

## **Les émissions X et $\gamma$ du rayonnement cosmique galactique**

Vincent Tatischeff

*Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse,  
IN2P3-CNRS, 91405 Orsay, France*

**Abstract.** The interactions of accelerated nuclei and electrons with interstellar matter and radiation field produce characteristic X- and  $\gamma$ -ray emissions, which provide a direct way to study cosmic rays on a Galactic scale. Continuum emission is first presented and some relevant properties of cosmic rays are discussed in the light of X- and  $\gamma$ -ray observations. The physics of atomic and nuclear line production by fast particle interactions is then described and the potential offered by these emissions to study the Galactic cosmic rays at non-relativistic energies is emphasized.

### **Contents**

|  |            |
|--|------------|
| <b>1. Introduction</b>                                       | <b>268</b> |
| <b>2. Les émissions à spectres continus</b>                  | <b>268</b> |
| 2.1 Les émissions interstellaires . . . . .                  | 268        |
| 2.2 Les émissions des sources des rayons cosmiques . . . . . | 273        |
| <b>3. Les émissions de raies</b>                             | <b>274</b> |
| 3.1 Raies $\gamma$ nucléaires . . . . .                      | 274        |
| 3.2 Raies X . . . . .  | 277        |
| <b>4. Conclusion</b>   | <b>279</b> |

## 1. Introduction

S'il est aujourd'hui reconnu que les rayons cosmiques d'énergie inférieure à  $\sim 3 \times 10^{15}$  eV (i.e. le "genou" du spectre) sont d'origine galactique, leurs sources d'accélération et leurs différents effets énergétiques dans le milieu interstellaire sont encore largement débattus. Les émissions X et  $\gamma$  que génèrent ces particules rapides en interagissant avec la matière et les champs de rayonnements interstellaires nous fournissent le meilleur moyen d'observer ces processus non-thermiques bien au-delà du système solaire. En particulier, l'observation de ces émissions est complémentaire à la détection directe du rayonnement cosmique au voisinage terrestre, qui ne nous procure qu'un échantillon spécifique et partiel des populations de particules accélérées qui imprègnent notre galaxie et en constituent une composante fondamentale.

L'essentiel de ce cours sera consacré aux émissions produites par les rayons cosmiques depuis quelques keV jusqu'à environ 100 GeV, ce domaine d'énergie étant largement couvert par des observations spatiales ayant débuté dans les années 1960. Mais il nous arrivera néanmoins de nous aventurer dans le domaine des ondes radio produites par effet synchrotron, ainsi que dans celui des rayons  $\gamma$  du TeV, qui bénéficie du développement actuel de plusieurs télescopes au sol utilisant l'effet Cherenkov atmosphérique.

Dans une première partie, nous présenterons les émissions à spectres continus, en soulignant les problèmes fondamentaux soulevés par les observations récentes. Dans une seconde partie, nous accorderons une place significative à la production par les rayons cosmiques de raies  $\gamma$  et X, bien que ces émissions n'aient pas encore été détectées avec certitude. Nous tenterons en effet de montrer qu'elles sont potentiellement très riches en informations concernant tant les propriétés du rayonnement cosmique de basse énergie, c'est-à-dire ici non-relativiste, que celles de la matière interstellaire.

## 2. Les émissions à spectres continus

Les processus d'émissions à spectres continus sont décrits en détail dans le cours d'Alexandre Marcowith. Nous présentons ici les contributions de ces processus à l'émission interstellaire (§ 2.1), puis discutons brièvement des observations relatives aux sources d'accélération des rayons cosmiques (§ 2.2).

### 2.1 Les émissions interstellaires

Le rayonnement cosmique produit dans notre galaxie une émission diffuse en rayons  $\gamma$  au travers de trois processus : le rayonnement de

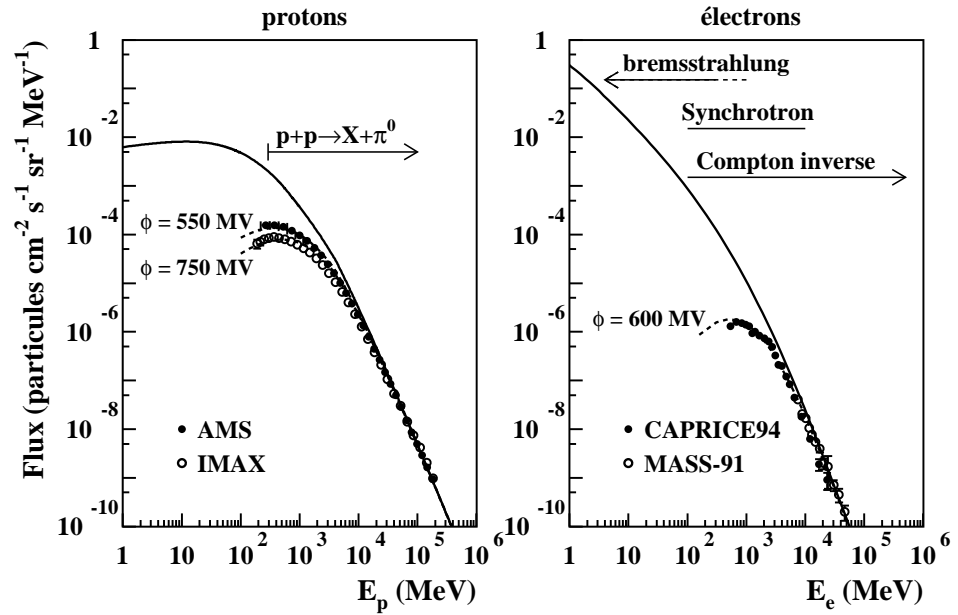


Figure 1.: Flux des protons (à gauche) et des électrons (à droite) du rayonnement cosmique en fonction de leurs énergies cinétiques. Lignes continues : spectres calculés des électrons (Moskalenko & Strong, 1998) et des protons dans le milieu interstellaire local. Lignes en tirets : spectres des rayons cosmiques au voisinage terrestre ; la modulation solaire est calculée avec le modèle de Gleeson & Axford (1968), où le paramètre  $\phi$  caractérise l'intensité de l'activité du soleil. Données : AMS (Alcaraz et al., 2000), IMAX (Menn et al., 2000), CAPRICE94 (Boezio et al., 2000) et MASS-91 (Grimani et al., 2002). Les domaines d'énergie où les émissions à spectres continus peuvent nous renseigner sur les interactions des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire sont indiqués.

freinage (Bremsstrahlung) et la diffusion Compton inverse des électrons, ainsi que la désintégration en deux photons  $\gamma$  des pions  $\pi^0$  produits par collisions des noyaux avec la matière interstellaire. Mais les contributions respectives de ces processus sont encore mal connues. Elles dépendent notamment de la distribution spatiale des différentes composantes de la matière interstellaire (Bremsstrahlung et désintégration des  $\pi^0$ ) des champs de rayonnements cosmologique à 2,7° K, infrarouges des poussières interstellaires et visibles des étoiles (diffusion Compton inverse), mais encore et surtout de l'intensité et de la distribution en énergie des rayons cosmiques. La figure 1 montre le flux des protons et des électrons du rayonnement cosmique au voisinage du soleil. Ces flux résultent de calculs de propagation des rayons cosmiques dans la galaxie

et sont incertains au dessous de quelques GeV du fait de la modulation solaire. Les domaines d'énergie cinétique dans lesquels les protons et les électrons peuvent contribuer à l'émission de fond galactique sont indiqués.

– La création de pions neutres est principalement due aux interactions  $p + p \rightarrow X + \pi^0$  (où  $X$  représente toutes les particules possibles). Elle requiert alors des protons d'énergie supérieure à l'énergie seuil de cette réaction,  $E_p^S = 280$  MeV.

– La collision d'un électron d'énergie cinétique  $E_e = (\Gamma - 1)m_e c^2$  ( $\Gamma$  étant son facteur de Lorentz,  $m_e$  sa masse et  $c$  la vitesse de la lumière) avec un photon d'énergie  $\epsilon$  communique à ce dernier par effet Compton inverse une énergie moyenne  $\epsilon_\gamma \cong (4/3)\Gamma^2\epsilon$ . Ainsi, seuls des électrons d'énergie supérieure à  $\sim 100$  MeV ( $\Gamma \gtrsim 200$ ) peuvent contribuer de façon significative à l'émission interstellaire de rayons  $\gamma$  ( $E_\gamma > 100$  keV) en difflusant sur des photons des rayonnements fossile ( $\epsilon \sim 1$  meV), infrarouges ( $\epsilon \sim 10$  meV) et visibles ( $\epsilon \sim 1$  eV).

– Le spectre rayonné par le Bremsstrahlung d'un électron d'énergie  $E_e$  s'étend jusqu'à  $\epsilon_\gamma^{max} = E_e$ , l'énergie moyenne des photons émis étant de l'ordre de  $E_e/3$ . Ce processus pourrait donc en principe impliquer les électrons du rayonnement cosmique sur tout leur spectre. Mais il est généralement admis que l'émission interstellaire au dessus de quelques centaines de MeV est principalement due aux désintégrations électromagnétiques des  $\pi^0$  et/ou à l'effet Compton inverse.

– Les électrons émettent également par effet synchrotron un rayonnement observé dans le domaine radio à des fréquences  $\nu$  allant de 10 MHz à 10 GHz. Cette émission est produite par des électrons d'énergie

$$E_e \approx 0,31 \text{ GeV} \times \left( \frac{\nu}{1 \text{ MHz}} \right)^{1/2} \times \left( \frac{B}{1 \mu\text{G}} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

soit comprise entre  $\sim 0,1$  et  $\sim 10$  GeV pour un champ magnétique interstellaire  $B$  de l'ordre de plusieurs  $\mu\text{G}$ .

La figure 2 montre le spectre de l'émission  $\gamma$  interstellaire détectée par trois instruments à bord de l'Observatoire à Rayons Gamma *Compton* (CGRO), ainsi que les résultats d'un modèle dit "conventionnel", dans lequel les flux des rayons cosmiques dans toute la galaxie sont ajustés aux données obtenues au voisinage terrestre (Strong et al., 2000). Les propriétés adoptés de la matière et des champs de rayonnements interstellaires reposent sur des observations détaillées dans d'autres longueurs d'onde (c.f. le cours de K. Ferrière, ce volume). Plusieurs remarques s'imposent au vu de cette figure :

– Le modèle reproduit les intensités observées à un facteur trois près sur trois ordres de grandeurs en énergie, de 10 MeV à 10 GeV, ce qui valide le cadre général des calculs.

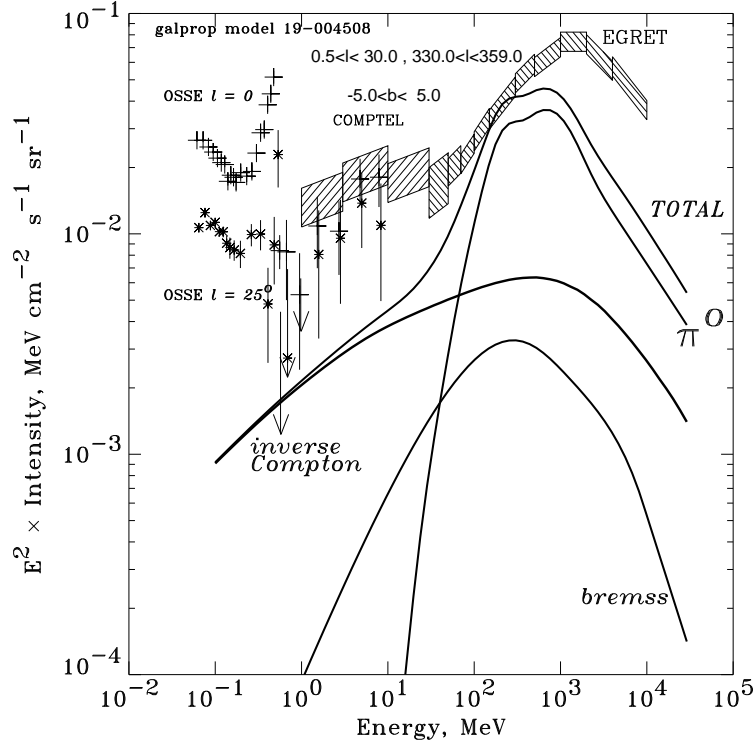


Figure 2.: Spectre de l'émission  $\gamma$  diffuse des régions internes de notre galaxie ( $300^\circ \leq \ell \leq 30^\circ$ ,  $|b| \leq 5^\circ$ ) d'après Strong et al. (2000). Les contributions calculées de la désintégration des  $\pi^0$ , de l'effet Compton inverse et du Bremsstrahlung, ainsi que l'intensité totale sont comparées aux données de OSSE (pour  $\ell=0^\circ$  et  $25^\circ$ ), COMPTEL et EGRET. La raie d'annihilation  $e^+e^-$  de 511 keV, observée avec OSSE, n'est pas considérée dans le cadre du modèle.

– L'émission prédite est dominée par l'effet Compton inverse au dessous de 70 MeV et par la désintégration des  $\pi^0$  au dessus de cette énergie. Ce résultat contraste avec ceux des modèles précédents, qui donnaient une contribution prépondérante du Bremsstrahlung au dessous de  $\sim 100$  MeV (voir par exemple Skibo & Ramaty, 1993). Cette différence s'explique essentiellement par le fait que le modèle de Strong et al. (2000) prédit un flux bien moindre d'électrons d'énergie inférieure à  $\sim 100$  MeV, qui rappelons-le, ne sont pas détectés au voisinage terrestre du fait de la modulation solaire.

– Le spectre calculé s'écarte de manière significative des intensités observées au dessous de 30 MeV et au dessus de 1 GeV. Aux plus basses énergies, les données obtenues avec OSSE montrent que le spectre mesuré

se raidit pour des énergies inférieures à celle de la raie d'annihilation. Les observations réalisées avec les expériences GINGA et RXTE dans le domaine des rayons X durs indiquent que ce spectre se prolonge ainsi de manière régulière jusqu'à environ 10 keV, où il se confond avec celui d'origine thermique probablement émis par la phase très chaude du milieu interstellaire ( $T \sim 10^6$  K ; Ferrière, ce volume). Ainsi, de  $\sim 10$  keV à  $\sim 30$  MeV l'émission de fond galactique demeure mystérieuse. Elle pourrait résulter en partie d'un très grand nombre de sources stellaires peu lumineuses (de nature inconnue), qui n'auraient pas été résolues par les télescopes en observation. Mais si une fraction non-négligeable de cette émission est réellement d'origine interstellaire, cela implique l'existence d'une population importante d'électrons *suprathermiques* (de quelques dizaines de keV à quelques dizaines de MeV) rayonnant par Bremsstrahlung<sup>1</sup>.

– Au dessus de  $\sim 1$  GeV, le déficit du modèle peut être comblé en supposant que les spectres des noyaux et/ou des électrons du rayonnement cosmique dans les régions internes de notre galaxie sont plus durs que ceux mesurés localement : des flux de protons ou d'électrons plus importants au dessus de  $\sim 10$  GeV conduisent respectivement à une contribution accrue de la désintégration des pions  $\pi^0$  ultra-relativistes ou du rayonnement  $\gamma$  de haute énergie produit par effet Compton inverse. Quoiqu'il en soit, *les distributions en énergie des rayons cosmiques détectés dans l'héliosphère ne sont sans doute pas représentatives de celles des particules rapides diffusant dans la galaxie loin du système solaire.*

Des informations complémentaires sur les rayons cosmiques peuvent être obtenues en étudiant la distribution spatiale de l'émission  $\gamma$  diffuse. En particulier, les champs de rayonnements radio, infrarouges et visibles étant moins concentrés dans le disque galactique que la matière interstellaire, la distribution en latitude de l'émission liée à la diffusion Compton inverse doit être plus étendue que celle du Bremsstrahlung et du rayonnement résultant de la désintégration des  $\pi^0$ . Des analyses de spectro-imagerie des prochaines données recueillies par les satellites INTEGRAL et GLAST devraient donc permettre de préciser les contributions relatives de ces trois processus, ainsi que l'extension spatiale du halo galactique dans lequel diffusent les rayons cosmiques.

Le profil en longitude de l'émission  $\gamma$  interstellaire contient également de précieuses informations concernant la variation de la densité des rayons cosmiques dans le disque de la Voie lactée. En étudiant la corrélation de l'intensité  $\gamma$  avec la répartition spatiale du gaz inter-

---

<sup>1</sup>Une contribution significative à l'émission en rayons X durs de diffusions Compton inverses d'électrons ultra-relativistes est exclue par les observations en radio du rayonnement synchrotron de ces mêmes électrons (voir fig. 1).

stellaire (obtenue grâce aux mesures des décalages spectraux des raies à 21 cm de l'hydrogène atomique et à 2.6 mm de la molécule CO dus à la rotation galactique), il est possible d'estimer la distribution en rayon galactocentrique de l'émissivité  $\gamma$  (soit le nombre de photons émis par seconde et par atome d'hydrogène du milieu interstellaire). Cette distribution est relativement plate : elle ne varie que d'un facteur 2 environ entre l'anneau moléculaire situé à  $\sim 4,5$  kpc du centre de la galaxie et le bord du disque<sup>2</sup>. Elle est en particulier sensiblement moins prononcée que celle estimée des vestiges de supernova. Cela ne remet sans doute pas en question le fait que ces objets soient les sources les plus probables des rayons cosmiques galactiques, mais pourrait plutôt nous renseigner sur des effets liés à leur propagation, tels que leur advection par un vent galactique ou l'anisotropie de leur diffusion (Breitschwerdt et al., 2002).

## 2.2 Les émissions des sources des rayons cosmiques

Il est généralement admis que les rayons cosmiques d'énergie inférieure à  $\sim 10^{15}$  eV sont accélérés par des ondes de choc dans les vestiges de supernova. Les observations dans les bandes des ondes radio et des photons X de rayonnements de type synchrotron non-thermique, ainsi que celles récentes d'émissions  $\gamma$  du TeV supportent l'hypothèse qu'au moins les électrons du rayonnement cosmique proviennent de ces objets (c.f. le cours de J. Ballet, ce volume). Mais il n'existe à ce jour aucune identification directe et irréfutable des sources cosmiques des noyaux accélérés.

Le signal recherché est la "bosse des  $\pi^0$ " centrée sur  $\epsilon_\gamma = 67,5$  MeV (la moitié de la masse des pions neutres) et il peut paraître intrigant que les observations d'EGRET n'aient pu permettre d'identifier sans ambiguïtés une telle émission en provenance de certains restes de supernova. Mais il faut souligner que seuls quelques systèmes associant d'une part un accélérateur de particules efficace et d'autre part des nuages moléculaires denses constituant une cible suffisamment épaisse, seraient susceptibles de produire un rayonnement  $\gamma$  théoriquement détectable avec cet instrument. Il est par ailleurs aujourd'hui établi qu'une fraction importante des supernovæ galactiques explosent au sein de *superbulles* de gaz chaud ( $T \sim 10^6$  K) et dilué ( $n_H \sim 1-5 \times 10^{-3}$  cm<sup>-3</sup>) engendrées par l'activité stellaire d'associations d'étoiles OB.

Le dernier catalogue d'EGRET contient 170 sources d'émission  $\gamma$  dont l'origine n'est pas clairement identifiée. Mais parmi celles-ci, 19 pourraient être associées à des restes de supernova détectés en radio,

---

<sup>2</sup>Cette variation témoigne néanmoins de l'origine galactique des rayons cosmiques, car dans le cas contraire leur densité devrait être constante.

dont au moins 5 (IC443, W28,  $\gamma$ -Cygni, SNR G205.5+0.5 et RX J1713.7-3946) apparaissent comme de bons candidats pour une production significative de rayons  $\gamma$  dus aux interactions de type  $p-p$  dans des nuages moléculaires adjacents (voir sur ce sujet la revue exhaustive de Torres et al., 2003). Mais il faudra sans doute attendre les données qui seront collectées par les satellites AGILE et GLAST pour que, si émission d'origine hadronique il y a, elle puisse être distinguée de celles dues aux électrons. Cette problématique devrait également bénéficier des prochaines observations de télescopes à effet Cherenkov opérant dans le domaine des photons  $\gamma$  du TeV, dont HESS, VERITAS, MAGIC et CANGAROO III.

### 3. Les émissions de raies

Les rayons cosmiques sont susceptibles de produire des émissions caractéristiques de raies  $\gamma$  au travers d'interactions nucléaires (§ 3.1) et de raies X par des collisions atomiques (§ 3.2) avec la matière interstellaire. Comme nous allons le voir, une détection avérée de ces émissions, qui fait encore défaut sans doute faute de sensibilité des instruments, pourrait dans le futur nous éclairer sur la participation active des rayons cosmiques *non-relativistes* à différents processus de transformation du milieu interstellaire, tels que l'ionisation, le chauffage, l'astrochimie ou la nucléosynthèse.

#### 3.1 Raies $\gamma$ nucléaires

Les collisions hadroniques de rayons cosmiques d'énergie supérieure à  $\sim 1$  MeV/nucléon avec la matière interstellaire peuvent conduire certains noyaux dans des états excités, qui en retournant à leur état fondamental, émettent des raies  $\gamma$  d'énergie comprise entre quelques dizaines de keV et environ 20 MeV. Une telle émission de raies de désexcitation nucléaire est souvent observée au cours des éruptions solaires les plus violentes et son analyse spectrale permet d'étudier en particulier la densité et la composition *isotopique* de l'atmosphère solaire, ainsi que les abondances, les distributions en énergie et le transport des noyaux accélérés.

La production de raies  $\gamma$  nucléaires en astrophysique a été étudiée de manière exhaustive par Ramaty et al. (1979) et Kozlovsky et al. (2002). La figure 3 montre un spectre, calculé avec le code informatique développé par ces auteurs, de l'émission de raies  $\gamma$  produite par interaction des rayons cosmiques avec le gaz du milieu interstellaire. J'ai supposé en première approximation que tous les noyaux accélérés avaient la même distribution en énergie que celle des protons dans le milieu interstellaire local (fig. 1) et que leurs abondances étaient identiques à celles des rayons cosmiques à leurs sources (Meyer et al., 1997, et références incluses).



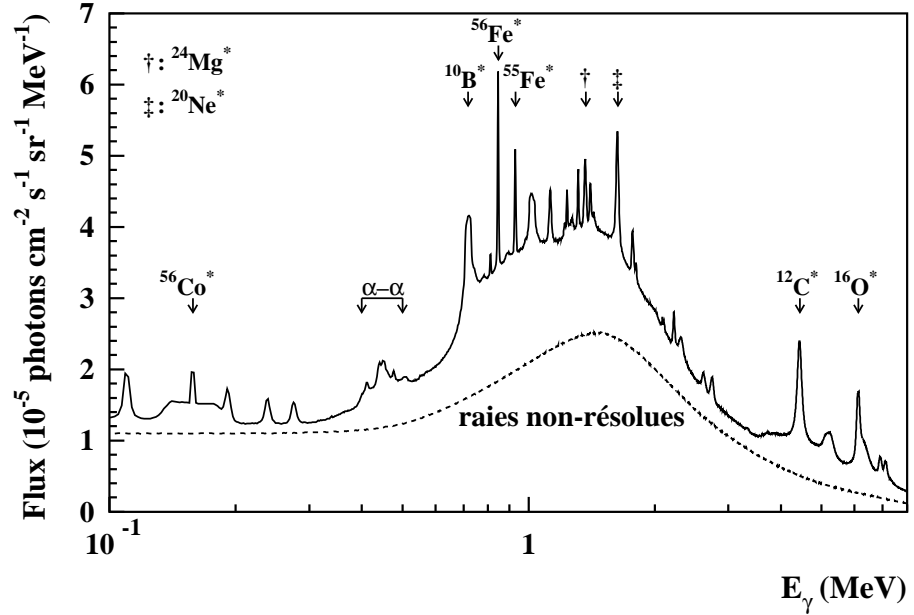


Figure 3.: Spectre calculé de l'émission diffuse de raies  $\gamma$  produite par les rayons cosmiques dans les régions internes de notre galaxie ( $300^\circ \leq \ell \leq 30^\circ$ ,  $|b| \leq 5^\circ$ ). La courbe en tirets montre la contribution estimée de toutes les raies non-résolues. Pour quelques raies significatives, les noyaux émetteurs sont indiqués. La raie large appelée  $\alpha$ - $\alpha$  est principalement émise au travers de réactions de fusion  $\alpha + {}^4\text{He}$  (voir texte).

On distingue sur cette figure un ensemble de raies plus ou moins fines, qui se superpose à des structures plus larges et à un spectre régulier (ligne en tirets) représentant un grand nombre de raies relativement peu intenses qui s'entremêlent au point d'être indiscernables d'un fond continu. Notons qu'à la fois la normalisation et la forme spectrale de cette dernière émission demeurent très incertaines.

L'élargissement des raies est dû à l'effet Doppler induit par la vitesse des noyaux émetteurs. Ainsi, les raies fines ( $\Delta E/E \sim 0.5\text{-}5\%$ ) sont produites par interaction des protons et des particules  $\alpha$  du rayonnement cosmique avec des noyaux plus lourds, initialement au repos dans le milieu interstellaire, et qui acquièrent dans les collisions une vitesse de recul relativement faible. Les plus intenses de ces raies correspondent aux excitations nucléaires des premiers niveaux d'énergie de noyaux relativement abondants : la raie à 847 keV du  ${}^{56}\text{Fe}^*$ , celle à 1,37 MeV du  ${}^{24}\text{Mg}^*$ , à 1,63 MeV du  ${}^{20}\text{Ne}^*$ , à 4,44 MeV du  ${}^{12}\text{C}^*$  ou encore à 6,13 MeV de l' ${}^{16}\text{O}^*$  (fig. 3). D'autres raies significatives proviennent de réactions de *spalla-*

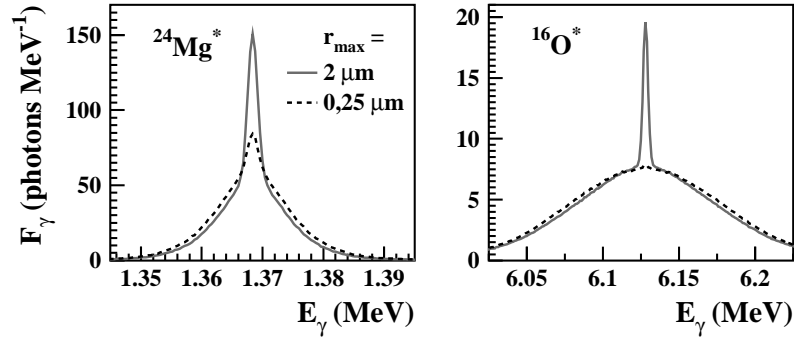


Figure 4.: *Profils de deux raies  $\gamma$  produites par les protons et les particules  $\alpha$  du rayonnement cosmique, celle du  $^{24}\text{Mg}^*$  à 1,369 MeV (à gauche) et celle de l' $^{16}\text{O}^*$  à 6,129 MeV (à droite), pour deux distributions en rayon  $r$  des grains de poussière du milieu interstellaire : une loi de puissance en  $r^{-3.5}$  de  $r_{\min}=5$  nm à  $r_{\max}=0,25$  ou  $2$   $\mu\text{m}$ . Les spectres calculés ont été normalisés à un photon émis dans chaque raie et convolués par une fonction de réponse caractéristique des détecteurs  $\gamma$  au germanium.*

tion, par exemple celle à 0,718 MeV issue de la désexcitation du  $^{10}\text{B}^*$  produit par fragmentation du  $^{12}\text{C}$  et de l' $^{16}\text{O}$  ambiants, ou encore celle à 0,931 MeV issue du  $^{55}\text{Fe}^*$ , qui résulte principalement de la réaction  $^{56}\text{Fe}(p,pn)^{55}\text{Fe}^*$ .

Des raies bien plus larges ( $\Delta E/E \sim 30\%$ ) découlent des collisions des noyaux relativement lourds du rayonnement cosmique avec l'hydrogène et l'hélium du milieu interstellaire. La plupart de ces raies s'entremêlent et contribuent à la bosse proéminente observée sur la figure 3 entre  $\sim 0.5$  et  $\sim 3$  MeV. Deux raies larges peuvent être néanmoins distinguées : celle du  $^{56}\text{Co}^*$  à 0,158 MeV ( $\Delta E \sim 50$  keV) produit par la réaction en cinématique inverse  $^1\text{H}(^{56}\text{Fe}, ^{56}\text{Co}^*)n$  et celle du  $^{12}\text{C}^*$  à 4,44 MeV ( $\Delta E \sim 1,5$  MeV). La raie large appelée  $\alpha$ - $\alpha$  est particulière : sa forme complexe résulte de l'amalgamation de deux raies de 0,429 et 0,478 MeV, produites respectivement par les réactions  $^4\text{He}(\alpha, n)^7\text{Be}^*$  et  $^4\text{He}(\alpha, p)^7\text{Li}^*$ .

La richesse d'un tel spectre montre la grande importance des prochaines détections de cette émission pour étudier tant le rayonnement cosmique que le milieu interstellaire. Outre des analyses de flux susceptibles de nous renseigner sur leurs compositions isotopiques et les distributions en énergie des particules accélérées, des études détaillées du profil de certaines raies pourraient révéler des propriétés particulières liées aux interactions des rayons cosmiques avec la matière interstellaire. A titre d'exemple, la figure 4 montre l'effet de la taille des grains de poussière du milieu interstellaire sur les profils des raies de 1,369 MeV ( $^{24}\text{Mg}^*$ ) et 6,129 MeV ( $^{16}\text{O}^*$ ). Les spectres calculés ont été convolués par une

fonction d'instrument caractéristique des détecteurs semi-conducteurs au germanium, tels que ceux du spectromètre d'INTEGRAL. On voit que pour une distribution en taille des grains s'étendant jusqu'à  $r_{max}=2 \mu\text{m}$ , les deux raies  $\gamma$  possèdent une composante très fine, de largeur égale à la résolution instrumentale ( $\Delta E \sim 2$  et  $\sim 4$  keV à respectivement 1,37 et 6,13 MeV). Cette composante est émise par des noyaux de  $^{24}\text{Mg}^*$  et d' $^{16}\text{O}^*$ , qui, piégés dans les grains interstellaires, sont fortement freinés avant de se désexciter. Ainsi, une détection de ces raies pourrait en principe permettre de repérer les plus gros grains de poussière du milieu interstellaire.

Signalons finalement que les rayons cosmiques doivent contribuer à l'intense émission interstellaire à 511 keV, au travers de la production de pions  $\pi^+$  ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  et  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ) et de radio-isotopes émetteurs  $\beta^+$  tels que le  $^{11}\text{C}$ , l' $^{13}\text{N}$ , l' $^{15}\text{O}$  etc... La principale source des positrons interstellaires pourrait néanmoins être les désintégrations  $\beta^+$  de noyaux radioactifs issus de la nucléosynthèse stellaire, en particulier le  $^{56}\text{Co}$  et le  $^{44}\text{Sc}$  (produits sous forme de  $^{56}\text{Ni}$  et de  $^{44}\text{Ti}$  dans les supernovas), ainsi que l' $^{26}\text{Al}$ .

### 3.2 Raies X

Les rayons cosmiques non-relativistes peuvent également produire une émission X caractéristique au travers de différents processus atomiques (Tatischeff et al., 1998). La figure 5 montre un spectre calculé de l'émission X produite par les ions du rayonnement cosmique dans les régions internes de la Voie lactée. Le spectre en traits pointillés a été obtenu sans prendre en compte l'absorption des photons X par effet photoélectrique avec les atomes interstellaires sur la ligne de visée. On voit que cette absorption peut être rédhitoire pour l'observation au dessous de quelques keV. Elle est toutefois sensiblement moins importante pour des sources plus proches du système solaire également susceptibles de produire des émissions X non-thermiques, comme les régions d'associations d'étoiles de type O ou B de la ceinture de Gould.

Le fond continu du spectre de cette émission X est principalement produit par Bremsstrahlung en cinématique inverse, c'est-à-dire par rayonnement des électrons ambiants au passage des champs Coulombiens associés aux ions rapides. Le Bremsstrahlung des électrons secondaires, i.e. les électrons ambiants qui sont accélérés par les impacts des ions incidents, contribue de façon négligeable (fig. 5).

Seules les raies  $K\alpha$  et  $K\beta$ , qui correspondent respectivement aux transitions atomiques  $2p \rightarrow 1s$  et  $3p \rightarrow 1s$ , ont été considérées pour cette figure. Dans le cas des ions rapides, les états  $2p$  et  $3p$  sont principalement peuplés par capture d'électrons ambiants au travers de réactions d'échange de charge, ainsi que par excitation des ions possédant avant la

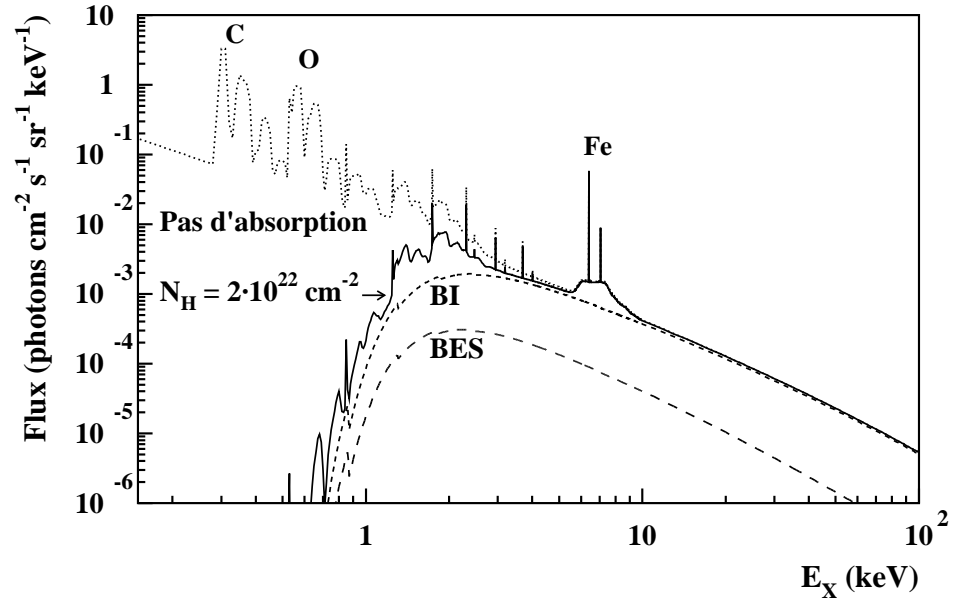


Figure 5.: Spectres calculés de l'émission X produite par les ions du rayonnement cosmique dans les régions internes de notre galaxie ( $300^\circ \leq \ell \leq 30^\circ$ ,  $|b| \leq 5^\circ$ ). Spectre en traits pleins : émission totale où l'absorption photoélectrique du milieu interstellaire est prise en compte avec une densité de colonne d'hydrogène de  $2 \times 10^{22}$  atomes  $\text{cm}^{-2}$ . Spectre en traits pointillés : émission totale sans prise en compte de l'absorption photoélectrique. BI : Bremsstrahlung inverse ; BES : Bremsstrahlung des électrons secondaires.

collision 1 ou 2 électrons dans l'état  $1s$ . Ces raies sont très larges. Par exemple, les raies  $K\alpha$  et  $K\beta$  des Fe XXVI ( $\text{Fe}^{+25}$ ) et Fe XXV ( $\text{Fe}^{+24}$ ), qui sont émises par des ions de  $\sim 10$  MeV/nucléon, fusionnent pour former une bosse caractéristique entre  $\sim 5,5$  et  $\sim 9$  keV (fig. 5). Soulignons que la détection d'une telle émission de raies très élargies pourrait constituer une signature sans équivoque de la présence d'ions de basse énergie dans le site astrophysique observé.

D'autres raies plus fines sont émises par les ions du milieu interstellaire, à la suite de l'ionisation de couches atomiques internes. Sur la figure 5, les plus intenses de ces raies fines sont celles du fer neutre à 6,4 et 7,1 keV (respectivement  $K\alpha$  et  $K\beta$ ). En comparaison avec les raies similaires produites par photoionisation (i.e. fluorescence), ces raies collisionnelles peuvent être élargies de plusieurs dizaines d'électron-volts et divisées en plusieurs composantes, du fait d'ionisations multiples suivant l'impact. Par exemple, la raie  $K\alpha$  du fer neutre produite par des ions O

de 1,9 MeV/nucléon est décalée vers le bleu de  $\sim 50$  eV et possède une largeur à mi-hauteur  $\Delta E \sim 100$  eV (Garcia et al., 1973). De telles signatures spectrales pourraient en principe être identifiées avec des satellites actuellement en observation comme XMM-Newton.

Une émission de raies X des atomes interstellaires peut également résulter d'impacts d'électrons accélérés. Ainsi, une éventuelle population d'électrons suprathermiques contribuant par Bremsstrahlung à l'émission de fond galactique au dessus de  $\sim 10$  keV (voir § 2.1), pourrait également produire des raies caractéristiques dans le domaine des rayons X mous. En particulier, cette population d'électrons pourrait contribuer au complexe des raies K du fer, dont l'origine dans l'émission de fond de la Voie lactée est aujourd'hui discutée.

#### 4. Conclusion

Depuis la découverte du rayonnement  $\gamma$  diffus de notre galaxie (Clark et al., 1968), les modèles d'accélération, de propagation et d'émission des rayons cosmiques se sont considérablement développés. Si les processus émissifs sont aujourd'hui globalement identifiés, les données d'observations toujours plus contraignantes mettent en lumière des propriétés encore mal comprises des rayons cosmiques. Ainsi, l'émission  $\gamma$  interstellaire au dessus de  $\sim 1$  GeV semble indiquer que les distributions en énergie des noyaux et/ou des électrons du rayonnement cosmique sont plus durs dans les régions internes de la Voie lactée que celles mesurées au voisinage terrestre. Cela pourrait nous renseigner sur leurs sources d'accélération, mais aussi sur leur transport dans la galaxie. Cette question est sans doute également liée à l'observation de la distribution en longitude de cette émission interstellaire, qui semble être sensiblement plus plate que celle des vestiges de supernovas. Il est évident qu'une identification directe en rayons  $\gamma$  des sources astrophysiques des noyaux accélérés, ce qui paraît être à la portée des prochains satellites AGILE et GLAST, constituera une avancée significative pour cette problématique.

L'origine du rayonnement de fond galactique de  $\sim 10$  keV à  $\sim 30$  MeV demeure l'un des mystères prégnants de l'astrophysique des hautes énergies. Il apparaît primordial de déterminer si cette émission résulte entièrement d'une superposition de nombreuses sources stellaires non-résolues ou si elle est au moins en partie de nature interstellaire. Cette question devrait grandement bénéficier des observations actuellement réalisées avec l'imageur d'INTEGRAL. Le cas échéant, elle pourrait révéler une composante importante du rayonnement cosmique de basse énergie, qui est peut-être associée à des processus d'accélération stochastique dans la phase chaude du milieu interstellaire (Dogiel et al., 2002).

D'une manière générale, le rayonnement cosmique demeure bien mal connu aux énergies non-relativistes, où ses effets dans le milieu interstellaire sont les plus importants, qu'il s'agisse d'ionisation, de chauffage, d'astrochimie ou de nucléosynthèse. Les émissions de raies  $\gamma$  et X apparaissent ici comme les moyens d'étude privilégiés de ces processus. Le développement d'instruments spatiaux toujours plus performants permet d'envisager avec optimisme les prochaines détections de ces émissions.

**Acknowledgments.** Je remercie Jean-Pierre Thibaud de sa lecture critique du manuscrit.

### Références

- Alcaraz, J. et al., 2000, *Phys. Lett.*, B490, 27.  
Boezio, M. et al., 2000, *ApJ*, 532, 653.  
Breitschwerdt, D., Dogiel, V. A., & Völk, H. J., 2002, *A&A*, 385, 216.  
Clark, G. W., Garmire, G. P., & Kraushaar, W. L., 1968, *ApJ*, 153, L203.  
Dogiel, V. A., Inoue, H., Masai, K., Schönfelder, V., & Strong, A. W., 2002, *ApJ*, 581, 1061.  
Garcia, J. D., Fortner, R. J., & Kavanagh, T. M., 1973, *Rev. Mod. Phys.*, 45, 111.  
Gleeson, L. J., & Axford, W. I., 1968, *ApJ*, 154, 1011.  
Grimani, C. et al., 2002, *A&A*, 392, 287.  
Kozlovsky, B., Murphy, R. J., & Ramaty, R., 2002, *ApJS*, 141, 523.  
Menn, W. et al., 2000, *ApJ*, 533, 281.  
Meyer, J.-P., Drury, L. O'C., & Ellison, D. C., 1997, *ApJ*, 487, 182.  
Moskalenko, I. V., & Strong, A. W., 1998, *ApJ*, 493, 694.  
Ramaty, R., Kozlovsky, B., & Lingenfelter, R. E., 1979, *ApJS*, 40, 487.  
Skibo, J. G., & Ramaty, R., 1993, *A&AS*, 97, 145.  
Strong, A. W., Moskalenko, I. V., & Reimer, O., 2000, *ApJ*, 537, 763.  
Tatischeff, V., Ramaty, R., & Kozlovsky, B., 1998, *ApJ*, 504, 874.  
Torres, D. F., Romero, G. E., Dame, T. M., Combi, J. A., & Butt, Y. M., 2003, *Phys. Rep.*, 382, 303.