

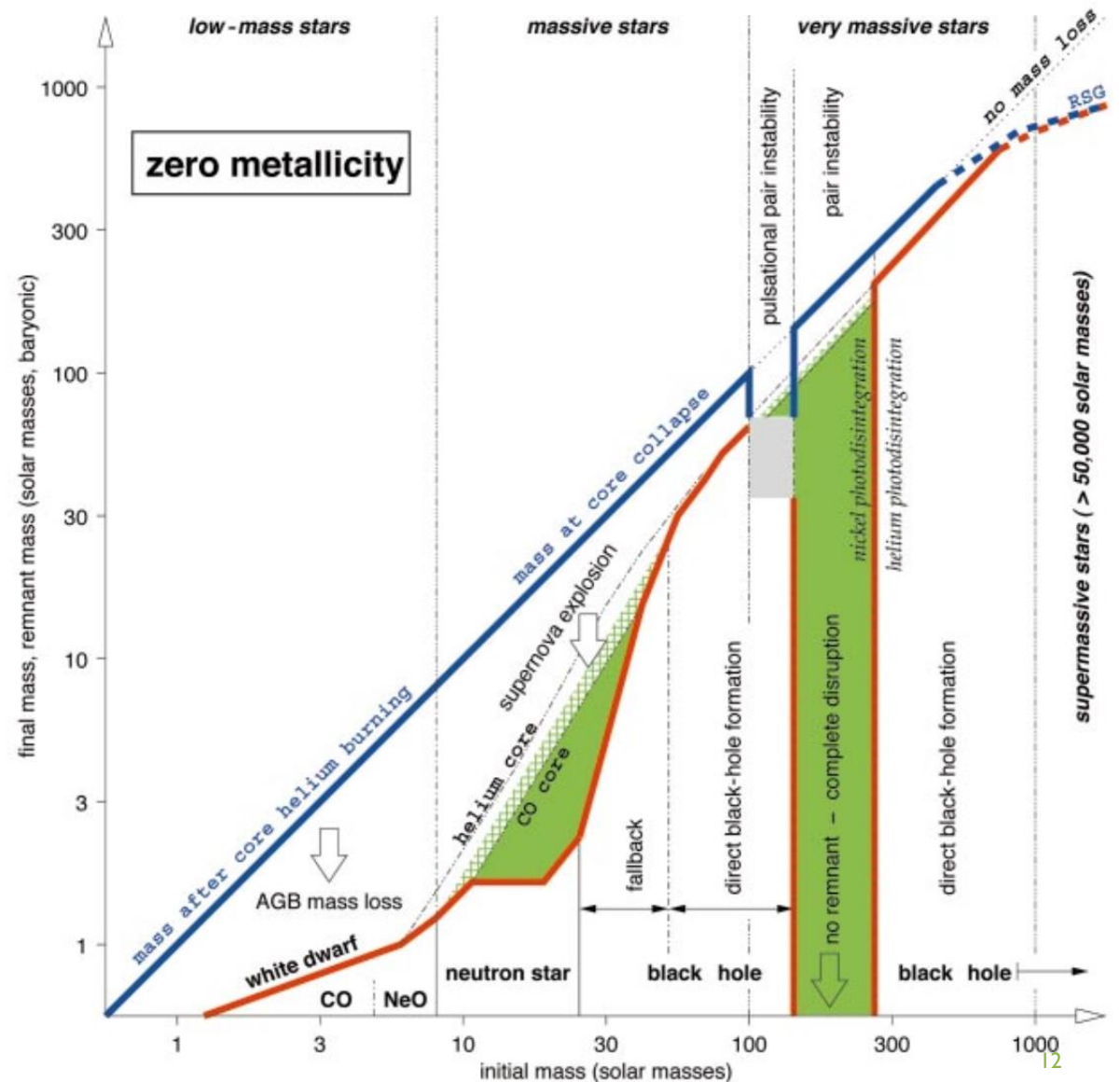
# ЛЕКЦИЯ 7: КОМПАКТНЫЕ ОСТАТКИ ЗВЁЗДНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВШЭ 2022/2023. БАКАЛАВРЫ, 4-Й МОДУЛЬ.

АНТОН БИРЮКОВ (АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА И ВШЭ), К.Ф.-М.Н

# КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

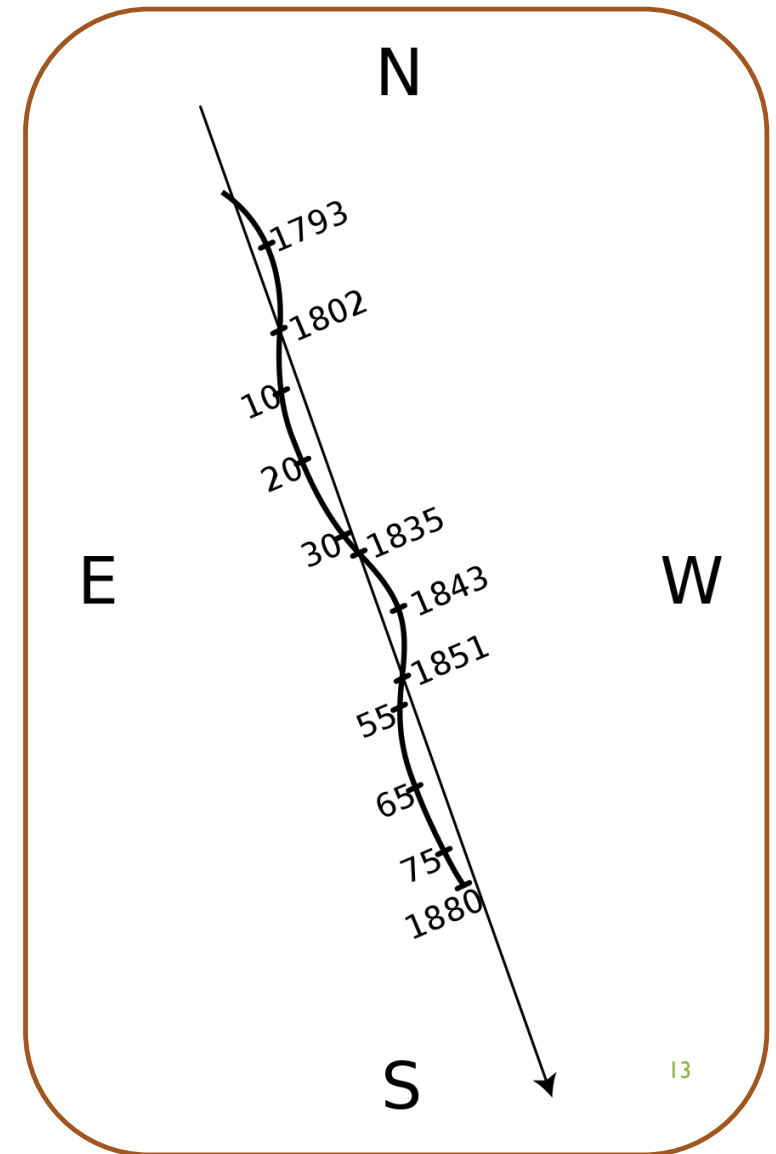
- **Белые карлики** – остатки звёзд с начальной массой до  $\sim 12M_{\odot}$ . Результат потери оболочки.
- **Нейтронные звёзды** – остатки звёзд с начальной массой  $\sim 8 \dots 30M_{\odot}$ . Образуются в ходе вспышки сверхновой SN Ib/c или II
- **Чёрные дыры** остаются от звёзд с начальной массой  $25M_{\odot} +$ . Или в ходе вспышки сверхновой (SLSN, Hypernova) или в ходе тихого коллапса.
- Всего в Галактике  $\sim 10^{10}$  компактных объектов. Из них 1% НЗ и 0.01% ЧД. Всего в Галактике  $\sim 400$  млрд. звёзд.



# БЕЛЫЕ КАРЛИКИ: НЕМНОГО ИСТОРИИ

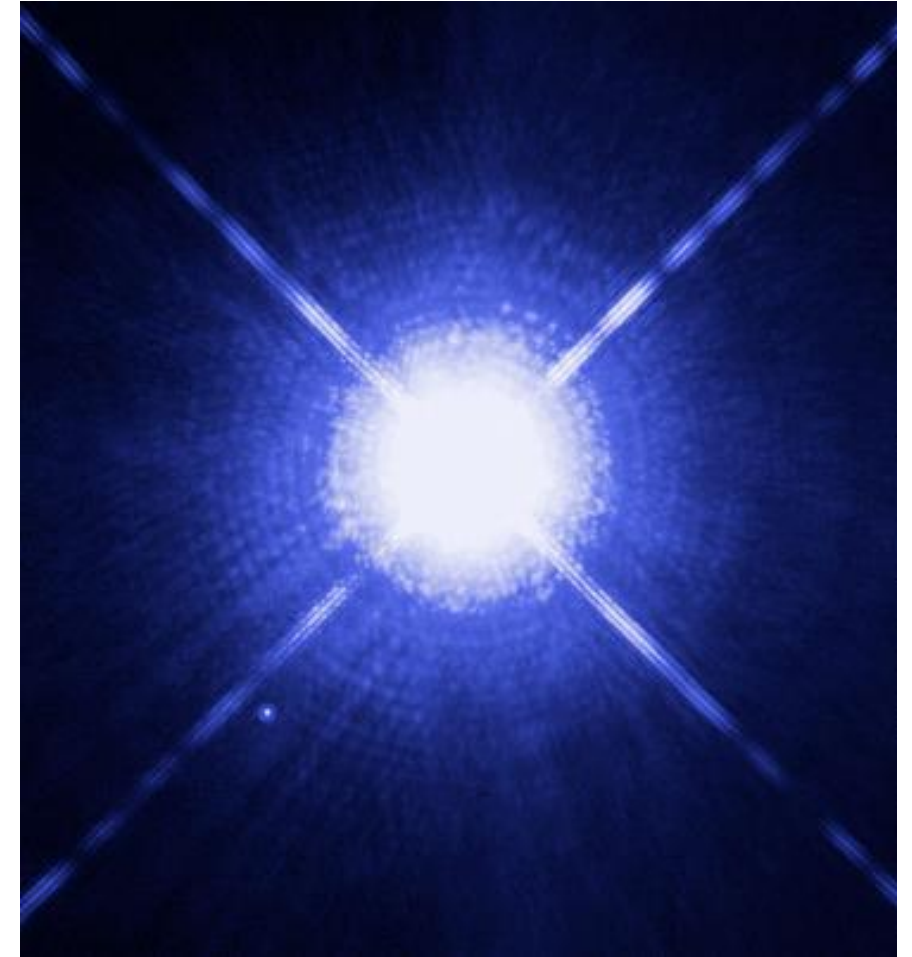
- 1844 г. – Фридрих Бессель предсказывает наличие невидимых массивных звёзд звезду рядом с Сириусом и Проционом исходя из их собственного движения.
- 1862 г. – Элван Кларк случайно обнаруживает Sirius B. Его светимость  $\sim 0.05L_{\odot}$ , в 1896 г. подобный объект обнаруживается и у Проциона.
- 1910 г. – 40 Eridani B относят к классу A0. И соответственно, при данной светимости имеет очень маленькие размеры.
- 1915 г. – Уолтер Адамс, получает спектр Sirius B. Температура оказывается 25 000 K
- 1922 г. – Виллем Лейтен вводит термин “белый карлик”

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



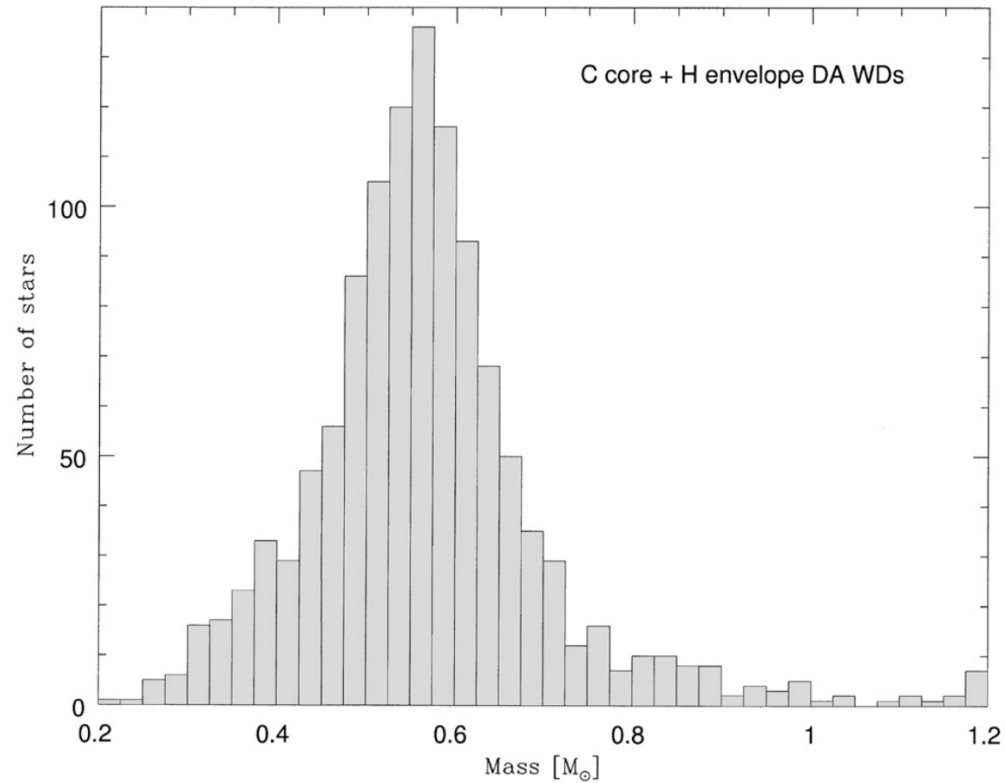
# БЕЛЫЕ КАРЛИКИ: НЕМНОГО ИСТОРИИ

- 1926 г. – Ральф Фаулер выдвигает идею о стационарности БК за счёт вырожденного фермионного газа (зная соотношение масса-радиус).
- 1930-е гг. – Андерсон, Стоунер, Френкель, Ландау, Чандрасекар: уравнение состояния вырожденного ферми-газа и максимальная масса БК.
- Сегодня, самый большой каталог белых карликов и кандидатов в эти объекты насчитывает 73000+ объектов (по данным обсерватории Gaia, 2018)
- Всего в галактике Млечный Путь предположительно несколько десятков миллиардов белых карликов.

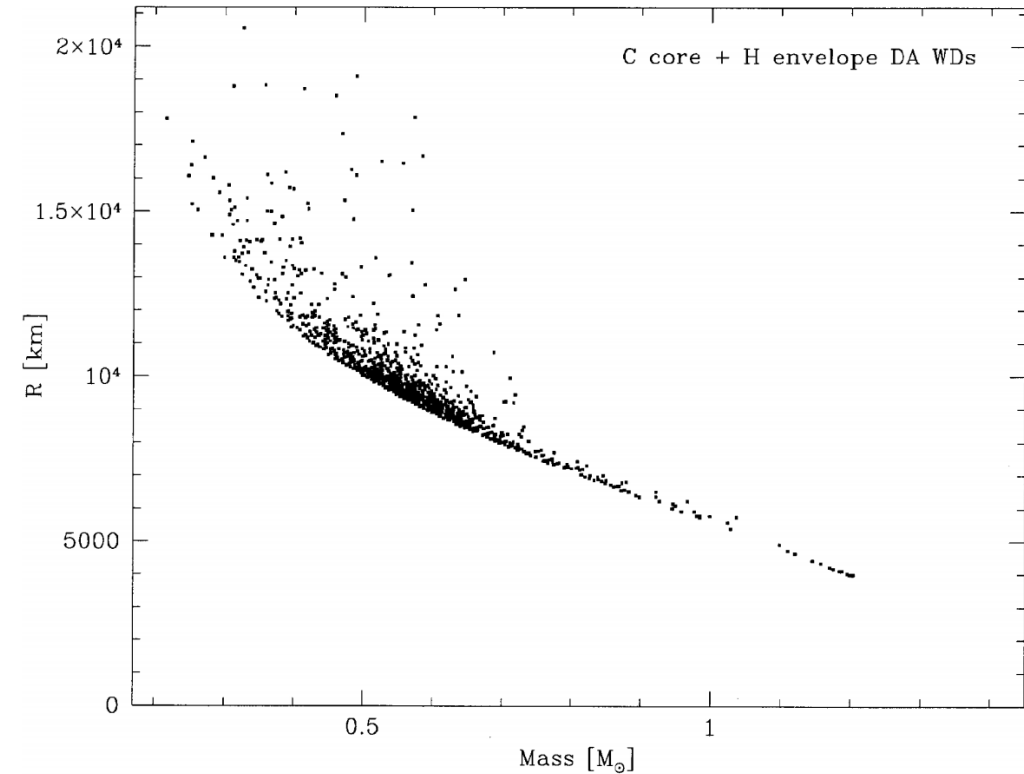


# МАССЫ И РАДИУСЫ БК

Madej et al., 2004, A&A, 419, L5

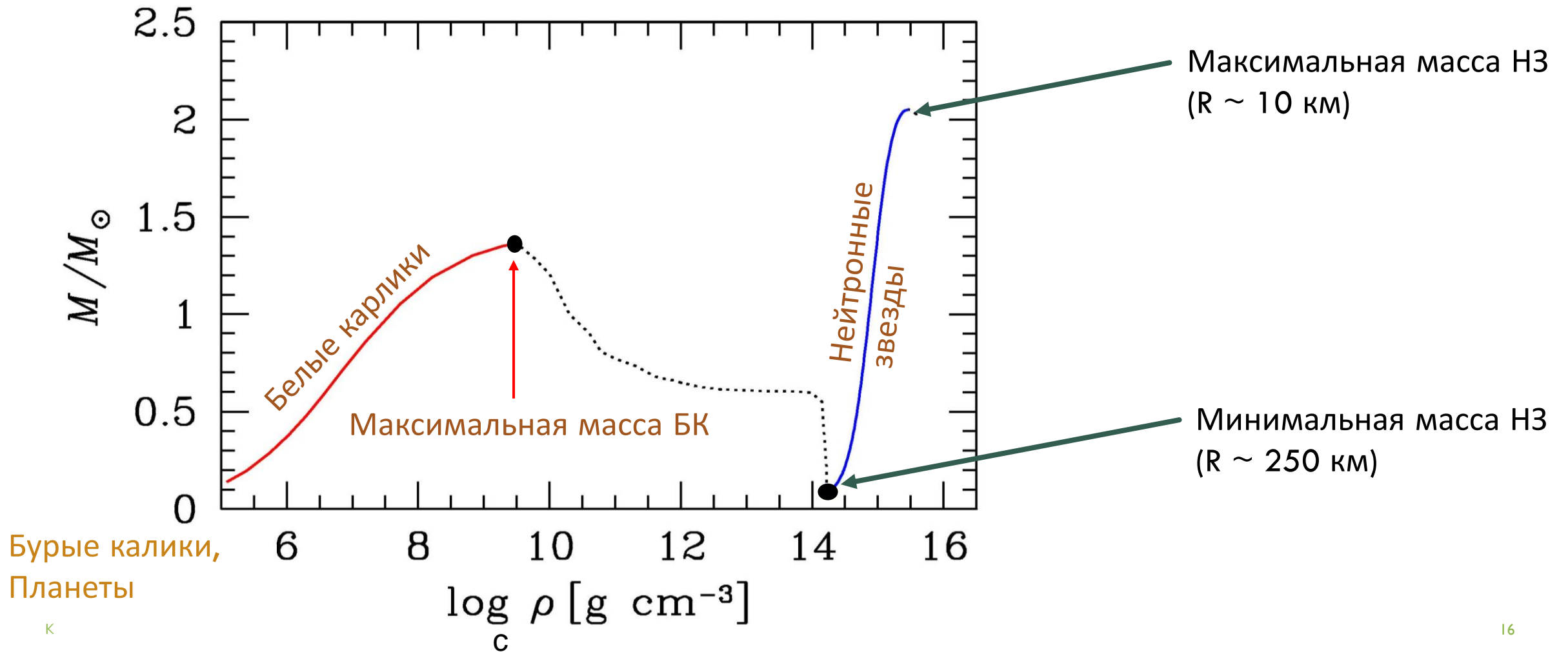


**Fig. 1.** Mass distribution of the 1175 DA white dwarfs of the SDSS DR1 sample with  $T_{\text{eff}} \geq 12\,000$  K. The peak mass is located at  $M = 0.562 M_{\odot}$ . Individual stars were grouped in bins of  $0.025 M_{\odot}$  width.



**Fig. 2.** Mass-radius relation for 1175 hot white dwarfs of the same sample. The relation does not extend to masses  $M$  higher than  $1.2 M_{\odot}$ , or rather to the highest surface gravities  $\log g > 9.0$ .

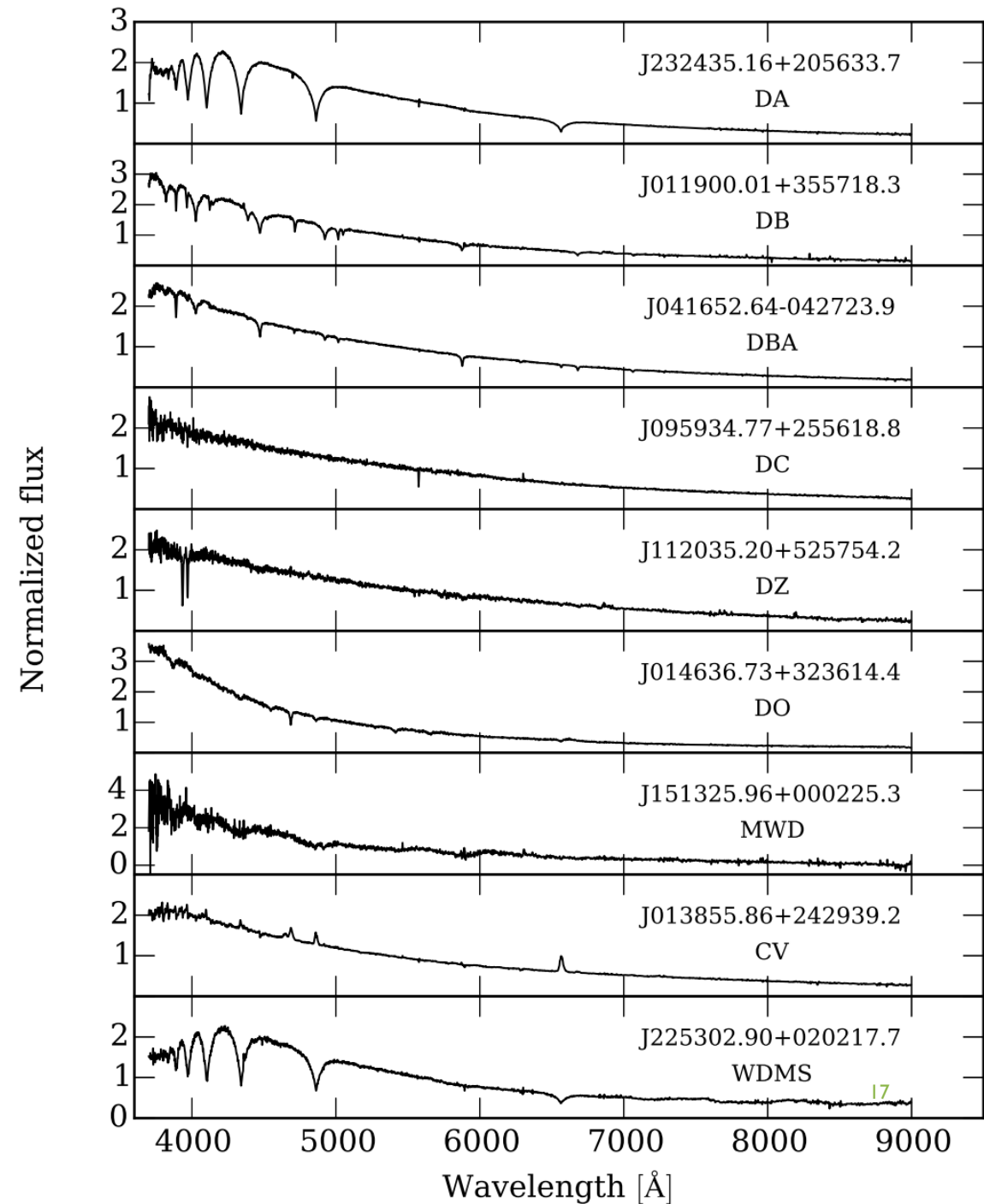
# УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ БК



# НАБЛЮДЕНИЯ БК

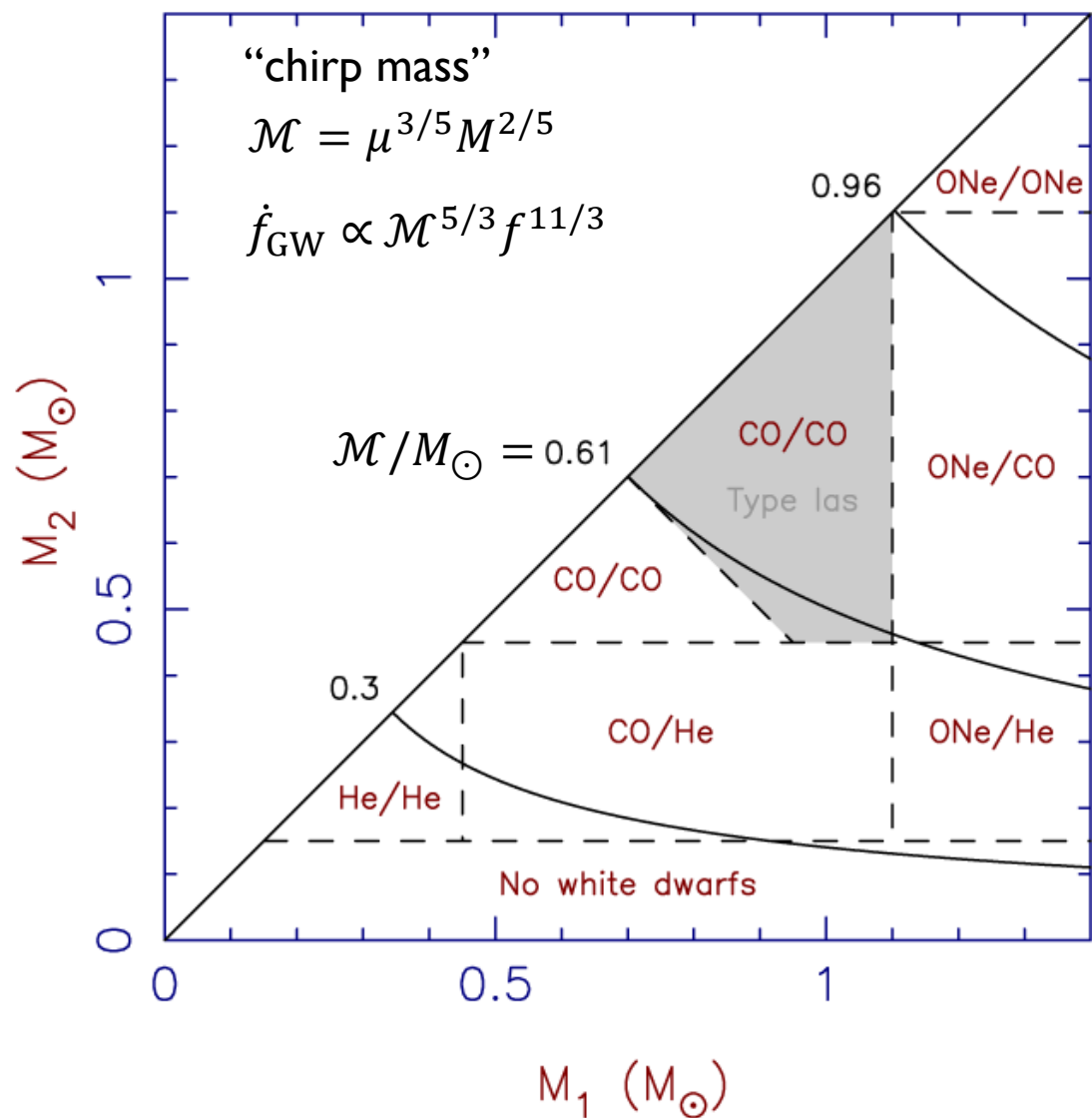
Class	$T_{\text{eff}}$ Range (K)	Spectral Characteristics
H-rich		
DA	6,000–100,000	Balmer lines only, no He or metal features
DAO	>45,000	Balmer lines and weak He II features
He-rich		
DO	45,000–100,000	Strong He II lines, some He I present
DB	12,000–30,000	He I lines, no H or metals*
DBA	12,000–30,000	He I lines and weak Balmer lines present
Cool WDs		
DQ	6,000–12,000; 18,000–24,000**	C features (atomic or molecular)
DZ	<6,000 <sup>†</sup> ; 10,000 <sup>‡</sup>	Metal lines only, no H or He
DC	<6,000 <sup>†</sup> ; 10,000 <sup>‡</sup>	Featureless continuum (no lines deeper than 5%)
Additional	Secondary Feature	
P	Magnetic with polarisation	
H	Magnetic with no detectable polarisation	
E	Emission lines present	
V	Variable	
d	Debris Disc	

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

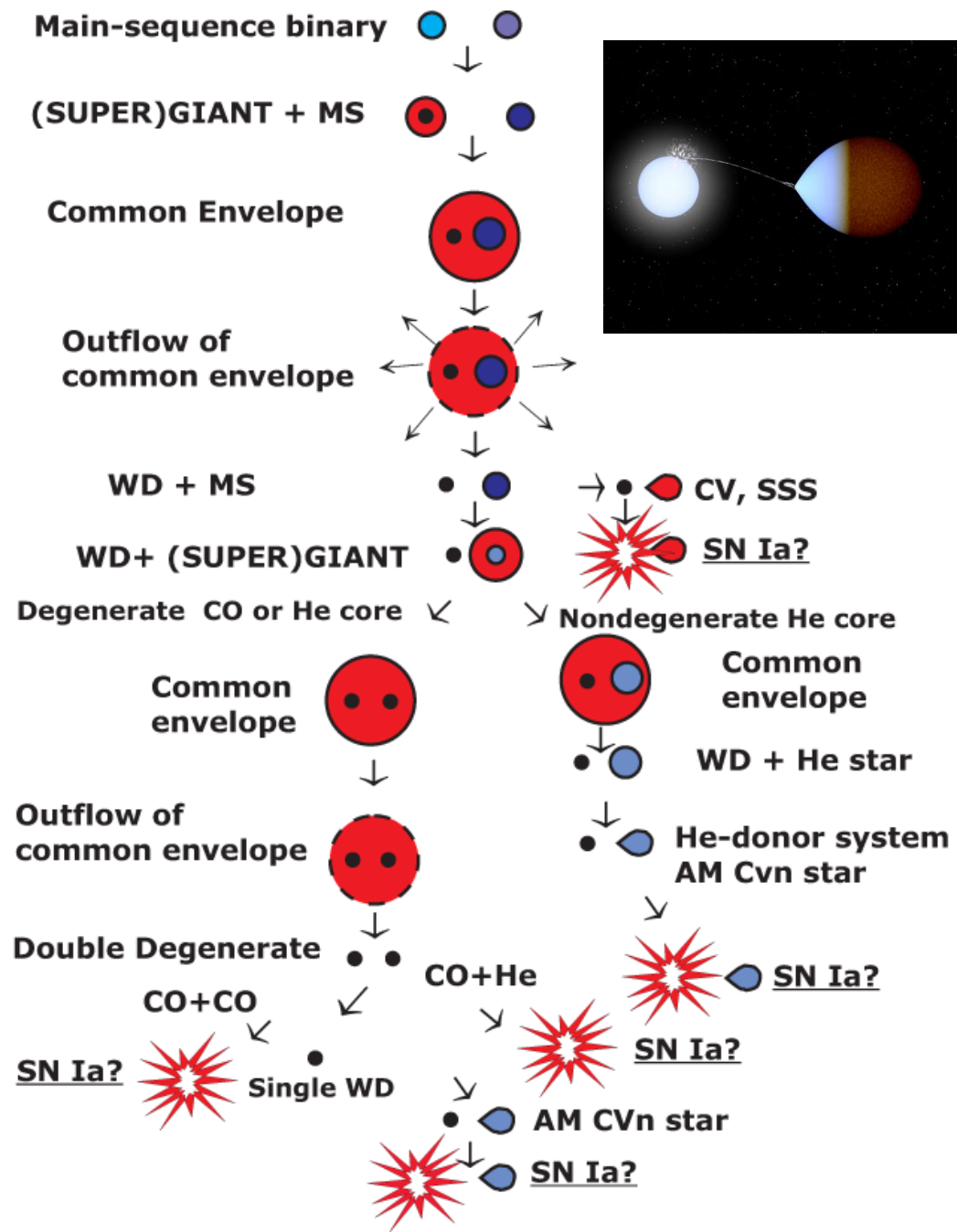




<https://www.emis.de/journals/LRG/Articles/lrr-2014-3/articlese7.html>

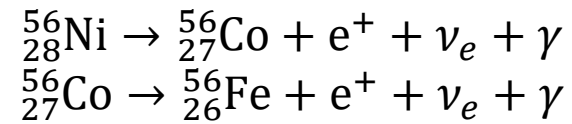


## CLOSE BINARIES



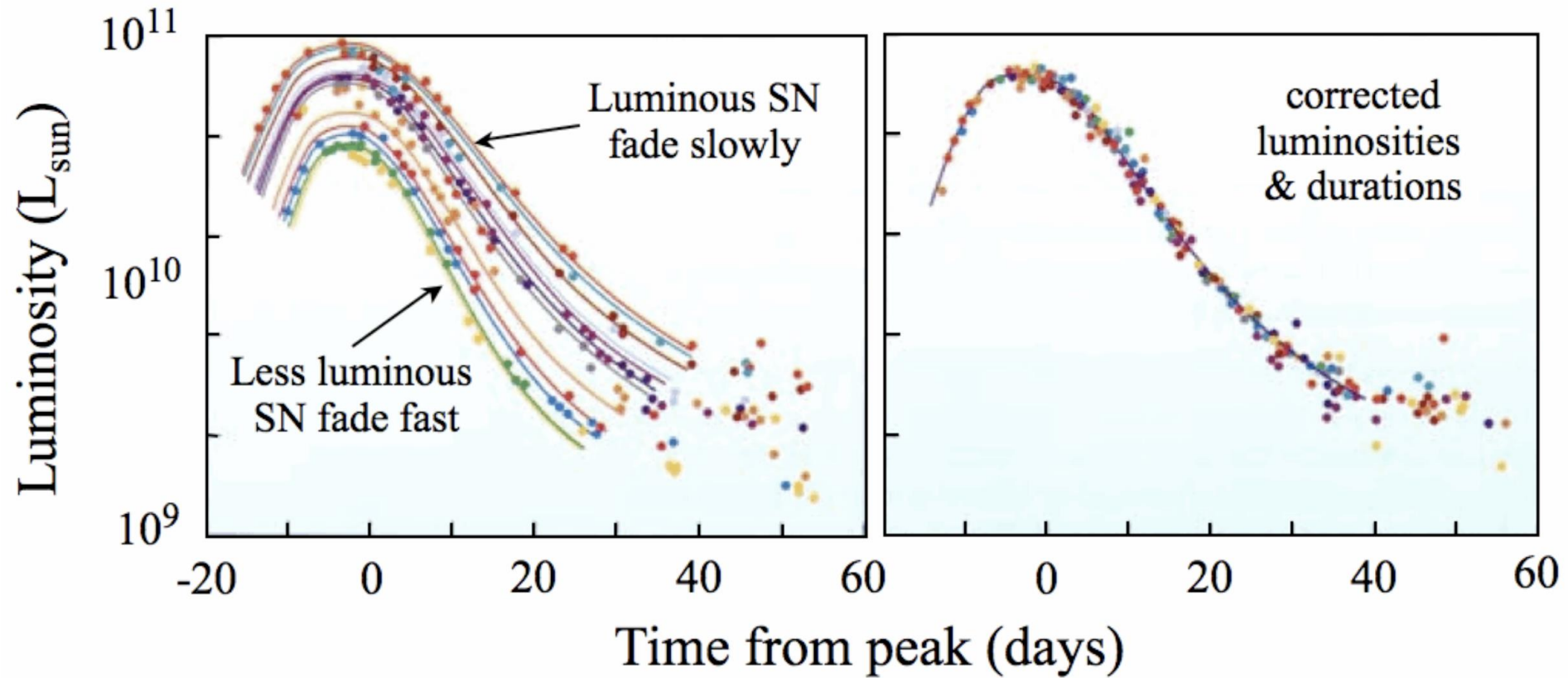


# СВЕРХНОВЫЕ Ia

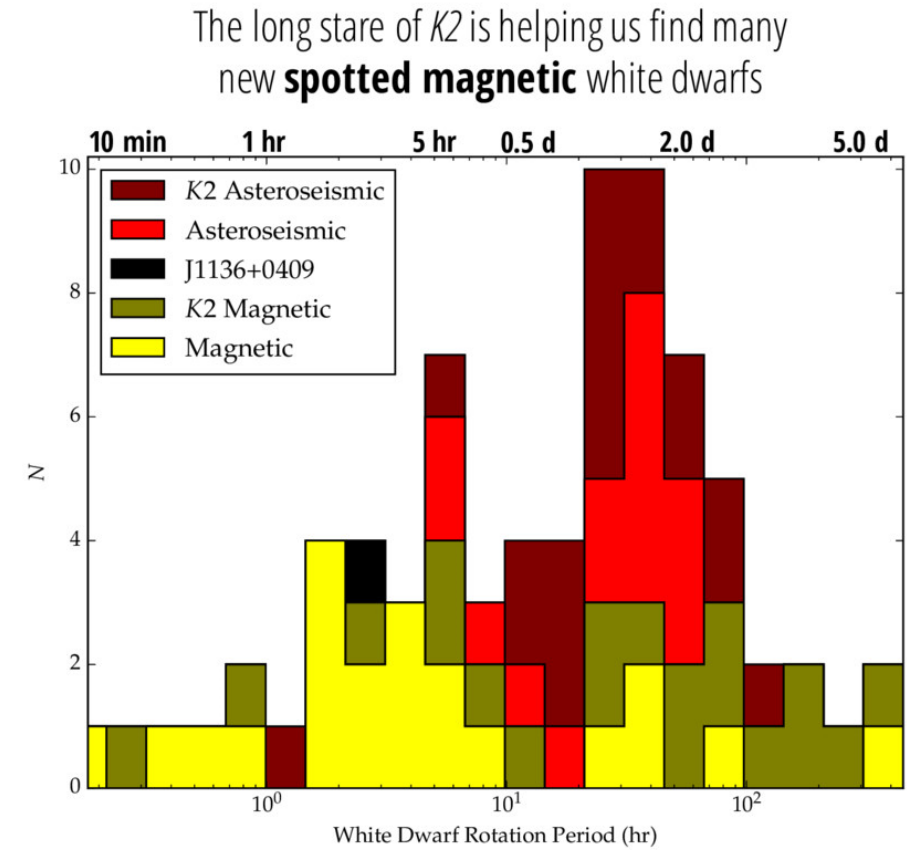
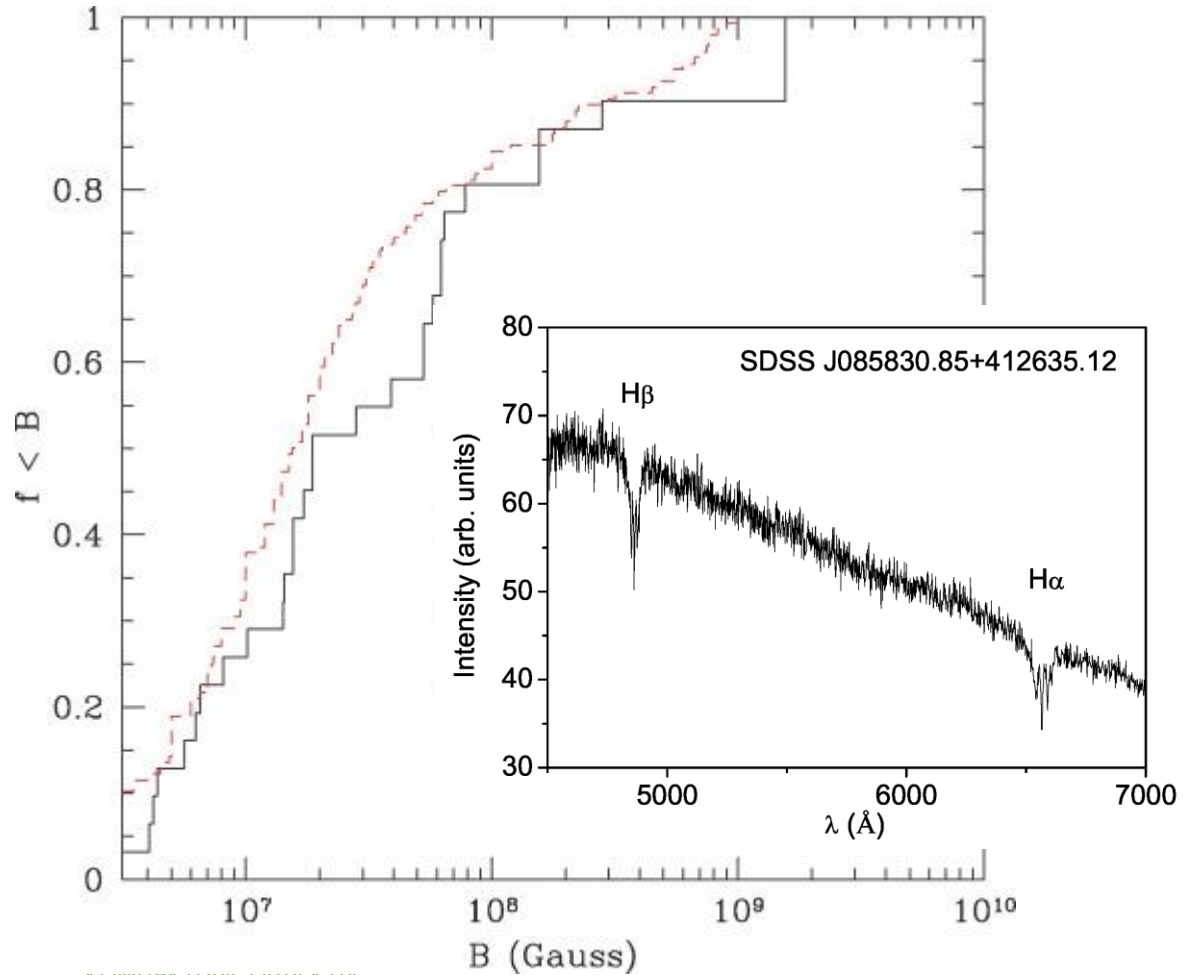


$$M_B = 0.252\Delta m_{15}(B)^2 - 0.015\Delta m_{15}(B) - 19.31$$

arXiv:1605.05507



# МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВРАЩЕНИЕ БК



When a massive star has burned all its fuel, it can make a spectacular exit as a supernova or fail to ignite

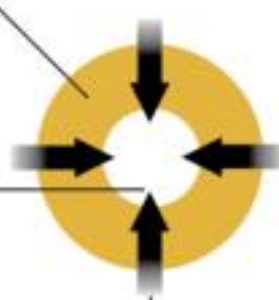
NewScientist  
5 May 2012

## COLLAPSE

Iron-nickel core exceeds 1.4 solar masses. Core collapses under gravity

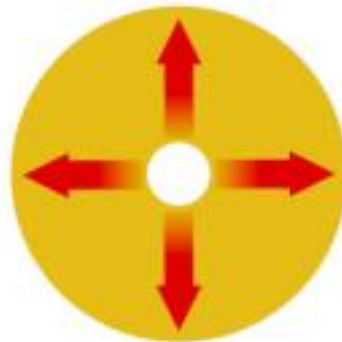
Protons combine with electrons to form neutrons and neutrinos

Star's outer layers of gas rush in



## SUPERNOVA

Shock wave of gas tears star apart. Explosion brighter than entire galaxy. The remnant is a neutron star



## FAILED SUPERNOVA

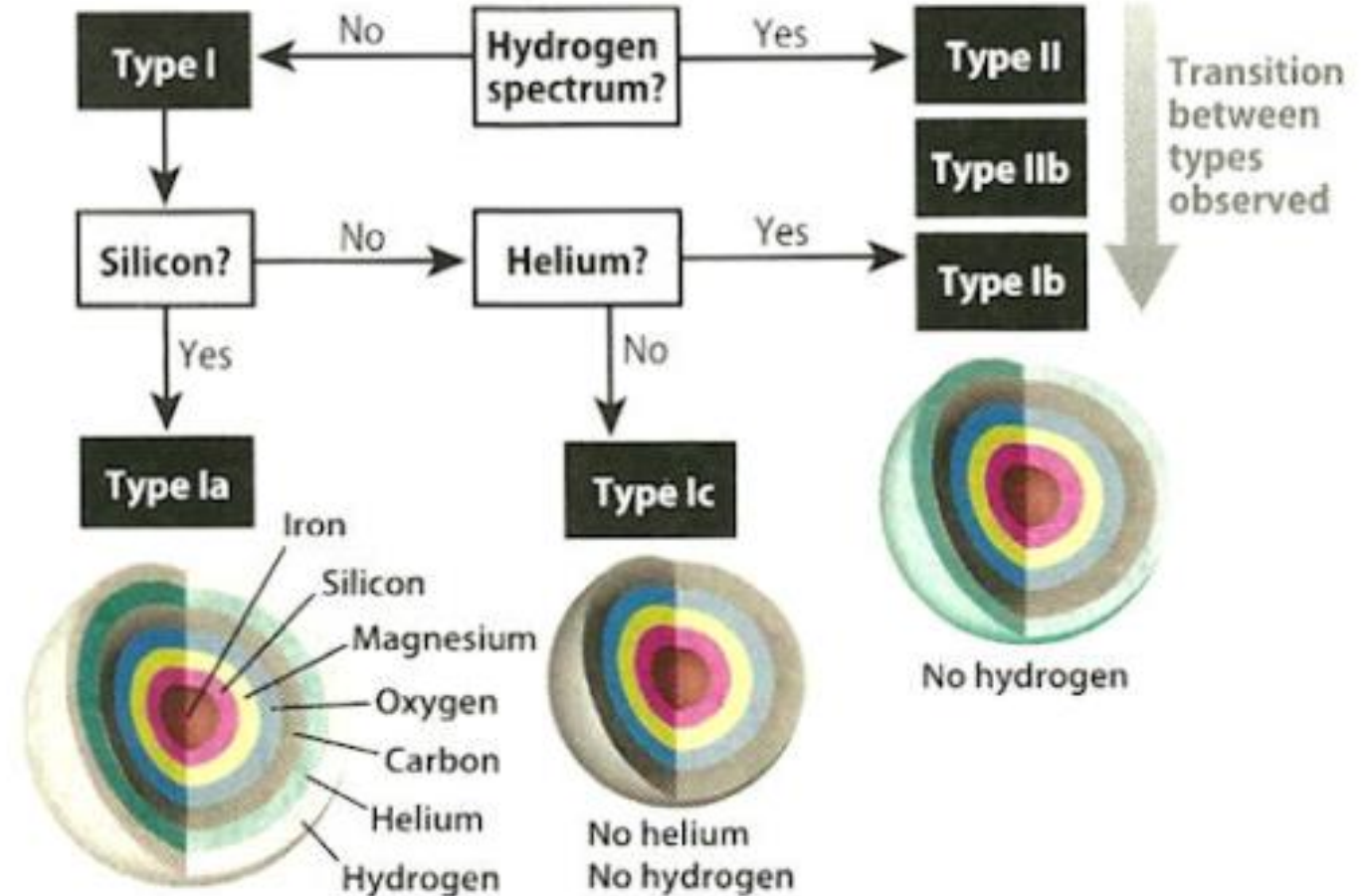
Shock wave stalls. More gas falls onto neutron star. It collapses to form a black hole. No explosion visible, just neutrinos



# supernovae spectra

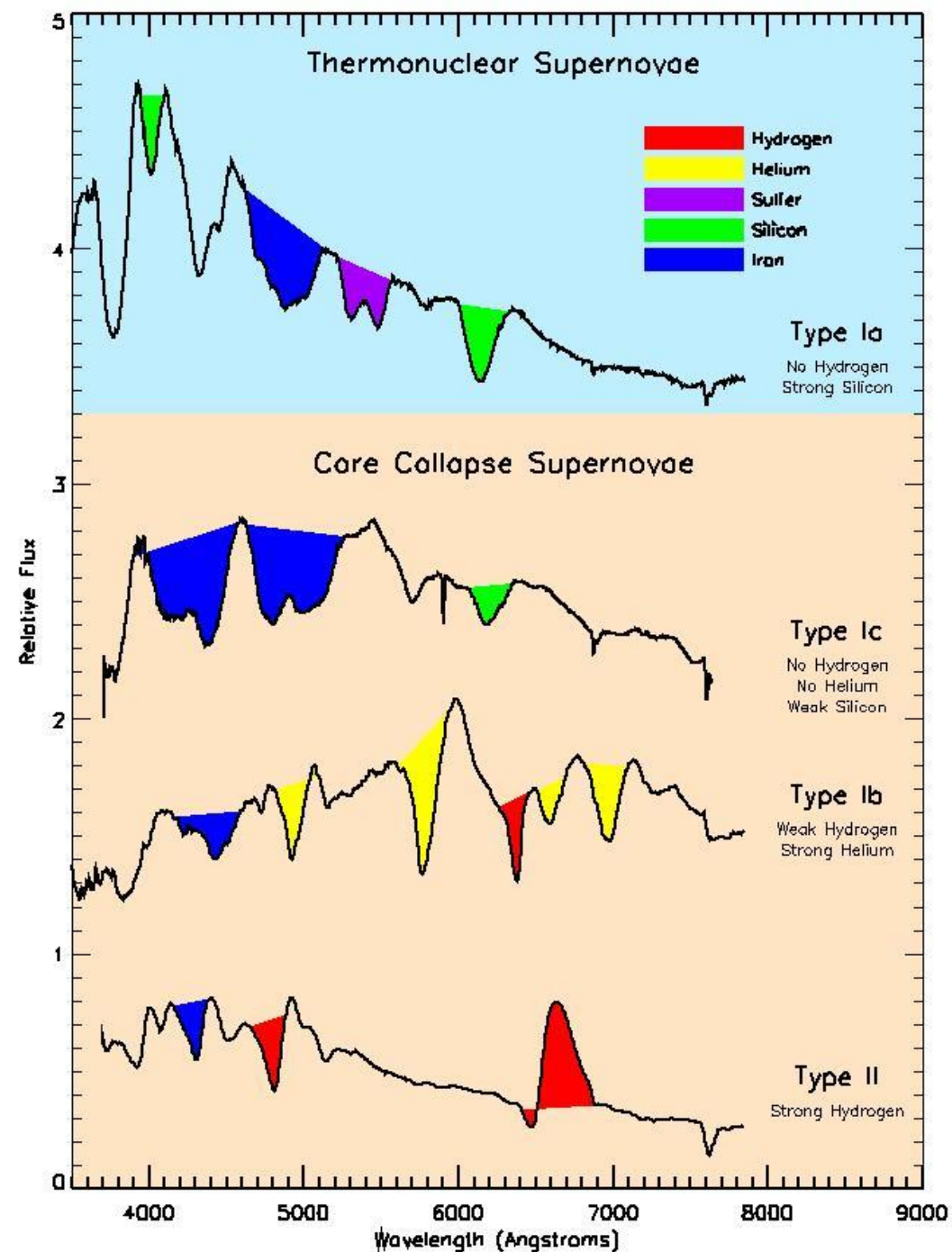
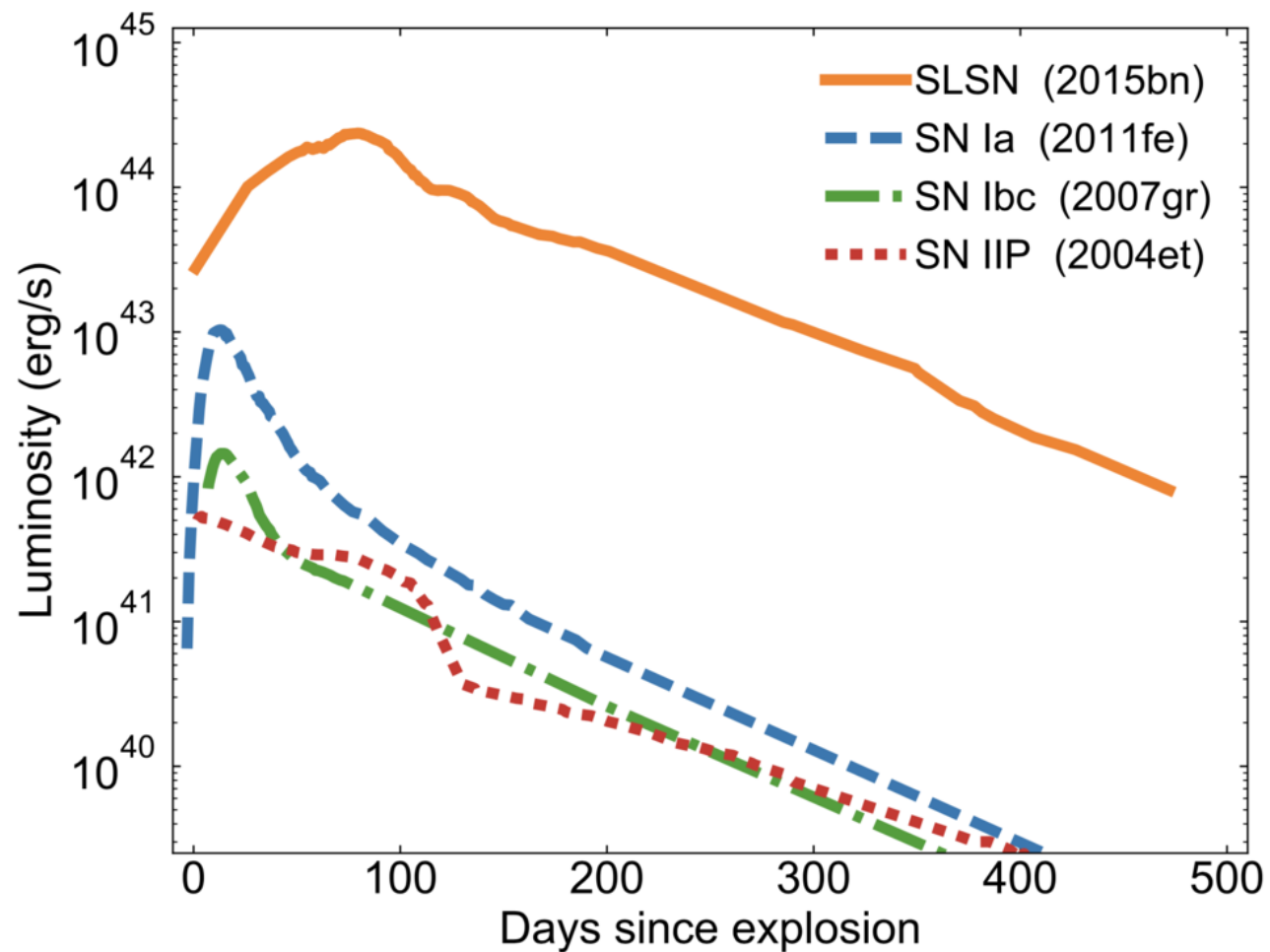
## Thermonuclear explosion

## Core collapse



To characterize a supernova, astronomers analyze its spectrum and look for hydrogen, silicon, and helium, as well as how the star's brightness changes over time. This diagram shows how the cores of stars that produce different types of supernovae compare. ASTRONOMY: ROEN KELLY, AFTER MARYAM MODJAZ

# СВЕРХНОВЫЕ

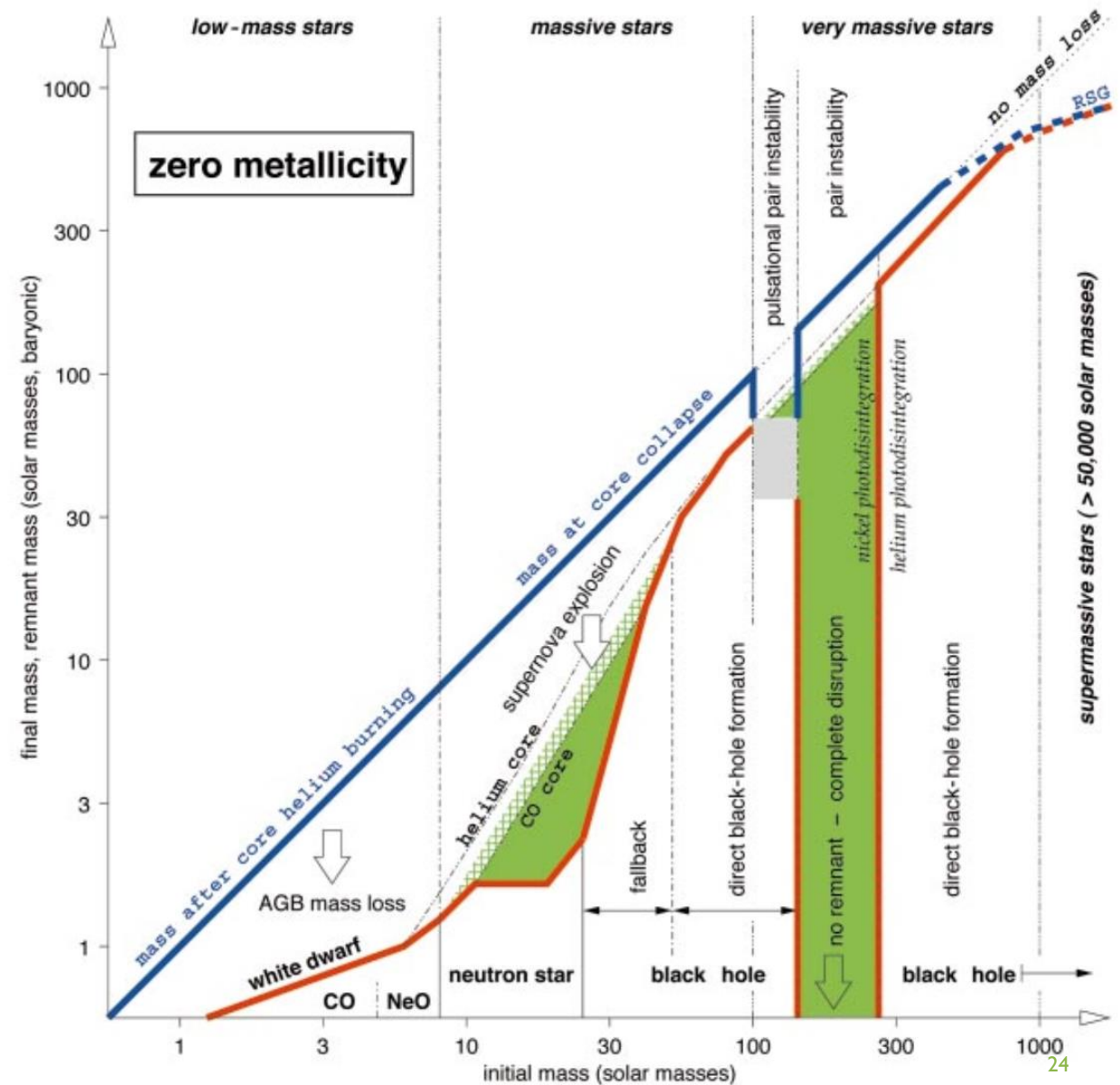




# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

- Нейтронные звёзды (НЗ) – вырожденные сколлапсировавшие ядра массивных ( $\sim 8 \dots 25 M_{\odot}$ ) звёзд.
- НЗ рождаются в рамках взрыва SN Ib/c или II
- Всего в Галактике скорее всего находится  $10^{8-9}$  НЗ (с темпом рождения  $< 1-3$  за столетие)
- Реально наблюдается 3500+ объектов, большинство которых – радиопульсары.

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

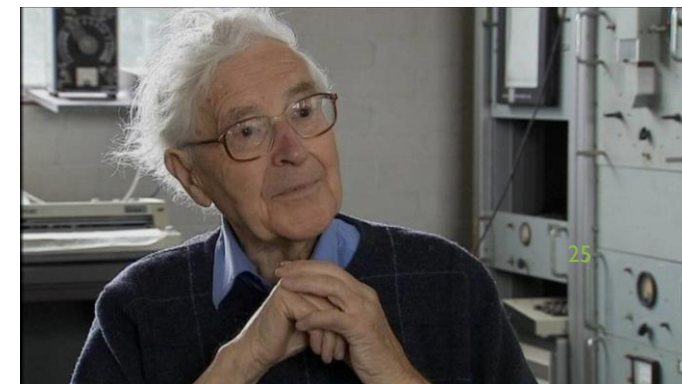
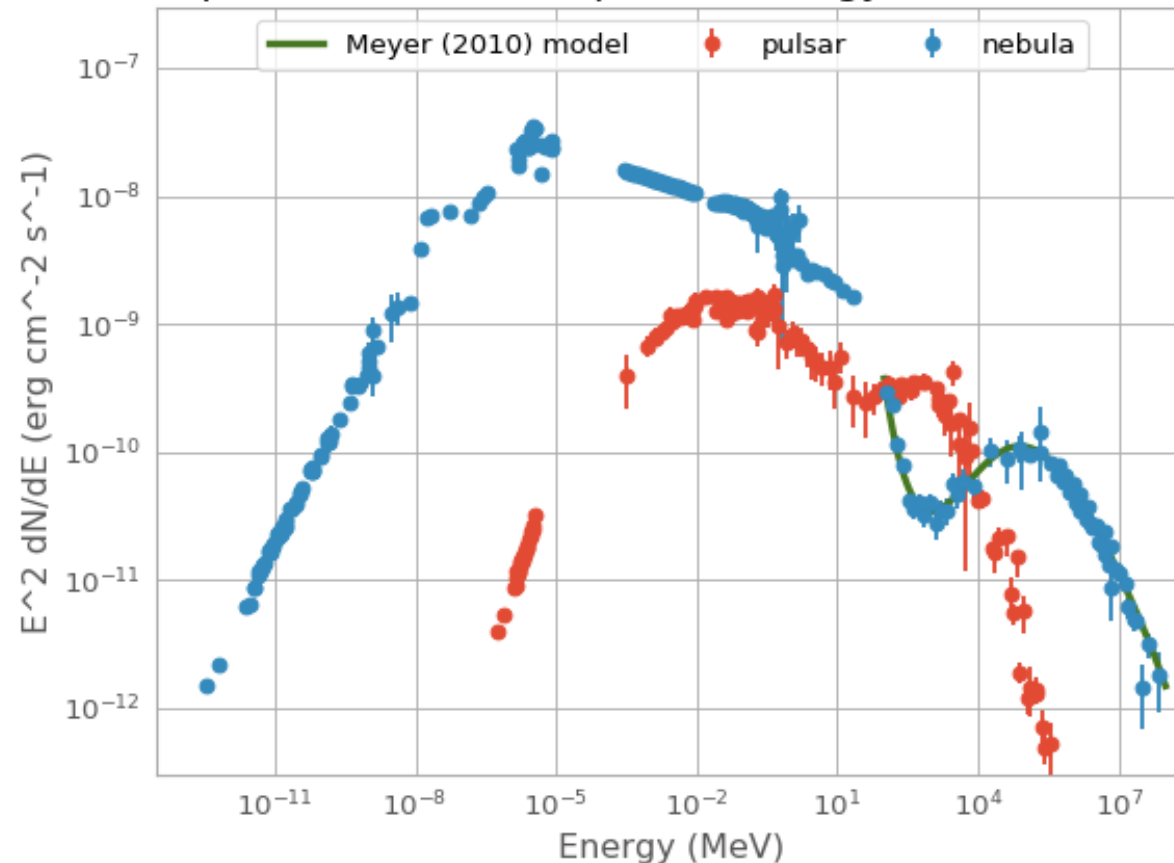


# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

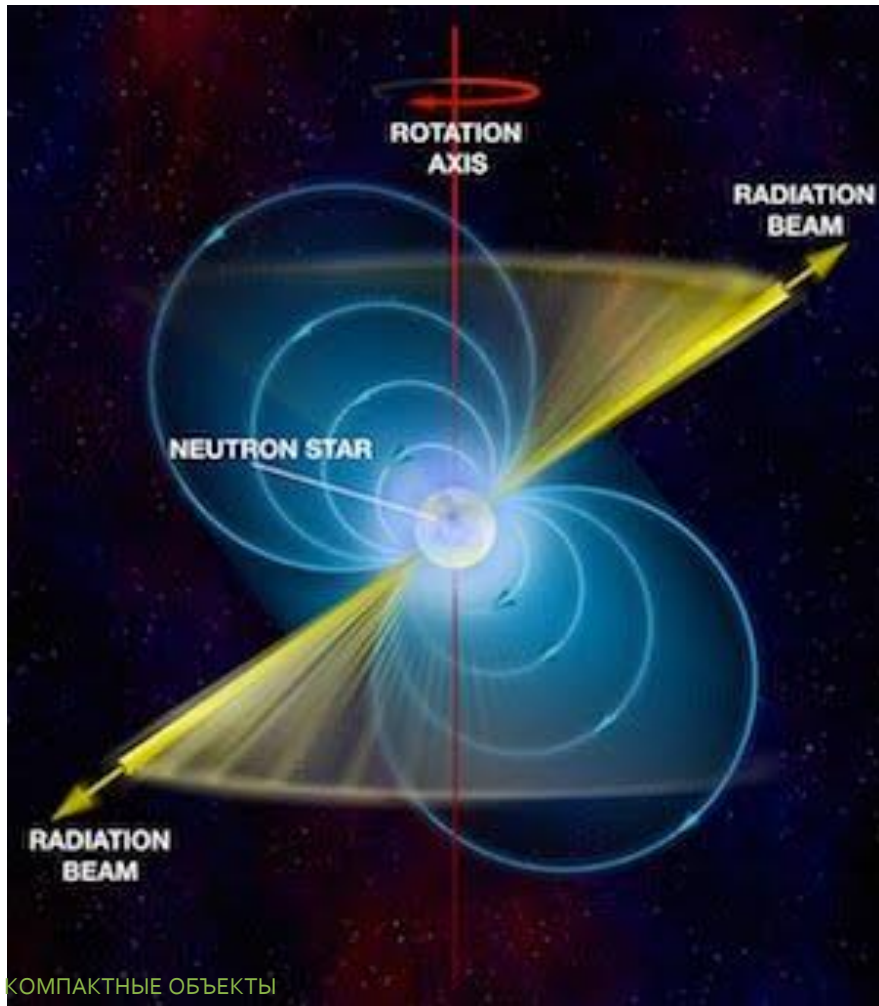
- Но в целом НЗ проявляют себя во всех диапазонах длин волн – от радио до гамма и далее.
- Первые теоретические предпосылки: Бааде и Цвикки 1934.
- Первый наблюдаемый объект: Sco X-1 (LMXB, Giacconi et al. 1962, PRL, 9, 439) – хотя о peculiarity центральной звезды в Крабовидной туманности знали еще в 19 веке.
- Открытие НЗ: Дж. Белл и Э. Хьюиш, 1968 (Nature, 217, 709)

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

## Crab pulsar and nebula spectral energy distribution (SED)



# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ



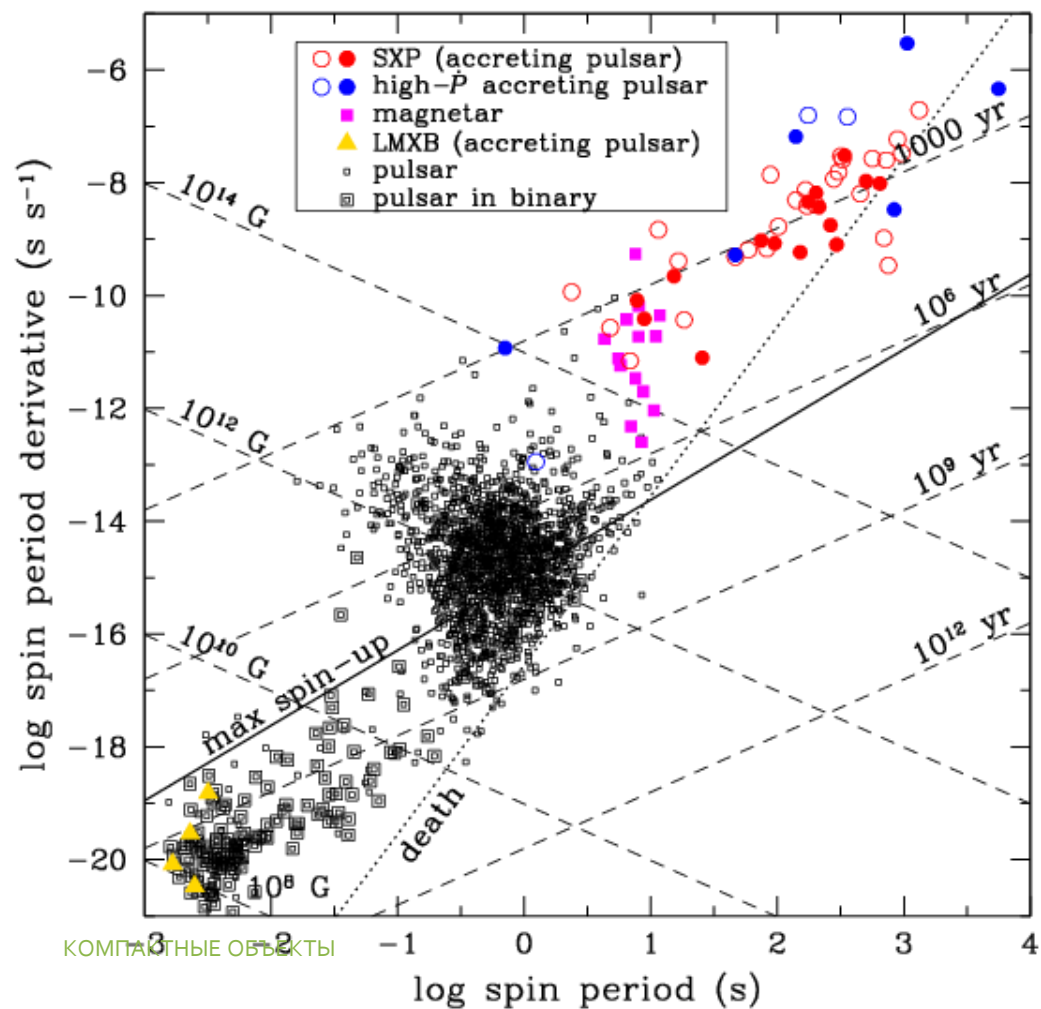
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

B. Saxton, NRAO/AUI/NSF

Параметр	Величина
Масса $M$	$1 \dots 2 M_{\odot}$
Радиус $R$	$\sim 10 \dots 15$ км
Плотность $\rho$	от $\sim 10^4 \dots 10^6$ г/см <sup>3</sup> на поверхности до $\sim 2 \cdot 10^{15}$ г/см <sup>3</sup> в центре
Период вращения $P$	1.5 мс – $10^3$ сек
Производная периода $\dot{P}$	$< 10^{-9}$ с/с, в среднем $\sim 10^{-14}$ с/с
Индукция магнитного поля на поверхности	$10^{9..15}$ Гс, в среднем $10^{12}$ Гс
«Время жизни»	10-100 млн. лет.



# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ: ДИАГРАММА $P - \dot{P}$

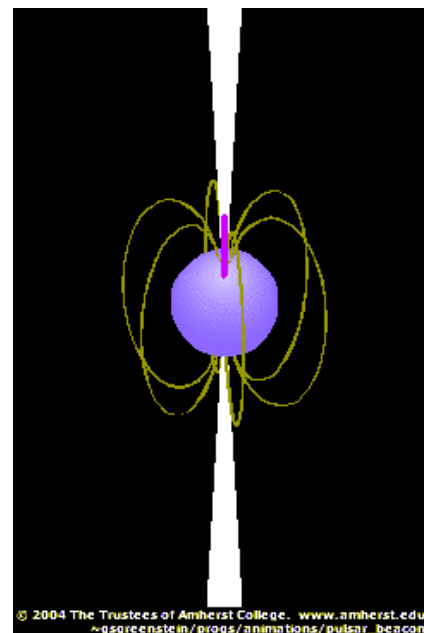


Стандартная оценка возраста пульсара:

$$\tau_{\text{ch}} = \frac{P}{2\dot{P}}$$

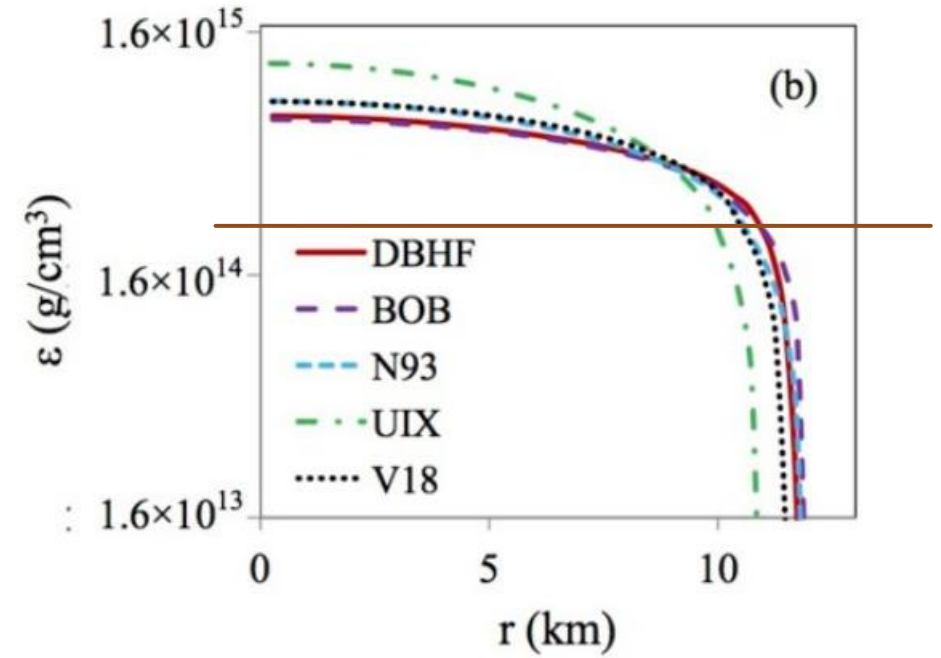
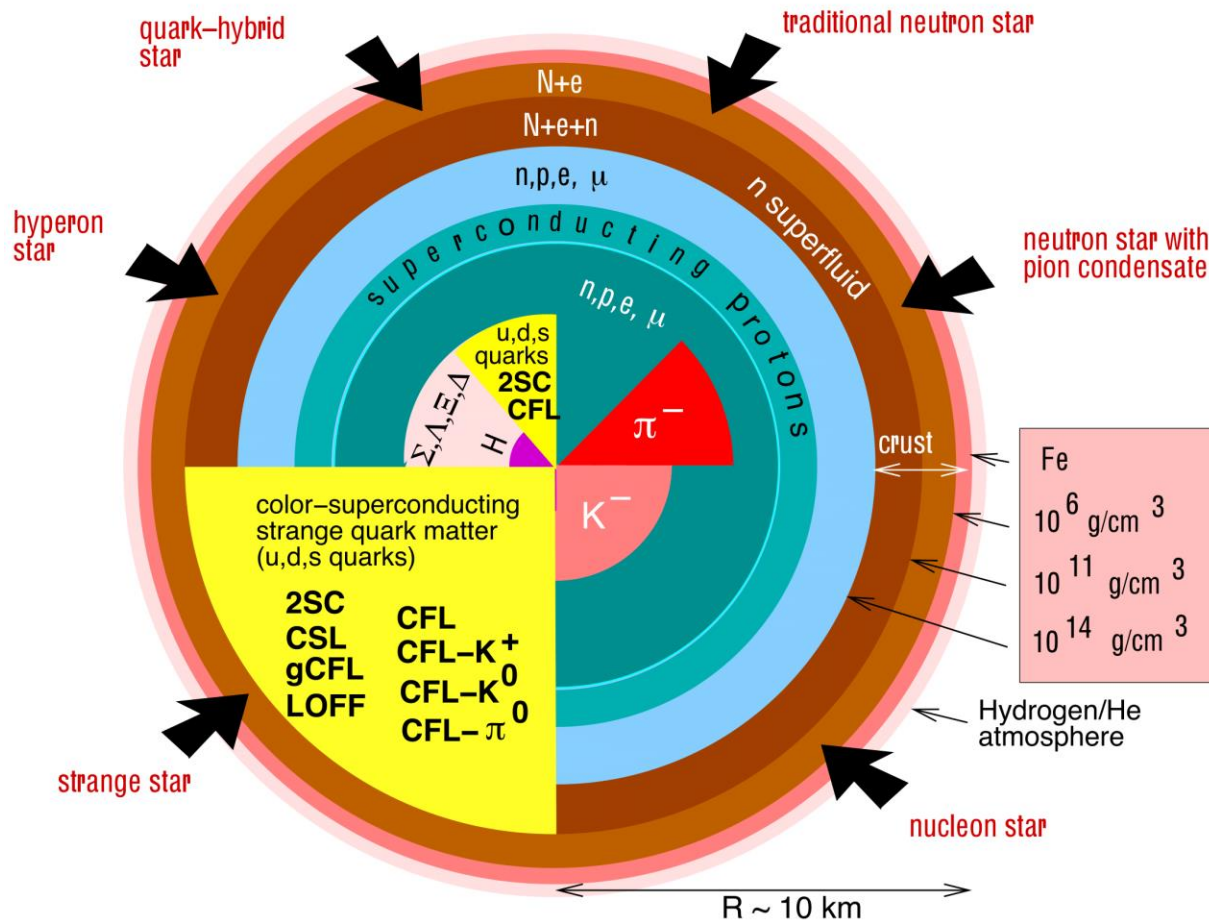
Стандартная оценка магнитного поля:

$$B_{\text{md}} \approx 3.2 \cdot 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ Гс}$$



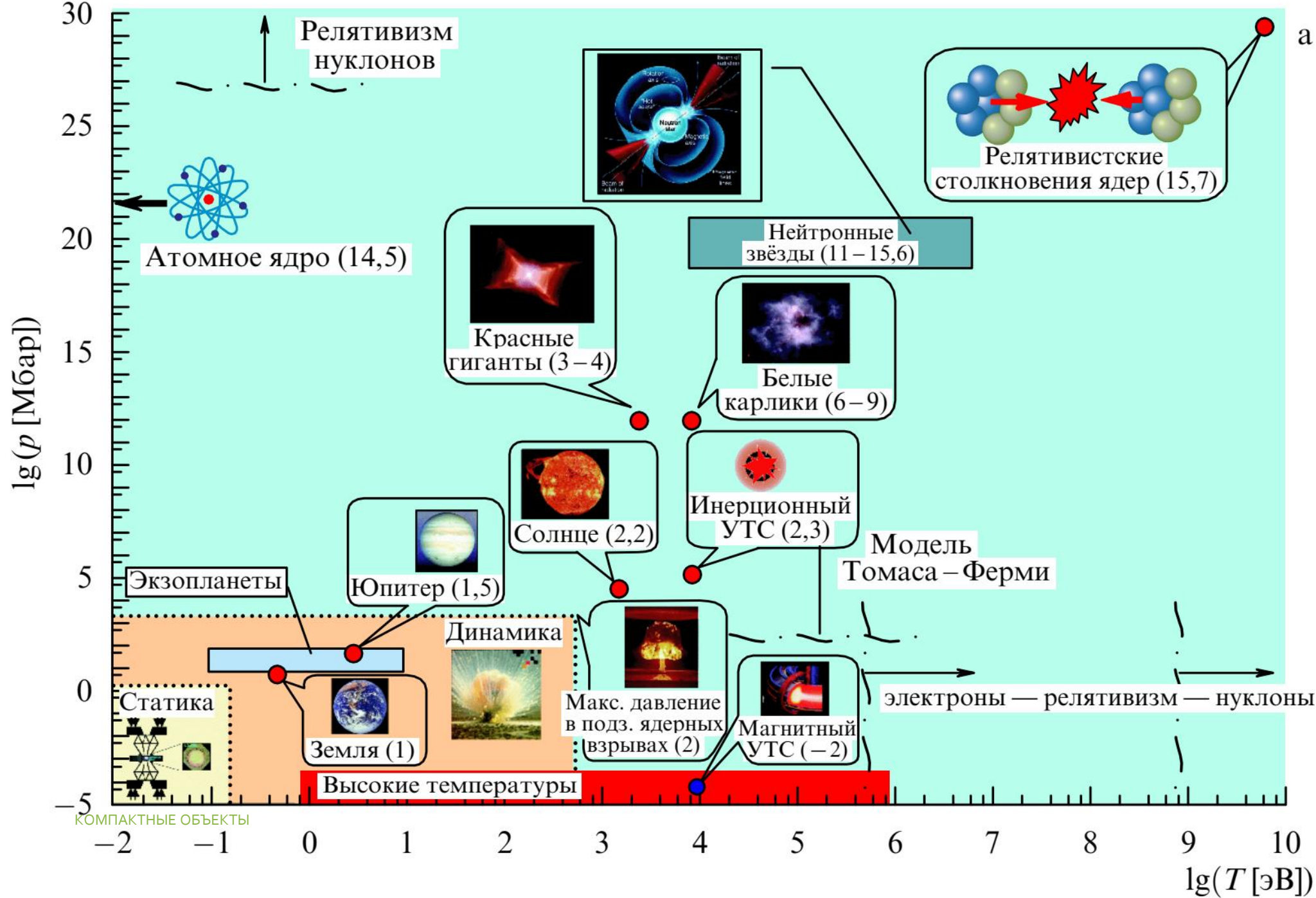
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

# ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ НЗ



Sammarruca 2014

$$\rho_0 = \frac{3m_p}{4\pi r_p} \approx 2.3 \cdot 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

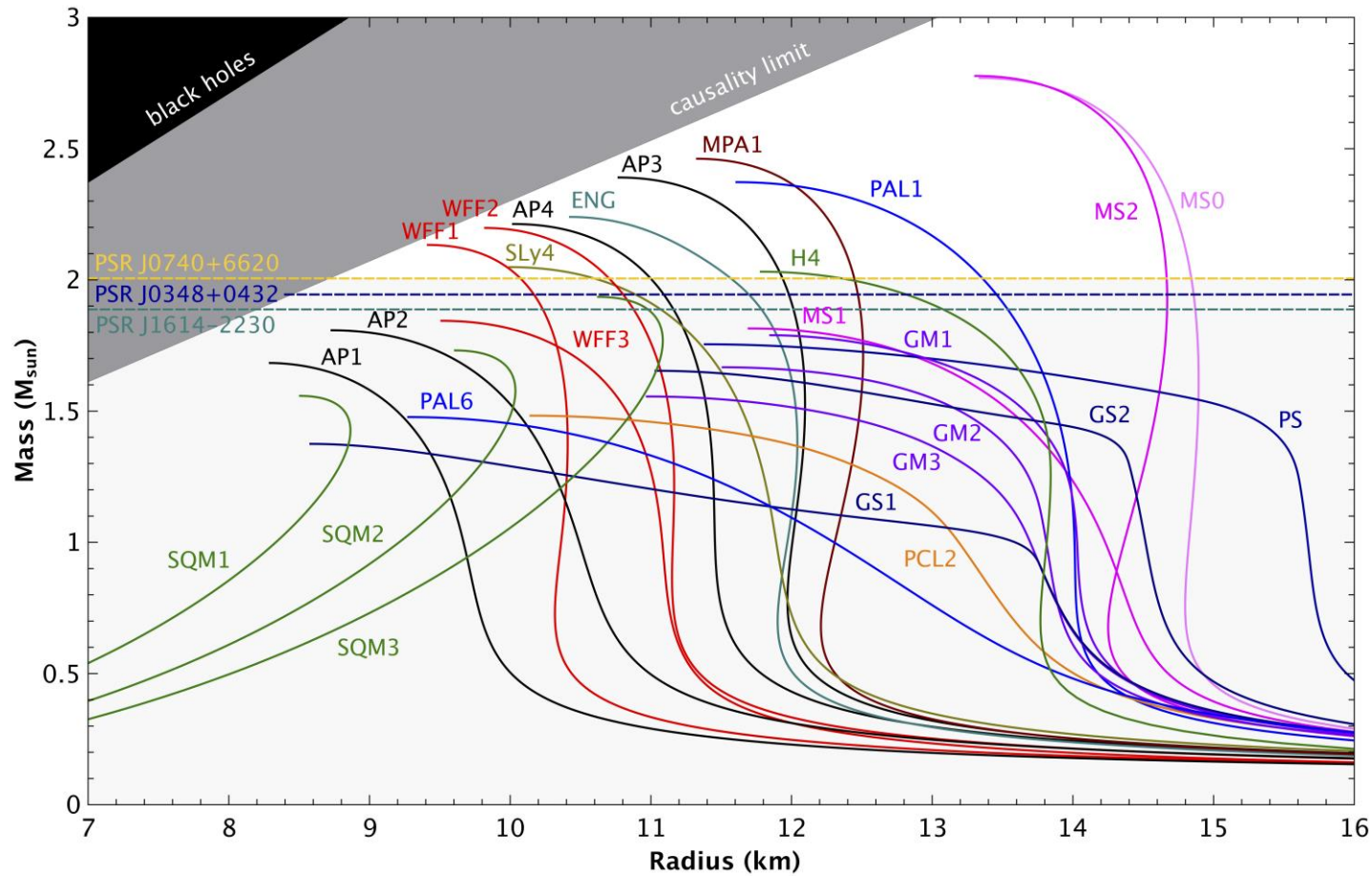


а

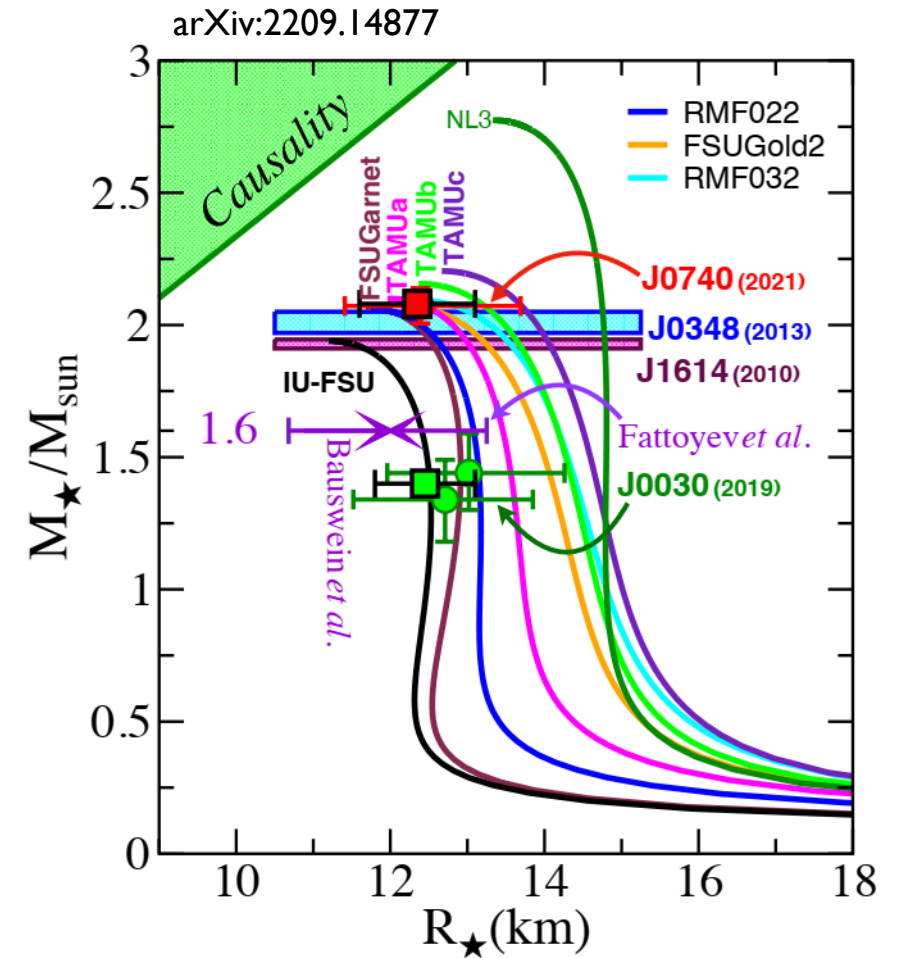
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



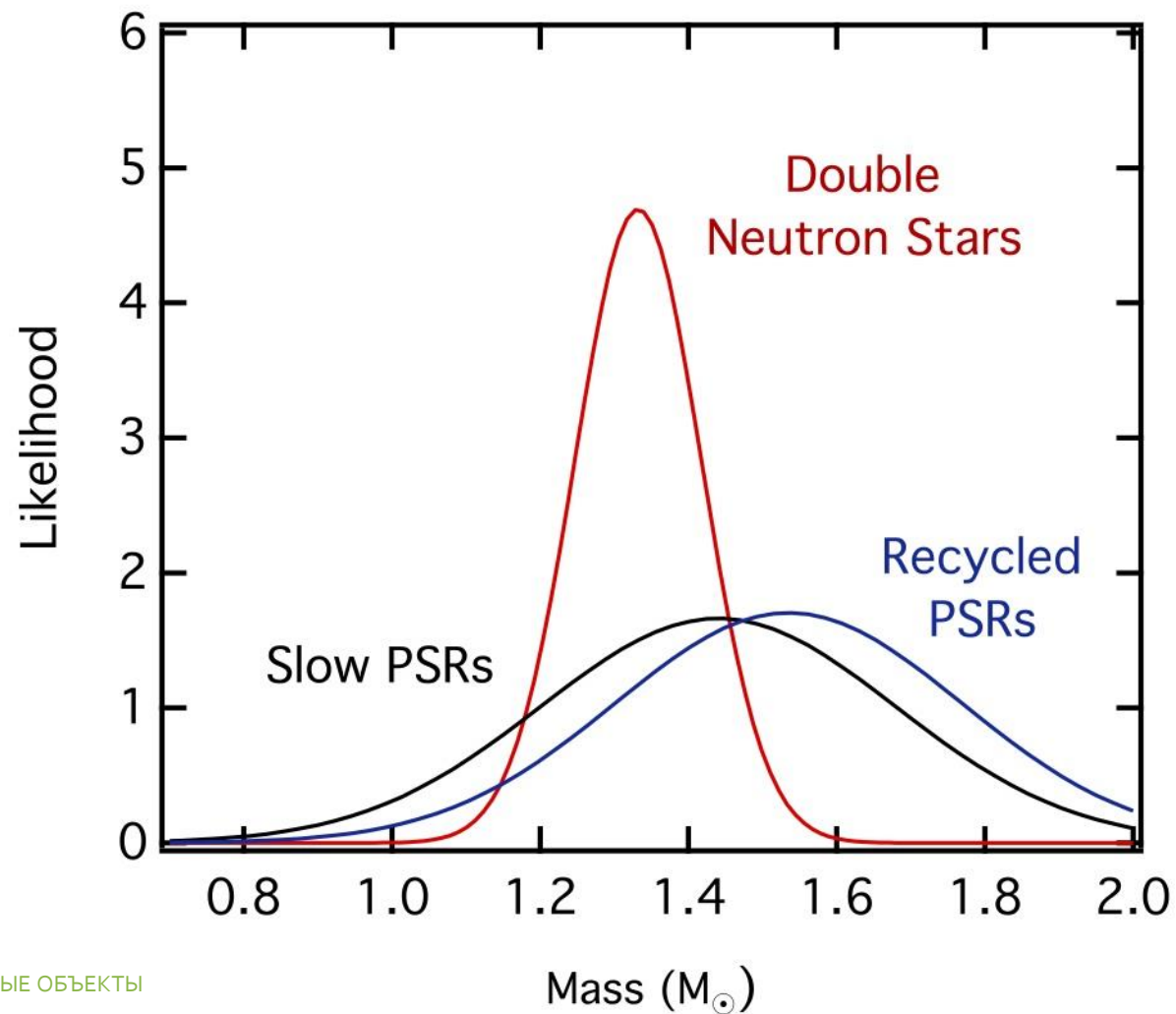
# УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ



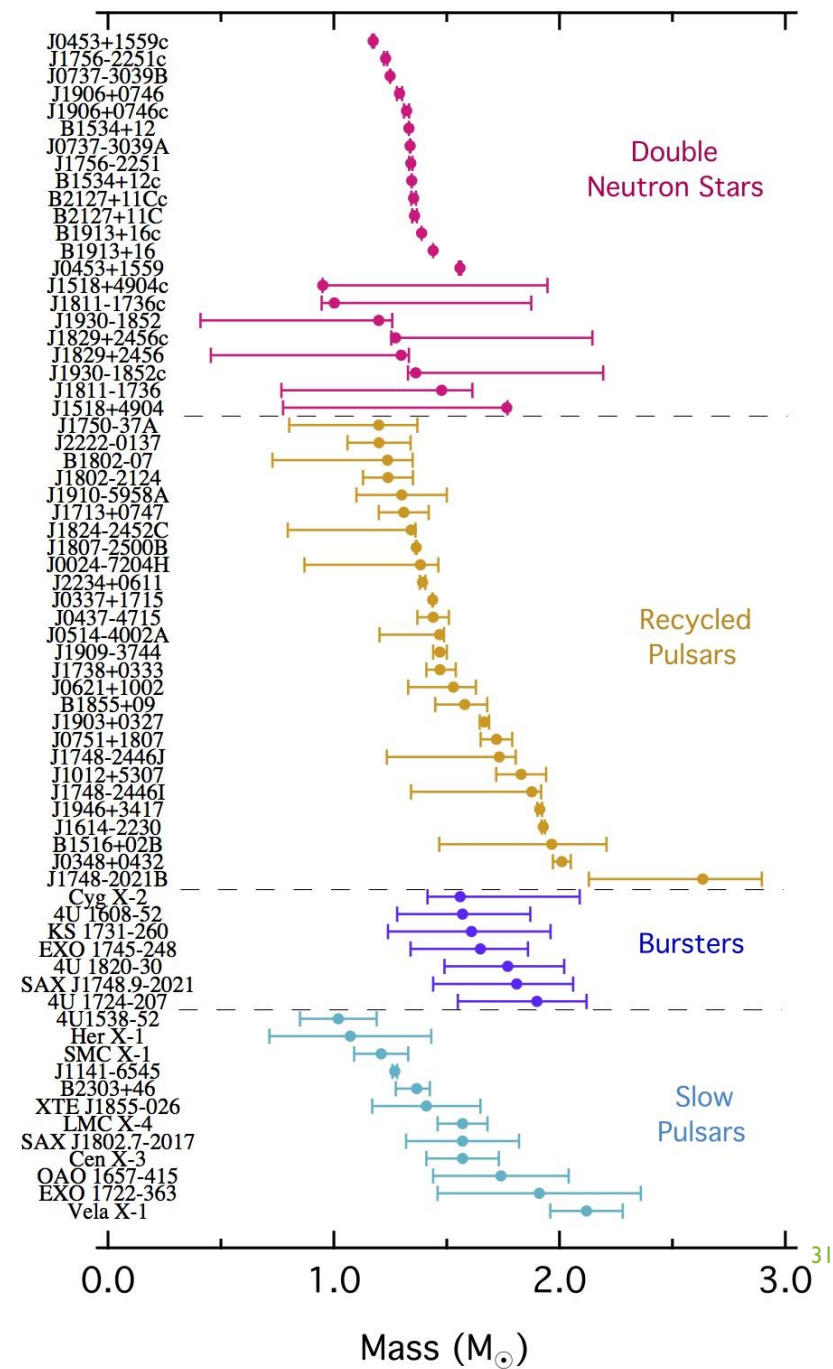
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



# МАССЫ НЗ

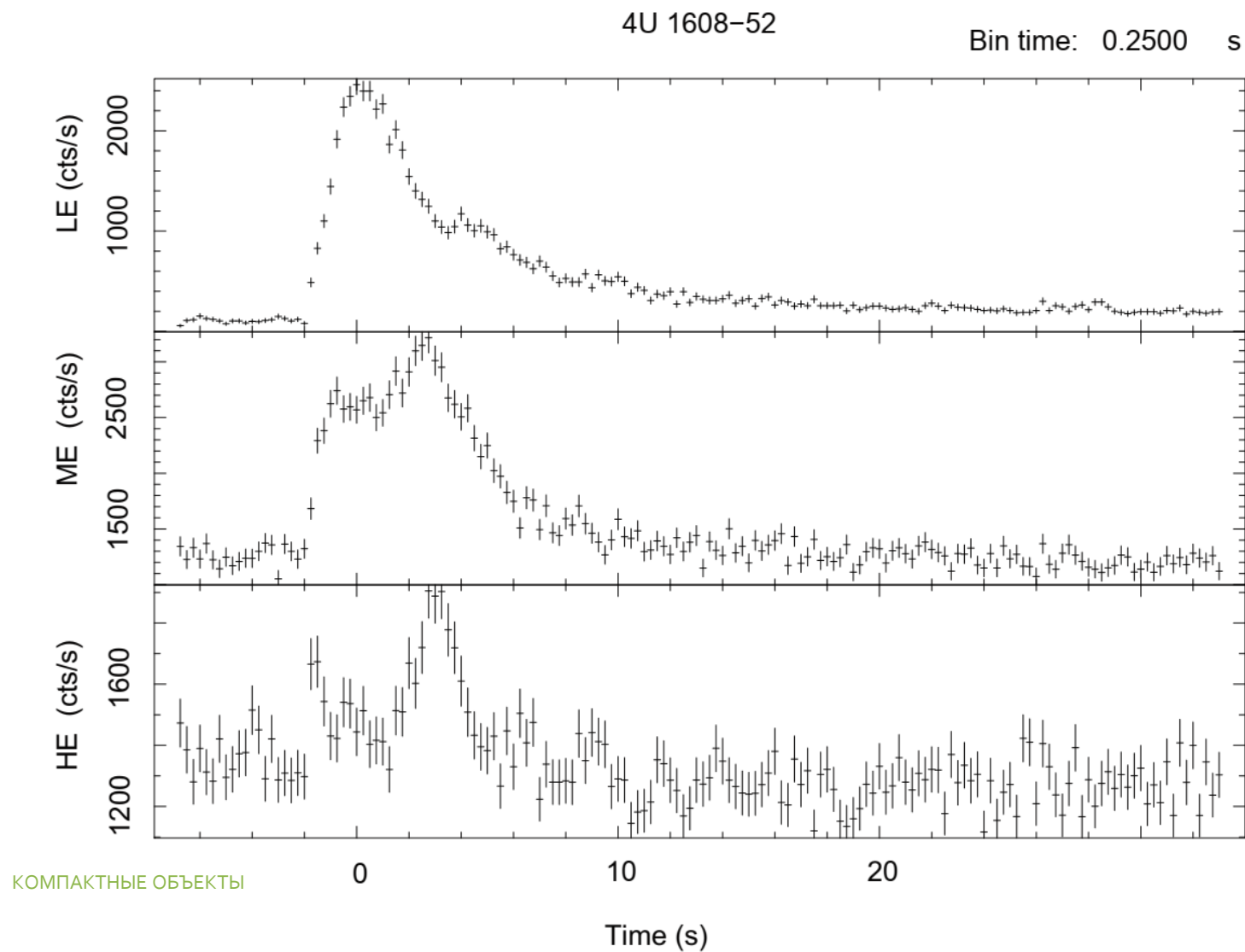


Ozel & Freire 2016

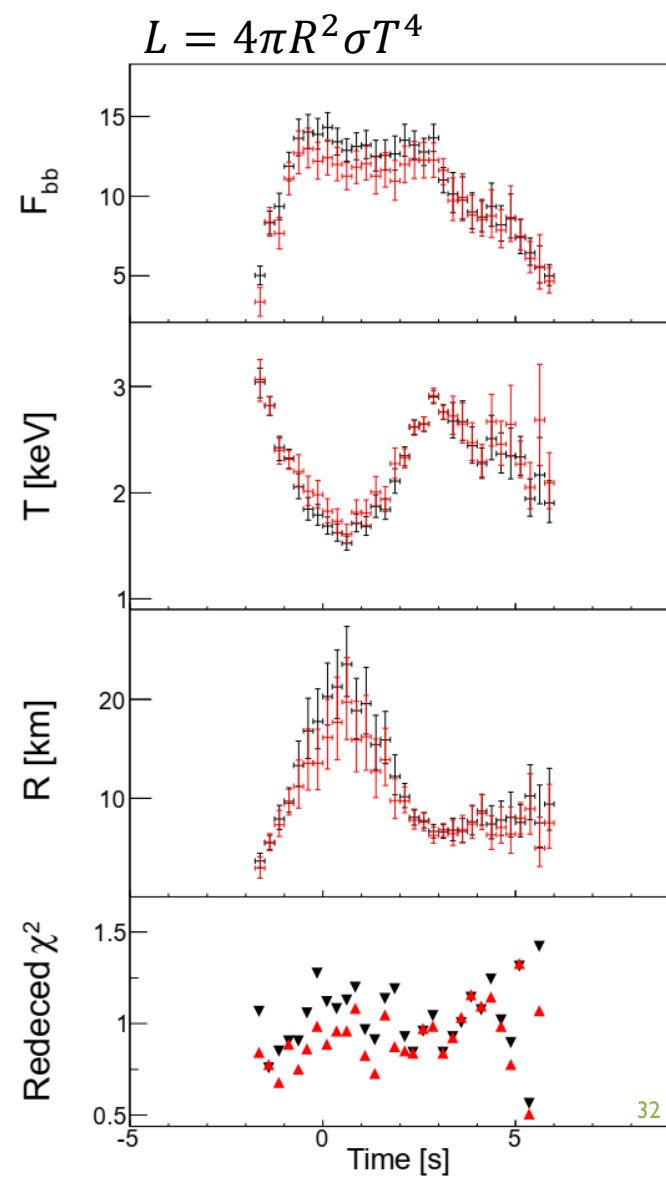


КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

# РАДИУСЫ НЗ



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

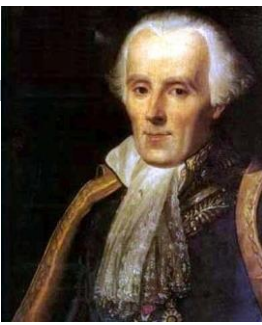


# ЧТО ТАКОЕ ЧЁРНАЯ ДЫРА?

- По физическому смыслу:  
Область пространства-времени, ограниченная горизонтом событий.
- По физическим свойствам:  
Тело, настолько массивное, что даже свет не может покинуть его границы.
- По происхождению:  
Класс сколлапсировавших объектов, не имеющих материальной поверхности.
- По наблюдаемым свойствам:  
Класс компактных объектов, физические процессы рядом с которыми проходят в сверхсильных гравитационных полях (то есть объясняются с привлечением таковых полей).

## КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Термин «ЧД» использовали Джон Мичелл (XVIII в), Энн Юин и Джон Уилер (XX в).



SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

## "Black Holes" in Space

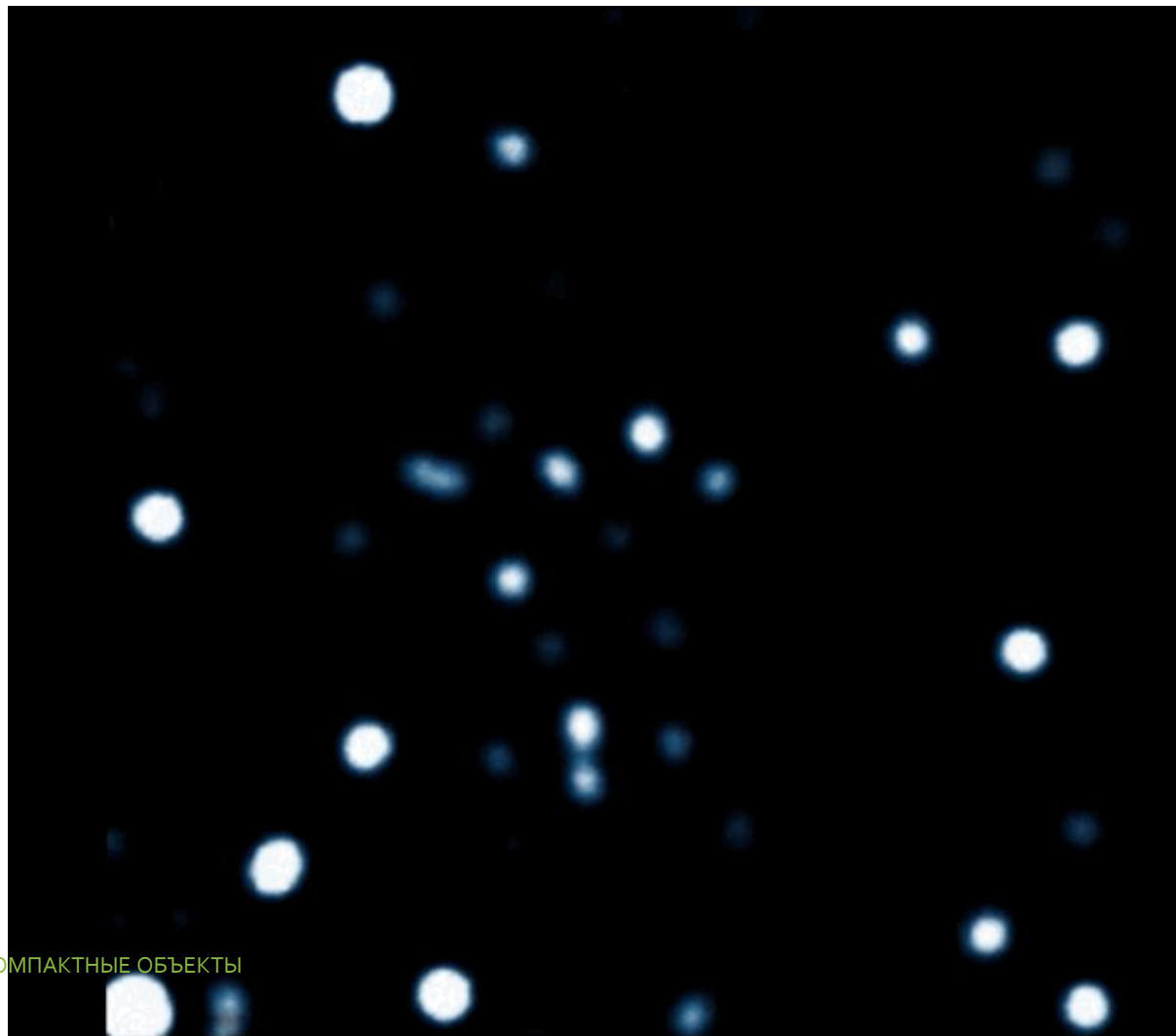
The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing



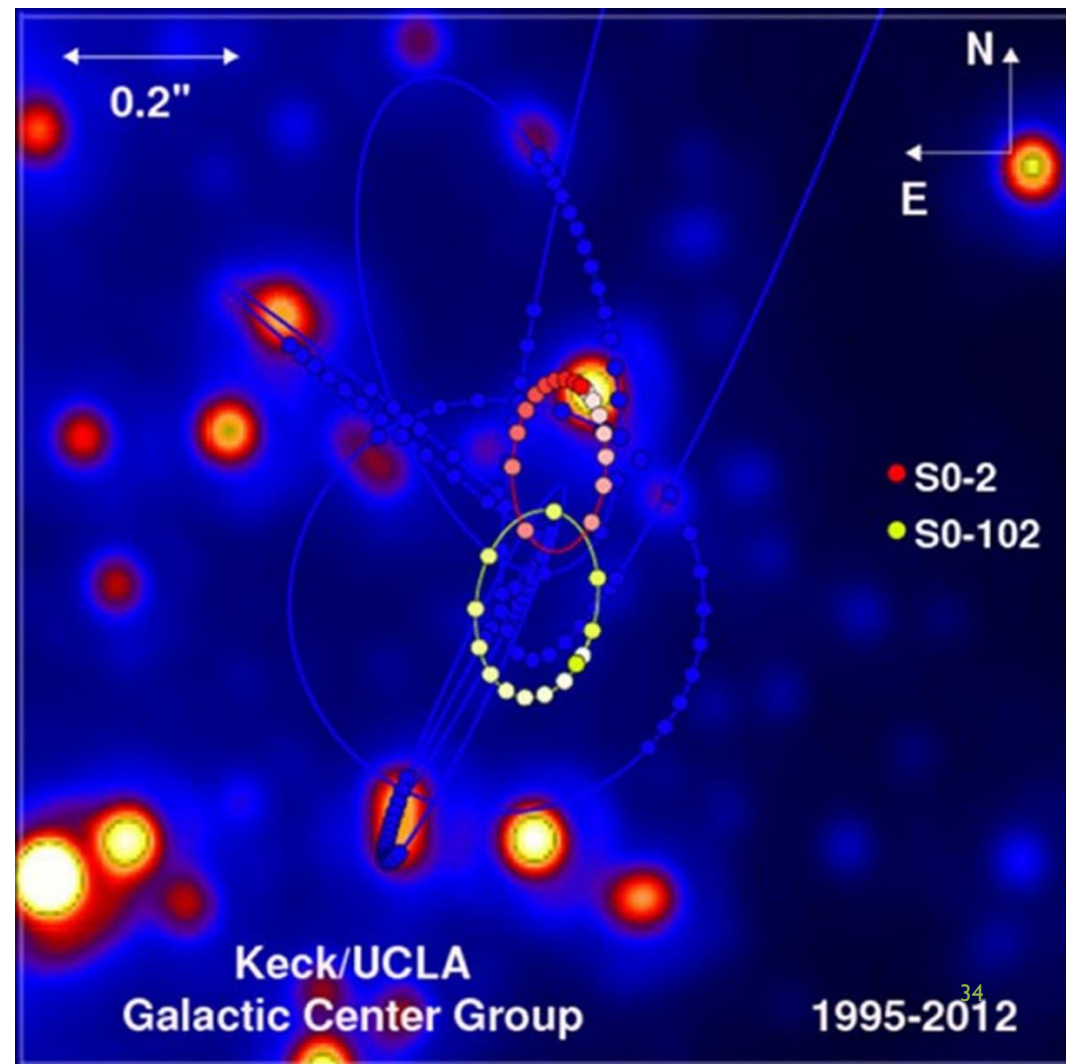


# СТРЕЛЕЦ A\* (SGR A\*)

$$\frac{M}{M_{\odot}} = \frac{a_{\text{a.e.}}^3}{T_{\text{лет}}^2} \approx \frac{(10^3)^3}{(15.2)^2} \approx 4 \times 10^6$$



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



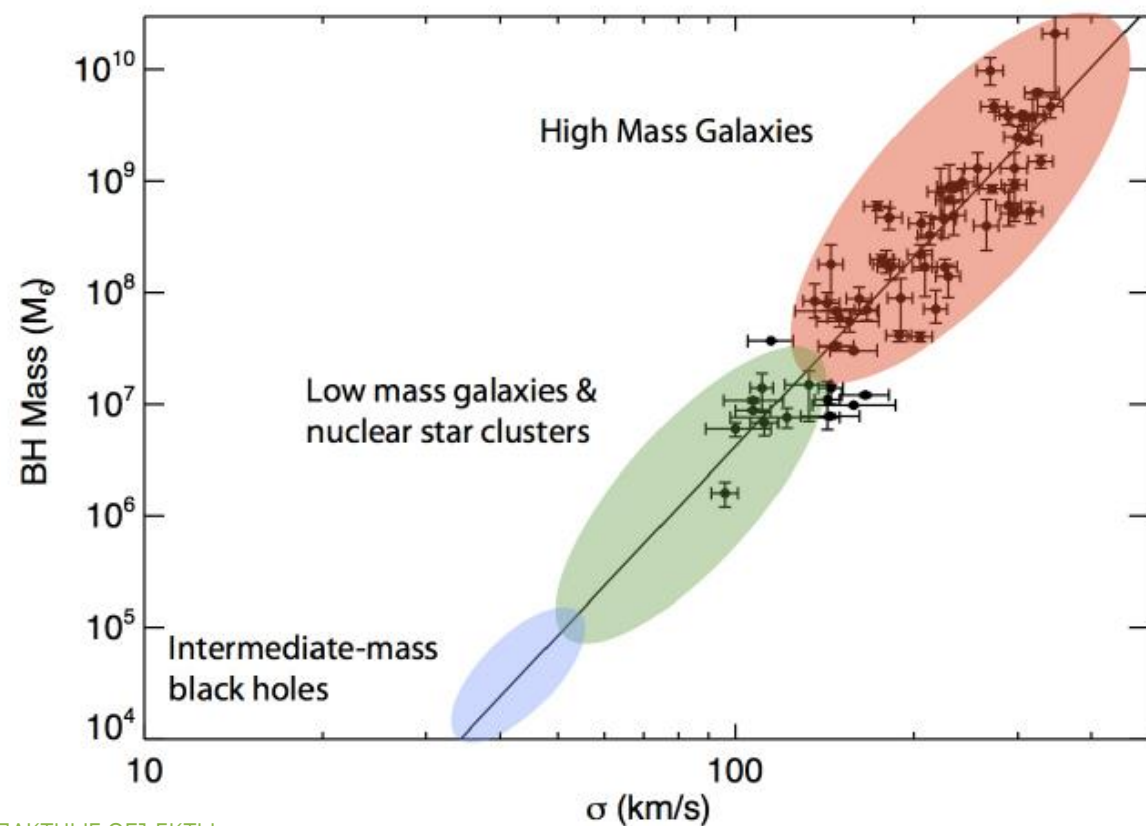
# ЗООПАРК ЧЁРНЫХ ДЫР

Первичные

Звёздные

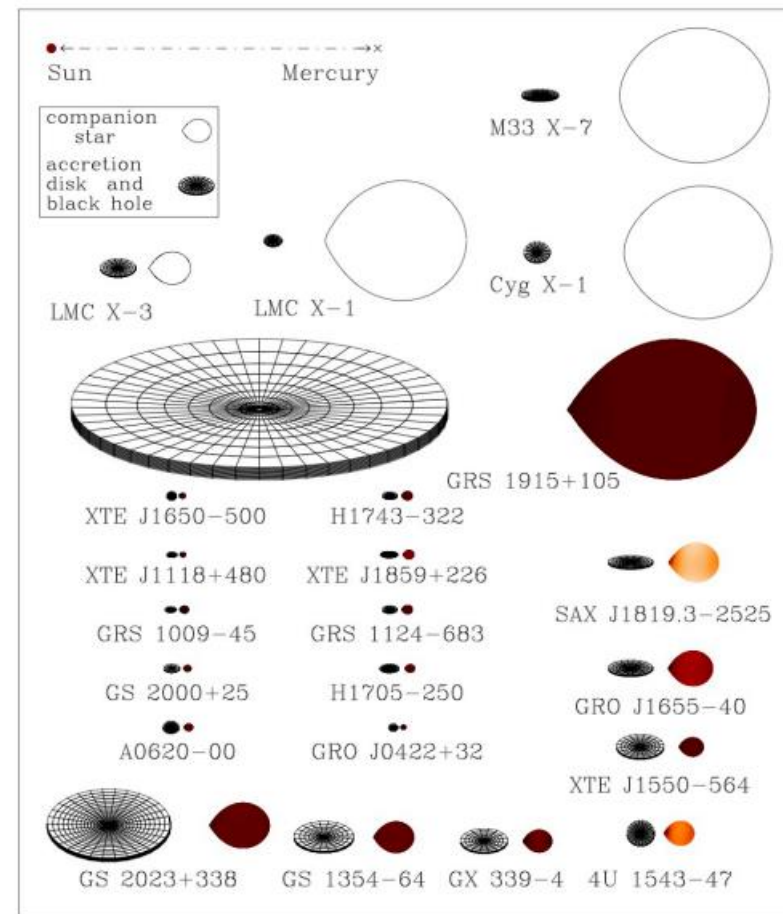
Промежуточные

Сверхмассивные



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

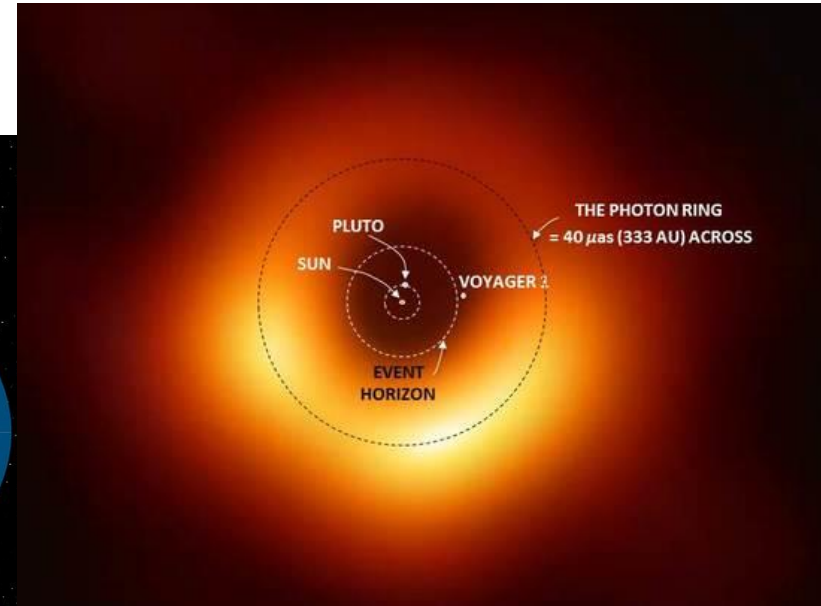
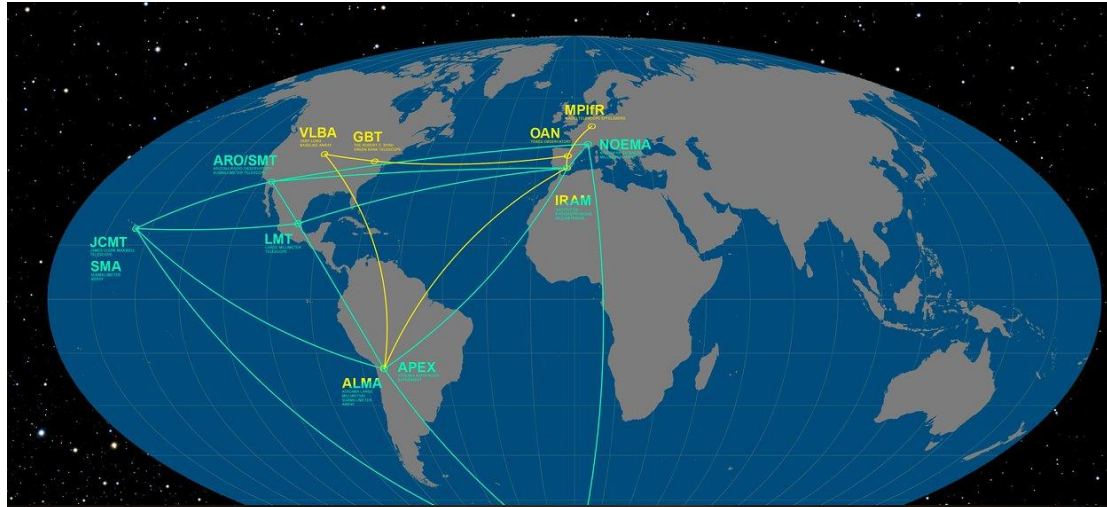
Wright et al. 2014



35

arXiv:1906.03871

# ПРОБЛЕМА ГОРИЗОНТА

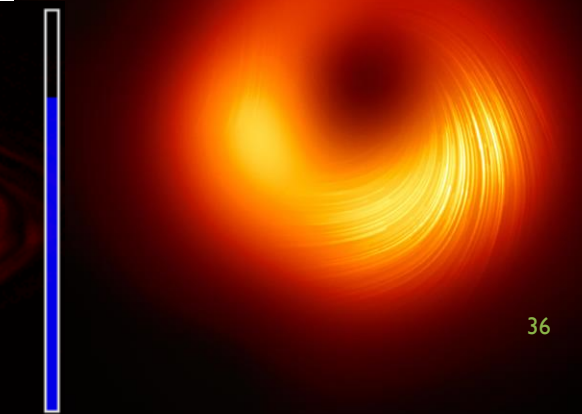
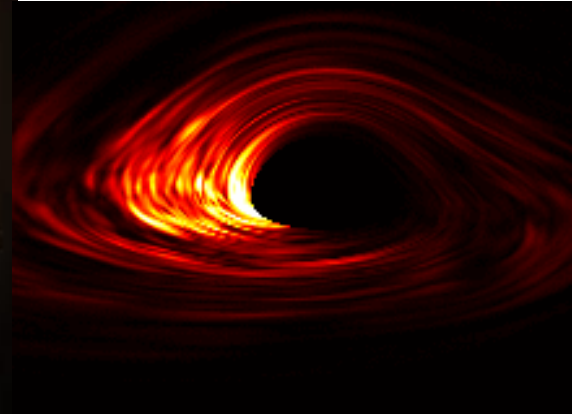


$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

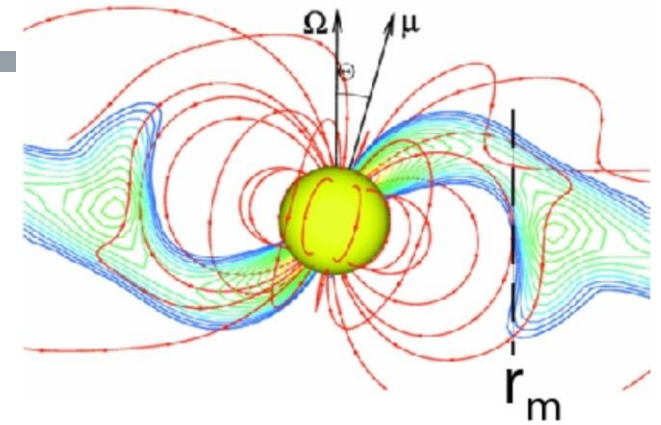
Радиус  
Шварцшильда



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 8



Рассмотрим аккрецию (падение) вещества на намагниченную нейтронную звезду. Магнитное поле звезды считаем дипольным. Также считаем, что вещество свободно падает на звезду с бесконечности под действием её гравитации с нулевой начальной скоростью. Пусть падение происходит в плоскости магнитного экватора. Вращением звезды пренебрегаем. На некотором радиусе  $r_m$  свободное падение вещества будет остановлено давлением магнитного поля и в дальнейшем материя будет двигаться преимущественно вдоль магнитных силовых линий. Такой радиус  $r_m$  называется *радиусом магнитосферы* аккрецирующей нейтронной звезды. Покажите, что по порядку величины радиус магнитосферы равен *Альфвеновскому радиусу* и в системе СГС записывается как:

$$r_m \sim r_A = \left( \frac{\mu^4}{2GM_*\dot{M}^2} \right)^{\frac{1}{7}},$$

где  $\mu$  – дипольный момент звезды,  $M_*$  – её масса, а  $\dot{M}$  -- темп аккреции [г/сек].