

УДК 539.412:539.1.09

## О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ЭФФЕКТА КВАНТОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ФОТОНОВ ПО ОПТОВОЛОКНУ

© 2023 г. Н. П. Калашников<sup>а</sup>, \*, А. С. Ольчак<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Москва, 115409 Россия

\*e-mail: kalash@mephi.ru

\*\*e-mail: asolchak@mephi.ru

Поступила в редакцию 26.06.2022 г.

После доработки 20.08.2022 г.

Принята к публикации 20.08.2022 г.

Скорость распространения света (потока фотонов) в оптоволокне заметно меньше скорости света в вакууме. Это обстоятельство позволяет рассмотреть процесс распространения фотонов в так называемой сопутствующей системе отсчета. Использование этой системы позволяет, например, нагляднее и проще описать закономерности движения ультрарелятивистских заряженных частиц и гамма-квантов в упорядоченной среде (эффект каналирования). Такое рассмотрение помогает обнаружить некоторые простые, хотя и достаточно неожиданные макроскопические квантовые эффекты, которые могут проявляться при прохождении электромагнитного излучения по волоконным световодам. В частности, при распространении фотонов по оптоволокну, закрученному в спираль, при определенных параметрах спирали должен проявляться эффект квантования момента импульса фотона. Обратит внимание на возможность такого эффекта и является задачей этой статьи, содержащей формулировку условий и оценки параметров, при которых эффект квантования момента импульса фотонов, движущихся по спиральной траектории, можно наблюдать.

**Ключевые слова:** фотоны, квантование момента импульса, оптическое волокно, сопутствующая система отсчета, квантовая электродинамика, каналирование, релятивистская физика, скорость света, лазерное излучение, когерентность.

DOI: 10.31857/S1028096023030044, EDN: LGPOZF

### ВВЕДЕНИЕ

Начнем с констатации нескольких общеизвестных фактов.

Лазеры испускают фотоны с определенным значением энергии и определенным вектором импульса. Фактически все испускаемые лазером фотоны, подчиняясь статистике Бозе–Эйнштейна, оказываются в одинаковых состояниях, описываемых одинаковыми волновыми функциями.

Процесс распространения оптического излучения в среде с точки зрения квантовой электродинамики [1, 2] представляет собой цепочку поглощений и испусканий фотонов атомами и молекулами среды, в результате чего средняя скорость распространения потока фотонов в среде снижается. В макроскопической оптике отношение скорости распространения фотонов в вакууме  $c_0 = 3 \times 10^8$  м/с к скорости распространения электромагнитного излучения в среде  $v < c_0$  назы-

вается коэффициентом преломления среды или оптической плотностью  $n = c_0/v > 1$ .

В прозрачной среде новые фотоны переизлучаются в том же, общем для потока лазерных фотонов, состоянии, не разрушая его когерентности. В современных оптоволоконных линиях связи достигнут исключительно высокий уровень прозрачности оптоволоконной среды [3]. Лучшие волокна обеспечивают затухание проходящего излучения на уровне  $\sim 0.1$  дБ/км, оптическая плотность волокна сохраняется на уровне  $n \sim 1.5$ , как в обычном стекле, что позволяет в должной мере проявляться эффекту полного внутреннего отражения излучения при прохождении по волокну. Скорость распространения света в волокне составляет лишь около  $2/3c_0$  и все фотоны потока, сгенерированного лазером, продолжают сохранять когерентность и, фактически, единую волновую функцию, несмотря на регулярные акты поглощения и переиспускания.

Заметное отличие скорости потока когерентных фотонов в среде от скорости света в вакууме позволяет математически рассмотреть процесс его распространения в так называемой сопутствующей системе отсчета (ССО), эффективно используемой, например, при изучении процесса прохождения и взаимодействия со средой ультра-релятивистских заряженных частиц и гамма-квантов [4–6]. Такое рассмотрение позволяет заметить некоторые простые, хотя и достаточно неожиданные макроскопические квантовые эффекты, которые могут проявляться при прохождении оптических фотонов по волоконным световодам. Обратит внимание на такие эффекты и является целью этой статьи.

### ПРОХОЖДЕНИЕ ПОТОКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО СПИРАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ, НАБЛЮДАЕМОЕ ИЗ СОПУТСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Пусть поток лазерного излучения проходит по прямому световоду со скоростью  $v = c_0/n \sim (2/3)c_0$ , где  $n$  – оптическая плотность вещества световода. В ССО, движущейся вместе с фронтом потока фотонов, и сам фронт, и любая другая волновая поверхность, будут казаться неподвижными. Релятивистские эффекты замедления времени и сокращения длины при скорости системы отсчета  $v \sim (2/3)c_0$  будут заметны, но не велики (Лоренц-фактор  $\gamma = (1 - v^2/c_0^2)^{-1/2} \sim 1.3$ ). Соответственно, частоты  $\omega$  фотонов, наблюдаемых в ССО, не будут сильно отличаться от их частоты  $\omega_0$ , наблюдаемой в лабораторной системе отсчета.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда волокно спиралевидно закручено вокруг некоторой оси  $OZ$  и шаг спирали  $h$  много больше радиуса закрутки  $r$  ( $h/r \gg 1$ ). Выберем центр отсчета ССО так, чтобы он двигался со скоростью, равной  $Z$ -компоненте скорости волнового фронта  $v = (c_0/n)(1 + r^2/h^2)^{-1/2} \approx c_0/n$ . В достаточно оптически плотной среде скорость распространения фотонов может оказаться сильно ниже  $c$ . Импульсы фотонов, наблюдаемых в этом случае в ССО, совпадут с поперечными (перпендикулярными оси  $OZ$ ) компонентами импульсов фотонов, наблюдаемых из лабораторной системы, и составят

$$p = (\hbar\omega r/hc_0). \quad (1)$$

Скорость потока фотонов в ССО будет очень низкой по сравнению со скоростью света:  $v = cr/h \ll c$ .

Как известно, правила квантования орбитального момента импульса  $L$ , в квантовой механике требуют, чтобы его пространственные компоненты принимали лишь дискретные значения, строго кратные постоянной Планка [6, 7]:  $L_z = m\hbar$ ,

( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Так квантуются орбитальные моменты движения электронов в атомах. Подобный эффект можно ожидать и при прохождении фотонов по оптоволокну. Момент импульса фотона при движении со скоростью  $v$  по окружности радиуса  $r$  равен  $L_z = pr$ , где импульс  $p$  определяется выражением (1). Соответственно, целым числам  $m$  должны быть равны величины

$$m = pr/\hbar = \omega_0 r^2/hc_0 = 2\pi r^2/h\lambda, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  и  $\lambda$  – частота и длина волны фотона, проходящего по спирально закрученному волокну, в лабораторной системе отсчета.

### ЭФФЕКТ КВАНТОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ФОТОНА ПО СПИРАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Как следует из (2), отношение радиуса спиральной траектории  $r$  к ее шагу  $h$  должно принимать значения

$$r/h = mc_0/\omega_0 r = m\lambda/2\pi r. \quad (3)$$

Соответственно, должны возникать определенные квантовые особенности прохождения света по волокну в зависимости от выполнения условия (3). При невыполнении условия (3) проникновение луча в волокно должно быть затруднено, так как его соответствующая спиралевидная траектория становится квантово невозможной.

Авторы (теоретики) не берут на себя смелость судить о технической реализуемости эксперимента по наблюдению этого эффекта. И хотя только отметить, что, скорее всего, для наблюдения следствий описанного выше эффекта квантования момента импульса движущегося по спирали фотона не потребуется изготавливать особое волокно.

Отметим также, что теоретически траектория луча света внутри обычного промышленного оптоволокну сама может иметь спиралевидную форму, если пустить узкий луч под небольшим углом  $\alpha$  к оси световода. Для современных световодов с диаметрами сердцевины  $d \sim 10$  мкм условие (3) может быть выполнено, если использовать лазеры инфракрасного диапазона. Однако такая возможность требует дополнительного анализа, учитывающего технические характеристики конкретных лазеров и световодов.

### ЗАВЕРШАЮЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Количественная оценка возможности наблюдения обсуждаемого эффекта квантования орбитального момента при прохождении фотонов по оптическому волокну требует аккуратного рассмотрения особенностей распространения лазерного излучения в волокне. Нужно оценить влия-

ние расходимости лазерного луча, дисперсию и степень коллимации. Нужно принять во внимание неоднородность оптической плотности реального волокна и конкретную геометрию распространения луча в световоде (прицельный параметр по отношению к оси световода, угол наклона к оси и т.п.). За выполнение таких расчетов имеет смысл браться на основе параметров конкретной экспериментальной установки. Авторы, однако, надеются, что приведенные в этом коротком сообщении соображения и простые оценки привлекут внимания экспериментаторов к принципиальной возможности наблюдения эффекта квантования момента импульса при распространении света по спиралевидной траектории в оптоволокне.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Программы «ПРИОРИТЕТ 2030».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berestecky V.B., Lifshitz E.M., Pitaevsky L.P.* Quantum Electrodynamics. Elsevier Publishers Ltd., 1982
2. *Chang W.* Principles of Lasers and Optics, 2005. ISBN-13: 978-0521642293 ISBN-10: 0521642299
3. *Бейли Д., Райм Э.* Волоконная оптика: теория и практика. Пер. с англ. М.: Кудиц-Пресс, 2008.
4. *Калашников Н.П., Ольчак А.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 6. С. 79.
5. *Kalashnikov N.P., Olchak A.S.* // Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. V. 12. № 2. P. 299
6. *Kalashnikov N.P., Olchak A.S.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. V. 16. № 4. P. 659.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Том III. Квантовая механика. М.: Наука, 1989.

## On the Possibility of Observing the Effect of Quantization of the Orbital Momentum, during the Passage of Laser Radiation through an Optical Fiber

N. P. Kalashnikov<sup>1, \*</sup>, A. S. Olchak<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup>National Nuclear Research University MPhI, Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: kalash@mephi.ru

\*\*e-mail: asolchak@mephi.ru

The speed of propagation of optical radiation in an optical fiber is noticeably lower than the speed of light in vacuum. This fact opens the possibility to consider the propagation of light in fiber in the so-called comoving frame of reference. This type of consideration proved to be very useful and helping, for example, in studying the motion of ultrarelativistic charged particles and gamma rays in ordered media (channeling effect). This type of consideration makes it possible to notice some simple, albeit rather unexpected, macroscopic quantum effects that can manifest themselves when laser radiation passes through optical fibers. In particular, when photons propagate along an optical fiber twisted into a helix, at certain parameters of the helix, the effect of quantization of the moment of the photon momentum should reveal itself. Attracting attention to the possibility of such an effect is the goal of this note, which contains the formulation of the conditions and estimates of the parameters under which the effect of quantization of the angular momentum of photons moving along a spiral trajectory should be observed.

**Keywords:** photons, angular momentum quantization, optical fiber, comoving reference frame, quantum electrodynamics, channeling, relativistic physics, speed of light, laser radiation, coherence.