

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»

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:

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

Δt – 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 \forall 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

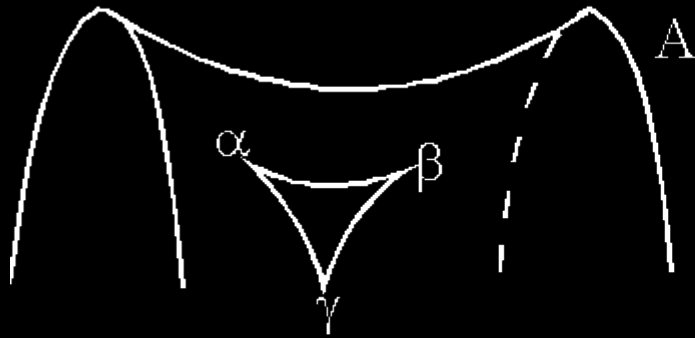


Принцип Маха

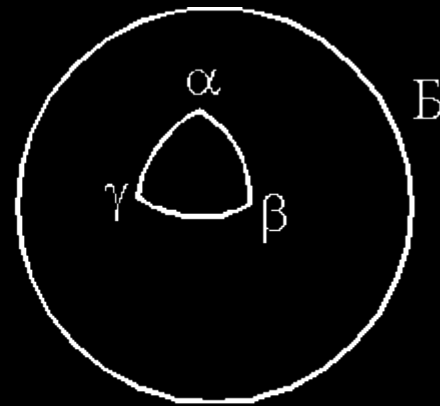
- Сила инерции возникает в результате гравитационного взаимодействия тела с веществом всей Вселенной.
- Абсолютно ли вращение? Будем ли мы ощущать вращение в абсолютно пустой Вселенной?

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

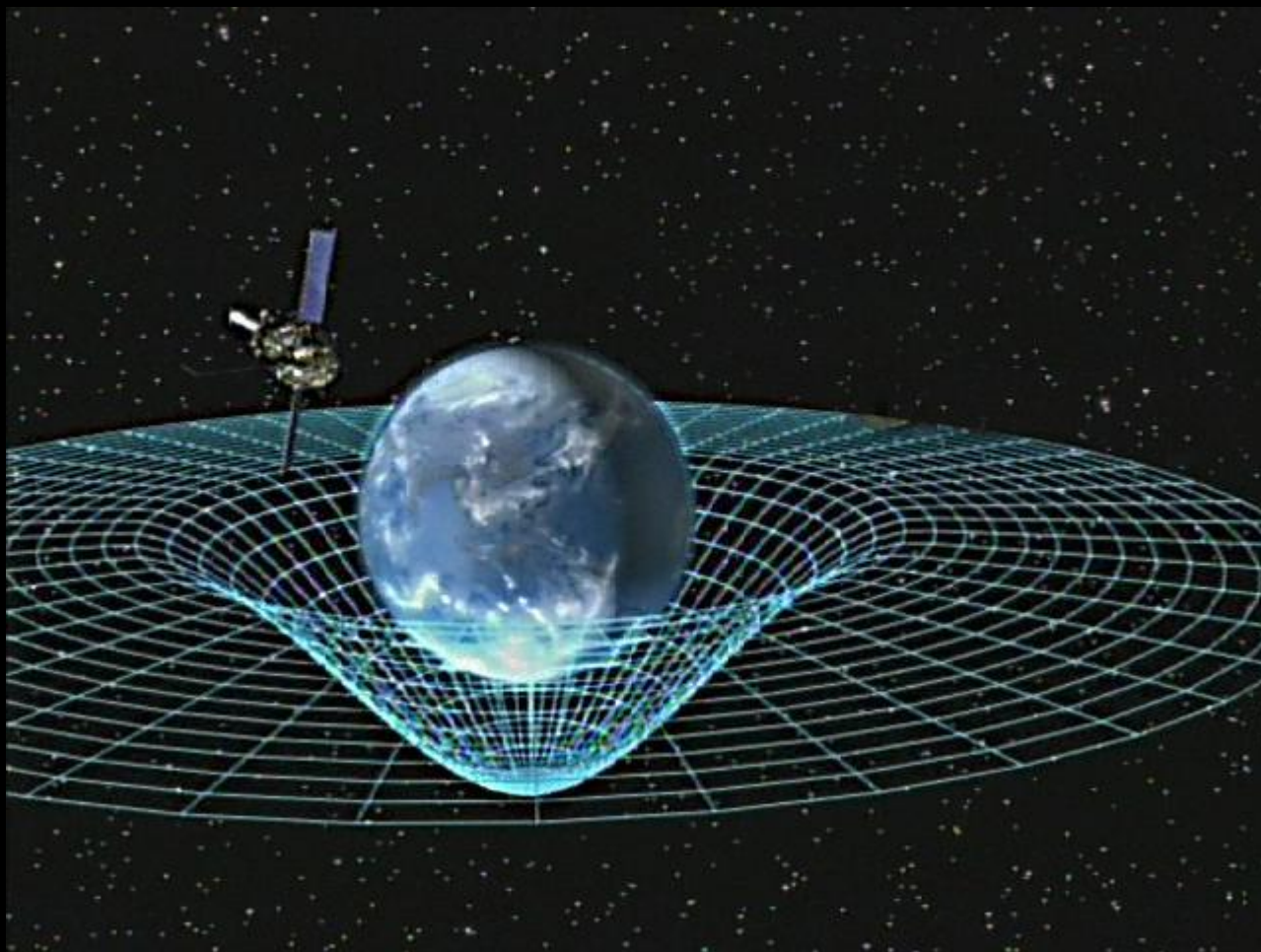
$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{\varphi}{c^2} \right), \qquad \Delta\nu = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2} \nu$$

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

Наблюдаемые и координатнозависимые величины

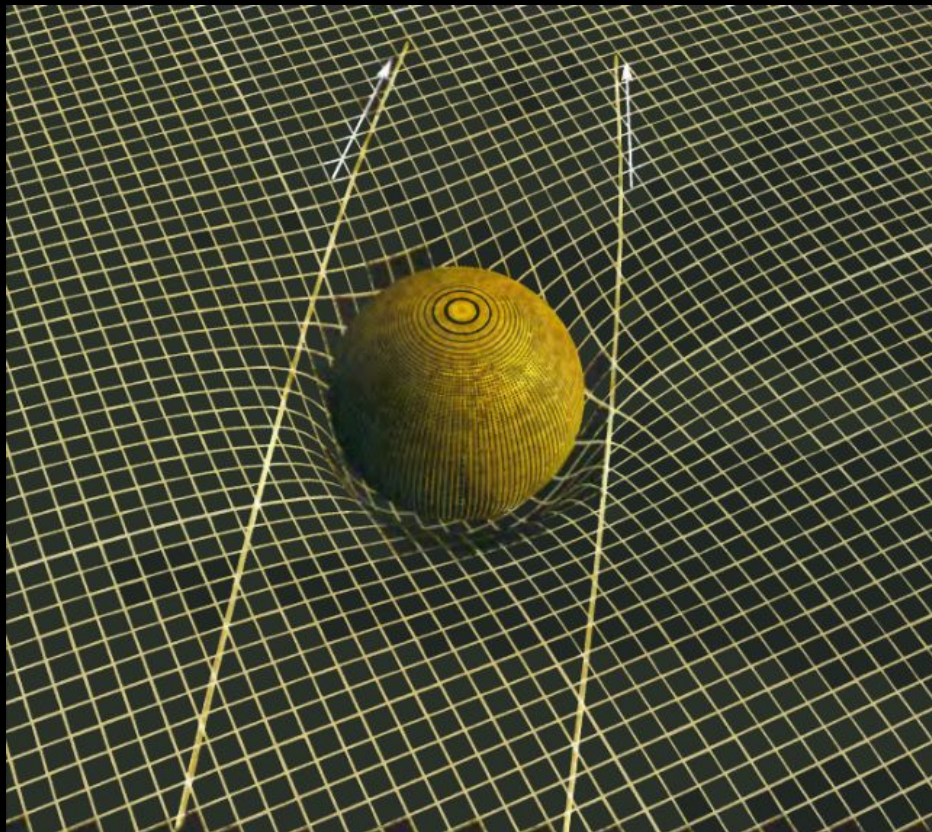
- Направления (углы)
- Промежутки времени (частоты)

Искривление метрики пространства-времени



Геодезические линии

Принцип наименьшего действия



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

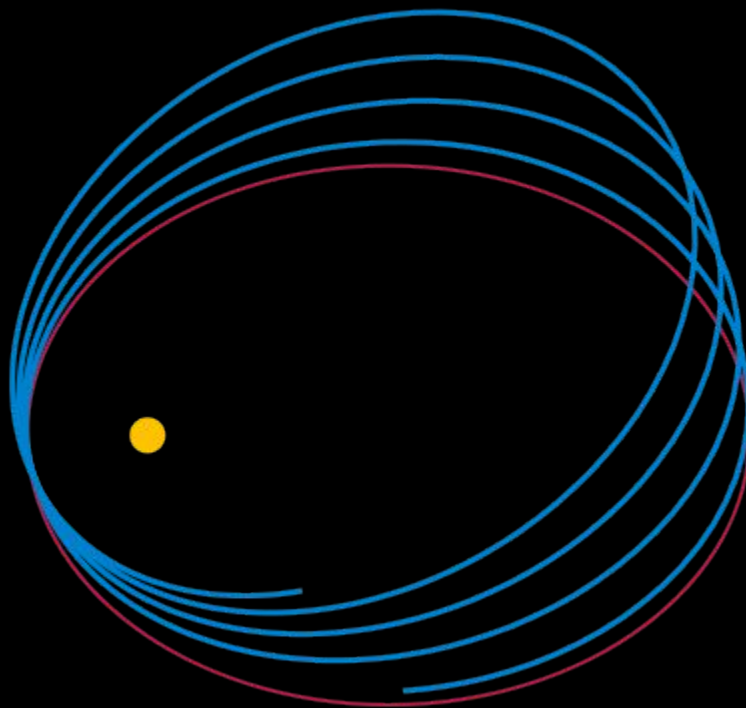
$$\delta S = -mc \delta \int_a^b ds = 0$$

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

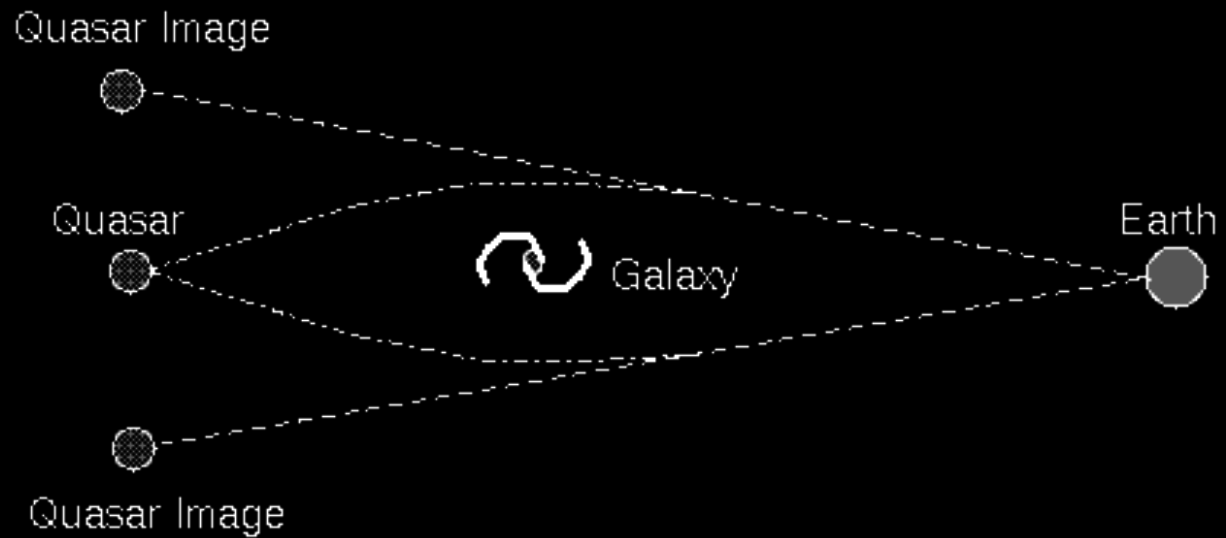
Принцип наименьшего действия был сначала сформулирован Мопертюи в 1746 году и далее развивался (после 1748 года) математиками Эйлером, Лагранжем и Гамильтоном.

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.

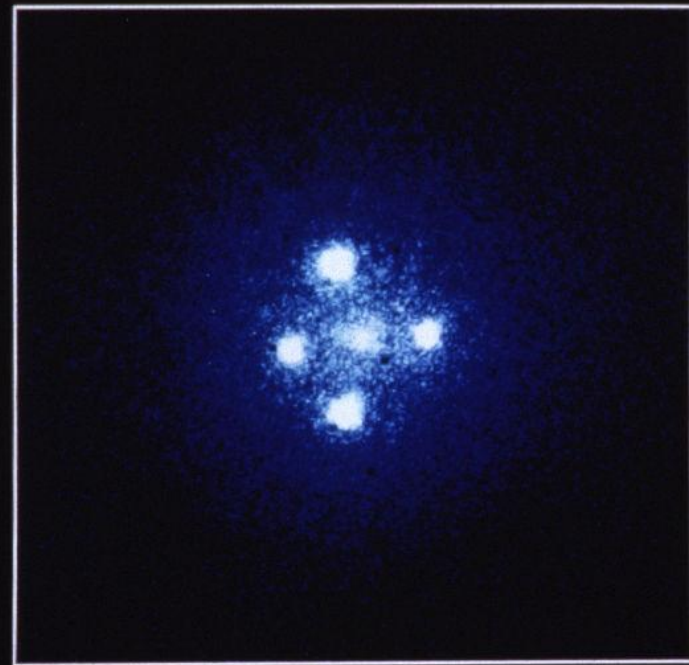
Орбиты планет в ОТО незамкнуты



Гравитационные линзы



Гравитационные линзы



Gravitational Lens G2237+0305

Черные дыры

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

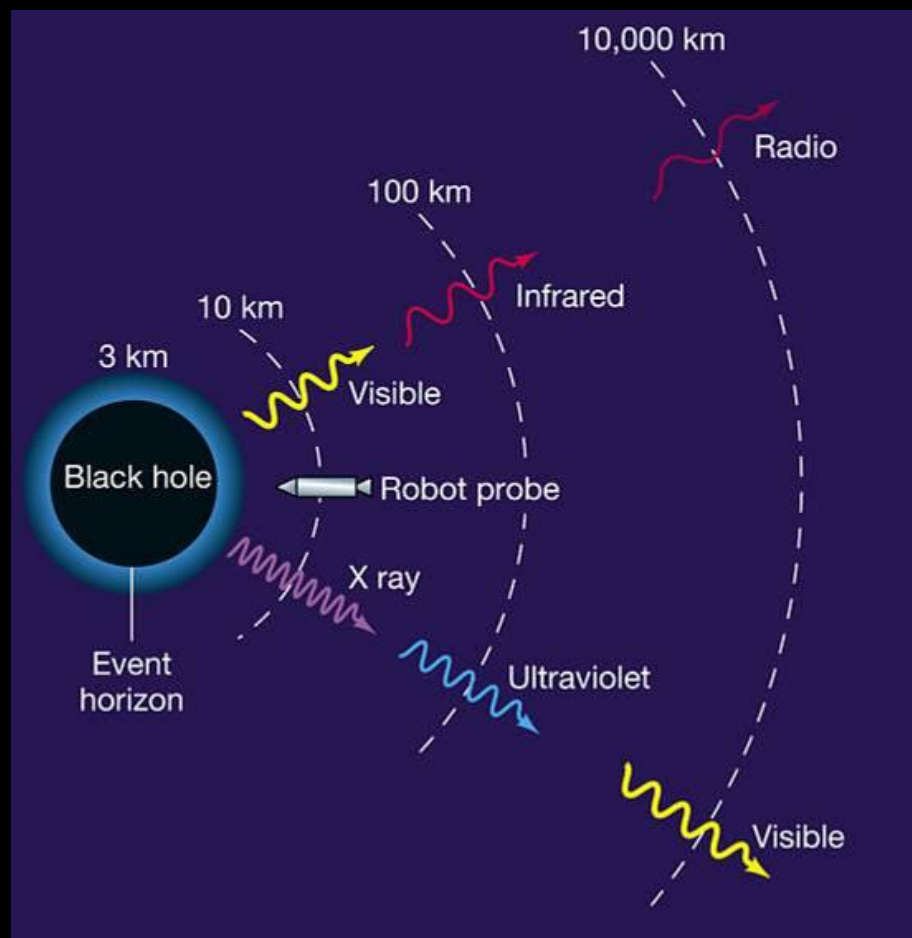
В 1783 году существование черных дыр предсказал английский астроном-любитель, священник и геолог Джон Митчел

Гравитационный радиус

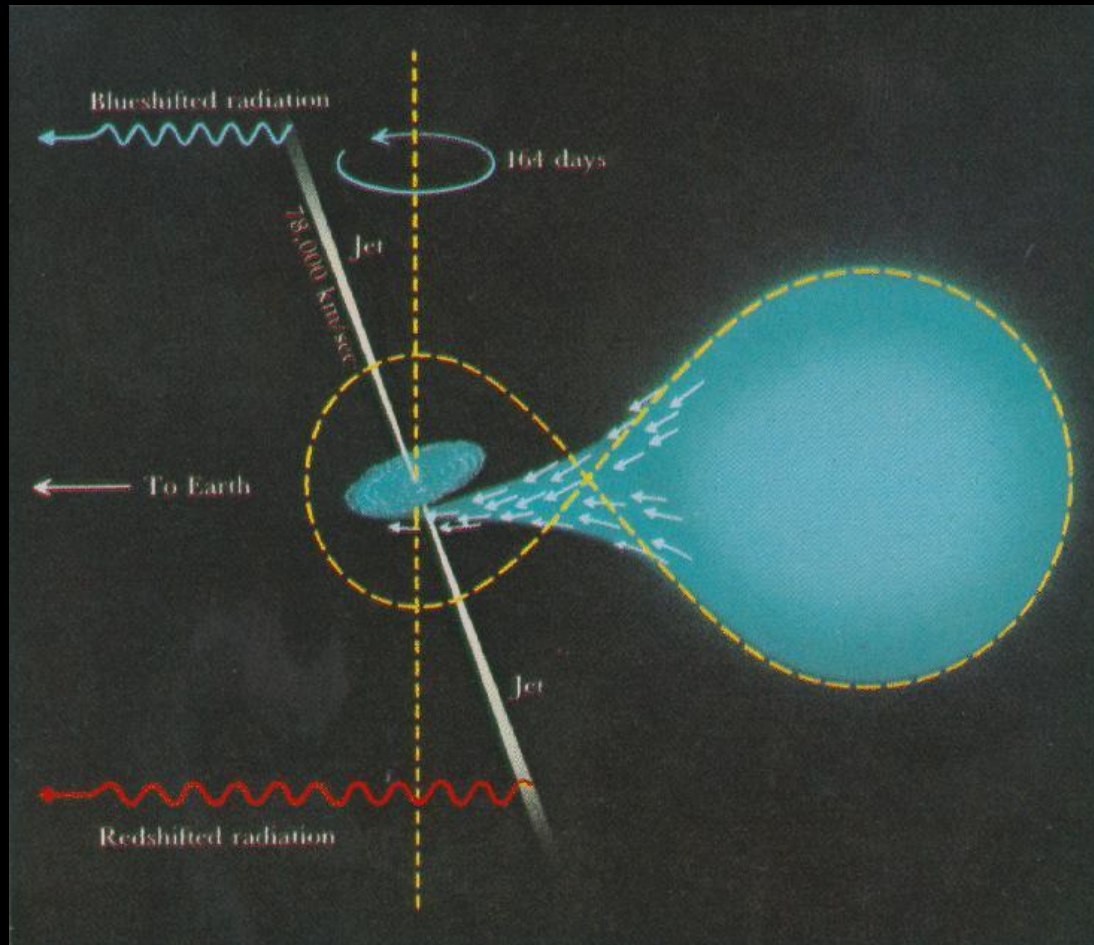
$$r_g = 2 \frac{GM}{c^2}$$

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

Гравитационное красное смещение вблизи черной дыры



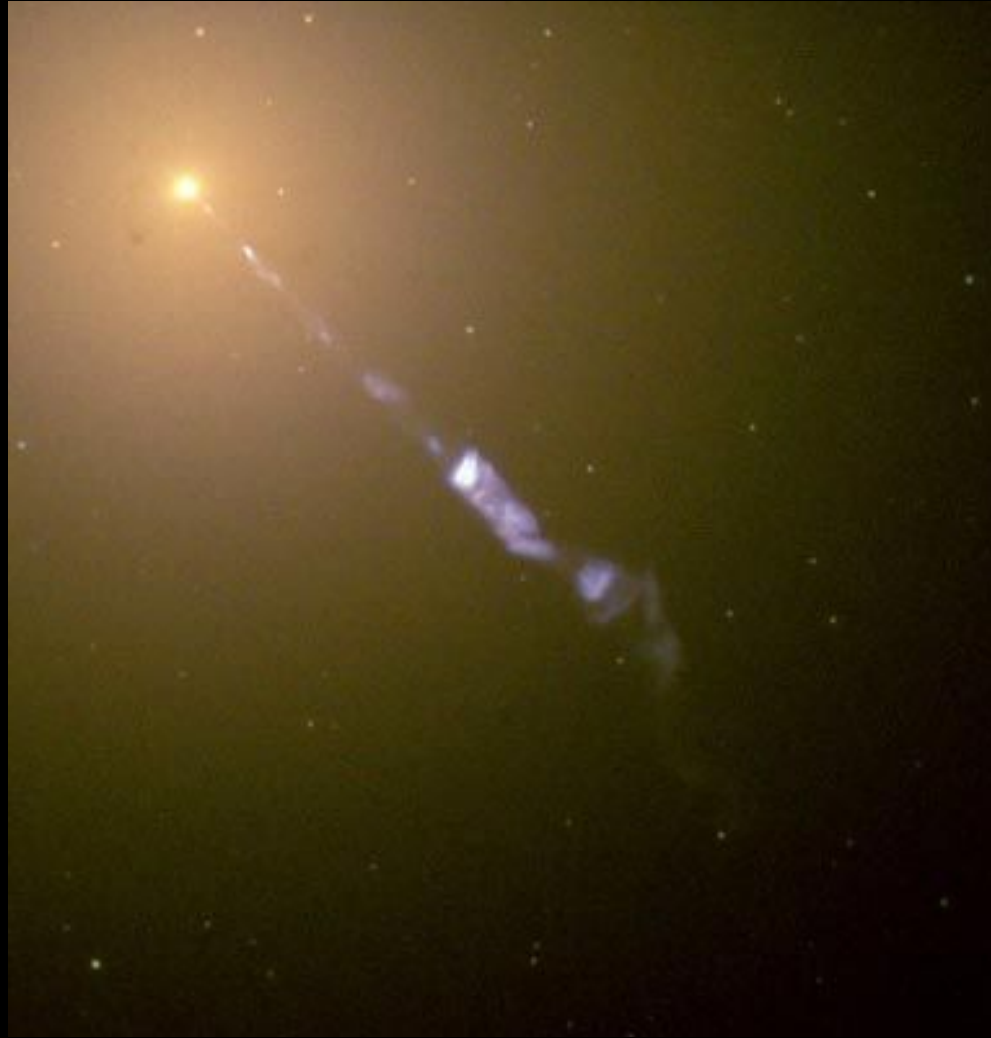
Обнаружение черных дыр



Линзирование



Выброс (jet) из ядра M87



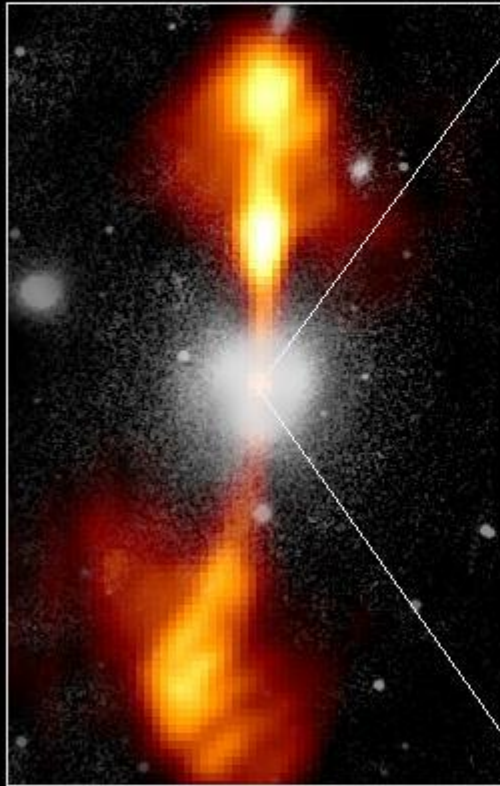
Выброс из ядра галактики имеет длину 7500 световых лет!

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

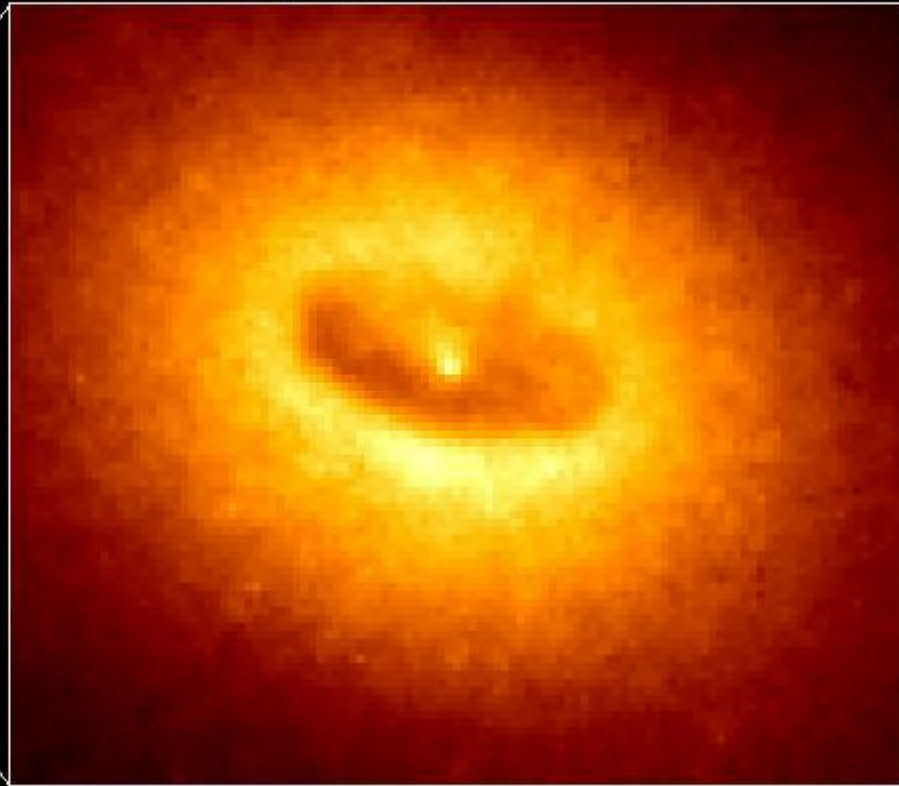
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS

Термодинамика черных дыр

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

Температура черной дыры

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

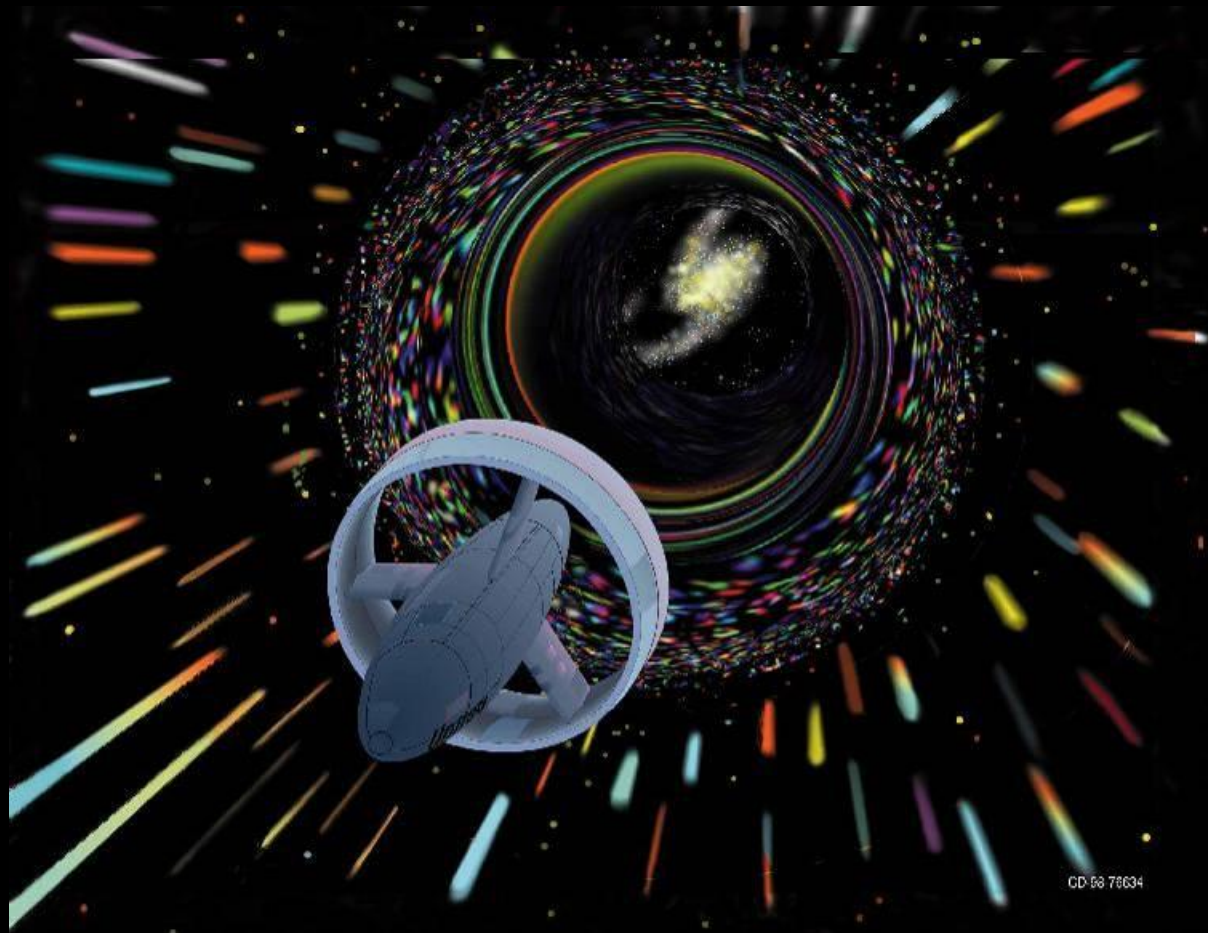
Энтропия черной дыры
 A – площадь горизонта событий

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

Время жизни черной дыры

1000 т испаряется за 84 секунды

Падение в черную дыру

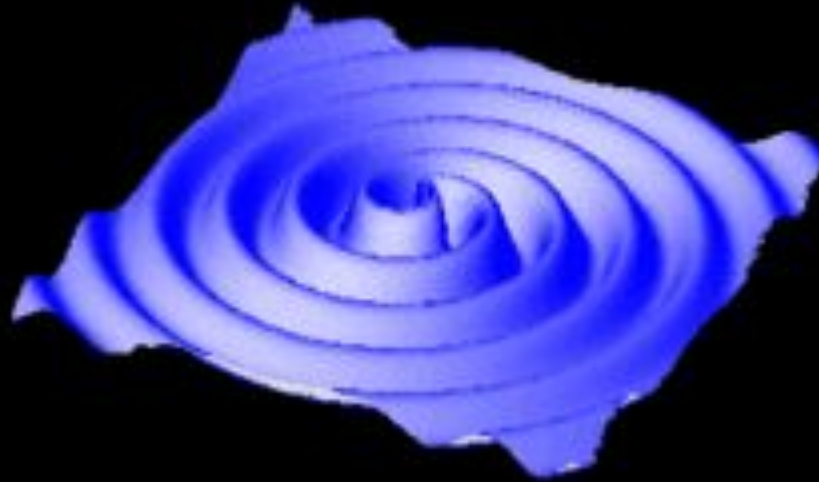


Гравитационные волны

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.

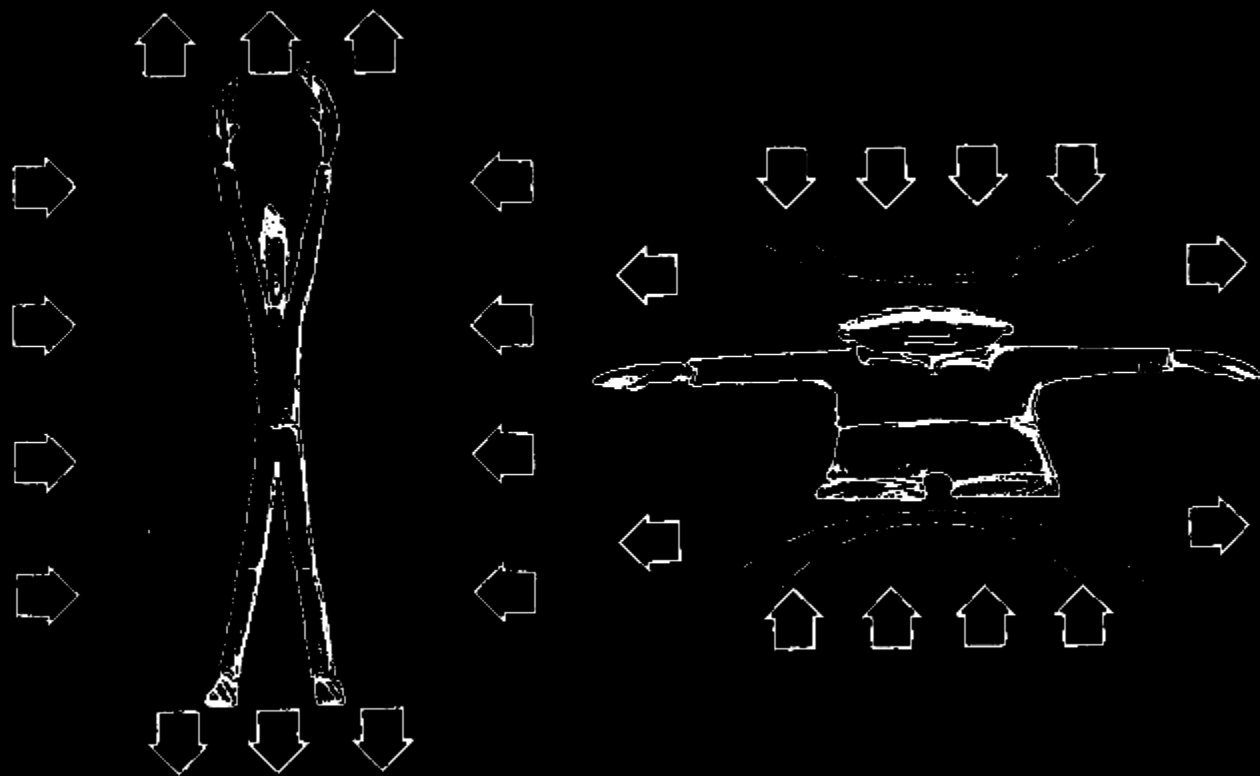
Для Солнечной системы, например, наибольшее гравитационное излучение производит подсистема Солнца и Юпитера. Мощность этого излучения — примерно 5 киловатт!

Гравитационные волны



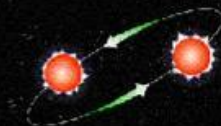
$$-\frac{dE}{dt} \approx \frac{G}{c^5}, \quad \dot{r} = -\frac{64G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$$

Гравитационные волны



Гравитационные волны

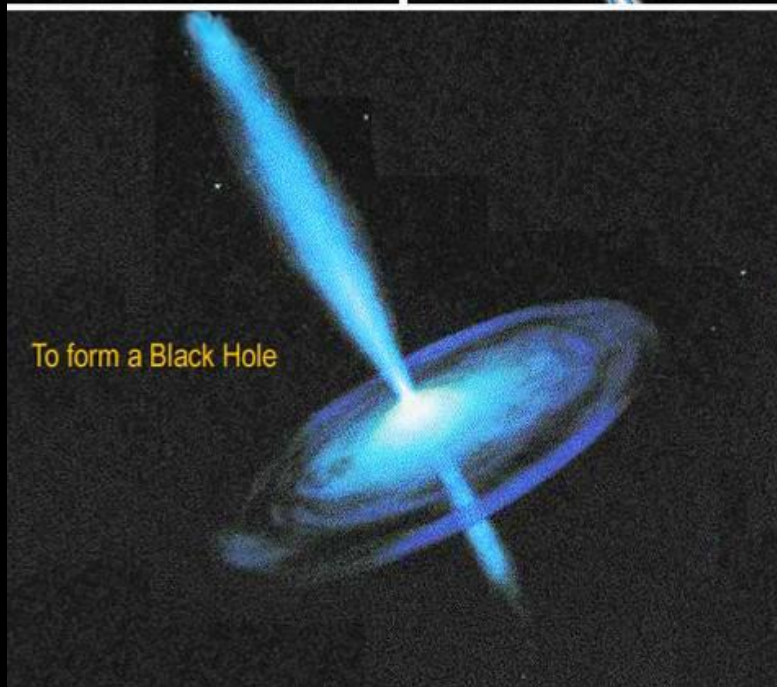
Corotating
Neutron Stars



Radiate
Gravity
Waves
and Merge



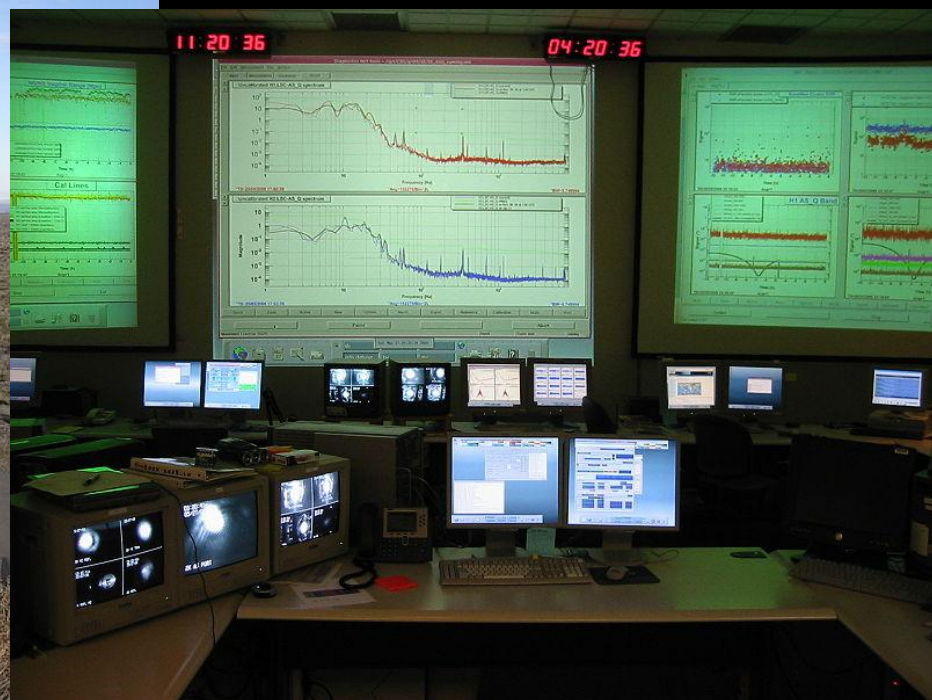
To form a Black Hole



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)
- Больше число измерений (5, 6, 10)