X-ray Pulsar Rush in 1998

今西 健介、辻本 匡弘、西内 満美子、横川 淳、小山 勝二 (京大理)

1 Abstract

We present recent remarkable topics about discoveries of X-ray pulsars.

1. Pulsations from two Soft Gamma-ray Repeaters
   These pulsars have enormously strong magnetic field (B$\sim 10^{15}$ G), thus these are called as "magnetar", new type of X-ray pulsars.

2. New Crab-like pulsars
   These discoveries lead to suggesting universality of Crab-like pulsars.

3. An X-ray bursting millisecond pulsar
   This is strong evidence for the recycle theory of generating radio millisecond pulsars.

4. X-ray pulsar rush in the SMC
   This indicates the younger star formation history in the SMC.

2 X 線パルサーの分類

電波観測と同様、X 線においても中性子星はやはりパルサーとして観測される。ただしその形態は、いわゆる電波パルサーのような単独中性子星だけでなく、連星系をなすものも存在する。それぞれの名称と特徴を以下に挙げる。

- **Crab-like pulsar (rotation-powered pulsar)**: 単独中性子星がその回転による運動エネルギーを X 線として放出するパルサー。代表例はカニ星雲。電波パルサーより年齢が若く、超新星残骸 (SNR) に付随しているのが大きな特徴。周期は 10–100 msec と速く、自転周期 (パルス周期) は徐々に遅くなっていく。

- **Accretion-powered pulsar**: 大 (小) 質量星と中性子星の連星系 (High/Low Mass X-ray Binary; HMXB/LMXB)。中性子星への質量降着によりその重力エネルギーを X 線として放出する。周期は 1– 数 100 sec に集中しており、自転周期 (パルス周期) は速くなったり遅くなったりする。

観測的な違いは多々あるが、物理過程における最も大きな違いはその X 線エネルギーの供給源 (運動エネルギーと重力エネルギー) である。

3 X 線パルサー観測: 最近の話題

3.1 Soft Gamma-ray Repeater から発見された新種のパルサー: magnetar

Soft Gamma-ray Repeater (SGR) とは、いわゆる Gamma-ray Burst (GRB) とは少し性質を異にする一群の burst 源で、今まで全天に 4 つが知られている。その特徴は以下の 3 つである。

1. GRB より低エネルギーのガンマ線を突発的に放つ。しかも短時間で何度も繰り返す。

2. 超新星残骸に付随している。

3. 4 つのうち 3 つは超新星残骸中に X 線点源の存在が確認されている。

その正体は全く謎であったが、特徴 2、3 から、超新星残骸に存在する単独中性子星ではないか、もしそうならパルスが検出できるのでは、ということが示唆されていた。

そしてついに 1998 年、2 つの SGR に付随する X 線点源からパルスが検出された。SGR 1806−20 (P=7.47sec)[1] と SGR 1900+14 (P=5.16sec)[2][3][4] である。

これらのパルサーは P-$\dot{P}$diagram 上で特殊な位置を占める (図 1の星印)。磁気双極子輻射を仮定すると、$B = 3 \times 10^{19}\sqrt{P\dot{P}}$ G により磁場を求めることができるが、これらの SGR は $\sim 10^{14-15}$ G という超強力な磁場を有

し、電波パルサーや Crab-like pulsar である普通の中性子星 (B$\sim 10^{12-13}$ G) とは明らかに別のものであることがわかった。この新種のパルサーを、強力な磁場に絡めて “magnetar”[5] と呼ぶ。

magnetar のもう一つ特殊な点は、その X 線エネルギーの供給源である。図 2に回転エネルギーロス $(-\dot{E}_{rot})$ と X 線強度 (L_X) の関係を示す。 Crab-like pulsar では $-\dot{E}_{rot} >> L_X$ となり、回転エネルギーの一部を X 線にしていると考えてよいが、 magnetar は逆に $-\dot{E}_{rot} > L_X$ なので、回転エネルギーでは足りないことがわかる。また、質量降着の証拠も得られていないので、重力エネルギーということも考えにくい。こういったことから、 magnetar には第 3 のエネルギー源を考えなくてはならない。その候補として真っ先に思いつくのが、豊富に存在する磁場のエネルギーである。観測的な証拠はまだ得られていないが、 magnetar は重力 / 運動エネルギーでなく、第 3 の要素である磁場のエネルギーを放出している可能性があるのである。

ところで、これらの SGR と非常に特徴が似ている一群の X 線パルサーが存在する。これらは Anoumalous X-ray Pulsar (AXP)[6] と呼ばれ、 P-$\dot{P}$diagram でもやはり SGR と同じような位置に来る (図 1 の四角)。その正体に関して、一つ面白い仮説が提唱されている。 SGR から AXP への進化説である。図 3に SGR と AXP の年齢と磁場の関係を示す。これを見ると、 SGR が磁場を decay させて AXP になっているというような描像が予想できる。今後の観測で、 AXP からガンマ線活動が確認されればこの仮説はいよいよ現実味を帯びてくるだろう。

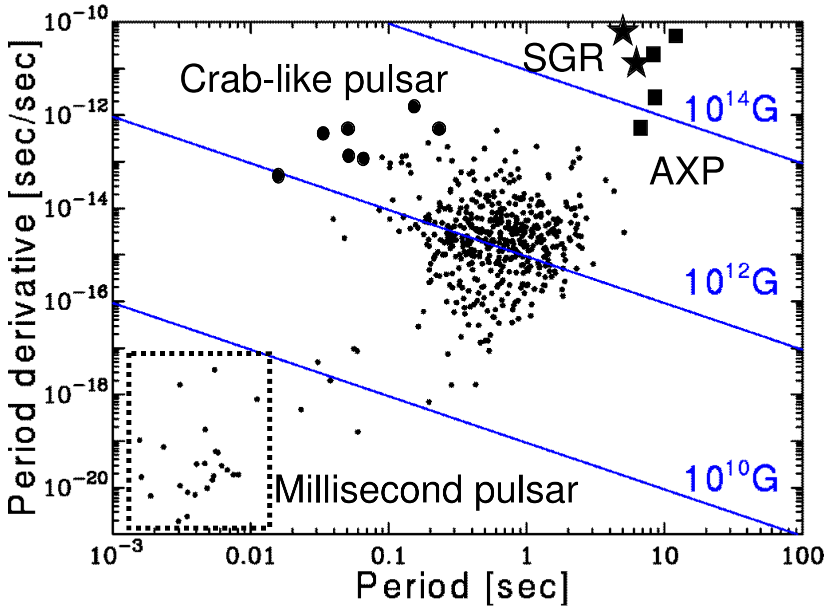

図 1: P-$\dot{P}$diagram

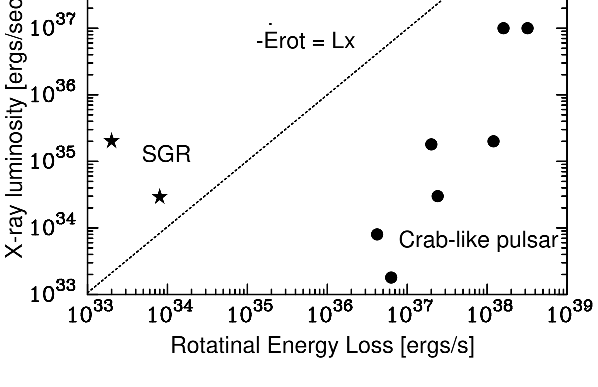

図 2: 回転エネルギーロス $(-\dot{E}_{rot})$ と X 線強度 (L_X) の関係

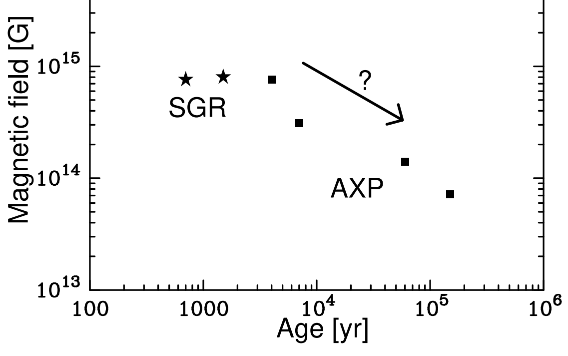

図 3: SGR と AXP の年齢と磁場の関係

3.2 Crab-like pulsar の相次ぐ発見

Crab-like pulsar は、大質量星の超新星爆発 (II 型超新星爆発: Type II SN) により生成されると考えられている。Type II SN は銀河系内でおよそ 100 年に 1 回起こるといわれている。一方、これまでの観測結果から、Crab は中性子星の誕生から現在までおよそ半分の運動エネルギーを放出したといわれているので、その年齢 (∼1000 年) から考えると Crab-like pulsar は数 1000 年は輝き続けると考えられる。すると、Type II SN で確実にパルサーが出来るとするなら、現在、数 10 個の Crab-like pulsar が存在すると予想される。

しかし、従来、Crab-like pulsar は銀河系内ではわずか 3 例 (Crab、Vela、PSR B1059−58) が知られているのみであった (さらに大マゼラン雲に PSR B0540−69 が 1 例発見されていた)。この数は明らかに少な過ぎる。そもそも、Type II SN → Crab-like pulsar という流れ自体も怪しいのでは、という疑問が残されていたのである。

そのような背景の中、1997–98 年にかけて新たな Crab-like pulsar の発見が相次いだ。その数は 4 つ (銀河系内で 3 つ、大マゼラン雲で 1 つ) にも上り、Crab-like pulsar の数は一気に倍増した。いまだ数は充分とは言えないものの、Crab-like pulsar が Type II SN で生成されるという説は、ある程度定量的に評価できるレベルには達したと言って良いだろう (しかし Type II SN である SN 1987A でいまだにパルサーが発見されないのは一つの謎ではある)。

以下に新発見のパルサーを紹介する。

- **G11.2−0.3**[7]: 周期 65 msec。歴史上に残っている A. D. 386 年の超新星爆発により生成されたと考えられたが、現在はその相関はやや疑問視されている。
- **RCW103**[8]: 周期 69 msec。超新星残骸の中心ではなく、端の方にある X 線源からパルスを検出した。おそらく爆発時に中性子星が強い kick velocity を受けて飛ばされたのだろう。
- **N157B**[9]: 周期 16 msec。大マゼラン雲 (LMC) の有名な超新星残骸 SN1987A の近所に存在する。Crab-like pusar の中では最速。
- **Puppis A**[10]: 周期 75 msec。

3.3 X-ray bursting millisecond pulsar の発見

(電波) ミリ秒パルサーと呼ばれる一群のパルサーが存在する (図 1)。特徴は、(1) 速い周期 (1–10 msec)、(2) 弱い磁場 (10^{9-10} G) である。ところで、中性子星は年とともに回転と磁場を弱めていくと考えられているので、この速い回転と弱い磁場というのは明らかに矛盾しているのである。その生成シナリオというのは一つの疑問であった。いくつかの説が唱えられたが、中でも最も有力視されていたのが「リサイクル説」[11] というものである。それは、

1. 単独中性子星が誕生 (B$\sim 10^{12}$ G)。
2. 回転、磁場が弱まり、パルサーとしては「死」を迎える (B$\sim 10^{9}$ G)。
3. 空間を漂っているうちに小質量星に捕まり、連星系を作る。
4. 小質量星から中性子星に質量降着が起こり X 線で輝き出す (LMXB)。中性子星は膠着物質から角運動量をもらい回転を速める。
5. 質量降着が止まり、邪魔なものがなくなった中性子星はミリ秒パルサーとして輝き出す。

というものである。これまで、この説の最も不定な点は 4 から 5 への進化であった。このシナリオを信用するなら、ある程度年を経た LMXB はミリ秒でパルスを出すはずである。しかし、LMXB のパルサーはこれまでいくつか見つかっていたが、その周期はいずれも ∼1 秒程度であった。

1998 年、その疑問を解消するような X 線天体が発見された。それは SAX J1808−3658 = XTE J1808−359 という名前で、もともと X 線バースト活動を見せる LMXB として発見されていた [12]。なんとこの天体から X 線で 2.49 msec のパルスが検出されたのである [13]。リサイクル説を支持する重要な証拠である。

3.4 小マゼラン雲でのパルサーラッシュ

小マゼラン雲 (Small Magellanic Cloud: SMC) は LMC の次に我々に近い銀河である。ここ数年、SMC で X 線パルサーの発見が相次いでいる。1997 年末から 1999 年にかけて実に 12 個 (!) もの X 線パルサーが発見され、以前から知られていた 3 つを加えるとその数は 15 個にも及ぶ (表 1)。まさに "パルサーラッシュ"[14] である。

これらのパルサーのうち 13 個は以下の共通の特徴を有している。

- 周期が秒単位 (0.7–320 sec)
- 高エネルギーまで伸びるスペクトル
- 年単位での激しい強度変動
- (一部は) 光学観測により大質量星と連星系をなすことがわかった

これらの特徴は全て HMXB Pulsar に良く見られるものである [15]。つまり、SMC の X 線パルサーはほとんどが HMXB なのである。

ところで今回の "パルサーラッシュ" は、SMC の異常な天体密度を明らかにした。図 4に SMC と我々の銀河系の HMXB (パルサーでないものも含む) と LMXB の個数の比較を示す。ただ、SMC と我々の銀河系は大きさが全然違うので、その質量比 (SMC : Our Galaxy = 1 : 100) で規格化してある。これを見ると一目瞭然、SMC で HMXB の比率が圧倒的に大きいことがわかる。これは一体何を意味しているのか？

一般に HMXB の中性子星の年齢は、その伴星の年齢から $\sim 10^7$ 年と言われている。一方、LMXB は 3.3 節でも述べたように生成にいくらかのタイムラグがあるため、年齢は $10^8 \sim 10^9$ 年と高齢になってしまう。これから、SMC の HMXB 過多は、SMC で 10^7 年あたりから急激に星形成が活発になったことを表しているのではないかと考えられる。実際、星団の観測などによると、SMC の星形成は LMC や Our Galaxy より遅れて活発になったと言われている。"パルサーラッシュ" は、SMC が若い銀河であることの証拠なのではないか？

表 1: SMC の X 線パルサー

名前	発見時			あすかでの	Refs.
	年	衛星	周期 (s)	周期 (s)	
SMC X-1‡	1976	(Rocket)	0.716	0.70876^a 0.710143^b 0.706481^c	[16][17]
RX J0059.2−7138‡	1994	ROSAT	2.7632	2.7632	[17][18]
2E 0050.1−7247‡	1995	ROSAT	8.88	—	[17][19]
AX J0051−722	1997	RXTE, ASCA	91.1	91.1	[20][21]
1WGA J0053.8−7226‡		ASCA	46.63	46.63	[20][22]
XTE J0054−720	1998	RXTE	169.3	—	[21][23]
XTE J0055−724‡		RXTE, BeppoSAX	58.97	59.00	[24][25]
AX J0049−729*		RXTE, ASCA	74.68	74.68	[20][26]
AX J0051−733*‡		ASCA	323.2	323.2	[23][27][28][29]
AX J0058−720*		ASCA	280.4	280.4	[27]
1SAX J0103.2−7209‡		BeppoSAX	345.2	348.9	[25][30][31][32]
AX J0105−722*†*		ASCA	3.34300	3.34300	[33]
AX J0049−732**		ASCA	9.1321	9.1321	[34]
XTE J0111.2−7317‡		RXTE, CGRO	31	30.9497	[35][36][37]
RX J0052.1−7319‡	1999	ROSAT	15.3	—	[37][38]

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 は暗すぎてそもそも X 線が検出できなかった。XTE J0054−720 は視野外。*: 我々京大グループが発見したもの。†: パルス検出の有意度は $\sim 99.5\%$。‡: 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。

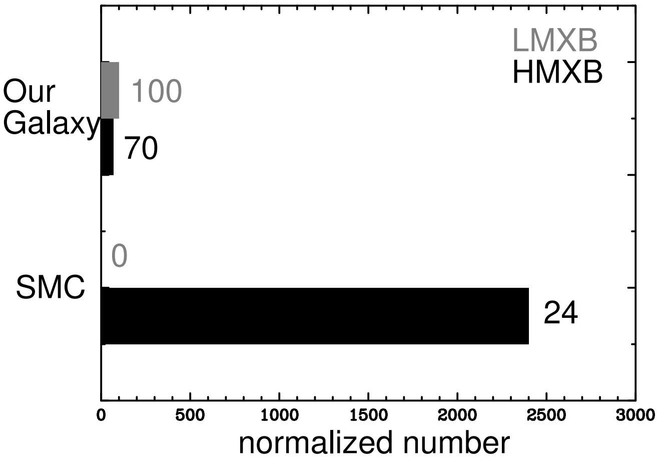

図 4: SMC と Our Galaxy の HMXB/LMXB の個数の比較。それぞれ質量比 (SMC : Oue Galaxy = 1 : 100) で規格化してある。

4 まとめ

図 5に中性子星の進化を表す。最近のめざましい成果により、以下のようなことが明らかになってきた。

- magnetar という、磁場のエネルギーを放出する新しい種類のパルサーが発見された。
- Crab-like pulsar が普遍的に存在することを示した。
- ミリ秒パルサーの生成シナリオ「リサイクル説」の裏付けとなる証拠をつかんだ。
- SMC で大量の X 線パルサーを発見した。

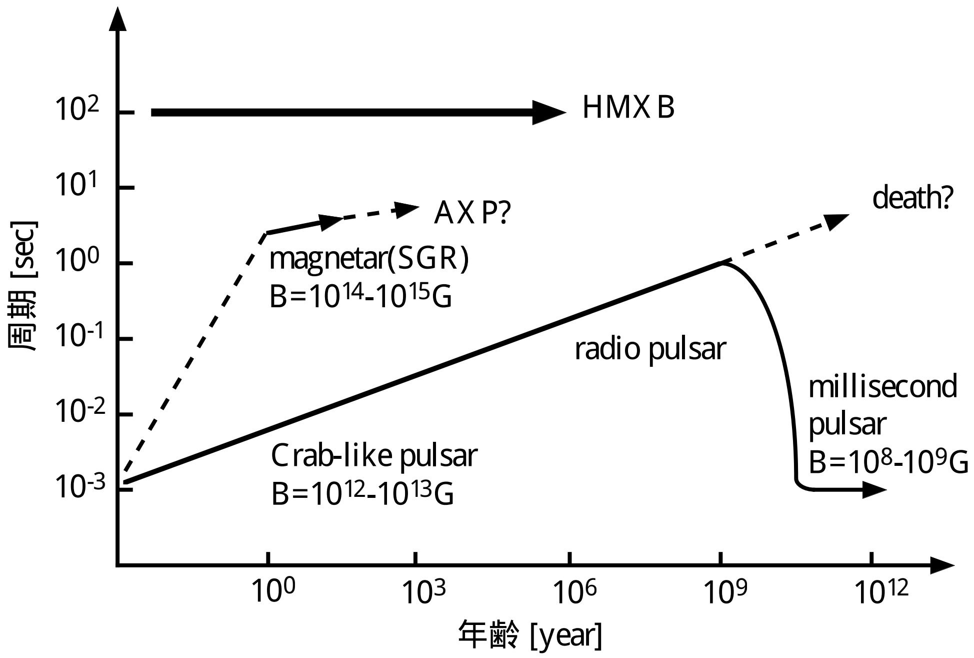

図 5: 中性子星の進化の様子

参考文献

[1] Kouveliotou, C. *et al. Nature* **393,** 235 (1998).

[2] Hurley, K. *et al. Astrophys. J.* **510,** L111 (1999).

[3] Kouveliotou, C. *et al. Astrophys. J.* **510,** L115 (1999).

[4] Murakami, T., Kubo, S., Shibazaki, N., Takeshima, T., Yoshida, A. & Kawai, N. *Astrophys. J.* **510,** L119 (1999).

[5] Thompson, C. & Duncan, R. C. *Astrophys. J.* **473,** 322 (1996).

[6] van Paradijs, J., Taam, R. E. & van den Heuvel, E. P. J. *Astron. Astrophys.* **299,** L41 (1995).

[7] Torii, K., Tsunemi, H., Dotani, T. & Mitsuda, K. *Astrophys. J.* **489,** L145 (1997).

[8] Torii, K. *et al. Astrophys. J.* **494,** L207 (1998).

[9] Marshall, F. E., Gotthelf, E. V., Zhang, W., Middleditch. J. & Wang, Q. D. *Astrophys. J.* **499,** L179 (1998).

[10] Pavlov, G. G., Zavlin, V. E. & Trümper, J. *Astrophys. J.* **511,** L45 (1999).

[11] 柴崎 徳明 「中性子星とパルサー」 (倍風館)

[12] in't Zand, J. J. M., Heise, J., Muller, J. M., Bazzano, A., Cocchi, M., Natalucci, L. & Ubertini, P. *Astron. Astrophys.* **331,** L25 (1998).

[13] Wijnands, R. & van der Klis, M. *Nature* **394,** 344 (1998).

[14] Yokogawa, J. 1999, Master thesis of Kyoto University

[15] Nagase, F. *Publ. Astron. Soc. Japan* **41,** 1 (1989).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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