

Introduction à la détection de particules

▷ Introduction

- ▶ Principes
- ▶ Interactions particule - matière

▷ Les détecteurs et illustration avec AMS

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

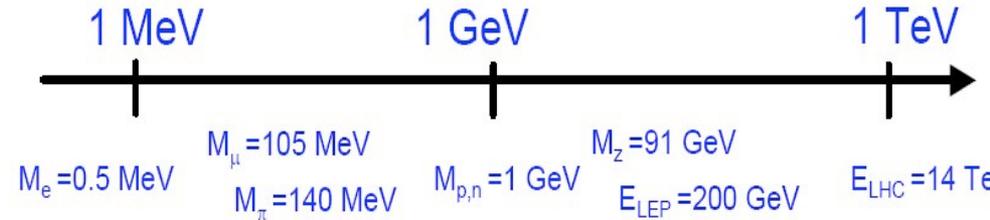
S.Rosier Lees (LAPP-IN2P3/CNRS)

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

▷ Identifier les particules

- ▶ Masse M (eV/c^2)
- ▶ Charge Q (Ze) et signe
- ▶ Durée de vie (s)



▷ Mesurer leurs caractéristiques:

- ▶ Energie E (eV)

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

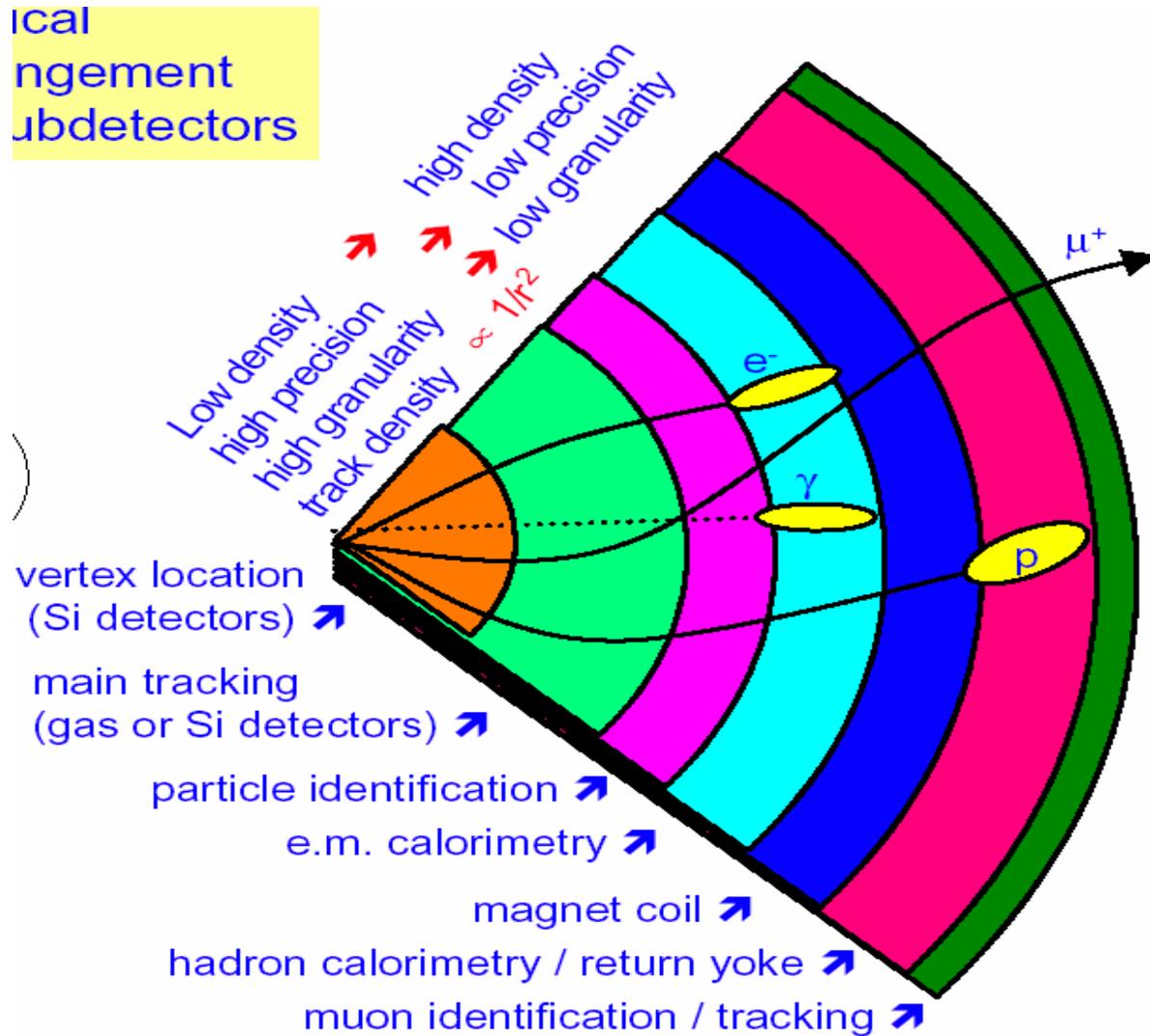
- ▶ Impulsion \mathbf{p} (eV/c)

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

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

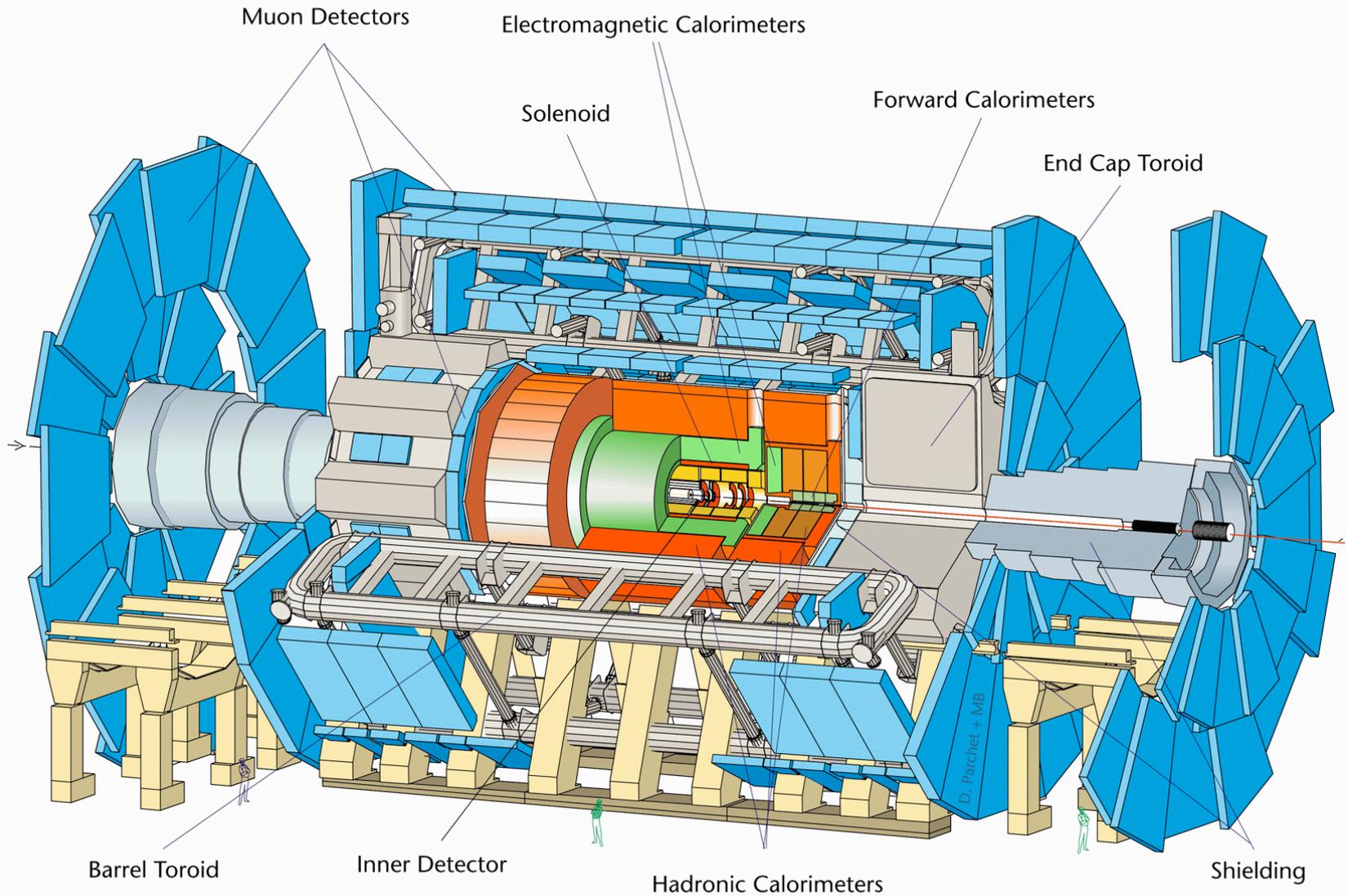
$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Structure globale d'un détecteur

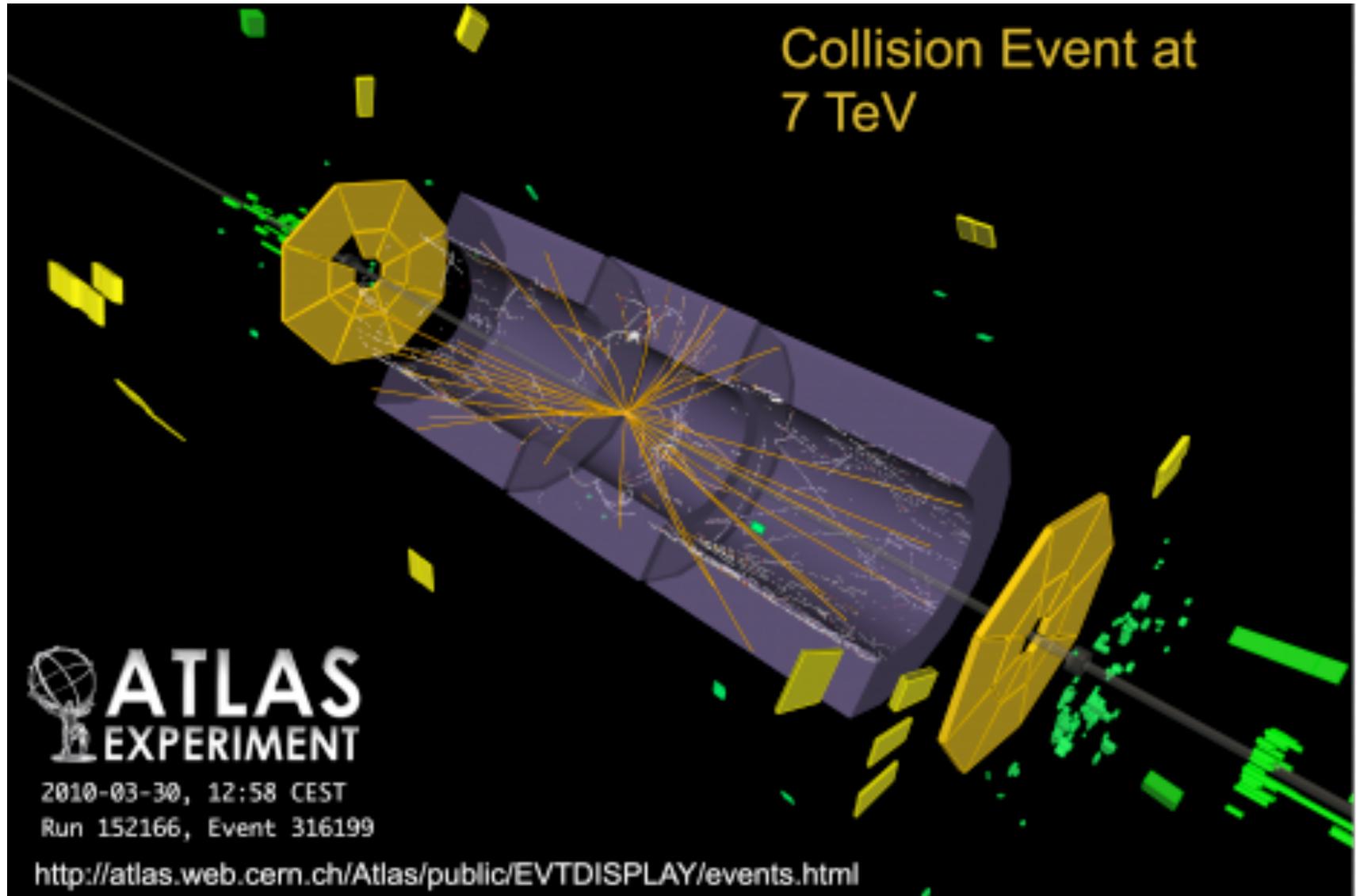


Le détecteur Atlas

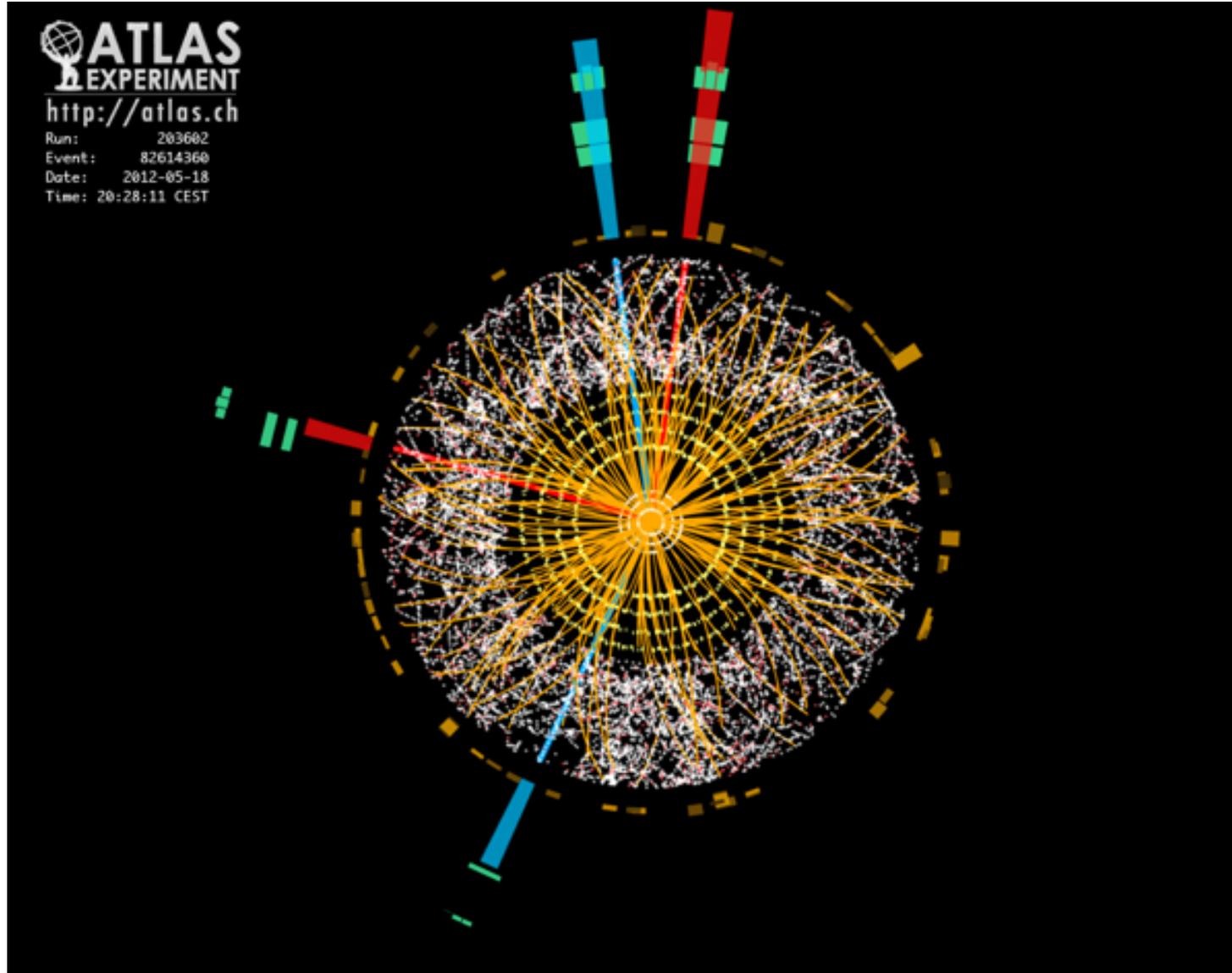
D712/mb-26/06/97



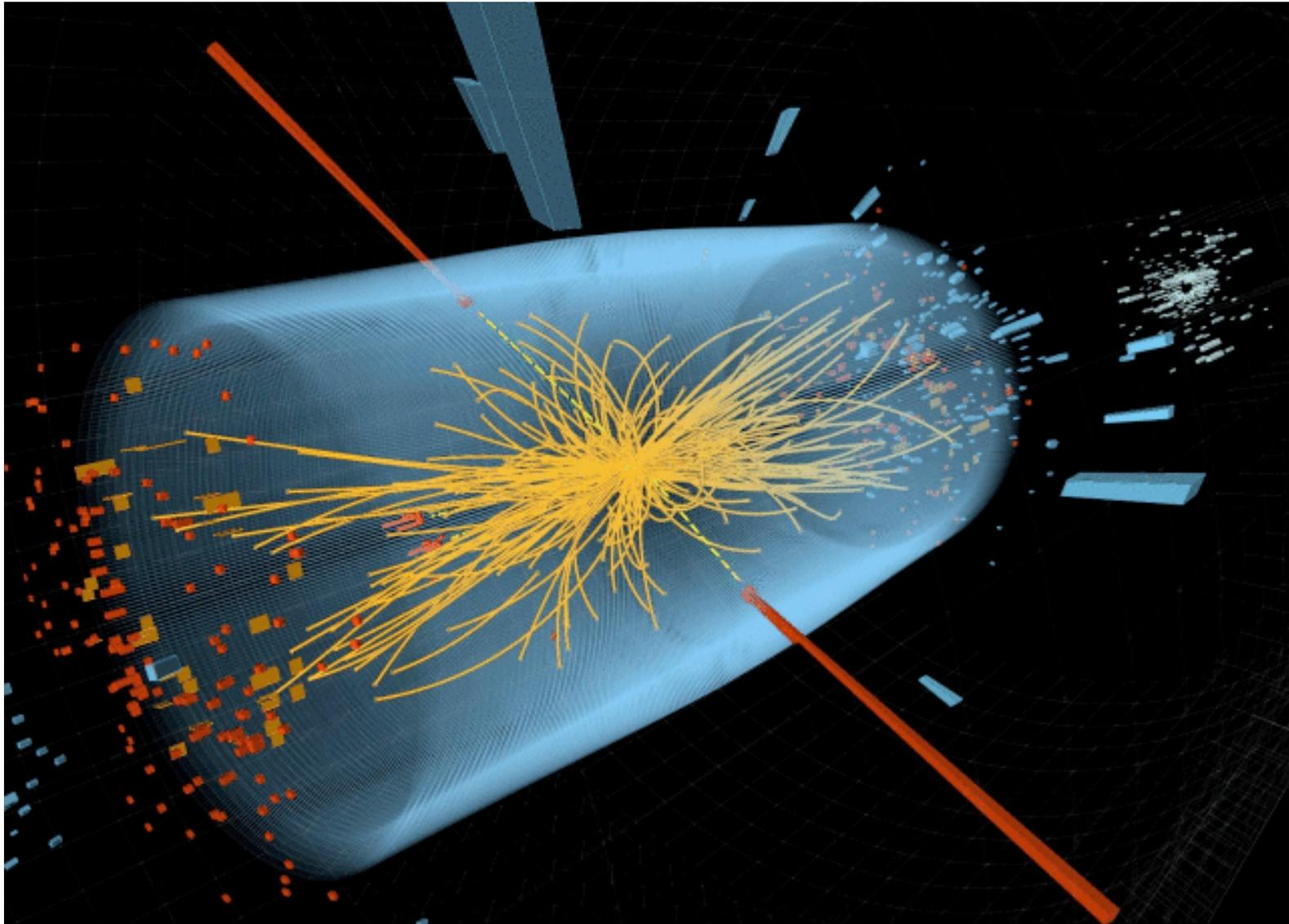
Le détecteur Atlas



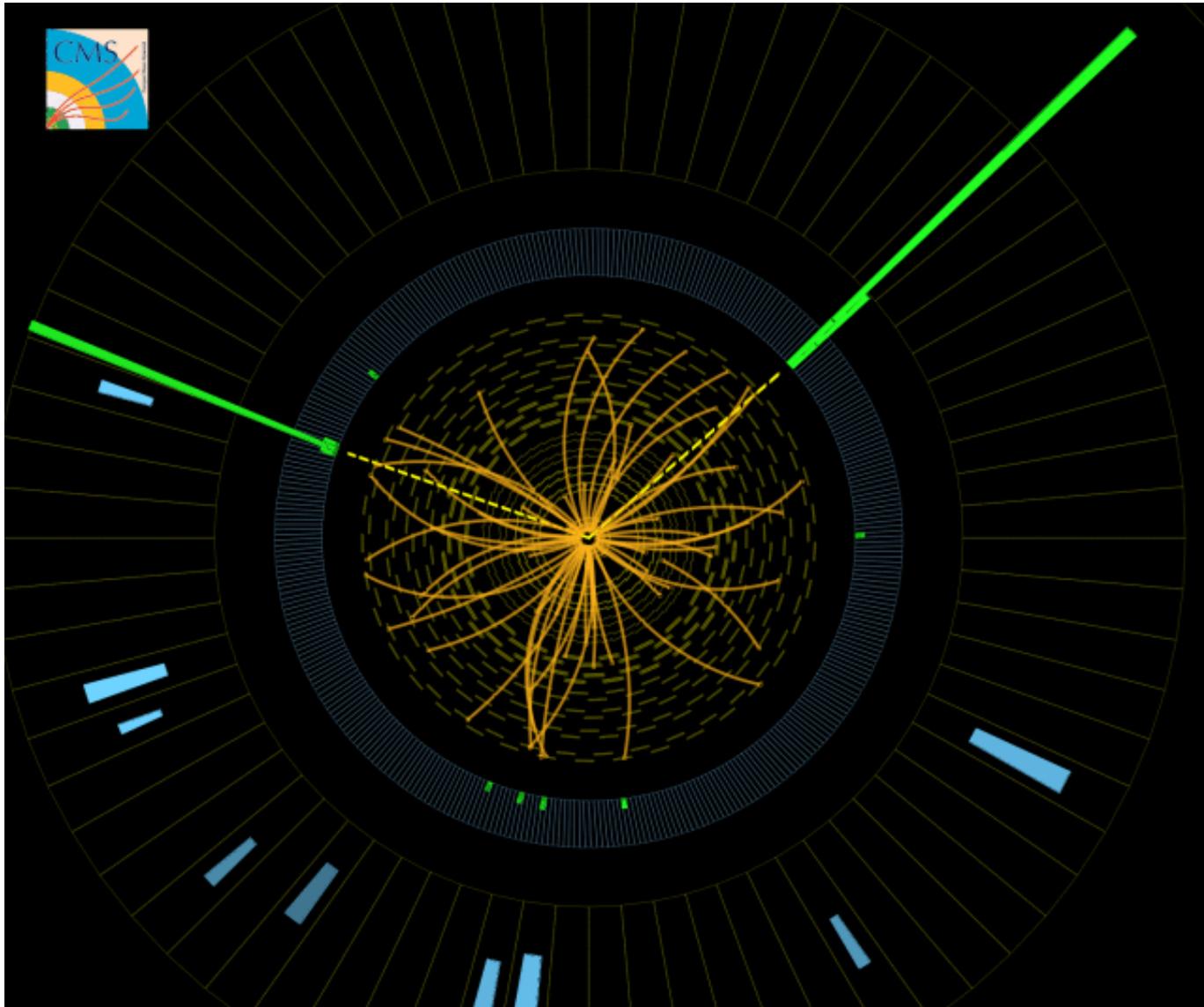
Le détecteur Atlas – Higgs Candidate

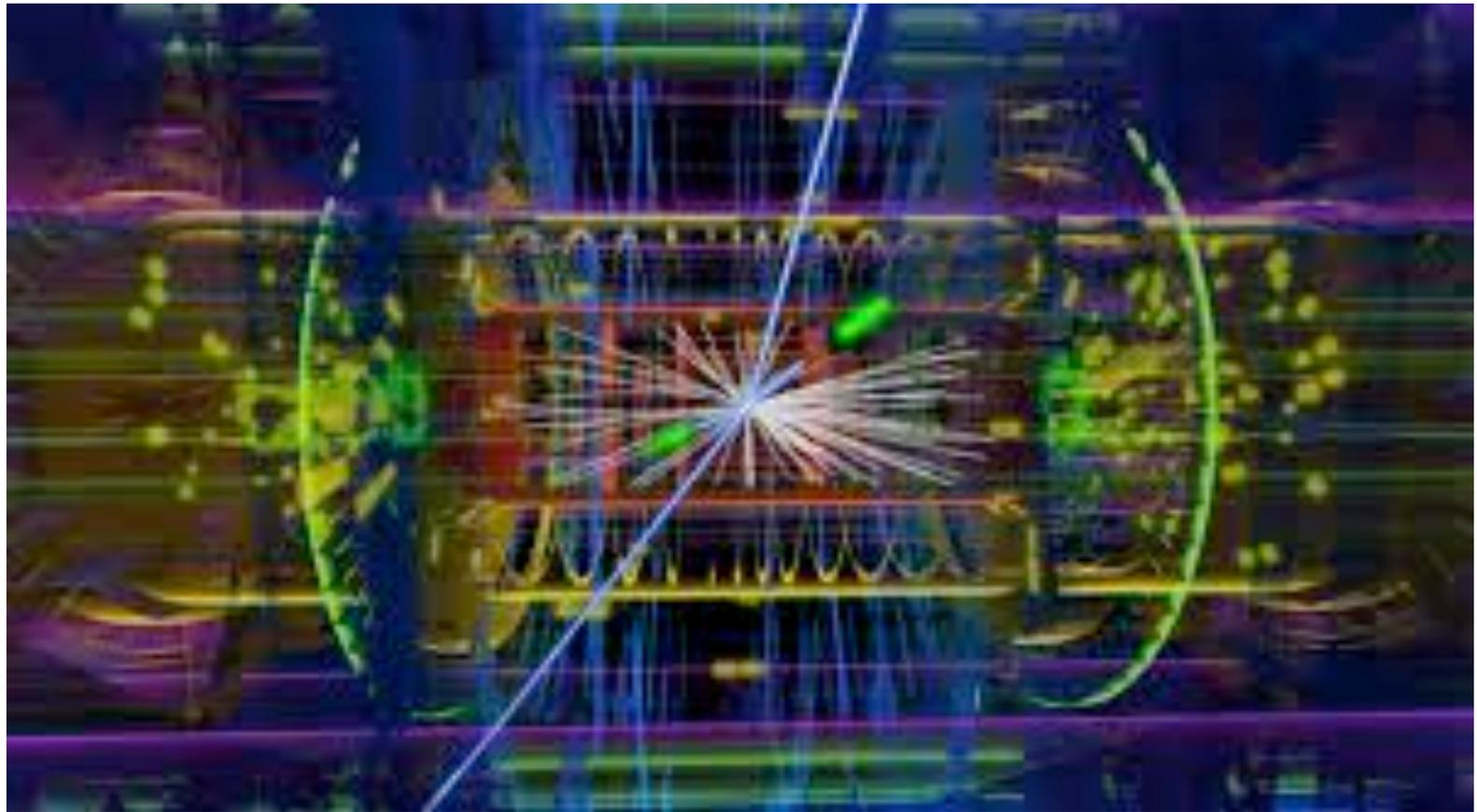


Le détecteur CMS – Higgs candidate

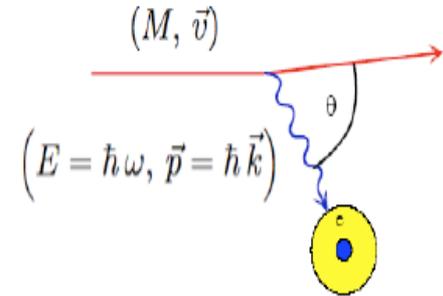


Le détecteur CMS – Higgs candidate





Intéraction particule-matière



▷ Particules « lourdes » 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 => **détection de charge**
- ▶ **Excitation de l'atome** ($\text{atom}^* \rightarrow \text{atom} + \gamma$) qui en se désexcitant va réémettre de la lumière => **détection de lumière**
- ▶ **Emission de Photon** pour les particules très relativistes (ex effet Tcherenkov, rayonnement de transition)
=> **détection de lumière**

Intéraction particule-matière

- ▷ Bethe - Bloch formula, énergie moyenne perdue par unité de longueur (dE) sur une épaisseur dx , par ionisation, pour les particules massives $m > m_\mu$

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

- ▷ dE/dx en $\text{MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ - dE/dx en MeV/cm diviser par ρ

$$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e c^2}$$

- ▷ Proportionnel à z^2 et Z/A

- ▷ dE/dx ne dépend que de β et est indépendant de la masse

- ▷ Prend en compte les transferts d'énergie, I est le potentiel d'excitation, $I = I_0 * Z$, $I_0 \approx 10 \text{ eV}$

$$I \leq dE \leq T^{\max}$$

Perte d'énergie par ionisation

- ▷ I) dE/dx décroît comme $\beta^{-3/5}$
- ▷ II) Minimum 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

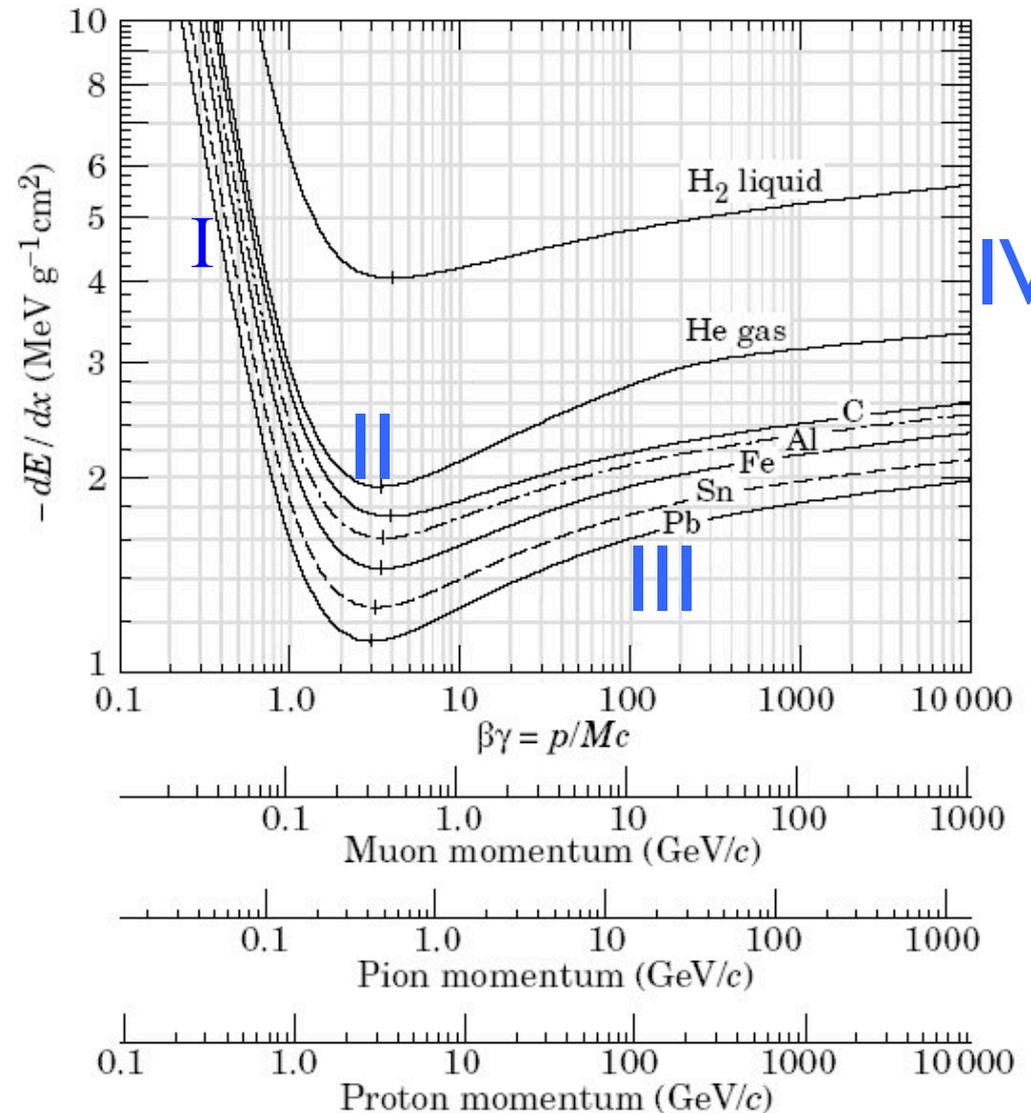


Illustration- Aleph- TPC

Gas: Ar/CH₄ 90/10

N_{samples} = 338, wire spacing 4 mm

dE/dx resolution: 4.5% for Bhabhas, 5% for m.i.p.'s

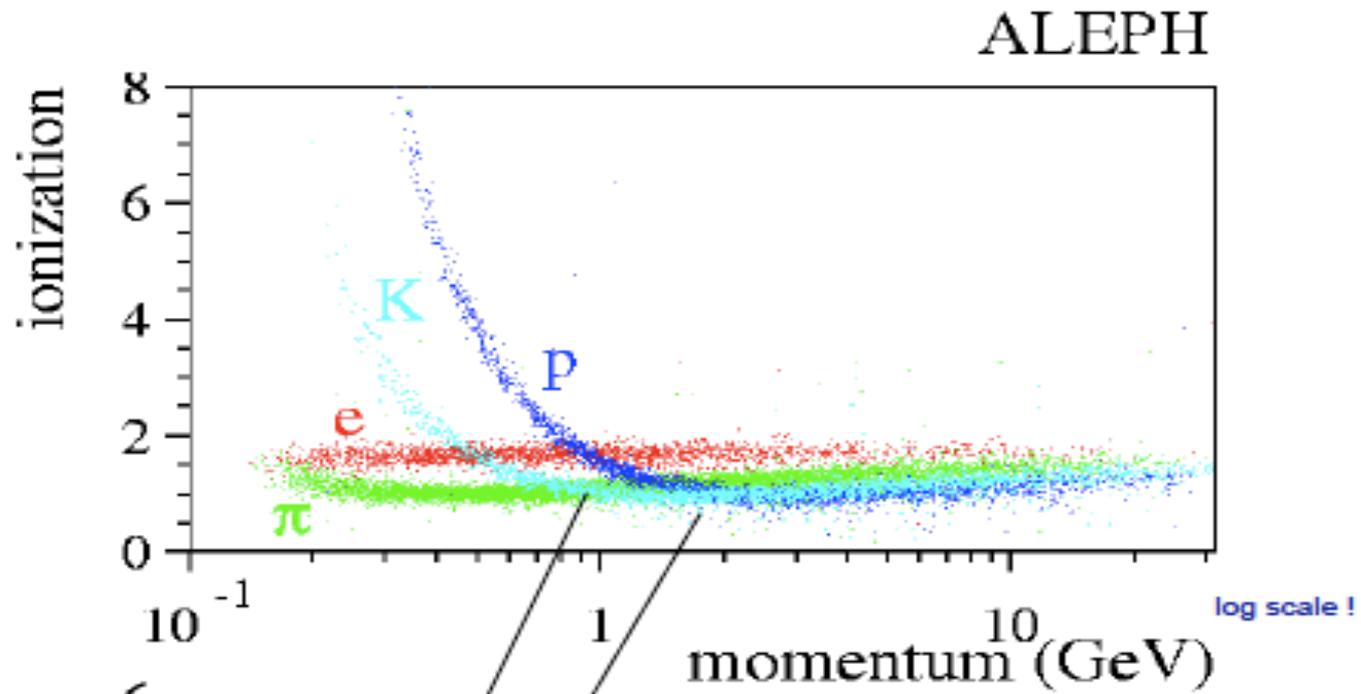
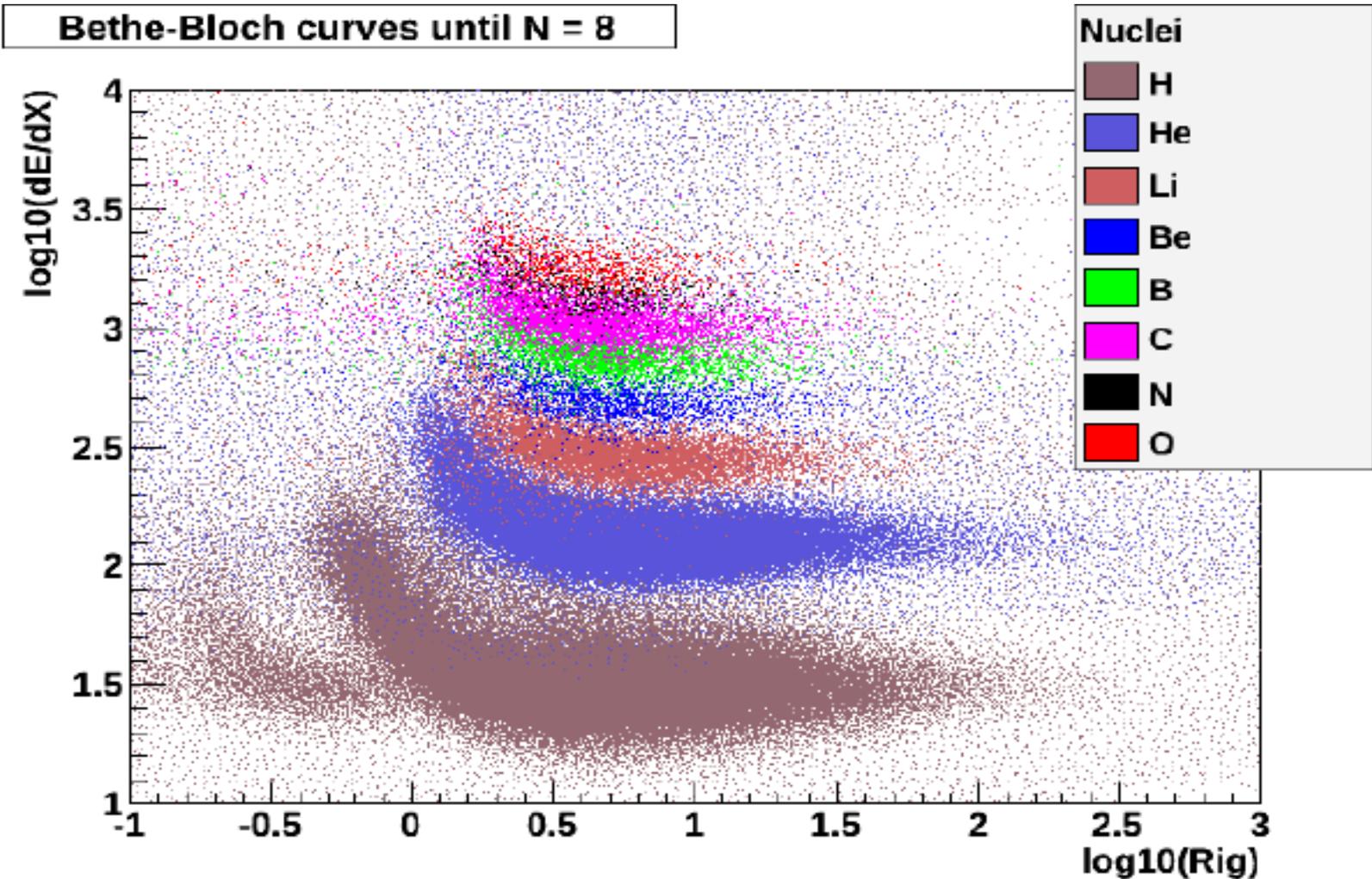
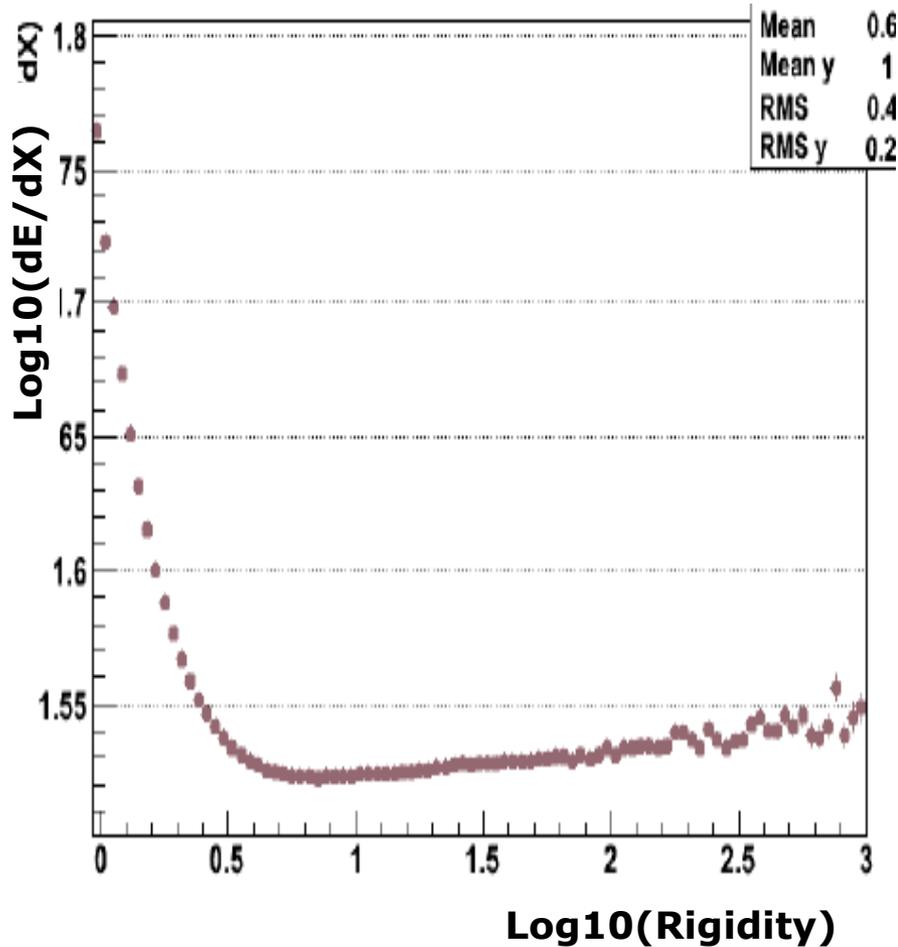


Illustration- AMS - Calorimetre

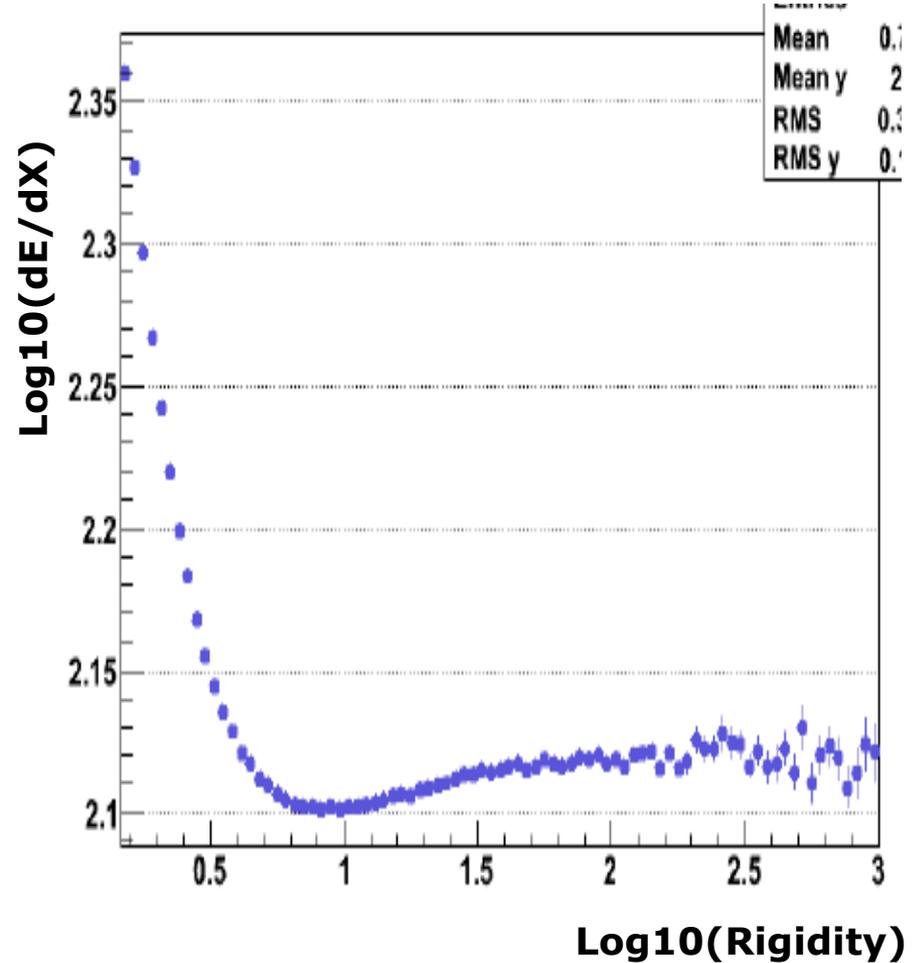


dE/dX measurements with ISS data

Hydrogen Nuclei

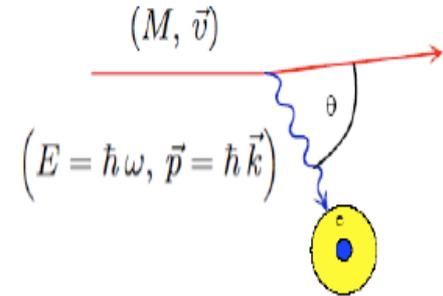


Helium Nuclei



As expected the

Intéraction particule-matière

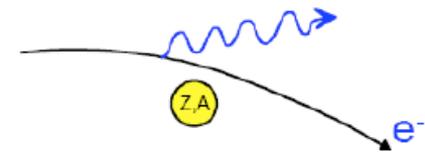


▷ Particules « légères » chargées (e^+, e^-)

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 => **détection de charge**

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



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

=> **détection de lumière**

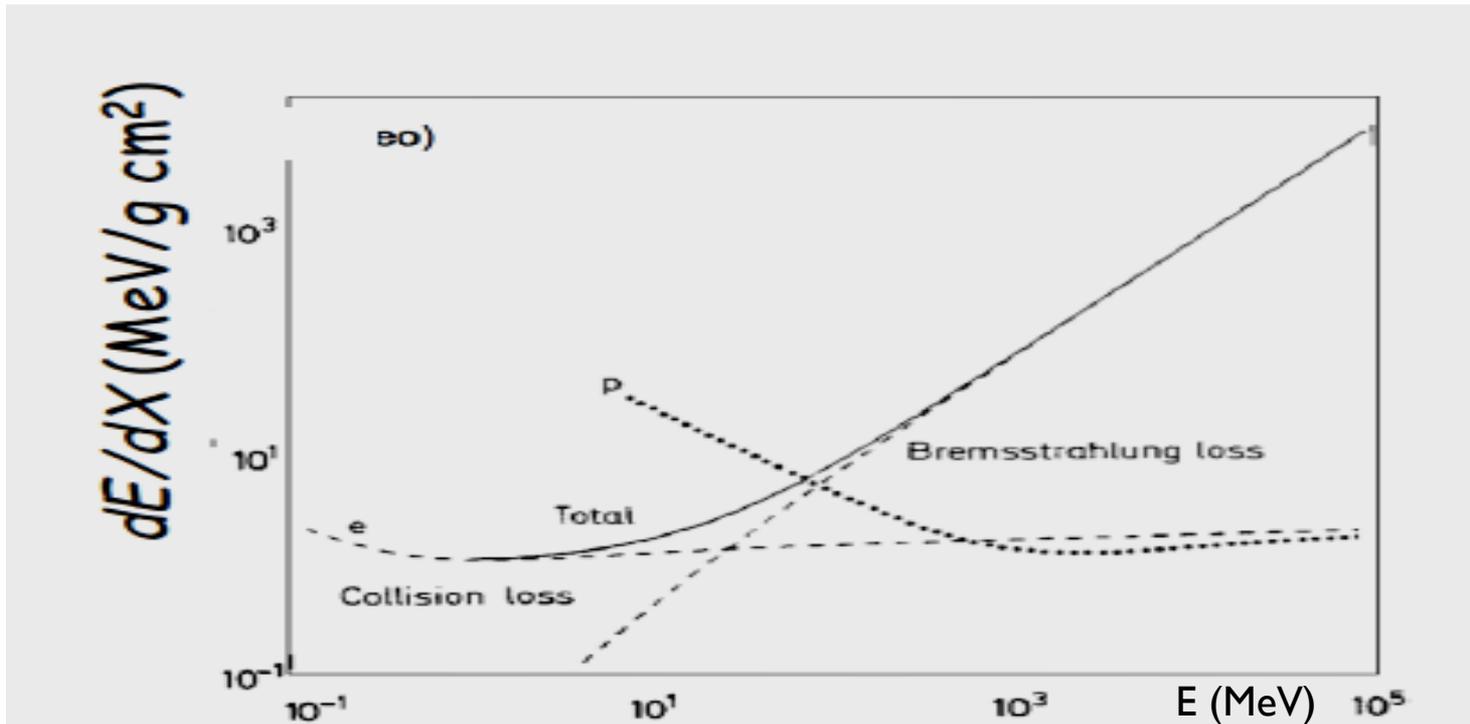
Intéraction particule-matière

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

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

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

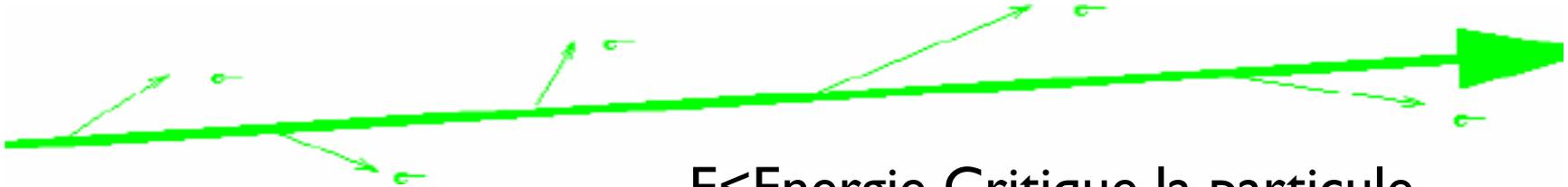
Proportional to E and 1/m² so relevant only for electrons or ultra-relativistic muons (> TeV)



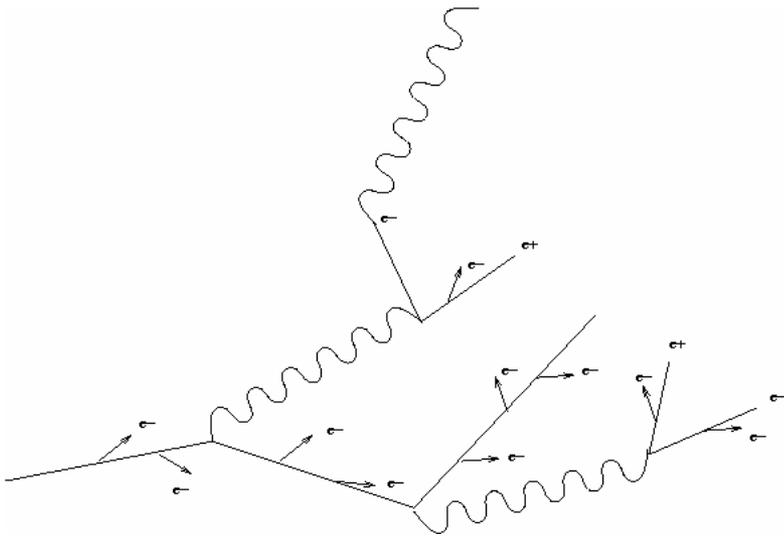
Longueur de radiation X_0 (g/cm²) distance au bout de laquelle l'énergie est diminuée d'un facteur e

Intéraction particule-matière

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



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



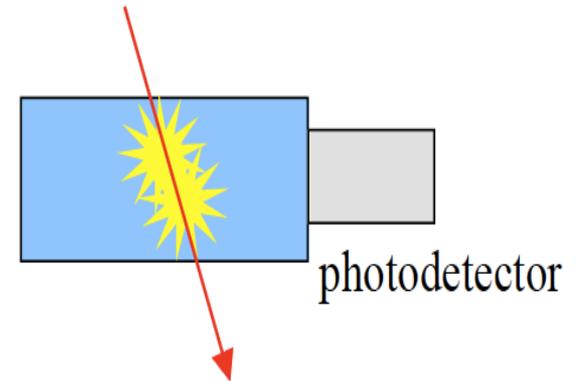
$E > \text{Energie Critique}$ la particule “génère” une gerbe de particule par rayonnement de freinage et perd son identité

E (MeV)

Scintillation

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

Scintillation

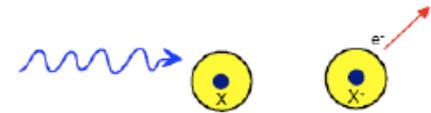
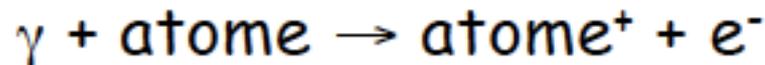


atome* -> atome + γ

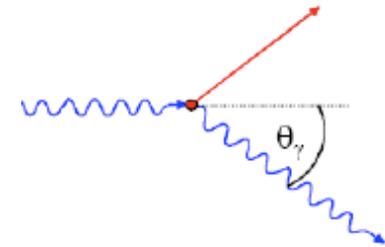
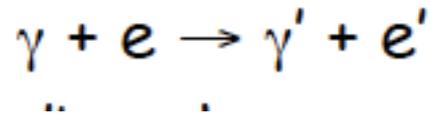
Intéraction photon (γ)-matière

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)

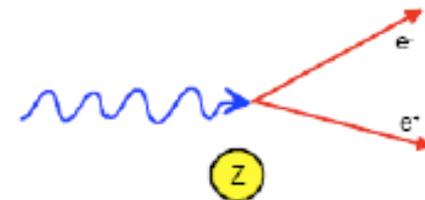
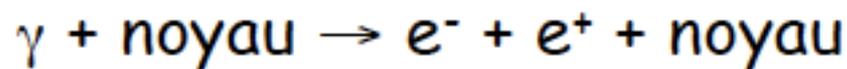


- Diffusion Compton (diffusion d'un photon sur un e^-)



- 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

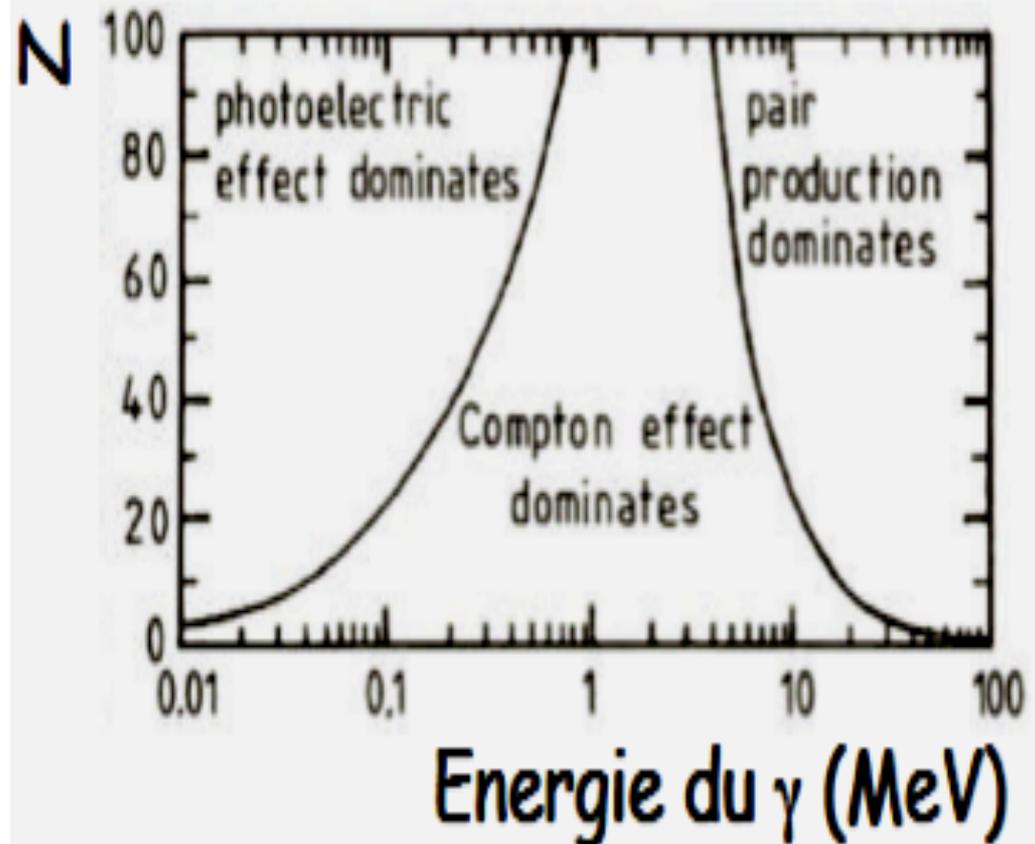
$$E_{\gamma} < 100 \text{ KeV}$$

- ▶ Diffusion Compton

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

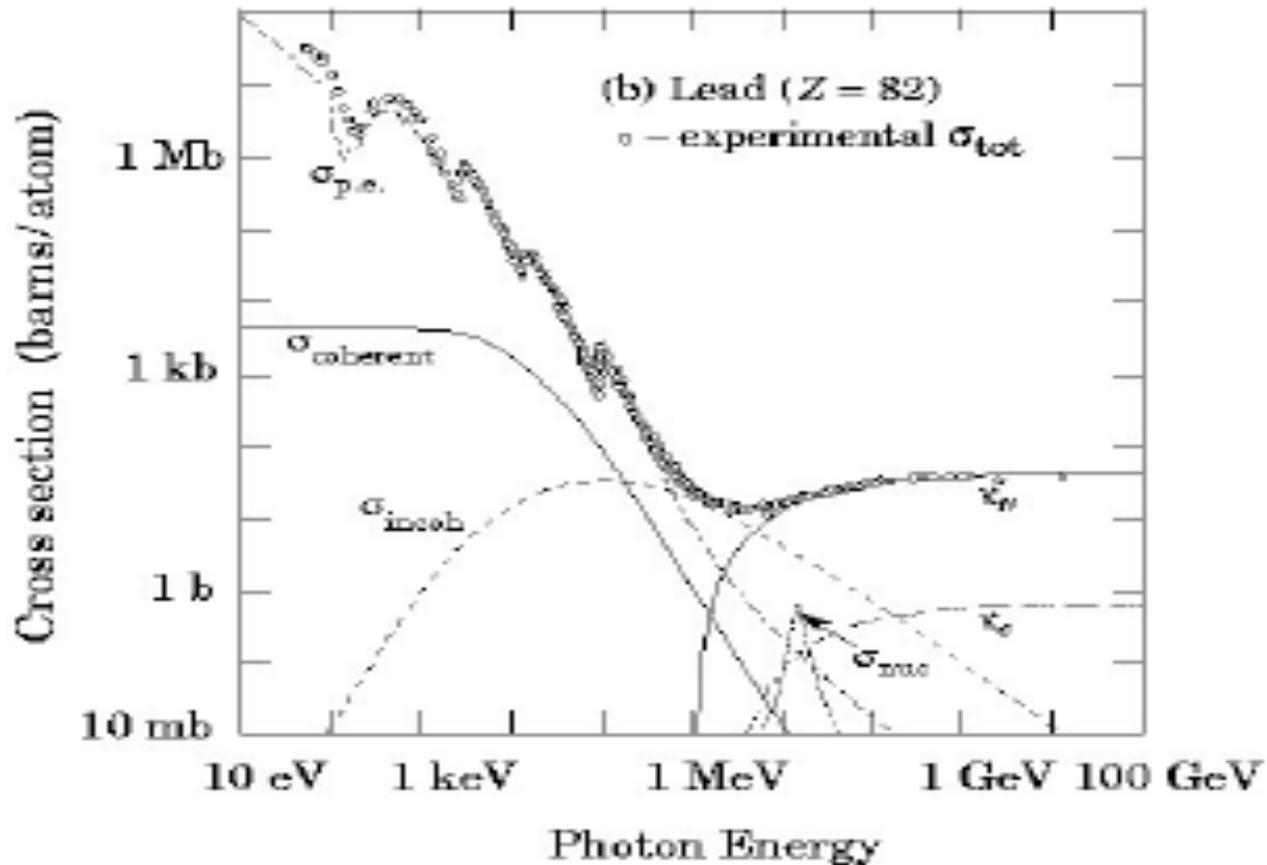
- ▶ Création de paires

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



Intéraction photon (γ)-matière

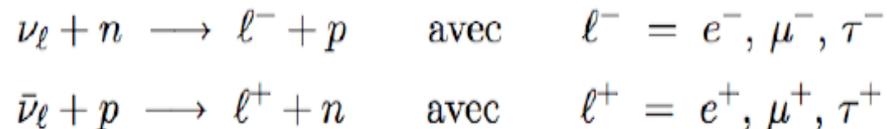
Probabilité de conversion d'un photon dans une longueur de radiation (X_0) est $e^{-7/9}$



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/cm²)
- ▷ **Neutrinos** : interaction faible, généralement **énergie manquante**

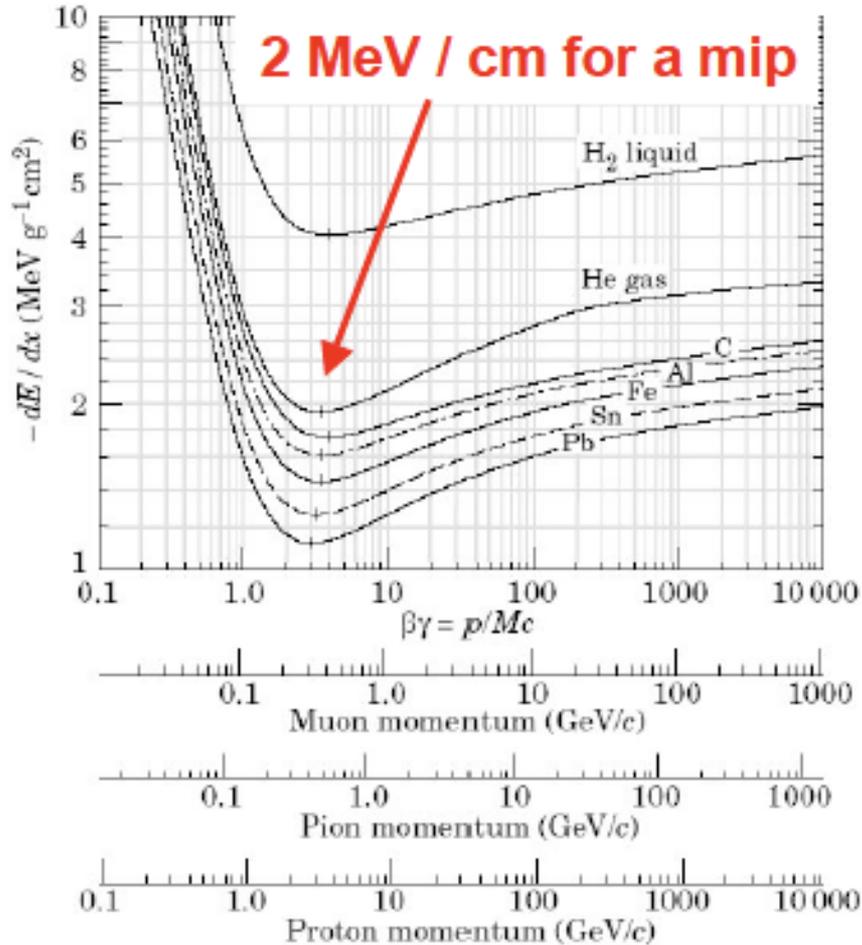
Pour les détecter, il faut les faire interagir :



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

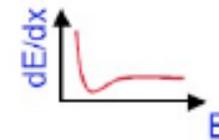
Résumé des interactions avec la matière



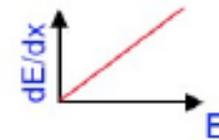
Radiation length X_0

e^+ / e^-

- Ionisation



- Bremsstrahlung



γ

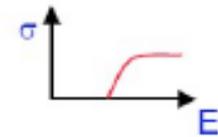
- Photoelectric effect



- Compton effect



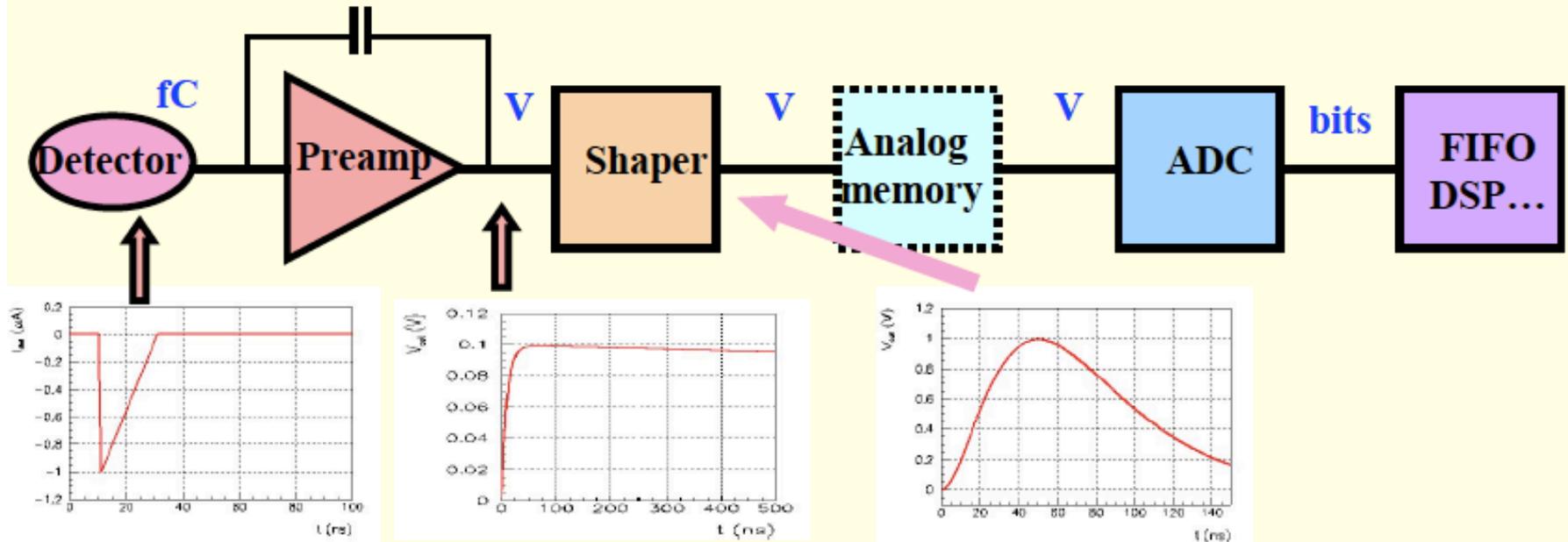
- Pair production



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

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**

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

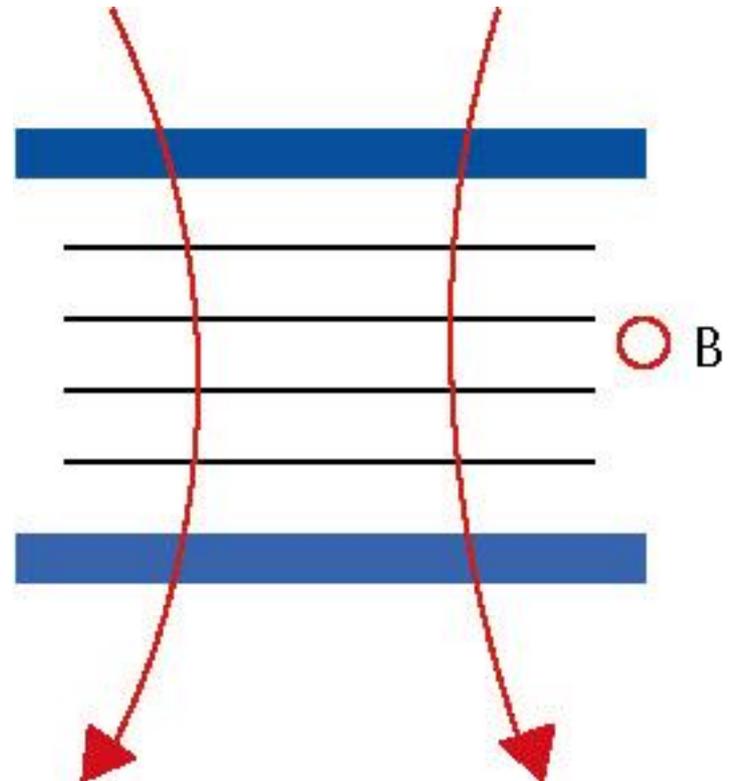
- ▶ Mesure de temps

▷ Identification des particules

- ▶ Noyaux (Z, M)
- ▶ Particule électromagnétique
- ▶ Séparation e/p



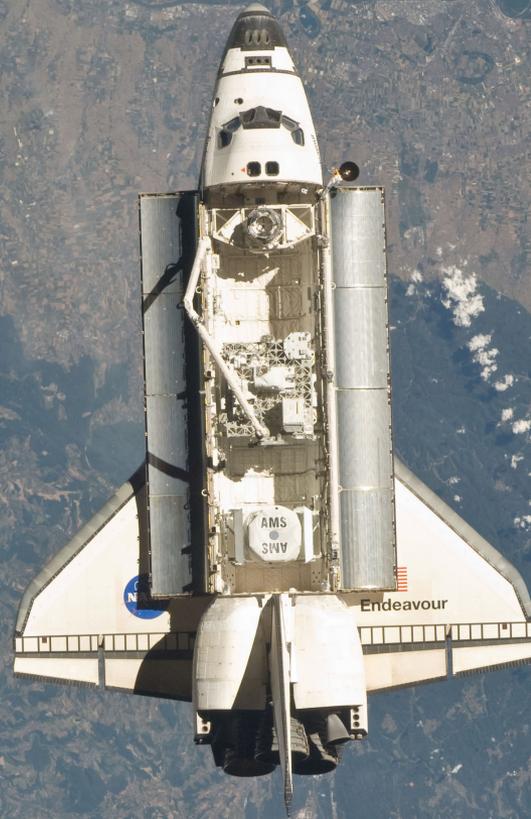
Un détecteur de physique des particules dans l'espace



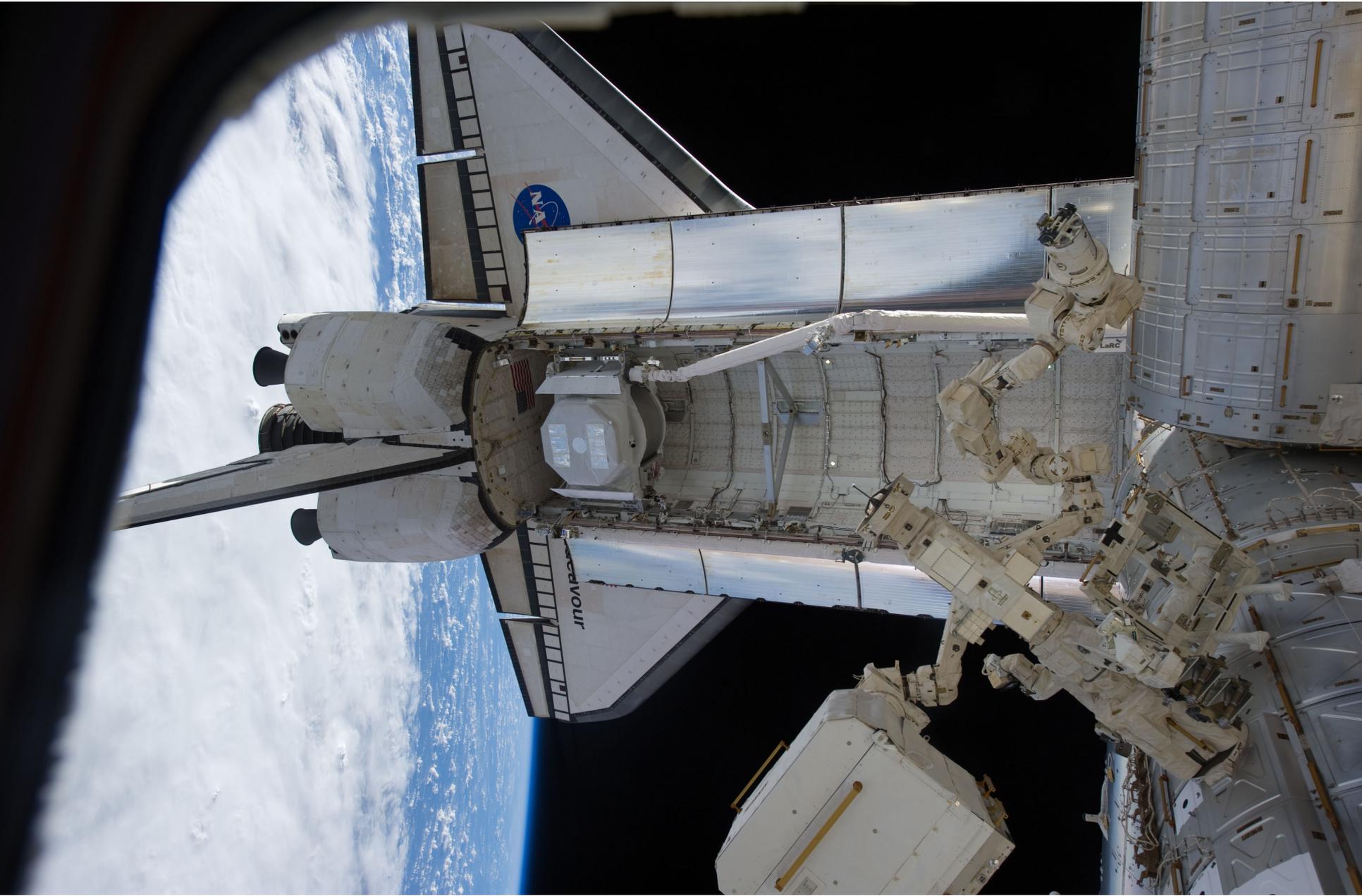
16th of May Launch + 8 s – KSC Cape Canaveral



16th of May Launch +
1.5 days



Launch + 3 days AMS docking – May 19th

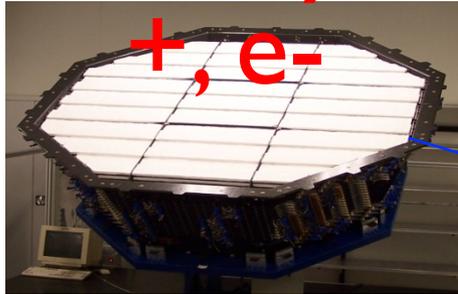


AMS Activation – May 19th 5:15



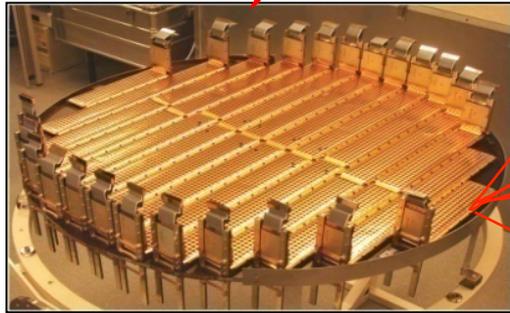
AMSTRAD τ precision, multipurpose spectrometer

Identify e^+ , e^-



Silicon Tracker

Z, P

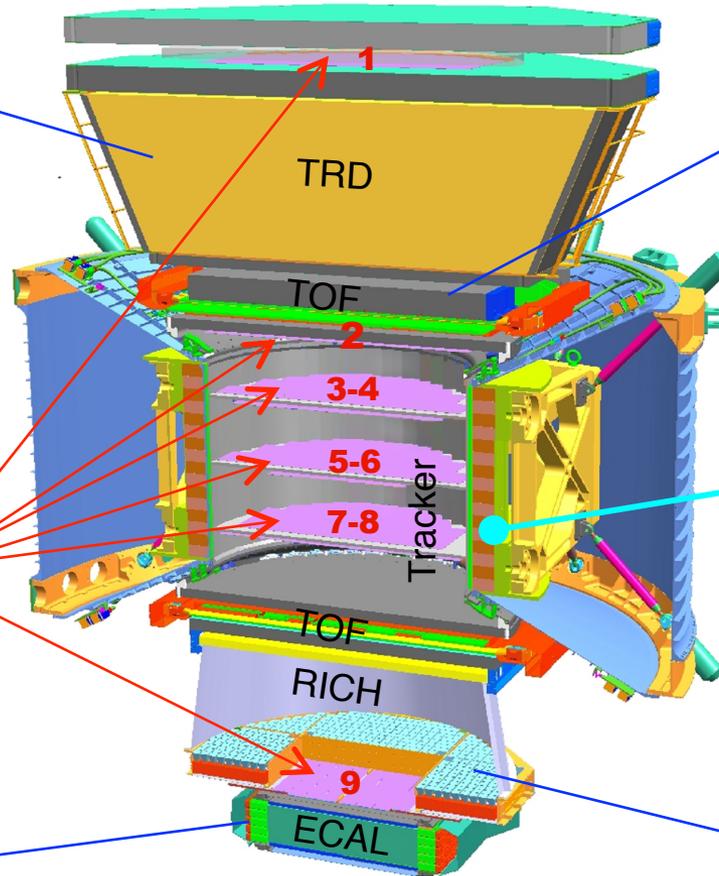


ECAL

E of e^+ , e^- , γ



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



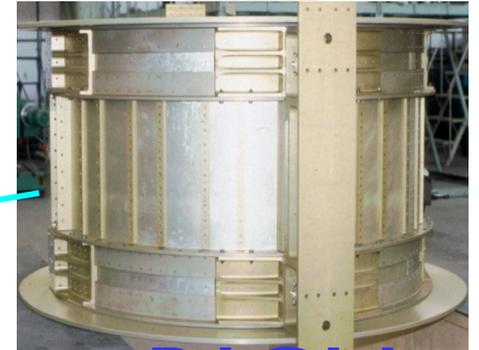
TOF

Z, E



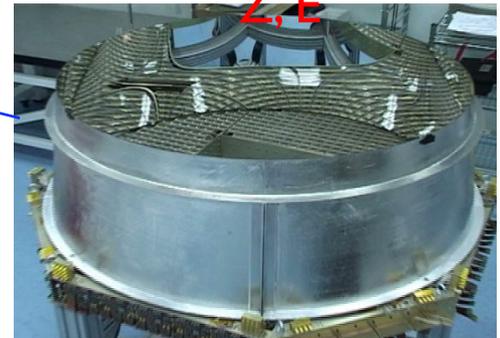
Magnet

$\pm Z$



RICH

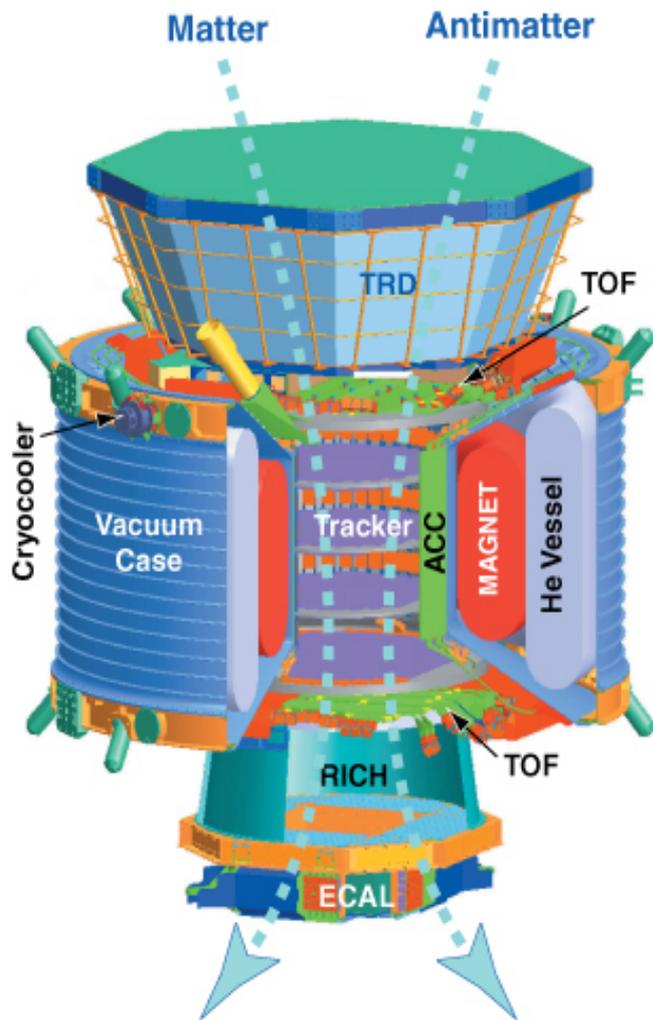
Z, E



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

AMS2: Alpha Magnetic Spectrometer

AMS: A TeV Magnetic Spectrometer in Space (3m x 3m x 3m, 7t)



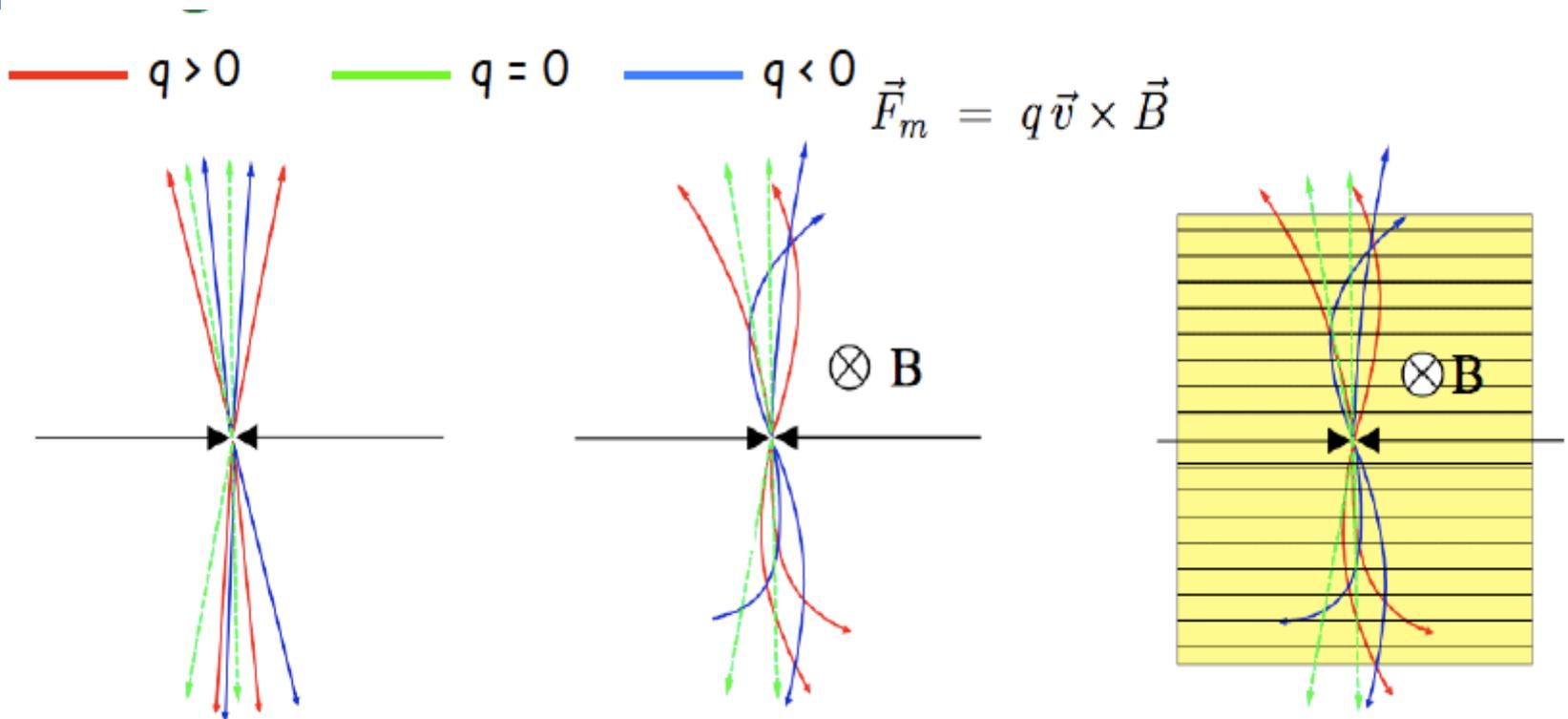
300,000 channels of electronics $\Delta t = 100 \text{ ps}$, $\Delta x = 10 \mu$

0.3 TeV	e^-	e^+	P	$\bar{\text{He}}$	γ
TRD					
TOF					
Tracker					
RICH					
Calorimeter					

Contraintes de l'espace

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

Pourquoi reconstruire les particules chargées ?



Sans champ B

Avec champ B

Avec champ B et
un détecteur

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

Pourquoi reconstruire les particules chargées ?

- 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** ($\omega_B = qB/m$)

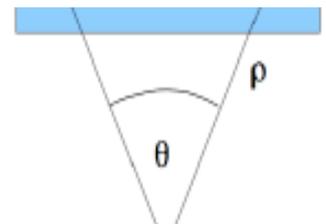
- Pour une particule relativiste :

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

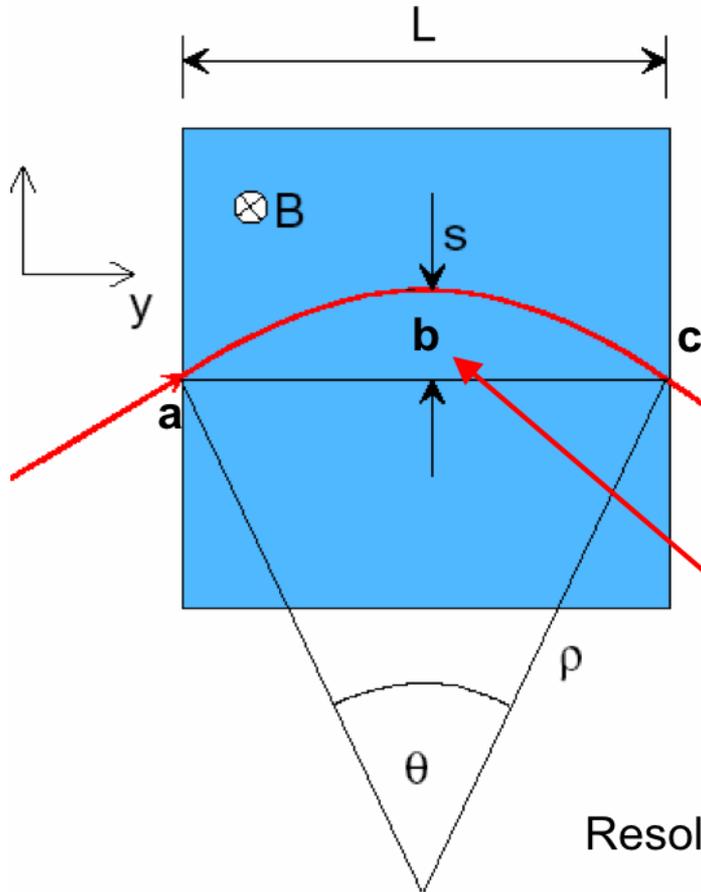
- La particule tourne autour de B à la fréquence ($\omega_B = qB/\gamma m$)

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

- Le sens de la courbure donne la charge



Pourquoi reconstruire les particules chargées ?



$$p_T = qB\rho$$

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

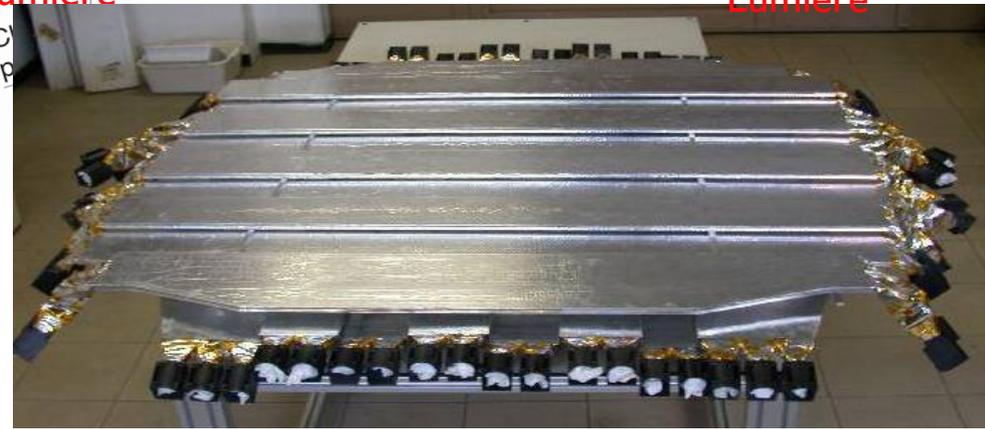
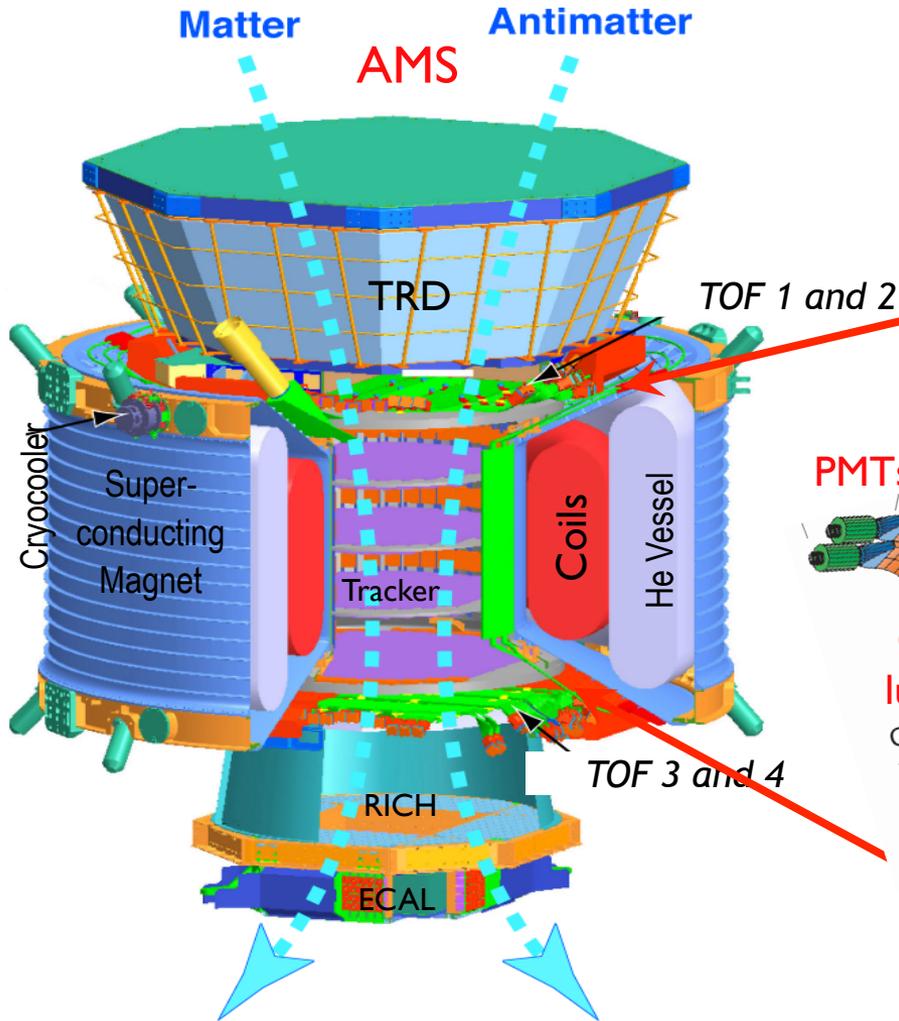
$$\frac{L}{2\rho} = \sin \theta/2 \approx \theta/2 \rightarrow \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

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

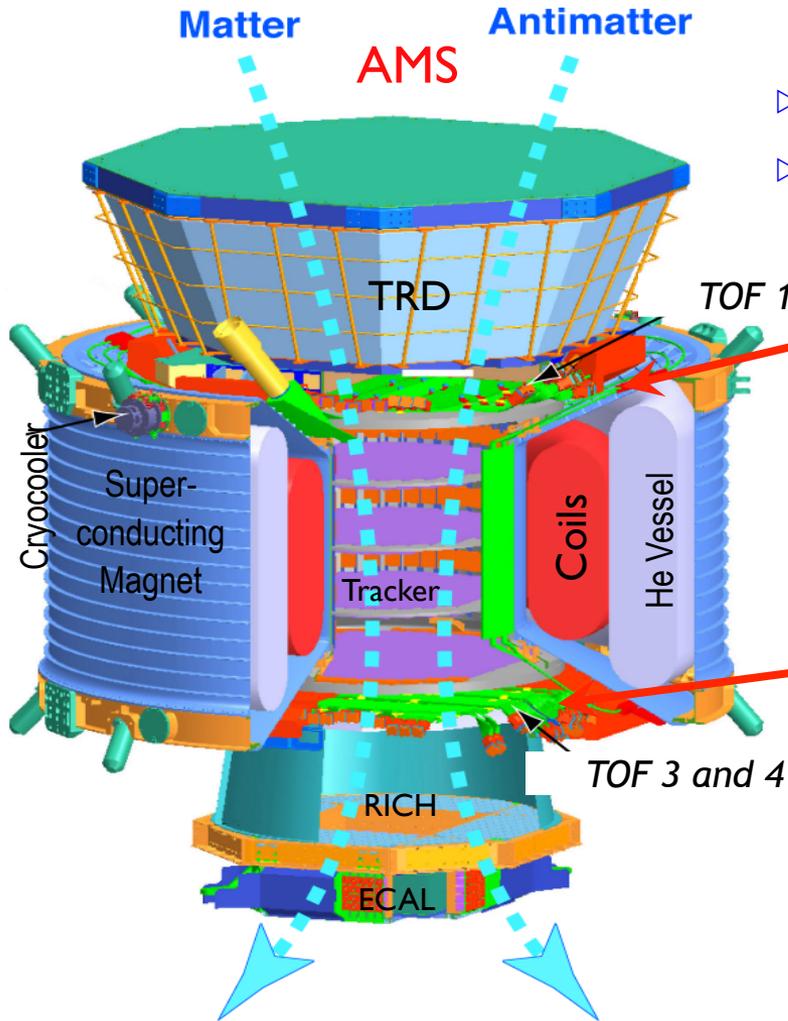
Resolution of momentum is given by resolution on sagitta

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

Temps de vol (scintillation et ionisation)



Temps de Vol



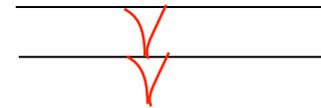
▷ Mesure de la vitesse $v = \text{distance} / \Delta t$

$$\Delta\beta/\beta \approx 3\%$$

▷ Mesure de la charge (Z^2)

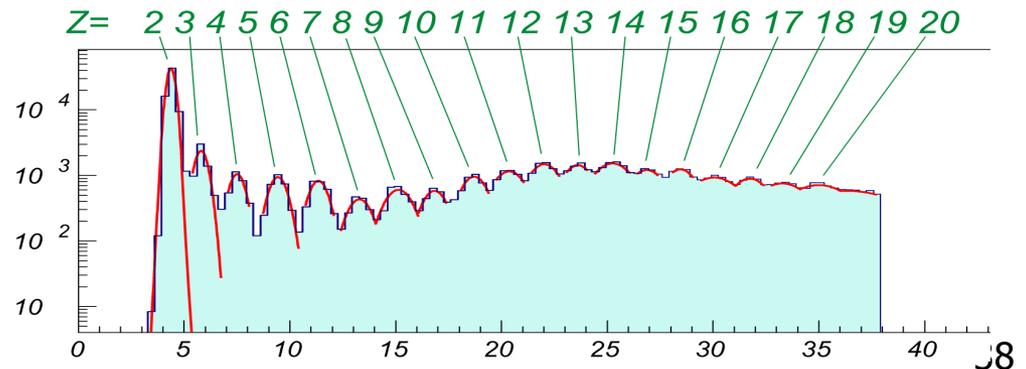
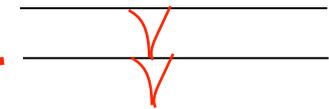
▷ Trigger- déclenchement

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



$\Delta t > 0$

Précision de 100 ps



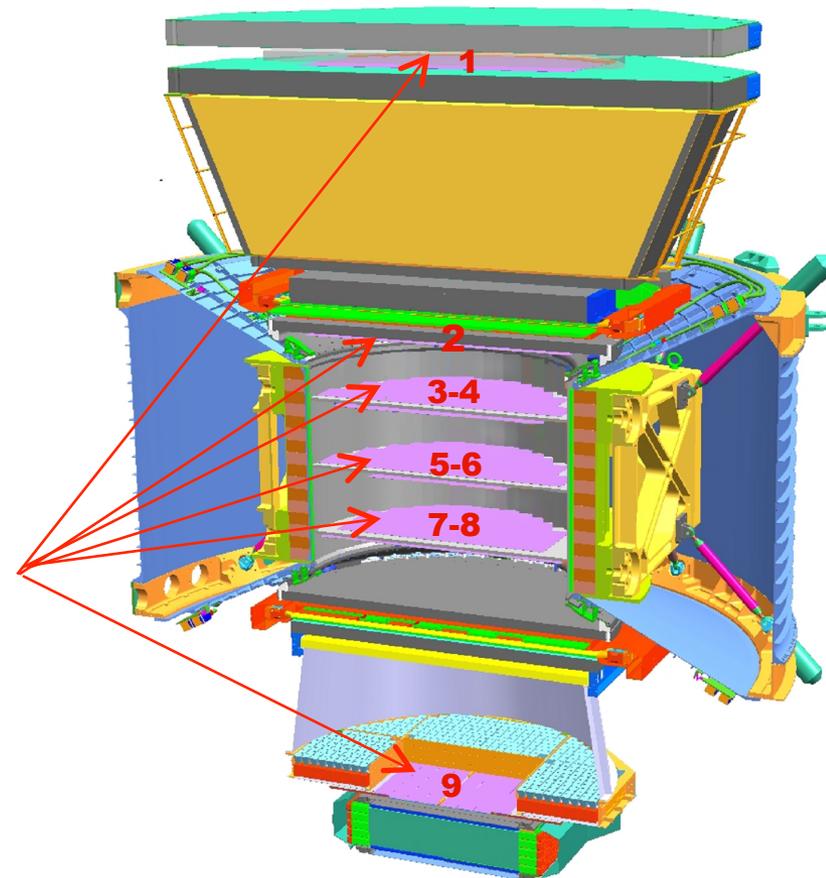
AMS-02

(10 Yrs to 18 yrs)
with Permanent Magnet
9 layers of Silicon

Mesure:

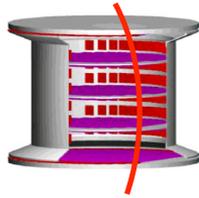
- ▷ Reconstruction de la trace en 9 points
- ▷ Rigidité P/Z jusqu'à qq TV
- ▷ $dE/dx \propto Z^2$
- ▷ Direction and energie des photons convertis

Détecteur de silicium



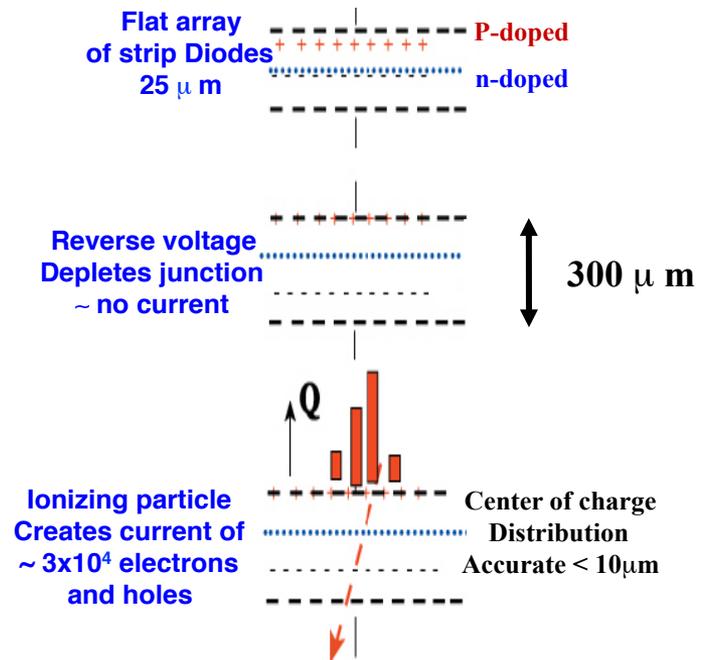
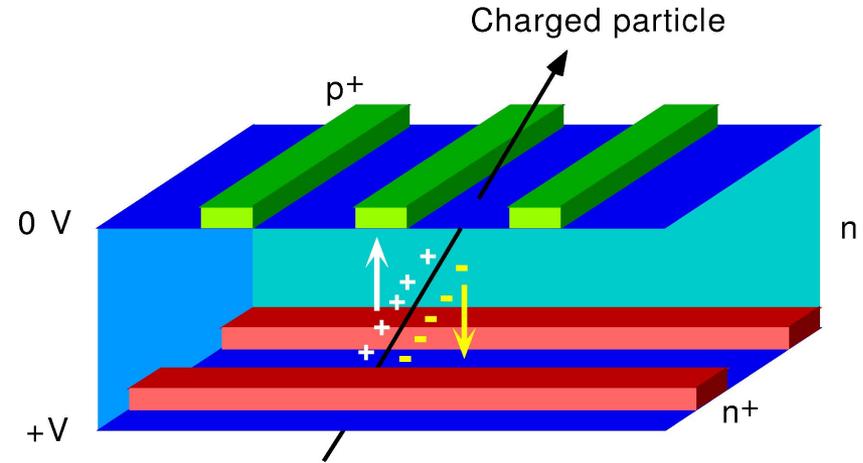
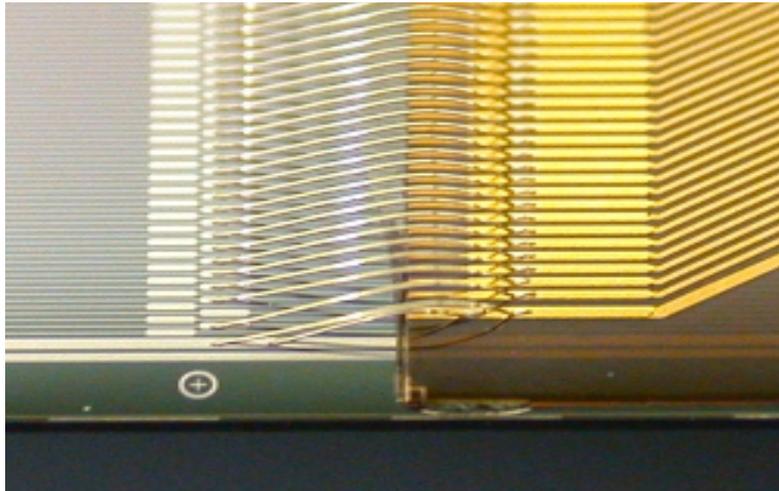
Layers 1 and 9 are far away from the magnet.

Trajectographe (ionisation)

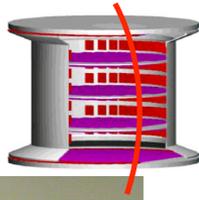


▷ Principe

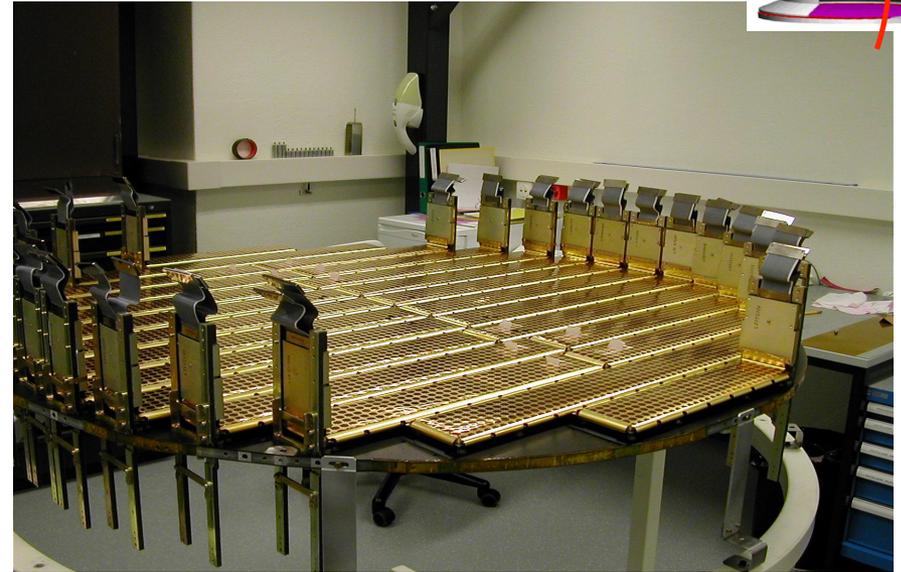
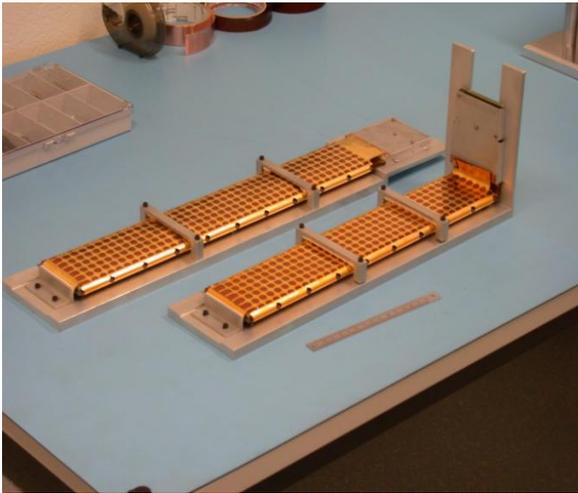
- ▶ 2500 senseurs microstrip en silicium double face,
- ▶ Mesure des deux coordonnées avec un seul detecteur et en minimisant la matière en amont du calorimètre



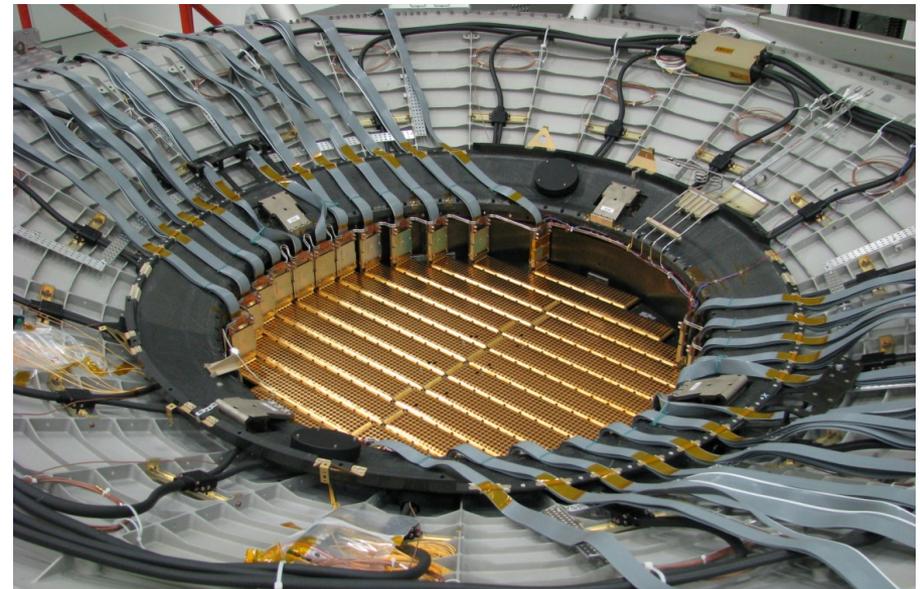
Trajectographe



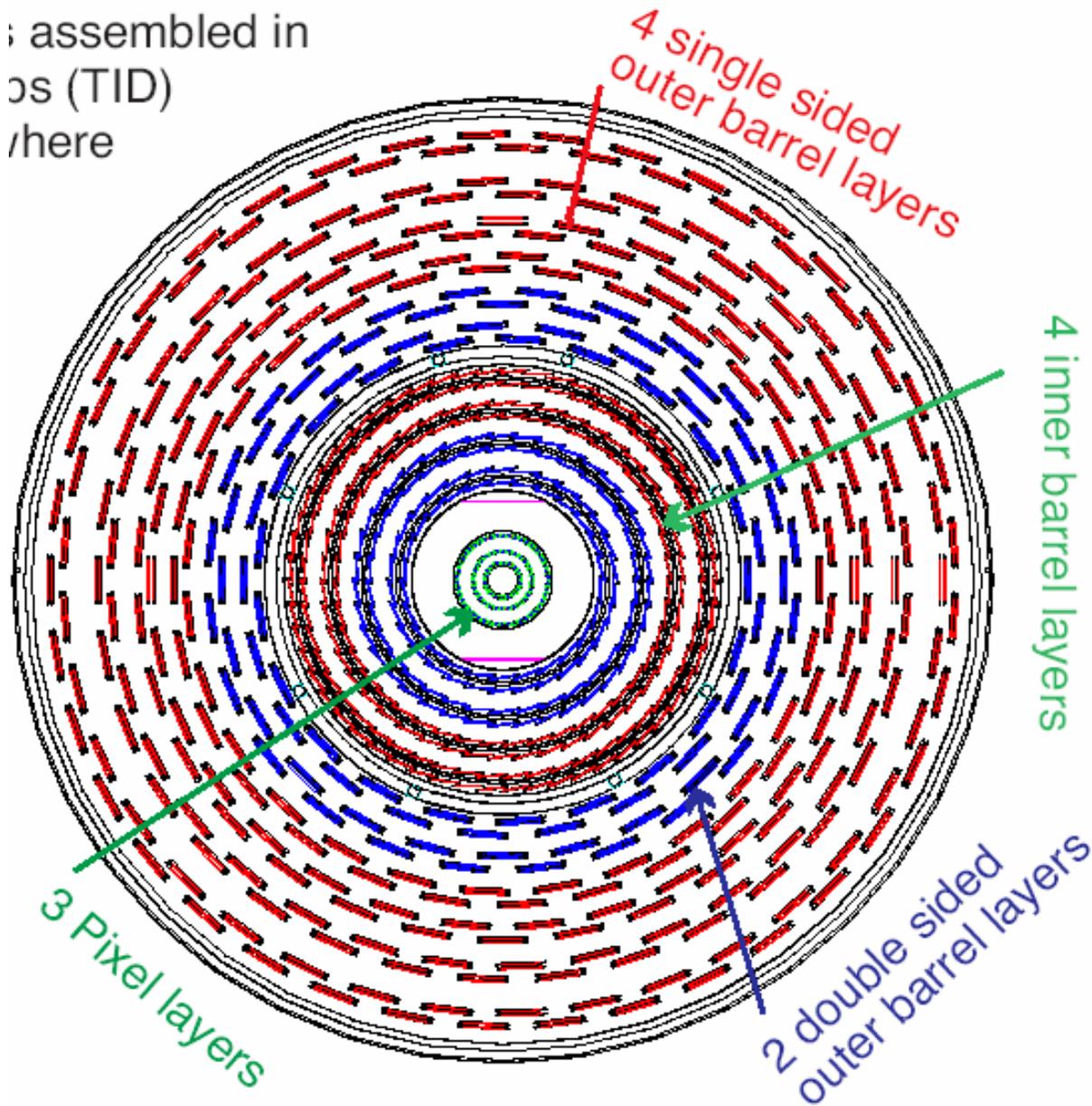
▷ 2 échelles



▷ 9 plans, 200 000 canaux

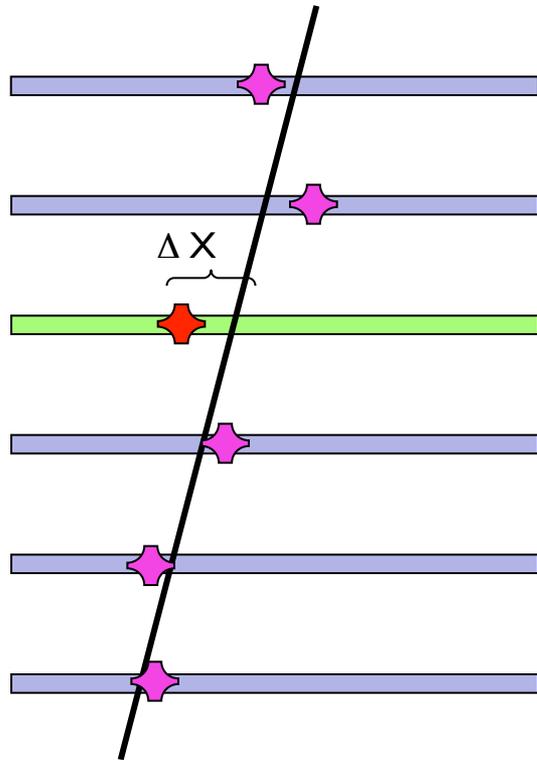
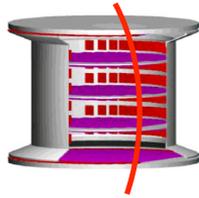


assembled in
os (TID)
/here



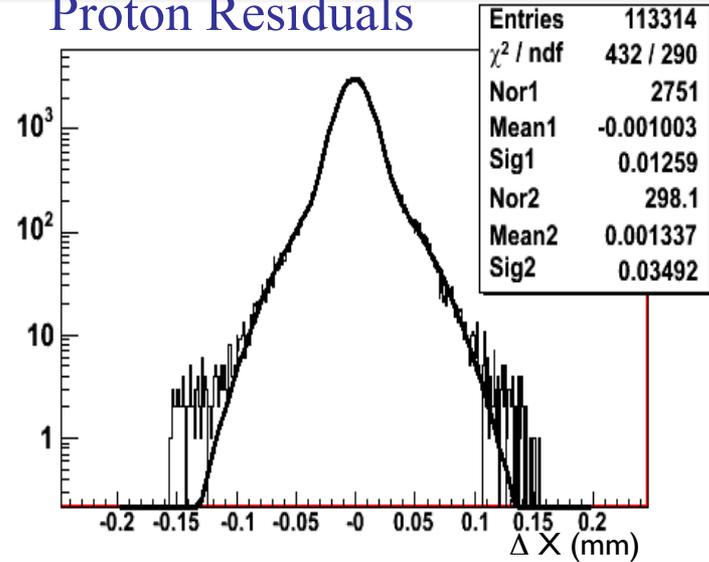
CMS,
beaucoup
plus
gros !

Trajectometre – reconstruction



The distribution of ΔX is fitted with a double gaussian
Resolution = 10 μm

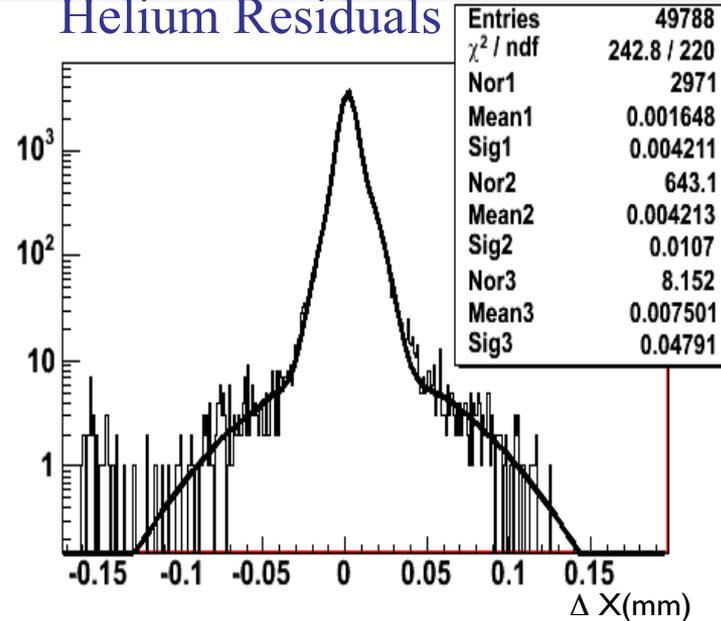
Proton Residuals



70% of events

30% of events

Helium Residuals



63% of events

34% of events

Mesure de la charge

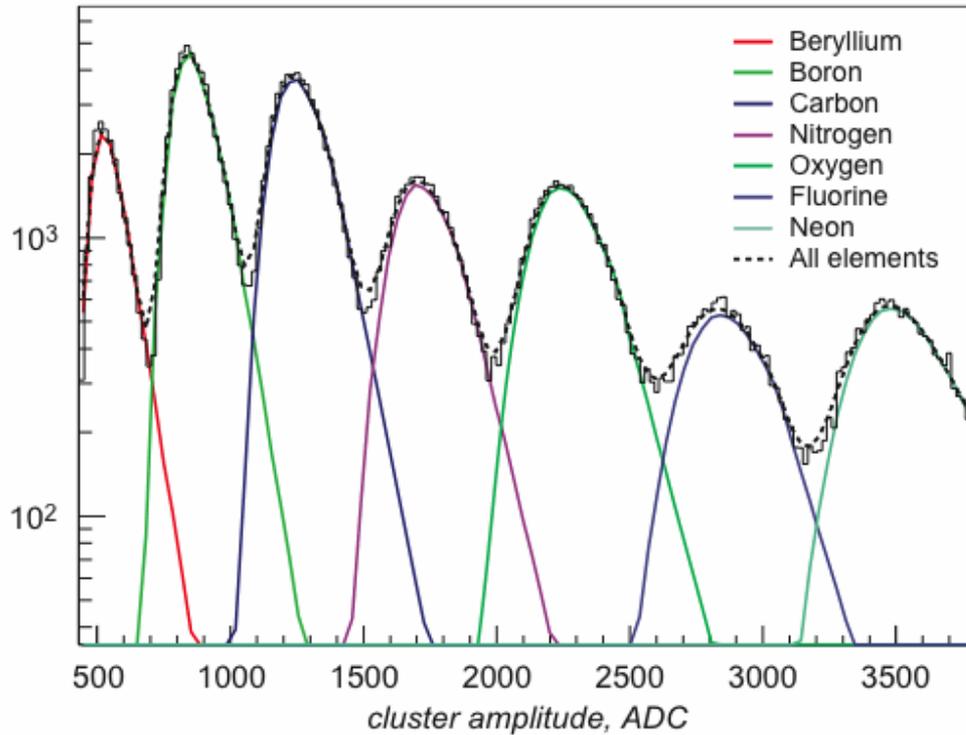
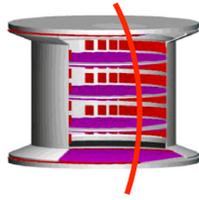
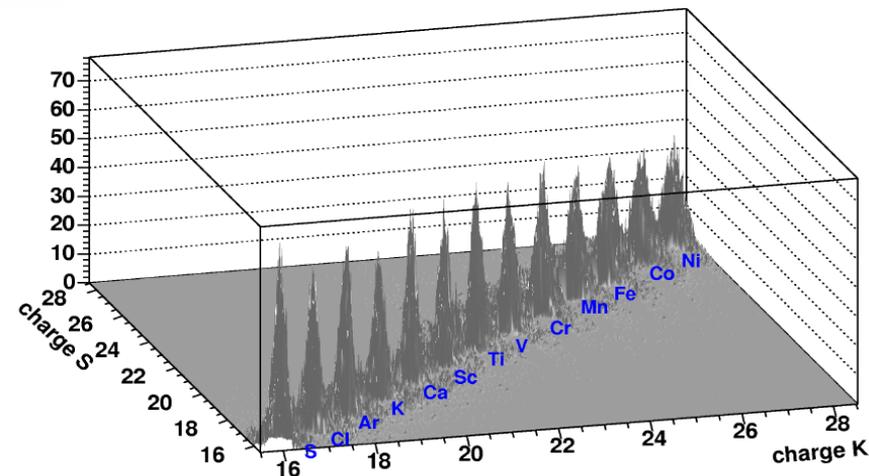
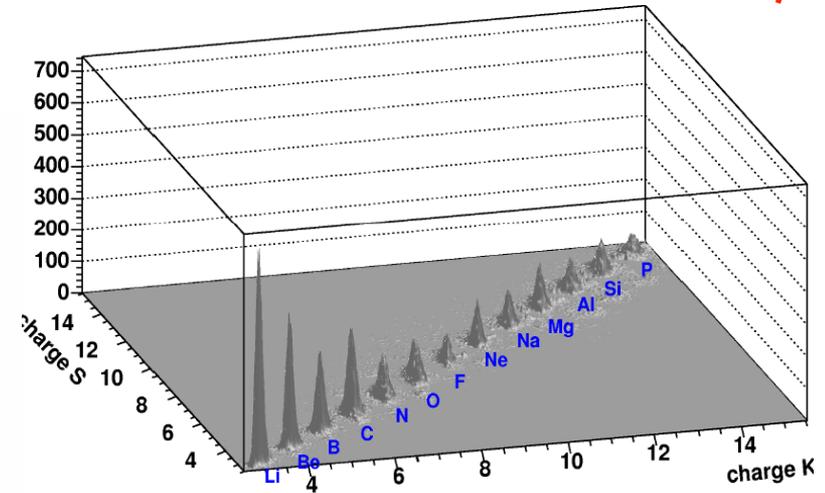


Fig. 4. Signals of charges up to Ne in the AMS tracker.

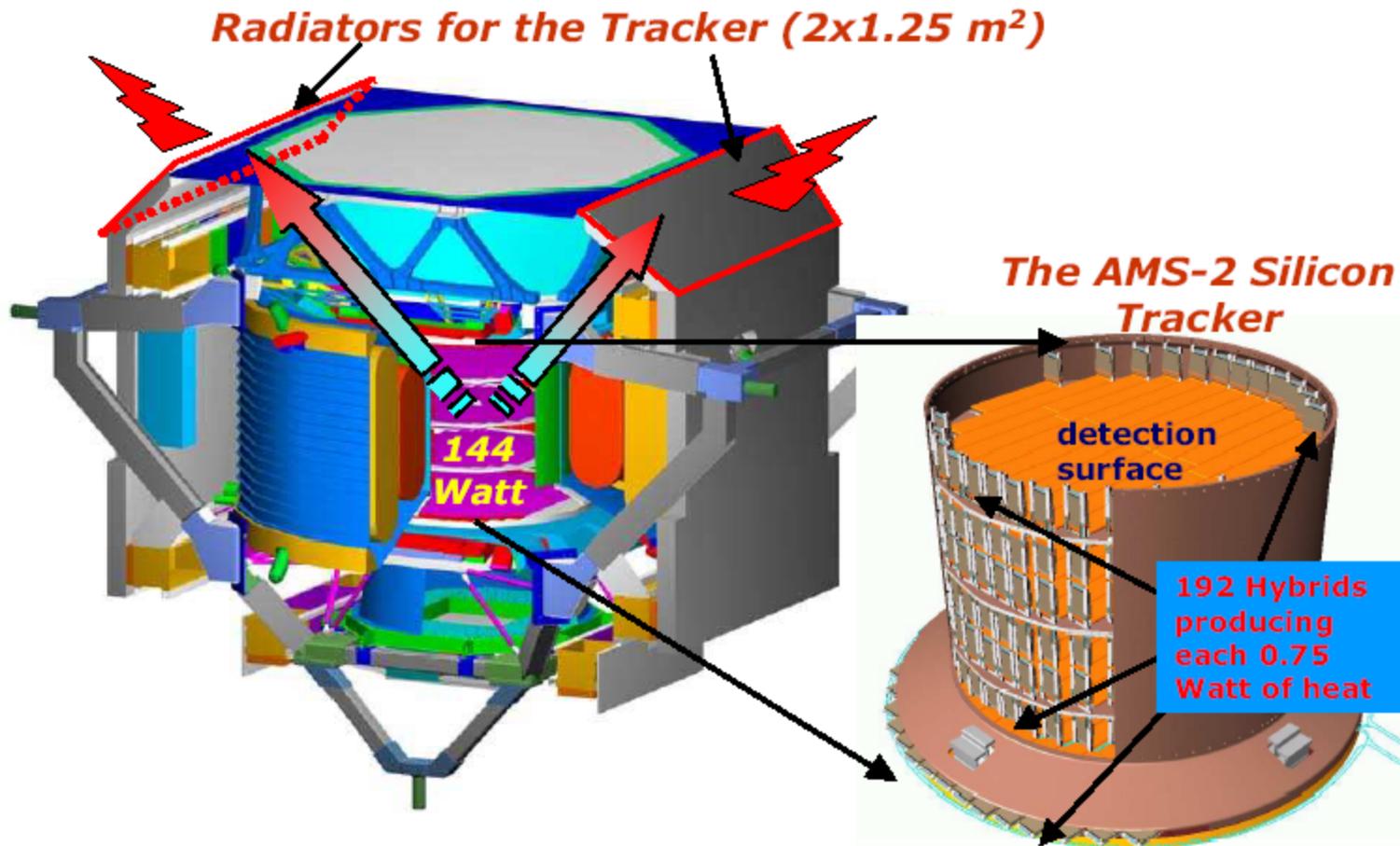


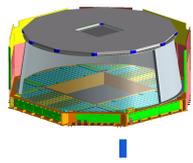
Tracker Thermal Control System

Two-phase pumped CO₂ loops

The most advanced cooling technology for space

Key technology for robotic or manned space exploration





Imagerie Cherenkov (anneau)

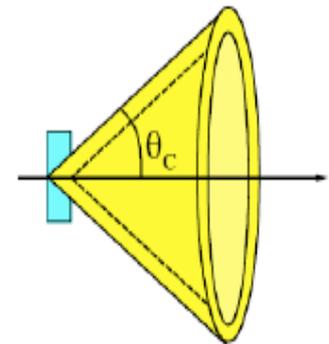
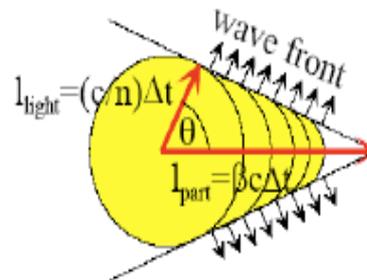
- Un **rayonnement Cherenkov** est émis quand une particule chargée traverse un milieu diélectrique avec une vitesse β supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu :

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

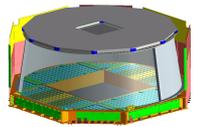
n : indice du milieu ($n > 1$)

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

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



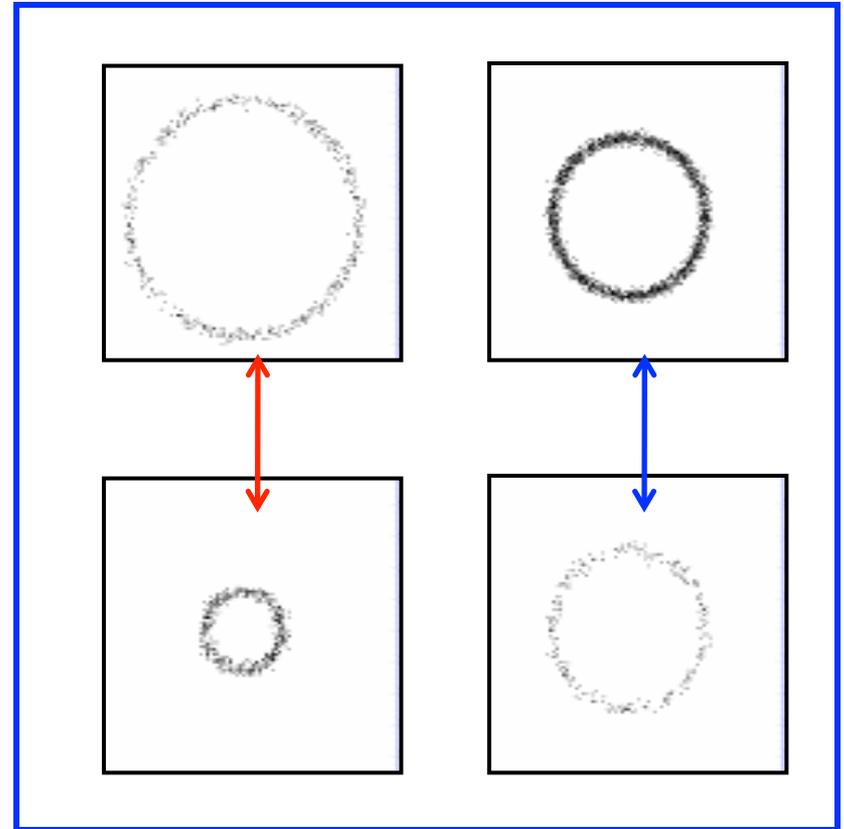
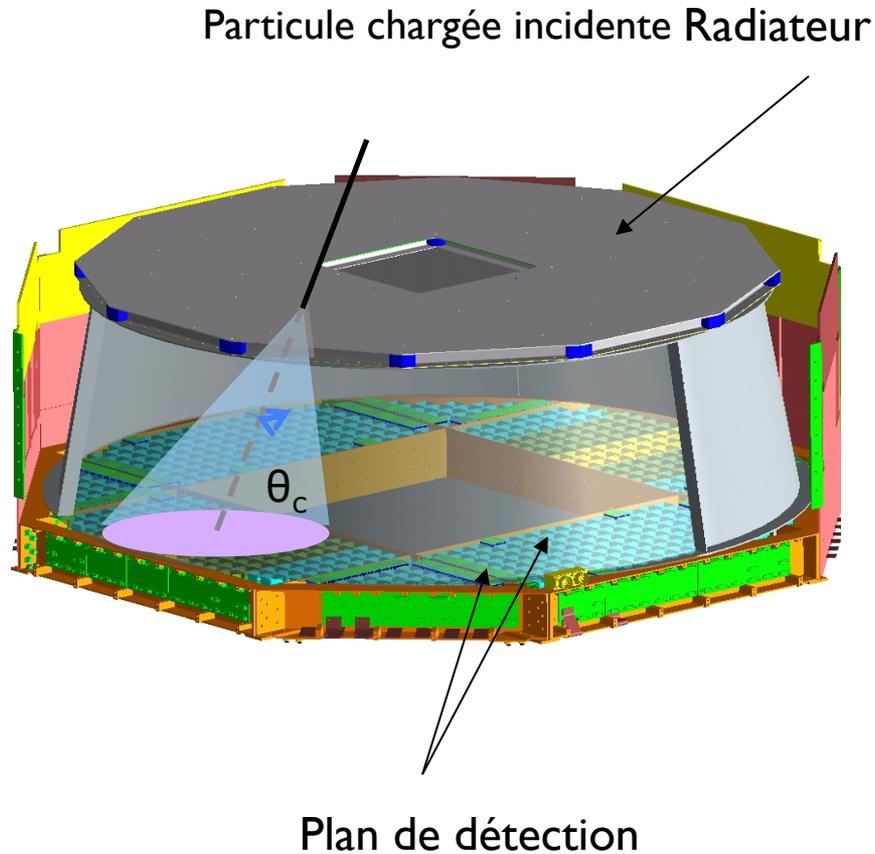
- Se produit dans tous les milieux transparents, y compris les scintillateurs, mais 100 fois plus faible que la scintillation



Imagerie Cherenkov (anneau)

▷ Vitesse et mesure de la charge

Anneaux

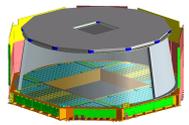


Mesure de β vitesse
(rayon)

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

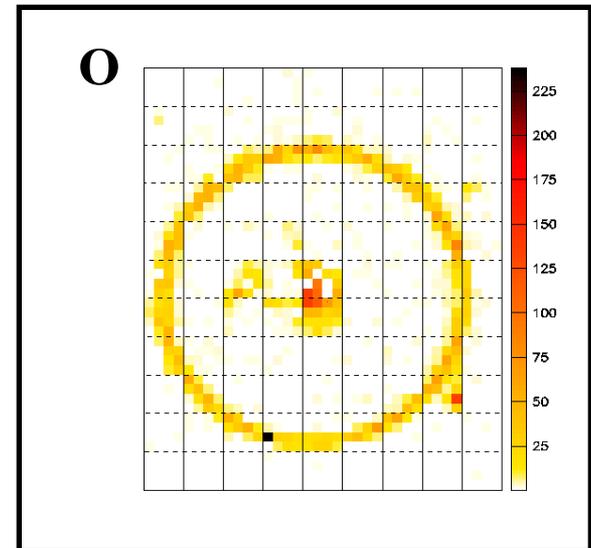
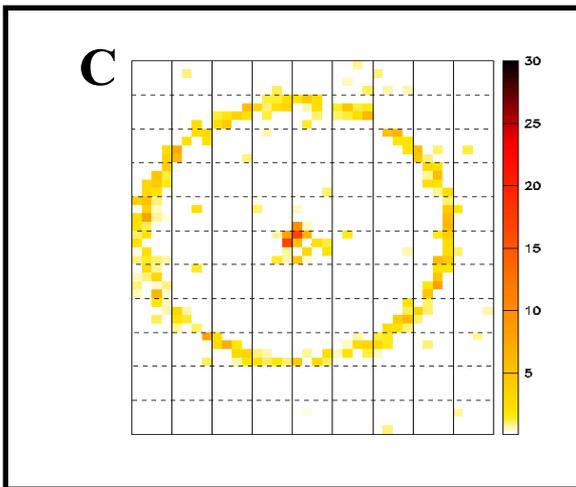
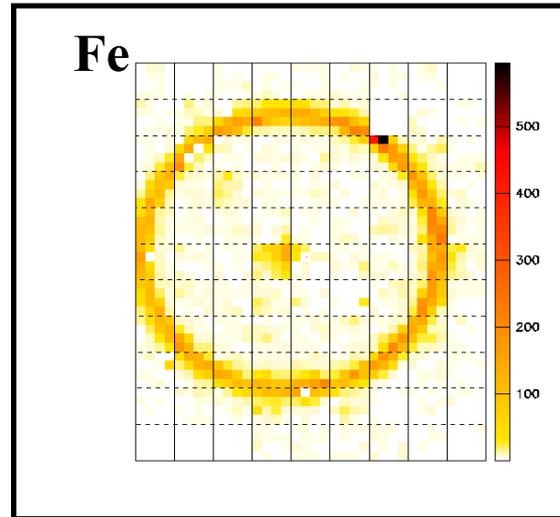
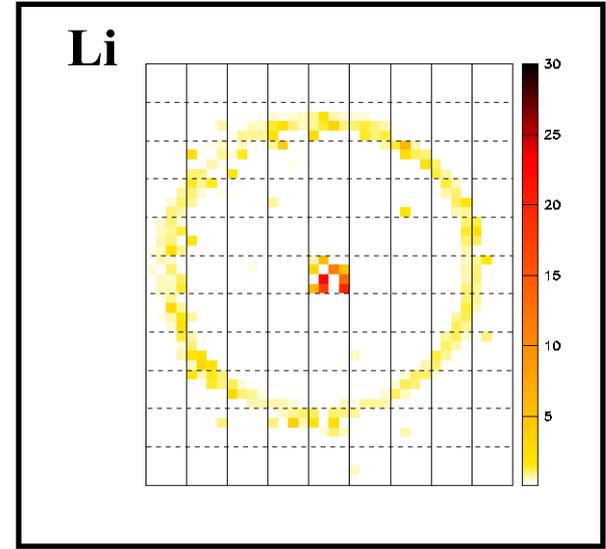
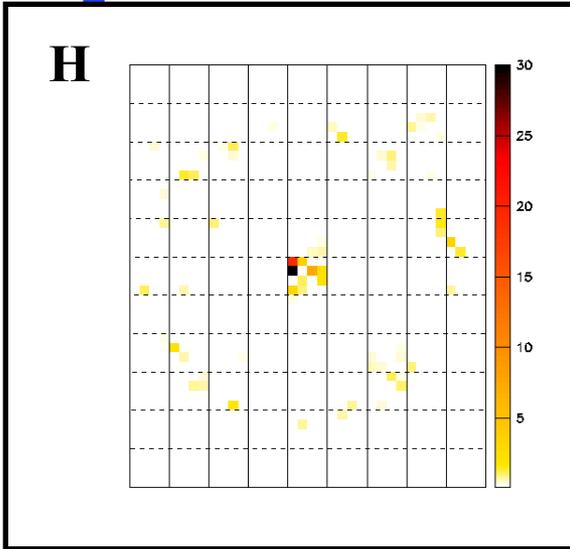
Z Charge électrique

$$\text{Signal} \propto Z^2$$

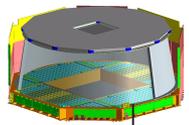


RICH – Mesure de la charge

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



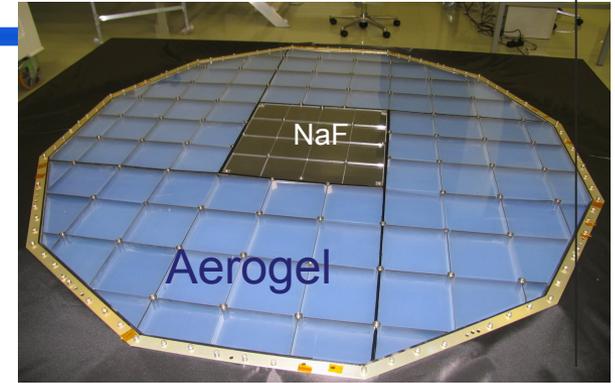
Collision products:
p, D, He⁴, Li⁶,...



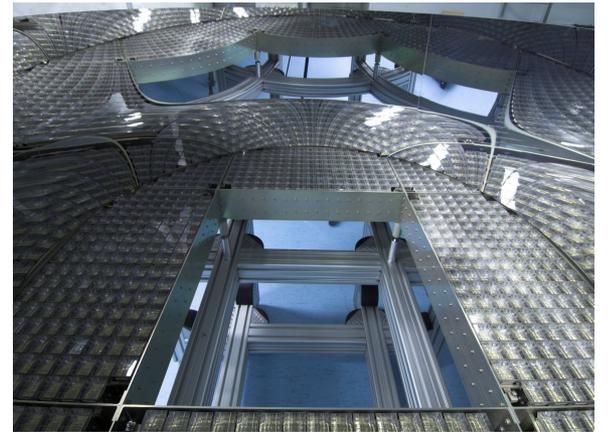
Ring Imaging Cerenkov

► Dual solid radiator configuration

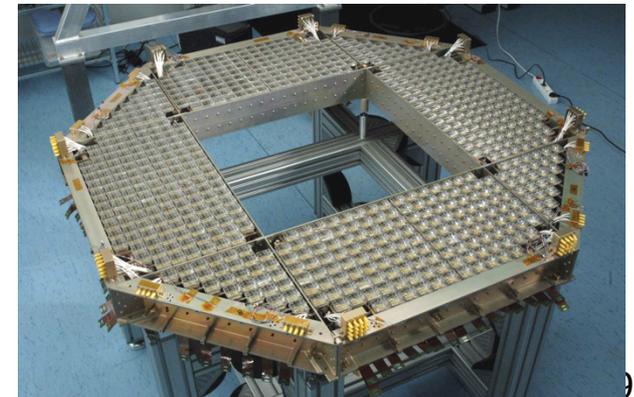
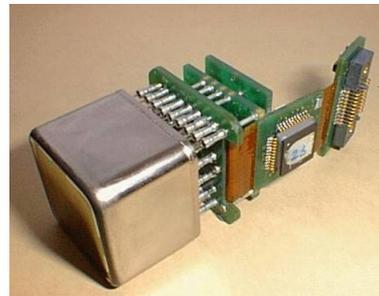
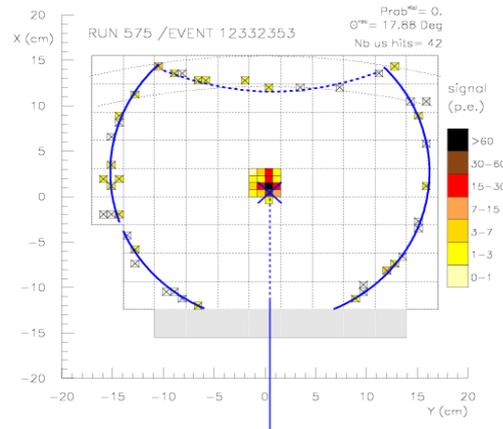
	Aerogel	NaF
Refraction Index	1.05	1.33
Opening angle (deg)	17.8	41.5
Velocity threshold	0.952	0.752

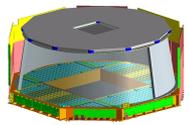


► Conical Reflector



► Photomultiplier matrix 10880 pixels

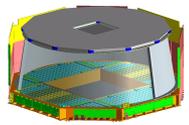




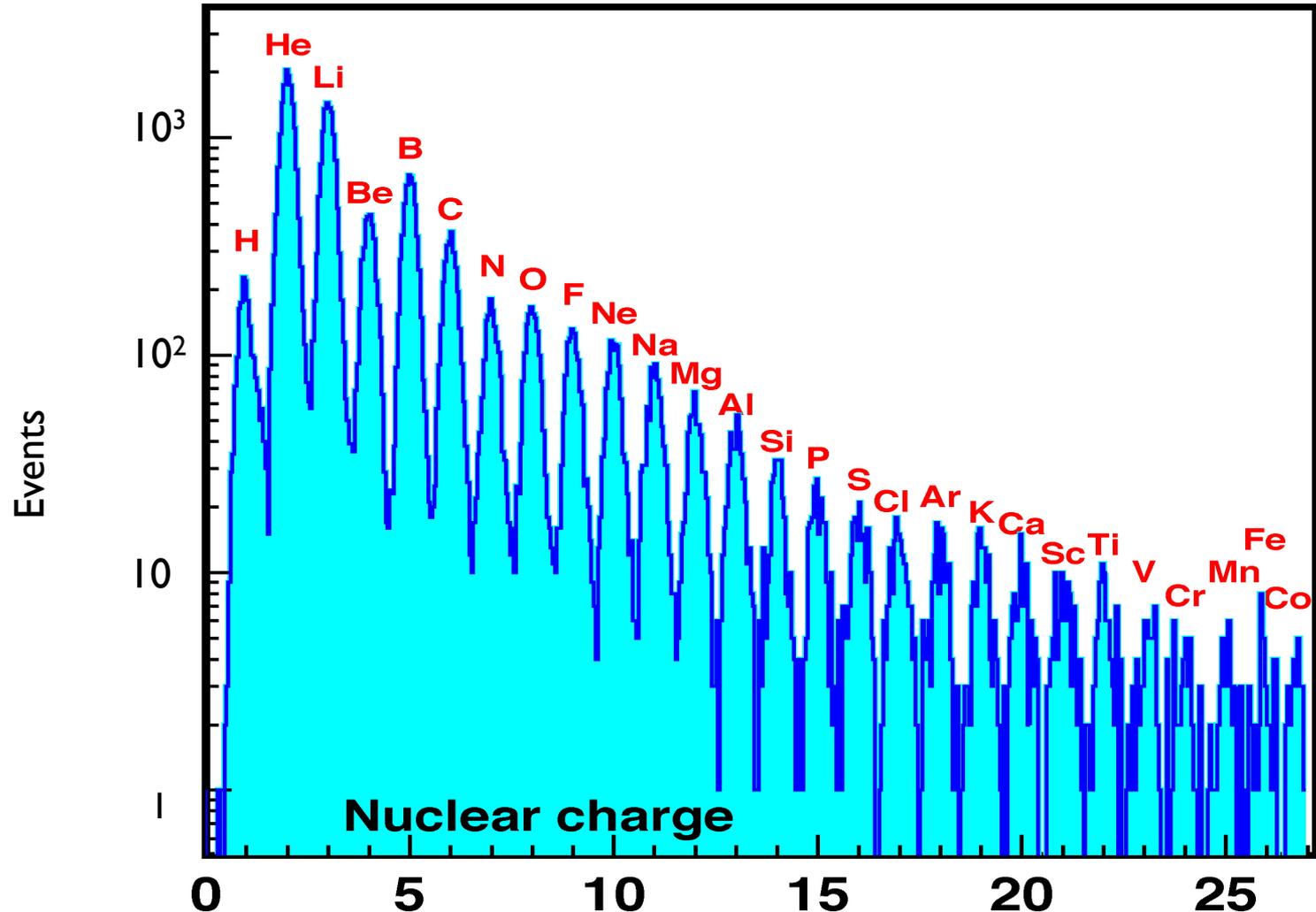
Ring Imaging Cerenkov

▷ Integration at Cern

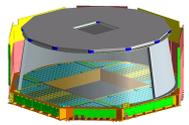




RICH – Charge Measurement



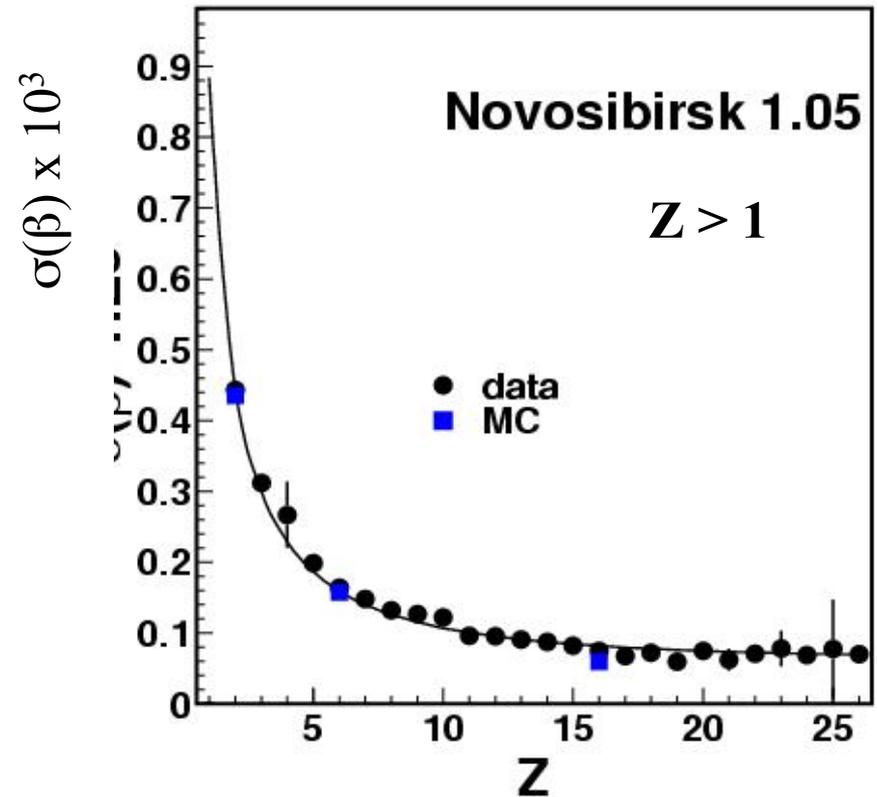
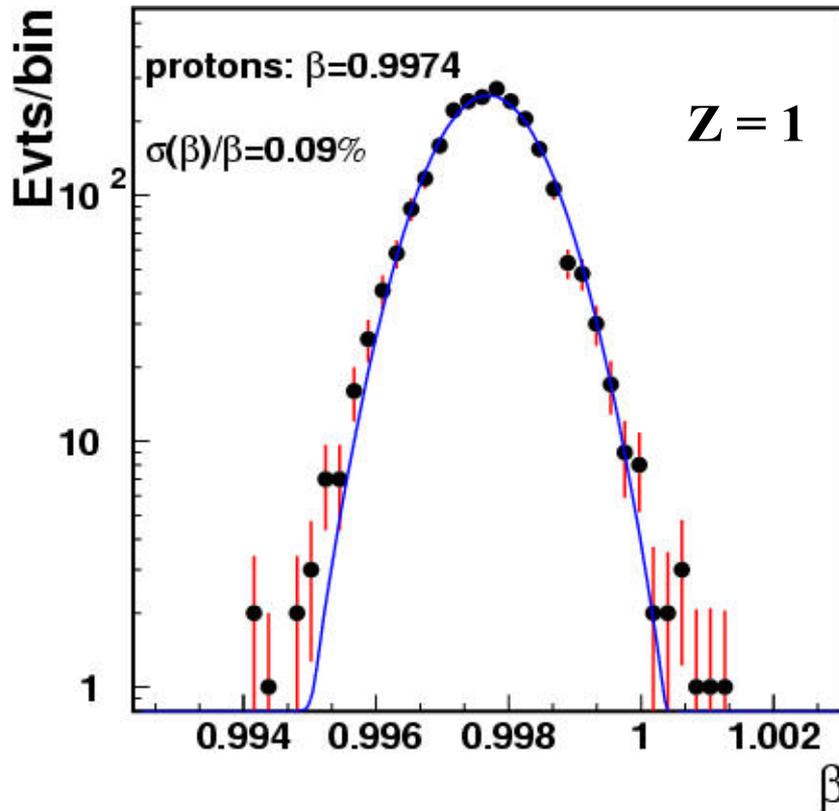
RICH has no consumables: AMS on ISS can study
high energy cosmic ray spectra indefinitely



RICH – mesure de la vitesse

▷ Aerogel radiator (Beam test)

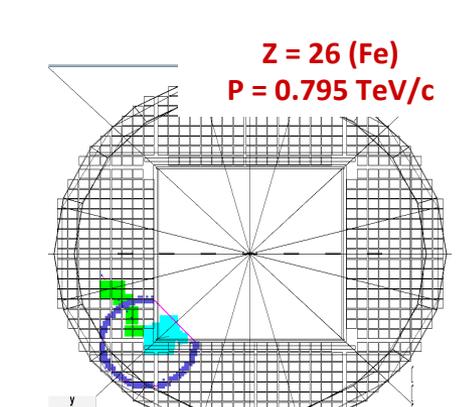
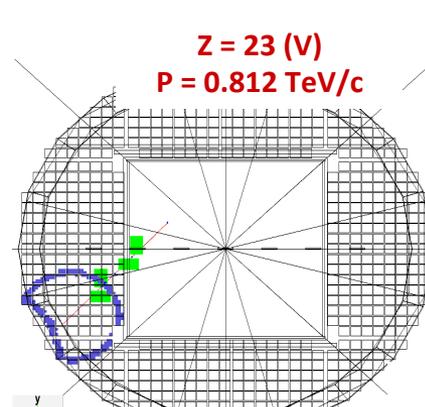
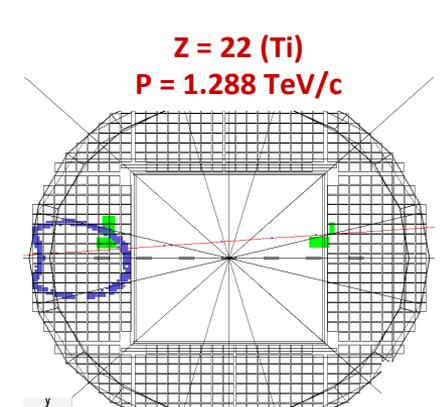
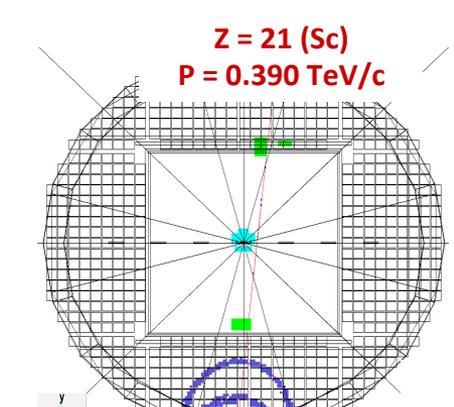
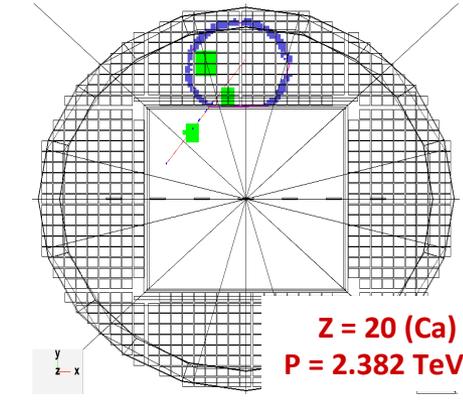
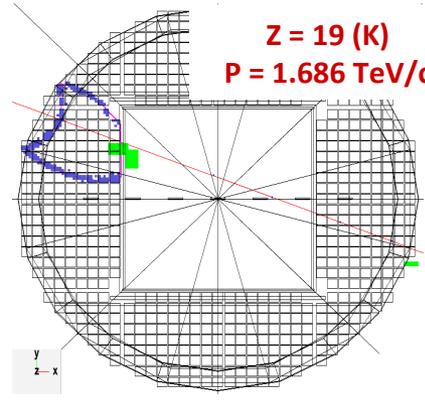
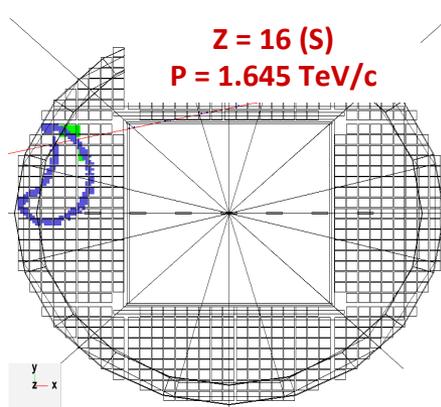
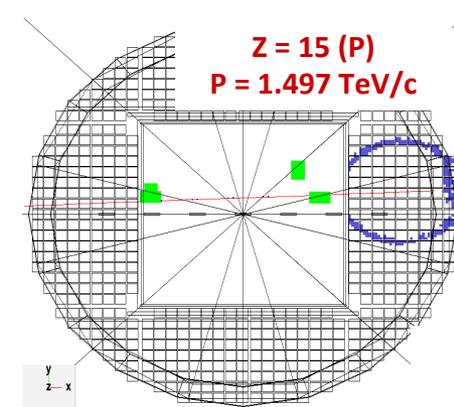
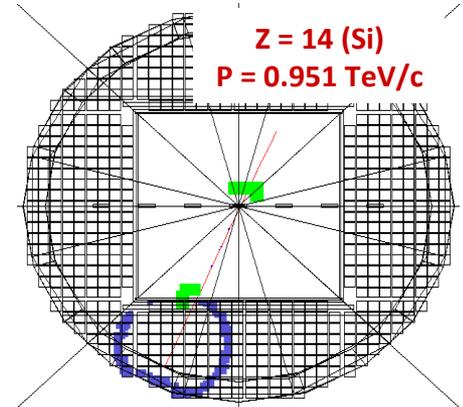
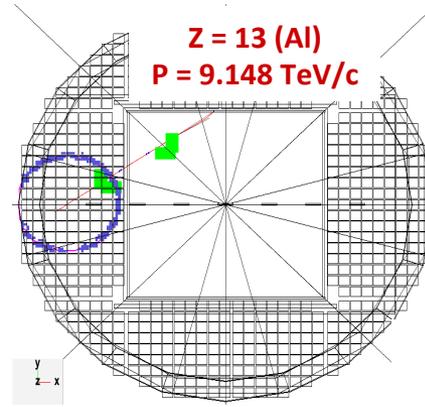
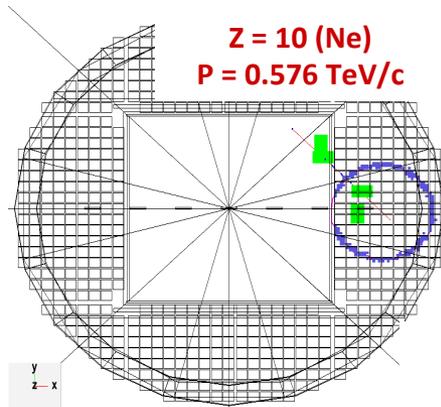
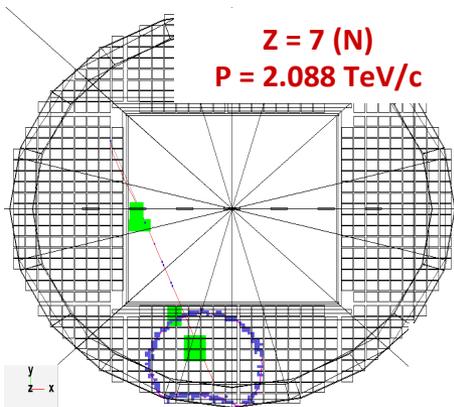
$E_k/n=158 \text{ GeV}/n$



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: Nuclei in the TeV range

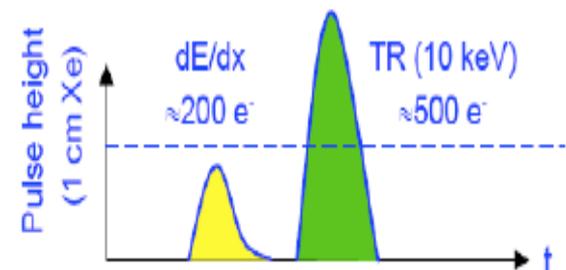
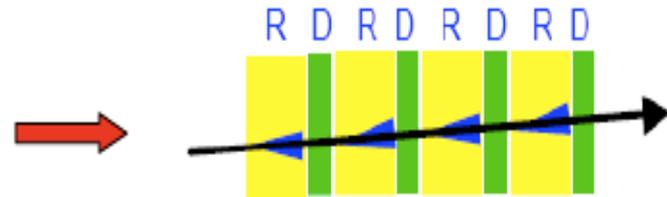


TRD - Rayonnement de transition – particule relativiste

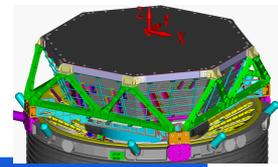
- Un « **rayonnement de transition** » est émis lorsqu'une particule chargée traverse un milieu présentant une discontinuité de l'indice de réfraction (ex : vide - diélectrique)
- Quelques calculs complexes d'électromagnétisme montrent que :
 - L'énergie W émise à chaque transition est $\propto \gamma$
 - ⇒ 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

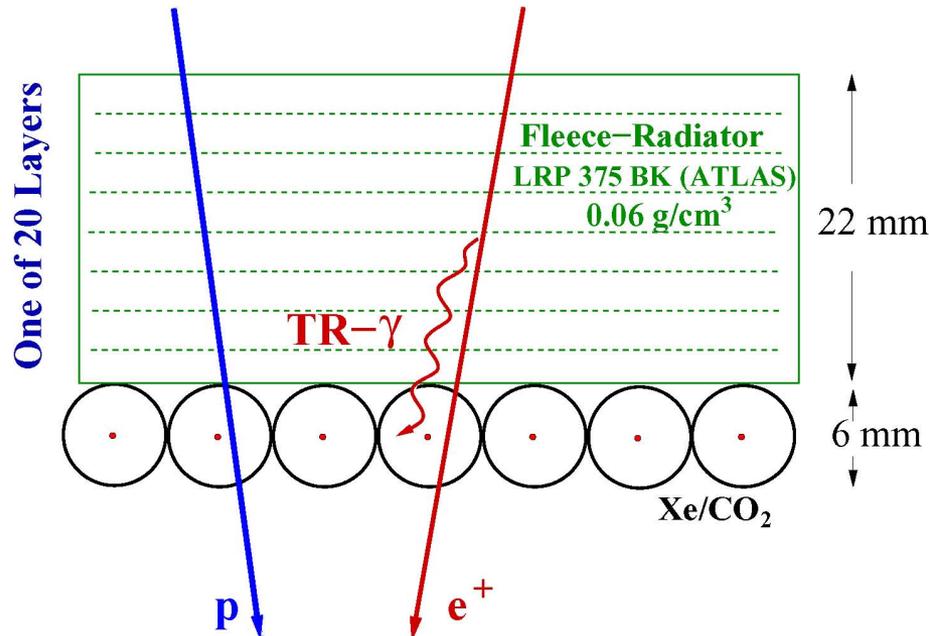
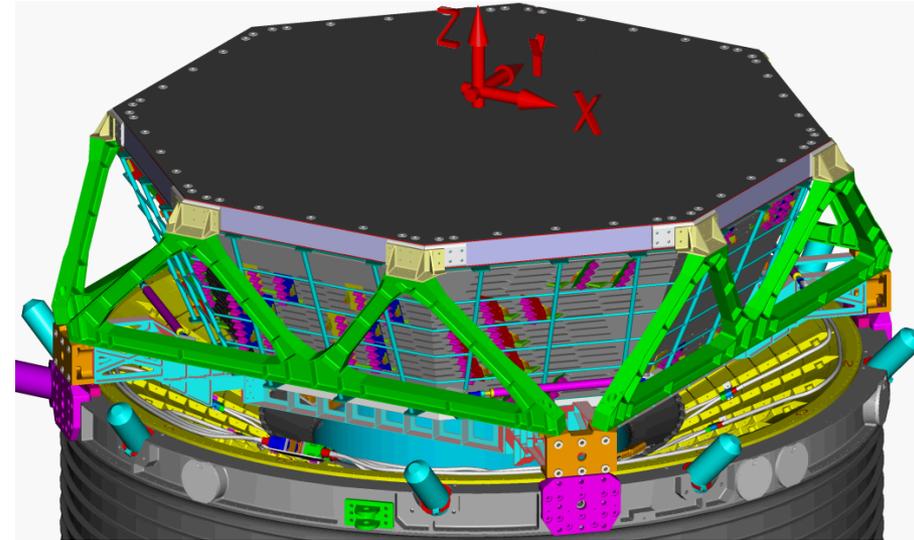


TRD

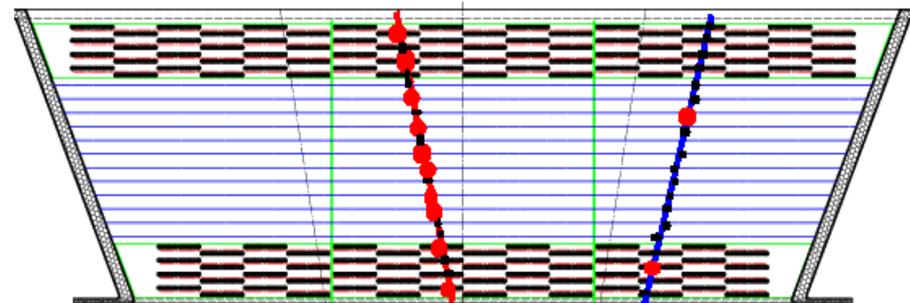


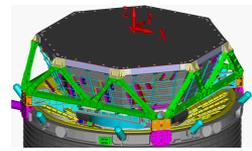
rejection proton $>10^2$ 1-300 GeV
acceptance: $0.45\text{m}^2\text{sr}$

- Configuration pour 60 cm de hauteur:
20 couches each existing of:
- 22 mm fibre fleece
 - $\text{\O} 6$ mm straw tubes filled with Xe/CO₂ 80%/20%



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

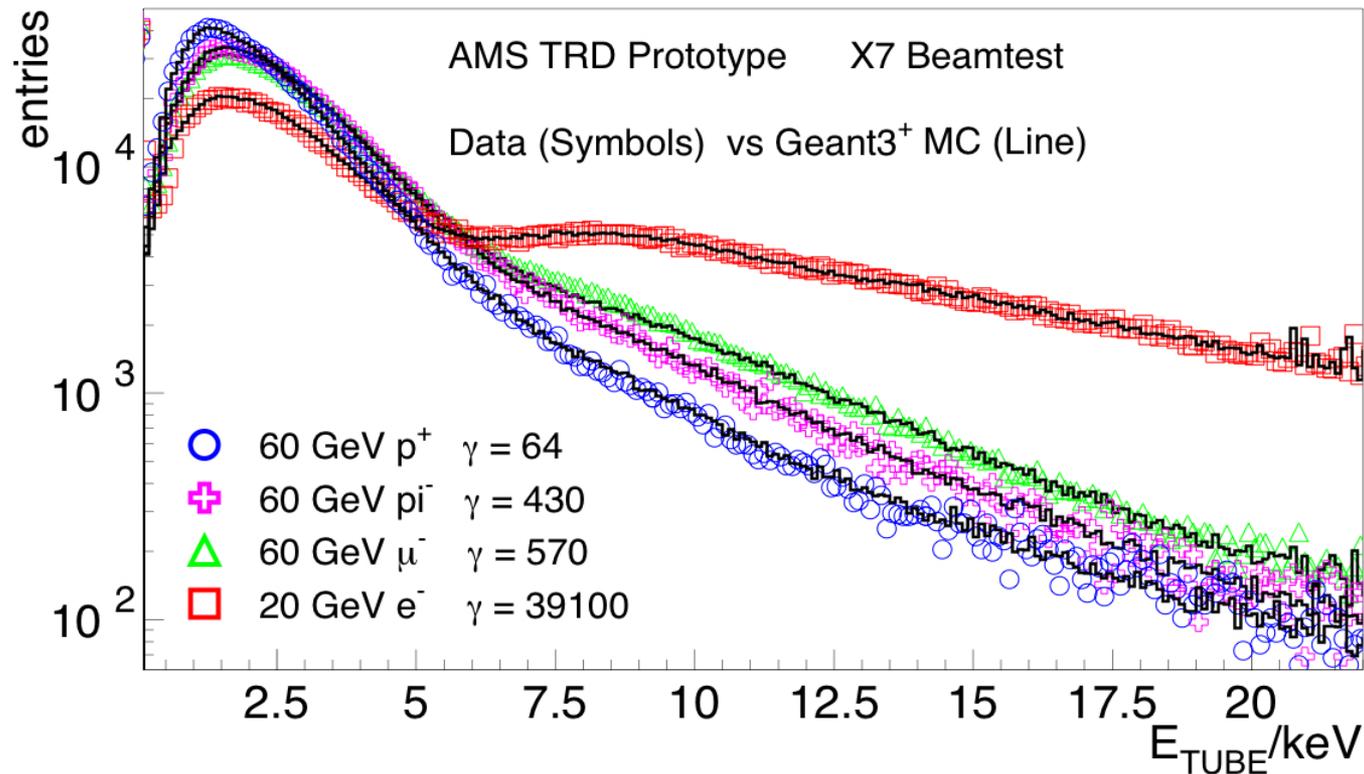


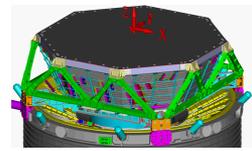


TDR – resultats test beam

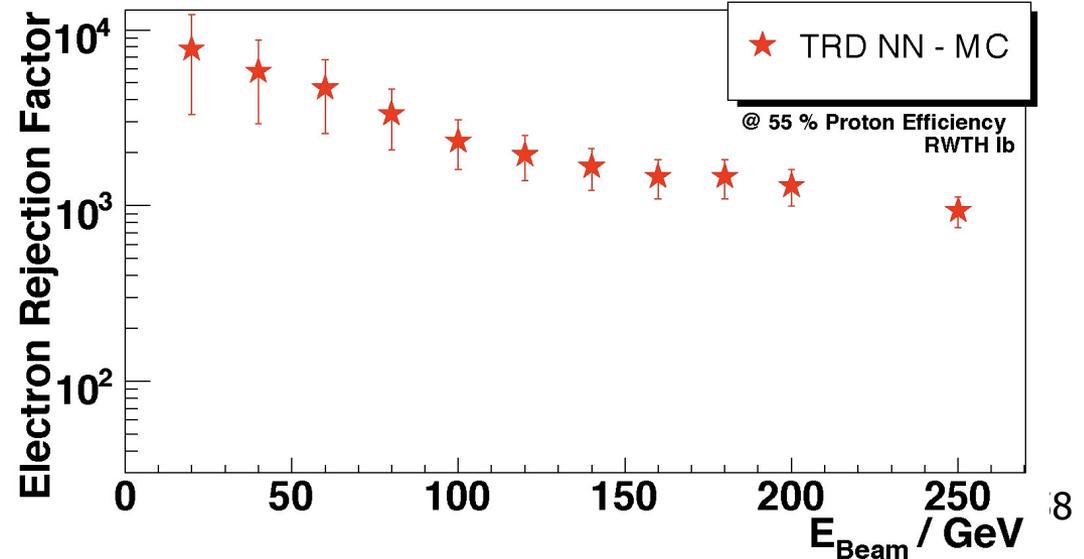
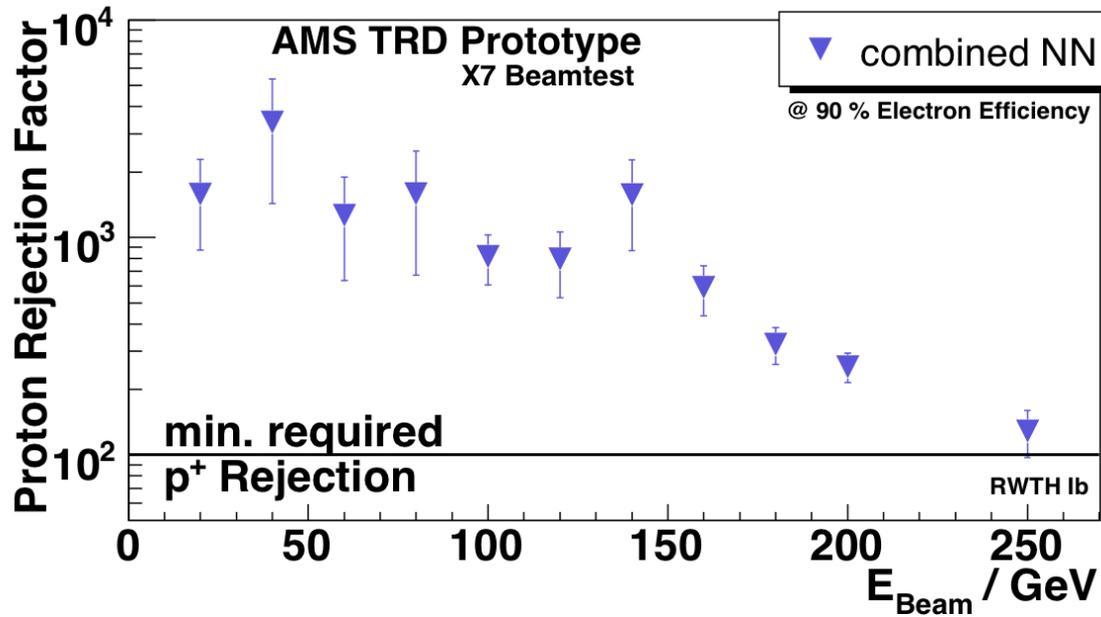
20 plans de TRD en test faisceau au CERN en 2000

3 million events of p, e, μ, π @ 5-250 GeV

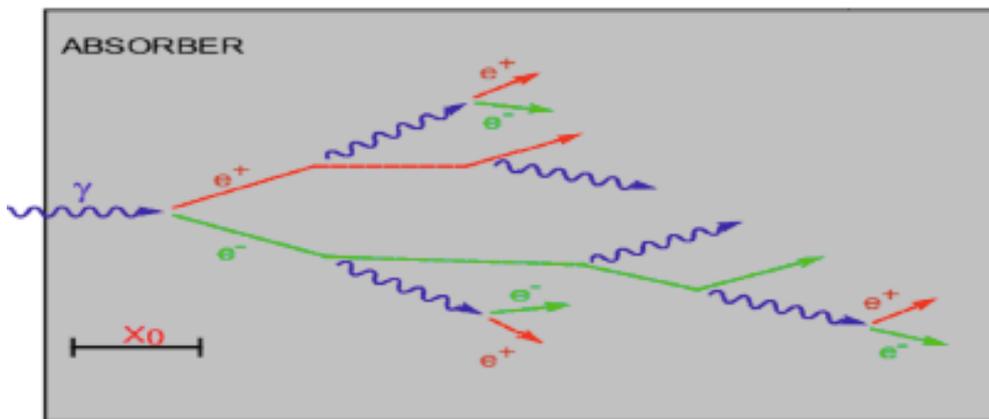
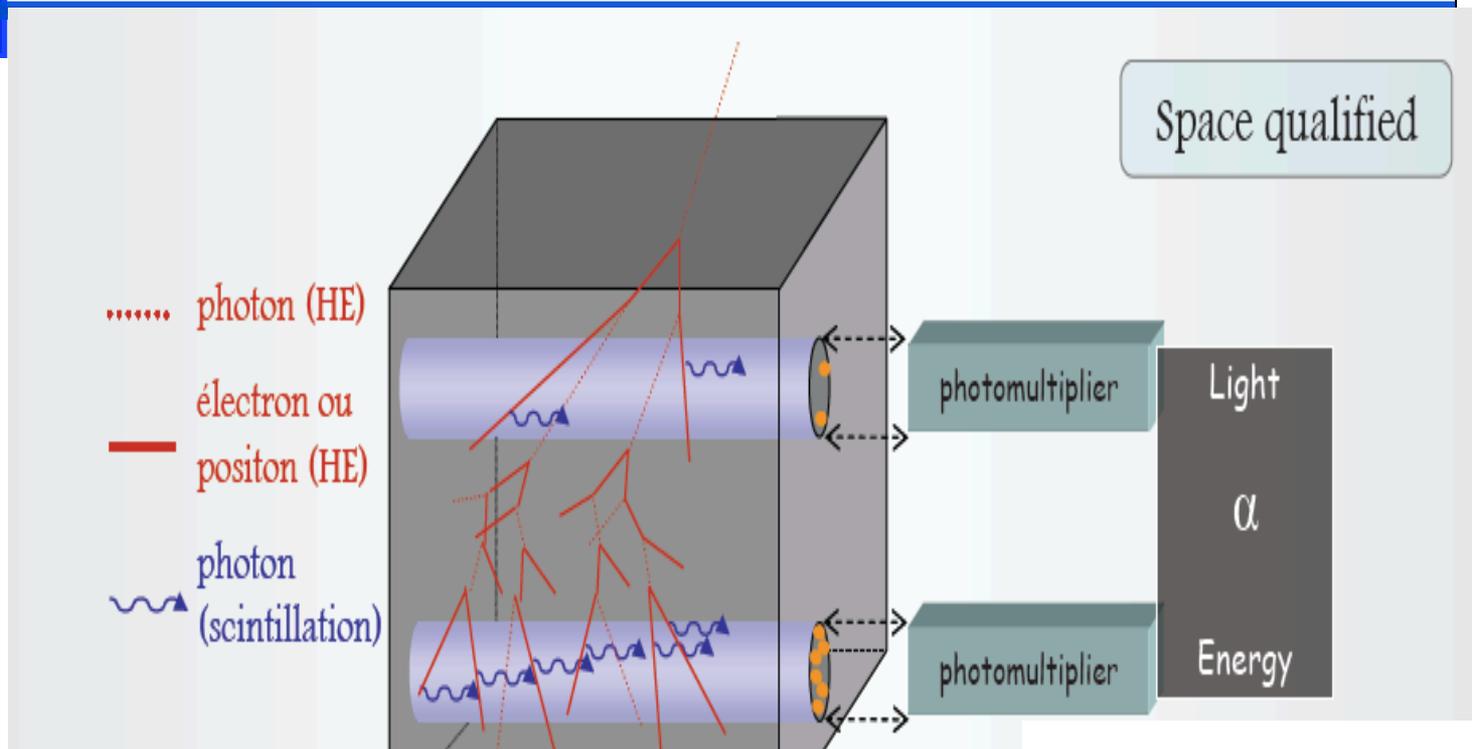
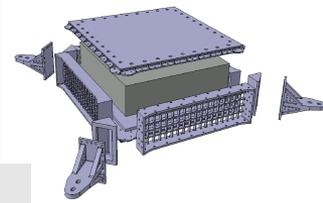




TDR – résultats Tests Faisceaux

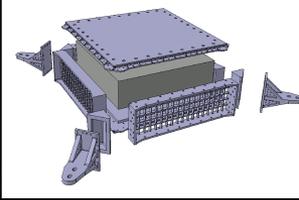


Calorimètre Electromagnétique

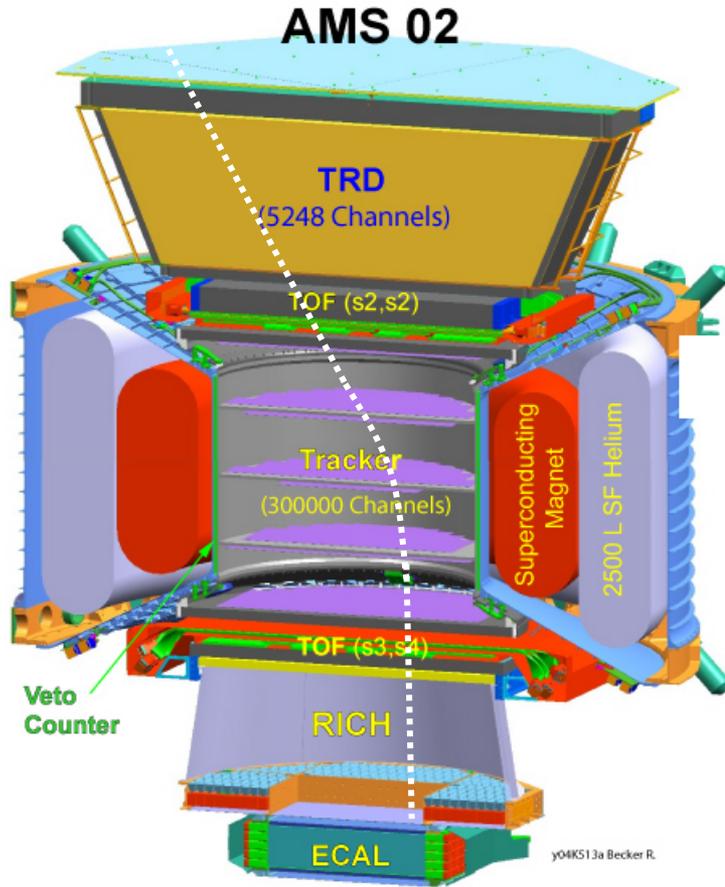


- Méthode destructive de mesure de l'énergie totale par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie
 - \Rightarrow formation de **gerbes électromagnétiques** ou **hadroniques**
 - L'énergie est convertie en excitation de la matière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

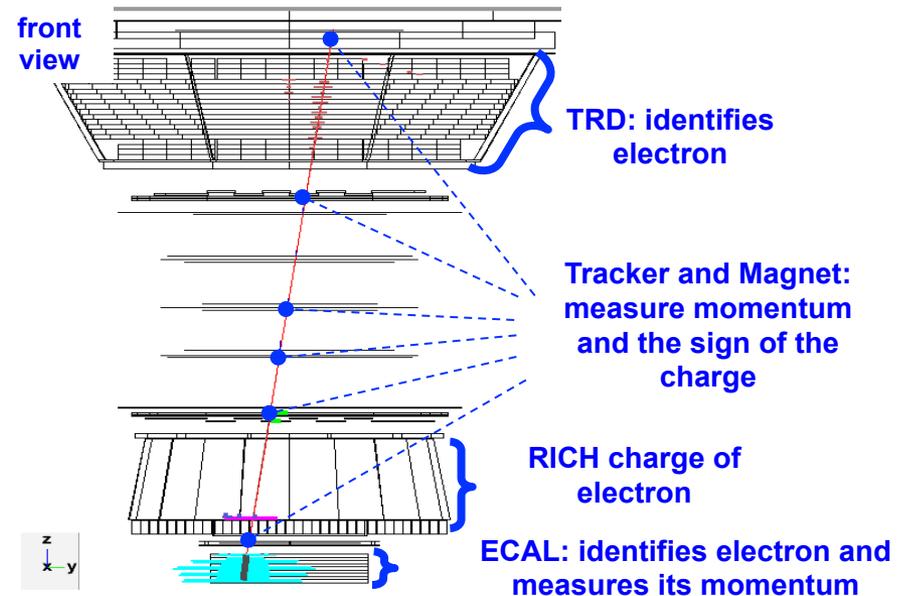
Calorimetre electromagnetique



3D imaging calorimeter

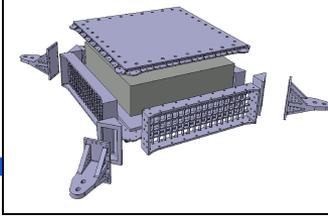


Particle ID (e.m gerbes vs. cascades de hadrons)
Mesure de l'énergie (e^+, e^-, γ) ($\Rightarrow 1\text{TeV}$)
systeme de déclenchement



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

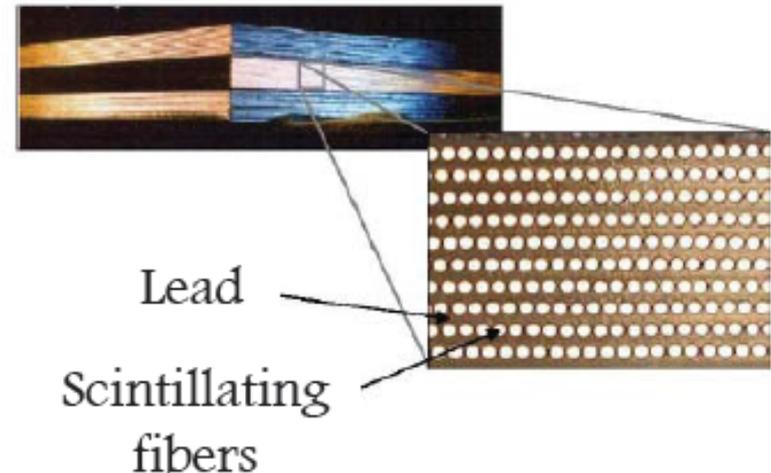
volume ratio Pb:fibres:glue : 60:34:6

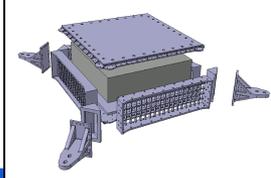
dimensions : $658 \times 658 \times 166.5 \text{ mm}^3$

poids : 498 kg

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

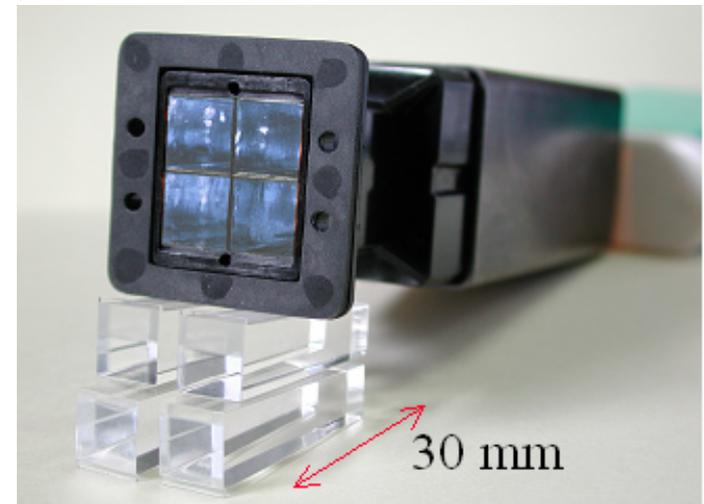
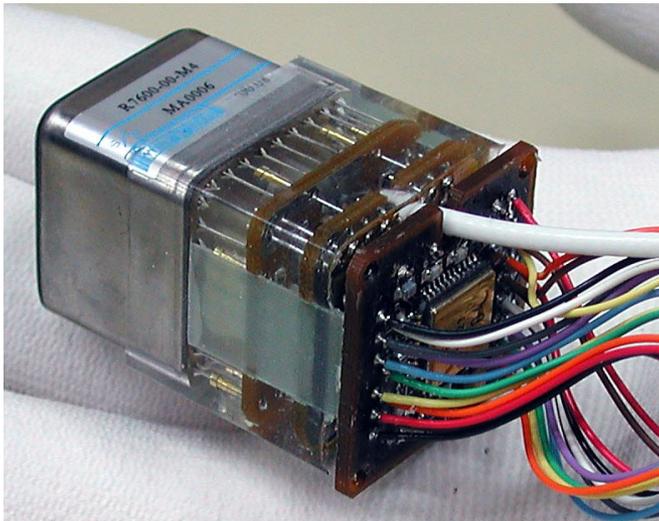
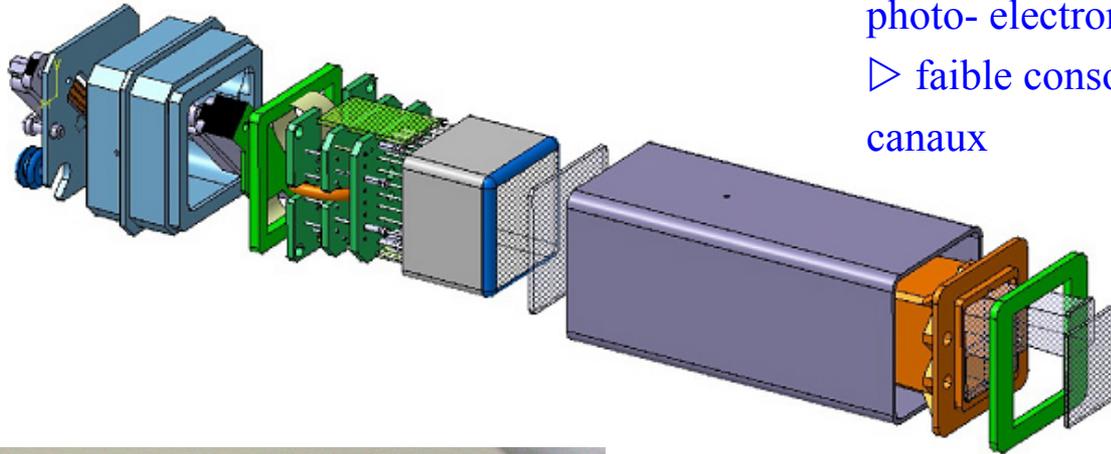
10 000 fibres



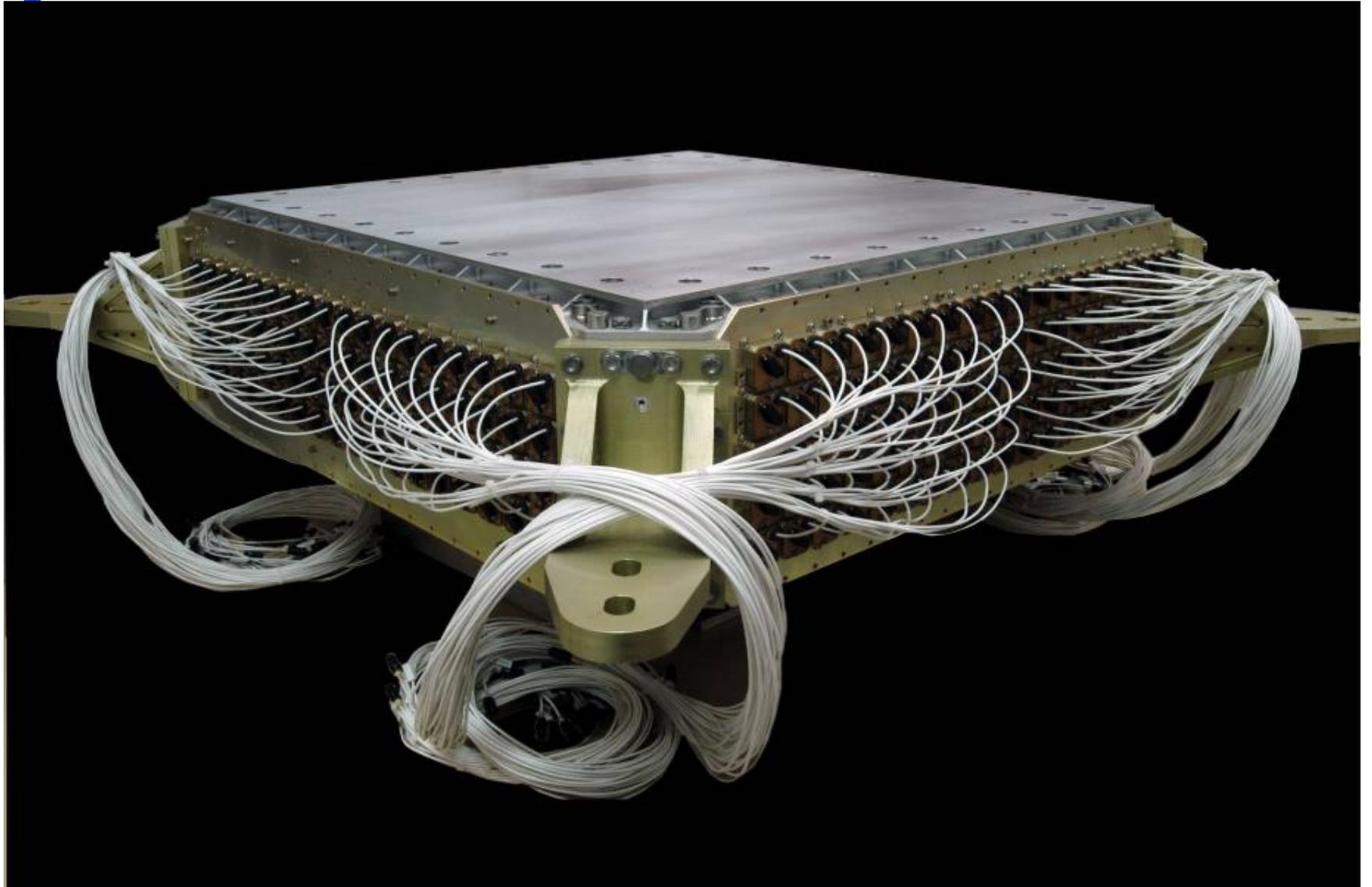


Light collection system

- ▷ 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

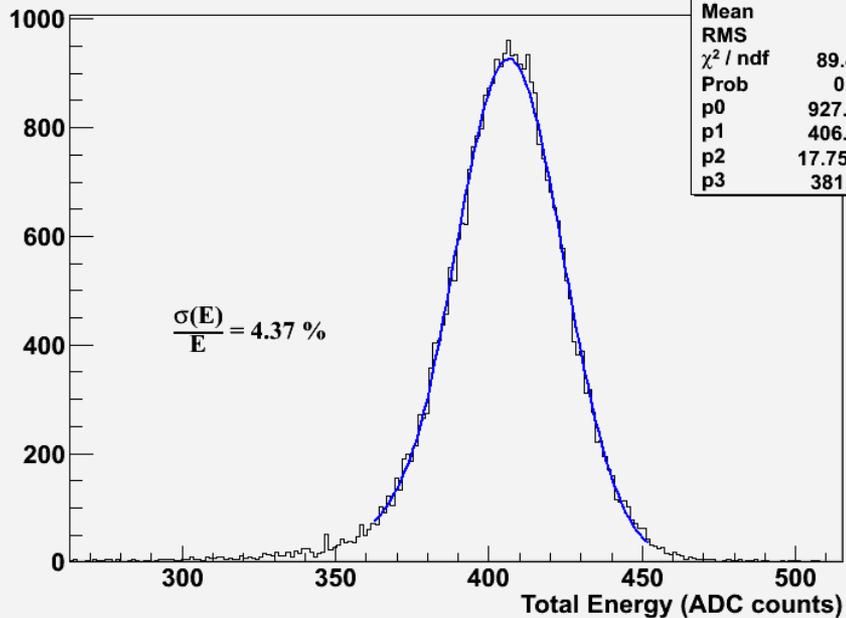


ECAL Construction



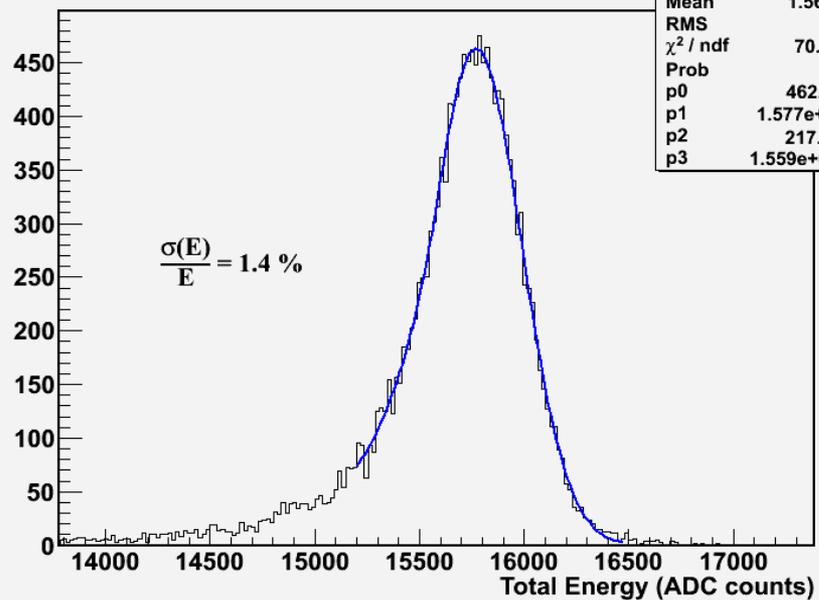
performance

Ebeam:6 GeV - Electron run:684



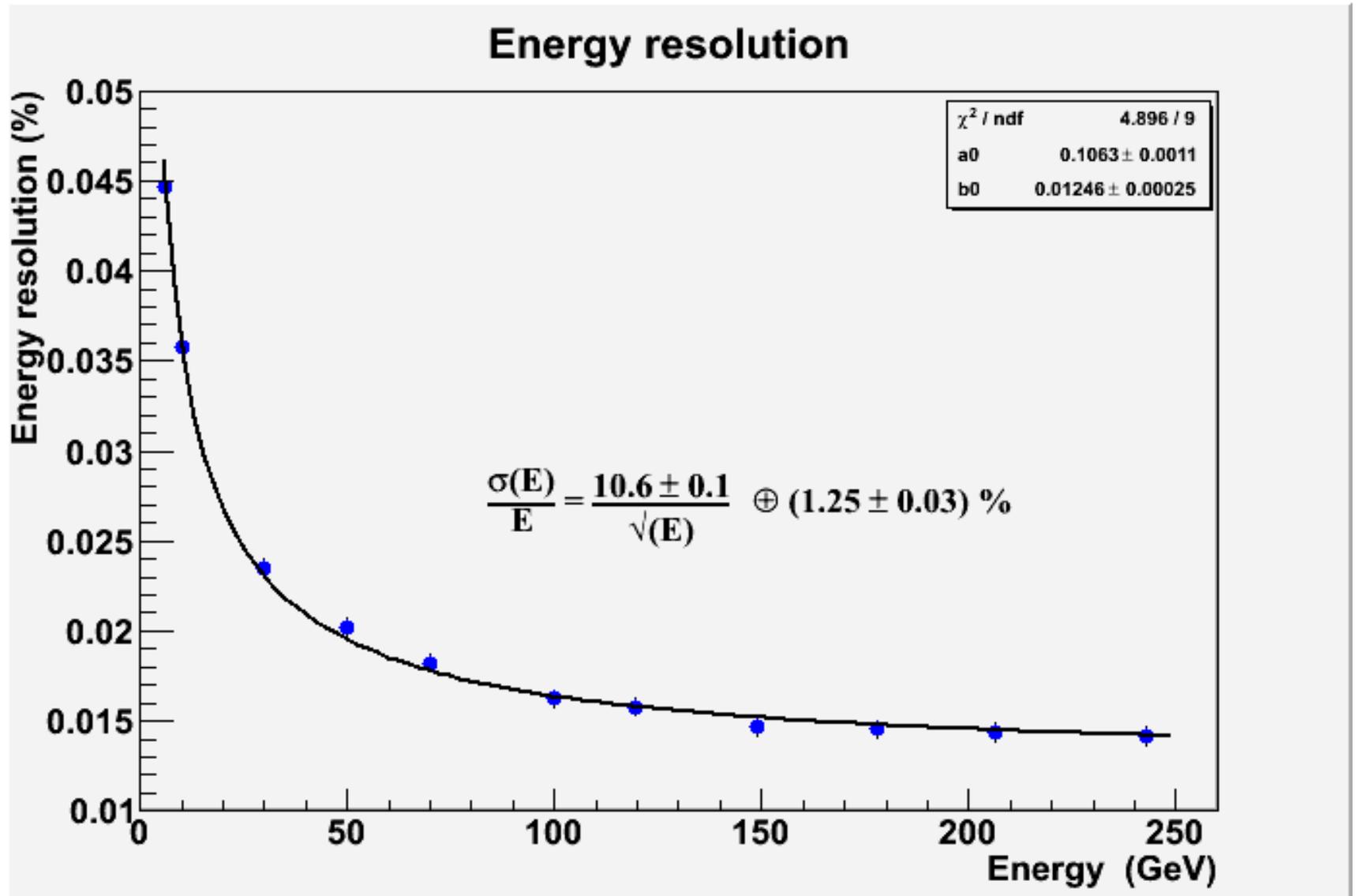
h40	
Entries	38385
Mean	404.7
RMS	21.73
χ^2 / ndf	89.41 / 67
Prob	0.03513
p0	927.1 ± 6.9
p1	406.5 ± 0.1
p2	17.75 ± 0.11
p3	381.1 ± 1.1

Ebeam:250 GeV - Electron run:410



h40	
Entries	17365
Mean	1.566e+04
RMS	376.9
χ^2 / ndf	70.74 / 67
Prob	0.354
p0	462.8 ± 5.1
p1	1.577e+04 ± 3
p2	217.7 ± 2.7
p3	1.559e+04 ± 11

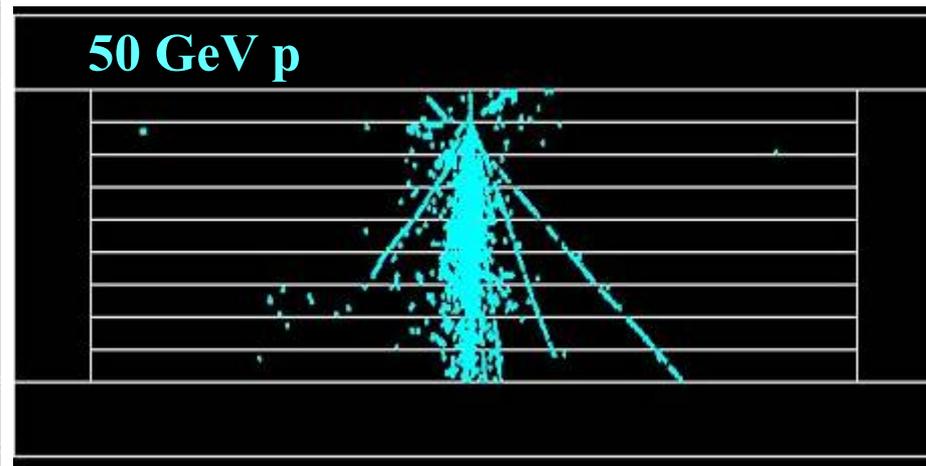
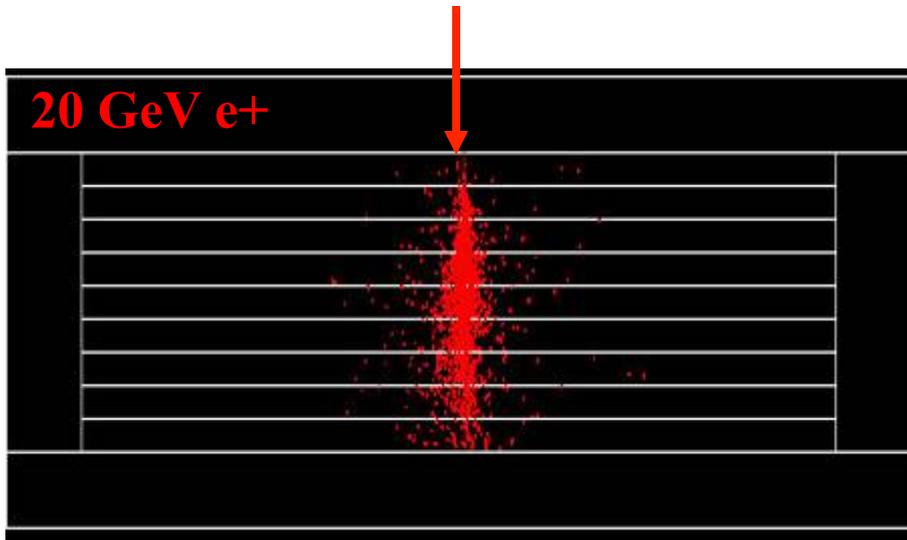
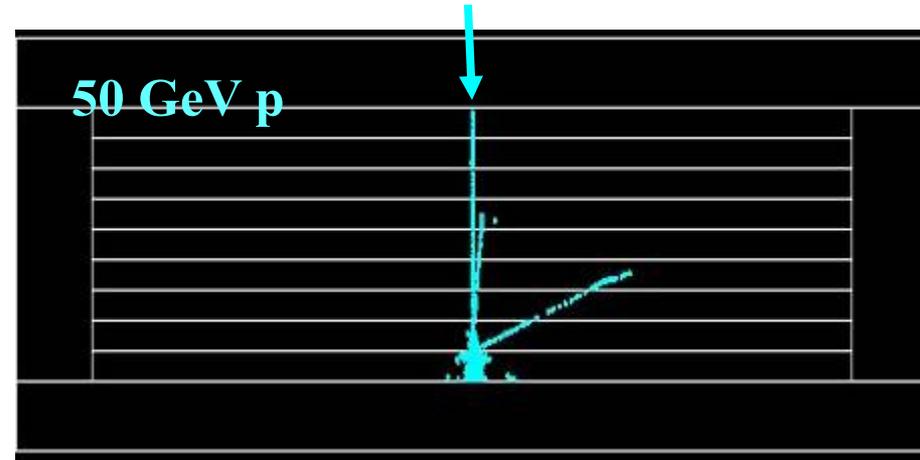
ECAL performance



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

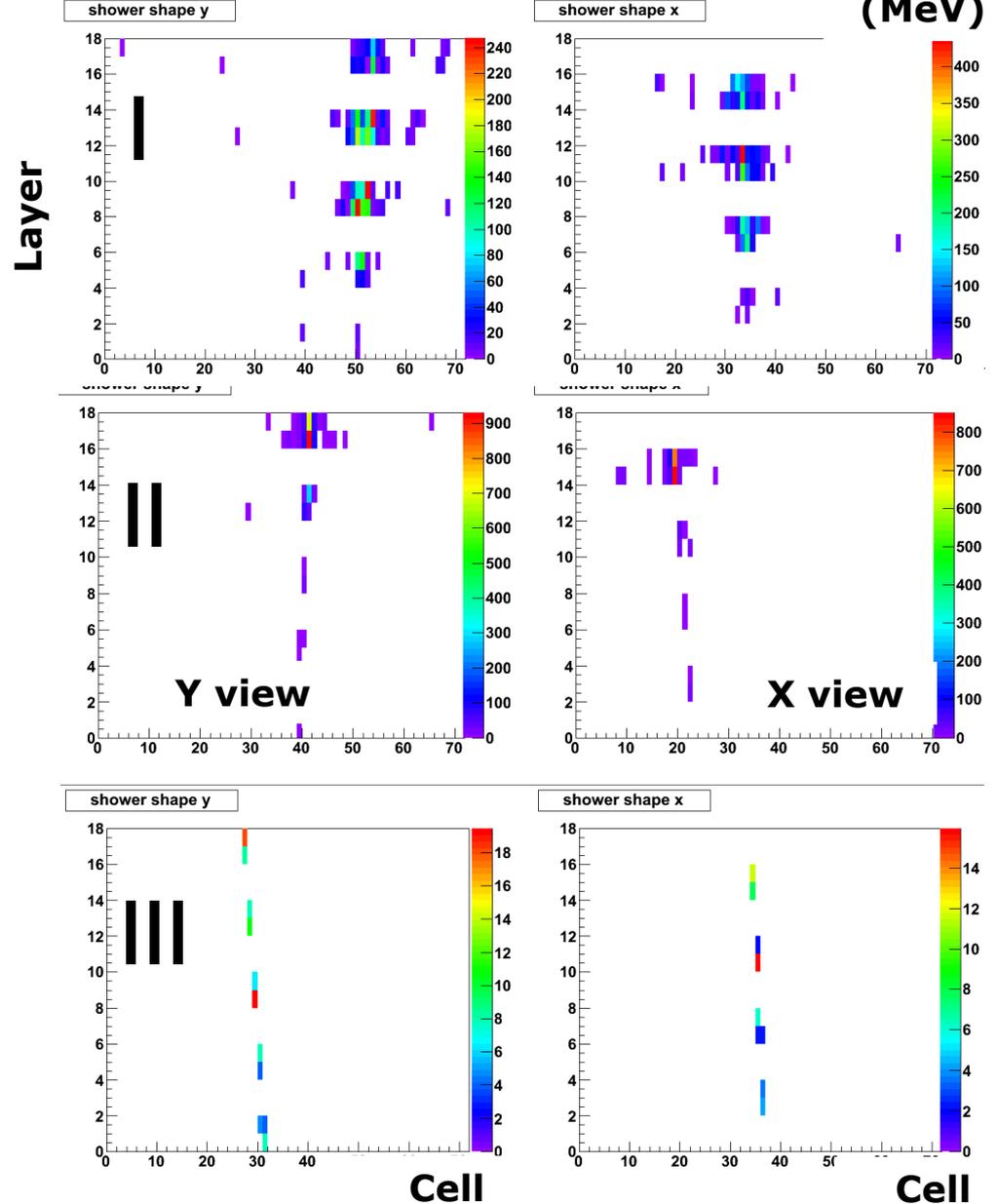
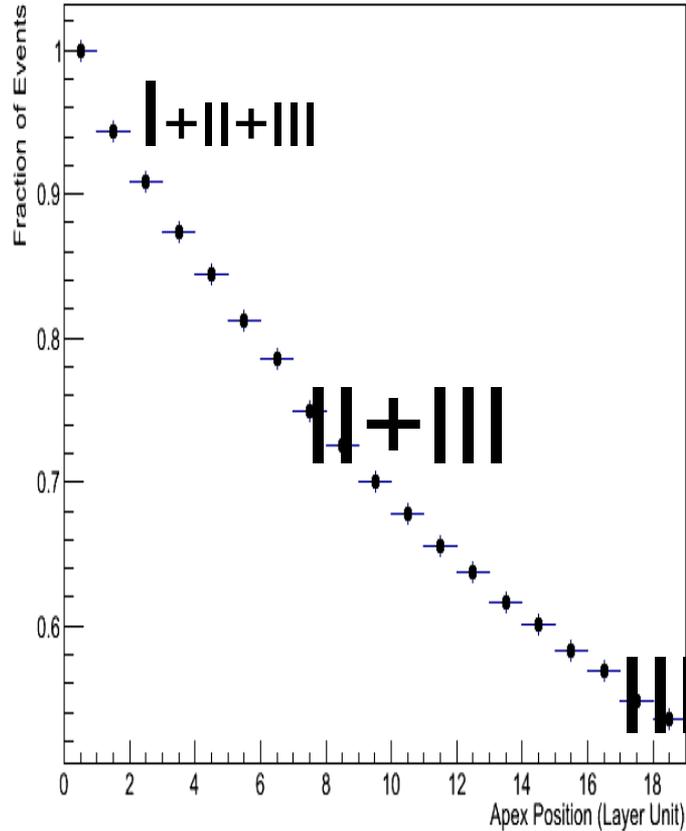
Simulation in Geant4



e/P rejection - ISS protons

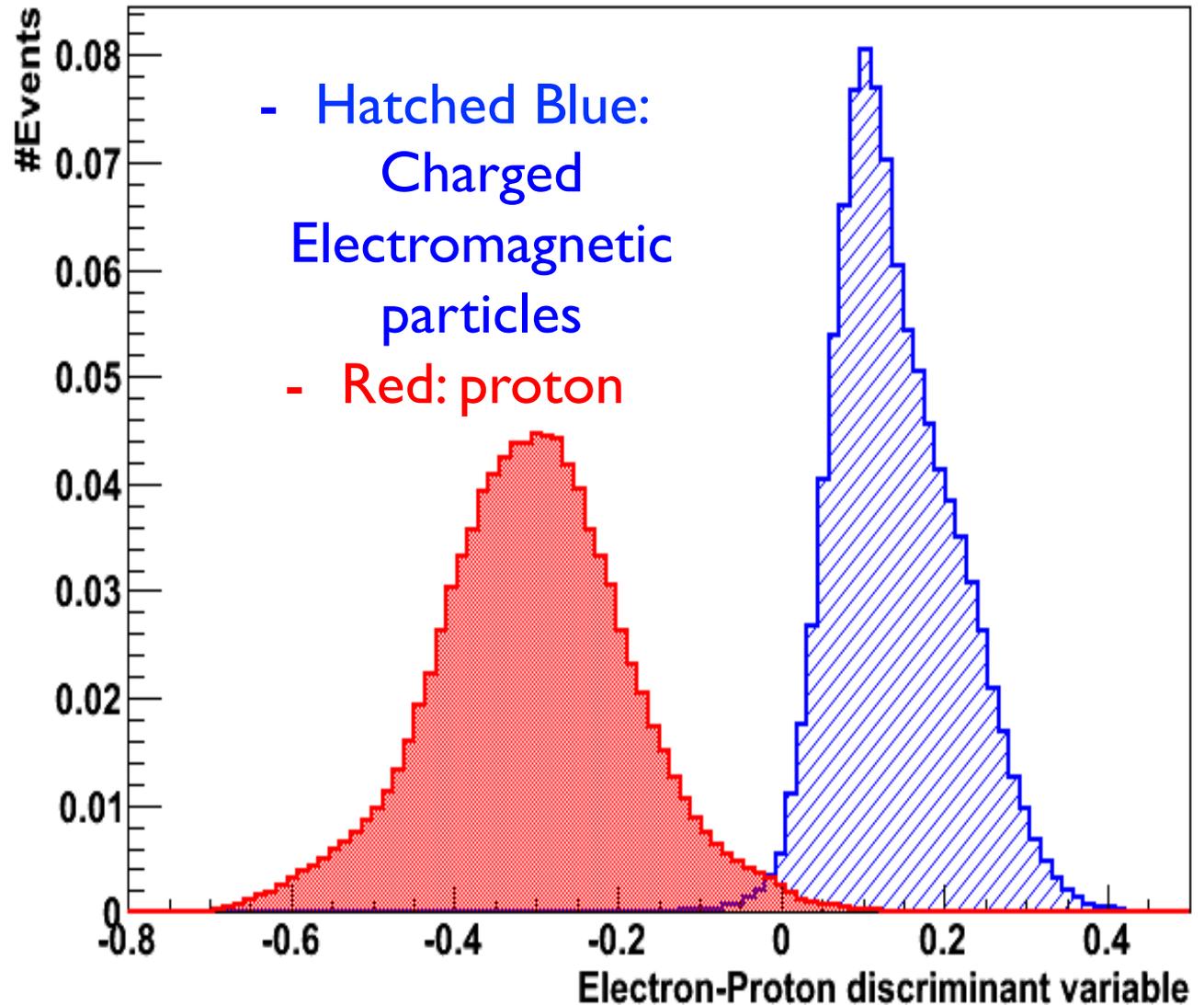
3 Signatures de l'interaction des protons dans le calorimetre

- 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



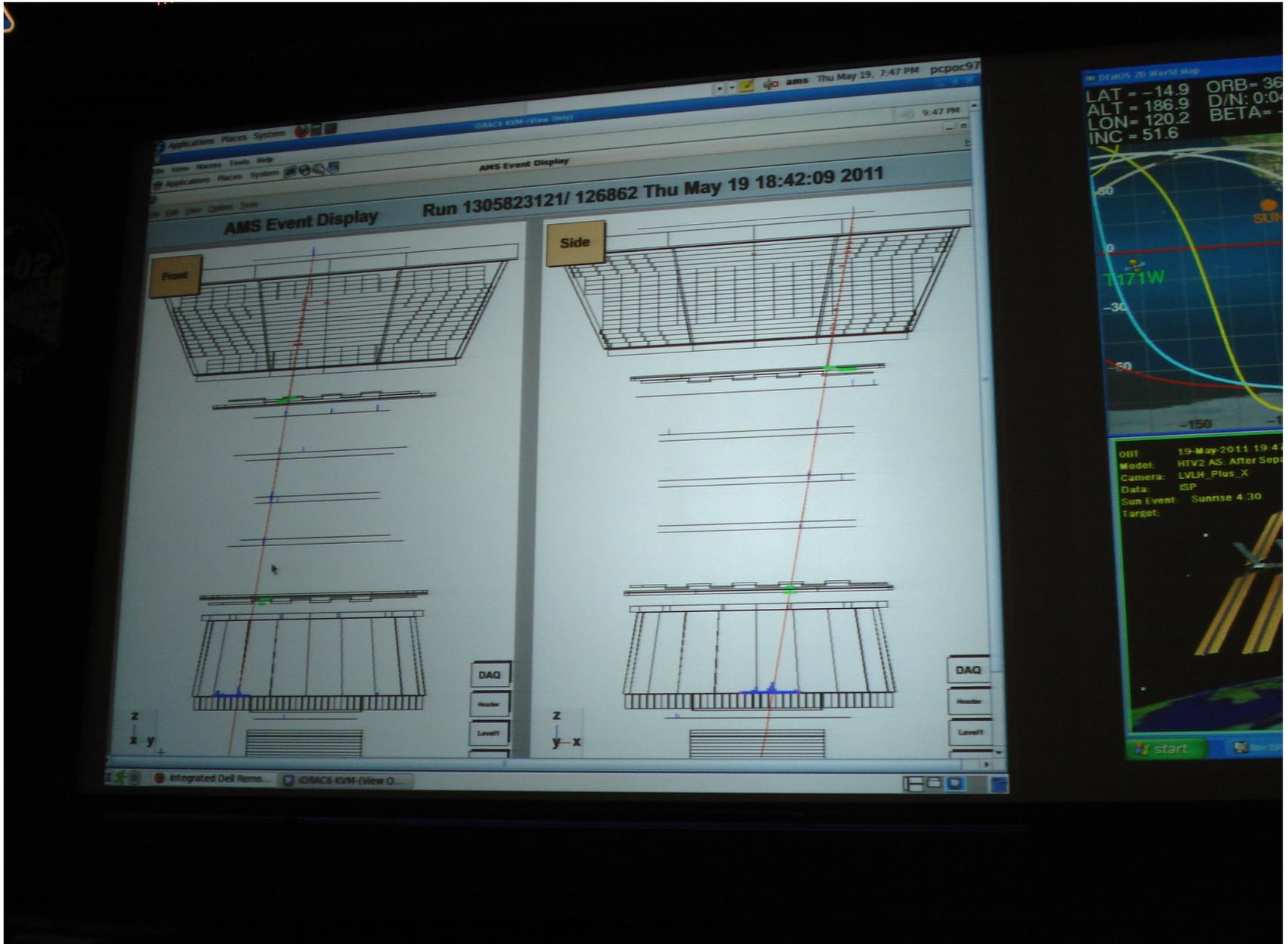
- Methode statistique qui permet de separarer les protons des positrons

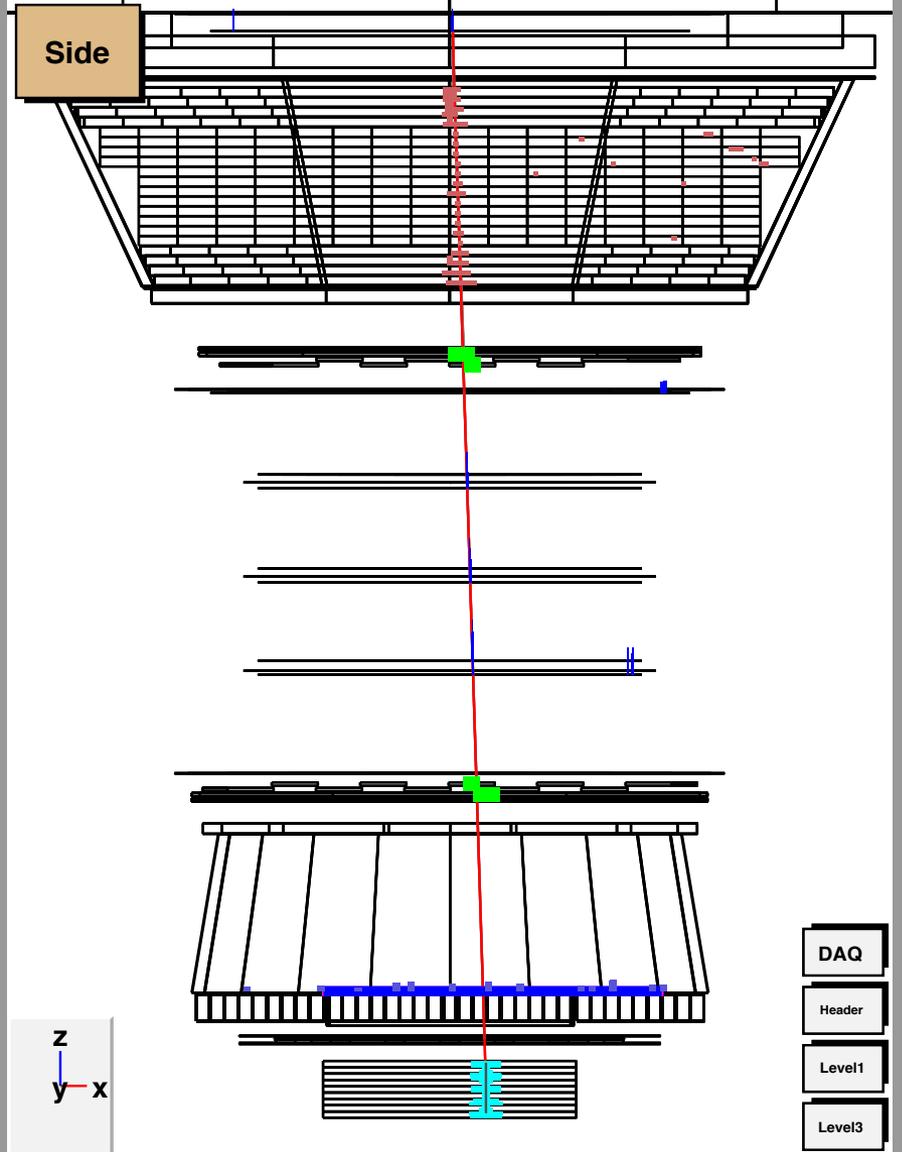
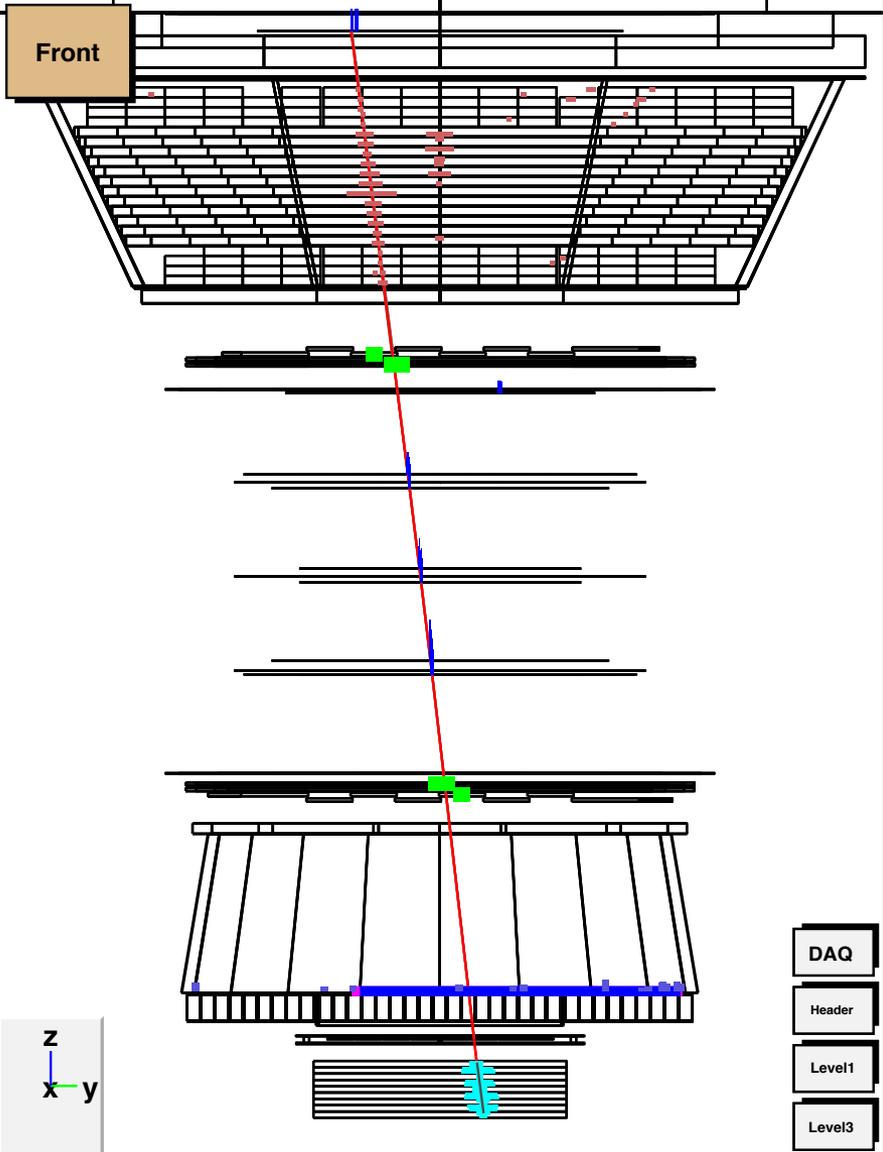
Characteristics of AMS

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

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

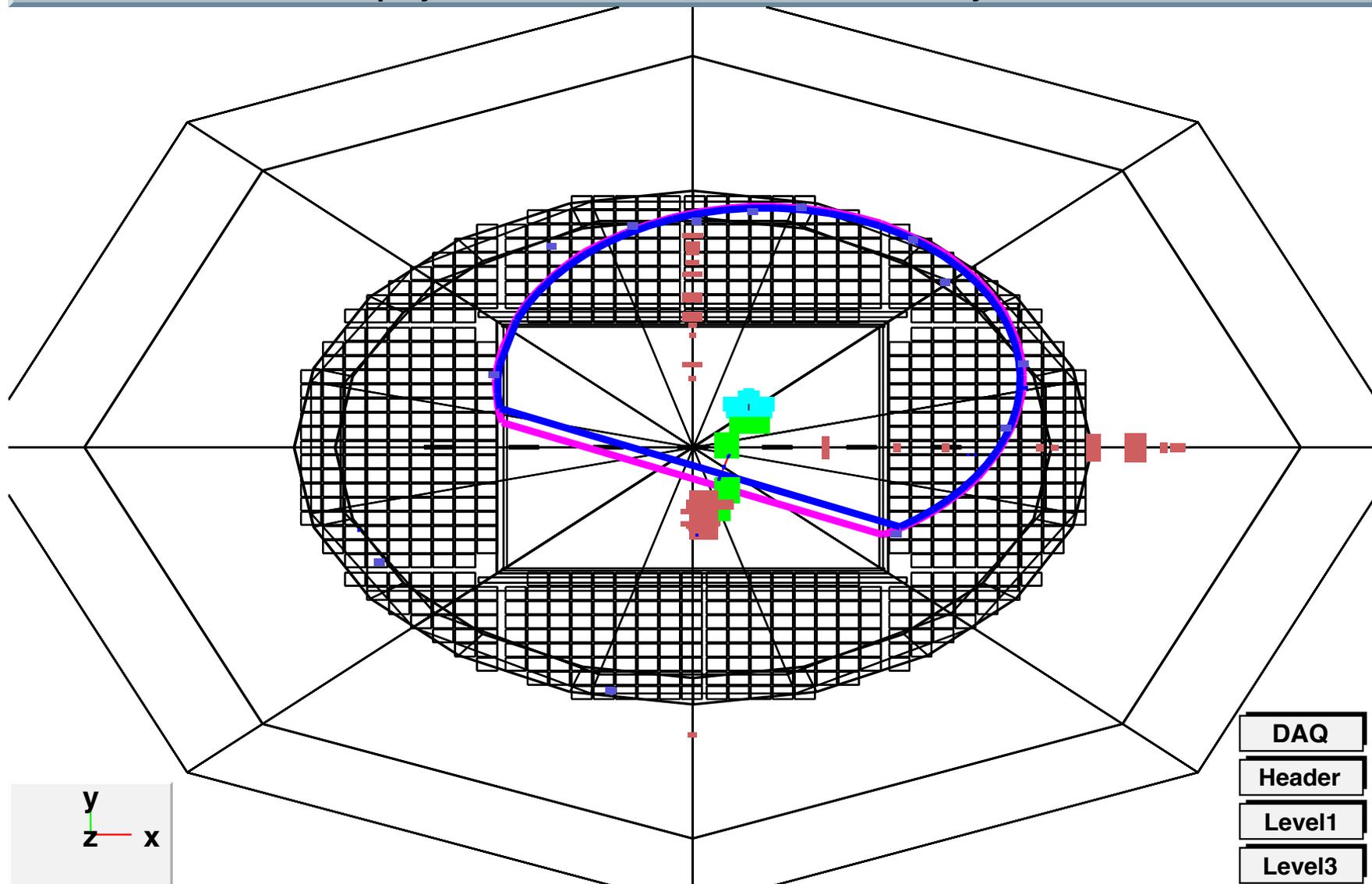
AMS First Science data – May 19th 9:15





particle TrTofTrdTrdHRichRichRFcal No 0 Id=47 n= 6 76- 0 26 M= 4 02+ 0 62 $\theta=3.03$ $\phi=1.33$ $Q=2$ R= 0.859+ 0.033/ 0.86 Coo=(3.79 -11.03 53.06) AntiC=482

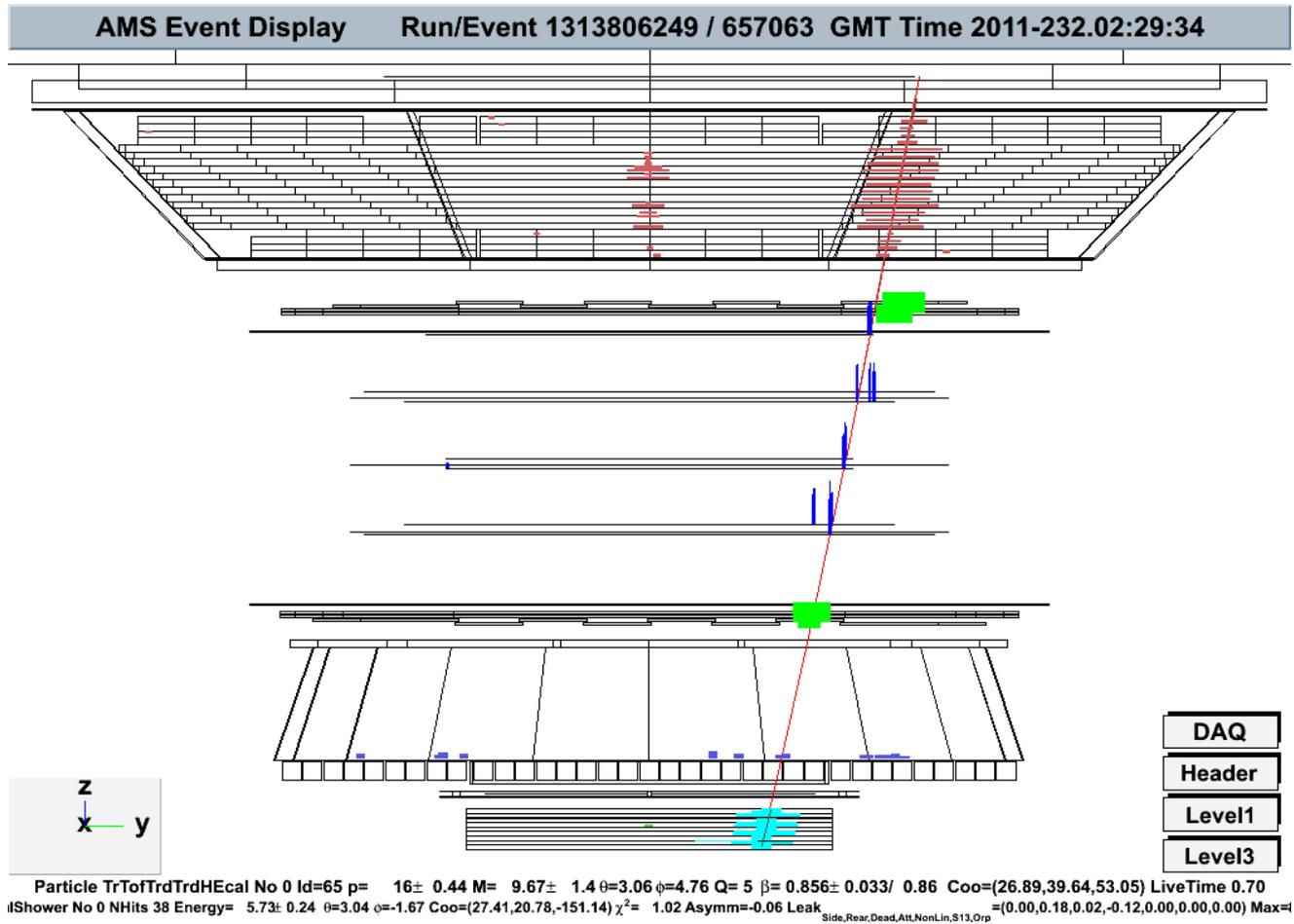
Helium candidate



Particle TrToFTrdTrdHRichRichBEcal No 0 Id=47 p= 6.76± 0.26 M= 4.02± 0.62 $\theta=3.03$ $\phi=1.33$ Q= 2 $\beta= 0.859\pm 0.033/ 0.86$ Coo=(3.79,-11.03,53.06) AntiC=482

Helium candidate

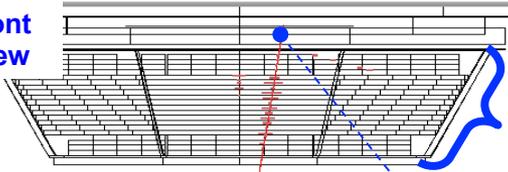
Boron candidate



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

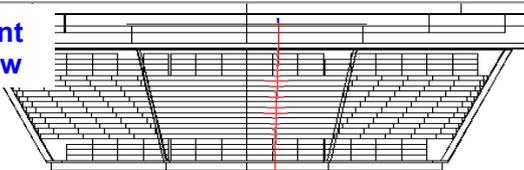
RICH charge of electron

ECAL: identifies electron and measures its momentum

z
x-y

369 GeV positron

front view



z
x-y

205 GeV positron

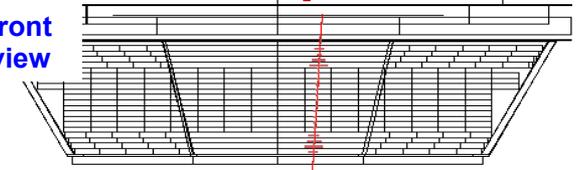
front view



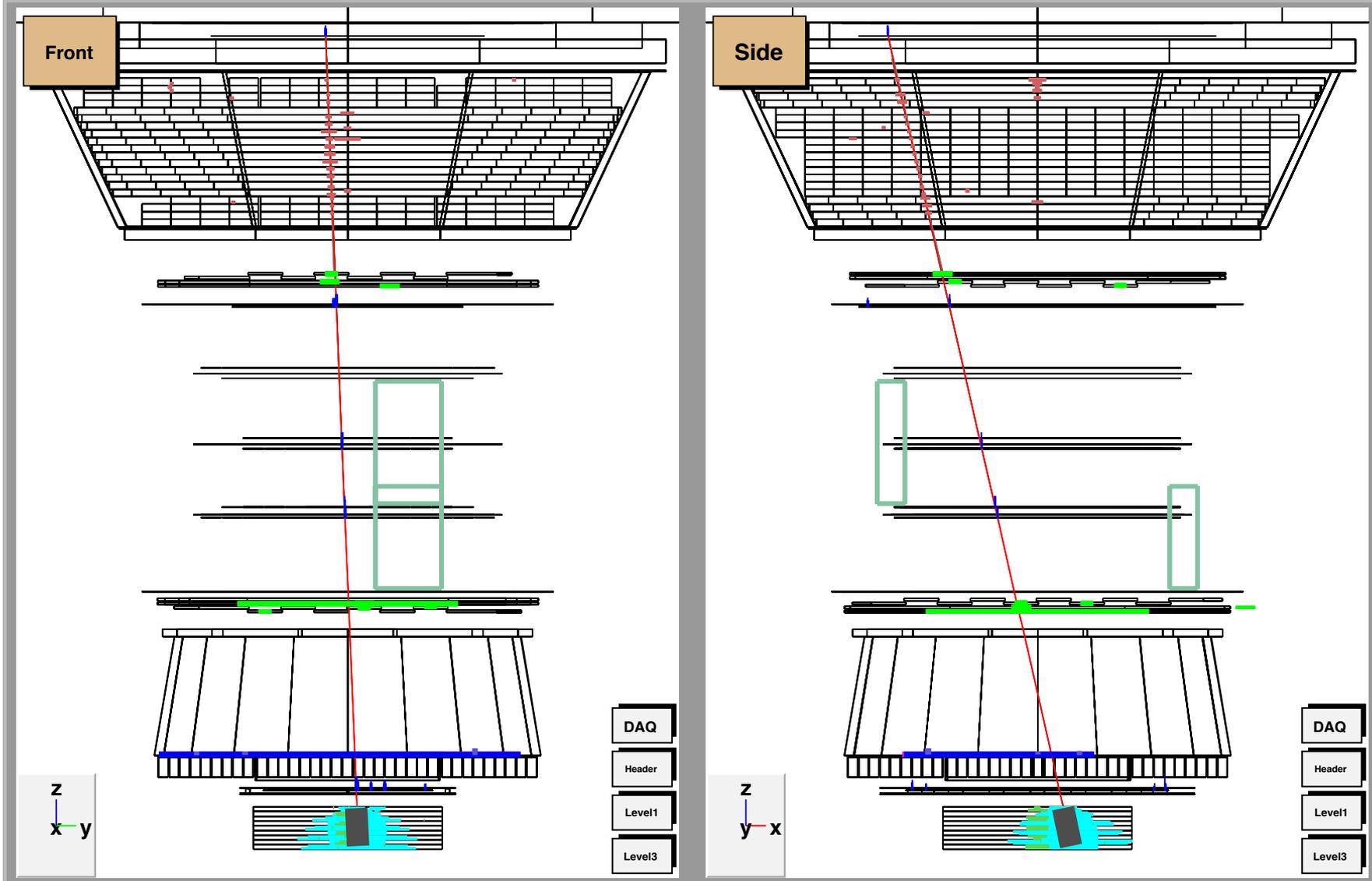
z
x-y

424 GeV positron

front view

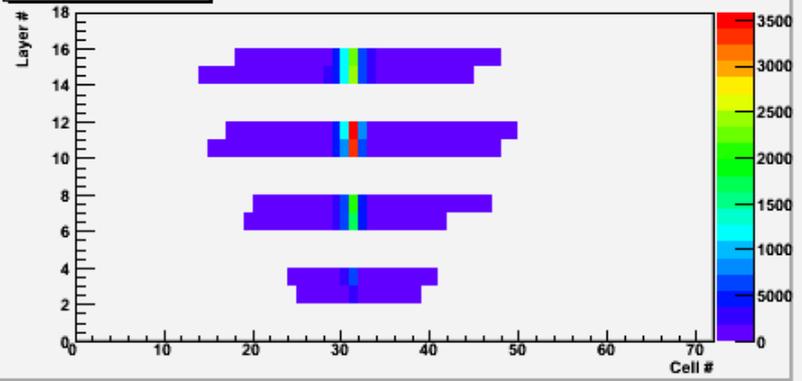


z
x-y

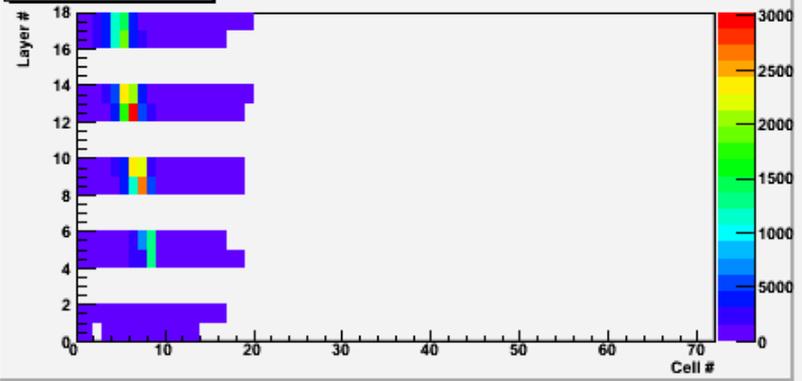


Electron candidate 276 GeV

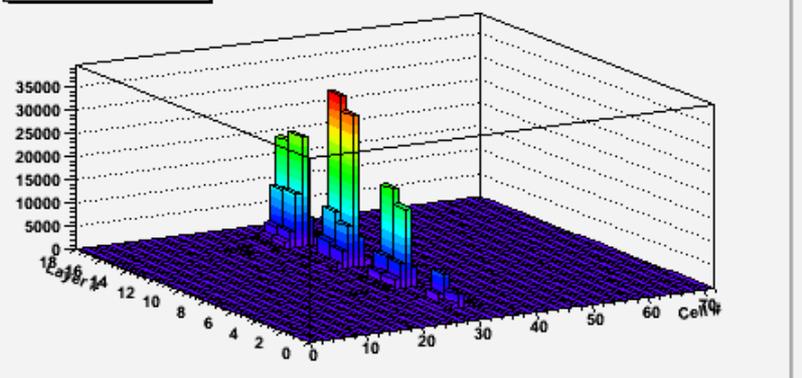
X Side, energy 901 GeV



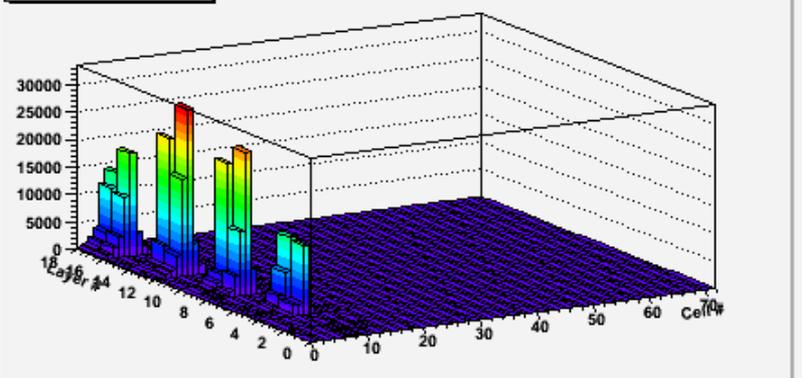
Y Side, energy 901 GeV



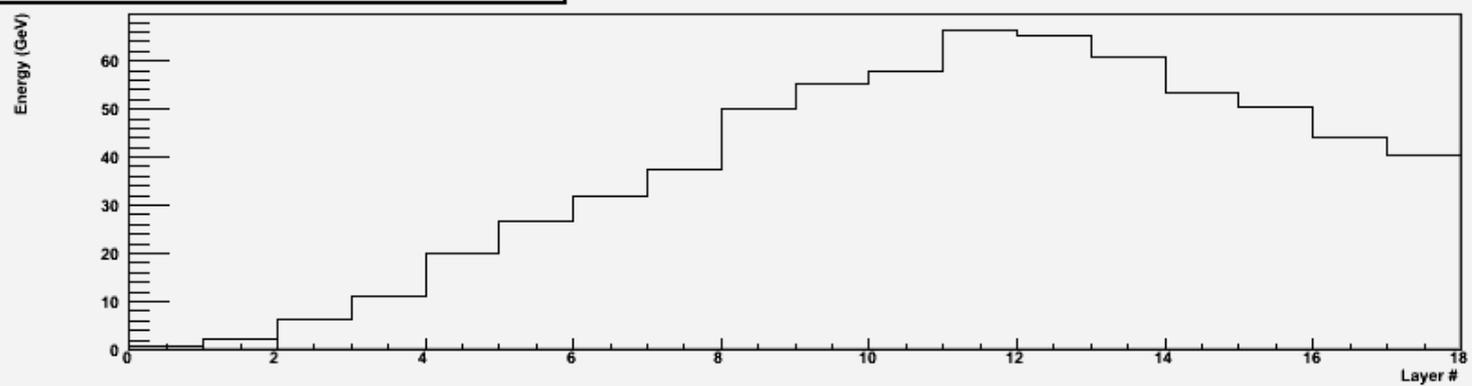
X Side, energy 901 GeV



Y Side, energy 901 GeV

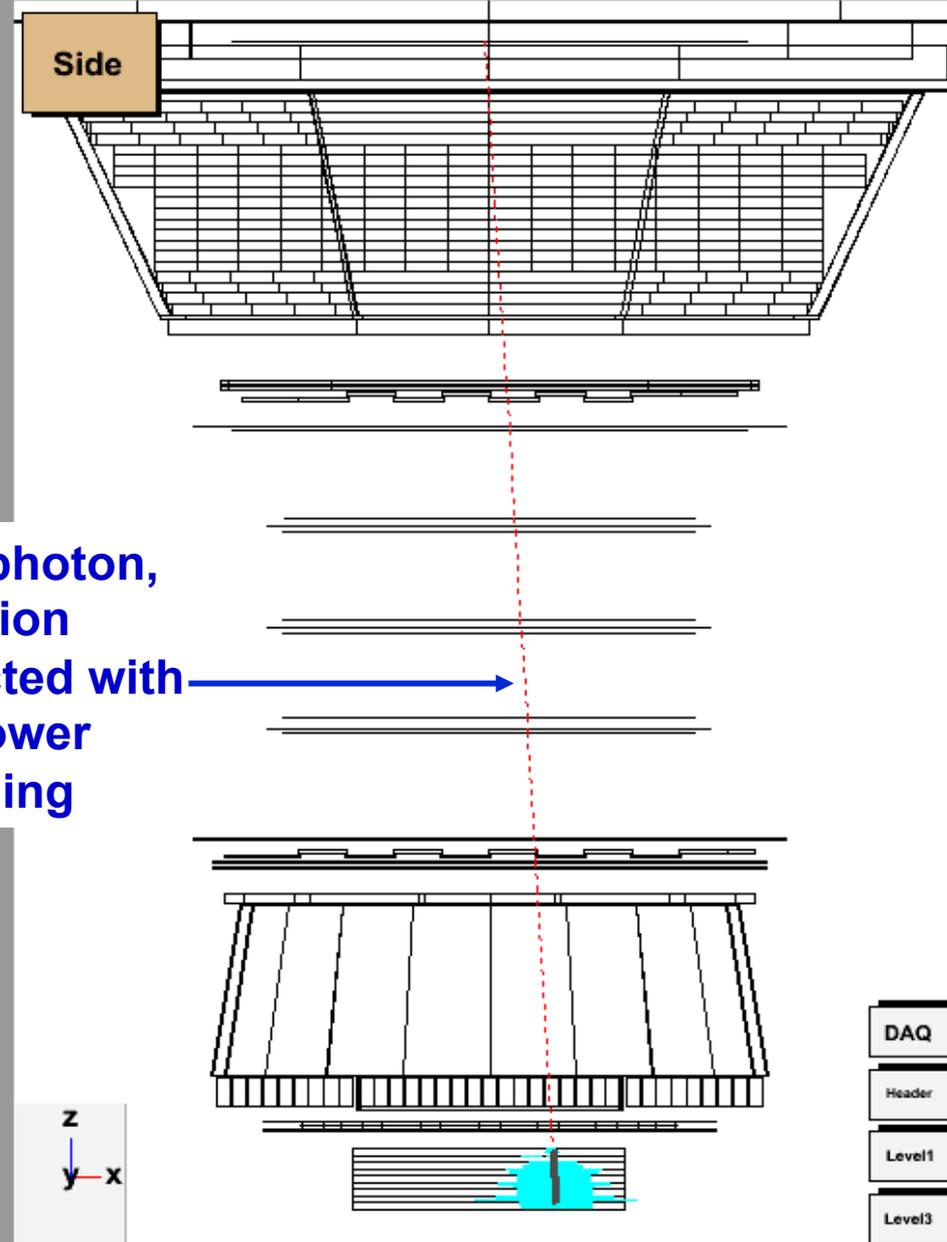
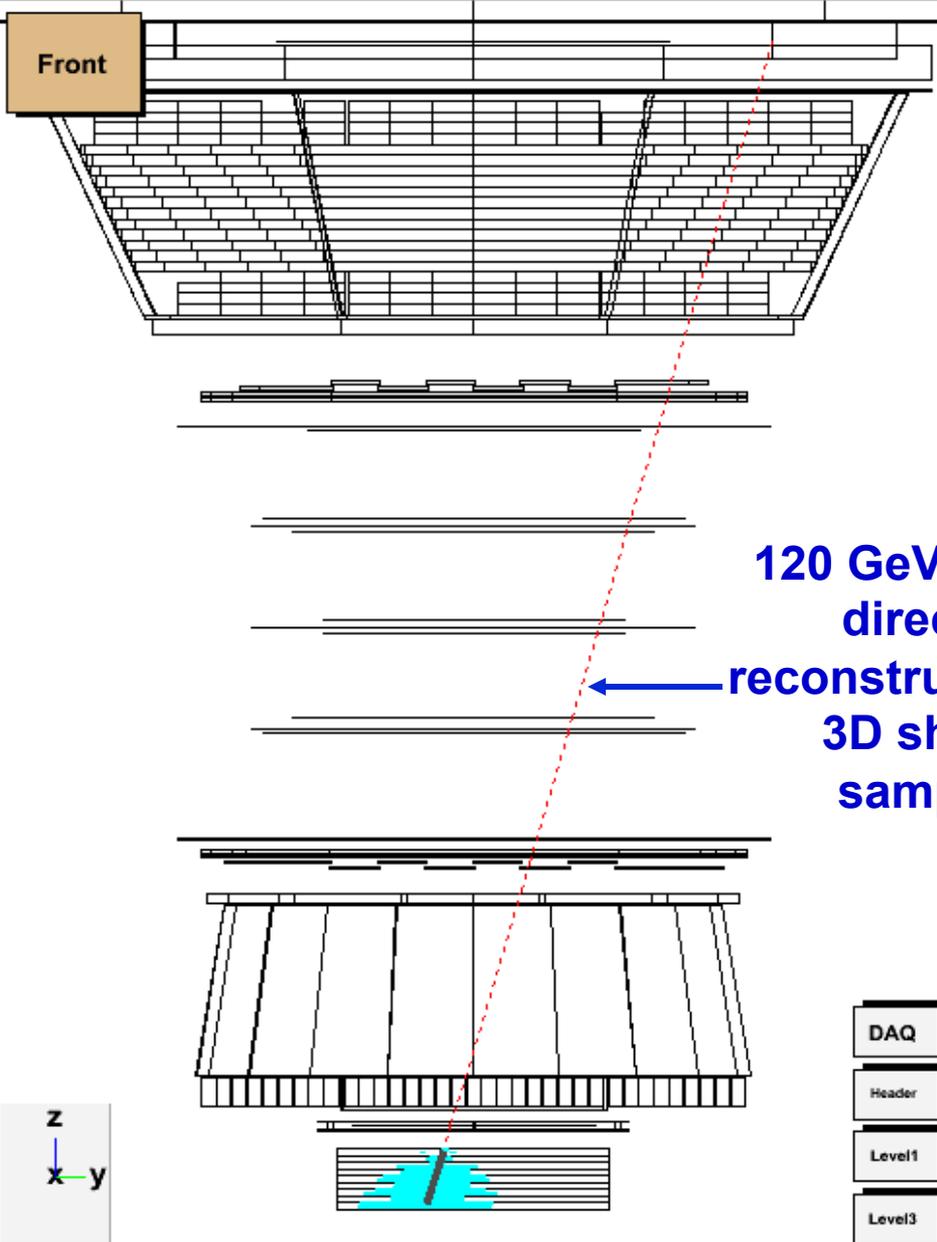


Longitudinal profile, energy 901 GeV, Run 1306168944 Event 122762



120 GeV photon

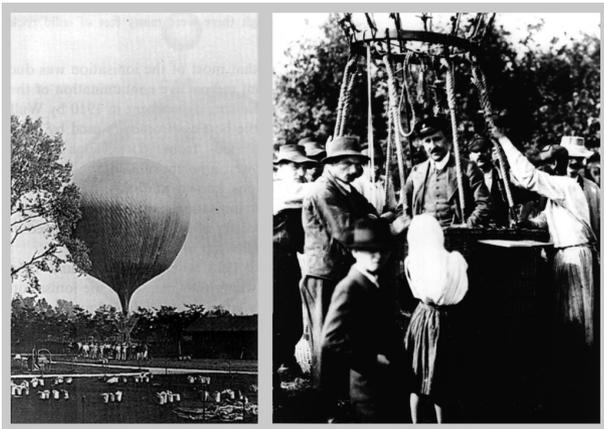
Unique Features: $17 X_0$, 3D ECAL, measure γ to 1 TeV, time resolution of $1\mu\text{sec}$



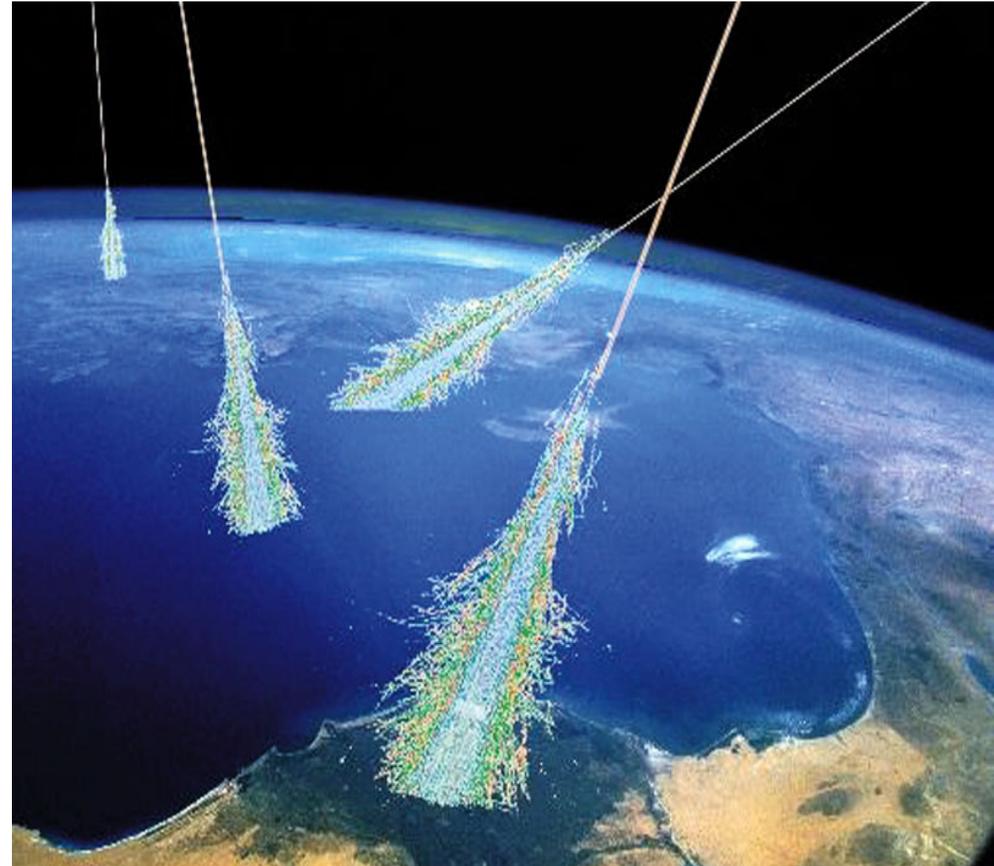
120 GeV photon,
direction
reconstructed with
3D shower
sampling

Détecter les rayons cosmiques sur la terre

L'atmosphère
devient le
détecteur



1912-1913 **V. Hess** and Kolhörster

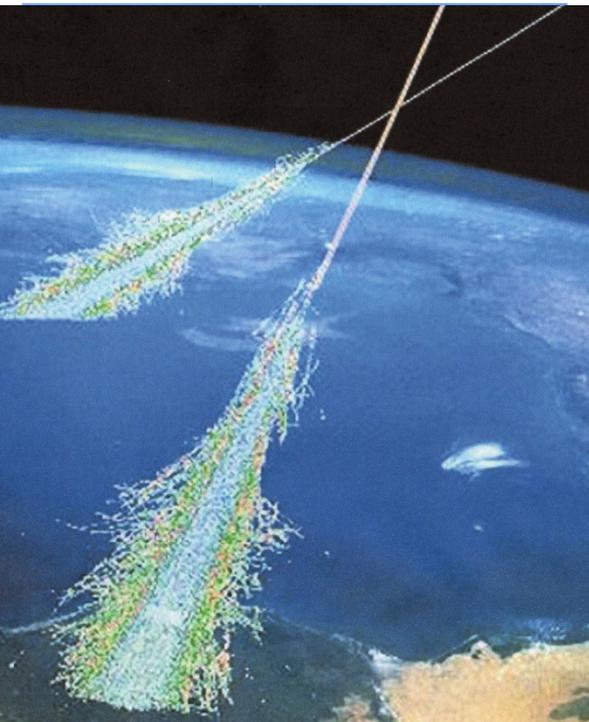


Les grandes gerbes atmosphériques

□ **1938, Pierre Auger** place 3 compteurs en triangle de façon qu'une coïncidence triple ne peut être produite par une seule particule mais nécessite au moins deux particules simultanées; avec son collaborateur **Roland Maze**, ils réduisent le temps de résolution des circuits de coïncidence de **1 millième à 1 millionième** de seconde!

A **Paris**, en écartant les compteurs de **5m**, il y a encore des coïncidences même résultat pour un écart de **200 m**

Au **Pic du Midi (2870 m)**, espacement de **70 m**: même résultat.

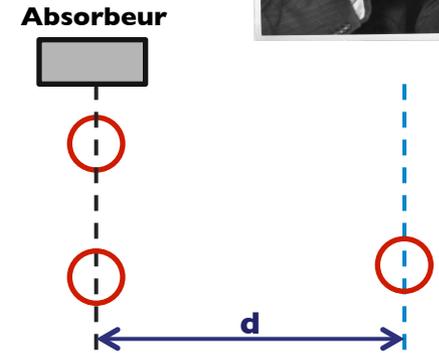


Auger (**3500 m** d'altitude; Suisse)

dispositif sur **300 m** de distance; toujours des coïncidences entre détecteurs répartis sur

Interprétation : 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.

A partir de la densité des gerbes de particules détectées, P. Auger remonte à l'énergie des particules primaires : certaines ont une énergie dépassant **10^{15} eV!**



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

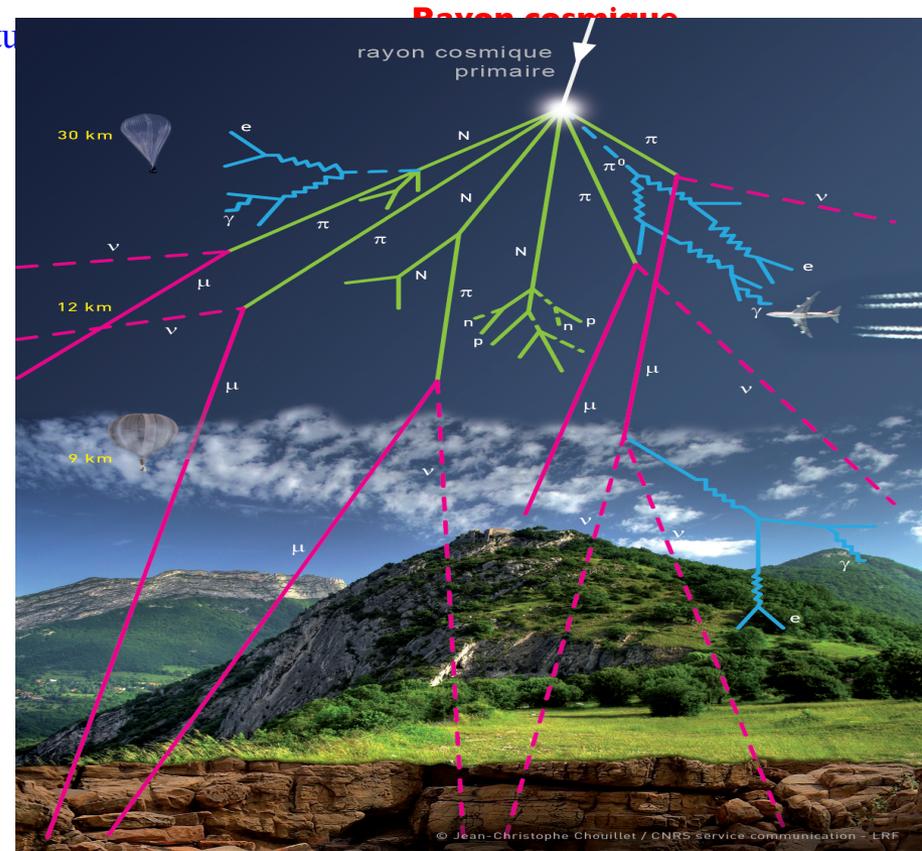
Les interactions dans la gerbe produisent:

- 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.

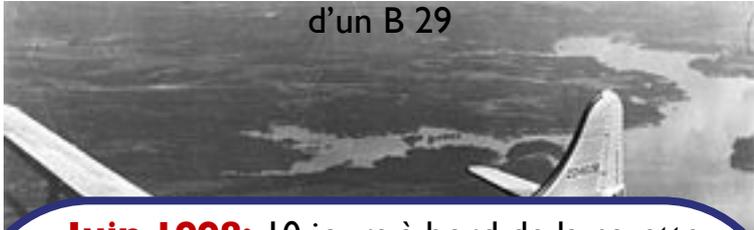


Gerbe électromagnétique
(e⁺, e⁻, γ)

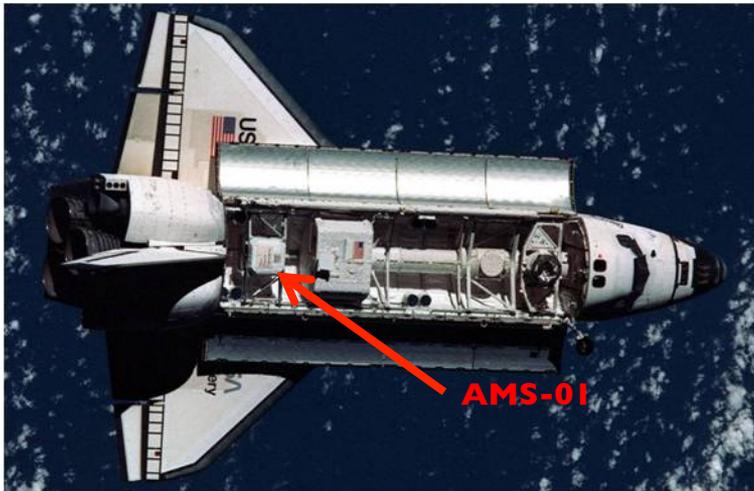
Gerbe hadronique;
(principalement μ et neutrinos au niveau du sol)

De nombreuses expériences au-delà des sommets...

1947: Carl Anderson enregistre des clichés de rayons cosmiques à **10 km d'altitude** avec une chambre à brouillard dans la soute d'un B 29



Juin 1998: 10 jours à bord de la navette **Discovery**; **altitude: 400 km**



(Vue depuis la station Mir)

2004-2010: expérience **CREAM**; 6 vols d'environ 1 mois à une **altitude de 38-40 km**



mais également au sol...

195

Expérience AGASA (Japon): vue d'une partie des détecteurs,
100 km² environ



1962: observation d'un rayon cosmique d'énergie **$> 10^{20}$ eV!**

15 octobre 1991: observation d'un rayon cosmique d'énergie **$3 \cdot 10^{20}$ eV!**

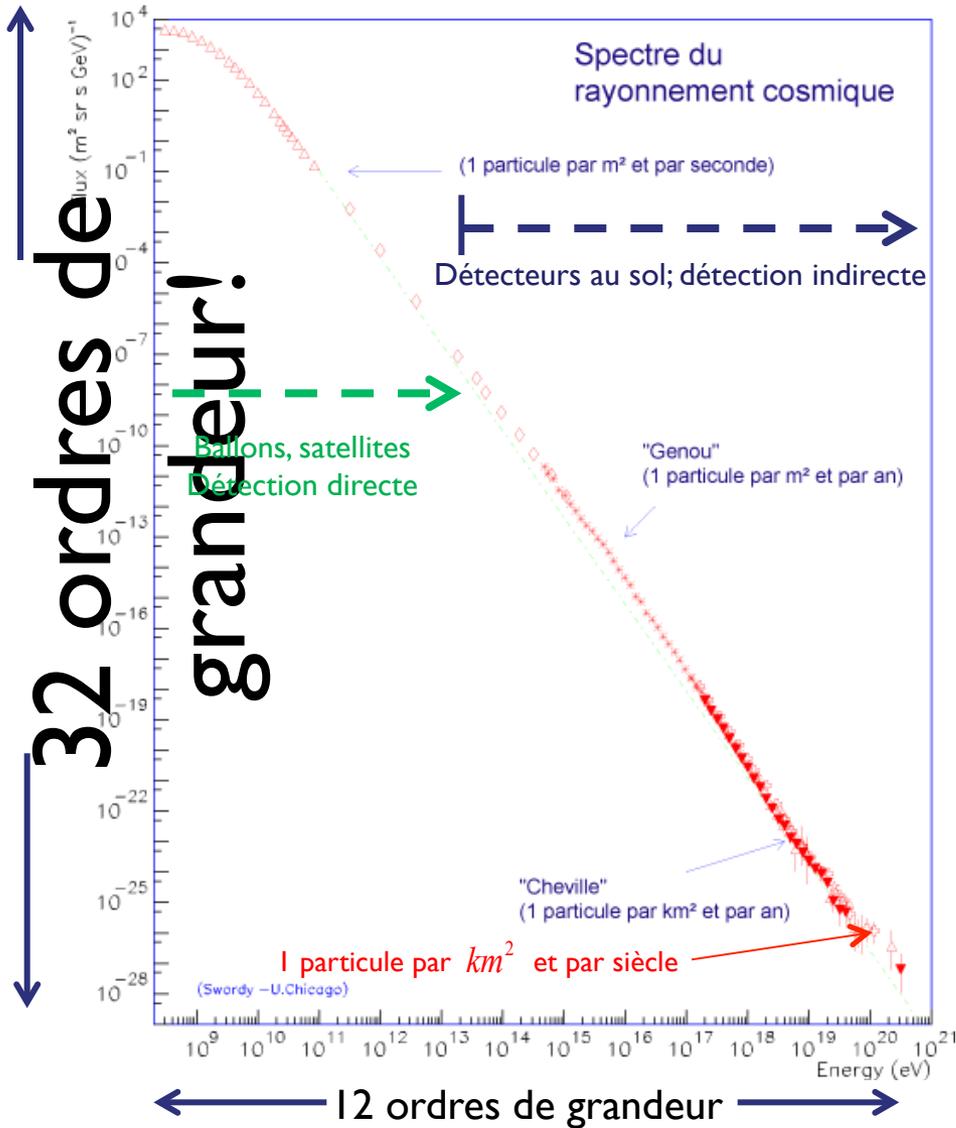
3 décembre 1993: observation d'un rayon cosmique d'énergie **$2 \cdot 10^{20}$ eV!**

Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (RCUHE):
 $3 \cdot 10^{20}$ eV = 50 joules !

**C'est l'énergie cinétique d'une balle de tennis (60 g) servie à la vitesse de 160 km/h
(dans un minuscule proton...)**

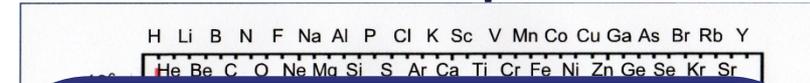
Comment et où sont générées des particules à de telles énergies?

Le rayonnement cosmique primaire

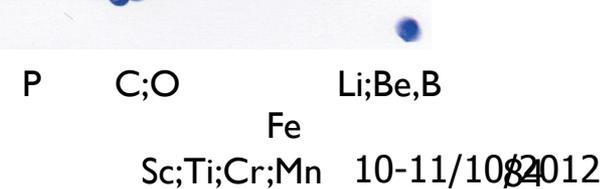


Composition du rayonnement cosmique primaire

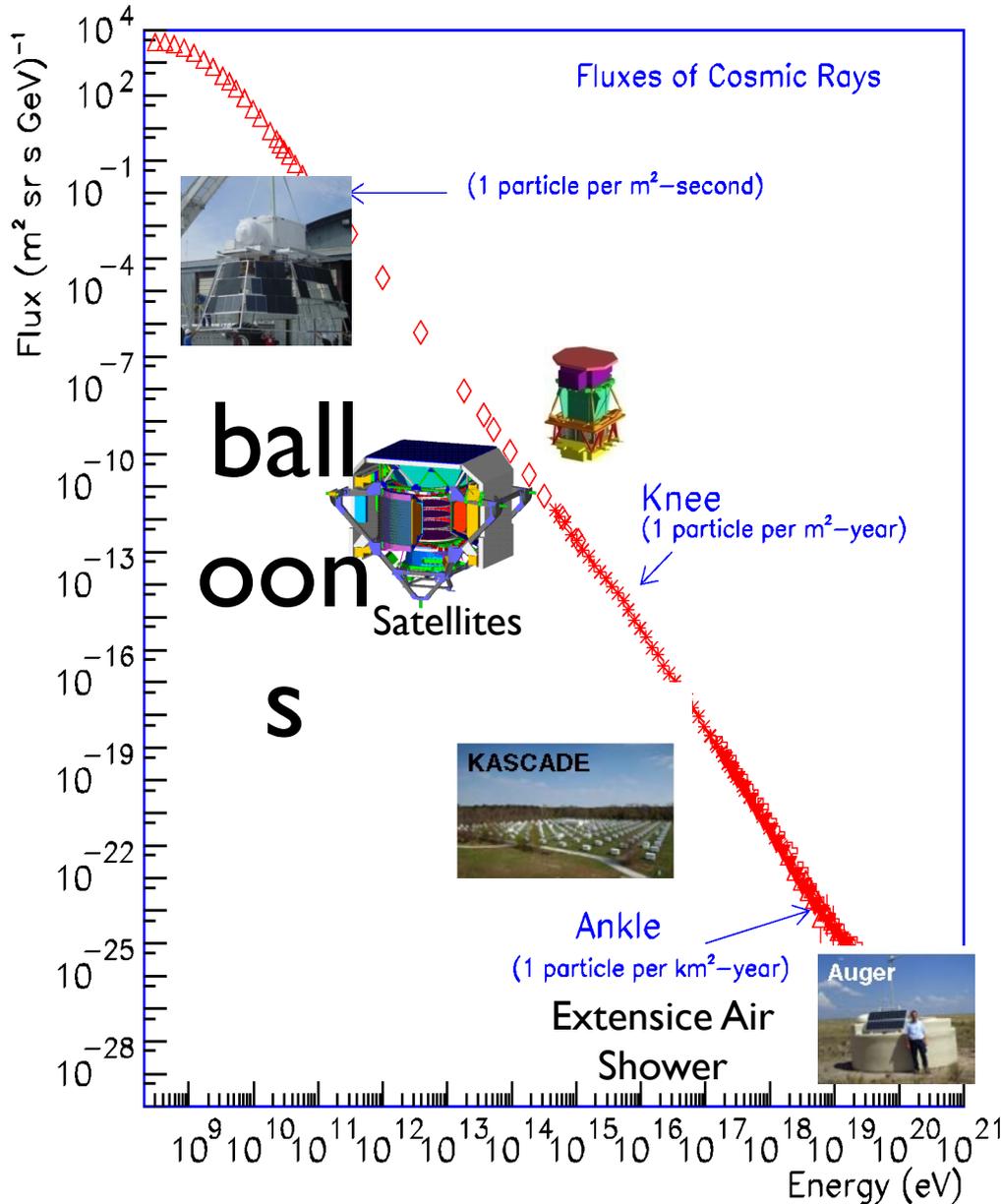
87% protons
11% noyaux d'hélium
2% noyaux plus lourds (du Li au Pb)
1% d'électrons et de positrons
 10^{-4} à 10^{-5} d'antiprotons



Une fraction des noyaux de Be est constituée de l'isotope ^{10}Be (radioactif, de période 1,5 million d'années). De l'abondance du ^{10}Be (rapport $^{10}\text{Be} / ^9\text{Be}$) et d'une estimation de la densité d'hydrogène interstellaire, on déduit que la durée moyenne du « voyage » d'un noyau de ^{10}Be est **de 10 millions d'années**.



Cosmic Ray fluxes measurements

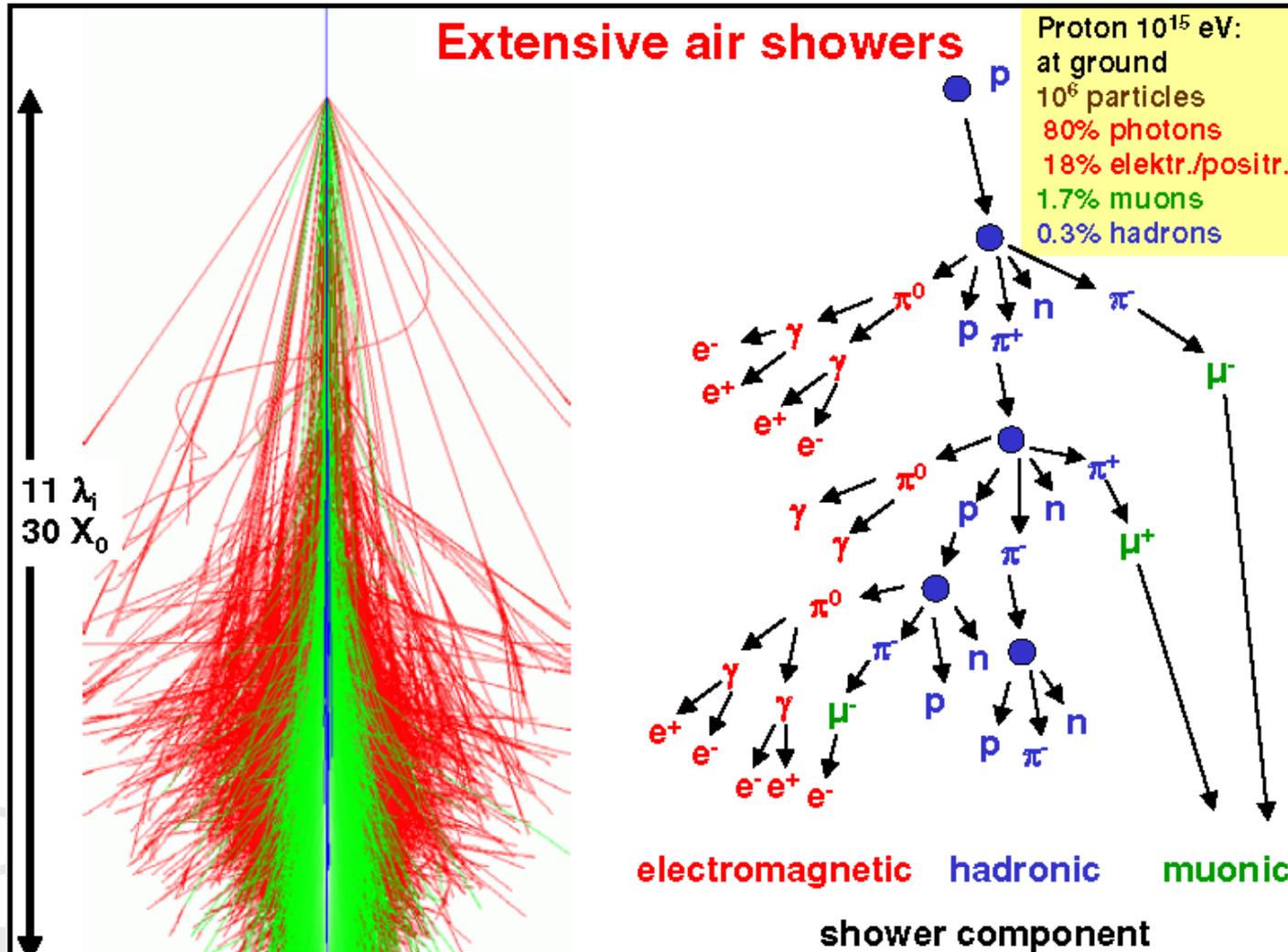


$$\frac{dN}{dE_0} \propto E_0^{-3}$$

Complementary devices and measurements for different energy ranges

- ▶ Nature of CR
- ▶ Origine of CR (sources)
- ▶ Propagation in different medium, galactic or extra galactic CR

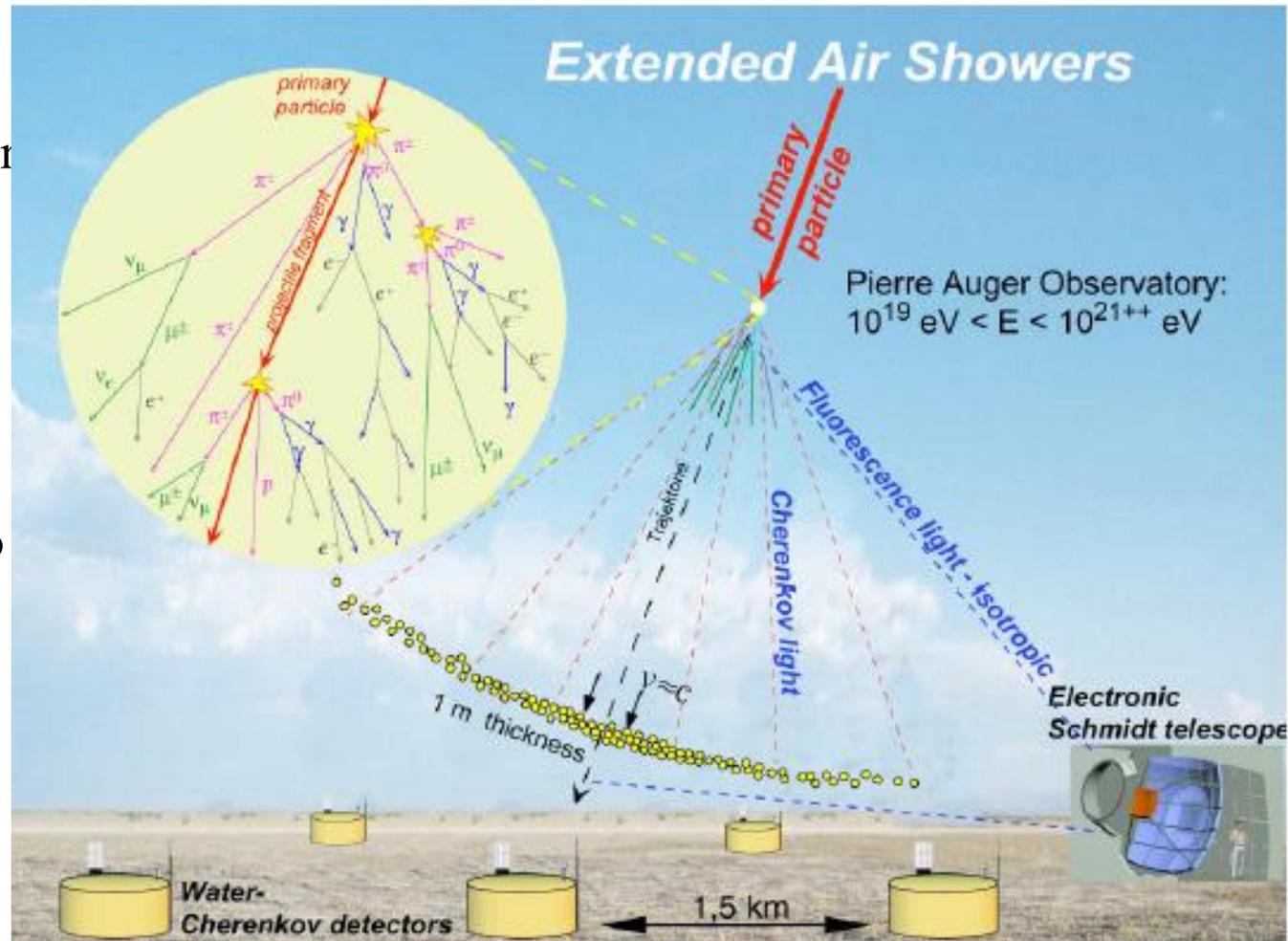
Extensive air showers



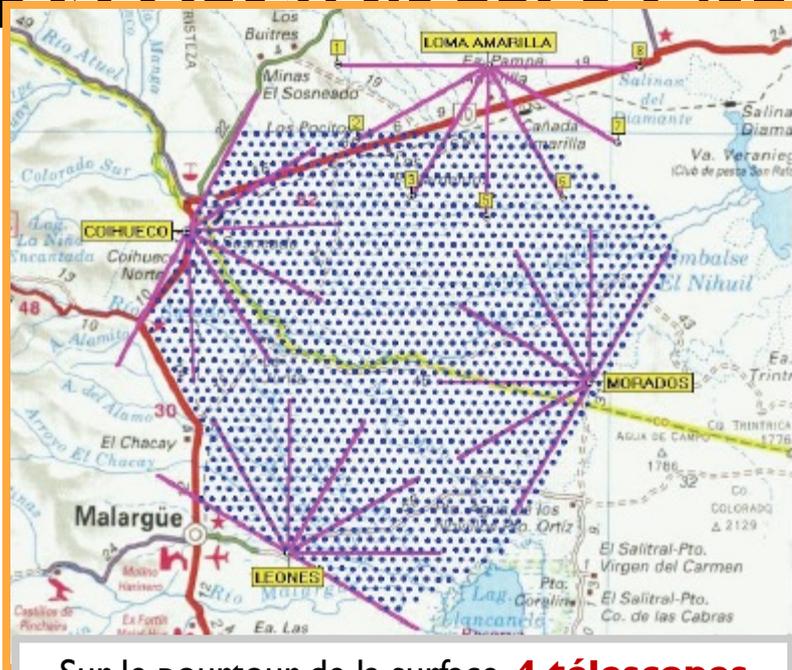
Auger observatory

➤ Auger: an hybrid detector using 2 methods:

- ▶ Sampling the number of particle at ground access to the lateral extension of the shower
- ▶ Fluorescence techniques: access to the longitudinal extension of the shower



L'observatoire AUGER (1)



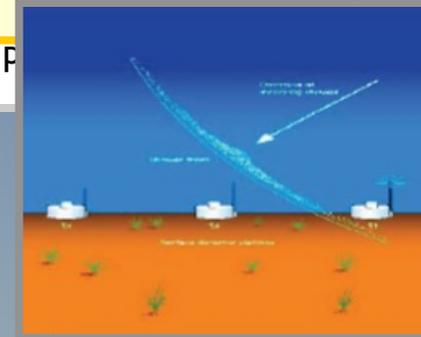
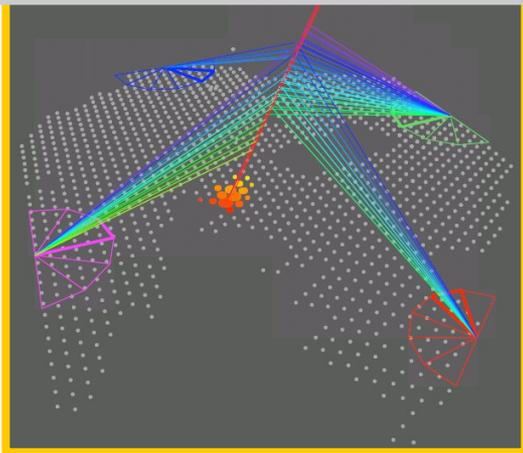
Rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{18} eV

1600 stations réparties sur une surface de **3600 km²**

les stations sont distantes de **1,5 km**.
Chaque station est remplie de **10000 l d'eau** et utilise la technique **Cerenkov** pour détecter les particules chargées. Elle est munie de **panneaux solaires** et d'un **GPS** pour la synchronisation en temps.

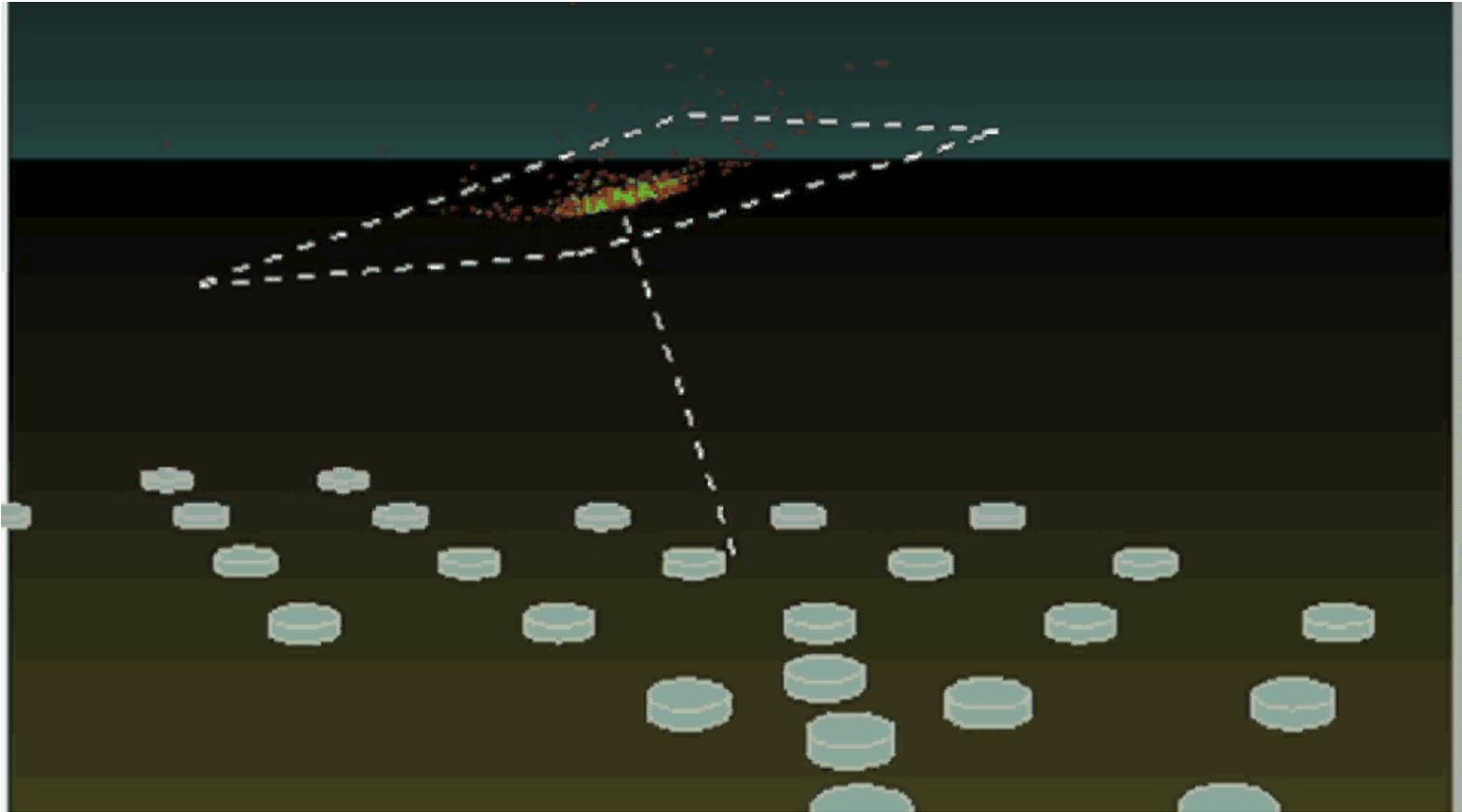
Le temps d'arrivée sur la station permet de déterminer la direction.

Sur le pourtour de la surface, **4 télescopes** utilisant la technique de **fluorescence**



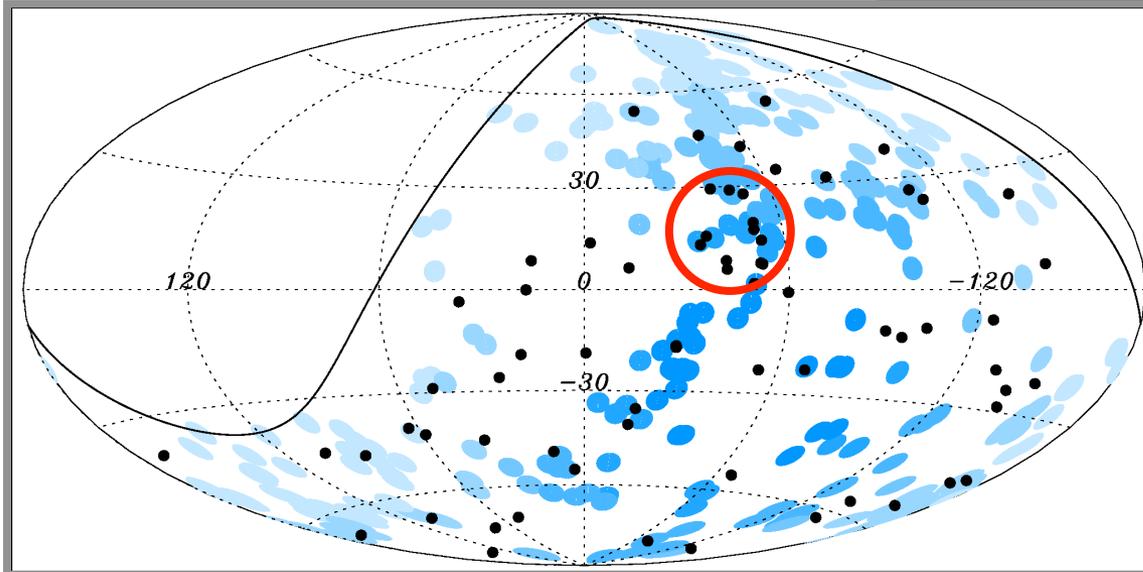
L'observatoire AUGER (2)

**Rayons cosmiques d'énergie
supérieure à 10^{18} eV**



L'observatoire AUGER (3)

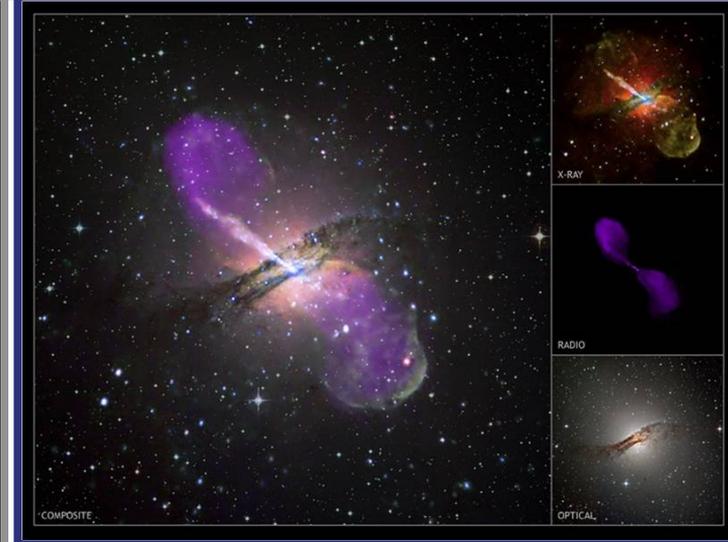
Rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{18} eV



Points noirs: **directions d'arrivée des 69 rayons cosmiques d'énergie supérieure à $5,5 \cdot 10^{19}$ eV** détectés par AUGER au 31 décembre 2009.

Les cercles bleus sont centrés sur les **318 AGN se trouvant à une distance inférieure à 75 Mpc** qui sont dans le champ de l'observatoire AUGER.

Sur les 69 RC observés, **18,8% se trouvent dans une région de 18° autour de Centaurus A.**



Centaurus A est une **galaxie elliptique massive** avec, en son cœur, un trou noir supermassif. Elle est située à environ **12 millions d'années lumière de la Terre**, et est la galaxie radio la plus puissante du ciel.

On pense que la masse du trou noir central équivaut à **100 millions de masses solaires**.

Obersevation des gamms au dessus de 100 GeV : l'atmosphère est le calormetre



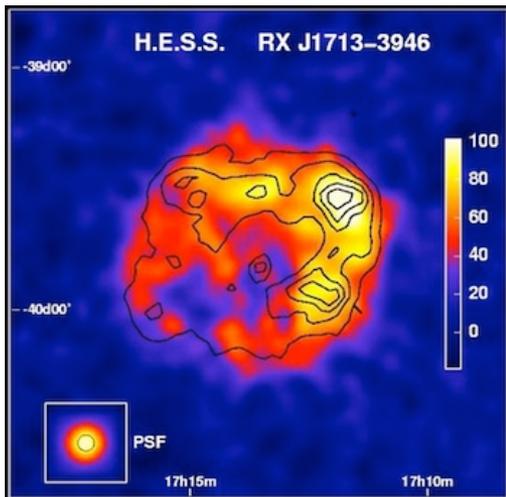
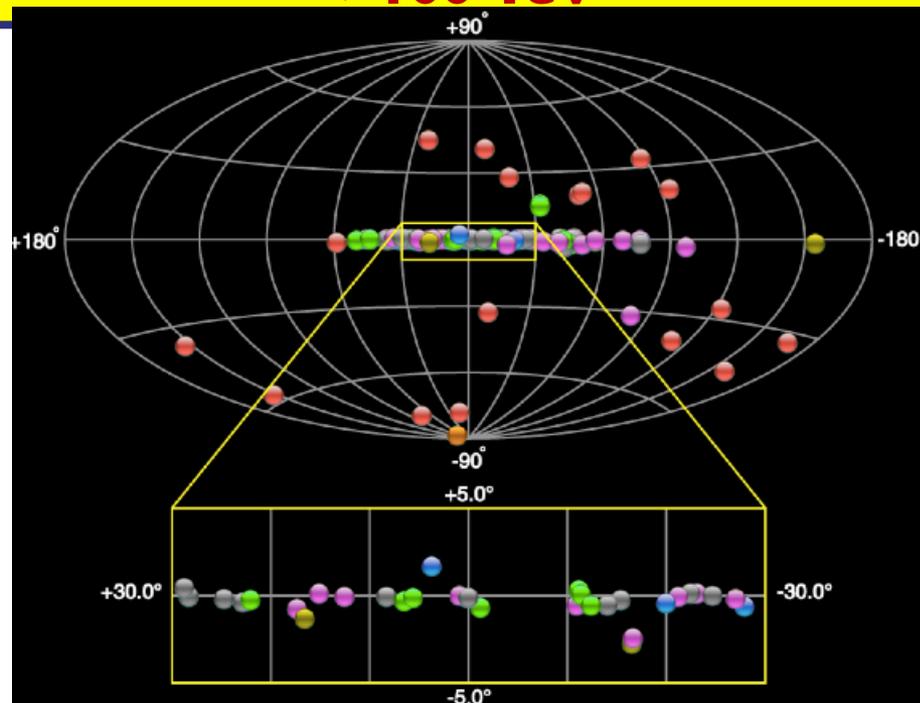
Télescope HESS (High Energy Stereoscopic System)(2)

Photons; énergie entre 100 GeV et > 100 TeV

À la mise en service de HESS, on connaissait une dizaine de sources gamma; **HESS en a rajouté 80 dont 19 extragalactiques**

Restes de supernovae
Noyaux actifs de galaxies
Nébuleuses de pulsars
Systèmes binaires
Objets non identifiés

...

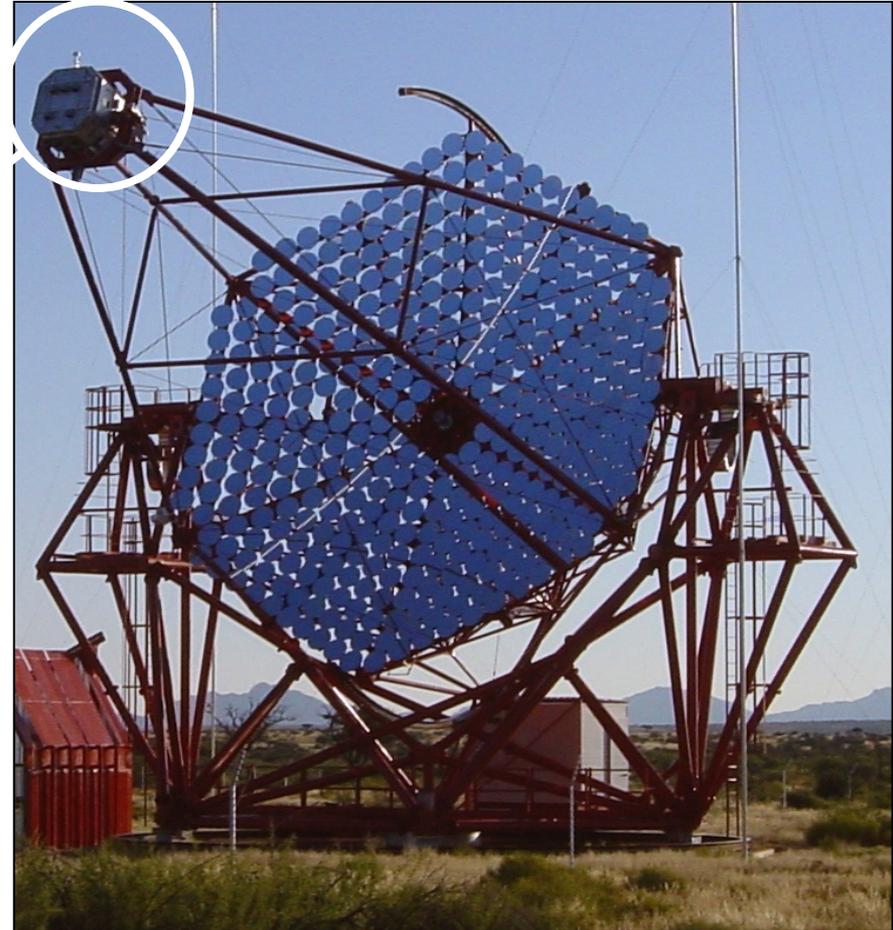


Ce cliché du reste de supernova RXJ1713 montre un rayonnement gamma d'énergie comprise entre 800 GeV et 10 TeV; l'onde de choc de ce reste de supernova (qui a eu lieu il y a 1600 ans) est un puissant accélérateur cosmique

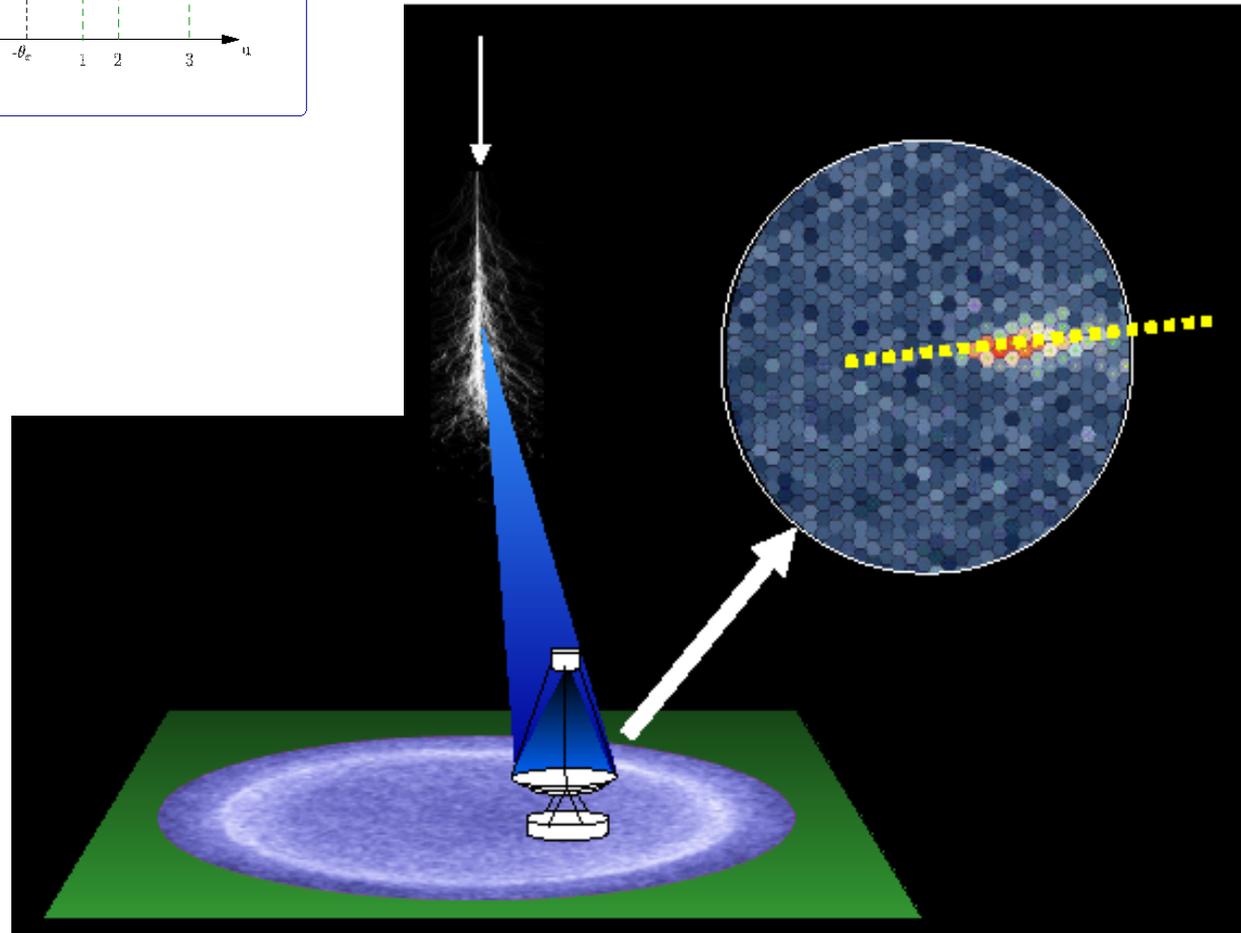
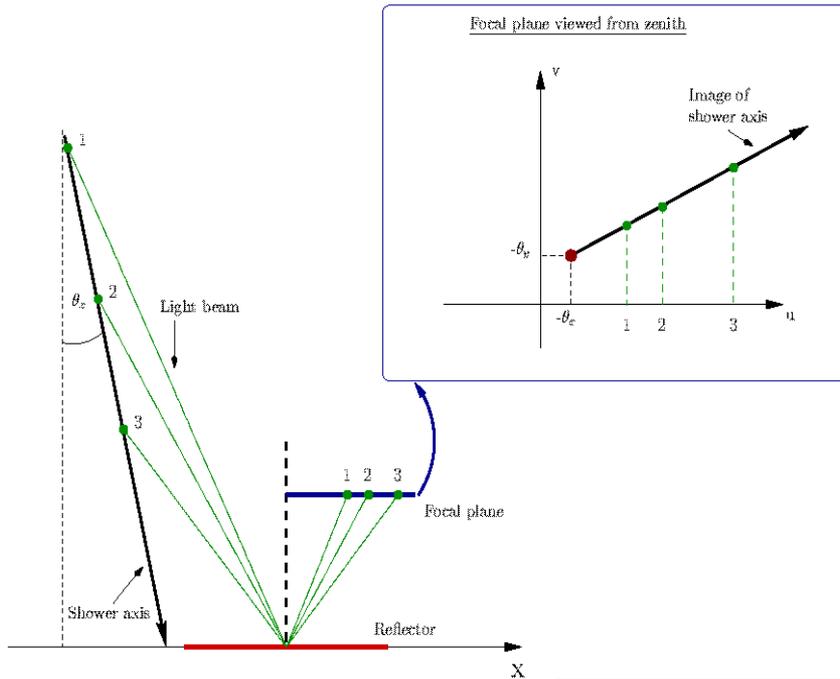
H.E.S.S. Telescopes/Cameras



- 960 photomultiplier tube pixels
- 5° FoV (1.4 m)
- 1 GHz sampling

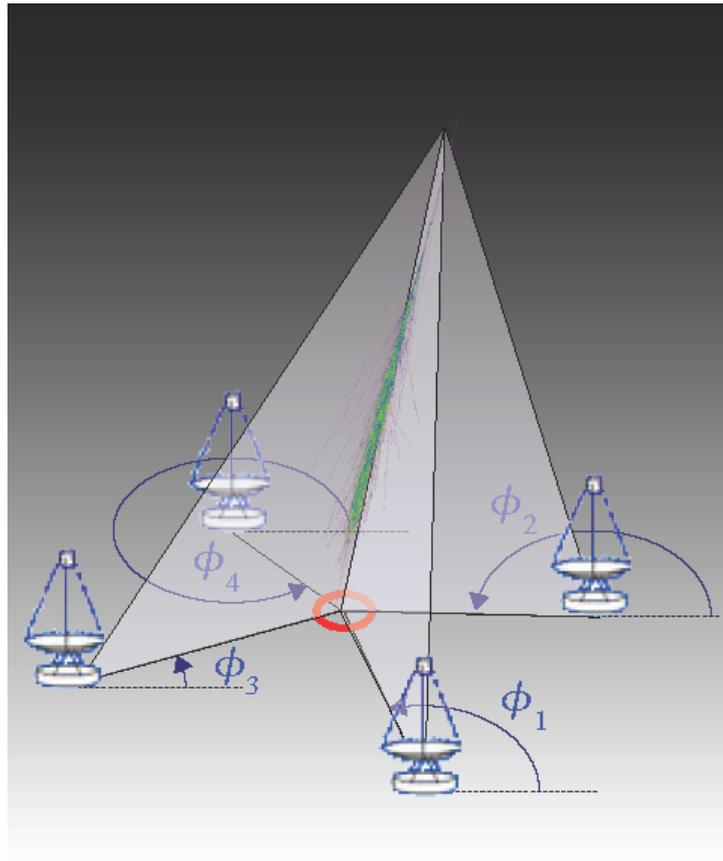


Reconstruction - Principle



Stereoscopic reconstruction

- ▷ Impact given the intersection lines (ϕ_i) on ground



- ▷ Shower direction given by the ellipse main axis intersections (in the camera frame)

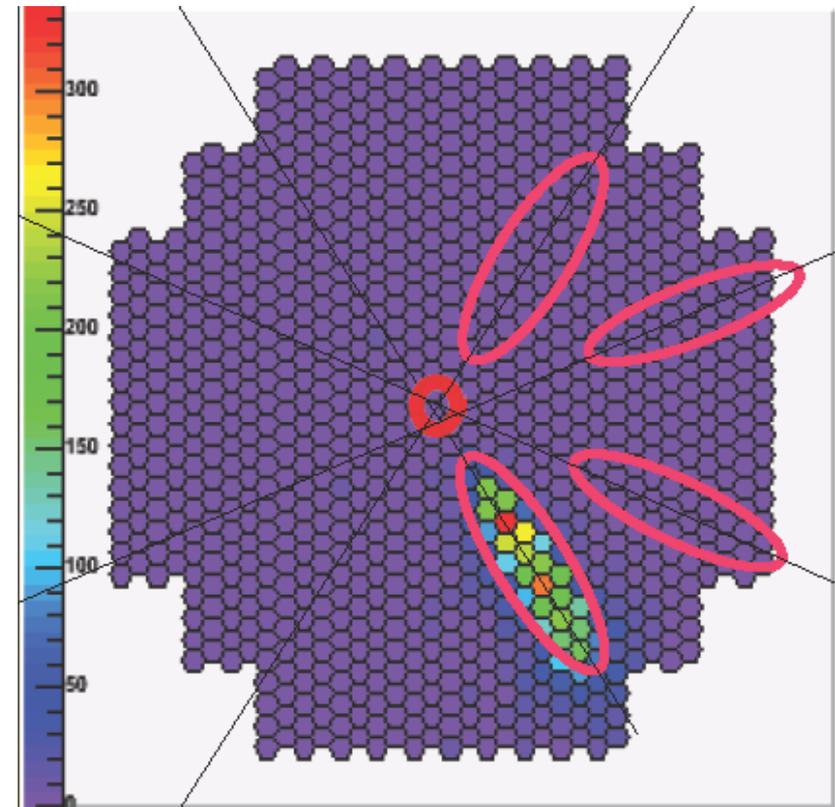
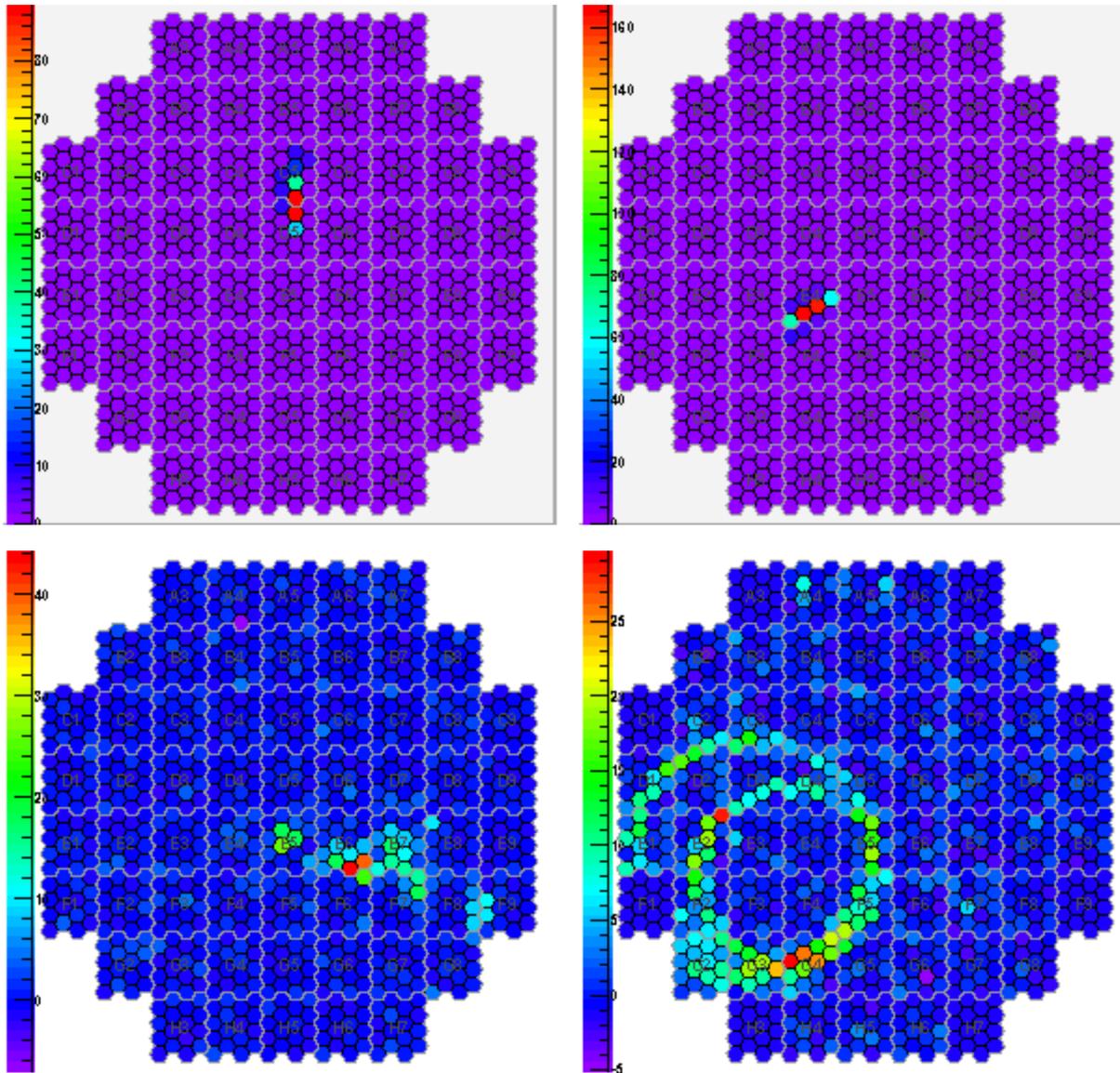
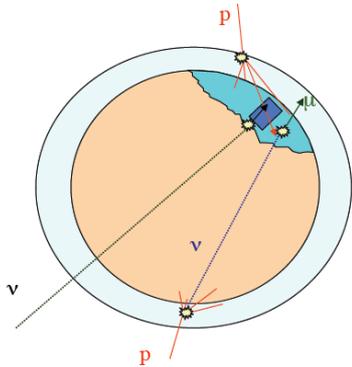


Image de particules



Les télescopes à neutrinos (ANTARES, Amanda...)

Neutrinos d'énergie entre 10^{10} eV et 10^{14} eV



un neutrino de haute énergie interagit dans la croûte terrestre, **un muon est produit**, dans la même direction.

Le muon peut parcourir jusqu'à une dizaine de km dans la croûte terrestre et émerger dans un volume instrumenté d'eau où il **crée un cône de lumière Cerenkov détecté par un réseau de photomultiplicateurs**.

La direction du muon, c'est-à-dire celle du neutrino étant déterminée, il est possible de pointer l'origine du neutrino.

On recherche des muons montants et on observe le ciel à travers de la Terre.

ANTARES, immergé à **40 km au large de Toulon**, par **2500 m de fond**.
12 lignes de 350 m de hauteur, espacées les unes des autres de **70 m** et couvrant une **surface de 0,1 km²**.
900 photomultiplicateurs sensibles à la lumière Cerenkov émise par le muon

Dans l'Antarctique, un détecteur similaire: **Icecube**, 50 fois plus volumineux, basé sur le même principe (en remplaçant l'eau par de la glace) observe l'autre moitié du ciel.

10-11/10/2012

