

*Нейтронные звёзды
и их значение
для фундаментальной физики*

А. Ю. Потехин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Санкт-Петербург

Нейтронные звёзды – самые плотные во Вселенной

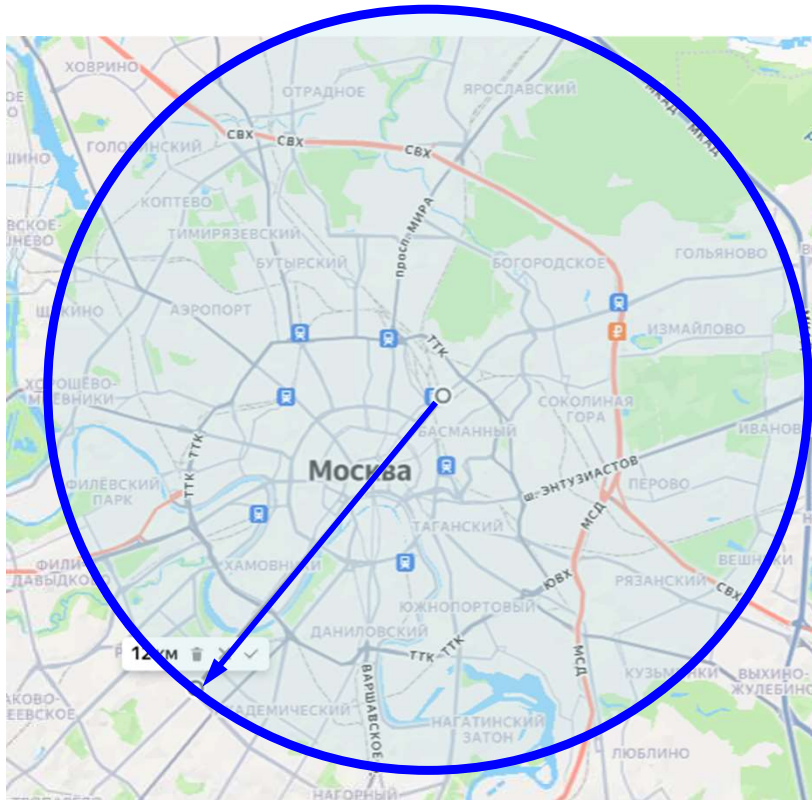
Масса и радиус: $M \sim (1 - 2) M_{\odot}$, $R \sim (10 - 15) \text{ км}$

$$(M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ г}, R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{ км})$$

Соответственно,

гравитационная энергия: $U_g \sim GM^2/R \sim 5 \times 10^{53} \text{ эрг} \sim 0.2 Mc^2$,

ускорение силы тяжести у поверхности: $g \sim GM/R^2 \sim 2 \times 10^{14} \text{ см с}^{-2}$,



средняя плотность:

$$\bar{\rho} \approx 3M/(4\pi R^3) \sim (2 - 3)\rho_{\text{нuc}}$$

выше ядерной!

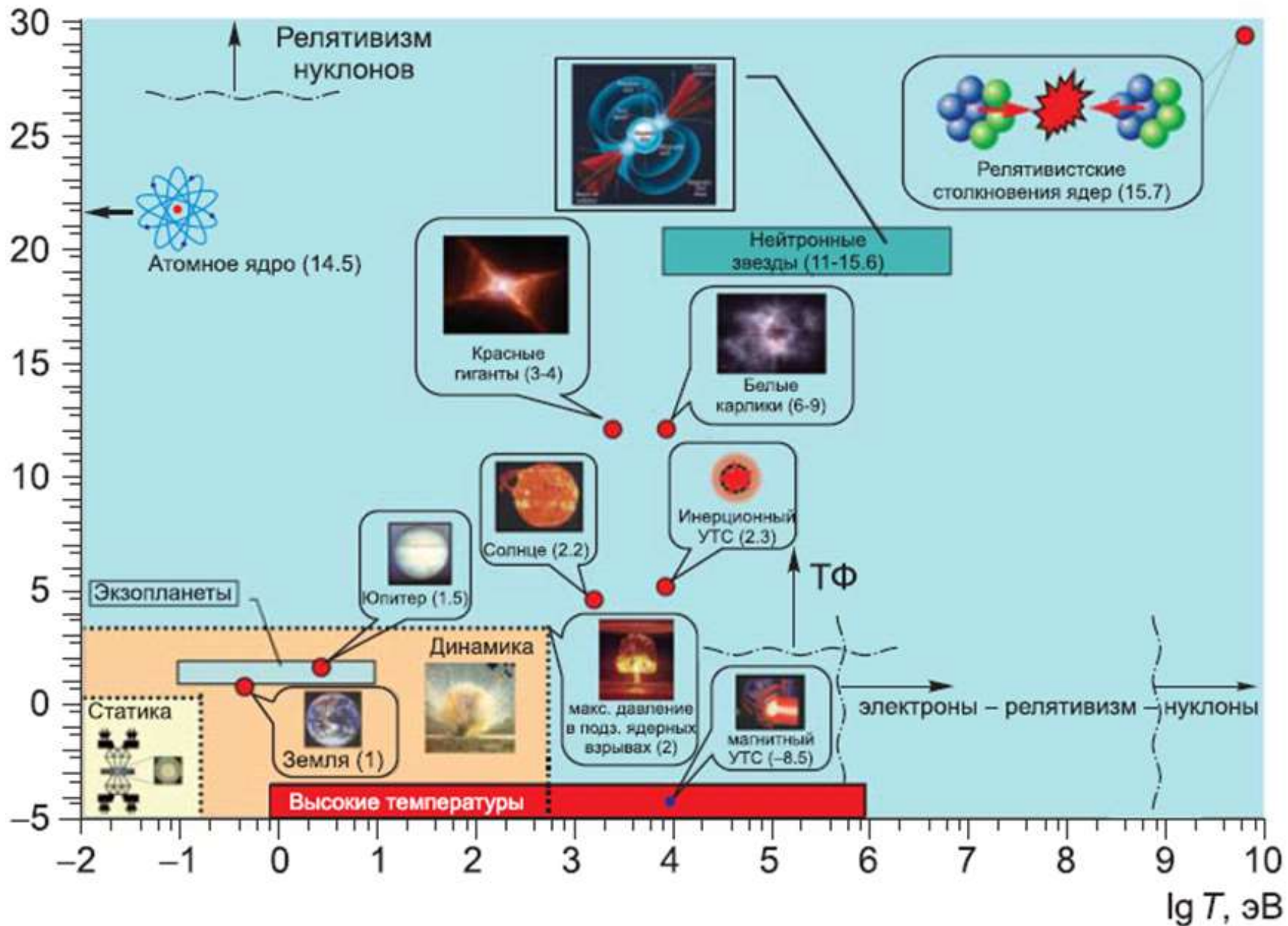
$$(\rho_{\text{нuc}} \approx 2.5 \times 10^{14} \text{ г см}^{-3})$$

«параметр компактности»

$$x_g = r_g/R \sim 0.2 - 0.6$$

⇒ эффекты ОТО!

$\lg P, \text{ Мбар}$

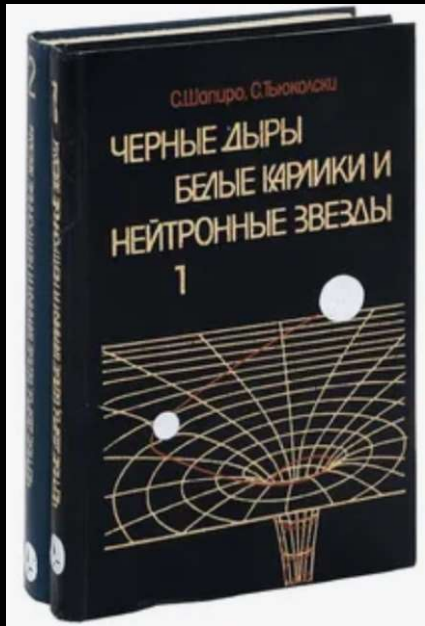


В.Е. Фортов. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. *УФН* 179, 653 (2009)

Экстремальные состояния в природе и в лаборатории. Цифры в скобках указывают логарифм плотности в г/см^3 . Область «статика» соответствует статическому, «динамика» — динамическому методам получения высоких давлений, «высокие температуры» — экспериментам при высоких температурах

Предсказание нейтронных звёзд

- ❖ Л.Д.Ландау (1931) – *предвидение* [L.D.Landau, “On the theory of stars,” *Physikalische Zs. Sowjetunion* **1**, 285 (1932)]: для звёзд с $M > 1.5M_{\odot}$ “**density of matter becomes so great that atomic nuclei come in close contact, forming one gigantic nucleus**”.
- ❖ J.Chadwick – *открытие нейтрона* [*Nature*, Feb.27, 1932]
- ❖ W.Baade & F.Zwicky (1933) – *предсказание нейтронных звёзд* [“Supernovae and cosmic rays,” *Phys. Rev.* **45** (1934) 138; “On super-novae,” *Proc. Nat. Acad. Sci.* **20** (1934) 254]: “...**supernovae represent the transitions from ordinary stars to neutron stars**, which in their final stages consist of extremely closely packed neutrons”; “...possess a very small radius and an extremely high density.”



Л.Д. Ландау
(1908–1968)



Дж. Чедвик
(1893–1960)



В. Бааде
(1893–1960)



Ф. Цвикки
(1898–1974)

Теория до открытия

❖ Т.Е.Стерне (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание *нейтронизации* с ростом плотности

Теория до открытия

❖ T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности

❖ F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88**, 522 (1938)]

– максимальная **энергия связи** нейтронной звезды;

– отличие «барионной массы» M_b от гравитационной массы M ;

– гравитационное красное смещение (“enormous *gravitational red shifts*”)

Теория до открытия

- ❖ T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности
- ❖ F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88**, 522 (1938)]
 - максимальная **энергия связи** нейтронной звезды;
 - отличие «барионной массы» M_b от гравитационной массы M ;
 - гравитационное красное смещение (“enormous gravitational red shifts”)
- ❖ R.C.Tolman; J.R.Oppenheimer & G.M.Volkoff (*Phys. Rev.*, 3.01. – 15.02.1939)
 - “**TOV equation**” (гидростатическое равновесие сферически симметричной звезды в ОТО); **максимальная масса** нейтронной звезды (в модели невзаимодействующих нейтронов $M_{\max} = 0.71 M_{\odot} < M_{\max}(\text{WD}) = 1.44 M_{\odot}$).

$$ds^2 = -e^{2\Phi(r)} c^2 dt^2 + e^{2\Lambda(r)} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$e^{2\Lambda(r)} = 1 - 2GM_r/c^2 r$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{M_r c^2}\right) \left(1 - \frac{2GM_r}{rc^2}\right)^{-1}$$

$$d\Phi(r)/dP(r) = -[P(r) + \rho(r)c^2]^{-1}$$

$$e^{2\Phi(R)} = 1 - r_g/R$$

Теория до открытия

- ❖ T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности
- ❖ F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88**, 522 (1938)]
 - максимальная **энергия связи** нейтронной звезды;
 - отличие «барионной массы» M_b от гравитационной массы M ;
 - гравитационное красное смещение (“enormous gravitational red shifts”)
- ❖ R.C.Tolman; J.R.Oppenheimer & G.M.Volkoff (*Phys. Rev.*, 3.01. – 15.02.1939)
 - **“TOV equation”** (гидростатическое равновесие сферически симметричной звезды в ОТО).
- ❖ **Уравнения состояния плотной материи.**
 - J.A.Wheeler, B.K.Harrison, *et al.* (1950s). A.G.W.Cameron (1959): $M_{\max} \sim 2 M_{\odot}$.
 - Я.Б.Зельдович (1961) – максимально жёсткое уравнение состояния.

Теория до открытия

- ❖ T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности
- ❖ F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88**, 522 (1938)]
 - максимальная **энергия связи** нейтронной звезды;
 - отличие «барионной массы» M_b от гравитационной массы M ;
 - гравитационное красное смещение (“enormous gravitational red shifts”)
- ❖ R.C.Tolman; J.R.Oppenheimer & G.M.Volkoff (*Phys. Rev.*, 3.01. – 15.02.1939)
 - **“TOV equation”** (гидростатическое равновесие сферически симметричной звезды в ОТО).
- ❖ **Уравнения состояния плотной материи.**
 - J.A.Wheeler, B.K.Harrison, et al. (1950s). A.G.W.Cameron (1959): $M_{\max} \sim 2 M_{\odot}$.
 - Я.Б.Зельдович (1961) – максимально жёсткое уравнение состояния.
- ❖ **Сверхтекучесть.** БКШ: J.Bardeen, L.N.Cooper, & J.R.Schrieffer (1957).
 - A.Bohr, B.R.Mottelson, & D.Pines, “Possible analog between the excitation spectra of nuclei and those of superconducting metal state,” [*Phys. Rev.* **110** (1958) 936].
 - А.Б.Мигдал (1959), В.Л.Гинзбург и Д.А.Киржниц (1964):
 $T_c \sim 10^{10}$ К, $\rho \sim 10^{13} - 10^{15}$ г/см³.

Теория до открытия

- ❖ T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности
- ❖ F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88**, 522 (1938)]
 - максимальная **энергия связи** нейтронной звезды;
 - отличие «барионной массы» M_b от гравитационной массы M ;
 - гравитационное красное смещение (“enormous gravitational red shifts”)
- ❖ R.C.Tolman; J.R.Oppenheimer & G.M.Volkoff (*Phys. Rev.*, 3.01. – 15.02.1939)
 - **“TOV equation”** (гидростатическое равновесие сферически симметричной звезды в ОТО).
- ❖ **Уравнения состояния плотной материи.**
 - J.A.Wheeler, B.K.Harrison, et al. (1950s). A.G.W.Cameron (1959): $M_{\max} \sim 2 M_{\odot}$.
 - Я.Б.Зельдович (1961) – максимально жёсткое уравнение состояния.
- ❖ **Сверхтекучесть.** БКШ: J.Bardeen, L.N.Cooper, & J.R.Schrieffer (1957).
 - A.Bohr, V.R.Mottelson, & D.Pines, “Possible analog between the excitation spectra of nuclei and those of superconducting metal state,” [*Phys. Rev.* **110** (1958) 936].
 - А.Б.Мигдал (1959), В.Л.Гинзбург и Д.А.Киржниц (1964):
 - $T_c \sim 10^{10}$ К, $\rho \sim 10^{13} - 10^{15}$ г/сс.
- ❖ **Нейтринное излучение.** Н.-Y.Chiu & E.E.Salpeter (1964); J.N.Bahcall & R.A.Wolf (1965).

Теория до открытия

- ❖ T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности
- ❖ F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88**, 522 (1938)]
 - максимальная **энергия связи** нейтронной звезды;
 - отличие «барионной массы» M_b от гравитационной массы M ;
 - гравитационное красное смещение (“enormous gravitational red shifts”)
- ❖ R.C.Tolman; J.R.Oppenheimer & G.M.Volkoff (*Phys. Rev.*, 3.01. – 15.02.1939)
 - **“TOV equation”** (гидростатическое равновесие сферически симметричной звезды в ОТО).
- ❖ **Уравнения состояния плотной материи.**
 - J.A.Wheeler, V.K.Harrison, *et al.* (1950s). A.G.W.Cameron (1959): $M_{\max} \sim 2 M_{\odot}$.
 - Я.Б.Зельдович (1961) – максимально жёсткое уравнение состояния.
- ❖ **Сверхтекучесть.** БКШ: J.Bardeen, L.N.Cooper, & J.R.Schrieffer (1957).
 - A.Bohr, V.R.Mottelson, & D.Pines, “Possible analog between the excitation spectra of nuclei and those of superconducting metal state,” [*Phys. Rev.* **110** (1958) 936].
 - А.Б.Мигдал (1959), В.Л.Гинзбург и Д.А.Киржниц (1964):
 $T_c \sim 10^{10}$ К, $\rho \sim 10^{13} - 10^{15}$ г/см³.
- ❖ **Нейтринное излучение.** Н.-Y.Chiu & E.E.Salpeter (1964); J.N.Bahcall & R.A.Wolf (1965).
- ❖ **Остывание.** R.Stabler (1960, PhD); Chiu (1964); Chiu & Salpeter (1964); D.C.Morton (1964), Bahcall & Wolf; S.Tsuruta & A.G.W.Cameron (1966).

Поиск и открытие нейтронных звёзд

Поиск в рентгене.

- R.Giacconi et al. (1962): рентгеновские детекторы на ракетах; ~ 20 источников; открытие Sco X-1 (Нобелевская премия 2002 года Giacconi “for outstanding contribution to X-ray astronomy”).



Рикардо Джаккони
(1931–2018)

Поиск и открытие нейтронных звёзд

Поиск в рентгене.

- R.Giacconi et al. (1962): рентгеновские детекторы на ракетах; ~ 20 источников; открытие Sco X-1 (Нобелевская премия 2002 года Giacconi “for outstanding contribution to X-ray astronomy”).
- S.Bowyer et al. (1964): рентгеновский источник в Крабовидной туманности ~ 10^{13} km (\Rightarrow *не* нейтронная звезда).



Рикардо Джаккони
(1931–2018)

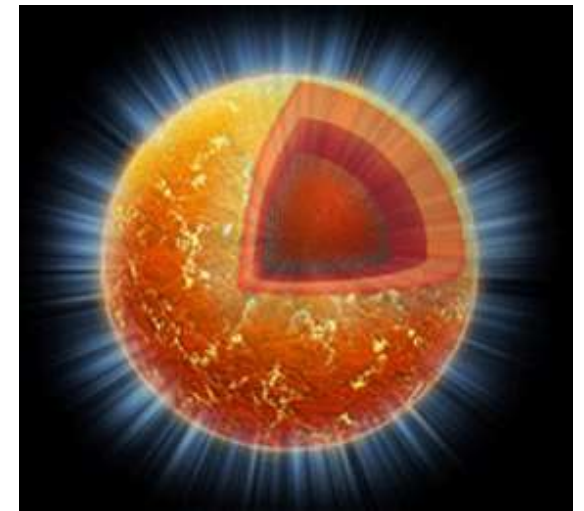
Поиск и открытие нейтронных звёзд

Поиск в рентгене.

- R.Giacconi et al. (1962): рентгеновские детекторы на ракетах; ~ 20 источников; открытие Sco X-1 (Нобелевская премия 2002 года Giacconi “for outstanding contribution to X-ray astronomy”).
- S.Bowyer et al. (1964): рентгеновский источник в Крабовидной туманности ~ 10^{13} km (\Rightarrow *не* нейтронная звезда).
- J.N.Bahcall & R.A.Wolf (1965): “The calculated cooling rates strongly indicate that the discrete x-ray sources ... are not neutron stars”.



Рикардо Джаккони
(1931–2018)



Поиск и открытие нейтронных звёзд

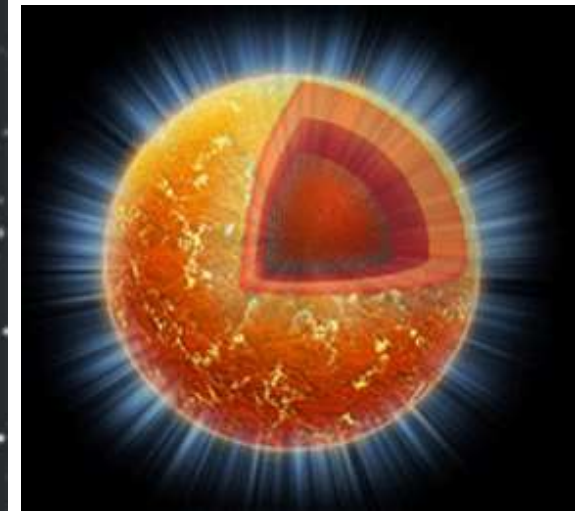
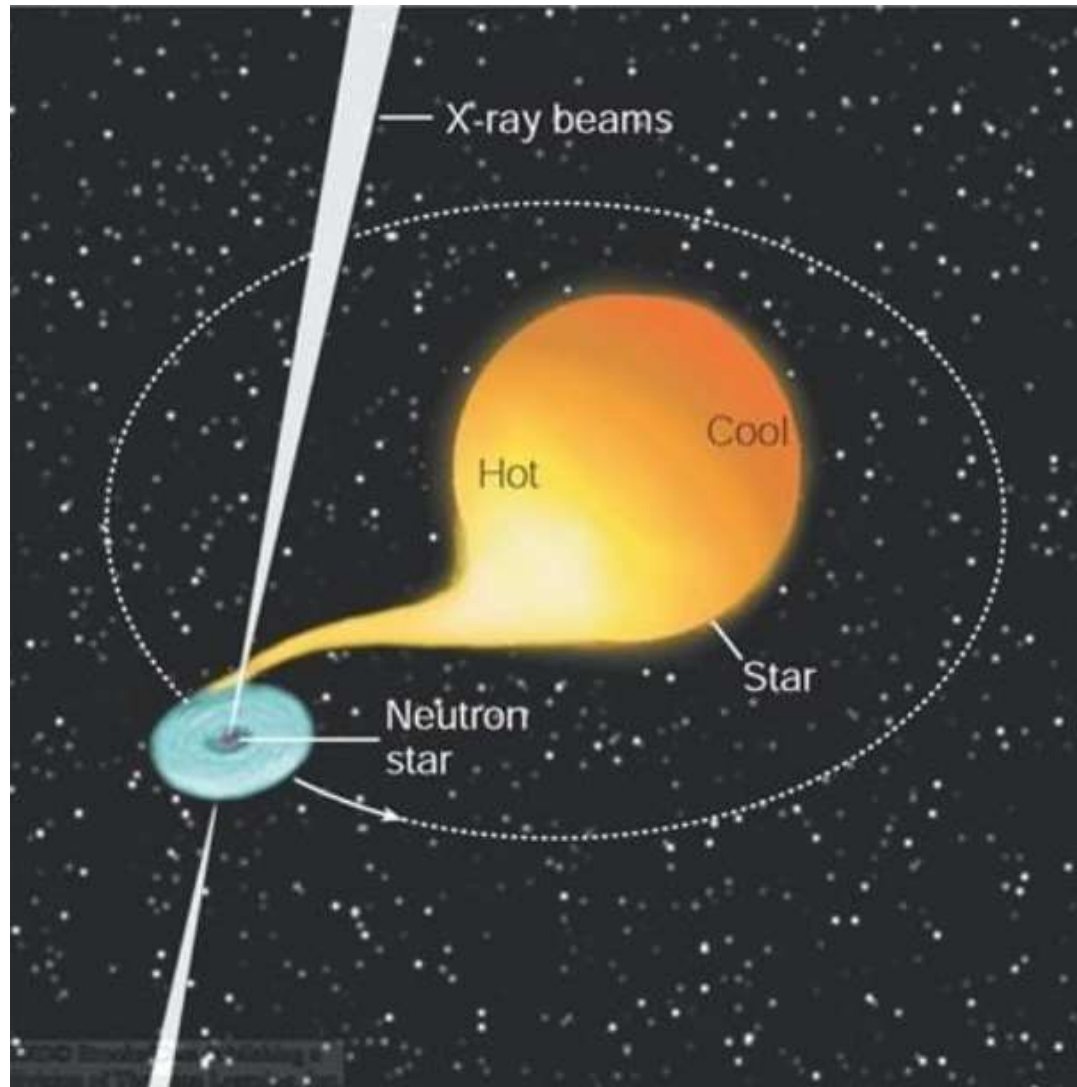


Рикардо Джаккони
(1931–2018)

- R.Giacconi et al. (1962): открытие Sco X-1.
- И.С.Шкловский (1967): Sco X-1 – “a neutron star in a state of accretion” (**верно!** но не принято научным сообществом).



И.С. Шкловский
(1916-1985)



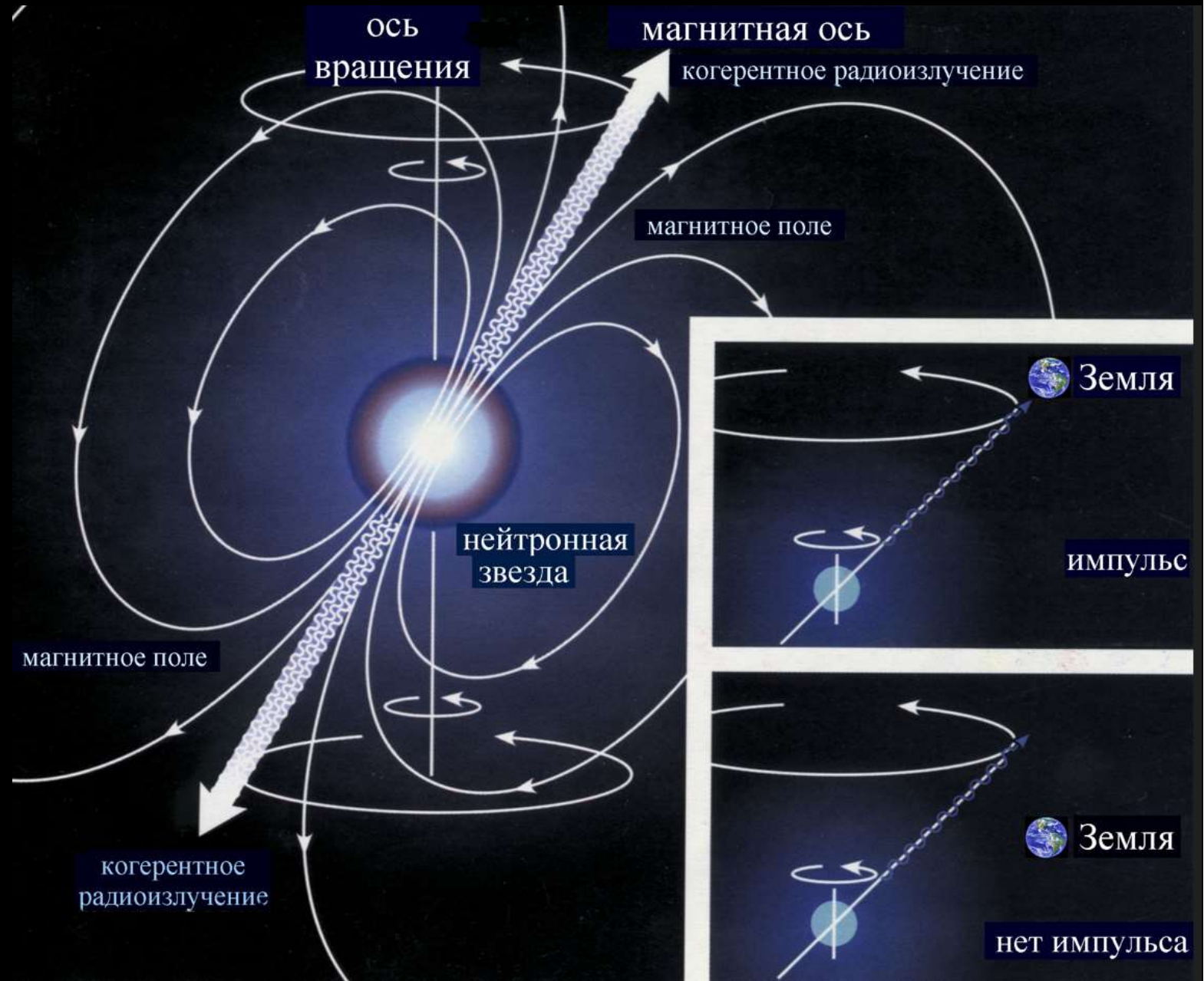
Нейтронные звёзды – звёзды с самым сильным магнитным полем



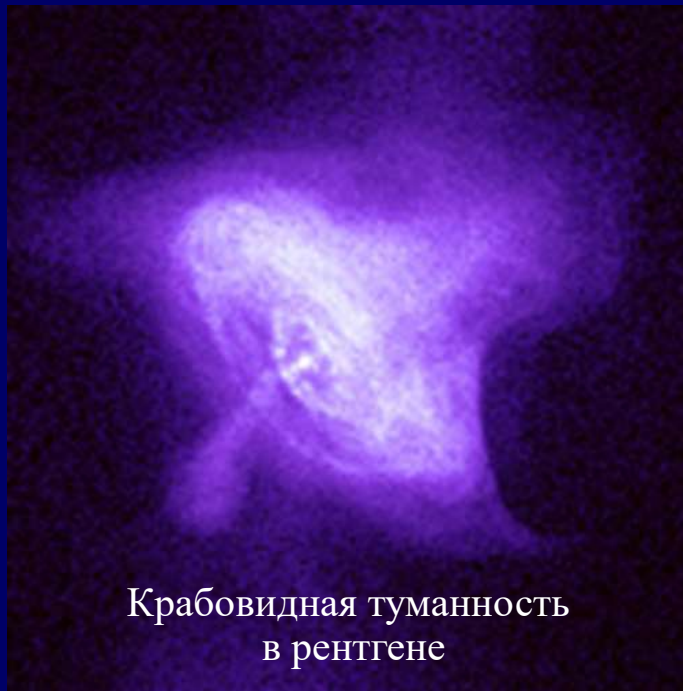
В.Л. Гинзбург
(1916–2009)

1964: $B \sim 10^{12}$ Гс

1971: $B \sim 10^8 -$
 $\frac{10^{12} - 10^{14}}{10^{15}}$ Гс



Поиск и открытие нейтронных звёзд



- *Плерионы (пульсарные туманности).*
- Н.С.Кардашёв (1964), Ф.Рацини (1967) – модели туманностей вокруг быстро вращающихся нейтронных звёзд с сильными магнитными полями.
- Ф. Рацини (1967), Т. Gold (1968): *модель пульсара.*



Н.С. Кардашёв
(1932–2019)



Франко Пачини
(1939–2012)



A. Hewish (1924–2021)



Jocelyn Bell (b.1943)

**6.08 – 28.11.1967: Джоселин Белл, Энтони Хьюиш
– открытие пульсаров**



Джоселин Белл у радиотелескопа в Кембридже, на котором были открыты пульсары

Нейтронные звёзды из гипотезы стали реальностью



A. Hewish (1924–2021)



Jocelyn Bell (b.1943)

6.08 – 28.11.1967: Джоселин Белл, Энтони Хьюиш – открытие пульсаров

К 1969 году стало ясно, что пульсары – это быстро вращающиеся нейтронные звёзды с сильными магнитными полями (T.Gold, 1968).



Thomas Gold (1920–2004)

Нейтронные звёзды из гипотезы стали реальностью



A. Hewish (1924–2021)



M. Ryle (1918–1984)

Нобелевская премия 1974 – Anthony Hewish & Martin Ryle
"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"



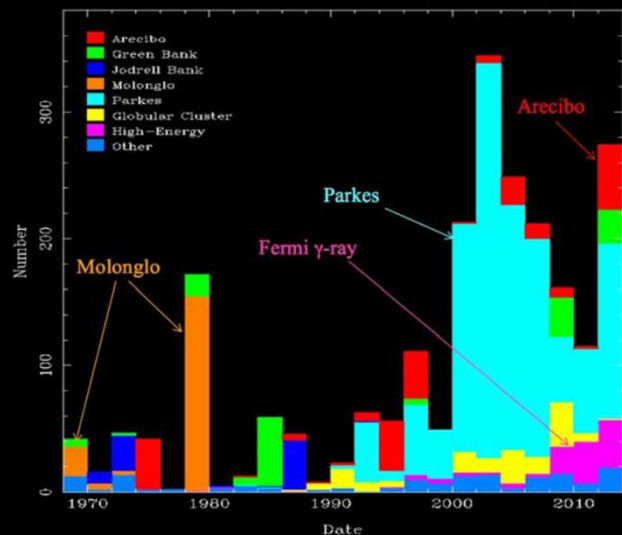
Jocelyn Bell (b.1943)



Томас Голд (1920–2004)

Разнообразные проявления нейтронных звёзд

- ❑ Источники радиоимпульсов – радиопульсары (1967). Нобелевская премия 1974 года (Энтони Хьюиш).
- ❑ Источники рентгеновского излучения (1962). Нобелевская премия 2002 года (Рикардо Джаккони).
- ❑ Двойные нейтронные звёзды – источники гравитационных волн и средство проверки ОТО (1974). Нобелевская премия 1993 года (Рассел Халс и Джозеф Тейлор).
- ❑ Источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (1979).
- ❑ Гамма-пульсары (2008).
- ❑ Всплески гравитационных волн (и ЭМ волн от ИК до гамма-диапазона) при слиянии нейтронных звёзд (GW170817). Нобелевская премия 2017 года (Райнер Вайсс, Кип Торн, Барри Бэриш).



Конкретные особенности каждого проявления не вполне ясны. Активно ведутся их теоретические исследования и накопление наблюдательного материала.

Всего на 2025 год обнаружено более **4000** нейтронных звёзд, из них около 90 % – в радиодиапазоне.

Наблюдения

Наземные радиотелескопы и оптические телескопы

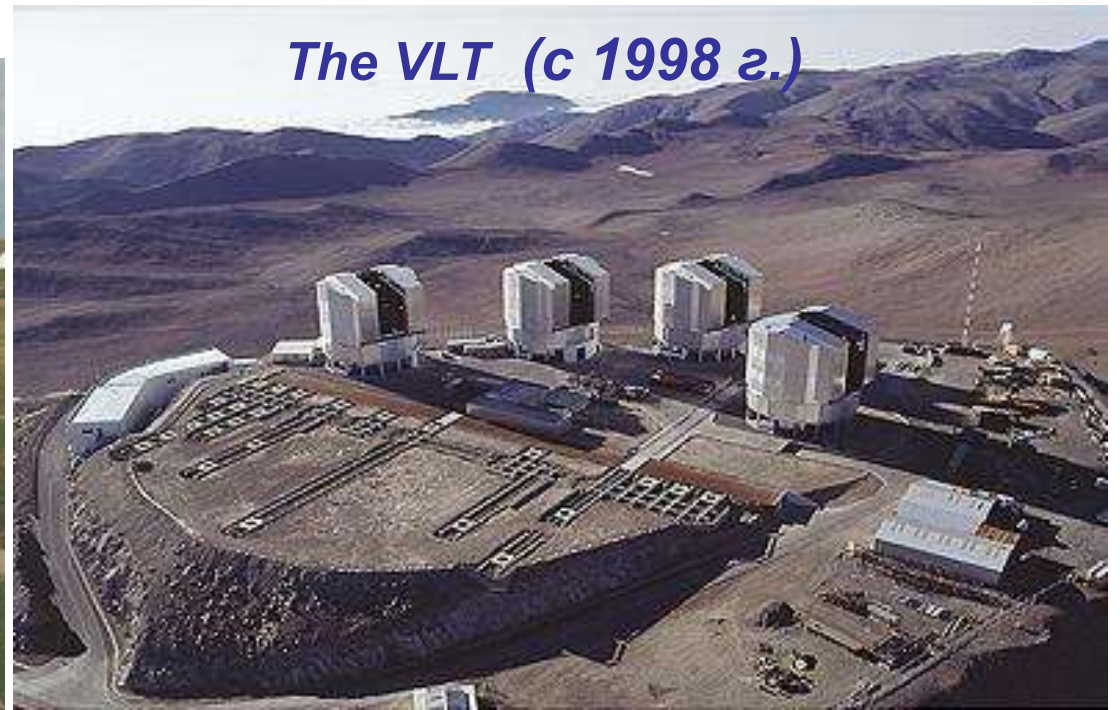
The Parkes radio telescope



*ALMA – Atacama Large Millimeter Array
(с 2013 г.)*

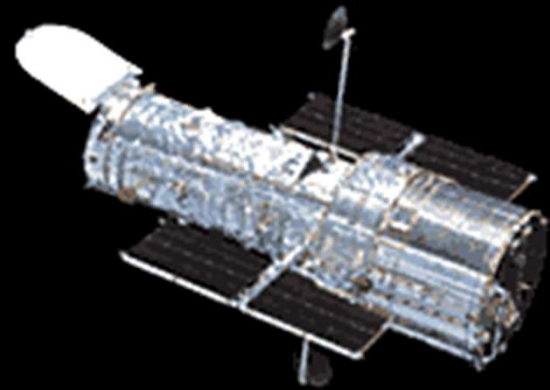


The VLT (с 1998 г.)



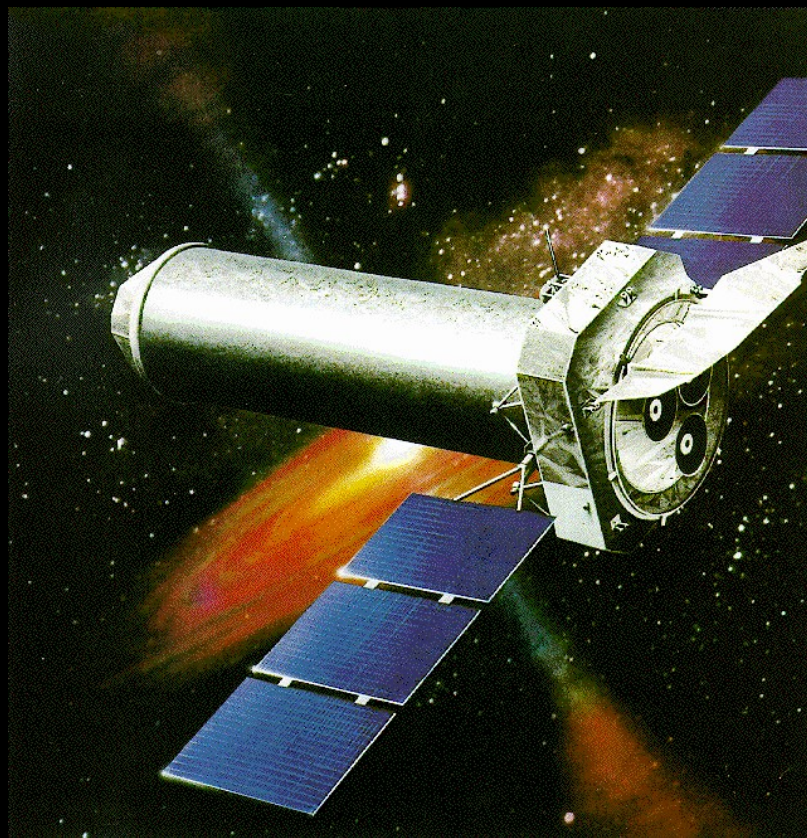
Наблюдения в космосе

Телескопы-«ветераны»



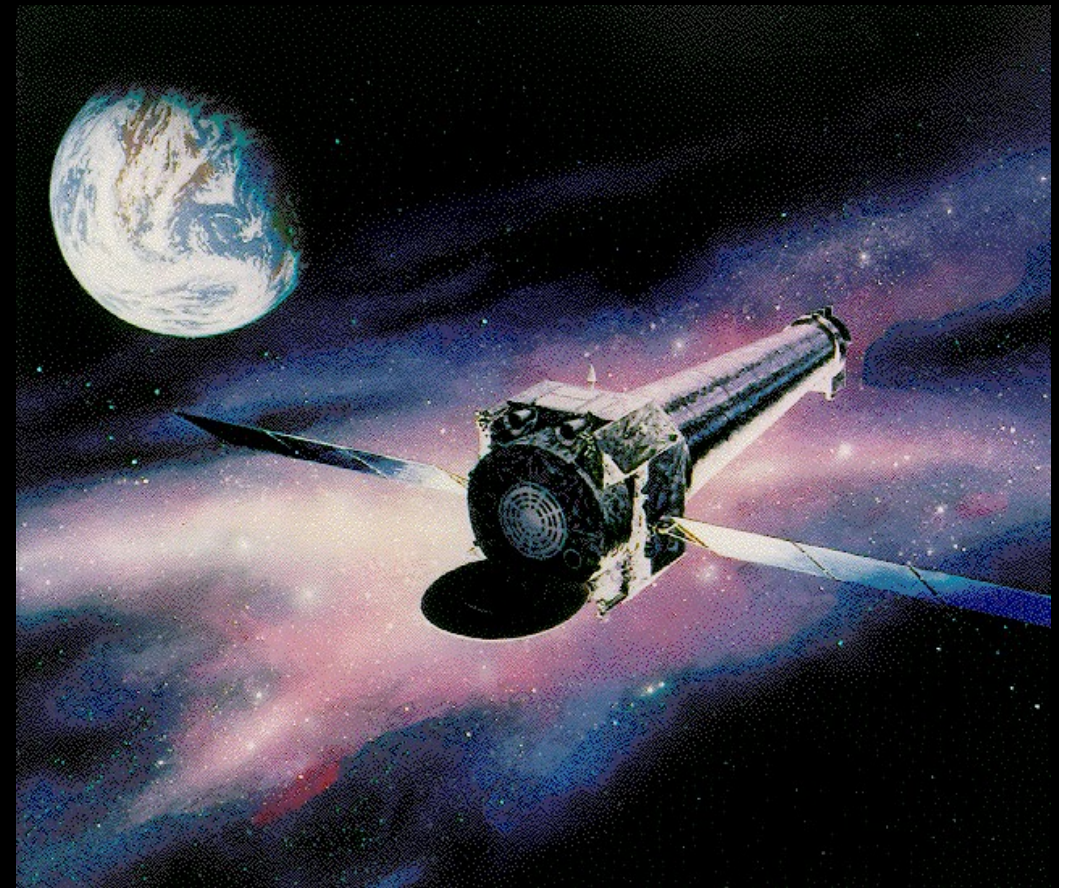
Hubble Space Telescope
(с 1990/1993 г.)

0.001–10 эВ



XMM-Newton (с 1999 г.)

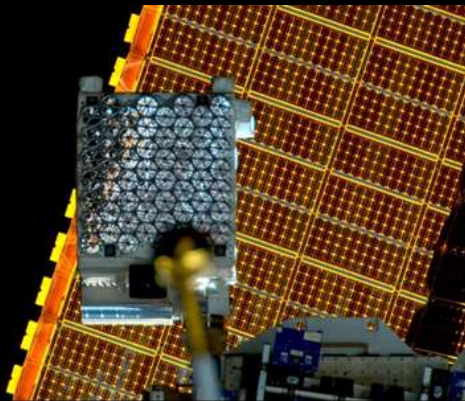
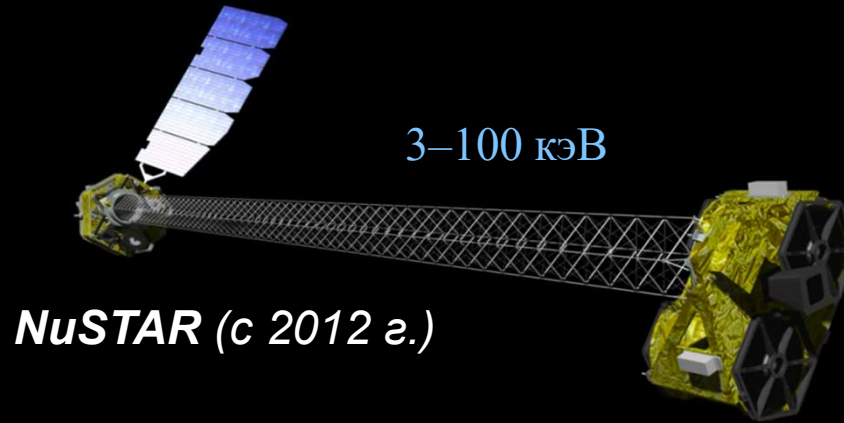
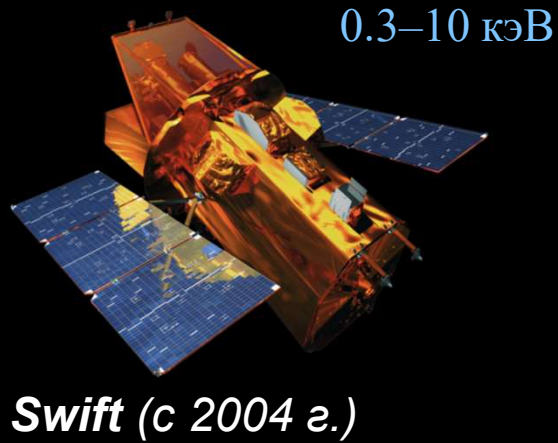
0.1–10 кэВ



Chandra (с 1999 г.)

Наблюдения в космосе

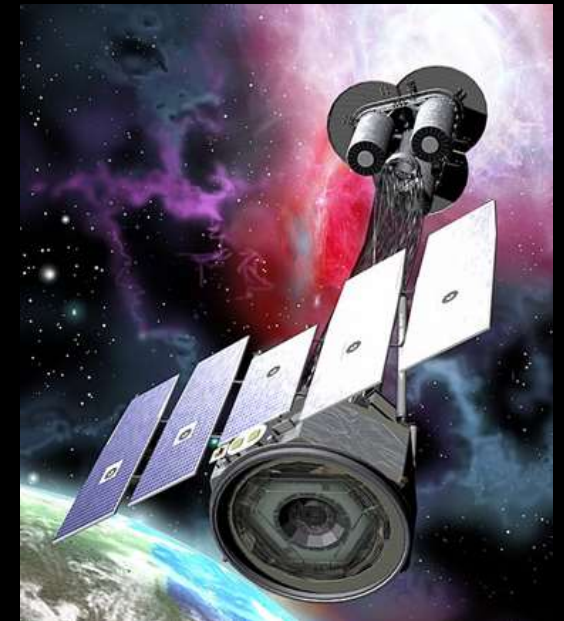
Действующие рентгеновские и гамма-обсерватории



NICER (с 2017 г.)
0.2–12 кэВ

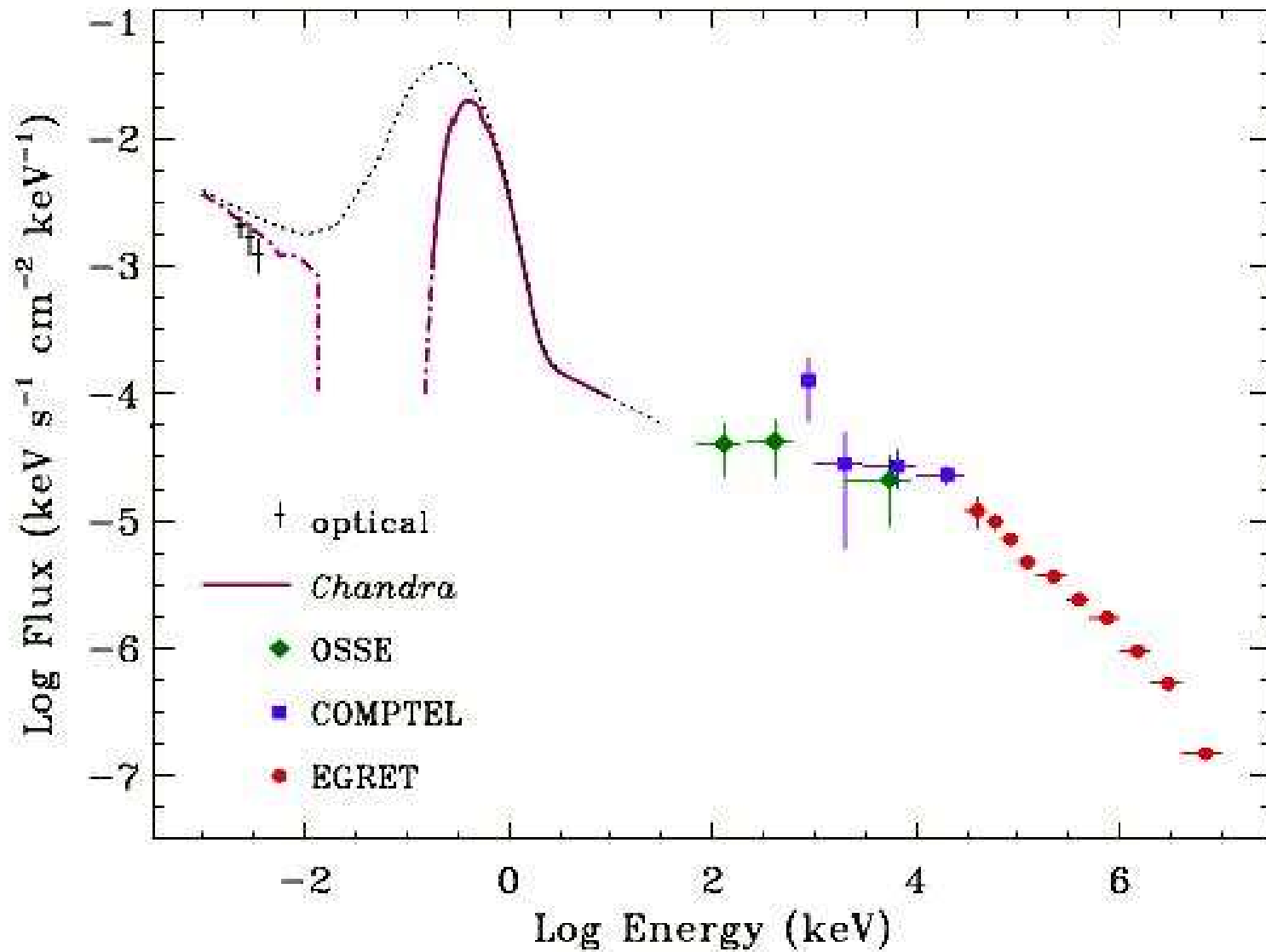


0.3–11 & 5–30 кэВ



IXPE (с 2021 г.)
2–8 кэВ, поляриметрия

Пример многоволнового спектра нейтронной звезды



Pavlov *et al.* (2002): Multiwavelength spectrum of the Vela pulsar

Наблюдения гравитационных волн

Advanced LIGO
(с 2015 г.)



Hanford (US-WA)

Virgo (с 2017 г.)



Италия

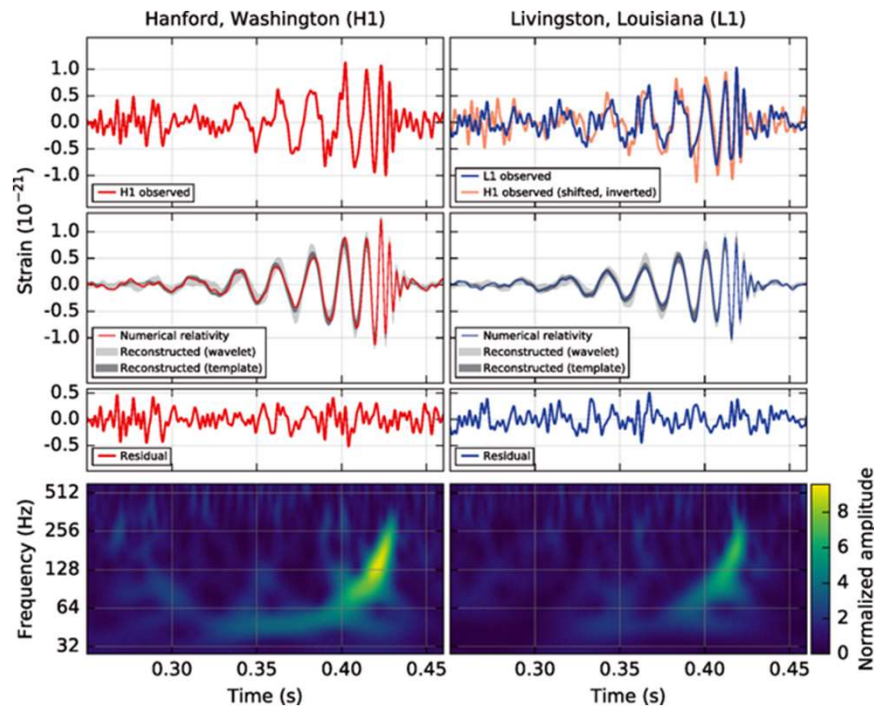
KAGRA (с 2020 г.)



Япония



Livingstone (US-LA)

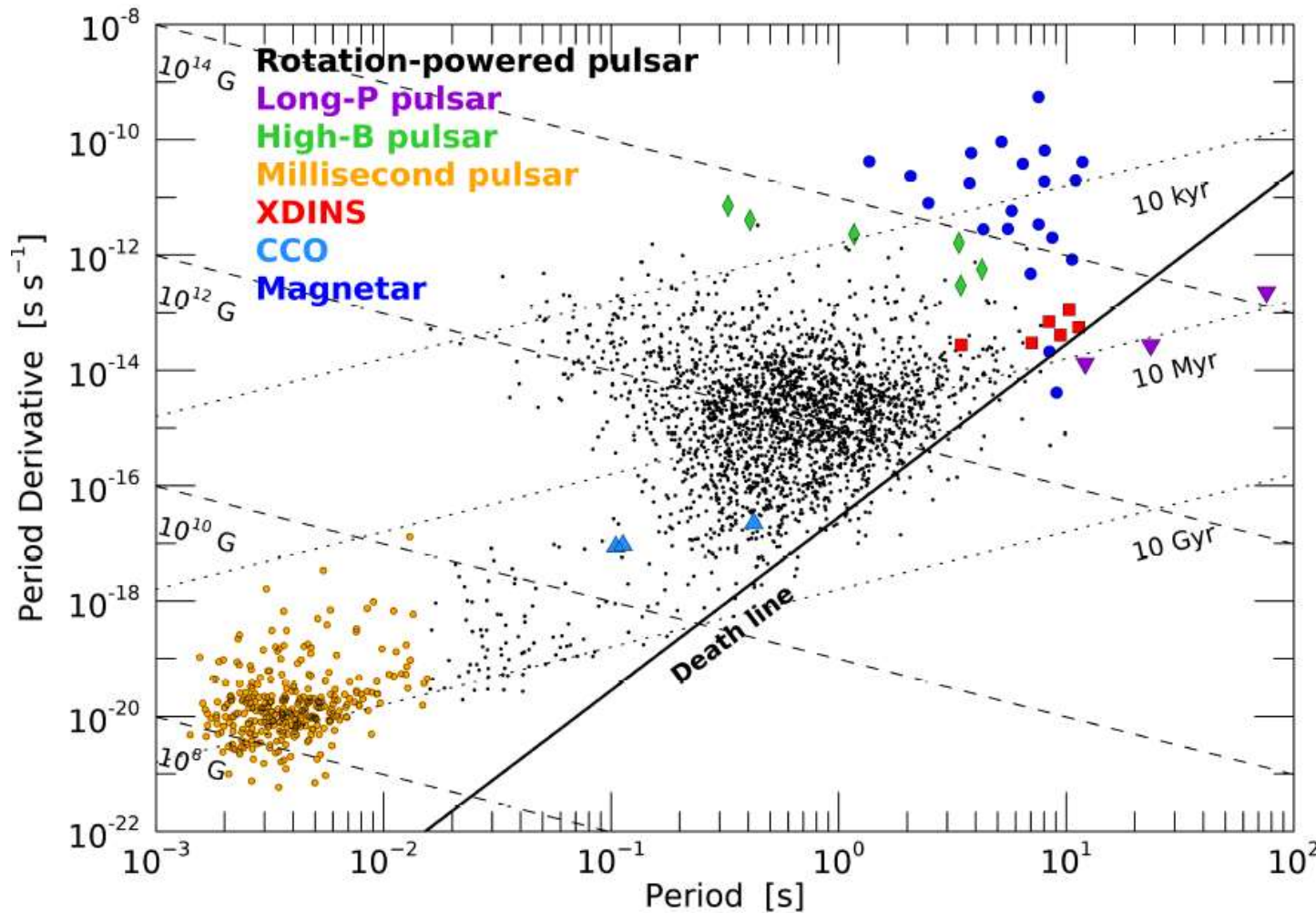


GW170817

Одиночные нейтронные звёзды на диаграмме «период – производная периода»

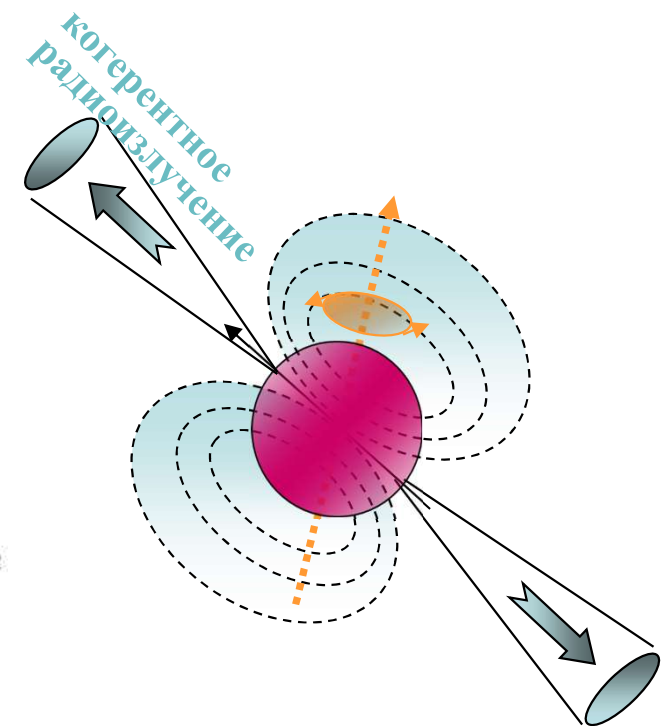
Типы объектов; характеристические значения возраста и магнитного поля

$$B_c = 3.2 \times 10^{19} (P \, dP/dt)^{1/2} \text{ Гс}$$



$$\tau_c \sim P/(2dP/dt)$$

$$B_{\text{QED}} = \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar} \approx 4.4 \times 10^{13} \text{ Гс}$$



«Диаграмма $P - P\text{-dot}$ » из обзора M.Rigoselli (2025)

Подтверждение сильного магнитного поля



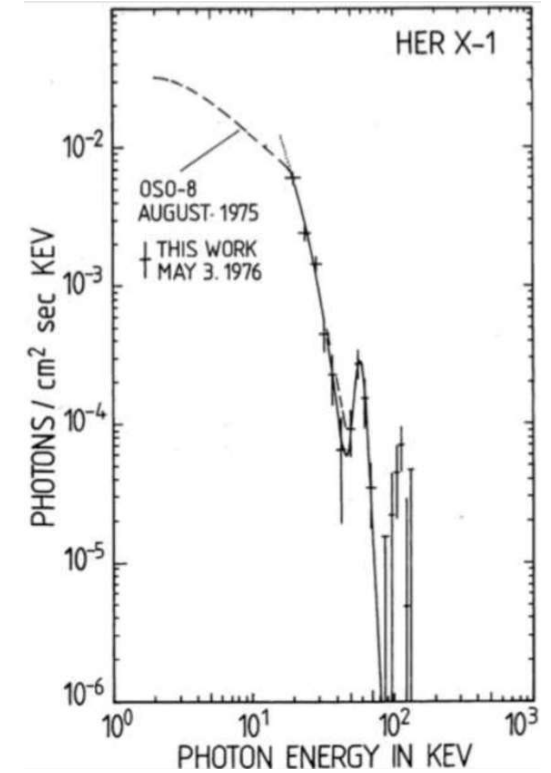
Ю.Н. Гнедин
(1935–2018)



Р.А. Сюняев
(р.1943)

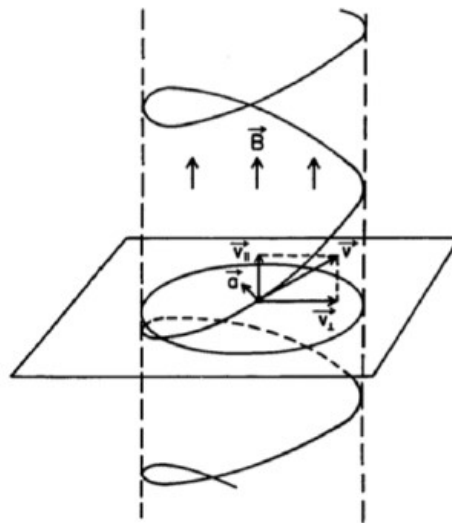


Й. Трюмпер
(р.1933)



Ю.Н. Гнедин & Р.А. Сюняев (1974) – предсказание электронных **циклотронных линий** в рентгеновских спектрах нейтронных звёзд

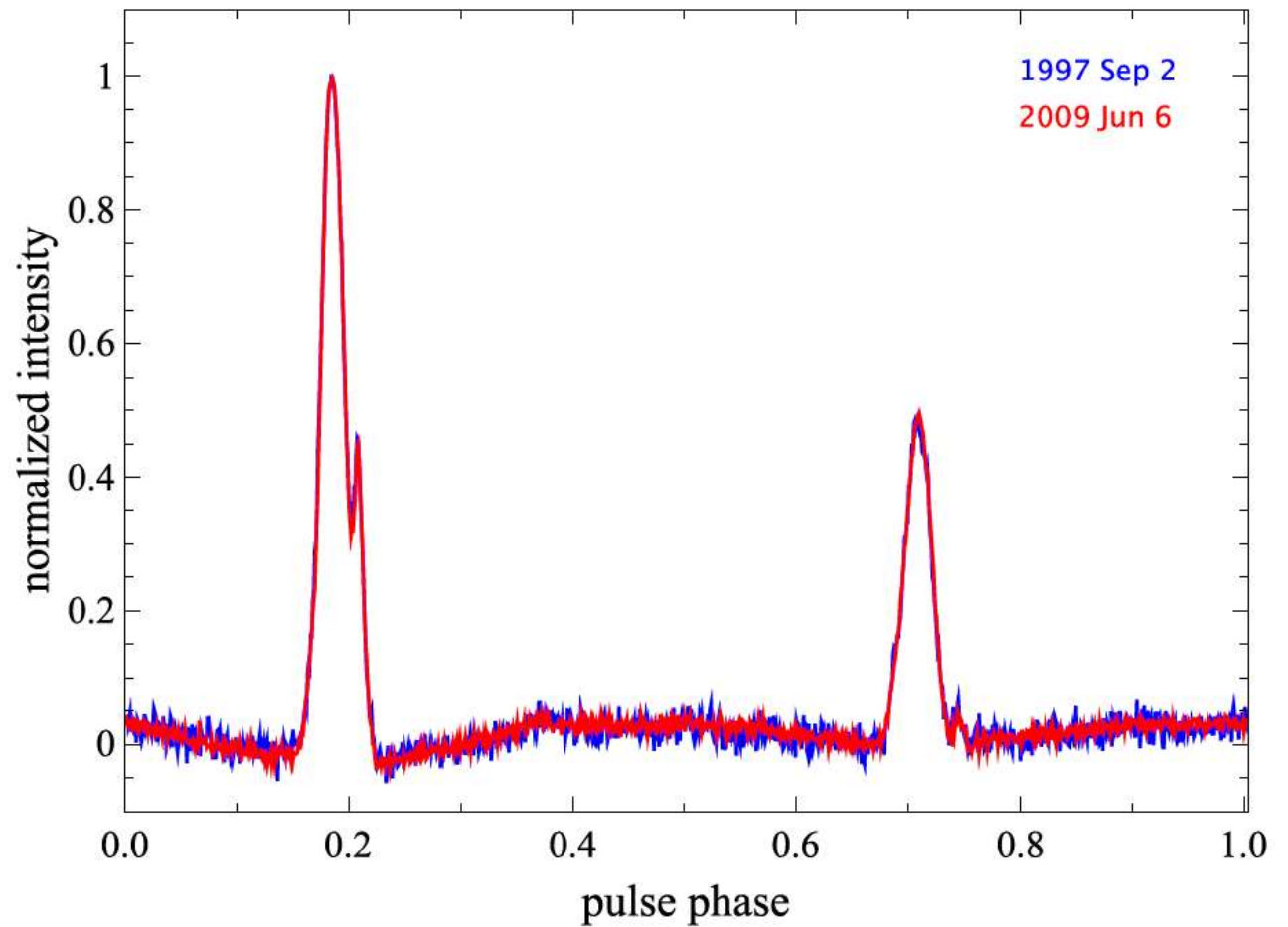
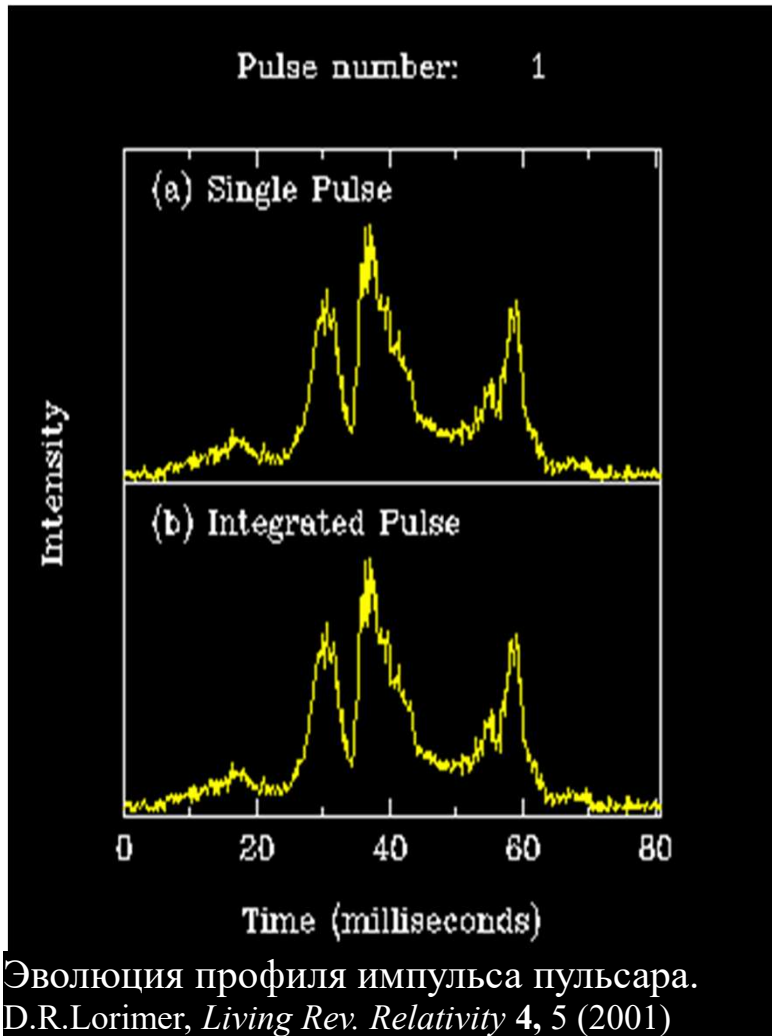
Циклотронная энергия прямо пропорциональна силе магнитного поля:
 $E_{ce} = 1.16 (B/10^{11} \text{ Гс}) \text{ кэВ.}$



J. Trümper *et al.* (1976) – **открытие** циклотронной линии в спектре Her X-1 (детекторы на воздушных шарах).

Известно около 40 нейтронных звёзд с надёжно наблюдаемыми циклотронными линиями (Staubert et al. 2018).

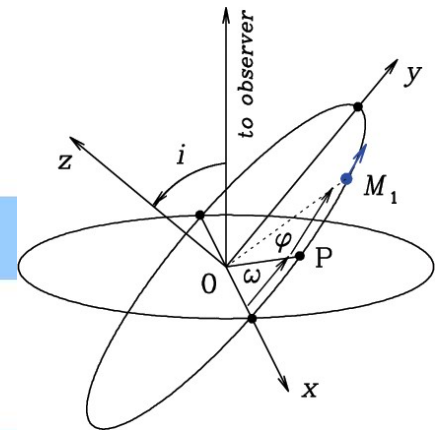
Радиопульсары – точные хронометры



Профили импульсов пульсара PSR B1937+21
($P = 1.558$ ms), измеренные с разницей в 12
лет

[Shao et al., *Class. Quant. Grav.* 13, 3121 (2012)]

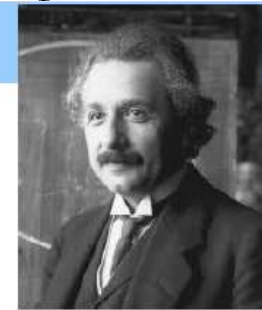
Двойные системы пульсар + компактный компаньон



Этап 1: Измерение кеплеровских параметров

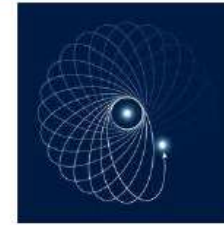
$$f_1 \equiv \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} \quad : \text{нужно еще два уравнения}$$

Этап 2: Измерение релятивистских параметров



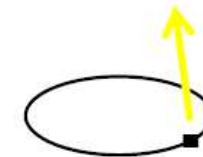
(a) *Вековой дрейф периастра:* $d\omega / dt$

$$(e \neq 0) \Rightarrow M = M_1 + M_2; M_{1\text{MAX}}; M_{1\text{MIN}}$$



(b) *Поперечный эффект Доплера + грав. красное смещение в поле M_2 :*

$$\frac{v^2}{2c^2} + \frac{GM_2}{r_{12}c^2} \Rightarrow \gamma = \frac{eGM_2(M_1 + 2M_2)}{\Omega_b c^2 aM} \quad (e \neq 0)$$

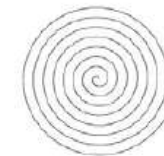


(c) *Гравитационное запаздывание:*

$$s \equiv \sin i = \frac{\Omega_b^{2/3} M^{2/3} x_1}{G^{1/3} M_2}, \quad r = \frac{GM_2}{c^3} \quad (i \approx 90^\circ)$$



(d) *Уменьшение орбитального периода:* dP_b / dt

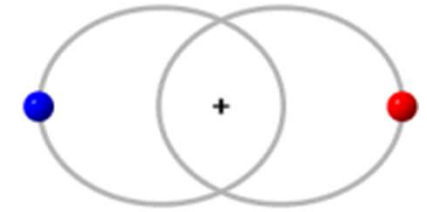


(e) *геодезическая прецессия Ω_{SO}*

Можно получить до пяти новых уравнений !

Пульсар В1913+16

Russel Hulse and Joseph Taylor

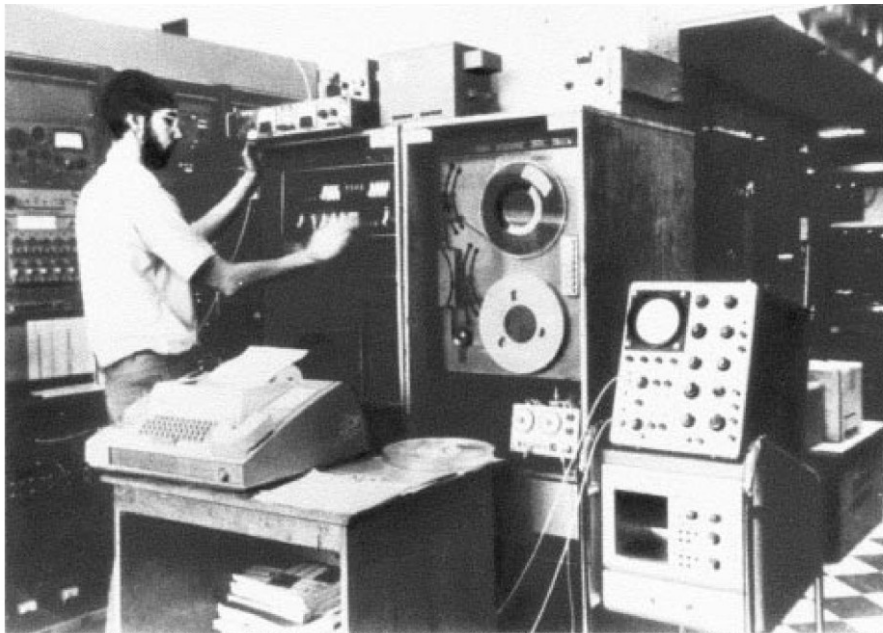


Открытие: 2 июня 1974 г.

Публикация: 15 января 1975 г.

Нобелевская премия 1993 г. «за открытие нового типа пульсаров и новых возможностей изучения гравитации».

The Arecibo 305-m radio telescope (NAIC-Arecibo Observatory, NSF)



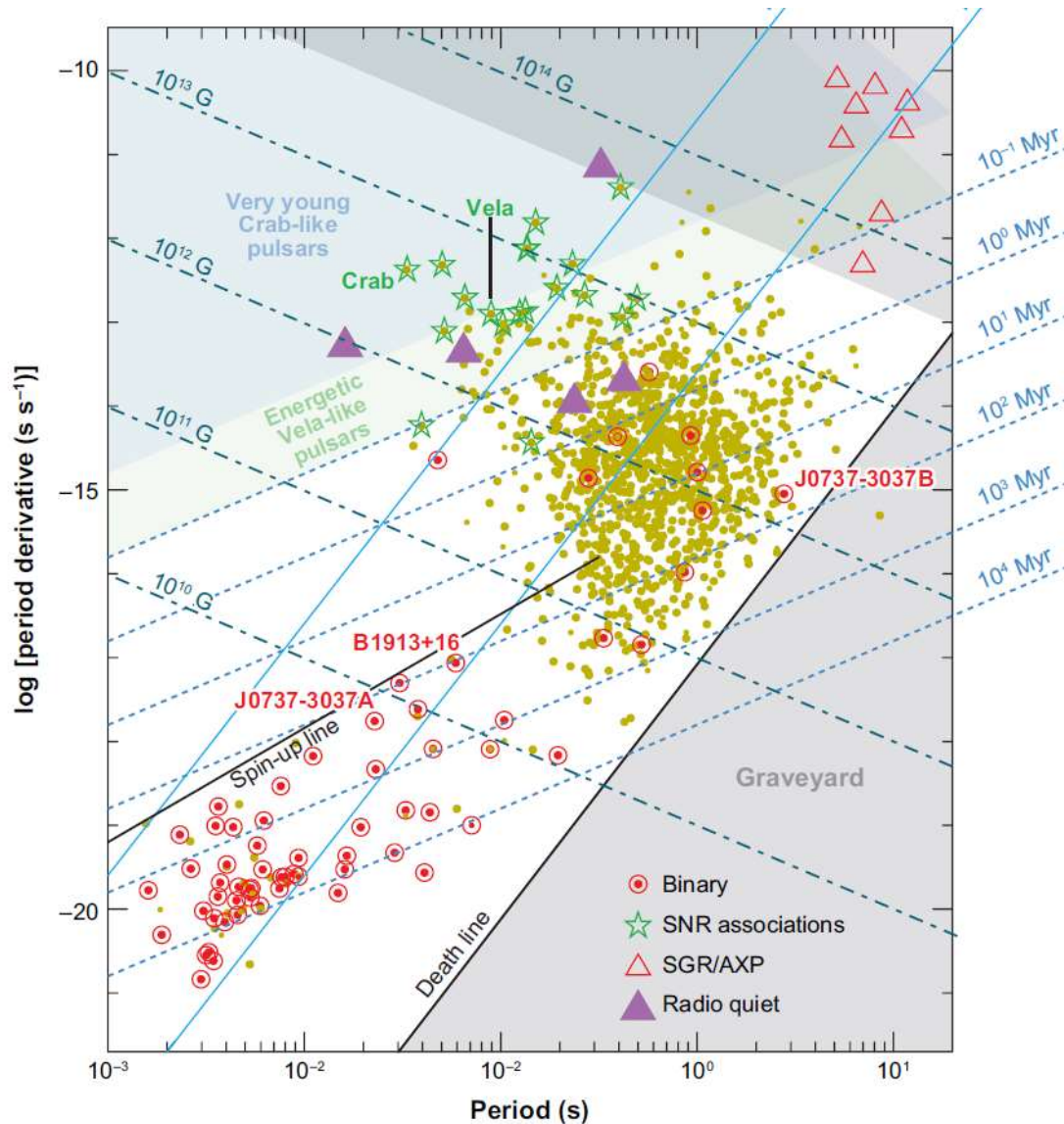
Двойной пульсар J0737-3039 A,B

Обе нейтронные звезды – радиопульсары

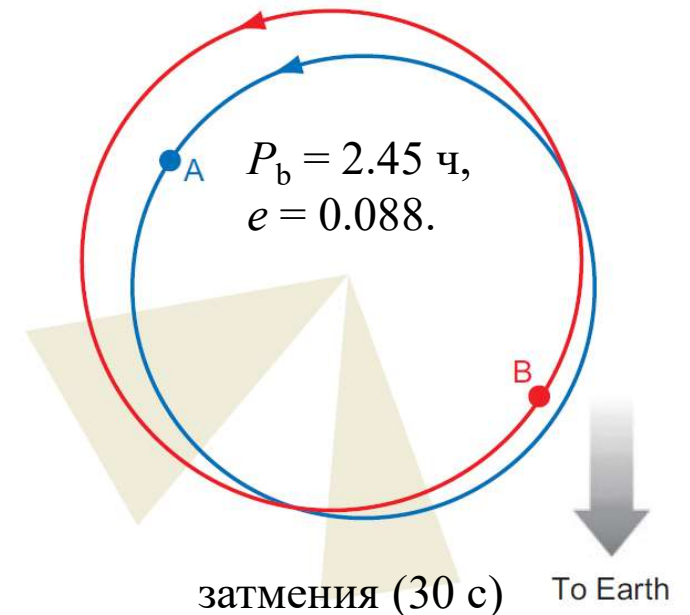
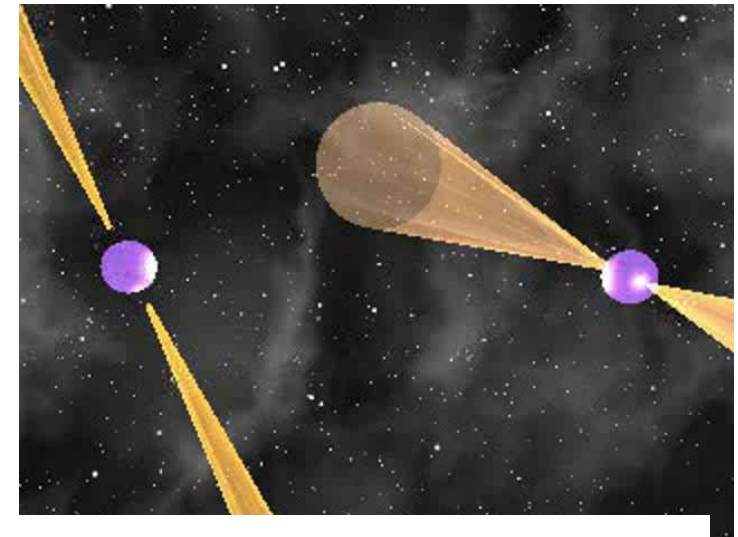
Обзор: M.Kramer et al., Phys. Rev. X **11**, 041050 (2021)

Пульсар A: открыт в 2001 (Burgay *et al.* 2003) $P = 22.7$ мс. Почти соосный ротатор ($\alpha < 3.2^\circ$).

Пульсар B: Lyne *et al.* (2004) $P = 2.773$ с. Перестал наблюдаться в 2008 г. ($\alpha \approx 50^\circ$).

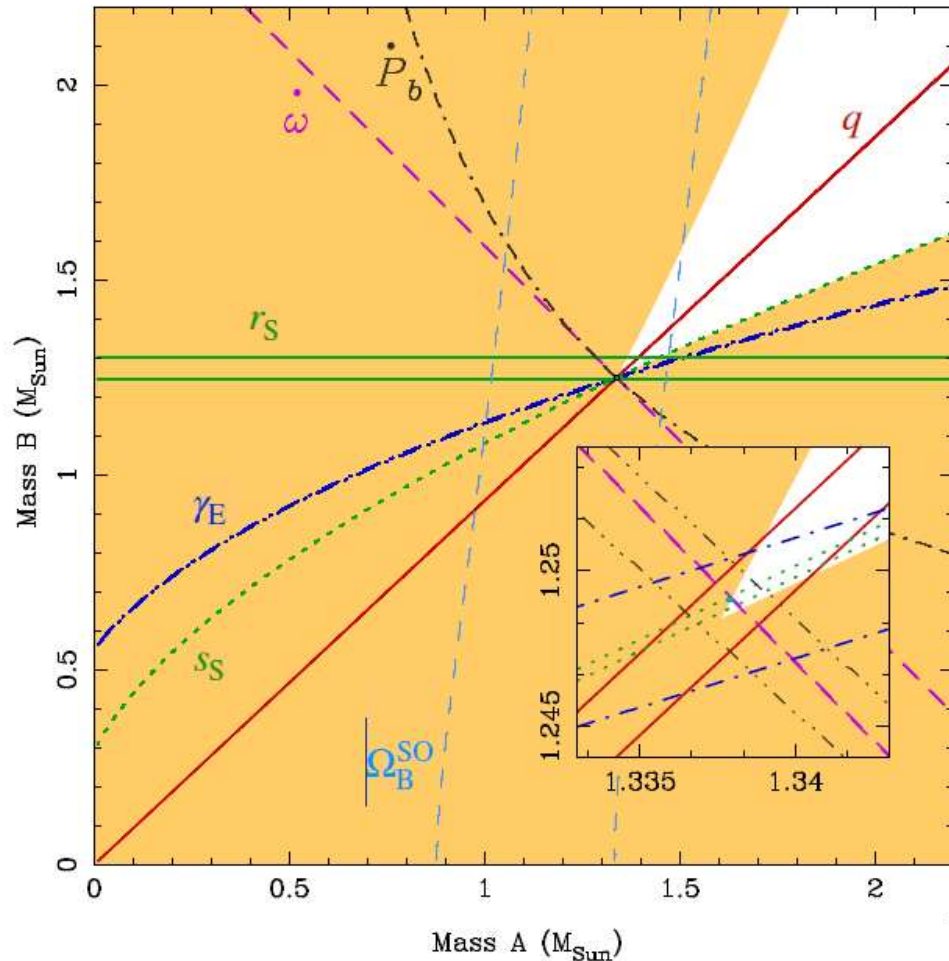


Kramers & Stairs, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 46, 541 (2008)

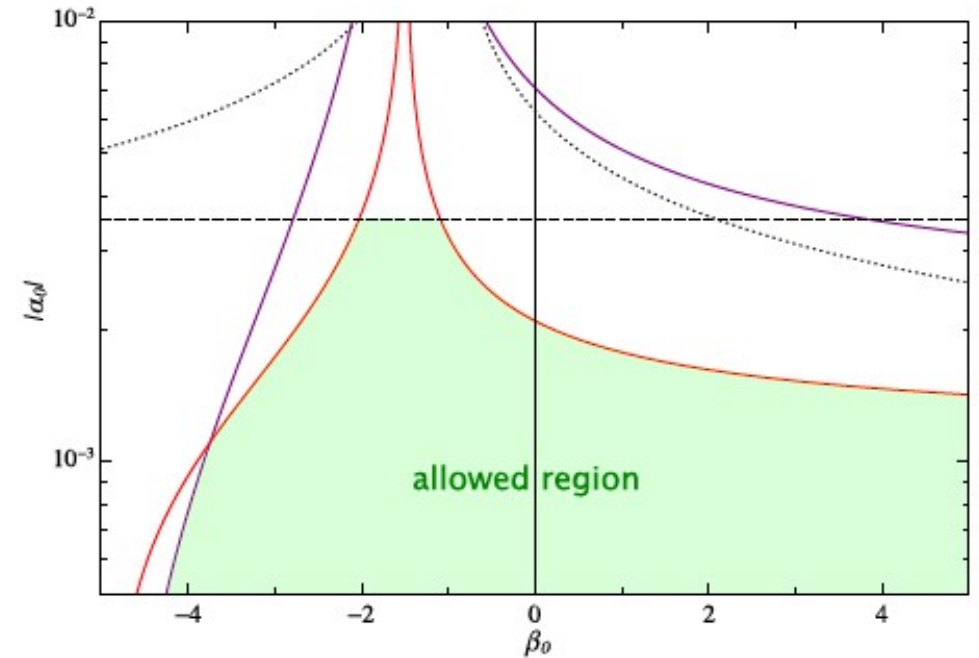


Проверка ОТО и альтернативных теорий

Обзор: N.Wex & M.Kramer, Universe 6, 156 (2020)



Разрешённые области для различных посткеплеровских параметров в зависимости от масс пульсаров А и В в двойном пульсаре. Закрашенная область исключена условием $\sin i < 1$.

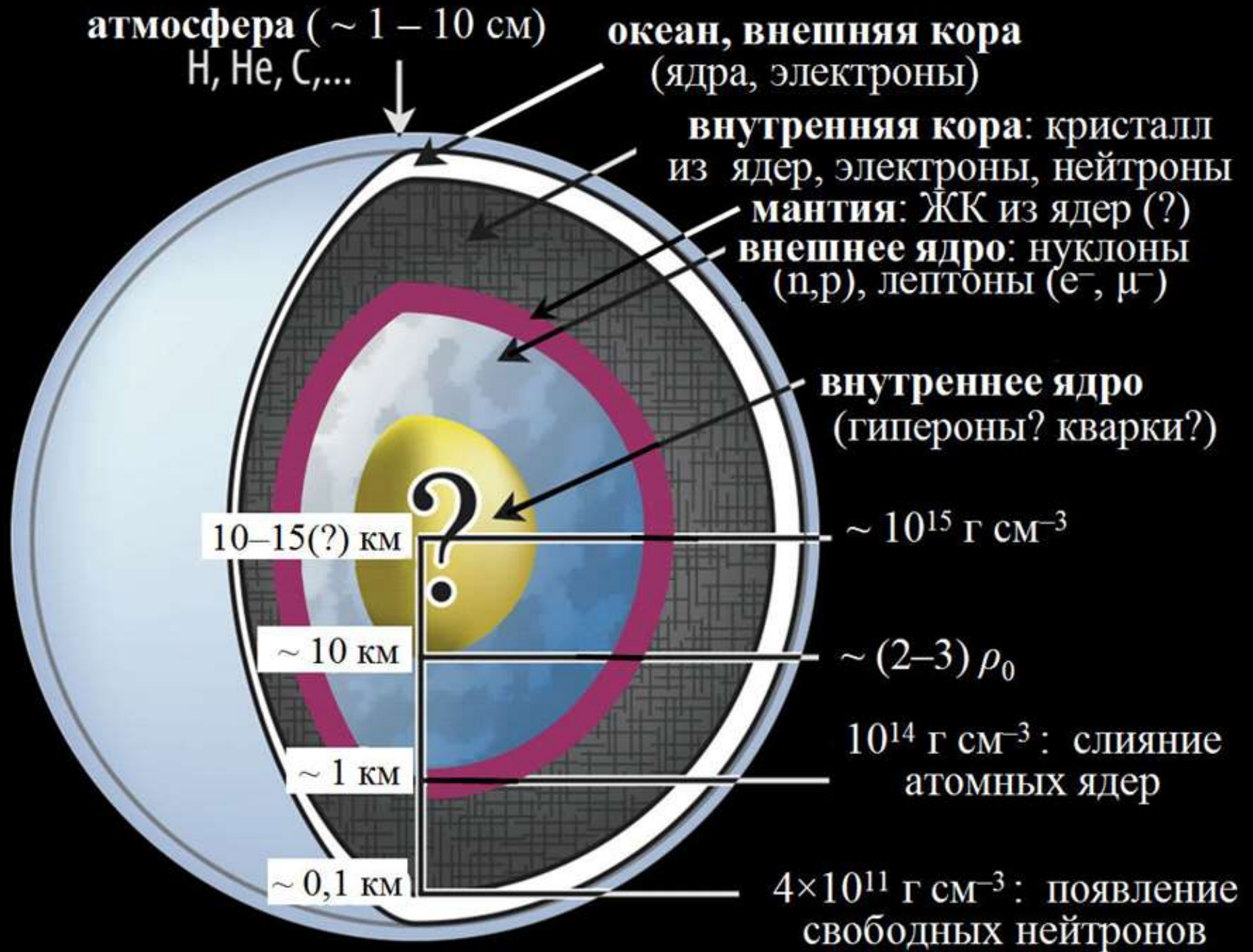


Ограничения на параметры теории тяготения DEF (Damour & Esposito-Farèse) из анализа наблюдений двойного пульсара (фиолетовая кривая), системы пульсара с двумя белыми карликами (красная кривая) и экспериментов на космических аппаратах ($\beta_0=0$ – Brans–Dicke).

Ограничения на пост-ньютоновские параметры (PPN)

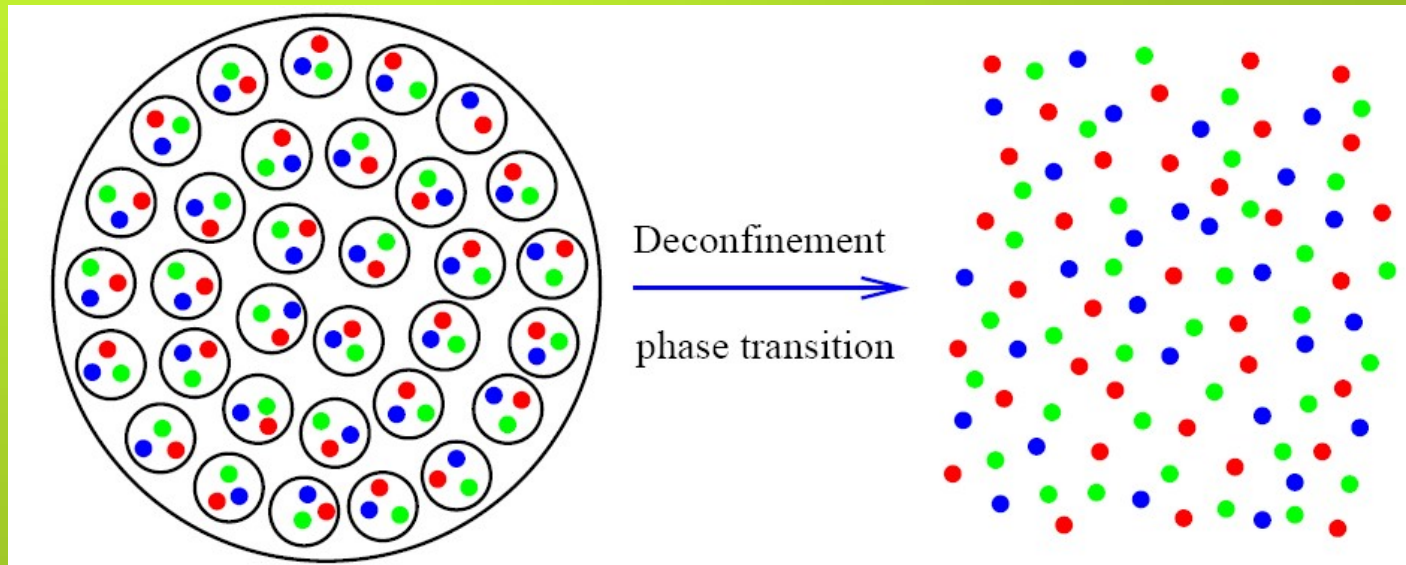
Parameter	Limit (95% C.L.)	Pulsar Experiment
$\hat{\xi}$	$< 3.9 \times 10^{-9}$	PSRs B1937+21 and J1744–1134 [135]
$\hat{\alpha}_1$	$-0.4^{+3.7}_{-3.1} \times 10^{-5}$	PSR J1738+0333 [140]
$\hat{\alpha}_2$	$< 1.6 \times 10^{-9}$	PSRs B1937+21 and J1744–1134 [141]
$\hat{\alpha}_3$	$< 4 \times 10^{-20}$	PSR J1713+0747 [117]
$\hat{\xi}_2$	$< 1.3 \times 10^{-5}$	Combination of several pulsars [142]

Структура нейтронной звезды



Гипотезы о внутреннем ядре

1. **Гиперонизация** – появление гиперонов, прежде всего Λ и Σ^- .
2. **Пионный конденсат** – бозе-конденсация коллективных возбуждений, подобных π -мезонам.
3. **Каонный конденсат** (возбуждения, подобные K -мезонам)
4. **Фазовый переход к кварковой материи** (u , d , s кварки + немного электронов).



- ✓ Гипотезы 2 – 4 – **экзотические модели** плотного вещества.
- ✓ **Состав** внутреннего ядра влияет на **уравнение состояния** и **нейтринные потери** энергии.
- ✓ **Сверхтекучесть** в ядре влияет на **остывание** и механические свойства.
- ✓ **Фазовый переход** может приводить к **более мягкому** уравнению состояния.

Кварковые звёзды



Д. Д. Иваненко (1904–1994)

Кафедра теоретической физики МГУ (1967 год)



Д. Ф. Курдгелайдзе

Гипотеза кварковых звезд // *Астрофизика*. — 1965. — Т. 1. — С. 479—482.

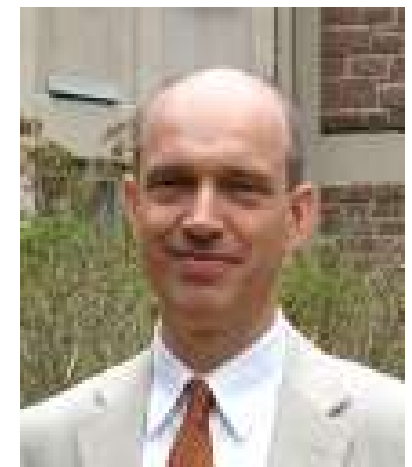
Сверхтекучесть: Remarks on quark stars // *Lett. Nuovo Cim.* **2**, 13 (1969)



Э. Виттен (р.1951)

E. Witten, Cosmic separation of phases //
Phys. Rev. D **30**, 272 (1984)
– странная кварковая материя.

M. Alford, K. Rajagopal, F. Wilczek (1998);
R. Rapp et al. (1998)
– цветная сверхпроводимость.



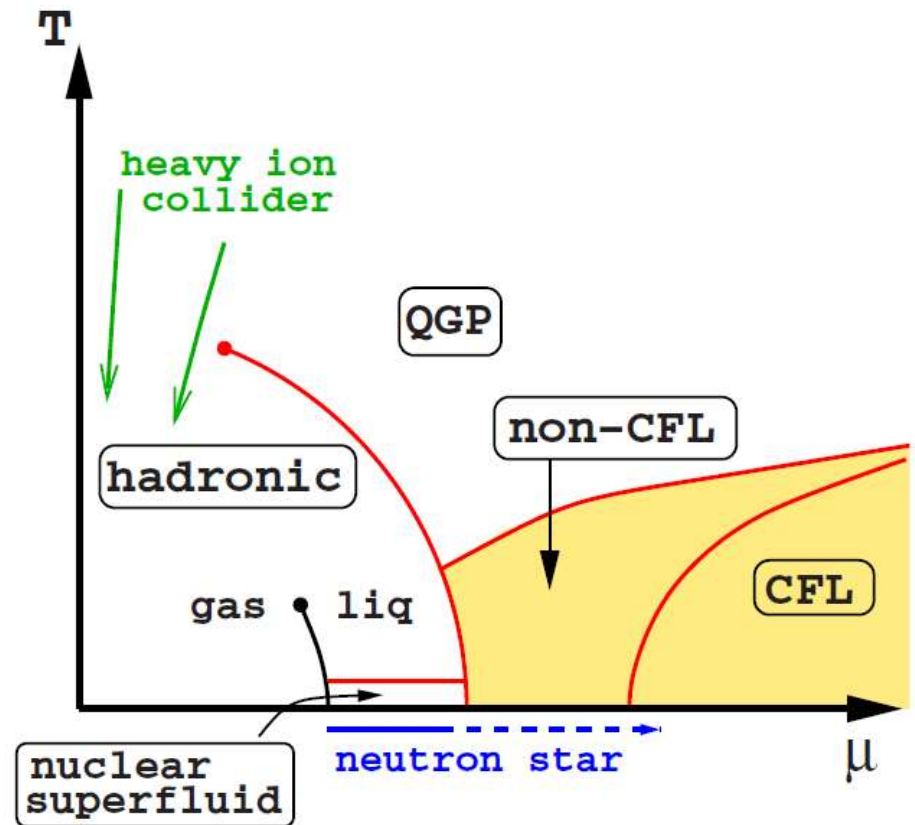
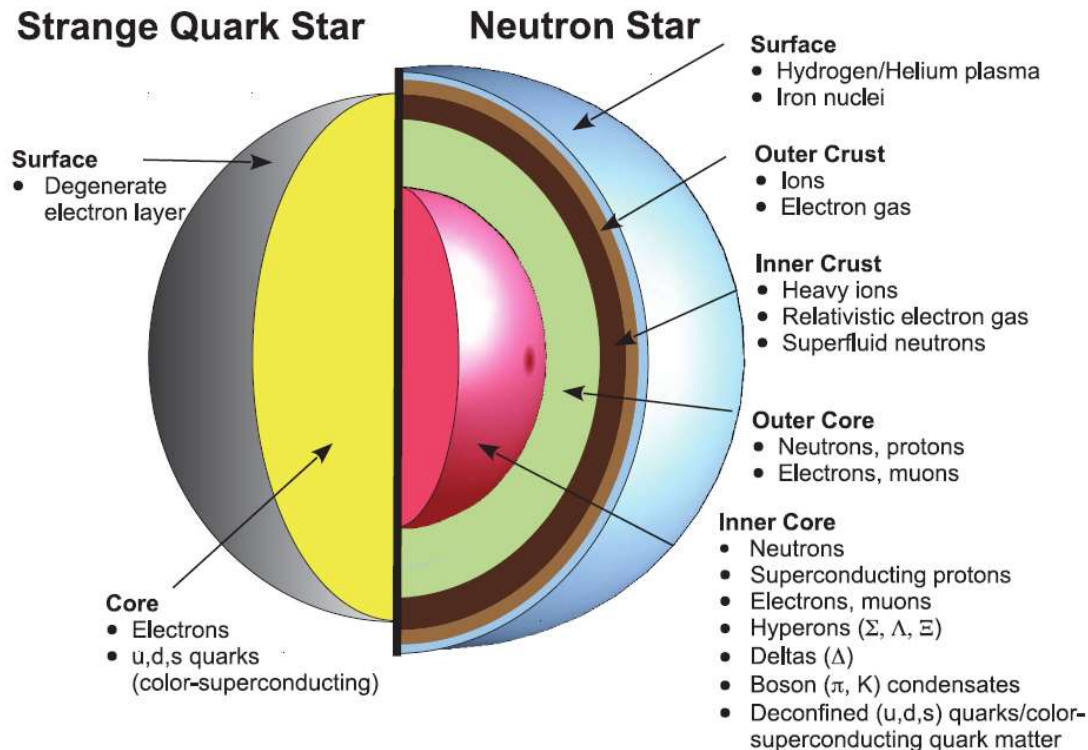
М. Алфорд (р.1962)

Кварковые звёзды

Обзоры:

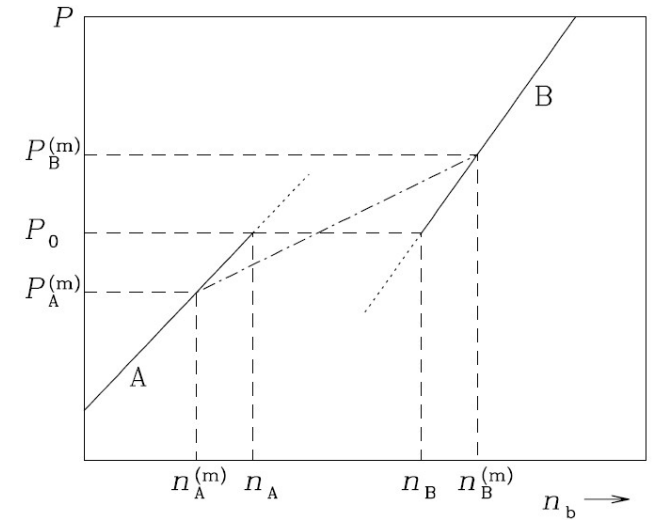
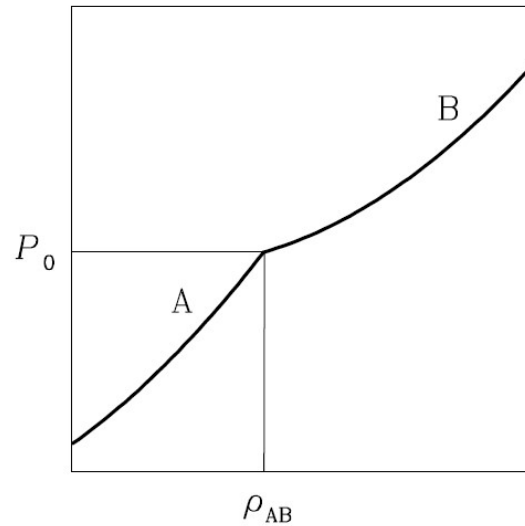
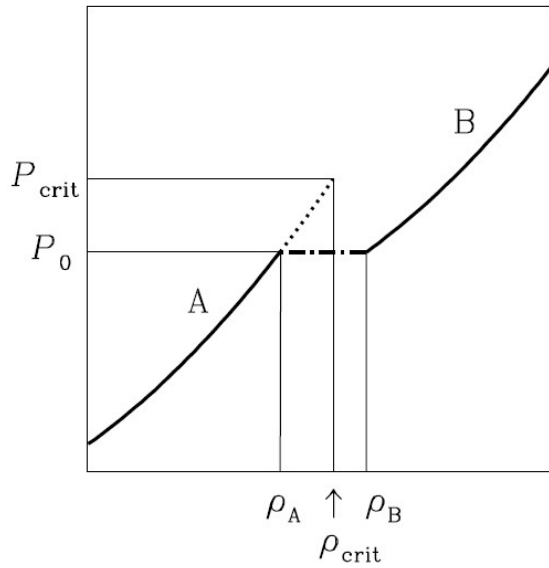
F. Weber et al. Properties of high-density matter in neutron stars // Mod. Phys. Lett. A **29**, 1430022 (2014)

M. Alford et al., Color-superconductivity in dense quark matter // Rev. Mod. Phys. **80**, 1425 (2008)



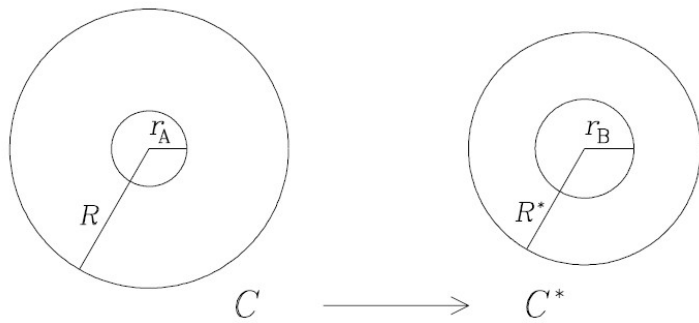
Гибридные звёзды и фазовые переходы

при декофайнменте, гиперонизации, образовании конденсата и т.д. в ядре звезды

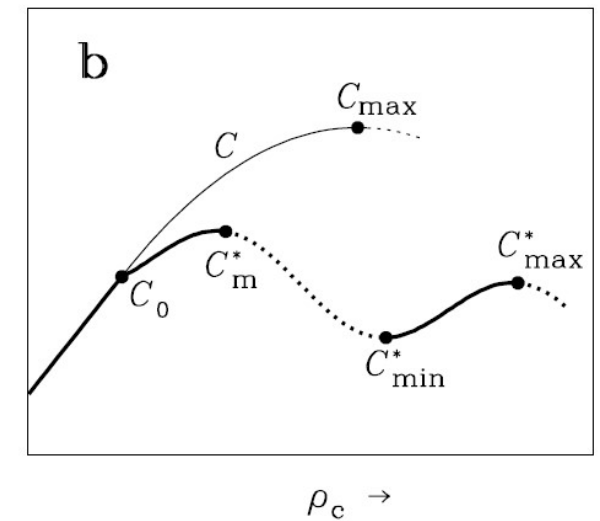
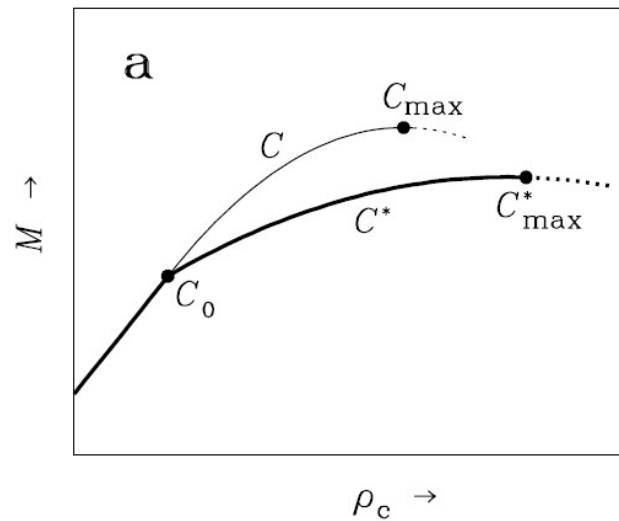


Возможность смешанной фазы

Фазовые переходы первого и второго рода



Переход от метастабильной к стабильной конфигурации



Подходы к расчётам уравнения состояния

внешняя кора

($\rho < 4,3 \times 10^{11} \text{ г см}^{-3}$)

- При $\rho < 5 \times 10^{10} \text{ г см}^{-3}$ – измеренные массы ядер
- При $\rho > 5 \times 10^{10} \text{ г см}^{-3}$ – метод Хартри – Фока – Боголюбова (HFVB) на основе эффективных потенциалов

+ электростатические взаимодействия

Унифицированные модели: одни и те же эффективные потенциалы (функционалы энергии) для коры и ядра звезды

внутренняя кора

($4,3 \times 10^{11} \text{ г см}^{-3} < \rho < 10^{14} \text{ г см}^{-3}$)

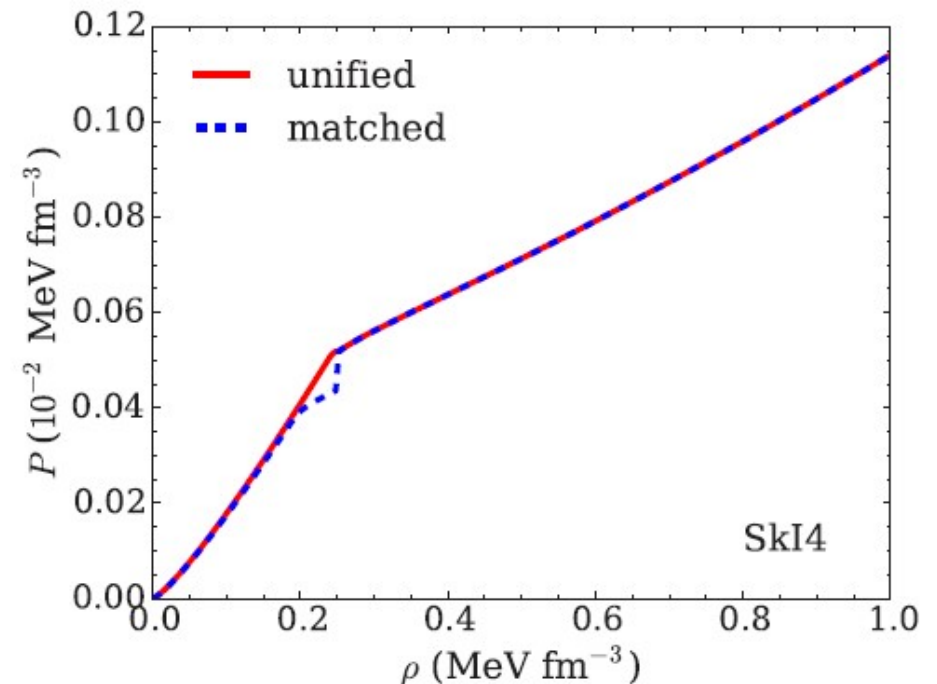
- модель жидкой капли и её обобщения
- Модель Томаса – Ферми и обобщения: **ETF** (= ОТФ, Киржниц, 1960-е), **TETF** (Brack 1984), **TETFSI** (Brack+ 1985)
- **HF** и **HFVB**
- с эффективными двухчастичными поотенциалами

ядро

($\rho > 10^{14} \text{ г см}^{-3}$)

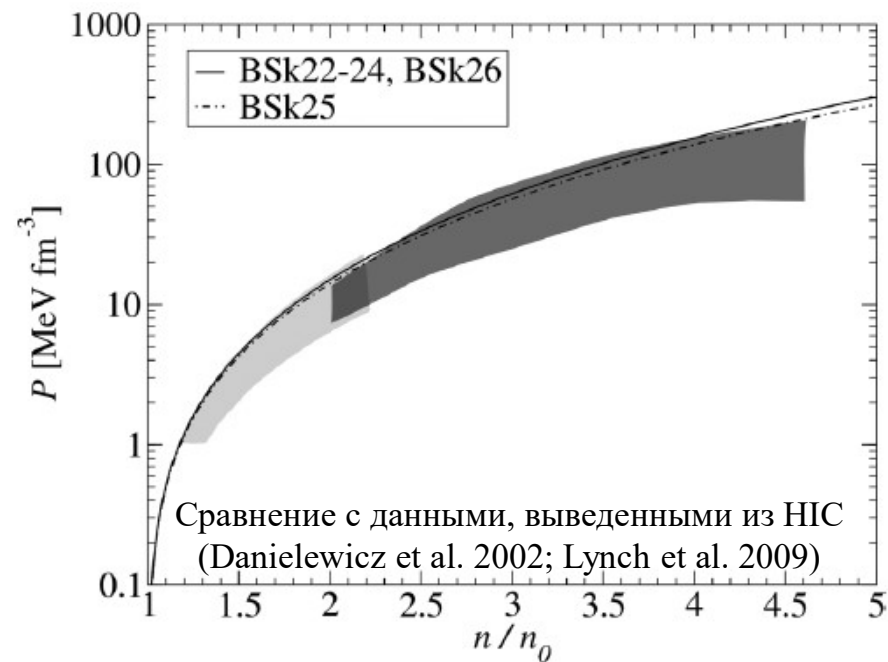
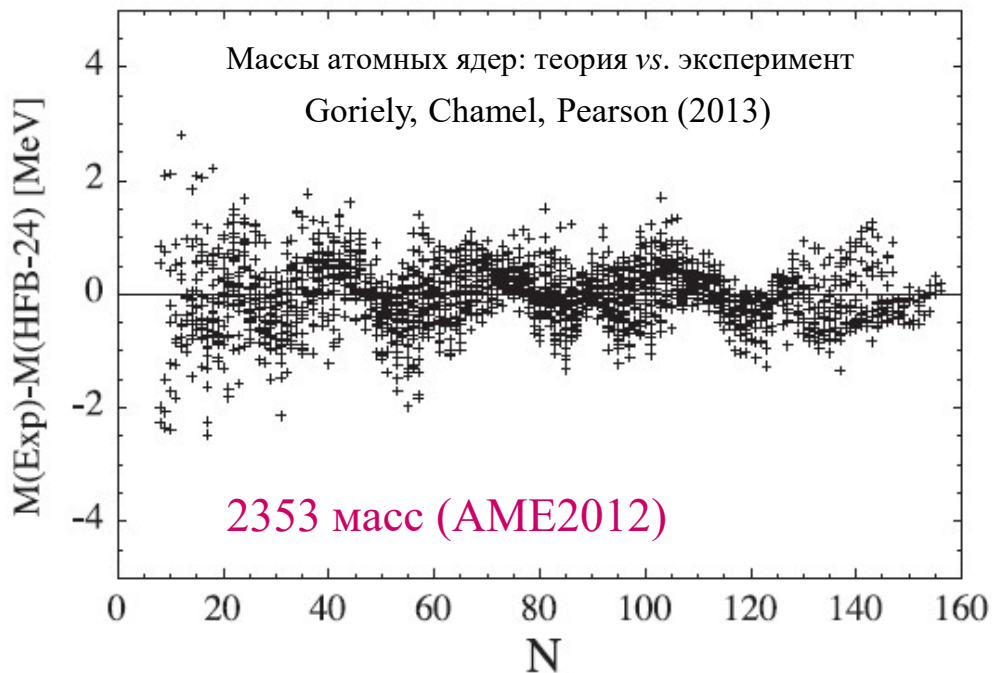
- **2- и 3-частичные** эфф. потенциалы + релятивистские поправки corrections (+ гипероны (+ мезоны + ...))
- Методы: **ETF**, **TETF**, **RMF** (relativistic mean field), **BBG** (Brueckner-Bethe-Goldstone), вариационные расчёты, Монте-Карло.

Рис. из: Fortin et al., *Phys. Rev. C* **94**, 035804 (2016):

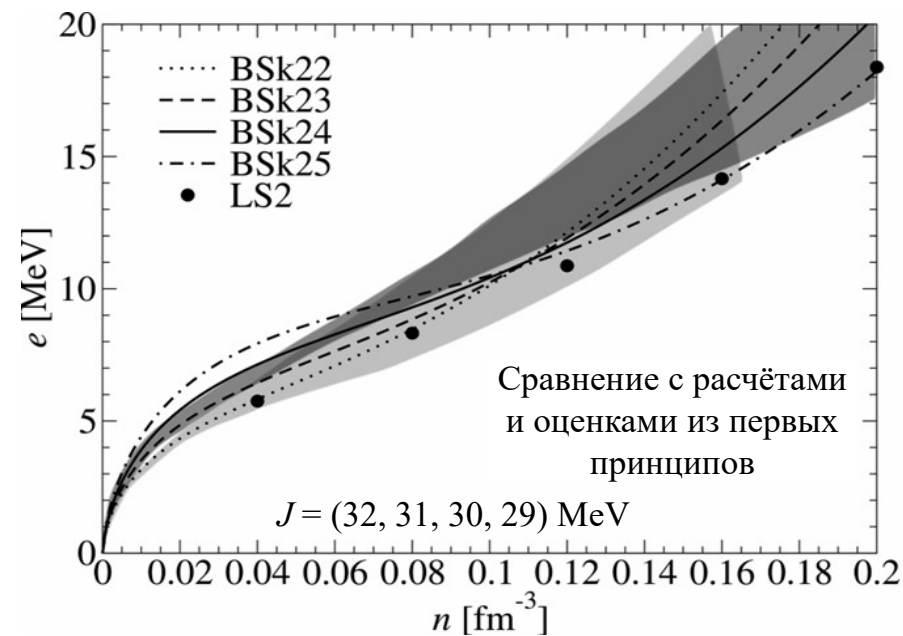
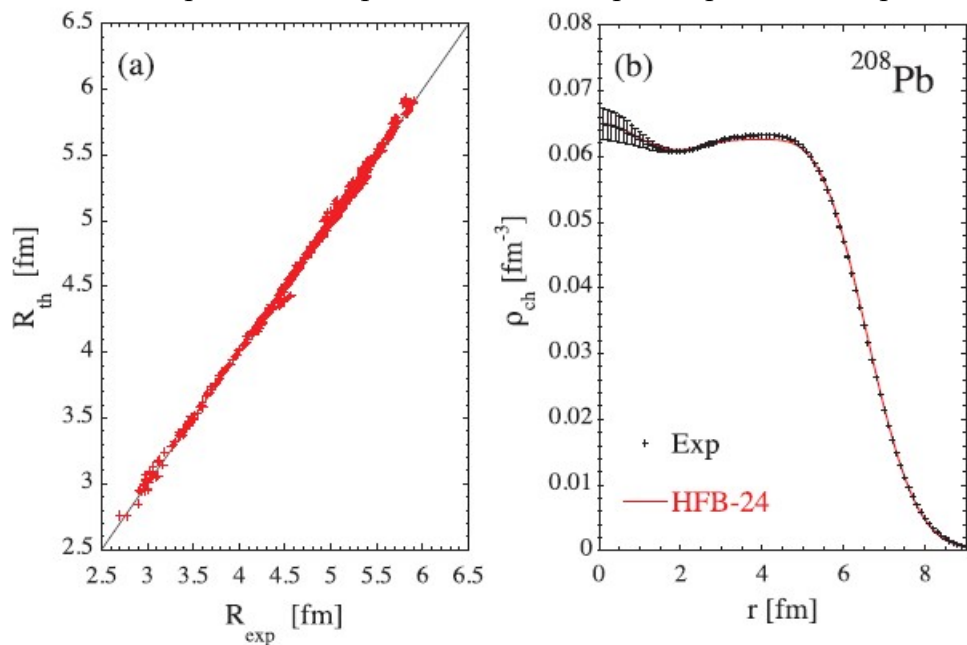


Новые уравнения состояния

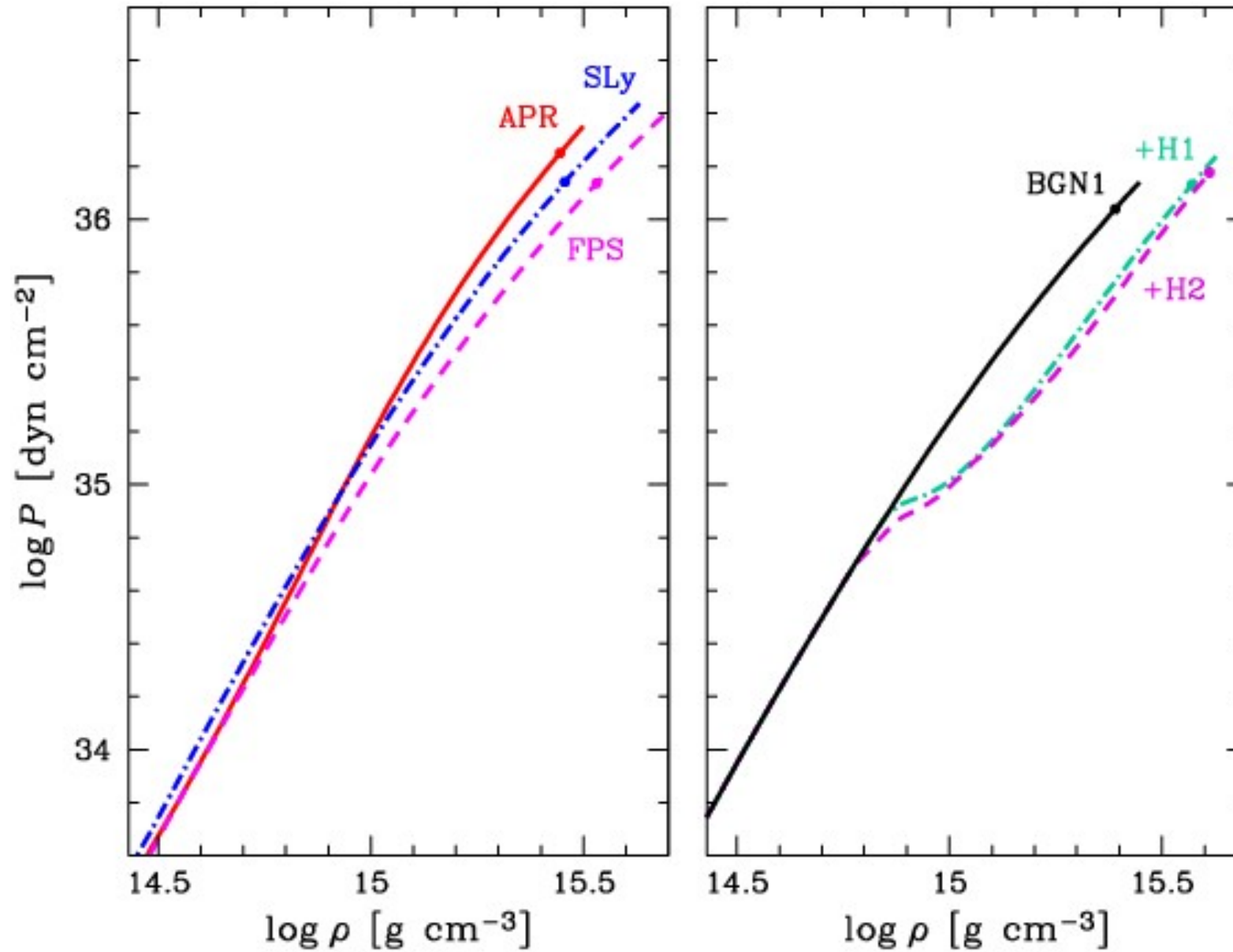
основаны на прогрессе в теории ядра, эксперименте и вычислениях



Распределение заряда в атомном ядре: теория vs. эксперимент

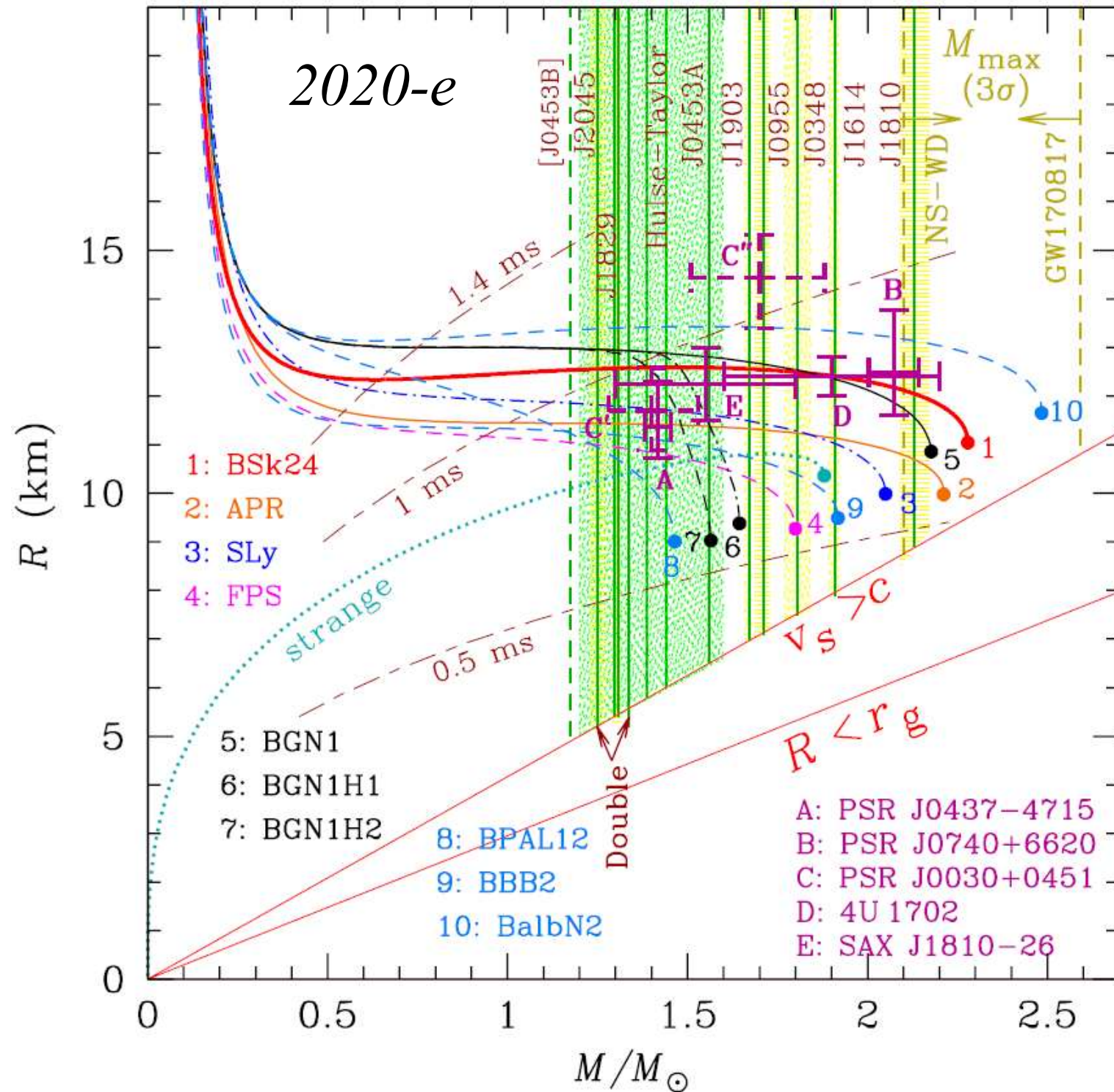


Примеры уравнений состояния для ядра нейтронной звезды

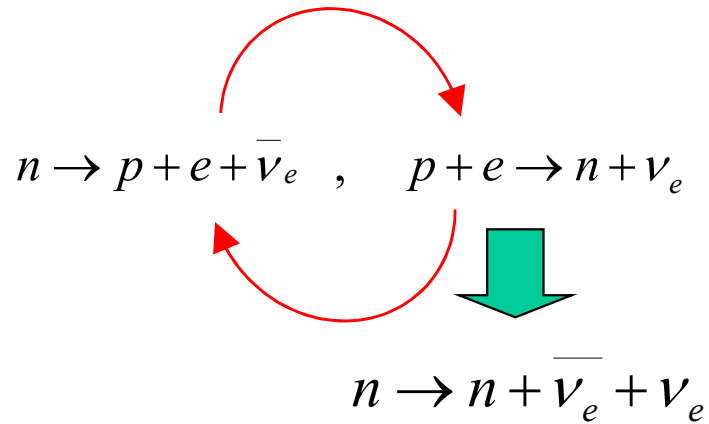


Haensel, A.P., Yakovlev, *Neutron Stars. 1. Equation of State and Structure* (Springer, New York, 2007)

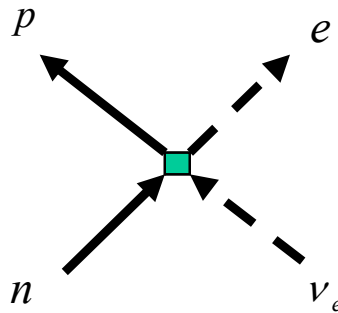
Соотношения «масса – радиус»



Излучение нейтрино



Урка-процессы



G. Gamow
(1904–1968)

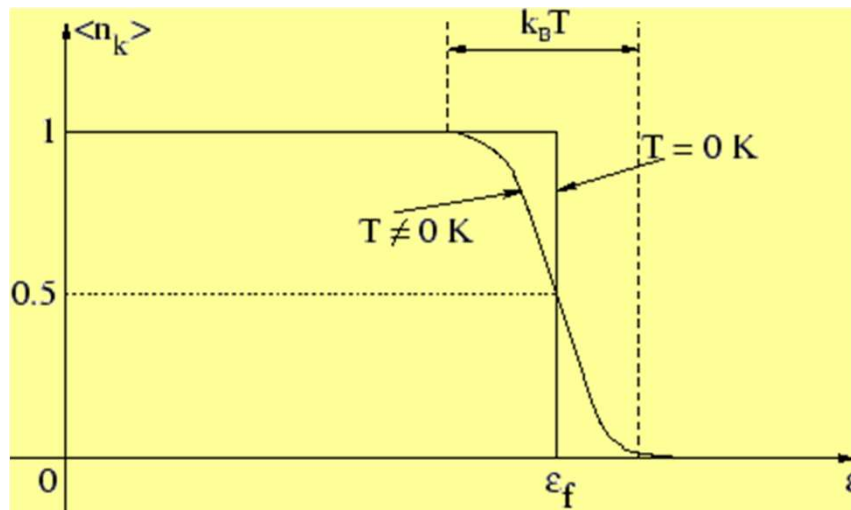


M. Schoenberg
(1916–1990)

Phys. Rev. **58**, 1117 (1940)

$$Q \sim 3 \times 10^{27} T_9^6 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$L_\nu \sim 10^{46} T_9^6 \text{ erg s}^{-1}$$



порог:

$$p_{Fn} \leq p_{Fp} + p_{Fe}$$

Модифицированные урка-процессы:



Излучение нейтрино

Основные реакции

D.G.Yakovlev & J.C.Pethick, Neutron star cooling, ARA&A **42**, 169 (2004)

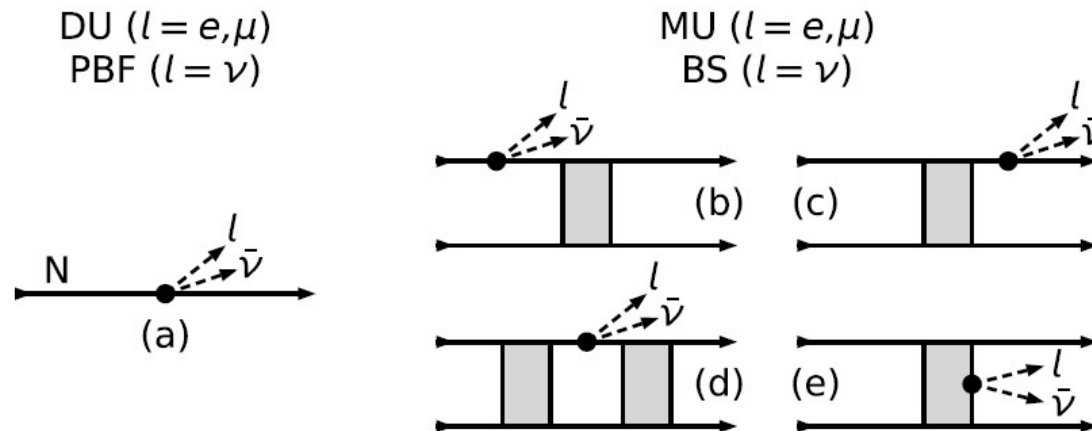
G.F.Burgio et al., Neutron stars and the nuclear equations of state, Prog. Part. Nucl. Phys. **120**, 103879 (2021)

$$Q_{\text{slow}} = Q_s T_9^8, \quad Q_{\text{fast}} = Q_f T_9^6$$

Process		Q_s [erg cm ⁻³ s ⁻¹]
Modified Urca	$nN \rightarrow pNe\bar{\nu}$ $pNe \rightarrow nN\nu$	$10^{20}-3 \times 10^{21}$ (MU)
Bremsstrahlung	$NN \rightarrow NN\nu\bar{\nu}$	$10^{19}-10^{20}$ (BS)

Direct Urca (DU):

Model	Process	Q_f [erg cm ⁻³ s ⁻¹]
Nucleon matter	$n \rightarrow pe\bar{\nu}$ $pe \rightarrow n\nu$	$10^{26}-3 \times 10^{27}$
Pion condensate	$\tilde{N} \rightarrow \tilde{N}e\bar{\nu}$ $\tilde{N}e \rightarrow \tilde{N}\nu$	$10^{23}-10^{26}$
Kaon condensate	$\tilde{B} \rightarrow \tilde{B}e\bar{\nu}$ $\tilde{B}e \rightarrow \tilde{B}\nu$	$10^{23}-10^{24}$



Излучение нейтрино

Process / Control function	Symbolic notation ^b	Formulae for Q_ν and/or R
<i>In the crust</i>		
1 Plasmon decay	$\Gamma \rightarrow \nu + \bar{\nu}$	Eqs. (15)–(32) of [1]
2 Electron-nucleus bremsstrahlung	$e^- + N \rightarrow e^- + N + \nu + \bar{\nu}$	Eqs. (6), (16)–(21) of [2]
3 Electron-positron annihilation	$e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$	Eq. (22) of [3]
4 ^c Electron synchrotron	$e^- \xrightarrow{B} e^- + \nu + \bar{\nu}$	Eq. (48)–(57) of [3]
<i>In the core</i>		
1 ^d Direct Urca (Urca)	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$ $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$	Eq. (120) of [3]
Magnetic modification ^c	$R_B^{(D)}$	Eqs. (247)–(250) of [3]
Reduction factors ^e	$R_x^{(D)}$	Eqs. (199), (202)–(206) of [3]
2 Modified Urca (Murca) (neutron branch)	$n + n \rightarrow n + p + e^- + \bar{\nu}_e,$ $n + p + e^- \rightarrow n + n + \nu_e$	Eq. (140) of [3]
Reduction factors ^e	$R_x^{(Mn)}$	Appendix of [4]
3 Murca (proton branch)	$p + n \rightarrow p + p + e^- + \bar{\nu}_e,$ $p + p + e^- \rightarrow p + n + \nu_e$	Eq. (142) of [3], corrected at $3p_{Fp} > p_{Fn} + p_{Fe}$ as per [4]
Reduction factors ^e	$R_x^{(Mp)}$	Appendix (and Eq. (25)) of [4]
4 Baryon-baryon bremsstrahlung	$\begin{cases} n + n \rightarrow n + n + \nu + \bar{\nu} \\ n + p \rightarrow n + p + \nu + \bar{\nu} \\ p + p \rightarrow p + p + \nu + \bar{\nu} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{Eq. (165) of [3]} \\ \text{Eq. (166) of [3]} \\ \text{Eq. (167) of [3]} \end{cases}$
Reduction factors ^e	$\begin{cases} R_x^{(m)} \\ R_x^{(np)} \\ R_x^{(pp)} \end{cases}$	$\begin{cases} \text{Eqs. (221), (222), (228) of [3]} \\ \text{and Eq. (60) of [4]} \\ \text{Eq. (220), (229) of [3]} \\ \text{and Eq. (54) of [4]} \\ \text{Eq. (221) of [3]} \end{cases}$
5 ^e Cooper pairing of baryons	$\begin{cases} n + n \rightarrow [nn] + \nu + \bar{\nu} \\ p + p \rightarrow [pp] + \nu + \bar{\nu} \end{cases}$	Eqs. (236), (241) of [3], corrected as per [5] (Sect. 3.3)
6 ^{c,e} Electron-fluxoid bremsstrahlung	$e^- + f \rightarrow e^- + f + \nu + \bar{\nu}$	Eqs. (253), (263), (266)–(268) of [3]

Таблица из обзора: А.Р., Pons, Page, Space Sci. Rev. **131**, 239 (2015)

Влияние сверхтекучести:

$$Q_\nu = R_{(\text{pairingtype})}^{(\text{processtype})} Q_\nu^{(0)}$$

Notes. ^a References: [1] Kantor and Gusakov (2007); [2] Ofengeim et al. (2014); [3] Yakovlev et al. (2001); [4] Gusakov (2002); [5] Leinson (2009, 2010). ^b Γ means a plasmon, e^- an electron, e^+ a positron, ν a neutrino, $\bar{\nu}$ an antineutrino (in general, of any flavor, but ν_e or $\bar{\nu}_e$ stands for the electron neutrino or antineutrino, respectively), p a proton, n a neutron, $[pp]$ and $[nn]$ their paired states, N stands for an atomic nucleus, and f for a proton fluxoid. At densities where muons are present, they participate in the Urca and bremsstrahlung processes fully analogous to the processes 1, 2, 3, 6 in the core (see details in Ref. [1]). R with subscripts/superscripts signifies a control function (correction factor) due to superfluidity

Сверхтекучесть нуклонов

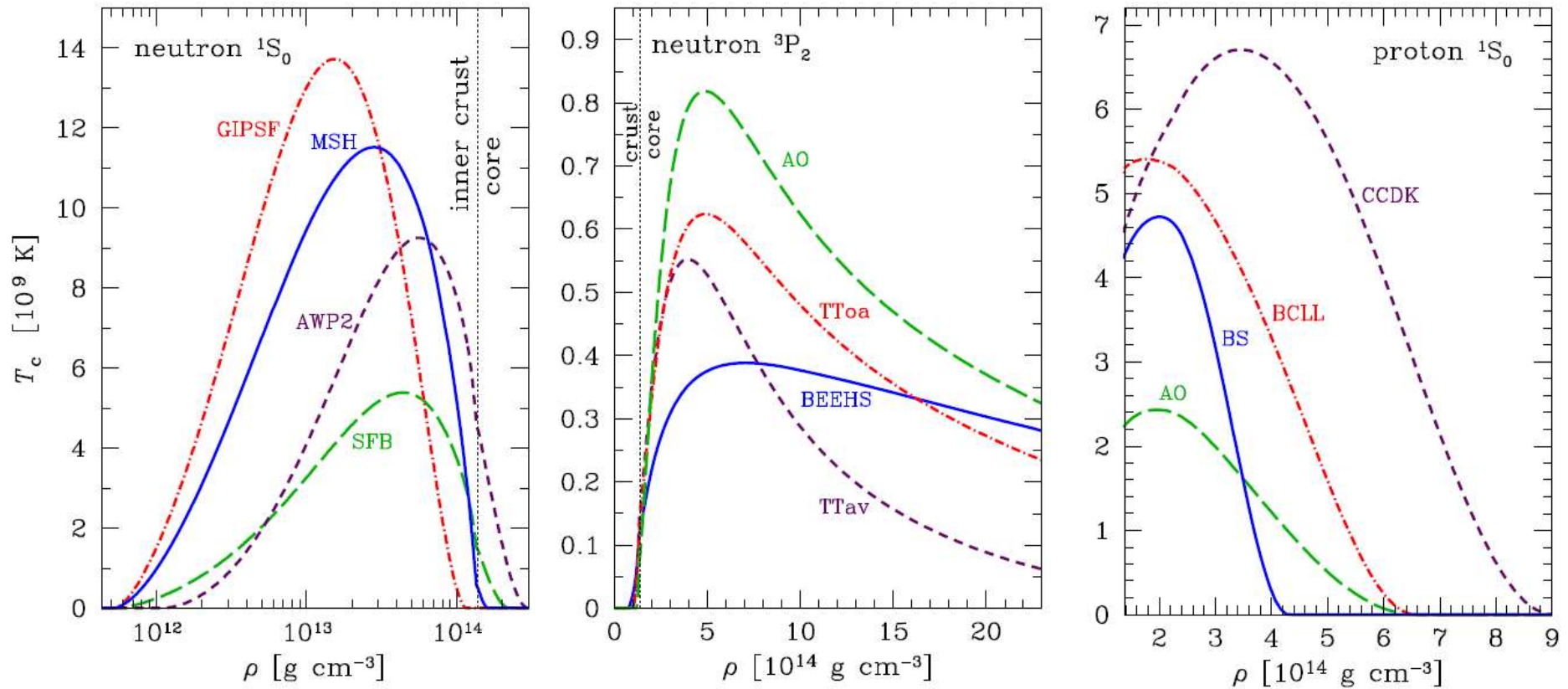
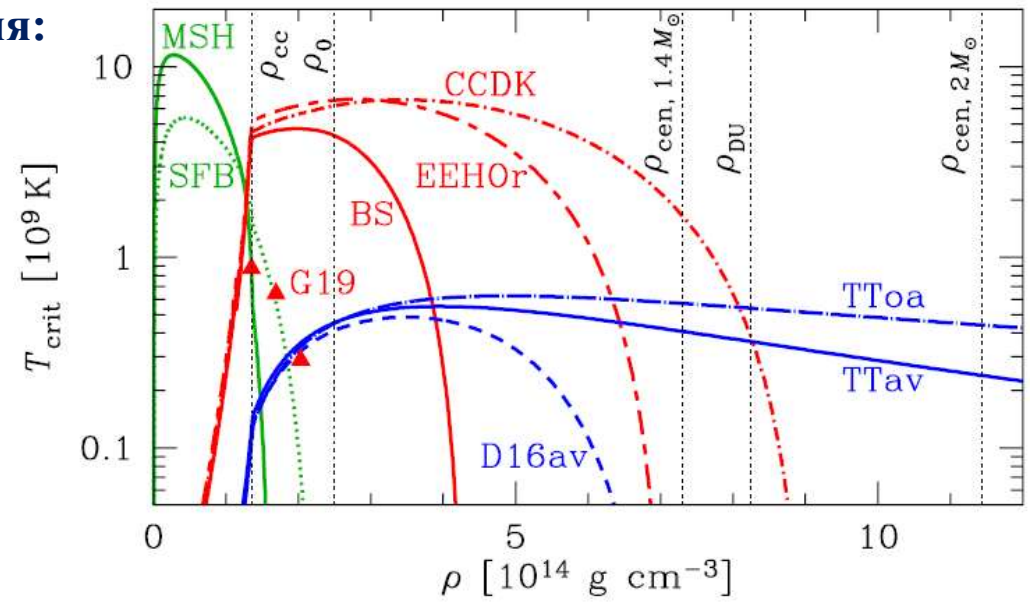


Рисунок из обзора: A.P., Pons, Page, Neutron stars – cooling and transport. *Space Sci. Rev.* **191**, 239 (2015).

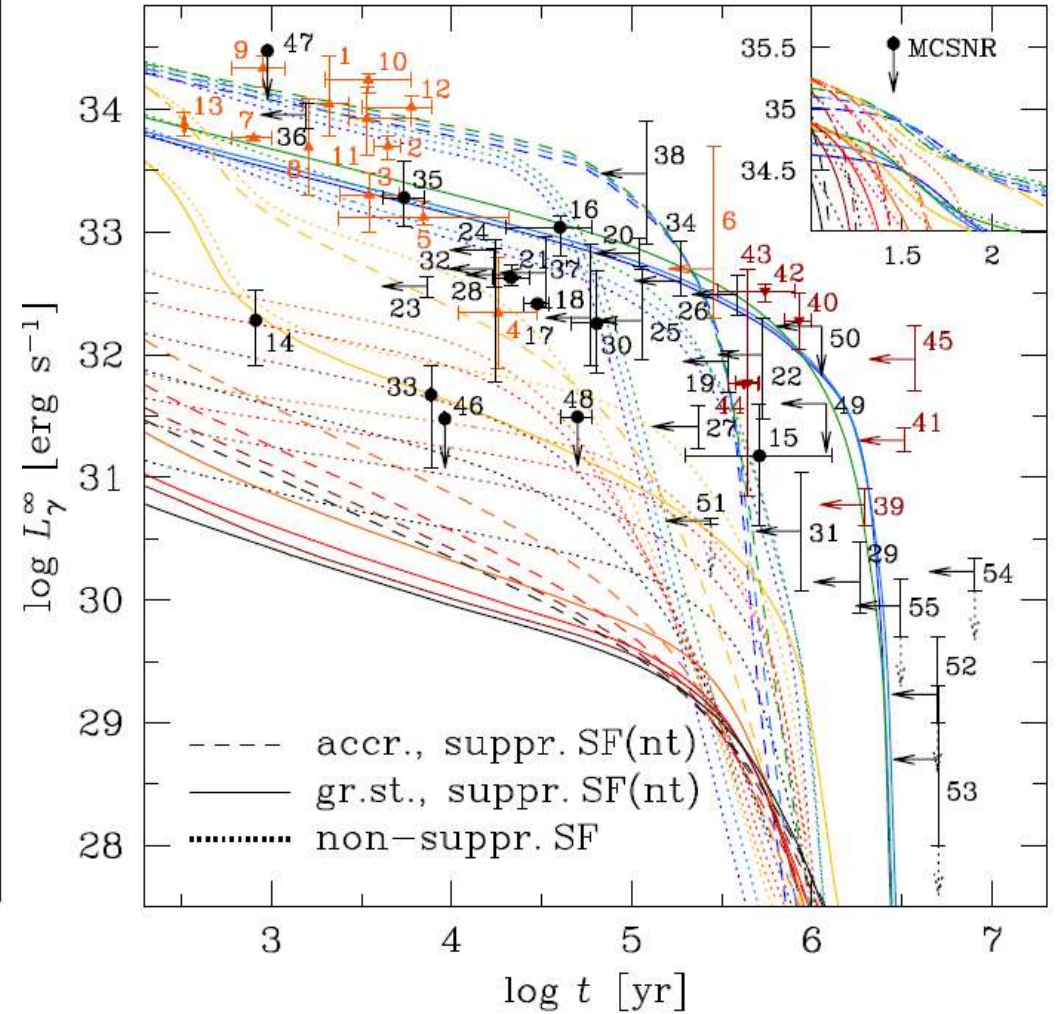
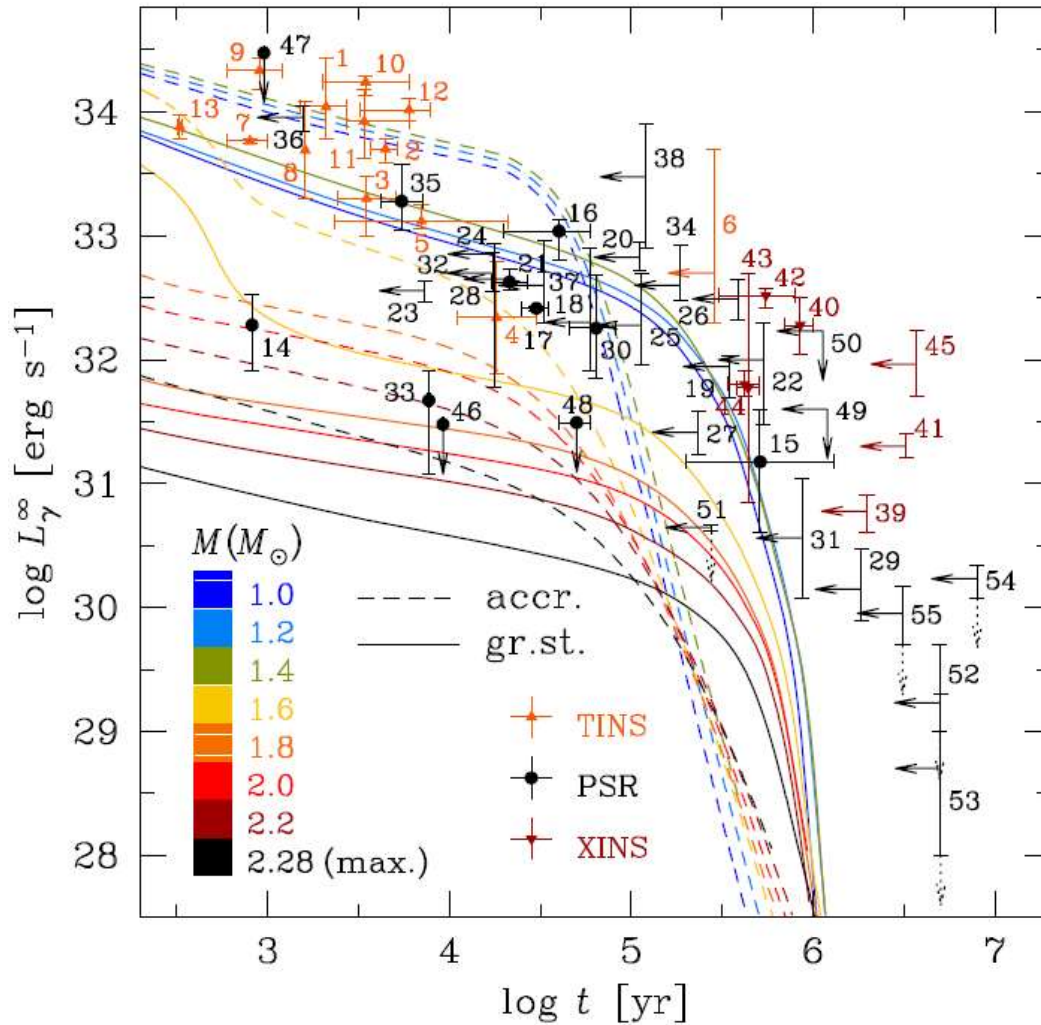
- AWP2 – Ainsworth et al. (1989)
- SFB – Schwenk et al. (2003)
- GIPSF – Gandolfi et al. (2008)
- MSH – Margueron et al. (2009)
- AO – Amundsen & Østgaard (1985)
- BEEHS – Baldo et al. (1998)
- TTav, TT0a – Takatsuka & Tamagaki (2004)
- BCLL – Baldo et al. (1992)
- CCDK – Chen et al. (1993)
- EEHOr – Elgarøy et al. (1996)
- BS – Baldo & Schulze (2007)
- D16av – Ding et al., *Phys. Rev. C* **94**, 025902 (2016)
- G19 – Guo et al., *Nucl. Phys. A* **986**, 18 (2019)

Ситуация сегодня:



Остывание нейтронных звёзд

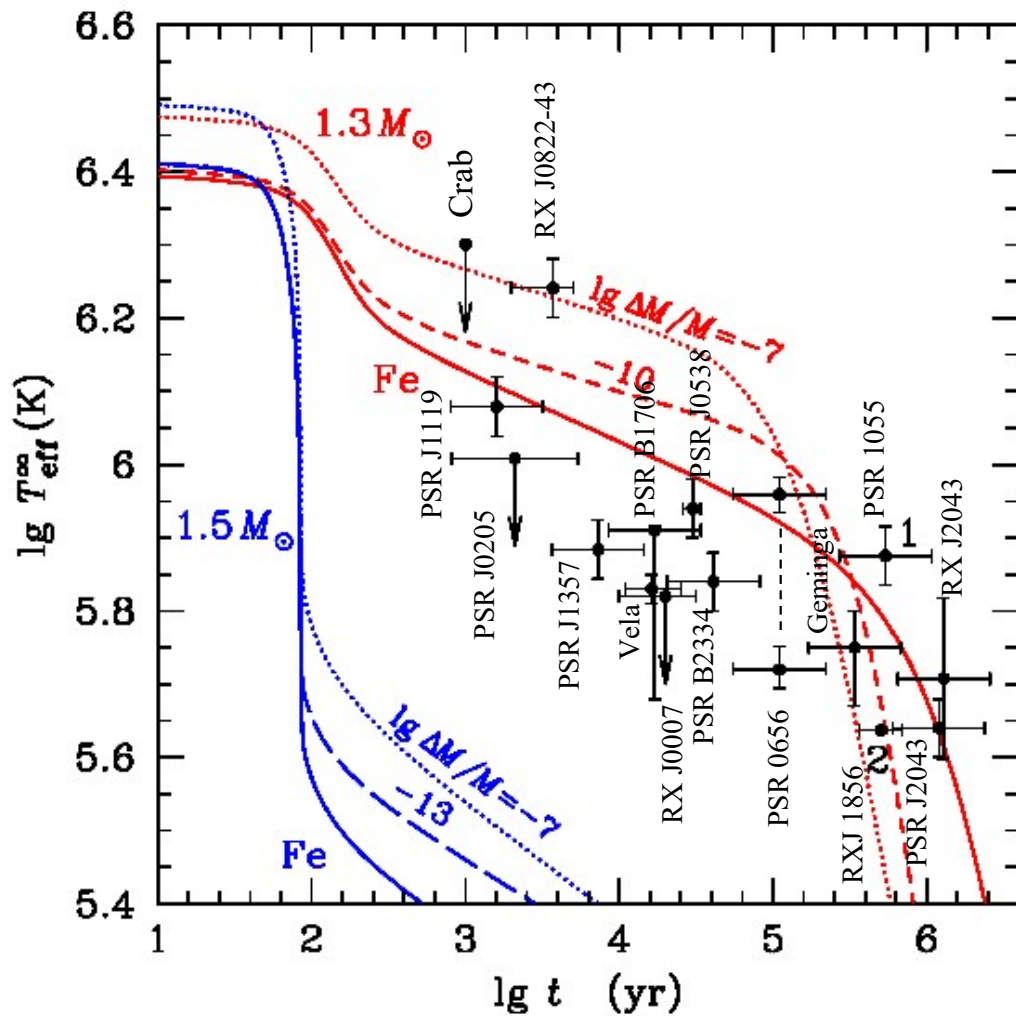
Влияние сверхтекучести нуклонов



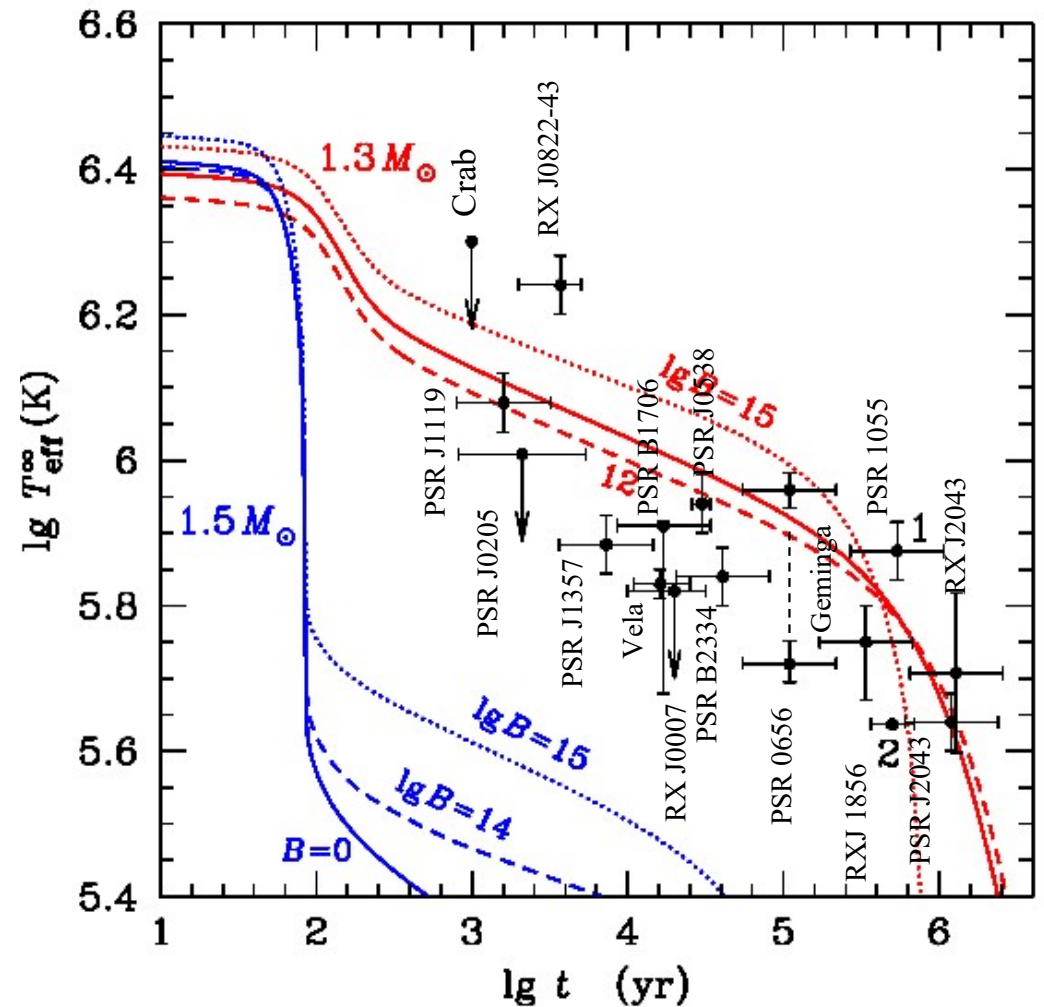
Остывание нейтронных звёзд

Влияние оболочек

Остывание нейтронных звёзд с аккрецированными оболочками



Остывание нейтронных звёзд с замагниченными оболочками

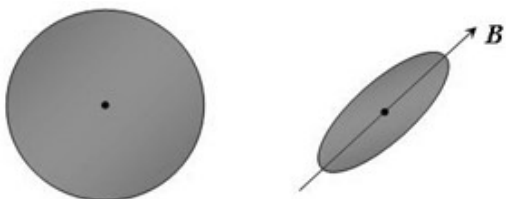


Характерные области значений магнитных полей

- Сильное поле B :

$$\hbar\omega_c = \hbar eB/m_e c > 1 \text{ а.у.}$$

$$B > B_0 = m_e^2 c e^3 / \hbar^3 = 2.35 \times 10^9 \text{ G}$$



$$E_b \sim \ln^2(B/B_0)$$

- Сверхсильное поле:

$$\hbar\omega_c > m_e c^2$$

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

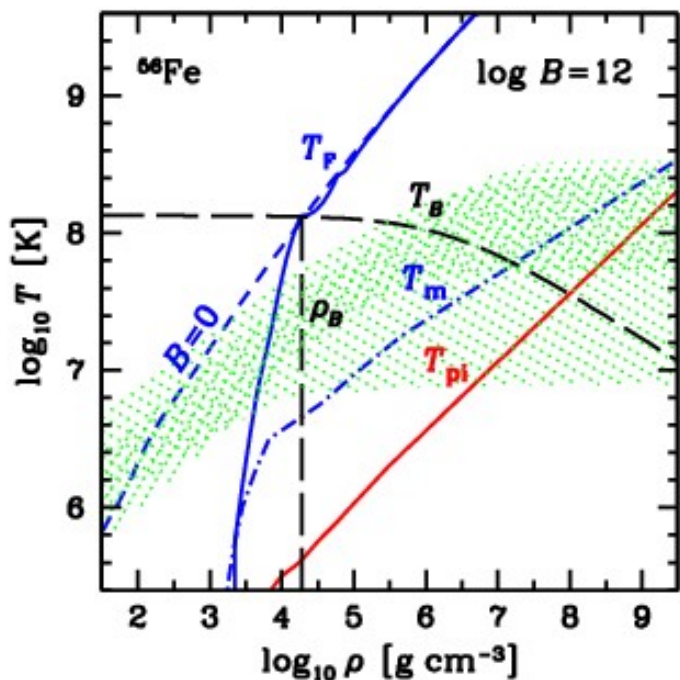
Уровни Ландау (Раби): $\epsilon_n = m_e c^2 (\sqrt{1 + 2bn} - 1)$

$$b \equiv B/B_{\text{QED}} \quad b \ll 1 \Rightarrow \epsilon_n \approx n \hbar \omega_c$$

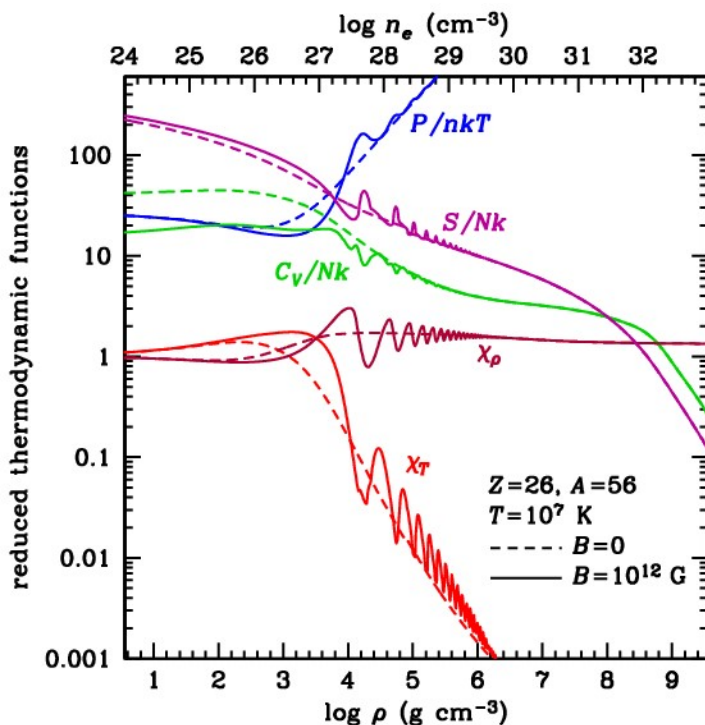
- Сильно квантующее поле:

$$\rho < \rho_B \approx 7 \times 10^3 B_{12}^{3/2} (\langle A \rangle / \langle Z \rangle) \text{ g cm}^{-3}$$

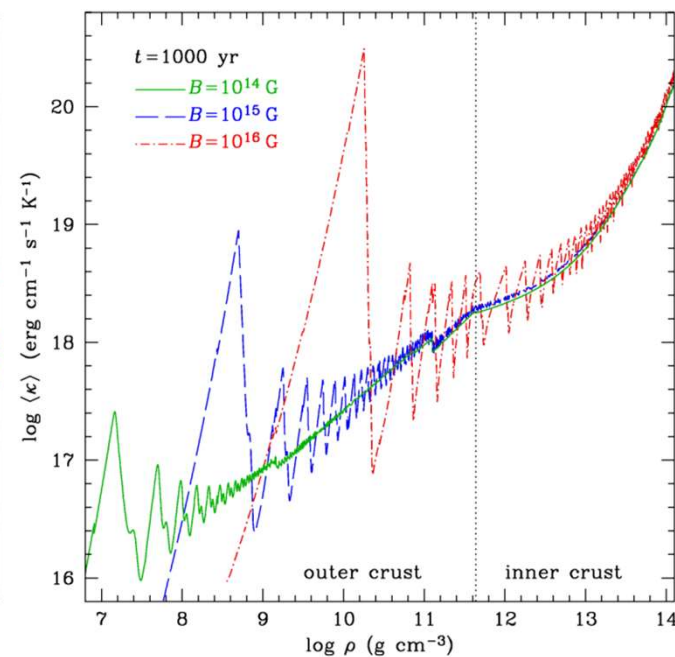
$$T \ll T_B = \hbar\omega_c / k_B \approx 1.3 \times 10^8 B_{12} \text{ K}$$



Haensel et al. 2007



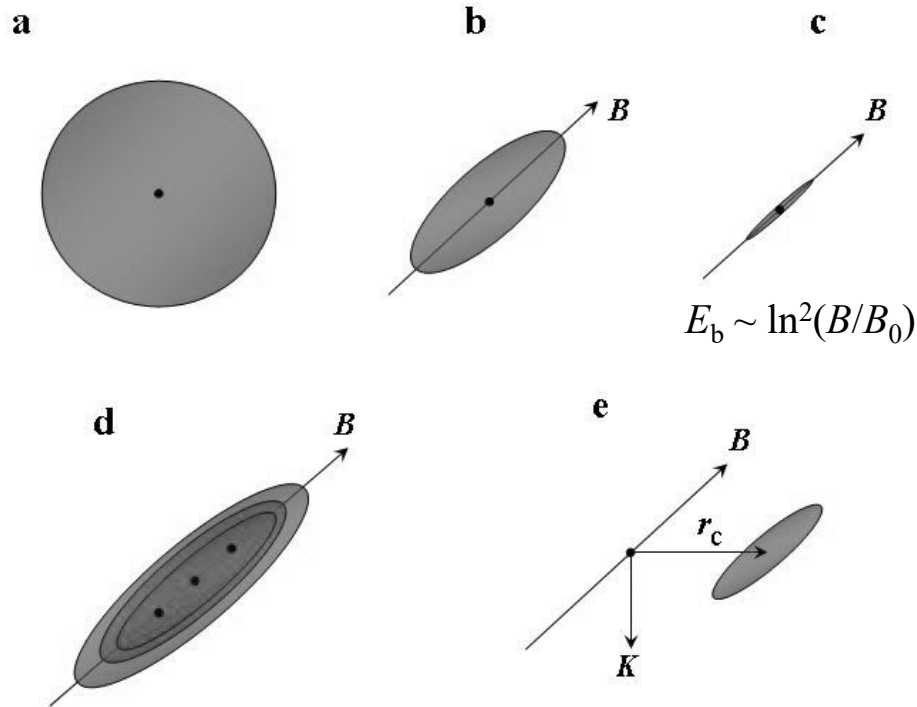
A.P. & Chabrier 2013



A.P. & Chabrier 2018

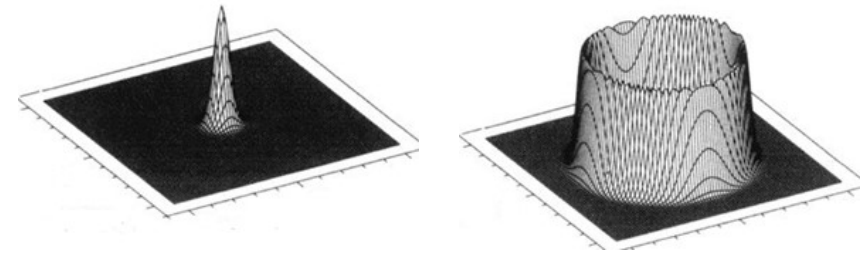
Атмосферы нейтронных звёзд: атомы в сильных магнитных полях

М. Ruderman, Phys. Rev. Lett. **27**, 1306 (1971)



основное состояние

возбуждённое состояние



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

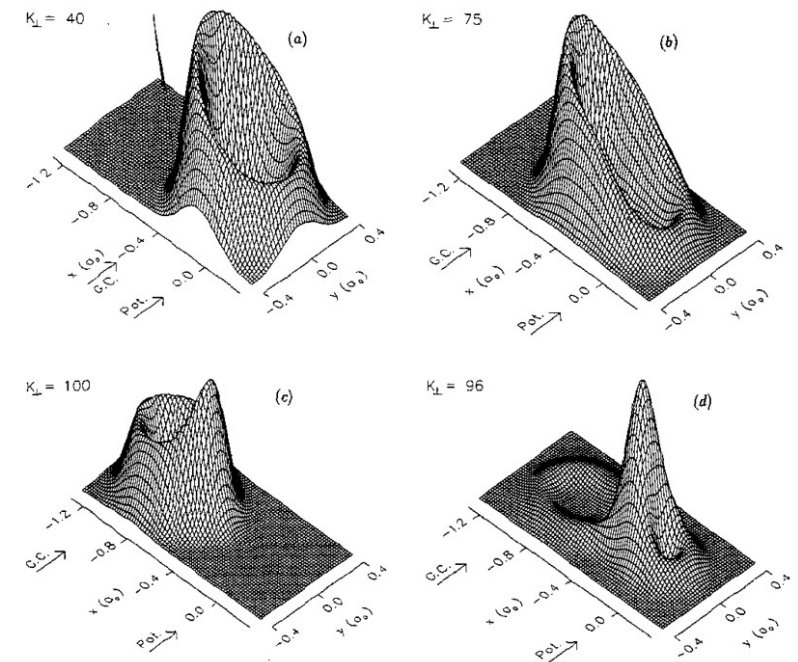


Иллюстрация влияния сильного магнитного поля на атомы.

a–c: атом H в основном состоянии

(**a:** $B \ll 10^9$ Гс, **b:** $B \sim 10^{10}$ Гс, **c:** $B \sim 10^{12}$ Гс).

d: Поле стабилизирует молекулярные цепочки.

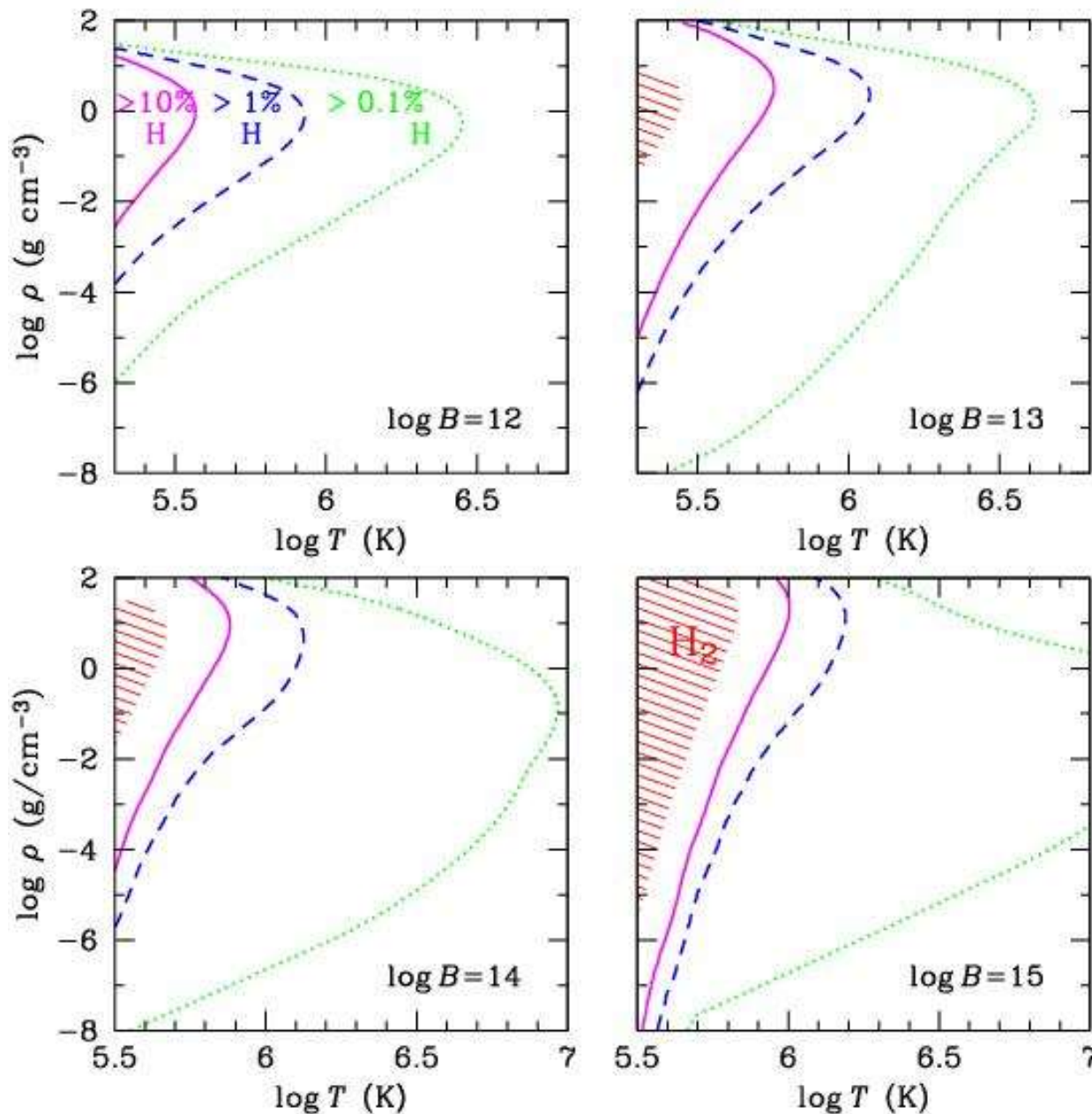
e: При движении поперёк магнитного поля возникает асимметрия.

М. Vincke, М. Le Dourneuf, D. Baye, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **25**, 2787 (1992)

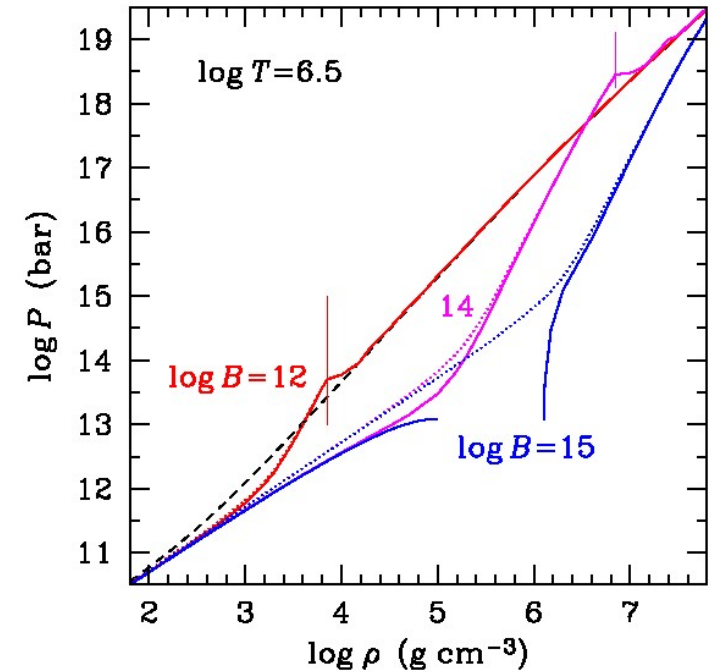
А.Р. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **27**, 1073 (1994)

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

Атмосферы нейтронных звёзд: степень ионизации, уравнение состояния



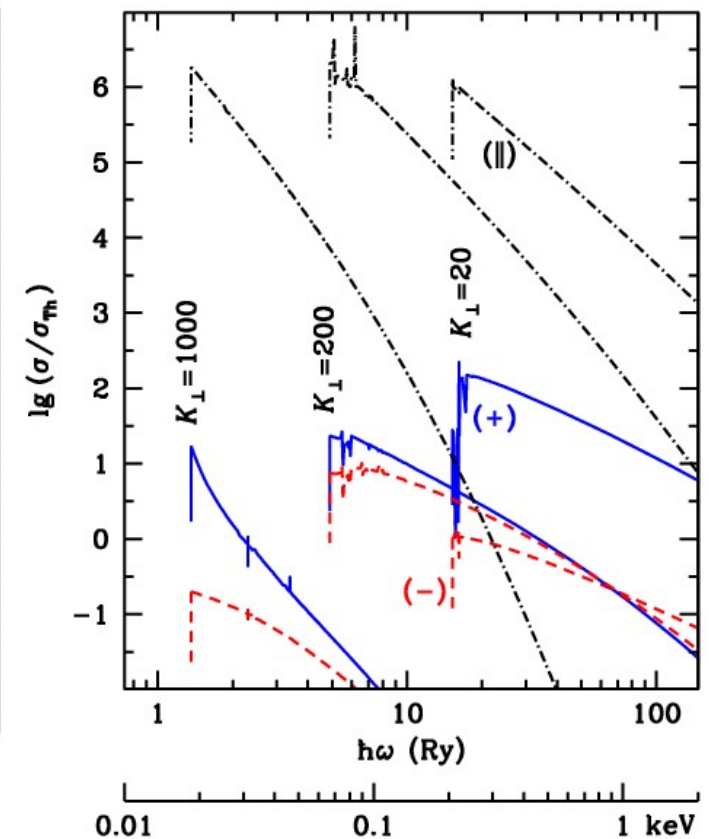
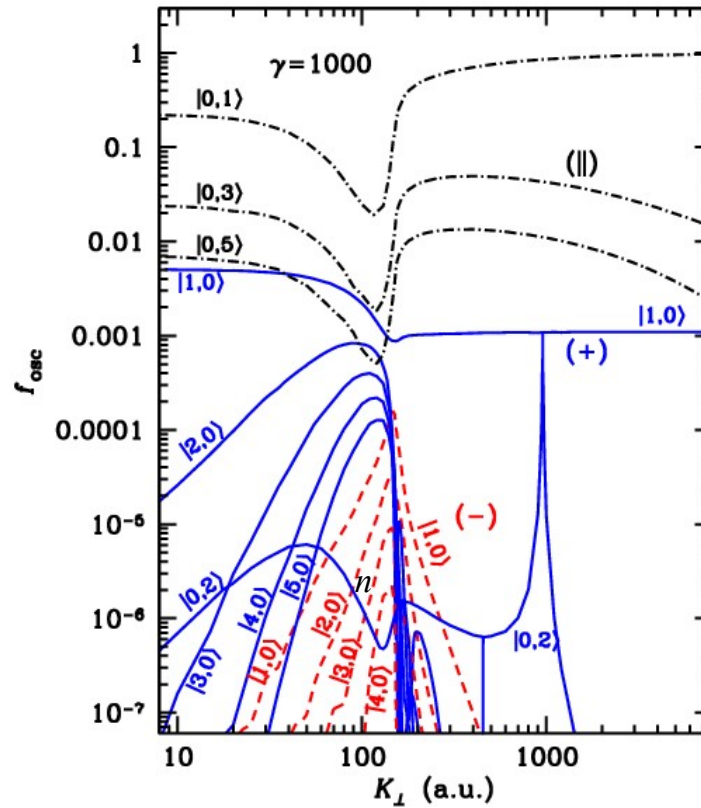
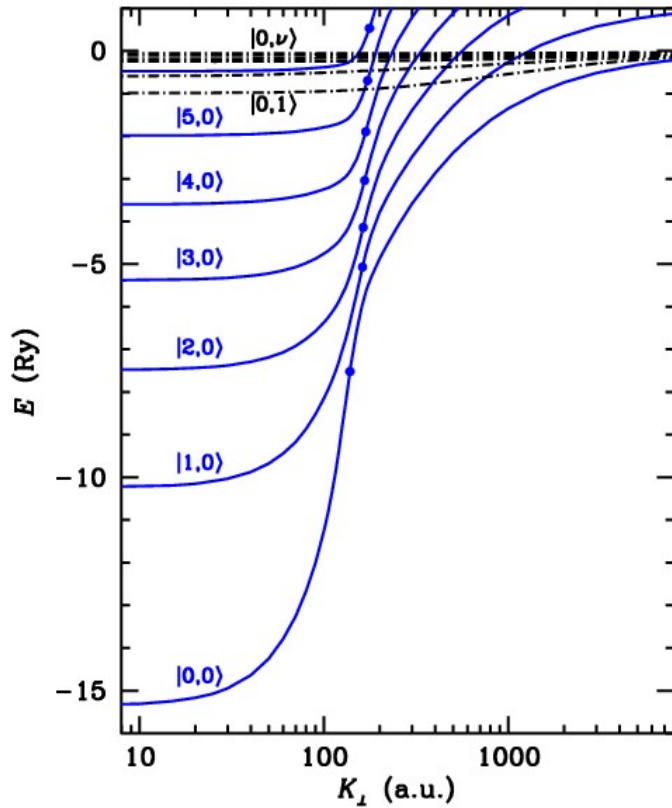
<http://www.ioffe.ru/astro/NSG/Hmagnet>



Уравнение состояния идеальной (точки) и неидеальной частично ионизованной (сплошные кривые) водородной плазмы при разных B (штриховая линия – $B = 0$).

A.P., G. Chabrier, Yu.A. Shibano, Phys. Rev. E **60**, 2193 (1999)

Атмосферы нейтронных звёзд: атомы в сильных магнитных полях



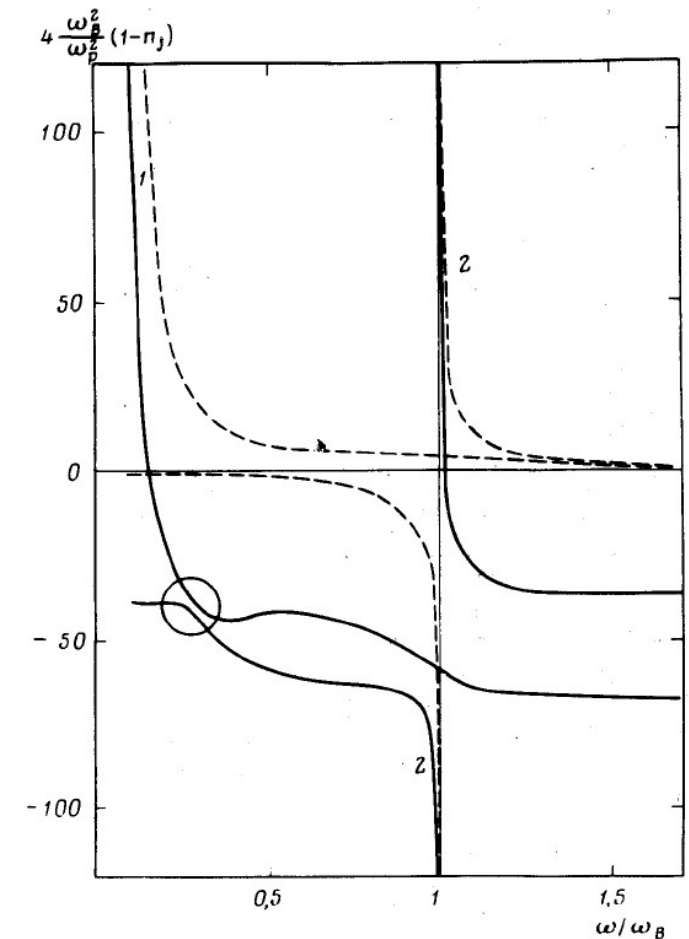
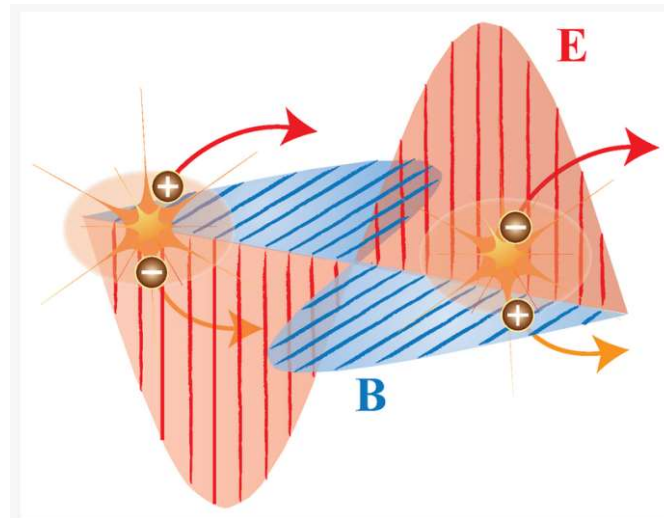
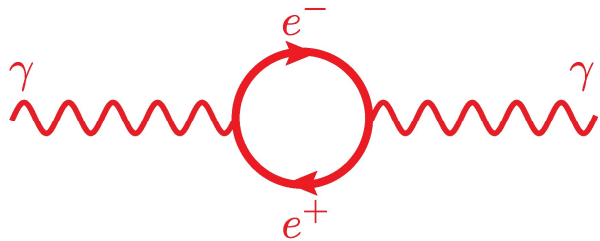
Энергии тесно связанных (сплошные кривые) и «водородоподобных» (слабосвязанных) состояний (штрихпунктир) в зависимости от поперечного псевдоимпульса при $B=2.35 \times 10^{12}$ Гс.

Силы осцилляторов для переходов с основного на низколежащие возбуждённые уровни для трёх основных поляризаций в зависимости от поперечного псевдоимпульса при $B=2.35 \times 10^{12}$ Гс.

Сечения фотоионизации атома в основном состоянии для трёх основных поляризаций и трёх значений поперечного псевдоимпульса в зависимости от энергии фотона при $B=2.35 \times 10^{12}$ Гс.

Поляризация вакуума

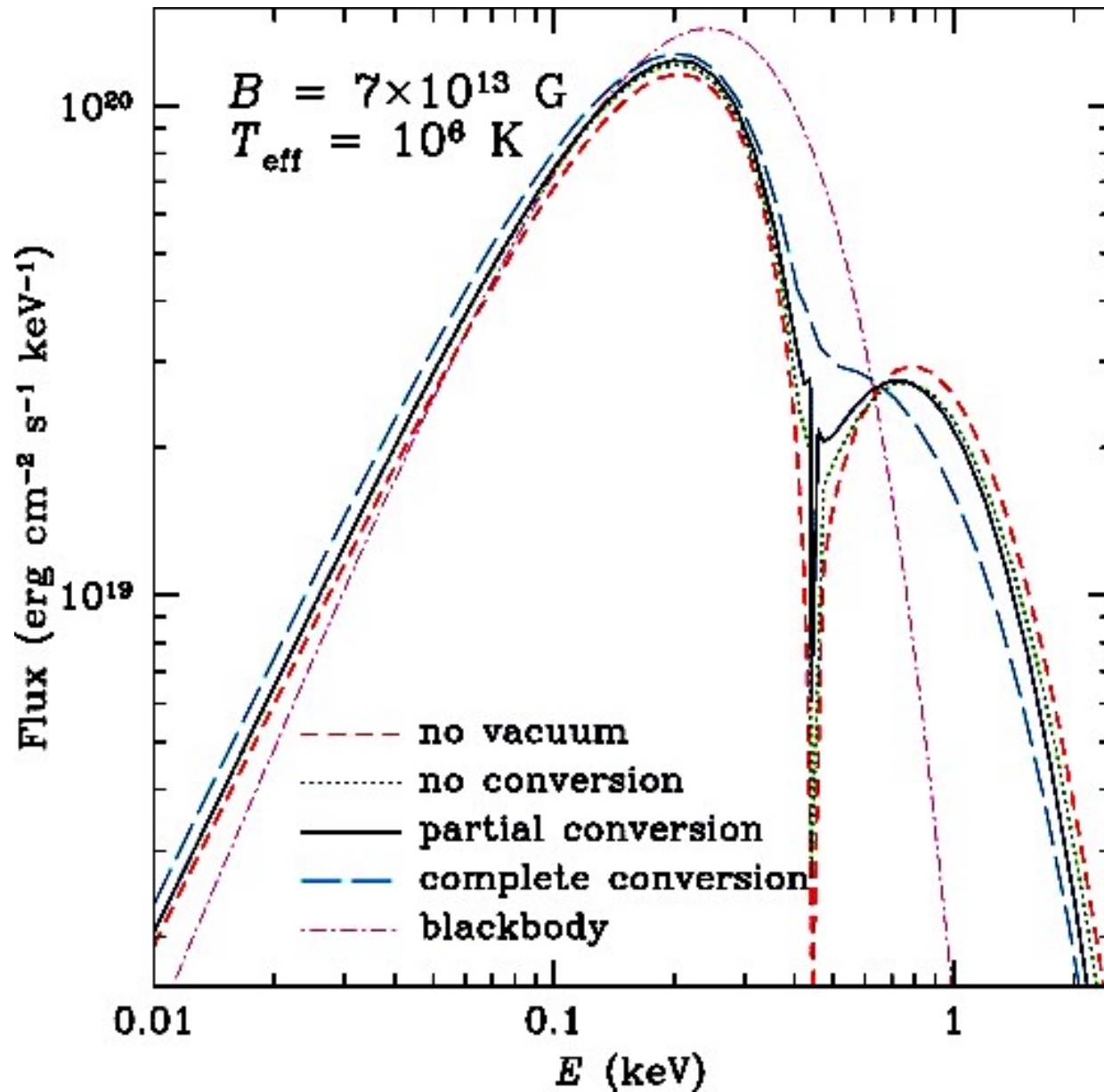
- R. Novick, M.C.Weisskopf, J.R.P.Angel, P.G.Sutherland. *The effect of vacuum birefringence of X-ray binaries and pulsars.* ApJ **215**, L117 (1977)
- Yu.N.Gnedin, G.G.Pavlov, Yu.A.Shibanov. *Influence of polarization of vacuum in a magnetic field on the propagation of radiation in a plasma.* Sov. Phys. JETP Lett. **27**, 305 (1978)
- G.G.Pavlov, Yu.N.Gnedin. *Vacuum polarization by a magnetic field and its astrophysical manifestations.* Astrophys. Space Phys. Reviews **3**, 197 (1984)



Dispersion curves with (solid) and without (dashed) vacuum polarization (Gnedin, Pavlov, Shibano 1978)

Атмосферы нейтронных звёзд

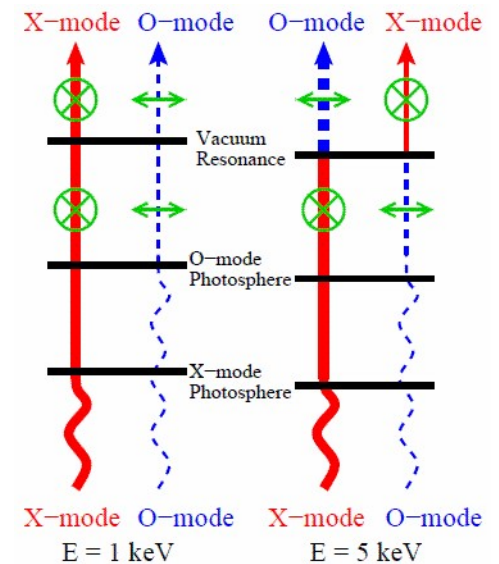
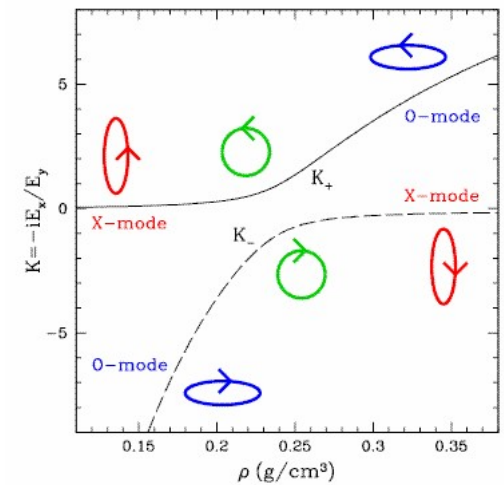
Влияние поляризации вакуума и связанной с ним конверсии нормальных мод на спектр выходящего излучения



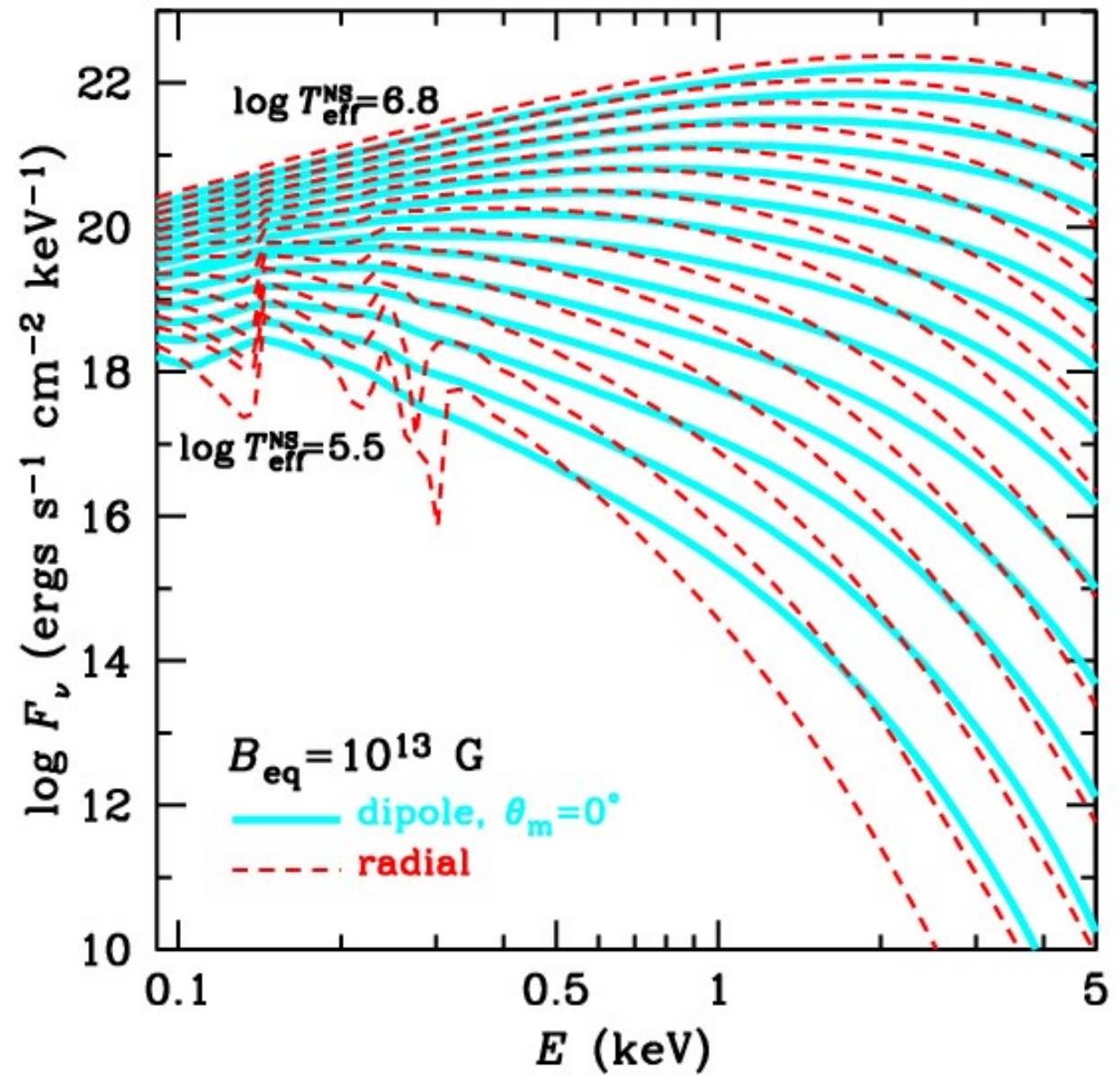
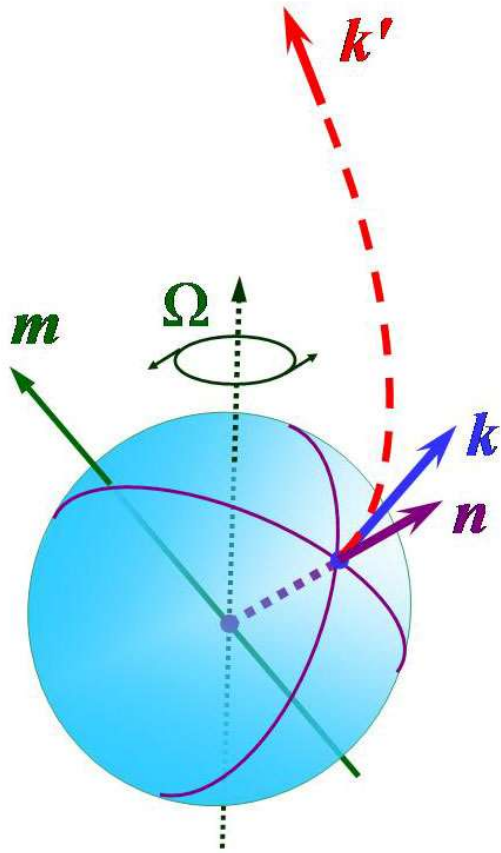
Ho & Lai, MNRAS **338**, 233 (2003)

Lai & Ho, ApJ **588**, 793 (2003).

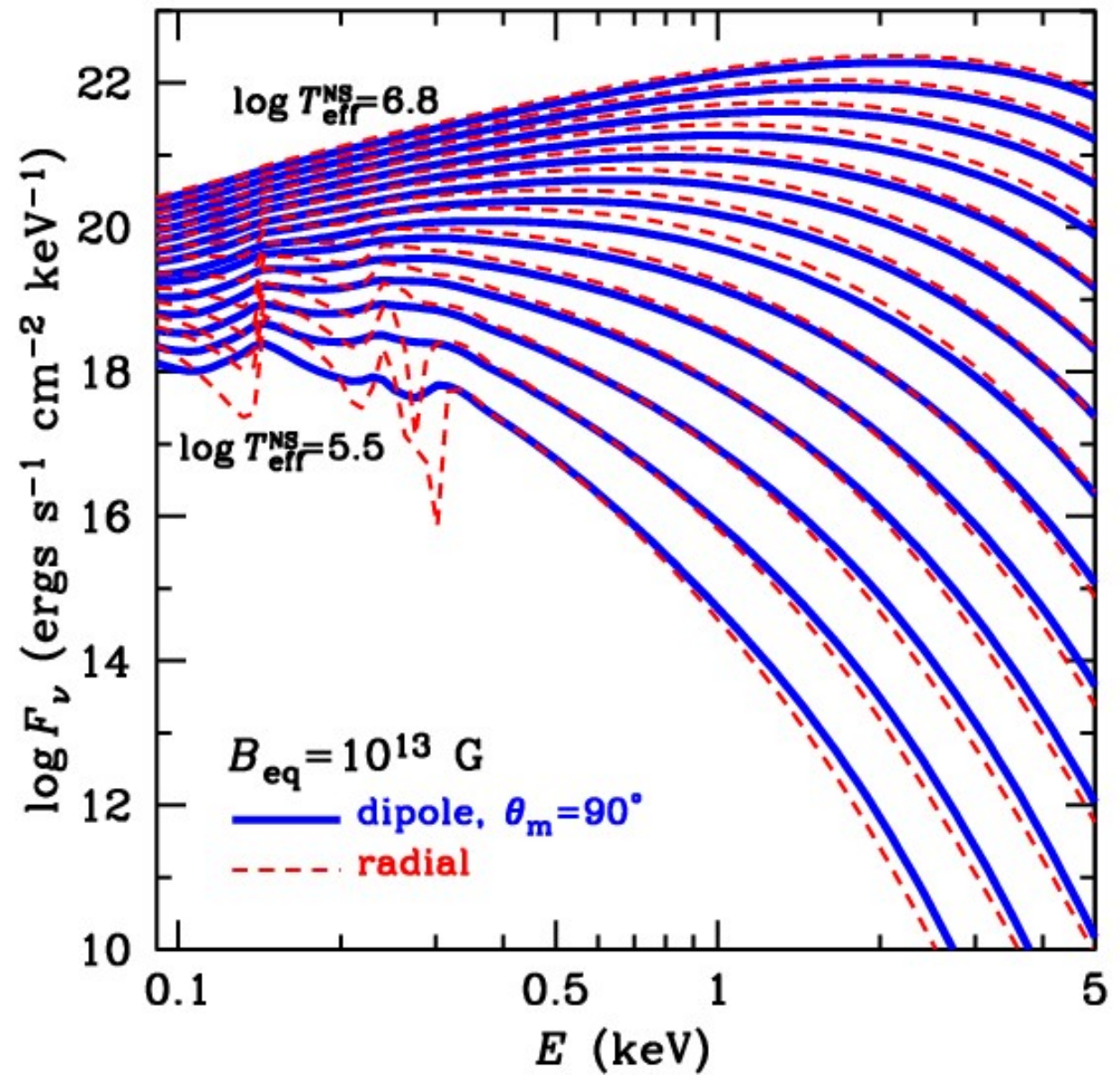
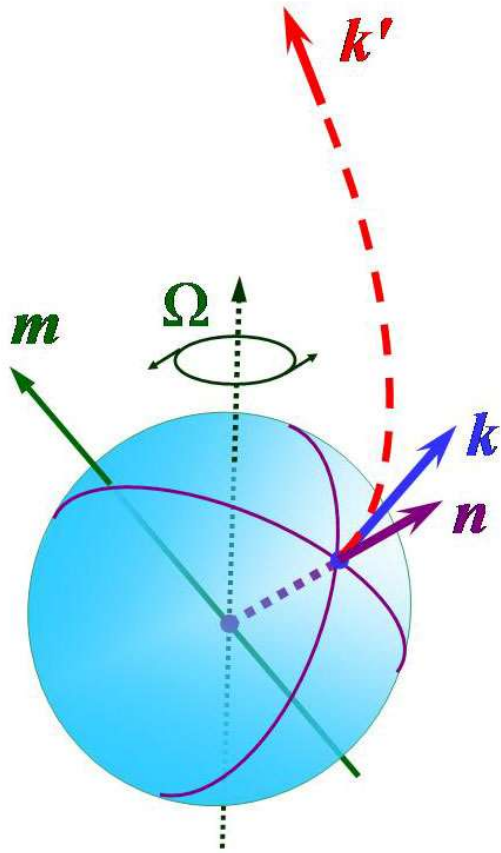
van Adelsberg & Lai,
MNRAS **373**, 495 (2007)



Моделирование наблюдаемого спектра: усреднение по поверхности звезды с учётом эффектов ОТО

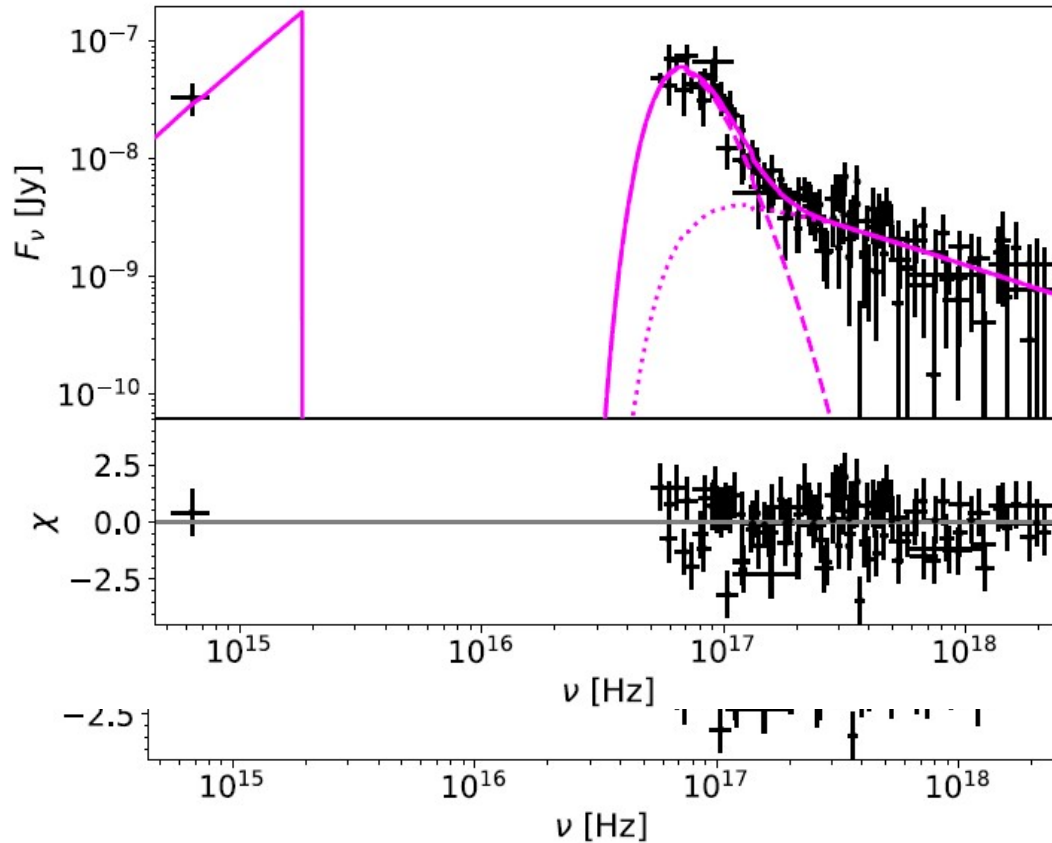


Моделирование наблюдаемого спектра: усреднение по поверхности звезды с учётом эффектов ОТО



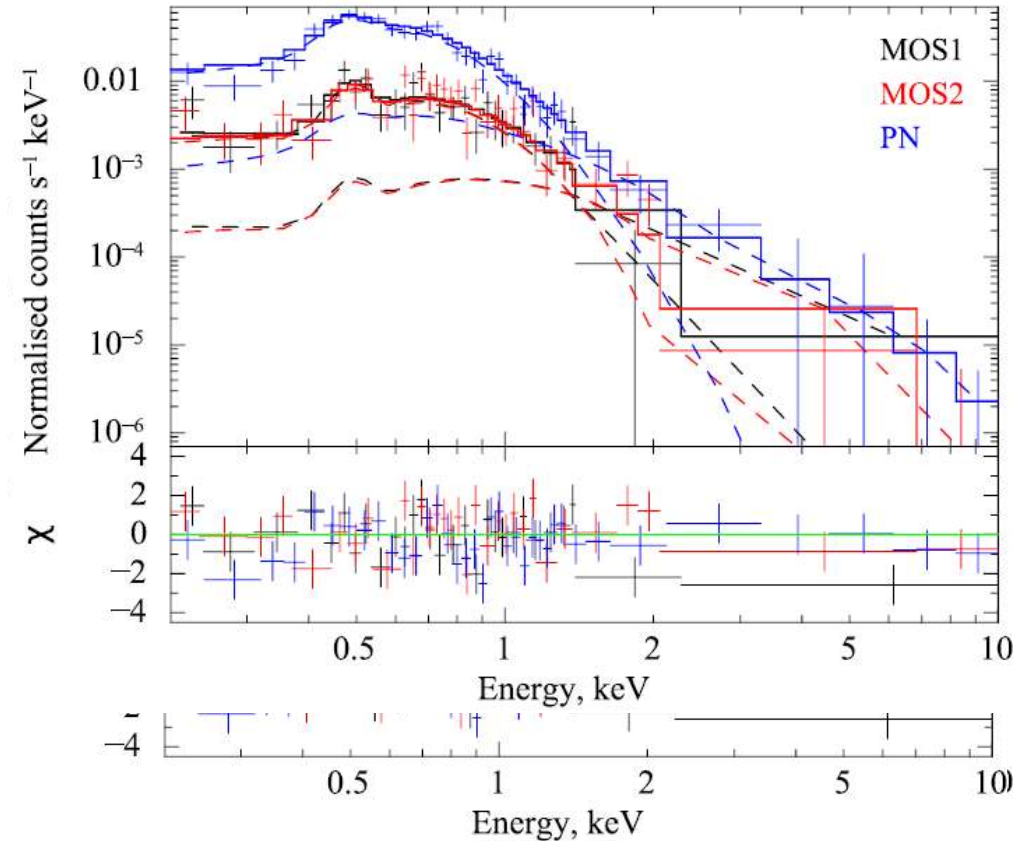
Связь теории с наблюдениями

Пример PSR J1957+5033



Zyuzin *et al.* *MNRAS* **513**, 6088 (2022).

Пример PSR J0554+3107

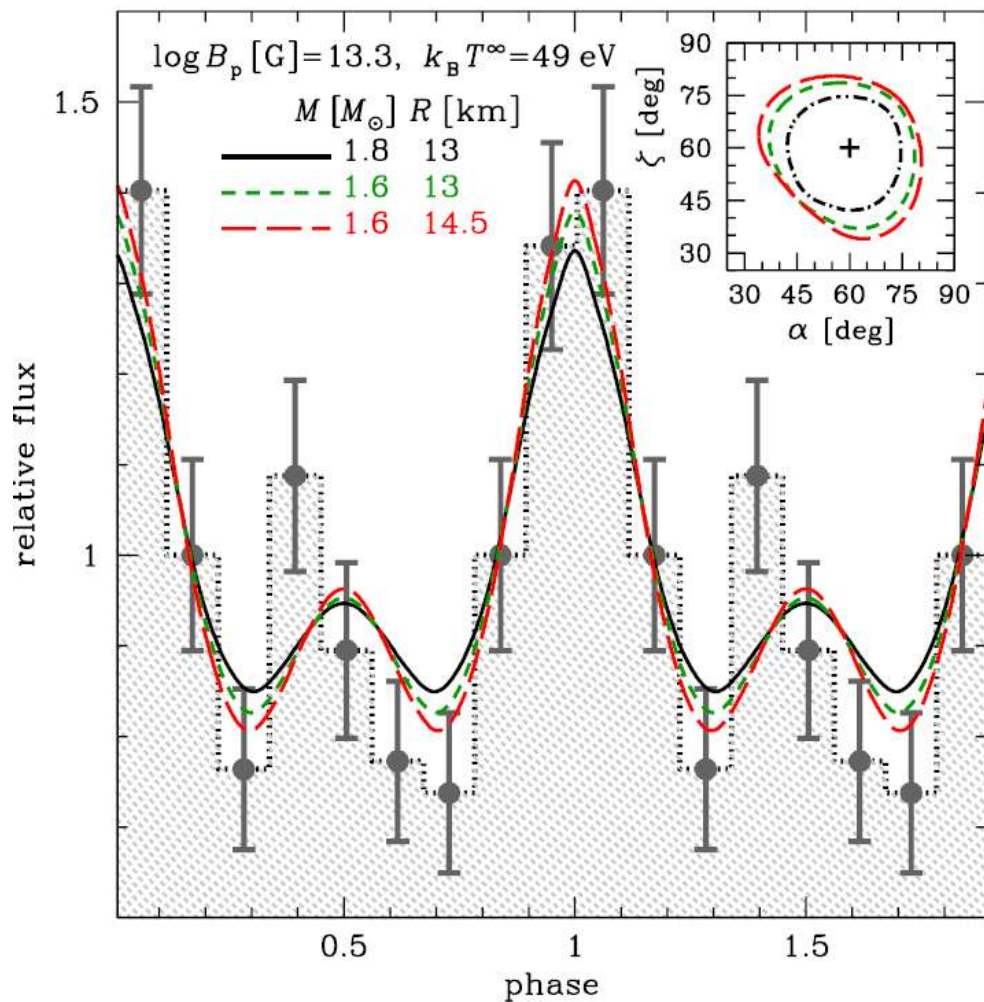


Tanashkin, Karpova, A.P., Shibanov, Zyuzin,
MNRAS **516**, 13 (2022).

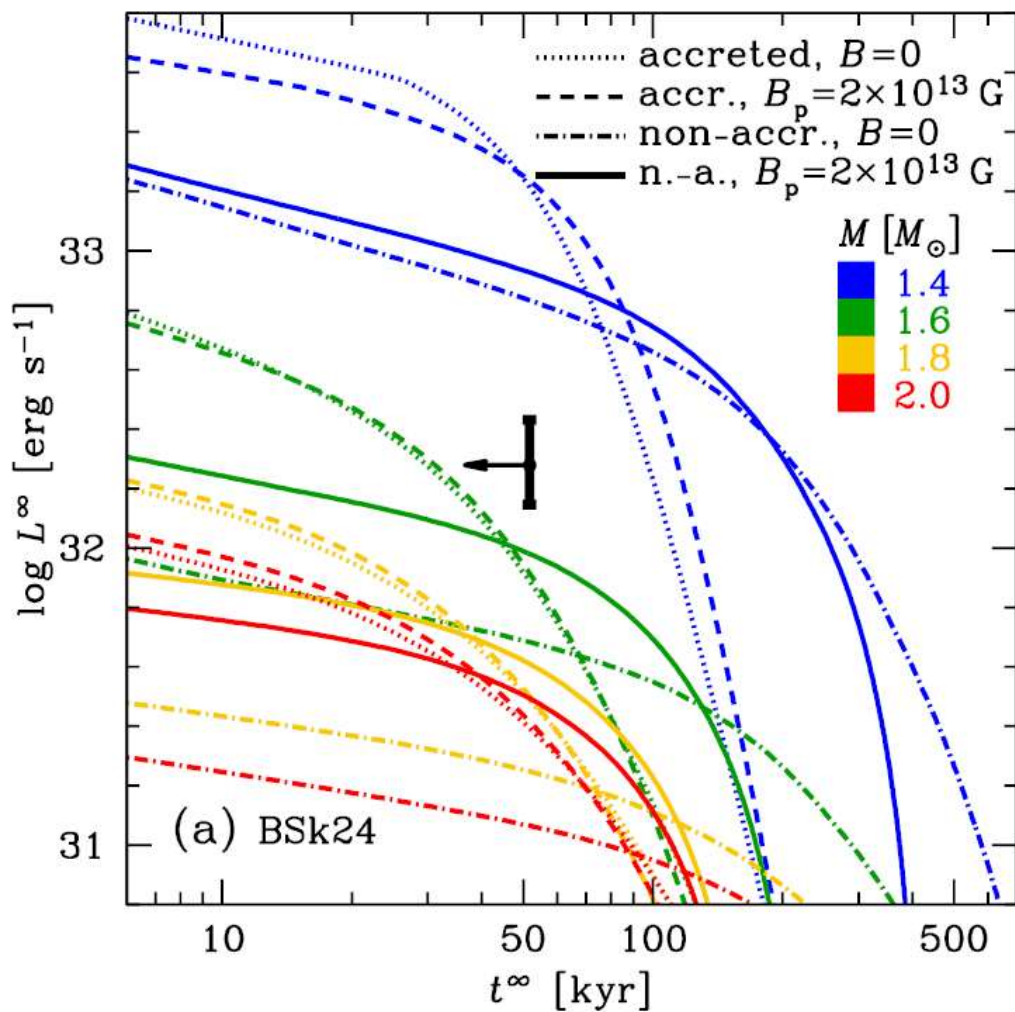
Спектр описывается моделью атмосферы (тепловая составляющая)
с добавлением степенной функции (нетепловая составляющая).

Связь теории с наблюдениями

Пример PSR J0554+3107



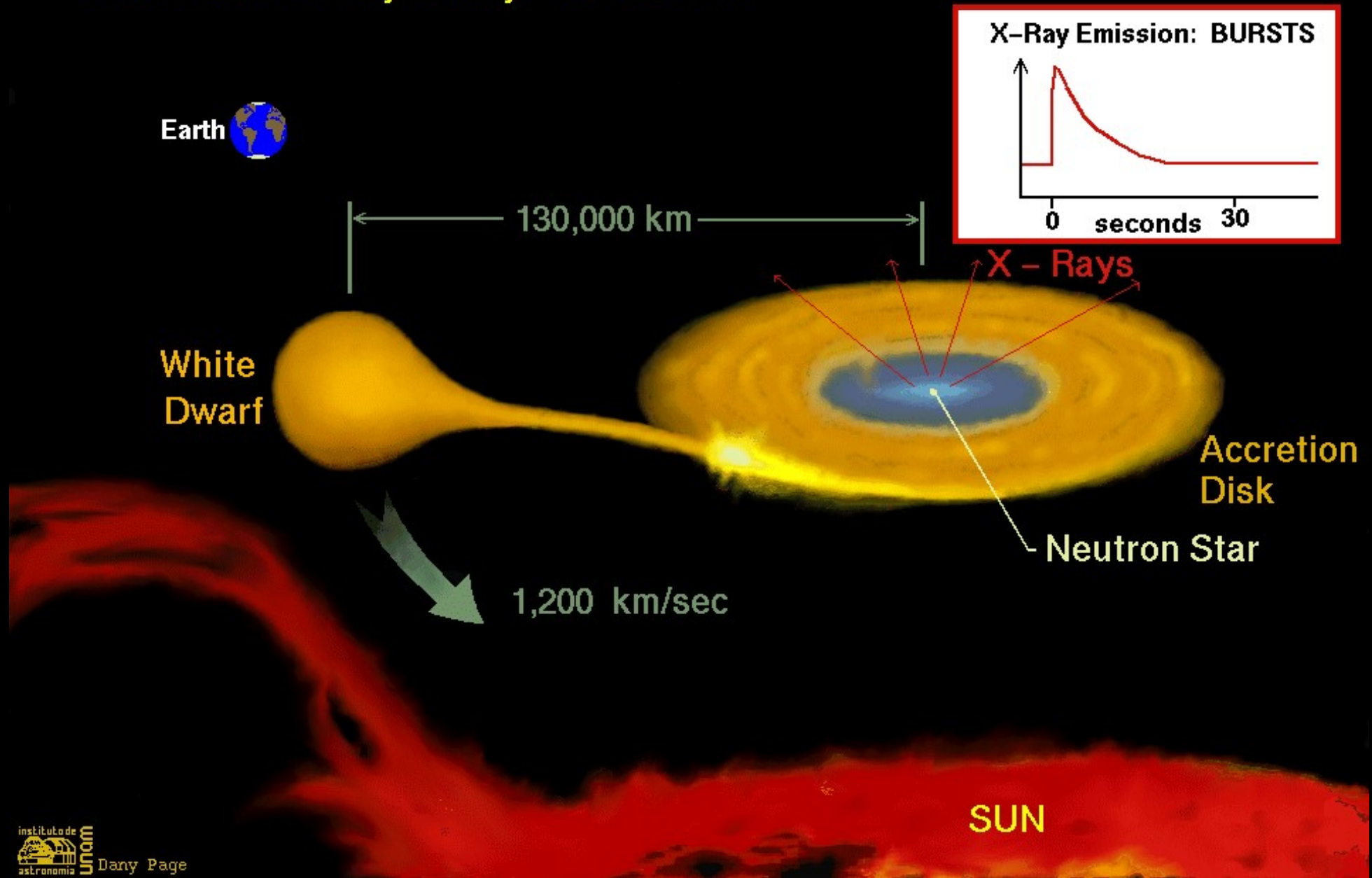
Профиль импульса в рентгене и его аппроксимация разработанными моделями. Ограничения на углы наклона магнитной оси (α) и луча зрения (ζ) к оси вращения.



Измеренная тепловая светимость и теоретические кривые остывание без учёта и с учётом магнитного поля, характерного для PSR J0554+3107

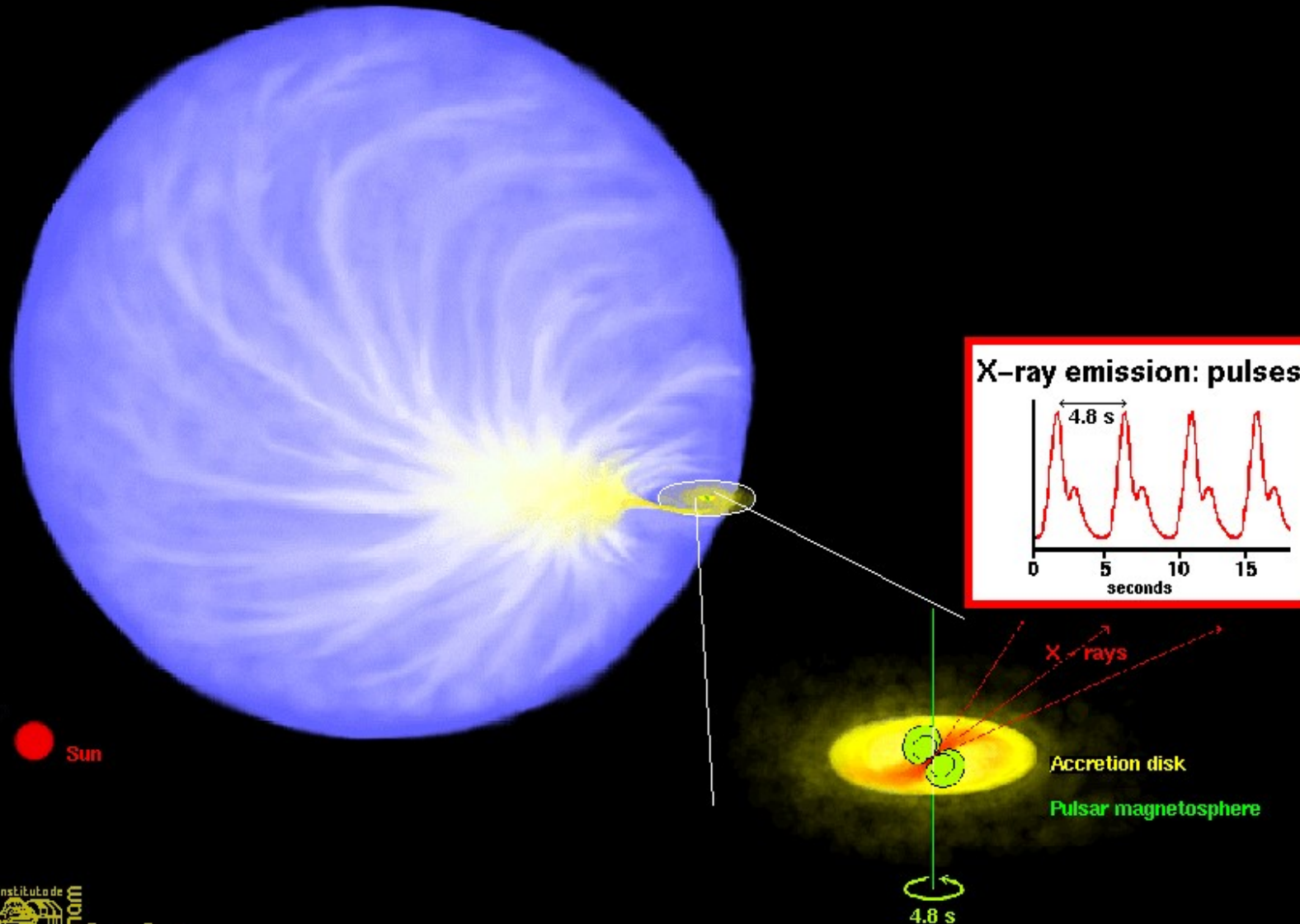
Нейтронные звёзды в двойных системах – рентгеновские двойные

A Low Mass X-Ray Binary: 4U 1820-30

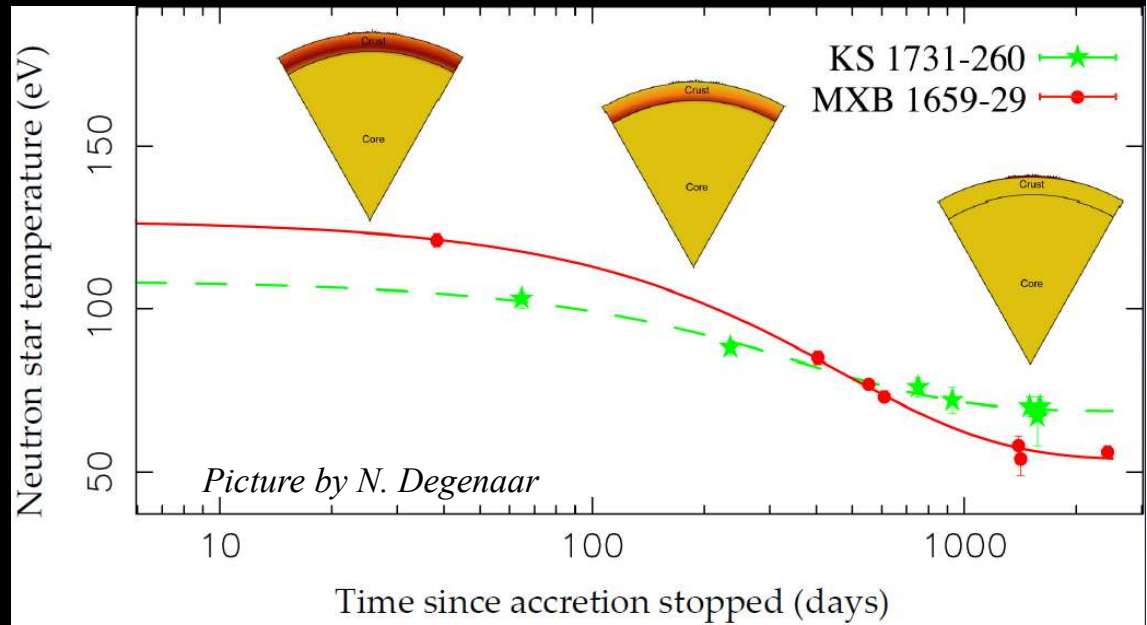
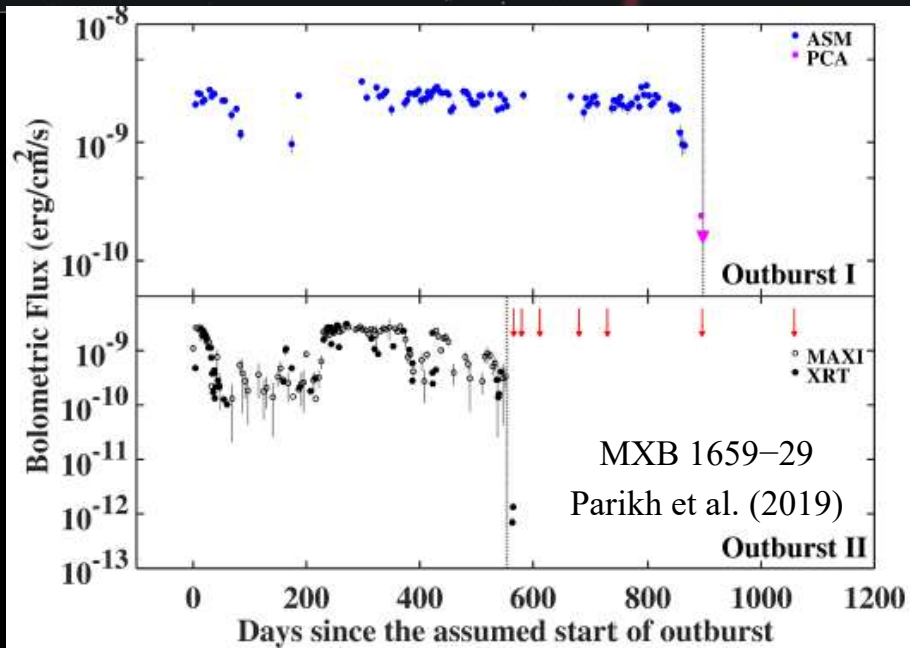
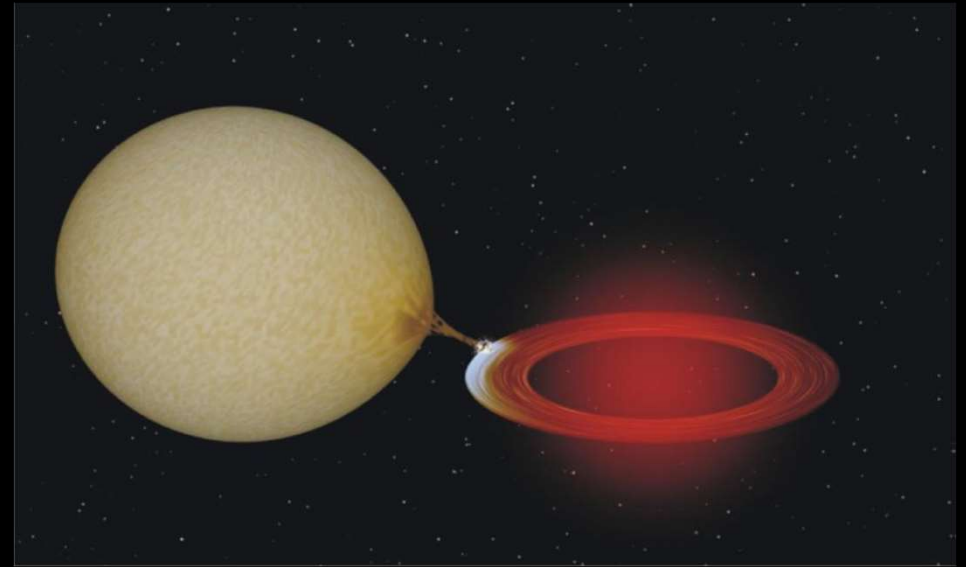
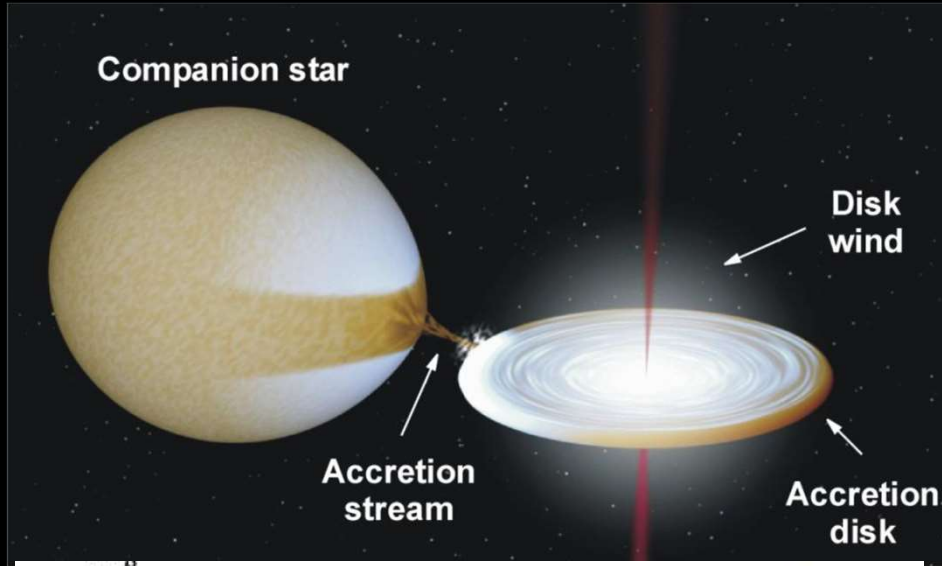


Нейтронные звёзды в двойных системах – рентгеновские двойные

CENTAURUS X-3: A HIGH MASS X-RAY BINARY



Нагрев и остывание нейтронных звёзд в мягких рентгеновских транзиентах



Вывод

Нейтронные звёзды – уникальные природные лаборатории для изучения вещества в экстремальных состояниях и проверки передовых физических теорий.



*Спасибо
за внимание!*