

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОДТОМ 65, ВЫПУСК 7
10 АПРЕЛЯ, 1997

Письма в ЖЭТФ, том 65, вып.7, стр.497 - 501

© 1997г. 10 апреля

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПИИ ПРОСТРАНСТВА
С ПОМОЩЬЮ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА*В.В.Рагульский**Институт проблем механики РАН
117526 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 20 февраля 1997 г.

Экспериментально установлено, что преломляющее действие конденсированной среды на световые волны с точностью $5 \cdot 10^{-8}$ не зависит от ее ориентации в пространстве.

PACS: 42.25.Gy, 42.50.Wm

Согласно современным теоретическим представлениям, окружающее нас пространство изотропно по отношению к оптическим явлениям. Исходя из этого, обычно считают [1], что преломляющее действие конденсированной среды на световые волны, идущие в противоположных направлениях, совершенно одинаково¹⁾. Однако экспериментальное обоснование таких воззрений оставляет желать лучшего.

Дело в том, что прямое сравнение преломляющих свойств среды для встречных световых пучков до сих пор проводилось с точностью, не превышающей $\sim 3 \cdot 10^{-5}$, см. статью Араго [3]. Из опубликованных в этой статье результатов наблюдений звезд через ахроматичную стеклянную призму следует, что показатель преломления с указанной точностью не зависит от того, находится ли источник света впереди, по ходу орбитального движения Земли, или же он светит ей вдогонку.

Известны также работы [4,5], в которых регистрировалось изменение поляризации у встречных световых пучков при их прохождении сквозь наклонную стеклянную пластину. Затем на основе полученных сведений и формул Френеля вычислялись соответствующие показатели преломления. Эти работы близки

¹⁾ В частности, это предположение широко используется в теории и практике обращения волнового фронта (см., например, [2]).

по методике, но противоположны по своим результатам. Из данных Физо [4] следует, что если один из пучков распространяется на восток, а другой — на запад, то "встречные" показатели преломления отличаются друг от друга, причем их разность (Δn) зависит от времени и достигает $3 \cdot 10^{-4}$. Но Брас [5] на основании собственных измерений (погрешность которых эквивалентна $\Delta n \sim 4 \cdot 10^{-5}$) утверждал, что "восточный" и "западный" показатели преломления одинаковы.

Вообще говоря, не исключено, что на изотропию наблюдаемых оптических процессов накладывают отпечаток различные факторы. Например, авторы указанных публикаций допускали, что на нее влияет быстрое движение²⁾. Как известно, теория относительности постулирует отсутствие такой зависимости, но постулат не есть доказательство. В какой мере он соответствует действительности, может выявить только опыт.

Выше было показано, что применительно к преломлению света интересующие нас экспериментальные результаты не согласуются между собой уже в четвертом десятичном знаке. Да и получены они лишь для немногих выделенных азимутов. Прояснить ситуацию могли бы более точные опыты. Об одном из них пойдет речь в предлагаемой статье.

Идея опыта такова: пропустим световой пучок через преломляющую призму и затем развернем его на строго фиксированный угол 180° . Тогда свет снова пойдет сквозь ту же призму, но на этот раз в обратном направлении. Если встречные показатели преломления одинаковы, то обратный пучок и после призмы останется коллинеарным исходному. В противном случае возникнет некоторое отклонение от коллинеарности, пропорциональное Δn . В итоге дело сведется к регистрации такого отклонения, которую можно произвести с высокой точностью. Угловую зависимость Δn можно определить, меняя пространственную ориентацию обсуждаемой оптической схемы.

Как видим, такая схема позволяет измерять непосредственно Δn (тогда как в предыдущих исследованиях этот параметр приходилось вычислять, пользуясь данными о величине встречных показателей преломления). Действие же совпадающих частей названных показателей здесь автоматически компенсируется. Это резко уменьшает влияние нестабильности внешних условий на конечные результаты.

Основные элементы экспериментальной установки обозначены на рис.1. Источником света служит электрическая лампа L , которая освещает узкую щель S , расположенную в фокальной плоскости объектива O_1 . Параллельный пучок, формируемый этим объективом, преломляется призмой V и попадает в высококачественную трипельпризму T , то есть в уголкового отражатель с тремя взаимно ортогональными гранями. Известно, что такой отражатель разворачивает падающий на него пучок на 180° , причем эта величина не зависит от угла падения. Отраженный свет проходит призму V в обратном направлении и фокусируется объективом O_1 . Потом часть его выходит через полупрозрачное зеркало M_1 , пространственно отделяясь от исходного излучения. Зеркало M_2 введено в схему для того, чтобы уменьшить габариты установки.

Репером для определений углового положения пучка, дважды прошедшего призму, служит тонкий штрих, который выгравирован на плоскопараллельной пластинке R . Она расположена в той плоскости, где этот пучок, фокусируясь,

²⁾ Имелось в виду движение Земли со скоростью 30 км/с по околосолнечной орбите. Позже выяснилось, что само Солнце движется еще быстрее. Возможно, его скорость ≈ 400 км/с [6].

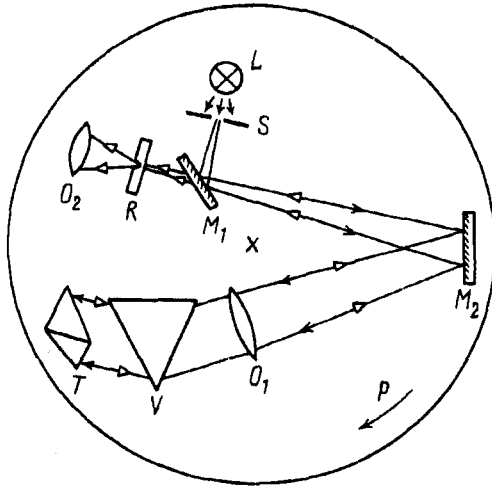


Рис.1. Схема экспериментальной установки: L – лампа накаливания; S – щель шириной 10 мкм; O_1 – ахроматичный объектив с фокусным расстоянием 1.5 м; V – призма из стекла К-8 с преломляющим углом 65° ; T – стеклянная трипельпризма, отраженный ею световой пучок имеет диаметр 5 см; M_1 – плоское полупрозрачное зеркало, обратная сторона его подложки просветлена; M_2 – плоское зеркало с непрозрачным алюминиевым покрытием; R – подвижная стеклянная пластинка с прямолинейным штрихом шириной 3 мкм; O_2 – окуляр со 100-кратным увеличением; P – поворотная платформа

создает изображение щели S . Пластинка закреплена на каретке, которую можно передвигать микрометрическим винтом, добиваясь совмещения штриха с указанным изображением. Контроль за совмещением ведется визуально через окуляр с большим увеличением O_2 . Все элементы установлены на платформе P , поворот которой позволяет менять ориентацию данной схемы без ее перестройки.

Если пространство в какой-то степени анизотропно и из-за этого встречные показатели преломления неодинаковы, то такой поворот сопровождается сдвигом изображения щели. В самом деле, пусть при определенном положении схемы показатель преломления для "обратного" направления больше, чем для "прямого". В этой ситуации отклонение призмой обратного пучка больше (на некоторый угол $\Delta\varphi$), чем исходного. Поворотом всего прибора на 180° ориентация пучков меняется на противоположную. Соответственно, в результате такой операции обратный пучок станет отклоняться на $\Delta\varphi$ меньше исходного. Объективом O_1 (с фокусным расстоянием f) угловые отклонения преобразуются в пространственные. Поэтому, если сначала изображение щели смещено на расстояние $\Delta x \equiv f\Delta\varphi$ от той точки, в которую оно попадало бы при $\Delta n = 0$, то во втором положении смещение от этой точки равно $-\Delta x$. Следовательно, поворот платформы на 180° должен приводить к сдвигу изображения на $2\Delta x$.

Легко выяснить, как соотносится такой сдвиг с Δn . Воспользуемся тем, что показатель преломления есть

$$n = \sin \alpha / \sin \beta, \quad (1)$$

где α и β – углы между перпендикуляром к границе раздела сред и преломляемыми лучами, измеренные по разные стороны от этой границы (у нас ею является поверхность призмы). В описываемом приборе призма была выставлена в положении минимального отклонения. А в этом случае, как известно, свет проходит сквозь нее параллельно основанию. Соответствующее геометрическое построение дает $\beta = \gamma/2$ и $\alpha = (\varphi + \gamma)/2$. Здесь γ – преломляющий угол призмы, а φ – угол, на который отклоняется ею световой пучок.

Дифференцирование (1) с использованием этих равенств приводит к

$$\Delta n = \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \frac{\Delta \varphi}{2} = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\gamma/2)}}{2 \sin(\gamma/2)} \frac{\Delta x}{f} \quad (2)$$

Последнее выражение в (2) получается при учете (1) и связи между $\Delta \varphi$ и Δx . Подставляя сюда известные характеристики установки ($\gamma = 65^\circ$, $n = 1.52$, $f = 1.5 \cdot 10^2$ см), имеем $\Delta n = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \Delta x$.

Ясно, что наименьшая обнаружимая величина Δx определяется тем, насколько стабильно и воспроизводимо положение репера по отношению к сфокусированному обратному пучку. Обсуждаемая схема такова, что нестабильность может возникнуть лишь из-за неконтролируемого изменения во взаимном расположении элементов S , M_1 и R . Для предотвращения этого они крепились на небольшом расстоянии друг от друга к одному жесткому металлическому корпусу, который был теплоизолирован, а также экранирован от магнитных и электрических полей. Остальные оптические детали были закрыты кожухом из плотной бумаги. Защитой от внешних воздействий служили, конечно, и железобетонные стены здания, в котором размещалась эта установка.

Как показали предварительные эксперименты, угловое положение интересующего нас пучка точнее всего можно отследить по дифракционной картине, которая возникает при его попадании в реперный штрих. Симметрия этой картины, наблюдаемой на расстоянии 0.5 мм от штриха через окуляр O_2 , столь чувствительна к поперечным сдвигам штриха относительно центра падающего на него (и сравнимого с ним по ширине) светового поля, что вполне обнаружимы сдвиги ~ 0.1 мкм. Разумеется, их регистрацию необходимо выполнять со столь же малой погрешностью. Чтобы добиться этого, каретка, несущая пластинку R , была ориентирована так, что направление ее движения (под действием микрометрического винта) оказалось почти параллельным штриху: угол между ними $\approx 1^\circ$. В этих условиях ход каретки сопровождается в основном продольным перемещением штриха, которое не меняет его положения относительно исследуемого светового поля. Сдвиг же в поперечном направлении оказывается в 60 раз меньшим. В итоге смещению барабана микрометра на 1 мм соответствовал поперечный сдвиг штриха всего на 0,2 мкм, что позволяло производить достаточно точные измерения.

С помощью описанной аппаратуры была найдена величина Δx для разных положений платформы (отстоящих друг от друга на 20°). В каждом из них 10 раз определялся тот отсчет на барабане микрометра, при котором штрих совпадал с центром изображения щели. После каждого измерения штрих отводился в сторону, а затем начиналось новое определение.

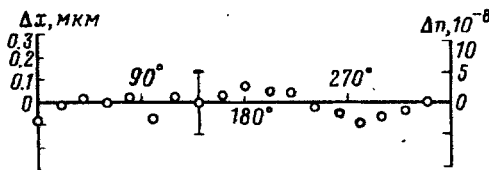


Рис. 2. Результаты определений Δn в зависимости от угла поворота платформы

Усредненные результаты измерений приведены на рис. 2. Там же показан их среднеквадратичный разброс. За нулевой угол поворота платформы принято

положение, при котором исходный пучок идет сквозь призму в северном направлении. Угол 90° отвечает восточной ориентации этого пучка. По оси ординат с одной стороны отложены единицы измерения Δx , а с другой – соответствующие величины Δn .

Как видим, зарегистрированные отклонения данного параметра от нуля не превосходят ошибки измерений ($\approx 5 \cdot 10^{-8}$). Отсюда следует, что по крайней мере с такой точностью окружающее нас пространство изотропно по отношению к преломлению света.

-
1. Г.Г.Слюсарев, в кн. *Физическая энциклопедия*, М.: Большая Российская энциклопедия, 1992, **з**, 382.
 2. В.В.Рагульский, *Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии света*, М.: Наука, 1990.
 3. F.Arago, *Comptes Rendus, Paris*. **36**, 38 (1853).
 4. H.Fizeau, *Comptes Rendus, Paris*. **49**, 717 (1859).
 5. D.B.Brace, *Philosophical magazine, Ser.6* **10**, 591 (1905).
 6. G.F.Smoot, M.V.Gorenstein, and R.A.Muller, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 898 (1977).