

Production et propagation de particules secondaires au voisinage de la Terre

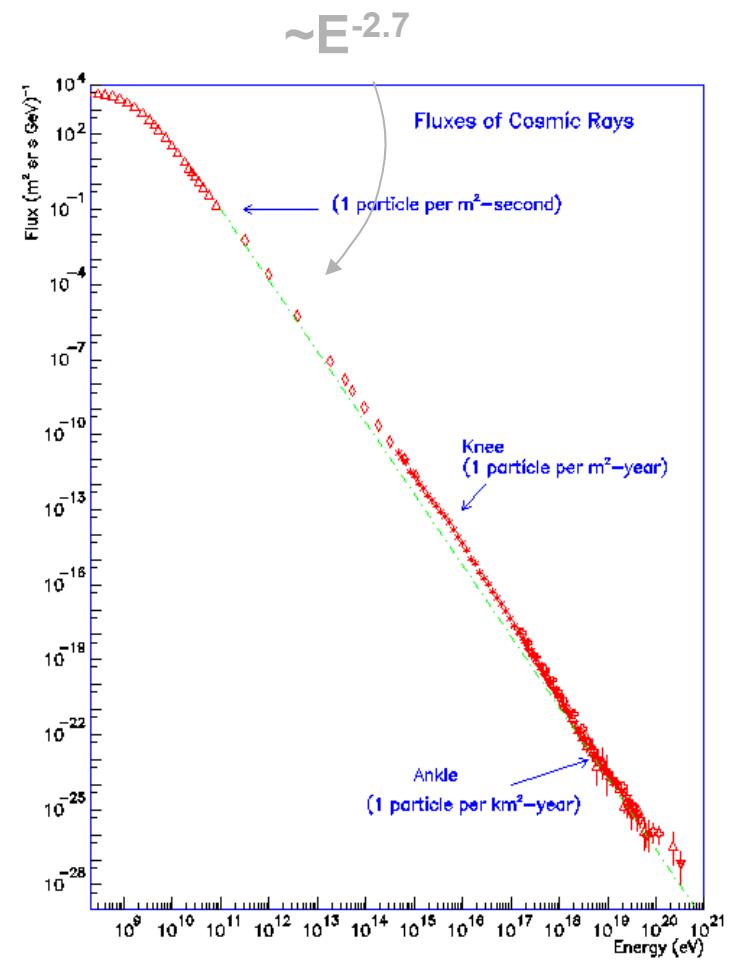
L. Derome

Soutenance de DHDR, le 21 janvier 2008

L. Derome, 21 janvier 2008

Rayonnement Cosmique

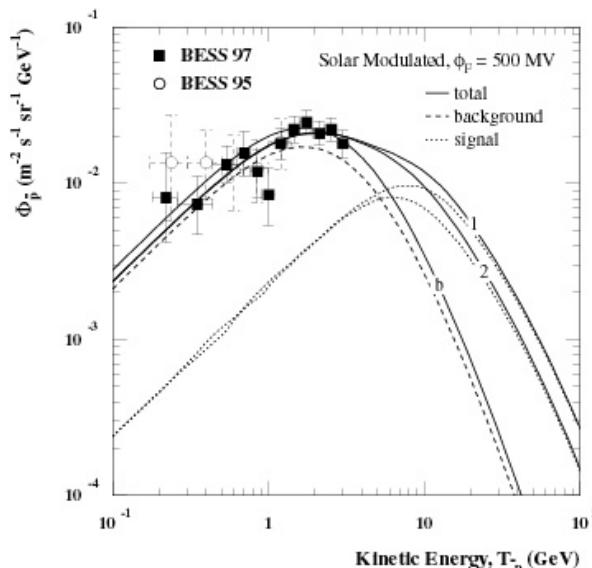
Rayonnement cosmique :
Mesuré depuis un siècle,
(vol de Victor Hess en 1912)



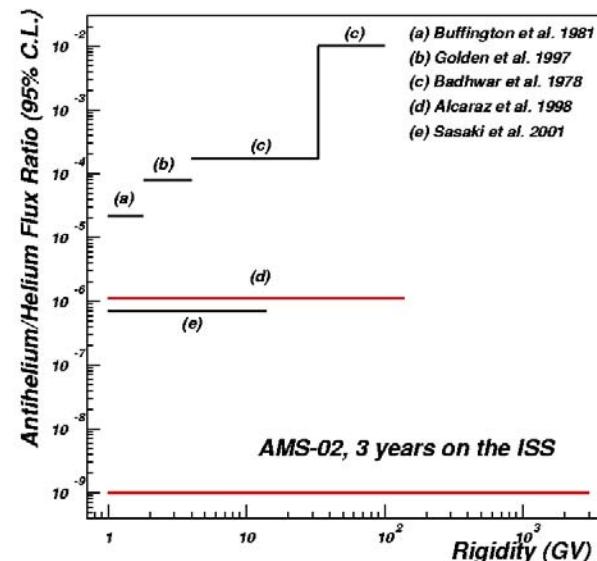
Rayonnement Cosmique

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

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



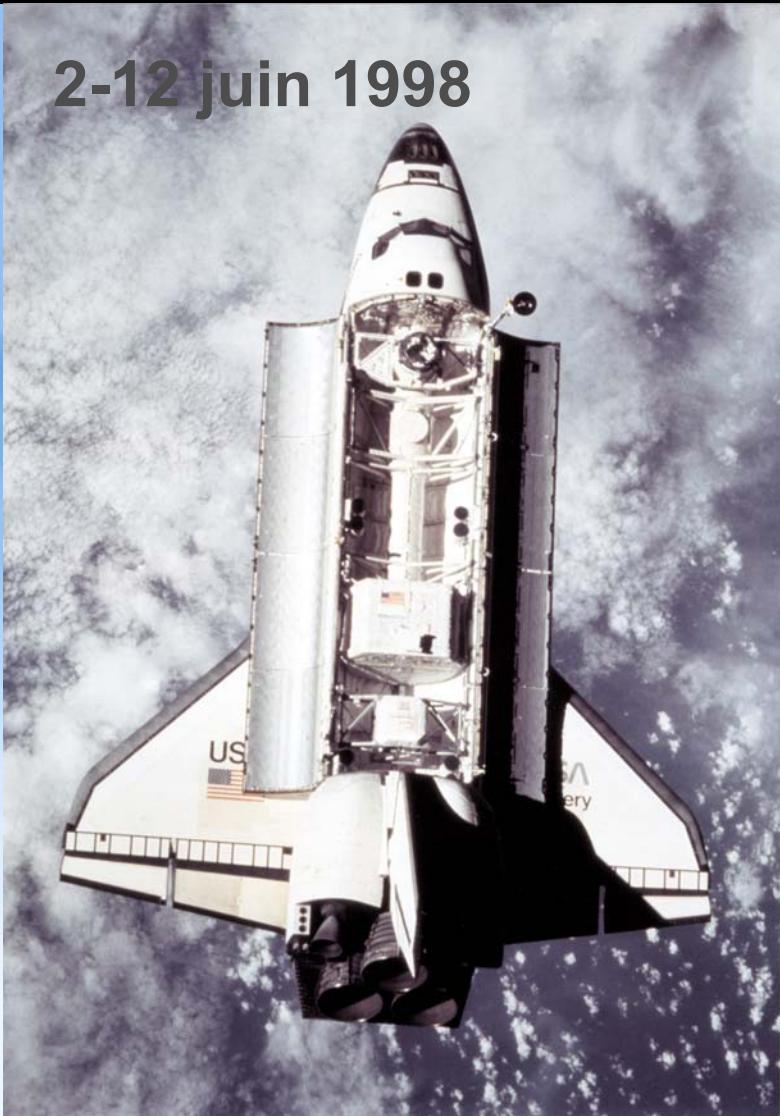
Symétrie matière/antimatière
 ${}^4\text{He}/{}^4\text{He}$



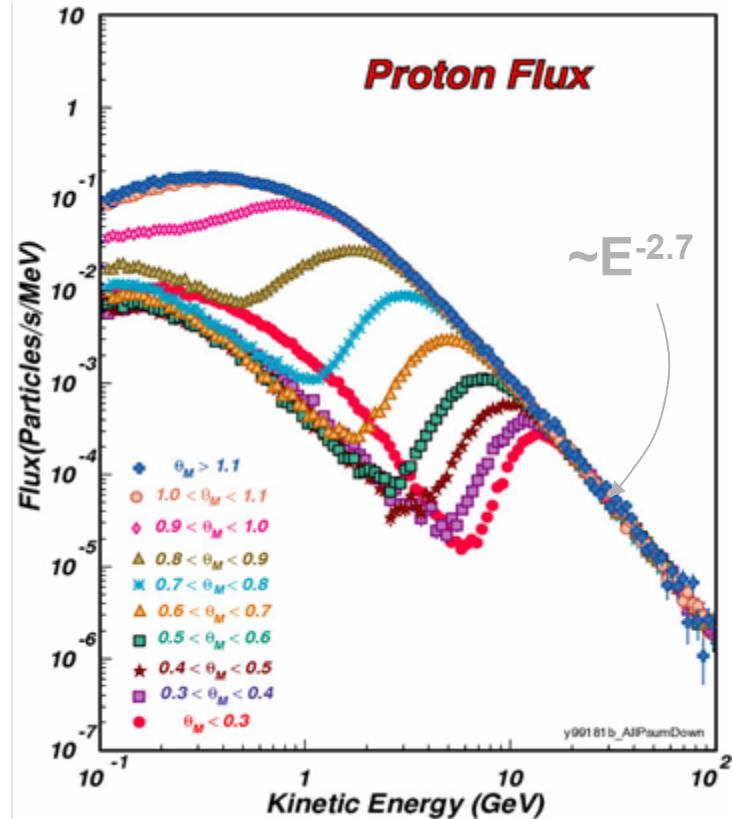
Programme
expérimental AMS01

Vol AMS01

2-12 juin 1998



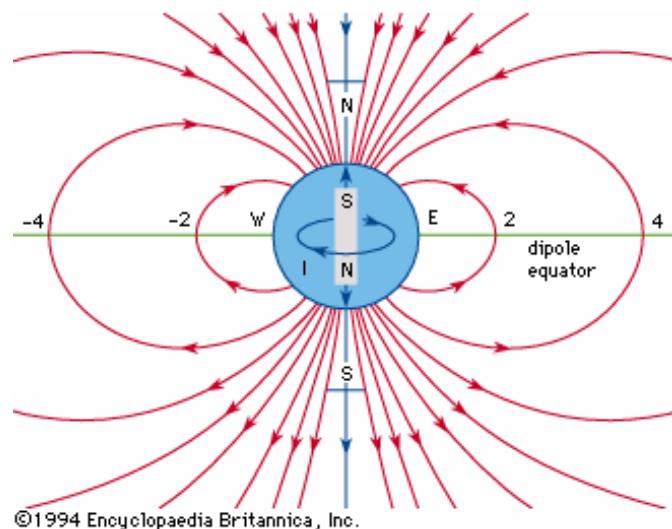
Mise en évidence d'une population importante sous la coupure géomagnétique



Mais aussi composantes $e^{+/-}$, ${}^3\text{He}$, D

Coupure Géomagnétique

Champs magnétique terrestre



Champ proche d'un dipôle

→ Bouclier magnétique qui repousse les particules de basses énergies

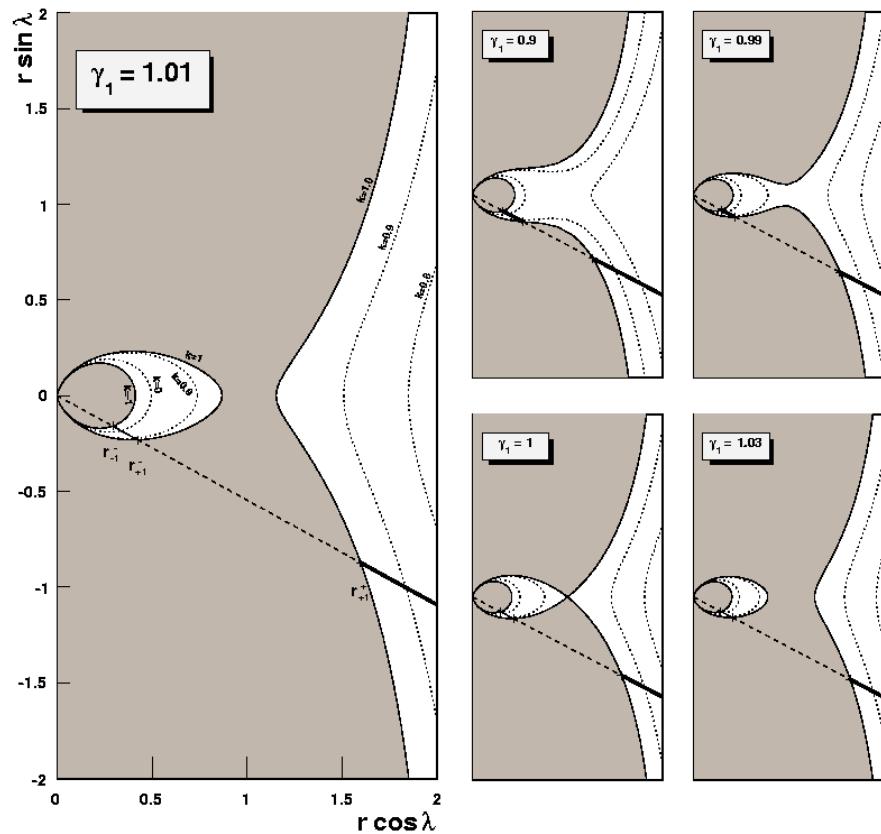
Trajectoire d'une particule dans un champs magnétique dipolaire :

- Pas de solutions générales
- Détermination de zones interdites en fonction de la constante du mouvement γ_1

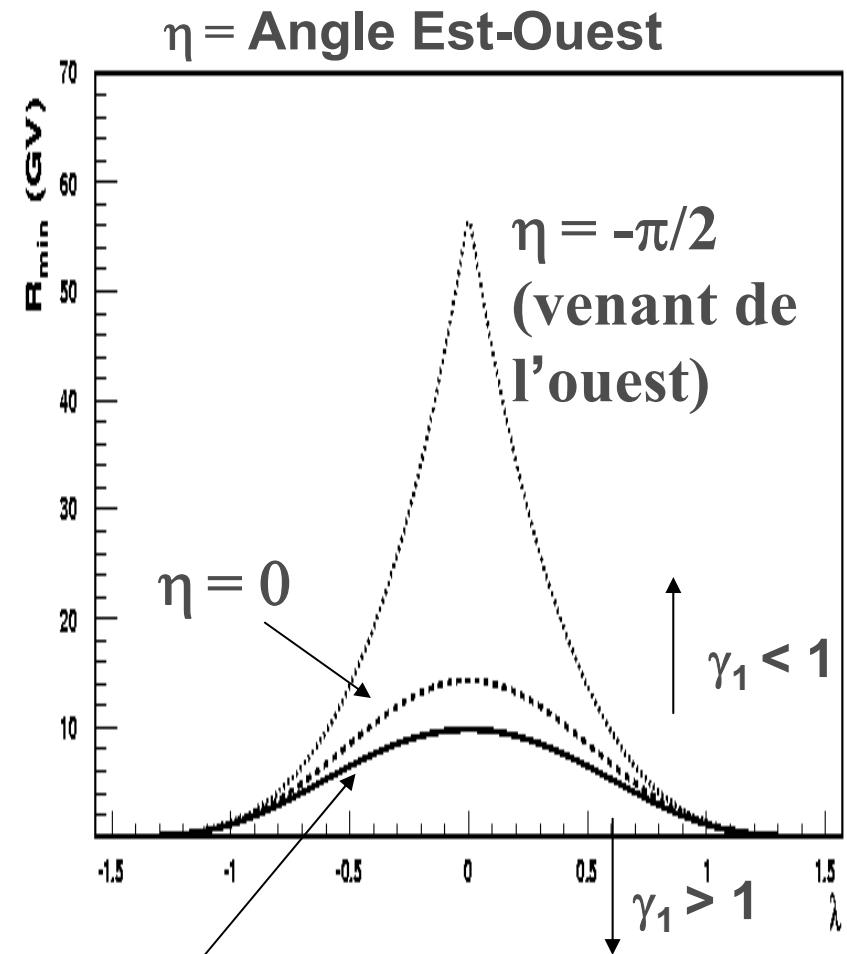
γ_1 : associée à la symétrie cylindrique

Coupure Géomagnétique

Zones interdites dans le plan équatorial



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

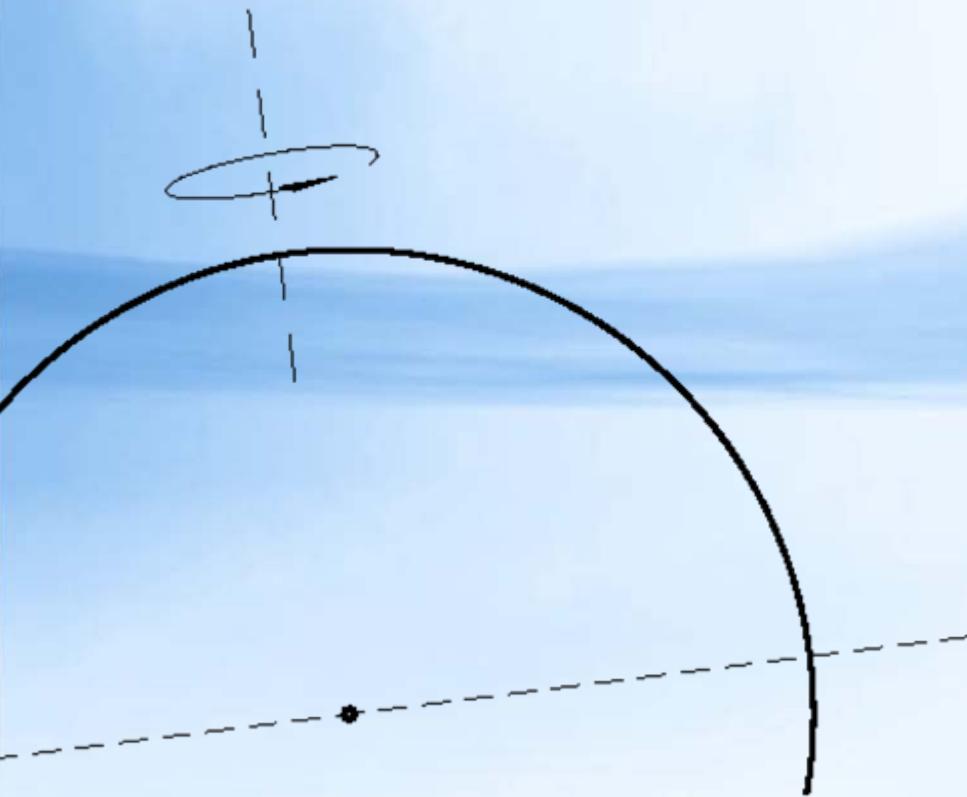


Particules sous la coupure

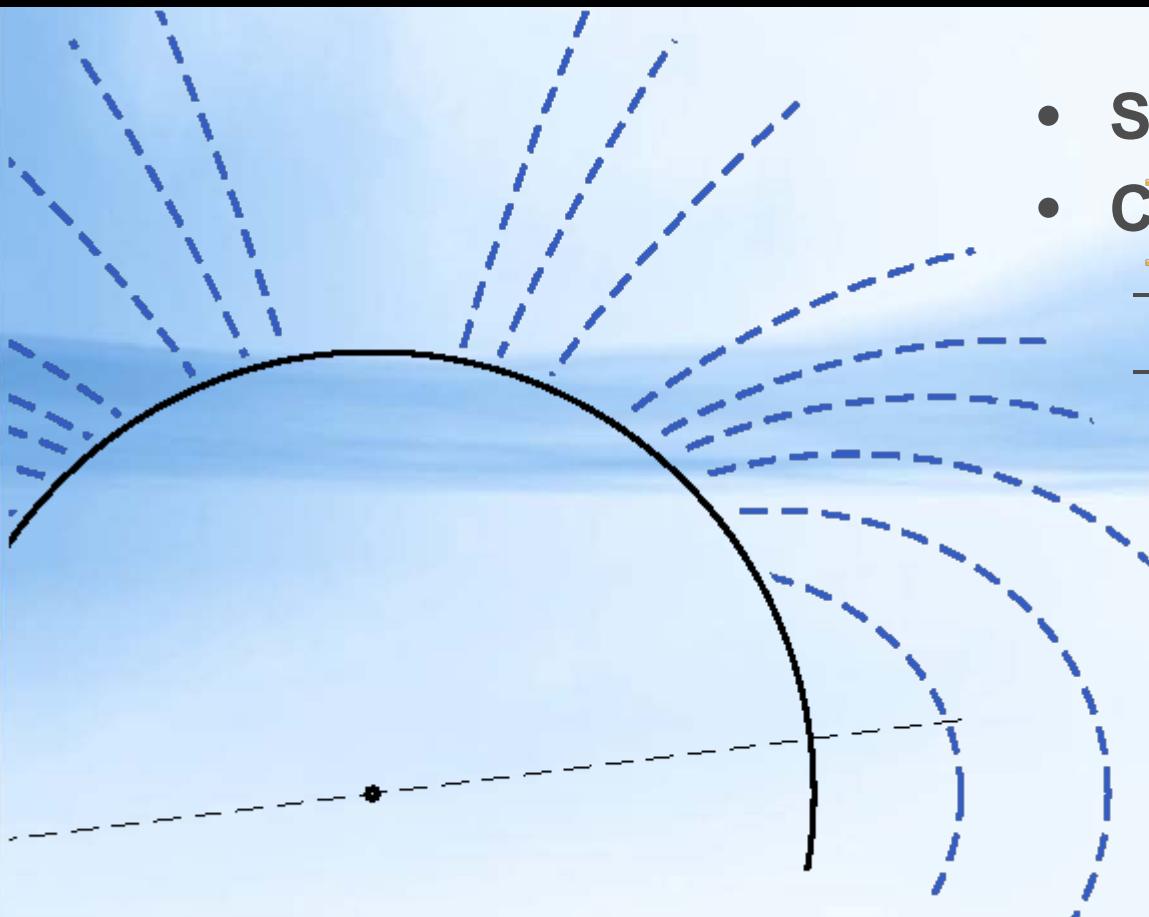
- **Hypothèse de travail :**
Les particules sous la coupure géomagnétique sont des particules piégées produites dans l'atmosphère.
- **Est-on capable de reproduire les flux dans une simulation intégrant la propagation et l'interaction des particules dans l'environnement terrestre ?**
- **Peut-on reproduire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

Simulation - Description

- **Simulation 3D**

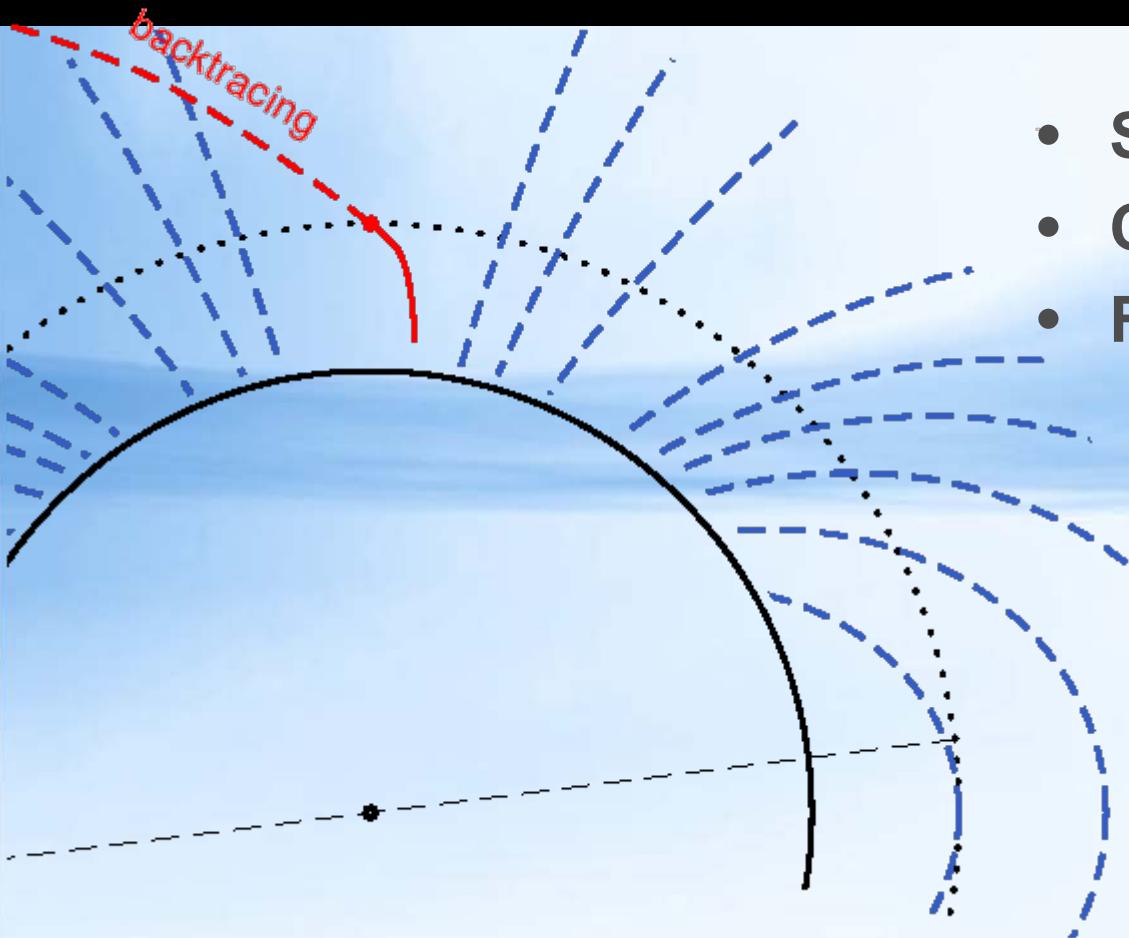


Simulation - Description



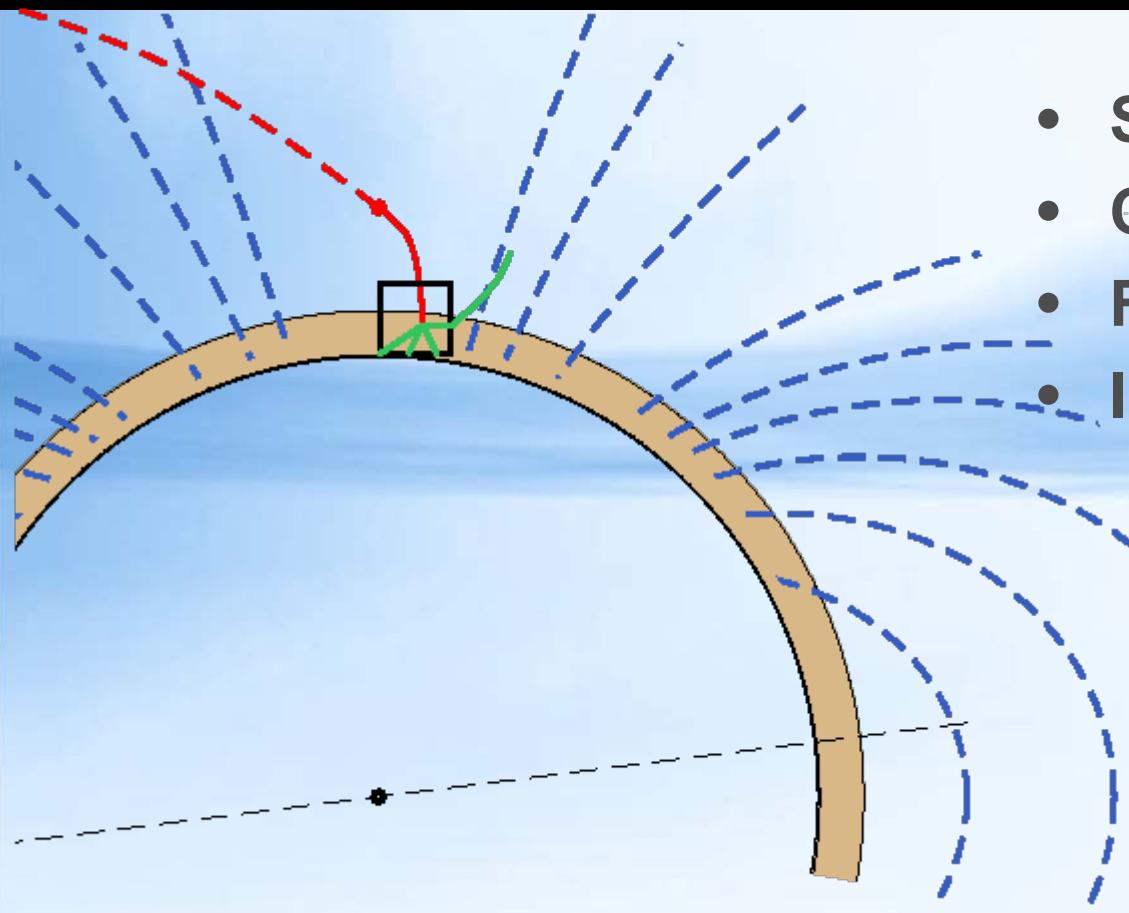
- **Simulation 3D**
- **Champ magnétique**
 - Modèle IGRF-2000
 - Runge-Kutta ordre 4 à pas adaptatif

Simulation - Description



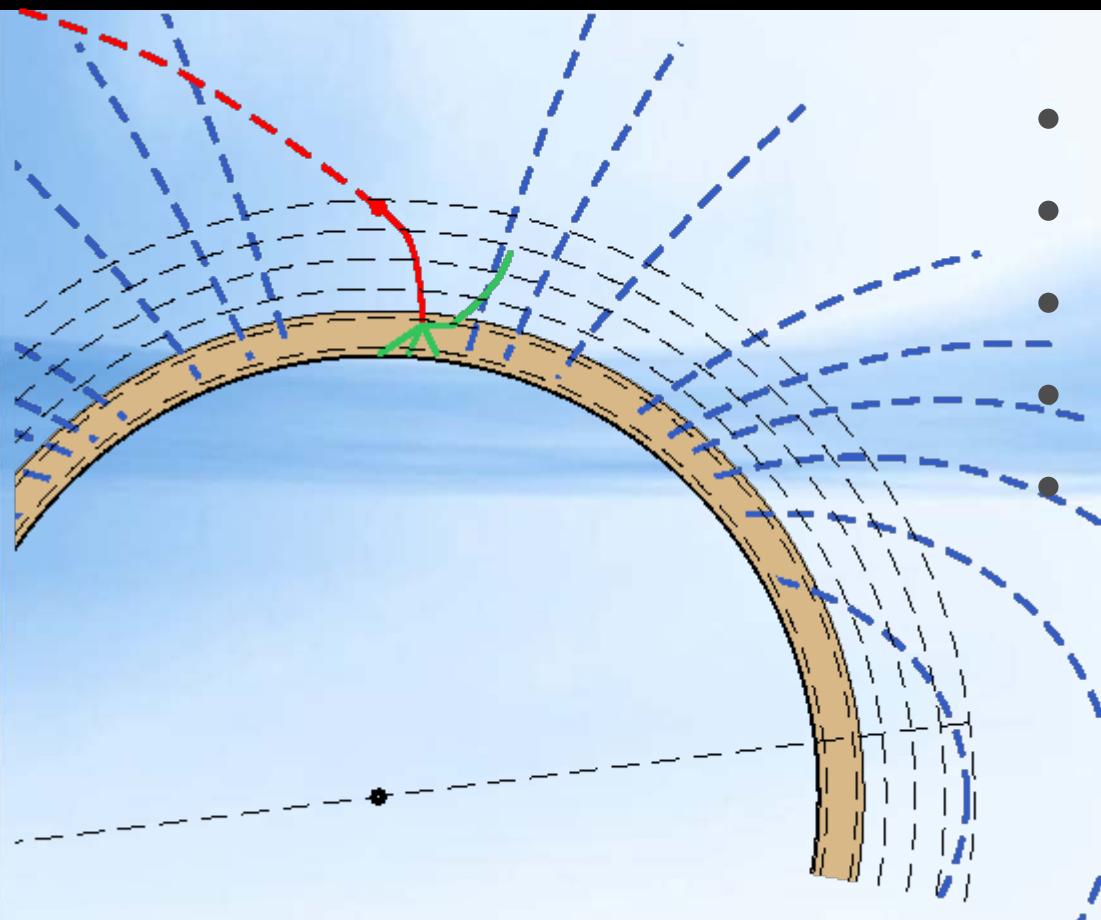
- **Simulation 3D**
- **Champ magnétique**
- **Flux primaires**
 - Flux primaire d'AMS01 (p,He)
- **Modulation solaire**
- **Génération depuis une sphère virtuelle**
- **« Backtracing » des particules**

Simulation - Description



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

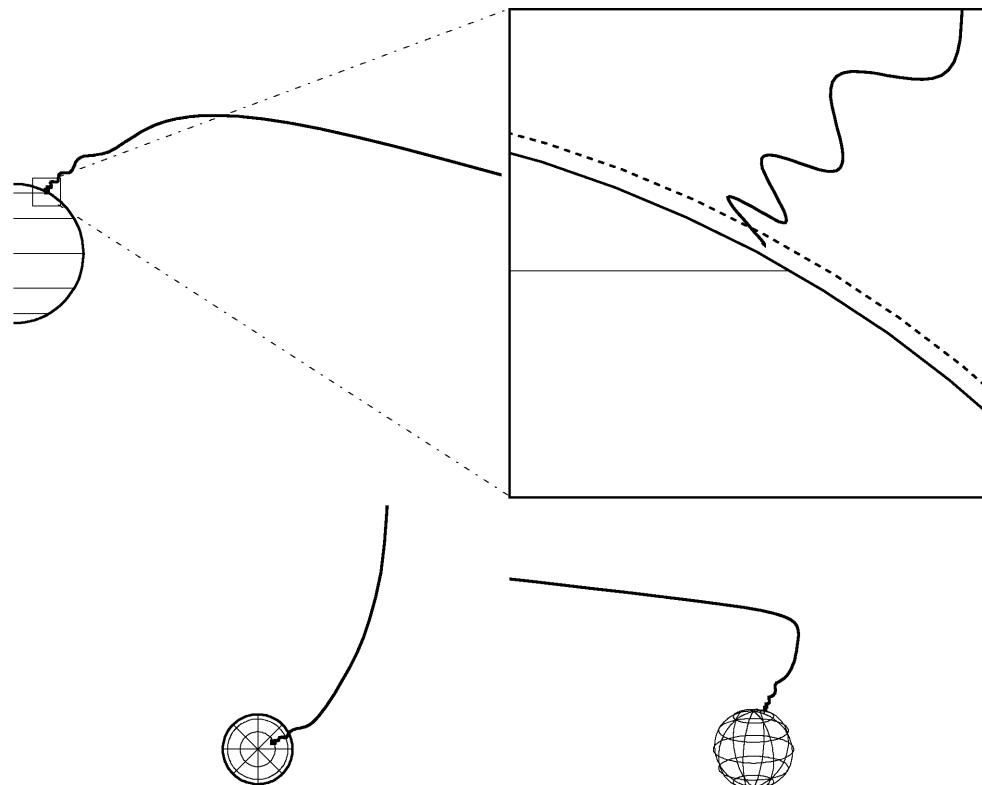
Simulation - Description



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

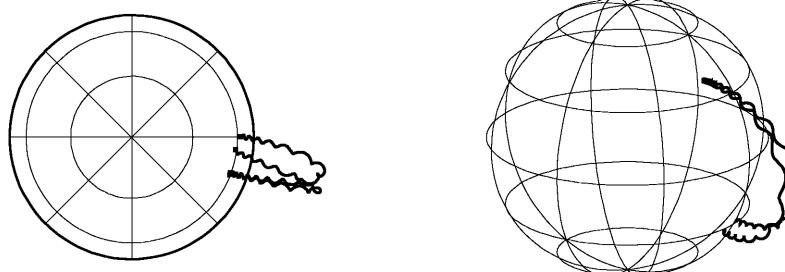
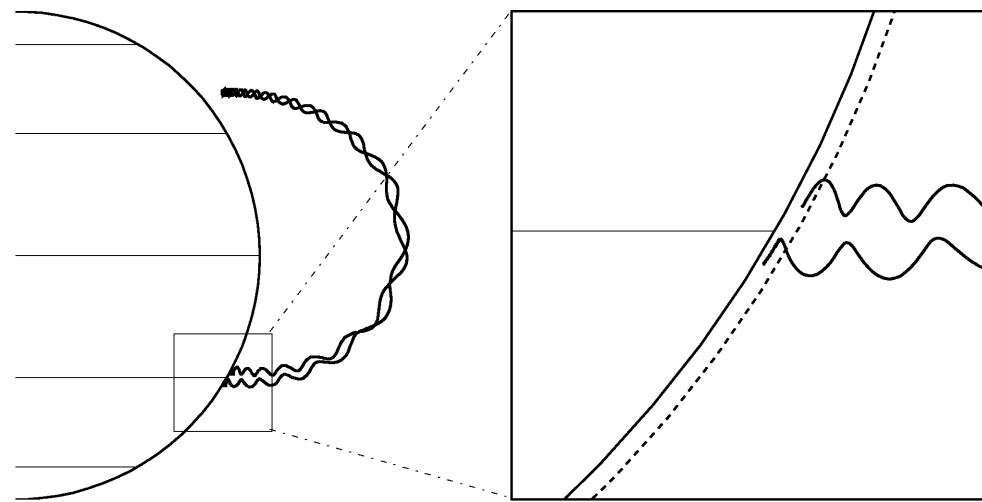
Simulation - Exemples

Exemple 1 : particule s'échappant



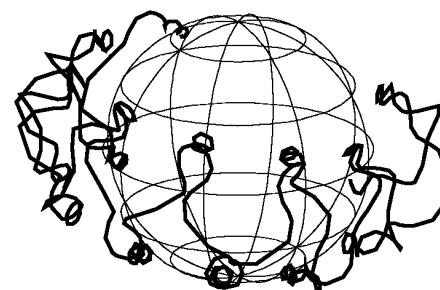
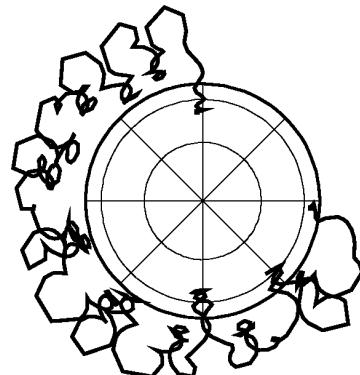
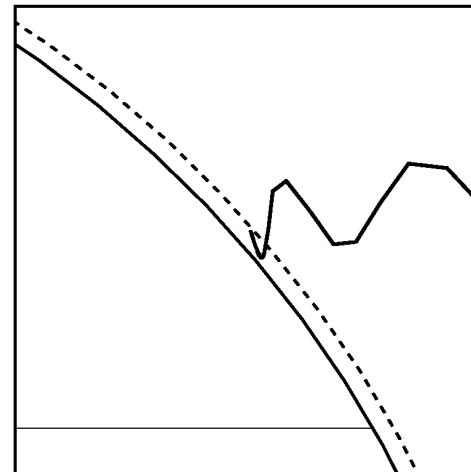
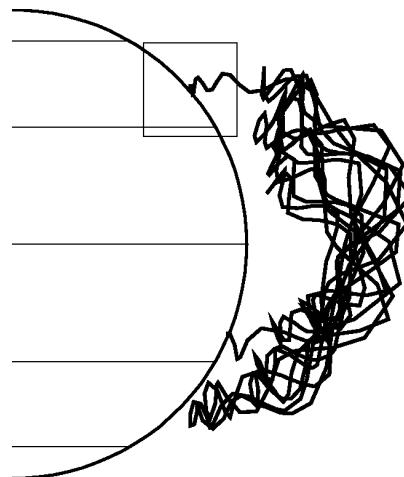
Simulation - Exemples

Exemple 2 : particule piégée



Simulation - Exemples

Exemple 3 : particule piégée

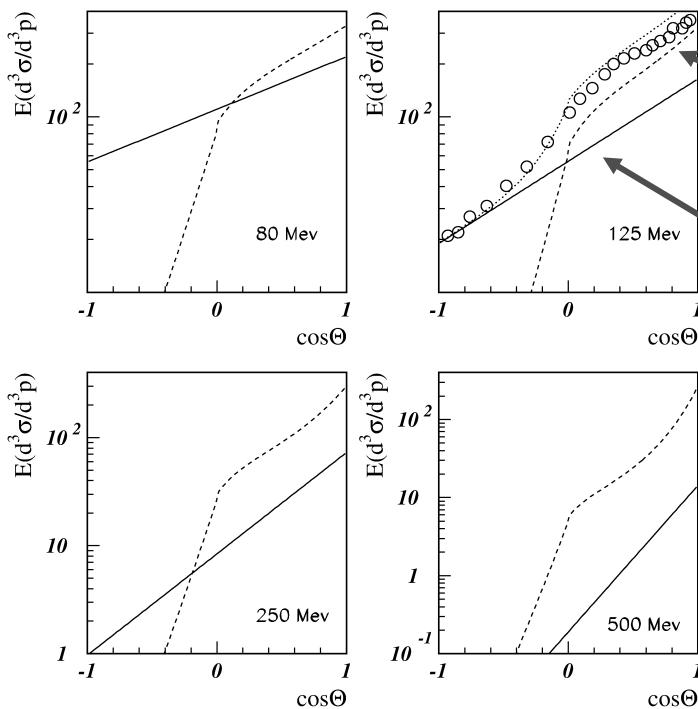


AMS01 - Proton

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

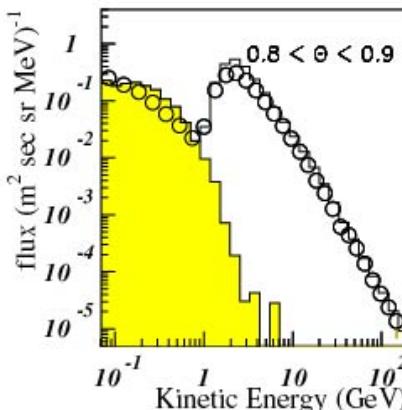
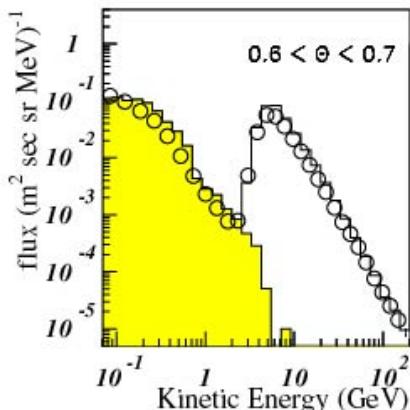
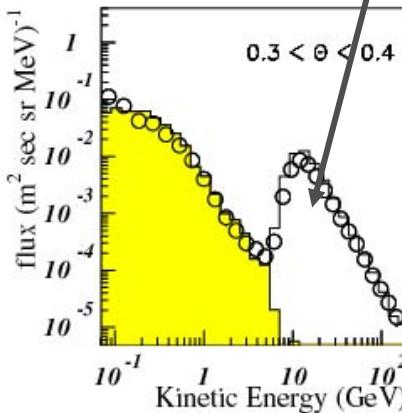
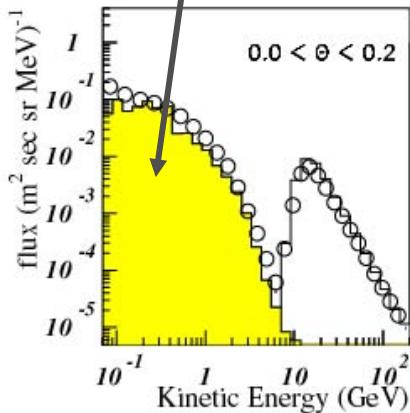
* A.M.Kalinovskii, V.Mokhov, and Yu.P. Nikitin, *Passage of particles through matter*, AIP, NY, 1989

AMS01 – Flux de Proton

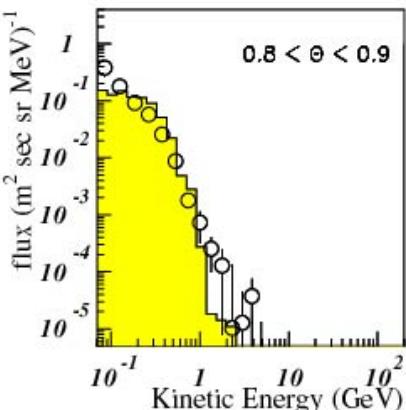
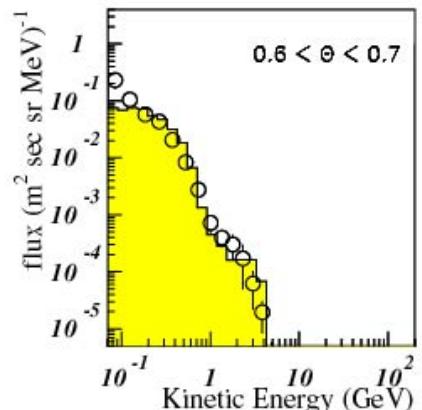
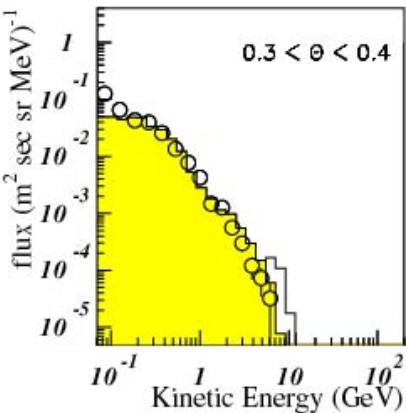
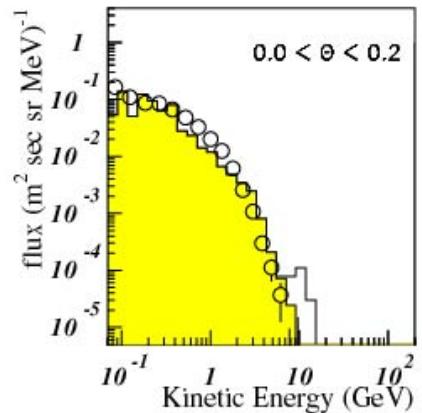
Protons Atmosphériques

Protons CR

Downgoing



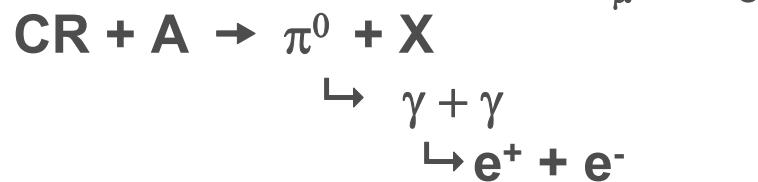
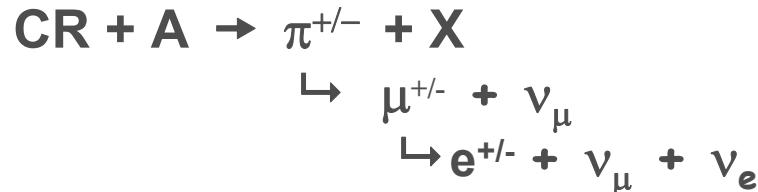
Upgoing



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

Électrons et positrons dans AMS01

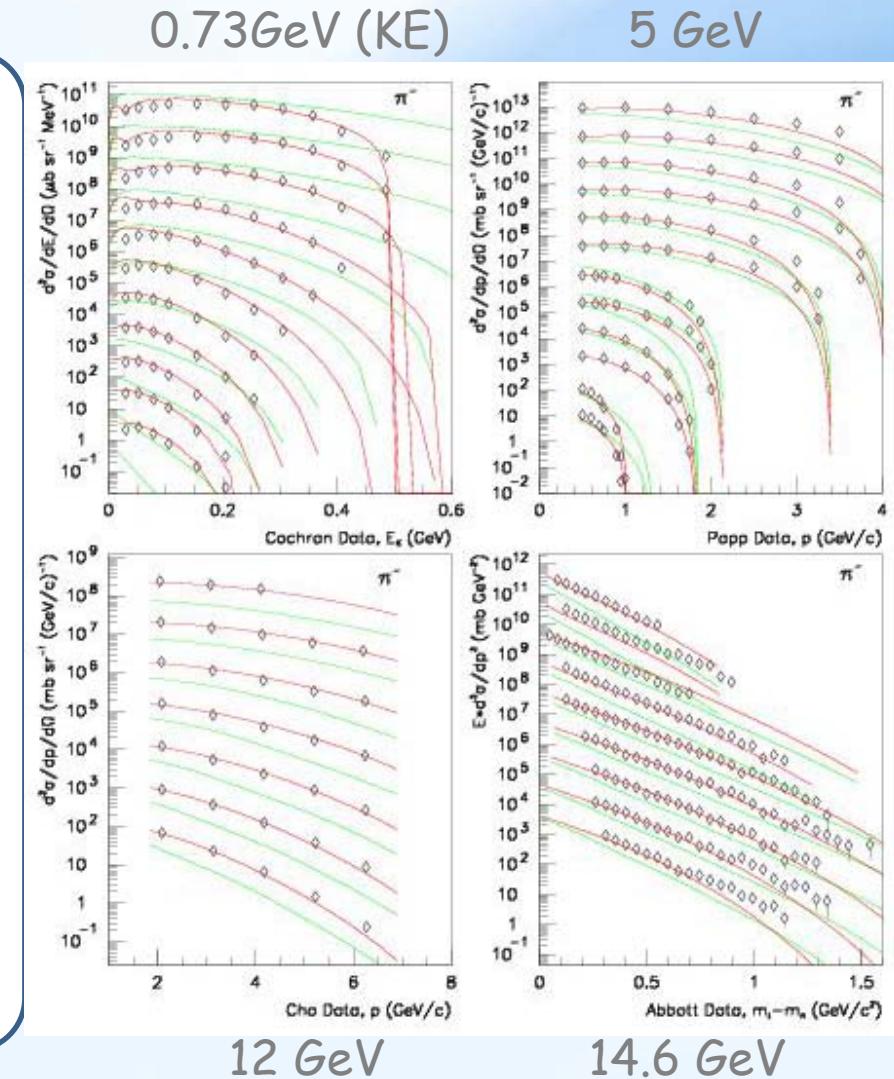
La population leptonique va être produite via la production et la désintégration de pion



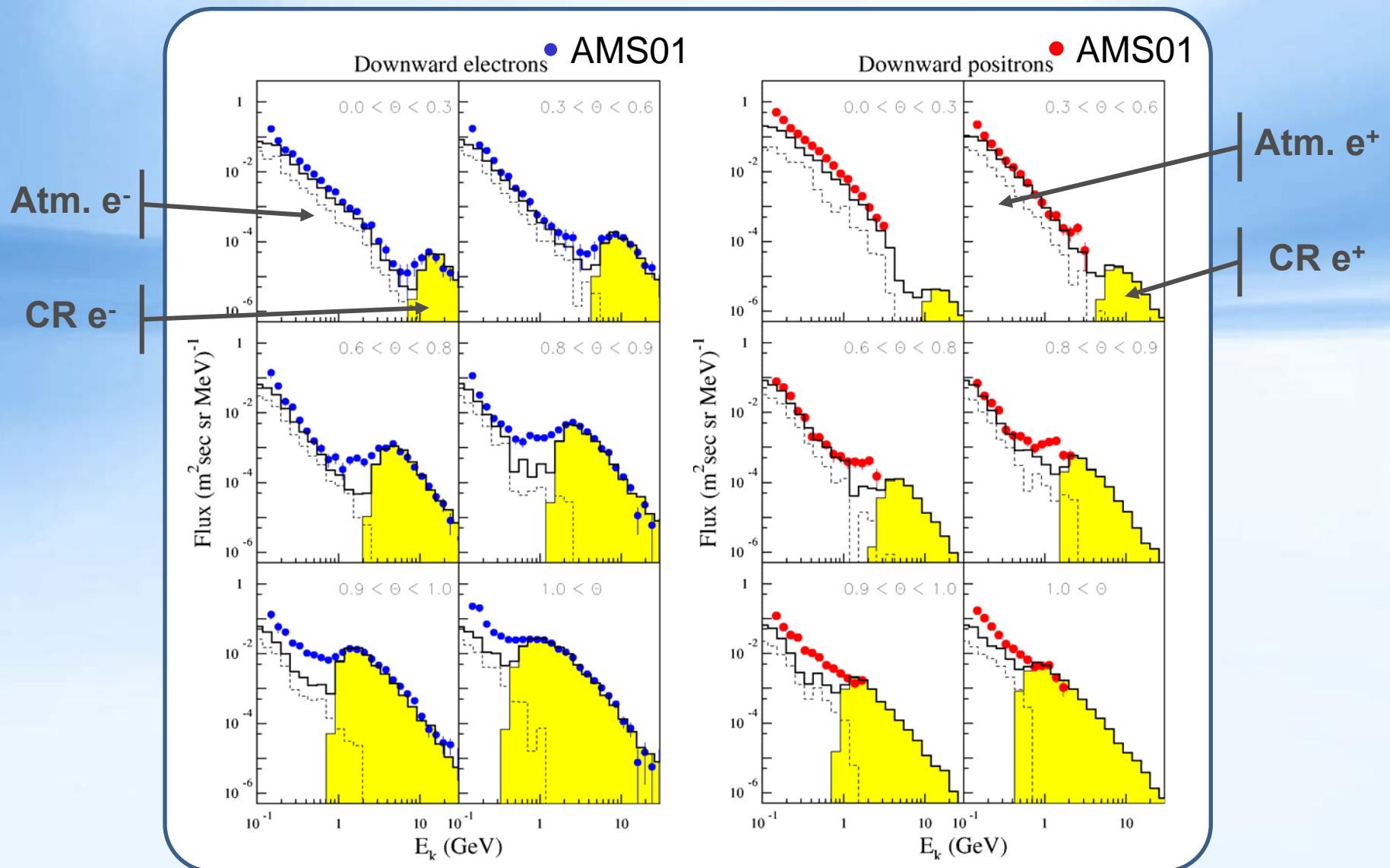
Implémentation de :

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

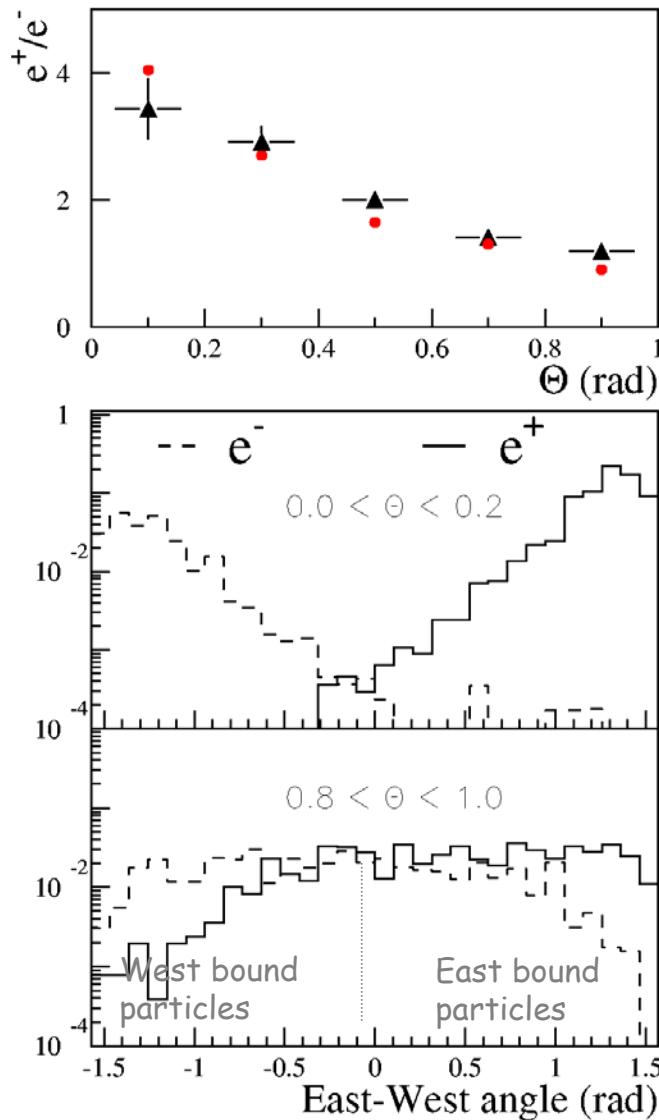
et des désintégrations des π et μ



AMS01 – Flux électrons et positrons



AMS01 asymétrie e^+/e^-



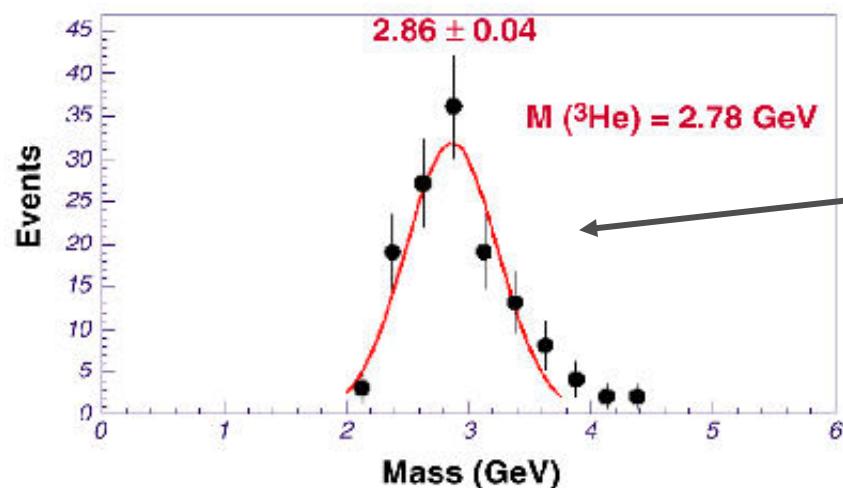
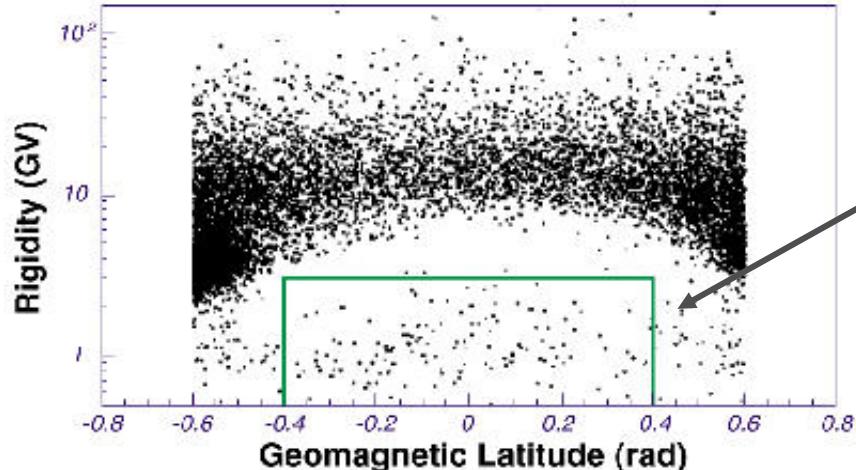
- AMS01 data
- ▲ Simulation

⇒ 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 ($\theta_M < 0.6$)



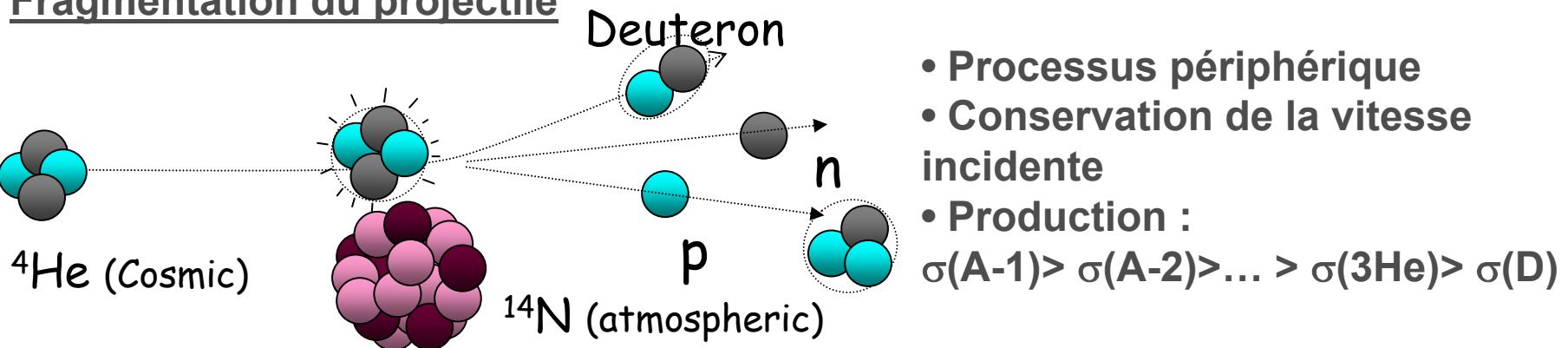
Mise en évidence d'une population Particule Z=2 par AMS01

- Particules ^3He majoritaires
- < 10% ^4He

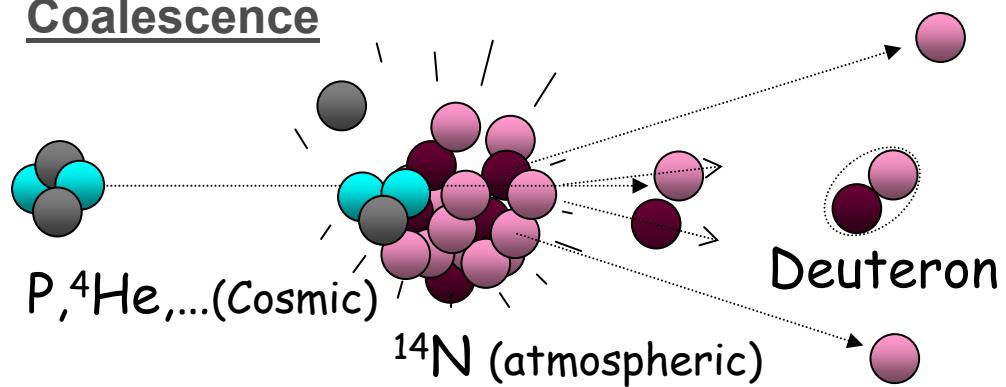
AMS collaboration,
Phys. Lett. B 494(2000)193

Fragmentation nucléaire vs Coalescence

Fragmentation du projectile



Coalescence



- Processus central
- Faible énergie de production
- Production :

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

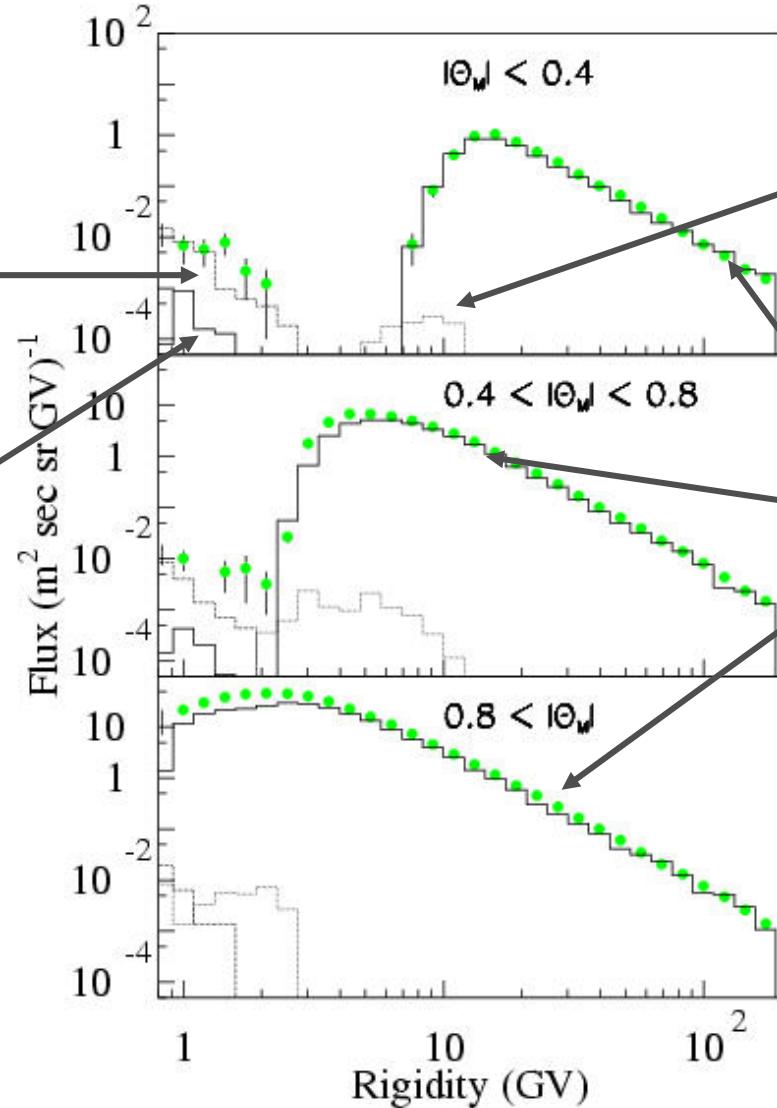
$$\sigma(\text{D}) > \sigma(3\text{He}) > \dots > \sigma(\text{A}) > \sigma(\text{A}+1)$$

Flux d'hélium sous la coupure

^3He produit par coalescence

^4He produit par coalescence

AMS01



^3He produit par fragmentation

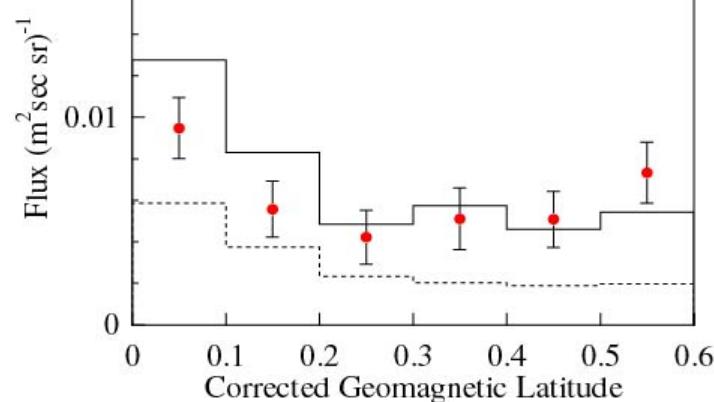
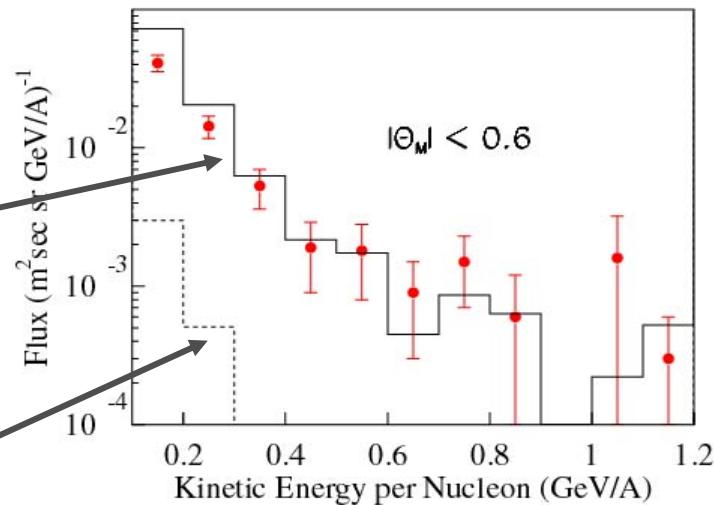
Rayon cosmique
 ^4He

Flux d'hélium sous la coupure

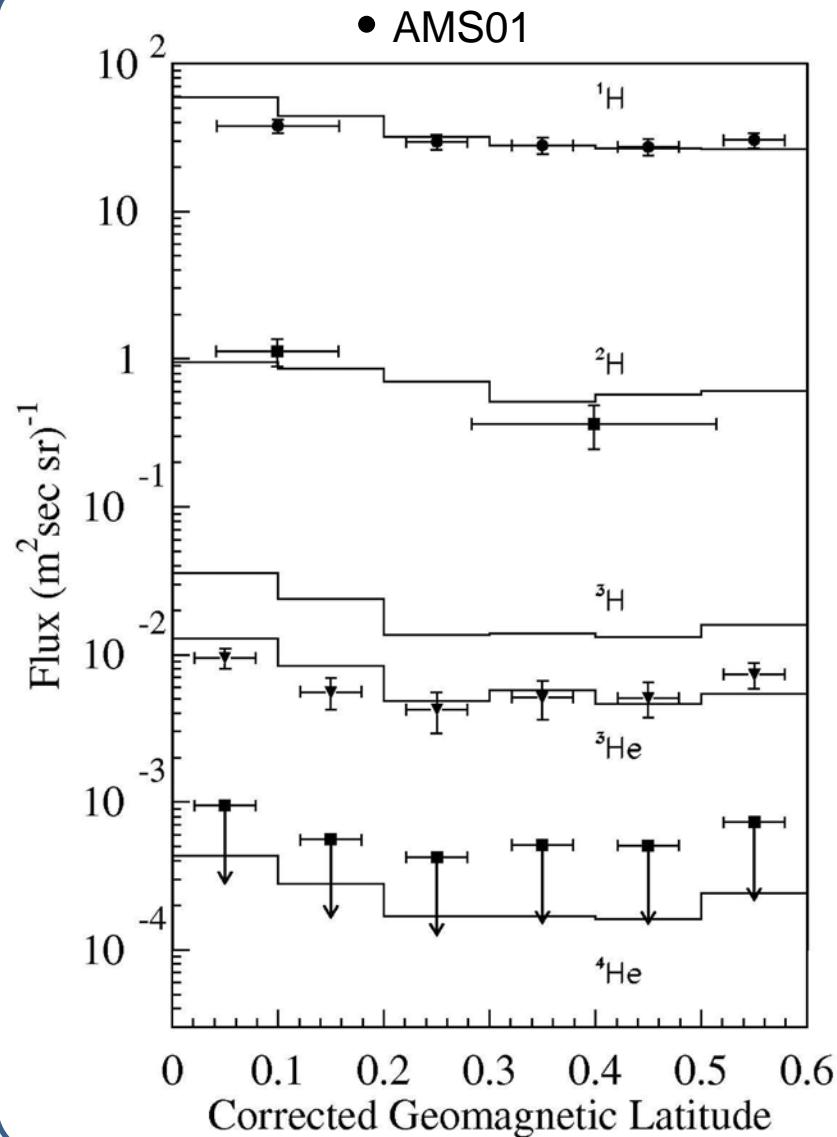
${}^3\text{He}$ produit par coalescence

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

● AMS01



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

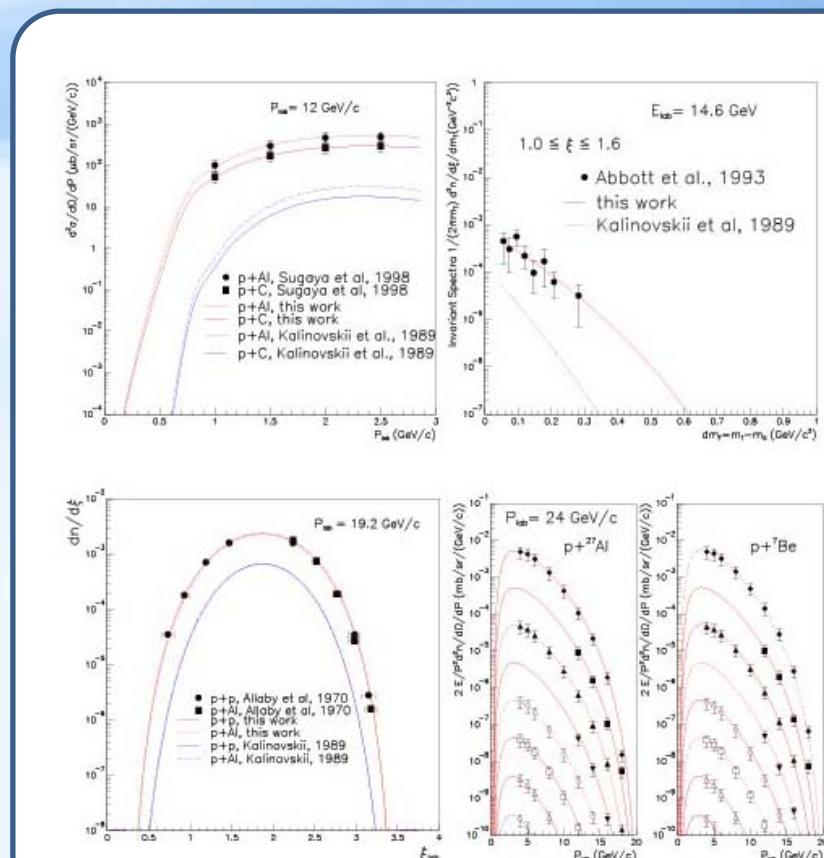
$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} (p + A \rightarrow \bar{p} + X)$$

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)



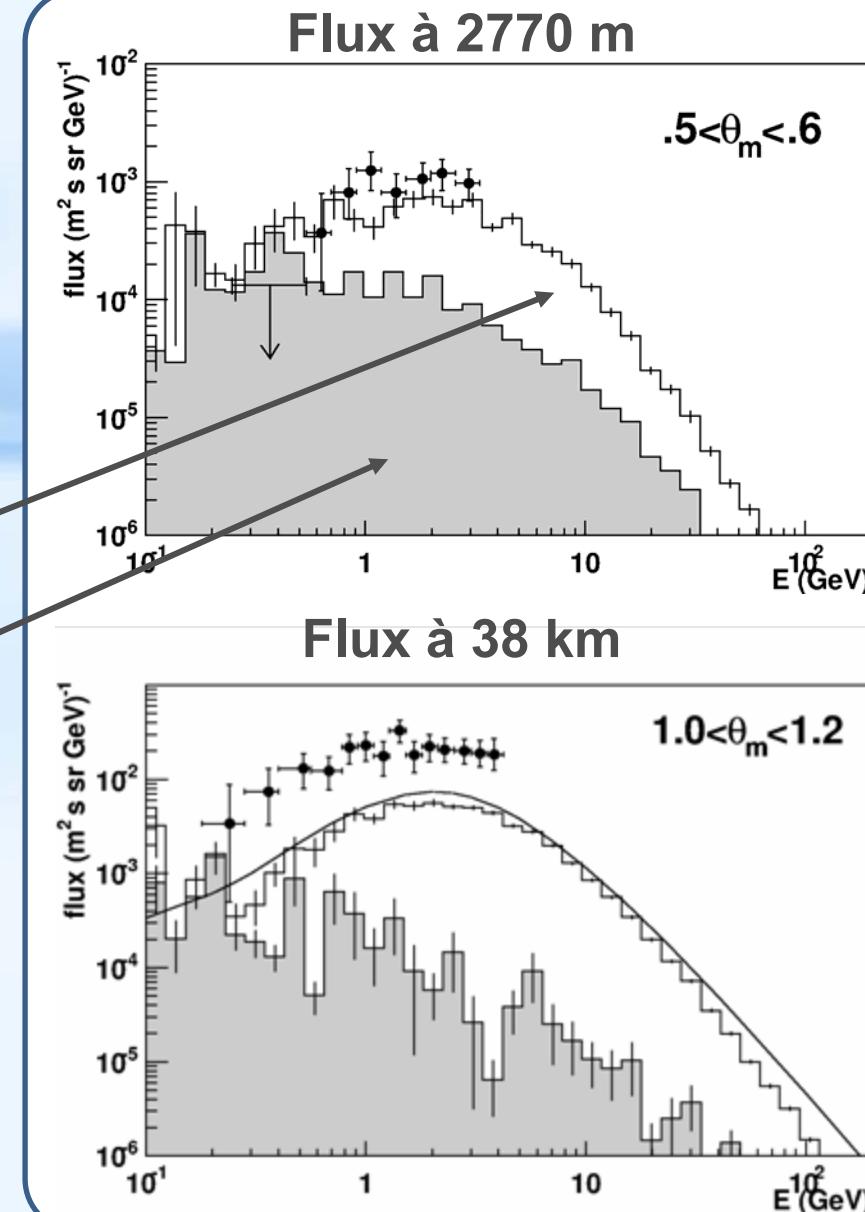
Antiproton atmosphérique (BESS)

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



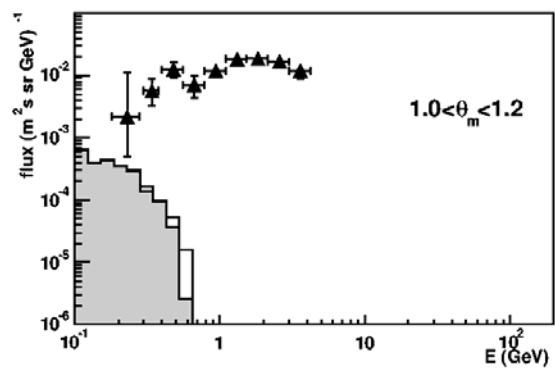
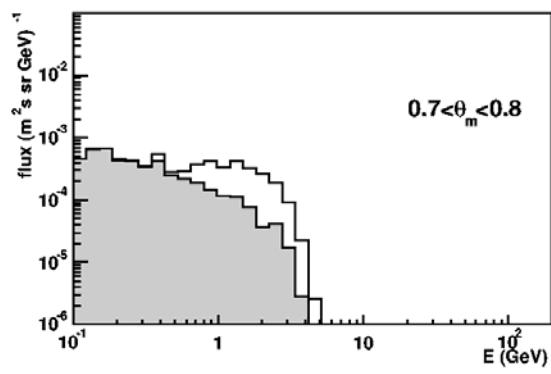
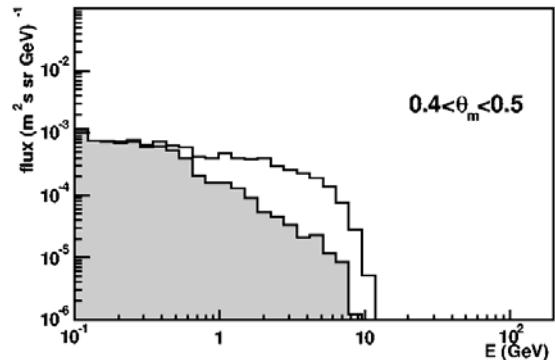
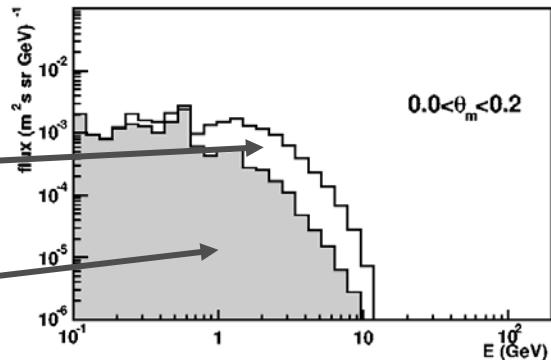
Antiprotons semi-piégés

Thèse Bruny Baret (2004)

Flux total

Cont. « tertiaire »

Composante piégées à 400 km d'altitude



+ Etude des populations \bar{D} , ${}^3\bar{H}$, ${}^3\bar{\text{He}}$, ${}^4\bar{\text{He}}$

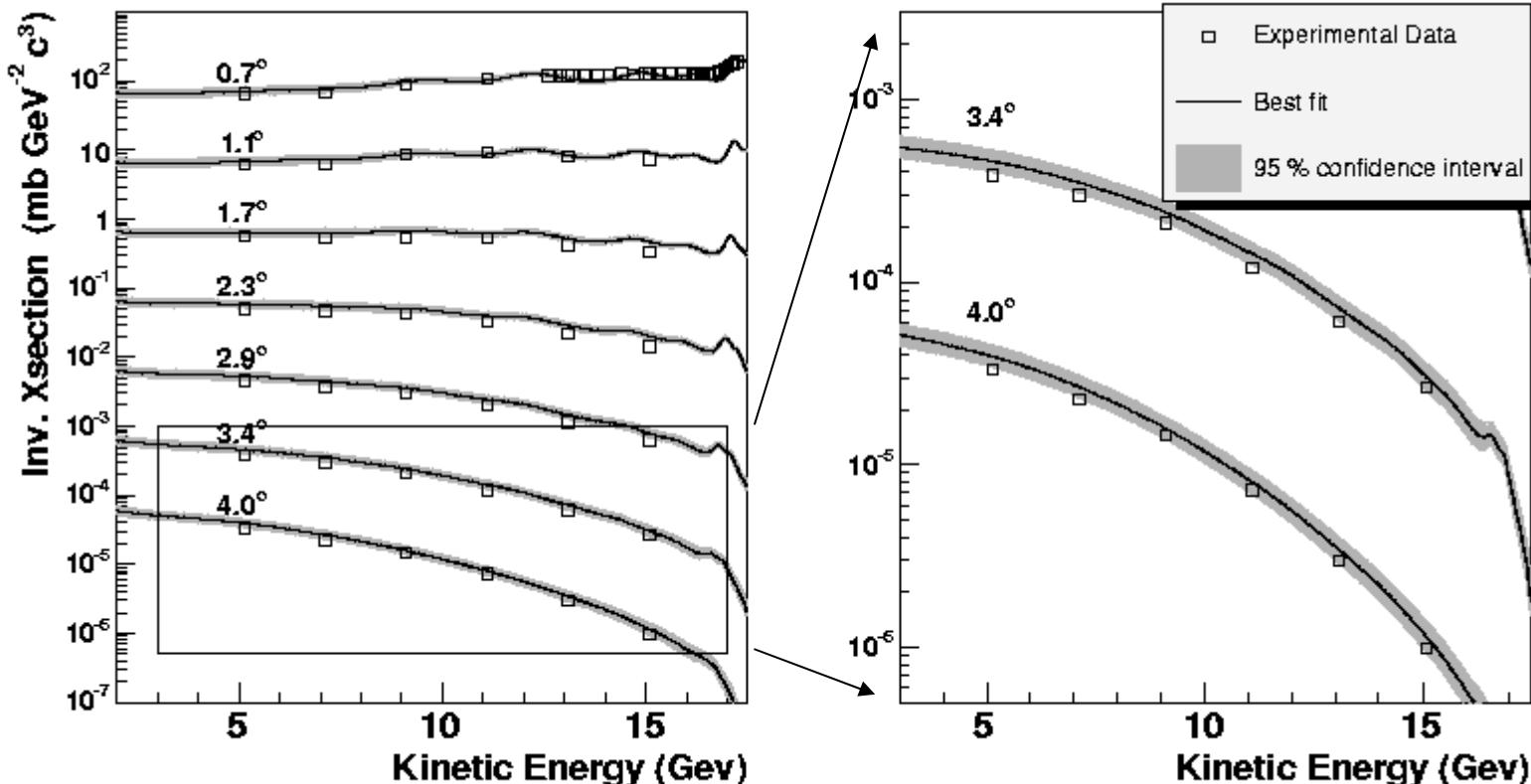
Production dans Atmosphère

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**

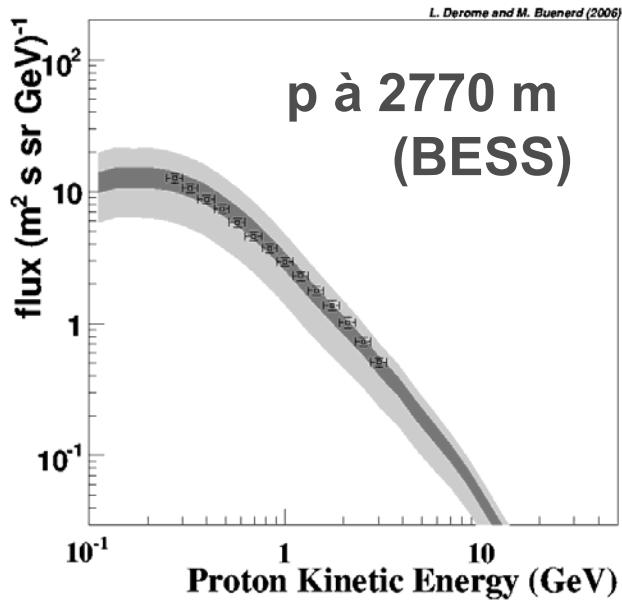
Production dans Atmosphère

Ajustement d'une forme fonctionnelle (KMN)
Exemple : $p(19.5 \text{ GeV}/c) + \text{Be} \rightarrow p + X$

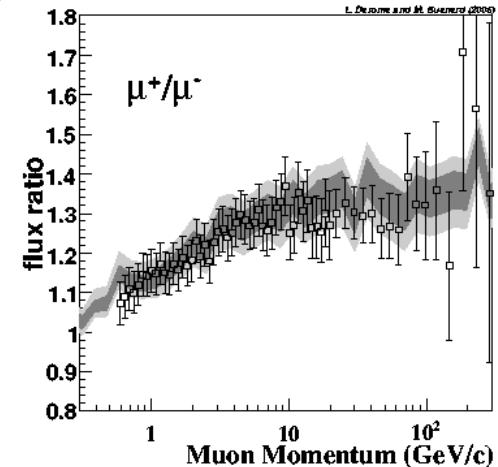
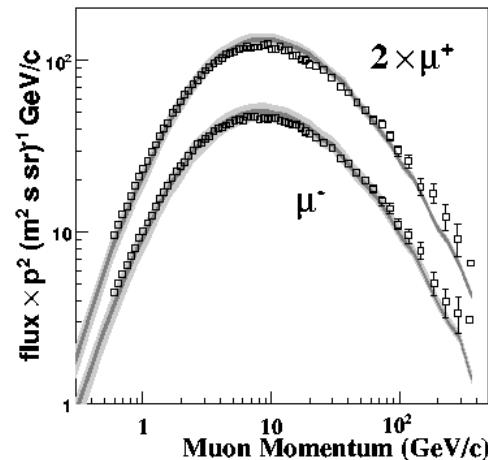


→ Meilleur ajustement et intervalle de confiance

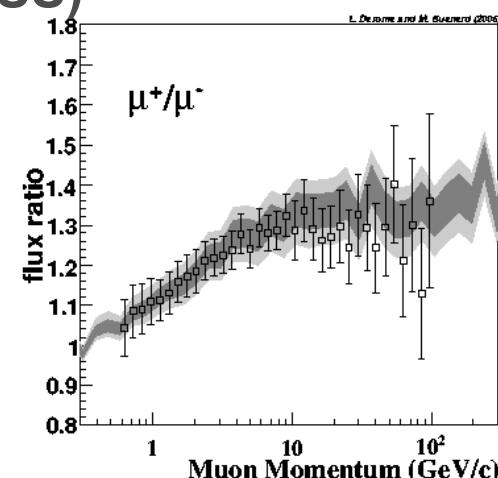
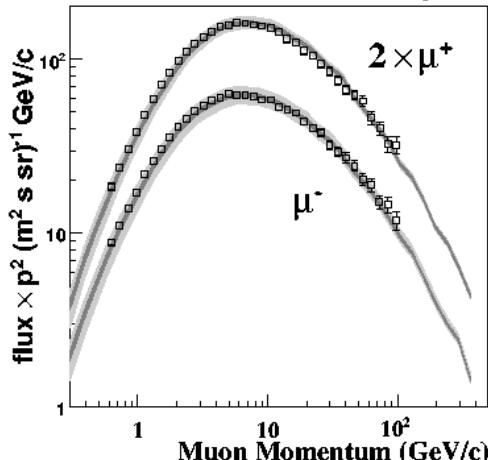
Production dans Atmosphère



muon à 0 m (BESS)



muon à 2770 m (BESS)

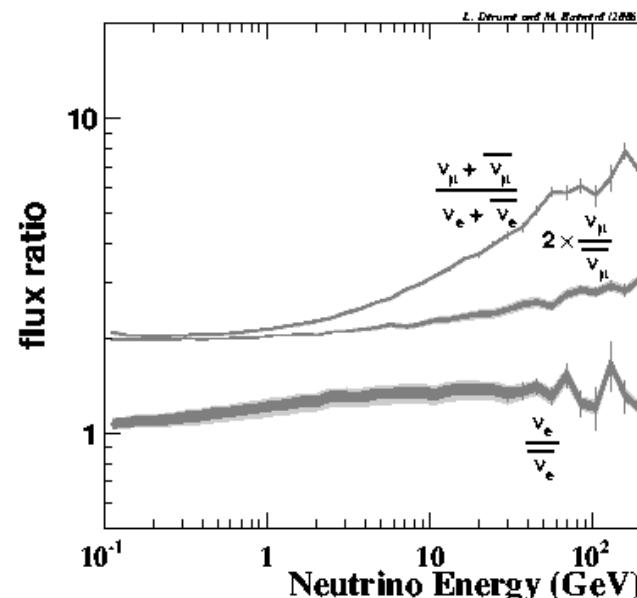
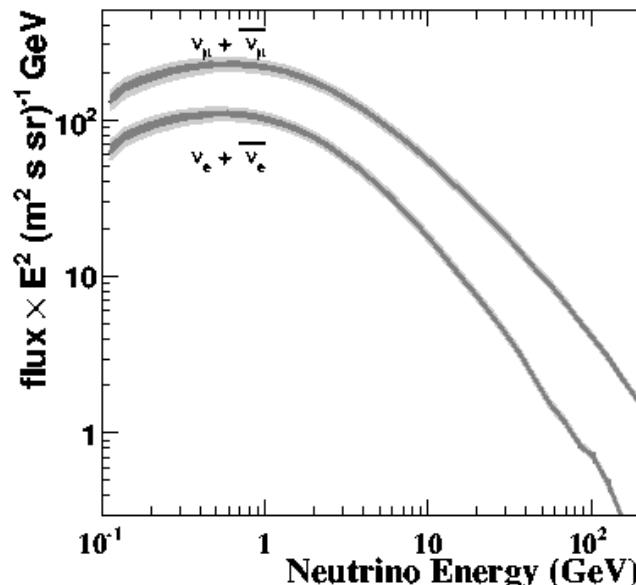
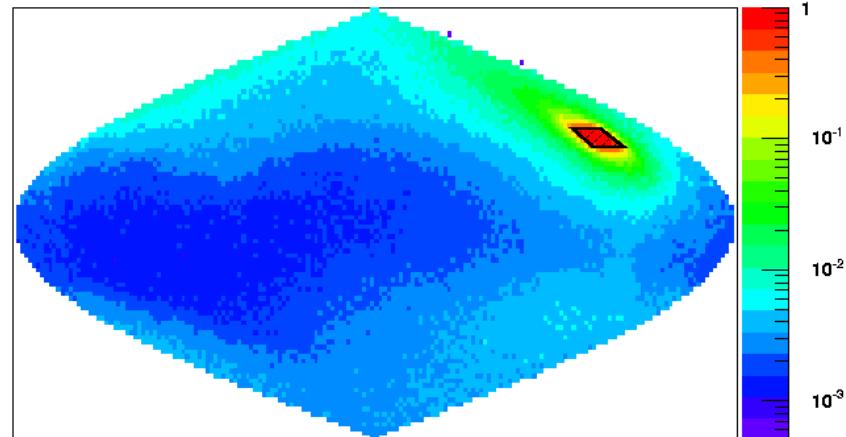


Fit des sections efficaces sur les données atmosphériques

Neutrinos Atmosphériques

Calcul des flux au niveau de SuperKamiokande

Taille du détecteur virtuel :
900x1600 km²
(Erreur systématique < 1%)



ν_{atm} : distribution zénithale

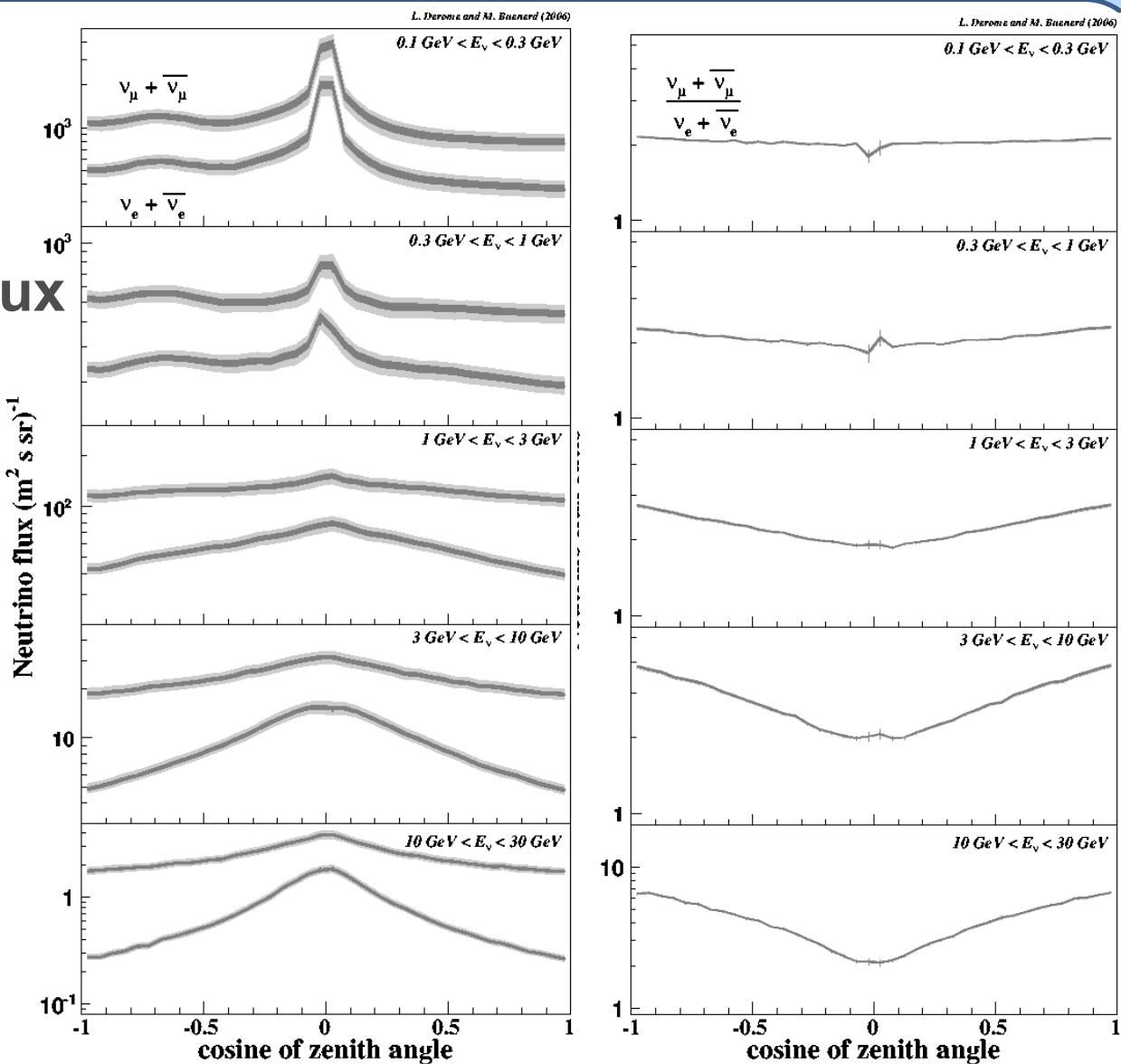
- Amplification du flux horizontal

- Dépendance en

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

des flux et du ratio

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



v_{atm} : distribution azimuthale

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

→ Asymétrie sur v_{atm}

Amplification de l'asymétrie pour :

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

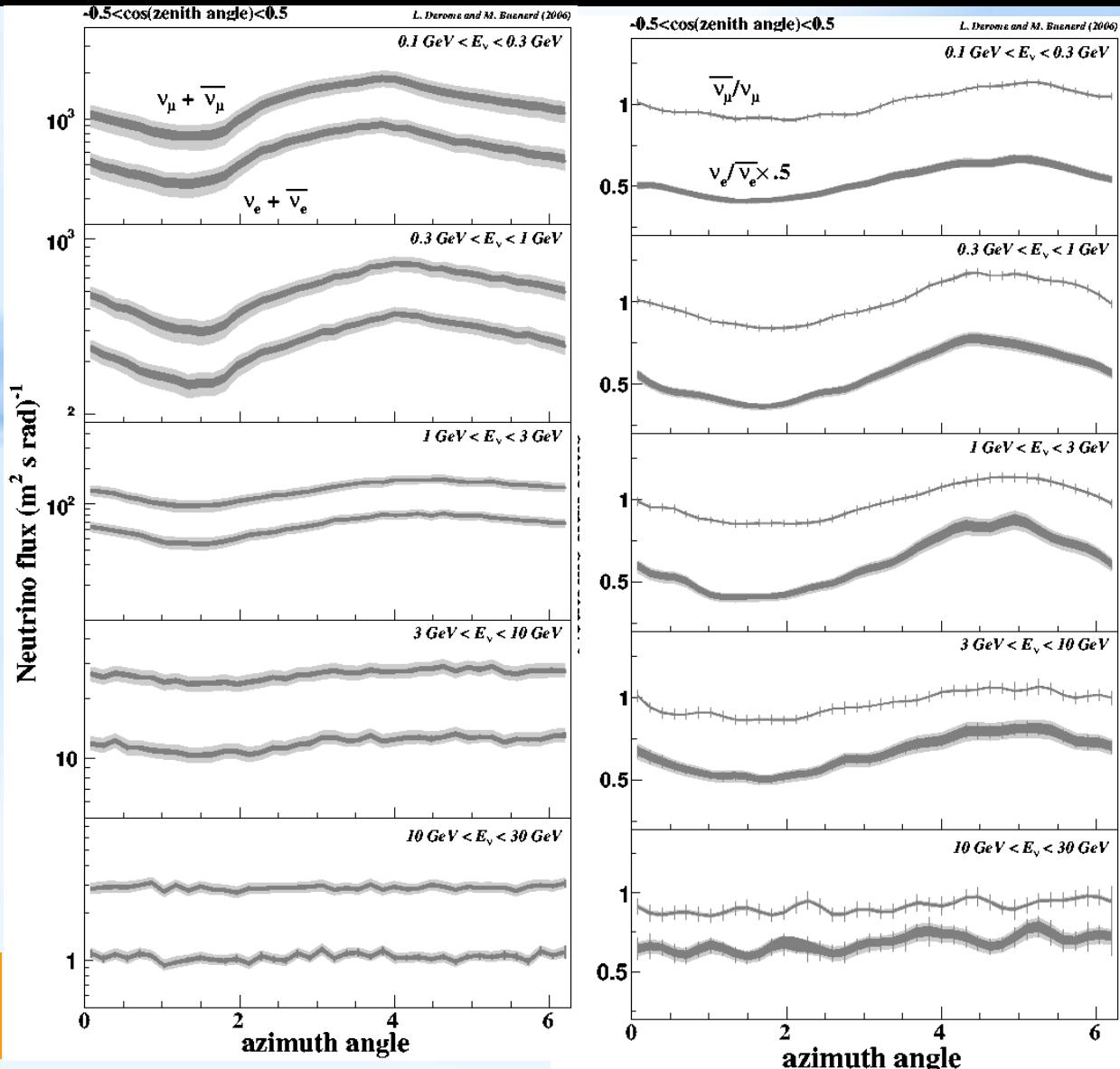
$$\mu^+ \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

versus :

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

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

$$A_{\bar{\nu}_e} < A_{\bar{\nu}_\mu} < A_{\bar{\nu}_\mu} < A_{\bar{\nu}_e}$$



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,**
 - ...

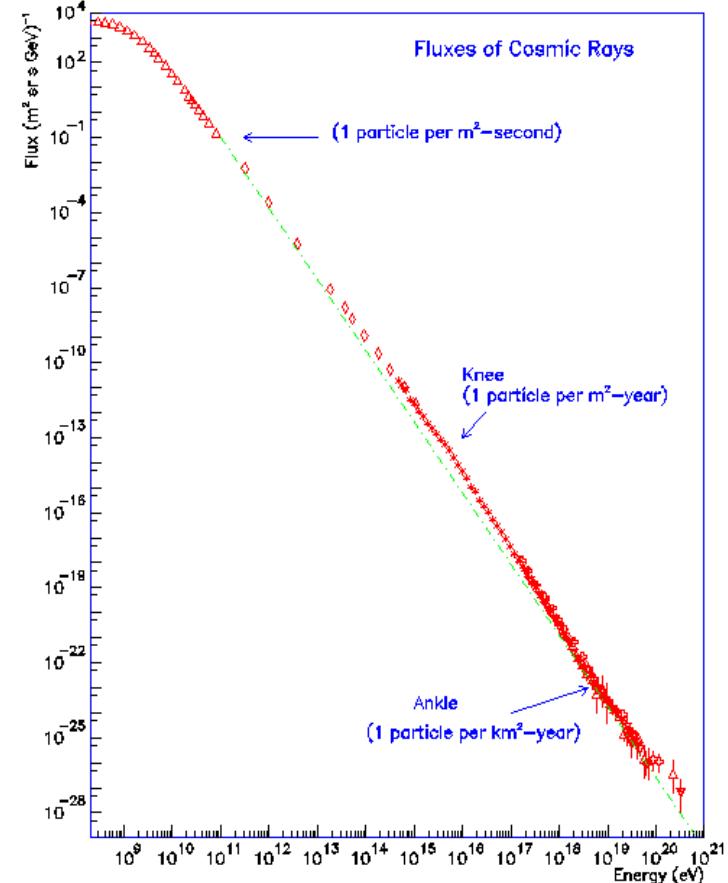
Rayonnement Cosmique

→ AstroParticules :

« Etude des ~~anisotropies~~ à haute énergie
des ~~constitutuants~~ et ~~l'origine~~ 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



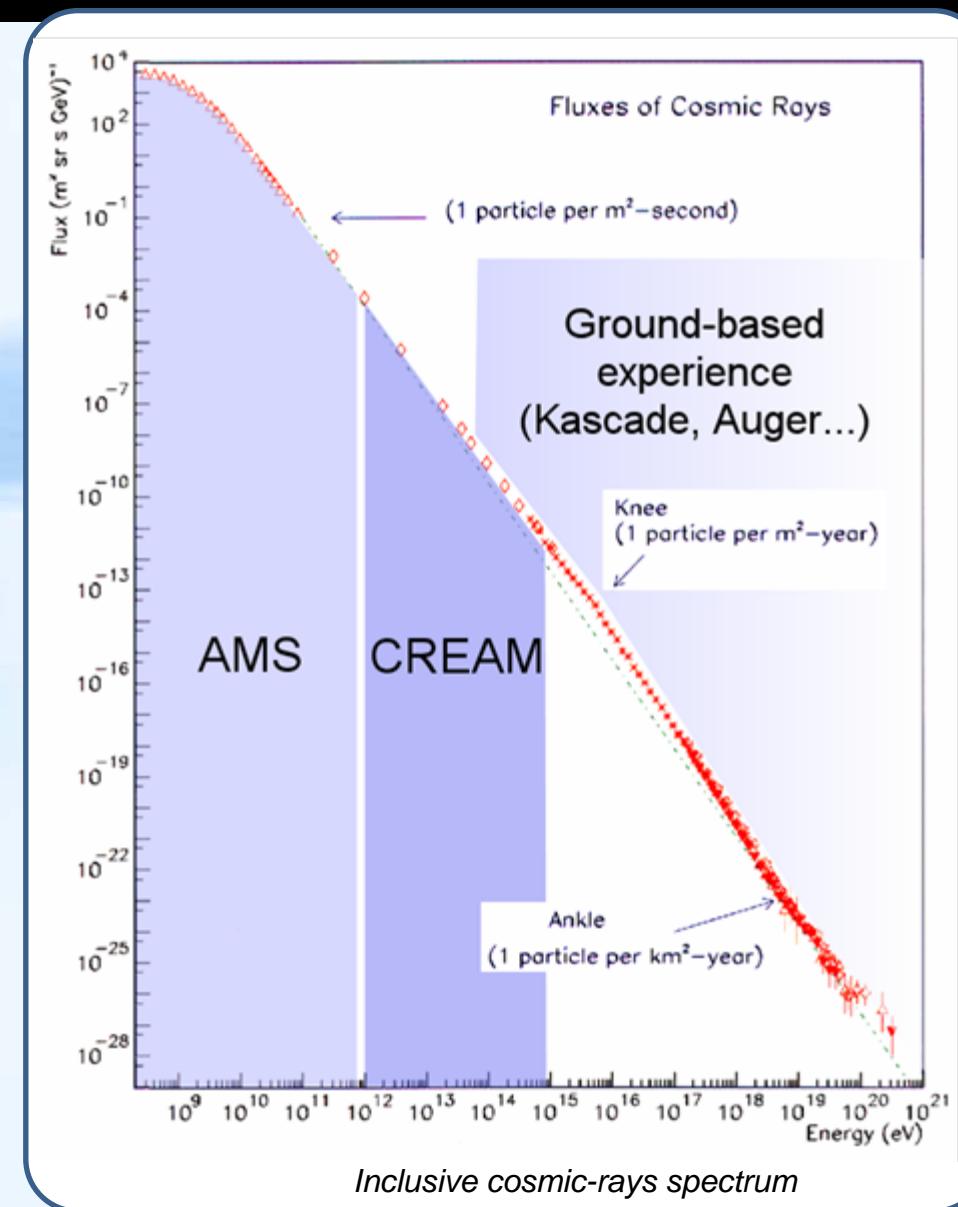
AMS :

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

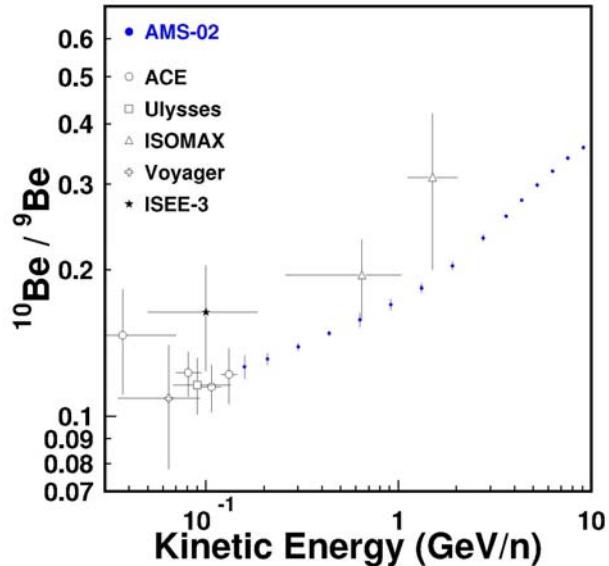


CREAM :

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



Propagation du RC



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

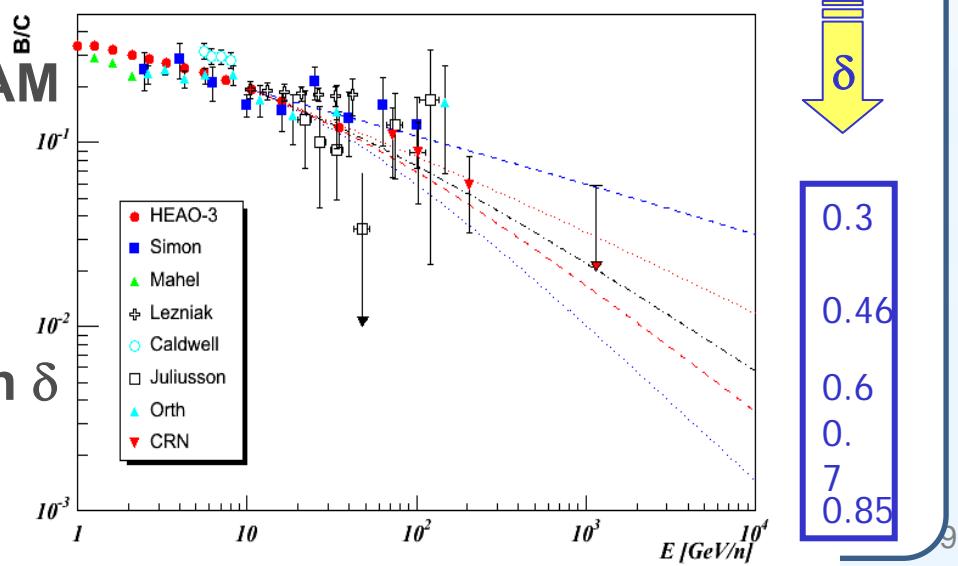
Mesure du temps de confinement du RC

→ Taille du halo de diffusion

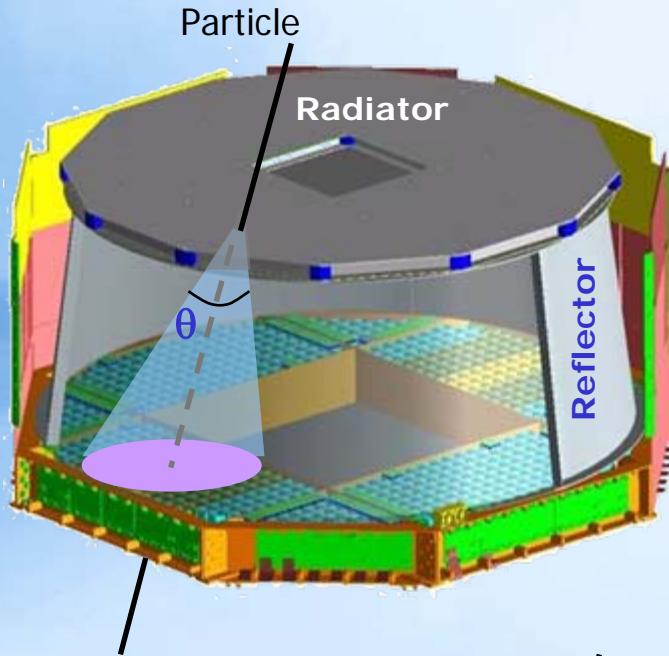
Mesure du rapport B/C dans CREAM

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

→ Amplitude de diffusion λ_0
indice spectral de diffusion δ

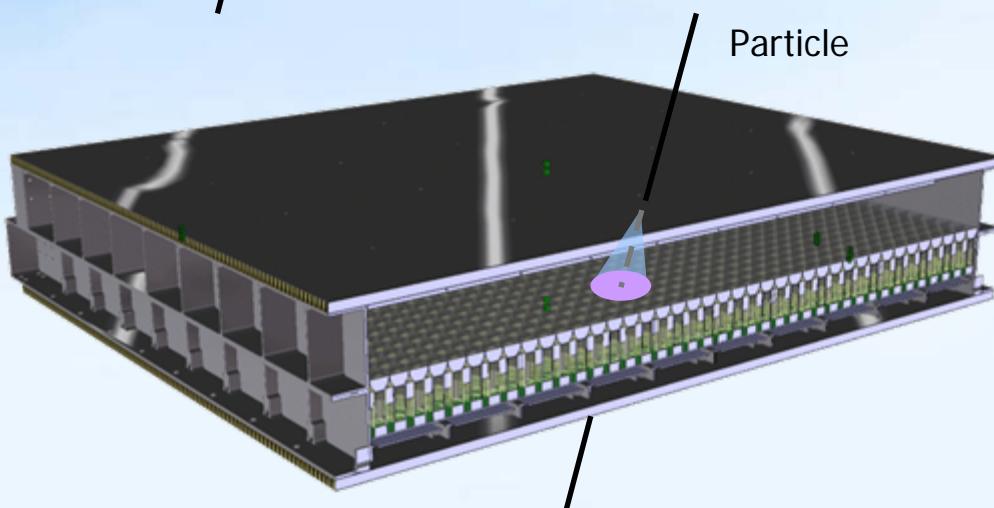


AMS02 et CREAM : détecteur Cerenkov



Imageur RICH d'AMS02 :

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

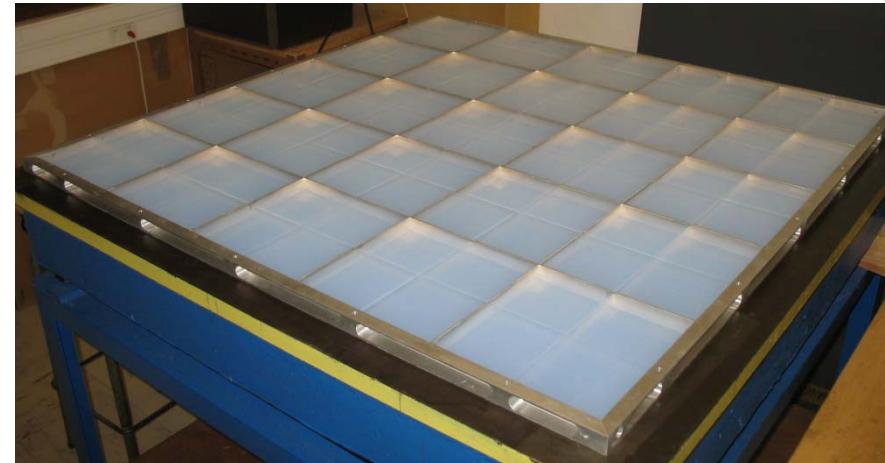
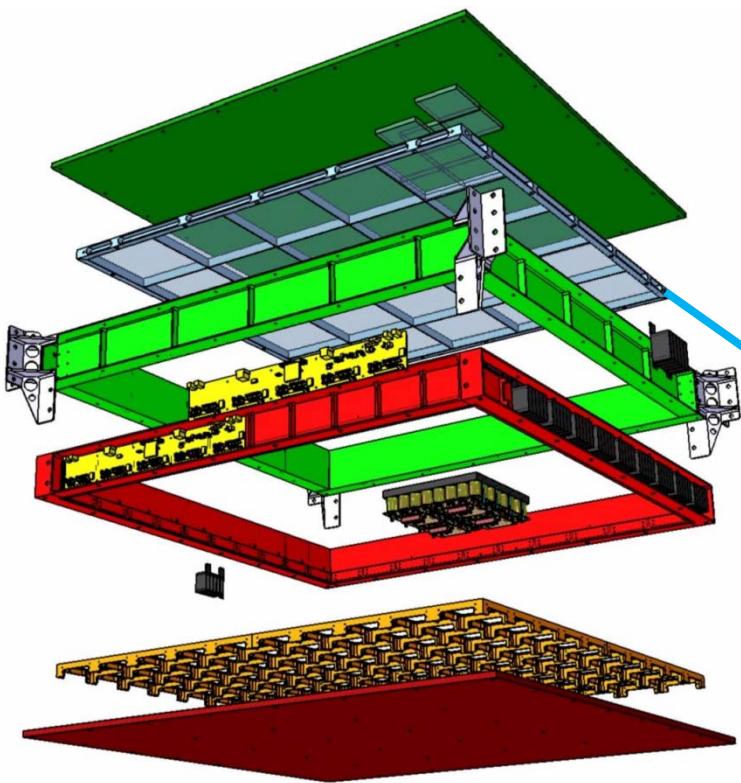


Imageur CherCam de CREAM :

- Mesure de charge (identification des éléments)

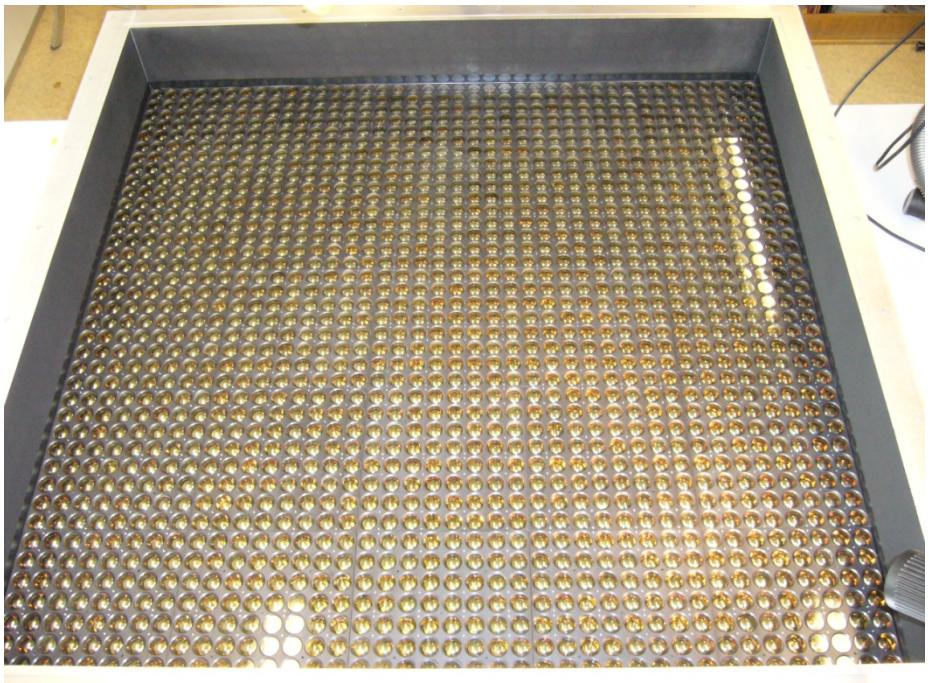
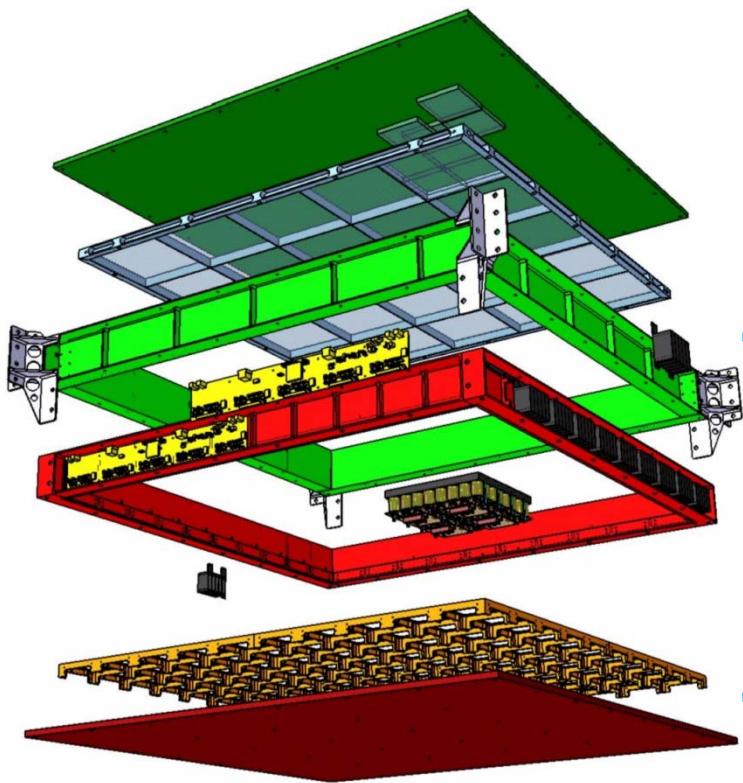
- Construit en 2006
- Vient d'effectuer son premier vol !

CherCam : Architecture et Construction



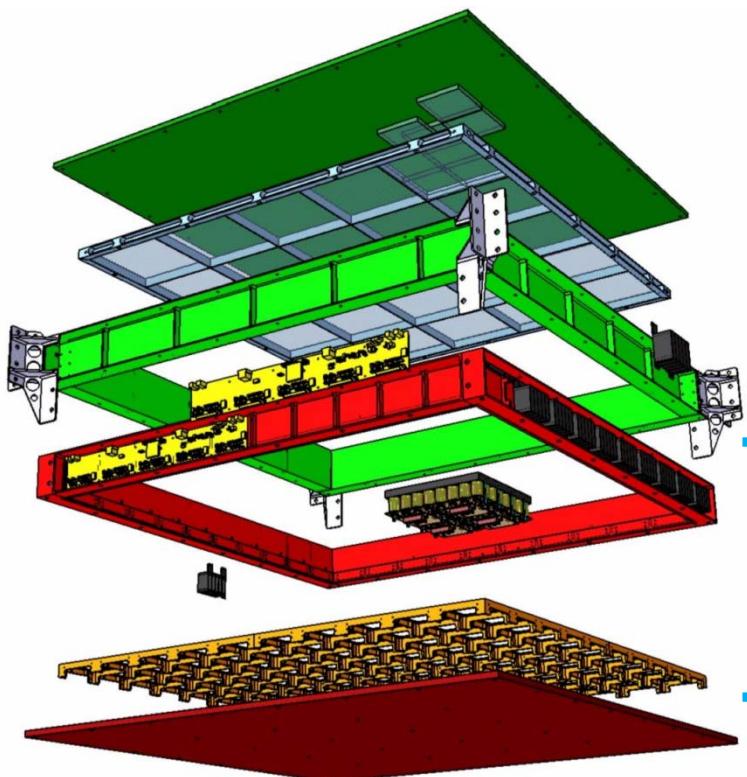
*Aerogel aluminum frame with
200 Mastushita SP50 tiles*

CherCam : Architecture et Construction

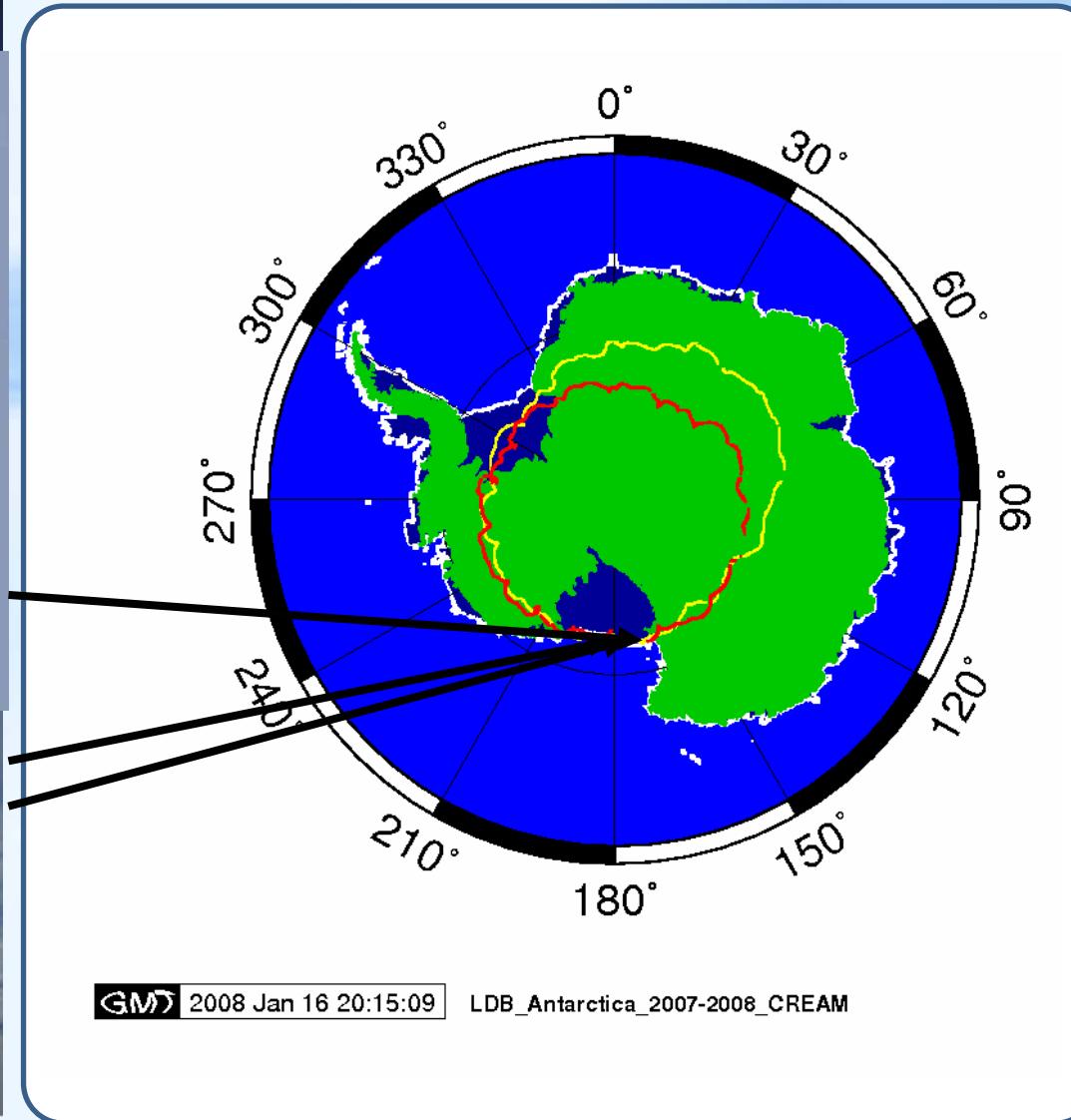


Complete PMTs frame

CherCam : Architecture et Construction



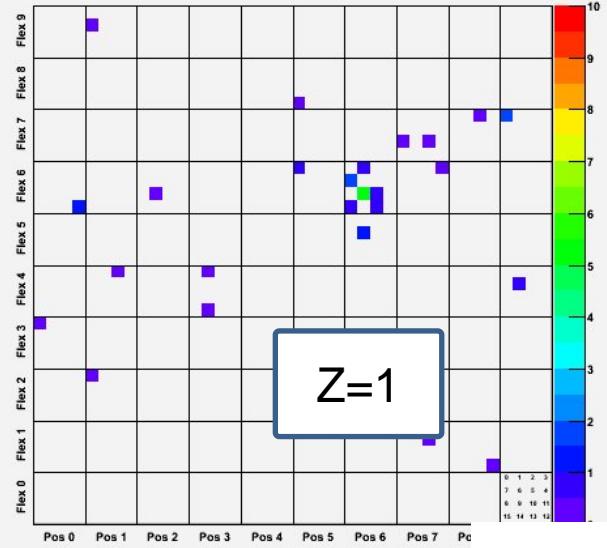
Vol 2007-2008



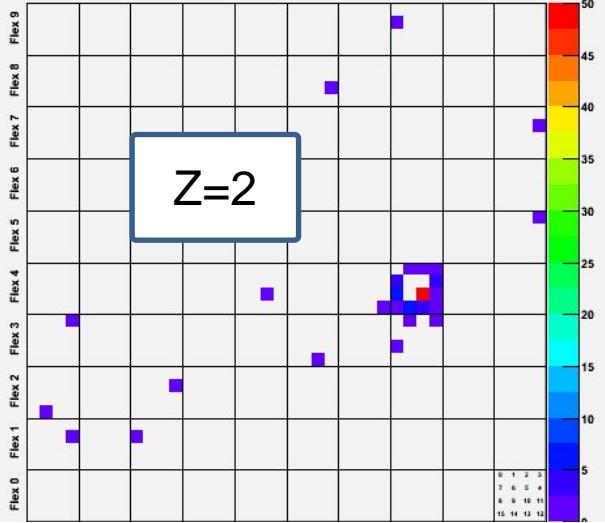
Vol 2007-2008

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

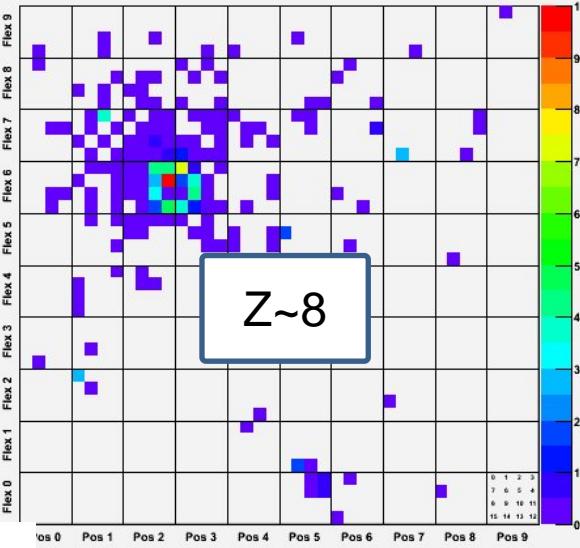
Event nb 40690/47992 of run 0 (mode 0)



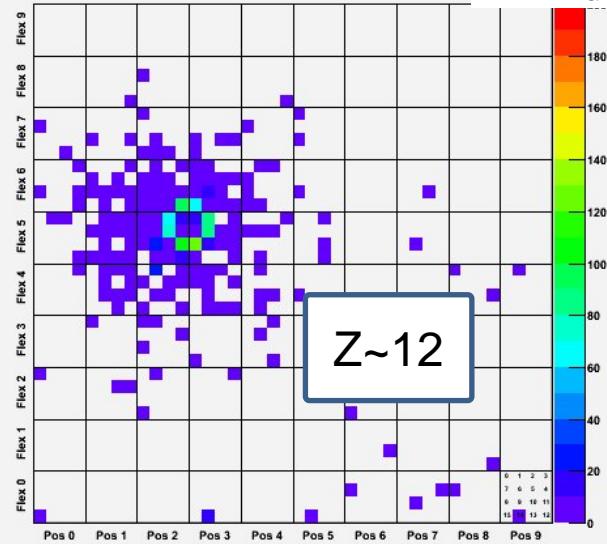
Event nb 40685/47992 of run 0 (mode 0)



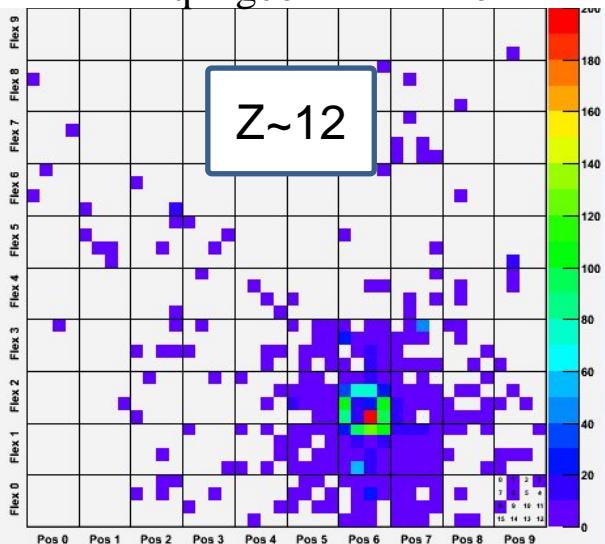
Event nb 40324/47992 of run 0 (mode 0)



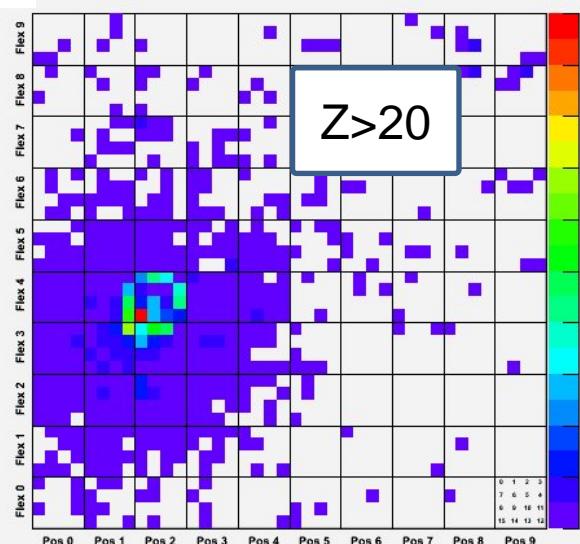
Event nb 40484/47992 of run 0 (mode 0)



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



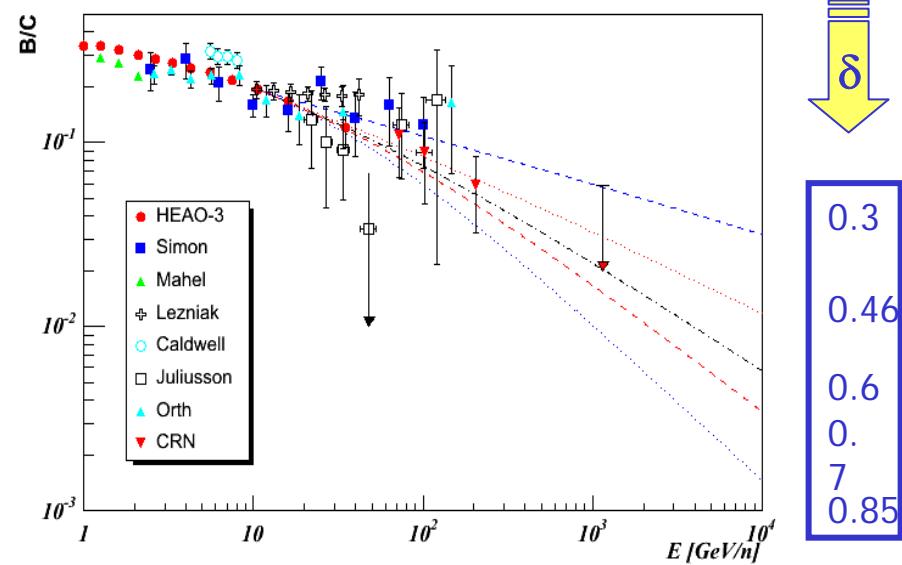
Event nb 40949/47992 of run 0 (mode 0)



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)

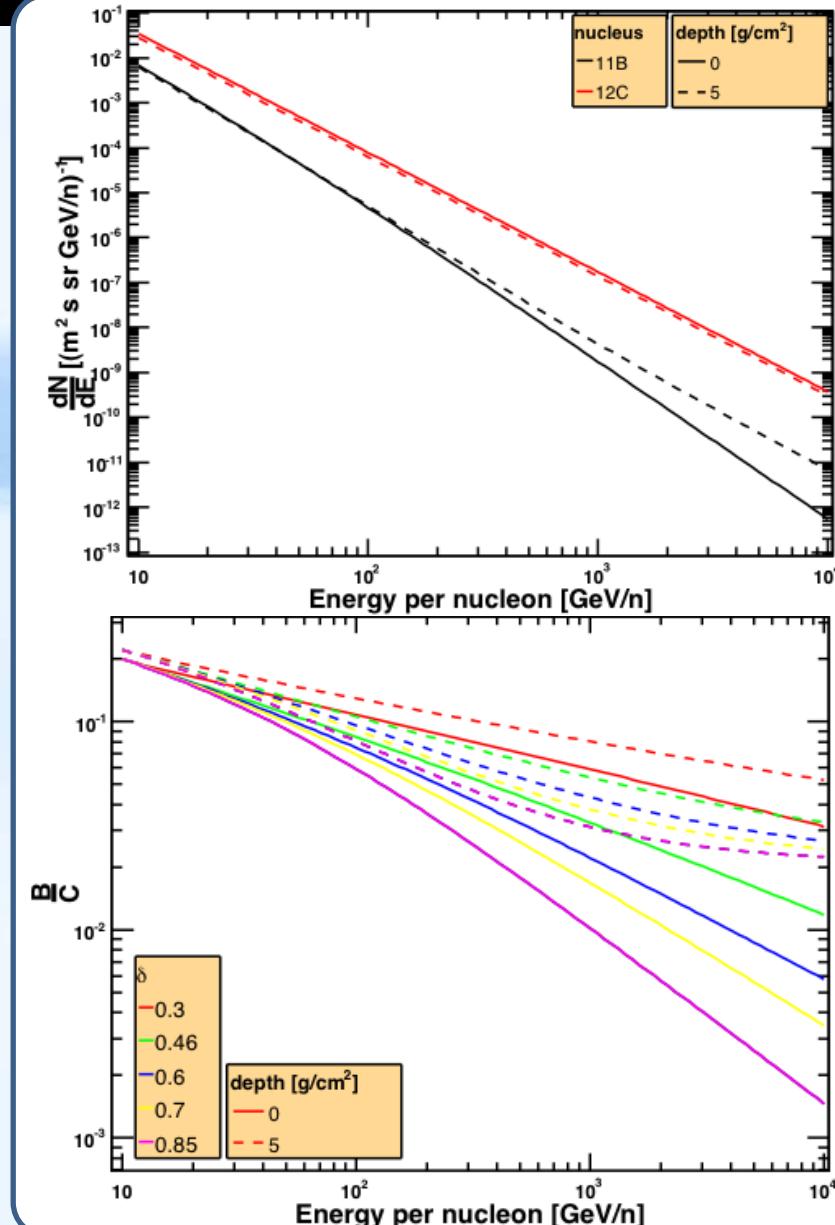
Propagation des ions dans l'atmosphère : Équation de transport

- perte d'énergie
- absorption
- fragmentation

Reconstruction des flux TOA :

- Inversion de l'équation de transport

- Etude des systématiques liés aux sections efficaces de fragmentation



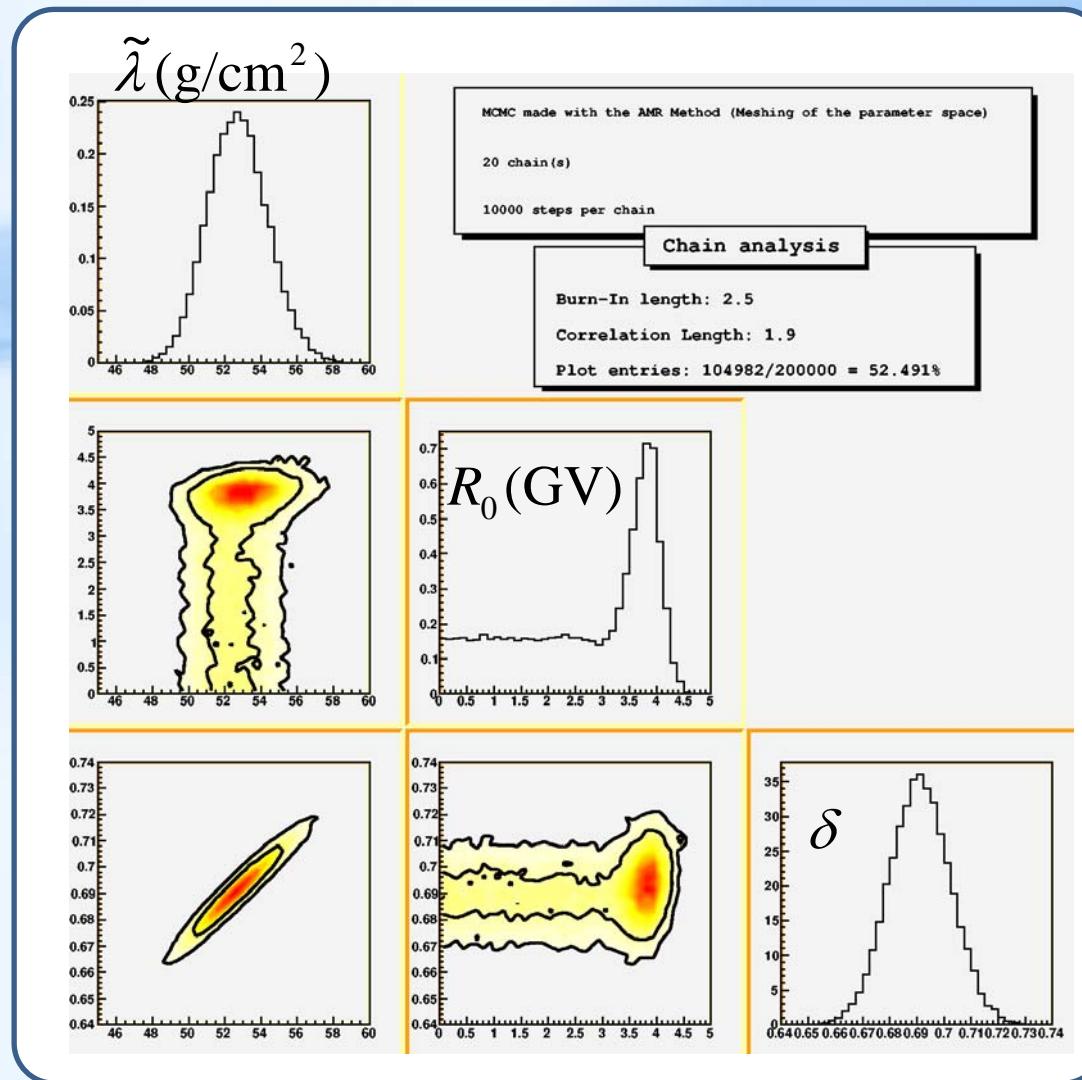
Contraintes sur les paramètres de propagation

Thèse Antje Putze (2009)

Activité en collaboration avec le LAPTH et LPNHE

- Nouvelles données permettent de mieux contraindre les paramètres
- Nécessité d'un outil bayesien : 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**

Conclusions et perspectives

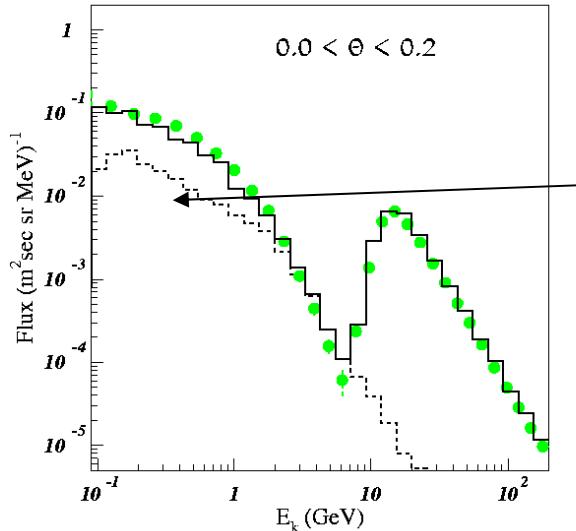
➤ Mesure du rayonnement cosmique

- Malgré plusieurs décennies d'observations, l'origine, les processus d'accélérations 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

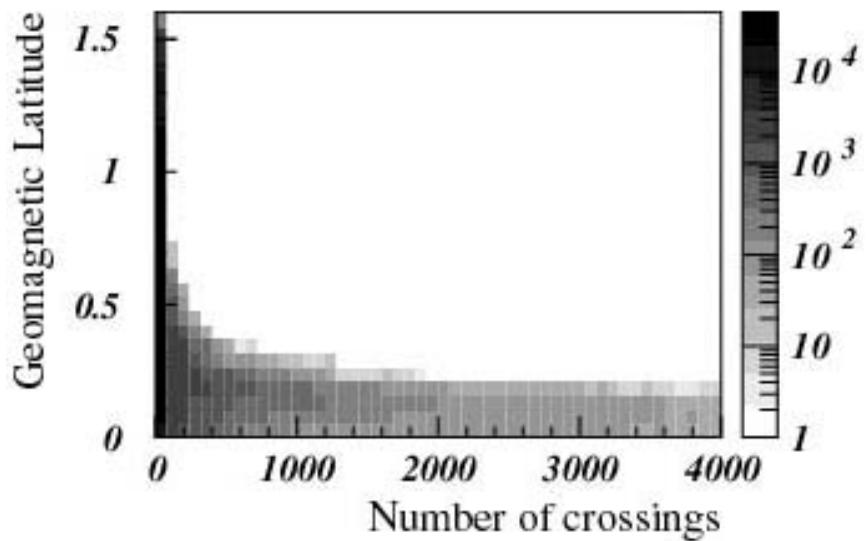
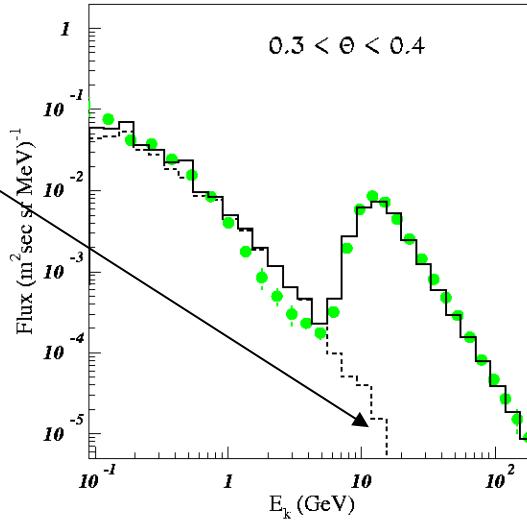


AMS01 – Flux de Proton

Nature de la composante piégée

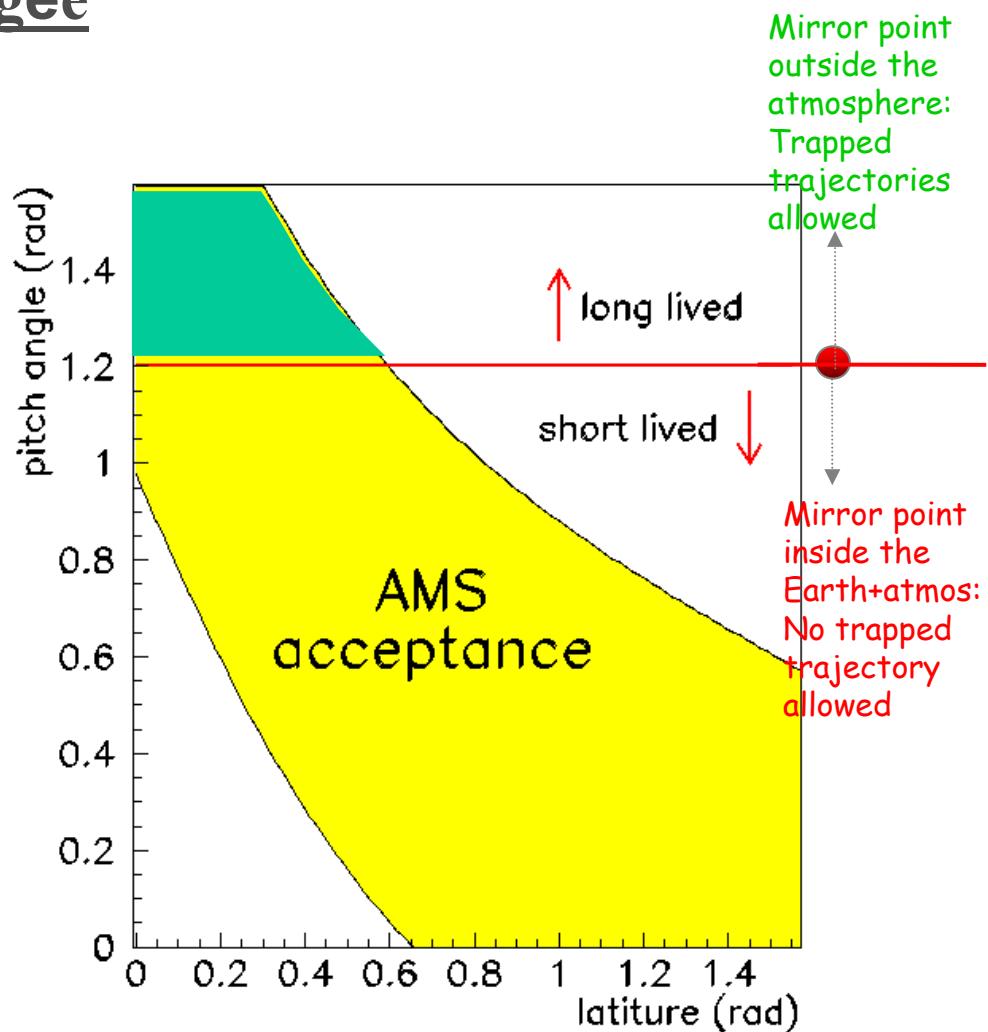
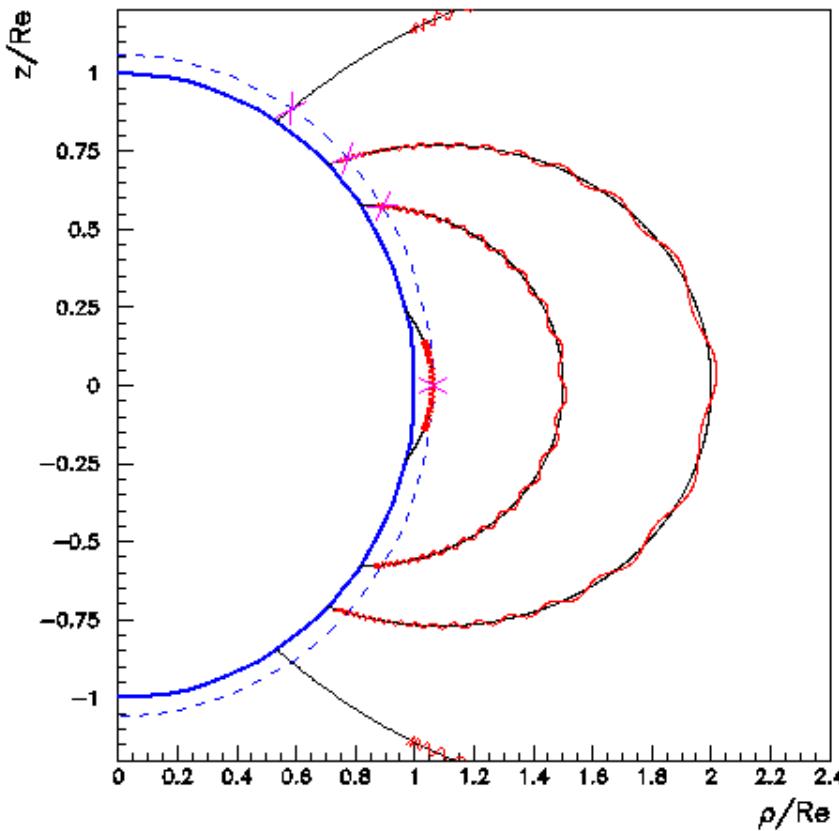


Contribution
 $N_{\text{cross}} > 10$

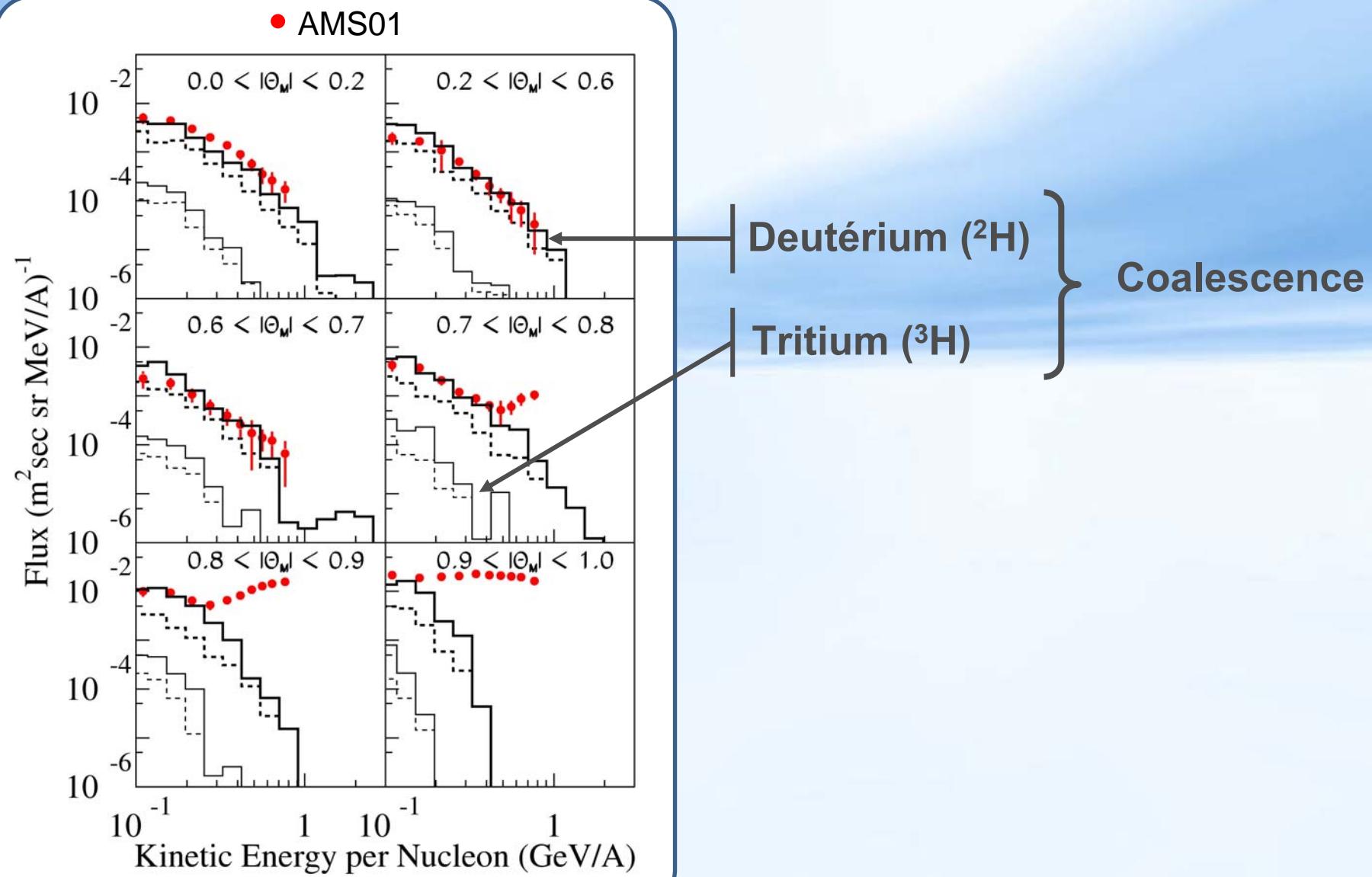


AMS01 – Flux de Proton

Nature de la composante piégée

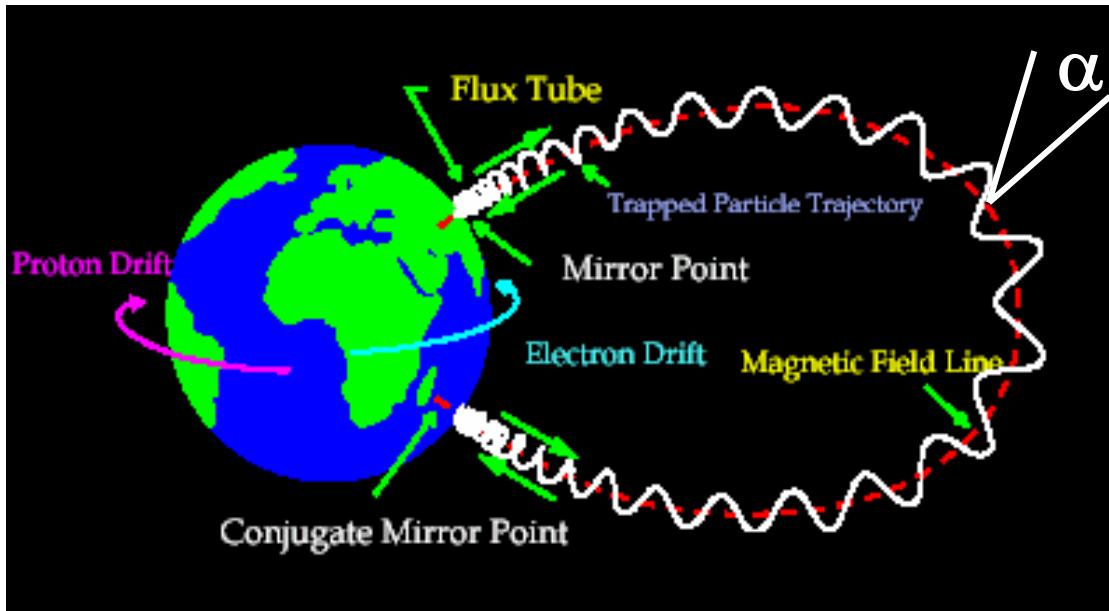


Flux de deutérium et tritium sous la coupure



Coupure Géomagnétique

Trajectoire des particules piégées



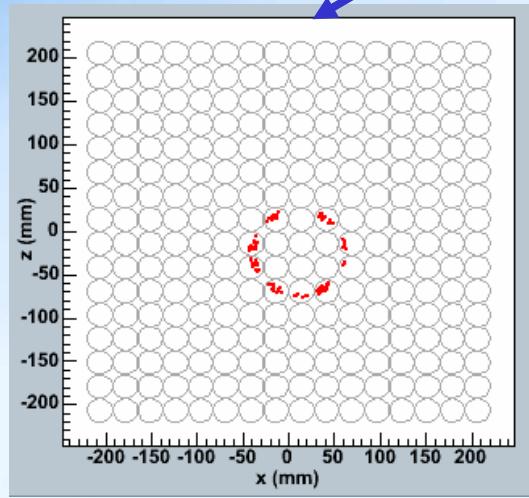
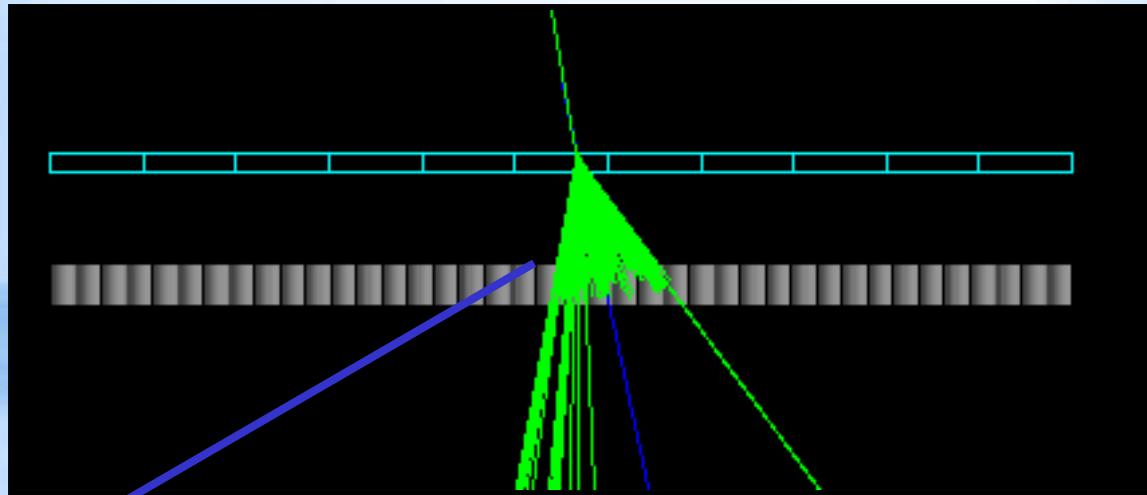
Particule piégée : (invariant adiabatique)
Dérive sur une enveloppe limitée par les points miroirs où elle rebondit :

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

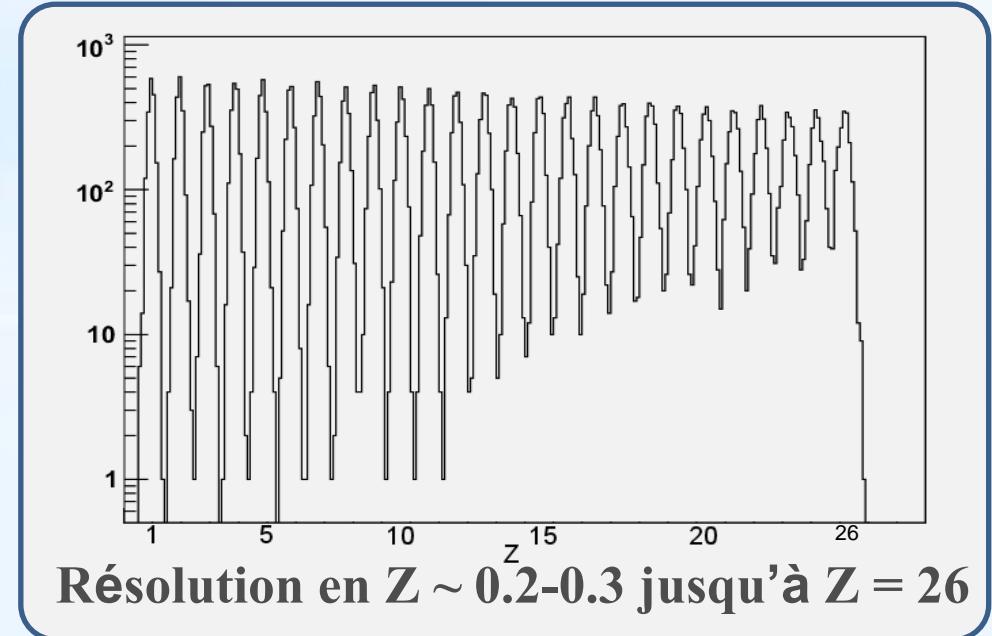
➡ Enveloppe de dérive

Simulation CherCam

Thèse Yoann Sallaz Damaz (2008)



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

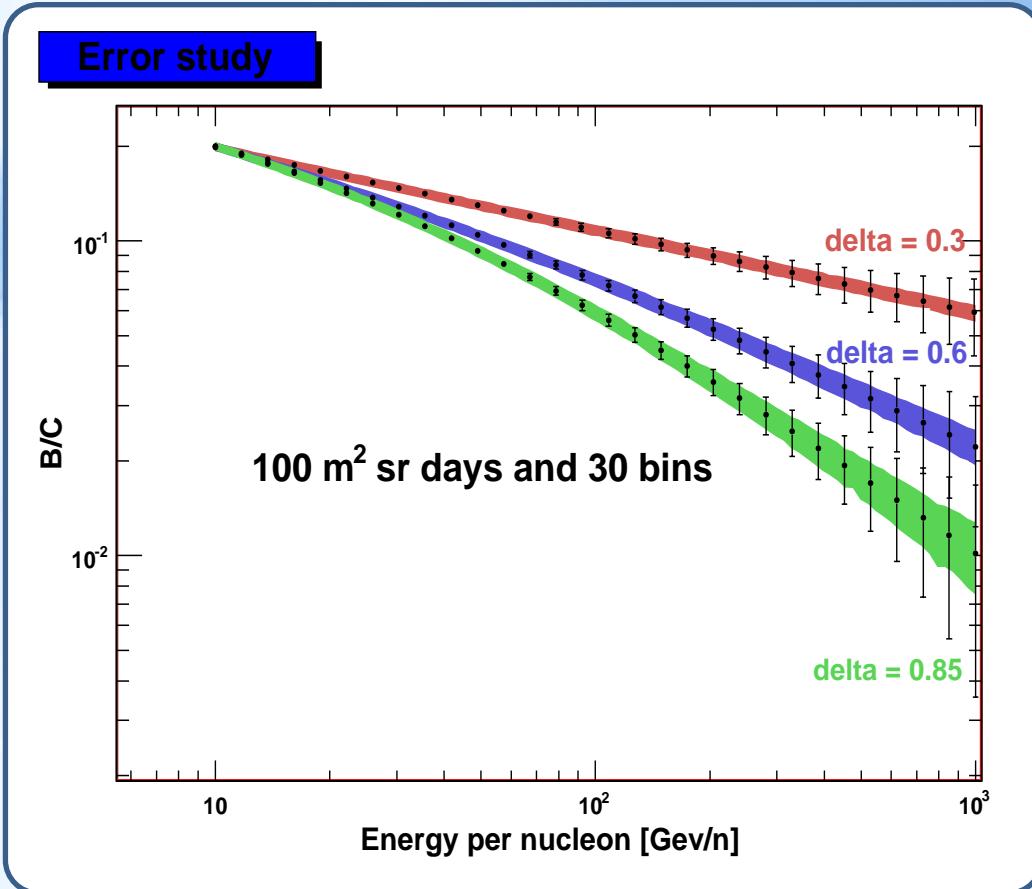


Résolution en $Z \sim 0.2\text{--}0.3$ jusqu'à $Z = 26$

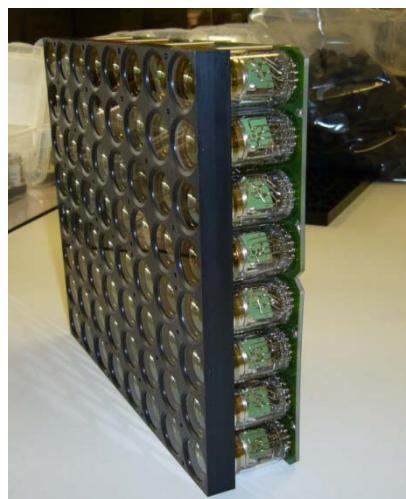
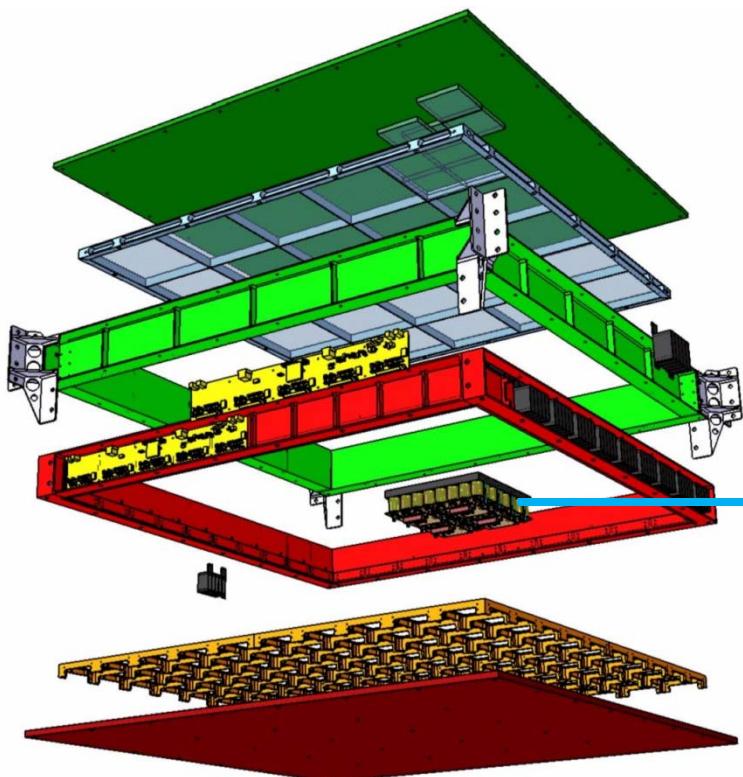
Production atmosphérique

Thèse Antje Putze (2009)

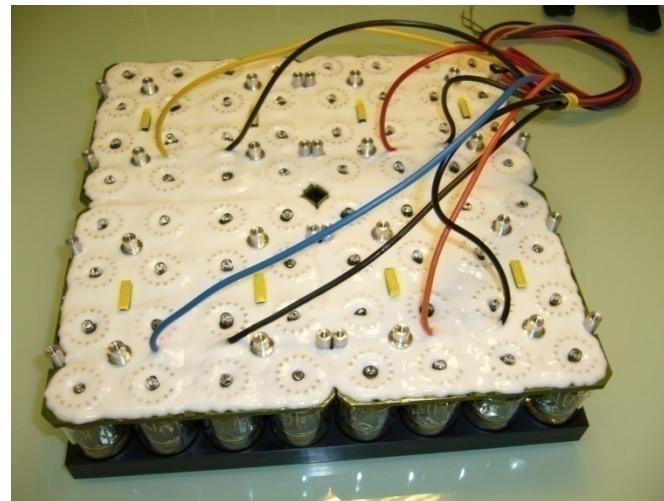
Reconstruction du flux
TOA (Top of Atmosphere)
et étude des incertitudes
liées aux sections
efficaces de
fragmentation.



CherCam : Architecture et Construction



8x8 PMTs Module



Module with potting