Rayonnement cosmique au voisinage de la Terre

L. Derome – LPSC Grenoble

De quoi va-t-on parler ?

- Propagation dans le champ magnétique terrestre :

→ Effet sur le rayonnement cosmique « primaire » : Coupure Géomagnétique

- Interaction dans l'atmosphère

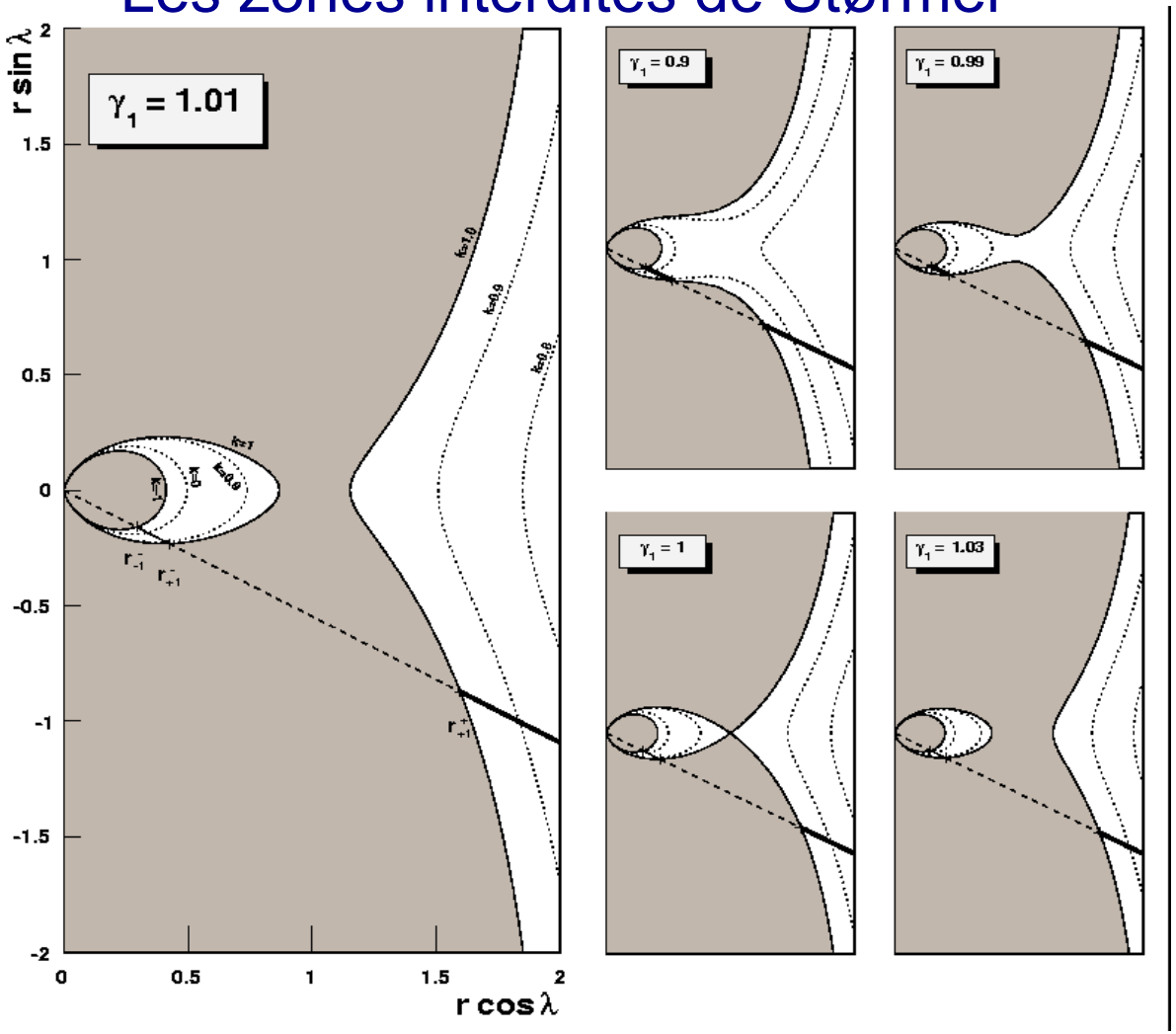
→ Production de particules « secondaires » : sous la coupure géomagnétique, particules (semi-)piégées.

Champs Géomagnétique

- Champ magnétique proche d'un dipôle (excentré et incliné)
- 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 du champ

Les zones interdites de Størmer

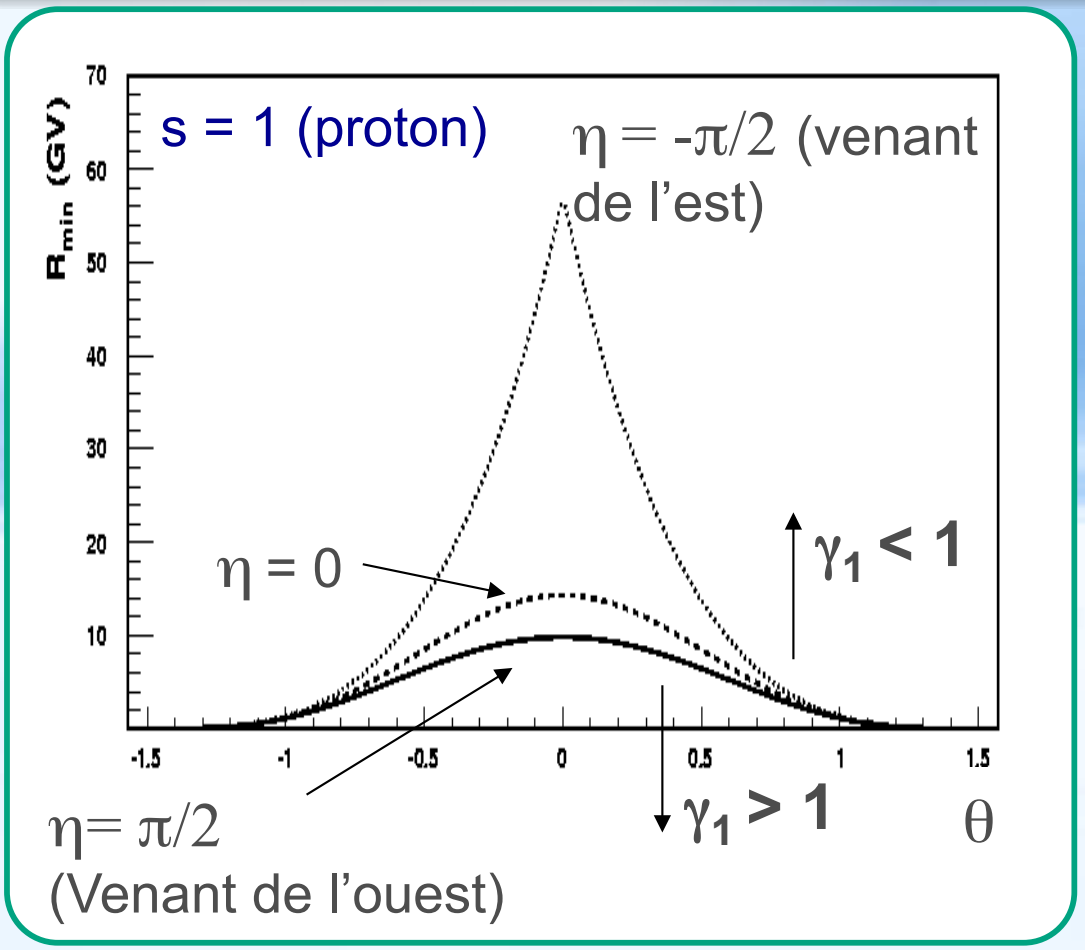


s = q/|q|, k = - s sin η, η= Angle Est-Ouest

Coupure Géomagnétique

- Formule de størmer :

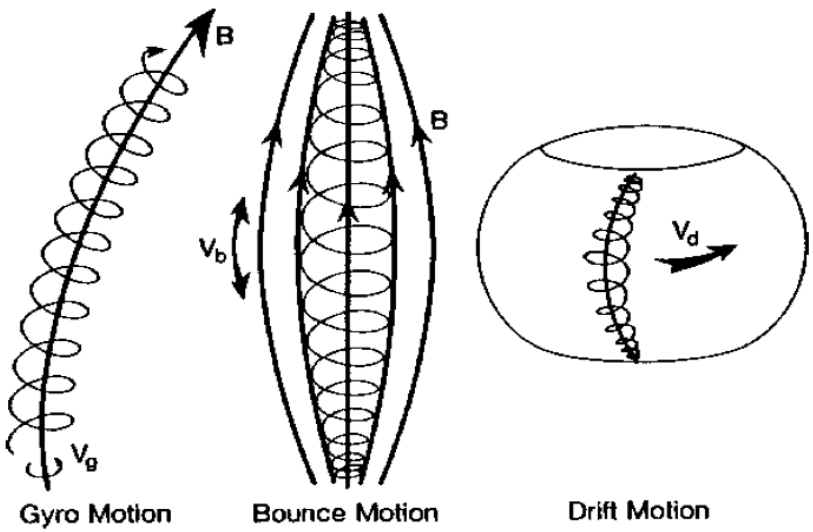
$$R_{cut} = \underbrace{\frac{\mu_0 M}{4\pi d^2}}_{= 56 \text{ GV à } d = R_E + 400 \text{ km}} \left[\frac{1 - \sqrt{1 + s \cos^3\theta \sin\eta}}{\cos\theta \sin\eta} \right]^2$$

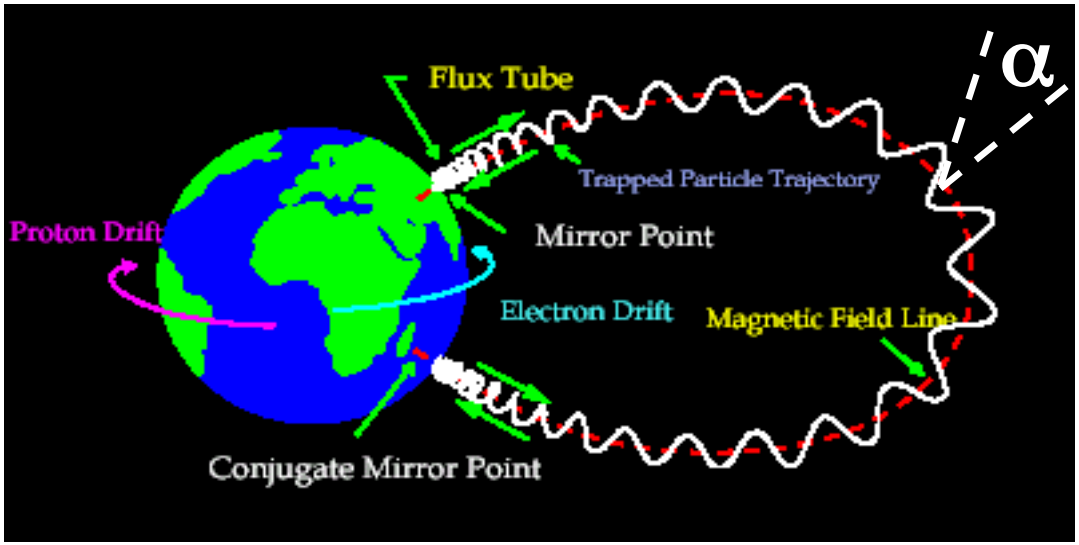


- Pour s=-1: $\eta \rightarrow -\eta$.
- Asymétrie est-ouest du rayonnement cosmique.
- Pour d,θ,R données → cône autorisé avec un flux isotrope (Théorème de Liouville)
- Reconstruction des flux du RC : prise en compte de la portion de l'acceptance du détecteur dans le cône.

Particules sous la coupure ($\gamma_1 > 1$)

A basse énergie, le mouvement peut se décomposer en trois composantes :



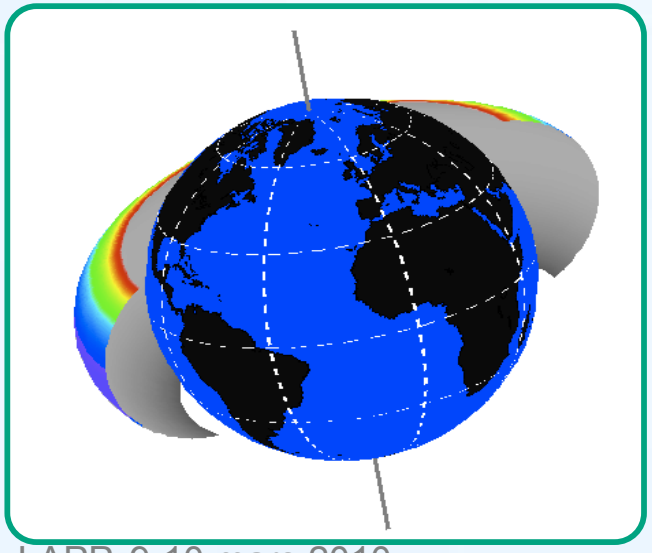


→ Dérive sur une enveloppe limitée par les points miroirs où elle rebondit :

$\alpha_{miroir} = \pi/2$

→ « envellopes de dérive »

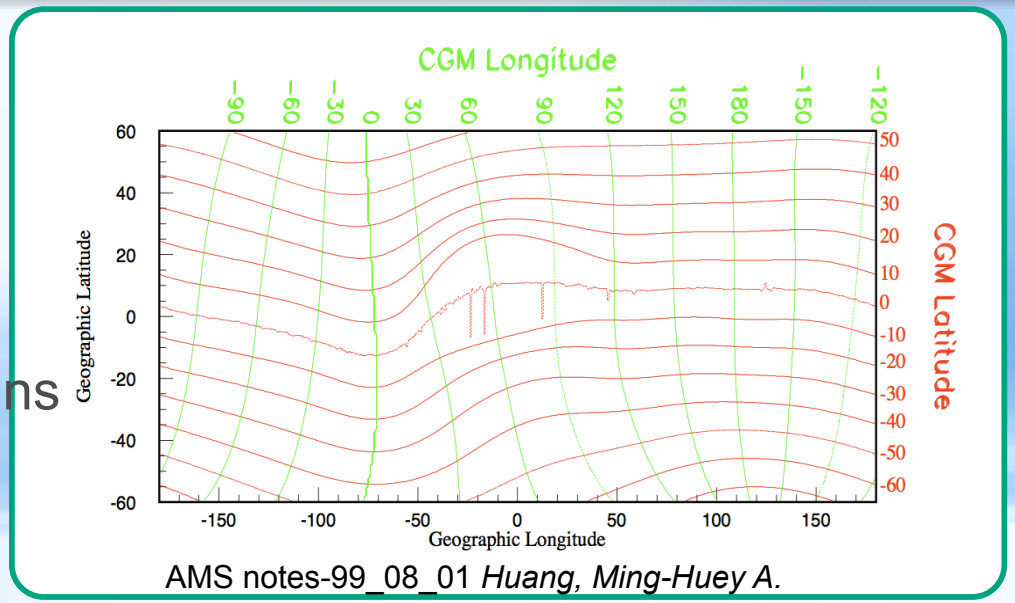
(Drift shell : L_{eq}, α_{eq})



Au delà de l'approximation dipolaire

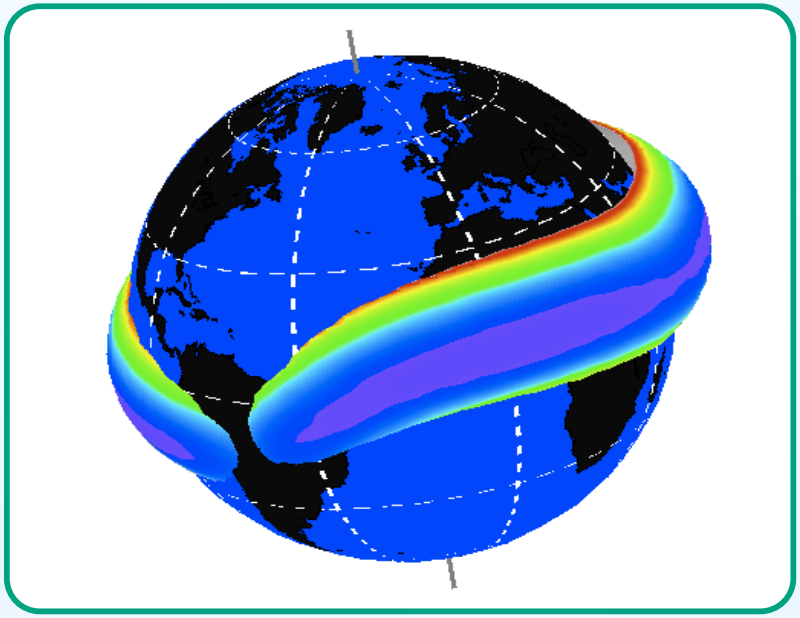
- Pour les particules « primaires » :
  - « backtracing » dans le champ géomagnétique (DGRF/IGRF)
  - Utilisation des coordonnées CGM (Corrected Geomagnetic Coordinates) dans la formule de Størmer :

$$R_{cut} = \frac{\mu_0 M}{4\pi d^2}\left[\frac{1-\sqrt{1+s\cos^3\theta_{CGM}\ \sin\eta}}{\cos\theta_{CGM}\ \sin\eta}\right]^2$$



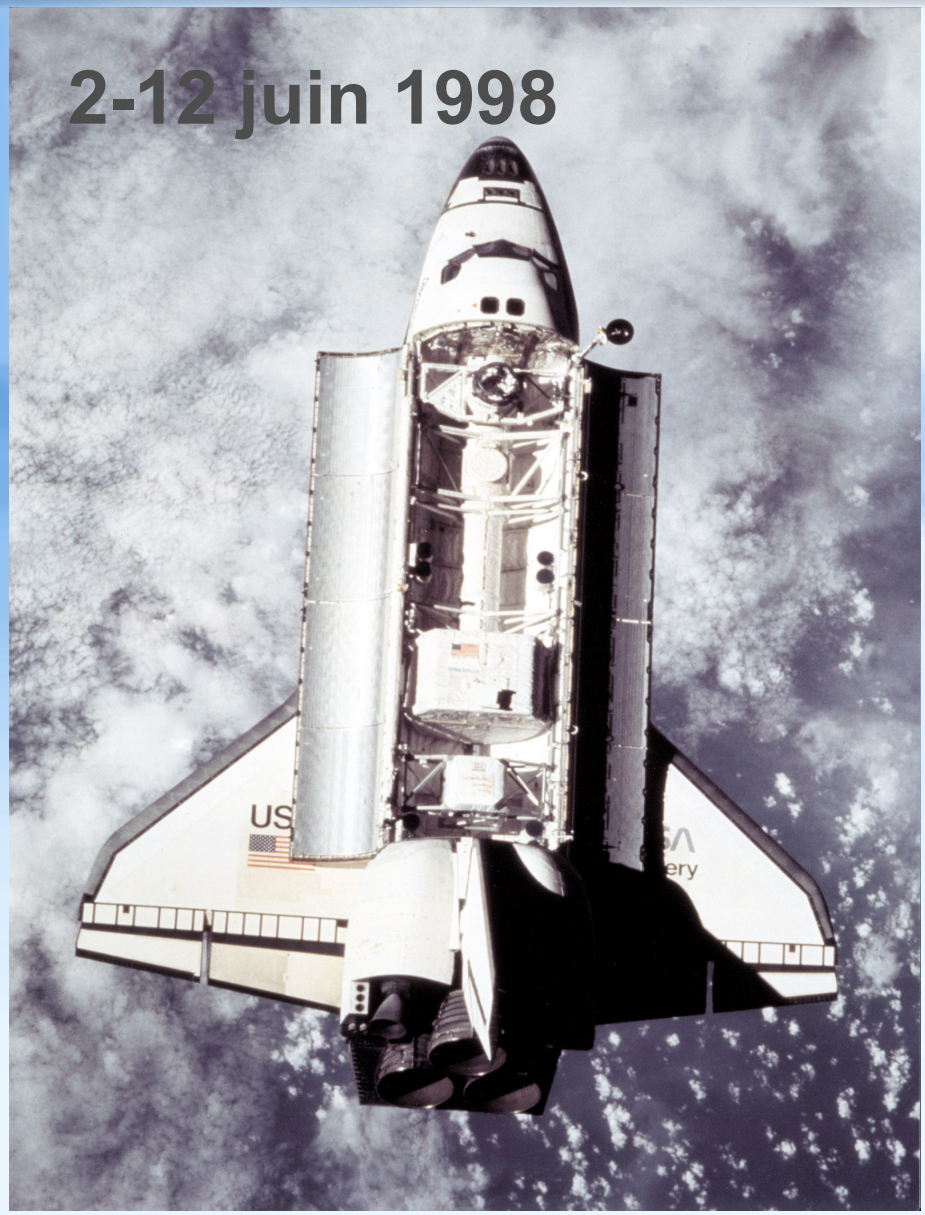
AMS notes-99_08_01 *Huang, Ming-Huey A.*

- Pour les particules « secondaires » :
  - Déformation des « enveloppes de dérive »
  - Certaines peuvent entrer dans l'atmosphère.

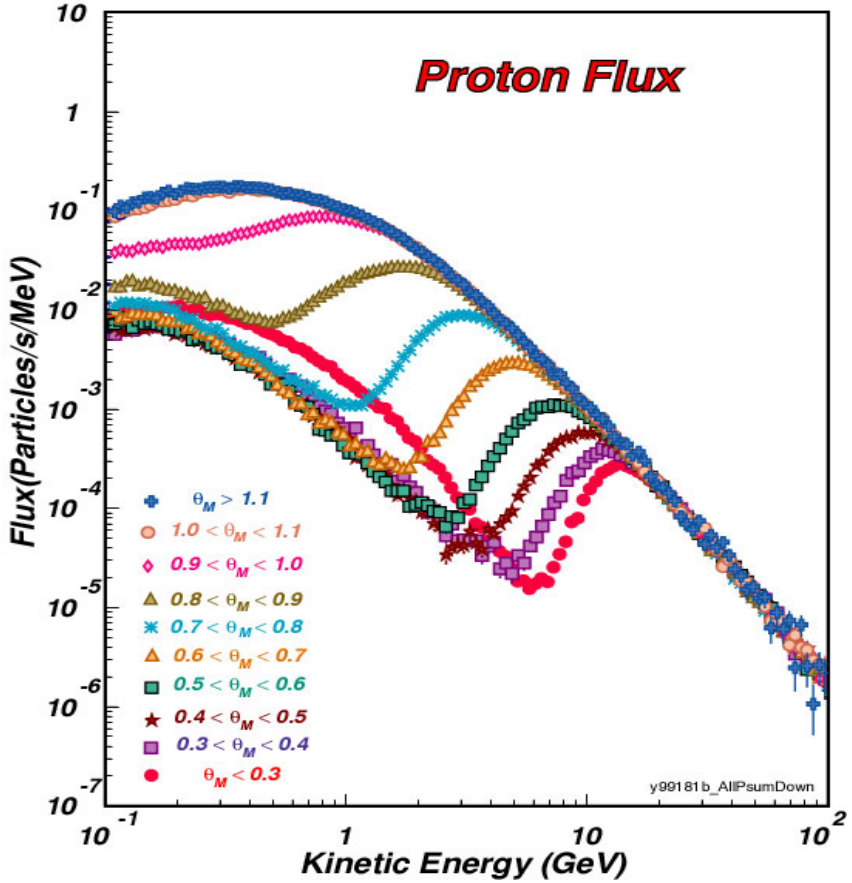


→ Production (et absorption) de particules secondaires (semi piégées)
≠ des particules dans les ceintures de Van Allen

Vol AMS01



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



→ **Mais aussi composantes $e^{+/-}$, ^3He, D**

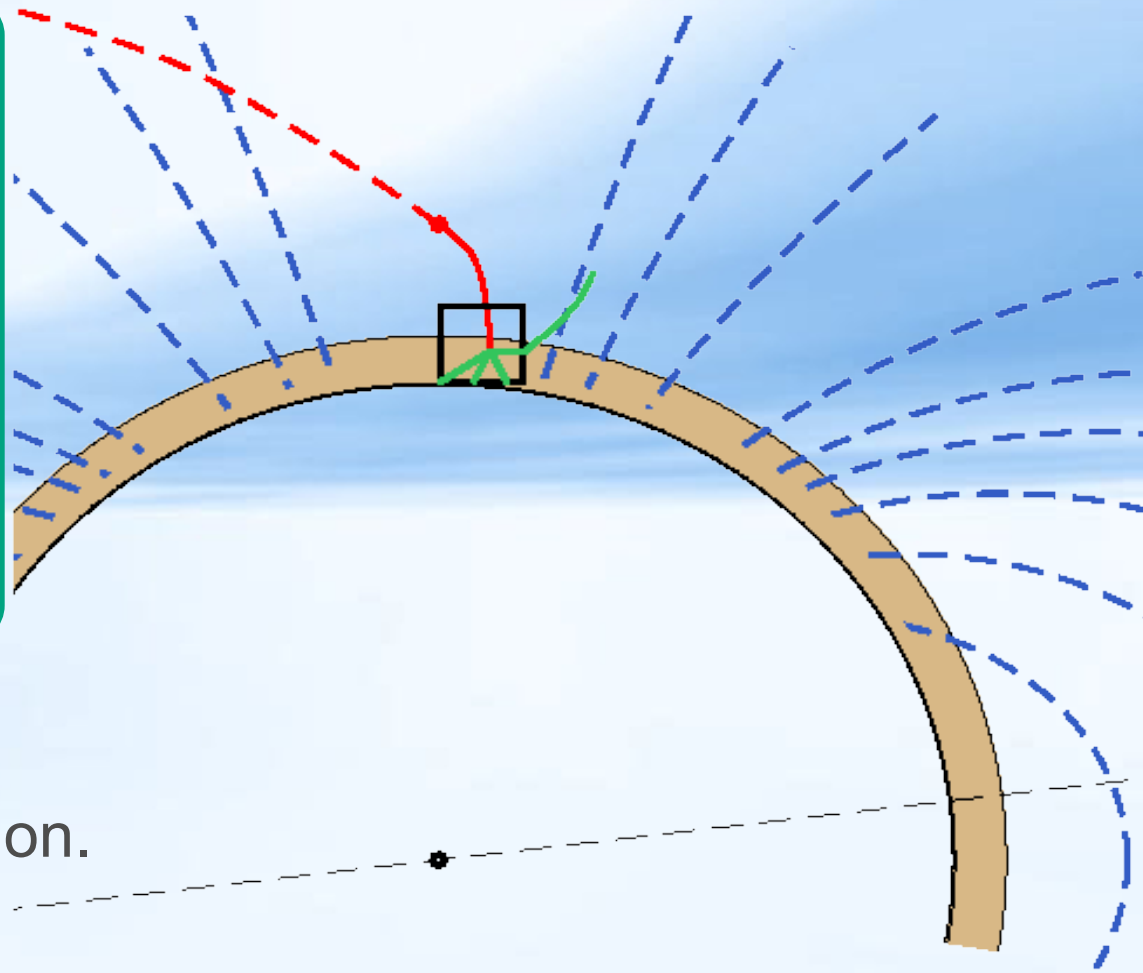
Simulation 3D

Développement d'une simulation :

→ Reproduire les flux mesurés

→ Comprendre les caractéristiques spécifiques observées par AMS01 :

- Rapport e^+/e^- de l'ordre de 4 dans la région équatoriale.
- $He^3/He^4 > 10$ sous la coupure.

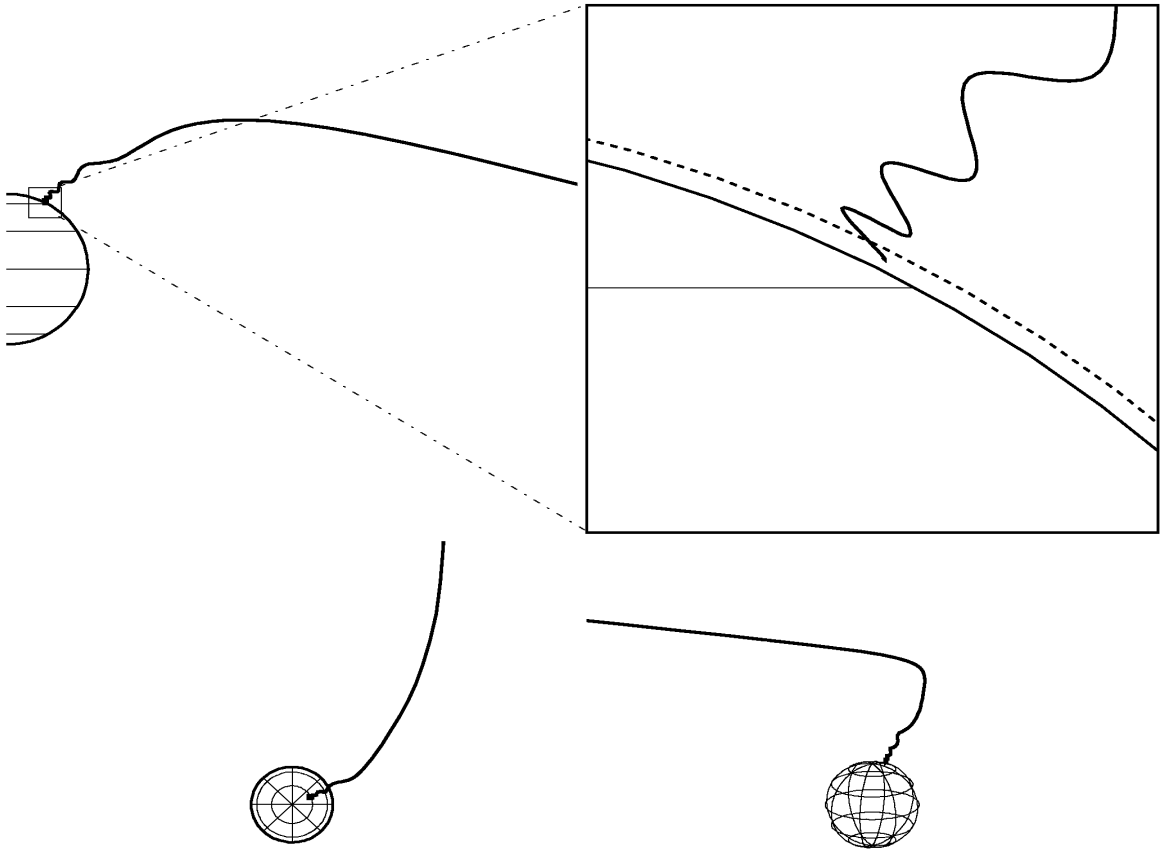


Simulation 3D :

- Champ magnétique – propagation.
- Génération primaires.
- Interactions : modèle d'atmosphère – sections efficaces.
- Détection.

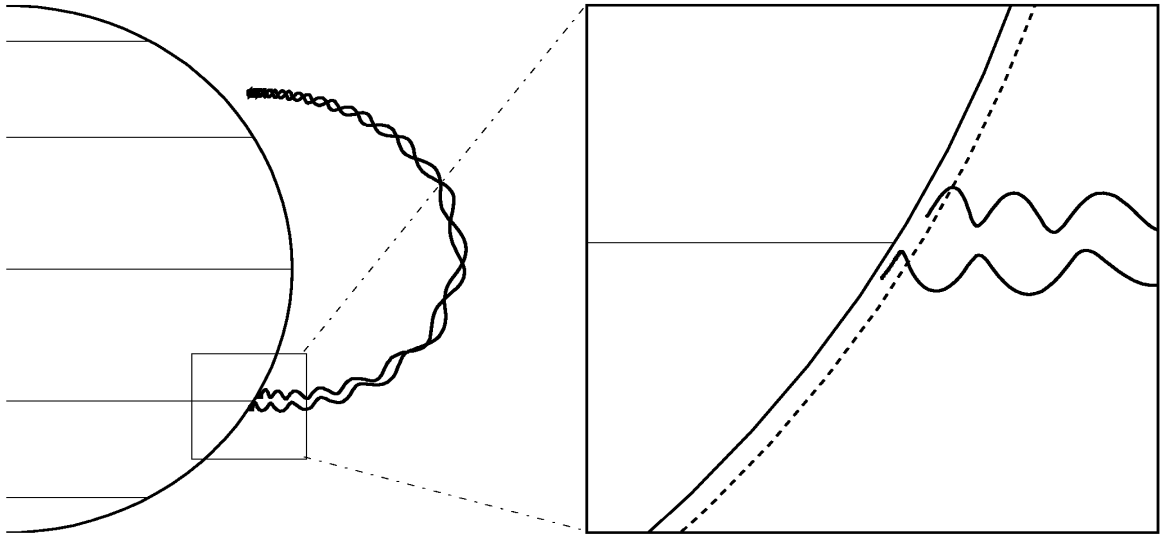
Simulation - Exemples

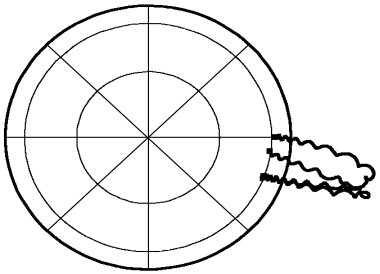
Exemple 1 : particule secondaire s'échappant

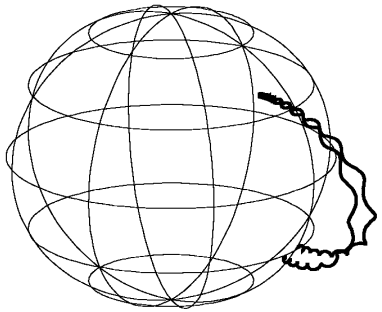


Simulation - Exemples

Exemple 2 : particule secondaire piégée

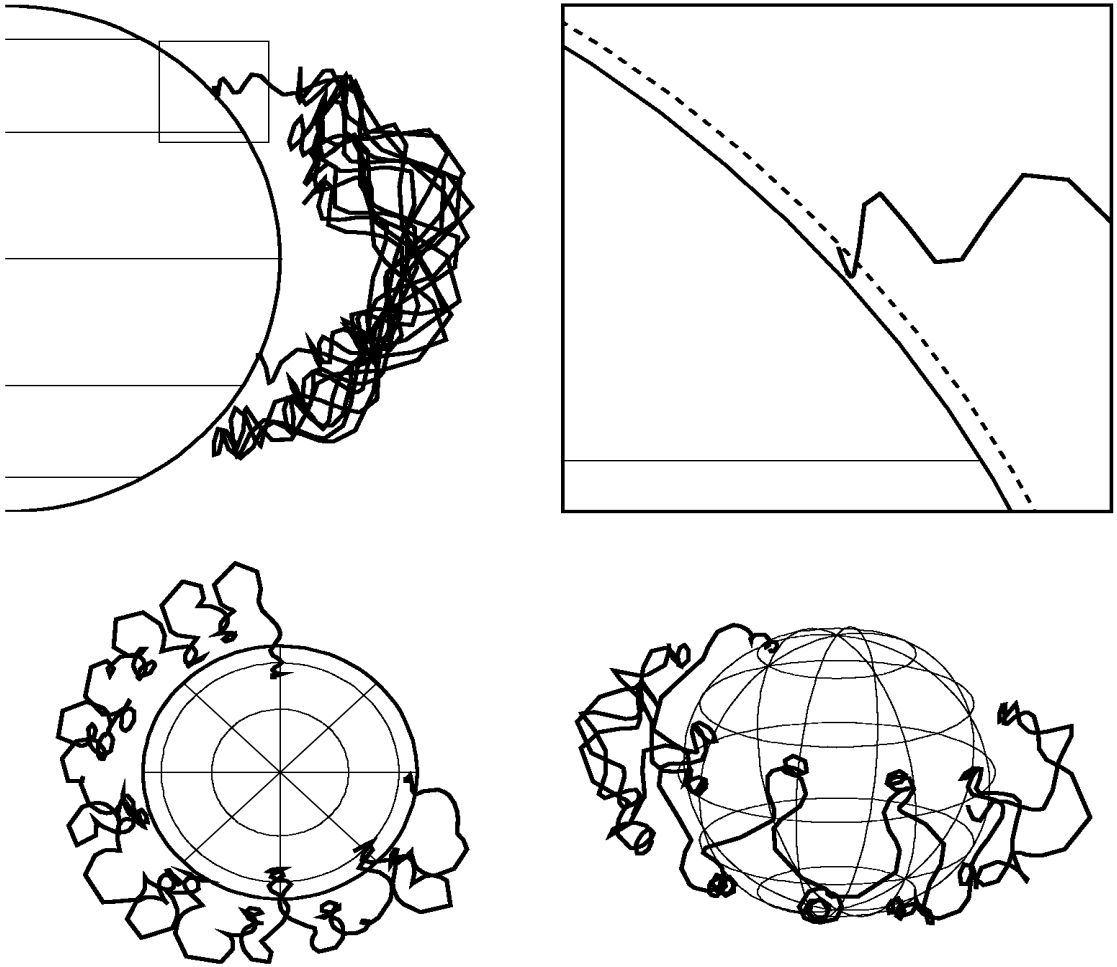




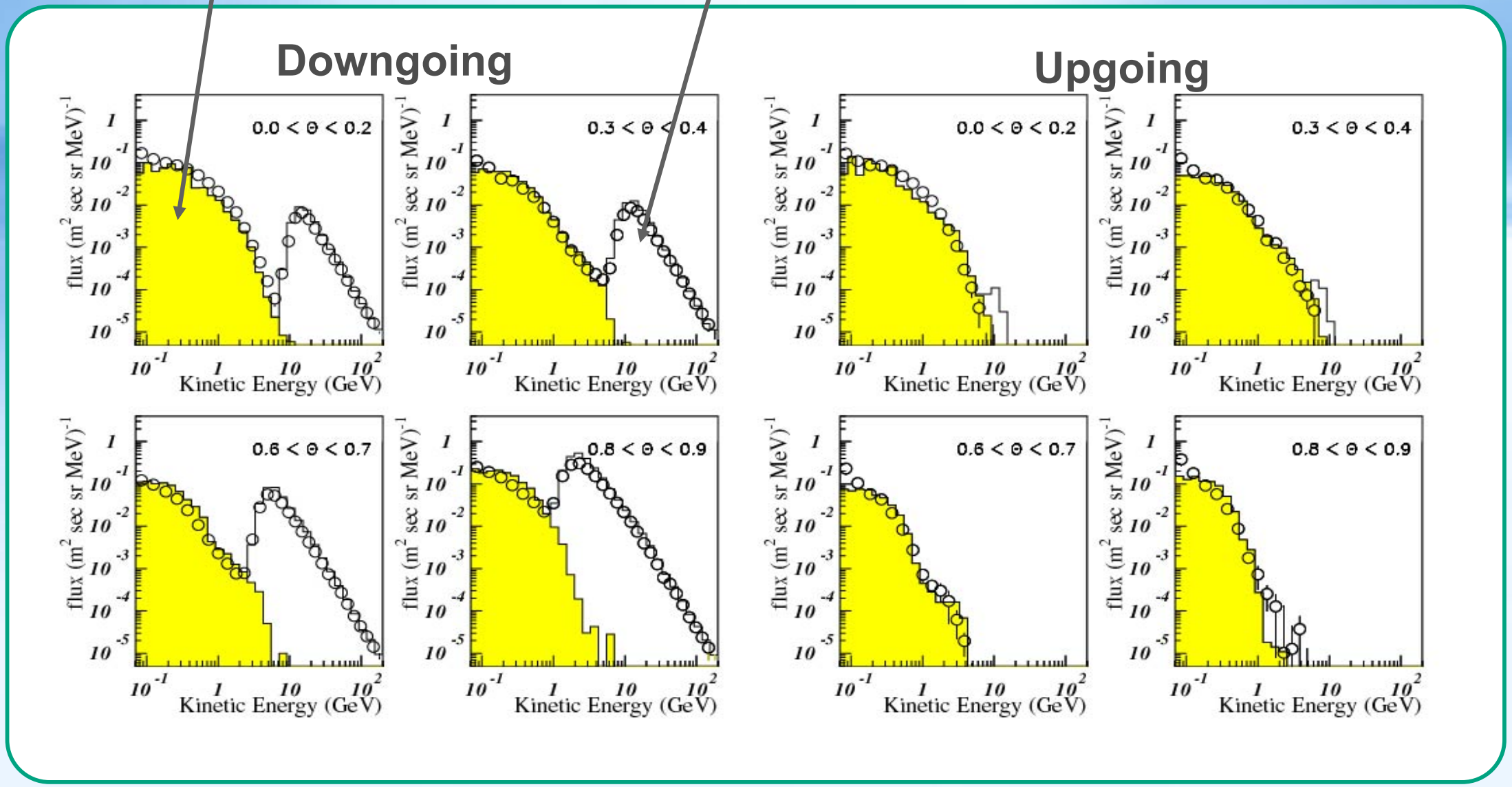


Simulation - Exemples

Exemple 3 : particule secondaire piégée



AMS01 – Flux de Proton

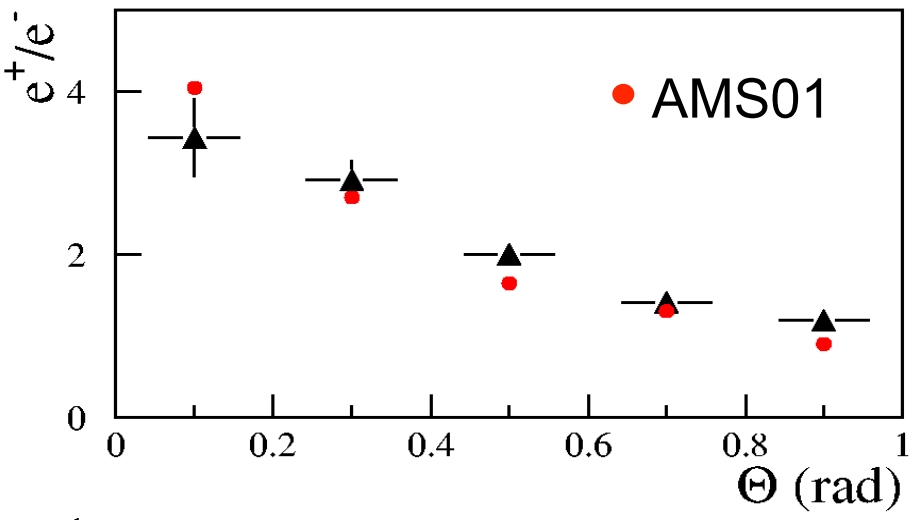


Composantes sous la coupure

Rapport e^+/e^- sous la CG :

Pour les protons venant de l'ouest (majoritaire à basse latitude) :

- e^- secondaires absorbés dans l'atmosphère
- e^+ s'échappe hors de l'atmosphère

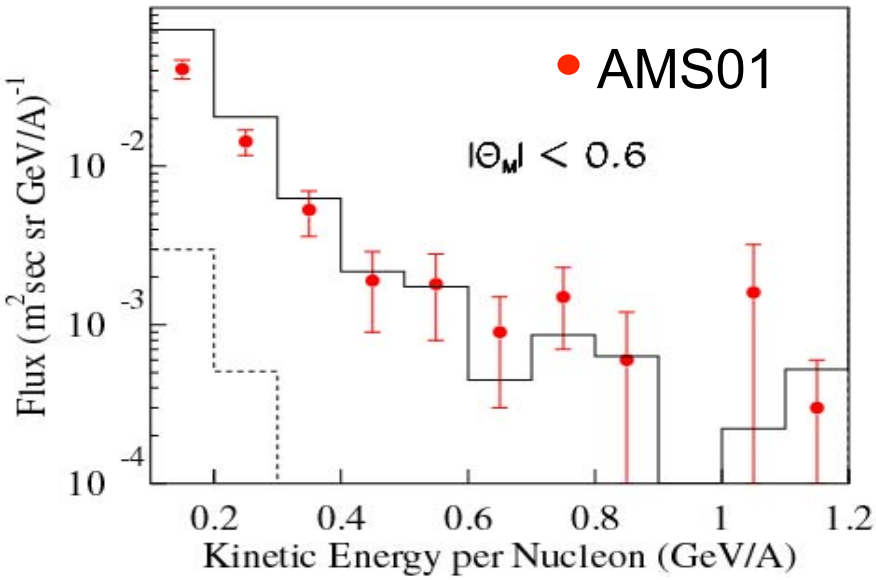


Z=2 sous la coupure géomagnétique : ^{3}He majoritaires (< 10% ^{4}He) :

- Production de noyaux légers à basse énergie dominée par la coalescence :

$$\sigma(D) > \sigma(^3He) > \ldots > \sigma(A) > \sigma(A+1)$$

- On retrouve dans cette hiérarchie dans les flux sous la CG : p > D > ^{3}He > ^{4}He



Conclusions et perspectives

- Important de bien comprendre les processus en jeu dans la magnétosphère pour l'analyse d'AMS02.
- Composante sous la GC : domaine d'étude riche.
  - Résultats d'AMS01 → beaucoup de questions.
  - Simulations 3D complète a permis de bien comprendre les mesures d'AMS01.
- Nouvelles mesures à venir (Pamela/AMS02) :
  - Certainement de nouvelles choses à comprendre.
  - Peut-être une possibilité de mieux contraindre les processus d'interaction.
    - Production d'antimatière,
    - Coalescence,
    - …

Quelques références…

- Articles « historiques » de Størmer, Lemaître & Vallarta.

  M.S. Vallarta « Theory of the Geomagnetic Effect of Cosmic Radiation », Handbuch der Physick, XLVI/I, 88 (1961).

- « Introduction to Geomagnetically Trapped Radiation », Martin Walt, Cambridge University Press, 1994.
- « Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets », Lev Dorman, Spinger 2009.
- NASA ModelWeb Catalogue and Archive :

  http://modelweb.gsfc.nasa.gov/

- ESA's Space Environment Information System (Spenvis) : http://www.spenvis.oma.be/

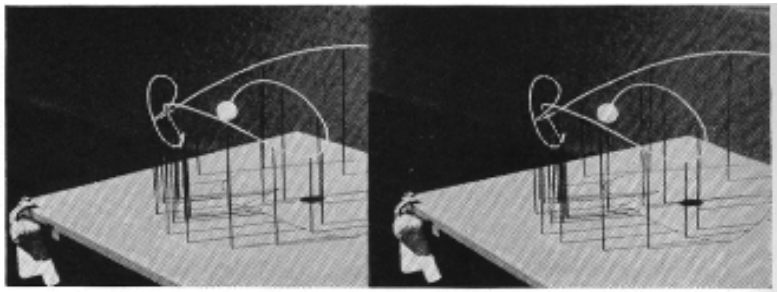


FIG. 149. Stereoscopic picture of the trajectory through the origin for $\gamma_1 = 0{\cdot}935$

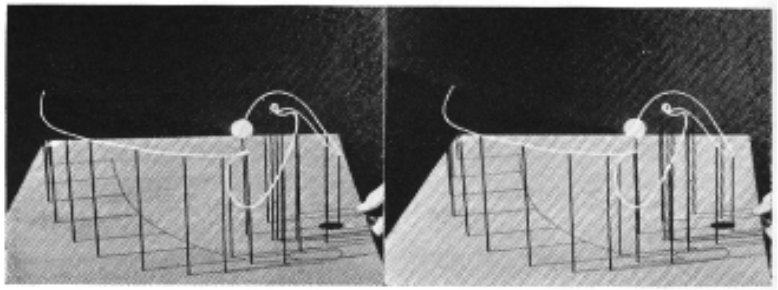
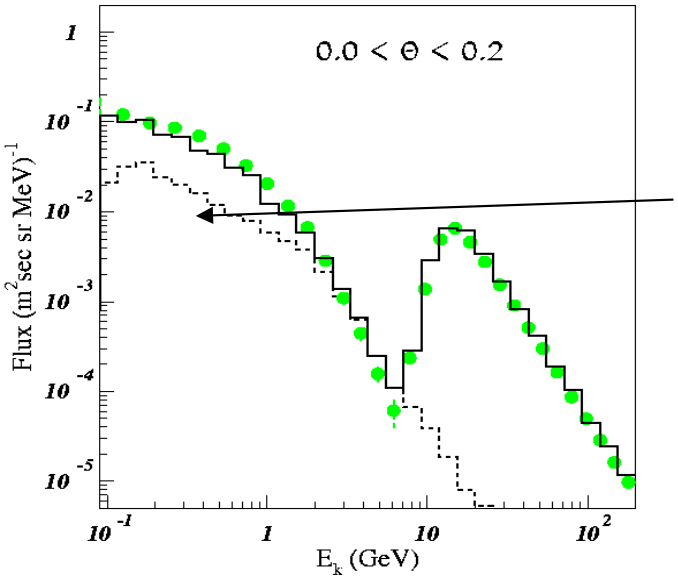


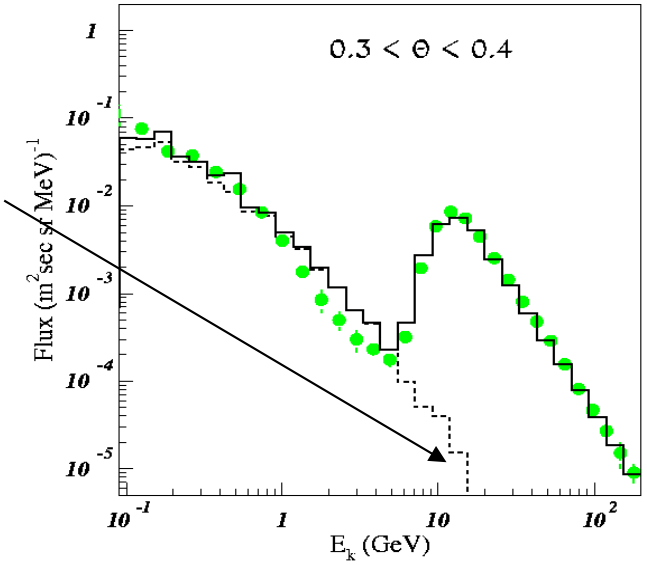
FIG. 150. Stereoscopic picture of the trajectory through the origin for $\gamma_1 = 0{\cdot}969$

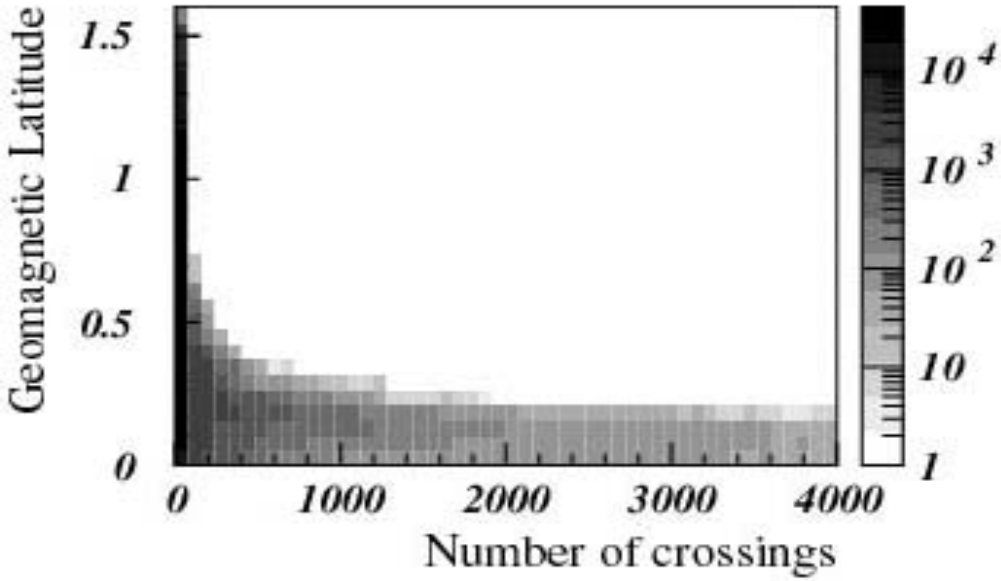
AMS01 – Flux de Proton

Nature de la composante piégée



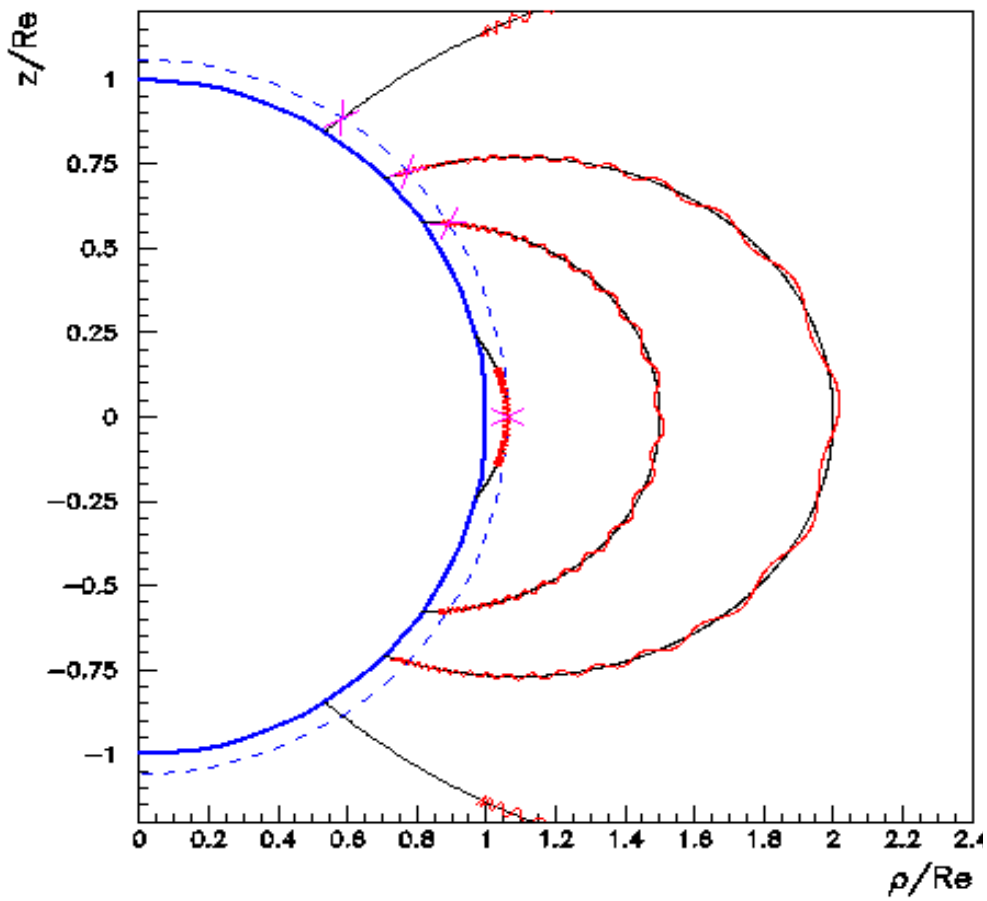
Contribution
N_{cross} < 10

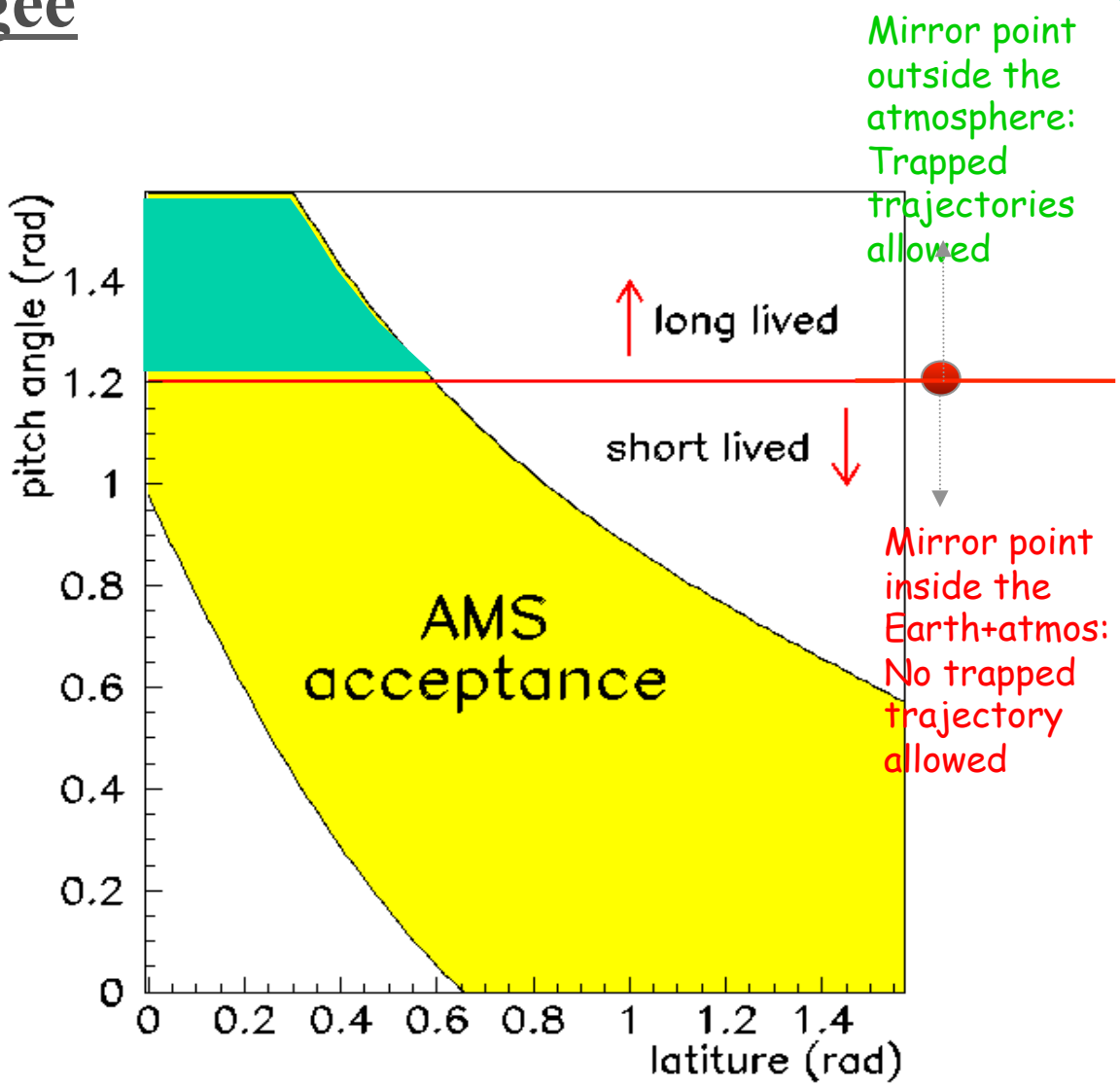




AMS01 – Flux de Proton

Nature de la composante piégée

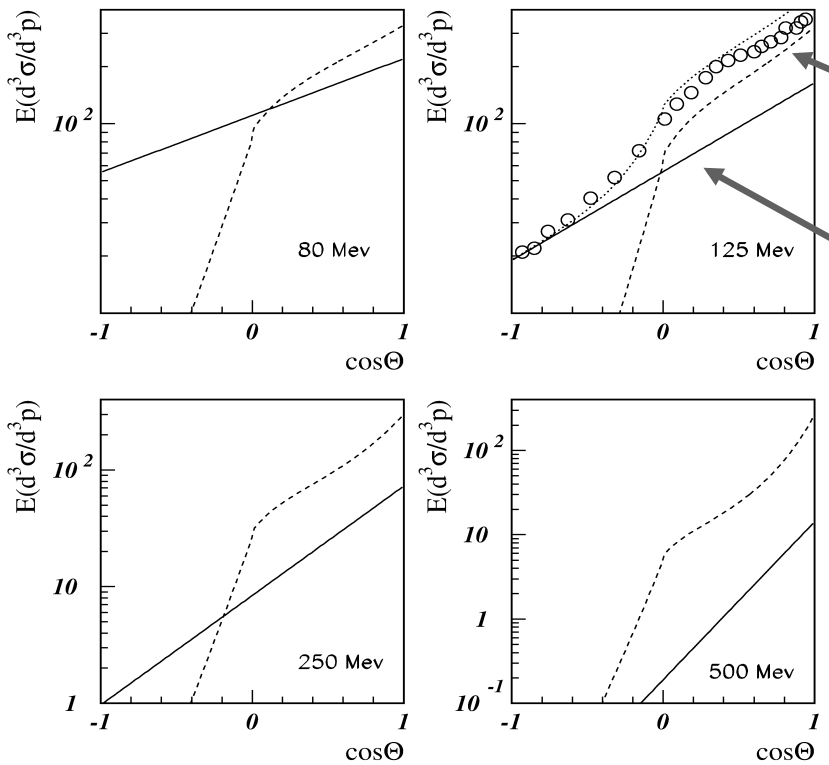




AMS01 - Proton

Générateur de proton

Modélisation de la section efficace $$E\frac{d^3\sigma}{d^3p}(p+A\rightarrow p+X)$$



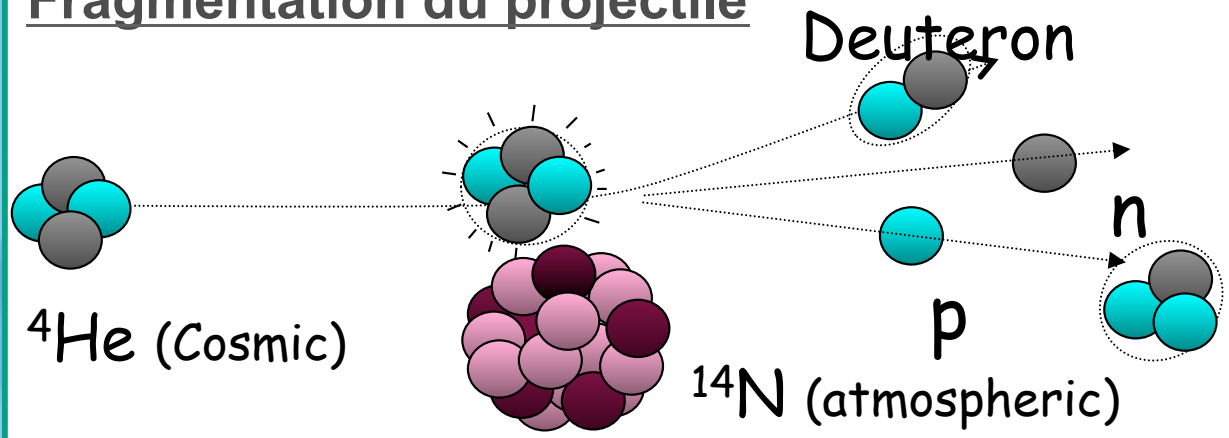
Prise en compte des composantes :

- **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*

Fragmentation nucléaire vs Coalescence

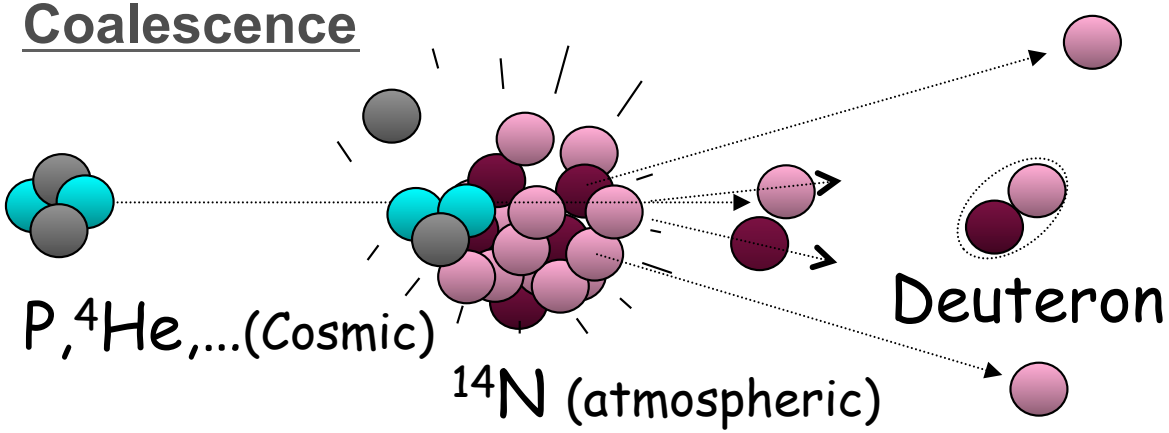
Fragmentation du projectile



- **Processus périphérique**
- **Conservation de la vitesse incidente**
- **Production :**

σ(A-1)> σ(A-2)>… > σ(3He)> σ(D)

Coalescence

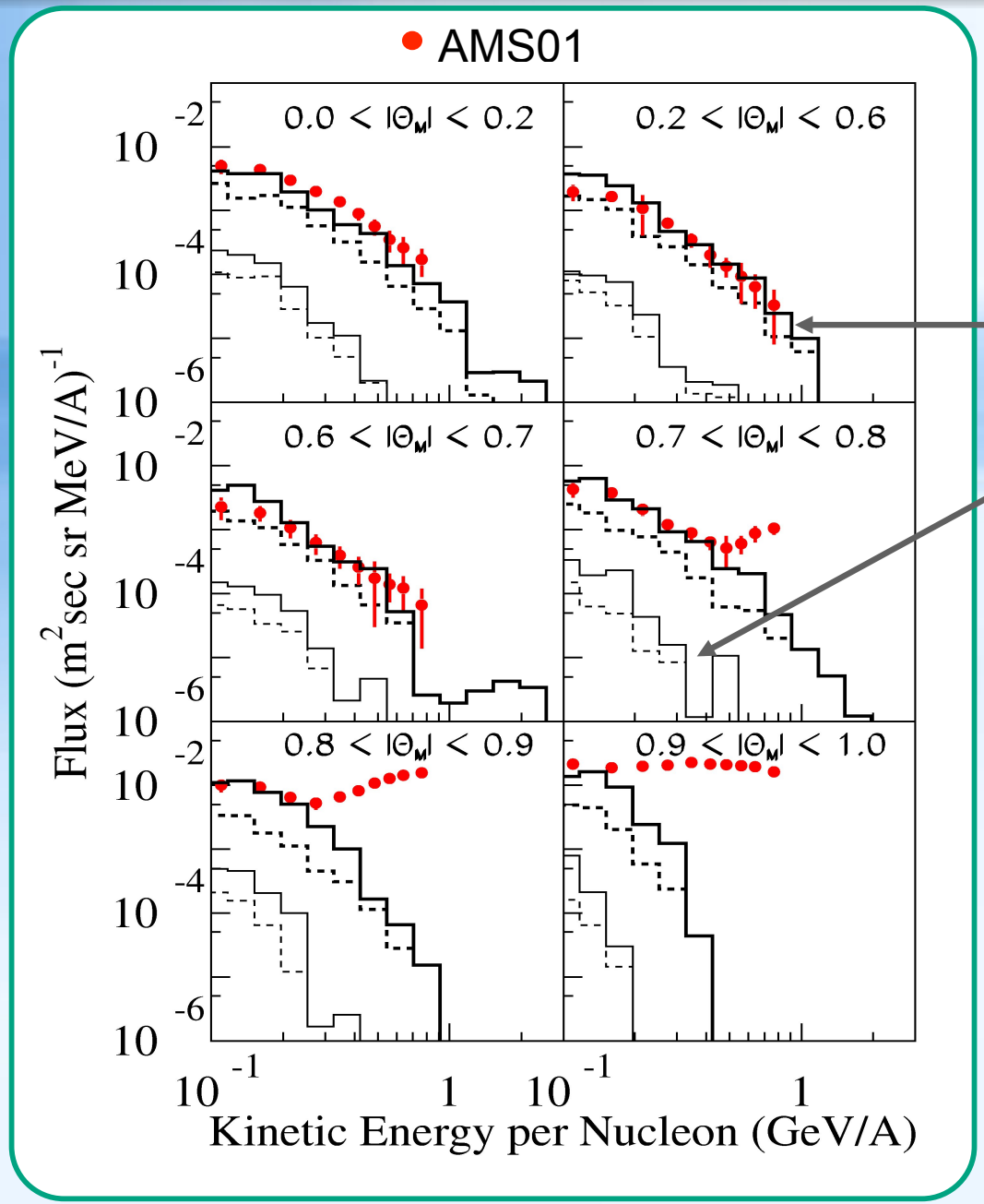


- **Processus central**
- **Faible énergie de production**
- **Production :**

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

σ(D) > σ(3He) > …> σ(A)> σ(A+1)

Flux de deutérium et tritium sous la coupure

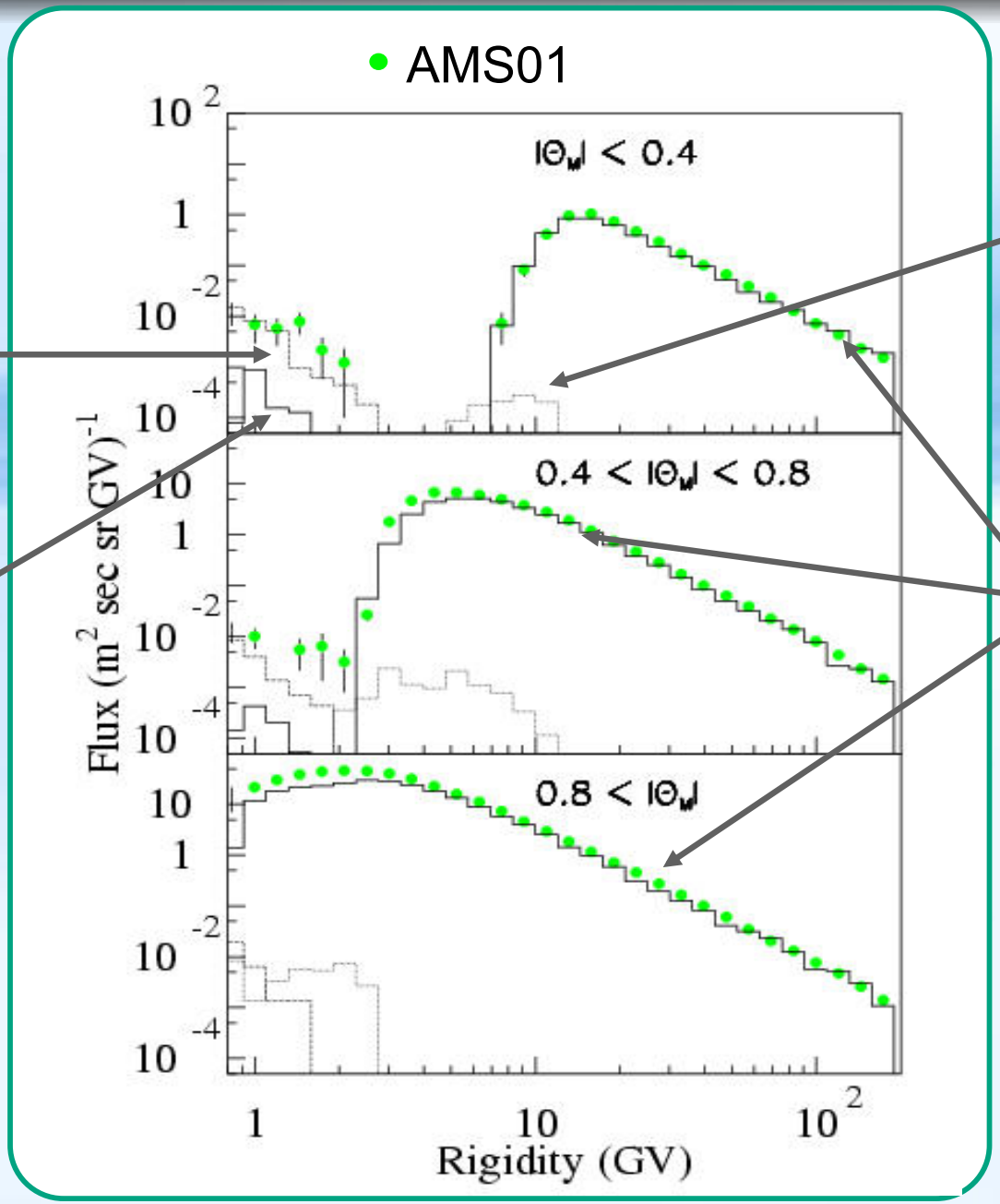


Deutérium (^{2}H)

Tritium (^{3}H)

Coalescence

Flux d'hélium sous la coupure



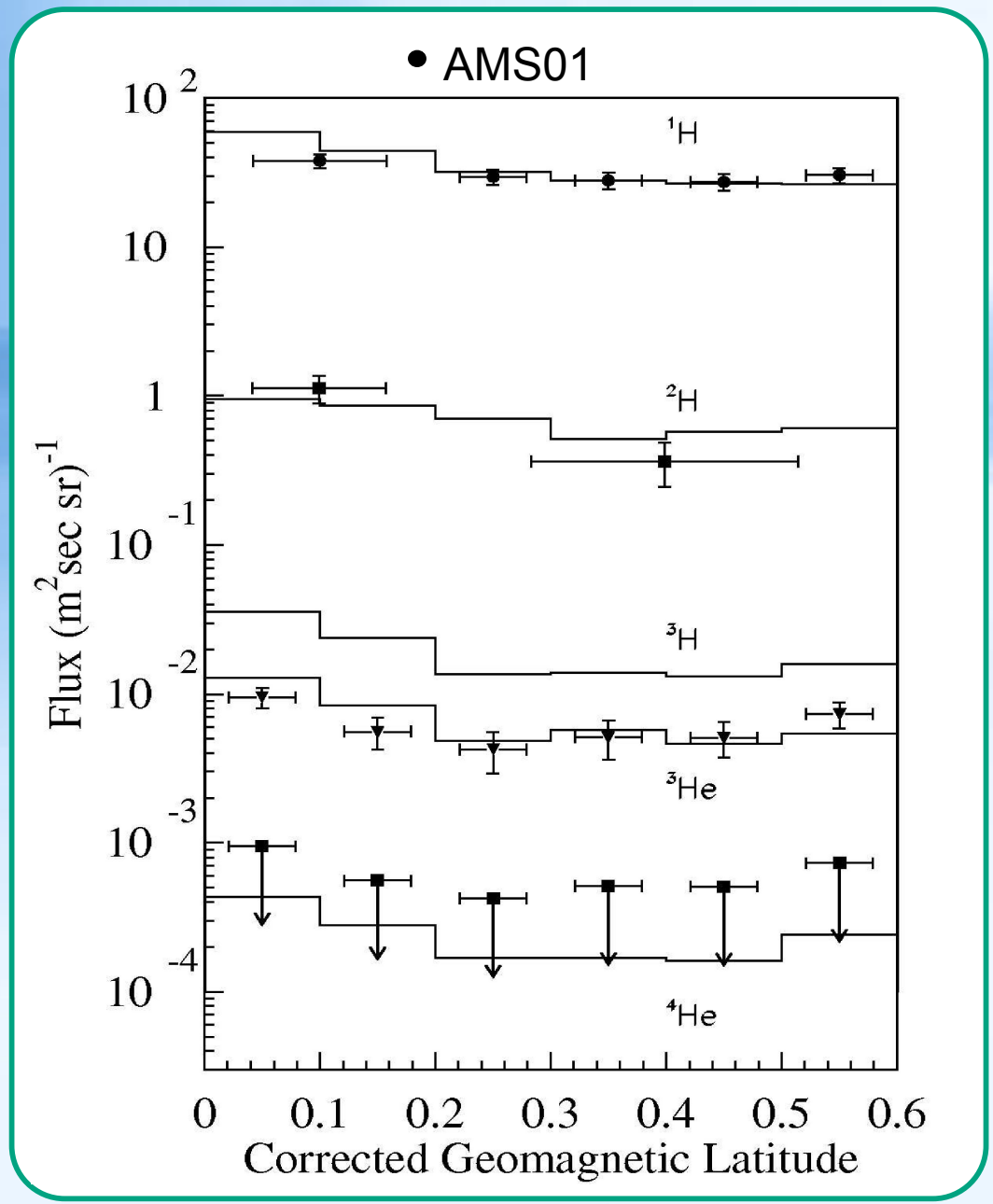
^{3}He produit par coalescence

^{4}He produit par coalescence

^{3}He produit par fragmentation

Rayon cosmique ^{4}He

Ions sous la coupure géomagnétique



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