

# **Production et propagation de particules secondaires au voisinage de la Terre**

**L. Derome**

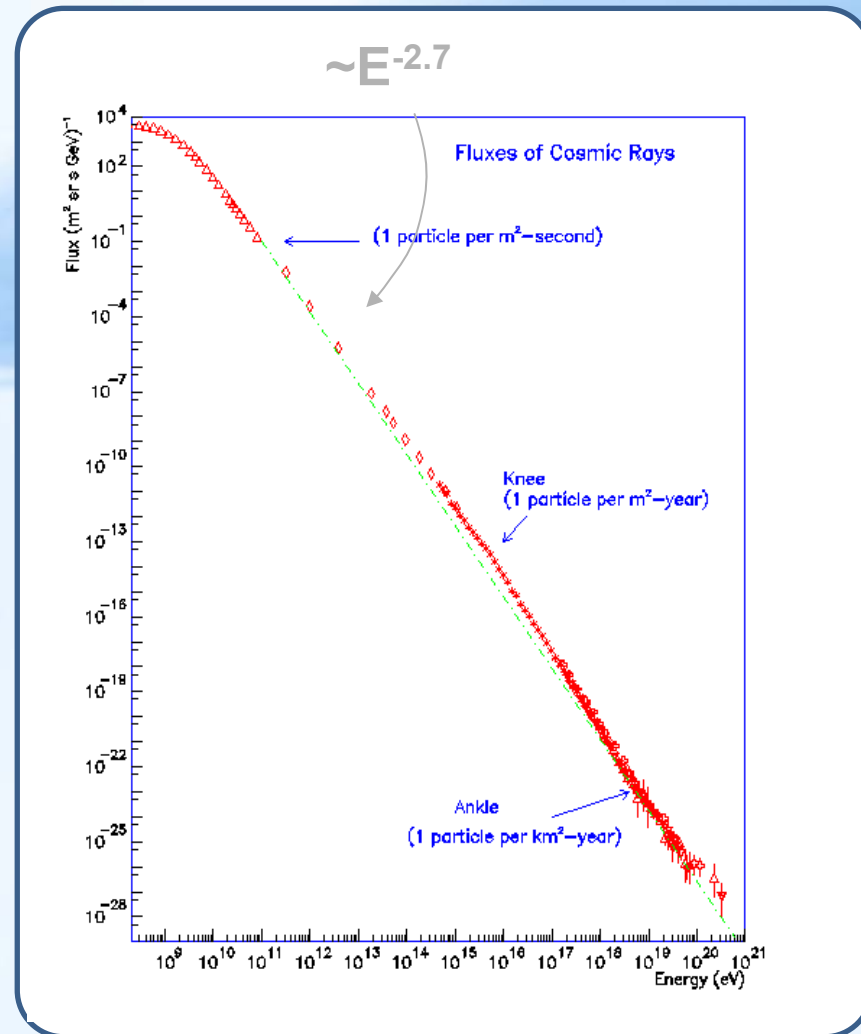
**Soutenance de DHDR, le 21 janvier 2008**

# Plan de la présentation

- **Introduction au rayonnement cosmique**
- **Simulation du rayonnement cosmique dans l'environnement terrestre**
  - **Interprétation des résultats d'AMS01**
  - **Production d'antimatière dans l'atmosphère**
  - **Production de neutrinos atmosphériques**
- **Mesure du rayonnement cosmique : présent et perspectives**

# Rayonnement Cosmique

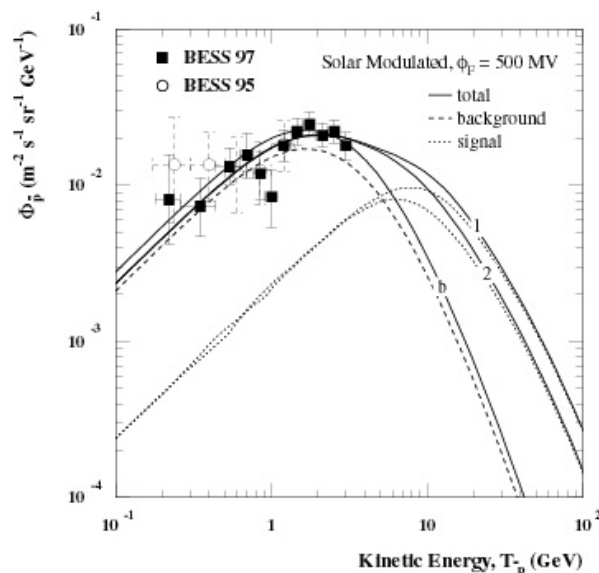
**Rayonnement cosmique :  
Mesuré depuis un siècle,  
(vol de Victor Hess en 1912)**



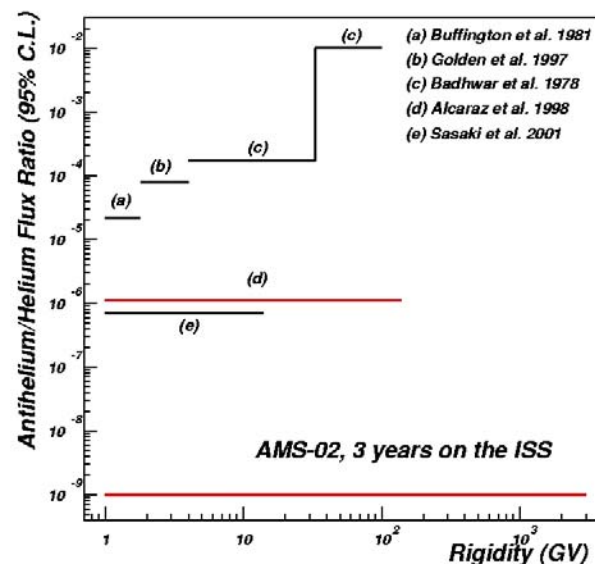
# Rayonnement Cosmique

➔ **AstroParticules :**  
« Etude des constituants  
fondamentaux de l'univers grâce  
au rayonnement cosmique »

**Recherche matière noire dans la  
galaxie :  $\bar{p}$ ,  $\bar{D}$ ,  $e^+$**



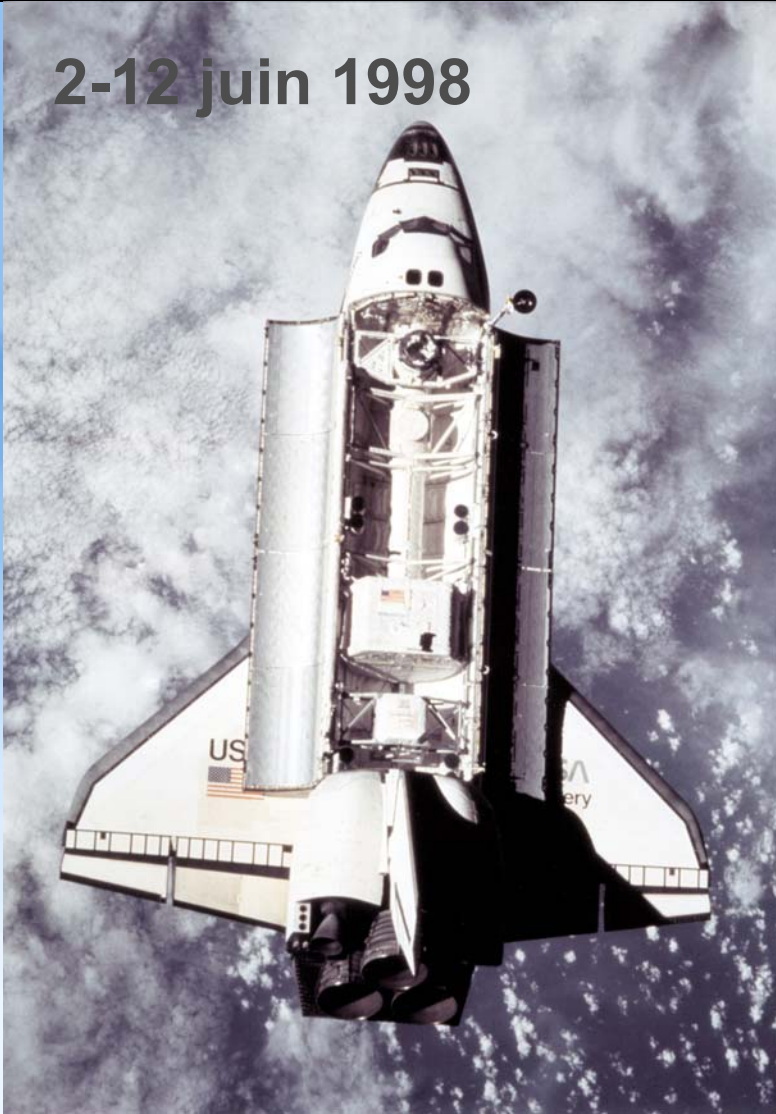
**Symétrie matière/antimatière  
 $^4\bar{\text{He}}/^4\text{He}$**



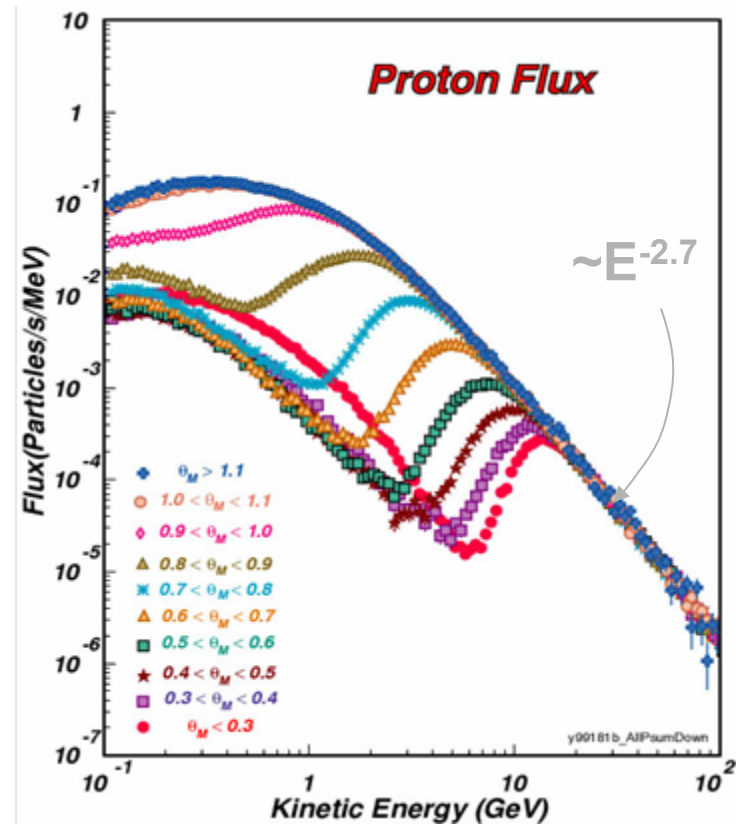
**Programme  
expérimental AMS01**

# Vol AMS01

2-12 juin 1998



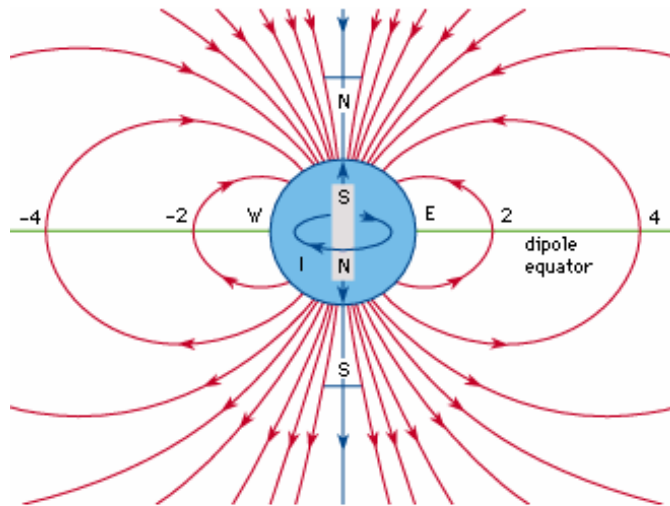
Mise en évidence d'une population importante sous la coupure géomagnétique



➡ Mais aussi composantes  $e^{\pm}$ ,  $^3\text{He}$ , D

# Coupure Géomagnétique

## Champs magnétique terrestre



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

**Champ proche d'un dipôle**

➡ **Bouclier magnétique  
qui repousse les particules  
de basses énergies**

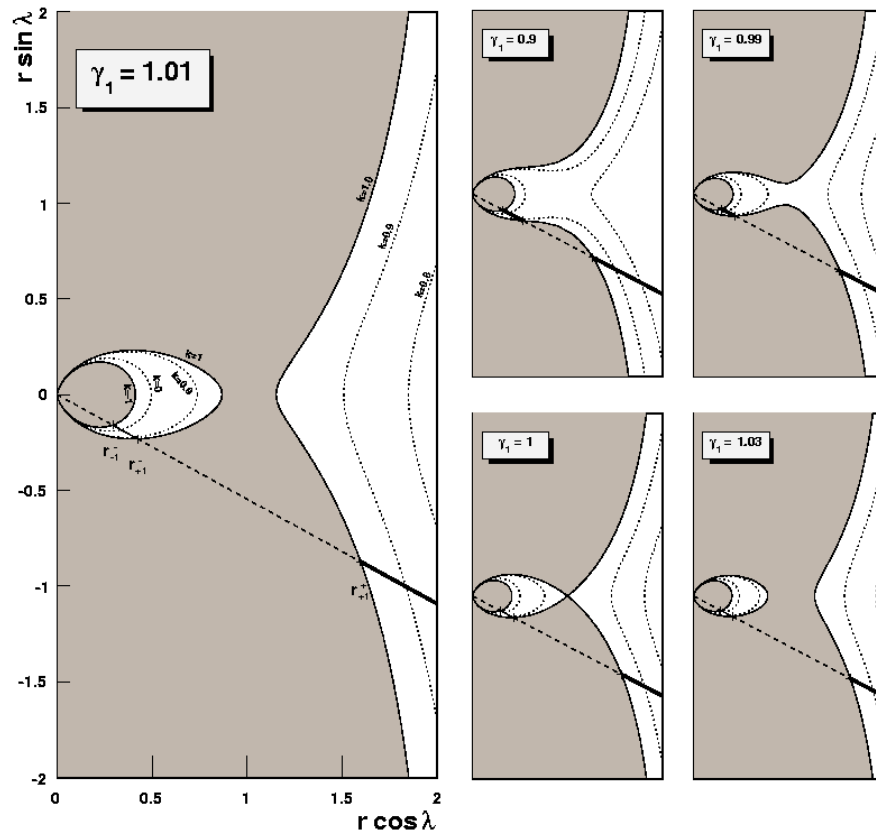
**Trajectoire d'une particule dans un champs  
magnétique dipolaire :**

- Pas de solutions générales
- Détermination de zones interdites en fonction de la constante du mouvement  $\gamma_1$

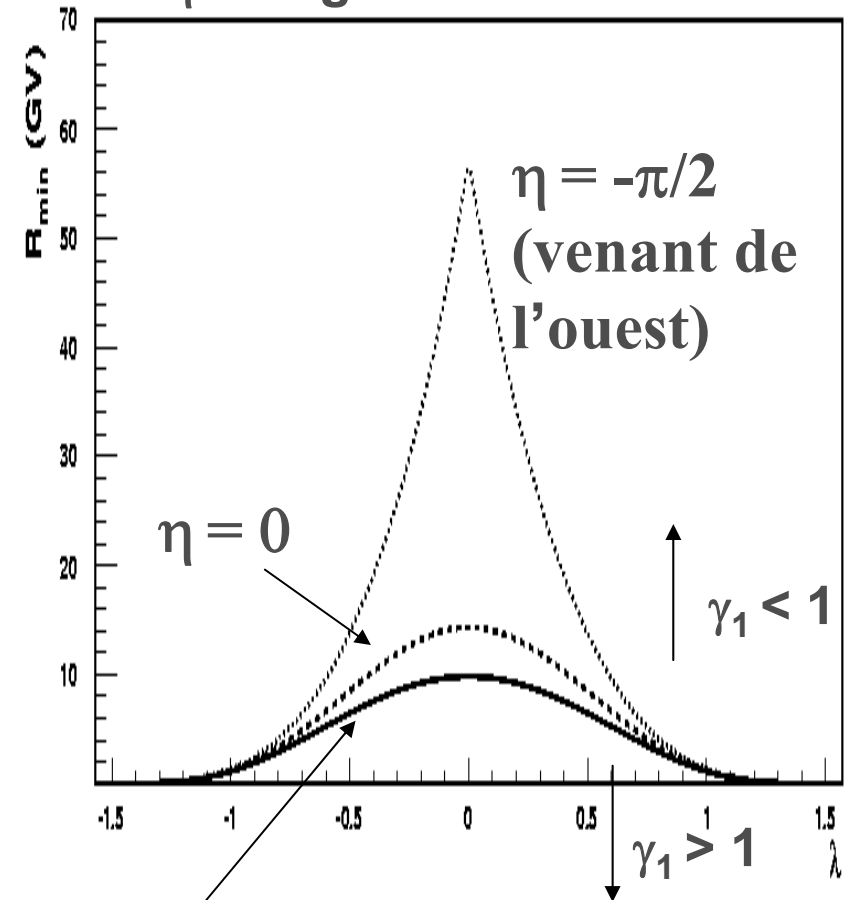
$\gamma_1$  : associée à la symétrie cylindrique

# Coupure Géomagnétique

## Zones interdites dans le plan équatorial



$\eta = \text{Angle Est-Ouest}$



$\eta = \pi/2$  (Venant de l'est)

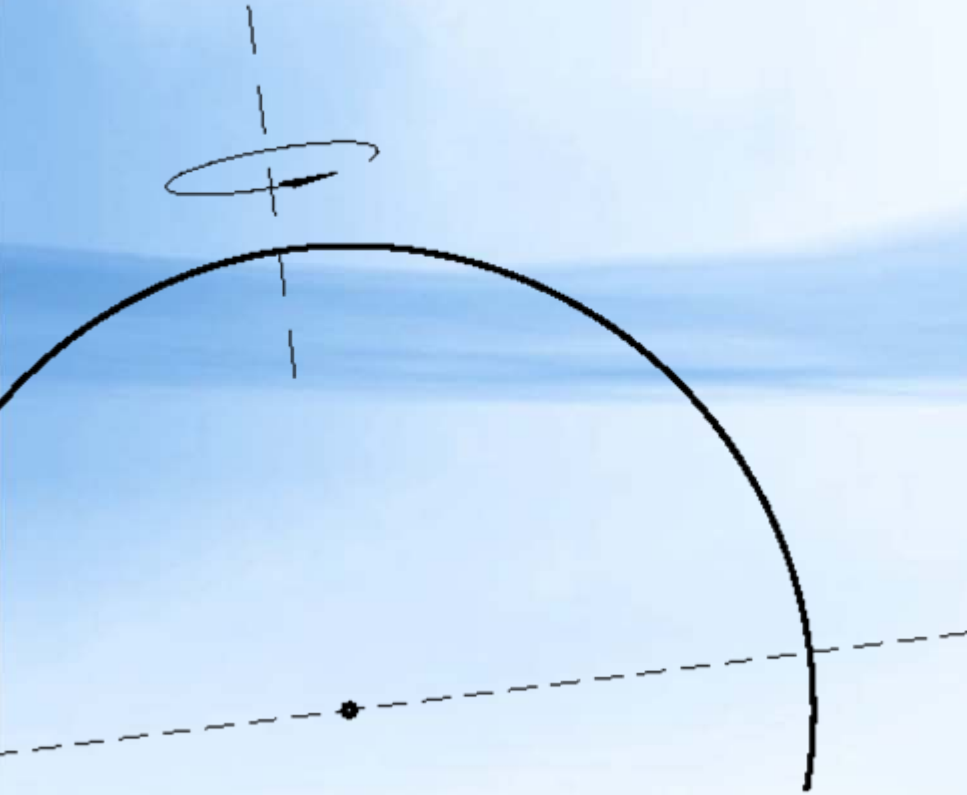
# Particules sous la coupure

- **Hypothèse de travail :**  
Les particules sous la coupure géomagnétique sont des particules piégées produites dans l'atmosphère.
- **Est-on capable de reproduire les flux dans une simulation intégrant la propagation et l'interaction des particules dans l'environnement terrestre ?**
- **Peut-on reproduire les caractéristiques spécifiques observées :**
  - Flux de proton dans la région équatoriale
  - Rapport  $e^+/e^-$  de l'ordre de 4 dans la région équatoriale
  - $\text{He}^3/\text{He}^4 > 10$  sous la coupure.

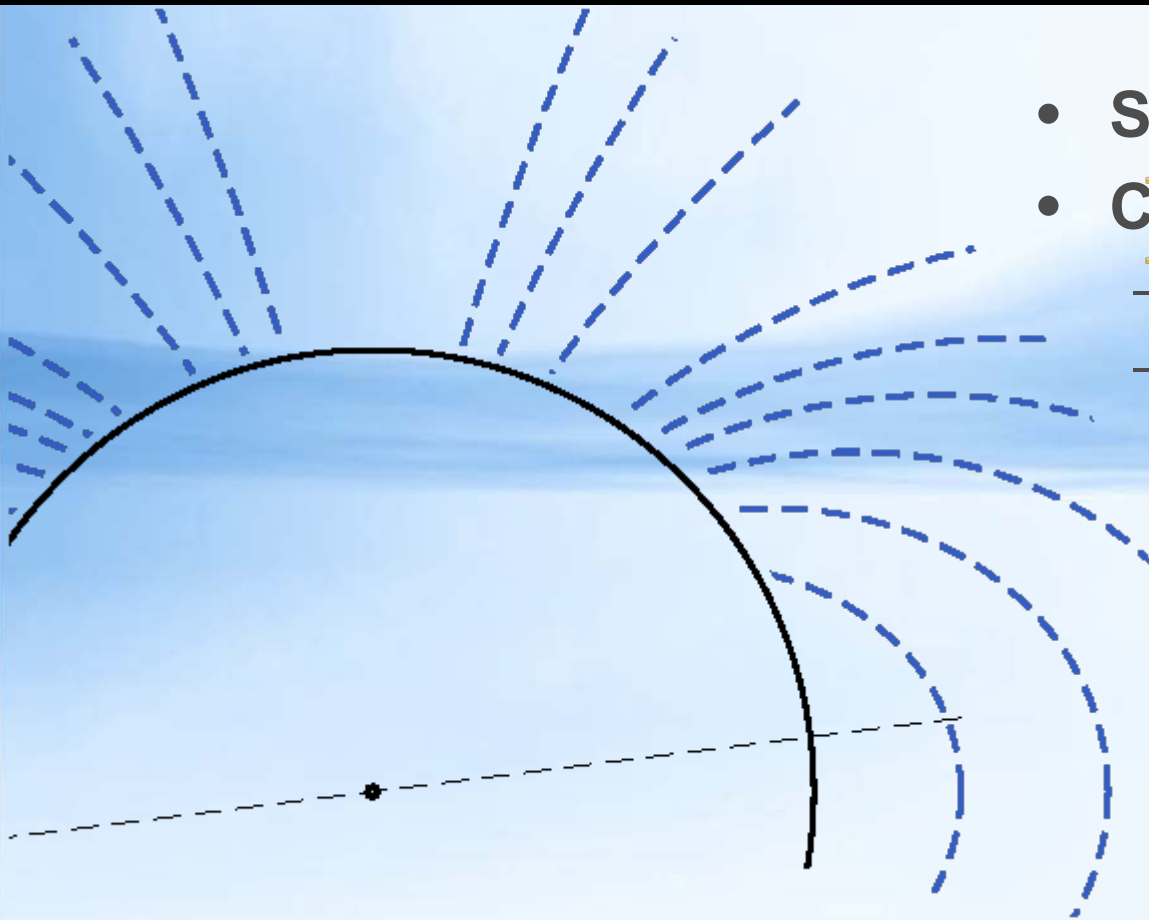


# Simulation - Description

- **Simulation 3D**

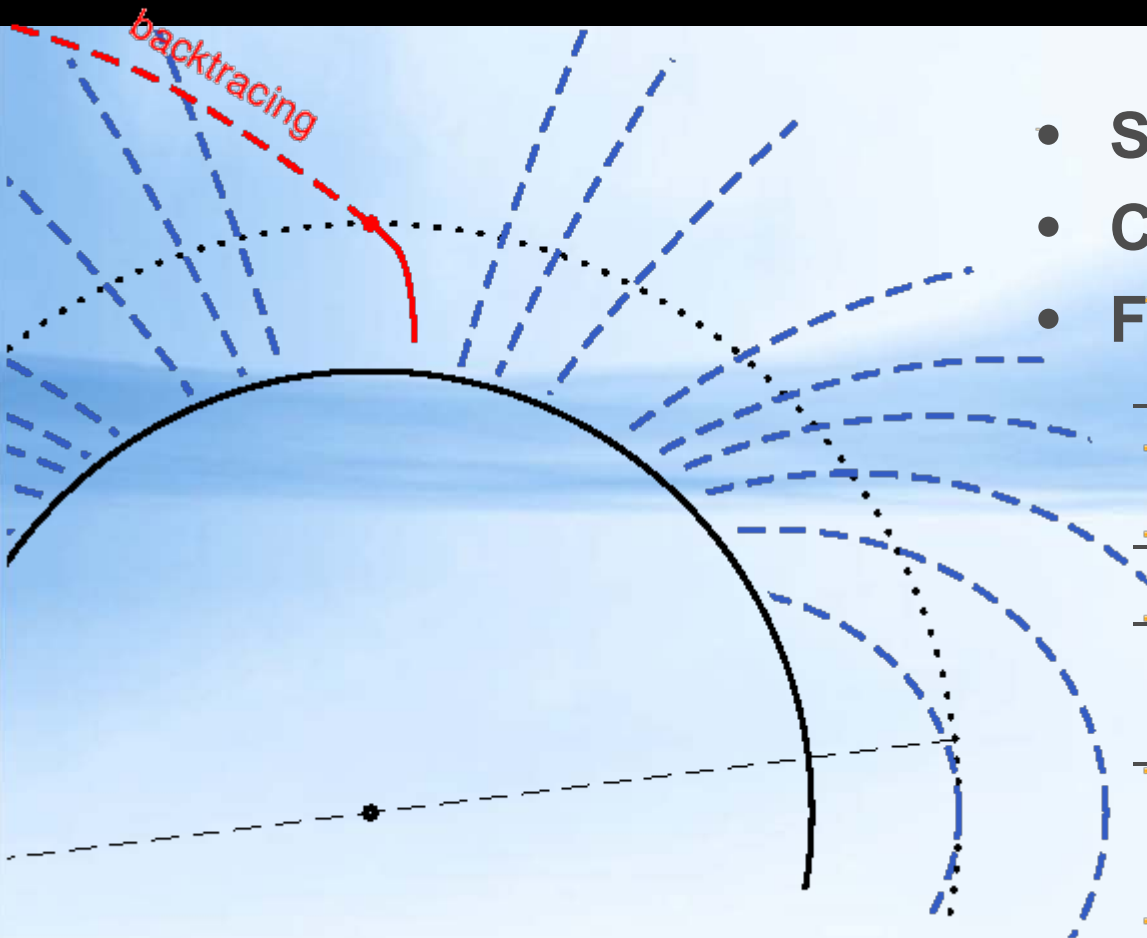


# Simulation - Description



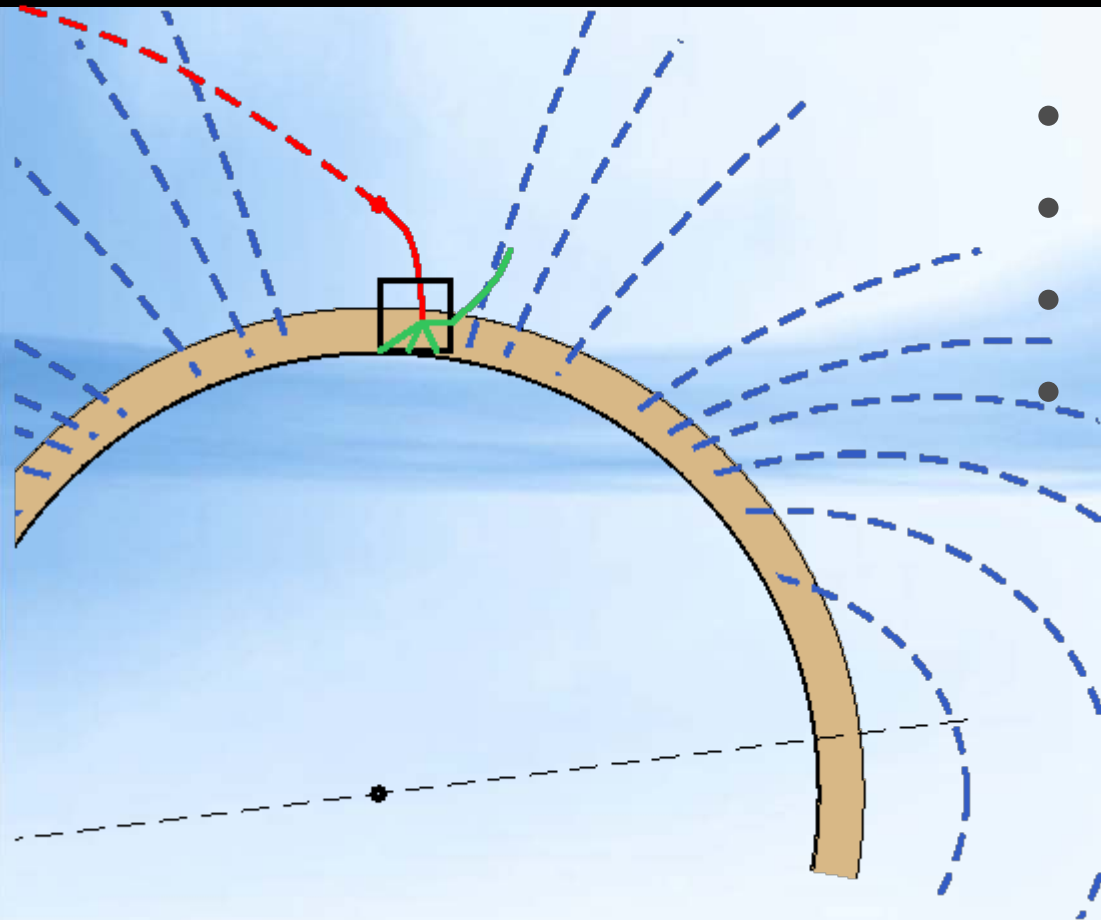
- **Simulation 3D**
- **Champ magnétique**
  - Modèle IGRF-2000
  - Runge-Kutta ordre 4 à pas adaptatif

# Simulation - Description



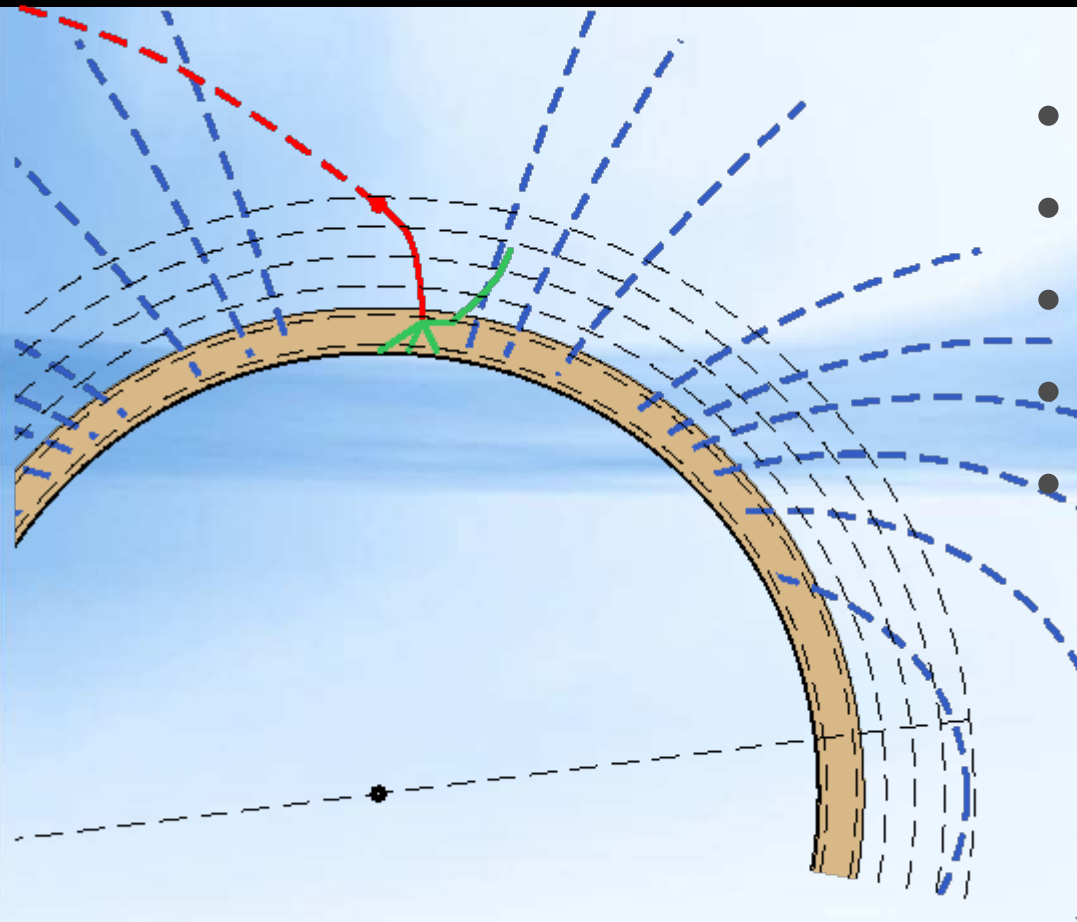
- **Simulation 3D**
- **Champ magnétique**
- **Flux primaires**
  - Flux primaire d'AMS01 (p,He)
  - Modulation solaire
  - Génération depuis une sphère virtuelle
  - « Backtracing » des particules

# Simulation - Description



- **Simulation 3D**
- **Champ magnétique**
- **Flux primaires**
- **Interactions**
  - **Modèle atmosphérique MSISE90**
  - **Sections efficaces différentielles :**
    - **Ajustement de formes fonctionnelles sur les données**
  - **Pertes par ionisations**

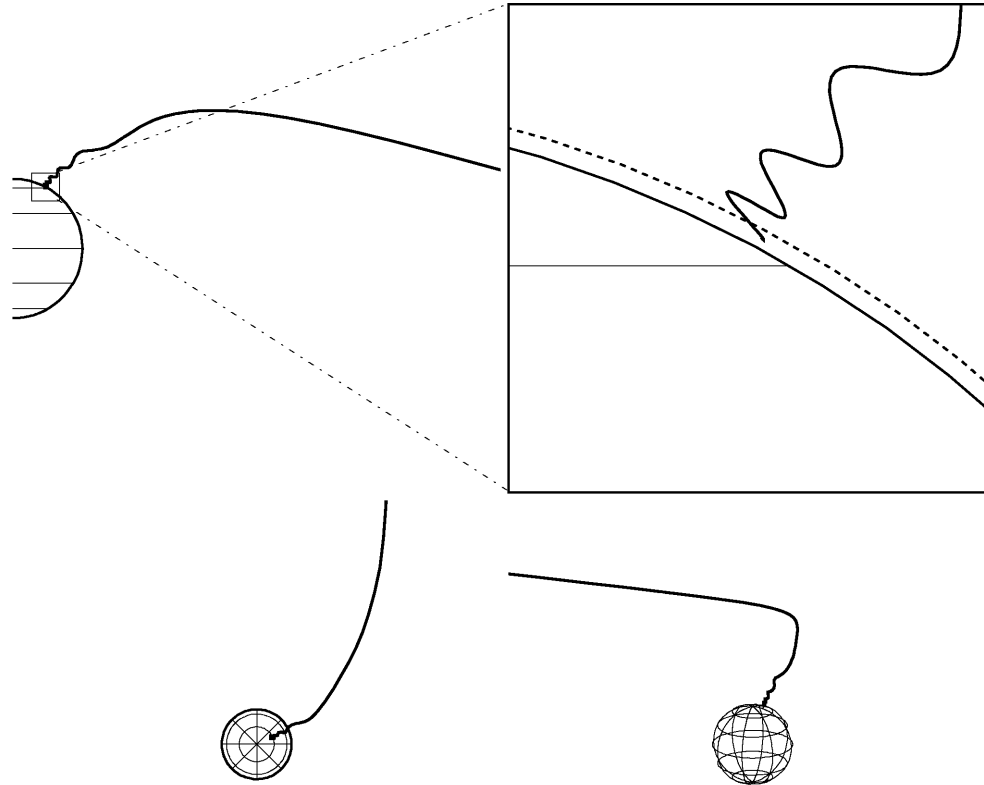
# Simulation - Description



- **Simulation 3D**
- **Champ magnétique**
- **Flux primaires**
- **Interactions**
- **Détection**
  - Définitions de surfaces virtuelles

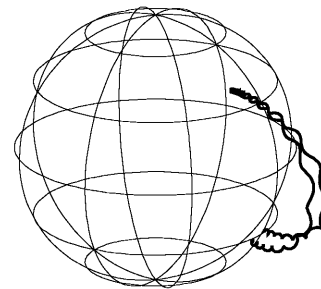
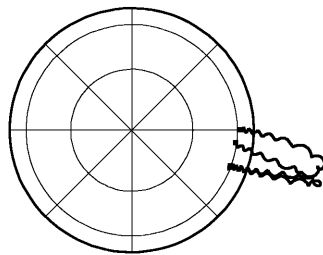
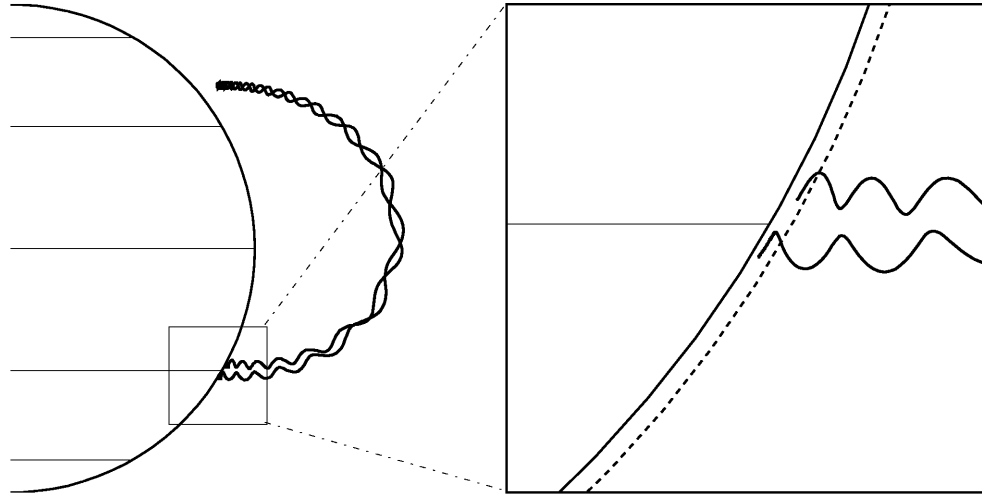
# Simulation - Exemples

## Exemple 1 : particule s'échappant



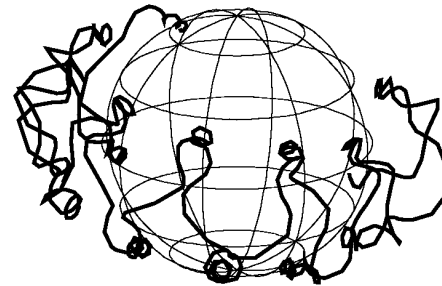
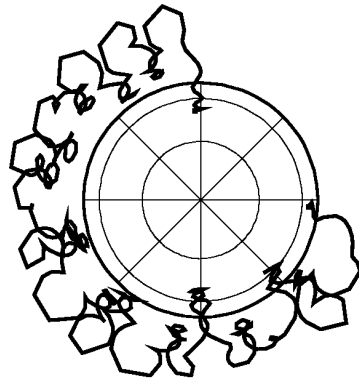
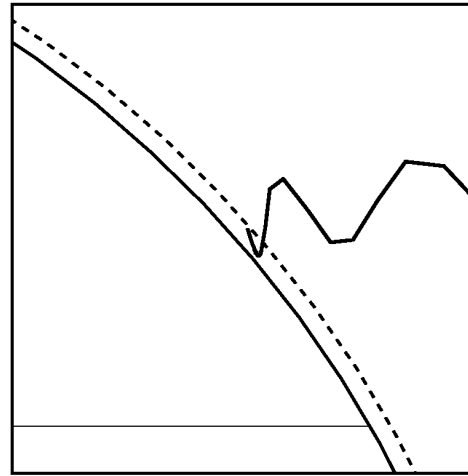
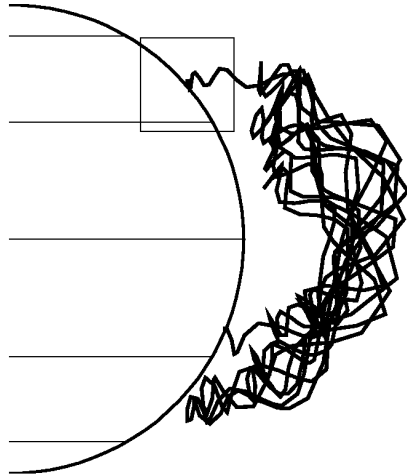
# Simulation - Exemples

## Exemple 2 : particule piégée



# Simulation - Exemples

## Exemple 3 : particule piégée



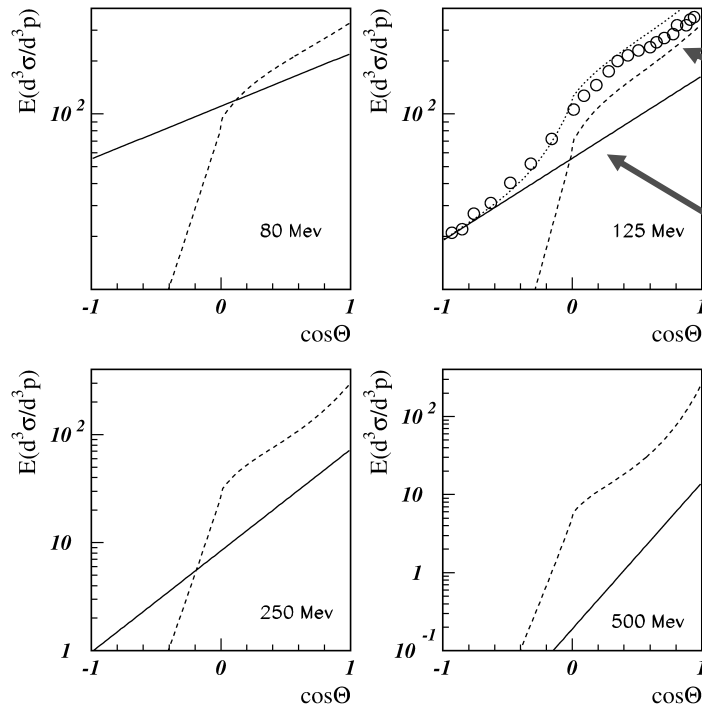


# AMS01 - Proton

## Générateur de proton

Modélisation de la section efficace

$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} (p + A \rightarrow p + X)$$



Prise en compte des  
composantes :

Quasi Elastic : paramétrisation  
de type KMN\*

Deep Inelastic (production à  
grand angle) : paramétrisation  
Bayukov

\* A.M.Kalinovskii, V.Mokhov, and Yu.P. Nikitin, *Passage of particles through matter*, AIP, NY, 1989

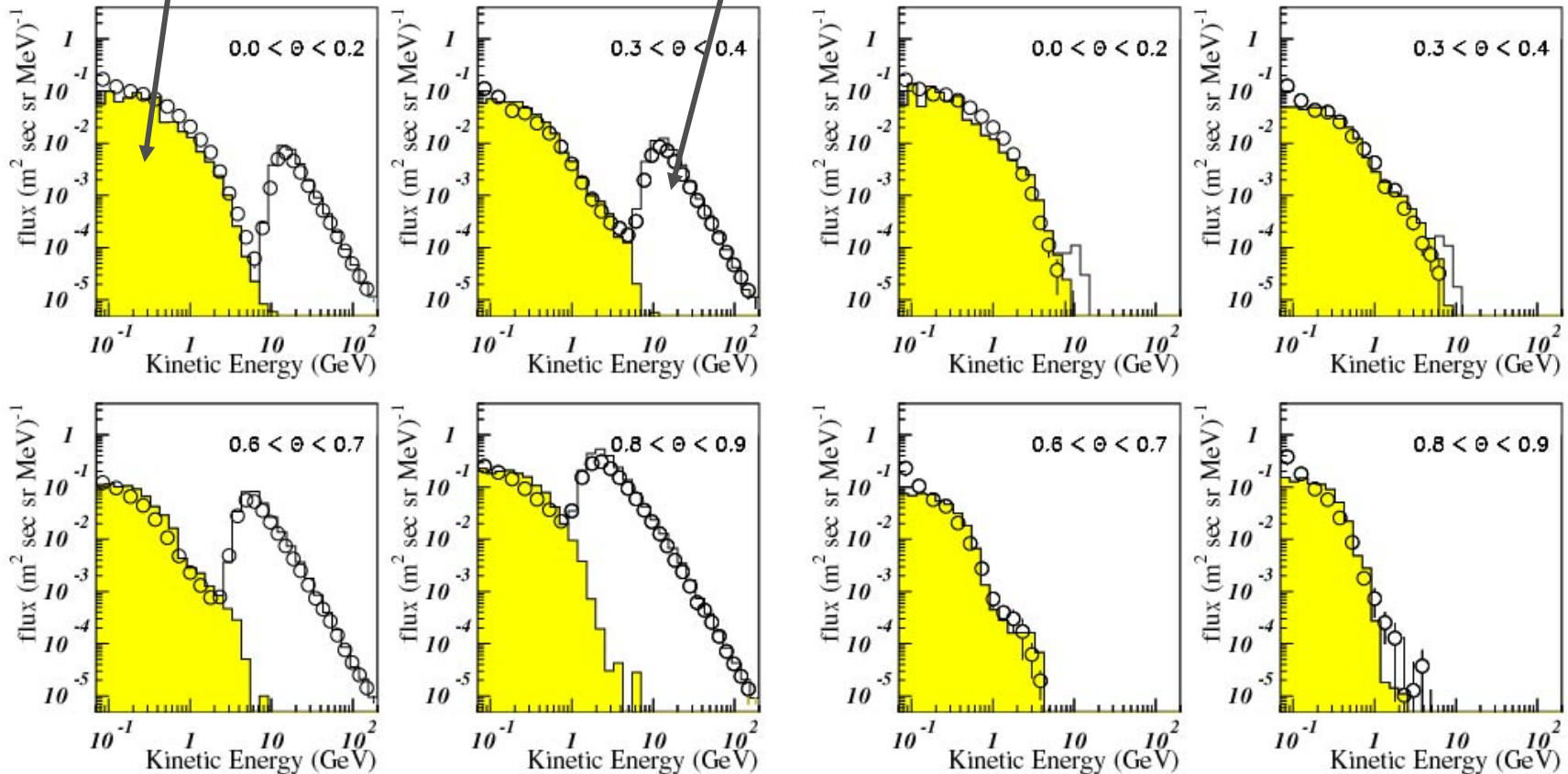
# AMS01 – Flux de Proton

Protons  
Atmosphériques

Protons CR

Downgoing

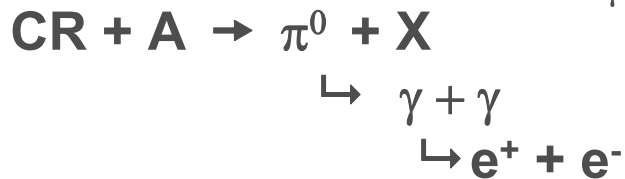
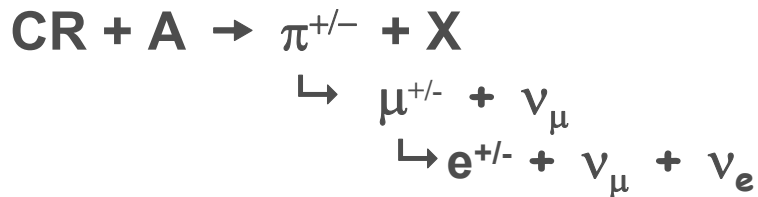
Upgoing



+ Origine du flux au niveau de l'équateur ( $|\theta| < .2$ )

# Électrons et positrons dans AMS01

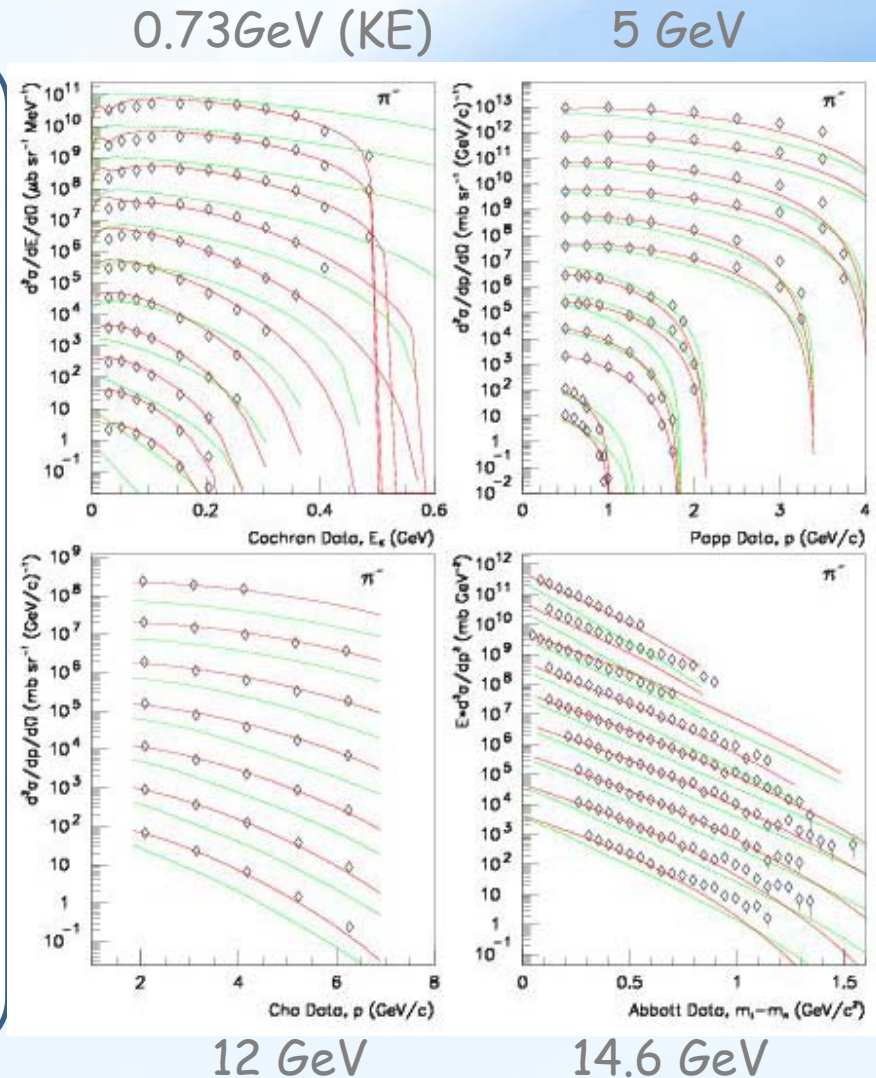
La population leptonique va être produite via la production et la désintégration de pion



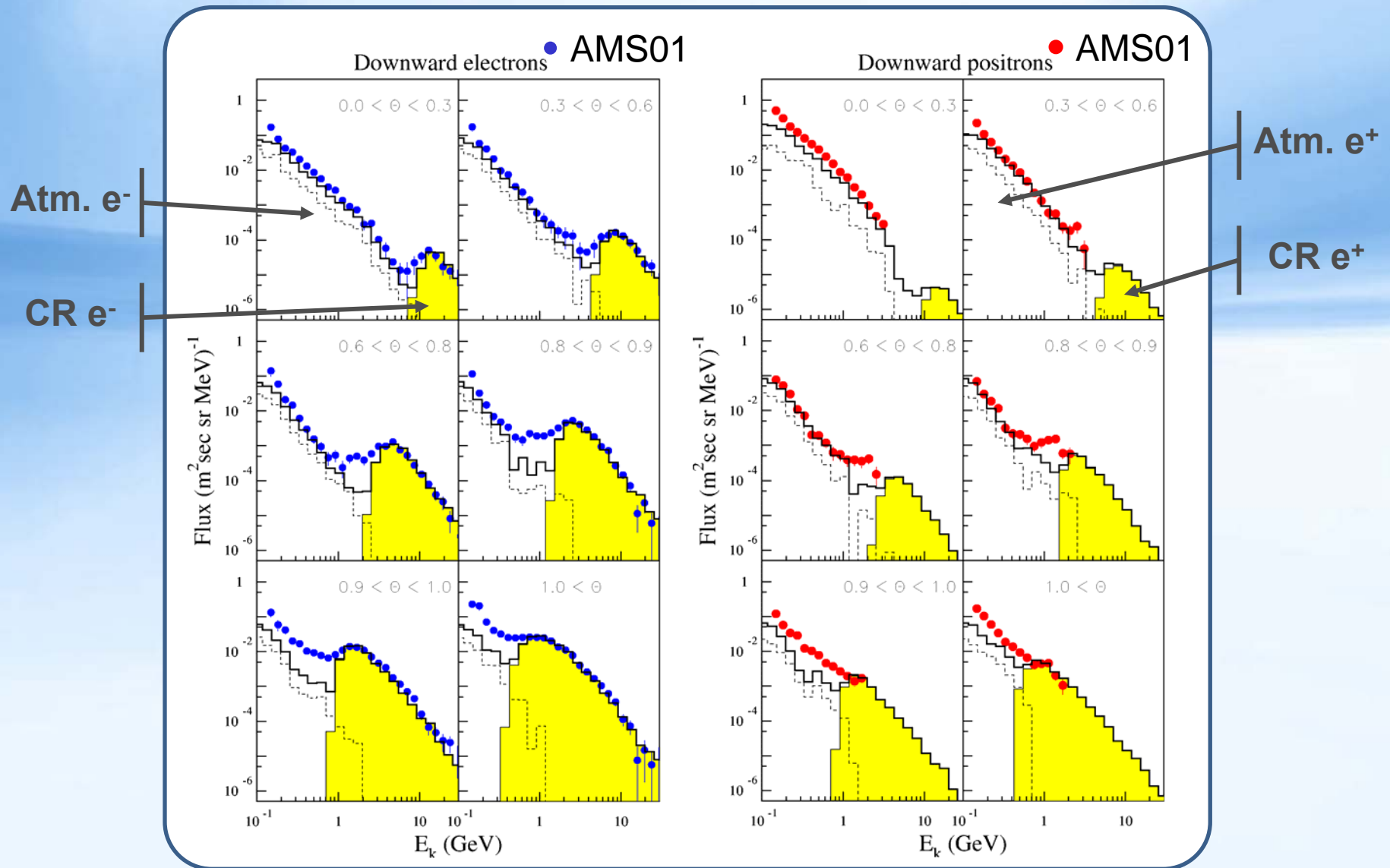
➔ Implémentation de :

$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} (p + A \rightarrow \pi^{+/-} + X)$$

et des désintégrations des  $\pi$  et  $\mu$



# AMS01 – Flux électrons et positrons

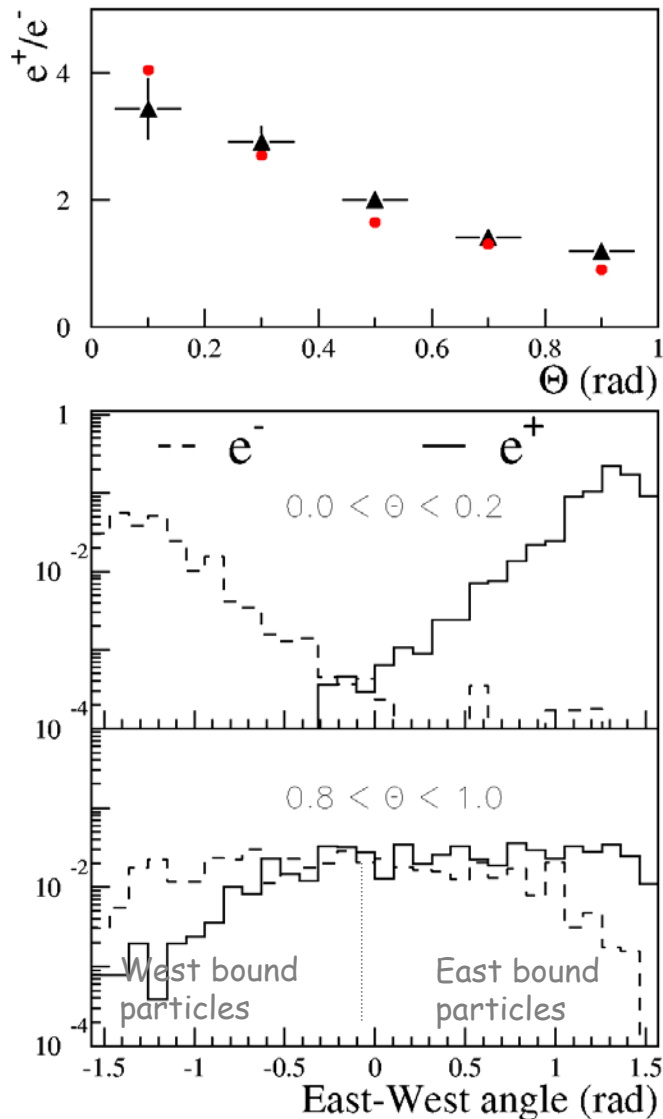


# AMS01 asymétrie $e^+/e^-$

- AMS01 data
- ▲ Simulation

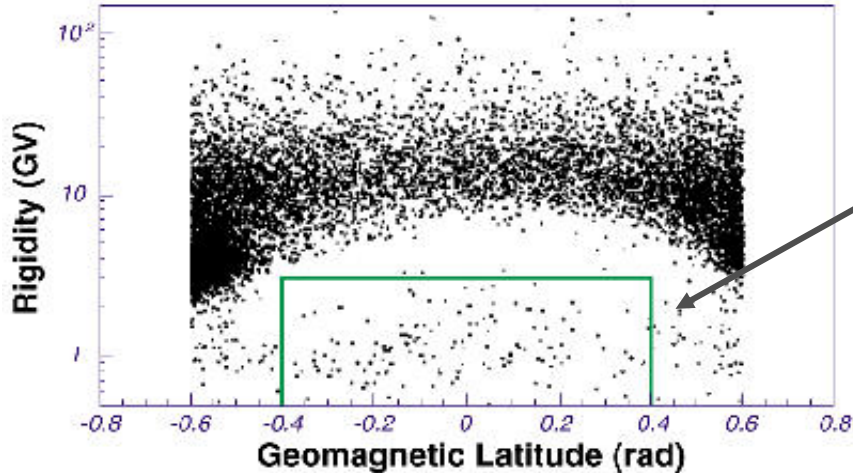
⇒ L'asymétrie  $e^+/e^-$  est due à la combinaison de

- 1) Asymétrie est-ouest du flux primaire
- 2) Production vers l'avant dominante dans les interactions.
- 3) L'absorption par l'atmosphère

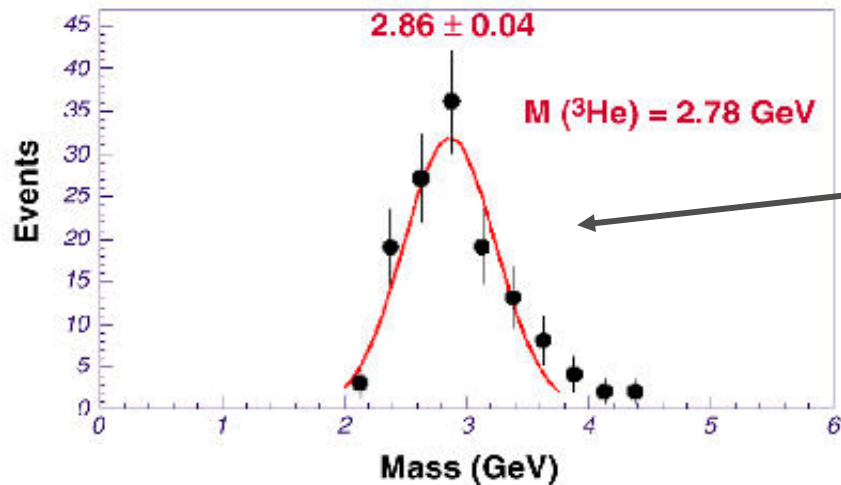


# Flux d'hélium sous la coupure

Equator Region ( $\theta_M < 0.6$ )



Mise en évidence d'une population  
Particule Z=2 par AMS01



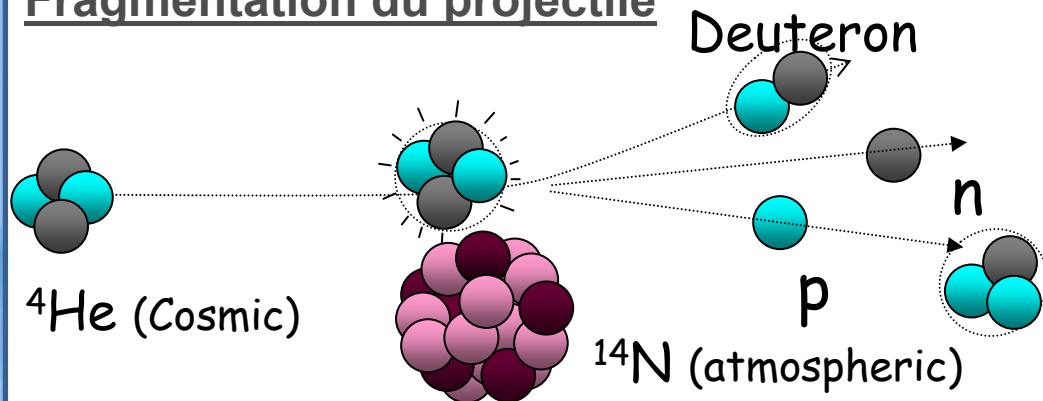
- Particules  $^3\text{He}$  majoritaires
- $< 10\%$   $^4\text{He}$

AMS collaboration,  
Phys. Lett. B 494(2000)193



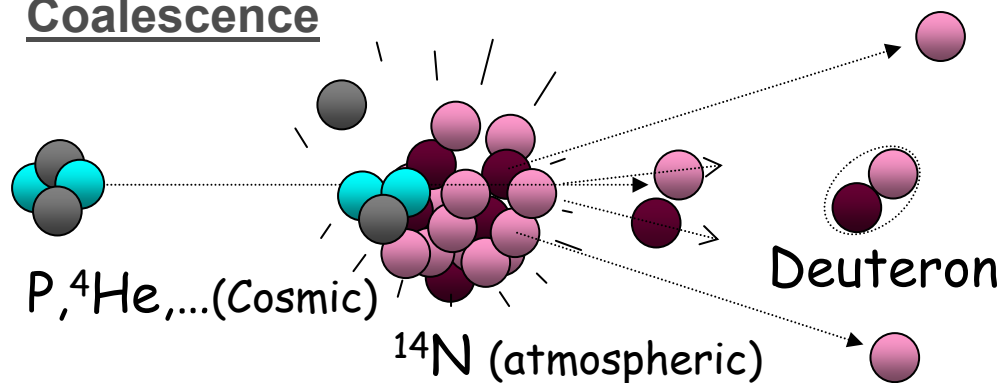
# Fragmentation nucléaire vs Coalescence

## Fragmentation du projectile



- Processus périphérique
- Conservation de la vitesse incidente
- Production :  
 $\sigma(A-1) > \sigma(A-2) > \dots > \sigma(3\text{He}) > \sigma(\text{D})$

## Coalescence

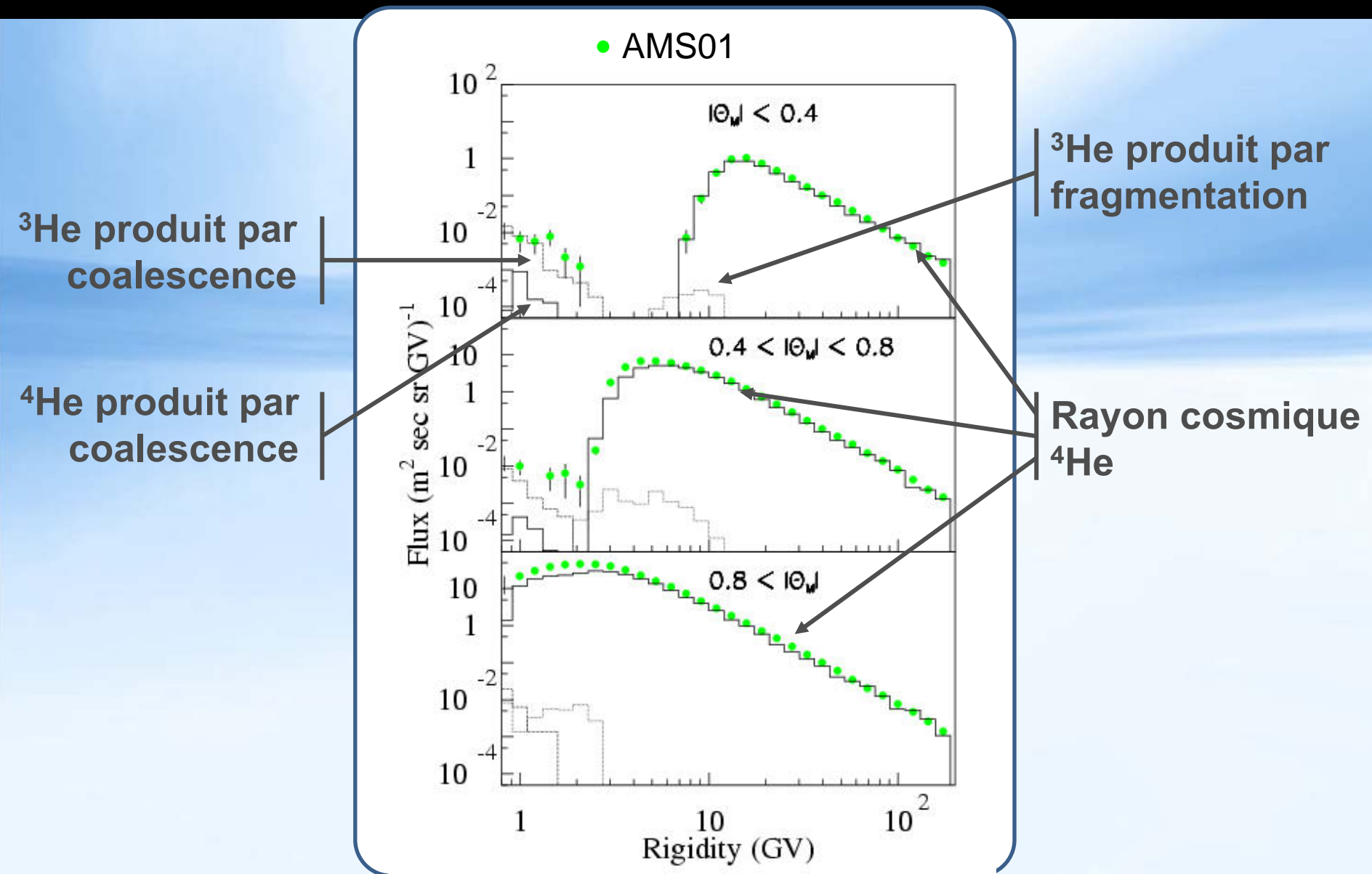


- Processus central
- Faible énergie de production
- Production :

$$E_A \frac{d^3 \sigma(A)}{d^3 p_A} = C_A \left( \frac{d^3 \sigma(N)}{d^3 p} \right)^A$$

$$\sigma(\text{D}) > \sigma(3\text{He}) > \dots > \sigma(A) > \sigma(A+1)$$

# Flux d'hélium sous la coupure

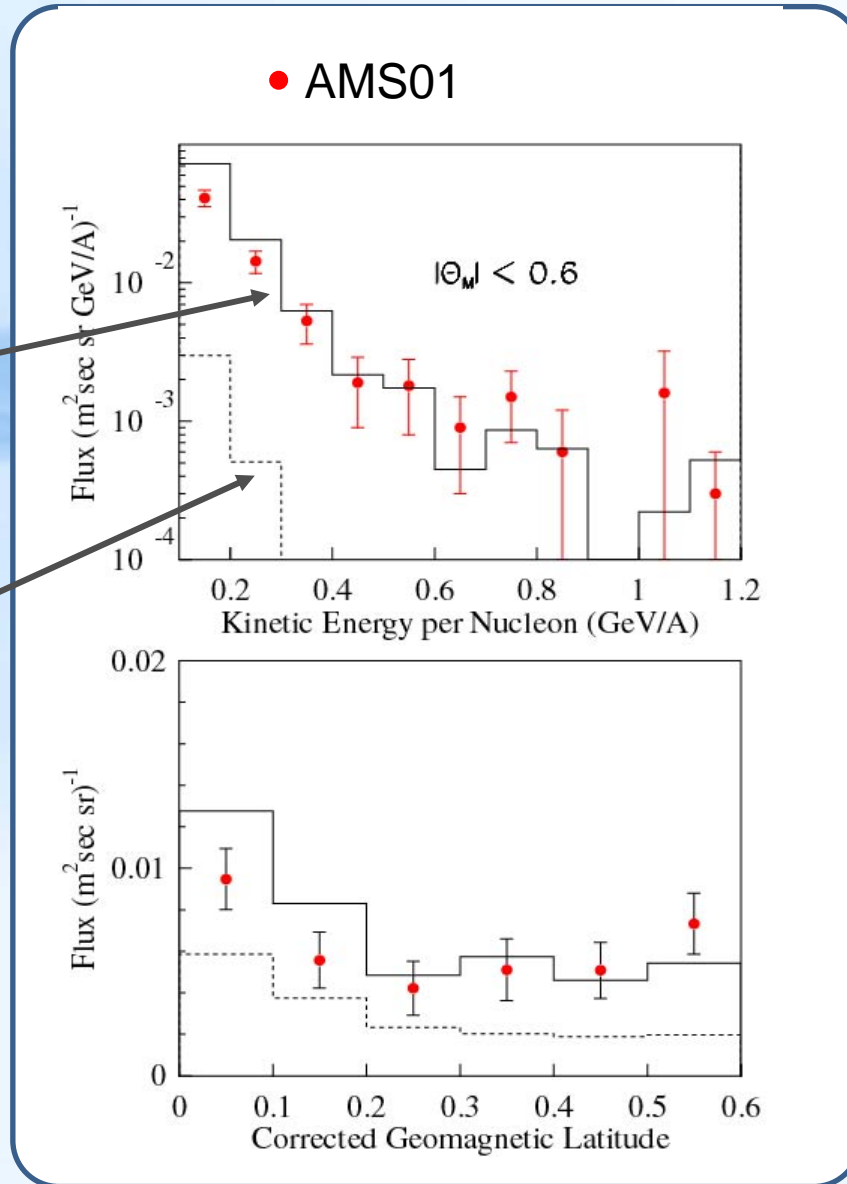




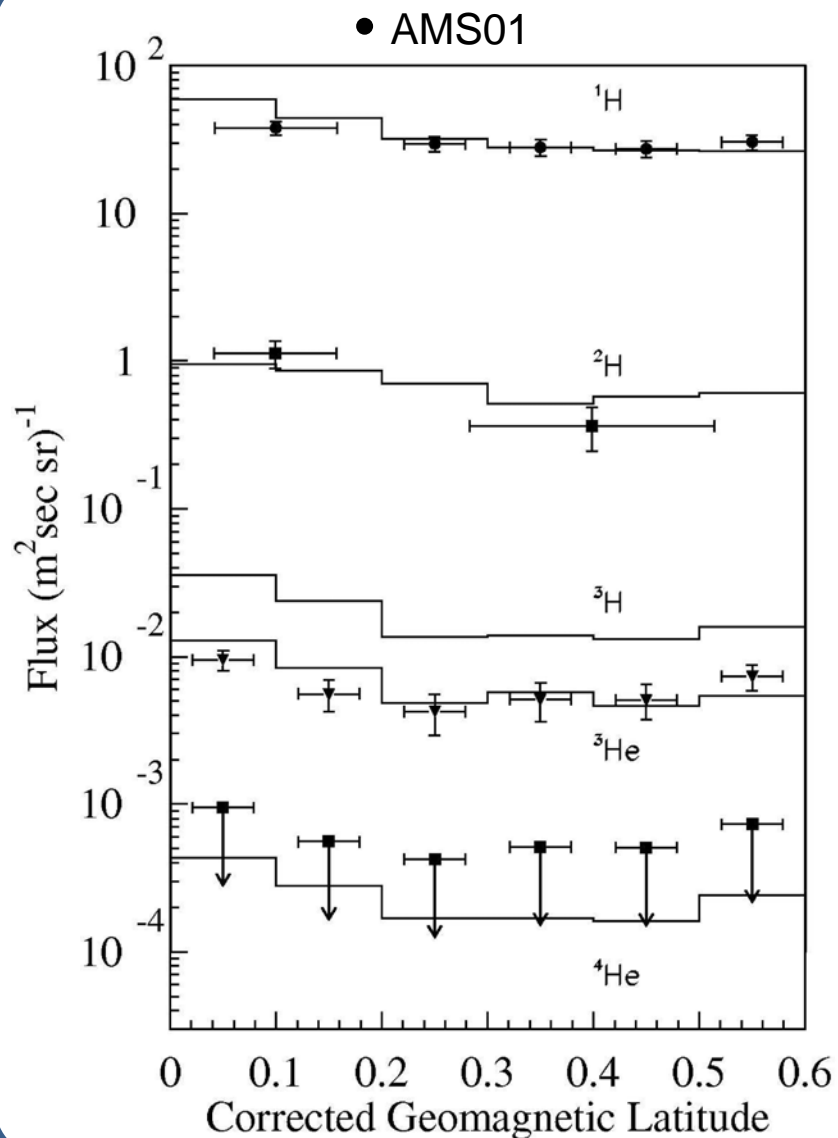
# Flux d'hélium sous la coupure

$^3\text{He}$  produit par  
coalescence

$^4\text{He}$  produit par  
coalescence



# Ions sous la coupure géomagnétique



➔ Mise en évidence d'une hiérarchie des abondances sous la coupure de type coalescence

# Antimatière Atmosphérique

## Objectifs

- Évaluation des antiprotons d'origines atmosphériques pour les expériences ballons
- Étude de la composante piégée d'antimatière

## Ajustement de

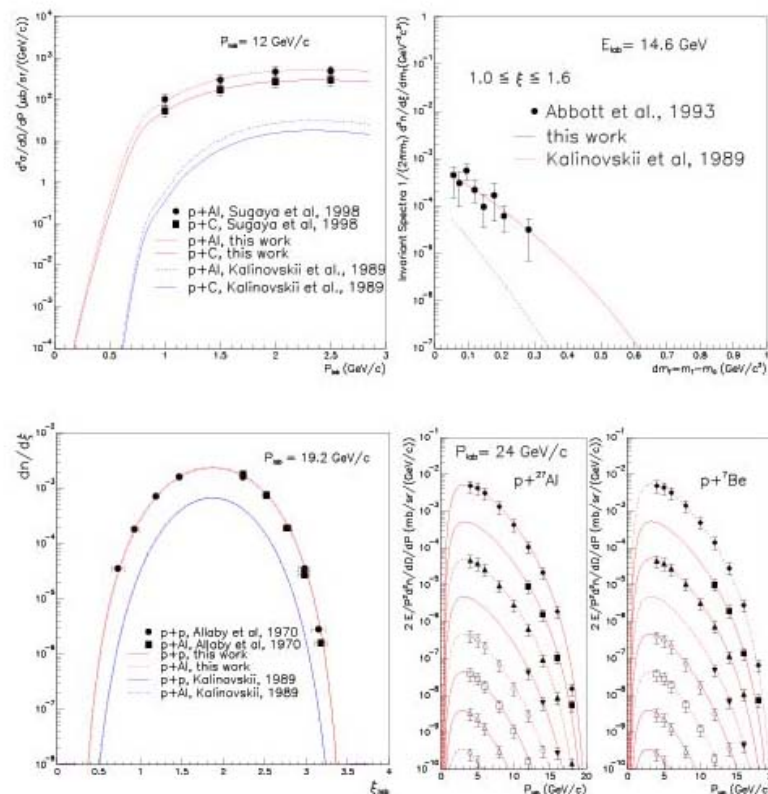
$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} (p + A \rightarrow \bar{p} + X)$$

## sur des données

## + production « tertiaire »

$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} (\bar{p} + A \rightarrow \bar{p} + X)$$

Thèses Ching Yuan Huang (2003),  
Bruny Baret (2004)



# Antiproton atmosphérique (BESS)

*Thèse Bruny Baret (2004)*

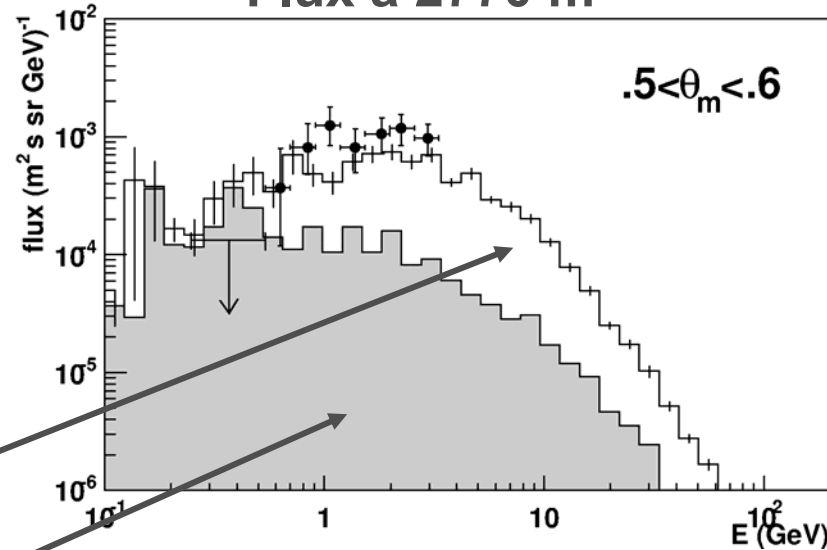
**BESS, alt 2770 m :**  
flux purement  
atmosphérique validation  
de la simulation

**Flux total**

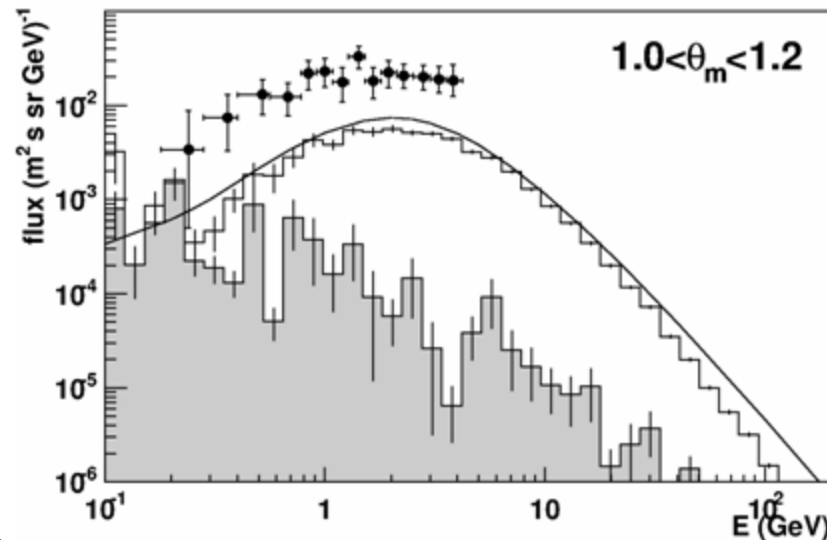
**Cont. « tertiaire »**

**BESS, alt 38 km :** nouvelle  
évaluation des antiprotons  
produits au dessus du  
ballon

**Flux à 2770 m**



**Flux à 38 km**



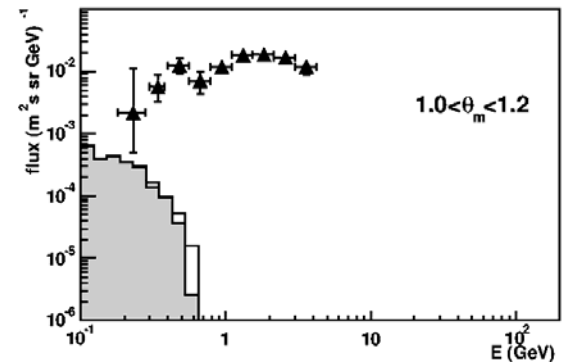
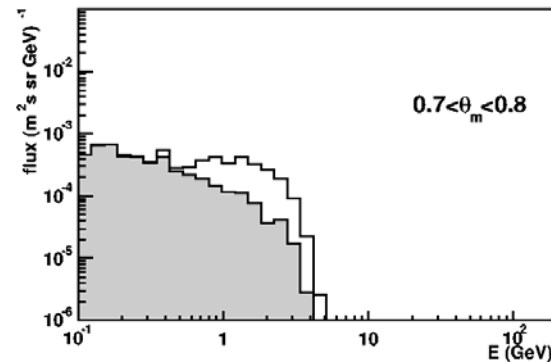
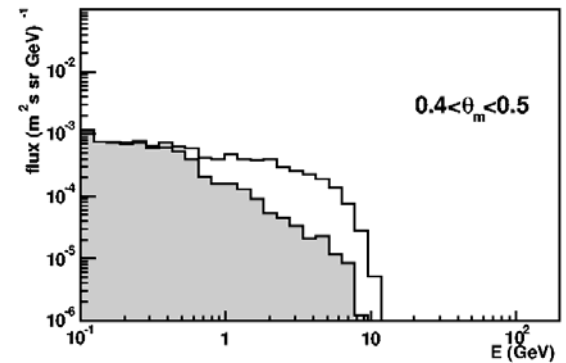
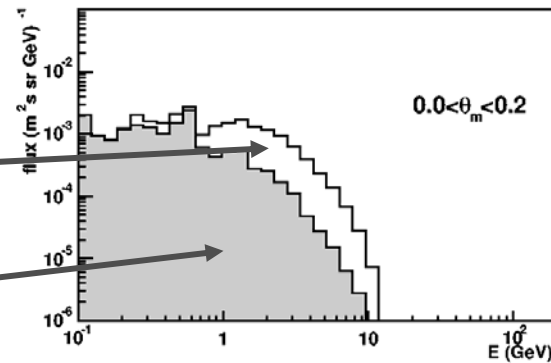
# Antiprotons semi-piégés

Thèse Bruny Baret (2004)

## Composante piégées à 400 km d'altitude

Flux total

Cont. « tertiaire »



+ Etude des population  $\overline{D}$ ,  ${}^3\overline{H}$ ,  ${}^3\overline{He}$ ,  ${}^4\overline{He}$

# Production dans Atmosphère

**Etude des flux dans l'atmosphère  $p, \mu^{+/-}$  ?**

- **Volume de données important**
- **Grande statistique**
- **Tests complémentaires de la simulation**
- **Permet d'estimer la production atmosphérique de neutrino dans une approche 3D**

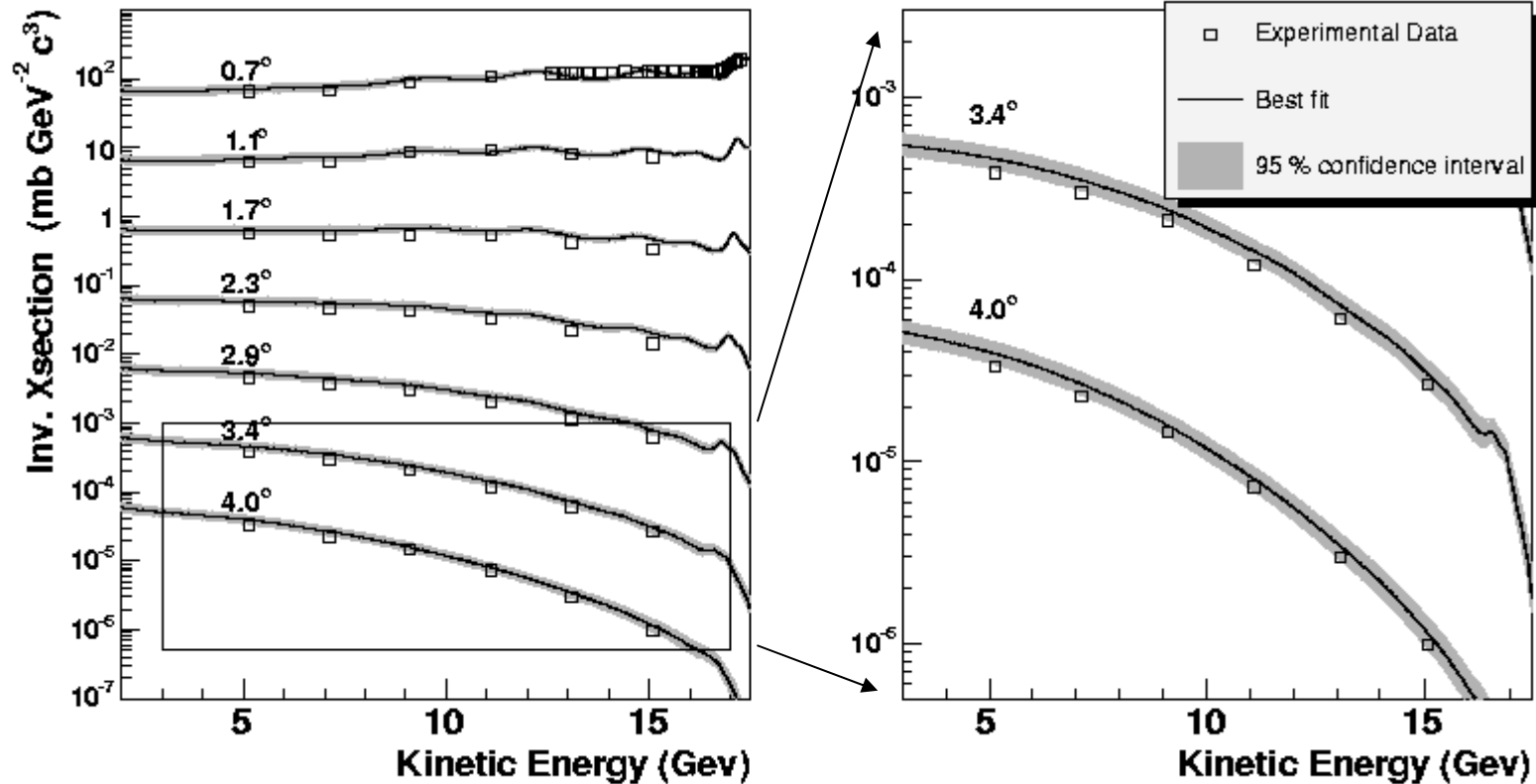


**Evaluation des incertitudes  
associées aux estimations des  
flux**

# Production dans Atmosphère

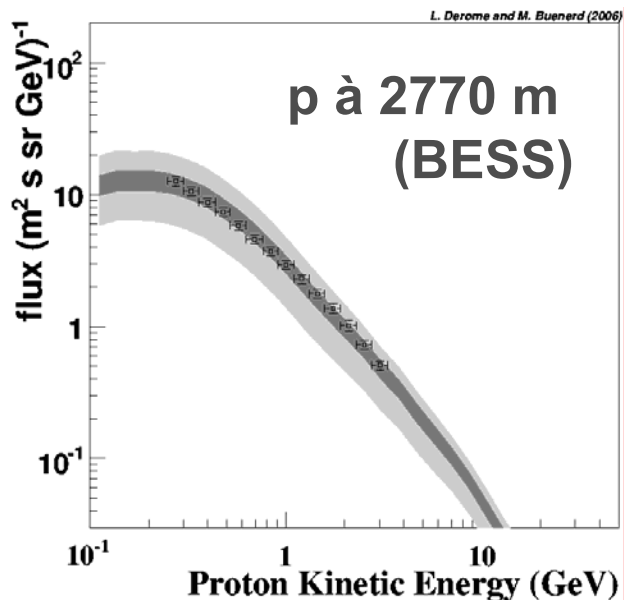
Ajustement d'une forme fonctionnelle (KMN)

Exemple :  $p(19.5 \text{ GeV}/c) + \text{Be} \rightarrow p + X$

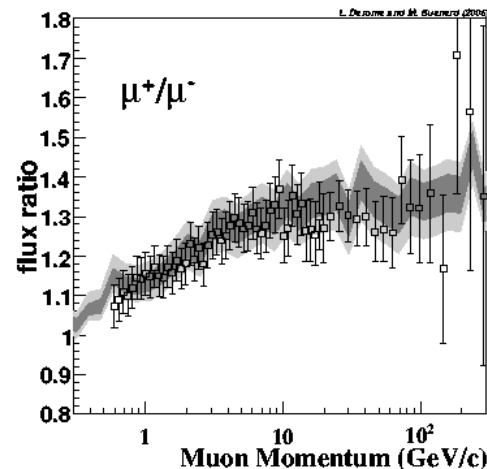
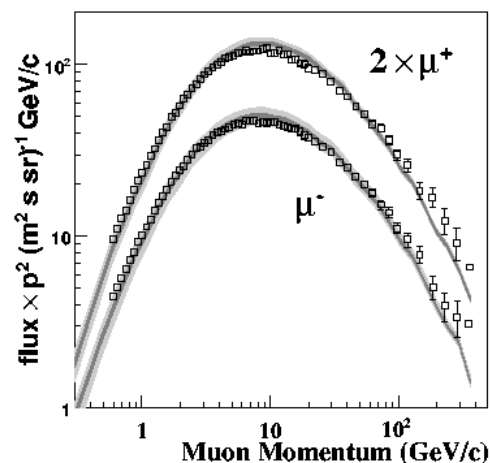


**Meilleur ajustement et intervalle de confiance**

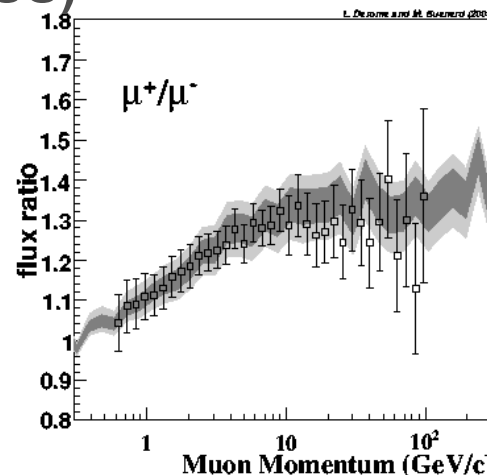
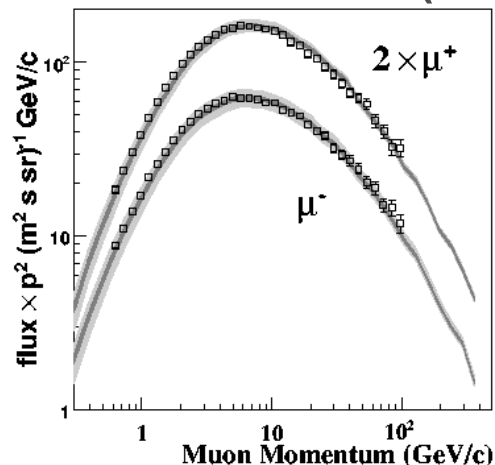
# Production dans Atmosphère



## muon à 0 m (BESS)



## muon à 2770 m (BESS)



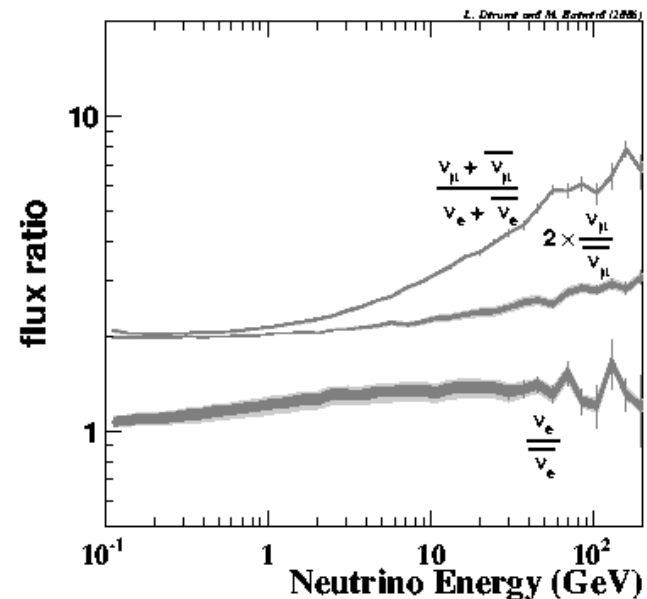
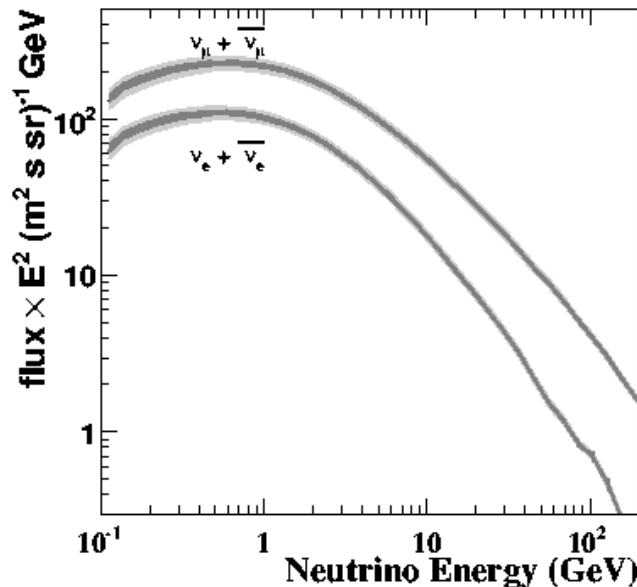
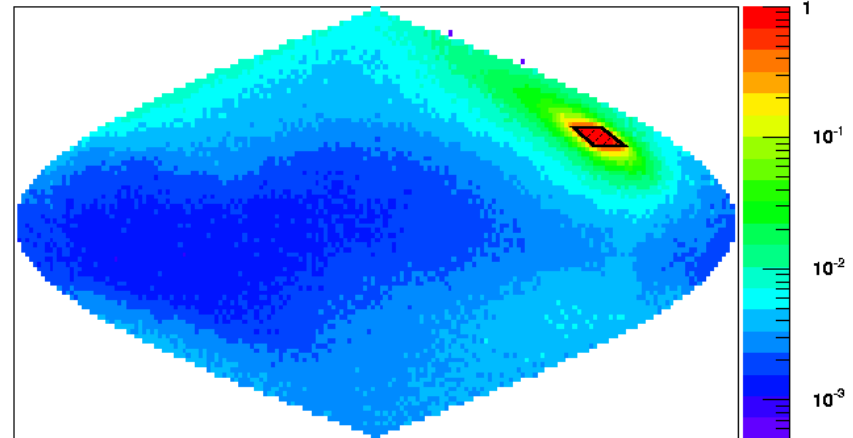
➔ Fit des sections efficaces sur les données atmosphériques



# Neutrinos Atmosphériques

Calcul des flux au niveau de SuperKamiokande

Taille du détecteur virtuel :  
900x1600 km<sup>2</sup>  
(Erreur systématique < 1%)



# $\nu_{\text{atm}}$ : distribution zénithale

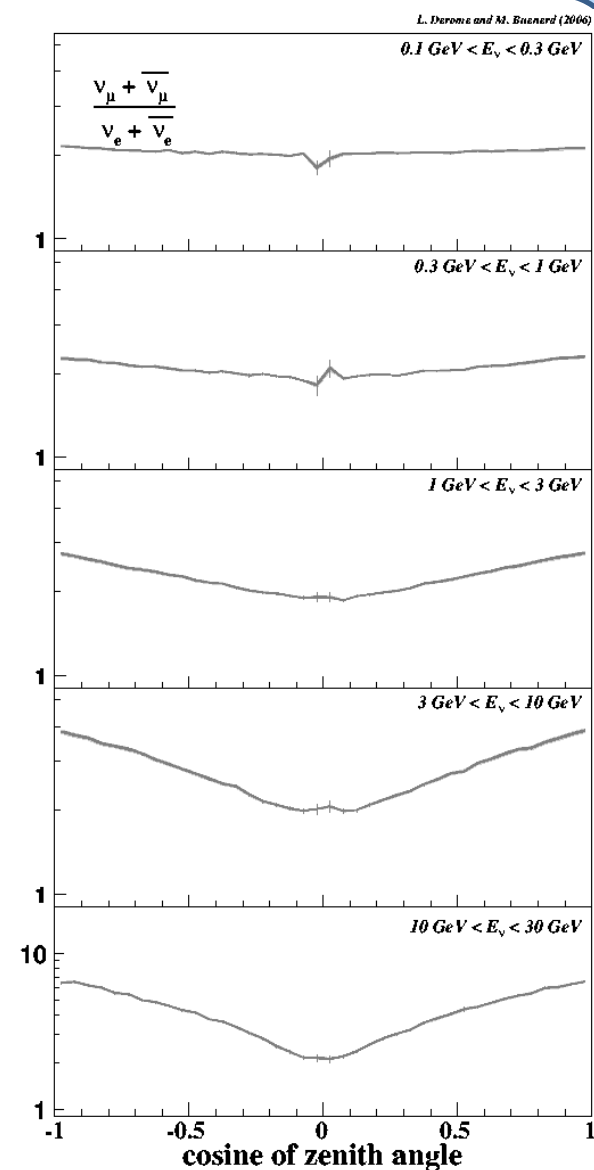
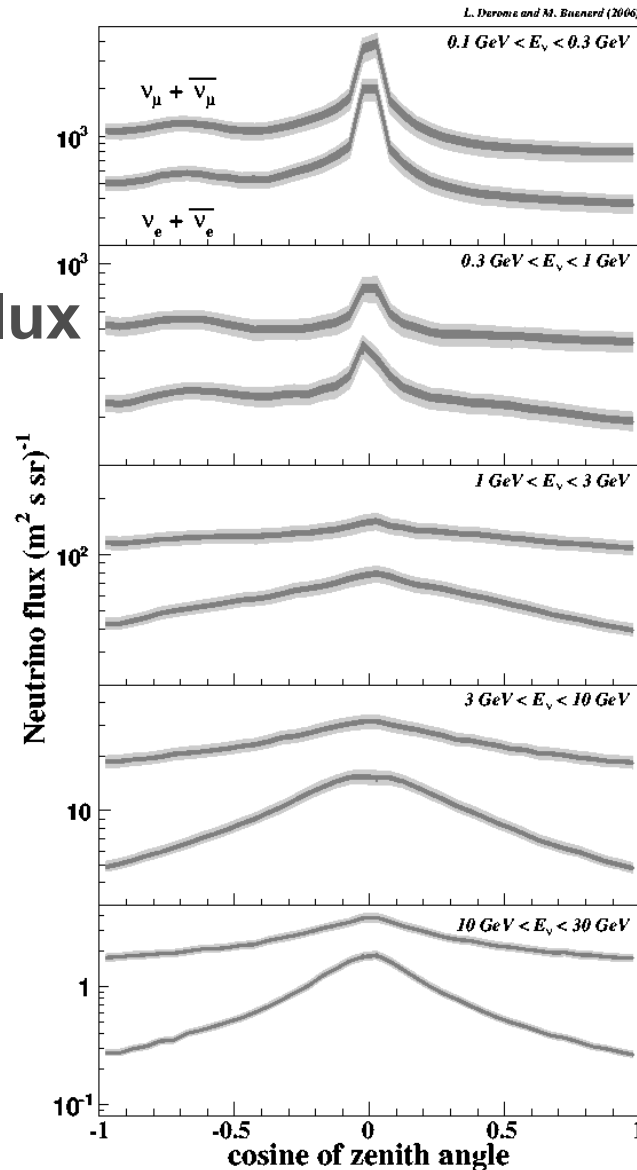
- Amplification du flux horizontal

- Dépendance en

$$L_{\text{atm}} \propto \frac{1}{\cos \theta_{\text{zenith}}}$$

des flux et du ratio

$\nu_{\text{muonic}} / \nu_{\text{electronic}}$



# $\nu_{\text{atm}}$ : distribution azimuthale

Effet est-ouest de la coupure géomagnétique sur le flux primaire

➔ Asymétrie sur  $\nu_{\text{atm}}$

Amplification de l'asymétrie pour :

$$p \rightarrow \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

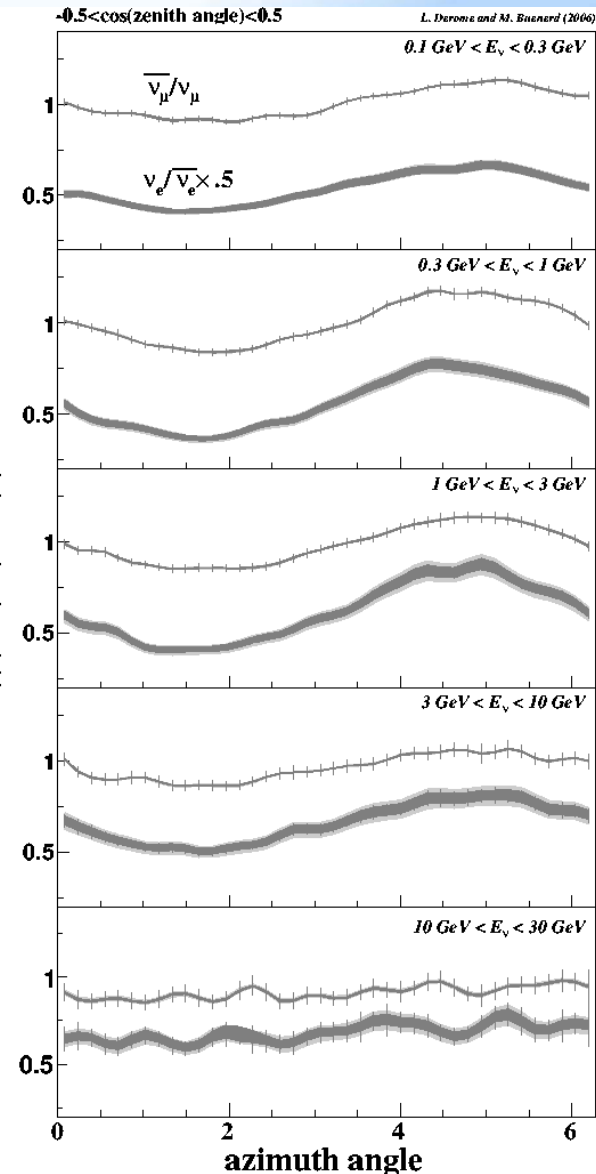
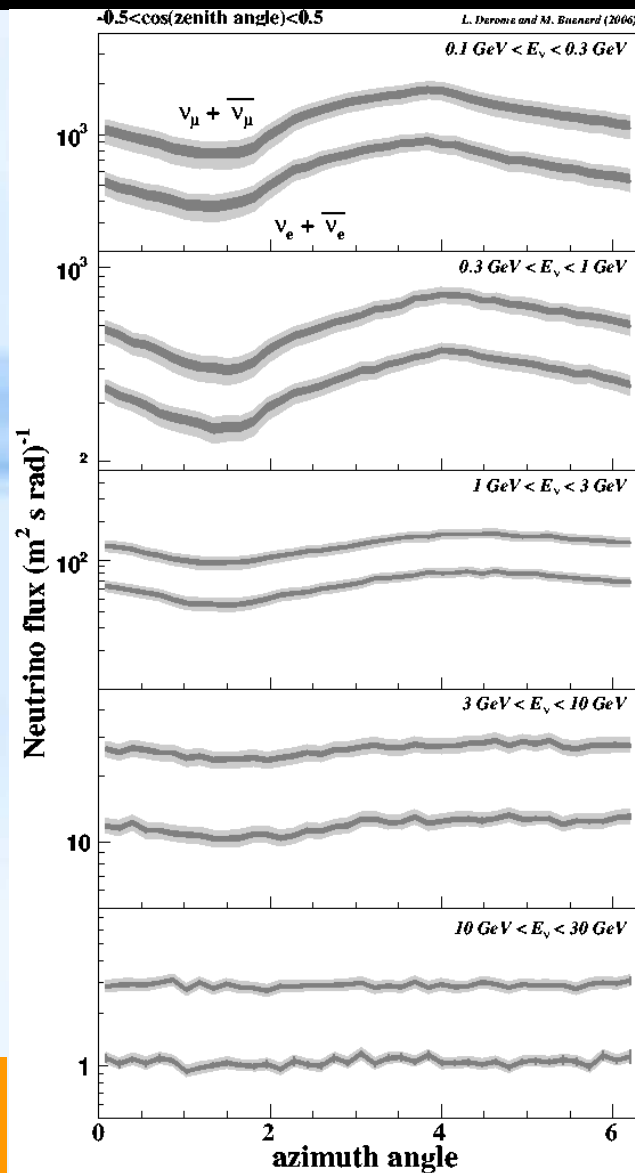
$$\mu^+ \rightarrow \nu_e \nu_\mu$$

versus :

$$p \rightarrow \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

$$A_{\nu_e^-} < A_{\nu_\mu^-} < A_{\nu_\mu^+} < A_{\nu_e^+}$$



# Simulation de l'interaction du RC : 1er bilan

- **Simulation initiée et développée pour comprendre les résultats d'AMS01**
- **Développée ensuite dans plusieurs directions :**
  - **Antimatière**
  - **Neutrinos atmosphériques**
- **Nouvelles mesures à venir (Pamela/AMS02) :**
  - **Certainement de nouvelles choses à comprendre**
  - **Mieux contraindre les processus d'interaction dans l'atmosphère.**
    - **Production d'antimatière,**
    - **Coalescence,**
    - **...**

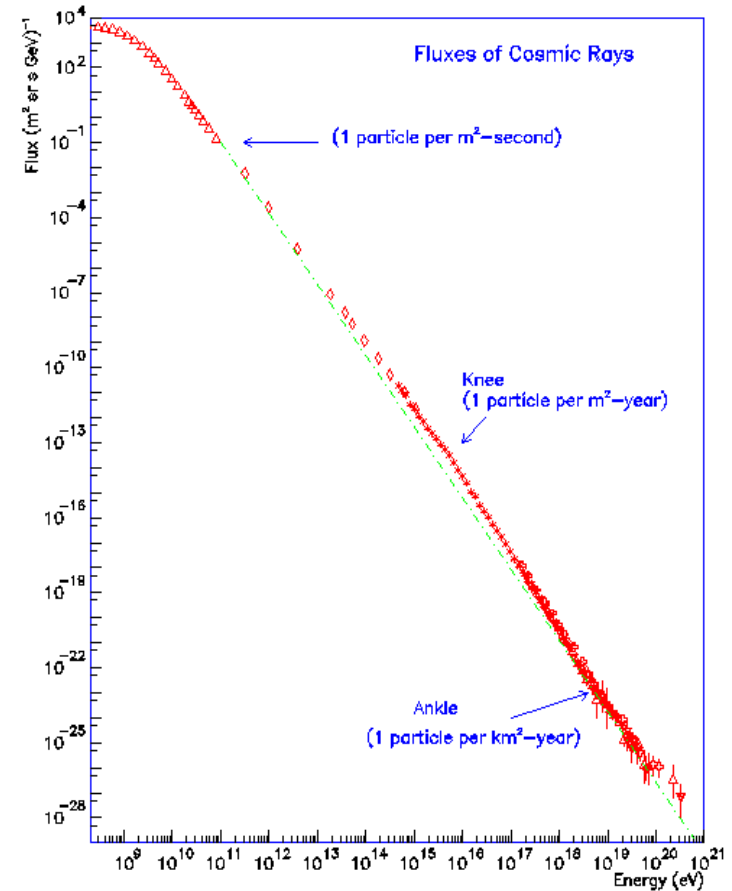
# Rayonnement Cosmique

## → AstroParticules :

« Etude des ~~constituants~~ à haute énergie  
des ~~constituants~~ de l'univers grâce au  
rayonnement cosmique »

RC : Mesuré depuis un siècle mais  
encore beaucoup de questions  
ouvertes :

- Source du rayonnement dans la galaxie
- Accélération du RC
- Processus d'injection
- Propagation dans la galaxie
- Origine de Genou
- Transition galactique-extragalactique
- Source extragalactique d'UHE
- Coupure GZK



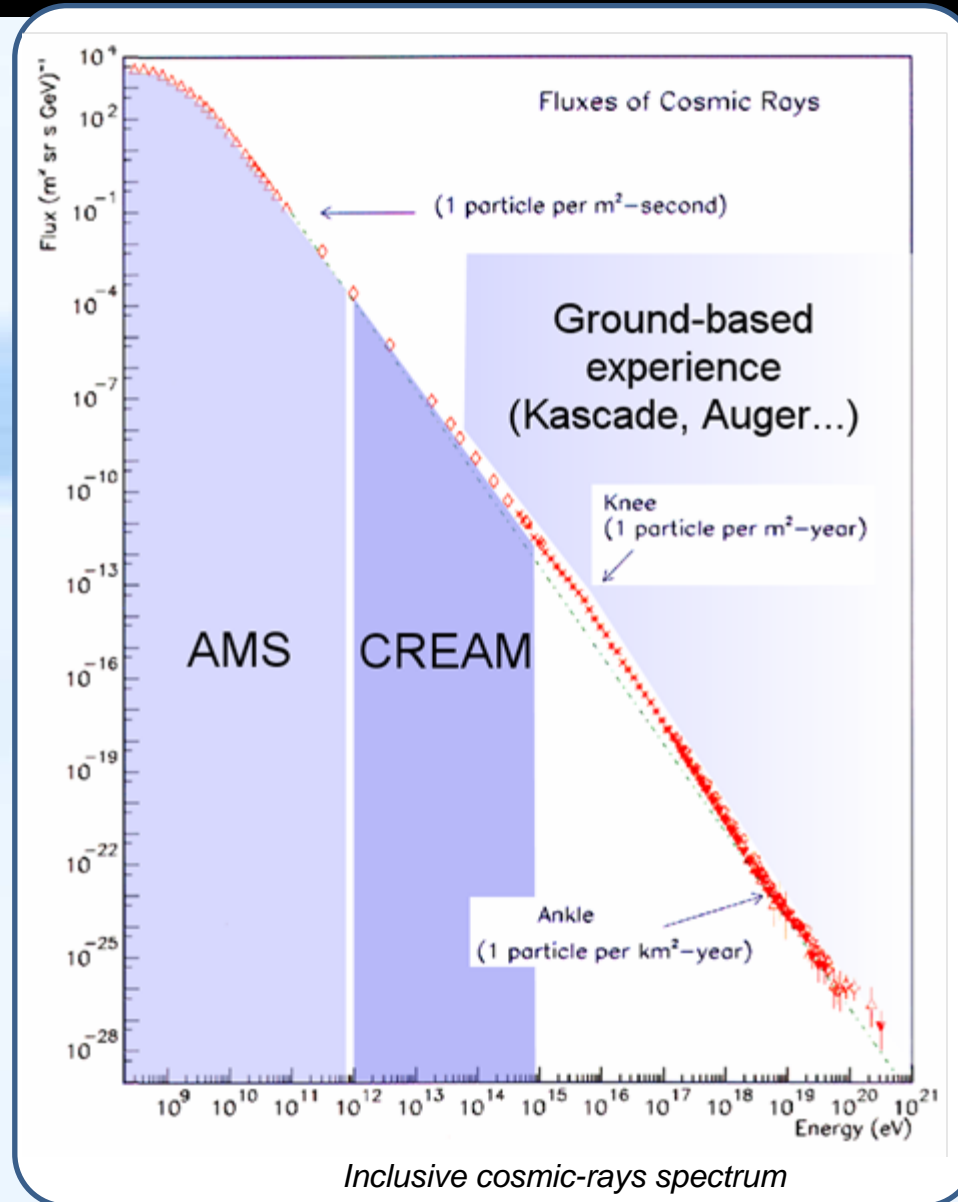
# Expériences AMS & CREAM

## ➡ AMS :

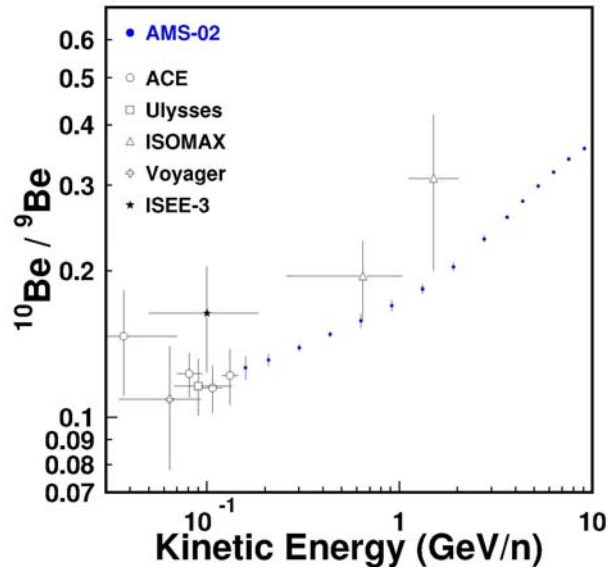
- Physique « exotique » : Matière noire/Antimatière
- Origine / Accélération du RC
- Propagation du RC

## ➡ CREAM :

- Origine / Accélération du RC
- Propagation du RC
- Calibration détecteur au sol



# Propagation du RC



Rapport  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  dans AMS02

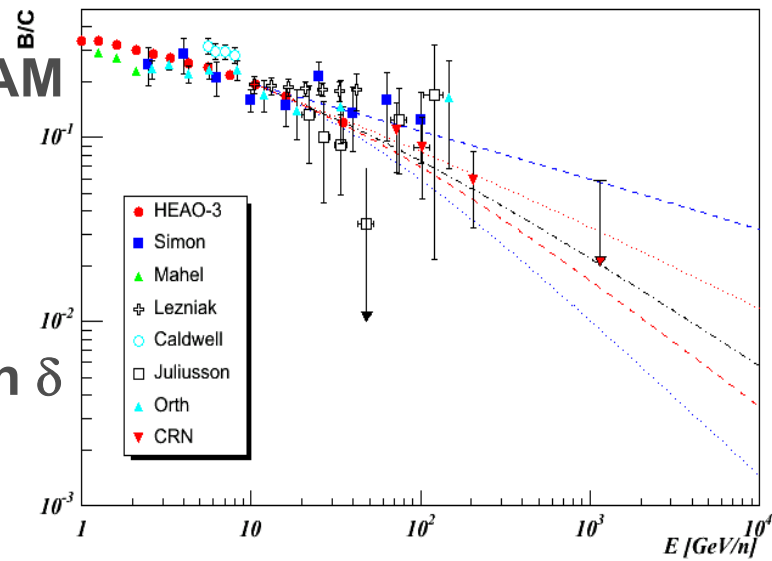
Mesure du temps de confinement du RC

➔ Taille du halo de diffusion

Mesure du rapport B/C dans CREAM

Secondaire/Primaire  $\sim \lambda_{\text{esc}} = \lambda_0 E^{-\delta}$

➔ Amplitude de diffusion  $\lambda_0$   
indice spectral de diffusion  $\delta$



0.3

0.46

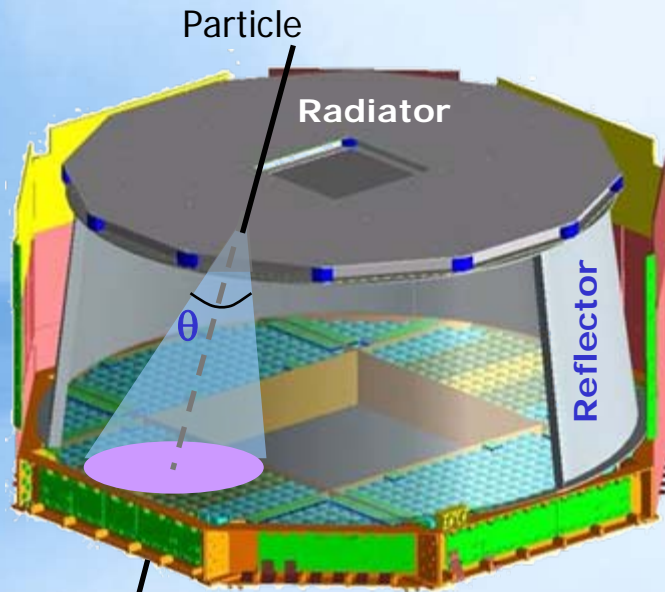
0.6

0.

7

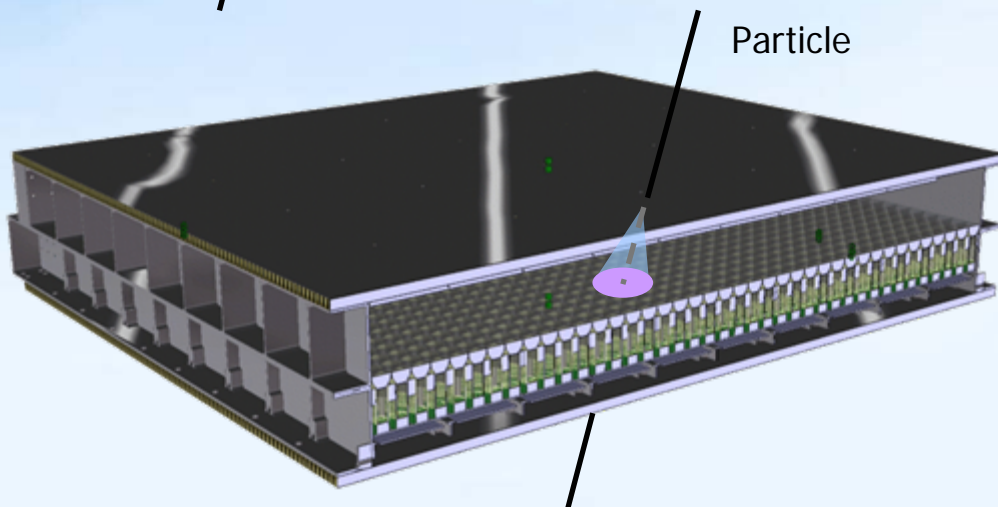
0.85

# AMS02 et CREAM : détecteur Cerenkov



## Imageur RICH d'AMS02 :

- Mesure de charge (identification des elements)
- Mesure de la vitesse (identification des isotopes)
- En cours d'intégration au CERN
- Près pour une installation sur l'ISS en 2009

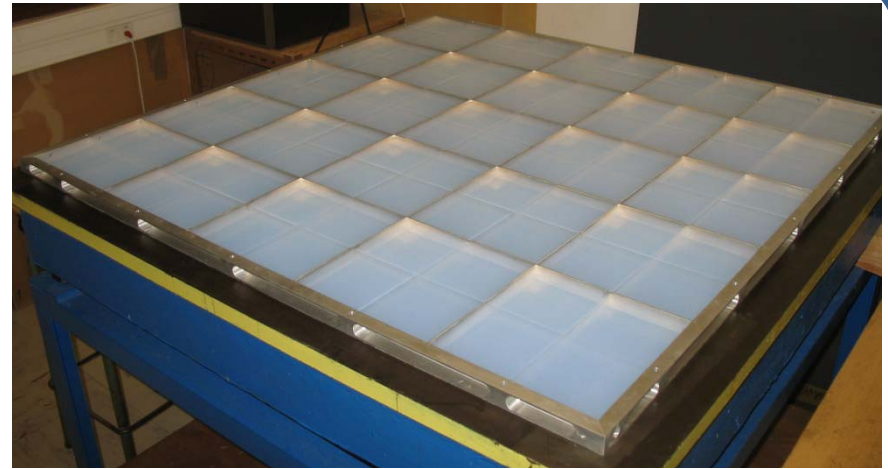
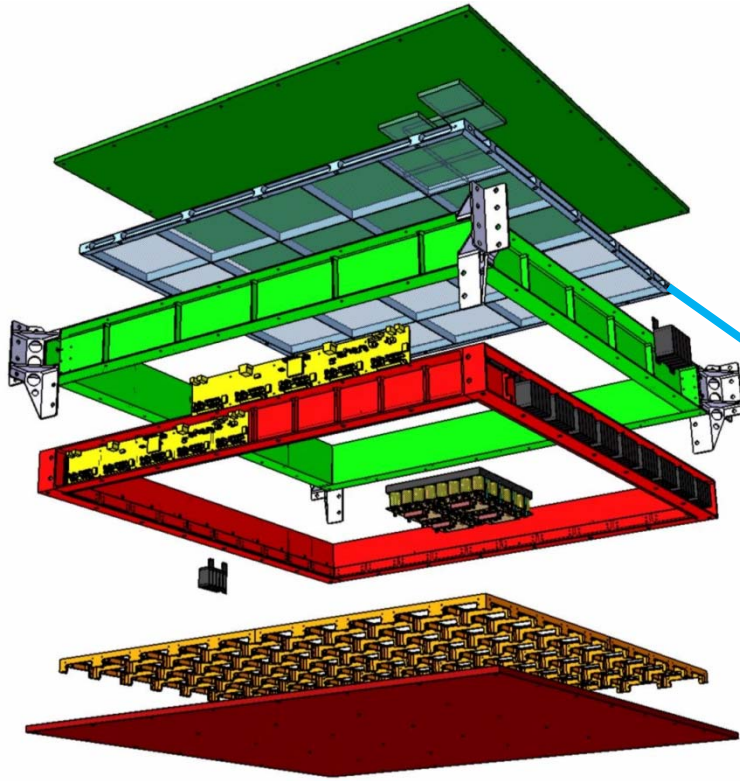


## Imageur CherCam de CREAM :

- Mesure de charge (identification des elements)
- Construit en 2006
- Vient d'effectuer son premier vol !

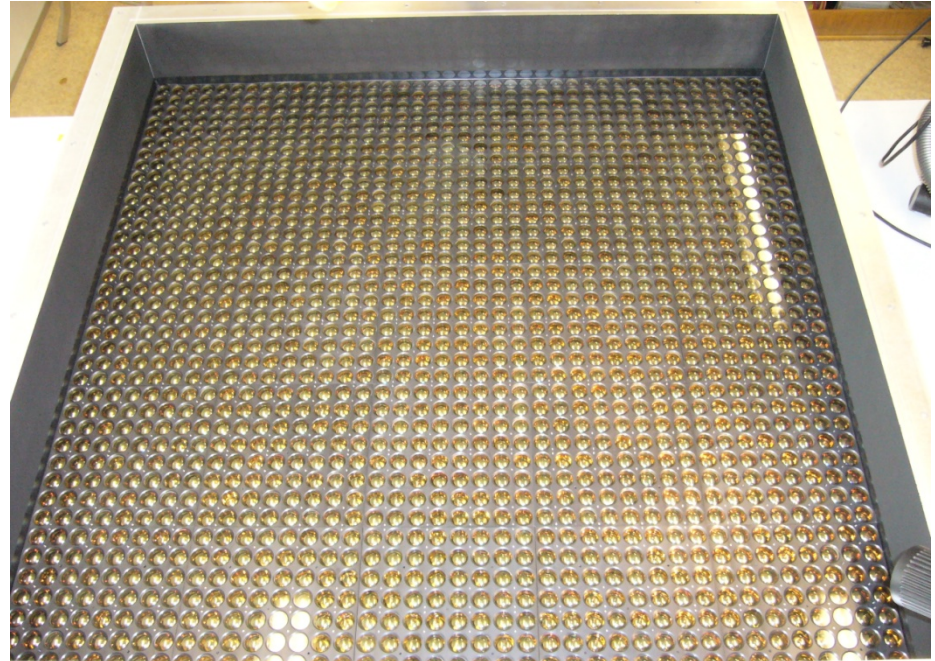
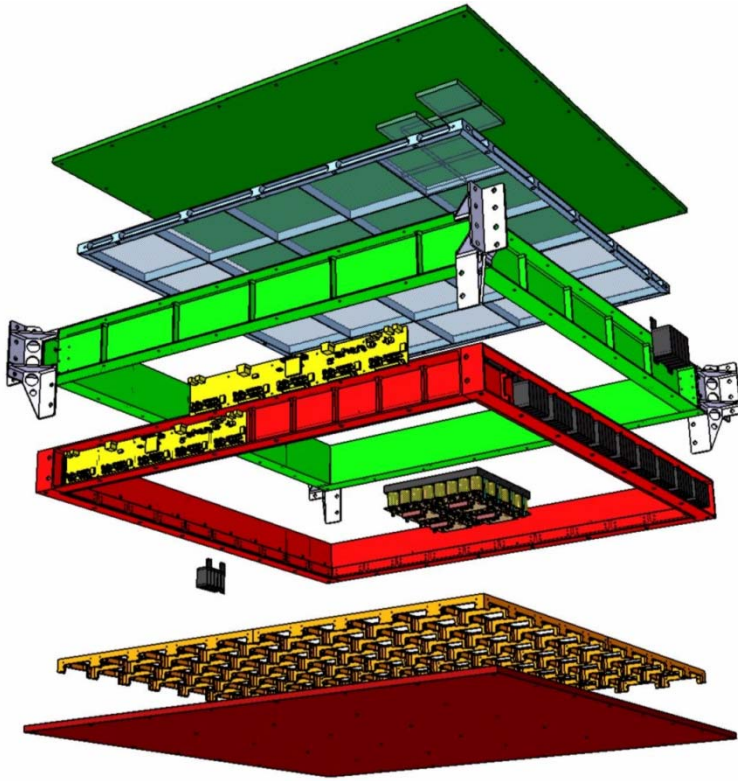


# CherCam : Architecture et Construction



*Aerogel aluminum frame with  
200 Mastushita SP50 tiles*

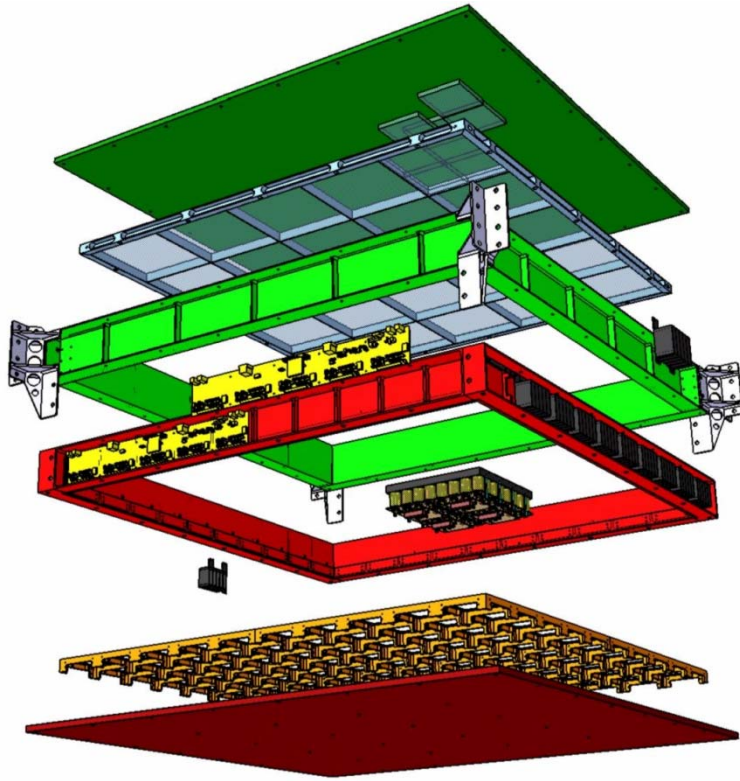
# CherCam : Architecture et Construction



*Complete PMTs frame*



# CherCam : Architecture et Construction



*Read-out electronics*

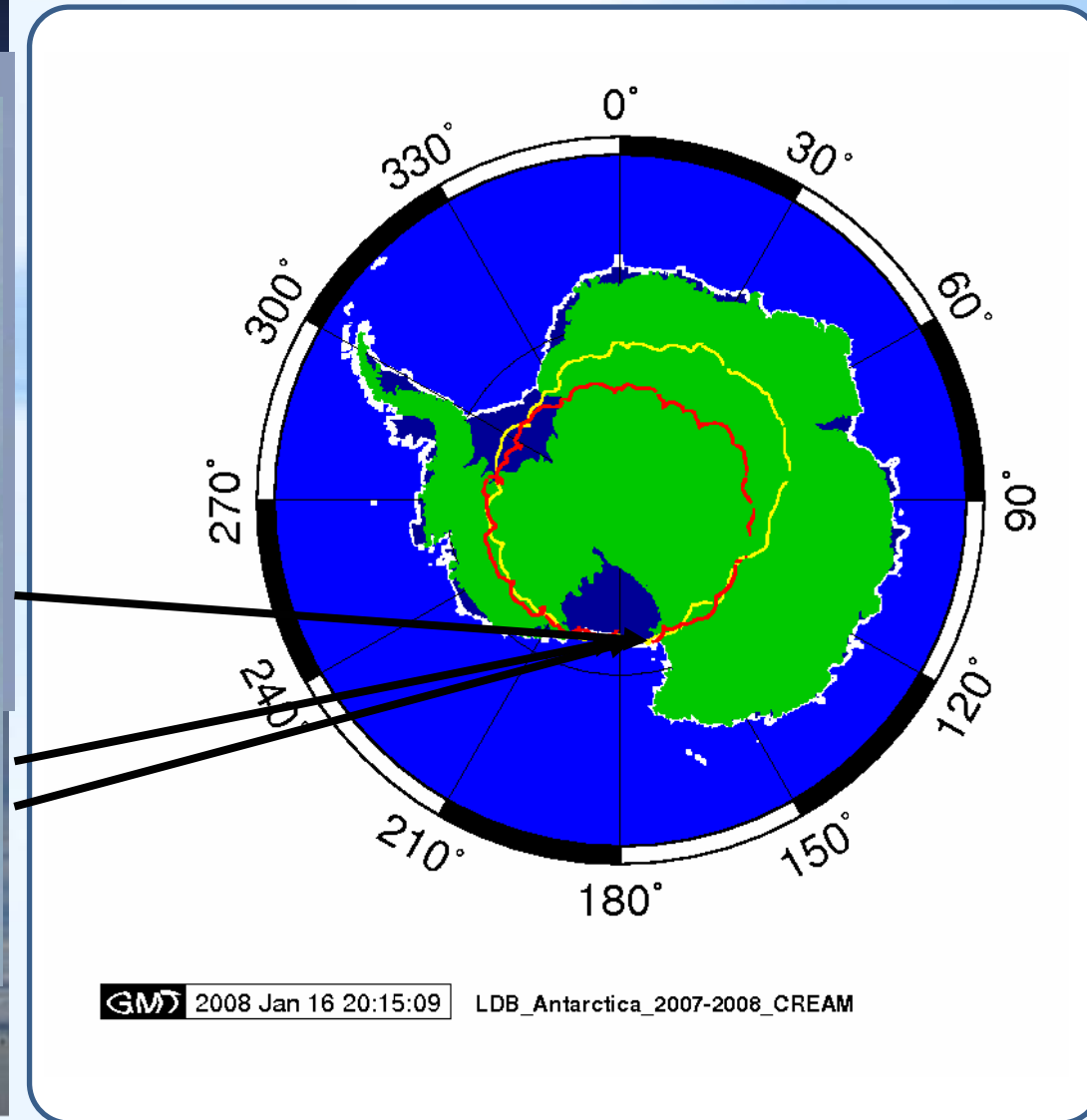


*2x 50 HV modules*

# Vol 2007-2008



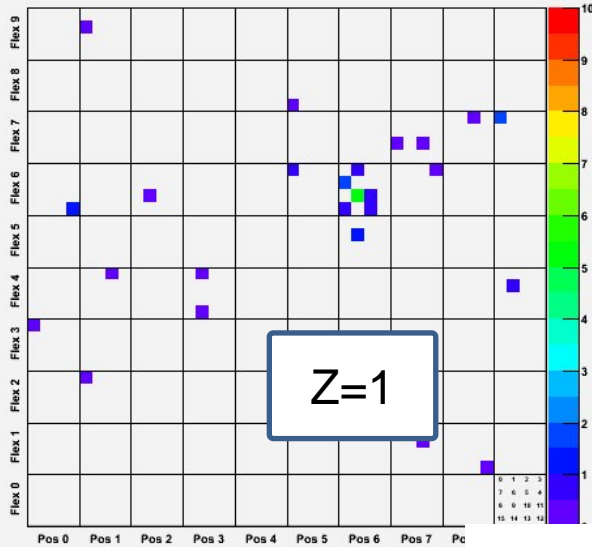
**Fin du vol le 16 janvier  
2008  
28 jours de vol  
(récupération en cours)**



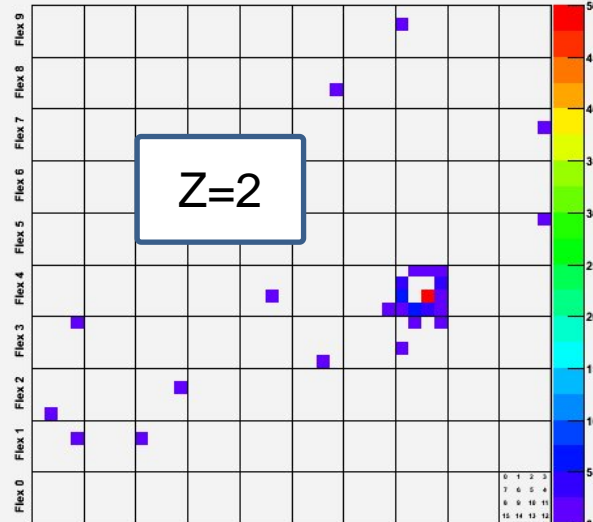
# Vol 2007-2008

## Quelques evenements du 23/12/2007- 23h00 GMT

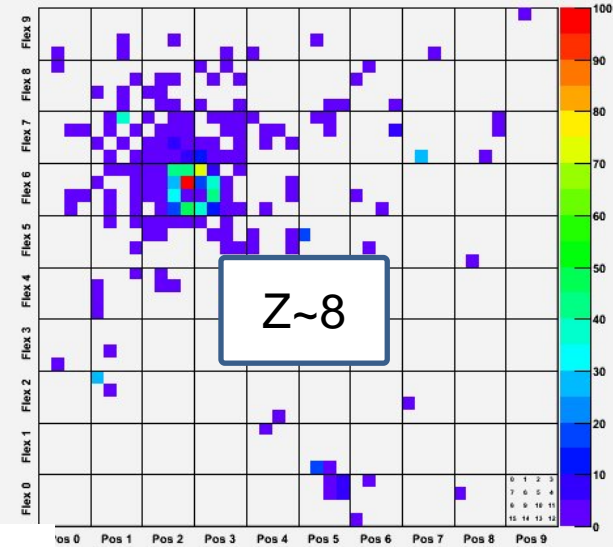
Event nb 40690/47992 of run 0 (mode 0)



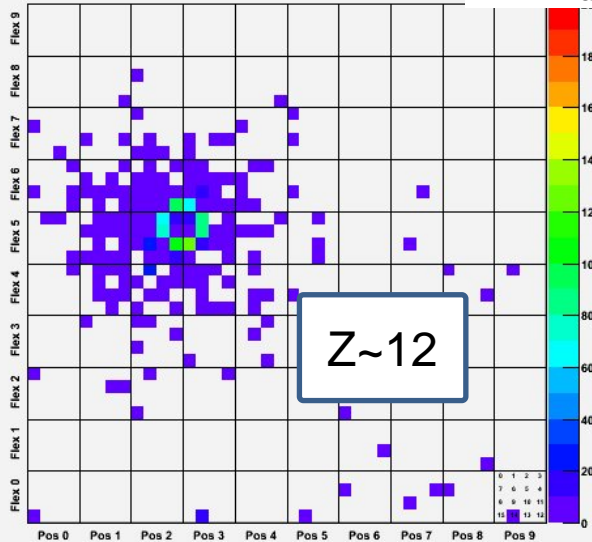
Event nb 40685/47992 of run 0 (mode 0)



Event nb 40324/47992 of run 0 (mode 0)

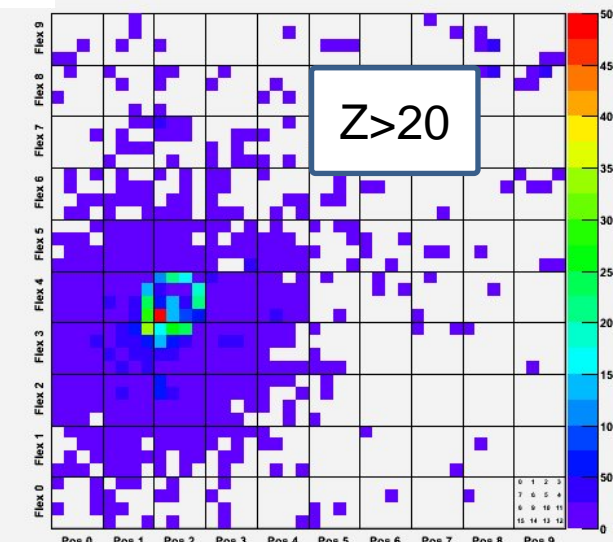
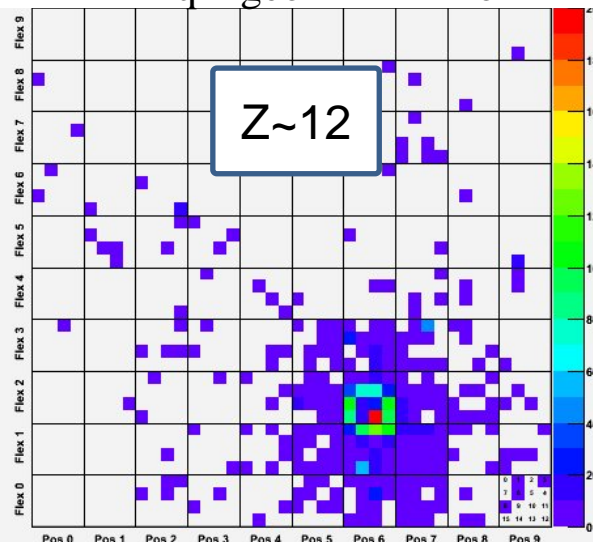


Event nb 40484/47992 of run 0 (mode 0)



$$N_{\text{det}}(Z) = \varepsilon_q \varepsilon_{\text{geo}} Z^2 N_{\text{pho}}(Z=1)$$

Event nb 40949/47992 of run 0 (mode 0)

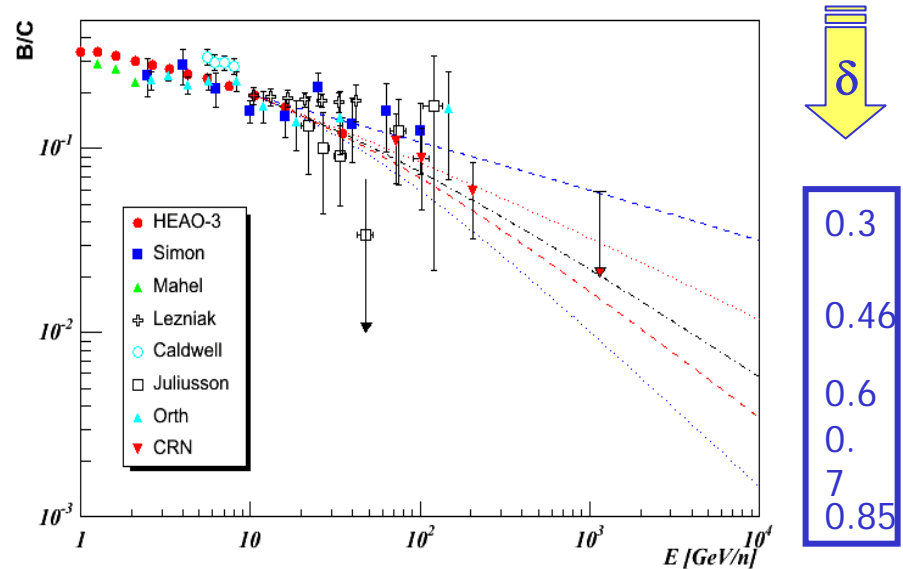




# Analyse des données CREAM

Thèse Yoann Sallaz Damaz (2008), Antje Putze (2009)

- Mesure de charge pour l'identification des éléments jusqu'à  $Z=26$
- Résolution suffisante pour mesurer le rapport  $B/C \sim 10^{-2}$



+

- Correction de la production atmosphérique
- Etude des contraintes sur les modèles de propagation

# Production atmosphérique

Thèse Antje Putze (2009)

Propagation des ions  
dans l'atmosphère :  
Équation de transport

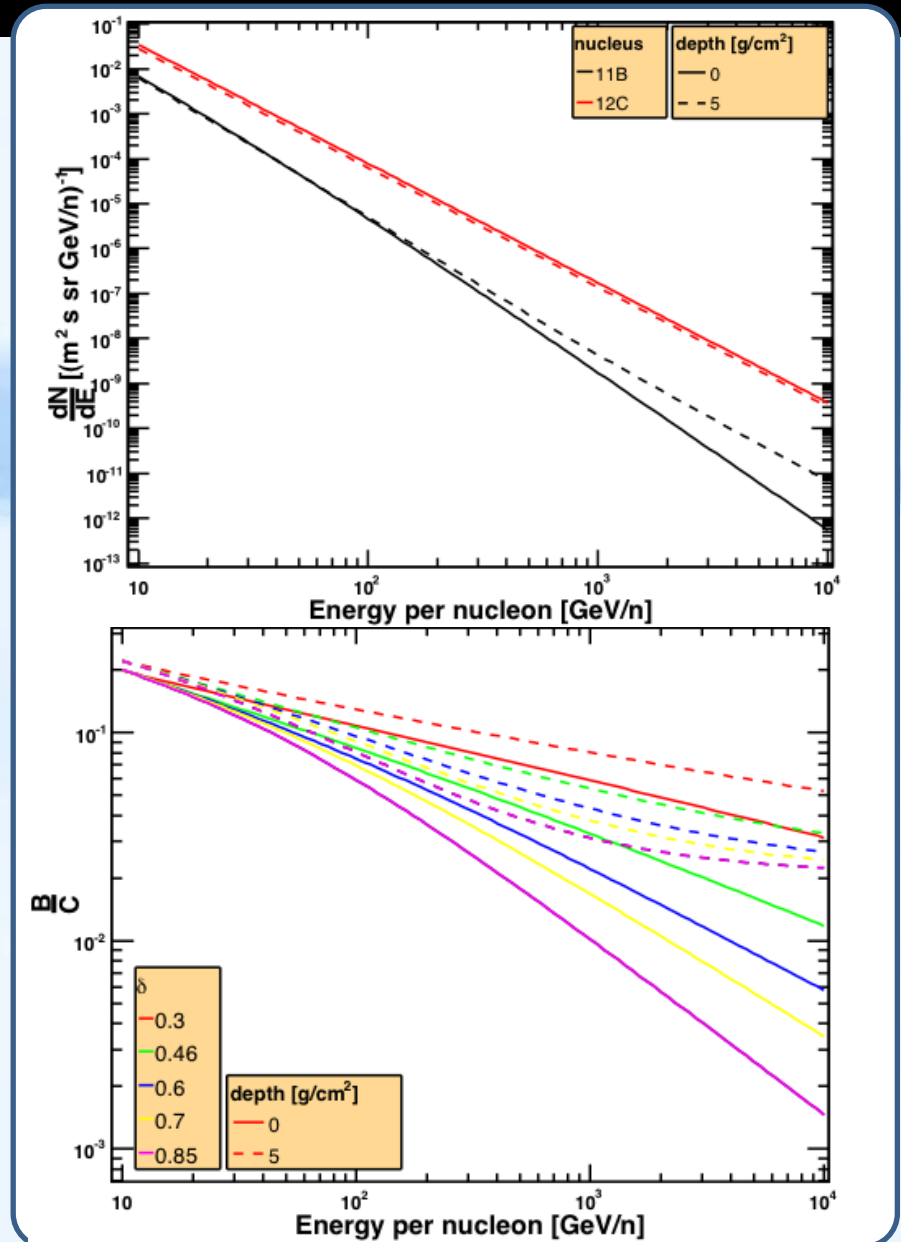
- perte d'énergie
- absorption
- fragmentation

Reconstruction des flux  
TOA :

- Inversion de l'équation  
de transport



Etude des systématiques  
liés aux sections efficaces  
de fragmentation



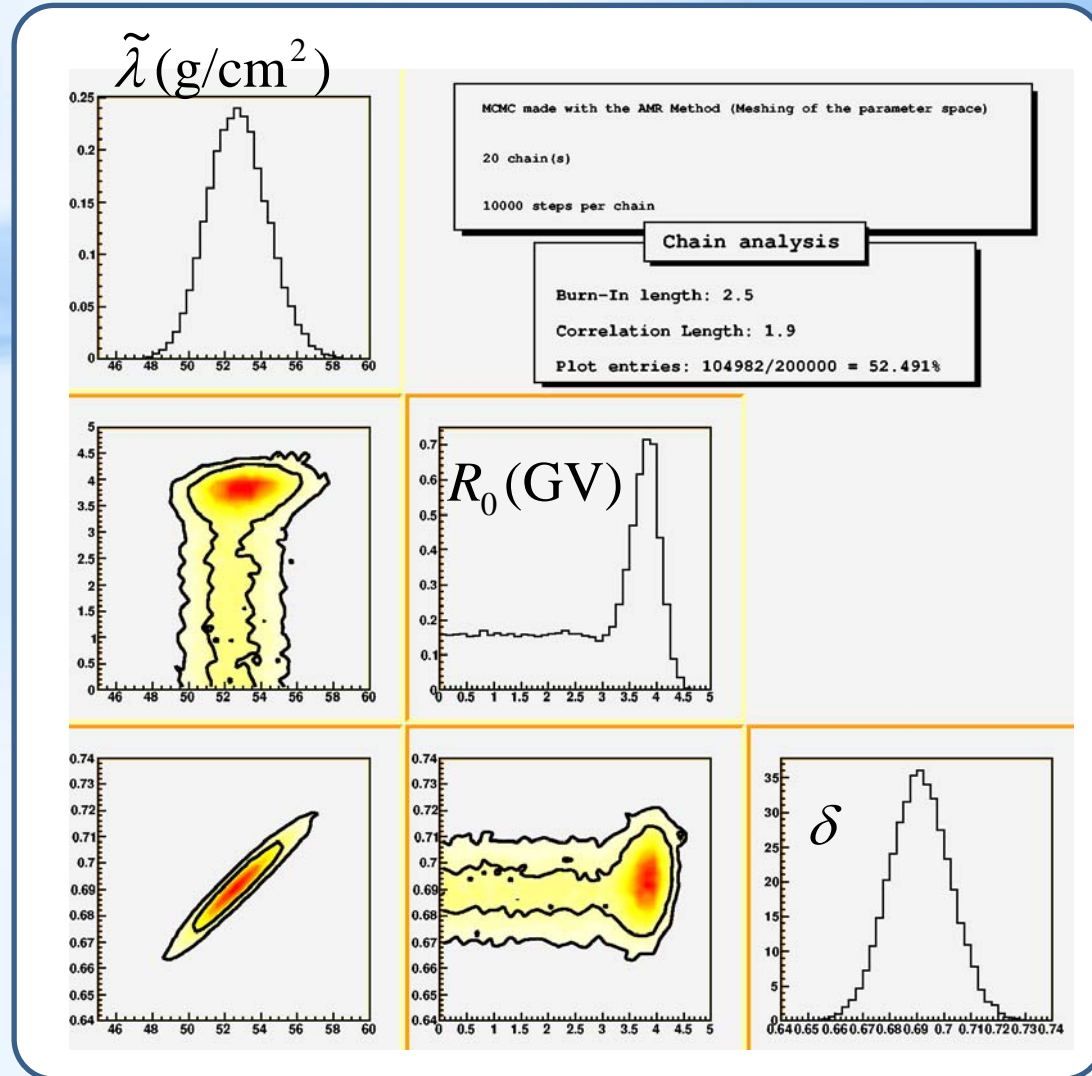
# Contraintes sur les paramètres de propagation

Thèse Antje Putze (2009)

Activité en collaboration avec le LAPTH et LPNHE

- Nouvelles données permettent de mieux contraindre les paramètres
- Nécessité d'un outil bayésien : Markov Chain Monte Carlo (MCMC)
- Premiers résultats avec le modèle de Leaky-Box

$$\lambda_{esc} = \begin{cases} \beta \tilde{\lambda} \left( \frac{R_0}{1GV} \right)^{-\delta} & \text{pour } R < R_0 \\ \beta \tilde{\lambda} \left( \frac{R}{1GV} \right)^{-\delta} & \text{pour } R > R_0 \end{cases}$$





# Conclusions et perspectives

- **Simulation de l'interaction du rayonnement cosmique dans l'environnement terrestre :**
  - **Activité très productive, permis de comprendre un grand nombres de processus**
  - **Code développé au fur et à mesure des besoins**
  - **Simulation capable de reproduire de façon très précise l'ensemble des particules secondaires depuis le niveau de la mer jusqu'à altitudes des satellites**

**Travail réalisé en collaboration avec :**

- Yong Liu**
- Ching Yuan Huang**
- Bruny Baret**
- Michel Buénerd**

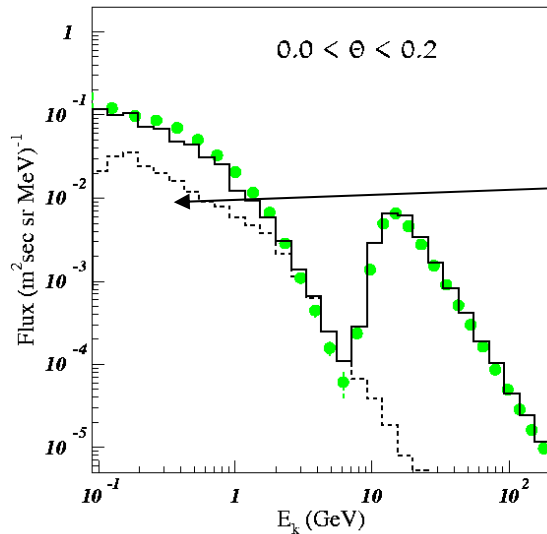
## ➤ **Mesure du rayonnement cosmique**

- Malgré plusieurs décennies d'observations, l'origine, les processus d'accélération et de propagation du RC dans la galaxie ne sont toujours pas élucidés
- L'observation des éléments du RC dans le domaine d'énergie du GeV au PeV permettra d'améliorer significativement la connaissance de la propagation et des sources du rayonnement cosmique.
- Analyse des données de CREAM en cours :
  - ➡ **Thèse de Yoann Sallaz Damaz en 2008**
  - ➡ **Thèse de Antje Putze en 2009**

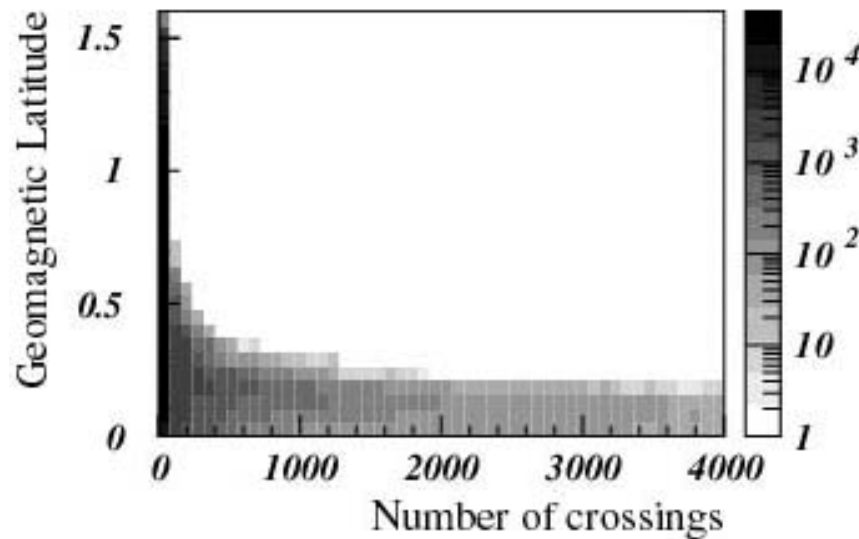
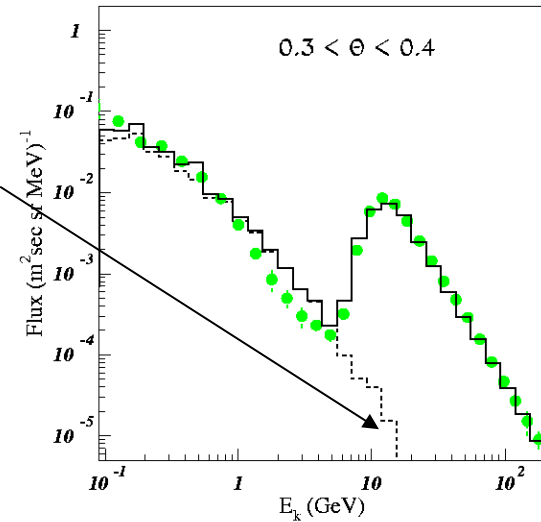


# AMS01 – Flux de Proton

## Nature de la composante piégée

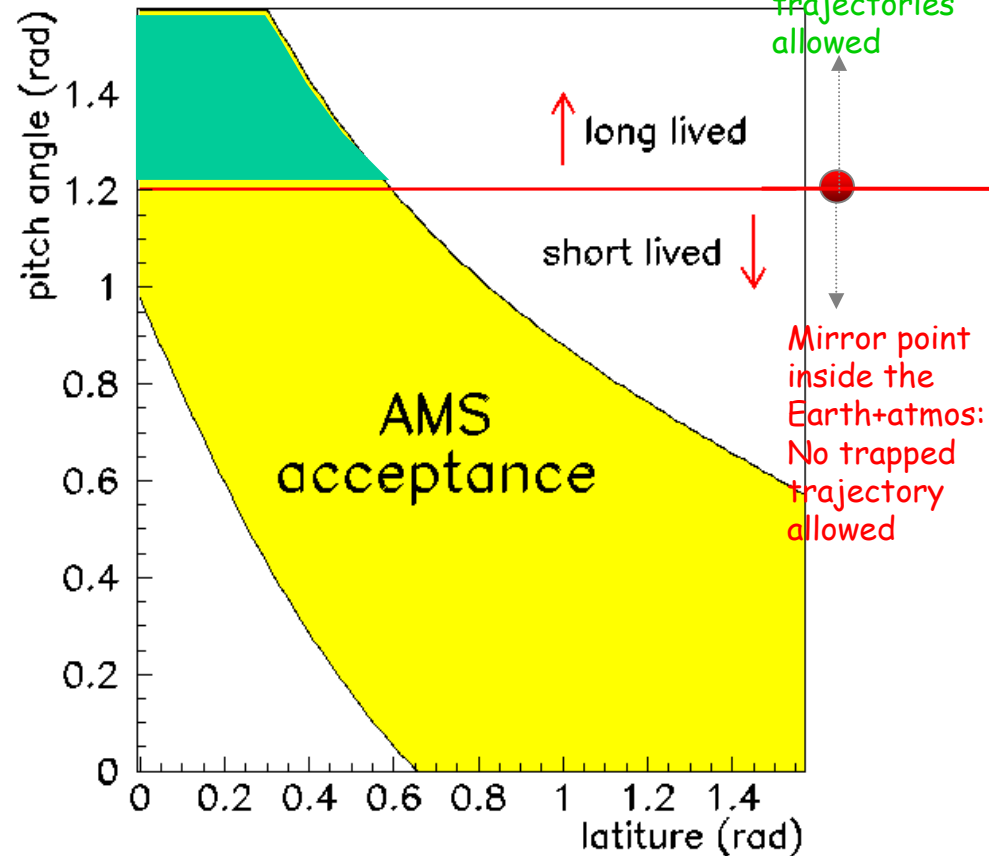
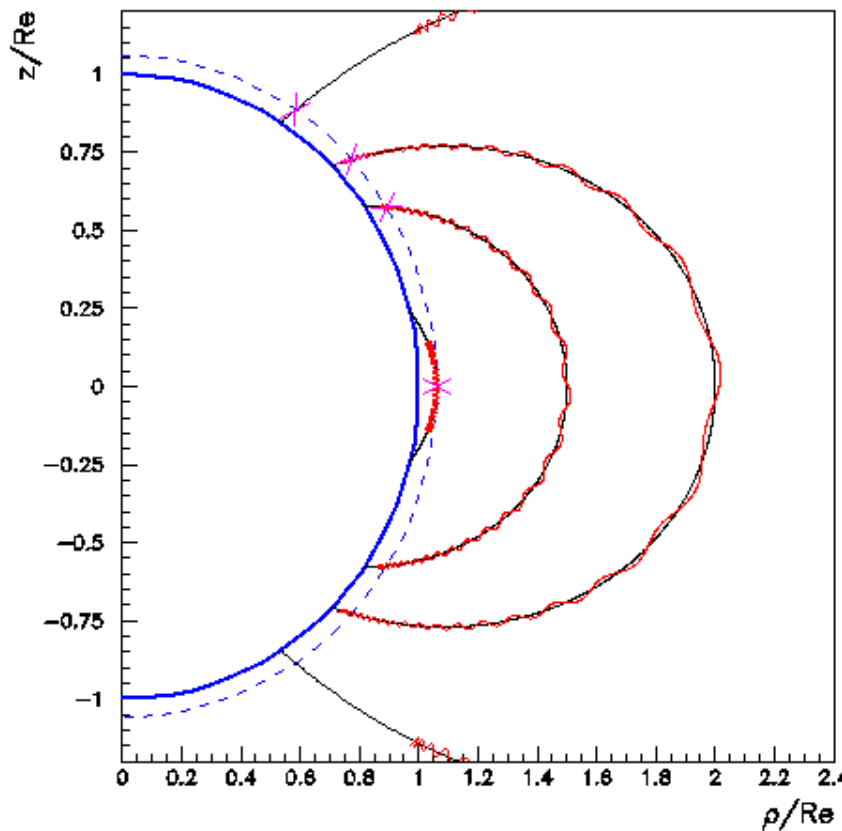


Contribution  
 $N_{\text{cross}} > 10$

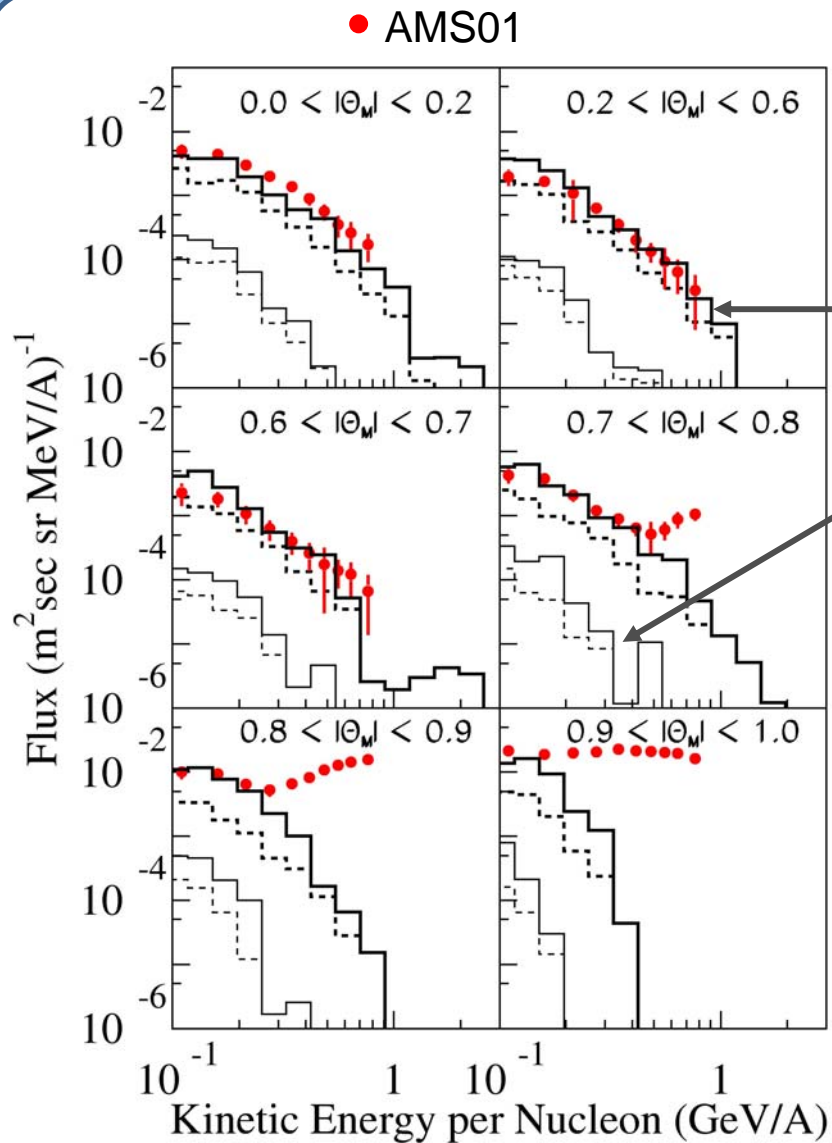


# AMS01 – Flux de Proton

## Nature de la composante piégée



# Flux de deutérium et tritium sous la coupure



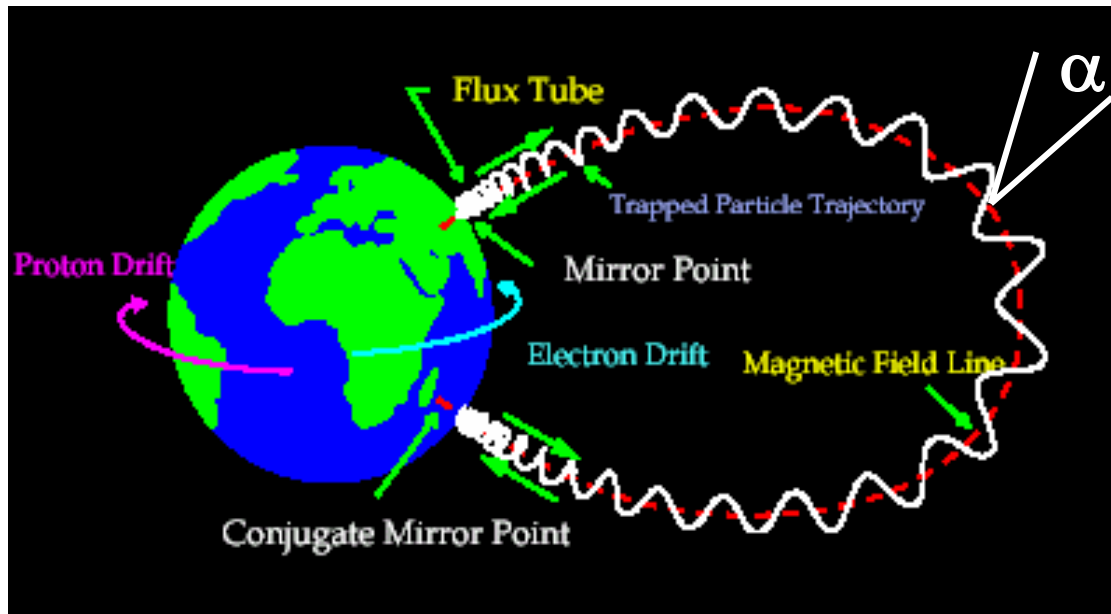
Deutérium ( $^2\text{H}$ )

Tritium ( $^3\text{H}$ )

Coalescence

# Coupure Géomagnétique

## Trajectoire des particules piégées



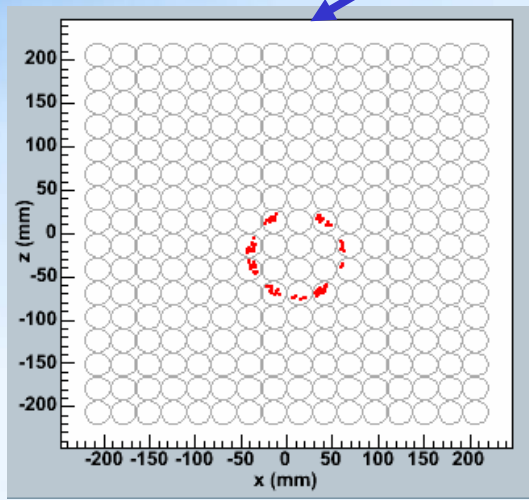
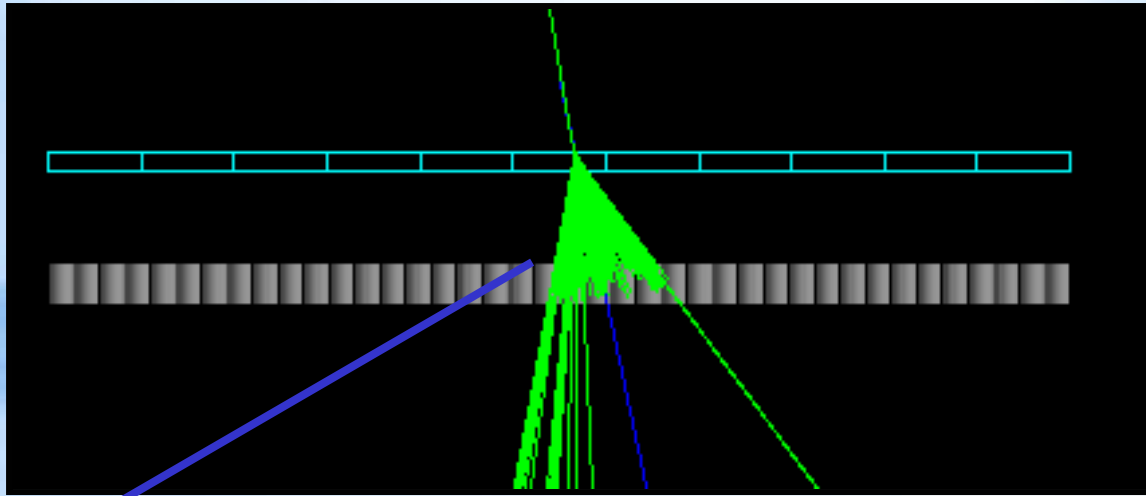
Particule piégée : (invariant adiabatique)  
Dérive sur une enveloppe limitée par les points miroirs où elle rebondit :

$$\alpha \text{ (pitch angle)} = \pi/2$$

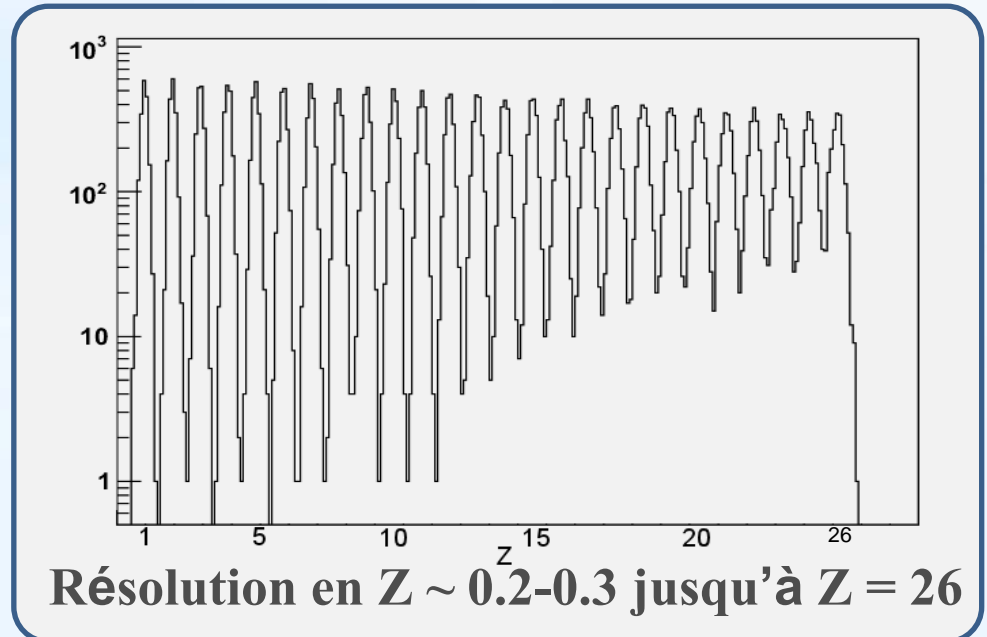
➡ Enveloppe de dérive

# Simulation CherCam

Thèse Yoann Sallaz Damaz (2008)



$$N_{\text{det}}(Z) = \varepsilon_q \varepsilon_{\text{geo}} Z^2 N_{\text{Pho}}(Z=1)$$

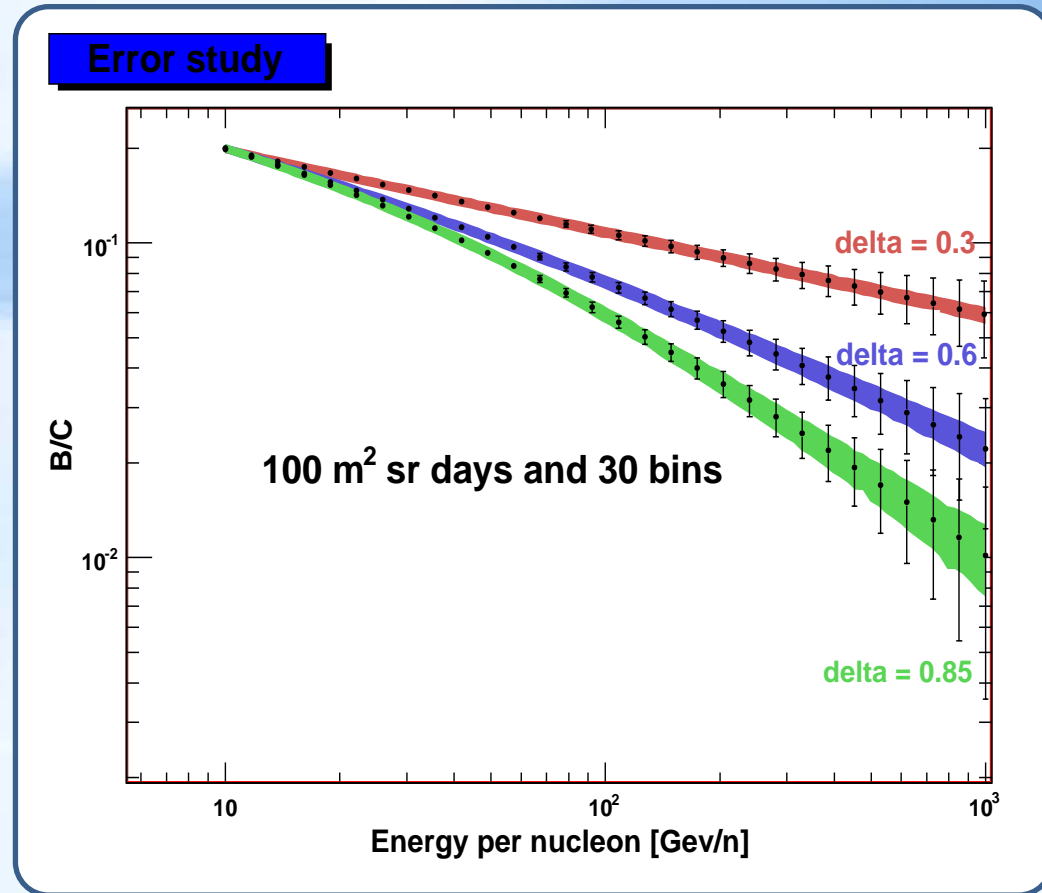




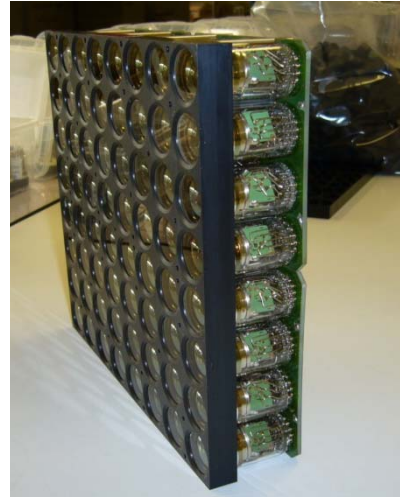
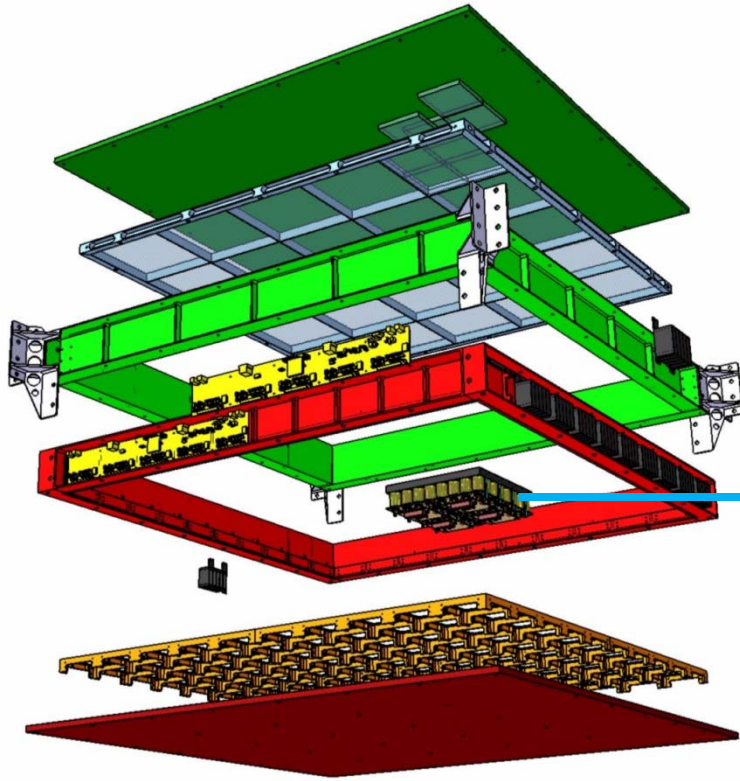
# Production atmosphérique

Thèse Antje Putze (2009)

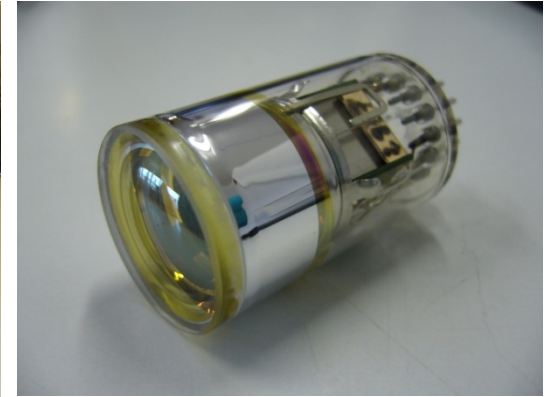
Reconstruction du flux  
TOA (Top of Atmosphere)  
et étude des incertitudes  
liées aux sections  
efficaces de  
fragmentation.



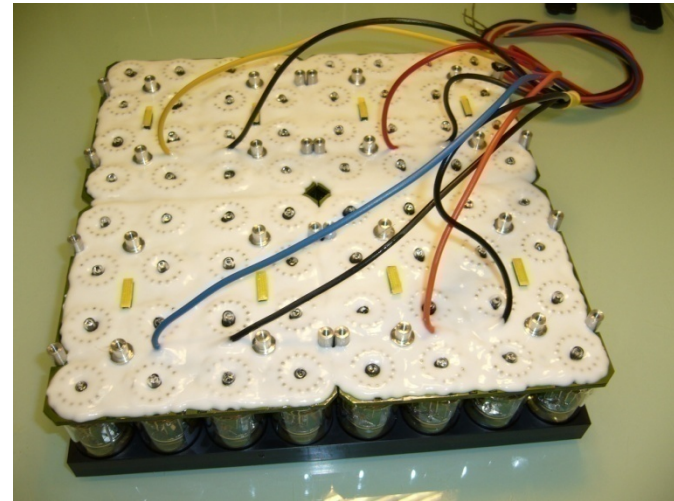
# CherCam : Architecture et Construction



*8x8 PMTs Module*



*PMT (Photonis XP1232)*



*Module with potting*