

Détermination des Flux des Photons Gamma de Basse Énergie d'Origine Cosmique dans l'Atmosphère

I. M. MARTIN et S. L. G. DUTRA

Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos SP

G. VEDRENNE et P. MANDROU

Centre D'Études Spatiales des Rayonnements (CESR), Toulouse, France

Recebido em 20 de Agosto de 1974

In this paper, we describe the technique and the result of the measure of the cosmic y-ray spectrum, in the energy range 1 to 15 MeV, with a omnidirectional detector placed in balloon borne experiment. The comparison of our results with those of other measurements, and theoretical predictions as well, are described.

Descrevemos, neste trabalho a técnica e o resultado obtido na medida do espectro de raios γ de origem cósmica entre 1 e 15 MeV, utilizando um detetor omnidirecional a bordo de balão estratosférico. A comparação dessas medidas com as de outros experimentadores, assim como previsões teóricas, são descritas.

1. Introduction

L'utilisation de ballons stratosphériques, de fusées-sondes et satellites, a permis d'effectuer des observations dans une bande du spectre électromagnétique pour lesquelles l'atmosphère terrestre est opaque. Ces moyens d'observation ont ainsi permis, ces dernières années, le développement de branches nouvelles de l'astronomie telle que l'astronomie X et γ . Dans ce domaine, les objectifs essentiels sont, d'une part, l'étude de sources discrètes d'origine galactique et extragalactique et, d'autre part, la détermination du spectre et de la distribution spatiale de la composante diffuse du rayonnement cosmique. Les sources discrètes distribuées dans l'Univers peuvent d'ailleurs être à l'origine de cette composante diffuse, mais les observations actuelles sont encore très rares et ne peuvent conduire à des conclusions définitives. Cependant, il n'est pas exclu que le bruit de fond γ soit le témoin de processus énergétiques remontant à une époque très reculée où notre Univers était jeune. Des interprétations dans ce sens ont déjà été avancées (Stecker)¹ et (Bui-Van et Hurley)².

En fait, les différents modèles théoriques proposés conduisent, dans le domaine 1 – 30 MeV, à des spectres de photons qui ne sont pas

très différents quant à la forme. Cela signifie que pour tenter une approche de l'origine de cette composante diffuse, son spectre doit être déterminé avec beaucoup de précision. Or, les difficultés d'expérimentation, quoique de nature quelque peu différente, selon le véhicule (ballon ou satellite) utilisé sont toujours grandes.

Les expérimentations à bord de satellites présentent l'avantage d'éviter l'influence de l'atmosphère terrestre et, par là même, d'éviter une contribution parasite importante. Cependant, les détecteurs utilisés, qui mettent en œuvre la plupart du temps des scintillateurs inorganiques du type NaI, s'activent sous l'effet des particules chargées. Les flux de ces particules sont notables en dehors de la magnétosphère, à cause de l'importance du rayonnement cosmique; de même à l'intérieur de la magnétosphère, outre les régions des ceintures de radiation (qui sont le plus souvent évitées), il existe des zones où les densités des particules sont élevées par suite de l'anomalie sud américaine. Dans tous les cas, il peut donc y avoir activation du cristal d'iodure de sodium, conduisant à des émissions de rayons γ avec les périodes variant de quelques dizaines de microsecondes à une cinquantaine de jours. Ainsi, pour un cristal de 25 g/cm^2 d'épaisseur (ce qui correspond aux caractéristiques des détecteurs utilisés sur les satellites ERS 18 et APOLLO 15), le calcul montre que le flux γ induit dans la gamme de 1 à 30 MeV est comparable au flux de la composante diffuse (Fishman)³ (Dyer *et al.*)⁴. Il est donc très difficile de se protéger contre cet effet d'activation et, de ce fait, il est nécessaire d'en tenir compte lors des dépouillements.

En outre, le rayonnement cosmique (ainsi que les particules chargées émises lors des sursauts solaires) provoque dans la structure même du satellite des interactions qui donnent lieu à des émissions de photons secondaires équivalentes à celles produites dans une atmosphère résiduelle de 4 g/cm^2 (Peterson *et al.*)⁵.

La principale difficulté, pour l'interprétation des observations effectuées à bord de ballons stratosphériques, est de séparer la composante diffuse d'un bruit de fond d'origine atmosphérique variable en fonction de la latitude et qu'il importe de déterminer avec précision. La présence de particules chargées d'origine secondaire peut, en outre, conduire à des phénomènes d'activation des scintillateurs analogues à ceux cités plus haut. Dans le cas du détecteur utilisé pour l'expérience décrite dans ce mémoire, il a été tenu compte de cet effet et un calcul a été effectué en considérant le flux de particules chargées mesuré,

soit 1 à 1,3 particules/cm².s. d'énergie supérieure à 0,7 MeV. Par rapport aux expériences en satellite du type ERS 18 ou APOLLO 15, cet effet est très atténué, en particulier à basse latitude géomagnétique.

Les mécanismes de production du rayonnement γ susceptibles d'intervenir dans l'atmosphère terrestre et dans l'espace interstellaire sont:

- Rayonnement de freinage des électrons, c'est-à-dire diffusion inélastique d'électrons dans le champ coulombien d'un noyau ou d'un électron;
- Rayonnement synchrotron qui correspond à l'émission de photons par les électrons défléchis dans un champ magnétique;
- Diffusion Compton inverse, c'est-à-dire l'interaction des électrons de grande énergie avec des photons (par exemple les photons de la lumière stellaire), peut donner lieu à un important transfert d'énergie et produire ainsi des photons X et γ ;
- Annihilation des positrons, et création de paires de photons γ d'énergie 0,511 MeV;
- Desexcitation nucléaire: des interactions nucléaires entre noyau et neutron, ou proton, peuvent exciter les noyaux d'atomes et leur desexcitation donne lieu à l'émission de photons γ ;
- Désintégration $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Les mésons neutres sont produits par des interactions fortes de protons avec le noyau de l'atome. La désintégration de ces mésons neutres est une source importante de photons γ dans l'atmosphère et dans l'espace interstellaire.

Pour la composante diffuse d'origine extraterrestre, les mécanismes de production de photons γ restent à établir. Néanmoins, plusieurs modèles ont été suggérés faisant appel aux processus suivants:

- Diffusion inverse Compton des électrons relativistes éjectés des radiogalaxies avec les photons du rayonnement universel (Brecher et Morrison)⁶.
- Interaction des rayons cosmiques avec le gaz intergalactique (Stecker)⁷;
- Annihilation matière-antimatière à des époques très lointaines (Omnès)⁸.

Ces modèles font apparaître un excès du flux des rayons γ par rapport au flux des rayons X, ce qui semble conforme aux résultats expérimentaux; mais ils ne sont pas capables d'expliquer les valeurs des flux observés. Une tentative a été faite afin d'expliquer les flux observés

simultanément dans les domaines de rayons X et des photons γ de 1 MeV (Bui-Van et Hurley)². Cette dernière approche repose sur les mêmes processus évoqués par Brecher et Morrison; mais il est tenu compte des diffusions multiples inverse Compton des rayons X avec les électrons relativistes qui peuvent produire des rayons γ de haute énergie (Brecher et Morrison)⁶. En tout état de cause, ces modèles reposent sur des résultats expérimentaux qui ne peuvent pas être considérés comme définitifs, compte tenu du nombre encore très restreint des mesures effectuées en particulier dans le domaine d'énergie de 1 à 50 MeV (Vette et *al.*)⁹, (Vedrenne et *al.*)¹⁰, (Trombka et *al.*)¹¹.

Le but de ce travail est de montrer la détermination du flux des photons γ d'origine cosmique. Les résultats expérimentaux et les calculs que nous avons développés montrent qu'il est possible, grâce à des expériences embarcables en ballons stratosphériques et effectuées à basse latitude, d'évaluer la composante du bruit de fond diffus d'origine extraterrestre dans la région de 1 à 15 MeV.

2. Ensemble de Détection

Les techniques de détection et d'analyse des rayonnements gamma dans les expériences spatiales (ballons, fusées-sondes, satellites) dépendent du domaine d'énergie considéré et mettent en oeuvre des instruments différents dont la liste principale est la suivante:

- Compteurs proportionnels pour des énergies comprises entre quelques eV et 10 keV;
- Détecteurs à scintillation entre 10 keV et 30 MeV;
- Chambres à étincelles pour des énergies supérieures à 30 MeV.

Le domaine d'étude abordé (0,7 MeV, 20 MeV environ) nécessite l'emploi de détecteurs à scintillation équipés de cristaux organiques (stilbène, antracène, scintillateurs plastiques) ou de cristaux inorganiques (NaI(Tl), CsI(Na), Ge(Li), Ca F₂(Eu), etc.) selon la gamme exacte d'énergie et la nature des particules à détecter.

Dans le domaine d'énergie 1 à 15 MeV, il n'existe pas à nos jours de détecteur de photons γ qui soit directif et utilisable pour des expériences dans l'espace.

Dans notre cas, le scintillateur d'analyse est un cristal de NaI (Tl) (10,16 cm x 10,16 cm) associé à un photomultiplicateur du type

RCA 8055. Ce détecteur est protégé par un boîtier d'aluminium, de 1 mm d'épaisseur, et le couplage optique du photomultiplicateur est effectué par un disque de PERPEX de 2mm d'épaisseur déposé sur le NaI(Tl). Ce scintillateur d'analyse est placé dans un puits de scintillateur plastique NE 102 A de 2 cm d'épaisseur, couplé à un photomultiplicateur XP 1030 RTC. Ce scintillateur plastique permet d'éliminer les particules chargées qui interagissent dans le détecteur, grâce à un système d'anticoïncidence (Figure 1).

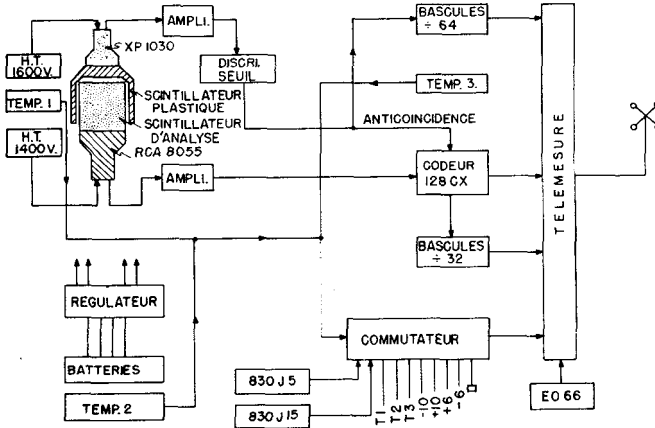


Fig. 1 - Schéma synoptique de l'ensemble de détection.

Le plot de synchronisation du codeur est utilisé pour déclencher le comptage intégrés des photons jusqu'à 18 MeV. Un système de télémesure FM/FM transmet l'ensemble des informations scientifiques ainsi que différents paramètres physiques et techniques (pression atmosphérique, températures, tensions d'alimentation).

La linéarité et la résolution du scintillateur d'analyse, ainsi que l'étalement du codeur de 128 canaux, sont vérifiés grâce à une série de sources monoénergétiques des rayons γ : ^{22}Na (0,511 MeV et 1,28 MeV); ^{137}Cs (0,662 MeV); ^{60}Co (1,17 MeV et 1,33 MeV); ^{88}Y (1,84 MeV); ^{228}Th (2,62 MeV); (Am-Be) (4,43 MeV).

Les impulsions provenant du photomultiplicateur RCA 8055 sont amplifiées et transmises à un codeur à 128 canaux. L'analyse du codeur ne peut être effectuée qu'en l'absence de toutes impulsions provenant du scintillateur plastique. Cette voie d'anticoïncidence a un seuil en énergie de 0,7 MeV.

Le calcul de la fonction de réponse du scintillateur ainsi que la méthode de restitution du spectre du rayonnement γ incident a partir du spectre experimental sont decrits par (MARTIN)^{1,2}.

3. Estimation du Flux des Photons γ d'Origine Cosmique entre 1 et 15 MeV

La determination du spectre du bruit de fond diffus a été obtenu en effectuant la comparaison entre les flux mesurés et le flux calculé a 4 mb et a 12 GV de coupure geomagnétique. Entre 0,7 et 4,5 MeV, nous avons obtenu le spectre des photons γ d'origine cosmique en faisant la comparaison entre les spectres mesurés à 4 mb et à differentes latitudes (VEDRENNE et al.)¹⁰; (MARTIN)¹². Il a été montré que le spectre du bruit de fond continu d'origine atmosphérique, a 4 mb et a 12 GV, peut s'écrire:

$$\left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{CALCULÉ}} = \left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{HI}} + \left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{HS}}, \quad (1)$$

ou, a $(dN/dE)_{\text{HI}}$, correspond le flux des photons γ venant de l'hemisphere inférieure et, a $(dN/dE)_{\text{HS}}$, de l'hemisphere supérieure.

Entre 1 et 15 MeV, la meilleure approximation calculée de ces spectres est:

$$\left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{HI}} = 0,18 E^{-1,2} \quad \text{photons/cm}^2 - \text{s} - \text{MeV},$$

$$\left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{HS}} = 0,06 E^{-1,1} \quad \text{photons/cm}^2 - \text{s} - \text{MeV}.$$

Le spectre global, mesuré a 4 mb, lors des vols de ballons effectués en 07/10/73 et 20/10/73, a partir de São José dos Campos, de coordonnés geographiques (23°12'S et 45°9'W), est donnée par:

$$\left(\frac{dN}{dE}\right)_{\text{MESURÉ}} = 0,3 E^{-1,2} \quad \text{photons/cm}^2 - \text{s} - \text{MeV}.$$

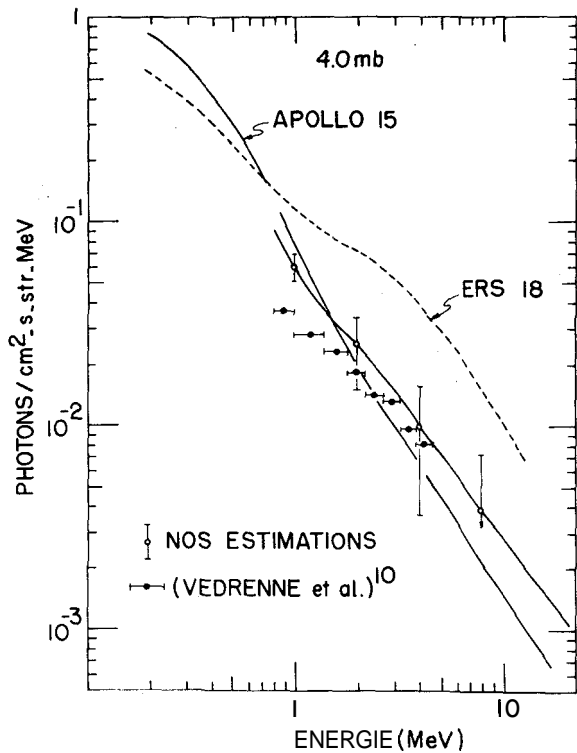


Fig. 2 - Spectres des photons γ d'origine cosmique mesurés a 4 mb.

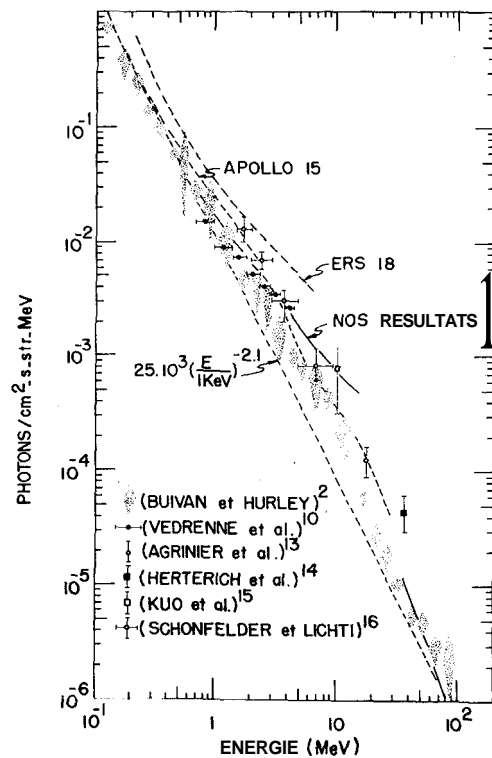


Fig. 3 - Spectre des photons γ d'origine cosmique.

L' excès de flux observé est obtenu par la différence $(dN/dE)_{\text{MESURÉ}} - (dN/dE)_{\text{CALCULÉ}}$, que nous avons déduite comme étant le spectre du bruit de fond diffus absorbé de la pression résiduelle de 4 mb.

Le spectre qu'en résulte de cette différence est porté sur la Figure 2 et les erreurs indiqués sur celle-ci ont été estimées d'après la Ref. 12.

Le spectre présenté sur la Figure 3 représente les flux des photons γ d'origine cosmique obtenu après correction de l'absorption atmosphérique, celle-ci tenant compte des diffusions multiples des photons γ dans l'atmosphère.

En fait, compte tenu des méthodes utilisées, a savoir l'extrapolation des courbes de montée a différentes énergies, il faut considérer que ces flux correspondent a des limites supérieures. Néanmoins, comme cette méthode de détermination des flux de photons γ , par des mesures dans l'atmosphère, n'est pas affectée par les phénomènes d'activation dans les détecteurs d'analyse, elle présente un grand intérêt dans l'avenir pour la détermination de la composante des photons γ d'origine cosmique. Mais les conditions d'observation seront meilleurs s'il est possible, d'une part, d'effectuer des mesures a basse latitude avec des détecteurs directifs et, d'autre part, d'augmenter la précision statistique sur la détermination des courbes de montée grâce a des ballons dont la vitesse ascensionnelle serait faible.

4. Conclusion

En conclusion, ce travail apporte une meilleure connaissance du spectre des photons γ d'origine cosmique, entre 1 et 15 MeV. En outre, nous avons montré la possibilité d'accéder a la détermination du bruit de fond γ d'origine extraterrestre grâce a des expériences en ballons. Les résultats obtenus justifient des nouvelles mesures a basse latitude a l'aide de détecteurs demi-directifs et des ballons-sondes.

Les auteurs expriment sa gratitude a Dr. Fernando de Mendonça, Dr. Luiz Gylvan Meira Jr. et au Professeur F. Cambou pour avoir appuyé cette recherche. Ce travail a été possible grâce à la collaboration scientifique entre l'INPE, Brésil, et le CESR et CNES, France.

Bibliographie

1. F. W. Stecker, *Ap. J.* 157, 507 (1969).
2. A. Bui-Van et K. Hurley, *Ap. J.* **188**, L 51 (1974).
3. G. J. Fishman, *Ap. J.* 171, 163 (1972).
4. C. S. Dyer, A. R. Engel et J. J. Quenby, *Astrop. and Sp. Sci.* **19**, 359 (1972).
5. L. E. Peterson, J. I. Vette et R. L. Jerde, UCSD-SP-70-03 (1970).
6. K. Brecher et P. Morrison, *Phys. Rev. Letters* **23**, 802 (1969).
7. F. W. Stecker – NASA-SP-259 (1971).
8. R. Omnès, *Phys. Rev. Letters* **23**, L 38 (1969).
9. J. I. Vette, D. Gruber, J. L. Matteson et L. E. Peterson, *Ap. J.* **160**, L 161 (1970).
10. G. Vedrenne, F. Albernhe, I. M. Martin et R. Talon, *Astrop. and Sp. Sci.* **15**, 50 (1971).
11. J. I. Trombka, A. E. Metzger, J. R. Arnold, J. L. Matteson, R. C. Reedy et L. E. Peterson, *Ap. J.* 181, 737 (1973).
12. I. M. Martin, Thèse d'Etat, Université de Toulouse, France (1974).
13. B. Agrinier, M. Forichon, J. P. Leray, B. Parlier, T. Montmerle, G. Boella, L. Marashi, B. Sacco, L. Scarsi, J. M. da Costa, R. A. R. Palmeira, 13 th Cosmic Ray Conference, Denver, USA (1973).
14. K. Herterich, K. Pinkau, H. Rothermel et M. Sommer, 13 th Cosmic Ray Conference, Denver, **1**, (1973).
15. F. S. Kuo, G. M. Frye et A. D. Zych, *Ap. J.* **186**, L 51 (1974).
16. V. Schonfelder et R. Lichti, Reprint MPI-PAE/Extraterr.95 – Garching – Munich (1974).