

Использование кольцевого лазера для исследования изотропии пространства

Н.В.Кравцов*, В.В.Рагульский**

Предложен эксперимент, позволяющий с высокой точностью проверить предположение об изотропии окружающего нас пространства. Ключевым элементом экспериментальной схемы является кольцевой лазер, часть резонатора которого заполнена конденсированной средой.

Ключевые слова: кольцевой лазер, изотропия пространства, скорость света.

Уникальные свойства кольцевых лазеров открывают широкие возможности их использования для прецизионных исследований в области фундаментальной и прикладной физики. Такие лазеры, например, весьма перспективны для поиска различных гравитационных и релятивистских эффектов [1–3] и создания квантовых стандартов частоты [4]. Кольцевые лазеры уже применяются для измерения неравномерности скорости вращения Земли с целью поиска причин этой неравномерности [5, 6]. Основанные на использовании свойств кольцевых лазеров лазерные гироскопы в настоящее время широко применяются в точных навигационных системах [7].

В настоящей работе мы хотим указать на возможность использования современных кольцевых лазеров для прецизионного исследования изотропии пространства.

Предположение об оптической изотропии пространства (т. е. о том, что скорость распространения световой волны не зависит от ориентации в пространстве траектории «источник излучения – наблюдатель») является одним из основных постулатов теории относительности [8]. Пространство считается изотропным и для других оптических явлений. Если пространство действительно изотропно, то и оптические невзаимные эффекты [9], чувствительные к направлению распространения световой волны относительно материальной среды, не должны зависеть от ориентации экспериментальной установки.

Заметим, что в большинстве опытов, в которых проводились прецизионные измерения скорости света, по существу определялась скорость, усредненная по двум противоположным направлениям его распространения [10].

Положение об оптической изотропии пространства в настоящее время является общепринятым, однако справедливость его может быть проверена только опытным путем. Экспериментальные проверки оптической изотропии пространства предпринимались неоднократно (см., напр., [11–13]). Наименьшая погрешность измерения за-

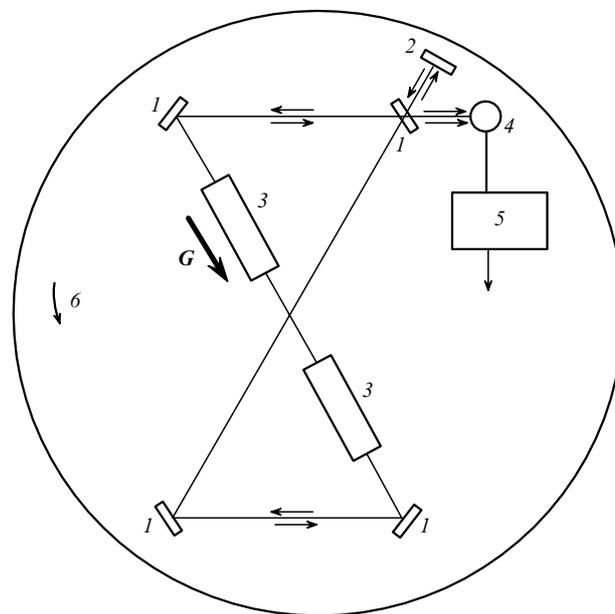


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки (активная среда лазера и элементы, создающие начальную частотную подставку, на рисунке не показаны):

1 – зеркала резонатора кольцевого лазера; 2 – возвратное зеркало оптического смесителя; 3 – прозрачная среда с показателем преломления, отличным от единицы; 4 – фотоприемник; 5 – схема для измерения разности частот встречных волн; 6 – поворотный стенд.

висимости скорости света от направления его распространения в пространстве $\Delta c/c$ получена в [14] и составляет всего $3 \cdot 10^{-9}$. Заметим, что изотропия пространства относительно инертных свойств материальных тел проверена с очень высокой точностью ($\Delta m/m = 10^{-22}$ [15]).

Таким образом, повышение точности экспериментальных исследований оптической изотропии пространства, несомненно, представляет большой интерес.

Принципиальная схема предлагаемого эксперимента показана на рис.1. Основой схемы является кольцевой лазер с резонатором в виде «восьмерки», часть которого заполнена прозрачными элементами с отличным от единицы показателем преломления. Такой резонатор может быть выполнен (так же как и резонатор лазерного гироскопа [7]) в виде моноблочной конструкции из плавленого кварца, в которой просверлены каналы для активной

*НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына при МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

**Институт проблем механики РАН, Россия, 117526 Москва, просп. Вернадского, 101; эл.почта: ragulsky@ipmnet.ru

среды. В эти же каналы вводятся прозрачные элементы, имеющие тщательно просветленные или срезанные под углом Брюстера торцы.

Пусть анизотропия пространства характеризуется направлением вектора \mathbf{G} : при распространении световой волны вдоль этого направления Δc максимально, а при ее распространении в перпендикулярном направлении $\Delta c = 0$. Для определенности положим, что начальная ориентация стэнда такова, что вектор \mathbf{G} параллелен плоскости резонатора кольцевого лазера и ориентирован так, как показано на рис. 1.

Время обхода световой волной кольцевого резонатора, частично заполненного средой с показателем преломления, отличным от показателя преломления активной среды, зависит (при наличии анизотропии пространства) от направления распространения этой волны [12]. В результате возникает разность времен обхода такого резонатора встречными волнами

$$\Delta t = \frac{2(n-1)l\Delta c}{c^2} - \frac{l\Delta n}{c}. \quad (1)$$

Здесь c – усредненная по двум встречным направлениям скорость света; Δc – возможное отличие «однонаправленной» скорости от средней скорости; n – усредненный по встречным направлениям показатель преломления конденсированной среды, находящейся в резонаторе; l – суммарная длина двух образцов этой среды, введенных в резонатор; Δn – возможная разность показателей преломления конденсированной среды для встречных волн, связанная с анизотропией пространства. При выводе (1) учтено, что показатель преломления обычно используемой газовой активной среды с достаточной степенью точности можно считать равным единице.

При работе кольцевого лазера наличие разности времен обхода Δt (чем бы она ни вызывалась) приводит к возникновению разности частот встречных волн $\Delta\omega$ [16]:

$$\Delta\omega = \frac{\omega\Delta t c}{L}, \quad (2)$$

где ω – средняя частота этих волн; L – оптическая длина лазерного резонатора. Комбинируя (2) и (1), получаем

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = 2(n-1) \frac{l}{L} \frac{\Delta c}{c} - \frac{l\Delta n}{L}. \quad (3)$$

Очевидно, что поворот лазера в плоскости контура резонатора на 180° приведет к изменению знака $\Delta\omega$. Сравнительно $\Delta\omega$ при различных ориентациях лазера, можно судить о наличии или отсутствии оптической анизотропии пространства. Зависимость $\Delta\omega/\omega$ от показателя преломления среды позволяет разделить эффекты, обусловленные возможным отличием от нуля Δc и Δn . Экспериментально полученные значения Δn приведены в [17].

Из сказанного ясно, что вся экспериментальная установка должна размещаться на стэнде, ориентацию которого в пространстве (например относительно направления на центр Галактики) можно изменять. В этом случае поиск анизотропии пространства сводится к точному измерению разности частот встречных волн при различной ориентации стэнда в пространстве.

Возвращаясь к конкретной схеме кольцевого лазера (см. рис. 1), подчеркнем, что использование резонатора в виде «восьмерки» позволяет исключить влияние эффекта Саньяка на частоты генерируемых волн [16], поскольку такой резонатор нечувствителен к этому эффекту, если площади треугольников, образующих контур кольцевого резонатора, равны, а прозрачные элементы, находящиеся в различных частях «восьмерки», идентичны.

В настоящее время относительная погрешность измерения частоты $\Delta\omega/\omega$ в современных серийных лазерных гироскопах составляет $10^{-16} - 10^{-17}$ [7], а в уникальных кольцевых лазерах она может быть уменьшена до $10^{-21} - 10^{-22}$ [6]. С учетом сказанного очевидно, что предлагаемый эксперимент может обеспечить рекордно высокую (на несколько порядков превышающую достигнутую ранее) точность исследования оптической изотропии пространства.

Технические сложности, связанные с проведением обсуждаемого эксперимента (необходимость обеспечения стабильной частотной подставки и магнитной экранировки, обеспечение жесткости конструкции кольцевого лазера и стабильности его параметров, высокоточное измерение частоты выходного сигнала и т. п.), вполне преодолимы при современном уровне лазерных технологий (см., напр., [3, 6]).

Авторы благодарны Е.Г.Ларионцеву за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 99-02-16054) и Программы «Фундаментальная метрология».

1. Scully M.O., Zubairy M.S., Haugan M.P. *Phys.Rev.A*, **24**, 2009 (1981).
2. Денисов В.И., Зубрило А.А., Кравцов Н.В., Пинчук В.Б. *Квантовая электроника*, **26**, 171 (1999).
3. Stedman G.E., Li Z.-Y., Rowe C.H., McGregor A.D., Bilger H.R. *Phys.Rev.A*, **51**, 4944 (1998).
4. Басов Н.Г., Беленов Э.М. В кн.: Н.Г.Басов. *О квантовой электронике* (М., Наука, 1987).
5. Stedman G.E., Bilger H.R., Li Z.-Y., Poulton M.P., Rowe C.H., Vetharaniam I., Wells P.V. *Aust.J.Phys.*, **46**, 87 (1993).
6. Stedman G.E., Li Z.-Y., Bilger H.R. *Appl.Optics*, **34**, 53 (1995).
7. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. *Квантовая электроника*, **30**, 96 (2000).
8. Эйнштейн А. *Собрание научных трудов* (М., Наука, 1965, т.1).
9. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н. *Квантовая электроника*, **27**, 98 (1999).
10. Фрум К., Эссен Л. *Скорость света и радиоволн* (М., Мир, 1973).
11. Marinov S. *Indian J.Theor.Phys.*, **39**, 267 (1991).
12. Ragulsky V.V. *Phys.Letts A*, **235**, 125; **236**, 609 (1997).
13. Рагульский В.В. *Изв. АН. Сер. физич.*, **63**, 818 (1999).
14. Riis E., Andersen L. et al. *Phys.Rev.Letts*, **60**, 81 (1988).
15. Hughes V.W., Robinson H.G., Beltran-Lopez V. *Phys.Rev.Letts*, **4**, 342 (1960).
16. Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И. *Лазерный гироскоп* (М., Сов. радио, 1975).
17. Рагульский В.В. *Письма в ЖЭТФ*, **65**, 497 (1997).

N.V.Kravtsov, V.V.Ragul'sky. Investigation of space isotropy using a ring laser.

An experiment is suggested for high-precision verification of the assumption concerning isotropy of ambient space. The essential element of the experimental setup is a ring laser with the cavity partially filled by condensed matter.