

地球大気中の電子対消滅による γ 線の観測*

中川 重雄**・佃 正晃**・奥平 清昭**・平島 洋**
吉森 正入**・村上 浩之**・山上 隆正**・岩間 滋**

概 要

Cosmic Rays が大気中で起す相互作用 (electron と positron との annihilation) で作られる 0.511 MeV ライン・ガンマ線を 1967 年から 1970 年までの 4 年間にわたり、気球実験によって測定した。

この 0.511 MeV ガンマ線は extraterrestrial γ -Rays を測定するときのバックグラウンドとなるので、その強度をおさえておくことは重要となる。3 回のわれわれの測定結果は誤差の範囲で非常によく一致し、その結果は断面積 1 cm^2 の大気柱当りの 0.511 MeV ライン・ガンマ線の発生率は $18.5 \pm 4.7 (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ である。

また宇宙線のエネルギー・バランスより期待される 0.511 MeV ライン・ガンマ線の発生率を理論計算した。

その結果、断面積 1 cm^2 の大気柱当りの発生率は $36.2 (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ である。

1. ま え が き

地球大気中において作られる二次宇宙線中の陽電子が消滅して発生する 0.511 MeV ライン・ガンマ線の観測は外国でも多くの人々によっておこなわれてきた。

1961 年 Peterson [1], 1963 年 Rocchia et. al. [2], 1964 年 Rocchia [3], 1967 年 Chapman et. al. [4], 1968 年 Chupp et. al. [5], Womack et. al. [6], 等がシンチレーション・カウンタ、および Ge(Li) 検出器を使用して測定をおこなっている。

1970 年度の実験にわれわれが使用した検出器は Ge(Li) 検出器であり、他の 2 回の実験にはシンチレーション・カウンタを使用した。

今回はおもに Ge(Li) 検出器の結果を報告すると同時に理論計算の結果と比較する。

2. 観 測 装 置

ガンマ線検出器としてはゲルマニウムにリチウムをドリフトさせた Ge(Li) 検出器を使用した。

この検出器の有効体積は 15 cc で、0.511 MeV ガンマ線に対する全エネルギー吸収効率 は 12% であり、気球飛揚中におけるエネルギー分解能は FWHM でおよそ 20 keV である。

Ge(Li) 検出器の性能を十分に保つためには 77°K の液体窒素の温度、および 10^{-7} mmHg

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 立教大学理学部

の高真空度の環境に保存しなければならない。

このために液体窒素の入ったクライオスタットを利用し、気球飛揚の直前に液体窒素の補給、および真空チェンバの封じ切りをおこなった。

液体窒素は発泡スチロール製の容器に約 5 リットル入っており、15 時間程度の気球観測は可能になっている。

回路のブロック図を図 1 に示してある。

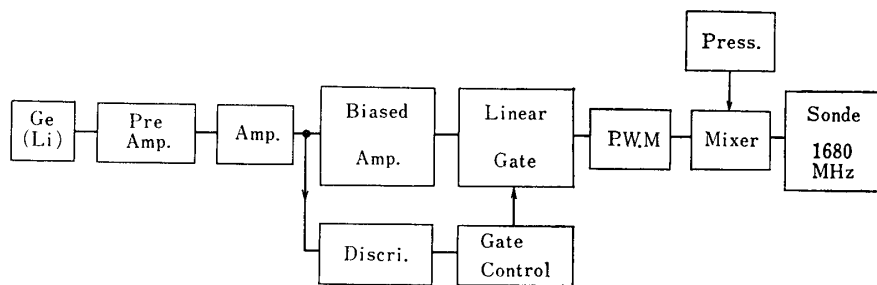


図 1 Block Diagram

Ge(Li) 検出器からの出力パルスは低雑音の電荷増幅型前置増幅器、および主増幅器を通り、リニア・ゲートをとおって、また主増幅器で増幅後、Pulse Width Modulation (PWM) 回路でそのパルス高に応じた時間幅で高さ一定のパルスに変換し、その出力で 10 kHz の発振器を動作させる。

10 kHz の信号はアネロイド気圧計の 3 組の接点につないだ各 500 Hz, 700 Hz, 1,000 Hz の発振器の出力とミックスしたのち、1,680 MHz のテレメータ主発振器を周波数変調している。

引き続き 2 個のパルスが入った場合、回路が誤動作をするのを防ぐために一つのパルスが入ると 10 msec の間ゲートを閉じるようになっている。

地上では 1,680 MHz の電波を受信復調後、10 kHz のバンドパス・フィルタを通し検波し、シュミット・トリガーで整形し、積分回路を通して時間幅に比例した高さの信号にし、さらにこれを微分して立上りの速いパルスにして、TMC 404C の 400 チャネル波高分析器に入れて解析をおこなう。

この Ge(Li) 検出器で観測できるエネルギー範囲は 300 keV~700 keV である。

他の 2 回の実験は電子回路のほうはほとんど Ge(Li) 検出器の場合と同じであり、検出器が高さ 1 in., 直径 1 in. の円筒形の NaI(Tl) 結晶を厚さ 1/4 in. のプラスチック・シンチレータで包んだフォスヴィッチ・シンチレーション・カウンタとなっており、その発光を光電子増倍管 RCA 6199 で電氣的信号に変えて処理した。

プラスチック・シンチレータは荷電粒子の計数を除去する Guard Counter の役目を果たしている。

3 回の実験とも電子回路の校正曲線は水銀パルサのパルスを入れて求め、エネルギーの絶対校正には Cs¹³⁷(0.662 MeV), Mn⁵⁴(0.840 MeV), Na²²(0.511 MeV) を用いた。

3. 観測結果

気球が水平飛行にはいつてから後に、Ge(Li) 検出器で測定した 300 keV から 700 keV までのガンマ線エネルギー・スペクトラムを図 2 に示した。

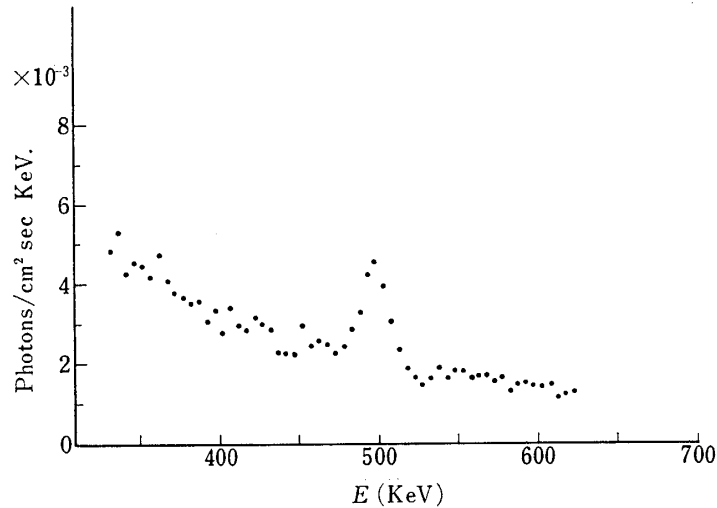


図 2 Gamma Ray Energy Spectrum at 7 g/cm²

陽電子消滅によってできる 0.511 MeV ライン・ガンマ線が連続スペクトラムの上ののった状態になっていることから、連続スペクトラムの部分をも最小二乗法により差引いて、0.511 MeV ライン・ガンマ線だけの高度変化を出したものを図 3 に示す。

この結果、断面積 1 cm² の大気柱当りの 0.511 MeV ガンマ線の発生率は

$$\int_0^{1030} \frac{C(l)}{\epsilon \cdot \lambda} dl \quad (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$$

l : 大気柱の深さ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

$C(l)$: 計数率/Geometrical Factor. (第 3 図参照) ($\text{counts} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)

ϵ : 0.511 MeV ガンマ線の全吸収効率

λ : 0.511 MeV ガンマ線の Attenuation Mean Free Path. ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

である。

$C(l)/\epsilon$ として図 3 のものを使用すれば、断面積 1 cm² の大気柱当りの 0.511 MeV ガンマ線の発生率は

$$18.5 \pm 4.7 \quad (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$$

となる。

この値はフォスヴィッチ・シンチレーション検出器で測定した 2 回の結果と誤差範囲の中で非常によく一致している。

なお、0.511 MeV ガンマ線に対するエネルギー分解能は Ge(Li) 検出器の方がフォスヴィッチ・シンチレーション検出器よりも 5 倍程度向上したため、われわれが以前報告したフォ

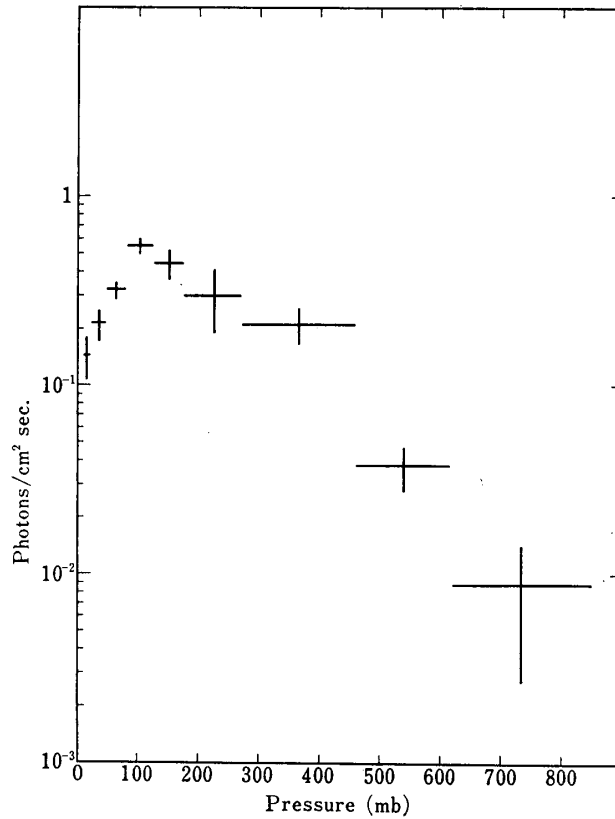


図3 Altitude Dependence of 0.511 MeV Line Gamma Rays

スウィッチ・シンチレーション検出器の結果[7]より 0.511 MeV に顕著なピークが見られる。(図2参照)

4. 理論計算

大気中で宇宙線が作る陽電子が減速して止まれば消滅して、0.511 MeV ガンマ線を発生するので、大気中で創生される陽電子の数をカスケード・シャワ理論と宇宙線のエネルギー・バランスから求めた。

まず、一つのカスケード・シャワでできる陽電子の数を計算するのに次のように3通りに分けて計算をおこなった。

(1) 光子による対創生によってできる Critical Energy 以下の陽電子総数 N_1 は

$$N_1 = \int_0^\infty dt \int_0^\varepsilon dE \int_0^\infty \gamma(E_0; W, t) \phi(E/W) dW/W$$

t : 深さ (Cascade Unit)

E : 創生された陽電子のエネルギー

ε : 空気中での Critical Energy (98 MeV)

W : 光子のエネルギー

E_0 : カスケード・シャワの親の粒子のエネルギー

$\gamma(E_0; W, t)$: 深さ t で $W \sim W+dW$ の間にある光子の数
 $\phi(E/W)dE/W$: W のエネルギーの光子が対創生で $E \sim E+dE$ の陽電子をつくる
 確率

となる.

光子のエネルギーが Critical Energy (98 MeV) 以上の場合は Rossi and Greisen [8] に基づく一次元のカスケード理論をもちい, Critical Energy 以下については Richard and Nordheim [9] の数値計算の結果をもちいた.

(2) Critical Energy 以上の陽電子が制動ふく射によって Critical Energy 以下に落ちる場合のその陽電子総数 N_2 は

$$N_2 = 1/2 \int_0^\infty dt \int_0^\infty dE \int_\epsilon^\infty \pi(E_0; E', t) \varphi(E' - E/E') dE'/E'$$

E' : 制動ふく射前の陽電子のエネルギー

E : 制動ふく射後の陽電子のエネルギー

$\pi(E_0; E', t)$: 深さ t で $E' \sim E'+dE'$ の間にある電子および陽電子の数

$\varphi(E' - E/E') dE'/E'$: E' の陽電子が制動ふく射によって E の陽電子になる確率

となる.

(3) Collision Loss によって Critical Energy 以下に落ちる陽電子の総数 N_3 は

$$N_3 = 1/2 \int_0^\infty \pi(E_0; \epsilon, t) \cdot \epsilon \cdot dt$$

$\pi(E_0; \epsilon, t)$: カスケード・シャワのはじまりから t の場所にあるエネルギー ϵ をもつ電子および陽電子の数

となる.

以上のことにより Incident Energy E_0 のカスケード・シャワによって作られる Critical Energy 以下の陽電子の総数 N は

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = (0.93 + 0.11 + 0.09) \times (E_0/\epsilon) = 1.13(E_0/\epsilon)$$

となる.

Critical Energy 以下の陽電子が Collision Loss で Slow down して消滅し, 0.511 MeV ライン・ガンマ線をつくる.

いろいろな E_0 については ΣE_0 をとることになるが, ΣE_0 は地球に入射する宇宙線の全エネルギー流のうちで, 電子および光子成分に行くエネルギー流に等しいとすればよい.

この値として, Hayakawa [10], Komori [11], によるエネルギー・バランスの計算から $\lambda = 28^\circ N$ の値, $250 \pm 30 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1}$ をもちいた.

その結果, 断面積 1 cm^2 の大気柱当りに作られる 0.511 MeV ガンマ線の Production Rate は

$$2 \times 1.13 \times (250 \times 2\pi/98) = 36.2 \quad (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$$

となる.

Table 1 0.511 MeV Gamma Ray Intensity
Comparison of Experimental Values with Other Measurements

Experimenters	Date of Flight	Pressure ($g \cdot cm^{-2}$)	Detector	Intensity ($gammas \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1}$)	Geomagnetic Latitude.
Peterson [1]	May 1961	6	2-in.-diam by 2 $\frac{1}{4}$ -in.-high NaI, 1/8-in.-thick NE-102 plastic anticoincidence shield	0.31 ± 0.03	57°N
Rocchia et al [2]	July 1963	5	1 $\frac{3}{4}$ -in.-diam by 2-in.-high NaI (no anticoincidence shield)	0.36	47°N
	May-June 1964	5	Same	0.34	47°N
	June-July 1964	5	Same	0.40	47°N
Chapman et al [4]	November 1967	5.3	20-cc Ge(Li) with 1/4-in.-thick NE-103 plastic anticoincidence shield	0.48 ± 0.03	33°N
	May 1967	3.8	Same	0.38 ± 0.09	31.5°N
Chupp et al [5]	December 1966 to April 1968	3.7	3-in.-diam by 3-in.-high CsI, 1/2-in.-thick NE-102 plastic anticoincidence shield	Varied from 0.16 ± 0.02 to 0.21 ± 0.02	42°N
Womack and Orerbeck [6]	May 1968	4.7	22-cc Ge(Li) with a 2.25-in NaI anticoincidence shield with opening to collimate incoming vertical radiation	0.47	32°N
Ours	September 1967	5	1-in.-diam by 1-in.-high NaI, 1/4-in.-thick plastic anticoincidence shield.	0.18 ± 0.05	26°N
Ours	September 1969		Same	0.21 ± 0.04	27°N
Ours	October 1970		15-cc Ge(Li) (no anticoincidence shield)	0.12 ± 0.03	27°N

Table 2 0.511 MeV Gamma Ray Production Rate
Comparison of Experiental Values with Theoretical Values
in an Atmospheric Column of 1 cm^2 Cross Section.

Experimenters	Experimental Value ($cm^{-2} \cdot sec^{-1}$)	Theoretical Value ($cm^{-2} \cdot sec^{-1}$)	Geomagnetic Latitude
Peterson	17.2	49.5	57°N
Rocchia et. al	24.6	44.8	47°N
Ours	18.5 ± 4.7	36.2	27°N

5. む す び

われわれの測定結果と外国での測定結果を表1に示す。この表1のわれわれの測定結果の値は外国の結果と合わせるために高度 $10\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ の 0.511MeV ガンマ線の値を $5\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ の高度に外そうした値を記してある。

測定結果より出された断面積 1cm^2 の大気柱当りの 0.511MeV ガンマ線の結果と理論計算の結果を表2に示す。また表2には Peterson [1], Rocchia. et. al. [2], の測定結果と理論計算の値を同時に示した。

表1に示すように、われわれの測定結果は外国の結果と比較すると緯度効果を考慮するとよく一致している。

しかし外国の anti-counter をつけた Ge(Li) 検出器の値がわれわれの測定結果より factor 2 ぐらい大きいようであるが、これは多分、anti-counter から出るガンマ線を含んでいるのではないかと思われる。

表2に記したわれわれの理論計算値には、陽電子の In-Flight-Annihilation による項と Positronium になる項の計算は入っていない。この項については現在計算中である、それを考慮すると、現在の値より約 30% 程度低い値を示すことになるであろう。

また Peterson の測定結果がわれわれの値や Rocchia et. al. の値と比較して低い値を示しているが、解析時に問題があって、Factor 2 低い値を示したということである。それについての論文はまだ出ていない。

なお、この観測をおこなうに当っては、東大宇宙航空研究所の西村 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る。

追 記

OGO-3 および5による Cline らの観測によれば 1MeV 付近の陽電子の強度は $\sim 10^{-1}\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ である[12][13]。この値から星間空間で陰陽電子対消滅により作られる 0.511MeV ライン・ガンマ線の強度は $10^{-1}\sim 10^{-2}\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ と推定される。 0.511MeV ライン・ガンマ線の高度曲線および異方性が高精度で測定されれば銀河起源の 0.511MeV ライン・ガンマ線の観測が可能になろう。

1971年2月6日

参 考 文 献

- [1] Peterson, L. E.: J. Geophys. Res., **68**, 979 (1963)
- [2] Rocchia, R., Labeyrie, J., Ducross, G. and Bocket, D.: 9th International Conference on Cosmic Rays, London, 423 (1966)
- [3] Rocchia, R.: Gamma Radiation in Space and in the Atmosphere, CEA report R-2939 (1966)
- [4] Chapman, G. T., Cumby, R. P., Gibbons, J. H., Macklin, R. L. and Parker, H. W.: To be published.
- [5] Chupp, E. L., Forrest, D. J., Lavakare, P. J. and Sarkady, A. A.: Bull. Am. Phys. Soc., **13**,

1399 (1968)

- [6] Womack, E. A. and Overbeck, J. W.: *J. Geophys. Res.* **75**, 1811 (1970)
- [7] 奥平清昭, 平島 洋, 山上隆正: 昭和42年度大気球シンポジウム, 139 (1968)
- [8] Rossi, B. and Greisen, K.: *Rev. Mod. Phys.*, **13**, 240 (1941)
- [9] Richards, J. A. and Nordheim, L. W.: *Phys. Rev.*, **74**, 1106 (1948)
- [10] 早川幸男: 宇宙線 (岩波講座) p. 132 (1955)
- [11] 小森博夫: 素粒子論研究, **6**, 375 (1954)
- [12] T. L. Cline and G. Porreca: *Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae* **29**, Suppl. 145 (1970)
- [13] T. L. Cline and E. W. Hones, Jr.; *ibid.* 159 (1970)