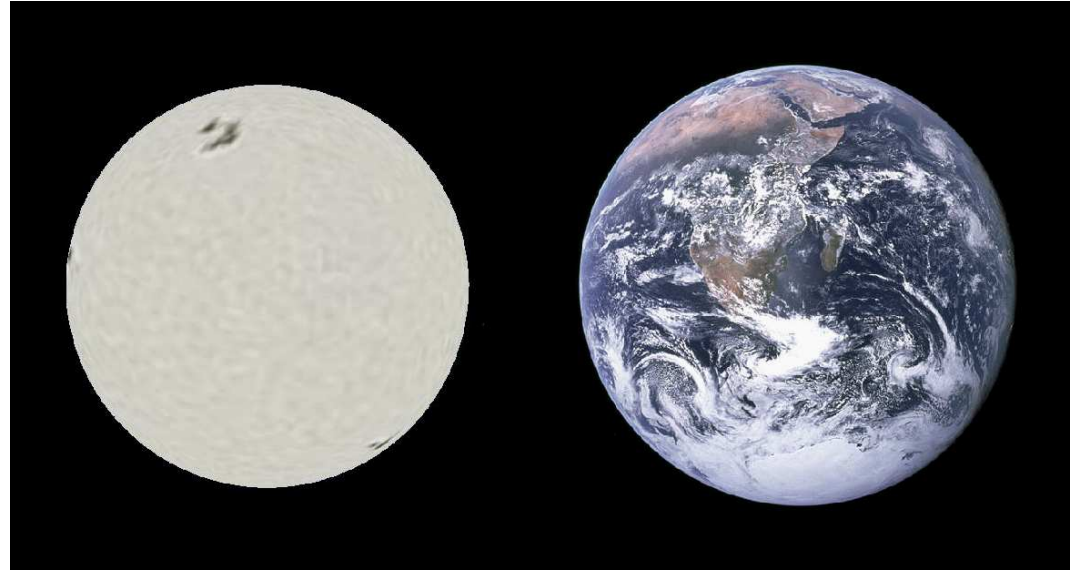
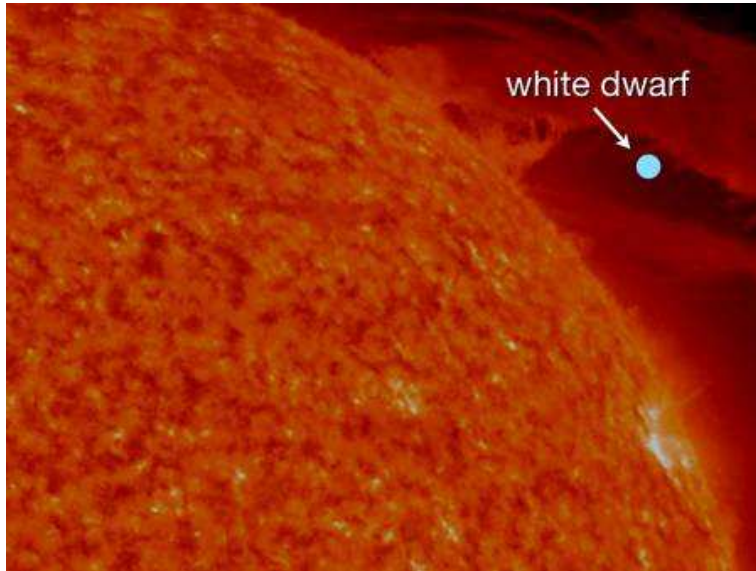


Лекция 1.

Общие сведения о компактных звёздах

1. Основные понятия
2. Белые карлики и плазма высокой плотности
3. Нейтронные звёзды и ядерная материя
4. Кварковые и гибридные звёзды

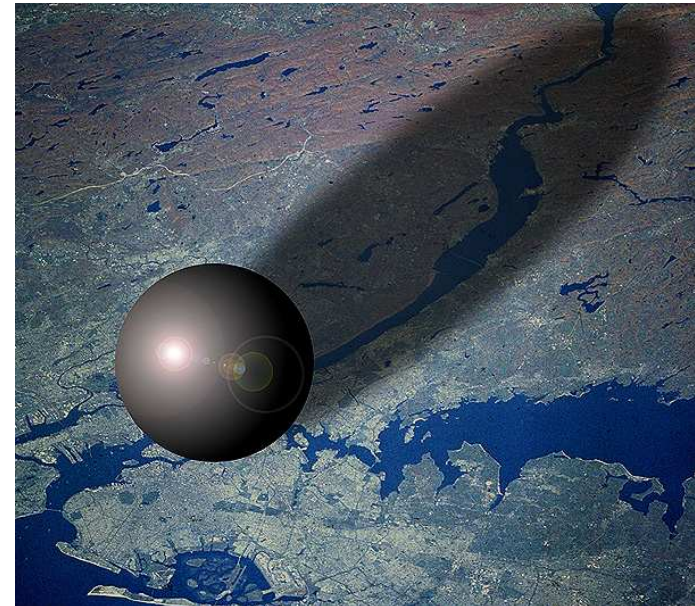
Белые карлики



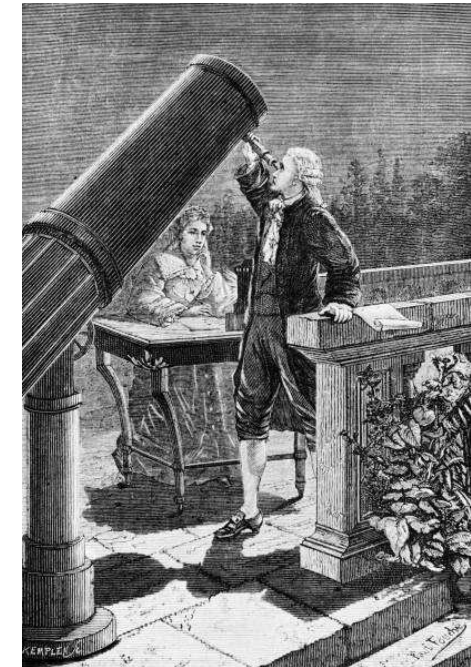
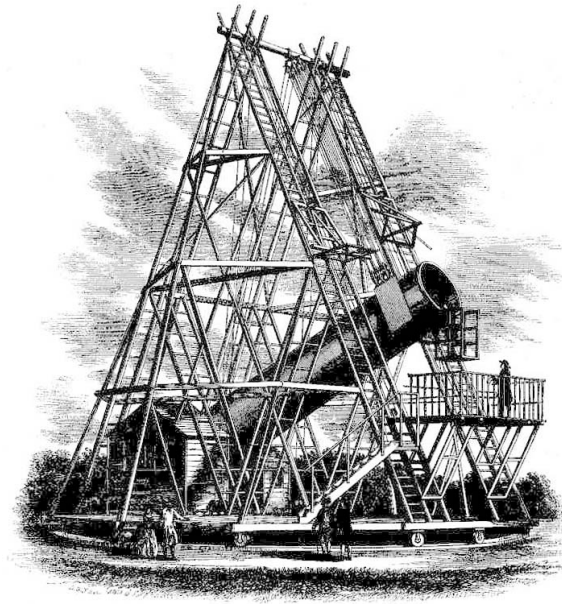
Нейтронные звёзды

Кварковые (странные) звёзды

Гибридные звёзды

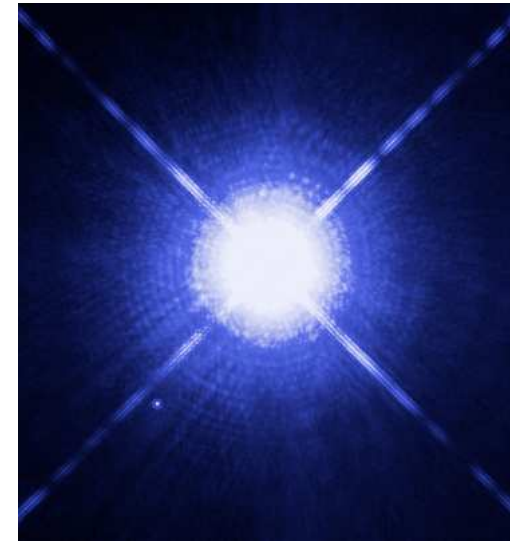
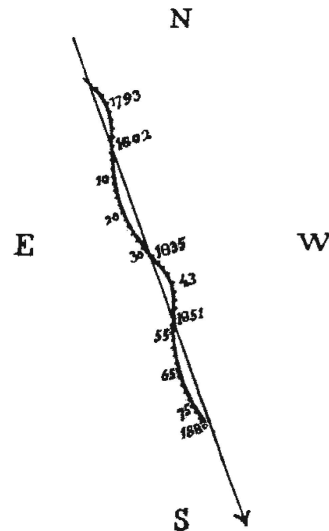


Открытие белых карликов



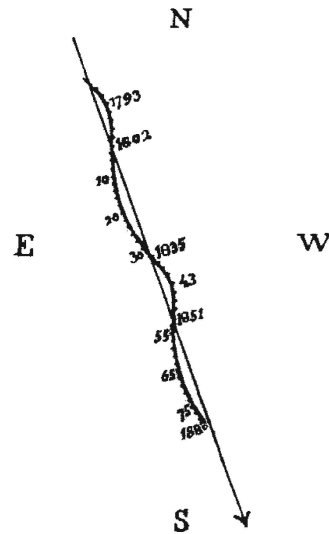
Уильям Гершель (1738-1822): 40 Эридана (1783, 1785)

Открытие белых карликов



Фридрих Бессель (1784-1846): Сириус В и Прокцион В (1844)

Открытие белых карликов



Фридрих Бессель (1784-1846): Сириус В и Процион В (1844)



Элвин Г. Кларк (1832-1897):
1862 (фото 1896)

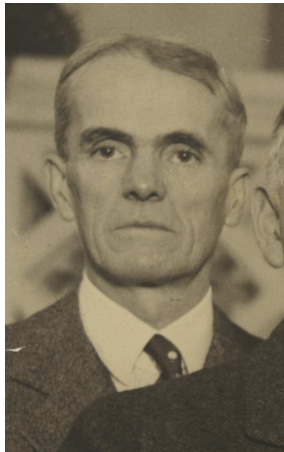


Джон М. Шеберле (1853-1924):
1896

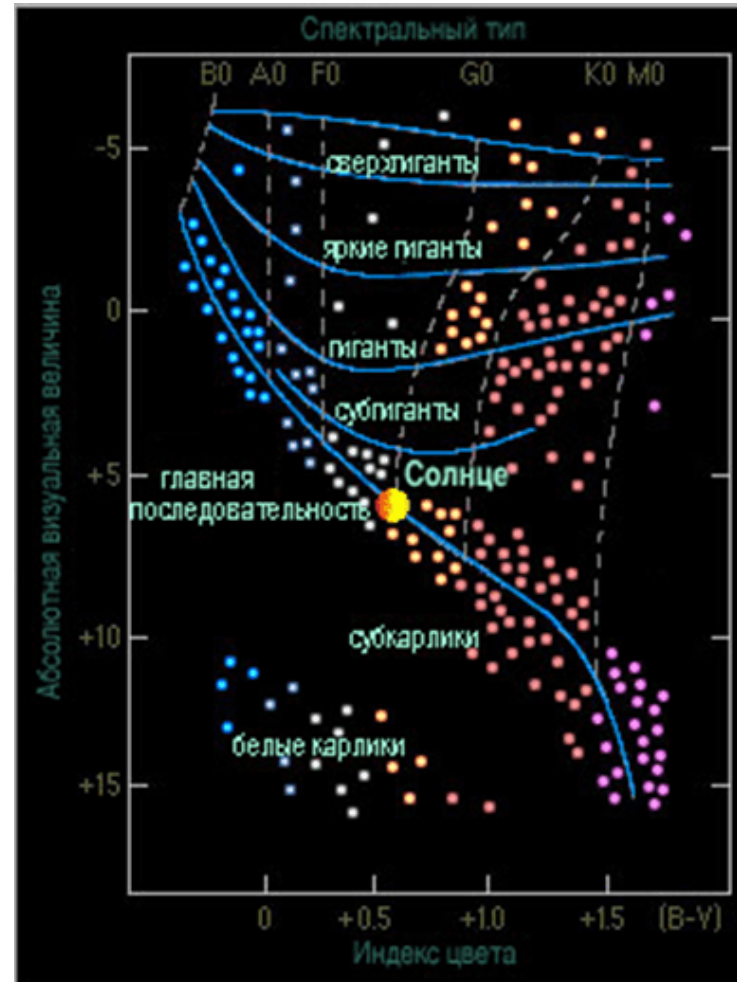
Парадокс плотности



Генри Рассел (1877-1957):
40 Эридана В (1910, 1914)



Уолтер Адамс (1876-1956):
1914 (Процион В), 1915 (Сириус В)



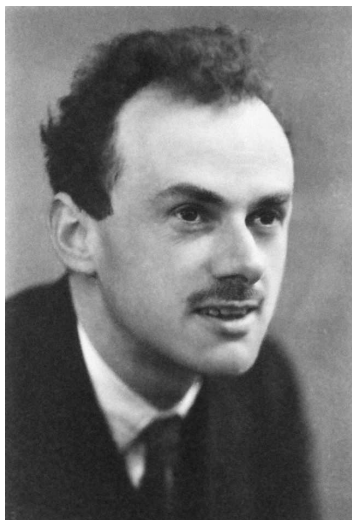
Разрешение парадокса плотности



Вольфганг Паули (1900-1958):
1924 (фото 1926)

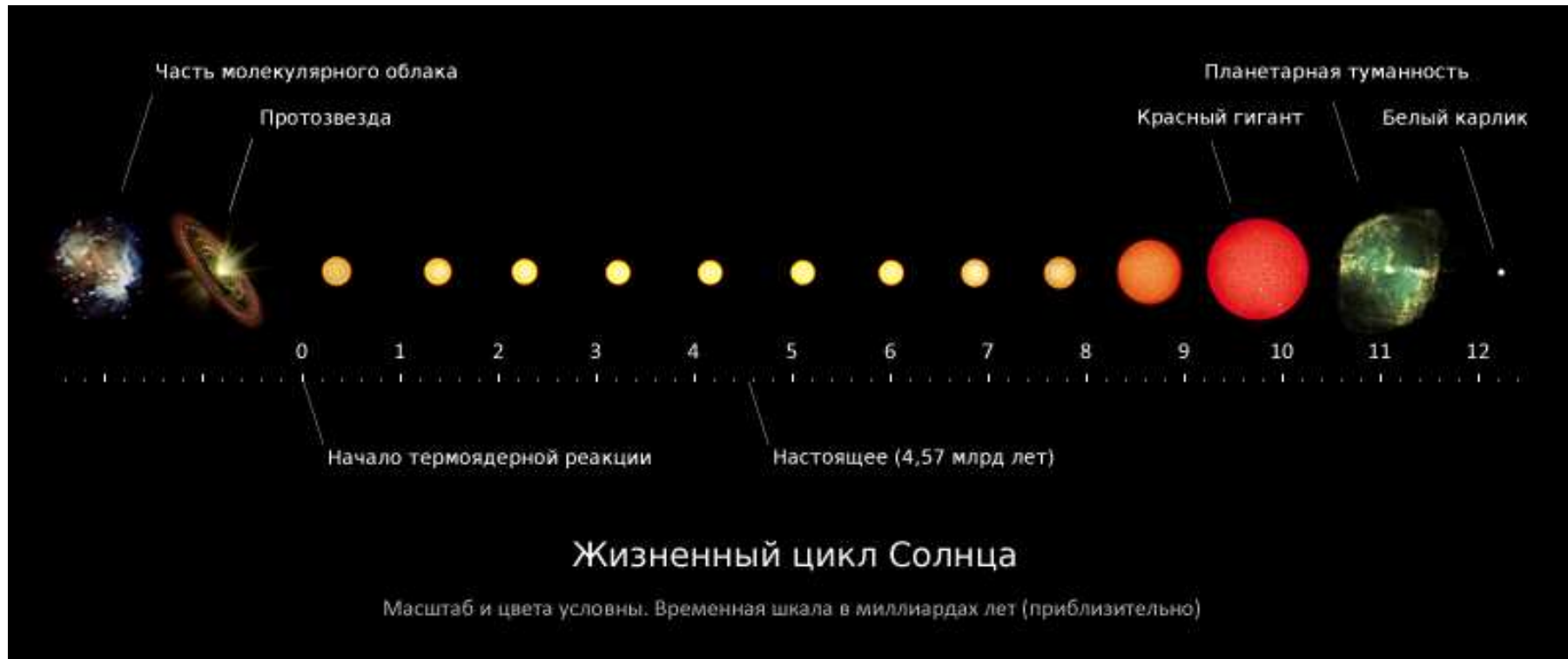


Энрико Ферми (1901-1954): 1925

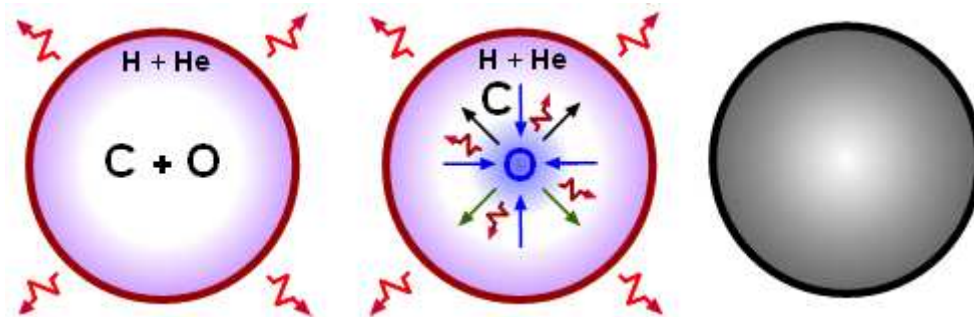


Поль Дирак (1902-1984); Ральф Фаулер (1889-1944): 1926

Происхождение белых карликов



Строение и эволюция белых карликов

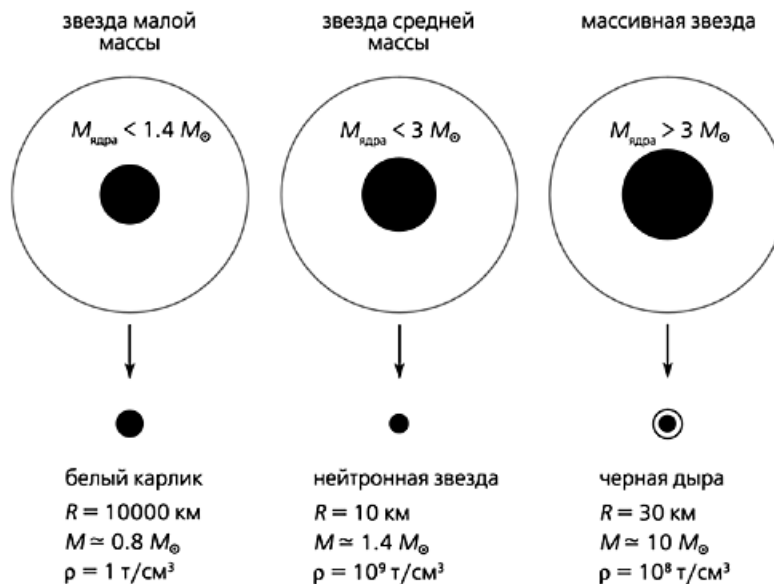


Предельная масса белых карликов

$$M_{\max} = 1,4 M_{\odot}$$



Я.И. Френкель (1894-1952):
1928



Эдмунд Стоунер (1899-1968):
1929, 1930



С. Чандрасекар (1910-1995):
1931



Л.Д. Ландау (1908-1968):
1932

Предсказание нейтронных звёзд

- ❖ Л.Д.Ландау (1931) – *предвидение* [L.D.Landau, “On the theory of stars,” *Physikalische Zs. Sowjetunion* 1 (1932) 285]: 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.”



В. Бааде
(1893–1960)



Ф. Цвикки
(1898–1974)

Предсказание
нейтронных звёзд в
изложении для
широкой публики
(*Los Angeles Times*,
19.01.1934)



Предсказание нейтронных звёзд

- ❖ Л.Д.Ландау (1931) – *предвидение* [L.D.Landau, “On the theory of stars,” *Physikalische Zs. Sowjetunion* **1** (1932) 285]: 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.”



Крабовидная туманность – остаток сверхновой звезды, вспыхнувшей 4 июля 1054.

Открыта в 1731 году британским астрономом-любителем Джоном Бэвисом (John Bavis).

Первый объект в каталоге Мессье (С. Messier, 1758).

Название «Краб» – с середины XIX в.

В 1921 году Лундмарк предположил, что туманность имеет отношение к событию 1054 года.

В 1942 году отождествлена как остаток SN 1054.

В 1968 году вблизи её центра открыт пульсар.

Теория нейтронных звёзд до их открытия

- T.E.Sterne (1933) – первое уравнение состояния ядерной материи; предсказание **нейтронизации** с ростом плотности
- F.Zwicky [“On collapsed neutron stars,” *Astrophys. J.* **88** (1938) 522]
 - 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 $M_{\max} = 0.71 M_{\odot} < M_{\max}(\text{WD}) = 1.44 M_{\odot}$).
- **Уравнения состояния плотной материи.**
 - J.A.Wheeler, В.К.Harrison, et al. (1950s). A.G.W.Cameron (1959): $M_{\max} \sim 2 M_{\odot}$.
 - Я.Б.Зельдович (1961) – максимально жёсткое уравнение состояния.
- **Сверхтекучесть.** БКИШ: J.Bardeen, L.N.Cooper, & J.R.Schrieffer (1957).
 - A.Bohr, В.Р.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.* $T \sim 10^6$ К => рентген => космические наблюдения.

➤ R.Giacconi et al. (1962): открытие Sco X-1 (Нобелевская премия 2002 года Giacconi “for outstanding contribution to X-ray astronomy”).

➤ И.С.Шкловский (1967): Sco X-1 – “a neutron star in a state of accretion” (**верно!** но раскритиковано Эластером Кэмероном и отвергнуто научным сообществом).

➤ *Плерионы (пульсарные туманности).*

S.Bowyer et al. (1964): рентгеновский источник в Крабовидной туманности $\sim 10^{13}$ км (=> не нейтронная звезда).

➤ Н.С.Кардашёв (1964), Ф.Расини (1967) – модели туманностей вокруг быстро вращающихся нейтронных звёзд с сильными магнитными полями.

➤ Расини (1967), Gold (1968): *модель пульсара.*



Риккардо Джаккони
(р.1931)



И.С. Шкловский
(1916-1985)



Н.С. Кардашёв (р.1932)



Франко Пачини
(1939-2012)



Джоселин Белл у
радиотелескопа в Кембридже,
на котором в 1967–68 гг.
были открыты пульсары
(*Jocelyn Bell Burnell*)

6.08 – 28.11.1967: Jocelyn Bell, Anthony Hewish

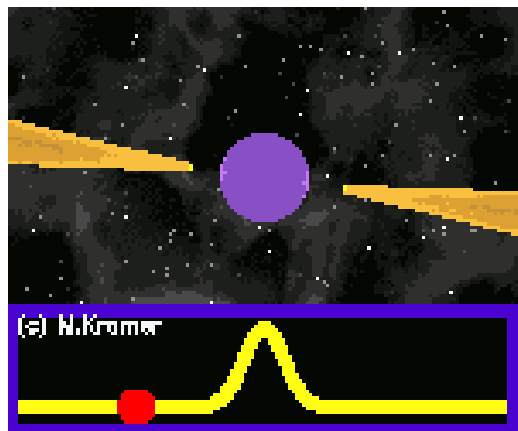
– открытие пульсаров

(Нобелевская премия 1974 – Hewish)

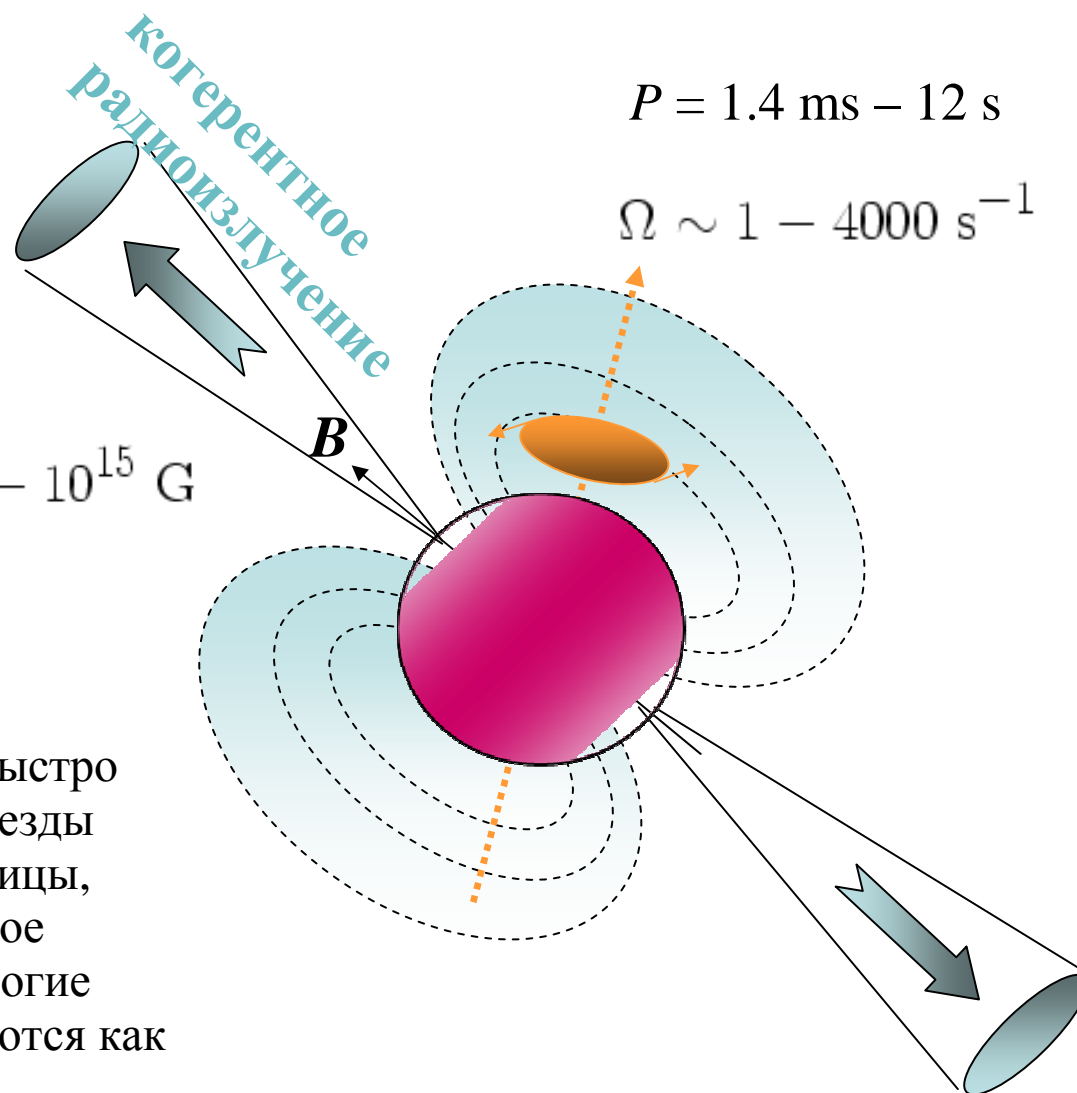
К 1969 году стало ясно, что пульсары – это быстро вращающиеся нейтронные звёзды с сильными магнитными полями (T.Gold, 1968).

Нейтронные звёзды из гипотезы стали реальностью.

Нейтронные звёзды – звёзды с самым сильным магнитным полем

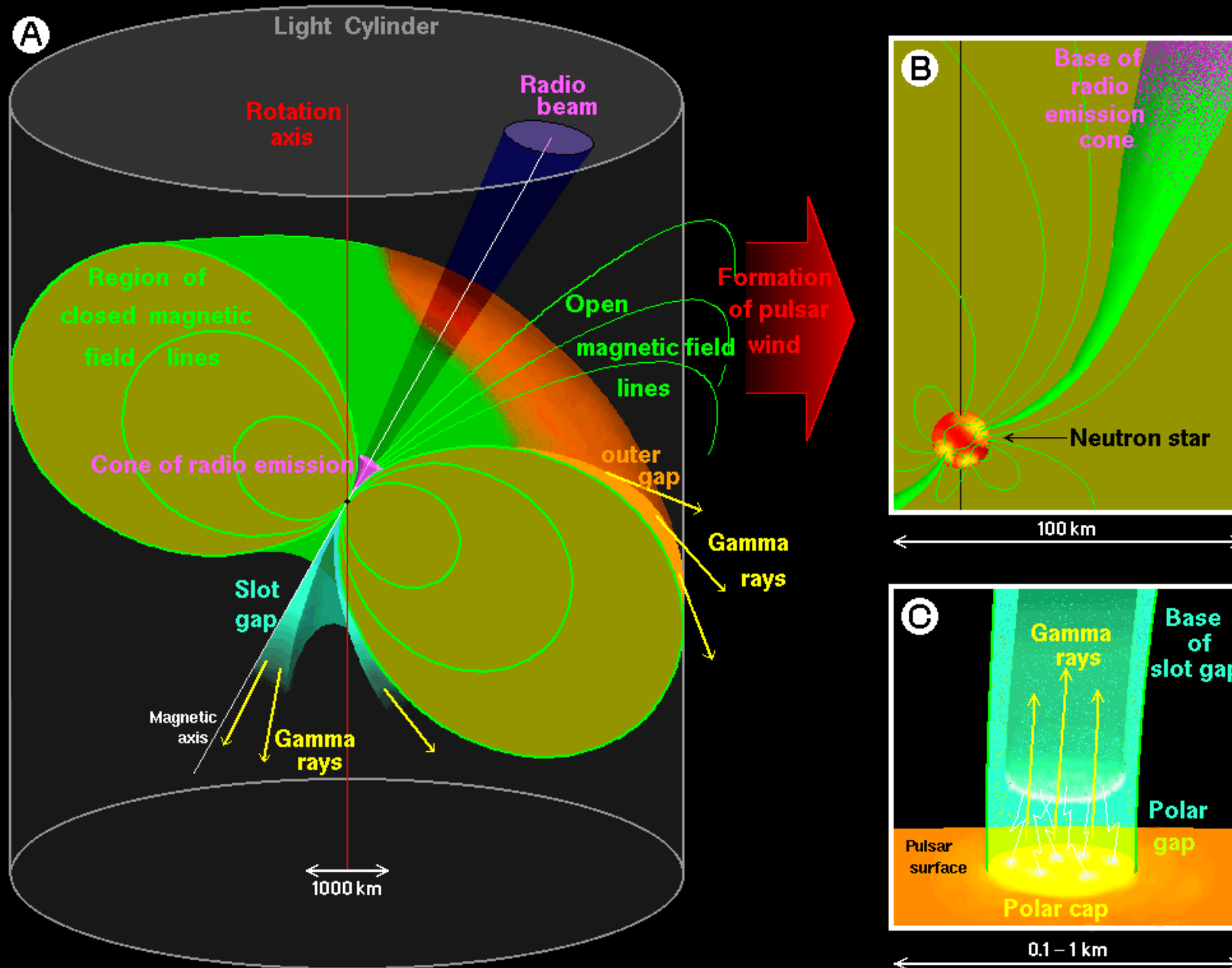


$$B \sim 10^8 - \underline{10^{12} - 10^{14}} - 10^{15} \text{ G}$$



В сильном магнитном поле быстро вращающейся нейтронной звезды ускоряются заряженные частицы, создавая мощное направленное радиоизлучение. Поэтому многие нейтронные звёзды наблюдаются как *пульсары*.

Многообразие процессов в магнитосфере пульсара



Влияние сильного магнитного поля на атомы

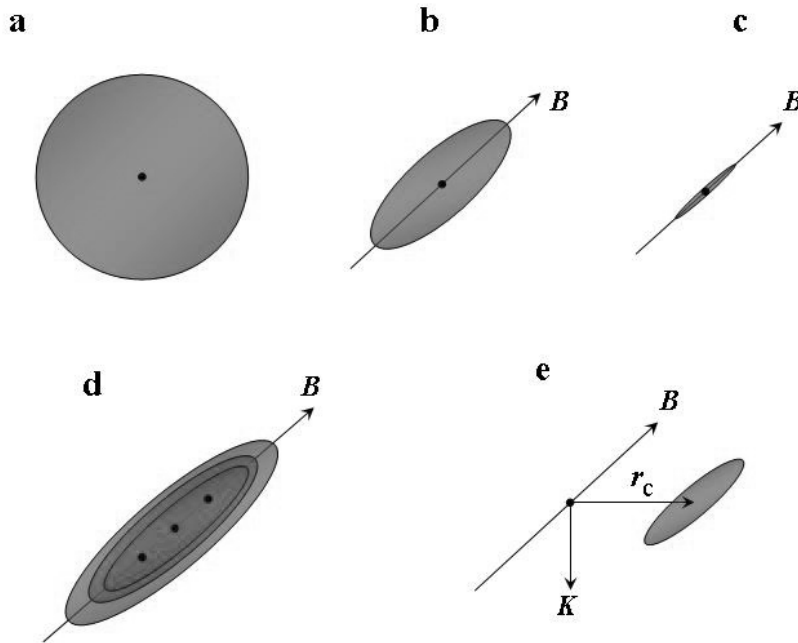


Иллюстрация влияния сильного магнитного поля на атомы.

a–c: атом H в основном состоянии

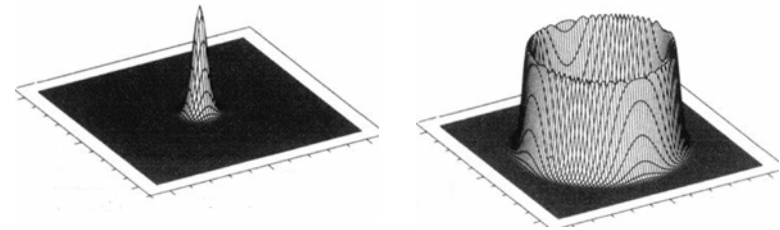
(**a:** $B \ll 10^9$ Гс, **b:** $B \sim 10^{10}$ Гс, **c:** $B \sim 10^{12}$ Гс).

d: Поле стабилизирует молекулярные цепочки.

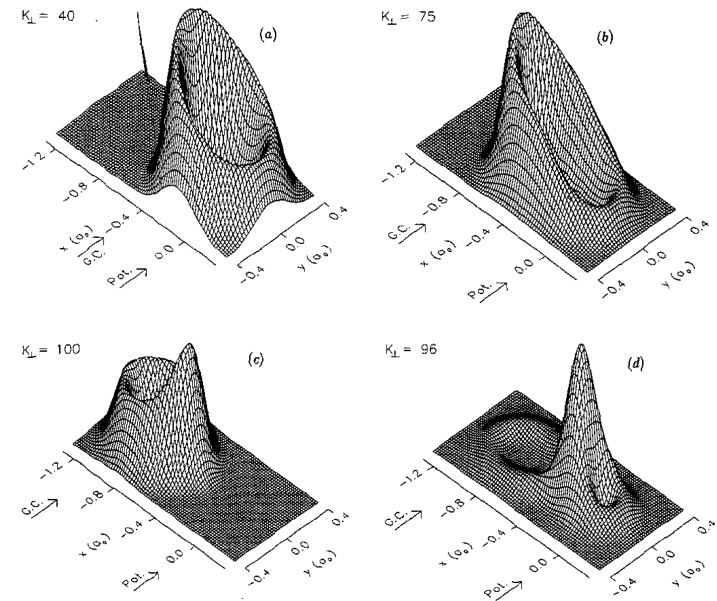
e: При движении поперёк магнитного поля возникает асимметрия.

основное состояние

возбужденное состояние

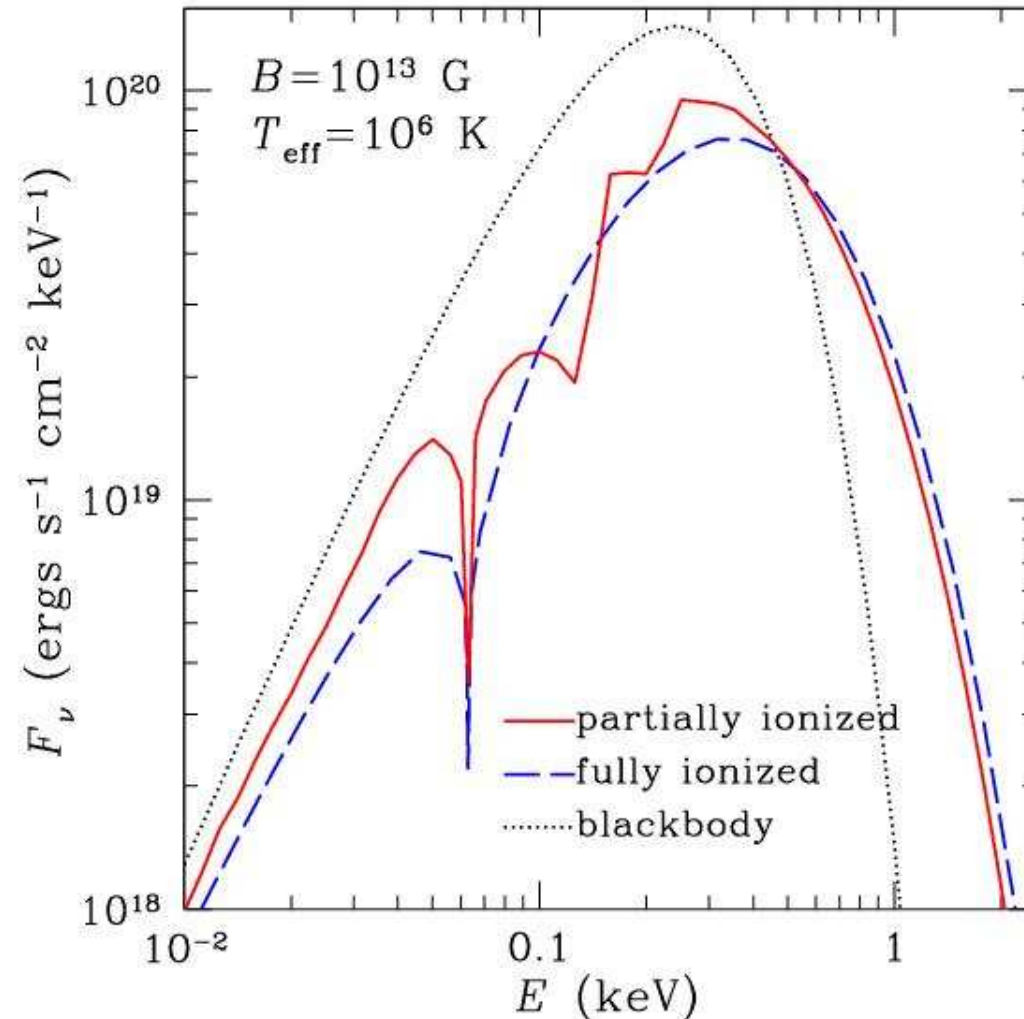


возбужденное состояние ($m=-5$) + движение



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:
спектр выходящего теплового излучения*



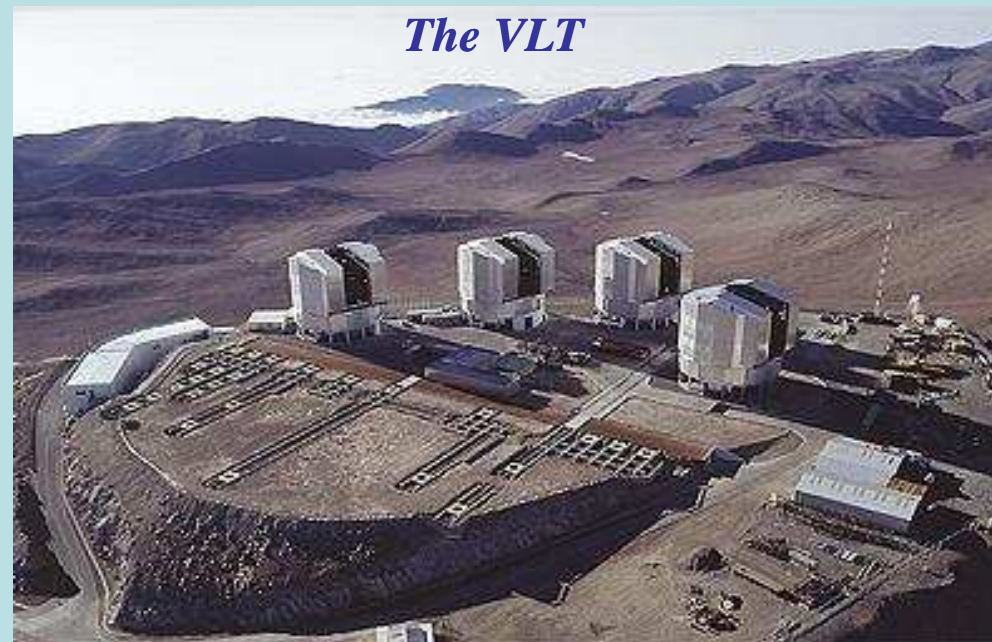
Планковский спектр (точки), модель полностью ионизованной атмосферы (штрихи) и частично ионизованной атмосферы (сплошная кривая)
(поле перпендикулярно к поверхности, поток излучения усреднён по углу)

Сравнение теории с наблюдениями

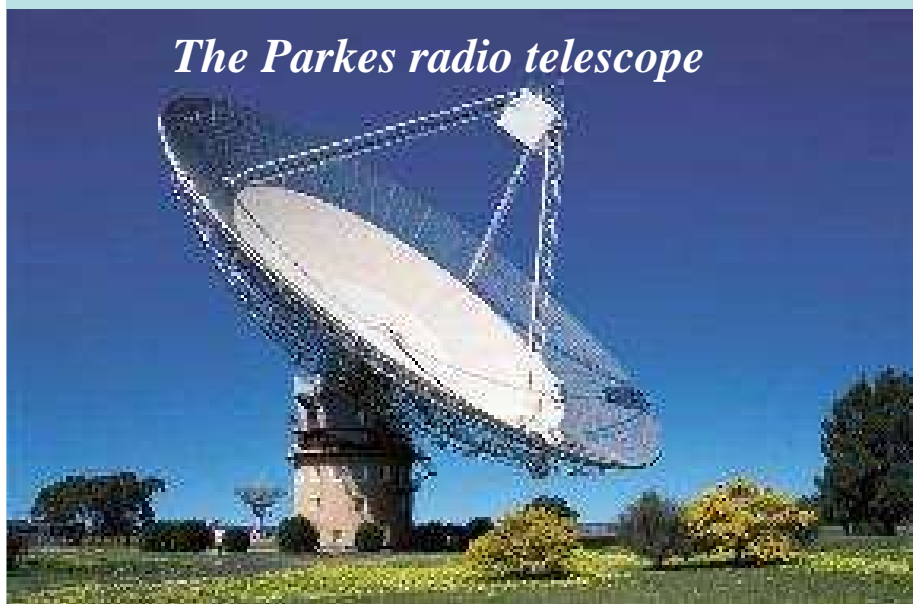
Наземные оптические и радиотелескопы



The Arecibo radio telescope



The VLT



The Parkes radio telescope



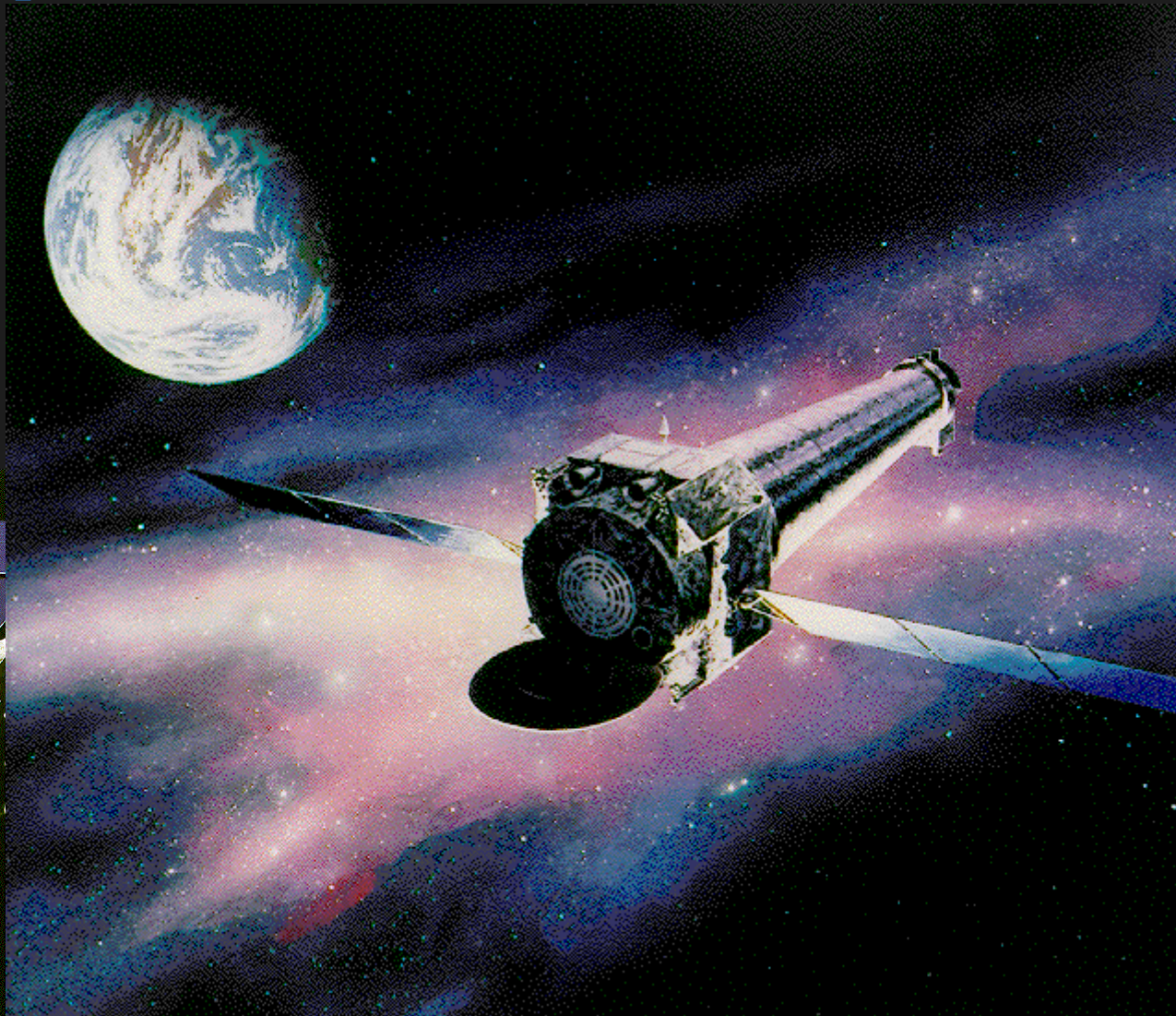
The VLA

Сравнение теории с наблюдениями

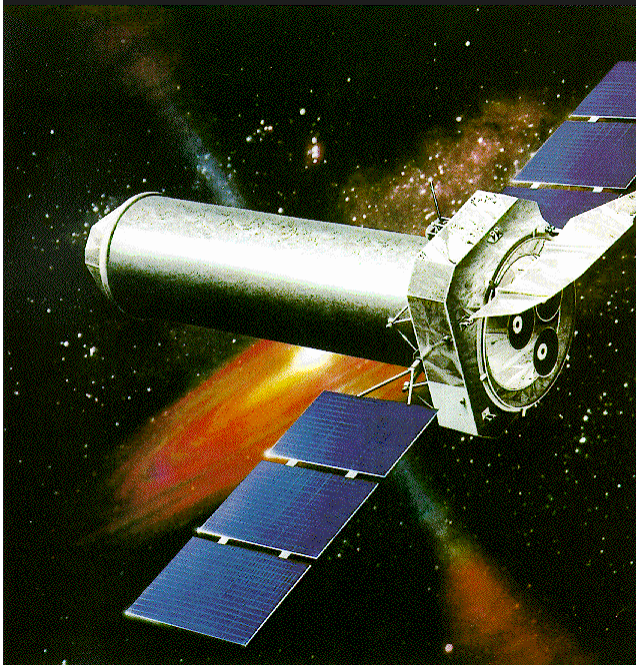
Оптические и рентгеновские телескопы в космосе



Hubble Space Telescope

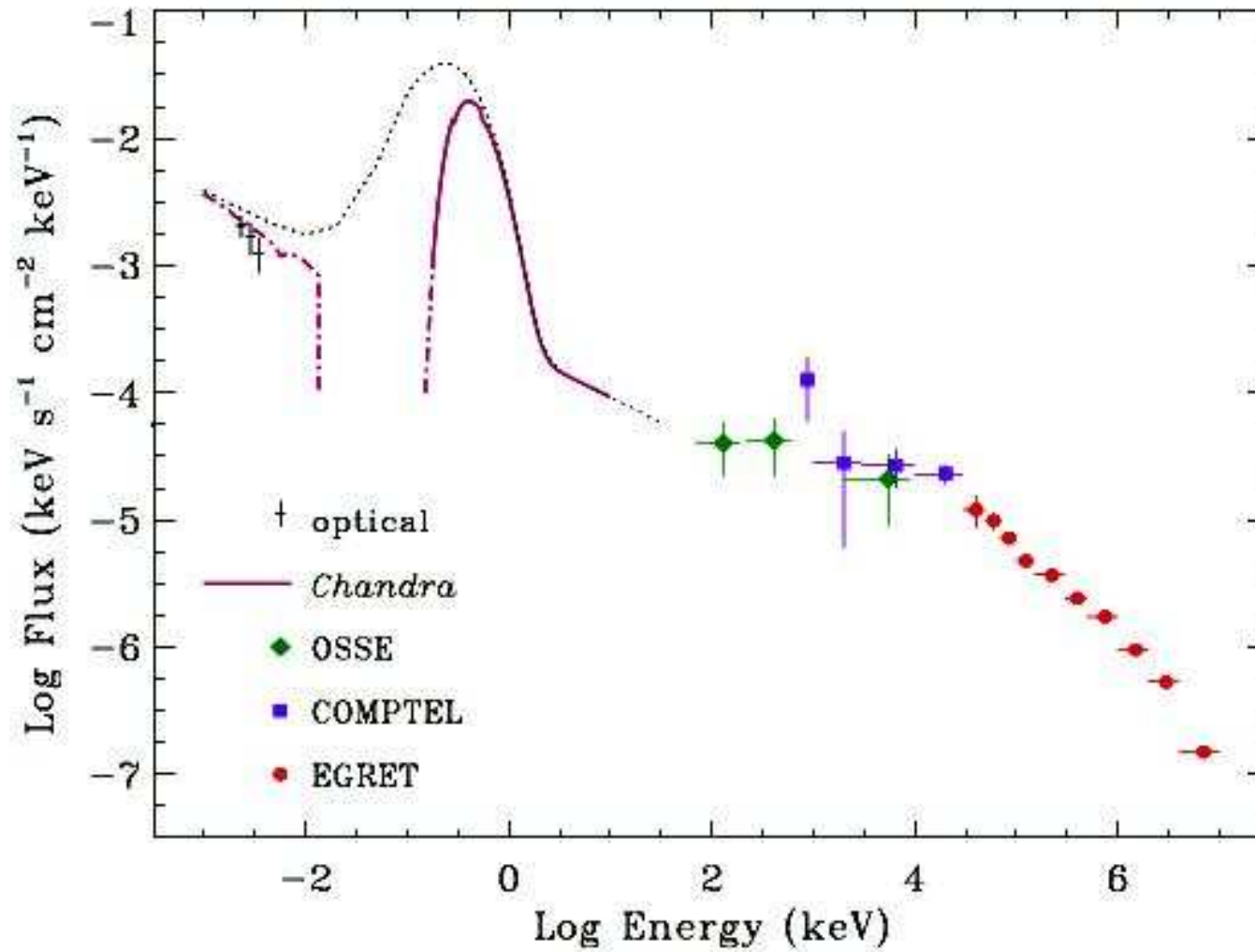


Chandra



XMM-Newton

Пример многоволнового спектра пульсара



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

Терромагнитная эволюция нейтронных звёзд

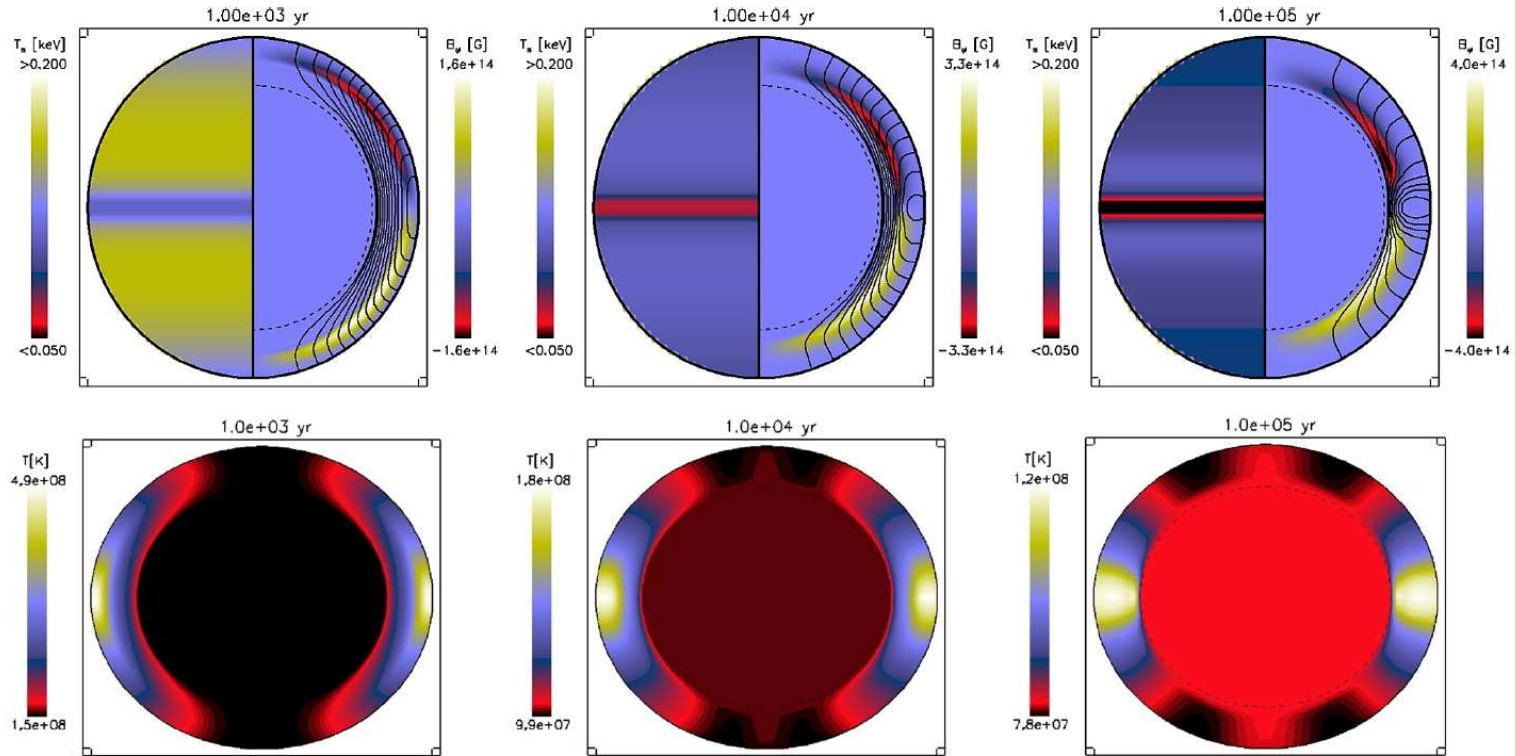
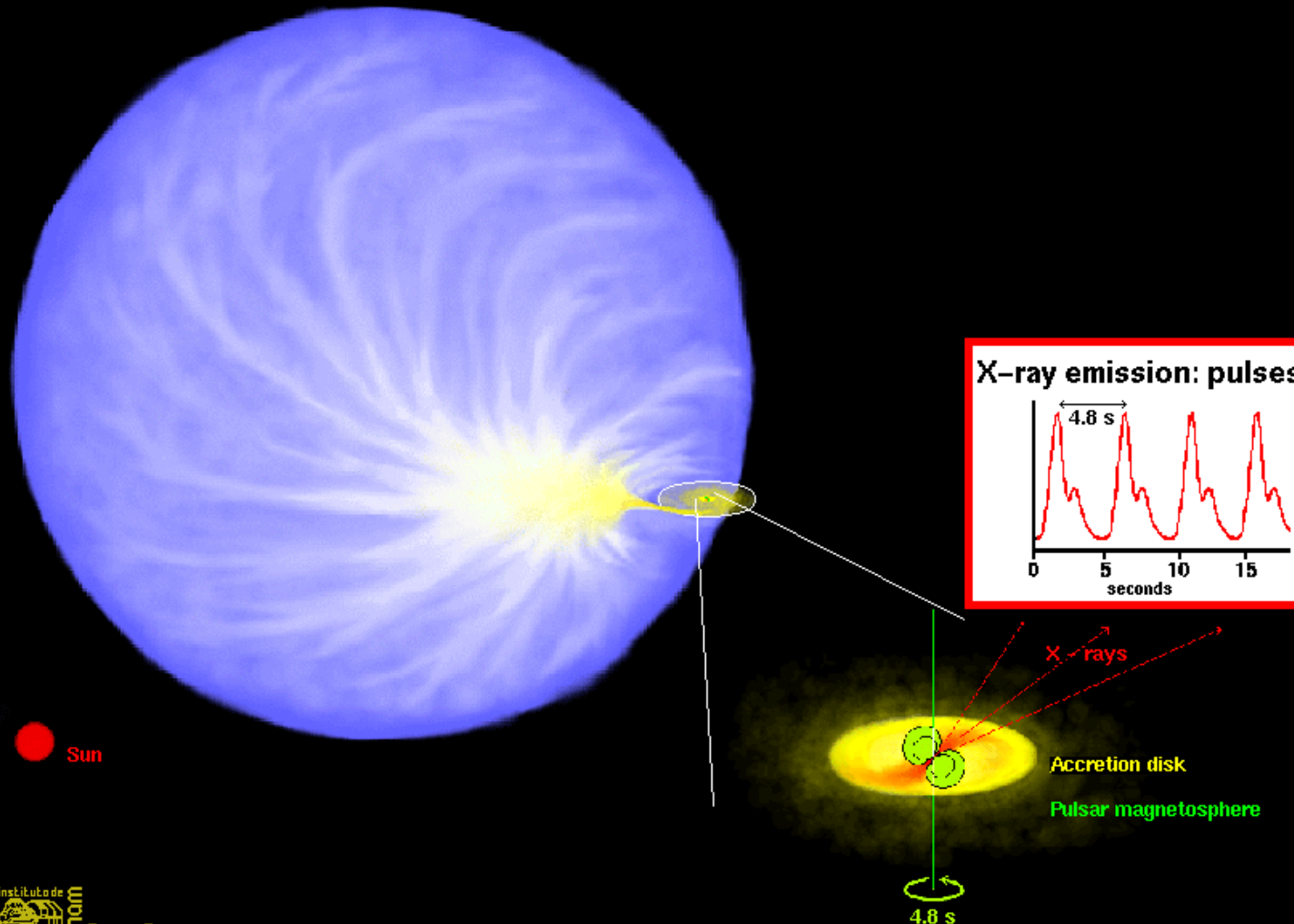


Figure 3. Snapshots of the evolution of **model A14** at 10^3 , 10^4 , 10^5 yr, from left to right. Top panels: the left hemisphere shows in colour scale the surface temperature, while the right hemisphere displays the magnetic configuration in the crust, whose thickness has been enlarged by a factor of 4 for visualization purposes. Black lines are the poloidal magnetic field lines, while colour scale indicates the toroidal magnetic field intensity (yellow: positive, red: negative). Bottom panels: temperature map inside the star.

Viganò *et al.* “Unifying the observational diversity of isolated neutron stars via magneto-thermal evolution models”:
Mon. Not. R. astron. Soc. 434, 123 (2013)

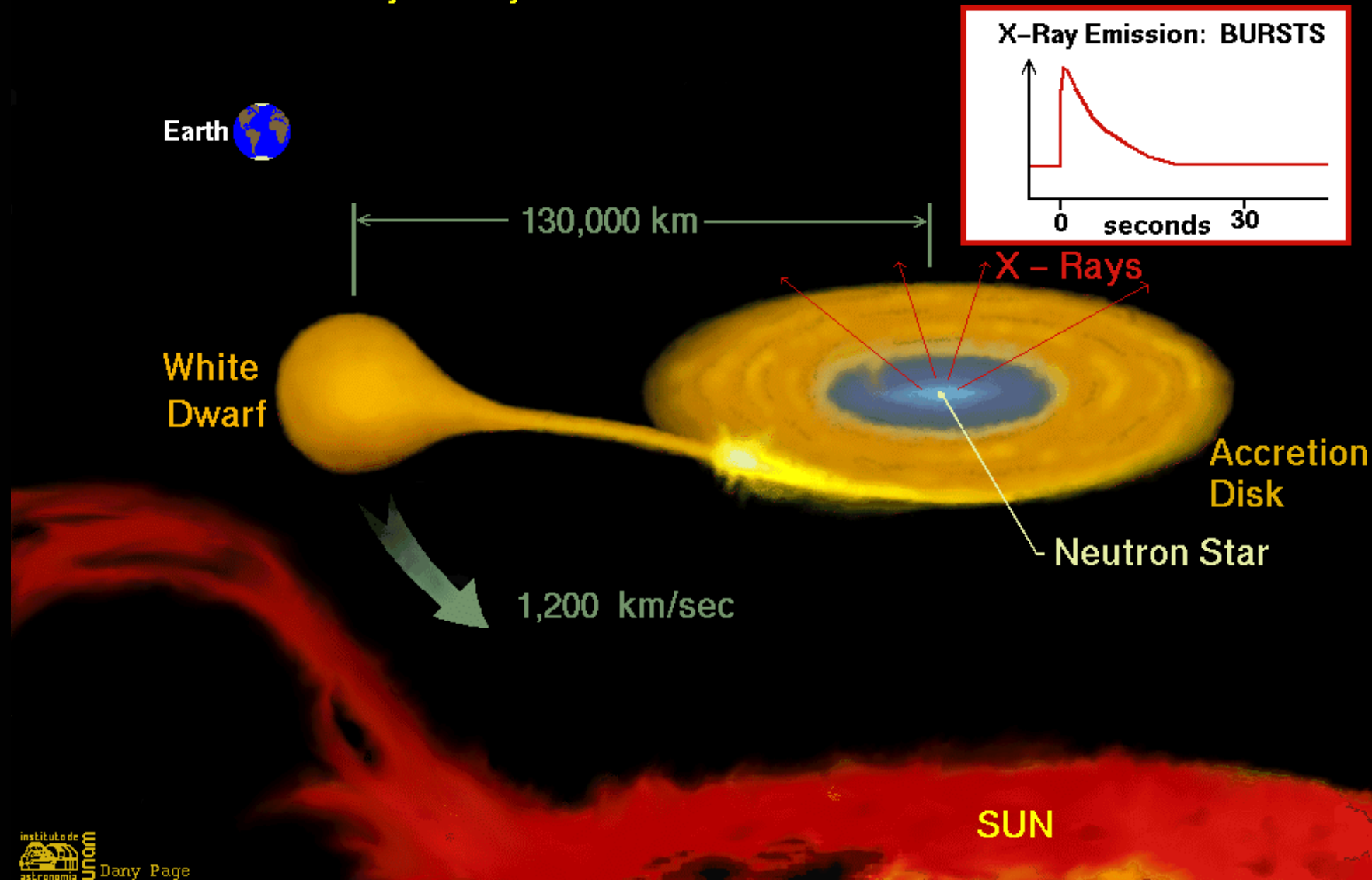
Нейтронные звёзды в двойных системах – рентгеновские двойные

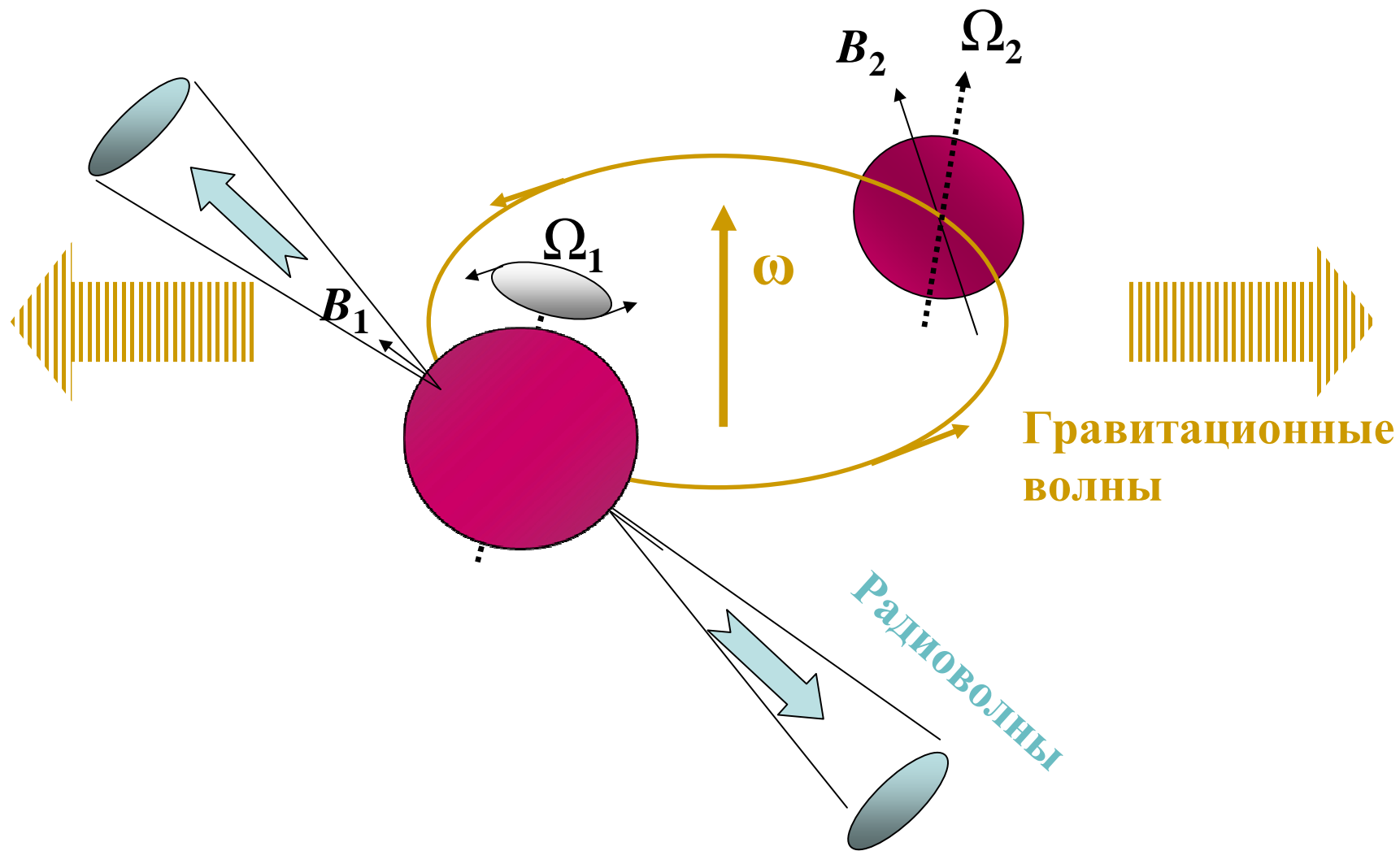
CENTAURUS X-3: A HIGH MASS X-RAY BINARY



Нейтронные звёзды в двойных системах – рентгеновские двойные

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





Двойные нейтронные звёзды излучают **гравитационные волны** (теряя угловой момент) и испытывают релятивистскую прецессию в согласии с общей теорией относительности Эйнштейна.

Кварковые звёзды



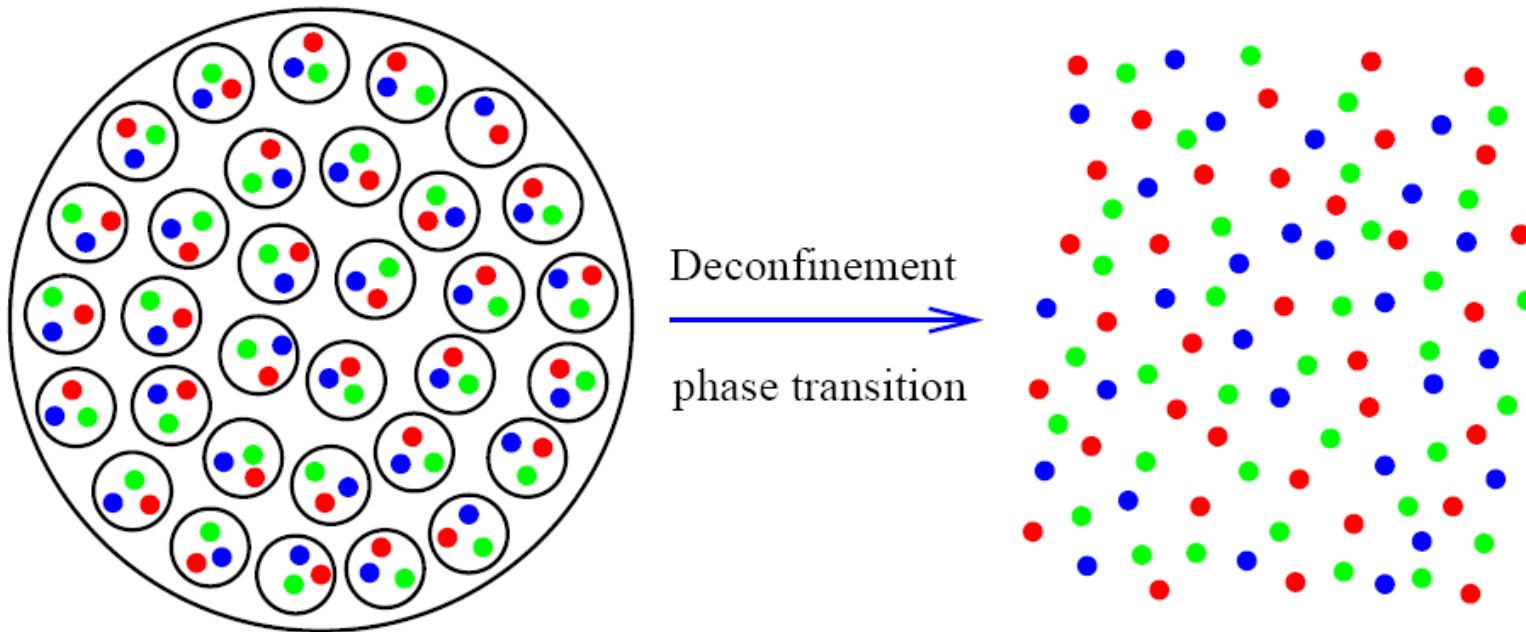
Д. Д. Иваненко (1904-1994)

Кафедра теор. физики МГУ (1967 год)



Д. Ф. Курдгеладзе

Деконфайнмент



Кварковые звёзды в сравнении с нейтронными

