

# АНИЗОТРОПИЯ ПРОСТРАНСТВА СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

В. О. Гладышев, Т. М. Гладышева, М. Дашко, Г. В. Подгузов,  
Н. Трофимов, Е. А. Шарандин

*Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия*  
*vgladyshev@mail.ru*

В работе обсуждается анизотропия, возникающая в движущихся средах. В таких средах скорость распространения света  $c$  нелинейно зависит от векторного поля скоростей движения среды. В результате оптическая анизотропия может зависеть от ориентации поля скоростей  $\vec{V}_2$  движущейся среды относительно вектора скорости  $\vec{V}$  движения интерферометра в пространстве независимых физических переменных. На основании решения дисперсионного уравнения сделан вывод о возможности измерения угловых вариаций в смещении интерференционной картины, наблюдаемой в движущемся интерферометре. Показано, что амплитуда вариации пропорциональна скорости движения интерферометра  $\vec{V}$ , однако эффект угловой зависимости является эффектом более высокого порядка малости по сравнению с классическим эффектом увлечения света.

Происхождение оптической анизотропии в движущейся среде связано с анизотропными свойствами сил связывающих атомы решетки среды и имеет локальный характер. В случае отличия геометрии пространства-времени от геометрии Минковского, нелинейные процессы взаимодействия электромагнитного излучения с движущейся средой будут зависеть от пространственной ориентации. В результате должны возникнуть дополнительные угловые вариации в наблюдаемой оптической анизотропии.

В работе обсуждаются результаты экспериментов по наблюдению оптической анизотропии света во вращающейся оптически прозрачной среде, а также пространственно-временные вариации в оптической анизотропии. В интерферометре свет от лазера с длиной волны  $\lambda = 0,632991 \pm 1 \times 10^{-7}$  мкм проходил через вращающийся оптический диск диаметром  $D = 45$  мм, длина пути одного луча в среде в проекции на плоскую поверхность диска  $l = 30$  мм, показатель преломления стекла  $n = 1,78$ , толщина  $d = 20$  мм, угол падения луча на плоскую поверхность диска  $\vartheta_0 = 53,5^\circ$ . Частота вращения диска изменялась в пределах от 100 до 380 Гц.

Результаты экспериментов подтвердили в первом приближении классическую линейную зависимость сдвига интерференционных полос от скорости движения среды.

Достигнутая в экспериментах точность позволяла зарегистрировать угловые вариации  $\delta\Delta$  в положении интерференционных полос при скоростях движения интерферометра  $\vec{V}$  на два порядка больших, чем галактическая скорость Земли. В проведенных экспериментах пространственная анизотропия сигнала не была обнаружена, что позволяет наложить ограничение на максимальную скорость движения интерферометра  $V < 0,1 c$ .

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант №МД-170.2003.08).

## Введение

Интерес к экспериментальным попыткам обнаружения анизотропии пространства-времени связан с известными результатами по измерению анизотропии реликтового микроволнового излучения [1]. Однако, наиболее ранние попытки обнаружить анизотропию пространства предпринимались не в радиоастрономии, а в оптике. К числу

этих попыток относятся классические эксперименты Хека [2], Майкельсона-Морли [3] и более современные опыты Бриллета и Холла [4]. Анализ измерительных процедур, реализованных в этих экспериментах, позволяет объяснить отсутствие проявления анизотропии методами современной оптики движущихся сред и предложить более чувствительные интерферометрические схемы.

Инвариантность уравнений электродинамики относительно преобразований Лоренца или Меллера базируется на инвариантных соотношениях для частных бесконечно малых приращений пространственной и временной переменных [5]. В работах [6], [7] был предложен метод построения пространственно-временных преобразований, обеспечивающий инвариантные соотношения для частных дифференциалов независимых переменных пространства, времени и одновременно удовлетворяющий Лоренц-инвариантности. На основании полученных преобразований было предложено разделить измерительные процедуры на два основных типа.

К первому типу относятся измерения физических величин, соответствующих полным приращениям пространственной и временной переменных. К экспериментам данного типа относятся все эксперименты, проводимые в одной инерциальной системе отсчета, в которой все элементы измерительного канала выглядят покоящимися для наблюдателя, например, эксперименты Майкельсона-Морли и Бриллета, Холла.

Второй тип реализует измерения неполных (частных) приращений переменных. В последнем случае сравниваются собственные значения физической величины, например, времени, измеренные в различных инерциальных системах отсчета (ИСО). Примером данного типа измерений является опыт Росси и Холла, в котором сравнивалось время жизни быстрых  $\pi$ -мезонов, рожденных в верхних слоях атмосферы, и  $\pi$ -мезонов в лабораторной системе отсчета [8].

Также существуют измерительные процедуры промежуточного типа, в которых существуют отдельные движущиеся элементы, с которыми взаимодействует электромагнитная волна. К числу данных процедур относятся интерферометры Хека и Физо [9]. В этих интерферометрах искусственно создается поле скоростей движущейся среды, что приводит к возникновению оптической анизотропии. Кинематические эффекты сокращения длины, изменения углов преломления и отражения, эффект Доплера и явление дисперсии обычно компенсируют наблюдаемое проявление инвариантных соотношений для частных дифференциалов физических переменных. Однако, наличие оптической анизотропии может привести к нарушению полной компенсации различных физических явлений. Действительно, распространение света в среде с трехмерным полем скоростей может быть описано на основе решения дисперсионного уравнения, в которое скорость среды входит нелинейным образом [10], [11]. В результате оптическая анизотропия становится дипольно зависящей от ориентации движущейся среды к вектору скорости движения лабораторной ИСО, в которой покоятся источник и приемник излучения. Другими словами, если инвариантные основания общей инвариантности имеют наблюдаемые следствия, то они должны проявиться в оптике движущихся тел в задачах, в которых источник излучения, приемник, границы раздела сред и сами среды движутся с различными скоростями.

Вместе с тем, представляет интерес происхождение оптической анизотропии, возникающей в движущихся средах. В таких средах скорость распространения света зависит от скорости и направления движения среды. Возникновение оптической анизотропии связано с неодинаковостью в различных направлениях сил связывающих атомы решетки среды и имеет локальный характер, т.е. возникает на масштабах малых по сравнению с длиной волны света. Макроскопическое проявление анизотропии является результатом интегрального характера взаимодействия электромагнитного излучения с

веществом. Поэтому можно предположить, что если геометрия пространства-времени отличается от геометрии Минковского, нелинейные процессы взаимодействия электромагнитного излучения с движущейся средой будут зависеть от пространственной ориентации. В результате должны возникнуть дополнительные угловые вариации в наблюдаемой оптической анизотропии, которая может быть измерена интерферометрическими методами.

Таким образом, неинвариантные свойства пространственно-временного континуума могут быть обнаружены в экспериментах оптики движущихся сред, когда не существует одной ИСО, в которой все элементы интерферометра покоятся. Это условие реализуется в интерферометрах Хека и Физо, в которых свет распространяется в движущейся среде. В случае, когда интерферометры движутся относительно выбранной ИСО, поворот может приводить к вариации положения интерференционных полос. Амплитуда вариации пропорциональна скорости движения интерферометра, однако эффект угловой зависимости является эффектом более высокого порядка малости по сравнению с классическим эффектом увлечения. Поэтому данное явление не могло быть обнаружено в ранних экспериментах. Причем вариация смещения полос должна быть больше в однопроходной схеме интерферометра Физо (рис. 1) по сравнению с двухпроходной.

**1. Оценка величины смещения полос в зависимости от ориентации поля скоростей движущейся среды относительно вектора скорости движения интерферометра**

Рассмотрим однопроходную схему интерферометра Физо в ИСО, где интерферометр покоится, т. е. при  $\beta = V/c = 0$ ,  $c$  – скорость света в вакууме. Скорости воды в ИСО интерферометра соответствует величина  $\vec{V}_{2n}$ ,  $\beta_{2n} = \pm V_{2n}/c$ . Нормальному падению лучей соответствуют инварианты  $I_t = k_t = k_0 \sin \vartheta_0 = 0$ ,  $-I_1 = \omega_0(1 - \beta) = \omega_0$  [10].

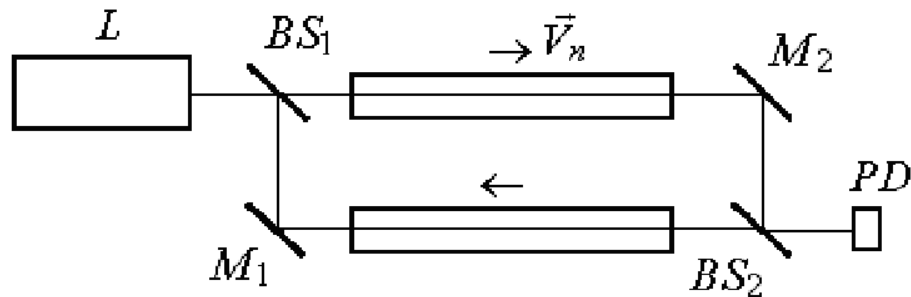


Рис. 1: Двухлучевой однопроходный интерферометр Физо

Тогда волновому вектору преломленного луча соответствует

$$k_{2n} = \frac{\omega_0 - \beta_{2n}(n_2^2 - 1) + n_2(1 - \beta_{2n}^2)}{c(1 - n_2^2\beta_{2n}^2)}. \tag{1}$$

Разность хода лучей будет зависеть от времени распространения света в двух плечах интерферометра

$$\Delta_0 = \frac{lc}{\lambda\omega_0}(k_{2n,2} - k_{2n,1}) = \frac{2l}{\lambda} \frac{\beta_{2n}(n_2^2 - 1)}{1 - n_2^2\beta_{2n}^2}. \tag{2}$$

В опыте Физо [9] использовалась двухпроходная схема, поэтому расчетная величина смещения полос равна  $\Delta = 2\Delta_0$ . Для параметров интерферометра  $l = 1,4875$  м,  $V_{2n} = 7,059$  м/с,  $n_2 \approx 1,33$  для солнечного света с  $\lambda = 0,526$  мкм, получаем  $\Delta = 0,205$ . В опыте Физо наблюдалось смещение  $\Delta_y = 0,23$ , что объясняется тем, что скорость воды в центре трубки была выше, чем использованное в расчетах среднее значение по сечению  $V_{2n}$ . Квадратичный член  $n_2^2\beta_{2n}^2 \approx 10^{-15}$  очень мал и не оказывает влияния на результаты. Заметим, что использование гелий-неонового лазера с  $\lambda = 0,632991 \pm 1 \times 10^{-7}$  мкм уменьшает расчетную величину до  $\Delta = 0,170$ . Использование однопроходной схемы (рис. 1) уменьшает это значение еще в два раза, однако изменение направления движения среды на противоположное позволит увеличить диапазон смещения полос также в два раза. Поэтому в качестве первой оценки ожидаемого смещения полос можно использовать значение  $\Delta_0 = 0,170$ .

Рассмотрим теперь интерферометр в ИСО, относительно которой он имеет продольную скорость  $\pm V$ . Тогда  $-I_1 = \omega_1(1 - \beta)$ , здесь  $\omega_1$  – частота излучателя в ИСО наблюдателя. Выражение (1) примет вид

$$k_{2n} = \frac{\omega_1}{c}(1 - \beta) \frac{\beta + (n_2^2 - 1) \frac{\beta - \beta_{2n}}{1 - \beta_{2n}^2} + n_2}{1 - \beta^2 - (n_2^2 - 1) \frac{(\beta - \beta_{2n})^2}{1 - \beta_{2n}^2}}. \quad (3)$$

Здесь  $V_{2n}$  – скорость в ИСО, относительно которой интерферометр движется. В ИСО интерферометра эта скорость будет равна  $V'_{2n}$ , причем

$$\beta_{2n} = \frac{\beta + \beta'_{2n}}{1 + \beta\beta'_{2n}}. \quad (4)$$

Подставив в (3), получим для двух лучей

$$k_{2n,1} = \frac{\omega_1}{c} \frac{\beta - \beta'_{2n} + n_2^2\beta'_{2n}(1 - \beta\beta'_{2n}) + n_2(1 - \beta_{2n}'^2)}{(1 + \beta)(1 - n_2^2\beta_{2n}'^2)}, \quad (5)$$

$$k_{2n,2} = \frac{\omega_1}{c} \frac{\beta + \beta'_{2n} - n_2^2\beta'_{2n}(1 + \beta\beta'_{2n}) + n_2(1 - \beta_{2n}'^2)}{(1 + \beta)(1 - n_2^2\beta_{2n}'^2)}. \quad (6)$$

Разность хода рассчитывается аналогично (2), однако вследствие эффекта Доплера длина волны здесь равна  $\lambda_1 = \lambda_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$ . Учтем также кинематический сдвиг интерферометра, в результате чего путь в среде увеличивается  $l = l_1/(1 - \beta)$ , а также эффект сокращения длины  $l_1 = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ . Результирующий сдвиг интерференционной картины (ИК) равен

$$\Delta = \frac{2l_0}{\lambda_0} \frac{\beta'_{2n}(n_2^2 - 1)}{(1 - \beta)(1 - n_2^2\beta_{2n}'^2)}. \quad (7)$$

Разность в показаниях интерферометров при  $\beta = 0$  и  $\pm\beta \neq 0$  будет равна

$$\Delta \pm \Delta_0 \approx \pm\beta\Delta_0. \quad (8)$$

Таким образом, максимальные вариации смещения полос в интерферометре, движущемся относительно Солнца с  $\beta \cong 10^{-4}$ , при повороте интерферометра могли бы иметь порядок величины  $\delta\Delta = 2\beta\Delta_0 = 3,4 \times 10^{-5}$  полосы без учета влияния дисперсии в движущейся среде.

Для оценки влияния дисперсии, возникающей вследствие изменения частоты электромагнитной волны на нормальном разрыве скорости, будем использовать экспериментально проверенную зависимость показателя преломления стекла от длины волны излучения.

Выражения (5), (6) примут вид

$$k_{2n,1} = k_{01} \frac{\beta - \beta'_{2n} + n_{2,1}^2 \beta'_{2n} (1 - \beta \beta'_{2n}) + n_{2,1} (1 - \beta_{2n}'^2)}{(1 + \beta) (1 - n_{2,1}^2 \beta_{2n}'^2)}, \quad (9)$$

$$k_{2n,2} = k_{01} \frac{\beta + \beta'_{2n} - n_{2,2}^2 \beta'_{2n} (1 + \beta \beta'_{2n}) + n_{2,2} (1 - \beta_{2n}'^2)}{(1 + \beta) (1 - n_{2,2}^2 \beta_{2n}'^2)}. \quad (10)$$

Волновые векторы находятся методом последовательных приближений. Сначала в (9), (10) подставляют показатель преломления, измеренный в ИСО, где среда покоится. При этом берут частоту падающего излучения. Затем рассчитываются соответствующие длины волн в движущейся среде.

$$\lambda_{2,1} = \frac{2\pi c}{k_{2n,1} v + \omega_1 (1 - \beta)}, \quad (11)$$

$$\lambda_{2,2} = \frac{2\pi c}{k_{2n,2} v + \omega_1 (1 - \beta)}. \quad (12)$$

Для каждой длины волны находят показатель преломления, например, для  $n_{1,1}$  будет соответствовать выражение

$$n_{2,1}^2 = A_1 + A_2 \lambda_{2,1}^2 + A_3 \lambda_{2,1}^{-2} + A_4 \lambda_{2,1}^{-4} + A_5 \lambda_{2,1}^{-6} + A_6 \lambda_{2,1}^{-8}. \quad (13)$$

Коэффициенты  $A_i$  для выбранного оптического материала являются справочными.

Аналогично рассчитывается  $n_{2,2}$ . Затем найденные показатели преломления подставляют вторично в (9), (10) и повторно рассчитывают волновые векторы. При необходимости, для повышения точности расчетов процедуру можно повторить.

Результаты численных экспериментов представлены в таблице 1. Общими для всех схем были параметры  $l = 1,4875$  м,  $V_{2n} = 7,059$  м/с,  $\beta = (V_z + V_s)/c$ , здесь  $V_z$  и  $V_s$  – суточная и орбитальная скорости Земли. Для воды брался показатель  $n_2 = 1,3314$ . Таким образом, дисперсия воды не учитывалась.

Так как в современном эксперименте целесообразно исключить влияние неоднородности движения воды, проводились сравнительные расчеты для воды и материала оптического стекла. Там где использовалось стекло ЛК5, показатель преломления рассчитывался по формуле (13) для каждого луча в зависимости от направления движения и, соответственно, частоты падающего света. В среднем он имел значение  $n_2 = 1,476615$ . Бездисперсионное (БД) приближение означало, что преломление на движущейся границе раздела сред рассчитывалось для показателя преломления на частоте падающего света. В действительности же после преломления на движущейся границе раздела сред частота света изменялась, что приводит к необходимости пересчета показателя преломления движущейся среды. Результаты численных расчетов с учетом дисперсии на границе раздела сред приведены в третьей строке таблицы. Значения  $\Delta$  и  $\Delta'$  приведены по модулю.

Таблица 1.

№	Длина волны, оптический материал	Смещение ИК		$\Delta' - \Delta$	$\Delta' + \Delta$
		$\beta > 0, \Delta$	$\beta < 0, \Delta'$		
1.	$\lambda = 0,526$ мкм, БД-приближение	$1,0283246 \times 10^{-1}$	$1,0288774 \times 10^{-1}$	$5,53 \times 10^{-5}$	$2,057202 \times 10^{-1}$
2.	$\lambda = 0,6328$ мкм, ЛК5, БД-приближение	$1,3054644 \times 10^{-1}$	$1,3062296 \times 10^{-1}$	$7,65 \times 10^{-5}$	$2,611694 \times 10^{-1}$
3.	$\lambda = 0,6328$ мкм, ЛК5 с дисперсией	$1,3056019 \times 10^{-1}$	$1,3060920 \times 10^{-1}$	$4,90 \times 10^{-5}$	$2,611694 \times 10^{-1}$

В первую очередь нужно отметить, что при  $\beta = 0$  для всех схем сумма  $\Delta' + \Delta$  равнялась приведенной в соответствующей графе таблицы величине. Из этого следует, что суммарное смещение ИК при смене направления движения среды не зависит от того, движется интерферометр, или нет. При этом разность  $\Delta' - \Delta$  была равна нулю также во всех случаях.

Из сравнения приведенных в таблице значений  $\Delta$  и  $\Delta'$  можно заметить, что для выбранного знака  $\beta > 0$  или  $\beta < 0$  величины  $\Delta$  и  $\Delta'$  несколько отличались друг от друга.

Для первой схемы разность  $\delta\Delta = \Delta' - \Delta = 5,53 \times 10^{-5}$  несколько больше первой оценки  $\delta\Delta = 2\beta\Delta_0 = 3,4 \times 10^{-5}$  и на три порядка меньше той погрешности, которая была достигнута в экспериментах Физо. Этот результат был получен без учета дисперсии в движущейся воде. Так как для воды трудно учесть дисперсию, для численного эксперимента было выбран легкий крон ЛК5, для которого коэффициенты дисперсии определены экспериментально.

Во второй строчке таблицы приведены результаты расчета без учета дисперсии в БД-приближении. Можно заметить, что разность  $\Delta' - \Delta$  возросла вследствие увеличения коэффициента  $\kappa_2 = n_2^2 - 1$  для стекла.

В третьей строке приведены результаты расчета с дисперсией. Дисперсия в материале движущегося стекла уменьшила разность  $\Delta' - \Delta$  на 36%. Следует отметить, что влияние дисперсии из-за движения границы раздела сред значительно влияет на результат. Заметим, что оценка влияния дисперсии проводилась по данным, полученным в неподвижном стекле. Кроме того, коэффициенты дисперсии  $A_i$  обеспечивают точность расчетов по формуле (18) с погрешностью  $\pm 1 \times 10^{-5}$ .

В двухпроходных схемах естественно ожидать уменьшения  $\Delta' - \Delta$  вследствие компенсации эффектов увлечения света в движущейся среде противоположного направления. Аналогичные расчеты для двухпроходных схем опубликованы в [12].

В целом, можно заключить, что вариации  $\delta\Delta$  весьма малы, максимальное значение  $\delta\Delta$  равно  $4,9 \times 10^{-5}$ . Вместе с тем, если использовать в расчетах скорость движения интерферометра в Галактике  $V = 250...300$  км/с ( $\beta \approx 10^{-3}$ ), величина  $\delta\Delta$  возрастает на порядок. Данная величина смещения полос может быть измерена в современных экспериментах. Кроме того, схема проведения эксперимента будет отличаться от приведенной на рис. 1, что при определенных условиях может привести к увеличению измеряемого эффекта.

Можно заметить, что вариации  $\delta\Delta$  зависят от показателя преломления стекла  $n_2$ , длины  $l$  скорости  $\vec{V}_{2n}$  и  $\vec{\beta}$ . Проведение эксперимента с изменением ориентации  $\vec{V}_{2n}$  и  $\vec{\beta}$  позволило бы выяснить существует ли зависимость  $\Delta' - \Delta$  от угла поворота ин-

терферометра. В случае нулевого результата можно было бы наложить границу на максимальную величину  $\beta$ .

С точки зрения эксперимента, схема на рис. 1 не является оптимальной, т. к. является нестабильной к различным возмущающим факторам. Отличительной особенностью интересующих нас интерферометров является наличие движущейся среды, что должно повлечь за собой возникновение вибраций внутри интерферометра. Однако, интерферометр может быть построен по разностной схеме, когда смещение любого элемента приводит к одинаковому влиянию на каждый из интерферирующих лучей.

## 2. Первые результаты экспериментов по наблюдению угловых вариаций в оптической анизотропии света во вращающейся оптически прозрачной среде

В работе использовалась схема интерферометра, эквивалентная в первом приближении интерферометру Хека или интерферометру Физо [2], в которых трубка с водой заменена оптическим диском (рис. 2). Луч от лазера  $L$  разделяется светоделителем  $BS$  на два, которые после зеркал  $M_1$  и  $M_2$  проходят вращающийся оптический диск  $OD$  в противоположных направлениях. Вследствие вращения  $OD$  один из лучей получает положительный сдвиг фазы, другой – отрицательный. Затем лучи смешиваются на  $BS$  и после зеркала  $M_3$  и оптической системы  $OS$  попадают на фотодетектор  $PD$ . Изменение направления вращения  $OD$  приводит к изменению направления смещения полос на  $PD$ .

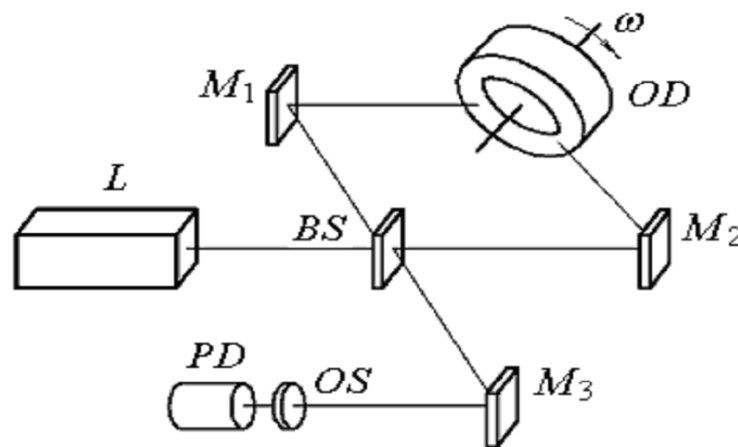


Рис. 2: Двухлучевой однопроходный интерферометр с вращающимся ОД

В экспериментах были реализованы следующие параметры: диаметр диска равнялся  $D = 45$  мм, длина пути одного луча в среде в проекции на плоскую поверхность диска  $l = 30$  мм, показатель преломления стекла ОД  $n = 1,78$ , толщина ОД  $d = 20$  мм, угол падения луча на плоскую поверхность диска  $\vartheta_0 = 53,5^\circ$ , длина волны лазера  $\lambda = 0,6329910 \pm 1 \times 10^{-7}$  мкм. Частота вращения диска изменялась в пределах от 100 до 380 Гц. Луч проходил ОД на расстоянии  $r = 0,0152$  м от оси вращения. Для данных параметров при частоте вращения  $\nu = 200$  Нз проекция скорости на волновой вектор равна  $V_{2n} = 19,1$  м/с. Ожидаемое смещение полос вследствие эффекта Физо равно  $\Delta'_0 = 1,33 \times 10^{-2}$ .

Однако теоретический анализ указывает на необходимость учета нарушения закона Снеллиуса вследствие наличия тангенциального разрыва скорости на границе раздела воздух-стекло.

Ранее были проведены эксперименты на интерферометре, схема которого близка двухпроходной схеме интерферометра Физо [14], [15]. В этих экспериментах было подтверждено, что дополнительное смещение полос вследствие поперечного эффекта Физо может составлять около 20% от основного смещения.

Вследствие поперечного увлечения света угол преломления рассчитывается по формуле

$$tg\vartheta'_2 = \frac{\sin\vartheta_0}{\sqrt{n^2 - \sin^2\vartheta_0} - (n^2 - 1)\beta_n}, \quad (14)$$

В нашем эксперименте  $\beta_n = 6,4 \times 10^{-8}$ , что определяет отклонение  $\vartheta'_2$  от  $\vartheta_2 = \arctg \frac{l}{3d}$  на уровне  $2 \times 10^{-6}$  градуса.

Дополнительное смещение интерференционной картины определяется по формуле

$$\Delta' = \frac{6d(n-1)}{\lambda} \left( \frac{1}{\cos\vartheta'_2} - \frac{1}{\cos\vartheta_2} \right) = 2,9 \times 10^{-3}. \quad (15)$$

Суммарное смещение полос вследствие продольного и поперечного эффекта Физо равно  $\Delta_\Sigma = \Delta'_0 + \Delta' = 1,62 \times 10^{-2}$  (без изменения направления вращения ОД). Следовательно, ожидаемая величина вариации полос при повороте интерферометра относительно вектора скорости Земли в Галактике равна  $\delta_0 \approx \beta\Delta_\Sigma \approx 1,62 \times 10^{-5}$ . Влияние дисперсии в материале может уменьшить эту величину до  $\delta\Delta = 4,7 \times 10^{-6}$ . Данная величина сдвига полос является весьма небольшой, однако может быть измерена.

Здесь следует обратить внимание на то, что оценки смещения интерференционных полос были выполнены в рамках электродинамики движущихся сред. Также были выполнены точные численные расчеты величины сдвига интерференционной картины в интерферометре, изменяющем свою пространственную ориентацию. Эти расчеты проводились поэлементно с учетом изменения углов падения, отражения, эффекта Доплера, сокращения размеров элементов вдоль направления движения, кинематических эффектов смещения и запаздывания лучей с учетом релятивистских членов и дисперсии в материале. Математическая модель, описывающая процессы распространения света в движущемся интерферометре, достаточно громоздка, но результаты расчетов дают смещение полос, величина которого по порядку величины равна приведенному значению в таблице 1.

Далее в работе представлены результаты экспериментов на новой схеме интерферометра с вращающимся оптическим диском (рис. 2).

Интерферометр был сконструирован на двух оптических платформах с пассивной системой вибростабилизации. На одной из платформ находился электродвигатель с ОД, на другой – остальная часть интерферометра. Обе платформы располагались на вращающемся основании. Для определения возможной зависимости сигнала от пространственной ориентации интерферометра были проведены измерения сигнала при повороте интерферометра на 360 градусов в прямом и обратном направлениях.

Свет переотражался на плоских поверхностях оптического диска. Интерференционное отражающее покрытие плоских зеркальных поверхностей диска было рассчитано на длину волны лазера.

Смещение интерференционной картины определялось по изменению времени следования интерференционных полос по апертуре фотодетектора (ФД). Метод измерений описан в работах [13], [14]. Метод пересчета интервала времени в смещение интерференционной картины осуществляется при помощи эллиптических интегралов второго рода и описан в [15]. Однако так как в течение всех измерений интерферометр настроен в одной и той же рабочей точке фазовой кривой смещение интерференционной картины (ИК) пропорционально времени следования полос в первом приближении.



В первой серии экспериментов интерферометр не был термостабилизирован. Однако за время проведения эксперимента изменение температуры окружающего воздуха изменялась в пределах, на который был рассчитан динамический диапазон лазера, равный  $5^{\circ}\text{C}$ .

В качестве измерительного фотодетектора был выбран фотодиод ФД256.

Время записи сигнала при одном угловом положении интерферометра – 2 сек. Частота вращения ОД была равна 180 Гц, что соответствовало 3600 замерам за время одного измерения.

Первичное преобразование сигналов осуществлялось аналого-цифровым преобразователем (АЦП) National Instruments PCI-6024 при входном разрешении 12 разрядов. На входы АЦП поступали сигналы от измерительного фотодиода, фотодиода для контроля мощности излучения лазера и термодатчика. Цифровая последовательность сигналов на частоте 200 кГц поступала в персональный компьютер и проходила дальнейшую обработку в среде LabVIEW.

Перед началом измерений интерферометр юстировался таким образом, чтобы за один оборот ОД по апертуре ФД проходили в горизонтальном направлении две или три интерференционные полосы: в первую половину периода в одном направлении, во вторую – в другом. Измеряемой величиной являлся  $\Delta t_y$  – интервал времени между моментами прохождения выбранной интерференционной полосой апертуры ФД. Так как эта величина прямо зависит от периода вращения ОД, ее нормировали на период  $T$ . Результаты измерений, выполненные 17 декабря 2005 г., и их сплайн-интерполяция представлены на рис. 3.

График состоит из двух ветвей, что соответствует прямому и обратному направлениям поворота. Измерения выполнялись при фиксированных ориентациях платформы с шагом  $\Delta\alpha = 22,5^{\circ}$  в лабораторной системе отсчета. Форма сигнала имеет минимум, который повторяется в прямом и обратном поворотах интерферометра. Относительная погрешность измерения  $\frac{\Delta t_y}{T}$  при фиксированной ориентации равнялась 0,55%. Время проведения замеров для построения одного графика равнялось 30 минутам, поэтому прямая и обратная ветви могут иметь горизонтальный сдвиг на  $1/48$  от периода. Влияние анизотропии могло проявиться в смещении сигнала при измерениях в различное время суток. Однако, повторные эксперименты, выполненные в другое время суток, дают близкую форму графиков с минимумом в центре. Это указывает на то, что форма сигнала имеет, по-всей видимости, в основном механическое происхождение и вызвана неидеальностью поворотной системы.

В следующей серии измерений шаг поворота интерферометра был уменьшен до  $\Delta\alpha = 15^{\circ}$ . Для повышения чистоты эксперимента интерферометр был помещен в кожух из оргстекла. Результаты эксперимента, выполненного 29 декабря 2005 г. в течении 50 минут, представлены на рис. 5. Из рис. следует, что общий вид угловой зависимости сохранился прежним, но появилась колебательная зависимость, повторяющаяся в прямом и обратном направлениях поворота интерферометра. Погрешность измерения  $\frac{\Delta t_y}{T}$  при фиксированной ориентации находится в пределах 0,75%.

Точность первых экспериментов была практически ограничена чувствительностью фотодетектора, частотой опроса и разрядностью АЦП. В связи с этим для проверки полученных результатов в эксперимент были внесены существенные изменения.

Интерферометр был помещен в кожух с активной системой термостабилизации. Точность поддержания температуры равнялась  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Угол поворота регистрировался фотоэлектронной системой и затем проходил обработку на ПК. Точность угловой привязки была не ниже  $0,2^{\circ}$ . В качестве измерительного фотодетектора был выбран высокоскоростной PIN-фотодиод S5821-01 (Hamamatsu).

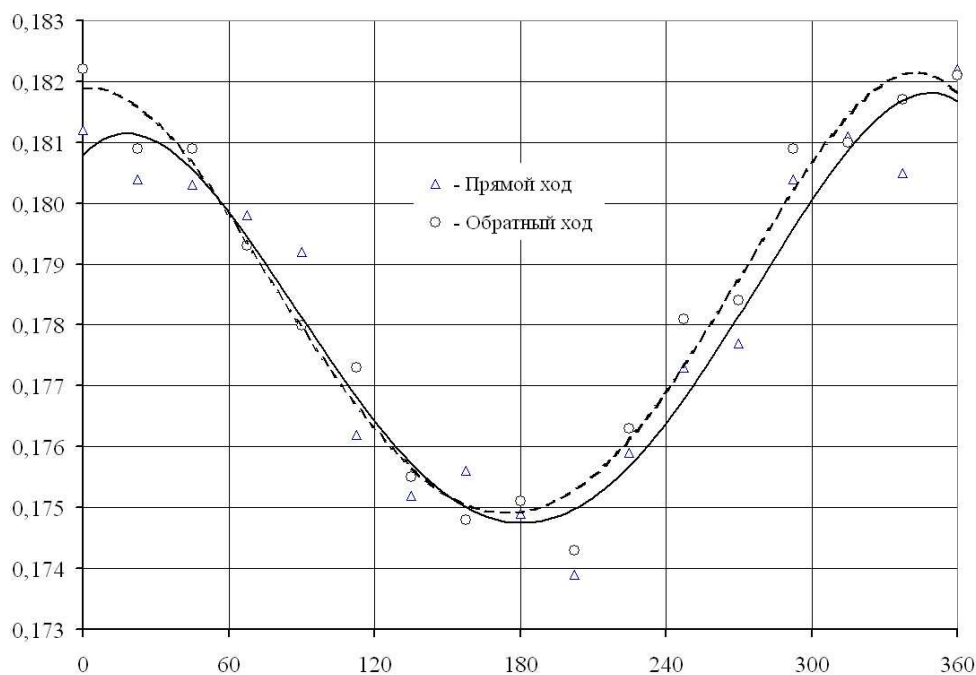


Рис. 3: Зависимость сигнала, нормированного на период,  $\frac{\Delta t_{ij}}{T}$ , от угла поворота интерферометра  $\alpha$ , °. Результаты первой серии измерений

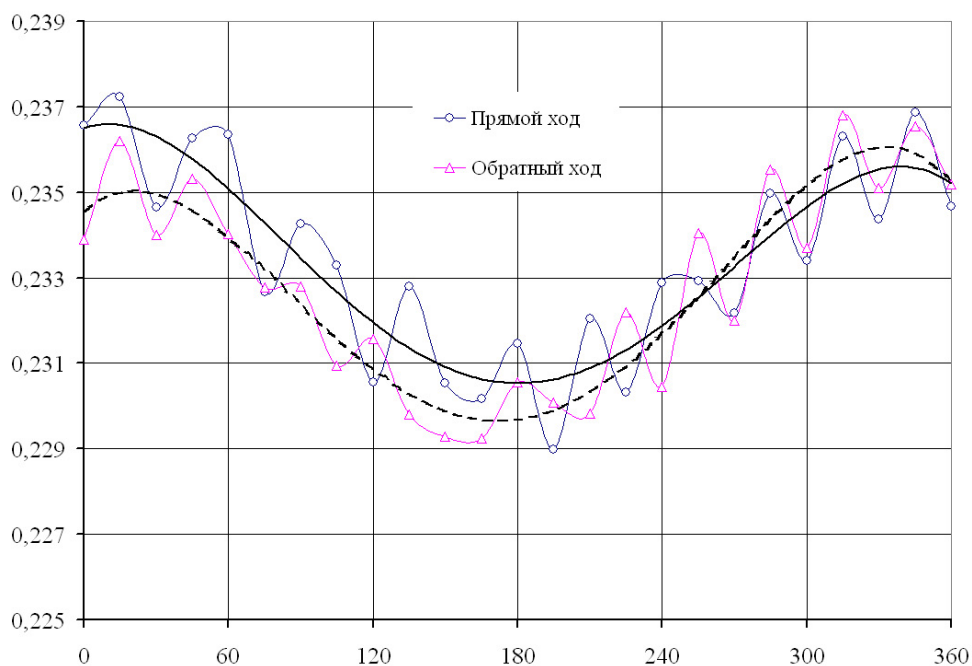


Рис. 4: Результаты второй серии измерений

Преобразование сигналов осуществлялось аналого-цифровым преобразователем National Instruments PCI-6132, имеющем частоту оцифровки сигнала 2,5 МГц при входном разрешении 14 разрядов на канал. Сигналы от измерительного фотодиода и фотодиода для контроля мощности излучения лазера поступали на независимые входы PCI-6132.

Время записи сигнала при одной частоте вращения 15 сек. Таким образом, например при частоте вращения 200 Гц одной точке на графике соответствует 3000 замеров. Для уменьшения влияния низкочастотных механических шумов и высокочастотных электромагнитных наводок использовалась полосовая фильтрация Батерворта 5 порядка.

Результаты третьей серии измерений, выполненные 25 марта 2006 г., представлены на рис. 6. При измерениях была выбрана частота вращения ОД 200 Гц. Экспериментальные данные были записаны с частотой дискретизации 1 МГц.

График сигнала, нормированного на период вращения ОД, и его сплайн-интерполяция для двух направлений поворота интерферометра в целом похожи на полученные ранее. Однако, угловая модуляция сигнала не наблюдается. Можно заметить, что погрешность измерений уменьшилась до 0,075%.

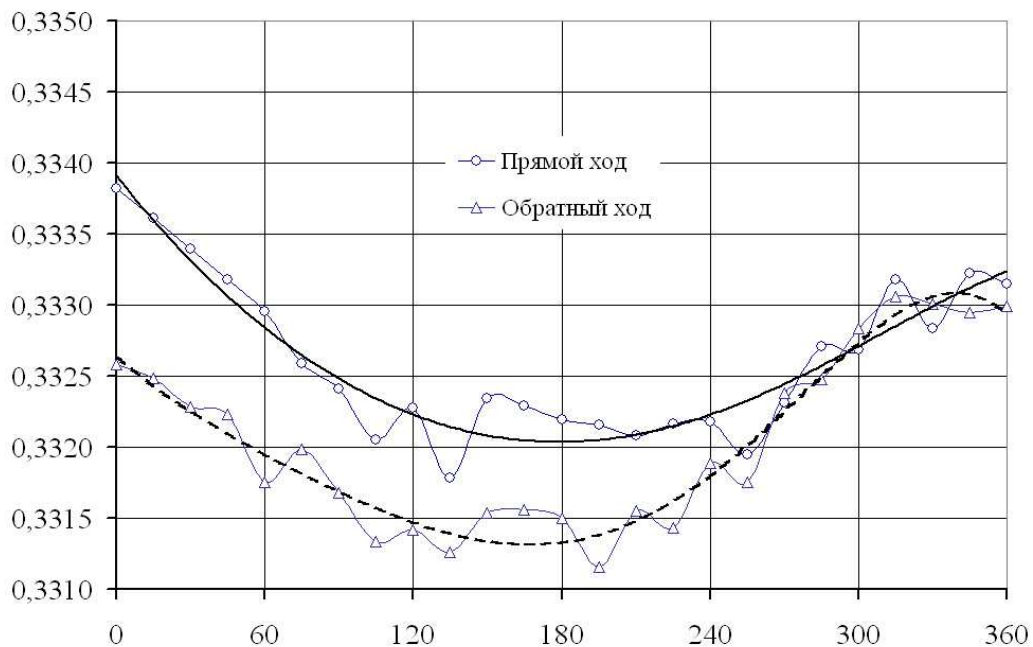


Рис. 5: Результаты третьей серии измерений

Из рис. 6 также следует, что величина дрейфа амплитуды сигнала за 50 минут составила около 0,36%. Дополнительные замеры показали, что дрейф амплитуды сигнала прямо пропорционален времени, поэтому замеры проводились через равные промежутки времени. Так как лазер являлся стабилизированным по частоте и мощности, а при повторном включении интерферометра через сутки или через неделю настройка оказывалась исходной, дрейф амплитуды сигнала, возможно, связан с динамической усталостью материала при вибрации платформы. Форма сигнала также имеет минимум, который повторяется в прямом и обратном поворотах интерферометра. В связи с наличием дрейфа амплитуды и неидеальностью поворотной системы информацию должна содержать разность сигналов, записанных в различное время суток.

В следующей серии экспериментов были сделаны измерения при разных скоростях вращения с целью определения оптимального соотношения сигнал/шум (результаты представлены ниже). Затем были сделаны попытки проведения измерений при скорости вращения диска, соответствующей  $\nu = 350$  Гц. На данной частоте формы кривых приобрели менее повторяющийся вид, что свидетельствовало о влиянии вибраций и

других факторов. В дальнейшем, из-за разрушения ОД, вызванного, по всей видимости, влиянием вибраций, не было проведено достаточного количества измерений в различное время суток.

Поэтому, анализ третьей серии экспериментов не позволяет сделать достоверный вывод об отсутствии проявлений анизотропии на достигнутом уровне точности. Для вывода о том, что разностный сигнал, находится на уровне случайной ошибки измерения, необходимо повторить эксперимент в различное время суток.

В таблице 2 представлены параметры интерферометров, реализованные в экспериментах Физо [9], Билгера и Ствелла [16], параметры эксперимента на дисковом двухпроходном интерферометре [13] и данные для последней серии экспериментов на однопроходном интерферометре (Рис. 2).

Так как в основном приближении увлечение света зависит от произведения  $(n_2^2 - 1) V_{2n}l$ , в последней колонке приведен параметр эффективности увлечения.

Здесь следует учесть, что в опыте Физо каждый из двух лучей проходил две трубки длиной  $l$ , поэтому эффект увлечения света определялся величиной  $4\kappa_2 V_{2n}l$ . В опыте Билгера и Ствелла свет многократно переотражался и проходил через вращающийся ОД эффективное число раз, которое зависело от коэффициента отражения зеркал и активной среды кольцевого лазера. Однако, работа [16] не позволяет сделать оценку числа переотражений. Можно только заметить, что измеренный сдвиг частоты связан не только со сдвигом фаз лучей, прошедших вращающийся диск, но и с изменением длины резонатора, вследствие изменения угла преломления на границах раздела воздух-вращающийся диск. В двухпроходной схеме [13], как и в опыте Физо, эффект увлечения определялся величиной  $4\kappa_2 V_{2n}l$ , но с учетом поперечного эффекта увлечения, эта величина возрастала на 20%. В однопроходной схеме для продольного эффекта имеем  $2\kappa_2 V_{2n}l$  и плюс поперечное увлечение света.

Таблица 2.

Название	$\omega$ , рад/с	$r$ , м	$V_{2n}$ , м/с	$l$ , м	$n_2$	$\kappa_2$	$\kappa_2 V_{2n}l$
Физо [9]	–	–	7,059	1,487	1,33	0,769	8,071
Билгер и Ствелл [16]	< 366, 5	< 0, 0133	< 4, 875	0,0072	1,457	1,124	< 0, 040
Двухпроходный интерферометр [13]	146,6	0,0225	3,299	0,089	1,48	1,190	0,375
Однопроходный интерферометр (Рис. 2)	< 2387, 6	0,0152	< 36, 291	0,030	1,78	2,168	< 2, 360

Можно заметить, что параметр эффективности в современных экспериментах ниже достигнутого в опыте Физо, поэтому прогресс в этой области связан со снижением уровня шума, увеличением числа проходов среды и возможностью компьютерной обработки больших массивов данных.

### 3. Измерение зависимости сдвига интерференционных полос от скорости движения среды

Следующая серия измерений была выполнена с целью проверки зависимости эффекта увлечения от скорости движения среды. В эксперименте при фиксированном угловом положении интерферометра частота вращения ОД изменялась в пределах от 100 до 380 Гц. Результаты измерений представлены на рис. 7 и рис. 8.

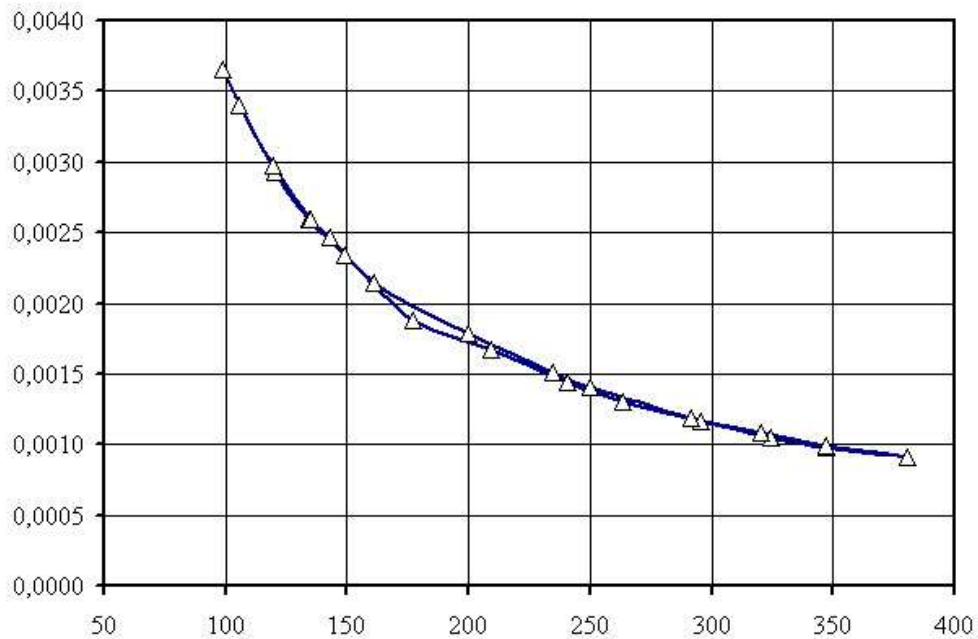


Рис. 6: Зависимость измеренного времени  $\Delta t_y$  (мс) прохождения интерференционной полосы по апертуре ФД от частоты вращения ОД  $\nu$ , Гц

На рис. 7 представлена зависимость сигнала (времени прохождения крайней интерференционной полосы по апертуре ФД) от частоты вращения ОД. График состоит из двух ветвей. Измерения начинались с низкой частоты, затем частота увеличивалась до максимальной. После этого частота уменьшалась приблизительно до начальной. Так как зависимость, полученная при увеличении частоты, близка зависимости при уменьшении частоты, можно сделать вывод о достаточно высокой стабильности результатов. Общее время проведения замеров для одного графика составляло порядка 20 минут. За это время лабораторная система отсчета незначительно изменяла пространственную ориентацию.

Зависимость сигнала от частоты имеет гиперболический вид, однако эта зависимость отлична от теоретической зависимости без учета эффекта Физо.

Зависимость разности рассчитанного сдвига полос без учета эффекта Физо и измеренного сдвига полос от скорости вращения представлена на рис. 8. Из рис. 8 следует, что эта зависимость имеет линейный вид и в первом приближении качественно подтверждает выражение (2). При периоде 3000 мкс (это соответствует частоте около 330 Гц) интервал времени следования интерференционной полосы уменьшается на достаточно большую величину – около 10%. Причем при периоде 5 мс эта величина соответствует расчетной величине ожидаемого сдвига ИК  $\Delta_\Sigma = \Delta'_0 + \Delta' = 1,62 \times 10^{-2}$ . Из рис. 8 следует, что погрешность определения смещения ИК находилась на уровне 1% на высоких частотах вращения, таким образом, минимально обнаружимое смещение находилось на уровне  $0,1\Delta_\Sigma = 1,62 \times 10^{-3}$ . Заметим, что погрешность третьей серии измерений, представленных на рис.6, была существенно меньше

Направление изменения интервала времени (увеличение или уменьшение) при фиксированном направлении вращения диска зависит лишь от юстировки интерферометра. Таким образом, если калибровать интерферометр, то по изменению времени следования полос можно будет определять смещение интерференционных полос. Затем можно

будет решать обратную задачу – по времени следования полос определять скорость движения среды. Если скорость движения среды задана, а в эксперименте проявляется анизотропия, то по величине анизотропной составляющей, измеренной при различных ориентациях интерферометра в пространстве, можно будет определить величину и направление скорости интерферометра в пространстве.

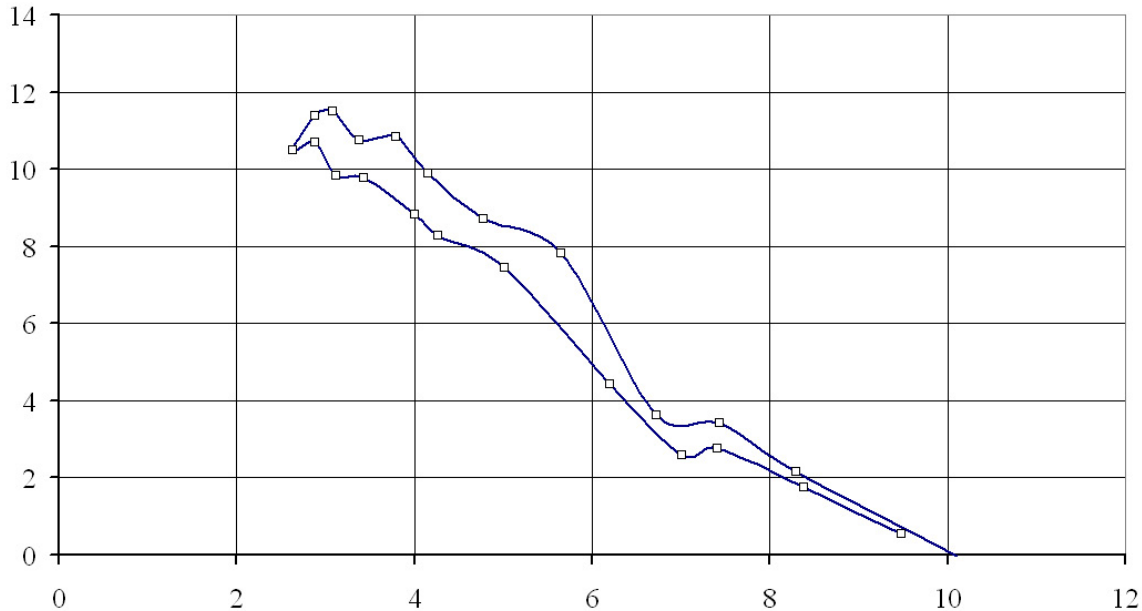


Рис. 7: Зависимость разности рассчитанного без учета эффекта Физо  $\Delta t$  и измеренного сигнала  $\Delta t_j$  (выраженная в процентах к расчетной величине сигнала) от периода вращения  $T$ , мс.

Выше была сделана оценка точности эксперимента по измерению анизотропной составляющей: минимальная измеряемая вариация в смещении полос равна  $\delta\Delta \approx 1,6 \times 10^{-3}$ . Если сравнить эту величину с полученной оценкой ожидаемой вариации  $\delta\Delta = 4,7 \times 10^{-6}$  вследствие галактической скорости ( $\beta \approx 10^{-3}$ ), то можно сделать вывод, что точность измерений должна быть в 340 раз выше. Следовательно, в эксперименте могла быть обнаружена такая величина вариации в смещении полос, которая может возникнуть при  $\beta \geq 0,34$ . Так как величина погрешности в третьей серии экспериментов не превышала 0,36% (если дрейф за 50 минут измерений принять за проявление шумовых факторов), что в 3 раза меньше, чем величина погрешности, которую брали для получения измеряемой оценки  $\delta\Delta$  и соответственно  $\beta$ , можно сделать вывод, что вариация  $\delta\Delta$  могла быть зарегистрирована если бы  $\beta \geq 0,1$ .

### Заключение

Увлечение света движущейся средой относится к одному из видов искусственной или наведенной оптической анизотропии. Основные результаты экспериментов качественно подтвердили линейную зависимость сдвига интерференционных полос от скорости движения среды в интервале скоростей до 36 м/с. Близкие результаты были получены в работе [16], но в меньшем диапазоне скоростей среды.

Анализ третьей серии экспериментов не позволяет сделать достоверный вывод об отсутствии проявлений пространственной анизотропии на достигнутом уровне точности. Для вывода о том, что сигнал, находится на уровне случайной ошибки измерения,

необходимо повторить эксперимент в различное время суток. Подводя итоги работы можно сделать вывод о том, что угловые вариации  $\delta\Delta$  могли быть зарегистрированы при  $\beta \geq 0,1$ .

В перспективе, принципиально важным является проверка обнаружимости  $\delta\Delta$  при точностях, соответствующих галактической скорости ( $\beta \approx 10^{-3}$ ). Для этого необходимо увеличить точность эксперимента на 2 порядка, что возможно путем использования большей частоты вращения ОД, проведения измерений с различными направлениями вращения ОД, увеличения числа проходов среды, лучшей системы виброзащиты интерферометра, более чувствительных фотодетекторов.

### Литература

1. Сажин М. В. Анизотропия и поляризация реликтового излучения. Последние данные. // УФН. 2004. Т. 174. № 2, с. 197–205.
2. Франкфурт У. И., Френк А. М. Оптика движущихся тел. – М.: Наука. 1972. 212 с.
3. Michelson A., Morley E. W. Influence of motion of the velocity of light // Am. J. Phys. 1886. V. 31. № 185. P. 377–386.
4. Brillet A., Hall J. L. Improved laser test of the isotropy of space. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 42. N 9, pp. 549–552.
5. Гладышев В. О. Необратимые электромагнитные процессы в задачах астрофизики: физико-технические проблемы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 276 с.
6. Gladyshev V. O. Special effects of relativity theory // Proceedings of British Society for the Philosophy of Science “Physical Interpretation of Relativity Theory”. – London, 1998. P. 99–108.
7. Gladyshev V. O. A possible explanation for the delay in detecting an astrophysical signal by using ground-based detectors // J. Moscow Phys. Soc. 1999. V. 9, N 1. P. 23–29.
8. Тоннела М.-А. Основы электромагнетизма и теории относительности. – М.: Изд-во ин. лит., 1962. 483 с.
9. Fizeau D’H. Sur les hypotheses relatives a l’ether lumineux, et sur une experience qui parait demonter que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumiere se propage dans leur interieur // Ann. de Chimie et de Phys. 1859. V. 57. P. 385.
10. Болотовский Б. М., Столяров С. Н. Отражение света от движущегося зеркала и родственные задачи // УФН, 1989. Т. 159. В. 1. С. 155–180.
11. Гладышев В. О. Искривление траектории распространения плоской монохроматической электромагнитной волны в среде с вращением // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58, вып. 8. С. 593–597.
12. Gladyshev V., Gladysheva T., Zubarev V., Podguzov G. V. On possibility of a new 3D experimental test of moving media electrodynamics // Proceedings of International Meeting PIRT-2005, Moscow: BMSTU, 2005. – pp. 202–207.
13. Гладышев В. О., Гладышева Т. М., Зубарев В. Е. Регистрация эффекта увлечения света в дисковом оптическом интерферометре // Письма в ЖТФ. 2002. № 3. – С. 88–94.
14. Gladyshev V. O., Gladysheva T. M., Zubarev V. Ye. The first results of the experiment on registering light dragging observed in an interferometer with rotating medium // Proceedings British Soc. Phil. Science “Phys. Interpr. Relativity Theory”. Imperial College. London. 2002, p. 169–175.
15. Gladyshev V., Gladysheva T., Zubarev V. Propagation of electromagnetic waves in complex motion media // Journal of Engineering Mathematics. 2006. V. 55. No. 1–4, p. 239–254.
16. Bilger H. R. & Stowell W. K. Light drag in a ring laser: An improved determination of the drag coefficient. // Phys. Rev. A. 1977. 16 (No 1), 313–319.