
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ: КРАТКИЙ ОБЗОР

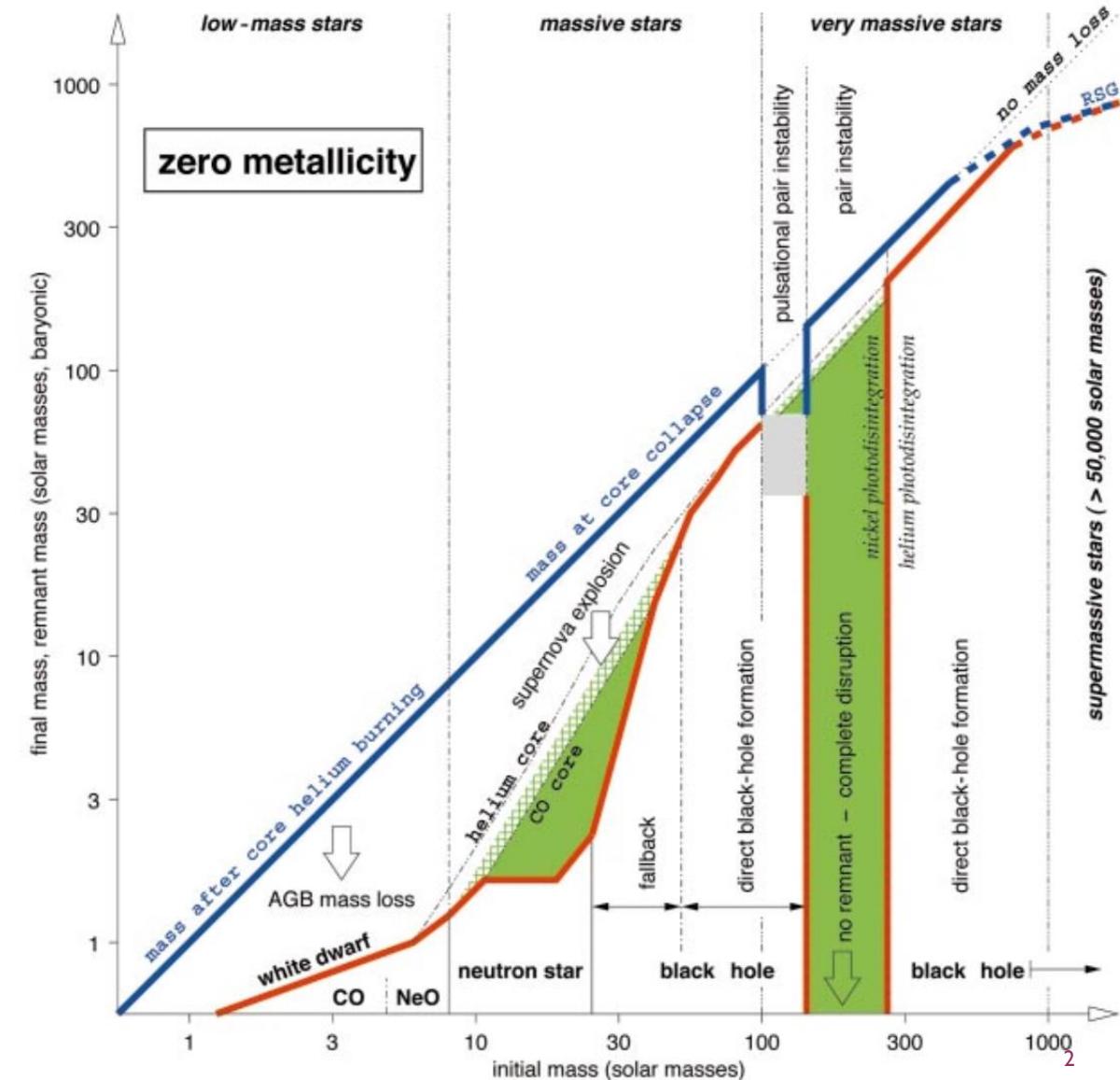
АНТОН БИРЮКОВ. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА», ОСЕНЬ 2022. ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ ВШЭ.



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

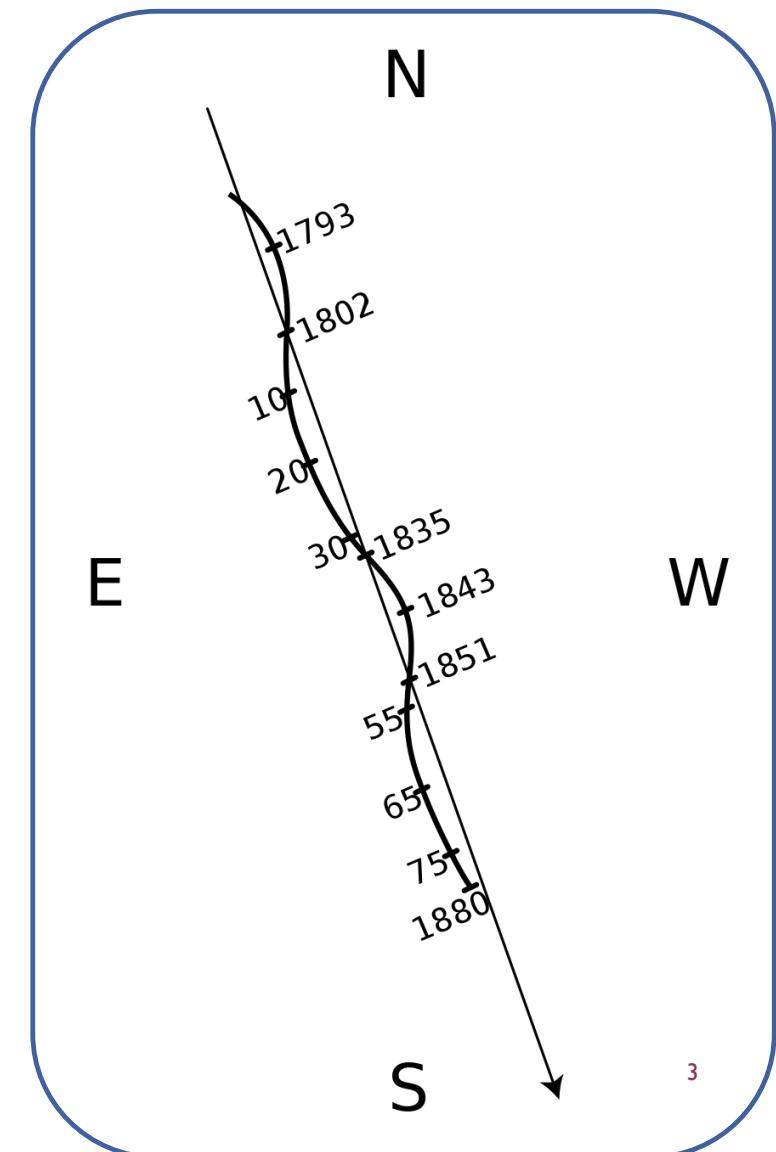
- **Белые карлики** – остатки звёзд с начальной массой до $\sim 12M_{\odot}$. Результат потери оболочки.
- **Нейтронные звёзды** – остатки звёзд с начальной массой $\sim 8 \dots 30M_{\odot}$. Образуются в ходе вспышки сверхновой SN Ib/c или II
- **Чёрные дыры** остаются от звёзд с начальной массой $25M_{\odot} +$. 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 ~ 400 млрд. звёзд.

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



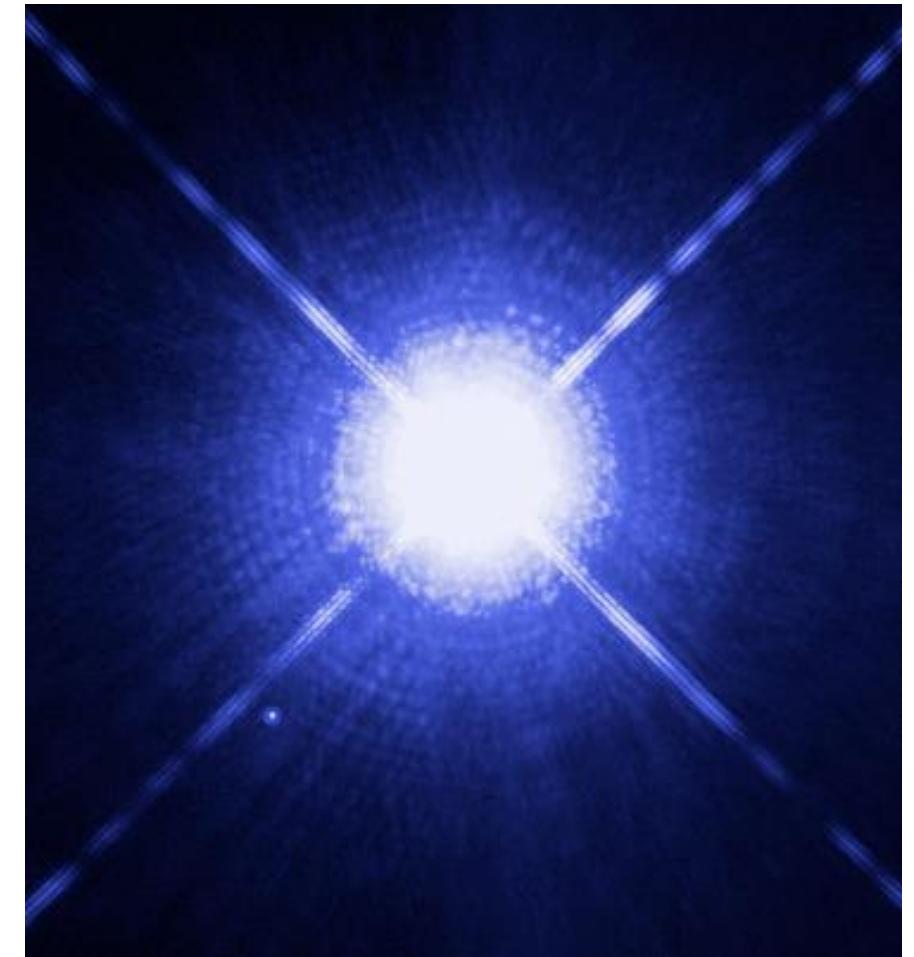
БЕЛЫЕ КАРЛИКИ: НЕМНОГО ИСТОРИИ

- 1844 г. – Фридрих Бессель предсказывает наличие невидимых массивных звёзд 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 К
- 1922 г. – Виллем Лейтен вводит термин “белый карлик”



БЕЛЫЕ КАРЛИКИ: НЕМНОГО ИСТОРИИ

- 1926 г. – Ральф Фаулер выдвигает идею о стационарности БК за счёт вырожденного фермионного газа (знай 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

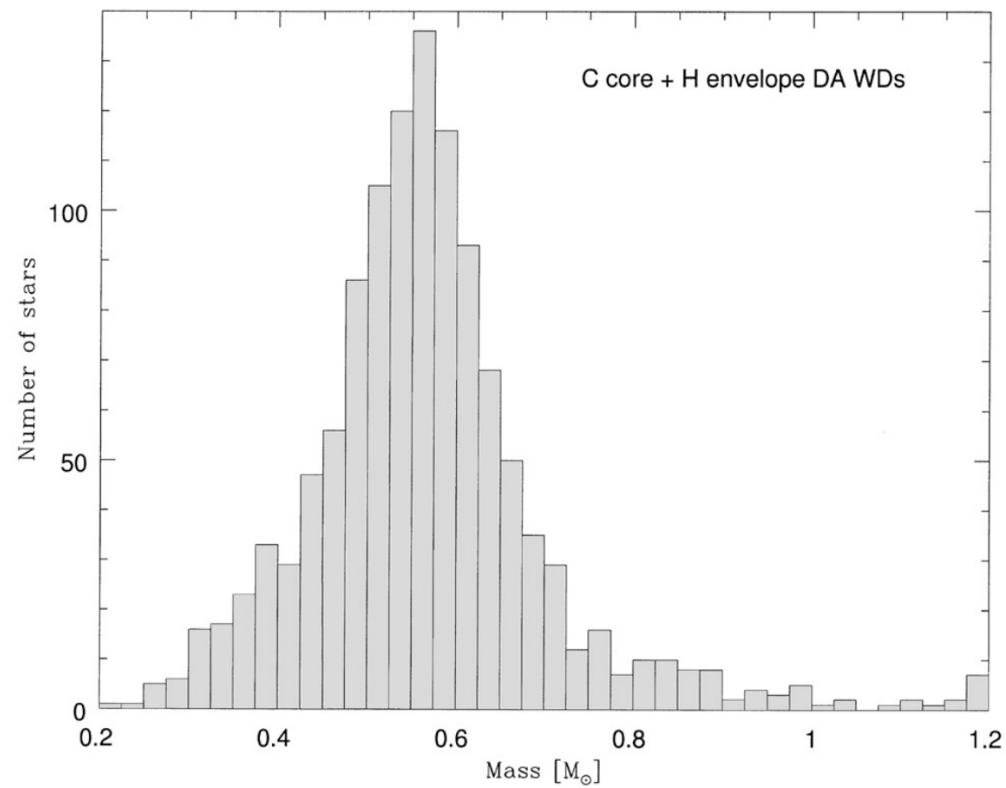


Fig. 1. Mass distribution of the 1175 DA white dwarfs of the SDSS DR1 sample with $T_{\text{eff}} \geq 12\,000$ K. The peak mass is located at $M = 0.562 M_{\odot}$. Individual stars were grouped in bins of $0.025 M_{\odot}$ width.

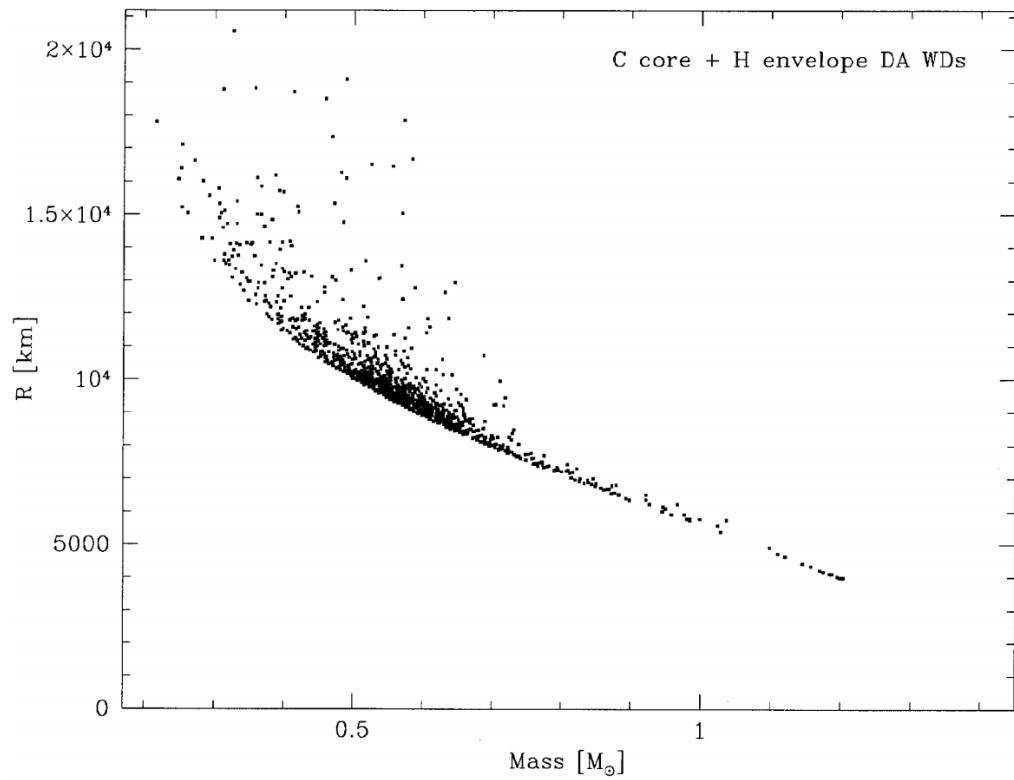
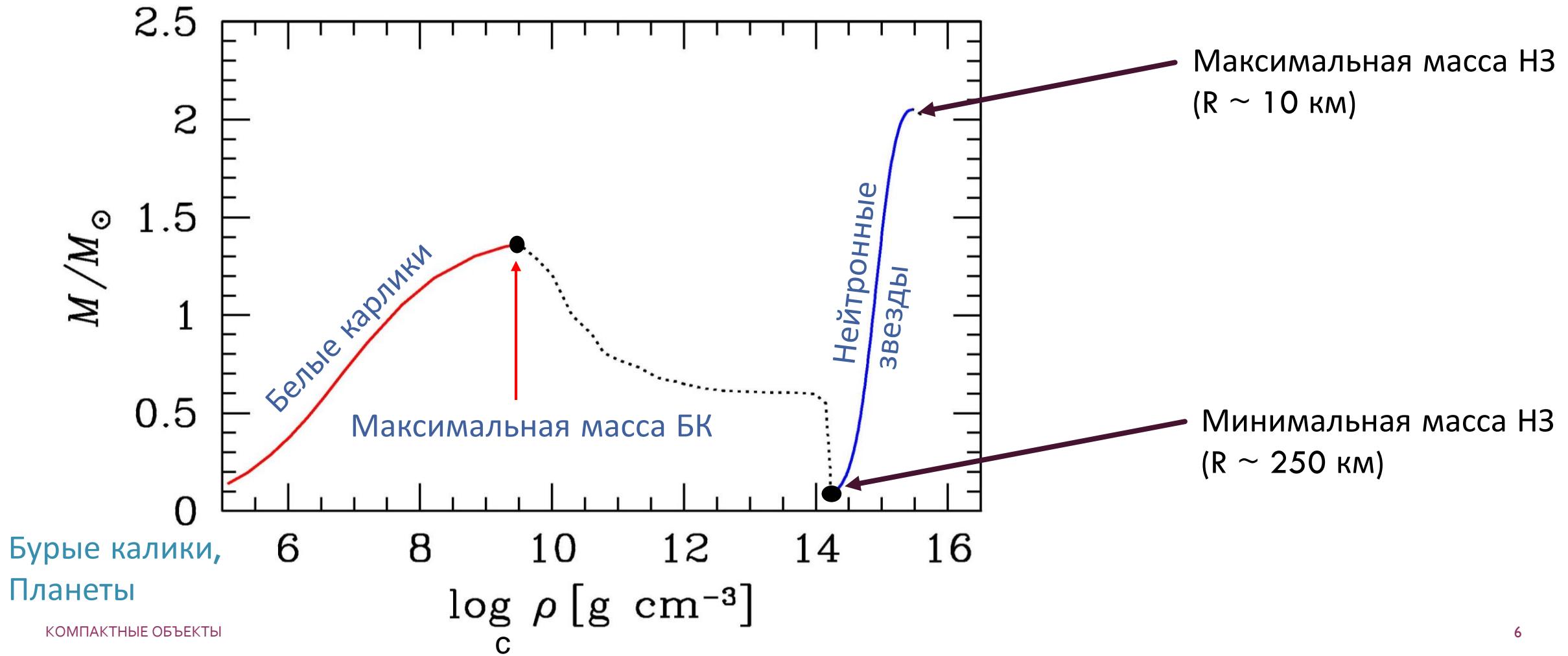


Fig. 2. Mass-radius relation for 1175 hot white dwarfs of the same sample. The relation does not extend to masses M higher than $1.2 M_{\odot}$, or rather to the highest surface gravities $\log g > 9.0$.

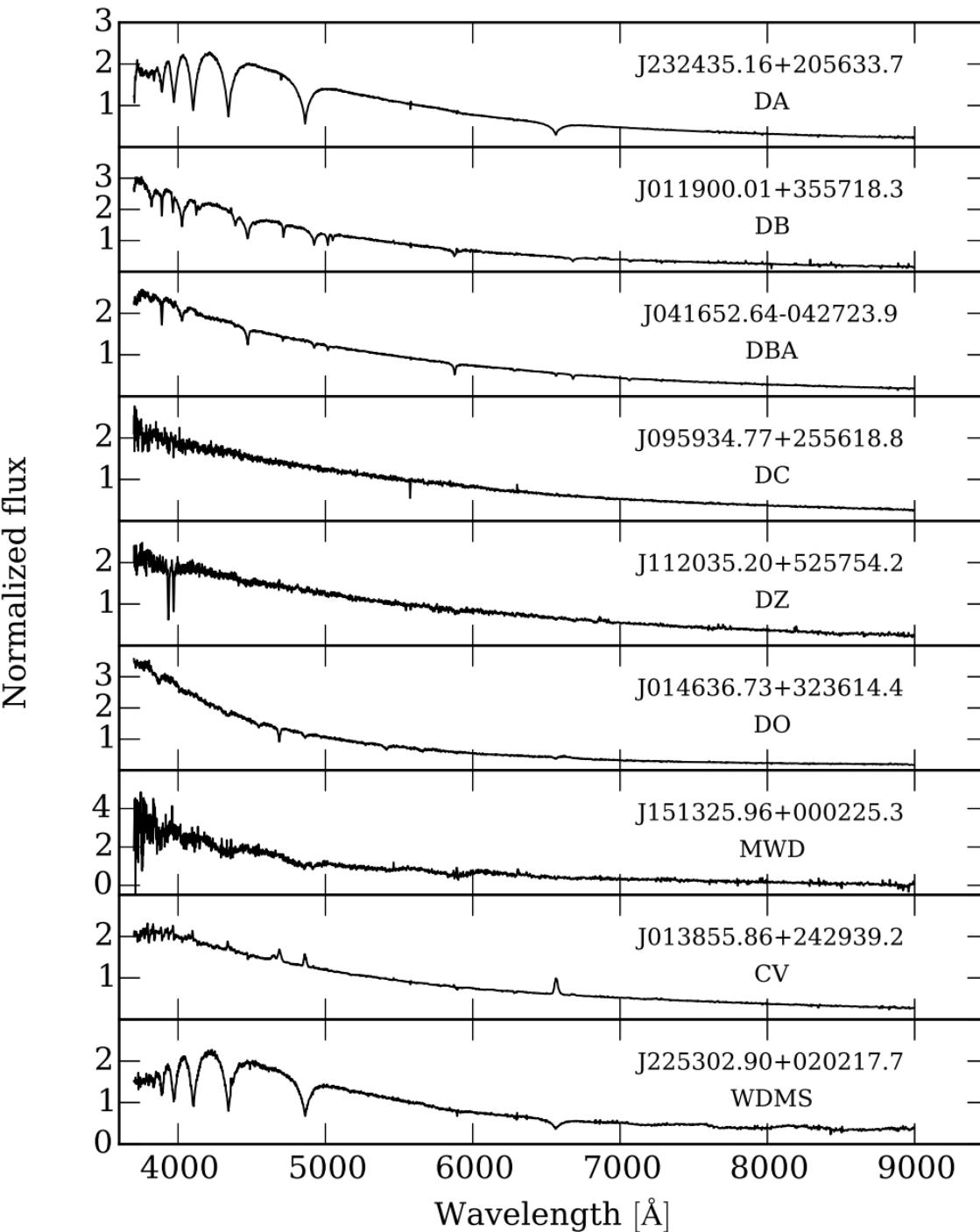
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ БК



НАБЛЮДЕНИЯ БК

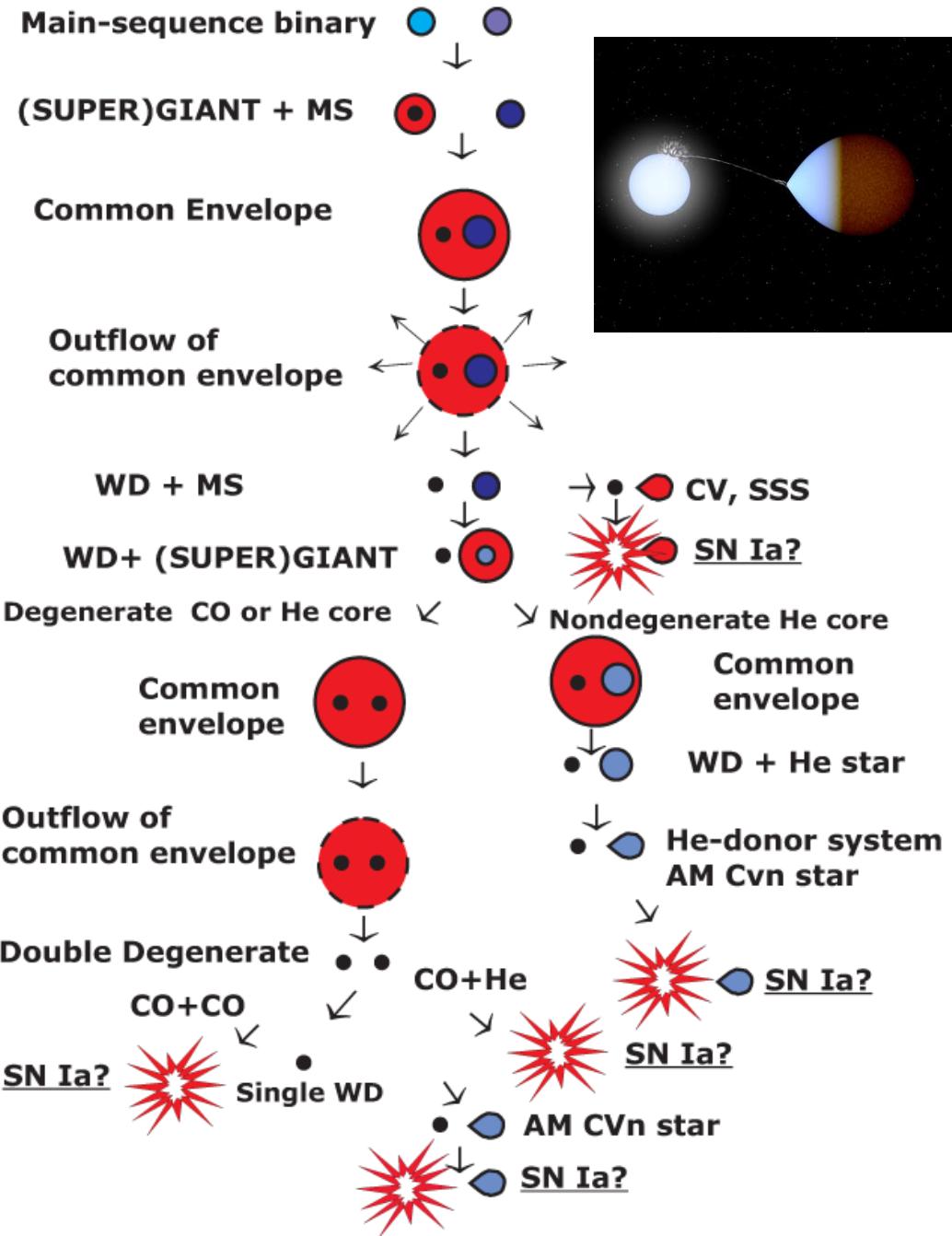
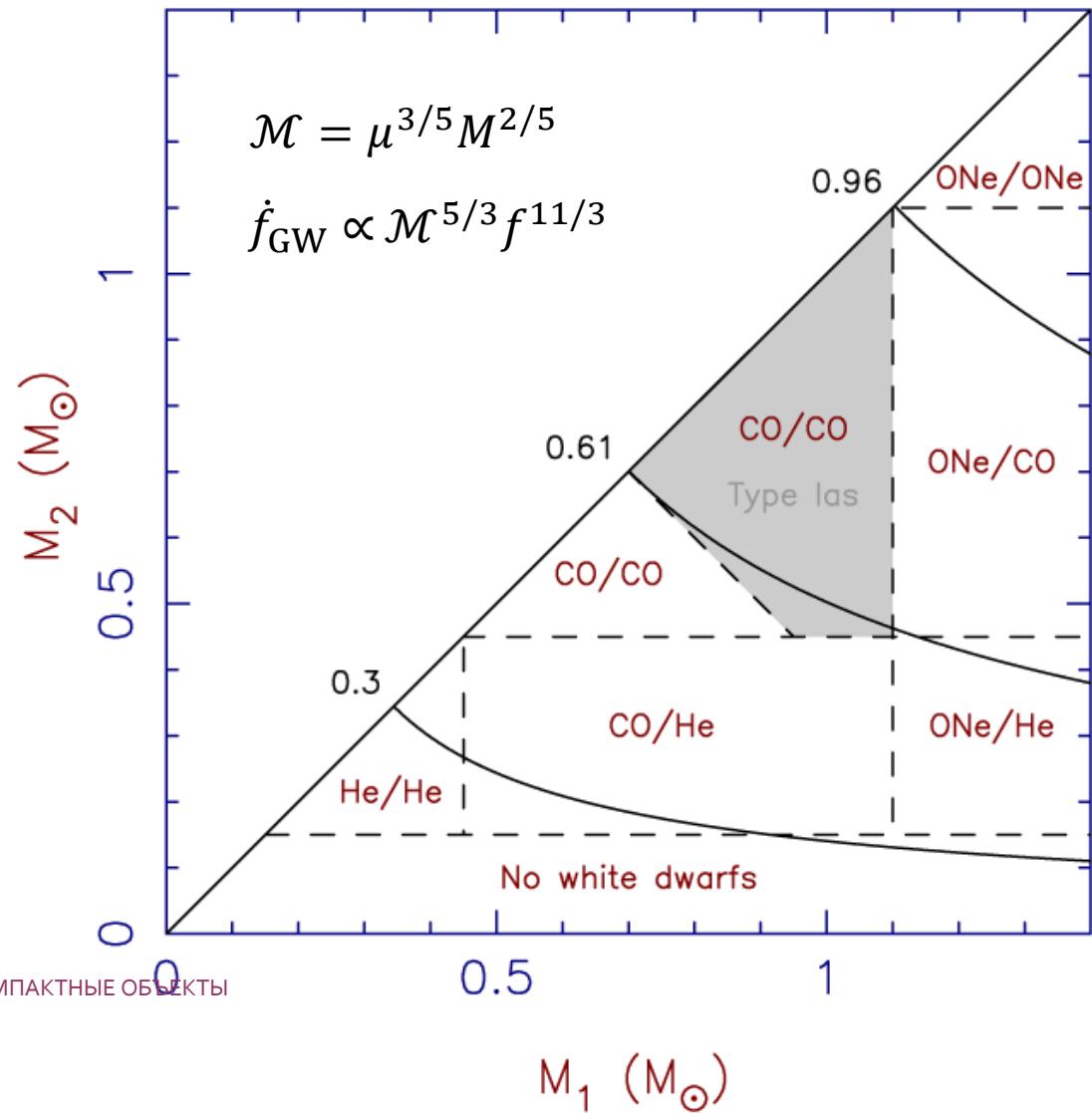
Class	T_{eff} Range (K)	Spectral Characteristics
H-rich		
DA	6,000–100,000	Balmer lines only, no He or metal features
DAO	>45,000	Balmer lines and weak He II features
He-rich		
DO	45,000–100,000	Strong He II lines, some He I present
DB	12,000–30,000	He I lines, no H or metals*
DBA	12,000–30,000	He I 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 [†] ; 10,000 [‡]	Metal lines only, no H or He
DC	<6,000 [†] ; 10,000 [‡]	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

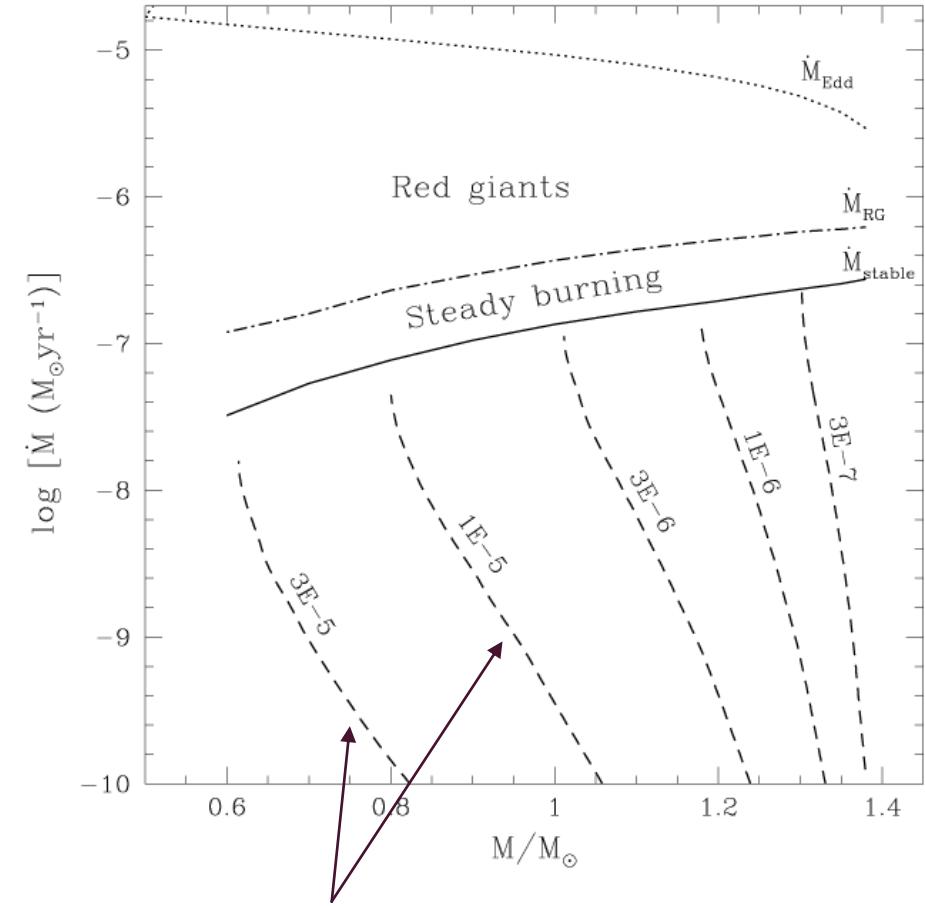
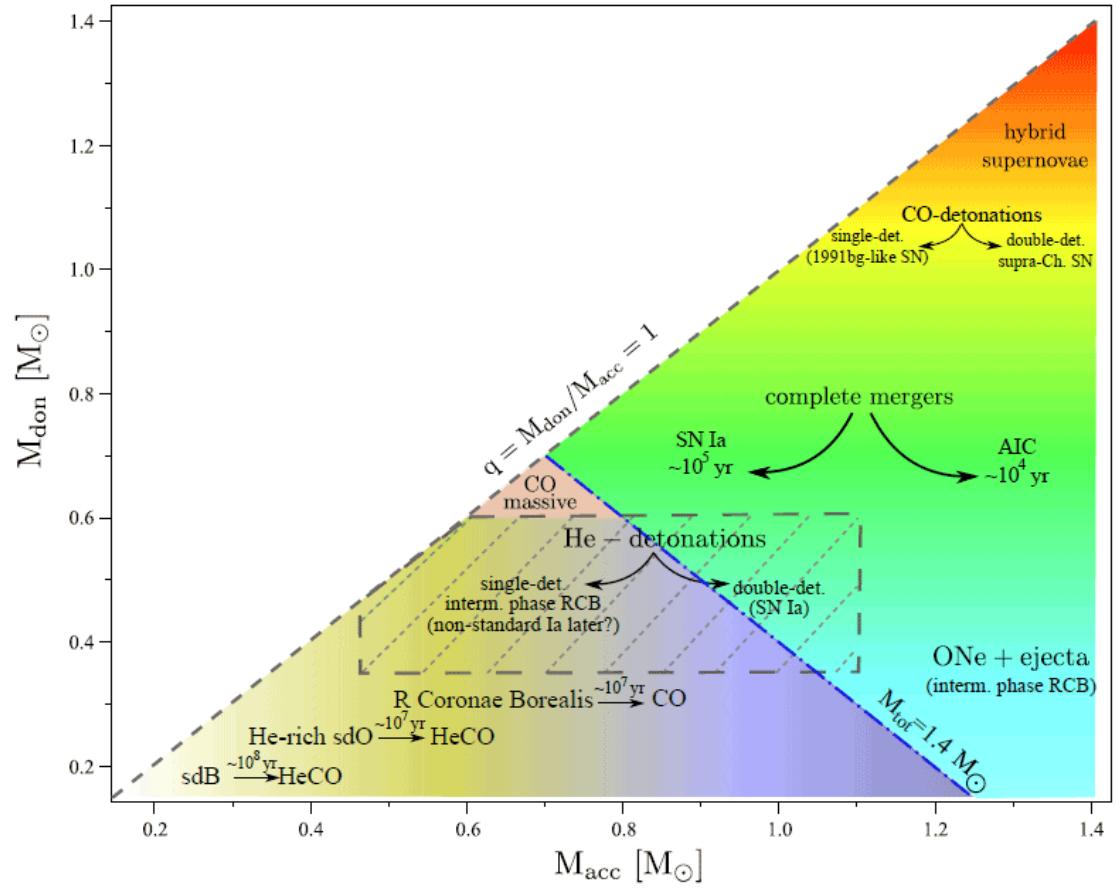


БК В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

<https://www.emis.de/journals/LRG/Articles/lrr-2014-3/article07.html>

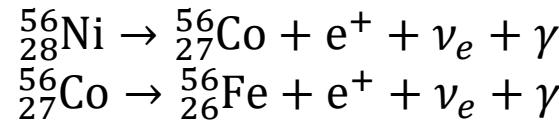


ВСПЫШКИ НОВЫХ И СВЕРХНОВЫЕ ТИПА Ia



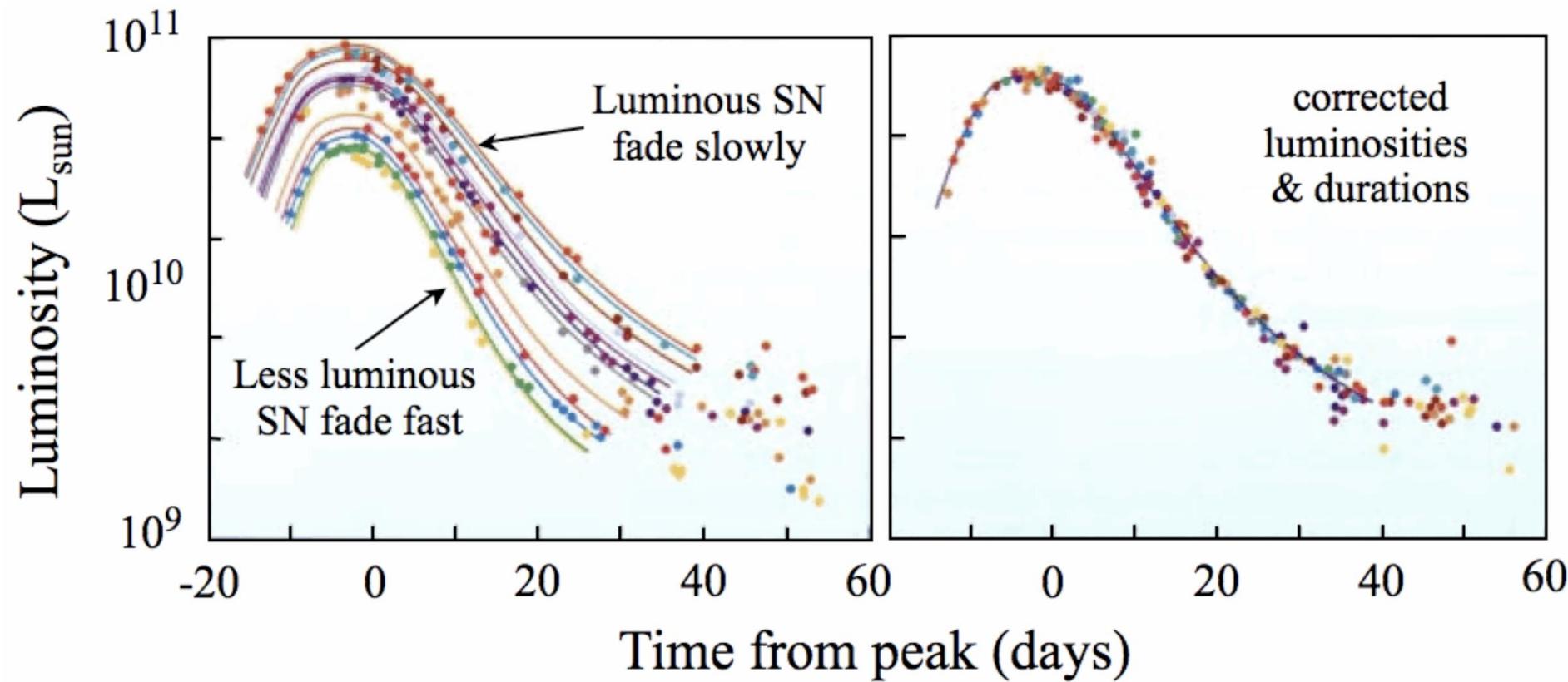
Масса детонирующей водородной оболочки (M_{\odot})

СВЕРХНОВЫЕ Ia

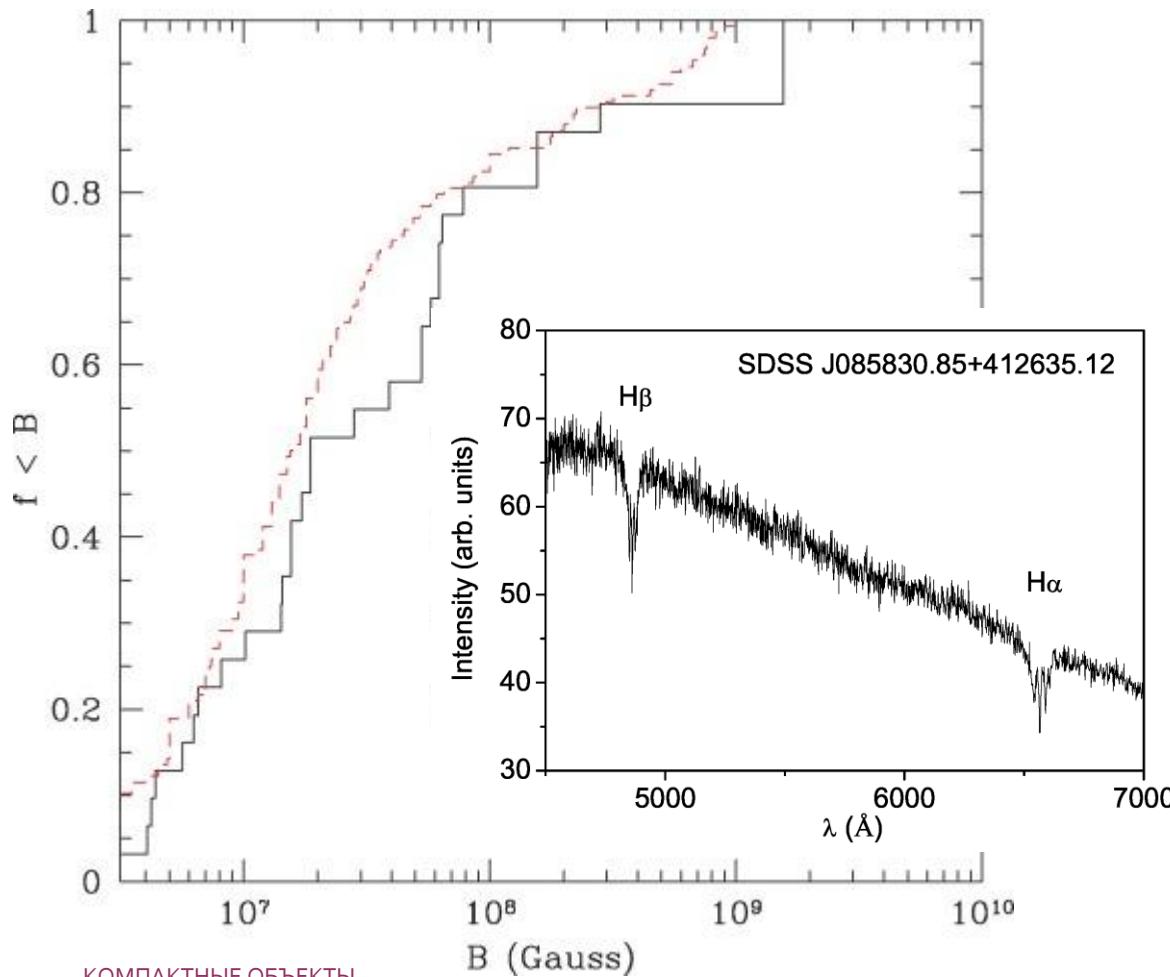


$$M_B = 0.252\Delta m_{15}(B)^2 - 0.015\Delta m_{15}(B) - 19.31$$

arXiv:1605.05507

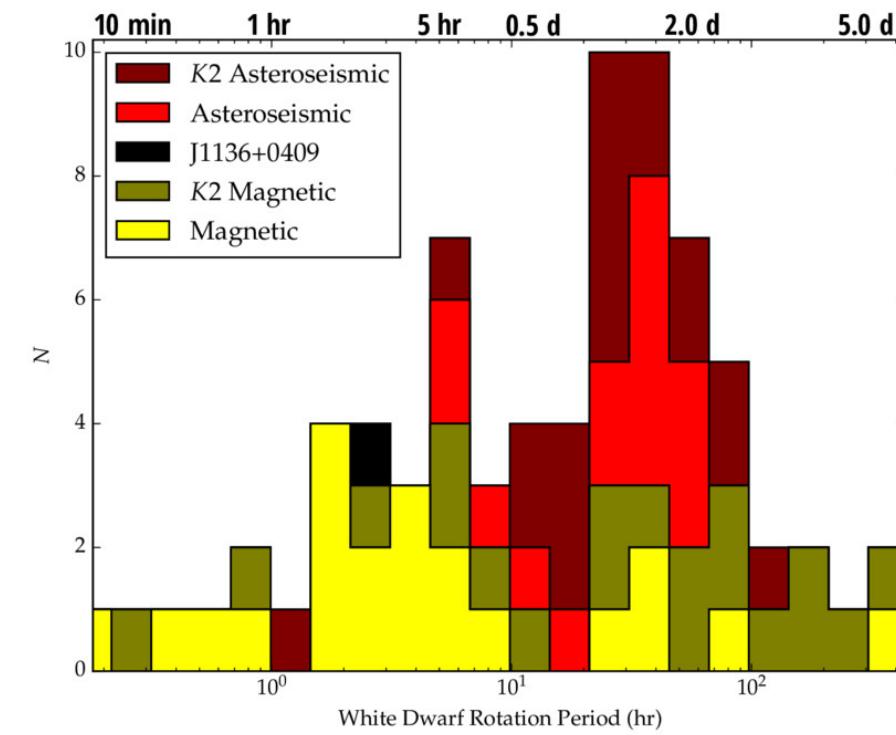


МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВРАЩЕНИЕ БК



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

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

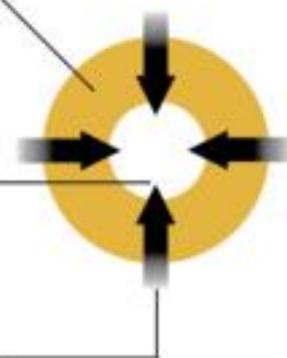


When a massive star has burned all its fuel, it can make a spectacular exit as a supernova or fail to ignite

COLLAPSE

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

NewScientist
5 May 2012

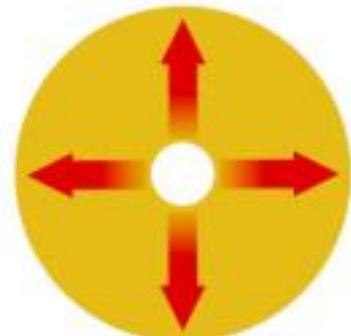


Protons combine with electrons to form neutrons and neutrinos

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



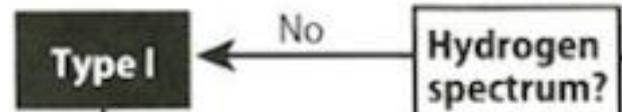
FAILED SUPERNOVA

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



Silicon?

Type Ia

Helium?

Type Ic

Hydrogen spectrum?

Type Ib

No

Yes

No

Yes

Yes

No

Hydrogen

Iron

Silicon

Magnesium

Oxygen

Carbon

Helium

Hydrogen

Core collapse

Transition between types observed

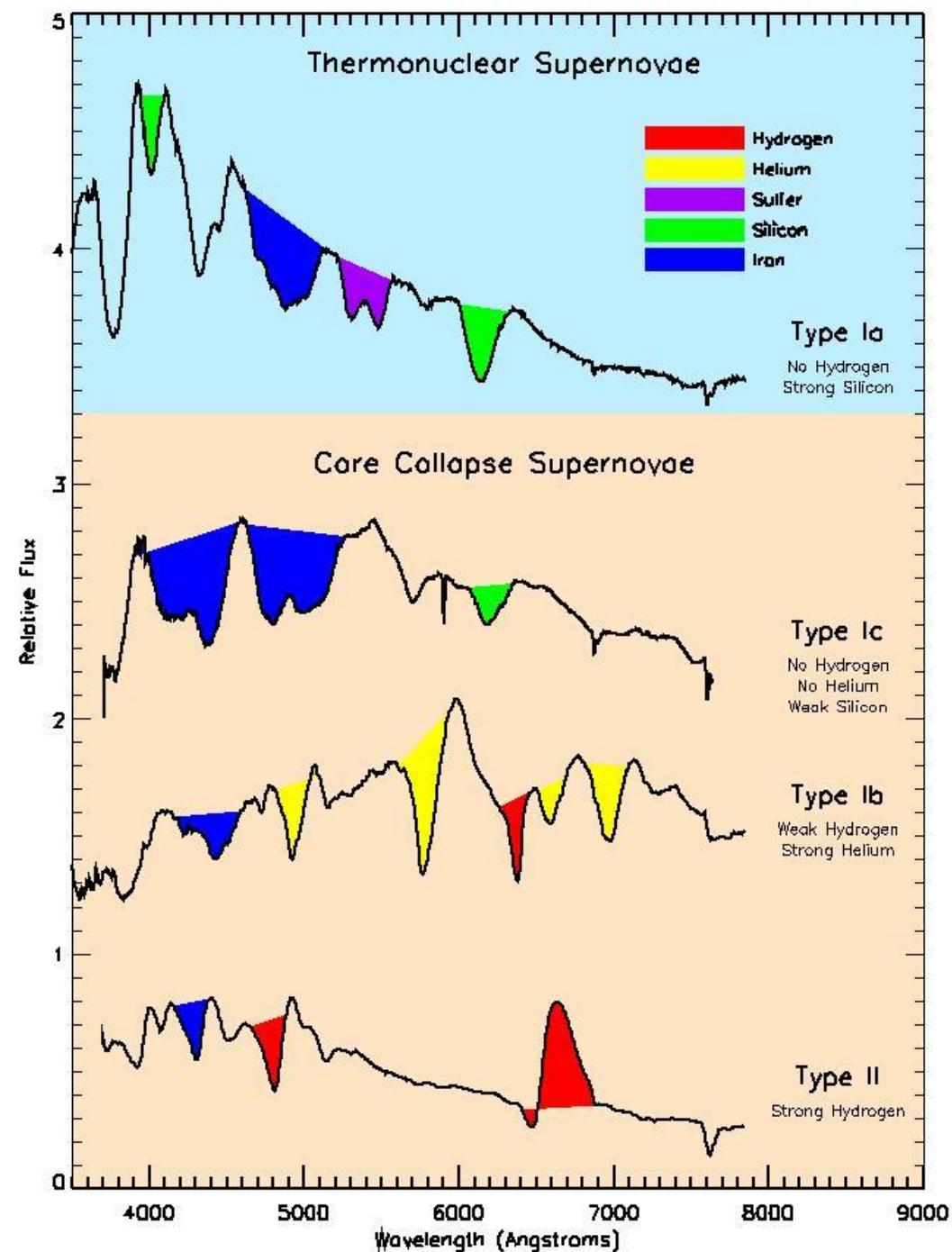
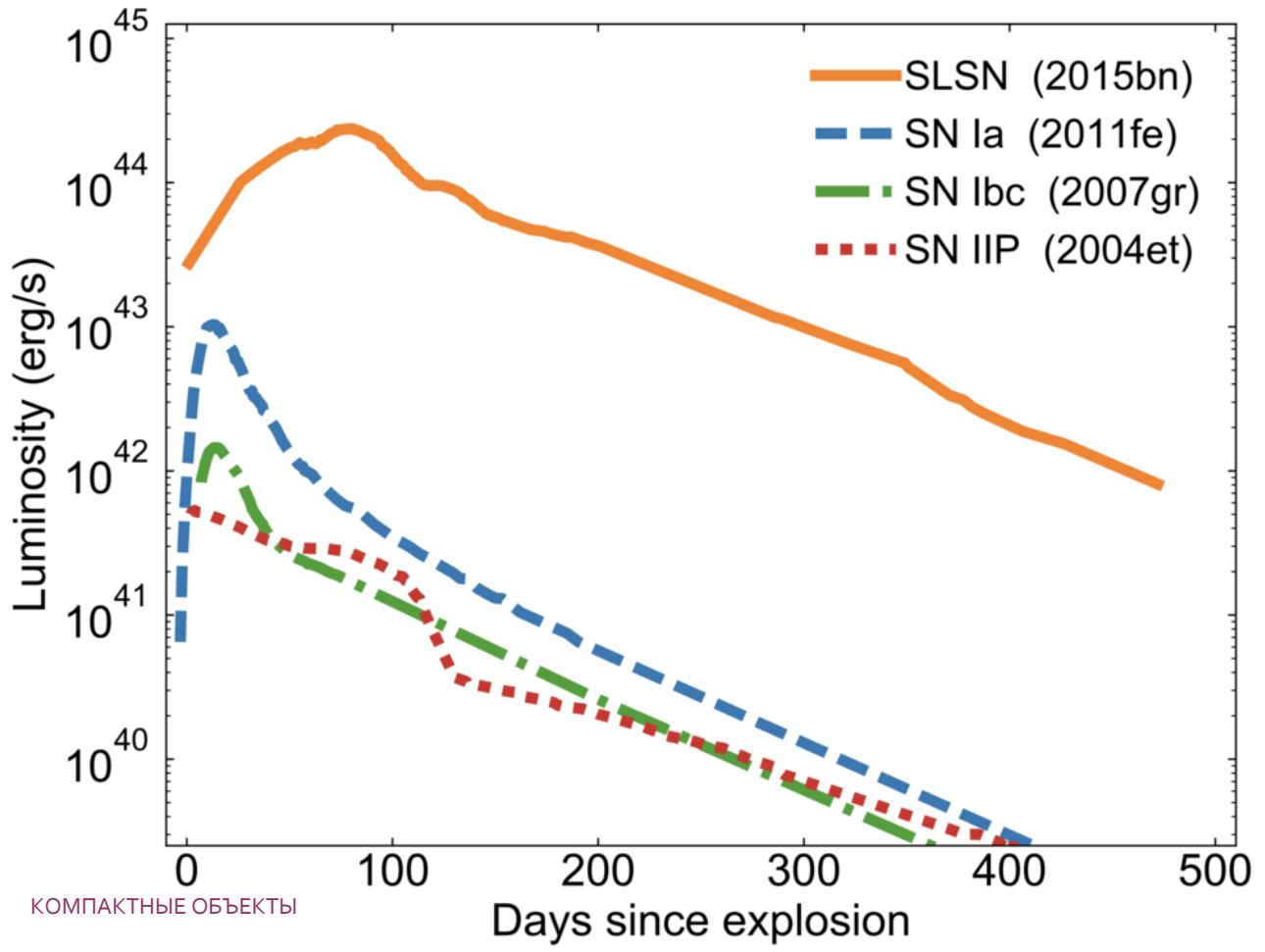


No hydrogen

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

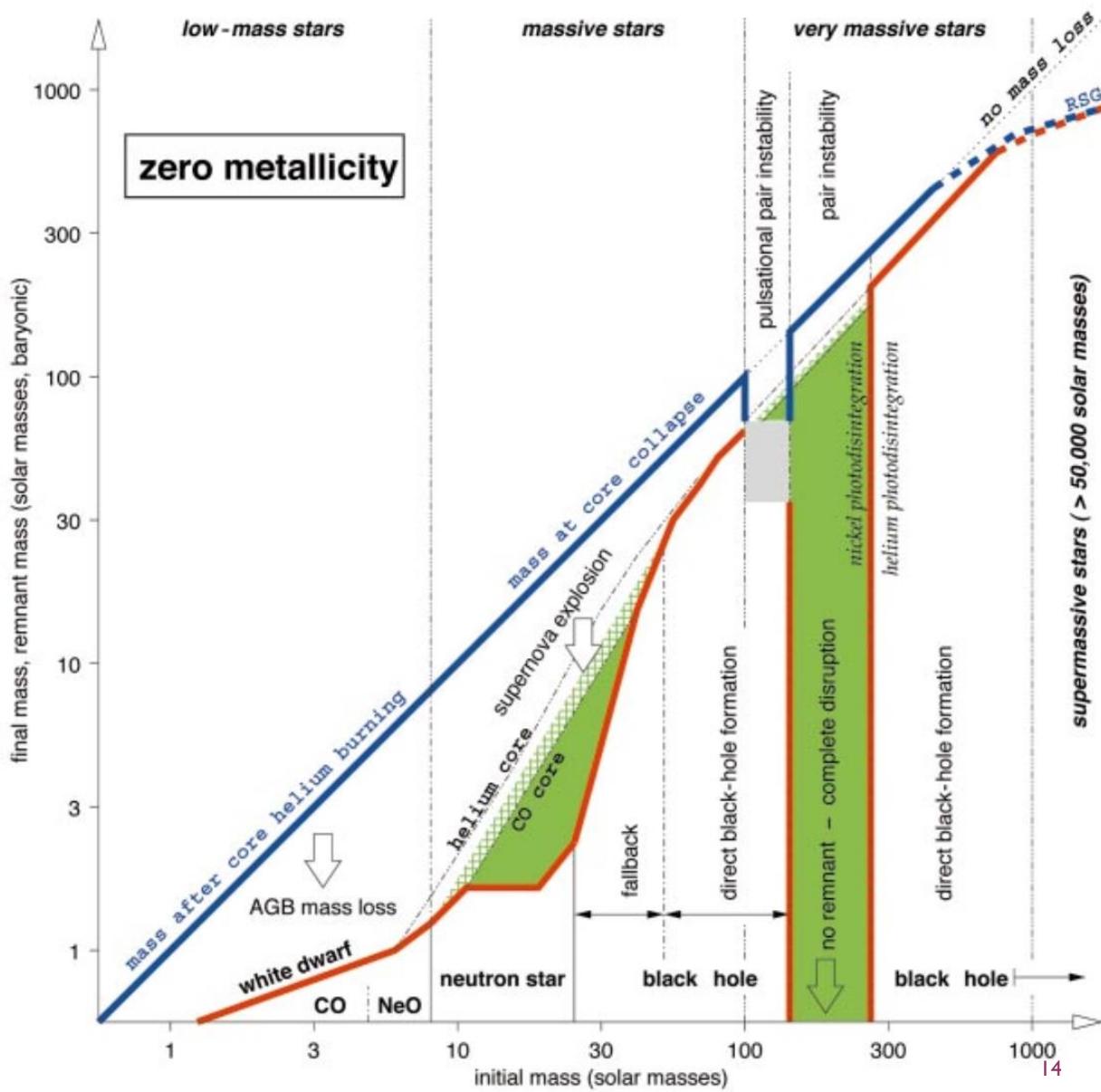
СВЕРХНОВЫЕ



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

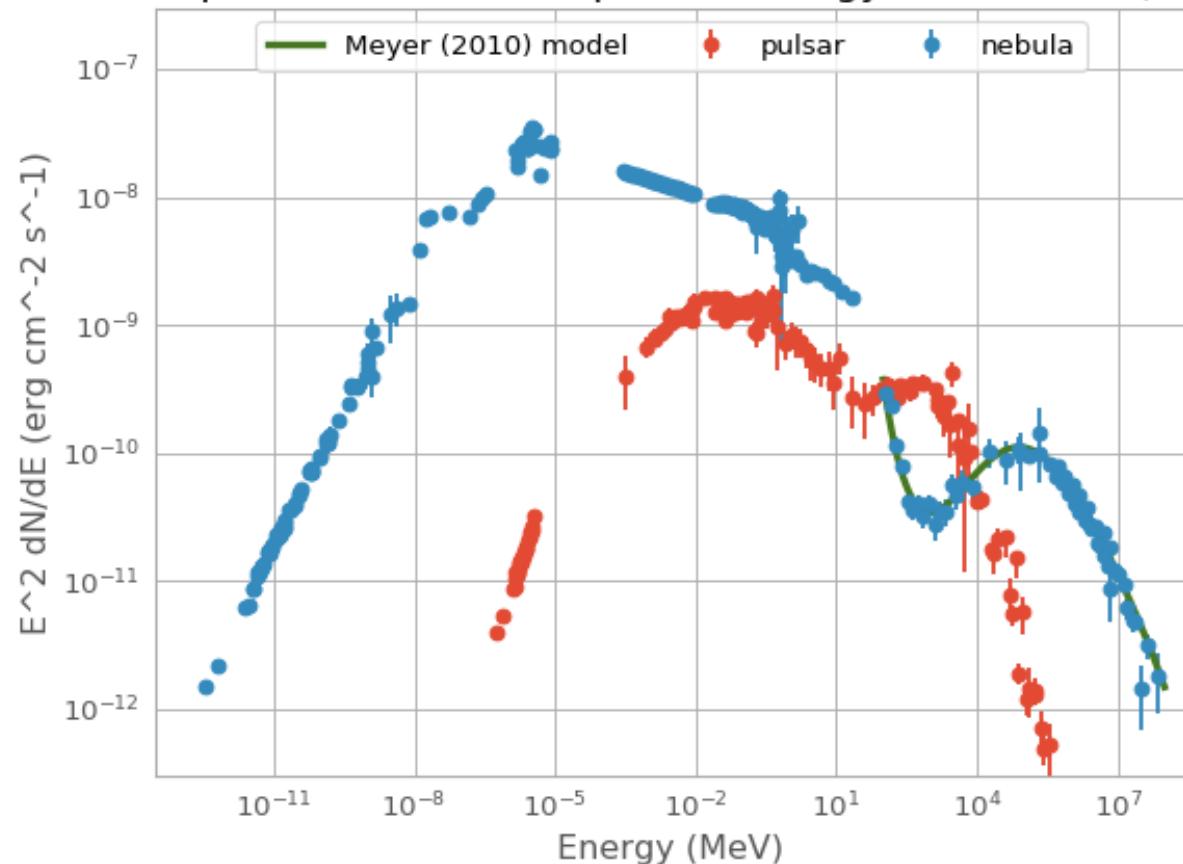


НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

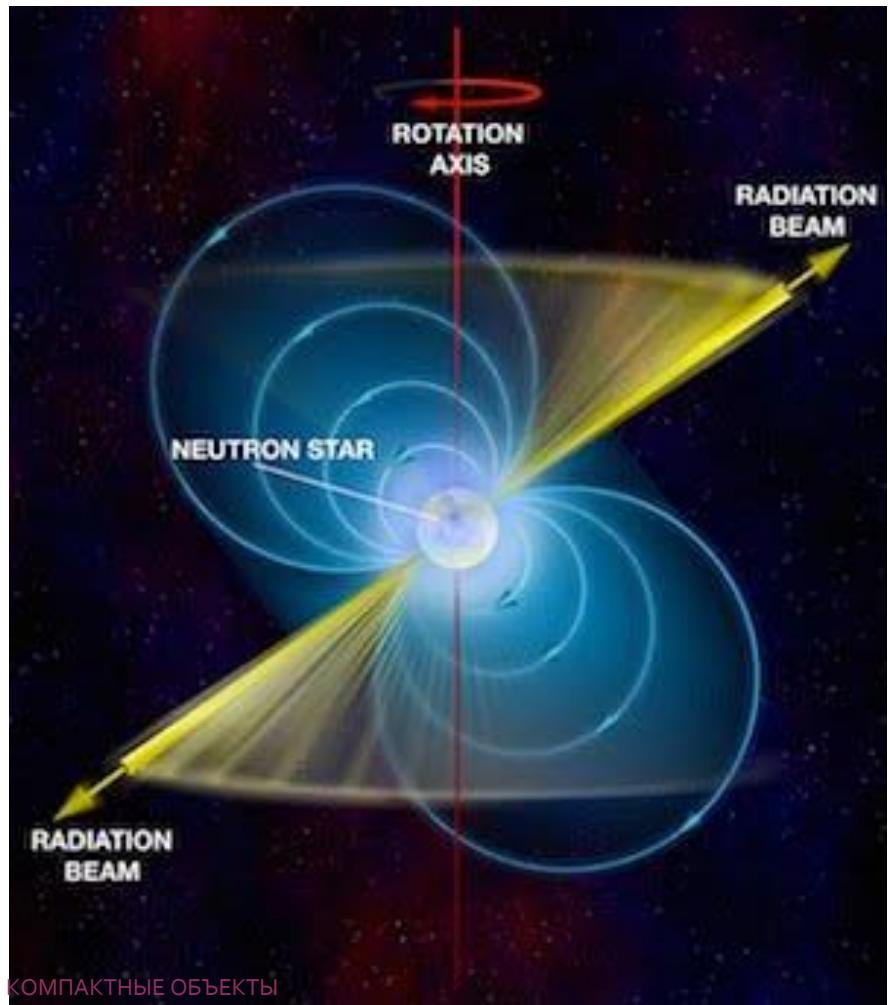
- Но в целом НЗ проявляют себя во всех диапазонах длин волн – от радио до гамма и далее.
- Первые теоретические предпосылки: Бааде и Цвикки 1934.
- Первый наблюдаемый объект: Sco X-1 (LMXB, Giacconi et al. 1962, PRL, 9, 439) – хотя о pecулярности центральной звезды в Крабовидной туманности знали еще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

https://docs.gammapy.org/o.6/tutorials/crab_mwl_sed/index.html

Crab pulsar and nebula spectral energy distribution (SED)



НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

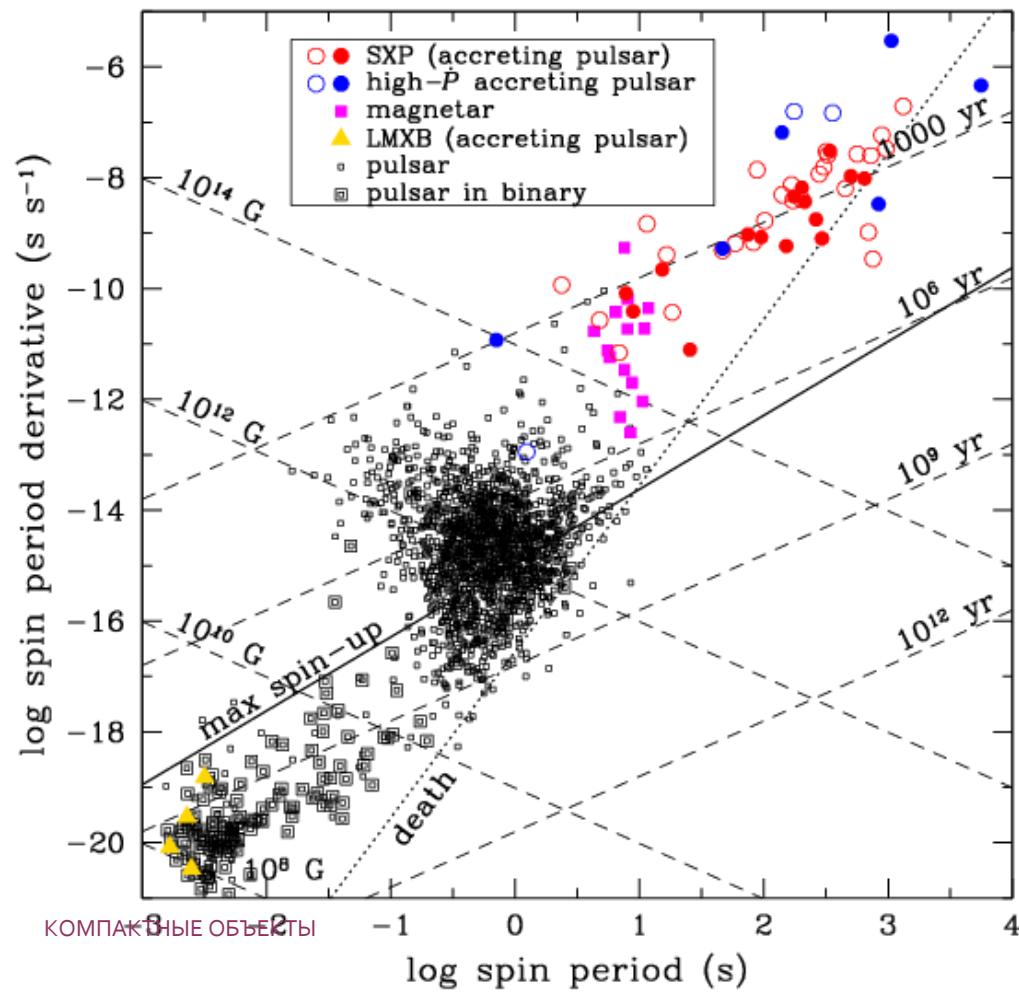


КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

B. Saxton, NRAO/AUI/NSF

Параметр	Величина
Масса M	$1 \dots 2 M_{\odot}$
Радиус R	$\sim 10 \dots 15$ км
Плотность ρ	от $\sim 10^4 \dots 10^6$ г/см ³ на поверхности до $\sim 2 \cdot 10^{15}$ г/см ³ 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

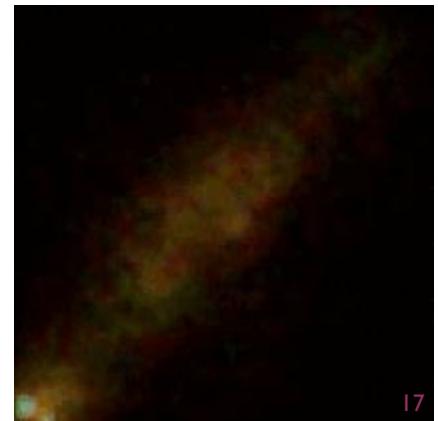
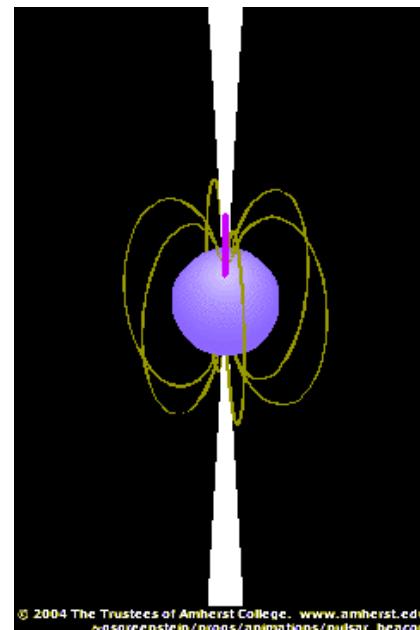


Стандартная оценка возраста пульсара:

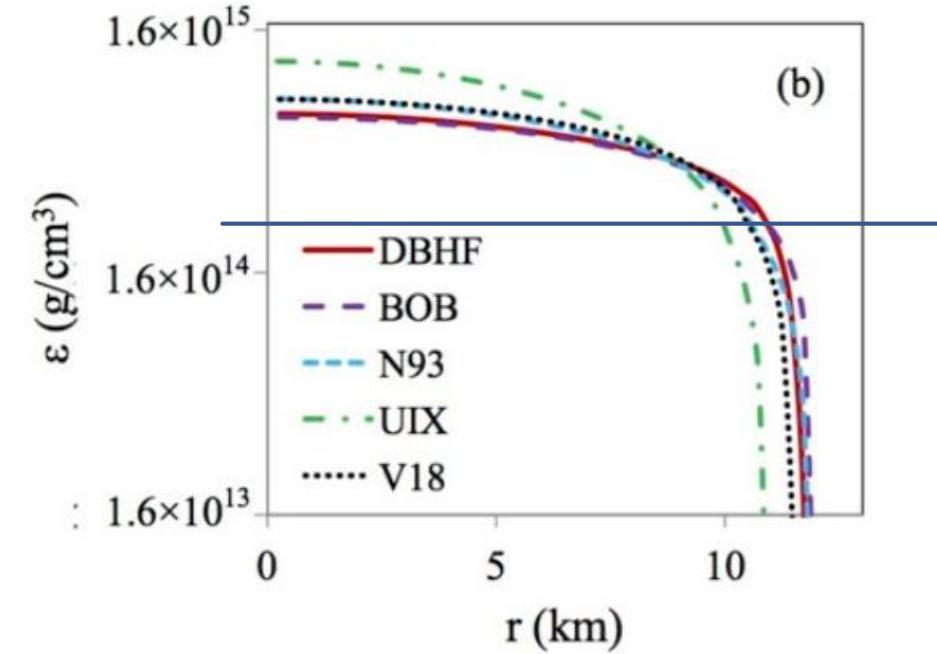
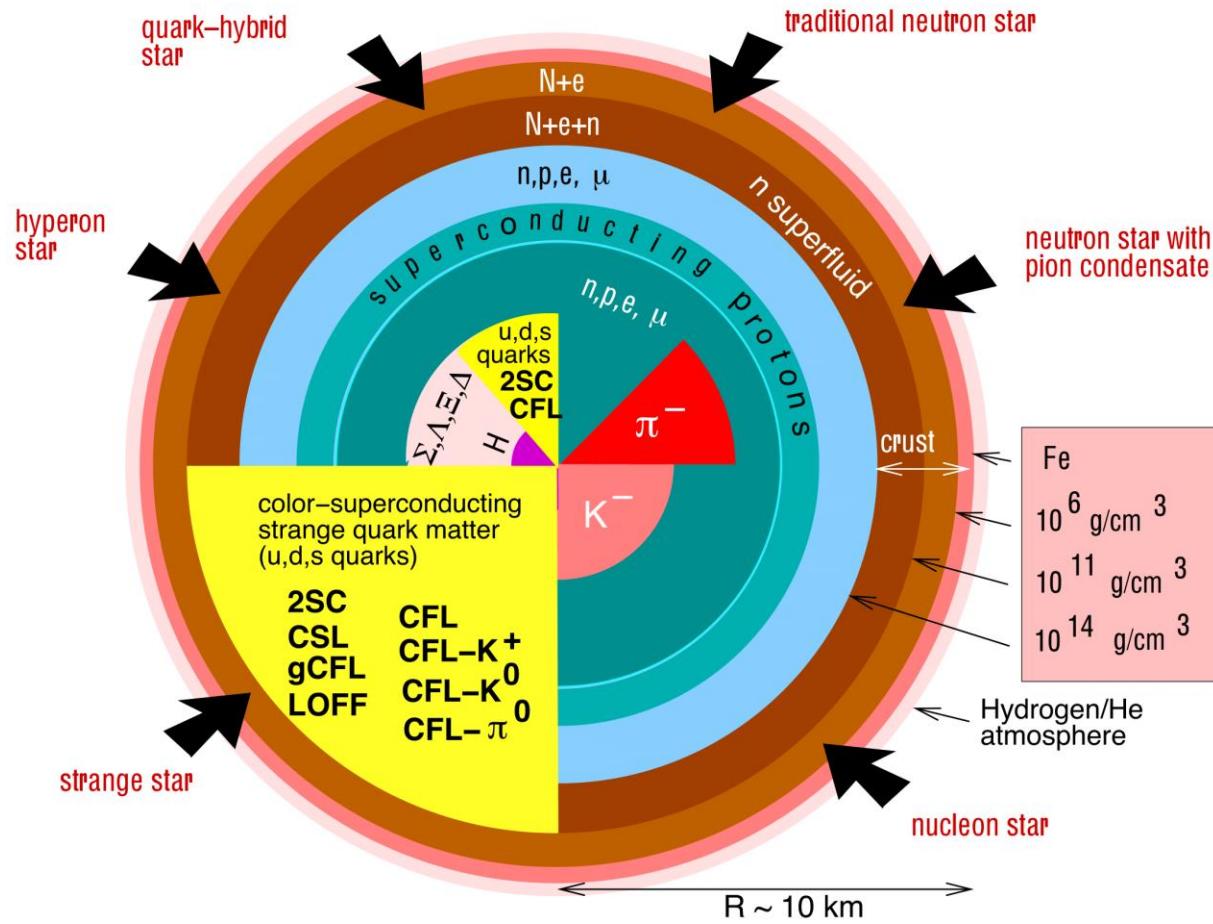
$$\tau_{\text{ch}} = \frac{P}{2\dot{P}}$$

Стандартная оценка магнитного поля:

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

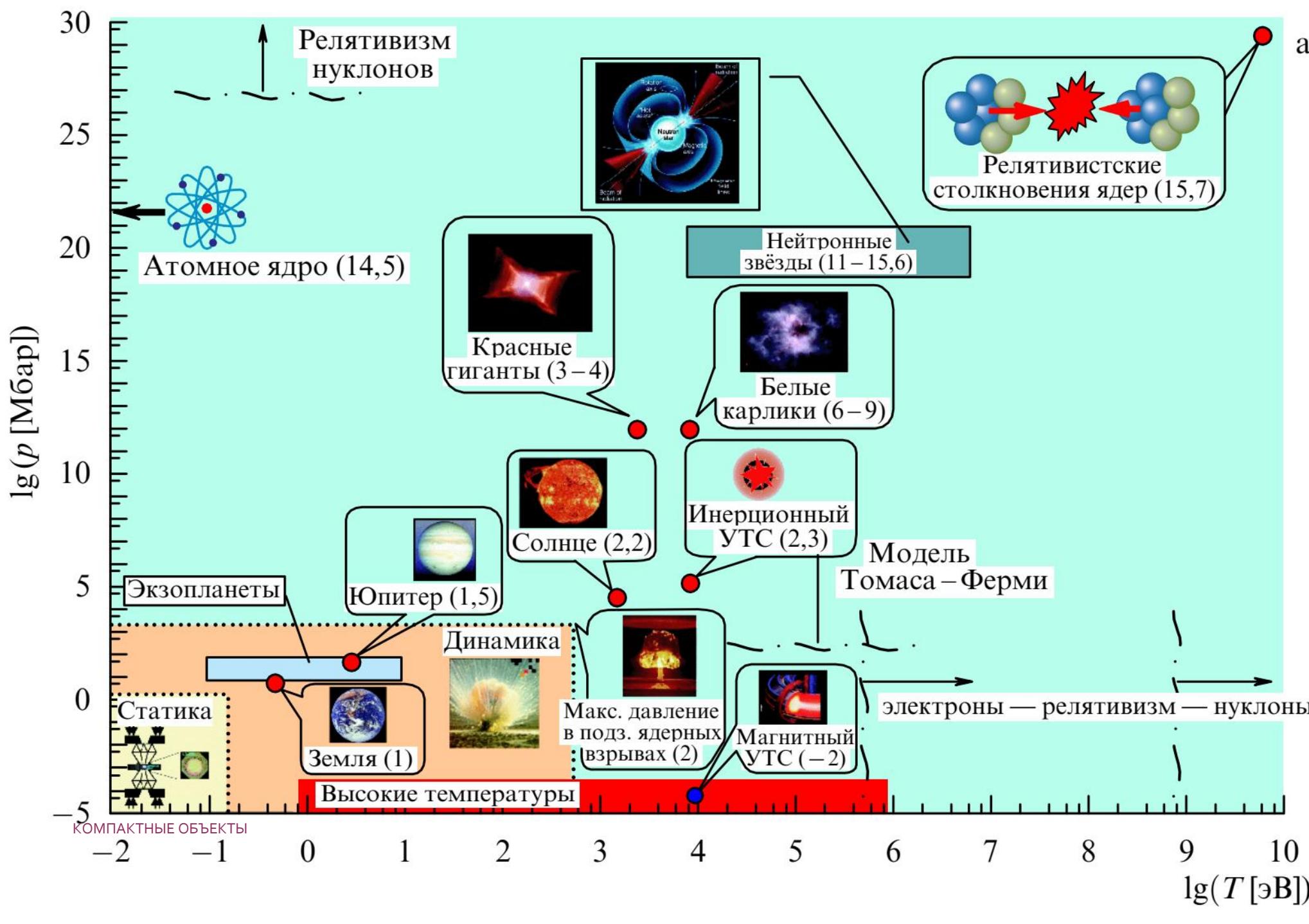


ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ НЗ



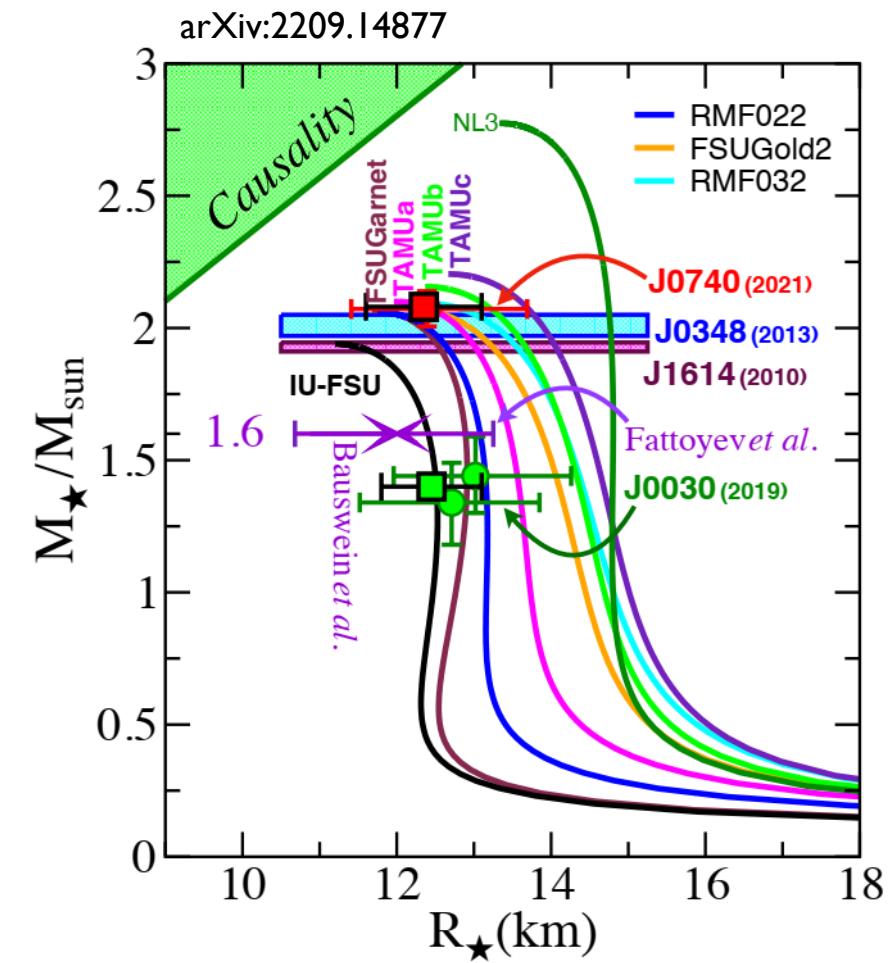
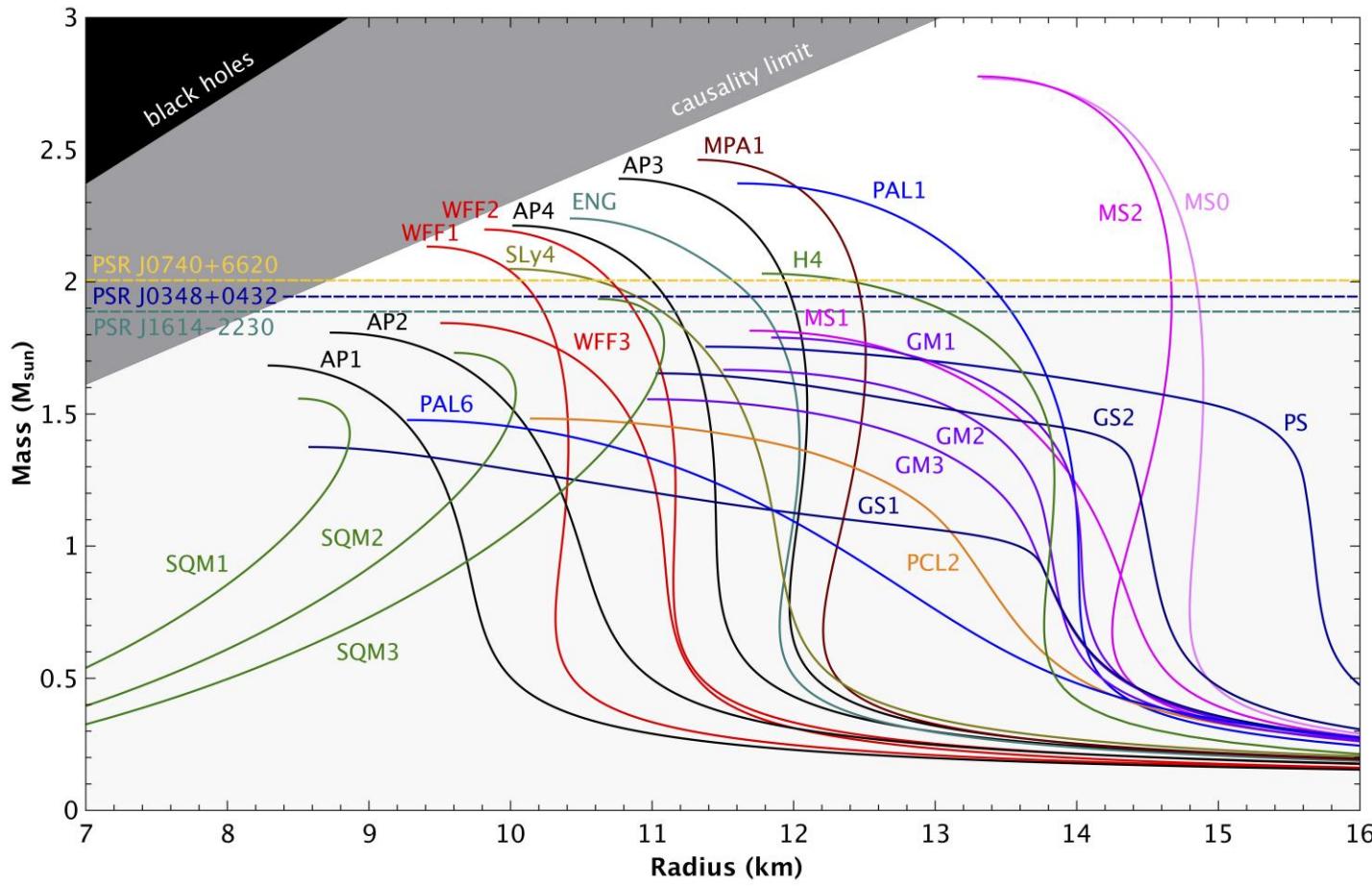
Sammarruca 2014

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

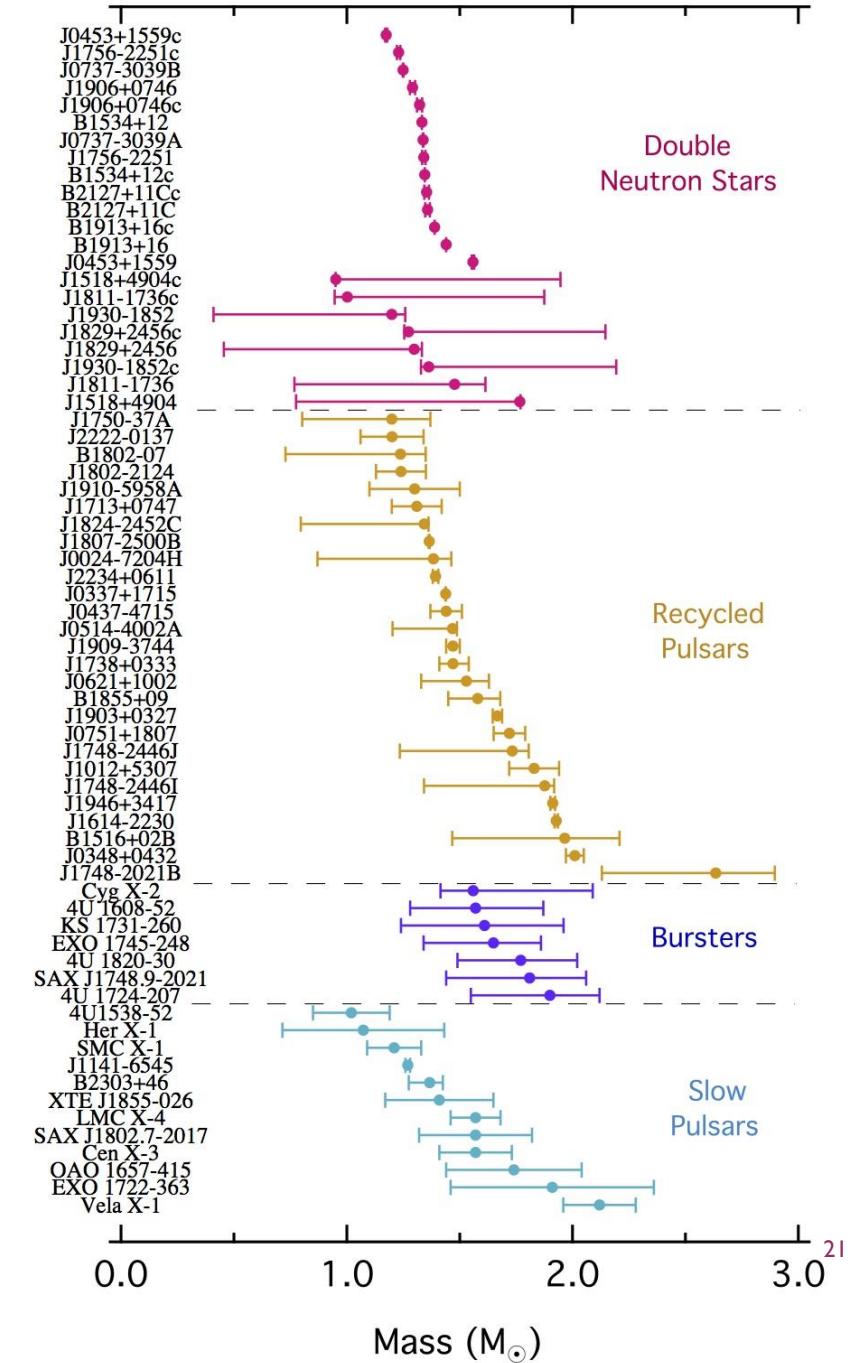
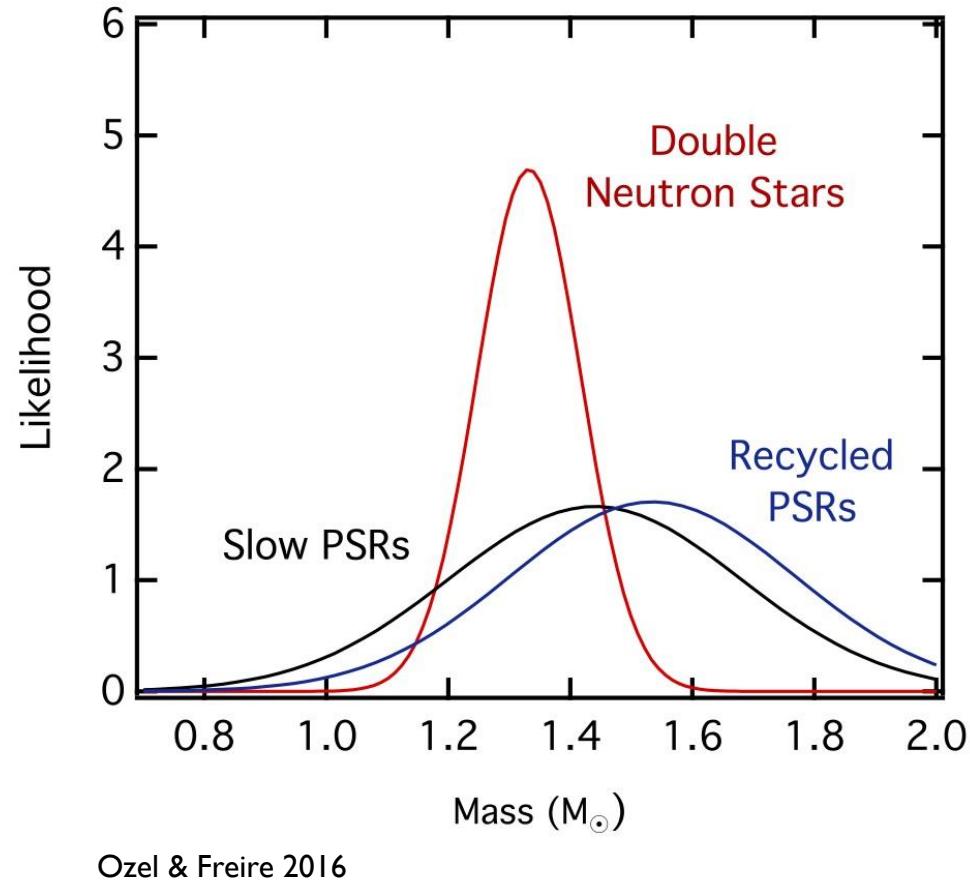


a

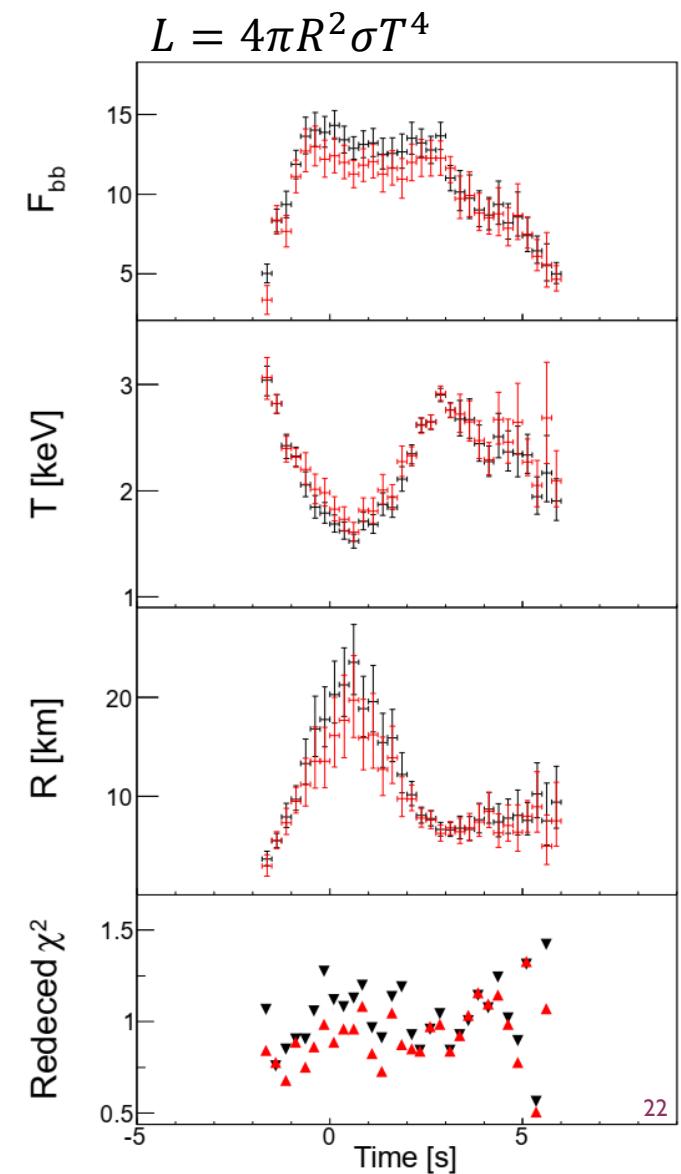
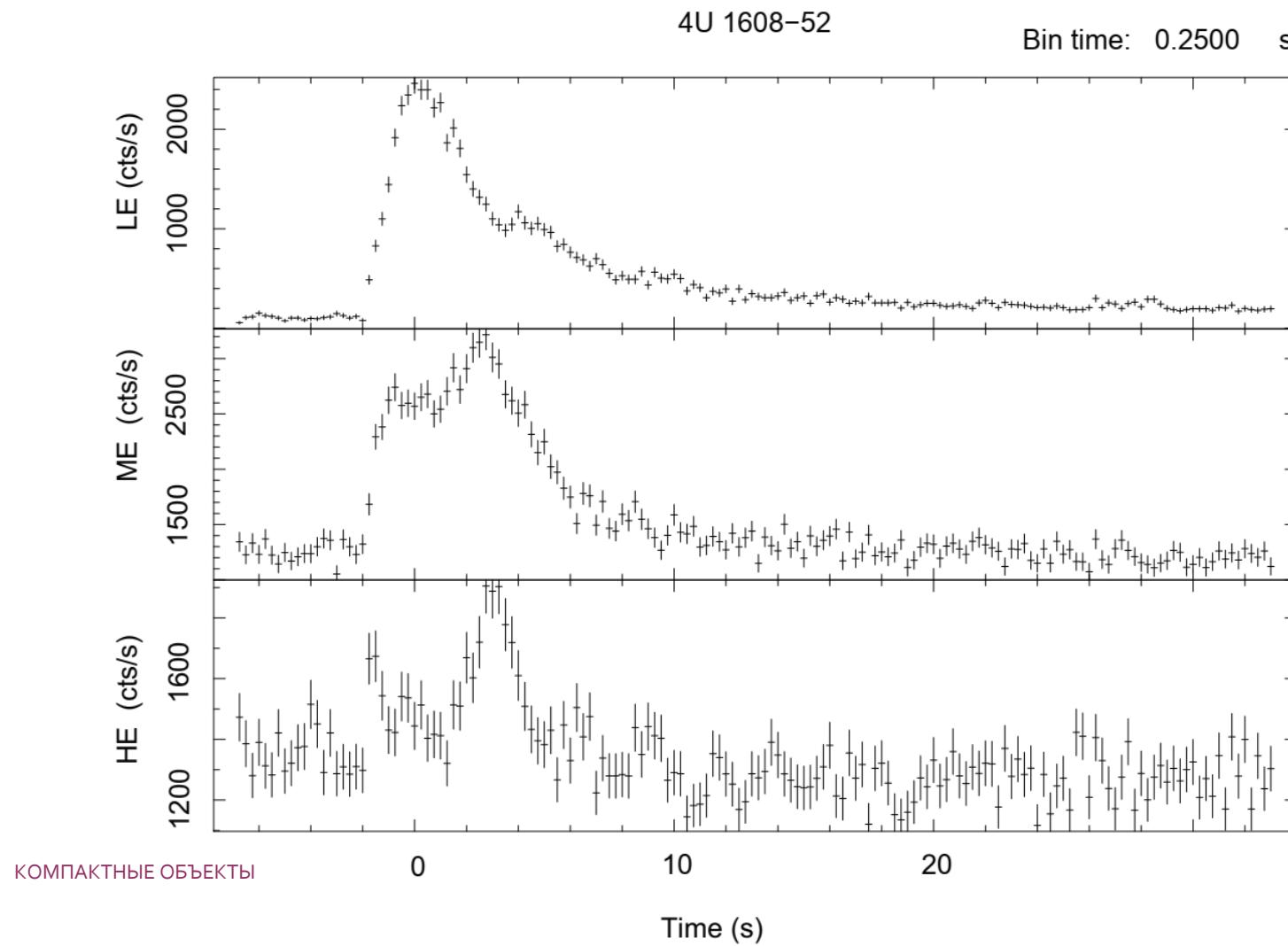
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ



МАССЫ НЗ



РАДИУСЫ НЗ



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 сколапсировавших 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).

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

"Black Holes" in Space

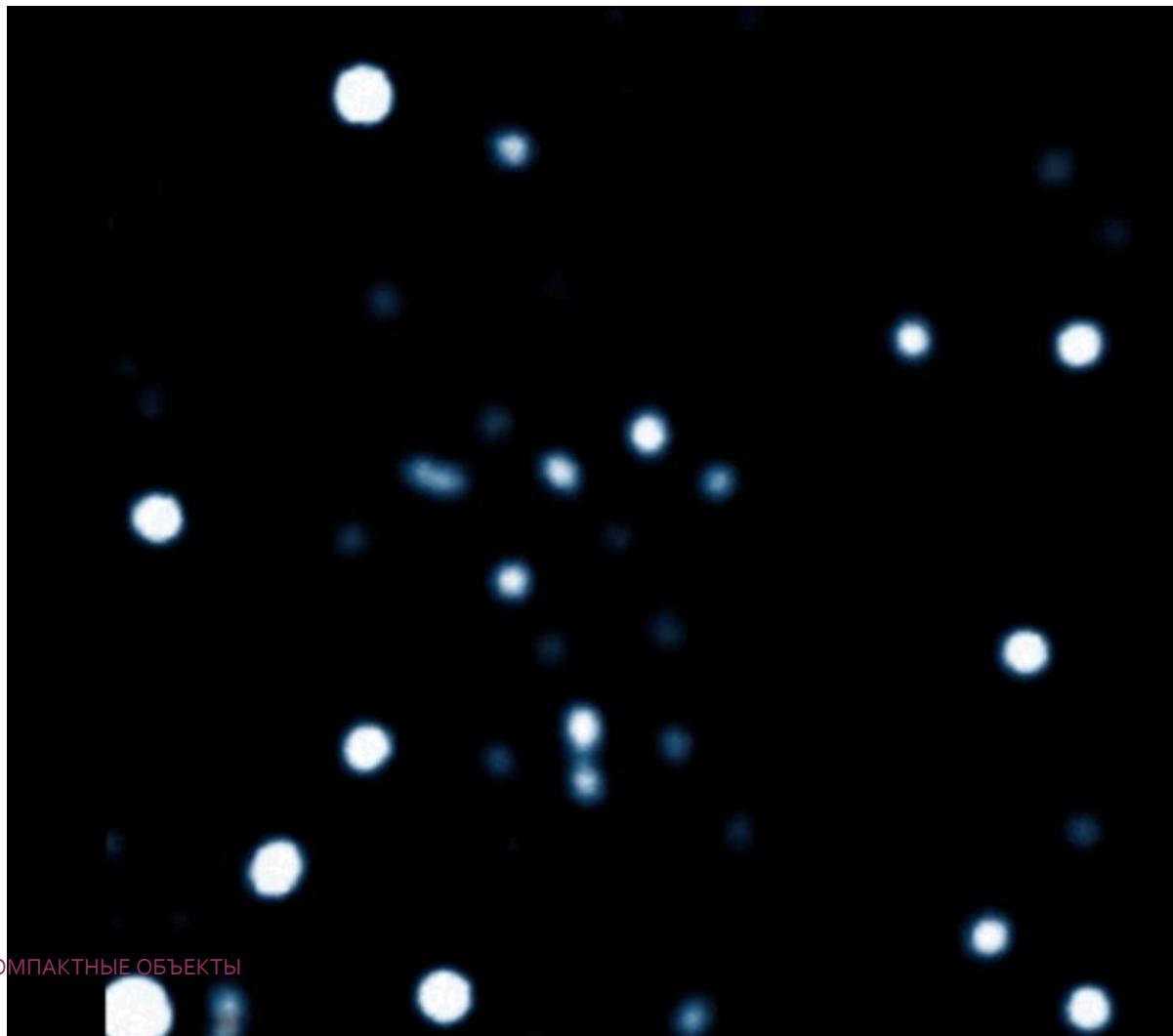
The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing



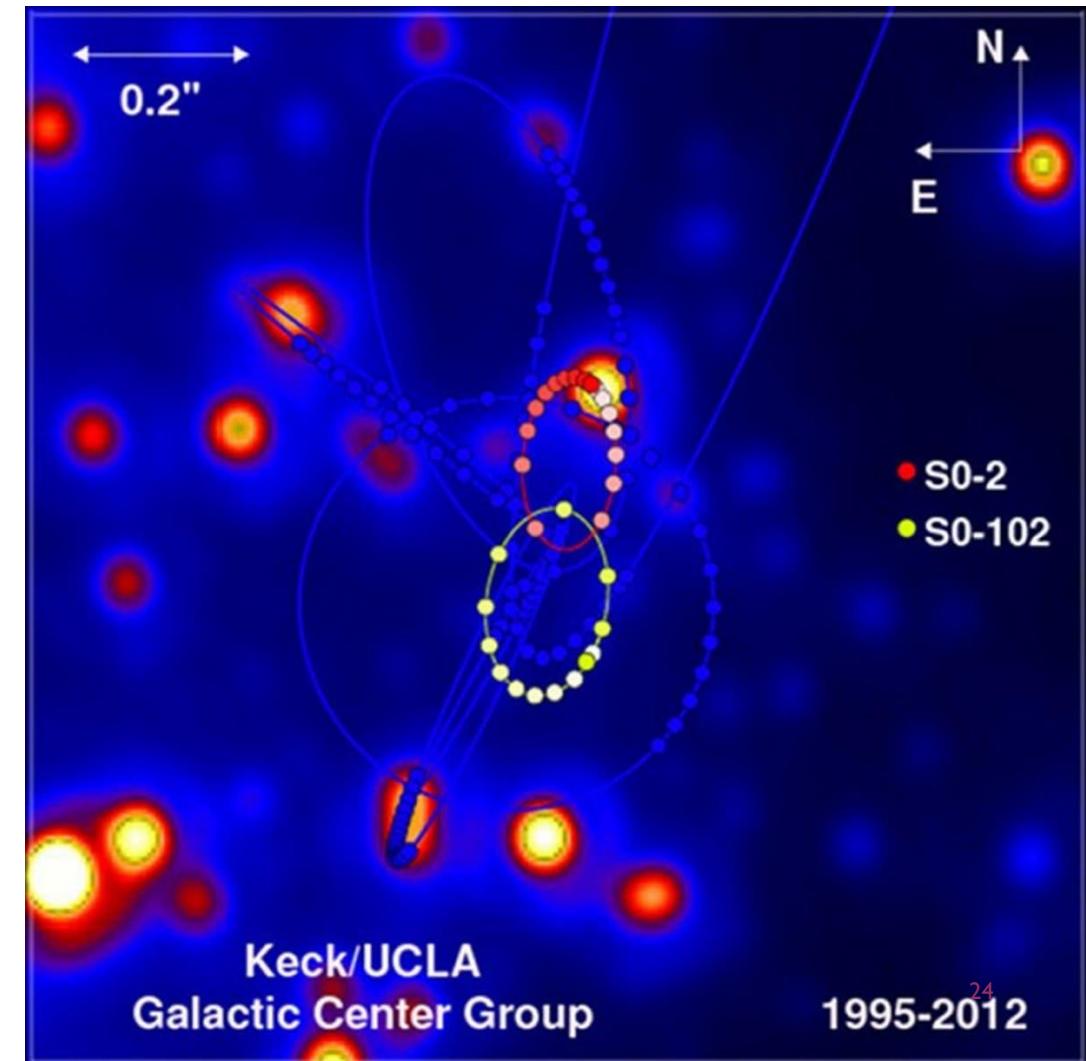
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

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

СТРЕЛЕЦ A* (SGR A*)



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



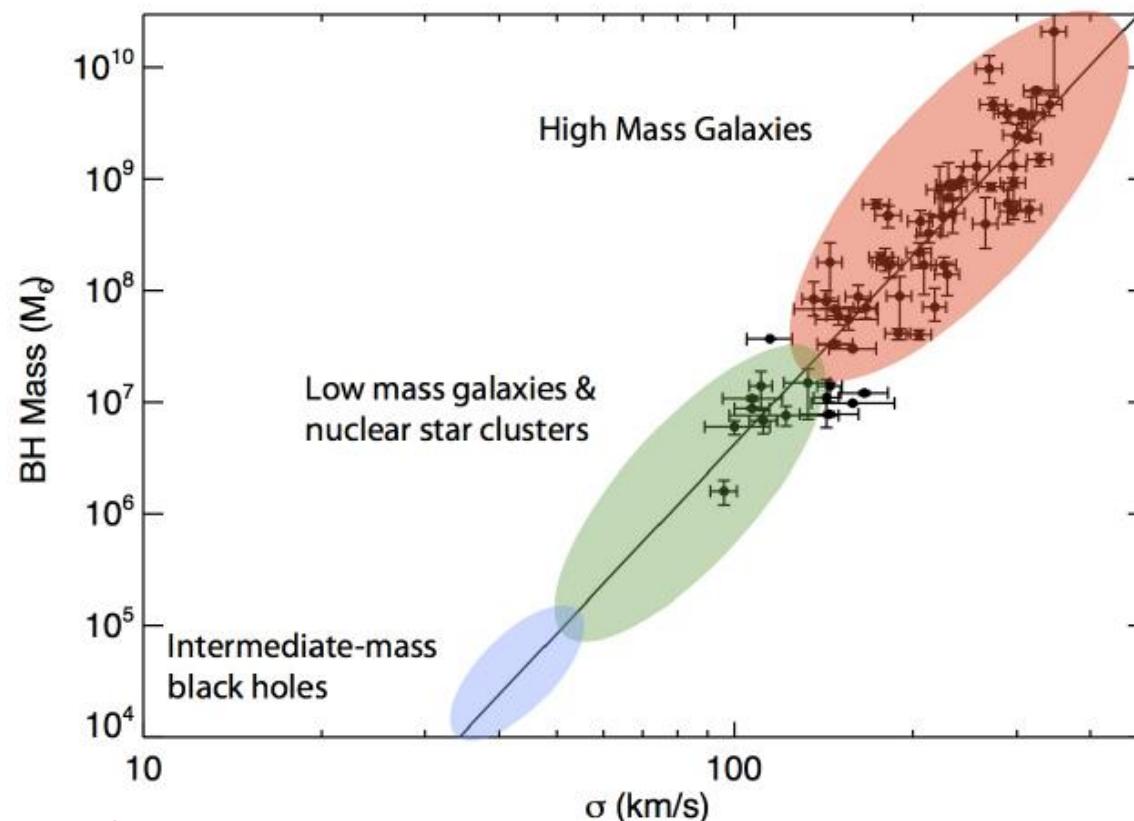
ЗООПАРК ЧЁРНЫХ ДЫР

Первичные

Звёздные

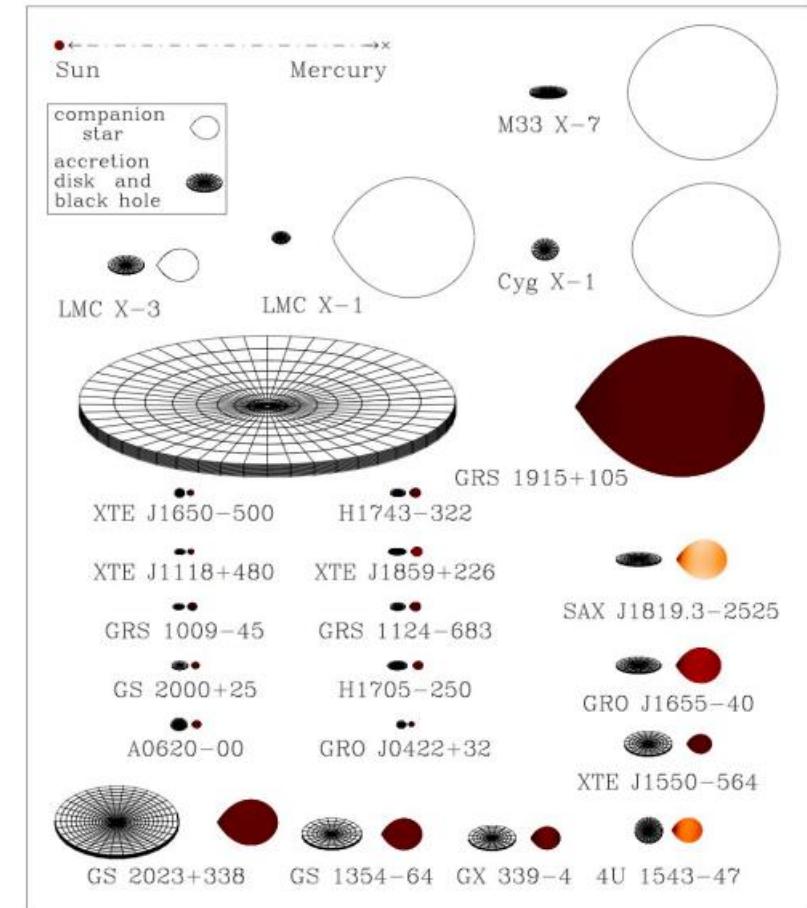
Промежуточные

Сверхмассивные



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Wright et al. 2014



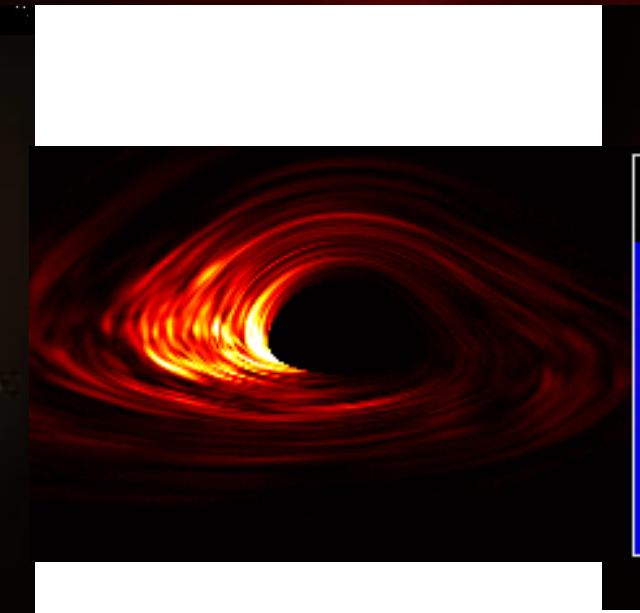
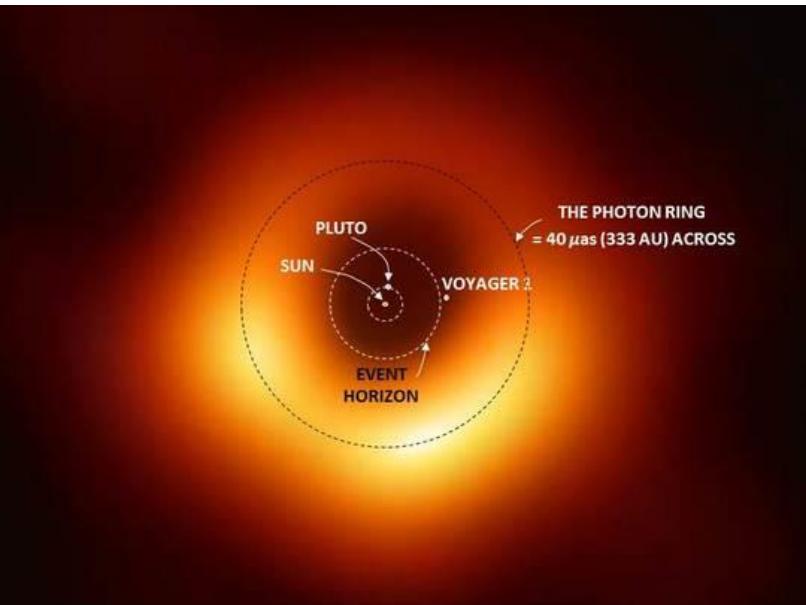
25

arXiv:1906.03871

ПРОБЛЕМА ГОРИЗОНТА



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



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

Радиус
Шварцшильда

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

НЕБОЛЬШОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ

НЕМНОГО ИСТОРИИ

- Ранние работы (до ОТО). Хевисайд (1893), Лоренц (1900), Пуанкаре (1905, 1908), Абрахам (1912).
- ОТО. Эйнштейн (1916). Квадрупольная формула.
- Эйнштейн, Розен (1936-37). Неопределенность с излучением волн двойными системами.
- Пирани, Файнман, Бонди (1956-57). Гравволны могут переносить энергию.
- Вебер (1965). Первые детекторы.
- Пустовойт, Герценштейн (1962), Вайсс (1972). Идея детекторов на основе лазерных интерферометров.
- Начало финансирования LIGO (1988). До этого – прототип (40 метров).
- Начало строительства первого крупного детектора GEO600 (1995). VIRGO (1996).
- Начало наблюдений на LIGO (2002).

ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ

$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ -- метрика.

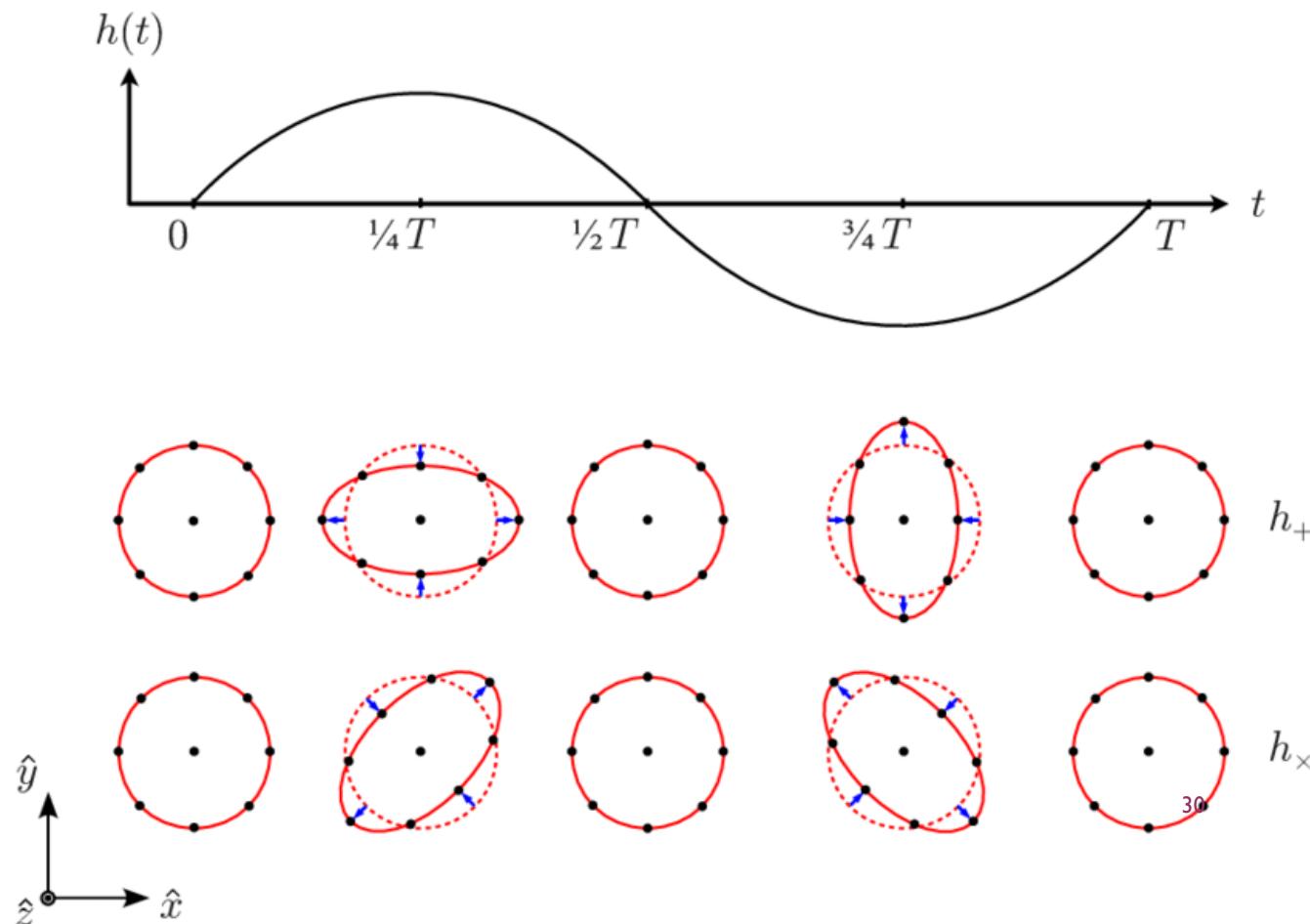
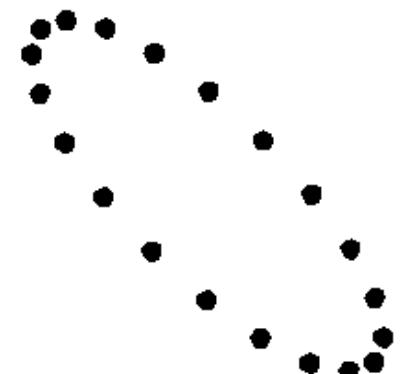
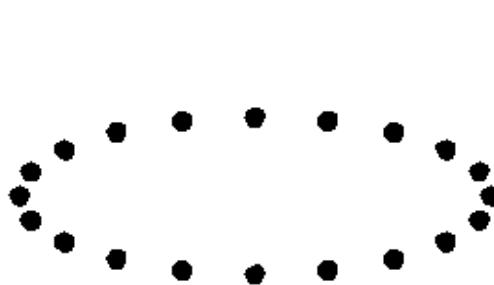
$h_{\mu\nu} = \bar{h}_{\mu\nu} + \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$ --
пертурбации.

$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ -- волновое уравнение.

$= 0$ -- в пустом пространстве.

ПРОЯВЛЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Действие гравитационной волны
аналогично эффекту приливов.



АМПЛИТУДА ГВ

$$h \sim \frac{G}{c^4} \frac{\ddot{Q}}{r} \sim \frac{r_s}{r} \frac{v^2}{c^2}$$

$r_s = \frac{2GM}{c^2}$ – радиус Шварцшильда
 v – характерные скорости
 r – расстояние до источника

$$h \approx 10^{-21} \left(\frac{M}{2M_\odot} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{P}{1 \text{ час}} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{1 \text{ кпк}} \right)^{-1}$$

$$h \approx 10^{-22} \left(\frac{M}{2.8M_\odot} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{P}{0.01 \text{ сек}} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{100 \text{ Мпк}} \right)^{-1}$$

Strain:
$$\begin{cases} h \sim \frac{\Delta L}{L} \\ h_c(f) = h \sqrt{N_{cycles}} \end{cases}$$

ГВ VS ЭМ

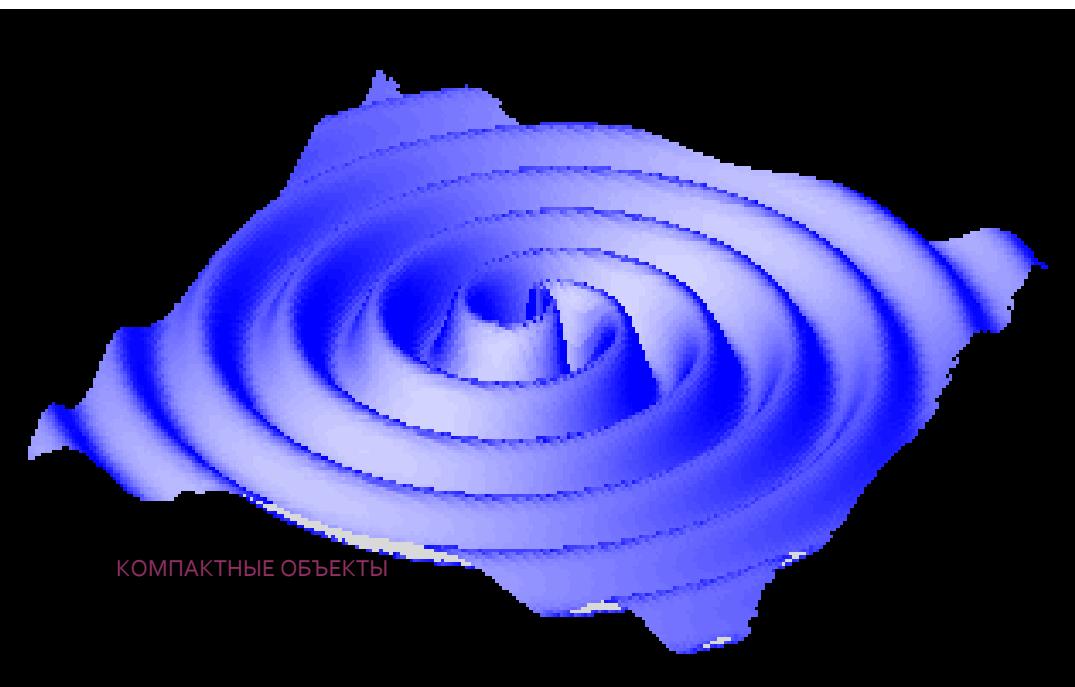
Электромагнитные волны

Гравитационные
волны

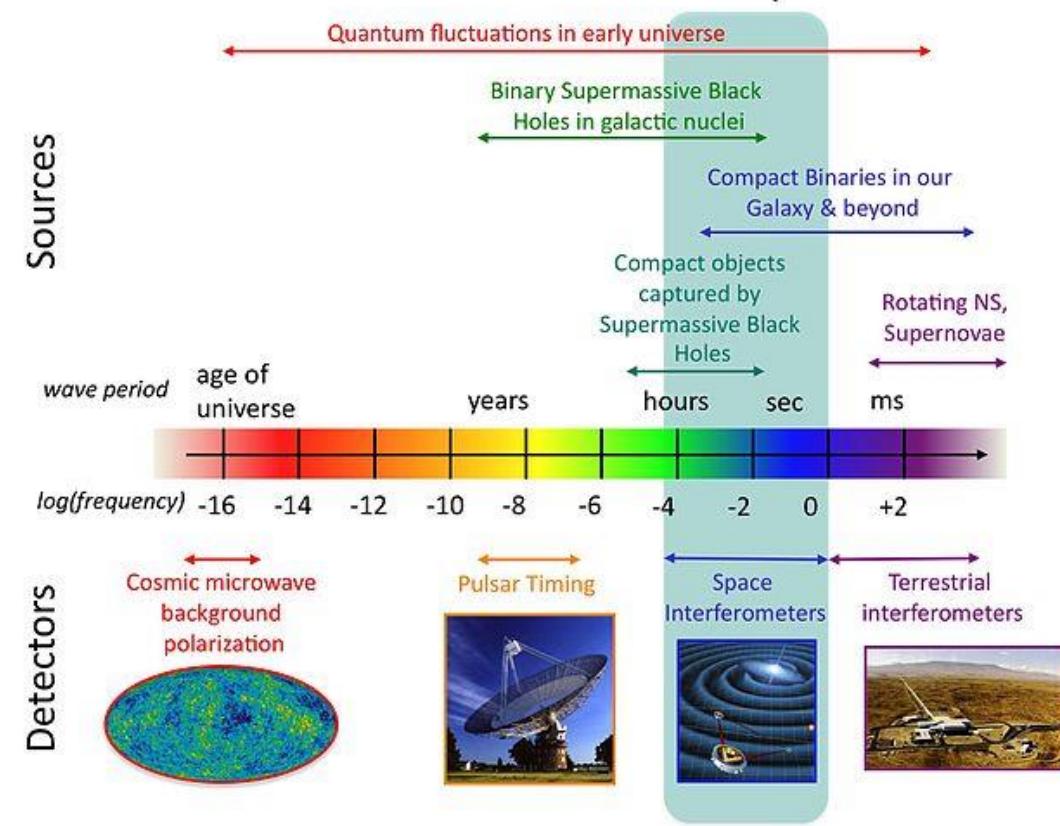
	Магнито-Гидро- Термо-Динамика	Макроскопическое движение
Физика		
Спектр	Широкий	Узкий
Взаимодействие с материей	Сильное	Слабое
Угловое разрешение	Лучше	Хуже
Данные	Поток	Амплитуда

СПЕКТР ГРАВВОЛН

- Космология
- Пары сверхмассивных черных дыр
- Пары черных дыр звездных масс и нейтронные звезды
- Сверхновые, вращающиеся НЗ, etc.



The Gravitational Wave Spectrum



МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ

Прямые

- Твердотельные (бар) детекторы
- Наземные лазерные интерферометры
- Космические лазерные интерферометры

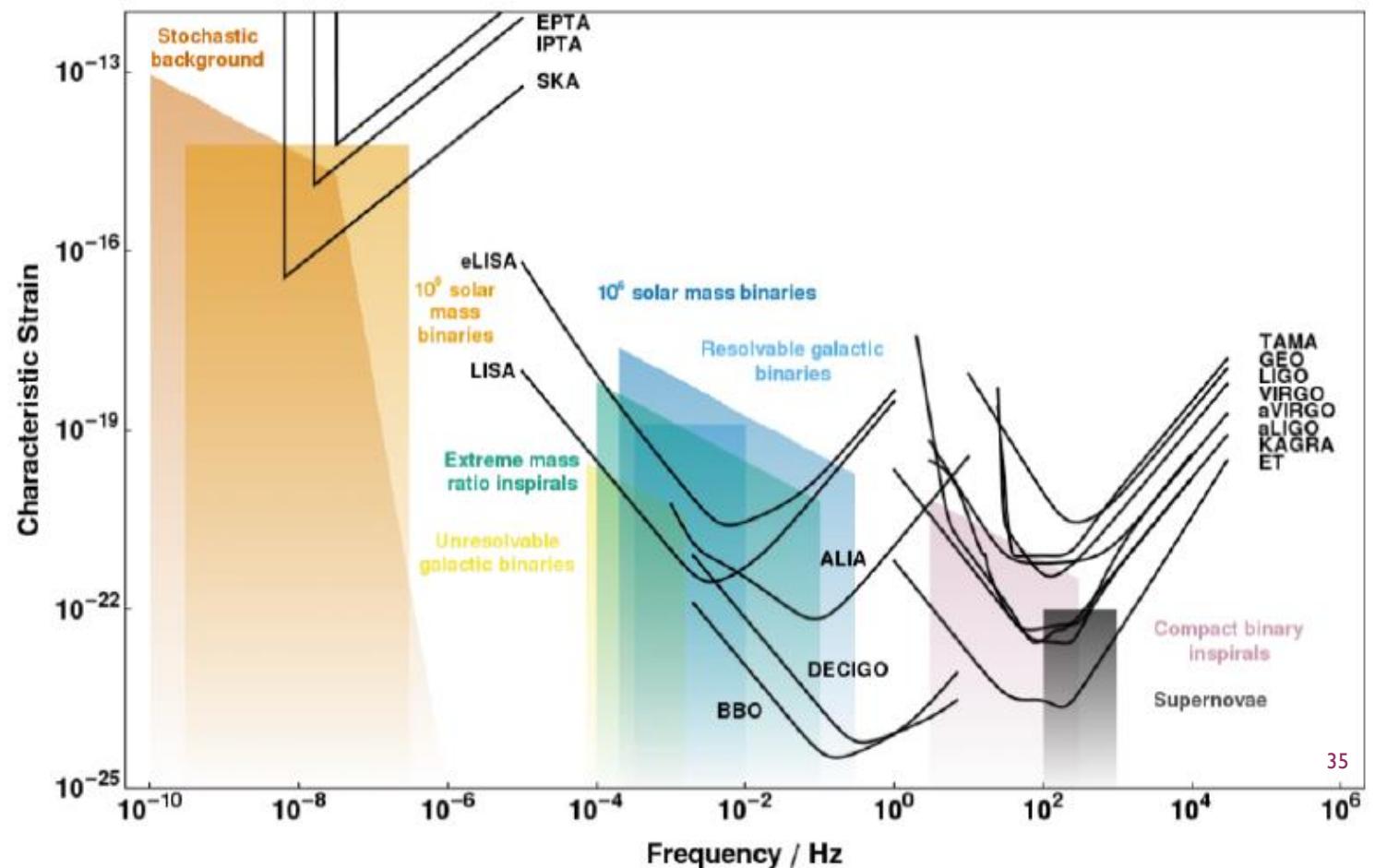
Косвенные (астрономические)

- Тайминг радиопульсаров
- Астрометрические наблюдения смещения положений звезд
- Наблюдения влияния гравитации на различные объекты
- Наблюдения поляризации реликта

РАЗНЫЕ МЕТОДЫ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ

- Первичные граввовны – наблюдения поляризации реликтового излучения
- Длинные волны – пульсарные проекты
- Промежуточные длины – космические интерферометры
- Слияния двойных – наземные интерферометры

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



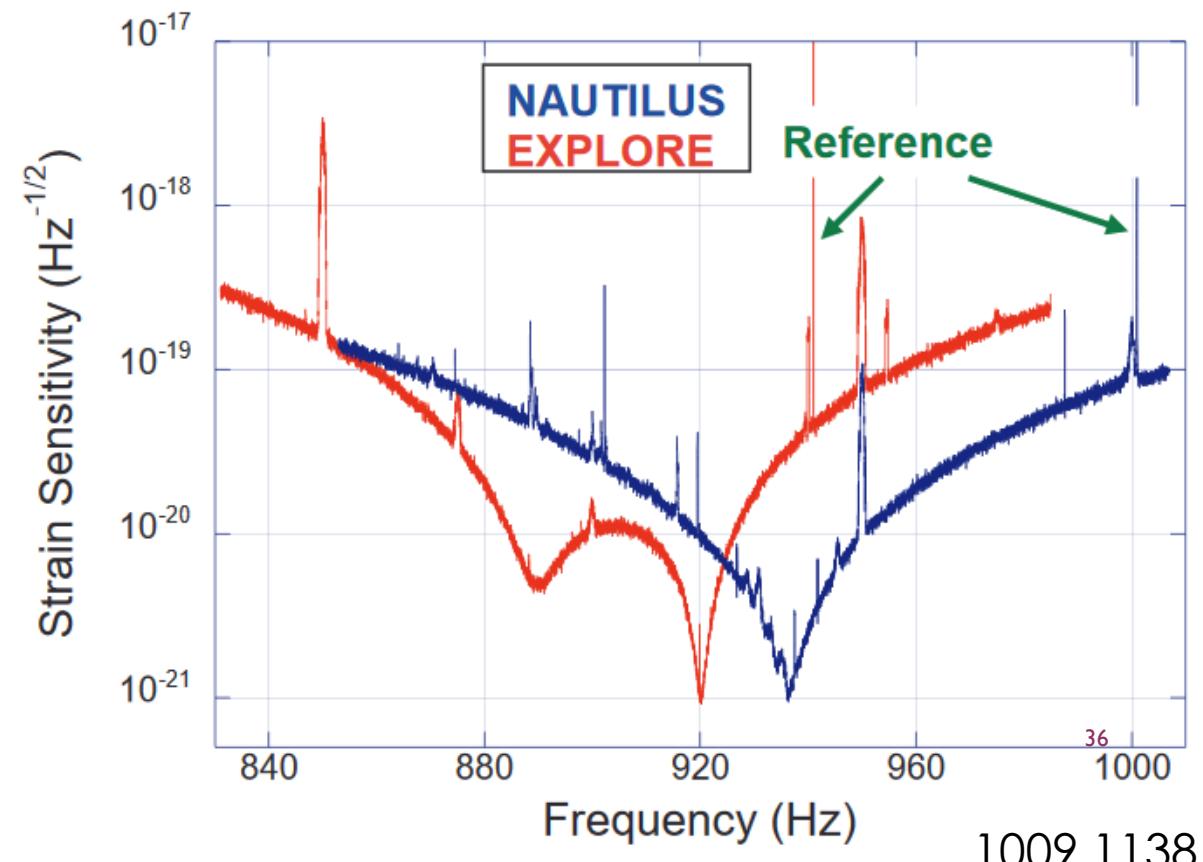
ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ (БАР) ДЕТЕКТОРЫ

Вторая половина 60х – вторая половина 90х гг.
От простых моделей до
сети больших криогенных установок.

ALLEGRO (1991), AURIGA (1997), EXPLORER (1990),
NAUTILUS (1995), NIOBE (1993)



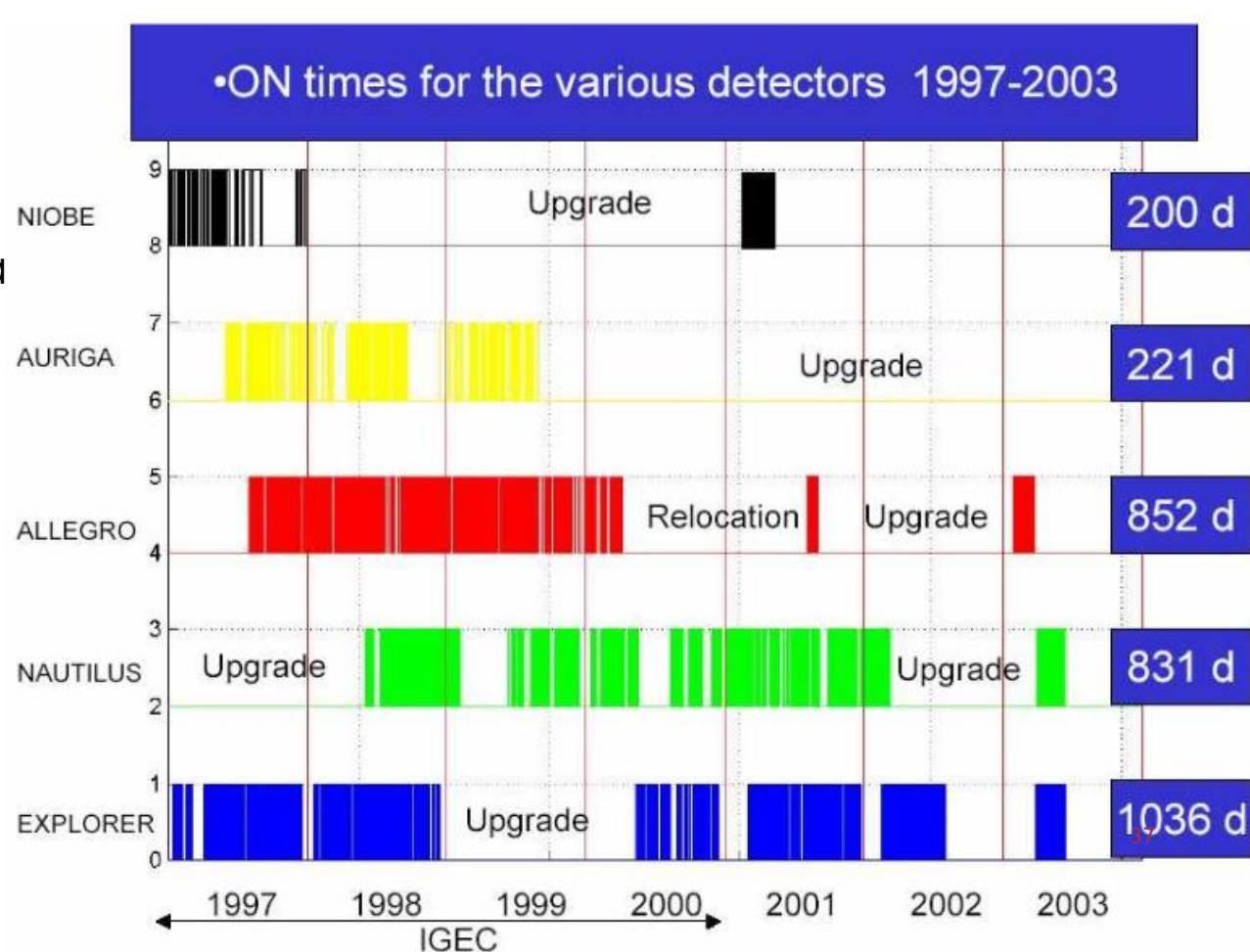
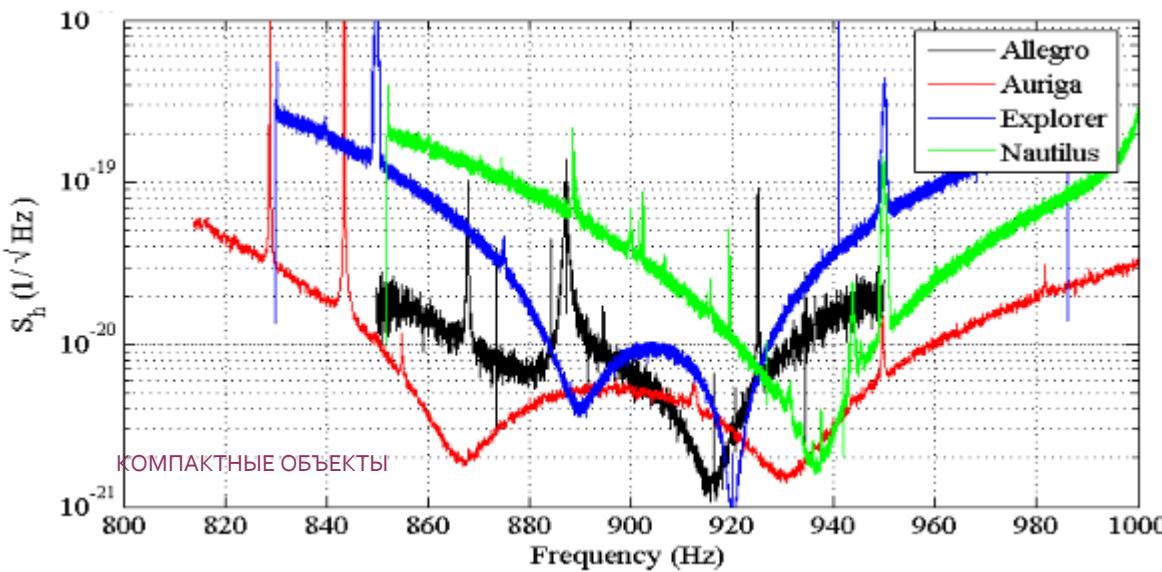
Чувствительность в узком
высокочастотном диапазоне.



ДЕТЕКТОРЫ ПРЕДПОСЛЕДНЕГО ПОКОЛЕНИЯ

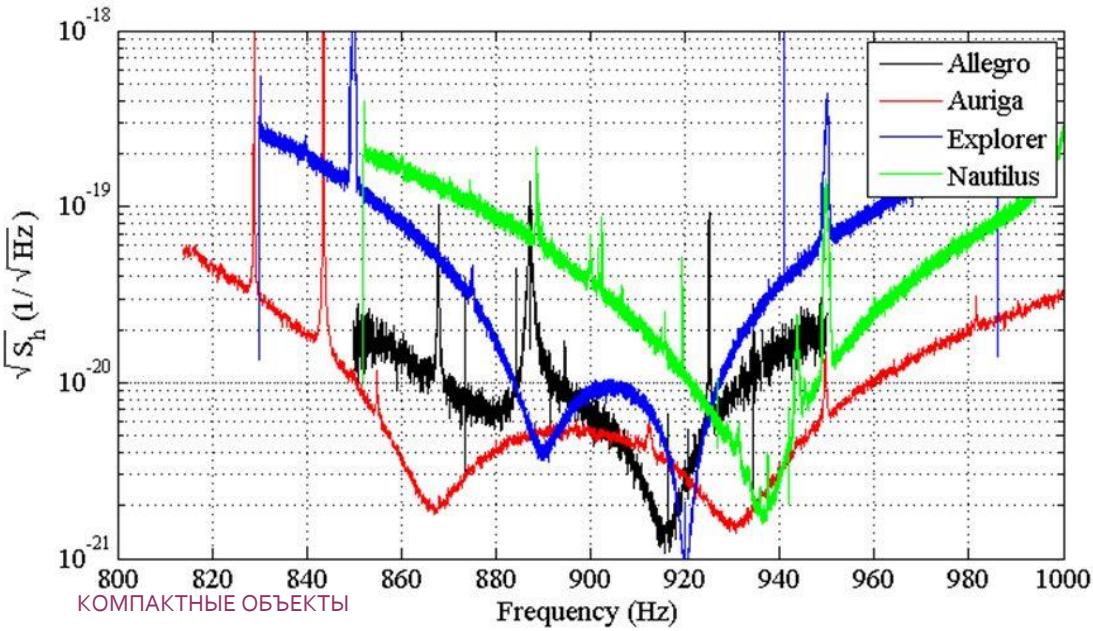
1009.1138

Охлаждение до температуры жидкого гелия,
сложные системы подвесов и новая электроника
для считывания сигнала.

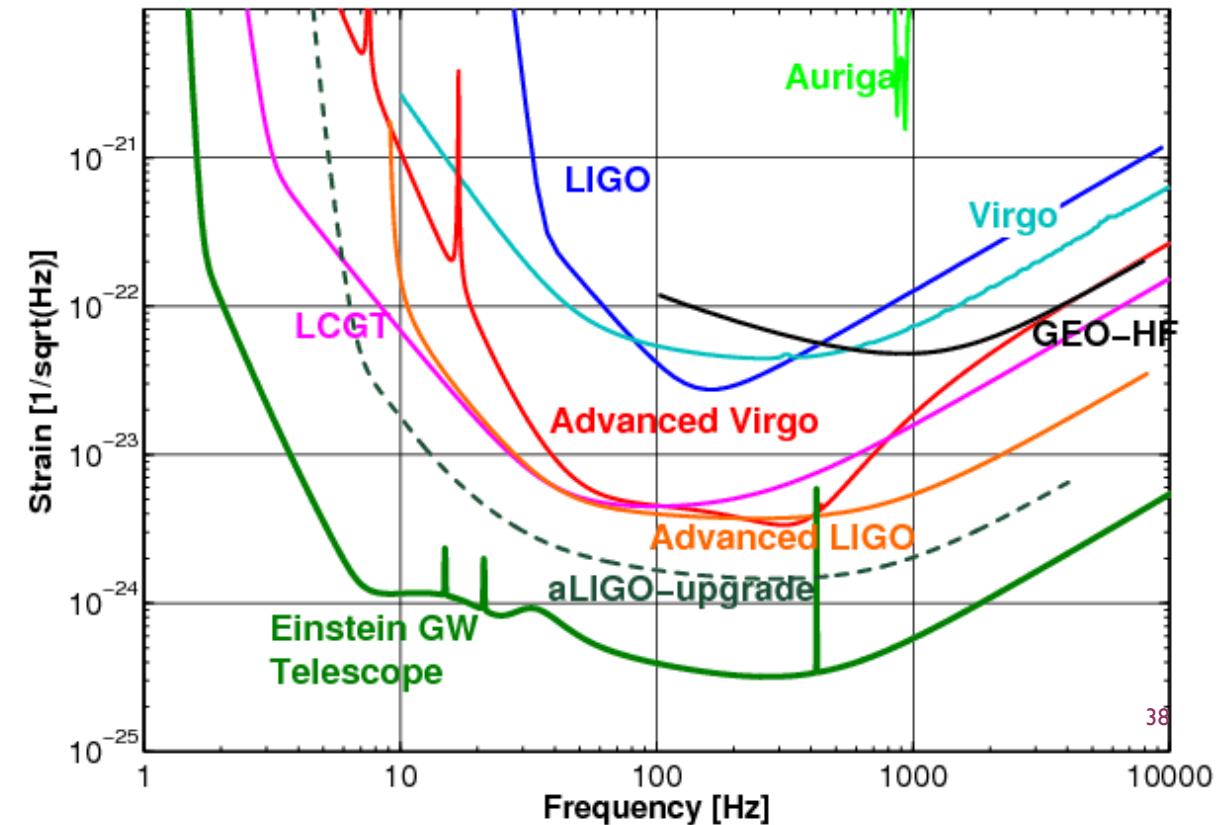


БАРЫ ПРОТИВ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

SENSITIVITY OF PRESENT DETECTORS



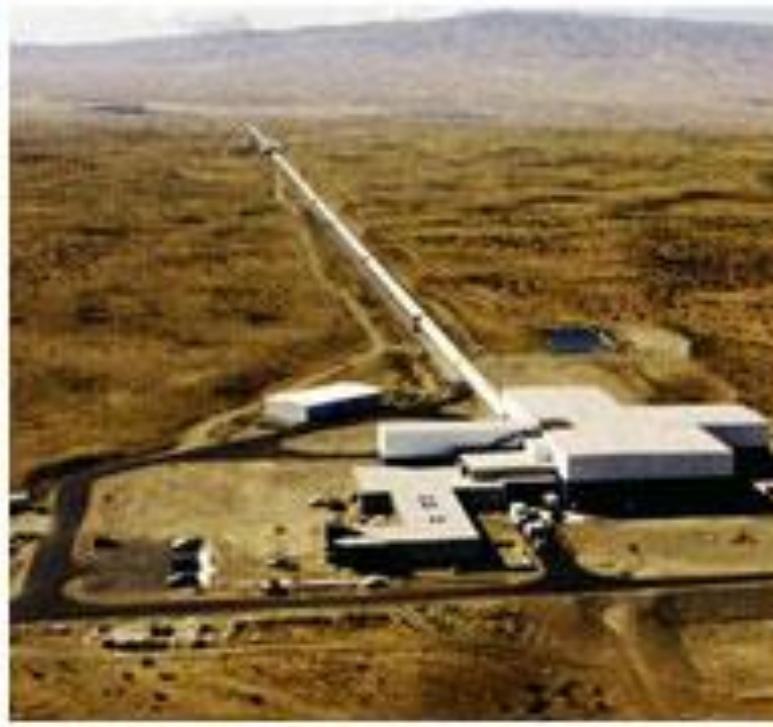
ILIAS WP1 – Cascina 13.11.2006



LIGO

LIGO

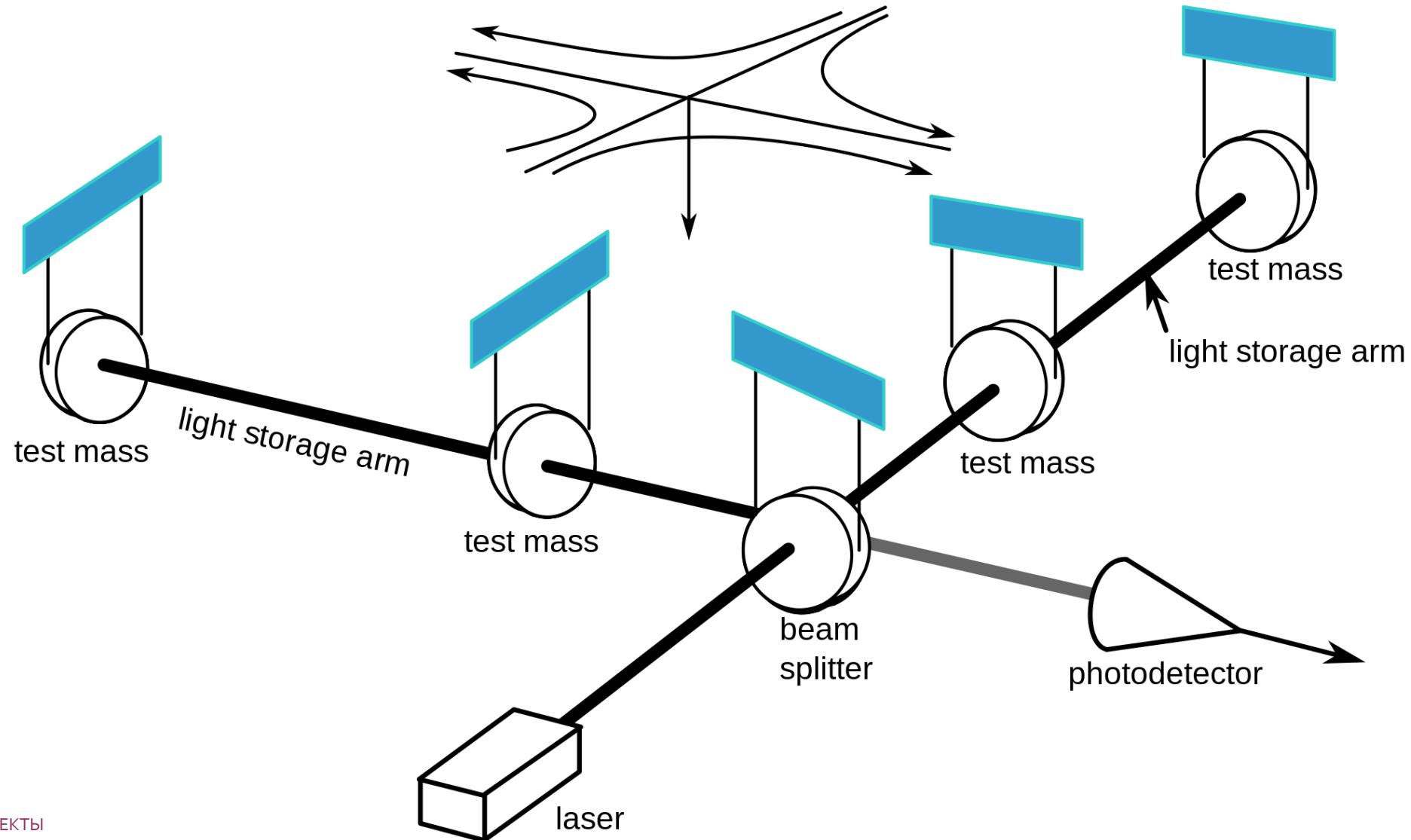
VIRGO



LIGO Lab/Virgo

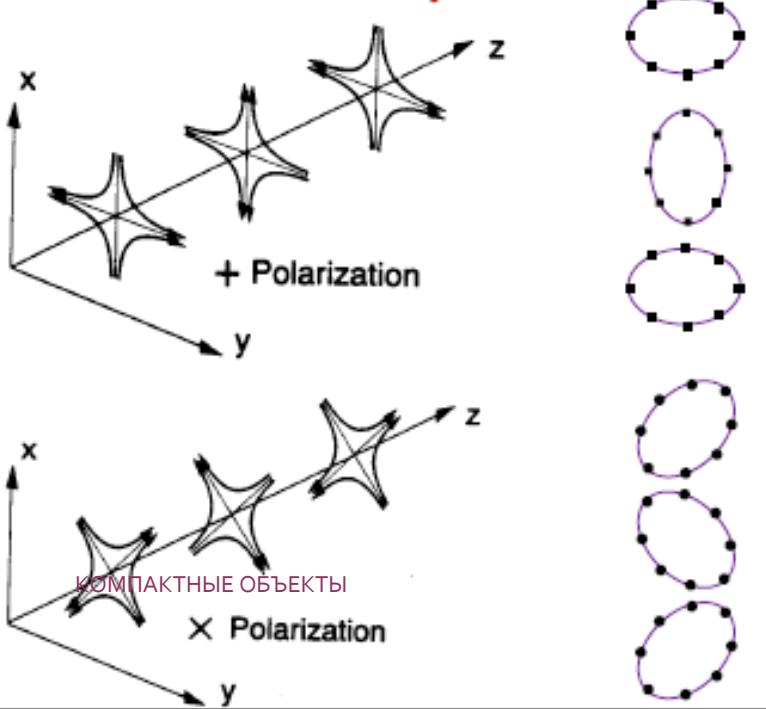
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Идея использования лазерных интерферометров для регистрации гравитационных волн была предложена Пустовойтом и Герценштейном в 1962 году.

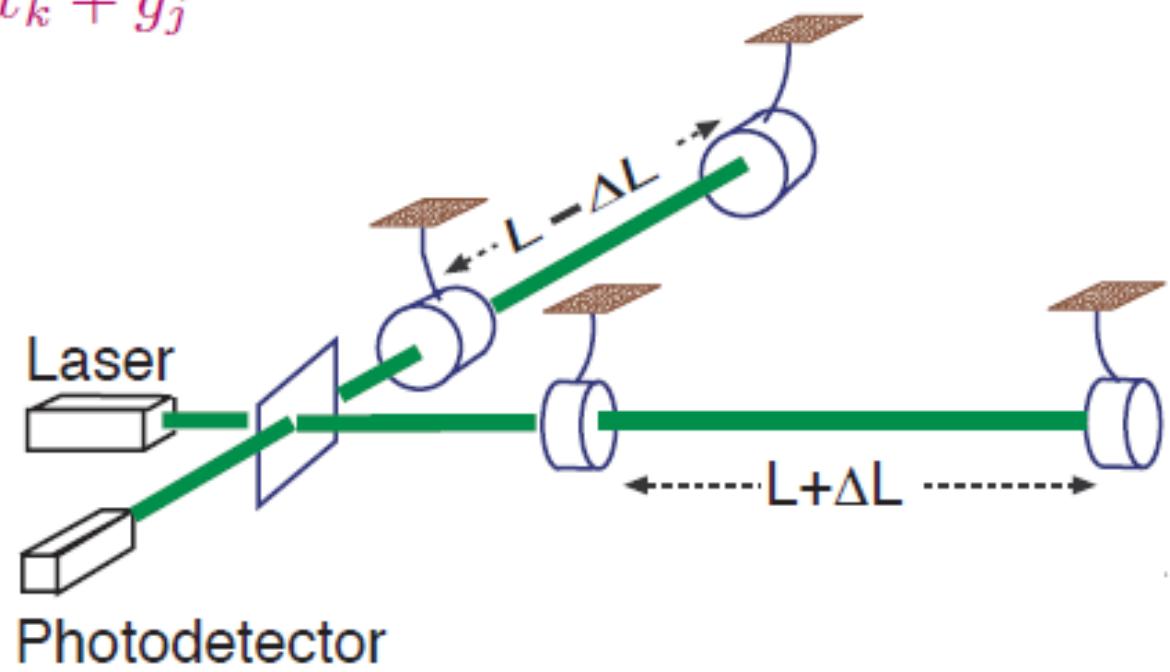


ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ ФОТОНА

Прохождение гравволны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра.

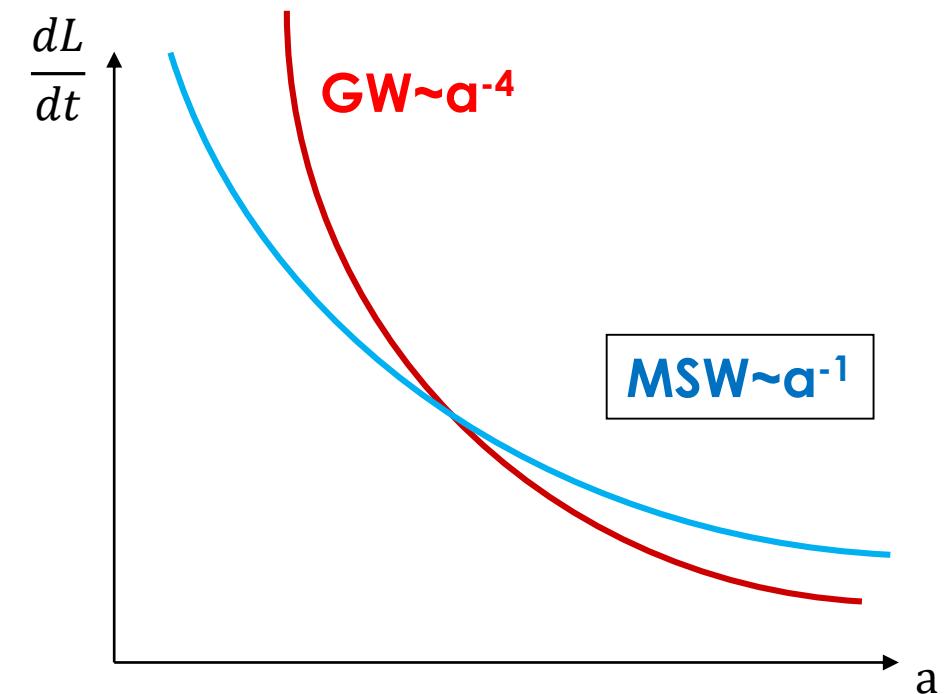
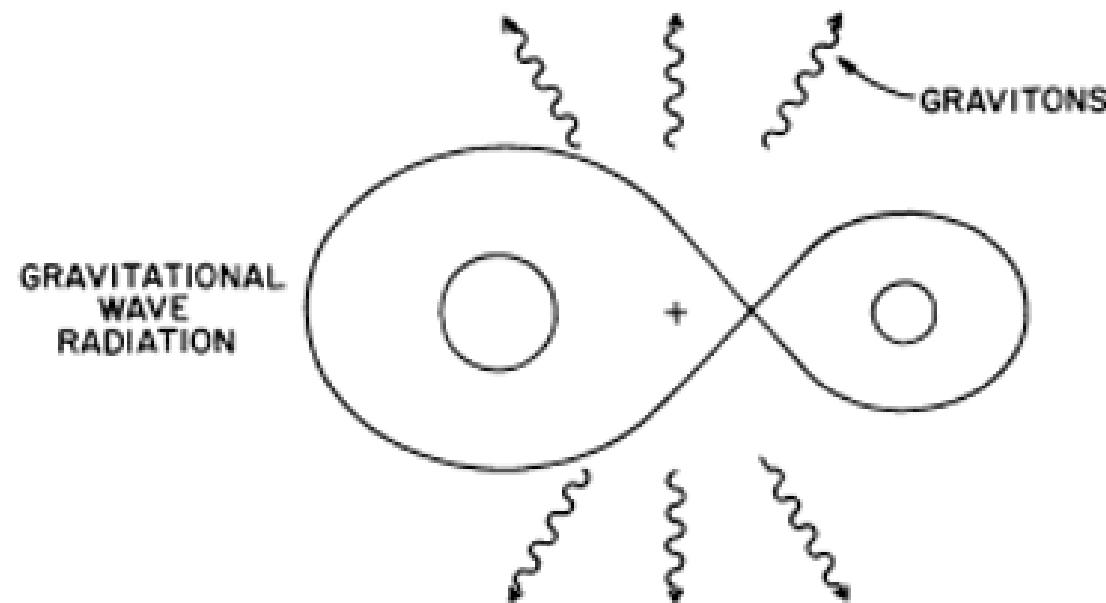


$$\ddot{x}_j = \frac{1}{2} \ddot{h}_{jk}^{\text{GW}} x_k + g_j$$



Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны.
Измерение происходит довольно сложным способом.

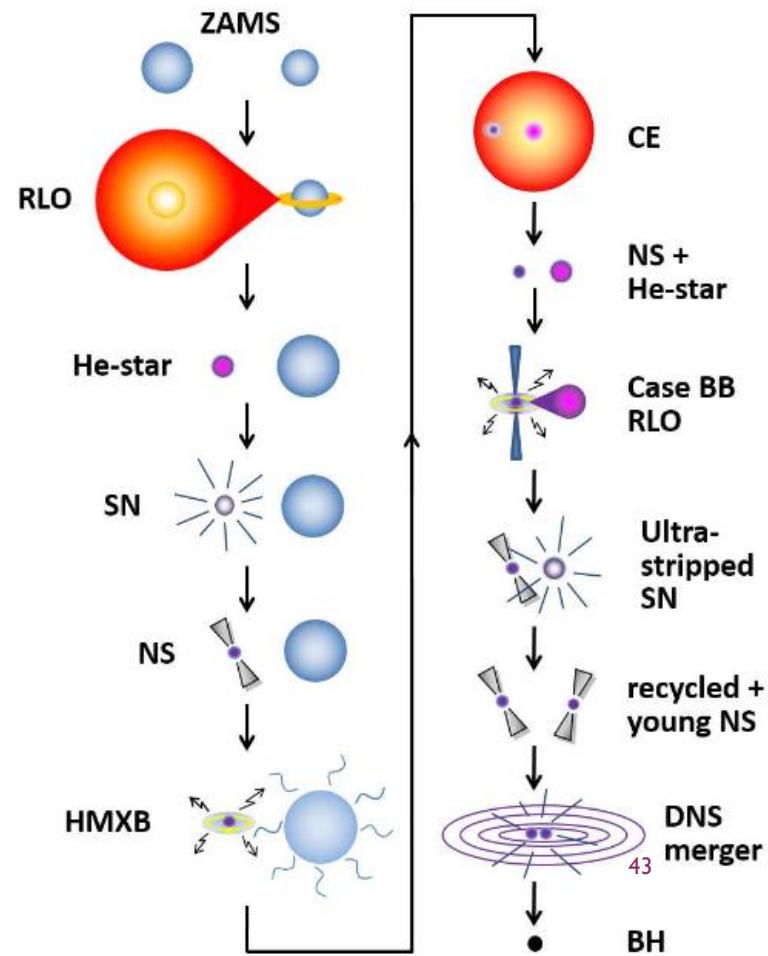
ГВ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ



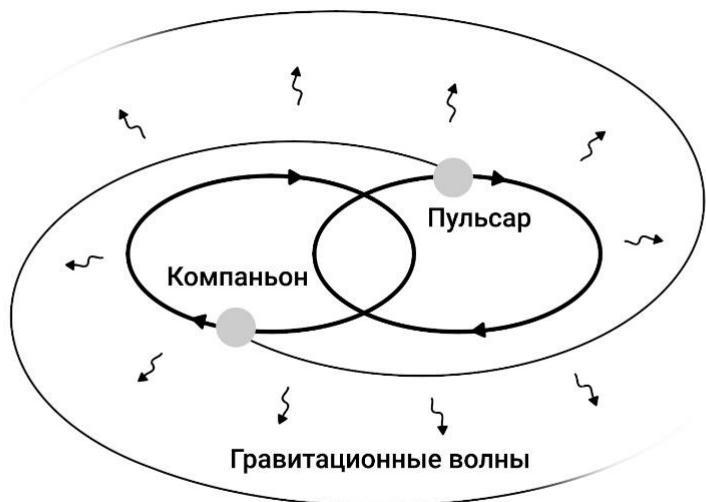
ДВОЙНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

1706.09438

Radio Pulsar	Type	P (ms)	\dot{P} (10^{-18})	B (10^9 G)	P_{orb} (days)	e	M_{psr} (M_\odot)	M_{comp} (M_\odot)
J0453+1559 ^a	recycled	45.8	0.186	0.92	4.072	0.113	1.559	1.174
J0737-3039A ^b	recycled	22.7	1.76	2.0	0.102	0.088	1.338	1.249
J0737-3039B ^b	young	2773.5	892	490	- -	- -	1.249	1.338
J1518+4904 ^c	recycled	40.9	0.0272	0.29	8.634	0.249	***	***
B1534+12 ^d	recycled	37.9	2.42	3.0	0.421	0.274	1.333	1.346
J1753-2240 ^e	recycled	95.1	0.970	2.7	13.638	0.304	-	-
J1755-2550 ^{f*}	young	315.2	2430	270	9.696	0.089	-	>0.40
J1756-2251 ^g	recycled	28.5	1.02	1.7	0.320	0.181	1.341	1.230
J1811-1736 ^h	recycled	104.2	0.901	3.0	18.779	0.828	<1.64	>0.93
J1829+2456 ⁱ	recycled	41.0	0.0525	0.46	1.176	0.139	<1.38	>1.22
J1906+0746 ^{j*}	young	144.1	20300	530	0.166	0.085	1.291	1.322
J1913+1102 ^k	recycled	27.3	0.161	0.63	0.206	0.090	<1.84	>1.04
B1913+16 ^l	recycled	59.0	8.63	7.0	0.323	0.617	1.440	1.389
J1930-1852 ^m	recycled	185.5	18.0	18	45.060	0.399	<1.32	>1.30
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ								
J1807-2500B ^{n*}	GC	4.2	0.0823	0.18	9.957	0.747	1.366	1.206
B2127+11C ^p	GC	30.5	4.99	3.8	0.335	0.681	1.358	1.354



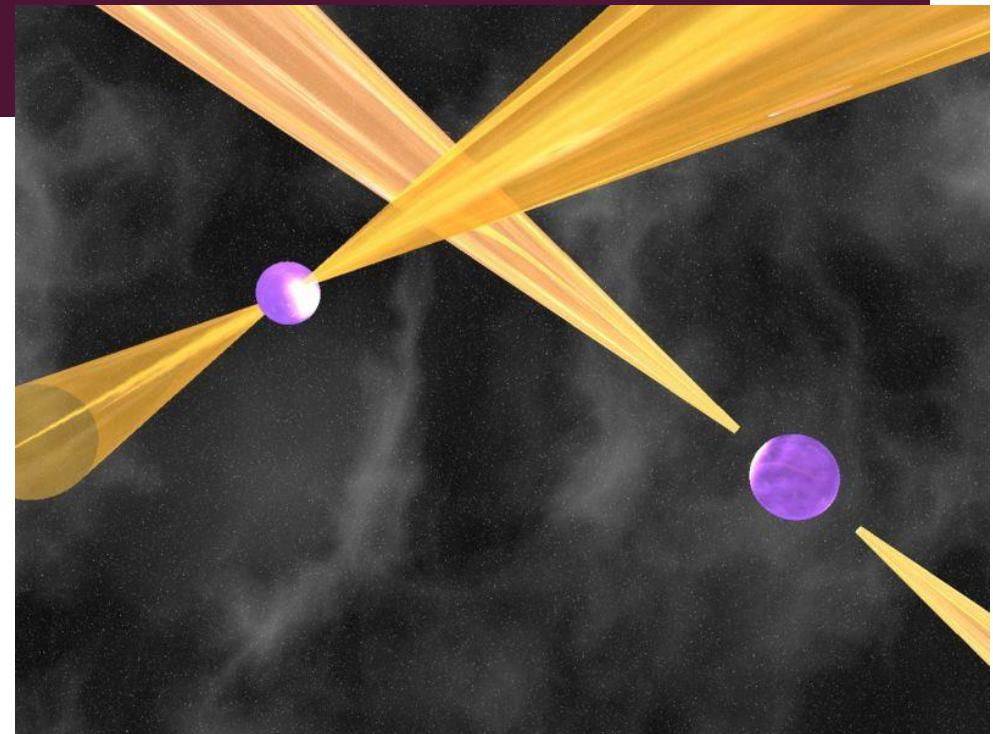
ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ



$$\frac{d\Delta_{E\odot}}{dt} = \sum_i \frac{Gm_i}{c^2 r_i} + \frac{v_\oplus^2}{2c^2} - \text{constant}.$$

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

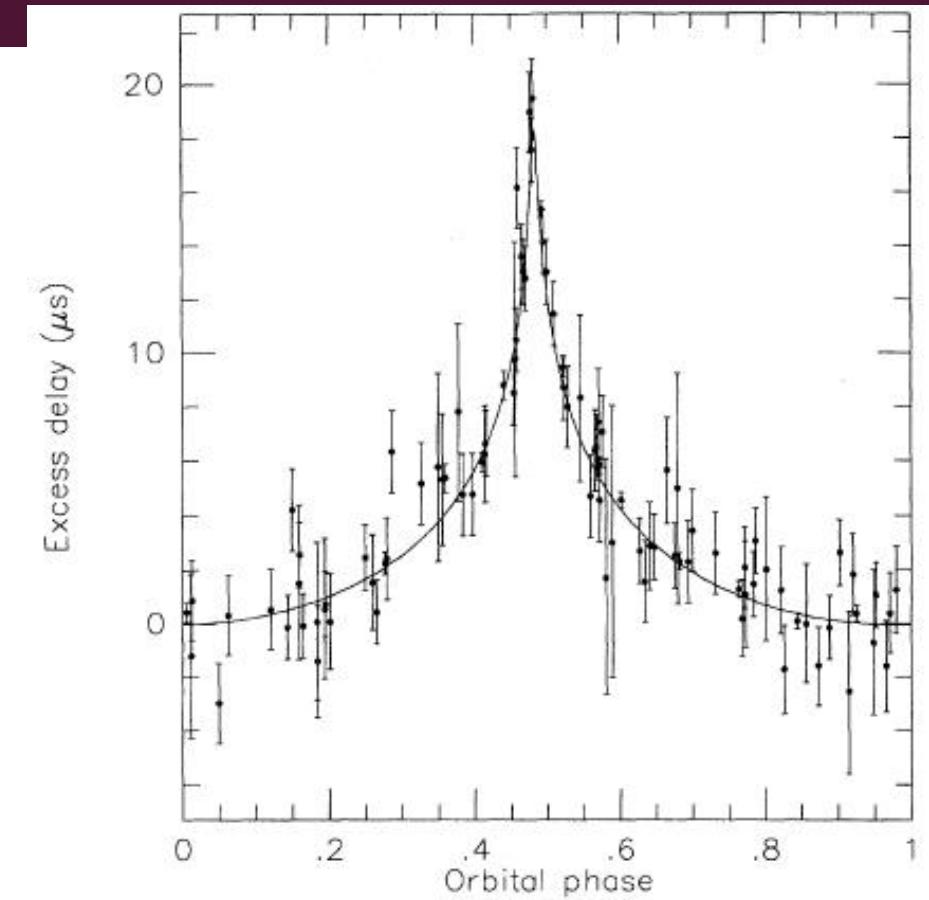
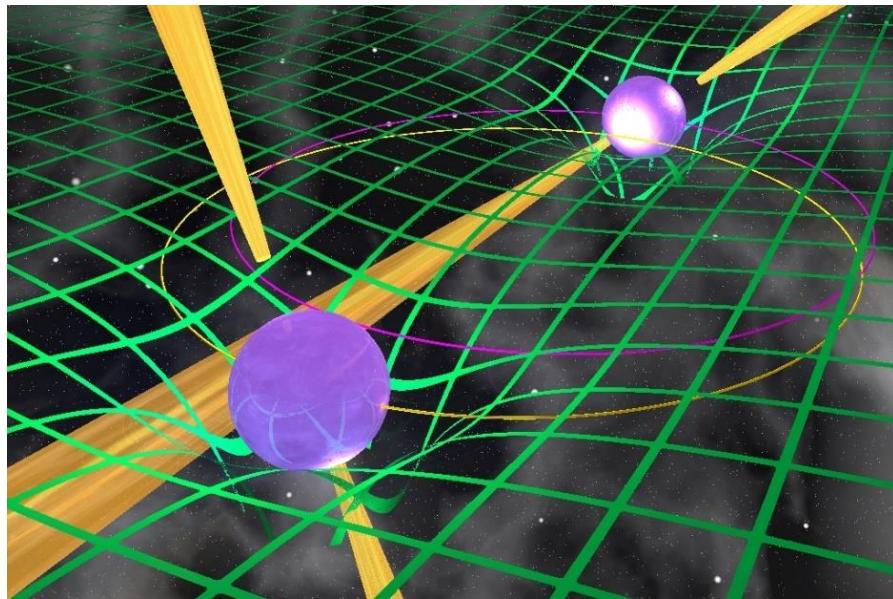
$$\Delta_{S\odot} = -\frac{2GM_\odot}{c^3} \log(1 + \cos\theta),$$



$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R\odot}(\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi) \\ + \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot}(\alpha, \delta) \\ - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s)$$

ЭФФЕКТ ШАПИРО

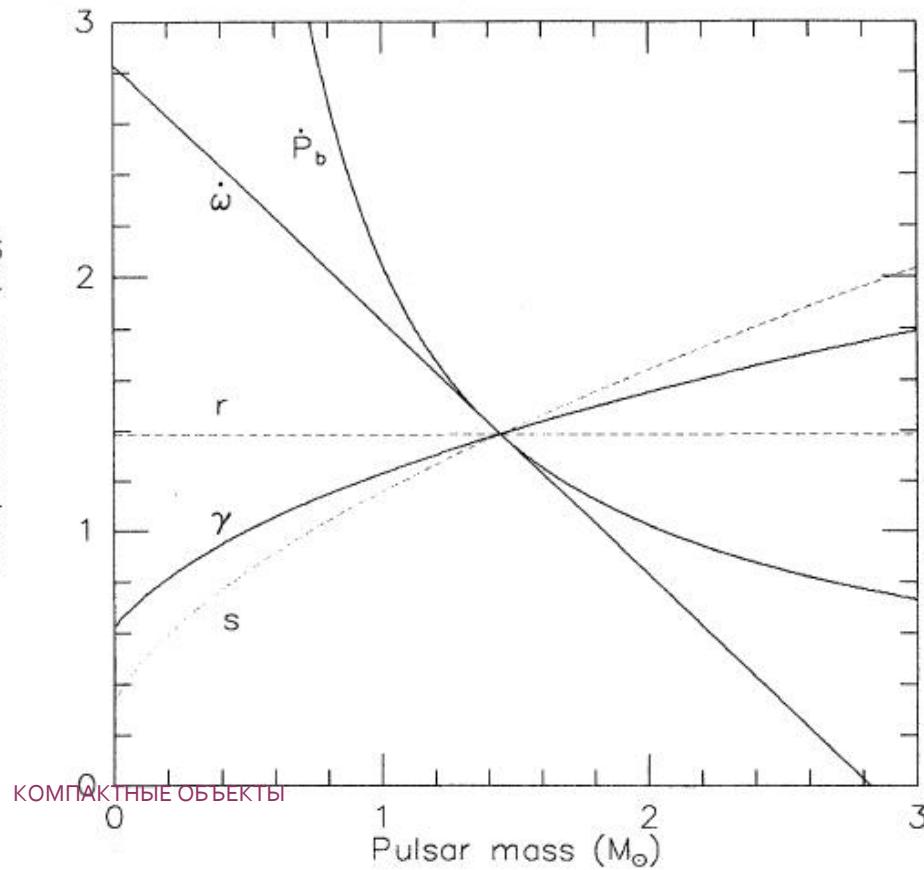
$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$



PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

ИЗМЕРЕНИЕ МАСС НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД

(Taylor) PSR J913+16

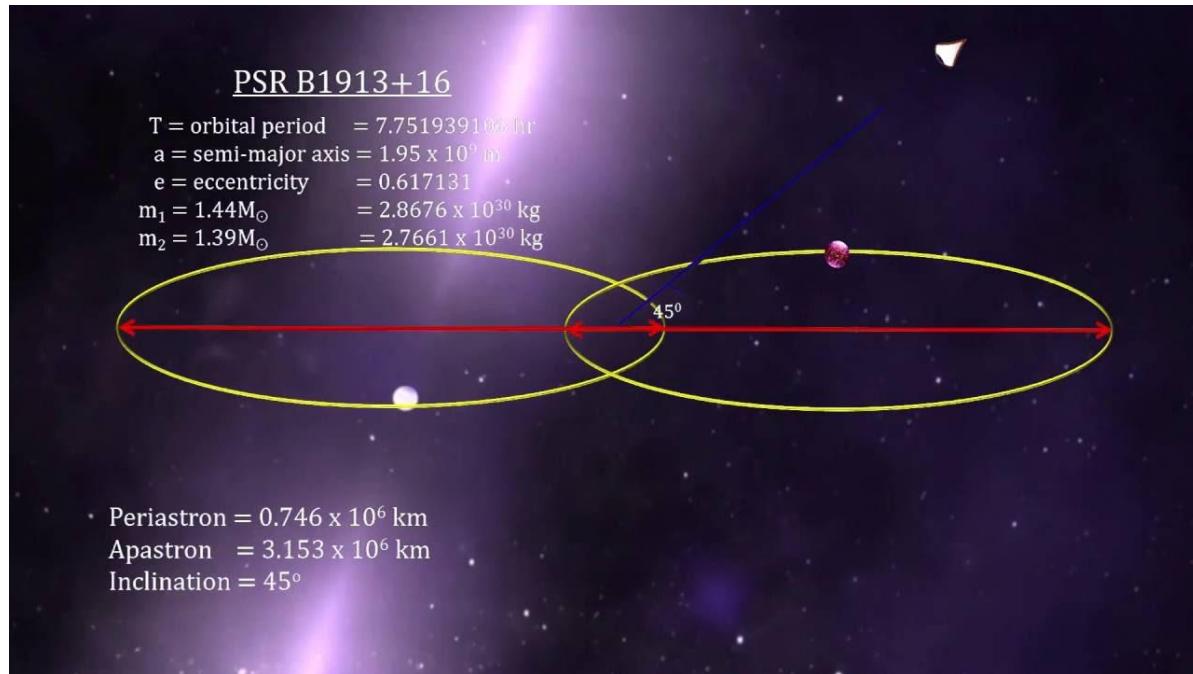


Наблюдение сразу нескольких эффектов позволяет измерить массы обеих звезд с очень высокой точностью. Иногда до 0.001.

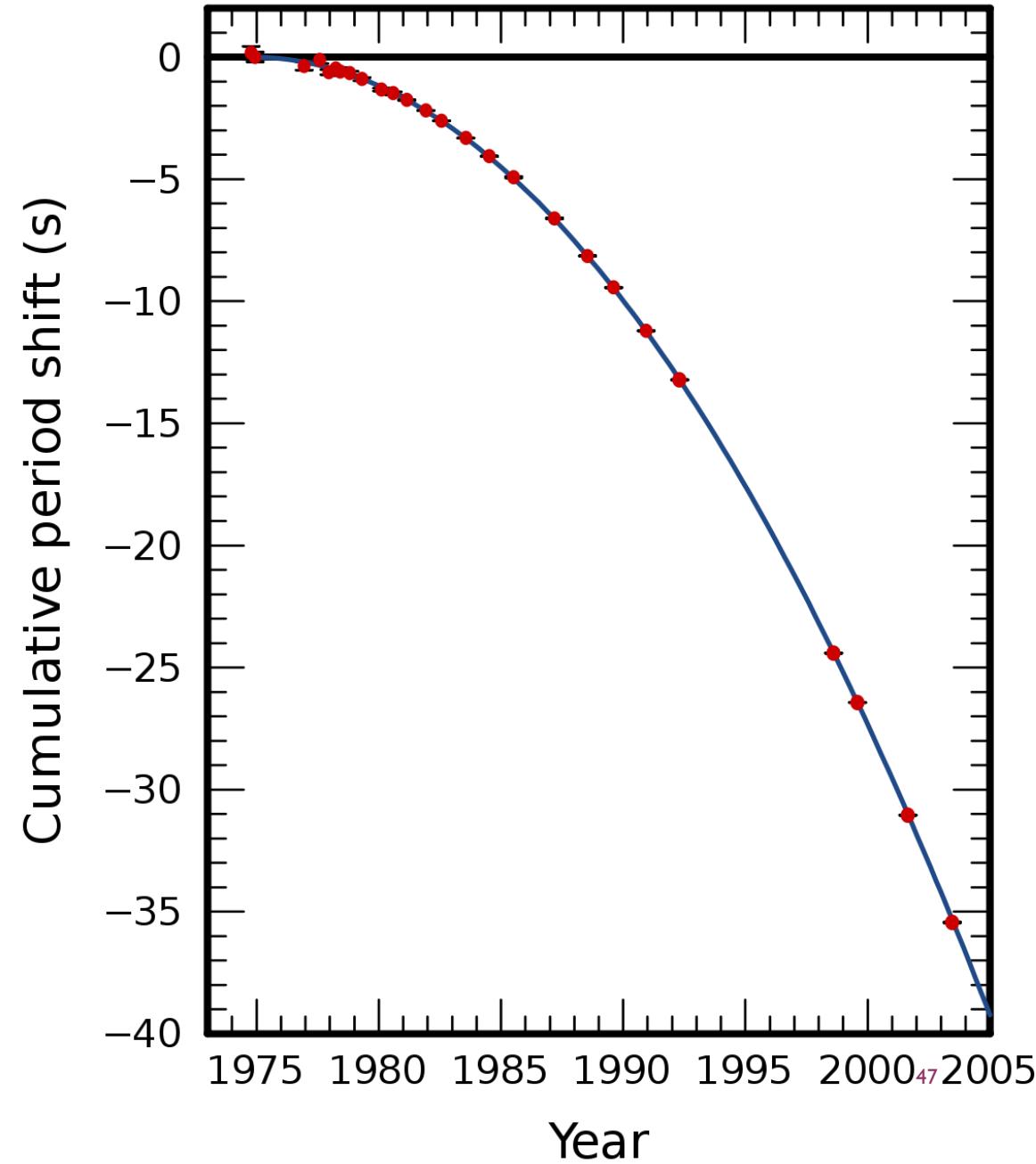
Хорошо измерено, как происходит сближение компонент двойной. Оно находится в полном соответствии с предсказаниями ОТО. Это было сильнейшим аргументом в пользу существования гравитационных волн.

Кроме того, можно оценить темп слияний нейтронных звезд.

ПУЛЬСАР ХАЛСА-ТЕЙЛОРА

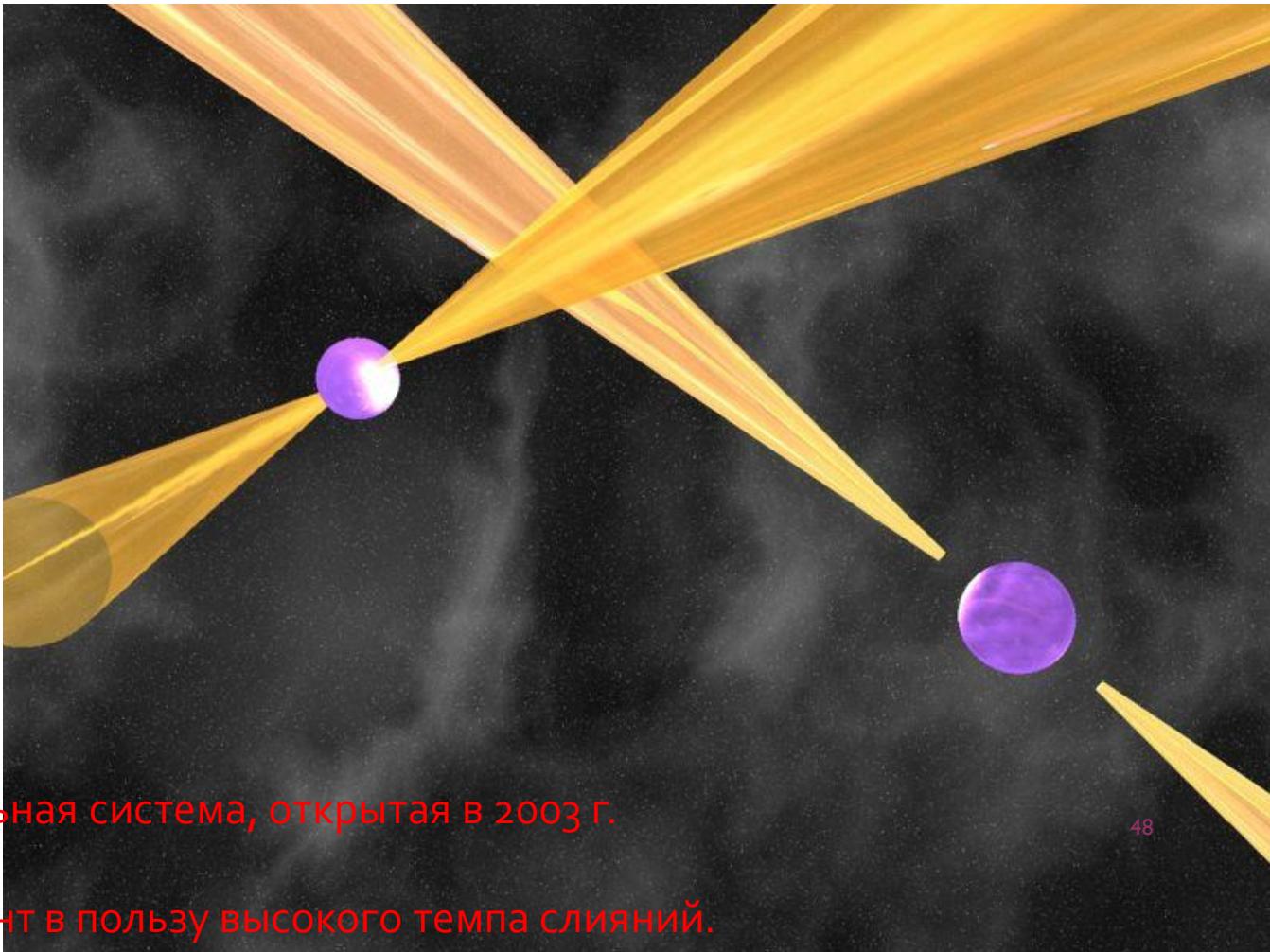
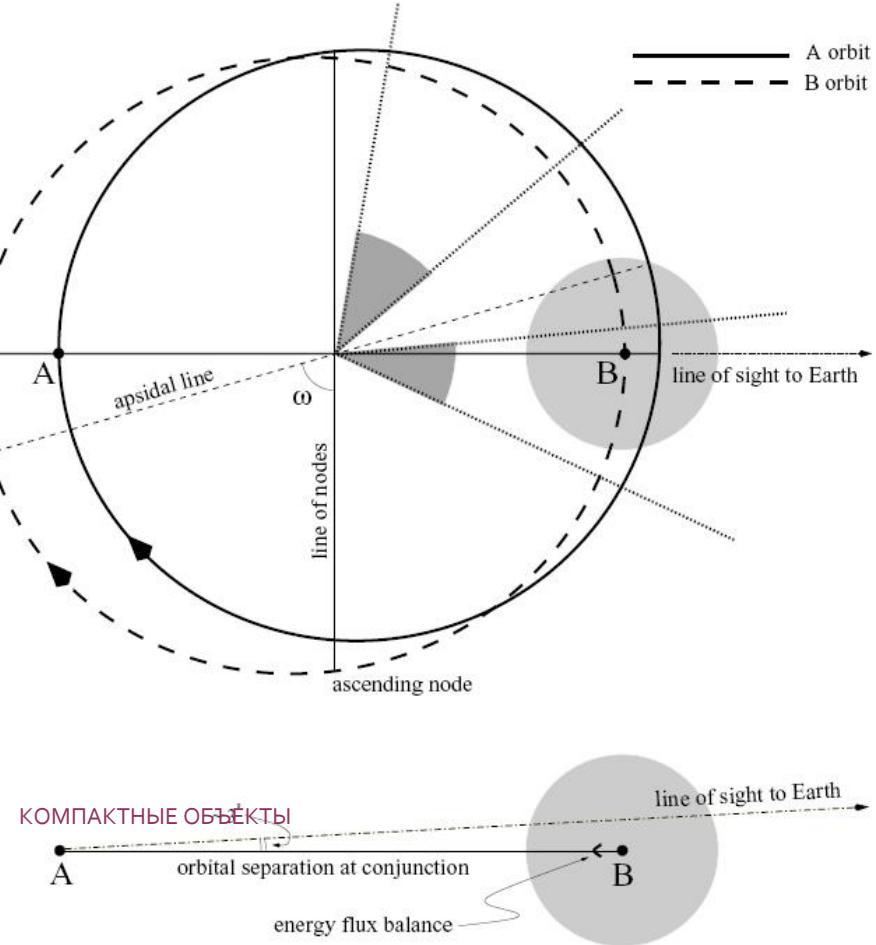


КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ



ДВОЙНОЙ ПУЛЬСАР PSR J0737-3039

(Lyne et al. astro-ph/0401086)



ПУЛЬСАРЫ И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

Сажин (1978), Детвейлер [Detweiler] (1979)

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -H^{ij} \left[h_{ij}(t_e, x_e^i) - h_{ij}(t_e - D/c, x_p^i) \right]$$

$$R(t) = - \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu} dt.$$

$$R_e(t) = \int_0^t \frac{P_+ A_+(t) + P_\times A_\times(t)}{2(1-\gamma)} dt$$

$$\Delta t \sim 10\text{ns} \left(\frac{1\text{Gpc}}{d} \right) \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right)^{5/3} \left(\frac{10^{-7}\text{Hz}}{f} \right)^{1/3}$$

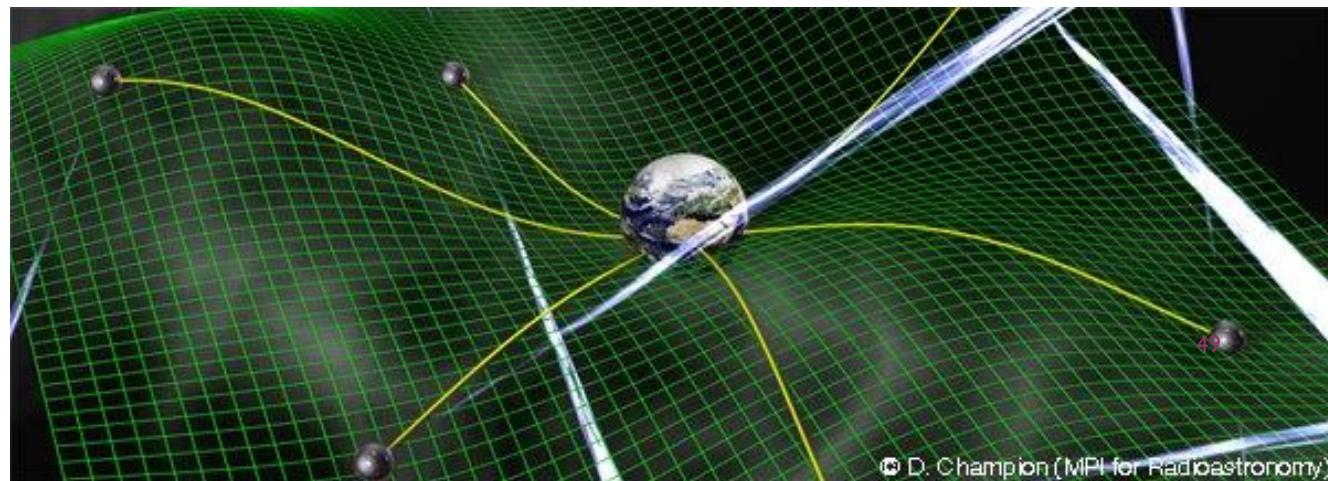
КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

1707.01615, см. также 2112.08064

Наблюдения большого количества радиопульсаров с хорошими временными характеристиками должны позволить выделить сигнал в точке наблюдения.

Будут наблюдаться скоррелированные изменения отклонения во времени прихода импульсов.

Периоды волн \sim (недель – лет)



HELLINGS-AND-DOWNS CURVE

1707.01615

Для изотропного стохастического
неполяризованного фонового сигнала
для пары пульсаров получим
корреляцию отклонений в тайминге:

$$c(\theta) = \frac{3}{2}x \ln x - \frac{x}{4} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\delta(x)$$

$$\frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}.$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t.$$

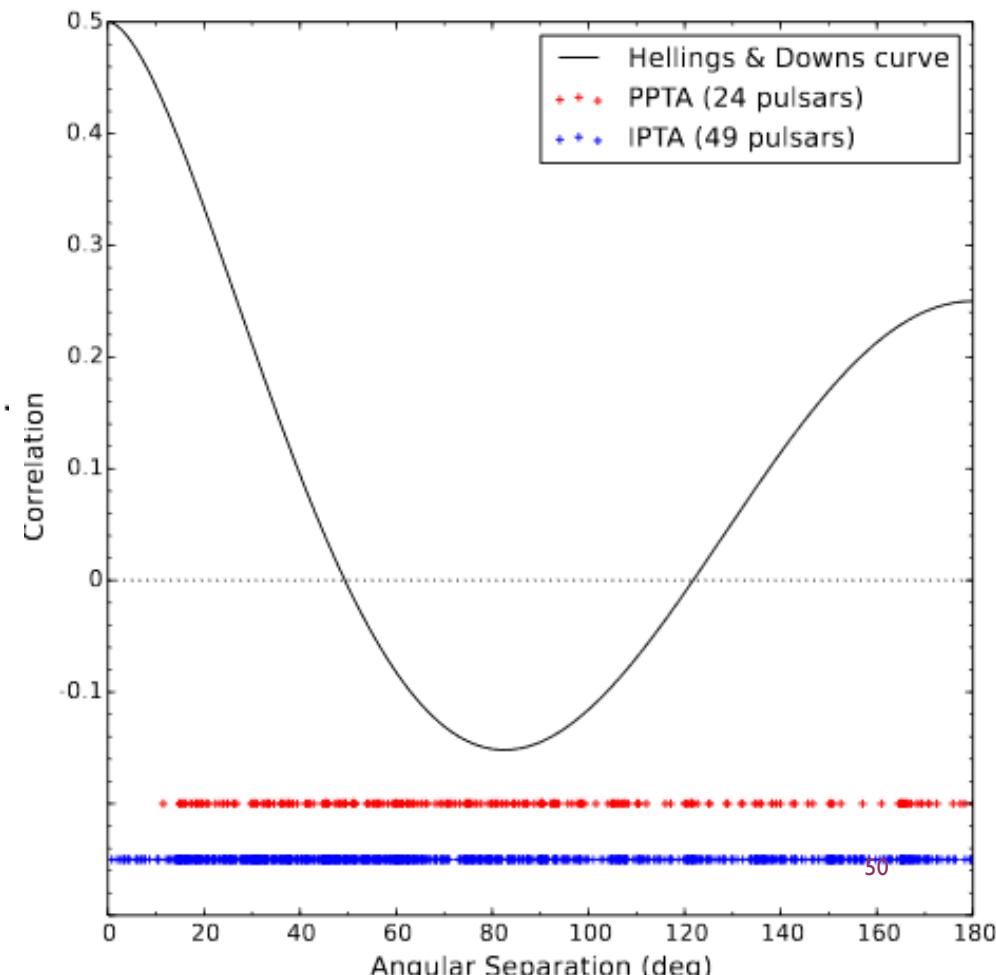
$$x = [1 - \cos \theta]/2$$

Θ – угол между пульсарами

См. детали в 1412.1142

КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Подробный обзор см. в 2112.08064



ТРИ ПРОЕКТА И ИХ ОБЪЕДИНЕНИЕ

IPTA=PPTA+EPTA+NANOGrav
<http://ipta4gw.org/>



EPTA - 18 пульсаров
PPTA - 24 пульсара
NANOGrav – 28 пульсаров

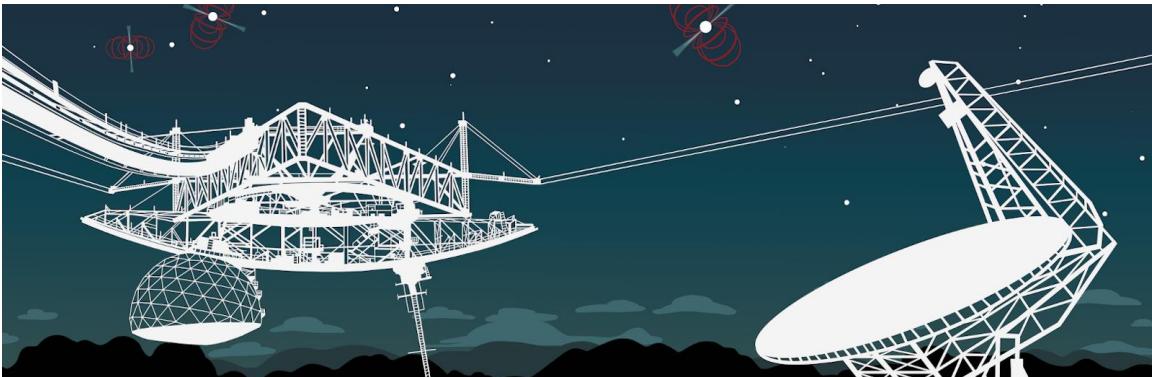


PPTA – Телескоп в Парксе

NANOGrav – GBT и Аресибо

EPTA – Эффельсберг, Сардиния, Джодрелл Бэнк, Нанси, Вестерборк

NANOGRAV: 12.5 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

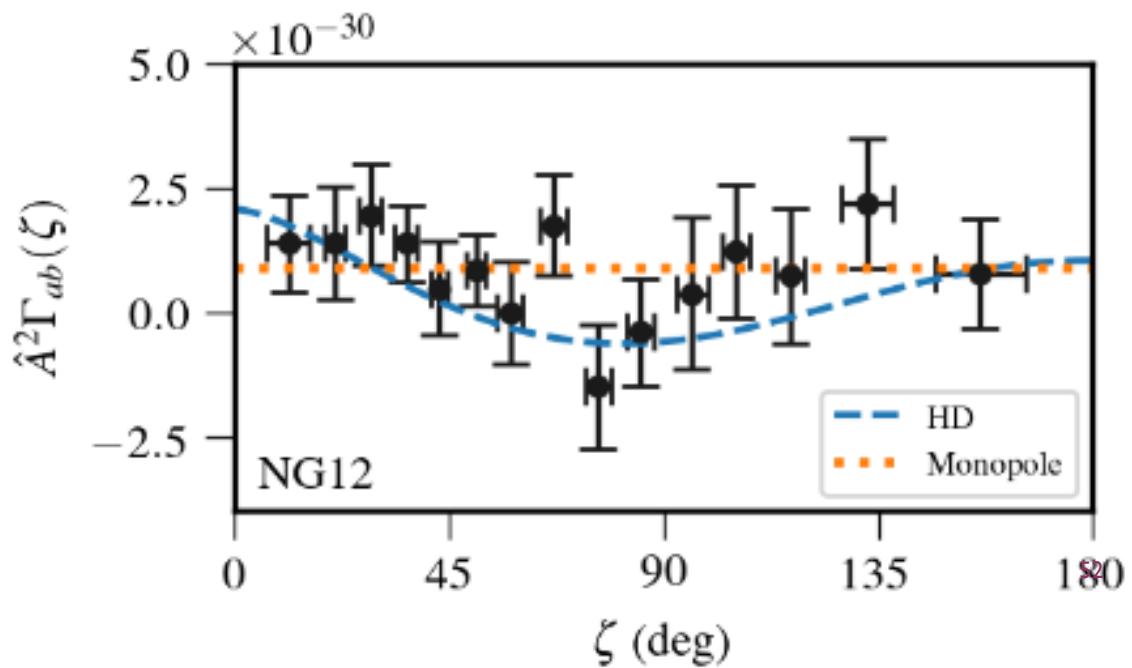


Впервые РТА заявляет о каком-либо сигнале.
Правда, что это за сигнал – непонятно.

Появилось уже довольно много публикаций,
пытающихся проинтерпретировать сигнал.

Сигнал не связан с ошибками часов или
с недостаточно точно учитываемыми
параметрами движения Солнечной системы.

Сигнал не похож на ожидаемый от фона
гравитационных волн от сливающихся
сверхмассивных черных дыр.



ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. (6 баллов) Покажите, что если равновесие белого карлика определяется давлением вырожденных ($E \ll E_F$) электронов, тогда уравнение состояния запишется в виде:

$$P = \frac{hc}{8} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} (Y_e m_p)^{-4/3} \rho^{4/3} = K_{4/3} \rho^{4/3},$$

где $Y_e \sim 2$ – число нуклонов, приходящихся на один электрон.

2. (4 балла) Покажите, что масса, при котором может существовать устойчивый углеродно-кислородный белый карлик не может превышать $M_{Ch} \approx 1.46 M_\odot$ -- так называемый предел Чандрасекара.



Субраманьян Чандрасекар
(1910 – 1995)