

## ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

## Ранние исследования эффекта Саньяка

Г.Б. Малыкин

*Проведен обзор работ конца XIX — первой половины XX веков, посвященных исследованию эффекта Саньяка. Рассмотрен вопрос о приоритетах. В частности, показано, что О. Лодж первым пришел к выводу о возможности наблюдения данного эффекта. Показано также, что кроме обнаружения вращения, основной целью большинства исследований было уточнение вида коэффициента увлечения эфира Френеля–Физо во вращающейся системе отсчета. Рассмотрены пути развития саньяковской интерферометрии: расширение рабочего диапазона электромагнитных волн и использование интерференции волн де Бройля материальных частиц, а также интерференции поверхностных акустических и магнитных волн.*

PACS numbers: 01.65.+g, 04.20.-q

## Содержание

1. Введение (337).
  2. Работы Оливера Лоджа (338).
  3. Работы Альберта Майкельсона (339).
  4. Диссертация Франца Гарресса (339).
  5. Работы Жоржа Марка Мари Саньяка (339).
  6. Работы Бела Погани (340).
  7. Работы Александра Дюфо и Фернанда Приюнье (340).
  8. Работы И.Л. Берштейна (341).
  9. Патент Арона Уоллеса (341).
- Список литературы (342).

## 1. Введение

Эффект Саньяка [1–3], заключающийся в том, что во вращающемся кольцевом интерферометре встречные волны приобретают взаимный фазовый сдвиг, который прямо пропорционален угловой скорости вращения и площади, охватываемой интерферометром, и обратно пропорционален длине волны излучения, в настоящее время довольно хорошо изучен. Этот эффект кроме оптического диапазона [1–3] зарегистрирован в диапазоне радиоволн [4], в рентгеновском диапазоне [5], а также для интерференции волн де Бройля материальных частиц — электронов [6], нейтронов [7] и атомов кальция [8]. Эффект Саньяка имеет место и для интерференции встречных поверхностных акустических и магнитных волн [9]. Кольцевые лазеры и волоконные кольцевые интерферометры, принцип действия которых основан на

эффекте Саньяка, нашли широкое применение для целей навигации [10].

Вопрос о ранних исследованиях эффекта Саньяка рассматривался в ряде работ [5, 6, 11–19], однако ни в одной из них не содержится достаточно полного исторического обзора этого вопроса. Нет также полной ясности и в вопросе о приоритетах, поскольку рассматриваемый эффект был до Ж. Саньяка обнаружен Ф. Гаррессом [20], а предложения о постановке такого эксперимента ранее высказывались А. Майкельсоном [21] и, как недавно стало известно, О. Лоджем [22, 23]. В связи с этим в литературе иногда встречаются такие термины, как эффект Майкельсона–Саньяка [12], интерферометр Майкельсона–Саньяка [14].

Следует отметить, что в работе С.И. Вавилова [11] приводится весьма подробное описание экспериментальных работ по измерению эффекта Саньяка, выполненных до 1928 г. В этой работе отмечен очень важный момент: эффект Саньяка является эффектом первого порядка по  $v/c$ , где  $v$  — скорость вращения зеркал кольцевого интерферометра,  $c$  — скорость света. Сама идея постановки такого эксперимента возникла после того, как эффекты второго порядка по  $v/c$  не были обнаружены. Однако С.И. Вавилов, вероятно, не был знаком с работами О. Лоджа [22, 23], поскольку в [11] он утверждал, что постановка задачи в данном вопросе принадлежит А. Майкельсону [21].

Отметим также, что поскольку эффект Саньяка имеет место во вращающейся системе отсчета (неинерциальной), то он является эффектом общей теории относительности. Соответствующий вывод можно найти, например, в [13].

Цель настоящей работы — последовательное и систематическое изложение ранних экспериментальных работ, посвященных исследованию эффекта Саньяка в первой половине XX века, когда эти работы представляли чисто академический интерес, т.е. до создания кольцевых лазеров [24] и волоконных кольцевых интерферометров [25]. Рассмотрены также некоторые, охва-

Г.Б. Малыкин, Институт прикладной физики РАН  
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46  
Тел. (8312) 38-45-67  
Факс (8312) 36-37-97  
E-mail: gelikon@appl. sci-nnov.ru

Статья поступила 1 апреля 1996 г.

тывающие несколько более широкий исторический период, работы, которые посвящены постановке задачи по измерению рассматриваемого эффекта. Труды каждого автора представлены в хронологической последовательности, начиная с первой работы на данную тему.

## 2. Работы Оливера Лоджа (1851–1940 гг.)

Впервые, насколько нам известно, предложение об обнаружении вращения Земли по сдвигу интерференционных полос в кольцевом интерферометре было высказано О. Лоджем в работе [22] (1893 г.). Интересно понять, каким путем он пришел к этой мысли. В [22] О. Лоджем проводились эксперименты по обнаружению увлечения эфира массивными телами. Свет в неподвижном кольцевом интерферометре Физо<sup>1</sup> [26] проходил в зазоре между двумя, соединенными между собой вращающимися дисками, общим весом в  $3/4$  т. Для увеличения чувствительности каждый из встречных лучей 3 раза обходил интерферометр, площадь которого составляла  $1 \text{ м}^2$ . Если бы эфир увлекался вращающейся массой, то это вызвало бы сдвиг интерференционных полос (так же, как движение воды в экспериментах И. Физо [26]). Поскольку сдвиг полос не наблюдался, О. Лодж пришел к выводу, что эфир не увлекается вращающимися массивными телами. Следовательно, эфир не увлекается и вращением Земли и ее вращение можно измерять относительно неподвижного эфира. Для этого О. Лодж предлагает изготовить интерферометр в форме квадрата площадью  $1 \text{ км}^2$ . Таким образом, О. Лодж на 11 лет раньше А. Майкельсона [21] предложил способ измерения вращения Земли с помощью кольцевого интерферометра большой площади.

В своей последующей работе [23] О. Лодж пишет о том, что если "... весь аппарат в целом — фонарь, оптическая система<sup>2</sup>, телескоп<sup>3</sup> и наблюдатель были бы установлены на вращающемся столе и приведены во вращение, то взаимный сдвиг (интерференционных) полос при вращении в противоположных направлениях мог бы быть обнаружен". Основные трудности О. Лодж видит в центробежных силах, действующих на наблюдателя. Отметим, что, как будет показано ниже, Ф. Гарресс [20] и Ж. Саньяк [1–3] нашли способы не размещать наблюдателя на вращающемся столе.

Интересно отметить, что работа О. Лоджа [22] часто упоминается в книгах, посвященных истории науки (см., например, [27–31]) в связи с тем, что [22] является одной из важнейших работ в истории специальной теории относительности. Известно [27–31], что один из создателей специальной теории относительности Д. Фитцджеральд сам не публиковал своих результатов о релятивистских преобразованиях, а сообщил о них О. Лоджу, который изложил их (разумеется, со ссылкой на Д. Фитцджеральда) в работе [32] и, несколько позже, в [22]. В 1895 г. А.Г. Лоренц в своей работе [33] указал на то, что он узнал о результатах Д. Фитцджеральда из [22].

<sup>1</sup> В экспериментах Ф. Гарресса [20], Ж. Саньяка [1–3] и последующих использовался кольцевой интерферометр Физо, вследствие чего широко распространенный термин "интерферометр Саньяка" следует считать неверным.

<sup>2</sup> Интерферометр.

<sup>3</sup> Устройство для наблюдения сдвига интерференционных полос.

Несмотря на известность работы [22] до недавнего времени полагали, что постановка задачи по измерению угловой скорости вращения с помощью кольцевого интерферометра принадлежит А. Майкельсону [21]. И только совсем недавно авторы работ [6, 17–19] обратили внимание на приоритет О. Лоджа в этом вопросе.

Отметим, что для объяснения ожидаемого эффекта О. Лодж [22, 23] так же, как впоследствии А. Майкельсон [21] и Ж. Саньяк [1–3], использовал теорию неподвижного эфира, полагая при этом, что во вращающемся кольцевом интерферометре скорость света для встречных волн различна. Однако, как показано в [34], при малых, по сравнению со световой, скоростях вращения края платформы такое принципиально неверное с точки зрения теории относительности предположение приводит к правильному результату.

Как было отмечено выше, эффект Саньяка является эффектом общей теории относительности [13]. Тем не менее расчеты, проведенные на основе специальной теории относительности, дают то же выражение для сдвига фазы встречных волн в кольцевом интерферометре [34]. В данном случае имеет место довольно редкий случай: при нерелятивистских скоростях движения зеркал кольцевого интерферометра предсказания теории неподвижного светового эфира, специальной и общей теории относительности дают одинаковый результат. Как отметил С.И. Вавилов [11]: "Если бы явление Саньяка было открыто раньше, чем выяснились первые результаты опытов второго порядка, то оно, конечно, рассматривалось бы, как блестящее доказательство наличия эфира". Возможно, глубокое убеждение о наличии светового эфира привело О. Лоджа к уверенности в положительном результате предполагаемого опыта.

Почему О. Лодж не поставил эксперимент по измерению сдвига интерференционных полос при вращении кольцевого интерферометра? Массивная вращающаяся платформа, выдерживающая до нескольких тысяч об/мин [22, 23], легко позволяла провести такой опыт. Однако О. Лодж вне всякого сомнения имел намерения измерить вращение Земли с помощью кольцевого интерферометра большой площади, о чем свидетельствует его переписка с Ж. Лармором в 1897 г. [35] (отдельные выдержки из этой переписки цитируются в [19]). Осуществить эти намерения О. Лоджу помешала скорее всего высокая стоимость проекта. Тем не менее постановка задачи по измерению вращения системы отсчета с помощью кольцевого интерферометра принадлежит О. Лоджу.

## 3. Работы Альберта Майкельсона (1852–1931 гг.)

В работе [21] (1904 г.) А. Майкельсон предлагает построить кольцевой интерферометр больших размеров (обсуждаются варианты:  $1 \times 1 \text{ км}$  — для измерения угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси и  $10 \times 10 \text{ км}$  — для измерения угловой скорости вращения Земли вокруг Солнца). Второй проект не был осуществлен, а осуществление первого проекта было отложено на 20 лет, по-видимому, в связи с финансовыми проблемами. В первом варианте [36] (1923 г.) зеркала кольцевого интерферометра располагались на открытом воздухе, и его потоки размывали интерференцион-

ные полосы. Во втором варианте [37] (1925 г., выполнен совместно с Г. Гэлем и Ф. Пирсоном) интерферометр размером  $630 \times 340$  м был размещен в системе из стальных труб диаметром 305 мм, из которой был удален воздух (давление составляло 12 мм рт. ст.). Очень оригинально был решен вопрос о том, от чего отсчитывать сдвиг интерференционных полос. Для этого имелся дополнительный опорный контур интерферометра существенно меньшей площади. В результате этих экспериментов А. Майкельсону и соавторам впервые удалось измерить угловую скорость вращения Земли с помощью кольцевого интерферометра.

Отметим, что А. Майкельсон ни разу не ссылаясь ни на работы О. Лоджа, ни на работы Ж. Саньяка, ни на эксперименты Ф. Гарресса. Вопрос о том, был ли знаком А. Майкельсон с работами О. Лоджа [22, 23], остается открытым, однако (из письма О. Лоджа Ж. Лармору) известно, что О. Лодж и А. Майкельсон встречались (предположительно на конференции в Торонто 19–25.08.1897 г.), где они обсуждали методы измерения эффекта Зеемана [38]. Отметим также, что соавтор А. Майкельсона в работе [37] Г. Гэль писал по поводу измерения угловой скорости вращения Земли [39]: "Такой же эксперимент был предложен О. Лоджем".

#### 4. Диссертация Франца Гарресса (погиб в 1915 г.)

Тема диссертации Ф. Гарресса [20] состояла в экспериментальном определении вида коэффициента увлечения Френеля–Физо: для классического случая он имеет вид  $\alpha = 1 - 1/n^2$ , с учетом поправки Г.А. Лоренца  $\alpha = 1 - 1/n^2 - (\lambda/n)(dn/d\lambda)$  (где  $n$  — коэффициент преломления среды,  $\lambda$  — длина волны света). Таким образом, вопрос стоял об экспериментальной проверке теории относительности. Отметим, что интерес к экспериментальному определению вида коэффициента увлечения эфира Френеля–Физо не ослабевает и сейчас (см., например, [40, 41]), поскольку для оптических диспергирующих материалов поправка Г.А. Лоренца, или так называемый дисперсионный член, составляет всего 1–2 % от величины  $1 - 1/n^2$ .

Исследования Ф. Гарресса проводились в 1909–1911 гг. в Йене. Установка представляла собой вращающийся со скоростью до 3000 об/мин (из-за значительных центробежных сил, которые деформировали интерферометр, основные измерения проводились при 500–600 об/мин) стол, по краю которого располагались 10 плотно сдвинутых призм полного внутреннего отражения, образующих кольцо диаметром 40 см. Таким образом, свет распространялся внутри стекла по ломаной линии, близкой к круговой. Очень оригинально Ф. Гарресс решил вопрос о расположении источника излучения и наблюдателя — регистрационного устройства. Они располагались вне вращающегося стола, а излучение вводилось с помощью системы призм сверху, по оси вращения и далее от центра вращающегося стола, по радиусу, к его краю, где оно разделялось по фронту на две половины, обходило кольцо во встречных направлениях и выводилось с вращающегося стола аналогичным образом. Для регистрации смещения интерференционных полос служила специальная фотокамера, а также имелась зрительная труба для визуального наблюдения. Для определения величины сдвига полос враще-

ние стола реверсировалось, благодаря чему эффект удваивался. Эксперименты сопровождались большими трудностями, в результате несчастного случая тщательно сбалансированная и отъюстированная установка была разрушена [19].

Как известно [12, 13], при обработке экспериментальных результатов Ф. Гарресс допустил ошибку, поскольку полагал, что сдвиг интерференционных полос связан исключительно с эффектом увлечения света вращающимся стеклом, заполняющим интерферометр, а не с вращением интерферометра в целом. Иными словами, Ф. Гарресс полагал, что если бы в интерферометре не было среды, то вращение не вызвало бы сдвига интерференционных полос. Ошибку Ф. Гарресса в расчетах исправил в начале 1914 г. немецкий астроном П. Гарцер [42], который в результате получил, что коэффициент увлечения Френеля–Физо имеет вид  $\alpha = 1 - 1/n^2$ . Отсюда П. Гарцер сделал вывод о том, что специальная теория относительности не верна. В этом же году А. Эйнштейн опубликовал свою работу [43], где показал, что если источник света и регистрирующее устройство расположены на вращающемся столе, то  $\alpha = 1 - 1/n^2$ , а если — вне стола, но ввод света в интерферометр осуществляется так, как это было в установке Ф. Гарресса, т.е. через ось вращения, то с точностью до членов порядка  $v^2/c^2$  имеет такой же вид. Таким образом, вращение кольцевого интерферометра, заполненного средой, с малыми линейными скоростями не может ни подтвердить, ни опровергнуть справедливость специальной теории относительности.

Ф. Гарресс, по-видимому, не был знаком с работами О. Лоджа и А. Майкельсона.

Диссертация Ф. Гарресса [20] долгое время считалась утраченной, однако совсем недавно она была обнаружена в библиотеке Тюбингенского университета Ф. Хассельбахом и М. Никлаусом [6]. Поскольку Ф. Гарресс не опубликовал своих результатов, это после окончания первой мировой войны сделал его научный руководитель, немецкий астроном, директор Йенской обсерватории О. Кнопф [44, 45].

#### 5. Работы Жоржа Марка Мари Саньяка (1869–1928 гг.)

Свои знаменитые эксперименты по измерению угловой скорости вращения с помощью кольцевого интерферометра [1–3] (1913 г.) Ж. Саньяк планировал задолго до их осуществления. В 1909 г. он обсуждал возможность таких измерений с академиком Парижской АН, нобелевским лауреатом Г. Липпманом [3], который представлял большинство работ Ж. Саньяка в журнал *Comptes Rendus* (доклады французской АН), а некоторые сообщения по поводу возможности измерения скорости света во вращающейся системе отсчета он высказывал еще в 1905 г. [46]. В 1910 г. Ж. Саньяк опубликовал работу [47], в которой обследовался трехзеркальный кольцевой интерферометр с периметром 30 м. (Эти же результаты он доложил на конгрессе в Брюсселе в 1910 г. [48].) Поскольку первые эксперименты проводились с белым светом, это вызывало некоторые трудности в наблюдении интерференционных полос. Отметим, что за время между 1910 г. и 1913 г. Ж. Саньяк опубликовал большое количество работ, посвященных данному вопросу, подробная библиография которых приводится в обзоре [14].

В экспериментах [1–3] угловая скорость вращения платформы составляла от 50 до 140 об/мин. Интерферометр размером около 0,5 м (площадь 866 см<sup>2</sup>), состоявший из пяти зеркал, четыре из которых были глухие и одно, делительное, полупрозрачное, квазимонохроматический источник излучения, а также регистрирующее устройство — фотокамера размещались на вращающейся платформе (Ж. Саньяк называл это устройство интерферографом). После фотографирования интерференционных полос при вращении платформы делалась остановка, фотопластинка сдвигалась и вращение возобновлялось в противоположном направлении, после чего проводилось повторное фотографирование. Таким образом, при обработке результатов эксперимента исключался случайный начальный сдвиг интерференционных полос, а полезный эффект удваивался. Для увеличения видности интерференционных полос Ж. Саньяк использовал линейно поляризованное призмой Николя излучение. Отметим, что Ж. Саньяк не ссылаясь на работы О. Лоджа и эксперименты Ф. Гарресса, о которых он вряд ли мог знать, а на работы А. Майкельсона он ссылаясь дважды. В работе [47] Ж. Саньяк писал: "Чтобы разделить один пучок (света) на два встречных интерферирующих пучка, я использовал сначала посеребренное полупрозрачное зеркало, как это сделал первым Майкельсон". Таким образом, Ж. Саньяк признавал приоритет А. Майкельсона только в отношении использования полупрозрачного посеребренного зеркала в качестве светоделителя в кольцевом интерферометре, а не в отношении постановки задачи об обнаружении вращения с помощью кольцевого интерферометра. В работе [3] Ж. Саньяк упоминал широко известные эксперименты А. Майкельсона и Э. Морли [49], которые были посвящены обнаружению поступательного движения Земли относительно неподвижного эфира и не имеют никакого отношения к обнаружению вращения системы отсчета, или, как тогда полагали, вращения Земли относительно неподвижного эфира. Ж. Саньяк провел целенаправленные эксперименты по обнаружению сдвига интерференционных полос во вращающемся кольцевом интерферометре и обнаруженный эффект справедливо назван его именем. Отметим, что Ж. Саньяк первым предложил использовать этот эффект для целей навигации [3].

## 6. Работы Бела Погани (1887–1943 гг.)

В 1925–1928 гг. венгерский физик Б. Погани восстановил и усовершенствовал экспериментальную установку Ф. Гарресса в Йене [50–52]. Измерения проводились при скорости вращения от 1000 до 2000 об/мин, были в значительной степени устранены вибрации, укреплены все элементы интерферометра с тем, чтобы центробежные силы не изменяли их положения. Интерферометр имел форму квадрата со стороной 35 см и состоял из четырех зеркал и призмы полного внутреннего отражения, которая разделяла входной пучок света по фронту на две равные части, обходявшие интерферометр во встречных направлениях. Ввод (и вывод) света на вращающуюся платформу осуществлялся так же, как и в экспериментах Ф. Гарресса. Кроме проверки и уточнения результатов Ф. Гарресса и Ж. Саньяка перед Б. Погани стояла важная задача — проверить, зависит ли величина эффекта от коэффициента преломления

среды, заполняющей кольцевой интерферометр. Для этой цели имелась возможность устанавливать по ходу лучей два массивных стеклянных бруска длиной по 32 см каждый, которые увеличивали оптическую длину интерферометра. Эксперименты Б. Погани с высокой точностью продемонстрировали, что величина эффекта Саньяка не зависит от коэффициента преломления среды, заполняющей кольцевой интерферометр. Это можно пояснить следующим образом: увеличение оптической длины кольцевого интерферометра при увеличении показателя преломления среды точно компенсируется уменьшением коэффициента увлечения Френеля–Физо. Этот вопрос подробно рассмотрен в ряде работ (см., например, работу И.Л. Берштейна [4]). Интересно отметить, что в конце 70-х годов, когда работы Б. Погани [50–52] были в значительной мере забыты, а работа И.Л. Берштейна [4] была мало известна оптикам, в связи с созданием волоконных кольцевых интерферометров [25] этот вопрос вновь активно обсуждался [53, 54].

## 7. Работы Александра Дюфо и Фернанда Прюнье

Первые работы А. Дюфо и Ф. Прюнье [55, 56] были выполнены в 1937 г. и посвящены экспериментальной проверке зависимости величины эффекта Саньяка от того, находится ли источник света на вращающейся платформе или вне ее. Как и следовало ожидать из результатов [43], при нерелятивистских скоростях вращения края платформы такая зависимость не наблюдается.

В последующей работе [57], выполненной в 1942 г., эти авторы поставили очень интересный эксперимент: вращался только интерферометр, а среда, заполняющая его (стекло), оставалась неподвижной. Скорость вращения составляла до 300 об/мин. А. Дюфо и Ф. Прюнье обнаружили, что в этом случае сдвиг интерференционных полос больше, чем в случае, когда интерферометр и среда вращаются как единое целое. Теоретическое объяснение этого явления содержится в работе Е. Поста [13], который показал, что сдвиг интерференционных полос  $\Delta z$  различен для следующих случаев.

1. Интерферометр и среда вращаются как единое целое (случай экспериментов Ф. Гарресса [20, 44, 45] и Б. Погани [50–52]):

$$\Delta z \sim n^2(1 - \alpha), \quad \text{где } \alpha = 1 - \frac{1}{n^2} \quad [43],$$

отметим, что только в этом случае  $n^2(1 - \alpha) = 1$  и величина  $\Delta z$  не зависит от значения  $n$ .

2. Интерферометр вращается, среда неподвижна (случай экспериментов А. Дюфо и Ф. Прюнье [57]):

$$\Delta z \sim n^2.$$

3. Интерферометр неподвижен, среда вращается (случай экспериментов И. Физо [26]):

$$\Delta z \sim n^2\alpha, \quad \text{где } \alpha = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \quad [43].$$

Таким образом, эксперименты А. Дюфо и Ф. Прюнье завершили исследование этих трех случаев.

## 8. Работа И.Л. Берштейна (р. в 1908 г.)

Исследование эффекта Саньяка в диапазоне радиоволн [4] проводились в 1950 г. в Горьковском физико-техническом институте и было поддержано академиком А.А. Андроновым и проф. Г.С. Гореликом. Кольцевой интерферометр представлял собой кабель РК-3 длиной 244 м, намотанный на барабан диаметром 2 м. Угловая скорость вращения барабана составляла от 60 до 78 об/мин. Длина волны излучения равнялась 10 м, причем и генератор, и электронная система обработки выходного сигнала располагались на барабане. Такой многовитковый интерферометр был прообразом будущих волоконных интерферометров (это было отмечено в [5]).

Цель работы формулируется в [4] следующим образом: "Интерес описываемого опыта мы видим в том, что: 1) он является (насколько нам известно) первым радиофизическим<sup>4</sup> опытом по электродинамике движущихся тел и 2) распространение волны в нашем опыте происходит в среде, сильно отличающейся от вакуума (диэлектрик, заполняющий кабель, имеет диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon = 2,44$ ); вследствие этого в описываемом опыте, как и в оптическом опыте Физо с текущей жидкостью, существенную роль играет (говоря языком дорелятивистской физики) френелевский эффект увлечения"<sup>5</sup>.

Чтобы оценить техническую сложность этих экспериментов, следует напомнить, что величина эффекта Саньяка обратно пропорциональна длине волны излучения. Таким образом, из-за большой длины волны установка имела чувствительность, более чем на семь порядков хуже, чем оптические установки, описанные выше. Разность фаз во встречных волнах, вызванная вращением барабана, составляла всего  $10^{-5}$  рад. Однако к этому времени И.Л. Берштейн разработал очень чувствительный метод измерения малых фазовых флуктуаций [58]<sup>6</sup>, который позволял измерять такое изменение фазы со значительным превышением над шумами.

Для измерения разности фаз во встречных волнах был применен оригинальный метод обработки сигнала. Излучение встречных волн интерферировало не между собой, а поочередно с опорным сигналом, идущим непосредственно от генератора. Коммутация осуществлялась специальным реле с частотой 12,5 Гц. Затем сигнал с частотой 12,5 Гц усиливался и подавался на синхронный детектор.

В результате работы [4] удалось обнаружить эффект Саньяка на радиоволнах и показать, что его величина не зависит от диэлектрической проницаемости (т.е. коэффициента преломления) среды.

## 9. Патент Арона Уоллеса

Заявка на патент А. Уоллеса [59], права на который он передал Мэксон Электроник Корпорейшен, была подана

9 июля 1958 г., а зарегистрирован он был 3 сентября 1963 г., т.е. рассматривался более пяти лет. Этот патент интересен тем, что в нем впервые предлагается схема волоконного кольцевого интерферометра, который был реально создан через 18 лет [25]. Кроме того, в этом патенте были впервые предложены схемы саньяковских датчиков вращения на рентгеновских лучах (реализовано через 36 лет [5]), на гамма-лучах (до сих пор не реализовано), а также на электронах (реализовано через 35 лет [6]). Однако технические решения всех предложенных схем настолько наивны (по крайней мере, с точки зрения нашего времени), что весьма сомнительно, извлекла ли Мэксон Электроник Корпорейшен коммерческую выгоду из этого патента.

К моменту публикации патента А. Уоллеса уже существовали кольцевые лазеры [24] и интерес к пассивным кольцевым интерферометрам надолго ослаб. Возможно, с этим связано то обстоятельство, что ссылки на этот патент в литературе практически отсутствуют, единственное, насколько нам известно, исключение составляет библиографическая работа Х. Ардитти [60].

Основные выводы данной работы следующие.

1. Постановка задачи по обнаружению вращения системы отсчета с помощью кольцевого интерферометра принадлежит О. Лоджу (1893 г.).

2. Первые целенаправленные экспериментальные исследования этого явления проведены Ж. Саньяком (1913 г.) и обнаруженный эффект справедливо назван его именем.

3. Ф. Гарресс полагал, что исследует эффект увлечения Френеля–Физо во вращающемся стекле (1909–1911 гг.) и только в 1914 г. из работ П. Гарцера и А. Эйнштейна стало ясно, в эксперименте Ф. Гарресса обнаружено вращение системы отсчета. Тем не менее, первые экспериментальные результаты о влиянии вращения системы отсчета на сдвиг интерференционных полос в кольцевом интерферометре и об отсутствии дисперсионного члена в коэффициенте увлечения Френеля–Физо в случае, если интерферометр, оптическая среда и источник света вращаются как единое целое, принадлежат Ф. Гаррессу.

4. Обнаружить вращение Земли с помощью эффекта Саньяка впервые удалось А. Майкельсону (1925 г.).

5. Независимость величины эффекта Саньяка от коэффициента преломления среды, заполняющей кольцевой интерферометр, впервые экспериментально подтвердил Б. Погани (1928 г.).

6. Практическая независимость величины эффекта Саньяка от расположения источника излучения впервые экспериментально показана А. Дюфо и Ф. Прюнье (1937 г.).

7. Первые измерения эффекта Саньяка на радиоволнах были выполнены И.Л. Берштейном (1950 г.). Им же впервые была применена электронная система обработки выходного сигнала.

8. Схема волоконного кольцевого интерферометра впервые предложена А. Уоллесом.

В заключение автор выражает благодарность И.А. Андроновой и И.Л. Берштейну за обсуждение работы, И.А. Яковлеву за ряд полезных замечаний. Работа частично поддержана грантом № 96–02–18568а РФФИ.

<sup>4</sup> Здесь имеется в виду радиодиапазон.

<sup>5</sup> Следует отметить, что в это время И.Л. Берштейн не был знаком с работами Б. Погани.

<sup>6</sup> За эту работу он был удостоен Президиумом АН СССР премии им. Л.И. Мандельштама в 1949 г.

## Список литературы

1. Sagnac M G *Compt. Rend.* **157** 708 (1913)
2. Sagnac M G *Compt. Rend.* **157** 1410 (1913)
3. Sagnac M G *J. Phys.* (Paris) **4** 177 (1914)
4. Берштейн И Л *ДАН СССР* **75** 635 (1950)
5. Высоцкий В И и др. *УФН* **164** 309 (1994)
6. Hasselbach F, Nicklaus M *Phys. Rev. A* **48** 143 (1993)
7. Werner S A, Staudemann J L, Collela R *Phys. Rev. Lett.* **42** 1103 (1979)
8. Riehle F et al. *Phys. Rev. Lett.* **67** 177 (1991)
9. Newburgh R G et al. *Proc. IEEE* **62** 1621 (1974)
10. Курицки М М, Голдштейн М С *ТИИЭР* **71** (10) 47 (1983)
11. Вавилов С И "Экспериментальные основания теории относительности", в кн. *С И Вавилов Собрание сочинений* Т. 4 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 9
12. Zernike F *Physica* **13** 279 (1947)
13. Post E *Rev. Mod. Phys.* **39** 475 (1967)
14. Hariharan P *Appl. Opt.* **14** 2319 (1975)
15. Telegdy V L *Phys. Today* **27** (11) 11 (1974)
16. Франкфурт У И, Френк А М *Оптика движущихся тел* (М.: Наука, 1972)
17. Heer C V *Proc. SPIE* **487** 2 (1984)
18. Wilkinson J R *Prog. Quant. Electr.* **116** 1 (1987)
19. Anderson R, Bilger H R, Stedman G E *Am. J. Phys.* **62** 975 (1994)
20. Harress F *Ph. D. Thesis* (Jena, 1912)
21. Michelson A A *Philos. Mag.* **5** 6 8 716 (1904)
22. Lodge O *Philos. Trans. R. Soc. (London)* **184** 727 (1893)
23. Lodge O *Philos. Trans. R. Soc. (London)* **189** 149 (1897)
24. Macek W M, Davis D T *Appl. Phys. Lett.* **2** 67 (1963)
25. Vali V, Shorthill R W *Appl. Opt.* **15** 1099 (1976)
26. Fizeau H *Compt. Rend.* **33** 349 (1851)
27. Whittaker E A *History of the Theories of Aether and Electricity* Vol. 1 (London.: T Nelson and Sons, 1951) p. 404
28. Кудрявцев П С *История физики* Т. 3 (М.: Просвещение, 1971) с. 27
29. Кудрявцев П С *Курс истории физики* (М.: Просвещение, 1982) с. 293
30. Спасский Б И *История физики* Т. 2 (М.: Изд-во МГУ, 1964) с. 152
31. Франкфурт У И *Очерки по истории специальной теории относительности* (М.: Изд-во АН СССР, 1961) с. 29
32. Lodge O *Nature* **46** 164 (1892)
33. Лоренц Г А, в сб. *Принцип относительности* (Под ред. В К Фредерикса, Д Д Иваненко) (М.-Л.: ОНТИ, 1935) с. 9
34. Логунов А А, Чугреев Ю В *УФН* **156** 137 (1988)
35. Lodge O *Past Years: An Autobiography* (London: Camelot, 1931)
36. Michelson A A *Astrophys. J.* **61** 137 (1925)
37. Michelson A A, Gale H G, assisted by Pearson F *Astrophys. J.* **61** 140 (1925)
38. Hynt B J *Hist. Studies Phys. Biol. Sci.* **16** 111 (1986)
39. Gale H G *Astrophys. J.* **74** 1 (1931)
40. Bilger H R, Zavodny A T *Phys. Rev. A* **5** 591 (1972)
41. Bilger H R, Stowell W K *Phys. Rev. A* **16** 313 (1977)
42. Harzer P *Astron. Nach.* **198** 378 (1914)
43. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 313
44. Knopf O *Ann. (der) Phys.* **62** 389 (1920)
45. Knopf O *Naturwissenschaften* **8** 815 (1920)
46. Sagnac M G *Compt. rend.* **141** 1220 (1905)
47. Sagnac M G *Compt. rend.* **150** 1302 (1910)
48. Sagnac M G *Congress de Bruxelles* Т. 1 (Bruxelles: Sept. 1910) p. 207
49. Michelson A A, Morley E W *Am. J. Sci. Ser. III* **34** 333 (1887)
50. Pogany B *Ann. (der) Phys.* **80** 217 (1926)
51. Pogany B *Naturwissenschaften* **15** 177 (1927)
52. Pogany B *Ann. (der) Phys.* **85** 244 (1928)
53. Valy V, Shorthill R W, Berg M F *Appl. Opt.* **16** 2605 (1977)
54. Leeb W R, Schiffner G, Scheiterer E *Appl. Opt.* **18** 1293 (1979)
55. Dufour A, Prunier F *Compt. rend.* **204** 1322 (1937)
56. Dufour A, Prunier F *Compt. rend.* **205** 658 (1937)
57. Dufour A, Prunier F *J. Phys. (Paris) Ser. VIII* **3** 153 (1942)
58. Берштейн И Л *Изв. АН СССР. Сер. Физика* **14** 145 (1950)
59. Wallace A *Electromagnetic Wave Gyroscopes or Angular Velocity Measuring System* UE Patent N 3102953 (Sept. 3, 1963, filed Jul. 9, 1958)
60. Arditty H J, in *Fiber-Optics Rotation Sensors – Springer Ser. in Optical Science* Vol. 12 (Eds S Ezekiel, H J Arditty) (Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1982) p. 27

## Earlier studies of the Sagnac effect

G.B. Malykin

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences  
ul. Ul'yanova 46, 603600 Nizhniy Novgorod, Russia  
Tel. (8312) 38-45 67. Fax (8312) 36-37 92  
E-mail: gelikon@appl.sci-nnov.ru*

Studies of the Sagnac effect carried out during the latter part of the nineteenth and the first half of the twentieth century are reviewed. A discussion of the priority issue is given which shows, in particular, that O. Lodge was the first to recognise the possibility of the effect. It is also shown that, apart from detecting the rotation, in most studies the improvement of the Fresnel-Fizeau drag coefficient in a rotating reference frame was the primary concern. As possible directions for the development of Sagnac interferometry, a wider operational range for electromagnetic waves, the interference of material de Broglie waves, and the interference of acoustic and magnetic surface waves are considered.

PACS numbers: **01.65. + g, 04.20.-q**

Bibliography — 60 references

Received 1 April 1996