**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное**

**учреждение высшего образования**

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ**

**Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

**Эссе**

Предпосылки создания А. Эйнштейном специальной теории относительности. Постулаты Эйнштейна.

Студентки 1 курса 151 группы

направления 09.03.04 «Программная инженерия»

факультет компьютерных наук и информационных технологий

Саратов 2024

**Содержание**

Введение

Цель работы

Актуальность

Задачи

1. Предпосылки создания теории относительности А.Эйнштейна.

1.1. Относительность движения по Галилею.

1.2. Математическое выражение принципа относительности классической механики.

1.3. Принцип относительности и законы Ньютона.

1.4. Преобразования Галилея

1.5. Принцип относительности в электродинамике.

1.6. Преобразования Лоренца.

2. Теория относительности.

2.1. Создание специальной теории относительности (СТО).

2.2. Создание общей теории относительности (ОТО).

3. Экспериментальная проверка общей теории относительности.  
 3.1 Смещение перигелия Меркурия.

3.2. Отклонение лучей света в поле тяжести.

3.3. Гравитационное смещение спектральных линий.

Заключение

Используемая литература

**Введение**

Принцип относительности - фундаментальный физический закон, согласно которому любой процесс протекает одинаково в изолированной материальной системе, находящейся в состоянии покоя, и в такой же системе в состоянии равномерного прямолинейного движения. Состояния движения или покоя определяются по отношению к произвольно выбранной инерциальной системе отсчета. Принцип относительности лежит в основе специальной теории относительности Эйнштейна.

Инерциальная система - понятие классической механики, первой фундаментальной физической теории, которая имеет высокий статус и в современной физике. Основы этой теории заложил И.Ньютон.

«Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние» так Ньютон сформулировал - закон, который сейчас называется первым законом механики Ньютона, или законом инерции.

Система отсчета, в которой справедлив закон инерции: материальная точка, когда на нее не действуют никакие силы (или действуют силы взаимно уравновешенные), находится B состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, называется инерциальной. Всякая система отсчета, движущаяся по отношению к ней поступательно, равномерно и прямолинейно, есть также инерциальная.

Теория относительности — физическая теория пространства и времени. В частной (специальной) теории относительности рассматриваются только инерциальные системы отсчета. Явления, описываемые теорией относительности, называются релятивистскими (от лат. «относительный») и проявляются при скоростях, близких к скорости света в вакууме (эти скорости тоже принято называть релятивистскими).

Существует фактически две различных теории относительности, известных в физике, одна из HHX называется специальной (частной) теорией относительности, другая общей теорией относительности. Альберт Эйнштейн предложил первую из них в 1905 г., вторую в 1916 г. Принимая во внимание, что специальная теория относительности связана, B первую очередь, с электрическими и магнитными явлениями и с их распространением в пространстве и времени, общая теория относительности была разработана, прежде всего, чтобы иметь дело с тяготением. Обе теории сосредотачиваются на новых подходах к пространству и времени, подходах, которые отличаются глубоко от тех, которые используются в каждодневной жизни; но релятивистские понятия пространства И времени неразрывно вплетаются в любую современную интерпретацию физических явлений в пределах от атома до вселенной в целом.

**Цель работы:** изучение создания специальной и общей теорий относительности Альбертом Эйнштейном.

**Актуальность:** Сейчас нет практически ни одной ветви современной физики, где, так или иначе, не присутствовали бы фундаментальные понятия квантовой механики или теории относительности. Выражение E=mc2 крылатая фраза, знакомая широкой публике.

**Задачи**: Теория, которая была опубликована почти столетие назад, уже выдержала все испытания, которым ее подвергали. Но ученые пытались найти в ней слабое звено, которое могло бы подвести к совершенно другой трактовке. Например, основы теории гравитации Эйнштейна несовместимы квантовой теорией, которая объясняет окружающий мир на атомном и элементарном, т.е. внутриатомном уровне.

1. **Предпосылки создания теории относительности А.Эйнштейна.**

**1.1. Относительность движения по Галилею**.

Возникновение теории относительности связано с неспособностью классической физики объяснить разнообразные физические явления, особенно проблему распространения света в движущейся среде. Одним из первых шагов на пути к формированию теории относительности стал принцип относительности Галилея, утверждающий равноправие всех инерциальных систем отсчета. Этот принцип является основой классической механики и математически выражает инвариантность уравнений механики относительно преобразований координат движущихся точек и времени при переходе между инерциальными системами отсчета.

Первоначальные идеи относительности механического движения были сформулированы Галилеем Галилеем в 1638 году в его работе "Диалог о двух основных системах мира - птолемеевой и коперниковой". Принцип относительности стал одним из фундаментальных принципов физики, согласно которому нельзя определить неподвижен ли объект или движется равномерно и прямолинейно, находясь внутри него. Галилей использовал наглядные примеры для объяснения этого принципа, подчеркивая необходимость рассмотрения различных точек зрения. Суть принципа относительности заключается в том, что нет способа определить абсолютное движение, и все инерциальные системы отсчета равносильны.

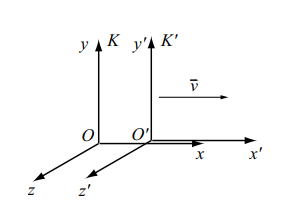
1. движение относительно: по отношению к наблюдению “в помещении под палубой корабля” и к тому, кто смотрит с берега .движение выглядит по-разному;
2. физические законы, управляющие движением тел в этом помещении, не зависят от того, как движется корабль (если только это движение равномерно). Иначе говоря, никакие опыты в “закрытой кабине” не позволяют определить, покоится кабина или движется равномерно и прямолинейно.

Таким образом, Галилей пришел к выводу, что механическое движение относительно, а законы, которые его определяют, абсолютны, то есть не имеют значения. Эти положения в корне отличались от общепринятых в то время представлений Аристотеля о существовании “абсолютного покоя” и “абсолютного движения”.

**1.2. Математическое выражение принципа относительности классической механики.**

Многие законы физики выражаются с помощью дифференциальных уравнений, которые не зависят от начального состояния физической системы. В частности, это относится к уравнениям движения классической механики (второй закон Ньютона). Из принципа относительности следует, что математическая форма этих законов должна быть одинаковой для всех инерциальных систем отсчета. Другими словами, уравнения законов должны сохранять свой вид при переходе от описания явления в одной инерциальной системе отсчета к другой. Это требование называется инвариантностью уравнения по отношению к преобразованию в другую систему отсчета.

Рассмотрим описание некоторого явления в двух инерциальных системах отсчета - в системах K и K', движущихся относительно друг друга со скоростями, постоянными по величине и направлению. Предположим, что направления координатных осей в системах K и K’ совпадают, а оси Ох и Ох’ совмещены с вектором скорости системы K’ относительно K.



В случае совпадения точек О с О’, то есть совпадения координатных осей двух систем отсчета, началом координат принимается момент времени t = 0. Положение материальной точки (частицы) определяется координатами х, у, z и временем t в системе отсчета К, а также координатами х', y', z' и временем t’ в системе отсчета К’. Любое событие, независимо от его характера (например, кратковременная вспышка света, столкновение частиц и т.д.), определяется местом и моментом времени его возникновения в выбранной системе отсчета. Физическое явление представляет собой совокупность элементарных событий, поэтому описание одного события служит основой для описания любого физического процесса.

**1.3. Принцип относительности и законы Ньютона.**

Принцип относительности Галилея неотделимо поместился в построенную И.Ньютоном классическую механику. Ее основу составляют три “аксиомы” - три знаменитых закона Ньютона. Уже первый из них, гласит: «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не принуждается приложенными силами изменить это состояние», говорит об относительности движения и одновременно указывает на существование систем отсчета (они были названы инерциальными), в которых тела, не испытывающие внешних воздействий, движутся «по инерции», не ускоряясь и не замедляясь. Как раз такие инерциальные системы присутствуют и при формулировке двух остальных законов Ньютона. При переходе из одной инерциальной системы в другую модифицируются многие величины, характеризующие движение тел, например, их скорости или формы траектории движения, но законы движения, то есть

соотношения, объединяющие эти величины, остаются постоянными.

**1.4. Преобразования Галилея.**

Как связаны между собой координаты и время одного и того же события, определенные в двух разных системах отсчета К и К’. В классической дорелятивистской физике принималось, что существование единого мирового времени t, одинакового для всех систем отсчета; поэтому по классическим представлениям для одного и того же события

t = t’. В действительности такая возможность определять время наступления событий во всех системах отсчета по одним и тем же часам неявно связана с предположением о существовании сигналов, распространяющихся с бесконечно большой скоростью.

Таким образом, согласно классическим представлениям о времени, если два события происходят одновременно с точки зрения некоторой системы отсчета, то эти события будут одновременными и для наблюдателя в любой другой системе отсчета. Точно так же промежуток времени между двумя событиями, в силу абсолютного характера времени, по классическим представлениям должен быть одинаковым во всех инерциальных системах отсчета. Аналогично, в дорелятивистской физике предполагалось, что пространственное рас- стояние между двумя точками, измеренное в один и тот же момент времени, во всех системах отсчета должно быть одинаковым, т. е. абсолютным, не зависящим от системы отсчета.

На основе этих классических представлений о пространстве и времени сразу устанавливается вид преобразования, связывающего координаты х, у, z и время t некоторого события, зафиксированные в системе отсчета К, с координатами и временем х', у', z', t' этого же события, зафиксированными в другой системе отсчета К', движущейся относительно К с постоянной скоростью в направлении оси Оx:

[x = x’+vt](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf),  [y = y’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf), [z = z’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf), [t = t’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf).

Эти простые формулы носят название преобразований Галилея. Вводя

радиусы-векторы r и r’, указывающие в каждой из систем К и К’ положение той точки, в которой произошло рассматриваемое событие, можно записать первые три соотношения преобразований Галилея в векторном виде: [r = r’ + vt.](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf)

Из преобразований Галилея сразу следует классический закон преобразования скорости частицы при переходе от одной системы отсчета к другой. Пусть радиус-вектор r(t) задает положение движущейся частицы в системе К, а г(t') — положение той же частицы в системе К'. Тогда [u = dr/dt](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf) - скорость этой частицы относительно системы К, а [u = dr’/dt'](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf) - скорость той же частицы относительно системы отсчета К’. Так как t = t', скорость в системе К’ можно находить дифференцированием соответствующего радиуса-вектора частицы r по t , а не по t’: [u’ = dr’/dt](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf). Поэтому почленным дифференцированием уравнений ([x=x’+vt, y = y’, z = z’,t = t’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf)), выражающих преобразования Галилея, получаем: [, ,](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf) .

Таким образом, преобразование скорости частицы при переходе от одной системы отсчета к другой в классической механике сводится просто к векторному сложению относительной

([u’= dr’/dt’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf)) и переносной скоростей: [u = u’+ v’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf).

**1.5. Принцип относительности в электродинамике.**

Напоследок 60-х – начале 70- х годов XIX столетия была построена новая фундаментальная физическая теория – электродинамика Дж. К. Максвелла. Принципиальная новизна этой теории заключалась в первую очередь в том, что Максвелл, руководствуясь мыслями Фарадея, придерживался концепции близкодействия, тесно связанной с понятием поля. В электродинамике Максвелла взаимодействие передавалось с конечной скоростью – скоростью распространения поля. Теория давала вполне определенное значение для этой скорости; в частности, в вакууме скорость распространения электромагнитного поля c выражалась через электрическую постоянную и магнитную постоянную по формуле:

Из уравнений Максвелла, неясно, в какой системе отсчета электромагнитные волны в вакууме движутся со скоростью c. Естественно было бы считать, что – в любой ИСО. Однако такое соображение противоречит классическому закону сложения скоростей, т.е. преобразованиям Галилея. А так как последнее считалось в XIX веке самоочевидным, то практически все физики безоговорочно придерживались точки зрения самого Максвелла, который полагал, что уравнения для электромагнитного поля (уравнения Максвелла) формулируются в системе отсчета, связанной с эфиром – особой средой, выступающей в качестве материального носителя всех электромагнитных (а значит, и оптических) явлений. Собственно в данной системе отсчета величина скорости света равна электродинамической постоянной c. В любой другой ИСО скорость света будет складываться по закону сложения скоростей со скоростью источника относительно эфира, т. е. уже не будет по модулю равна c. Таким образом ИСО, связанная с эфиром, оказывается выделенной и может претендовать на роль абсолютной системы отсчета. Это значит, что принцип относительности в электродинамике несправедлив. Однако принцип относительности в электродинамике можно было попытаться сохранить даже в рамках традиционных для того времени представлений. Существовали две возможных модели поведения эфира по отношению к движущимся к сквозь него телам:

1) эфир может полностью увлекаться ими;

2) он может оставаться неподвижным.

Две эти альтернативы вызвали в конце XIX века резкий подъем интереса к проблеме распространения света в движущихся средах.

1. Немецкий физик Генрих Герц (1857 – 1894) предположил, что эфир всецело увлекается движущимися сквозь него телами. Это значит, что электродинамические явления аналогичны акустическим, которые мы наблюдаем, находясь в закрытом вагоне поезда. В рамках этой гипотезы:

а) принцип относительности универсален;

б) ньютонова механика верна;

в) уравнения Максвелла требуют модификации.

Поэтому необходимо было построить новую электродинамику, отличную от электродинамики Максвелла, что сам же Герц и сделал. Необходимые для проверки новой теории наблюдения были проведены задолго до Герца. Наблюдения, необходимые для проверки новой теории, были сделаны задолго до Герца. Во - первых, наблюдения за аберрацией звездного света (Дж.Брэдли, 1728), а во - вторых эксперименты Физо (1851). Оба эксперимента показали, что гипотеза о полностью увлеченном эфире была исключена на опыте.

2. Гипотезу противоположного характера высказал голландский физик Хендрик Антон Лоренц (1853–1928). Согласно гипотезе Лоренца, эфир полностью неподвижен и не участвует в движении материальных тел. Электродинамические явления в этом случае аналогичны акустическим явлениям, наблюдаемые, когда мы находимся на движущейся открытой платформе. Другими словами, согласно Лоренцу, должен существовать “эфирный ветер”.

В данной схеме:

а) принцип относительности в механике справедлив;

б) принцип относительности в электродинамике несправедлив;

в) уравнения Ньютона и уравнения Максвелла в вакууме – правильны, при этом последние формулируются в системе отсчета, связанной с эфиром.

Электродинамика материальной среды в движении, разработанная Лоренцем, была частью созданной им электронной теории. В частности, Лоренц показал, что для опытного подтверждения его гипотезы об «эфирном ветре» необходимы измерения с точностью порядка [.](https://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)

Идею соответствующего эксперимента предложил еще Максвелл за год до смерти, в 1878 г. Опыт, предложенный Максвеллом, был реализован американским экспериментатором Альбертом Майкельсоном (1852–1931). В эксперименте, проведенном [Майкельсона](https://www.youtube.com/watch?v=HDEB47x_huA) в Берлине в 1881 г., где Майкельсон проходил стажировку у Г. Гельмгольца, свет от наземного источника разделялся стеклянной пластиной на два луча. На примерно равных расстояниях от стеклянных пластин на путях отраженного и проходящего лучей и перпендикулярно к ним расположены два зеркала, отражающие свет обратно к пластинке. Если, как предполагалось, скорость света не одинакова в двух направлениях,перпендикулярных друг другу, между лучами возникает разность фаз и интерференционная картина будет смещена. Точность интерферометра Майкельсона была такова, что «эфирный ветер» можно было обнаружить с точностью до 10 километров в секунду, что втрое меньше скорости Земли на околосолнечной орбите. Однако никакого «эфирного ветра» обнаружено не было. Позднее, вернувшись в США, [Майкельсон совместно с Морли](https://www.youtube.com/watch?v=lGLw531-7So) в 1887 г. провел аналогичный эксперимент с точностью в 20 раз выше, но результат все равно оказались отрицательным.

Результаты экспериментов Майкельсона не означают, что эфира не существует. Однако независимо от того, существует эфир или нет, результаты экспериментов Майкельсона означают, что скорость света изотропна при любой ИСО.

В результате в конце XIX – начале XX века в физике возникла парадоксальная ситуация:

а) явление аберрации доказывает, что эфир абсолютно неподвижен;

б) опыт Физо свидетельствует о частичном увлечении эфира;

в) опыт Майкельсона свидетельствует о полном увлечении эфира.

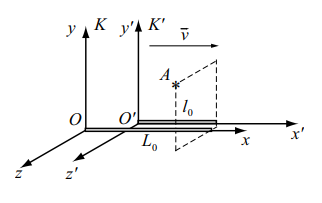
Кроме того, теории Герца и Лоренца, которые казались единственными альтернативными теориями, оказались несостоятельными. Для выхода из сложившейся ситуации было выдвинуто множество предположений. Упомянем лишь два из них, наиболее важных с исторической и физической точек зрения.

3. Согласно гипотезе сокращения Лоренца-Фицджеральда (1892 г.), представление о неподвижном эфире сохраняется, но считается, что тела, движущиеся в эфире, уменьшаются в размерах в направлении своего движения  [,](https://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka) где l – продольный размер тела в неподвижной системе отсчета, относительно которой тело движется со скоростью v,

а – собственная длина тела (размер тела в системе отсчета, относительно которой оно покоится). Важно подчеркнуть, что эта шкала имеет буквальное и прямое значение. Лоренц объяснял его изменением электрических сил, действующих между частицами в движущемся теле, а также предположил, что электроны сплющиваются при движении относительно эфира. Гипотеза сжатия объясняла отрицательные результаты эксперимента Майкельсона, но была введена только по этой причине и выглядела крайне искусственной. Более того, впоследствии выяснилось, что гипотеза не согласуется с экспериментальным данным (отметим, что гипотеза Лоренца – Фицджеральда не эквивалентна выводам СТО о сокращении предельного размера движущихся тел: они имеют совершенно разный смысл, и ни с одним из результатов экспериментальных данных СТО не согласуется). [Эксперимент Кеннеди-Торндайка](https://www.youtube.com/watch?v=3S4vfF2j2t0&t=20s) (1932 г.), в котором использовался разноплечный интерферометр и наряду с орбитальным движением Земли учитывалось также ее суточное вращение и движение Солнца. Из-за этих движений интерференционная картина должна была меняться в течение 12 часов и 6 месяцев, но этого не наблюдалось. Опыт Кеннеди Торндайка можно интерпретировать как доказательство инвариантности скорости света, то есть того, что значение не зависит от системы отсчета.

**1.6. Преобразования Лоренца.**

Рассмотрим событие А, описываемое двумя инерциальными системами отсчета К и К’. Как и прежде, предположим, что система К’ движется относительно K в положительном направлении оси Ох со скоростью и, и что в момент времени t = 0 начала координат систем отсчета К и К’ совпадают. Пусть координаты и время события А в системе К есть х, у, z и t, a в системе К’ - соответственно х', у', z' и t’.



Расстояние, перпендикулярное относительной скорости системы отсчета, одинаково для К и в К’, поэтому у = y’ и z = z’. Чтобы выразить координату х события А через х’ и t’, мысленно расположим жесткий стержень вдоль оси Ох от начала координат до точки х. Очевидно, что координата х события А - это просто собственная длина этого стержня. Обозначим ее через . Длина L этого же стержня в системе отсчета К’, относительно которой стержень движется со скоростью -, в соответствии с релятивистской формулой преобразования длины, дается выражением . С точки зрения наблюдателя в К’, длину стержня L можно представить как сумму расстояния vt' между точками О и О’ в момент времени t’, когда по его часам происходит событие А, и координаты х' события А. Таким образом,  [= x' + vt'.](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf) Учитывая, что = х, из этого получаем следующее уравнение, которое выражает координату х события А в системе К через координату x’ и время ť этого же события в системе отсчета К':

Чтобы получить недостающую формулу для момента времени t через х' и t', мысленно поместим теперь жесткий стержень в системе К’ протяженностью от начала координат О’ до точки х'. Очевидно, что координата х' события А - это собственная длина этого стержня. Обозначим ее . Для системы К этот стержень движется (вместе с системой К’) со скоростью , и его длина в К равна , т. е. [x’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf). Теперь наблюдатель в К может выразить координату х события А как сумму расстояния ОO' = vt между точкой О и точкой О’ в момент времени t, когда по его часам происходит событие А, и длины стержня . Так как = x', получаем [х = vt + x’](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf). Теперь выразим х через х’ и t’ с помощью (). В результате после несложных преобразований, мы получим окончательное выражение для t через х' и t':

Уравнения и дают законы необходимые для преобразования координат и времени любого события при переходе от одной инерциальной системы отсчета в другую. Они называются преобразованиями Лоренца.

Запишем их еще раз:

[, y = y’, z = z’,](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Lectures/Relativ.pdf)

**2. Теория относительности.**

Альберт Эйнштейн родился 14 марта 1879 года в городе Ульм (Германия) в небогатой еврейской семье. Летом 1880 года семья Эйнштейнов переехала в Мюнхен и открыла компанию по производству электрооборудования.

В 1894 году из-за проблем с бизнесом семья переехала в Италию (сначала в Милан, затем в Павию). Здесь Альберт Эйнштейн написал свою первую научную работу "Об исследовании состояния эфира в магнитном поле". В 1895 году Эйнштейн попытался поступить в престижный Технический университет в Цюрихе. Однако, успешно пройдя вступительные испытания по физике и математике, ему не удалось сдать общий экзамен, кроме того у него не было аттестата о среднем образовании (получил его в сентябре 1896 г. в школе швейцарского городка Арау по совету директора и преподавателей Политехникума, которые были поражены его способностями и рекомендовали подать документы на следующий год). В октябре 1896 года Эйнштейн уже без экзаменов поступил в политехникум. В 1901 году он получил диплом учителя физики и математики. Получив швейцарское гражданство (Эйнштейн не отказывался от гражданства этой страны до самой смерти), в 1902 году он поступил на работу в Швейцарское патентное бюро (Берн), где прослужил техническим экспертом до 1909 г.

Режим работы в бюро позволял Эйнштейну заниматься научными исследованиями. В 1905 г. в нескольких выпусках авторитетного немецкого журнала он опубликовал три статьи, радикально изменившие фундаментальную физику (позднее 1905 г. назовут "годом чудес"): первая - о теории относительности ("К электродинамике движущихся сред"), вторая - о броуновском движении частиц под действием ударов отдельных молекул ("О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты") и третья с теоретическим описанием фотоэффекта ("Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света").

Все три статьи были революционными, но наиболее радикальной была работа о специальной теории относительности (СТО).

**2.1. Создание специальной теории относительности (СТО).**

В 1905 году в немецком научном журнале «Anallen der Physik» была опубликована статья Эйнштейна под названием «К электродинамике движущихся сред». В этой работе специальная теория относительности изложена практически полностью, не только как естественное объяснение экспериментальных результатов Майкельсона, но и как правильная и последовательная интерпретация всех известных механических, электродинамических и оптических явлений. Прежде всего, Эйнштейн полностью отказался от гипотезы эфира и стал рассматривать само электромагнитное поле как особый вид материи, не нуждающийся ни в какой среде. Этот отказ был связан с тем, что концепция эфира оказалась внутренне противоречивой и даже с ее помощью он не смог согласовать результаты самых разнообразных экспериментов по распространению света. Отказавшись от эфирной гипотезы, Эйнштейн путем глубокого общефизического анализа пришел к выводу, что два важнейших положения: частный принцип относительности (распространяемый не только на механические, но и на электродинамические явления) и принцип универсальности скорости света – находятся в согласии друг с другом. Однако в то же время они решительно противоречат преобразованиям Галилея и вытекающему из них классическому закону сложения скоростей. Поэтому Эйнштейн сделал революционный шаг вперед. Он отказался от преобразований Галилея и привычных взглядов на пространство и время. В результате остались два фундаментальных утверждения, которые обычно называют “постулатами Эйнштейна”.

**Постулат 1. (принцип относительности Эйнштейна):**

Все физические законы ковариантны по отношению к преобразованиям перехода от одной ИСО к любой другой ИСО.

**Постулат 2. (принцип инвариантности скорости света в вакууме):**

В природе существует инвариантная конечная скорость – скорость света в вакууме c.

Заметим, что принцип относительности Эйнштейна априори не содержит никаких предположений о конкретном виде преобразований перехода из одной ИСО в другую. В СТО соответствующие преобразования, заменяющие преобразования Галилея, должны выводиться из основных постулатов, а не формулироваться в виде самостоятельного положения. Необходимые преобразования координат и времени были найдены Лоренцем в 1904 г., еще до создания СТО. Лоренц исходил из того факта, что преобразования Галилея меняют вид уравнений Максвелла, и получил другие преобразования, названные преобразованиями Лоренца, которые оставляют уравнения электродинамики ковариантными (а, следовательно, меняют форму уравнений ньютоновской механики!). Аналогичные преобразования получил и французский математик Пуанкаре. Однако, хотя работы Лоренца и Пуанкаре явились важным этапом на пути к созданию СТО, однако два этих ученых все же не сделали решающего шага: в их работах не содержалось, по выражению В. Паули, «нового и глубокого понимания всей проблемы», переосмысление в новом свете самих понятий пространства и времени, которое присутствовало в статье Эйнштейна. Именно поэтому создателем СТО следует считать А. Эйнштейна, отмечая в то же время и большой, серьезный вклад Лоренца и Пуанкаре. Новые представления о пространстве и времени, нашедшие математическое выражение в преобразованиях Лоренца, привели к пересмотру основных уравнений ньютоновской механики. Эйнштейном была построена новая, релятивистская механика; при этом выявились принципиально новые, ранее неизвестные кинематические эффекты, такие как релятивистское сокращение длины, относительность одновременности, релятивистское замедление времени. Эйнштейн получил новую, релятивистскую формулу сложения скоростей взамен прежней, классической:

Важно отметить, что для всех без исключения соотношений релятивистской кинематики выполняется принцип соответствия: в классическом пределе, когда v, u << c, преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, а релятивистская формула сложения скоростей – в соответствующую классическую. Следует отметить большой вклад в развитие математического аппарата СТО видного немецкого математика Германа Минковского (1864-1909 гг.). Минковскому принадлежит своеобразная геометрическая трактовка основных положений СТО, в основе которой лежит введенное им четырехмерное псевдоевклидово пространство (x, y, z, ict). В этой трактовке математическим выражением постоянства скорости света служит утверждение об инвариантности четырехмерного интервала по отношению к преобразованиям Лоренца. Важнейшим открытием релятивистской динамики в работе Эйнштейна явилось введение принципиально нового вида энергии – энергии покоя Е0, связанной с массой тела знаменитым соотношением Е0=m , где m – масса тела (инвариантная характеристика, принципиально не зависящая от состояния его движения). Как показал Эйнштейн, при строго релятивистском подходе закон сохранения массы становится неверным; имеет место закон сохранения энергии в его наиболее общей форме, учитывающий и энергию покоя тел. Закон сохранения массы в его старом понимании справедлив лишь в нерелятивистском приближении.

**2.2. Создание общей теории относительности (ОТО).**

После 1905 году, Эйнштейн продолжил активное исследование релятивистского подхода в физическом понимании вселенной. Особенно значимой стала его большая статья, опубликованная в 1907 году и названная "О принципе относительности и его последствиях". В этой работе Эйнштейн впервые озадачился о том, как принцип относительности применим к системам, движущимся друг относительно друга с ускорением, и сформулировал принцип эквивалентности между гравитационными и инерционными силами. Этот принцип утверждает полную равноправие гравитационного поля и ускоренной системы отсчета, подобранной соответствующим образом. Это был решающий шаг Эйнштейна на пути развития теории относительности и их обобщения. В этой же работе он также исследовал влияние гравитационного поля на электромагнитные процессы и показал, что гравитационное поле влияет на частоту излучаемого света, и что теорема эквивалентности энергии и массы справедлива не только для инертной, но и для тяготеющей массы. В своей статье 1907 года Эйнштейн также доказал, что часы в точке с гравитационным потенциалом идут на 2 (1 ) раза быстрее, чем часы, находящиеся в начале координат. Физические процессы протекают быстрее в области с большим гравитационным потенциалом. В частности, Эйнштейн доказал, что свет, падающий с поверхности Солнца, имеет длину волны, "приблизительно на две миллионных доли больше, чем свет, испускаемый атомами на Земле". В 1911 году, в работе "О влиянии силы тяжести на распространение света", Эйнштейн снова обращается к вопросу об эквивалентности постоянного гравитационного поля и равномерно ускоренной системы координат. Согласно Эйнштейну, наблюдатель, находящийся в неинерциальной системе отсчета, не в состоянии определить, движется ли он ускоренно или находится под действием поля тяготения. В этой работе Эйнштейн отказывается от постоянства скорости света в присутствии гравитационного поля. Он пишет: “Если мы обозначим через скорость света в начале координат, то скорость света c в некотором месте с гравитационным потенциалом будет равна ”.

Отсюда Эйнштейн приходит к выводу об искривлении лучей света в гравитационном поле и получает формулу для отклонения светового луча в поле тяготения Солнца. В 1913 г. Эйнштейн публикует совместно с М. Гроссманом работу «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения». В ней сформулирована связь гравитационного поля с метрическим тензором , входящим в выражение для квадрата четырехмерного интервала

Здесь элементы в общем случае являются функциями координат, а по индексам i и k подразумевается суммирование. Отличие метрики 4 - пространства () от галилеевой [,](https://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka) в соответствии с идеями Энштейна, можно отнести на счет наличия тяготения. В пространстве, свободном от гравитационных полей, элементы метрического тензора есть , , (для ).

Т.о. геометрические свойства пространственно-временного континуума (метрика) не являются неизменными, а зависят от физических объектов (масс), находящихся в этом пространстве - времени. В теории относительности распределение массы характеризуется с помощью тензора энергии-импульса, в который плотность и давление входят как взаимосвязанные характеристики. В случае идеальной сплошной среды компоненты ковариантного тензора записываются в виде[.](http://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)

Здесь - плотность энергии вещества, включая энергию покоя частиц,

p – давление, - 4-скорость, определяющая перенос импульса в соответствующих координатных направлениях. Тензор имеет 10 независимых компонентов, а его ковариантная 4-хмерная дивергенция равна нулю. В последнем свойстве проявляется релятивистское обобщение законов ньютоновой механики. Далее, в соответствии с основной гипотезой Эйнштейна, тяготение является следствием искривления пространства-времени, причем степень этого искривления определяется веществом, распределенным согласно тензору 2-го ранга [()](http://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka). Отсюда следует, что и кривизна пространства - времени должна характеризоваться симметричным тензором 2-го ранга. Из геометрии известно, что степень искривления пространства с произвольным числом измерений описывается тензором Римана-Кристоффеля 4-го ранга. Однако более детальный анализ привел Эйнштейна к выводу, что сам тензор в основное уравнение теории входить не может, поскольку он имеет 20 независимых компонентов, тогда как имеется 10 независимых компонентов фундаментального метрического тензора .

В статье « Уравнения гравитационного поля » (1915 г.) Эйнштейн показал, что свойства 4-х мерного пространства – времени следует описывать тензором 2-го ранга , который является комбинацией тензора Риччи c инвариантом кривизны R: [.](http://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)

Тензор принято называть тензором Эйнштейна, записанным в ковариантной форме. Как и для тензора , ковариантная 4-дивергенция тензора равна нулю. Поэтому Эйнштейн предположил, что между двумя этими тензорами существует линейная связь, и записал основное уравнение ОТО в виде:, где - постоянная Эйнштейна.

Ее связь с гравитационной постоянной G была найдена из условия, что в случае слабых гравитационных полей ОТО переходит в теорию тяготения Ньютона. Запись тензора в явной форме сводит уравнение Эйнштейна к 6 независимым дифференциальным уравнениям 2-го порядка. Для каждого конкретного случая их решают следующим образом: в первую очередь, задают определенную функциональную форму для тензора например вида (), а затем подбирают функции так, чтобы выполнялось уравнение (). Чаще всего такую задачу решают, значительно упрощая форму и , либо методом последовательных приближений.

Сразу после завершения ОТО, в 1916 г. немецкий астроном и физик Карл Шварцшильд (1873-1916) применил уравнение Эйнштейна () к исследованию свойств пространства–времени вблизи заданной массы M. Задача сводилась к интегрированию уравнений [(](https://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)) при условии, что их правая часть равна нулю, поскольку в пустоте (в пространстве массы М) все компоненты тензора энергии-импульса = 0. На основе этого т. н. «внешнего» решения Шварцшильда был проведен анализ задачи Кеплера, т.е. исследовано движение материальной точки m вблизи центральной массы М (скажем, планеты вокруг Солнца) и закономерности распространения световых лучей вблизи массы М. Шварцшильд в своей работе вновь получил предсказанные Эйнштейном три эффекта ОТО:

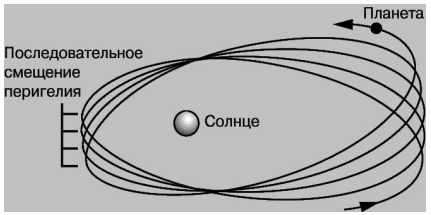
1) движение перигелиев планет;

2) отклонение световых лучей при прохождении вблизи гравитирующих масс;

3) красное смещение небесных светил.

**3. Экспериментальная проверка общей теории относительности.  
 3.1 Смещение перигелия Меркурия.**

Меркурий является ближайшей к солнцу планетой и, согласно Кеплеру, движется вокруг солнца по эллиптической орбите. Уравнение орбиты имеет вид:, где – параметр орбиты, а – большая полуось, е – эксцентриситет. Как показал Эйнштейн, при учете релятивистских поправок уравнение траектории планеты несколько модифицируется: [.](http://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)

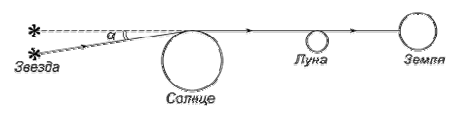
Следовательно, за каждый оборот планеты вокруг Солнца большая полуось ее эллиптической орбиты поворачивается в направлении движении на угол [.](http://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)

Отсюда ясно, что из всех планет Солнечной системы данный релятивистский эффект должен быть наиболее сильным именно для Меркурия. Расчет показал, что релятивистское смещение перигелия Меркурия составляет приблизительно 43” (угловых секунд) в столетие. Несмотря на то, что этот чрезвычайно слабый эффект «заслоняется» другими, гораздо более сильными, его все же удается выделить на их фоне и надежно подтвердить с точностью до 0.1.

**3.2. Отклонение лучей света в поле тяжести.**

В уже упоминавшейся работе 1907 года, Эйнштейн исследовал воздействие гравитации на электромагнитные и оптические процессы. Он пришел к выводу, что влияние гравитационного поля Земли настолько мало, что нет возможности сравнить результаты его теории с экспериментом. Однако он не учел эффект кривизны пространства. В статье "О влиянии силы тяжести на распространение света" от 1911 года Эйнштейн снова обращается к вопросу воздействия гравитации на оптические процессы. Он рассматривает лучи света, проходящие возле Солнца: под влиянием солнечной гравитации эти лучи должны отклоняться. Это отклонение должно привести к появлению видимого увеличения углового расстояния между Солнцем и близкой к нему звездой. Эйнштейн писал: "Было бы очень желательно, чтобы астрономы заинтересовались этим вопросом, даже если предыдущие рассуждения казались бы слишком спорными или фантастическими".

В работе "Основы общей теории относительности" 1916 года Эйнштейн, в отличие от предыдущих работ, учитывал кривизну пространства. Он определил, что световой луч, проходящий возле сферического объекта с массой M, отклоняется от прямолинейного пути на угол , где r - минимальное расстояние от луча до центра объекта. В частности, для Солнца получается , где – радиус Солнца.



Отклонения видимых положений неподвижных звезд, расположенных "недалеко" от солнца, наблюдают во время полных солнечных затмений (во всякое другое время ярко светящееся солнце не позволяет наблюдать ближайшие к нему звезды). Звезды, которые находятся вблизи солнца, фотографируются во время солнечного затмения и сравниваются с их же фотографией, когда солнце находится в другой части неба. Положения звезд на фотографии, сделанной во время затмения, должны быть смещенными в радиальном направлении. Впервые этот эффект был надежно установлен в ходе наблюдения полного солнечного затмения 29 мая 1919 года, что явилось настоящим триумфом. Впоследствии аналогичные наблюдения были повторены неоднократно, и общий вывод таков: теория ото подтверждается с точностью до 10 – 20 %.

После открытия в 60-е годы XX века мощных внегалактических радиоисточников – квазаров – оказалось, что два из них находятся вблизи эклиптики и потому в своем видимом годичном перемещении на небесной сфере солнца проходят вблизи них. Это позволило измерить отклонение радиоволн, проходящих вблизи солнца. Результаты подтвердили предсказание Эйнштейна с точностью до 1 %. Еще один метод проверки этого эффекта – измерение запаздывания отраженного радиоимпульса, направленного на Меркурий, Венеру или Марс в моменты, когда для земного наблюдателя данная планета находится "почти за солнцем". Этим методом в конце 60-х годов теория была подтверждена с точностью 0,2 %.

**3.3. Гравитационное смещение спектральных линий.**

Из общей теории относительности также следует, что спектральные линии света, испускаемого поверхностью тела массы М и радиуса R, смещаются в « красную » сторону на величину [.](http://newread.rusneb.ru/books/fiziko-matematicheskiye-nauki/istoriya-fiziki-xx-veka)

Для солнца при длине волны λ = 400нм эта формула дает = 0,08нм – величину, которую практически невозможно наблюдать на фоне других эффектов. Однако в спектрах белых карликов, радиусы которых в 50 – 100 раз меньше радиуса Солнца, эффект более ощутим. И все же точность здесь не превышает 10%, поскольку как радиус звезды, так и ее масса определяются со значительной погрешностью, а спектральные линии имеют довольно большое естественное уширение. В последние десятилетия XX века для определения красного смещения в гравитационном поле Земли используются методы ядерной спектроскопии, основанные на эффекте Мессбауэра. Подобные измерения подтверждают формулу () с точностью до 1%.

**Заключение**

Теория относительности А. Эйнштейна действительно представляет собой одну из наиболее глубоких и фундаментальных теорий в современной физике. Она перевернула наше представление о пространстве, времени и гравитации, открыв новые горизонты для понимания фундаментальных законов природы. Принцип относительности А. Эйнштейна подчеркивает равноправие всех инерциальных систем отсчета, что означает, что физические законы должны быть одинаковыми во всех таких системах. Постоянство скорости света в вакууме, независимо от движения источника света, выводит нас на удивительные явления, такие как относительность времени и длины, и вызывает феномены, противоречащие нашим интуитивным представлениям о мире.Общая теория относительности, или теория тяготения Эйнштейна, раскрывает связь между пространством-временем и гравитацией, представляя гравитацию как искривление пространства под действием массы. Эта теория успешно объясняет такие явления, как изгибание света в гравитационных полях и существование черных дыр. Релятивистские эффекты, приведенные в теории относительности, проявляются при крайне высоких скоростях движения тел и подтверждаются экспериментально, включая измерения “планковскими” спутниками и другими технологическими достижениями.

Таким образом, теория относительности А. Эйнштейна остается важным фундаментом современной физики и технологии, непрерывно вдохновляя нас и открывая новые горизонты в понимании мира вокруг нас. Точно так, преобразования Лоренца играют ключевую роль в специальной теории относительности, позволяя объяснить ряд значимых эффектов. Они показывают, что скорость света в вакууме является предельной скоростью передачи любой информации или взаимодействия. Это приводит к интересным последствиям, таким как относительность одновременности и эффекты времени и пространства при высоких скоростях. Учение относительности действительно ставит под вопрос классические представления о пространстве и времени, предлагая более точную модель реальности. Это особенно важно при рассмотрении гравитации и связанных с ней явлений, таких как черные дыры, кривизна пространства-времени и гравитационные волны. Интересно, что общая теория относительности дает новые выводы, отличающиеся от тех, что следовали из ньютоновской теории тяготения. Она расширяет наше понимание мира и предлагает более глубокий взгляд на структуру пространства и времени. Следовательно, представления о пространстве и времени играют фундаментальную роль в нашем понимании физической реальности, и теория относительности реально вносит значительный вклад в нашу актуальную картину мира. Особенно велика ее роль в физике ядра и элементарных частиц, в том числе и для расчетов гигантских установок, которые предназначены для потоков очень быстрых частиц, необходимых для экспериментов, позволяющих продвинуться в изучении строения материи.

**Мое мнение** на тему постулатов Эйнштейна заключается в том, что постулаты Эйнштейна были основополагающими в изменении нашего понимания физического мира. Они пошатнули классические концепции пространства, времени и гравитации и проложили путь к новым открытиям, включая теорию квантовой механики и космологию. Постулаты Эйнштейна продолжают быть основой современной физики, подтверждая его гениальность и далеко идущее влияние его работы.

**Используемая литература**

1. История физики XX века: учебное пособие / М.Р. Расовский, А.П. Русинов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 182 с.
2. Е. И. Бутиков. Релятивистские представления в курсе общей физики. Учебное пособие. 2006 г.
3. В. Н. Григорьев. История физики в биографиях ее творцов.
4. О специальной и общей теории относительности. Под редакцией проф.С. Я. Лившица.
5. Специальная теория относительности. David Bohm. Перевод с английского Н. В. Мицкевич. Под редакцией А. З. Петрова. 1967.
6. Лекция №7. Релятивистская механика (СТО). к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.