

УДК 524.354-43

## НИЖНИЙ ПРЕДЕЛ ТЕМПЕРАТУРЫ АККРЕТОРОВ

© 2003 г. М. К. Абубекеров<sup>1</sup>, В. М. Липунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 20.06.2002 г.; принята в печать 10.01.2003 г.

Обращается внимание на то, что для замагниченных аккрецирующих звезд (нейтронных звезд, белых карликов и, возможно, звезд Т Тау) должна существовать универсальная корреляция между основными наблюдаемыми параметрами: светимостью, периодом и температурой. В первом приближении такая зависимость неплохо выполняется для рентгеновских пульсаров, промежуточных поляров и звезд Т Тау. Что же касается аномальных пульсаров (так называемых “магнетаров”) и мягких гамма-репитеров (soft gamma repeaters), то их параметры резко выпадают из общей зависимости и даже находятся в “запрещенной” области. Это является серьезным аргументом против интерпретации их как аккрецирующих нейтронных звезд.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Теория аккреции на замагниченные звезды развивалась в связи с открытием и изучением рентгеновских пульсаров в двойных системах [1]. Хотя до окончательного построения полной теории далеко, тем не менее основные положения обсуждавшиеся еще в 70-е годы, можно считать в первом приближении бесспорными. Среди них главными являются следующие:

1) размер магнитосферы аккрецирующей замагниченной звезды близок к так называемому альевновскому радиусу:

$$R_A = \left( \frac{\mu^2}{2\dot{M}\sqrt{2GM_x}} \right)^{2/7};$$

2) в процессе эволюции аккрецирующая звезда под действием ускоряющих и замедляющих моментов сил стремится прийти в равновесное состояние, когда размер магнитосферы близок к радиусу коротации ( $\kappa \simeq 1$ ) [2]:

$$R_A = \kappa R_c = \kappa (GM_x/\omega^2)^{1/3};$$

3) время достижения равновесия всегда меньше характерного времени жизни звезды на стадии аккректора:

$$t_{eq} = \frac{I\omega}{\dot{M}\sqrt{GM_x}} = \frac{M_x}{\dot{M}} \left( \frac{R_x}{R_c} \right)^3 \ll \frac{M_x}{\dot{M}}.$$

Вообще говоря, последние два пункта подразумевают, что реализуется дисковый вариант аккреции, что заведомо применимо к системам, в которых перетекание происходит через внутреннюю точку

Лагранжа, но также вполне вероятно и для аккреции из звездного ветра. Здесь речь пойдет только о системах с дисковой аккрецией. Напомним, что основными экспериментальными величинами при наблюдении рентгеновских пульсаров являются — светимость ( $L$ ), период ( $P$ ), скорость изменения периода ( $\dot{P}$ ) и характерная спектральная температура ( $kT_{spec}$ ). Первые три величины очевидно связаны друг с другом, поскольку светимость определяется темпом аккреции и им же определяется скорость изменения периода. В данной статье мы обращаем внимание на то, что три пункта, перечисленные нами выше, позволяют предположить, что для любых аккрецирующих звезд (аккректоров) должна существовать также корреляция их светимостей и периодов с характерной температурой излучения.

### 2. НОВАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ РАВНОВЕСНЫХ ПУЛЬСАРОВ

Произведем нижнюю оценку характерной температуры зоны излучения аккректора. В первом приближении можем использовать формулу Стефана-Больцмана

$$L = S\sigma T^4. \quad (1)$$

Размер области, на которую выпадает аккрецируемое вещество, оценим исходя из дипольности силовых линий магнитного поля аккректора [3]:

$$S = 2\pi R_x^2 \epsilon^2, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  — угол раскрытия полярной колонки, определяемый через радиус аккректора  $R_x$  и размер

Таблица 1. Температуры аккректоров

Тип	Имя	$kT_{\min}$ , эВ	$kT_{\text{spec}}$ , эВ	$kT_{\text{эф}}$ , эВ	$f(L)$
Нейтронные звезды	Her X-1	3754	19000	13593	1.398
	4U 0115+63	4965	8000	5631	1.421
	X0331+53	4633	15500	11089	1.398
	Cen X-3	7045	14300	8511	1.680
	Vela X-1	6954	17500	13112	1.335
Магнетары	AXJ 1845-0258	1752	640	541	1.182
	1E 2259+586	1259	410	365	1.121
	1E 1841-045	1911	550	465	1.182
	4U 0142+615	2456	390	314	1.240
	1E 1048-5937	1964	640	530	1.206
	1RXS J17084.9	1986	460	386	1.190
	SGR 1900+14	696	500	486	1.027
Мягкие гамма-репиторы	SGR 1806-20*	76000	9000	5357	1.680
	SGR 1627-41	1107	1300	1181	1.10
	SAXJ 1808.4-36	81	200	223	0.896
Барстер	AM Her	3.868	28	16	1.68
Поляр	DQ Her	0.937	20	11.9	1.68
Промежуточные поляры	SW UMa	3.307	70	41.6	1.68
	T Tau	0.290	0.43	0.25	1.68

\* Указана температура рентгеновской вспышки источника.

альвеновской зоны  $R_A$ , как:

$$\epsilon = \left( \frac{R_x}{R_A} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Примем во внимания тот факт, что аккректор в процессе эволюции стремится в состояние, при котором альвеновский радиус приближается к радиусу коротации  $R_c$ , т.е.

$$R_A = \kappa R_c, \quad (4)$$

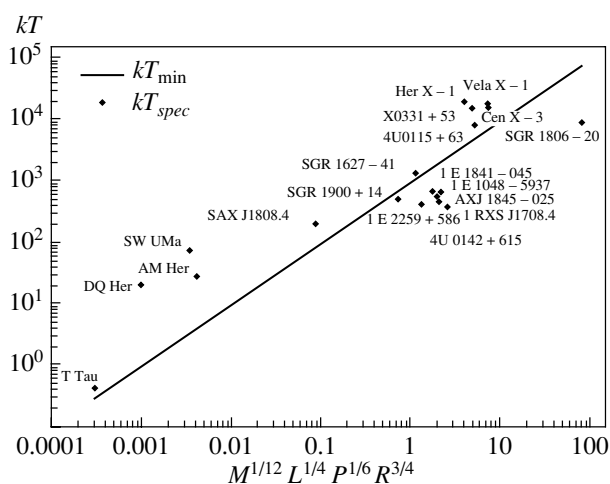
где  $\kappa$  — безразмерный коэффициент — близкий к единице. Далее, используя определение радиуса коротации и выражения (1)–(4), получим минимальную температуру зоны аккреции в чернотельном приближении

$$kT_{\min} = 0.94 \frac{M_1^{1/12} L_{35}^{1/4} P^{1/6}}{R_6^{3/4}} \text{кэВ}. \quad (5)$$

В выражении (5) произведена нормировка массы на одну солнечную массу, светимости на  $10^{35}$  эрг/с, периода на одну секунду, радиуса на  $10^6$  см. Данная зависимость представлена на рисунке прямой линией.

Еще раз уделяем особое внимание тому, что выражение (5) дает нижний предел для температуры зоны излучения аккректора. Поскольку аккрецируемое вещество вследствие РТ-неустойчивости в

приполярных зонах канализируется силовыми линиями магнитного поля, в результате чего выпадает не на полярную шапку аккректора, а в узкое кольцо существенно меньшей площади [1]. Очевидно, полученный нижний предел температуры может быть применим к любому замагниченному аккректору независимо от его природы — нейтронная звезда, белый карлик или обычная звезда. Главное, что-



Зависимость спектральной температуры от параметров аккректора. Единицы измерения величин:  $kT$  — в эВ,  $M$  — в  $M_{\odot}$ ,  $L$  — в  $10^{35}$  эрг/с,  $P$  — в с,  $R$  — в  $10^6$  см.

Таблица 2. Используемые числовые значения основных характеристик аккректоров

Тип	Имя	$P$ , с	$L$ , $10^{35}$ эрг/с	$R$ , $10^6$ см	$M/M_{\odot}$
Нейтронные звезды	Her X-1	1.24	200	1.0	1.4
	4U 0115+63	3.61	300	1.0	1.4
	X0331+53	4.38	200	1.0	1.4
	Cen X-3	4.84	1000	1.0	1.4
	Vela X-1	283	63	1.0	1.4
Магнетары	AXJ 1845–0258	6.97	3	1.0	1.4
	1E 2259+586	6.98	0.8	1.0	1.4
	1E 1841–045	11.76	3	1.0	1.4
	4U 0142+615	8.69	10	1.0	1.4
	1E 1048–5937	6.44	5	1.0	1.4
	1RXS J17084.9	10.99	3.6	1.0	1.4
Мягкие гамма-репиторы	SGR 1900+14	5.16	0.09	1.0	1.4
	SGR 1806–20*	7.47	$10^7$	1.0	1.4
	SGR 1627–41	6.41	0.5	1.0	1.4
Барстер	SAXJ 1808.4–36	0.0025	0.003	1.0	1.4
Поляр	AM Her	11139.2	0.0002	700	1.0
Промежуточные поляры	DQ Her	71.07	0.00002	700	1.0
	SW UMa	954	0.0005	700	1.0
Объект Т Тау	T Tau	432000	0.0044	140000	1.0

\* Указана светимость рентгеновской вспышки источника. Массы и радиусы нейтронных звезд не претендуют на абсолютную точность, их значения взяты как наиболее вероятные.

бы мы имели дело с замагниченными объектами аккрецирующими из диска. Несомненно, такими объектами являются часть рентгеновских пульсаров, рентгеновские барстеры, катаклизмические переменные (поляры и промежуточные поляры), возможно, звезды типа Т Тау [4].

### 3. РОЛЬ ЭФФЕКТА КОМПТОНИЗАЦИИ

В случае аккрецирующих нейтронных звезд для перехода от спектральной рентгеновской температуры аккректора  $kT_{spec}$  (в качестве которой принята температура в законе  $I \propto \exp^{-h\nu/kT_{spec}}$ , аппроксимирующего наблюдаемые спектры) к эффективной температуре излучающей зоны зададимся моделью атмосферы из работы [5].

В данной работе выявляется влияние комптонизации на спектр и предлагается выражение для

перехода от  $kT_{spec}$  к  $kT_{eff}$

$$T_{spec} = f(L)T_{eff}, \quad (6)$$

где функция связи  $f(L)$  имеет вид

$$f(L) = \begin{cases} 1.51(L/L_{edd})^{0.04}, & L \ll L_{edd}; \\ 1.68 & L \simeq L_{edd}. \end{cases}$$

Результат поправки за эффект комптонизации представлен в табл. 1. Видно, что значения температур наблюдаемых аккректоров по-прежнему выше своего минимального значения. Для других типов аккректоров — полярных и звезд типа Т Тау, эффект комптонизации менее значителен, но даже после поправки на максимально возможное значение  $f(L)$  расхождение между эффективной температурой их излучающей зоны и минимально возможной остается весьма большим (табл. 1).

Таблица 3. Ссылки на наблюдательные данные аккректоров

Тип	Имя	Ссылки
Нейтронные звезды	Her X-1	[6, 7]
	4U 0115+63	[6, 7]
	X0331+53	[6, 7]
	Cen X-3	[6, 7]
	Vela X-1	[6, 7]
Магнетары	AXJ 1845–0258	[8–10]
	1E 2259+586	[8–10]
	1E 1841–045	[8–10]
	4U 0142+615	[8–10]
	1E 1048–5937	[8–10]
Мягкие гамма-репиторы	1RXS J17084.9	[8, 10, 11, 12]
	SGR 1900+14	[13–16]
	SGR 1806–20	[17–20]
Барстер	SGR 1627–41	[21–23]
	SAXJ 1808.4–36	[24, 25]
Поляр	AM Her	[6, 26, 27]
Промежуточные поляры	DQ Her	[6, 28]
	SW UMa	[6, 29]
Объект Т Тау	T Tau	[4, 6]

#### 4. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СИСТЕМЫ ПОЛЯРОВ И ЗВЕЗД Т Тау

AM Her — катаклизмическая переменная, относящаяся к подклассу полярнов. Представляет, двойную систему из магнитного белого карлика и красного карлика. Красный карлик заполнил свою полость Роша. Наблюдается почти полное совпадение орбитального и собственного периода вращения белого карлика  $P_{spin} = 0.77P_{orb}$ . Предполагаемое магнитное поле на поверхности белого карлика  $\sim 10^9$  Гс [6].

DQ Her — катаклизмическая переменная относящаяся к подклассу промежуточных полярнов. Представляет собой двойную систему, состоящую из белого карлика и звезды класса  $K-M$  (более точно класс не установлен). Коэффициент синхронизации  $P_{spin} = 0.004P_{orb}$ . Предполагаемое поле на поверхности белого карлика  $\sim 10^6$  Гс [6].

SW UMa — катаклизмическая переменная, относящаяся к подклассу промежуточных полярнов. Периодически вспыхивает как новая. Представляет собой двойную систему, состоящую из белого карлика и звезды класса  $M2$  (или более позднего). Наблюдается корреляция орбитального периода системы с периодом вращения белого карлика  $P_{spin} = 0.195P_{orb}$  [6].

Звезды типа Т Тау — молодые звезды, аккреционная светимость которых лежит в пределах от  $0.02L_{\odot}$  до  $0.2L_{\odot}$  (в работе в качестве расчетной светимости взята  $0.1L_{\odot}$ ). Периоды колеблются от 3 до 10 дней (в среднем 5 дней). Массы звезд порядка  $1 - 1.5M_{\odot}$ . Магнитные поля на поверхности достигают  $10^4$  Гс [4]. Использованные в работе числовые значения характеристик аккректоров содер- жатся в табл. 2. Ссылки на литературные источники, в которых приводятся данные наблюдений, сведены в табл. 3.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Обратимся к найденной зависимости нижнего предела температуры аккректоров (5), показанной на рисунке. По оси ординат отложена рентгеновская спектральная температура, по оси абсцисс отложена обобщенная координата

$$\frac{M^{1/12} L^{1/4} P^{1/6}}{R^{3/4}}.$$

Выбор обобщенной координаты оси абсцисс был направлен на то, чтобы в данных координатах зависимость (5) обратилась в прямую линию. Напомним еще раз, что сочетание параметров аккректора в выражении (5) является результатом объединения выражений (1)–(4) и как следствие правая часть выражения (5), а значит, и обобщенная координата оси абсцисс рисунка несет информацию о периоде вращения аккректора, светимости и косвенно о его моменте инерции.

На этот же график были нанесены температуры  $kT_{\text{spec}}$ , характеризующие наблюдаемые спектры. На основе того, что теоретическая площадь зоны аккреции явно завышена, а также принимая во внимание действие комптонизации на выходящее излучение, можно уверенно сказать, что точки с  $kT_{\text{spec}}$  должны лежать выше своих теоретических значений или же в крайнем случае равны им. Ниже теоретической прямой (5) располагается “мертвая зона” для источников с аккреционной природой светимости.

Из рисунка видно, что аномальные рентгеновские пульсары (магнетары) и мягкие гамма-репиторы лежат в “мертвой зоне”. Слегка выпадает из этой тенденции только SGR 1627-41. Но в отличие от заведомых аккректоров, для которых выполняется условие  $kT_{\text{spec}} \gg kT_{\text{min}}$ , для SGR 1627-41  $kT_{\text{min}} \simeq kT_{\text{spec}}$ . Следует подчеркнуть, что положение SGR 1627-41 выше линии минимальных температур аккректоров не противоречит неаккреционной природе его светимости.

Принимая во внимание вышесказанное, можно поставить под сомнение аккреционную природу свечения магнетаров и мягких гамма-повторителей. Возможно, иной механизм ответственен за их светимость в рентгеновском диапазоне. Например, одним из механизмов может явиться диссипация магнитного поля  $\sim 10^{14}$ – $10^{15}$  Гс [30, 31]. Таким образом, предлагаемая авторами универсальная зависимость на основе связи характерной температуры зоны излучения аккректора с его основными характеристиками — светимостью, периодом, массой и радиусом — позволит добавить веский аргумент за аккреционную (или же неаккреционную) модель рентгеновской светимости объекта.

Авторы выражают признательность С.А. Ламзину, Н.И. Шакуре, С.Б. Попову за полезные обсуждения. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 00-02-17164а) и ФЦНТП “Астрономия” 1.4.4.1, и 1.4.2.3.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. М. Липунов, *Астрофизика нейтральных звезд* (М.: Наука, 1987), с. 280.
2. В. М. Липунов, Н. И. Шакура, Письма в “Астрон. журн.” **2**, 343 (1976).
3. K. Davidson and J. P. Ostriker, *Astrophys. J.* **179**, 585 (1973).
4. E. Gullbring, L. Hartmann, C. Briceño, and N. Calvet, *Astrophys. J.* **492**, 323 (1998).
5. S. Miyaji and Y. Takanaka, *Physics of neutron star and black holes*, Eds Y. Tanaka (Tokyo: Universal Academy Press, Inc., (1988), p. 269.
6. A. M. Cherepashchuk, N. A. Katysheva, Khruzina, C. Yu. Shugarov, *Highly evolved close binary stars: catalog Netherland* (Gordon and Breach Science Publishers SA., 1996a) Vol.1 Part1.
7. F. Nagase, ISAS Symp. of Astrophysics 1992 (eds F. Makino and F. Nagase), p. 2.
8. E. V. Gotthelf and G. Vasisht, *New Astronomy* **3**, 293 (1998).
9. R. Perna, J. Heyl, L. Hernquist, A. Juett, and D. Chakrabarty, *Astrophys. J.* **557**, 18 (2001).
10. Marsden., R. Lingenfelter, R. Rotshild, and J. Higdon, *Astrophys. J.* **550**, 397 (2001).
11. M. Sugizaki, *PASJ* **49**. L25 (1997).
12. G. Israel, T. Oosterbroek, L. Stella, *et al.*, *Astrophys. J.* **560**, L.65 (2001).
13. K. Hurley, P. Li, C. Kouveliotou, T. Murakami, *et al.*, *Astrophys. J.* **510**, L.111 (1999).
14. C. Kouveliotou, A. Tennant, P. Woods, *et al.*, *Astrophys. J.* **558**, L.47 (2001).
15. E. Gogus, C. Kouveliotou, P. Woods, *et al.*, *Astrophys. J.* **577**, 929 (2002).
16. P. Woods, C. Kouveliotou, E. Gogus, C. Thompson, K. Hurley, M. Finger, J. Swank, and D. Smith, *Asrophys. J.* **552**, 748 (2001).
17. C. Kouveliotou, M. Weisskopf, P. Woods, and R. Fender, *Nature* **393**, 235 (1998).
18. S. Corbel, P. Wallyn, T. Dame, *et al.*, *Astrophys. J.* **478**, 624 (1997).
19. D. Kaplan, D. Fox, S. Kulkarni, *et al.*, *Astrophys. J.* **564**, 935 (2002).
20. E. Fenimore, J. Laros, and A. Ulmer, *Astrophys. J.* **432**, 742 (1994).
21. P. Woods, C. Kouveliotou, J. van Parolus, *et al.*, *Astrophys. J.* **519**, 139 (1999).
22. S. Corbel, C. Chapius, T. Dame, and P. Durouchoux, *Astrophys. J.* **526**, L.29 (1999).
23. K. Hurley, T. Strohmayer, P. Li, *et al.*, *Astrophys. J.* **528**, L. 21 (2000).
24. L. Stella, S. Campana, S. Mereghetti, D. Ricci, and G. L. Israel, astro-ph/0005429 22 May 2000.

25. J. J.M. in't Zand, J. Heise, J. M. Muller, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **331**, L25 (1998).
26. D. T. Wickramasinghe, J. Bailey, S. M. Meggit, *et al.*, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **251**, 28 (1991).
27. I. R. Tuohy, F. K. Lamb, G. P. Garmire, and K. O. Mason, *X-ray Astronomy Advance in Space Exploration* (eds W. A. Baity and L. E. Peterson) (Pergamon Press: COSPAR, 1979), p. 197.
28. J. Paterson, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **106**, 209 (1994).
29. A. W. Shafer, P. Szkody, and J. R. Thorstensen, *Astrophys. J.* **308**, 765 (1986).
30. R. C. Duncan and C. Thompson, *Astrophys. J.* **392**, L9 (1992).
31. R. C. Duncan and C. Thompson, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **275**, 255 (1995).

## THE LOWER TEMPERATURE LIMIT OF ACCRETORS

**M. K. Abubekеров and V. M. Lipunov**

There should be a universal correlation between the main observational parameters of magnetized accreting stars (neutron stars, white dwarfs, and possibly T Tauri stars): their luminosities, periods, and temperatures. To first approximation, such a dependence is obeyed reasonable well for X-ray pulsars, intermediate polars, and T Tauri stars. In contrast, the parameters of anomalous pulsars (so-called "magnetars") and soft gamma-ray repeaters differ sharply from this dependence, and even occupy a "forbidden" region in the parameter space. This presents a serious argument against the interpretation that these are accreting neutron stars.