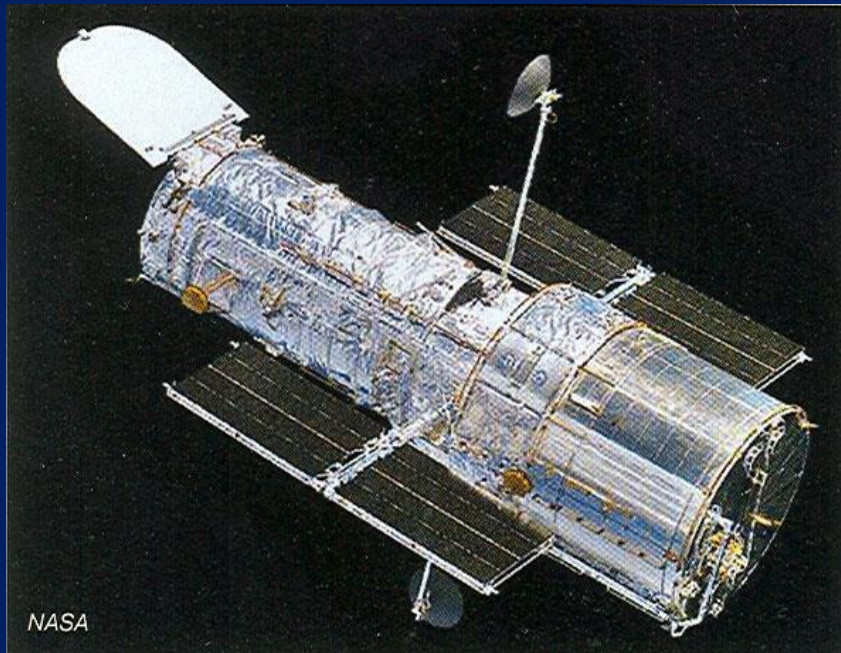
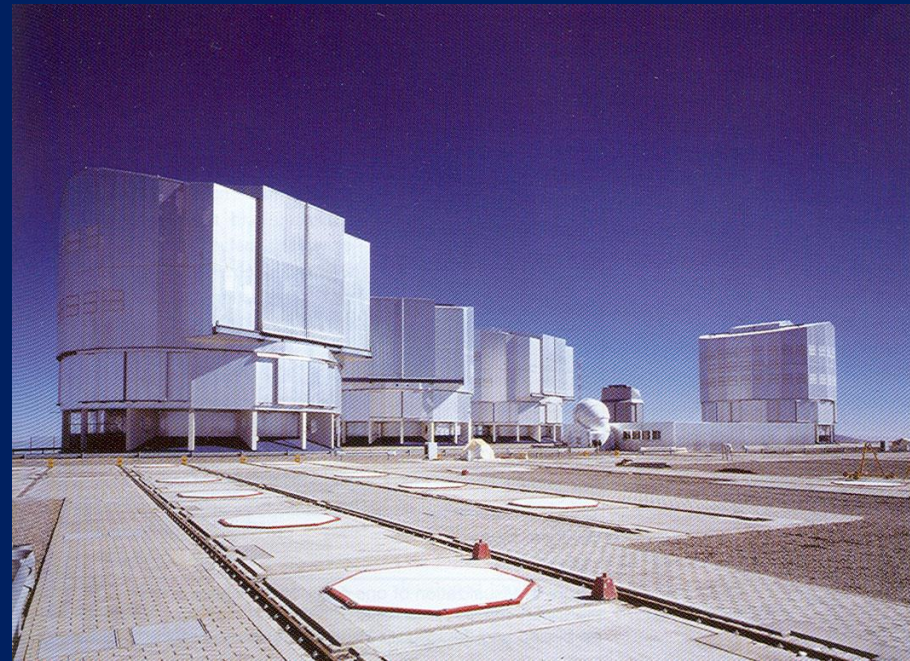
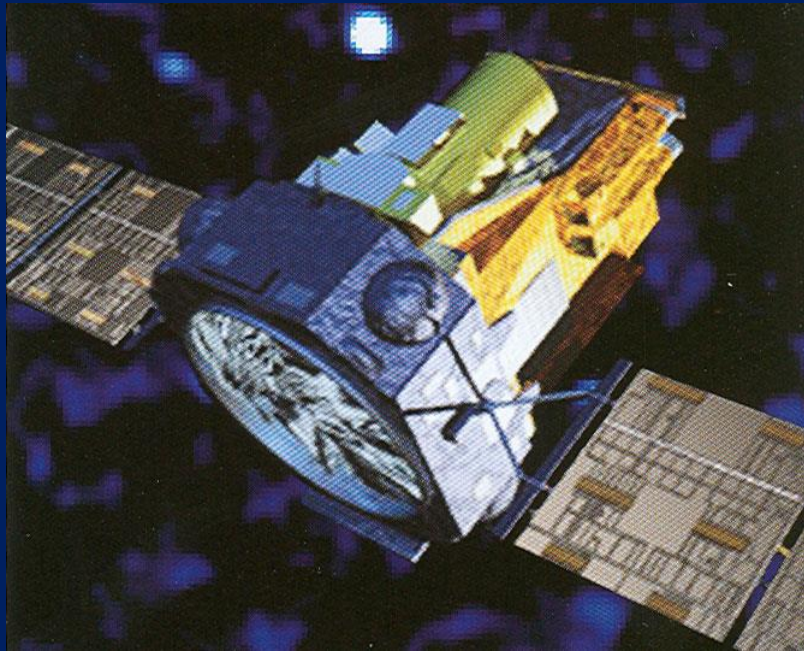


КАК УВИДЕТЬ ЧЕРНУЮ ДЫРУ?

А.М.Черепашук
(ГАИШ МГУ)

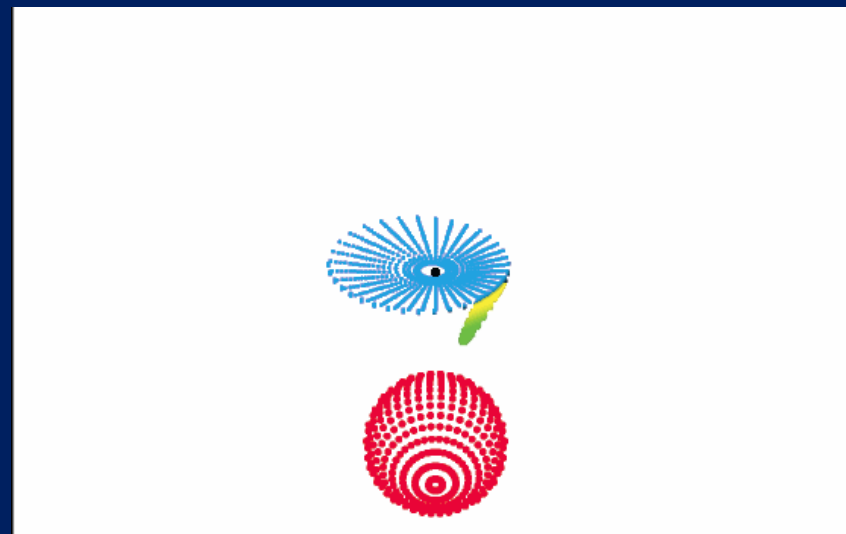
- За полвека наблюдательных исследований черных дыр (ЧД) в этой актуальной области астрофизики имеются большие достижения.
- По движению звезд и газа измерены массы примерно трех десятков звездных ЧД в рентгеновских двойных системах ($M_{\text{ВН}} = 4 \div 16 M_{\odot}$) и массы многих сотен сверхмассивных ЧД в ядрах галактик ($M_{\text{ВН}} = 10^6 \div 10^{10} M_{\odot}$).



NASA



- 45 лет тому назад был открыт первый кандидат в черные дыры (Cyg X-1) в рентгеновской двойной системе.
- Рентгеновская двойная система: оптическая звезда — донор вещества и аккрецирующий релятивистский объект NS или ВН



R. Giacconi — Нобелевская премия 2002г.

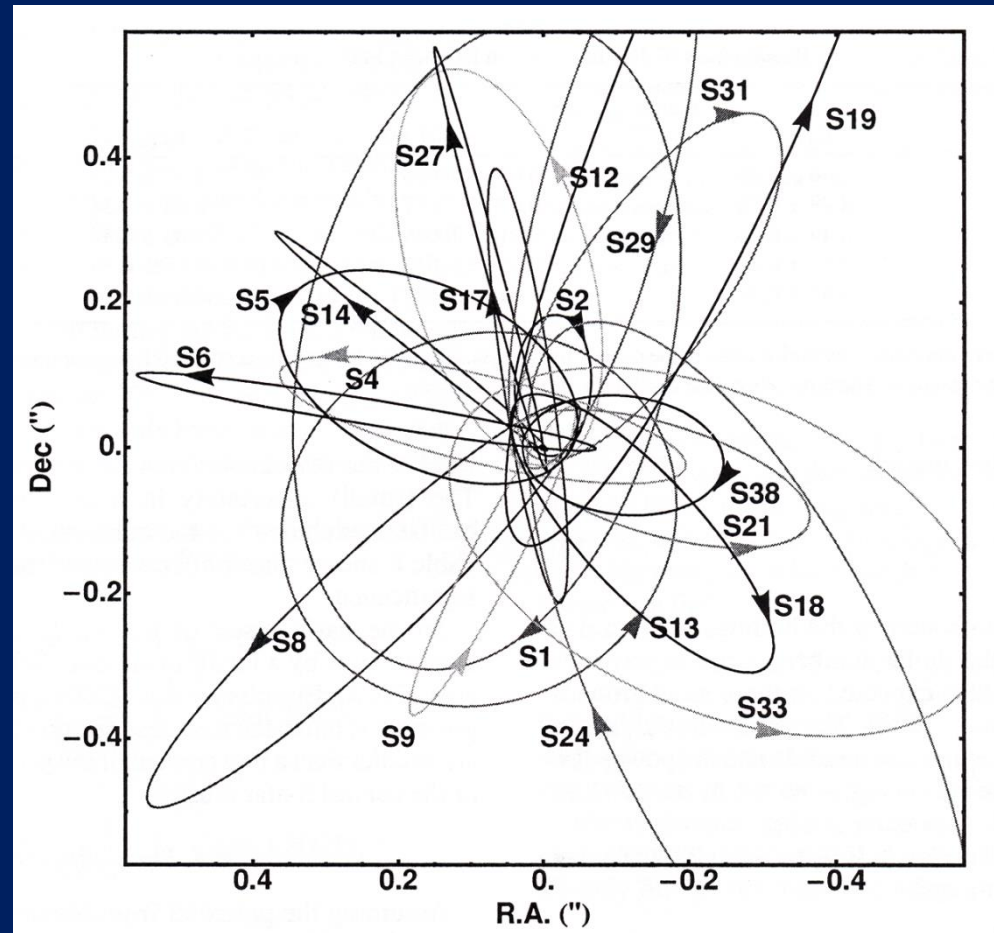
Наблюдения сверхмассивных ВН в галактических ядрах.





- Метод разрешенной кинематики (Resolved kinematics method).

Основан на прямых наблюдениях движений «пробных тел» (звезд, газовых дисков и т.п.) в гравитационном поле ВН. Применяется для близких галактик, для которых углового разрешения телескопа или интерферометра (NGC4258) достаточно, чтобы наблюдать отдельные «пробные тела» и их движение.

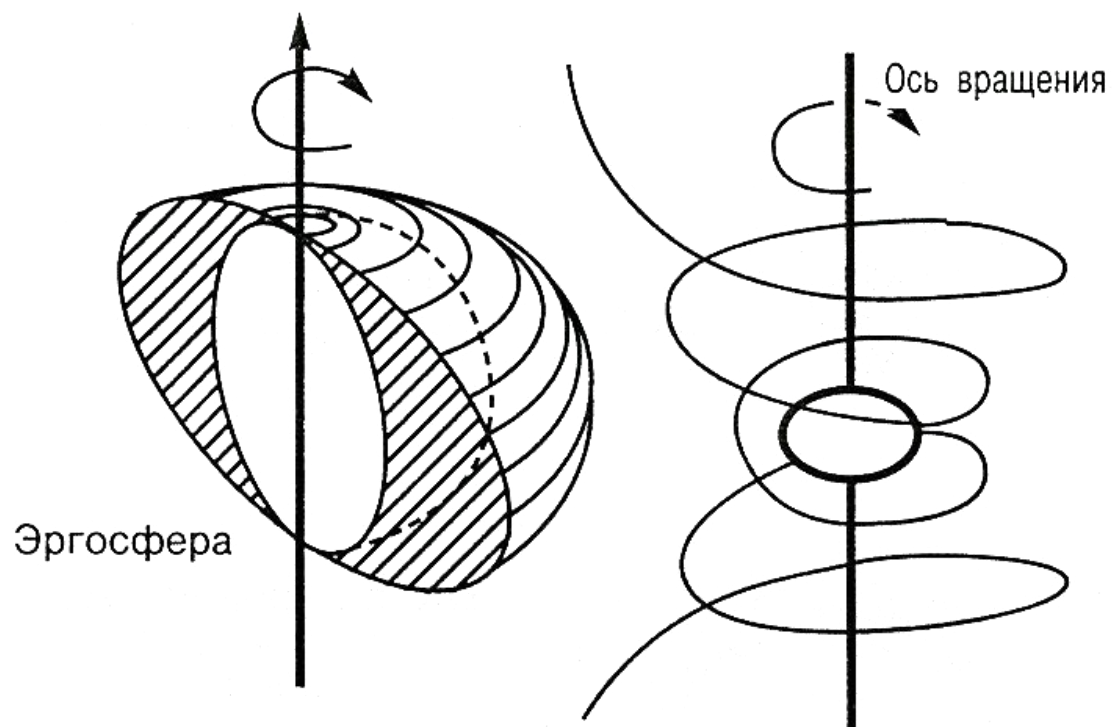


Gillessen и др., 2009

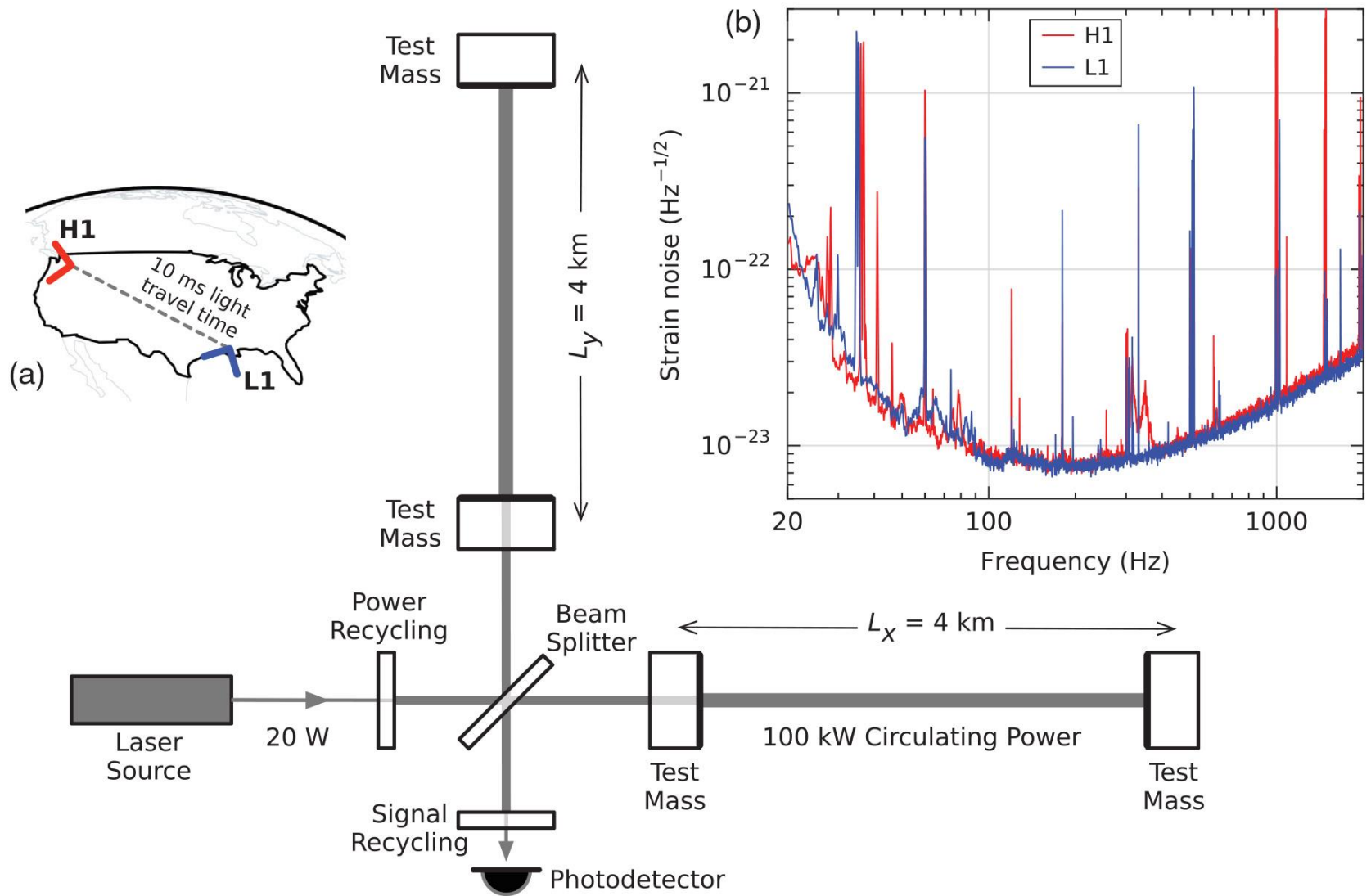
- Экспериментально оцененные радиусы ЧД в данном случае не превышают нескольких гравитационных (Шварцшильдовских) радиусов:

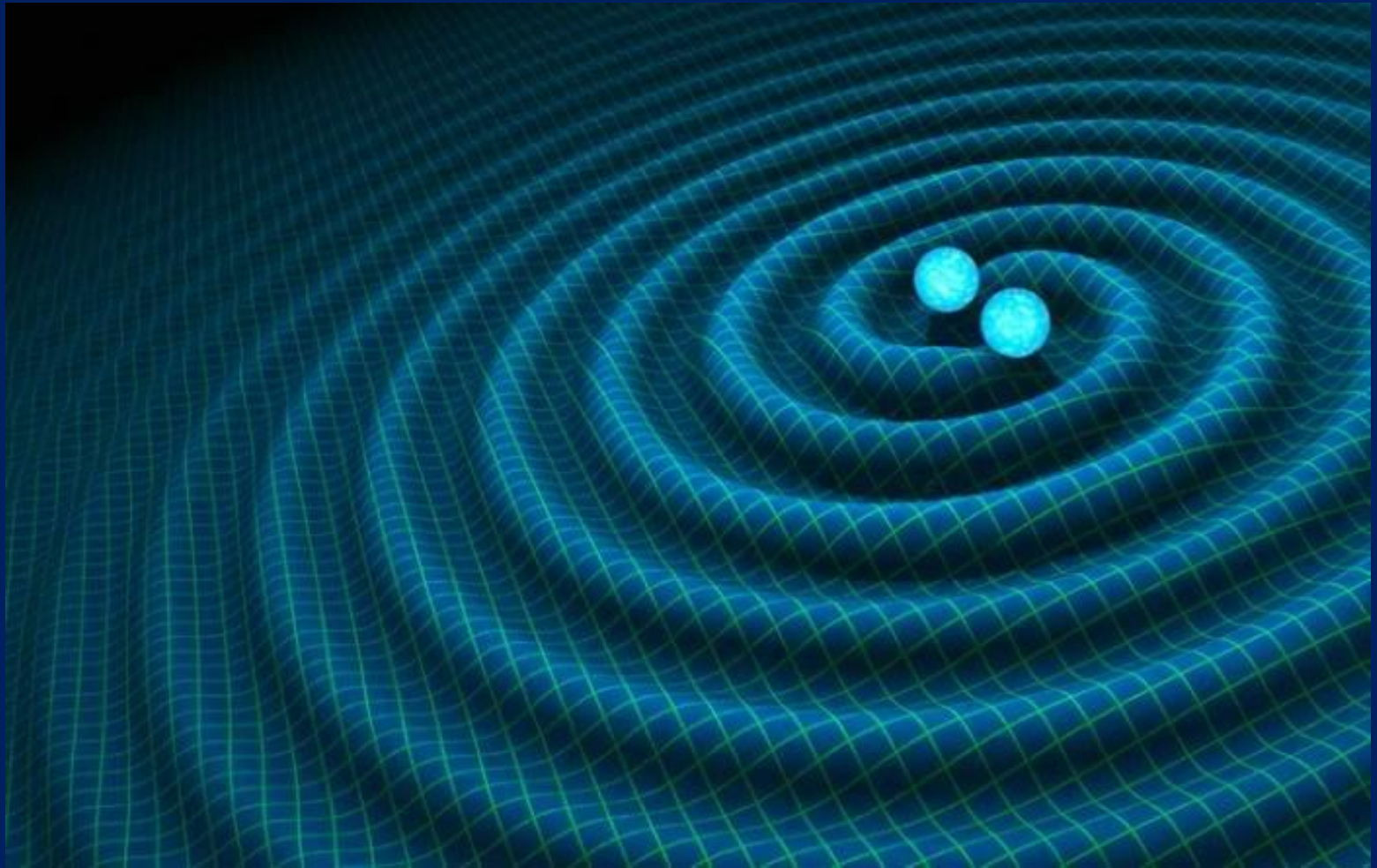
$$r_{sh} = \frac{2GM_{BH}}{c^2}.$$

- Радиус горизонта событий ЧД r_h в случае невращающейся ЧД равен Шварцшильдовскому радиусу r_{sh} , в случае вращающейся ЧД $r_h < r_{sh}$.

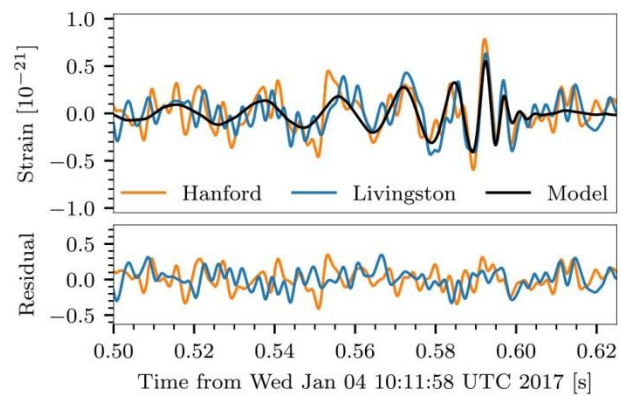
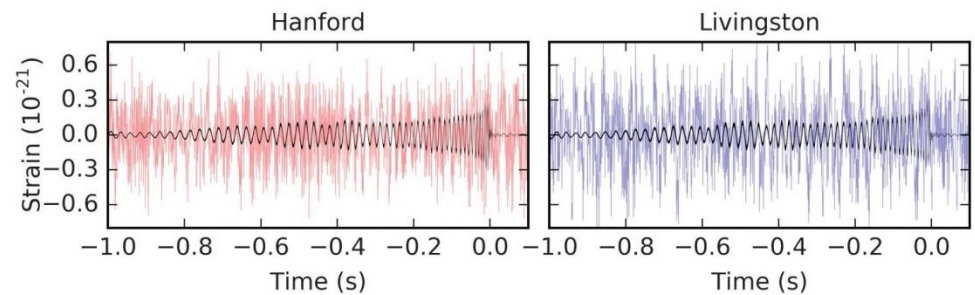
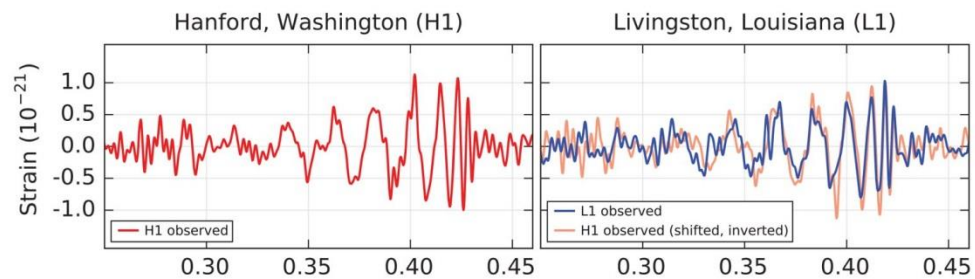








- В 2016 году началась эра гравитационно-волновой астрономии, а 3 октября 2017 года американские ученые **Кип Торн, Райнер Вайсс и Барри Бариш** были удостоены Нобелевской премии за открытие гравитационных волн. (**М.Е.Герценштейн и В.И.Пустовой**). К настоящему времени обсерваторией **LIGO** открыты гравитационно-волновые (**ГВ**) сигналы от слияния ЧД в четырех гравитационно-волновых двойных системах: GW 150914 (**$36 M_{\odot} + 29 M_{\odot}$**), GW 151226 (**$14 M_{\odot} + 8 M_{\odot}$**), LVT 151012 (**$23 M_{\odot} + 13 M_{\odot}$**), GW 170104 (**$31.2 M_{\odot} + 19.4 M_{\odot}$**).



- С августа 2017 г. американская ГВ обсерватория LIGO (**LIGO 1 + LIGO 2**) начала работать в паре с итальянской ГВ обсерваторией **VIRGO**, что сильно повысило надежность ГВ наблюдений и позволило значительно уменьшить размеры области локализации ГВ сигнала на небе (от **~ 1000** кв. град. до нескольких десятков кв. град.).
- В сентябре 2017 г. ГВ комплексом **LIGO / VIRGO** открыт первый ГВ сигнал от слияния ЧД в двойной системе GW 170814 (**$31 M_{\odot} + 25 M_{\odot}$**).

- Дальнейшие наблюдения на комплексе **LIGO / VIRGO** позволят сделать новые выдающиеся открытия.
- Например, открыть слияние нейтронных звезд в двойных системах, которые могут сопровождаться значительными наблюдательными проявлениями как в гамма и рентгеновском диапазонах, так и в оптическом диапазоне спектра.

- 17 августа 2017 г. Комплекс **LIGO/VIRGO** открыл гравитационно-волновой сигнал от слияния нейтронных звезд в двойной системе **GW170817**.

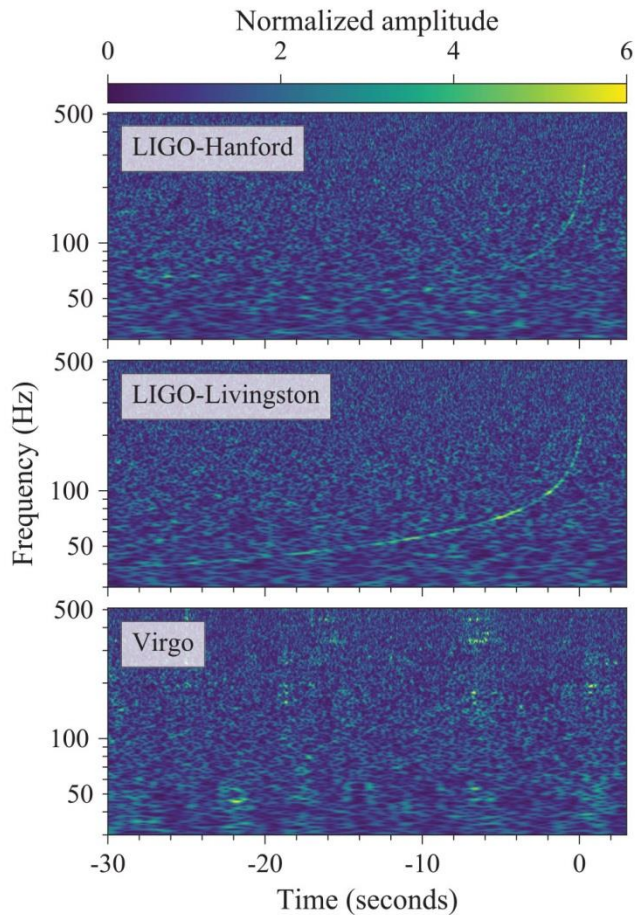


FIG. 1. Time-frequency representations [65] of data containing the gravitational-wave event GW170817, observed by the LIGO-Hanford (top), LIGO-Livingston (middle), and Virgo (bottom) detectors. Times are shown relative to August 17, 2017 12:41:04 UTC. The amplitude scale in each detector is normalized to that detector's noise amplitude spectral density. In the LIGO data, independently observable noise sources and a glitch that occurred in the LIGO-Livingston detector have been subtracted, as described in the text. This noise mitigation is the same as that used for the results presented in Sec. IV.

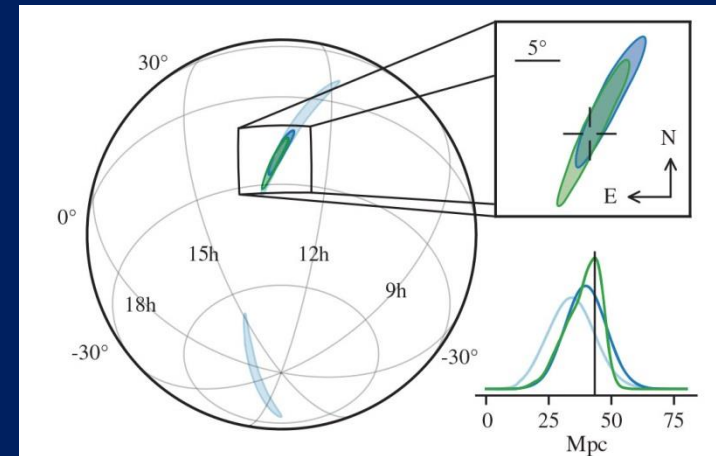


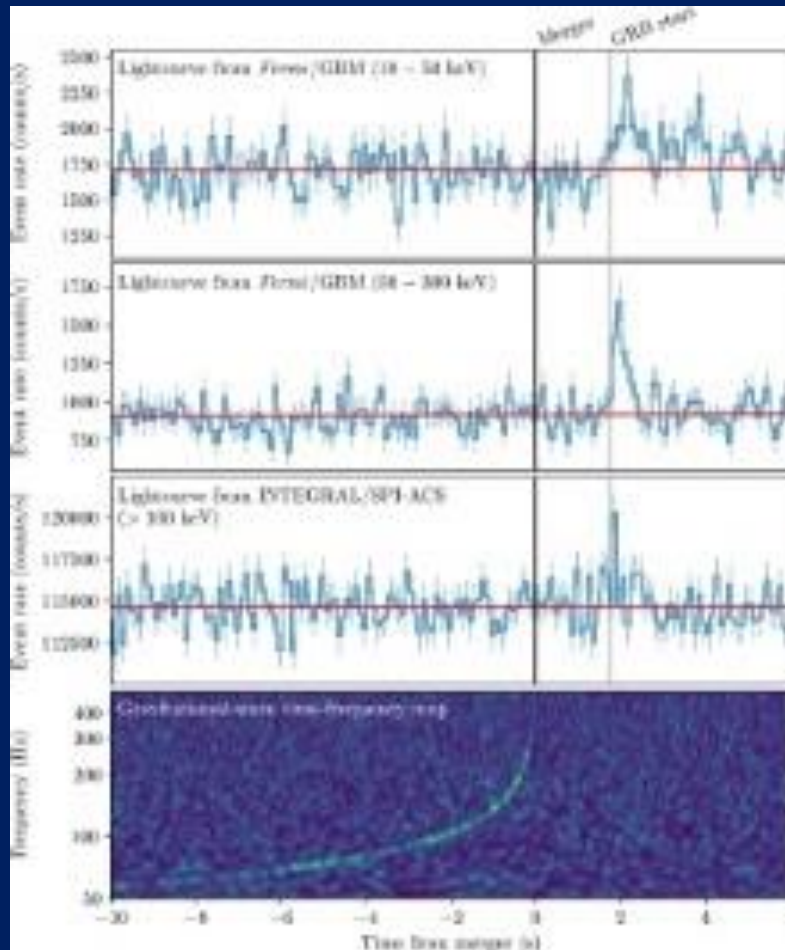
FIG. 3. Sky location reconstructed for GW170817 by a rapid localization algorithm from a Hanford-Livingston (190 deg^2 , light blue contours) and Hanford-Livingston-Virgo (31 deg^2 , dark blue contours) analysis. A higher latency Hanford-Livingston-Virgo analysis improved the localization (28 deg^2 , green contours). In the top-right inset panel, the reticle marks the position of the apparent host galaxy NGC 4993. The bottom-right panel shows the *a posteriori* luminosity distance distribution from the three gravitational-wave localization analyses. The distance of NGC 4993, assuming the redshift from the NASA/IPAC Extragalactic Database [89] and standard cosmological parameters [90], is shown with a vertical line.

Параметры нейтронных звезд в гравитационно-волновой системе GW170817.

TABLE I. Source properties for GW170817: we give ranges encompassing the 90% credible intervals for different assumptions of the waveform model to bound systematic uncertainty. The mass values are quoted in the frame of the source, accounting for uncertainty in the source redshift.

	Low-spin priors ($ \chi \leq 0.05$)	High-spin priors ($ \chi \leq 0.89$)
Primary mass m_1	1.36–1.60 $M_\odot$	1.36–2.26 $M_\odot$
Secondary mass m_2	1.17–1.36 $M_\odot$	0.86–1.36 $M_\odot$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio m_2/m_1	0.7–1.0	0.4–1.0
Total mass m_{tot}	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy E_{rad}	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance D_L	40^{+8}_{-14} Mpc	40^{+8}_{-14} Mpc
Viewing angle Θ	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	≤ 800	≤ 700
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	≤ 800	≤ 1400

- Всплеск гамма-излучения и оптическое изображение гравитационно-волнового события GW170817.



- Наряду с развитием ГВ – астрономии, в настоящее время имеются большие перспективы развития коротковолновой ($\lambda \lesssim 1$ мм) межконтинентальной и космической радио интерферометрии (проект Миллиметрон, рук. Н.С.Кардашев). В частности, успешно развивается проект наземной VLBI коротковолновой интерферометрии ЕНТ (Event Horizon Telescope), угловое разрешение которого $\sim 10^{-5}$ секунды дуги.



- Все эти мощные наблюдательные средства помогут ученым наблюдать процессы, происходящие вблизи горизонтов событий звездных и сверхмассивных ЧД и исследовать эффекты сильной гравитации вблизи ЧД.

- Благодаря развитию ГВ астрономии вышла на прочный наблюдательный базис новая наука – геометродинамика, которая изучает нелинейную динамику пустого пространства-времени.
- Пустое пространство-время – это особый вид материи, свойства которой, например, параметры кривизны и завихренности, можно изучать с помощью ГВ-телескопов и проверять нелинейные уравнения ОТО Эйнштейна во всей их сложности.

- Важнейшая задача исследования ЧД – это наблюдательное изучение свойств их горизонтов событий.
- На горизонте событий ход времени, с точки зрения далекого наблюдателя, останавливается. Все процессы на горизонте событий, с точки зрения далекого наблюдателя, бесконечно замедляются. Поэтому ЧД не имеет наблюдаемой поверхности.
- Более того, особенности на горизонте событий могут быть устранены выбором соответствующей системы координат

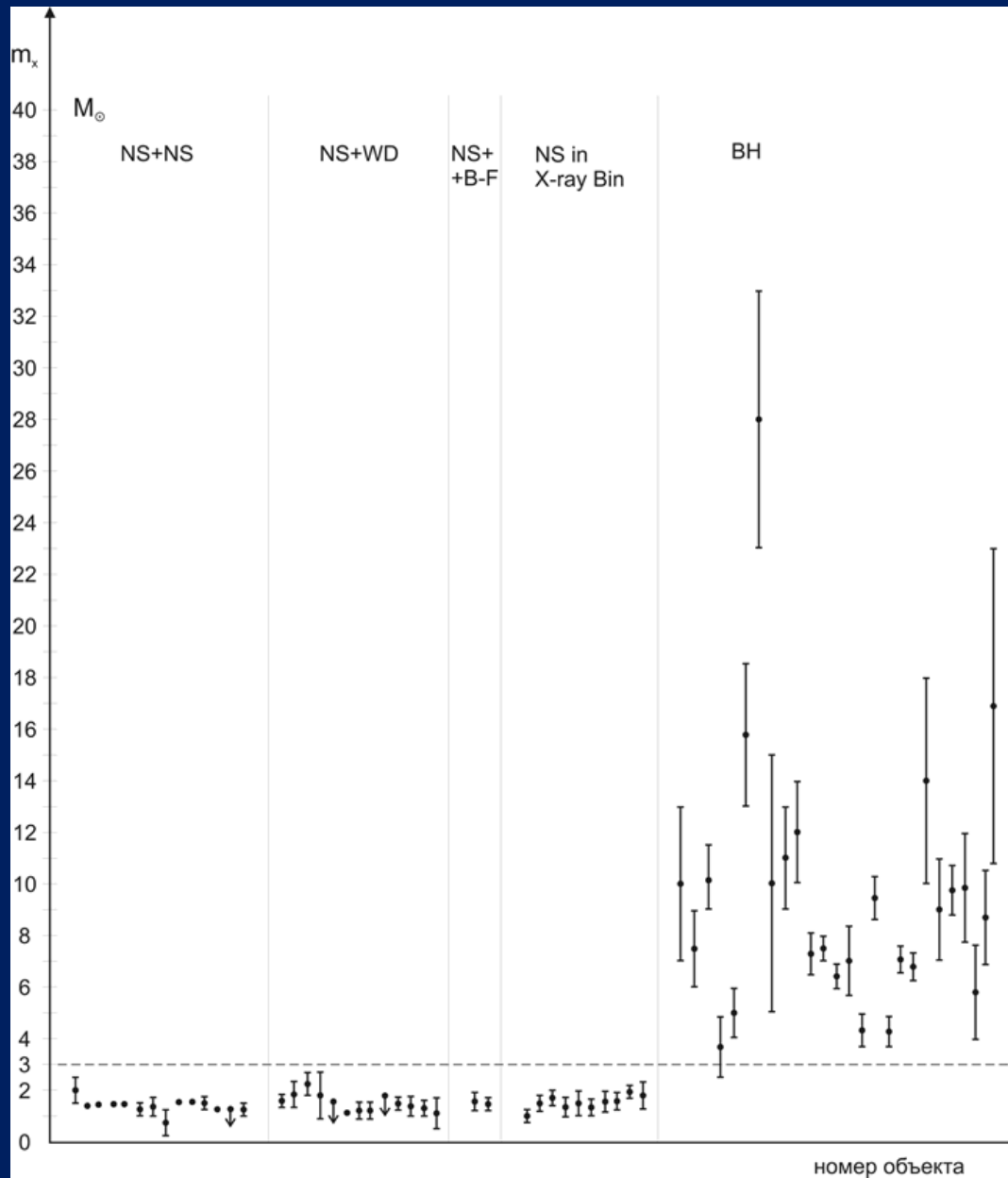
- Все эти почти фантастические свойства ЧД до последнего времени не позволяли многим физикам и астрофизикам поверить в их реальное существование во Вселенной. Однако в последние годы, благодаря интенсивным исследованиям в электромагнитном (рентген, оптика, радио) и ГВ-диапазонах сомнения в реальном существовании ЧД у большинства ученых отпали.
- Тем не менее, чтобы окончательно поставить последнюю "точку над i " в этом деле, важно провести эксперименты, которые позволили бы реально "увидеть" черную дыру.

- ГВ-наблюдения позволяют "услышать" звон от слияния ЧД в двойных системах и в каком-то смысле "увидеть" как колеблется горизонт событий вновь образовавшейся более массивной ЧД.
- Радиоинтерферометрические наблюдения на коротких волнах с помощью ЕНТ с угловым разрешением $\sim 10^{-5}$ секунды дуги дают принципиальную возможность построить изображение темной "тени" от сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики ($M_{\text{ЧД}} = 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, $D_{\text{тени}} = 5 \cdot 10^{-5}$ секунды дуги), а также в центре галактики М87 ($M_{\text{ЧД}} = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$, $D_{\text{тени}} = 4 \cdot 10^{-5}$ секунды дуги).

Рассмотрим возможности наблюдений эффектов сильной гравитации вблизи звездных ЧД.

- К настоящему времени по наблюдениям в электромагнитном диапазоне измерены массы **27** ЧД звездных масс ($M_{\text{ВН}} = 4 \div 16 M_{\odot}$) и массы **80** нейтронных звезд ($M_{\text{НЗ}} = 1 \div 2 M_{\odot}$).

Masses of NSs and BHs



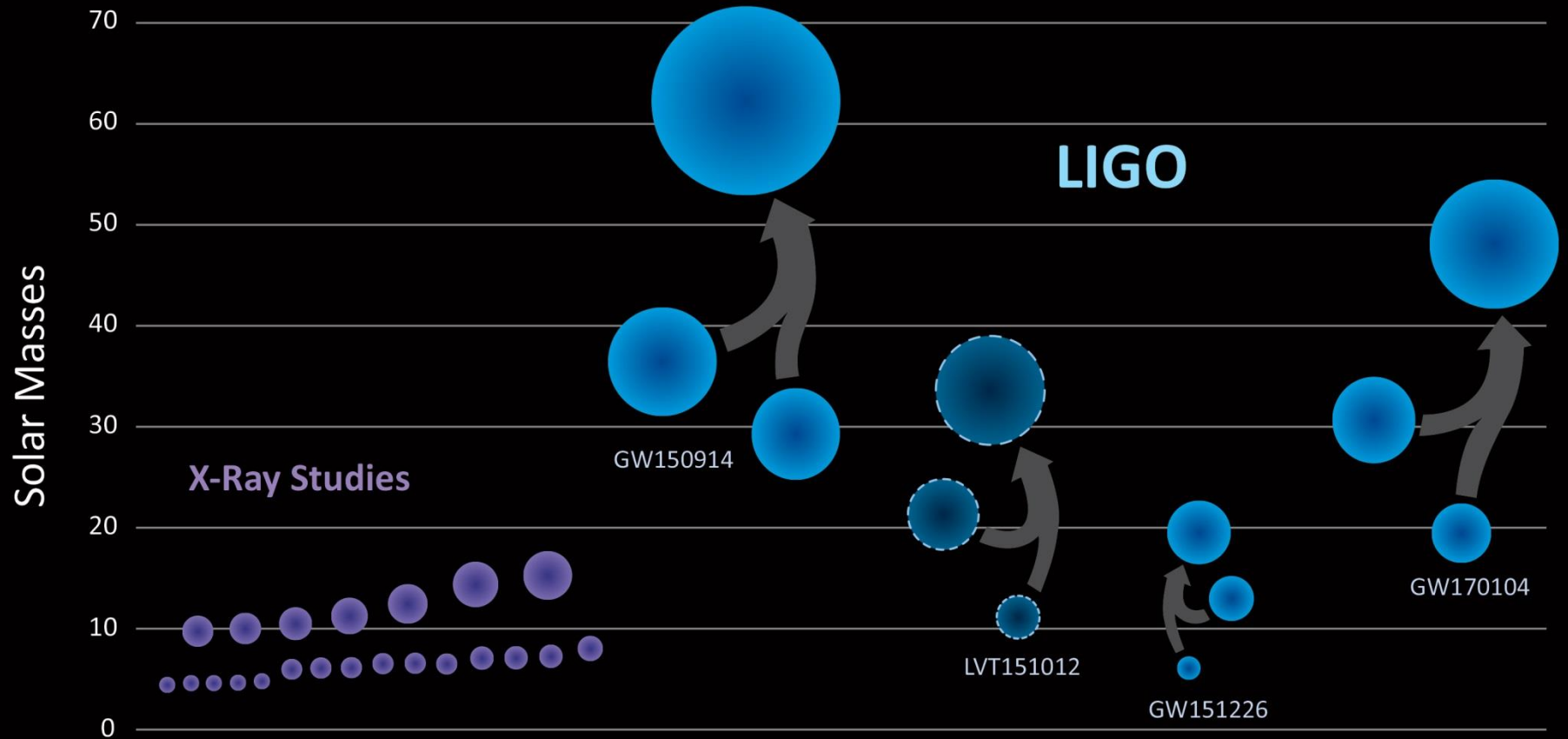
- Оказалось, что НЗ и ЧД различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном согласии с предсказанием ОТО о существовании абсолютного верхнего предела массы НЗ $M_{\text{НЗ}} < 3 M_{\odot}$.

- Во всех 80 случаях, когда релятивистский объект показывает явные признаки наблюдаемой поверхности (радиопульсар, рентгеновский пульсар, рентгеновский барстер 1^{го} типа), его измеренная масса не превышает $3 M_{\odot}$.
- Во всех 27 случаях, когда измеренная масса релятивистского объекта превышает $3 M_{\odot}$, он не показывает признаков наблюдаемой поверхности (не является ни радио, ни рентгеновским пульсаром, ни рентгеновским барстером 1^{го} типа) в полном согласии с предсказанием ОТО.

- Этот замечательный результат, основанный на исследованиях свыше сотни релятивистских объектов является сильным косвенным аргументом (но не доказательством) в пользу существования горизонта событий у ЧД звездных масс.
- Но некоторые НЗ также не показывают признаков наблюдаемой поверхности. Кроме того, нельзя судить о природе объекта по отсутствию у них каких-либо признаков *(Притча о древних греках).*

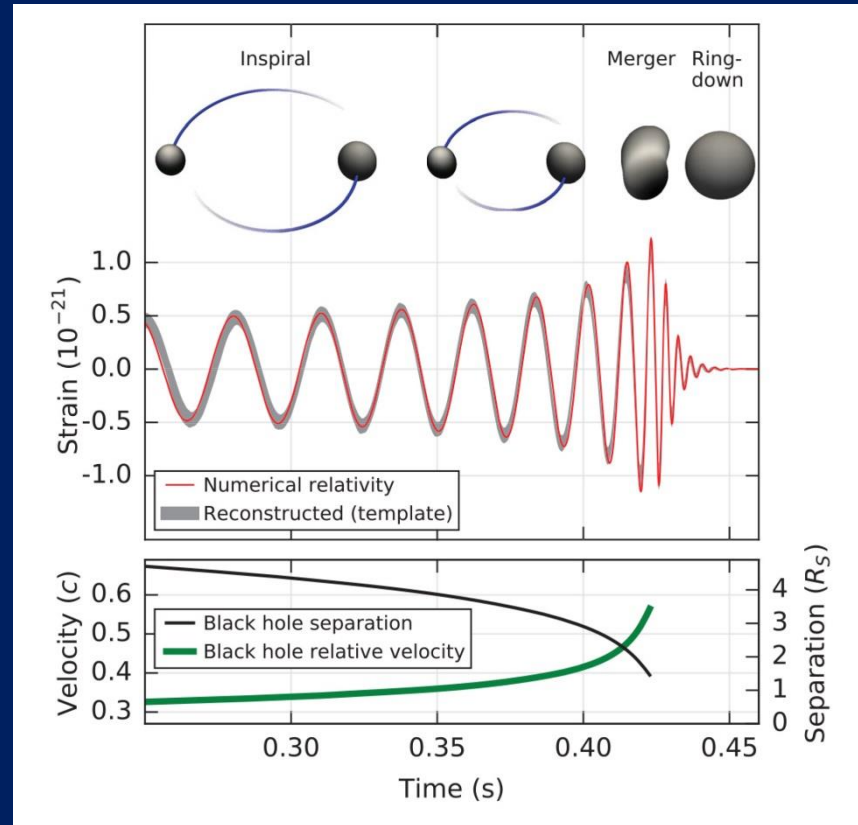
- ГВ-наблюдения сливающихся ЧД в двойных системах позволяют дать дополнительные и весьма убедительные свидетельства существования горизонтов событий у ЧД звездных масс.

Black Holes of Known Mass



- Чтобы доказать существование горизонта событий у ЧД необходимо наблюдать эффекты, специфичные для ЧД (подобные феномену пульсара для НЗ).
- Такими специфичными эффектами могут служить различные моды затухающих колебаний вновь образовавшейся ЧД при слиянии двух ЧД меньших масс (стадия **ring-down** на ГВ "кривой блеска").

Light curve in the model of BH merging

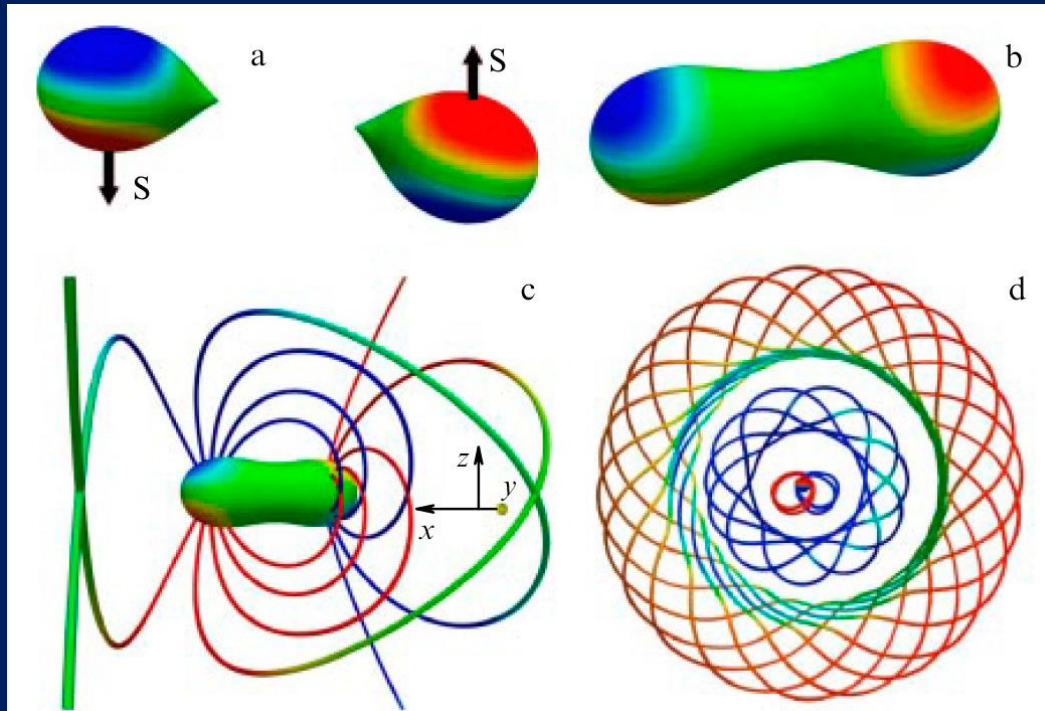


$$L = \frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{a^5}$$

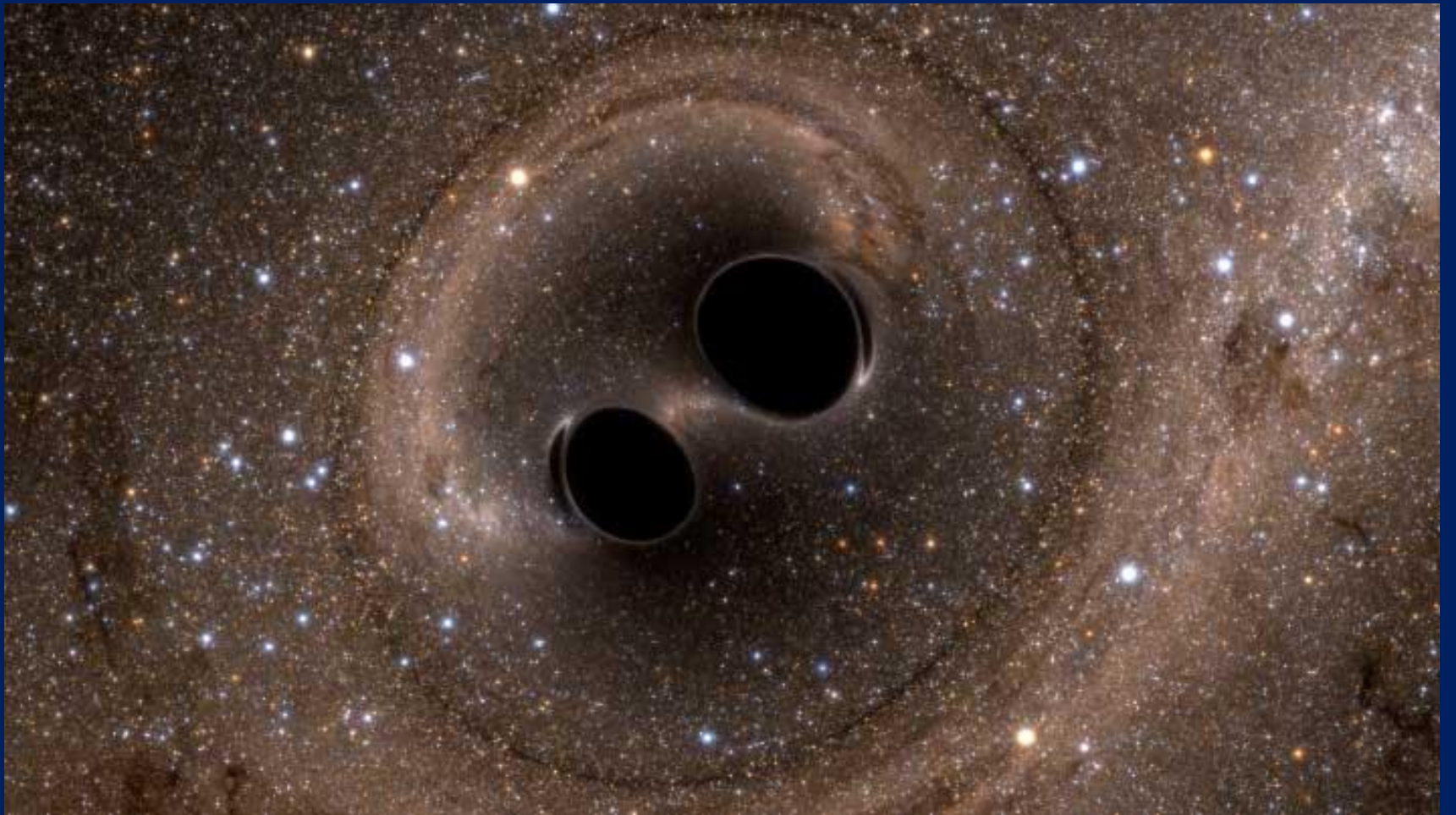
$$\text{Chirp mass: } M = \frac{(m_1 \cdot m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left(\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right)^{3/5} = 30 M_{\odot}$$

- Детальное моделирование процесса слияния двух ЧД (см., например, Шил и Торн, 2014) в рамках точных уравнений ОТО показало, что вновь образовавшаяся более массивная ЧД сильно возбуждена, в результате чего формируются гравитационные волны, которые генерируются натяжением нового горизонта событий и его завихренностью (так называемыми тендексами и вортексами горизонта).

From the work by Sheel and Thorne



(Color online). Event horizons and vortex lines of spinning black holes, colliding head-on with transverse spins; from the simulation in [22]. (a) Horizon vortices and spin directions just before merger. (b) Horizon vortices just after merger, which retain their individuality. (c) Vortex lines linking horizon vortices of the same polarity (red to red or dark gray to dark gray; blue to blue or light gray to light gray). Lines are color coded by vorticity (different scale from the horizon). (d) Sloshing of near-zone vortices generates toroidal vortex loops (two shown here) composed of orthogonal vortex lines, traveling outward as gravitational waves; these are accompanied by intertwined tendex lines (not shown). The horizon, with attached vortex lines, is visible in the center. Figure adapted from [20]. See [23] for a movie of horizon vortices for this simulation.



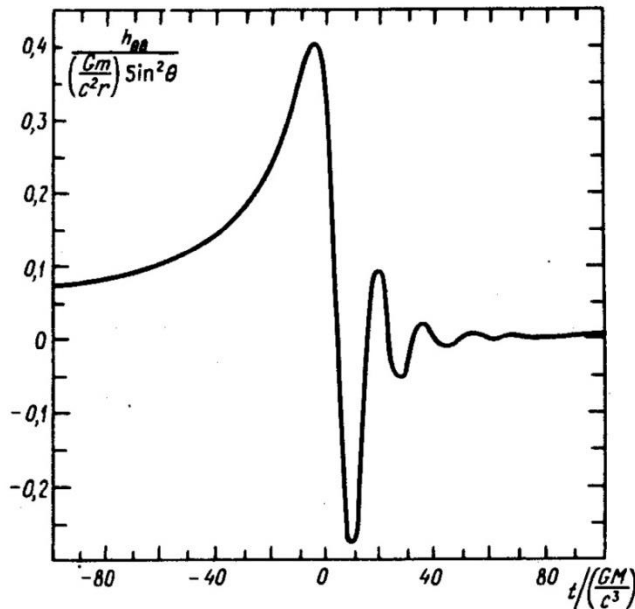
- Часть энергии этих гравитационных волн уходит внутрь ЧД, а другая часть — на бесконечность.
- Поэтому сильные осцилляции горизонта событий быстро (экспоненциально) затухают со временем. Характерное время затухания — один или несколько колебательных периодов.

- Позднее, когда вновь образовавшаяся ЧД становится менее возбужденной по сравнению с ее финальной стадией, описываемой метрикой Керра, ее возмущения представляют собой квазинормальные моды колебаний с параметрами $l = 2$ и $m = 2$ (где l и m — параметры соответствующих сферических гармоник, на которые можно разложить соответствующие относительно малые возмущения метрики).

- Наблюдая суперпозицию квазинормальных мод колебаний горизонта событий вновь образовавшейся более массивной ЧД, с помощью ГВ телескопов мы как бы видим ЧД, поскольку эти колебания специфичны именно для ЧД.

- В качестве примера, рассмотрим простейший случай формирования квазинормальных мод колебаний горизонта событий ЧД при падении на нее пробной частицы малой массы (см., например, Новиков и Фролов, 1986).

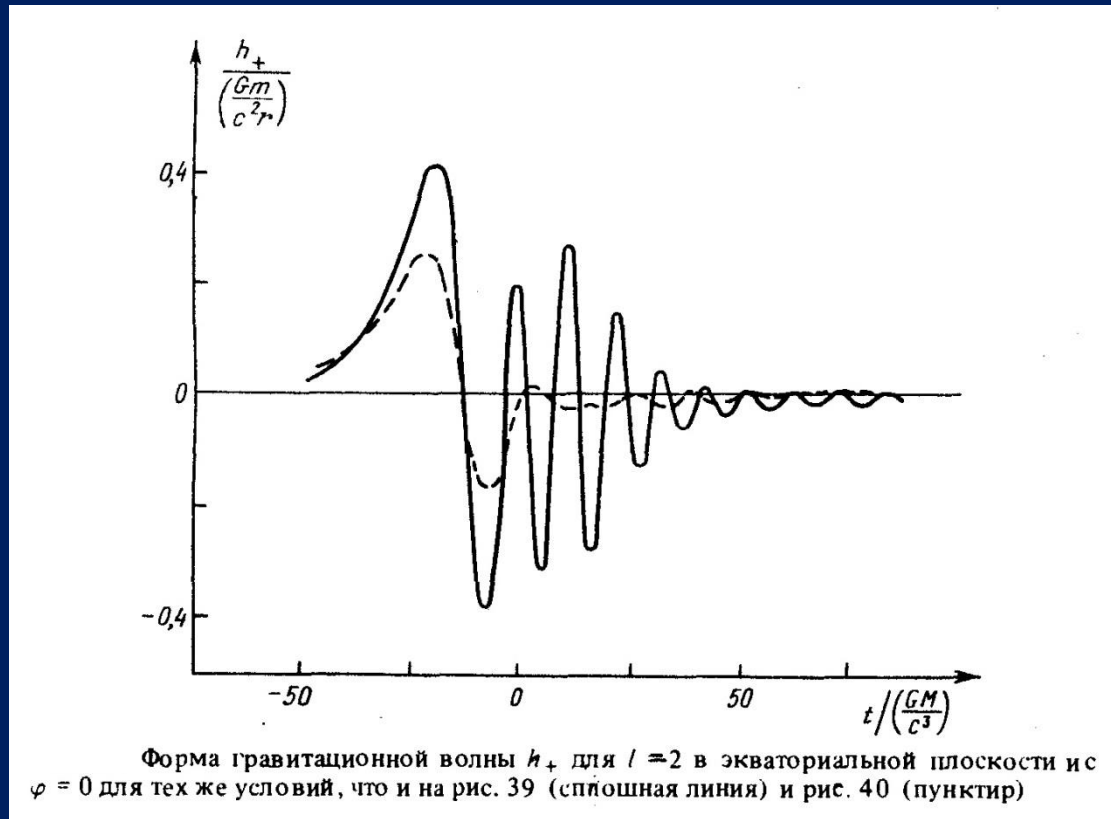
Случай невращающейся ЧД.



Форма волны для $l = 2$ гравитационного излучения радиально падающей частицы с $v_\infty = 0$; направление $\theta = 0$ совпадает с траекторией частицы [по данным Петрич и др. (1985)]. Здесь и на других аналогичных рисунках знак h зависит от определения, может определяться разными авторами по-разному и непринципиален

Здесь монотонно возрастающая часть ГВ сигнала представляет собой ГВ радиацию малой частицы, падающей с переменным ускорением на ЧД, а осциллирующая часть соответствует квазинормальным модам колебаний горизонта событий, связанным с возмущениями, внесенными в метрику ЧД при поглощении ею пробной массы.

Случай вращающейся ЧД.



Здесь сплошная линия соответствует движению пробной массы в направлении вращения ЧД, а пунктирная линия — в направлении против вращения ЧД.

Видно, что в случае вращающейся ЧД длительность стадии затухания квазинормальных мод колебаний больше, чем в случае невращающейся ЧД.

Рассмотрим теперь возможности наблюдений эффектов сильной гравитации вблизи сверхмассивных ЧД.

- Косвенные свидетельства существования горизонта событий у сверхмассивной ЧД в ядре галактики М87 (Broderick et al., 2015).
- От М87 наблюдается мощный коллимированный релятивистский джет. Независимо от конкретного механизма формирования этого джета, его мощность может быть сформирована при некотором минимальном темпе аккреции вещества на центральную сверхмассивную ЧД.



- Если компактный сверхмассивный объект в центре М87 не является ЧД, аккреция вещества, питающая мощность джета, должна приводить к значительному выделению энергии на поверхности компактного объекта и обеспечивать заметное ИК и оптическое излучение в центре М87, чего не наблюдается.
- Следовательно, гипотеза о существовании наблюдаемой поверхности у сверхмассивного компактного объекта в центре галактики М87 должна быть отвергнута.
- Это — существенный косвенный аргумент в пользу существования горизонта событий у сверхмассивной ЧД в центре галактики М87.

- Прямые свидетельства существования горизонта событий у сверхмассивных ЧД могут быть получены в скором времени с помощью **ЕНТ**, путем построения изображений темных теней на фоне ярких аккреционных дисков от сверхмассивных ЧД в центре нашей Галактики и галактики М87.
- В случае невращающейся ЧД линейный диаметр темной тени в 2.6 раза больше ее удвоенного шварцшильдовского радиуса:

$$d_{\text{тени}}^{\text{лин.}} = \sqrt{27} \frac{2GM}{c^2} .$$

Это связано с сильным искривлением лучей света вблизи горизонта событий ЧД.

- Для сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики ($M_{\text{ЧД}} = 4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$, $D = 8.3$ кпк) угловой диаметр тени

$$d_{\text{тени}} = 5.3 \cdot 10^{-5} \text{ сек. дуги.}$$

- Для сверхмассивной ЧД в центре галактики М87 ($M_{\text{ЧД}} = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$, $D = 1.79 \cdot 10^4$ кпк) угловой диаметр тени

$$d_{\text{тени}} = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ сек. дуги.}$$

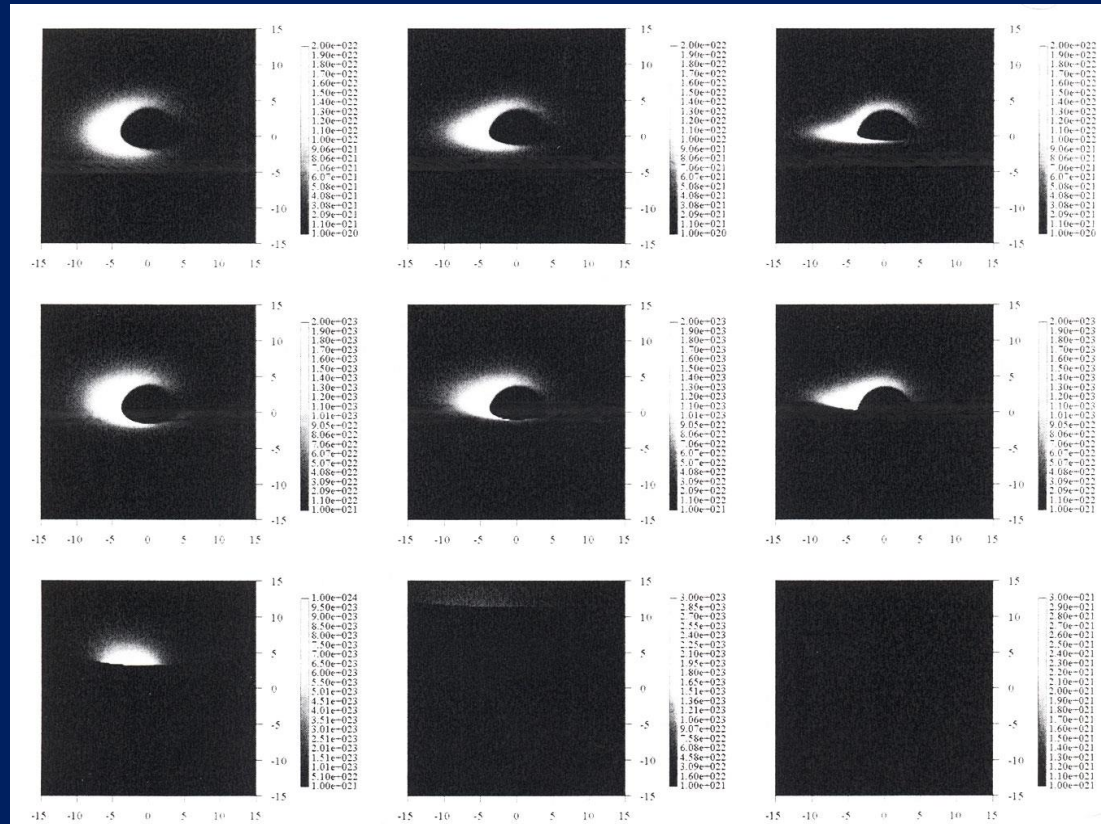
- Для $\lambda = 1.3$ мм угловое разрешение ЕНТ

$$\sim 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ сек. дуги.}$$

- Для $\lambda = 0.9$ мм угловое разрешение ЕНТ

$$\sim 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ сек. дуги.}$$

Что мы можем увидеть:

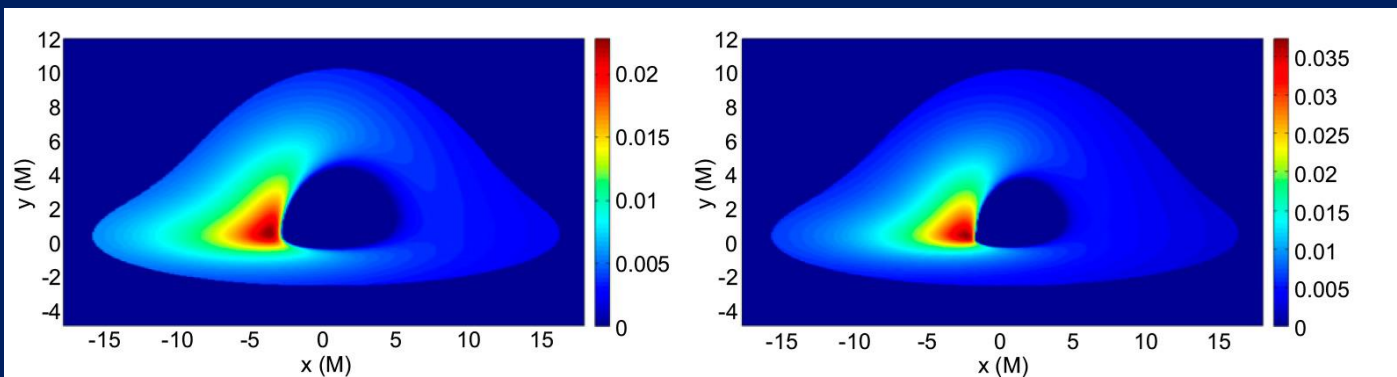


В случае быстро вращающихся внутренних частей аккреционного диска распределение яркости вблизи ЧД асимметрично благодаря Доплер-эффекту и эффекту релятивистского увлечения системы отсчета. Форма тени асимметрична из-за влияния эффекта увлечения системы отсчета вблизи вращающейся ЧД (Takahashi and Watarai 2007).

- С помощью ЕНТ можно будет проверить наличие обобщенной метрики Керра близи ЧД (имеет или не имеет ЧД "волосы").
- Согласно Johannsen (2015) квазикерровская метрика может быть описана соотношением

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^k + h_{\mu\nu},$$

Где дополнительный член $h_{\mu\nu}$ описывает обобщение метрики Керра.



Direct images of geometrically thin accretion disks around (left panel) a Kerr black hole with spin $a = 0.95M$ and (right panel) a Kerr-like black hole with the same spin and a value of the deviation parameter $\alpha_{13} = -1$. Both panels show the observed number flux density of (radially symmetric) thermal disk emission at 1 keV in units of $\text{keV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. The highest emission originates from a strongly localized region near the ISCO on the side of the black hole that is approaching the observer where Doppler boosting and beaming are particularly high. This region shifts toward the black hole and emits a significantly higher flux for negative values of the parameter α_{13} .

- Недавние **ЕНТ**-наблюдения центра нашей Галактики (**Johnson et al., 2015**) позволили предварительно изучить распределение радиояркости ($\lambda = 1.3$ мм) вблизи сверхмассивной ЧД:

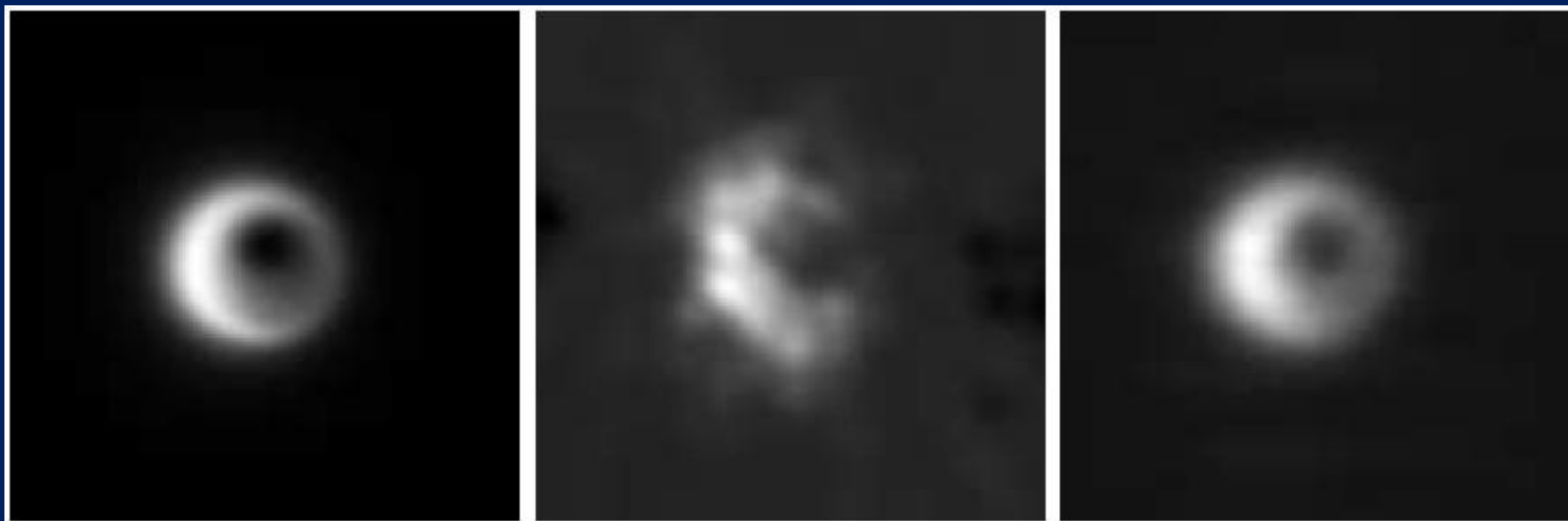
- 1) Гауссово распределение яркости (полуширина $5.2 \cdot 10^{-5}$ сек. дуги) надежно отвергается наблюдениями.

- 2) Яркое кольцо однородной яркости есть простейшая модель, удовлетворяющая наблюдениям на **ЕНТ**.

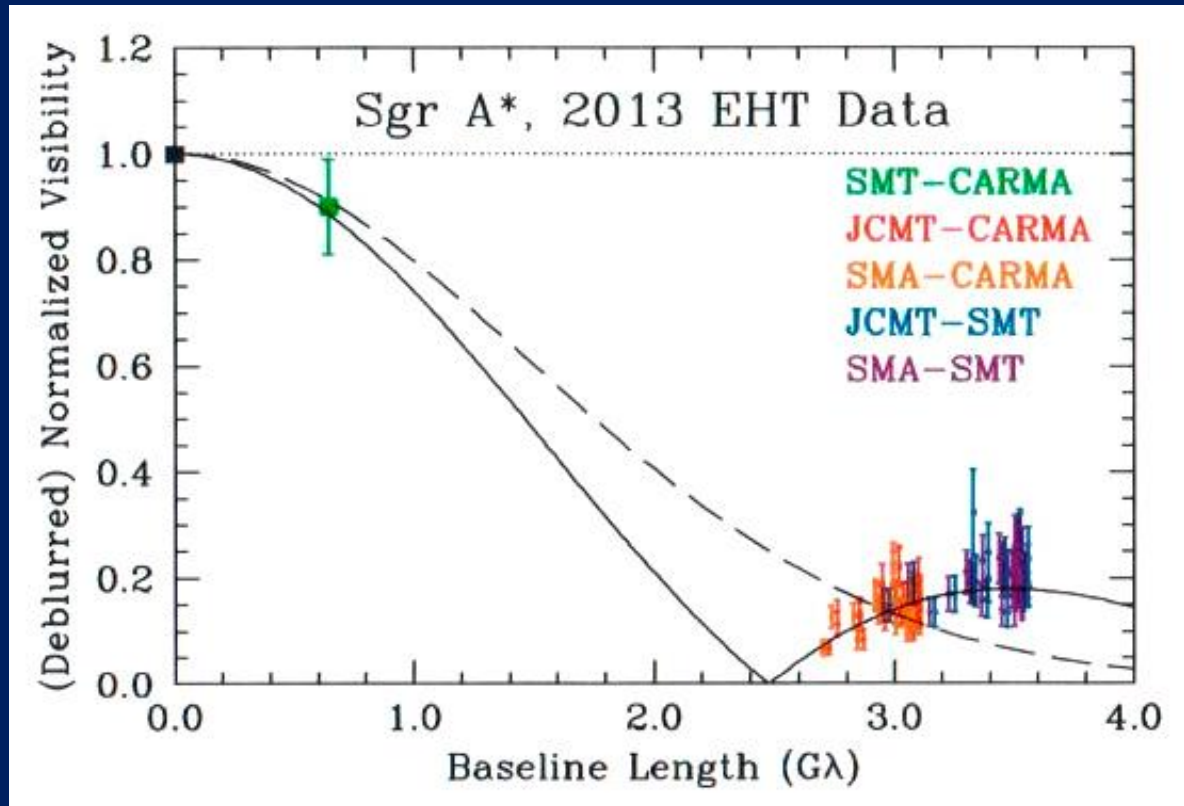
- Внутренний диаметр кольца $2.1 \cdot 10^{-5}$ сек. дуги, внешний диаметр $9.7 \cdot 10^{-5}$ сек. дуги.

- Теоретическое значение углового диаметра тени $5.3 \cdot 10^{-5}$ сек. дуги.

(Данные Радиоастрона по пульсарам!)



Johnson, Fish, Doeleman et al., 2015:



Total-intensity VLB1 of Sgr A* and fitted geometrical models. Normalized, deblurred visibilities are shown as a function of baseline length; errors are $\pm 1\sigma$ (thermal plus systematic). The dashed line shows the best-fit circular Gaussian (FWHM: $52 \mu\text{as}$), which is incompatible with our data. The best-fit elliptical Gaussian provides a fit that is only marginally better. Many simple geometrical models can produce a rising visibility with baseline at $\sim 2.7 G\lambda$. An annulus of uniform intensity (inner diameter: $21 \mu\text{as}$, outer diameter: $97 \mu\text{as}$), shown with a solid line, is perhaps the simplest model that is consistent with our data, although many alternatives are possible (see discussion in the text). For most points, remaining systematic uncertainties in the calibration solution are the dominant source of error.

- S.S.Doeleman: "Всего лишь 6-7 лет тому назад идея о том, что мы можем получить изображение черной дыры казалась абсолютно спекулятивной, однако благодаря постоянному техническому прогрессу и последним научным достижениям, перспективы для успешного решения этой проблемы стали весьма реальными".

End