

О ДРОБЛЕНИИ КВАНТОВ

Л. В. Прохоров

НИИ физики им. В. А. Фока, Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Обсуждаются вопросы о природе частиц, волновых функций и возможности дробления квантов.

The following problems are discussed: nature of particles, wave functions and possibility of breaking of quanta.

PACS: 03.65.Ud, 03.65.Ta

1. На страницах журнала «Успехи физических наук» оживленно дискутировался вопрос о возможности дробления электрона на две половинки [1–4]. Его важность связана как с экспериментальными исследованиями (дробный квантовый эффект Холла [5]), так и с теоретическими работами [6–9]. В упомянутых публикациях [1–4] главным образом обсуждался конкретный случай дробления пузырька с электроном в жидком гелии.

2. Следует подчеркнуть, что для ответа на этот вопрос прежде всего необходимо иметь четкие ответы на более «простые» вопросы:

1. Что есть частица?
2. Что есть волновая функция?

Дискуссия велась в рамках общепринятых представлений, сформировавшихся в 20-х гг. прошлого века: частица (электрон, фотон) есть точечный объект [3], вопрос о смысле волновой функции обсуждается по сей день [10], ставятся эксперименты [11, 12].

Между тем эти представления о волновых функциях и частицах заведомо неудовлетворительны, что подчеркивается следующим общеизвестным фактом. П. Дирак в своей книге [13, с. 27] писал: «... каждый фотон интерферирует лишь с самим собой. Интерференции между двумя разными фотонами никогда не происходит». Однако еще в 1956 г. наблюдалась интерференционная картина с участием двух фотонов [14] (см. обсуждение в [7, с. 80]). Недавно аналогичный опыт был осуществлен с участием фермионов [15]. Разумеется, двухфотонная волновая функция $\psi(x_1, x_2)$ не может описать их интерференцию, на чем и базировалось упомянутое утверждение П. Дирака. В 1950–1951 гг. Д. И. Блохинцев и Я. И. Френкель опубликовали статьи [16, 17], в которых давалось ныне общепринятое определение: частица есть квант, одночастичное возбуждение поля. Но возбуждение поля с конечной энергией заведомо не может быть локальным — поле, возбужденное в одной точке, обладает бесконечной энергией. Все утверждения о свойствах частиц (квантов) должны базироваться на теории квантованных полей.

Это относится и к понятию волновой функции. В квантовой теории, скажем, скалярного поля $\hat{\varphi}(x)$ волновая функция частицы с импульсом \mathbf{p} в координатном представлении задается матричным элементом

$$\psi_p(x) = \langle 0 | \hat{\varphi}(x) | p \rangle = e^{-ipx}, \quad px = p_0x_0 - \mathbf{p}\mathbf{x}, \quad (1)$$

или, в более общем виде, используя оператор $\hat{\varphi}(f) = -i \int d^3x f(x) \overleftrightarrow{\partial}_0 \hat{\varphi}(x)$, имеем

$$\psi_p(f) = \langle 0 | \hat{\varphi}^+(f) | \mathbf{p} \rangle = i \int d^3x f^*(x) \overleftrightarrow{\partial}_0 e^{-ipx}, \quad (2)$$

где $f(x)$ есть, по определению, волновая функция частицы (надлежащая нормировка подразумевается). Вектор $\hat{\varphi}(f)|0\rangle$ отвечает одночастичному возбуждению поля, поле возбуждено лишь в той области пространства, где $f(x) \neq 0$. Функция $f(x)$ характеризует также степень возбуждения осцилляторов поля.

Закключаем: частица есть квант, одночастичное возбуждение поля, все волновые свойства частиц есть проявления волновых свойств поля. Волновая функция характеризует возбуждение поля, частицу можно обнаружить только в той области пространства Δx , где поле возбуждено, т. е. где функция $f(x)$ отлична от нуля.

3. Теперь находят естественное объяснение все известные факты. Фотон — не точка, он характеризуется своей длиной (объемом) когерентности (это понятие появилось еще в XIX в.). В опыте Брауна и Твисса наблюдалась интерференция двух возбуждений электромагнитного поля. Становится понятной причина «точечности» частиц — это есть следствие локальности взаимодействия полей [7]. Проясняется и сущность соотношения неопределенностей: «частица» может быть зарегистрирована в любой точке ее объема когерентности. Соответствующее распределение по импульсу получается с помощью преобразования Фурье, причем, как известно из математики, $\Delta x \Delta k \geq 1$, где k — волновое число ($2\pi/\lambda$). В квантовой механике $p = \hbar k$, откуда следует неравенство $\Delta x \Delta p \geq \hbar$. Таким образом, соотношение неопределенностей характеризует свойства одночастичного возбуждения полей.

Вопрос о природе амплитуд вероятности — особый, в настоящее время он изучается [18, 19, 7–9]. П. Дирак писал [20, с. 157]: «На вопрос, что является главной чертой квантовой механики, я склонен теперь ответить, что это не некоммутативная алгебра. Это существование амплитуд вероятности, лежащих в основе всех атомных процессов». Возможность аксиоматизировать вероятностную теорию, базирующуюся на амплитудах вероятности, рассмотрена в [7]. В [9] показано, каким образом описание с помощью амплитуд вероятностей может появиться в классической физике. Разумеется, данный феномен имеет место только на планковских расстояниях $l_P \sim 10^{-33}$ см.

Как ясно из вышесказанного, следует различать вопросы о природе амплитуд вероятности и о смысле волновой функции. Первый касается причин появления в физике комплексных вероятностных функций, второй — природы понятия «частица» и физического смысла сопоставляемой ей комплексной функции. Одночастичное возбуждение поля при взаимодействии с другими квантами ведет себя как неделимый объект («частица»). Надо полагать, что устойчивость таких возбуждений поля связана с энергией взаимодействия образующих его осцилляторов. При взаимодействии полей один из возбужденных осцилляторов, скажем, электромагнитного поля начинает передавать свою энер-

гию осциллятору заряженного поля (локальность). Но это не может не повлиять на соседние осцилляторы, ибо допустимы только непрерывные конфигурации полей [7, с. 30]. Процесс взаимодействия не закончится, пока остальные возбужденные осцилляторы не передадут свою энергию данному. Если допустить, что расстояния между осцилляторами порядка длины Планка l_P , то энергия разрывного состояния поля в одномерной теории равна $E \sim \gamma(\Delta\varphi/\Delta x)^2 \Delta x \sim \gamma(\Delta\varphi)^2 l_P^{-1}$, т. е. она огромна, если $\gamma(\Delta\varphi)^2 \sim 1$. Это проясняет причину того, что одночастичные возбуждения при взаимодействии друг с другом ведут себя как неделимые объекты. Для того, чтобы раздробить квант на две половинки, нужны макроскопическая энергия, макроскопические тела. В случае дробного квантового эффекта Холла роль макроскопического объекта играет внешнее магнитное поле.

4. Нет никаких законов, запрещающих деление возбуждения поля на две или более частей. Для этого требуются лишь макротела, обладающие макроскопическими энергиями. В случае фотонов роль такого макротела может играть полупрозрачное зеркало (сплиттер). Соответствующий эксперимент был предложен в [21]. В настоящее время он реализуется в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (группа Н. Т. Баграева). Особенность эксперимента — в малой интенсивности источника: исследуются отдельные кванты, что позволяет избежать возможных эффектов, связанных с группировкой фотонов. Уже полученные результаты исключают стандартную трактовку фотона как неделимой частицы, а сплиттера — как прибора, который с вероятностью 1/2 может его или пропустить, или отразить. В [9] предложен аналогичный опыт с ультрахолодными нейтронами, дана оценка времени жизни половинок нейтрона (оно увеличивается в 32 раза).

Что касается возможности дробления электрона в опыте с пузырьком в жидком гелии, то здесь важно различать *принципиальную* возможность дробления квантов и возможность их дробления в данном конкретном случае. Для того, чтобы судить об этом, нужно знать пределы применимости модели Х. Мариса [22], учитывать методику эксперимента и конкретные возможности экспериментатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В. П. // УФН. 2006. Т. 176. С. 1007.
2. Рубаков В. А. // Там же. С. 1014.
3. Пятаевский Л. П. // УФН. 2007. Т. 177. С. 115.
4. Федичкин Л. Е. // Там же. С. 579.
5. Tsui D. C., Stoermer H. L., Gossard A. C. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 1559.
6. Jackiw R., Rebbi C. // Phys. Rev. D. 1976. V. 13. P. 3398.
7. Прохоров Л. В. Квантовая механика — проблемы и парадоксы. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2003.
8. Прохоров Л. В. // Вестн. СПбГУ. 2001. Сер. 4. № 4. С. 101.
9. Прохоров Л. В. // ЭЧАЯ. 2007. Т. 38. С. 696.
10. Aspect A. // Nature. 2007. V. 446. P. 866.

11. Rowe M. A. et al. // Nature. 2001. V. 409. P. 791.
12. Groeblacher S. et al. // Nature. 2007. V. 446. P. 871.
13. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики. М.: Физматгиз, 1960.
14. Hanbury Brown R., Twiss R. Q. // Nature. 1956. V. 177. P. 27.
15. Jelts T. et al. // Nature. 2007. V. 445. P. 402.
16. Блохинцев Д. И. // УФН. 1950. Т. 42. С. 76; 1951. Т. 44. С. 104.
17. Френкель Я. И. // УФН. 1950. Т. 42. С. 69; 1951. Т. 44. С. 110.
18. 't Hooft G. // Class. Quant. Grav. 1999. V. 16. P. 3263.
19. Adler S. Quantum Theory as an Emergent Phenomenon. Cambridge Univ. Press, 2004.
20. Dirac P. A. M. // Fields and Quanta. 1972. V. 3. P. 139.
21. Прохоров Л. В. О принципиальных проблемах квантовой механики. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2002.
22. Maris H., Valibar S. // Phys. Today. 2000. V. 54, No. 2. P. 29.

Получено 26 апреля 2008 г.