

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Применение модифицированного метода Дюге для измерения лоренцевского сокращения длины движущегося тела

Г.Б. Малыкин

Из преобразований Лоренца следует, что для неподвижного наблюдателя время в движущейся инерциальной системе отсчёта замедляется, а линейные размеры сокращаются. Если первый эффект был зарегистрирован более 80 лет назад, то второй до сих пор непосредственно не зарегистрирован. Предложено использовать модифицированный метод Дюге для измерения лоренцевского сокращения длины движущегося тела с помощью распространения световых импульсов в оптической среде — жидкости. Рассмотрено три варианта схемы измерений: со "световым квадратом" в оптической среде, со "световой линейкой" в двух оптических средах с различным показателем преломления, а также с двумя релятивистскими сгустками электронов в вакууме. Показано, что ранее не рассмотренный классический эффект сжатия пространственных интервалов между световыми импульсами в оптической среде существенно снижает точность измерения. Показано также, что обусловленное различным запаздыванием света от различных участков движущегося тела искажение сторон светового квадрата, ориентированных ортогонально направлению движения, также снижает точность измерения методом "светового квадрата".

Ключевые слова: преобразования Лоренца, релятивистское сокращение длины, световые импульсы

PACS number: 03.30. + p

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038877>

Содержание

1. Введение (1117).
2. Эксперименты М. Дюге (1118).
3. Классический эффект сжатия временных интервалов между световыми импульсами в оптической среде. Отличие материальной и световой линеек. η -фактор (1119).
4. Методы регистрации лоренцевского сокращения длины (1119).
5. Заключение (1120).
- Список литературы (1121).

1. Введение

Как известно, специальная теория относительности (СТО) А. Эйнштейна [1] утверждает, что вследствие преобразований Лоренца (ПЛ) для неподвижного наблюдателя, находящегося в некоторой инерциальной системе отсчёта (ИСО) K , линейные размеры тел, находящихся в движущейся со скоростью v относительно него ИСО K' , сокращаются в γ раз вдоль направления движения, а время в ИСО K' замедляется в γ раз (где $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ — так называемый гамма-фактор или лоренц-фактор, c — скорость света в вакууме).

Лоренцевское замедление времени в γ раз было зарегистрировано только в конце 1930-х – середине 1940-х

Г.Б. Малыкин. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, БОКС-120, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: malykin@ufp.appl.sci-nnov.ru

Статья поступила 20 октября 2020 г.,
после доработки 9 ноября 2020 г.

годов в ходе экспериментов [2–4] по обнаружению предсказанного в [1] в 1905 г. поперечного эффекта Доплера (ПЭД), а вскоре и по увеличению времени жизни мюонов [5–7]. В настоящее время ПЭД проявляется при различных физических прецизионных измерениях и при этом зачастую служит источником принципиально неустранимой систематической ошибки. Например, в газовых лазерах с нелинейно-поглощающей ячейкой (н.п.я.) — квантовых стандартах частоты [8–11] — ПЭД, возникающий вследствие имеющего максвелловское распределение по скоростям теплового движения молекул поглощающего газа по направлению, ортогональному лазерному лучу внутри н.п.я., является принципиальным ограничением ширины сверхзузких резонансов поглощения. Вследствие разброса теплового движения частиц по абсолютным скоростям каждая молекула будет иметь резонансную частоту, зависящую от её скорости. Поэтому линия поглощения ансамбля частиц будет иметь дополнительное уширение [12]. ПЭД вызывает также сдвиг центра резонанса [13]. Уже в середине 1970-х гг. стабильность и воспроизводимость частоты лазеров с метановой (CH_4) н.п.я. по порядку величины достигала соответственно 10^{-15} и 10^{-14} от частоты генерации [8]. Влияние же ПЭД могло сдвинуть эту частоту на $10^{-12}–10^{-13}$ [13]. Уменьшить влияние ПЭД можно путём охлаждения поглощающего газа или замены метана газом, имеющим более тяжёлые молекулы, в частности OsO_4 .

Лоренцевское же сокращение длины в γ раз до сих пор непосредственно не наблюдалось.

Принято считать, что последнее явление подтверждается результатами экспериментов Майкельсона – Морли (ММ) [14, 15]. Действительно, результаты [14, 15] прекрасно объясняются лоренцевским сокращением длины.

Однако, как отмечено в [16], существует большое число "альтернативных объяснений" результатов экспериментов ММ. Лоренцевское сокращение длины подтверждается также фактом существования релятивистского закона сложения скоростей [16], многократно проверенного в ходе измерений на ускорителях. Однако и в этом случае существует большое число "альтернативных объяснений". Одно из таких объяснений (приближённое) было получено ещё в 1818 г. О. Френелем [17] — так называемая теория частично увлекаемого движущейся оптической средой "светоносного эфира". Список таких примеров можно было бы продолжить.

Разумеется, как рассмотренные "альтернативные объяснения", так и "альтернативные объяснения" ряда других эффектов СТО, не основанные на применении ПЛ, являются некорректными. В частности, как показано в [16], они не объясняют всю совокупность существующих классических оптических экспериментов. Тем не менее важно осуществить непосредственное измерение лоренцевского сокращения длины.

Отметим, что из результатов различных наблюдений движущихся с околосветовой скоростью астрономических объектов, вследствие эффекта Террелла–Пенроуза [18, 19] (он будет рассмотрен в разделе 2), также невозможно сделать вывод о существовании лоренцевского сокращения длины.

Цель данной работы — предложить несколько вариантов несложных прямых измерений лоренцевского сокращения длины движущегося объекта, использующих некоторую модификацию известных экспериментов М. Дюге [20–22] по фотографированию движущейся в воде так называемой "световой гантели", состоящей из двух пикосекундных импульсов света.

2. Эксперименты М. Дюге

В 1969–1971 гг. М. Дюге осуществил свои знаменитые эксперименты [20–22], которые вполне могли привести, но, к сожалению, не привели к регистрации лоренцевского сокращения линейных размеров движущегося объекта в направлении движения. Не вдаваясь в технические детали экспериментов [20–22], отметим, что при этом пикосекундный оптический импульс от лазера двигался через наполненную водой оптическую кювету. В воду для рассеяния света было добавлено немного молока, что позволяло наблюдать эти импульсы сбоку их оптического пути и снимать их на фотокамеру с помощью сверхскоростного керровского затвора, который подробно описан в [23]. Поскольку кювета с водой была очень короткая (~ 15 см), то световые импульсы не успевали расплываться из-за хроматической дисперсии воды.

В СССР в то время эксперименты М. Дюге вызвали большой интерес. Его работа [22] была переведена на русский язык и опубликована в УФН. В.А. Угаров написал об этих экспериментах три статьи [24–26] ([24] написана совместно с Я.А. Смородинским). Даже в журнале для школьников "Квант" была опубликована статья Н.Н. Малова [27] с описанием экспериментов М. Дюге.

Однако М. Дюге [20–22] ограничился измерением чисто классического эффекта запаздывания света: в кювете двигались два одновременно испущенных световых импульса (это был поделённый зеркалом один световой

импульс, по терминологии М. Дюге так называемая световая гантель), которые располагались в плоскости, ортогональной траектории световых импульсов. Из-за запаздывания света на фотоплёнке изображение того светового импульса, который был дальше от фотокамеры, отставало от того светового импульса, который был ближе к фотокамере. В ходе измерений М. Дюге менял угловую ориентацию световой гантели в плоскости, ортогональной линии движения световых импульсов, вследствие чего запаздывание света и, соответственно, отставание дальнего от фотокамеры светового импульса менялись.

Если бы М. Дюге пропускал через кювету так называемый световой квадрат — четыре световых импульса в плоскости, ортогональной оптической оси фотокамеры, то стороны светового квадрата искались бы по-разному: стороны квадрата, ориентированные в направлении движения, должны испытывать лоренцевское сокращение, а ортогональные ему стороны квадрата — нет. Если бы М. Дюге пропускал через кювету световой куб, состоящий из восьми световых импульсов, то он мог бы зарегистрировать эффект Террелла–Пенроуза [18, 19], согласно которому для случая куба, движущегося с релятивистской скоростью, неподвижный наблюдатель видит изображение куба повёрнутым.

К сожалению, ни того, ни другого М. Дюге не сделал. Для того чтобы понять, почему так произошло, кратко процитируем два его высказывания.

"Световой пакет движется с релятивистской скоростью, однако лоренцевского сокращения он не испытывает, если излучающий его лазер неподвижен. Поэтому на изображение сформированного светового импульса будет оказывать влияние только эффект запаздывания волн" [22].

"Этот эффект сдвига можно понимать как возникающий из-за эффекта распространения волны, не прибегая к специальной теории относительности; это не противоречит теории Террелла, поскольку последняя строго имеет дело с материальными объектами" [21].

Из первого высказывания М. Дюге следует, что он, возможно, был сторонником баллистической гипотезы В. Ритца [28, 29], согласно которой скорость света складывается со скоростью источника излучения. В действительности движение лазера могло только вследствие эффекта Доплера изменить частоту света от лазера. Из второго высказывания М. Дюге следует, что в ходе каких-то своих измерений он пришёл к выводу, что эффекты сокращения размеров материального тела и светового изображения этого же тела при его релятивистском движении в оптической среде существенно различаются. Этот вопрос будет подробно рассмотрен в разделе 4.

Для регистрации эффекта лоренцевского сокращения длины в [24] предлагалось сфотографировать на одном кадре не только движущуюся световую линейку, но и одновременно и неподвижную материальную линейку, размеры которой не сократились.

В настоящее время существуют лазеры, создающие фемтосекундные (и даже аттосекундные) импульсы [30–34], что позволяет проводить данные измерения с существенно большей точностью.

В разделе 4 мы рассмотрим несколько возможных методов регистрации эффекта лоренцевского сокращения длины, а также укажем некоторые источники регулярной погрешности измерений.

3. Классический эффект сжатия временных интервалов между световыми импульсами в оптической среде. Отличие материальной и световой линеек. n -фактор

В этом разделе мы обратим внимание на простой классический оптический эффект сжатия временных интервалов между световыми импульсами в оптической среде, который ранее не рассматривался, и в частности не рассматривался в работах М. Дюге [20–22].

Если из лазера выходят два световых импульса с временным интервалом τ , то после входа в оптическую среду с пренебрежимо малой дисперсией и показателем преломления n интервал становится равным τ/n . Соответственно, и длина отрезка между движущимися световыми импульсами становится в n раз короче, вне зависимости от лоренцевского сокращения длины в γ раз. Это явление объясняется очень просто: на тот момент времени, когда последующий световой импульс поступает на вход оптической среды, предыдущий импульс успевает пройти в среде меньшее расстояние, чем в пустоте. По аналогии с термином "γ-фактор" сокращение длины отрезка между движущимися световыми импульсами в n раз будем именовать n -фактором.

В итоге длина световой линейки, ориентированной в направлении движения, испытывает сокращение в $n\gamma$ раз. Поскольку в оптической среде $v = c/n$, то $\gamma = 1/\sqrt{1 - 1/n^2}$ и реальное расстояние между световыми импульсами, наблюдаемое в ИСО K , составит

$$L_{\text{contr}}^{\text{real}} = \frac{L}{n\gamma} = \frac{L\sqrt{1 - 1/n^2}}{n}. \quad (1)$$

Выражение (1) следует учитывать и при обработке результатов фотографирования светового квадрата или светового куба.

Можно предложить простую механическую аналогию классического эффекта уменьшения длины между световыми импульсами в оптической среде. Пусть по горизонтальному участку трамвайных рельсов с одинаковой скоростью 40 км ч^{-1} движется большое число трамваев с интервалом 4 м. Когда часть этих трамваев начинает движение по подъёмному участку трассы, их скорость уменьшается до 20 км ч^{-1} , а интервал — до 2 м, поскольку в момент времени, когда последующий трамвай начинает двигаться по подъёму, предыдущий трамвай успевает пройти по подъёму вдвое меньшее расстояние, чем на горизонтальном участке трассы.

Указанная аналогия предоставляет возможность просто пояснить различие между световой и материальной линейками. Если трамвай соединены между собой стальными бамперами длиной 4 м, то при въезде на подъём трамвай не может потерять скорость, так как последующие за ним трамваи будут подталкивать его через бамперы. Интервал между трамваями в этом случае также сохраняется, он никак не может уменьшиться, поскольку задаётся бамперами.

Таким образом, аналогом релятивистского движения световой линейки в оптической среде является поезд из независимых трамваев, а материальной линейки — поезд из соединённых бамперами трамваев. Следовательно, для релятивистской материальной линейки будет проявляться только эффект лоренцевского сокращения длины. К сожалению, материальную линейку, в отличие от световой, практически невозможно разогнать до релятивистских скоростей.

4. Методы регистрации лоренцевского сокращения длины

Модифицированный метод Дюге со световым квадратом. Поскольку стороны квадрата, ориентированные в направлении движения, испытывают сокращение $n\gamma$, а две другие не испытывают сокращения, то две последние стороны, которые переносятся из движущейся ИСО K' в неподвижную ИСО K без изменения, и являются эталоном длины стороны квадрата L . А две первые стороны квадрата в ИСО K будут иметь длину $L_{\text{contr}} = L/n\gamma$. Однако здесь имеют место явления, которые не позволяют автоматически использовать равенство $\gamma = L/L_{\text{contr}}$.

Как показано в [35], наблюдатель в ИСО K видит эту сторону квадрата "повёрнутой" на угол α и видит, что длина стержня увеличилась (см. рис. 1 [35]). Выражение для угла α нетрудно получить из выражения (20) работы [35]:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{v}{c} \right) \frac{\sin \theta}{1 - v/c \cos \theta}, \quad (2)$$

где θ — угол между фотокамерой и скоростью светового квадрата. Соответственно, длина этой стороны светового квадрата увеличивается в $1/\cos \alpha$ раз. Если $\theta = 90^\circ$, то $\alpha = 0$ и сторона светового квадрата, ориентированная ортогонально направлению движения, не "поворачивается" и её длина не возрастает. Очевидно, что невозможно одновременно для обеих сторон светового квадрата выполнить условие $\theta = 90^\circ$. Например, если $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$, то наклон составит $\alpha \simeq 2,5^\circ$, а удлинение — $\simeq 11\%$ от исходной длины.

Таким образом, при обработке измерений, выполненных модифицированным методом Дюге, со световым квадратом необходимо внести поправки на результаты выражений (1) и (2).

Метод световой линейки, движущейся в двух различных жидкостях. Выражение (1) даёт возможность найти длину состоящей из двух импульсов световой линейки, ориентированной в направлении движения в ИСО K . Если у нас имеются две различные жидкости с различными показателями преломления n_1 и n_2 , то соотношение наблюдавшихся в ИСО K длин световых линеек в двух жидкостях $L_{\text{contr1}}^{\text{real}}$ и $L_{\text{contr2}}^{\text{real}}$ составит

$$\frac{L_{\text{contr1}}^{\text{real}}}{L_{\text{contr2}}^{\text{real}}} = \frac{n_2 \sqrt{1 - 1/n_1^2}}{n_1 \sqrt{1 - 1/n_2^2}}. \quad (3)$$

Из существующих жидкостей наименьший показатель преломления при комнатной температуре имеет вода ($n = 1,3330$), а наибольший — сероуглерод ($n = 1,6277$). Проведя измерения длин $L_{\text{contr1}}^{\text{real}}$ и $L_{\text{contr2}}^{\text{real}}$, можно, используя выражение (3), получить экспериментальное значение лоренцевского сокращения длины световой линейки.

Однако и здесь имеется одна серьёзная проблема. В соответствии с выражением (1) реальное сокращение световой линейки в воде составляет 0,4960, а для сероуглерода — 0,4847. Это очень малое различие, и использование выражения (3) приведёт к крайне низкой точности вычисления экспериментального значения лоренцевского сокращения длины световой линейки. Причина этого заключается в том, что по мере возрастания показателя преломления жидкости лоренцевское сокращение длины уменьшается, а классический эффект уменьшения длины между световыми импульсами возрастает,

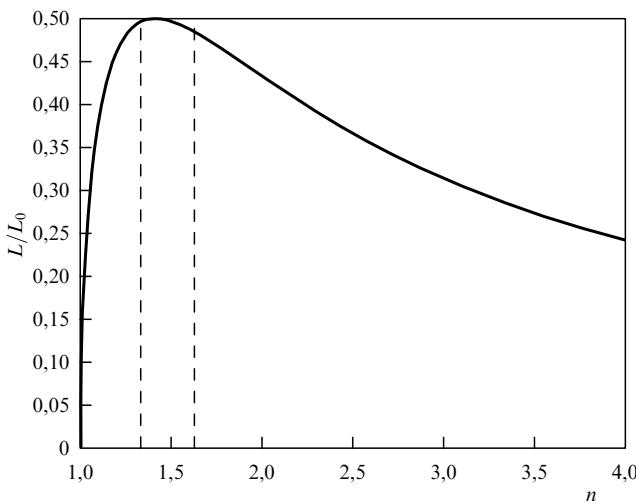


Рис. 1. Зависимость суммарного воздействия эффекта лоренцевского сокращения длины и классического эффекта уменьшения длины между световыми импульсами в оптической среде от величины показателя преломления n . Вертикальными штриховыми линиями показан диапазон значений n для реально существующих жидкостей.

и один эффект частично компенсирует другой. На рисунке 1 представлена теоретическая зависимость наблюдаемой в ИСО K длины световой линейки $L_{\text{contr}}^{\text{real}}$ от показателя преломления n . Из рисунка 1 видно, что в диапазоне значений показателей преломления существующих жидкостей ($n = 1,33 - 1,63$) величина $L_{\text{contr}}^{\text{real}}$ практически не зависит от n .

Отметим, что всё сказанное относится и к световому квадрату, точнее говоря, к двум сторонам квадрата, ориентированным в направлении движения, поскольку они являются световыми линейками.

Метод световой линейки и светового квадрата при движении импульсов в газах. В принципе, можно было бы применить метод световой линейки, движущейся в двух различных газах. Наименьший показатель преломления при атмосферном давлении имеет гелий ($n = 1,000035$), а наибольший — ксенон ($n = 1,000702$). В этом случае величины n -факторов мало отличаются от 1 и не влияют на результаты измерений. Однако величины γ -факторов здесь очень велики: $\gamma \sim 120$ для гелия и $\gamma \sim 30$ для ксенона. Такое большое укорочение световой линейки не позволит провести достаточно точное измерение, световая линейка практически сольётся в точку. Точно так же световой квадрат практически превратится в вертикальную световую линию.

Отметим, что попытка регистрации эффекта Террелла–Пенроуза [18, 19] при движении восьми световых импульсов — светового куба — в газе также весьма затруднительна, поскольку при таких больших значениях γ -фактора световой куб повернётся почти на 90° и неподвижный наблюдатель увидит изображение не куба, а квадрата.

Кроме того, в газах уже при низких интенсивностях света проявляются нелинейные эффекты. Вследствие вышесказанного рассматриваемые измерения в газах следует считать малоперспективными.

Метод регистрации лоренцевского сокращения длины с помощью релятивистских сгустков электронов. Пусть на выходе линейного ускорителя имеется два сгустка электронов — так называемых бэнча, которые по инерции движутся в вакуумированной трубе с релятивистской или нерелятивистской скоростью. Поскольку расстоя-

ние между бэнчами небольшое, порядка нескольких десятков сантиметров, они не успевают "расплыться". С помощью специальных датчиков можно определить расстояние между бэнчами для обоих случаев и, сравнивая эти расстояния, определить величину лоренцевского сокращения длины. Так как бэнчи движутся в вакууме, классический эффект уменьшения длины между бэнчами в принципе не будет иметь места.

Поскольку расстояние между бэнчами мало, то влиянием гипотетического эффекта анизотропии скорости света [36] (по современным оценкам не превышает 10^{-15}) можно пренебречь. Поскольку во время измерений движущиеся бэнчи находятся точно напротив неподвижных датчиков, влиянием эффекта неодновременности событий в различных ИСО [16] на показания датчиков также можно пренебречь.

5. Заключение

Довольно часто обсуждается вопрос о том, реальными или кажущимися являются замедление времени и сокращение линейных размеров тел в движущихся ИСО для наблюдателя в неподвижной ИСО. Рассмотрим классический эффект Доплера на примере выполненных 175 лет назад экспериментов Х. Бейс-Баллота [37] по регистрации эффекта Доплера. На движущейся железнодорожной платформе два трубача поочерёдно без перерыва играли одну и ту же ноту. Когда поезд удалялся, для неподвижного наблюдателя высота звука понижалась, а когда поезд приближался — повышалась. Что же имело место "на самом деле"? Для наблюдателя на платформе звук был одной частоты, а для наблюдателя на земле — другой частоты. И то и другое происходило "на самом деле". В ходе экспериментов [37] музыканты и слушатели менялись местами и, как и следовало ожидать, эффект Доплера оказался коммутативным. Точно так же надо относиться и к эффектам СТО: во всех ИСО все физические явления происходят одинаково, но для других ИСО длина и время событий из первой ИСО меняются в соответствии с ПЛ.

О СТО и ПЛ написаны тысячи, если не десятки тысяч, научных работ. Однако экспериментальное исследование следствий ПЛ происходит очень медленно и с большим опозданием. Пример с регистрацией релятивистского замедления времени, проведённой в 1938–1947 гг., представлен в разделе 1. Приведём другой пример. В 1908 г. В. Ритц предложил так называемую баллистическую гипотезу [28, 29], согласно которой скорость света складывается со скоростью источника излучения. Эта гипотеза должна была дать возможность объяснения накопившихся в то время в физике проблем, не выходя за рамки классической физики. В частности, баллистическая гипотеза Ритца объясняла результаты экспериментов ММ [14, 15] (см., например, [38]). Предпринималось много попыток экспериментального опровержения гипотезы Ритца (ссылки на эти работы приводятся в [39, 40]), однако либо их точность была недостаточна, либо к ним имелись претензии по схеме экспериментов [16, 39]. Только в 2011 г. Е.Б. Александров и соавторы в ходе экспериментов на синхротроне с весьма высокой точностью показали [41, 42], что скорость света не зависит от скорости источника излучения.

В заключение приведём основные выводы данной заметки.

- Предложено использовать модифицированный метод Дюге для измерения лоренцевского сокращения длины движущегося тела с помощью распространения опти-

ческих импульсов или сгустков электронов. Рассмотрено три варианта схемы измерений: со "световым квадратом" в оптической среде, со "световой линейкой" в двух оптических средах с различным показателем преломления n и с двумя relativistическими сгустками электронов в вакууме.

2. Показано, что классический эффект сжатия пространственных интервалов между световыми импульсами в оптической среде с показателем преломления n (n -фактор) существенно снижает точность измерения первыми двумя методами, поскольку для реально существующих жидкостей зависимость n -фактора от величины n почти полностью компенсирует зависимость γ -фактора от величины n .

3. Показано, что обусловленное различным запаздыванием света от различных участков движущегося тела искажение ориентированных ортогонально направлению движения сторон светового квадрата также снижает точность измерения методом "светового квадрата".

Автор выражает благодарность Е.Б. Александрову за ряд полезных замечаний, Б.М. Болотовскому за плодотворные обсуждения, В.И. Поздняковой за помощь в работе, С.М. Копейкину и М. Эроимскому за обсуждение возможности использования результатов наблюдений движущихся астрономических объектов для непосредственной регистрации лоренцевского сокращения длины. Работа поддержана проектами по Государственным заданиям № 0035-2019-0013 и № 030-2021-0013.

Список литературы

1. Einstein A *Ann. Physik* **17** 891 (1905) Vol. 322 в новой нумерации на сайте Wiley Online Library; Пер. на русск. яз.: Эйнштейн А *Собрание сочинений* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 7
2. Ives H E, Stilwell G R J. *Opt. Soc. Am.* **28** 215 (1938)
3. Otting G *Phys. Z.* **40** 681 (1939)
4. Ives H E, Stilwell G R J. *Opt. Soc. Am.* **31** 369 (1941)
5. Гинзбург В Л *УФН* **31** 174 (1947)
6. Тамм И Е *УФН* **31** 157 (1947)
7. Тамм И Е (Ред.) *Мезон* (М.–Л.: Гостехиздат, 1947)
8. Летохов В С, Чеботаев В П *Квантовая электроника* **1** 245 (1974); Letokhov V S, Chebotaev V P *Sov. J. Quantum Electron.* **4** 137 (1974)
9. Багаев С Н, Чеботаев В П *УФН* **148** 143 (1986); Bagaev S N, Chebotaev V P *Sov. Phys. Usp.* **29** 82 (1986)
10. Тайченачев А В, Юдин В И, Багаев С Н *УФН* **186** 193 (2016); Taichenachev A V, Yudin V I, Bagayev S N *Phys. Usp.* **59** 184 (2016)
11. Хабарова К Ю, Калганова Е С, Колачевский Н Н *УФН* **188** 221 (2018); Khabarova K Yu, Kalganova E S, Kolachevsky N N *Phys. Usp.* **61** 203 (2018)
12. Baklanov E V, Chebotaev V P *Opt. Comm.* **12** 312 (1974)
13. Бакланов Е В, Дубецкий Б Я *Квантовая электроника* **2** 2041 (1975); Baklanov E V, Dubetskii B Ya *Sov. J. Quantum Electron.* **5** 1108 (1975)
14. Michelson A A *Am. J. Sci.* **s3-22** 120 (1881)
15. Michelson A A, Morley E W *Am. J. Sci. III* **s3-34** 333 (1887)
16. Малыкин Г Б *Оптика и спектроскопия* **107** 624 (2009); Malykin G B *Opt. Spectrosc.* **107** 592 (2009)
17. Fresnel A *Ann. Chim. Phys.* **9** 57 (1818); Пер. на русск. яз.: Френель О *Избранные труды по оптике* (Под. ред. Г С Ландсберга) (М.: Гостехиздат, 1955) с. 516
18. Terrell J *Phys. Rev.* **116** 1041 (1959)
19. Penrose R *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **55** 137 (1959)
20. Duguay M, Hansen J *IEEE J. Quantum Electron.* **7** 37 (1971)
21. Duguay M A, Mattick A T *Appl. Opt.* **10** 2162 (1971)
22. Duguay M A *Am. Scientist* **59** 551 (1971); Пер. на русск. яз.: Дюре М *УФН* **109** 157 (1973)
23. Duguay M A, in *Progress in Optics* Vol. 14 (Ed. B Wolf) (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1976) p. 161
24. Смородинский Я А, Угаров В А *УФН* **107** 141 (1972); Smorodinskii Ya A, Ugarov V A *Sov. Phys. Usp.* **15** 340 (1972)
25. Угаров В А *Наука и жизнь* (6) 49 (1973)
26. Угаров В А, в сб. *Эйнштейновский сборник* 1973 (Под ред. В Л Гинзбурга) (М.: Наука, 1974) с. 201
27. Малов Н Н *Кванты* (4) 10 (1974)
28. Ritz W *Ann. Chim. Phys.* **8** 13 145 (1908)
29. Ritz W *Arch. Sci. Phys. Nat. Geneva* **26** 209 (1908)
30. Гинзбург В Н и др. *Квантовая электроника* **49** 299 (2019); Ginzburg V N et al. *Quantum Electron.* **49** 299 (2019)
31. Гинзбург В Н и др. *Квантовая электроника* **50** 331 (2020); Ginzburg V N et al. *Quantum Electron.* **50** 331 (2020)
32. Стрелков В В и др. *УФН* **186** 449 (2016); Strelkov V V et al. *Phys. Usp.* **59** 425 (2016)
33. Жёлтиков А М *УФН* **191** 386 (2021); Zheltikov A M *Phys. Usp.* **64** 370 (2021)
34. Юшков К Б, Молчанов В Я, Хазанов Е А *УФН* **191** 874 (2021); Yushkov K B, Molchanov V Ya, Khazanov E A *Phys. Usp.* **64** (8) (2021) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.06.038793>
35. Болотовский Б М, Малыкин Г Б *УФН* **189** 1084 (2019); Bolotovskii B M, Malykin G B *Phys. Usp.* **62** 1012 (2019)
36. Малыкин Г Б *УФН* **174** 801 (2004); Malykin G B *Phys. Usp.* **47** 739 (2004)
37. Buys Ballot C H.D. *Ann. Phys. Chem.* **3** **66** (11) 21 (1845)
38. Swenson L S (Jr.) *The Ethereal Aether* (Austin: Univ. of Texas Press, 1972)
39. Франкфурт У И, Френк А М *Оптика движущихся тел* (М.: Наука, 1972)
40. Малыкин Г Б *Оптика и спектроскопия* **109** 1018 (2010); Malykin G B *Opt. Spectrosc.* **109** 951 (2010)
41. Александров Е Б и др. *Письма в ЖЭТФ* **94** 374 (2011); Aleksandrov E B et al. *JETP Lett.* **94** 344 (2011)
42. Александров Е Б и др. *УФН* **181** 1345 (2011); Aleksandrov E B et al. *Phys. Usp.* **54** 1272 (2011)

Application of the modified Duguay method for measuring the Lorentz contraction of a moving body length

G.B. Malykin. Federal Research Center Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Ulyanova 46, BOX-120, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: malykin@ufp.appl.sci-nnov.ru

According to Lorentz transformations, for a stationary observer, time in a moving inertial reference frame slows down, while the linear dimensions are reduced. While the first effect was observed more than 80 years ago, the second one has not been directly observed so far. The modified Duguay method is proposed in this paper for measuring the Lorentz contraction of a moving body length using the propagation of light pulses in an optical liquid medium. Three variants of the measurement scheme are considered: with a 'light square' in an optical medium, with a 'light ruler' in two optical media with different refractive indices, and with two relativistic electron bunches in a vacuum. It is shown that the classical effect of compression of spatial intervals between light pulses in an optical medium, which was not considered earlier, considerably reduces the measurement accuracy. It is also shown that the distortion of the sides of a light square oriented orthogonal to the movement direction caused by the different delays of light from different parts of a moving body also reduces the measurement accuracy of the light square method.

Keywords: Lorentz transformations, relativistic length contraction, light pulses

PACS number: 03.30.+p

Bibliography — 42 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **191** (10) 1117–1121 (2021)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038877>

Received 20 October 2020, revised 9 November 2020
Physics – Uspekhi **64** (10) (2021)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.11.038877>