

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 , He^{++} , autres noyaux...
 - ▶ RCs *leptoniques* : e^- , e^+
- ▶ n’inclut pas les rayons γ (cours de [J. Knödlseeder](#) et [J. Brégeon](#))
- ▶ ni les neutrinos (cours d’[A. Enzenhöfer](#))

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission γ diffuse

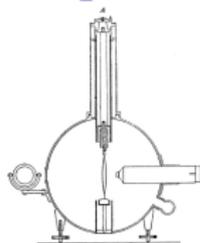
Composition des RCs

Confinement des RCs

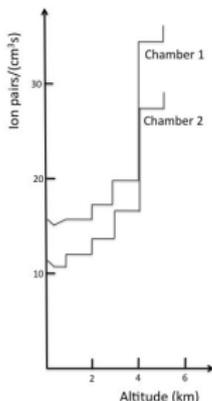
Cosmic-ray electrons (and e^+)

Découverte des rayons cosmiques (II)

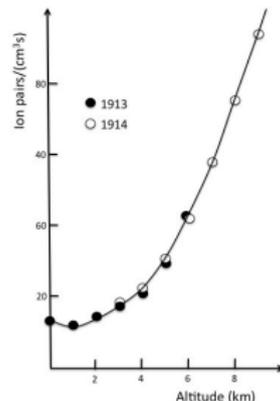
- ▶ Th. Wulf (1909) : électroscope précis et robuste
- ▶ mesures sur la Tour Eiffel (300 m) : ionisation comparable au sol



V. Hess dans sa nacelle



mesures de Hess



de Kolhörster

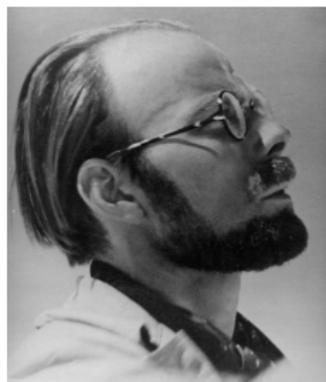
- ▶ Victor Hess (1912) : mesures en ballon \Rightarrow origine cosmique
- ▶ W. Kolhörster : confirmation jusqu'à une altitude de 9 km (niveau typique de rayonnement ionisant en avion)

Gerbes atmosphériques de rayons cosmiques

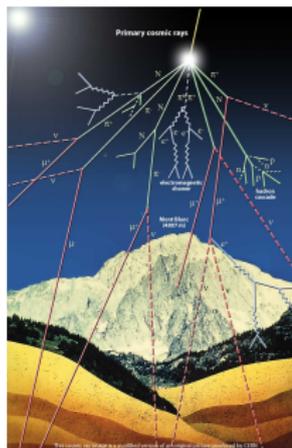
LES GRANDES GERBES DE RAYONS COSMIQUES

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

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)

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission γ diffuse

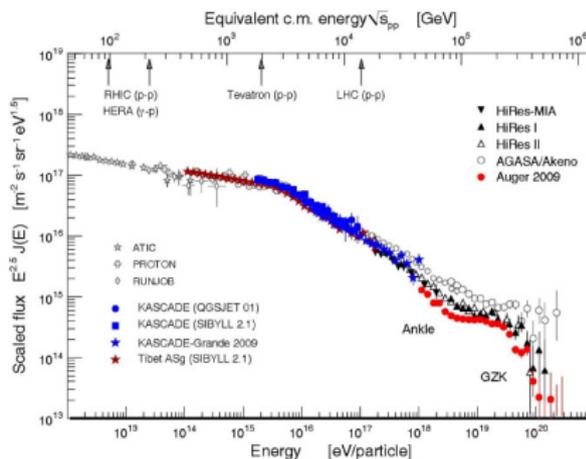
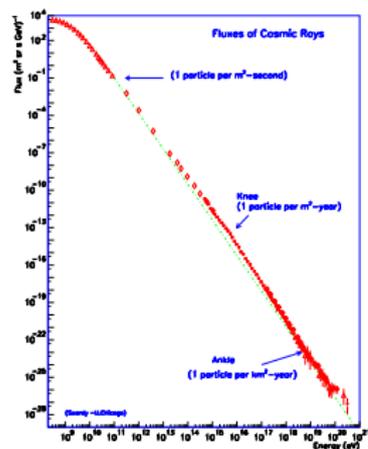
Composition des RCs

Confinement des RCs

Cosmic-ray e^{\pm}

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 3×10^{15} eV, “cheville” à 3×10^{18} eV



- ▶ particules primaires (p , 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

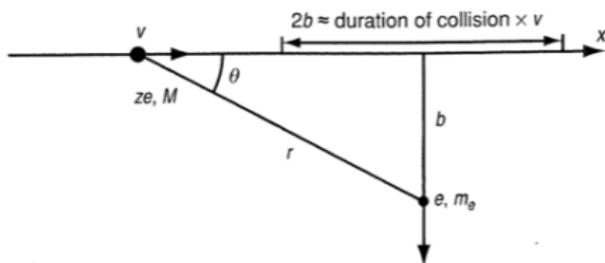
- ▶ pour $E = 1 \text{ TeV}/Z$, $B = 10 \mu\text{G}$ (vent solaire), $r_L \approx 20 \text{ AU} \Rightarrow$ rayons cosmiques avec $E \ll 1 \text{ TeV}$ significativement déviés
- ▶ rayons cosmiques avec $E \lesssim 1 \text{ GeV}$ “repoussés” par fluctuations magnétiques dans le vent solaire : *modulation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



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

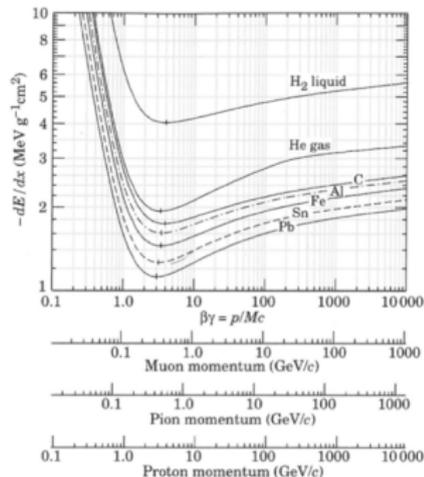
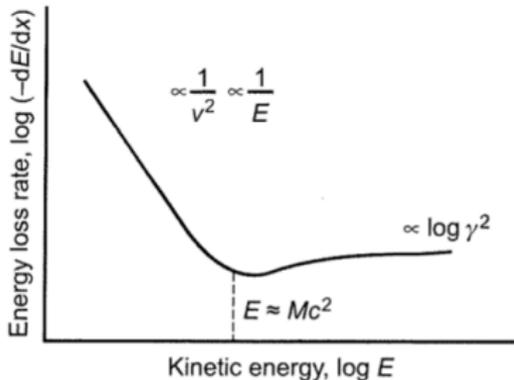
$$\int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp} dt = \frac{2Ze^2}{bV} = \Delta p_e \quad \Rightarrow \quad \Delta E = \frac{2Z^2 e^4}{m_e b^2 V^2}$$

Ionisation et détection des rayons cosmiques

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

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

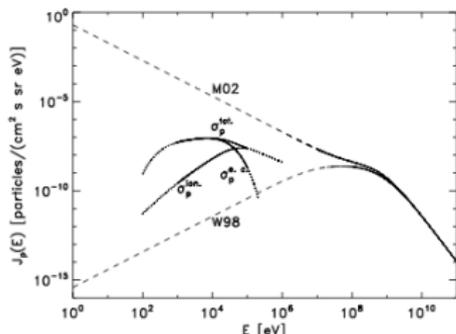
- ▶ $\propto 1/V^2$ à basse énergie, $\propto \ln \gamma^2$ à énergies relativistes



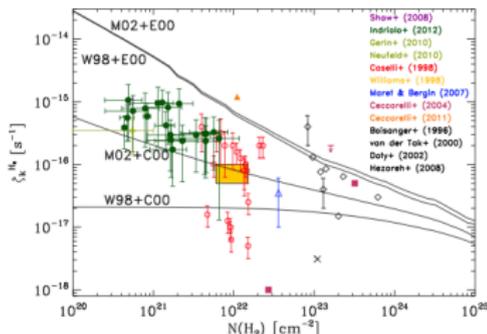
- ▶ dépend uniquement de V et de Z (pas de la masse M)
- ▶ permet la détection des rayons cosmiques (notamment avec des *scintillateurs* qui émettent $\propto -dE/dx$)

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)

Historique

Spectre en énergie

Ionisation

Rayonnement

Émission γ diffuse

Composition des RCs

Confinement des RCs

Cosmic-ray \pm

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 : $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$

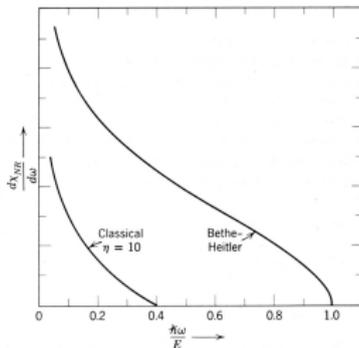
► $\Delta p_{z,\max} \approx m_e v \Rightarrow b_{\min}^{(q)} \approx \frac{\hbar}{m_e v}$

► $b_{\min}^{(q)} > b_{\min}^{(c)}$ 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)

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

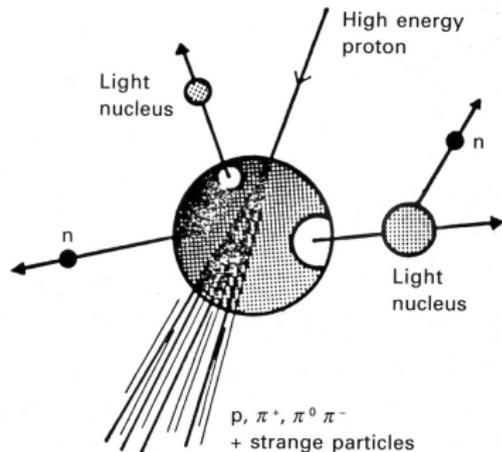
$$P(\omega) \approx \frac{16 Z^2 e^6}{3 m_e^2 c^4} N \ln \left(\frac{m_e \gamma^2 c^2}{\hbar \omega} \right)$$

\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 γ : interactions hadroniques puis désintégration des π^0 produits



- ▶ principales particules secondaires : π^+ , π^0 , π^- (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)

Section efficace de production des π^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 π^0 par collisions $p - p$ mesurée jusqu'à ~ 1 TeV, modèles hadroniques au-delà :

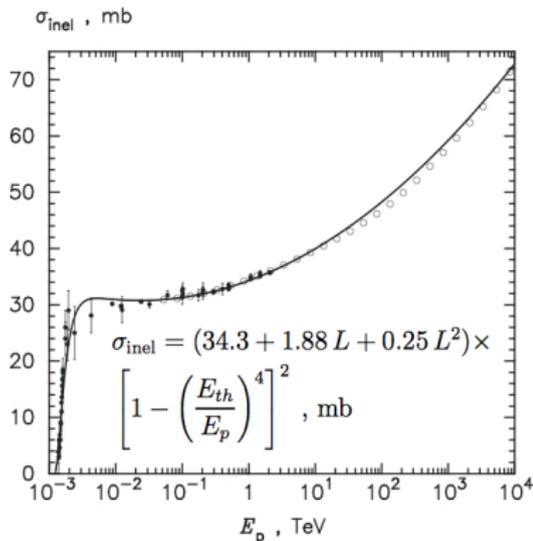
Kelner, Aharonian & Bugaykov
(2006), *Phys. Rev. D* **74**, 034018

ajustement empirique de
simulations avec SIBYLL

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

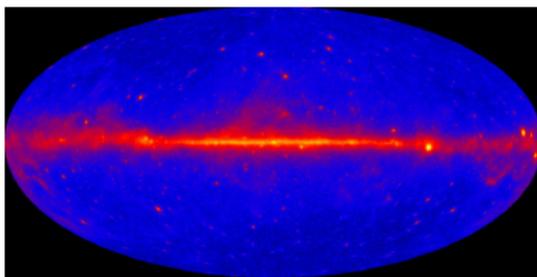
spectres de π^0 empiriques
donnés dans même article

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

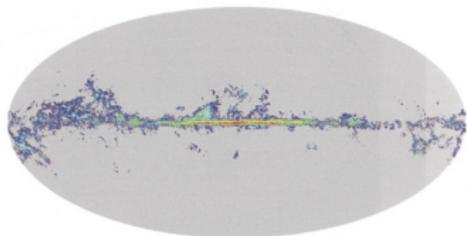


Emission γ galactique corrélée avec le gaz

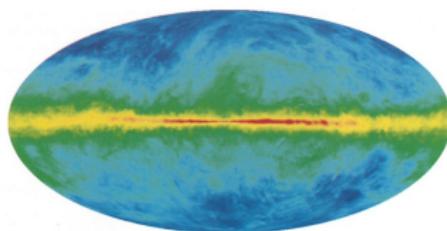
- ▶ émission diffuse de la Galaxie en rayons γ domine les cartes du ciel révélé par *Fermi*-LAT :



- ▶ structures corrélées avec traceurs du gaz interstellaire :



CO (Dame et al. 2001)

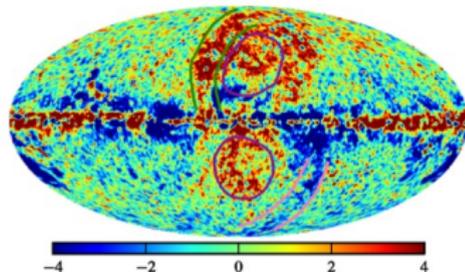
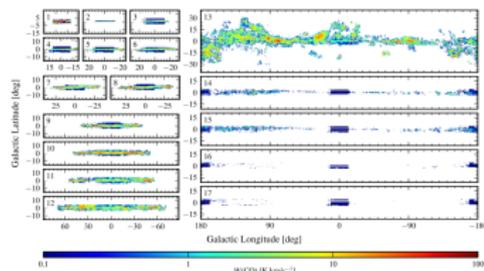
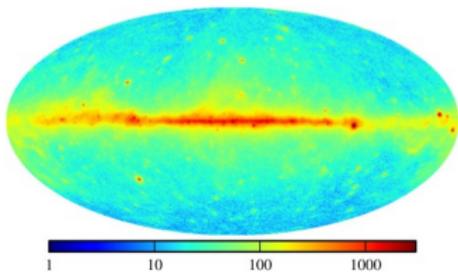
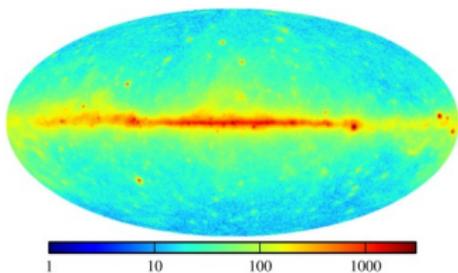


HI (21 cm)

- ▶ 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 γ diffuse

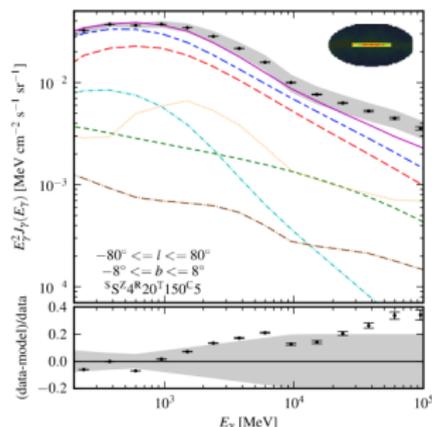
- ▶ utilisant les données de *Fermi*-LAT (Ackermann et al. 2012)
- ▶ traceurs du gaz (CO, HI, E_{B-V}), divisés en anneaux en R_{Gal}



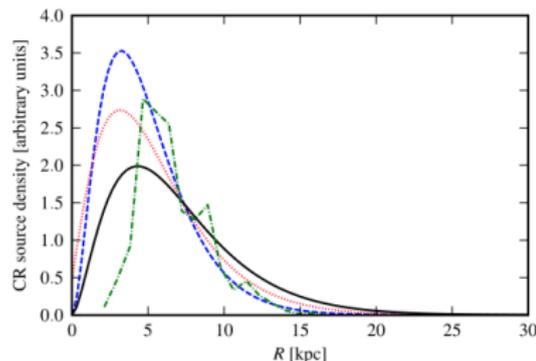
- ▶ modélisation globalement très bonne (en bas, vs. données en haut)
- ▶ résidus : structures non-modélisées (“bulles” de *Fermi*, Loop I)

Implications pour les RCs dans la Galaxie

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



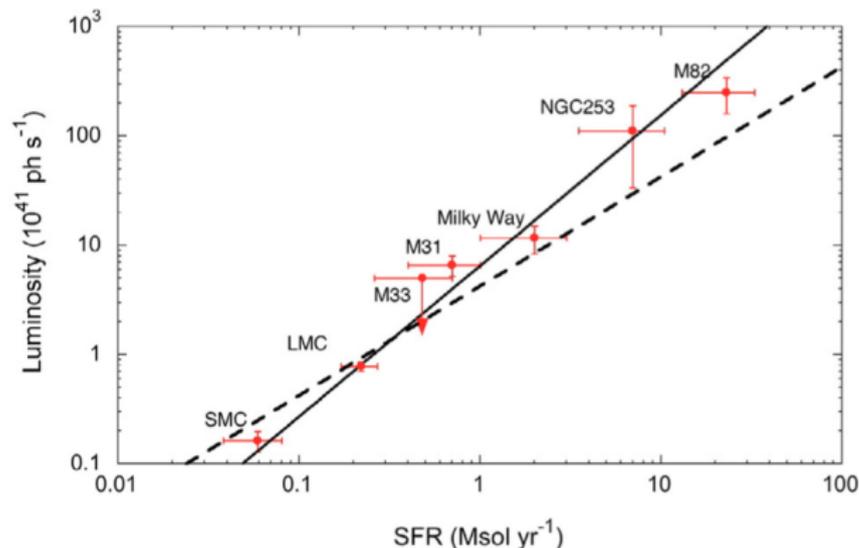
(Ackermann et al. 2012)



- ▶ distribution en R_{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(?) γ -ray emission from other galaxies

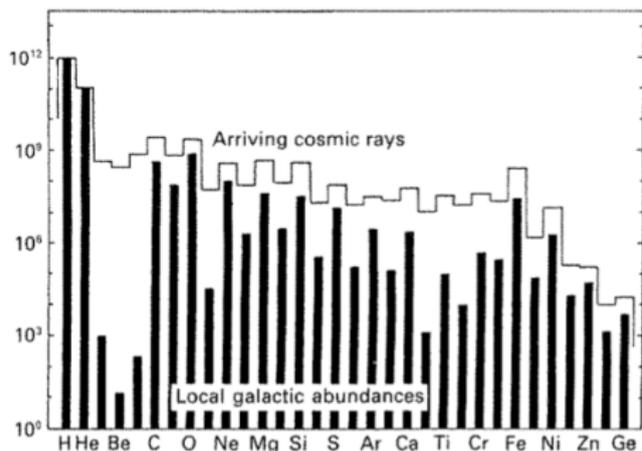
- ▶ inferred CR density comparable in Andromeda Galaxy (M31), but lower in Large and (especially) Small Magellanic Clouds
- ▶ gas tracers \Rightarrow cosmic-ray density lower in LMC and SMC
- ▶ cosmic rays at these energies are **Galactic**, not universal



(Abdo et al. 2010)

- ▶ high γ -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

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

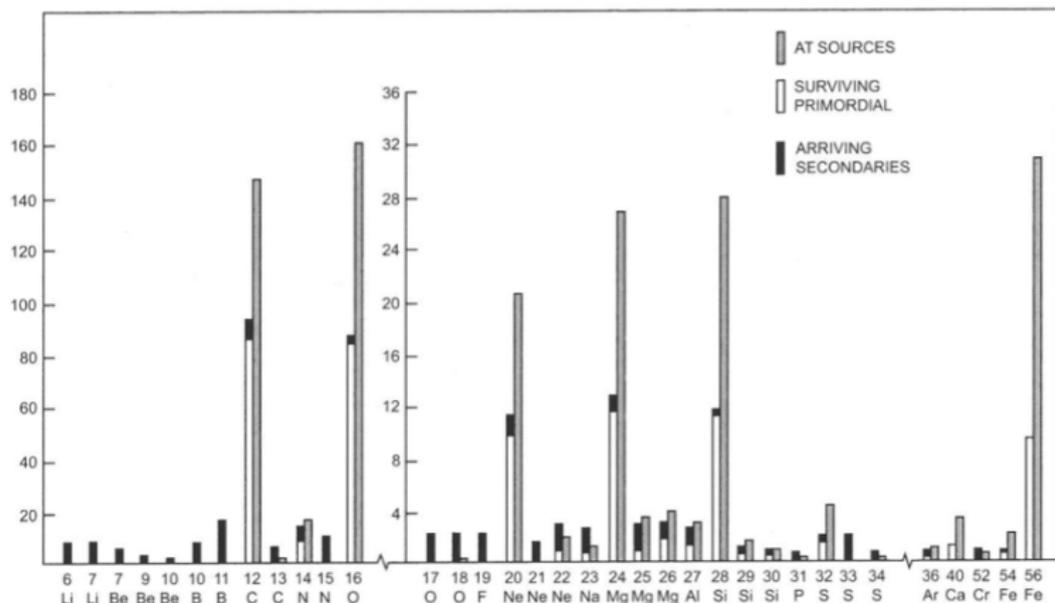
$$\Rightarrow \quad n_M(\xi) = n_M(0) \exp(-\xi/\xi_M)$$

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

- ▶ $\xi_M = 6 \text{ g/cm}^2$, $\xi_L = 8.4 \text{ g/cm}^2$, $P_{M \rightarrow L} = 0.28$, $n_L/n_M \approx 0.25$
- ▶ impliquerait un grammage rencontré typique de **4.8 g/cm²**

Composition : primaires et secondaires

- calcul complet avec toutes les sections efficaces de spallation

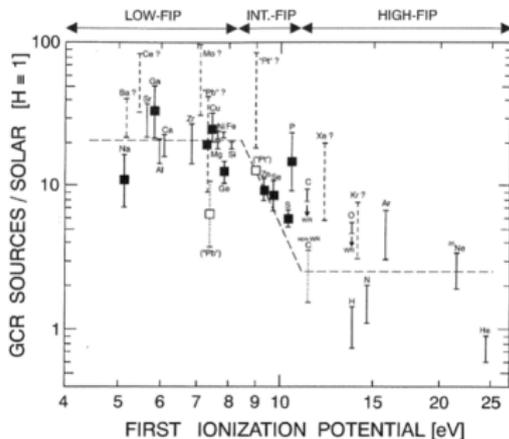


d'après Shapiro (1991) et Wefel (1991)

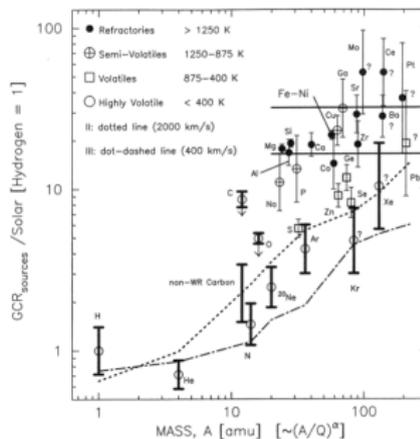
- permet de remonter aux abondances à la source

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.



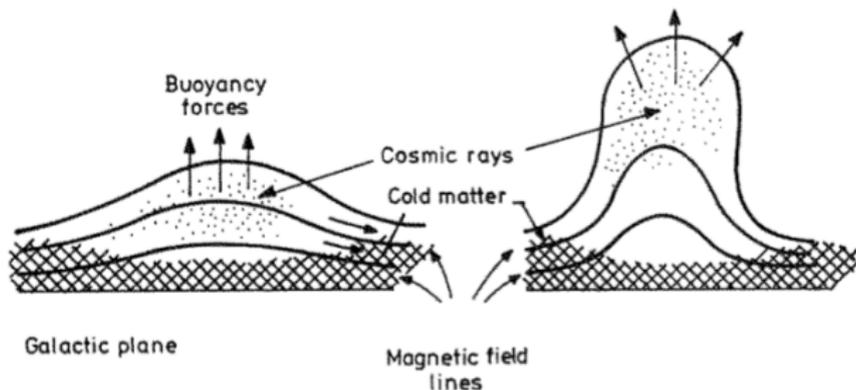
d'après Ellison et al.

- ▶ 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

Volume de confinement : le halo galactique

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

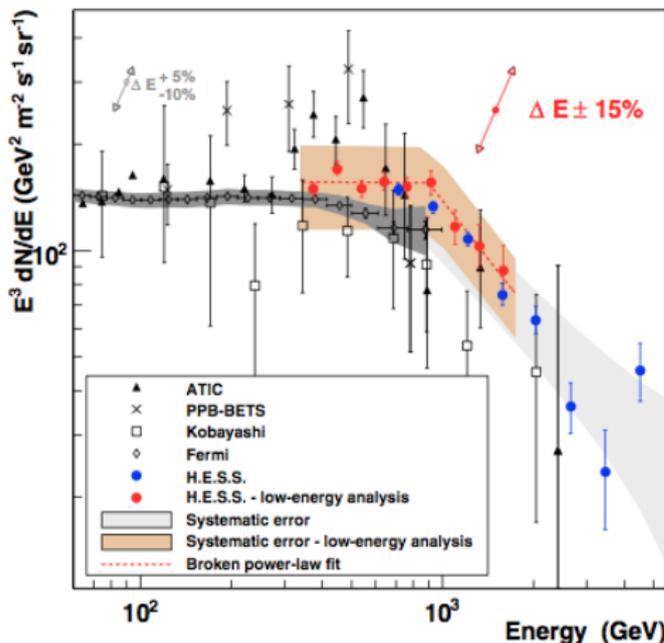
- ▶ chauffage et ionisation du MIS : cosmiques de basse énergie
- ▶ densité de RCs varie peu dans la Galaxie
- ▶ densités différentes dans autres galaxies

Composition et implication

- ▶ *spallation* explique la composition observée, avec $\xi \approx 5$ g/cm²
- ▶ 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 ~ 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

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

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

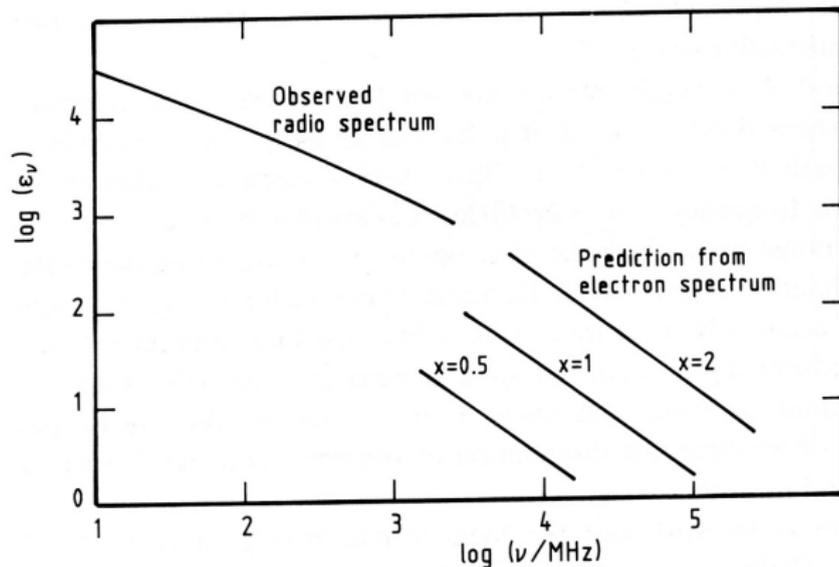
Spécialisons pour un électron : $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2$, $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}$

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

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

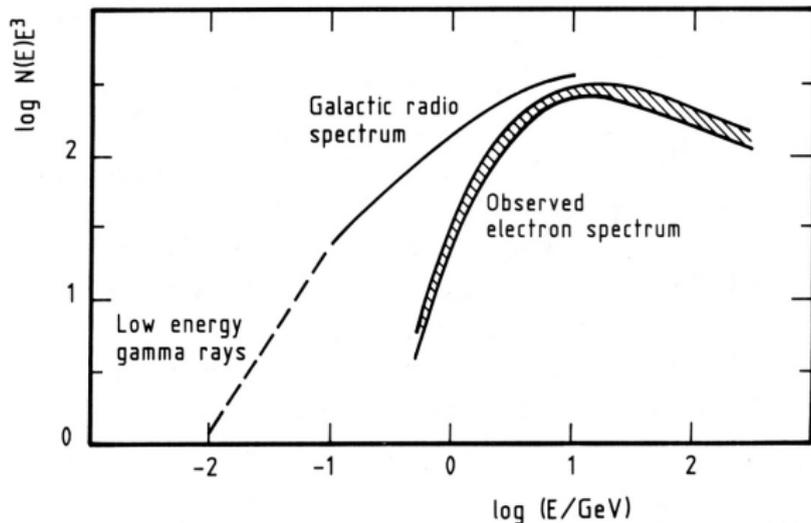
$$\langle \sin^2 \alpha \rangle = \frac{2}{3} \quad \Rightarrow \quad \langle P_{\text{synch}} \rangle = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_B$$

Rayonnement synchrotron de la Galaxie



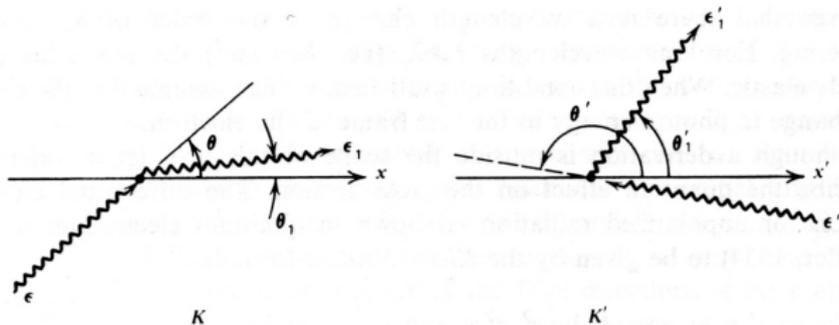
⇒ champ magnétique galactique $B \sim 3 \mu\text{G}$

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 γ 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 :

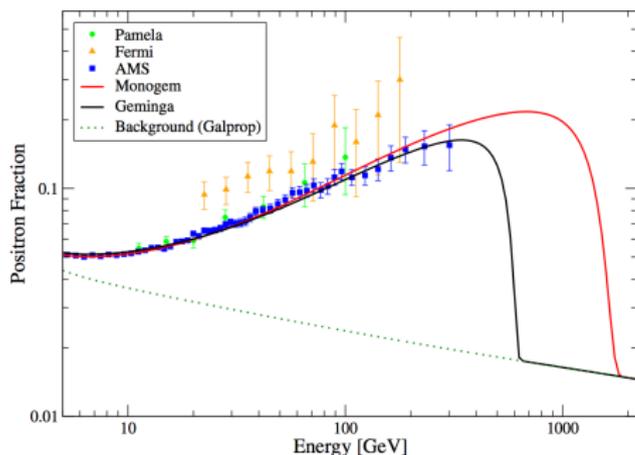
$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{P_{\text{CI}}}{c\sigma_T N_\nu} = \frac{4}{3}\beta^2 \gamma^2 h\nu$$

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**?