# Теория относительности

Релятивистская механика

# Физика до теории относительности

- **Аристотель**: движение – переход вещества в форму. Поведение тел определяется соотношением их составе «земли» и «огня».
- **Галилей**: принцип относительности: *в инерциальных системах отсчета все механические явления проистекают одинаково*.

# Механика и теория тяготения Ньютона

- Первый закон – закон инерции.
- Второй закон – закон движения:

$$m\,\mathbf{a} = \mathbf{F}$$

- Третий закон – закон действия и противодействия
- Закон всемирного тяготения

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

# Теория электромагнитных явлений Максвелла

- Связь напряженности магнитного поля с движением электрических зарядов
- Поле статического электрического заряда
- Связь напряженности электрического поля с изменением магнитного поля
- Магнитных зарядов нет

# Концепция эфира

- Электромагнитные волны в эфире
- Скорость распространения электромагнитных волн постоянная величина, не зависящая от взаимной скорости приемника и получателя!

# «Световые часы»

## Световые часы и замедление их хода

2 зеркала, расположенных параллельно друг другу на расстоянии $l_0$ $\Rightarrow$ $\Delta t_0 = 2l_0/c$.

2 экз. световых часов с равными базами $l_0$. Один находится в ЛСО, наблюдатель видит их собств. период колебаний $\Delta t_0 = 2l_0/c$.

Второй движется со скор. u, наблюдатель из ЛСО обнаружит:

$$S = 2(l_0^2 + (u\,\Delta t/2)^2)^{1/2}$$

$\Delta t$ – период колебаний светового пакета в движущихся часах:

$$\Delta t = S/c = (2(l_0^2 + (u\,\Delta t/2)^2)^{1/2})/c = ((2l_0/c)^2 + (u/c)^2\,\Delta t^2)^{1/2} = (\Delta t_0^2 + \beta^2\Delta t^2)^{1/2}$$

$$\Delta t^2 = \Delta t_0^2 + \beta^2\Delta t^2 \;\rightarrow\; \Delta t_0^2 = (1 - \beta^2)\,\Delta t^2 \;\rightarrow$$

$\Delta t = \Delta t_0/(1 - \beta^2)^{1/2}$ - движущиеся часы замедляют ход (и ∀ другие, иначе нарушается принцип относительности)

Наблюдатель, движущийся вместе с часами, обнаружит замедление хода часов, оставшихся в ЛСО.

# Общая теория относительности

Релятивистская теория гравитации

# Основы общей теории относительности

- Законы физики должны быть составлены так, чтобы они были справедливы для произвольно движущихся координатных систем.

# Общий принцип относительности

Основные законы физики для двух наблюдателей, движущихся произвольным образом и использующих произвольные, непрерывно преобразуемые одна в другую системы координат, имеют одинаковый вид.

# Тайна тяготения

- Экранирование телами «ударов» гипотетических частиц или эфира
- Электродинамические модели
- Равенство инертной и гравитационной масс

$$F = m_i a \quad F = G\frac{m_g M}{r^2}$$

# Ускоренная система отсчета и гравитационное поле

**Принцип эквивалентности**:

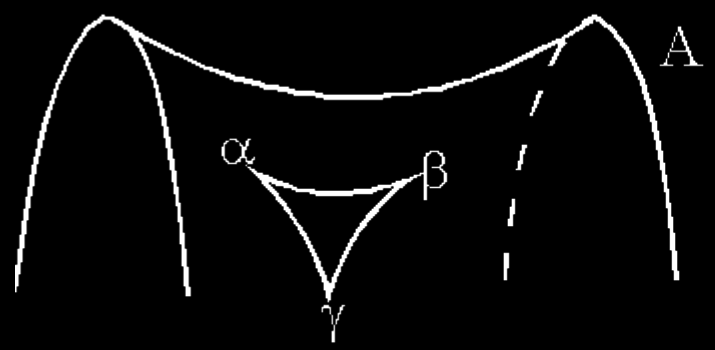
- Никакими экспериментами невозможно определить покоится ли тело в однородном гравитационном поле или движется ускоренно
- Никакими экспериментами невозможно определить движется ли тело прямолинейно и равномерно вдали от гравитирующих масс или свободно падает в однородном гравитационном поле

# Принцип Маха

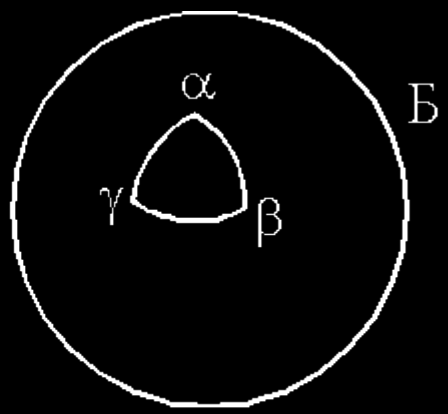
- Сила инерции возникает в результате гравитационного взаимодействия тела с веществом всей Вселенной.
- Абсолютно ли вращение? Будем ли мы ощущать вращение в абсолютно пустой Вселенной?

# Неевклидовы геометрии

- Геометрия Римана
- Геометрия Лобачевского




$\alpha+\beta+\gamma < 180^\circ$




$\alpha+\beta+\gamma > 180^\circ$

- Парадокс Эренфеста (о длине окружности вращающегося диска)

# Уравнение Эйнштейна

$$R_{ij} - \frac{1}{2} R g_{ij} = \chi T_{ij}$$

- $R_{ij}$ – тензор Риччи, его компоненты выражаются через первые и вторые производные от компонент тензора $g_{ij}$
- $g_{ij}$ – метрический тензор
- $T_{ij}$ – тензор энергии-импульса материи, создающей искривленность пространства-времени.

# Гравитационное замедление времени и гравитационное красное смещение

$$d\tau = \frac{1}{c}\sqrt{g_{00}}\,dx^0 \qquad g_{00} = 1 + \frac{2\varphi}{c^2} = 1 - \frac{2Gm}{c^2 R}$$

Часы в гравитационном поле идут медленнее для удаленного наблюдателя

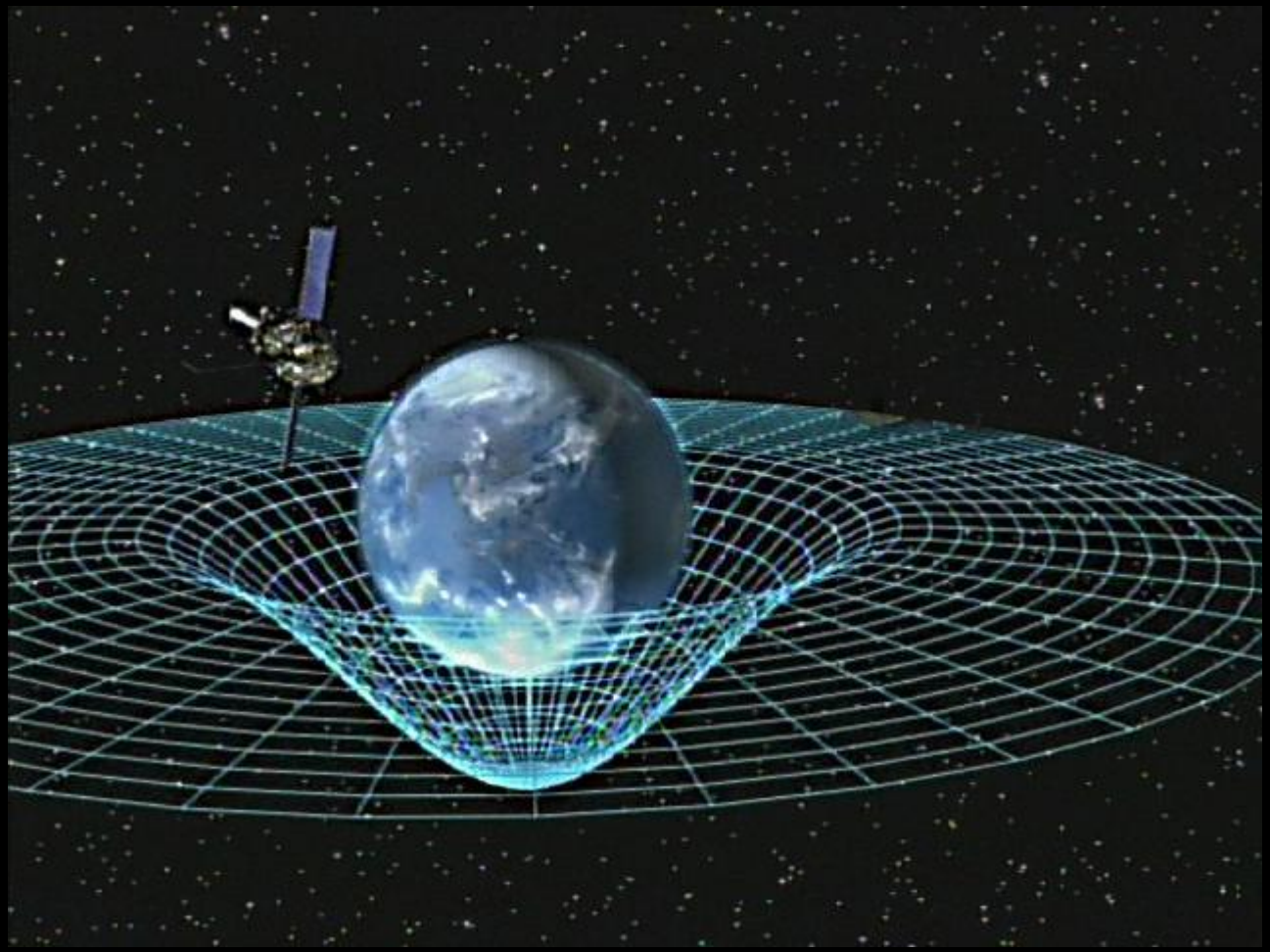
$$\nu = \nu_0\left(1 - \frac{\varphi}{c^2}\right), \qquad \Delta\nu = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2}\nu$$

Частота света возрастает с увеличением $|\phi|$, т.е. возрастает при приближении к создающим поле телам; наоборот, при удалении луча от этих тел частота света уменьшается.

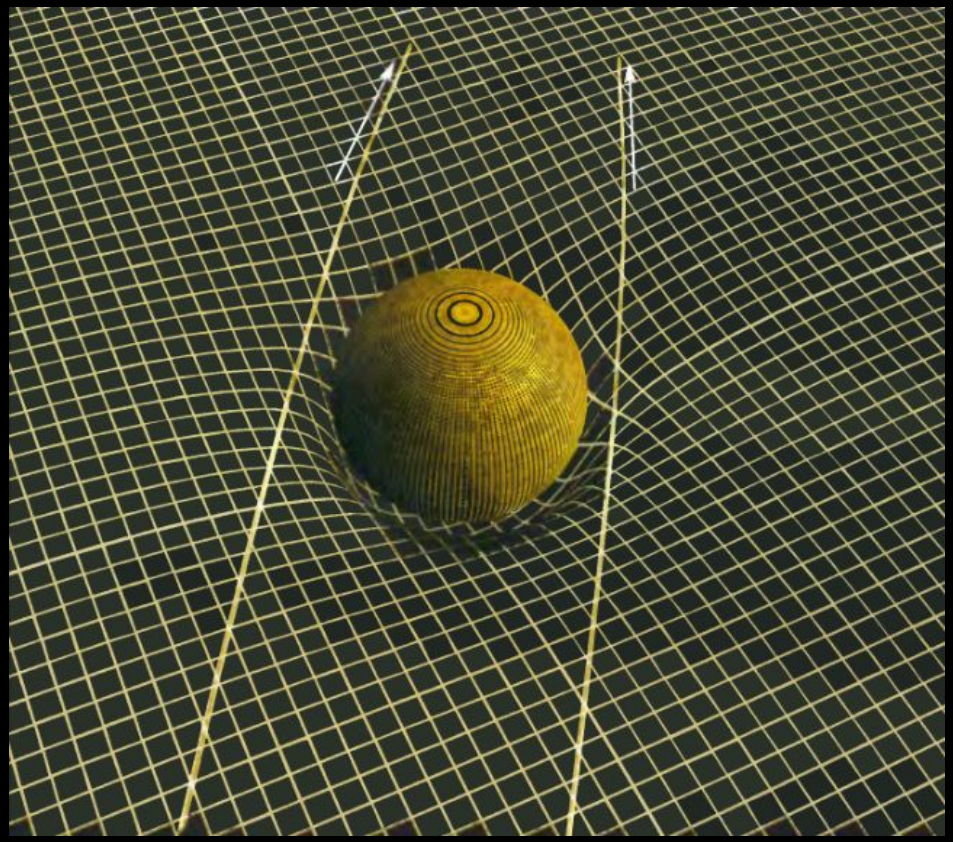
# Наблюдаемые и координатнозависимые величины

- Направления (углы)
- Промежутки времени (частоты)

# Искривление метрики пространства-времени



# Геодезические линии
## Принцип наименьшего действия



$$S = -mc\int_a^b ds = \min$$

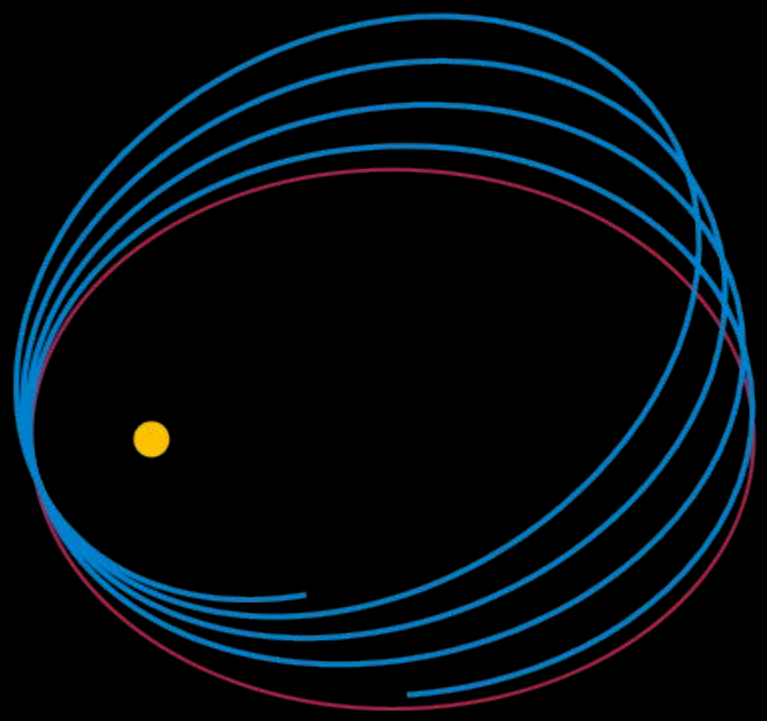
$$\delta S = -mc\,\delta\int_a^b ds = 0$$

$$\frac{du^i}{ds} = 0$$

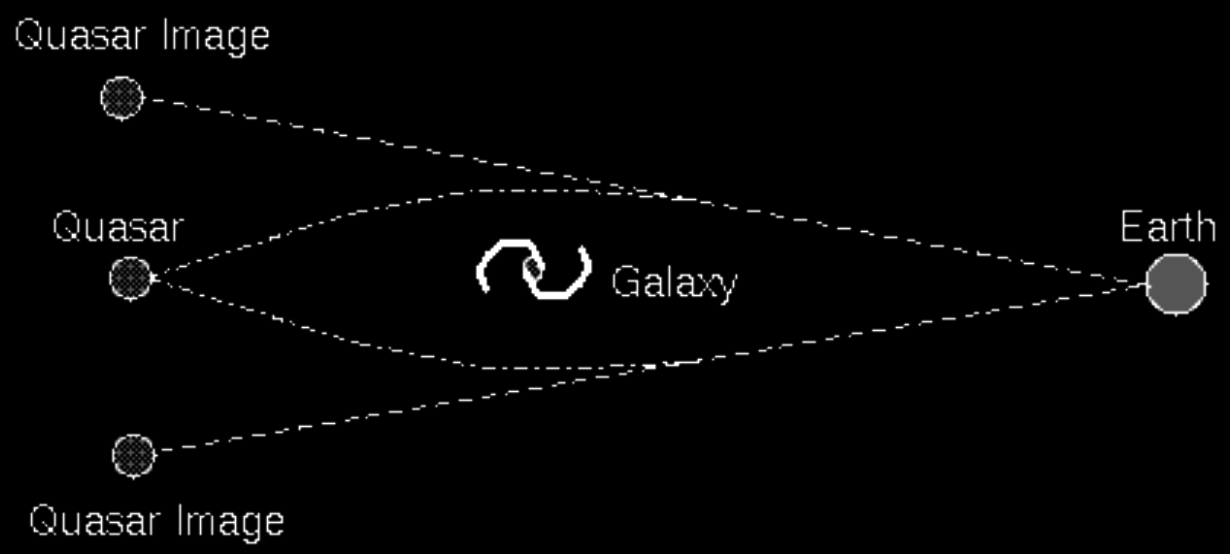
Принцип наименьшего действия был сначала сформулирован Мопертюи в 1746 году и далее развивался (после 1748 года) математиками Эйлером, Лагранжем и Гамильтоном.

Совершенство Вселенной требует определенной экономии в природе и противоречит любым бесполезным расходам энергии. **Естественное движение должно быть таким, чтобы сделать некоторую величину минимальной**. Нужно было только найти эту величину, что он и продолжал делать. Она являлась произведением продолжительности (время) движения в пределах системы на удвоенную величину, которую мы теперь называем кинетической энергией системы.

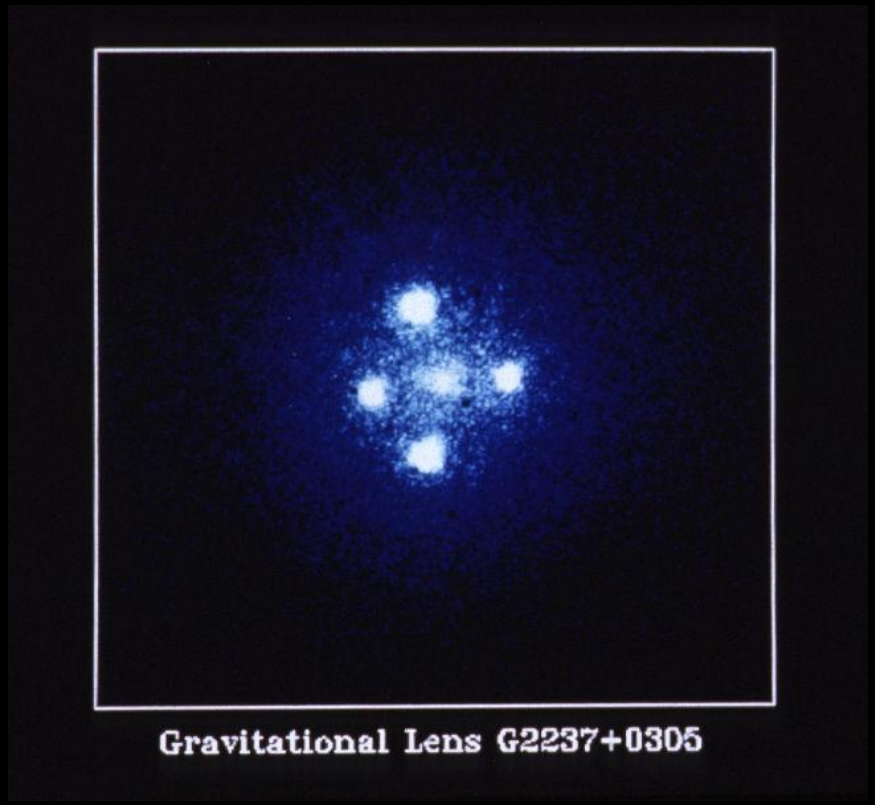
# Орбиты планет в ОТО незамкнуты



# Гравитационные линзы



# Гравитационные линзы



# Черные дыры

Под черной дырой понимается область пространства-времени, для которой вторая космическая скорость равна скорости света *c* = 300 000 км/с

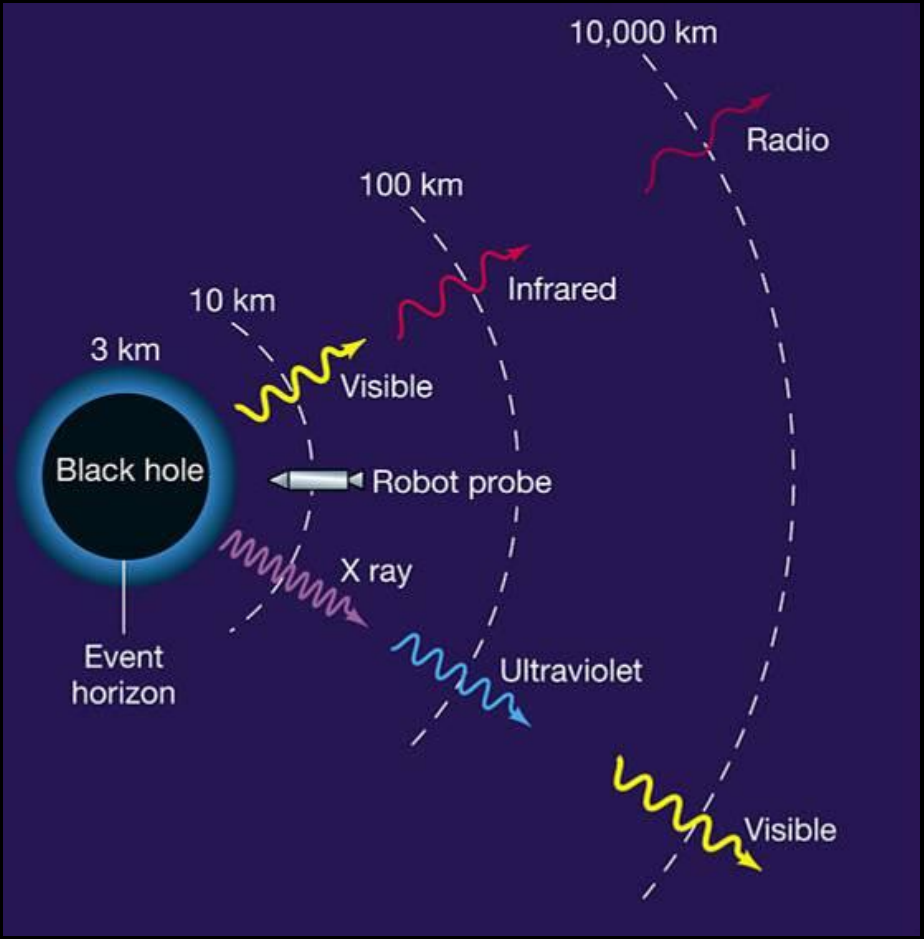
В 1783 году существование черных дыр предсказал английский астроном-любитель, священник и геолог Джон Митчел

# Гравитационный радиус

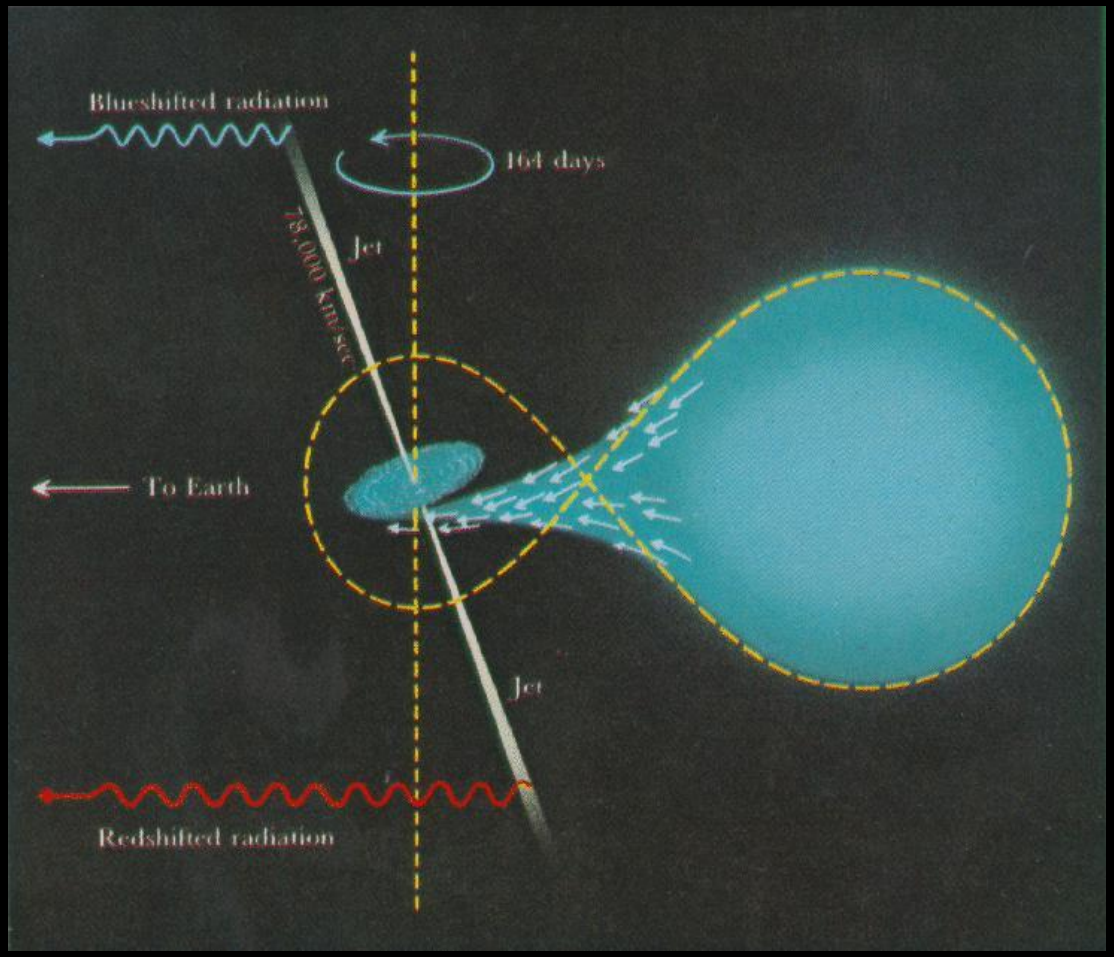
$$r_g = 2\frac{GM}{c^2}$$

- Для Земли – 9 мм
- Для Солнца – 3 км

# Гравитационное красное смещение вблизи черной дыры

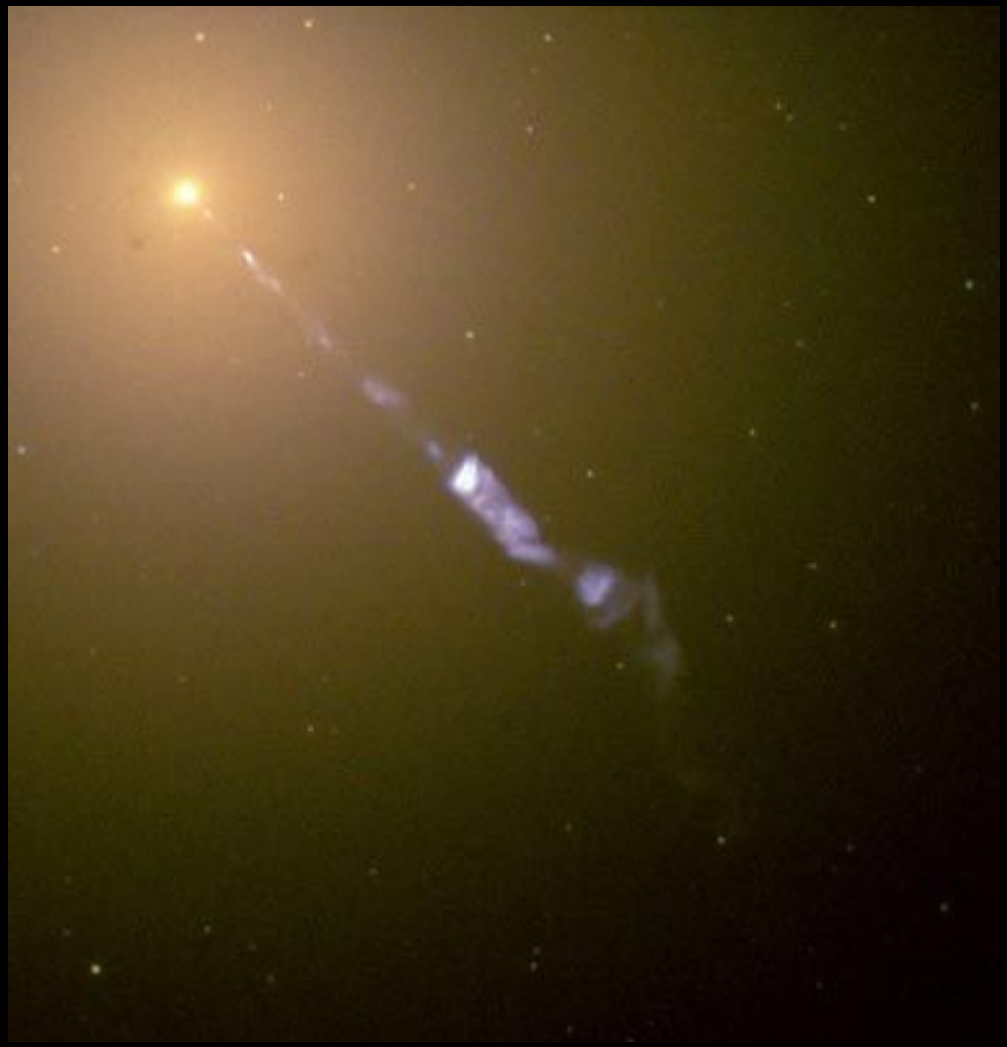


# Обнаружение черных дыр



# Линзирование

# Выброс (jet) из ядра M87



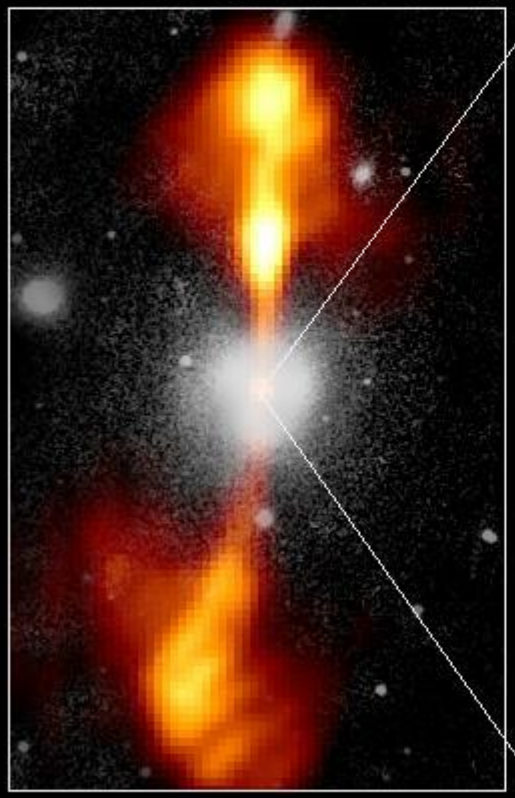
Выброс из ядра галактики имеет длину 7500 световых лет!

# Core of Galaxy NGC 4261

## Hubble Space Telescope

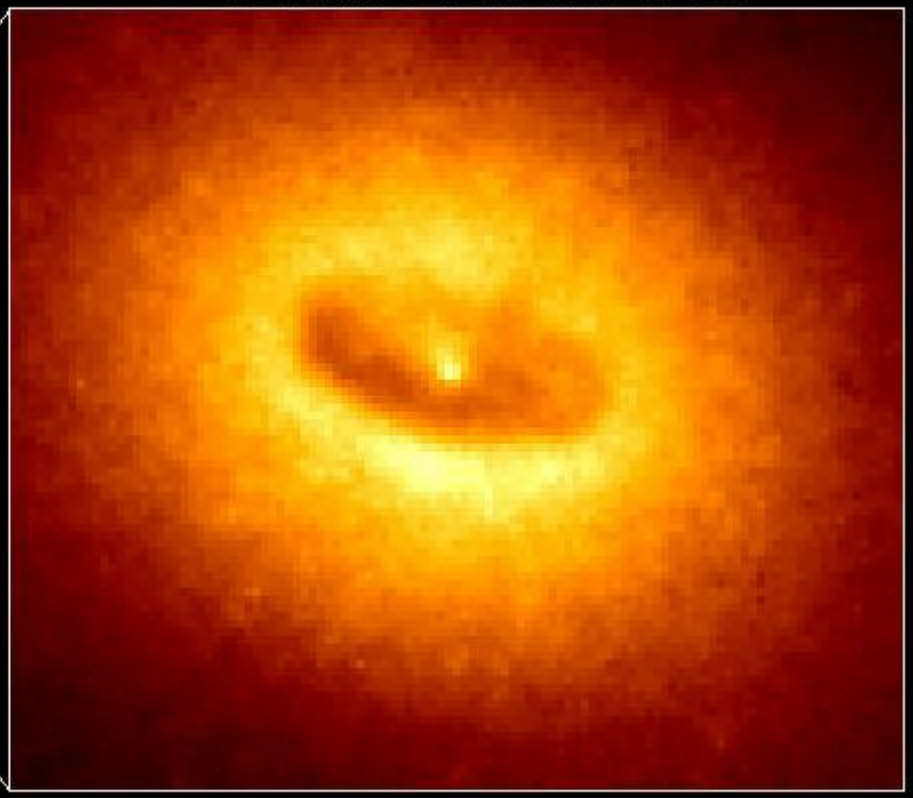
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



1.7 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS

# Термодинамика черных дыр

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

Температура черной дыры

$$S = \frac{A k c^3}{4\hbar G}$$

Энтропия черной дыры
*A* – площадь горизонта событий

$$t = \frac{5120\pi G^2 M^3}{\hbar c^4}$$

Время жизни черной дыры

*1000 т испаряется за 84 секунды*

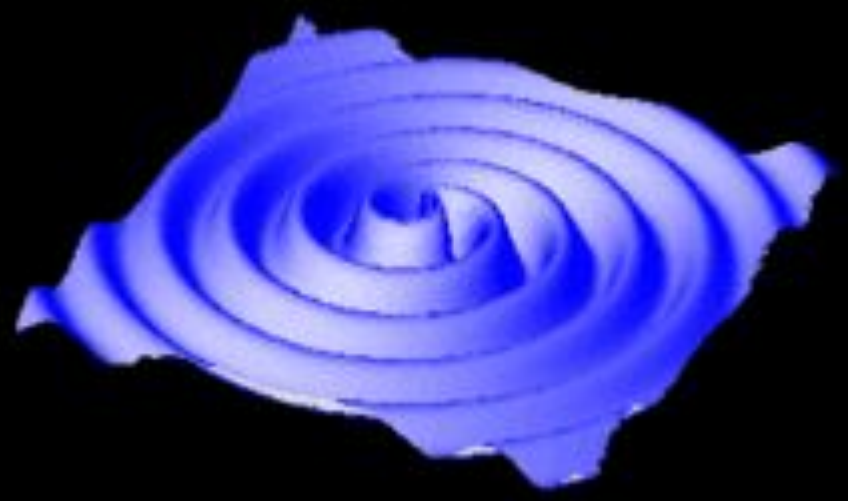
# Падение в черную дыру

# Гравитационные волны

Гравитационную волну излучает любая движущаяся ускоренно материя. Для возникновения волны существенной амплитуды необходимы чрезвычайно большая масса излучателя или/и огромные ускорения, амплитуда гравитационной волны прямо пропорциональна ускорению и массе генератора, то есть ~ma. Два объекта излучают гравитационные волны только в паре, причём в результате интерференции они существенно взаимно гасятся.

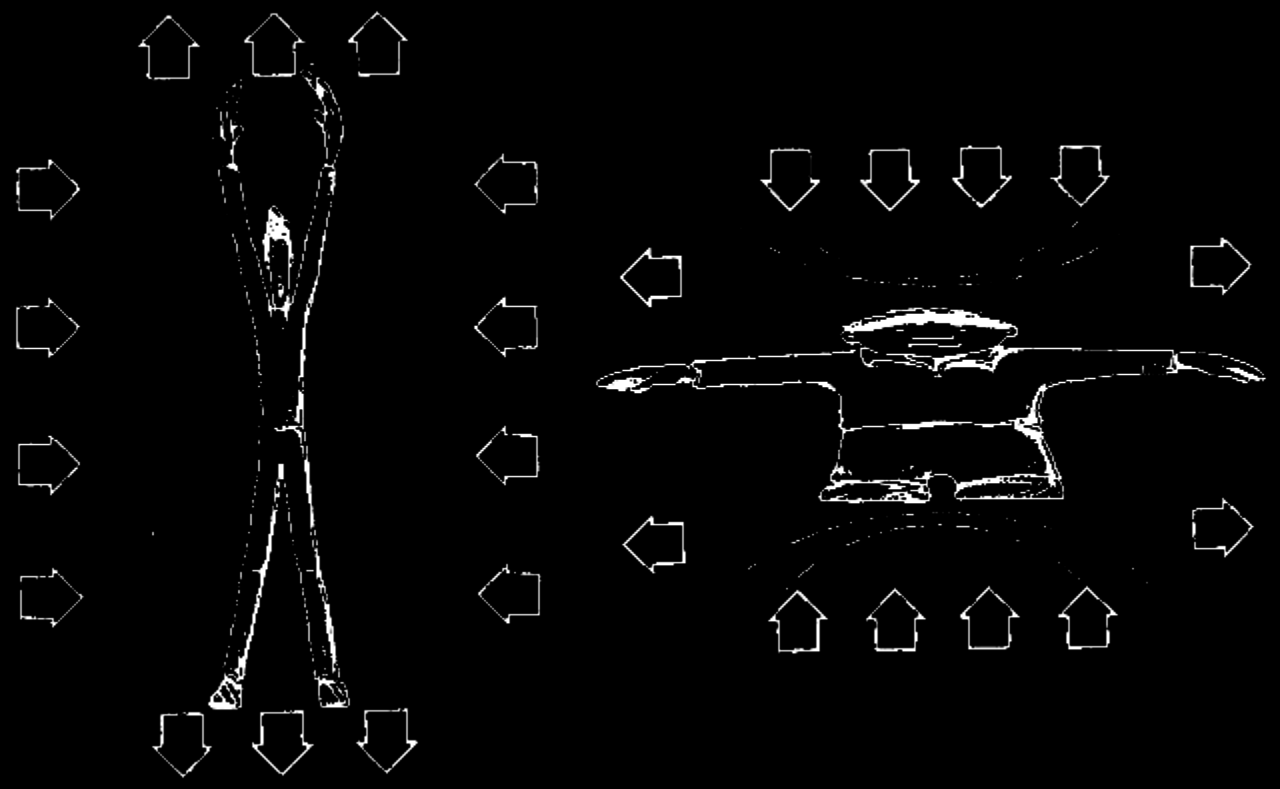
Для Солнечной системы, например, наибольшее гравитационное излучение производит подсистема Солнца и Юпитера. Мощность этого излучения — примерно 5 киловатт!

# Гравитационные волны

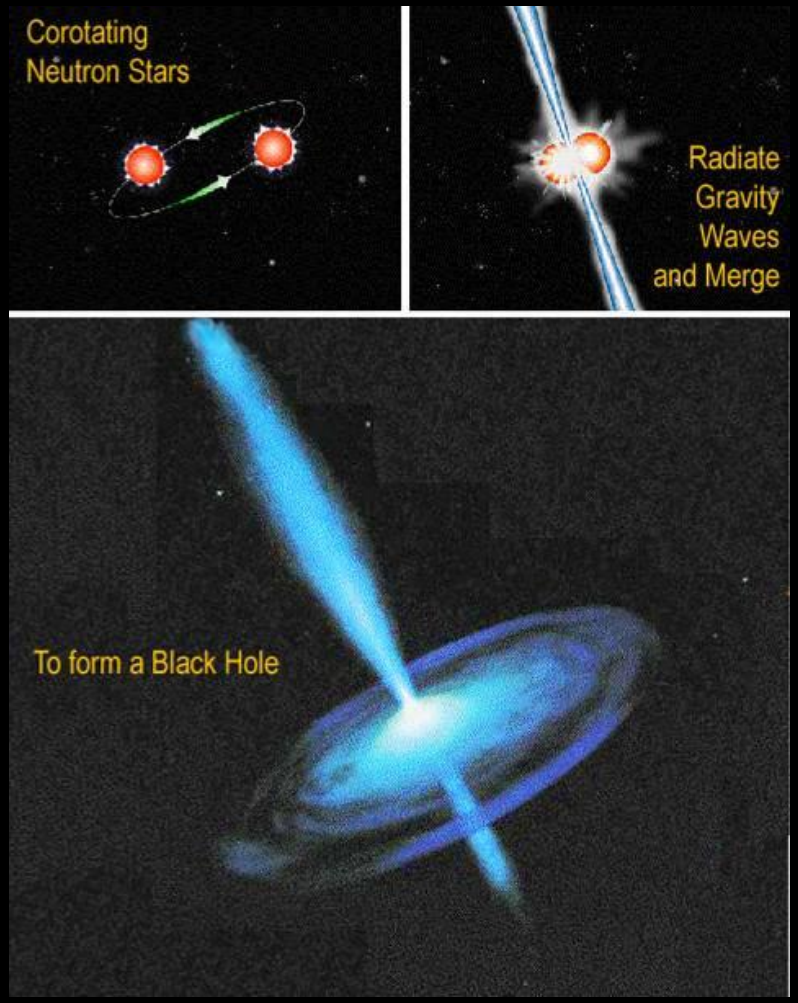


$$-\frac{dE}{dt} \propto \frac{G}{c^5}, \quad \dot{r} = -\frac{64G^3 m_1 m_2 \left(m_1 + m_2\right)}{5c^5 r^3}$$

# Гравитационные волны



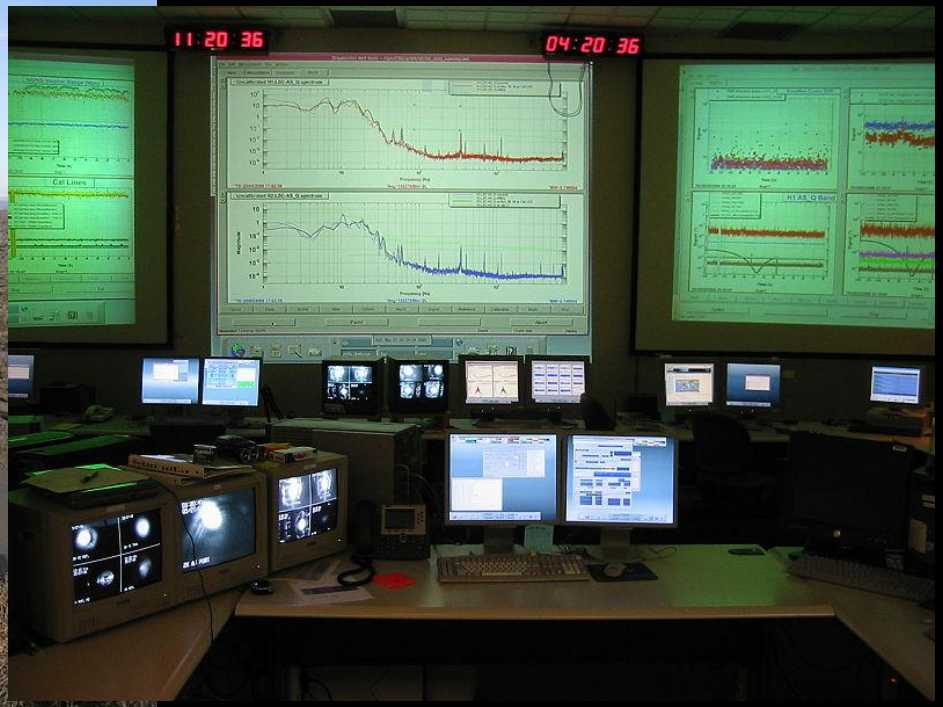
# Гравитационные волны



# Проект LIGO

LIGO (англ. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) — лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория.

LIGO состоит из двух обсерваторий, удалённых друг от друга на 3002 километра. Поскольку скорость распространения гравитационных волн, как ожидают, равна скорости света, это расстояние даёт разницу в 10 миллисекунд, которая позволит определить направление на источник зарегистрированного сигнала.



# Проект LISA

LISA — это совместный эксперимент НАСА и Европейского космического агентства по исследованию гравитационных волн. Его название расшифровывается как Laser Interferometer Space Antenna (Космическая антенна, использующая принцип лазерного интерферометра). В настоящее время эксперимент находится в стадии проектирования, предполагаемое время запуска — 2020 год. Расчётная продолжительность эксперимента — 5 лет, с возможностью продления до 10 лет.

# Скорость распространения гравитации

- В теории гравитации Ньютона скорость гравитации не входит ни в одну формулу, считаясь бесконечно большой.
- В общей теории относительности потенциалами гравитационного поля выступают компоненты метрического тензора, так что гравитационное поле отождествляется в сущности с метрическим полем.
- Во многих альтернативных теориях гравитации скорость её распространения может существенно отличаться от скорости света, так что непосредственное измерение скорости гравитации представляет собой тест на работоспособность этих теорий.

# Космология

- Решение Фридмана
- Большой взрыв
- Нестационарная Вселенная

$$R_{ij} - \frac{1}{2} R g_{ij} = \frac{8\pi k}{c^4} T_{ij} + \Lambda g_{ik}$$

# Эффекты ОТО

- Гравитационное замедление времени
- Поправки к классическим теориям движения тел в гравитационном поле
- Гравитационное красное смещение
- Гравитационные волны
- Чёрные дыры
- Космология

# Экспериментальные подтверждения ОТО

- Движение перигелия Меркурия
- Искривления путей световых лучей
- Смещение частот спектральных линий
- Задержка радиолокационных сигналов

# Проблемы в ОТО

- Выполнение закона сохранения энергии и импульса
- Наличие сингулярностей
- Квантовая гравитация (на масштабах $10^{-33}$ см)
- Большее число измерений (5, 6, 10)