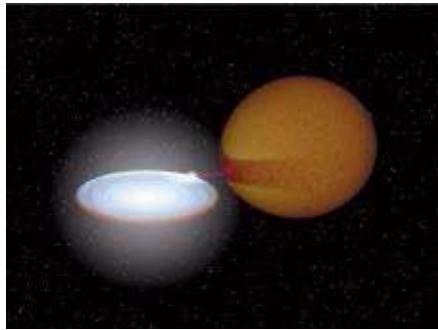


Лекция 7.

Компактные звёзды в двойных системах

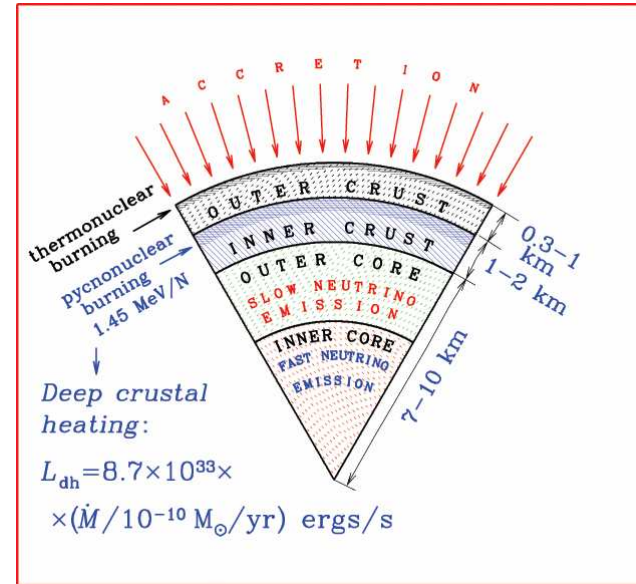
1. Основные типы двойных систем с компактными звёздами
2. Мягкие рентгеновские транзиенты: глубокий прогрев коры
3. Рентгеновские пульсары
4. Рентгеновские барстеры
5. Определение массы компактной звезды по её движению в двойной системе

Мягкие рентгеновские транзиенты: глубокий прогрев коры



Haensel & Zdunik, *Astron. Astrophys.* **227**, 431 (1990)

В целом: 1,45 МэВ/нуклон



1.980×10^{30}	9.075×10^{11}	$^{52}\text{S} \rightarrow ^{46}\text{Si} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.07	0.13	0.09
2.253×10^{30}	1.131×10^{12}	$^{46}\text{Si} \rightarrow ^{40}\text{Mg} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.18	0.14	0.10
2.637×10^{30}	1.455×10^{12}	$^{40}\text{Mg} \rightarrow ^{34}\text{Ne} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.39	0.16	0.12
3.204×10^{30}	1.951×10^{12}	$^{34}\text{Ne} + ^{34}\text{Ne} \rightarrow ^{68}\text{Ca}$ $^{68}\text{Ca} \rightarrow ^{62}\text{Ar} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.39	0.09	0.40
3.216×10^{30}	2.134×10^{12}	$^{62}\text{Ar} \rightarrow ^{56}\text{S} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.45	0.09	0.05
3.825×10^{30}	2.634×10^{12}	$^{56}\text{S} \rightarrow ^{50}\text{Si} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.50	0.09	0.06
4.699×10^{30}	3.338×10^{12}	$^{50}\text{Si} \rightarrow ^{44}\text{Mg} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.55	0.09	0.07
6.043×10^{30}	4.379×10^{12}	$^{44}\text{Mg} \rightarrow ^{36}\text{Ne} + 8n - 2e^- + 2\nu_e$ $^{36}\text{Ne} + ^{36}\text{Ne} \rightarrow ^{72}\text{Ca}$ $^{72}\text{Ca} \rightarrow ^{66}\text{Ar} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.61	0.14	0.28
7.233×10^{30}	5.839×10^{12}	$^{66}\text{Ar} \rightarrow ^{60}\text{S} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.70	0.04	0.02
9.238×10^{30}	7.041×10^{12}	$^{60}\text{S} \rightarrow ^{54}\text{Si} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.73	0.04	0.02
1.228×10^{31}	8.980×10^{12}	$^{54}\text{Si} \rightarrow ^{48}\text{Mg} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.76	0.04	0.03
1.602×10^{31}	1.127×10^{13}	$^{48}\text{Mg} + ^{48}\text{Mg} \rightarrow ^{96}\text{Cr}$	0.79	0.004	0.11
1.613×10^{31}	1.137×10^{13}	$^{96}\text{Cr} \rightarrow ^{88}\text{Ti} + 8n - 2e^- + 2\nu_e$	0.80	0.02	0.01

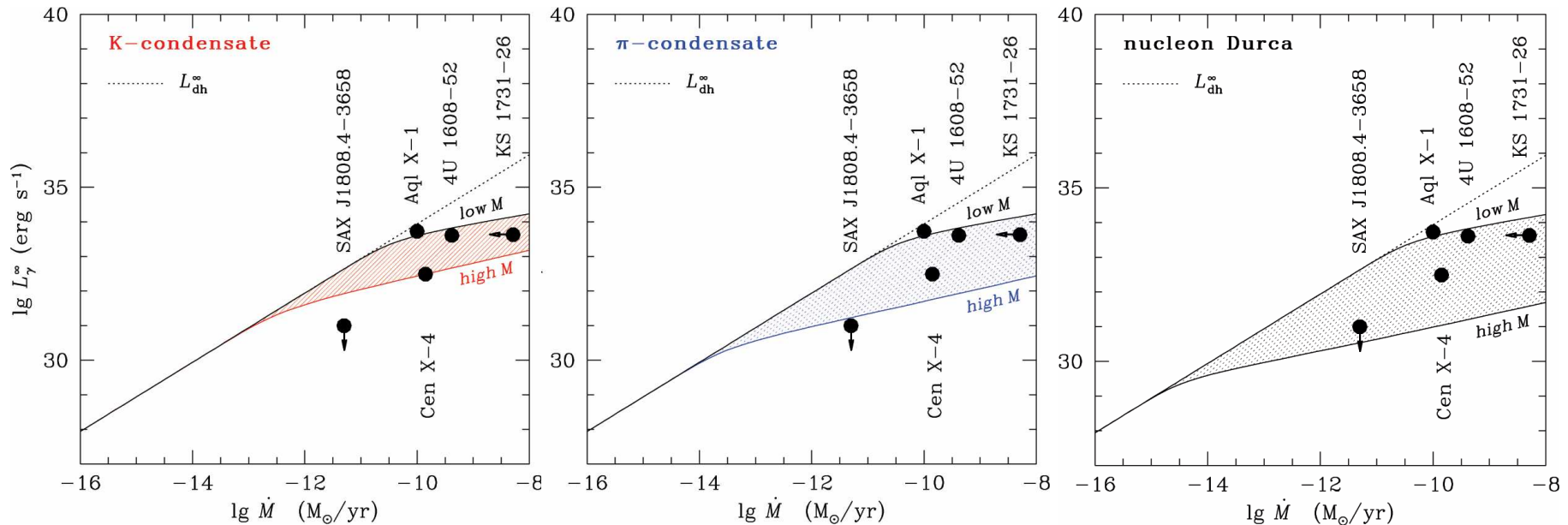
Мягкие рентгеновские транзиенты: кривые подогрева

Yakovlev, Levenfish, Haensel, *Astron. Astrophys.* **407**, 265 (2003)

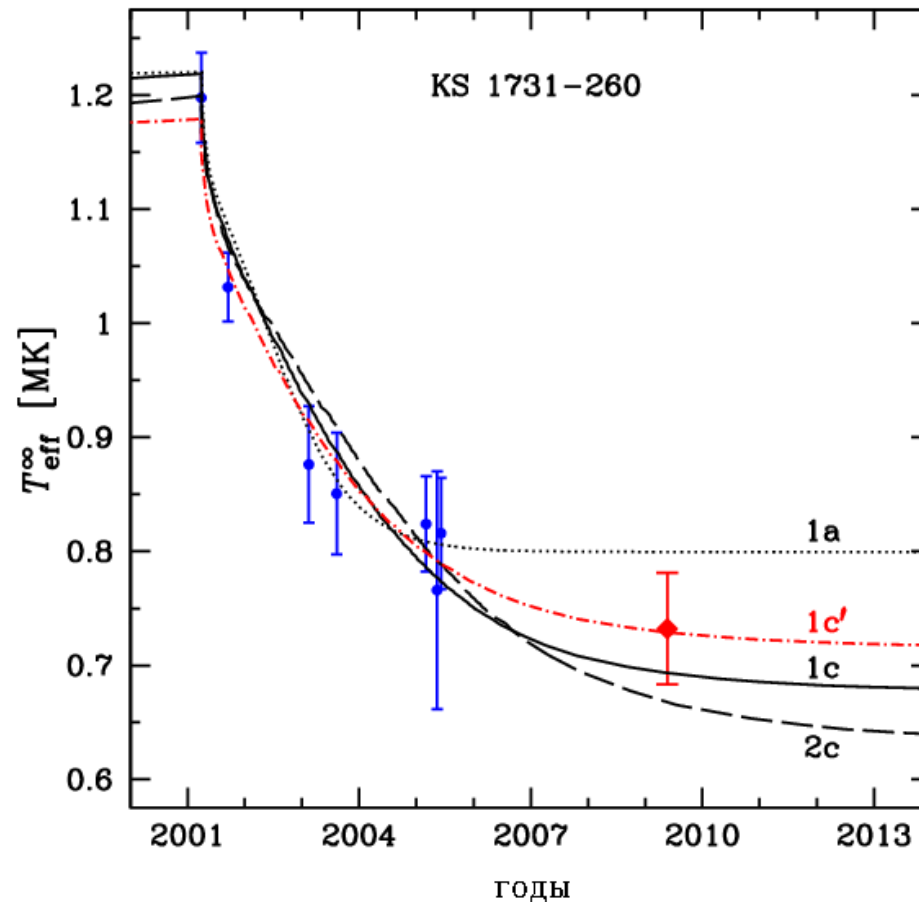
Table 4. Parameters of NSs in SXRTs

Source	\dot{M} , $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$	L_{γ}^{∞} , erg s^{-1}	T_s^{∞} , eV	R^{∞} , km	Reference
Aql X-1	1.0×10^{-10}	5.3×10^{33}	113	15.9	Rutledge et al. (2002b) : Table 6, fit 10
Cen X-4	1.4×10^{-10}	3.1×10^{32}	76 ^{*)}	12.9	Rutledge et al. (2001) : Table 4
4U 1608-522	4.2×10^{-10}	4.1×10^{33}	170 ^{*)}	9.4	Rutledge et al. (1999) : Table 2
KS 1731-260	5.1×10^{-9}	4.3×10^{33}	110	15	Wijnands et al. (2002) : Table 1, fit 2
SAX J1808.4-3658	5.0×10^{-12}	$\lesssim 1.0 \times 10^{31}$	—	—	Campana et al. (2002) : Sect. 2.2

^{*)} nonredshifted



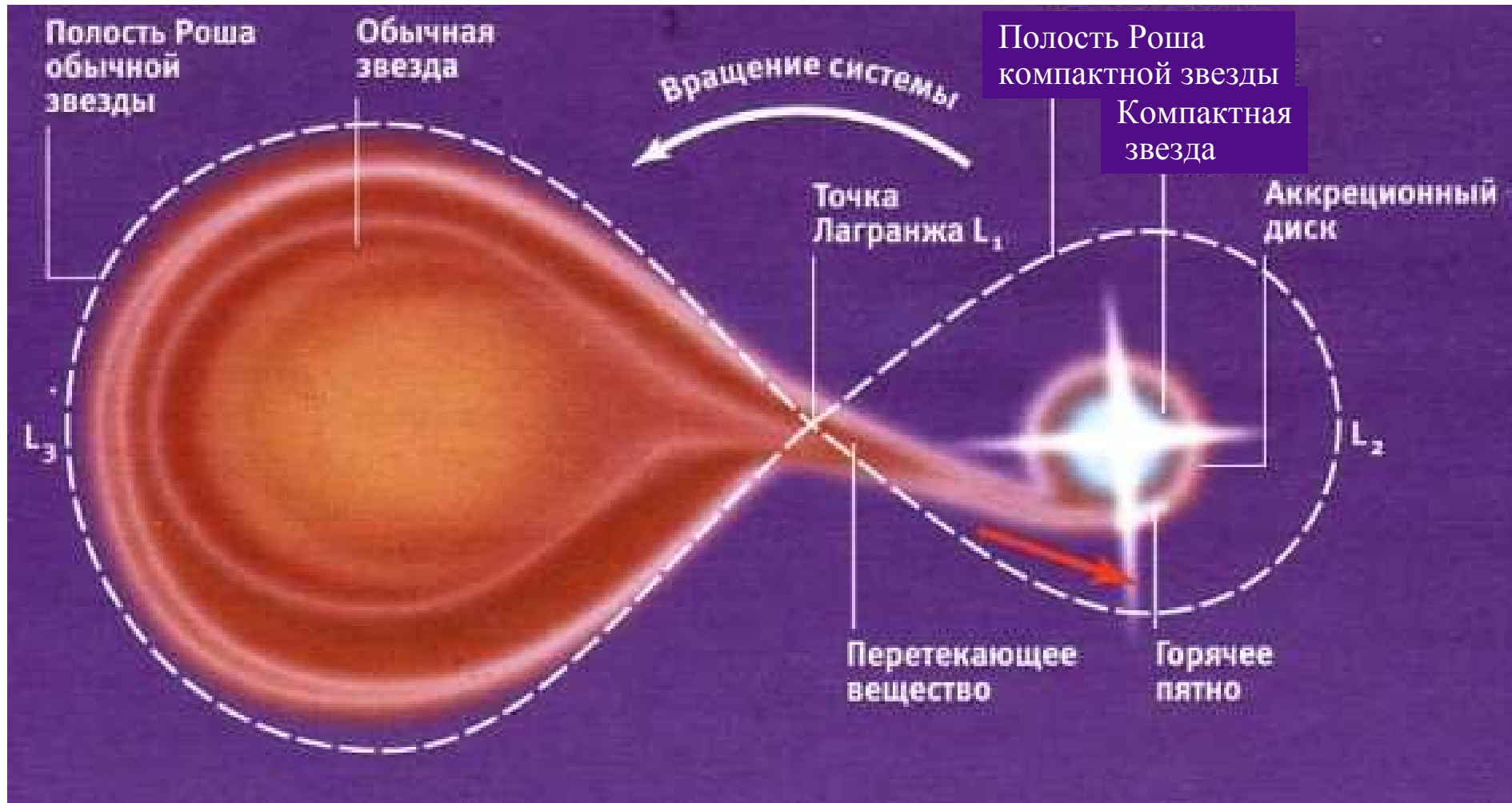
Мягкие рентгеновские транзиенты: остывание коры



Теоретические кривые остывания коры для разных моделей нейтронных звёзд [Shternin *et al.* *Mon. Not. R. astron. Soc.* **382**, L43 (2007)] в сравнении с наблюдениями мягкого рентгеновского транзиента KS 1731–260 [Cackett *et al.* *Astrophys. J.* 722, L137 (2010)].

Модели: 1a – $M = 1,6 M_{\text{Sun}}$, $T_0 = 0,8 \text{ MK}$, $E_{44} = 2,6$; 1c – $M = 1,6 M_{\text{Sun}}$, $T_0 = 0,67 \text{ MK}$, $E_{44} = 2,4$; 2c – $M = 1,4 M_{\text{Sun}}$, $T_0 = 0,63 \text{ MK}$, $E_{44} = 2,4$ (модель 1a предполагает наличие аккрецированной оболочки и умеренной сверхтекучести нейтронов в коре; модель 1c' – дополнительная к приведённым в статье Shternin *et al.* 2007).

Аккреция из полости Роша



Аккреция из звёздного ветра

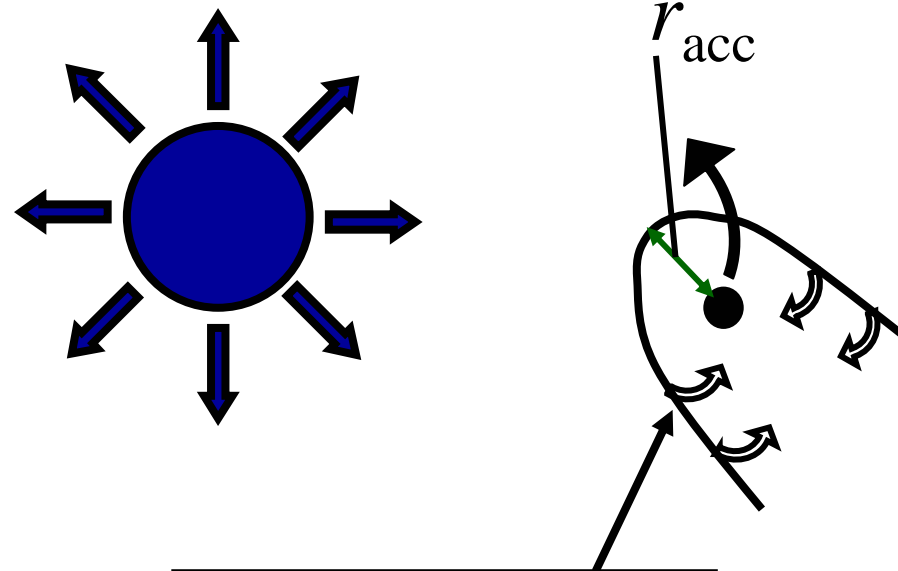
Вещество будет аккрецировать на звезду: если его скорость меньше второй космической на наименьшем расстоянии.

V_w = скорость ветра

V_x = скорость компактного объекта

R_c = скорость захвата

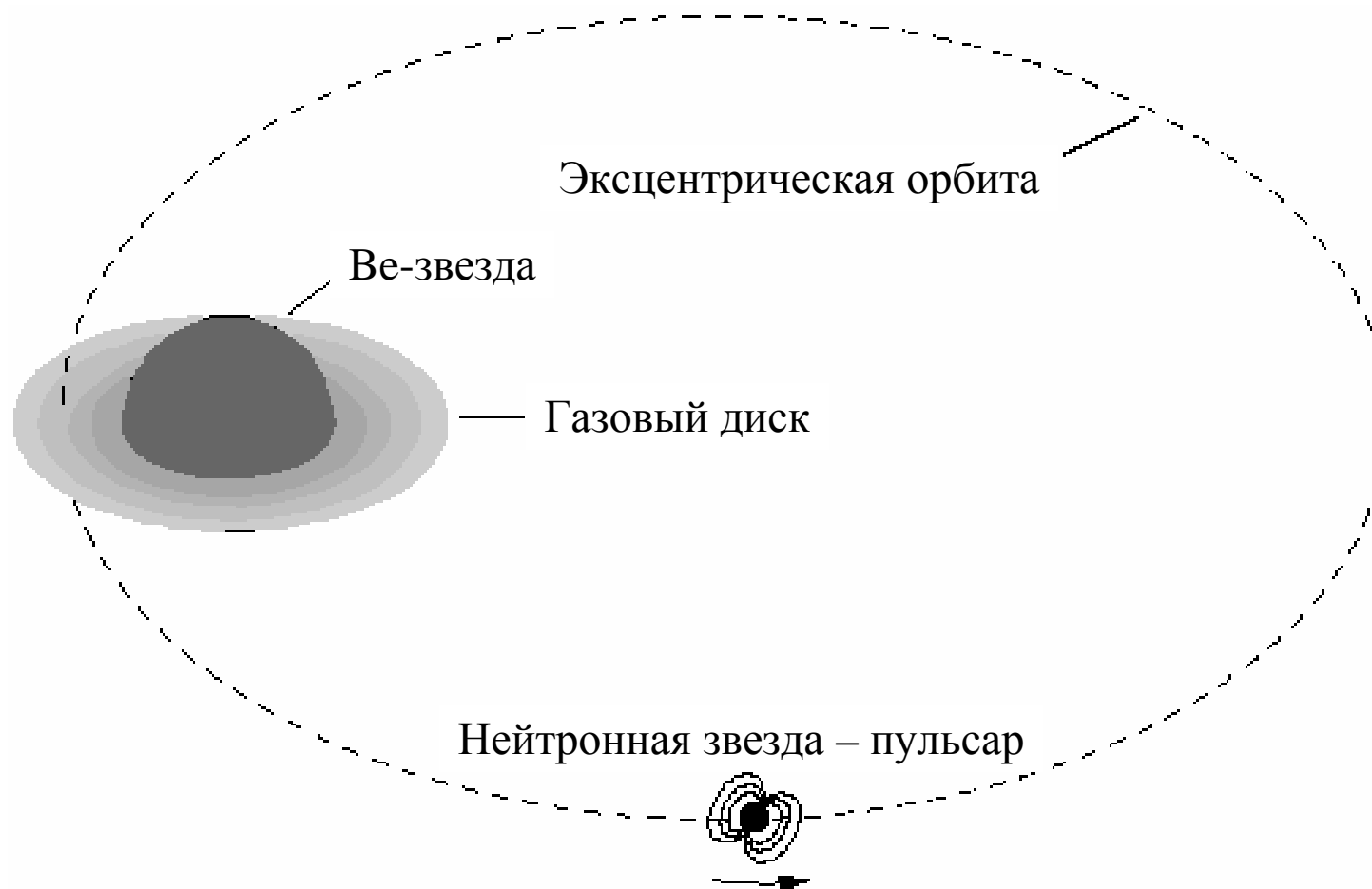
$$R_c = \frac{2GM_x}{V_x^2 + V_w^2}$$



вещество накапливается
в хвосте головной
ударной волны

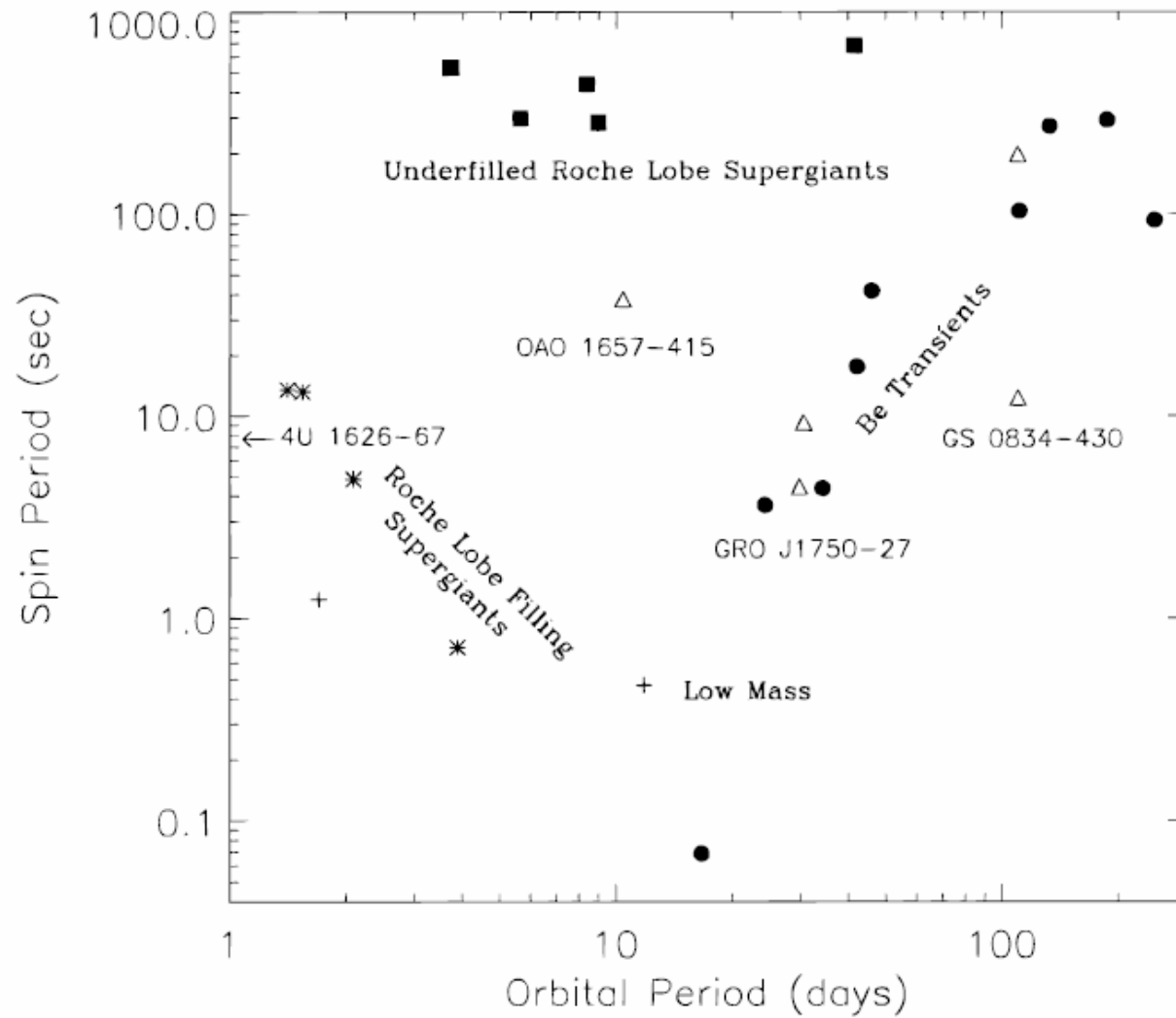
Аккрецирующие пульсары

Обзор: Bildsten et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **113**, 367 (1997)

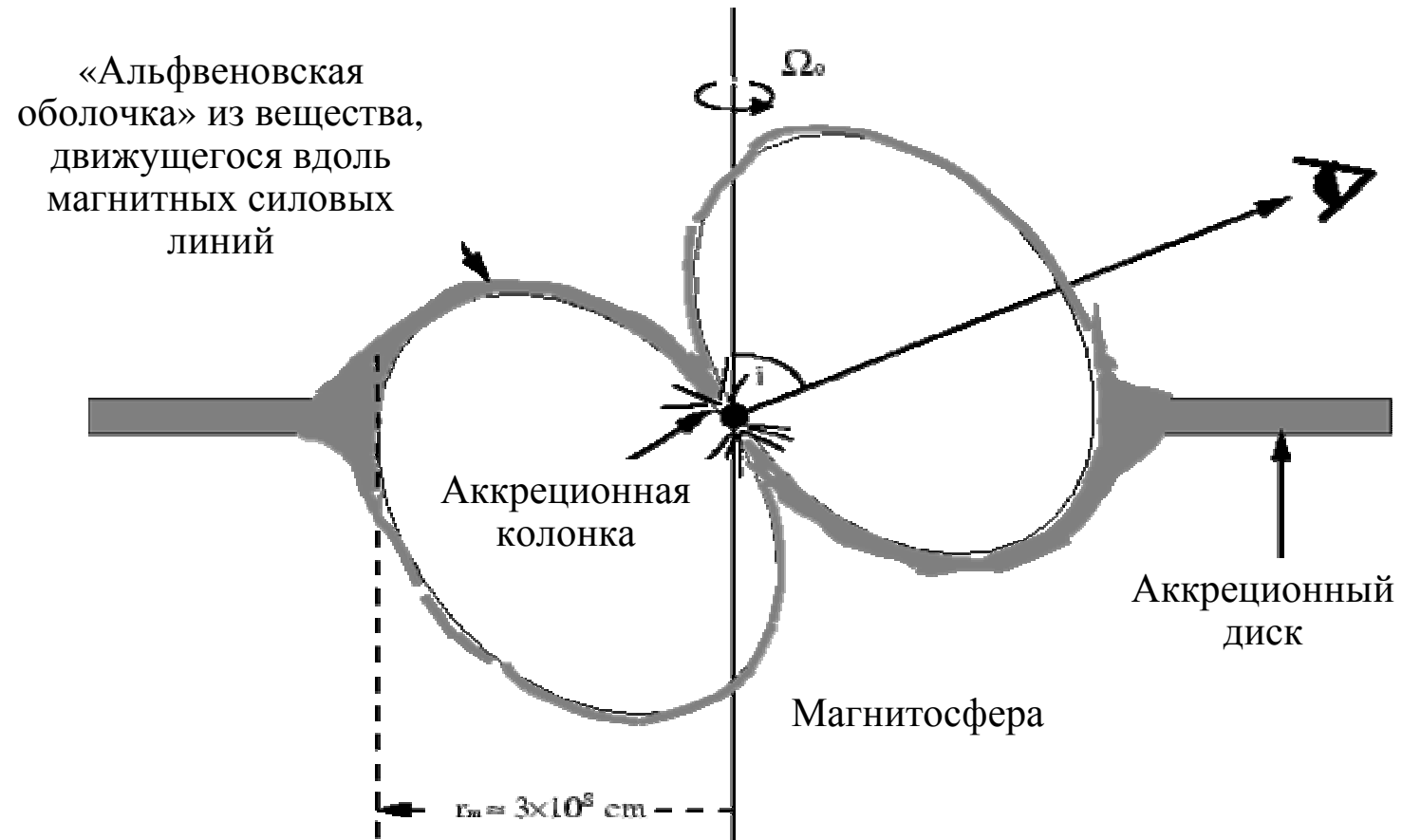


Аккрецирующие пульсары

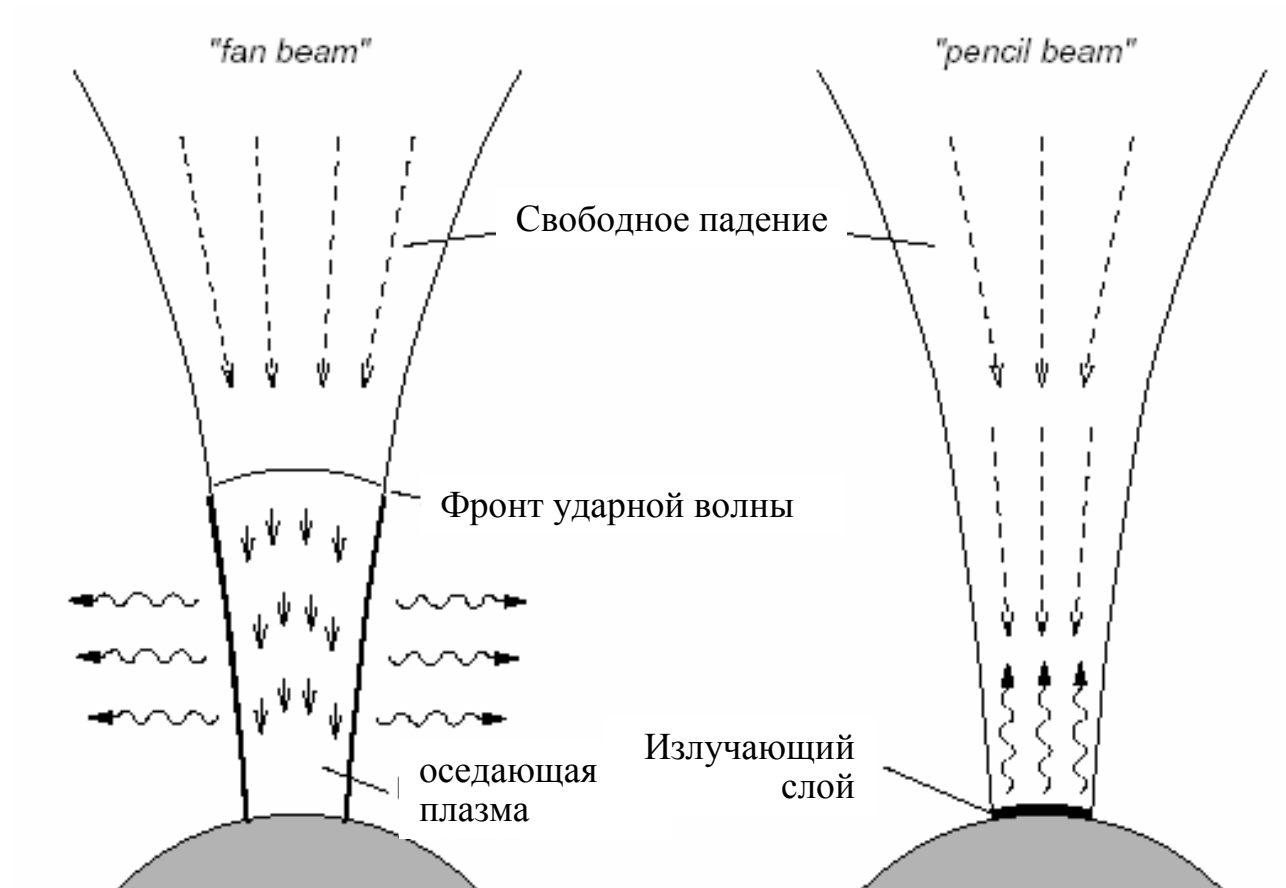
Обзор: Bildsten et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **113**, 367 (1997)



Аккрецирующие пульсары



Излучение аккреционной колонки



$$L_{\text{acc}} = \frac{GM_{\text{X}} \dot{M}}{R_{\text{X}}} \simeq 1.2 \times 10^{36} \text{ ergs s}^{-1} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-10} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{M_{\text{X}}}{1.4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{10 \text{ km}}{R_{\text{X}}} \right)$$

Аккрецирующие пульсары

Баланс магнитного давления и давления падающего вещества $p_{mag} = \frac{B^2}{8\pi} = p_{ram} = \rho v^2$

Радиус магнитосферы $r_m \sim 4 \times 10^8 \text{ cm} \left(\frac{\mu}{10^{30} \text{ G cm}^3} \right)^{4/7}$

$$\mu \sim BR^3$$

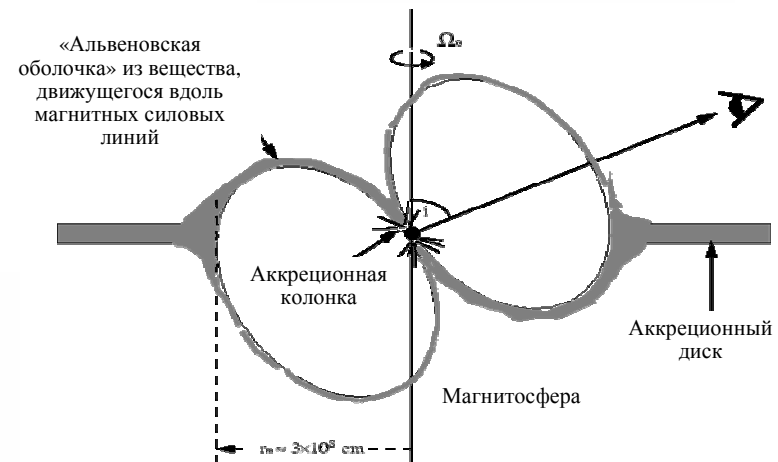
$N \approx \dot{M} \sqrt{GM_X r_m}$ – крутящий момент сил

Радиус коротации $r_{co} = \left(\frac{GM_X P_{spin}^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \simeq 1.7 \times 10^8 \text{ cm} \left(\frac{P_{spin}}{1 \text{ s}} \right)^{2/3} \left(\frac{M_X}{1.4 M_\odot} \right)^{1/3}$

$$r_m < r_{co} \Rightarrow N_0 \equiv \dot{M} \sqrt{GM_X r_{co}}$$

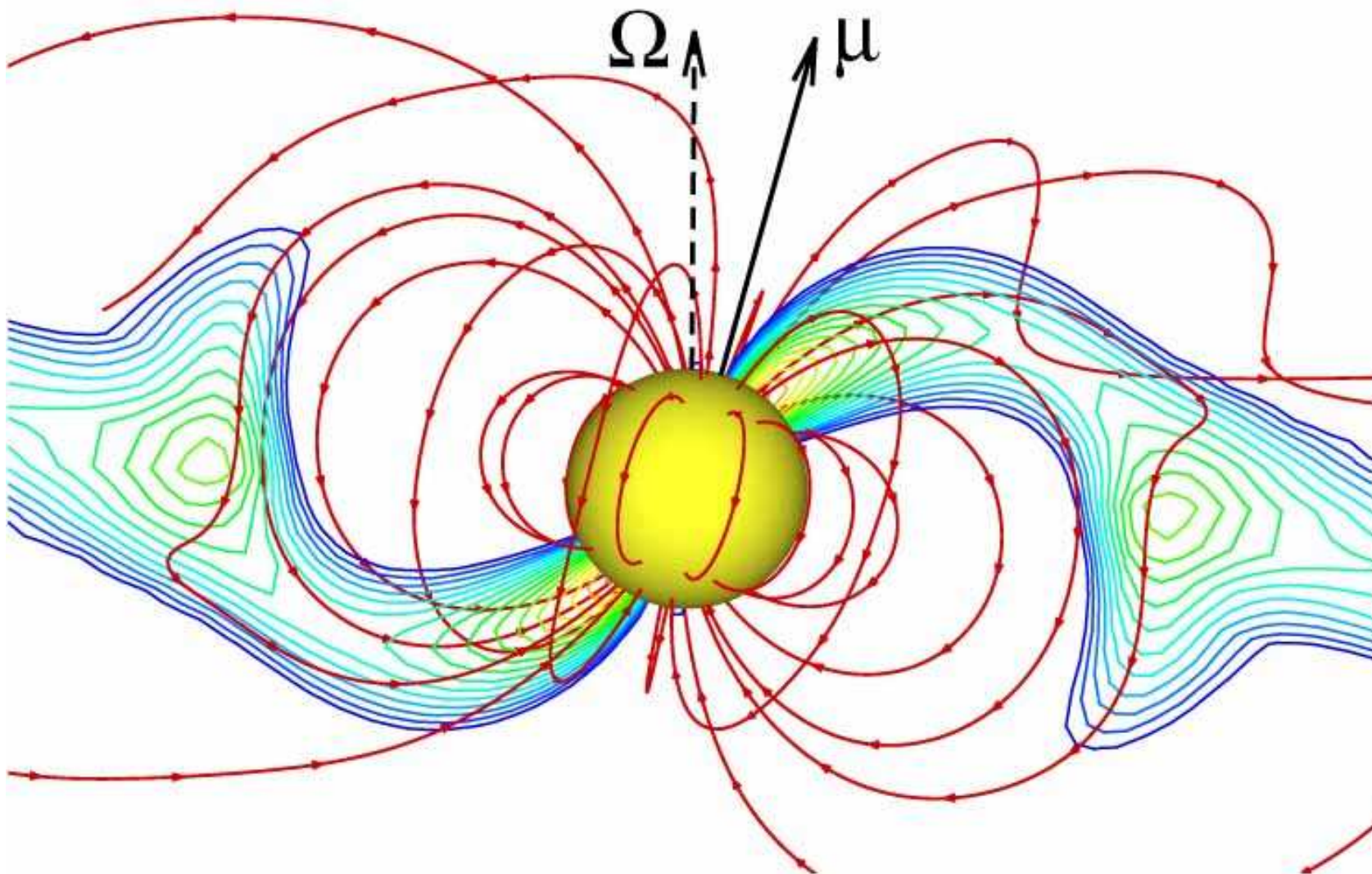
Более сложная (более полная) модель:

$$N = \left(\dot{M} \sqrt{GM r_m} + \frac{\mu^2}{9r_m^3} \right) n(\omega) - \frac{\dot{E}_{dipole}}{2\pi v_s}$$



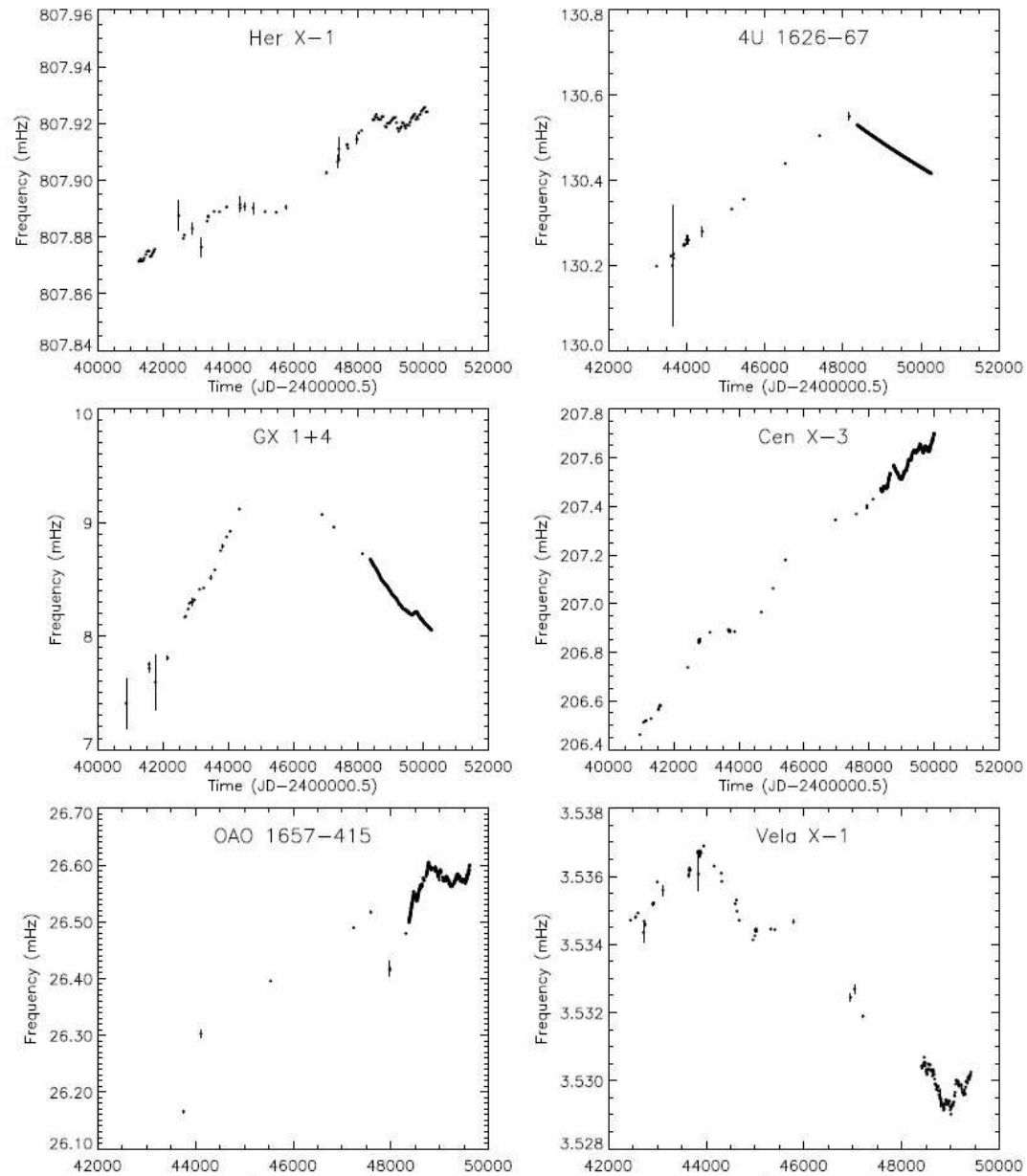
Аккрецирующие пульсары

Пример численного моделирования
[Romanova et al., *Astrophys. J.* **610**, 920 (2004)]



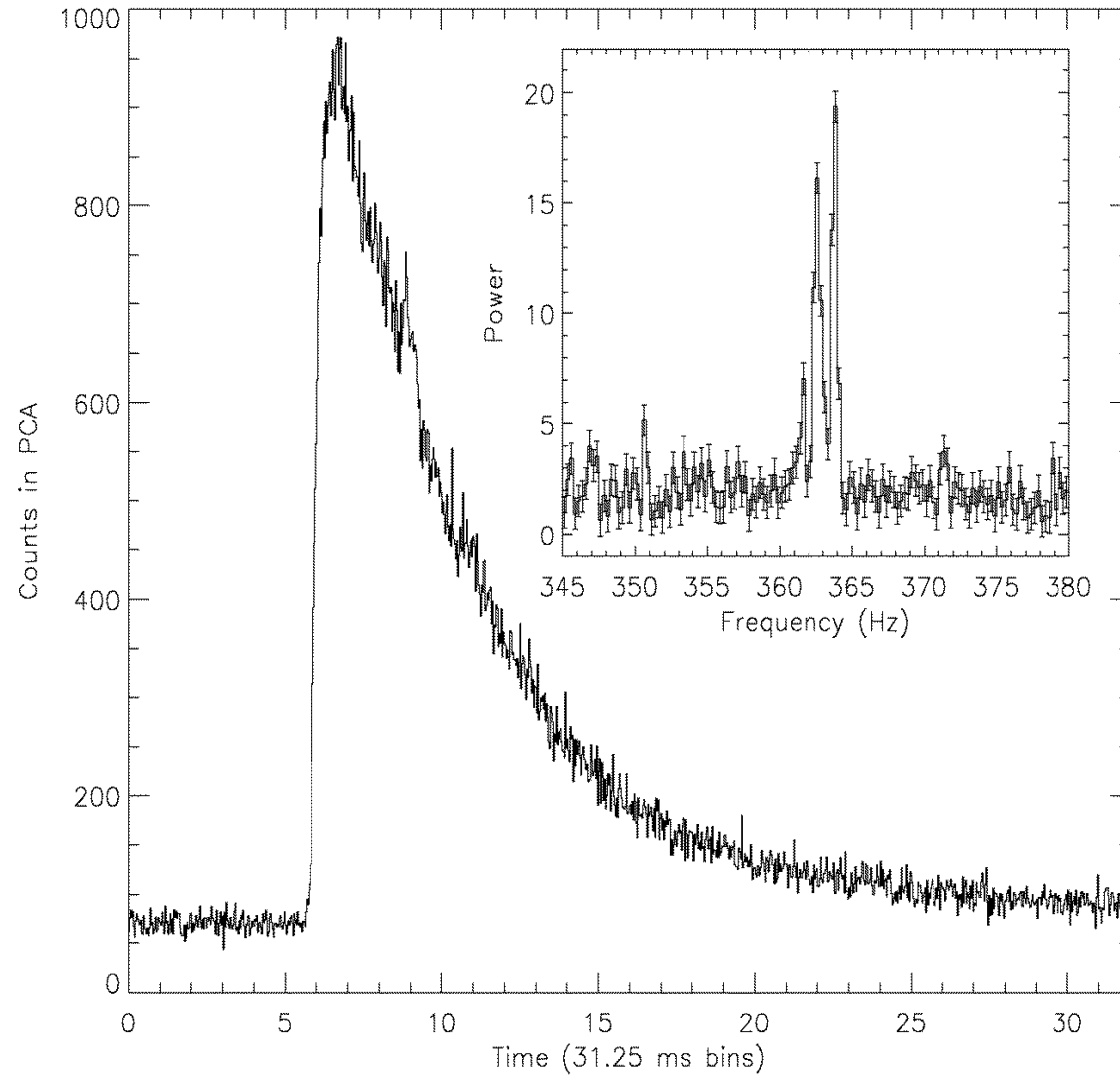
Аккрецирующие пульсары

BILDSTEN ET AL.



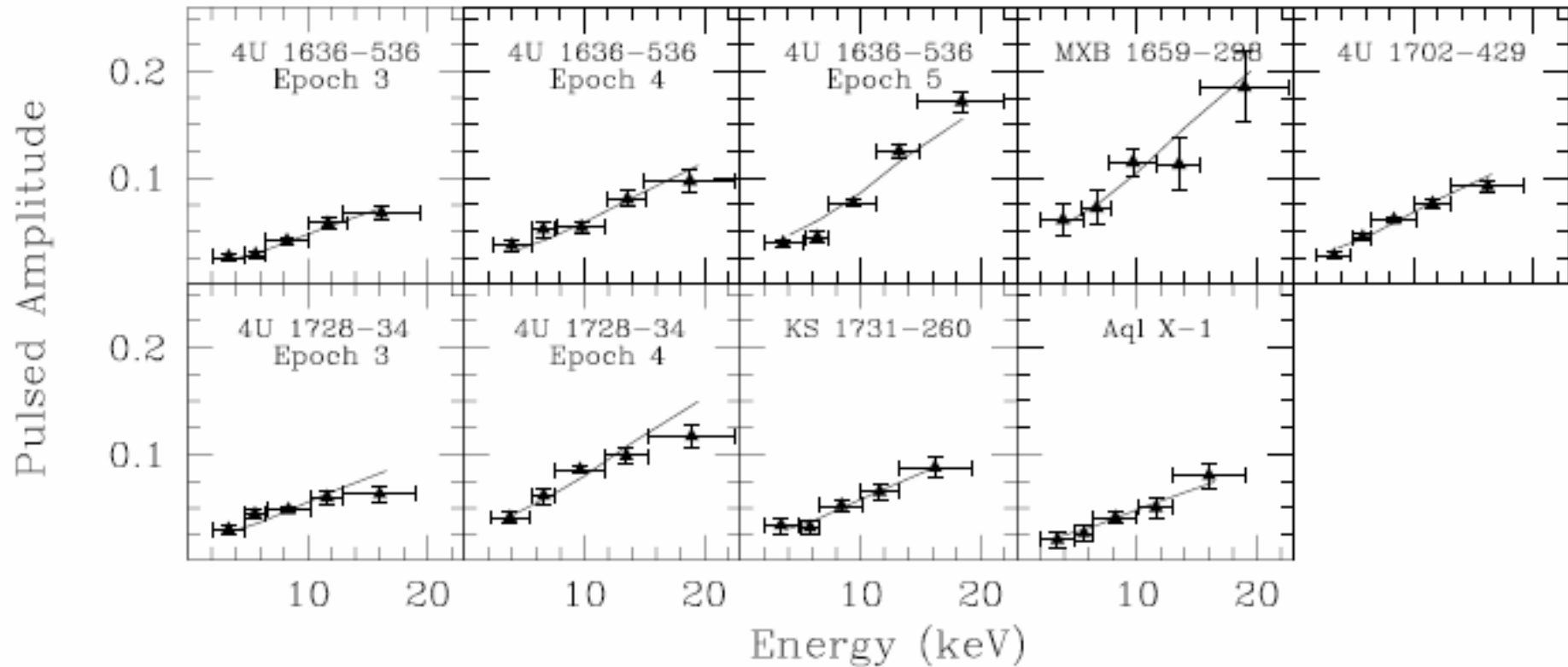
Рентгеновские миллисекундные пульсары

Пример: 4U 1728-34



Рентгеновские миллисекундные пульсары

Зависимость амплитуды от энергии



Piro & Bildsten (2006)

$$A(E) \propto \frac{1}{B_E(T)} \frac{dB_E(T)}{dT} \propto \frac{xe^x}{e^x - 1} = \begin{cases} \text{const}, & x \ll 1 \\ x, & x \gg 1 \end{cases}$$

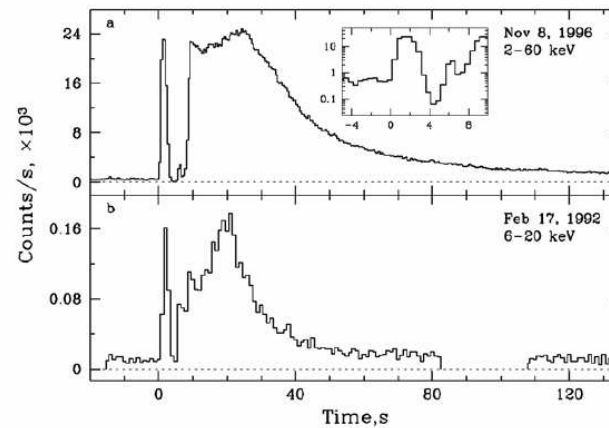
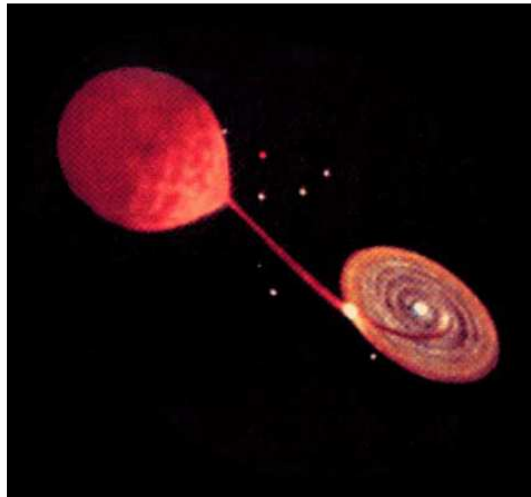
$$x = \frac{E}{kT}$$

Рентгеновские барстеры

Рентгеновские вспышки нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах (LMXBs) благодаря взрывному термоядерному горению легких элементов (H, He, C) в нападавшем на нейтронную звезду веществе

Продолжительность – от 10 (большинство) до 1000 секунд

Могут достигать Эддингтоновской светимости
(вспышки с расширением фотосферы)

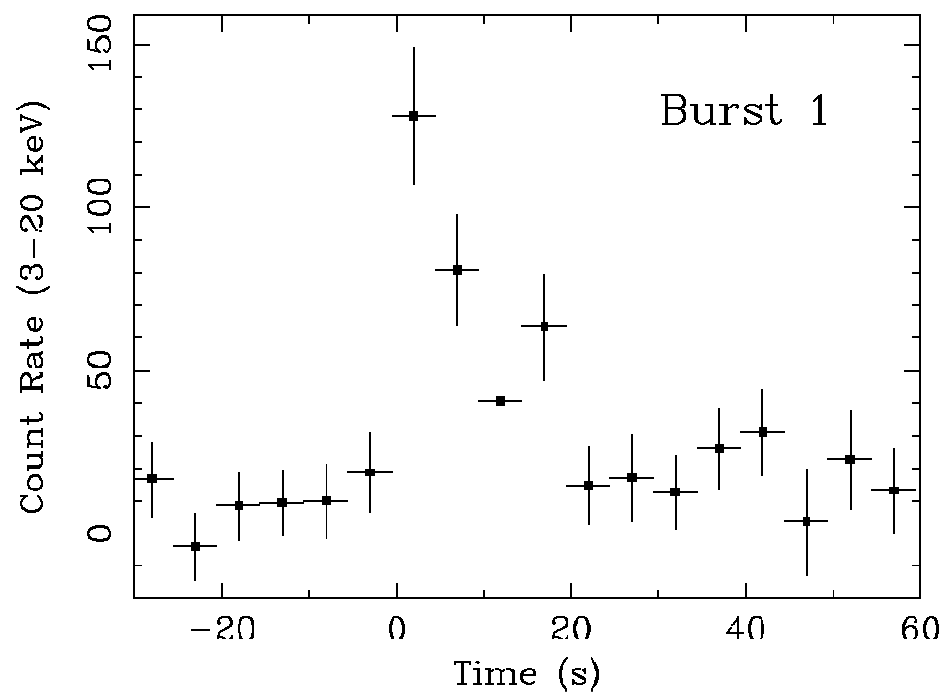


4U 1724-307 в Terzan 2

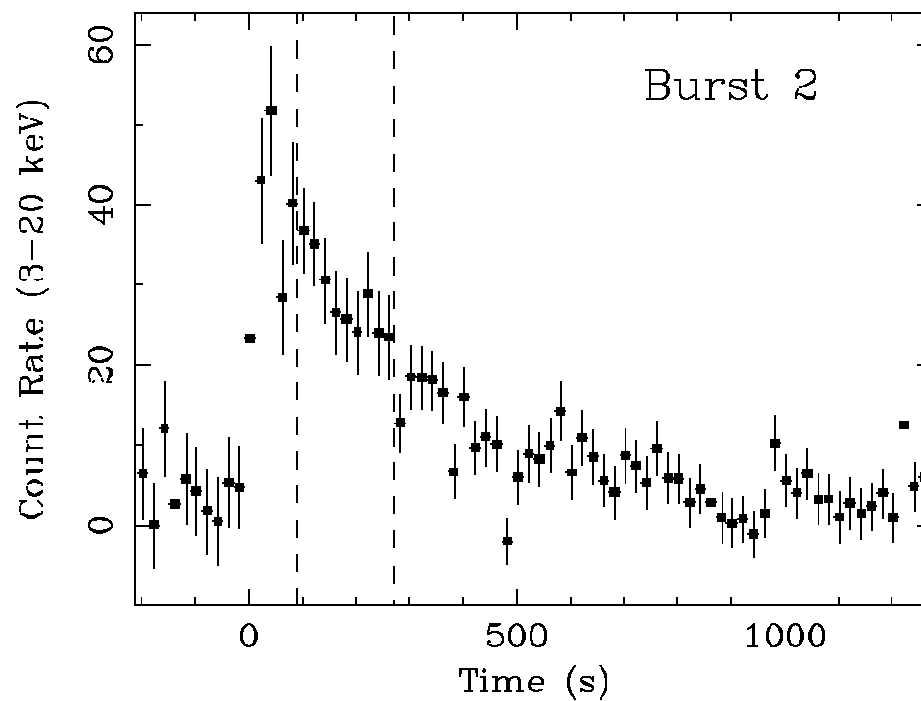
Рентгеновские барстеры

Примеры вспышек (IGR J17254-3257)

Короткая вспышка (17.02.2004)

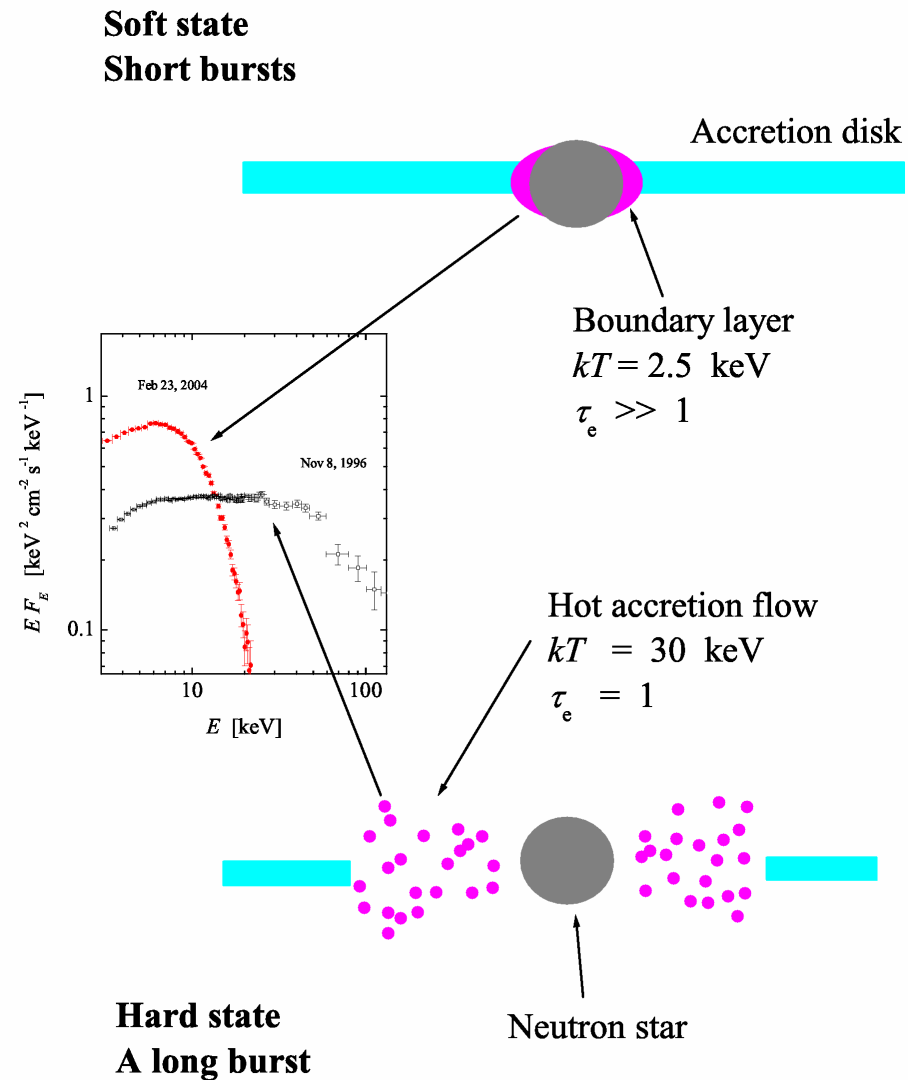


Длинная вспышка (1.10.2006)



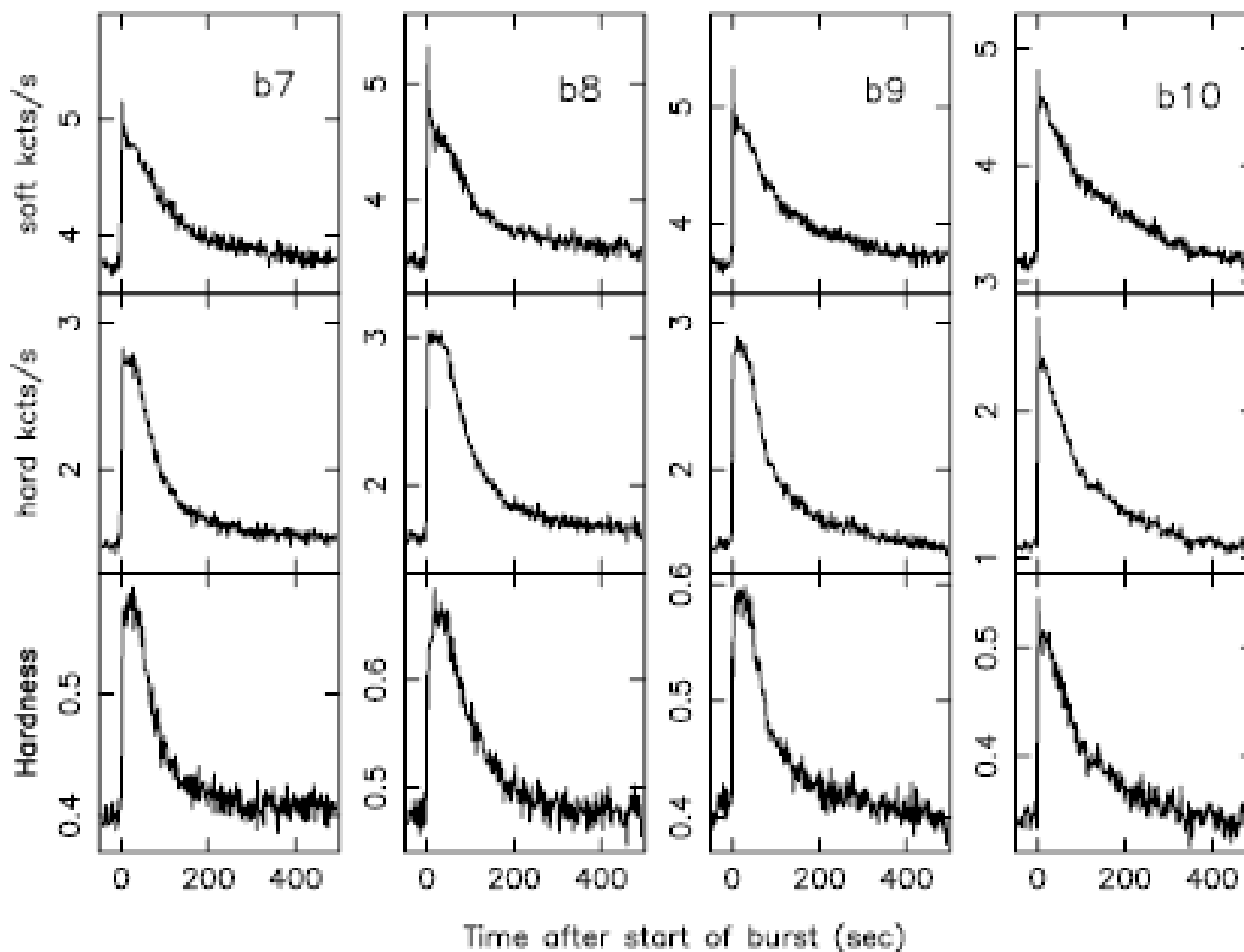
Рентгеновские барстеры

Обзор: Suleimanov et al., *Eur. Phys. J. A* **52**, 20 (2016)



Рентгеновские барстеры

Пример: эволюция спектральной жёсткости при длинной вспышке барстера GX 17+2
[Kuulkers et al., *Astron. Astrophys.* **382**, 503 (2002)]



Рентгеновские барстеры

Рентгеновские вспышки с большой светимостью (выше эддингтоновского предела) вызывают расширение фотосферы $R=R(t)$ с последующим оседанием к обычному радиусу $R=R_0$ и к переходу на стадию спокойного остывания.

В простейших моделях предполагается, что в момент окончания оседания ($t=t_0$, “touchdown point”) поток излучения поверхности всё ещё эддингтоновский:

$$L_{\text{Edd}} = 4\pi c(1 + z_g) \frac{GMm_p}{\sigma_T} \approx 1,26 \times 10^{38} (1 + z_g) \frac{M}{M_\odot} \text{ эрг с}^{-1}$$

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2$$

(+ поправки на отдачу для $T_{\text{eff}} > 10^7$ К)

На дальнейшей стадии спокойного остывания ($t > t_0$) отношение

$$L / \sigma_{\text{SB}} T_{\text{eff}}^4 = (R/D)^2$$

остаётся примерно постоянным. При этом

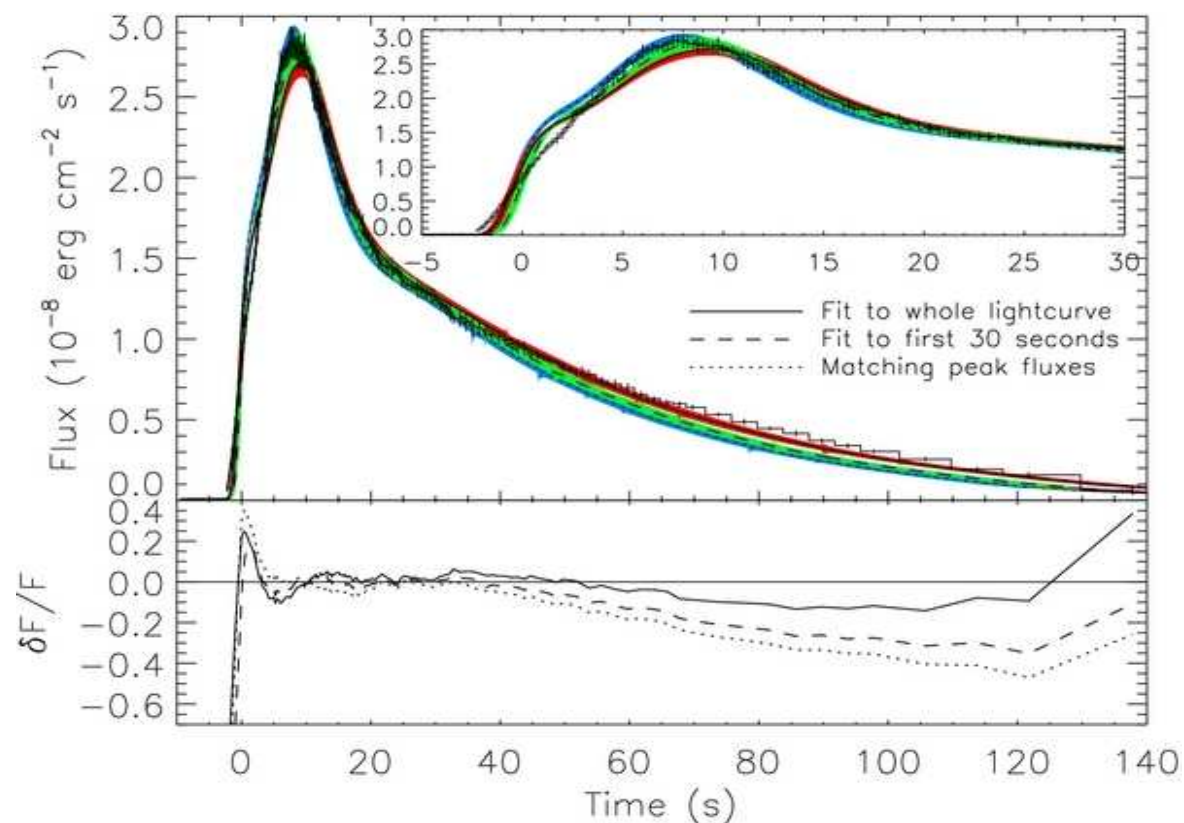
$$T_{\text{eff}} = f_c T_{\text{bb}},$$

где f_c – «цветовая поправка» (color correction factor, модельно зависим). Решая систему уравнений, можно одновременно определить M и R (пока что с большими неопределённостями).

Более надёжный метод – аппроксимация наблюдаемых зависимостей $f_c(L)$, а также $L(t)$ для длинных вспышек при помощи теоретических моделей фотосфер [Сулейманов, Ревнивцев и др., *Astrophys. J.* **742**, 122 (2011); Zamfir, Cumming, Galloway, *Astrophys. J.* **749**, 69 (2012)]

Рентгеновские барстеры

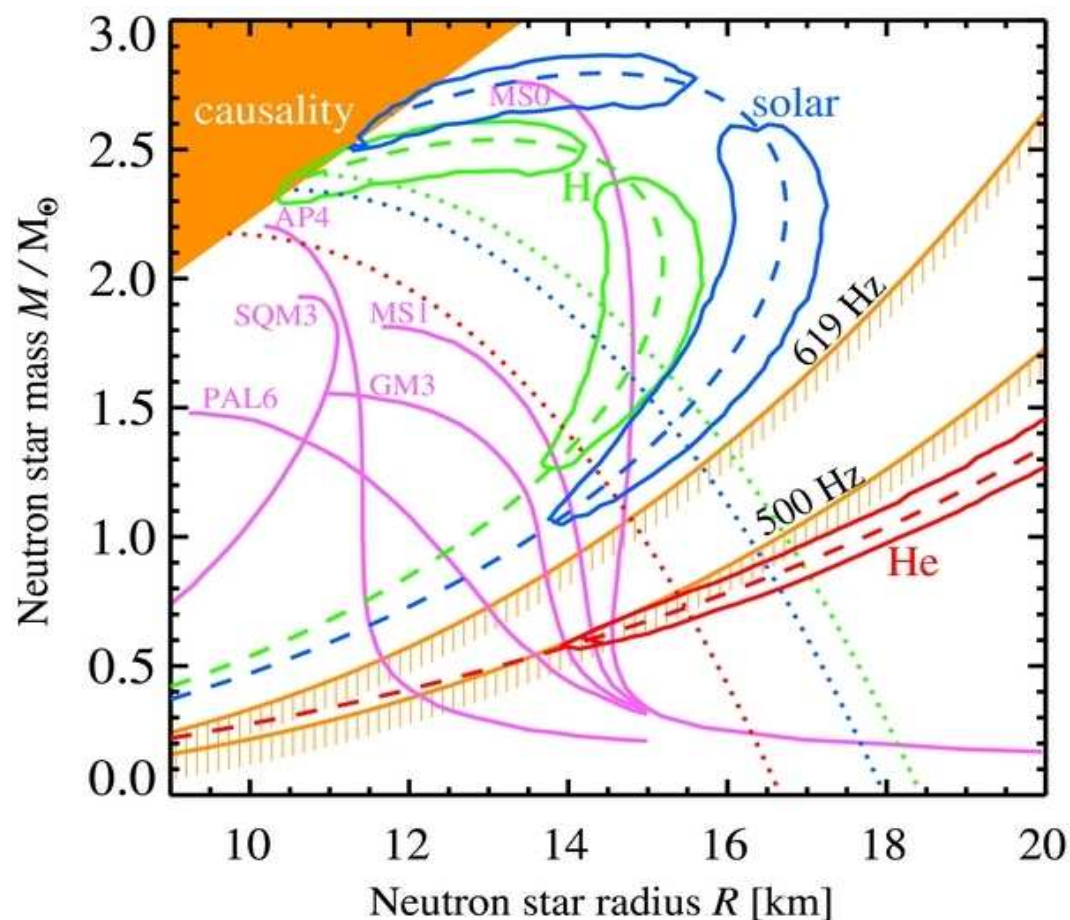
Более надёжный метод – аппроксимация наблюдаемых зависимостей $f_c(L)$, а также $L(t)$ для длинных вспышек при помощи теоретических моделей фотосфер [Сулейманов, Ревнивцев и др., *Astrophys. J.* **742**, 122 (2011); Zamfir, Cumming, Galloway, *Astrophys. J.* **749**, 69 (2012)]



Теоретические подгонки кривой блеска барстера GS 1826–24 [Zamfir et al., *Astrophys. J.* **749**, 69 (2012)].

Рентгеновские барстеры

Модельная зависимость результатов



Ограничения на массу и радиус нейтронной звезды в барстере 4U 1724–307 при разных предположениях о составе фотосферы [Suleimanov et al., *Astrophys. J.* **742**, 122 (2011)].

Кеплеровские орбиты

$$m_1 = m_s, m_2 = m_c, a_1, a_2, e$$

$$M_T = m_1 + m_2, a = a_1 + a_2,$$

$$a_1 = am_2/M_T, a_2 = am_1/M_T$$

Орбитальный период: $P_b = 2\pi/\Omega_b$

$$s = r_2 - r_1 \quad \mu \equiv \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$-\frac{GM_T \mu}{s^3} s = \mu \frac{d^2 s}{dt^2}$$

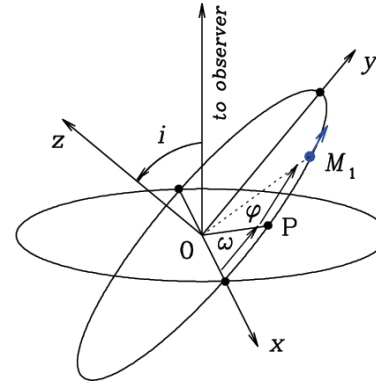
\Rightarrow III закон Кеплера: $P_b^2 = 4\pi^2 a^3 / (GM_T)$

$$\Rightarrow GP_b^2 \frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} = 4\pi^2 a_1^3$$

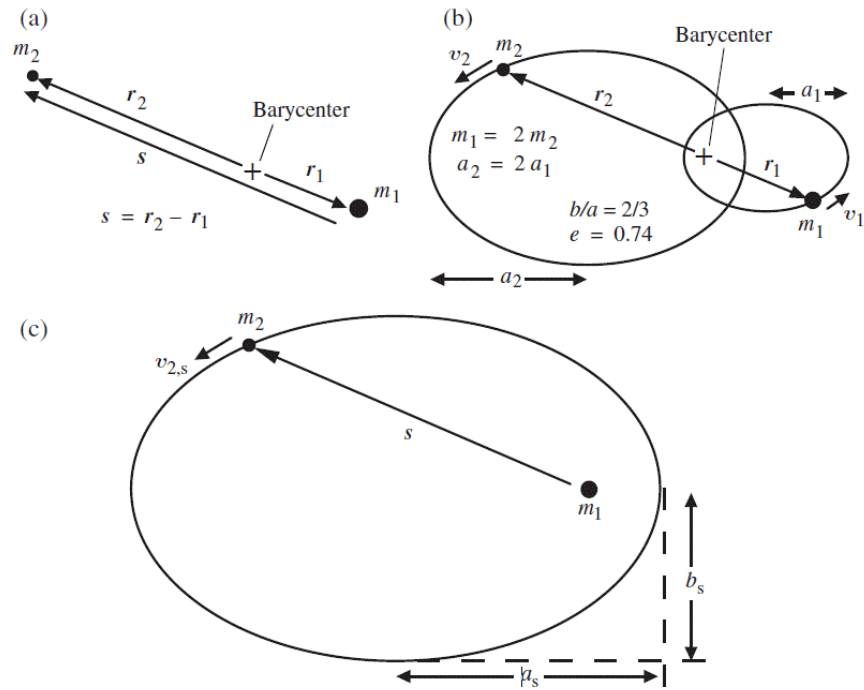
Из наблюдений определяются P_b и $(a_1 \sin i)$.

$$\Rightarrow \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{4\pi^2}{GP_b^2} (a_1 \sin i)^3$$

$$f_1 \equiv \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$$



Пример 1: наблюдение движения звезды:
параметры орбиты



Пример 2: движение точечных масс $m_1 = 2m_2$:

(a) – определение радиус-векторов, (b) – движение в системе центра масс, (c) – движение m_2 относительно m_1).