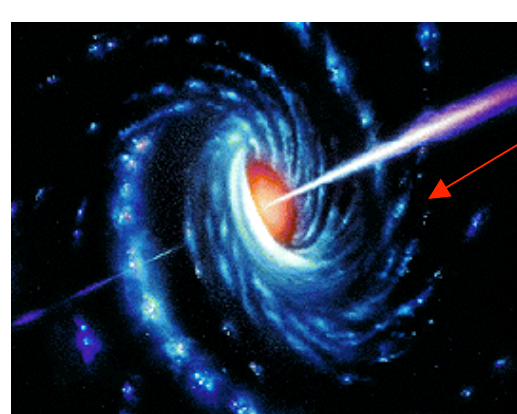




Les objets

Extraction de l'énergie



Accélération

Interaction avec la matière



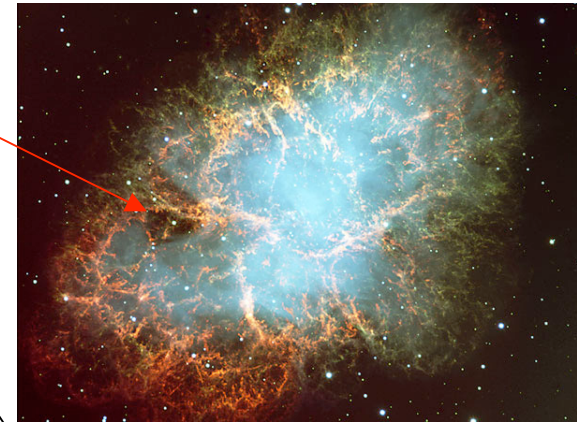
Propagation

Interaction avec la matière



Détection

Interaction avec la matière



Les objets

**Les mêmes phénomènes
Physiques se retrouvent à
toutes les étapes du
voyage des rayons cosmiques
vers la Terre**



Cours N°2 : Les rayons cosmiques

- Objectifs astroparticules des sources à la détection

- Cours essentiellement orienté vers l'astronomie gamma

- Cours Denis Dumora

- Les premiers concepts

- Les rayons cosmiques

- Découverte

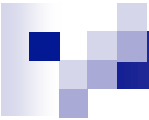
- Données observationnelles

- Paramètres pertinents

- Problèmes liés à la propagation depuis les sources

- Processus physiques conduisant à des photons de Haute Energie

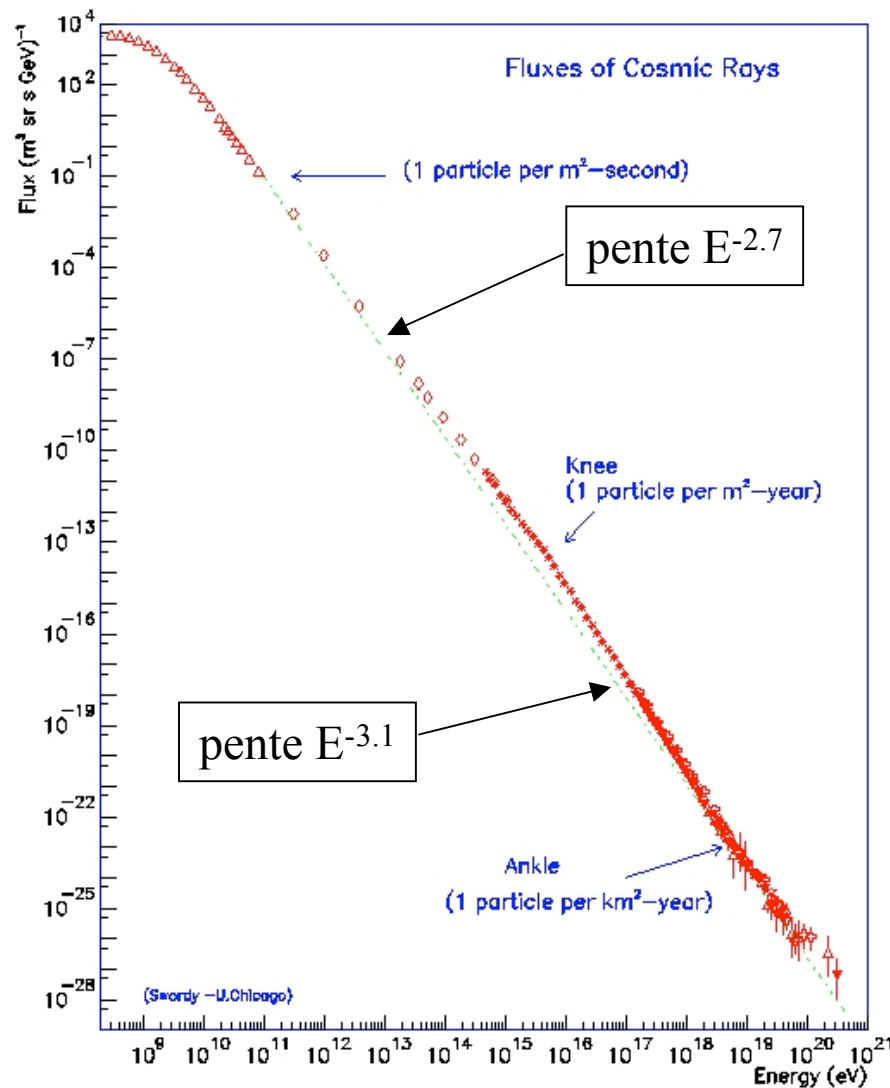
- Observation des gamma de Haute Energie, techniques et résultats



Le rayonnement cosmique

- Le rayonnement cosmiques en quelques données
 - Sur Terre, environ 1000 particules par m² et par seconde.
 - Le terme rayons cosmiques est réservé aux particules chargées
 - Essentiellement des noyaux pour la haute énergie (90%p, 9%He...)
 - Particules pour la plupart ultra-relativistes
 - Jusqu'à 10²¹eV soit l'énergie cinétique d'une balle de tennis au service!!!!
- Historique
 - Premiers indices fin du XVIII^{ème} siècle, décharge d'objets isolés.
 - Fin du XIX^{ème}, Wilson hypothèse d'un rayonnement extérieur à la Terre
 - **1912** V. Hess mesure une augmentation du rayonnement ionisant avec l'altitude
 - Les années 30, l'âge d'or découverte du monde des particules par l'étude du RC.

Données observationnelles : flux



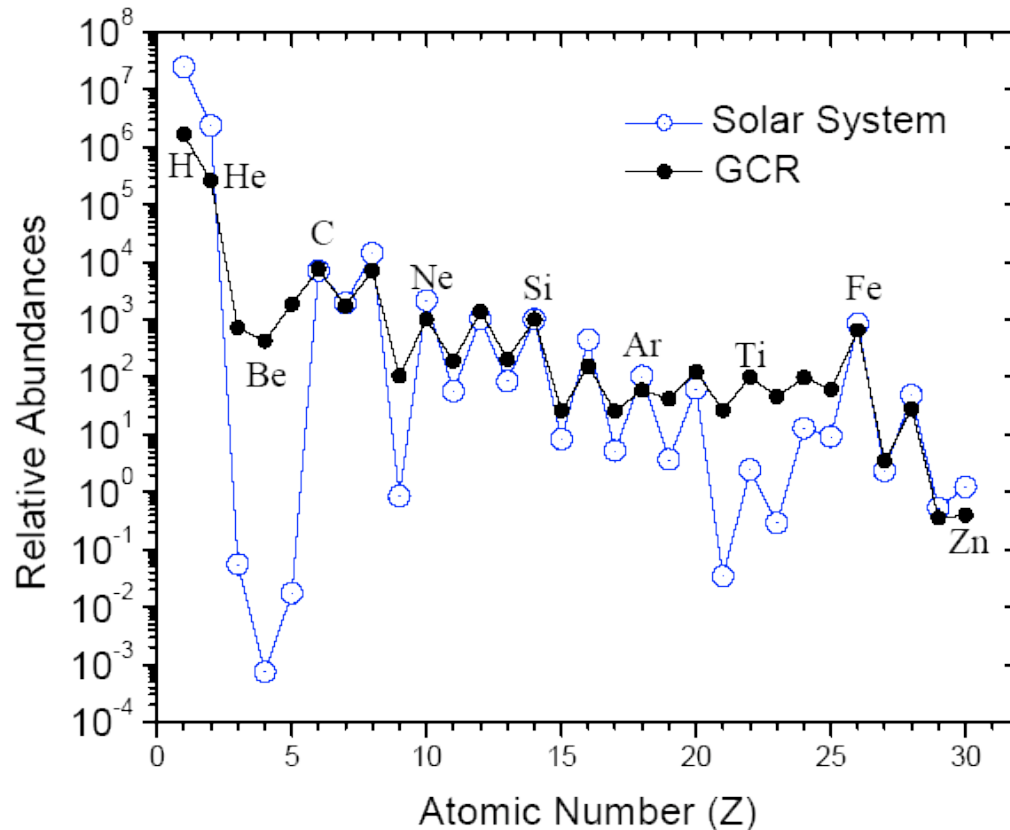
- Flux observé pour tous les primaires

Galactique: Supernovae

Galactique?, Étoiles à neutrons, super bulles, particules réaccélérées

Extragalactique?;
source?, composition?

Données observationnelles : composition



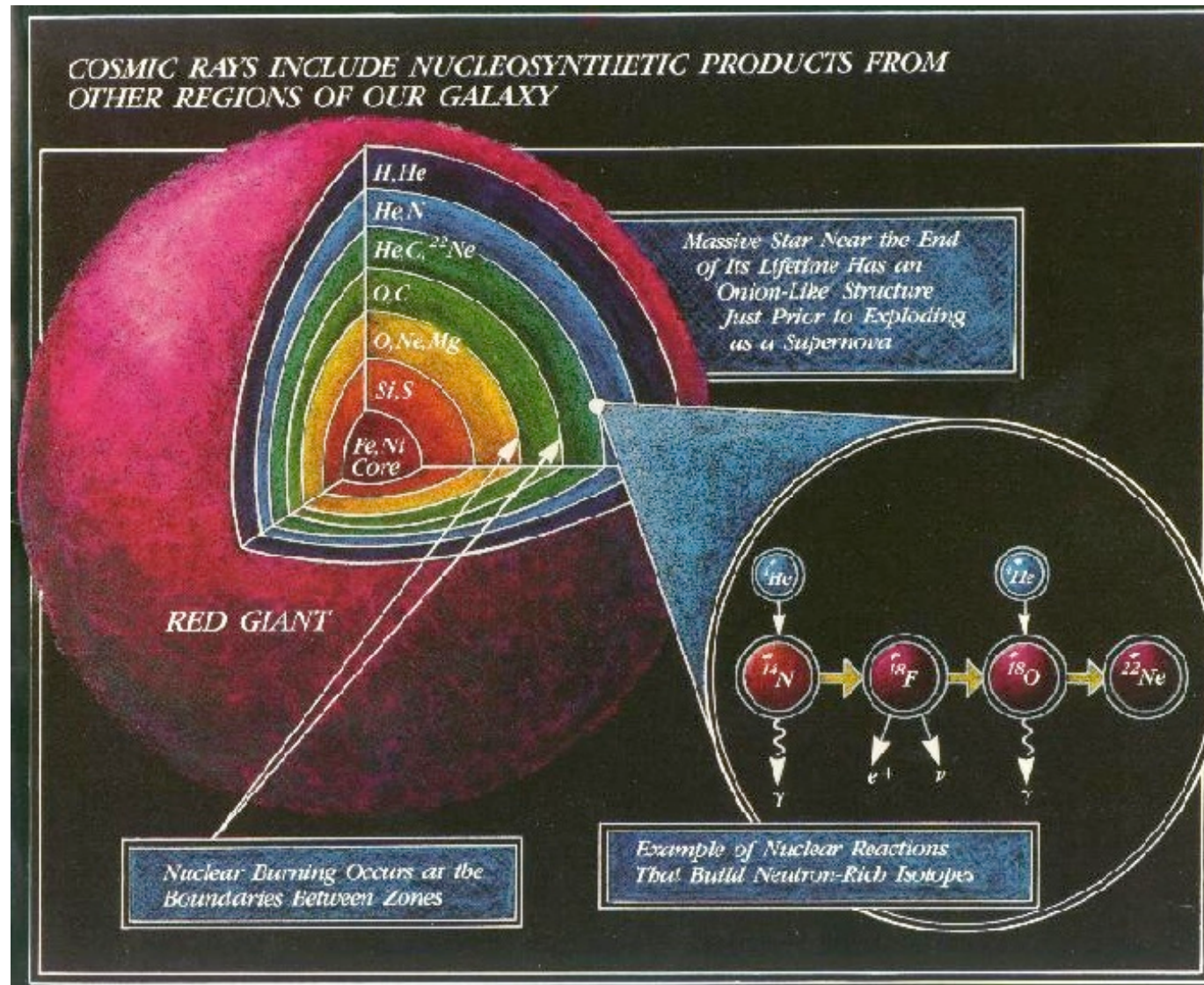
○ Abondance dans le système solaire

● Composition du rayonnement cosmique

■ La composition du rayonnement cosmique diffère de celle trouvée dans le système solaire

- Alternance pair-impair
- Mais le RC contient des éléments pratiquement absents dans le système solaire
- Il faut donc imaginer un processus qui modifie la composition initiale du rayonnement cosmique

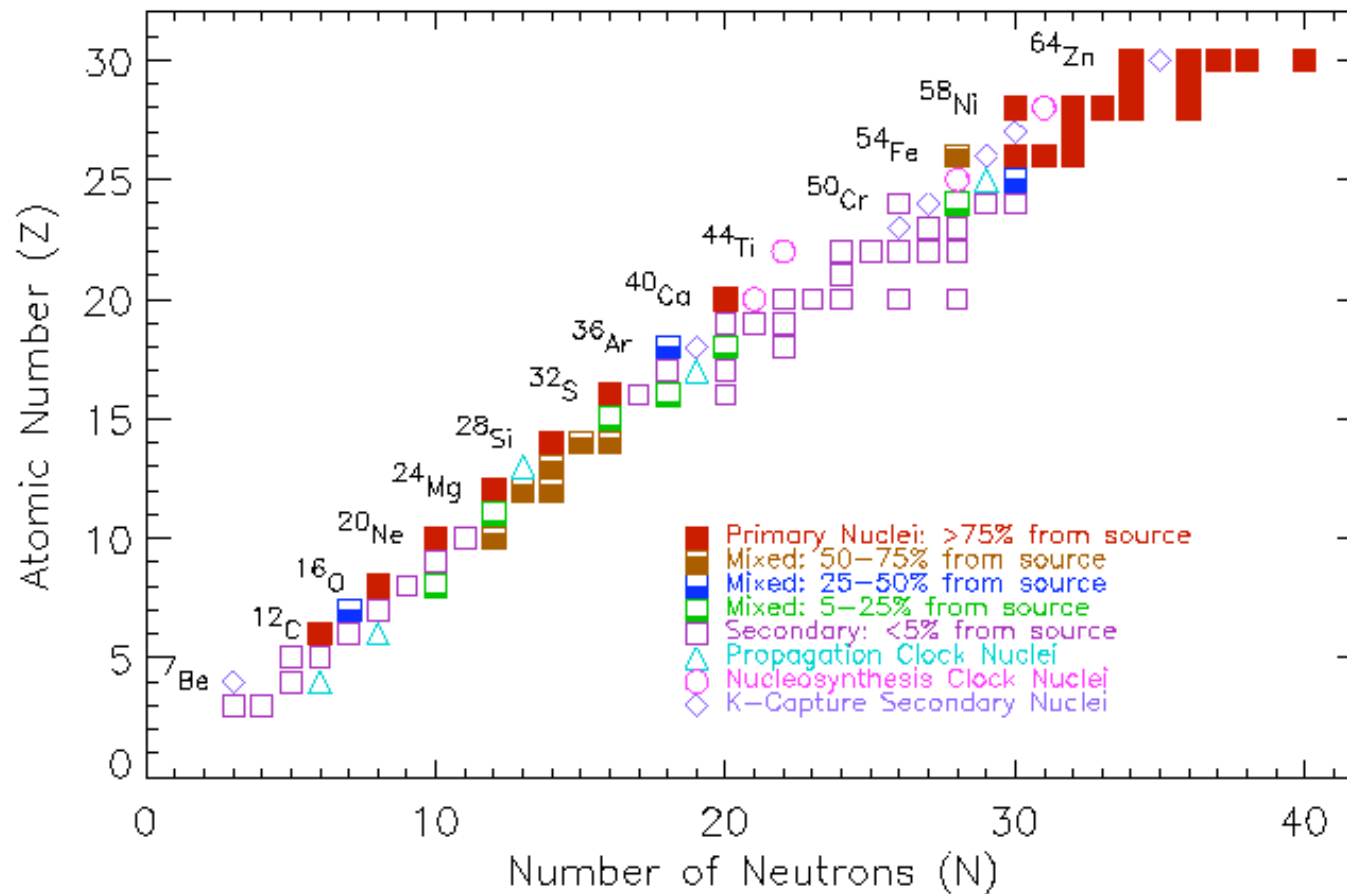
Le rayonnement cosmique



Les sources de
noyaux

Le rayonnement cosmique

- L'hypothèse du rayonnement primaire retravaillé par spallation



Le grammage

- Les rayons cosmiques interagissent dans le milieu interstellaire et forment de nouvelles espèces.
- La mesure des rapports d'abondance primaire/secondaire permet de mesurer la quantité de matière traversée
- C'est le grammage exprimé en $g.cm^{-2}$

- Estimation du grammage

$$\frac{dN_p}{dx} = -\frac{\sigma_p}{m} N_p$$

pour un primaire

$$\frac{dN_s}{dx} = +\frac{B(p \rightarrow s)\sigma_p}{m} N_p - \frac{\sigma_s}{m} N_s$$

pour un secondaire



Calculons

$$N_s/N_p$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \left\{ \exp\left(\frac{\sigma_s}{m}x - \frac{\sigma_p}{m}x\right) - 1 \right\} \frac{N_p^0 B(p \rightarrow s)\sigma_p}{\sigma_s - \sigma_p}$$

pour un noyau
léger

$$x = 5g.cm^{-2}$$

$$x = 2g.cm^{-2}$$

pour un noyau
lourd

Distribution des grammages

- Valeurs mesurées sont des grammages moyens
- $P_0(x)$ (Path Length distribution) probabilité qu'un RC arrivant sur Terre ait traversé un grammage x .

$$\mathcal{P}_\sigma(x) = \mathcal{P}_0(x) \exp\left(-\frac{\sigma x}{m}\right)$$

- avec σ section efficace de spallation.

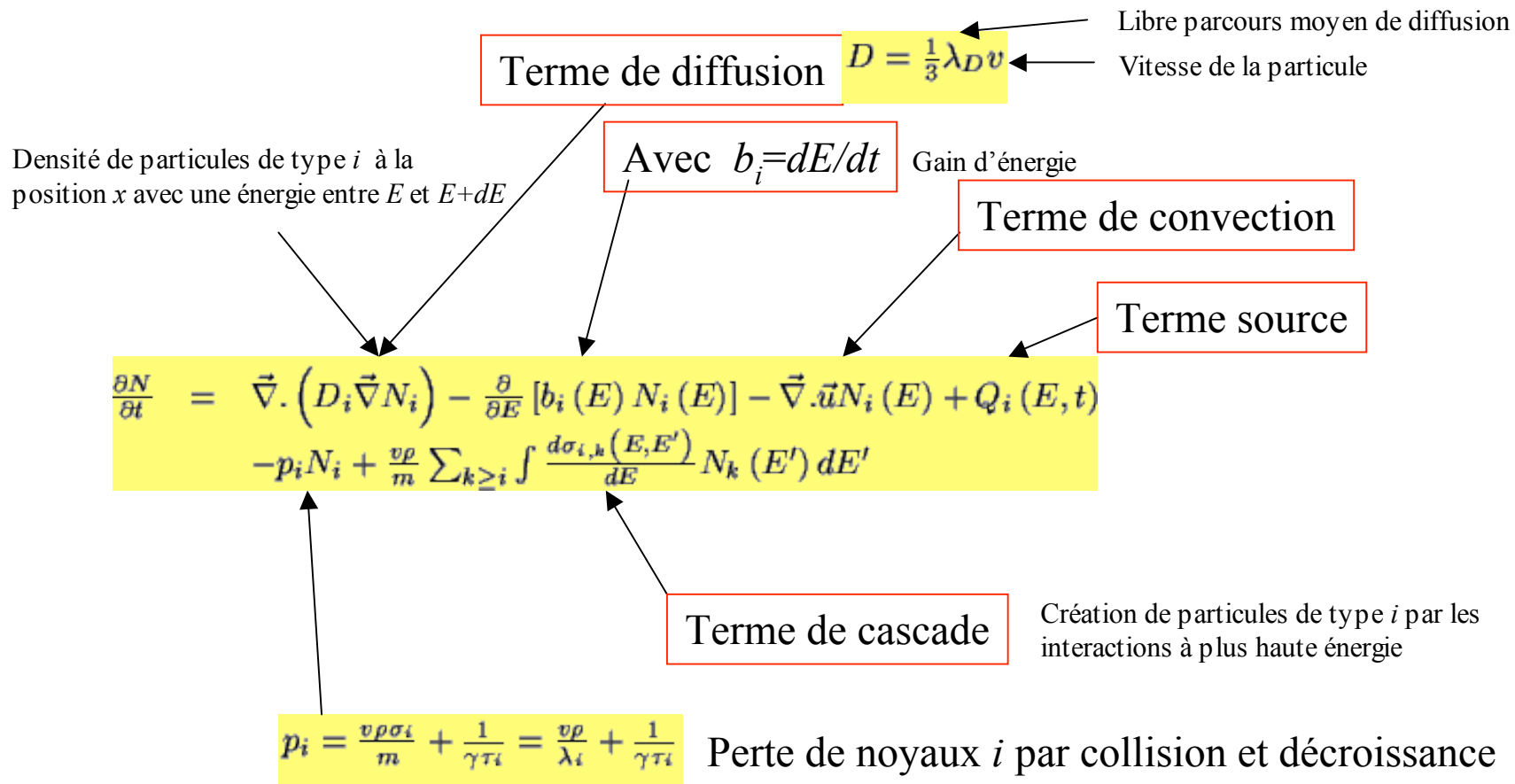
Donc $\bar{x} = \int_0^\infty x \mathcal{P}_\sigma(x) dx$ avec $1 = \int_0^\infty \mathcal{P}_\sigma(x) dx$

$$N_p(\sigma) = \int_0^\infty \mathcal{P}_0(x) \exp\left(-\frac{\sigma x}{m}\right) dx \times N_p(\sigma = 0)$$

- Les réactions de spallation affectent la densité des rayons cosmiques
- Les conséquences de observations
 - RC confinés
 - (distance caractéristique parcourue dans la Galaxie(grammage) $\gg$ rayon de la Galaxie)
 - RC peuvent s'échapper
 - (distance parcourue dans la Galaxie avant spallation $\gg$ rayon de la Galaxie)

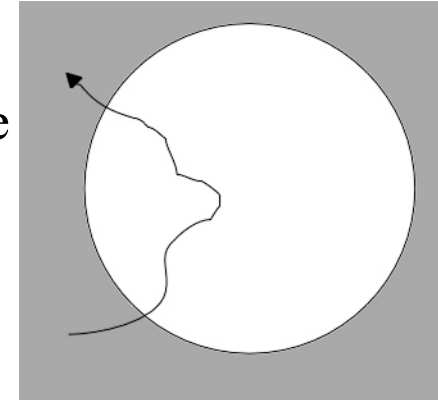
Propagation des Rayons Cosmiques

- Mécanismes d'accélération et de propagation liés.
- Équation traitant l'ensemble du phénomène (Ginzburg, Syrovatskii)



Propagation des Rayons Cosmiques – Leaky Box

- Modèle simplifié, mais qui fonctionne.
- Le modèle Leaky Box (la boîte qui fuit) tient compte de façon simple des deux grands mécanismes relevés précédemment **confinement** et **échappement**



■ Hypothèses

- Rayons cosmiques se propageant librement dans un volume avec une proba d'échappement constante $\tau_{esc}^{-1} \ll c/h$ h demi épaisseur du disque galactique $h=100-150pc$
- Le terme de diffusion est ici $-\frac{N}{\tau_{esc}}$
- τ_{esc} temps moyen passé par le rayon cosmique dans le volume de confinement
- A l'équilibre l'équation de transport s'écrit

$$\frac{N_i(E)}{\tau_{esc}(E)} = Q_i(E) - \left(\frac{\beta c \rho}{\lambda_i} + \frac{1}{\gamma \tau_i} \right) N_i(E) + \frac{\beta c \rho}{m} \sum_{k \geq i} \sigma_{i,k}(E) N_k(E)$$

section efficace de spallation

Propagation des Rayons Cosmiques – Leaky Box

- La grandeur $\lambda_{esc} \equiv \rho \beta c \tau_{esc}$ correspond au taux moyen de matière traversé par une particule de vitesse βc
- Des observations montrent que l'on peut décrire un grand nombre de noyaux galactiques avec une λ_{esc} unique.

$$\lambda_{esc} = \beta c \rho \tau_{esc} = 10.8 g.cm^{-2} \beta \left(\frac{4}{R}\right)^\delta \quad \text{pour} \quad R > 4GV \quad \text{avec} \quad \delta = 0,6$$

$$\lambda_{esc} = 10.8 g.cm^{-2} \beta \quad \text{pour} \quad R < 4GV$$

R rigidité magnétique $B\rho = \frac{p}{Ze}$

Pour des particules ultra relativistes $R = \frac{E_{\gamma V}}{Zc}$

Conséquence : pour un primaire $\frac{N_p(E)}{\tau_{esc}(E)} = Q_p(E) - \frac{\beta c \rho}{\lambda_p} N_p(E) \Rightarrow N_p(E) = \frac{Q_p(E) \tau_{esc}(E)}{1 + \frac{\lambda_{esc}}{\lambda_p}}$

Propagation des Rayons Cosmiques – Leaky Box

- Pour des protons $\lambda \sim 55g.cm^{-2}$, on a $\lambda_{esc} \ll \lambda_p$

$$N_p(E) \sim Q_p(E) \tau_{esc}(E)$$

- Or le spectre observé est en $E^{-2.7}$ ce qui donne pour le terme source

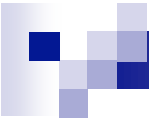
$$E^{-2.7+0.6} = E^{-2.1}$$

- Cela conforte les modèle d'accélération type Fermi

- Problème des secondaires instables

dépendance séparée en τ_{esc} et ρ


$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{\sigma_{p \rightarrow s}}{\sigma_p} \frac{\lambda_{esc}}{\lambda_p \left[1 + \frac{\lambda_{esc}}{\lambda_s} + \frac{\tau_{esc}}{\gamma \tau_s} \right]}$$



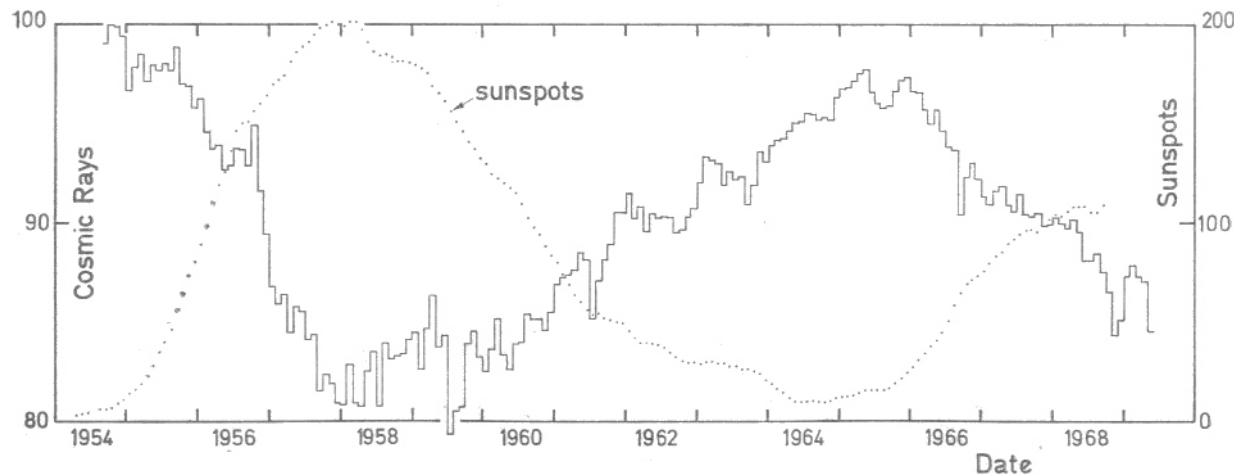
Propagation des Rayons Cosmiques – Leaky Box

■ Limitations des modèles Leaky Box

- ☐ Pas d'explication physique aux phénomènes de confinement et d'échappement
- ☐ Cependant malgré la simplicité, ils donnent de bons résultats pour les noyaux stables
- ☐ Cependant, on souhaiterait
 - déterminer l'origine des rayons cosmiques
 - savoir quelles sont les sources
 - savoir où sont les sources
 - savoir comment varie la densité de rayonnement cosmique en fonction de la position dans la Galaxie
- ☐ Pour espérer obtenir ces réponses, des modèles plus complexes sont nécessaires.
- ☐ Ce sont les modèles dits de diffusion.

Rayons Cosmiques – Coupures basse énergie

- Les rayons cosmiques basse énergie sont piégés dans le champ magnétique terrestre.
 - Le spectre apparaît donc coupé à basse énergie
- L'activité solaire modifie le spectre



Correlation of the counting rate of the Leeds neutron monitor with monthly sunspot numbers.

Rayons Cosmiques – Coupures Haute Énergie – Effet GZK

- Milieu interstellaire baigné par les photons du fond diffus cosmologique

▲ Energie caractéristique $E_\gamma = 2.5 \times 10^{-4} eV$

$$(P + p)^\mu (P + p)_\mu = (\omega + \epsilon)^2 = \epsilon_{CM}^2$$

$$N + \gamma \longrightarrow \pi + N \quad m_\pi + M_N$$

$$\omega \geq \frac{m_\pi (m_\pi + 2M_N)}{2\epsilon (1 - \cos \theta)}$$

$$\omega \sim 10^{20} eV$$

Un calcul rigoureux donne plutôt $\omega \sim 5 \times 10^{19} eV$

Rayons Cosmiques – Coupures Haute Énergie – Effet GZK

- Calcul du libre parcours des particules GZK

$$\lambda = \frac{1}{\sigma_{\pi p} N_{photons}}$$

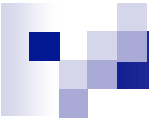
- Une application numérique raisonnable donne

$$\lambda \approx 10^{23} m \sim 3 Mpc$$

- soit une durée de propagation $\tau \approx 10^7 ans$

- perte d'énergie du projectile à chaque interaction $\gamma m_{\pi} c^2$ soit $\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{m_{\pi}}{m_p} \approx 10\%$

- Le proton a donc perdu toute son énergie au bout de $10^8 ans$ soit un horizon de $30 Mpc$



Origine des rayons cosmiques Ultra Haute Énergie

- Plus de 300 modèles, qui doivent tenter d'expliquer
 - Les flux observés
 - l'apparente isotropie
 - les multiplets d'évènements
- Deux (trois) grandes familles
- Les modèles astrophysiques (bottom-up)
 - sources : objets connus, propagation classique
 - Etoiles à neutrons, objets compacts
 - Sursauts gamma
 - radio galaxies
 - sources proches et champ magnétique intense
- Les modèles top-down
 - sources : désintégration de particules de très grande masse
 - Défauts topologiques
 - Wimpzillas
- Modèles hybrides
 - source classique, mais nouveau type de propagation