

DÉTECTION ET ÉTUDE DES IONS DANS LE RAYONNEMENT COSMIQUE PAR L'EXPÉRIENCE CREAM

Antje Putze

LPSC Grenoble

14 décembre 2007





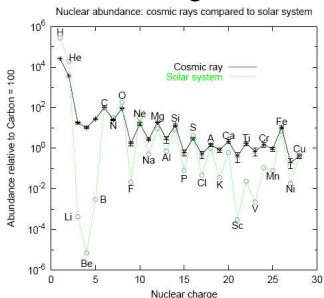
Plan

- 1 Rayonnement cosmique
- 2 CherCam, un détecteur Čerenkov pour CREAM
- 3 Propagation du rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre
- 4 Propagation du rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire
- 5 Conclusion



Composition et abondances

Particules chargées :



98% noyaux

2% électrons

- 87% protons
- 12% hélium
- 1% noyaux lourds

Abondances similaires aux abondances solaires, mais :

- les éléments légers (Li, Be, B) et les éléments sub-Fe (Sc, Ti, Mn) sont plus abondants
- H et He sont moins abondants

FIG.: Abondances relatives

[astro-ph/0510321]

Abondances



Sources, Propagation

Quelles sont les sources? Comment le rayonnement cosmique est-il accéléré? Quel(s) est(sont) le(s) mécanisme(s) de propagation?



Spectre énergétique

Le spectre énergétique

- s'étend sur plus de 13 ordres de grandeurs
- peut être décrit par une loi de puissance :

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

- possède deux anomalies :

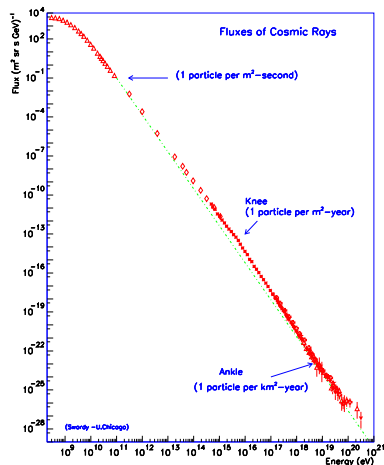
- 1 le genou à $\sim 3 \cdot 10^{15}$ eV
- 2 la cheville à $\sim 5 \cdot 10^{18}$ eV

Spectre



Propagation

Quel(s) est(sont) le(s) mécanisme(s) de propagation ?



[\[astroparticle.uchicago.edu/cosmic_ray_spectrum_picture.htm\]](http://astroparticle.uchicago.edu/cosmic_ray_spectrum_picture.htm)





Questions ouvertes

- Quelles sont les **sources** ?
- Où se trouvent les **sources** ?
- Existe-t-il des **sources exotiques** ?
- Comment le rayonnement cosmique est-il **accéléré** ?
- Comment est-il **propagé** ?
- Qu'est-ce que provoque le **genou** et/ou la **cheville** ?
- Existe-t-il une **limite** (GZK – cut off) ?

⋮

Intérêt physique du rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique peut nous donner des informations sur la **composition** et la **structure** de la galaxie, sur la **distribution des sources** et sur les **processus physiques** se déroulant dans la galaxie.



Questions ouvertes

- Quelles sont les **sources** ?
- Où se trouvent les **sources** ?
- Existe-t-il des **sources exotiques** ?
- Comment le rayonnement cosmique est-il **accéléré** ?
- **Comment est-il propagé** ?
- Qu'est-ce que provoque le **genou** et/ou la **cheville** ?
- Existe-t-il une **limite** (GZK – cut off) ?

⋮

Intérêt physique du rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique peut nous donner des informations sur la **composition** et la **structure** de la galaxie, sur la **distribution des sources** et sur les **processus physiques** se déroulant dans la galaxie.



Modèle de Leaky Box

Equation de diffusion (sans pertes en énergie)

$$\frac{N_i}{\tau_{\text{esc}}} + \bar{n}v\sigma_i N_i = q_i + \sum_{j>i} \bar{n}v\sigma_{ij} N_j$$

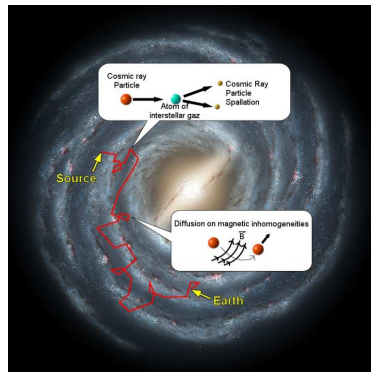
A l'équilibre : **absorption** \sim **production**

$$\frac{N}{\tau_{\text{esc}}} = q$$

$$N \propto E^{-\gamma}, \quad \tau_{\text{esc}} \propto E^{-\delta}, \quad q \propto E^{-\alpha}$$

$$\Rightarrow \gamma = \alpha + \delta$$

La détermination d'un paramètre entraîne la détermination de l'autre !





Modèle de Leaky Box

Equation de diffusion (sans pertes en énergie)

$$\frac{N_i}{\tau_{\text{esc}}} + \bar{n}v\sigma_i N_i = q_i + \sum_{j>i} \bar{n}v\sigma_{ij} N_j$$

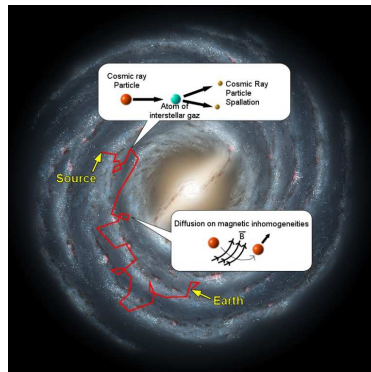
A l'équilibre : **absorption** \sim **production**

$$\frac{N}{\tau_{\text{esc}}} = q$$

$$N \propto E^{-\gamma}, \quad \tau_{\text{esc}} \propto E^{-\delta}, \quad q \propto E^{-\alpha}$$

$$\Rightarrow \gamma = \alpha + \delta$$

La détermination d'un paramètre entraîne la détermination de l'autre !



Rapports secondaires sur primaires

Information sur la **matière traversée**
 λ_{esc} à partir des rapports
 secondaires sur primaires :

$$\frac{S}{P} \propto \tau_{\text{esc}} \propto \lambda_{\text{esc}}$$

Test sensible des modèles de
 propagation par le **rapport B/C** :

$$\lambda_{\text{esc}}^{B/C} \propto R^{-\delta}$$

Identification de l'indice spectral δ
 possible (par un fit) à partir des
 énergies $E_k > 10^2 \text{ GeV/n}$

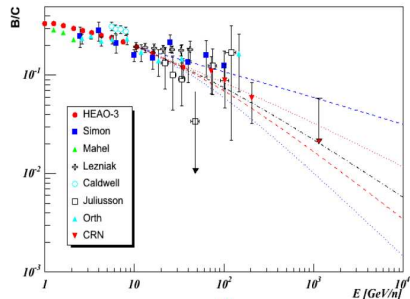


FIG.: Données du rapport B/C (points) et calculs (lignes) pour des indices spectraux de $\delta = 0.3, 0.46, 0.6, 0.7$ et 0.85 [A. Castellina & F. Donato, *Astroparticle Physics*, 24 (2005) 146]



Plan

- 1 Rayonnement cosmique
- 2 CherCam, un détecteur Čerenkov pour CREAM
- 3 Propagation du rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre
- 4 Propagation du rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire
- 5 Conclusion



L'expérience Cosmic Ray Energetics And Mass

Expérience en ballon :

Mesure directe du rayonnement cosmique

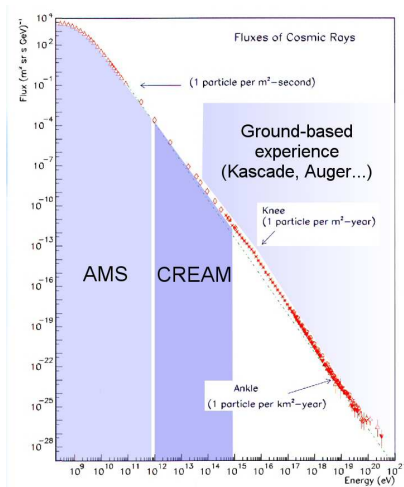
Gamme d'énergie :

10^{12} à 10^{15} eV

Objectifs :

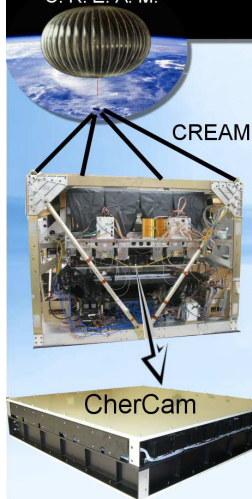
Mesure des flux des éléments du rayonnement cosmique (H à Fe)

- Etude de la propagation du rayonnement cosmique
- Recherche d'une coupure en éléments du rayonnement cosmique avant le genou
- Calibration des détecteurs de grande surface



C. R. E. A. M.

The CherCam Detector



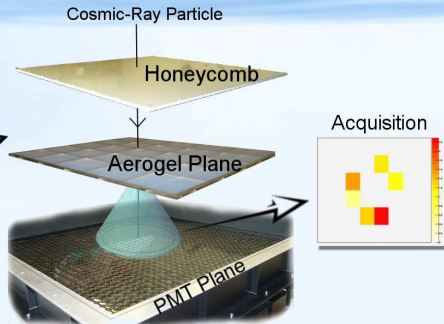
CREAM → 6 subdetectors
(measurement of the charge, the energy...)

CherCam, one of the subdetectors, measures the charge

→ based on the Čerenkov effect:
Photons generated in the aerogel are
detected by photomultiplier tubes

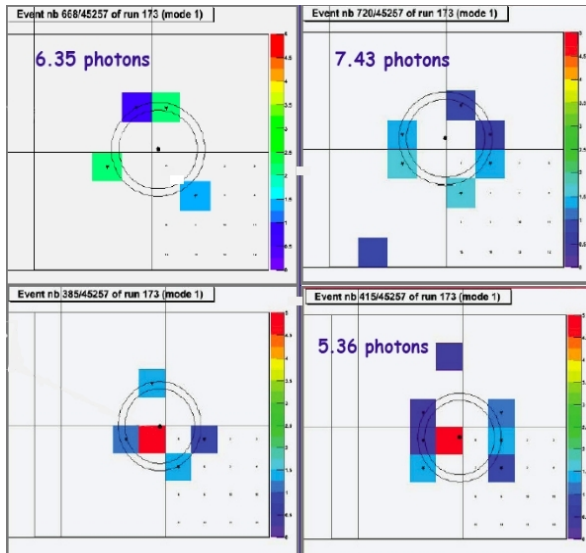
Determination of the particle charge Z :

→ The photon number in the light cone is **proportional to Z^2**





Quelques événements





Plan

- 1 Rayonnement cosmique
- 2 CherCam, un détecteur Čerenkov pour CREAM
- 3 Propagation du rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre**
- 4 Propagation du rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire
- 5 Conclusion



Problématique

Interaction du rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre :

- Absorption
- Production des gerbes de particules

Altitude d'une expérience en ballon est ~ 40 km, ce qui correspond à une épaisseur de matière traversée de ~ 5 g/cm² :

- **Absorption**
- **Fragmentation** des noyaux lourds en noyaux plus légers

Formulation de la problématique

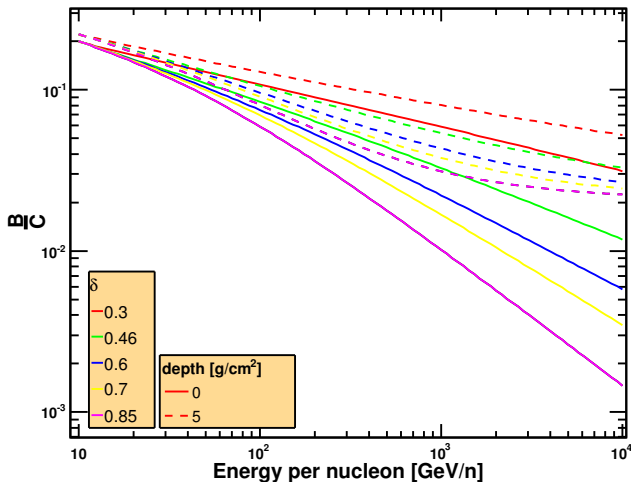
Les mesures des flux secondaires du rayonnement cosmique interstellaire sont influencées par la **production supplémentaire des particules secondaires** dans l'atmosphère terrestre.



B/C atmosphérique

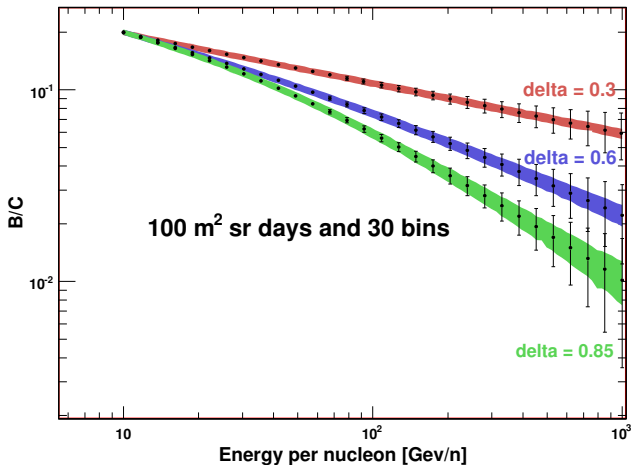
[A. Putze et al, ICRC 2007 Proceedings, Merida (Mexico), 0888]

B/C in the atmosphere



 Estimation de l'erreur systématique

[A. Putze et al, ICRC 2007 Proceedings, Merida (Mexico), 0888]

Error study



Plan

- 1 Rayonnement cosmique
- 2 CherCam, un détecteur Čerenkov pour CREAM
- 3 Propagation du rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre
- 4 Propagation du rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire
- 5 Conclusion



Modèles de propagation

Absence d'une théorie définitive expliquant la nature de la propagation du rayonnement cosmique

⇒ Utilisation des modèles semi-empiriques

Modèles semi-empiriques

Modèle de Leaky Box, Modèle de Diffusion à une et à deux dimensions, Weighted Slab Model, ...

Paramètres

δ , λ_0 , D , R_0 , V_a , V_c , D_d , D_h , ...

⇒ Nécessité de contraindre les modèles et les paramètres

Collaboration avec des théoriciens du LPNHE et du LAPTH



Modèles de propagation

Absence d'une théorie définitive expliquant la nature de la propagation du rayonnement cosmique

⇒ Utilisation des modèles semi-empiriques

Modèles semi-empiriques

Modèle de Leaky Box, Modèle de Diffusion à une et à deux dimensions, Weighted Slab Model, ...

Paramètres

δ , λ_0 , D , R_0 , V_a , V_c , D_d , D_h , ...

⇒ Nécessité de contraindre les modèles et les paramètres

Collaboration avec des théoriciens du LPNHE et du LAPTH



Approche bayésienne et chaînes de Markov

But :

Détermination des densités de probabilité des paramètres de propagation

Outil :

Markov Chain Monte Carlo (MCMC)

Algorithme de Metropolis-Hastings

Comment ça marche (version simplifiée) :

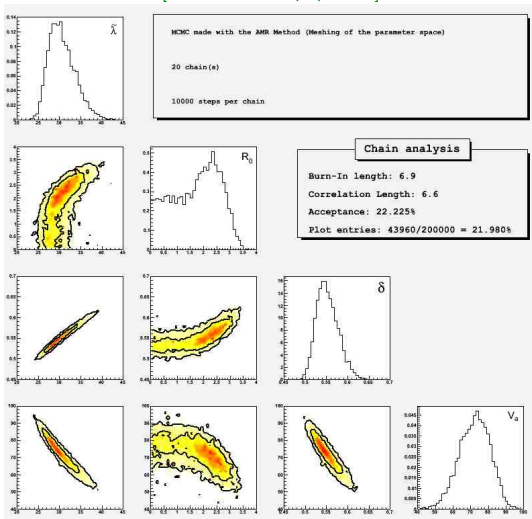
- Echantillonnage et exploration de l'espace des paramètres avec des chaînes de Markov
- Temps passé dans une région par une chaîne de Markov \propto la densité de probabilité cherchée

⇒ Pour un bin donné il faut seulement compter les entrées dans les chaînes de Markov pour cette valeur !



Résultats préliminaires

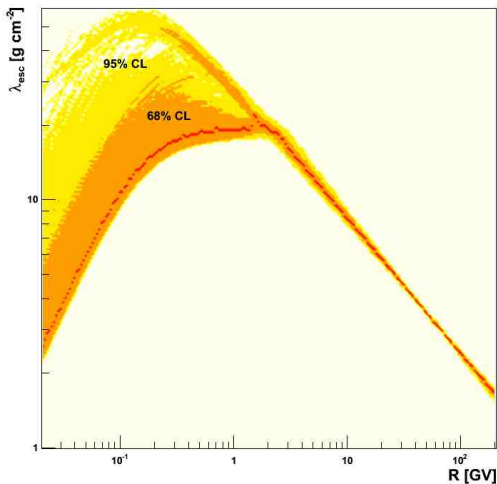
[A. Putze et al, in preparation]





Résultats préliminaires : λ_{esc}

[A. Putze et al, in preparation]





Plan

- 1 Rayonnement cosmique
- 2 CherCam, un détecteur Čerenkov pour CREAM
- 3 Propagation du rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre
- 4 Propagation du rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire
- 5 Conclusion



Conclusion

Rayonnement cosmique :

- Etude du rayonnement cosmique = étude de tous les **noyaux**
- **Rapports secondaires sur primaires** sont un test sensible pour les modèles de propagation

Rayonnement cosmique dans l'atmosphère terrestre :

- **Influence non-négligable** de la production supplémentaire de noyaux secondaires dans l'atmosphère terrestre
- **Estimation des erreurs systématique et statistique**

Contraintes des paramètres de propagation :

- **Reproduction des résultats physiques attendus**, compatibles avec d'autre valeurs existantes
- **Exclusion** de l'indice spectral de Kolmogorov $\delta = 1/3$ pour le modèle de Leaky Box avec et sans réaccélération



Perspectives I

Interaction du rayonnement cosmique :

- Interaction du rayonnement cosmique dans le détecteur
⇒ **Simulation** du détecteur CREAM
- **Création d'un logiciel plus performant utilisable par d'autres expériences**

Contraintes des paramètres de propagation :

- Etude des **modèles de diffusion dépendant de la zone**, parce que récemment il a été montré que ces modèles peuvent affecter les flux exotiques estimés de façon considérable ([[astro-ph/0612714](#)])
- Utilisation de **données expérimentales nouvelles et plus précises** pour les rapports secondaires sur primaires B/C et Sc+V+Ti/Fe de PAMELA, AMS et CREAM pour l'analyse MCMC



Perspectives II

Analyse des données du vol de CREAM en décembre 2007

