

INPE-510-RI/216

TÍTULO: DETERMINATION DES FLUX DE PHOTONS
GAMMA DE BASSE ENERGIE D'ORIGINE
COSMIQUE DANS L'ATMOSPHERE

PROJETO: TELA

AUTORES: I.M. Martin, S.L.G. Dutra, G.
Vedrenne et P. Mandrou

REVISADO EM AGOSTO DE 1975



Coordenador

cc: 14

DETERMINATION DES FLUX DE PHOTONS GAMMA DE BASSE ENERGIE
D'ORIGINE COSMIQUE DANS L'ATMOSPHERE

I.M. Martin et S.L.G. Dutra
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
São José dos Campos - São Paulo - Brasil

G. Vedrenne et P. Mandrou
Centre d'Etudes Spatiale des Rayonnements - CESR
Toulouse - France

RESUMO

Neste trabalho descrevemos a técnica e o resultado obtido no que diz respeito a medida do espectro de raios γ de origem cósmica entre 1 a 15 MeV, utilizando um detetor omnidirecional a bordo de balão estratosférico. A comparação destas medidas com as de outros experimentados, assim como previsões teóricas, são descritas.

ABSTRACT

In this paper we describe the technique and the result of measurements of the cosmic γ -ray spectrum in the energy range 1 to 15 MeV with an omnidirectional detector placed in a balloon borne experiment. The comparison of these results with other measurements and theoretical estimates is also described.

I - 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'observations 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) utilisés 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 oeuvre 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 $1.3 \text{ particules/cm}^2 \cdot \text{s}$. 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 intergalac-

tique (STECKER)⁷.

- Annihilation matière-antimatière à des époques très lointaines (OMNES)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.

II - ENSEMBLE DE DETECTION

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 des détecteurs des 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 2 mm 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).

Le plot de synchronisation du codeur est utilisé pour déclencher le comptage intégré 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'étalonnage du codeur de 128 canaux, sont vérifiées 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 à partir du spectre expérimental est décrit par (MARTIN)¹²

III - ESTIMATION DU FLUX DES PHOTONS γ D'ORIGINE COSMIQUE ENTRE 1 ET 15 MeV

La détermination du spectre du bruit de fond-diffus a été obtenue en effectuant la comparaison entre les flux mesurés et le flux calculé à 4 mb et à 12 GV de coupure géomagnétique. Entre 0.7 à 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 différentes latitudes (VEDRENNE et al)¹⁰; (MARTIN)¹². Il a été montré que le spectre du bruit de fond continu d'origine atmosphérique à 4 mb et à 12 GV peut s'écrire par:

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

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

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

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

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

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

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

Les excès de flux observé est obtenu par la différence $(dN/dE)_{\text{MESURE}} - (dN/dE)_{\text{CALCULÉ}}$, que nous avons déduit 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 indiquées 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 à savoir l'extrapolation des courbes de montée à différentes énergies, il faut considérer que ces flux correspondent à 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'observations seront meilleures s'il est possible d'une part d'effectuer des mesures à basse latitude avec des détecteurs directifs et d'autre part d'augmenter la précision statistique sur la détermination des courbes de montée grâce à des ballons dont la vitesse ascensionnelle serait faible.

CONCLUSION

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment sa gratitude à Dr. Fernando de Mendonça, Dr. Luiz Gylvan Meira Jr. et au Professeur F. Cambou pour avoir appuyer ce 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. Abernhe, 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'État, 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, 13th Cosmic Ray Conference, Denver, USA (1973).
14. K. Herterich, K. Pinkau, H. Rothermel et M. Sommer, 13th 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).

LÉGENDE DES FIGURES

- Figure 1 Schéma synoptique de l'ensemble de détection.
- Figure 2 Flux de photons γ d'origine cosmique à 4 mb.
- Figure 3 Flux de photons γ d'origine cosmique.

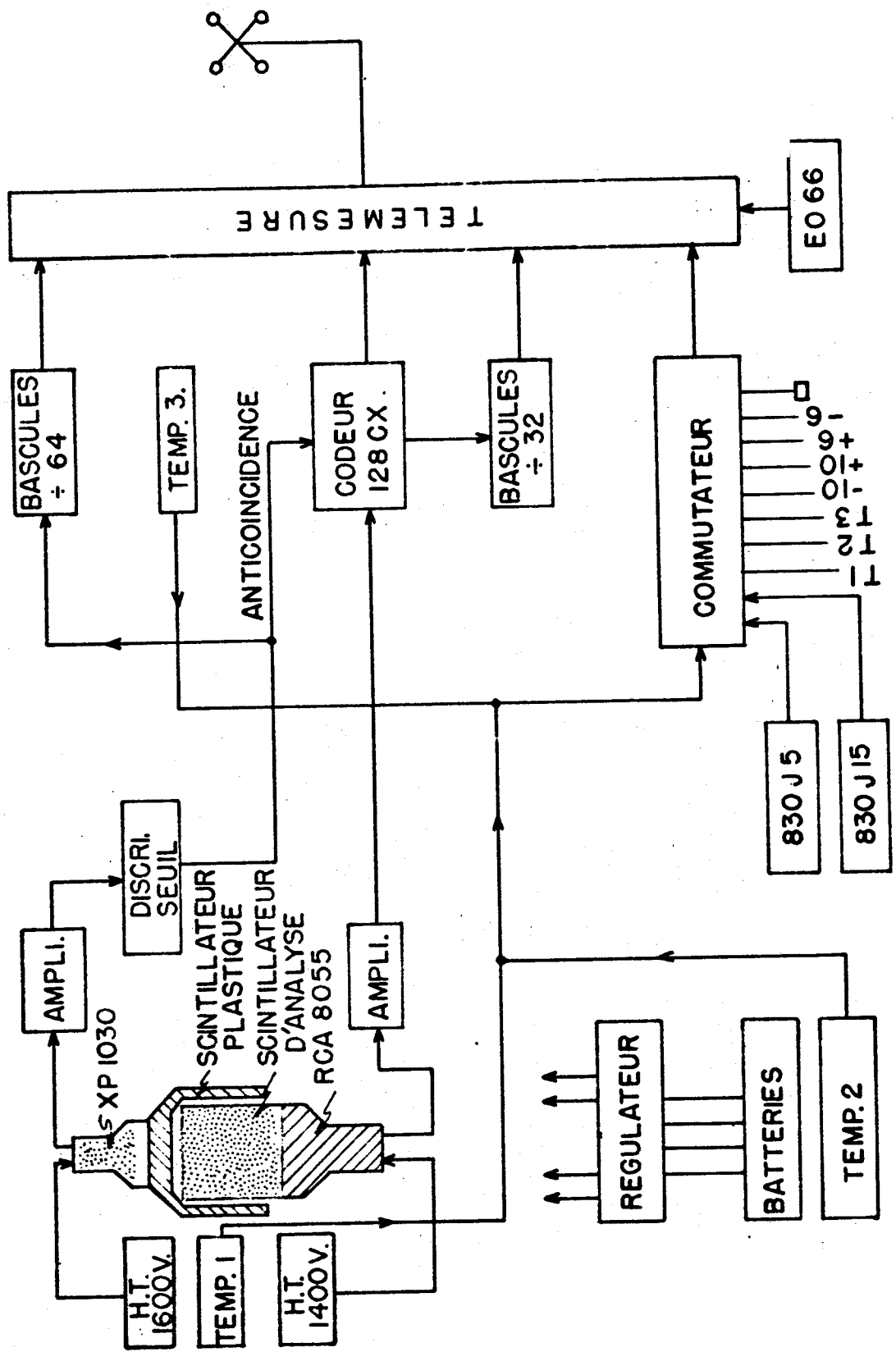


Fig. 1

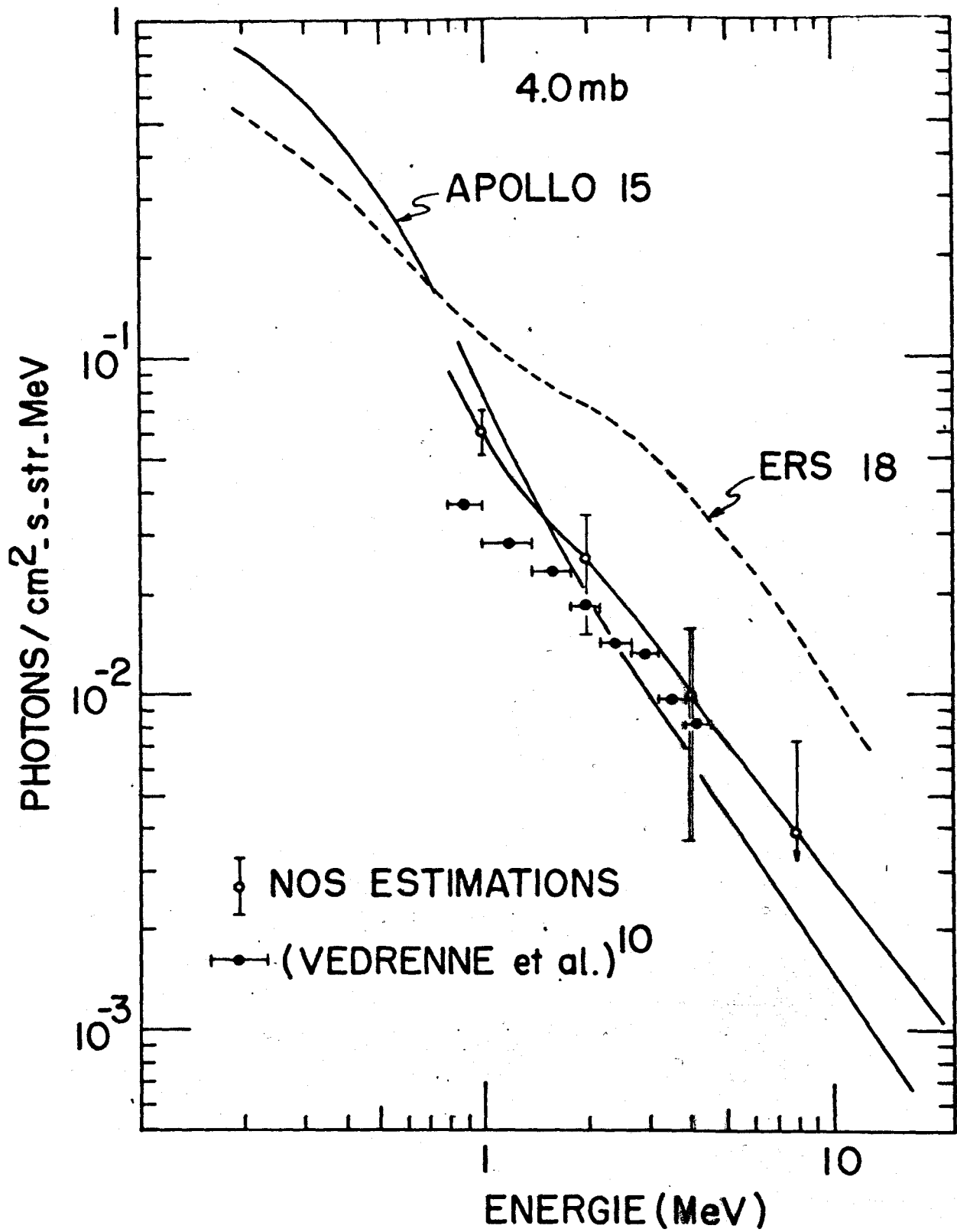


Fig. 2

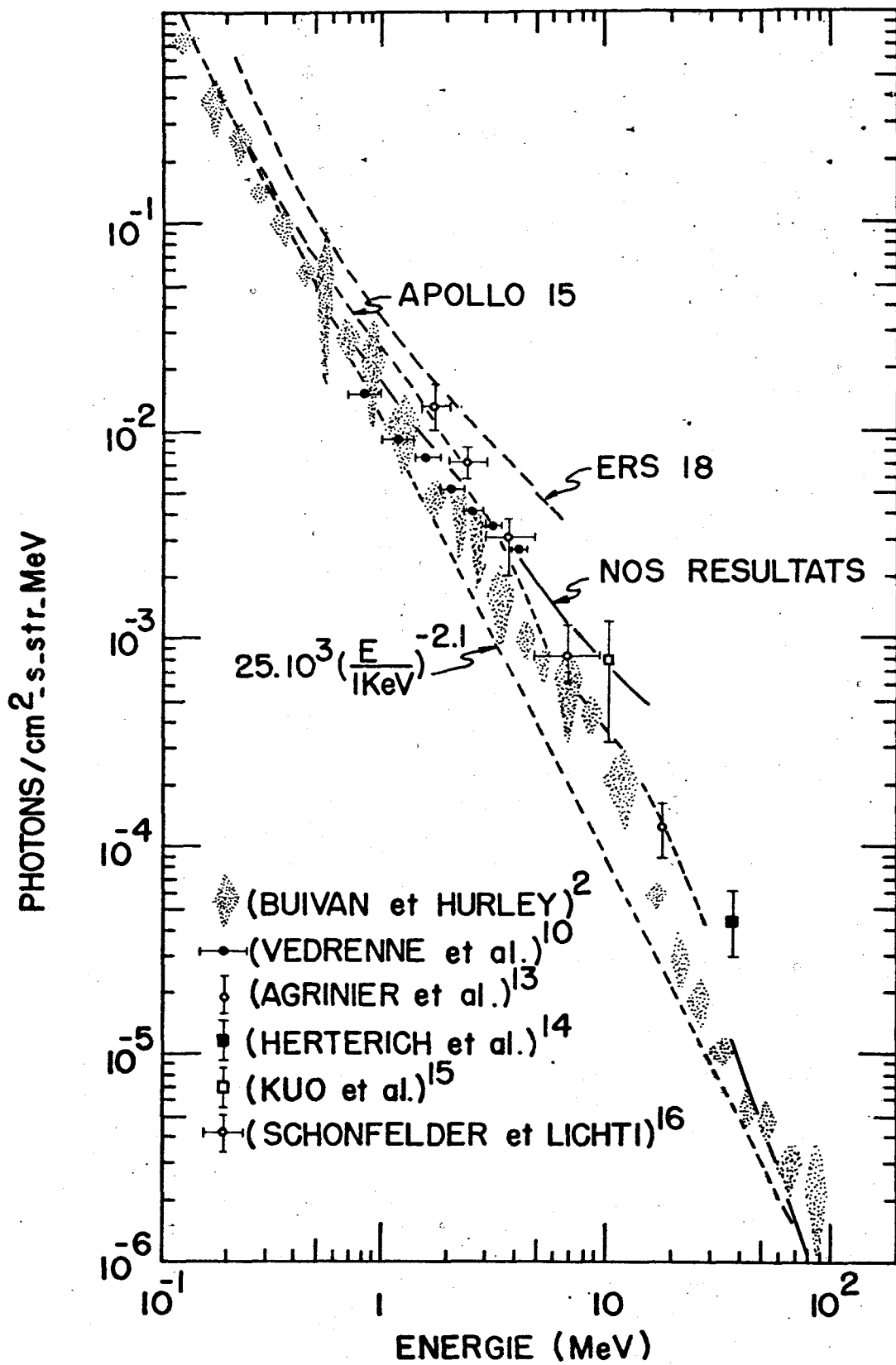


Fig. 3