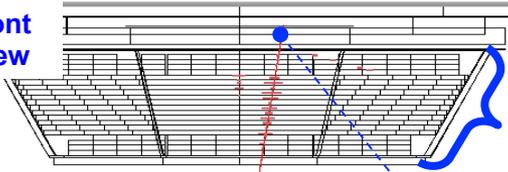


AMS data on ISS: 424 GeV positron

AMS data: High energy e^\pm

1.03 TeV electron

front view



TRD: identifies electron

Tracker and Magnet: measure momentum and the sign of the charge

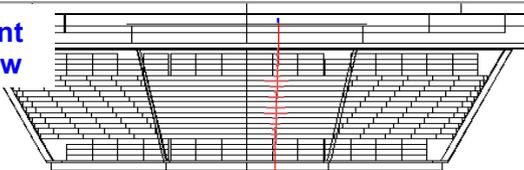
RICH charge of electron

ECAL: identifies electron and measures its momentum

z
x-y

369 GeV positron

front view



TRD: identifies electron

Tracker and Magnet: measure momentum and the sign of the charge

RICH charge of electron

ECAL: identifies electron and measures its momentum

z
x-y

z
x-y

205 GeV positron

front view



TRD: identifies electron

Tracker and Magnet: measure momentum and the sign of the charge

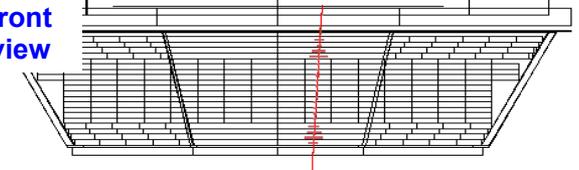
RICH charge of electron

ECAL: identifies electron and measures its momentum

z
x-y

424 GeV positron

front view



TRD: identifies electron

Tracker and Magnet: measure momentum and the sign of the charge

RICH charge of electron

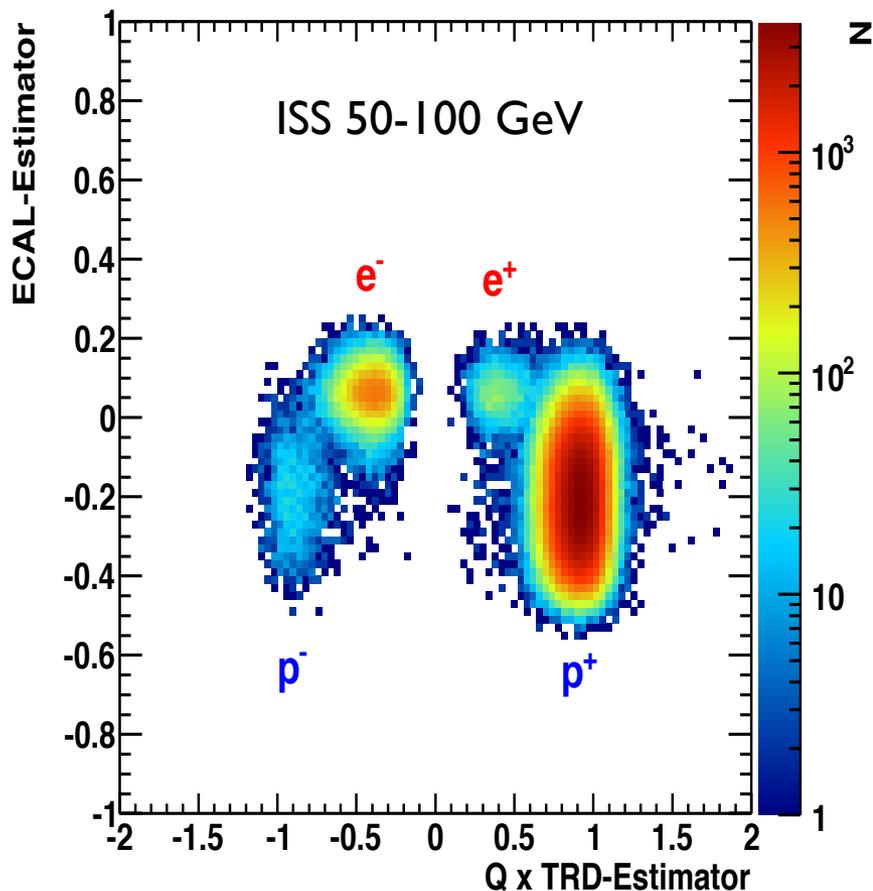
ECAL: identifies electron and measures its momentum

z
x-y

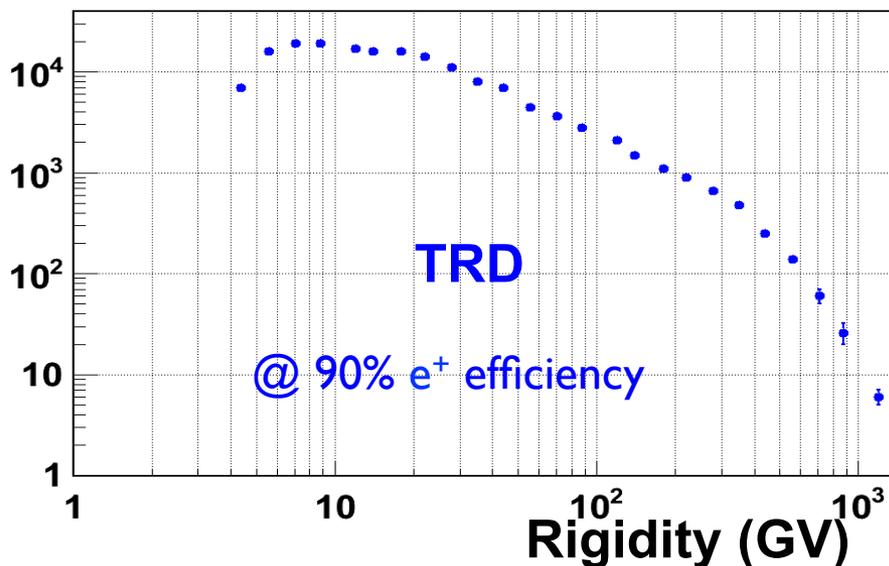
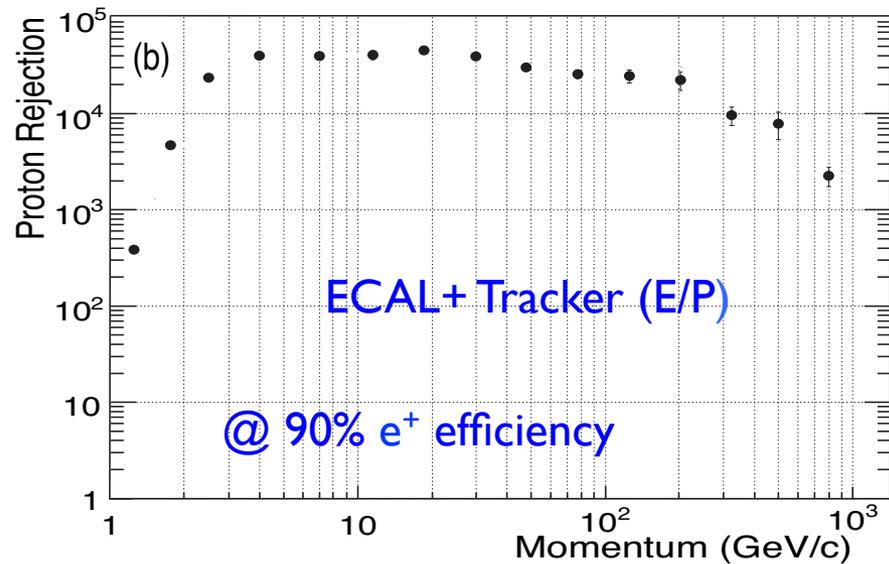
z
x-y

Proton rejection

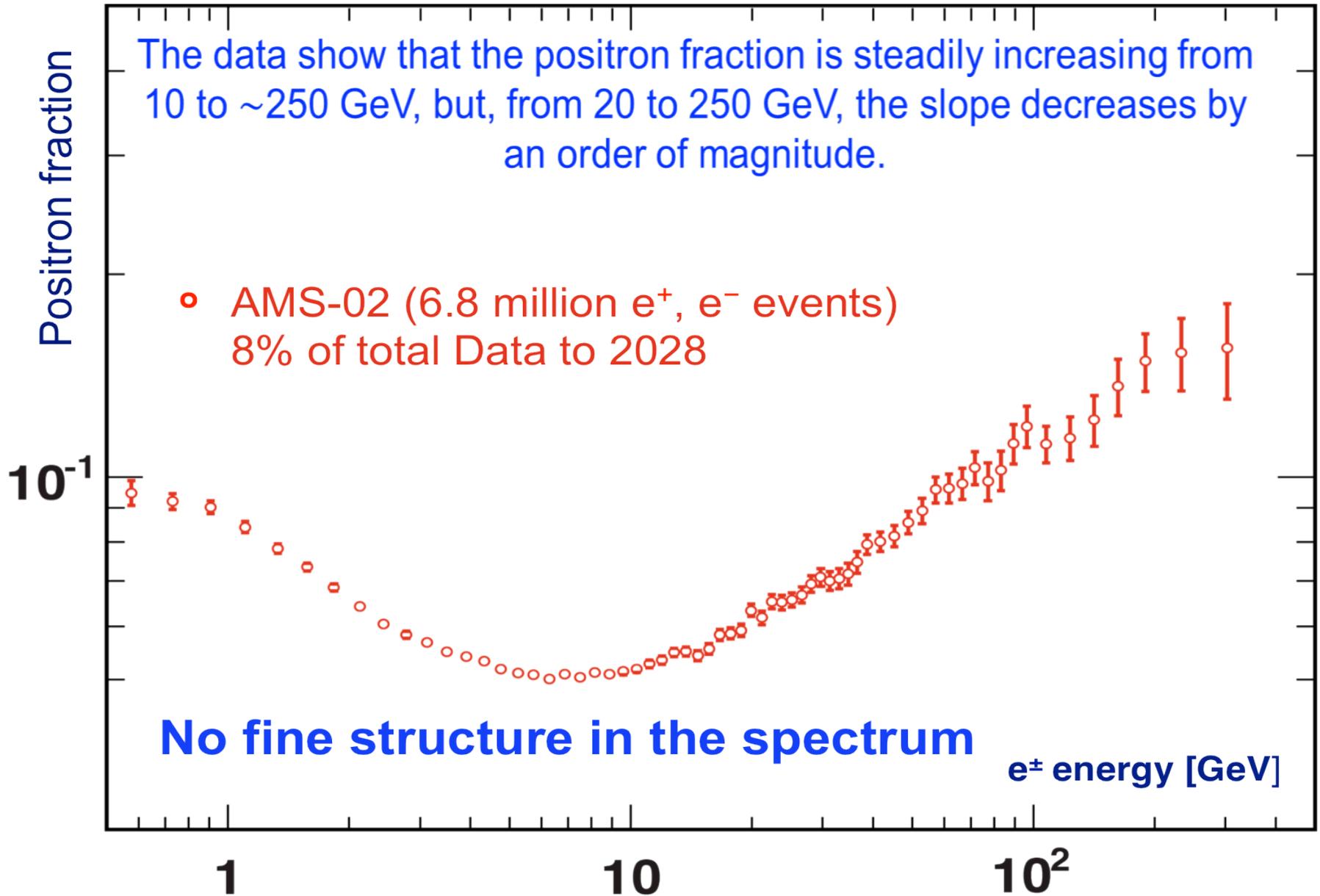
ECAL estimator : Boost Decision Tree based on the 3D shower shape features



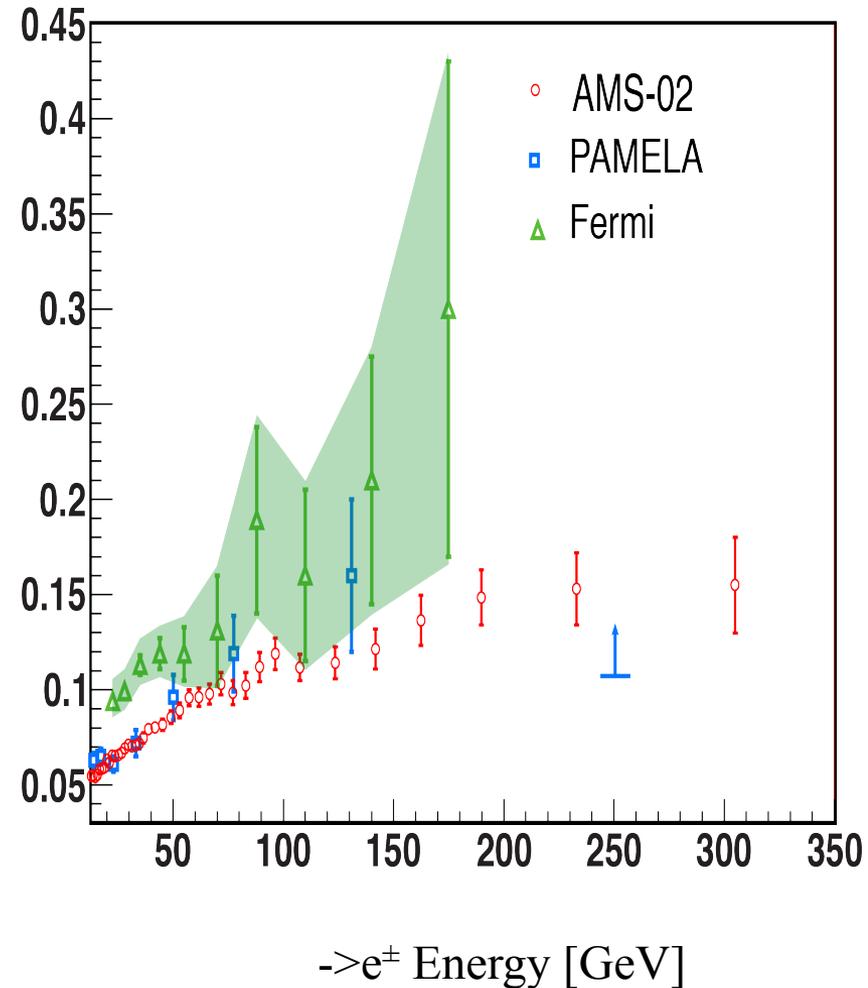
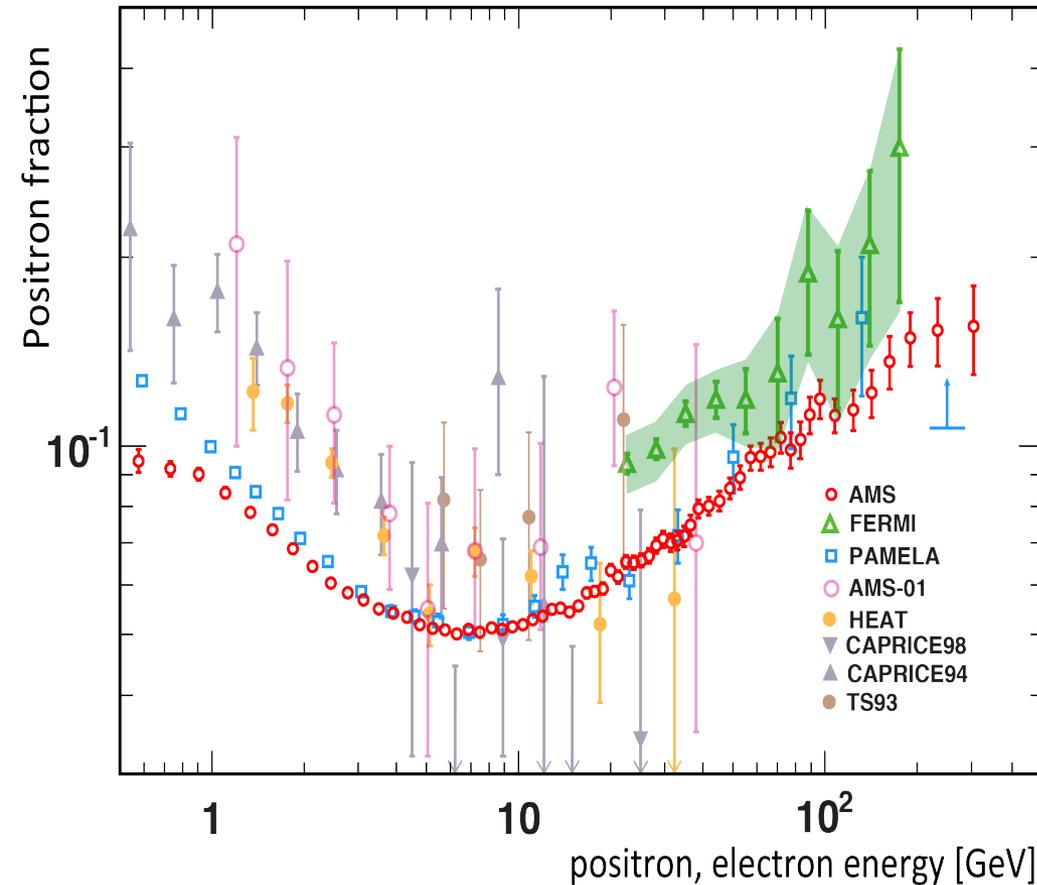
TRD estimator : likelihood based on the signal amplitude in each layer (20 in total)



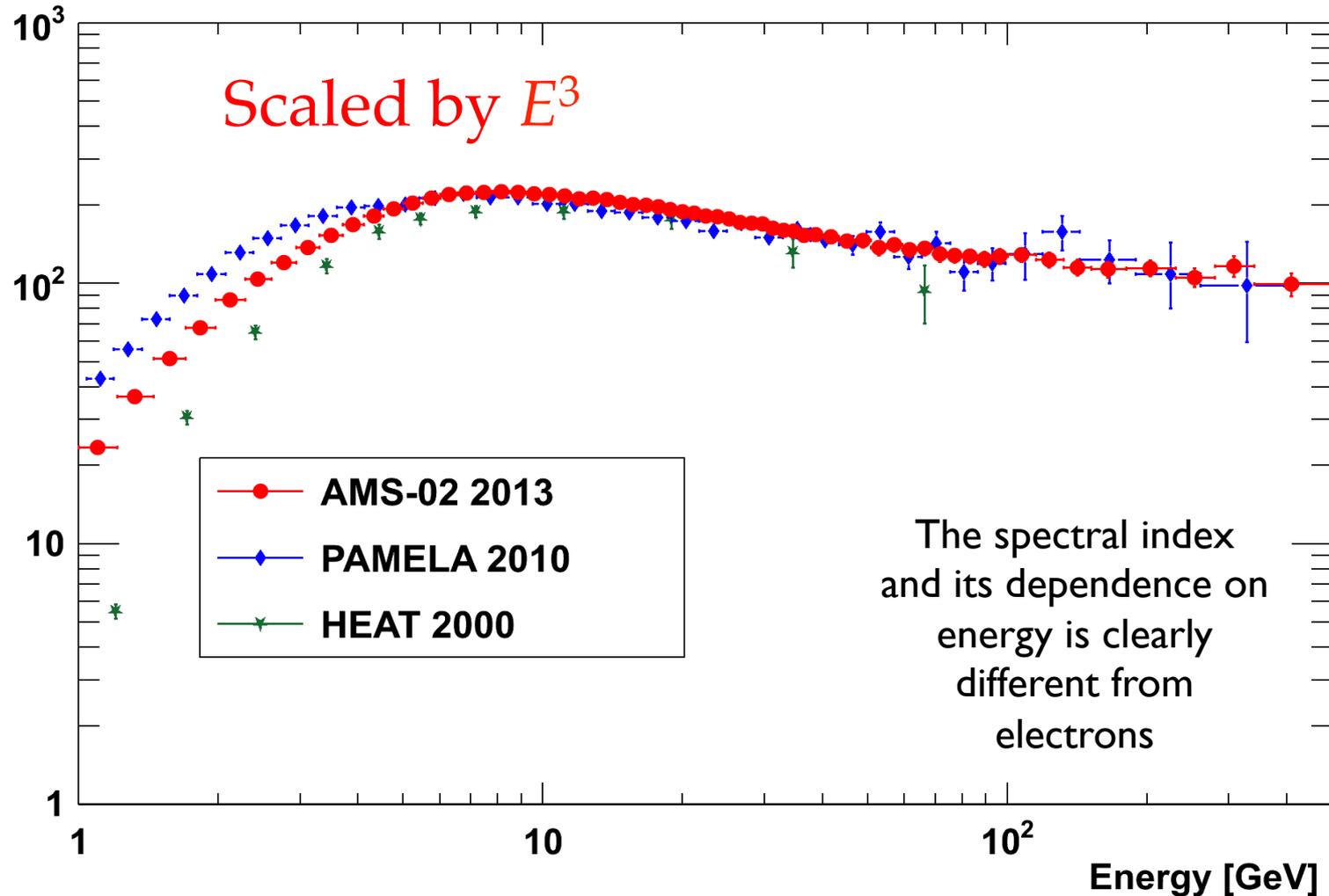
Positron fraction



Positron fraction : comparaison des mesures

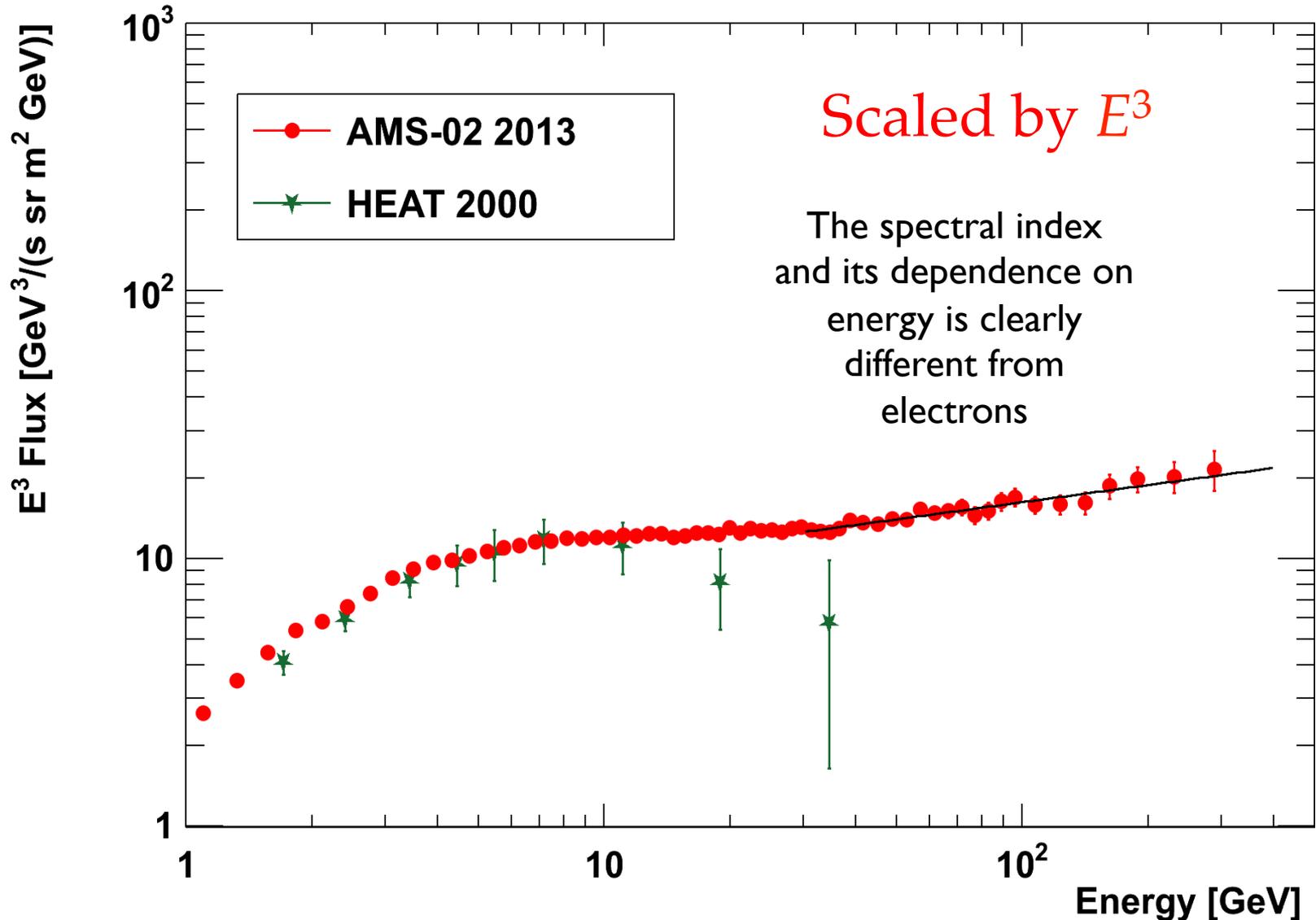


AMS-02 Electron Flux up to 500 GeV



Statistical errors only

AMS-02 Positron Flux =>to 350 GeV



Statistical errors only

Characteristics of AMS

$$\Delta t = 100 \text{ ps}, \Delta x = 10 \text{ } \mu\text{m}, \Delta v/v = 0.001$$

	e^-	P	He, Li, Be, ... Fe	γ	e^+	\bar{P}, \bar{D}	\bar{He}, \bar{C}
TRD							
TOF							
Tracker							
RICH							
ECAL							
Physics example	Cosmic Ray Physics				Dark matter		Antimatter

Le système de déclenchement AMS-02

