

ФИЗИКА · КОСМОЛОГИЯ · 2026

Чёрные дыры и гравитация

От горизонта событий до первой фотографии:
что мы знаем о самых экстремальных объектах во Вселенной

8 слайдов · строгая презентация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Что такое чёрная дыра?

Область пространства-времени с настолько сильным гравитационным полем, что из неё не может выбраться даже свет. Предсказаны общей теорией относительности Эйнштейна, подтверждены наблюдениями.

КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРЫ

- Горизонт событий — граница, за которой информация не выходит наружу. Точка невозврата.
- Сингулярность — точка бесконечной плотности и кривизны пространства-времени в центре.
- Эргосфера — область вокруг вращающейся дыры, где пространство «увлекается» за ней.



Радиус Шварцшильда

Критический радиус, при котором масса становится чёрной дырой. Выведен Карлом Шварцшильдом в 1916 году — всего через год после публикации ОТО Эйнштейна.

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

G — гравитационная постоянная · M — масса объекта · c — скорость света

СОЛНЦЕ

≈ 2.95 км

Если сжать Солнце до размера
малого города — оно станет
чёрной дырой

ЗЕМЛЯ

≈ 8.87 мм

Размер горошины. Вся масса
планеты в объёме меньше
сантиметра

ЧЕЛОВЕК

≈ 10⁻²⁵ м

Планковский масштаб.
Недостижимо при современных
технологиях

Типы чёрных дыр

ЗВЁЗДНЫЕ

$3 - 100 M_{\odot}$

Образуются при гравитационном коллапсе массивных звёзд. В галактике Млечный Путь — десятки миллионов. Ближайшая известная — Cygnus X-1 на расстоянии ~6070 св. лет.

СВЕРХМАССИВНЫЕ

$10^5 - 10^{10} M_{\odot}$

В центре почти каждой галактики. M87* — 6.5 млрд масс Солнца. Sagittarius A* в центре Млечного Пути — 4 млн масс Солнца.

ПЕРВИЧНЫЕ

$\sim 10^{-8} - 10^2 M_{\odot}$

Гипотетические. Могли образоваться в первые секунды после Большого взрыва из флуктуаций плотности. Пока не обнаружены экспериментально.

Излучение Хокинга

В 1974 году Стивен Хокинг показал: чёрные дыры не совсем чёрные. Квантовые эффекты у горизонта событий приводят к медленному испарению.

МЕХАНИЗМ

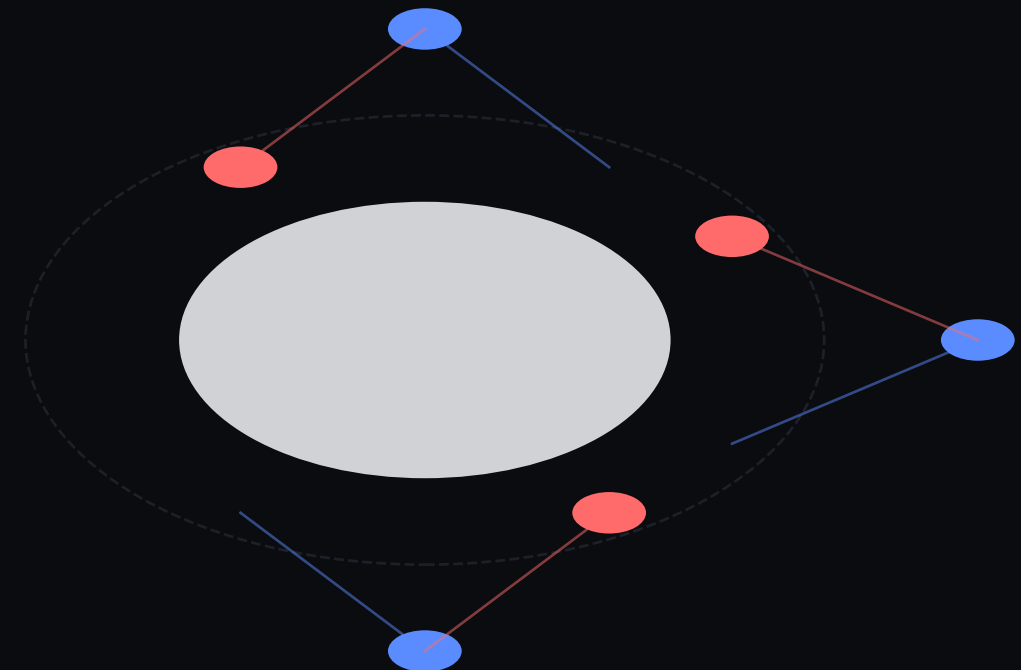
Вакуум у горизонта событий рождает пары частица-античастица. Одна улетает наружу, другая падает внутрь. Внешний наблюдатель видит поток частиц — излучение.

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}$$

Температура обратно пропорциональна массе. Больше дыра — холоднее.

ВРЕМЯ ИСПАРЕНИЯ

Для чёрной дыры массой Солнца — $\sim 10^{67}$ лет.
Для сверхмассивной — больше возраста Вселенной (~ 13.8 млрд лет).

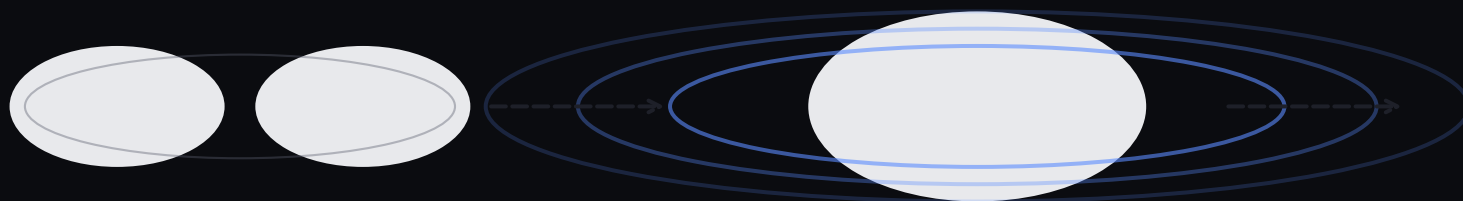


виртуальные пары частиц у горизонта

ОТКРЫТИЕ

Гравитационные волны

14 сентября 2015 года LIGO впервые напрямую обнаружил гравитационные волны — от слияния двух чёрных дыр в 1.3 млрд световых лет от Земли. Сигнал получил имя GW150914.



две чёрные дыры на орбите

слияние и испускание волн



гравитационная волна

РАССТОЯНИЕ

1.3 млрд

световых лет
до слияния

МАССЫ ДО

36 + 29

масс Солнца

ИТОГОВАЯ МАССА

62

масс Солнца

ЭНЕРГИЯ ВОЛНЫ

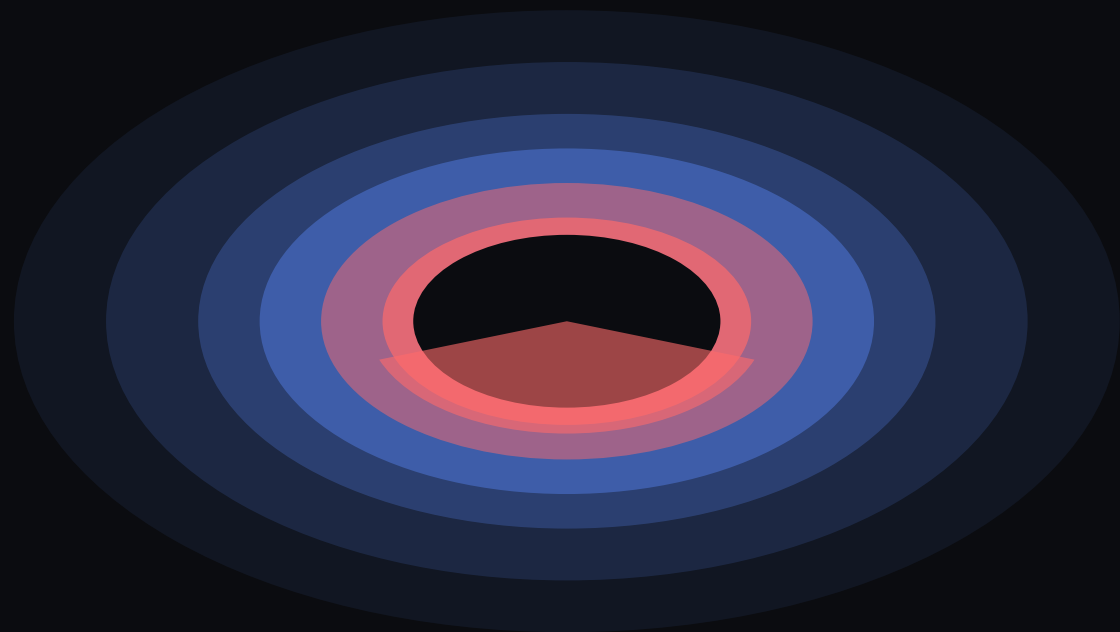
3

массы Солнца
эквивалент

ЭКСПЕРИМЕНТ

Первая фотография чёрной дыры

10 апреля 2019 года коллаборация Event Horizon Telescope опубликовала первое в истории изображение тени чёрной дыры — объекта M87* в центре галактики Мессье 87.



тень M87* · 55 млн световых лет

ТЕЛЕСКОПЫ

8 радиотелескопов по всей планете, синхронизированных атомными часами

ЭФФЕКТИВНЫЙ ДИАМЕТР

Равен диаметру Земли — благодаря интерферометрии очень длинной базы (VLBI)

ДЛИНА ВОЛНЫ

1.3 мм — короткие миллиметровые волны пробивают пылевой диск вокруг дыры

УГЛОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

20 микроарксекунд — хватит увидеть бублик на поверхности Луны с Земли

Что мы знаем и что ещё предстоит

ПОДТВЕРЖДЕНО

- Чёрные дыры существуют и наблюдаются
- Они излучают и медленно испаряются
- Слияния порождают гравитационные волны
- Их можно сфотографировать

ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ

- Информационный парадокс Хокинга
- Что внутри сингулярности?
- Существуют ли первичные дыры?
- Как объединить ОТО и квантовую механику?

*«Чёрные дыры — не столько объекты, сколько области
искривлённого пространства-времени»*

— Кип Торн, лауреат Нобелевской премии по физике 2017