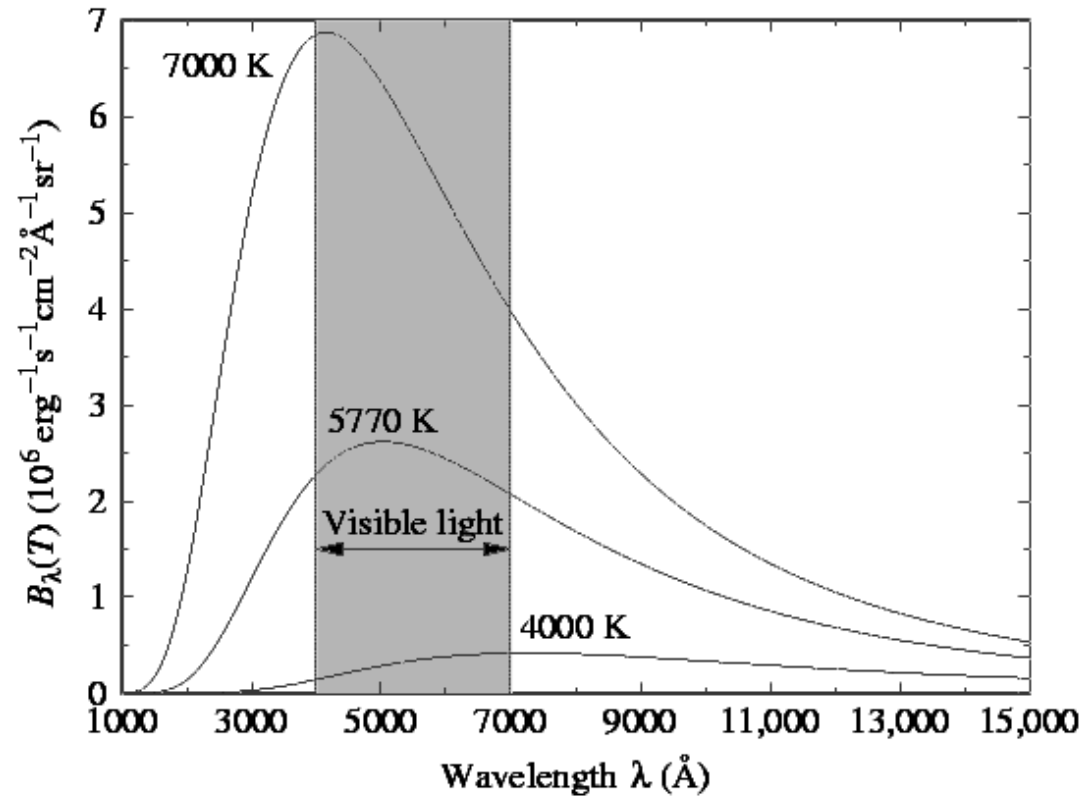


Лекция 6.

Определение параметров компактных звёзд по их тепловому излучению

1. Оценка эффективной температуры и радиуса по модели планковского спектра
2. Наблюдаемые спектры белых карликов
3. Модельные тепловые спектры горячих и холодных белых карликов и нейтронных звёзд
4. Наблюдаемые тепловые спектры нейтронных звёзд
5. Влияние эффектов ОТО на наблюдаемое тепловое излучение нейтронных звёзд
6. Остывание белых карликов и определение их параметров по кривым остывания
7. Остывание нейтронных звёзд и определение их параметров по кривым остывания
8. Глубокий прогрев коры мягких рентгеновских транзиентов (МРТ). «Кривые подогрева» и ограничения на модели ядра и оболочек нейтронных звёзд в составе МРТ

Простейшая оценка температуры и радиуса по тепловому спектру



Лучевая интенсивность излучения абсолютно чёрного тела на единицу круговой частоты ω :

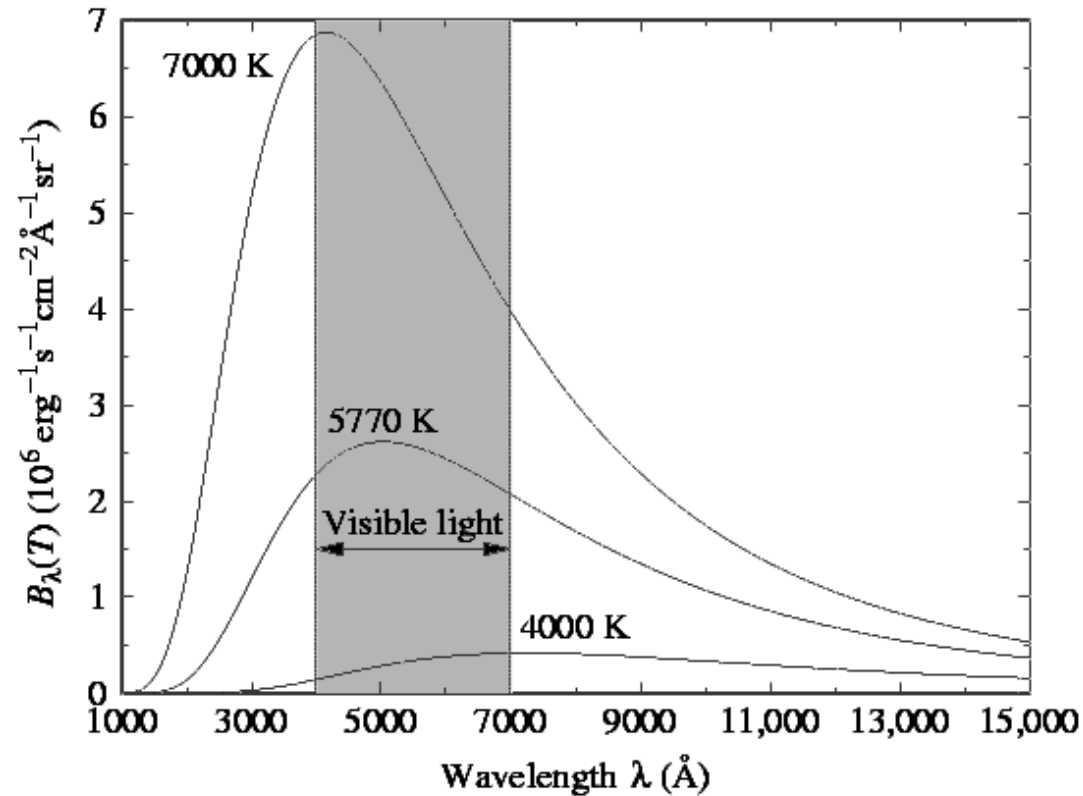
$$B_{\omega, T} = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^3 c^2} \frac{1}{\exp[\hbar \omega / (k_B T)] - 1}$$

→ «цветовая температура» T_{col} ;

если известно расстояние D , то светимость $L = 4\pi D^2 F_{\text{bol}}$;

полагая $T_{\text{eff}} = T_{\text{col}}$, из $L = 4\pi \sigma R^2 T_{\text{eff}}^4$ находим R .

Простейшая оценка температуры и радиуса по тепловому спектру



Лучевая интенсивность излучения абсолютно чёрного тела на единицу круговой частоты ω :

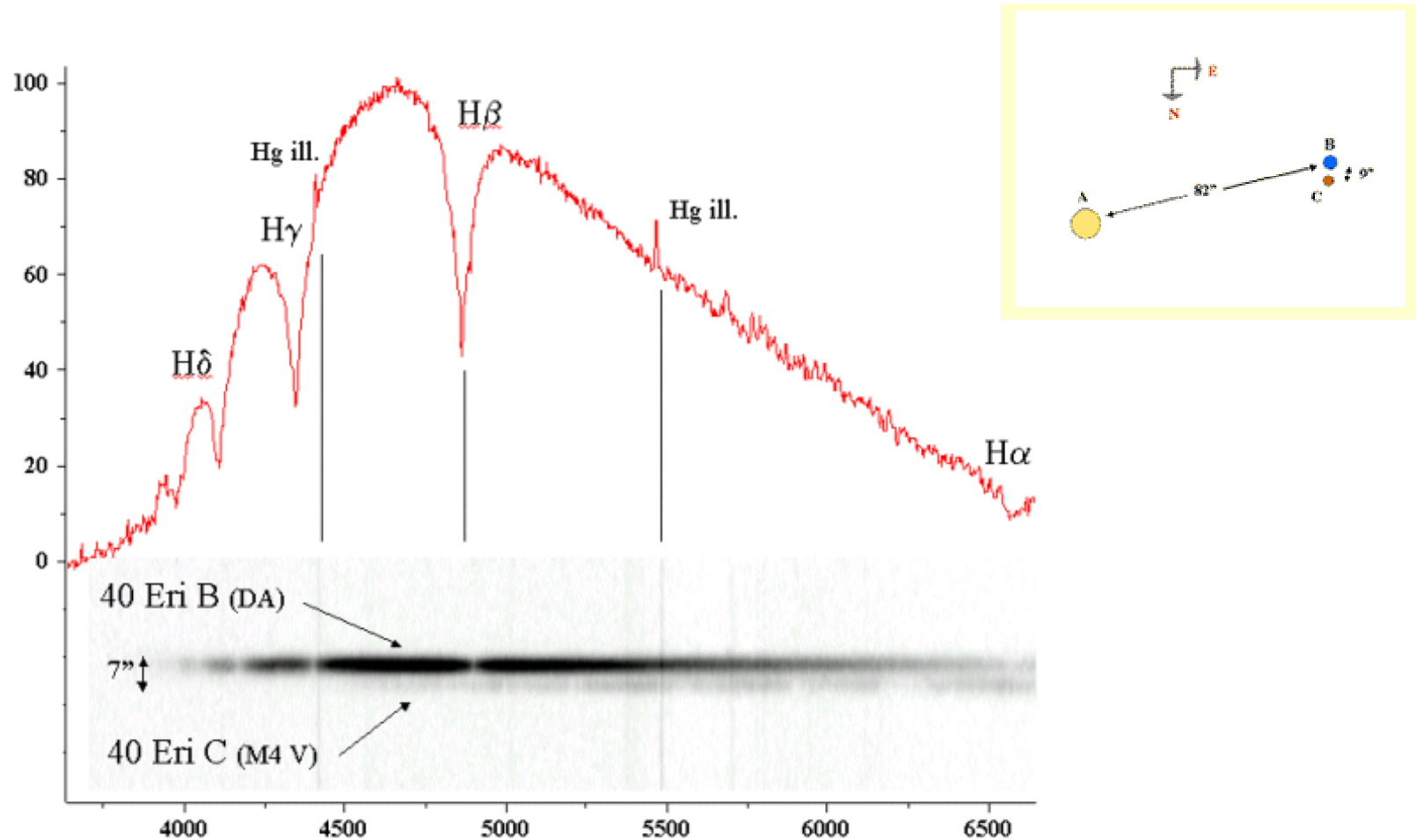
$$B_{\omega, T} = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^3 c^2} \frac{1}{\exp[\hbar \omega / (k_B T)] - 1} \rightarrow T_{\text{col}};$$

Межзвёздное поглощение искажает спектр

Например, влияние межзвёздного поглощения в мягком рентгене примерно оценивается множителем $\times \exp[-(N_{\text{H}}/10^{21} \text{ см}^{-2}) (\hbar \omega / 0,16 \text{ кэВ})^{-8/3}]$

\rightarrow можно оценить D (и/или среднюю концентрацию водорода n_{H}); $L=4\pi D^2 F_{\text{bol}} \rightarrow R.$

Пример наблюдаемого спектра белого карлика



Спектр 40 Эридана В с бальмеровскими линиями водорода

Построение теоретической модели атмосферы

Стандартные методы – Д. Михалас. *Звёздные атмосферы* (М: Мир, 1982)

Общий алгоритм – решение системы уравнений:

- гидростатического равновесия
- баланса энергии
- переноса излучения

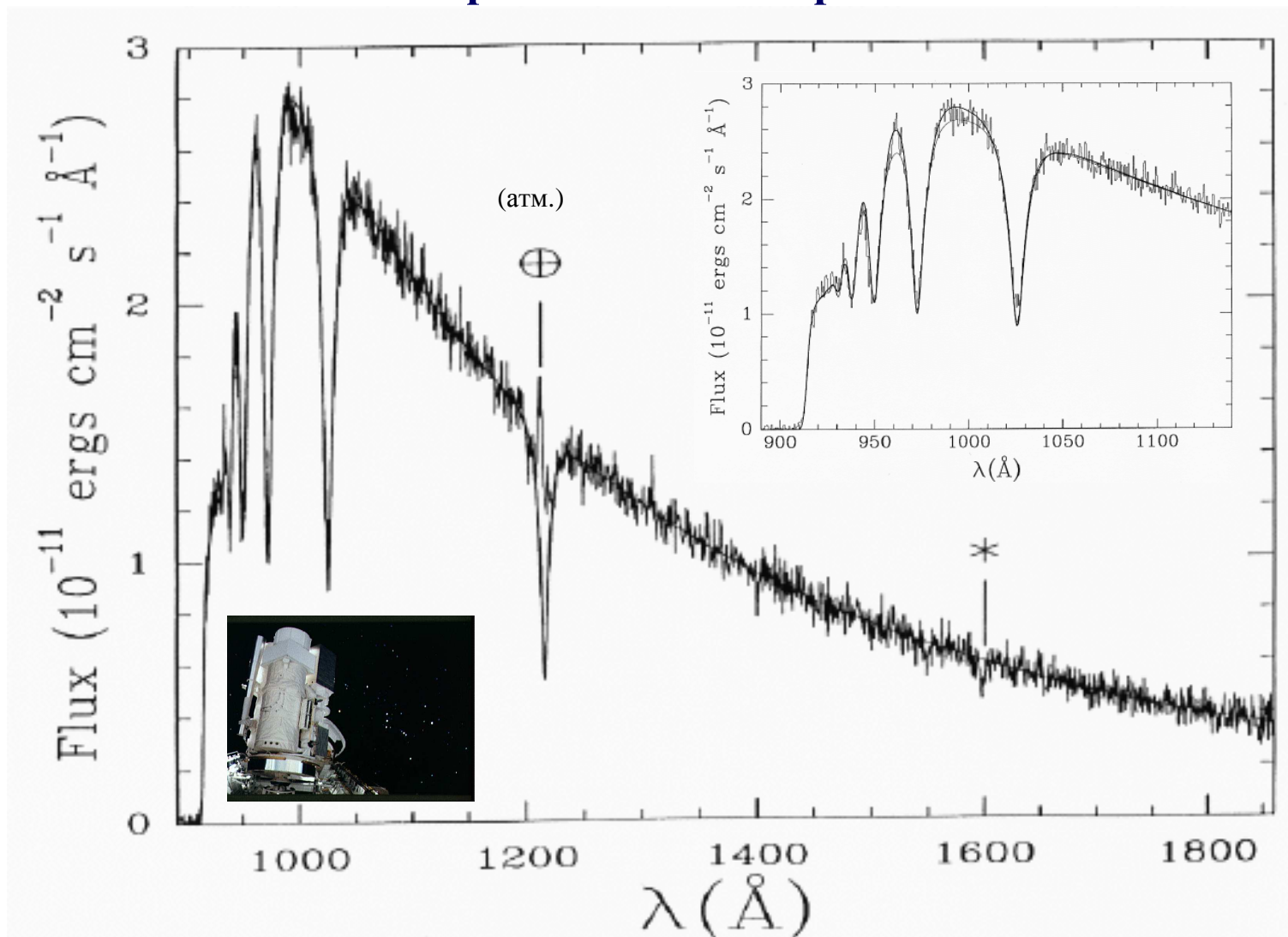
Основные исходные данные:

- уравнение состояния вещества (в широком смысле)
- непрозрачности (коэффициенты поглощения и рассеяния)

В общем случае для этого требуются:

- атомные и молекулярные данные (энергии связи, сечения поглощения)
- данные о составе – ионизационный баланс
- термодинамические величины
- учёт плазменных эффектов (уширение линий, ионизация давлением и др.)

Сравнение наблюдаемого и теоретических спектров горячего белого карлика



Спектр белого карлика G191-B2B с лаймановскими линиями водорода (Hopkins Ultraviolet Telescope и теоретические модели при $T_{\text{eff}}=59250 \text{ K}$, $\lg g = 7.5$, $N_{\text{H}} = 1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, $b = 10 \text{ km/s}$)

Непрозрачности в атмосфере холодного белого карлика

18

B. Hansen / Physics Reports 399 (2004) 1–70

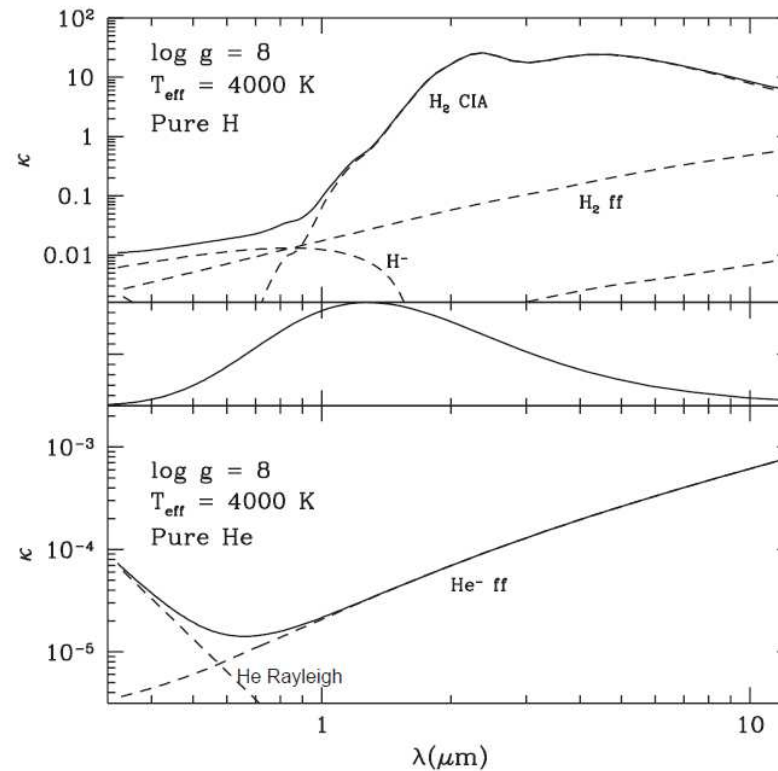


Fig. 5. *Photospheric opacities*. The upper panel shows the opacity sources at the photosphere of a 4000 K, hydrogen atmosphere white dwarf. The opacity is dominated in the infra-red by the H_2 CIA, and by H^- at shorter wavelengths. The lower panel shows the same for a pure helium atmosphere. The middle panel shows the black-body distribution for this temperature. The true spectrum will be distorted from this form by the variation of the opacity with wavelength—flux is driven from wavelengths with high opacity to the windows of lowest opacity.

Спектры холодных белых карликов

B. Hansen / Physics Reports 399 (2004) 1–70

19

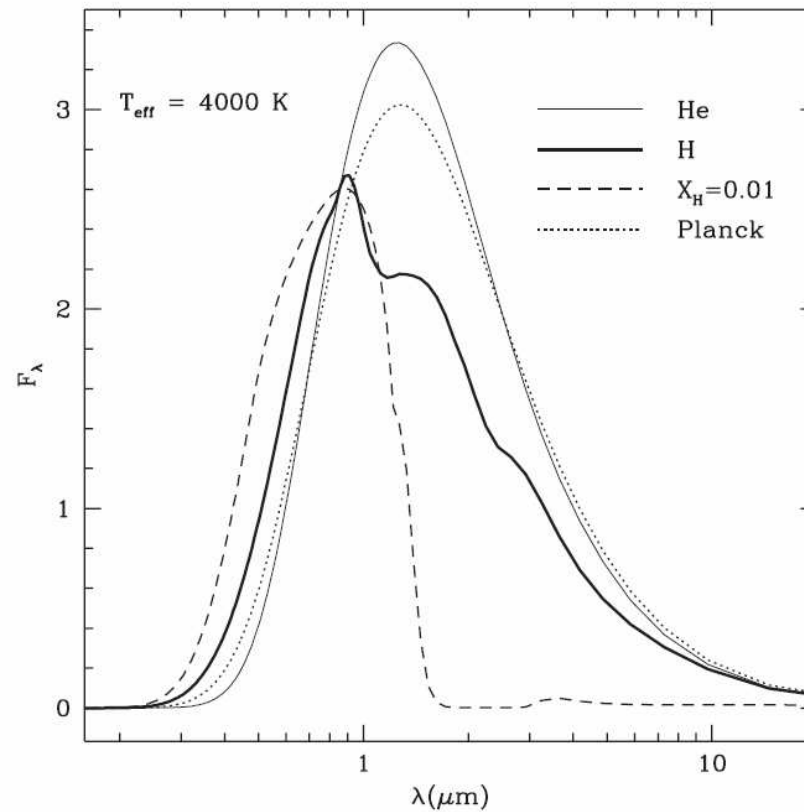


Fig. 6. *Infra-red absorption.* The dotted line indicates the Planck curve for a temperature of 4000 K. The thin solid line shows the spectrum for a pure helium atmosphere with the same effective temperature. The thick solid line shows a pure hydrogen atmosphere. The flux depression in the infra-red due to the collisionally induced absorption is evident. The dashed line shows a spectrum at the same effective temperature, but for an atmosphere that is 1% hydrogen and 99% helium by mass. The infra-red decrement is much stronger.

Спектры магнитных белых карликов

638

F. Euchner et al.: Zeeman tomography of magnetic white dwarfs. I. *Astron. Astrophys.* **390**, 633 (2002)

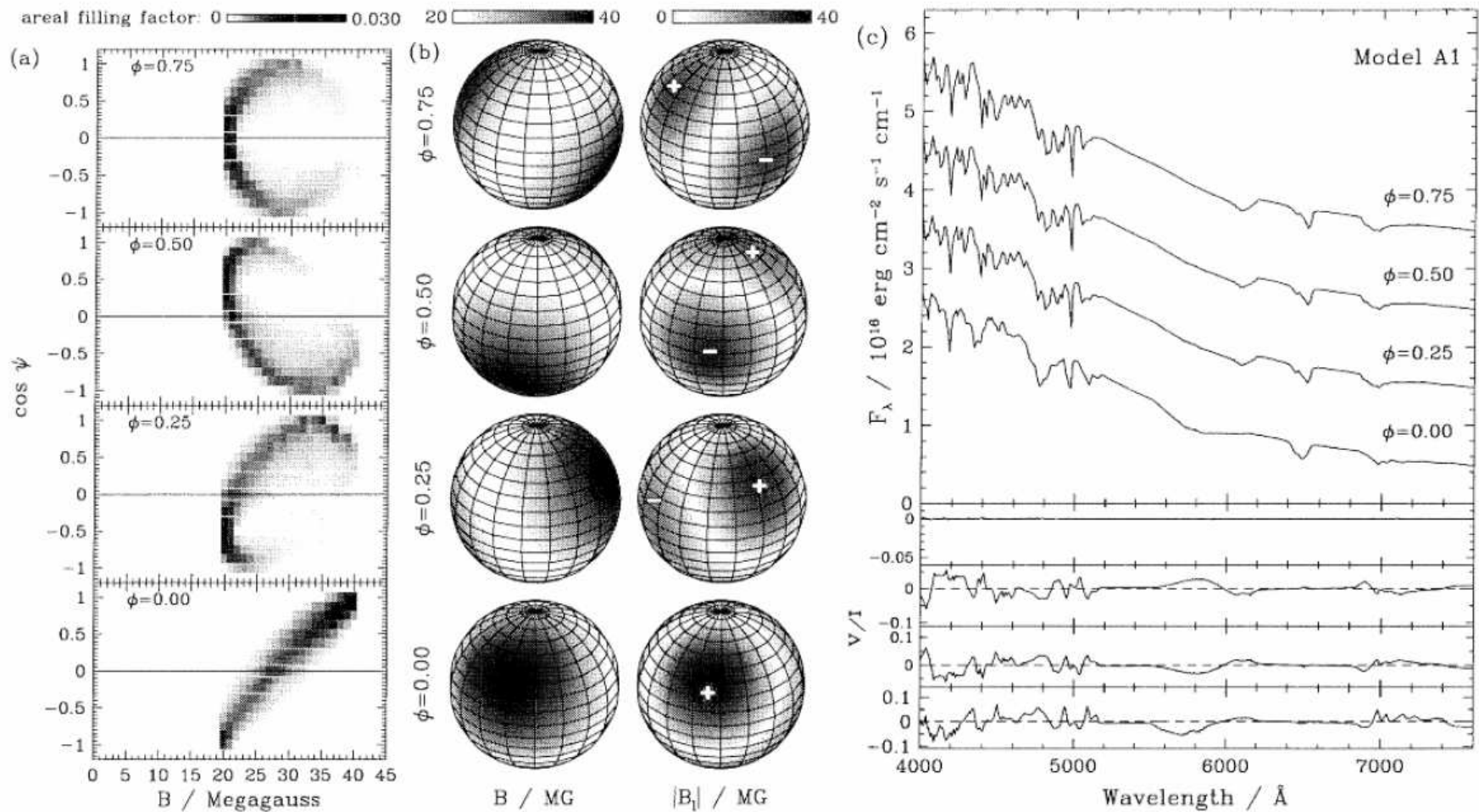
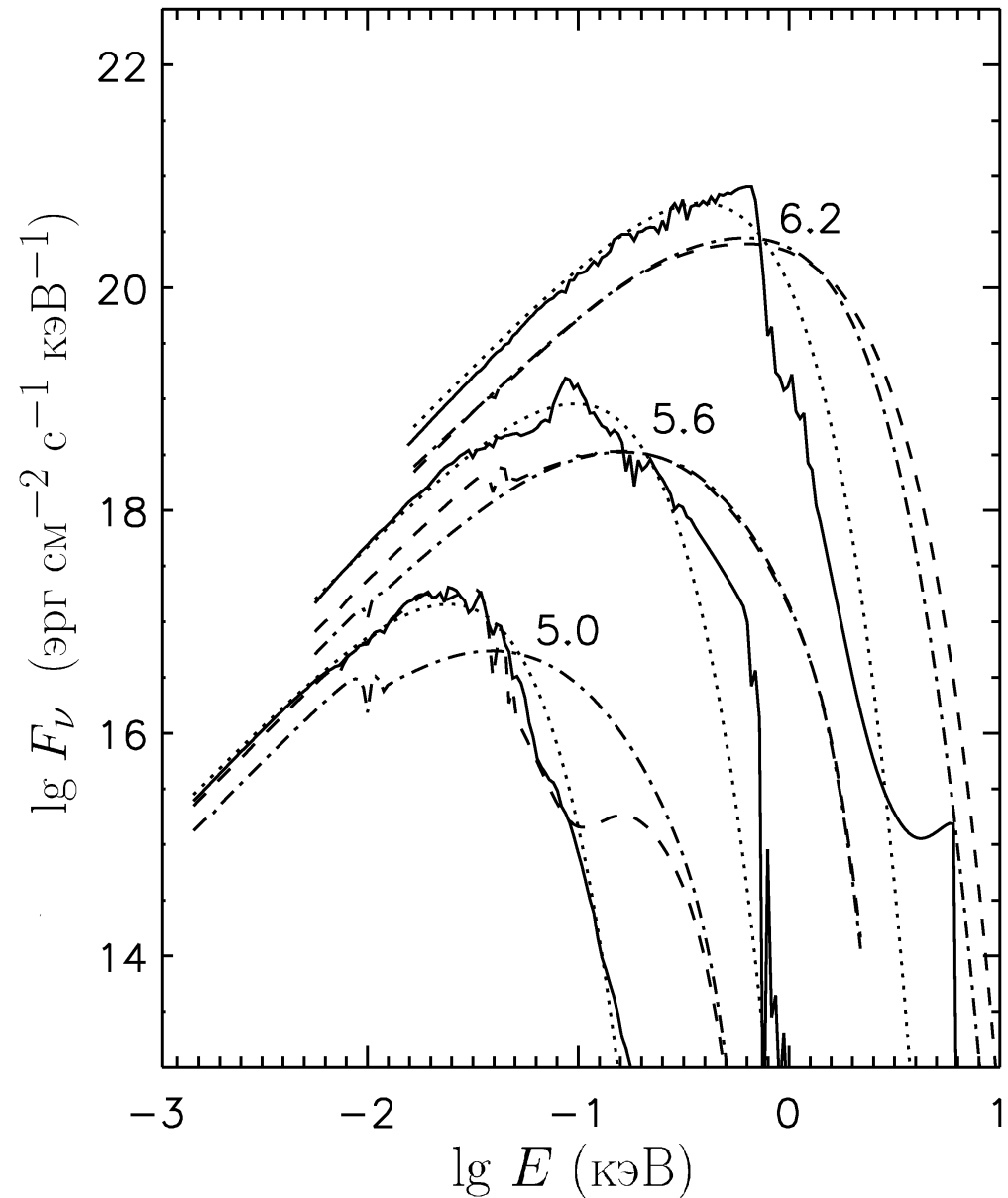


Fig. 4. Model (A1), centred dipole viewed at $i = 60^\circ$: a) B - ψ diagram, b) field strength and longitudinal component, c) flux and polarization spectra. The + and - symbols indicate the sign of the longitudinal component of the magnetic field. For clarity, the flux spectra at $\phi = 0.25, 0.5, \text{ and } 0.75$ have been shifted upwards by one flux unit each.

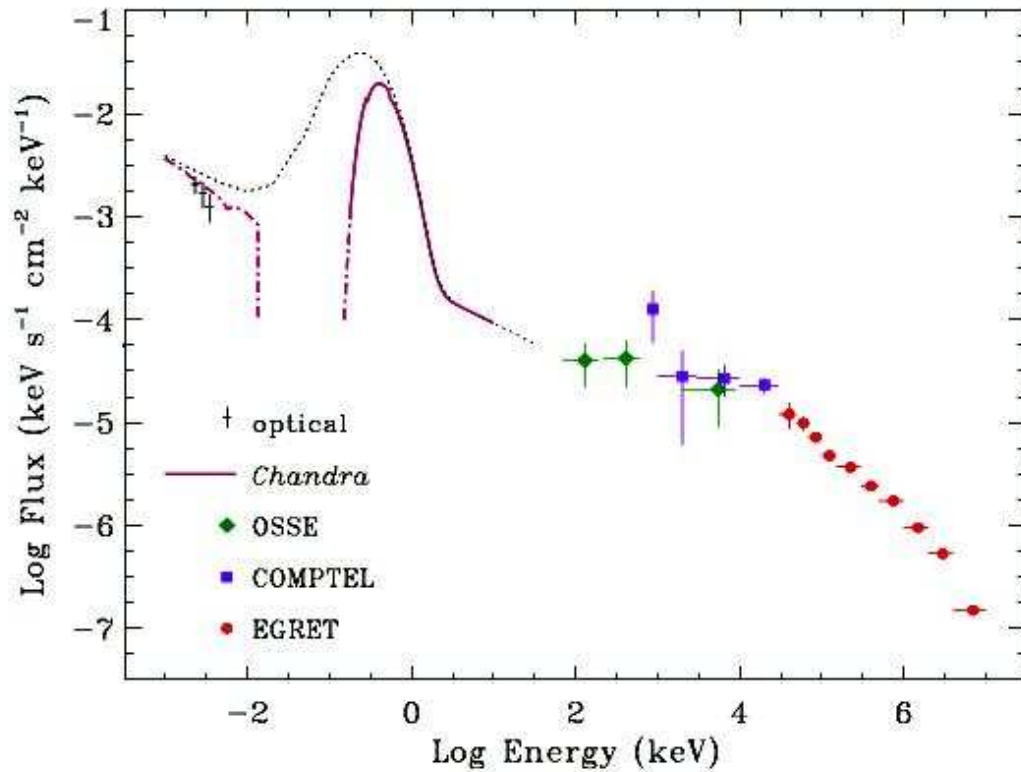
Теоретические тепловые спектры нейтронных звёзд

Плотности потока энергии излучения как функции энергии фотона для фотосферы, состоящей из железа (сплошные линии), гелия (штриховые) и водорода (штрихпунктир) в сравнении со спектром чёрного тела (точечные кривые) при $g=2,43 \times 10^{14}$ см/сек².
Числа у кривых – значения $\lg T_{\text{eff}}$ [К].

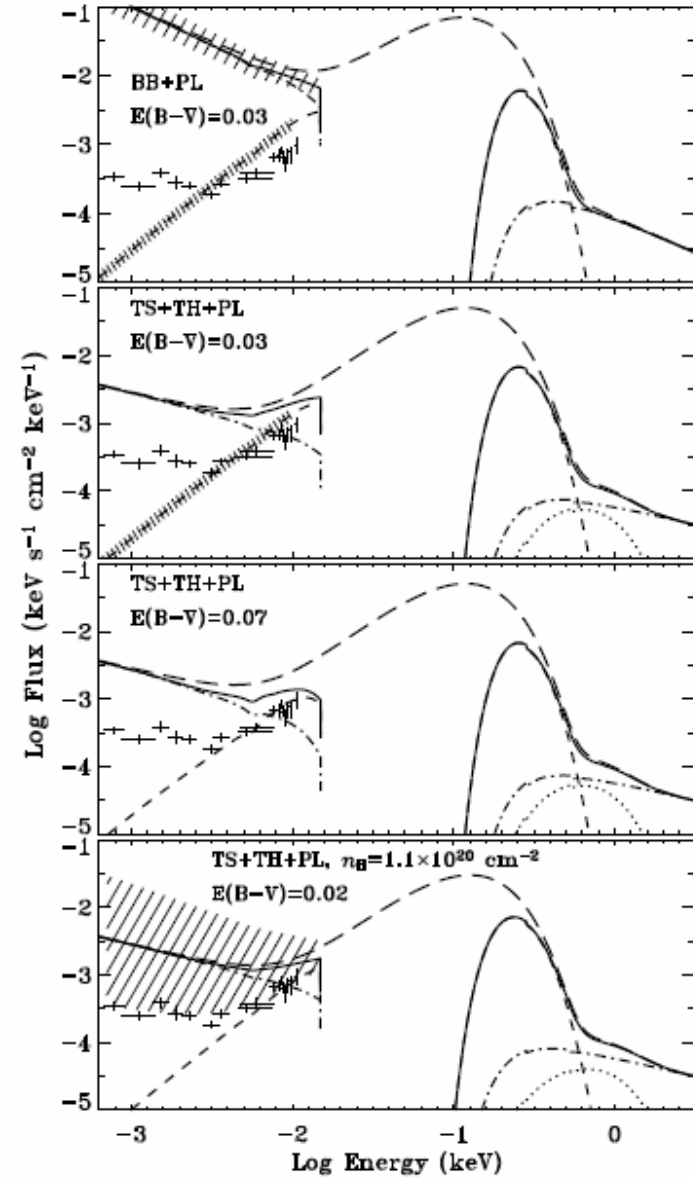
Pons *et al.*, *Astrophys. J.* **564**, 921 (2002)



Примеры наблюдаемых широкодиапазонных спектров нейтронных звёзд



Pavlov *et al.* (2002): многоволновой спектр пульсара Вела



Kargaltsev *et al.* (2005): многоволновой спектр пульсара Геминга

Эффекты ОТО

Масса и $M \sim 1.4 M_{\odot}, \quad R \sim 10 \text{ km}$
 $(M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33} \text{ g}, \quad R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{ km})$

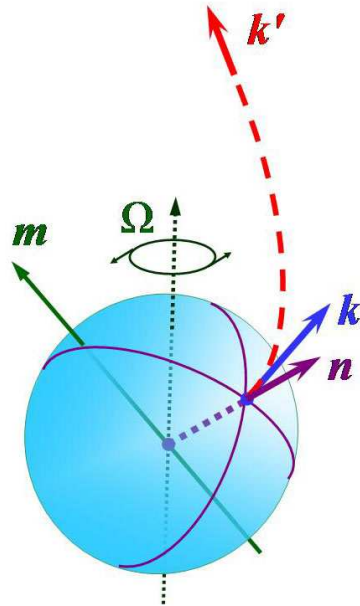
Гравитационный радиус: $r_g = 2GM/c^2 \approx 2.95 M/M_{\odot} \text{ km}$

Гравитационное ускорение:

$$g = (1 + z_g) GM/R^2 \approx 1.328 \times 10^{14} (1 + z_g) (M/M_{\odot}) (R/10 \text{ km})^{-2} \text{ cm s}^{-2}$$

Красное смещение: $1 + z_g = (1 - r_g/R)^{-1/2}$

$$\omega_{\infty} = \omega_{\text{surf}} \sqrt{1 - r_g/R}$$

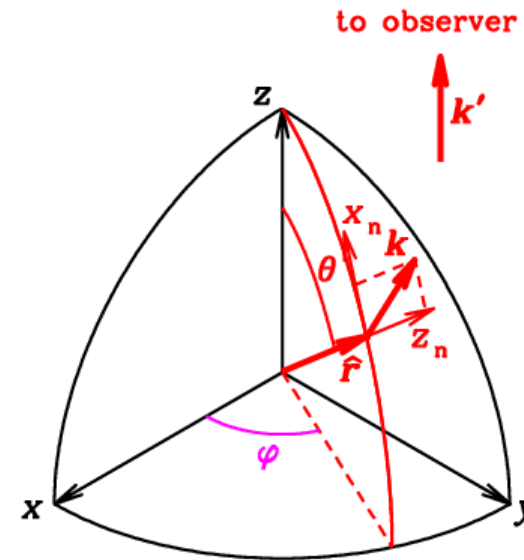
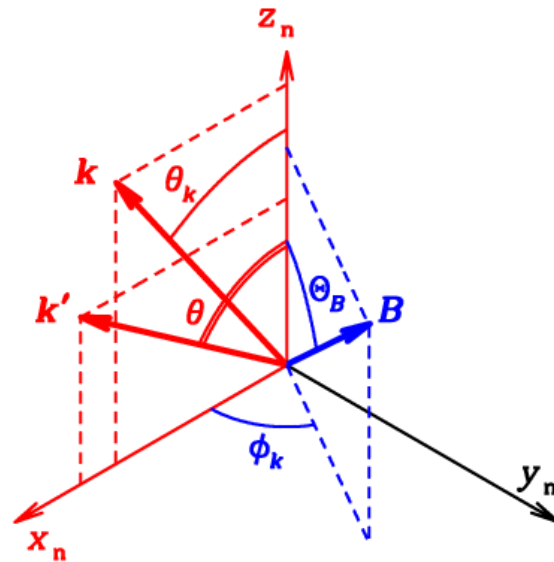
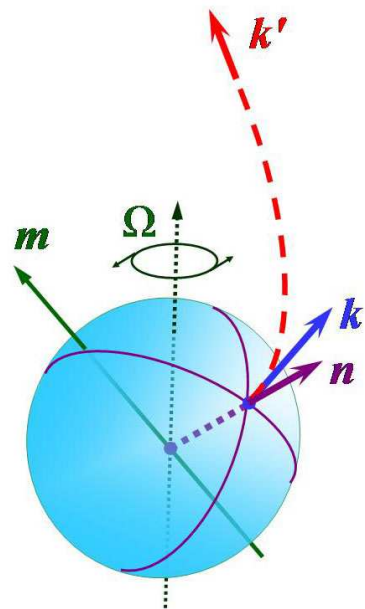
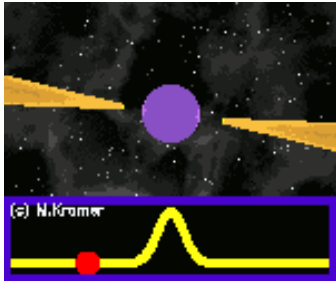


$$T_{\infty} = T_{\text{eff}} \sqrt{1 - r_g/R}$$

Лучи изгибаются вблизи поверхности звезды, позволяя “заглянуть за горизонт”.

«Видимый» радиус: $R^{\infty} = R(1 + z_g)$

Неоднородное распределение температуры у пульсаров



$$\hat{x}_n = -\cos \varphi \cos \theta \hat{x} - \sin \varphi \cos \theta \hat{y} + \sin \theta \hat{z}$$

$$\hat{y}_n = -\sin \varphi \hat{x} - \cos \varphi \hat{y}$$

$$\hat{z}_n = \cos \varphi \sin \theta \hat{x} + \sin \varphi \sin \theta \hat{y} + \cos \theta \hat{z}$$

$$F_E = A \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \theta_k d\theta_k I_E(\theta_k, \phi_k; B, \Theta_B)$$

$$\sin \phi_k = \sin \varphi \sin \theta_m / \sin \gamma$$

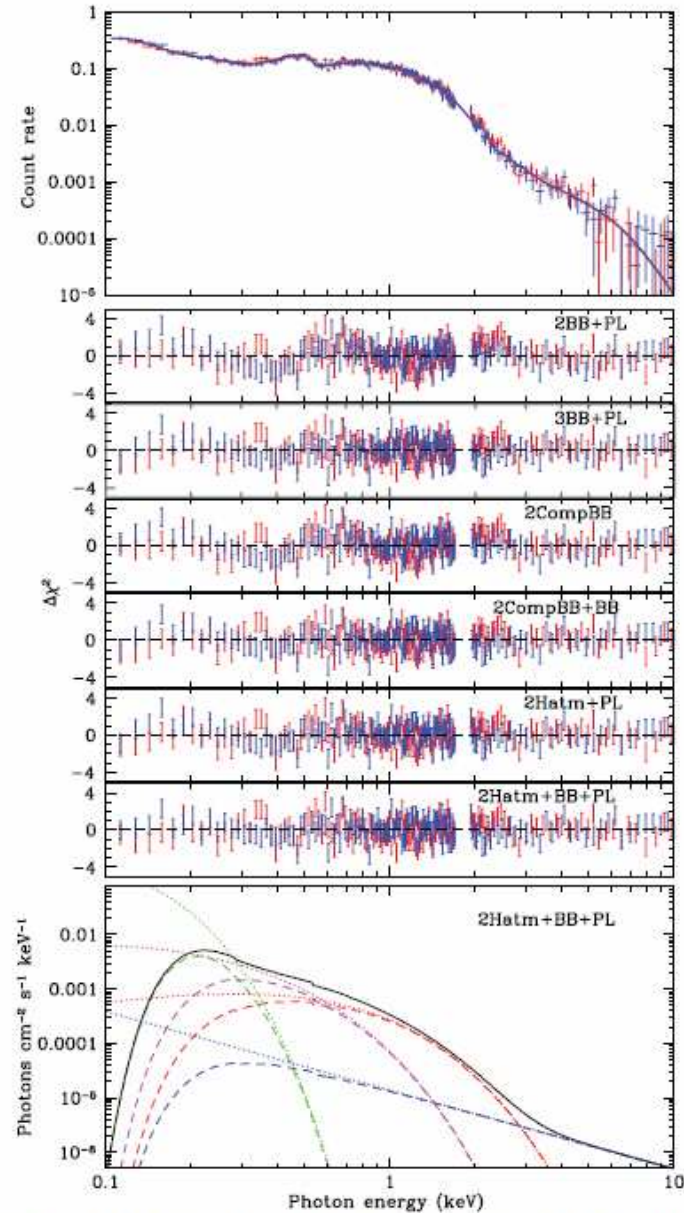
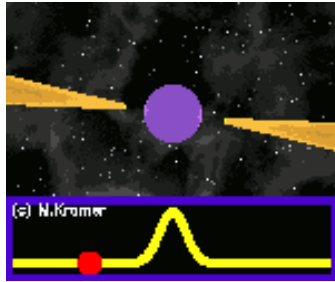


Figure 3. *XMM-Newton* X-ray EPIC MOS1/2 spectra of PSR J0437-4715 fitted with a two-temperature H atmosphere model plus a power law and a cool blackbody (solid line). The middle six panels show the fit residuals for the various models listed in Table 1. The bottom panel shows the best-fit two-temperature H atmosphere model plus a power law and a cool blackbody. The dashed and dotted lines show the individual absorbed and unabsorbed model components, respectively, while the solid line shows the total spectrum. See the text and Table 1 for best-fit parameters and acronym definitions.

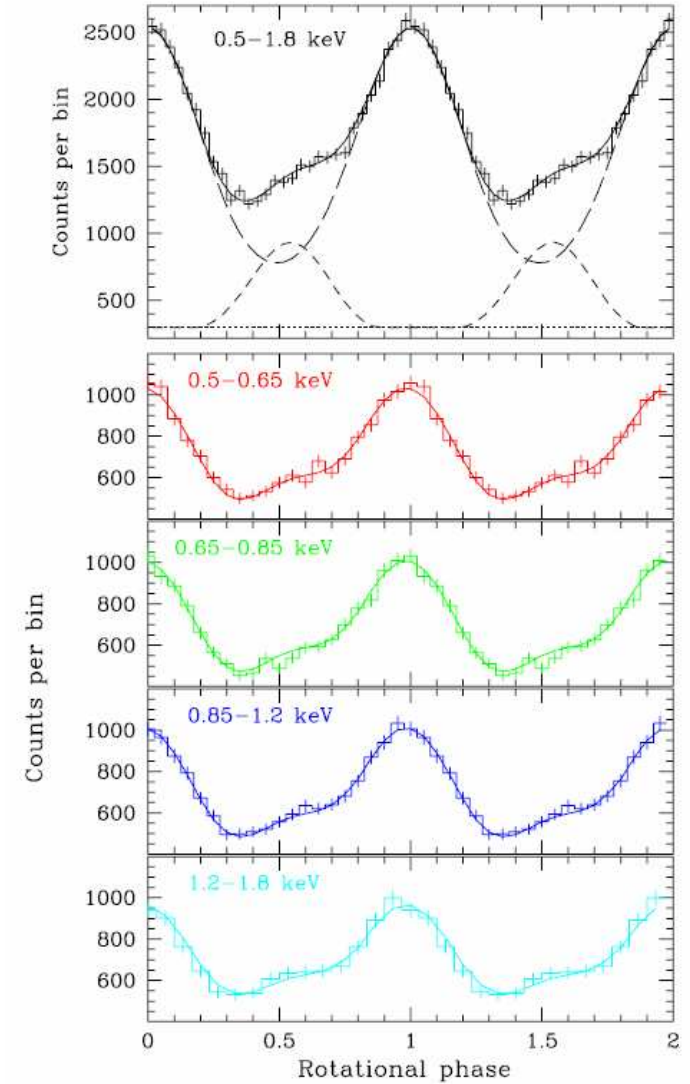


Figure 5. Top panel: the *XMM-Newton* EPIC pn pulse profile in the 0.5–1.8 keV range with the best-fit model (solid line). The individual contributions from each polar cap are shown with the dashed lines. The dotted line shows the background level. Bottom four panels: *XMM-Newton* EPIC pn pulse profiles of PSR J0437-4715 in the 0.5–0.65, 0.65–0.85, 0.85–1.2, and 1.2–1.8 keV bands (from top to bottom, respectively) fitted with a model of a rotating neutron star with two-temperature H atmosphere polar caps. See the text for best-fit parameters.

Тепловая структура оболочек компактной звезды

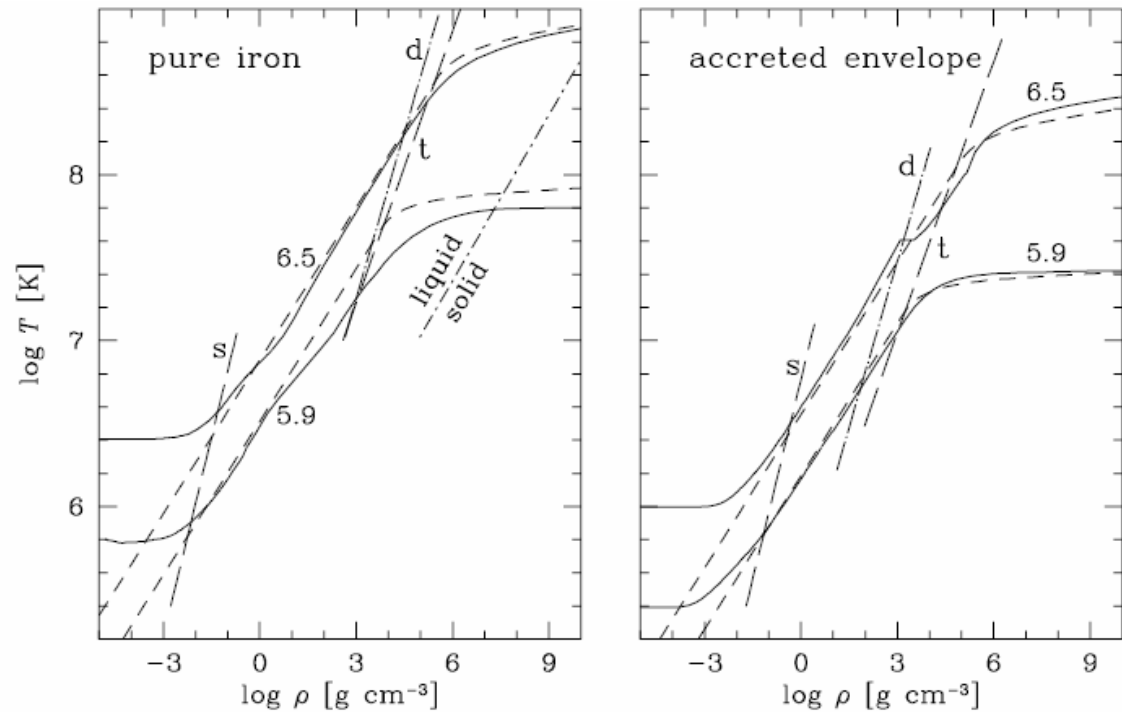
$$T_6 \approx 4 q^{2/13} \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{4/13}$$

$$\rho_1 = 2.675 \frac{A}{Z} \text{ g cm}^{-3}$$

$$q = \frac{Z(1+Z)}{A} \frac{T_{e6}^4}{g_{14}}$$

$$T_F \approx (1.16 \times 10^6 \text{ K}) \times \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{2/3}$$

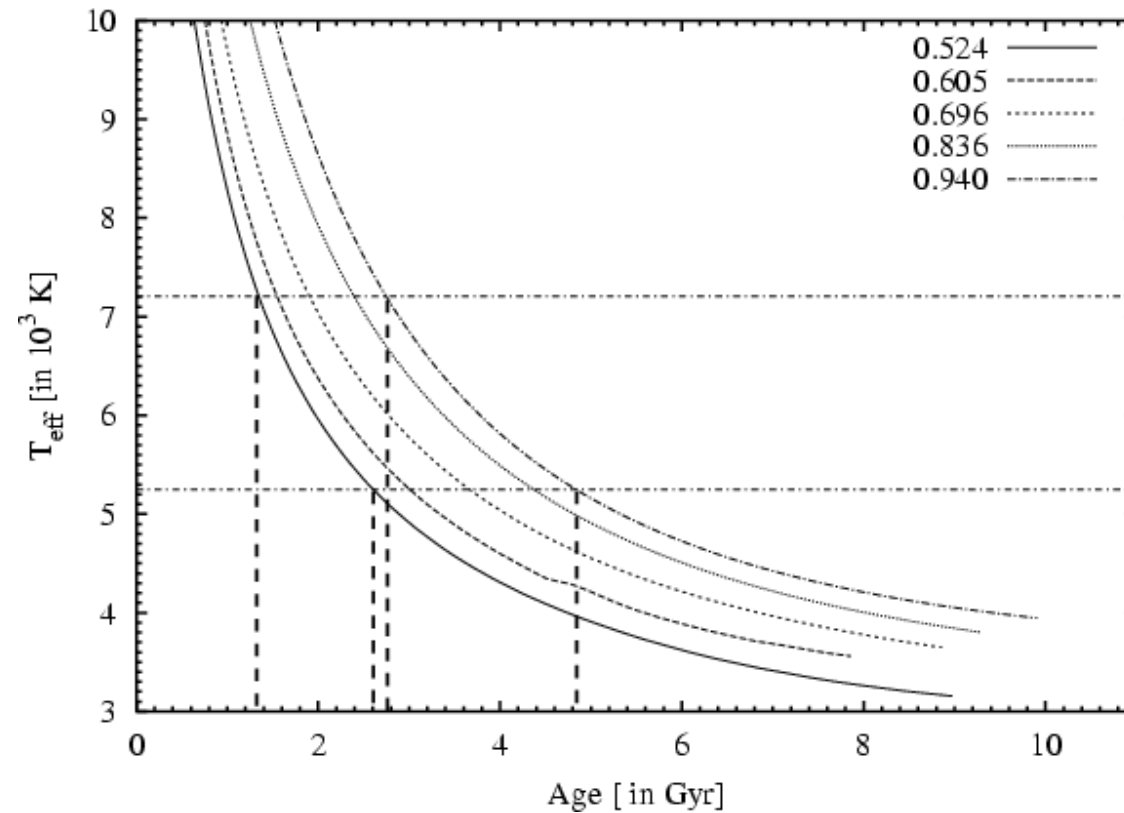
$$T_6 = T_F \Rightarrow T_6 \sim 8q^{2/7}$$



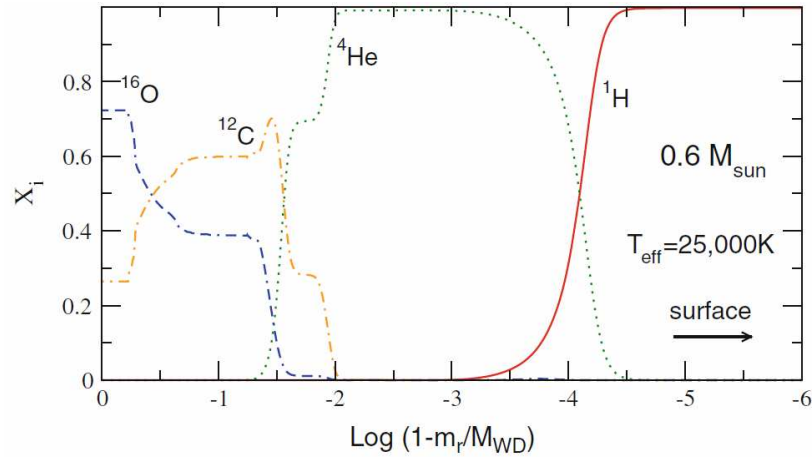
Зависимости температуры от плотности в теплоизолирующих оболочках нейтронной звезды, состоящих из железа (левое окно) и из лёгких элементов, аккрецировавших на поверхность звезды (правое окно) для двух значений эффективной температуры: $\lg T_{\text{eff}} [\text{K}] = 5.9, 6.5$. Сплошные кривые – численное решение; штриховые линии – аналитические аппроксимации для невырожденного вещества (слева от прямой “d”) и вырожденного вещества (справа от прямой “d”). Прямая “s” показывает положение излучательной поверхности: на которой $T = T_{\text{eff}}$; прямая “t” – геометрическое место точек: в которых электронные и фотонные теплопроводности равны друг другу. Рис. из статьи, доступной по ссылке: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0104003> (см. детали в ней).

Остывание белого карлика: простая модель

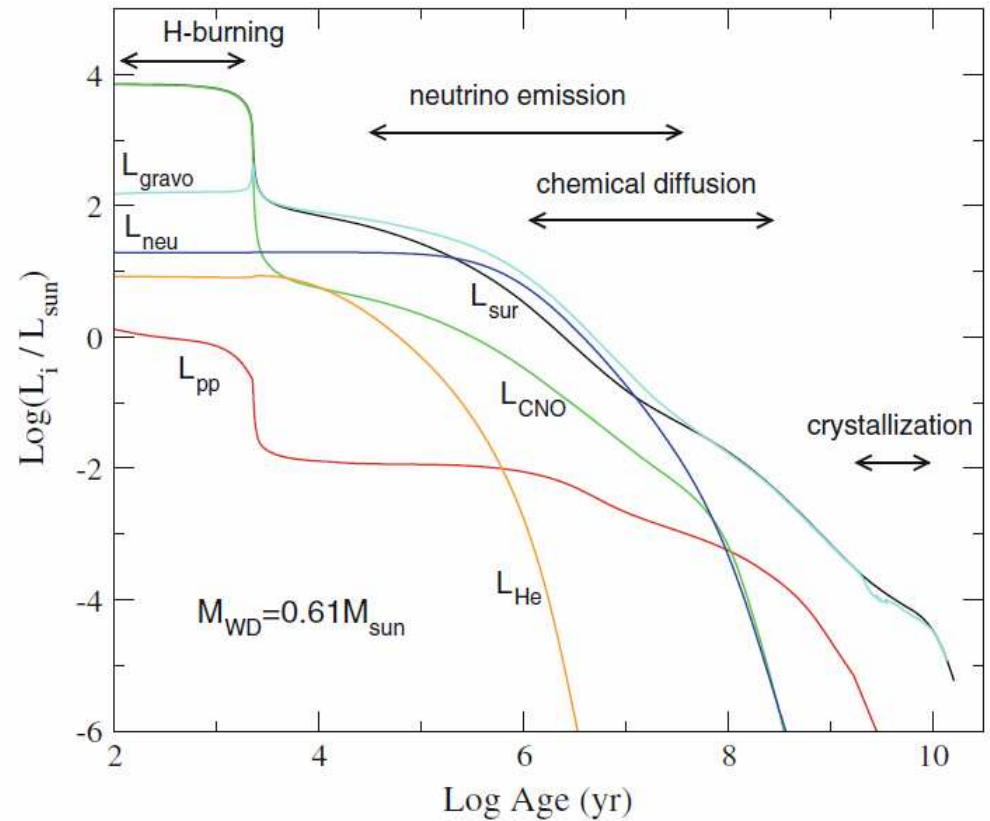
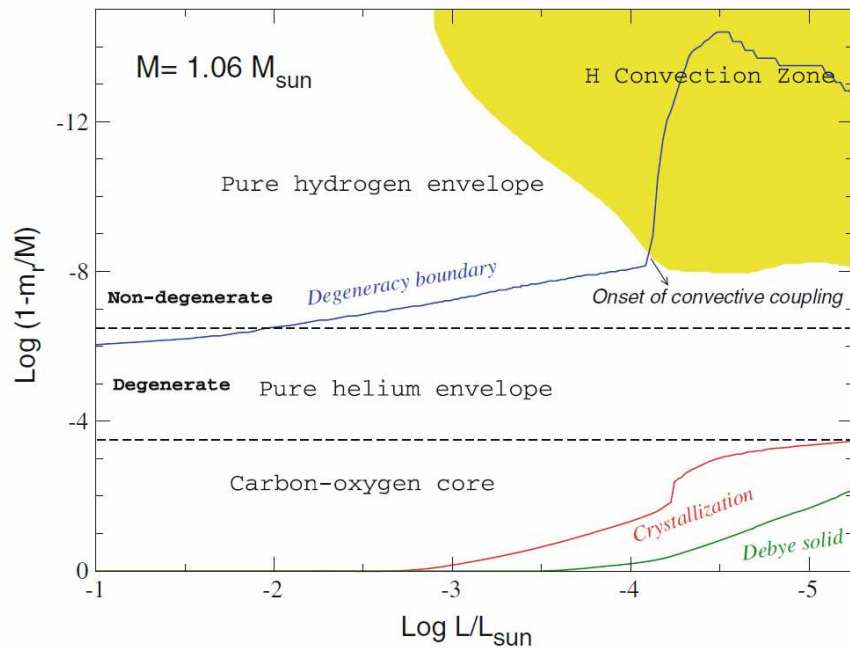
$$L \sim 8.4 \times 10^{-4} L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{t}{10^9 \text{ yrs}} \right)^{-7/5}$$



Остывание белого карлика: сложная модель



Состав белого карлика с тонкой водоородной оболочкой



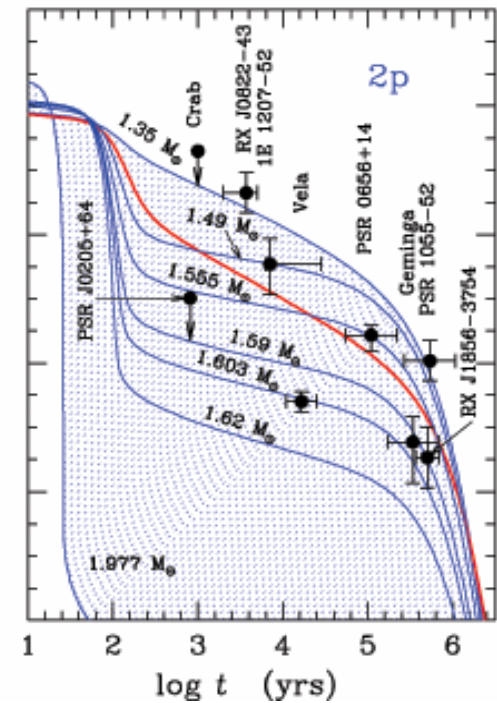
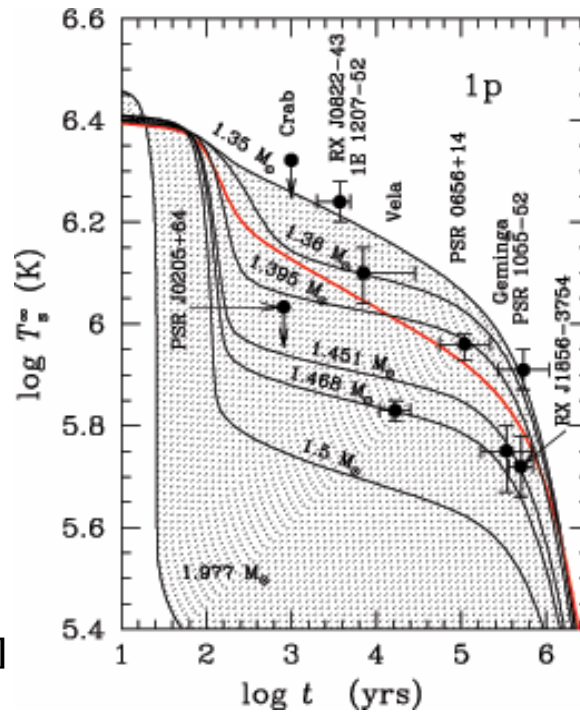
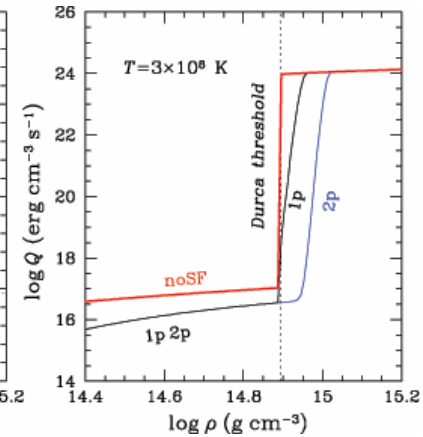
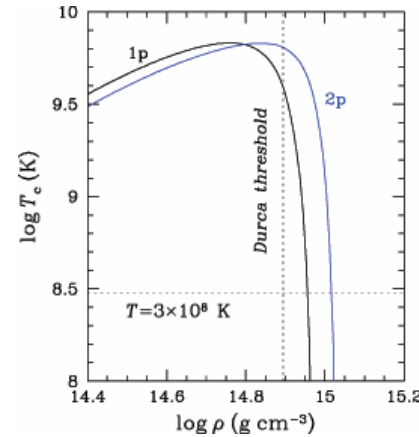
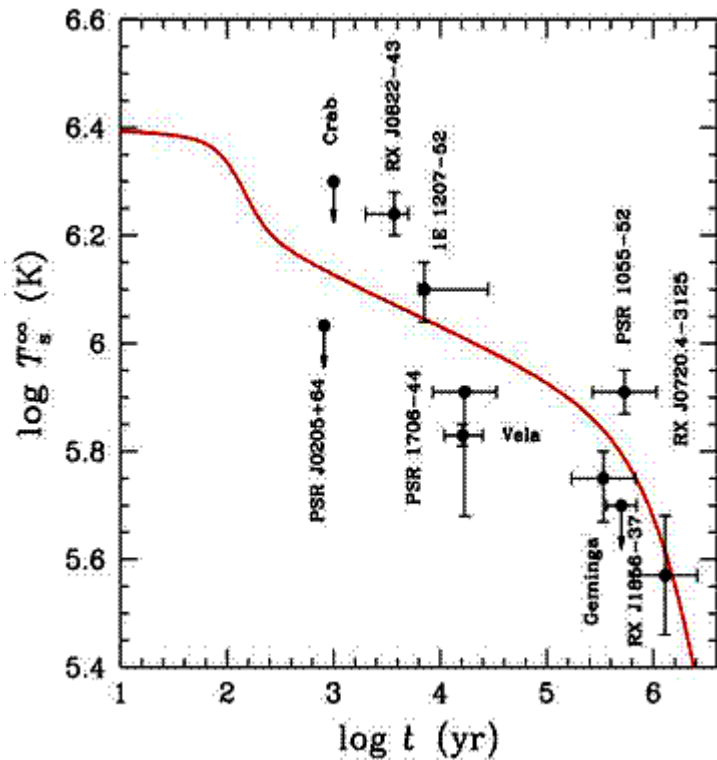
Остывание

Остывание нейтронных звёзд с протонной сверхтекучестью в ядре

“Базовая кривая остывания”

нейтронной звезды

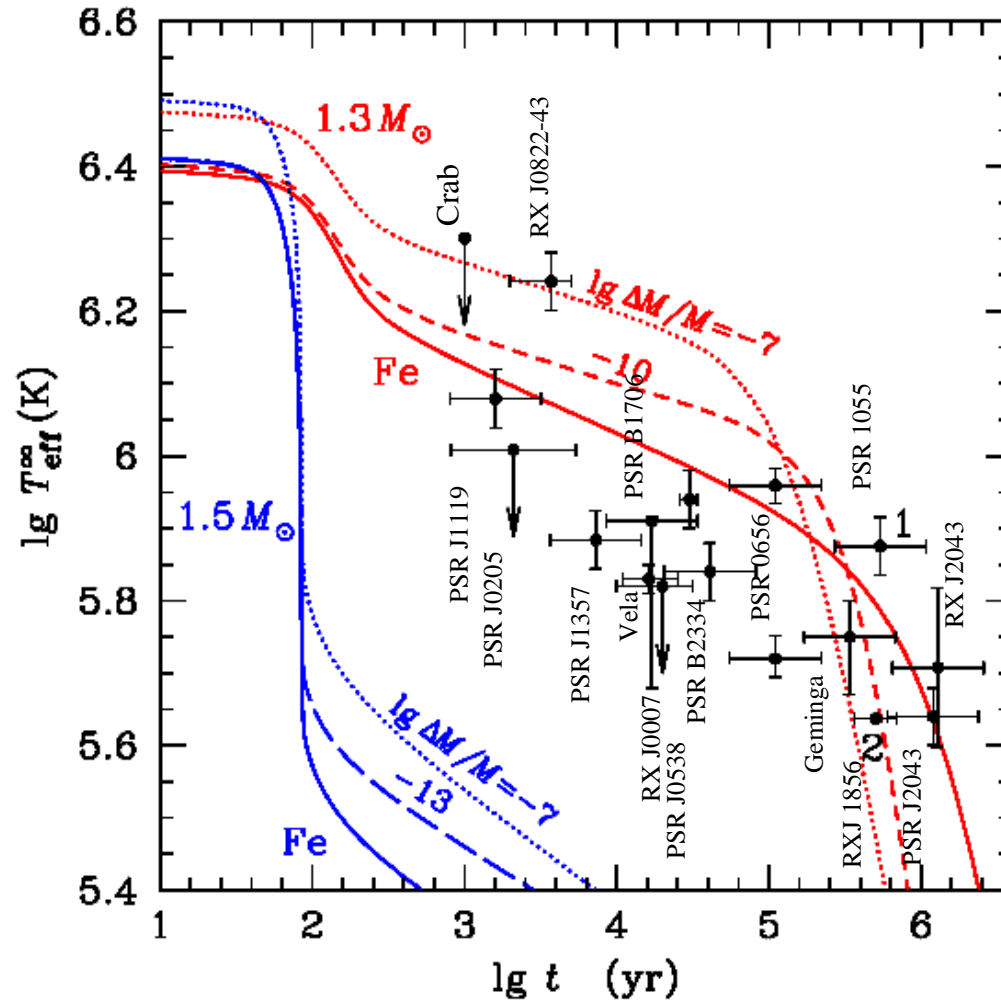
(без сверхтекучести, без экзотики)



Neutron star cooling

[Yakovlev et al. (2005) Nucl. Phys. A 752, 590c]

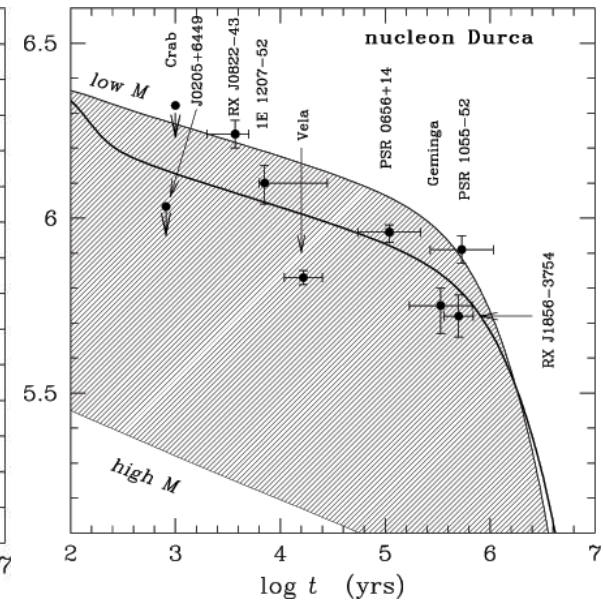
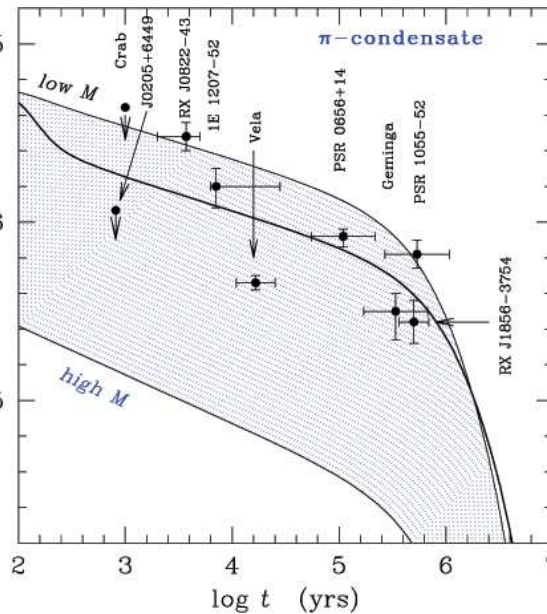
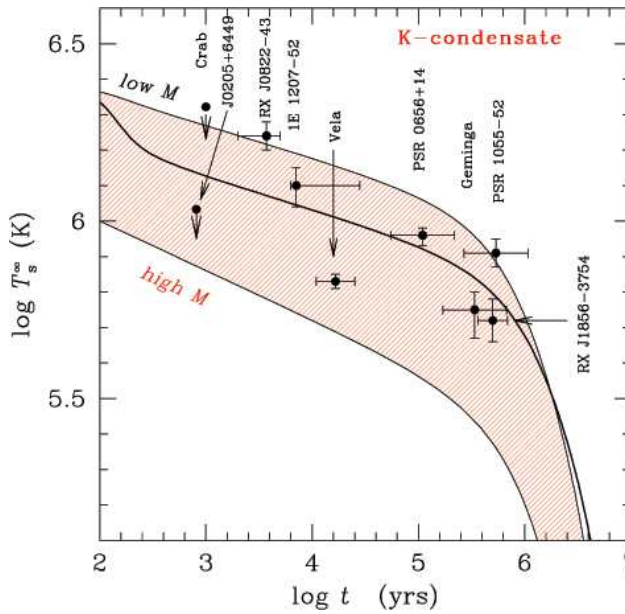
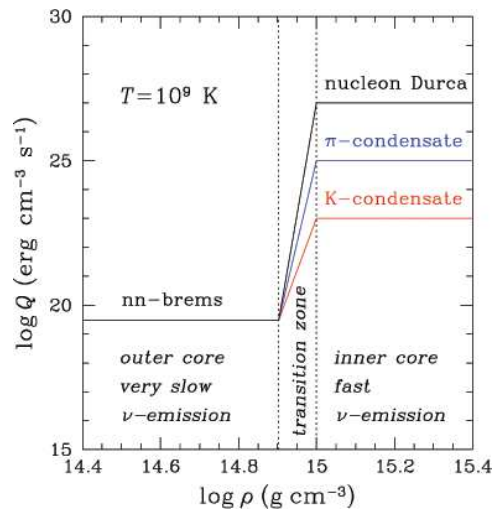
Остывание нейтронных звёзд разной массы с оболочками разного состава



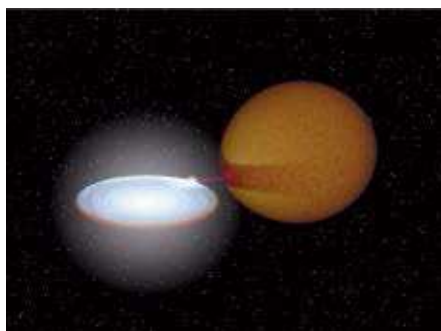
А.П. (2010) УФН 180, 1279

Остывание нейтронных звёзд нестандартного состава

Yakovlev *et al.* (2005) *Nucl. Phys. A* **752**, 590c

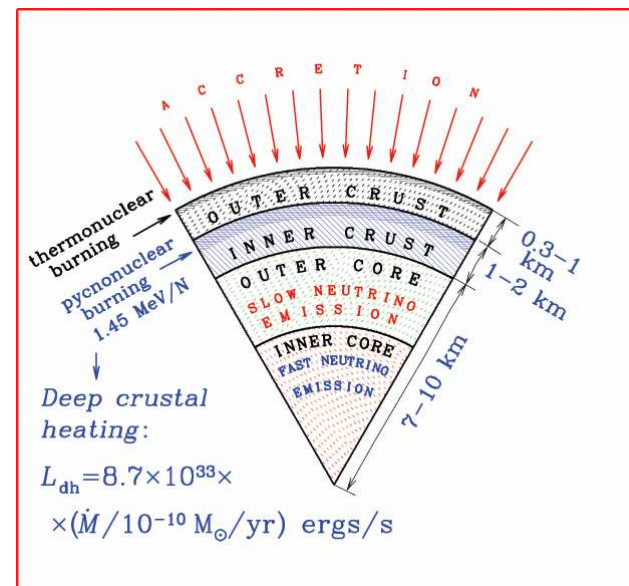


Мягкие рентгеновские транзиенты: глубокий прогрев коры



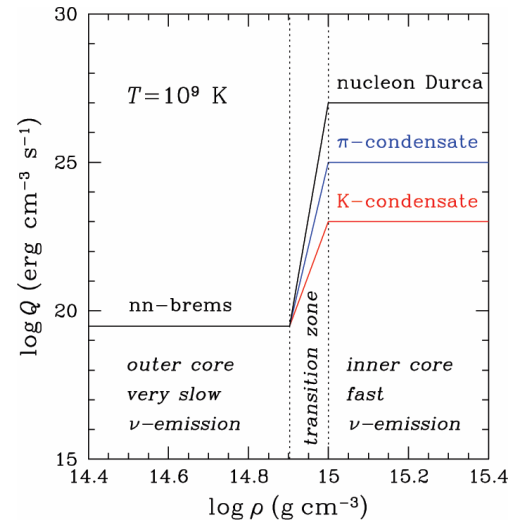
Haensel & Zdunik, *Astron. Astrophys.* **227**, 431 (1990)

В целом: 1,45 МэВ/нуклон

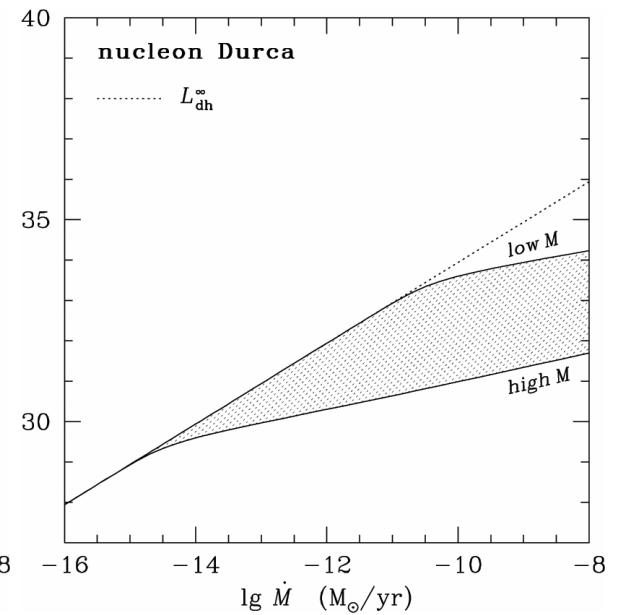
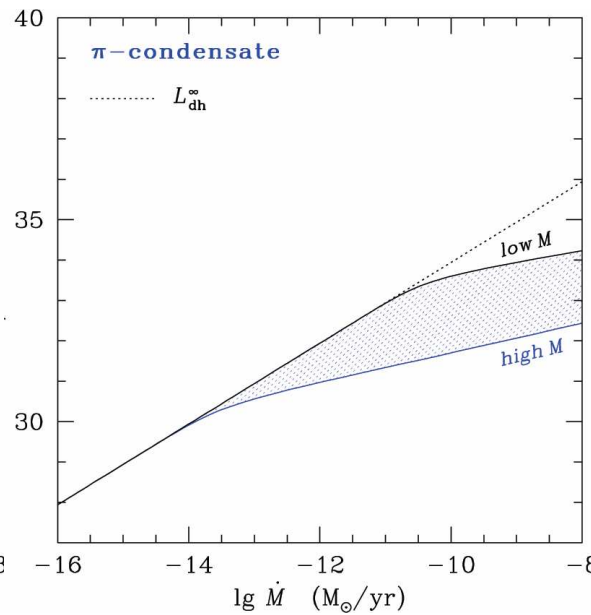
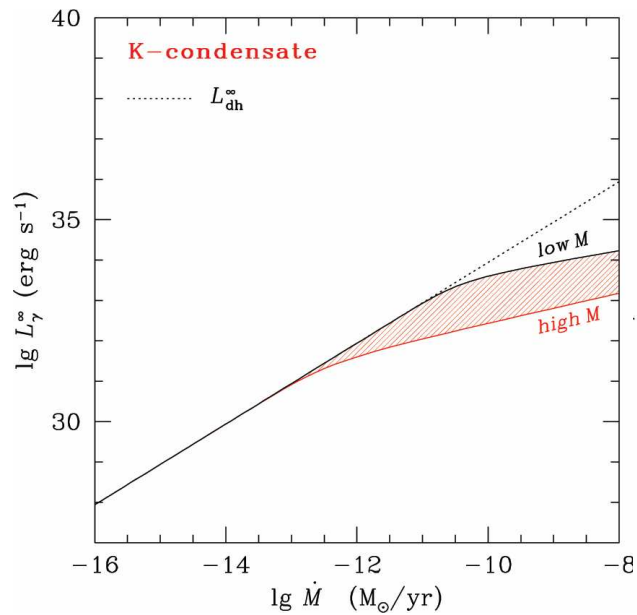


1.980×10^{30}	9.075×10^{11}	$^{52}\text{S} \rightarrow ^{46}\text{Si} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.07	0.13	0.09
2.253×10^{30}	1.131×10^{12}	$^{46}\text{Si} \rightarrow ^{40}\text{Mg} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	0.18	0.14	0.10
2.637×10^{30}	1.455×10^{12}	$^{40}\text{Mg} \rightarrow ^{34}\text{Ne} + 6n - 2e^- + 2\nu_e$	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»



Кривые подогрева для нейтронных звёзд нестандартного состава



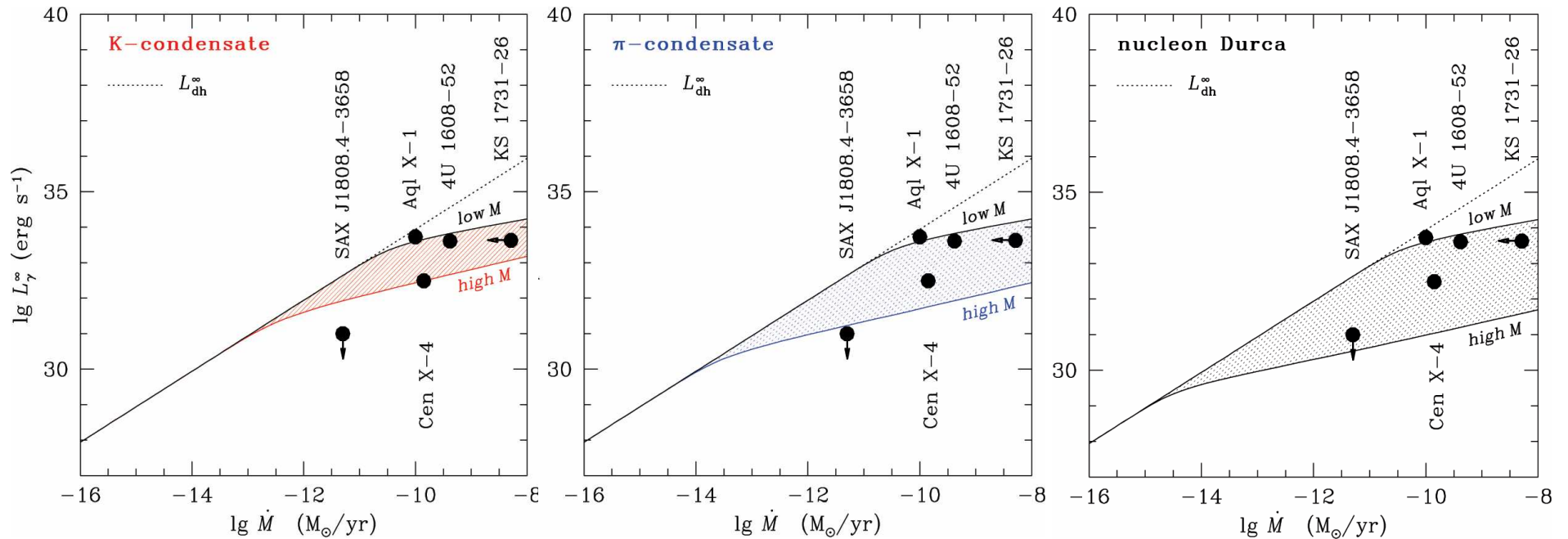
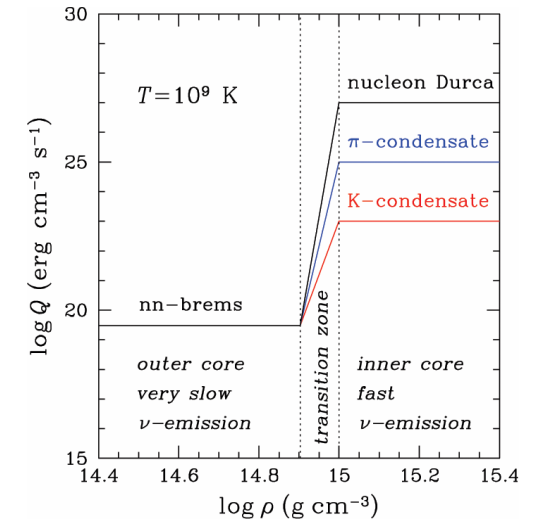
Мягкие рентгеновские транзиенты: «кривые подогрева»

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

Table 4. Parameters of NSs in SXRTs

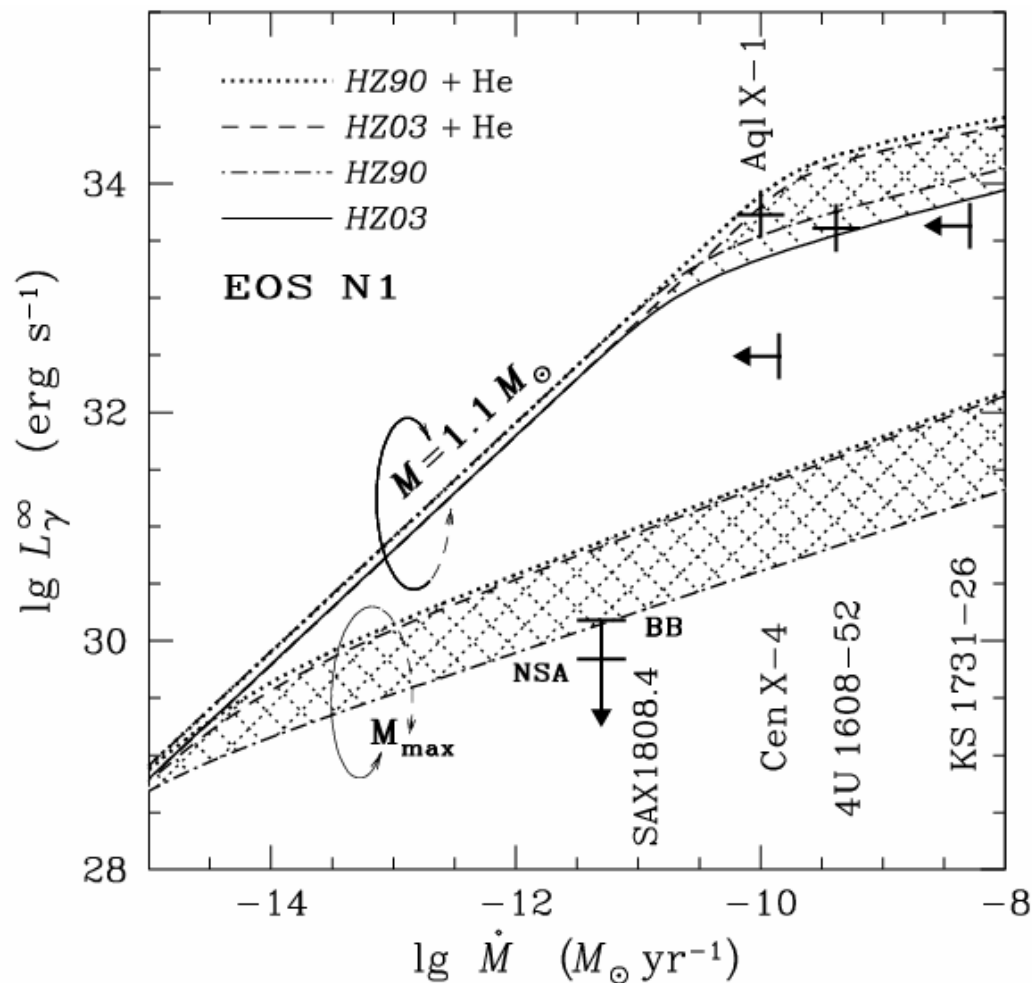
Source	\dot{M} , $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$	L_{γ}^{∞} , erg s^{-1}	T_s^{∞} , eV	R^{∞} , km	Reference
Aql X-1	1.0×10^{-10}	5.3×10^{33}	113	15.9	Rutledge et al. (2002b) : Table 6, fit 10
Cen X-4	1.4×10^{-10}	3.1×10^{32}	76 ^{*)}	12.9	Rutledge et al. (2001) : Table 4
4U 1608-522	4.2×10^{-10}	4.1×10^{33}	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}	$\approx 1.0 \times 10^{31}$	—	—	Campana et al. (2002) : Sect. 2.2

^{*)} nonredshifted



Мягкие рентгеновские транзиенты: «кривые подогрева»

Пример сравнения теоретических «кривых подогрева» МРТ с наблюдательными ограничениями



Теоретический тепловой поток в спокойном состоянии в зависимости от среднего темпа аккреции. Показаны результаты для разных масс и разных составов аккрецированной оболочки. Однократно и перекрёстно заштрихованные области соответствуют диапазонам светимости при разных толщинах слоя гелия для двух моделей коры (“HZ90” и “HZ03”).

Рисунок из статьи: Yakovlev et al., *Astron. Astrophys.* **417**, 169 (2004)