

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

**Квадратичный эффект Саньяка:
влияние гравитационного потенциала силы Кориолиса
на разность фаз в плечах
вращающегося интерферометра Майкельсона
(объяснение результатов экспериментов
Д.К. Миллера 1921 – 1926 гг.)**

Г.Б. Малыкин, В.И. Позднякова

Показано, что когда равноплечный интерферометр Майкельсона принимает участие во вращении, например, Земли вокруг своей оси или вокруг Солнца и при этом его плечи по-разному ориентированы относительно плоскости вращения, возникает разность фаз лучей, прошедших по разным плечам интерферометра. Эта разность фаз обусловлена различной величиной ньютоновского (нерелятивистского) скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса, действующего на разные плечи интерферометра. Показано, что разность фаз пропорциональна длине плеча интерферометра Майкельсона, квадрату угловой скорости вращения и квадрату расстояния от центра вращения, в связи с чем предложено именовать данное явление квадратичным эффектом Саньяка. В качестве примера рассмотрены широко известные в своё время эксперименты Д.К. Миллера, утверждавшего, что он обнаружил поступательное движение Земли относительно гипотетического "светоносного эфира". Показано, что результаты этих экспериментов объясняются различием воздействия, обусловленного орбитальным вращением Земли, скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса на замедление времени в ортогональных плечах интерферометра Майкельсона.

Ключевые слова: интерферометр Майкельсона, сила Кориолиса, гравитационный потенциал, орбитальное вращение Земли

PACS number: 03.30.+p

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201504g.0431

Содержание

1. Введение (431).
2. Эксперименты Д.К. Миллера и реакция мирового физического сообщества на их результаты. Обзор работ (432).
3. Вращение интерферометра Майкельсона в теории относительности (434).
4. Вращение интерферометра Майкельсона, расположенного на поверхности Земли, относительно плоскости эклиптики (436).
5. Анализ результатов экспериментов Д.К. Миллера (436).

6. Дальнейшие исследования возможной анизотропии скорости света (437).

7. Заключение (438).

Список литературы (439).

...Если Вы, дорогой читатель, хотели бы использовать эту интереснейшую ситуацию, чтобы сделать ставку, то я рекомендовал бы Вам пари, что эксперименты Миллера окажутся неисправными или что его результаты не имеют ничего общего с "эфирным ветром". Я сам был бы весьма рад поставить свои деньги на это.
А. Эйнштейн [1]

...Толкование Миллера не согласуется с его наблюдениями, которые остаются голым фактом, требующим объяснения.

С.И. Вавилов [2]

Г.Б. Малыкин. Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, ГСП-120, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация. E-mail: malykin@ufr.appl.sci-nnov.ru
В.И. Позднякова. Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: vega@ipmras.ru

Статья поступила 23 декабря 2014 г.,
после доработки 2 февраля 2015 г.

1. Введение

Как показано в специальной теории относительности (СТО), никакими экспериментами, в том числе интерфе-

рометрическими, невозможно обнаружить поступательное движение. Однако расположенный на поверхности Земли интерферометр Майкельсона (ИМ) совершает не только поступательное, но и вращательное движение, которое является абсолютным, и оно может быть зарегистрировано, поскольку при этом возникают центробежное ускорение $\Omega^2 R$ и ускорение Кориолиса для движущихся фотонов $2\Omega R c$ (где c — скорость света в вакууме, Ω — угловая скорость вращения, R — радиус вращения). В случае, когда ИМ заполнен оптической средой с показателем преломления n , скорость света и, соответственно, ускорение Кориолиса для движущихся фотонов будут в n раз меньше. В настоящей статье рассматриваются только ИМ без оптической среды.

Как показано в разделе 3, в реальных случаях центробежное ускорение в ИМ пренебрежимо мало по сравнению с ускорением Кориолиса для движущихся фотонов. В разделе 3 также показано, что возникновение разности фаз в плечах вращающегося ИМ связано не непосредственно с указанными выше ускорениями, а с гравитационными (ньютоновскими) потенциалами соответствующих им сил: силы Кориолиса и центробежной силы. ИМ участвует одновременно в трёх вращательных движениях: 1) вращении Земли вокруг своей оси ($\Omega = 7,27 \times 10^{-5}$ рад c^{-1} , на экваторе $R = 6,3 \times 10^3$ км и скорость $v_{\text{Earth}} = 458$ м c^{-1}); 2) орбитальном вращении Земли вокруг Солнца ($\Omega = 1,97 \times 10^{-7}$ рад c^{-1} , $R \approx 1,5 \times 10^8$ км, $v_{\text{orbit}} \approx 30$ км c^{-1}); 3) вращении Земли вместе с Солнечной системой вокруг центра Галактики (Млечного Пути) ($\Omega \sim 8 \times 10^{-16}$ рад c^{-1} , $R \sim 2,5 \times 10^{17}$ км, $v_{\text{Gal}} \sim 220-240$ км c^{-1})¹.

Вращение вследствие эффекта Саньяка [4–11] приводит к возникновению разности фаз встречных волн в кольцевом интерферометре (КИ). В неподвижной (лабораторной) системе отсчёта эффект Саньяка является следствием релятивистского закона сложения скоростей: скорости световой волны и скорости вращения КИ [7, 8, 10, 11]. В сопровождающей вращение КИ системе отсчёта эффект Саньяка является следствием различия для встречных волн в КИ величины ньютоновского (нерелятивистского) скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса, вызывающих замедление времени [7, 9–11]. В этой системе отсчёта интерферометр неподвижен и отпадает необходимость в вычислении смещений и поворотов его оптических элементов. В разделах 3, 4 мы применим метод, развитый в [7, 9–11], для вращающегося ИМ.

Цель данной статьи — показать, что вращение приводит к возникновению дополнительной разности фаз не только в КИ, но и в ИМ, если его плечи поразному ориентированы относительно плоскости вращения. Таким образом, изменение разности фаз на выходе ИМ при его повороте, наблюдавшееся в экспериментах

Майкельсона–Морли (М–М) [12, 13] и их многочисленных повторениях, не имеет никакого отношения к гипотетическому "светоносному эфиру".

Как известно, в 1881 г. А.А. Майкельсон (1852–1931) создал ИМ для решения в высшей степени актуальной в то время проблемы: обнаружения поступательного движения Земли относительно гипотетического неподвижного "светоносного эфира" [12]. Эксперименты с ИМ неоднократно повторялись, в том числе и самим А.А. Майкельсоном вместе с Э.У. Морли (1838–1923) в 1887 г. [13], и они всегда показывали наличие некоторого изменения разности фаз в ортогональных плечах ИМ при его повороте, которое, однако, было существенно меньше величины, предсказываемой теорией "светоносного эфира". Отрицательные результаты экспериментов М–М [12, 13] явились причиной отвержения гипотезы о "светоносном эфире" и в конечном итоге привели к созданию СТО [14–16]. При этом незначительные изменения разности фаз в плечах ИМ стали относить к погрешности эксперимента.

Эксперименты М–М [12, 13] неоднократно повторялись. Один из повторных экспериментов, проведённый в 1921–1926 гг. в астрономической обсерватории Маунт-Вильсон (Mount Wilson Observatory) Д.К. Миллером (1866–1941), показал довольно значительное изменение разности фаз на выходе ИМ при его медленном вращении [17–20]. Сам Д.К. Миллер и многочисленные ещё в то время сторонники теории "светоносного эфира" восприняли этот факт как окончательное опровержение СТО. В СССР одна из работ Д.К. Миллера [18] была опубликована в журнале *Успехи физических наук (УФН)* в переводе на русский язык [21], а С.И. Вавилов опубликовал ряд статей [22–25] в *УФН* и монографию [2], в которых он отстаивал справедливость СТО и высказывал сомнения относительно трактовки результатов Д.К. Миллера.

Ряд исследователей в США и Западной Европе повторили [26–34]² эксперименты М–М, и результаты повторных экспериментов показали наличие некоторого изменения разности фаз на выходе ИМ, однако существенно меньшего, чем в экспериментах Д.К. Миллера [17–20]. Результаты Д.К. Миллера обсуждались на специально проведённой 4–5 февраля 1927 г. в обсерватории Маунт-Вильсон конференции [36], на которой присутствовали многие известные физики и астрономы, в том числе А.А. Майкельсон и Г.А. Лоренц.

Результаты экспериментов Д.К. Миллера и по сей день будоражат воображение некоторых противников СТО. Поэтому другая цель настоящей статьи состоит в том, чтобы показать, что результаты экспериментов [17–20] находят простое объяснение в рамках СТО.

2. Эксперименты Д.К. Миллера и реакция мирового физического сообщества на их результаты. Обзор работ

Семья Морли и Миллеров были соседями в Кливленде (штат Огайо, США) и дружили домами [37]. В 1900 г. Э.У. Морли и Д.К. Миллер вместе поехали в Париж на международный научный конгресс, где встретились с лордом Кельвином (У. Томсон) [38]. Кельвин прочитал

¹ Указанные величины для Галактики являются только ориентировочными, поскольку скорость вращения звёзд вокруг центра Галактики не убывает как корень из расстояния до центра Галактики (как следует из ньютоновской механики), а подчиняется более сложному закону: вначале она возрастает пропорционально расстоянию до центра, а затем становится постоянной. Это может быть следствием как наличия в Галактике распределённых тёмной материи и тёмной энергии, так и допущенных при астрономических измерениях скоростей звёзд и галактик значительных ошибок, которые возникают вследствие эффекта релятивистской аберрации [3].

² Перевод работы [34] на русский язык опубликован в *УФН* [35].

доклад, посвящённый изложению основных теорий эфира и значению экспериментов М–М [12, 13], а затем в частной беседе убедил Э.У. Морли и Д.К. Миллера ещё раз повторить эти эксперименты на более высоком уровне точности [38].

Таким образом, дружба с Э.У. Морли и встреча с Кельвином оказали кардинальное влияние на расширение круга научных исследований Д.К. Миллера, который в то время уже был сложившимся высококвалифицированным акустиком — создавал устройства для гармонического анализа, синтеза и записи звука (на киноплёнку), консультировал производителей музыкальных инструментов.

В 1902–1905 гг. Э.У. Морли и Д.К. Миллер повторили эксперименты М–М с ИМ больших размеров — с длиной плеча 32 метра³ (результаты были опубликованы в статье [26] 1905 года). Эксперименты [26] показали, что измеренная разность фаз световых волн на выходе ИМ была существенно меньше, чем предсказываемая теорией эфира. В то время уже была создана СТО [14–16], которая предсказывала нулевые результаты экспериментов М–М, и, казалось бы, всякая надобность в их повторении отпала.

Однако в первых десятилетиях XX в. СТО имела ещё немало серьёзных противников, известных высококвалифицированных физиков, получивших образование в XIX в. К их числу относился и Д.К. Миллер. Для своих новых опытов (1921–1926 гг.) он использовал интерферометр, который частично сохранился ещё со времён проведения совместных с Э.У. Морли измерений [26], однако осуществил ряд модернизаций, в частности несколько раз менял материал рамы интерферометра, для того чтобы по возможности исключить влияние магнитного поля Земли, температуры и других мешающих факторов [17–20]. Предварительные измерения Д.К. Миллер провёл в Кливленде, а основные — в обсерватории Маунт-Вильсон, расположенной на горе Вильсон в Калифорнии [17–20].

Результаты экспериментов Д.К. Миллера [17–20] (весьма подробно изложенные им в работе [38] 1933 г., подводящей итог его многолетней деятельности) оказались сенсационными: Д.К. Миллер получил значение скорости "эфирного ветра" $\approx 10 \text{ км с}^{-1}$, довольно близкое по порядку к предсказываемой теорией "светоносного эфира" величине $\sim 30 \text{ км с}^{-1}$, равной орбитальной скорости Земли. Сам Д.К. Миллер и другие сторонники теории "светоносного эфира" восприняли это как окончательное опровержение СТО. Д.К. Миллер полагал, что кроме орбитального движения Земли относительно неподвижного эфира имеет место также поступательное движение всей Солнечной системы относительно эфира, причём скорость этого движения порядка 200 км с^{-1} [38]. Кроме того, он считал, что у поверхности Земли скорость "эфирного ветра" существенно уменьшается, поэтому измерения следует проводить высоко в горах, причём ИМ должен находиться в лёгком строении, так как капитальные кирпичные стены, по его мнению, плохо пропускают "эфирный ветер".

Интересна реакция на результаты [17–20] в СССР. Как отмечено выше, работа Д.К. Миллера [18] была

опубликована в *УФН* в переводе на русский язык [21]. С.И. Вавилов опубликовал статьи [22–25] в *УФН* и монографию [2], в которых он аргументированно отстаивал справедливость СТО и высказывал обоснованные сомнения в авторской трактовке результатов Д.К. Миллера. В частности, С.И. Вавилов опубликовал в *УФН* [25] сделанный им сокращённый перевод на русский язык работы Р.Дж. Кеннеди [27], посвящённой повторению экспериментов М–М с более высокой точностью измерения сдвига интерференционных полос. Обзор Г. Йооса [39], в котором, в частности, критически обсуждались результаты опытов Д.К. Миллера, также был опубликован в переводе на русский язык в *УФН* [40].

В то же время уже после первой публикации Д.К. Миллера в апреле 1922 г. [17] некоторые отечественные высококвалифицированные физики высказали сомнения в справедливости СТО. В частности, Я.И. Грдина [41] и Л.Я. Штрум [42] предложили различные варианты видоизменения релятивистского закона сложения скоростей. А физик-теоретик Л. Кордыш [43] для объяснения результатов [17] предположил, что решение уравнений Максвелла допускает возможность существования сверхсветовых скоростей.

Известный в своё время непримиримой борьбой со СТО физик и философ-марксист А.К. Тимирязев принял результаты экспериментов Д.К. Миллера с большим энтузиазмом. Он перевёл на русский язык работы Д.К. Миллера [19, 20] и опубликовал переводы, соответственно [44, 45], в журнале *Под знаменем марксизма (ПЗМ)*, причём [44] предварил их своим восторженным предисловием [46] и переводом [47] на русский язык благожелательной по отношению к Д.К. Миллеру заметки Л. Зильберштейна из *Nature* [48]. О результатах Д.К. Миллера А.К. Тимирязев написал статью даже в газету *Известия* [49].

В США и Западной Европе реакция на неожиданные результаты Д.К. Миллера [17–20] была более прагматичной — их начали не только обсуждать, но и проверять: в США — Р.Дж. Кеннеди [27], К.К. Иллигворт [28] и А.А. Майкельсон с соавторами [31, 32], в Бельгии — А. Пикар и Е. Стаэль [29, 30], в Германии — Г. Йоос [33, 34]. Обсуждение результатов Д.К. Миллера [17–20, 27] произошло на специально проведённой 4–5 февраля 1927 г. в обсерватории Маунт-Вильсон конференции [36], на которой присутствовали многие известные физики и астрономы, в том числе сам Д.К. Миллер, А.А. Майкельсон, Р.Дж. Кеннеди, Г.А. Лоренц, П. Эпштейн, а также известный американский астроном Г. Стрёмберг, который оказывал помощь Д.К. Миллеру при обработке результатов [18, 38].

Дискуссия, состоявшаяся на конференции [36], не внесла никакой ясности в обсуждаемый вопрос. Д.К. Миллер стоял на своём; Р.Дж. Кеннеди указал, что его эксперименты [27] не подтвердили результатов Д.К. Миллера; П. Эпштейн сообщил о результатах А. Пикара и Е. Стаэля [29, 30], которые, так же как и результаты [27], продемонстрировали значительно меньший сдвиг интерференционных полос на выходе ИМ, чем в экспериментах Д.К. Миллера [17–20]; А.А. Майкельсон, дипломатично не сказав ни да, ни нет, только выразил радость по поводу того, что исследования Д.К. Миллера и Р.Дж. Кеннеди вызывают новый интерес к его старым экспериментам; Г.А. Лоренц лишь повторил свою старую идею [50] о том, что экспери-

³ В экспериментах [12] длина плеча ИМ составляла 1,2 м, а в [13] — 11 м.

менты М–М и их повторения находят объяснение с помощью гипотезы о сокращении реальной длины плеч ИМ, движущихся относительно эфира: "Если меня спросят, рассматриваю ли я это сокращение как реальность, то я отвечу да. Это такая же реальность, как и всё, что мы наблюдаем" [50].

Интересно отметить, что А. Эйнштейн не счёл нужным рассматривать результаты Д.К. Миллера в научных публикациях, а лишь с нескрываемой иронией прокомментировал их в газетной статье⁴ [1].

Дальнейшие повторения экспериментов М–М [28, 31–34] также не подтвердили результатов Д.К. Миллера [17–20, 38], которые так и остались научным артефактом.

В работе [52], опубликованной спустя почти 30 лет после конференции [36], результатов Д.К. Миллера [17–20, 38] объяснялись как следствие неоднородного нагрева плеч ИМ.

В разделе 3 мы рассмотрим влияние орбитального движения Земли на разность фаз в плечах ИМ с точки зрения теории относительности.

3. Вращение интерферометра Майкельсона в теории относительности

Ранее исследователи полагали, что разность фаз встречных лучей возникает в результате вращения только в таких интерферометрах, которые охватывают некоторую замкнутую площадь. К интерферометрам такого типа относятся, в частности, интерферометры Саньяка и Маха–Цендера. В этом случае разность фаз встречных лучей прямо пропорциональна площади внутри интерферометра. Поскольку в каждом из ортогональных плеч ИМ площадь равна нулю, ранее полагали, что вращение не вызывает разности фаз в плечах ИМ.

Однако недавно итальянский исследователь П. Маранер обратил внимание на то, что вращение приводит к некоторой разности фаз света в ортогональных плечах ИМ [53]. В работе [53] рассмотрен частный случай, в котором оба плеча ИМ лежат в плоскости вращения, иными словами, оба плеча ортогональны оси вращения. В этом случае при вращении ИМ его оптические элементы перемещаются относительно лабораторной инерциальной системы отсчёта (ИСО) и в результате свет в каждом плече описывает некоторую небольшую замкнутую площадь. Тогда вследствие эффекта Саньяка [4–11] при условии, что плечи ИМ ориентированы так, что расстояния от центра вращения до концов первого и второго плеч различны, возникает весьма небольшая разность фаз. Эта разность фаз пропорциональна квадрату длины плеча ИМ, угловой скорости вращения и расстоянию от центра вращения [53]. Так, согласно [53], вращение Земли вызывает в достаточно большом ИМ, исследовавшемся в [13] (длина плеча $L = 11$ м), разность фаз излучения $\Delta\Phi \sim 10^{-8}$ рад, которая практически не

может быть зарегистрирована. Но, как показано в [53], для длиннобазовых ИМ (например, для применяемого в проекте LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) интерферометра с $L = 4$ км) с многократным переотражением света (благодаря установленным в плечах интерферометра резонаторам Фабри–Перо) эффект может быть существенным.

Здесь мы рассмотрим более сильный эффект, имеющий место в случае, когда плечи ИМ по-разному ориентированы относительно плоскости вращения. Как показано в наших работах [7, 9–11], для вращающегося кольцевого интерферометра удобно вычислять фазовые набег в сопровождающей его вращение системе отсчёта с помощью величины ньютоновского (нерелятивистского) скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса, вызывающих замедление времени. В этой системе отсчёта интерферометр неподвижен и отпадает необходимость в вычислении смещений и поворотов его оптических элементов.

Ниже мы применим метод [7, 9–11] для вращающегося ИМ. Очевидно, что в случае, рассмотренном в [53], величины скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса, действующего на разные плечи ИМ, практически равны. Их весьма незначительная разница обусловлена небольшим различием в расстоянии от разных точек плеч интерферометра до центра вращения и различной ориентацией плеч.

В общем случае плечи ИМ могут быть по-разному ориентированы к плоскости вращения. Вначале рассмотрим наиболее простой случай, когда плоскость на поверхности Земли, в которой расположен ИМ, ортогональна плоскости вращения, при этом одно из плеч ИМ ортогонально (нижний индекс \perp) оси вращения, а другое — параллельно ей (нижний индекс \parallel). Тогда в сопровождающей вращение системе отсчёта времена распространения света в плечах ИМ в прямом (верхний индекс плюс) и обратном (верхний индекс минус) направлениях для кругового движения выражаются в виде [7, 9–11]

$$t_{\perp}^{\pm} = t\sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{2c^2} \mp \frac{2\Omega R}{c}}, \quad t_{\parallel}^{\pm} = t\sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{2c^2}}, \quad (1)$$

где $t = L/c$, Ω — угловая скорость вращения, R — радиус вращения. Выражения (1) являются приближёнными, и они справедливы при условии $2\Omega R/c \ll 1$ [7, 9–11]. В этом случае $\Omega^2 R^2/c^2 \ll 2\Omega R/c$.

В соотношениях (1) второй член в подкоренных выражениях обусловлен влиянием скалярного гравитационного потенциала центробежной силы, а третий член в подкоренном выражении для t_{\perp}^{\pm} — влиянием скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса.

Выражения (1) выведены для кругового движения [7, 9–11] при отсутствии гравитационных полей. В рассматриваемом здесь случае орбитального движения Земли имеется сила гравитации Солнца, которая равна по величине и противоположна по знаку центробежной силе, вследствие чего выражения (1) упрощаются⁵:

⁴ В [51] указано на интересный момент. В статье [1] А. Эйнштейн пишет "господин Миллер" (Herr Miller), в то время как в соответствии с существовавшей тогда научной этикой университетского преподавателя следовало именовать "профессор Миллер". Таким образом, А. Эйнштейн недвусмысленно выразил недоверие к результатам Д.К. Миллера. Справедливости ради отметим, что Д.К. Миллер в статьях [18–20] пишет просто "Эйнштейн", не употребляя ни инициалов, ни слова "господин" (mr.).

⁵ В действительности полная компенсация имеет место для точки, находящейся на орбите. Поскольку ИМ находится на поверхности Земли, он незначительно меняет вследствие вращения Земли своё положение относительно орбиты и имеет место некоторая неполная компенсация.

$$t_{\perp}^{\pm} \approx t \sqrt{1 \mp \frac{2\Omega R}{c}} \approx t \left(1 \mp \frac{\Omega R}{c} - \frac{1}{2} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2} - \dots \right), \quad t_{\parallel}^{\pm} \approx t. \quad (2)$$

Здесь в разложении подкоренного выражения для t_{\perp}^{\pm} мы учли члены первого и второго порядка малости. Тогда разность времён распространения света в плечах ИМ

$$\Delta t \approx (t_{\parallel}^{+} + t_{\parallel}^{-}) - (t_{\perp}^{+} + t_{\perp}^{-}) = -\frac{L}{c} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}, \quad (3)$$

а оптическая разность фаз в плечах ИМ, измеренная в ширине интерференционной полосы (2π рад),

$$\Delta\Phi = \Delta t \frac{c}{\lambda} = -\frac{L}{\lambda} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}, \quad (4)$$

где λ — длина волны излучения.

Следует отметить, что если разность фаз встречных световых волн во вращающемся КИ (эффект Саньяка), обусловленная воздействием скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса на замедление времени [7, 9–11], пропорциональна $\Omega R/c$, то разность фаз световых волн в плечах вращающегося ИМ пропорциональна $\Omega^2 R^2/c^2$, поскольку при суммировании набега фаз для встречных световых волн в том плече ИМ, которое ортогонально оси вращения, члены первого порядка по $\Omega R/c$ взаимно уничтожаются. Следовательно, если эффект Саньяка является эффектом первого порядка по $\Omega R/c$, то рассматриваемый здесь эффект представляет собой эффект второго порядка по $\Omega R/c$. Поэтому можно предложить именовать данное явление квадратичным эффектом Саньяка. Квадратичный эффект Саньяка, в отличие от обычного, может иметь место даже в интерферометрах, не охватывающих замкнутой площади.

Поскольку скорость кругового движения ИМ $v_{\text{circ}} = \Omega R$, отсюда

$$\Delta\Phi = -\frac{L}{\lambda} \frac{v_{\text{circ}}^2}{c^2}. \quad (5)$$

Интересно отметить, что выражение (5), полученное на основе теории относительности, формально с точностью до знака совпадает с выражением

$$\Delta\Phi = \frac{L}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}, \quad (6)$$

которое можно получить с помощью классических кинематических вычислений при предположении о существовании "светоносного эфира". Вывод выражения (6) приводится в [12, 13] и ряде учебников (см., например, [54]). Однако при наличии формального совпадения выражений (5) и (6) между ними имеются существенные физические различия.

1. Выражение (6) для эфира справедливо и для линейного движения ИМ, а выражение (5) верно только для кругового движения ИМ, т.е. при наличии силы Кориолиса.

2. Для справедливости выражения (6) достаточно, чтобы первое плечо ИМ было параллельно скорости его движения, а ориентация в пространстве второго плеча неважна, поскольку оно ортогонально первому при любой ориентации. Для справедливости выражения (5) первое плечо ИМ должно быть ортогонально оси вращения, а второе — параллельно ей.

3. Как показано в [12, 13, 54], при расчёте выражения (6), полученного в рамках теории "светоносного эфира", в первом плече ИМ, ориентированном параллельно скорости его движения, возникает связанный с рассматриваемым эффектом набег фазы, вдвое больший, чем следует из (6), а во втором, ортогональном, плече ИМ возникает соответствующий набег фазы, равный по величине и противоположный по знаку тому, который следует из (6). Алгебраическая сумма этих фазовых набегов представлена выражением (6). Напротив, при расчёте выражения (5), полученного в рамках СТО, весь фазовый набег, связанный с рассматриваемым эффектом, возникает в первом плече ИМ, ортогональном оси вращения.

4. В (5) и (6) учитываются только члены порядка v^2/c^2 . Если добавить в выражения (5) и (6) члены более высокого порядка по v^2/c^2 , то (5) и (6) станут различаться не только по знаку, но и по величине. Однако, поскольку для орбитального движения Земли $v^2/c^2 \ll 1$, это различие будет невелико.

Рассмотрим более общий случай, когда плоскость, в которой находится ИМ, по-прежнему ортогональна плоскости вращения, но плечи интерферометра повернуты на угол ψ относительно прямой, лежащей в плоскости вращения (для выше рассмотренного случая, которому соответствует выражение (2), $\psi = 0$). Это позволит выяснить, как меняется оптическая разность фаз в плечах ИМ при его повороте, т.е. при изменении угла ψ . В данном случае

$$\begin{aligned} t_{\pi/2+\psi}^{\pm} &\approx t \sqrt{1 \mp \frac{2\Omega R}{c} \cos \psi} \approx \\ &\approx t \left(1 \mp \frac{\Omega R}{c} \cos \psi - \frac{1}{2} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2} \cos^2 \psi - \dots \right), \\ t_{\psi}^{\pm} &\approx t \left(1 \mp \frac{\Omega R}{c} \sin \psi - \frac{1}{2} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2} \sin^2 \psi - \dots \right), \end{aligned} \quad (7)$$

а оптическая разность фаз в плечах ИМ выражается как

$$\Delta\Phi(\psi) = -\frac{L}{\lambda} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2} \cos(2\psi). \quad (8)$$

Рассмотрим теперь самый общий случай, когда площадка, в плоскости которой расположен ИМ, наклонена на угол $\pi/2 - \phi$ относительно плоскости вращения, а одно из плеч ИМ повернуто на угол ψ относительно параллельной плоскости вращения прямой, лежащей в плоскости площадки. Тогда посредством довольно громоздких тригонометрических вычислений можно показать, что

$$\Delta\Phi(\psi, \phi) = -\frac{L}{\lambda} \frac{\Omega^2 R^2}{c^2} (\cos^2 \phi \cos(2\psi) - \sin^2 \phi). \quad (9)$$

Очевидно, что при $\phi = 0$ выражение (9) переходит в (8). При $\phi = 90^\circ$ оба плеча ИМ лежат в одной плоскости (плоскости вращения) и, следовательно, хотя эффект замедления времени и имеет место, его величина в обоих плечах интерферометра является одинаковой и не зависит от угла поворота ψ . Однако, как отмечалось выше, выражение (1), а следовательно, и (9) являются приближёнными. В действительности имеется ещё очень слабый эффект, который не учтён в (9). Этот эффект рассмотрен в [53], и его величина численно равна

величине рассмотренного здесь эффекта, умноженной на коэффициент $2\sqrt{2}L/R$. Поскольку для классических экспериментов М–М и их повторений [12, 13, 26–34] длина плеча ИМ $L \approx 1–30$ м, а для орбитального движения Земли $R \approx 1,5 \times 10^{11}$ м, очевидно, что рассмотренный в [53] эффект весьма мал.

Из выражения (9) следует, что если ИМ равномерно поворачивают вокруг его оси, т.е. изменение угла ψ происходит по линейному закону $\psi = at$ (где a — постоянная величина), то изменение интенсивности интерференционного сигнала происходит на второй гармонике частоты $a/(2\pi)$, т.е. на частоте a/π . Отметим, что выражение (9) не имеет прямого аналога в теории "светоносного эфира".

4. Вращение интерферометра Майкельсона, расположенного на поверхности Земли, относительно плоскости эклиптики

Рассмотрим орбитальное движение Земли в плоскости эклиптики. Поскольку экватор Земли наклонён к плоскости эклиптики под углом $23^\circ 26' 13''$, площадка на поверхности Земли, расположенная на географической широте φ , постоянно изменяет свою угловую ориентацию относительно плоскости эклиптики при вращении Земли вокруг своей оси. Если площадка находится в экваториальной области, т.е. лежит между параллелями $23^\circ 26' 13''$ северной широты (с.ш.) и $23^\circ 26' 13''$ южной широты (ю.ш.) ($-23^\circ 26' 13'' \leq \varphi \leq 23^\circ 26' 13''$), то два раза в сутки она становится ортогональной к плоскости эклиптики. Если $|\varphi| > 23^\circ 26' 13''$, то площадка никогда не займёт положение, ортогональное к плоскости эклиптики. Нетрудно показать, что при этом площадка достигает максимального и минимального углового отклонения от ортогональной ориентации к плоскости эклиптики при $\phi^+ = \varphi + 23^\circ 26' 13''$ и $\phi^- = \varphi - 23^\circ 26' 13''$ соответственно. На рисунке приведено схематическое изображение ИМ, расположенного на поверхности Земли, вращающейся по орбите и вокруг своей оси.

Для численных оценок разности фаз в плечах в выражение (9) следует подставлять значения ϕ^+ и ϕ^- . Очевидно, что в Северном полушарии при повороте ИМ на угол ψ амплитуда изменения разности фаз будет максимальной при ϕ^- и минимальной при ϕ^+ , поскольку в первом случае площадка, на которой нахо-

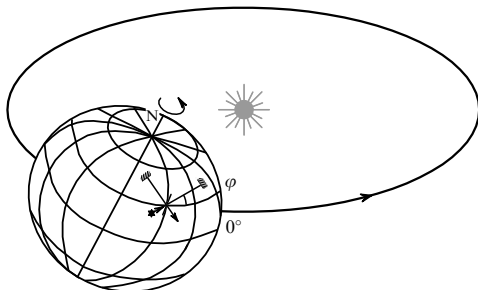


Рисунок. Земля вращается вокруг своей оси и по орбите вокруг Солнца. Точка N — северный полюс Земли. Стрелками указаны направления вращения. Широта экватора 0° . Плоскость экватора наклонена к плоскости эклиптики (плоскости орбиты). На широте φ в Северном полушарии на поверхности Земли расположен интерферометр Майкельсона, ориентированный под некоторым углом к направлению соответствующей параллели. Звёздочкой обозначен источник света, прямыми стрелками указаны направления входа в ИМ и выхода из него светового пучка.

дится интерферометр, расположена под углом к плоскости эклиптики, более близким к прямому углу, чем во втором случае.

5. Анализ результатов экспериментов Д.К. Миллера

Широта, на которой находится астрономическая обсерватория Маунт-Вильсон в Калифорнии, где проводились основные эксперименты Д.К. Миллера [17–20, 38], составляет $\varphi = 34^\circ 13' 28''$ с.ш. Таким образом, для основных экспериментов Д.К. Миллера⁶ [18–20, 38] $\phi^+ = 34^\circ 13' 28'' + 23^\circ 26' 13'' = 57^\circ 39' 41''$, $\phi^- = 34^\circ 13' 28'' - 23^\circ 26' 13'' = 10^\circ 47' 15''$.

ИМ в экспериментах [18–20, 38] имел следующие параметры: длина плеча $L = 32,03$ м, длина волны света $\lambda = 0,57$ мкм [38]. Несмотря на то что Д.К. Миллер, как и все исследователи того времени, проводил измерения в долях интерференционной полосы, он почти никогда в своих работах не приводит первичные данные, а указывает результаты в скорости "эфирного ветра" (км с^{-1}). Для того чтобы получить данные Д.К. Миллера в размерности интерференционных полос, следует провести преобразование, обратное выражению (6). В экспериментах Д.К. Миллера [18–20, 38] при повороте ИМ на угол $\psi = 90^\circ$ от некоторого другого значения угла ψ наблюдалось максимальное изменение сдвига фаз в плечах ИМ (что косвенно подтверждает справедливость выражения (9)), соответствующее скорости "эфирного ветра" в экспериментах около 10 км с^{-1} . Этому отвечает амплитуда периодического сдвига $A(\Delta\Phi) = 6,25 \times 10^{-2}$ интерференционной полосы (сдвиг на одну интерференционную полосу означает изменение разности фаз в плечах ИМ на 2π).

Поскольку Д.К. Миллер в ходе измерений изменял угол поворота ИМ ψ , теоретическое значение амплитуды изменения сдвига фазы на выходе ИМ $\Delta\Phi(\psi)$ можно получить из выражения (9):

$$A(\Delta\Phi(\phi^\pm)) = \frac{L \Omega^2 R^2}{\lambda \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} \cos^2 \phi^\pm. \quad (10)$$

Тогда $A(\Delta\Phi(\phi^+)) = 1,6 \times 10^{-1}$ и $A(\Delta\Phi(\phi^-)) = 5,4 \times 10^{-1}$. Следовательно, измеренная в экспериментах [18–20, 38] величина $A(\Delta\Phi)$ должна лежать в пределах $1,6 \times 10^{-1} - 5,4 \times 10^{-1}$ сдвига интерференционной полосы. Экспериментальный результат Д.К. Миллера в 2,5 раза меньше нижнего теоретического предела ($1,6 \times 10^{-1}$) сдвига полосы. Такому отклонению не следует удивляться: в [18–20, 38] на графиках приводятся усреднённая зависимость $\Delta\Phi(\psi)$ и экспериментальные точки, разброс которых в несколько раз выше среднего значения. Д.К. Миллер объяснял этот разброс как "вариации эфирного ветра". В действительности в [18–20, 38] имел место какой-то фактор, приводящий к случайному

⁶ По невыясненной причине Д.К. Миллер указал в работе [20] для Маунт-Вильсон значение $\varphi = 31^\circ 14'$ с.ш. Точка с такой широтой находится более чем на 330 км южнее обсерватории Маунт-Вильсон, на территории Мексики, в штате Нижняя Калифорния. Это тем более странно, что для точных астрономических наблюдений местоположение обсерватории определяется с точностью лучшей, чем угловая секунда. В других своих работах Д.К. Миллер вообще не касается вопроса о широте Маунт-Вильсон.

изменению сдвига интерференционных полос при медленном вращении ИМ. Можно предположить, что крестовина основания ИМ (4×4 м) в [18–20, 38] была недостаточно хорошо сбалансирована относительно центра вращения и при медленном вращении незначительно изменялся прогиб её концов (на которых располагались зеркала ИМ) под собственным весом. Поскольку точность измерений в [18–20, 38], впрочем, как и в других интерферометрических измерениях того времени, была невысокой, согласие экспериментальных результатов [19, 20, 38] с теоретическими оценками можно считать вполне удовлетворительным.

Отметим, что если бы при численных оценках по формуле (9) мы взяли в качестве линейной скорости вращения ИМ не орбитальную скорость Земли, а скорость вращения вокруг центра Галактики, то получили бы значение $A(\Delta\Phi)$, на два-три порядка превышающее значение, измеренное в экспериментах М–М [12, 13], Морли–Миллера [26], Миллера [17–20, 38] и других повторных экспериментах [27–34]. Кроме того, угол наклона экватора Земли к плоскости Галактики составляет $\approx 62,4^\circ$, а направление вращения противоположно направлению вращения Земли вокруг Солнца. Следовательно, если галактическое вращение Земли в какой-то мере влияет на ИМ, то обусловленный этим влиянием сдвиг фазы должен вычитаться из сдвига фазы, вызванного орбитальным вращением Земли.

Из выражения (9) также видно, почему измерения Д.К. Миллера в Кливленде дали несколько меньший сдвиг интерференционных полос, чем в обсерватории Маунт-Вильсон. Широта Кливленда $\varphi = 41^\circ 29' 58''$ и, соответственно, для ИМ, использовавшегося в экспериментах [18–20, 38], амплитуда сдвига полос должна лежать в пределах $9,8 \times 10^{-2} - 4,9 \times 10^{-1}$, что меньше, чем для Маунт-Вильсон. Сам Д.К. Миллер объяснял причину этого различия тем, что обсерватория Маунт-Вильсон расположена на 1,5 км выше Кливленда и скорость "эфирного ветра" там больше [38].

Результаты расчёта в соответствии с выражением (9) для экспериментов [12, 13, 26–34] показывают, что для [12, 30, 31] амплитуда сдвига интерференционных полос $A(\Delta\Phi)$ лежит в пределах, определяемых выражением (10), а в остальных работах $A(\Delta\Phi)$ в несколько раз меньше нижнего теоретического предела.

Подробный анализ экспериментов [27–34], который является темой отдельного исследования, будет проведён авторами настоящей статьи в работе [55]⁷. Здесь отметим только, что эксперименты [27–30, 33, 34] проводились на более высоких широтах, чем основные эксперименты Д.К. Миллера [18–20, 38] в обсерватории Маунт-Вильсон, и в соответствии с выражением (9) величина амплитуды сдвига интерференционных полос $A(\Delta\Phi)$, нормированная на длину плеча ИМ L , в [27–30, 33, 34] меньше, чем в [18–20, 38].

6. Дальнейшие исследования возможной анизотропии скорости света

Классические эксперименты М–М и их повторения [12, 13, 26–34] проводились на протяжении почти 50 лет

(1881–1930 гг.). В дальнейшем неоднократно проводилась проверка анизотропии скорости света, однако методика этих измерений всегда отличалась от таковой в классических экспериментах М–М [12, 13]. В данном разделе мы кратко рассмотрим некоторые из этих экспериментов.

Уже в самом начале XX в. некоторые исследователи стали сомневаться в доказательной силе экспериментов М–М [12, 13]. Высказывалось множество различных возражений, но наиболее серьёзным из них являлось то, что, согласно гипотезе Фитцджеральда–Лоренца [50, 58], имеет место действительное сокращение длины тел в направлении их движения в γ раз. В этом случае, в противоречие предсказаниям СТО, различные инерциальные системы отсчёта уже не являются равноправными, выделенной оказывается та ИСО, которая связана со "светоносным эфиром".

К сожалению, ИМ в принципе не может выявить разницы между предсказаниями СТО [14–16] и гипотезы Фитцджеральда–Лоренца [50, 58]. Требовалось повторить эксперименты М–М с неравноплечным ИМ. В этом случае в ходе годичного изменения абсолютной величины скорости движения Земли относительно гипотетического "светоносного эфира" (что должно иметь место ввиду векторного сложения скорости Земли относительно Солнца и скорости Солнца относительно связанной с "эфиром" ИСО) длина плеча интерферометра должна изменяться на различную величину. Однако для проведения подобных экспериментов необходим достаточно яркий монохроматический источник излучения с большой длиной корреляции. Свет от существовавших в то время источников излучения, пропущенный через монохроматор, не имел достаточной яркости, а лазеров тогда ещё не было. Только в 1932 г. проводившиеся в течение девяти месяцев эксперименты Р. Кеннеди и Э. Торндайка (К–Т) [59] с ИМ, длины плеч которого различались в 7,5 раз, показали практически полное отсутствие предсказываемого гипотезой Фитцджеральда–Лоренца сдвига интерференционных полос и, следовательно, подтвердили справедливость СТО.

Следует особо отметить, что основное отличие экспериментов К–Т [59] от экспериментов М–М [12, 13] заключается даже в не различии длин плеч ИМ, а в том, что в ходе экспериментов К–Т [59] неравноплечный ИМ вообще не поворачивался вокруг своей оси, т.е. угол ψ в выражениях (7)–(9) не изменяется, $\psi = \text{const}$. В этом случае медленное изменение разности фаз в плечах ИМ происходит вследствие того, что с суточным периодом (из-за вращения Земли) изменяется угол ϕ (см. выражение (9)). Поэтому эксперименты типа К–Т нуждаются в специальном теоретическом анализе. В частности, если бы экватор Земли не имел наклона к плоскости эклиптики, то рассматриваемый в настоящей статье эффект замедления времени вследствие наличия скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса в экспериментах типа К–Т вообще не приводил бы ни к какому изменению разности фаз в плечах ИМ.

Эксперименты К–Т были повторены Д. Хилсом и Дж. Холлом с He–Ne-лазером с йодной нелинейно поглощающей ячейкой ($\lambda = 0,63$ мкм) на весьма высоком уровне точности [60]. Недавно немецкие исследователи повторили эксперименты К–Т с двумя ортогонально ориентированными резонаторами Фабри–Перо из кристаллического сапфира, охлаждённого до температуры

⁷ Укажем, что в сборнике работ [51] приводятся в переводе на русский язык работы [1, 12, 13, 19, 20, 26–32, 36, 38, 46, 56, 57].

жидкого гелия [61–63]. Как и в экспериментах К–Т [59], в [60–63] плита, на которой размещалась оптическая установка, не вращалась, а использовалось вращение Земли вокруг своей оси.

В работе Дж. Холла и А. Бриллета [64] ИМ вообще не применялся. Излучение вращающегося He–Ne-лазера, привязанного по частоте к неподвижному квантовому стандарту частоты (He–Ne-лазеру с метановой нелинейно поглощающей ячейкой, $\lambda = 3,39$ мкм), пропускалось через стабилизированный резонатор Фабри–Перо, который вращался вместе с лазером, причём оптическая ось лазера была ортогональна оси вращения. В этом случае не было возможности проводить одновременное сравнение разности фаз световых лучей в ортогональных направлениях. Кроме того, поскольку стабилизация длины резонатора Фабри–Перо осуществлялась по частоте вращающегося He–Ne лазера, любой эффект, вызывающий изменение его резонансных частот, автоматически приводил к изменению резонансных частот резонатора Фабри–Перо.

Ещё в конце 1950-х годов Дж.П. Седархольм с соавторами выполнили измерение [56, 57] с использованием двух аммиачных мазеров (частота генерации 23870 МГц), которые имели параллельную ориентацию резонаторов и взаимно противоположное направление излучения возбуждённых молекул аммиака. По замыслу авторов [56, 57] существование "эфирного ветра" должно привести к возникновению разности частот генерации двух мазеров, причём при их одновременном повороте на 180° эта разность должна сменить знак, чего, однако, в ходе экспериментов [56, 57] не наблюдалось. Поскольку в [56, 57] не сравнивались скорости электромагнитного излучения в ортогональных направлениях, эти измерения не имеют непосредственного отношения к экспериментам М–М и их повторениям, а следовательно, не могут ни подтвердить, ни опровергнуть выражения (7)–(9). Результаты работ [56, 57] могут только указать на отсутствие влияния "эфирного ветра" на частоту генерации мазеров.

По-видимому, наиболее близок к экспериментам М–М эксперимент Ч. Эйсле, А.Ю. Невского и С. Шиллера [65], в котором проводилось сравнение резонансных частот вакуумированного стеклянного высокодобротного резонатора квадратного сечения для взаимно-ортогональных направлений. Ось одного из резонаторов Фабри–Перо располагалась горизонтально, а другого — вертикально. Длина стороны квадрата составляла 8,4 см, ширина резонанса — около 10 кГц. Весь блок вращался вокруг вертикальной оси с угловой скоростью $\approx 0,3$ оборота в минуту. Резонаторы возбуждались излучением Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1,06$ мкм), совмещение частоты излучения с резонансными частотами ортогональных сторон резонатора осуществлялось с помощью акусто-оптических преобразователей.

Главное отличие экспериментов [65] от экспериментов М–М [12, 13] заключается в том, что в [65] применялся не ИМ, а два ортогонально ориентированных резонатора. Рассматриваемый в настоящей статье эффект (см. выражения (2), (3)) предполагает, что оптические длины резонатора для встречных направлений в случае, когда его оптическая ось ортогональна оси вращения, различаются, причём уже в первом порядке величины по $\Omega R/c$. Таким образом, для резонаторов Фабри–Перо [65] имеет место невзаимность для встреч-

ных волн. Однако задача по вычислению собственных частот резонаторов Фабри–Перо при наличии невзаимности (например, частот генерации лазера, в резонаторе которого имеется кювета с движущейся жидкостью), пока не получила корректного решения. В связи с этим следует заметить, что результаты [65] нуждаются в дополнительном анализе.

7. Заключение

Перечислим основные результаты настоящей статьи:

1. Показано, что в ортогональных плечах вращающегося равноплечного ИМ в случае, когда его плечи поразному ориентированы относительно плоскости вращения, возникает разность фаз лучей, обусловленная разницей величин ньютоновского (нерелятивистского) скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса, действующего на разные плечи интерферометра.

2. Поскольку разность фаз встречных световых волн, обусловленная эффектом Саньяка [4–11], во вращающемся КИ пропорциональна величине $\Omega R/c$, а во вращающемся ИМ — величине $\Omega^2 R^2/c^2$, предложено именовать последнее явление квадратичным эффектом Саньяка. И обычный, и квадратичный эффекты Саньяка являются следствием воздействия скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса на замедление времени во вращающейся системе отсчёта [7, 9–11]. Квадратичный эффект Саньяка, в отличие от обычного, может иметь место даже в интерферометрах, не охватывающих замкнутую площадь.

3. Показано, что результаты экспериментов Д.К. Миллера [17–20, 38] находят простое объяснение в рамках СТО.

4. С нашей точки зрения, имеет место весьма необычная для физики ситуация, когда одновременно правы исследователи, придерживающиеся противоположных концепций, т.е. не только А. Эйнштейн и С.И. Вавилов, но и в определённом смысле Д.К. Миллер. А. Эйнштейн совершенно верно утверждал, что результаты Д.К. Миллера не имеют ничего общего с "эфирным ветром" [1]. С.И. Вавилов был абсолютно прав, утверждая, что толкование Миллера "не согласуется с его наблюдениями, которые остаются голым фактом, требующим объяснения" [2]. В 1920-е годы такого объяснения ещё не было, но оно дано в настоящей статье. Д.К. Миллер зарегистрировал систематическое изменение сдвига фаз в плечах ИМ при его вращении, по порядку величины близкое к тому, которое следует из выражения (9). Разумеется, интерпретация Д.К. Миллера собственных результатов [17–20, 38] с помощью теории "светоносного эфира" неверна.

5. Поскольку эксперименты М–М в классическом виде не повторялись 75 лет, а чувствительность интерферометрических измерений за это время возросла на много порядков, целесообразно повторить их на основе современной оптической элементной базы. Ещё более 60 лет назад Г.С. Горелик [66] и И.Л. Берштейн [67] применили модуляционный метод фазовых измерений в оптике, что позволило при достаточно высокой интенсивности света обнаруживать периодические изменения разности фаз с точностью до 10^{-6} – 10^{-7} рад.

В известном смысле Д.К. Миллеру повезло: он проводил основные измерения [17–20, 38] в обсерватории Маунт-Вильсон, расположенной на широте, наиболее

близкой к экватору по сравнению с широтой мест проведения других аналогичных экспериментов (за исключением экспериментов [31, 32], которые также проводились в обсерватории Маунт-Вильсон). Кроме того, в [17–20, 38] длина плеч ИМ L была больше, чем в других аналогичных экспериментах.

Может возникнуть вопрос: почему сам А. Эйнштейн не объяснил результаты Д.К. Миллера [17–20] с помощью ньютоновского скалярного гравитационного потенциала сил Кориолиса во вращающейся системе отсчёта? Это тем более удивительно, потому что не кто иной, как А. Эйнштейн открыл влияние скалярного гравитационного потенциала на замедление времени [68] и распространение света [69]. Причина, вероятно, связана с довольно пренебрежительным отношением А. Эйнштейна как к самому Д.К. Миллеру, так и к его результатам [17–20], рассмотренным в разделе 2. Д.К. Миллер позиционировал свои результаты [17–20] как опровержение СТО, а А. Эйнштейн был полностью уверен в справедливости СТО, не верил результатам Д.К. Миллера и не дал себе труда найти им рациональное объяснение.

Когда настоящая статья уже была принята к печати, была опубликована экспериментальная работа [70], результаты которой демонстрируют отсутствие анизотропии скорости света по меньшей мере в восемнадцатом знаке. Однако в [70] использовался не оптический ИМ, а так называемые кубиты — ячейки памяти квантового компьютера — в присутствии сильного магнитного поля. Если бы анизотропия скорости света имела место, то суточное и орбитальное движение Земли приводило бы к изменению связи между двумя кубитами, чего не наблюдалось. Но в эксперименте [70] не имеет места распространение света (или волн де Бройля материальных частиц, или волн иной природы), в частности распространение света в прямом и обратном направлении, как в плечах ИМ. Следовательно, не возникает действующей на фотоны силы Кориолиса и, соответственно, квадратичного эффекта Саньяка. Результаты [70], так же как и анализ экспериментов [56, 57, 59–65], проведённый в разделе 6, показывают, что не все методы исследования по обнаружению возможной анизотропии скорости света предполагают возникновение силы Кориолиса и её влияние на результаты измерений.

Авторы выражают благодарность И.П. Маранеру за предоставление его работы [53] до её опубликования, А.К. Киселеву и М.А. Эфроимскому за обсуждение вопросов, связанных с орбитальным и галактическим движением Земли, Е.А. Романец-Щербак за предоставление труднодоступных статей [41–43], Вл.В. Кочаровскому за обсуждение метода измерения возможной анизотропии скорости света [70]. Работа частично поддержана грантом совета при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-2001.2014.2.2.

Список литературы

1. Einstein A "Meine Theorie und Millers Versuche", Vossische Zeitung, 19 Jan. (1926)
2. Вавилов С И *Экспериментальные основания теории относительности* (Сер. Новые течения научной мысли. N 3–4) (М.–Л.: Госиздат, 1928); *Собрание сочинений* Т. 4 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 9
3. Малыкин Г Б, Романец Е А *Оптика и спектроскопия* **112** 993 (2012); Malykin G B, Romanets E A *Opt. Spectrosc.* **112** 920 (2012)

4. Логунов А А, Чугреев Ю В *УФН* **156** 137 (1988); Logunov A A, Chugreev Yu V *Sov. Phys. Usp.* **31** 861 (1988)
5. Малыкин Г Б *УФН* **167** 337 (1997); Malykin G B *Phys. Usp.* **40** 317 (1997)
6. Вугальтер Г А, Малыкин Г Б *Изв. вузов. Радиофизика* **42** 373 (1999); Vugal'ter G A, Malykin G B *Radiophys. Quantum Electron.* **42** 333 (1999)
7. Малыкин Г Б *УФН* **170** 1325 (2000); Malykin G B *Phys. Usp.* **43** 1229 (2000)
8. Андропова И А, Малыкин Г Б *УФН* **172** 849 (2002); Andronova I A, Malykin G B *Phys. Usp.* **45** 793 (2002)
9. Малыкин Г Б *УФН* **172** 969 (2002); Malykin G B *Phys. Usp.* **45** 907 (2002)
10. Малыкин Г Б *УФН* **184** 775 (2014); Malykin G B *Phys. Usp.* **57** 714 (2014)
11. Malykin G B, Pozdnyakova V I *Ring Interferometry* (Berlin: De Gruyter, 2013)
12. Michelson A A *Am. J. Sci.* **3** **22** 120 (1881)
13. Michelson A A, Morley E W *Am. J. Sci.* **3** **34** 333 (1887)
14. Poincaré H *C.R. Acad. Sci.* **140** 1504 (1905); Пуанкаре А *Избранные труды* Т. 3 (М.: Наука, 1974) с. 429
15. Poincaré H *Rendiconti Circolo Mat. Palermo* **21** 129 (1906); Пуанкаре А *Избранные труды* Т. 3 (М.: Наука, 1974) с. 433
16. Einstein A *Ann. Physik* **17** 891 (1905); Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 7
17. Miller D C *Phys. Rev.* **19** 407 (1922)
18. Miller D C *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **11** 306 (1925)
19. Miller D C *Nature* **116** 49 (1925)
20. Miller D C *Science* **63** 433 (1926)
21. Миллер Д К *УФН* **5** 177 (1925)
22. Вавилов С И *УФН* **5** 457 (1925)
23. Вавилов С И *УФН* **6** 76 (1926)
24. Вавилов С И *УФН* **6** 242 (1926)
25. Вавилов С И *УФН* **6** 421 (1926)
26. Morley E W, Miller D C *Phil. Mag.* **6** **9** 680 (1905)
27. Kennedy R J *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **12** 621 (1926)
28. Illingworth K K *Phys. Rev.* **30** 692 (1927)
29. Stahel E *Naturwissenschaften* **14** 935 (1926)
30. Piccard A, Stahel E *Naturwissenschaften* **15** 140 (1927)
31. Michelson A A, Pease F G, Pearson F *Nature* **123** 88 (1929)
32. Pease F G *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **42** 197 (1930)
33. Joos G *Ann. Physik* **7** 385 (1930)
34. Joos G *Naturwissenschaften* **19** 784 (1931)
35. Иоос Г *УФН* **12** 136 (1932)
36. "Conference on the Michelson-Morley experiment" *Astrophys. J.* **68** 341 (1928)
37. Fletcher H *Biographical Memoir of Dayton Clarence Miller 1866–1941* (Biographical Memoirs, Vol. 23, 3rd Memoir) (Washington, DC: National Academy of Sciences of the USA, 1943)
38. Miller D C *Rev. Mod. Phys.* **5** 203 (1933)
39. Joos G *Phys. Z.* **27** 1 (1926)
40. Иоос Г *УФН* **6** 21 (1926)
41. Грдина Я И *Изв. Екатеринбургского горного ин-та* **14** 615 (1924), Юбилейный вып., Ч. II научная
42. Штрум Л *Изв. Киевского политехн. и сельхоз. ин-тов* **1** (1) 107 (1924)
43. Кордыш Л *Изв. Киевского политехн. и сельхоз. ин-тов* **1** (1) 9 (1924)
44. Миллер Д *Под Знаменем Марксизма* (8–9) 194 (1925)
45. Миллер Д *Под Знаменем Марксизма* (11) 91 (1926)
46. Тимирязев А *Под Знаменем Марксизма* (8–9) 191 (1925)
47. Зильберштейн Л *Под Знаменем Марксизма* (8–9) 192 (1925)
48. Silberstein L *Nature* **115** 798 (1925)
49. Тимирязев А К "Новые опыты Дейтон–Миллера, опровергающие теорию относительности Эйнштейна", *Изв. ВЦИК*, 30 июля (1926)
50. Lorentz H A *Arch. Néerl* **25** 363 (1892)
51. Ацюковский В А (Ред.) *Эфирный ветер* 2-е изд. (М.: Энергоатомиздат, 2011)

52. Shankland R S et al. *Rev. Mod. Phys.* **27** 167 (1955)
53. Maraner P *Ann. Physics* **350** 95 (2014)
54. Ландсберг Г С *Оптика* 3-е изд. (М.: ГИТТЛ, 1952)
55. Малыкин Г Б, Позднякова В И, готовится к печати
56. Cedarholm J P et al. *Phys. Rev. Lett.* **1** 342 (1958)
57. Cedarholm J P, Townes C H *Nature* **184** 1350 (1959)
58. FitzGerald G F *Science* **13** 390 (1889)
59. Kennedy R J, Thorndike E M *Phys. Rev.* **42** 400 (1932)
60. Hils D, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **64** 1697 (1990)
61. Braxmaier C et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 010401 (2001)
62. Müller H et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 020401 (2003)
63. Müller H et al. *Phys. Rev. D* **67** 056006 (2003)
64. Brillat A, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **42** 549 (1979)
65. Eisele Ch, Nevsky A Yu, Schiller S *Phys. Rev. Lett.* **103** 090401 (2009)
66. Брусин И Я, Горелик Г С, Пиковский С А *ДАН СССР* **83** 553 (1952)
67. Берштейн И Л *УФН* **49** 631 (1953)
68. Einstein A *Jahrbuch Radioaktivität Elelektronik* **4** 411 (1907); Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 65
69. Einstein A *Ann. Physik* **35** 898 (1911); Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 165
70. Pruttivarasin T et al. *Nature* **517** 592 (2015)

Quadratic Sagnac effect — the influence of the gravitational potential of the Coriolis force on the phase difference between the arms of a rotating Michelson interferometer (an explanation of D.C. Miller's experimental results 1921 – 1926)

G.B. Malykin

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Ul'yanova 46, GSP-120, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: malykin@ufp.appl.sci-nnov.ru*

V.I. Pozdnyakova

*Institute of Microstructure Physics, Russian Academy of Sciences,
GSP-105, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: vera@ipmras.ru*

It is shown that when an equal-arm Michelson interferometer is involved in rotation (for example, Earth's rotation around its axis or around the Sun) and if its arms are oriented differently with respect to the plane of rotation, a phase difference arises between the rays that pass through different arms. This phase difference is due to the fact that the arms experience different values of the Newton (nonrelativistic) scalar gravitation potential of the Coriolis force. It is shown that phase difference is proportional to the interferometer arm length, the square of the angular velocity of the rotation and the square of the distance from the center of rotation — hence the proposal to call this phenomenon quadratic Sagnac effect. In the present paper we consider, as an illustrative example, the results of the once well-known experiments of D.C. Miller, who claimed to observe the translational motion of the Earth relative to the hypothetical "luminiferous ether". It is shown that this claim can actually be explained by the fact that, because of the orbital motion of the Earth, the time dilations in the orthogonal arms of the Michelson interferometer are influenced differently by the scalar gravitation potential of the Coriolis force.

Keywords: Michelson interferometer, Coriolis force, gravitational potential, Earth orbital motion rotation

PACS number: **03.30. + p**

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201504g.0431

Bibliography — 70 references

Received 23 December 2014, revised 2 February 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (4) 431 – 440 (2015)

Physics – Uspekhi **58** (4) (2015)