

## **УДИВИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕРЫ ОТЛИЧИЯ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ**

*Работа представлена кафедрой методики обучения физике.*

*Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор А. А. Гриб*

*При изучении квантовой механики студентам часто бывает сложно воспринимать принципы этой области физики. Она обладает некоторыми чертами, которые необычны в классической механике. Чтобы понять, как квантовый мир отличается от классического, можно предложить несколько задач.*

**Ключевые слова:** *физика, квантовая механика, волновая функция, вероятность, мысленный квантовый эксперимент.*

## EXTRAORDINARY EXAMPLES OF THE DIFFERENCE BETWEEN QUANTUM AND CLASSICAL PHYSICS

*When students study quantum mechanics it is often difficult for them to perceive principles of this area of physics. It has some features that seem unusual in classical physics. In order to understand the difference between the quantum and classical worlds, it is possible to set several problems.*

**Key words:** *physics, quantum mechanics, wave function, probability, imaginary quantum experiment.*

Физика возникла как наука о природе, в которой для описания физических законов используются точные математические методы. Классическая физика была создана в Средние века. Квантовая физика возникла в начале XX в. Как известно, в основе классической физики лежит механика, а в ее основе – законы Исаака Ньютона. В основе квантовой механики лежит принцип суперпозиции состояний. Итак, между ними существуют принципиальные отличия.

Классическая физика является наукой детерминированной, случайность в ней обычно связывается с нашим незнанием. В квантовой физике вероятность имеет фундаментальное значение и не связана с нашим незнанием. В классической физике можно думать, что мы описываем природу как она есть сама по себе, независимо от используемых нами средств наблюдения. В квантовой физике это не так, результат наблюдения принципиально зависит от того, каким прибором мы пользуемся.

Интересно более подробно остановиться на примерах, иллюстрирующих различия между этими теориями. Как известно, в классической физике исследуемый объект находится лишь в каком-то одном или в другом состоянии. К примеру, учащийся может бегать на улице или кушать в столовой. Однако он не может быть в этих двух местах в одно и то же время, что могло бы соответствовать суперпозиции этих состояний.

Тем не менее в природе для микрочастиц имеет место и совершенно другая ситуация, когда объект находится в суперпозиции состояний. Иными словами, происходит наложение двух или большего числа состояний друг на друга без какого-либо взаимного влияния. Например, экспериментально доказано, что один

объект, который мы, по привычке, называем частицей, может как бы одновременно проходить через две щели в непрозрачном экране. Частица, проходящая через первую щель, – это одно состояние, та же частица, проходящая через вторую, – другое. И эксперимент показывает, что наблюдается сумма этих состояний. В таком случае говорят о суперпозиции состояний, или о чисто квантовом состоянии. Речь идет о квантовой суперпозиции (когерентной суперпозиции), т. е. о суперпозиции состояний, которые не могут быть реализованы одновременно с классической точки зрения. Состояния квантовой частицы описываются посредством так называемой волновой функции, которую также называют вектором состояния [4, с. 7–10]. Можно сказать, что волновая функция описывает «программу» поведения электронов. Как в компьютере есть «железо» и программа, так и в квантовом мире электрон (частица) играет роль «железа», а волновая функция – программы. Программа описывает, что можно делать электрону, а что нельзя. Существуют различные программы его поведения, они зависят от условий наших наблюдений. Когда меняется прибор наших наблюдений, меняется и программа. Можно сравнить это с воздействием красного или зеленого сигнала на автомобилиста. Это не физическое воздействие, однако оно задает действие водителя. В соответствии с программой, которая задается водителю светофором, он едет дальше или останавливается.

Для того чтобы разобраться в этих понятиях, можно рассмотреть классический двухщелевой эксперимент, который был описан Фейнманом. Из него следует, что когда наблюдатель смотрит на электрон и фиксирует его состояние, то электрон ведет себя как обычная частица. А когда

наблюдатель на него не смотрит, электрон проявляет волновые свойства. (Действительно, электрон ведет себя как волна, но это не обычная, физическая волна, а комплексная волна вероятности, которую невозможно увидеть.)

Так, электрон как бы «чувствует», что за ним смотрят, и ведет себя в соответствии с действиями наблюдателя. Выходит, наблюдение как бы «вырывает» объект из совокупности неопределенных квантовых состояний и переводит его в проявленное, наблюдаемое состояние [5, с. 199–212].

Оказывается, если измерение, проведенное над классической системой, может и не оказать никакого влияния на ее состояние, для квантовой системы это не так. В связи с этим интересно разобрать некоторые задачи вместе со студентами, которые проиллюстрируют различия классического и квантового миров. Итак, любопытен следующий случай, предложенный Элитзуром и Вайдманом [2]: ниже представлен интерферометр, имеющий два оптических входа (рис. 1).

Фотон выстреливается в точку 1, где установлено полупрозрачное зеркало. Он может попасть в точку 3, пройдя по пути 1–2–3, либо 1–4–3. Если нет возможности проверить, по какому пути прошел фотон, то в точке 3 мы будем наблюдать интерференционную картину. Пусть при интерференции детектор 2, установленный вблизи точки 3, всегда дает ответ «да», а детектор 1 всегда дает ответ «нет».

Однако, если каким-либо образом мы можем проследить, по какому пути прошел фотон, интерференция не наблюдается и тогда детектор 1 может дать ответ «да». Теперь представьте, что человек раздобыл две разные бомбы. Одна из них никогда не взорвется, если на ее поверхности окажется фотон, а другая может взорваться, если фотон достигнет ее поверхности.

Можем ли мы провести эксперименты с фотонами и понять, взорвется ли одна из бомб, не взрывая ее? С точки зрения классической физики это невозможно, однако какой ответ дает квантовая физика? Проведем три эксперимента. Посмотрим, что будет происходить, когда:

I – бомбы вообще нет;

II – установлена бомба, которая не взрывается, если на ее поверхности окажется фотон, он просто полетит сквозь нее;

III – установлена бомба, которая взрывается, если на ее поверхность попадает фотон, при этом фотон все равно полетит дальше.

Итак,

I – когда бомбы нет, мы сможем наблюдать интерференционную картину. Детектор 2 даст ответ «да», а 1 – «нет».

Теперь установим бомбу на входе 1–4–3.

II – вначале установим невзрывающуюся бомбу. В данном случае между бомбой и фотоном не будет взаимодействия, и мы будем наблюдать интерференционную картину. Детектор 2 даст ответ «да», а детектор 1 всегда

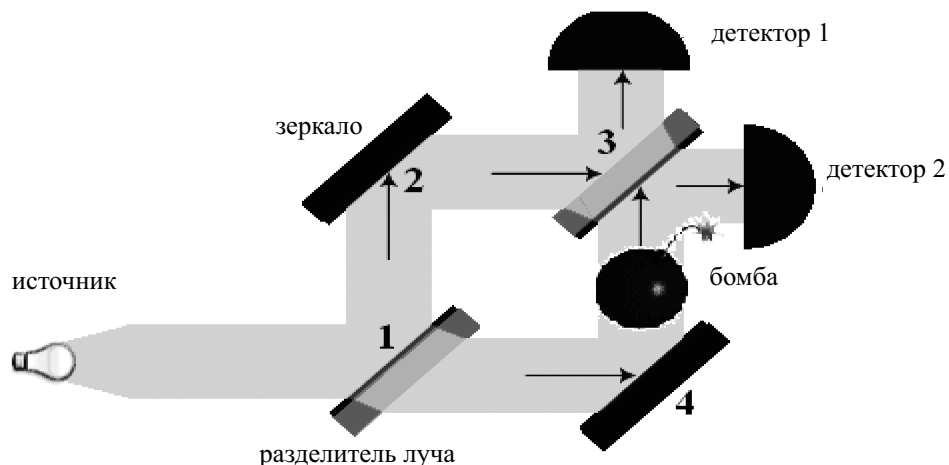


Рис. 1. Пример, предложенный Элитзуром и Вайдманом

дает ответ «нет». Так, этот случай аналогичен первому.

III – теперь мы имеем дело с бомбой, которая взрывается от попадания фотона на ее поверхность. Здесь следует принять во внимание, что для квантовой частицы важна сама вероятность взрыва (из-за того что бомба может взорваться, мы можем знать путь, пройденный фотоном в интерферометре), и интерференционная картина исчезает. Существует любопытная вероятность отрицательного эксперимента, когда бомба, установленная в 1–4–3, может взорваться, но этого не происходит, так как фотон движется по пути 1–2–3! Тогда детектор 1 дает ответ «да». Интерференционная картина исчезает, и мы поймем, что оружие взорвется, если фотон коснется его поверхности, не взрывая бомбы! Удивление состоит в том, что в классической физике мы не могли бы получить такую информацию. Квантовая частица, проходя по 1–2–3, как бы «чувствует» наличие бомбы в 1–4–3 [2, р. 164].

Также интересно рассмотреть отрицательный эксперимент Реннингера [3, р. 417–421]. Схема этого эксперимента изображена на рис. 2. Есть два сферических экрана, один из которых имеет отверстие. В центре находится источник электронов. Экраны покрыты сцинтиллирующим веществом, т. е. когда на них попадают электроны, то они начинают светиться. Итак, происходит  $\beta$ -распад и вы-



Рис. 2. Эксперимент Реннингера

летает электрон. Он имеет импульс  $p$ . Если экран 1 светится, значит, электрон попал в него. Если же экран 1 не светится, значит, электрон пролетел через отверстие. Таким образом, мы располагаем информацией, что электрон не попал в экран 1, мы имеем отрицательное знание. Это наше отрицательное знание меняет волновую функцию (которая зависела от импульса). Следовательно, импульс стал другим. Импульс электрона изменился, несмотря на то что ему не сообщили энергии, никакого взаимодействия не было. Это произошло, потому что мы что-то узнали [2, с. 163]. Другими словами, электрон («железо» в компьютере) имел до отверстия (до бомбы) одну программу поведения, а после него – другую. Программа зависит от сознания наблюдателя. Как сказал Де Бройль, программа – это определенная организация поведения электрона. Программа описывает все возможности электрона. Когда меняется информация, меняются и возможности. Такой эксперимент с двумя экранами еще не был поставлен, однако это можно сделать. Можно нанести на экран 2 сцинтиллирующее вещество, которое будет светиться, когда импульс электрона будет больше определенного значения. При этом импульс электрона в источнике должен быть меньше этого значения. Так, по вспышке на экране 2 мы определим, что импульс электрона стал больше.

Итак, при изучении квантовой механики важно помнить об особенностях этой области физики. Здесь не только сами объекты, но и наши знания об объектах влияют на получаемый результат. Как однажды Белл процитировал Йордана, наблюдения не только искажают величины, которые должны быть измерены, они их создают. Во время измерения координаты электрон вынужден принять решение. Мы вынуждаем его занять определенное положение в пространстве; до этого он не был там или в каком-либо другом месте, тогда он еще не выбрал определенное положение в пространстве [1, р. 660]. Действительно, изучаемые в квантовой механике величины до измерения как бы не существуют сами по себе, а проявляются в зависимости от наших знаний о них.

## ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ

---

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Am. J. Phys.* Vol. 69, No. 6, June 2001 F. Laloe.
2. *Grib A. A.* Nonlocality in Quantum Physics. New York, 1999. 225 p.
3. *Renninger M.* Messungen ohne störung des meЯ objects. *Zeit. Phys.* 158, 1960.
4. *Заречный М.* Квантово-мистическая картина мира: структура реальности и путь человека. СПб.: Весь, 2006. 224 с.
5. *Фейнман Р.* Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1977. Т. 3. 234 с.