

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Некоторые методические вопросы квантовой оптики в общих курсах физики

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Кашичкин Александр Олегович
студента 4 курса, новый №4022 группы,
направления подготовки 03.03.02 Физика
Института физики

Научный руководитель
д.ф.-м.н. профессор

В.Л. Дербов

Заведующий кафедрой
компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется необходимостью повышения знаний студентов в области квантовой физики как основы современных технологий.

Цель работы – расширить познания студентов в области квантовой физики, так как в классических курсах атомной физики у студентов представления о фотонах остаются на уровне гипотезы Планка, фотоэффекта и эффекта Комптона.

Задачами работы являются: ответы на вопросы, возникающие при прочтении стандартных книг по атомной и квантовой физике, и расширение понимания о фотонах читающих.

Метод исследования теоретический: Аргументированное обсуждение вопросов потребовало привлечения сведений из специальных книг и статей по квантовой оптике, выходящих за рамки программы по общей физике.

Объект исследования – квантовая оптика. **Предмет исследования** – отражение законов квантовой оптики в учебных материалах.

Методическая значимость работы обусловлена возможным использованием в учебном процессе в качестве дополнительного материала для преподавателей и студентов, желающих расширить свои знания и углубить понимание ряда вопросов, касающихся квантовых состояний света и их теоретического описания.

Структура ВКР. Выпускная квалификационная работа (ВКР) содержит введение, 3 главы, заключение, список использованных источников (31 наименование).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются аспектные характеристики выпускной работы (актуальность, цель, задачи, методы исследования, объект и предмет исследования, новые результаты и т.д.).

Первая глава носит название «Квантование электромагнитного поля. Фотоны». Она состоит из 6 пунктов: процедура квантования в резонаторе, состояния поля с определенной энергией, вырожденные моды и перепутанные состояния, “состоит ли свет из фотонов?”, разложение по плоским, волнам и квантование поля в свободном пространстве и экспериментальная демонстрация фоковских состояний. В первом пункте мы постарались ответить на вопросы, возникающие при изучении процедуры квантования в резонаторе. Дальше мы постарались понятно объяснить, что такое фотоны и дали определение фоковским состояниям. В следующей главе мы утверждаем, что разные моды поля могут иметь совпадающие частоты (вырождение), тогда собственные векторы оператора полной энергии не являются единственными. А при наличии вырождения мод по частоте, множество состояний поля с определенной энергией включает бесконечное число состояний типа, кото-

рые нельзя представить в виде произведений. Такие нефакторизуемые состояния - пример перепутанных или запутанных квантовых состояний.

остоит ли свет из фотонов? Этот вопрос мы бы хотели внимательней разобрать. Многие считают, что термин «фотон» означает только порцию энергии поля. Оказавшись в фоковском состоянии, поле характеризуется энергией, которая складывается из энергий отдельных порций $\hbar\omega_k$. А электромагнитное поле (свет) состоит из фотонов, а фотон является частицей света. Но это не совсем так. Почему же? Практика показывает, что ни один из распространенных источников света (солнце, огонь, различные лампы, светодиоды, лазеры) не генерирует свет в фоковских состояниях! Ведь фоковские состояния можно добиться только в специально поставленных экспериментах. Получается, энергия и число фотонов, уже не имеют вполне определенного значения, а измеряются с некоторым статистическим разбросом. В свете сказанного, утверждение «свет состоит из фотонов» нельзя понимать так, как мы понимаем утверждения «кристаллическая решетка состоит из ионов» или «атом водорода состоит из ядра и электрона». Еще одним устойчивым заблуждением является представление о фотоне как о носителе определенного импульса. В традиционном курсе атомной физики объяснение эффекта Комптона дается на основе законов сохранения импульса и энергии в модели столкновения электрона и фотона как двух материальных точек. Для правильного взгляда на импульс фотона необходимо понимание того, что моды резонатора могут иметь разнообразную пространственную структуру в зависимости от его размеров и формы. Почему же представление о фотонах с определенным импульсом во многих случаях справедливо? По той же причине, по которой в обычной оптике работает приближение плоских волн. Любая волна с гладкой поверхностью волнового фронта является локально плоской на малом участке поверхности. Так как понятие суперпозиции в настоящее время выходит на передний план квантовой науки, потому что именно оно лежит в основе кубита. И на наш взгляд, в современных программах по атомной и квантовой физике, этому важнейшему понятию уделяется недостаточно внимания. При изучении элементарной атомной физики (начиная с постулатов Бора) вырабатывается стойкое убеждение, что квантовые системы (атомы) большую часть времени находятся в стационарных состояниях с определенной энергией, между которыми с определенной вероятностью совершают переходы под действием внешних возмущений. На самом деле атомы могут быть приготовлены в любой суперпозиции стационарных состояний. Так же стоит акцентировать внимание обучаемых на том, что для атомов состояния с определенной энергией на практике типичны, а для электромагнитного поля, напротив, их получение и детектирование требуют немалых усилий и затрат.

Далее мы демонстрируем установку для наблюдения состояний с определенным числом фотонов.

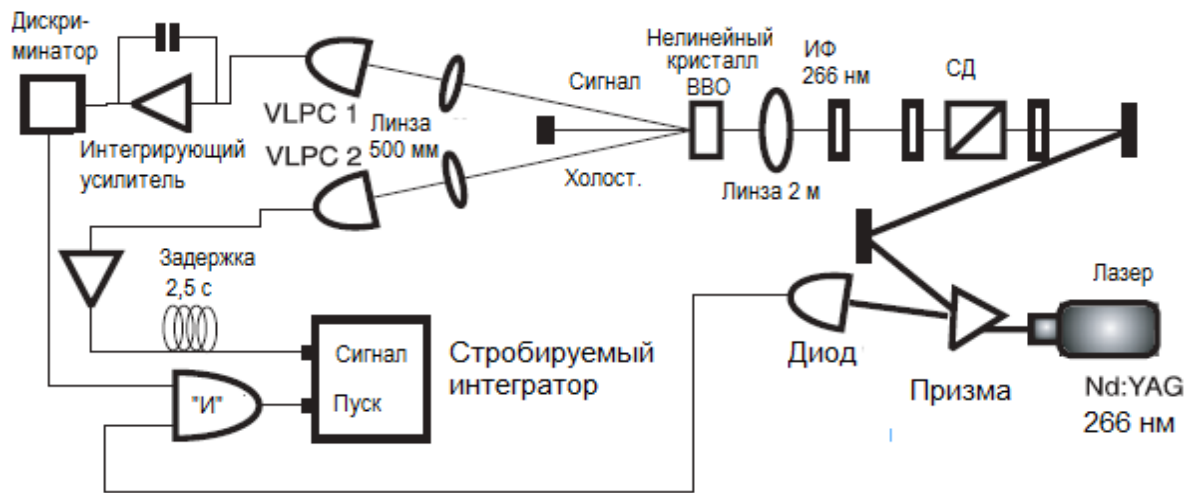


Рис. 1. Схема установки для наблюдения состояний с определенным числом фотонов

В этой схеме при одномодовой накачки получаются фоковские состояния. Если же накачка многомодовая, то получается суперпозиция мод, однако, получаемое состояние все равно является состоянием, в котором число фотонов имеет вполне определенное значение.

Вторая глава носит название «Квантовые состояния одной моды электромагнитного поля». Здесь идет речь о квантовых состояниях одной моды электромагнитного поля. Эта глава состоит из 3 пунктов: Неклассичность фоковских состояний, Феноменологическая теория фотонов: плюсы и минусы, Когерентные состояния. В начале этой главы мы хотели обсудить “неклассичность” фоковских состояний.

Фоковские состояния обладают свойствами, несовместимыми с классической оптикой. Таким образом, не только наивные представления о фотонах, но и знание квантования поля, оставляют в физическом мировоззрении не устраненный разрыв между фотонами и волновой оптикой. В фоковском состоянии среднее значение напряженности электрического поля в любой точке пространства и в любой момент времени равно нулю:

$$\langle \mathbf{E} \rangle \equiv \langle n | \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) | n \rangle = 0$$

Аналогичное соотношение имеет место для среднего значения магнитного поля. Если среднее поле равно нулю, то где же заключена вся энергия света в фоковском состоянии? Конечно, в *флуктуациях* поля, величина которых характеризуется дисперсией, которая для напряженности электрического поля в фоковском состоянии вычисляется как

$$\sigma_{\mathbf{E}}^2 = \langle (\mathbf{E} - \langle \mathbf{E} \rangle)^2 \rangle = \langle \mathbf{E}^2 \rangle = 4\pi\hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) |\mathbf{u}(\mathbf{r})|^2 = 4\pi E_n |\mathbf{u}(\mathbf{r})|^2$$

Эта величина всегда отлична от нуля и положительна. Она пропорциональна энергии поля E_n и не зависит от времени.

Таким образом, фоковские состояния не обеспечивают перехода к классическому описанию в пределе низких частот и больших амплитуд. А справедливость такого описания подтверждается экспериментом. Это позволяет говорить о фоковских состояниях как о неклассических состояниях электромагнитного поля. «Неклассичность» этих состояний проявляется и в статистических свойствах.

В следующем пункте мы даем определение феноменологической теории фотонов и определяем ее минусы и плюсы. Пропорциональность плотности энергии поля квадрату модуля комплексной амплитуды моды дает основание для феноменологической теории фотонов, в которой классическое поле является амплитудой плотности вероятности обнаружить фотон. Несомненным плюсом является возможность описать явления классической оптики, например, интерференционные полосы, как результат многократного попадания фотонов в разные точки фоточувствительной матрицы, вероятность которого пропорциональна классической интенсивности. А минусом, обладание вредным побочным эффектом с точки зрения понимания теории. Так как у частиц, например, электронов, есть волновая функция $\psi(\mathbf{r}, t)$, такая что $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ - это плотность вероятности обнаружения частицы. Трудно не сделать вывода, что электрическое поле - это и есть координатное представление волновой функции фотона. Однако такая трактовка принципиально неверна и сильно мешает правильному усвоению идей квантовой оптики.

Переходим к самому большому пункту нашей работы, к когерентным состояниям. Излучение непрерывного стабилизированного одномодового лазера, обеспечивает максимальный контраст интерференционных полос - свидетельство когерентности. Какое же квантовое состояние поля генерируют такие источники? Это так называемые когерентные состояния поля. Хорошо известный факт сильные поля лучше описываются классической теорией. Исходя из этого мы можем заключить, что на практике состояния поля достаточно часто бывают близки к когерентным. Когерентные состояния – суперпозиция фоковских состояний:

Когерентные состояния обеспечивают минимальное возможное произведение неопределенностей для квадратурных компонент электрического поля. При этом сами эти неопределенности равны друг другу. Данное свойство является основным характеристическим свойством когерентных состояний и может быть принято за определение таковых. Тогда когерентными называются состояния с наименьшим произведением равных неопределенностей, а то, что они являются собственными для оператора уничтожения, выводится как следствие. Для практики это не меняет дела, так как когерентным состояниям присущи оба свойства.

Поскольку наличие квантовых неопределенностей (неустранимого квантового шума) является принципиальным отличием квантовых измерений от классических, можно сказать, что поведение когерентных состояний в указанном смысле наиболее близко к классическому описанию. Именно на это указывается в большинстве учебников, мы же еще раз подчеркнем, что

близость к классическому описанию в случае когерентного состояния поля ярко выражается в поведении средних значений наблюдаемых величин, в частности, электрического поля. Особенно если поле сильное, и его квантовая неопределенность намного меньше амплитуды колебаний. Для плоской монохроматической волны среднее значение поля в когерентном состоянии меняется в пространстве и времени как эта волна.

Квантовая неопределенность (дисперсия) убывает с ростом среднего числа фотонов. Именно поэтому поля мощных когерентных лазеров прекрасно описываются классикой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассмотрены ответы на вопросы освещения физики квантовых состояний светового поля и ошибочных представлений о корпускулярной оптике, связанных с пробелами в учебном материале по атомной и квантовой физике. Указаны плюсы и минусы феноменологической оптики фотонов, в которой электрическое поле играет роль амплитуд плотности вероятности обнаружения фотона и проанализированы свойства когерентных состояний, позволяющие проследить связь между классическим и квантовым описанием поля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Weiskopf V., Wigner E. Zs. Phys. 63, 54; 65, 18 (1930)
2. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. М: ИЛ, 1956]
3. Шпольский, Э. В. Атомная физика: учебник: в 2 томах - 8-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, Т.1 : Введение в атомную физику - 2010. - 560 с.
4. Глаубер Р., Оптическая когерентность и статистика фотонов, в кн.: Квантовая оптика и квантовая радиофизика, пер. с англ. и франц., М., 1966
5. Глаубер Р.Дж., Холл Дж.Л., Хэнш Т.В. Нобелевские лекции по физике - 2005 // УФН. 2006. Т. 176. С. 1341
6. Hanbury Brown R., Twiss R. Q. Interferometry of the intensity fluctuations in light. I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation // Proceedings of the Royal Society A. 1957. V. 242. No. 1230. P. 300–324.
7. Клышко Д.Н. Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты // Успехи физических наук, 1994. Т. 164, № 11. С. 1187-1214.
8. Гринштейн Дж., Зайонц А.. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. Долгопрудный: Интеллект , 2008. 400 с.
9. М. Нильсен, И. Чанг. Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир, 2006. 824 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Физматлит, 2016. 800 с.
11. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М.: Высшая школа, 1976. 660 с.

12. Давыдов А.С. Квантовая механика: Учебное пособие. СПб: ВНУ, 2011. 704 с.
13. Борисов А.В. Основы квантовой механики. Физический факультет МГУ, 1998 г. <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1161226&uri=page7.html#6-3>.
14. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика. М.: Физматлит, 2003. 512 с.
15. Килин С.Я. Квантовая оптика. Поля и их детектирование. М.: УРСС, 2003.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Физматлит, 2012. 536 с.
17. Баргатин И.В., Гришанин Б.А, Задков В.Н.. Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физических наук, 2001. Т. 171, №. 6, с. 625-647.
18. Clauser J.F. Experimental distinction between the quantum and classical field theoretic predictions for the photo-electric effect // Phys. Rev. D, 1974. V. 9. P. 853-860.
19. Grangier P., Roger G., Aspect A. Experimental evidence for a photon anti-correlation effect on a beamsplitter // Europhys. Lett., 1986. V. 1. P. 173-179.
20. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Т. 1. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 759 с.
21. Yamamoto Y., Haus H.A.. Preparation, measurement and information capacity of optical quantum states // Rev. Mod. Phys., Vol. 58, 1986. pp. 1001-1020.
22. Caves C.M., Drummond P.D.. Quantum limits on bosonic communication rates // Rev. Mod. Phys., Vol. 66, 1994. pp. 481-538.
23. Kim J., Benson O., Kan H., Yamamoto Y.. A single-photon turnstile device // Nature, Vol. 397, 1999. pp. 500-503.
24. Lounis B., Moerner W.E.. Single photons on demand from a single molecule at room temperature // Nature, Vol. 407, 2000. pp. 491-493.
25. Michler P., Kiraz A., Becher C., Schoenfeld W.V., P.M. Petroff, Zhang L., Hu E., Imamoglu A.. A quantum dot single-photon turnstile device // Science, Vol. 290, No. 5500, 2000. pp. 2282-2285.
26. Santori C., Pelton M., Solomon G., Dale Y., Yamamoto Y. Triggered Single Photons from a Quantum Dot // Phys. Rev. Lett., Vol. 86, 2001. pp. 1502-1506.
27. Yuan Z., Kardynal B.E., Stevenson R.M., Shields A. J., Lobo C.J., Cooper K., Beattie N.S., Ritchie D.A., Pepper M. Electrically driven single-photon source // Science, Vol. 295, No. 5552, 2002. pp. 102-105.
28. Varcoe B.T.H., Brattke S., Weidinger M., Walther H.. Preparing pure photon number states of the radiation field // Nature, Vol. 403, 2000. pp. 743-746.
29. Brown K.R., Dani K.M., Stamper-Kurn D.M., Whaley K.B. Phys. Rev. A. Deterministic optical Fock-state generation // Phys. Rev. A, Vol. 67, 2003. P. 043818.
30. Waks E., Diamanti E., Yamamoto Y. Generation of photon number states // New Journal of Physics, Vol. 8, No. 4, 2006.
30. Turner G. et al. Workshop on Scintillating Fiber Detectors (Notre Dame University) // Visible photon counters for scintillating fiber applications: I. Characteristics and performance. Paris. 1993. P. 613.
31. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.