

СТОЛЕТИЕ ЭФФЕКТА САНЬЯКА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЙ: ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДО ВОЛН МАТЕРИИ

В 1913 г. Ж. Саньяк опубликовал результаты первого экспериментального наблюдения влияния вращения на фазовый сдвиг интерференционной картины в оптическом интерферометре. В течение последующих ста лет велись споры о значении и интерпретации этого открытия, и сейчас, век спустя, выясняется, что данные наблюдения универсальны и справедливы для любого типа волн, от оптических (или электромагнитных) до используемых с недавнего времени волн материи. После прорыва, вызванного открытием лазеров, и недавнего открытия ультрахолодных атомов датчики вращения с использованием эффекта Саньяка стали обеспечивать высочайшую точность инерциальных измерений и являются основой навигационных систем, а в будущем, возможно, будут использоваться для точного изучения вращения Земли или задания границ общей теории относительности.

1. Эффект Саньяка 100 лет назад

Сто лет назад [1], в 1913 г., Жорж Саньяк опубликовал первые экспериментальные доказательства [2] влияния вращения на разность времен обхода и фазовый сдвиг интерференционной картины в кольцевом интерферометре – эффекта, уже предсказанного им в более ранних работах [3] и ранее предвосхищенного другими знаменитыми учеными, например Майкельсоном [4]. Саньяк не первым наблюдал этот эффект – двумя годами ранее Харресс [5] измерил смещение при определении коэффициента увлечения Френеля – Физо [6]. Но это смещение было истолковано как проявление эффекта Саньяка только в 1914 г., в то же время доказав, что эффект Саньяка не зависит от коэффициента преломления среды распространения света, что не следовало явно из эксперимента Саньяка.

Буйе Филипп. Доктор наук, инженер Лаборатории фотоники и нанотехнологий Университета Бордо (Франция).

Научный редактор перевода д.т.н. Ю.В.Филатов.

Статья по докладу на XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Уже в своей первой статье Саньяк предсказал, что вращение Земли должно производить некий эффект. Он отмечал, что «в горизонтальной оптической схеме... суточное вращение Земли должно, если эфир неподвижен, приводить к относительному повороту эфира... Я надеюсь определить, существует ли соответствующий эффект небольшого оптического поворота».

Ученый так и не добился своей цели, так как для этого потребовался бы невероятно огромный интерферометр. Только в 1925 г. – более чем через 30 лет после первоначального сообщения и через 12 лет после пионерского эксперимента Саньяка – удалось измерить эффект Саньяка, вызванный вращением Земли, когда Майкельсон и Гейль [7] использовали оптический интерферометр с площадью $0,25 \text{ км}^2$. И только с появлением лазера, в 60-х годах, новые экспериментальные разработки по эффекту Саньяка привели к созданию первого лазерного гироскопа (Мацек и Дэвис [8], 1963 г.), а позже – первого волоконно-оптического гироскопа [9] в 1976 г. Первые промышленные лазерные гироскопы были выведены на рынок в начале 1980-х, а первые волоконные гироскопы – в начале 1990-х годов.

После первых измерений вращения, произведенных Саньяком с помощью интерферометра, было предпринято еще много попыток более точных измерений с использованием различных вариаций его интерферометра [10, 11, 12].

Существуют два основных направления развития интерферометров Саньяка. В оптических интерферометрах Саньяка [10, 11, 12] ставится задача повышения чувствительности за счет увеличения длины пути двух лучей до вывода их из интерферометра. Есть две основные схемы: кольцевые лазерные гироскопы, где наблюдаемый извне сдвиг фазы пропорционален углу поворота, и волоконно-оптические гироскопы, где сдвиг фазы пропорционален угловой скорости. Многочисленные витки вокруг одной физической площади приводят к увеличению площади чувствительного элемента. Интерферометры на волнах материи, чувствительные к эффекту Саньяка, обычно ограничены интерферометрами Маха – Цендера [13, 14]. Интерферометрам на волнах материи присуща более высокая чувствительность, чем оптическим интерферометрам Саньяка за счет меньшей скорости и длины волны частиц по сравнению со светом. Эти интерферометры проигрывают оптическим из-за ограниченной площади. Чувствительность волоконно-оптических интерферометров можно

легко менять, например, за счет увеличения количества витков волокна, в то время как чувствительность интерферометров на волнах материи неизменна.

Интерферометр Саньяка (рис. 1) описан в работе «О доказательствах реальности люминофорного эфира при помощи эксперимента с вращающимся интерферометром», в Трудах (Comptes rendus) от 27 октября (стр. 708 этого тома) следующим образом: «... горизонтально вращающаяся пластина (диаметр

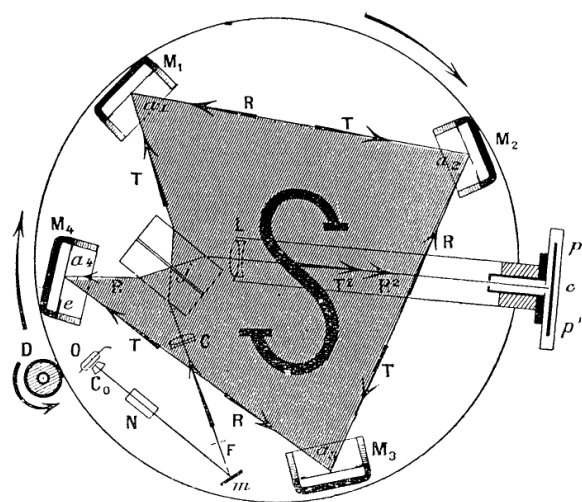


Рис. 1. Оригинальный интерферометр Саньяка, 1913 г.

ром 50 см), на которой расположены плотно прикрученные (регулируемые винты затянуты запорными винтами) оптические части, а также источник света O , маленькая лампа с горизонтальной металлической нитью накаливания. Микрообъектив C_0 проецирует изображение нити накаливания через призму Николя на горизонтальный прорез F в фокальной плоскости коллимационного объектива C ; m – отражающее зеркало. Вертикально поляризованный (по терминологии Френеля) параллельный луч разделяется светоделителем с воздушным зазором j как в обычном интерферометре в моем исследовании (*Comptes rendus*, т. 150, 1910, стр. 1676), который я применял в оптическом исследовании движения Земли (Брюссельский конгресс, сентябрь 1910, т. I, стр. 207; *Comptes rendus*, т. 152, 1911, стр. 310; *Le Radium*, 1911, стр. I): луч T , прошедший через воздушный зазор j , последовательно отражается от четырех зеркал M и проходит по замкнутому контуру $ja_1a_2a_3a_4j$ площадью S . Луч R , отраженный тем же воздушным зазором, проходит по тому же контуру в противоположном направлении. Возвращаясь к j , луч T , снова прошедший, и луч R , снова отраженный, накладываются в том же направлении вдоль T^2 и R^2 и формируют интерференционные полосы в главном фокусе линзы L на мелкозернистой фотопластинке pp^f .»

2. Эффект Саньяка в оптических интерферометрах

Схема интерферометра Саньяка представлена на рис. 2, а. Интерференционная картина, зарегистрированная на выходе интерферометра, чувствительна к любой разности фаз двух встречных лучей. В случае если интерферометр вращается в своей плоскости с угловой частотой Ω_{rot} , с помощью простого дифференцирования можно получить величину разности фаз $\Delta\phi$.

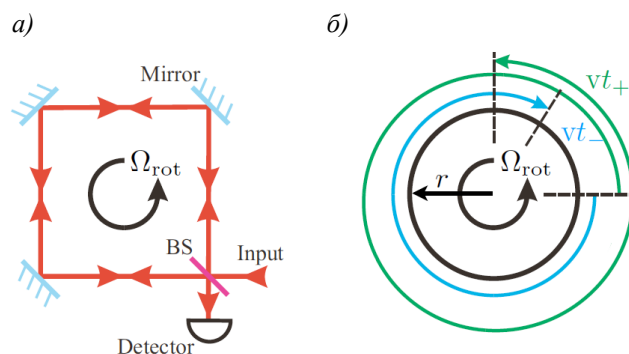


Рис. 2. Интерферометр Саньяка: а) схема, б) интерферометр Саньяка в виде кольца
Mirror-зеркало, BS— светоделитель, Input-вход

На рис. 2, а видно, что свет от источника света расщепляется на два луча светоделителем. Затем два встречных луча циркулируют по интерферометру и интерферируют на светоделителе. У интерферометра два выходных порта – один к источнику света, другой – к детектору. На рис. 2, б представлен интерферометр Саньяка в виде кольца радиуса r , вращающийся с угловой скоростью Ω_{rot} . Показаны изменения длины пути двух встречных лучей $vt_{\pm}$.

Рассмотрим кольцевой интерферометр (рис 2, б). Время, за которое два луча обходят контур интерферометра $t_{\pm}$, определяется формулой

$$t_{\pm} = \frac{2\pi r \pm r \Omega_{\text{rot}} t_{\pm}}{v} = \frac{2\pi r}{v \mp r \Omega_{\text{rot}}}.$$

где v – скорость распространения света по контуру Саньяка. Из этого следует, что разность времени распространения двух встречных лучей δt равна

$$\delta t = \frac{4\pi r^2 \Omega_{\text{rot}}}{v^2 - (r \Omega_{\text{rot}})^2}$$

Разность фаз двух встречных лучей $\Delta\phi$ равна $v \delta t / \lambda_0$, где λ_0 – длина волны. Если площадь интерферометра равна A , то

$$\Delta\phi = \frac{4A \cdot \Omega_{\text{rot}}}{\lambda_0 v}.$$

Чувствительность данного интерферометра к вращению зависит только от длины волны и проекции угловой скорости вращения на площадь, охватываемую интерферометром. Центр вращения и форма петли не влияют на чувствительность, в отличие от угла между плоскостью вращения и плоскостью интерферометра. Эффект Саньяка проявляется в интерферометрах Саньяка и интерферометрах Маха – Цендера.

3. Оптические гироскопы в навигации

Эффект Саньяка применяется в точной навигации, которая обеспечивает успешное функционирование летательных и космических аппаратов, кораблей и других подвижных объектов. Глобальная система позиционирования (GPS) позволяет современным штурманам определять мгновенное положение объекта с точностью, которой бы позавидовали мореплаватели прошлых веков, ориентировавшиеся по звездам. Однако надежная навигация только с помощью GPS требует постоянной связи со спутниковой сетью. Для подводных лодок такая связь невозможна, для космических летательных аппаратов – бесполезна, а в случае помех сигналам GPS связь становится невозможной вне зависимости от типа подвижных объектов.

Штурман может рассчитать местоположение объекта и тогда, когда сигналы GPS недоступны, используя проверенный временем метод счисления. Суть метода проста: штурман рассчитывает текущее положение объекта по его последнему известному положению и измерениям скорости и курса во времени. В современной инерциальной навигации такие измерения производятся путем интегрирования выходных данных акселерометров и гироскопов. Погрешность рассчитанного значения смещения от точки, где была произведена последняя коррекция по GPS, накапливается вследствие несовершенства используемых датчиков, поэтому точная инерциальная навигационная система требует периодической коррекции по GPS. Если применяются более совершенные датчики, интервалы между GPS-коррекциями можно увеличивать без снижения точности расчета положения. Поэтому разработка гироскопов с меньшими погрешностями представляет значительный практический интерес.

Гироскоп Саньяка представляет собой простой интерферометр, в котором путь, где проходят интерферирующие волны, охватывает определенную площадь (рис. 2). Вращение этого прибора с угловой скоростью Ω_{rot} приводит к образованию сдвига фазы встречных волн, а значит, и к сдвигу интерференционной картины выходного сигнала. Чтобы понять, будет ли такое устройство

практически полезным, рассмотрим реактивный самолет,двигающийся с крейсерской скоростью около 1000 км/ч. Установленный на нем гироскоп должен быть чувствителен к медленным вращениям – около 15 град/ч (скорость вращения Земли). В противном случае положение, рассчитанное инерциальной навигационной системой, уже через минуту полета будет иметь погрешность в несколько километров. Для кольцевого интерферометра приемлемого размера с радиусом 5 см разность длин пути при скорости вращения Земли составляет только 38×10^{-15} м, а результирующий сдвиг фазы – 56 нрад. Такой маленький сдвиг фазы трудно измерить интерферометрическим способом. Таким образом, на первый взгляд, кажется, что чувствительность оптического гироскопа Саньяка слишком мала, чтобы иметь практическую пользу.

Один из методов достижения желаемой чувствительности был разработан в начале 60-х гг. Мацеком и Дэвисом [8], вдохновленными историческим опытом Саньяка [2] и Майкельсона с Гейлем [7]. Вскоре после создания первого лазера Майманом был изобретен лазерный гироскоп, где вращение регистрируется по сдвигу картины биений двух встречных мод кольцевого лазера. Чтобы перейти от лабораторных экспериментов к промышленному производству, потребовалось пятнадцать лет: в 1978 г. авиационный завод Boeing решил оснастить свои новые модели (767 и 757) лазерными гироскопами производства компании Honeywell, которая и сегодня является мировым лидером на рынке лазерных гироскопов. Многие другие компании производят и продают лазерные гироскопы, которыми оборудуются множество объектов, включая космические аппараты (например, европейский ракетоноситель Ariane был изначально оснащен лазерными гироскопами производства французской компании, позже приобретенной компанией Thales).

Другой метод – увеличить охватываемую площадь, заменив одновитковый волновод длинным оптическим волокном, намотанным на катушку. При использовании намотки длиной 1 км фазовый сдвиг составит около 180 мрад при скорости вращения Земли, что можно измерить интерферометрическим методом. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы такого класса точности в настоящее время используются в инерциальных навигационных системах на множестве объектов, включая новейшие авиалайнеры Airbus и Boeing [15].

Надежный гироскоп должен обеспечивать высокую чувствительность и низкие погрешности измерения. Сдвиги фазы, не связанные с вращением, приводят к появлению систематической погрешности в измеряемой угловой скорости. Таким образом, курс, рассчитанный навигационной системой, со временем начинает отходить от истинного курса. Например, изменения температуры приводят к сдвигам фазы за счет механических деформаций или непосредственного изменения коэффициента преломления в гироскопе. Ускорения могут искажать форму чувствительного элемента. Посторонние магнитные поля могут влиять на поляризацию распространяющегося света. Соответственно, истинный показатель качества шумовой характеристики оптического гироскопа – стабильность смещения нуля (а не его амплитуда). К сожалению, достигнутая на данный момент стабильность смещения нуля не позволяет сделать инерциальные навигационные системы абсолютно независимыми от GPS-коррекций. Ошибка местоположения всего через час полета авиалайнера, оснащенного оптическими инерциальными датчиками, составит несколько километров [16], а лучшие волоконно-оптические гироскопы обеспечивают определение положения с погрешностью несколько километров за месяц. Мини-

мальная измеряемая скорость вращения должна уменьшиться на три порядка, чтобы ошибка местоположения по прошествии часа была в пределах нескольких метров. Это задача, которую призваны решить будущие инерциальные датчики.

4. От света к материи: эффект Саньяка в атомных интерферометрах

В течение целого столетия квантовая физика не переставала открывать удивительные, интригующие и иногда просто невероятные явления. Квантовая физика, в частности, позволяет примирить теории волновой и корпускулярной природы света, которые, однозначно противореча друг другу в традиционной физике, вызвали одну из главных научных дискуссий в конце XIX века. С 1924 года, когда Луи де Бройль обобщил для материальных частиц корпускулярно-волновой дуализм, открытый Планком и Эйнштейном для фотонов, стало возможно определять длину волны материи – длину волны де Бройля $\lambda_{dB} = h/p$, связанную с импульсом частицы $p = mv$. Первые эксперименты по дифракции волн материи – наблюдение дифракции электронов на поверхностной решетке металлического кристалла, дифракция луча гелиевых атомов на поверхности кристалла NaCl или, позже, дифракция нейтронов – открыли дорогу для оптики и интерферометрии с волнами материи, но и выявили две серьезные проблемы. С одной стороны, у большинства волн материи длина волны гораздо меньше нанометра – в тысячи раз меньше, чем у видимого света, поэтому наблюдение волновых эффектов представляет значительную трудность. С другой стороны, для волн материи не существует естественного зеркала или светоделителя. Поэтому в течение долгого времени только волны материи, состоящие из элементарных частиц – нейтронов или электронов, – удавалось «заставить» проявить волновые характеристики вследствие их малой массы и соответственно большой длины волны де Бройля. Дифракция от трех тонких металлических кристаллов позволила создать электронный интерферометр Маха – Цендера. В 1974 г. Х. Раух и его сотрудники создали первый «идеальный кристаллический нейтронный интерферометр» с использованием трех решеток, вырезанных на одном кремниевом кристалле.

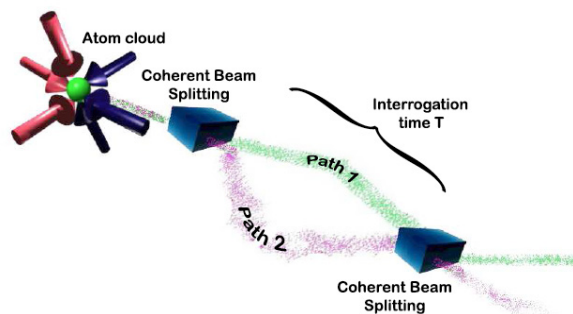


Рис. 3. Принцип работы атомного интерферометра

Сверху вниз: ансамбль атомов – когерентное расщепление луча – пути 1, 2 – время опроса T

Исходный атомный волновой пакет расщепляется на две части первым светоделителем (рис. 3). После этого волновые пакеты свободно распространяются по двум разным траекториям в течение периода T , за которое они накапливают разные фазы. Затем на волновые пакеты подается последний им-

пульс для модулирования количества атомов на каждом выходе в соответствии с разностью фаз.

На рис. 4, а показан первый гравиметр на основе атомного источника, разработанный группой С. Чу в Стэнфорде. На рис. 4, б приведены вариации силы тяжести, записанные за 2 дня. Точность прибора позволяет определить приливные эффекты (ocean loading effects). На рис. 4, в показан 6-осный инерциальный датчик (Парижской обсерватории и Института оптики): множества холодные атомы запускаются по параболической траектории и взаимодействуют с лазерами в верхней части параболы. Четыре конфигурации интерферометров (рис. 4, г) обеспечивают измерение трех компонент вращения и трех компонент ускорения.

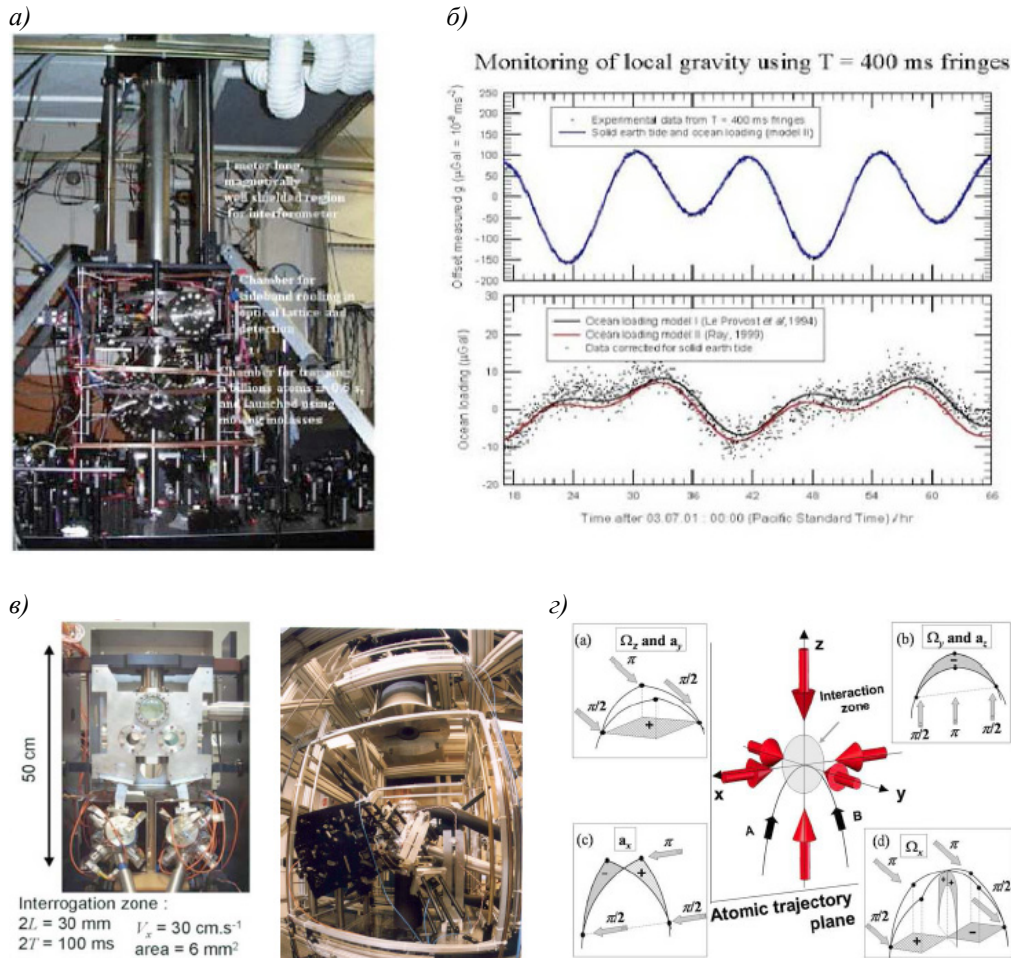


Рис. 4. Первый гравиметр на основе атомного источника

В начале 1990-х годов физики научились работать с атомными волнами де Бройля, и возникло направление атомной оптики. Появилась возможность отклонять волны материи с помощью решеток, выполненных методом микрообработки, или световых решеток либо создавать атомные зеркала с помощью затухающих световых волн в виде высокоотражающего покрытия на стеклянной поверхности (аналогично высокоотражающим диэлектрическим покрыти-

ям в оптике). С помощью таких атомных оптических элементов можно наблюдать явление интерференции атомной волны де Бройля в так называемых атомных интерферометрах, которые могут успешно использоваться в качестве приборов для высокоточных физических или инерциальных измерений. Наконец, возможность захватить и лишить подвижности частицы в ловушках [17], где скорость атомов составляет несколько миллиметров в секунду (т.е. температура порядка миллионной доли градуса выше абсолютного нуля) или даже меньше (сотни нанокельвинов, при которых квантовое поведение атомов напрямую наблюдаемо [18]), позволяет достичь чрезвычайно высокой чувствительности, а также уменьшить сложность, используя, например, атомные чипы.

В чем секрет такой эффективности атомной интерферометрии? В световом интерферометре [19] электромагнитные волны движутся со скоростью света, т.е. очень быстро. В атомном интерферометре атомные волны, движущиеся с гораздо меньшей скоростью, имея значительно более длинное время опроса. Таким образом, атомные интерферометры более чувствительны к среде, чем оптические: разница составляет до 10^{11} раз для такой же площади интерферометра и отношения сигнал/шум. Такую чувствительность можно использовать для прецизионных измерений: влияния на атомы электрических и магнитных полей, массы атома (для проверки некоторых фундаментальных законов физики), эффектов декогерентности и столкновения (коэффициент преломления для атомных волн), а также инерциальных эффектов, например гравитационного ускорения (возможно применение для поиска нефти и полезных ископаемых), вращения или ускорения, которому подвергается интерферометр (который тогда становится инерциальным датчиком). Помимо применения в навигации такую чувствительность к инерциальным эффектам можно использовать для проверки фундаментальных законов физики также в космосе, где потенциал этой технологии раскроется полностью.

Как объяснить чувствительность атомных интерферометров к вращениям или ускорениям? «Классические» доводы позволяют раскрыть влияние таких возмущений. Когда на атомы действуют ускорение или вращение вдоль их траектории, скорость частиц вдоль этой траектории меняется. Изменение скорости атомов приводит к изменению атомной длины волны де Бройля, что приводит к разности фаз между двумя плечами интерферометра и сдвиг интерференционной картины каждого выходного порта. В 1991 г. атомные интерференционные методы были использованы в контрольно-проверочном эксперименте для измерения вращений и ускорений; в последующие годы для исследования этого нового типа инерциальных датчиков было проведено множество теоретических и экспериментальных работ. Некоторые из последних работ показали, что вращения и ускорения можно отслеживать с исключительно высокой точностью и чувствительностью путем точного измерения фазовых сдвигов при распространении волн де Бройля в конфигурации Маха – Цендера с использованием трех импульсов, выступающих в качестве входного светоделиителя, зеркала и выходного светоделиителя.

Если три световых импульса разнесены в пространстве с взаимной ориентацией $\mathbf{k}$ (обычно, если атомная скорость $\mathbf{v}$ перпендикулярна направлению лазерных лучей $\mathbf{k}$), интерферометр чувствителен к вращениям так же, как в геометрии Саньяка для световых интерферометров. Ясно, что для петли Саньяка, охватывающей площадь $A = \mathbf{k} \mathbf{v} T^2$, вращение Ω производит фазовый сдвиг

$$\Delta\phi_{\text{rot}} = \frac{4\pi}{\lambda v_L} \Omega \cdot A.$$

Здесь мы получаем формулу Саньяка, вытекающую из факта, что время, за которое волна материи проходит путь 1 или 2 (см. рис. 3), меняется вследствие вращения. Гироскопы, построенные по этому принципу, в лабораторных условиях демонстрируют результаты, успешно выдерживающие сравнение с современными гироскопами: самые лучшие атомные гиromетры способны измерять вращение до 6×10^{-10} рад/с и интегрировать данные за более чем 1000 с при полном отсутствии дрейфа.

Если платформа на которой происходит распространение лазерных лучей ускоряется или если атомы подвергаются гравитационному ускорению, фазовый сдвиг содержит члены, связанные с ускорением: $\Delta\phi_{\text{acc}} = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{g} T^2$.

В стационарном интерферометре с вертикально направленными лазерными лучами фазовый сдвиг измеряет ускорение вследствие силы тяжести g . Следует отметить, что атомный интерферометрический гравиметр, и традиционный гравиметр с уголкового отражателем обеспечивают согласие результатов на уровне 10^{-9} . Такой гравиметр используется для измерения силы тяжести с высокой точностью в ваттовых весах, которые будут применяться для определения килограмма.

В силу стабильности выходного сигнала пара таких импульсных световых акселерометров хорошо подходит для измерения гравитационного градиента силы тяжести. Основная идея состоит в том, чтобы одновременно создать два пространственно разнесенных интерферометра, использующие общий лазерный луч. В этом случае технический шум ускорения измерительной платформы является источником синфазного шума, который приводит к почти идентичным фазовым сдвигам на акселерометрах. С другой стороны, наличие гравитационного градиента вдоль оси измерения приводит к остаточному дифференциальному фазовому сдвигу. Такая конфигурация использовалась для измерения гравитационного градиента Земли, а также гравитационного градиента, связанного с распределениями масс. Лабораторные гравитационные градиометры достигают уровня разрешения более 1 Е (где 1 Е = 10^{-9} с⁻²) и будут далее использоваться для подземных исследований [20].

В общем случае в выходных данных датчиков присутствуют компоненты вращения и ускорения. В навигационных приложениях отклики на вращения и ускорения должны быть изолированы друг от друга. На практике это достигается применением нескольких источников атомов и осей распространения лазерных лучей. Интересно отметить, что один прибор, таким образом, может одновременно выдавать данные о вращении и ускорении. Для навигационных приложений, где требуется одновременная выдача скорости вращения и ускорения по трем взаимно ортогональным осям, это большое преимущество.

5. Эффект Саньяка, 100 лет спустя

Эффект Саньяка породил споры о его измерении и интерпретации [10], идущие уже в течение века, и привел к многим значимым открытиям в области инерциальных измерений (измерений вращения).

Благодаря прорыву, вызванному открытием лазеров, а также идее использования оптоволокна для считывания и измерения, эффект Саньяка в течение уже 50 лет является основой разработки новейших инерциальных датчиков с

широчайшей областью применения – от прецизионной навигации до определения колебаний Земли с помощью гигантского кольцевого лазерного гироскопа [21].



Жорж Саньяк (род. 14 октября 1869) в Ecole Normale Supérieure, Париж, 1890 г.

Сегодня, через сто лет после первого эксперимента Саньяка, новый прорыв приводит к разработке интерферометров на волнах материи для определения инерциальных эффектов [22] и к промышленному внедрению первых атомных инерциальных датчиков [23].

Что будет дальше, пока еще трудно предсказать, но нет никаких сомнений в том, что сам Жорж Саньяк был бы крайне удивлен тому, что его пионерский эксперимент, изначально задуманный для проверки теории относительности, теперь повторяется для определения релятивистского эффекта, от увлечения инерциальных систем координат [24] до проверки пост-ньютоновских теорий [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. **R. Anderson, H.R. Bilger and G.E. Stedman**, Sagnac effect: a century of Earth-rotated interferometers, in *Am. J. Phys.* 62, 11, 975-985, 5 (1994).
2. **G. Sagnac**, L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme, in *C.R. Acad. Sci. (Paris)* 157, 708-710 (1913) (содержит полный список предыдущих предложений).
3. **G. Sagnac**, Effect tourbillonnaire optique. La circulation de l'éther lumineux dans un interférographe tournant, in *J. Phys. Radium Ser. 5*, 4, 177-195 (1914).
4. **A.A. Michelson**, Relative motion of earth and aether, in *Philos. Mag.* 8, 716-719 (1904).
5. **F. Harress**, thesis, Jena (unpublished), accounted in O. Knopf, 1. Die versuche von F. Harress über die geschwindigkeit des liches in bewegten körpen, in *Ann. Phys. Vierte Folge* 62, 389-447 (1920).
6. **H. Fizeau**, Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, in *Comptes Rendus* 33: 349-355 (1851).
7. **A.A. Michelson, H.G. Gale and F. Person**, The effect of the Earth's rotation on the velocity of light, in *Astrophys. J.* 61, 137-145 (1925).
8. **W. Macek and D. Davis**, Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers, in *Applied Physics Letters*, 2 (3), p. 67 (1963).
9. **V. Vali and R. Shorthill**, Passive Ring Interferometer, in *Applied Optics*, 15, p. 1099 (1976).
10. **G. E. Stedman**, Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics, in *Rep. Prog. Phys.* 60, 615 (1997).
11. **E. J. Post**, in *Rev. Mod. Phys.* 39, 475 (1967).
12. **W. W. Chow et al.**, in *Rev. Mod. Phys.* 57, 61 (1985).
13. **F. Riehle, T. Kisters, A. Witte, and J. Helmcke**, *Phys. Rev. Lett.* 67, 177(1991).
14. **T. L. Gustavson, P. Bouyer, and M. A. Kasevich**, *Phys. Rev. Lett.* 78, 2046 (1997).
15. **G. A. Pavlath**, Northrop Grumman, Fiber-optic gyros: The vision realized, Report No. 24235, in http://www.es.northropgrumman.com/by_division/navigationssystem/whitepapers/assets/Fiber-Optic_Gyros.pdf.
16. **Northrop Grumman**, LN-251 Embedded INS/GPS System, Report No. 22940/02-06/2000/Crawford in http://www.es.northropgrumman.com/solutions/ln251/assets/LN-251_Embedded_INS-GPS_System.pdf.
17. **C. Cohen-Tannoudji, W.B. Phillips et S. Chu**, Nobel 1998; H.J. Metcalf and P. Van Der Straten. *Laser Cooling and Trapping* (Springer Verlag, Berlin 1999).
18. **C. Weiman, E. Cornell and W. Ketterle**, Nobel 2001; When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser. in: *Les Prix Nobel 2001* (The Nobel Foundation, Stockholm, 2002), pp. 118-154. reprinted in: *ChemPhysChem* 3, 736-753 (2002). *Rev. Mod. Phys.*, 74, 1131-1151 (2002).

19. **See for example** the special issue of Appl. Phys., B 54 (1992) or P.R. Berman (ed.). Atom Interferometry (Academic Press, 1997).
20. **<https://sites.google.com/site/migaproject/project-definition>**
21. **O. Graydon**, Sensing: Giant laser gyroscope detects Earth's wobble in Nature Photonics 6, 12 (2012).
22. **R. Geiger, V. Ménotet, G. Stern, N. Zahzam, P. Cheinet, B. Battelier, A. Villing, F. Moron, M. Lours, Y. Bidel, A. Bresson, A. Landragin & P. Bouyer**, Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry, in Nature Communications 2, Article number: 474 doi:10.1038/ncomms1479.
23. **www.muquans.com**
24. **http://esamultimedia.esa.int/docs/HYPER_Report.pdf**
25. **F. Bosi et al.**, Measuring Gravito-magnetic Effects by Multi Ring-Laser Gyroscope, in Phys. Rev. D 84, 122002 (2011).

Abstract. G. Sagnac published in 1913 the first experimental observation of the effect of a rotation on the fringe phase shift in an optical interferometer. His discovery has stimulated a century long debate on its meaning and interpretation, and reveals nowadays, 100 years later, that his observations are universal and exist for any kind of waves, from optical (or electromagnetic) waves to the most recently used matter-waves. With the breakthrough in the discovery of lasers, and lately the discovery of ultra cold atoms, rotation sensors using the Sagnac effect are nowadays reaching the best levels in precision inertial measurement and are currently at the heart of the navigation systems, and could even be used in the future to study precisely the rotation of the earth or to set the frontiers of general relativity.

Key words: Sagnac Effect, Inertial Sensor, Matter Waves, Cold Atoms, Laser Gyro