マゼラン雲の X 線源

今西 健介、横川 淳、辻本 匡弘、小山 勝二 (京大理)

1 Introduction

宇宙に存在する様々な天体は、種族ごとに特徴的な成因、寿命を持つ。例えば太陽のような軽い星は 10^8 年以上の寿命を持つが、太陽の 10 倍以上の質量を持つ星（大質量星）の寿命は 10^7 年程度である。したがって、ある銀河における天体種族の存在比や空間分布などの情報は、その銀河の進化過程や現在の状況などを知る上で重要な鍵となる。特に、超新星残骸（SNR）、中性子星、ブラックホールといった「星の死骸」は、いずれも明るいＸ線天体として観測される。したがってＸ線天体の種族分布を研究することにより、その銀河内での星生成の歴史に関する直接的な情報が得られる。今回、我々は特に大マゼラン雲 (LMC) と小マゼラン雲 (SMC) に着目し、Ｘ線衛星「あすか」による観測データを元にそのＸ線源の系統的解析を行なった。

両マゼラン雲は以下の理由により、こういった系統的解析に適した銀河であると考えられる。

- 空間的にＸ線源を分類することができる程度の近さに存在する。
- LMC までの距離が ~50kpc、 SMC までの距離が ~60kpc と比較的精度良く求まっているため、観測量を物理量に戻す時に (flux から luminosity など) 不定性が小さい。
- 適当な大きさ (LMC が $10^\circ \times 10^\circ$、 SMC が $3^\circ \times 3^\circ$) なので、現実的な観測時間で全体を覆うことが出来る。
- 一般に低エネルギーＸ線ほど星間吸収を強く受けるが、 LMC と SMC は銀河面から外れた方角に位置するため、この影響が少ない。

以下では、まず 2 章で「あすか」による観測データを紹介する。 3 章では我々の解析結果を紹介し、それに基づいたＸ線源の分類を行なう。 4 章では Hardness Ratio を用いた新しいＸ線源の分類法を導入し、 5 章ではそれに基づいて両マゼラン雲の個数分布を調べる。 6 章では今回明らかになったマゼラン雲のＸ線源の分布から、マゼラン雲の星形成の歴史についての議論を行なう。

2 「あすか」によるマゼラン雲の観測

「あすか」による観測はこれまで LMC に対し 42 回、 SMC に対し 10 回行なわれている。我々はこのうち、それぞれ 40 回、 8 回の観測データを用いて解析を行なった。「あすか」はガス蛍光比例計数管 (GIS) と CCD カメラ (SIS) を搭載しているが、今回の解析には視野が広く、硬Ｘ線バンドまで高感度が持続できる GIS のデータを用いた。空間分解能は $\sim 30''$–$1'$、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図 1に示す。図中の円状に見えるイメージ (半径 $\sim 20'$) 1 個が 1 回の観測に対応している。

3 Ｘ線天体の系統的解析

我々はこのイメージから、 S/N>5 の基準で、 LMC で 34 個、 SMC で 39 個のＸ線源を抽出した。各Ｘ線源に対し、以下のような系統的解析を行った。

3.1 周期的強度変動の探査

パルサーの直接的証拠である周期的な強度変動（パルス）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。その結果、 SMC の 11 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 (辻本匡弘の収録参照)、残りは既知のパルサーからのパルスの確認である。既知のパルサーのうち XTE J0055−724、 SMC X-1 (1995 年観測分)、 RX J0052.1−7319

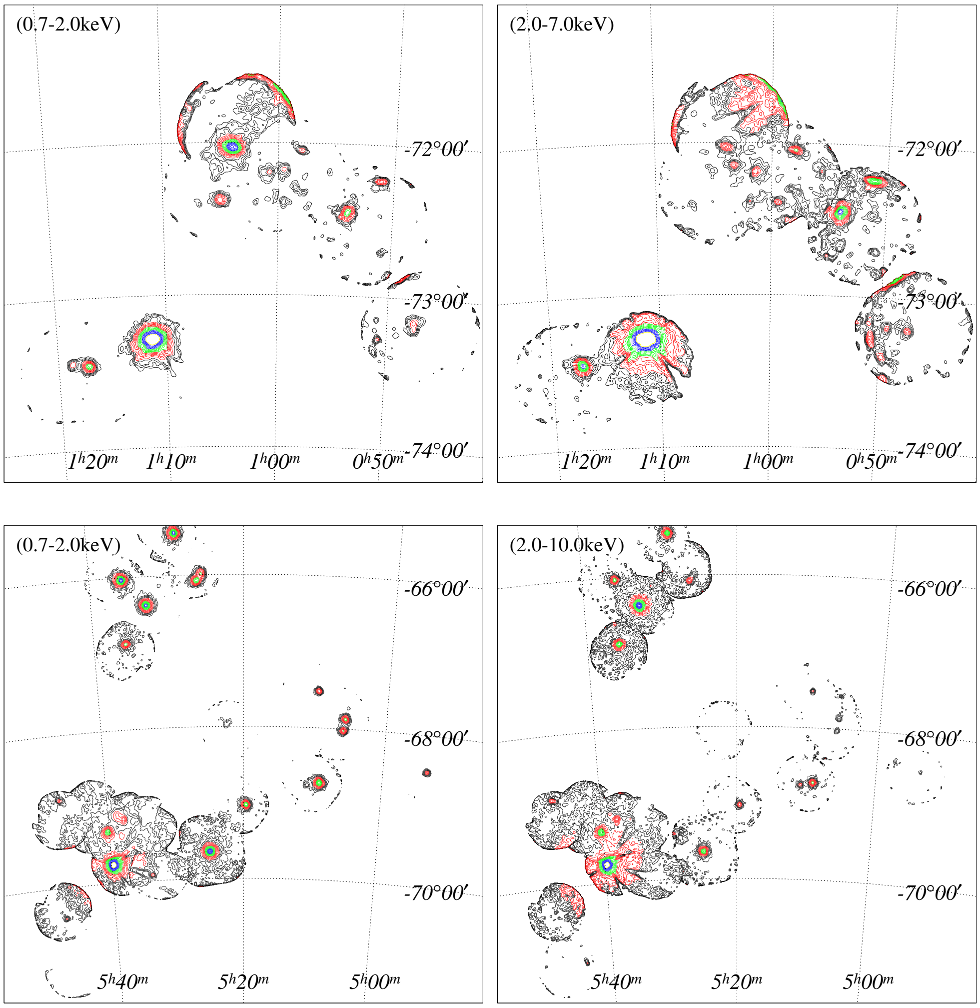

図 1: 「あすか」によるマゼラン雲のイメージ(上 2 枚が SMC、下 2 枚が LMC)。 2keV 以下が左、 2keV 以上が右。座標は 2000 年分点。コントアレベルはログスケール。

からはパルスが検出できなかったが、 epoch folding search という手法により前者 2 個からは既知の周期に近い周期のパルスが検出された。 RX J0052.1−7319 からはこの手法でもパルスが検出できなかった。結果を表 1に記す。

また、同様にして LMC の 5 天体からパルスを検出した(いずれも既知のパルサー)。また A0538−67 からはパルスが検出できなかった。こちらは表 2にまとめた。

3.2 バーストの探査

バースト(10–100s スケールで起こる突発的な強度変動)は LMXB の直接的証拠である。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。しかしどの天体からもバーストは見つからなかった。

3.3 スペクトル解析

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、それ以外に対しては power-law を用いた。ただし SMC の SNR、DEM S128 [1] と 0056−725 に対しては、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 を

[1] AX J0103.2−7209 と同一

表 1: 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][2]
				0.710143^b	
				0.706481^c	
RX J0059.2−7138‡	1994	ROSAT	2.7632	2.7632	[2][3]
2E 0050.1−7247‡	1995	ROSAT	8.88	—	[2][4]
AX J0051−722	1997	RXTE, ASCA	91.1	91.1	[5][6]
1WGA J0053.8−7226‡		ASCA	46.63	46.63	[5][7]
XTE J0054−720	1998	RXTE	169.3	—	[6][8]
XTE J0055−724‡		RXTE, BeppoSAX	58.97	59.00	[9][10]
AX J0049−729*		RXTE, ASCA	74.68	74.68	[5][11]
AX J0051−733*‡		ASCA	323.2	323.2	[8][12][13][14]
AX J0058−720*		ASCA	280.4	280.4	[12]
1SAX J0103.2−7209‡		BeppoSAX	345.2	348.9	[10][15][16][17]
AX J0105−722*†⋆		ASCA	3.34300	3.34300	[18]
AX J0049−732*⋆		ASCA	9.1321	9.1321	[19]
XTE J0111.2−7317‡		RXTE, CGRO	31	30.9497	[20][21][22]
RX J0052.1−7319‡	1999	ROSAT	15.3	—	[22][23]

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（本文参照）。2E 0050.1−7247 は暗すぎてそもそも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 ∼ 99.5%。‡: 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。[a–c]: SMC X-1 は３回観測されている。それぞれ 1993 年 [a]、1995 年 [b]、1998 年 [c] を表す。

表 2: 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	—	[2]
LMC X-4‡	1983	SAS3	13.5	13.5029	[2]
PSR B0540−69†	1984	Einstein	0.0504	0.0504	[24]
RX J0502.9−6626‡	1995	ROSAT	4.0635	—	[25]
EXO 053109−6609.2‡		ROSAT	13.7	13.699	[26]
RX J0529.8−6556‡	1997	ROSAT	69.5	—	[27]
PSR J0537−69†	1998	SAX	0.0161	0.0161	[28]
1SAX J0544.1−710‡		SAX	96.079	96.089	[29]

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（本文参照）。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。

適用した（横川淳の収録に詳述）。検出限界は$\sim 10^{-13}$ erg s^{-1} cm^{-2}程度だと分かった。

3.4 X線源の分類

以上の解析結果から、それぞれのX線源の分類を行なった。分類に用いたX線源の種類は、超新星残骸 (Supernova Remnant; SNR)、中性子星と大質量星の連星パルサー (High Mass X-ray Binary Pulsar; HMXBP)、中性子星と小質量星の連星系 (Low Mass X-ray Binary; LMXB)、ブラックホール連星系 (BH Binary)、回転駆動型パルサーが付随した超新星残骸 (Crab-like SNR) の5つである。それぞれの分類の基準を以下に示す。

- **SNR**：電波観測[30]–[32]でシェル状の構造が確認されるなどして、SNRと認定されているもの。
- **HMXBP**：秒単位での遅いパルス周期と、年単位での長期的な強度変動が確認出来たもの。SMCでは表1のうちのAX J0103.2−7209とAX J0049−732以外、LMCでは表2のうちのPSR B0540−69とPSR J0537−69以外がこれに該当する。
- **LMXB**：バーストが確認出来たもの。今回は、LMC、SMC共に1つも確認されなかった。
- **BH Binary**：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、LMC X−3) [33]以外からは確認出来なかった。
- **Crab-like SNR**：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。やはりLMC中の既知のもの (PSR B0540−69[24]、PSR J0537−69[29]) しか確認出来なかった。

この結果、表3のような分類を得た。

表3:「あすか」の観測により検出されたX線源の分類

	LMC	SMC
Pointings	40	8
SNR	13	8
HMXBP	4	10
LMXB	0	0
BH Binary	2	0
Crab-like SNR	2	0
Unknown	11	20

4 新しい分類法

4.1 X-ray HR diagram

これらのX線源の違いは、そのスペクトルの硬さに明確に表れる。SNRとHMXBPを例にとって比べてみる。図2に典型的なSNRとHMXBPのスペクトルを示す。明らかにHMXBPの方がhardなスペクトルであることがわかる。この傾向をより明確に表すため、我々は“Hardness Ratio (HR)”という値を導入した。Hardness Ratioの定義は、

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

H : Hard band (0.7–2.0keV) の photon count
S : Soft band (2.0–7.0keV) の photon count

で、1に近いほどスペクトルがhardで、−1に近いほどsoftであるような値である。我々は、抽出したX線源についてそれぞれのHRを導出し、total count rate (0.7–7.0keV) に対してプロットした (図3)。図3を見ると、SNRとHMXBPに明確な違い、即ち、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[2] (以下、それぞれをSNR region、HMXBP regionと呼ぶ)。つまり、我々はこのHRによってX線源を明確に分離出来ることを明らかにしたのである。BH BinaryとCrab-like SNR

[2] 例外的に2つのSNRがregionから外れているが、これは3.3節で述べた熱的なスペクトルでは表現できないSNR (DEM S128、0056−725) である (横川淳の収録参照)。ここでは深く触れない。

に関しては統計が少ないので何とも言えないが、いずれも HMXBP region と SNR region の間の領域に存在しているようである。 LMXB に関しても simulation からやはり間の領域に存在することを確認している。この分類法は、スペクトルフィットによるモデル依存がなく、シンプルにデータのみで行なえる、というのが特徴である。

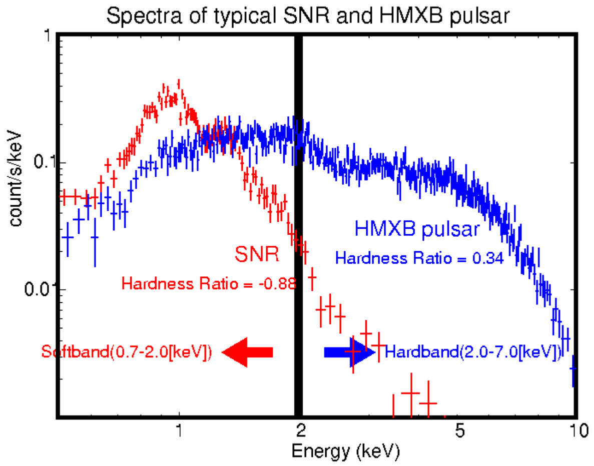

図 2: SNR と HMXBP の典型的なスペクトル

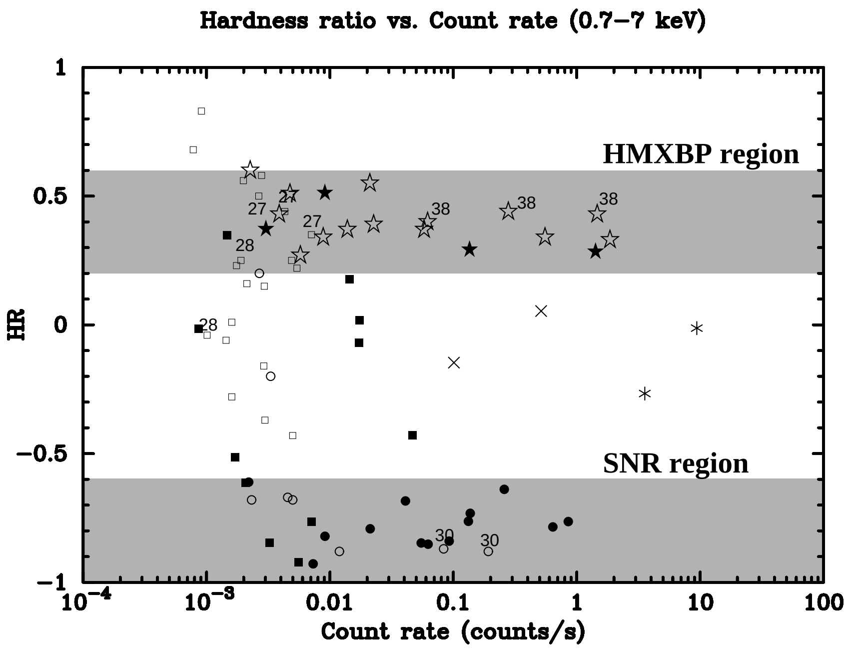

図 3: X-ray HR diagram (Hardness Ratio – Count rate 相関図)

○: LMC SNR、☆: LMC HMXBP、*: LMC BH Binary、×: LMC Crab-like SNR、□: LMC Unknown
●: SMC SNR、★: SMC HMXBP、■: SMC Unknown
図中で「27」「28」「30」「38」と番号が振ってあるものは、複数回観測のある天体

4.2 HMXBP/SNR 候補天体

逆に、この HR 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出来る。正体のわかっていないX線源は図 3中では四角の点で示してあるが、このうち SNR/HMXBP region に収まっているものはそれぞれ SNR/HMXBP の候補と考えられるのである。それぞれの候補を表 4に示す。

表 4: SNR/HMXBP の個数

	LMC	SMC
SNR	13	8†
SNR 候補 *	4	0
HMXBP	4	10
HMXBP 候補 *	1	8†

*: HR により正体を推測したもの
†: SNR 0056−720 が重複して数えられている

5 マゼラン雲のX線源の個数密度

以上の結果に基づき、 LMC、 SMC のX線源の個数密度を、最も良く調べられている我々の銀河系と比較する。今回、 LMXB、 BH Binary、 Crab-like SNR はサンプルが少なかったので除外し、 SNR と HMXBP の比較のみ行なった。その際の注意点を 2 つ上げる。

- 図 1を見てもわかる通り、「あすか」ではまだ観測回数が十分でなくマゼラン雲の全領域を覆っていないので、それぞれ正体のわかっている個数は過去のX線観測から引用し [8][30]–[32] [34]–[38]、それに最近発見されたパルサーを加えた。さらに今回認定した候補も加えてある。
- それぞれの銀河は大きさが全く違うので、X線源の個数は質量比 (Our Galaxy : LMC : SMC = 100 : 10 : 1) に規格化して比べている。

図 4に比較の結果を示す。特に顕著な特徴は、 SMC の HMXBP が圧倒的に多いということである。

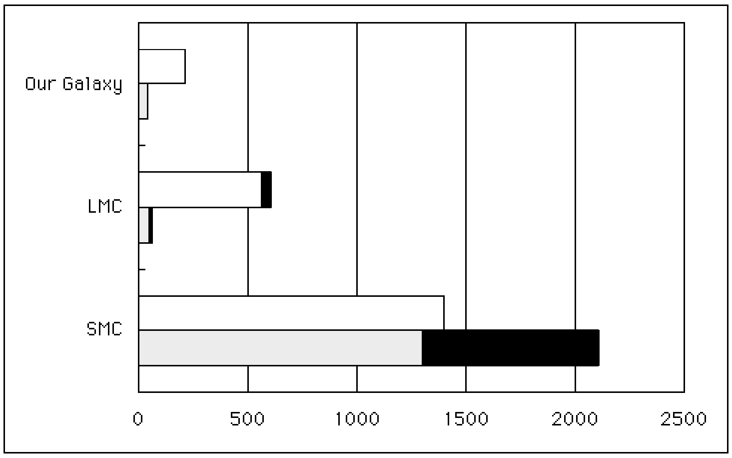

図 4: SNR と HMXBP の個数密度の比較：それぞれ質量比 (Our Galaxy : LMC : SMC = 100 : 10 : 1) で規格化してある。白が SNR の個数で、灰色が HMXB の個数。今回認定した候補は黒い部分で示してある。

6　議論

HMXBP の年齢は、その companion star の大質量星の年齢から $\sim 10^7$ 年と考えられている。つまり、今回の SMC に HMXBP が多いという結果は、 10^7 年前に SMC で活発な星形成があったことを示唆しているのである。実際、一つの理論計算によると、両マゼラン雲は $\sim 2\times10^8$ 年前に近接相互作用を起こしたという解も存在している [39]。この接近を契機にして、小さい方の SMC では現在まで星形成が活発に行なわれていると考えるのはごく自然のことであるが、X線観測ではそのうち 10^7 年前という時間の星形成の証拠を捕らえることが出来たといえる。

また、我々の銀河系には HMXB と同程度の数の LMXB が見つかっているのに対し、 SMC では未だ 1 つも LMXB が見つかっていないというのも興味深い事実である。これを評価するには、 HMXB と LMXB の生成シナリオを考える必要があろう。 HMXB の生成シナリオは、大質量星と大質量星の連星系のうち片方が超新星爆発を起こして、出来た中性子星と残った大質量星が binary を保って出来ると言われている。一方 LMXB は、単独で出来た中性子星が小質量星にキャプチャーされて出来ると考えられている。つまり、 HMXB は中性子星誕生後比較的早く形成されるのに対し、 LMXB の生成にはいくらかのタイムラグが存在しているのである。以上を踏まえると、 SMC で LMXB が発見されないという事実は、 SMC の星形成はまだ LMXB を作るまでには至っていない、即ち、 SMC はまだ星形成の新しい若い銀河である、というふうに解釈することも出来るのである。この推定を確かめるためには、光学観測によりマゼラン雲中の星団の年齢がどのようになっているかを調べる必要があろう。

7　結論、今後

我々は、「あすか」のデータを用いて LMC、 SMC のX線源を系統的に解析し、それらの種族分類が Hardness Ratio というパラメータで明確に行なえることを明らかにした。さらに SMC の特殊な個数密度の分布から、 10^7 年前以降の活発な星形成の証拠を捕らえた。

しかし 5 章でも述べたように、「あすか」の観測数はまだ十分ではなく、マゼラン雲全体を覆うまでには至っていない。我々は 1999 年中に「あすか」による追観測を、 LMC に対し 400ksec、 SMC に対し 200ksec 行なう予定である (図 5)。これによりさらにX線源のサンプルは増え、 HR による分類法はより確固たるものになるだろう。

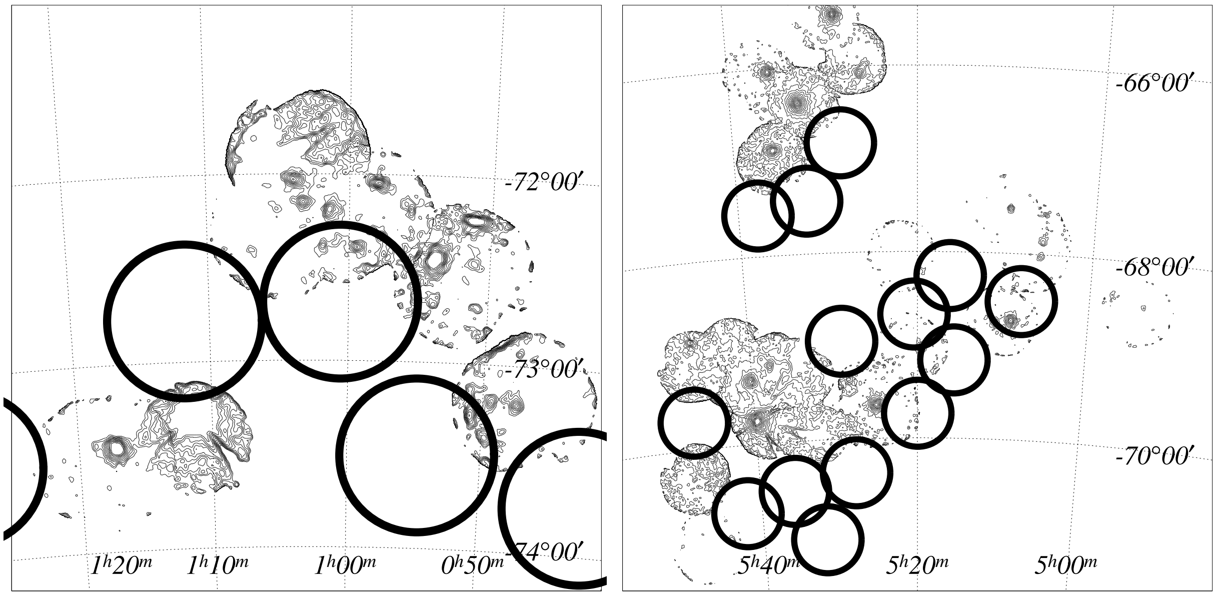

図 5: 「あすか」による大小マゼラン雲の観測計画: 丸で示したところを 1999 年中に観測する予定である

参考文献

[1] Lucke, R. *et al. Astrophys. J.* **206,** L25 (1976).

[2] Bildsten, L. *et al. Astrophys. J. Suppl.* **113,** 367 (1997).

[3] Hughes, J. *Astrophys. J.* **427,** L25 (1994).

[4] Israel, G. L. *et al. Astrophys. J.* **484,** L141 (1997).

[5] Corbet, R., Marshall, F. E., Ozaki, M. & Ueda, Y. *IAU Circ.* No. 6803 (1997).

[6] Lochner, L. C. *IAU Circ.* No. 6858 (1998).

[7] Buckley, D. A. *et al. IAU Circ.* No. 6789 (1997).

[8] Cowley, A. P. *et al. Publ. Astron. Soc. Pacific* **109,** 21 (1997).

[9] Marshall, F. E. & Lochner, J. C.; Santangelo, A. *et al. IAU Circ.* No. 6818 (1998).

[10] Israel G. L. *et al. IAU Circ.* No. 6999 (1998).

[11] Yokogawa, J. & Koyama, K. *IAU Circ.* No. 6835 (1998).

[12] Yokogawa, J. & Koyama, K. *IAU Circ.* No. 6853 (1998).

[13] Cook, K. *IAU Circ.* No. 6860 (1998).

[14] Schmidtke, P. C. & Cowley, A. P. *IAU Circ.* No. 6880 (1998).

[15] Yokogawa, J. & Koyama, K. *IAU Circ.* No. 7009 (1998).

[16] Hughes, J. P. & Smith. R. C. *Astron. J.* **107,** 1363 (1994).

[17] Ye, T. *et al. Monthly Notices Roy. Astron. Soc.***275,** 1218 (1995).

[18] Yokogawa, J. & Koyama, K. *IAU Circ.* No. 7028 (1998).

[19] Imanishi, K., Yokogawa, J.,& Koyama, K. *IAU Circ.* No. 7040 (1998).

[20] Chakrabarty, D., Levine, A. M., Clark, G. W. & Takeshima, T.; Wilson, C. A. & Finger, M. H. *IAU Circ.* No. 7048 (1998).

[21] Chakrabarty, D. *et al. IAU Circ.* No. 7062 (1998).

[22] Israel, G. L. *et al. IAU Circ.* No. 7101 (1999).

[23] Lamb, R. C., Prince, T. A., Macomb, D. J. & Finger, M. H *IAU Circ.* No. 7081 (1999).

[24] Seward, F. D., Harnden, F. R. JR., & Helfand, D. J. *Astrophys. J.* **287,** L19 (1984).

[25] Schmidtke, P. C., Cowley, A. P., McGrath, T. K. & Anderson, A. L.L *Astrophys. J.* **107,** 450 (1995).

[26] Haberl, F., Dennerl, K. & Piestch, W.K *Astron. Astrophys.* **302,** L1 (1995).

[27] Haberl, F., Dennerl, K., Piestch, W. & Reinsch, K. *Astron. Astrophys.* **318,** 490 (1997).

[28] Marshall, F. E. *et al. Astrophys. J.* **499,** L179 (1998).

[29] Cusumano, G. *et al. Astron. Astrophys.* **337,** 772 (1998).

[30] Mathewson, D. S. *et al. Astrophys. J. Suppl.* **51,** 345 (1983).

[31] Mathewson, D. S. *et al. Astrophys. J. Suppl.* **55,** 189 (1984).

[32] Mathewson, D. S. *et al. Astrophys. J. Suppl.* **58,** 197 (1985).

[33] van Paradijs, J. 1998, Neutron Stars and Black Holes in X-Ray Binaries, in "The Many Faces of Neutron Stars", eds. R. Buccheri, J. van Paradijs, & M. A. Alpar (London: Kluwer Academic Publishers), in press

[34] Wang, Q. *et al. Astrophys. J.* **374,** 475 (1991).

[35] Wang, Q. & Wu, X. *Astrophys. J. Suppl.* **78,** 391 (1992).

[36] Schmidke, P. C. *et al. Publ. Astron. Soc. Pacific* **106,** 843 (1994).

[37] Schmidke, P. C. *et al. astro-ph/*9812217(1998).

[38] Kahabka, P. *et al. astro-ph/*9812143(1998).

[39] Sawa, T., Fujimoto, M., & Kumai, Y. *IAU Symp.* **190,** 166(1998).