

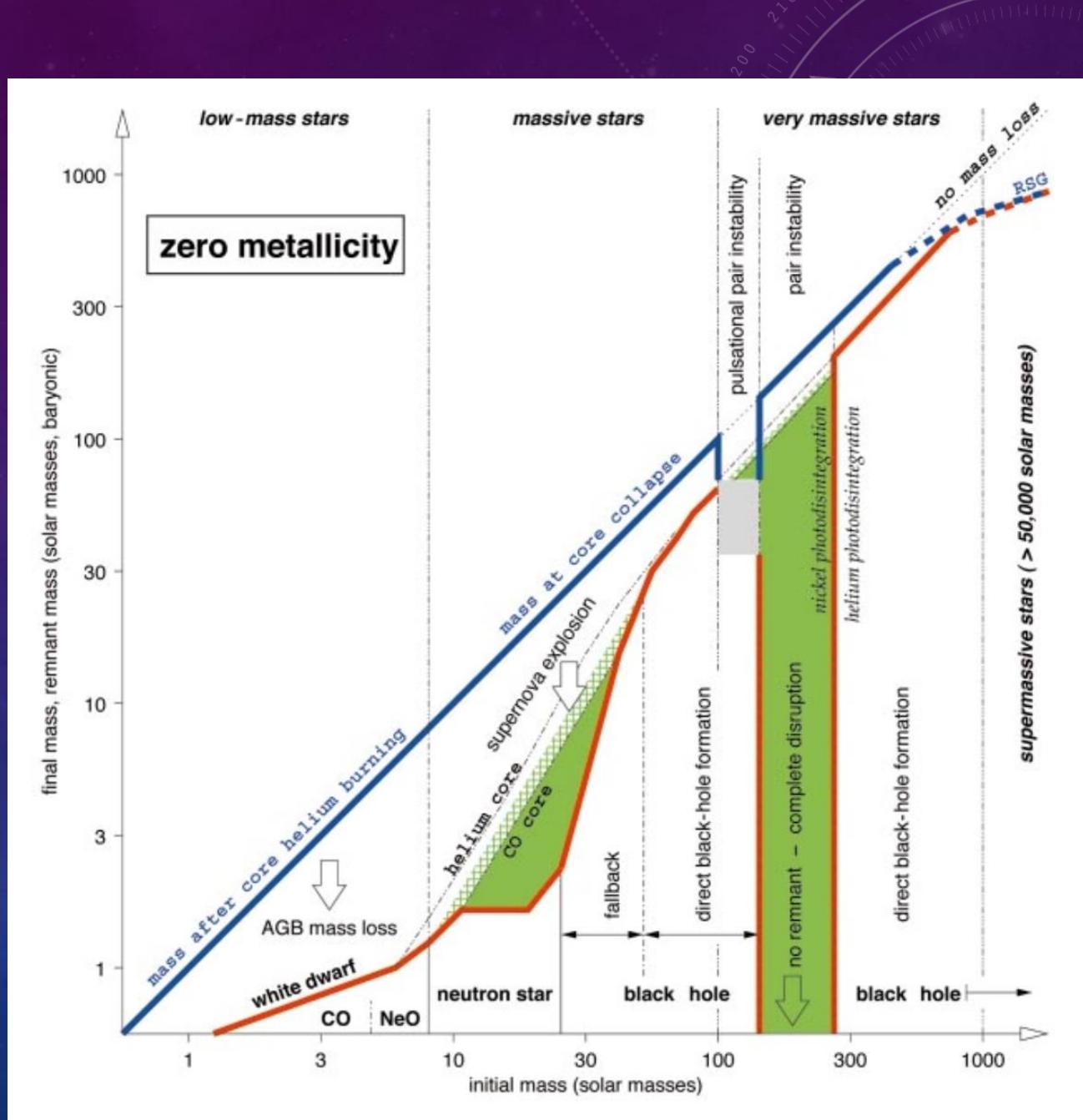
# КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ: КРАТКИЙ ОБЗОР

(ЛЕКЦИЯ 8. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

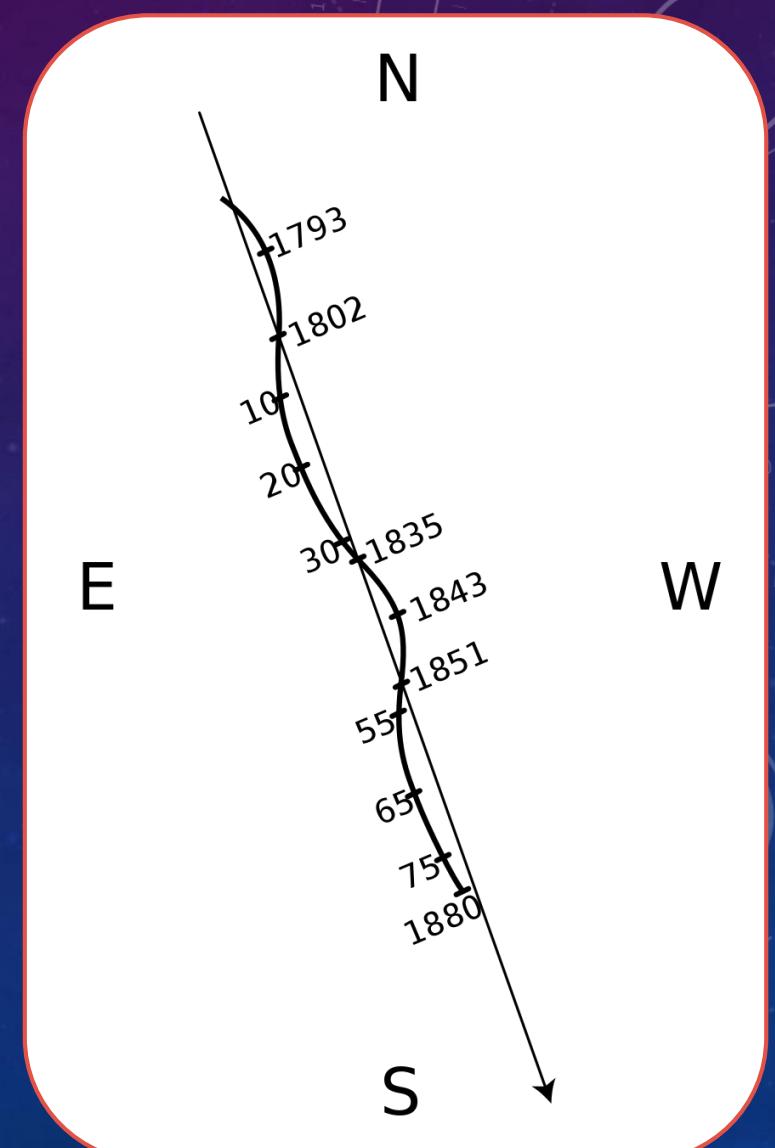
# КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

- Белые карлики – остатки звёзд с начальной массой до  $10 - 12M_{\odot}$ . Результат потери оболочки.
  - Нейтронные звёзды – остатки звёзд с начальной массой  $10 - 12 \dots 30 - 40M_{\odot}$ . Образуются в ходе вспышки сверхновой SN Ib/c или II
  - Чёрные дыры остаются от звёзд с начальной массой  $40M_{\odot} +$ . 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.



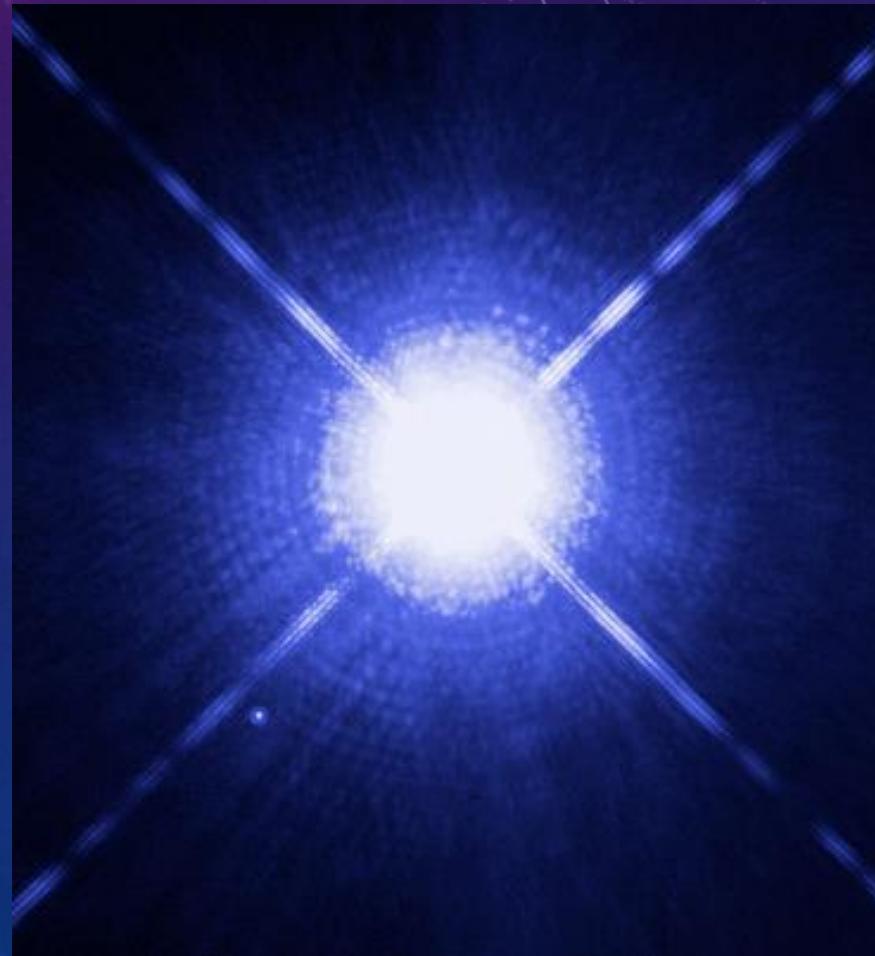
# БЕЛЫЕ КАРЛИКИ: ИСТОРИЯ

- 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 Сириус Б. Его светимость  $\sim 0.05L_{\odot}$ , в 1896 г. подобный объект обнаруживается и у Проиона.
- 1910 г. – 40 Эридана Б относят к классу A0. И соответственно, при данной светимости имеет очень маленькие размеры.
- 1915 г. – Уолтер Адамс, получает спектр Сириуса Б. Температура оказывается 25 000 К
- 1922 г. – Виллем Лейтен вводит термин “белый карлик”



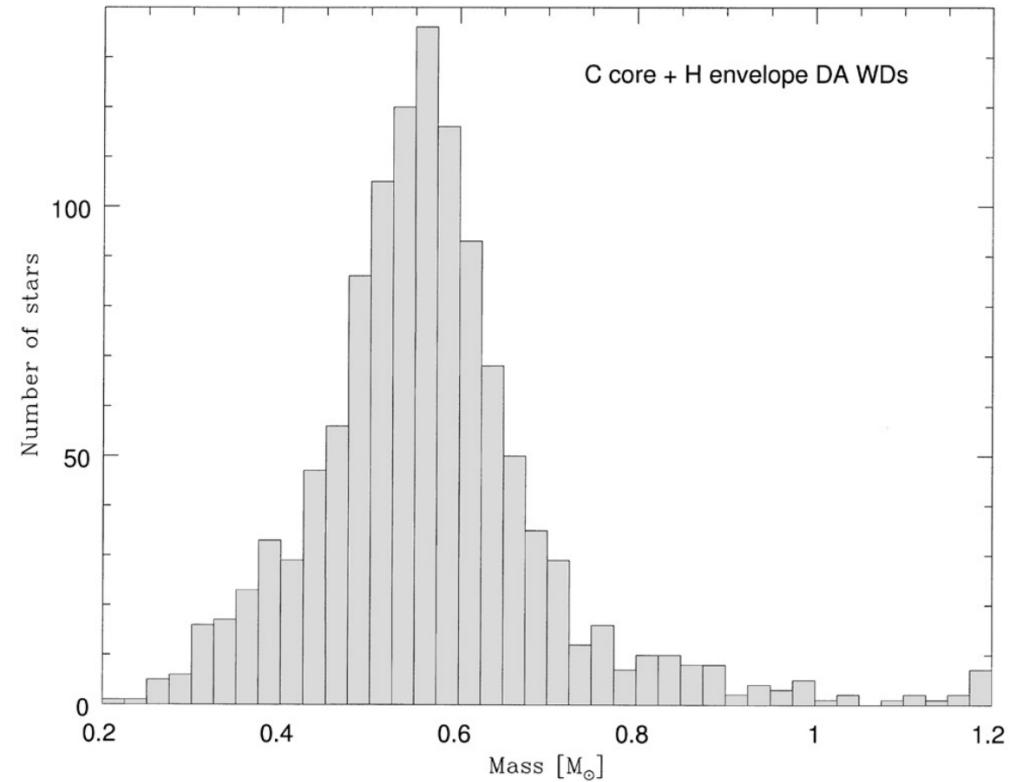
# БЕЛЫЕ КАРЛИКИ: ИСТОРИЯ

- 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.

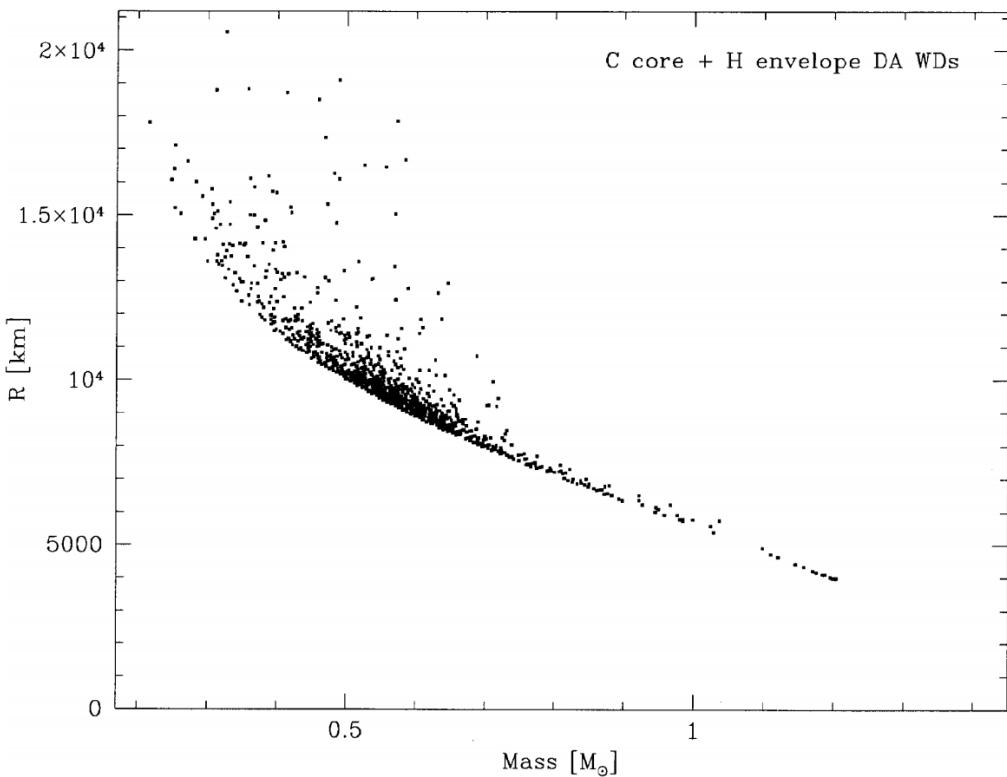


# ПАРАМЕТРЫ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

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

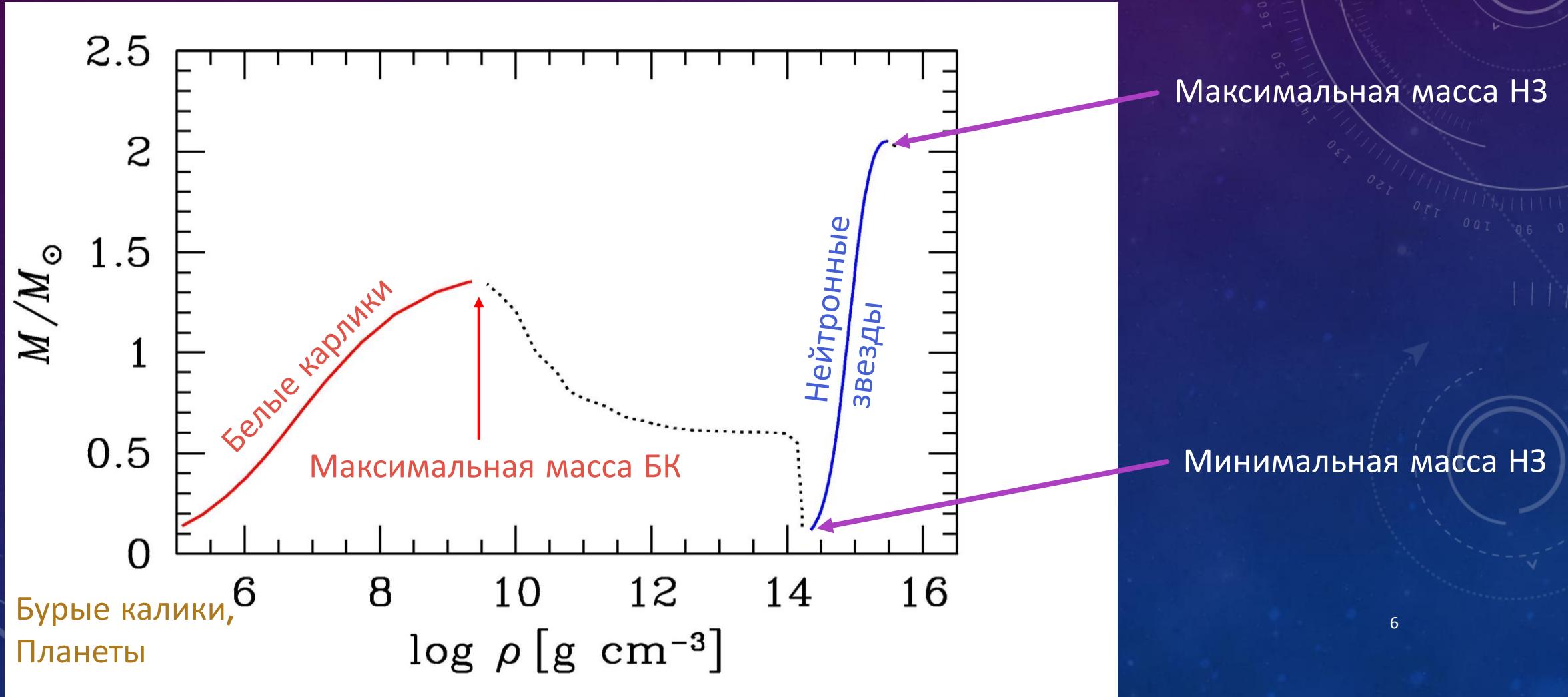


**Fig. 1.** Mass distribution of the 1175 DA white dwarfs of the SDSS DR1 sample with  $T_{\text{eff}} \geq 12\,000$  K. The peak mass is located at  $M = 0.562 M_{\odot}$ . Individual stars were grouped in bins of  $0.025 M_{\odot}$  width.



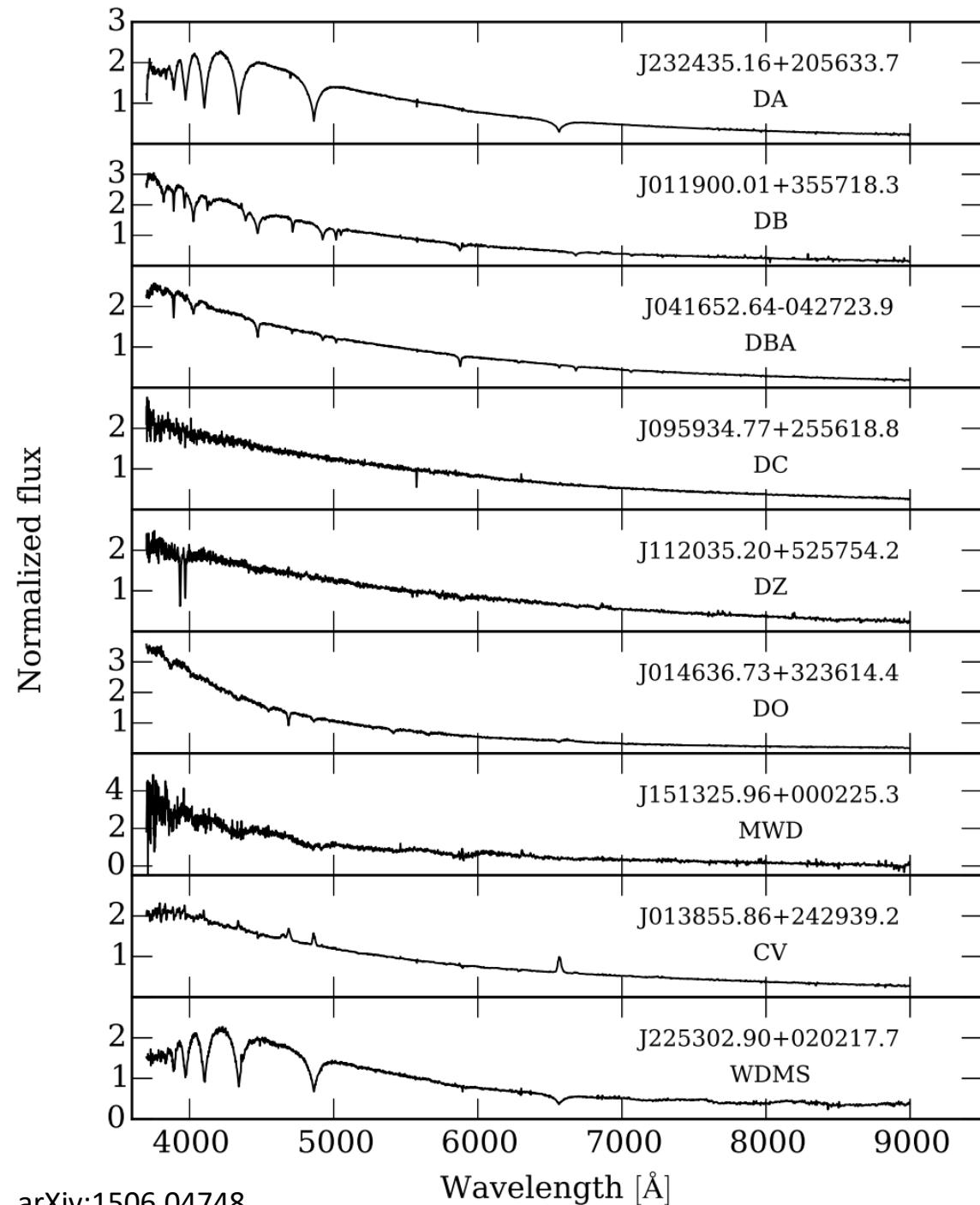
**Fig. 2.** Mass-radius relation for 1175 hot white dwarfs of the same sample. The relation does not extend to masses  $M$  higher than  $1.2 M_{\odot}$ , or rather to the highest surface gravities  $\log g > 9.0$ .

# ПАРАМЕТРЫ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

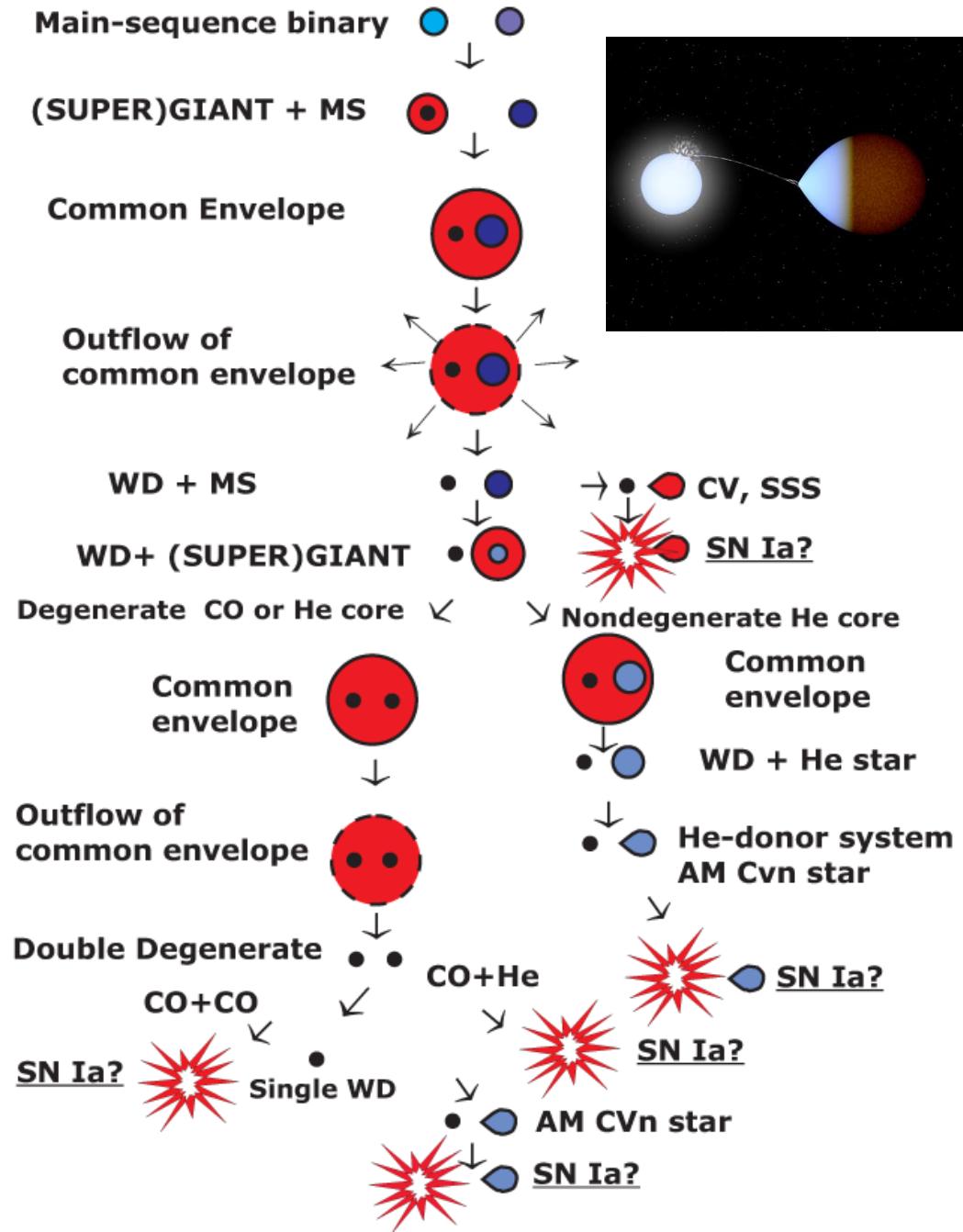


# СПЕКТРЫ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

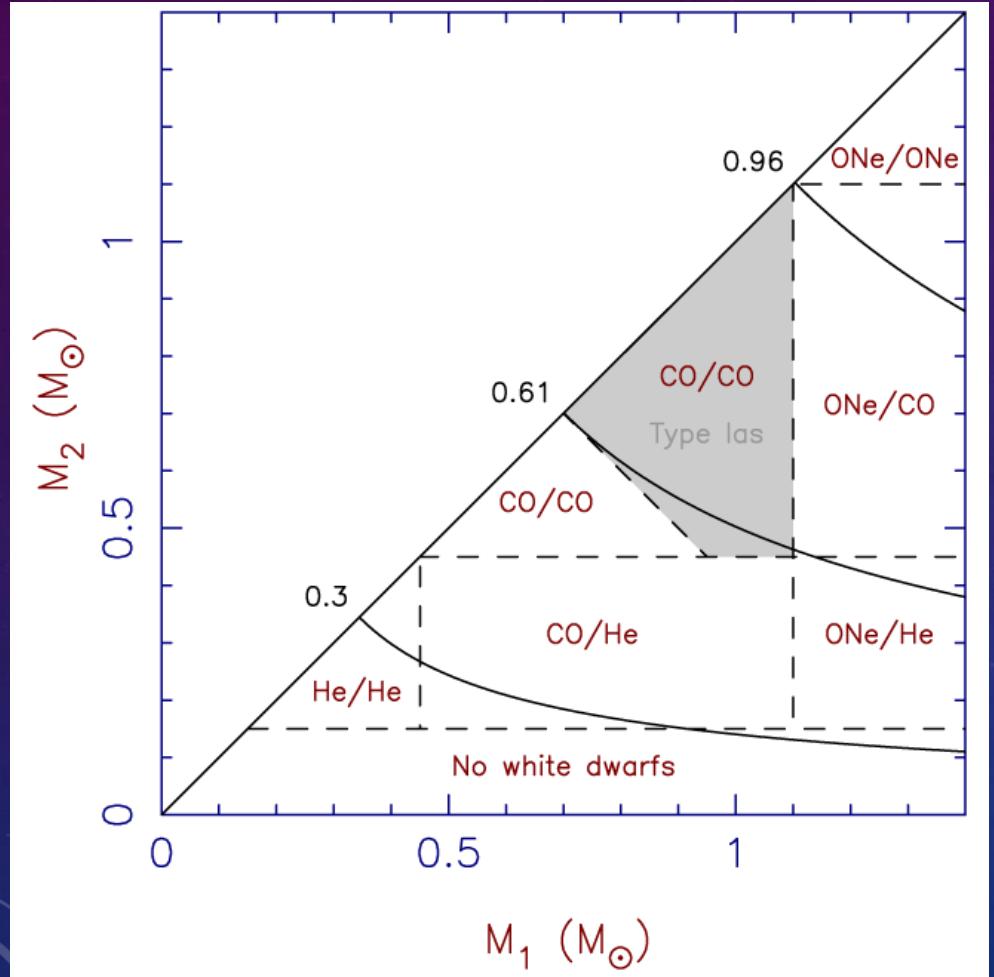
Class	$T_{\text{eff}}$ Range (K)	Spectral Characteristics
H-rich		
DA	6,000–100,000	Balmer lines only, no He or metal features
DAO	>45,000	Balmer lines and weak He II features
He-rich		
DO	45,000–100,000	Strong He II lines, some He I present
DB	12,000–30,000	He I lines, no H or metals*
DBA	12,000–30,000	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



## CLOSE BINARIES

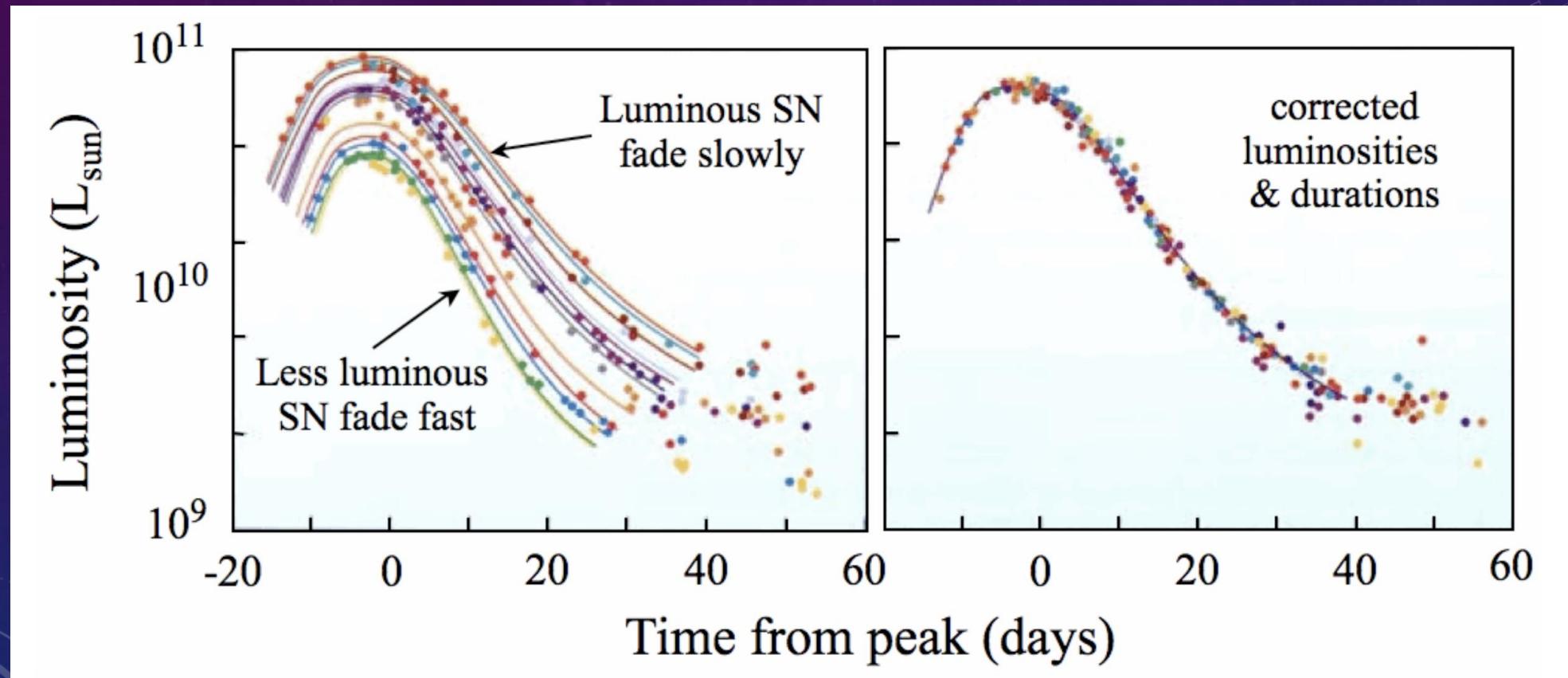


# БК В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

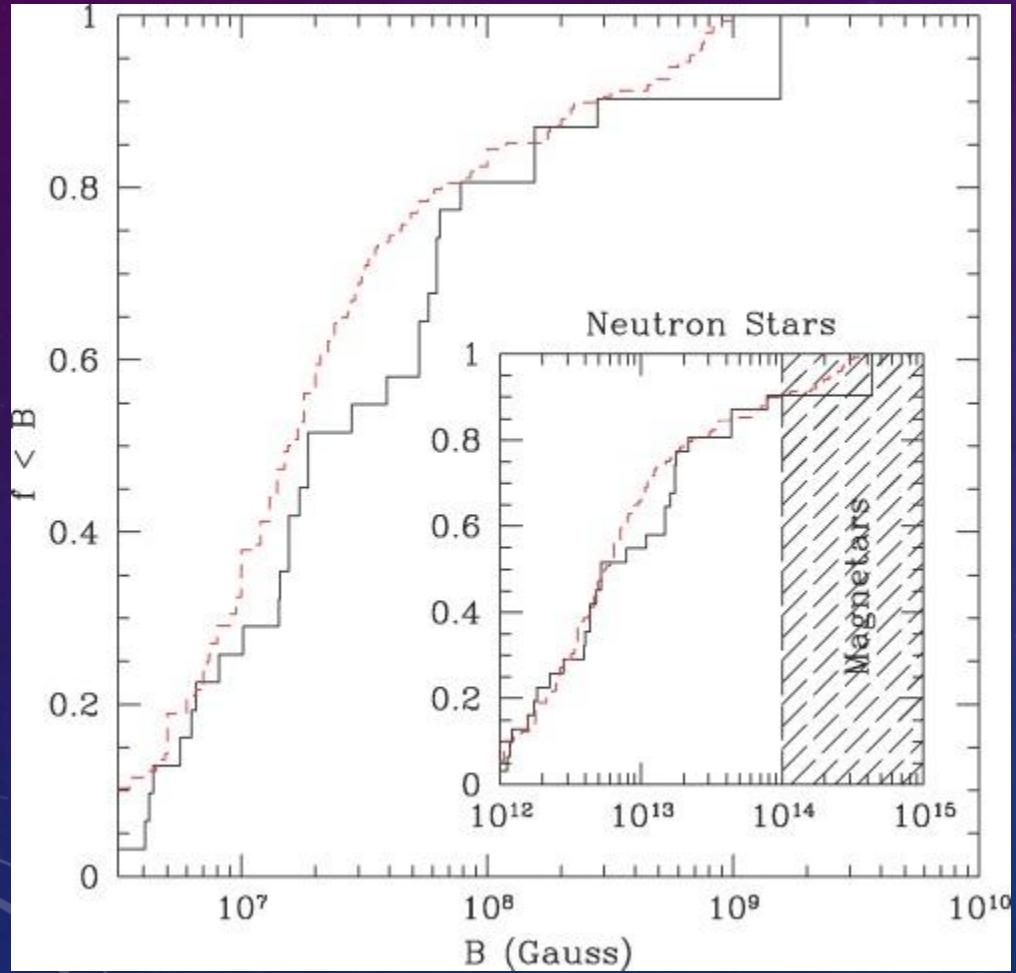


<https://www.emis.de/journals/LRG/Articles/Irr-2014-3/articlese7.html>

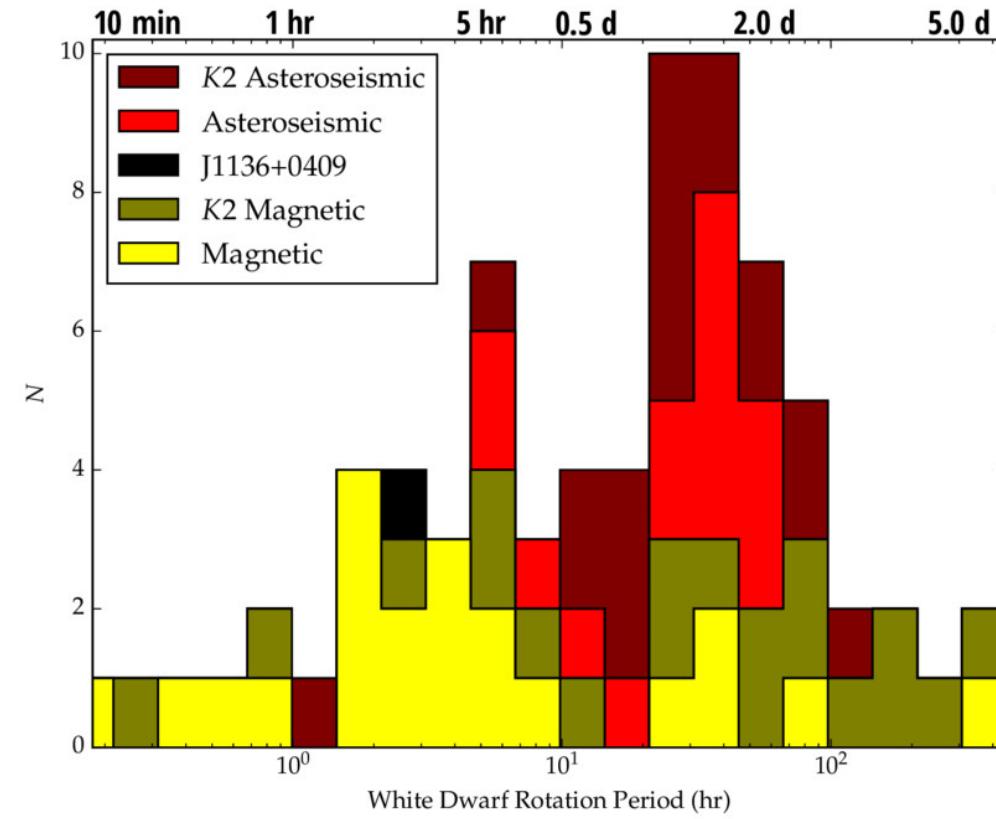
# НОВЫЕ И СВЕРХНОВЫЕ IA



# МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВРАЩЕНИЕ БК



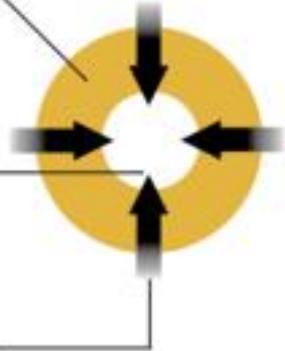
The long stare of *K2* is helping us find many new **spotted magnetic** white dwarfs



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

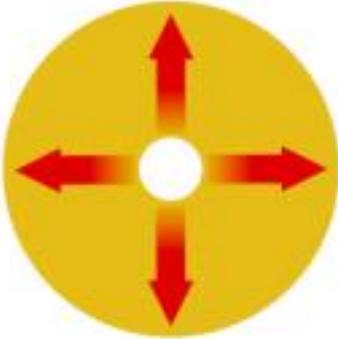
### COLLAPSE

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



### SUPERNOMA

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



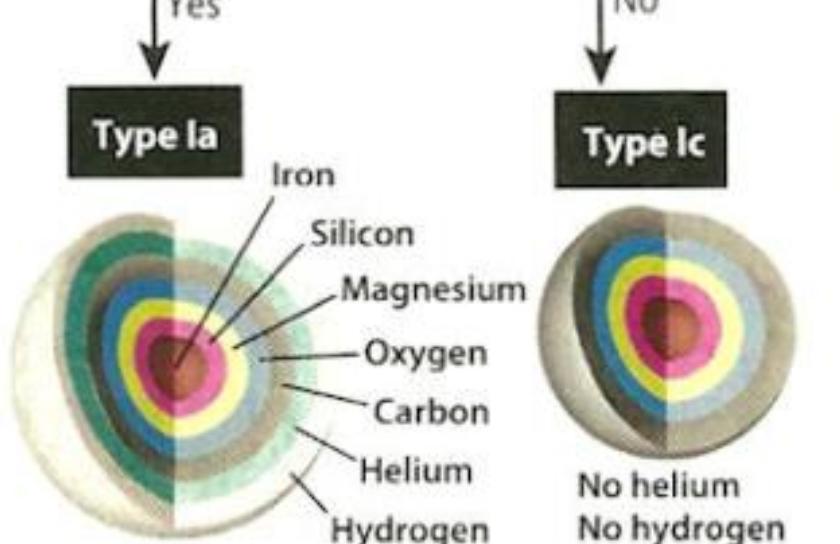
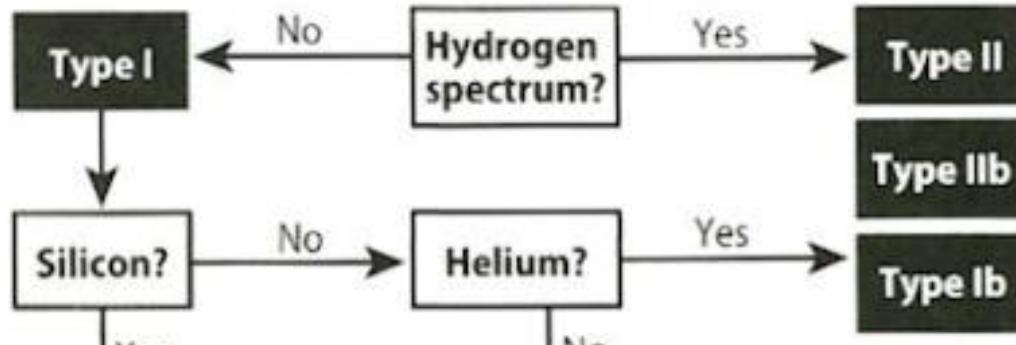
### FAILED SUPERNOVA

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

NewScientist  
5 May 2012

# supernovae spectra

## Thermonuclear explosion

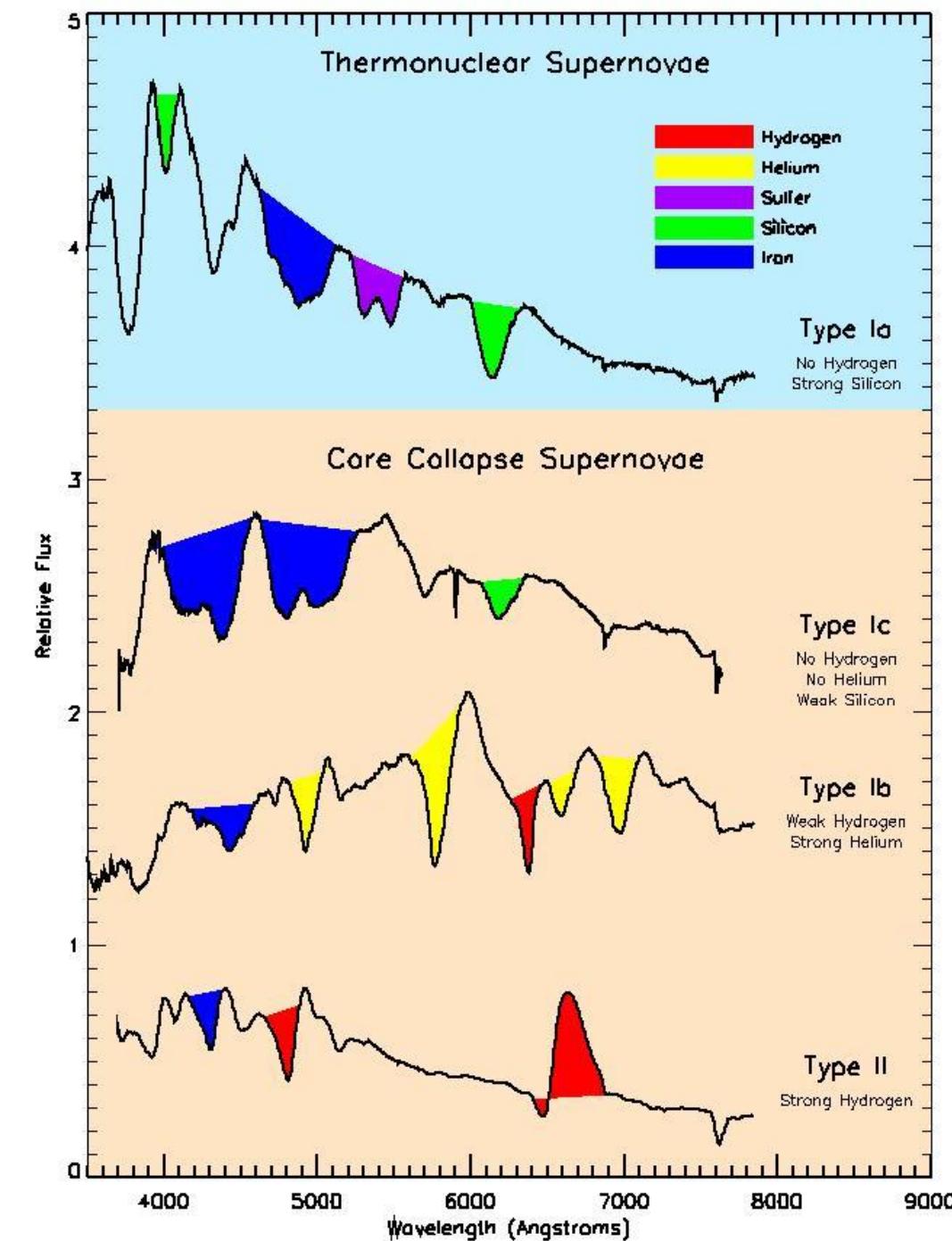
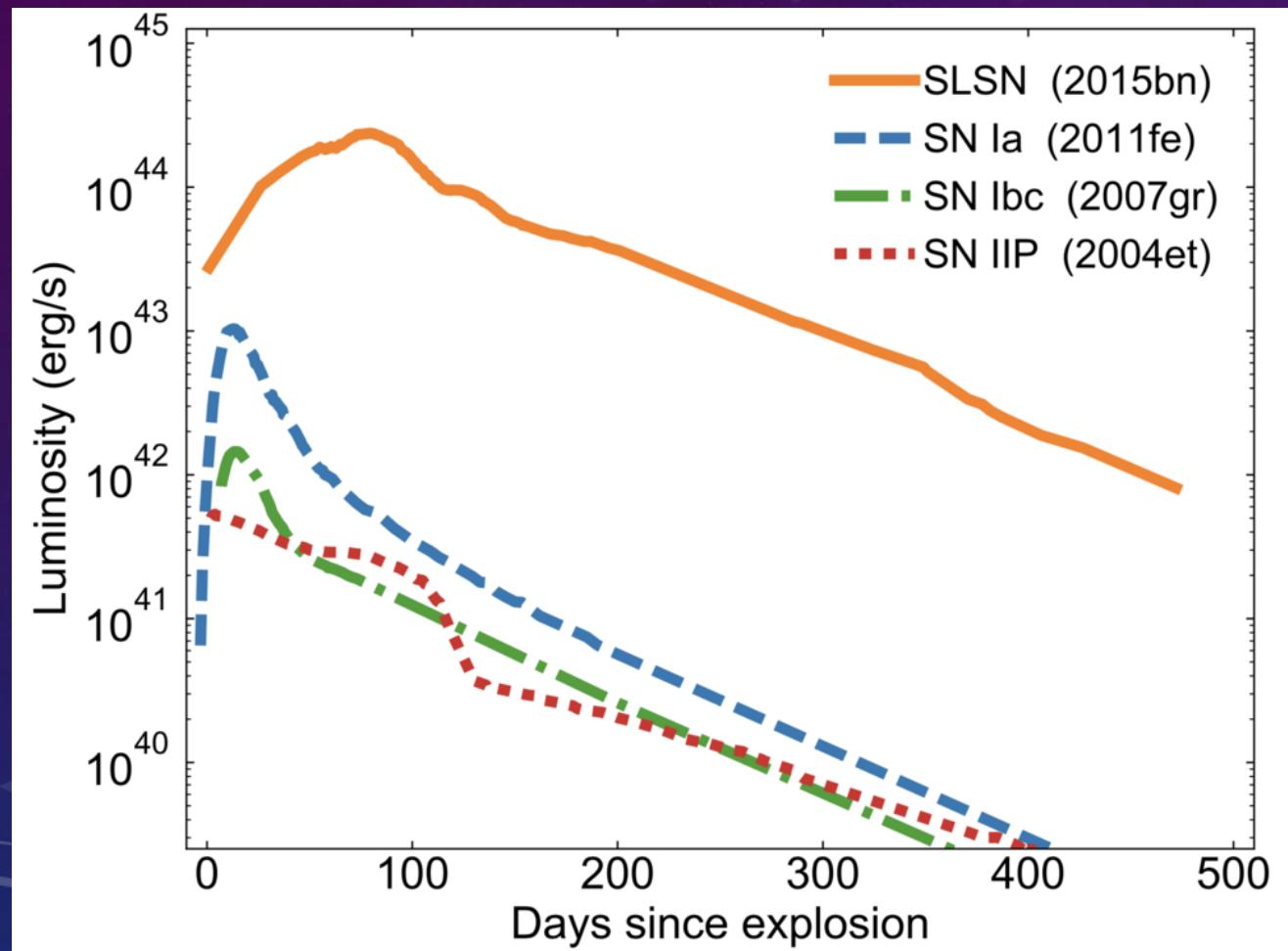


## Core collapse

Transition between types observed

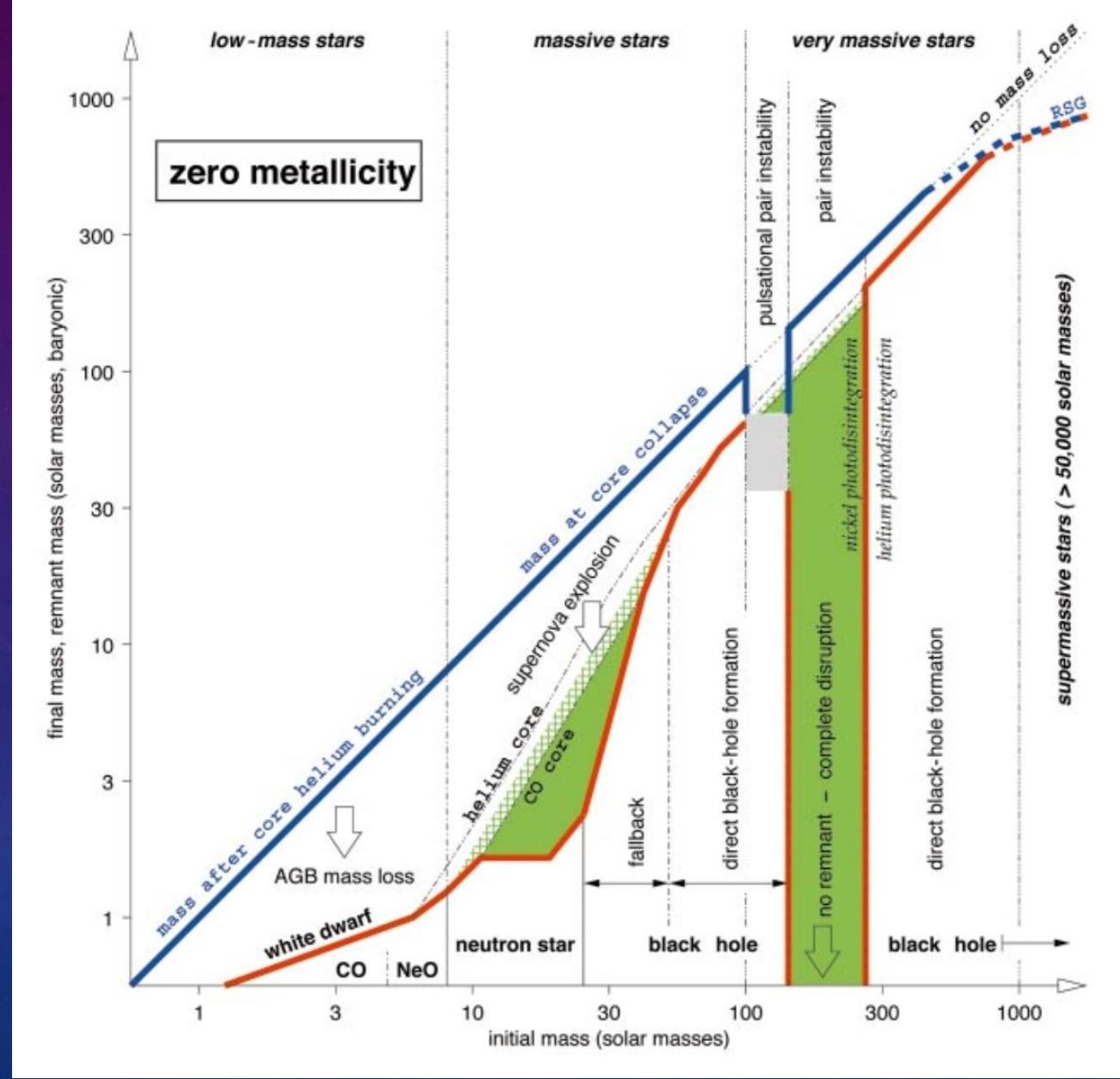
To characterize a supernova, astronomers analyze its spectrum and look for hydrogen, silicon, and helium, as well as how the star's brightness changes over time. This diagram shows how the cores of stars that produce different types of supernovae compare. ASTRONOMY: ROEN KELLY, AFTER MARYAM MODJAZ

# СВЕРХНОВЫЕ



# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

- Нейтронные звёзды (НЗ) – вырожденные сколапсировавшие ядра массивных ( $\sim 8 \dots 40 M_{\odot}$ ) 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.

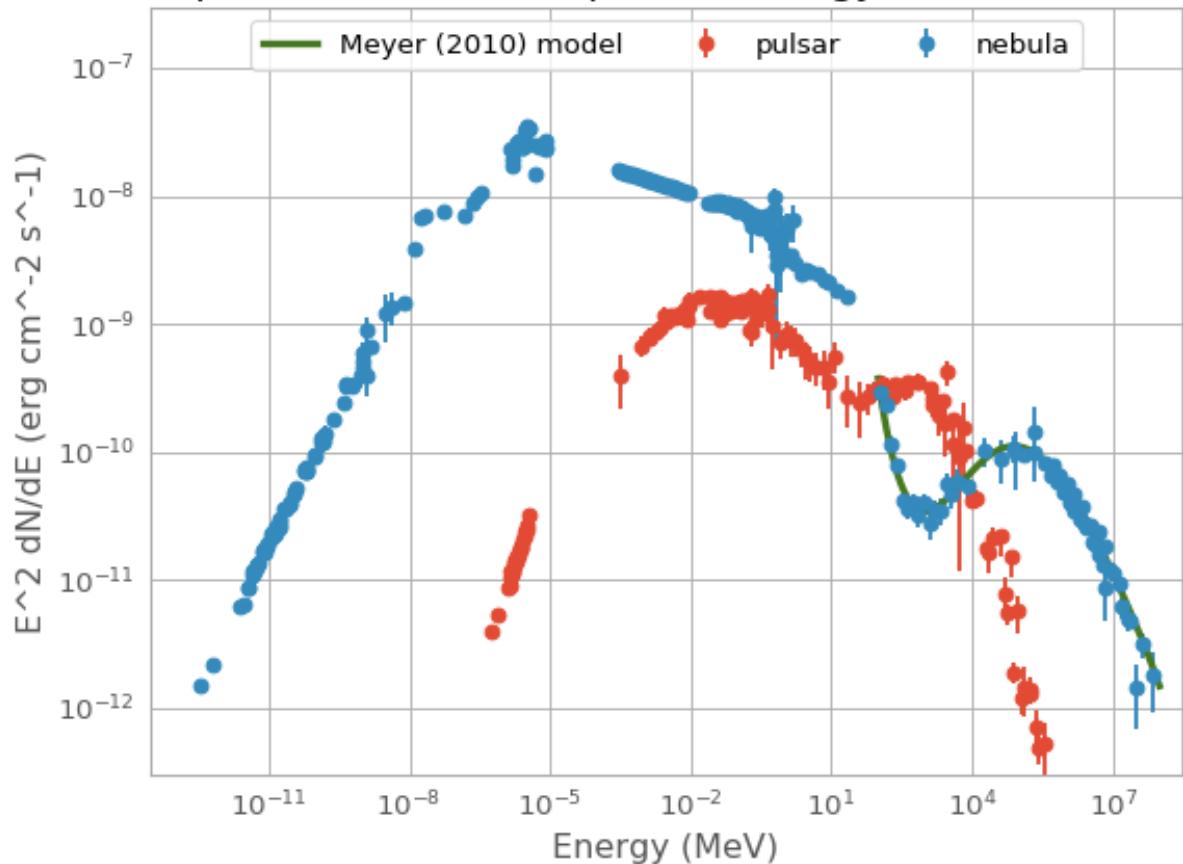


# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

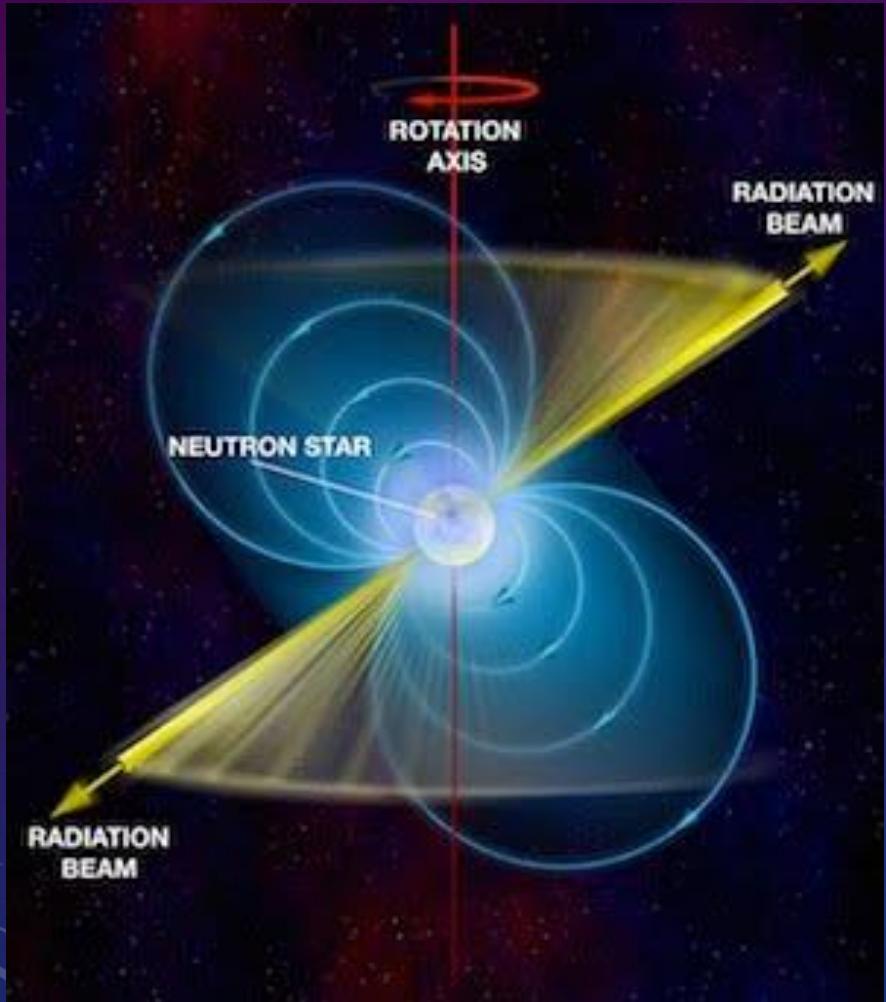
- Но в целом НЗ проявляют себя во всех диапазонах длин волн – от радио до гамма и далее.
- Первые теоретические предпосылки: Бааде и Цвикки 1934.
- Первый наблюдаемый объект: Sco X-1 (LMXB, Giacconi et al. 1962, PRL, 9, 439) – хотя о pecулярности центральной звезды в Крабовидной туманности знали еще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

[https://docs.gammapy.org/0.6/tutorials/crab\\_mwl\\_sed/index.html](https://docs.gammapy.org/0.6/tutorials/crab_mwl_sed/index.html)

Crab pulsar and nebula spectral energy distribution (SED)

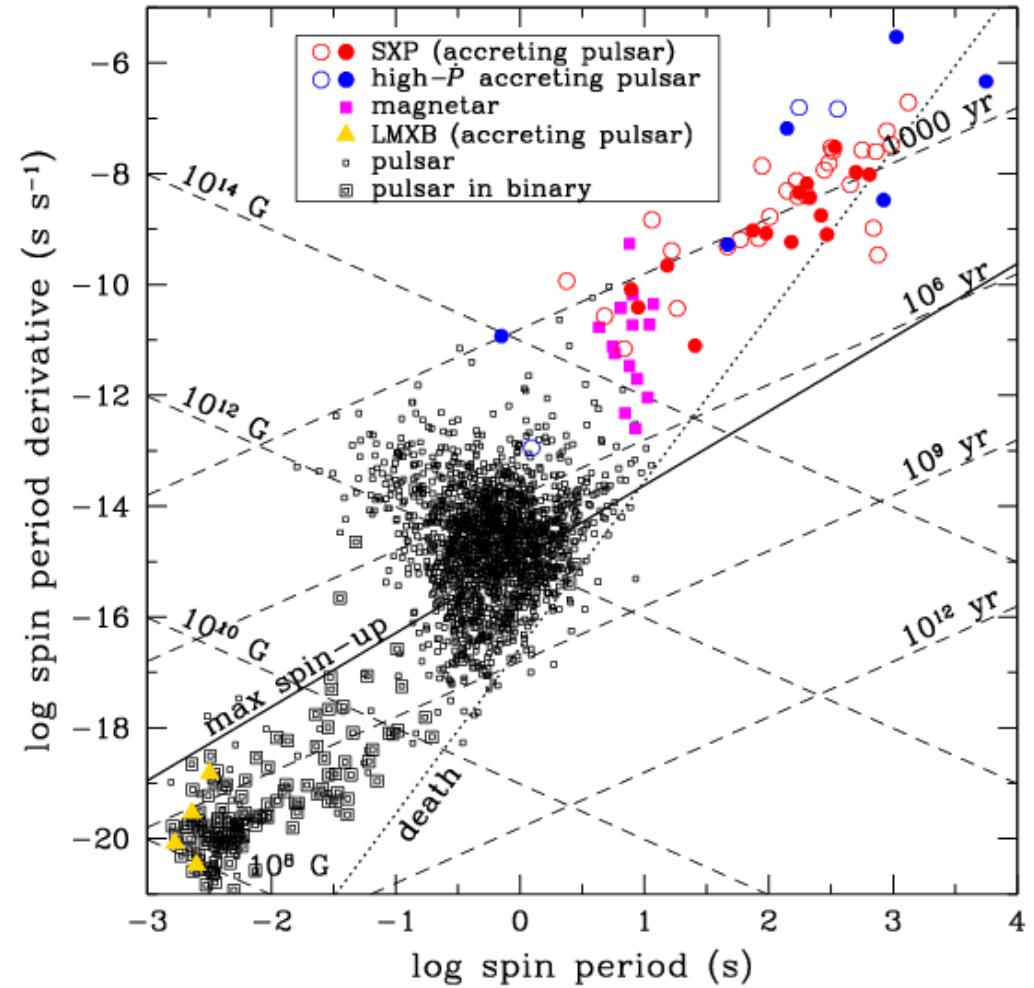


# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ



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	$10^{9\dots 15}$ Гс, в среднем $10^{12}$ Гс
«Время жизни»	10-100 млн. лет.

# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

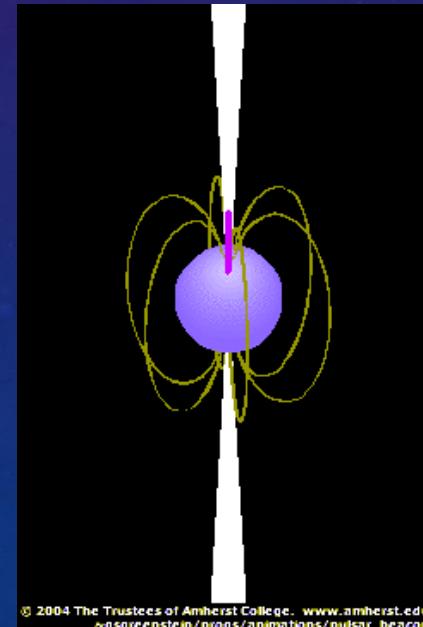


Стандартная оценка возраста пульсара:

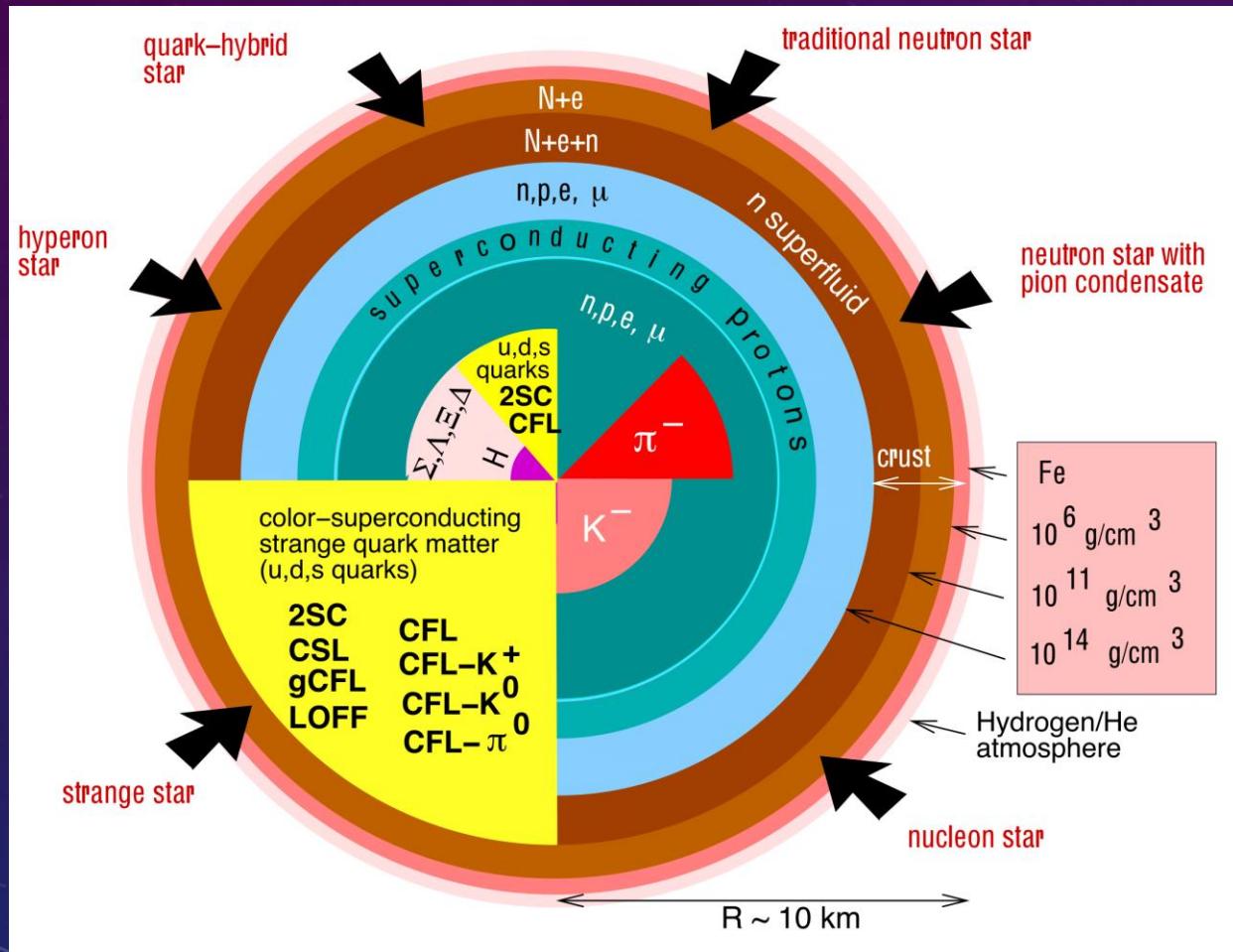
$$\tau_{\text{ch}} = \frac{P}{2\dot{P}}$$

Стандартная оценка магнитного поля:

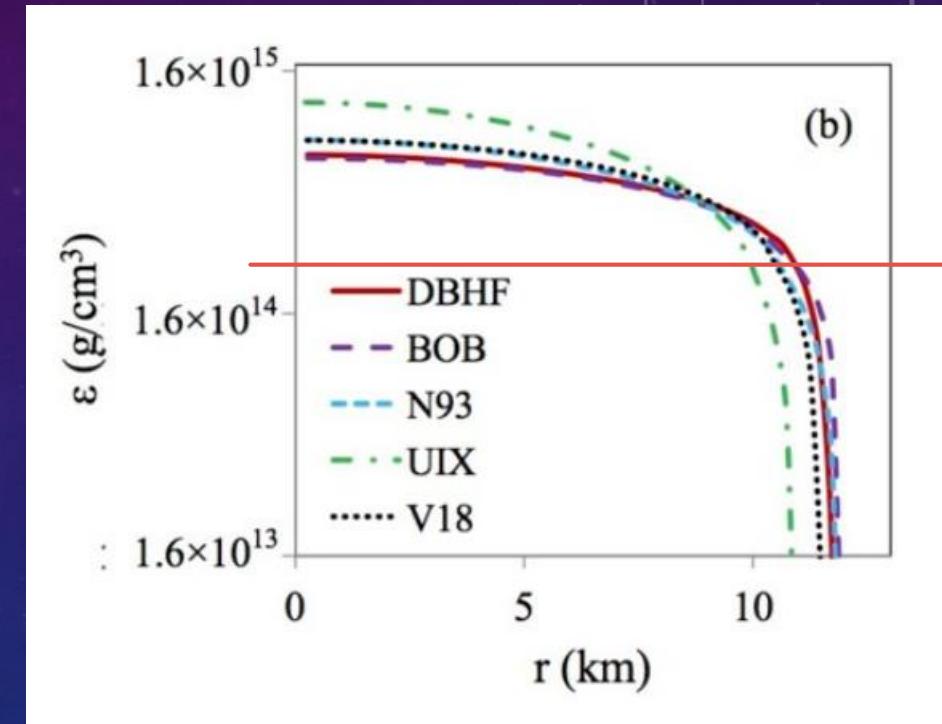
$$B_{\text{md}} \approx 3.2 \cdot 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ Гс}$$



# ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ НЗ

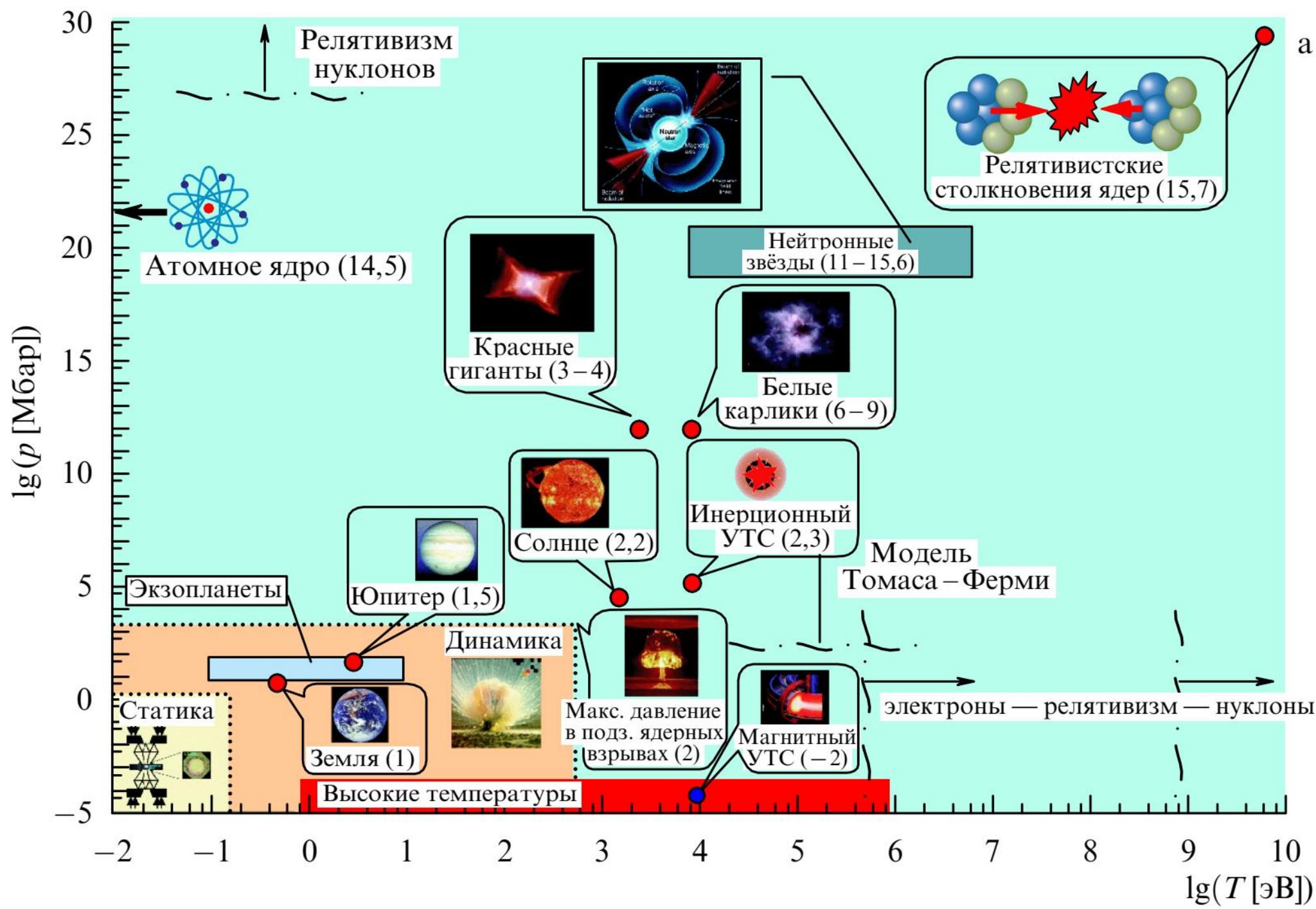
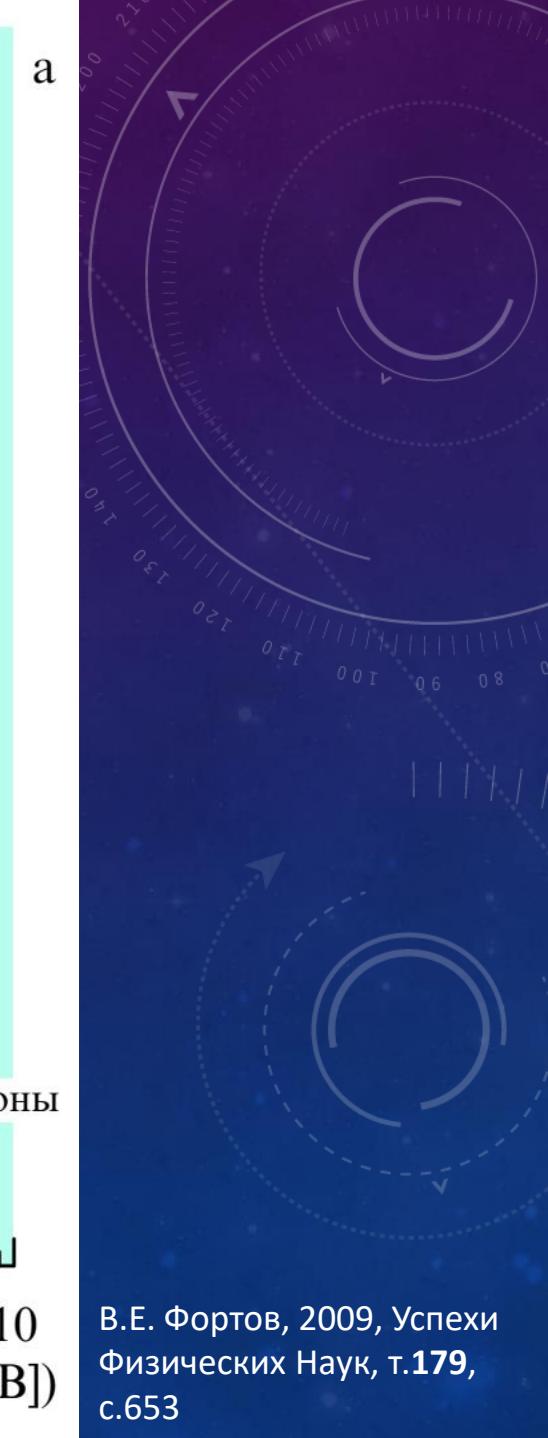


<https://compstar.uni-frankfurt.de/outreach/short-articles/what-are-neutron-stars-made-out-of/>

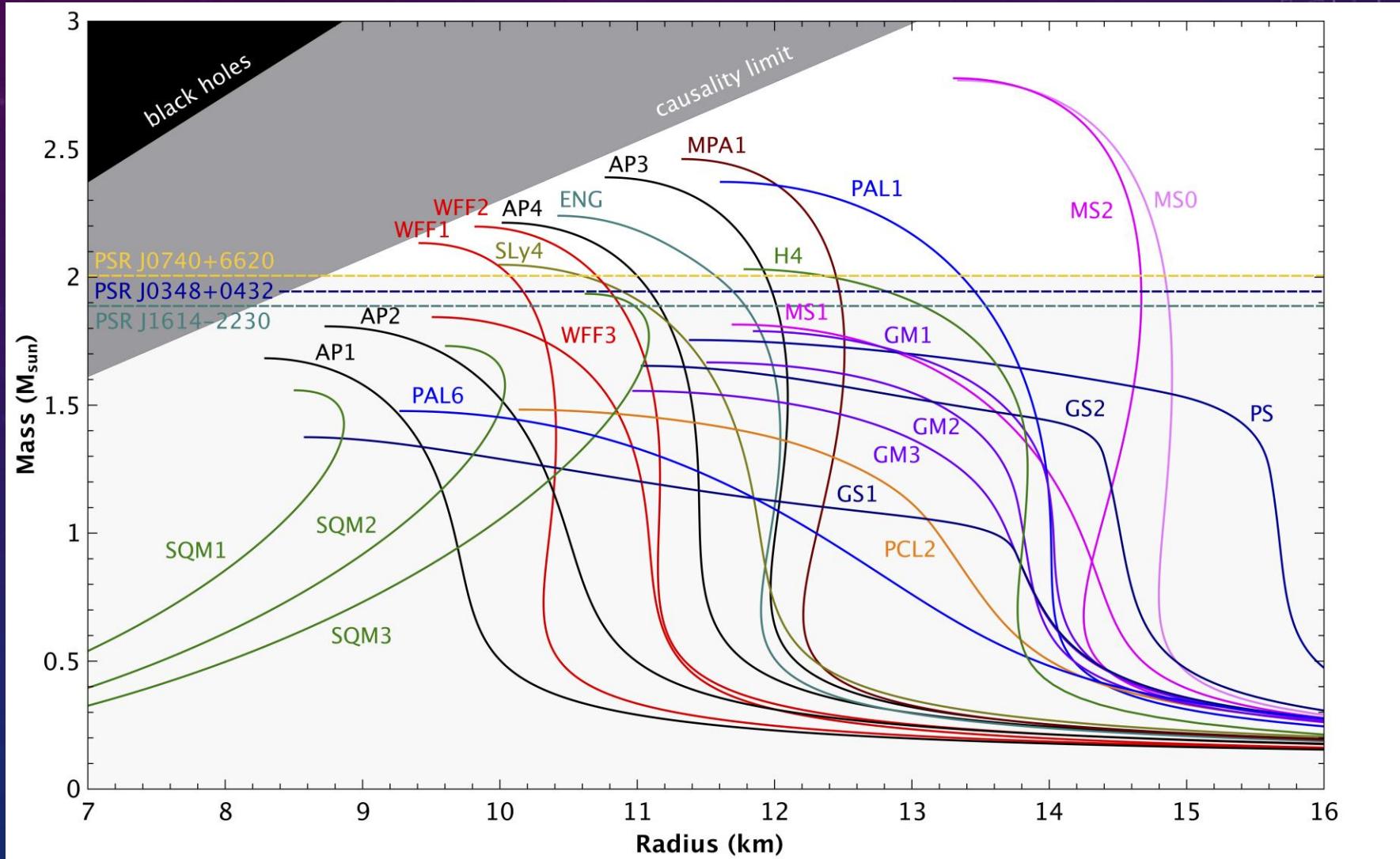


Sammarruca 2014

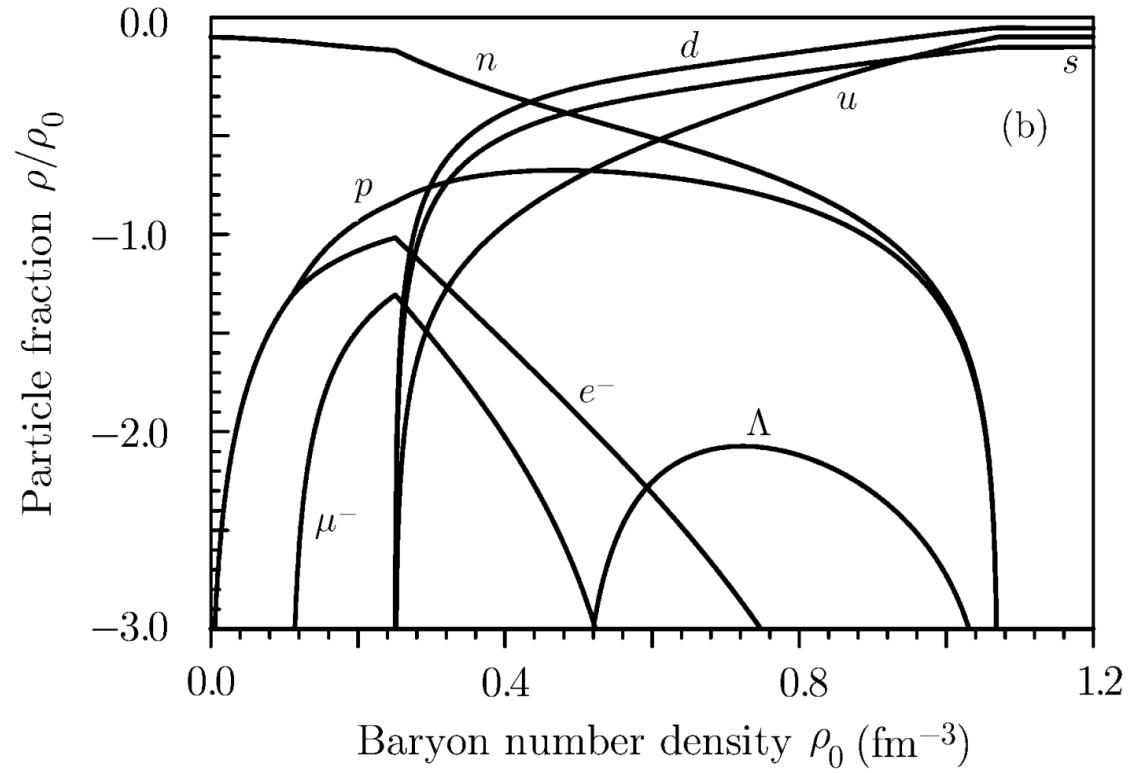
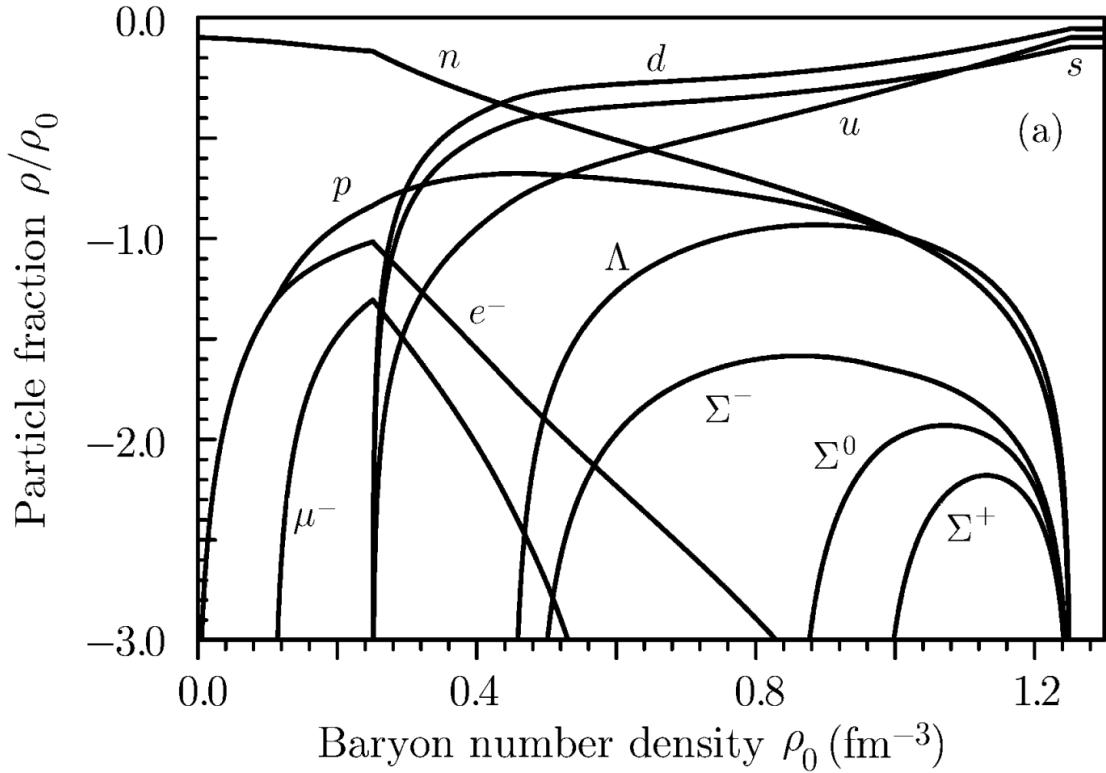
$$\rho_0 = \frac{3m_p}{4\pi r_p^3} \approx 2.3 \cdot 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$



# УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

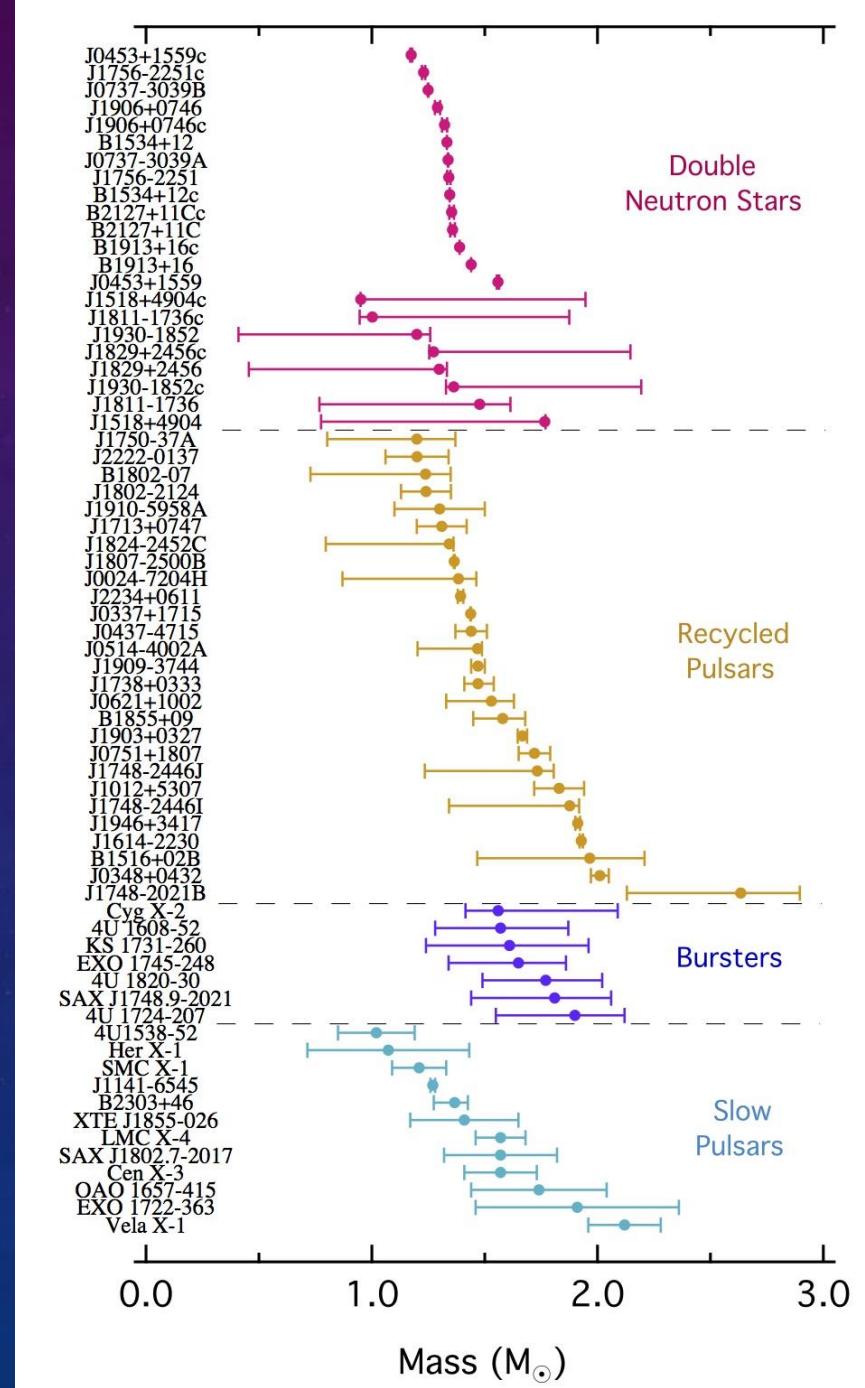
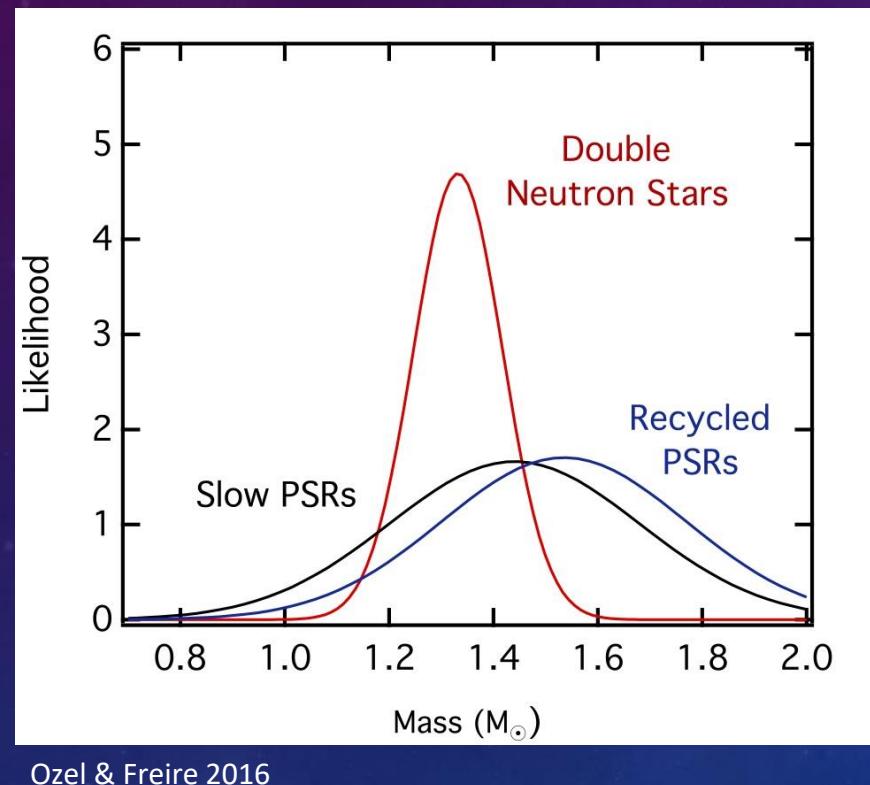


# ПРОБЛЕМА ГИПЕРОНОВ

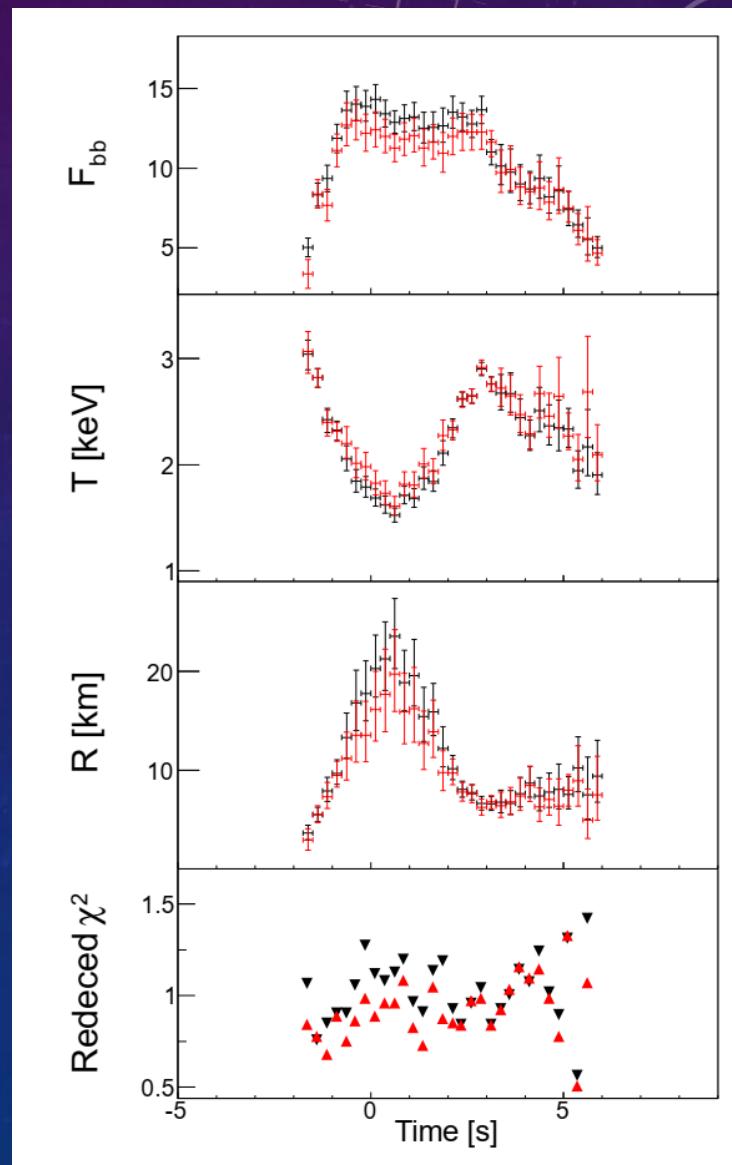
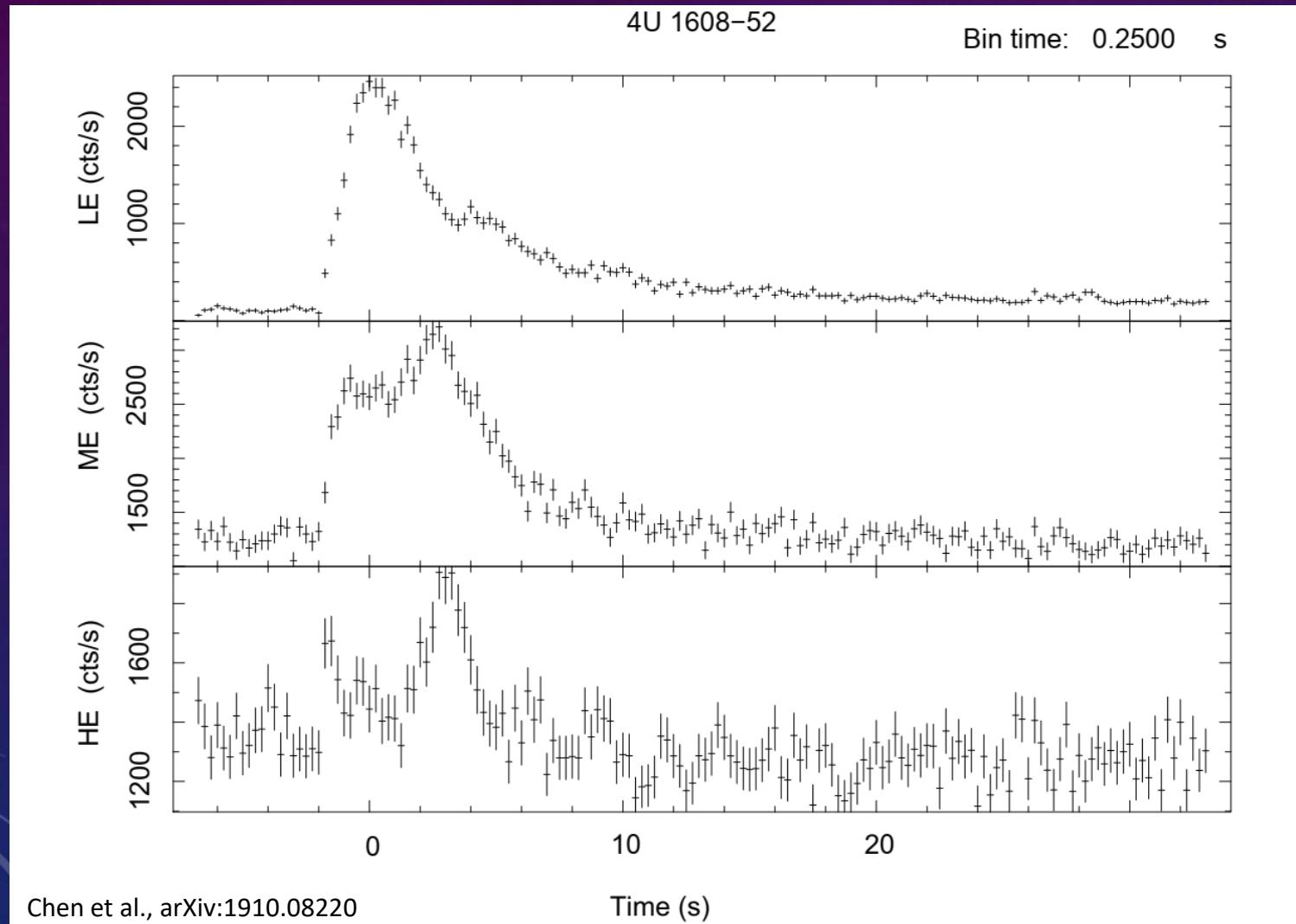


Bao et al. 2006, Comm. Theor. Phys., 45, 505

# МАССЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД



# РАДИУСЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД

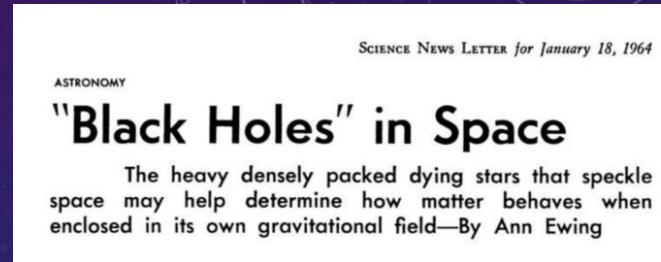


$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

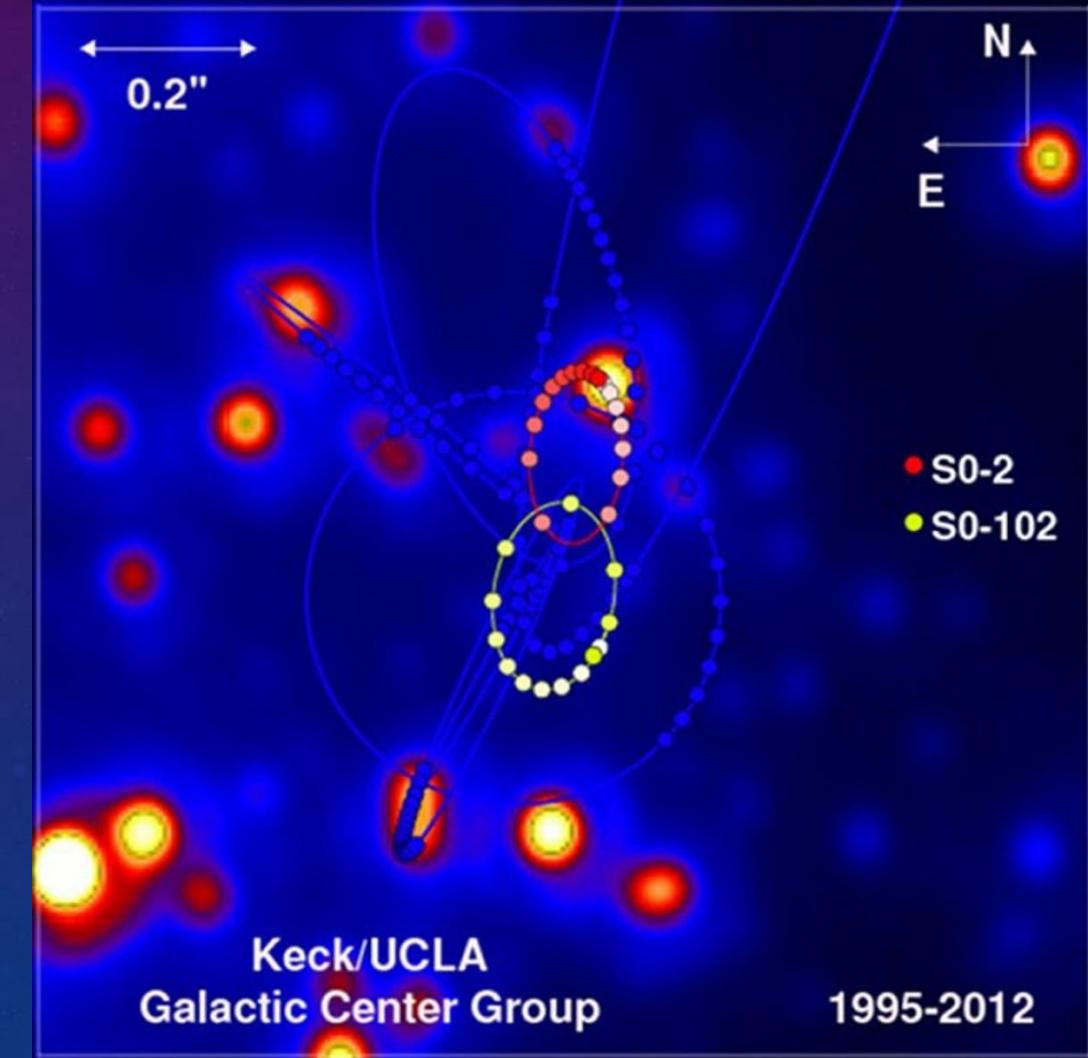
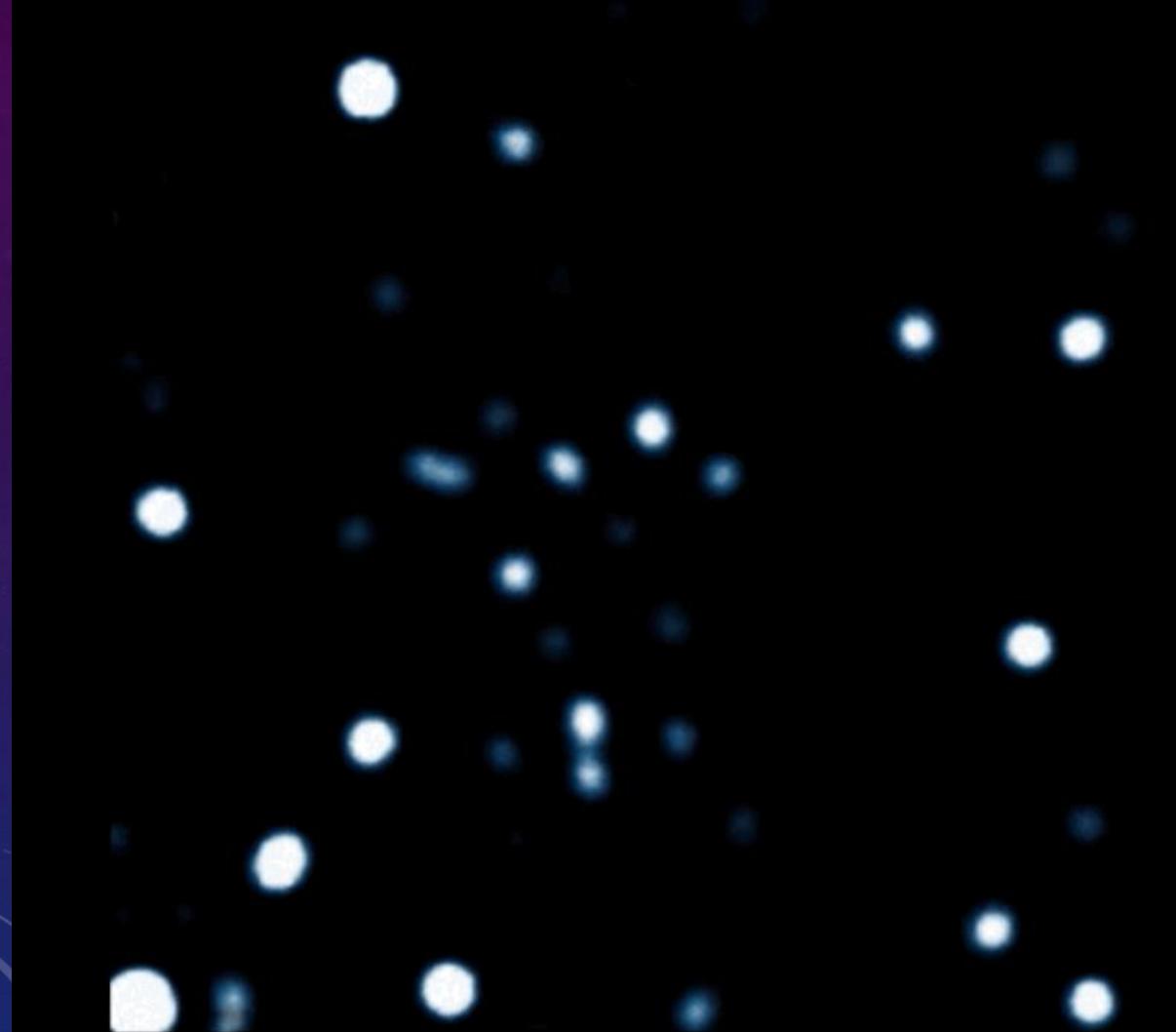
# ЧТО ТАКОЕ ЧЁРНАЯ ДЫРА?

- 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).

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



# СТРЕЛЕЦ А\* (SGR A\*)



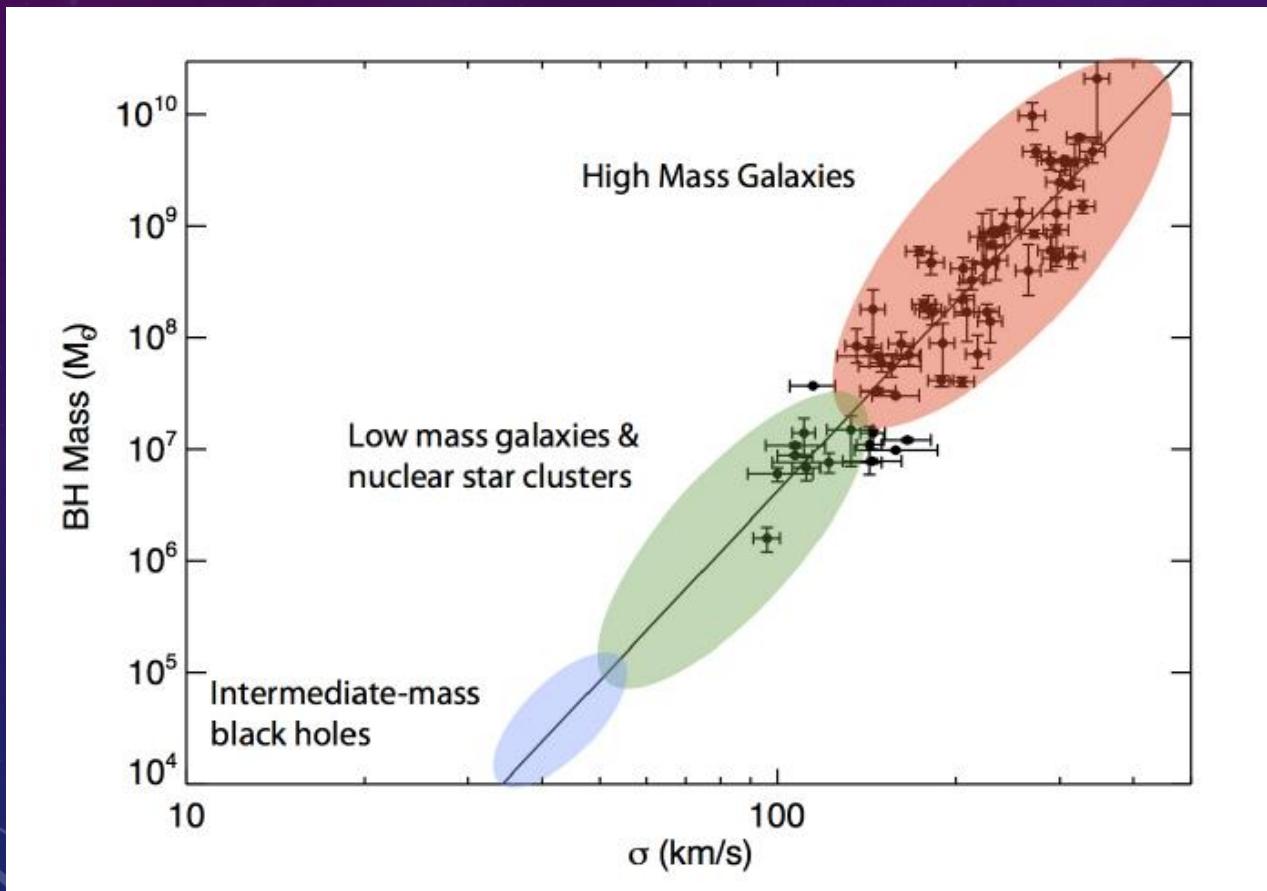
Первичные

Звёздные

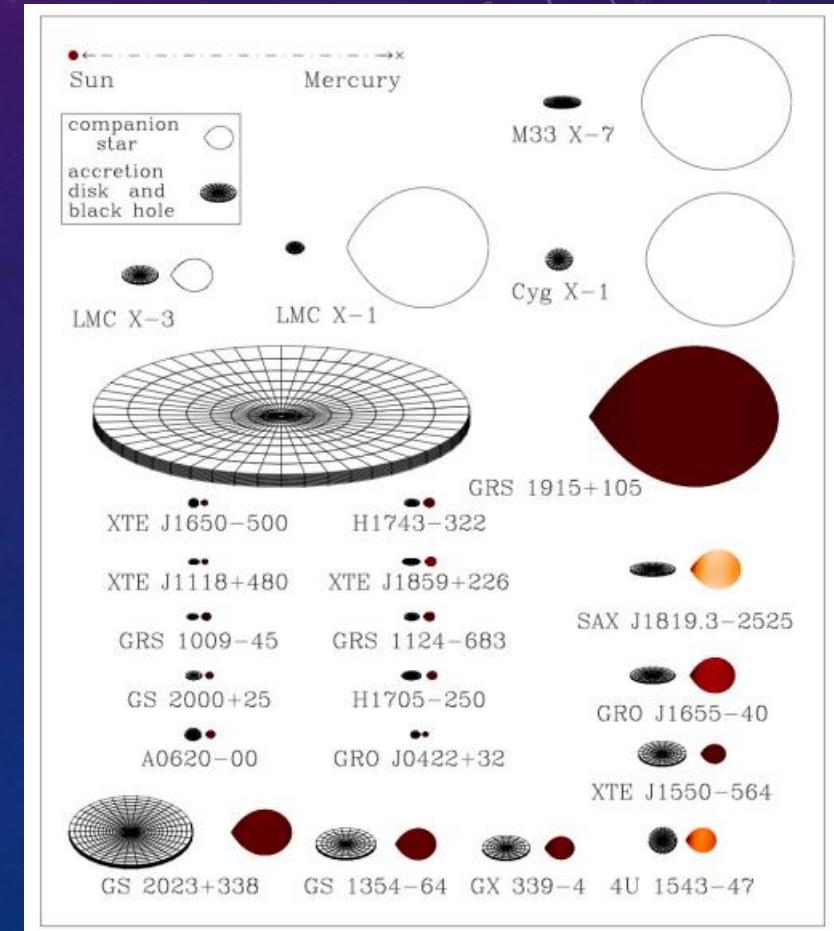
Промежуточные

Сверхмассивные

# ЗООПАРК ЧЁРНЫХ ДЫР

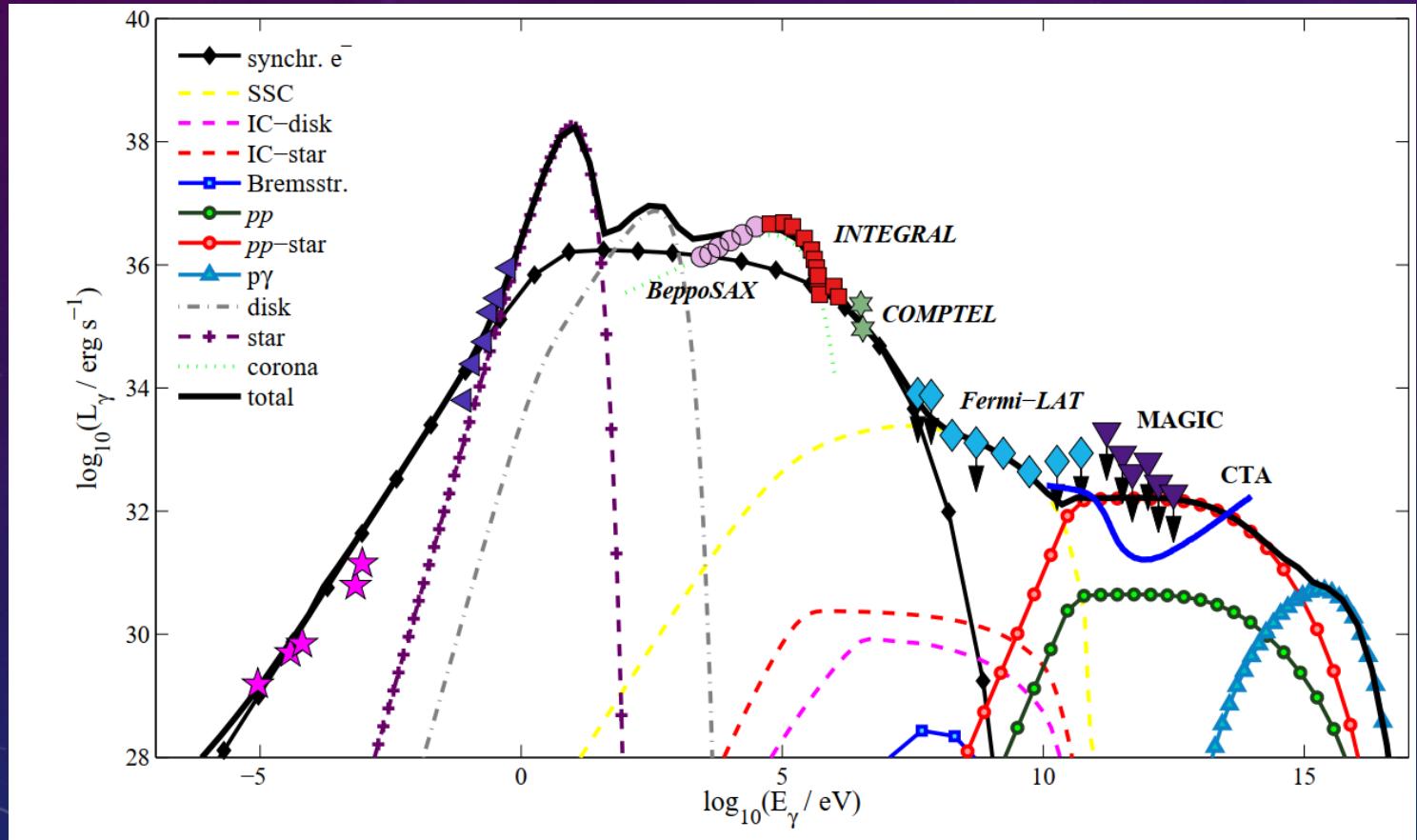


Wright et al. 2014

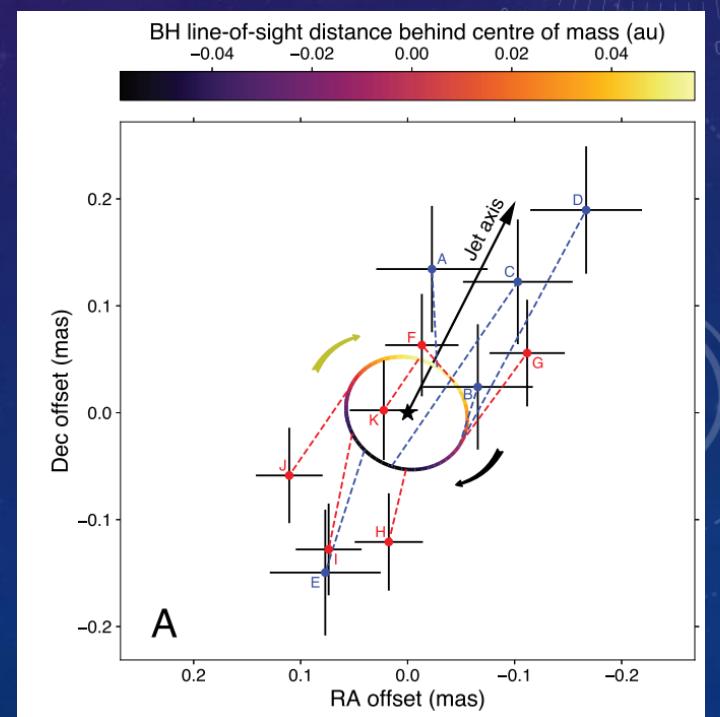
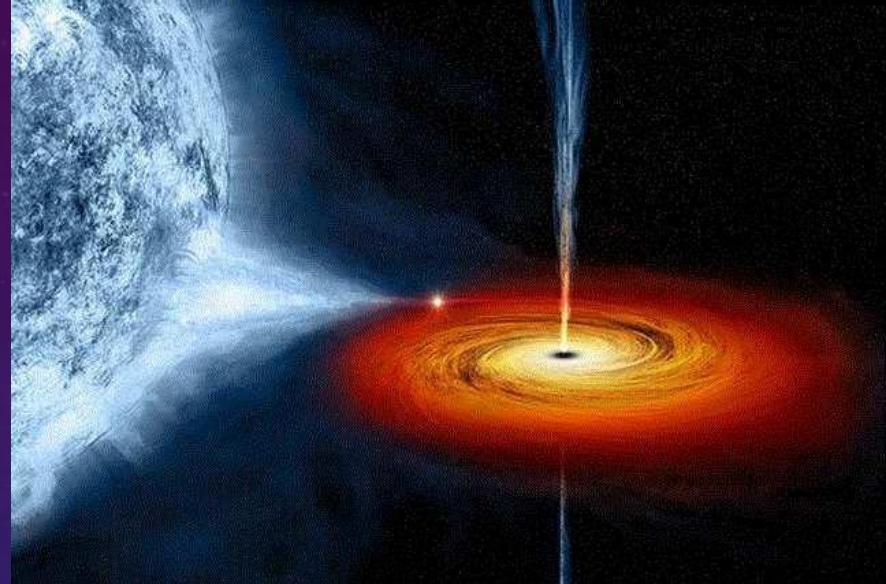


arXiv:1906.03871

# ЛЕБЕДЬ X-1 (CYG X-1)

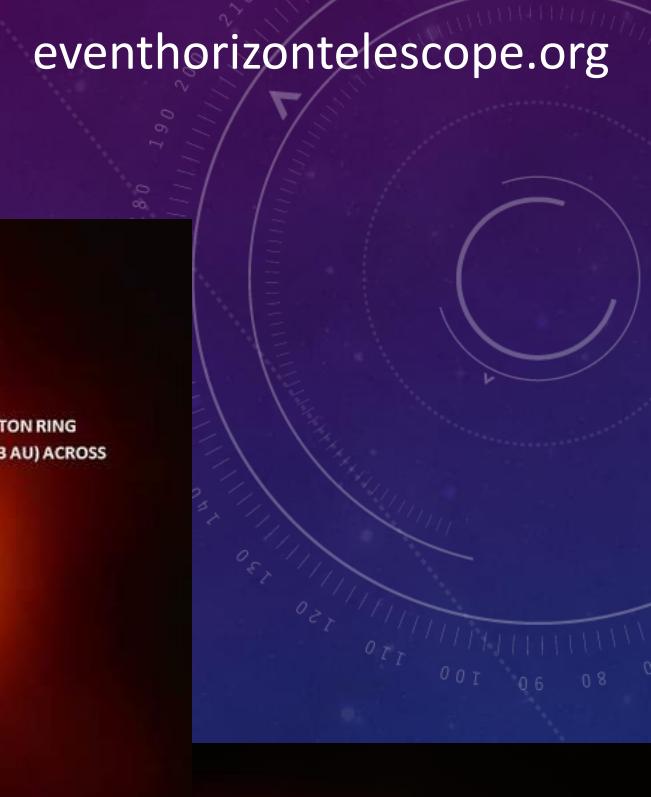
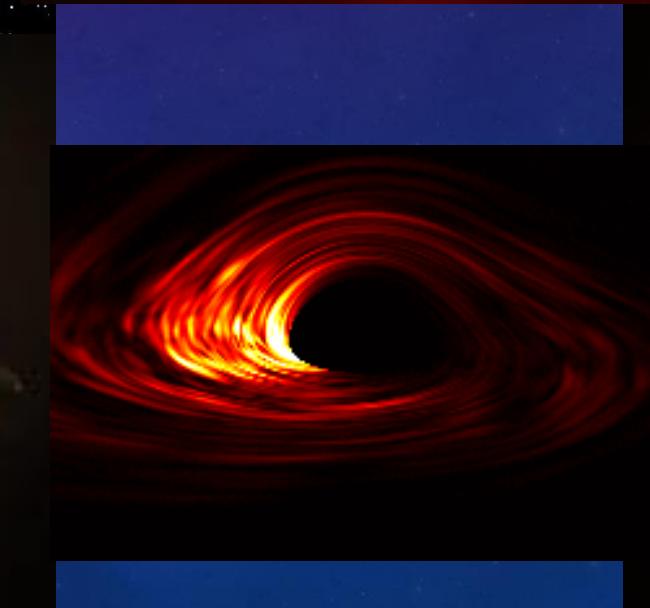
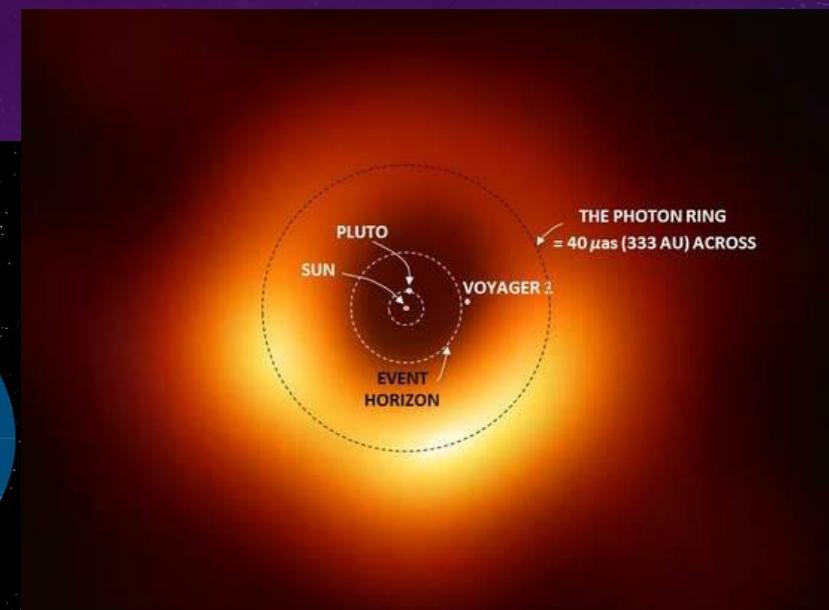
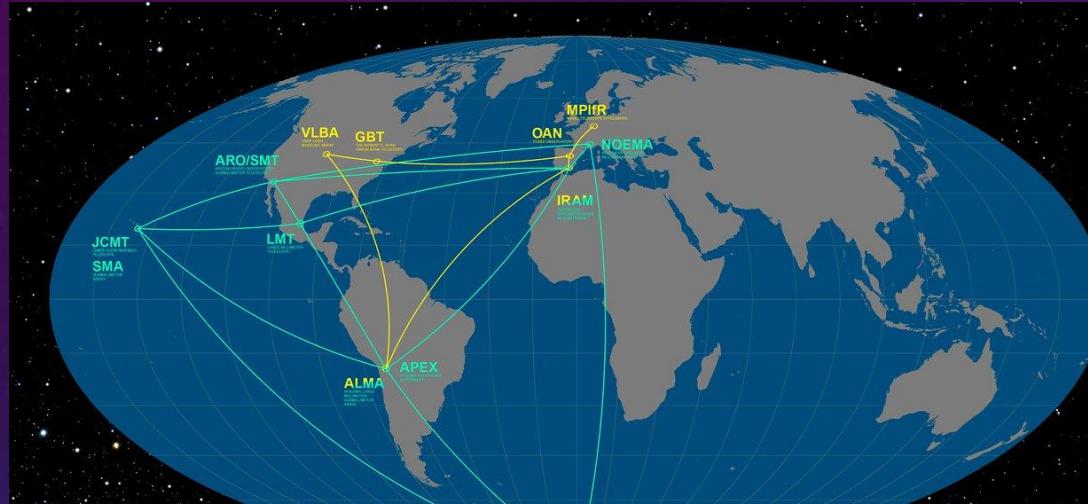


arXiv:1512.04772



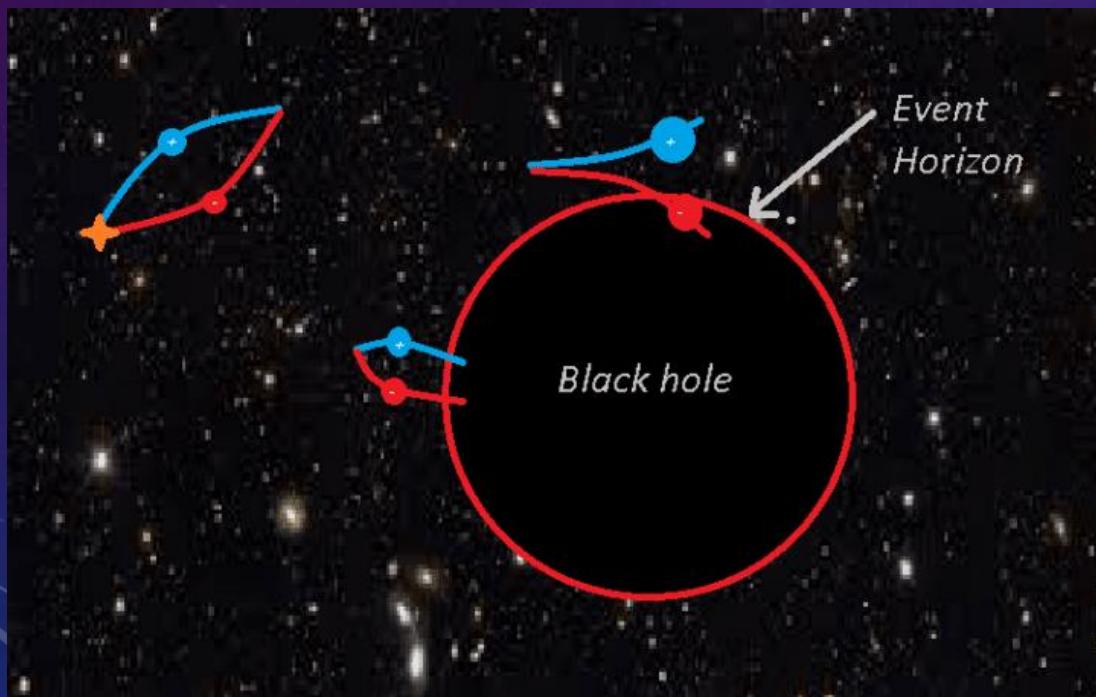
arXiv:2102.09091

# ПРОБЛЕМА ГОРИЗОНТА



# ЧД И ИНФОРМАЦИЯ

$$t_H \propto \frac{G^2 M^3}{hc}$$
 -- время испарения ЧД массой  $M$



Хокинг и Торн: Надо  
подправить квантовую  
теорию!



Джон Прескилл: Нет, надо  
подправить общую теорию  
относительности!