



Department of
theoretical
astrophysics

П.С. Штернин, Д.Г. Яковлев, Р. Haensel, А.Ю. Потехин

Остывание нейтронной звезды после
глубокого прогрева коры в транзиентном
рентгеновском источнике KS1731-260

MNRAS Letters, accepted

Санкт-Петербург, 23 октября 2007 г.

Квази-постоянные рентгеновские транзиенты

Мягкие рентгеновские транзиенты – маломассивные двойные системы с аккрецией на компактный объект

В спокойном состоянии – тепловое излучение $L_x < 10^{34}$ erg/s

В период аккреции (недели/месяцы) $L_x \approx 10^{36} \div 10^{39}$ erg/s

Тепловое излучение в спокойном состоянии – результат подогрева нейтронной звезды в период аккреции за счёт пикноядерных реакций в коре

Brown, Bildstein, Rutledge 1998.

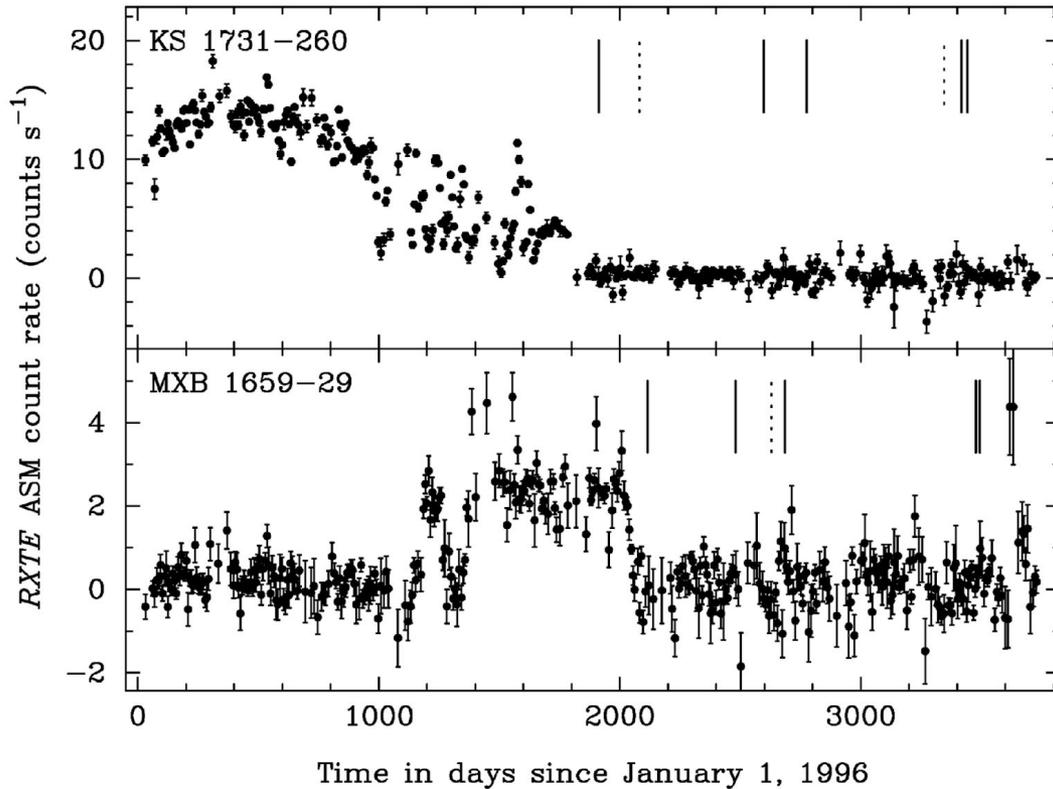
Квази-постоянные транзиенты – долгий период аккреции ~ годы

Кора звезды существенно нагревается – выходит из теплового равновесия с ядром

Тепловое излучение в спокойном состоянии **сразу** по окончании аккреции определяется остыванием коры – это позволяет тестировать её свойства и микрофизику

Рентгеновские транзиенты KS 1731-260 и MXB 1659-29

Cackett, et.al. 2006



KS 1731-260

октябрь 1988 – февраль 2001
>12.5 лет аккреции
средний поток (при аккреции)
 $f_{ob}(0.01 \div 20 \text{ keV}) \approx 5.6 \cdot 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

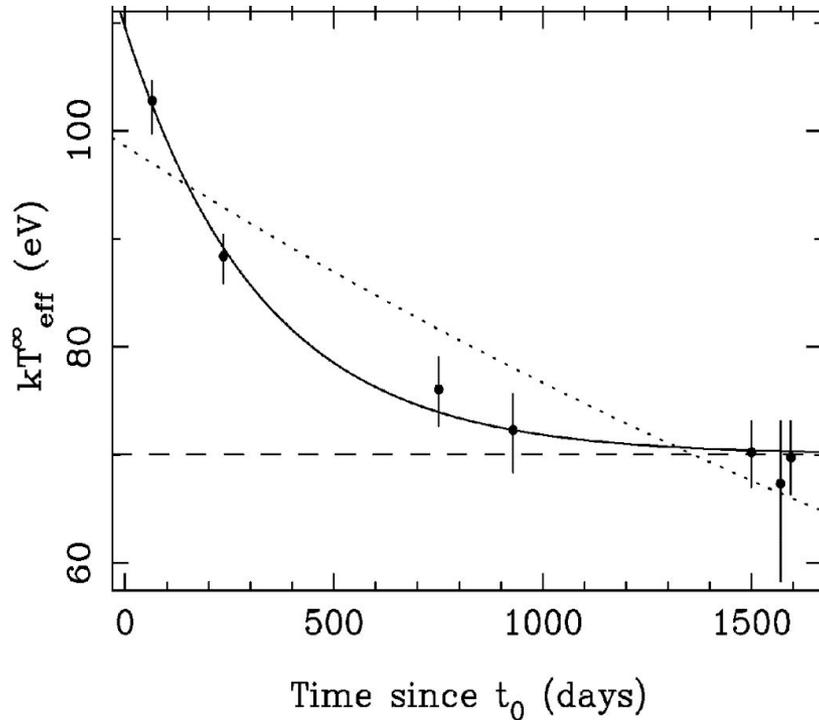
MXB 1659-29

октябрь 1976 – сентябрь 1978
апрель 1999 – сентябрь 2001
~2.5 лет аккреции
средний поток (при аккреции)
 $f_{ob}(0.01 \div 20 \text{ keV}) \approx 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Наблюдались в спокойном состоянии сразу после выключения аккреции
CHANDRA; XMM-Newton

Кривая остывания KS 1731-260

Cackett et.al. 2006



модель водородной атмосферы

$$R = 10 \text{ km}$$

$$M = 1.4 M_{\odot}$$

$$d = 7 \text{ кpc}$$

Экспоненциальная подгонка

$$a \exp(-(t - t_0) / b) + c$$

$$b = 325 \pm 101 \text{ d}$$

$$c = 70 \pm 1.6 \text{ eV}$$

Измерена релаксация коры вплоть до равновесия с ядром

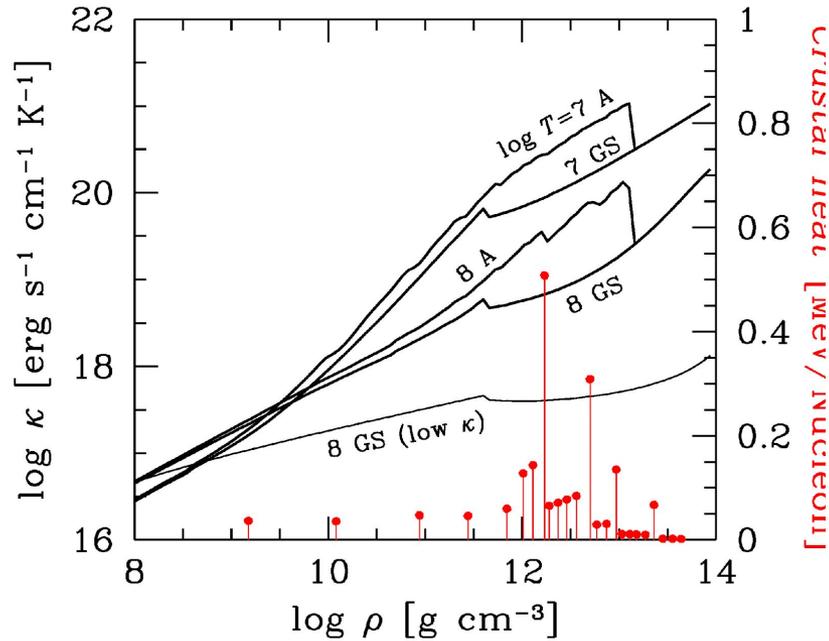
Rutledge et.al. 2002

=> высокая теплопроводность в коре,
усиленное нейтринное излучение в ядре

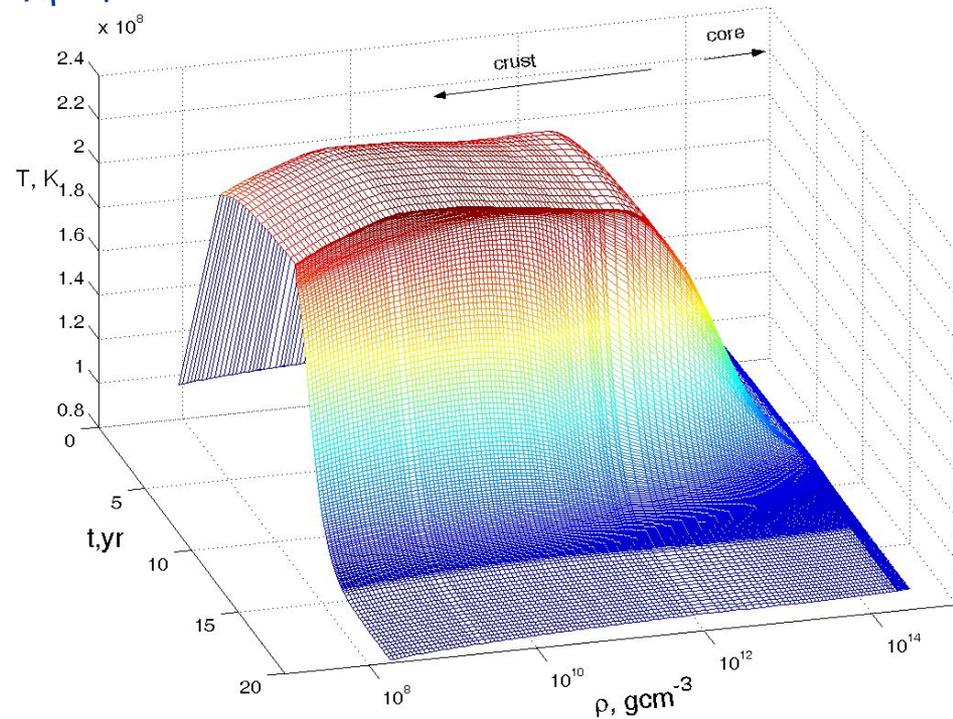
Модель глубокого прогрева коры

аккреция -> сжатие вещества -> пикноядерные реакции

Haensel & Zdunik 1990, 2007



Профиль температуры при глубоком прогреве



суммарно $Q_{nuc} = 1.9$ MeV/Nucleon

Начальный (быстрый) этап релаксации определяется внешней корой

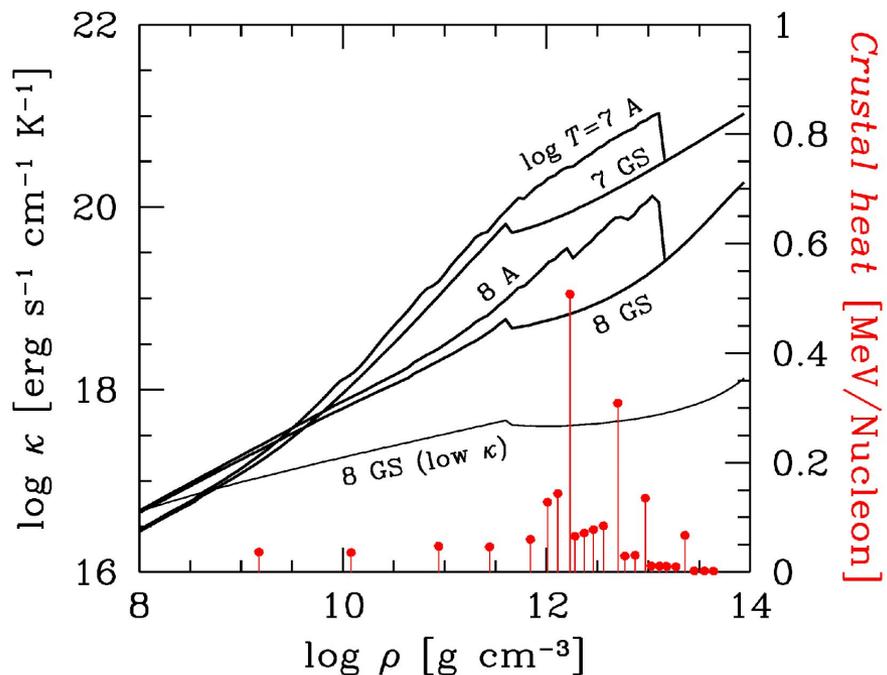
Большая часть энергии идёт в ядро. Однако его подогрев незначителен (хотя не 0)

Скорость релаксации. Теплопроводность.

$$\tau \propto \left[\int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{c_v}{\kappa} \right)^{1/2} dr \right]^2$$

временной масштаб тепловой диффузии

$\kappa \uparrow \Rightarrow \tau \downarrow$



GS – вещество в основном состоянии

A – аккрецированная кора (изменение состава вследствие пикноядерного горения)

low κ – “низкая” теплопроводность (Brown, 2000) в аморфной коре (Jones, 2004)

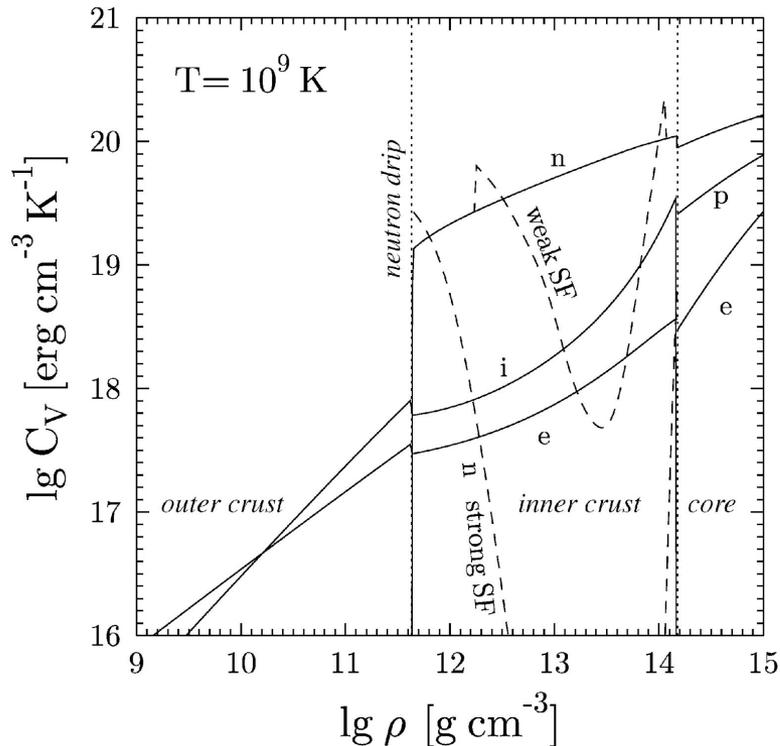
Скорость релаксации. Сверхтекучесть.

$$\tau \propto \left[\int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{C_V}{K} \right)^{1/2} dr \right]^2$$

временной масштаб тепловой диффузии

$$C_V \downarrow \Rightarrow \tau \downarrow$$

Нейтронная сверхтекучесть подавляет теплоёмкость



Нейтронная сверхтекучесть

Сильная – BCS модель

Умеренная - учёт многочастичных эффектов (Wambach et.al. 1993)

Сверхтекучесть ускоряет выход тепла из внутренней коры => увеличивает темп поздней релаксации коры

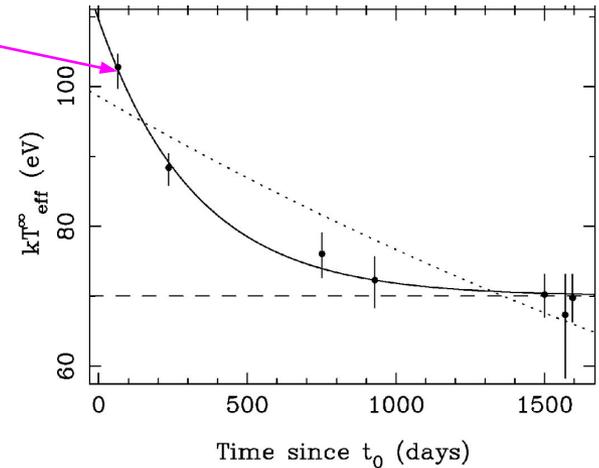
Параметры моделирования

Подготавливается звезда с температурой поверхности T_{s0}^∞
12.5 – летний нагрев постоянной мощности до 1 февраля 2001
Мощность определяется первой точкой

Энергетика ограничена потоком массы

$$f_{ob} = 5.6 \cdot 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \stackrel{d \approx 7 \text{ kpc}}{\Rightarrow} \dot{M}_{ob} = 5 \cdot 10^{-9} M_\odot / \text{yr}$$

$$E_{tot} \leq \dot{M}_{ob} \times 12.5 \text{ yr} \times \frac{1.9 \text{ MeV/Nucleon}}{M_{\text{Nucleon}}} = 2.4 \cdot 10^{44} \text{ erg}$$



Модели звёзды

APR EOS (Akmal, Pandharipande, Ravenhall 1998)

$$M = 1.4 M_\odot$$

$$R = 12.14 \text{ km}$$

$$\Delta R = 1.16 \text{ km}$$

$$M = 1.6 M_\odot$$

$$R = 11.88 \text{ km}$$

$$\Delta R = 890 \text{ m}$$

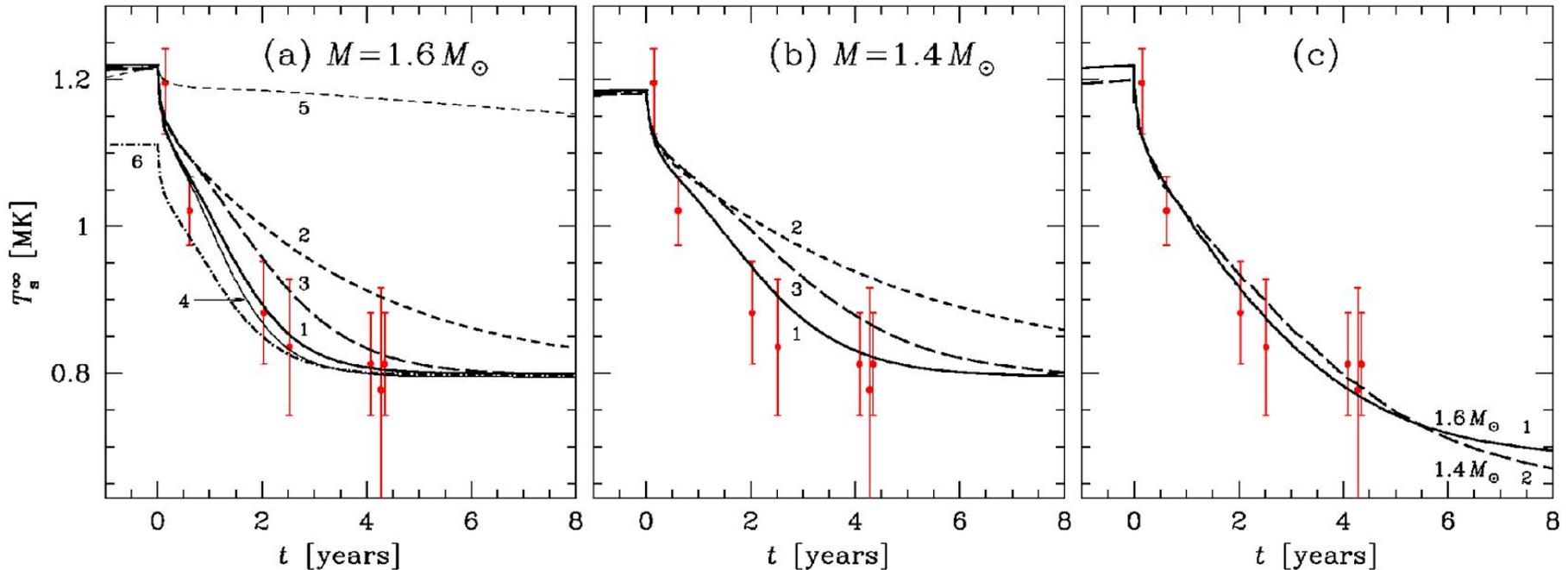
Бóльшая масса => более тонкая кора => быстрее релаксация

Результаты моделирования

Curve	T_{s0}^∞ MK	Crust model	Conduction in crust	Superfluid in crust	E_{tot} 10^{44} erg
1a	0.8	A	normal	moderate	2.6
2a	0.8	GS	normal	none	1.9
3a	0.8	GS	normal	moderate	1.8
4a	0.8	A	normal	strong	2.6
5a	0.8	A	low	moderate	0.6
6a	0.8	A	normal	moderate	1.9
1b	0.8	A	normal	moderate	2.3
2b	0.8	GS	normal	none	1.7
3b	0.8	GS	normal	moderate	1.5
1c	0.67	GS	normal	none	2.4
2c	0.63	GS	normal	none	2.4

$$E_{tot} \leq 2.4 \cdot 10^{44} \text{ erg}$$

- (a) – более тонкая кора – быстрее релаксация, нужно больше энергии
- (b) – релаксация медленнее, но энергии требуется меньше
- (c) – релаксация кора-ядро не прекратилась



Выводы

- Текущие наблюдения источника KS1731--260 могут быть объяснены с помощью модели глубокого прогрева коры в рамках стандартной микрофизики нейтронной звезды.
 - Наилучший сценарий: аккрецированная кора с нормальной теплопроводностью и нейтронной сверхтекучестью; достаточно массивная звезда (с тонкой корой); не слишком высокая нейтринная светимость в ядре.
 - Модель аморфной коры приводит к слишком долгому остыванию.
 - Прямой Urca процесс в ядре звезды приводит к слишком быстрому остыванию.
 - Тепловая релаксация коры и ядра может быть не завершена.
- 