

Ge (Li) スペクトロメーターによる銀河ラインガンマ線の観測*

吉森 正人**・渡辺 博之**・奥平 清昭**
平島 洋**・村上 浩之**

概 要

銀河起源のライン・ガンマ線を観測するために、1977年9月30日、エネルギー分解能の高い Ge(Li) スペクトロメーターを用いて気球観測を行った。この観測により、銀経 50° から 210° の範囲の銀河面が観測され、陽電子消滅による 0.511 MeV ならびに $^{14}\text{N}^*$ (1.632 MeV)、 $^{20}\text{Ne}^*$ (1.634 MeV)、 $^{24}\text{Mg}^*$ (1.369 MeV)、 $^{28}\text{Si}^*$ (1.779 MeV) および $^{56}\text{Fe}^*$ (0.847 MeV) の核ガンマ線強度の上限値を求めることができた。これらのライン・ガンマ線強度の上限値は、 $10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ のオーダーであり、この結果は、これまでに得られている上限値と一致している。

1. はじめに

銀河系内で発生するライン・ガンマ線は、低エネルギー宇宙線と星間ガスおよびダストとの衝突によってつくられると考えられ、ライン・ガンマ線の観測は、銀河系内の宇宙線と星間物質の空間分布、エネルギー分布ならびに組成に関する重要な情報を提供してくれる。観測対象となるラインガンマ線は、陽電子消滅からの 0.511 MeV ラインと C, N, Ne, Mg, Si および Fe などの重い核の励起状態から放出される核ガンマ線とがあり、いずれも 10 MeV 以下のエネルギー領域にある。

星間ガスおよびダストの空間分布や組成は、これまでの水素原子の 21 cm 電波の観測に加えて、最近 CO 分子の 2.6 mm 電波や H 109α や H 166α の水素イオンの再結合線の観測、さらに星雲ダストからの赤外線や 100 MeV 以上の高エネルギーガンマ線の観測により、次第に明らかにされてきている。しかしながら、低エネルギー宇宙線は、電磁波のように直進性がないこと、また地球近傍で観測された宇宙線は、太陽変調を大きくうけているために、銀河系内における空間分布やエネルギー分布を調べることはむずかしく、二次生成物のライン・ガンマ線の観測を通してのみ知ることができる。銀河系内におけるライン・ガンマ線の空間分布から、低エネルギー宇宙線の空間分布を推定し、これを超新星やパルサーのような活動的な天体の空間分布や高エネルギーガンマ線ならびに星間物質の空間分布と比

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 立教大学理学部

較することにより、宇宙線の起源や伝播を銀河構造の観点から調べることができると考えられる。

銀河ライン・ガンマ線の中で、0.511 MeV ライン・ガンマ線は、主として 100 MeV/nuc. 以下の低エネルギー宇宙線と星間ガスとの衝突によってつくられる ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O のような不安定な β^+ 崩壊核から放出される β^+ が、星間空間中で電離損失によって減速され、陰電子と対消滅してつくられると考えられている。Yoshimori [1] は、この過程で生成される 0.511 MeV ラインの空間分布を求め、銀河中心方向で 3×10^{-5} photon cm^{-2} s^{-1} rad^{-1} 、銀経 60° 以上で 6×10^{-6} photons cm^{-2} s^{-1} rad^{-1} になることを示した。また、核ガンマ線は、100 MeV/nuc. 以下の低エネルギー宇宙線と星間物質との衝突によってつくられる励起核が、基底状態へ遷移するとき放出されるが、励起核が、宇宙線であるか、星間ガスであるか、あるいは星間ダストであるかによって、観測されるガンマ線のラインスペクトルが非常に異なってくるのが予想される。Yoshimori [1] は、宇宙線中の励起核から放出されるライン・ガンマ線は、ドップラー効果が大きいために数 100 keV から 1 MeV のひろがったスペクトルを示し、星間ガスからのライン・ガンマ線は、100 keV 程度のひろがり、そして星間ダストからのライン・ガンマ線は、ダストの熱運動のみに依存するため数 keV 以下の非常に鋭いライン・スペクトルを示すことを計算から求めた。この結果、宇宙線中の励起核から放出される核ガンマ線は、ライン・ガンマ線として識別することが困難となり、星間ガスおよびダストからの核ガンマ線のみが、ライン・ガンマ線の観測対象となってくる。核ガンマ線の中で最も強度が大きいと予想されるのは、 $^{12}\text{C}^*$ (4.439 MeV) と $^{16}\text{O}^*$ (6.129 MeV) のラインで、その強度は、銀河中心方向で 1×10^{-5} photons cm^{-2} s^{-1} rad^{-1} 、銀経 60° 以上で 2×10^{-6} photons cm^{-2} s^{-1} rad^{-1} と推定されている。このために、ライン・ガンマ線を銀河バックグラウンドガンマ線から分離することが、観測的には非常にむずかしいと考えられている。

銀河ライン・ガンマ線の観測は、これまでいくつかのグループによって行われているが最も興味ある結果は、Haymes 等 [2] の NaI (Tl) を用いた気球観測で得られたもので、銀河中心方向から異常に強いライン・ガンマ線がとらえられている。観測結果は、0.511 MeV ラインに対し $(8.0 \pm 2.3) \times 10^{-4}$ photons cm^{-2} s^{-1} 、また $^{12}\text{C}^*$ (4.439 MeV) ラインに対し $(9.5 \pm 2.7) \times 10^{-4}$ photons cm^{-2} s^{-1} という強度を示しており、銀河中心付近では予想以上に宇宙線と星間物質の密度が高くなっていることを示唆している。また、Dyer 等 [3] による Apollo - 15, 16, 17 による観測、Ling 等 [4] および Imhof 等 [5] による Ge (Li) スペクトロメーターを用いた観測では、0.511 MeV と $^{12}\text{C}^*$ (4.439 MeV) ライン強度の上限値として $10^{-2} - 10^{-3}$ photons cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} 程度が求められている。

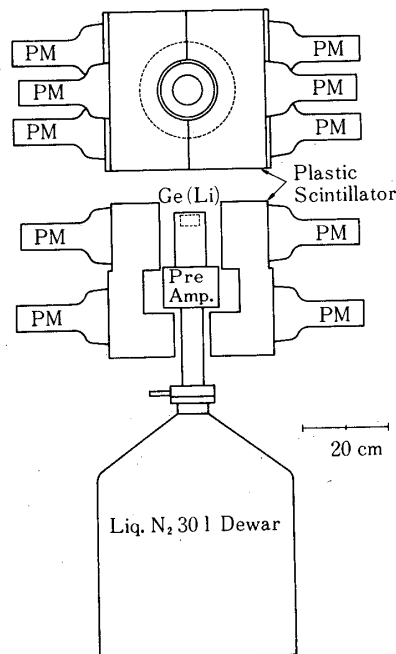
われわれは、銀河面が強いライン・ガンマ線の発生源となっていると予想し、昭和 52 年 9 月に B₅₀-14 気球に Ge (Li) スペクトロメーターを搭載し、銀経 50° から 210° にわたって銀河面からのライン・ガンマ線を観測し、強度の上限値を得ることができた。本報告では、ライン・ガンマ線の観測装置、気球飛翔および観測結果について述べ、これまでの観測結果との比較、検討を行う。

2. 観測装置

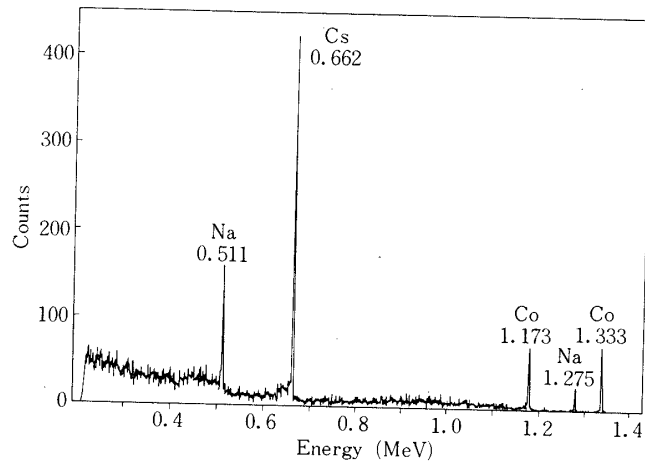
銀河起源のライン・ガンマ線強度は、 10^{-5} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 程度と予想されるので、気球観測では、地球大気中でつくられるバックグラウンド・ガンマ線が大きな妨げとなってくる。このために、銀河ライン・ガンマ線の検出器としては、地球大気成分を高い効率で除去するとともに、エネルギー分解能の高い検出器でライン成分を連続成分から分離する必要がある。そこで Ge (Li) スペクトロメーターのまわりをプラスチック・シンチレーターのアクティブ・コリメーターでシールドしたガンマ線スペクトロメーターが用いられた。

気球に搭載したライン・ガンマ線検出器の概略図を第1図に示す。中心部の Ge (Li) 検出器は、真空度 10^{-7} mmHg のクライオスタットに入れられ、30 l の液体窒素により冷却されている。Ge (Li) 検出器は、同軸型で、有効体積は 30 cm^3 、印加高圧電圧は 1.800 V である。エネルギー分解能は、 ^{22}Na (0.511, 1.275 MeV), ^{136}Cs (0.662 MeV) および ^{60}Co (1.173, 1.333 MeV) の較正用のガンマ線源を用いて測定された。測定結果は第2図に示されているが、 ^{60}Co のラインに対して 3 keV の半値幅である。また、光電ピーク効率の測定結果を第3図に示すが、0.511 MeV ラインに対して 8%, 1.333 MeV に対して 3% 程度になっている。ガンマ線のエネルギーが 3 MeV 以上になると、光電ピーク効率よりもダブル・エスケープ効率が大きくなってくると予想される。

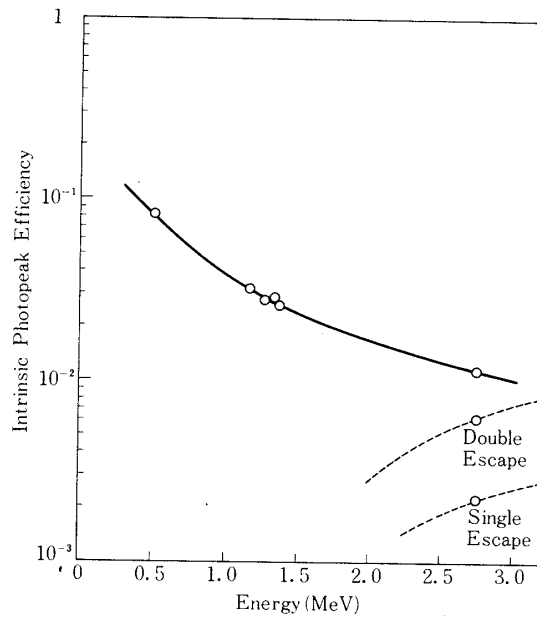
プラスチック・シンチレーターのシールドは、地球大気中で発生するガンマ線および荷電粒子成分を除去するとともに、Ge (Li) 検出器の視野を決定するコリメーターの役割もっている。シールドの厚さは 10 cm で、0.511 MeV ガンマ線に対しては、大気成分を 50%程



第1図



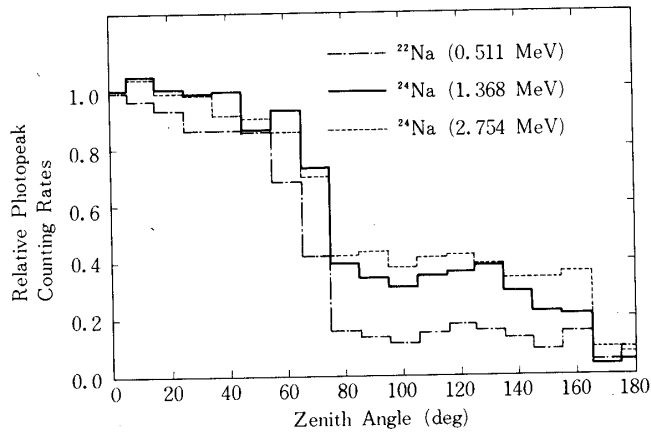
第2図



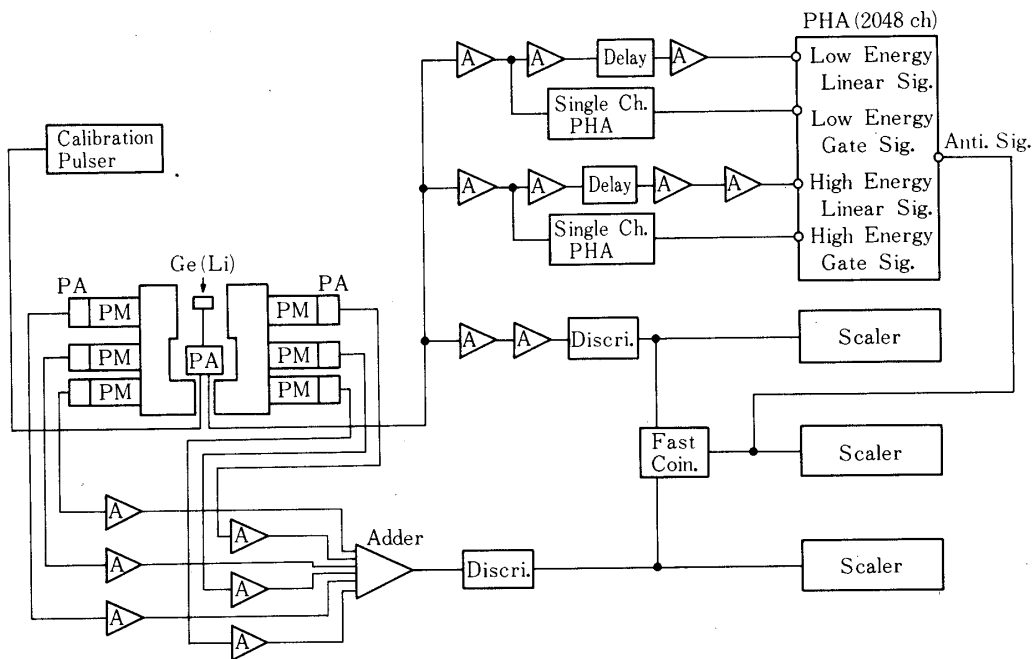
第3図

度に減らすことができるが、2 MeV以上のガンマ線に対しては、シールド効果は、小さく
 なると思われる。また、コリメーターとしての効果を調べるために、 ^{22}Na の 0.511 MeV
 および ^{24}Na の 1.368 MeV と 2.754 MeV のガンマ線を用いて、光電ピーク計数率の天頂
 角分布が測定された。測定結果を第4図に示すが、Ge(Li) 検出器の視野角は $\pm 70^\circ$ とな
 っている。

Ge(Li) スペクトロメーターで観測されるガンマ線のエネルギー範囲は、0.2 MeVから
 5.3 MeV で、この範囲を0.2~2.0 MeV の低エネルギーバンドと2.0~5.3 MeV の高エネ
 ルギーバンドの二つに分け、それぞれのエネルギーバンドについて2048チャンネルの波高



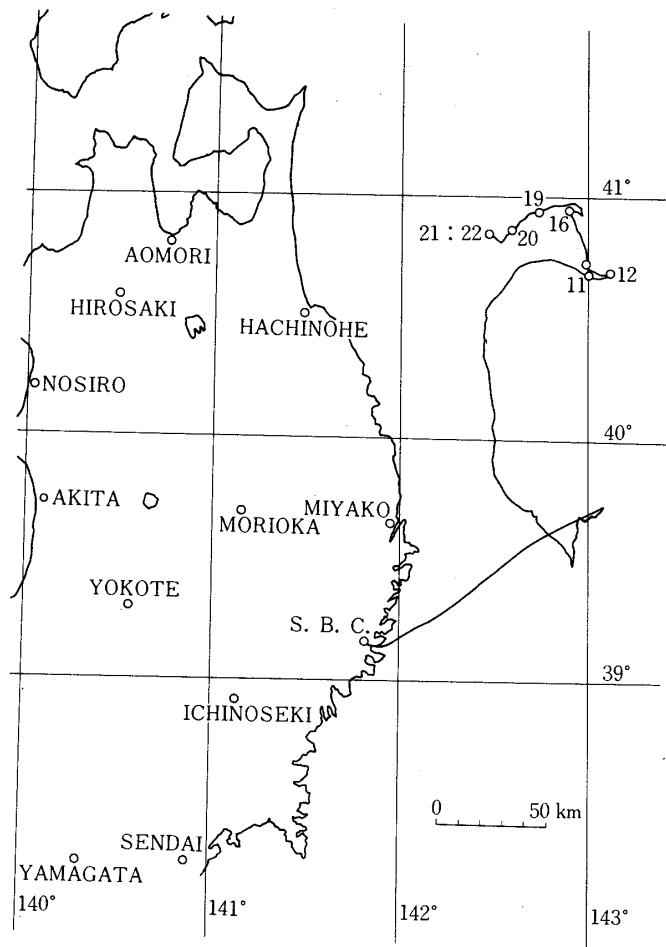
第4図



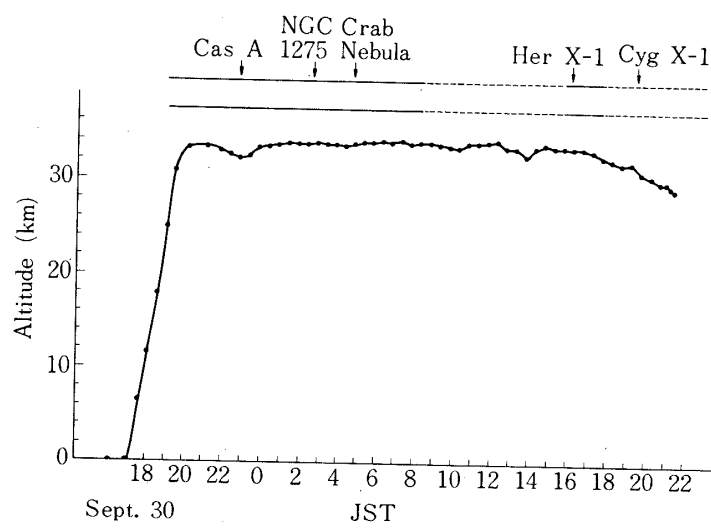
第5図

析器により、エネルギー・スペクトルが測定される。低エネルギー・バンドでは、1チャンネルが0.88 keVとなり、また高エネルギー・バンドでは1チャンネルが1.61 keVとなり、Ge(Li)検出器のエネルギー・分解能3 keVに比較して十分小さくなっている。

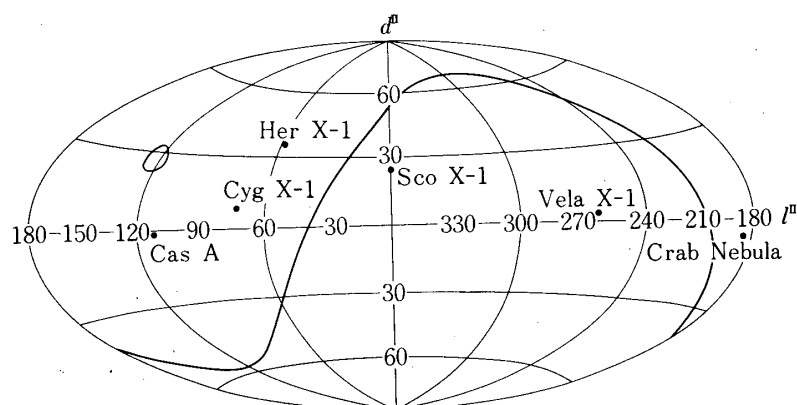
プラスチック・シンチレーターは、5インチ直径の光電子増倍管6本で集光され、それらの信号が加算された後、200 keVレベルのディスクリミネーターを通り、Ge(Li)検出器の信号と反同時計数される。Ge(Li)スペクトロメーターの電子学・ブロック・



第 6 図



第 7 図



第8図

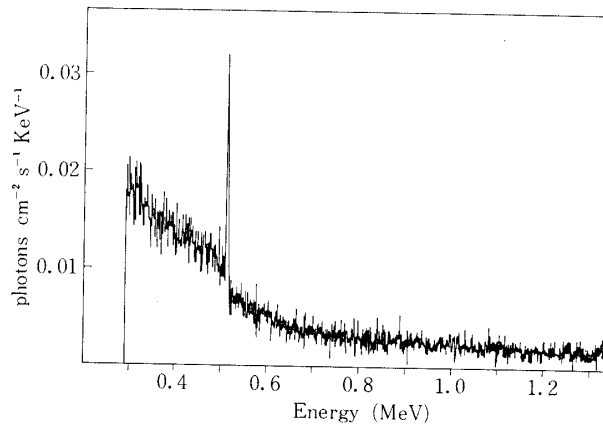
ダイアグラムを第5図に示す。

地上へ伝送される信号は、ガンマ線が Ge (Li) 検出器に入射するごとに送られる波高値信号以外に、0.125 秒の間集積された Ge (Li) 検出器の計数値、プラスチック・シンチレーターの計数値、Ge (Li) 検出器とプラスチック・シンチレーターとの反同時計数値および観測装置4点の温度信号がある。これらのデータ信号は、16384 ビット/秒の PCM 方式で地上へ伝送される。観測装置の全重量は175 kg で、およそ50時間の観測が可能な電源を搭載した。

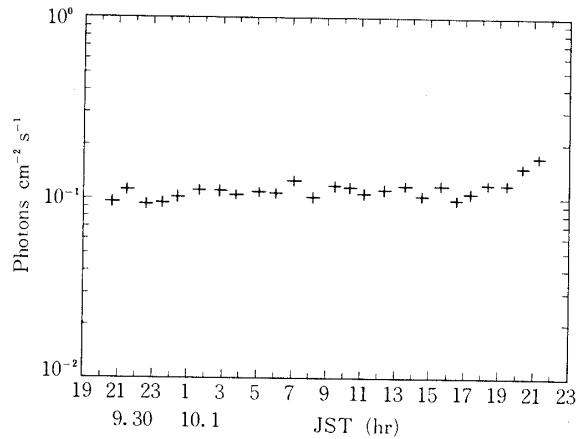
3. 気球飛翔と観測結果

銀河ライン・ガンマ線観測装置を搭載した $B_{50} - 14$ 気球は、1977年9月30日17時12分 (JST) 放球され、第6図に示すような航跡をたどり、10月1日21時22分 (JST) までおよそ28時間にわたる長時間飛翔を行った。この間、気球は第7図のような飛翔曲線を描き、高度7 mb から9 mb の範囲をおよそ21時間水平飛翔し、最後の4時間は、8 mb から15 mb までゆっくりと降下させた。水平飛翔中、Ge (Li) スペクトロメーターが銀河面を観測した時間帯および活動的な天体が視野内に入った時刻も、第7図には示してある。第8図には、Ge (Li) スペクトロメーターで観測された銀河系の領域が銀河座標で示されており、今回の観測では、銀経 50° から 210° までの銀河面が観測されたが、ライン・ガンマ線の強度が最も大きいと考えられる銀河中心方向は、視野に入らなかった。また視野内に入った活動的な天体としては、Cyg X-1, Cas A, NGC 1275, Crab nebula および Her X-1 などがあるが、Ge (Li) スペクトロメーターの視野角が大きいため S/N の点で、これらの点状源からのライン・ガンマ線の検出は不可能であろう。

水平飛翔中、観測装置の温度の低下により、エレクトロニクス回路の一部に故障が生じ、2.0 - 5.3 MeV の高エネルギーバンドのガンマ線の観測が困難となり、今回の実験では、0.2 - 2.0 MeV の低エネルギーバンドのガンマ線のみが測定された。第9図には、低エネルギーバンドの観測結果を示す。0.511 MeV の強いライン・ガンマ線が見られるが、これは大部分が地球大気中でつくられたものである。このラインの強度は、 1.0×1.0^{-3} phot-



第9図



第10図

$\text{photons cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、1970年にわれわれが Ge (Li) スペクトロメーターで観測した値 $1.3 \times 10^{-1} \text{ photons cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ [6] よりやや小さくなっている。これは、1970年の観測では、プラスチック・シンチレーターのシールドをつけなかったために、大気ガンマ線成分を除くことができなかったことによるものである。また、第9図のスペクトルで、0.511 MeV ラインの低エネルギー側に見られるもり上がりは、シールドおよびライオスタット内で0.511 MeV ラインがおこしたコンプトン散乱によるものであろう。銀河面で発生したライン・ガンマ線の強度は、銀河面が Ge (Li) スペクトロメーターの視野内に入っている9月30日20時から10月1日10時までに観測されたライン強度と、銀河面が視野内に入っていない10月1日11時から14時までに観測されたライン強度の差から求めることができる。0.511 MeV ラインについて、観測された強度の時間変化を第10図に示すが、両時間帯で観測された0.511 MeV ライン強度は、統計誤差内で一致している。この結果から銀河面で発生する0.511 MeV ライン強度の上限値として $4 \times 10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ が得ら

第1表

| Gamma-Ray Line (MeV) | Origin | Upper Limit ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$) |
|-------------------------|--|--|
| 0.511 | e^+ annihilation | 4×10^{-3} |
| 0.847 | $^{56}\text{Fe}^*$ | 1.2×10^{-3} |
| 1.369 | $^{24}\text{Mg}^*$ | 2.0×10^{-3} |
| 1.632 | $^{14}\text{N}^*$, $^{20}\text{Ne}^*$ | 1.5×10^{-3} |
| 1.779 | $^{28}\text{Si}^*$ | 1.0×10^{-3} |

れた。この値は、Dyer 等の得た上限値 $(3.0 \pm 1.5) \times 10^{-3}$ 、また Ling 等の上限値 9.2×10^{-3} とほぼ一致している。さらに 2 MeV 以下のエネルギー領域にある核ガンマ線として、 $^{14}\text{N}^*$ (1.632 MeV), $^{20}\text{Ne}^*$ (1.634 MeV), $^{24}\text{Mg}^*$ (1.369 MeV), $^{28}\text{Si}^*$ (1.779 MeV) および $^{56}\text{Fe}^*$ (0.847 MeV) などがあるが、これらのラインは今回の観測ではスペクトル中に見られないため、それらのライン強度の上限値のみが求められた。第1表に得られた上限値を示すが、いずれも $(1 - 2) \times 10^{-3}$ photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ である。これまでに観測されたこれらの核ガンマ線のデータとしては、個々のラインに対して強度が求められていないが、Haymes 等が、銀河中心方向に対して 1.2 - 2.0 MeV 領域の核ガンマ線強度として $(2.6 \pm 0.6) \times 10^{-3}$ photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を得ている。観測された核ガンマ線は、 $^{20}\text{Ne}^*$ (1.634 MeV), $^{24}\text{Mg}^*$ (1.369 MeV) および $^{28}\text{Si}^*$ (1.779 MeV) であろうと考えられている。

4. むすび

今回の気球観測では、銀河面内で最も活動的な中心核が観測されず、ガンマ線発生率の小さな銀経 50° から 210° の銀河面が観測され、陽電子消滅による 0.511 MeV および $^{14}\text{N}^*$, $^{20}\text{Ne}^*$, $^{24}\text{Mg}^*$, $^{28}\text{Si}^*$ および $^{56}\text{Fe}^*$ の核ガンマ線強度の上限値が得られた。これらのライン・ガンマ線強度の上限値は、 $10^{-3} - 10^{-2}$ photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ であり、これまでの観測で得られている上限値とほぼ一致している。

銀河ライン・ガンマ線の強度は、地球大気中で発生するバックグラウンドに対して 10^{-2} 以下と予想されるので、気球観測では、大気バックグラウンド成分をできるだけ除去しなければならず、この点が観測技術上大きな課題となってくる。われわれの観測では、Ge (Li) スペクトロメーターのシールドとしてプラスチック・シンチレーターを用いたが、大気バックグラウンド成分の除去率が 50 - 30% で不十分であり、今後 NaI (Tl) または CsI (Tl) シンチレーターを用いて除去率の向上をはかる必要がある。このシールドの改良に加えて、Ge (Li) 検出器の大型化をはかり、検出感度を上げることにより銀河ライン・ガンマ線強度の上限値を一桁程度下げることができると考えられる。

また Haymes 等の観測結果が示すように、銀河中心核には宇宙線と星間ガスおよびダストが予想以上に大量に存在している可能性があり、Ge (Li) スペクトロメーターを用いてライン・ガンマ線を高い精度で観測することが望まれる。この点について、日本における気球観測では、銀河中心核が天頂角 65° に位置するため、大気吸収が大きくなり、ライン・ガ

ンマ線の観測はできず、オーストラリアまたは南アメリカでの観測が必要になってくる。近い将来、海外協力により南半球での気球観測を行いたいと考えている。

1978年5月27日

参 考 文 献

- [1] Yoshimori, M., 1978 to be published.
- [2] Haymes, R. C., Walraven, G. D., Meegan, C. A.,
Hall, R. D., Djuth, F. T. and Shelton, D. H., 1975. *Ap. J.* **201**, 593.
- [3] Dyer, C. S., Trombka, J. I., Evans, L. G., Bielefeld, M. J., Selzer,
S. M. and Metzger, A. E., 1977. *Proc. 12th ESLAB Symp. (Frascati)*
ESA SP-124. 181.
- [4] Ling, J. C., Mahoney, W. A., Willett, J. B. and Jacobson, A. S., 1977.
J. Geophys. Res., **82**, 1463.
- [5] Imhof, W. L. and Nakano, G. H., 1977. *Ap. J.* **214**, 38.
- [6] Nakagawa, S., Tsukuda, M., Okudaira, K., Hirasima, Y.,
Yoshimori, M., Yamagami, T., Murakami, H. and Iwama, S., 1971.
Proc. 11th Int. Cosm. Ray Conf. (Hobart) **1**, 77.