

Черные дыры

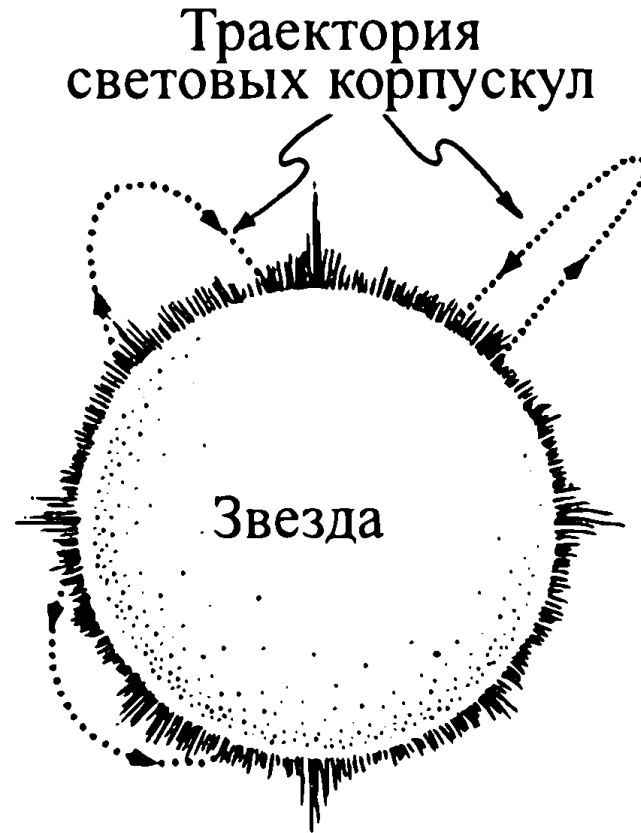
Пылесосы Вселенной





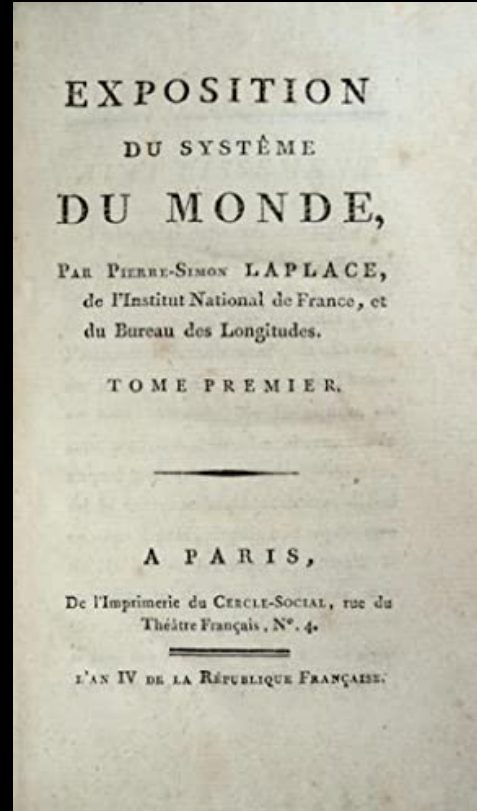
Черная дыра – область в пространстве - времени,  
гравитационное притяжение которой настолько велико, что  
никакое тело не может её покинуть.

1783 – Джон Митчелл, «Чёрные звёзды»

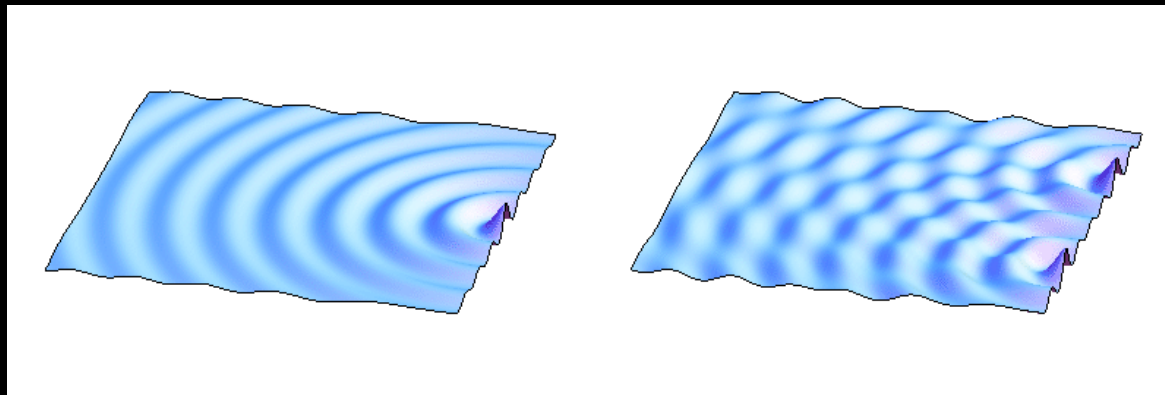


3.1. Поведение света, испущенного звездой, диаметр которой меньше критического, согласно расчетам, сделанным Джоном Митчеллом в 1783 г. на основании корпускулярной модели света и закона тяготения Ньютона

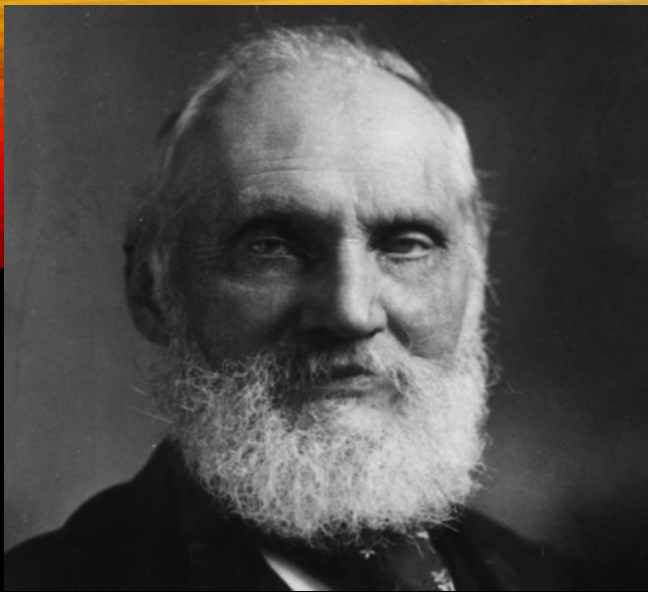
1796 – Пьер-Симон Лаплас, «Изложение системы мира»



Первое (1796) и второе (1799) издания – корпускулярная картина мира. Третье издание – волновая теория света, черных дыр там нет.

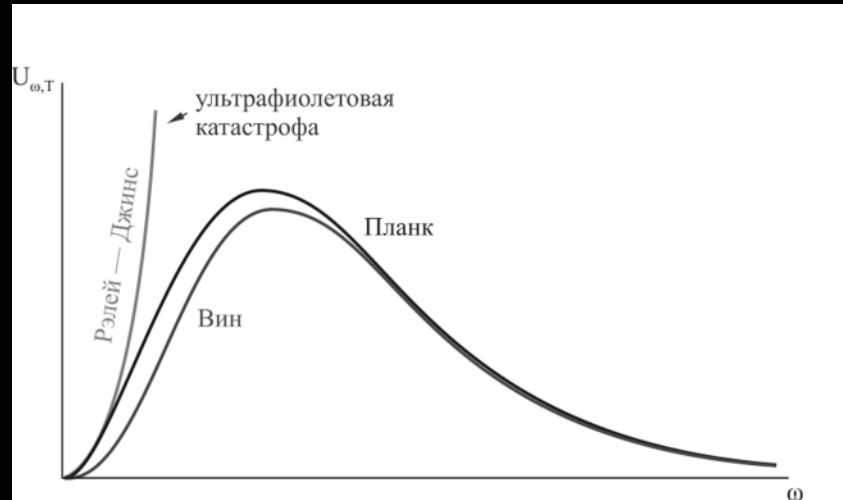


Интерференция



1900 – Уильям Томпсон, «Гучи XIX века над динамической теорией теплоты и света»

- 1) Несоответствие между механикой Ньютона и теорией электромагнетизма Максвелла.
- 2) «Ультрафиолетовая катастрофа».



1967 – Джон Уилер, термин «чёрная дыра».

Механика  
(уравнения  
Ньютона)



Электромагнетизм  
(уравнения  
Максвелла)



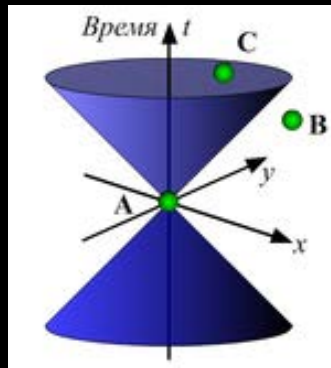
Эйнштейн,  
Пуанкаре, Лоренц



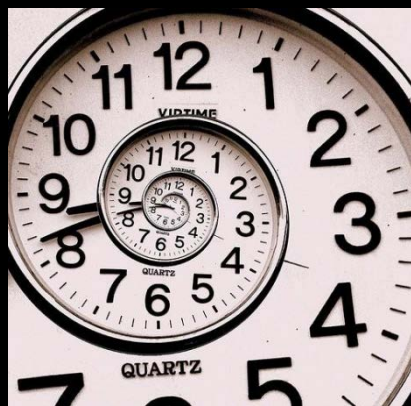
Специальная теория относительности  
(СТО)

# Следствия СТО

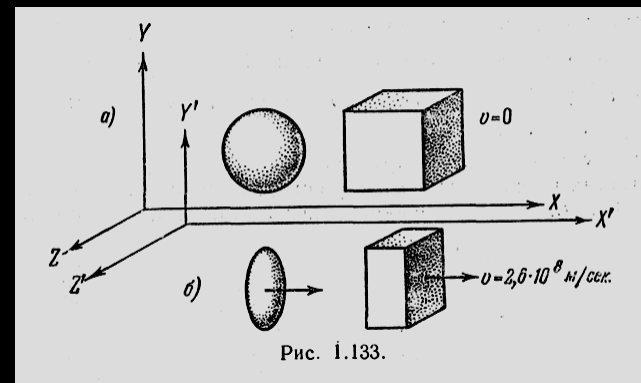
Пространство + время = пространство-время



Замедление времени

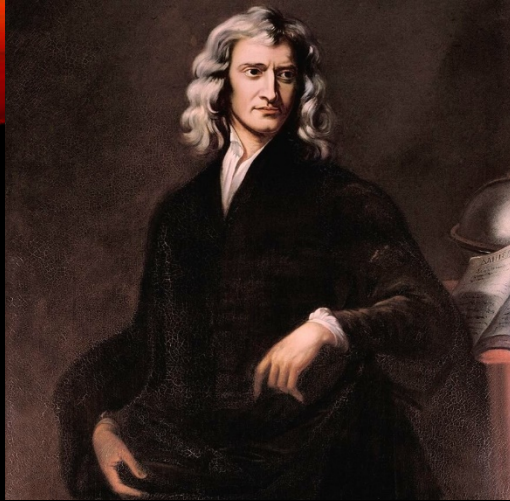


Сокращение длины

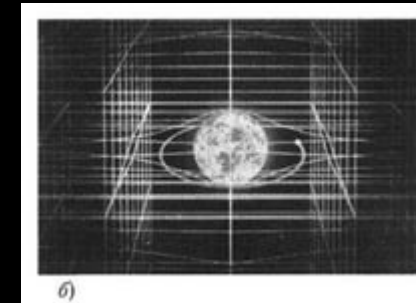
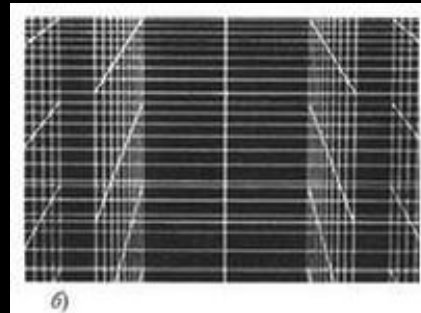
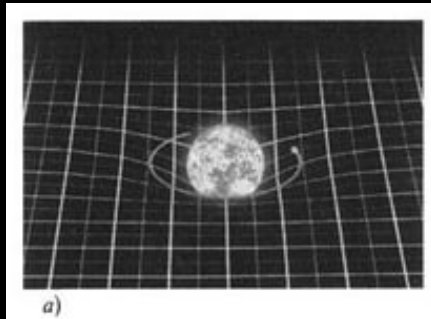
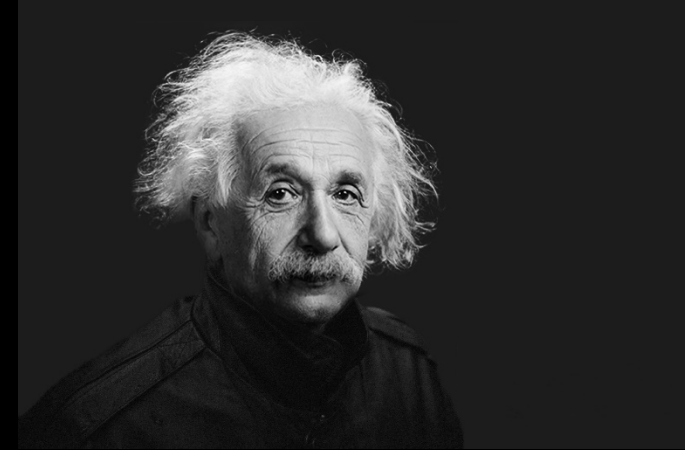


$$E=mc^2$$

# Общая теория относительности (ОТО)



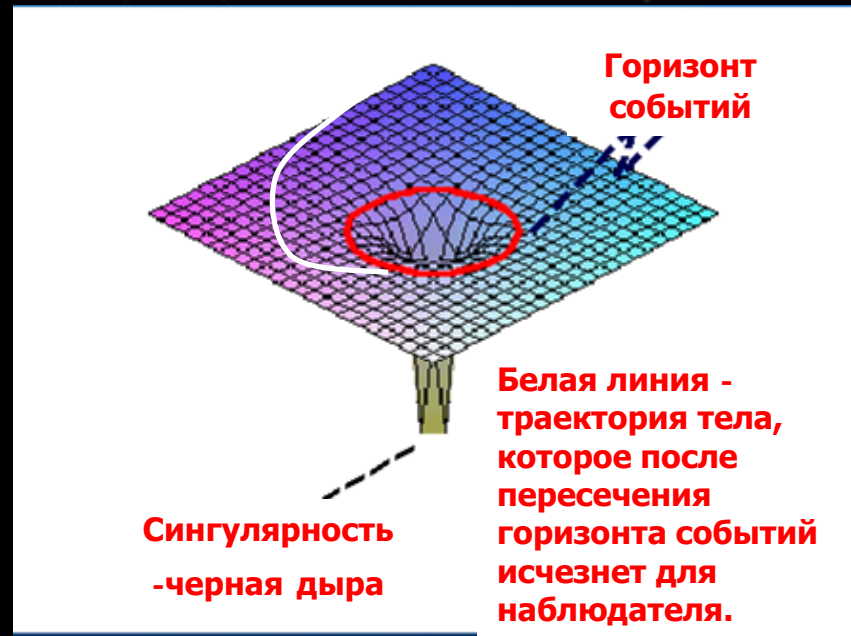
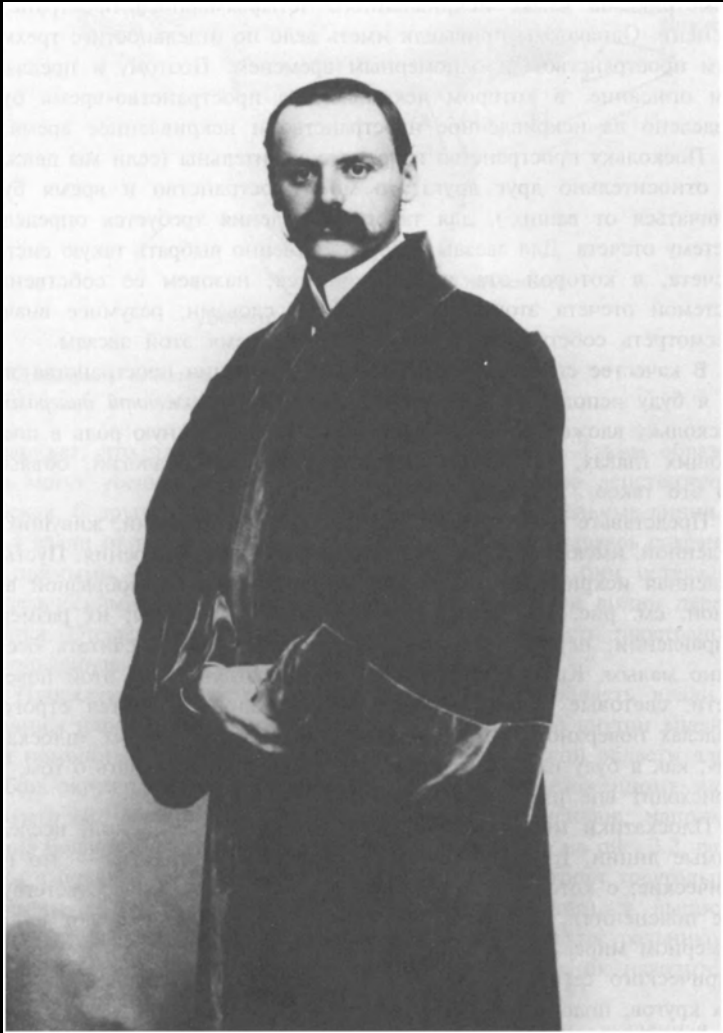
Тела движутся по  
инерции в  
искривлённом  
пространстве-  
времени.



- 1) Масса- энергия «указывает» пространству-времени, как оно будет искривляться.
- 2) Кривизна «указывает» массе-энергии, как ей двигаться.



# 1916 – Карл Шварцшильд, первое решение уравнений Эйнштейна, гравитирующий шар

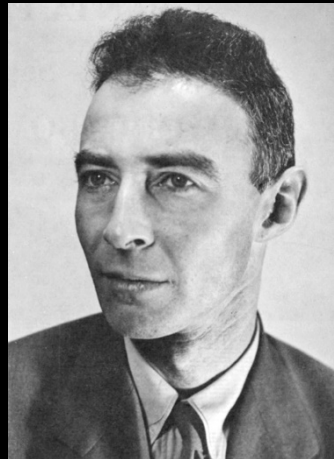


## Другие решения уравнений ОТО

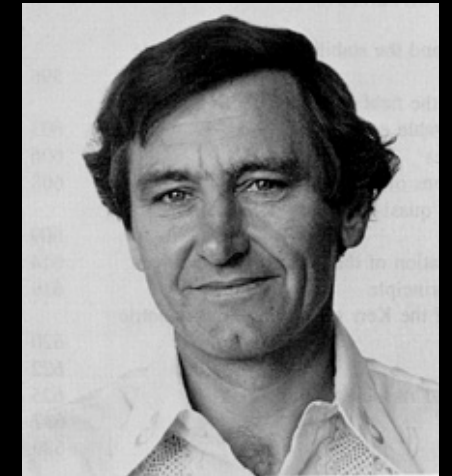
Заряженная черная дыра – Ганс Рейснер (1916) и Гуннар Нордстрём (1918)

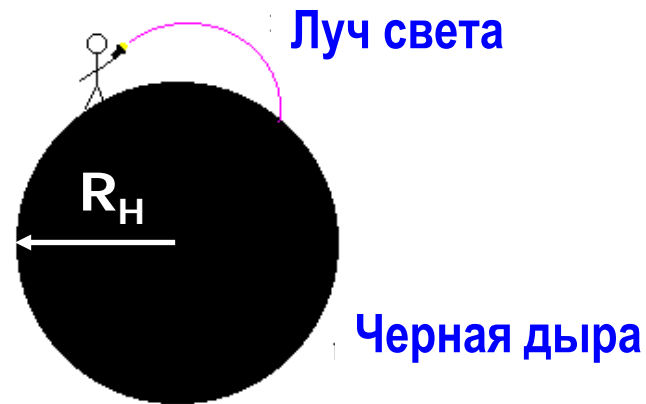
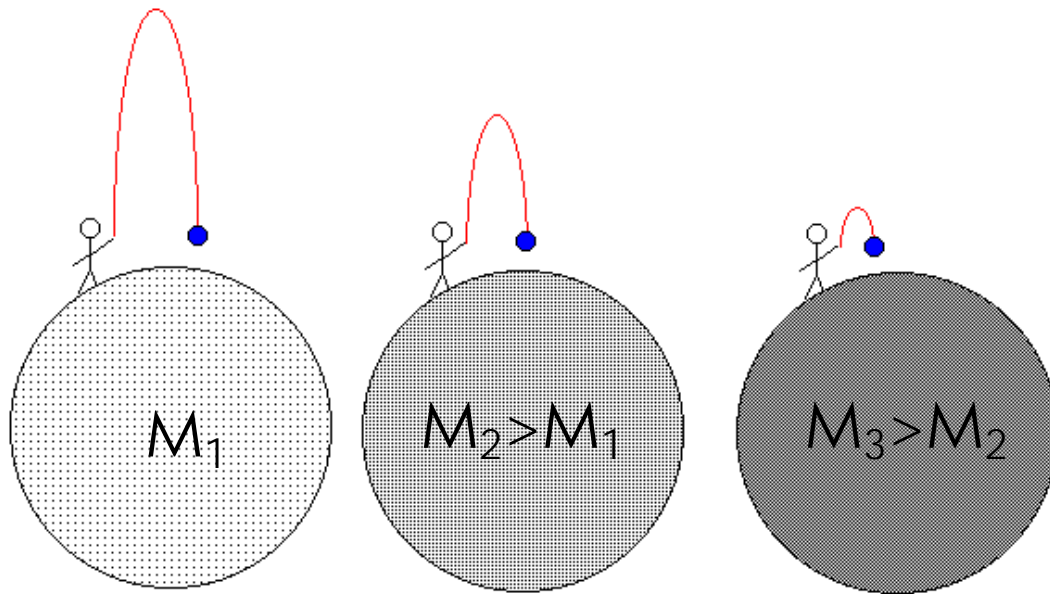


Коллапс пылевидной сферы – Роберт Оппенгеймер и Хартларнд Снайдер (1939) «О бесконечном гравитационном сжатии»



Вращающиеся черная дыра (1963) – Рой Керр





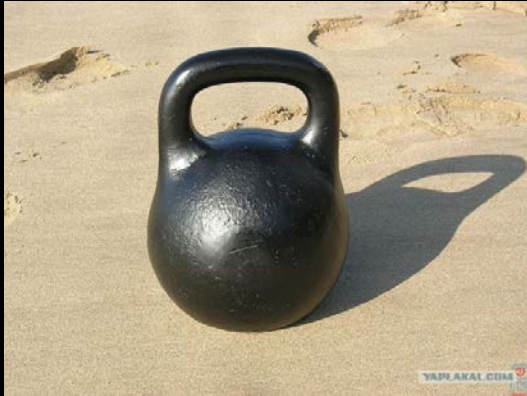
Никакая информация не будет выходить из-за горизонта событий. Время на этой границе останавливается.

$R_H$  для Солнца = 3 км.

$R_H$  для Земли = 9 мм.

# «У черной дыры нет волос»

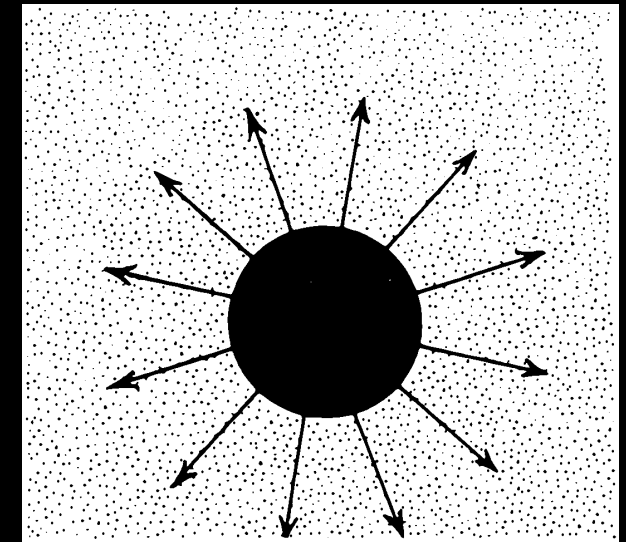
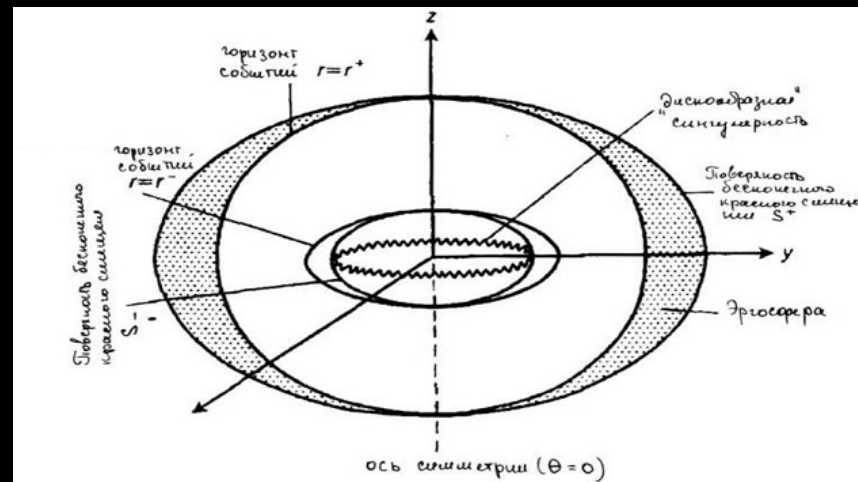
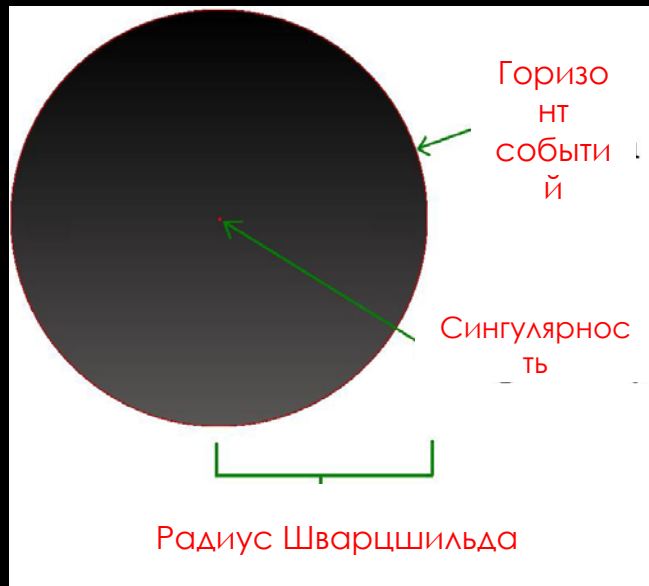
Масса



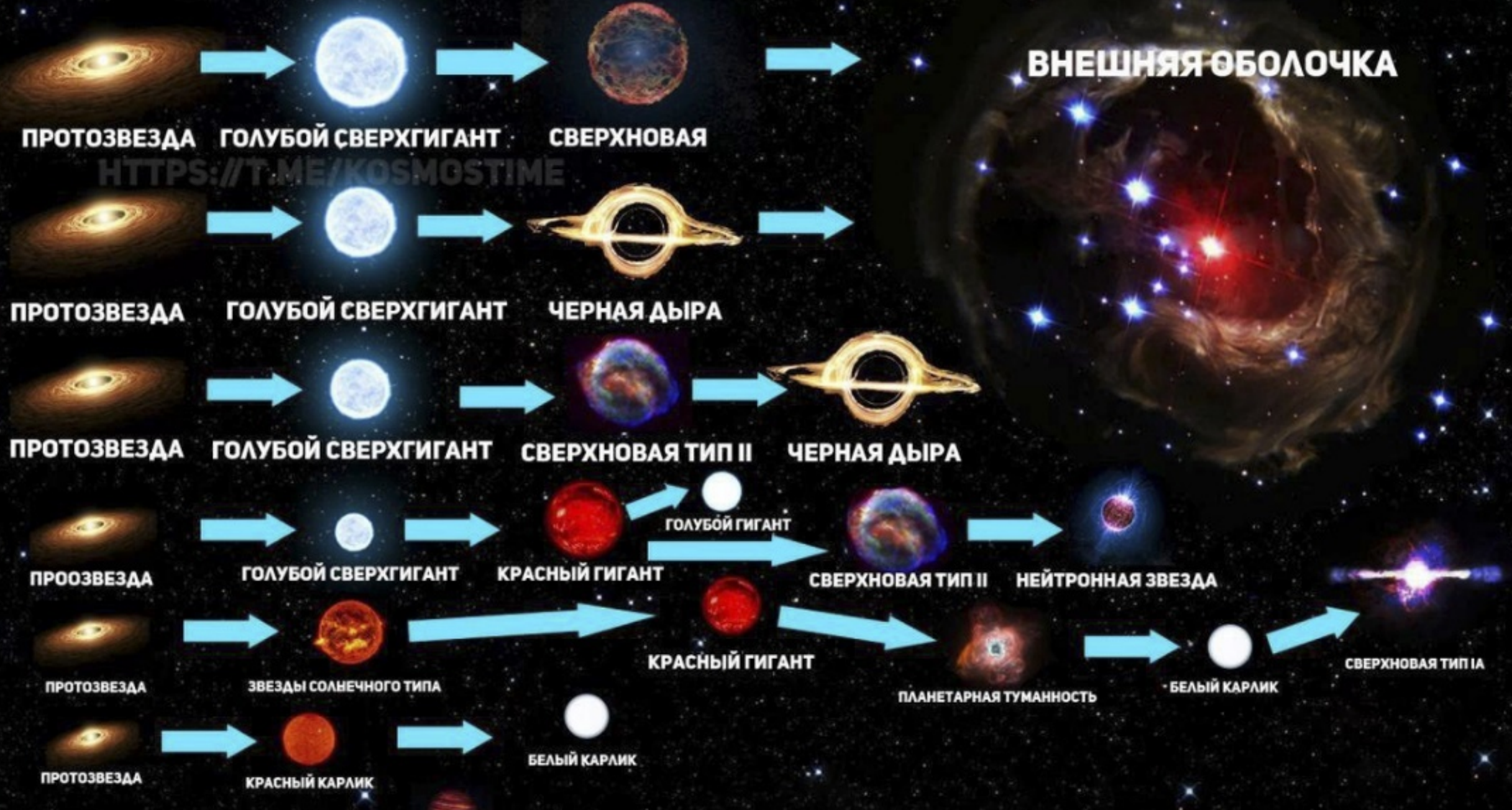
Момент  
импульса



Электрический  
заряд



Типы черных дыр. 1) Черные дыры звездной массы.



# Типы черных дыр. 2) Сверхмассивные черные дыры.

СМЧД находятся в центрах галактик

## Галактика Андромеды

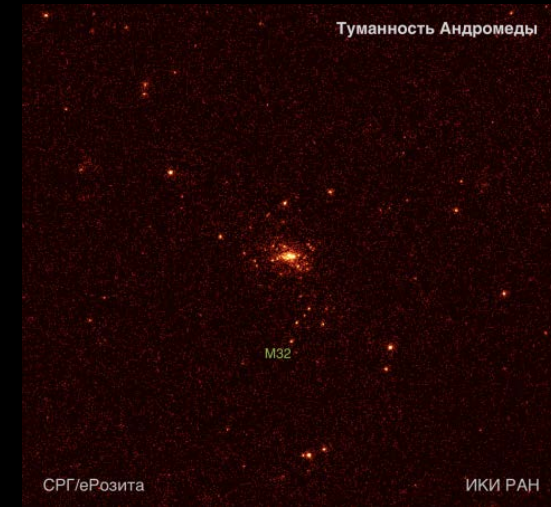
Видимый диапазон



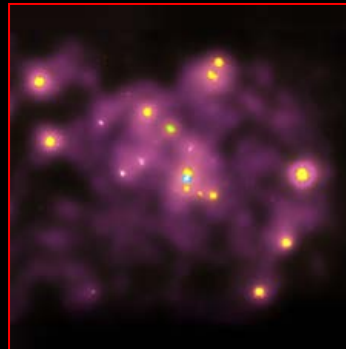
УФ - диапазон



Рентгеновский  
диапазон



Центральная часть в  
рентгеновском  
диапазоне

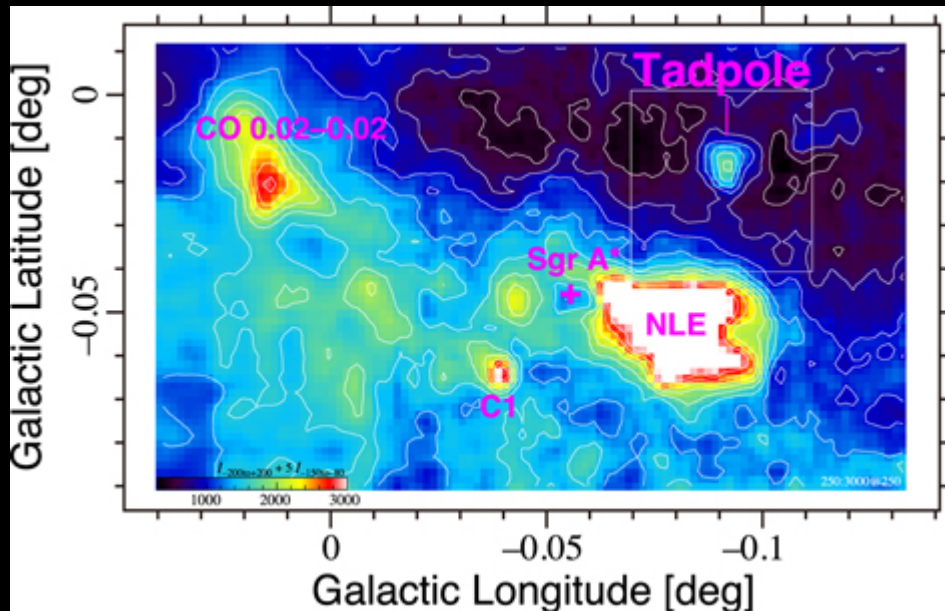


Масса  $10^5 - 10^9$   
солнечных.

### Типы черных дыр. 3) Черные дыры промежуточной массы.



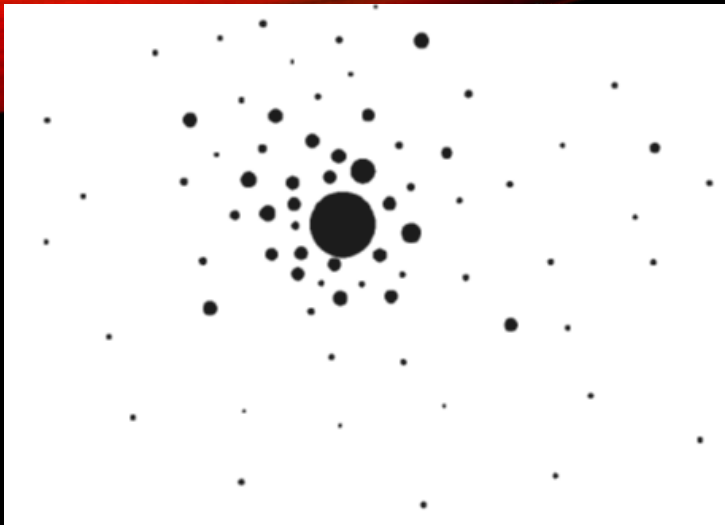
Возможно, они являлись  
«строительными блоками»  
для СМЧД.



Их очень трудно обнаружить.

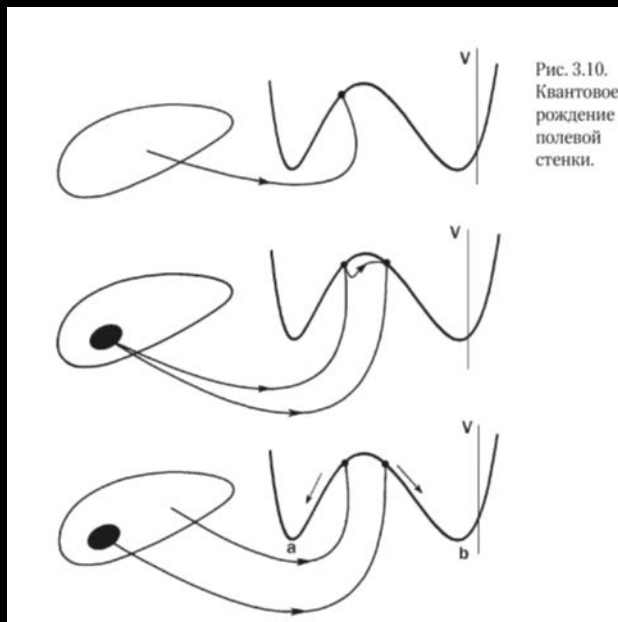
Масса  $10^3 - 10^4$  солнечных

## Типы черных. 4) Первичные черные дыры.



Кластер  
первичных  
черных дыр

Они должны были  
образоваться довольно  
скоро после  
возникновения  
Вселенной.



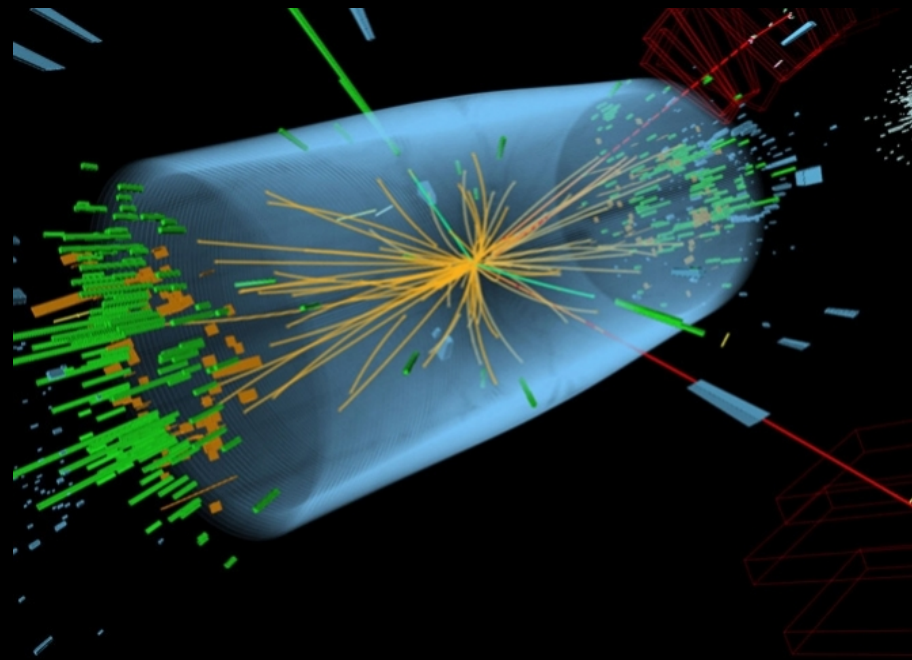
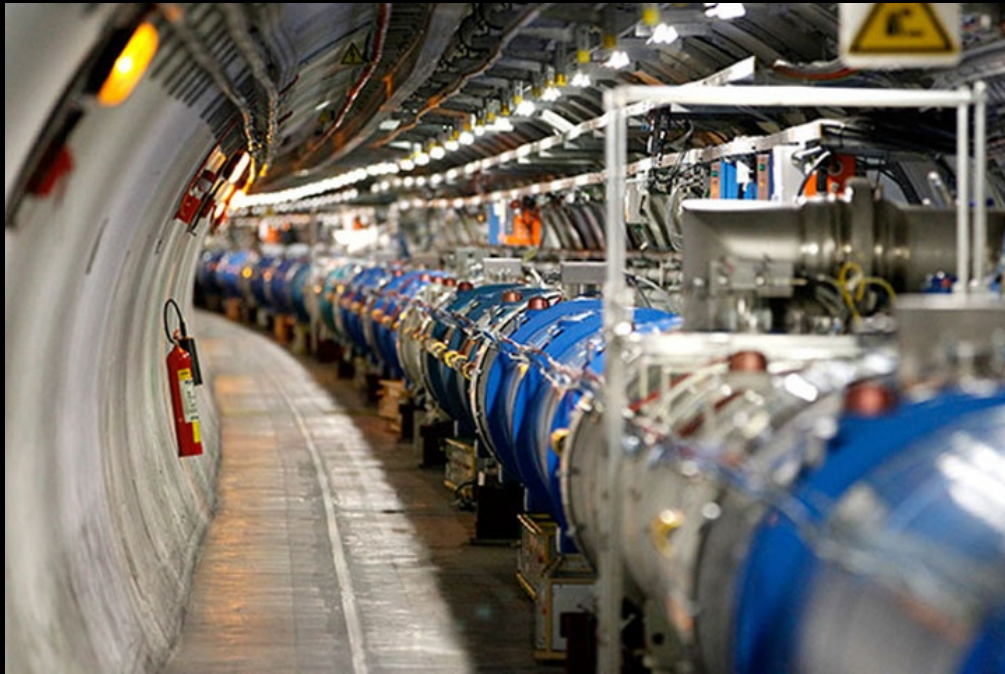
Топологические  
дефекты  
пространства

Масса больше  $10^{11}$  кг.



## Типы черных дыр. 5) микроскопические черные дыры.

Могут образоваться при столкновении высокоэнергичных частиц на ускорителях.



# Шкала электромагнитных волн

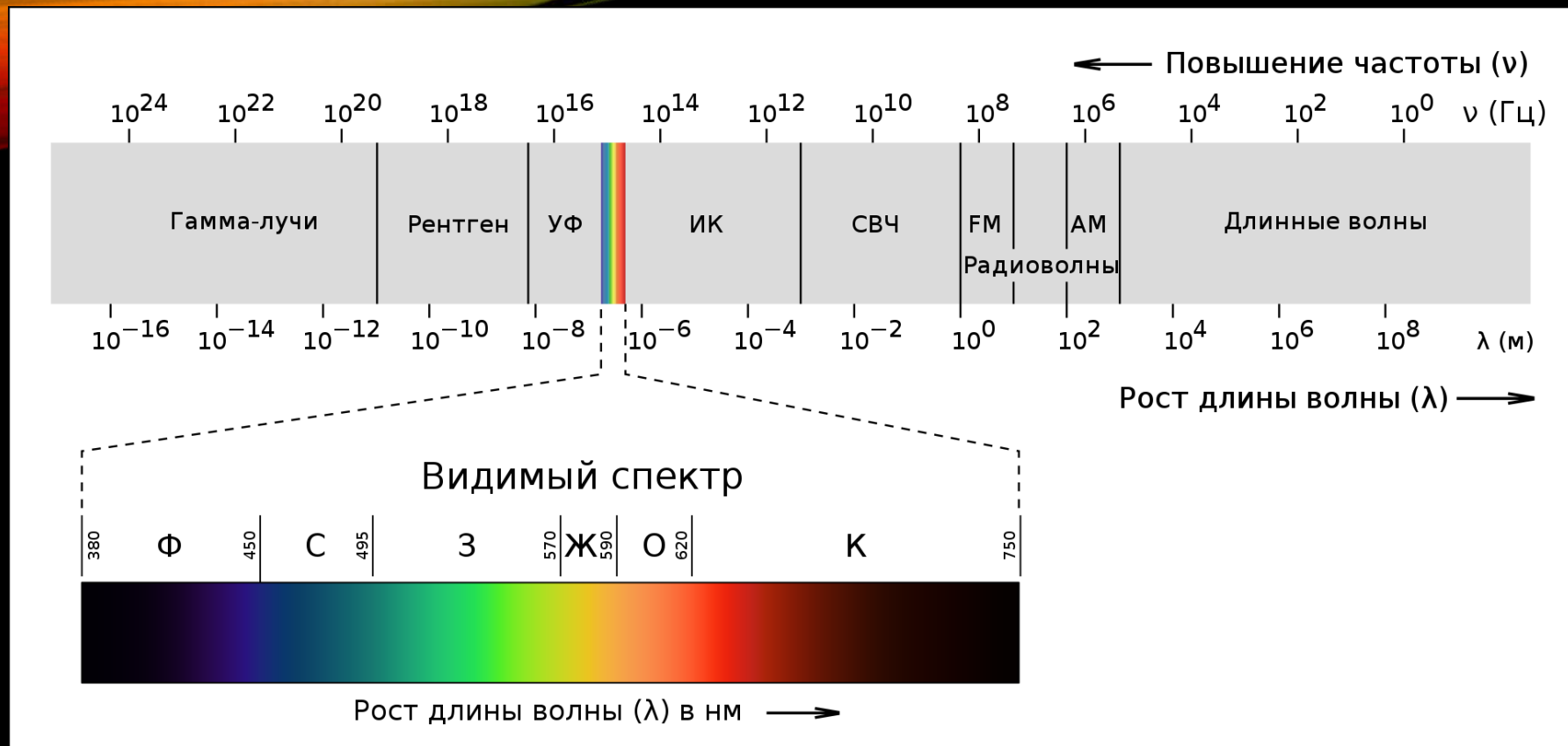


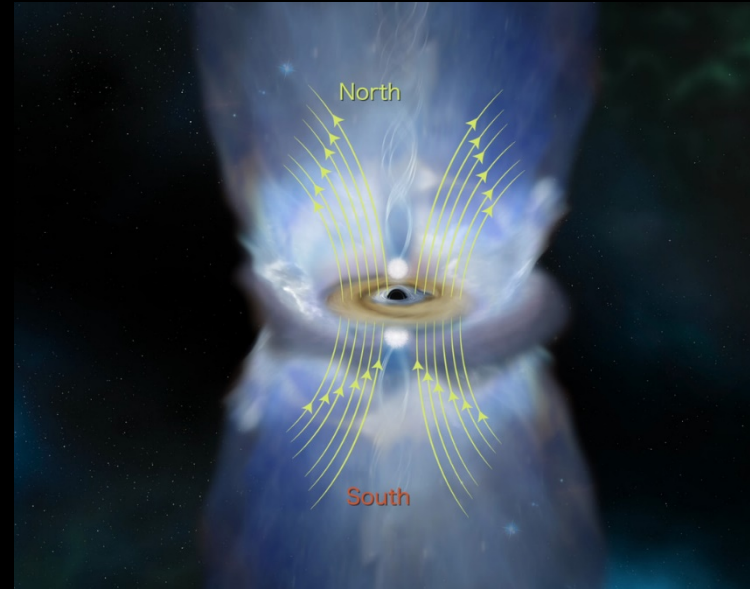
Рис. 1.1. Электромагнитное поле представляется в виде волны. Быстро осциллирующая волна детектируется как группа фотонов.

$$E = h\nu$$

# Как обнаружить черные дыры (1)

Сами черные дыры наблюдать нельзя!

Черная дыра может проявить себя через взаимодействие с газом и пылью, которые ее окружают.



- 1) Образование аккреционных дисков
- 2) Резкое изменение яркости окружающего вещества
- 3) Выбросы вещества (джеты)

Благодаря этому взаимодействию образуются квазары – ярчайшие объекты во Вселенной.



# Как обнаружить черные дыры (2).

Расчет массы «кандидата» на основе траекторий окружающих его звезд.

На этом снимке приведены результаты многолетних наблюдений за положением звезд в центре нашей Галактики.



**Roger Penrose**

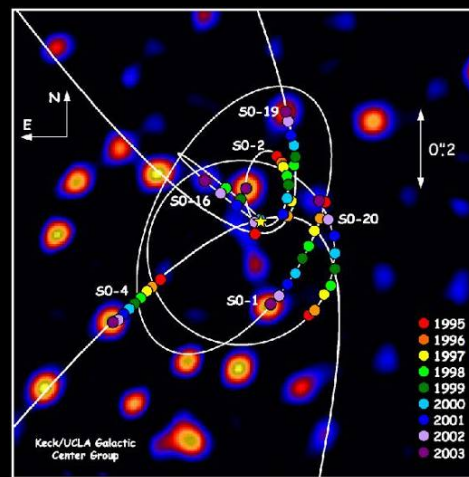
“for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

**Reinhard Genzel**

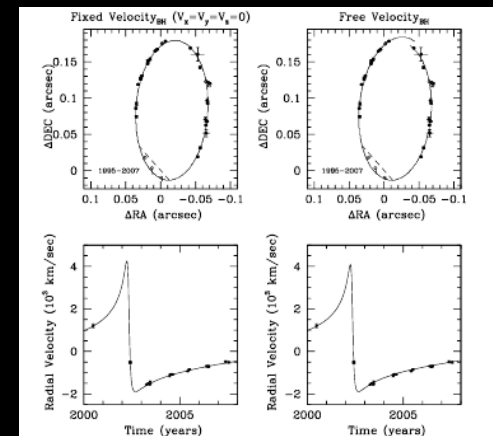
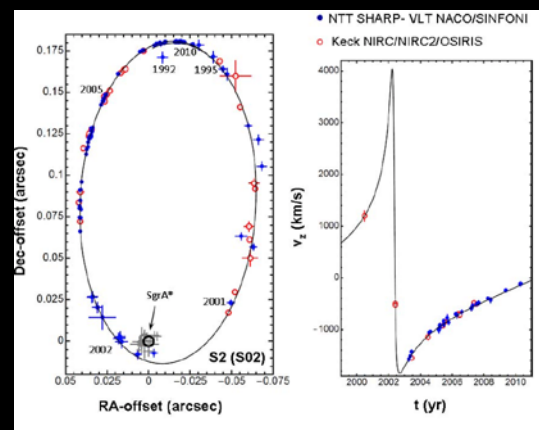
“for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy”

**Andrea Ghez**



Genzel, Eisenhauer & Gillessen (2010)

Ghez et. al.





«Гравитационный коллапс и пространственно-временные сингулярности», Пенроуз, 1965 г.

Возникновение горизонта событий при коллапсе тела неизбежно приводит к образованию сингулярности – участку с бесконечной кривизной пространства времени о плотностью материи.

Закон всемирного тяготения 1684г.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Закон Кулона 1785г.

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Consider the time development of a Cauchy hypersurface  $C^3$  representing an initial matter distribution. We may assume Einstein's field equations and suitable equations of state governing the matter. In fact, the only assumption made here about these equations of state will be the non-negative definiteness of Einstein's energy expression (with or without cosmological term). Suppose this matter distribution undergoes gravitational collapse in a way which, at first, qualitatively resembles the spherical symmetrical case. It will be shown that, after a certain critical condition has been fulfilled, deviations from spherical symmetry cannot prevent space-time singularities from arising. If, as seems justifiable, actual physical singularities in space-time are not to be permitted to occur, the conclusion would appear inescapable that inside such a collapsing object at least one of the following holds: (a) Negative local energy occurs.<sup>6</sup> (b) Einstein's equations are violated. (c) The space-time manifold is incomplete.<sup>7</sup> (d) The concept of space-time loses its meaning at very high curvatures—possibly because of quantum phenomena.<sup>2</sup> In fact (a), (b), (c), (d) are somewhat interrelated, the distinction being partly one of attitude of mind.

Before examining the asymmetrical case, consider a spherically symmetrical matter distribution of finite radius in  $C^3$  which collapses symmetrically. The empty region surrounding the matter will, in this case, be a Schwarzschild field, and we can conveniently use the metric  $ds^2 = -2dvdr + dv^2(1 - 2m/r) - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$ , with an advanced time parameter  $v$  to describe it.<sup>8</sup> The situation is depicted in Fig. 1. Note that an exterior observer will always see matter outside  $r=2m$ , the collapse through  $r=2m$  to the singularity at  $r=0$  being invisible to him.

After the matter has contracted within  $r=2m$ , a spacelike sphere  $S^2$  ( $t = \text{const}$ ,  $2m > r = \text{const}$ ) can be found in the empty region surrounding the matter. This sphere is an example of what will be called here a trapped surface—defined generally as a closed, spacelike, two-surface  $T^2$  with the property that the two systems of null geodesics which meet  $T^2$  orthogonally converge locally in future directions at  $T^2$ . Clearly trapped surfaces will still exist if the matter region has no sharp boundary or if spherical symmetry is dropped, provided that the deviations from the above situation are not too great.

Indeed, the Kerr solutions with  $m > a$  (angular momentum  $ma$ ) all possess trapped surfaces, whereas those for which  $m \leq a$  do not.<sup>9</sup> The argument will be to show that the existence of a trapped surface implies—irrespective of symmetry—that singularities necessarily develop.

The existence of a singularity can never be inferred, however, without an assumption such as completeness for the manifold under consideration. It will be necessary, here, to suppose that the manifold  $M_+^4$ , which is the future time development of an initial Cauchy hypersurface  $C^3$  (past boundary of the  $M_+^4$  region), is in fact null complete into the future. The various assumptions are, more precisely, as follows: (i)  $M_+^4$  is a nonsingular (+---) Riemannian manifold for which the null half-cones form two separate systems ("past" and "future"). (ii) Every null geodesic in  $M_+^4$  can be extended into the future to arbitrarily large affine parameter values (null completeness). (iii) Every timelike or null geodesic in  $M_+^4$  can be extended

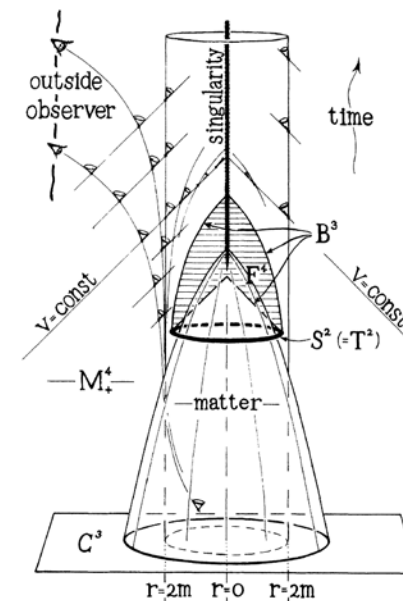
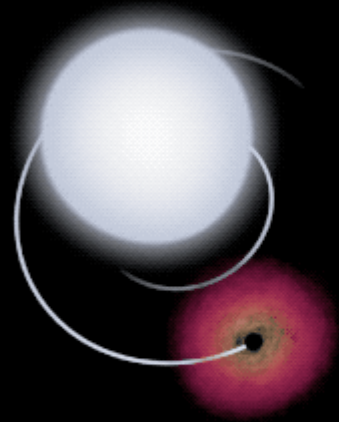


FIG. 1. Spherically symmetrical collapse (one space dimension suppressed). The diagram essentially also serves for the discussion of the asymmetrical case.

# Как обнаружить черные дыры (3).

Взаимодействие с соседом по звездной системе.



## Cygnus X-1

First confirmed black hole

Distance: 7,200 light-years

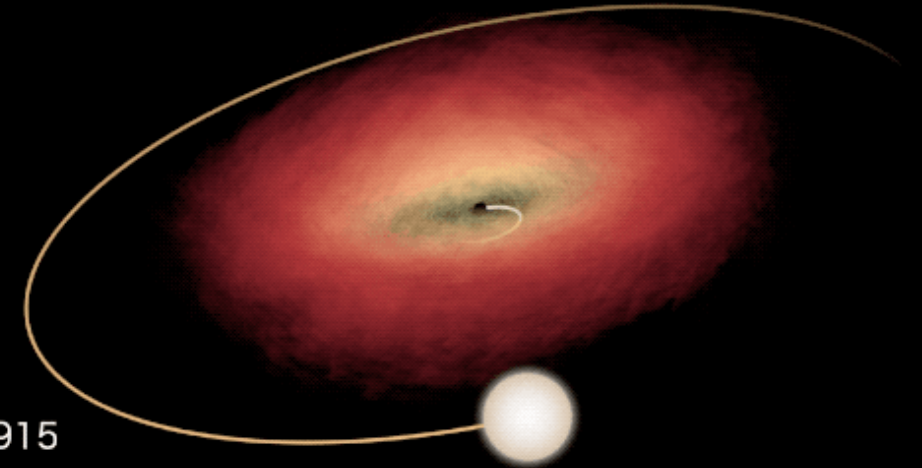
Orbital period: 5.6 days

Black hole mass: 21 Suns

Companion mass: 40 Suns

• Sun  
to scale

H1705



GRS 1915

## MAXI J1659

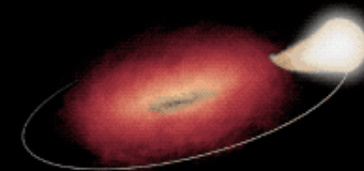
Fastest-known orbit of an accreting black hole

Distance: 29,000 light-years

Orbital period: 2.4 hours

Black hole mass: 5 Suns

Companion mass: 0.2 Suns

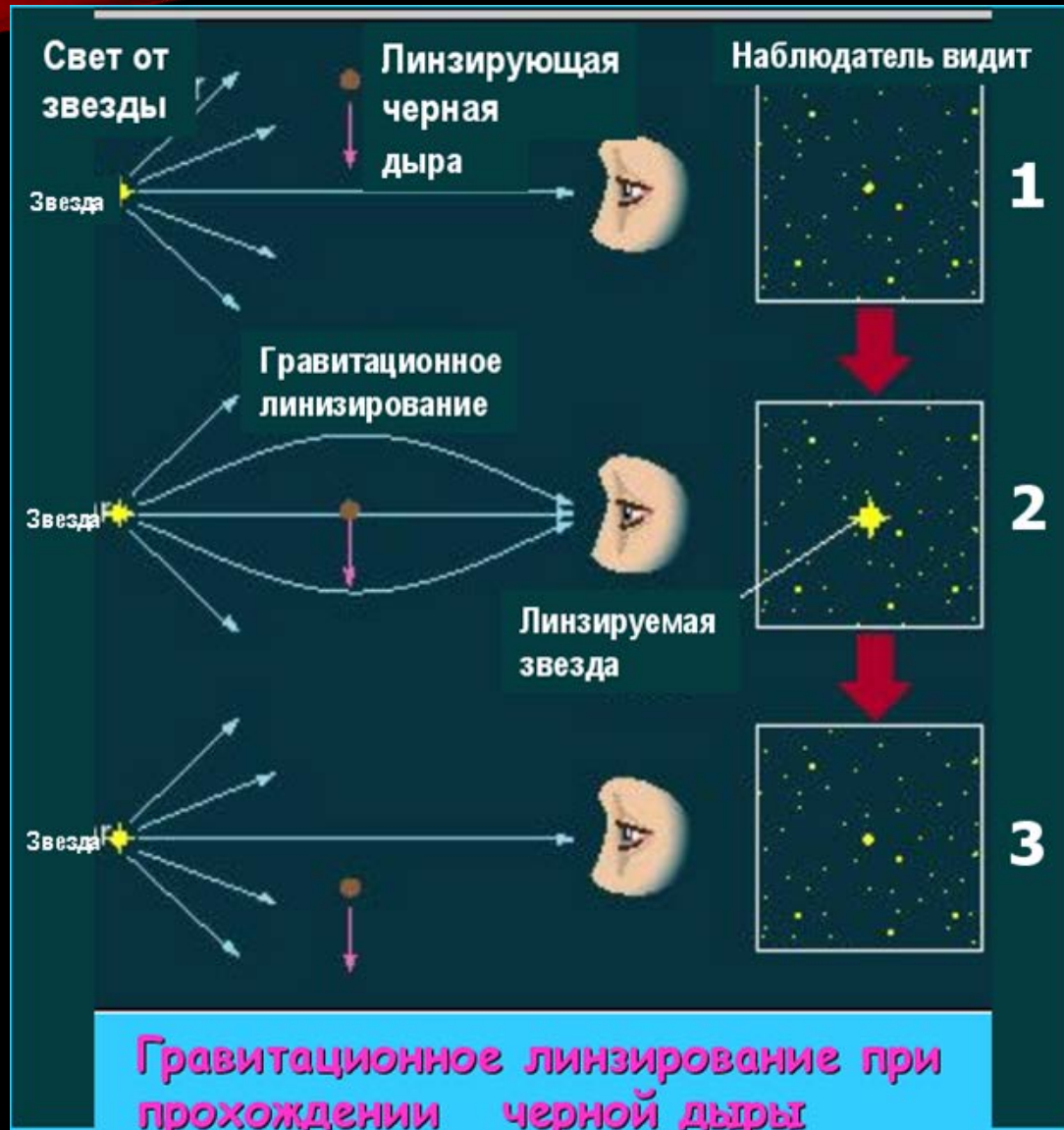


Sun  
to scale

Черная дыра «воруют» вещество у своего соседа.

# Как обнаружить черные дыры (4).

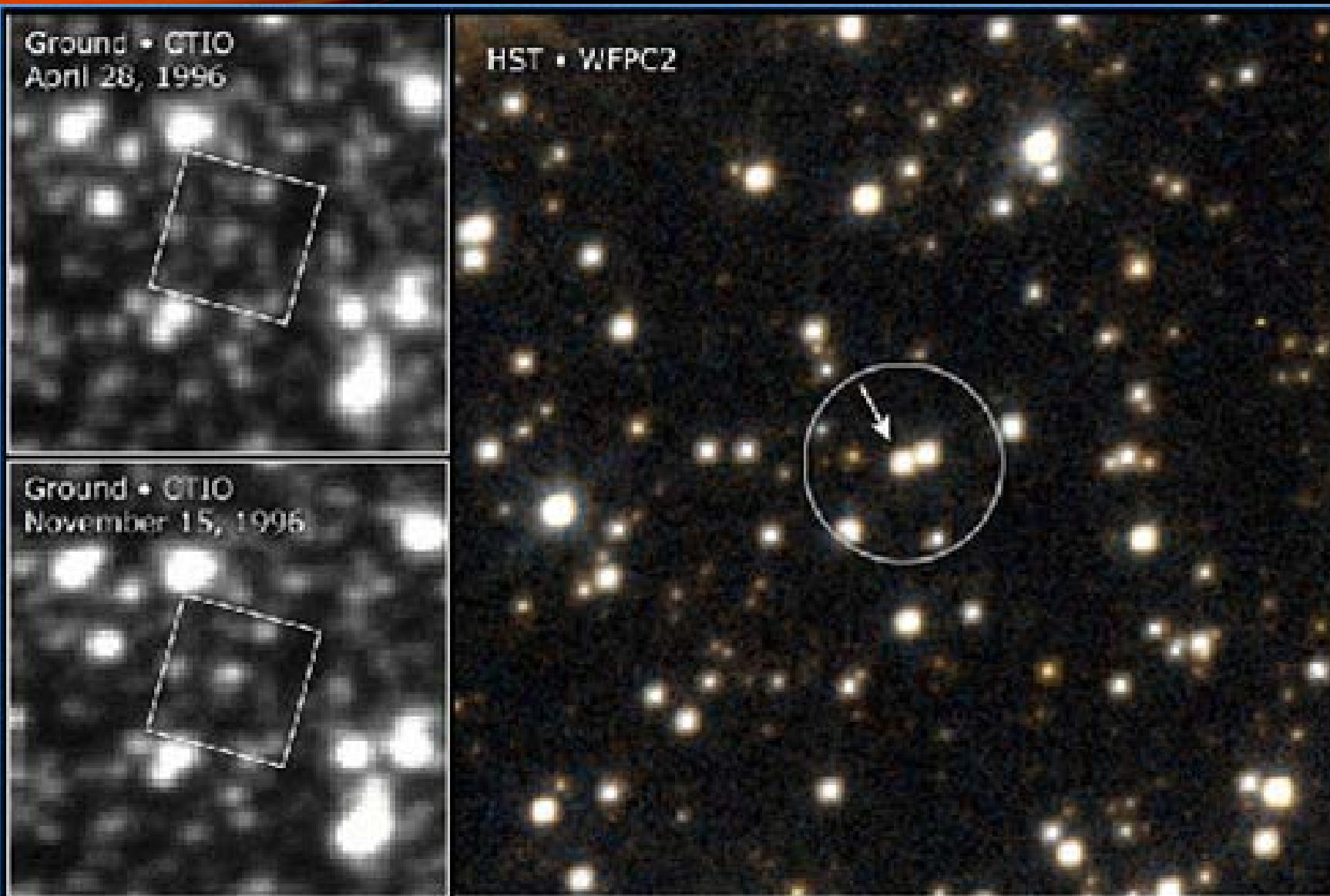
## Эффект гравитационного линзирования.



Гравитационное поле черных дыр искривляет лучи света, идущие от далеких звезд. Благодаря этому блеск звезды кратковременно возрастает.



# Гравитационное (микро)линзирование.



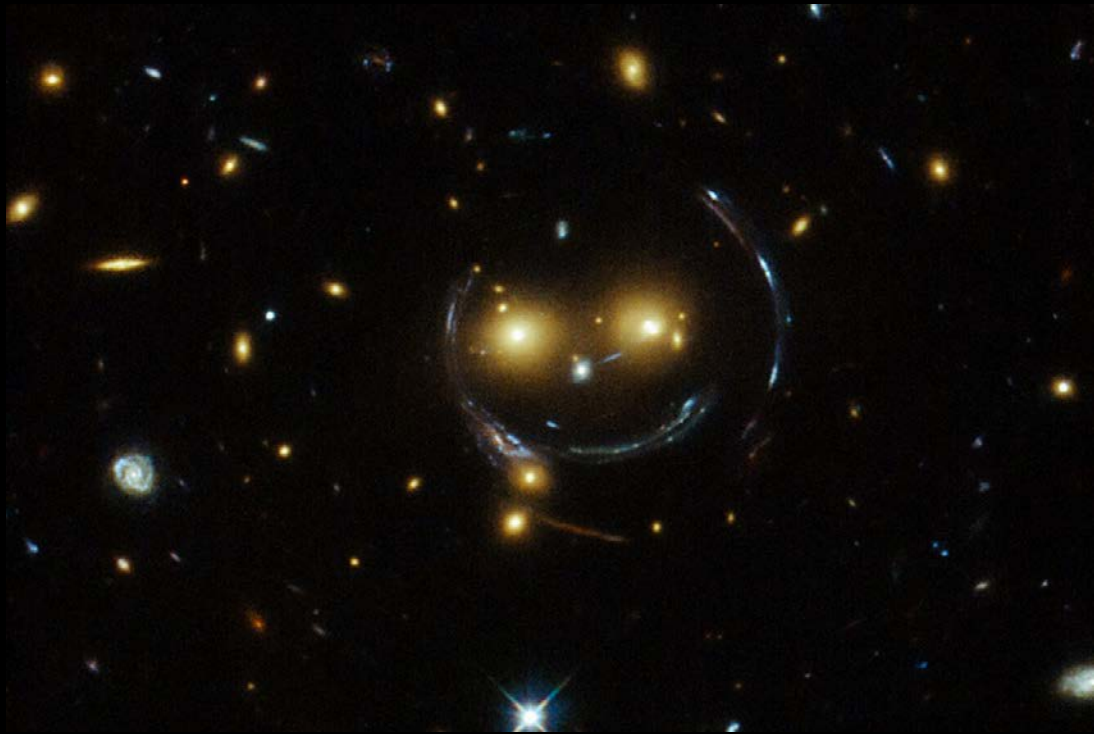
**Microlens Event MACHO-96-BLG-5**

**HST • WFPC2**

NASA and D. Bennett (Notre Dame University) • STScI-PRC00-03

# Гравитационное (макро)линзирование. Кольцо Эйнштейна

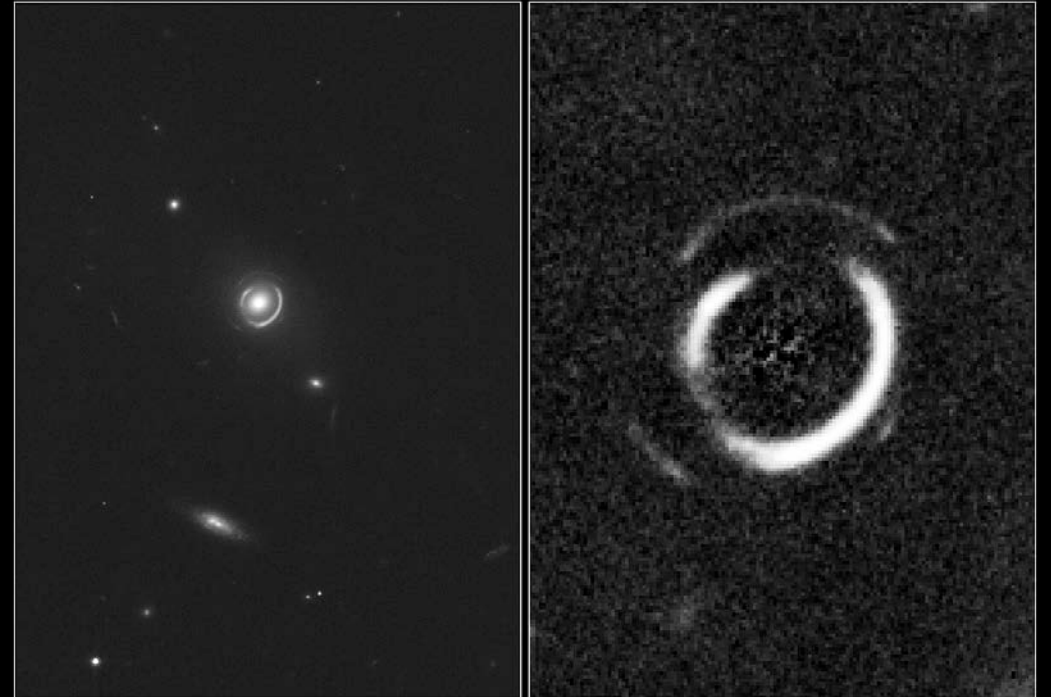
«Чеширский кот»



Двойное кольцо Эйнштейна

Double Einstein Ring SDSSJ0946+1006

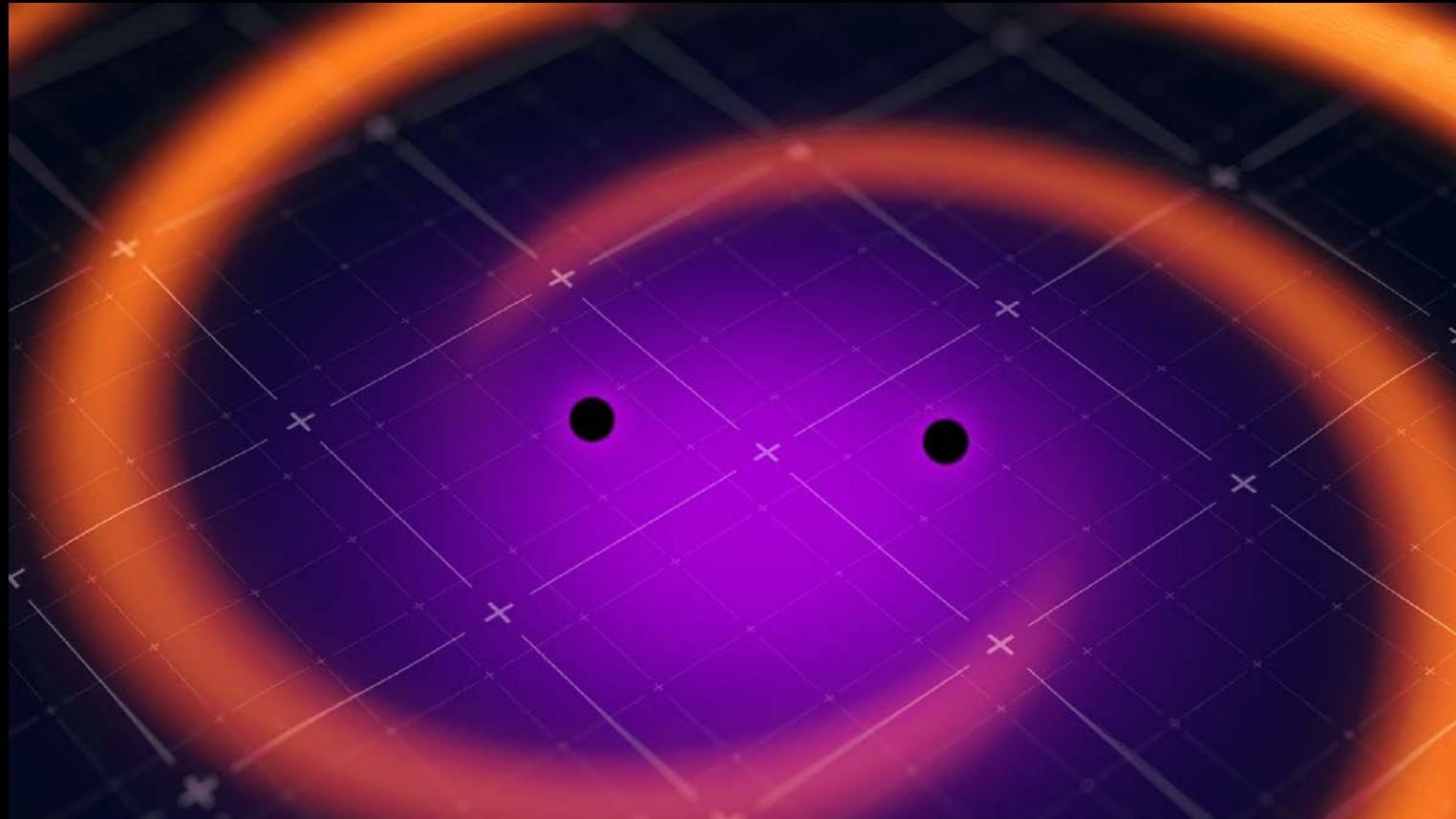
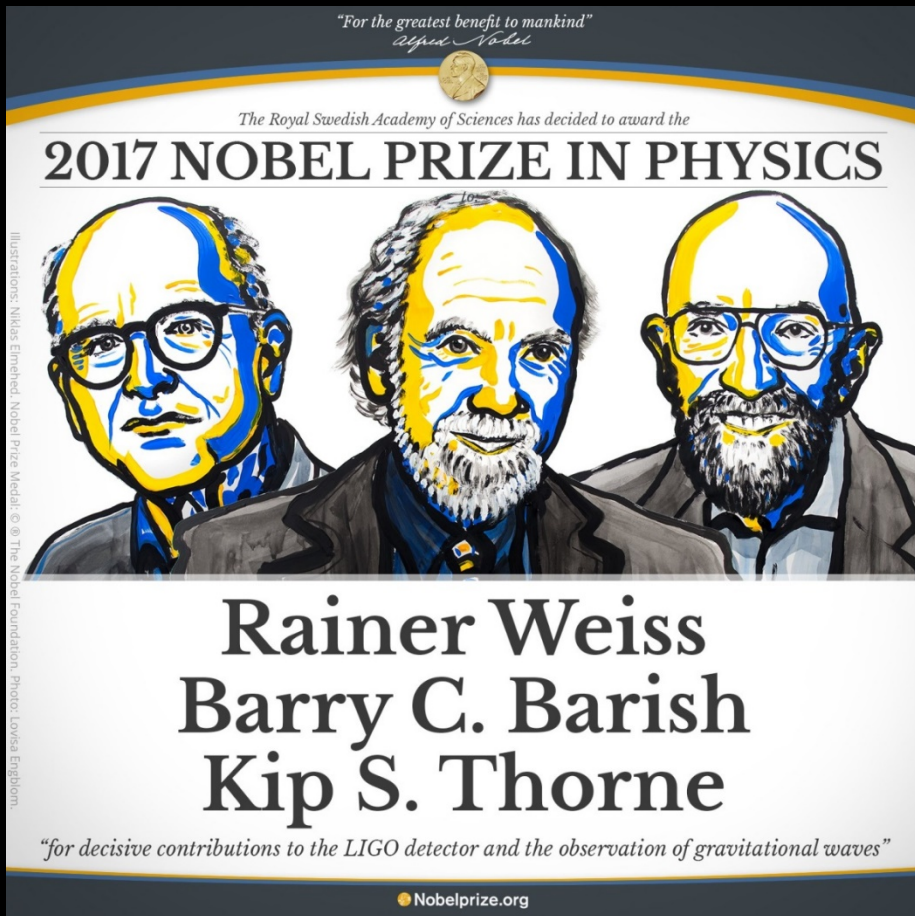
Hubble Space Telescope - ACS/WFC



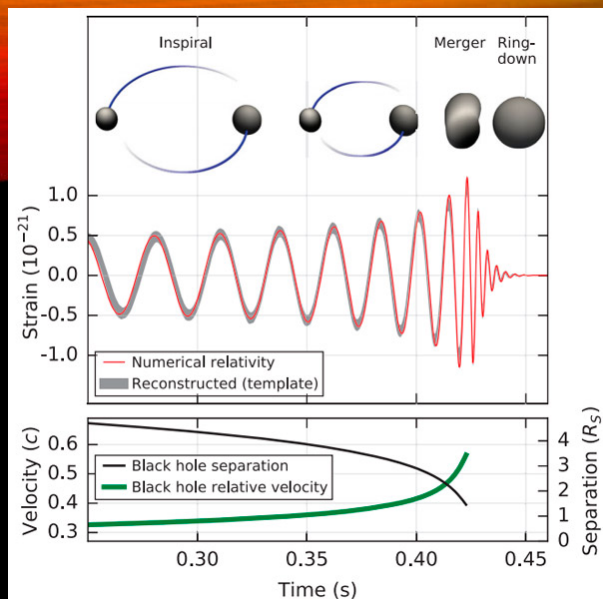
# Как обнаружить черные дыры (5).

## Гравитационные волны.

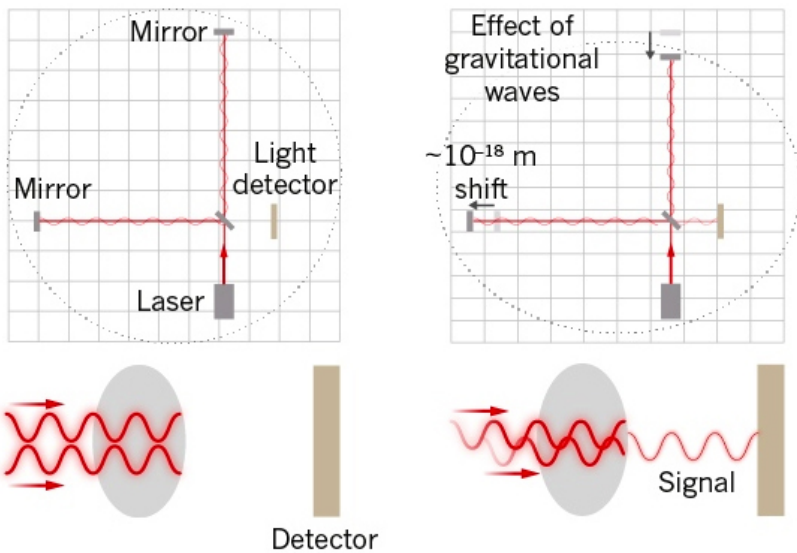
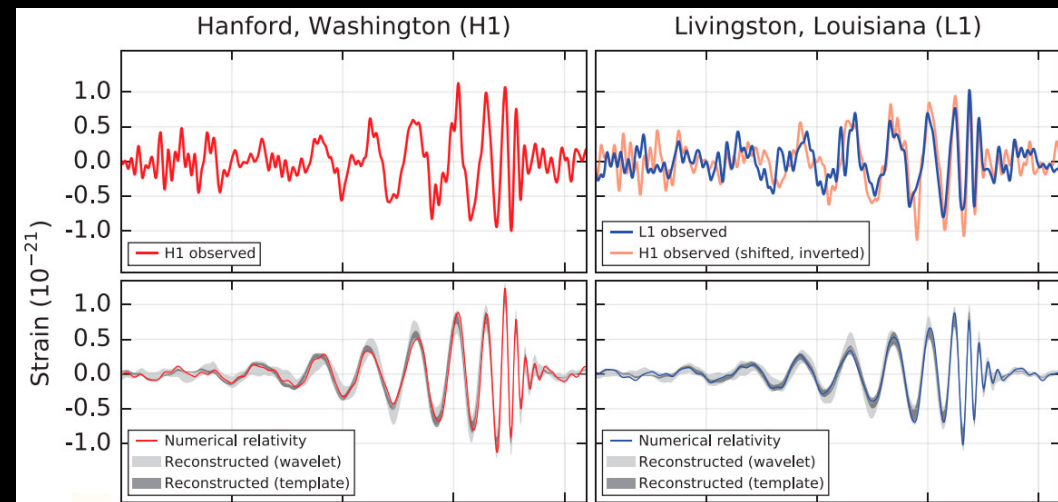
Гравитационные волны – «рябь» пространства – времени. Проще всего их можно зафиксировать в результате столкновения двух черных дыр.



# Событие GW140915



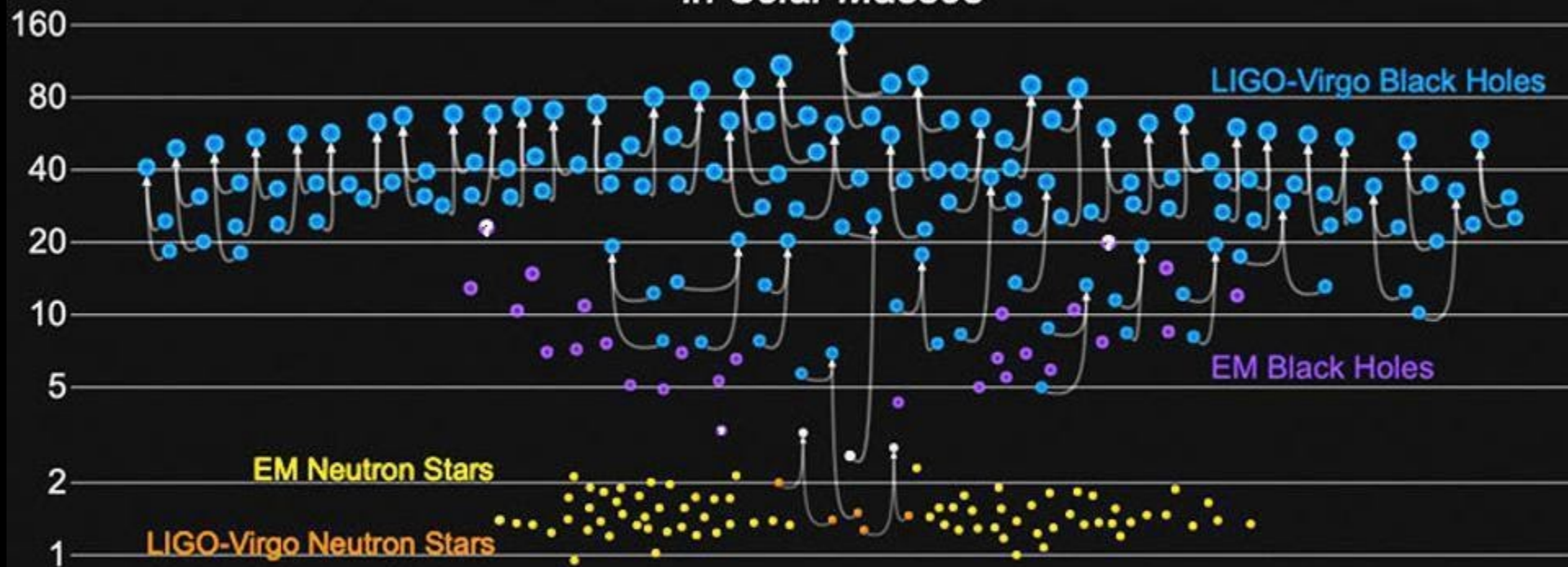
В галактике, удаленной от нас на расстояние 1,3 млрд. св. лет, произошло столкновение двух ЧД массой 36 и 29 СОЛНЕЧНЫХ.



В результате образовалась ЧД массой в 62 СОЛНЕЧНЫХ.



# Masses in the Stellar Graveyard *in Solar Masses*



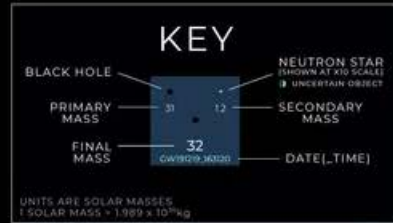
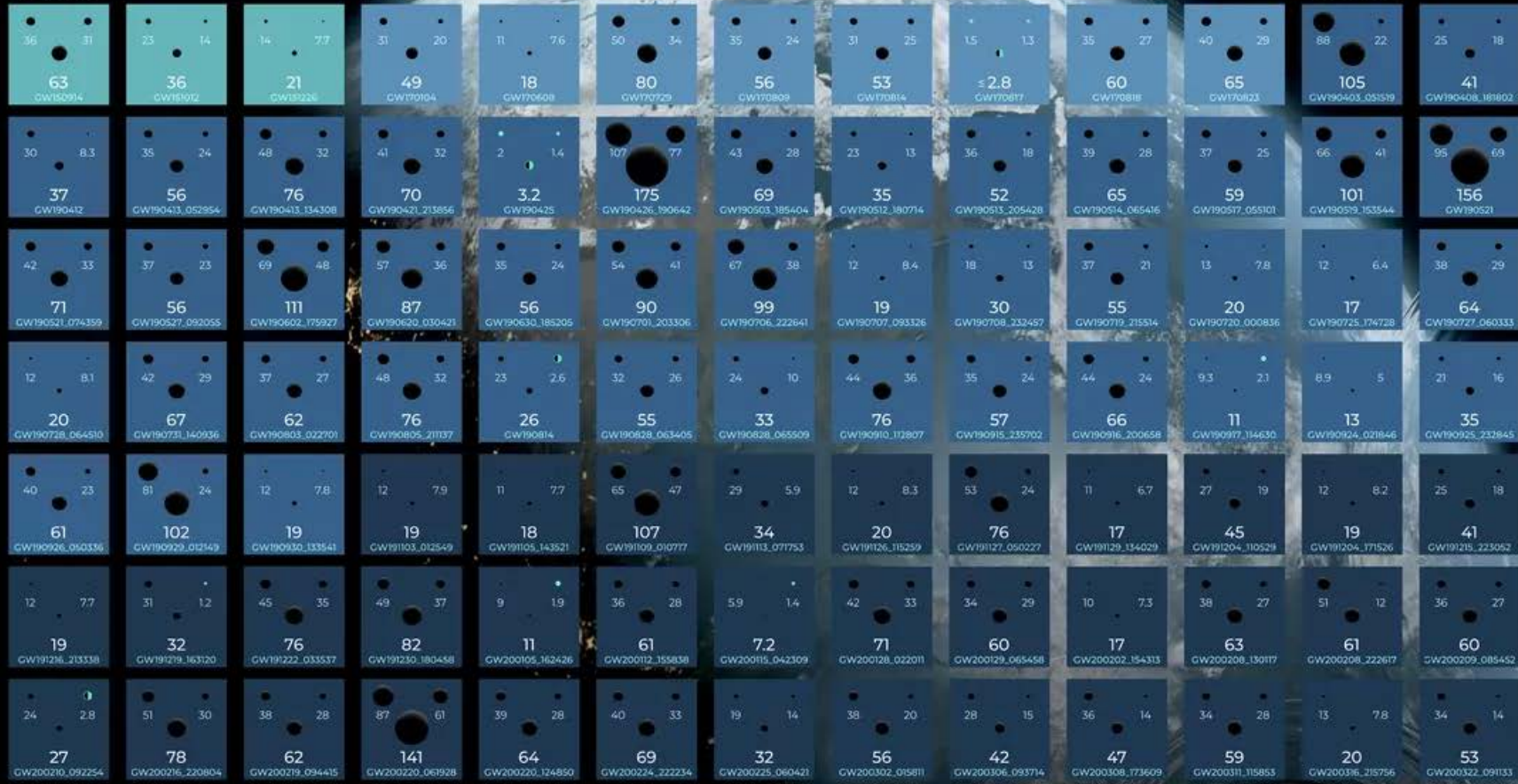
GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

OBSERVING  
01  
RUN  
2015 - 2016

02  
2016 - 2017

03a+b  
2019 - 2020



Note that the mass and merger dates have not been independently confirmed, which is why the final mass is sometimes larger than the sum of the primary and secondary masses, or why the final mass is smaller than the primary plus secondary mass.

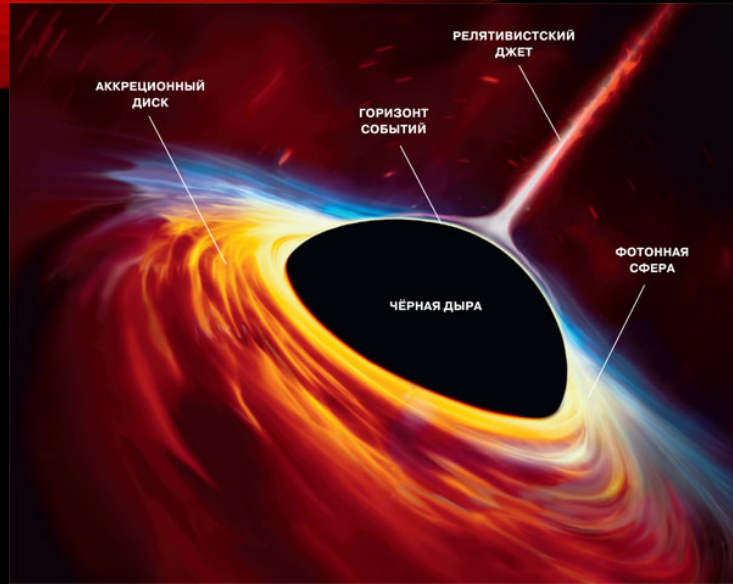
The events listed here have a probability of being gravitational waves of at least 95%, or they have a time-to-be-repeated of less than 1 year.

# GRAVITATIONAL WAVE MERGER DETECTIONS

SINCE 2015



Как обнаружить черные дыры (6).  
«Изображение» черной дыры.



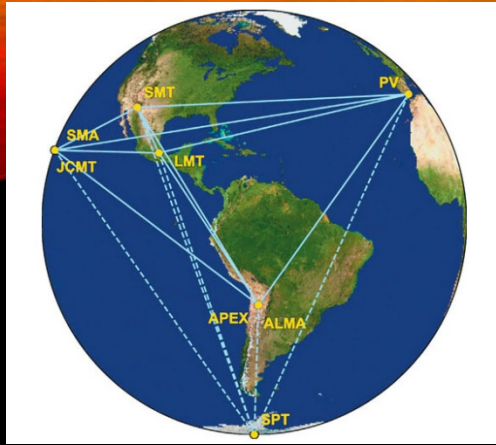
Схематичная структура вещества вблизи черной дыры



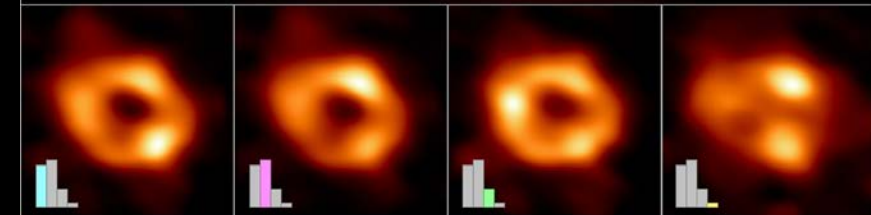
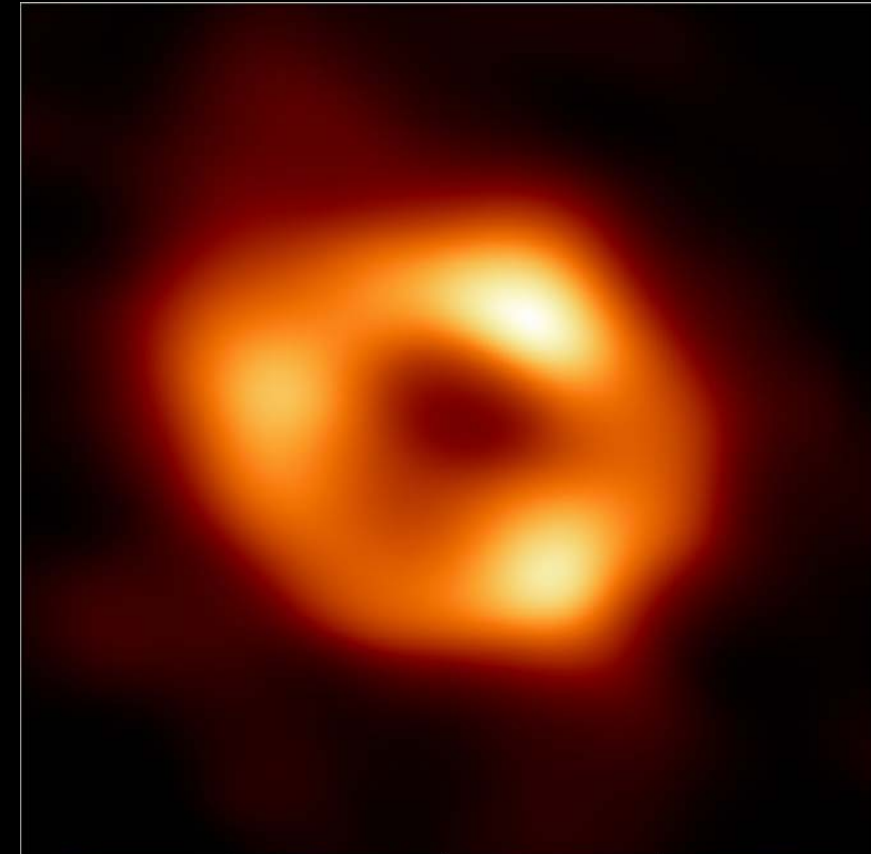
Жан-Пьер Люмине (1979)



Компьютерное моделирование 1989 года – аккреционный диск черной дыры с разных ракурсов.



Черная дыра в центре галактики M87

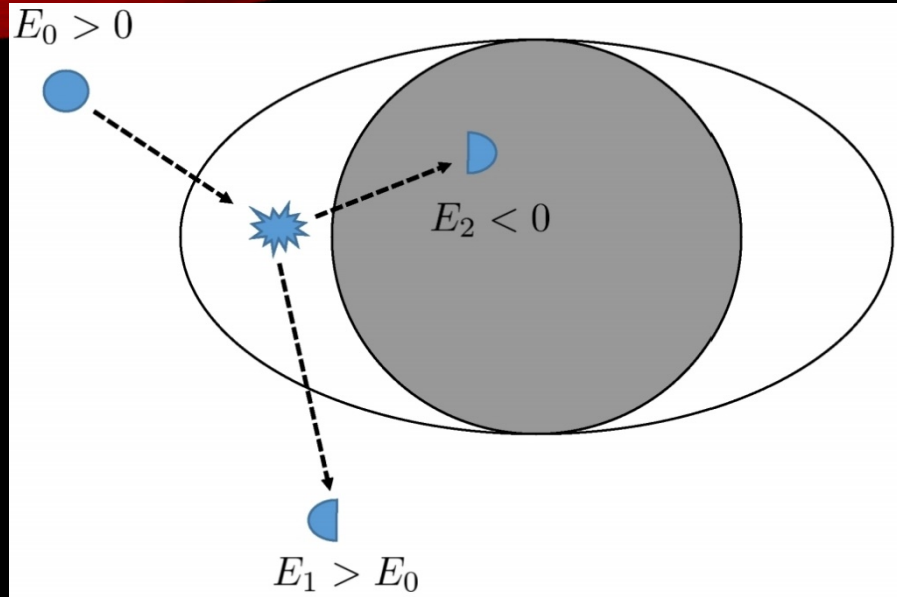


Черная дыра Sgr A\* в центре галактики Млечный Путь.

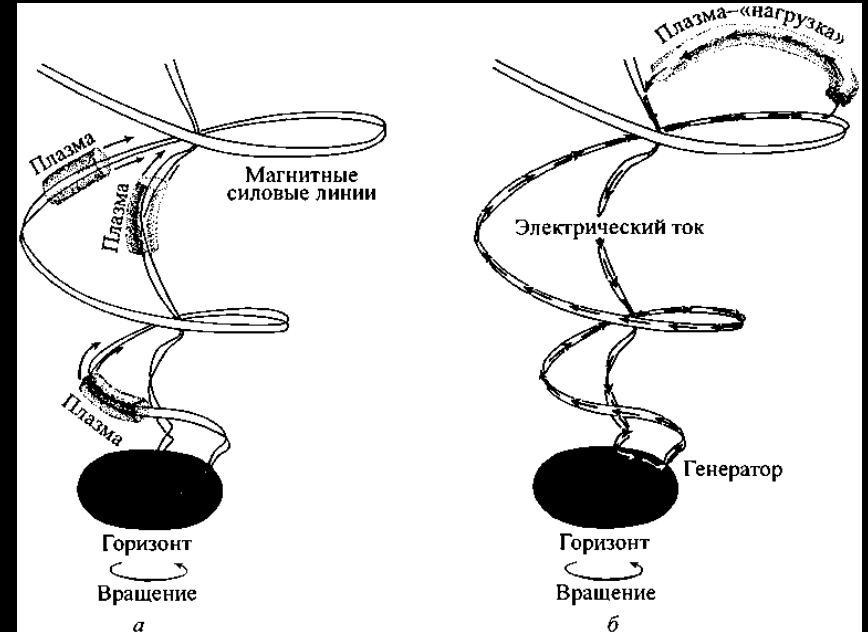


# Извлечение энергии из черной дыры.

Процесс Пенроуза



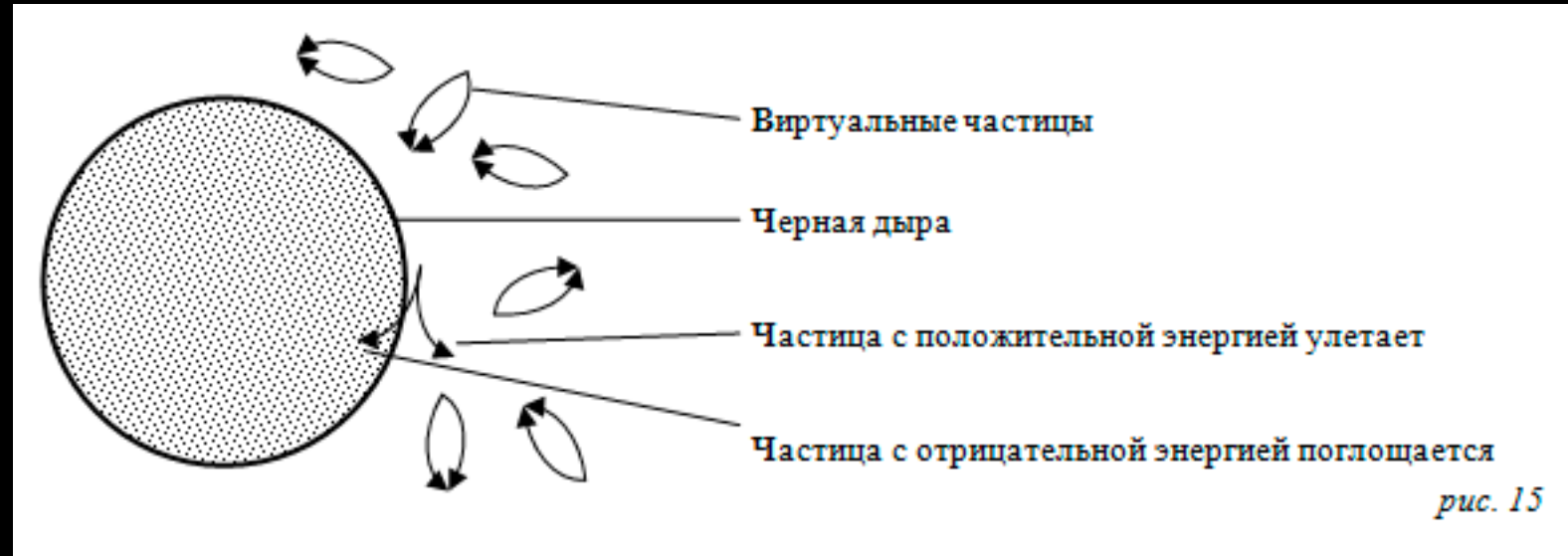
Процесс Блендфорда – Знаека.



Квазар



# Испарение черных дыр. (Хокинг, 1973)



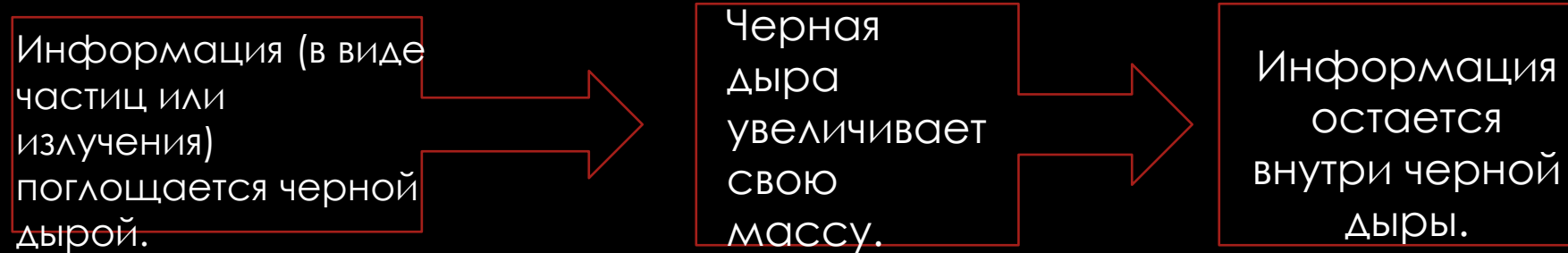
У горизонта событий рождается пара частица – античастица. Затем одна из них падает за горизонт, а другая улетает от черной дыры, унося ее энергию.

**Черные дыры могут взрываться!**

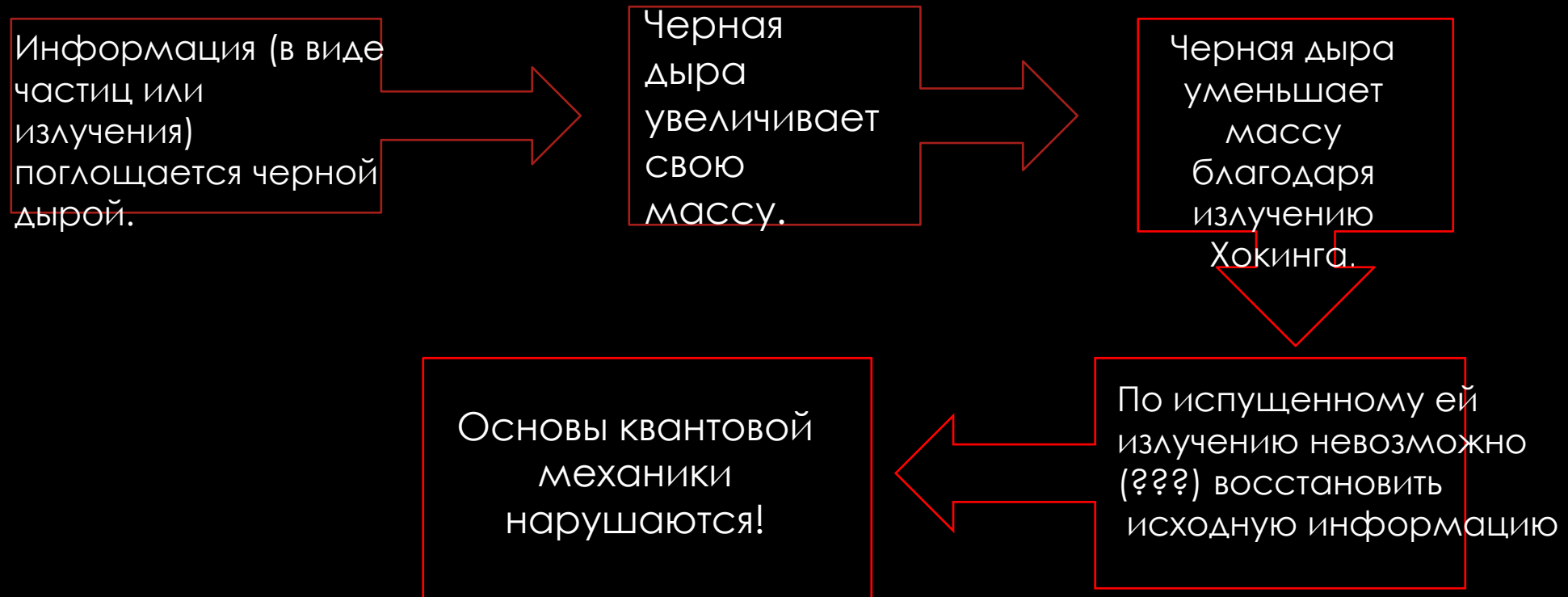
Адамс, Лафлин . «Пять возрастов вселенной: в глубинах физики вечности»  
Эпоха черных дыр :  $10^{40}$  –  $10^{100}$  лет.

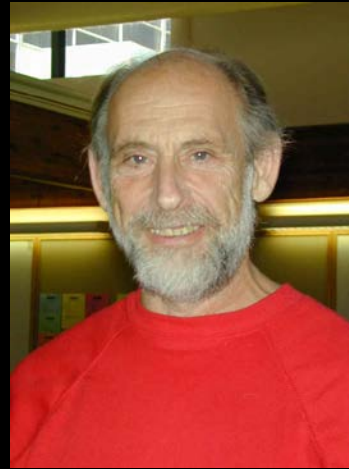
# Парадокс потери информации в черной дыре.

Классический случай:



Квантовый случай:





С.Хокинг , К.Торн (1983) :  
информация не  
сохраняется!

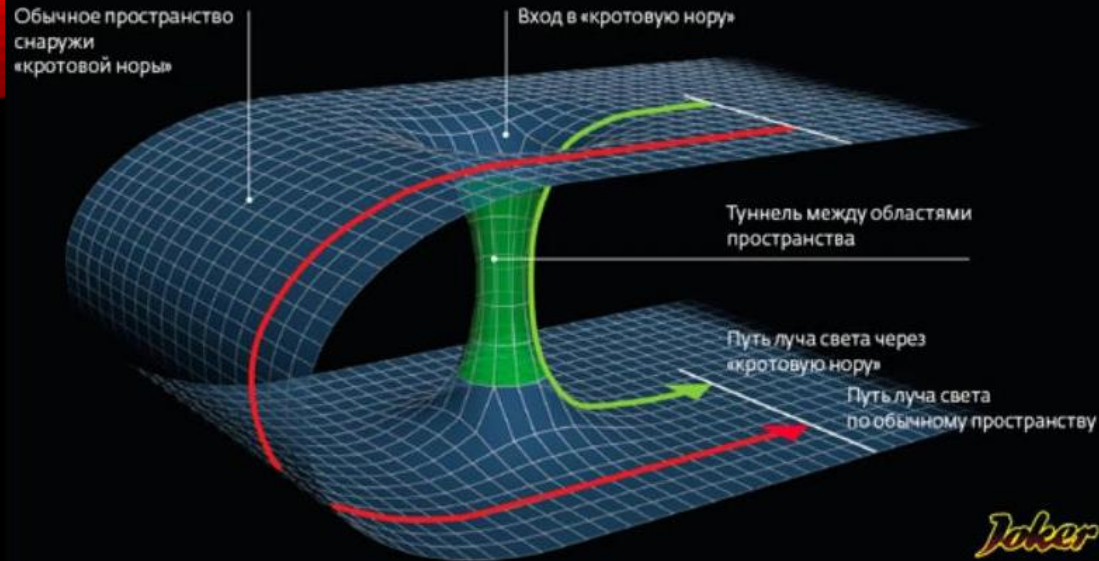
Л. Сасскинд,  
Д.Прескилл:  
информация  
сохраняется!

В 2004 году Хокинг признал свое поражение.

Возможный вариант решение – в нашей вселенной может образоваться только «кажущаяся» черная дыра, не содержащая сингулярность.

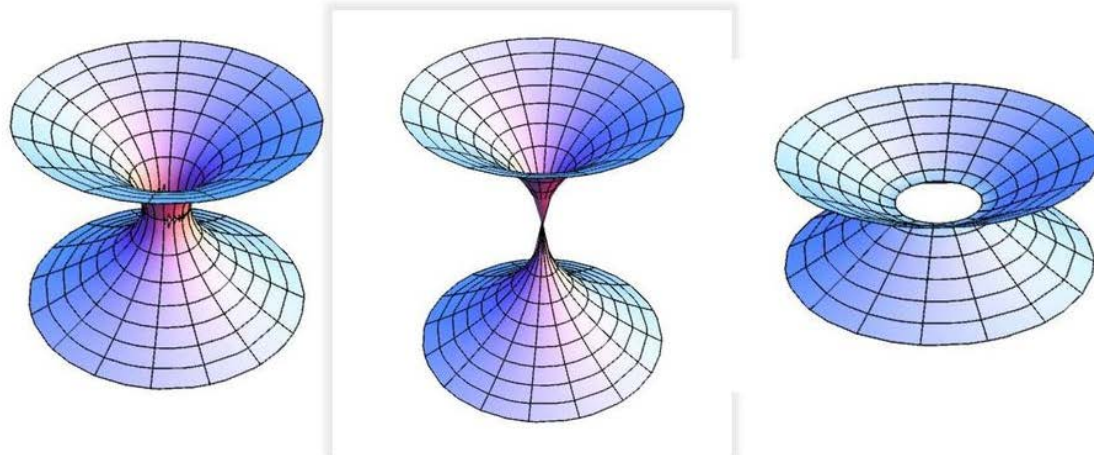
# Кротовые норы и белые дыры.

## Двумерная модель «кротовой норы»



Кротовая нора –  
туннель в  
пространстве-  
времени.

## Непроходимая «кротовая нора»



Для создания стабильной  
проходимой кротовой  
норы требуется вещество  
с отрицательным  
давлением. (Или  
квантовые поля?)

Белая дыра – антипод черной дыры.

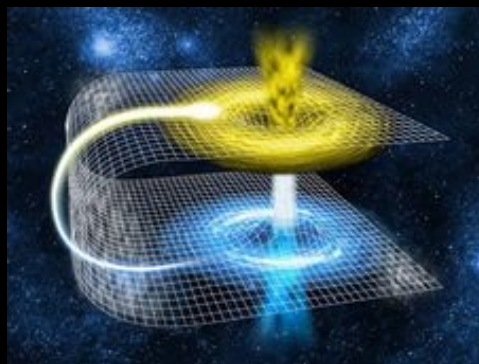


## Что же внутри черной дыры???

Точно узнать ответа этот вопрос мы можем, только попав  
внутри черной дыры...

Современные  
представления –  
сингулярность.

Возможно, черная дыра - портал в  
другие области Вселенной или даже  
в другие вселенные!!



Для того, чтобы это понять, нужно объединить  
ОТО и квантовую механику. Возможно, это  
сделает теория струн...



**Спасибо за внимание!**