

# 銀河ラインガンマ線の観測

奥 平 清 昭\*

## 1. はじめに

電磁波のスペクトルは図 1<sup>1)</sup>のように大変幅の広いものであるが、天文学は長い間、そのごく一部分を媒体として利用してきた。しかし、最近の 50 年にも足りない間に、電波やエックス線等の新しいチャンネルを加えて、その領域は急激にひろがった。その結果をみると、チャンネルが異なると、天空は全く違った様相を示す事がわかる。このようにして、新しいチャンネルをひらく事の重要性が認識されるようになった。

エックス線天文学は 1962 年ジャコビーの観測に端を発し、その後急成長をとげ、人工衛星「アインシュタイン」、「はくちょう」の成果により、押しも押されもしない天文学の一分野として市民権を得るにいたった。そこでエックス線に隣接するチャンネルとして、ガンマ線がクローズ・アップされようとしている。

ガンマ線はエックス線よりも波長の短い電磁波である。従って電磁波といっても波動性より粒子性が強く、スペクトルは波長を使わないで、光子のもつエネルギーであらわすのが普通である。もともと、エックス線は電

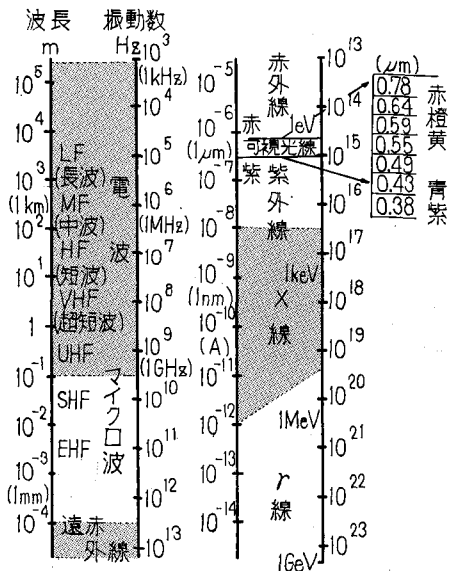
子の運動状態の変化、ガンマ線は原子核の内部状態の変化により発生する電磁波につけられた名前であるが、観測する立場からいえば発生機構がどうであろうと、同じエネルギーの光子は同じように観測できるので、便宜上エックス線とガンマ線とはエネルギーで区分する場合も多い。原子核から放出される光子は一定のエネルギーをもちスペクトルはラインになる。一方、電子は自由-自由遷移や逆コンプトン過程のように、光子発生前後に電子のもつエネルギーは一定でないから、光子のスペクトルは連続スペクトルとなる。

ガンマ線のエネルギーが高くなると方向性をもった検出器を作りやすくなるので、100 MeV 付近の連続ガンマ線の観測が進んで、人工衛星 SAS-2, COS-B によって約 1度の角分解能をもった天球の光度分布図が作られている<sup>2)</sup>。その結果をみると、この領域のガンマ線源は等方成分、銀河面——特に中心から 5 kpc の範囲——にひろがった成分と、約 20 箇の点源に分解できる。点源の中にはカニ・パルサーのように、強いエックス線を放出しているものもあるが、対応するエックス線星をもたないものもある。ラインガンマ線のエネルギー領域は二者の間にあるので、どうなっているか興味深い。

## 2. ラインガンマ線の発生機構

ラインガンマ線の発生機構としては、太陽粒子線の仲間をふくむ広い意味の宇宙線と星間物質との相互作用、超新星爆発の際作られる不安定原子核の崩壊の二つが考えられる。表 1、表 2 はそれぞれの代表的なプロセスを示したものである。また、ガンマ線にふくめるのは適当でないかも知れないが、中性子星の強い磁場の中で運動する電子の角運動量が量子化されて、その変化にともなって生じるサイクロトロン線がある。

宇宙線によるガンマ線生成のうちで中性パイ中間子を經由するものは、ドップラー効果によるひろがりがあるので、連続ガンマ線とみなす方が適当である。また中性子捕獲過程は中性子のベータ崩壊との競争になるので、星間空間のように物質の希薄な場所ではおこりにくい。核励起ガンマ線を観測すれば、宇宙線と星間物質との空間分布、組成を知ることができる<sup>3)</sup>。図 2 は適当な仮定により理論的に導いた銀河中心方向のガンマ線スペクトルである<sup>4)</sup>。比較のために 1981 年 4 月 1 日 0145-0157UT の間に人工衛星「ひのとり」が観測した太陽フレヤからのガンマ線スペクトルを図 3 に示しておく。同



可視光線の限界ならびに色の境界は人の眼によって違う。ここには大略の値があげてある。

図 1 電磁波の波長、振動数と光子エネルギー

\* 立教大学 Kiyooki Okudaira: Observation of Galactic Gamma Ray Lines

表1 宇宙線によるラインガンマ線発生過程

発生過程	光子エネルギー (keV)
核励起	
$^{12}\text{C}(p, p'\gamma)^{12}\text{C}$	4438
$^{14}\text{N}(p, p'\gamma)^{14}\text{N}$	1632, 2313
$^{16}\text{O}(p, p'\gamma)^{16}\text{O}$	6129, 6917
$^{20}\text{Ne}(p, p'\gamma)^{20}\text{Ne}$	1634
$^{24}\text{Mg}(p, p'\gamma)^{24}\text{Mg}$	1369
$^{28}\text{Si}(p, p'\gamma)^{28}\text{Si}$	1779
$^{56}\text{Fe}(p, p'\gamma)^{56}\text{Fe}$	847
電子対消滅	
$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$	511
$\rightarrow 3\gamma$	連続スペクトル
中性子捕獲	
$^1\text{H} + n \rightarrow ^2\text{D} + \gamma$	2223
$^{56}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}\text{Fe} + \gamma$	7632, 7646
中性パイ中間子の崩壊	
$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	$\sim 7 \times 10^4$

表2 超新星, 新星による不安定核の生成

崩壊系列	平均寿命 (年)	1回の爆発による生成核数	光子エネルギー (keV)	1崩壊当りの光子, 陽電子数
$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	0.31	$3 \times 10^{54}$	847	1
			1238	0.70
			2598	0.17
$^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$	1.1	$7 \times 10^{52}$	1771	0.16
			1038	0.13
$^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	1.1	$7 \times 10^{52}$	$e^+$	0.2
			122	0.88
$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}$	3.8	$3 \times 10^{52}$	14	0.88
			136	0.12
$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}$	3.8	$3 \times 10^{52}$	1275	1
			$(10^{48}/\text{新星})$	$e^+$
$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$	68	$6 \times 10^{51}$	1156	1
			78	1
$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$	68	$6 \times 10^{51}$	68	1
			$e^+$	0.94
$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$	$4.3 \times 10^5$	$5 \times 10^{50}$	1332	1
			1173	1
$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$	$4.3 \times 10^5$	$5 \times 10^{50}$	59	1
			1809	1
$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$	$1.1 \times 10^6$	$4 \times 10^{50}$	1130	0.04
			$e^+$	0.85

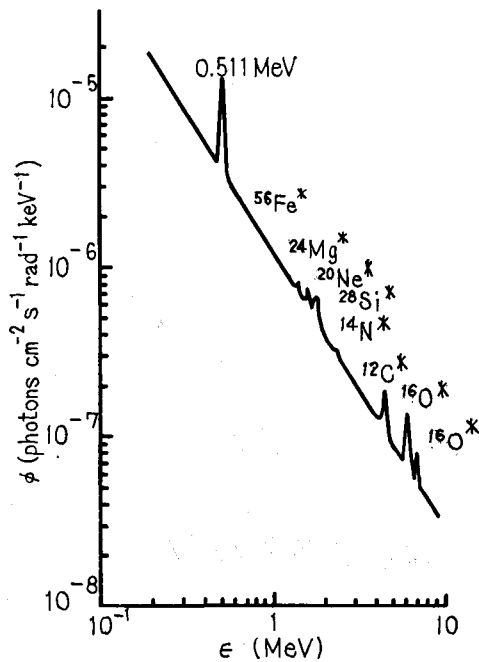


図2 銀河中心方向のガンマ線スペクトル (理論)

じ $^{16}\text{O}$ の励起過程でも, 入射粒子が $^{16}\text{O}$ 核の場合, 標的核が星間ガス中の $^{16}\text{O}$ 核, 同じく星間塵中の $^{16}\text{O}$ 核の三つの場合でドップラー効果によるひろがりにはちがっている(図4). 十分エネルギー分解能のある検出器でこの三者を分離できれば,  $^{16}\text{O}$ 核が気相と固相にどう配分されているか, 宇宙線中の存在比がどうなっているか

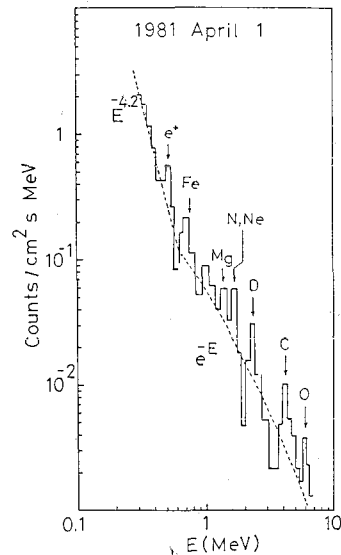


図3 太陽フレアのガンマ線スペクトル(「ひのと」による観測)(1981.4.1)

がわかる. 核励起ガンマ線を作る宇宙線は比較的能量が低く太陽系の内部まで到達できないので, 直接測定できず, ガンマ線の観測をまつしか方法はない.

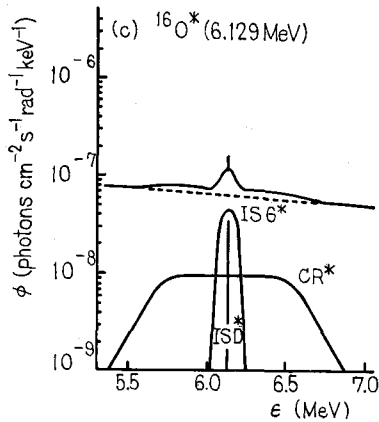


図 4 ピークの形 (理論)

ISD\* は星間塵, ISG\* は星間ガス, CR\* は宇宙線中の  $^{16}\text{O}$  核励起をあらわす. 上の曲線は連続成分と重ねたスペクトル

電子対消滅過程には二光子崩壊と三光子崩壊の二つがあり, 分岐比はその場所の温度, 密度に関係する. スペクトルの形は分岐比と温度に関係するので, エネルギー分解能のよい検出器を使えば発生場所の温度, 密度を推定できる.

また中性子星の表面近くで発生するガンマ線は強い重力場による赤方偏移をうけるはずである.

このようにピーク的位置, かたちからラインガンマ線発生場所の環境条件を知ることができる.

超新星爆発によって作られる不安定原子核の崩壊によるガンマ線を検出できれば元素合成の理論を直接的に検証できる.  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{22}\text{Na}$  のような短寿命核は新しい超新星残骸を点源として観測されるはずである. 一方  $^{26}\text{Al}$  のような寿命の長い核は一つ一つの超新星との対応はつけられないが, 銀河内に特に活動的な領域があるとすれば知る事ができる. また Al の生成率——超新星の頻度が銀河創成以来一定であったかどうかたしかめる事もできよう<sup>5)</sup>.

サイクロトロン線が検出できれば中性子星に期待される強い磁場の存在とその強度があきらかになる.

### 3. ラインガンマ線の観測

以上述べてきたように, ラインガンマ線を観測すれば, 非常に多くの情報が得られるはずであるが, これまでの所観測はあまり進んでいない. その理由の第1はガンマ線はエックス線に比べて透過能が大きいのですだれコリメーターのように広い開口角と高い角分解能をもった検出器が作れない事である. もっとエネルギーがあがると, ガンマ線の入射方向をきめられるようになり, 開口

角も広い検出器が作られるので, ラインガンマ線領域より強度の低い 100 MeV 付近の観測が先行しているのである. 第2にエックス線の場合と対照的であるが, ラインガンマ線の強度は理論家の予想を上回る事が殆どなく弱いためである. 第3の理由は第2の理由とも関連するが, バックグラウンドの問題である. 宇宙線と地球大気の相互作用により発生するガンマ線および宇宙線や地球の放射線帯粒子による検出器とその周辺物質の放射化のために, 我々の測りたい信号に比してはるかに強い雑音の下での測定を強いられるわけである. 以上のような困難にもかかわらず, 最近になって結果が出始めたのは, 検出器の大型化と衛星利用による観測時間の増加によるものである. この両者は統計的ゆらぎをへらして微小な信号をみつけ易くするのである.

ラインガンマ線の検出器は原子核実験に使用するものと同様で, シンチレーション検出器が使われていたが, 最近ではエネルギー分解能のよさを買って, 冷却を必要とする技術上の難点にもかかわらずゲルマニウム検出器が使われるようになってきている. 将来の可能性としては, 液体 Xe を使った検出器の開発が進んでいる. 上述の検出器はそれだけではガンマ線の入射方向を区別できないので, ガンマ線の吸収体を用いたコリメーターに収納して方向性をもたせる. コリメーターがバックグラウンドの発生源となるのを防ぐため, コリメーターをシンチレーターで作り, 中の検出器との逆同時放電をとるアクティブ・コリメーターの方式を採用するのが通常である. これです, 例えば銀河中心方向と別の方向との比較により, 銀河中心部でのガンマ線発生の様子がわかる. あるいは, 検出器の方向は一定にしておいて, シャッターを開閉してその差をとってもよい. バックグラウンドにふくまれないようなラインであれば, こんな手をかけなくてもよい.

以上のような方法で銀河中心のラインガンマ線をとらえたという報告は 1970 年代のはじめにさかのぼる. 最初ラインの位置が 476 keV と報告されたので, その発生過程について議論をよんだが, その後観測を重ねて電子対消滅によるラインに落ち着いた. 特にゲルマニウム検出器により得られたスペクトル (図5) は決定的で, ピークの形から発生場所の温度, 密度まで導き出す事ができた. しかし, 今度はこのラインの強度に対応するだけの陽電子生成機構が考えにくいとして, 理論家の頭を悩ませている. 最近の人工衛星 HEAO-3 の観測によると, この強度は1年位のタイム・スケールで時間変化を示すのではないかという<sup>6)</sup> (表3).

統計的に有意と思われるもう一つの観測例はエックス線星 Her X-1 からのサイクロトロン線である. ツルンベル<sup>7)</sup>は Her X-1 のスペクトルに 58 keV, 110 keV の

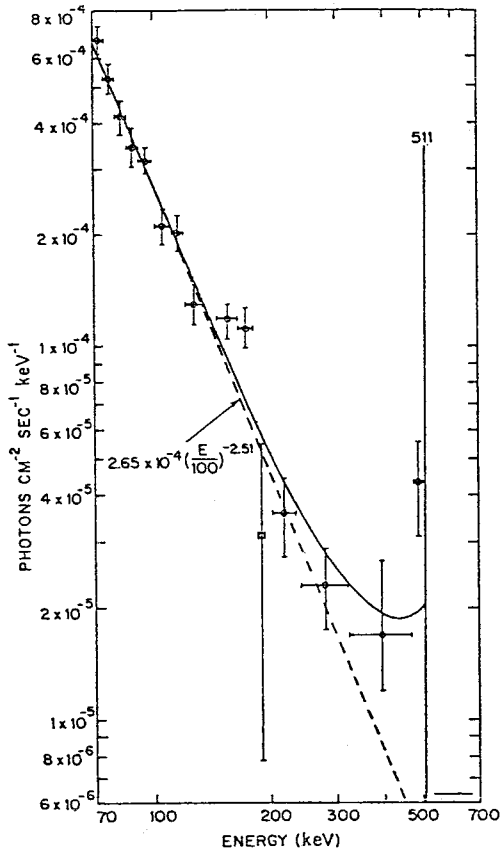


図5 大気頂上に焼直した銀河中心方向のガンマ線スペクトル (点線は連続成分) (1977.11.11)

表3 銀河中心方向のラインガンマ線観測

ラインの中心エネルギー (keV)	強度 ( $10^{-3}$ photons $\cdot$ cm $^{-2}$ $\cdot$ sec $^{-2}$ )	観測日	観測手段
476 $\pm$ 24	1.8 $\pm$ 0.5	1971.11.20	S, 気球
530 $\pm$ 11	0.80 $\pm$ 0.23	1974. 4. 2	同上
511	4.18 $\pm$ 1.56	1977. 2.14 17	G, 気球
510.7 $\pm$ 0.5	1.22 $\pm$ 0.22	1977.11.11	G, 気球
511	2.35 $\pm$ 0.71 (1.24 $\pm$ 0.43)	1979. 4.15	同上
510.90 $\pm$ 0.25	1.85 $\pm$ 0.21	1979.10	G, COS B
510.1	0.65 $\pm$ 0.27	1980. 3	同上

S はシンチレーション検出器  
G はゲルマニウム検出器

2本のラインを発見し、 $10^{12}$  G 程度の磁場を運動する電子によるサイクロトロン線とその高調波であるとした。カニ・パルサーでも 73 keV のラインが検出されてサイクロトロン線とされている。しかし、これらのラインを否定するような観測もあり、あるいは時間変化があるの

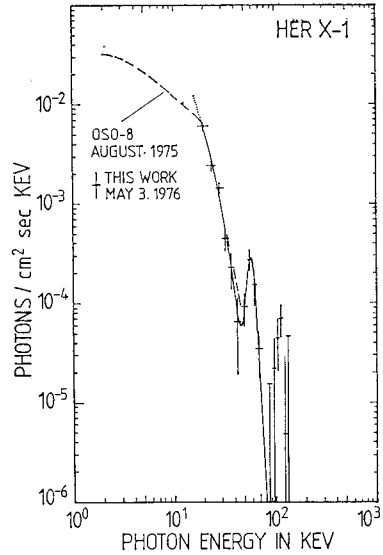


図6 Her X-1 のスペクトル (観測) (1976.5.3)

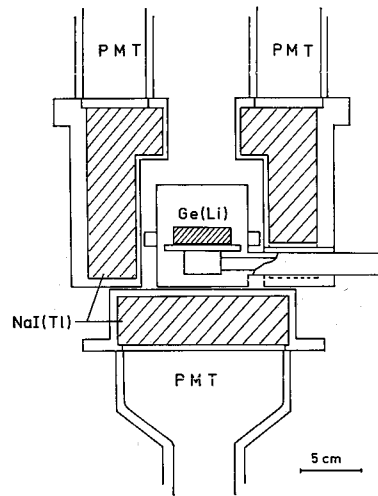


図7 立教大学で準備中のラインガンマ線観測装置

Ge(Li) : ゲルマニウム検出器  
NaI(Tl) : アクチブ・コリメーター  
PMT : 光電増倍管

かも知れない。この問題ははまだ結着をみるに至っていないので、我々はゲルマニウム検出器とアクチブ・コリメーターの組合せを気球にのせて、上述の2点源の観測を実施するべく準備を進めている (図7)。ツルンペルの検出器と比較して面積は小さいが、エネルギー分解能は良いので、彼の報告した強度があれば検出可能である。気球飛揚は来年5月の予定である。

4. むすび

1979年9月に軌道にのった人工衛星 HEAO-3 は約  $100\text{ cm}^3$  のゲルマニウム検出器を4箇のせ、視野の半値幅は  $35^\circ$  である。その感度はこれまでの気球観測より1桁よいという。さらに '80年代半ばに打ち上げ予定のガンマ線観測衛星 (GRO) は12ケのゲルマニウム検出器を並べて約  $2100\text{ cm}^3$  の体積で  $10^{-6}\text{ photon}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$  の感度を得ている。理論家の予想するラインの強度はこの水準を越すものが多い。GROには大面積のシンチレーション検出器もせて幅の広いラインも検出できるようになっている。

このように本格的なラインガンマ線観測が進んでいるので、その成果がみのも遠くないと期待される。

参 考 文 献

- 1) 理科年表, 昭和56年
- 2) B. N. Swanenburg et al., Ap. J. **243** ('81) L69
- 3) R. Ramaty et al., Ap. J. Suppl. **40** ('79) 487
- 4) M. Yoshimori, Aust. J. Phys. **32** ('79) 383

- 5) R. Ramaty, in *Gamma Ray Spectroscopy in Astrophysics* ed. T. C. Cline & R. Ramaty (NASA TM-79619)
- 6) G. R. Riegler et al., Ap. J. Letter to be published
- 7) J. Trümper et al., Ap. J. **219** ('78) L105

☆ ☆ ☆

☆ ☆

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価380円(千70円) '82-3月号・2月5日発売!

3月号のおもな内容

- ★1983年6月11日、インドネシアで5分をこす長い皆既日食が見られます。条件はどうか、天候は、現地の状況は? インドネシア日食情報第1号です。
- ★古い小惑星の軌道を調べて、小惑星の発見・確認に活躍している浦田武さんが、最近二つの小惑星を発見、ヤマモト、カンダと命名しました。そのいきさつを...
- ★鏡面研磨のベテラン苗村敬夫さんが、ドールキルハムという型の望遠鏡の概略、主鏡の磨き方などを解説。
- ★以前から有名なシュワスマン・ワハマ第II彗星の変光についての新説を、斉藤馨さんが紹介します。
- ★ほかに、マイコン講座、3月の観測ガイド.....など

★星のない夜に楽しむ本★

天文通のあなたも、興味を持つて間もないあなたも、奇問・珍問・難問664に挑戦。

# クイズ

# 星座

定価600円

天文ガイド編  
斉田博編