

# 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 протекают 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

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

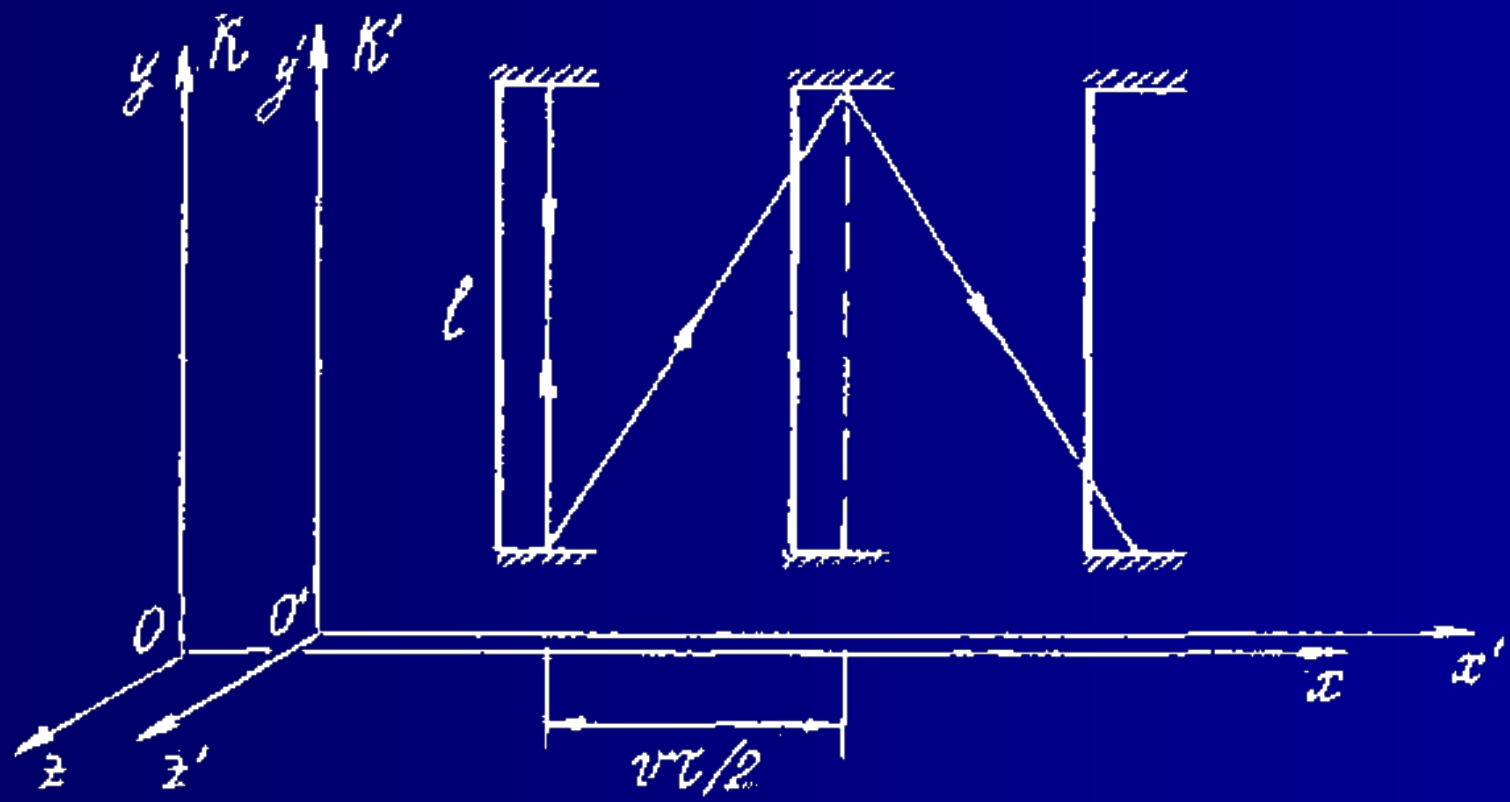
# Теория электромагнитных явлений Максвелла

- 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»



# 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.

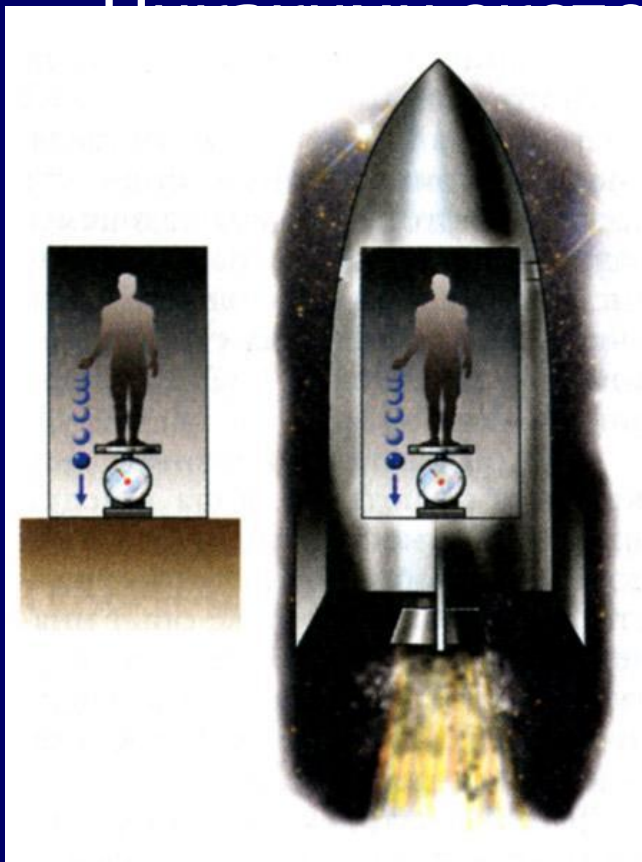
# Тайна тяготения

- 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:



Эквивалентности: эксперимент не может отличить лифт, движущийся равномерно и прямолинейно, от лифта, движущегося с ускорением. Эквивалентности: эксперимент не может отличить лифт, движущийся с ускорением, от лифта, движущегося равномерно и прямолинейно. Эквивалентности: эксперимент не может отличить лифт, движущийся с ускорением, от лифта, движущегося с ускорением.



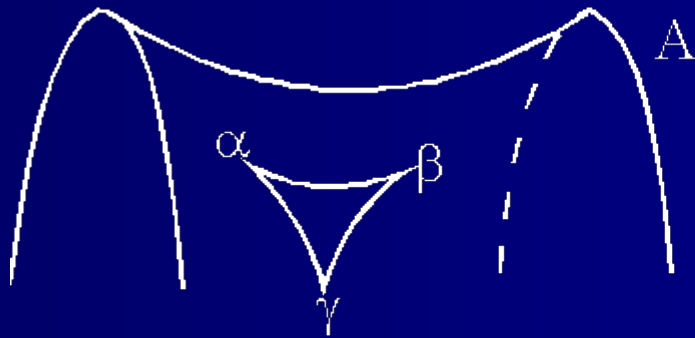
ет

# Принцип Маха

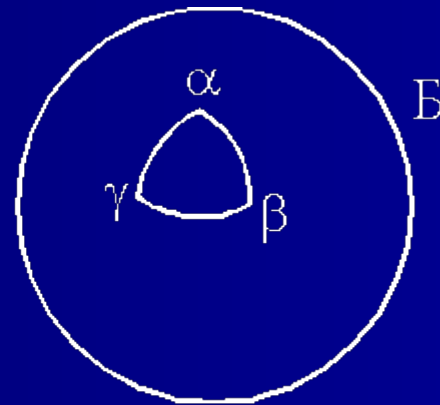
- Сила инерции возникает в результате гравитационного взаимодействия тела с веществом всей Вселенной.
- Абсолютно ли вращение? Будем ли мы ощущать вращение в абсолютно пустой Вселенной?

# 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

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

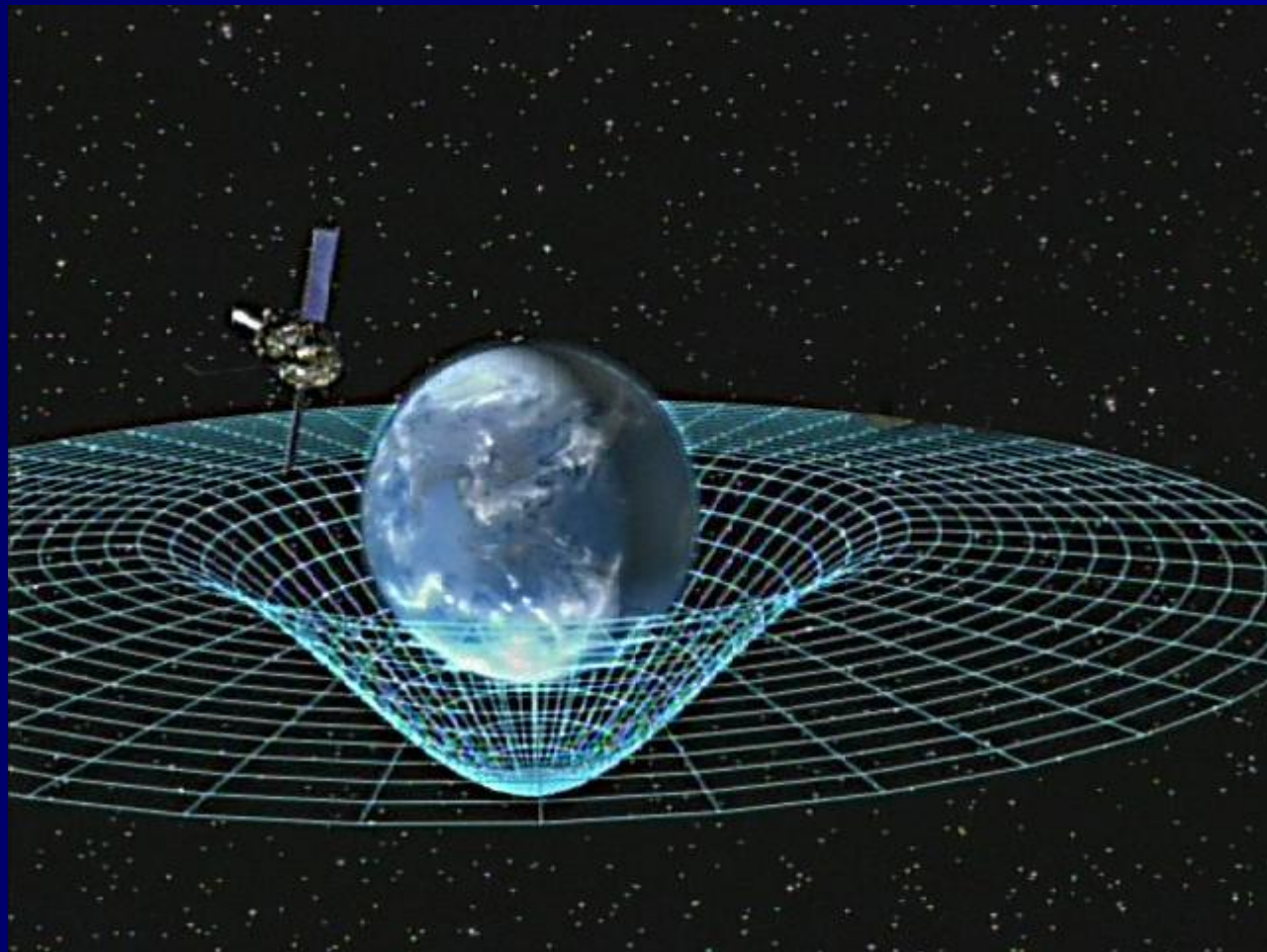
Частота света возрастает с увеличением  $|\varphi|$ , т.е. возрастает при приближении к создающим поле телам; наоборот, при удалении луча от этих тел частота света уменьшается.

# Наблюдаемые и координатнозависимые величины

- Направления (углы)
- Промежутки времени (частоты)

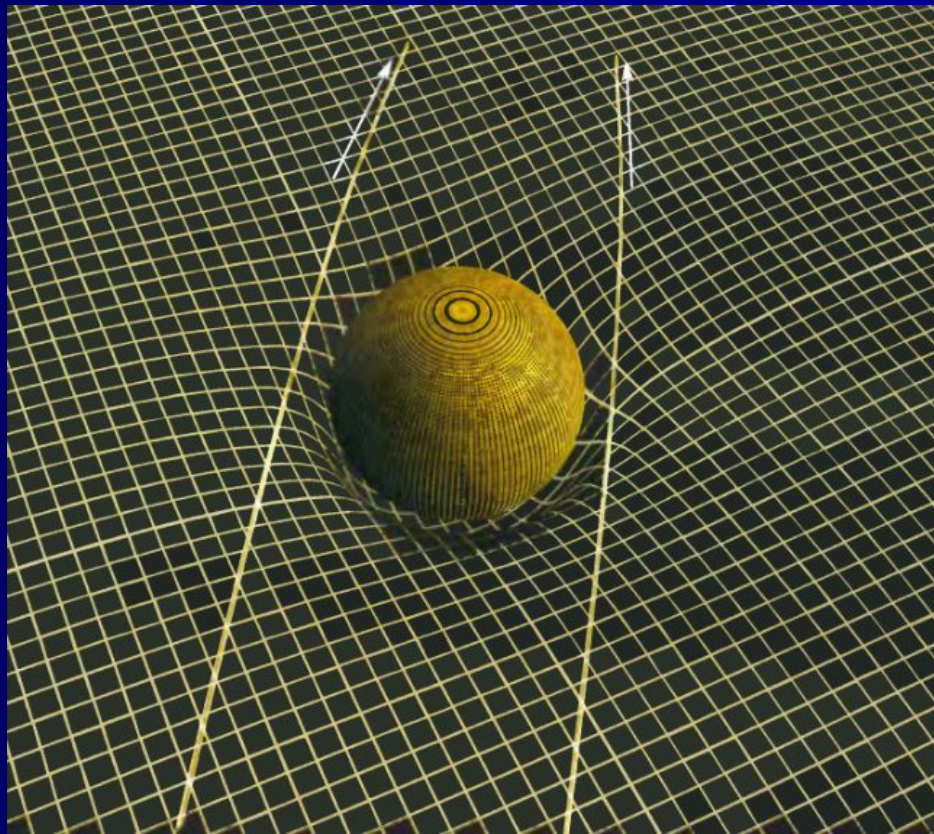


# Искривление метрики пространства-времени



# Геодезические линии

## Принцип наименьшего действия



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

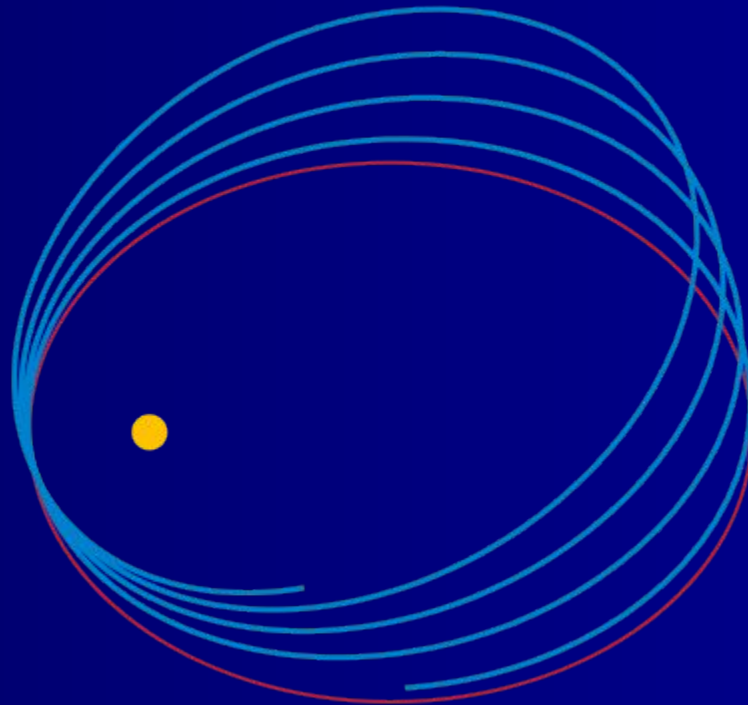
$$\delta S = -mc \delta \int_a^b ds = 0$$

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

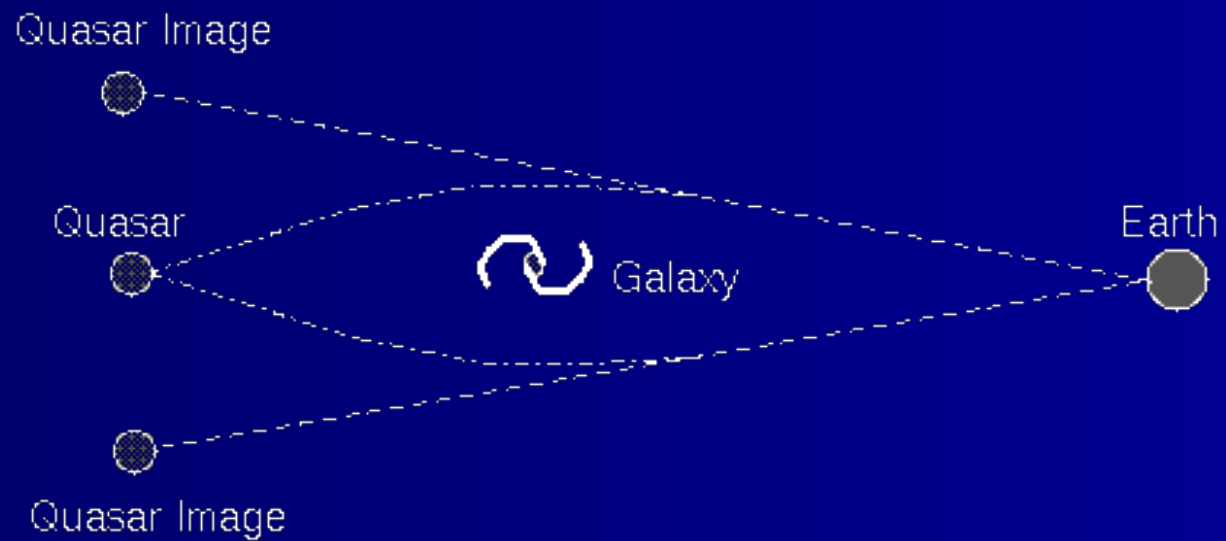
Принцип наименьшего действия был сначала сформулирован Мопертюи в 1746 году и далее развивался (после 1748 года) математиками Эйлером, Лагранжем и Гамильтоном.

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.

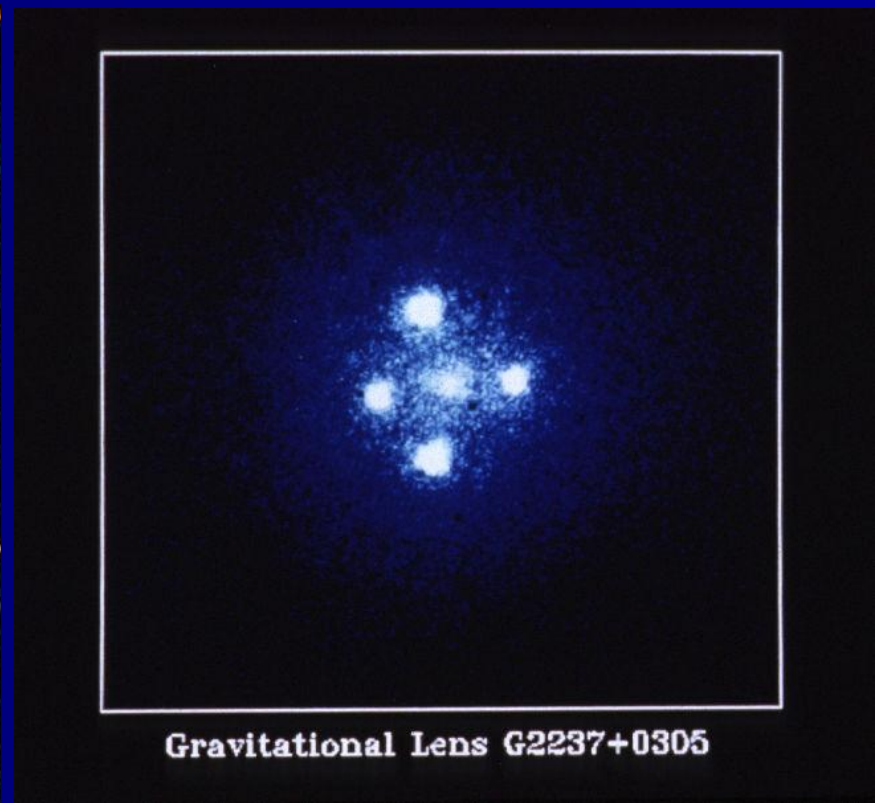
# Орбиты планет в ОТО незамкнуты



# 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

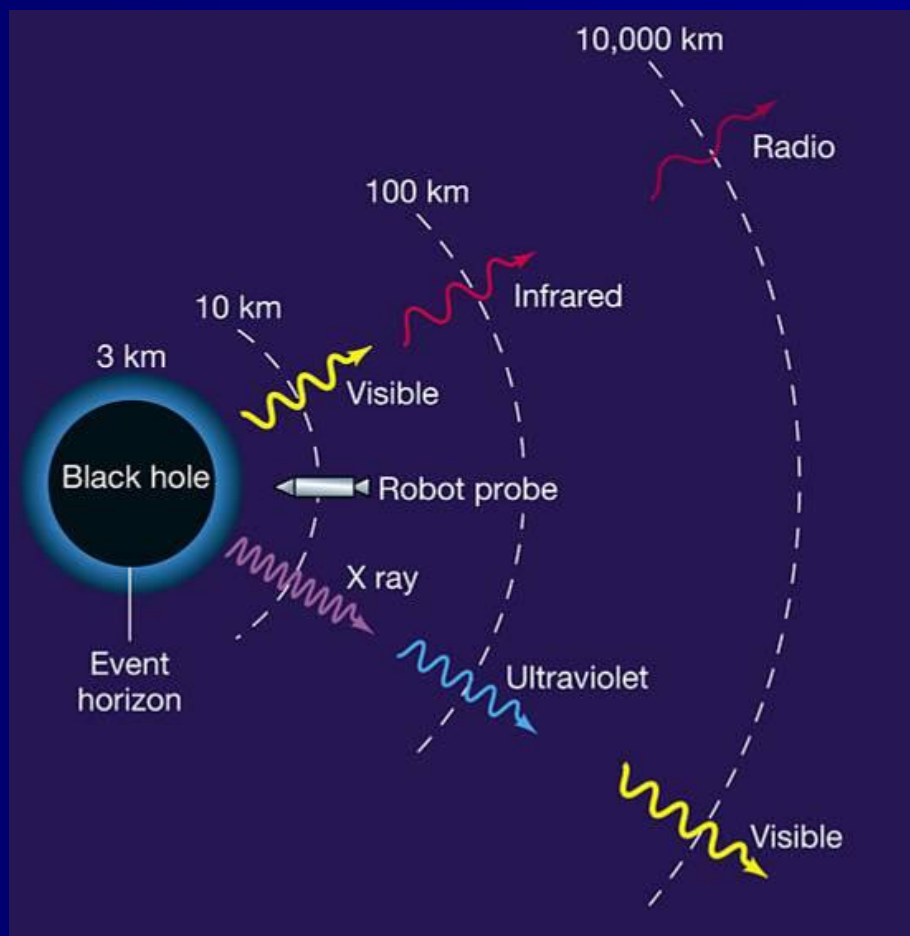
В 1783 году существование черных дыр предсказал английский астроном-любитель, священник и геолог Джон Митчел

# Гравитационный радиус

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

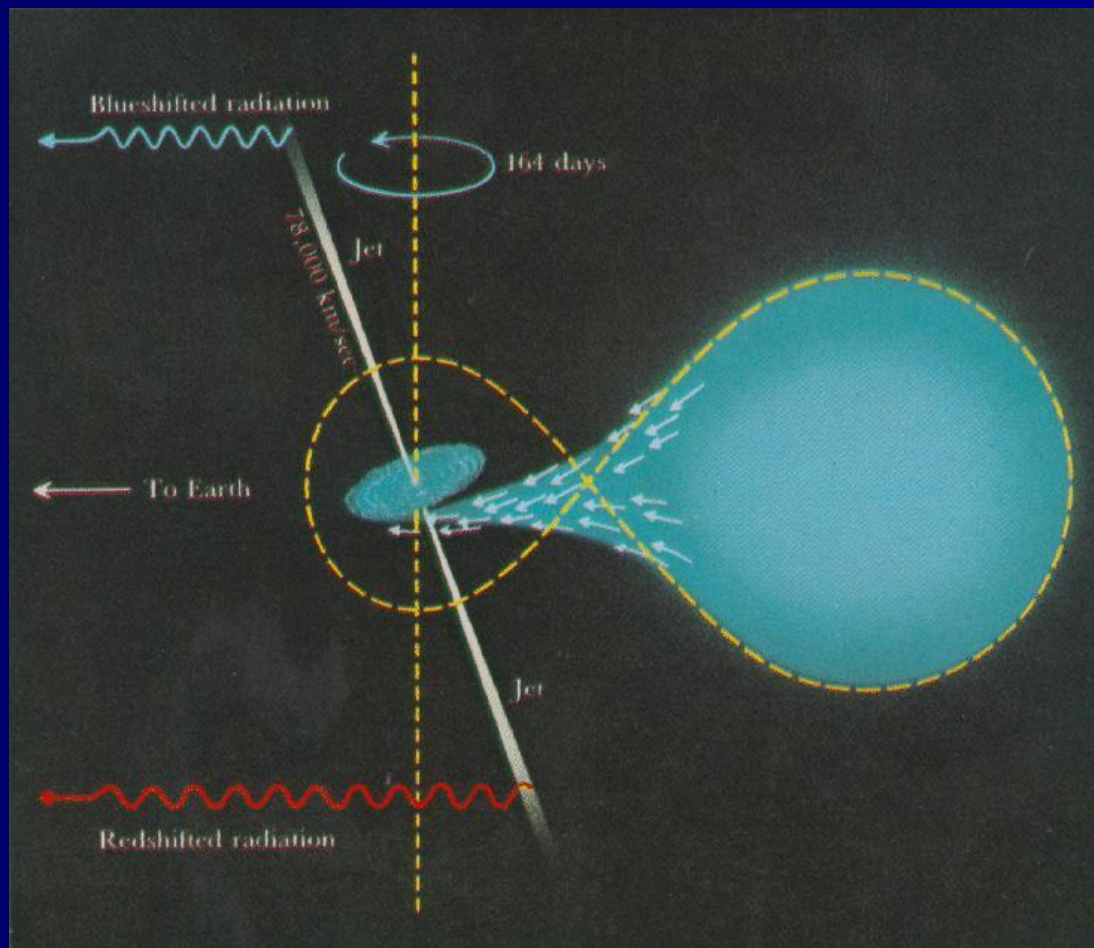
- Для Земли – 9 мм
- Для Солнца – 3 км

# Гравитационное красное смещение вблизи черной дыры





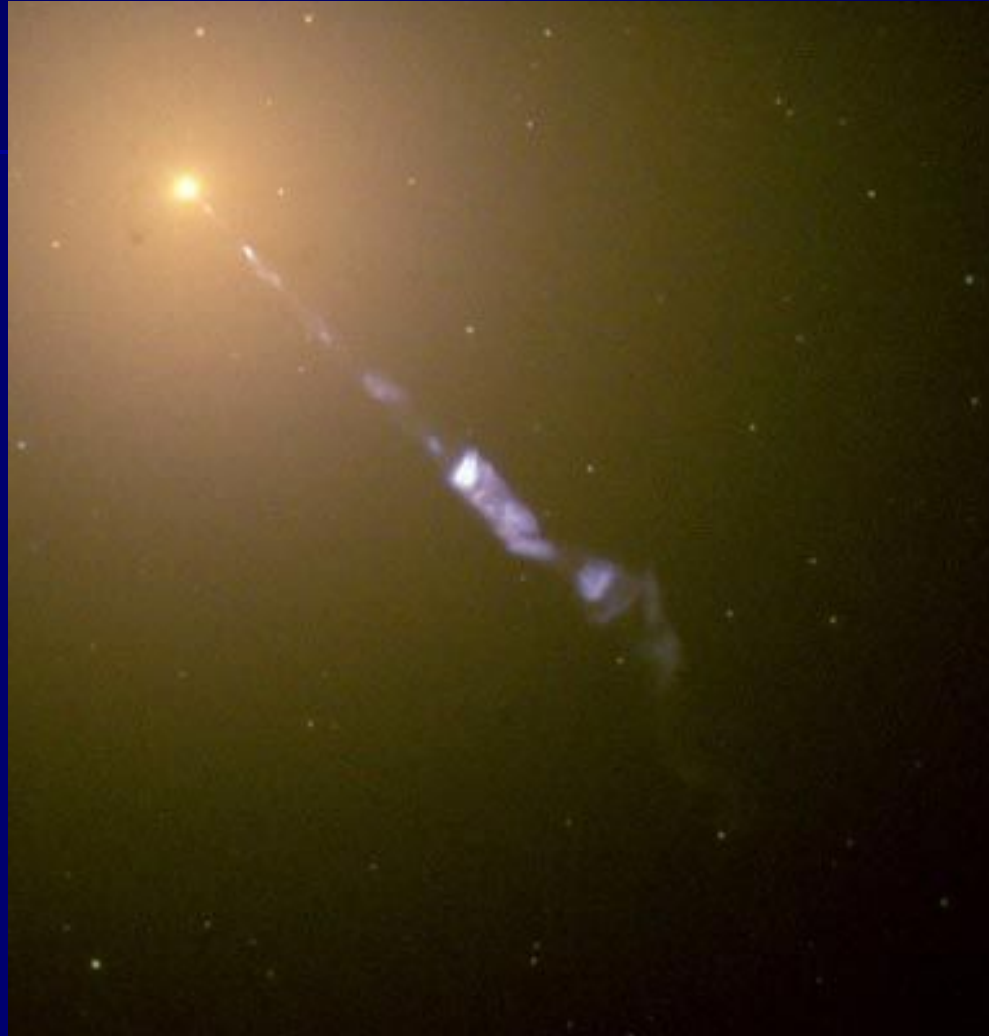
# Обнаружение черных дыр



# Линзирование



# Выброс (jet) из ядра M87



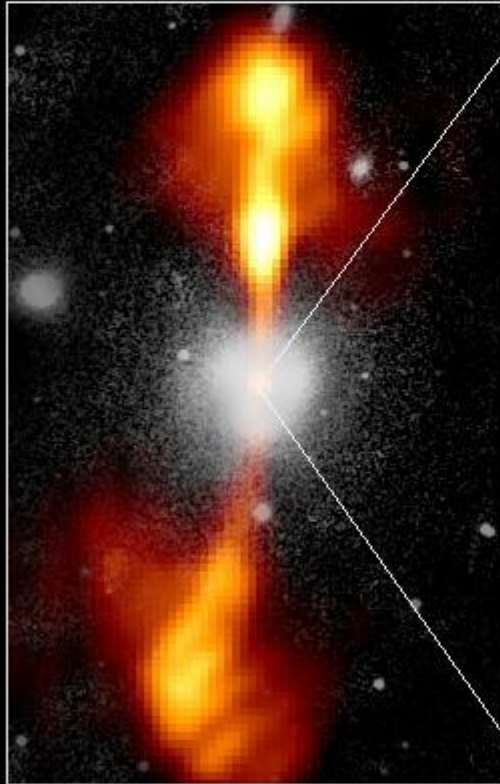
Выброс из ядра галактики имеет длину 7500 световых лет!

# Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

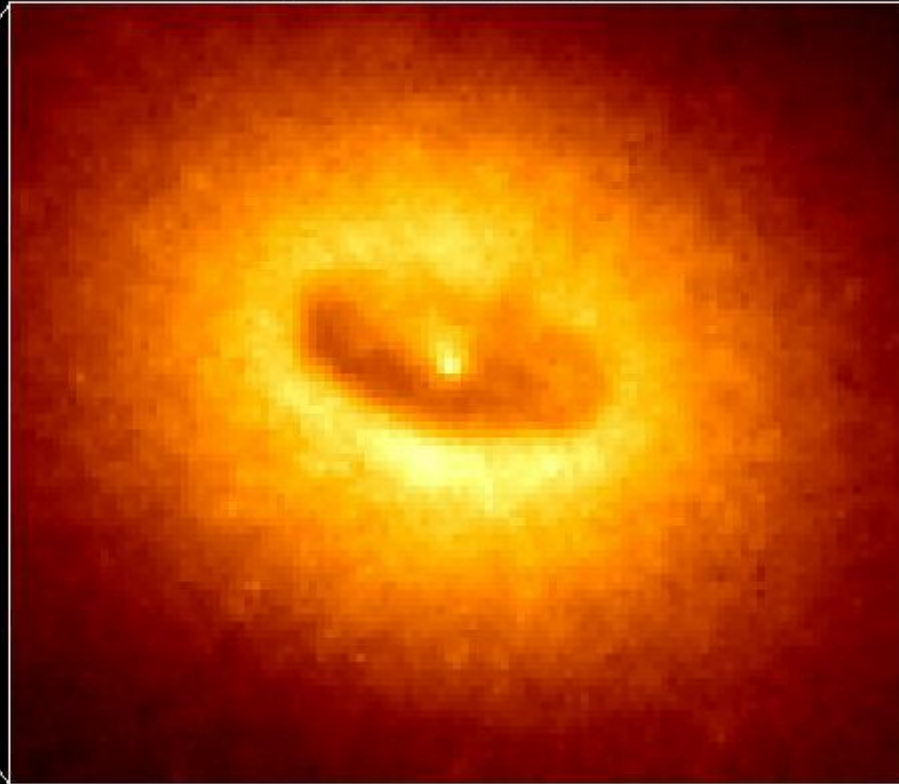
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS

# Термодинамика черных дыр

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}$$

Температура черной дыры

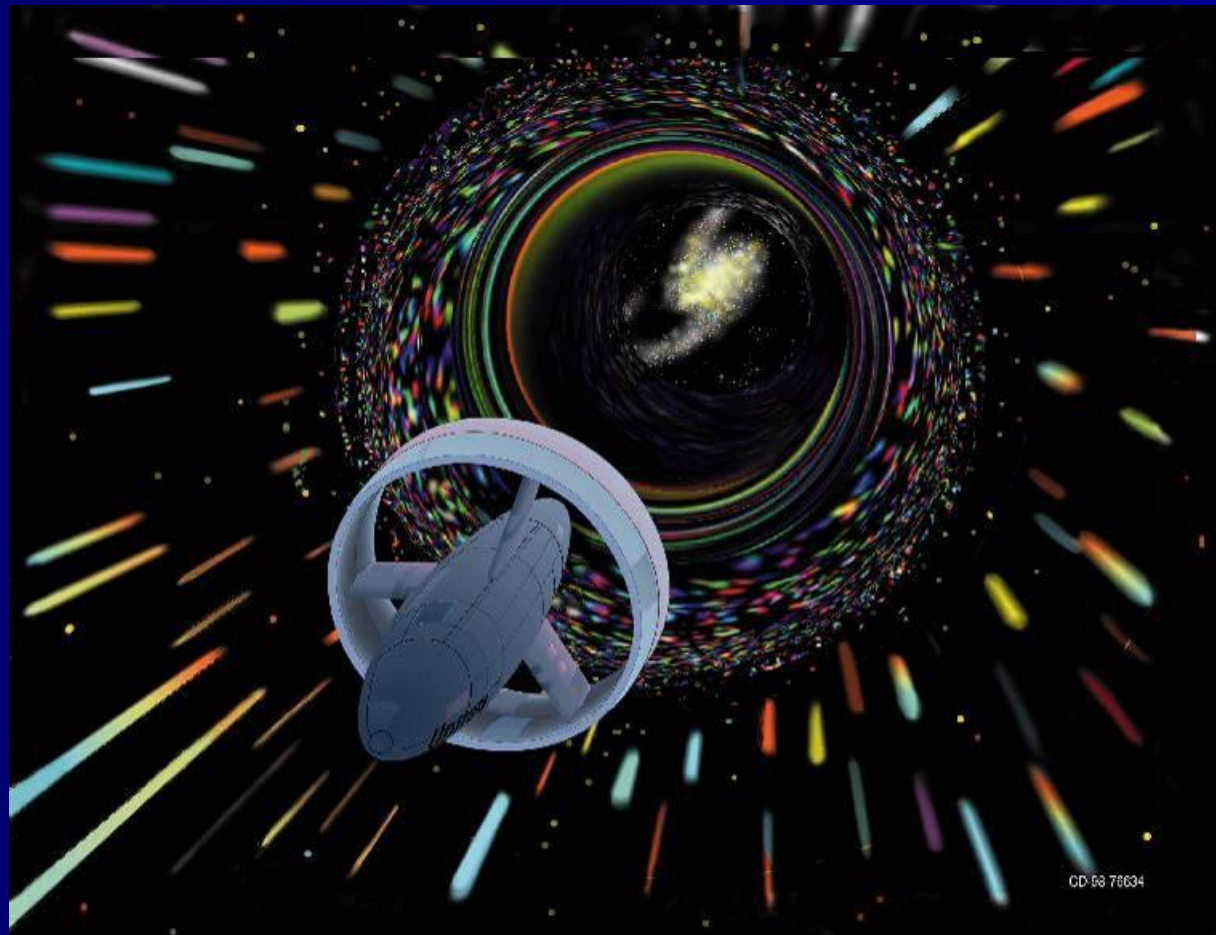
$$S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}$$

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

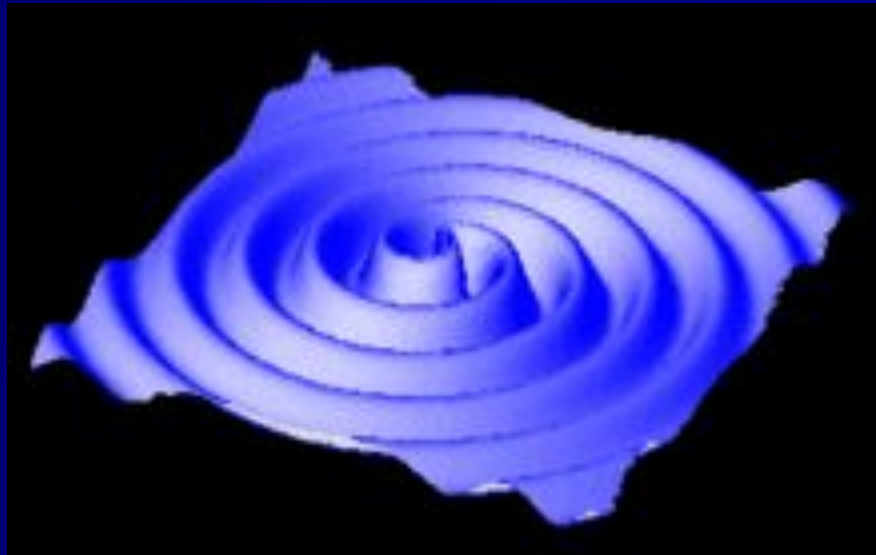


# Гравитационные волны

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  $\sim ma$ . 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!

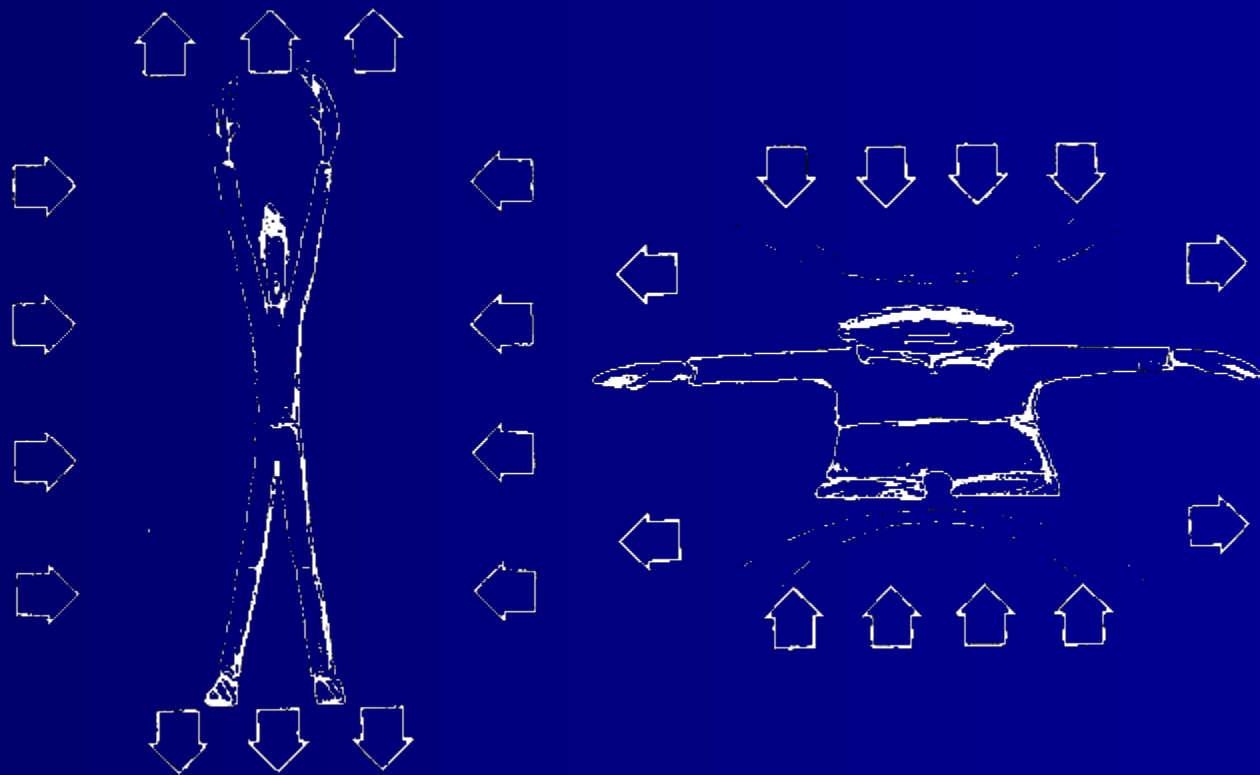
# Гравитационные волны



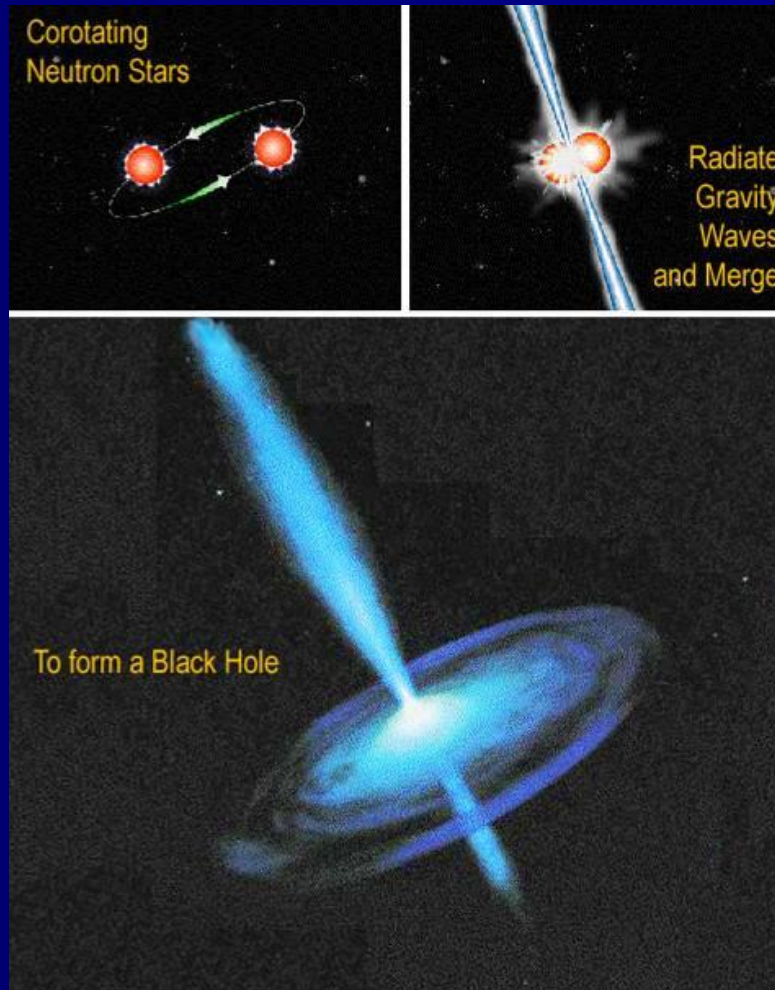
$$-\frac{dE}{dt} \sim \frac{G}{c^5}, \quad \dot{r} = -\frac{64G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$$



# Гравитационные волны



# Гравитационные волны



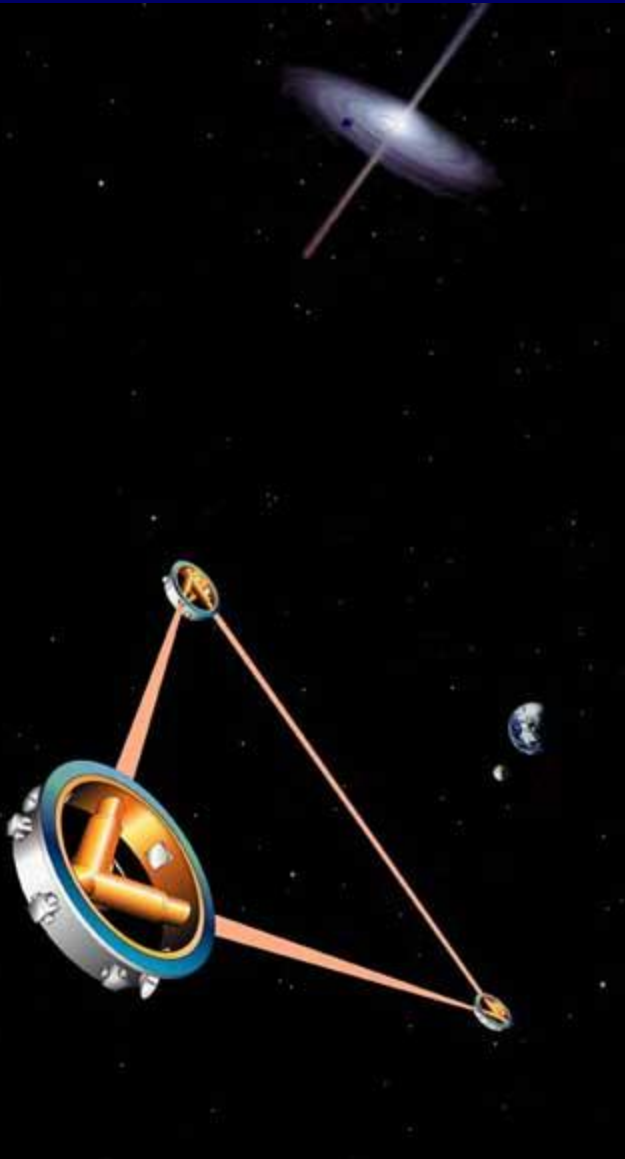
# Проект LIGO

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 Фрийдмана
- 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)
- Больше число измерений (5, 6, 10)