

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

О сдвиге фаз в равномерно вращающемся
интерферометре Майкельсона

(Комментарий к статье Г.Б. Малыкина и В.И. Поздняковой)

"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.)"

[УФН 185 431 (2015)]

П. Маранер

*Доказывается, что т.н. "квадратичный эффект Саньяка", недавно предложенный Г.Б. Малыкиным и В.И. Поздняковой, является следствием неверной оценки релятивистских поправок второго порядка, а не реальным физическим явлением. Представлено правильное выражение для сдвига фаз, вызванного вращением интерферометра Майкельсона.***Ключевые слова:** интерферометр Майкельсона, сила Кориолиса, гравитационный потенциал, орбитальное вращение Земли

PACS numbers: 03.30.+p, 07.60.Ly, 42.87.Bg

DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037675

В статье [1], недавно опубликованной в журнале *УФН*, Г.Б. Малыкин и В.И. Позднякова рассмотрели влияние вращения на равносторонний интерферометр Майкельсона, расположенный в плоскости, касательной к поверхности Земли. Их вычисление даёт вызванный вращением фазовый сдвиг

$$\Delta\Phi = 2\pi \frac{L\Omega^2 R^2}{\lambda c^2} [\cos^2 \varphi \cos(2\alpha) + \sin^2 \varphi], \quad (1)$$

где L — собственная длина плеч интерферометра, Ω — угловая скорость вращения, R — радиус вращения, λ — длина волны излучения, c — скорость света, φ — широта расположения интерферометра, α — азимут (угол в горизонтальной плоскости, измеренный по часовой стрелке от направления на север) его первого плеча¹. Этот эффект является квадратичным по V/c , отношению скорости вращения интерферометра $V = \Omega R$ к скорости света, и формально напоминает исторически ожидавшийся результат эксперимента Майкельсона – Морли [2,

3] при подстановке скорости вращения вместо скорости эфирного ветра. Авторы предлагают для своего открытия название "квадратичный эффект Саньяка" и используют его для объяснения ненулевого результата повторения Миллером эксперимента Майкельсона – Морли [4], некогда бывшего предметом долгих дебатов.

Вопреки утверждению работы [1], сдвиг фаз, возникающий в равномерно вращающемся произвольно ориентированном равноплечном интерферометре Майкельсона уже был вычислен в самом общем случае в работе [5] (по каким-то причинам ошибочно процитированной лишь под номером [53] в [1]). В частности, для прямоугольного интерферометра, расположенного в плоскости, касательной к поверхности Земли, уравнение (15) из [5] даёт

$$\Delta\Phi = -\sqrt{2}\pi \frac{L^2\Omega^2 R}{\lambda c^2} \sin(2\varphi) \sin(\alpha + 45^\circ), \quad (2)$$

с теми же обозначениями, что и выше. Кроме другой зависимости от углов, (2) существенно отличается по величине от (1) на множитель L/R .

Оба результата претендуют на то, что они получены в рамках специальной теории относительности. Работа [5] предлагает приспособление классического вывода (нулевого) фазового сдвига Майкельсона – Морли [2, 6] к случаю равномерного вращения. Вычисление осуществляется с точки зрения инерциального наблюдателя и затем относится к вращающемуся вместе с интерферометром наблюдателю. В работе [1] вывод осуществляется непосредственно в неинерциальной вращающейся системе отсчёта, и результат приписывается рас-

¹ В работе [1] этот сдвиг фаз выражен в уравнении (9) в терминах угла $\psi = 90^\circ - \alpha$ и в единицах ширины интерференционной полосы 2π .

П. Маранер (P. Maraner), School of Economics and Management, Free University of Bozen-Bolzano, Universitätsplatz-Piazzetta dell'Università 1, I-39100 Bolzano-Bozen, Italy
E-mail: pmaraner@unibz.it

Статья поступила 28 августа 2015 г.

тяжению времени, вызванному скалярным гравитационным потенциалом силы Кориолиса. В принципе, оба результата должны быть идентичными. Их различие нуждается в разъяснении.

В связи с этим позвольте заметить, что в пределе очень больших радиусов вращения R , при сохранении постоянной скорости вращения $V = \Omega R$, равномерное вращение приближается к движению по инерции, и сдвиг фаз в равностороннем интерферометре Майкельсона должен, соответственно, стремиться к нулю. Это верно для выражения (2), которое приближается к нулю как $1/R$. Это не так для выражения (1), которое остаётся постоянным. Следовательно, результат Малыкина и Поздняковой представляется мне находящимся в противоречии со специальной теорией относительности.

Чтобы определить возможные проблемы в выводе (1), будет достаточно пересмотреть частный случай, обсуждённый в начале раздела 3 работы [1], где плоскость интерферометра перпендикулярна плоскости вращения, с одним плечом перпендикулярным и одним параллельным ей ($\varphi = 0$, $\alpha = 90^\circ$). Во вращающейся системе отсчёта Малыкин и Позднякова оценивают собственное время распространения света в перпендикулярном (индекс \perp) и параллельном (индекс \parallel) плечах интерферометра, в прямом (индекс $+$) и обратном (индекс $-$) направлениях соответственно как²:

$$\tau_{\parallel}^{\pm} \simeq \frac{L}{c} \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}}, \quad \tau_{\perp}^{\pm} \simeq \frac{L}{c} \sqrt{1 \pm \frac{2\Omega R}{c} - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}}. \quad (3)$$

С точки зрения авторов: 1) множители L/c есть координатное время распространения вперёд и назад t_{\parallel}^{\pm} , t_{\perp}^{\pm} в параллельном и перпендикулярном плечах, оценённое просто как время, необходимое свету для распространения на расстояние L со скоростью c ; 2) множители с квадратными корнями есть факторы релятивистского растяжения времени $(1 + 2U/c^2)^{1/2}$, где U — нерелятивистский скалярный потенциал кориолисовой и центробежной сил. После разложения по степеням V/c и других приближений Малыкин и Позднякова получают (1) как $2\pi c/\lambda$, умноженное на разницу собственных времён распространения $\Delta\tau \simeq (\tau_{\parallel}^+ + \tau_{\parallel}^-) - (\tau_{\perp}^+ + \tau_{\perp}^-)$ для света в двух плечах интерферометра.

В этом месте представляются необходимыми некоторые разъяснения.

1. В равномерно вращающейся системе отсчёта нулевые геодезические, соединяющие различные пространственно-временные точки в противоположных направлениях, в общем случае не совпадают. Как указано в [7] в контексте интерферометрии Саньяка, это означает, что пути, проходимые светом при распространении вперёд и назад во вращающихся плечах интерферометра, не совпадают. В частности, их длина не одинакова и не равна длине плеч интерферометра L . Кроме того, в равномерно вращающейся системе отсчёта скорость света не является константой [8]³. В принципе, вполне возможно, что

эти два эффекта компенсируются и дадут просто L/c для координатного времени распространения вперёд и назад независимо от ориентации. Однако это должно быть доказано. С этой целью можно решить уравнения геодезических во вращающихся координатах и получить нулевые геодезические, соединяющие светоделитель с зеркалом, вместе с их параметризацией, или можно рассмотреть эту проблему в инерциальной системе отсчёта и затем перейти во вращающуюся систему отсчёта. Второй вариант был выбран в [5]. Применение описанного там детального вычисления к данному выбору ориентации интерферометра даёт координатные времена распространения вперёд и назад в параллельном и перпендикулярном плечах в виде

$$t_{\parallel}^{\pm} \simeq \frac{L}{c} \left(1 + \frac{\Omega^2 R^2}{2c^2}\right), \quad t_{\perp}^{\pm} \simeq \frac{L}{c} \left(1 \pm \frac{\Omega R}{c} + \frac{\Omega^2 R^2}{2c^2}\right), \quad (4)$$

с точностью до членов третьего порядка по V/c . Они отличаются от L/c , что означает ошибочность первых множителей в (3).

2. Силы Кориолиса являются взаимодействиями, зависящими от скорости, полностью аналогичными по своей математической структуре силам Лоренца [10]. Как таковые, они не могут быть описаны на языке скалярного потенциала, а могут быть выведены только из векторного потенциала. Даже если в иных обстоятельствах авторы заявили, что "понятие скалярного потенциала может быть введено для таких сил с определёнными ограничениями и оговорками" [11], ни в каком случае силы Кориолиса не вызывают растяжение времени. Возможно, простейшим способом убедиться в этом является использование тензорного формализма общей теории относительности. В стандартных обозначениях интервал в пространстве Минковского во вращающейся системе координат (t, R, ϕ, z) записывается [8]

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}\right) c^2 dt^2 - dR^2 - R^2 d\phi^2 - dz^2 - 2\Omega R^2 dt d\phi. \quad (5)$$

Кориолисовы взаимодействия входят в уравнения движения только через недиагональный элемент метрики g_{02} , тогда как интервал τ собственного времени между двумя событиями выражается через g_{00} и интервал координатного времени t как

$$\tau = \frac{1}{c} \sqrt{g_{00}} t = \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 R^2}{c^2}} t \simeq t \left(1 - \frac{\Omega^2 R^2}{2c^2}\right) \quad (6)$$

с точностью до членов четвёртого порядка по V/c (см. параграфы 84 и 88 в [8]). Следовательно, также и факторы растяжения времени в (1) ошибочны.

Согласно (2), вплоть до членов четвёртого порядка по V/c , выражения (4) и (6) дают нулевую разницу $\Delta\tau$ собственных времён распространения в двух плечах интерферометра с данным выбором ориентации. Соответственно, также и фазовый сдвиг исчезает.

В итоге представляется, что предложенный Малыкиным и Поздняковой "квадратичный эффект Саньяка" есть в большей степени следствие неверной оценки релятивистских поправок второго порядка, нежели реальный физический эффект. Как показано выше, на это

² В уравнении (1) работы [1] L/c выражается как t , и обозначения t_{\parallel}^{\pm} , t_{\perp}^{\pm} используются вместо τ_{\parallel}^{\pm} , τ_{\perp}^{\pm} . Ради ясности мы предпочитаем использовать t с возможными нижними и верхними индексами для обозначения координатного времени и τ с возможными нижними и верхними индексами для собственного времени.

³ Читатель может посмотреть наглядную визуализацию этих эффектов в [9].

непосредственно указывает тот факт, что выражение (1) не исчезает в пределе очень больших R при постоянном V , как этого требует специальная теория относительности. Что касается экспериментальных результатов Миллера, мы можем удовлетвориться общепринятым анализом Шенкланда с соавторами [4]. С другой стороны, новые и независимые выводы фазового сдвига, вызванного вращением в интерферометре Майкельсона, представляли бы большой интерес.

Примечания при корректуре

Непротиворечивый вывод во вращающейся системе отсчёта фазового сдвига, вызванного равномерным вращением интерферометра Майкельсона, теперь опубликован в [12]. Это новое вычисление в [12] определено свободно от влияния возможных спорных пунктов, связанных с выводом в инерциальной системе отсчёта и выдвигаемых в возражениях к этому комментарию, опубликованному ниже [13].

В дополнение я хотел бы отметить, что главная цель этой статьи состоит не в доказательстве приоритета моей предшествующей работы [5] над работой Г.Б. Малькина и В.И. Поздняковой [1], а в утверждении, что их результат не может быть правильным просто потому, что вызванный вращением неинерциальный эффект не может зависеть от одной только скорости вращения $V = \Omega R$, приводя к одинаковому результату для всех наблюдателей, движущихся с этой скоростью, незави-

симо от их удалённости от центра вращения.

В противоположность утверждаемому в возражениях к этому комментарию [13], сдвиг фаз, вызванный равномерным вращением в интерферометре Саньяка, в действительности стремится к нулю в пределе больших радиусов вращения R , при условии, что скорость вращения $V = \Omega R$ поддерживается постоянной.

Список литературы

1. Малькин Г Б, Позднякова В И *УФН* **185** 431 (2015); Malykin G B, Pozdnyakova V I *Phys. Usp.* **58** 398 (2015)
2. Michelson A A, Morley E W *Am. J. Sci.* **3** 34 333 (1887)
3. Shankland R S *Am. J. Phys.* **32** 16 (1964)
4. Shankland R S et al. *Rev. Mod. Phys.* **27** 167 (1955)
5. Maraner P *Ann. Physics* **350** 95 (2014)
6. Møller C *The Theory of Relativity* (Oxford: Clarendon Press, 1972)
7. Maraner P, Zendri J-P *Gen. Relat. Grav.* **44** 1713 (2012)
8. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Теория поля* (М.: Физматлит, 2014); Пер. на англ. яз.: Landau L D, Lifshitz E M *The Classical Theory of Fields* (Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000)
9. Maraner P "Rotating Michelson–Morley interferometer", <http://demonstrations.wolfram.com/RotatingMichelsonMorleyInterferometer/>
10. Coisson R *Am. J. Phys.* **41** 585 (1973)
11. Малькин Г Б *УФН* **170** 1325 (2000); Malykin G B *Phys. Usp.* **43** 1229 (2000)
12. Maraner P *Gen. Relat. Grav.* **48** 1 (2016)
13. Малькин Г Б, Позднякова В И *УФН* **186** 796 (2016); Malykin G B, Pozdnyakova V I *Phys. Usp.* **59** (7) (2016)

On the phase shift in a uniformly rotating Michelson interferometer

(comment on "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)" by G.B. Malykin and V.I. Pozdnyakova [*Phys. Usp.* **58** 398 (2015); *Usp. Fiz. Nauk* **185** 431 (2015)])

P. Maraner

*School of Economics and Management,
Free University of Bozen-Bolzano,
Universitätsplatz-Piazzetta dell'Università 1, I-39100 Bolzano-Bozen, Italy
E-mail: pmaraner@unibz.it*

It is argued that the "quadratic Sagnac effect" recently put forward by G.B. Malykin and V.I. Pozdnyakova is the consequence of an incorrect estimation of second order relativistic corrections and not a real physical phenomenon. The correct expression for the phase shift induced by rotations in a Michelson interferometer is presented.

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

PACS numbers: **03.30.+p**, 07.60.Ly, 42.87.Bg

Bibliography — 13 references

Received 28 August 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (7) 793–795 (2016)
DOI: 10.3367/UFN.2015.12.037675

Physics–Uspekhi **59** (7) (2016)
DOI: 10.3367/UFNe.2015.12.037675