

Exercices Astroparticules

EOOS-105

ISAE-SUPAERO

Luigi Tibaldo

1. Densité d'énergie des rayons cosmiques

Le spectre des rayons cosmiques > 1 GeV est décrit approximativement par l'expression suivante

$$J_p = \frac{dN_p}{dt dS d\Omega dE_p} = 2 \times \left(\frac{E_p}{1 \text{ GeV}} \right)^{-2.7} \text{ protons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ GeV}^{-1}.$$

Calculer leur densité volumique d'énergie en sachant que le flux de particules est à peu près isotrope.

2. L'anomalie Li-Be-B

Dans les rayons cosmiques on trouve un rapport Li-Be-B/C-N-O $\simeq 0.25$. En déduire le grammage (densité de colonne) d'hydrogène avec lequel les rayons cosmiques ont interagi avant d'arriver dans le système solaire. Utiliser les sections efficaces suivantes :

$$\begin{aligned} \text{CNO} + \text{H} &\rightarrow X & \sigma_p &= 239 \text{ mbarn} \\ \text{LiBeB} + \text{H} &\rightarrow X & \sigma_s &= 161 \text{ mbarn} \\ \text{CNO} + \text{H} &\rightarrow \text{LiBeB} + X & \sigma_{sp} &= 84 \text{ mbarn} \end{aligned}$$

où nous rappelons que $1 \text{ mbarn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Guide pour la solution

Nous faisons l'hypothèse que à l'origine le matériel dont sont issus les rayons cosmiques rassemble à celui du système solaire : Li-Be-B sont négligeables par rapport à C-N-O. Nous appelons donc les noyaux du groupe C-N-O noyaux primaires. Pendant la propagation les noyaux primaires sont détruits dans des collisions inélastiques avec l'hydrogène. L'évolution du nombre de primaires n_p en fonction de la distance parcourue l peut se décrire par l'équation

$$\frac{dn_p}{dl} = -\frac{n_p}{\lambda_p}$$

où

$$\lambda_p = \frac{1}{n_H \cdot \sigma_p}$$

est la distance moyenne de désintégration des primaires avec n_H densité de l'hydrogène cible. Li-Be-B sont produits essentiellement dans les désintégrations des primaires, et ensuite ils sont aussi sujets à des collisions qui les font disparaître. L'évolution du nombre de secondaires n_s pourtant peut se décrire par l'équation

$$\frac{dn_s}{dl} = \frac{n_p}{\lambda_{sp}} - \frac{n_s}{\lambda_s}$$

où nous avons défini également la distance moyenne de production d'un secondaire par les interactions des primaires λ_{sp} et la distance moyenne de désintégration des secondaires λ_s . Trouver la solution de ce système d'équations différentielles couplées ...

3. **Energie seuil pour la production de particules dans les interactions des protons cosmiques**

Pendant leur propagation les protons cosmiques sont sujets à des collisions qui peuvent produire des nouvelles particules. Calculer l'énergie seuil (énergie minimale) que un proton (masse $1 \text{ GeV}/c^2$) doit avoir pour produire :

- un pion neutre π^0 (masse $135 \text{ MeV}/c^2$) en interagissant avec un proton à repos ;
- un Δ^+ (masse $1.23 \text{ GeV}/c^2$) en interagissant avec un photon du fond diffus cosmologique (température 2.7 K) qui se propage dans la direction opposée à celle du proton.

4. **Les muons atmosphériques**

Les interactions des rayons cosmiques dans l'atmosphère produisent des nombreux pions. Trouver la distance moyenne parcourue par un pion d'énergie 1 GeV avant de décroître dans le processus

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

et déterminer l'énergie maximale du muon produit dans la désintégration du pion. Trouver ensuite la distance moyenne parcourue par le muon avant de décroître. Valeurs : masse du pion $140 \text{ MeV}/c^2$, vie moyenne du pion 26 ns , masse du muon $106 \text{ MeV}/c^2$, vie moyenne du muon $2.2 \mu\text{s}$.