大小マゼラン雲におけるＸ線天体種族の分類

小山班：辻本匡弘 <tsujimot@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>
今西健介、横川淳、西内満美子、小山勝二 (京都大学 物理 宇宙線)

abstract

今回小山班 (X 線観測) では、一昨年末より続く SMC でのパルサーラッシュ (今西健介氏の集録に詳述) に喚起され、 LMC と SMC の X 線源の系統的な解析に着手した。「あすか」の観測データから X 線源を抽出し、時間解析およびスペクトル解析によってそれらの種族分類を行なったので、その結果を報告する。また、スペクトルの硬さと X 線種族の間に簡単な関係があることを見い出し、その関係を暗い X 線源の分類に利用することも併せて述べる。

1　マゼラン雲における X 線天体の系統的解析と分類

1.1　「あすか」によるマゼラン雲の観測

X 線観測衛星「あすか」は現在までに LMC を 42 回、 SMC を 10 回観測している。今回我々はアーカイブデータを中心に、それぞれ 40 回、 8 回の観測データ用いて解析を行なった。「あすか」にはガス蛍光比例計数管 (GIS) と CCD カメラ (SIS) が搭載されているが、今回の解析には視野が広く、かつ硬 X 線バンドまで高感度を持続できる GIS のデータを主に用いた。 GIS は視野が半径 $\sim 20'$ で、空間分解能は $30'' \sim 1'$、エネルギー分解能は 5.9keV で 8%、時間分解能は最大 62.5ms である。GIS により得られた両マゼラン雲のイメージを appendix A に示す。

1.2　X 線源の解析手法

我々は今回、 S/N>5 の基準を設定し、これらのイメージから LMC で 32 個、 SMC で 39 個の X 線源を抽出した。そして、各 X 線源に対し、種族分類を目的として以下に列挙する時間解析およびスペクトル解析を行なった。

パルセーションの探査　Binary Pulsar、 Crab-like pulsar の直接的証拠となるパルセーションの有無を、ライトカーブに対してフーリエ変換を施すことで調べた。統計不足によりフーリエ変換でパルスを検出できない一部の既知のパルサーに対しては folding technic を援用した。

SMC では 12 天体からパルスを検出した。このうち 5 個は我々が初めて発見したパルサーであり (今西健介氏の集録参照)、残りは既知のパルサーからのパルスの確認である。また同様に、 LMC の 5 天体からパルスを検出した。これらはいずれも既知のパルサーである。

なお、 SMC、 LMC の X 線パルサーについては、本研究の結果も含めて appendix B にまとめてあるので参照されたい。

バーストの探査　バースト (10 $\sim$ 100s スケールで起こる突発的な強度変動) は LMXB の証拠となる。各 X 線源のライトカーブをいくつかのタイムスケールで binning し、バースト活動の有無を調べた。今回はどの天体からもバーストは見つからなかった。

ラインの検定　電波観測から SNR と分かっているものに対しては、 SIS のデータを用いてスペクトル中の高電離イオンからのラインの有無を調べた。具体的には「あすか」のエネルギーバンドに含まれる Mg、 Si、 S のラインの有無を検定し、そのうち 1 種類でもラインが存在していれば熱的 SNR と分類した。

X 線強度の概算　各天体の X 線強度を求めるため、スペクトルを簡単なモデルでフィットした。電波観測から SNR と言われているものに対しては熱的プラズマモデル、それ以外は power-law モデルを用いた。ただし SMC の 2 つの SNR、 DEM S128 (= AX J0105−722) および 0056−725 に関しては、熱的プラズマモデルが非現実的な解を与えたので、改めて power-law でフィッティングした。

- **BH Binary**（ブラックホール連星系）：スペクトルが 2 成分 (soft な blackbody + hard な powerlaw) で表現できるもの。LMC の既知の 2 つ (LMC X-1[25] と LMC X-3[25]) がこれに相当する。
- **Crab-like SNR** (回転駆動型パルサーが付随した超新星残骸)：ミリ秒単位でのパルスが検出できたもので、SNR に付随しているもの。LMC 中の既知の 2 つ (PSR B0540−69[26] と PSR J0537−69[21]) がこれに相当する。

上述の基準にしたがって X 線源を分類した結果、各種族に対して表 1 に示す結果を得た。

2 X 線の HR 図

さて、前章の分類法に従えば、LMC で 11 個、SMC で 20 個の X 線源 (ほとんどが非常に暗い天体) の種族が “unknown” で残されている。今回我々は、X 線の Hardness Ratio と種族の簡単な関係を見い出し、更にそれを利用することで、種族が “unknown” な X 線源の種族を推定することにする。

2.1 Hardness Ratio

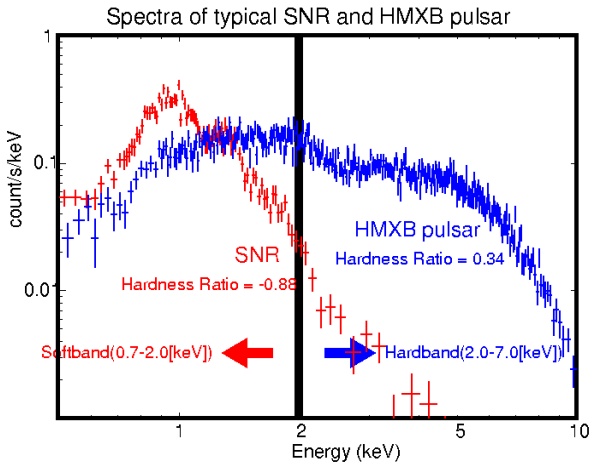

図 1: 熱的 SNR と HMXBP のスペクトル例

X 線天体の種族の違いは、スペクトルの違いとして顕著に現れる。図 1 に代表的な熱的 SNR と HMXBP のスペクトルを示すが、ここで HMXBP は hard な、熱的 SNR は soft なスペクトルを有していることが見てとれる。この「スペクトルの硬さ」を定量的に評価する量が、今回我々が用いた Hardness Ratio である。

Hardness Ratio (HR) は各 X 線源に対して

$$HR = \frac{H - S}{H + S}$$

H : Hard band (0.7–2.0keV) の photon count
S : Soft band (2.0–7.0keV) の photon count
のように定義され、 HR が 1 に近いほど hard な、 −1 に近いほど soft なスペクトルを持つことを表している。

2.2 HR 図

我々は、抽出した各 X 線源の HR を導出し、 total count rate (0.7–7.0keV) の対数を横軸に、 HR を縦軸にプロットした (図 2 : 異論もあるかと思うが、以下ではこれを “HR 図” と呼ぶ) 。

この図を見ると、熱的 SNR と HMXBP 関して明確な違い、即ち、 X 線の強度によらず 熱的 SNR は −1.0<HR< −0.6、 HMXBP は 0.2<HR<0.6 にほぼ収まっているということがわかる (以下、それぞれを SNR region、 HMXBP region と呼ぶ)。また、 BH Binary と Crab-like SNR は、 HR ∼ 0 付近に分布している。

このようにして、 X 線天体の種族別に HR 図上でそれぞれ特徴的な位置を占めることが分かる。なお、この分類法は、スペクトルフィットによるモデル依存性がなく、シンプルに観測データのみで行なえる、というのが特徴である。

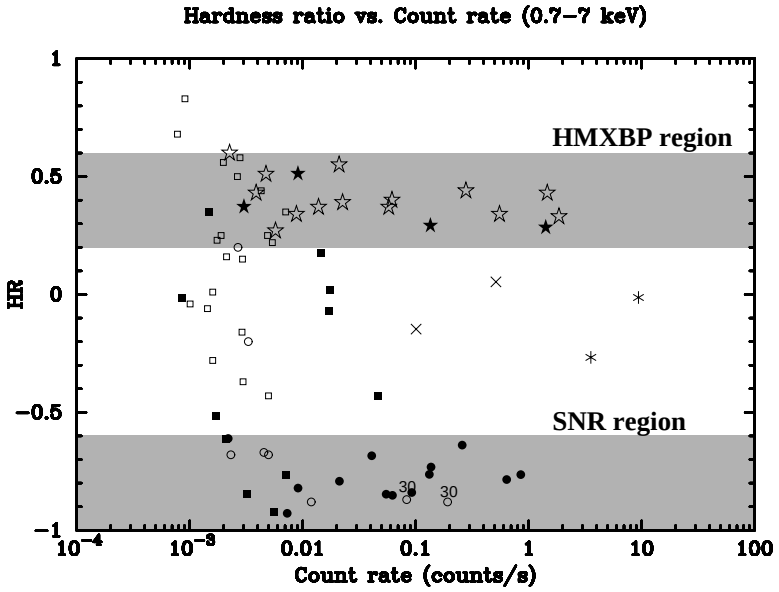

図 2: X 線の HR 図
●: LMC SNR、★: LMC HMXBP、*: LMC BH Binary、
×: LMC Crab-like SNR、 ■: LMC unknown
○: SMC SNR、☆: SMC HMXBP、□: SMC unknown

2.3 HMXBP と熱的 SNR の候補天体

このHR図を用いれば、今まで正体のわかっていなかったX線源に対しても、その正体を推測することができる。実際にはHMXBP と 熱的SNR に関して、 HMXBP region および SNR region が設定できたので、これらの region 中にある “unknown” 天体をそれぞれ HMXBP および 熱的 SNR の候補天体とする。なお、サンプル数の少ない BH Binary と Crab-like SNR に関しては明確に region が定義できなかったので今回は取り扱わない。

このようにしてLMC、 SMC のX線源の分類は、種族が “unknown” な天体の推測をつけることで更に進めることができる (表2) 。

表 1: 「あすか」の観測により検出された種族毎のX線源の個数

	LMC	SMC
Pointings	40	9
SNR†	13	8
HMXBP	4	11
LMXB	0	0
BH Binary	2	0
Crab-like SNR	2	0
unknown	11	20
total	32	38

†: 電波で SNR と認定されたものの数 (熱的でないものも含む)

表 2: 熱的SNR と HMXBP の個数

種族	LMC	SMC
SNR† ‡	13	8
SNR 候補 *	4	0
HMXBP	4	11
HMXBP 候補 *	1	8‡

*: HR 図から種族を推測したもの
†: 電波で SNR と認定されたものの数 (熱的でないものも含む)
‡: SNR 0056−725 が重複して数えられている

3 まとめ

表1および表2が、今回のデータ解析の結果得られたLMC とSMC のX線天体種族の個数である。これを見るとLMC とSMC で種族の個数に違いがあることが分かる。とくにSMC で HMXBP がその候補と併せて非常に多いことが目立つ。銀河間の天体種族の違いはその銀河の進化

過程の違いによるものと考えられるから、今回の結果は LMC と SMC の進化を解く鍵となるであろう。なお、横川氏の集録には、今回の結果を踏まえた LMC、 SMC の進化に関する議論が展開されているので、そちらも併せて参照していただきたい。

参考文献

[1] Bildsten, L. et al. 1997, ApJS 113, 367
[2] Buckley, D. A. H. et al. 1997, IAU Circ. 6789
[3] Chakrabarty, D. et al. 1998a, IAU Circ. 7048
[4] Chakrabarty, D. et al. 1998b, IAU Circ. 7062
[5] Cook, K. 1998, IAU Circ. 6860
[6] Corbet, R. et al 1997, IAU Circ. 6803
[7] Cowley, A. P. et al. 1997, PASP 109, 21
[8] Haberl, F. et al. 1995, A&A 302, L1
[9] Haberl, F. et al. 1997, A&A 318, 490
[10] Hughes, J. P. & Smith, R. C. 1994, AJ 107, 1363
[11] Hughes, J. P. 1994, ApJ 427, L25
[12] Imanishi, K. et al. IAU Circ. 7040
[13] Israel, G. L. et al. 1997, ApJ 484, L141
[14] Israel, G. L. et al. 1998, IAU Circ. 6999
[15] Israel, G. L. et al. 1999, IAU Circ. 7101
[16] Lamb, R. C. et al. 1999, IAU Circ. 7081
[17] Lochner, J. C. et al. 1998, IAU Circ. 6814
[18] Lucke, R. et al. 1976, ApJ 206, L25
[19] Marshall, F. E. & Lochner, J. C. 1998, IAU Circ. 6818
[20] Marshall, F. E. et al. 1998, ApJ 499, L179
[21] Cusumano, G. et al. 1988, A&A337, 772
[22] Mathewson, D. S. et al. 1983, ApJS51, 345
[23] Mathewson, D. S. et al. 1984, ApJS55, 189
[24] Mathewson, D. S. et al. 1985, ApJS58, 197
[25] van Paradijs, J. 1998, Neutron Stars and Black Holes in X-Ray Bi naries, in “The Many Faces of Neutron Stars”, eds. R. Buccheri, J. van Paradij s, & M. A. Alpar (London: Kluwer Academic Publishers), in press
[26] Seward, F. D. et al, 1984, ApJ287, L19
[27] Schmidtke, P. C. et al. 1995, ApJ 107, 450
[28] Ye, T. et al. 1995, MNRAS 275, 1218
[29] Yokogawa, J. & Koyama, K. 1998a, IAU Circ. 6835
[30] Yokogawa, J. & Koyama, K. 1998b, IAU Circ. 6853
[31] Yokogawa, J. & Koyama, K. 1998c, IAU Circ. 7028
[32] Yokogawa, J. & Koyama, K. 1998d, IAU Circ. 7009

Appendix

A 「あすか」による SMC,LMC の観測

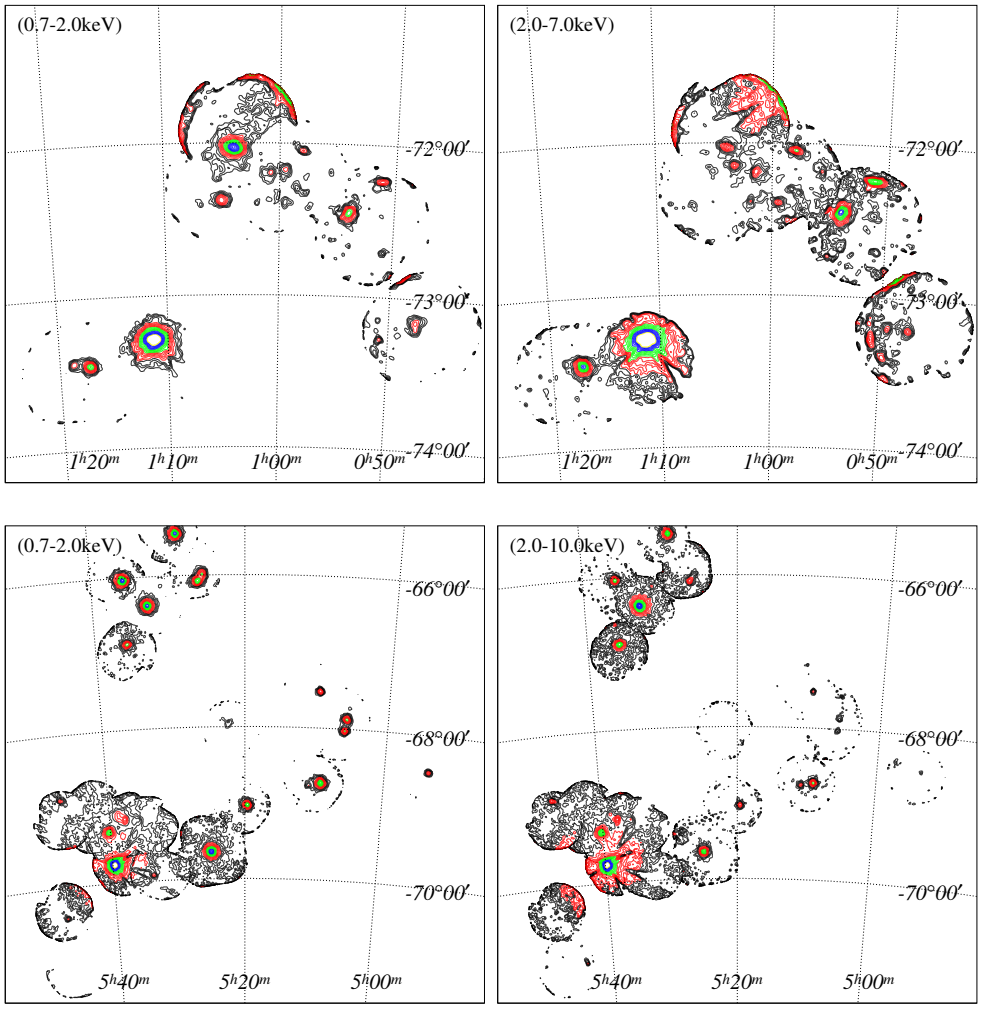

図 3: 「あすか」によるマゼラン雲のイメージ: 上側に SMC、下側に LMC のイメージを示す。左側は soft band (0.7–2.0[keV])、右側は hard band (2.0–10.0[keV]) のイメージである。図中の円状に見えるイメージ 1 個が 1 回の観測に対応している。(座標は 2000 年分点。 contour level は log scale)

B　SMC,LMC の X 線パルサー

表 3: SMC の X 線パルサー

名前	発見時			[本研究]	Refs.
	年	衛星	周期 (s)	周期 (s)	
SMC X-1‡	1976	(Rocket)	0.716	0.70876[a]	[1][18]
				0.710143[b]	
				0.706481[c]	
RX J0059.2−7138‡	1994	ROSAT	2.7632	2.7632	[1][11]
2E 0050.1−7247‡	1995	ROSAT	8.88	—	[1][13]
AX J0051−722	1997	RXTE, ASCA	91.1	91.1	[6][17]
1WGA J0053.8−7226‡		ASCA	46.63	46.63	[2][6]
XTE J0054−720	1998	RXTE	169.3	—	[7][17]
XTE J0055−724‡		RXTE, BeppoSAX	58.97	59.00	[14][19]
AX J0049−729*		RXTE, ASCA	74.68	74.68	[6][29]
AX J0051−733*‡		ASCA	323.2	323.2	[5][7][30]
AX J0058−720*		ASCA	280.4	280.4	[30]
1SAX J0103.2−7209‡		BeppoSAX	345.2	348.9	[10][14][28][32]
AX J0105−722*†⋆		ASCA	3.34300	3.34300	[31]
AX J0049−732*⋆		ASCA	9.1321	9.1321	[12]
XTE J0111.2−7317‡		RXTE, CGRO	31	30.9497	[3][4][15]
RX J0052.1−7319‡	1999	ROSAT	15.3	—	[15][16]

注：４列目はパルス発見時の周期、５列目は「あすか」の観測データで求められた周期。
RX J0052.1−7319 からはパルスが検出できなかった。2E 0050.1−7247 は暗すぎて X 線が検出できなかった。XTE J0054−720 は視野外。*: 本研究で初めてパルスが発見されたもの。†: パルス検出の有意度は $\sim 99.5\%$。DEM S128 の X 線対応天体。‡: 光学対応天体が見つかったもの。SMC X-1 は B 型星、RX J0059.2−7138 はよく分からないが青い星、その他は Be 型星。⋆: 10 倍以上の長期的時間変動が確認されていないもの。

表 4: LMC の X 線パルサー

名前	発見時			[本研究]	Refs.
	年	衛星	周期 (s)	周期 (s)	
A0538−67‡	1977	Ariel 5	0.069	—	[1]
LMC X-4‡	1983	SAS3	13.5	13.5029	[1]
PSR B0540−69†	1984	Einstein	0.0504	0.0504	[26]
RX J0502.9−6626‡	1995	ROSAT	4.0635	—	[27]
EXO 053109−6609.2‡		ROSAT	13.7	13.699	[8]
RX J0529.8−6556‡	1997	ROSAT	69.5	—	[9]
PSR J0537−69†	1998	SAX	0.0161	0.0161	[20]
1SAX J0544.1−710‡		SAX	96.079	96.089	[21]

注：４列目はパルス発見時の周期、５列目は「あすか」の観測データで求められた周期。
A0538−67 からはパルスが検出できなかった。RX J0502.9−6626 と RX J0529.8−6556 は視野外。†: Crab-like SNR (後述) と考えられている。‡: 光学対応天体が見つかったもの。LMC X-4 は O 型星、他は Be 型星。