

О специальной теории относительности Эйнштейна

Пришлось как-то услышать в обыденном разговоре, что «по теории Эйнштейна всё в мире относительно». Да и любой из вас наверняка что-нибудь слышал подобное об относительности всего и везде. У людей, которые изучали теорию Эйнштейна, такие заявления вызывает улыбку или внутренний дискомфорт. А у меня возникло желание для тех, кто не изучал теорию Эйнштейна, рассказать немного о ней без особых сложностей и минимумом формул.

Можно сказать, что существуют две физики: Ньютоновская и условно назовем, современная, впрочем, современная тоже разделяется на эйнштейновскую и квантовую.

Появление Ньютоновской отнесём к 1686 году, то есть почти на 350 лет назад. Ньютон сформулировал понятия и законы, которые исправно служили человечеству в качестве расчётов и предсказаний, пока скорости и величины в этих расчётах были недалеко от масштаба человека, то есть если рассматривать поднимаемые грузы, движущиеся экипажи и механизмы, движения планет вокруг Солнца.

Важнейшей базой Ньютоновской физики (если выражаться точнее, механики) является принцип относительности, впрочем, сформулированный Галилеем, который жил на один век раньше Ньютона. Принцип относительности Галилея и механику Ньютона удобно иллюстрировать на примере движущегося с постоянной скоростью поезда на хороших бесстыковых рельсах. Пусть скорость небольшая, если мерить по рельсам, 10 м/сек. В нём все физические процессы выполняются для пассажиров также, как если бы они находились на вокзале, или для пассажиров поезда, который движется с постоянной скоростью навстречу, допустим, тоже со скоростью 10 м/сек. И пусть пассажиры поездов - физики, имеют в руках радары и другие приборы, которыми могут измерять скорости окружающих предметов, людей и даже звука, быстренько заглядывать в окна встречного поезда. У всех пассажиров есть очень точные часы.

Особый интерес представляет, когда пассажир выглядывает в окно. Ему кажется, более того, его прибор показывает, что пассажир в окне встречного поезда, который сидит на своей полке, движется мимо со скоростью 20 м/сек. И часы его идут также, как у нашего наблюдателя. И это никого не удивляет, с точки зрения опыта и здравого смысла это нормально. И в эту физику и здравый смысл укладывалось всё, например, скорость распространения звука в воздухе, которая в нормальных условиях составляет 330 м/сек.

Если пассажир увидит впереди поезда источник звука на земле, например, на стройке забивают сваи, и он измерит скорость доносящегося звука, то она составит 340 м/сек. Если источник звука расположен сбоку от движения поезда, то измерения покажут, очевидно, те же 330 м/сек. А теперь внимание: если пассажир не знает скорость своего поезда, то он легко может вычислить скорость поезда как $340 - 330 = 10$ м/сек.

Но в 19 веке учёные стали подбираться к непривычным скоростям, а именно, к скорости света. Сумели измерить эту скорость, выяснили, что она составляет примерно 300000 км/сек. А также то, что свет – это волна. И было очевидно, что волна должна распространяться в какой-то среде, ну как волны звука в воздухе или воде. Назвали эту среду эфир. Среда эта была какая-то волшебная, она давала основу для распространения света и радиоволн с сумасшедшей скоростью, но при этом никак не чувствовалась ни людьми, ни даже планетами, никакого трения и сопротивления. Но к его существованию успели привыкнуть, даже с тех пор у радиопередач сохранилось выражение «выйти в эфир».

И задумали физики измерить, как этот эфир располагается вокруг Земли и других планет, неподвижен ли он относительно Солнца, или же наша планетная система вместе с Землей движется куда-то относительно этой эфирной среды. Уже давно вычислили, что Земля летит по своей орбите со скоростью 30 км/сек. Некий Майкельсон в конце 19 века придумал прибор, который измерял разницу скорости света в двух перпендикулярных направлениях, по которой можно было вычислить, куда и с какой скоростью летит Земля по отношению к эфиру, примерно так, как мы выше показали, как определить скорость поезда, измеряя скорость звука в двух поперечных направлениях. И вдруг эксперимент показывает, что скорость света одинакова при её излучении в любом направлении, куда бы не двигалась Земля! То есть скорость Земли ничего не добавляет и не убавляет от скорости света в любом направлении. Это то же самое, что если бы из

нашего поезда некий спортсмен бросил бы гирию в вагоне в направлении локомотива со скоростью 5 м/сек (относительно вагона), она бы вылетела в окно и упала бы на перрон тоже со скоростью 5 м/сек, а не $10+5 = 15$ м/сек, как это происходит на самом деле. Ну что же это такое, господа! Ну ладно, пусть не 15 м/сек, а 14.999 м/сек из-за трения воздуха, но ведь 5 м/сек! Как будто этот спортсмен стоит на перроне, а не промчался мимо в окне грохочущего поезда!

Это был шок. Эксперимент повторяли с другими улучшенными приборами, подключились физики Морли, Миллер, Кеннеди, маялись лет 20, результат был тот же. Пытались объяснить тем, что при таких скоростях пространство сжимается по направлению движения, физик Лоренц даже вывел формулы, как это происходит. Они, кстати, достаточно простые. Но стройной картины не получалось, были противоречия с наблюдениями.

И вот в 1905 году Эйнштейн придумывает теорию относительности, точнее, её первую часть, в которой рассматриваются системы, которые движутся равномерно, без ускорений (их называют инерциальными). Придумку Эйнштейна позже стали называть специальной теорией относительности, то есть для специального случая инерциальных систем. Главным постулатом в ней было признание того, что свет имеет одинаковую скорость, в какой бы системе он (свет) не испускался и в какой бы она (скорость) не измерялась. Эйнштейн включил в свою теорию и формулы Лоренца, и теория получилась математически стройной, всё объясняла. По этой теории получалось, что эфир для света не нужен, но при околосветовых скоростях движения получались странные вещи (хотя чему удивляться, странность появилась в реальном эксперименте Майкельсона-Морли).

Например, если бы наши поезда двигались по своим рельсам навстречу друг другу со скоростями не 10 м/сек, а 270000 км/сек, и физик, сидящий в одном из поездов, измерял бы скорость другого поезда, считая свой поезд неподвижным (или, как правильно говорить, измерял бы относительную скорость другого поезда), то получилось бы не $270000+270000 = 540000$ км/сек, как мы привыкли складывать по механике Ньютона, а 298200 км/сек! И никакое физическое тело, в какой бы системе отсчёта мы бы не измеряли его относительную скорость, эта скорость не может быть больше скорости света, то есть 300000 км/сек.

И ещё, если бы физик в первом поезде получал бы данные с часов физика во втором поезде, то он бы видел, что они отстают, то есть относительно первого поезда время во втором поезде движется медленнее. Мало того, если бы физик во втором поезде наблюдал бы часы физика в первом поезде, то он бы тоже увидел, что часы в первом поезде отстают от часов во втором поезде! То есть картина совершенно симметрична, нет общей правды, и зависела бы от того, относительно какого поезда (или инерциальной системы) проводятся наблюдения! Собственно, поэтому она и называется теория относительности, только эта относительность напроць сносит очевидные представления, основанные на здравом смысле. Эйнштейн потом расширил эту теорию до общей теории относительности, там учитываются и массы тел, и ускорения, и получаются еще более удивительные выводы. Это тема уже для другого поста, но главное то, что за прошедшие 100 с лишним лет проведено много наблюдений и астрономических, и всё более сложными экспериментами на Земле, включая дорожные ускорители, теория относительности многократно подтвердилась, используется физиками как привычный инструмент вычислений. Здравый смысл, по крайней мере у физиков, давно к этому привык.

В рамках СТО есть вывод самой известной формулы современной физики. Но она настолько лаконична, а выражает столь важное свойство материи, что я решил вынести информацию о ней в отдельный пост.

Дополнение 1.

Чуть подробнее о формулах Лоренца. В случае движения систем измерений вдоль одной оси они выглядят и выводятся достаточно просто, в геометрической интерпретации добавлением поперечного движения и использованием формулы Пифагора. Для наглядности приведем не сами формулы преобразования координат, а пример следствия из формул. Пусть, одна система измерений (поезд №1) движется относительно другой системы (поезда №2) вдоль одной оси со скоростью v , и мы обозначим некоторый промежуток измерения времени между одними и теми же измерениями в первой системе как dt_1 , а во второй как dt_2 (измеряет наблюдатель из первой

системы, это важно), то для наблюдателя из первой системы время во второй будет двигаться медленнее, чем в первой согласно выражению

$$dt_1 = dt_2 \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

или более наглядно

$$dt_2 = dt_1 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

так как $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ будет всегда меньше единицы и будет стремиться к нулю при стремлении v к скорости света.

И это выражение обратимо для наблюдателя из второй системы, то есть если время и во второй, и в первой системе измеряется из второй:

$$dt_2 = dt_1 \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Кстати, сомножитель $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ в формулах Лоренца встречается постоянно и называется коэффициентом Лоренца (или Лоренц-фактором), обозначается как γ (греческая гамма).

Если системы движутся не вдоль одной оси, а под произвольным углом, то говорят уже не о формулах Лоренца, а о преобразованиях Лоренца, используют операции для векторов, и они выглядят несколько сложнее. Но что важно, они сохраняют обратимость (инвариантность).

Дополнение 2.

В фантастических рассказах персонажи запросто перемещаются быстрее скорости света какими-то хитрыми нуль-перелётами. Но еще Эйнштейн показал интересную вещь. Нельзя не только перемещаться материальному телу быстрее скорости света, - нельзя передавать информацию быстрее скорости света! Эйнштейн, (и мы вслед за ним в этой статье), любил для мысленных экспериментов использовать поезда, которые очень быстро едут мимо каких-то бесконечных платформ. Так вот, один из его мысленных экспериментов заключается в том, что в вагоне едет и спит на нижней полке пассажир, на него с багажной полки падает чемодан и убивает его. Это сразу обнаруживает проводник вагона, и по внутренней связи быстрее скорости света сообщает машинисту, который находится в тысячах километрах впереди (ну вот такие поезда!). Машинист мгновенно передаёт это сообщение ближайшему путевому обходчику на перроне. Тот по своей фантастической связи, но тоже быстрее света, передаёт назад, всем путевым обходчикам. И путевой обходчик, который находится напротив вагона, в котором произошло это происшествие, мгновенно передаёт сообщение проводнику. И по формулам Лоренца (вычисления без высшей математики, проверка доступна старшекласснику) это сообщение приходит раньше момента падения чемодана! Проводник идет и задвигает чемодан поглубже, происшествия не случается. То есть налицо нарушение принципа причинности и всякой логической взаимосвязи. Поэтому нельзя передавать информацию быстрее скорости света.

Я познакомился с СТО ещё старшеклассником, по популярной брошюре, там не было о невозможности передачи информации быстрее света. И мне казалось, что всё понятно. Но вот этот парадокс поведал нам, студентам матфака НГУ, на лекции по физике Кулаков Юрий Иванович, и я тогда впервые серьёзно изумился. Нужно ещё сказать, что в этом была еще и заслуга Юрия Ивановича, блестящего лектора и вообще удивительного человека. Но о нём расскажу как-нибудь позже.

Дополнение 3.

Разумеется, законы теории относительности действуют и при привычных нам скоростях, например, 10 м/сек, но при этом они отличаются от механики Ньютона на исчезающе малые доли процента, то есть в привычных нам масштабах удобнее механика Ньютона.

Дополнение 4.

Эйнштейн утверждал, что к независимости скорости света от системы отсчёта он пришёл независимо от опытов Майкельсона-Морли, проводя мысленный эксперимент, как будто он летит со скоростью света и смотрит на себя в зеркало. Но что-то меня берёт сомнение. Наверно, он всё же краешком уха слышал об этом эксперименте. А то почему бы тогда много раньше никто не придумал такой же мысленный эксперимент, например, тот же Ньютон? Полагаю, он был не менее гениальный, чем Эйнштейн, только в его время ставили эксперименты с приборами попроще.

Дополнение 5.

А что это за скорость света, которую, кстати, обозначают буквой C (или c)? Недавние эксперименты по обнаружению гравитационных волн показали, что скорость распространения гравитации тоже равна C . То есть C в формулах Лоренца – это какая-то более фундаментальная величина, какая-то собственная характеристика пространства-времени, к которой подстроены два столь разных физических явления. Правда, в общей теории относительности Эйнштейна гравитационной силы как таковой вовсе нет, это форма искривления пространства-времени. Но гравитационные волны, как колебания пространства-времени, есть. Но всё равно, C – это не только скорость света.

Что ещё можно сказать? Не стоит упоминать всю теорию относительности Эйнштейна: окружающий мир в наших привычных условиях и масштабах, и в сильно отличающихся, ведет себя по-разному. А если кто-то бодро употребляет слова «относительность Эйнштейна» применительно к бытовым вещам, а также слова «квантовый», «энергетика» (обычно с приставкой «био»), то это либо невежа, или, хуже того, мошенник, который за деньги впаривает Вам бесполезный прибор или лечение.

Алсынбаев Камиль, Калининград, 2023 г.
kamil.alsynbaev@mail.ru