

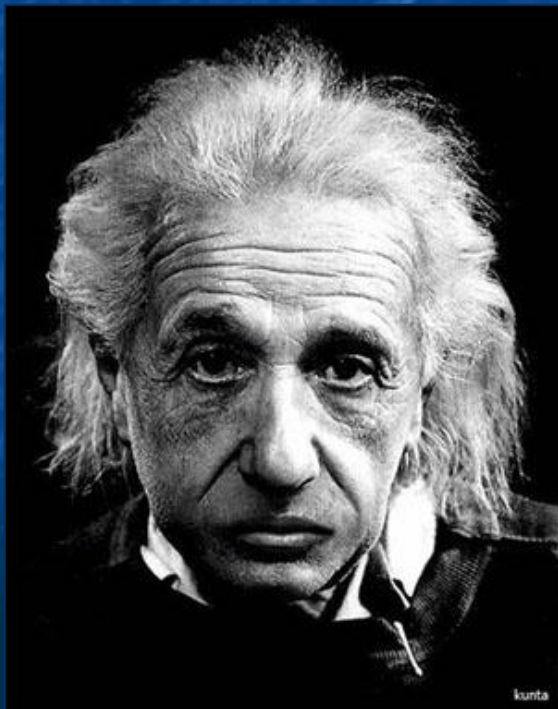
# Теория относительности

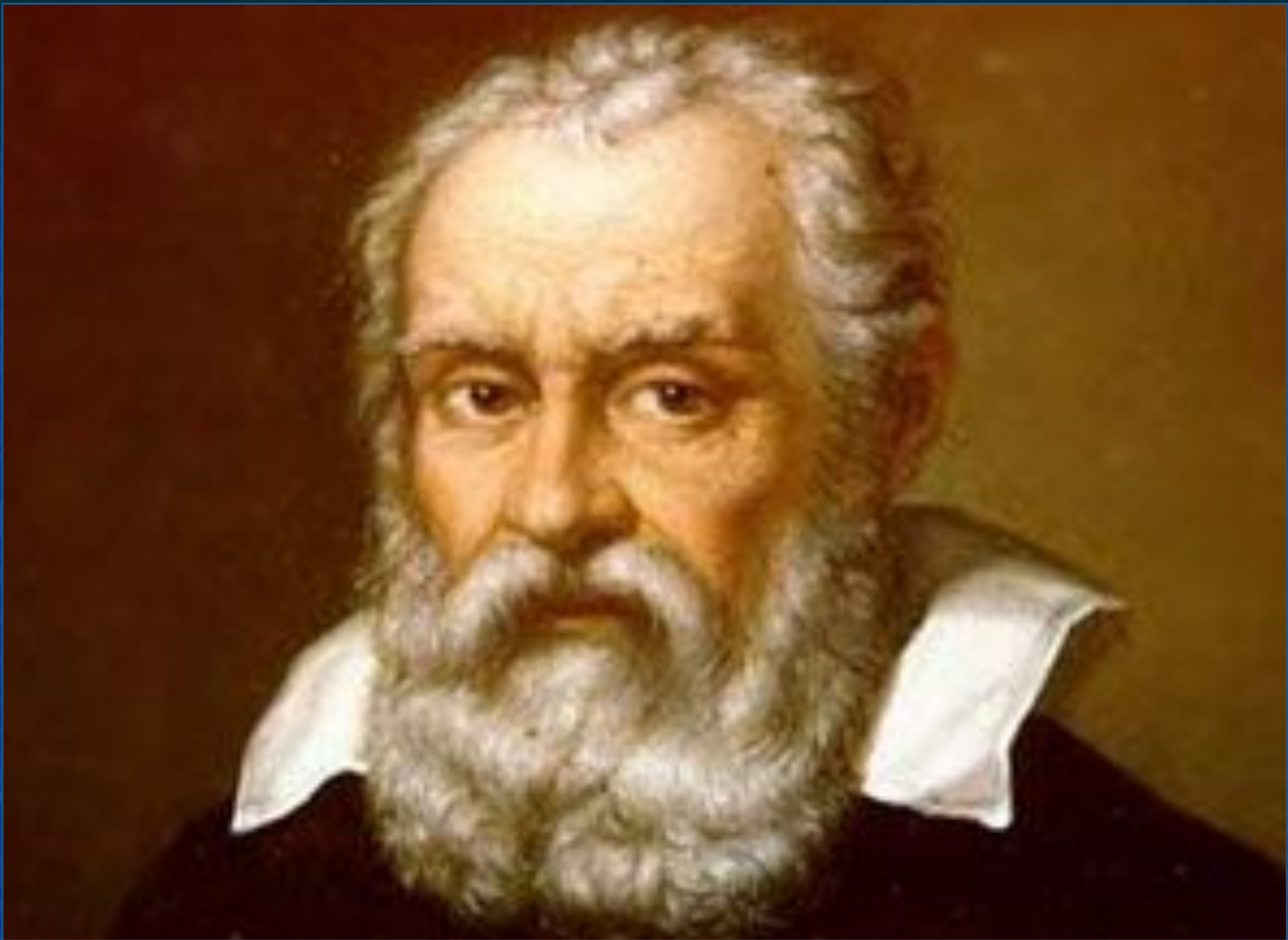
# Содержание

1. Рождение теории
2. Принцип относительности
3. Преобразования Галилея
4. Преобразования Лоренца
5. Специальная теория относительности
6. Создание СТО
7. Релятивистская теория
8. Постулаты Эйнштейна
9. Сущность СТО
10. Следствия СТО
  - 10.1. «Поезд Эйнштейна»
  - 10.2. «Парадокс близнецов»
11. Элементы релятивистской динамики
12. Общая теория относительности
13. Основные принципы общей теории относительности
  - 12.1. Необходимость релятивистской теории гравитации
  - 12.2. Принцип равенства гравитационной и инертной масс
  - 12.3. Пространство-время ОТО и сильный принцип эквивалентности
14. Уравнения Эйнштейна
15. Основные следствия ОТО
16. Проблемы ОТО
  - 16.1. Проблема энергии
  - 16.2. ОТО и квантовая физика
17. Опыты подтверждающие общую теорию относительности

# Рождение теории

Великий немецкий ученый-физик Альберт Эйнштейн (1879-1955) до 1933 г. жил в Германии, затем в США. Член многих академий наук, почетный член Академии наук СССР, лауреат Нобелевской премии 1921г. Выдающийся вклад Эйнштейна в науку - создание теории относительности. В 1905г. им была опубликована в почти законченном виде специальная, или частичная, теория относительности.





Галилео Галилей

# Принцип относительности

Г. Галилеем было установлено, что все механические явления в различных инерциальных системах протекают одинаково, т.е. никакими механическими опытами, проводимыми «внутри» данной инерциальной системы, невозможно установить, покоится данная система или движется прямолинейно и равномерно. Это положение названо *принципом относительности Галилея*.

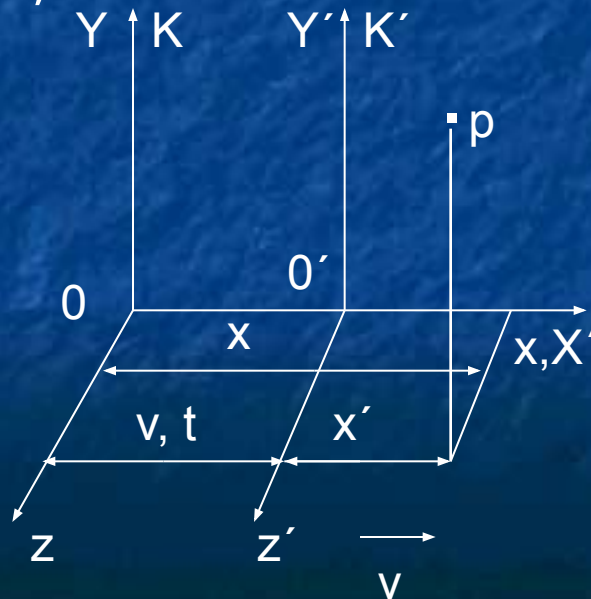
Принцип относительности Галилея является обобщением многочисленных опытов. По принципу Галилея, все системы отсчета, которые относительно инерциальной движутся равномерно и прямолинейно, также являются инерциальными. Систему, движущуюся ускоренно относительно инерциальной, называют *неинерциальной*.

# Преобразования Галилея

Для тех случаев, когда движение тела необходимо описать в другой системе отсчета, найдём формулы преобразования координат при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Допустим, инерциальная система  $K'$  движется со скоростью  $v$  вдоль оси  $Ox$  относительно другой инерциальной системы  $K$ . Для простоты предположим, что оси координат систем  $K$  и  $K'$  в начальный момент времени  $t=t'=0$  совпадали.

Допустим, материальная точка  $P$  покоится относительно системы  $K$ . Её положение в системе  $K$  характеризуется радиусом-вектором  $r$  или координатами  $x, y, z$ . Относительно системы  $K'$  эта точка движется и её положение в системе  $K'$  характеризуется радиусом-вектором  $r'$  или координатами  $x', y', z'$ .

Время в обеих инерциальных системах отсчета  $K$  и  $K'$  течет одинаково, часы синхронизированы, т.е.  $t=t'$ .



Связь между радиусами-векторами  $r'$  и  $r$  одной и той же точки  $P$  в системах  $K$  и  $K'$  имеет вид

$$r' = r - vt.$$

Это соотношение можно записать для каждой из декартовых координат. С учетом того, что  $t=t'$ , получим:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

Эти уравнения называют *прямыми преобразованиями Галилея*.

Если материальная точка  $P$  неподвижна в системе  $K'$ , то уравнение её движения в системе  $K$  можно записать с помощью *обратных преобразований Галилея*:

$$r = r' + vt,$$
$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z'.$$



Лоренц Г.А.



# Преобразования Лоренца

Преобразования Галилея исходят из предположения, что синхронизация часов осуществляется с помощью мгновенно распространяющихся сигналов. Однако таких сигналов в действительности не существует.

Существование верхней границы для скорости распространения сигналов привело к другим формулам преобразования, позволяющим по координатам и времени произвольного события, найденным в определенной инерциальной системе  $K$ , найти координаты того же самого события в любой другой инерциальной системе  $K'$ , движущейся относительно  $K$  в направлении оси  $x$  прямолинейно и равномерно со скоростью  $v$ :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - v \cdot x/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Из преобразований Лоренца вытекает целый ряд следствий. В частности, из них следует релятивистский эффект замедления времени и лоренцево сокращение длины. Пусть, например, в некоторой точке  $x'$  системы  $K'$  происходит процесс длительностью  $\tau_0 = t'_2 - t'_1$  (собственное время), где  $t'_1$  и  $t'_2$  – показания часов в  $K'$  в начале и конце процесса. Длительность  $\tau$  этого процесса в системе  $K$  будет равна

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 + vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{t'_1 + vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Можно показать, что из преобразований Лоренца вытекает релятивистское сокращение длины.

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2} = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}.$$

При  $v \ll c$  преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея. Теория относительности не отвергает преобразования Галилея, а включает их как частный случай, справедливый при малых  $V$ .

Из преобразований Лоренца следует, что скорость  $V$  не может быть равна или больше скорости света  $C$ , так как подкоренное выражение при  $V=C$  обращается в нуль, а при  $V>C$  отрицательно и преобразования Лоренца теряют физический смысл

# Специальная теория относительности

**Специальная теория относительности (СТО), частная теория относительности** — теория, заменившая механику Ньютона при описании движения тел со скоростями, близкими к скорости света. При малых скоростях различия между результатами СТО и ньютоновской механикой становятся незначительными.

# Создание СТО

Специальная теория относительности была разработана в начале XX века усилиями Г. А. Лоренца, А. Пуанкаре и А. Эйнштейна. Вопрос приоритета в создании СТО имеет дискуссионный характер: основные положения и полный математический аппарат теории, включая групповые свойства преобразований Лоренца, в абстрактной форме были впервые сформулированы А. Пуанкаре в работе «О динамике электрона» на основе предшествующих результатов Г. А. Лоренца, а явный абстрактный вывод базиса теории — преобразований Лоренца, из минимума исходных постулатов был дан А. Эйнштейном в практически одновременной работе «К электродинамике движущихся сред». По этому поводу в англоязычной Википедии есть отдельная статья.

# Релятивистская теория

В 1905 г. Эйнштейн опубликовал статью «К электродинамике движущихся тел», в которой сформулировал основные положения своей релятивистской теории - специальной теории относительности. Эта теория, считая, что все инерциальные системы координат совершенно равноправны и в отношении механических, и электромагнитных явлений, а скорость света инвариантна во всех инерциальных системах отсчета, разрешала противоречия классической физики тем, что содержала новый взгляд на пространство и время. Эйнштейн в основу специальной теории относительности заложил два постулата:

**1. Принцип относительности Эйнштейна.** Уравнения, выражающие законы природы инвариантны (неизменны) по отношению к преобразованию координат и времени от одной инерциальной системы отсчета к другой.

**2. Принцип постоянства скорости света.** Скорость света в пустоте одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от движения источника или приемника света. Скорость света в вакууме всегда постоянна и равна 300000 км/с, она является предельной скоростью распространения любого сигнала.

# Постулаты Эйнштейна

В основе СТО лежат два постулата, являющиеся обобщением экспериментально установленных закономерностей.

1. В любых инерциальных системах отсчета все физические явления протекают одинаково (принцип относительности Эйнштейна).

Принцип относительности Эйнштейна является обобщением принципа относительности Галилея, который утверждает одинаковость *механических явлений* во всех инерциальных системах отсчета.

2. Скорость света не зависит от скорости движения источника во всех инерциальных системах отсчёта.

Формулировка второго постулата может быть шире: «Скорость света постоянна во всех инерциальных системах отсчёта»

Экспериментальная проверка постулатов СТО в известной степени затруднена проблемами философского плана: возможностью записи уравнений любой теории в инвариантной форме безотносительно к её физическому содержанию, и сложности интерпретации понятий «длина», «время» и «инерциальная система отсчёта» в условиях релятивистских эффектов.

# Сущность СТО

Следствием постулатов СТО являются преобразования Лоренца, заменяющие собой преобразования Галилея для нерелятивистского, «классического» движения. Эти преобразования связывают между собой координаты и времена одних и тех же событий, наблюдаемых из различных инерциальных систем отсчёта.

Специальная теория относительности получила многочисленные подтверждения на опыте и является безусловно верной теорией в своей области применимости. Специальная теория относительности перестает работать в масштабах всей Вселенной, а также в случаях сильных полей тяготения, где её заменяет более общая теория — **общая теория относительности**. Специальная теория относительности применима и в микромире, её синтезом с квантовой механикой является квантовая теория поля.



# Следствия СТО

К концу XIX в. развитие физики привело к осознанию противоречий и несовместимости трех принципиальных положений классической механики:

- скорость света в пустом пространстве всегда постоянна, независимо от движения источника или приемника света;
- в двух системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, все законы природы строго одинаковы, и нет никакого средства обнаружить абсолютное прямолинейное и равномерное движение (принцип относительности);
- координаты и скорости преобразовываются из одной инерциальной системы в другую согласно классическим преобразованиям Галилея.

Альберт Эйнштейн возникшие противоречия иллюстрировал мысленным экспериментом, который получил название «Поезд Эйнштейна»:

Представим себе наблюдателя, едущего в поезде и измеряющего скорость света, испускаемого в направлении движения поезда фонарями на обочине дороги, т.е. движущегося со скоростью  $s$  в системе отсчета - железнодорожное полотно, относительно которого поезд движется со скоростью  $v$ . Какова же скорость света относительно движущегося вагона? Она равна  $w = s - v$ . Т.е. выходит, что скорость света разная по отношению к различным инерциальным системам отсчета, в роли которых в данном случае выступают железнодорожное полотно и движущийся вагон. А это, с одной стороны, противоречит принципу относительности, согласно которому физические процессы происходят одинаково во всех инерциальных системах отсчета; с другой стороны, - положению о постоянной скорости света, т.к. уже надежно было доказано, что скорость света не зависит от скорости движения источника света и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Она конечна и является предельной скоростью распространения любого сигнала.'

## «Парадокс Близнецов»

Из специальной теории относительности следует не только относительность одновременности двух событий, происшедших в разных точках пространства, но также и относительность измерений длин и интервалов времени, произведенных в разных системах отсчета, движущихся относительно друг друга. То есть, расстояние между двумя материальными точками (длина тела) и длительность происходящих в теле процессов являются не абсолютными, а относительными величинами. При движении, приближающемся к скорости света, замедляется время, замедляются все процессы, происходящие в системе, в том числе в живых организмах, изменяются - сокращаются продольные (вдоль движения) размеры тел.

В этом отношении показателен пример, называемый «парадокс близнецов». Из двух близнецов, космонавт, вернувшийся на Землю, окажется моложе своего брата, оставшегося на Земле, т. к. на космическом корабле, двигающемся с огромной скоростью, темп времени замедляется и все процессы проходят медленнее, чем на Земле. Парадокс близнецов был подтвержден экспериментально. Однако, эффекты замедления времени очень малы ( $v_0 / c \ll 1$ ), и мы пока не умеем их практически использовать.

Так же, как и в случае квантовой механики, многие предсказания теории относительности противоречат интуиции, кажутся невероятными и невозможными. Это, однако, не означает, что теория относительности неверна. В действительности, то, как мы видим (либо хотим видеть) окружающий нас мир и то, каким он является на самом деле, может сильно различаться. Уже больше века учёные всего мира пробуют опровергнуть СТО. Ни одна из этих попыток не смогла найти ни малейшего изъяна в теории. О том, что теория верна математически, свидетельствует строгая математическая форма и чёткость всех формулировок. О том, что СТО действительно описывает наш мир, свидетельствует огромный экспериментальный опыт. Многие следствия этой теории используются на практике. Очевидно, что все попытки опровергнуть СТО, обречены на провал, хотя бы потому, что сама теория опирается на три постулата Галилея (которые несколько расширены), на основе которых построена механика Ньютона, а также на дополнительный постулат о постоянстве скорости света во всех системах отсчета. Все четыре не вызывают какого либо сомнения. Более того, точность их проверки является настолько высокой, что постоянство скорости света положено в основание определения метра — единицы длины, в результате чего скорость света становится константой автоматически, если измерения вести в соответствии с метрологическими требованиями.

# Элементы релятивистской динамики

Все уравнения, описывающие законы природы, должны быть инвариантны относительно преобразований Лоренца. К моменту создания СТО теория, удовлетворяющая этому условию, уже существовала – это электродинамика Максвелла. Однако уравнения классической механики Ньютона оказались неинвариантными относительно преобразований Лоренца, и поэтому СТО потребовала пересмотра и уточнения законов механики.

В основу такого пересмотра Эйнштейн положил требования выполнимости закона сохранения импульса и закона сохранения энергии в замкнутых системах. Для того, чтобы закон сохранения импульса выполнялся во всех инерциальных системах отсчета, оказалось необходимым изменить определение импульса тела. Вместо классического импульса в СТО **релятивистский импульс** тела с массой  $m$ , движущегося со скоростью записывается в виде

$$\vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Релятивистский импульс тела можно рассматривать как произведение релятивистской массы тела на скорость его движения. Релятивистская масса  $m$  тела возрастает с увеличением скорости по закону

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

где  $m_0$  — масса покоя тела,  $v$  — скорость его движения.

При  $v/c \ll 1$  выражение для импульса переходит в то, которое используется в механике Ньютона  $p = m_0 v$ , где под  $m$  понимается масса покоя ( $m = m_0$ ), ибо при  $v/c \ll 1$  различие  $m$  и  $m_0$  несущественно.

Закон пропорциональности массы и энергии является одним из самых важных выводов СТО. Масса и энергия являются различными свойствами материи. Масса тела характеризует его инертность, а также способность тела вступать в гравитационное взаимодействие с другими телами. Важнейшим свойством энергии является ее способность превращаться из одной формы в другую в эквивалентных количествах при различных физических процессах – в этом заключается содержание закона сохранения энергии. Пропорциональность массы и энергии является выражением внутренней сущности материи. Формула Эйнштейна

$$E_0 = mc^2$$

выражает фундаментальный закон природы, который принято называть **законом взаимосвязи массы и энергии**.

для покоящихся частиц ( $p = 0$ )  $E = E_0 = mc^2$

Такие частицы называются **безмассовыми**. Для безмассовых частиц связь между энергией и импульсом выражается простым соотношением

$$E = pc.$$

# Общая теория относительности

В 1907-1916 гг. создана общая теория относительности, которая объединяет современное учение о пространстве и времени с теорией тяготения. По масштабу переворота, совершенного Эйнштейном в физике, его часто сравнивают с Ньютоном.

Общая теория относительности (ОТО) — физическая теория пространства-времени и тяготения, основана на экспериментальном принципе эквивалентности гравитационной и инерционной масс и предположении о линейности связи между массой и вызываемыми ею гравитационными эффектами.



# Основные принципы общей теории относительности

## ► Необходимость релятивистской теории гравитации

Теория гравитации Ньютона основана на понятии силы тяготения, которая является дальнедействующей силой — она действует мгновенно на любом расстоянии. Этот мгновенный характер действия несовместим с полевой парадигмой современной физики, и, в частности, со специальной теорией относительности, выведенной Эйнштейном, Пуанкаре и Лоренцем в 1905 году. Действительно, в этой теории никакая информация не может распространиться быстрее скорости света в вакууме.

С принципом инвариантности законов природы, универсальный характер которого был предположен Эйнштейном, учёные предприняли «поход за святым Граалем» — теорией гравитации, которая бы была совместима с ним. Результатом этого поиска явилась общая теория относительности, основанная на принципе тождественности гравитационной и инертной массы.

## ► Принцип равенства гравитационной и инертной масс

В классической механике Ньютона существует два понятия массы: первое относится ко второму закону Ньютона, а второе — к закону всемирного тяготения. Первая масса — инертная (или инерционная) — есть отношение *негравитационной* силы, действующей на тело, к его ускорению. Вторая масса — гравитационная (или, как её иногда называют, тяжёлая) — определяет силу притяжения тела другими телами и его собственную силу притяжения. Вообще говоря, эти две массы измеряются, как видно из описания, в различных экспериментах, поэтому совершенно не обязаны быть пропорциональными друг другу. Их строгая пропорциональность позволяет говорить о единой массе тела как в негравитационных, так и в гравитационных взаимодействиях. Подходящим выбором единиц можно сделать эти массы равными друг другу.

Иногда принцип равенства гравитационной и инертной масс называют слабым принципом эквивалентности. Альберт Эйнштейн положил его в основу **общей теории относительности.**

## ► Пространство-время ОТО и сильный принцип эквивалентности

Часто неправильно считают, что в основе общей теории относительности лежит принцип эквивалентности гравитационного и инерционного поля, который обычно формулируют так:

*«Достаточно малая по размерам физическая система, находящаяся в гравитационном поле, по поведению неотличима от такой же системы, находящейся в ускоренной (относительно инерциальной системы отсчёта) системе отсчёта, погружённой в плоское пространство-время специальной теории относительности».*

Иногда тот же принцип постулируют как  
«локальную справедливость  
специальной теории относительности»  
или называют «сильным принципом  
эквивалентности».

Исторически этот принцип действительно сыграл большую роль в становлении общей теории относительности и использовался Эйнштейном при её разработке. Однако в самой окончательной форме теории он на самом деле не содержится, так как пространство-время как в ускоренной, так и в исходной системе отсчёта в специальной теории относительности является неискривленным — плоским, а в общей теории относительности оно искривляется любым телом и именно его искривление вызывает гравитационное притяжение тел.

Аналогичным образом не совсем корректным является и название «общая теория относительности». Она является лишь одной из множества теорий гравитации, рассматриваемых физиками сейчас, в то время как специальная теория относительности является практически общепринятой научным сообществом и составляет краеугольный камень базиса современной физики.

# Значение ОТО для современной физической картины мира

- Если СТО связывает воедино пространство и время, то ОТО устанавливает триединую связь: пространство-время-материя. Суть этой связи была пояснена самим Эйнштейном: *«Раньше полагали, что если бы из Вселенной исчезла вся материя, то пространство и время сохранились бы; теория относительности утверждает, что вместе с материей исчезли бы и пространство, и время».*
- Теория относительности полностью отказывается от существующих в классической физике представлений о пространстве, времени и материи. Относительны не только все измерения в пространстве и времени (так как они зависят от движения наблюдателя), но и сама структура пространства-времени, которая определяется распределением вещества во Вселенной. А так как вещество распределено во Вселенной неравномерно, то пространство искривлено и время в разных частях Вселенной течет с разной скоростью.

# Основные следствия ОТО

Первыми предсказанными и проверенными экспериментальными следствиями общей теории относительности стали три классических эффекта, перечисленных ниже в хронологическом порядке их первой проверки:

1. Дополнительный сдвиг перигелия орбиты Меркурия по сравнению с предсказаниями по механике Ньютона.
2. Отклонение светового луча в гравитационном поле Солнца.
3. Гравитационное красное смещение или, что то же самое, замедление времени в гравитационном поле.

# Проблемы ОТО

## ► Проблема энергии

Так как энергия, с точки зрения математической физики, представляет собой величину, сохраняющуюся из-за однородности времени, а в общей теории относительности, в отличие от специальной, вообще говоря, время неоднородно, то закон сохранения энергии может быть выражен в ОТО только локально, то есть в ОТО не существует такой величины, эквивалентной энергии в СТО, чтобы интеграл от неё по пространству сохранялся при движении по времени.

## ► ОТО и квантовая физика

Главной проблемой ОТО с современной точки зрения является невозможность построения для неё квантово-полевой модели каноническим образом.

Сложности в реализации такой программы для ОТО троякие: во-первых, переход от классического гамильтониана к квантовому неоднозначен, так как операторы динамических переменных не коммутируют между собой; во-вторых, гравитационное поле относится к типу полей со связями, для которых структура уже классического фазового пространства достаточно сложна, а квантование их наиболее прямым методом невозможно; в-третьих, в ОТО нет выраженного направления времени, что составляет трудность при его *необходимом* выделении и порождает проблему интерпретации полученного решения.

# Опыты, подтверждающие общую теорию относительности

## ► Проверка принципа эквивалентности

Поскольку в основе теории тяготения Эйнштейна лежит принцип эквивалентности, его проверка с максимально возможной точностью является важнейшей экспериментальной задачей. Л.

Этвиш (L. Eotvos) с помощью крутильных весов доказал справедливость принципа эквивалентности с точностью до  $10^{-8}$ , Р. Дикке (R. Dicke) с сотрудниками довел точность до  $10^{-10}$ , а В.Б. Брагинский с сотрудниками -- до  $10^{-12}$ .



## ► Отклонение луча света в поле Солнца

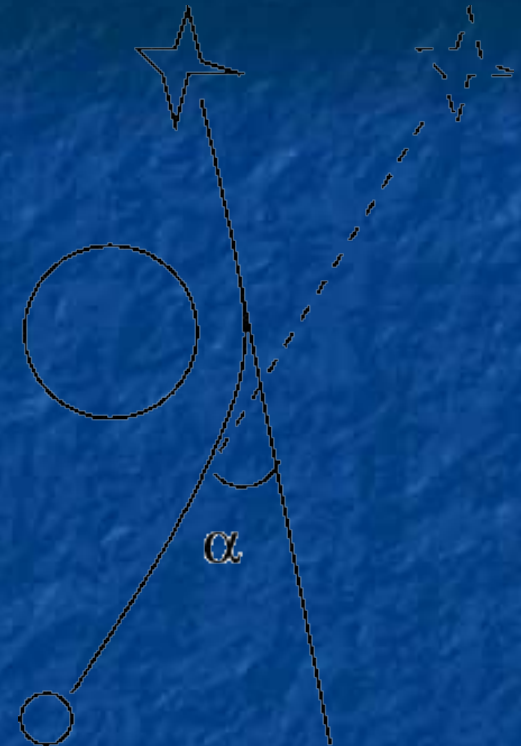
Одним из косвенных экспериментальных подтверждений ОТО является отклонение луча света в поле Солнца. Из эксперимента было получено, что электромагнитное поле взаимодействует с гравитационным полем.

Мы измеряем время, когда мы перестаем видеть эту звезду (эти эксперименты проводятся во время полных солнечных затмений), и извлекаем угол отклонения луча света от прямой. Из теории угол отклонения для Солнца равен:

$$\alpha = -\frac{2r_g}{p}$$

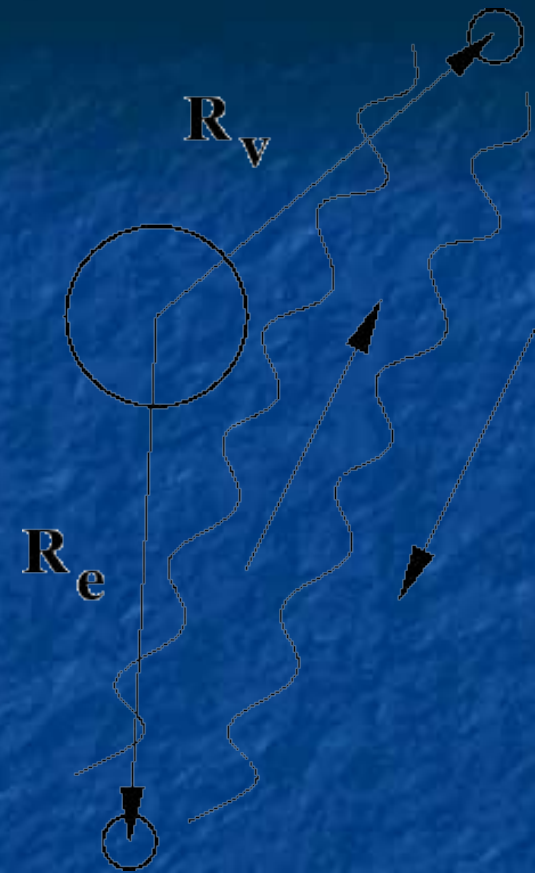
Где  $r_g$  гравитационный радиус Солнца

$p$  прицельный параметр (в данной постановке эксперимента он примерно равен радиусу Солнца)



## ► Запаздывание сигнала в поле Солнца

Еще один косвенный эксперимент, подтверждающий ОТО -- запаздывание сигнала в поле Солнца. Сигнал посылается на Венеру и регистрируется время прихода сигнала обратно. Значение времени прохождения сигнала туда и обратно в поле Солнца (гравитационный объект искажает пространство-время) отличается от значения если бы Солнца не было (свободное пространство -- нет искажений).



На протяжении более 80 лет теория Эйнштейна демонстрирует свою необычайную стройность, экономность построения и красоту. На данный момент существует множество экспериментов и наблюдений, подтверждающих правильность общей теории относительности Эйнштейна и не наблюдается физических явлений, противоречащих ей. Следовательно, ОТО скорее *верна* чем нет.

Работа над этой теорией была нелегкой. Эйнштейн писал: *«В свете уже достигнутых знаний то или иное удачное достижение кажется почти само собой разумеющимся, и его суть без особого труда способен ухватить любой мало-мальски грамотный студент. Но годы изнурительных поисков во мгле, наполненные страстным стремлением к истине, сменой уверенности и разочарования, и, наконец, выход работы в свет – это способен понять лишь тот, кто пережил все*