

1 MeV 領域の銀河 γ 線の上限*

奥平清昭**・平島 洋**・山上隆正**

概 要

1 MeV 領域における γ 線を気球で観測した。2 個の NaI に鉛をはさんだ response が非等方的なカウンターを用いて γ 線の方向分布を測定した。その結果、観測された γ 線の $(34 \pm 17)\%$ は銀河 γ 線の可能性がある。更にホスヴィッチ・カウンターで γ 線のエネルギー・スペクトルを測定した。方向分布の測定の結果も考慮して、銀河 γ 線の上限は $(4.3 \pm 2.1) \times 10^{-3}$ counts/cm² sec ster MeV と与えられる。

1. 序 論

$\lesssim 100$ KeV の硬 X 線および $\gtrsim 10$ MeV の高エネルギー γ 線は従来技術的な困難さが克服しやすい点から観測結果も比較的多い。 γ 線天文学が Hayakawa[1], Morrison[2], Savedoff [3] により提唱されてから最初に観測が試みられたのも [4] 50 MeV 近傍の $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ による銀河 γ 線に対してであった。1 MeV 近傍の γ 線の観測も若干はある。このエネルギー領域の γ 線を観測する際には、大気からまたは人工衛星などの飛しょう体から発生する γ 線に対する考慮がなされねばならない。

現在まで観測が行なわれた等方的な銀河 X 線および γ 線に対していろいろな説明が試みられている。1965 年に 3°K の cosmic black body radiation が発見されたが [5][6], この光子に高エネルギー電子が衝突する逆コンプトン効果により銀河 X 線および γ 線の説明をしようとする試みもなされている [7][8]。銀河 γ 線の観測は宇宙論とも関連してその結果が重要であるから、我々は大気中で発生した γ 線の寄与に対する考慮を払った。

2. γ 線の方向分布

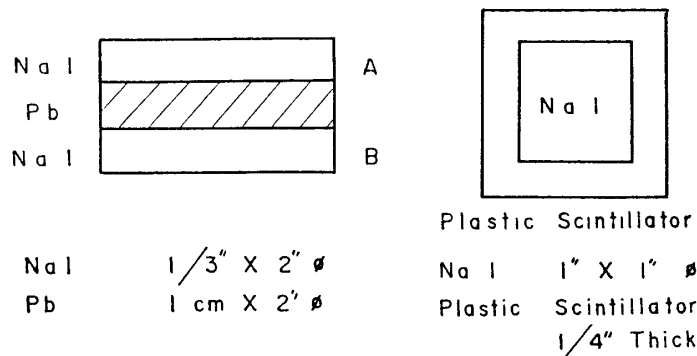
2.1 方向分布観測装置 (2 結晶カウンター)

我々はシンチレーション・カウンターを用い ~ 10 gcm⁻² の高度での γ 線の方向分布を観測された γ 線のうちの銀河 γ 線の割合の上限を求めた。

γ 線の方向分布を測定するためのシンチレーション・カウンターは第 1 図(a) に示すように 2 個の $1/3^\circ \times 2^\circ \phi$ の NaI の間に $1\text{cm} \times 2^\circ \phi$ の鉛をはさんだものである (“2 結晶カウンター” と呼ぶ)。この 2 結晶カウンターのおおの NaI の response は γ 線の入射方向により異なる。鉛の後方にある NaI ではことに鉛による吸収のため計数率が減る。2 結晶カウンター中の一つの NaI について Cs¹³⁷ の γ 線 (662 KeV) の全吸収に対する response

* 宇宙研特別事業費による研究論文

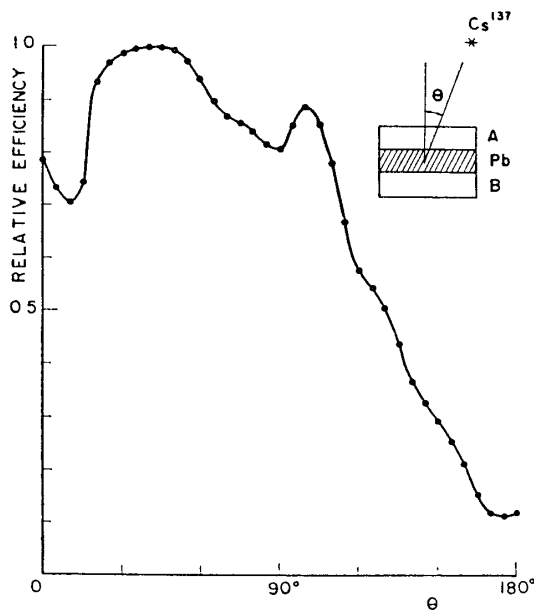
** 立教大学理学部物理学教室



(a) 2結晶カウンター (方向分布測定用) (b) ホスヴィッチ・カウンター (エネルギー・スペクトル測定用)

第1図 1 MeV 領域 γ 線観測用シンチレーション・カウンター

の方向依存性を第2図に示す。パルス高対エネルギーの校正には Cs^{137} の γ 線を用いた。またそれぞれ二つの NaI について計数としてとるエネルギーの下限は NaI A に対しては 440 KeV, NaI B に対しては 400 KeV である。同じ線源に対しても二つの NaI のエネルギー

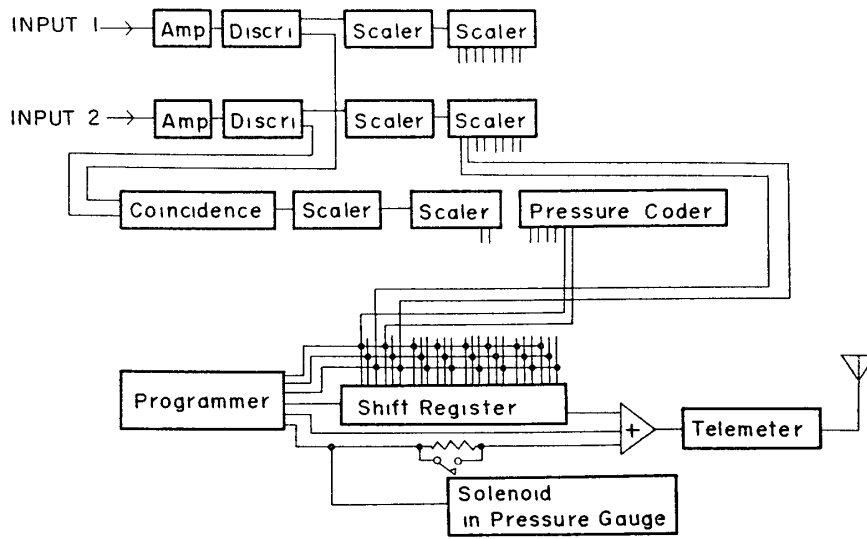


第2図 2結晶カウンターの Response の方向依存性

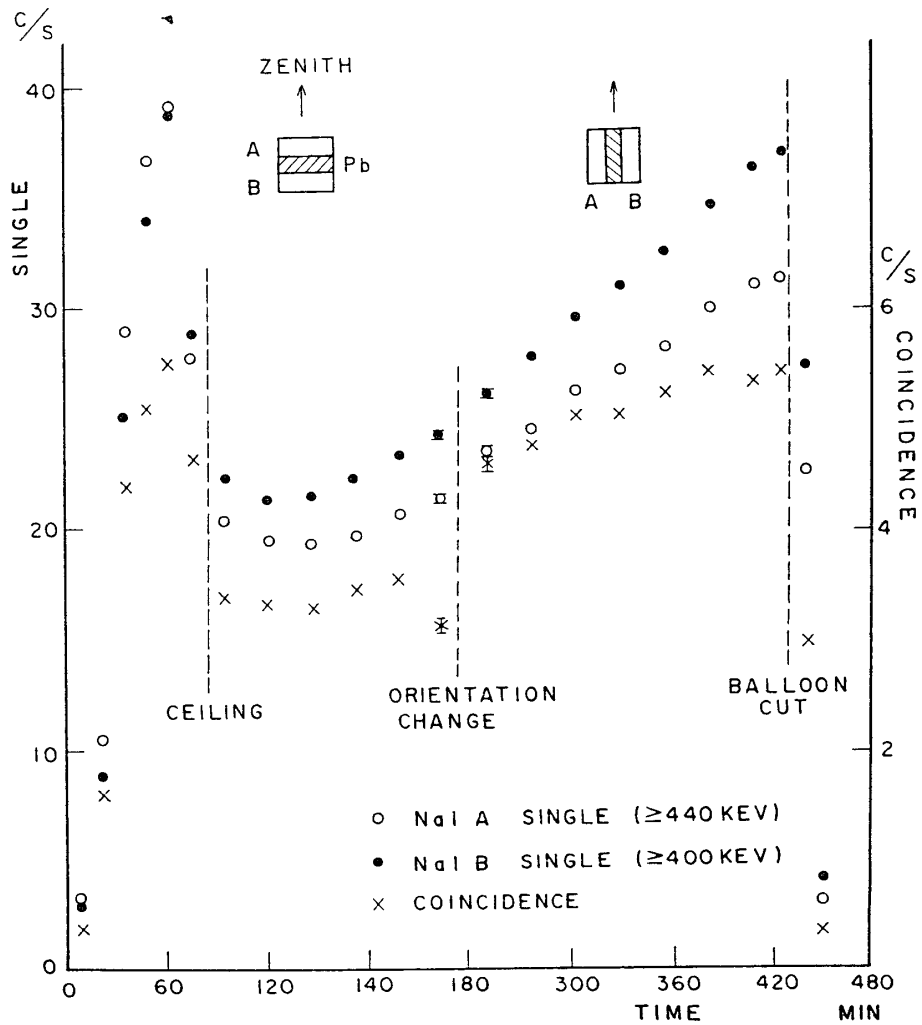
下限の差によってそれぞれの NaI の計数率の絶対値は異なる。そこで後述するように2結晶カウンターの軸方向をタイマで切り換え、軸が水平方向にあるとき二つの NaI の計数率の比を基準としてとることによって、このエネルギー下限の差による計数率の違いを規格化した。

気球は 1966 年 9 月 29 日に飛揚され、地磁気緯度 $\lambda=26^\circ N$ のところで 14.2 gcm^{-2} の高度まで達した。110 分間水平飛行を行なったのち、ゆっくりと高度が下り、 49 gcm^{-2} になったときに気球から装置が切り離された。二つの NaI のそれぞれの計数および同時計数が 298.1 MHz の FM-FM テレメータで伝送された。同時計数は両方の NaI に同時に感じた荷電粒子を除外するためのものである。

回路のブロック・ダイアグラムを第3図に示した。それぞれの計数はまず 2^4 だけ scale down する。個々の NaI の計数は4段の2進 scaler に記録させ、同時計数は1段の2進 scaler に記録させる。この三つの計数を 2.2 秒を1語として shift register を通して連続的に読み出した。このとき scaler は reset をせず、計数の積分値を順次読み出した。これは二つの NaI の計数率の差を問題にするのには計数の下の方のけたがわかる必要があるためである。



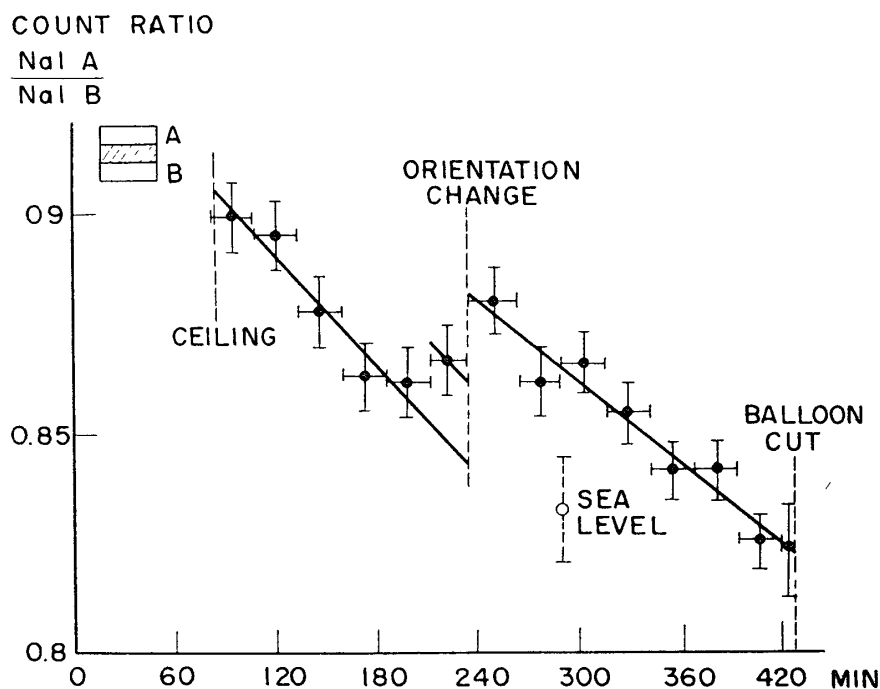
第3図 2結晶カウンター回路ブロック・ダイアグラム



第4図 2結晶カカウンターの各計数率

2.2 観測結果

おのおのの NaI の計数率および同時計数率を第4図に示す。同時計数を起したものは荷電粒子によるとしてその計数率を個々の NaI の計数率から差し引いた。この差し引かれた二つの NaI の計数率の比を求めた。気球の水平飛行開始からゴンドラ切り離しまでの、上述のようにして得た計数率比を第5図に示す。水平飛行開始から150分間は NaI A が上、NaI B が下になるようにカウンター軸を垂直（軸が天頂方向と平行）にした。はじめの120分間は 14.2 gcm^{-2} の高度で水平飛行し、その後はゆっくりと下降したが水平飛行開始後120分から150分までの30分間の平均高度は 16.6 gcm^{-2} であった。水平飛行開始後150分経ったときにカウンター軸の方向を 90° 回転してそれ以後はカウンター軸が水平になるようにした。第5図からわかるように計数率比は時間と共に暫次減少するが、これは NaI の熱容量と温度変化による効果を補償する回路の熱容量の間に差があるためであって、熱平衡に達するまでの過渡的な現象である。カウンター軸が水平のときは、いかなる高度でも NaI A の側と NaI B の側の両側からの γ 線の flux は等しいと考えられるから計数率比は高度には関係なく本来同じ値のはずである。熱平衡に達するまでは過渡的に計数率比は変化するが、気球が浮遊している間に熱平衡に近づいて行き、ゴンドラ切り離しのときには地上でカウンター軸を水平にして観測された計数率比と同じ値に落着いている。カウンター軸の方向を変化させたとき（第5図の orientation change のとき）に計数率比は急激に変化して、計数率比の“jump”が観測された。カウンター軸が垂直のときで、前述したように 14.2 gcm^{-2} の高度と 16.6 gcm^{-2} の平均高度の二通りの場合について、それぞれ計数率比の jump が得られる。この計数率比の jump は明らかにカウンター軸が垂直の場合と水平の場合の計数率比に違いがあることを示しており、したがってカウンター軸が垂直な場合には二つの NaI の

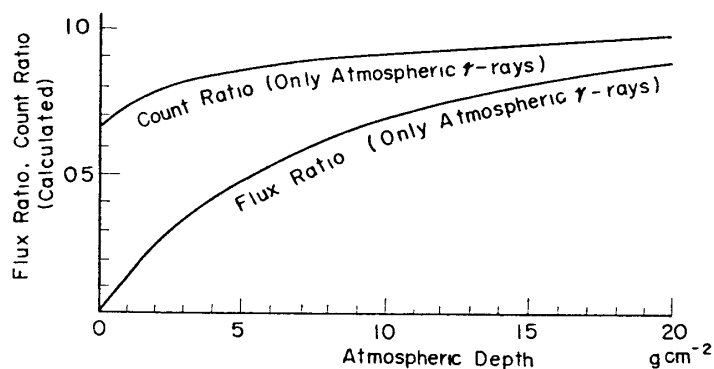


第5図 2結晶カウンター計数率比

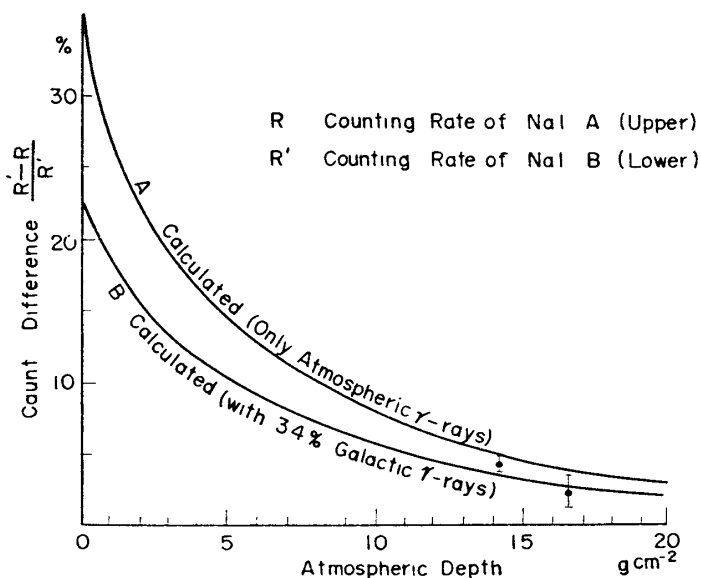
計数率に差があることを示している。カウンター軸が水平のときには NaI A の側からと NaI B の側から入射する γ 線は対称でその flux は等しい。この状態では計数率比は本来 1 になるべきであるが、二つの NaI で計数としてとるエネルギーの下限に違いがあるために二つの計数率の間に差が生ずる。したがって、カウンター軸の方向変化直前の垂直方向での計数率比の値は、軸方向変化直後での水平方向での計数率比の値で割って規格化した。

2.3 計算値との比較および銀河 γ 線の割合の上限

大気の深さ $\leq 20 \text{ gcm}^{-2}$ のところでカウンターに入る 1 MeV 領域の γ 線の計算を行なった。まず大気中で発生する γ 線について計算を行なった。この計算では、空気の単位質量当りの γ 線の発生率は一様で発生点から等方的に放出するとし、この γ 線は大気により指数関数的に attenuate するというモデルを用いた。 γ 線のエネルギーが低く、かつ $\leq 20 \text{ gcm}^{-2}$ というような大気の深さでは、むしろこのモデルがよいと考えられる。attenuation mean free path としては平均的な代表値として 13.0 gcm^{-2} を用いた。上方からの大気 γ 線による flux を下方からの大気 γ 線による flux で割った flux 比の計算値が第 6 図(a) に示されている。



(a) 大気 γ 線による Flux 比および計数率比



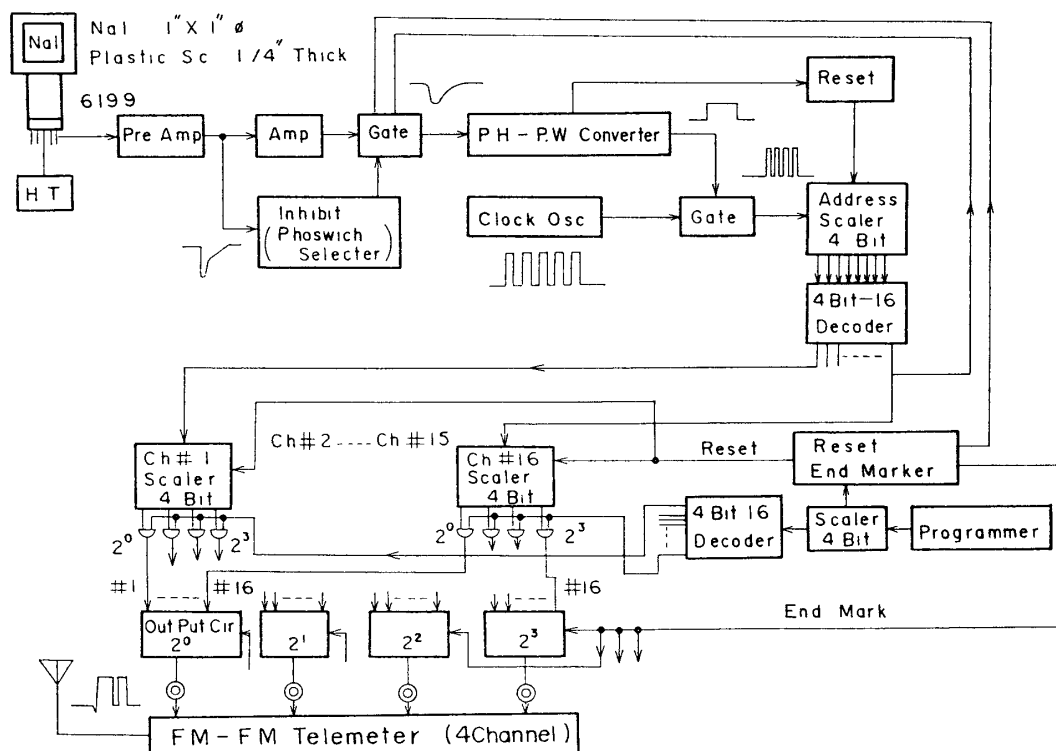
(b) 2 結晶カウンターの計数率差の計算値および観測値
第 6 図

また、この計算された大気 γ 線の一方方向強度と第2図に示されたカウンターの response の方向依存性を考慮して計算された計数率比を同じく第6図(a)に示した。この計数率比を計数率差に直して図示したものが第6図(b)の曲線Aである。この図には第5図から得られた我々の観測値2点を示してある。大気 γ 線のみを考えた場合の計数率差の曲線Aからのずれは、観測された γ 線のある部分が大気外の銀河 γ 線であるということによる、と考えられる可能性がある。大気による attenuation を考えて、大気頂にどれだけの等方的な一次銀河 γ 線が入射するとすれば、この我々の観測値と合うかを最小二乗法で求めた。この場合に予想される計数率差が第6図(b)の曲線Bである。これによれば $\geq 440\text{KeV}$ の γ 線に対しては、 $\lambda=26^\circ\text{N}$ 、大気頂では観測される γ 線の $(34\pm 17)\%$ が大気 albedo γ 線ではなく、地球外の銀河 γ 線ということになるが、我々はこの値を銀河 γ 線の割合の上限値と考え、後述するように 1MeV 領域の γ 線のエネルギー・スペクトルを求めるときにはこれを用いることにする。

3. γ 線のエネルギー・スペクトル

3.1 ホスヴィッチ・カウンター

γ 線のエネルギー・スペクトルを測定するためのスペクトロメータとしてはホスヴィッチ・カウンターを用いた。第1図(b)に示されたように、 $1''\times 1''\phi$ の NaI を $1/4''$ の厚さのプラスチック・シンチレータで包んだものである。荷電粒子はプラスチック・シンチレータを外から貫通し、これは NaI によるパルスより速いパルスを生じる。このホスヴ



第7図 γ 線エネルギー・スペクトロメータ・ブロック・ダイアグラム

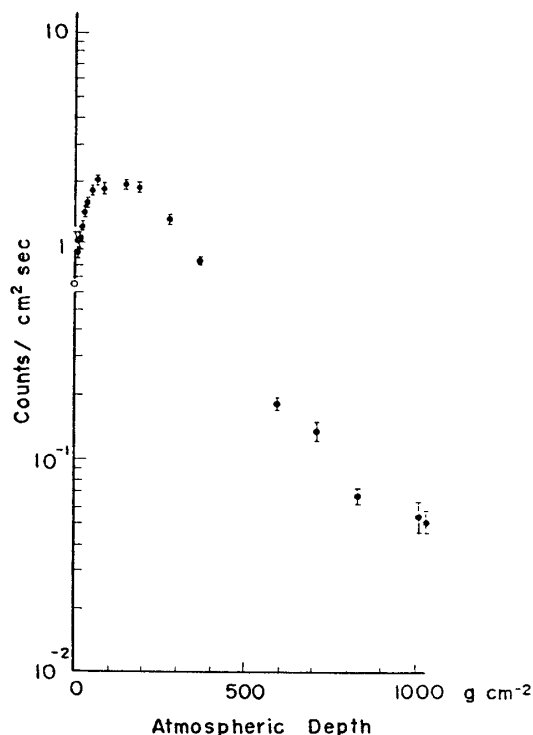
イッチ・カウンターでは γ 線に対する効率はNaIの方がプラスチック・シンチレーターよりはるかに高いので、速いパルスを伴ったものは荷電粒子によるものとして取り除いた。この荷電粒子によるeventの除去のテストは地上で μ 中間子を用いて行なった。 γ 線によるNaIからのパルスは気球搭載の16チャンネル波高分析器で分析した。エネルギーの下限は1.2MeVで、エネルギー較正は Co^{60} (1.33MeV), Na^{24} (1.37MeV, 2.75MeV)を用いて行なった。気球に搭載されたこの γ 線エネルギー・スペクトロメータのブロック・ダイアグラムを第7図に示す。 γ 線によるパルスはアナログ・デジタル変換器に入り、次におおののエネルギー・チャンネルに振り分けられ、エネルギー・チャンネルごとに7.5秒間4段の2進 scaler にためられる。その後0.5秒間でためられた scaler が2進4けたで読み出される。この16のエネルギー・チャンネルごとの計数が2結晶カウンターの場合と同じ298.1MHzの4チャンネルFM-FMテレメータで伝送された。

3.2 観測結果

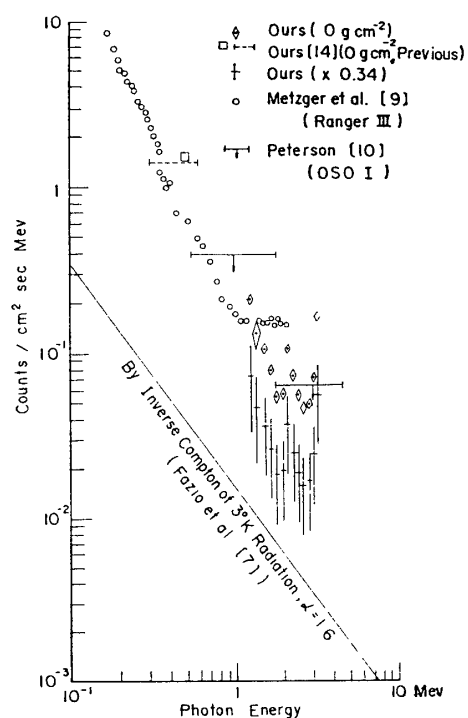
気球飛揚は1966年9月29日に前述の2結晶カウンターの気球飛揚直後行なわれ $\lambda=26^\circ\text{N}$ で高度 10gcm^{-2} の水平飛行をした。

$\geq 1.2\text{MeV}$ の γ 線の計数率の高度変化を第8図に示す。 100gcm^{-2} の高度のところは transition maximum で、そこでは $2.0\text{counts/cm}^2\text{sec}$ であった。高度変化についての mean absorption length は 270gcm^{-2} から 830gcm^{-2} の間では 195gcm^{-2} である。 $\geq 10\text{gcm}^{-2}$ の高度変化を大気頂に外そうして 0gcm^{-2} での値は $0.66\text{counts/cm}^2\text{sec}$ と得た。

我々が観測した1.2~3.3MeVの γ 線のエネルギー・スペクトルを第9図に示す。1MeV



第8図 $\geq 1.2\text{MeV}$ γ 線計数率の高度変化



第9図 γ 線エネルギー・スペクトルと銀河 γ 線の上限

近辺の γ 線のエネルギー・スペクトルは Metzger ら[9], Peterson ら[10], Rocchia ら[11], Frost ら[12], および Peterson ら[13] によって観測されている。等方的な銀河 γ 線に対する観測を行なった代表的な [9], [10] のデータを同じく第9図に示す。Fazio ら[7] により計算された, 3°K black body radiation の逆コンプトン効果による銀河 γ 線の理論値を同図に示した。この直線は銀河電子のエネルギー・スペクトルのべきとして -1.6 を採用して求めたものである。 0gcm^{-2} における我々の値は前述のごとく高度変化を用いて 10gcm^{-2} での観測値から外そうした値である。なお我々の値は大気 γ 線の少ない $\lambda=26^\circ\text{N}$ という低い地磁気緯度で観測された値である。

0.4MeV 近傍の我々の二観測値は以前に簡単なシングル・シンチレーション・カウンターで求めたもので [14], 大気 γ 線については $\lambda=26^\circ$ の低地磁気緯度での flux は $\lambda=40\sim 50^\circ\text{N}$ の高地磁気緯度で flux の $1/2.5\sim 1/3$ の値であった。この緯度効果は transition maximum $\sim 100\text{gcm}^{-2}$ の高度での値を比較して求めたもので, 一次 γ 線の影響は無視できる。

4. 結 論

3 で述べたように γ 線のエネルギー・スペクトロメータで, 大気頂 0gcm^{-2} での $1.2\sim 3.3\text{MeV}$ のエネルギー・スペクトルを得たが, γ 線の方向分布の結果を利用すれば γ 線のエネルギー・スペクトルの値を更に下げることができる。すなわち等方的な銀河 γ 線の強度の上限値を下げることができる。方向分布の観測結果によれば, 大気頂で観測される 1Mev 領域の γ 線中銀河 γ 線の割合の上限は $(34\pm 17)\%$ であると考えられるから, 我々が観測した第9図の $\lambda=26^\circ\text{N}$, 0gcm^{-2} でのエネルギー・スペクトルの値にそれぞれ 0.34 を掛けたものを同図に十字の印で $\text{counts/cm}^2 \text{ sec MeV}$ を単位としたままで plot した。これが等方的な銀河 γ 線の強度の上限を与えるわけで, $1.2\sim 3.1\text{MeV}$ の銀河 γ 線強度の上限は $(4.3\pm 2.1)\times 10^{-3}\text{counts/cm}^2 \text{ sec ster MeV}$ と与えられる。

なお, この観測を行なうに当っては, 東大宇宙研の西村 純教授はじめ大気球飛揚グループによる気球飛揚に対して衷心より感謝の意を表す。

1968年1月24日

参 考 文 献

- [1] 早川幸男: 宇宙線研究, **1**, 63 (1956); 同速報, **4**, 174 (1959); 同速報, **5**, 341 (1960).
- [2] Morrison, P.: Nuovo Cimento, **7**, 858 (1958).
- [3] Savedoff, M. P.: Nuovo Cimento, **13**, 12 (1959).
- [4] Kraushaar, W. L. and Clark, G. W.: J. Phys. Soc. Japan, **17**, Supplement A-III, 1 (1962); Kraushaar, W., Clark, G. W., Garmire, G., Helmken, H., Higbie, P., and Agogino, M.: Ap. J., **141**, 845 (1965).
- [5] Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., and Wilkinson, D. T.: Ap. J., **142**, 414 (1965).
- [6] Penzias, A. A. and Wilson, R. W.: Ap. J., **142**, 419 (1965).
- [7] Fazio, G. G., Stecker, F. W. and Wright, J. P.: Ap. J., **144**, 611 (1966).
- [8] Felton, J. E. and Morrison, P.: Ap. J., **146**, 686 (1966).
- [9] Metzger, A. E., Anderson, E. C., Van Dilla, M. A. and Arnold, J. R.: Nature, **204**, 766

(1964).

- [10] Peterson, L. E.: Presentation to 6th COSPAR International Space Symposium, Buenos Aires (1965); Space Res. **6** (1966).
- [11] Rocchia, R., Labeyrie, J., Ducros, G. and Boclet, D.: Proc. Int. Conf. Cosmic Rays, London, 423 (1966).
- [12] Frost, K. J., Rothe, E. D. and Peterson, L. E.: J. Geophys. Res., **71**, 4079 (1966).
- [13] Peterson, L. E., Schwarz, D. A., Pelling, R. M. and McKenzie, D.: J. Geophys. Res., **71**, 5778 (1966).
- [14] 平島 洋, 奥平清昭: 東大宇宙研報告, **2**, No. 1 (C), 321 (1966).