

## Принципы СТО

*Темы кодификатора ЕГЭ:* принцип относительности Эйнштейна, инвариантность скорости света.

Принцип относительности Галилея, подробно рассмотренный в предыдущем листке, говорит о том, что никакие лабораторные опыты механики не помогут определить, покоится ли лаборатория или движется равномерно и прямолинейно.

Но возникает закономерный вопрос: а кто заставляет нас ограничиваться лишь механическими явлениями? Давайте перейдём в другие области физики: будем наблюдать в движущейся лаборатории распространение тепла или света, ставить опыты с электромагнитными колебаниями, изучать ядерные процессы. . . Раз уж механика нам не помощник, то, быть может, где-нибудь в молекулярной физике, электродинамике, оптике, атомной или ядерной физике найдутся явления, на протекании которых скажется равномерно-прямолинейное движение лаборатории? Тогда, сопоставив ход таких явлений в неподвижной и в движущейся системах отсчёта, мы зафиксируем факт движения и сможем измерить его скорость.

С развитием электродинамики поначалу казалось, что так оно и есть. Дело в том, что, в отличие от законов механики Ньютона, уравнения Максвелла оказались не инвариантными относительно преобразований Галилея.

### Гипотеза о мировом эфире

Из уравнений Максвелла следует, например, что свет в вакууме распространяется со скоростью  $c = 300000$  км/с в любом направлении, причём эта скорость не зависит от того, покоится ли источник света или движется. Физиков данный факт ничуть не удивлял: свет рассматривался как колебания особой всепроникающей среды — неподвижного мирового эфира. Считалось, что электромагнитные волны распространяются в эфире аналогично звуковым волнам в воздухе, а со звуком ведь дело обстоит точно так же: сигнал от бибикнувшего автомобиля бежит в воздухе во все стороны со скоростью примерно 330 м/с вне зависимости от скорости, с которой движется автомобиль.

А теперь представьте себе, что вы находитесь в звездолёте, который мчится в космическом вакууме со скоростью  $v = 50000$  км/с относительно удалённых звёзд. Вы сидите лицом по ходу движения звездолёта и смотрите на лампочку, которая находится в его носовой части.

Свет от лампочки, не обращая внимания на её движение, перемещается относительно звёзд со скоростью  $c$ . Вы движетесь навстречу свету со скоростью  $v$ ; стало быть, относительно вас свет имеет скорость  $c + v = 350000$  км/с. Вы измеряете эту скорость, сопоставляете её с известным значением  $c$  и приходите к выводу, что двигаетесь со скоростью 50000 км/с! Таким образом, электромагнитные явления вроде бы позволяют отличить покой от равномерно-прямолинейного движения.

У вас, кстати, может возникнуть вопрос: а чем плох аналогичный эксперимент со звуком? Давайте бибикнем в носовой части длинного движущегося лимузина, измерим скорость звука относительно нас и опровергнем принцип относительности Галилея! Ничего не выйдет: если лимузин замкнутый (как и должно быть), то он увлекает свой воздух вместе с собой, и вы ничего не заметите<sup>1</sup>. А вот в звездолёте вам никуда не деться от всепроникающего «эфирного

---

<sup>1</sup>Конечно, в открытом автомобиле звук будет нести на вас вместе с окружающим воздухом, и скорость звука действительно окажется больше; но открытый автомобиль является нарушением правил — это всё равно, что выглянуть наружу.

ветра», который несётся вам в лицо и увеличивает тем самым скорость света в описанном выше эксперименте с лампочкой<sup>2</sup>.

Соответственно, многие учёные (в том числе выдающийся голландский физик Х. Лоренц) считали, что инерциальные системы отсчёта, будучи равноправными с точки зрения механики, в электродинамике перестают быть таковыми. Имеется выделенная, привилегированная система отсчёта, связанная с неподвижным мировым эфиром. Остальные системы отсчёта движутся относительно неё, и возникающий «эфирный ветер» меняет в них величину скорости света.

С целью обнаружения эфирного ветра в 1881 году был поставлен один из самых знаменитых физических экспериментов — опыт Майкельсона. С помощью чувствительного интерферометра производились попытки измерить скорость Земли относительно эфира. А именно, исследовалась интерференционная картина, даваемая двумя когерентными пучками света, имеющими перпендикулярные направления. Интерферометр движется относительно эфира вместе с Землёй; при вращении интерферометра меняется направление эфирного ветра относительно интерферометра, что должно сказываться на скоростях пучков и давать сдвиги интерференционной картины.

Однако никаких сдвигов обнаружено не было! Наблюдения проводились в разное время года (когда скорость Земли ощутимо меняла направление) и неизменно давали отрицательный результат. Интерферометр был настолько точный, что списать отсутствие эфирного ветра на недостаточную чувствительность прибора было нельзя.

Почему же движение Земли относительно эфира не удаётся зафиксировать? Не сомневаясь в существовании эфира, Лоренц заметил, что результаты опыта Майкельсона полностью объясняются, если сделать невероятное предположение: размеры движущегося предмета сокращаются в направлении движения! Так, если стержень длины  $l_0$  начинает двигаться вдоль своей оси со скоростью  $v$ , то его длина становится равной

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (1)$$

Эта гипотеза, названная *лоренцевым сокращением*, не вытекала на тот момент из каких-либо физических принципов и стояла особняком, будучи призвана лишь справиться с отрицательным результатом опыта. Но тем не менее формула (1) действительно оказалась верна! Её объяснение пришло позже, уже в рамках теории относительности Эйнштейна.

## Постулаты Эйнштейна

Альберт Эйнштейн — величайшая фигура в истории физики. Для разрешения трудностей, описанных выше, он отказался от некоторых сложившихся в физике устоев и предпринял весьма радикальные шаги. Сформулируем ещё раз те проблемы, с которыми столкнулась физика, и их решения, предложенные Эйнштейном.

*1. Не удаётся обнаружить привилегированную систему отсчёта, связанную с неподвижным мировым эфиром.*

Так её и нет вовсе. Никакого эфира не существует. Все инерциальные системы отсчёта полностью равноправны между собой, и никакими физическими опытами нельзя выделить одну из них среди остальных.

Таким образом, Эйнштейн обобщил принцип относительности Галилея с механических на вообще все физические явления.

---

<sup>2</sup>Пытаясь спасти принцип относительности Галилея применительно к электродинамике, Герц предположил, что эфир также увлекается движущимися телами — как воздух лимузином. Из этой гипотезы следовало, однако, что струя воды, увлекая эфир, должна увлекать и луч света — а в экспериментах такого не наблюдалось.

**Принцип относительности Эйнштейна.** *Всякое физическое явление при одних и тех же начальных условиях протекает одинаково в любой инерциальной системе отсчёта.*

Следовательно, если ваша лаборатория находится внутри корабля, то не только механический, но и вообще никакой эксперимент не даст вам ответа на вопрос, покоится ли корабль или движется равномерно и прямолинейно. Вы можете ставить опыты с газами, изучать тепловые явления, наблюдать за распространением электромагнитных волн, следить за атомными и ядерными процессами, анализировать взаимодействия элементарных частиц — и нигде вам не удастся обнаружить каких-либо отклонений в протекании этих явлений, вызванных фактом равномерно-прямолинейного движения корабля.

В предыдущем разделе мы убедились в том, что законы механики имеют одинаковую математическую форму во всех инерциальных системах отсчёта: уравнения, выражающие эти законы, инвариантны относительно преобразований Галилея. Таков смысл принципа относительности Галилея. Обобщающий его принцип относительности Эйнштейна утверждает, что *любой физический закон имеет одинаковую математическую форму во всех инерциальных системах отсчёта.* Все уравнения, выражающие законы физики, должны быть инвариантны относительно перехода из одной инерциальной системы отсчёта в другую.

В частности, основные уравнения электродинамики — уравнения Максвелла — должны сохранять свою форму при таком переходе. Как же тогда быть со следующей трудностью?

*2. Электродинамика противоречит механике в том, что уравнения Максвелла не инвариантны относительно преобразований Галилея.*

Что ж, это проблема механики, а не электродинамики. Уравнения Максвелла блестяще работают в области электромагнитных явлений. Если преобразования Галилея не вяжутся с уравнениями Максвелла, то неверны преобразования Галилея, а не уравнения Максвелла.

Но легко сказать — преобразования Галилея неверны! Во-первых, они, казалось бы, совершенно очевидны — вам наверняка не составило труда в них разобраться. Чему там, собственно говоря, быть неверным?

А во-вторых — следствием преобразований Галилея, как мы видели, является закон сложения скоростей. Вы неоднократно пользовались им при решении задач. Что же получается — и закон сложения скоростей объявляется неверным?

Да, именно так — гласил ответ Эйнштейна. Классическая механика Ньютона нуждается в глубоком, коренном пересмотре своих основных принципов. И слабый пункт классической механики состоит в том, что механические законы предполагают *мгновенность* распространения взаимодействий между телами.

Рассмотрим, например, гравитационное притяжение двух тел. Если одно из тел сместить в сторону, то, согласно закону всемирного тяготения, второе тело «почувствует» этот факт мгновенно, как только изменится расстояние от него до первого тела. Получается, что взаимодействие передаётся от одного тела к другому с бесконечной скоростью.

Эксперименты, однако, показывают, что механизм передачи взаимодействий состоит в следующем: изменение состояния тела меняет поле около него; возникшее возмущение поля начинает бежать во все стороны с некоторой *конечной* скоростью и лишь спустя определённый промежуток времени достигает другого тела. Мгновенно передающихся взаимодействий ни в каких опытах не наблюдается.

Но если взаимодействия не могут передаваться в бесконечной скоростью, то *в природе существует предельная, максимальная скорость распространения взаимодействий.* Изменённые законы механики должны учитывать наличие этой предельной скорости и, соответственно, конечность времени передачи взаимодействий между телами.

Второй постулат<sup>3</sup> Эйнштейна отводит исключительную роль скорости света.

---

<sup>3</sup> *Постулат* в физике — это утверждение, которое служит обобщением опытных фактов и принимается без доказательства. Постулат формулирует свойства природы: «Наш мир таков, что...» Постулаты аналогичны

**Принцип инвариантности скорости света.** В каждой инерциальной системе отсчёта свет движется в вакууме с одной и той же скоростью; величина этой скорости не зависит от того, покоится или движется источник света.

Таким образом, вышеописанный опыт с лампочкой в носовой части звездолёта нам провести не удастся: скорость света относительно наблюдателя в звездолёте будет равна  $c$ , а не  $c + v$ , и наблюдатель не сможет заметить факт движения звездолёта. Классический закон сложения скоростей применительно к скорости света не работает.

Мы увидим далее, что максимальная скорость распространения взаимодействий, присущая нашему миру, оказывается равной как раз скорости света в вакууме. Никакой сигнал, никакое тело, никакой вообще материальный объект в природе не может двигаться со скоростью, превышающей  $c$ . Величина  $c$  является фундаментальной константой, отражающей свойства мира, в котором мы живём.

Оба постулата Эйнштейна — принцип относительности и принцип инвариантности скорости света — легли в основу *специальной теории относительности (СТО)*. Эта теория затрагивает глубокие свойства пространства-времени, радикально меняя наши представления об окружающем мире<sup>4</sup>. Механика, построенная Эйнштейном на постулатах СТО, получила название *релятивистской* (от англ. *relativity* — относительность).

Новые и удивительные свойства пространства-времени и новые законы, устанавливаемые в СТО, проявляются при больших скоростях движения — и тем ярче, чем ближе мы подходим к скорости света. В повседневной жизни мы не замечаем этих релятивистских эффектов — по той простой причине, что привычные нам скорости чрезвычайно малы по сравнению со скоростью света. Во многих практических задачах можно считать скорость света бесконечной — и тогда прекрасно работает классическая механика.

Итак, классическая механика оказывается приближённой теорией и годится для небольших скоростей. Релятивистская механика используется тогда, когда скорости тел достаточно близки к скорости света — в таких ситуациях классическая механика отказывает совершенно. Классическая механика является предельным случаем релятивистской механики: формулы классической механики получаются из релятивистских формул предельным переходом  $c \rightarrow \infty$ .

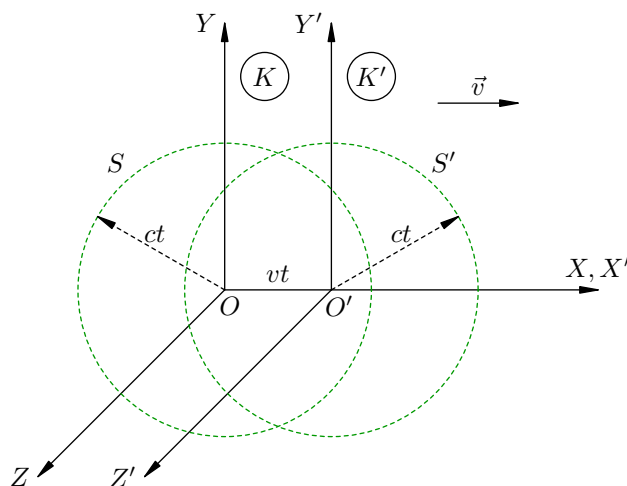


Рис. 1. Кажущийся парадокс со световой вспышкой

аксиомам в геометрии. В основе любой физической теории лежат некоторые постулаты — они играют роль первичных утверждений, из которых остальные утверждения теории выводятся в качестве следствий.

<sup>4</sup>Впоследствии Эйнштейн развил *общую теорию относительности (ОТО)*, которая описывает свойства пространства-времени при наличии гравитационного поля. Оказывается, гравитационное поле приводит к искривлению пространства-времени. ОТО настолько сложна, что рассмотрение даже самых её начал выходит далеко за рамки школьной программы. В СТО влиянием гравитации пренебрегают.

Какие же новые свойства пространства-времени и новые физические законы открыла теория относительности? Мы будем рассказывать о них в двух следующих разделах. Здесь мы покажем лишь, что из постулатов СТО следуют весьма неожиданные и, казалось бы, парадоксальные выводы.

Рассмотрим системы отсчёта  $K$  и  $K'$  — те же, что и в предыдущем листке (рис. 1). В момент времени  $t = 0$ , когда их начала  $O$  и  $O'$  находятся в одной точке, в этой точке происходит световая вспышка.

Где окажется волновой фронт вспышки к моменту времени  $t$ ?

В системе  $K$  свет распространяется во все стороны со скоростью  $c$ . Поэтому в системе  $K$  вспышка достигнет сферы  $S$  радиуса  $ct$  с центром в точке  $O$ .

В системе  $K'$  скорость света также равна  $c$ . Значит, в системе  $K'$  вспышка достигнет сферы  $S'$  того же радиуса  $ct$ , но с центром в точке  $O'$ .

Однако точки  $O$  и  $O'$  к моменту  $t$  разойдутся на расстояние  $vt$ . Получается, что волновой фронт в один и тот же момент времени находится на двух разных сферах  $S$  и  $S'$ . Противоречие?

Противоречия на самом деле нет. Причина кажущегося парадокса кроется в понятии *одновременности*. На место нашего интуитивного понимания одновременности приходит чёткое определение этого термина, даваемое в СТО.