

Замедление времени как эмпирический закон и постоянство скорости света

Тимур Султан-заде

10 сентября 2026 г.

Аннотация

Показано, что если принять подтверждённый экспериментами эффект замедления времени при движении за первичный эмпирический закон, то принцип постоянства скорости света перестаёт быть постулатом и становится логически необходимым следствием. Вывод опирается на закон замедления времени, экспериментальный факт изотропности скорости света и принцип относительности Галилея, не требуя привлечения теоретического понятия одновременности. Такой подход не вступает в противоречие со специальной теорией относительности, а напротив — даёт эмпирическое обоснование её исходным положениям, иллюстрируя возможность возвращения физической теории на эмпирический фундамент. Работа оставляет открытым вопрос о первопрочине эффекта замедления времени.

Ключевые слова: замедление времени, специальная теория относительности, эмпирическая физика, постоянство скорости света, Лоренцево сокращение.

1 Введение

История точного знания движется не по прямой, а по спирали — это в равной мере и факт из жизни науки, и фундаментальный закон диалектики. Сначала накапливаются разрозненные опытные данные; затем находится гениальная теоретическая конструкция, которая объединяет их несколькими смелыми постулатами. Однако на новом витке выясняется, что одно из следствий этой конструкции настолько надёжно закреплено в опыте, что само готово выступить в роли фундамента. Теория,

некогда стоявшая на постулатах, получает новую, эмпирическую точку опоры внутри себя. Именно такой путь прошла квантовая запутанность: из математического курьёза она превратилась в экспериментально подтверждённый факт, ставший основой для целых направлений науки — квантовых вычислений и криптографии.

Похожий виток просматривается и в сегодняшнем понимании эффекта замедления времени.

В классическом построении специальной теории относительности (СТО), изложенном в работе Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» (1905) [1], во главу угла ставятся постулаты: принцип относительности и постоянство скорости света; замедление же времени выводится как теорема. Однако с позиции физики, опирающейся на прямые эмпирические обобщения, естественно посмотреть на ситуацию иначе. Замедление времени — не гипотеза, а грубый, многократно перепроверенный факт. Самый точный на сегодня эксперимент подтвердил предсказания релятивистской формулы с относительной погрешностью менее 2.3×10^{-9} [2].

Может ли этот закон сам послужить фундаментом теории? Наша цель — показать, что да. Приняв его в качестве исходной точки, мы, не привлекая дополнительных постулатов, придём к постоянству скорости света. Тем самым один из главных постулатов теории превращается в обоснованный вывод, а сама теория получает дополнительную эмпирическую опору.

2 Методологический урок СТО

К концу XIX века в физике сложилась ситуация, которую иначе как запутанным узлом не назовёшь. Уравнения Максвелла прекрасно описывали электромагнитные явления, но их согласование с классической механикой требовало введения гипотетической среды — эфира. При этом для каждого опыта приходилось вводить свою модель среды. Так, модель, объяснявшая аберрацию звёзд, требовала, чтобы Земля двигалась сквозь неподвижный эфир. Однако опыт Майкельсона и Морли показал, что скорость света во всех направлениях одинакова, и не обнаружил движения относительно эфира.

Каждое новое теоретическое построение, призванное «распутать» этот узел, лишь добавляло новых противоречий. Ситуация всё больше напоминала гордиев узел, распутать который, казалось, невозможно [3].

Эйнштейн поступил с этим узлом так же, как Александр Македонский: он его разрубил. Вместо того чтобы искать физическую причину постоянства скорости света или пытаться согласовать её с механикой

эфира, он просто принял это утверждение как постулат [1]. Скорость света была объявлена постоянной не в силу какого-либо ещё не открытого физического механизма, а потому что это утверждение, принятое как постулат, позволило построить теорию, устраняющую фундаментальные противоречия в электродинамике того времени. Вопрос «почему?» был заменён утверждением «да будет так!».

Этот шаг был не просто смелым — он изменил сам метод познания. Если раньше физика шла от опытных фактов к теоретическим обобщениям, то теперь во главу угла ставилась математическая аксиома, из которой дедуктивно выводились следствия. Такой подход позволил избежать тупиковых споров о природе эфира и стремительно построить законченную теорию — специальную теорию относительности. Именно в её рамках замедление времени, сокращение длины и другие релятивистские эффекты были получены из постулатов как теоремы.

Однако у этого успеха была и обратная сторона. Когда явление выводится как теорема, оно перестаёт восприниматься как фундаментальная загадка природы. Замедление времени, низведённое до статуса «всего лишь следствия», надолго выпало из поля зрения физиков как самостоятельный объект для поиска его физической первопричины. Постулат, однажды введённый как инструмент, со временем превратился в нечто большее — в окончательное объяснение. И это, в свою очередь, стало препятствием для дальнейшего движения вглубь.

Настоящая работа не отвергает достижения Эйнштейна. Напротив, она опирается на них, чтобы сделать следующий шаг. Мы не возвращаемся назад, отказываясь от постулатов, а переходим на новый виток спирали познания, возвращаясь к эмпирической физике на более высоком уровне понимания. Если во времена Эйнштейна математический постулат был необходим, чтобы разрубить гордиев узел противоречий в физике, то сегодня, имея на руках многократно проверенные экспериментальные данные о замедлении времени, мы можем, как будет показано далее, вывести из этого закона постоянство скорости света, возвращая тем самым основания теории на эмпирическую почву, и вновь поставить вопрос о его физической первопричине.

3 Закон замедления времени

Эффект релятивистского замедления времени состоит в том, что длительность физического процесса, связанного с движущимся объектом, зависит от того, какими часами она измеряется. Часы, движущиеся вместе с объектом, покажут меньшее значение, чем часы, относительно кото-

рых этот объект движется¹. Этот эффект был теоретически предсказан Эйнштейном в [1] как следствие постулатов специальной теории относительности, а затем многократно подтверждён прямыми экспериментами.

Замедление времени подтверждено независимыми измерениями нескольких типов.

- **Мюоны в атмосфере.** Собственное время жизни мюона составляет около 2,2 микросекунды. Тем не менее, рождённые в верхних слоях атмосферы частицы регистрируются на уровне моря. Причина — с точки зрения наземного наблюдателя их «внутренние часы» замедлены в полном соответствии с релятивистским законом [4].
- **Прямые измерения атомными часами.** В эксперименте Хафеле–Китинга цезиевые часы, размещённые на борту самолёта, совершили кругосветный перелёт в восточном, а затем в западном направлении; расхождение их показаний с неподвижным эталоном точно совпало с предсказаниями теории [5].
- **Прецизионная проверка на ускорителях.** В 2014 году прецизионный эксперимент по наблюдению поперечного эффекта Доплера на пучках быстрых ионов лития подтвердил формулу замедления времени с относительной погрешностью менее 2.3×10^{-9} , что на два порядка превзошло точность предшествовавших опытов [2].
- **Инженерные формулы спутниковой навигации.** В системе GPS релятивистские эффекты учитываются путём сдвига частоты бортовых генераторов. Без такой коррекции вклад одного только релятивистского замедления времени (7,2 мкс/сут) приводил бы к погрешности позиционирования около 2,16 км в сутки [6].

Таким образом, фундаментальный закон замедления времени формулируется однозначно:

Для любого объекта, движущегося с постоянной скоростью V относительно лабораторной системы отсчёта, длительность любого физического процесса $\Delta t'$, измеренная в собственной системе отсчёта объекта, связана с длительностью Δt того же процесса, измеренной в лабораторной системе, соотношением

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}, \quad (1)$$

¹Здесь и далее речь идёт исключительно о релятивистском замедлении времени, предсказываемом специальной теорией относительности. Эффекты гравитационного замедления, описываемые общей теорией относительности, в настоящей работе не рассматриваются.

где c — скорость света в вакууме, измеренная в лабораторной системе отсчёта (фундаментальная константа, значение которой известно из независимых экспериментов).

4 Вывод постоянства скорости света

Теперь, приняв закон замедления времени в качестве исходного, покажем, что из него вместе с принципом относительности Галилея и экспериментальным фактом изотропности скорости света с необходимостью следует постоянство скорости света во всех системах отсчёта, движущихся с постоянной скоростью относительно лабораторной. Дополнительно будет получено Лоренцево сокращение продольных размеров.

Для математического вывода мы будем называть лабораторную систему отсчёта *неподвижной*, а собственную систему отсчёта движущегося объекта — *движущейся*. Под длиной в движущейся системе везде ниже понимается длина покоящегося предмета, измеренная в его собственной системе отсчёта.

4.1 Продольное распространение света

Рассмотрим две точки A и B , жёстко связанные друг с другом и движущиеся вдоль соединяющей их прямой с постоянной скоростью V относительно неподвижной системы отсчёта. Расстояние между точками в движущейся системе обозначим $L'_{\parallel}$. Вопрос о соотношении $L'_{\parallel}$ с расстоянием в неподвижной системе L пока оставим открытым.

Из A испускается световой сигнал, который отражается от B и возвращается обратно в A .

Неподвижная система. Используя подход, применённый Эйнштейном в [1], время прохождения сигнала до точки B и обратно есть

$$t_{\parallel} = \frac{L}{c - V} + \frac{L}{c + V} = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (2)$$

Движущаяся система. Точки A и B в этой системе неподвижны, продольный размер $L'_{\parallel}$, скорость света в продольном направлении $c'_{\parallel}$. Общее время, за которое свет возвращается, равно

$$t'_{\parallel} = \frac{2L'_{\parallel}}{c'_{\parallel}}. \quad (3)$$

Согласно закону (1), времена связаны:

$$t'_{\parallel} = t_{\parallel} \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (4), получаем первое ключевое соотношение:

$$\frac{L'_{\parallel}}{c'_{\parallel}} = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (5)$$

В классической картине, где время абсолютно, а расстояние между точками неизменно, скорость света, определяемая как отношение расстояния ко времени, должна была бы меняться при переходе от одной системы отсчёта к другой. В релятивистской же ситуации, когда и длительность процессов, и расстояния могут зависеть от движения, само понятие скорости становится вопросом определений. Уравнение (5) наглядно это демонстрирует: оно связывает скорость света в движущейся системе с её продольным размером, но по отдельности не фиксирует ни то, ни другое. Из этого соотношения нельзя сделать однозначный вывод о том, что именно изменяется при переходе в движущуюся систему — продольный размер, скорость света или обе величины одновременно. Чтобы разрешить эту неоднозначность, рассмотрим поперечное распространение света.

4.2 Поперечное распространение света

Теперь рассмотрим тот же источник и приёмник, но расположим их так, чтобы прямая AB была перпендикулярна вектору скорости V . В неподвижной системе отсчёта свет проходит путь по гипотенузам двух равных прямоугольных треугольников с катетами $Vt_{\perp}/2$ и L . Тогда общее время будет равно:

$$t_{\perp} = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (6)$$

В движущейся системе точки A и B неподвижны, поперечный размер между ними $L'_{\perp}$, скорость света в поперечном направлении $c'_{\perp}$. Время обращения составляет

$$t'_{\perp} = \frac{2L'_{\perp}}{c'_{\perp}}. \quad (7)$$

Согласно закону замедления времени (1):

$$t'_{\perp} = t_{\perp} \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (8)$$

Подставляя (6) и (7) в (8), получаем второе ключевое соотношение:

$$\frac{L'_{\perp}}{c'_{\perp}} = \frac{L}{c}. \quad (9)$$

Это соотношение также не даёт однозначного значения скорости света в поперечном направлении. Поэтому требуются дополнительные рассуждения о поперечном размере.

4.3 Неизменность поперечных размеров

Интуитивно понятно, что поперечный размер не должен зависеть от скорости относительного движения; тем не менее дадим строгое доказательство. Для этого воспользуемся известным мысленным экспериментом.

Рассмотрим две одинаковые окружности (окружность 1 и окружность 2), движущиеся навстречу друг другу вдоль общей оси, перпендикулярной их плоскостям. Предположим, что поперечные размеры изменяются при движении. Без ограничения общности будем считать, что при движении они уменьшаются (случай увеличения рассматривается аналогично).

Свяжем неподвижную систему отсчёта с окружностью 1. В момент, когда центры окружностей совпадают, радиус движущейся окружности 2, согласно нашему предположению, окажется меньше радиуса покоящейся окружности 1. Это означает, что окружность 2 будет вложена в окружность 1.

Теперь свяжем неподвижную систему отсчёта с окружностью 2. В силу принципа относительности Галилея и симметрии задачи, в момент совпадения центров движущаяся окружность 1 будет иметь уменьшенный радиус. Следовательно, окружность 1 окажется вложенной в окружность 2.

Таким образом, в зависимости от выбора системы отсчёта одно и то же событие описывается одновременно двумя противоположными отношениями вложения: окружность 2 в окружности 1 и окружность 1 в окружности 2. Это означает, что топологическая конфигурация системы — то, какая окружность находится внутри другой, — зависит от наблюдателя, что невозможно в реальном физическом пространстве, где геометрические отношения включения объективны. Следовательно, исходное

предположение неверно, и поперечные размеры не зависят от скорости относительного движения.

Стоит отметить, что принцип относительности Галилея был сформулирован ещё в XVII веке и к моменту написания [1] являлся проверенным опытным фактом. Принципиальный шаг, сделанный Эйнштейном, состоял в распространении этого принципа на электродинамику и оптику.

4.4 Постоянство скорости света и Лоренцево сокращение

Теперь привлечём третий экспериментальный факт — изотропность скорости света. Опыты Майкельсона–Морли [7] и современные измерения с вращающимися оптическими резонаторами [8] надёжно установили, что скорость света в движущейся системе не зависит от направления. Следовательно, $c'_\perp = c'_\parallel = c'$.

Выше, в разделе 4.3, мы доказали, что $L'_\perp = L$. Подставляя этот результат в уравнение (9) с учётом изотропности скорости света, получаем

$$\frac{L}{c'} = \frac{L}{c} \quad \Rightarrow \quad c' = c.$$

Таким образом, скорость света одинакова во всех системах отсчёта, движущихся с постоянной скоростью относительно лабораторной. Этот принцип, являющийся в стандартной СТО постулатом, здесь выведен как прямое следствие трёх наблюдаемых фактов: закона замедления времени, принципа относительности Галилея и изотропности скорости света.

Из продольного уравнения (5) с учётом $c'_\parallel = c$ немедленно вытекает

$$L'_\parallel = L \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}.$$

Это Лоренцево сокращение, одно из основных следствий СТО. В отличие от стандартного вывода, оно получено здесь без привлечения понятия одновременности — исключительно из измеряемых времён прохождения световых сигналов.

5 Заключение

Проделанный анализ показывает, что фундаментальный эмпирический закон замедления времени — взятый как первичная данность — при простейшей математической процедуре с необходимостью приводит

к постоянству скорости света. Весь вывод опирается исключительно на непосредственно измеряемые величины — времена прохождения световых сигналов, — без привлечения теоретического понятия одновременности. Таким образом, принцип постоянства скорости света утрачивает аксиоматический статус и становится обоснованным следствием экспериментальных фактов.

Мы возвращаемся к эмпирической физике на новом витке спирали познания: не отказываясь от математического аппарата СТО, а напротив — предлагая эмпирическое обоснование её исходным положениям. Замедление времени перестаёт быть просто теоремой: оно становится одним из краеугольных камней физической реальности. Это открывает дорогу к поиску его глубинной причины — в свойствах квантового вакуума или внутренней структуре материи. Не исключено, что этот поиск приведёт к созданию новой теории эфира, построенной на основе современных экспериментальных данных. А возможно, ответ будет найден в чём-то совершенно ином, что сегодня трудно даже вообразить и что находится далеко за пределами современного научного познания.

Список литературы

- [1] Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper // Annalen der Physik. — 1905. — V. 322. — №. 10. — P. 891–921.
- [2] Botermann B. et al. Test of time dilation using stored Li^+ ions as clocks at relativistic speed // Physical Review Letters. — 2014. — V. 113. — P. 120405.
- [3] Pais A. “Subtle is the Lord...”: The Science and the Life of Albert Einstein. — Oxford University Press, 1982.
- [4] Rossi B., Hall D. B. Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum // Physical Review. — 1941. — V. 59. — №. 3. — P. 223–228.
- [5] Hafele J. C., Keating R. E. Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains // Science. — 1972. — V. 177. — №. 4044. — P. 166–168.
- [6] Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity. — 2003. — V. 6. — №. 1.
- [7] Michelson A. A., Morley E. W. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether // American Journal of Science. — 1887. — V. s3-34. — №. 203. — P. 333–345.

- [8] Herrmann S. et al. Test of the Isotropy of the Speed of Light Using a Continuously Rotating Optical Resonator // Physical Review Letters. – 2005. – V. 95. – №. 15. – P. 150401.