

# Тепловое излучение нейтронных звёзд с сильным магнитным полем

А. Ю. Потехин

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>ГАО РАН

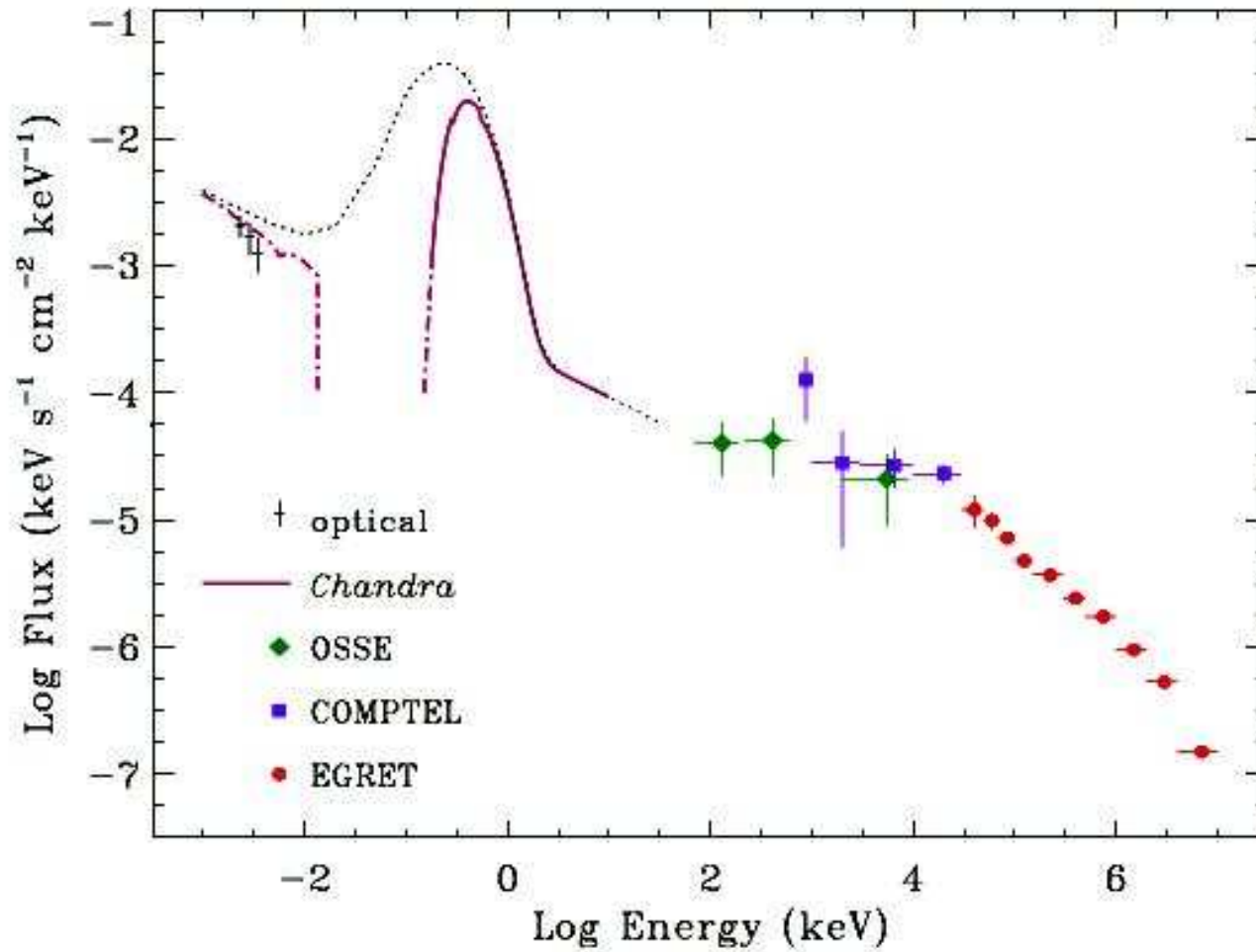
План:

Введение

1. Оболочки: уравнение состояния, теплопроводность, остывание
2. Формирование тепловых спектров
  - 2.1. Атмосферы: уравнение состояния, непрозрачности, спектры
  - 2.2. Излучение конденсированной поверхности и гибридные модели

Заключение

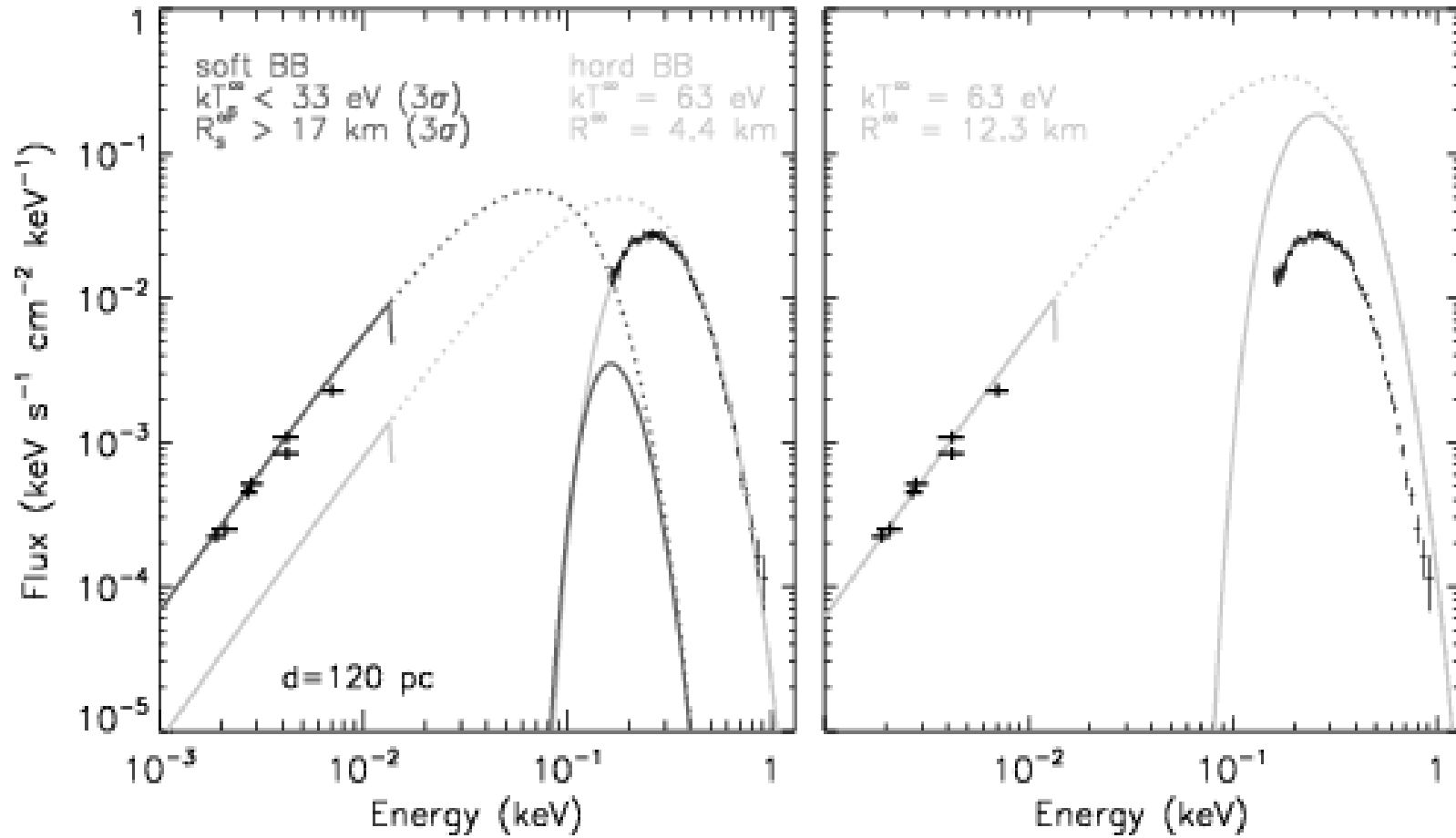
## Типичный спектр изолированной нейтронной звезды



Multiwavelength spectrum of the Vela pulsar

G.G.Pavlov, V.E.Zavlin, & D.Sanwal (2002) in *Neutron Stars, Pulsars, and Supernova Remnants*, ed. W.Becker, H.Lesch, & J.Trümper, *MPE Report* **278**, 273

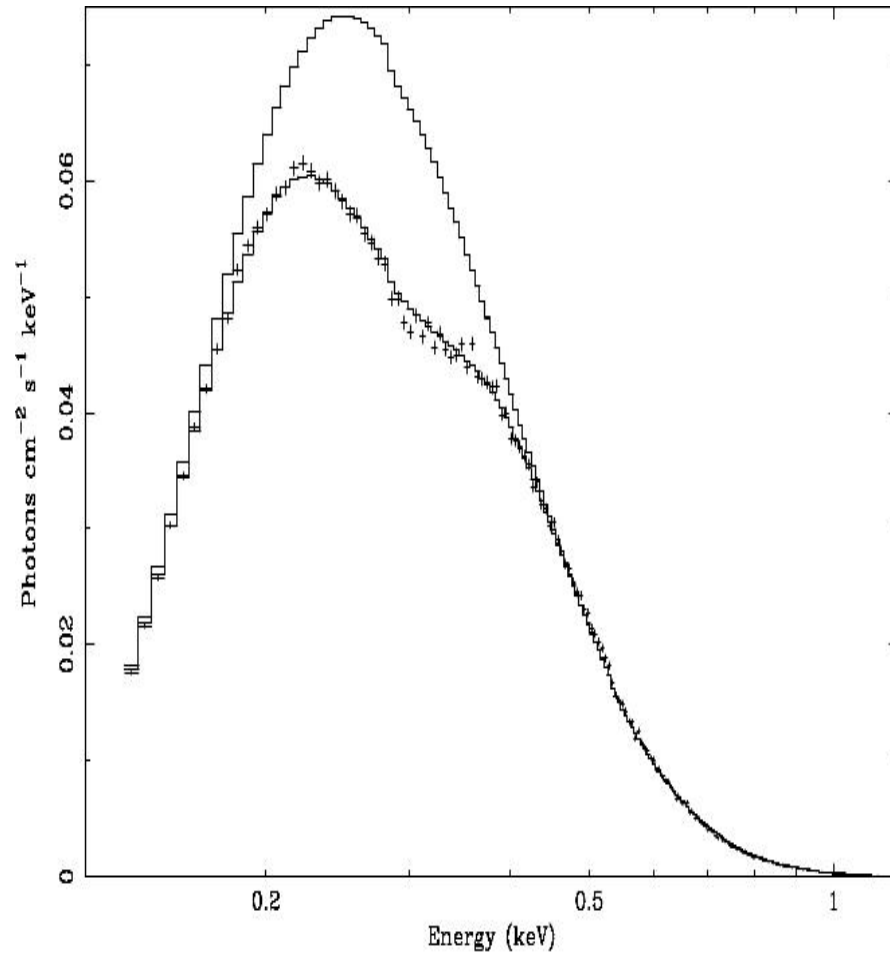
*Пример спектра радиотихой нейтронной звезды*



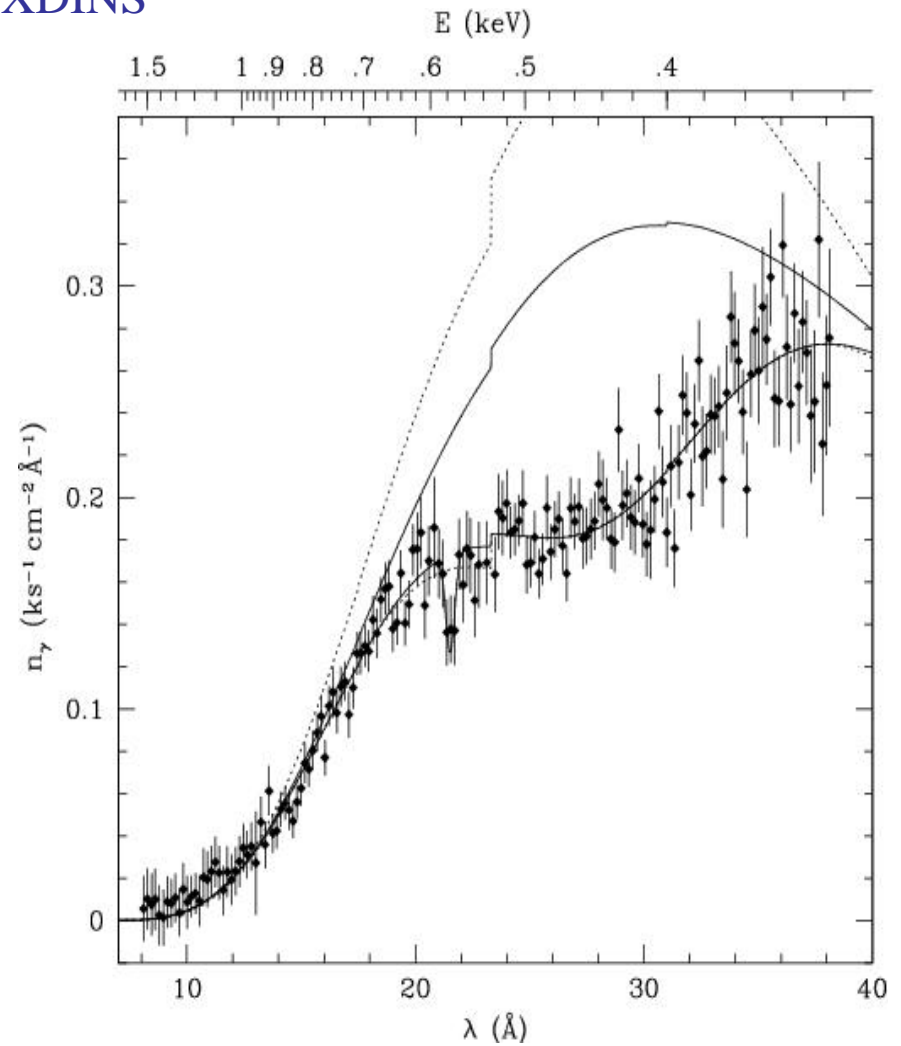
Burwitz et al. (2003). Spectrum of RX J1856.5-3754

# Особенности в спектрах радиотихих нейтронных звёзд

## Примеры для XDINS

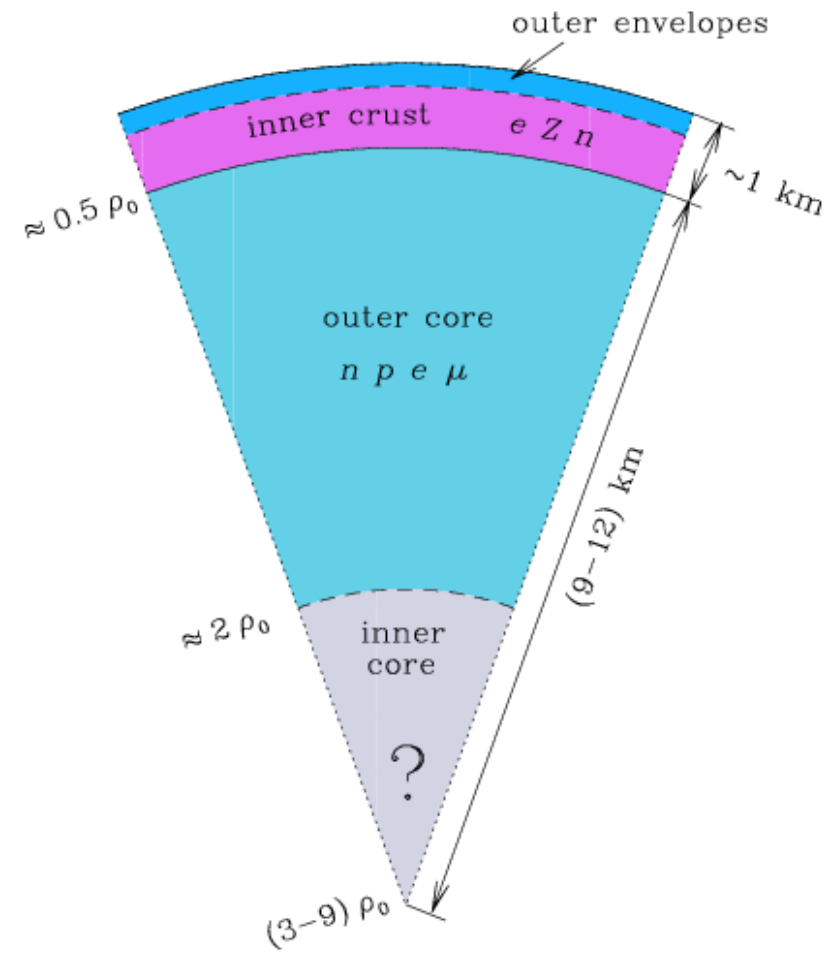


Haberl *et al.* (2004) *A&A* **419**, 1077:  
absorption line in RX J0720.4-3125

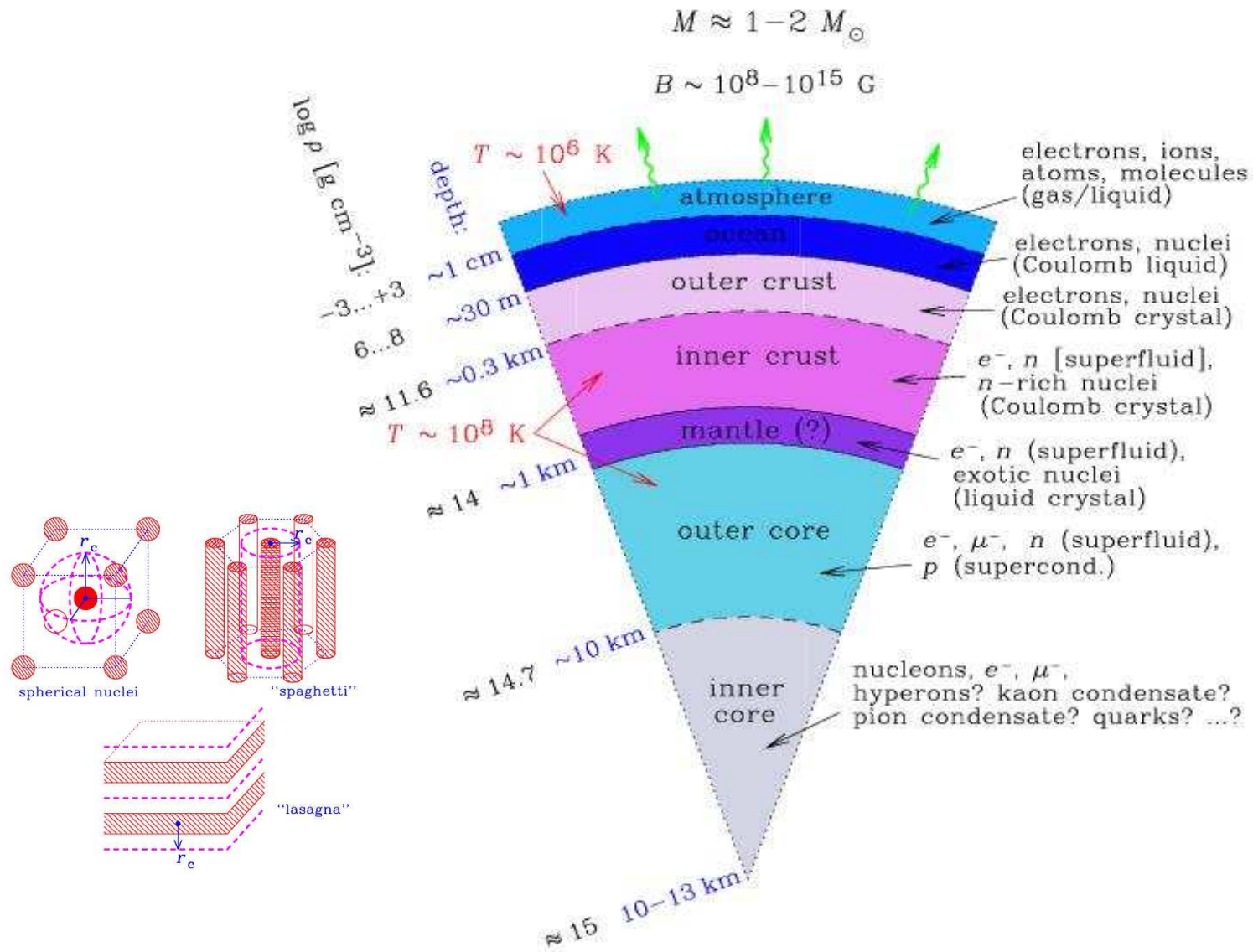


van Kerkwijk *et al.* (2004) *ApJ* **608**, 432:  
absorption line in RX J1605.3+3249

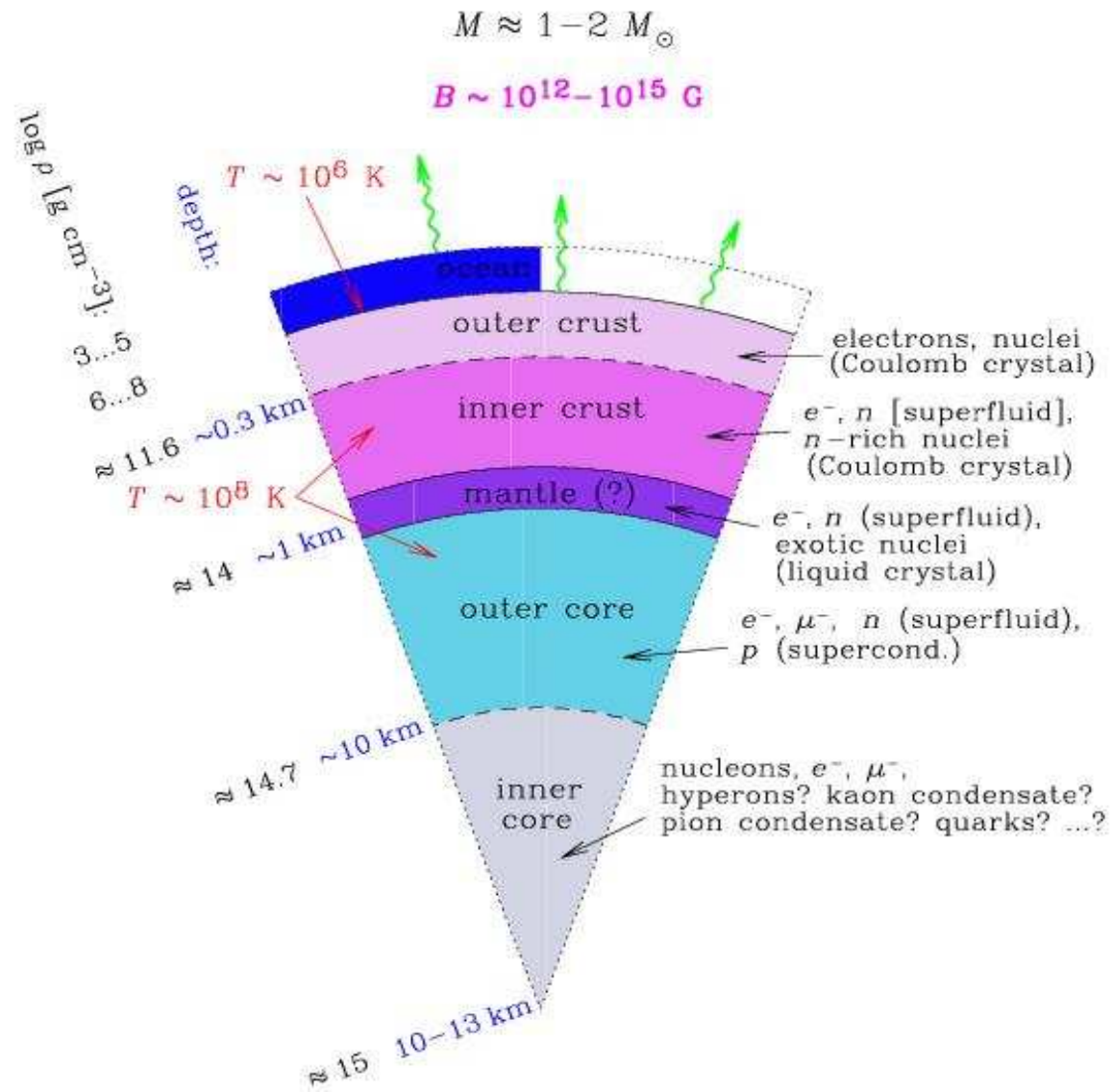
## Структура нейтронной звезды



## Более детальная структура оболочек



# Вариант – нейтронная звезда без атмосферы



# Характерные масштабы магнитных полей

Сильное магнитное поле  $B$ :

$$E_{ce} = \hbar\omega_{ce} = \hbar eB/m_e c = 115.77 B_{13} \text{ keV} > 1 \text{ a.u.} = 0.02721 \text{ keV}$$

$$B > m_e^2 c^3 / \hbar^3 = 2.35 \times 10^9 \text{ G}$$

Сверхсильное поле:

$$E_{ce} > m_e c^2$$

$$B > m_e^2 c^3 / e \hbar = 4.4 \times 10^{13} \text{ G}$$

Сильно квантующее магнитное поле:

$$\rho < \rho_B = m_{\text{ion}} n_B A/Z \approx 2.2 \times 10^5 B_{13}^{3/2} (A/Z) \text{ g cm}^{-3}$$

$$T \ll T_B = \hbar\omega_{ce} / k_B \approx 1.3 \times 10^9 B_{13} \text{ K}$$

Квантующее магнитное поле для ионов:

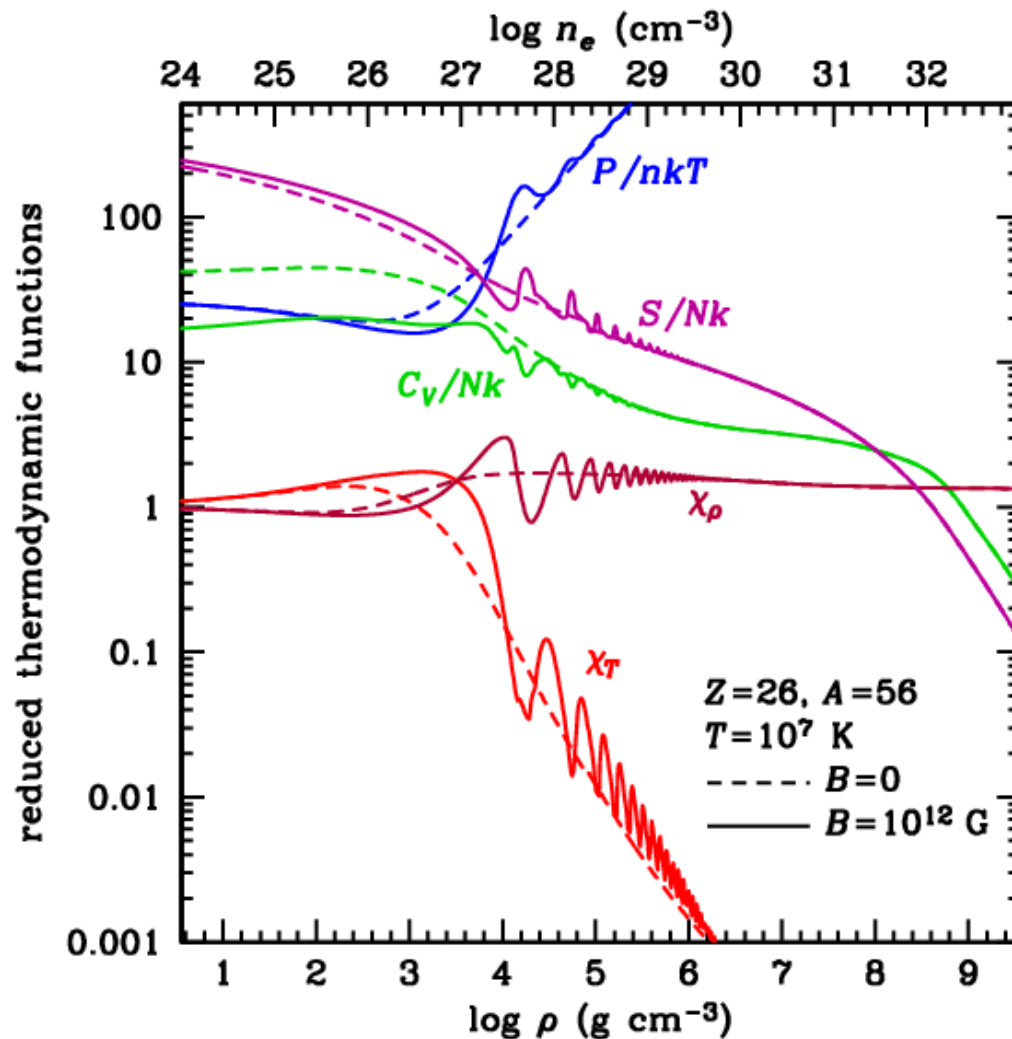
$$E_{ci} = \hbar\omega_{ci} = 0.06351 B_{13} \text{ keV},$$

$$E_{ci}/k_B \approx 7.37 \times 10^5 (Z/A) B_{13} \text{ K}$$



## Уравнение состояния в оболочках

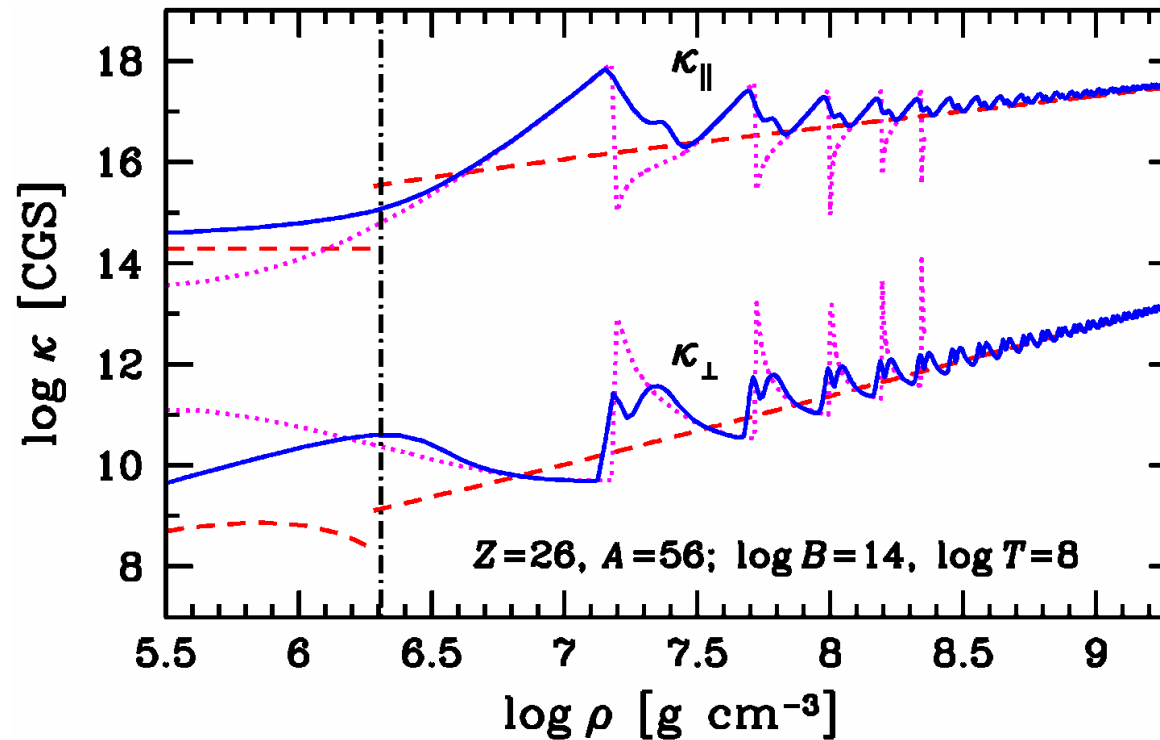
<http://www.ioffe.ru/astro/EIP/>



Нормированные термодинамические функции полностью ионизованного железа без магнитного поля (пунктир) и в сильном магнитном поле (сплошные кривые)

## Теплопроводности в сильно замагниченных оболочках

<http://www.ioffe.ru/astro/conduct/>



Сплошные кривые – точный расчёт, точечные – без  $T$ -интегрирования,  
пунктир – без магнитного квантования

Ventura & Potekhin (2001), in *The Neutron Star – Black Hole Connection*, ed. Kouveliotou *et al.* (Dordrecht: Kluwer) 393

**Сводка и ссылки:** Cassisi, AYR, *et al.* (2007) *Astrophys.J.* **661**, 1094

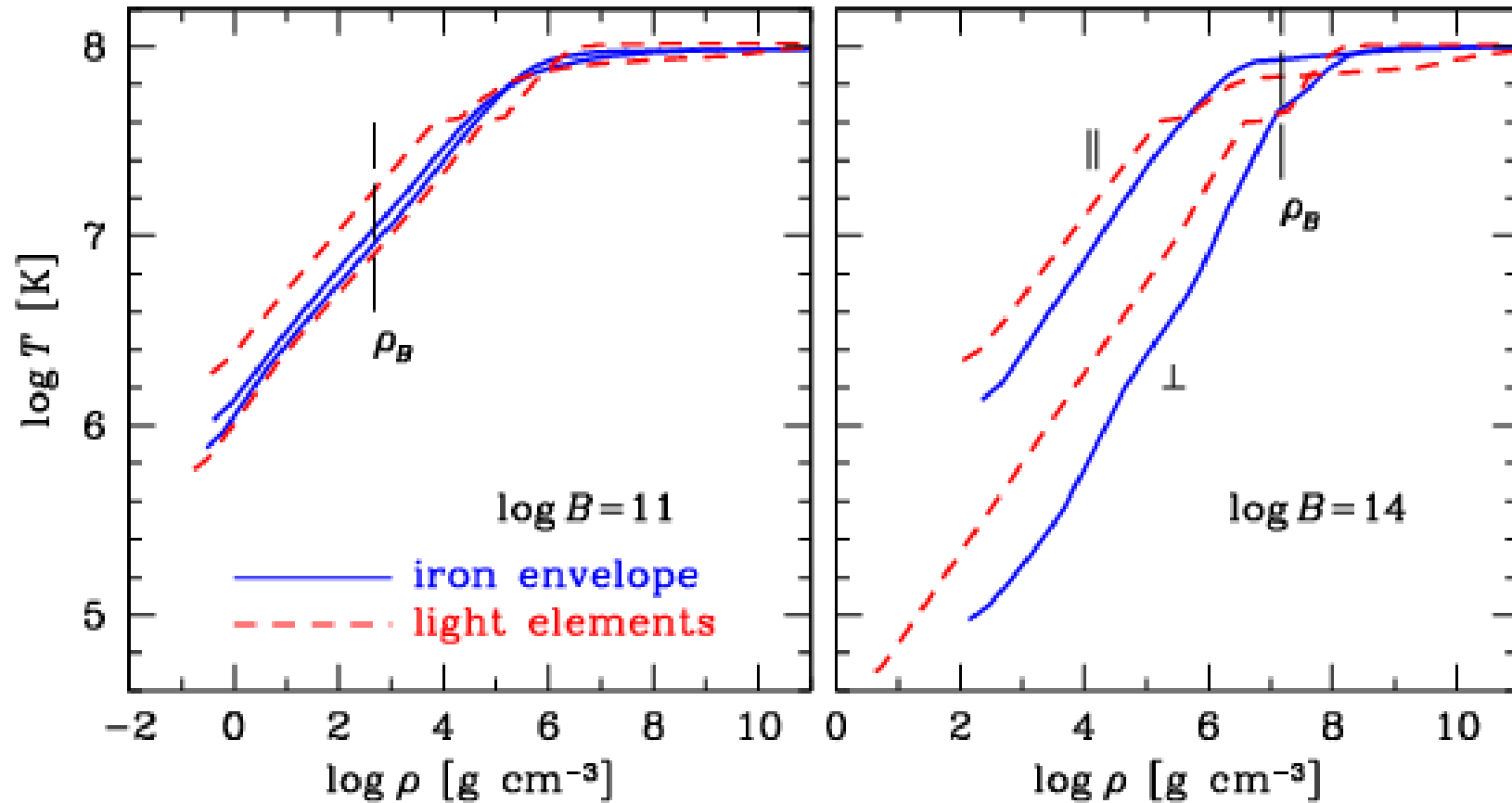
**Исправление при очень низких температурах:** Чугунов (2012) *ПАЖ* **38**, 28

**Ионная теплопроводность:** Chugunov & Haensel (2007) *MNRAS* **381**, 1143

**Нейтронная теплопроводность:** Aguilera *et al.* (2009) *Phys. Rev. Lett.* **102**, 091109

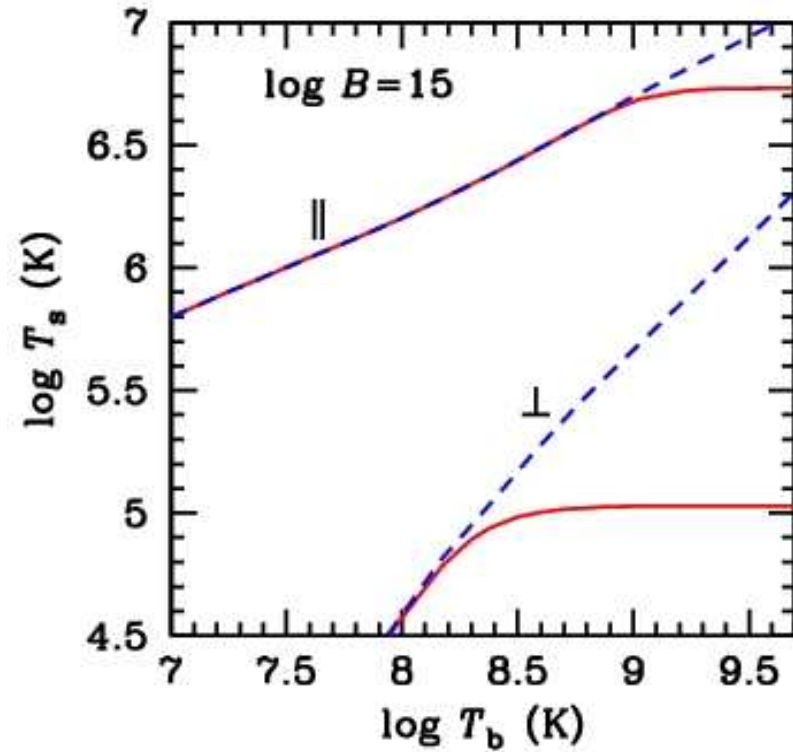
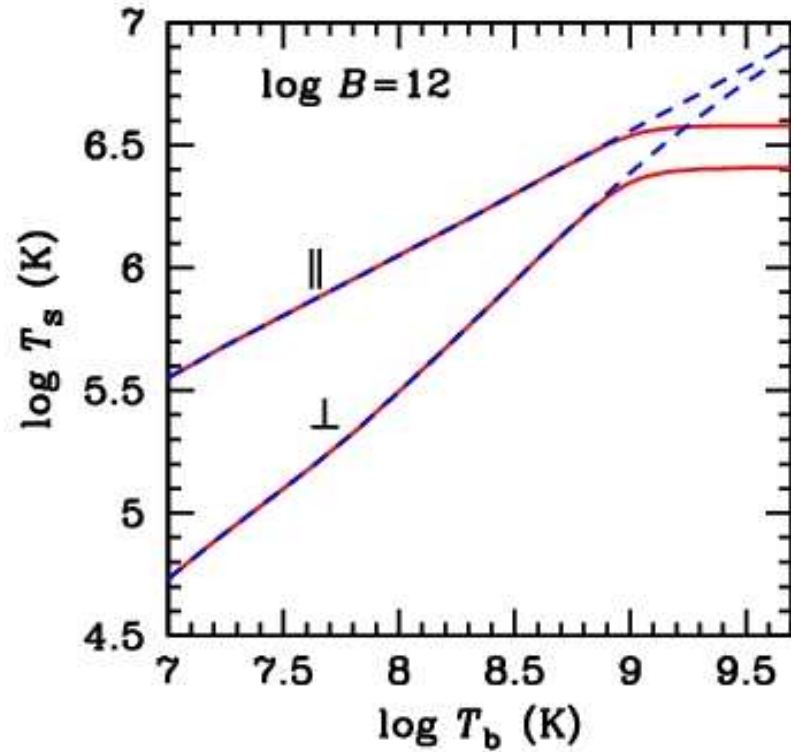
**но: «увлечение» нейтронов –** Chamel, Page, & Reddy (2013) *Phys. Rev. C* **87**, 035803

## Профили температуры в оболочках



$$T_s - T_b$$

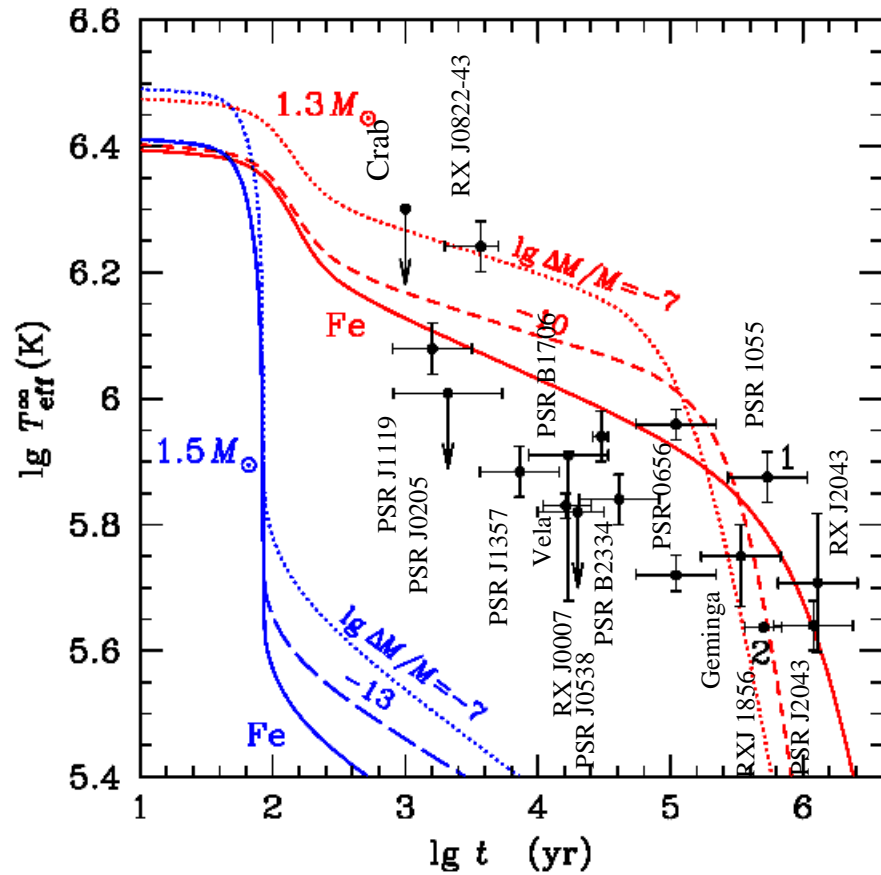
*Перепады температур на толщине теплоизолирующей оболочки*



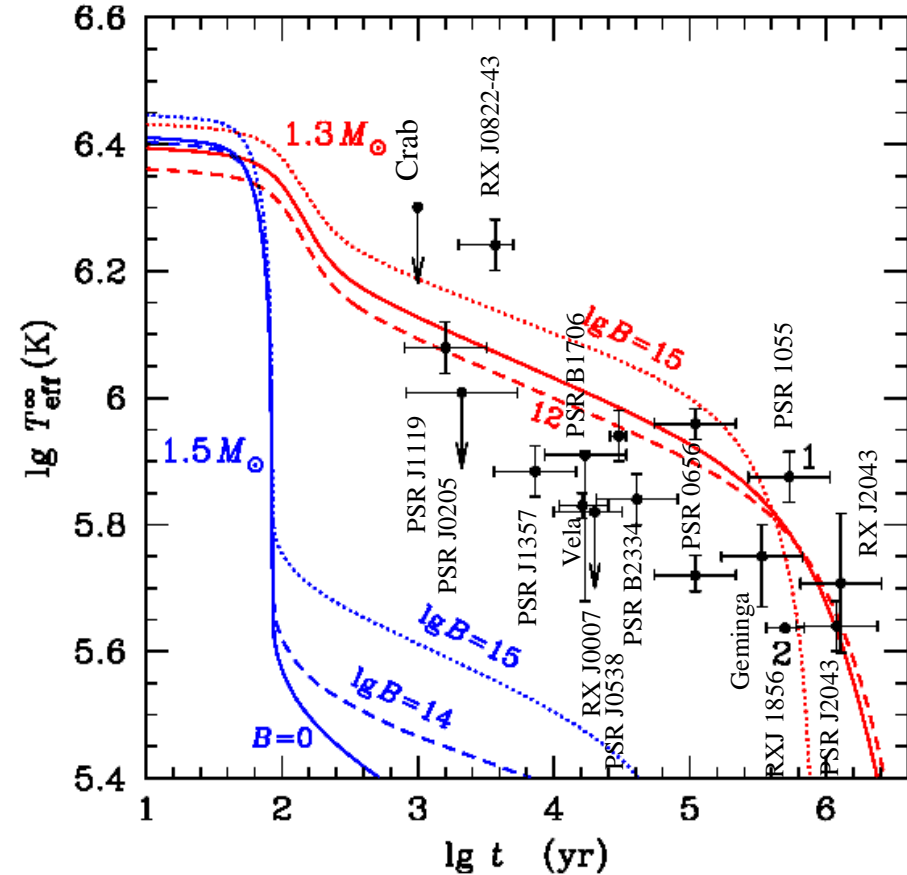
Эффективная поверхностная температура  $T_s$  как функция внутренней температуры  $T_b$

AYP, Chabrier, Yakovlev (2007) *ApSS* **308**, 353

*Остывание нейтронных звёзд  
с аккрецированными оболочками*



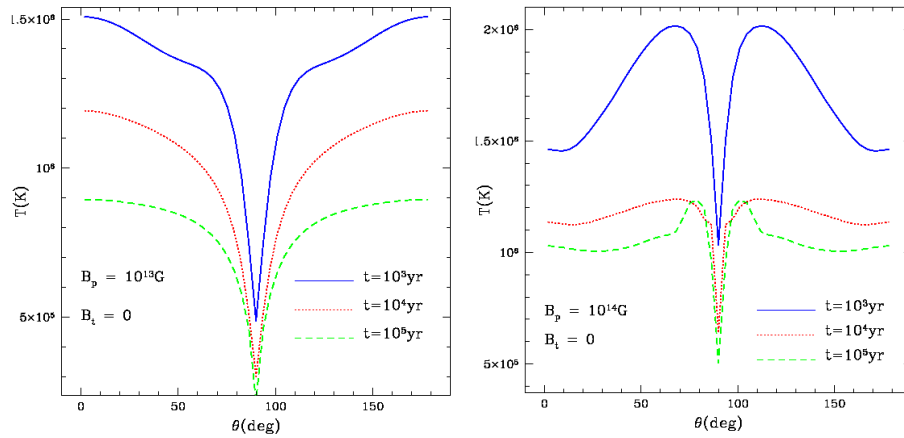
*Остывание нейтронных звёзд  
с замагниченными оболочками*



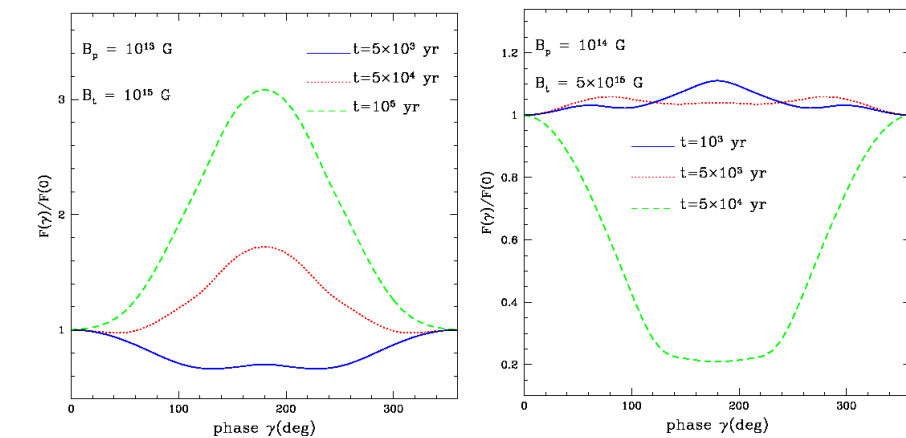
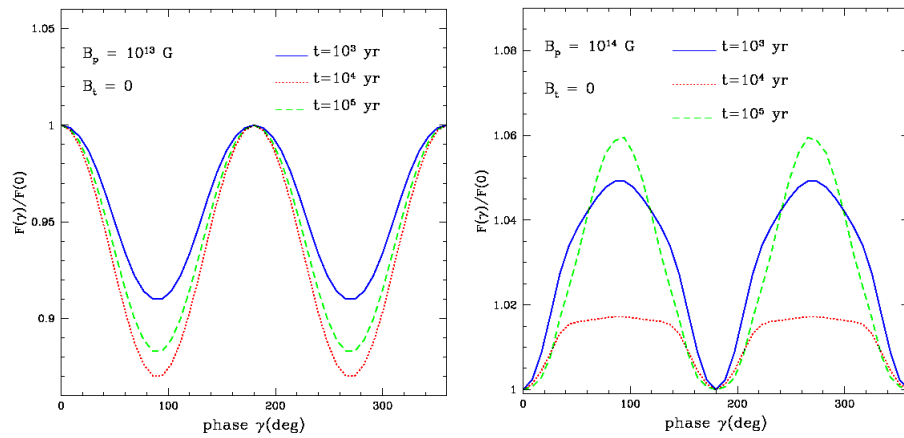
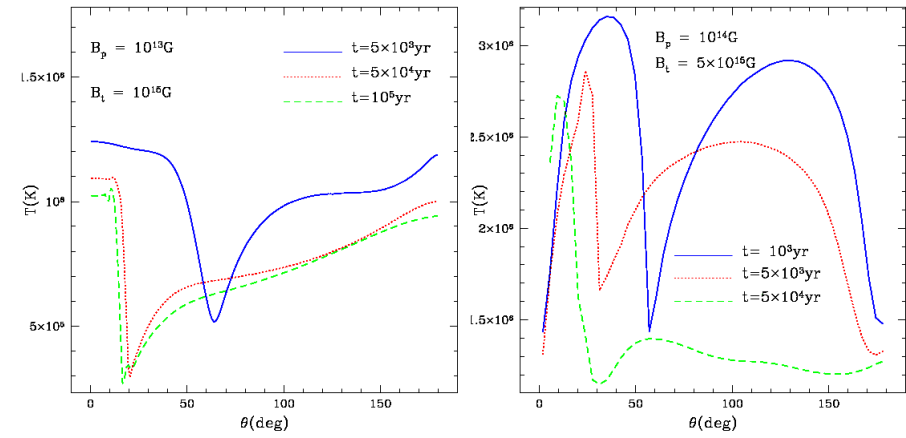
# Распределение температуры по поверхности и формы импульсов

Perna, Viganò, Pons, & Rea (2013) *MNRAS* **434**, 2362

## Dipole field at birth



## Dipole + toroidal field at birth



## *Атмосферы: общий подход*

Стандартные методы – D.Mihalas (1978) *Stellar Atmospheres*

Общий алгоритм – решение связанных уравнений:

- Гидростатического равновесия
- Энергетического баланса
- Переноса излучения

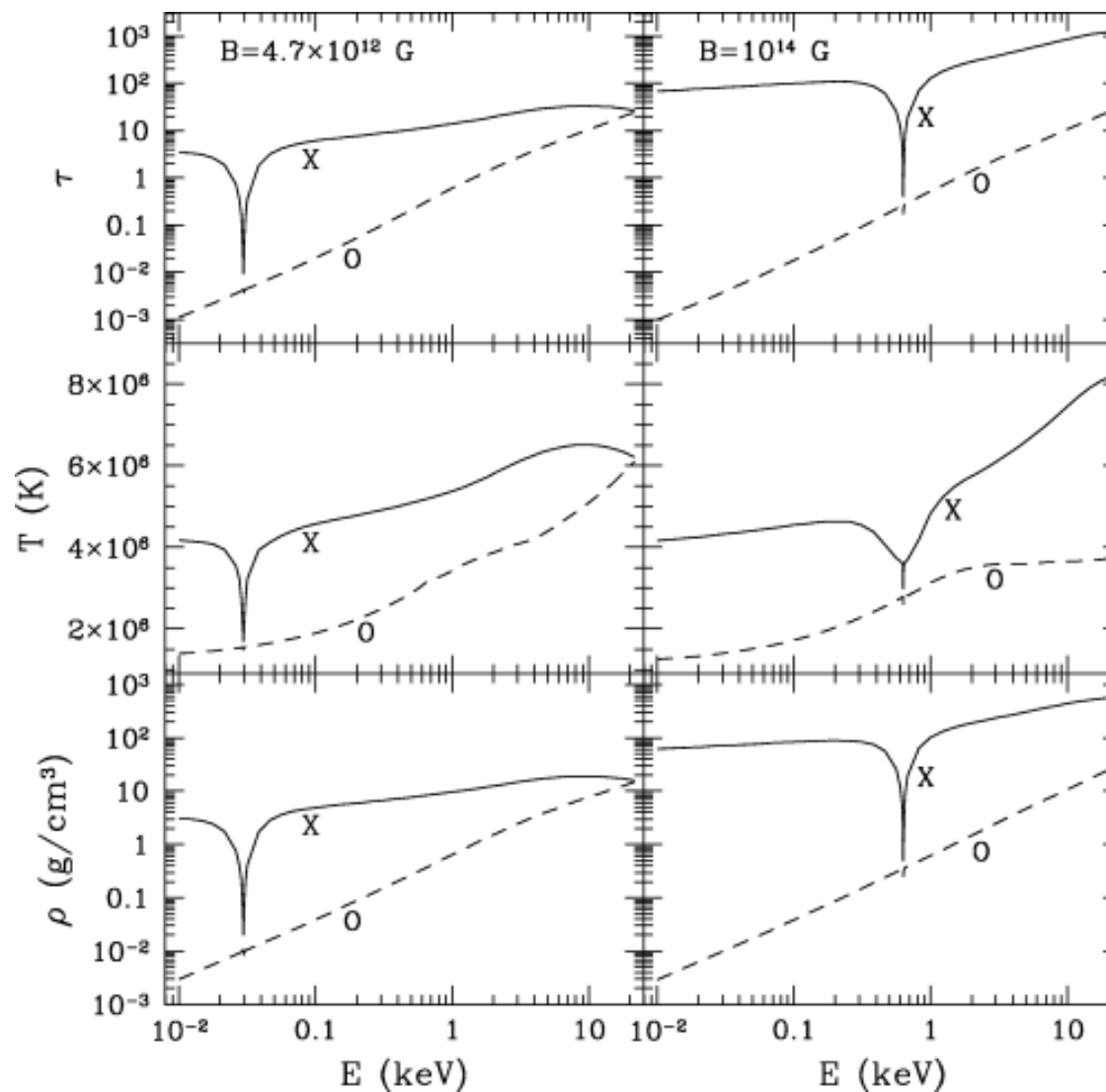
Основные составляющие:

- Уравнение состояния
- Спектральные непрозрачности

В общем случае, для этого требуется учитывать:

- Атомные и молекулярные данные (энергии связи, сечения)
- Ионизационное равновесие
- Термодинамические величины
- Плазменные эффекты (уширение линий, ионизация давлением и т.д.)

## *Полностью ионизованные атмосферы нейтронных звёзд с сильными полями*



Ю.Н.Гнедин,  
Г.Г.Павлов,  
Ю.А.Шибанов,  
А.Д.Каминкер,  
Д.Г.Яковлев,  
(1970е – 1980е)

В.Е.Завлин,  
Ю.А.Шибанов,  
Г.Г.Павлов,  
J.Ventura  
(1990е)

S.Zane & R.Turolla,  
W.C.G.Ho & D.Lai  
(2000е)

Характеристики атмосферы на оптической глубине = 1 для X- и O-мод поляризации

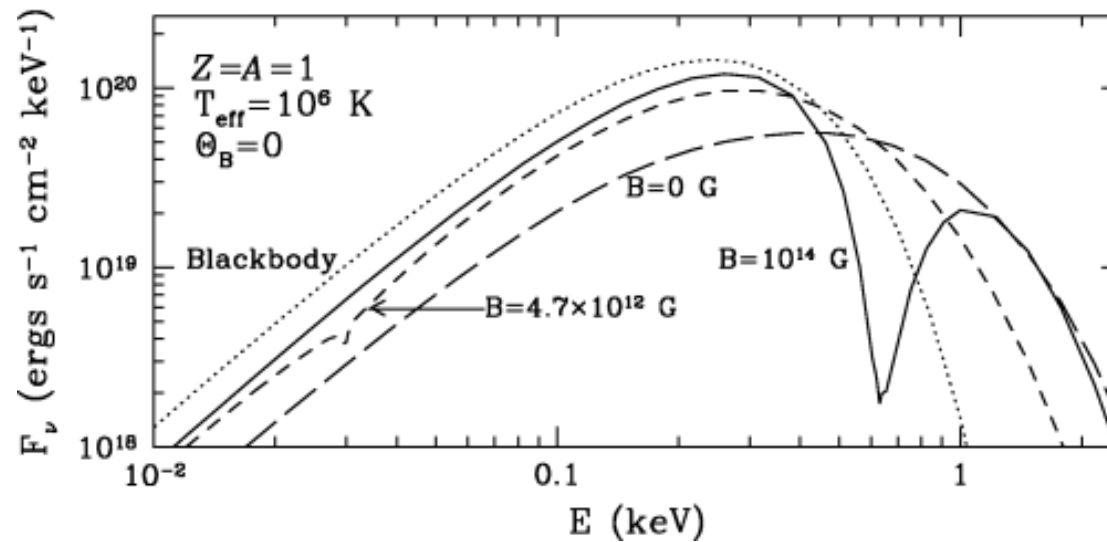
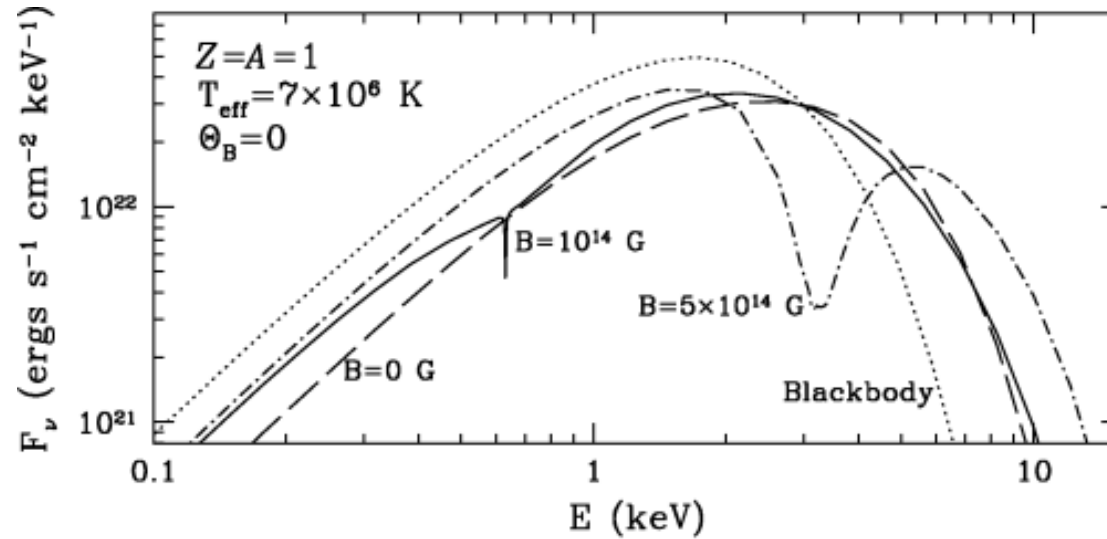


## *Полностью ионизованные атмосферы нейтронных звёзд с сильными полями*

Ю.Н.Гнедин,  
Г.Г.Павлов,  
Ю.А.Шибанов,  
А.Д.Каминкер,  
Д.Г.Яковлев,  
(1970е – 1980е)

В.Е.Завлин,  
Ю.А.Шибанов,  
Г.Г.Павлов,  
J.Ventura  
(1990е)

S.Zane & R.Turolla,  
W.C.G.Ho & D.Lai  
(2000е)



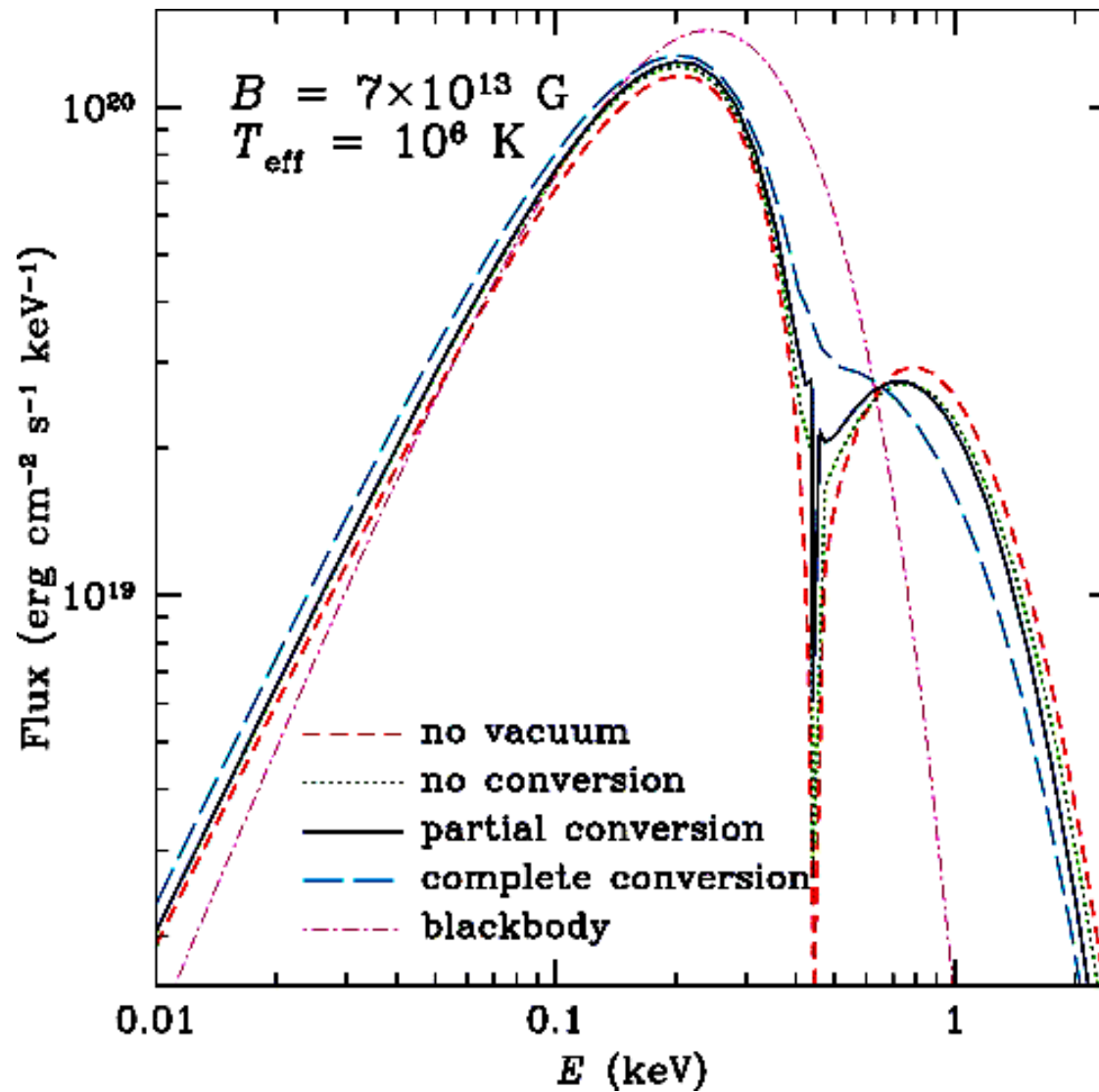
Сравнение спектров немагнитных и магнитных атмосфер

# Влияние поляризации вакуума

Ю.Н.Гнедин, Г.Г.Павлов,  
(1970e – 1984)

Ho & Lai (2003) *MNRAS* **338**, 233

van Adelsberg & Lai (2007)  
*MNRAS* **373**, 495



## Связанные состояния в сильных магнитных полях

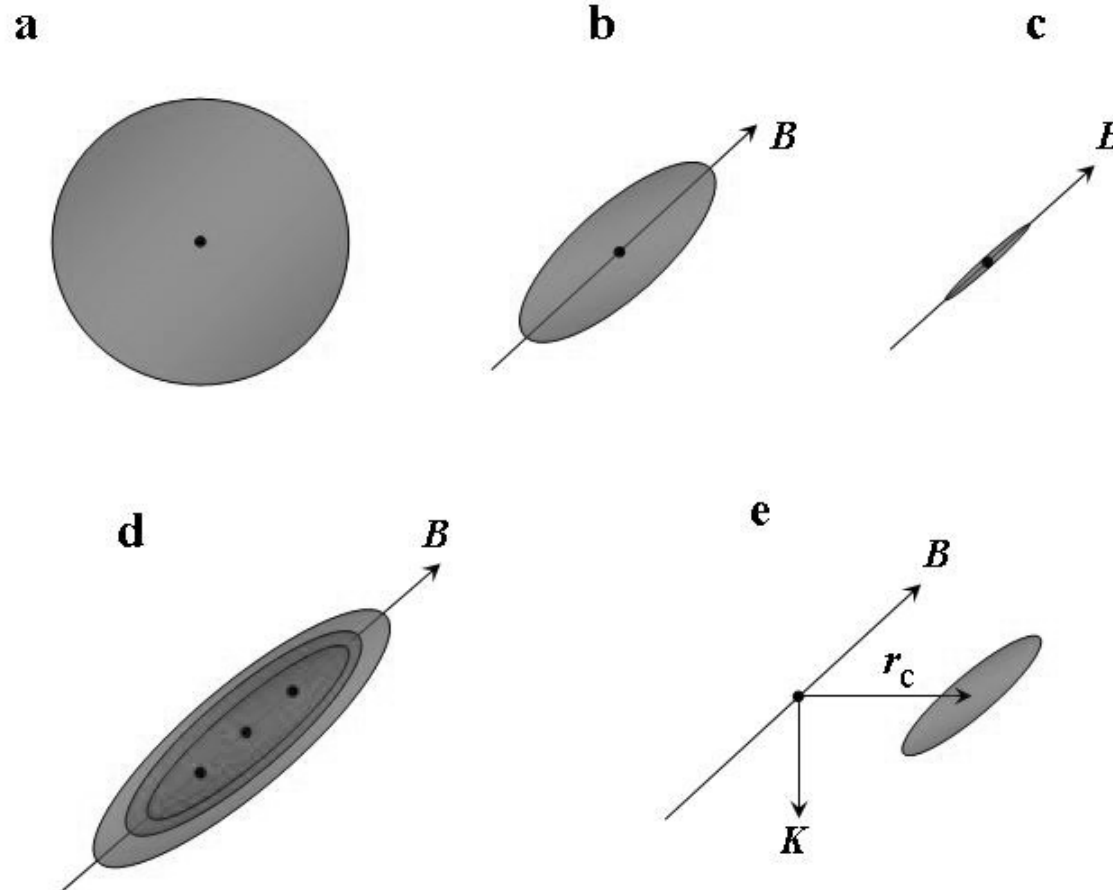
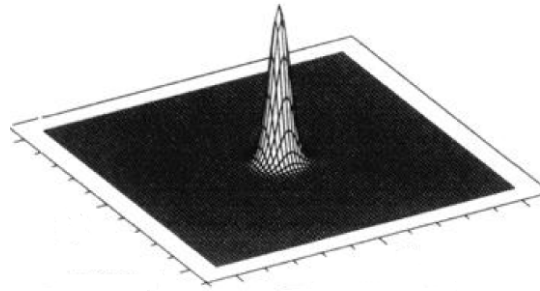


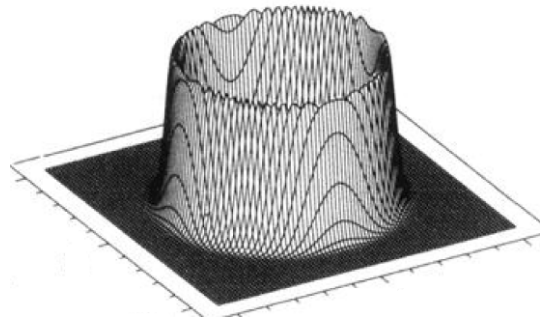
Иллюстрация влияния сильного магнитного поля на атомы.  
**a–c:** атом H в основном состоянии (**a:**  $B \ll 10^9$  G, **b:**  $B \sim 10^{10}$  G, **c:**  $B \sim 10^{12}$  G).  
**d:** Поле стабилизирует молекулярные цепочки.  
**e:** При движении поперёк магнитного поля возникает асимметрия.

# Примеры влияния сильного магнитного поля на волновые функции

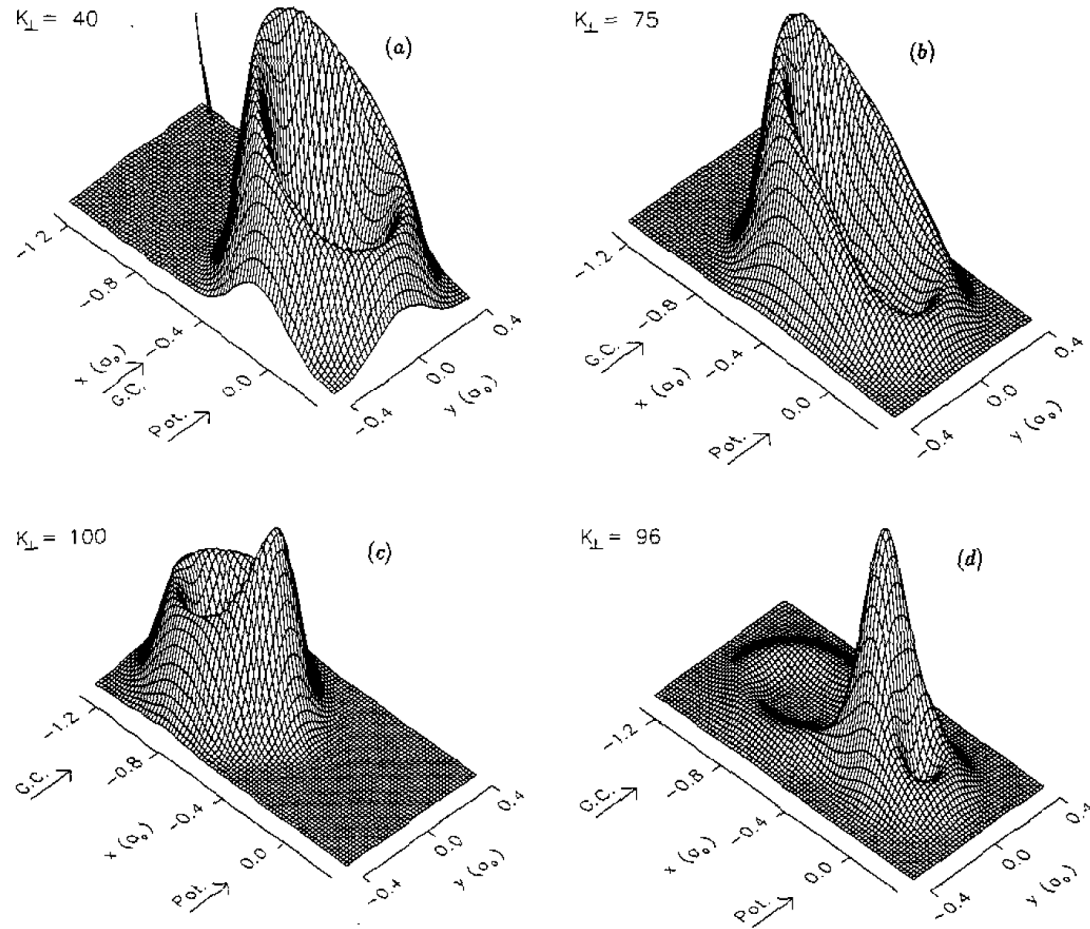
основное состояние



возбужденное состояние



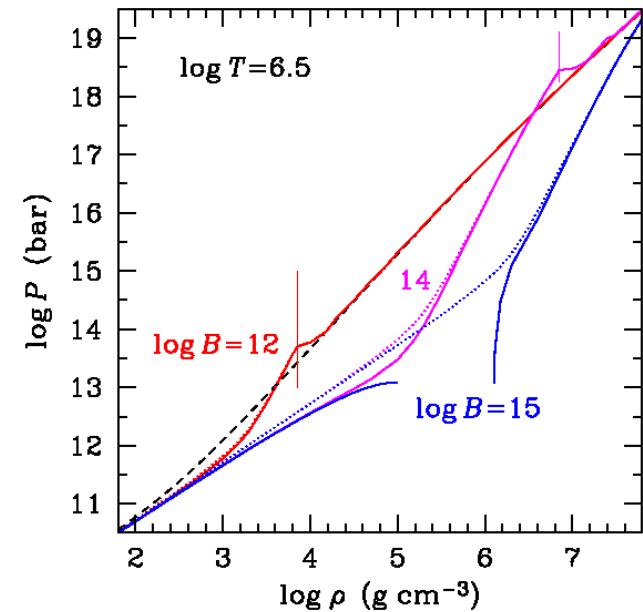
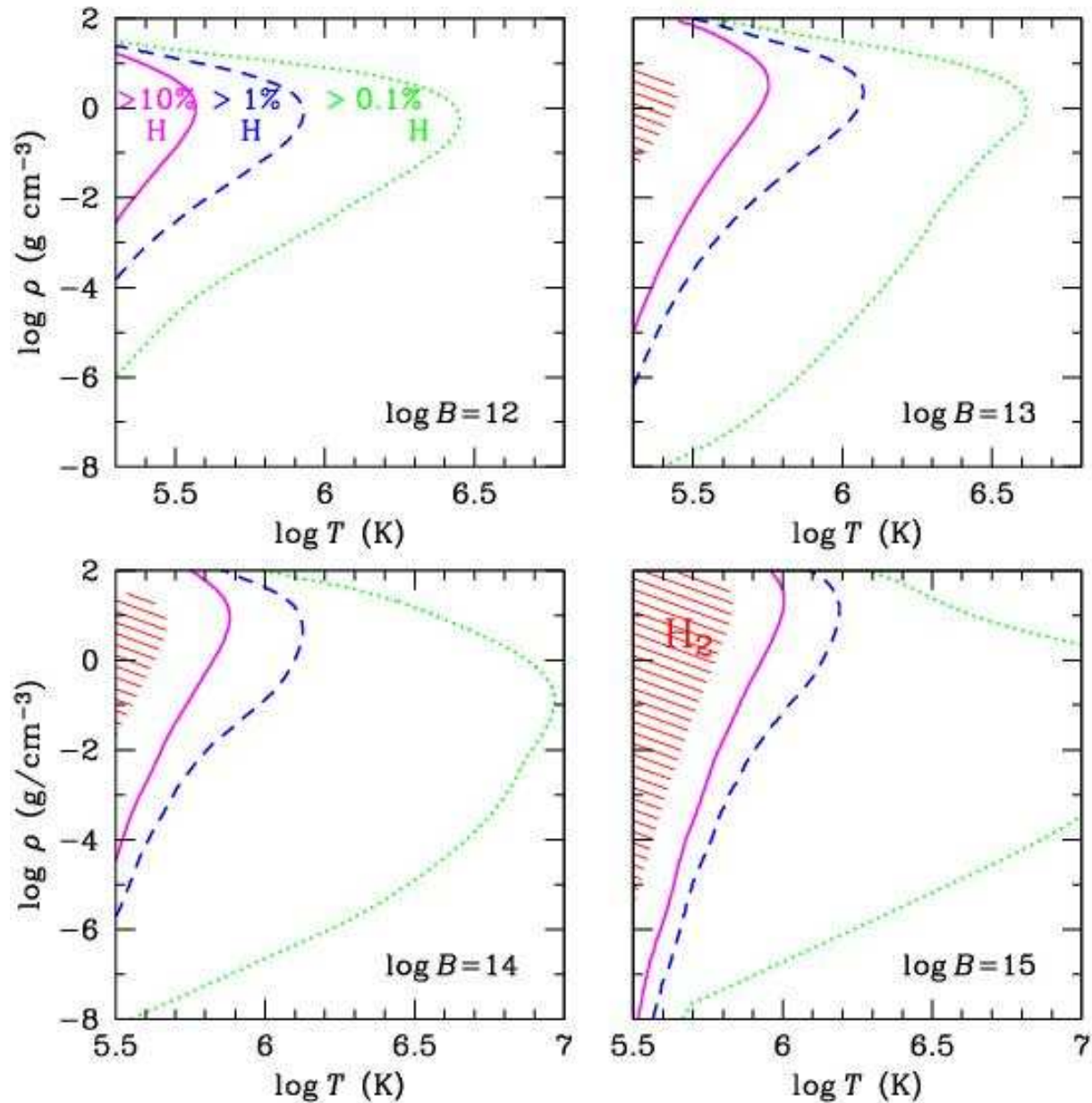
возбужденное состояние ( $m=-5$ ) + движение



Квадраты модулей волновых функций неподвижного (левая колонка) и движущегося атома водорода в магнитном поле  $B=2.35 \times 10^{11}$  Г в плоскости, перпендикулярной полю.

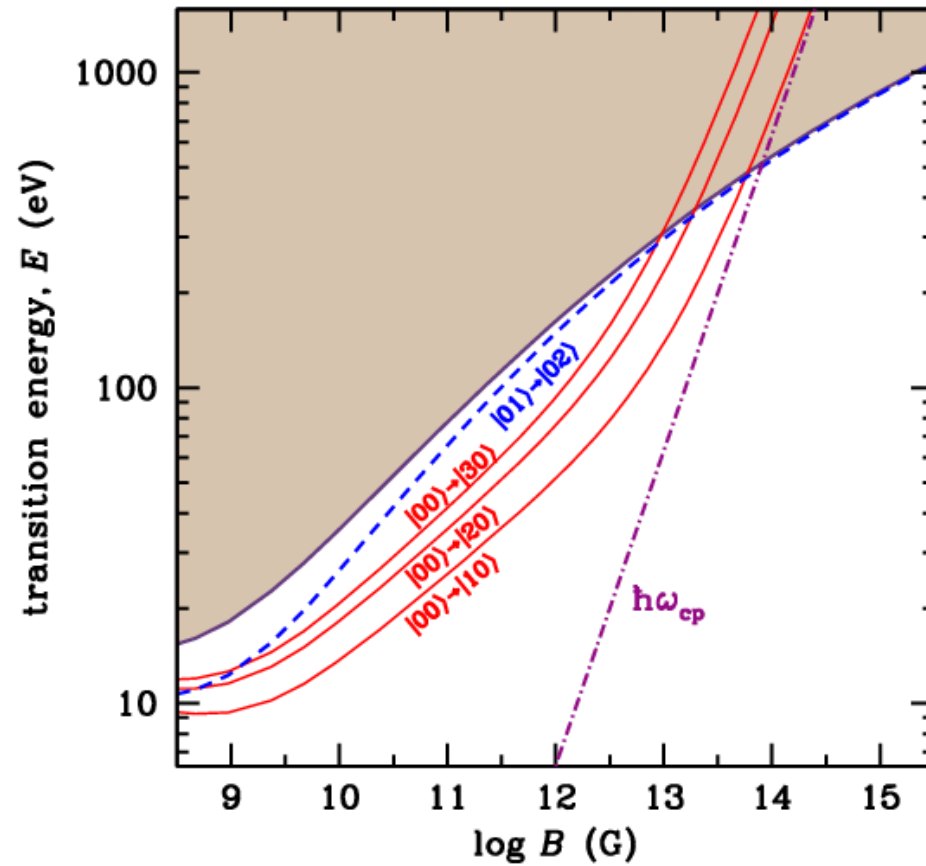
# Ионизационное равновесие и уравнение состояния

<http://www.ioffe.ru/astro/EIP/>



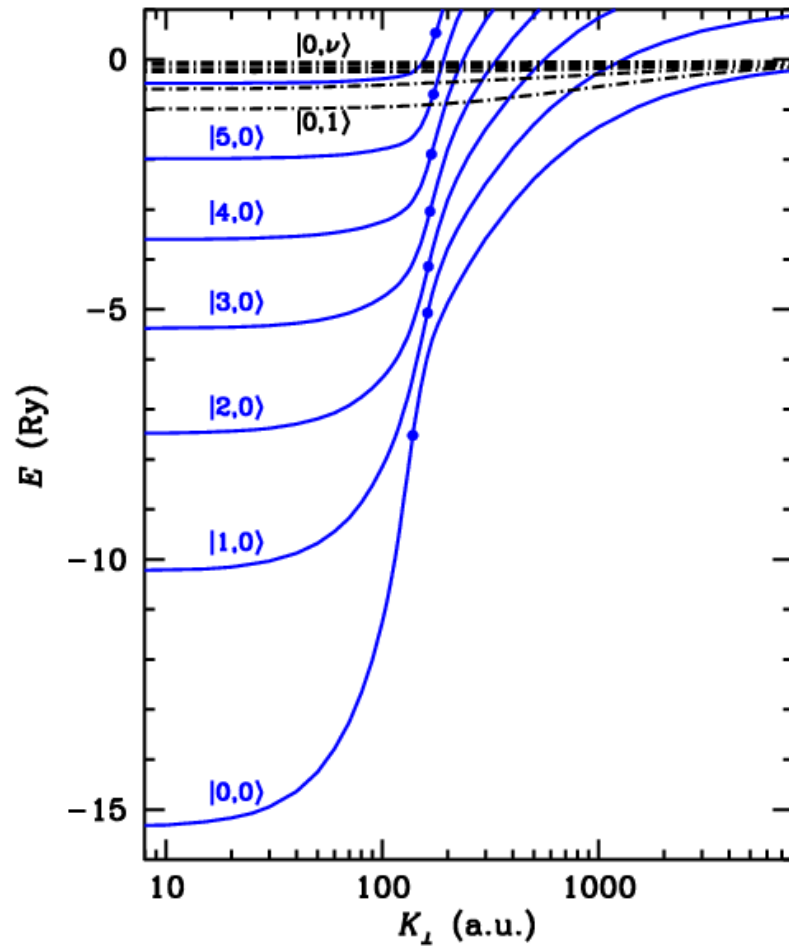
Уравнение состояния идеальной (точечные кривые) и неидеальной (сплошные) H плазмы при разных  $B$   
[AYP & Chabrier (2004) *ApJ* **600**, 317]

*Зависимость энергий переходов между уровнями атома  
от магнитного поля*

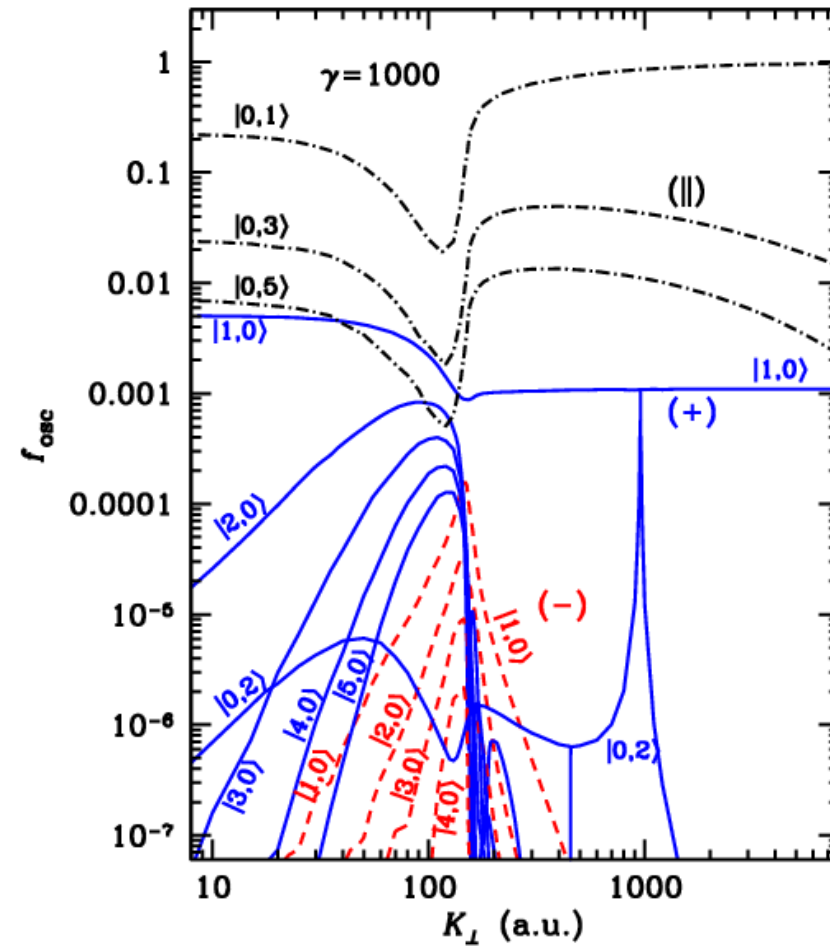


Основные энергии переходов для атома водорода как функции  $B$   
[AYP & Chabrier (2004) *ApJ*, **600**, 317]

## Переходы между дискретными уровнями: *эффекты движения*

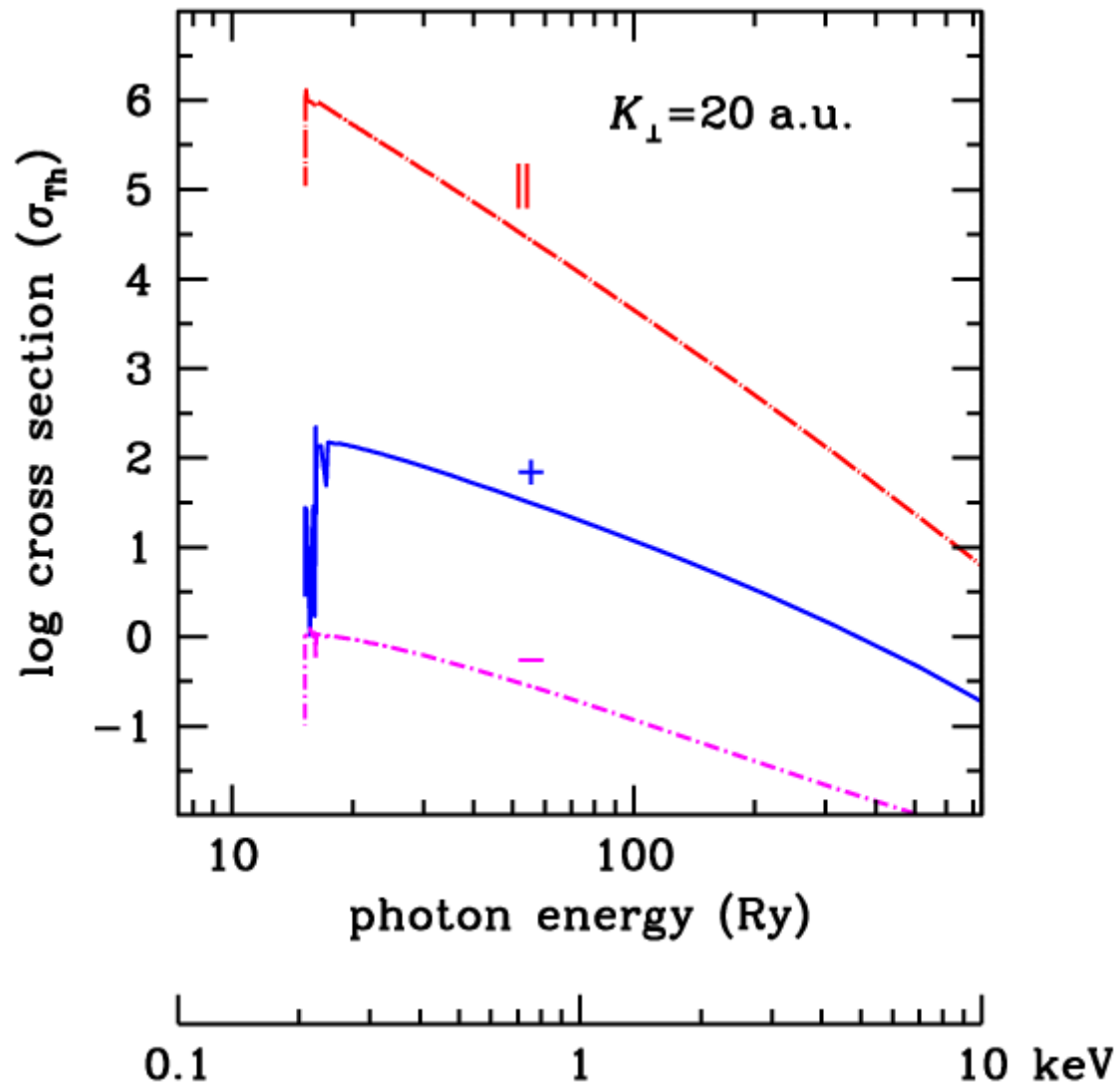


Энергии связи атома водорода в поле  $B=2.35 \times 10^{12}$  G как функции поперечного обобщённого импульса  $K$



Силы осцилляторов для переходов из основного на возбуждённые уровни атома водорода в поле  $B=2.35 \times 10^{12}$  G как функции поперечного обобщённого импульса

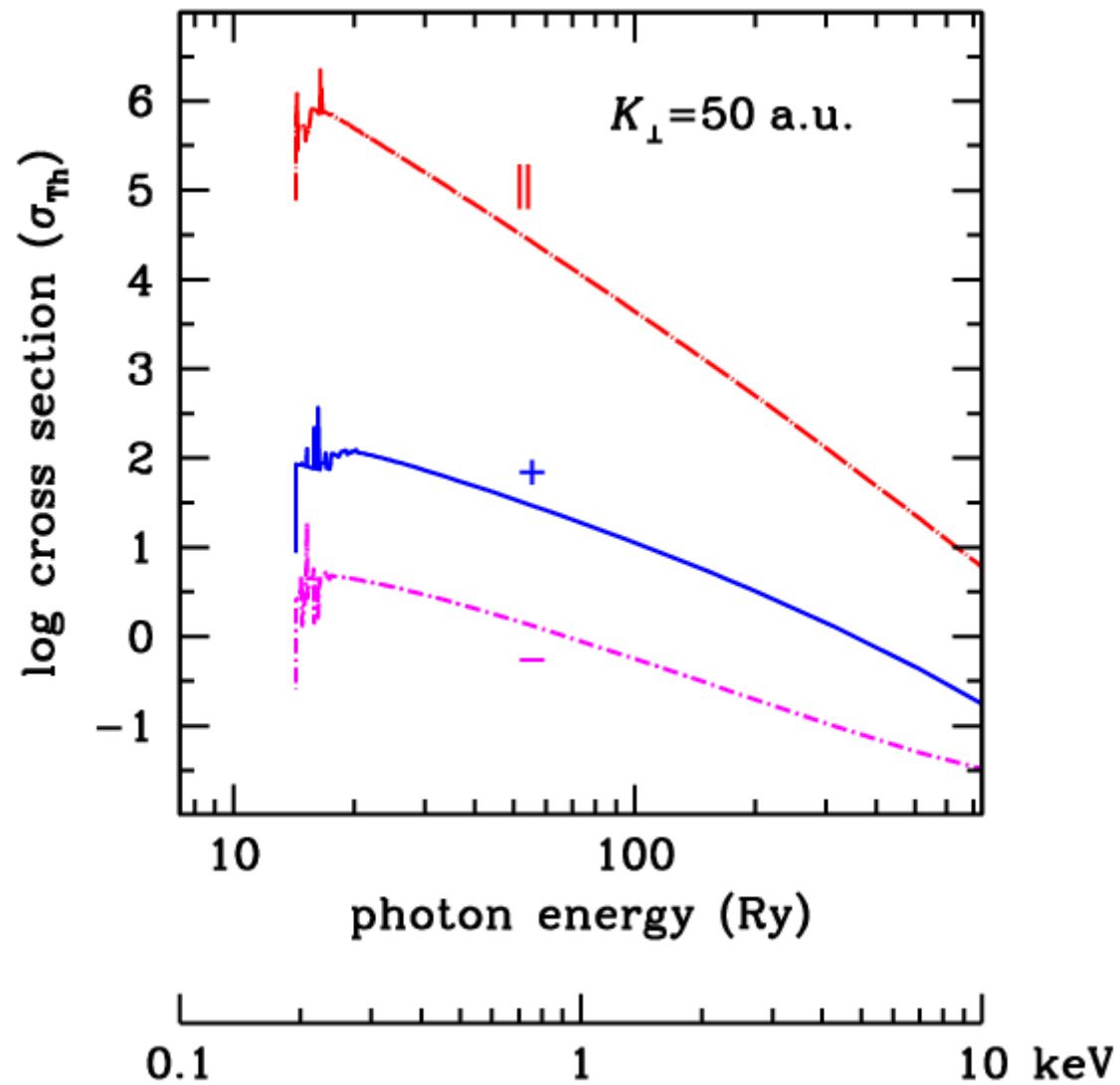
*Сечения фотоионизации атома, движущегося в сильном магнитном поле*



Сечения фотоионизации атома водорода в основном состоянии при  $B=2.35 \times 10^{12}$  G  
[AYP & Pavlov (1997) *Astrophys. J.* **483**, 414]

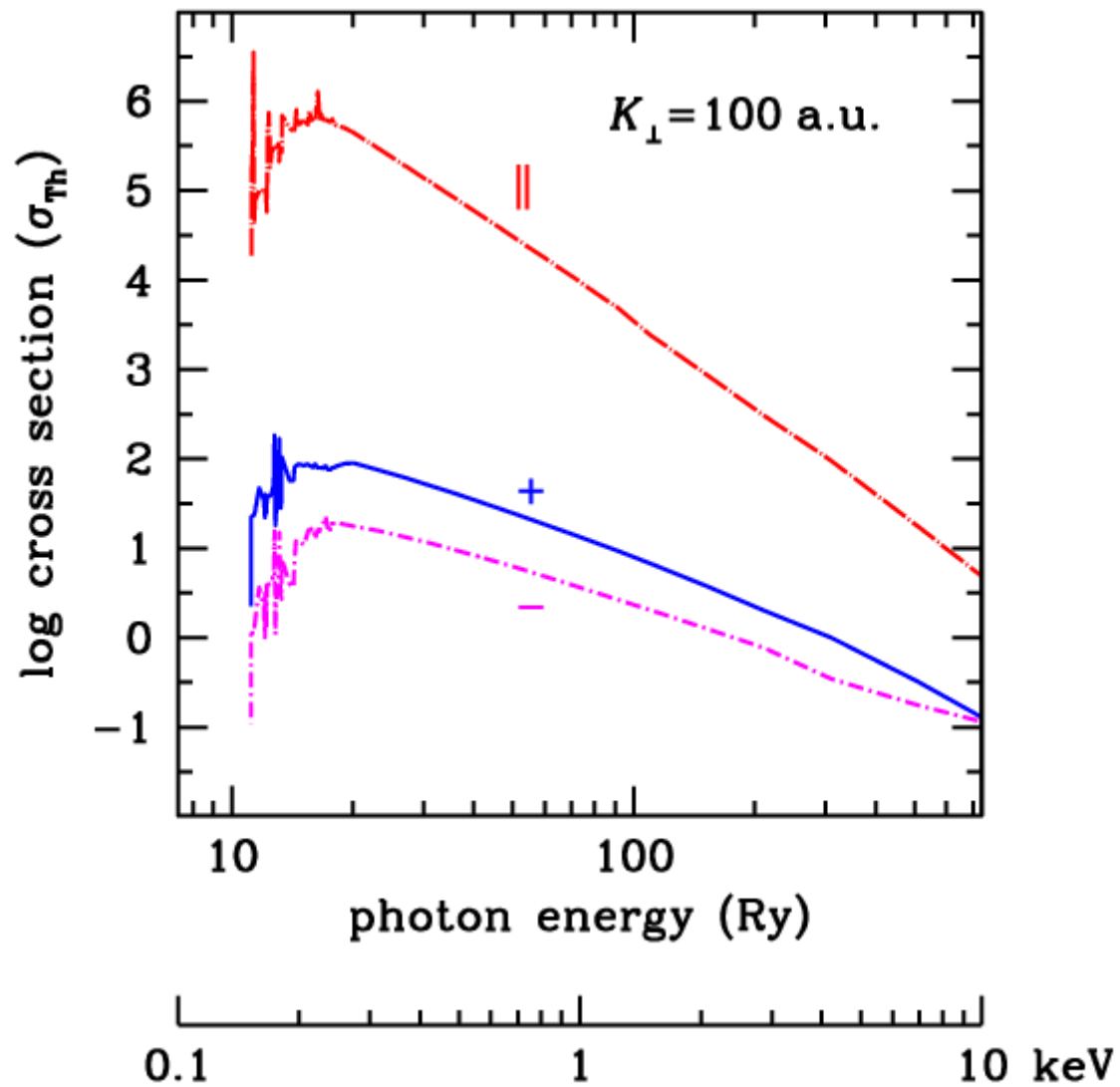


*Сечения фотоионизации атома, движущегося в сильном магнитном поле*



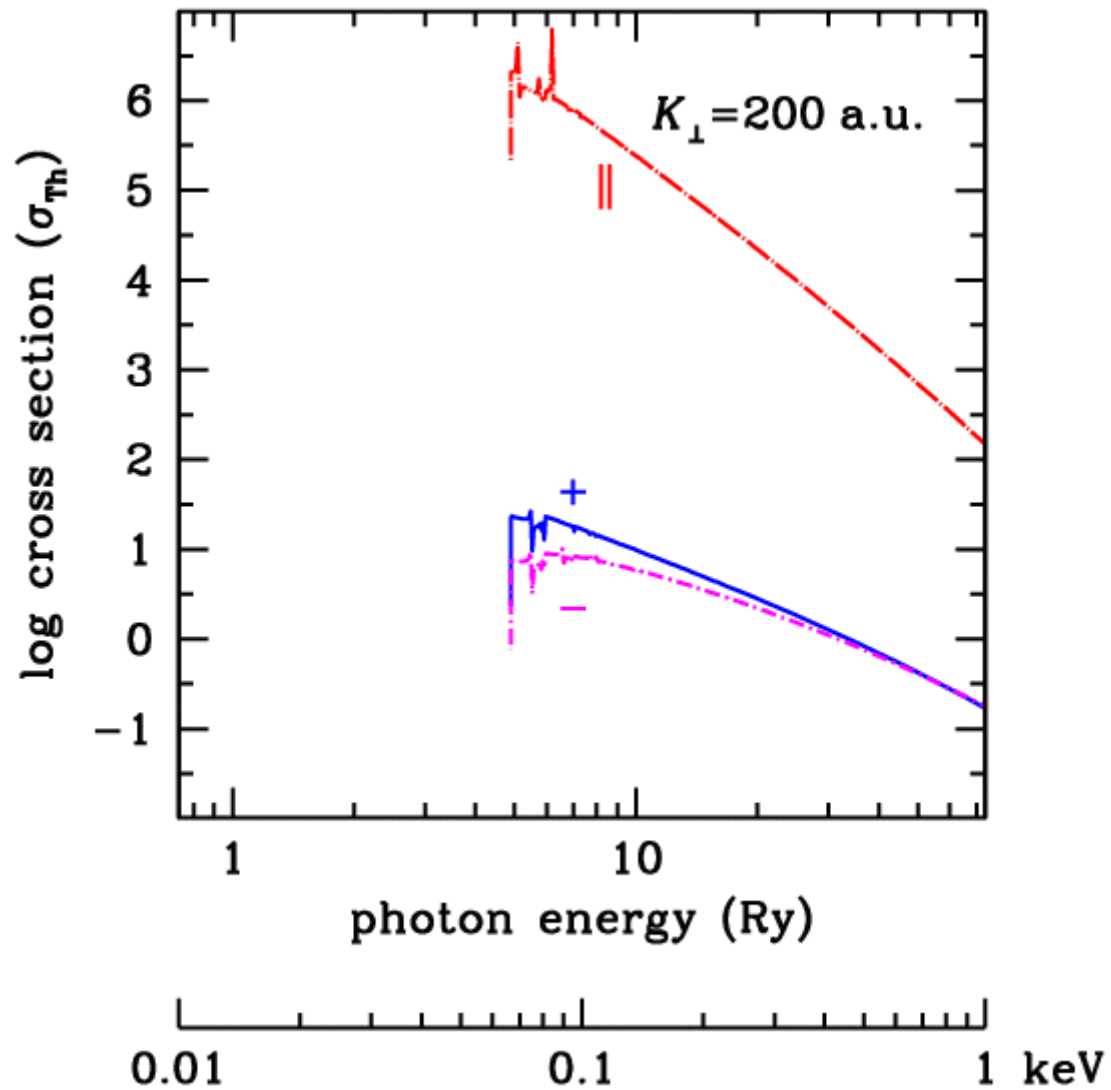
Сечения фотоионизации атома водорода в основном состоянии при  $B=2.35 \times 10^{12}$  G  
[AYP & Pavlov (1997) *Astrophys. J.* **483**, 414]

*Сечения фотоионизации атома, движущегося в сильном магнитном поле*



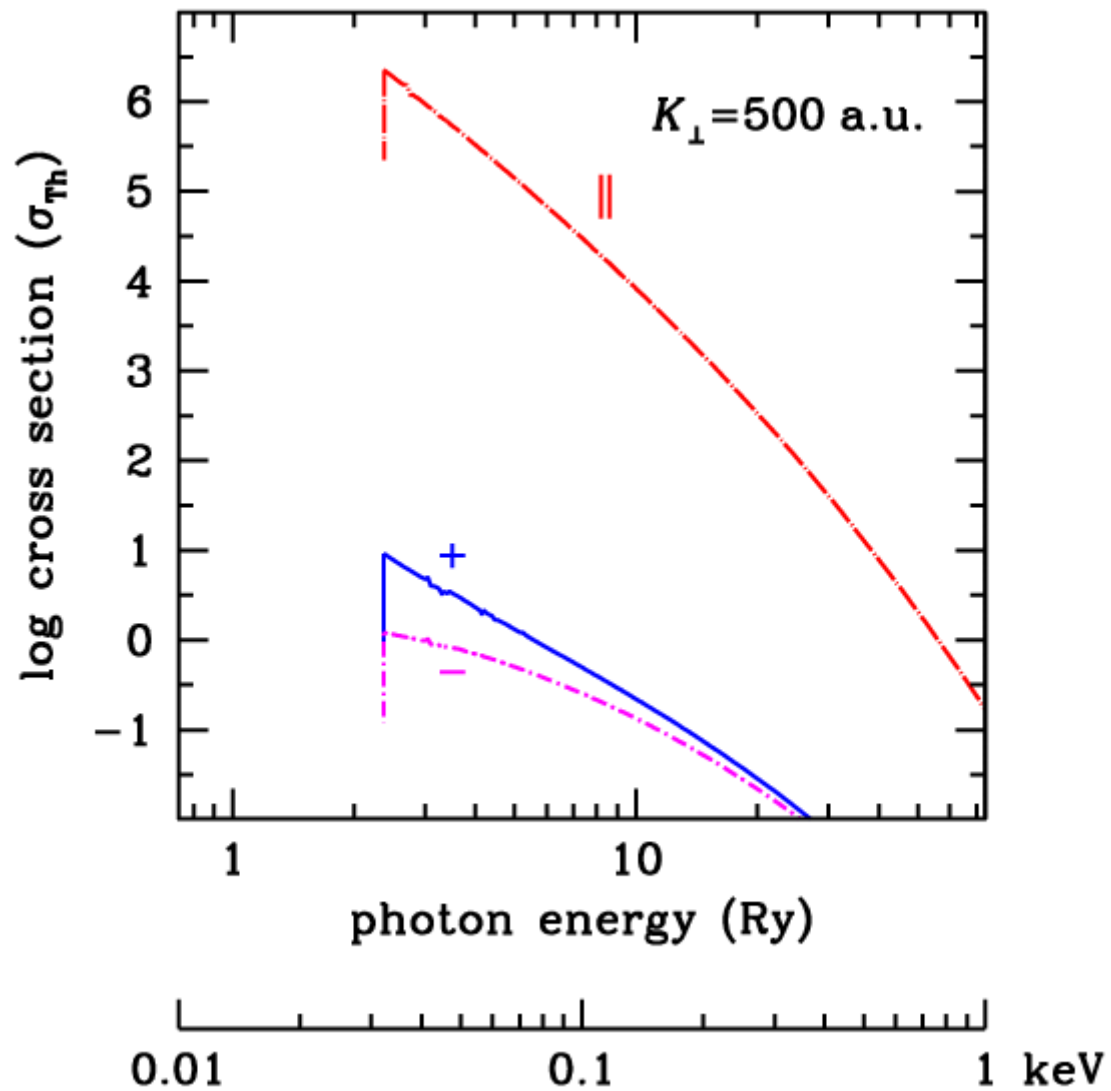
Сечения фотоионизации атома водорода в основном состоянии при  $B=2.35 \times 10^{12}$  G  
[AYP & Pavlov (1997) *Astrophys. J.* **483**, 414]

*Сечения фотоионизации атома, движущегося в сильном магнитном поле*



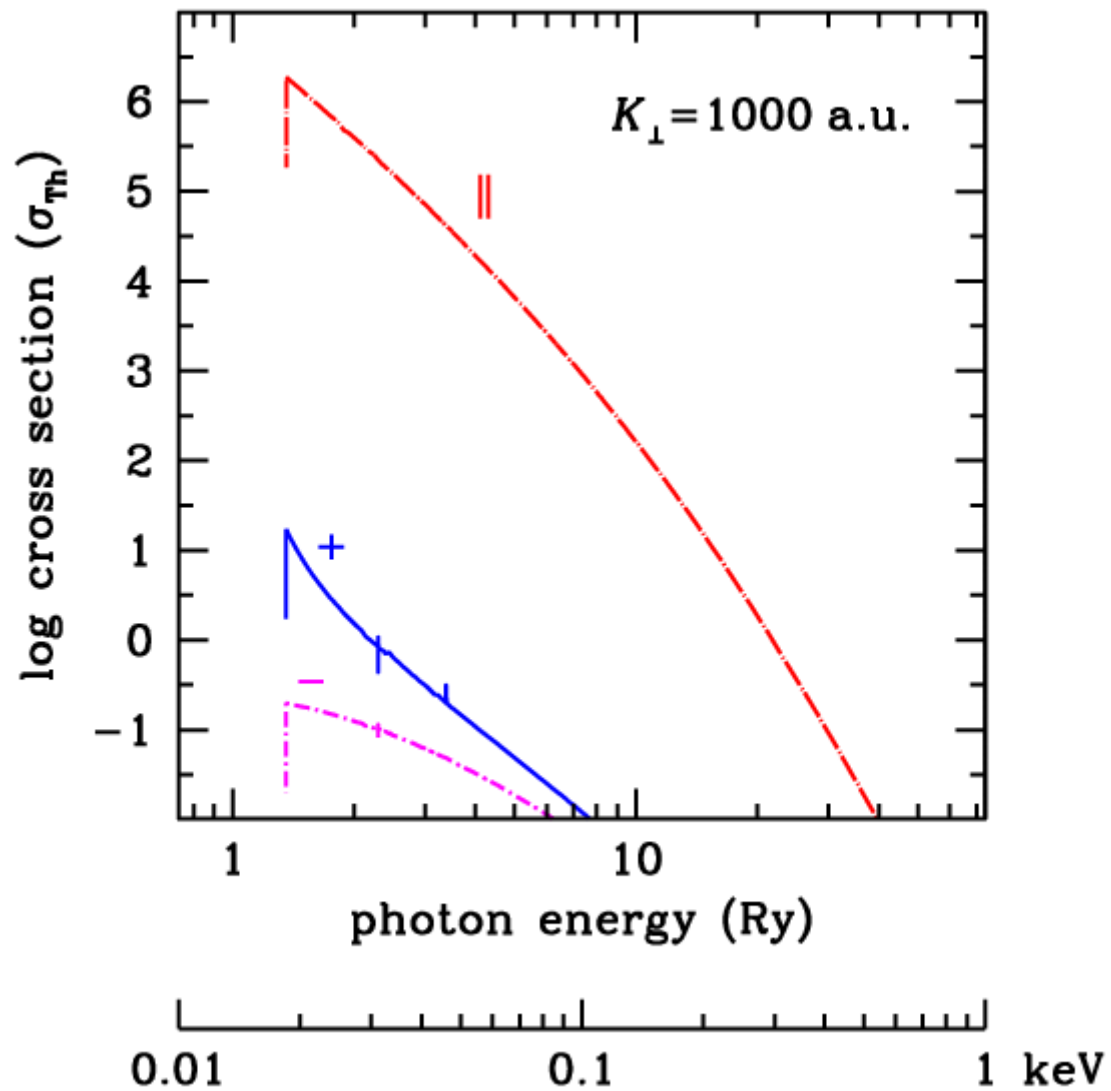
Сечения фотоионизации атома водорода в основном состоянии при  $B=2.35 \times 10^{12}$  G  
[AYP & Pavlov (1997) *Astrophys. J.* **483**, 414]

*Сечения фотоионизации атома, движущегося в сильном магнитном поле*



Сечения фотоионизации атома водорода в основном состоянии при  $B=2.35 \times 10^{12}$  G  
[AYP & Pavlov (1997) *Astrophys. J.* **483**, 414]

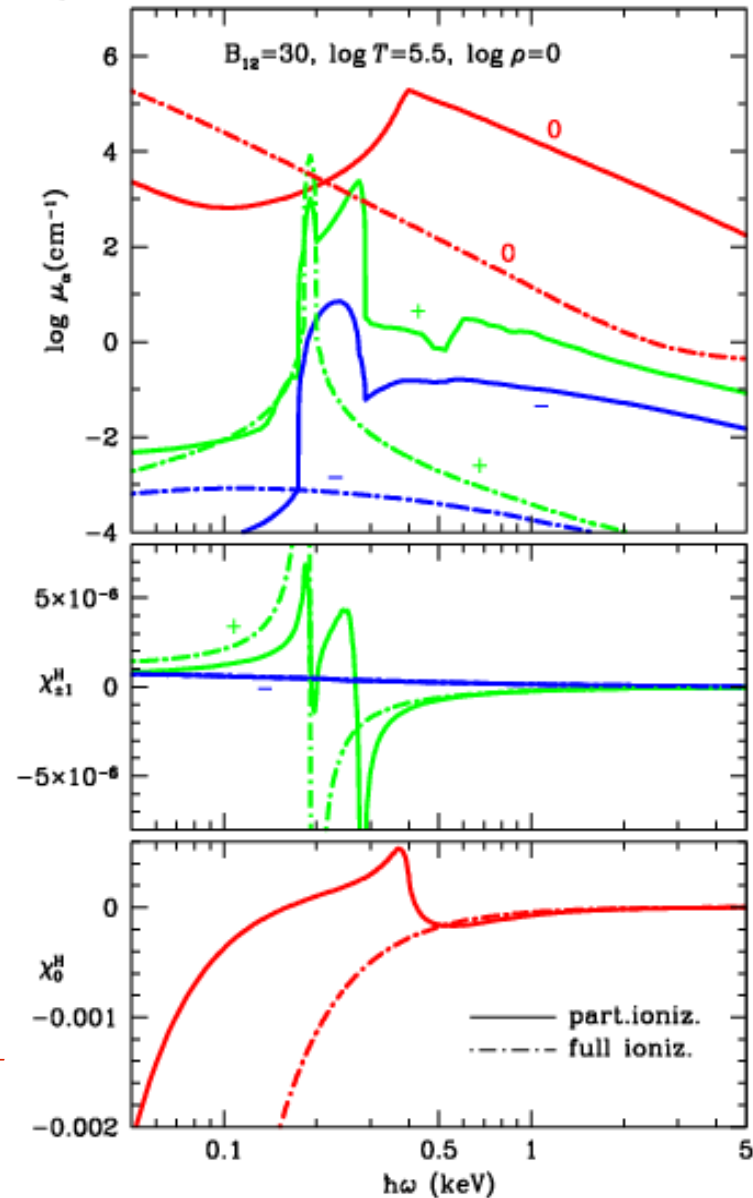
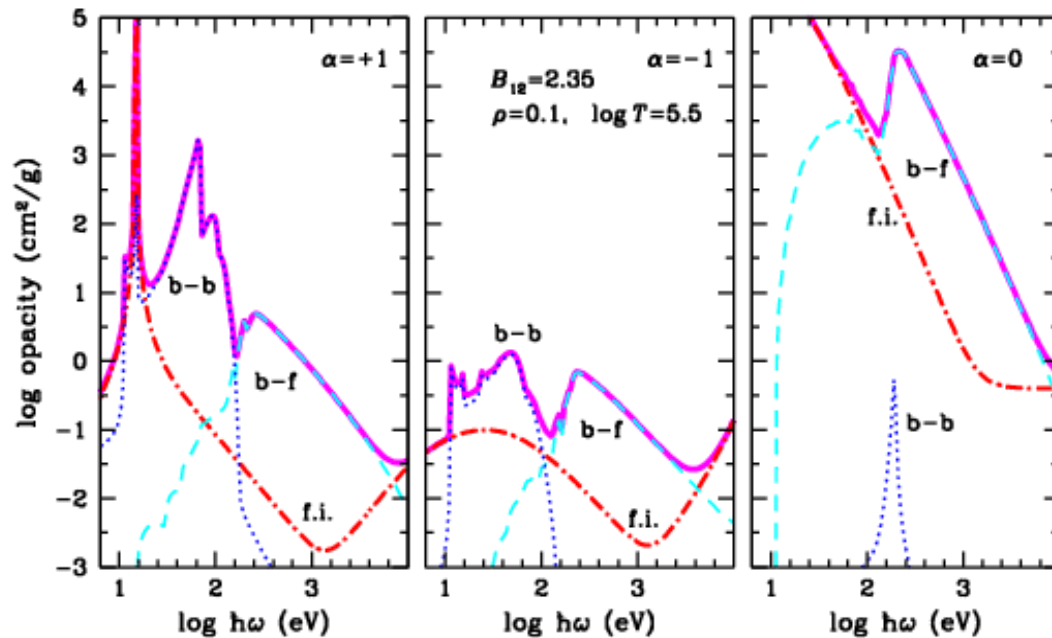
# Сечения фотоионизации атома, движущегося в сильном магнитном поле



Сечения фотоионизации атома водорода в основном состоянии при  $B=2.35 \times 10^{12}$  G  
[AYP & Pavlov (1997) *Astrophys. J.* **483**, 414]

**Непрозрачности и поляризуемость плазмы в сильном магнитном поле:  
эффекты неидеальности и неполной ионизации**

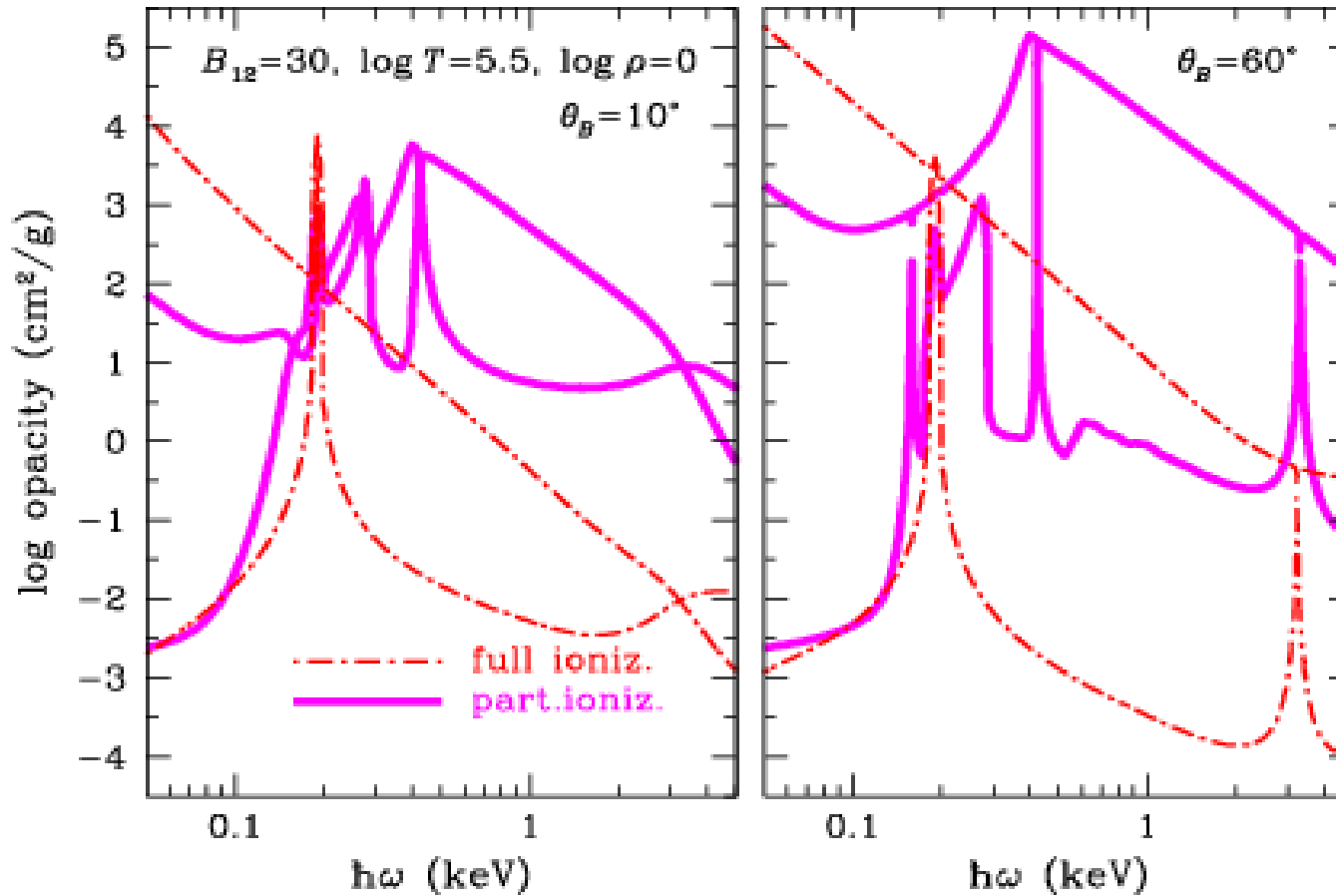
$$\kappa_j(\omega, \theta_B) = \sum_{\alpha=-1}^1 |e_{\alpha}^j(\omega, \theta_B)|^2 \hat{\kappa}_{\alpha}(\omega), \quad j = 1, 2 (X, O)$$



Непрозрачности для 3 основных поляризаций.  
Сплшные кривые – с учётом связ. состояний,  
штрихпунктир – по модели полной ионизации  
[AYP & Chabrier (2003) *ApJ* 585, 955]

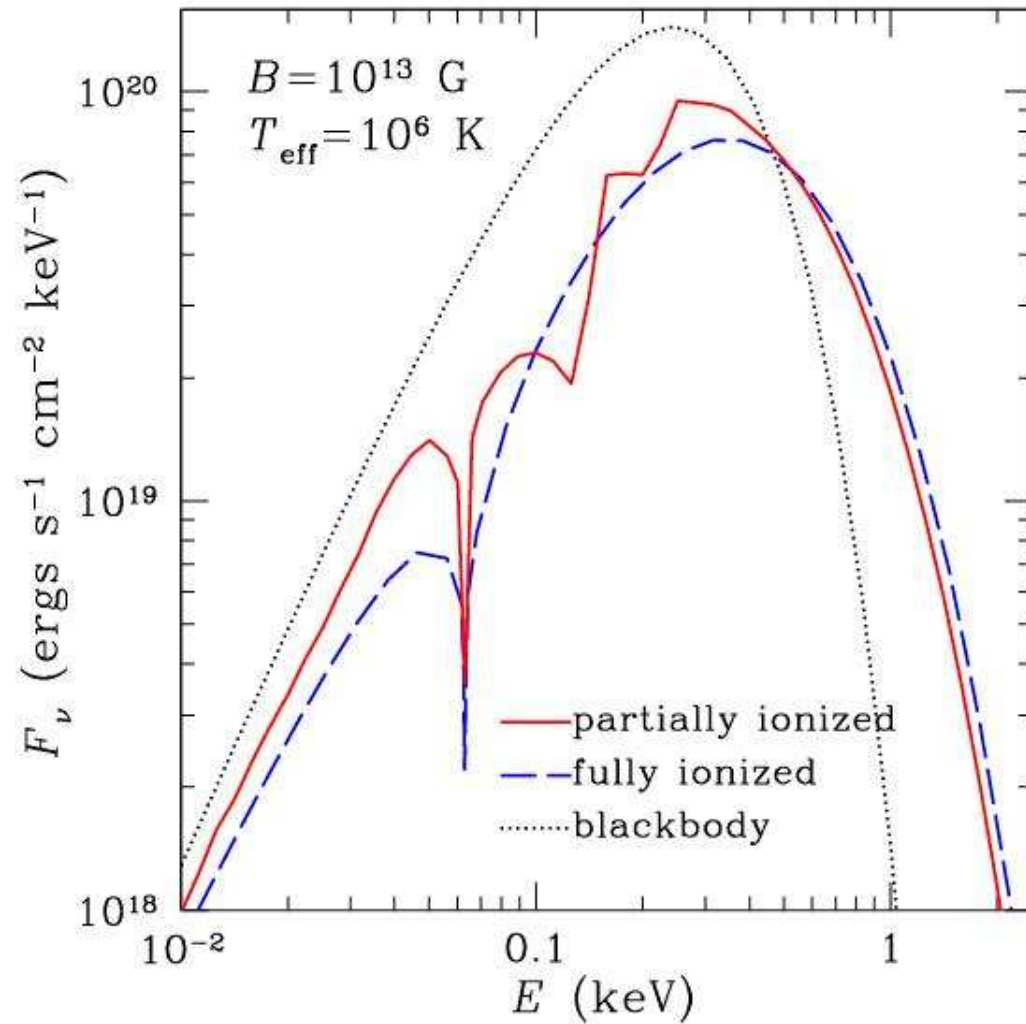
Справа: *вверху* – основные компоненты  
коэффициентов поглощения; *в середине и внизу* –  
компоненты тензора поляризуемости  
[AYP *et al.* (2004) *ApJ* 612, 1034]

***Непрозрачности для нормальных волн:  
влияние неполной ионизации в сильном магнитном поле***



Непрозрачности для двух нормальных мод, распространяющихся под двумя углами к магнитным силовым линиям (при тех же параметрах). Кривые разного типа – разные модели; верхняя кривая каждого типа – необыкновенная, нижняя – обыкновенная волна [AYP *et al.* (2004) *ApJ* **612**, 1034]

*Результат: спектр выходящего излучения*



AYP, Lai, Chabrier, Ho, & van Adelsberg (2006) *J.Phys.A: Math. Gen* **39**, 4453

Влияние переноса в атмосфере при её неполной ионизации на спектр излучения  
нейтронной звезды с  $B=10^{13}$  Гс,  $T=10^6$  К

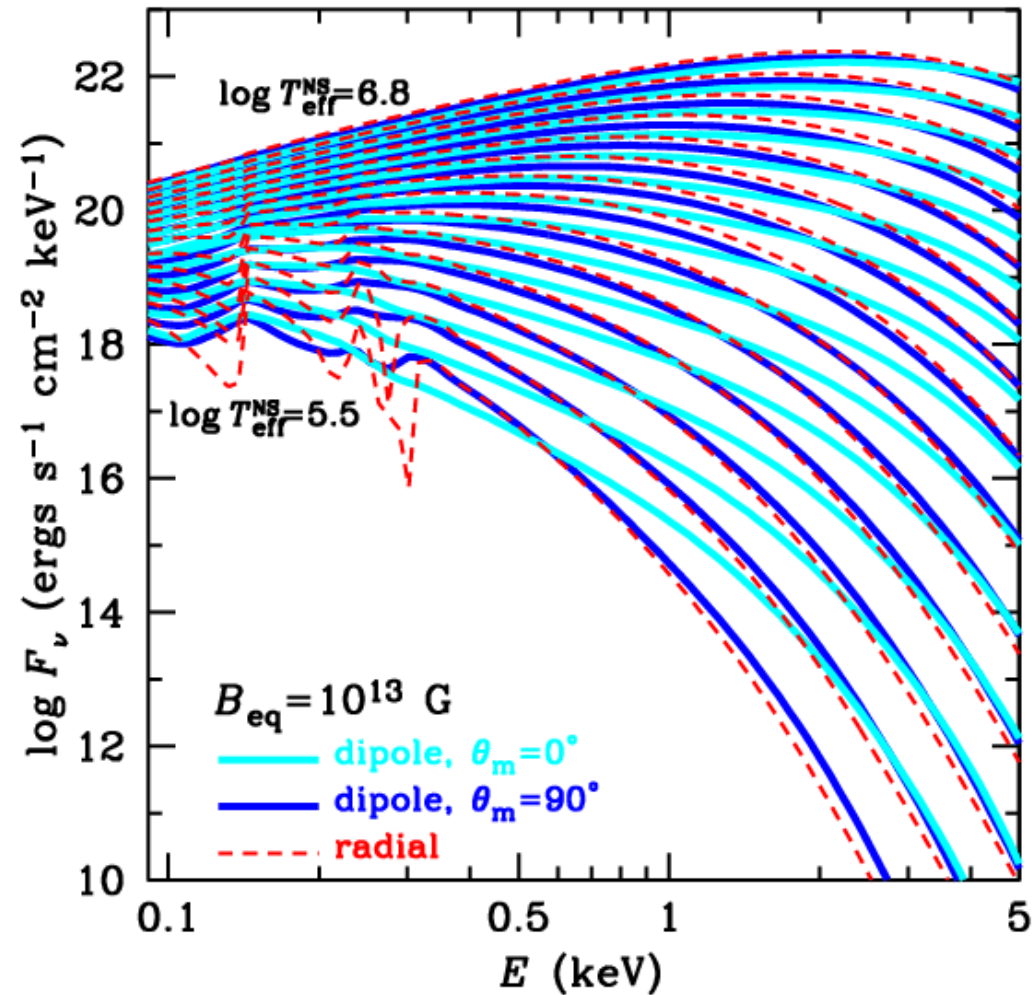
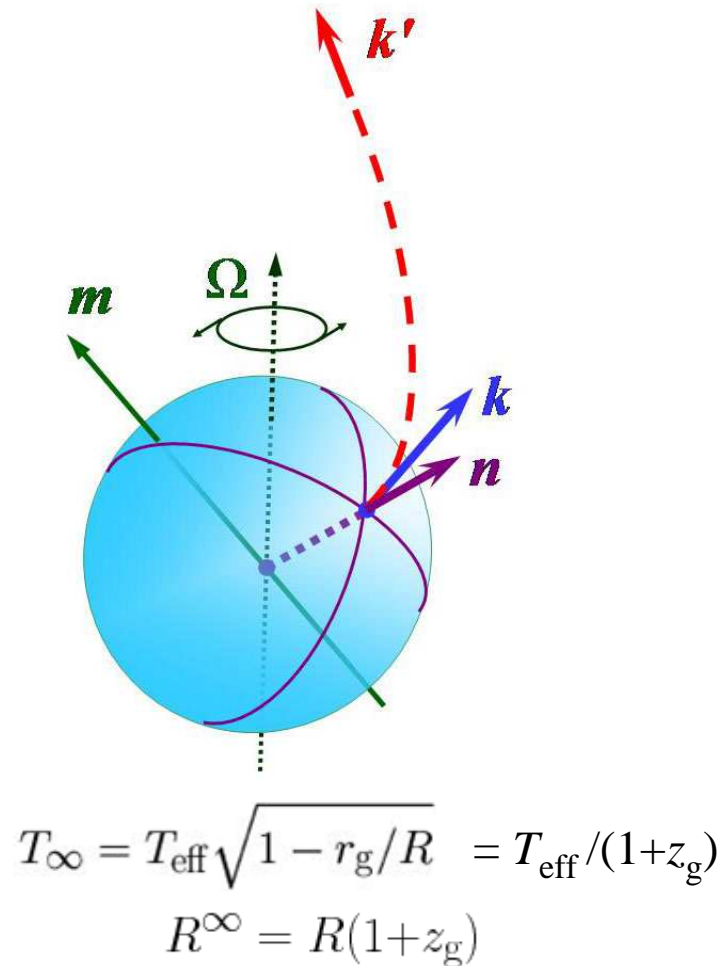
(поле нормально к поверхности, спектр усреднён по углам)

[рисунок предоставил Вин Хо (W.C.G. Ho)]



*Расчёт наблюдаемого спектра требует учёта распределения  $T$  и  $B$  по поверхности, красного смещения и искривления лучей*

*Результат моделирования в случае дипольного поля*

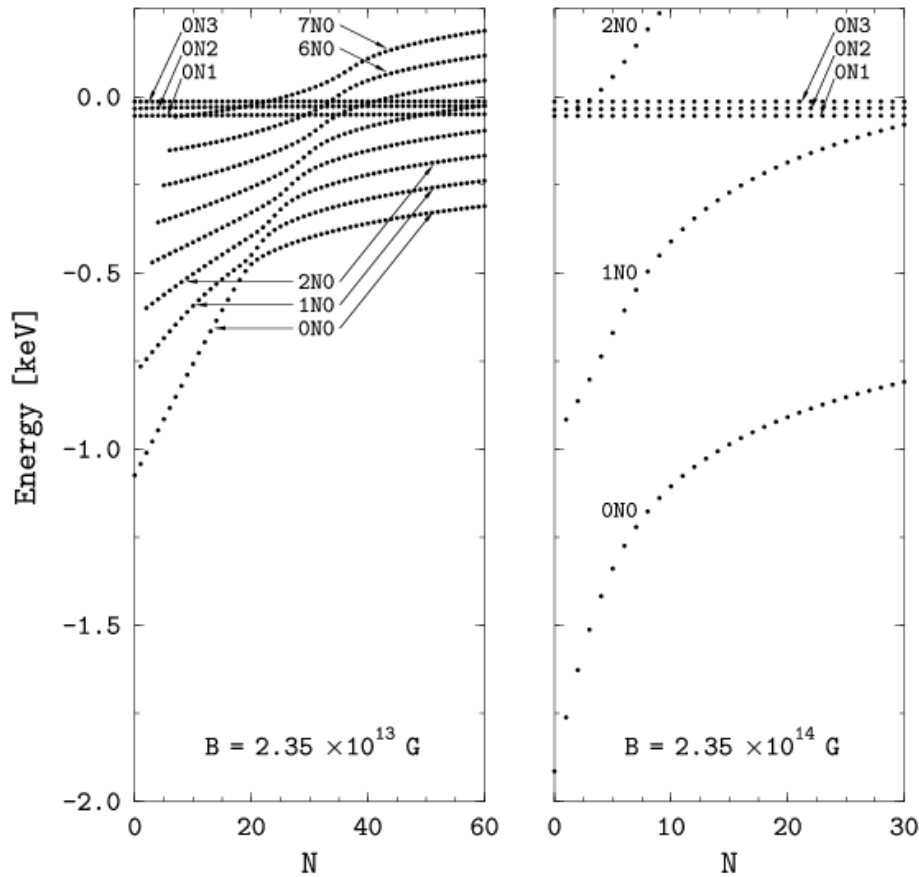


Спектральные особенности сглаживаются из-за распределения поля.

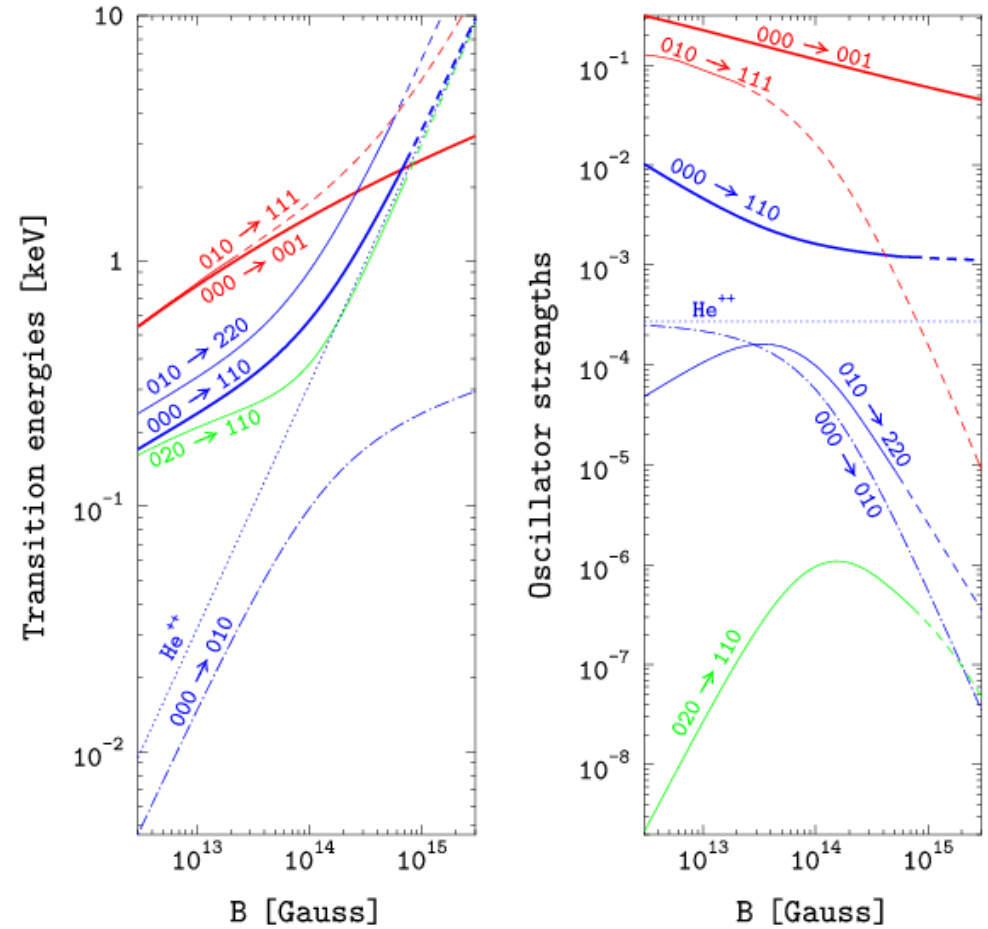
XSPEC: NSMAX – <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xanadu/xspec/models/nsmax.html>

# Ион гелия $\text{He}^+$ , движущийся в сильном магнитном поле

Pavlov & Bezchastnov (2005) *ApJ* **635**, L61



Энергии связи как функции числа  $N$ , характеризующего состояние движения поперёк поля



Энергии переходов и силы осцилляторов как функции  $B$

# Гелиевая атмосфера: ионизационное равновесие

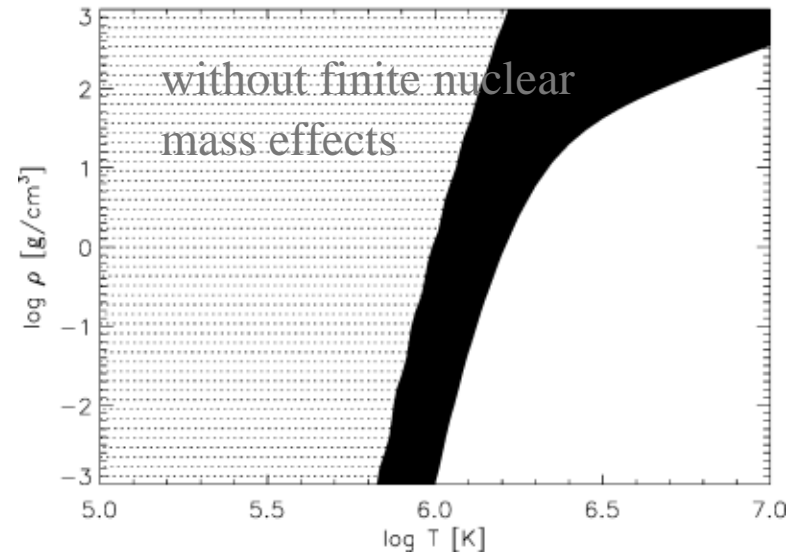
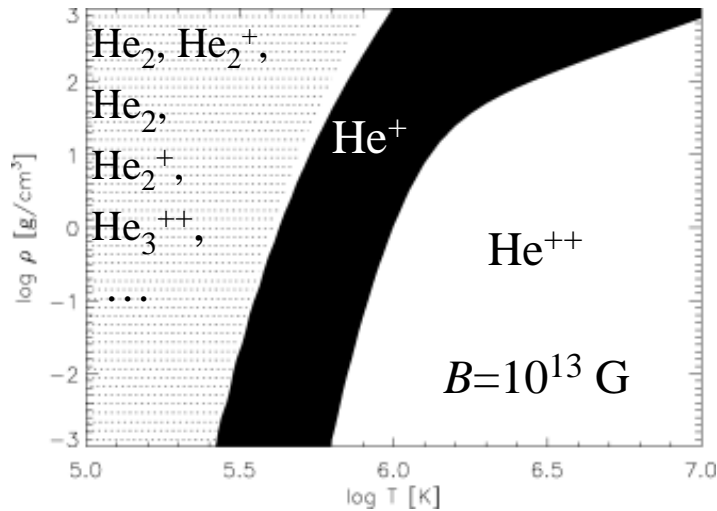
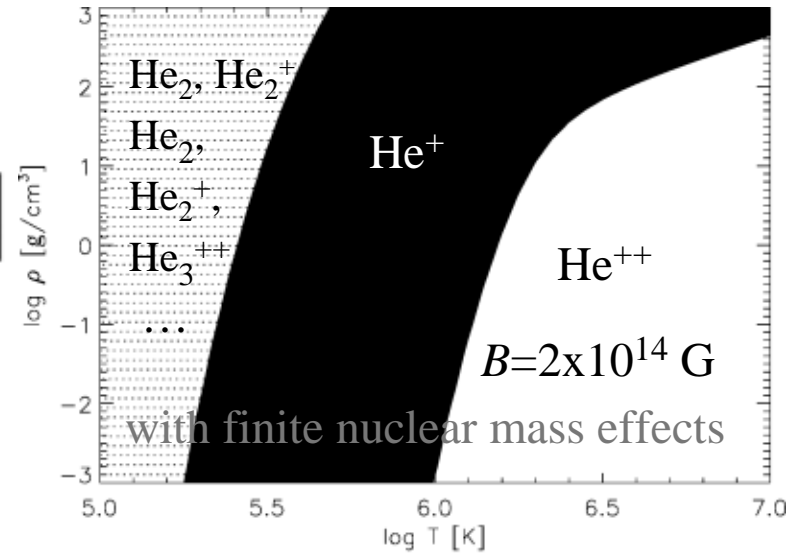
Mori & Heyl (2007)  
MNRAS 377, 905

$$\frac{n_i}{n_{i+1}n_e} = \frac{z_i}{z_{i+1}z_e}, \quad z_e = 2 \left( \frac{m_e k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \frac{\eta_e}{\tanh \eta_e},$$

$$z_i = \left( \frac{M_i k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{1/2} \frac{\eta_i}{\sinh \eta_i} \int_0^\infty \frac{K_\perp dK_\perp}{2\pi \hbar^2} \sum_\kappa w_{i,\kappa}(K_\perp) \exp \left[ -\frac{\epsilon_{i,\kappa}(K_\perp)}{kT} \right]$$

$$\eta_e = \hbar \omega_B / 2k_B T, \quad \omega_B = eB / m_e c$$

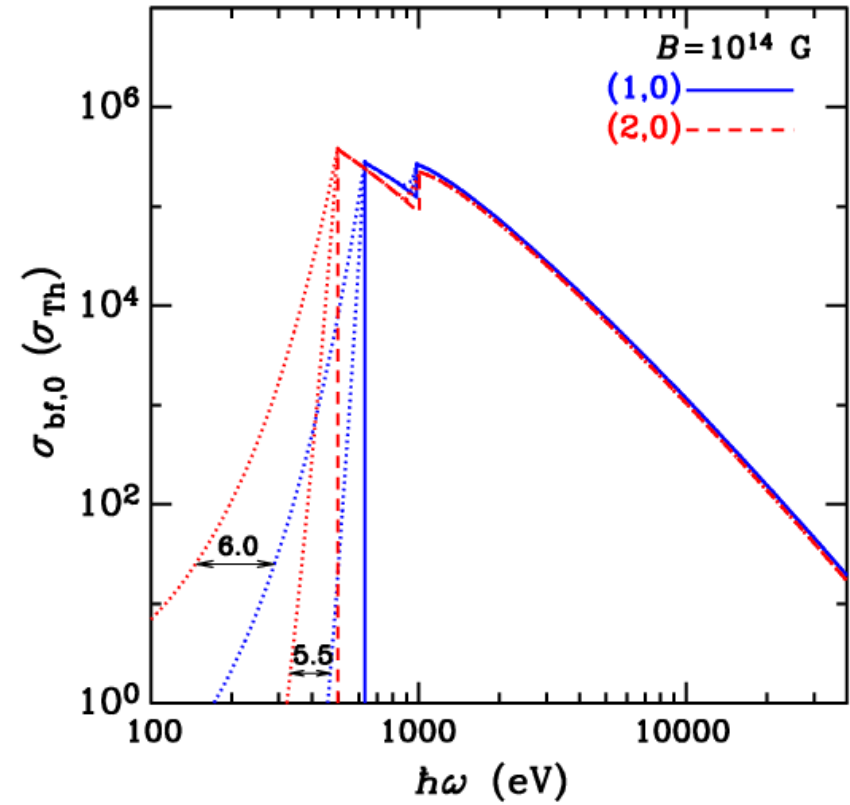
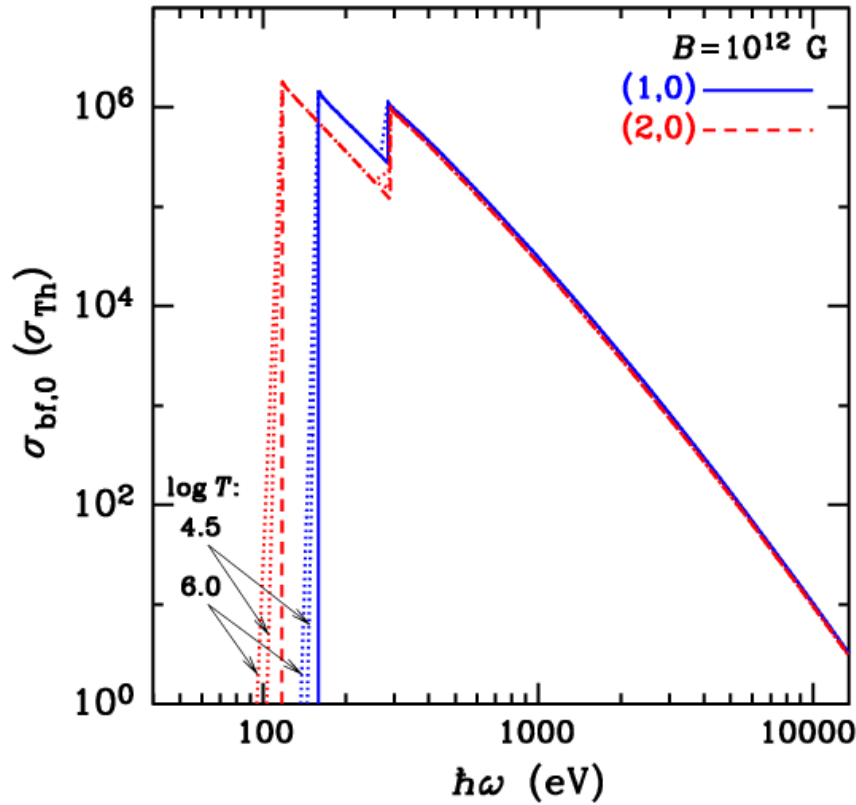
$$\eta_i = \hbar \Omega_{Bi} / 2k_B T, \quad \Omega_{Bi} = Z_i e B / M_i c$$



Ionization and dissociation balance of helium at  $B=2 \times 10^{14}$  G

# Атом гелия: фотоионизация

Medin, Lai, & AYP (2008) *MNRAS* 383, 161

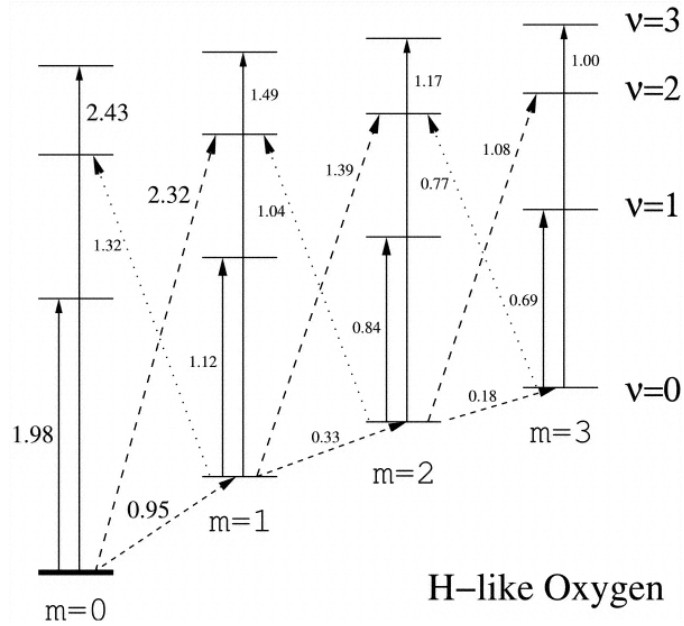


Сечения фотоионизации для поляризации вдоль  $B$  без учёта (сплошные и штриховые линии) и с учётом (точечные линии) эффектов движения атомов

$$\sigma(\omega) \approx \sigma(\omega_{thr}) \exp \left[ -\frac{M_{\perp} \omega_{thr} - \omega}{M \Omega_c} - \frac{\hbar(\omega_{thr} - \omega)}{k_B T} \right]$$

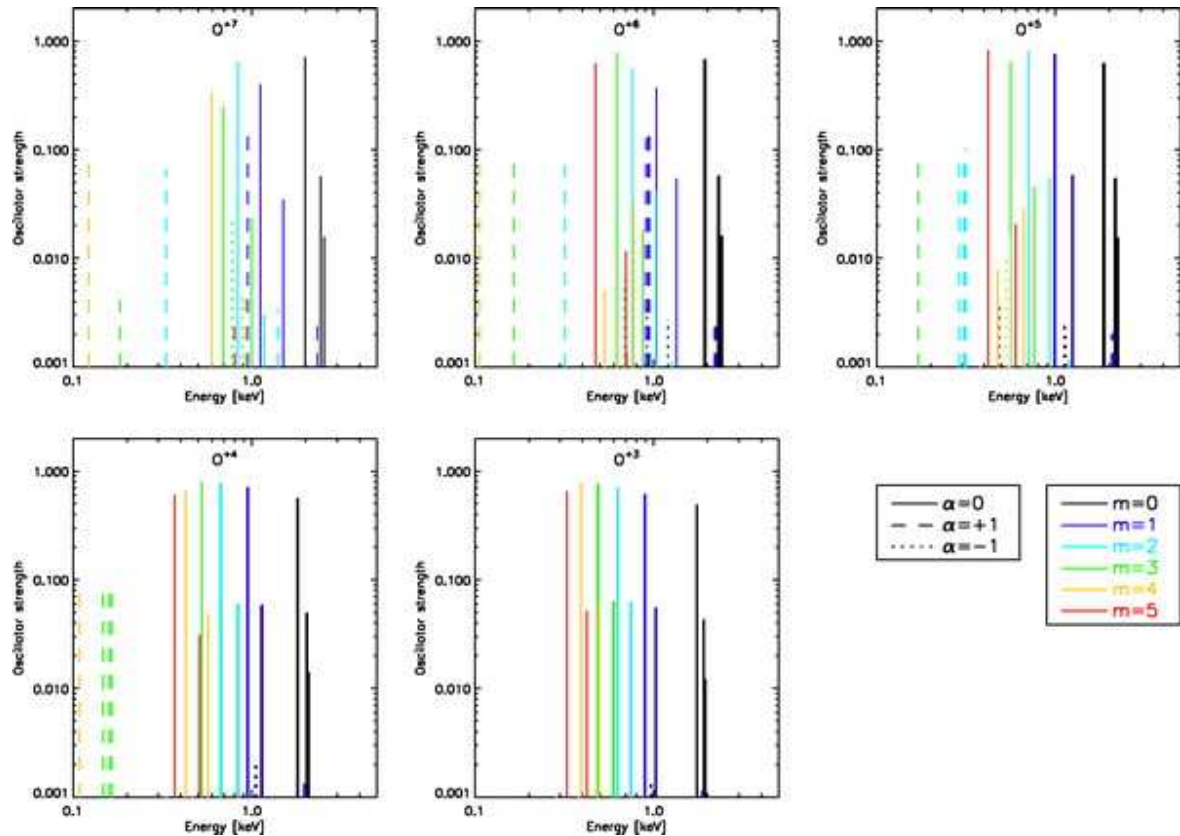
# Модели атмосфер для элементов среднего веса

Mori & Hailey (2006) *ApJ* 648, 1139



H-like Oxygen

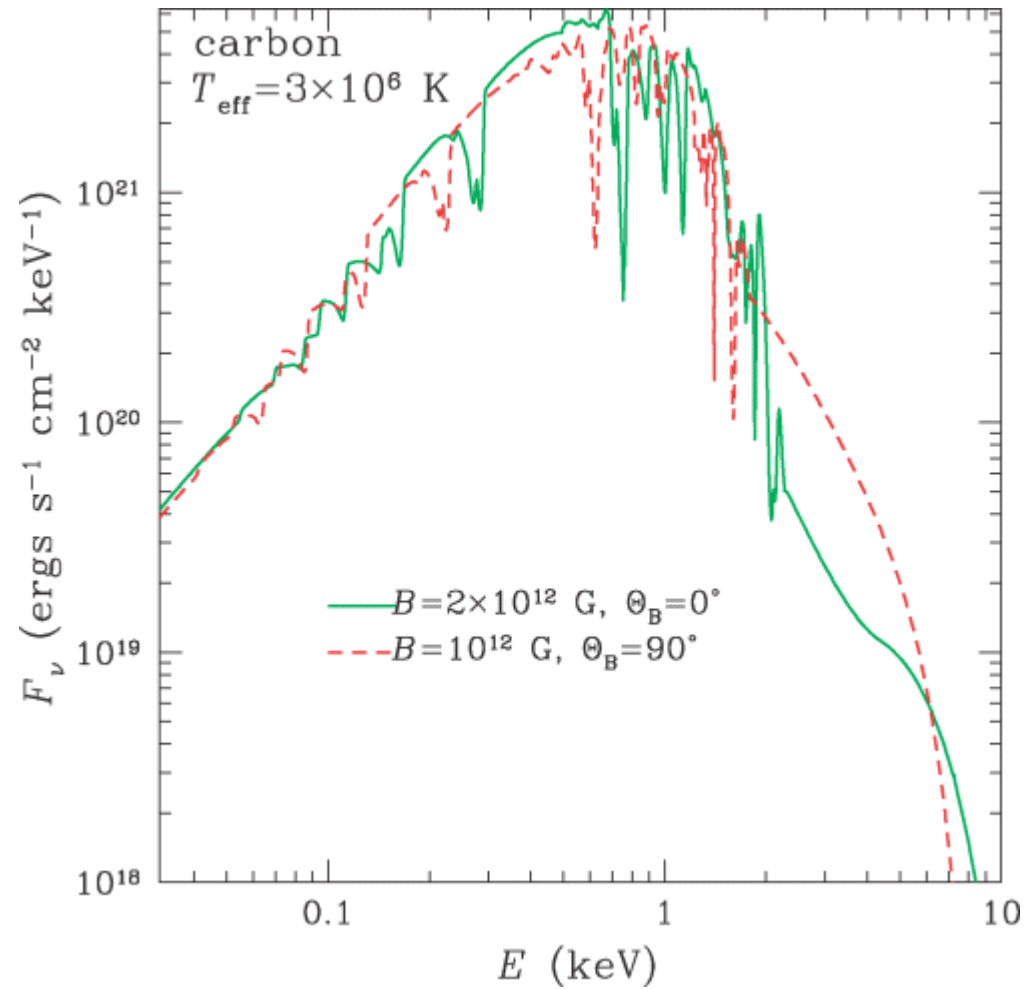
Энергии и разрешённые переходы из основного состояния при  $B=10^{12}$  Гс



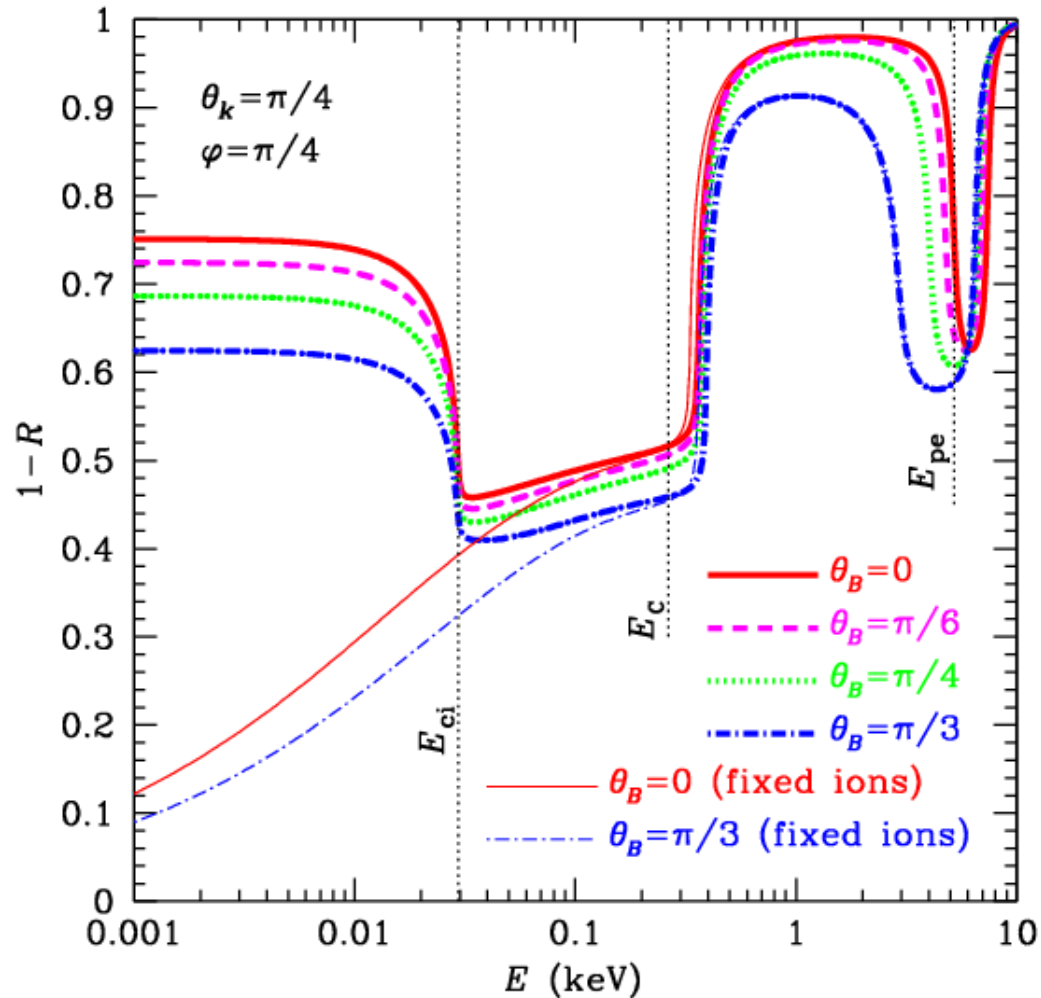
Энергии и силы осцилляторов для разрешённых переходов из различных тесно связанных состояний

# Модели атмосфер для элементов среднего веса

Mori & Ho (2007) *MNRAS* 377, 905



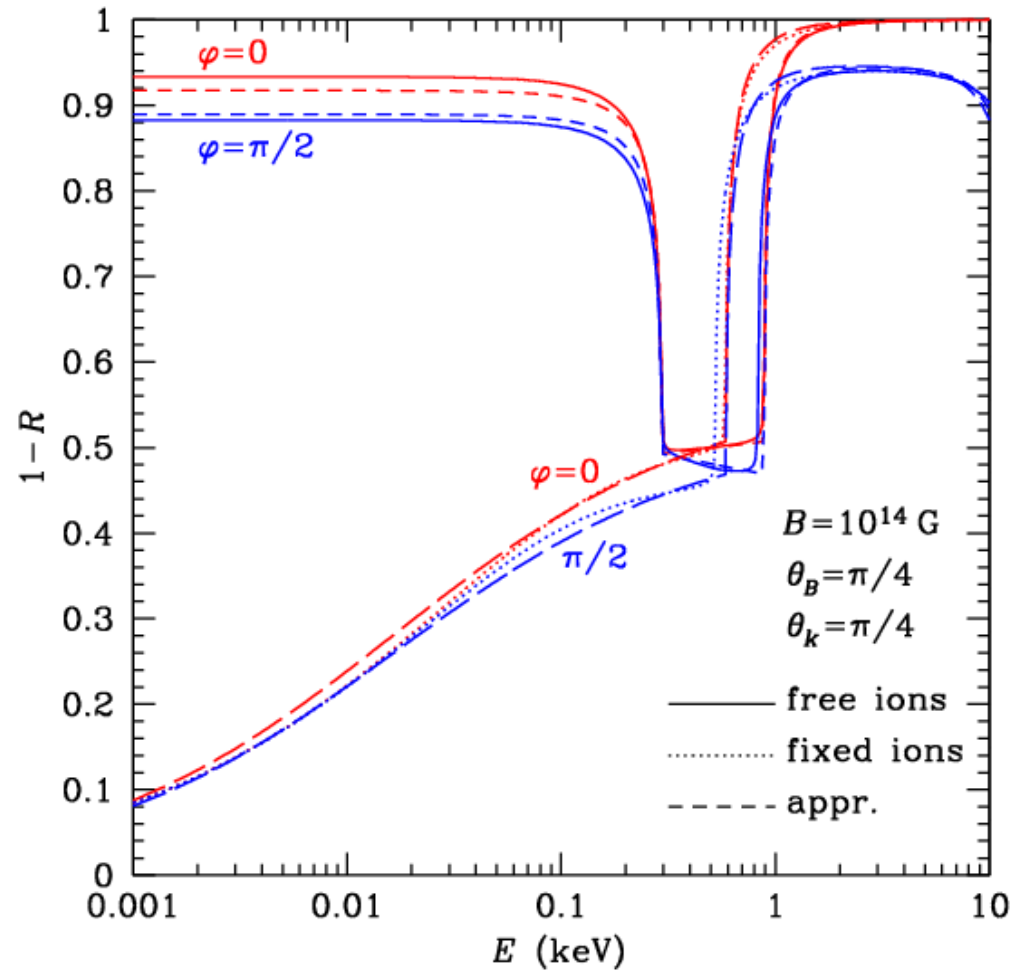
## Излучение конденсированной поверхности



Безразмерная излучательная способность железной поверхности как функция энергии фотона при  $B=10^{13}$  G и разных углах наклона поля к поверхности  $\theta_B$ .

Метод из van Adelsberg *et al.* (2005) *ApJ* **628**, 902; усовершенствованный в 2011 г.

## Излучение конденсированной поверхности



Безразмерная излучательная способность железной поверхности как функция энергии фотона при  $B=10^{13}$  G для разных углов наклона поля  $\theta_B$  и луча  $\theta_k$ . Расчёт и аналитическая подгонка.

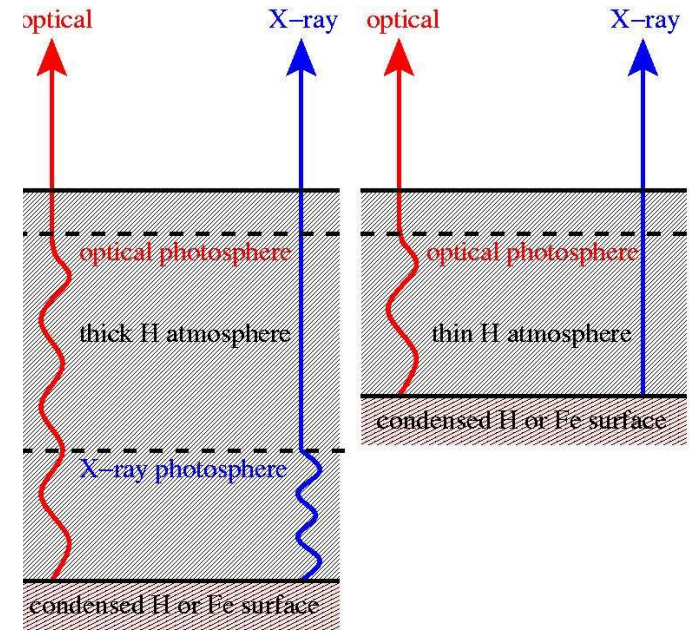
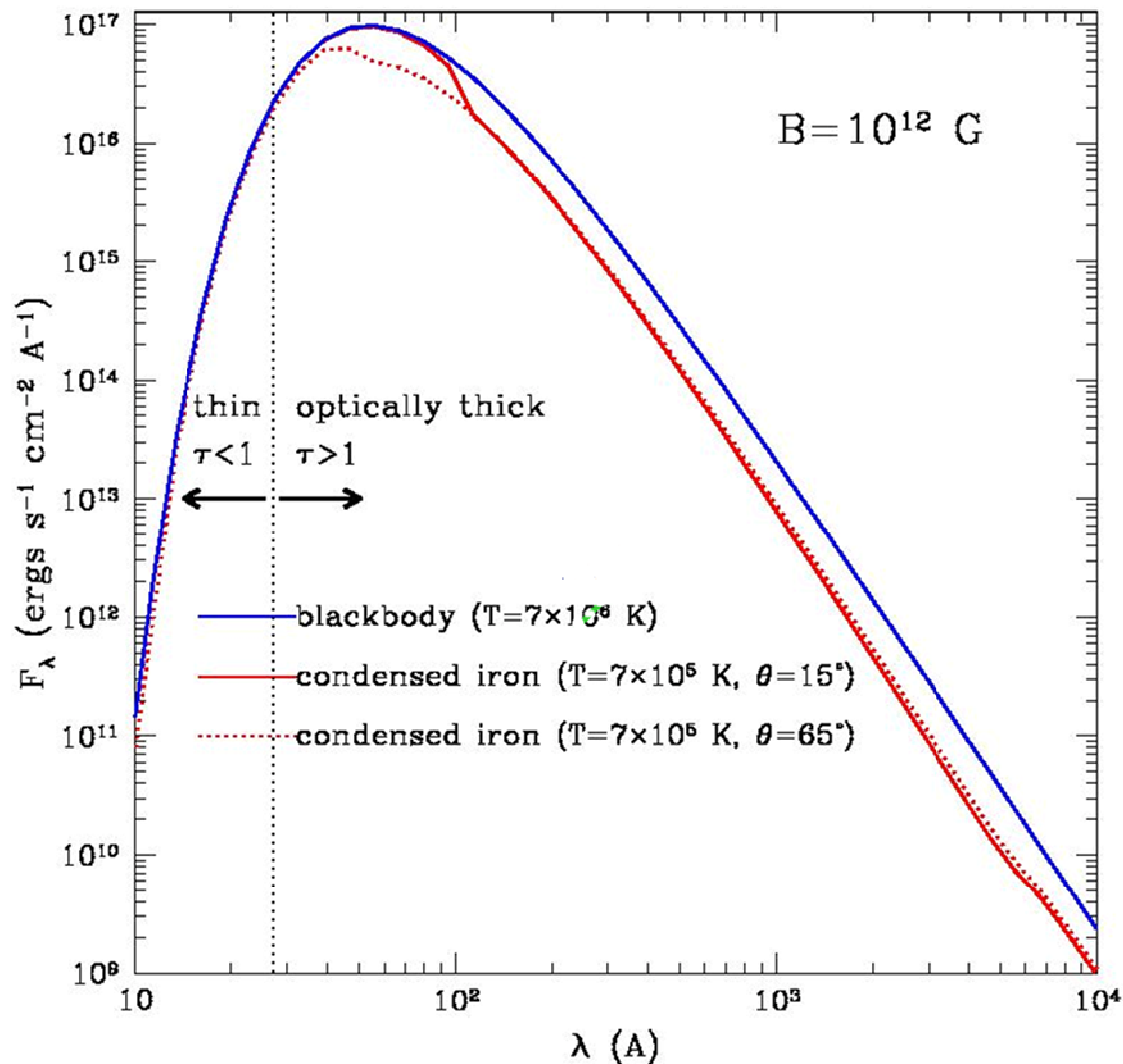


## «Тонкие атмосферы»

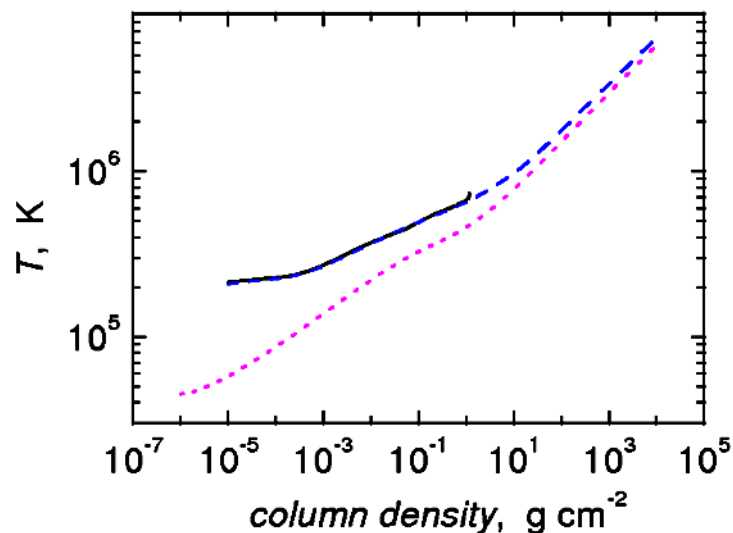
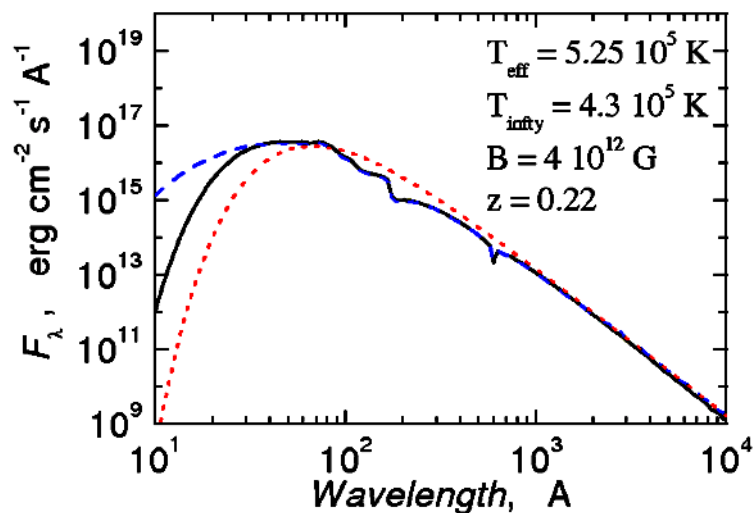
= конденсированная поверхность под атмосферой конечной толщины

Идея – Motch, Zavlin, & Haberl (2003);

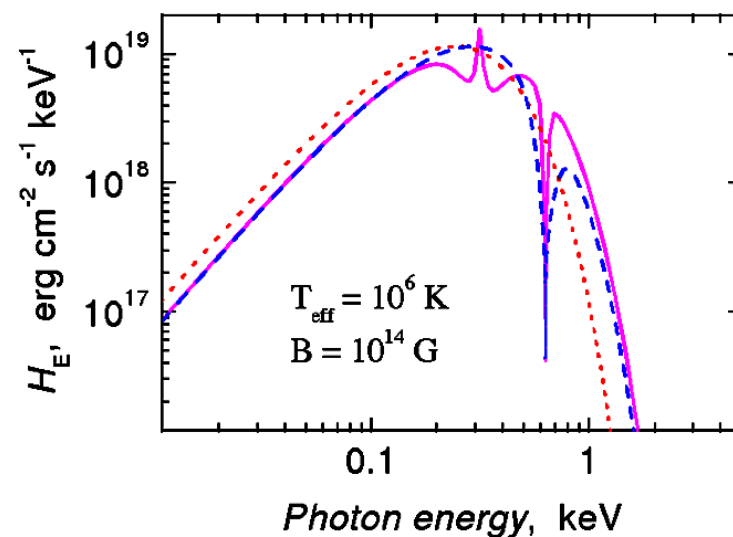
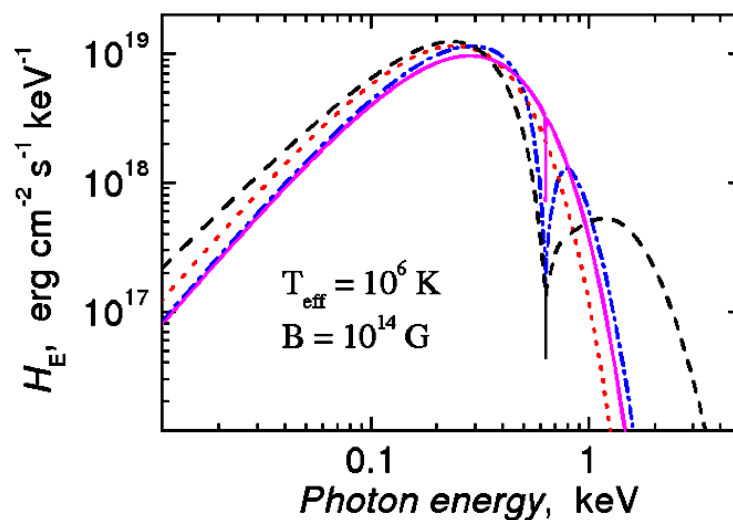
реализация – W.C.G. Ho (2004 – 2007) и В.Ф. Сулейманов (2008 – 2012) с соавторами



## «Тонкие» и «бутербродные» (слоистые) атмосферы

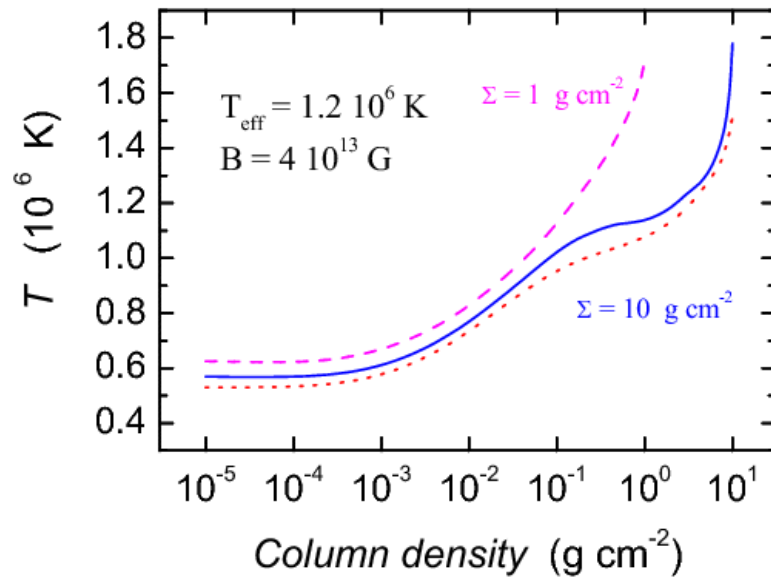
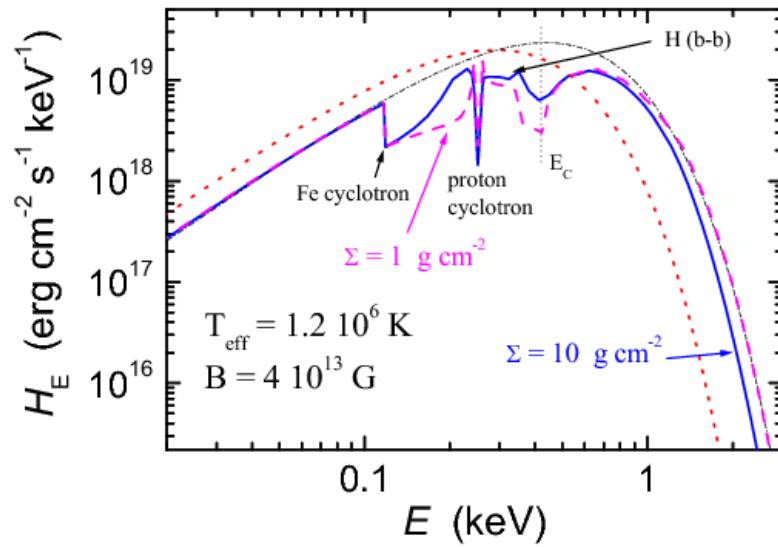


Выходящие спектры (вверху) и профили температуры (внизу) для **частично ионизованных** полубесконечных и конечных атмосфер в сравнении с моделью **полной ионизации**

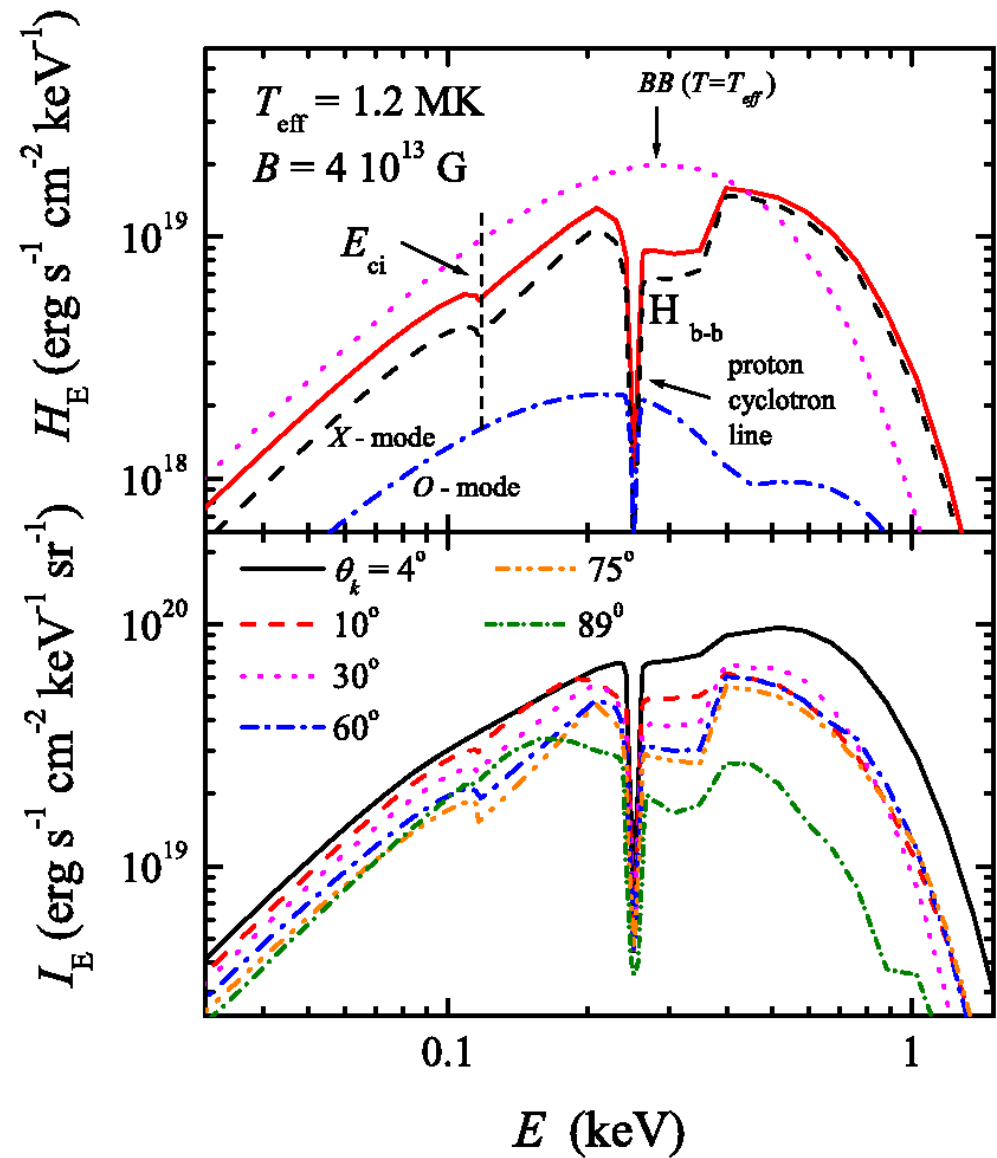


Спектры полностью ионизованных атмосфер. Вверху – H (толстая – штрихи,  $100 \text{ g cm}^{-2}$  – штрихпунктир,  $1 \text{ g cm}^{-2}$  – сплошные); внизу – H/He ( $25/75 \text{ g cm}^{-2}$ ). Точечные – blackbody.

## Тонкие атмосферы – разные модели



Suleimanov *et al.* (2010) *A&A* **522**, A111

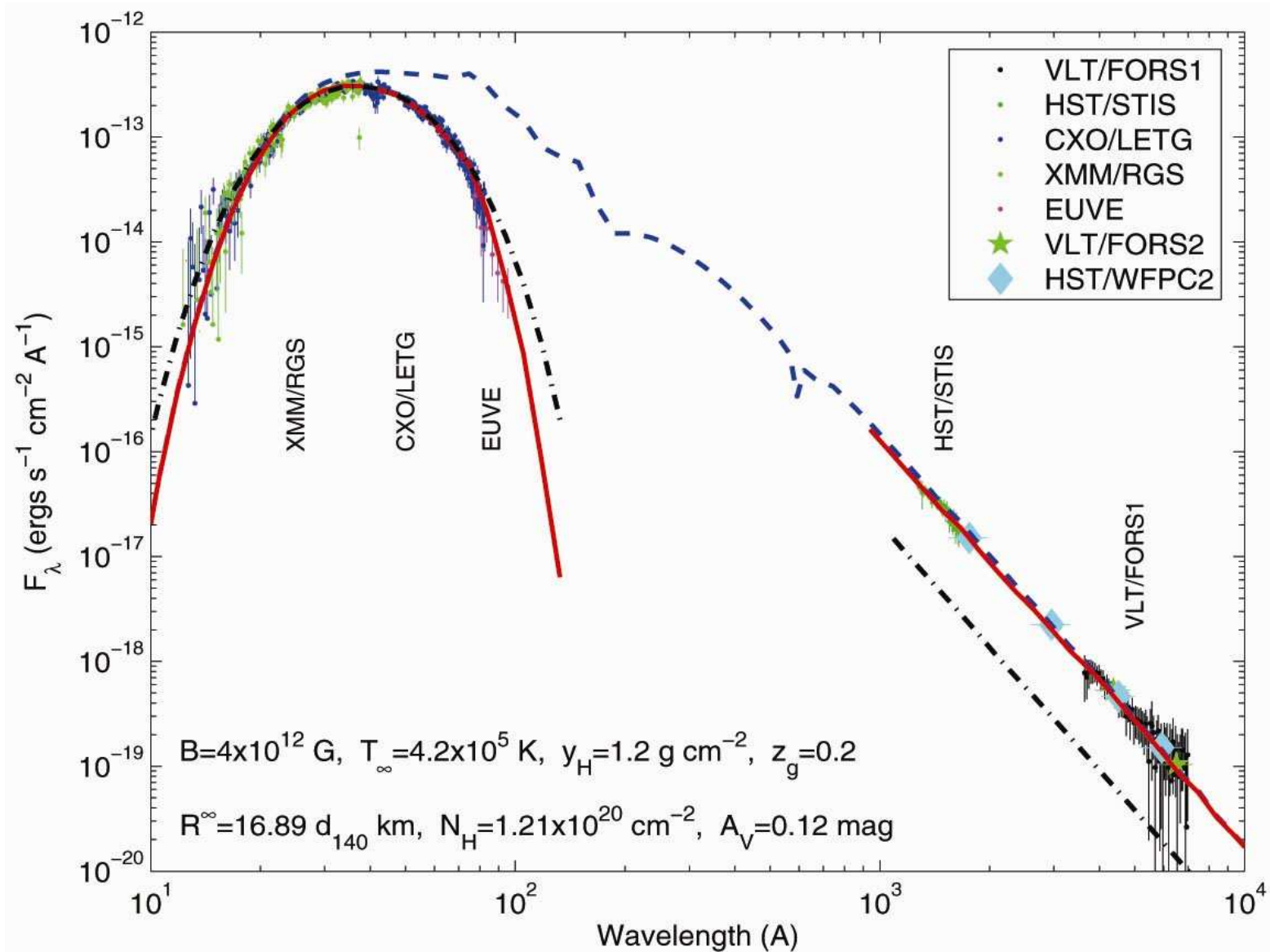


AYP *et al.* (2012) *A&A* **546**, A121

*Связь теории с наблюдениями*

**RX J1856.4-3754**

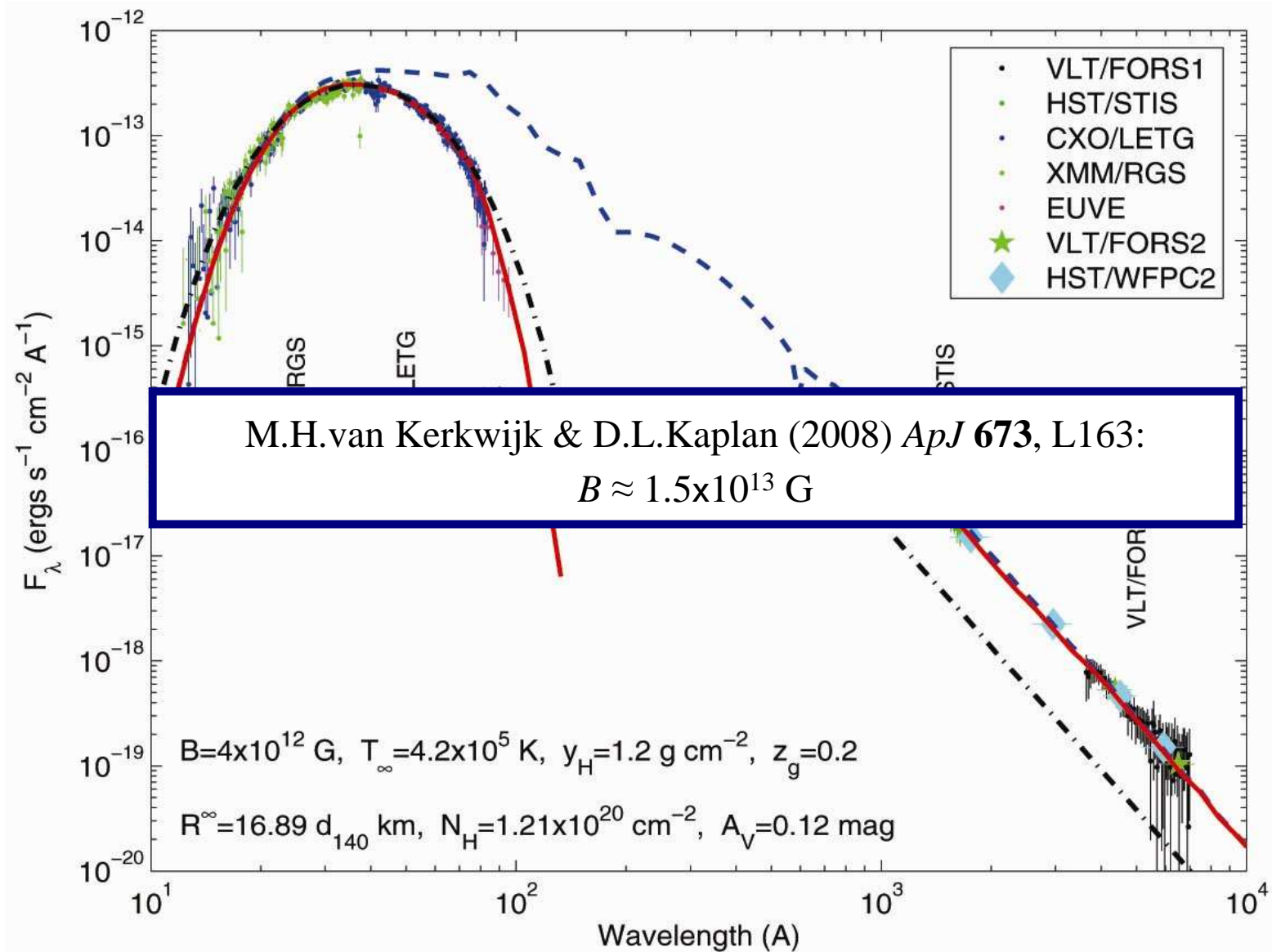
Ho *et al.* (2007) *MNRAS*, **375**, 821



# Связь теории с наблюдениями

## RX J1856.4-3754

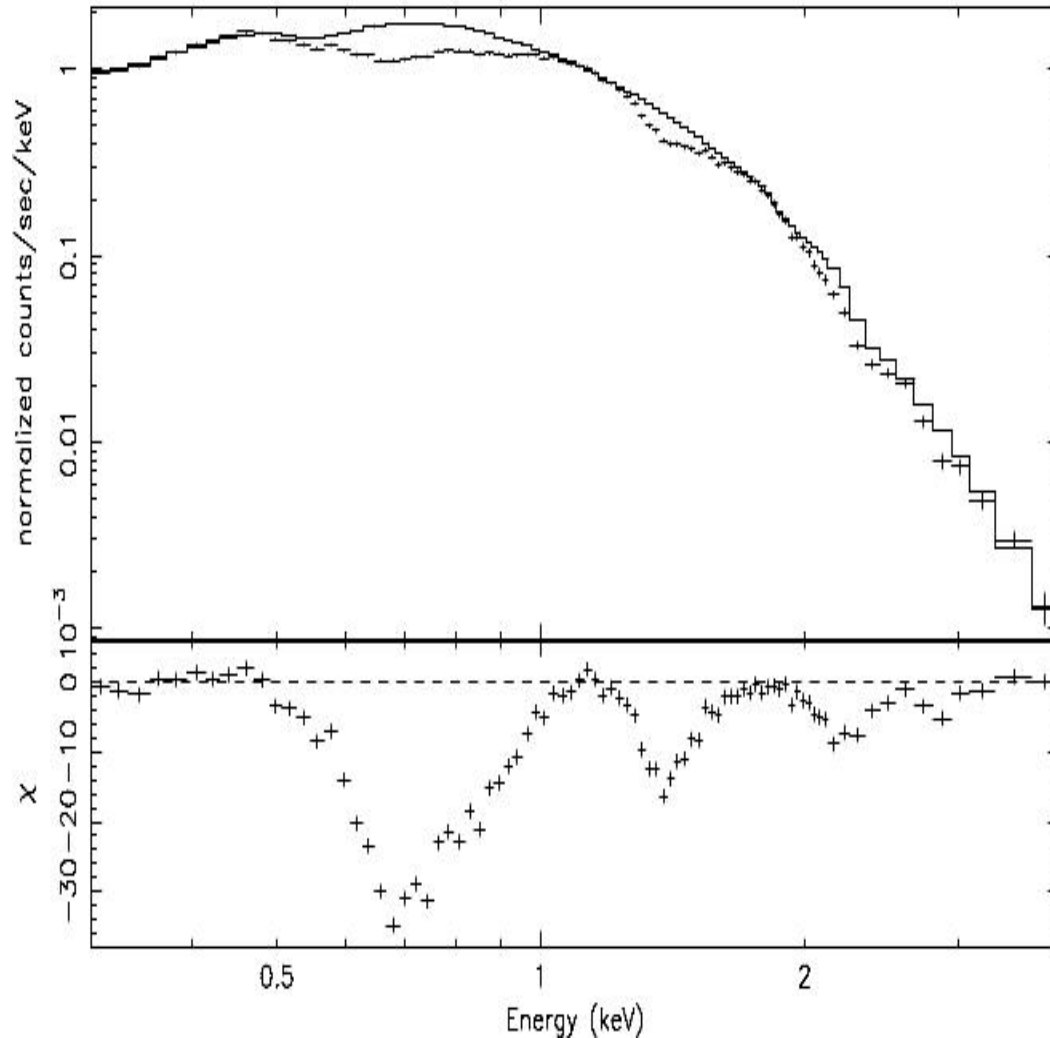
W.C.G.Ho *et al.* (2007) *MNRAS*, **375**, 821



# Связь теории с наблюдениями

## 1E 1207.4–5209

Data and best fit continuum model



[Bignami *et al.* (2004) *Mem.S.A.It.* **75**, 448]

$$\hbar\omega_c = \hbar eB/mc = 11.577 B_{12} \text{ keV}$$

$$\hbar\omega_{ci} = \hbar ZeB/m_i c = 6.35 (Z/A) B_{12} \text{ eV}$$

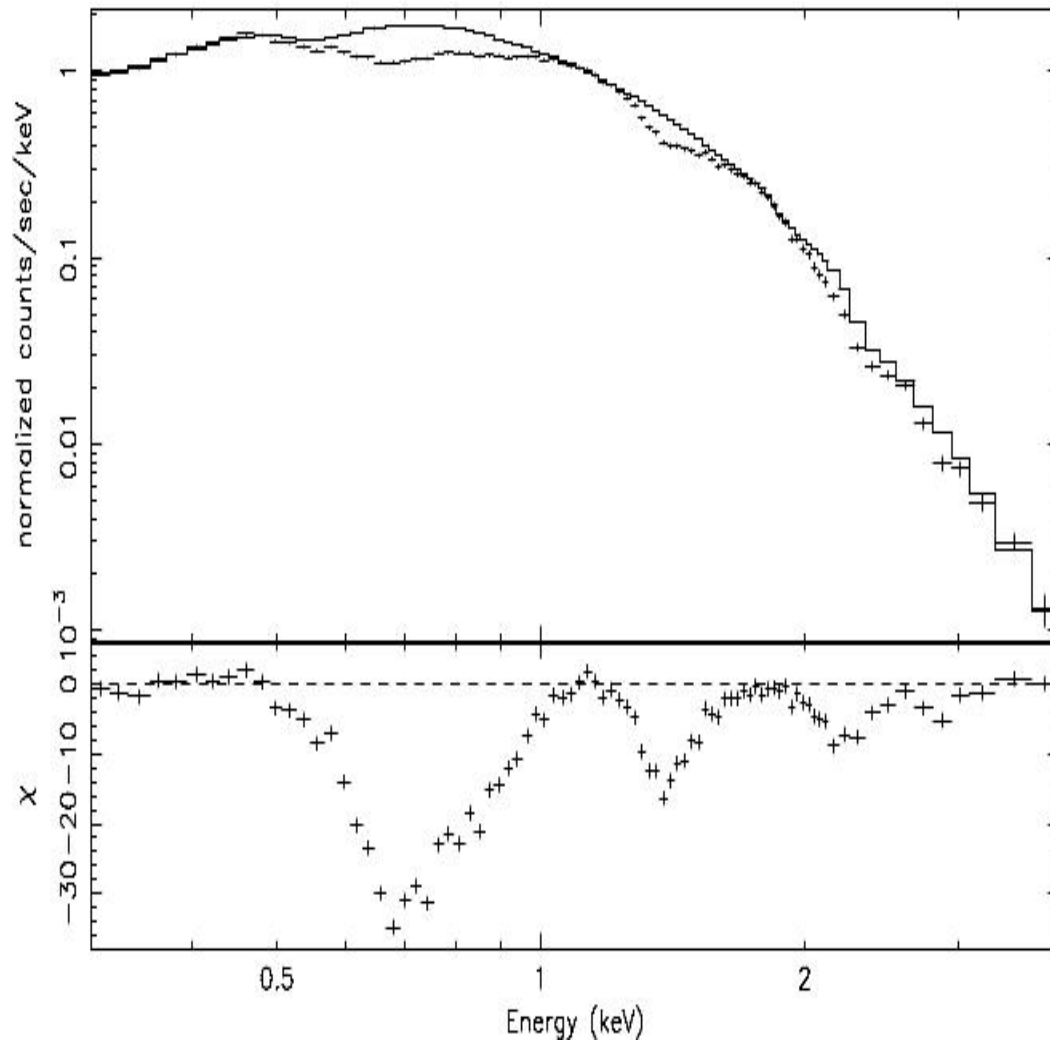
$$\max(T_{\text{eff}}, E_a)/mc^2 \sim 10^{-3}$$

Mori, Chonko, & Hailey (2005) *ApJ* **631**, 1082:  
only 2 features are real.

## Связь теории с наблюдениями

1E 1207.4–5209

Data and best fit continuum model



$$\hbar\omega_c = \hbar eB/mc = 11.577 B_{12} \text{ keV}$$

$$\hbar\omega_{ci} = \hbar ZeB/m_i c = 6.35 (Z/A) B_{12} \text{ eV}$$

$$\max(T_{\text{eff}}, E_a)/mc^2 \sim 10^{-3}$$

Pavlov & Shibano (1978) *SvA* **22**, 214;

Zane *et al.* (2001) *ApJ* **560**, 384:

**electron or proton (ion) free-free**  
cyclotron harmonics?

**Electron** cyclotron  $\rightarrow B \approx 8 \times 10^{10} \text{ G}$ .

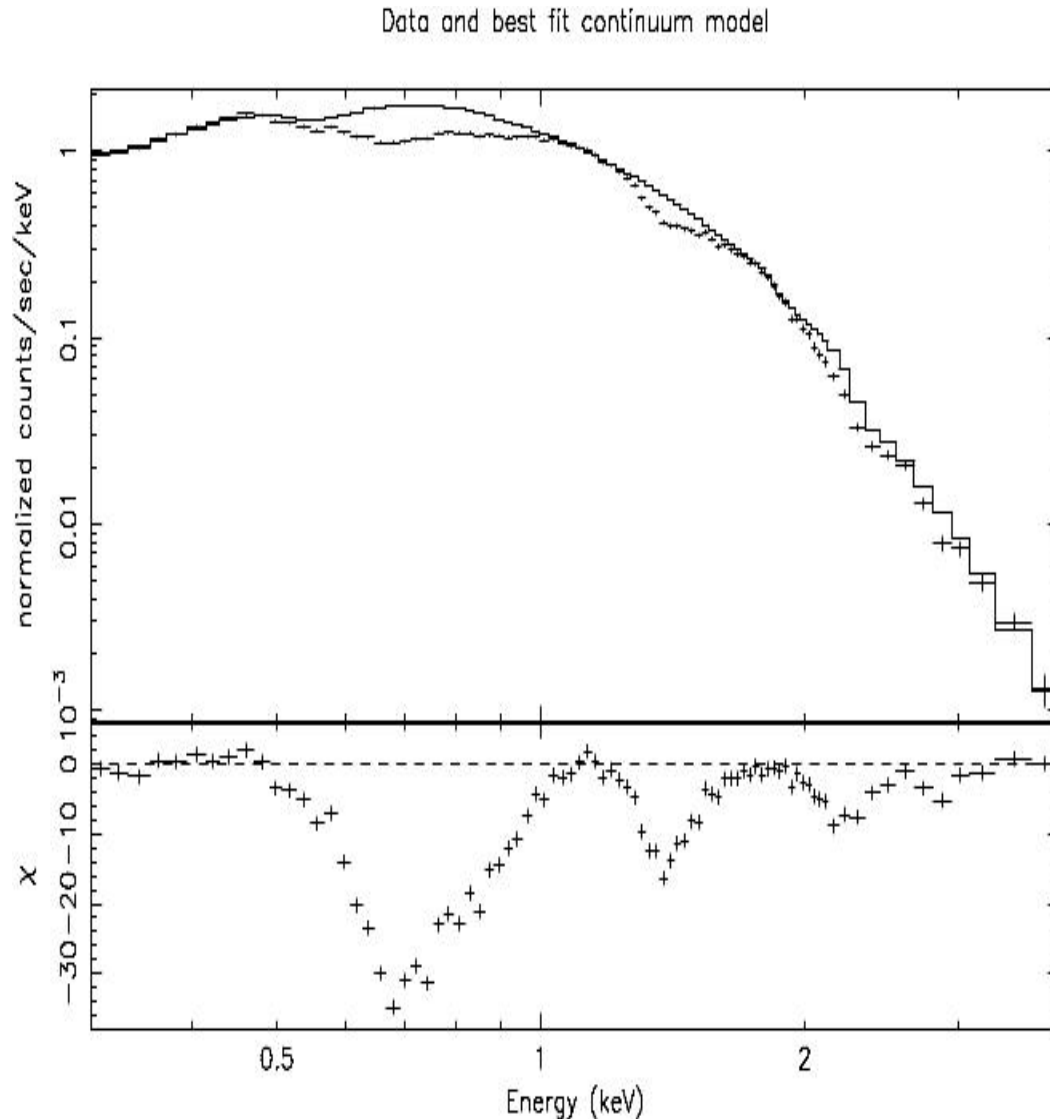
Suleimanov, Pavlov, & Werner (2010)

*ApJ* **714**, 630

(“quantum” cyclotron harmonics)

## Связь теории с наблюдениями

1E 1207.4–5209



$$\hbar\omega_c = \hbar eB/mc = 11.577 B_{12} \text{ keV}$$

$$\hbar\omega_{ci} = \hbar ZeB/m_i c = 6.35 (Z/A) B_{12} \text{ eV}$$

$$\max(T_{\text{eff}}, E_a)/mc^2 \sim 10^{-3}$$

Pavlov & Shibano (1978) *SvA* **22**, 214;

Zane *et al.* (2001) *ApJ* **560**, 384:

**electron or proton (ion) free-free**  
cyclotron harmonics?

**Electron** cyclotron  $\rightarrow B \approx 8 \times 10^{10} \text{ G}$ .

Suleimanov, Pavlov, & Werner (2010)

*ApJ* **714**, 630

(“quantum” cyclotron harmonics)

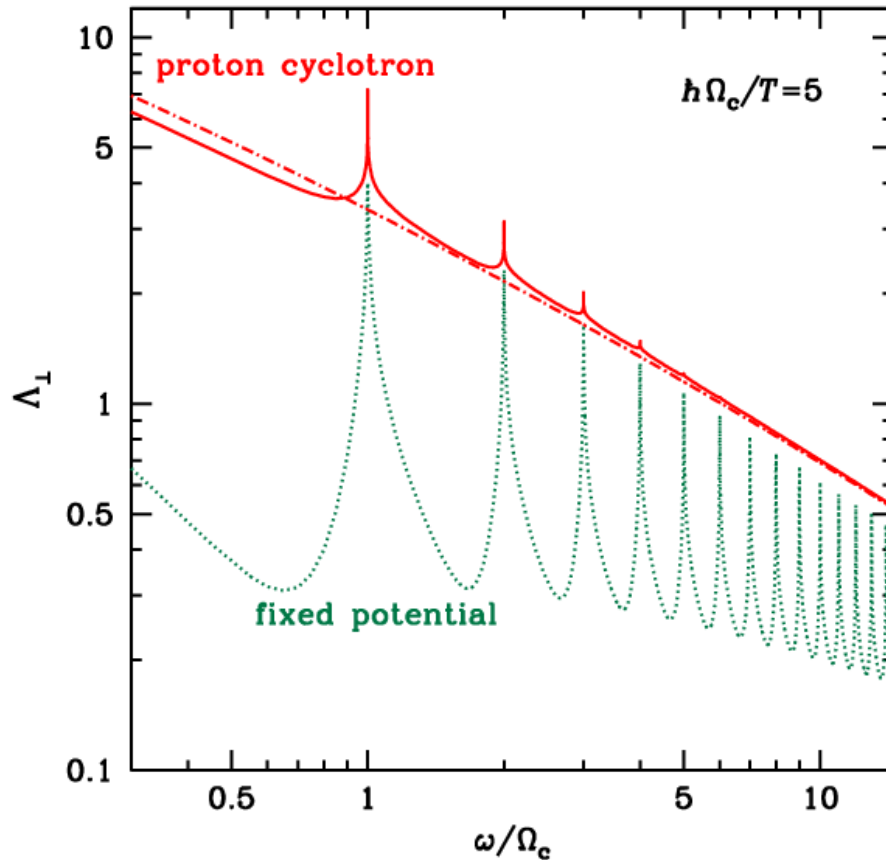
Halpern & Gotthelf (2011) *ApJ* **733**, L28:

$B \approx 2.4 \times 10^{11} \text{ G}$  or  $9.9 \times 10^{10} \text{ G}$  (!)

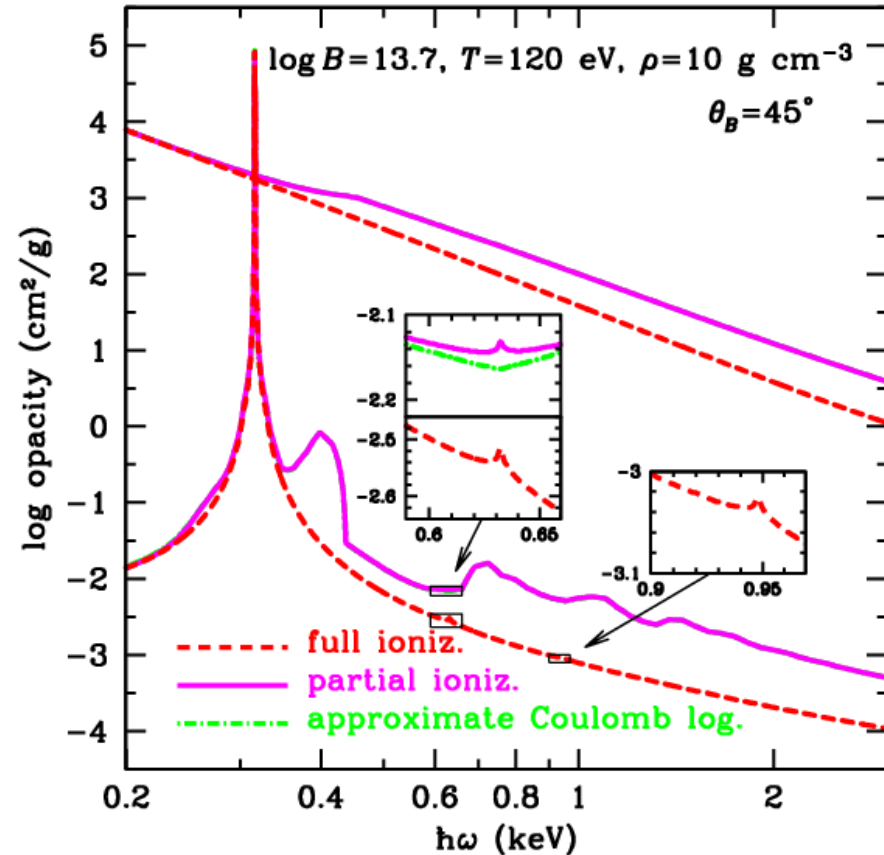


# Отсутствие ионных циклотронных гармоник в спектрах изолированных НЗ

AYP (2010) *Aston. Astrophys.* 518, A24

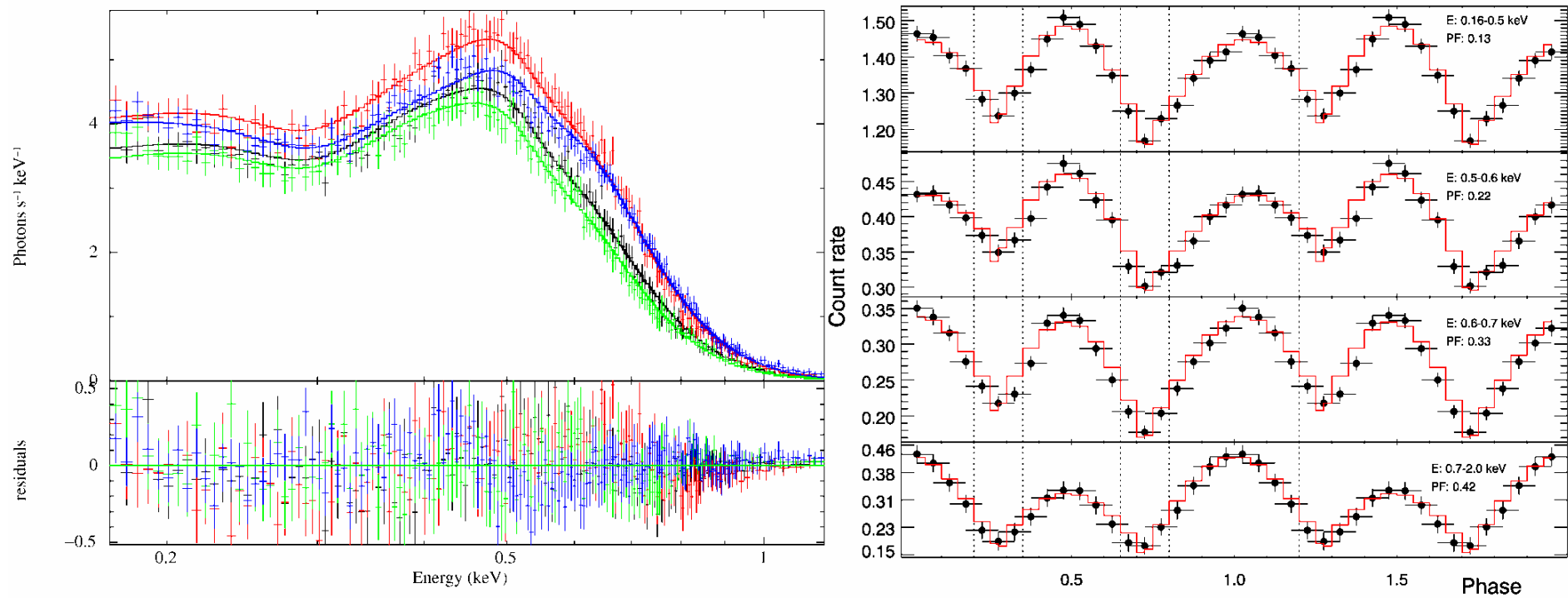


Coulomb logarithm in the cross section of the free-free photoabsorption in a H plasma with a strong magnetic field as a function of the ratio of photon frequency  $\omega$  to the cyclotron frequency  $\Omega_c$ . Dotted line – approximation of a fixed scattering potential (suitable for electron cyclotron harmonics) Solid line – an accurate calculation. Dash-dotted line – neglecting Landau quantization for protons.



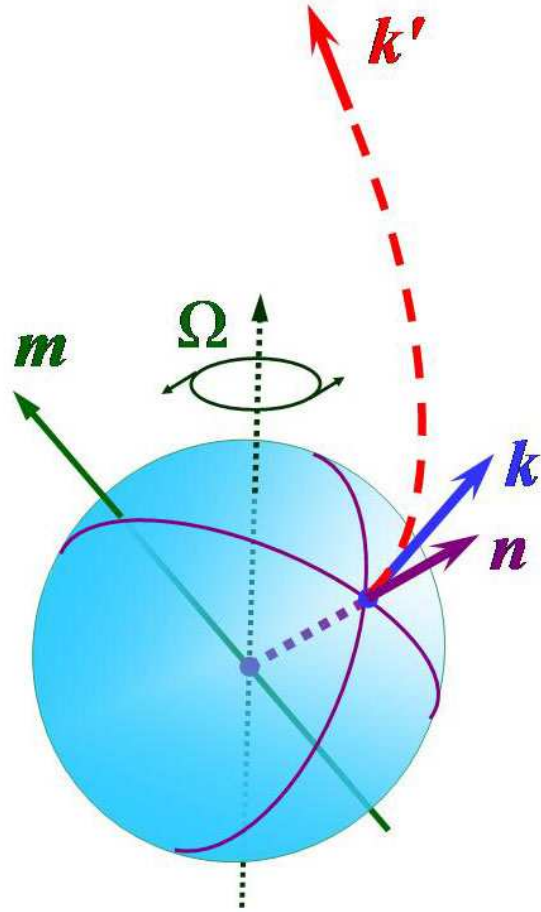
Opacities for O- (upper curves of each type) and X-modes of radiation in the H atmosphere of a NS with  $B=5 \times 10^{13}$  G. Dashes – fully ionized plasma model, solid lines – partially ionized, dot-dashed – partially ionized without free-free cyclotron harmonics. The features caused by incomplete ionization (atomic resonances) are much stronger than proton cyclotron harmonics.

# RBS 1223



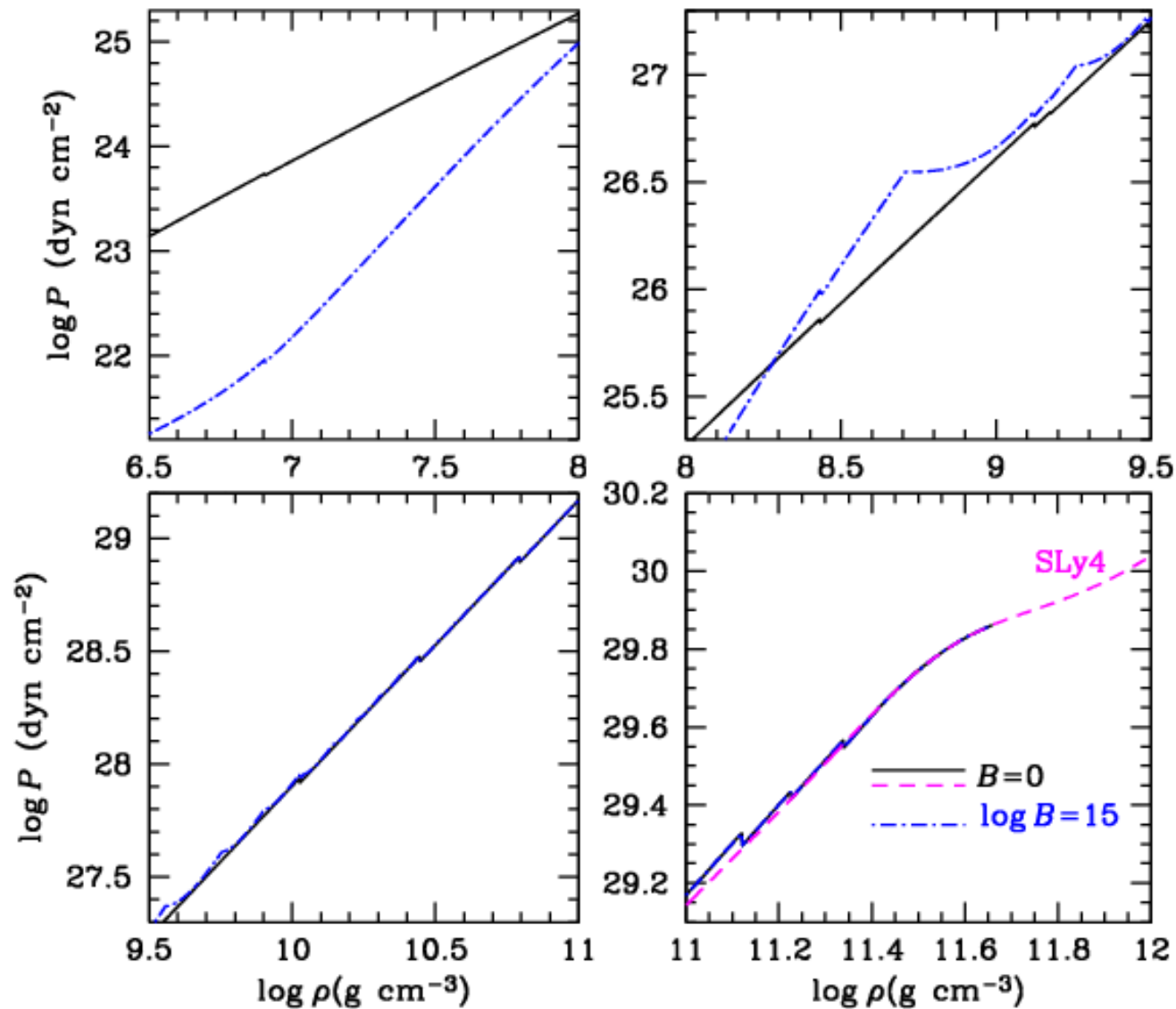
Hambaryan et al. (2011) *Astron. Astrophys.* **534**, A74

## RBS 1223



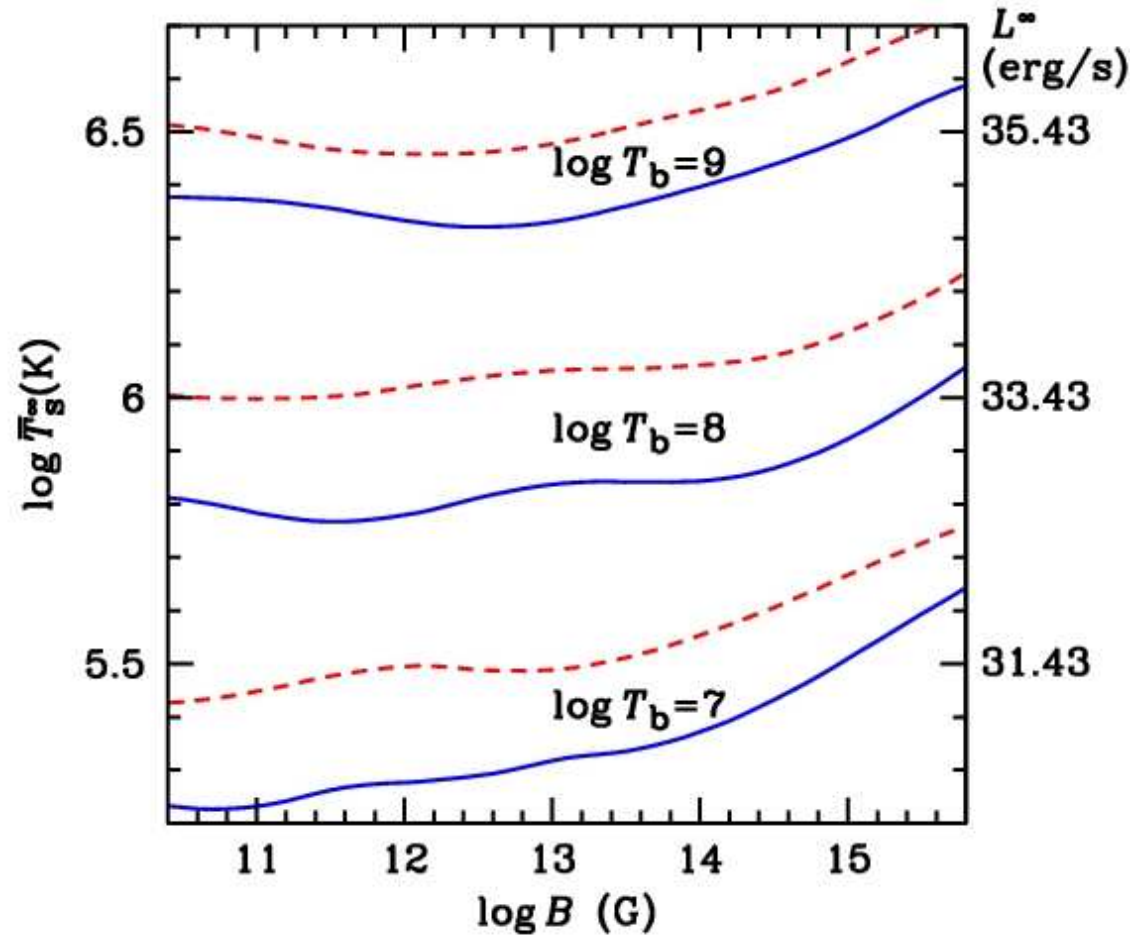
Fitted parameter	Spectral Model	
	Iron condensed surface	Blackbody
	partially ionized H atmosphere	electron scattering
$T_{p1}$ [eV]	$105.0^{+2.0}_{-4.0}$	$109 \pm 4.0$
$T_{p2}$ [eV]	$99.0 \pm 3.0$	$106 \pm 3.0$
$B_{p1}$ [ $10^{14}$ G]	$0.86 \pm 0.02$	$0.65 \pm 0.03$
$B_{p2}$ [ $10^{14}$ G]	$0.86 \pm 0.02$	$0.58 \pm 0.02$
$a_{p1}$	$0.61 \pm 0.11$	0.25
$a_{p2}$	$0.29 \pm 0.05$	0.25
$\tau^0$	$2.76^{+0.10}_{-0.02}$	$1.90 \pm 0.06$
$\sigma$ [eV]	$225.8^{+5.6}_{-1.8}$	$168.0 \pm 6.0$
$z$	$0.15 \pm 0.02$	$0.17 \pm 0.03$
$\kappa$ [°]	$4.2 \pm 0.6$	$4.0 \pm 0.4$
$i$ [°]	$48.9 \pm 0.5$	$45.6 \pm 0.5$
$\theta$ [°]	$90.0 \pm 0.5$	$90.0 \pm 0.5$

## Сверхсильное поле влияет на уравнение состояния коры звезды



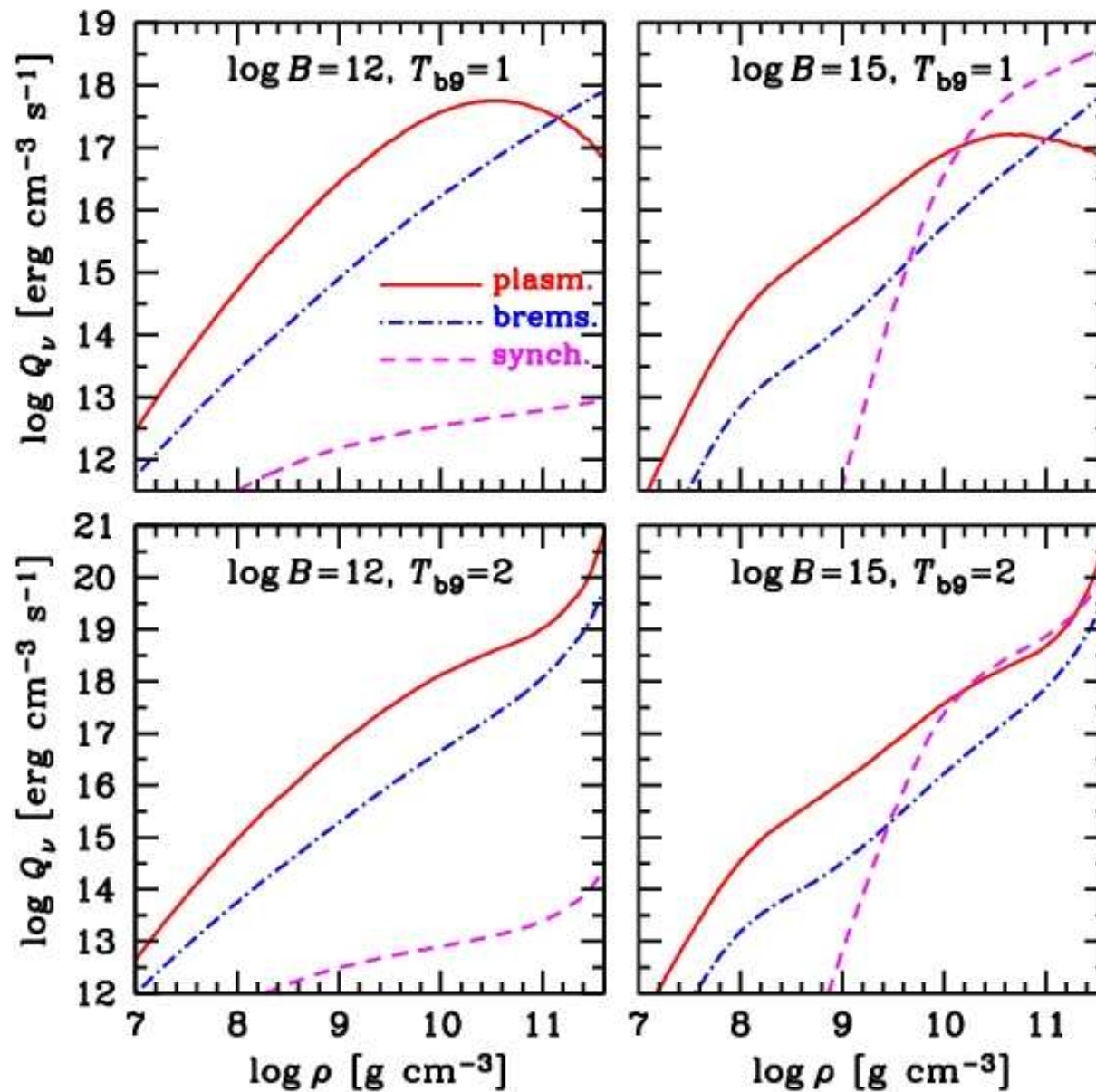
Зависимость давления от плотности для основного состояния ядерной материи в коре нейтронной звезды без поля и со сверхсильным магнитным полем

## Сверхсильное поле влияет на полную светимость звезды



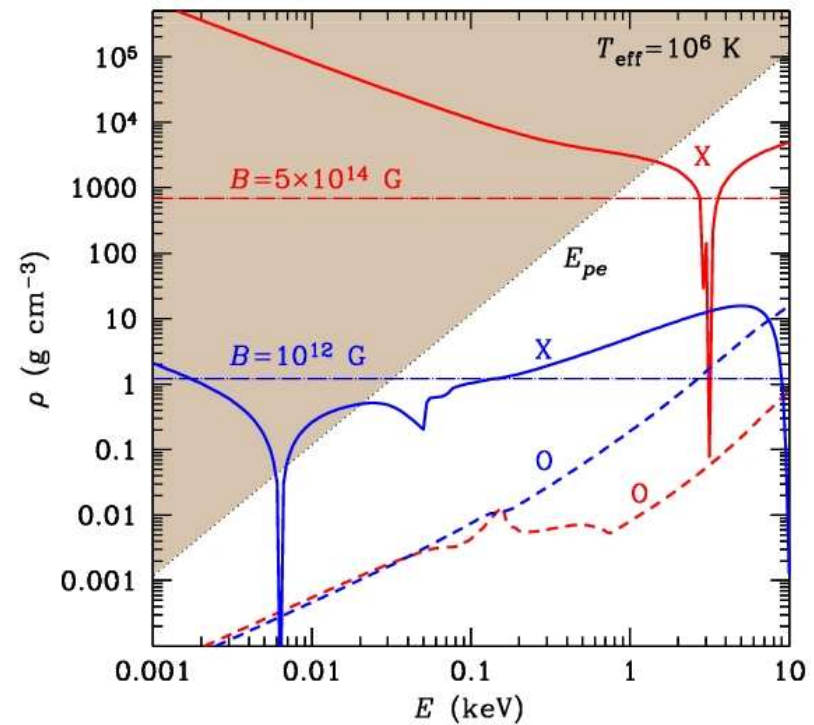
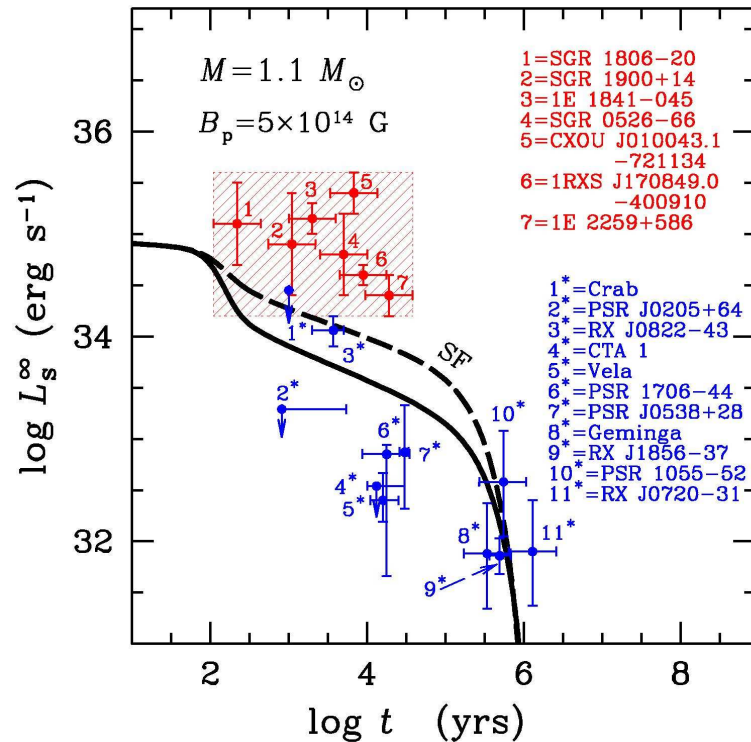
Зависимость средней эффективной температуры от величины магнитного поля (в дипольной модели) для разного состава оболочек

*Сверхсильное поле влияет на нейтринную светимость коры горячих нейтронных звёзд*



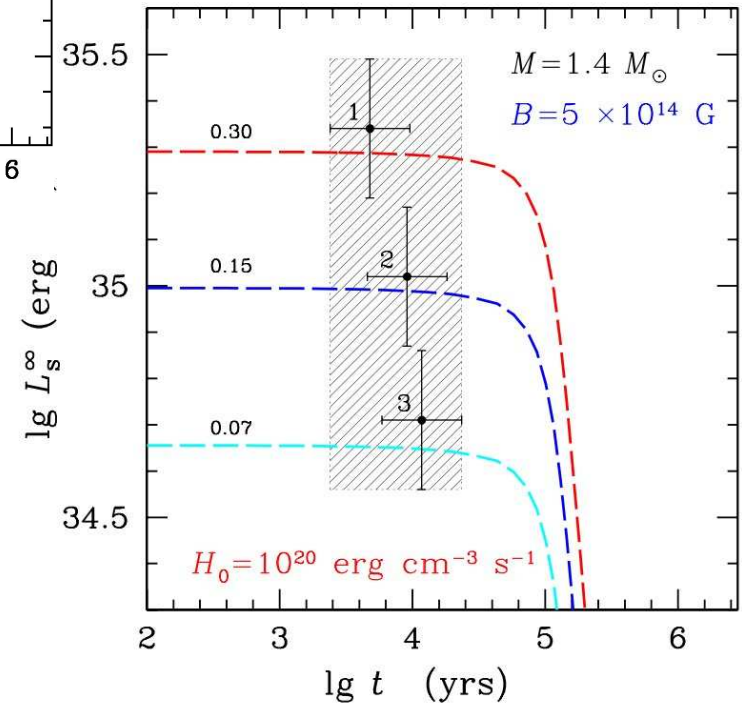
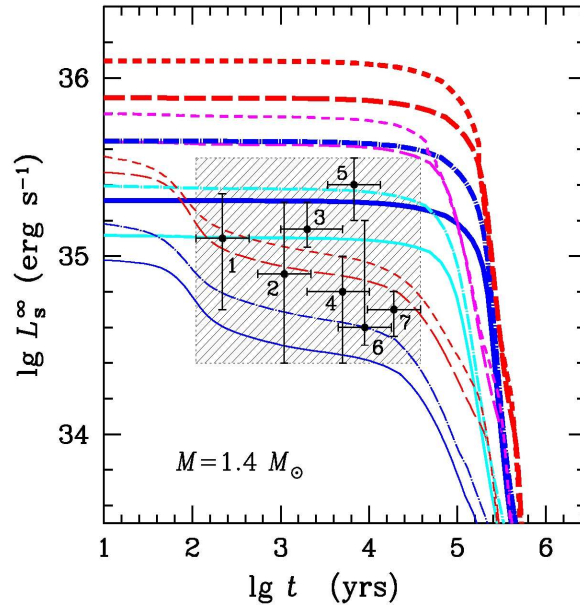
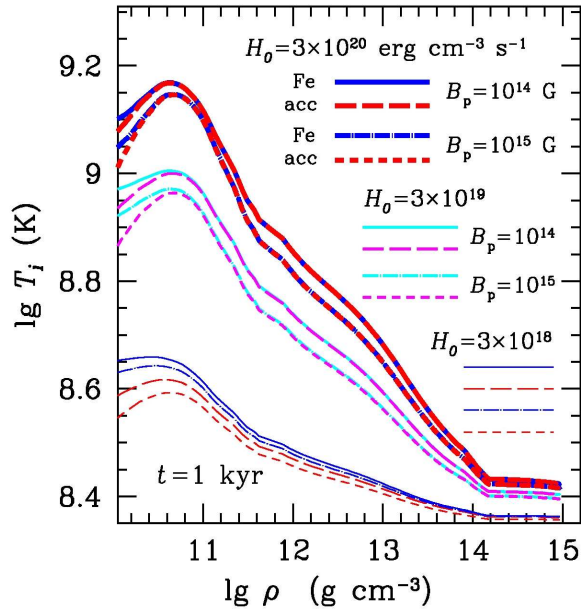
## Задачи для сверхсильных полей

1. Энергетический баланс магнитаров
2. Анизотропный перенос тепла во внутренней коре?
3. Поверхность: молекулы, цепочки, конденсация
4. Непертурбативные эффекты конечной массы атомных ядер
5. Перенос излучения на частотах ниже плазменной



# Задачи для сверхсильных полей

## 1. Энергетический баланс магнитаров



A.D.Kaminker *et al.* (2009) *Mon. Not. R. astr. Soc.* **395**, 2257

Kaminker *et al.* (2013) ASP Conf. Ser. **466**, 237



## Заключение

- Модели *уравнений состояния, проводимостей, теплопроводностей и непрозрачностей* для сильно замагниченной плазмы достаточно развиты и применяются для моделирования тепловой структуры оболочек нейтронных звёзд и спектров их теплового излучения. Модели спектров, построенные с учётом *сильных магнитных полей, неполной ионизации и магнитной конденсации* начинают с успехом использоваться для интерпретации наблюдений.
- Для *химических элементов, отличных от H*, непрозрачности магнитных атмосфер известны только в грубом приближении и требуют дальнейших исследований.
- *Сверхсильные* магнитные поля дают новые эффекты, которые могут проявляться в наблюдениях, причём эти эффекты сопровождаются теоретическими неопределённостями и требуют дальнейшего изучения.