

# 銀河ガンマ線ラインの観測\*

渡辺 博之\*\*・吉森 正人\*\*・奥平 清昭\*\*  
中本 淳\*\*・平島 洋\*\*

(1983年5月27日受理)

## Observation of Galactic Gamma-ray Lines

By

Hiroyuki WATANABE, Masato YOSHIMORI, Kiyooki OKUDAIRA,  
Atsushi NAKAMOTO and Yo HIRASIMA

**Abstract:** The observation of the galactic gamma-ray lines was performed from 1982 September 29 to 30 using a Ge(Li) spectrometer at 38 km. During the balloon flight, the Crab Nebula, *Her X-1*, and *Cyg X-1* were observed. The data analysis is not yet completed, but the spectral excess around 62 keV was observed from *Her X-1*. We compare our data with another observation.

### 概 要

Ge(Li)スペクトロメーターを使用して、1982年9月29日から30日にかけて高度38 kmにおいて、銀河 $\gamma$ 線ラインの観測を行なった。この気球実験で、カニ星雲、*Her X-1*、*Cyg X-1*の観測を行なうことができた。解析は、まだ完了していないが、*Her X-1*からは62 keVにピークを持つスペクトルが得られたので、他の観測データとの比較を行なった。

### 1. はじめに

宇宙 $\gamma$ 線ラインの観測によって、超新星や新星の爆発時における核合成の様子や、星間空間での宇宙線や星間物質の空間分布などの知識が得られることは、これまでに言われてきた。

一方、観測のほうでも Haymes et al. [1]が、銀河中心領域から511 keVのポジトロン

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 立教大学理学部

消滅ラインと、 $^{12}\text{C}$ の励起核からの $\gamma$ 線(4.43 MeV)と考えられる4.6 MeVのラインを検出した。その後511 keVのラインは、Leventhal et al. [2]によっても検出された。またカニ星雲から、Leventhal et al. [3]は400 keVのラインを検出した。これは、星雲の中心にある中性子星の表面付近で発生した511 keVのラインが、中性子星の重力によって赤方偏移したものと考えられている。また、これにより低エネルギーの領域でも Trümper et al. [4]が、Her X-1の観測で58 keVのラインを検出している。これは、中性子星の磁極付近の強磁場( $\sim 10^{12}$  gauss)における電子のサイクロトロン線と考えられている。さらに、Ling et al. [5]は、カニ星雲からの73 keVのラインを検出した。その後、Strickman et al. [6]も、やはりカニ星雲から77 keVのラインを検出している。

このように、 $\gamma$ 線ラインの発生過程も、p, n等の衝突による原子核の励起核から放出される核 $\gamma$ 線、ポジトロン消滅 $\gamma$ 線に加えて、中性子星の磁極付近での電子のサイクロトロン放射によるラインも観測データとして得られつつある。我々は、このような天体からの $\gamma$ 線ラインを検出するために、1982年9月29日から30日にかけて気球を利用して観測を行なった。測定された $\gamma$ 線のエネルギー領域は30-700 keVである。この気球観測でカニ星雲、Her X-1、およびCyg X-1の観測を行なった。データ解析は、まだ完了してはいないが、これまでの解析で得られた結果について述べる。

## 2. 観測装置

図1に、この実験に使用した $\gamma$ 線検出器の概略図を示す。検出器は、直径46 mmのプレ

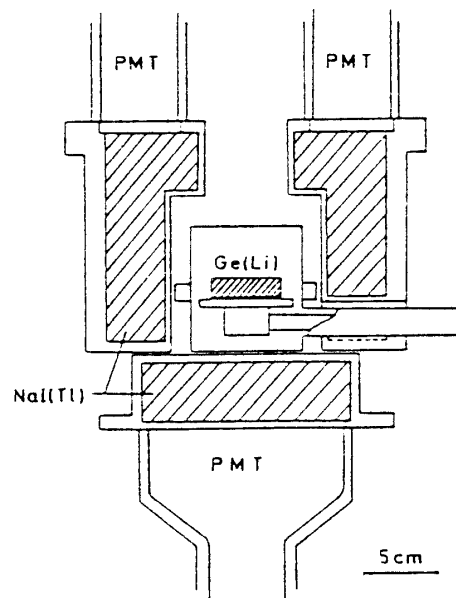


図1  $\gamma$ 線検出器の概略図

ーナー型の Ge (Li) を使用した  $\gamma$  線スペクトロメーターと、NaI (Tl) のアクティブコリメーターとから構成される。

Ge (Li) のエネルギー分解能は 81 keV のラインに対して 5.5 keV (FWHM) である。また、この Ge (Li) は真空チェンバー内にマウントされ、コールドフィンガーを通して液体窒素によって冷却されている。液体窒素のタンクの容量は 17 l あり、気球高度で固体になるのを防ぐため 300 mb の圧力弁が取り付けられている。また、真空チェンバーは 1 l/s の排気能力を持つイオンポンプに接続され、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$  mmHg の高真空に保たれている。

一方、アクティブコリメーターとして働く NaI (Tl) シンチレーターは、Ge (Li) の真空チェンバーの横に位置するサイドシンチレーターと、下に位置するボトムシンチレーターの 2 つのブロックからなる。サイドシンチレーターは、直径 19.0 cm、高さ 14.3 cm、ボトムシンチレーターは、直径 14.3 cm で、両シンチレーターとも厚さは 4.0 cm である。また、エネルギー分解能は 511 keV のラインに対し、サイドシンチレーター、ボトムシンチレーターでそれぞれ、11%、14% (FWHM) である。

このシンチレーターは、大気中や検出器の周辺、あるいは検出器自身から発生するバックグラウンド  $\gamma$  線を除く働きと、検出器の視野を決定する働きとを持っている。さらに、これは Ge (Li) 検出器でコンプトン散乱した  $\gamma$  線を捕らえ、Ge (Li) 内で入射  $\gamma$  線の全エネルギーを吸収したイベントのみを有効イベントとして識別するアンチコンプトンカウンターとしての働きも持っている。

このシンチレーターを使用したアクティブコリメーターによって決定される視野の広さは、81 keV において  $26^\circ$  (FWHM) であり、356 keV になると  $33^\circ$  とやや広がる。

このような  $\gamma$  線検出装置を用い、天体が視野に入っている時と入っていない時のスペクトルの差をとることによって、天体からの  $\gamma$  線強度を求める。ただ、この場合、視野を固定して星の日周運動を利用すると、天体の観測とバックグラウンド測定との間に時間間隔があき、その間に気球の高度変化などによってバックグラウンドの強度が変化することも考えられる。そこで、ある一定時間ごとに強制的に天頂角をそのままに、方位角のみを変えることで、できるだけ同一条件で天体とバックグラウンドの測定をすることにした。

気球実験において地磁気センサーを利用した方向規正を行うと、ゴンドラは特定の方向に固定されたままであるが、ここで、ゴンドラ内に取り付けられた地磁気センサーをモーターで回転させると、こんどは、この逆の方向にゴンドラが回転していく。 $\gamma$  線検出器はゴンドラに固定されているので、ゴンドラの回転にともない、検出器の視野は天頂角一定のまま方位角が変化していく。したがって、地磁気センサーを一定時間ごとに、決められた角度だけ、右回り、左回りを交互に繰り返していくことによって、2 点の定められた方位角に向かせることができる。

実際の観測では、これまでに行なわれた観測のように方位角を南と北に  $180^\circ$  反転させる方式では、Her X-1、Cyg X-1 の南中時の天頂角が  $4^\circ$  になり、 $30^\circ$  ほどの視野をもつ測定器では 1 時間半ほどしか視野に入らない。むしろ Her X-1 や Cyg X-1 に対しては東と西に  $180^\circ$  反転させた方が観測時間を長くとることができる。しかし、このようにした場合には、カニ星雲が視野にほとんど入ってこない。そこで、カニ星雲と Her X-1、Cyg X-1 の

観測時間をできるだけ長くし、かつ装置があまり複雑にならないように考慮して、真南から東と西へそれぞれ  $60^\circ$  振らせることにした。この場合、3天体とも南中2時間前から南中2時間後まで観測可能となる。ただしバックグラウンドの測定も同時に行なうので、有効観測時間はこの半分となる。この場合、天体の南中前は東の空で天体を観測し、西の空でバックグラウンドを測定するが、南中後は西の空で天体を観測し、東の空でバックグラウンドを測定することになる。なお、 $\gamma$ 線検出器の詳しい点については文献[7]を、また観測方法については文献[8]を参照されたい。

上空で得られたデータは、クロックサイクル 16 kHz のバイフェイズ PCM 方式のテレメータで地上へ送られ、時刻信号とともに磁気テープに記録される。また、これと同時に、簡易再生装置を使って観測中の検出器の状態を監視して、必要に応じて地上からコマンドを送ることができる。

テレメータで送られてくるデータは次のようなものである。

1)  $\gamma$ 線イベント

- Ge(Li) でのパルスハイト (10 bit)
- アクティブコリメータでのパルスハイト (6 bit  $\times$  2)
- イベントが起こった時刻 (分解時間 1 ms)

2) モニターデータ

- Ge(Li) の計数率
- アクティブコリメータの計数率
- 装置の各点の温度
- テレメータへ送り出されたデータのワード数
- 地磁気センサーの出力
- ゴンドラに対する地磁気センサーの位置を示すフラグ
- Ge(Li)、フォトマル、イオンポンプ用の高圧電源の ON-OFF フラグ

これらのデータを磁気テープから再生して、ミニコンピューター (NOVA-01) で解析する。この解析システムは 1979 年の銀河  $\gamma$ 線ラインの気球実験の際に製作したもの[9]を、部分的に改良、追加したものである。

### 3. 気球観測

気球は 1982 年 9 月 29 日 16 時 55 分 (JST) に三陸大気球観測所より放球され、約 3 時間後に高度 38 km に達し、この高度での観測データを約 24 時間とることができた。レベル高度に達した後、20 時にはゴンドラに方向規正がかけられた。 $\gamma$ 線検出器の視野の中心は天頂角  $15^\circ$  にセットしてあり、方向規正がかけられるまでは視野は天頂角  $15^\circ$  で方位角は定まっていないが、規正をかけた後は、方位角は真南から東と西へそれぞれ  $60^\circ$  ずれた方位角に交互に向けられる。

このような操作を繰り返しながら、同時に星の日周運動を利用することによって、天体とバックグラウンドの測定を続けた。この方式によって、30 日の明け方にはカニ星雲を、また 30 日午後から夕方にかけて Her X-1 を、さらに夜には Cyg X-1 を観測することがで

きた。

観測中は、送られてきたデータを磁気テープに記録するとともに、エレクトロニクス回路や検出器などの温度や、Ge、シンチレーターの計数率などをペンレコーダーで監視し、必要に応じてコマンドを送った。明け方には温度が最も下がり、地磁気センサーを回転させるモーターは $-42^{\circ}\text{C}$ まで下がったが、正常に動作しつづけた。また回路系、検出器とも正常に働いていた。ただ、Geの真空チェンバー内の真空を保っているイオンポンプを動作させると、Geのスペクトルのなかで低エネルギー部分( $\sim 30\text{ keV}$ 以下)にノイズがのっていたので、特定の天体の観測はイオンポンプの電源を切った状態で行なわれた。

#### 4. 観測結果

$\gamma$ 線のイベントは、アンチ信号の状態にかかわらず、すべてテレメーターにより地上へ送られる。したがって、同じデータを使用してアクティブコリメーターを、アンチ ON にした時と、アンチ OFF にした時を比較することができる。この比較を行なったのが図2で、30日明け方のデータ(約1時間)を使用したものである。図中に見られる $500\text{ keV}$ 付近のラインは、ポジトロン消滅ライン( $511\text{ keV}$ )である。これは大気や検出器およびその周辺の物質と宇宙線との相互作用の結果生じたポジトロンの消滅の際に放出されたものである。このようにアクティブコリメーターをアンチ ON の状態で使用することによって、1桁以上もバックグラウンドを低下させることができる。

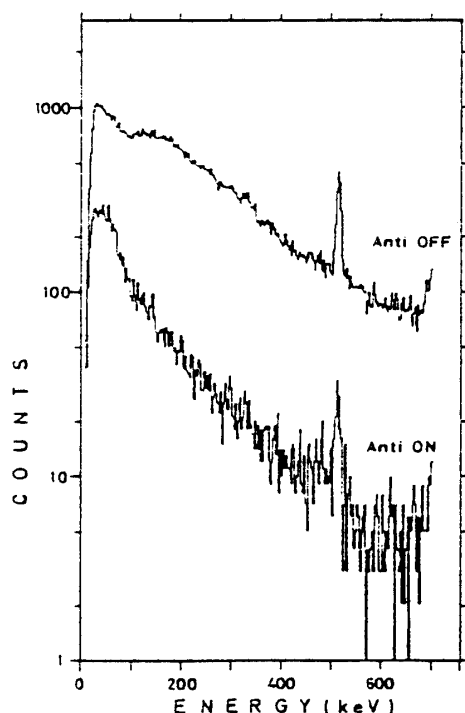


図2 大気の深さ  $4\text{ g/cm}^2$  で得られたスペクトル。アクティブコリメーターを使用することによって、Anti OFFのスペクトルからAnti ONのスペクトルのように、バックグラウンドが1桁以上も低下する。

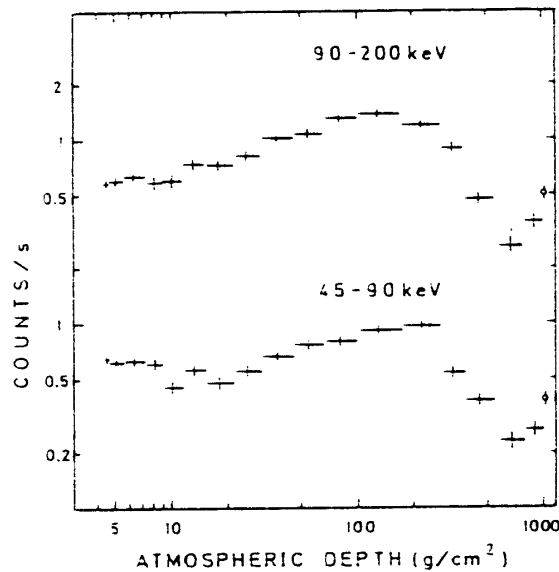


図3 気球の上昇中に得られた $\gamma$ 線計数率の高度変化.

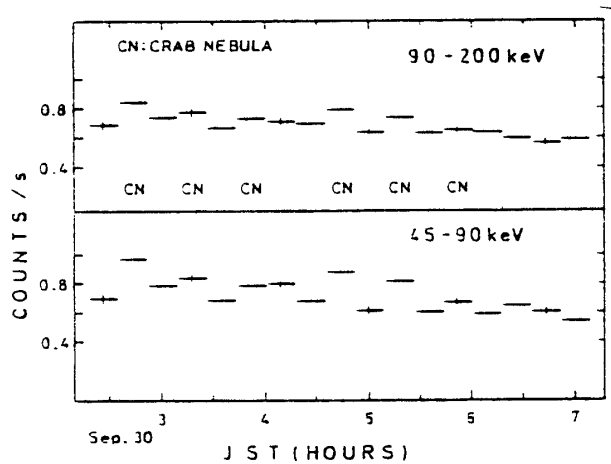


図4 カニ星雲観測中の $\gamma$ 線計数率変化. 図中の「CN」はカニ星雲が視野内にあることを示す.

次に、気球の上昇中に得られた大気 $\gamma$ 線の計数率の高度変化を図3に示す。気球の上昇にともない、 $100\text{--}200\text{ g/cm}^2$ で最大値に達した後、徐々に減少し、 $10\text{ g/cm}^2$ 以下では逆に増加あるいは一定になっている。これは宇宙 $\gamma$ 線の等方成分や天体による寄与であると思われる。これを測定している時刻は、Cyg X-1が南中した直後であり、この増加にはCyg X-1からの成分が含まれていると考えられる。

図4、図5に、天体を観測中のアンチON状態でのGeの計数率変化を示す。図4はカニ星雲を観測時のものであり、図5はHer X-1およびCyg X-1観測時のものである。視野

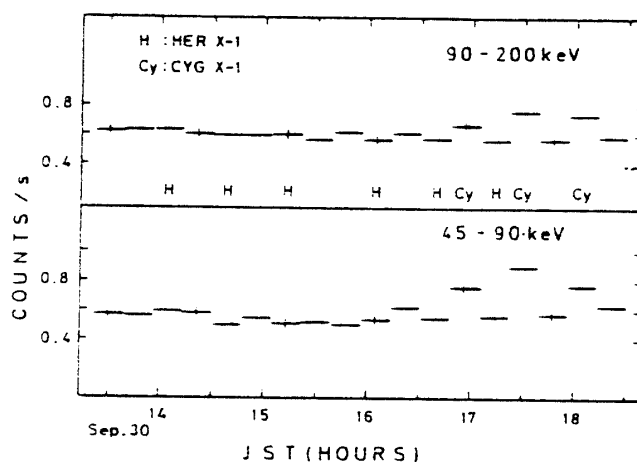


図5 Her X-1およびCyg X-1観測中の $\gamma$ 線計数率変化。図中の「H」,「Cy」はそれぞれHer X-1, Cyg X-1が視野内にあることを示す。

を東西に振っているため、天体の南中前後では1ピリオド(17分)ごとに計数率が増減している。カニ星雲とCyg X-1は計数率の増加が明らかであるが、Her X-1は予想される強度がカニ星雲やCyg X-1に比べて1桁ほど低いので、この図では増加は認められない。

次に、天体が視野内に入っているピリオドとバックグラウンドのピリオドとのスペクトルの差をとり、天体からの成分を導き出したのが図6から図8のスペクトルである。これは、パルスハイトのドリフトとテレメーターの転送によるデッドタイムとを補正したものである。図6, 7, 8はそれぞれ、カニ星雲, Cyg X-1, Her X-1のパルスハイトスペクトルである。カニ星雲, Cyg X-1の2つの天体についてのスペクトルの詳細は現在解析中であるが、図6, 7とも予想された強度とほぼ一致している。以下、Her X-1について暫定的な結果ではあるが述べていく。

パルスハイトのスペクトルから $\gamma$ 線のスペクトルを導き出すには、厳密には、検出器の $\gamma$ 線に対するレスポンス関数を使用して逆変換を行なうのであるが、ここでは簡便法として、入射 $\gamma$ 線のエネルギーはすべて検出器で吸収されるものと仮定して、全エネルギー吸収効率を使用して $\gamma$ 線スペクトルを求めた。この方法は、 $\sim 100$  keV以上になると、コンプトン散乱等の効果を考慮しなければならないため適切ではないが、 $100$  keV以下では光電効果が優勢になり、入射 $\gamma$ 線のエネルギーと検出器でのエネルギー吸収量とが等しくなってくること、また、アクティブコリメーターがアンチコンプトンカウンターとして働くこと、さらに、 $\gamma$ 線ラインの強度に関しては厳密に逆変換したものと変わらないこと、などを考慮して全エネルギー吸収効率から $\gamma$ 線スペクトルを求めた。

さらに、視野内での天体の移動にともなう検出器の有効面積の補正、および大気吸収に対する補正を行なって得たHer X-1の $\gamma$ 線スペクトルを図9に示す。この図中には、比較のためTrümper et al. [4]の結果も示してある。ただし、彼等のデータはHer X-1のパ

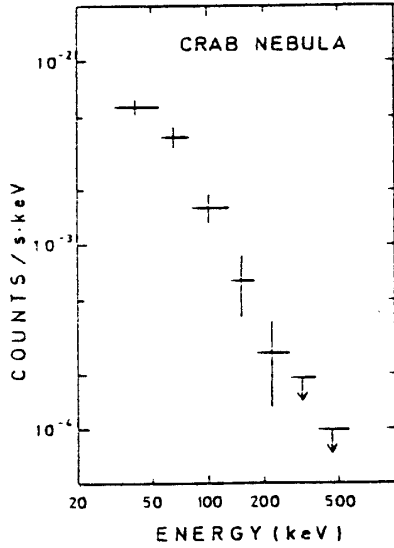


図6 カニ星雲のパルスハイトスペクトル。

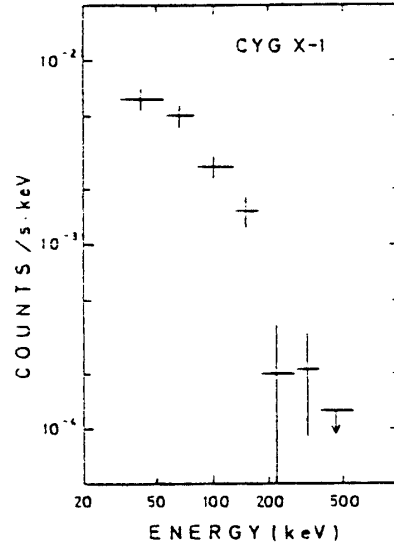


図7 Cyg X-1のパルスハイトスペクトル。

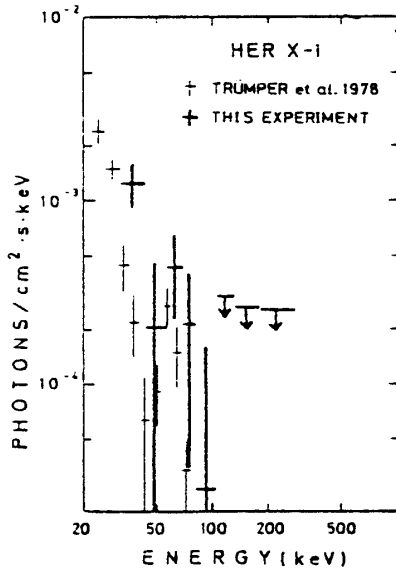


図8 Her X-1のパルスハイトスペクトル。

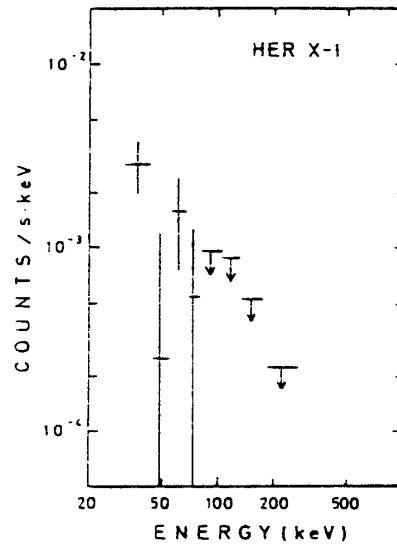


図9 Her X-1のγ線スペクトル。

ルサーの1.2秒の周期を利用して、パルスの出ているフェイズと出していないフェイズとの差をとっている。すなわち、Her X-1のパルス成分のスペクトルである。一方、我々のデ



ータはパルサーからの成分を含んだ Her X-1 全体からのスペクトルである。観測した時刻は, Boynton et al. [10]と Giacconi et al. [11]のデータをもとに計算すると, Turn-ON から5日後にあたり, Her X-1 のパルサーと連星をなす主星の陰には入っていない。

このスペクトルのなかで特徴的なことは, 50 keV 付近に落ちこみ, あるいは 60 keV 付近に盛り上がりが見られることである。我々の得たデータは統計精度が十分とはいえないが, 56-80 keV をすべてライン成分と考えて, その強度を求めると,  $(7.9 \pm 2.8) \times 10^{-3}$  photons/cm<sup>2</sup>·s となる。これは Trümper 等の得た  $3 \times 10^{-3}$  photons/cm<sup>2</sup>·s の 1.7~3.6 倍の強度になる。また, このラインをサイクロトロン線と考え, ピークのエネルギー 62 keV に対応する発生源での磁場の強さを求めると,  $5.7 \times 10^{12}$  gauss となる。さらに, 発生源を中性子星の磁極の表面付近と考えると, 重力による赤方偏移のためラインのエネルギーの値は, これより数 10% 高くなり, その場合には磁場の値も, より強いものとなる。

### 5. ま と め

大気の深さ 4 g/cm<sup>2</sup> において銀河  $\gamma$  線ラインの観測を行なった。この気球実験で, カニ星雲, Her X-1, Cyg X-1 の観測を行ない, これらの天体からのスペクトルを得た。特に Her X-1 からは, 62 keV に盛り上がりを持つスペクトルが得られた。これは, 1976 年に Trümper et al. [4] が最初に検出し, 電子のサイクロトロン線と考えられている 58 keV のラインと, ほぼ同じエネルギーであり, その強度は彼等の測定値の 2.6 倍にあたる  $(7.9 \pm 2.8) \times 10^{-3}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> であった。なお, カニ星雲, Cyg X-1 については現在解析中である。

気球実験の際には, 宇宙科学研究所の西村研究室, 広沢研究室の皆様にご協力して頂きました。深く感謝します。

### 参 考 文 献

- [1] R. C. Haymes, G. D. Walraven, C. A. Meegan, R. D. Hall, F. T. Djuth, and D. H. Shelton, *Ap. J.*, **201**, 593 (1975).
- [2] M. Leventhal, C. J. MacCallum, A. F. Hutters, and P. D. Stang, *Ap. J.*, **240**, 338 (1980).
- [3] M. Leventhal, C. MacCallum, and A. Watts, *Ap. J.*, **216**, 491 (1977).
- [4] J. Trümper, W. Pietsch, C. Reppin, W. Voges, R. Staubert, and E. Kendziorra, *Ap. J. (Letters)*, **219**, L 105 (1978).
- [5] J. C. Ling, W. A. Mahoney, J. B. Willett, and A. S. Jacobson, *Ap. J.*, **231**, 896 (1979).
- [6] M. S. Strickman, J. D. Kurfess, and W. N. Johnson, *Ap. J. (Letters)*, **253**, L 23 (1982).
- [7] 渡辺博之, 吉森正人, 奥平清昭, 平島洋, 中本淳, 宇宙観測シンポジウム 昭和 56 年度, 504 (1981).
- [8] 渡辺博之, 吉森正人, 奥平清昭, 平島洋, 中本淳, 宇宙観測シンポジウム 昭和 57 年度, 77 (1982).
- [9] 渡辺博之, 吉森正人, 奥平清昭, 平島洋, 宇宙観測シンポジウム 昭和 55 年度, 590 (1980).
- [10] P. E. Boynton, L. M. Crosa, and J. E. Deeter, *Ap. J.*, **237**, 169 (1980).
- [11] R. Giacconi, H. Gursky, E. Kellogg, R. Levinson, E. Schreier, and H. Tananbaum, *Ap. J.*, **184**, 227 (1973).