

# Rayons Cosmiques (Galactiques): détection, propriétés et origine

Yves Gallant

LUPM, CNRS/IN2P3, U. de Montpellier

OCEvU Summer Camp

# Les premières astroparticules

- ▶ le terme “rayons cosmiques” désigne conventionnellement les particules **chargées** de haute énergie en provenance de l’espace
  - ▶ RCs *hadroniques* :  $p$ ,  $\text{He}^{++}$ , autres noyaux...
  - ▶ RCs *leptoniques* :  $e^-$ ,  $e^+$
- ▶ n’inclut pas les rayons  $\gamma$  (cours de [J. Knödlseeder](#) et [J. Brégeon](#))
- ▶ ni les neutrinos (cours d’[A. Enzenhöfer](#))

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission  $\gamma$  diffuse

Composition des RCs

Confinement des RCs

Cosmic-ray electrons (and  $e^+$ )

# Découverte des rayons cosmiques (I)

- ▶ décharge d'électroscopes : rayonnement ionisant dans l'air
- ▶ H. Becquerel, M. Skłodowska Curie (1896) : découverte de la radioactivité (très ionisante : radioactivité terrestre)

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission  $\gamma$  diffuse

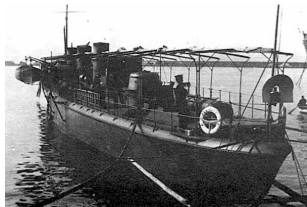
Composition des RCs

Confinement des RCs

Cosmic-ray  $e^{\pm}$



D. Pacini avec un électroscope

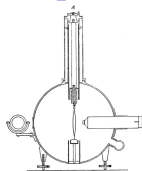


cacciatorpediniere *Fulmine*

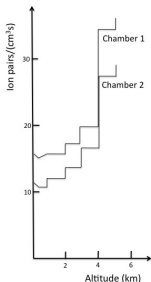
- ▶ Domenico Pacini (1910) : ionisation même en mer  
⇒ autre source que radioactivité terrestre
- ▶ Pacini (1911) : ionisation moindre 3 m sous l'eau  
⇒ rayons pénétrants dans l'atmosphère

# Découverte des rayons cosmiques (II)

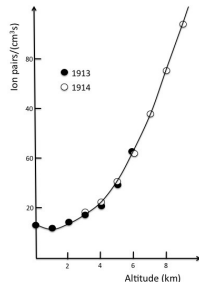
- ▶ Th. Wulf (1909) : électroscope précis et robuste
- ▶ mesures sur la Tour Eiffel (300 m) : ionisation comparable au sol



V. Hess dans sa nacelle



mesures de Hess



de Kolhörster

- ▶ Victor Hess (1912) : mesures en ballon  $\Rightarrow$  origine cosmique
- ▶ W. Kolhörster : confirmation jusqu'à une altitude de 9 km (niveau typique de rayonnement ionisant en avion)

# Gerbes atmosphériques de rayons cosmiques

## LES GRANDES GERBES DE RAYONS COSMIQUES

PAR PIERRE AUGER, ROLAND MAZE, PAUL EHRENFEST JR, ANDRÉ FRÉON.

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

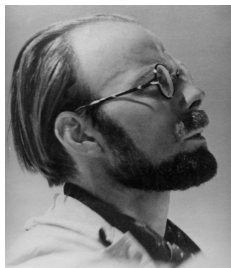
Émission  $\gamma$  diffuse

Composition des RCs

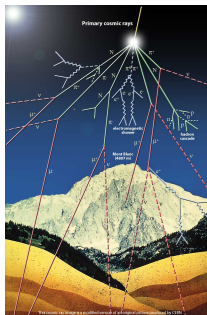
Confinement des RCs

Cosmic-ray  $e^{\pm}$

**Sommaire.** — Les coïncidences entre des compteurs de Geiger-Muller, placés à des distances de plusieurs mètres ont pu être décelées et ont conduit à mettre en évidence l'existence de très grandes gerbes de rayons cosmiques dans l'atmosphère. Les caractères de ces gerbes sont étudiés dans des laboratoires de haute montagne et à Paris. Ils conduisent à voir dans ces gerbes des cascades de Bhabha-Heitler, produites par des électrons d'énergie très élevée atteignant  $10^{14}$  eV. Une composante pénétrante qui pourrait contenir des neutrons est également mise en évidence dans ces gerbes.



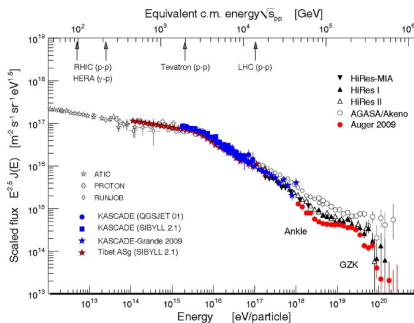
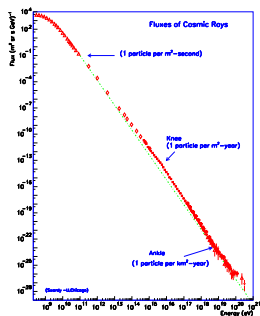
P. Auger (1935)



- ▶ Auger et al. (1939) : coïncidences (à  $5 \mu\text{s}$  près) entre détections jusqu'à 75 m de distance (Pic du Midi, Jungfraujoeh)
- ▶ énergie du rayon cosmique primaire  $\lesssim 10^{14}$  eV (= 160.2 erg)

# Spectre en énergie des rayons cosmiques

- ▶ plus de 12 ordres de grandeur en énergie, et de 30 en flux
- ▶ particules *relativistes*, distribution en énergie *non-thermique*
- ▶ lois de puissance  $dN/dE \propto E^{-\Gamma}$ ,  $\Gamma \approx 2.7$  entre  $10^{10}$  et  $10^{15}$  eV
- ▶ cassures : “genou” à  $3 \times 10^{15}$  eV, “cheville” à  $3 \times 10^{18}$  eV



- ▶ particules primaires ( $p$ ,  $\text{He}$ ,  $e^-$ , ...) incidentes sur l’atmosphère
- ▶ mesures directes (ballons, satellites, AMS) jusqu’à  $\sim 10^{14}$  eV
- ▶ au-delà, réseaux de détecteurs au sol des gerbes atmosphériques (incertitudes systématiques des modèles d’interactions hadroniques)

# Énergie et confinement des rayons cosmiques

- ▶ particule chargée dans champ magnétique : orbite hélicoïdale avec rayon de gyration (de Larmor) relativiste

$$r_L \equiv \frac{m\gamma v c}{qB} \sin \alpha \approx \frac{E}{ZeB} \approx \frac{0.3 \text{ pc}}{Z} \left( \frac{E}{\text{PeV}} \right) \left( \frac{3\mu\text{G}}{B} \right)$$

## Exclusion des rayons cosmiques de l'héliosphère

- ▶ pour  $E = 1 \text{ TeV}/Z$ ,  $B = 10 \mu\text{G}$  (vent solaire),  $r_L \approx 20 \text{ AU} \Rightarrow$  rayons cosmiques avec  $E \ll 1 \text{ TeV}$  significativement déviés
- ▶ rayons cosmiques avec  $E \lesssim 1 \text{ GeV}$  “repoussés” par fluctuations magnétiques dans le vent solaire : *modulation solaire*

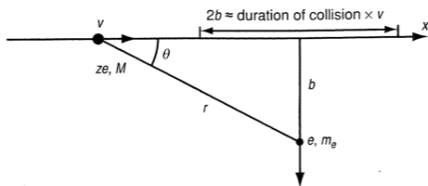
## Confinement des rayons cosmiques dans la Galaxie

- ▶ pour  $E = 3 \times 10^{18} \text{ eV}$ ,  $B = 3 \mu\text{G}$  (MIS),  $r_L \approx 1 \text{ kpc} \Rightarrow$  rayons cosmiques au-delà de la “cheville” pas significativement déviés
- ▶  $E \gtrsim 3 \times 10^{18} \text{ eV}/Z$  : cosmiques d’ultra-haute énergie (UHECR)
- ▶ directions  $\sim$ isotropes : UHECRs d’origine extra-galactique
- ▶ en-deça, diffusion dans le champ magnétique galactique



# Ionisation : interaction avec un électron

- ▶ particule énergétique de vitesse  $V$ , de charge  $Ze$  et de masse  $M$ , passant à une distance  $b$  ( $\equiv$  paramètre d'impact) d'un électron considéré au repos
- ▶ transfert d'énergie faible  $\Rightarrow$  trajectoire approximée rectiligne



$$F_{\perp} = \frac{Ze^2}{r^2} \sin \theta ; \quad dt = \frac{dx}{V} \quad \Rightarrow$$

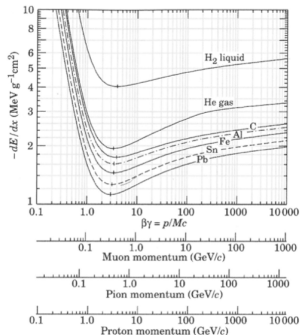
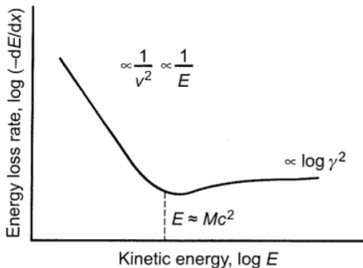
$$\int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp} dt = \frac{2Ze^2}{bV} = \Delta p_e \quad \Rightarrow \quad \Delta E = \frac{2Z^2 e^4}{m_e b^2 V^2}$$

# Ionisation et détection des rayons cosmiques

- ▶ formule de Bethe-Bloch (traitement quantique relativiste) :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z^2 e^4 n_e}{m_e V^2} \left[ \ln \left( \frac{2\gamma^2 m_e V^2}{\bar{I}} \right) - \frac{V^2}{c^2} \right]$$

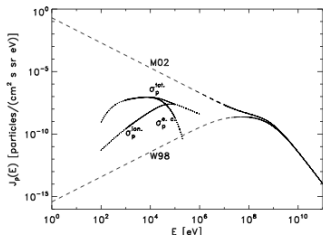
- ▶  $\propto 1/V^2$  à basse énergie,  $\propto \ln \gamma^2$  à énergies relativistes



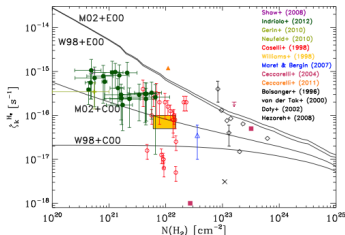
- ▶ dépend uniquement de  $V$  et de  $Z$  (pas de la masse  $M$ )
- ▶ permet la détection des rayons cosmiques (notamment avec des *scintillateurs* qui émettent  $\propto -dE/dx$ )

# Ionisation dans le milieu interstellaire

- ▶ importante pour chauffage du MIS (avec SNe et UV stellaire)
- ▶ source d'ionisation dans nuages moléculaires (protégés de la photoionisation par les poussières)  $\Rightarrow$  chimie du MIS



(Padovani et al. 2009)



(Padovani et al. 2013)

- ▶ nécessite extrapolation du spectre des rayons cosmiques aux basses énergies (incertaine à cause de la modulation solaire)
- ▶ taux d'ionisation déduits dans les nuages semblent compatibles avec l'extrapolation de Moskalenko et al. (2002)

# Bremsstrahlung

- ▶ rayonnement d'une charge accélérée dans le potentiel coulombien d'une autre charge
- ▶ principal processus de perte d'énergie pour un électron relativiste dans une cible dense
- ▶ de l'allemand *Brems-* (freinage) et *-strahlung* (rayonnement)
- ▶ considérerons principalement le cas d'une particule énergétique (relativiste dans le cas général)
- ▶ milieu ambiant implicitement supposé ionisé (plasma)

# Régime quantique (non-relativiste)

► principe d'incertitude de Heisenberg :  $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$

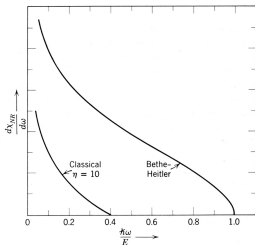
►  $\Delta p_{z,\max} \approx m_e v \Rightarrow b_{\min}^{(q)} \approx \frac{\hbar}{m_e v}$

►  $b_{\min}^{(q)} > b_{\min}^{(c)}$  lorsque  $\frac{v}{c} > Z \frac{e^2}{\hbar c} = Z\alpha \approx \frac{Z}{137}$

$$P(\omega) \approx P_0 \ln \left( \frac{m_e v^2}{\hbar \omega} \right)$$

$$\hbar \omega_{\max} = \frac{1}{2} m_e v^2 \equiv E$$

$$\Rightarrow P_{\text{tot}} \propto Z^2 N v$$



► traitement quantique exact (Bethe-Heitler) :

$$P(\omega) = P_0 \ln \left[ \frac{(\sqrt{E} + \sqrt{E - \hbar\omega})^2}{\hbar\omega} \right]$$

# Bremsstrahlung (ultra-)relativiste

$$\blacktriangleright b_{\max}^{(c)} \approx \frac{\gamma v}{\omega'}, b_{\min}^{(q)} \approx \frac{\hbar}{m_e v} \Rightarrow \ln \left( \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right) \approx \ln \left( \frac{m_e \gamma v^2}{\hbar \omega'} \right)$$

$\blacktriangleright$  transformation de Lorentz :  $P = dE/dt = P'$  invariant  
(symétrie de l'émission dans le référentiel propre)

$$\blacktriangleright \omega = \omega' \gamma (1 + \beta \cos \theta') \Rightarrow \text{pour } \omega' \text{ donné,}$$
$$\langle \cos \theta' \rangle = 0 \Rightarrow \langle \omega \rangle = \gamma \omega' \text{ et } d\langle \omega \rangle = \gamma d\omega'$$

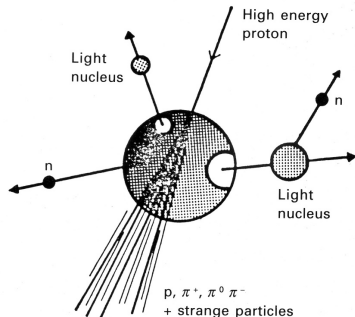
$$P(\omega) \approx \frac{16 Z^2 e^6}{3 m_e^2 c^4} N \ln \left( \frac{m_e \gamma^2 c^2}{\hbar \omega} \right)$$

$\blacktriangleright$  condition supplémentaire :  $\hbar \omega_{\max} = m_e \gamma c^2$

$$P_{\text{tot}} \approx \langle P(\omega) \rangle \omega_{\max} \propto Z^2 N \gamma$$

# Interaction hadroniques de protons relativistes

- ▶ processus électromagnétiques examinés précédemment : rayonnement des protons plus faible par facteur  $(m_e/m_p)^2$   
⇒ processus peu efficaces, généralement négligeables
- ▶ principal canal de conversion de l'énergie des protons et noyaux relativistes en rayons  $\gamma$  : interactions hadroniques puis désintégration des  $\pi^0$  produits



- ▶ principales particules secondaires :  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$  (aussi particules étranges, antinucléons...)
- ▶ en proportions  $\sim$  égales à haute énergie  $E_p$

- ▶ ( noyau résultant souvent instable : *spallation* due aux rayons cosmiques, et des rayons cosmiques )

# Spectre des $\gamma$ de désintégration de $\pi^0$

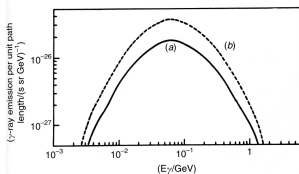
dans le référentiel propre du  $\pi^0$ ,  $E'_\gamma = \frac{m_\pi c^2}{2}$

$$E_\gamma = \gamma_\pi (E'_\gamma + \beta_\pi \cdot \mathbf{p}'_\gamma c) = \gamma_\pi \frac{m_\pi c^2}{2} (1 + \beta_\pi \cos \theta')$$

$$\Rightarrow \frac{1 - \beta_\pi}{2} < \frac{E_\gamma}{E_\pi} < \frac{1 + \beta_\pi}{2} \quad \text{ou}$$

$$\frac{m_\pi c^2}{4\gamma_\pi} < E_\gamma < \gamma_\pi m_\pi c^2 \quad \text{lorsque } \gamma_\pi \gg 1$$

isotrope dans CM :  $\frac{dN_\gamma}{d\mu'} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} = \frac{1}{E_\pi \beta_\pi}$



- ▶ maximum du spectre à  $E_\gamma = m_\pi c^2/2$
- ▶ spectre symétrique en abscisse logarithmique

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission  $\gamma$  diffuse

Composition des RCs

Confinement des RCs

Cosmic-ray  $e^\pm$



# Section efficace de production des $\pi^0$

- pour  $E_\gamma > m_\pi c^2/2$ ,

$$N(E_\gamma) = 2 \int_{E_{\min}}^{\infty} \frac{N(E_\pi)}{\sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2 c^4}} dE_\pi, \quad E_{\min} = E_\gamma + \frac{m_\pi^2 c^4}{4E_\gamma}$$

- section efficace de production de  $\pi^0$  par collisions  $p - p$  mesurée jusqu'à  $\sim 1$  TeV, modèles hadroniques au-delà :

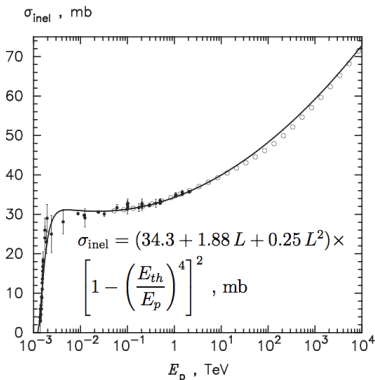
Kelner, Aharonian & Bugaykov  
(2006), *Phys. Rev. D* **74**, 034018

ajustement empirique de  
simulations avec SIBYLL

$$L \equiv \ln(E_p/\text{TeV})$$

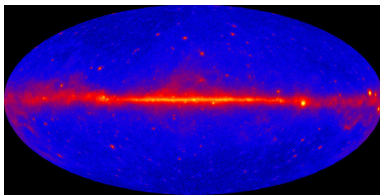
spectres de  $\pi^0$  empiriques  
donnés dans même article

- inélasticité :  $\langle E_\pi \rangle / E_p \approx 0.18$

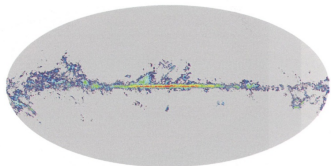


# Emission $\gamma$ galactique corrélée avec le gaz

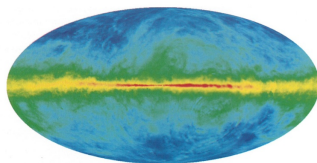
- ▶ émission diffuse de la Galaxie en rayons  $\gamma$  domine les cartes du ciel révélé par *Fermi*-LAT :



- ▶ structures corrélées avec traceurs du gaz interstellaire :



CO (Dame et al. 2001)

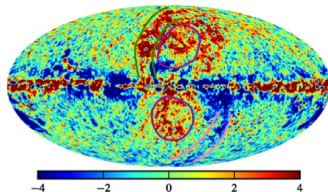
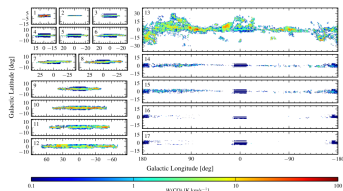
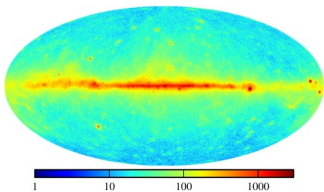
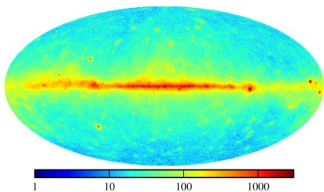


HI (21 cm)

- ▶ attendu si densité de rayons cosmiques dans la Galaxie proche de celle mesurée dans l'héliosphère (p.ex. Strong et al. 2004)

# Modélisation détaillée de l'émission $\gamma$ diffuse

- ▶ utilisant les données de *Fermi*-LAT (Ackermann et al. 2012)
- ▶ traceurs du gaz (CO, HI,  $E_{B-V}$ ), divisés en anneaux en  $R_{\text{Gal}}$



- ▶ modélisation globalement très bonne (en bas, vs. données en haut)
- ▶ résidus : structures non-modélisées (“bulles” de *Fermi*, Loop I)

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission  $\gamma$  diffuse

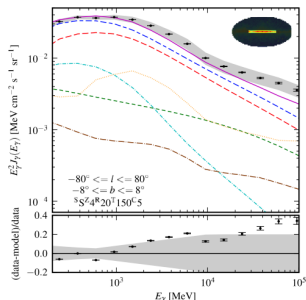
Composition des RCs

Confinement des RCs

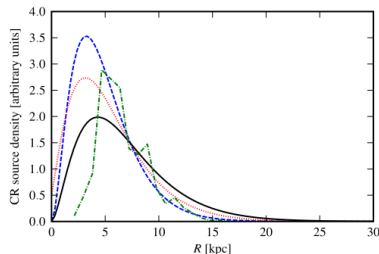
Cosmic-ray  $e^{\pm}$

# Implications pour les RCs dans la Galaxie

- ▶ **émission  $\gamma$  diffuse** des régions centrales de la Galaxie dominée par **désintégration de  $\pi^0$** , puis **Bremsstrahlung** à basse énergie et **Compton Inverse** à haute énergie



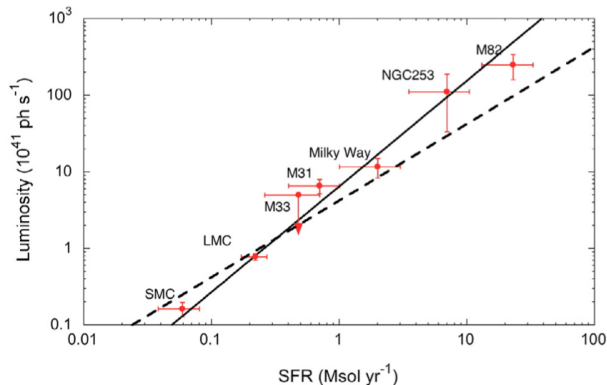
(Ackermann et al. 2012)



- ▶ distribution en  $R_{\text{Gal}}$  des sources des rayons cosmiques moins “piquée” favorisée : courbe noire (SNRs, Case & Bhattacharya 1998) plutôt que pulsars ou **étoiles OB**
- ▶ grandes valeurs de l'échelle verticale ( $z_h > 4$  kpc) et du rayon ( $R_h > 20$  kpc) du halo favorisées, surtout dans régions externes
- ▶ rayons cosmiques présents dans toute la Galaxie

# Diffuse(?) $\gamma$ -ray emission from other galaxies

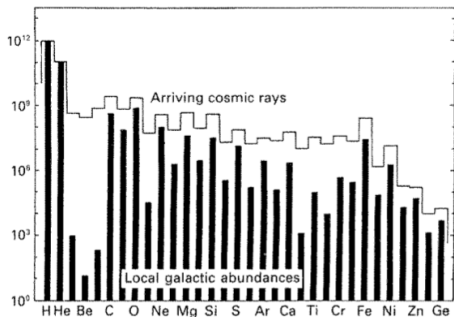
- ▶ inferred CR density comparable in Andromeda Galaxy (M31), but lower in Large and (especially) Small Magellanic Clouds
- ▶ gas tracers  $\Rightarrow$  cosmic-ray density lower in LMC and SMC
- ▶ cosmic rays at these energies are **Galactic**, not universal



(Abdo et al. 2010)

- ▶ high  $\gamma$ -ray luminosity of starburst galaxies NGC 253 and M82
- ▶ consistent with cosmic-ray production  $\propto$  massive star formation

# Composition des rayons cosmiques (hadroniques)



(Lund 1984)

- ▶ différences entre les abondances du système solaire (photosphère solaire et chondrites) et celles des rayons cosmiques :
  - ▶ beaucoup plus grande abondance de Li, Be, B
  - ▶ plus grande abondance d'éléments en-deça du Fe
  - ▶ différence pair-impair en  $Z$  moins marquée
  - ▶ plus faible abondance relative de H, He
- ▶ la plupart de ces différences s'expliquent par la *spallation*

# Primaires/secondaires et grammage rencontré

- ▶ équation de transfert simplifiée pour  $i$ , en grammage  $\xi \equiv \rho vt$  :

$$\frac{dn_i}{d\xi} = -\frac{n_i}{\xi_i} + \sum_{j>i} \frac{P_{j \rightarrow i}}{\xi_j} n_j, \quad \text{où} \quad \xi_i \equiv \frac{\langle m \rangle}{\sigma_i}$$

- ▶ approximations :

- ▶ C, N, O (groupe  $M$ ) très abondants : négliger plus lourds
- ▶ Li, Be, B (groupe  $L$ ) : densité initiale négligeable

$$\frac{dn_M}{d\xi} = -\frac{n_M(\xi)}{\xi_M} \quad ; \quad \frac{dn_L}{d\xi} = -\frac{n_L(\xi)}{\xi_L} + \frac{P_{M \rightarrow L}}{\xi_M} n_M(\xi)$$

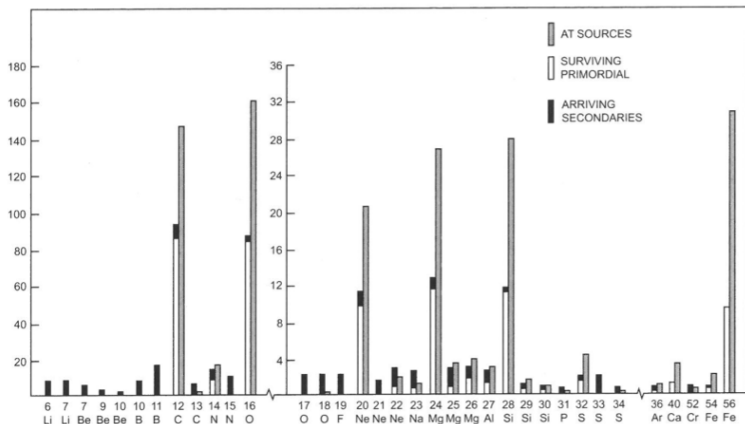
$$\Rightarrow \quad n_M(\xi) = n_M(0) \exp(-\xi/\xi_M)$$

$$\frac{n_L(\xi)}{n_M(\xi)} = \frac{P_{M \rightarrow L} \xi_L}{(\xi_L - \xi_M)} \left[ \exp\left(\frac{\xi}{\xi_M} - \frac{\xi}{\xi_L}\right) - 1 \right]$$

- ▶  $\xi_M = 6 \text{ g/cm}^2$ ,  $\xi_L = 8.4 \text{ g/cm}^2$ ,  $P_{M \rightarrow L} = 0.28$ ,  $n_L/n_M \approx 0.25$
- ▶ impliquerait un grammage rencontré typique de **4.8 g/cm<sup>2</sup>**

# Composition : primaires et secondaires

- calcul complet avec toutes les sections efficaces de spallation



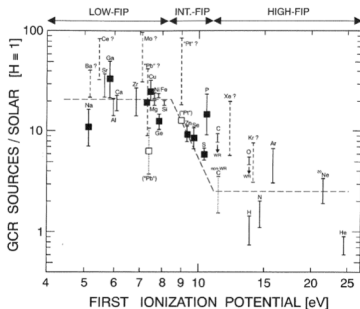
d'après Shapiro (1991) et Wefel (1991)

- permet de remonter aux abondances à la source

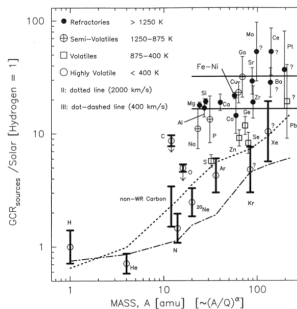


# Composition des rayons cosmiques à la source

- ▶ composition isotopique (d'un élément) peu sensible à la spallation
- ▶ surabondance de  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  ( $4\times$ ); aussi  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ ,  $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ ...
- ▶ isotopes riches en neutrons : milieu enrichi par nucléosynthèse ?



d'après Meyer et al.

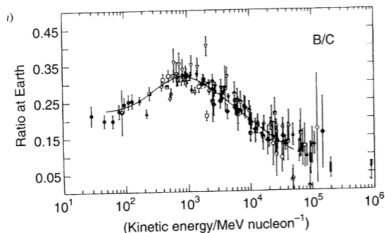


d'après Ellison et al.

- ▶ biais clair en fonction du potentiel de première ionisation (FIP) ou de la volatilité (condensation ou non dans les poussières IS)
- ▶ indication sur les biais d'injection dans l'accélération des RCs

# Secondaires radioactifs et temps de confinement

- ▶ permettent de contraindre le *temps* de confinement (ou d'échappement)  $\tau_{\text{esc}}$  (en plus du grammage  $\xi = \langle \rho \rangle V \tau_{\text{esc}}$ )
- ▶ en particulier  $^{10}\text{Be}$ , produit par spallation pour  $\sim 10\%$  du total [ $^7\text{Be} + ^9\text{Be} + ^{10}\text{Be}$ ]; décroît en  $^{10}\text{B}$  avec  $\tau_{\text{rad}} = 1.51 \times 10^6$  ans
- ▶ fraction observée  $2.8\% \Rightarrow \tau_{\text{esc}} \approx 10^7$  ans,  $\langle n \rangle \approx 0.3 \text{ cm}^{-3}$

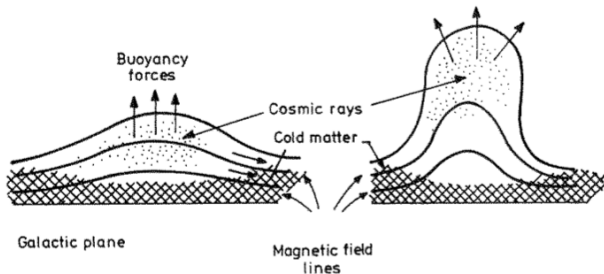


- ▶  $\xi$  et  $\tau_{\text{esc}}$  obtenus à  $\sim 1$  GeV, mais B/C suggère que le temps de confinement diminue avec l'énergie croissante
- ▶ permet de dériver un coefficient de diffusion phénoménologique

# Volume de confinement : le halo galactique

- ▶ échappement du halo galactique d'épaisseur  $z_h \sim 3$  kpc  
⇒ **diffusion**, avec coefficient phénoménologique à  $\sim 1$  GeV

$$\kappa \approx z_h^2 / \tau_{\text{esc}} = 3 \times 10^{29} \text{ cm}^2 / \text{s}$$



- ▶  $u_{\text{RC}} \approx 1 \text{ eV/cm}^3$  ;  $u_{\text{B}} \approx 0.2 \text{ eV/cm}^3$  ;  $u_{\text{gaz}} \approx 1 \text{ eV/cm}^3$
- ▶ instabilité de Parker : RCs tirent  $B$  vers halo, mais ancré dans gaz froid ⇒ halo a  $B \sim$  galactique, confine les RCs
- ▶ aussi en faveur d'un halo étendu : émission synchrotron (radio)

## Spectre en énergie

- ▶ loi de puissance  $dN/dE \propto E^{-2.7}$  jusqu'à  $\sim 3 \times 10^{15}$  eV
- ▶  $E \lesssim 1$  GeV : spectre atténué par *modulation solaire*
- ▶ confinés par champ  $B$  galactique jusqu'à  $\sim 3 \times 10^{18}$  eV/ $Z$

## Processus non-thermiques

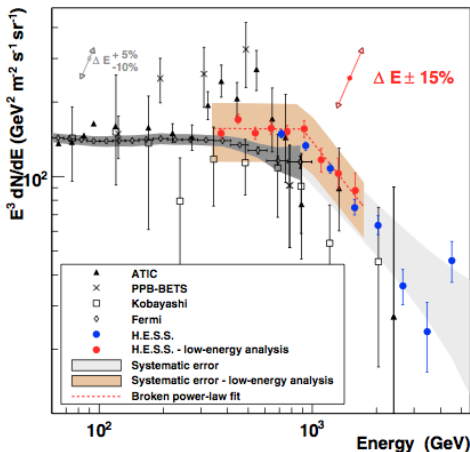
- ▶ chauffage et ionisation du MIS : cosmiques de basse énergie
- ▶ densité de RCs varie peu dans la Galaxie
- ▶ densités différentes dans autres galaxies

## Composition et implication

- ▶ *spallation* explique la composition observée, avec  $\xi \approx 5$  g/cm<sup>2</sup>
- ▶ composition primaire montre biais en FIP ou en volatilité
- ▶ secondaires radioactifs : temps de confinement  $\tau_{\text{esc}} \sim 10^7$  ans
- ▶ observations suggèrent halo d'épaisseur plusieurs kpc

# Cosmic-ray electrons and positrons

- ▶ abundance :  $\sim 1\%$  of hadronic cosmic rays (protons)
- ▶ spectrum somewhat steeper than hadronic cosmic rays :



$$\frac{dN_e}{dE} \propto E^{-3}$$

spectral break  
at  $\sim 1$  TeV

(Aharonian et al. 2009)

- ▶ (spectral peak reported by ATIC not confirmed by later experiments)
- ▶ high-energy CR  $e^\pm$  propagation affected by *radiative losses*

# Rayonnement synchrotron

- ▶ rayonnement d'une charge accélérée dans un champ magnétique
- ▶ initialement observé dans les premiers accélérateurs d'électrons, d'où son nom
- ▶ processus dominant dans l'émission radio de la Galaxie, des vestiges de supernovae, des sources extragalactiques...
- ▶ responsable de l'émission radio, optique et en rayons X de la Nébuleuse du Crabe et autres nébuleuses de pulsars

# Puissance totale du rayonnement

$$a_{\perp} = \frac{q}{m\gamma c} |\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = \frac{vqB \sin \alpha}{m\gamma c}$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{q^2}{c^3} \gamma^4 \left( a_{\perp}^2 + \gamma^2 a_{\parallel}^2 \right) = \frac{2}{3} \frac{q^4}{m^2 c^3} B^2 \beta^2 \gamma^2 \sin^2 \alpha$$

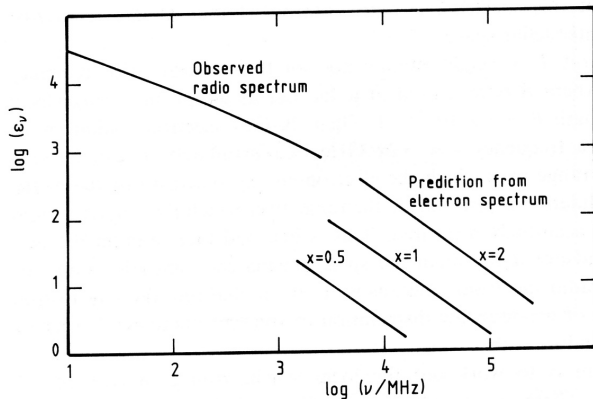
Spécialisons pour un électron :  $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2$ ,  $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}$

$$P_{\text{synch}} = 2\sigma_T c U_B \beta^2 \gamma^2 \sin^2 \alpha, \quad \text{où} \quad U_B = \frac{B^2}{8\pi}$$

Moyenne sur les angles d'attaque  $\alpha$  (pour une distribution isotrope, ou dans le temps pour un électron qui diffuse en angle d'attaque) :

$$\langle \sin^2 \alpha \rangle = \frac{2}{3} \quad \Rightarrow \quad \langle P_{\text{synch}} \rangle = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_B$$

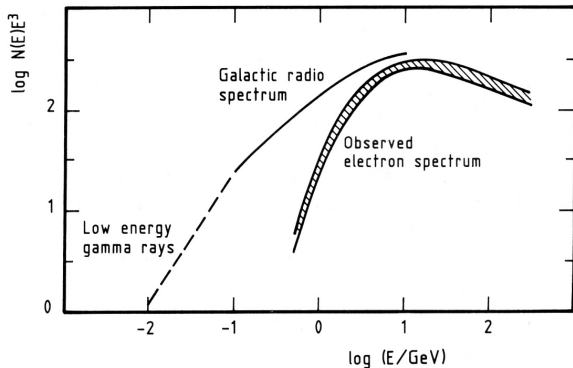
# Rayonnement synchrotron de la Galaxie



⇒ champ magnétique galactique  $B \sim 3 \mu\text{G}$

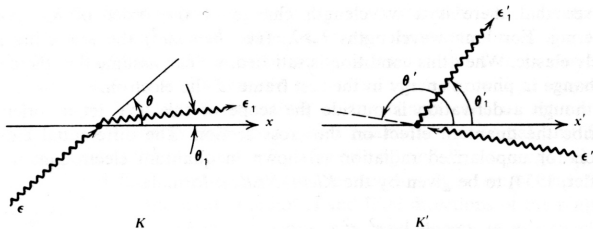


## Spectre des électrons cosmiques



# Effet Compton inverse : gain d'énergie

- ▶ électron en mouvement (relativiste) : transformations de Lorentz



$$h\nu' = h\nu\gamma(1 - \beta \cos \theta), \quad \epsilon_1 = \epsilon'_1\gamma(1 + \beta \cos \theta'_1)$$

$$\text{pour } \theta \gg 1/\gamma, \quad h\nu' \sim \gamma h\nu$$

$$\text{pour } \pi - \theta'_1 \gg 1/\gamma, \quad \epsilon_1 \sim \gamma\epsilon'_1$$

$$\text{et } \epsilon'_1 \approx h\nu' \Rightarrow \epsilon_1 \sim \gamma^2 h\nu$$

- ▶ photon gagne de l'énergie (contrairement à l'effet Compton), d'où le nom de mécanisme **Compton inverse**
- ▶ gain d'énergie maximal pour  $\theta = \pi, \theta'_1 = 0$  :  $\epsilon_1 \approx 4\gamma^2 h\nu$

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission  $\gamma$  diffuse

Composition des RCs

Confinement des RCs

Cosmic-ray  $e^\pm$

# Puissance émise par effet Compton inverse

- ▶ perte d'énergie nette : soustraction de l'énergie incidente :

$$-\frac{dE_e}{dt} = c\sigma_T\gamma^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{3}\right) U_{\text{rad}} - c\sigma_T N_\nu h\nu$$

$$P_{\text{CI}} = -\frac{dE_e}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_T c U_{\text{rad}} \beta^2 \gamma^2$$

- ▶ résultat général, relativiste ou non (dans le régime Thomson)
- ▶ comparaison avec puissance synchrotron :

$$\frac{P_{\text{CI}}}{P_{\text{synch}}} = \frac{U_{\text{rad}}}{U_B} \quad \text{où} \quad U_B \equiv \frac{B^2}{8\pi}$$

- ▶ énergie moyenne des photon diffusés :

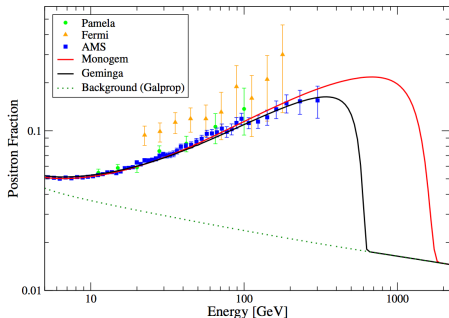
$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{P_{\text{CI}}}{c\sigma_T N_\nu} = \frac{4}{3}\beta^2 \gamma^2 h\nu$$

# Energy losses and cosmic-ray $e^\pm$ propagation

- ▶ for CMB,  $U_{\text{rad}} \approx 0.25 \text{ eV/cm}^{-3}$
- ▶ similar for Galactic IR and stellar backgrounds
- ▶ at  $E = 100 \text{ GeV}$ , typical energy loss time is  $\sim 3 \text{ Myr}$
- ▶ typical diffusion coefficient at these energies :  
 $\kappa \sim 2 \times 10^{29} \text{ cm}^2 \text{ s}$
- ▶ corresponding diffusion length :  $\sim 2 \text{ kpc}$
- ▶  $\Rightarrow$  high-energy CR  $e^\pm$  must be from *local* sources  
(nearest spiral arms of Galaxy)

# Cosmic-ray positrons

- ▶ mostly *secondaries* created by (hadronic) cosmic-ray spallation
- ▶ e.g.  $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ ,  $\pi^+ \rightarrow e^+ (+\nu's)$
- ▶ predictions depend on details of cosmic-ray propagation model



(from Linden & Profumo 2013)

- ▶ *PAMELA* (2009) measured rising positron fraction  $e^+/(e^+ + e^-)$  increase with  $E$ , inconsistent with secondary origin
- ▶ confirmed to higher  $E$  : *Fermi-LAT* (2012), *AMS-02* (2013, 2014)
- ▶ spectrum and positron fraction require **primary**  $e^\pm$  source
- ▶ signature of DM annihilation? Or **Pulsar Wind Nebulae**?