

ASM の発見した X 線新星 GS 2000+25 とその観測*

常深 博**・北本俊二**・岡村定矩***

Diane Roussel-Dupre****

(1989 年 1 月 10 日受理)

The Observation of a Bright X-Ray Nova, GS 2000+25, Discovered with The ASM

By

Hiroshi TSUNEMI, Shunji KITAMOTO, Sadanori OKAMURA
and Diane ROUSSEL-DUPRE

Abstract: We report here the discovery with the All Sky Monitor Detector on board the GINGA satellite of the X-ray transient, GS 2000+25, which appeared in the constellation Vulpecula on 23 April, 1988. The maximum observed intensity was 12 Crab (1-6 keV). Two stars in the X-ray error box appeared to increase from the epoch of the Palomar Observatory Sky Survey ; one of these was confirmed to be the counterpart by optical spectra and radio measurements. The X-ray spectrum and light curve during the decay phase shows that it belongs to a class of ultra-soft sources which include black hole candidates like A 0620-00. A detailed comparison with A 0620-00 supports the identification of GS 2000+25 as a possible new black hole candidate.

* 宇宙研特別事業費による研究論文
** 大阪大学理学部
*** 東京大学理学部天文教育センター
**** Los Alamos National Laboratory

概 要

1988年4月23日に『ぎんが』搭載のASMが、銀河面から約3度離れたこぎつね座にX線新星を発見し、GS 2000+25と名付けた。その後増光し、最大強度は12クラブ(1~6 keV)に達した。光学観測から、パロマ-星図と比べて増光している二個の星が検出された。その後、その内の一個がX線新星の光学天体であることが光のスペクトルと電波の観測から分かった。X線のスペクトルからは、この新星がA 0620-00に代表されるようないわゆるウルトラソフトX線新星であることが示された。GS 2000+25とA 0620-00との詳細な比較から、GS 2000+25も有力なブラックホール候補であることが分かった。

Key Words : X線新星, GS 2000+25, ブラックホール候補

I. はじめに

X線新星はそのスペクトルからソフトとハードとの二種類に分類される[1]。普通、ハードなスペクトルを持つX線新星は早期型星を含んだ連星系で、X線パルサーであることが多い(例えば、4U 0115+63, A 0535+26)。これに対し、ソフトなスペクトルを持つX線新星は普通、晩期型星との連星系である。ソフトなX線新星のあるもの、例えば、4U 1608-522, Cen X-4, Aql X-1, 等はX線バーストを起こしたため中性子星を含んでいることが判っている。Whiteたち[2]は、定常X線星とX線新星とをスペクトルの硬さで比較し、更に、これらのスペクトルと伴星との類似性からX線新星と定常X線星は連星系内の質量交換の異なった状態を観測しているものであると結論している。更に、彼らは、X線星をスペクトルに従って全部で三種類に分類している。即ち、ハード、ソフト、それにウルトラソフトと呼べるものである。ハードとソフトのX線星については、中性子星で磁場の強いものと弱いものとであることが判っている。これに対して、ウルトラソフトと呼ばれるX線星は、LMC X-1, LMC X-3, A 0620-00, GX 339-4, Cyg X-1等で、何れもブラックホールを含んでいるものと考えられている。

我々は、『ぎんが』衛星に搭載した全天監視装置(ASM)でウルトラソフトのX線新星を発見した。ここに、これらの観測の結果、並びに、史上最も明るかったX線新星A 0620-00とのスペクトルや光度曲線等の類似点を報告し議論する。

II. 観 測

『ぎんが』[3]の搭載のASM[4]は2台のガス比例計数管からなり、各々の計数管は傾きの異なった3個のファンビーム(約 $1\times 45^\circ$)コリメーターを持っている。ASMの測定エネルギー範囲は1~20 keVである。通常の全天走査観測モードでは、衛星が約20分かけて一回転するとき、このエネルギー範囲を16チャンネルに分けてデータを取る。普通、この

全天走査観測モードは毎日一回行い、この観測により X 線星の位置決定精度は 0.5° 以下、検出限度は 50 ミリクラブ以下である。これ以外の時間は、ASM は LAC[5] の視野の反対方向の空をじっと観測し続けているだけである。但し、その間のほとんどのデータは 1~20 keV までの全計数率だけで、詳細なエネルギー情報はない。それでも、時折 16 チャンネルの詳細なスペクトルの取れることもある。この時の時間分解能は、LAC のデータモード等によって決まり、1/16~2 秒である。

1) X 線による観測

『ぎんが』搭載の ASM が、いつものように全天走査観測モードで天空を観測中の 1988 年 4 月 26 日、銀河面から 3° ほど離れたこぎつね座の中に、大変明るい X 線新星を見つけ、GS 2000+25 と名付けた。この時、X 線新星 GS 2000+25 は、衛星の赤道面からざっと 30° も離れていたため、ASM のコリメータ透過率はせいぜい 30% であったが、9~10 クラブくらいの明るさであることが判った[6]。それ以前にこの領域の観測は 4 月 22 日に行っていたが、その時は何も検出できず、この場所における強度の上限 (5σ) として 30 ミリクラブを得ていた。

ところで、4 月 23~24 日にかけて、LAC は BV Pup を観測していたが、このターゲットは、偶然にも GS 2000+25 のほぼ反対方向に位置する。こういうわけで、この新星の増光中の振舞いを ASM は殆ど連続的にポインティング観測していた。最初に GS 2000+25 が ASM の視野に入ったのは、LAC が BV Pup を観測し始めた 4 月 23 日 00:30 (U. T.) であり、その時既に約 500 ミリクラブに増光していた。その後、地球による X 線源の掩蔽、ブラジルアノマリー等のバックグラウンドの高い領域の通過時などによる観測の中断はあったが、LAC の次の観測目標である SN 1987 A へ衛星が移動し始める 4 月 25 日 04:10 (U. T.) まで連続して観測した。この連続観測のデータは、殆ど総て 1~20 keV までの全計数率だけであり、時間分解能も LAC の観測モードによるため、1/16, 1/2, 2 秒の組合せとなっている。この連続観測の間のコリメータの透過率は大体 70% であった。増光中の強度変化の中には、著しい周期性はなく、変動の上限値は 1/8 秒から 100 秒の間で 2% 以下 (5σ) であった。

4 月 23 日に最初に検出した時から、4 月 28 日に最大強度 12 クラブ (1~6 keV) に達するまで、GS 2000+25 はほぼ直線的に増光している。その後、6 月の末まで概ね指数関数的に減光しており、その時の減光の時定数 (e-folding time) は 30.8 ± 0.7 日であった。ところが、7 月になると少なくとも 5 日間は約 50% 程増光しフレアを起こしたことが判った。このフレアの振舞いは、衛星の太陽角等の制限のため詳細に捉えるには至らなかった。その後、GS 2000+25 は前と同じような時定数で減光している。

図-1(a)には 7 月まで、ASM で捉えた X 線の光度曲線を示す。また、図-1(b)にはこの X 線新星の増光中の幸運な連続観測の結果得られた光度曲線を示す。増光中のデータを除いた全てのデータは、ASM の全天走査時における観測で得られたものであり、従って、これらの点の観測時間はせいぜい数秒にしか過ぎない。

初めて詳細な X 線エネルギースペクトルが得られたのは 4 月 24 日で、新星の強度は最大強度時の約半分になった時である。このスペクトルを図-2 に示す。この観測は、たまた

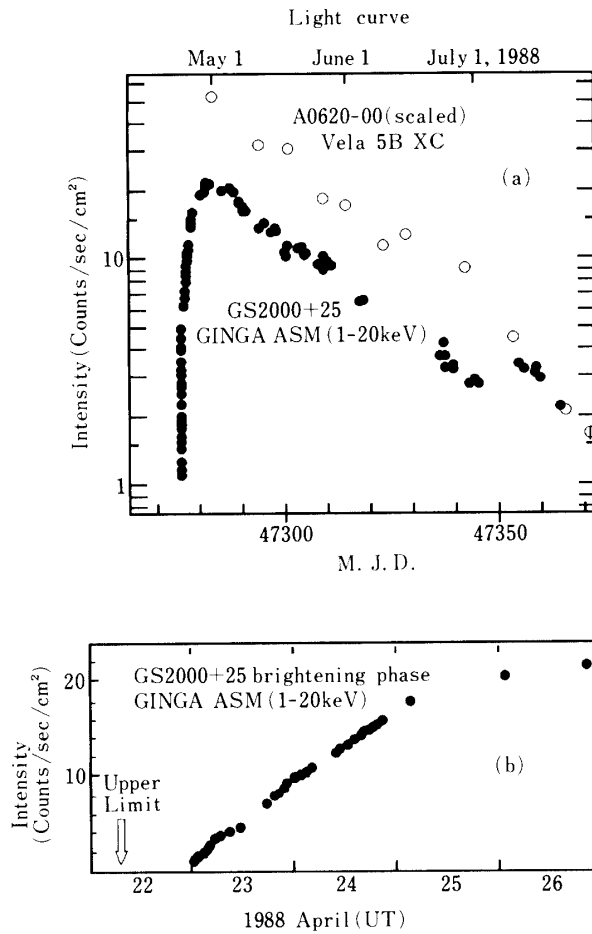


図1 (a) 1~20 keV の範囲において7月までにASMが捉えたX線の強度曲線を●で示す。ここで示したデータは、増光時のものを除いて全てASMの全天走査によるものである。また、A 0620-00をVela 5Bで観測した結果を同じ時間のスケールで○で示す。後者については、縦スケールを適当に変えて見やすく表示した。(b) ASMが捉えた増光時のX線強度を示す。このデータのほとんどのものは1~20 keVの全計数率であった。また、検出前に行われた走査による観測の上限値(5σ)も矢印で示した。

ま、全天走査を開始する直前約100秒間だけASMモードになったため得られたもので、従って走査モードで得られたデータよりもかなり統計がよい。このデータ(1~10 keV)を他のX線新星のこれまでの結果と比べるため、巾級数関数で合わせてみると、データとの一致具合は良くないが、その巾の値(photon index)の最適値は 4.39 ± 0.03 となった。この値は、確かにGS 2000+25がウルトラソフトスペクトルX線星であることを示している[2]。

この最初のスペクトルを種々の単一成分のモデル(巾級数, 黒体輻射, 熱制動輻射, ディ

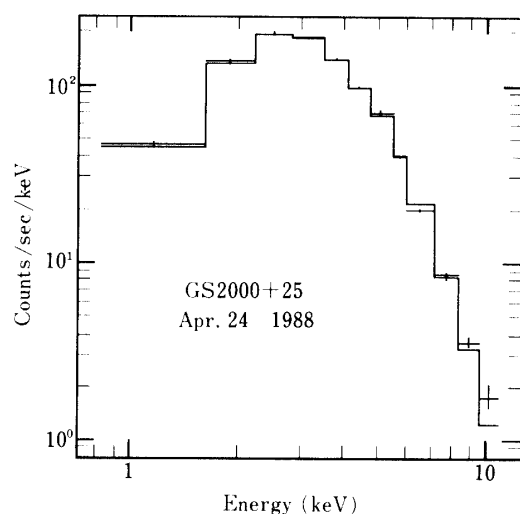


図2 増光時の途中、強度が最大強度の約半分になった時点で捉えた最初の X 線スペクトルを示す。データは十字で示し、ディスク黒体輻射スペクトルの最適モデルを実線で示した。

スク黒体輻射[7])と比べてみたところ、これら全てのモデルは、統計上棄却されることが判った。というのは、自由度9に対して、reduced χ^2 の値はそれぞれ順に57.8, 12.0, 8.5, 4.7となったからである。しかし、ASMのデータに含まれる系統的な誤差を考慮する[4]と、これらの値は約40%に減少する。これは、X線新星の強度が強いため、統計誤差はほとんどなく系統的な誤差しか残っていないことによる。この点を考慮すると、結局ディスク黒体輻射モデルだけが許されることになる(5%の危険率で棄却できない)。最適パラメータは、ディスク内縁の温度 $T_e = 1.14 \pm 0.02$ keV, 星間吸収の量 $\log N_H = 22.06 \pm 0.06$ となる。また、ディスク内縁の半径 $R_s = 9 \pm 1 (D/2 \text{ kpc}) (\cos i)^{-1/2}$ km となる。ここで、 i はディスクの傾き角、 D は距離である。図-1のデータの内、図-2で示したスペクトルデータ以外は全て走査モードで得られたものなので、新星をそれぞれ数秒しか観測していないため統計が悪い。しかし、それらのスペクトルの硬さ(6-20 keV/1-6 keV)は、統計の範囲内で一定(0.03 ± 0.01)であった。

以上に示したデータ以外に、詳細なスペクトル観測を数回、LACまたはASMでポインティング観測している。このうち、ASMのポインティング観測によって得たスペクトルを図-3に示す。これらは、4月28日、5月17日、7月13日に得たものである。このスペクトルのうち、10 keV以下の部分についてはディスク黒体輻射でよく合うが、10 keV以上の部分にはそれで表わしきれない高エネルギー成分のあることが判る。ASMによる観測では、その測定範囲が20 keV以下に限られるため、ハードテールがどのようなスペクトルをしているかははっきりしない。それらについては、測定エネルギー範囲の広いLACの観測に譲る。

20 keV~250 keVにも達する高エネルギー成分が、ソ連の『クワント』[8]によって見

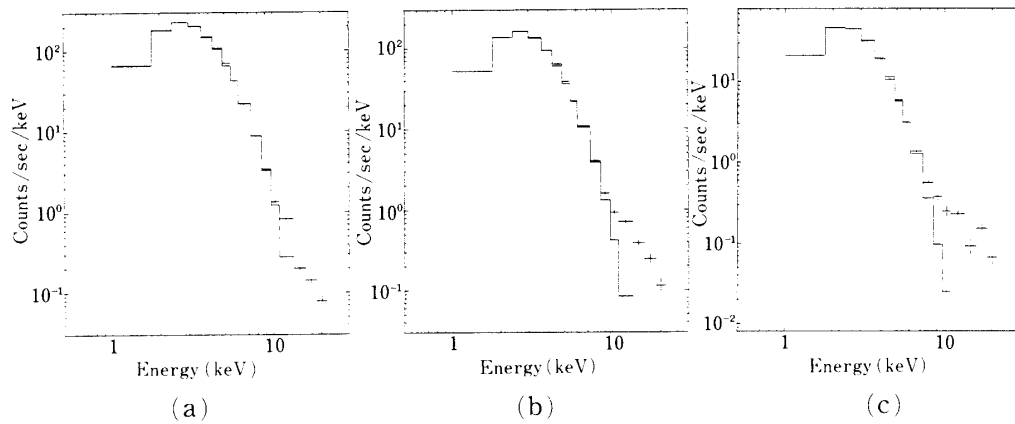


図3 ASMのポインティングによる観測で得たX線スペクトル。観測した日時は、順に(A)4月28日、(B)5月17日、(C)7月13日である。何れも統計がよく、10 keVを越える部分のハード成分が見える。10 keV以下の領域では、やはりディスク黒体輻射がよく合う。

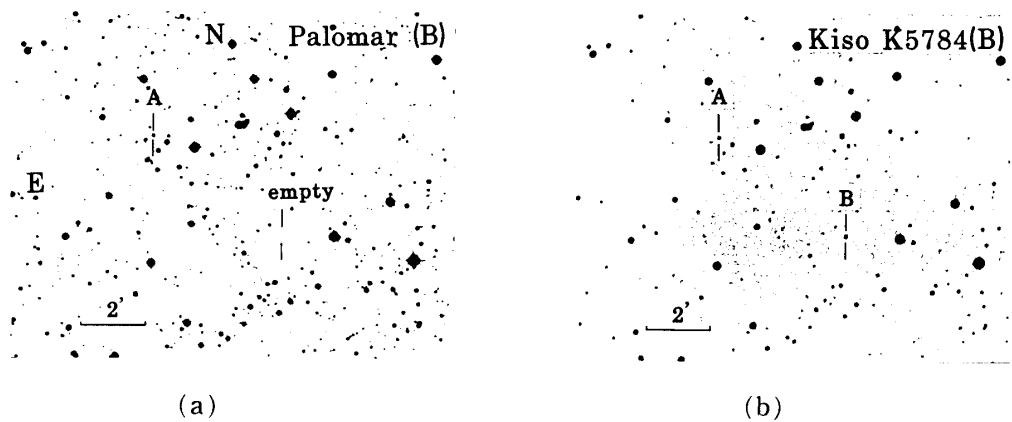


図4 パロマーチャートのGS 2000+25の領域(a)と、木曾で撮影した同領域(b)を示す。何れも、候補(A, B)は波線で示した。

い出されているが、それらは大変弱く、またASMの測定範囲外であるため判らない。

2) 光学観測

ASMによる発見の後、東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡[9]で光学天体の搜索が始まった。4月27日から5月2日までの間に6枚の写真がとられたが、X線による位置精度内に2個の有力な候補(A, B)が見つかった[10]。何れもB等級光度が17~18等級である。その後、電波領域でも増光している星が見つかり[11]、その振舞い等が以前見つかったX線新星A 0620-00の場合のそれとそっくりであることが判った。光学領域での候補

Bと一致している。分光観測，例えばキットピーク[12]で行われたものによると，著しい構造が見られず A 0620-00 の場合と良く似た赤味があった連続成分を持つことが報告されている。このことから，候補 B が GS 2000+25 であると言える。

木曾で初めて撮影した写真と，同じ領域のパロマー写真星図とを図-4 に示す。何れも，候補(A, B)は波線で示した。その場所は

$$\alpha=20\text{ h}00\text{ m }42.86\pm0.04\text{ s}, \delta=+25^{\circ}05'43.5\pm0.7''(\text{eq.1950})$$

である。この星は，1978年に撮影されたパロマーチャートには写っていない。その時の限界等級(21等級)から，少なくとも今回の X 線フレアーにより，3.5等級増光していることになる。

III. 議 論

ウルトラソフトスペクトルを持つ X 線新星は，物質が降着しているブラックホールの有力候補，またはバルジ成分のうちスペクトル分布の低温成分側へ漏れ出した星と考えられる[2]。いくつかのウルトラソフトスペクトルを持つ X 線新星はブラックホール候補と見られているが，この事実だけから GS 2000+25 をブラックホール候補とするわけにはいくまい。そこで，以下では GS 2000+25 とこれとよく似た振舞いをした X 線新星 A 0620-00 とを比較検討してみる。A 0620-00 は，X 線天文学史上最も明るかった X 線新星で，X 線フレアーの終了後に行われた精密光学観測[13]により，その連星系の振舞いが判り，コンパクト星の質量からブラックホールであることが確認されたものである。

a) X 線の光度曲線

Vela 5 B 衛星で得られた A 0620-00 の光度曲線を図-1 に示し，GS 2000+25 と比較した。ここで，A 0620-00 の強度は適当に比較し易いように縦軸の縮尺を変更している。この二個の光度曲線(減衰の様子)は大変良く一致していることが判ろう。増光中の振舞いは，両星とも極大の前三日にわたり直線的に明るくなっている。GS 2000+25 の場合には，それ以前の詳細な観測はないが，A 620-00 は極大の 5 日ほど前にプリカーサーのあったこと[14]が知られている。極大後約 50 日ほどは GS 2000+25 は 30.8 ± 0.8 日で，また A 0620-00 は 28.9 ± 1.8 日[1]で指数関数的に減光している。両星とも 50~75 日後にそれぞれフレアーを起こしており，何れも 5 日程度は継続していたとみられる。A 0620-00 の場合には，さらに約 170 日後に数倍にもなるフレアーを起こしている。従って，GS 2000+25 も今後注意が必要である。

b) X 線の変動

どちらの X 線新星もパルサーのような顕著な強度変動は示していない。A 0620-00 については[15]0.2 ミリ秒から 0.25 秒の範囲でのパルス強度は 2%以下，同じく 435 秒までの範囲では 0.5%以下である。一方，GS 2000+25 の増光時に行った ASM によるポインティングの観測では，0.125 秒から 100 秒の周期の間のパルス強度は 2%以下(5 σ)であった。極大以降の LAC または ASM によるポインティング観測による強度変動については，別の機会に譲る。

c) X線スペクトル

A 0620-00 についての X 線スペクトルは、巾関数によって解析されており [16], その巾指数はプリカーサーの起こった頃の 0.6 から極大時の 4.15 まで変化している. スペクトル巾指数のこの変化は, 他のウルトラソフトスペクトルを示す X 線源, 例えば GX 339-4, CirX-1, CygX-1 等強度の強い状態と弱い状態とを示す星に良くみられる現象である [2].

両者とも, 20 keV を越える高エネルギー側にスペクトルでテールを引いているのが観測されている [8, 16]. つまり, A 0620-00 のデータは, 単一のモデルでは表わしきれない. GS 2000+25 については, 1~10 keV の範囲に限ると, 巾級数, 黒体輻射, 制動輻射等の単一モデルでは合わないが, ディスク黒体輻射からうまく合う. 低質量 X 線連星系のスペクトルは, 多くの場合 1 keV 程度のディスク黒体輻射と 2 keV 程度の黒体輻射との組合せで表わせることが知られている [7]. ディスク黒体輻射は降着円盤からの輻射に相当し, 黒体輻射は中性子星表面からの輻射に相当すると考えられている. GS 2000+25 のスペクトルは, 10 keV までなら, この内の中性子星表面からの輻射に相当する成分が見えず, 降着円盤からの成分だけが見えていることになる.

d) 光学天体について

これらの両者の X 線新星の光学天体は, 静穏期と X 線フレア期とで大変な増光を示し, A 0620-00 と GS 2000+25 とではそれぞれ 8 等級, >3.5 等級の増光であった. A 0620-00 は B 等級で 12.5 にまで明るくなったが, GS 2000+25 では 17.5 であった. もしこれら X 線新星が同様な連星系であり, その極大時の絶対等級が同じならば, B 等級での差の内 1.5 等級は, X 線の最大強度が距離を反映していると考えれば説明できる. 残りの 3.5 等級は, X 線のスペクトル解析で求めた星間吸収の量と星間物質による赤化との関係を使えば [17], 概ね説明できることが判る. この時, 静穏期の B 等級は 25.5 となり, パロマーチャートの限界等級 (21 等級) から考えて写っていないことと矛盾しない. 今のところ, A 0620-00 の静穏期で行われたような光学観測 [13] だけが, ブラックホールを含んでいるかどうかを決定できるわけだが, GS 2000+25 に対する同様の観測は, 以上のような考察から大層困難であろう.

これら両新星に対する光学領域でのスペクトル観測 [12, 18, 19] は, 共に著しい特徴のない赤みがかった連続成分であることを示している. 何れも強い輝線は認められていない.

e) 電波領域での輻射

両方の X 線新星からは電波領域でも観測がなされており, たいそう類似している. GS 2000+25 については断熱膨張をしている一様な物質と巾指数 2.0~2.5 の相対論的電子とからのシンクロトロン輻射でよく表わされており [20], この点からも A 0620-00 に似ているといえる.

f) フレアの再帰性

A 0620-00 は [21], 約 57 年の再帰性を持っていることが知られている. 一方, GS 2000+25 については, ウフルや HEAO-1 でも観測はなく, Vela 5 B 衛星のデータベースにもない. 更に, 最近 X 線領域でのモニターがなされていなかったがその間もフレアしてなか

ったとすると、少なくとも再帰性は20年以上であると見られる。

光度曲線が類似していること、X線の著しい変動がないこと、スペクトルがウルトラソフトで似ていること、光学天体の増光の仕方やスペクトル、更に電波での類似性等から、GS 2000+25はA 0620-00と驚くべき類似性を示していると結論出来る。従って、GS 2000+25がブラックホール候補であることを強く示唆している。もちろん、ブラックホール候補であることの決定的な証拠は、静穏時に光学領域でA 0620-00でなされたような観測[13]が必要であろう。もっとも、静穏時の光度が25.5等であるとすれば、そのような観測はハッブル望遠鏡の出現を待たねばならない。

この観測にあたっては、宇宙科学研究所のみなさん、並びに銀河チーム、木曾観測所のメンバー、リック天文台のTony Mischの協力を得ました。ここに関係各位に感謝します。

参 考 文 献

- [1] Kaluzienski, L. J., Holt, S. S., Boldt, E. A. and Serlemitsos, P. J. 1977, *Astrophys. J.* **212**, 203.
- [2] White, N. E. and Marshall, F. E., 1984, *Astrophys. J.* **281**, 354.
- [3] Makino, F. and Ginga Team 1987, *Astro. Lett. and Communications*, **25**, 223.
- [4] Tsunemi, H., Kitamoto, S., Manabe, M., Miyamoto, S., Yamashita, K., and Nakagawa, M. 1988, submitted to *Publ. Astron. Soc. Japan*.
- [5] Turner, M. J. L., et al. 1988, submitted to *Publ. Astron. Soc. Japan*.
- [6] Makino, F. and Ginga team 1988, *IAU Circ. No.4588*.
- [7] Mitsuda, K., et al. 1984, *Publ. Astron. Soc. Japan.* **36**, 741.
- [8] Sunyaev R., and Kvant team 1988, *IAU Circ. No. 4606*.
- [9] Takase, B., Ishida, K., Shimizu, M., Maehara, H., Hamajima, K., Noguchi, T., and Ohashi, M. 1977, *Annals Tokyo Astron. Obs.*, 2nd ser., 16, 74.
- [10] Okamura, S., and Noguchi, T. 1988, *IAU Circ. No.4606*.
- [11] Hjellming, R. M., Calovini, T. A. and Cordova, F. A. 1988 a, *IAU Circ. 4607*.
- [12] Wagner, R. M., Henden, A. A., and Bertram, R. 1988, *IAU Circ. No.4600*.
- [13] McClintock, J. E. and Remillard, R. A. 1986, *Astrophys. J.* **308**, 110.
- [14] Elvis, M. et al. *Nature* 1975, **257**, 656.
- [15] Doxsey, R., et al. 1976, *Astrophys. J. Letters*, **203**, L 9.
- [16] Ricketts, M. J., Pounds, K. A. and Turner, M. J. L. 1975, *Nature* **257**, 657.
- [17] Ryter, C., Cesarsky, C. J., and Audouze, J. 1975, *Astrophys. J.* **198**, 103.
- [18] Boley, F., Wolfren, R., Bradt, H., Doxsey, R., Jernigan, G., and Hiltner, W. A. 1976, *Astrophys. J. Letters*, **203**, L 13.
- [19] Gull, T. R., York, D. G., Snow, T. P., Jr., and Henize, K. G. 1976, *Astrophys. J.* **206**, 260.
- [20] Hjellming, R. M., Calovini, T. A. and Cordova, F. A. 1988 b, submitted to *Astrophys. J. Letters. (Letters)*.
- [21] Eachus, L, Wright, E. and Liller, W. 1976, *Astrophys. J. Letters* **203**, L 17.