

Тема 9. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ОТО)

- 9.1. Обобщение закона тяготения Ньютона
- 9.2. Принцип эквивалентности сил инерции и сил тяготения
- 9.3. Теория тяготения Эйнштейна. Основные положения ОТО
- 9.4. Следствия из принципа эквивалентности
9.4. Следствия из принципа эквивалентности, подтверждающие ОТО

9.1. Обобщение закона тяготения Ньютона

Между любыми видами материи существует универсальное взаимодействие, проявляющееся в притяжении тел.

Потенциальная энергия тела массы m в поле тяготения равна:

$$U = m\varphi$$

где φ – потенциал поля тяготения.

Если величина U мала по сравнению с энергией тела mc^2 , т.е. если $(\varphi / c^2) \ll 1$ и тело движется со скоростью, много меньшей скорости света $(v \ll c)$, то мы имеем дело с классическим гравитационным полем для которого справедлив закон всемирного тяготения Ньютона.

В полях тяготения обычных небесных тел это условие выполняется. Так, на поверхности Солнца $\varphi / c^2 \approx 4 \cdot 10^{-6}$, а на поверхности белых карликов, порядка 10^{-3} .

Теория тяготения Ньютона предполагает мгновенное распространение полей тяготения, что не согласуется с принципами специальной теории относительности, основанной на том экспериментальном факте, что любое взаимодействие распространяется со скоростью, меньшей или равной скорости света. Поэтому теорию тяготения Ньютона нельзя применять к сильным полям тяготения, разгоняющим частицы до скорости, близкой к скорости света.

Теория тяготения Ньютона неприменима для описания движения частиц вблизи массивных тел (в частности, для описания траектории движения света в поле тяготения). Неприменима теория тяготения Ньютона и для описания переменных полей тяготения, создаваемых движущимися телами.

Обобщение теории тяготения на основе специальной теории относительности было сделано А. Эйнштейном в 1908 – 1916 гг. Эта теория была названа им общей теорией относительности (ОТО).

В ОТО описываются *сильные гравитационные поля* ($\varphi / c^2 \approx 1$) и движение в них с большими скоростями ($v \approx c$)

В ОТО учитывается воздействие материи на свойства пространства и времени, а эти измененные свойства пространства-времени влияют на сам характер физических процессов.

9.2. Принцип эквивалентности сил инерции и сил тяготения

Важнейшей особенностью полей тяготения является то, что тяготение совершенно одинаково действует на разные тела, сообщая им одинаковые ускорения, независимо от свойств тел. Это было известно еще в ньютоновской теории и положено в основу новой, эйнштейновской теории тяготения.

Под действием гравитационной силы

$$F = \gamma \frac{Mm_g}{r^2} = m_g g$$

все тела на поверхности Земли падают с одинаковым ускорением – *ускорением свободного падения*. Этот факт был установлен Ньютоном и может быть сформулирован как ***принцип строгой пропорциональности гравитационной массы m_g*** , определяющей взаимодействие тела с полем тяготения, ***и инертной массы m_{in}*** , определяющей сопротивление тела действующей на него силе и входящей во второй закон Ньютона:

$$F = m_{in} a.$$

Уравнение движения тела в поле тяготения записывается в виде:

$$m_{in} \vec{a} = m_g \vec{g},$$

где \vec{a} – ускорение, приобретаемое телом под действием поля тяготения, напряженностью $\vec{G} = \vec{g}$. В этом случае, согласно Ньютону, для всех тел $m_g = m_{in}$ и $\vec{a} = \vec{g}$ – ускорение не зависит от массы и равно напряженности поля тяготения.

Таким образом, все тела в поле тяготения и в поле сил инерции, при $\vec{a} = \vec{g}$ движутся совершенно одинаково.

Например, движение тел в космическом корабле, летящим с ускорением $\vec{a} = \vec{g}$ и в корабле стоящем на Земле в поле тяжести с напряженностью $\vec{G} = \vec{g}$ будет одинаковым. Силы инерции в ускоренно движущемся корабле будут неотличимы от гравитационных сил, действующих в истинном поле тяготения. *Поэтому силы инерции можно считать эквивалентными гравитационным силам.*

Тождественность инерциальной и гравитационной масс, является следствием эквивалентности сил инерции и сил тяготения.

Этот факт называется *принципом эквивалентности Эйнштейна*. Согласно этому принципу, *все физические процессы в истинном поле тяготения и в ускоренной системе отсчета, в отсутствии тяготения, протекают одинаковым образом.*

Это фундаментальный закон природы.

Следствием этого закона является то, что находясь внутри закрытой кабины, невозможно определить, чем вызвана сила mg , тем, что кабина движется с ускорением

$\vec{a} = \vec{g}$ или действием притяжения Земли.

Ярчайшим доказательством равенства сил инерции и гравитации является состояние невесомости космонавтов в космическом корабле (падают под действием гравитационных сил и отлетают под действием центробежных сил инерции).

*Принцип эквивалентности —
основополагающий в ОТО
Эйнштейна.*

9.3. Теория тяготения Эйнштейна. Основные положения ОТО

Итак, мы с вами показали, что силы инерции эквивалентны силам тяготения. Эквивалентность, однако, это не тождественность и существуют некоторые различия.

Допустим, $\vec{G} = \vec{a}$ (вагон движется прямолинейно). При уменьшении ускорения \vec{a} напряженность эквивалентного поля должна изменяться во всех точках вагона одновременно, т.е. изменения должны распространяться мгновенно.

Эти рассуждения предполагают так называемое дальнодействие сил инерции, в то время как возмущения гравитационного поля распространяются с конечной скоростью, равной скорости света. То есть, гравитационные взаимодействия являются близкодействующими.

Ускоренно движущийся космический корабль имитирует только однородное поле тяготения, одинаковое по величине и направлению во всем пространстве. Но поля тяготения, создаваемые отдельными телами, не таковы.

Чтобы имитировать, например, сферическое поле тяготения, надо, исходя из принципа эквивалентности, потребовать, чтобы истинное гравитационное поле создавалось локальными, соответствующим образом ускоренными в каждой точке системами отсчета.

В результате, в любой конечной области, пространство-время окажется искривленным – неевклидовым. Сумма углов треугольника в таком пространстве не равна π , отношение длины окружности к радиусу отлично от 2π , время в разных точках течет по-разному.

Согласно Эйнштейну, **истинное гравитационное поле есть проявление искривления четырехмерного пространства времени.**

Кривизна пространства-времени создается источниками гравитационного поля – массами вещества и всеми видами энергии, присутствующими в системе, поскольку

энергия и масса эквивалентны
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Поэтому тяготение зависит не только от распределения масс в пространстве, но и от их движения, давления и напряжений, имеющих в телах от всех физических полей.

Движение тел в искривленном пространстве-времени происходит по кратчайшим траекториям – геодезическим, которые в трехмерном пространстве-времени воспринимаются как движение по искривленным траекториям с переменной скоростью.

Изменение гравитационных полей в вакууме *распространяется со скоростью света.*

В основу ОТО положены два постулата:

ДВА ПОСТУЛАТА ОТО

1. Принцип эквивалентности сил инерции и сил гравитации. (Этот факт можно считать доказанным. Эффект гравитации и ускорения движения частиц – неразличимы).

2. Гравитационное взаимодействие распространяется с конечной скоростью, равной скорости света **c** в виде гравитационных волн. (Пока кванты гравитационного поля – гравитоны, не обнаружены).

Еще одним ключевым моментом в ОТО является понятие **кривизны пространства времени.**

Проведем мысленный эксперимент:

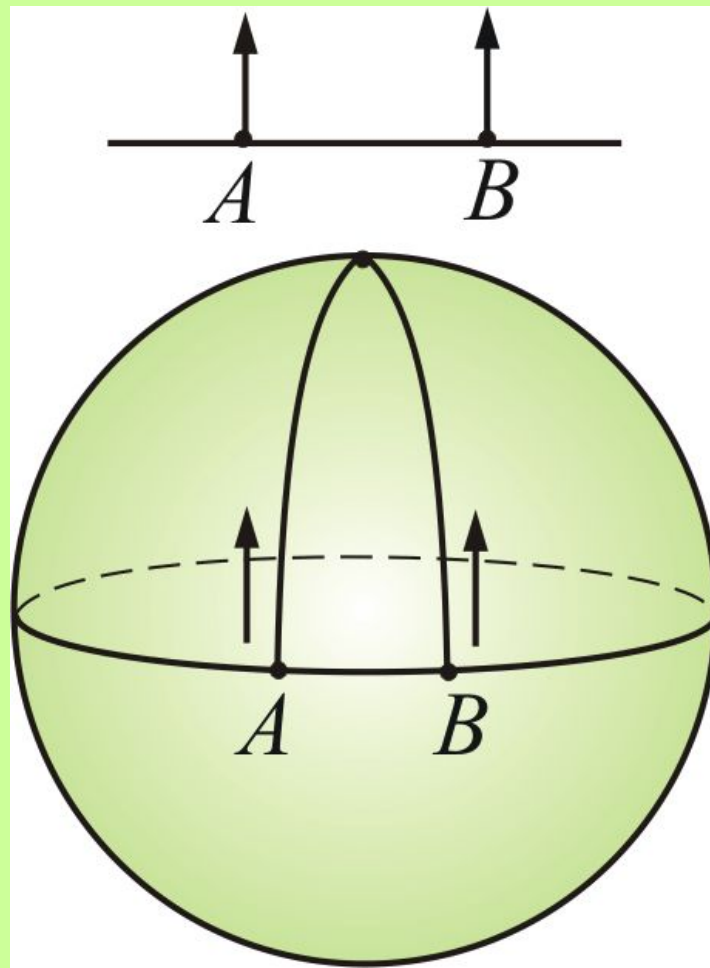


Рисунок 9.1

В ходе путешествия плоские двумерные существа (ПЛОСКАТИКИ) отправившиеся из A и B по параллельным дорогам будут замечать, что они приближаются друг к другу (кривизны сферы, если она достаточно велика, они не замечали и не знали, что живут на сфере). И приближаются они все быстрее и быстрее – с ускорением, как будто под действием некой силы.

Назовем эту силу ***гравитацией***.

Наблюдатель со стороны видит, что сама кривизна выступает в роли силы, т.е. ***геометрические свойства пространства выступают в роли реально действующих сил!***

Анализируя этот мысленный эксперимент и тот факт, что *любые массы притягиваются всегда*, Эйнштейн пришел к мысли, что ***сила тяготения не есть специфическая сила***, то, что мы принимаем за силу притяжения, следует рассматривать лишь как ***проявление специфики геометрических свойств пространства-времени.***

СТО оперирует плоским пространством-временем, а ОТО – искривленным.

Любая масса, искривляет пространство-время, другая масса, попадая в область искривления, испытывает силу притяжения.

Герман Минковский (1864 – 1909), бывший учитель математики Эйнштейна, ввел четырехмерное пространство-время и дал геометрическое представление теории относительности. Перестройка теории относительности в мировую геометрию вынудила Эйнштейна заявить: *«С тех пор, как за теорию относительности взялись математики, я ее сам больше не понимаю»*.

Математики Г. Риман и Н. Лобачевский создали теорию искривленного пространства произвольного числа измерений. Эйнштейн воспользовался математическими формулами Римана (четырехмерного пространства-времени).

Минковский для описания пространственно-временных событий ввел геометрическую терминологию.

Совокупность значений t, x, y, z для характеристики места и времени события - **мировая точка**.

Множество мировых точек есть четырехмерное пространство, называемое ***пространством Минковского***.

Линия в пространстве Минковского называется **мировой линией**.

Серьезно ОТО начала проверяться лишь с двадцатых годов прошлого века, т.е. недавно, и пока нет ни одного факта, противоречащего ОТО.

9.4. Следствия из принципа эквивалентности, подтверждающие ОТО

1. Замедление времени в гравитационных полях

Общая теория относительности предсказывает замедление хода часов в гравитационных полях.

Пусть часы движутся с ускорением g , тогда их скорость, после того, как они прошли расстояние x , равна

$$v = \sqrt{2gx}.$$

С точки зрения неподвижного наблюдателя промежутки времени dt в неподвижной и dt_0 в подвижной системах отсчета связаны соотношением:

$$dt = \frac{dt_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{dt_0}{\sqrt{1 - \frac{2gx}{c^2}}},$$

где dt – промежуток времени в пространстве без поля.

Поскольку $\varphi = gx$ – гравитационный потенциал, то имеем в слабых гравитационных полях ($\varphi \ll c^2$)

$$dt = \frac{dt_0}{\sqrt{1 - 2\varphi / c^2}} \cong dt_0 \left(1 + \frac{\varphi}{c^2} \right)$$

– время течет тем медленнее, чем больше абсолютная величина гравитационного потенциала.

Этот эффект был подтвержден прямым экспериментом. В 1976 г. на высоту 104 км на ракете были подняты водородные часы, точность хода которых составляет 10^{-15} с. На Земле оставили точно такие же часы, предварительно синхронизировав с улетевшими часами. Через два года часы вернули и сравнили показания, разность $4,5 \cdot 10^{-10}$ с совпала с расчетной по ОТО, с точностью 0,02%.

2. Красное гравитационное смещение частоты фотонов

При приближении света к телам, создающим гравитационное поле, частота света убывает с увеличением абсолютной величины потенциала поля.

Для частоты света в гравитационном поле можно записать:

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{\varphi}{c^2} \right)$$

где ν – частота света с точки зрения неподвижного наблюдателя, ν_0 – частота света в подвижной системе отсчета.

Так, если свет испускается в точке с потенциалом φ_1 , и приходит в точку с потенциалом φ_2 , то линии спектра смещаются в сторону красного цвета на величину

$$\Delta\nu = \nu(\varphi_1) - \nu(\varphi_2) = (\varphi_2 - \varphi_1) \frac{\nu_0}{c^2}.$$

Если на Земле наблюдать спектр, испускаемый на Солнце и звездах, то $|\varphi_2| < |\varphi_1|$ и $\Delta\nu < 0$, т.е. смещение происходит в сторону меньших частот (красный спектр). Этот факт был доказан в 1960 г. с помощью эффекта Мессбауэра и подтверждает следствие ОТО с точностью до 1%.

3. Отклонение светового луча массивными телами

ОТО объясняет вдвое большее отклонение светового луча вблизи массивных тел, чем это предсказывала теория Ньютона. Эксперимент был проведен в 1919 г. Световой луч, вблизи одной из планет, отклонился на $1,75''$, тогда как по теории Ньютона искривление должно было произойти на $0,87''$, т.е. вдвое меньше.

4. *Объяснение смещения орбиты Меркурия*

Известно, что за 100 лет орбита Меркурия сместилась на $1^{\circ} 33' 20''$. Из теории Ньютона следует смещение, за счет влияния планет, на $1^{\circ} 32' 37''$, а где же еще $43''$. Подставив в формулы ОТО параметры Солнца и Меркурия, Эйнштейн получил скорость прецессии орбиты на $43''$ за 100 лет!

5. Черные дыры

ОТО предполагает наличие во Вселенной черных дыр – космических объектов, поглощающих все частицы, в том числе фотоны, подходящие к их поверхности.

Допуская, что фотон обладает гравитационной массой, можно оценить размеры r_g и массу M космического объекта, способность стать черной дырой. Для этого необходимо, чтобы кинетическая энергия фотона была меньше или равна его потенциальной энергии на бесконечности:

$$\frac{m_{\gamma} c^2}{2} \leq G \frac{m_{\gamma} M}{r_g},$$

т.е. если

$$r_g \leq G \frac{2M}{c^2}$$

свет не сможет покинуть данный космический объект. Уже есть достаточно веские доказательства существования черных дыр. Основная трудность состоит в том, что они поглощают все и почти ничего не излучают. Поэтому об их существовании можно судить по косвенным данным: поглощению вещества и испусканию в этом процессе излучения.

Подобное явление можно наблюдать в системе двойных звезд, в частности, обычно называют двойную систему СудХІ (Лебедь ХІ). *Пространство внутри черных дыр сворачивается, время останавливается.*

Предсказанные ОТО гравитационные волны в прямых экспериментах еще не наблюдались, но последствия их излучения системами небесных тел обнаружены. Согласно ОТО, период орбитального движения двойной звездной системы должен уменьшиться из-за излучения гравитационных волн.

Это уменьшение открыто в системе, одним из компонентов которой является пульсар *PSR193 + 16*. По расчетам ОТО относительное уменьшение периода в этой системе за один оборот должно составлять $2,4 \cdot 10^{-12}$, а наблюдения дают значение $(2,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-12}$.

Все вышеизложенное говорит о правильности принципов, положенных в основу ОТО, о непротиворечивости ее выводов и фундаментальности предсказанных ею физических эффектов.



The image features a vibrant red and black space-themed background. A bright red nebula or star field is visible, with a dark, shadowed region in the center. In the foreground, there are dark, rocky, and cratered terrain elements, suggesting a planetary or lunar surface. The text 'Черныё дыр' is prominently displayed in the center, rendered in a bold, black, sans-serif font with a white outline. The word 'Черныё' is on the top line, and 'дыр' is on the bottom line.

**Черныё
дыр**

Автор термина

- Черная Дыра -

американский физик Дж. Уилер

(предложен в 1968 году)

Это настолько массивный объект,
что его поле тяготения удерживает
все электромагнитные излучения

В классическом естествознании
такие объекты рассматривались
как абстрактные модели

Основное уравнение ЧД:

Hubble Space Telescope
strengthened the evidence
for a massive black hole
in the nearby galaxy

M32

M32

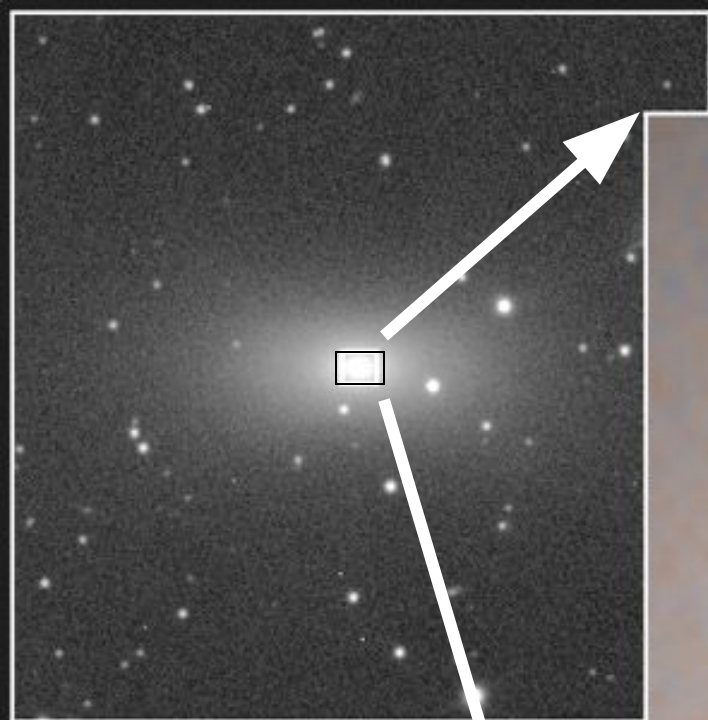
Andromeda

principal investigator, animation: Roeland P. van der Marel [marel@sns.ias.edu]

*Компьютерный анализ
вращения звезд в M32
(подозревается присутствие
Черной дыры)*



Галактика с активным ядром



Ground

1998 z



Disk in Galaxy NGC 7052

HST • WFPC2

PRC98-22 • June 18, 1998 • ST ScI OPO

R. P. van der Marel (ST ScI), F. C. van den Bosch (University of Washington) and NASA

← 800 св. лет →

Оценку массы ЧД производ

по скорости звезд в

по скорости звезд в

аккреционном диске

$M = 1,2 \text{ млрд Солнц}$

ДЖЕТ - выброс

замагниченной плазмы

$$V_{\text{плазмы}} = 8 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

Плазма - релятивистская!

Джет



Диск аккреции



излучение



Черная дыра (схема)



Джет



Диск аккреции

