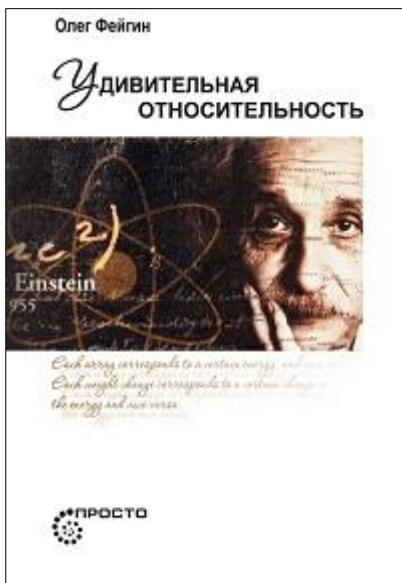


## Олег Фейгин. Удивительная относительность

Что такое теория относительности, о которой все знают из школьного курса физики, но мало кто может кратко и точно объяснить ее суть? Можно ли доступно рассказать об основах этой современной науки, отметившей не так давно свой столетний юбилей? Эти и многие другие вопросы постарался решить автор, популярно рассказывая об элементарных основах одной из главных теорий современной физики.

Олег Фейгин. Удивительная относительность. – СПб. Страна, 2017. – 188 с.



### Глава 1. Звездный год новой физики

В истории науки 1666 год известен как *annus mirabilis*, что на латыни означает «год чудес». Тогда Исаак Ньютон, спасаясь от чумы, свирепствовавшей в Кембридже и Лондоне, скрылся в своем родовом поместье, в Вулсторпе. Там, в материинском доме, великий физик и математик смог не только разработать основы дифференциального исчисления, но и разложить спектр белого света, а также открыть закон всемирного тяготения (подробнее биографию ученого см. [Томас Левенсон. Ньютон и фальшивомонетчик](#)).

Никто даже не предполагал, что кто-либо когда-нибудь сможет повторить научный подвиг Ньютона. Тем более, что это окажется по плечу скромному служащему бернского Бюро патентов Альберту Эйнштейну, сумевшему сделать 1905 год новым *annus mirabilis*.

В престижном немецком журнале *Annalen der Physik* («Анналы физики») появилось пять научных статей малоизвестного автора, три из которых принадлежат к числу величайших работ в истории науки. В одной из них давалось квантовое объяснение фотоэлектрического эффекта. За эту работу Эйнштейн через шестнадцать лет был удостоен Нобелевской премии.

В работе, посвященной броуновскому движению, Эйнштейн показал, что, хотя одна молекула за одно столкновение не может сдвинуть частицу с места, миллионы случайных столкновений в секунду могут объяснить блуждание частиц, которое наблюдал Броун.

Третья статья излагала специальную теорию относительности, соединявшую в одно целое материю, пространство и время. Это была довольно необычная научная работа, без ссылок, не говоря уже о цитатах, на другие признанные авторитеты.

В эйнштейновских статьях было сравнительно мало математических расчетов и много логического анализа. Приводимые в них доводы выглядели несокрушимыми, а парадоксальные выводы возникали с какой-то поразительной легкостью. Наверное, не скоро в истории появится гений, способный создать подобные шедевры научной мысли в течение лишь одного года....

### Глава 3. Смерть мирового эфира

В 1887 году Альберт Майкельсон с Эдвардом Морли провели эксперимент, вошедший в историю под их именами. Его целью было обнаружение абсолютного движения нашей планеты среди

безбрежного мирового океана, абсолютно покоящегося «светоносного эфира».

Экспериментаторы собирались послать один луч света на известное расстояние в одном направлении, а другой луч — на такое же расстояние под прямым углом к первому. Оба луча будут отправлены одновременно и возвратятся в одну и ту же исходную точку. Если эфир действительно существует, лучи должны вернуться в исходную точку в разное время, и будет иметь место явление интерференции — одно из свойств волнового движения. Оно выразится в том, что в точке пересечения волн двух лучей получатся перемежающиеся полосы света, известные как характерная картина интерференции.

Однако интерференции обнаружено не было. Иными словами, приходилось признать невероятное: как бы быстро мы ни бежали за светом, его скорость относительно нас будет неизменной. Такое заключение противоречило всему человеческому опыту, и многие ученые стали искать пути спасения для гипотезы мирового эфира.

В 1892 году Хендрик Лоренц дал объяснение отрицательным результатам опыта Майкельсона — Морли и получил формулу сокращения размеров тел в направлении их движения, названную впоследствии сокращением Лоренца — Фицджеральда. В 1895 году он также ввел понятие релятивистского времени, которое для движущихся тел протекает иначе, чем для покоящихся. В 1904 году Лоренц вывел формулы, связывающие между собой координаты и время для одного и того же события в двух разных инерциальных системах отсчета, и получил формулу, связывающую массу электрона со скоростью его движения. Все эти результаты сыграли важнейшую роль в дальнейшем развитии идей релятивизма.

В отсутствие эфирного ветра и эфира как такового стал очевиден неразрешимый конфликт между классической механикой Ньютона (подразумевающей некую абсолютную систему отсчета) и уравнениями Максвелла (согласно которым скорость света имеет предельное значение, не зависящее от выбора системы отсчета), что и привело в итоге к появлению теории относительности. Опыт Майкельсона—Морли окончательно показал, что «абсолютной системы отсчета» в природе не существует.

#### Глава 4. Теория пространства и времени

Анри Пуанкаре еще в 1898 году, задолго до Эйнштейна в своей работе «Измерение времени» сформулировал всеобщий принцип относительности, что чаще всего приписывают Эйнштейну, а затем ввел понятие четырехмерного пространства-времени, что в общем-то считается достижением учителя и соавтора Эйнштейна, Германа Минковского. Еще одним несомненным достижением французского ученого была высказанная в 1900 году концепция об относительности одновременности событий в различных системах отсчета, включавшая предположение об абсолютном пределе скорости света в природе.

К сожалению, главным заблуждением Пуанкаре было упорное использование концепции мирового светоносного эфира. В 1905 году Пуанкаре развил свои идеи в статье «О динамике электрона». По неизвестным причинам окончательный расширенный вариант этой работы, которая могла бы стать судьбоносной для ее автора, ученый опубликовал в январе 1906 года в малоизвестном итальянском математическом журнале. Собственно, это и решило приоритет создания теории относительности в пользу Эйнштейна.

Эйнштейн в своих первых работах по теории относительности использовал по существу ту же математическую модель, что и Пуанкаре: преобразования Лоренца, релятивистская формула сложения скоростей и др. Однако, в отличие от Пуанкаре, Эйнштейн сделал решительный вывод и полностью упразднил понятие эфира вместе с опирающимся на него понятием абсолютного движения и абсолютного времени, которые продолжал использовать Пуанкаре.

Все новые эффекты, которые Лоренц и Пуанкаре считали динамическими свойствами эфира, в теории относительности Эйнштейна вытекают из объективных свойств пространства и времени. В этом главное отличие подходов Пуанкаре и Эйнштейна, замаскированное внешним сходством их математических моделей: они по-разному понимали глубокую физическую сущность своих моделей. Эйнштейн смог создать целостную и всеобщую теорию пространства и времени, носящую имя «специальная теория относительности» (СТО).

Дальнейший шаг состоит в признании пропорциональности между полным запасом энергии тела и его полной массой:  $E = mc^2$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Таким образом получается, что скорость света является фундаментальной величиной, определяющей, в частности, взаимосвязь массы и энергии, выраженную через это знаменитое уравнение. Тем самым высказывается предположение, что величина массы покоя характеризует запас энергии покоящегося тела. Запас этот включает в себя различные виды энергии: тепловую, химическую, атомную, внутриядерную, а также энергию элементарных частиц, входящих в состав атома.

Сам Эйнштейн так объяснял относительную одновременность двух событий:

*Пусть по рельсам идет очень длинный поезд с постоянной скоростью. Пассажиры его с удобством примут свой поезд за то твердое исходное тело (систему координат), к которому они будут приурочивать все события. Всякое событие, совершающееся вдоль полотна железной дороги, происходит также у определенного пункта поезда.*

*Возникает следующий вопрос. Два события (например, два удара молнии A и B) будут ли также одновременны по отношению к поезду? Мы сейчас убедимся, что ответ отрицателен.*

*Когда мы говорим, что удары молний одновременны по отношению к насыпи, то это означает следующее: лучи света, выходящие из мест удара молнии A и B, встречаются в середине M участка насыпи AB. Но событиям A и B соответствуют также места A и B в поезде: M\* есть середина участка AB поезда. Пункт M\* в момент удара молнии (если судить с полотна дороги) совпадает с пунктом M, но он движется со скоростью поезда. Если бы наблюдатель, сидящий в поезде в пункте M\*, не подвигался с той же скоростью, а все время оставался в пункте M, то оба световые луча от молний A и B достигли его одновременно, т. е. встретились бы как раз у него. Но в действительности наблюдатель движется (если судить с полотна дороги) навстречу лучу света, идущему из B, и удаляется от луча, нагоняющего его из A. Поэтому он раньше увидит луч из B, чем луч из A. Следовательно, пассажиры, для которых вагон служит исходным телом, должны будут прийти к заключению, что удар молнии в B произошел раньше, чем в A. Мы приходим таким образом к следующему важному выводу.*

*После некоторого размышления ты предложишь мне следующим образом установить одновременность. Соединяющий оба места отрезок AB будет измерен по рельсам, и в середине его будет поставлен наблюдатель. Последний снабжен приспособлением, позволяющим ему одновременно видеть оба места A и B. Если теперь наблюдатель одновременно воспримет оба удара молнии, то, значит, они одновременны.*

*События, которые одновременны в отношении к железнодорожному полотну, не одновременны в отношении к поезду, и наоборот (относительность одновременности). Каждое исходное тело (система координат) имеет свое особое время. Указание времени только тогда получает смысл, когда указано исходное тело, к которому оно относится.*

## Глава 7. Природа гравитации

Гравитация — это сила, которая управляет всей Вселенной. Она держит нас на Земле, определяет орбиты планет, обеспечивает устойчивость Солнечной системы. Именно она играет главную роль при взаимодействии звезд и галактик, определяя, очевидно, прошлое, настоящее и будущее Вселенной. Она всегда притягивает и никогда не отталкивает, действуя на все, что видимо, и на многое из того, что невидимо. И хотя гравитация была первой из четырех фундаментальных сил природы, законы которых были открыты и сформулированы в математической форме, она все еще остается неразгаданной загадкой.

Как действует этот закон, в принципе ясно, но вот причина, вызывающая притяжение масс, требует более глубокого понимания. Трудно себе представить, как ничем не связанные между собой планеты и звезды, удаленные друг от друга на гигантские расстояния, «узнают» о существовании друг друга. И сегодня, три столетия спустя после открытия гравитации, все еще не существует четкого понимания этого явления.

## Глава 8. Теория тяготения Эйнштейна

В 1916 году Эйнштейн предложил принципиально новую теорию тяготения, названную общей теорией относительности. Один из главных выводов этой теории — тесная связь между временем, пространством и распределением массы. Согласно Эйнштейну, пространство и время — это формы существования материи.

Исчезнет материя — исчезнут пространство и время. Масса изменяет геометрию пространства своей гравитацией. Геометрия пространства, ее изменение со временем, а также скорость течения самого времени зависят от распределения и движения материи в пространстве, которые, в свою очередь, зависят от его геометрии. Таким образом, геометрия пространства указывает материю, какие свойства она должна иметь, а материя указывает пространству-времени, как оно должно быть искривлено.

Известно, что электрические силы зависят от диэлектрической проницаемости среды, так что от электромагнитного поля можно эффективно экранироваться. А вот гравитация, напротив, не зависит от среды, для нее не существует экранов и она универсальна. Это подсказывает, что всемирное тяготение, возможно, каким-то образом связано со свойствами самого пространства — универсального поля действия всех физических процессов.

Со времен античных натурфилософов-метафизиков пространство считалось математической абстракцией, всегда и всюду одинаковым, не зависящим от заполняющих его тел и никак не проявляющее себя в материальном мире. В этом идеализированном пространстве более двух тысячелетий успешно царствовала геометрия Евклида. Первым, кто высказал мысль о возможности построения других геометрий, столь же последовательных и непротиворечивых, как и евклидова, был профессор математики Казанского университета Николай Иванович Лобачевский (подробнее см. [Леонард Младинов. Евклидово окно](#)).

Раздумья о природе всемирного тяготения, в конце концов, привели гений Эйнштейна к осознанию глубокой связи между гравитацией и пространством. Более того, открытые незадолго до этого Лоренцем и Фицджеральдом формулы для перехода от одной движущейся системы координат к другой говорили, что пространство нельзя рассматривать отдельно от времени. Три пространственных координаты и время входили в эти формулы так симметрично, что можно было говорить о едином четырехмерном пространстве-времени.

В процессе создания математического аппарата теории относительности Эйнштейн обратился за консультациями к своему бывшему преподавателю, профессору Цюрихского политехникума Марселю Грассману. Как математик Грассман был хорошо знаком с геометрией искривленных многомерных пространств Римана и сразу понял, в каких геометрических формализмах нуждается теория Эйнштейна.

Однако основные уравнения этой теории впервые вывел знаменитый геттингенский математик Давид Гильберт. Уравнения Гильberta—Эйнштейна устанавливают количественную связь сил всемирного тяготения с кривизной пространства. Оказалось, там, где есть поле тяготения, пространство всегда искривлено. И наоборот, пространственная кривизна проявляется в виде сил гравитации.

Прошло всего два года, и теория блестяще подтвердила опытом: во время очередного солнечного затмения было открыто предсказанное ею искривление световых лучей гравитационным полем Солнца. При этом, необходимо помнить, что в свое время австрийский математик и логик Курт Гедель доказал теорему о том, что в любой теории, какой бы стройной и самосогласованной она ни была, обязательно есть внутренние противоречия и вопросы, на которые она не может ответить. Общая теория относительности Эйнштейна не составляет исключение (подробнее см. [Эрнест Нагель, Джеймс Рой Ньюмен. Теорема Гёделя](#)).

## Глава 11. Волны тяготения

Французский ученый эпохи Просвещения Пьер Симон Лаплас был так восхищен математическим аппаратом, связывающим все известные тогда элементы мироздания, что восторженно воскликнул на заседании Парижской академии наук: «Взмахивая рукой я управляю звездами!». Великий энциклопедист имел в виду закон всемирного тяготения Ньютона и Гука, связывающий все массы во Вселенной (см. [Пьер Симон Лаплас. Опыт философии теории вероятностей](#)).

Современный физик мог бы перефразировать Лапласа: взмахните рукой — и по всей Вселенной побежит гравитационная волна! Эти волны расходятся почти от любого движущегося предмета, но настолько малы, что их регистрация составляет труднейшую техническую проблему. Все дело в слабости гравитационного взаимодействия, ведь оно чуть ли не на сорок порядков (!) уступает электромагнитному действию. Чтобы возникла достаточно сильная для регистрации гравитационная волна, нужно заставить двигаться с околосветовыми скоростями очень большие массы, сравнимые с массой звезд.

В мировых СМИ изредка появлялись сенсационные заявления ученых, объявлявшие об очередном открытии гравитационного прибоя. Но, увы! Все они до последнего времени таки не нашли подтверждения. Сюда же следует отнести и несостоявшиеся сенсации о различных проявлениях левитации, антигравитации и создании всяческих гравицап<sup>1</sup> слишком увлекающимися личностями...

11 февраля 2016 года навсегда войдет в историю. В этот день произошла одна из величайших научных сенсаций последнего времени — открытие гравитационных волн. Рябь в ткани пространства-времени, которая искажает пространство и время вокруг себя, дошла до Земли и впервые была напрямую зарегистрирована (рис. 1).

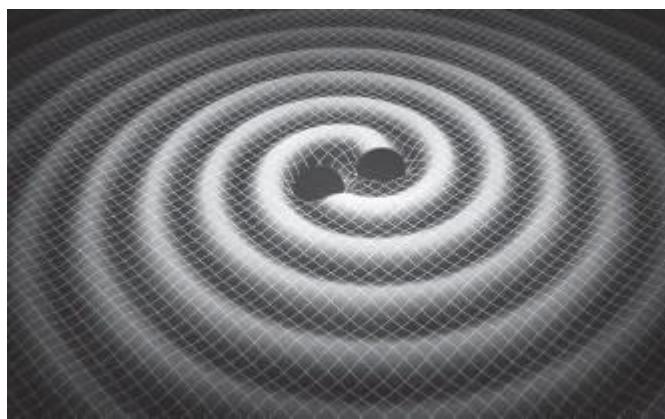


Рис. 1. Модель гравитационных волн, возникнувших от столкновения двух нейтронных звезд или черных дыр

## Глава 12. Провалы застывших звезд

Черные дыры застывших звезд — коллапсары, полностью поглощающие любые излучения и ничего не излучающие сами. Черная дыра — область пространства, в которой поле тяготения настолько сильно, что даже свет не может ее покинуть. Границу области, за которую не выходит свет, называют горизонтом черной дыры.

Массивные звезды стареют очень быстро. В процессе всей своей жизни они теряют массу, то есть выбрасывают вещество в пространство. Как правило, эволюция таких звезд заканчивается мощным взрывом — «вспышкой сверхновой», в результате которой огромные облака звездного вещества выбрасываются в межзвездную среду. «Остаток» звезды сжимается под действием силы тяготения и может стать нейтронной звездой, то есть звездой, состоящей из вырожденного нейтронного газа.

Именно внутреннее давление вырожденного газа противодействует силе гравитации и останавливает сжатие звезды. Однако, если масса сжимающейся звезды превышает солнечную массу более чем в три раза, никакая сила не сможет остановить процесс сжатия. По мере сжатия напряженность гравитационного поля вокруг звезды все более нарастает. В ходе нарастающего сжатия нарастает и искривление пространства-времени. Наконец, когда звезда сожмется до радиуса в несколько километров, пространство-время «свернется», и звезда исчезнет из видимой Вселенной, от нее останется только гравитационное поле — следовательно, произойдет рождение черной дыры.

<sup>1</sup> [Гравицапа](#) — фантастическое устройство из советского кинофильма «Кин-дза-дза!» режиссёра Георгия Данелия. Гравицапа, установленная в двигатель пепелаца (космического корабля), позволяла персонажам фильма совершать мгновенные межгалактические перелёты.

В научном мире уже довольно давно обсуждается захватывающая возможность создания микроколлапсаров при помощи ускорителей частиц. Перспектива создания черных дыр на Земле может показаться безумной. Откуда мы знаем, что они благополучно распадутся, а не продолжат свой рост и в конце концов не проглотят нашу планету? На первый взгляд, весьма обоснованная тревога, особенно если учесть, что некоторые детали исходной теории микроколлапсаров могут быть неверны: скажем, утверждение, что информация разрушается в черных дырах. Однако общие принципы квантовой механики указывают, что микроскопические черные дыры не могут быть устойчивы, а значит, они безопасны.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Если некоторые детали исходной теории микроколлапсаров могут быть неверны, то, наверное, могут быть неверны и общие принципы квантовой механики, а тогда земные черные дыры могут представлять опасность! – Прим. Багузина