

В. Л. Янчили́н

---

# КВАНТОВАЯ НЕЛОКАЛЬНОСТЬ



СЕРИЯ  
**REFFERO**



URSS

**В. Л. Янчилин**

**КВАНТОВАЯ  
НЕЛОКАЛЬНОСТЬ**



**URSS**  
**МОСКВА**

**Янчилин Василий Леонидович**

**Квантовая нелокальность.** — М.: КРАСАНД, 2010. — 144 с.

(Relata Refero.)

Изучив данную книгу, читатель поймет, что скрывается за пестрой математикой микромира, узнает, как «сиритотавливается» квантовое состояние и строится его волновая функция. На простых рисунках читатель сможет увидеть, как электрон проходит через два отверстия одновременно и как происходят знаменитые квантовые скачки.

Автор данной книги старался избежать существенного минуса большинства учебников по квантовой механике — недостаточной наглядности при изложении материала.

Для студентов естественно-научных специальностей, преподавателей, научных работников.

Издательство «КРАСАНД».

121096, Москва, ул. 2-я Филевская, 7, корп. 6.

Формат 60×90/16. Печ. л. 9. Зак. № 3198.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-396-00089-6

© КРАСАНД, 2009



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

# Оглавление

## Глава 1. Что можно ожидать от квантовой механики?

- 1.1. Кто первый обвинил квантовую механику в нелокальности? ..... 6
- 1.2. Любая физическая теория должна быть локальной!  
Или, все-таки, нет?..... 9
- 1.3. Какое нелокальное взаимодействие разрешается квантовой  
механикой? ..... 12
- 1.4. Квантовое состояние нельзя наблюдать непосредственно ..... 16
- 1.5. Собственный момент импульса или спин ..... 18
- 1.6. Чему равна проекция спина? ..... 19
- 1.7. Квантовая нелокальность в чистом виде ..... 21
- 1.8. Можно ли обойти нелокальность? ..... 23

## Глава 2. Дискретное движение - ключ к пониманию квантовых процессов

- 2.1. Есть ли альтернатива непрерывному движению? ..... 26
- 2.2. Может ли одна частица находиться сразу в двух удалённых  
друг от друга областях? ..... 29
- 2.3. Три правила дискретного движения ..... 37

## Глава 3. Квантовая механика - это очень просто!

- 3.1. Наглядный образ квантового движения ..... 41
- 3.2. Плотность вероятности ..... 43
- 3.3. Как складывать вероятности? ..... 45
- 3.4. Закон сложения вероятностей или зачем  
в квантовой механике нужны комплексные числа? ..... 46
- 3.5. Волновая пси-функция – это математический образ  
квантового состояния ..... 49
- 3.6. Квантовое состояние объекта – это его история ..... 50
- 3.7. Как определить квантовое состояние  
и построить волновую пси-функцию? ..... 53

## **Глава 4. Почему Эйнштейн так и не принял квантовую механику?**

4.1. Эйнштейн ставит вопрос ребром .....	59
4.2. Функция вероятности для белого шара в чёрном ящике .....	62
4.3. Функция вероятности для квантового объекта .....	63
4.4. Позиция Эйнштейна .....	65
4.5. Эксперимент с часами и его продолжение .....	69
4.6. О бессмысленности такого понятия, как точная координата .....	76
4.7. Ключевой момент спора – нелокальность .....	81

## **Глава 5. Квантовая логика**

5.1. Корпускулярно-волновой дуализм .....	85
5.2. Можно ли изменить состояние квантового объекта, никак не воздействуя на него? .....	89
5.3. Эксперимент Уйлера с отложенным выбором .....	92
5.4. Интерферометр Маха-Цандера .....	97

## **Глава 6. Эксперимент Эйнштейна - Подольского - Розена**

6.1 Формулировка эксперимента .....	102
6.2 Эксперимент Боба .....	106
6.3 Поляризация фотона .....	110
6.4 Решающий эксперимент .....	114
6.5 Ловушка редукционизма: только атомы и пустота .....	119

## **Глава 7. Квантовая экзотика**

7.1 Что следует требовать от хорошей интерпретации? .....	124
7.2 Почему исчезает интерференция? .....	128
7.3 Квантовый ластик .....	131
7.4 Квантовые киборги .....	135
Список литературы .....	141

## От издательства

Эта книга продолжает серию «Relata Refcro» (дословный перевод — рассказываю рассказанное).

Под этим грифом издательство предоставляет трибуну авторам, чтобы высказать публично новые идеи в науке, обосновать новую точку зрения, донести до общества новую интерпретацию известных экспериментальных данных, etc.

В споре разных точек зрения только решение Всликого судьи — Времени — может стать решающим и окончательным. Сам же процесс поиска Истины хорошо характеризуется известным высказыванием Аристотеля, вынесенным на обложку настоящей серии: авторитет учителя не должен довлеть над учеником и препятствовать поиску новых путей.

Мы надеемся, что публикуемые в этой серии тексты внесут, несмотря на свое отклонение от установившихся канонов, свой вклад в познание Истины.

## ГЛАВА 1

# ЧТО МОЖНО ОЖИДАТЬ ОТ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ?

Человек, который впервые серьёзно вникает в квантовую механику, как правило, время от времени впадает в прострацию и перестаёт что-либо понимать. Поэтому необходимо уже в первой главе предупредить читателя, *с чем именно он столкнётся.*

### **1.1. Кто первый обвинил квантовую механику в нелокальности?**

Несмотря на то, что я учился на физическом факультете Новосибирского государственного университета, и лекции по квантовой механике нам читал известный российский физик Иосиф Бенционович Хрипович, я совсем не слышал о нелокальности. И даже не припомню, чтобы кто-нибудь произносил это слово.

Узнал я о существовании такого слова совершенно случайно. Мы с друзьями возвращались после игры в футбол и, как обычно, что-то обсуждали. В какой-то момент один из моих приятелей Жора сказал:

– Я не могу принять квантовую механику, потому что это нелокальная теория.

Жора приехал в новосибирский Академгородок откуда-то из Средней Азии. Кто читал ему лекции по квантовой механике, мне неизвестно. Иногда он произносил фразы, которые трудно было понять. Пытаясь вникнуть в смысл его слов, я спросил:

– Жора, а что такое нелокальная теория?

– Нелокальная теория – это теория, которая допускает возможность мгновенного действия на расстоянии. Например, теория тяготения Ньютона, в которой гравитационное взаимодействие от одного тела к другому передается мгновенно.

– Что ты такое говоришь? Время нелокальных теорий закончилось в восемнадцатом веке. Да и тогда никто всерьез не верил в возможность мгновенного распространения взаимодействия. А после того как Фарадей ввел в физику понятие поля, всем стало ясно, что любое взаимодействие передается посредством поля с конечной скоростью. Я не верю, что квантовая механика, построенная после теории относительности, может быть нелокальной теорией. Скорее всего, ты говоришь о нерелятивистской квантовой механике, которая описывает поведение тел, движущихся во много раз медленнее света. В этом случае при передаче взаимодействия от одного тела к другому можно пренебречь временной задержкой. Но при желании эту задержку, разумеется, всегда можно учесть.

Но Жора стоял на своём. Дескать, нелокальность содержится в самой сути квантовой механики. И невозможно из нее удалить нелокальность, не разрушив при этом всё здание этой теории.

Сказанное Жорой шло вразрез с моим мировоззрением, и поэтому я не воспринял его слова всерьез. Если бы квантовая механика была нелокальной теорией, то об этом нам обязательно сообщили бы на лекциях в университете, мы обязательно обсуждали бы это на семинарах. Но как я уже сказал, ни на лекциях, ни на семинарах не то чтобы не обсуждали нелокальность, но и само такое слово вообще не произносили.

Область моих научных интересов не была связана непосредственно с квантовой механикой, но, тем не менее, часто



пересекалась с ней. И каждый раз во время такого пересечения я все глубже и глубже погружался в таинственный и удивительный квантовый мир. «Вот это да! – говорил я себе после очередного погружения. – Теперь понятно, что имел в виду Нильс Бор, когда говорил свою знаменитую фразу» [9,с.318]:

Если квантовая теория не вызывает на первых порах возмущения, то не может быть, чтобы её правильно поняли.

В такие минуты казалось, что я уже дошел до самых глубин парадоксального квантового царства. И совершенно не верилось, что в квантовом мире могло быть нечто ещё более невероятное и противоречивое, чем то, что я узнал. Но после нового погружения я был опять в недоумении и растерянности: «старые» парадоксы тускнели на фоне «новых».

Когда я приблизился к нелокальности, то вспомнил историю, рассказанную одним из наших профессоров про Ландау. Иногда Ландау, после обсуждения парадоксов квантовой механики со своими коллегами говорил примерно следующее: «Всё, в общем, ясно, но возможны каверзные вопросы, на которые может ответить только Бор» [10]. Эти слова врезались мне в память. Получалось, что Ландау не знал ответов на некоторые вопросы квантовой механики, и, более того, не стеснялся честно признаться в этом. Вполне может быть, что те самые вопросы возникали как раз по поводу квантовой нелокальности.

Постепенно причудливая музыка квантового мира становилась понятней, ближе, привычней. И, наконец, пришло прояснение. Я осознал изящество квантовых скачков и увидел всю красоту нелокальности.

Сейчас я знаю о нелокальности достаточно, чтобы написать эту книгу. И надеюсь, что смогу это квантовое явление изложить простым и понятным языком, доступным как специалистам по квантовой механике, так и не специалистам.

Более того, я уверен, что изучение квантовой механики следует начинать именно с рассказа о нелокальности. Ведь прежде чем объяснять школьникам закон Всемирного тяготения, им нужно сообщить о движении Земли. Глупо оставлять это сообщение на потом. Точно также, прежде чем знакомить студентов с формулами квантовой механики, им следует поведать о нелокальности. Тем более что это явление очень простое. Его смогут понять не только студенты-первокурсники, но и школьники старших классов, и вообще все интересующиеся устройством нашего мира.

Нелокальность – это просто!

Единственным препятствием, мешающим пониманию нелокальности, является *предубеждение* против этого явления. Большинство физиков почему-то уверено (да я и сам был такой), что этого не может быть, потому что этого не может быть никогда. И здесь, конечно, нужно напомнить основное правило физики: только грамотно поставленный эксперимент вправе решить, *что* существует в природе, а *что* – нет.

## 1.2. Любая физическая теория должна быть локальной! Или, все-таки, нет?

Нелокальность (по-английски nonlocality) означает отрицание локальности. Поэтому прежде чем обсуждать это явление, имеет смысл сказать несколько слов о локальности.

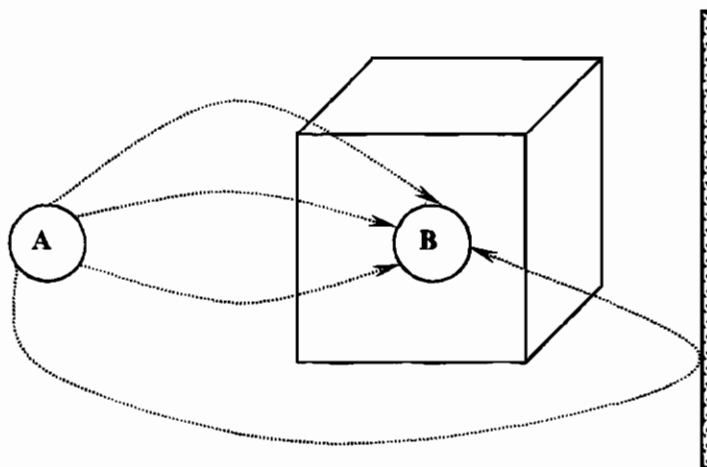
Так что такое локальная теория?

Это такая теория, в которой предполагается, что любое взаимодействие или действие передается строго локально, то есть распространяется в пространстве, последовательно проходя все точки.

Возьмем какой-нибудь физический объект, например, атом. Всё происходящее с ним зависит, во-первых, от его состояния и, во-вторых, от воздействия, оказываемого на него другими объектами, то есть от воздействия всей остальной Вселенной. Локальная теория подразумевает, что воздействие остальных тел

Вселенной на этот атом можно учесть, совершенно ничего не зная о состоянии Вселенной. Достаточно «контролировать» пространство, непосредственно окружающее атом. Воздействие прочих тел будет сводиться к тому, что свойства этого пространства несколько изменятся. Например, в нем могут появиться магнитные и электрические поля. Зная, как распределены различные поля в непосредственной близости от атома, мы сможем рассчитать, как будет изменяться его состояние.

То есть локальная теория подразумевает, что объект А не может непосредственно повлиять на объект В (см. рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Согласно принципу локальности воздействие объекта А (пунктирные линии со стрелками) на объект В будет как-то перемещаться в пространстве последовательно проходя все точки, лежащие между объектами. Контролируя пространство внутри куба, окружающего объект В, мы сможем полностью учесть влияние объекта А.

Для того чтобы произвести своё влияние, объект А должен направить к объекту В некий физический носитель, именуемый

полем. Это поле будет обладать и энергией, и массой, и оно будет двигаться от одного объекта к другому (в общем случае – по различным траекториям), последовательно проходя все точки, лежащие между ними. Зная характеристики этого поля в непосредственной близости от объекта В, мы сможем полностью учесть влияние объекта А. А если мы сможем оградить объект В оболочкой, непроницаемой для поля, генерируемого объектом А, то объект А *никак не сможет* повлиять на объект В.

Итак, согласно локальной теории одно тело не может непосредственно повлиять на другое, минуя разделяющее их пространство. И, кроме того, любое воздействие не может распространяться в пространстве быстрее света.

Принцип локальности достаточно прост и очевиден. Он подтверждается не только физическими экспериментами, но и всей историей человечества. Мы не можем «перепрыгивать» через расстояния. И не только мы – никто не может это делать. Даже свет вынужден «ползти» по пространству миллионы лет, чтобы попасть из одной галактики в другую.

Мысль о том, что одно тело может мгновенно повлиять на другое, «перепрыгнув» своим влиянием через разделяющее их пространство, выглядит дикой и абсурдной. Подобная телепатия хороша для фантастических романов и кинофильмов, наряду с вечным двигателем и машиной времени, но ей не место в научной картине мира. Все здравомыслящие физики убеждены в этом. По крайней мере, *были* убеждены до создания квантовой механики. Но после того как они столкнулись с парадоксальным поведением субатомных частиц, у некоторых из них зародилось сомнение. Объекты микромира вели себя так, как будто бы на них не распространялся принцип локальности. Следовало очень внимательно разобраться в сложившейся ситуации. И либо «спасти» принцип локальности, либо посредством простого и ясного эксперимента наглядно показать, что этот принцип в микромире *не выполняется*.

### 1.3. Какое нелокальное взаимодействие разрешается квантовой механикой?

Итак, локальная теория запрещает непосредственное воздействие одного тела на другое, минуя разделяющее их пространство. Соответственно, нелокальная теория допускает такое воздействие. Хорошим примером нелокальных (и ненаучных!) теорий является магия. Вот что утверждают два ее основных закона (подробнее, см. например [21]).

*Первый закон магии.* Если у вас есть некий предмет, который длительное время находился в контакте с интересующим вас объектом, то, манипулируя с этим предметом, вы можете оказывать влияние на данный объект.

*Второй закон магии.* Если вы сделаете точную копию некоторого объекта, то воздействие, оказываемое на нее, вызовет аналогичное воздействие на оригинал.

Эти законы наверняка известны тем читателям, которые смотрят фантастические триллеры, вроде «Иствикских ведьм». Разумеется, в научном мире их не воспринимают всерьез. Лично я также ничего не знаю о подтверждении этих законов по той простой причине, что совершенно не интересуюсь магией. Но меня интересует квантовая механика, которая тоже является нелокальной теорией, но которая, тем не менее, не магия. Поэтому очень важно подчеркнуть, *какое именно* нелокальное воздействие разрешается квантовой механикой, а какое – нет.

Суть квантовой нелокальности можно показать на следующем простом примере. Предположим, вы подбрасываете монету, и она случайным образом падает то «орлом», то «решкой». В соседней комнате ваш друг также подбрасывает монету. Обе монеты будут падать совершенно случайно и выпадение у вас, скажем, орла никак не будет зависеть от того, *что* выпадет у вашего друга.

Теперь предположим, что эти монеты являются квантовыми объектами и некоторое время находились в непосредственной близости, взаимодействуя друг с другом. В

этом случае, согласно квантовой механике, их поведение уже не будет независимым. Обе монеты окажутся связанными нелокальными связями, и поэтому будут представлять *единое целое*. Случайное выпадение у вас орла или решки будет зависеть от того, *что* выпало у вашего друга. Конкретный вид этой зависимости (корреляции) будет определяться исходным квантовым состоянием обеих монет. Например, может быть такая корреляция: если у вас выпадет орел, то у вашего друга – решка, и наоборот.

Конечно, монеты не являются квантовыми объектами, и подобная корреляция в их поведении не наблюдается. Этот пример нужен только для того, чтобы обозначить основные черты нелокального взаимодействия. Чтобы он был «ближе» к квантовой реальности, предположим, что каждая монета, прежде чем упасть, может длительное время находиться в «подвешенном» состоянии.

Скажем, каждая монета находится в черном ящике и вращается вокруг своей оси, стоя на ребре. И малейшее воздействие извне приводит к тому, что она теряет равновесие и падает. Но если внешнего воздействия нет, то монета может вращаться сколь угодно долго.

Итак, две монеты после взаимодействия друг с другом пришли во вращение. Затем их очень аккуратно поместили в черные ящики и удалили на большое расстояние друг от друга. Разберём вкратце основные черты нелокального взаимодействия, связывающего их, предполагая, что монеты являются квантовыми объектами.

Если мы подействуем на одну из монет так, что она упадет, то упадет и вторая. Причем «показания» монет будут скоррелированы между собой. Например, если одна выпадет решкой, то другая обязательно орлом, и наоборот.

Можно ли, воздействуя на одну монету, управлять другой?

Нет, нельзя. Мы можем, воздействуя на одну монету, заставить другую как-то упасть. Но мы не в состоянии сделать так, чтобы она упала, скажем, вверх орлом. Мы не можем это

сделать потому, что не в состоянии заставить первую монету упасть нужным нам образом. Воздействуя на нее, мы заставляем ее упасть. Но процесс ее падения – случайный, и заранее неизвестно, упадет она орлом или решкой. Тем не менее, вторая монета словно бы чувствует первую, и ее падение жестко связано с падением первой монеты. Эта жесткая связь двух случайных процессов, разделенных большим расстоянием, и называется нелокальностью.

Зависит ли эта связь от расстояния?

Нет, не зависит. Нелокальная связь *непосредственно* объединяет два объекта и совершенно не зависит от разделяющего их расстояния.

Какое максимальное расстояние было между квантовыми объектами в *реальных* экспериментах по нелокальному взаимодействию?

В 1997 году в Парижском Оптическом Институте группой Гизина (N. Gisin) был проведен корреляционный опыт с фотонами. Пары этих частиц, связанных нелокальными связями, разделялись на расстояние около 10 километров. Несмотря на такое расстояние, случайное поведение одного фотона было жестко связано со случайным поведением другого. Фотоны вели себя так, словно бы они чувствовали друг друга. Мы подробно разберем этот эксперимент в параграфе 6.4.

Сколько времени может существовать нелокальная связь между объектами?

Она может существовать сколь угодно долго. Но малейшее возмущение, случайно подействовавшее на одну из монет, вызовет ее падение и, соответственно, падение другой монеты. После этого нелокальная связь будет безвозвратно разрушена.

Что нужно сделать, чтобы восстановить нелокальную связь между объектами?

Необходимо сделать так, чтобы они провзаимодействовали между собой.

С какой скоростью передается нелокальное взаимодействие?

Оно передается мгновенно, то есть с бесконечной скоростью. Хотя более корректно, видимо, говорить так. Система, состоящая из объектов, связанных нелокальным взаимодействием, ведет себя как *единое целое*. И реагирует на внешнее воздействие тоже как единое целое. Когда мы возмущаем один объект, мы возмущаем всю систему целиком. И система скачкообразно переходит в новое состояние. При этом изменяется физическое состояние *всех* объектов, входящих в эту систему. В нашем случае система состоит всего из двух монет, и когда мы возмущаем одну монету, изменяется состояние сразу обеих монет.

Мы возмущаем систему, и она скачкообразно переходит в новое состояние. Сколько времени длится такой переход?

Такой переход также совершается мгновенно. Но точное время, когда он происходит, определить нельзя. Можно сказать и так. Переход происходит мгновенно, но момент времени, когда он происходит, «размазан» по оси времени. Эта размазанность перехода определяется одним из самых основных соотношений квантовой механики – соотношением неопределенностей.

Можно ли, используя нелокальное взаимодействие, передать энергию или хотя бы информацию из одного места в другое быстрее, чем со скоростью света?

Нет, нельзя. Есть два случайных процесса, происходящих в разных местах пространства и разделенных большим расстоянием. Наблюдая за одним из них, мы видим случайный процесс и ничего более. Мы даже не можем наверняка знать, связан ли он нелокальными связями с другим процессом. Возможно, эта связь была, но она могла в любой момент разрушиться из-за какого-нибудь воздействия из вне. Единственный способ проверить *реальное* наличие нелокальных связей – сравнить между собой результаты случайных процессов. Если они строго скоррелированы друг с другом, значит нелокальная связь между ними была.



## 1.4. Квантовое состояние нельзя наблюдать непосредственно

Можно ли как-то «подсмотреть» за вращающейся монетой, чтобы убедиться, вращается ли она или уже упала?

Нет, нельзя. Чтобы получить хоть какую-то информацию о состоянии монеты, необходимо обменяться с ней энергией. Но малейший обмен энергиями выведет монету из равновесия, и она упадет. Вторая монета при этом также упадет. Если бы мы могли следить за подвешенным состоянием монеты, не нарушая его, мы могли бы точно знать, *когда* было совершено падение другой монеты. В этом случае можно было бы передавать информацию быстрее света.

Вся беда в том, что, подсмотрев за состоянием монеты, мы разрушаем его, и монета падает. А мы при этом никак не можем определить, то ли это *наше* воздействие привело монету к падению, то ли она упала уже *до* этого воздействия, вследствие каких-то иных причин. То есть у нас есть всего две возможности.

*Первая возможность.* Мы не пытаемся узнать состояние монеты. При этом монета может находиться либо в подвешенном состоянии, либо упасть в какое-то определенное состояние (орел или решка). Все эти три состояния могут иметь место, но мы *не знаем*, в каком именно состоянии находится монета.

*Вторая возможность.* Мы пытаемся узнать состояние монеты и видим, что она упала либо орлом, либо решкой. При этом мы не знаем, *почему* монета упала. То ли мы вызвали ее падение, то ли она *уже* упала вследствие падения другой монеты.

И здесь, наверное, у каждого, кто знакомится с квантовой механикой, может зародиться вполне обоснованное подозрение. А существуют ли вообще эти подвешенные (неопределенные) состояния? Ведь они в принципе ненаблюдаемы!

В существовании подвешенных состояний сомневался, например, Эйнштейн. Он хорошо понимал, что из самого факта существования подвешенных состояний сразу же вытекает нелокальность. Эйнштейн не мог примириться с нелокальностью

и именно поэтому отрицал существование подвешенных состояний. Эрвин Шредингер не верил в возможность перехода из подвешенного состояния в определенное, то есть не верил в возможность квантовых скачков. Он даже написал статью «Существуют ли квантовые скачки?» [25]. Луи де Бройль в течение всей жизни колебался, принимать ли ему квантовую механику с ее нелокальностью или нет. Возражения этих выдающихся физиков против квантовой механики весьма поучительны, и мы подробно ознакомимся с позицией Эйнштейна в главе 4. А сейчас очень важно подчеркнуть следующее.

Подвешенные (неопределенные) квантовые состояния – *наблюдаемы!*

Конечно, подвешенные состояния нельзя наблюдать непосредственно. Как уже отмечалось, если мы попытаемся подсмотреть за состоянием монеты, то она выйдет из равновесия и упадет, после чего уже будет невозможно узнать, находилась ли она в подвешенном состоянии или уже упала до нашего вмешательства. Тем не менее, подвешенные состояния можно наблюдать косвенным образом. Если мы очень осторожно приблизим друг к другу монеты, находящиеся в подвешенном состоянии, то сможем наблюдать различные интерференционные явления. Интерференционные явления будут неопровержимо свидетельствовать, что монеты находятся именно в подвешенном состоянии, потому что между упавшими монетами никаких интерференционных явлений *никогда не наблюдалось*.

Вся таинственность и все богатство необычных и, на первый взгляд, парадоксальных явлений квантового мира происходит именно благодаря интерференции (интерференция – это просто особый род взаимодействия) подвешенных состояний.

## 1.5. Собственный момент импульса или СПИН

А сейчас давайте перейдем от монет к настоящим квантовым объектам, например, к электронам.

Электрон, как известно, частица со спином  $\frac{1}{2}$ . Наличие у частицы спина означает, что она обладает собственным моментом импульса, как если бы она имела размер и вращалась вокруг своей оси. Но это, конечно же, не так. Электрон не имеет размера и во всех экспериментах ведет себя как точечный объект, размер которого, по крайней мере, меньше чем  $10^{-18}$  м. Если мы умножим  $10^{-18}$  м на массу электрона ( $m_e \approx 10^{-30}$  кг) и на максимально возможную скорость – скорость света ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с), то получим максимально возможный собственный момент импульса электрона (предполагая, что он вращается вокруг своей оси):

$$L_e \approx 10^{-18} \text{ м} \cdot 10^{-30} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^{-40} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$$

Но электрон обладает собственным моментом импульса порядка величины постоянной Планка  $\hbar \approx 10^{-34}$  кг·м<sup>2</sup>/с. То есть в триста тысяч раз больше! Почему электрон обладает таким большим моментом вращения, непонятно.

Когда в 1925 году Дж. Уленбек и С. Гаудсмит, пытаясь объяснить строение атомных спектров, выдвинули гипотезу о собственном моменте импульса электрона, то Паули со свойственной ему прямоотой обсмеял их. Он заявил, что электрон не может обладать таким большим собственным моментом, так как для этого он должен вращаться со скоростью много большей скорости света. Огорченные Уленбек и Гаудсмит уже хотели забрать обратно свою статью из редакции журнала, но, на их счастье, Эрэнфест уже отправил ее в печать.

До сих пор не известно, с какой скоростью вращается электрон вокруг своей оси. Не известно даже то, есть ли у него вообще какая-то ось. Но зато очень хорошо известно, что электрон обладает собственным моментом импульса.

Другой странной особенностью электрона является то, что абсолютная величина его собственного момента импульса всегда одна и та же. Электрон может столкнуться с другим электроном, может вращаться вокруг ядра в каком-нибудь атоме, может взаимодействовать с большим числом разнообразных объектов, может исчезнуть, проаннигилировав с позитроном, и затем возникнуть снова – абсолютная величина его собственного момента всегда остается той же самой. Не правда ли, странная особенность?

Но эти две «странности» электрона просто-напросто меркнут на фоне третьей. С ней физики столкнулись сразу же, как только попытались ответить на простой вопрос.

## 1.6. Чему равна проекция спина?

Если абсолютная величина собственного момента импульса электрона всегда одна и та же, то чему равна проекция этого момента, скажем, на ось  $Z$ ?

Ответ на этот простой вопрос оказался тоже очень простой.

Проекция момента импульса электрона на ось  $Z$  может быть равна либо  $+\frac{1}{2}\hbar$ , либо  $-\frac{1}{2}\hbar$ .

Когда я впервые услышал этот простой ответ на лекции по квантовой механике, то совершенно потерял способность воспринимать весь последующий материал.

Действительно, чем выделена ось  $Z$ ? Почему проекция момента импульса на нее выглядит так просто? Что будет, если мы возьмем ось  $X$ ?

Ответ будет тем же самым, ведь ось  $X$  ничем не хуже оси  $Z$ . А если взять ось  $Z'$ , которая повернута на небольшой угол относительно  $Z$ ?

Опять тот же ответ, потому что направление  $Z'$  тоже ничем не хуже направления  $Z$ .

Эта шокирующая простота в поведении электрона надолго выбила меня из колеи. Я несколько успокоился только после того, как узнал из Фейнмановских лекций по физике, что эта

особенность электрона шокировала не только меня, но и всех остальных физиков без исключения [19,с.114]. Произошло это после того, как Штерн и Герлах в своих знаменитых экспериментах доказали, что проекция собственного момента импульса электрона принимает только значения либо  $+\frac{1}{2}\hbar$ , либо  $-\frac{1}{2}\hbar$  вдоль любой произвольно ориентированной оси.

Здесь могут возникнуть, по крайней мере, два вопроса.

*Вопрос первый.* Если проекция собственного момента электрона на любую ось всегда равна половине постоянной Планка, то создается впечатление нарушения закона сохранения момента импульса в микромире. Так ли это?

*Вопрос второй.* Почему электрон ведет себя так странно? Существует ли какое-нибудь более-менее разумное объяснение его поведения?

На эти вопросы мы постараемся дать развернутый ответ в главе 3. Что же касается закона сохранения момента импульса, то, забегая вперед, можем успокоить читателя. Этот закон *строго* выполняется не только в макромире, но и в микромире. Причём в каждом отдельно взятом элементарном процессе.

Пока же читателю достаточно принять странное поведение электрона как многократно проверенный экспериментальный факт, который, к тому же, следует из основных формул и законов квантовой механики. Так что в самом здании квантовой механики все в полном порядке. Трудности возникают только в нашем сознании при попытке понять поведение субатомных частиц. О том, почему возникают эти трудности, и что нужно сделать, чтобы преодолеть их, мы поговорим в главах 2 и 3.

А сейчас давайте вернемся к нашему электрону. Вот наиболее важные экспериментальные данные о поведении его собственного момента импульса или, как принято говорить в квантовой механике – спина (когда физики столкнулись со странными свойствами собственного момента импульса в микромире, они придумали для него особое название – спин).

Допустим, мы измерили проекцию его спина вдоль оси  $Z$ , и она оказалась равной  $+\frac{1}{2}\hbar$ . В этом случае любое последующее

измерение проекции спина вдоль оси  $Z$  даст со стопроцентной вероятностью тот же самый результат. Если же теперь мы измерим проекцию спина на ось  $X$  (или  $Y$ , то есть возьмем ось, перпендикулярную оси  $Z$ ), то с вероятностью 50% мы получим  $+\frac{1}{2}\hbar$  и с вероятностью 50 процентов  $-\frac{1}{2}\hbar$ .

То есть о результате данного измерения *ничего нельзя сказать заранее*. Это абсолютно случайный процесс. Он чем-то напоминает бросание монеты. Но только выпадение орла или решки при бросании монеты – это не совсем случайный процесс. Исход каждого бросания монеты определяется, во-первых, скоростью, с которой ее подбросили. Во-вторых, вращением, которое ей придали. И, в-третьих, расстоянием до стола, на который она падает. И, в принципе, сразу же после того как монету подбросили, можно рассчитать, *как* она упадет.

Совсем иное дело – измерение проекции спина электрона. Здесь мы сталкиваемся, что называется, со случайностью в самом чистом виде. Были, правда, физики, которые полагали, что исход каждого измерения определяется некими скрытыми параметрами – какими-то неизвестными внутренними характеристиками электрона. И если бы мы могли узнать эти параметры, то смогли бы предсказать результат каждого измерения. Но ряд изящных экспериментов, проведенных в конце двадцатого века, показал, что это не так. Есть ли скрытые параметры у электрона или их нет, в любом случае измерение проекции спина носит абсолютно случайный характер. Почему это так, мы поговорим далее. А сейчас нам нужно двигаться дальше.

## 1.7. Квантовая нелокальность в чистом виде

Человек, изучающий квантовую механику, чем-то напоминает ребёнка, в первый раз открывающего матрёшку. Ребёнок поначалу думает, что каждая новая матрёшка – последняя, но затем открывает её и с удивлением обнаруживает ещё одну. И если вы думаете, что ничего абсурднее, чем

поведение проекции спина электрона, придумать нельзя, то вы ошибаетесь. Потому что сейчас мы подошли к наиболее загадочному квантовому явлению – нелокальности. Конечно, невозможно в одной главе объяснить все парадоксы и причуды квантовой механики. Но мы и не ставим такой цели. Наша цель куда скромнее – вкратце обрисовать некоторые из них, чтобы читатель имел представление о том, с чем он столкнется, изучая квантовую механику.

Итак, нелокальность. Пока не вдаваясь в детали – только самое основное.

Возьмем атом гелия. Это, в каком-то смысле, очень интересный объект. Два протона и два нейтрона расположены в его ядре так, что спин ядра, то есть его полный собственный момент импульса, равен нулю. Но для нас гораздо важнее другое. Два электрона в атоме гелия заполняют так называемую *s*-оболочку. На этой оболочке орбитальный момент каждого электрона равен нулю. И, кроме того, спины электронов на этой оболочке направлены в противоположные стороны. То есть атом гелия – это объект, который всегда выглядит одинаково, как его ни крути.

Теперь предположим, что мы выстрелили по ядру атома гелия какой-нибудь тяжелой частицей. Например, ядром атома кислорода, которое в четыре раза тяжелее ядра гелия. Ядро кислорода, двигаясь с высокой скоростью, налетает на ядро гелия, выбивает его из атома на большое расстояние и само также улетает. После этого два электрона, между которыми действуют электрические силы отталкивания, разлетаются в разные стороны.

Мы выбираем некоторую ось *Z* и измеряем вдоль нее проекцию спина одного электрона. Как уже отмечалось, мы можем получить только два варианта: либо  $+\frac{1}{2}\hbar$ , либо  $-\frac{1}{2}\hbar$ . Как говорится, третьего не дано. Допустим, мы получили  $+\frac{1}{2}\hbar$ . В этом случае измерение проекции спина другого электрона вдоль той же оси *Z* даст результат  $-\frac{1}{2}\hbar$ . И это вроде бы понятно: ведь полный момент импульса двух электронов был равен нулю.

Затем мы повторяем наш эксперимент снова и снова. И каждый раз случайным образом проекция спина первого электрона вдоль оси  $Z$  оказывается равной либо  $+\frac{1}{2}\hbar$ , либо  $-\frac{1}{2}\hbar$ . А проекция спина второго электрона, соответственно, либо  $-\frac{1}{2}\hbar$ , либо  $+\frac{1}{2}\hbar$ .

Зависит ли проекция спина второго электрона от того, измерили ли мы проекцию первого или нет?

Любой здравомыслящий человек ответит, что, конечно же, не зависит!

А что получается согласно квантовой механике?

Согласно квантовой механике два электрона описывались общей волновой функцией и представляли собой *единое* целое. При этом ни у одного из двух электронов не было определенной проекции спина. При измерении проекции спина первого электрона вдоль оси  $Z$  произошло мгновенное и скачкообразное изменение квантового состояния *обоих* электронов – знаменитый квантовый скачок (математически это явление описывается редукцией волновой функции). Только в этот момент проекция спина первого электрона приняла определенное значение вдоль оси  $Z$  (с вероятностью 50 процентов  $+\frac{1}{2}\hbar$  и с вероятностью 50 процентов  $-\frac{1}{2}\hbar$ ). И в тот же самый момент времени проекция спина второго электрона также приняла определенное значение вдоль оси  $Z$ . Вот это и есть квантовая нелокальность в чистом виде.

## 1.8. Можно ли обойти нелокальность?

Кто-то наверняка не согласится с написанным в предыдущем параграфе и захочет возразить, например, так. Когда электроны разлетелись в разные стороны, спин каждого электрона получил какое-то направление. И если первый электрон получил проекцию спина  $+\frac{1}{2}\hbar$  вдоль оси  $Z$ , то второй, соответственно, получил  $-\frac{1}{2}\hbar$ . Такой вывод можно сделать, основываясь только на законе сохранения импульса, а нелокальность тут совершенно не причем.



Если бы все было так просто, то не было бы такого шума вокруг квантовой механики!

Итак, мы измерили проекцию спина первого электрона вдоль оси  $Z$  и получили  $+\frac{1}{2}\hbar$ . И теперь мы знаем, что проекция спина второго электрона на эту же ось равна  $-\frac{1}{2}\hbar$ . Когда электрон получил эту проекцию? Согласно квантовой механике – в момент измерения проекции спина первого электрона (до этого измерения второй электрон не обладал определенной проекцией спина). Согласно здравому смыслу измерение спина первого электрона никак не могло повлиять на спин второго (ведь расстояние между электронами может быть сколь угодно большим, например, несколько световых лет).

Попробуем рассуждать, основываясь на здравом смысле. Ядро атома кислорода выбивает ядро у атома гелия, и электронное облако гелия самопроизвольно распадается на два электрона, которые разлетаются в противоположные стороны. Каждый электрон получает некоторое случайное, но вполне определенное направление спина. При этом в соответствии с законом сохранения импульса спины электронов направлены в противоположные стороны.

Здесь возникает небольшое затруднение. Электронное облако гелия не имело *никакого* выделенного направления. Это была система, обладающая совершенной центральной симметрией. Но после того как облако распалось на два электрона, возникло выделенное направление, связанное со спинами электронов. Почему возникло выделенное направление? Какой механизм лежит в основе спонтанного нарушения симметрии?

Подобное затруднение можно, конечно, обойти, предположив, что симметрия сохраняется только статистически в среднем, но нарушается в отдельно взятом элементарном процессе. Это немного неприятно, особенно если учесть, что законы сохранения (энергии, импульса и момента импульса) непосредственно связаны с симметрией пространства-времени.

Посмотрим, что получится, если мы будем измерять проекции спинов электронов вдоль некоторой оси  $Z$ . Если

случайно окажется, что ось  $Z$  параллельна спинам электронов, то мы обнаружим, что спины электронов направлены в противоположные стороны, т. е. получим значения  $+\frac{1}{2}\hbar$  и  $-\frac{1}{2}\hbar$ . Но вероятность того, что случайно выбранная ось окажется параллельной спинам электронов, мала. Скорее всего, она будет не параллельна им.

А что если выбранная ось  $Z$  окажется перпендикулярной спинам электронов? В этом случае проекция спина *каждого* электрона может с равной вероятностью оказаться как  $+\frac{1}{2}\hbar$ , так и  $-\frac{1}{2}\hbar$  вдоль этой оси. То есть в 25 случаях из ста окажется, что проекции спинов *обоих* электронов будут равны  $+\frac{1}{2}\hbar$ , в 25 случаях из ста — будут равны  $-\frac{1}{2}\hbar$  и только в 50 случаях из ста спины электронов окажутся противоположно направленными.

Теперь ясно, как определить, какая из двух точек зрения (нелокальная или локальная) является правильной. Для этого нужно взять множество атомов гелия, выбить у них ядра и затем измерить проекции спинов разлетевшихся электронов вдоль случайно выбранных осей. Если справедлива квантовая механика, подразумевающая нелокальность взаимодействия, то проекции спинов электронов *всегда* будут иметь противоположные направления. А если верна точка зрения, отвергающая нелокальное взаимодействие, то в некоторых случаях проекции спинов будут направлены в одну и ту же сторону.

В 1964 году Джон Белл физик из ЦЕРНа (Европейский центр ядерных исследований) даже рассчитал, в скольких случаях из ста проекции спинов должны иметь одинаковое направление, чтобы можно было сделать вывод об ошибочности квантовой механики.

Но старания Белла оказались напрасны. Эксперимент показал, что в ста случаях из ста проекции спинов имели противоположное направление! Такую корреляцию в поведении квантовых объектов можно было объяснить, только допустив возможность нелокального взаимодействия между ними.

## ДИСКРЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ – КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ КВАНТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

### 2.1. Есть ли альтернатива непрерывному движению?

Когда мы анализируем поведение квантовых объектов, то, как правило, приходим к какому-то противоречию или, по крайней мере, к замешательству. Подобные противоречия и замешательства свидетельствуют о том, что мы в наших рассуждениях используем какие-то ошибочные предположения. Возможно, мы неявным образом используем некоторую идею, взятую из повседневного опыта, которая становится в корне неверной при ее применении к квантовым процессам. Поэтому, чтобы понять поведение квантовых объектов, нужно постараться отбросить разные «очевидные» предположения и исходить только из экспериментальных данных.

Итак, что мы имеем?

С одной стороны, твердо установлено, что фотон, электрон (и другие квантовые объекты) являются *неделимыми*. Невозможно разделить на части электрон или фотон.

С другой стороны, также твердо установлено, что фотон, электрон (и другие квантовые объекты) обладает волновыми свойствами. Фотон или электрон могут запросто двигаться одновременно по разным путям и также одновременно пройти сразу через два или более отверстий.

На первый взгляд, свойства бесконечно делимой волны противоречат свойствам неделимой частицы. Однако тот экспериментальный факт, что квантовый объект является и частицей и волной, означает, что данное противоречие никакого отношения к реальности не имеет и существует только лишь в нашем сознании. И это означает, что в нашем сознании существует некоторая идея, которую мы неявным образом используем, и которая мешает понять логику квантового мира.

Что же это за идея?

Чтобы ее обнаружить, можно рассуждать, например, так. Допустим, мы полагаем, что неделимый электрон не может пройти одновременно через два отверстия.

Возникает вопрос: можем ли мы это доказать? Или нам это только *кажется*, что свойство быть бесконечно делимой волной противоречит свойству быть неделимой частицей?

И здесь выясняется, что нам это только *кажется*. Потому что доказать это мы не можем. И не только мы, никто доказать этого не в состоянии (если бы кто-то мог доказать, то доказал бы, и все в таком случае знали бы, что такое доказательство есть). Более того, оказывается, что доказать противоречивость корпускулярно-волновых свойств электрона можно только при дополнительном условии, предположив, что электрон *движется по непрерывной траектории*. То есть если попытаться объединить вместе все эти три условия (неделимость, волновые свойства и движение по траектории), то тогда и только тогда мы придем к противоречию. Не случайно многие курсы квантовой механики начинаются со слов (см., например, [14]): «В квантовой механике не существует понятия траектории частиц».

На первый взгляд может показаться, что и движение тела по траектории также следует из опыта. Но это не так. Ведь траектория – это бесконечно тонкая непрерывная геометрическая линия. Это чисто математическое понятие, то есть абстракция. На основании экспериментальных данных мы можем начертить только приближенную траекторию, по которой движется тело или его центр масс. В классической физике мы привыкли к тому,

что чем точнее измерены координаты тела, тем точнее совпадает путь тела с определенной траекторией. Но ведь это не может продолжаться до бесконечности. И при достижении определенной точности измерений физика начнет отличаться от геометрии. Реальный мир выйдет за рамки, которые установило ему наше сознание. И квантовые парадоксы свидетельствуют именно об этом.

Чтобы лучше разобраться с движением квантовых объектов, попробуем разобраться с самим понятием движения. Так что же такое движение?

Движение – это изменение местоположения тела с течением времени. В самом общем виде движение тела можно выразить через некоторую функцию

$$\vec{r} = \vec{r}(t)$$

Здесь  $\vec{r}$  – точка в трехмерном пространстве, где в данный момент времени  $t$  находится тело. Предполагается, что размерами тела можно пренебречь. Если же размерами пренебречь нельзя, то  $\vec{r}$  – местоположение его центра масс.

Для того чтобы описать движение тела, нужно измерить его координаты в различные моменты времени и затем выбрать подходящую функцию  $\vec{r}(t)$ , которая лучше всего описывала бы движение этого тела. Обычно подразумевается, что  $\vec{r}(t)$  – непрерывная функция. И действительно, любое движение, происходящее в макром мире, – это непрерывное движение.

*Тело покидает одну точку пространства и через бесконечно малое время оказывается в соседней точке.*

Не было такого случая, чтобы тело покинуло одну точку и затем, минуя все соседние точки, сразу оказалось в удаленной точке. Такие «прыжки» через расстояния нетрудно представить мысленно, но трудно поверить, что они могут происходить в реальном мире. Поэтому общепринято, что  $\vec{r}(t)$  – функция непрерывная, и также общепринято, что движение тела нельзя описывать разрывной функцией.

Тем не менее, анализируя поведение частиц в микромире, мы пришли к выводу, что их движение невозможно описать непрерывными функциями. Например, невозможно описать непрерывной функцией движение фотона, который, с одной стороны, является неделимым объектом, а, с другой, – ухитряется двигаться *одновременно по двум различным путям* (этот эксперимент обсуждается в параграфе 5.4). Поэтому имеет смысл попробовать описать движение квантовых объектов при помощи функций, *не являющихся непрерывными*.

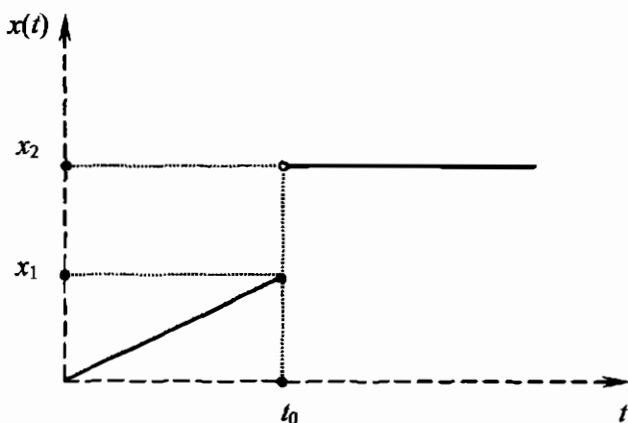
Стоит отметить, что многие физики считают понятие *не непрерывного или разрывного* движения настолько диким и абсурдным, что даже не хотят его обсуждать. С этим нельзя согласиться. Потому что, как правило, заранее не известно, *что* окажется верным, а *что* нет. В истории физики известно немало случаев, когда идеи, поначалу казавшиеся бредовыми и несуразными, в дальнейшем пробивали себе дорогу и становились общепризнанными и чуть ли не очевидными. Поэтому имеет смысл обсудить понятие движения, *не являющегося непрерывным*. И если такое понятие приведет к *чему-то* очевидно неверному или, по крайней мере, не поможет лучше понять поведение квантовых объектов, то мы отбросим его. Но если введение в физику этого понятия не приведет к конфликту с уже известными законами и, к тому же, позволит непротиворечиво объяснить парадоксы микромира, то мы будем использовать его и в дальнейшем.

## **2.2. Может ли одна частица находиться сразу в двух удалённых друг от друга областях?**

На первый взгляд может показаться, что понятие *не непрерывного (разрывного)* движения вступает в явное противоречие с законами теории относительности, которая ограничивает скорость передвижения тел в пространстве

скоростью света. Но, как будет видно в дальнейшем, это не так. Теории относительности явно противоречит только движение, являющееся непрерывным на одном участке и разрывным на другом. Например, такое как на рисунке 2.1.

Что же касается движения, описываемого функцией, разрывной в каждой точке, то при некоторых условиях такое движение не будет противоречить теории относительности.



**Рис. 2.1.** График зависимости координаты тела от времени. Непрерывная функция  $x(t)$  терпит разрыв в точке  $t_0$ . Такое движение противоречит теории относительности, так как из точки  $x_1$  в точку  $x_2$  тело движется быстрее света (с бесконечной скоростью).

Рассмотрим в качестве примера такой вариант функции Дирихле:

$$\begin{cases} x(t) = x_1, & \text{если } t \text{ рациональное число} \\ x(t) = x_0, & \text{если } t \text{ иррациональное число} \end{cases}$$

И пусть движение квантового объекта описывается этой функцией (см. рис. 2.2).

В этом случае мы уже не можем сказать, что объект движется из точки  $x_0$  в точку  $x_1$  с бесконечной скоростью, потому

что данный объект вообще не движется, а находится одновременно в точках  $x_0$  и  $x_1$ . Действительно, какой сколь угодно малый промежуток времени  $\Delta t$  мы бы не взяли, он успеет бесконечное число раз побывать в точках  $x_0$  и  $x_1$ . То есть разрывное движение в данном случае не приводит к бесконечной скорости перемещения объекта в пространстве, а приводит только к *неопределенности* его положения.

Предположим, что мы решили поймать этот объект. Очевидно, что его нужно ловить в точках  $x_0$  и  $x_1$ , так как в других точках он не бывает. Хотя объект находится все время в точках  $x_0$  и  $x_1$ , мы не сможем поймать его *сразу* в двух точках, потому что, во-первых, он всего один, а, во-вторых, мы предполагаем, что он *неделим*. То есть с какой-то вероятностью мы поймаем его в точке  $x_0$ , а с какой-то — в точке  $x_1$ .



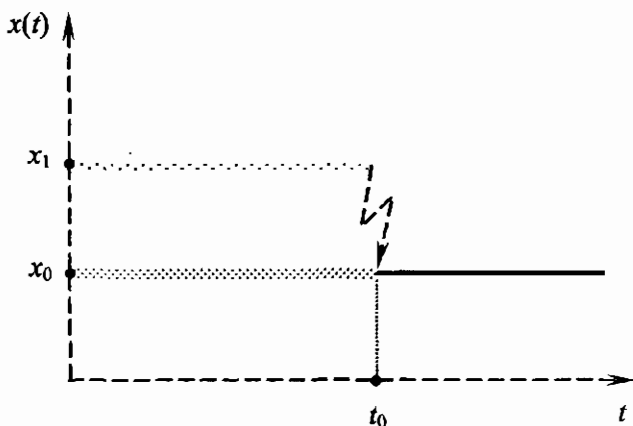
Рис. 2.2.

Допустим, мы поймали его в точке  $x_0$ . Можно ли в этом случае сказать, что объект переместился из точки  $x_1$  в точку  $x_0$  с бесконечной скоростью? Нет, так говорить не совсем корректно, потому что объект, перед тем, как мы его поймали, не находился в точке  $x_1$ , а находился сразу и в точке  $x_1$ , и в точке  $x_0$ . Кроме того, в данном случае нас волнует не столько вопрос о скорости



объекта, сколько вопрос о том, противоречит ли его движение теории относительности.

Теория относительности запрещает объекту, *наблюдаемому* или *пойманному* в точке  $x_1$ , мгновенно (или хотя бы быстрее света) переместиться в точку  $x_0$  и быть там *наблюдаемым* или *пойманным*. Но эта теория ничего не говорит про объект, который находился сразу в двух точках  $x_0$  и  $x_1$ , а затем, в результате какого-то воздействия извне, стал находиться только в точке  $x_0$ , как это изображено на рисунке 2.3.



**Рис. 2.3.** До момента времени  $t_0$  местоположение объекта описывалось функцией Дирихле, и он находился сразу в двух точках  $x_0$  и  $x_1$ . В момент времени  $t_0$  мы его поймали в точке  $x_0$ . Хотя такое поведение объекта выглядит несколько странным и даже не правдоподобным, оно *не противоречит* теории относительности.

Тем не менее, если мы обратим этот процесс во времени, то он уже будет противоречить теории относительности (рис. 2.4).

Действительно, до момента времени  $t_0$  объект можно было наблюдать в точке  $x_0$ , а, начиная с момента времени  $t_0$ , появилась вероятность наблюдать его в точке  $x_1$ . То есть появилась ненулевая вероятность того, что объект *как целое* мгновенно

переместится из точки  $x_0$  в точку  $x_1$  и, более того, это перемещение может быть *наблюдаемо*.

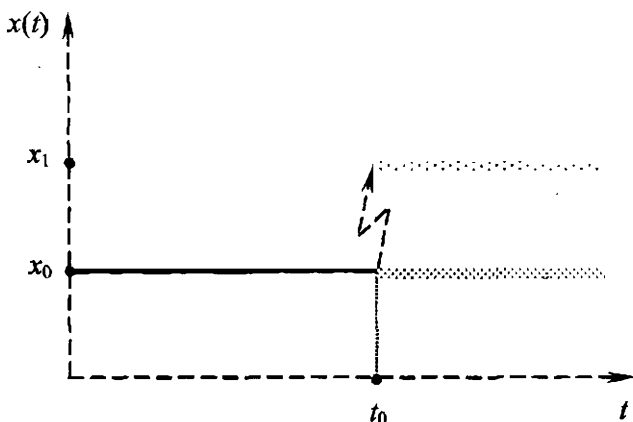


Рис. 2.4. Процесс обратный процессу, изображенному на рис. 2.3. До момента времени  $t_0$  объект находился и мог быть наблюдаемым в точке  $x_0$ , а затем, в момент времени  $t_0$ , стал находиться сразу в двух точках  $x_0$  и  $x_1$ . Такой процесс уже *противоречит* теории относительности.

Кто-то, возможно, захочет здесь возразить примерно так. Когда объект находился сразу в точках  $x_0$  и  $x_1$  (рис. 2.3), то существовала ненулевая вероятность наблюдать его и в точке  $x_0$ , и в точке  $x_1$ . И, следовательно, существовала ненулевая вероятность наблюдаемого перемещения объекта из одной точки в другую за бесконечно малое время, что противоречит теории относительности.

Это не так. Действительно, когда объект находился сразу в двух точках  $x_0$  и  $x_1$  (рис. 2.3), существовала ненулевая вероятность наблюдать его и в одном месте, и в другом. Тем не менее, было невозможно *зарегистрировать* его мгновенный переход из точки  $x_1$  в точку  $x_0$  (или наоборот). Так как для этого объект необходимо было наблюдать сначала в точке  $x_1$ , а затем в  $x_0$ .

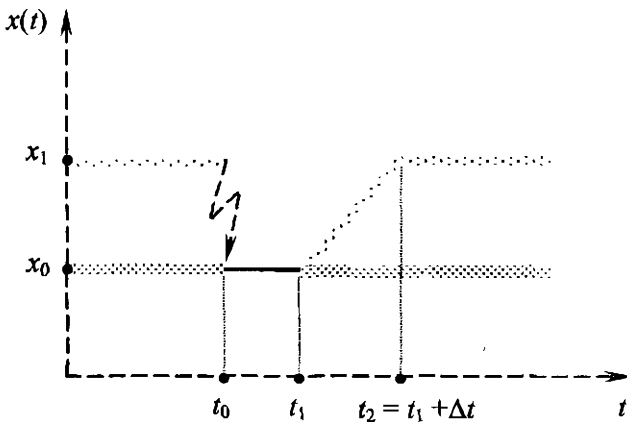
Но в тот же момент времени, когда объект обнаруживается в одной точке, он тут же теряет возможность находиться в другой точке.

Итак, объект может находиться сразу в двух точках пространства, и это не будет противоречить теории относительности, при соблюдении одного очень важного условия.

*Если объект регистрируется в одной точке, то он в тот же момент времени теряет способность находиться в другой.*

Навсегда ли объект теряет эту способность?

Нет, не навсегда. Он не может находиться в другой точке лишь в тот же самый момент времени, когда его регистрируют в первой точке. Но он может снова оказаться в другой точке и, таким образом, находиться сразу в двух точках спустя некоторое время. Например, в результате движения, изображенного на рисунке 2.5.



**Рис. 2.5.** Объект находился в двух точках  $x_0$  и  $x_1$ . В момент времени  $t_0$  он был обнаружен (пойман, зарегистрирован, наблюдаем...) в точке  $x_0$  и перестал находиться в точке  $x_1$ . Затем по истечении некоторого времени, двигаясь так, как изображено на рисунке, он снова стал находиться в точках  $x_0$  и  $x_1$ .

Чтобы его движение не противоречило теории относительности, необходимо выполнения условия:

$$\Delta t \geq \frac{x_1 - x_0}{c} \quad (2.1)$$

Здесь  $c$  – скорость света.

То есть, если объект будет двигаться так, как изображено на рисунке 2.5, с соблюдением условия (2.1), то его движение *не будет противоречить теории относительности*.

Проще говоря, мы не сможем зарегистрировать этот объект в двух точках пространства так, чтобы он переместился из одной точки в другую быстрее света.

Наши рассуждения об объекте, находящемся сразу в двух разных точках, нетрудно обобщить на три точки при помощи такой модификации функции Дирихле:

$x(t) = x_0$ , если  $t$  – иррациональное число.

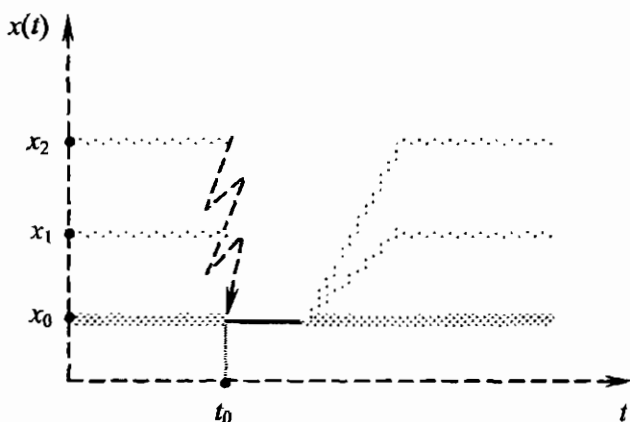
$x(t) = x_1$ , если  $t$  – рациональное число и его можно представить в виде несократимой дроби  $\frac{m}{n}$ , где  $n$  – натуральное число, а  $m$  – целое нечётное число.

$x(t) = x_2$ , если  $t$  – рациональное число и его можно представить в виде несократимой дроби  $\frac{m}{n}$ , где  $n$  – натуральное число, а  $m$  – целое чётное число.

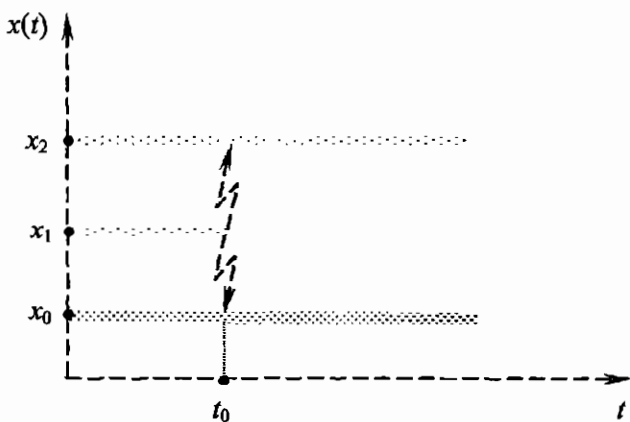
Такой объект может двигаться, например, так, как изображено на рисунках 2.6, 2.7.

И если объект будет двигаться так, как изображено на рисунках 2.6 и 2.7, то его движение (естественно, при выполнении условия 2.1) не будет противоречить теории относительности.

Этот результат нетрудно обобщить на  $N$  точек, где  $N$  – произвольное сколь угодно большое число.



**Рис. 2.6.** Объект, находящийся сразу в точках  $x_0, x_1, x_2$ , в момент времени  $t_0$  регистрируют в точке  $x_0$ . Затем, спустя некоторое время, объект снова оказывается в точках  $x_0, x_1, x_2$ .



**Рис. 2.7.** В момент времени  $t_0$  объект, находящийся сразу в трёх точках  $x_0, x_1, x_2$ , пытаются зарегистрировать в точке  $x_1$ . Но это не удается сделать. В результате объект теряет способность находиться в точке  $x_1$  и находится только в двух точках  $x_0$  и  $x_2$ .

### 2.3. Три правила дискретного движения

Можно сформулировать в самом общем виде три правила, при соблюдении которых движение объекта может не быть непрерывным и при этом, тем не менее, не будет противоречить теории относительности.

*Правило первое.* Если объект находится сразу в  $N$  точках, то эти точки не могут удаляться друг от друга и перемещаться в пространстве быстрее, чем со скоростью света.

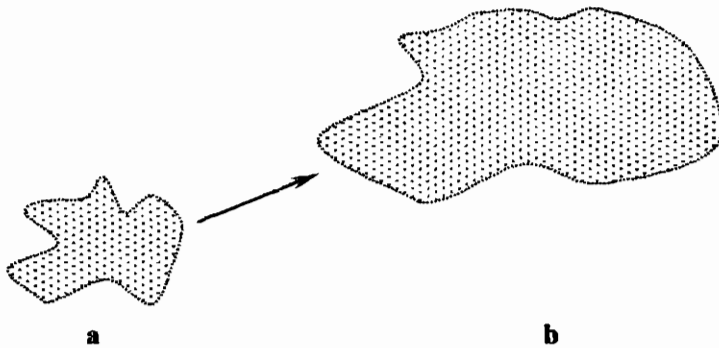
*Правило второе.* Если объект будет зарегистрирован в одной точке, то он в тот же момент времени теряет возможность находиться во всех остальных точках.

*Правило третье.* Если будет сделана попытка зарегистрировать объект в данной точке, но он там не будет зарегистрирован (ведь вероятность обнаружить его в одной из точек, где он находится, больше нуля, но меньше единицы), то он теряет возможность находиться в этой точке. При этом вероятность обнаружить его в остальных точках, где он находится, возрастает скачком.

Используя эти нехитрые и, в общем-то, очевидные правила, можно описать произвольное движение квантового объекта в трехмерном пространстве.

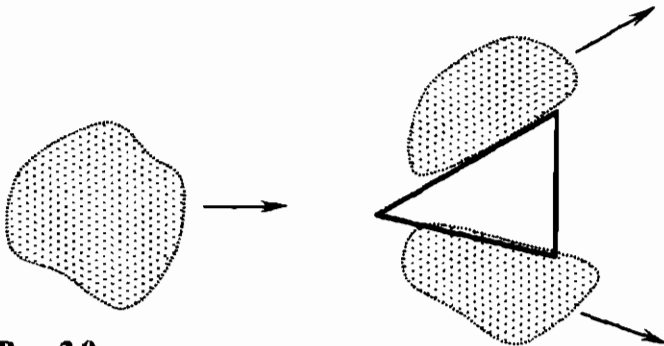
Например, сначала квантовый объект (электрон, фотон, протон и т. д.) мог находиться во всех точках некоторой области пространства (см. рис. 2.8,а). Затем, с течением времени, эта область могла, во-первых, перемещаться в пространстве и, во-вторых, расплываться, увеличивая свои размеры и изменяя свою форму (рис. 2.8,б).

При этом расплывание и перемещение области ограничено скоростью света и поэтому является *непрерывным* процессом. Хотя сам объект движется внутри нее *не непрерывно*, то есть не существует непрерывной функции способной описать его движение. Можно сказать, что он исчезает из одной точки области и в тот же самый момент времени появляется в другой ее точке.



**Рис. 2.8.** Квантовый объект находится сразу во всех точках некоторой области (а). Затем эта область перемещается в пространстве, изменяя свои размеры и форму (б).

Если область, где движется квантовый объект, налетит на препятствие, то она может, разделившись на две (или более) частей, обойти препятствие с разных сторон (см. рис. 2.9).



**Рис. 2.9.**

В самом общем случае область, в которой «размазан» квантовый объект, может разделиться на произвольное число частей, которые могут двигаться с различными скоростями в

различных направлениях, изменяя со временем свои размеры и форму.

Будет ли движение квантового объекта, находящегося сразу во всех этих областях, противоречить теории относительности?

Нет, не будет. Конечно, при условии соблюдения сформулированных выше правил. Например, если мы регистрируем квантовый объект в некоторой маленькой области пространства (в предельном случае – в точке), то в тот же самый момент времени этот объект перестанет находиться во всех остальных областях, где он до этого находился.

Такое необычное поведение квантового объекта формально противоречит теории относительности. Но фактически оно не противоречит теории относительности, так как, используя его, мы, в принципе, не сможем зарегистрировать (наблюдать) перемещение объекта из одной области пространства в другую (или из одной точки в другую) со скоростью, большей, чем скорость света. Потому что, зарегистрировав объект в одной области, мы, тем самым, лишаем его возможности двигаться во всех остальных областях.

Введенное таким образом движение мы будем в дальнейшем называть дискретным (так как оно является разрывным в каждый момент времени) или, иногда, хаотическим (подчеркивая тем самым, что процесс регистрации объекта в одной из областей его «обитания» носит чисто случайный характер).

Итак, дискретное движение *не противоречит* теории относительности. Тем не менее, может возникнуть вопрос: зачем нужно придумывать такое сложное движение?

Непрерывное движение, вполне пригодное для описания физических процессов в макромире, приводит к явным противоречиям при описании квантовых процессов. Единственной альтернативой непрерывному движению является дискретное движение (кто в этом сомневается, может попытаться придумать какой-нибудь третий тип движения). Поэтому имеет смысл попробовать применить его для описания квантовых



процессов. Как будет видно в дальнейшем, дискретное движение позволит непротиворечиво объяснить *все* известные квантовые парадоксы, включая корпускулярно-волновой дуализм, нелокальность и квантовые скачки.

Кроме того, дискретное движение поможет дать простое и наглядное представление для таких, традиционно считающихся трудными понятий, как квантовое состояние, волновая функция, редукция волновой функции, запутанное состояние, когерентные состояния, спин и т.д. Используя понятие дискретного движения, можно сделать квантовую механику простой, наглядной и понятной. По крайней мере, сам я стал понимать эту область физики только после того, как начал использовать дискретное движение для описания квантовых процессов. Надеюсь, что и у читателя большая часть проблем, связанных с недопониманием квантовой механики, исчезнет после прочтения этой книги.

Конечно, используя понятие дискретного движения, невозможно предсказать все тонкости и вывести все формулы квантовой механики. Точно так же, как, используя понятие непрерывного движения невозможно получить уравнения классической физики.

Тем не менее, мысленно представляя движение тел по различным траекториям, в зависимости от действующих на них сил или полей, можно лучше понять физический смысл, скрывающийся за уравнениями Ньютона или Максвелла. Точно также, мысленно представляя дискретное движение квантовых объектов по различным областям, можно лучше понять физический смысл, скрывающийся за уравнениями квантовой механики. Более того, используя *только* понятие дискретного движения и не привлекая законов квантовой механики, можно, на качественном уровне, предсказать наиболее интересные и парадоксальные черты квантового мира, такие, как корпускулярно-волновой дуализм, нелокальность и квантовые скачки. Именно этому и посвящена следующая глава. И начнем мы с самого основного понятия квантовой механики – с понятия квантового движения.

# КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА – ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО!

*Наглядно представить себе волну-частицу невозможно, не стоит и пытаться. В нашей повседневной жизни нет ничего такого, что хотя бы отдаленно напоминало подобную нелепость.*

Известный популяризатор науки Пол Девис [11, с.30]

### 3.1. Наглядный образ квантового движения

Если известно, как распределены в пространстве различные поля, и нужно рассчитать движение частицы, то необходимо задать начальные условия, характеризующие физическое состояние этой частицы. Если частица – классический объект, то достаточно задать координаты ее местоположения и вектор скорости. Скорость и местоположение – это *все*, что нужно знать о начальном состоянии частицы, чтобы предсказать, где она окажется, скажем, через час. Классическая частица движется по непрерывной траектории, и поэтому в каждый момент времени ее состояние полностью характеризуется шестью числами (три – для местоположения и три – для скорости). Но квантовая частица движется не по непрерывной траектории. Она движется дискретно. Дискретное движение значительно сложнее непрерывного, и здесь уже шестью числами не отделаешься.

Сколько же нужно чисел, чтобы полностью охарактеризовать дискретно движущуюся частицу в данный момент времени?

Очень много. А если точнее – бесконечно много чисел. Ведь дискретно движущаяся частица – это очень сложный объект. Какой угодно малый промежуток времени мы бы ни взяли, такая частица все равно успеет побывать за это время в различных, возможно, даже сильно удаленных друг от друга областях пространства. Поэтому, чтобы охарактеризовать ее состояние, нужно, по крайней мере, перечислить все те области, в которых она совершает дискретное движение в данное время. Образно говоря, нам нужно сделать снимок сразу всего трехмерного пространства с очень короткой экспозицией. Сделав его, мы вычеркнем те точки, где частица не побывала, и оставим те, где она успела побывать.

Предположим, что в данный момент времени было сделано множество подобных снимков состояния нашей частицы с различными экспозициями. Просматривая их, мы обнаружим, что снимки с очень короткими экспозициями практически не отличаются друг от друга. И это понятно. Ведь области, в которых частица совершает дискретное движение, могут перемещаться в пространстве и изменять свою форму со скоростью, *не большей*, чем скорость света. А если нам попадется снимок с длительной экспозицией, то области, в которых частица дискретно движется, успеют за время экспозиции изменить форму и переместиться в пространстве. Поэтому на таком снимке они будут размазаны.

Теперь понятно, *что* нужно сделать, чтобы охарактеризовать дискретно движущуюся частицу. Нужно брать снимки всё с более и более короткими экспозициями до тех пор, пока они не будут практически совпадать друг с другом. Нужно сделать снимок со временем экспозиции, стремящимся к нулю, но не равным нулю!

Для того чтобы охарактеризовать местоположение частицы, движущейся по непрерывной линии, достаточно задать точку, где она находится в данный момент времени. Но для того чтобы охарактеризовать местоположение дискретно движущейся частицы одной точки – не достаточно. Нужно задать все точки,

где она бывает в течение очень маленького промежутка времени. Например, у функции Дирихле таких точек только две (рис. 1.2). Но в общем случае их может быть бесконечно много. Снимок всего трехмерного пространства, сделанный с ненулевой, но очень короткой экспозицией, как раз и выявит расположение всех таких точек. И для того чтобы охарактеризовать местоположение частицы в данный момент времени, нам понадобятся координаты всех этих точек.

Конечно, пример со снимком, сделанным со всего пространства, – слишком гипотетический. Более того, если бы нам даже удалось сделать прибор, способный сфотографировать состояние дискретно движущейся частицы, то своим воздействием на нее он тут же изменил бы ее состояние до полной неузнаваемости. Гипотетический пример со снимком, сделанным со всего пространства, нужен исключительно для того, чтобы у читателя возникла картинка дискретно движущейся частицы, потому что эта картинка есть *наглядный образ квантового движения*. Возможно, вы уже не раз слышали, что квантовое движение настолько сложно и настолько непохоже на движение обычных объектов, что его невозможно даже представить себе.

Это не так. Мы только что, сделав гипотетический снимок с дискретно движущейся частицы, наглядно представили себе квантовое движение. Дискретное движение частицы почти совпадает с квантовым движением. Есть, правда, некоторые отличия, но они, несмотря на свою важность, не вносят каких-либо существенных изменений в эту картину, и их мы обсудим далее.

## 3.2. Плотность вероятности

Достаточно ли перечислить все точки, в которых частица успела побывать в течение короткого промежутка времени, чтобы полностью охарактеризовать ее местоположение?

Конечно, нет! Приглядимся внимательнее к нашему снимку. Одни точки «пропечатались» на нем очень сильно, другие слабее, третьи едва различимы. Это потому, что в одних точках частица бывает чаще, в других – реже. Например, если движение частицы описывается функцией Дирихле (см. рис. 2.2), то частица, в основном, находится в точке  $x_0$  и очень редко оказывается в  $x_1$ . Потому что иррациональных чисел гораздо больше, чем рациональных. Что касается частицы, описываемой модифицированной функцией Дирихле (см. рис. 2.6, 2.7), то такая частица проводит равное время в точках  $x_1$  и  $x_2$ , хотя, в основном, находится в точке  $x_0$ .

Поэтому для характеристики квантового движения недостаточно указать множество точек, в которых находится частица в данный, очень короткий, промежуток времени, необходимо также указать относительную частоту ее появления в каждой точке. Чем чаще бывает частица в какой-то точке или области, тем больше шансов ее там поймать.

Итак, для описания дискретного движения недостаточно указать множество точек или множество областей, в которых частица *находится* в данный, очень короткий, промежуток времени. Нужно также указать и *плотность вероятности* ее появления в каждой точке. Именно плотность вероятности, а не вероятность. Мы ведь всегда ловим частицу не в конкретной точке пространства, а в небольшом объеме вокруг нее. Умножив плотность вероятности на этот объем, мы и получим вероятность обнаружить в нем частицу.

А нужно ли нам знать конкретный вид функции, описывающей дискретные прыжки частицы в пространстве?

Нет, не нужно. Совершенно неважно, в какой последовательности частица проходит точки, в которых она находится в данный, очень короткий, промежуток времени. Для того чтобы рассчитать шансы поймать ее в том или ином месте, достаточно знать только *распределение плотности вероятности*.

### 3.3. Как складывать вероятности?

Нужны ли ещё какие-нибудь характеристики для описания квантового движения?

На этот вопрос трудно ответить, исходя из общих соображений. Следует обратиться к эксперименту. Предположим, что частица, например электрон, дискретно движется в двух областях пространства: **A** и **B** (см. рис. 3.1). И эти области движутся навстречу друг другу.

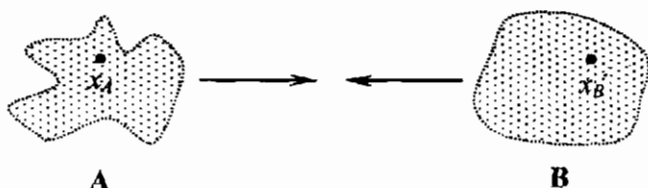


Рис. 3.1. Электрон находится в двух областях пространства **A** и **B**, которые движутся навстречу друг другу.

Зная распределение плотности вероятности внутри области **A** (или **B**), мы можем рассчитать вероятность обнаружить электрон в любом месте этой области. Но как изменится эта вероятность после того, как область **A** столкнется с областью **B**?

Пусть  $\rho_{\#}(x_A)$  плотность вероятности обнаружить электрон в точке  $x_A$ ,  $\rho_{\#}(x_B)$  — в точке  $x_B$ . Предположим, в какой-то момент времени эти точки пересекаются в точке  $x_0$ . Чему будет равна плотность вероятности обнаружить электрон в этой точке?

$$\rho_{\#}(x_0) = ?$$

Может быть, нужно просто сложить плотности вероятности?

$$\rho_{\#}(x_0) = \rho_{\#}(x_A) + \rho_{\#}(x_B) \quad (3.1)$$

Такой вывод выглядит вполне естественным, и можно даже привести доводы в его пользу. Пусть, скажем, вероятность

обнаружить электрон внутри области А равна 70 %, а внутри В, соответственно, 30 %. То есть вероятность обнаружить электрон в одной из этих областей равна 100 %. Ясно, что после того, как области столкнутся, вероятность обнаружить внутри них электрон также будет равна 100 %. То есть можно утверждать, что вероятности, взятые по всем областям, где дискретно движется электрон, должны складываться.

Но будут ли эти вероятности складываться в маленьких областях, и будут ли плотности вероятности складываться в отдельных точках, в соответствии с (3.1)?

Эксперимент дает однозначный ответ – нет!

Оказывается, плотность вероятности обнаружить электрон в точке  $x_0$  будет зависеть не только от  $\rho_W(x_A)$  и  $\rho_W(x_B)$ , но и от того, в фазе или не в фазе придут они в эту точку. Если вероятности приходят в какое-то место в фазе, то они усиливают друг друга, а если в противофазе, то, наоборот, гасят.

Поэтому плотность вероятности нужно складывать с учетом фазового множителя. То есть для того чтобы наиболее полно охарактеризовать движение электрона (или другого квантового объекта) в данной точке пространства, нужно задать два числа. Первое число – это плотность вероятности, а второе – фазовый множитель.

### 3.4. Закон сложения вероятностей или зачем в квантовой механике нужны комплексные числа?

Очень удобно записывать эти два числа в виде одного комплексного (см. рис. 3.2). Например, в точке  $x_A$  местоположение электрона будет характеризоваться комплексным числом  $\Psi_A$ :

$$\Psi_A = \sqrt{\rho_W(x_A)} \cdot e^{i\varphi_A} \quad (3.2)$$

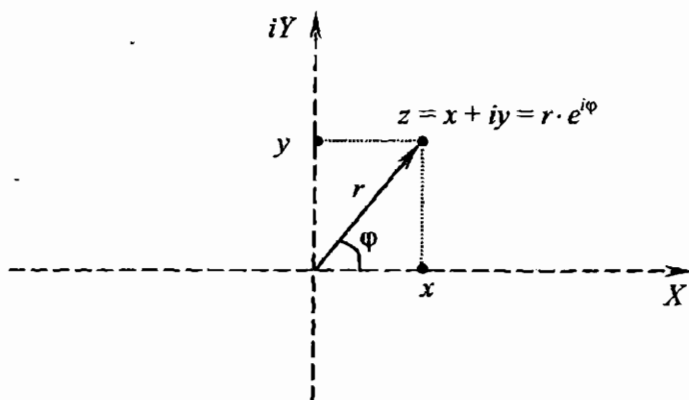
Здесь  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица,  $\varphi_A$  – фаза, а  $e^{i\varphi_A}$  – фазовый множитель. Соответственно в точке  $x_A$  состояние электрона будет характеризоваться комплексным числом  $\Psi_B$ :

$$\Psi_B = \sqrt{\rho_W(x_B)} \cdot e^{i\varphi_B} \quad (3.3)$$

Комплексное число  $\Psi_A$  (или  $\Psi_B$ ) называется *амплитудой вероятности* и играет очень важную роль в квантовой механике, так как именно оно характеризует квантовое состояние частицы в данной точке пространства.

Комплексные числа широко применяются как в классической физике, так и в квантовой. Напомним, что:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad (3.4)$$



**Рис. 3.2.** Любое комплексное число  $z$  можно изобразить в виде точки на так называемой комплексной плоскости ( $X; iY$ ). Его можно представить либо в виде суммы действительной части  $x$  и мнимой части  $iy$ , либо в виде модуля  $r$ , умноженного на фазовый множитель  $e^{i\varphi}$ , который по модулю равен единице:  $|e^{i\varphi}| = 1$ .

Итак, для характеристики движения электрона (или другого квантового объекта) используются комплексные числа. Это



вызвано тем, что производить вычисления с одним комплексным числом проще, чем с двумя действительными. Напомним, что при произведении двух комплексных чисел их модули перемножаются, а фазы складываются. Запись квантового состояния при помощи комплексных чисел – это удобный способ учесть сразу не только *величину* амплитуды вероятности, но и её *фазу*.

Теперь вернёмся к вопросу о сложении вероятностей. Две области, в которых дискретно движется один электрон, движутся навстречу друг другу (см. рис. 3.1) и сталкиваются.

Чему равна плотность вероятности обнаружить электрон в точке  $x_0$  – в точке, в которой сталкиваются точка  $x_A$  из области А и точка  $x_B$  из области В?

Ответ достаточно простой:

$$\rho_W(x_0) = \left| \sqrt{\rho_W(x_A)} \cdot e^{i\varphi_A} + \sqrt{\rho_W(x_B)} \cdot e^{i\varphi_B} \right|^2 \quad (3.5)$$

Обычно его записывают в таком виде:

$$\Psi(x_0) = \Psi(x_A) + \Psi(x_B) \quad (3.6)$$

$$\rho_W(x_0) = |\Psi(x_0)|^2 \quad (3.7)$$

То есть складываются не вероятности, а амплитуды вероятностей с учётом их фаз. Почему дело обстоит именно так, никто не знает. Так устроен квантовый мир. Но если бы квантовый мир был бы устроен по-другому, чуть-чуть проще, скажем, складывались бы вероятности (3.1), то все квантовые эффекты были бы НЕ НАБЛЮДАЕМЫ! Электрон мог бы двигаться дискретно сколько угодно, находиться сразу и на Земле, и на Луне, это не имело бы никакого значения. Никто не смог бы заметить такое странное поведение электрона! Мы делаем вывод о движении электрона сразу по двум (или более) путям только на основании интерференционных эффектов. А если бы складывались вероятности, то никаких интерференционных эффектов не было бы.

### 3.5. Волновая пси-функция – это математический образ квантового состояния

Пытаясь наиболее полно описать дискретное движение квантового объекта, мы вплотную подошли к основному понятию квантовой механики – понятию *квантового состояния*. Когда мы хотим охарактеризовать классический объект, нам достаточно указать его местоположение и скорость (предполагается, что масса объекта известна). Зная эти характеристики в некоторый момент времени, можно полностью рассчитать его дальнейшее движение. Совсем иное дело – квантовый объект. Такой объект движется не по непрерывной траектории, а дискретно. И какой, сколь угодно малый промежуток времени мы бы ни взяли, он не будет обладать ни определенным местоположением, ни определенной скоростью.

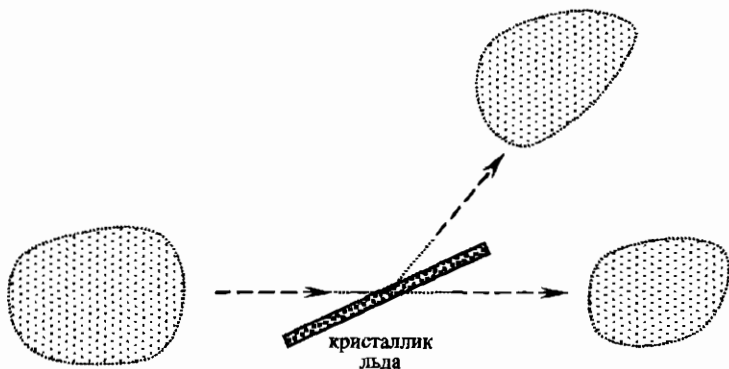
Чтобы полностью описать состояние квантового объекта нужно, во-первых, указать все точки пространства, в которых он находится в настоящее время. Во-вторых, указать плотность вероятности обнаружить его в какой-либо из этих точек. И, наконец, в-третьих, указать какую фазу имеет эта плотность вероятности в каждой точке. То есть нужно задать *две действительные функции* на всём трёхмерном пространстве. Одну для плотности вероятности и другую для фазы. Но, как оказалось, удобнее вместо этого задать на всём пространстве *одну комплексную функцию* вида (3.3), которая будет содержать сразу и величину амплитуды вероятности, и её фазу.

Эта комплексная функция получила специальное название: *волновая пси-функция*. Она позволяет полностью описать *физическое состояние* квантового объекта и таким образом является *математическим выражением его квантового состояния*.

### 3.6. Квантовое состояние объекта – это его история

Предположим, что некий фотон (или любой другой квантовый объект – электрон, протон, ядро атома и т. д.), двигаясь к Земле через межпланетное пространство из глубин космоса, разделился по дороге на множество волновых пакетов разного размера и формы (области пространства, в которых дискретно движется квантовый объект, мы будем иногда называть волновыми пакетами). Он мог, например, разделяться на такие волновые пакеты всякий раз, когда пролетал через какой-нибудь микроскопический кристаллик льда, частично отражаясь от него и частично проходя его насквозь (см. рис. 3.3).

Теперь предположим, что, используя какой-нибудь детектор, то есть прибор, способный взаимодействовать с фотоном, мы регистрируем этот фотон и получаем какую-то информацию о нем.



**Рис. 3.3.** Каждый раз, проходя через кристаллик льда, играющий роль светоделителя, волновой пакет, в котором дискретно движется фотон, разделяется на два пакета. В результате число волновых пакетов постоянно возрастает.

Сможем ли мы из полученной информации определить волновую пси-функцию фотона?

Нет, не сможем.

Допустим, мы захотели узнать расположение и полное число всех волновых пакетов, в которых дискретно движется данный фотон. И для этого мы установили множество детекторов в местах ожидаемого появления этих пакетов. Но как только фотон будет зарегистрирован в одном из них, в тот же момент *все остальные волновые пакеты бесследно исчезнут*. И мы в принципе не сможем узнать, находился или нет фотон еще в каком-нибудь месте, помимо того места, где он был пойман.

Чтобы узнать квантовое состояние некоторого объекта, нужно получить хоть какую-то информацию о нем. А чтобы получить информацию, нужно произвести измерение каких-либо его параметров. Например, измерить или местоположение, или импульс, или энергию, или скорость, или поляризацию и т. д. Произведя подобное измерение, мы вызовем *редукцию квантового состояния*, так называемый *квантовый скачок*, в результате которого квантовый объект мгновенно перейдет из одного состояния в другое.

Скажем, при регистрации фотона на фотопластинке, он перейдет из состояния, когда он находился во многих местах, в состояние, когда он находится только в одном месте. В результате, получив небольшую информацию об исходном состоянии фотона, мы безвозвратно теряем большую часть информации об этом состоянии.

Мы можем частично восстановить эту информацию, если в деталях изучим пространство, через которое двигался фотон. Обнаруженные на пути фотона кристаллики льда будут свидетельствовать о том, что фотон расщеплялся на волновые пакеты, проходя через них.

Необходимо отметить, что в огромной информации, содержащейся в квантовом состоянии фотона, содержится *вся история* его путешествия через космическое пространство. По мере того как фотон движется сквозь пространство, заполненное

различными объектами, как-то влияющими на его движение, квантовое состояние фотона непрерывно усложняется. Такое усложнение будет происходить до тех пор, пока фотон, взаимодействуя с каким-нибудь макрообъектом, не вызовет в нем необратимых изменений (способность фотопластинки чернеть при попадании в нее фотона как раз и относится к числу таких необратимых изменений и именно поэтому используется для его регистрации). После этого фотон будет локализован в малом объеме пространства, и его квантовое состояние редуцирует (схлопнется). Математически такая локализация будет выражена в редукции волновой функции фотона. При этом вся история его движения будет «стерта».

Вообще говоря, фотон при регистрации исчезает. Но если мы зарегистрируем в некоторой точке пространства какую-нибудь другую частицу, например электрон, то несмотря на то что сам электрон сохранится, вся история его движения будет также стёрта из его волновой функции. Электрон словно бы заново рождается, и в который раз начинает свою историю с «белого листа».

Итак, регистрируя фотон (или любой другой квантовый объект), мы вызываем редукцию его квантового состояния и безвозвратно теряем большую часть информации, которая содержалась в его квантовом состоянии.

Однако это не страшно, потому что для науки история движения одного фотона не имеет какого-либо значения. Для науки представляет интерес сведения об окружающем нас космическом пространстве и, регистрируя фотон, пришедший из космических глубин, мы получаем небольшую частичку таких сведений. Мы теряем почти всю информацию об истории движения фотона, зато получаем крупинку информации об устройстве Мироздания. Регистрируя и изучая фотоны, которые в неимоверном количестве приходят на Землю из Космоса, астрономы получают огромную информацию о космическом пространстве и о космических телах.

Все это хорошо. Но нас ведь, помимо изучения космоса, также интересует и изучение квантовых объектов. Как же их изучать, если при попытке получить информацию об их квантовом состоянии, большая часть этой информации бесследно исчезает?

### **3.7. Как определить квантовое состояние и построить волновую пси-функцию?**

Существует единственный способ получить *полную информацию* о состоянии квантового объекта – это изучить множество квантовых объектов, находящихся *в одном и том же* квантовом состоянии. И чем сложнее квантовое состояние объекта, тем большее число объектов, находящихся в том же самом квантовом состоянии, нам понадобится изучить.

Предположим, что из космических глубин через определенный интервал времени, скажем, одну секунду, к нам на Землю прилетают фотоны, находящиеся *в одном и том же* квантовом состоянии (конечно, такое предположение чересчур фантастическое, потому что состояние космоса все время изменяется, но в качестве наглядного примера оно вполне подойдет). Мы установим на Земле большое количество детекторов для поимки этих фотонов, а еще лучше – сделаем один огромный детектор и вынесем его за пределы земной атмосферы в космос.

Если область, занимаемая этим гигантским детектором, превзойдет область, содержащую все волновые пакеты, в которых дискретно движется каждый фотон, то каждую секунду мы будем ловить один фотон. Если же область, в которой дискретно движется фотон, по своим размерам будет превосходить наш детектор, то будут встречаться секунды, когда мы не поймем фотон. В этом случае для изучения квантового состояния фотона придется установить дополнительные детекторы в других местах околоземного пространства, а возможно, и еще дальше. Но предположим, этого не случится.

Предположим, что каждую секунду наш детектор всегда ловит один фотон. Значит, все в порядке, и теперь мы сможем определить квантовое состояние фотона.

Сначала мы будем просто регистрировать прилетающие фотоны (да, мы еще предположим, что наш детектор так хитро устроен, что никакие другие фотоны, находящиеся в другом квантовом состоянии, он *не регистрирует!*) И в результате мы определим все области пространства, в которых дискретно движется каждый прилетающий фотон. Затем мы построим зависимость плотности вероятности местонахождения фотона от координат данного места. И таким образом, узнаем квадрат модуля волновой функции фотона, то есть функцию:

$$\rho_W(x, y, z, t) = |\Psi(x, y, z, t)|^2$$

Где  $t$  – это время прибытия фотона на детектор, и, вообще говоря, это время может быть разным для разных участков детектора. Чем точнее мы захотим узнать эту функцию, тем большее число фотонов нам придется зарегистрировать. Ну вот, наконец, мы узнали эту функцию с требуемой для нас точностью. Что дальше?

Теперь начинается самая трудная часть эксперимента – нам нужно определить фазу волновой функции фотона в зависимости от координат  $x, y, z$ . Только тогда мы будем знать о квантовом состоянии фотона все (на самом деле, не все, ведь фотон обладает еще и определенной поляризацией, но с поляризацией мы познакомимся далее, а пока не будем принимать ее в расчет).

Итак, амплитуда волновой функции – это комплексная величина и ее всегда можно представить в виде:

$$\Psi = A \cdot e^{i\varphi} = A \cdot (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (3.8)$$

Где  $A$  – модуль амплитуды (неотрицательное действительное число),  $\varphi$  – фаза, а  $e^{i\varphi}$  – соответственно, фазовый множитель. Модуль амплитуды нам уже известен, он равен:

$$A = \sqrt{\rho_W(x, y, z, t)} \quad (3.9)$$

Осталось найти фазу. Как это сделать?

Вообще говоря, физический смысл имеет не сама фаза, а лишь *разность* фаз. Поэтому мы можем взять любую точку или очень маленькую область пространства, в которой  $\rho_W > 0$  и приписать ей *нулевую* фазу. А затем определить разность фаз между этой маленькой областью и какой-нибудь другой маленькой областью, в которой также  $\rho_W > 0$ .

Чтобы определить эту разность фаз между маленькими областями **A** и **B**, нужно существенно изменить схему эксперимента (см. рис. 3.4).

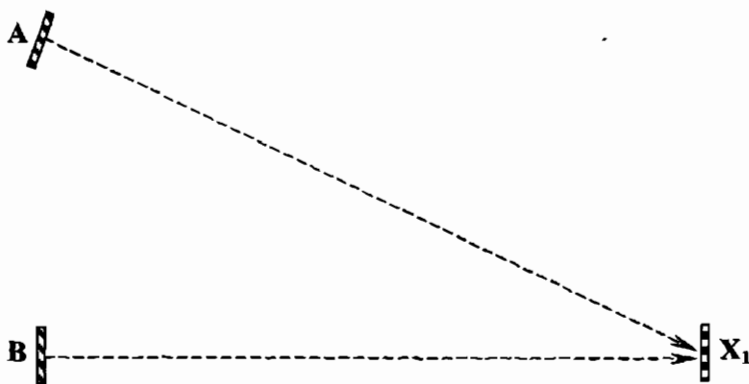


Рис. 3.4.

Во-первых, нужно убрать подальше детектор фотонов, чтобы он не вызывал редукцию их квантового состояния. Во-вторых, на том же самом месте, где на детекторе была маленькая область **A**, нужно поставить маленькое зеркальце размером с область **A**, которое будет полностью ее закрывать. И аналогичное зеркальце установить на месте маленькой области **B**. Эти зеркала будут отражать падающие на них волновые пакеты в некоторую маленькую область **X<sub>1</sub>**, где будет установлен детектор фотонов.



Мы уже знаем плотность вероятности  $\rho_W(A)$  обнаружить фотон внутри области  $A$  и плотность вероятности  $\rho_W(B)$  обнаружить фотон внутри области  $B$  (нужно взять области  $A$  и  $B$  настолько маленькими, чтобы внутри них ни модуль амплитуды, ни даже ее фаза существенно не менялись, кроме того, размеры этих областей должны быть равны). Теперь, регистрируя фотоны в области  $X_1$ , мы сможем определить плотность вероятности  $\rho_W(X_1)$  обнаружить фотон в какой-либо точке внутри этой области.

Затем мы можем по-другому повернуть зеркала в областях  $A$  и  $B$  и направить волновые пакеты в маленькую область  $X_2$ , где также расположен детектор фотонов.

Пока волновой пакет движется из  $A$  (или из  $B$ ) в область  $X_1$  (или  $X_2$ ), его фаза изменяется. Частота изменения фазы как раз равна частоте фотона, которая, в свою очередь, пропорциональна его энергии. Таким образом, фаза волнового пакета изменяется пропорционально времени его пути и, значит, пропорционально пройденному расстоянию. По-разному ориентируя зеркала в  $A$  и  $B$ , можно добиться того, что в некоторую маленькую область  $X_{\max}$  волновые пакеты придут *в одной и той же фазе*, что даст максимальную плотность вероятности внутри этой области:

$$\rho_W(X_{\max}) = \left( \sqrt{\rho_W(A)} + \sqrt{\rho_W(B)} \right)^2 \quad (3.10)$$

И, соответственно, найдётся такая маленькая область  $X_{\min}$ , в которую волновые пакеты придут *в противофазе*, что даст наименьшую плотность вероятности внутри этой области:

$$\rho_W(X_{\min}) = \left( \sqrt{\rho_W(A)} - \sqrt{\rho_W(B)} \right)^2 \quad (3.11)$$

Зная частоту фотона, и сравнивая между собой длины отрезков  $|AX_{\max}|$  и  $|BX_{\max}|$ , можно определить разность фаз между маленькими областями  $A$  и  $B$ . И, соответственно, между некоторыми точками  $B$  и  $A$ , лежащими внутри этих областей.

Обозначим эту разность как  $\varphi_B$ . Теперь мы знаем, чему равна волновая функция фотона в точках  $A$  и  $B$ . В точке  $A$ :

$$\Psi(A) = \sqrt{\rho_W(A)} \quad (3.12)$$

Так как мы условились считать фазу фотона в этой точке равной нулю. И в точке  $B$ :

$$\Psi(B) = \sqrt{\rho_W(B)} \cdot e^{i\varphi_B} \quad (3.13)$$

Действуя аналогичным образом, мы можем определить значение волновой функции фотона во всех остальных точках. Теперь мы знаем о квантовом состоянии данного фотона все.

Конечно, мы пропустили целый ряд нюансов. Одним из таких нюансов, как уже отмечалось, является поляризация фотона. Другим может являться то, что данный фотон не будет обладать определенной энергией и, следовательно, не будет обладать и определенной частотой, что может сильно усложнить определение разности фаз между различными точками. Кроме того, отдельные волновые пакеты могут приходить на детектор с большой временной задержкой, что также усложнит задачу. Однако все это чисто технические трудности, и, в принципе, ясно, что задачу о нахождении волновой функции квантового объекта можно решить. Если, конечно, имеется достаточное количество квантовых объектов, находящихся в *одном и том же* квантовом состоянии.

И, конечно, принципиальная трудность здесь в том, что, как правило, все квантовые объекты, существующие в природе, хоть незначительно, но отличаются друг от друга своим квантовым состоянием, так как имеют *различные* собственные истории. Где же взять большое количество совершенно одинаковых квантовых объектов?

Все очень просто. Их нужно приготовить самим!

Для того чтобы приготовить большое число квантовых объектов, например электронов, в одинаковом квантовом состоянии, нужно, во-первых, где-нибудь «взять» большое число

электронов. Во-вторых, стереть их индивидуальные истории, произведя редукцию их квантовых состояний. И, в-третьих, придумать для них какую-нибудь новую историю, чтобы получить у всех одинаковое и интересное для нас квантовое состояние. Затем с такими совершенно одинаковыми электронами можно проводить различные эксперименты.

Конечно, прежде чем проводить такие эксперименты, необходимо провести контрольный эксперимент по измерению квантового состояния этих электронов, чтобы убедиться в том, что оно именно такое, какое изначально планировалось.

## ПОЧЕМУ ЭЙНШТЕЙН ТАК И НЕ ПРИНЯЛ КВАНТОВУЮ МЕХАНИКУ?

В этой главе мы рассмотрим, какую позицию по отношению к квантовой механике занимал такой выдающийся физик, как Альберт Эйнштейн. И в первую очередь, нас будет интересовать его отношение к нелокальности.

### 4.1. Эйнштейн ставит вопрос ребром

Известно, что Эйнштейн не принимал квантовую механику, считая ее неполной теорией. А *почему* он занял такую позицию? Чем ему не понравилась квантовая механика? Что означает его обвинение этой теории в неполноте? Чем руководствовался Эйнштейн, возражая против квантового механического мировоззрения? На все эти вопросы мы сейчас постараемся ответить.

Необходимо сразу подчеркнуть, что Эйнштейн внес значительный вклад в создание квантовой механики. В 1905 году он выдвинул очень смелую по тем временам гипотезу, что свет представляет собой поток частиц – фотонов. Именно за это открытие Эйнштейн получил в 1921 году Нобелевскую премию. В 1917 году Эйнштейн рассчитал, как связаны между собой интенсивности вынужденного и спонтанного излучения. В 1924 году совместно с индийским физиком Бозе разработал статистику частиц с целым спином – так называемую статистику Бозе-Эйнштейна. Кроме того, Эйнштейн приветствовал все революционные идеи, вносимые в квантовую механику другими физиками. Он поддержал гипотезу Планка о кванте действия, атомную теорию Бора, гипотезу де Бройля о волновой природе

электрона. И, тем не менее, он не торопился признавать квантовую механику. Почему?

Эйнштейн сразу же обратил внимание на самую парадоксальную черту квантовой механики, которую в дальнейшем он называл «призрачное дальное действие» или «действие призраков» (термин «нелокальность» был введен значительно позднее). Вот как он сформулировал свою позицию на пятом Сольвеевском конгрессе [28]:

К квантовой теории можно подходить с двух точек зрения, по-разному оценивающих область применимости теории. Именно эти точки зрения я и хотел бы рассмотреть на простом примере.

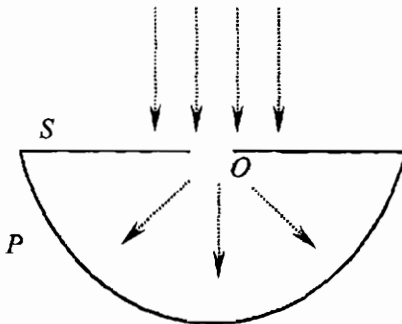


Рис. 4.1

Пусть  $S$  – экран, в котором проделано небольшое отверстие  $O$  (см. рис. 4.1), и пусть  $P$  – фотопленка, имеющая форму полусферы большого радиуса. Предположим, что электроны падают на экран  $S$  в направлении, указанном стрелками. Часть этих электронов пройдет через отверстие  $O$ . Так как отверстие мало, а электроны обладают скоростью, они равномерно распределяются по всем направлениям и воздействуют на пленку.

Общим для обеих точек зрения на квантовую теорию является описание процесса как волн де Бройля, почти нормально падающих на экран  $S$  и испытывающих дифракцию на отверстии  $O$ . По другую сторону отверстия  $O$  возникают сферические волны, достигающие пленки  $P$ . Их интенсивность на поверхности  $P$  определяет меру волн, дошедших до рассматриваемого участка пленки.

Теперь мы можем охарактеризовать обе точки зрения.

1. *Первая точка зрения.* Волны де Бройля – Шредингера соответствует не одному электрону, а облако электронов, распределенному в пространстве. Квантовая теория ничего не говорит об отдельных процессах. Она дает

информацию лишь относительно бесконечного множества элементарных процессов.

2. *Вторая точка зрения.* Квантовая теория претендует на полное описание отдельных процессов. Каждая частица, падающая на экран, не характеризуется положением и скоростью, а описывается пакетом волн де Бройля – Шредингера, имеющим малую протяженность и малый разброс по направлениям. Этот волновой пакет дифрагирует и после дифракции его части попадают на пленку  $P$ .

Согласно первой, чисто статистической точке зрения,  $|\Psi|^2$  выражает вероятность того, что в рассматриваемом участке пространства, например, в том месте, где находится пленка, имеется *одна* из частиц электронного облака.

Согласно второй точке зрения,  $|\Psi|^2$  выражает вероятность того, что *определенная* частица в рассматриваемый момент времени находится в заданном месте (например, там, где расположена пленка). Теория, таким образом, рассматривает отдельные процессы и претендует на полное описание всех фактов и закономерностей.

Вторая точка зрения гораздо радикальнее первой в том смысле, что она содержит все результаты, которые получаются в теории, основанной на первой точке зрения; в то же время обратное утверждение неверно. Только в силу второй точки зрения из теории следует, что законы сохранения выполняются и для элементарных процессов. Только в силу второй точки зрения теория сумела объяснить результат эксперимента Гейгера и Бете. Только она позволила объяснить, почему в камере Вильсона капельки, образующиеся при пролете  $\alpha$ -частицы, раскладываются почти вдоль прямых.

Все же я не могу не высказать некоторые возражения против второй точки зрения. Рассеянные волны, достигшие пленки  $P$ , не имеют никакого избранного направления. Если считать, что  $|\Psi|^2$  задает просто вероятность пребывания некоторой частицы в данный момент времени на рассматриваемом участке пленки, то отсюда бы следовало, что *один и тот же* элементарный процесс оказывает действие в *двух или многих* местах пленки. Однако интерпретация, согласно которой  $|\Psi|^2$  выражает вероятность того, что *определенная* частица находится во вполне определенном месте, предполагает совершенно особый механизм действия на расстоянии, не позволяющим волнам, непрерывно распределенным в пространстве, оказывать свое действие одновременно в *двух* участках пленки.

Итак, Эйнштейн поставил вопрос ребром. Если квантовая механика даст *полное* описание реальности (полное в том смысле, что волновая функция применима к описанию даже одного электрона и адекватно описывает его *реальное* состояние), то из нее вытекает существование некоего механизма, обеспечивающего мгновенное действие на расстоянии. Другими словами, редукция волновой функции – это математическое описание *реального* физического процесса.

В виду особой важности этого вывода для понимания физического смысла квантовой механики проиллюстрируем его на простых примерах.

## 4.2. Функция вероятности для белого шара в чёрном ящике

Предположим, у нас есть два черных ящика. Пусть в одном из них в результате какого-нибудь случайного процесса оказывается белый шар. Мы *не знаем*, в каком из ящиков он находится, и поэтому говорим: вероятность обнаружить шар в одном из ящиков равна  $1/2$ . Затем мы удаляем один ящик на значительное расстояние и открываем его. И в тот самый момент, когда мы его открываем, вероятность обнаружить шар во втором ящике изменяется скачком. Если мы, например, обнаруживаем в первом ящике шар, то вероятность обнаружить его во втором уменьшается скачком от  $1/2$  до 0. Получается, что наше наблюдение над первым ящиком *мгновенно* изменяет вероятность обнаружить шар во втором ящике, который может быть удален на любое расстояние от первого.

Можно ли в данном случае говорить о мгновенном действии на расстоянии?

Конечно же, нет!

Ведь в данном случае изменяется не реальное местонахождение белого шара в черном ящике, а всего лишь *наше знание* об этом местонахождении. С самого начала белый шар находился *только в одном* из двух черных ящиков. А мы не знали, в каком именно. Но после того как открыли один ящик, тут же поняли, что находится во втором.

Когда мы не знаем, где находится белый шар, то можем описывать его местонахождение при помощи функции вероятности. В этом случае открытие первого ящика мгновенно изменяет функцию вероятности, описывающую нахождение белого шара во втором ящике, *не меняя* при этом его реального местонахождения. Мы можем говорить о редукции (мгновенном

и скачкообразном изменении) функции вероятности в результате нашего наблюдения. Но эта редукция отражает только мгновенное и скачкообразное изменение *нашего знания*, произошедшего в результате наблюдения, и *никакого* отношения к изменению реального местонахождения шара не имеет. В данном случае редукция функции вероятности – это *не физический* процесс.

### 4.3. Функция вероятности для квантового объекта

Теперь перейдем от белого шара к квантовому объекту, например, к электрону. Белый шар является классическим объектом и может находиться либо в одном черном ящике, либо в другом и третьего ему не дано. Но не таков электрон, которому как раз третье и дано! Конечно, электрон так же, как и белый шар, может находиться только в каком-нибудь одном ящике. Но, кроме того, (и именно это делает квантовый мир таким интересным!) электрон может находиться *сразу* в двух ящиках. Скажем, с вероятностью 30% в первом и 70% – во втором. И в данном случае эта вероятность будет отражать не наше незнание местонахождения электрона, а именно его *физическое* состояние. Кроме того, физическое состояние электрона определяется не только вероятностью обнаружения его в одном из черных ящиков, но и определенной фазой. Волновая функция, описывающая состояние электрона во втором ящике может быть сдвинута по фазе относительно волновой функции, описывающей электрон в первом ящике.

Почему мы уверены, что электрон может находиться сразу в двух ящиках? Да потому, что мы можем очень аккуратно вынуть содержимое из черных ящиков, затем соединить друг с другом и направить на детектор, на котором можно будет наблюдать различные интерференционные эффекты между тем, что находится в первом ящике и тем, что находится во втором. Более того, мы можем по своему усмотрению влиять на эти



интерференционные эффекты, изменяя разность фаз между тем, что находится в первом ящике и тем, что во втором. Этого можно добиться, например, подержав один из ящиков некоторое время в магнитном поле.

Подобные интерференционные эффекты совершенно не наблюдаемы в случае белых шаров или любых других классических объектов. И только поэтому мы вправе считать, что классический объект в отличие от квантового всегда находится только в одном месте пространства, независимо от того, знаем ли мы, где он находится или нет.

И последнее замечание. Если мы знаем волновую функцию электрона, то мы знаем о нем все. Но мы можем не знать его волновую функцию. Например, если электрон прилетел к нам непонятно откуда, то мы *в принципе* не сможем узнать его волновую функцию. Или если кто-то приготовил электрон в определенном квантовом состоянии и не сказал нам, *как* он это сделал, то мы тоже не сможем узнать волновую функцию электрона.

Мы можем точно (точность в этом случае ограничена только возможностями экспериментальной техники, никаких теоретических ограничений на нее нет) знать эту функцию только в том случае, если сами приготовили его квантовое состояние, или это состояние приготовил кто-то другой и подробно рассказал нам, *как* он это сделал.

Так что же делать, если мы *не знаем* волновую функцию, описывающую местонахождение электрона в двух черных ящиках?

Мы можем описывать местонахождение электрона при помощи функции вероятности так же, как мы это делали в случае белого шара, когда не знали, где он находится. И в этом случае функция вероятности также будет описывать не реальное состояние электрона, которое нам не известно, а будет отражать лишь *наше незнание* его состояния. И, следовательно, редукция вероятности не будет соответствовать *реальному* изменению *физического* состояния электрона.

Если электрон действительно находился сразу в двух ящиках, то, открывая один ящик, и пытаясь обнаружить там электрон, мы *обязательно* вызовем *реальное изменение* его состояния *сразу в двух ящиках*. Это мгновенное и скачкообразное изменение *физического* состояния электрона (квантовый скачок) будет полностью описываться редукцией волновой функции электрона.

Но если мы не знаем эту волновую функцию, то и ее редукцию мы также не сможем узнать. Нам придется довольствоваться знанием редукции функции вероятности. А эта редукция будет только *частично* отражать изменение реального состояния электрона и частично – изменение *нашего знания* о его состоянии. При этом вся информация о *реальном* состоянии электрона до его наблюдения будет безвозвратно потеряна.

#### 4.4. Позиция Эйнштейна

Сделав такое длинное отступление, мы сможем лучше понять замечание Эйнштейна, высказанное им в адрес квантовой механики. Этим замечанием Эйнштейн сразу же поднимает ключевой вопрос квантовой механики – вопрос о волновой функции.

*Что именно* отражает вероятностный характер волновой функции: *наше незнание* действительного местоположения электрона (или другого квантового объекта) или же *действительную* неопределенность в его местоположении?

Если волновая функция описывает только наше незнание истинного местоположения, то, очевидно, что она *неприменима* к описанию движения одного электрона, а применима лишь как *статистическое* описание движения большого числа электронов. Такую интерпретацию волновой функции Эйнштейн называет статистической, имея в виду, по-видимому, аналогию со статистическим распределением Максвелла, применимым к большому числу молекул газа, но не применимым к движению отдельной молекулы.

Если же волновая функция описывает *действительную* неопределенность в местоположении электрона, то в этом случае она, разумеется, применима и для описания движения отдельного электрона. Такую интерпретацию волновой функции Эйнштейн называет копенгагенской, потому что она была разработана копенгагенской школой. В основном, Бором и Гейзенбергом.

Статистическая интерпретация сделана в рамках классической физики. Она проста и наглядна. Копенгагенская интерпретация – это нечто принципиально новое, идущее вразрез с классическим научным мировоззрением. Бор разрабатывал эту интерпретацию не на основе абстрактных теоретических идей, а пытаясь непротиворечиво объяснить всю совокупность разнообразных экспериментальных фактов. И с этой задачей Бор справился, хотя для этого ему пришлось пожертвовать классической наглядностью для описания квантовых процессов.

Эйнштейн также подчеркивает, что только копенгагенская интерпретация позволяет объяснить существующие эксперименты, в то время как статистическая неспособна это сделать. И, тем не менее, Эйнштейн указывает на важную особенность копенгагенской интерпретации, которая сильно его смущает.

Если принять статистическую интерпретацию, то редукция волновой функции – это редукция вероятности, которая не имеет никакого отношения к *физическому* процессу, а отражает только изменение *наших знаний* об этом процессе. Но если принять копенгагенскую интерпретацию, то редукция волновой функции – это *физический* процесс. Но что это за процесс? Классическая физика никогда не сталкивалась с подобными процессами. Электрон, проявляя свою волновую природу, занимал, как волна, огромный объем пространства. И вдруг, в результате измерения его положения он мгновенно схлопнулся практически в точку! Как возможно подобное?!

Эйнштейн словно бы говорил физикам, собравшимся на пятом Сольвеевском конгрессе: «Да, копенгагенская интерпретация позволяет, в отличие от статистической,

объяснить все имеющиеся экспериментальные данные. Но посмотрите, какой абсурд следует из нее. Разве может подобный процесс иметь место в действительности?»

Скорее всего, участники конгресса не совсем поняли, о чем именно говорил Эйнштейн. Только что выстроенное здание квантовой механики еще окутывал густой и непроницаемый туман. И нужно было обладать проницательностью Эйнштейна, чтобы, заглянув сквозь этот туман в самый фундамент нового здания, увидеть там со всей ясностью нечто поистине абсурдное.

Даже такой выдающийся физик как Луи де Бройль, открывший волновую природу электрона, не сразу осознал физический смысл редукции волновой функции. В противном случае он не разрабатывал бы теорию волны-пилота. Примерно четверть века потребовалось ему, чтобы разглядеть то, что почти сразу же разглядел Эйнштейн. Но когда де Бройль все-таки разглядел, что за физика скрывается за редукцией волновой функции, он обозвал такую физику магией и отошел от копенгагенской интерпретации [7].

По всей видимости, Эйнштейн понял, что участники конгресса не понимают его. И тогда он решил действовать иначе. Если копенгагенская интерпретация неверна, а верна статистическая, то электрон (или другой квантовый объект) имеет определенное, вполне конкретное местоположение в пространстве. Просто мы не знаем, где он находится. То же самое относится и к его импульсу. То есть электрон обладает и точной координатой своего местоположения, и точным знанием импульса. Поэтому Эйнштейн сделал вывод, что соотношение неопределенностей Гейзенберга отражает не реальное положение вещей, не неопределенность в местоположении и импульсе электрона, существующие в действительности, а лишь нашу неспособность их одновременно измерить. Измеряя местоположение электрона, мы воздействуем на него и, в результате, его импульс изменяется непредсказуемо. Чем точнее мы хотим измерить координату электрона, тем сильнее измеряем его импульс. И наоборот, измеряя импульс, мы непредсказуемым

образом изменяем местоположение электрона. Пытаясь получить какую-то информацию о движении электрона, мы воздействуем на него. И это воздействие нельзя сделать сколь угодно малым. Потому что существует минимальное действие, так называемый квант действия, открытый Планком. В результате Эйнштейн пришел к выводу, что соотношение неопределенностей Гейзенберга относится исключительно к самому процессу измерения.

Получается странная ситуация: электрон имеет точную координату и точный импульс, но непосредственно мы можем измерить только что-то одно. Что же делать? Ответ напрашивается сам собой. Если нельзя что-то измерить напрямую, то нужно попробовать измерить это косвенно. И Эйнштейн решил придумать такой мысленный эксперимент, в котором можно было бы в результате и прямых и косвенных измерений измерить координату и импульс электрона точнее, чем это допускается соотношением неопределенностей. За время, пока длился конгресс, Эйнштейн придумал множество подобных экспериментов. Но к счастью, для квантовой механики Нильс Бор смог найти во всех них какую-нибудь ошибку. Квантовая неопределенность вела себя во всех мысленных (да и во всех реальных) экспериментах как нечто абсолютно реальное. Она переходила из одной формы в другую, но никуда при этом не исчезала.

Можно отметить, что если бы Эйнштейн смог придумать, как измерить импульс и координату электрона точнее, чем это допускается соотношением неопределенностей, то он разрушил бы все здание квантовой механики, так как выбил бы из-под него фундамент. Мысленные эксперименты, предложенные Эйнштейном, широко обсуждались в научной литературе, в частности, они проанализированы в статье Бора «Дискуссии с Эйнштейном по проблемам теории познания в атомной физике», напечатанной в сборнике «Альберт Эйнштейн: ученый и философ», который был издан в честь семидесятилетия Эйнштейна. Поэтому мы не будем обсуждать здесь эти

эксперименты, а рассмотрим только один мысленный эксперимент Эйнштейна, который он предложил уже на шестом Сольвеевском конгрессе в 1930 году. Да и то лишь потому, что у него было интересное продолжение.

## 4.5. Эксперимент с часами и его продолжение

На шестом Сольвеевском конгрессе Эйнштейну удалось сильно потрепать нервы и Нильсу Бору, и всем остальным сторонникам квантовой механики. Потому что он придумал мысленный эксперимент по опровержению соотношения неопределенностей, в котором поначалу ни Бор, ни кто-либо другой не могли найти ошибку. Вот суть этого знаменитого эксперимента.

Предположим, у нас есть герметичный ящик с излучением, внутри которого имеется часовой механизм, способный на краткий миг открыть заслонку в ящике (рис. 4.2).

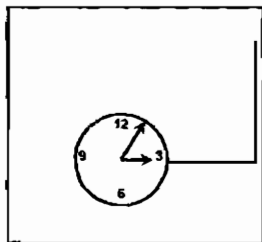


Рис. 4.2

Таким кратковременным открыванием заслонки в принципе можно добиться того, что из ящика вылетит единственный фотон. Благодаря часовому механизму мы будем знать точный момент времени вылета этого фотона. Для того чтобы нарушить соотношение неопределенностей для времени и энергии, нам нужно теперь очень точно определять энергию фотона. Как это сделать? Да очень просто! Нужно взвесить ящик

до и после вылета фотона, а затем, используя всем известное соотношение между массой и энергией  $E = mc^2$ , определить энергию фотона.

Обычно Бор достаточно быстро находил ошибку в рассуждениях Эйнштейна, но с этим экспериментом он промучился до утра. Но, тем не менее, обнаружил ошибку и здесь. Вот аргументы Бора.

Чтобы взвесить ящик, его нужно поставить на весы (см. рис. 4.3). Процесс взвешивания приведет к тому, что ящик будет иметь неопределенность в местоположении по вертикали.

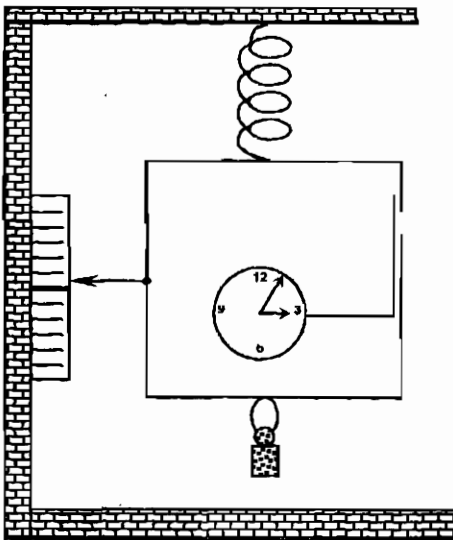


Рис. 4.3

Так как скорость хода часов изменяется в гравитационном поле, и поэтому зависит от высоты, на которой они расположены, то неопределенность в положении ящика приведет к неопределенности в показании часов, находящихся внутри ящика. И чем точнее мы будем измерять вес ящика, тем сильнее будет неопределенность в показании часов внутри ящика. В

результате, определив точно энергию вылетевшего фотона, мы не будем знать момента времени, когда он вылетел.

Однако Эйнштейн не сдался. Он нашел очень интересное продолжение. После того как фотон вылетел, мы можем повторно взвесить ящик и в результате определить энергию фотона с любой нужной нам точностью. Правда, в этом случае мы не будем знать точный момент его вылета. Но ведь мы можем не взвешивать ящик повторно, а открыть его и сверить часы. И в этом случае мы будем знать точное время вылета фотона.

Таким образом, возможны два варианта проведения данного эксперимента.

*Первый вариант.* Мы ставим ящик с излучением на весы. Процесс взвешивания сопровождается затухающими колебаниями ящика по вертикали и приводит к тому, что показания часов в ящике *не совпадают* с показаниями наших (эталонных) часов. Затем внутри ящика срабатывает часовой механизм, и из ящика вылетает один фотон. После этого мы снова взвешиваем ящик и определяем точную энергию вылетевшего фотона. Однако при этом показания часов в ящике снова сбиваются на неопределенную величину, и поэтому мы не знаем точный момент времени вылета фотона (по эталонным часам).

*Второй вариант.* Мы взвешиваем ящик. Затем из него вылетает фотон. После этого вместо того чтобы вторично взвесить ящик, мы открываем его и сверяем часы. Мы знаем момент вылета фотона по часам в ящике, видим разницу в показании часов в ящике и эталонных часов и, в результате, определяем точное время вылета фотона по эталонным часам.

Итак, после того как фотон вылетит из ящика, мы можем по своему усмотрению либо определить его точную энергию (первый вариант), либо точное время его вылета (второй вариант). Эйнштейн полагал как само собой разумеющееся, что наши действия с ящиком после вылета фотона никак не могут повлиять на вылетевший фотон, и поэтому сделал следующий вывод.



Раз мы можем, не влияя на фотон, определить и его точную энергию, и точный момент его вылета, значит, фотон обладает и тем, и другим одновременно. И, следовательно, соотношение неопределенностей для энергии фотона и времени его вылета отражает не реальное положение вещей, не реальную неопределенность в движении фотона, а лишь нашу неспособность их измерить одновременно. И отсюда Эйнштейн сделал вывод о неполноте квантово-механического описания действительности.

Начиная с этого момента и далее, в споре между Эйнштейном и Бором будет недопонимание. Эйнштейну следовало бы поставить вопрос ребром: может ли измерение, сделанное над ящиком, повлиять на *реальное* состояние вылетевшего из него фотона?

Но Эйнштейн так вопрос никогда не поставит. Возможно, потому что он был абсолютно уверен в отрицательном ответе на него. Эйнштейн, основываясь на своем мировоззрении, даже в мыслях не допускает возможности нелокального взаимодействия. Безоговорочное неприятие нелокальности время от времени проскальзывает в его статьях [26-30]. Поэтому, как само собой разумеющееся, Эйнштейн, подразумевая невозможность нелокального взаимодействия, переходит сразу к неполноте квантовой механики. В результате, вместо того, чтобы обсудить важный и принципиальный вопрос о квантовой нелокальности, Эйнштейн и Бор обсуждают очень скользкий вопрос о полноте квантовой механики.

Вопрос о полноте квантовой механики скользкий по двум причинам. Во-первых, полных теорий в абсолютном смысле этого слова не существует, так как область применения любой теории ограничена. Во-вторых, представления о полноте теории у всех разные.

Бор *принял* квантовую механику. В отличие от Эйнштейна, который не принял новую теорию и поэтому глядел на здание квантовой механики как бы со стороны, Бор «находился» внутри этого здания. Он видел изнутри все величие и всю красоту *нового*

взгляда на Мир. Рассуждения Эйнштейна о неполноте квантовой механики, мягко говоря, казались ему странными. Ведь математический аппарат квантовой механики совершенно свободен от каких бы то ни было противоречий. И используя его, можно рассчитать результат любого эксперимента. О какой неполноте здесь может идти речь? Если Эйнштейн, рассуждая о поведении квантовых объектов, приходит, как ему кажется, к противоречию, то это его, Эйнштейна, проблемы. И, значит, рассуждать так, как рассуждает Эйнштейн, нельзя. Нужно либо рассуждать по-другому, либо вообще не рассуждать. Эйнштейн пытается протащить обычную логику в квантовый мир, и это у него не получается. По мнению Эйнштейна это свидетельствует о неполноте квантовой теории, по мнению Бора – о неполноте обычной логики.

Теперь посмотрим на этот спор с позиции Эйнштейна. Ведя многолетние дискуссии с Бором, Эйнштейн понял, что Бор его не понимает. Эйнштейн пытался поднять вопрос о квантовом объекте самом по себе, безотносительно к тому, какие измерения над ним прodelьвают. А Бор не хотел разговаривать таким образом. Он все время требовал, чтобы ему дали точное описание экспериментальной установки и тогда, используя математический аппарат квантовой механики, он сможет рассчитать результаты измерений.

Но, несмотря на непонимание, Эйнштейн не сдавался. И в 1933 году он совместно с Подольским и Розеном придумал свой знаменитый мысленный эксперимент, в котором смог очень просто показать следующее: либо квантовая механика неполна, либо она – нелокальна.

Подавляющая часть современных физиков отрицательно относится к самой возможности нелокального взаимодействия. Даже мысль о том, что одно тело может воздействовать на другое, минуя разделяющее их пространство, вызывает у них неприязнь. В то время как у не физиков отношение к нелокальности более спокойное. В чем же тут дело?

Я думаю, причина здесь чисто психологическая. Сознание физиков, в отличие от сознания простых людей сильно ограничено жесткими рамками классической физики. С одной стороны, это, разумеется, хорошо, так как подобные рамки не позволяют сознанию расплываться и, таким образом, помогают эффективнее решать физические задачи. Но, с другой стороны, когда под влиянием экспериментальных фактов на сцену выходит новая физика, в данном случае – квантовая механика, подобные рамки продолжают удерживать сознание в плену устаревших предрассудков, мешая понять новую теорию.

Наверное, многие согласятся с тем, что любая физическая теория это не абсолютная истина, а все лишь модель, которая на данном этапе познания лучше всего отражает устройство Мироздания. И если именно так относится к физической теории, то никакого вреда от нее не будет. Но если физик возводит теорию или хотя бы какие-то ее положения в ранг догмы, то он сам добровольно подвергает себя заточению внутри этой теории.

В большей степени это касается теорий, имеющих слабую связь с экспериментами, например, таких, как общая теория относительности. Многие из специалистов этой теории совершенно потеряли чувство реальности и представляют собой довольно жалкое зрелище. О том, что это именно так, писал, в частности, Ричард Фейнман в письме с Варшавской конференции по гравитации в 1962 году, после чего зарекся посещать подобные мероприятия. Он так сильно ругает «специалистов» по общей теории относительности, что я даже не могу привести здесь его слова. Впрочем, любой желающий может прочитать их сам [20]. А ведь с тех пор теоретики общей теории относительности еще больше погрузились в абстракции. Хуже обстоят дела с космологами и с специалистами по теории суперструн. Полнейший отрыв от эксперимента превратил сторонников этих теорий в нечто вроде средневековых схоластов.

Но вернемся к квантовой механике. Эта теория имеет очень богатую экспериментальную базу, в том числе существует масса экспериментов, подтверждающих нелокальное взаимодействие.

И, тем не менее, значительная часть специалистов по квантовой механике не торопится признать факт нелокальности.

Их поведение чем-то напоминает поведение загнанных волков. Известно, что когда волки оказываются в загоне, огороженном веревкой с привязанными к ней красными флажками, то они *никогда* в таких случаях не осмеливаются перепрыгнуть через эти, в общем-то, безобидные флажки, предпочитая броситься под ружья охотников. Так и в сознании большинства физиков «проведена» линия, на которой крупными буквами написано: «СТОП! Дальше нельзя, там нелокальность». И послушные физики останавливаются, предпочитая игнорировать экспериментальные данные. А иногда начинают нести такую околесицу, по сравнению с которой нелокальность выглядит детской шалостью. Например, Дойч предпочитает проповедовать параллельные миры, лишь бы не замечать нелокальности.

В общем-то, эта книга написана как раз для того, чтобы помочь читателю преодолеть внутренний запрет на нелокальное мировоззрение. Когда читатель преодолет этот запрет, он сам начнет оценивать всю красоту и величие нелокальности. Казалось бы, что проще, нужно только сказать себе: «Я всегда рассматривал исключительно локальные взаимодействия, теперь попробую рассмотреть и нелокальные, и погляжу, что из этого получится». Однако многим трудно решиться даже на такой совершенно безобидный шаг.

В своем развитии, как физик, я прошел ряд этапов, начиная от полного неприятия нелокальности и заканчивая пониманием того, что наш мир буквально пронизан нелокальными связями. Возможно, краткий перечень этих этапов поможет читателю преодолеть предубеждение против нелокальности.

**Первый этап.** Я впервые услышал о том, что квантовая механика – нелокальная теория и решил, что это абсурд. Наверное, кто-то что-то напутал или не смог в чем-то правильно разобраться. Так как никакой нелокальности не может быть, потому что не может быть никогда!

Второй этап. Действительно, квантовый мир очень странный, но нелокальность здесь совершенно не причем.

Третий этап. Нелокальности в квантовом мире, безусловно, нет. Но квантовые объекты ведут себя так, словно между ними есть какое-то подобие нелокальной связи.

Четвертый этап. Если считать, что квантовая механика – полная теория, то, действительно, из нее вытекает нелокальность. Теперь я понимаю, *почему* Эйнштейн возражал против полноты квантовой механики. Получается, необходимо сделать выбор. Либо признать квантовую механику неполной теорией, либо признать нелокальность.

Пятый этап. Ну если квантовую механику, несмотря на все ее достижения и вызванный ими технический прогресс двадцатого века, считать неполной теорией, то какую же тогда теорию считать полной?! Придется пожертвовать принципом локальности.

Шестой этап. А откуда, вообще, в физику попал принцип локальности? Например, закон сохранения энергии связан с однородностью времени, закон сохранения импульса – с изотропией пространства. А с каким свойством нашего мира связан принцип локальности? И оказывается, что единственной причиной для введения в физику этого принципа является ограниченность человеческого сознания!

## **4.6. О бессмысленности такого понятия, как точная координата**

Когда я еще не понимал, что в основе квантовой механики лежит нелокальность, то также не мог понять, *о чем* спорили Эйнштейн и Бор. Как и многие физики, я думал, что Эйнштейну не нравится принцип неопределенности, и он всеми силами пытается его обойти. Мне было странно, что Эйнштейн пытался трактовать квантовую неопределенность как отражение нашего незнания, вместо того, чтобы трактовать ее как отражение некоторой реальности, которая объективно существует в

микромире *независимо* от нашего знания. Ведь такое понятие, как *точная* координата, не имеет смысла. Давайте разберем этот вопрос.

В качестве примера рассмотрим центр масс покоящегося тела, который находится в некоторой точке пространства, и предположим, что эта точка имеет точные координаты своего местоположения. Но что означает *точные* координаты? Какая максимальная точность все еще имеет *физический* смысл?

Понятно, что точность в один метр имеет физический смысл. И точность в  $10^{-10}$  метра также имеет физический смысл. Используя современные ускорители, являющиеся в каком-то смысле гигантским микроскопами, можно измерять расстояния вплоть до  $10^{-18}$  метра, и поэтому такая точность также имеет физический смысл. А как быть с точностью, например,  $10^{-33}$  метра? Можно надеется, что с развитием техники эта точность станет когда-нибудь достижима и поэтому также будет иметь физический смысл. Но в настоящее время точность  $10^{-33}$  метра *неизмеряема*, и поэтому сейчас такая точность *не имеет* физического смысла.

А как быть с точностью  $10^{-100}$ ,  $10^{-1000}$ ,  $10^{-10000}$  метра? Предположим, что такие расстояния, хоть и совершенно не измеряемы, все же имеют физический смысл, то есть они *реально* существуют в нашем пространстве. Какие выводы можно сделать из такого предположения?

Размер атомного ядра  $10^{-15}$  метра, размер видимой Вселенной  $10^{26}$  метра. Разница составляет 41 порядок. Это означает, что если величина  $10^{-56}$  метра существует реально, то внутри атомного ядра можно разместить вселенную, которая не будет по своей сложности уступать нашей Вселенной. По крайней мере, используя ячейки пространства размером  $10^{-56}$  метра, можно в масштабе атомного ядра разместить столько же информации, сколько и в нашей вселенной, используя ячейку пространства размером  $10^{-15}$  метра. А внутри каждого атомного ядра этой маленькой вселенной также можно разместить по еще меньшей вселенной. И так далее до бесконечности.

Наш мир предстает в виде своеобразной матрешки, состоящей из вложенных друг в друга вселенных. Нет ни самой маленькой, ни самой большой. Эта бесконечная последовательность вложенных вселенных тянется в обе стороны: в сторону микромира и в сторону мегамира.

Когда я учился в шестом классе, такие рассуждения меня забавляли, но затем, повзрослев, понял, что подобные бесконечности свидетельствуют не о реальном положении вещей, а о слабости нашего разума, который, рассуждая по аналогии, ходит по логическому кругу, не в силах выйти за его пределы.

Чтобы это показать, достаточно внимательно рассмотреть, как происходит в нашем сознании процесс деления пространства на части.

Сначала мы мысленно представляем себе объем пространства размером около одного метра и делим его длину на тысячу частей, выделяя, таким образом, объем пространства размером в один миллиметр. Затем мы в своем воображении увеличиваем этот маленький объем приблизительно до размера одного метра и снова начинаем процесс деления. И так далее. То есть мы в воображении все время делим один и тот же объем пространства размером около метра. Когда мы его делим первый раз, то мысленно подписываем: «один метр». Когда мы этот же объем делим во второй раз, то мысленно подписываем: «один миллиметр». Затем мы этот же объем подписываем: «один микрон» и т. д.

Нам только кажется, что мы погружаемся в микромир, на самом же деле, мы топчемся на месте. Мы, как правило, неосознанно предполагаем, что объем пространства размером один метр в точности подобен объему размером один миллиметр, а тот, в свою очередь, в точности подобен объему размером в один микрон и т. д. Однако объемы в микромире могут *качественно* отличаться от объемов в макромире, и такое отличие будет означать, что процесс деления пространства на части, происходящий в нашем сознании, *никакого* отношения к реальности не имеет.

Итак, наше воображение, действуя исключительно по аналогии, порождает дурную бесконечность, которая, по всей видимости, *никакого* отношения к реальности не имеет. Разумно предположить, что в микромире с пространством что-то происходит, и это что-то ставит предел нашим рассуждениям, не позволяя дурной бесконечности проникнуть в реальный мир. Перефразируя слова Аристотеля о том, что Природа не терпит пустоты, можно сказать, что Природа не терпит дурной бесконечности. В том смысле, что Природа как искусный мастер никогда не повторяется, но, переходя от одной меры к другой, всегда открывает нам новые грани бытия.

Поэтому когда я узнал, что в микромире есть неопределенность, то, еще не понимая толком, что это такое, обрадовался самому факту ее существования. Я рассуждал примерно так. Физики открыли в микромире неопределенность. Судя по их неприятию этой неопределенности, она не плод их фантазии, а реальность. Чем хуже эта неопределенность вписывается в существующую картину Мира, тем лучше. Значит, открыто нечто поистине новое и удивительное. Я интуитивно чувствовал, что эта неопределенность и есть тот предел, который поставила Природа дурной бесконечности, изящно и просто разрешив тем самым известную антиномию Канта о бесконечной делимости.

И нужно не закрывать глаза, делая вид, будто никакой неопределенности не существует, как поступают многие физики (с таким отношением ко всему новому непонятно зачем они вообще занимаются физикой), а, наоборот, пошире открыть их, чтобы если и не разобраться, то, по крайней мере, лучше увидеть, *что же такое* эта самая неопределенность.

Поэтому мне было вдвойне непонятно, почему Эйнштейн отрицал существование неопределенности в микромире, утверждая, что частица имеет точную координату и точный импульс. Хотя ведь ясно: эти понятия не имеют физического смысла. Об этом, кстати, писал и Макс Борн в статье [4]:



Я утверждаю, что математическое понятие точки континуума не имеет непосредственного физического смысла. Так, например, не имеет смысла говорить, что координата  $x$  точечной массы (или центра масс протяженного тела) имеет величину, представленную в некоторых заданных единицах действительным числом, скажем,  $x = \sqrt{2}$  дюймов или  $x = \pi$  см.

Современная физика достигла своих крупнейших успехов в немалой степени с помощью применения методологического принципа, согласно которому понятия, относящиеся к различиям за пределами возможного опыта, не имеют физического смысла и должны быть элиминированы. Этот принцип не раз применялся в физике начиная со времен Ньютона. Наиболее замечательными примерами успешного использования этого принципа являются обоснование Эйнштейном специальной теории относительности путем отказа от понятия эфира – субстанции, находящейся в состоянии абсолютного покоя, а также обоснование Гейзенбергом квантовой механики, базирующееся на элиминации из картины строения атома радиусов и частот обращения электронов вокруг ядра. Я полагаю, что этот принцип следует применить и к идее физической непрерывности. Рассмотрим, например, утверждение:  $x = \pi$  см. Если  $\pi_n$  является аппроксимацией числа  $\pi$ , его первыми  $n$  десятичными знаками, то разность  $\pi_n - \pi_m$  для достаточно больших значений  $n$  и  $m$  становится меньше точности любого возможного измерения, если даже допустить, что эта точность может быть неограниченно улучшена с течением времени.

Поэтому утверждения приведенного выше типа должны быть исключены из физики.

Это, конечно, не следует понимать так, что я отвергаю математическое понятие действительного числа, которое незаменимо для нужд прикладного анализа. Ситуация, таким образом, требует описания неточно определенных физических величин с помощью действительных чисел.

Итак, математическое понятие точной координаты не имеет физического смысла, и, значит, точечное тело (центр его масс) не может двигаться по непрерывной траектории, которая есть математическая абстракция. Единственной альтернативой непрерывному движению является дискретное. В макром мире непрерывное движение еще остается хорошим приближением, но в микромире это приближение уже не работает.

## 4.7. Ключевой момент спора – нелокальность

Мне сразу же стала ясна позиция Эйнштейна, как только я понял, что в основе квантовой механики лежит нелокальность. Эйнштейн считал нелокальное взаимодействие абсурдом и именно поэтому отрицал реальность неопределенности. Логика рассуждений здесь очень проста. Если мы предположили, что неопределенность в движении частицы *действительно* существует, то это будет означать, что частица в одно и то же время может находиться в разных областях пространства. В этом случае волновая функция будет описывать *реальное* состояние частицы (а не наше незнание ее местоположения, как все еще продолжают думать некоторые физики). И локализация частицы в малой области пространства (квантовый скачок) описывается редукцией волновой функции (еще раз подчеркнем, что редукция волновой функции описывает *реальный физический*, а вовсе не логический процесс, как все еще продолжают думать некоторые физики). А эта редукция квантового состояния (мгновенное схлопывание области местонахождения частицы до сколь угодно малого размера) подразумевает некий механизм нелокального взаимодействия.

Эйнштейн считал, что такой процесс невозможен, и именно поэтому отрицал неопределенность. Я же, наоборот, был абсолютно убежден в *реальности* неопределенности и именно поэтому был *вынужден* сделать вывод о существовании нелокального взаимодействия. Моя уверенность в существовании неопределенности, в свою очередь, основывалась (как это ни странно звучит!) на принципе Маха. Эта тема подробно обсуждается в [32] (смотри также [33]).

Но вернемся к спору между Эйнштейном и Бором. Хотя этот спор был по существу о нелокальности, возможность мгновенного действия на расстоянии всерьез не обсуждалась его участниками. Как только Эйнштейн в своих рассуждениях доходил до нелокального взаимодействия, то тут же

«поворачивал обратно». Он словно бы говорил: «Ну вот, видите, мы пришли к противоречию, потому что нелокальное взаимодействие – это абсурд». Что касается Бора, то он тоже ходил вокруг да около нелокальности, не рискуя называть вещи своими именами. В результате спор между этими двумя выдающимися физиками тянулся несколько десятилетий. А ведь Бор мог в любой момент его завершить. Для этого он должен был сказать Эйнштейну примерно следующее.

Когда мы посредством измерительного прибора воздействуем на первую частицу, то изменяем не только ее состояние, но и состояние второй частицы. Состояние второй частицы при этом *реально* изменяется. Это может показаться странным, абсурдным, невероятным, но это отличительная черта квантовой механики.

После таких слов позиции участников спора стали бы предельно ясными, и спор благополучно завершился бы.

Эйнштейн со свойственной ему пронизательностью понял, что из квантовой механики вытекает нелокальность и занял предельно ясную позицию: «Я не верю в нелокальность и поэтому не принимаю квантовую механику». Как показало дальнейшее развитие физики, Эйнштейн оказался не прав. В настоящее время нелокальность – это многократно проверенный экспериментальный факт. Тем не менее, Эйнштейна нельзя упрекнуть в каком-либо непонимании квантовой механики. Наоборот, он значительно раньше всех других физиков сумел разглядеть истинное лицо квантово-механического взгляда на мир. Другое дело, что у него было предубеждение против нелокальности. А у кого из физиков не было такого предубеждения? Многие из известных современных физиков до сих пор *не понимают*, что в основе квантовой механики лежит нелокальность. И вот их-то как раз и стоит упрекнуть в плохом знании физики, тем более что некоторые из них занимаются *преподаванием* квантовой механики. В результате широкие слои научной общественности имеют неверное представление о физическом смысле процессов, протекающих в микромире.

А ведь *физический* смысл этих процессов прост. Он странен, абсурден, невероятен, удивителен, но, тем не менее, прост. Его суть можно выразить в нескольких фразах.

Во-первых, основной принцип микромира – это принцип суперпозиции: квантовый объект может находиться в нескольких различных состояниях *в одно и то же время*. При этом каждое из этих состояний характеризуется своей амплитудой вероятности, в которой также учитывается и относительная фаза данного состояния. Все эти амплитуды могут быть выражены математически при помощи так называемой  $\Psi$ -функции. И, следовательно, эта функция описывает *реальное* состояние квантового объекта.

Во-вторых, при взаимодействии с классическим объектом квантовый объект может *мгновенно* перейти из одного состояния в другое, совершив так называемый квантовый скачок. Этот процесс математически описывается редукцией волновой  $\Psi$ -функции. То есть редукция  $\Psi$ -функции описывает *реальный* физический процесс. Можно отметить, что хотя квантовый скачок происходит мгновенно, точное время его совершения неопределенно (в пределах соотношения неопределенностей).

В-третьих, после взаимодействия двух квантовых объектов между ними возникает *нелокальная* связь: изменяя квантовое состояние одного объекта, мы *мгновенно* изменяем квантовое состояние другого объекта, который может находиться сколь угодно далеко от первого. Система, состоящая из таких объектов (в общем случае их может быть сколь угодно много) ведет себя как *единое целое*, несмотря на то, что эти объекты могут быть пространственно отделены друг от друга большим расстоянием. Математически такая система описывается волновой  $\Psi$ -функцией с *неразделяющимися* переменными. Происходящее в одной части системы зависит не только от того, что ее непосредственно окружает, но и от состояния всей системы в целом.

Итак, вся парадоксальность квантового мира исчерпывается тремя вещами.

Квантовый объект может находиться в различных состояниях в одно и то же время (принцип суперпозиции). Например, электрон может находиться сразу в различных точках пространства, обладать разными энергиями, иметь различные значения импульса, разные направления спина.

Квантовый объект, находясь в разных состояниях, может мгновенно перейти в какое-то одно состояние (редукция волновой  $\Psi$ -функции). Например, электрон, обладая разными значениями импульса, после взаимодействия с классическим объектом переходит в состояния с определенным значением импульса.

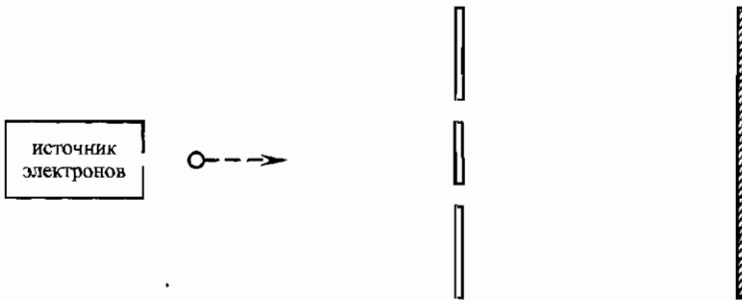
Между различными квантовыми объектами может существовать нелокальная связь.

## КВАНТОВАЯ ЛОГИКА

### 5.1. Корпускулярно-волновой дуализм

Во многих книгах по квантовой механике в качестве иллюстрации корпускулярно-волнового дуализма рассматривается эксперимент, в котором квантовая частица проходит сразу через два отверстия. Этот эксперимент, ставший уже классическим, Ричард Фейнман считал ключевым для понимания квантовой механики. Напомним вкратце его суть.

Из некоторого источника по одной вылетают квантовые частицы. Это могут быть фотоны, электроны, протоны, нейтроны, ядра атомов, и даже атомы! Пусть для определенности это будут электроны (рис. 5.1).



**Рис. 5.1.** Из источника по одному вылетают электроны и, пройдя через экран с двумя отверстиями, попадают на детектор.

Итак, из источника по одному и достаточно редко (имеется в виду, что время полета электрона от источника до детектора во

много раз меньше промежутка времени, через который электроны вылетают из источника) вылетают электроны и, пройдя через экран с двумя отверстиями, попадают на детектор.

Попробуем предугадать результаты этого эксперимента, основываясь на логике, которая используется (и весьма успешно!) при описании движения классических тел.

Электрон – это неделимая частица, и поэтому, проходя через экран, он будет проходить либо через первое отверстие, либо через второе. Если мы знаем, чему равна вероятность попадания электрона в различные участки детектора, при его прохождении через одно отверстие (второе, к примеру, закрыто), то сможем рассчитать эту вероятность и для электрона, прошедшего через экран с двумя отверстиями. Формула расчета очень проста:

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x) \quad (5.1)$$

Здесь  $P_1(x)$  – вероятность попадания электрона в небольшую окрестность точки  $x$  на детекторе, когда открыто только первое (верхнее) отверстие.  $P_2(x)$  – вероятность попадания в ту же окрестность, когда открыто только второе (нижнее) отверстие.  $P_{12}(x)$  – вероятность, когда открыты оба отверстия.

Но эксперимент однозначно опровергает формулу (5.1). График вероятности  $P_{12}(x)$  выглядит совсем не так как показано на рис. 5.2, с, а примерно так, как показано на рис. 5.2, d. Из чего следует, что:

$$P_{12}(x) \neq P_1(x) + P_2(x) \quad (5.2)$$

Чему же равна вероятность  $P_{12}(x)$ ?

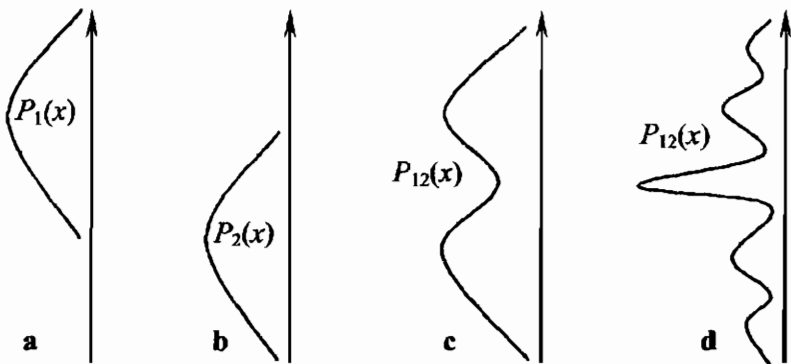
Формула для ее нахождения немного сложнее, чем (5.1), но все равно достаточно проста. Если мы знаем, чему равна волновая функция  $\Psi_1(x)$  электрона, прошедшего только через первое отверстие (второе закрыто) и попавшего в точку  $x$  на детекторе (а найти эту волновую функцию можно, к примеру, по методике, изложенной в параграфе 3.7) И если мы знаем волновую функцию  $\Psi_2(x)$ , то ответ такой:

$$\Psi_{12}(x) = \Psi_1(x) + \Psi_2(x) \quad (5.3)$$

И соответственно:

$$P_{12}(x) = |\Psi_1(x) + \Psi_2(x)|^2 \neq |\Psi_1(x)|^2 + |\Psi_2(x)|^2 \quad (5.4)$$

То есть складываются не вероятности, а волновые функции, иначе говоря – складываются квантовые состояния. Получается, что электрон, являясь неделимой частицей, все же проходит одновременно через два отверстия. Что-то от него, описываемое  $\Psi_1$ , проходит через первое отверстие, и в то же самое время что-то от электрона, описываемого  $\Psi_2$ , проходит через второе отверстие.



**Рис. 5.2.** Графики распределения плотности вероятности попадания электронов в детектор (см. рис. 5.1).

- a). Открыто только верхнее отверстие на экране.
- b). Открыто только нижнее отверстие.
- c). Ожидаемое распределение при двух открытых отверстиях.
- d). Наблюдаемое в эксперименте распределение.

В самом начале XX века подобные эксперименты были проведены с фотонами, в середине XX века – с электронами, в 80-е годы – с нейтронами и в 90-е годы – с атомами.



Прохождение неделимого электрона сразу через два отверстия в свое время настолько поразило воображение физиков (мышление которых, что, впрочем, вполне естественно, было ограничено рамками классической физики), что проблема корпускулярно-волнового дуализма ожесточенно дискутировалась на протяжении нескольких десятилетий. В настоящее время подобными экспериментами, наверно, уже никого не удивишь. И тем не менее, все еще есть физики, которые боятся называть вещи своими именами. Вот что пишет, например, известный специалист по квантовой механике Антон Цайлингер, [6]:

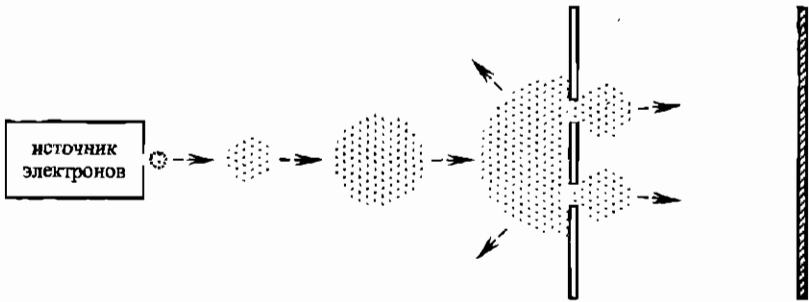
В качестве небольшого предостережения отметим, что также неверно и говорить, что частица пролетает через обе щели одновременно, хотя такое утверждение можно нередко услышать. Проблема здесь в том, что, с одной стороны, это предположение противоречиво, поскольку частица – это локализованный объект, с другой стороны, такое утверждение не несет смысла с точки зрения рассматриваемой операции.

Очевидно, что Цайлингер неправ, так как квантовая частица в общем случае – это не локализованный объект. Конечно, мы сможем, если постараемся, локализовать электрон в какой-либо точке (малой области) пространства. Но электрон также может находиться и в различных местах одновременно. Например, электрон, пролетающий сразу через два отверстия, существенно отличается (по своему квантовому состоянию) и от электрона, проходящего через первое отверстие и от электрона, проходящего через второе. И самое важное здесь то, что это отличие можно *зарегистрировать* экспериментально.

Поведение электрона, проходящего сразу через два отверстия, будет противоречиво, только если предположить, что он движется по непрерывной траектории. В рамках дискретного движения никакого противоречия нет. Более того, модель дискретного движения позволяет наглядно представить, *как именно* электрон проходит одновременно через два отверстия.

Электрон вылетает из источника, совершая дискретное движение в достаточно маленькой области пространства (рис. 5.3). При движении электрона эта область постоянно

увеличивается в размерах. И когда электрон подлетает к экрану, ее размеры уже превышают расстояние между отверстиями. После того как эта область достигает экрана одна из ее частей проходит через верхнее отверстие, другая – через нижнее, а третья отражается от экрана и движется в обратную сторону. Между тем, что прошло через верхнее отверстие и тем, что прошло через нижнее, и наблюдается интерференция на детекторе.

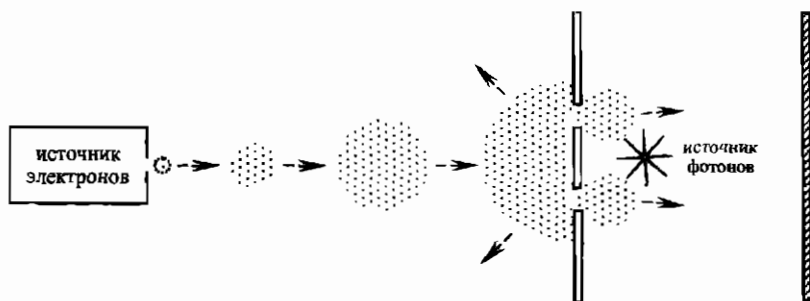


**Рис. 5.3.** Дискретное движение помогает понять, как неделимый электрон проходит через два отверстия одновременно.

## 5.2. Можно ли изменить состояние квантового объекта, никак не воздействуя на него?

Несколько изменим схему эксперимента. Разместим за экраном источник фотонов так, чтобы они взаимодействовали с электронами, прошедшими через два отверстия. В результате каждого такого взаимодействия электрон будет совершать квантовый скачок – мгновенный переход из состояния, когда он находился сразу в двух местах (точнее, в трех – часть облака, где дискретно движется электрон, отражается от экрана), в состояние, когда он находится только в одном месте. То есть

электроны будут терять возможность двигаться по обоим путям, и будут двигаться только по одному пути. Как результат на детекторе не будет наблюдаться интерференция. И это понятно. Ведь осветив электроны, мы совершили вмешательство в их движение. О том, что фотоны взаимодействовали с электронами, мы можем узнать не только по исчезновению интерференционной картины, но и наблюдая отклонение фотонов от прямолинейного пути.



**Рис. 5.4.** Источник фотонов, установленный сразу за экраном, разрушит интерференционную картину на детекторе.

А можно ли сделать так, чтобы фотоны не отклонялись от прямолинейного движения, а интерференция все равно исчезла? Иначе говоря, можно ли изменить квантовое состояние электрона, никак не воздействуя на него?

Уберем источник фотонов, и вместо него сделаем небольшой детектор электронов и будем ставить его поочередно то сразу за первым отверстием, то – за вторым. Каждый электрон, пролетевший через два отверстия, будет регистрироваться этим детектором с вероятностью, равной 50%. То есть половина электронов, пролетевших через отверстия в экране, никаких, даже самых незначительных, отметин на детекторе не оставят.

Изменится ли квантовое состояние этих электронов? Сначала попробуем ответить на этот вопрос, оставаясь в рамках классической физики.

Один из основных законов классической физики – Третий закон Ньютона: действие всегда равно противодействию. Согласно этому закону, если электрон *никак* не воздействовал на детектор, то, соответственно, и детектор не мог оказать какого-либо воздействия на электрон. Получается, что состояние электронов, которые не были зарегистрированы детектором, не могло измениться.

А что получается в действительности?

В действительности квантовое состояние этих электронов изменяется и, притом, весьма существенно. Ведь электроны, которые не были зарегистрированы маленьким детектором, тем не менее, потеряли способность двигаться сразу по обоим путям. И теперь вынуждены двигаться только по одному. А двигаясь только по одному пути, они не смогут создать на основном детекторе интерференционную картину.

Итак, детектор, поставленный сразу за отверстием и не зарегистрировавший электрон, тем не менее, *изменяет* квантовое состояние электрона. Это исключительно квантовое явление, не имеющее аналогов в классической физике. Рассмотрим его более детально.

Электрон, прошедший через два отверстия, находится одновременно в двух удаленных друг от друга областях пространства – вблизи первого отверстия и вблизи второго. Электрон способен так двигаться потому, что он движется *дискретно*. Можно сказать, что электрон в данном случае образует два пространственно разделенных волновых пакета.

Один из этих волновых пакетов налетает на детектор, установленный рядом с отверстием, и *не взаимодействует* с ним. Но в результате такого «не взаимодействия» этот волновой пакет бесследно исчезает, при этом вероятность обнаружить электрон во втором пакете возрастает скачком с 0,5 до 1. Этот квантовый

скачок не описывается ни уравнением Шредингера, ни каким-либо другим уравнением.

Можно сказать, что квантовое состояние электрона изменяется мгновенно. Но при этом сам момент времени, когда произошел квантовый скачок, неопределен. Он как бы размазан по оси времени. Эту неопределенность во времени можно оценить, поделив длину волнового пакета на среднюю скорость его движения.

### 5.3. Эксперимент Уилера с отложенным выбором

С момента создания квантовой механики и почти на протяжении всего XX века велись ожесточенные споры об ее физическом смысле. Было не совсем ясно, что именно представляет собой квантовый объект, и какую модель – частицы или волны – следует использовать для описания его движения.

Во времена Эйнштейна и Бора эти споры носили в основном теоретический характер, но в конце XX века, благодаря значительному прогрессу в технике физического эксперимента, появилась уникальная возможность непосредственно ответить на многие интригующие вопросы квантовой механики.

Рассмотрим хорошо известный пример. Фотон налетает на полупрозрачное зеркало (стеклянную пластинку, покрытую тонким слоем серебра). Что произойдет дальше?

Во-первых, фотон может пройти зеркало насквозь.

Во-вторых, он может отразиться от него.

В третьих, проявив свою волновую природу, частично отразиться, а частично пройти зеркало насквозь.

Вот как комментировал этот процесс Эйнштейн [2, с.417].

Пусть на пути фотона помещено полупрозрачное зеркало, предоставляющее ему для направления его дальнейшего распространения две возможности. Тогда фотон может быть зарегистрирован на одной и только на одной из двух фотографических пластинок, находящихся на большом расстоянии

друг от друга на упомянутых направлениях; если же мы заменим пластинки зеркалами, то мы сможем наблюдать явления, показывающие, что обе отражённые волны интерферируют. При всякой попытке наглядно представить себе поведение фотона мы, стало быть, встретились бы со следующим затруднением: с одной стороны, мы должны были бы сказать, что фотон всегда выбирает *один* из двух путей, с другой же стороны, он ведёт себя так, как если бы он пошёл по *обоим* путям сразу.

Итак, если мы хотим зарегистрировать фотон при помощи фотопластинки, то, он, проявив свои корпускулярные свойства, либо целиком отразится от зеркала, либо пройдет его насквозь. Но если мы не будем мешать ему двигаться, то есть не будем пытаться его поймать в каком-нибудь месте, то фотон, проявив свою волновую природу, будет двигаться по обоим путям *одновременно*.

Таким образом, при интерпретации этого эксперимента возникает два вопроса.

*Вопрос первый.* Как неделимый фотон может двигаться одновременно по обоим путям?

*Вопрос второй.* Как все-таки движется фотон после того, как долетит до полупрозрачного зеркала?

Бор утверждал, что ответить на эти вопросы можно только в том случае, если указана *конкретная* схема проведения эксперимента, включающая в себя описание всех измерительных приборов, кроме того, он предлагал отказаться от наглядного представления квантовых процессов.

А что если нет конкретной схемы? Если экспериментатор еще сам не определил, какие измерительные приборы он будет использовать? Скажем, фотон вылетел из источника, долетел до полупрозрачного зеркала, а экспериментатор все еще думает: как же ему поступить дальше?

Следует отметить, что уже Эйнштейн придумал множество мысленных экспериментов с отложенным выбором, чтобы загнать Бора в логический тупик и доказать либо неполноту, либо противоречивость квантовой механики. Но Бору всегда удавалось выйти из тупика. Но, судя по тому, что ожесточенные споры

продолжались, можно было сделать вывод, что ясности в понимании квантовой механики еще не было.

Возможно, Джон Уилер был одним из первых, кто предложил провести *реальный* эксперимент с отложенным выбором.

Вот краткое описание этого эксперимента, взятое из журнала «В мире науки» [24] (рис. 5.5).

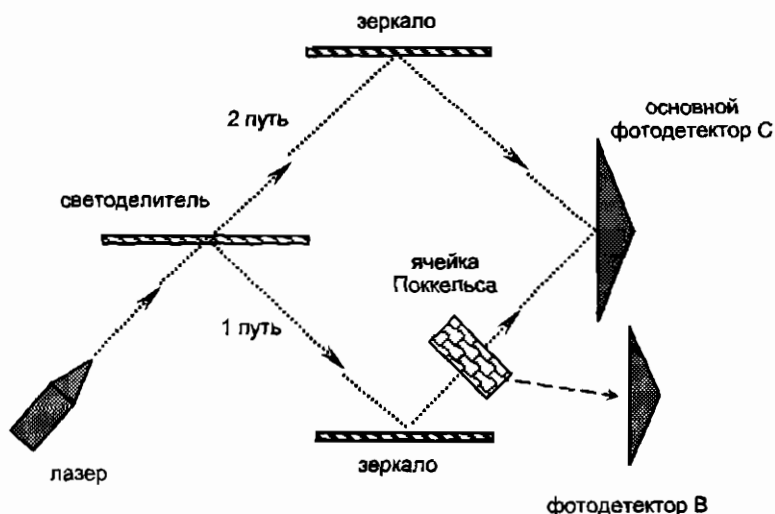


Рис. 5.5

На некотором расстоянии от светоделителя устанавливается переключатель, так называемая ячейка Пококельса – устройство, способное под действием электрического поля изменить свое состояние за несколько наносекунд. Когда ячейка «выключена», фотон свободно проходит через нее и может интерферировать сам с собой, проявляя свойства волны. А когда «включена» – отклоняется в фотодетектор В, давая информацию о своем маршруте и проявляя

таким образом свойства частицы. Схема этого эксперимента позволяет экспериментатору сделать свой выбор *уже после того*, как фотон сделает свой. А именно, когда фотон уже прошел светоделитель, состояние ячейки Поккельса случайным образом изменяется.

Когда ячейка Поккельса случайным образом выключается, то оказывается, что фотон двигался в виде волны по обоим путям одновременно, создавая интерференционные эффекты в фотодетекторе С. Когда же ячейка Поккельса случайным образом включается, то оказывается, что фотон двигался только по какому-то одному из двух возможных путей: либо по первому пути, попадая в фотодетектор В, либо по второму, попадая в фотодетектор С, не создавая при этом каких-либо интерференционных эффектов.

Давайте проанализируем этот эксперимент, основываясь на здравом смысле. Фотон, вылетевший из лазера, проходит через светоделитель и либо как волна движется сразу по двум путям, либо как частица – только по одному.

Когда включается ячейка Поккельса, то оказывается, что фотон двигался только по одному пути, а когда она выключается, то оказывается, что фотон двигался сразу по обоим путям. Получается, что изменение состояния ячейки, сделанное *уже после того*, как фотон «сделал свой выбор», способно, тем не менее, повлиять на этот выбор. Получается, то, что происходит в настоящем времени, способно как-то повлиять на прошлое.

А ведь нетрудно представить себе гипотетический эксперимент, в котором расстояние между светоделителем и ячейкой Поккельса будет составлять десятки световых лет. Предположим теперь, что пучок фотонов прошел светоделитель. При этом каждый фотон сделал свой выбор и как-то движется дальше. Тем не менее, через несколько лет экспериментатор по своему усмотрению может повлиять на этот выбор. Если он включит ячейку Поккельса, то окажется, что все фотоны несколько лет назад, когда проходили светоделитель, «решили» двигаться как частицы только по одному пути. А если он



выключит ячейку, то окажется, что каждый фотон несколько лет назад «репил» проявить свойства волны, расщепился на светоделителе на две части и теперь движется сразу по обоим путям.

Логические затруднения в интерпретации этого эксперимента возникают только в том случае, если считать фотон либо обычной волной, либо частицей, движущейся по непрерывной траектории. В рамках модели дискретного движения этих трудностей не возникает, и эксперимент становится простым и понятным.

Фотон может двигаться сколь угодно долго, совершая дискретное движение в двух (или более) различных областях. Если эти области направить навстречу друг другу, то можно наблюдать интерференционные эффекты. Если же зарегистрировать фотон в одной из этих областей, то другая при этом бесследно исчезнет.

В данном случае фотон, проходя светоделитель, расщепляется на два волновых пакета. Когда один из этих пакетов достигает ячейки Поккельса, он может либо пройти через нее (ячейка выключена), либо отклониться в сторону (ячейка включена). Если он отклоняется в сторону, то движется к фотодетектору **В**. В результате мы имеем две области, в которых фотон движется дискретно. Одна область движется к детектору **В**, другая – к детектору **С**. Предположим для определенности, что в детектор **В** волновой пакет попадает раньше, чем в детектор **С**. Сразу после этого происходит квантовый скачок. При этом фотон либо регистрируется детектором **В**, а второй волновой пакет, соответственно, бесследно исчезает, либо не регистрируется детектором **В**, и тогда фотон полностью оказывается в волновом пакете, который движется к детектору **С**.

В любом случае состояние ячейки Поккельса никак не влияет на выбор фотона, который *всегда* расщепляется на светоделителе на два волновых пакета.

## 5.4. Интерферометр Маха-Цандера

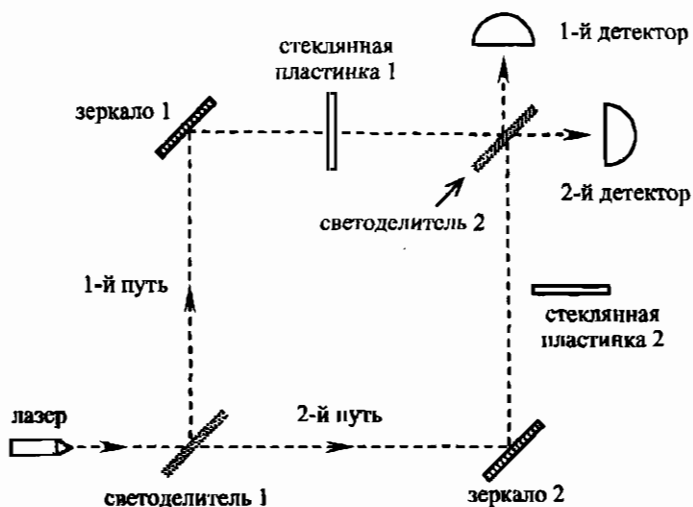
С одной стороны из эксперимента хорошо известно, что фотон является неделимым объектом. Никто никогда не наблюдал, скажем, полфотона или какую-то его часть. С другой стороны, также хорошо известно, что фотон может двигаться по двум или более путям одновременно. Этот вывод непосредственно следует из анализа экспериментов, вроде того, который был описан в параграфах 5.1 и 5.2. В этих экспериментах наблюдается интерференция между тем, что прошло по одному пути и тем, что прошло по другому пути. Именно по результатам интерференционной картины и делается вывод, что фотон (электрон, нейтрон...), являясь неделимым объектом, все же двигался одновременно по двум или более путям.

Однако у того, кто впервые сталкивается с подобными «парадоксами» корпускулярно-волнового дуализма, возникают подозрения в правильности интерпретации таких экспериментов. А действительно ли фотон движется сразу по двум путям? Может быть интерференционная картина – это следствие некоторых взаимодействий между *разными* фотонами, но каждый фотон, являясь неделимым объектом, движется строго по одному пути?

Чтобы полностью устранить подобные сомнения, мы сейчас рассмотрим эксперимент, в котором интерференционные эффекты проявляются уже при движении даже *одного* фотона. Вот схема этого эксперимента, в котором используется так называемый интерферометр Маха-Цандера (рис. 5.6).

Из лазера по одному вылетают фотоны. После того как фотон долетает до первого светоделителя, он может двигаться либо по первому пути, либо по второму, либо по обоим путям одновременно. Двигаясь по первому пути, он отражается от зеркала 1, а двигаясь по второму, – от зеркала 2. Затем оба пути снова пересекаются на светоделителе 2, после чего фотон может быть зарегистрирован либо детектором 1, либо детектором 2, но никогда обоими одновременно. То есть каждый фотон всегда регистрируется только одним детектором. Первый путь перекрыт

тонкой стеклянной пластинкой 1. Ее назначение – увеличить оптическую длину пути фотона, вследствие чего фотон, двигаясь по первому пути, приходит на второй светоделитель с некоторым отставанием по фазе. Меняя толщину стеклянной пластины, можно добиться любого произвольного сдвига фазы. Вместо стеклянной пластинки можно использовать любое устройство, способное увеличить (изменить) оптическую длину пути. Аналогичное устройство можно использовать и на втором пути.



**Рис. 5.6.** Интерферометр Маха-Цандера

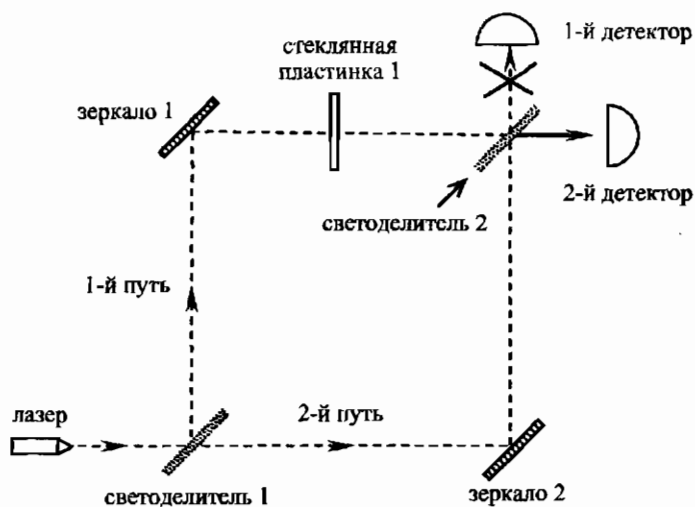
Попробуем предсказать результаты этого эксперимента, основываясь на здравом смысле. Так как фотон всегда регистрируется одним и только одним детектором, то, следовательно, он движется только по одному пути. Поэтому после прохождения светоделителя фотон с вероятностью, скажем, 50 % проходит его насквозь и движется по первому пути, а с вероятностью 50 % – отражается от него и движется по второму пути. Аналогичным образом фотон движется, достигнув

второго светоделителя. Таким образом, каждый фотон, вылетев из лазера, будет двигаться по какому-то одному из всех возможных путей и с 50 процентной вероятностью будет зарегистрирован каким-либо одним из двух детекторов.

С этой точки зрения увеличение оптической длины пути одного из плеч интерферометра не приведет ни к каким заметным эффектам. Фотон просто будет достигать детектора с некоторой задержкой по фазе.

А что наблюдается в эксперименте?

В эксперименте наблюдается следующее. Изменяя оптическую длину первого пути можно добиться того, что все меньше и меньше фотонов будет попадать на первый детектор. А при определенном увеличении оптической длины первого пути, вообще, *ни один* фотон не попадет в первый детектор – все они будут регистрироваться только вторым (рис. 5.7).



**Рис. 5.7.** Подобрав стеклянную пластинку нужной толщины, можно добиться, что все без исключения фотоны будут попадать только во 2-й детектор. И наоборот.

Продолжая дальнейшее изменение оптической длины пути, можно добиться противоположного результата – все фотоны будут регистрироваться только первым детектором.

Для большей наглядности, предположим, что вблизи первого пути стоит экспериментатор и держит в руках «ключ» – устройство, способное плавно изменять оптическую длину пути. Изменяя положение этого ключа, экспериментатор может, по своему усмотрению, сделать так, чтобы все фотоны попадали только на первый детектор или, наоборот, – только на второй. Направляя ключом фотоны то на первый детектор, то на второй, экспериментатор сделает вывод, что *все* фотоны движутся по первому пути, потому что своим ключом он *управляет движением всех фотонов*.

Можно поставить второго экспериментатора с аналогичным ключом у второго пути. И тогда, манипулируя своим ключом, он также сделает вывод, что все фотоны движутся по второму пути.

Итак, данный эксперимент позволяет убедиться в том, что *каждый* фотон движется по двум различным путям одновременно. Ведь перекрывая ключом какой-либо один из двух путей, мы оказываем воздействие сразу на все фотоны. Получается, что фотон, расщепившись на светоделителе, движется в виде двух волновых пакетов сразу по двум различным путям. И на детекторе наблюдается их интерференция. Удлиняя оптическую длину одного из путей, мы изменяем фазу двигающегося по нему волнового пакета и, тем самым, влияем на результат интерференции.

Однако если мы попытаемся поймать сразу два волновых пакета, то у нас ничего не получится. Мы сможем поймать только один, а второй при этом бесследно исчезнет.

Этот эксперимент считается наиболее трудным для понимания. Например, известный современный специалист по квантовым вычислениям Дэвид Дойч [13], анализируя его, приходит к выводу, что по второму пути движется «двойник» фотона из параллельного мира! На основании этого эксперимента

Дойч пытается доказать, что существует множество различных вселенных.

Если же использовать модель дискретного движения, то дать интерпретацию эксперименту не составит труда. Сначала фотон, расщепляется на 1-м светоделителе на два волновых пакета. Затем каждый из этих пакетов расщепляется еще на два на 2-м светоделителе. В результате образуется четыре волновых пакета внутри которых дискретно движется один фотон. При этом два пакета, интерферируя между собой, движутся к 1-му детектору, а два – ко второму. Изменяя оптическую длину только одного пути, можно добиться того, что на первый детектор волновые пакеты придут в противофазе, а на второй, соответственно, в фазе. То есть, создавая дополнительный сдвиг фазы только одного волнового пакета, мы *управляем* движением фотона.

Прелесть этого эксперимента в том, что он позволяет ясно «увидеть», как неделимый фотон движется сразу по обоим путям.

## ЭКСПЕРИМЕНТ ЭЙНШТЕЙНА – ПОДОЛЬСКОГО – РОЗЕНА

### 6.1 Формулировка эксперимента

Когда Эйнштейн понял, что ни Бор, ни остальные физики его не понимают, он постарался выразить свое недовольство квантовой механикой как можно яснее. И в 1935 году совместно с Розеном и Подольским рассмотрел следующий мысленный эксперимент [30]. Две частицы находятся какое-то время во взаимодействии, а затем разлетаются в разные стороны. Мы можем измерить с любой требуемой точностью импульс первой частицы и в результате, основываясь на законе сохранения импульса, определить импульс второй частицы. Кроме того, мы можем с любой требуемой точностью измерить координаты первой частицы, и в результате, исходя из неподвижности центра масс замкнутой системы, определить координаты второй частицы. Получается, что «не трогая» вторую частицу и производя измерения только над первой (которая, в общем случае, может находиться сколь угодно далеко от второй, например, на расстоянии нескольких световых лет), мы можем по своему усмотрению определить либо ее импульс, либо местоположение с любой требуемой точностью.

Далее Эйнштейн рассуждал примерно так. Если мы, совершенно не возмущая вторую частицу, можем определить ее импульс, значит, она обладает определенным импульсом. И если мы, совершенно не возмущая вторую частицу, можем определить ее точное местоположение, значит, она обладает точным местоположением. То есть вторая частица обладает и определенным импульсом, и определенным местоположением, и, следовательно, соотношение неопределенностей для импульса и

координаты отражает не реальное состояние частицы, а лишь *нашу* неспособность измерить и импульс и координату одновременно. Следовательно, квантовая механика, основанная на принципе неопределенности, дает *неполное* описание реальности.

Эти аргументы Эйнштейна не на шутку растревожили Бора. Как только Бор ознакомился с ними, он тут же отложил все свои дела и стал обдумывать, как ему ответить на них. И уже через месяц вышла его статья [3], в которой он постарался защитить квантовую механику от обвинения в неполноте.

К сожалению, ответ Бора следует признать неудовлетворительным. По крайней мере, он не удовлетворил ни Эйнштейна, ни кого бы то ни было еще из противников квантовой механики. Более того, даже некоторые сторонники копенгагенской интерпретации, включая такого выдающегося физика, как Луи де Бройль, под влиянием Эйнштейновских аргументов со временем отошли от позиции Бора.

В своем ответе Бор не сказал ничего нового в защиту квантовой механики. Он еще раз подчеркнул, какую роль играют измерительные приборы при исследовании микромира, напомнил, что математический аппарат квантовой механики свободен от каких бы то ни было внутренних противоречий, но не сделал никаких *конкретных* возражений по поводу аргументов Эйнштейна. Вот как комментировал этот спор известный философ Карл Поппер [16]:

Я считаю, что эта интерпретация формализма (имеется в виду копенгагенская интерпретация – В.Я.) опровергнута экспериментом Эйнштейна, Подольского и Розена. Ибо *отсутствует вмешательство в дела частицы А*, которая может находиться весьма далеко в тот момент, когда мы возмущаем частицу В, измеряя её координату или импульс.

Хотя этот довод прост и ясен, а потому – убедителен, он не принят в качестве такового. Мне представляется, что причина тому – авторитет Бора, а не сила его контраргументов. Ибо по сравнению с простыми и ясными идеями Эйнштейна контраргументы Бора весьма трудны для понимания. Эйнштейн



никогда не понимал их (как он сам мне говорил), и я не встречал ни одного физика, способного изложить их просто и ясно.

Таким образом, Эйнштейн, предложивший совместно с Подольским и Розеном свой знаменитый мысленный эксперимент, смог очень просто доказать следующее. Либо квантовая механика не полна в том смысле, что неопределенность, присутствующая в ней, отражает не реальное положение вещей в микромире, а лишь наше незнание, либо она нелокальна. В результате физики разделились на два лагеря. Одни вместе с Эйнштейном, не в силах смириться с нелокальностью, считали квантовую механику неполной теорией. Другие, уверенные в полноте новой теории, закрывали глаза на нелокальность. Существовал еще, правда, третий лагерь физиков, которые вообще не задумывались над подобными вопросами.

Физика – наука экспериментальная, и поэтому любую проблему в ней можно решить с помощью эксперимента. Однако эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена для этой цели не подходил. Даже если бы физики того времени его провели, они все равно не смогли бы определить, кто прав: Эйнштейн или Бор. Более того, несколько видоизмененная версия этого эксперимента многократно проводилась Артуром Комптоном и другими физиками. Имеется в виду рассеяние рентгеновских лучей на электронах. В этом, ставшем уже классическим, эксперименте происходит упругое столкновение двух частиц – налетающего фотона и покоящегося электрона (обычно электрон не покоится, а «связан» в атоме, но энергией связи можно пренебречь по сравнению с энергией фотона). Было обнаружено, что в каждом акте столкновения строго выполняются законы сохранения импульса и энергии. Электрон получает ровно столько энергии, сколько теряет ее рентгеновский фотон.

Ввиду важности этого эксперимента для понимания квантовой механики обсудим его с двух противоположных точек зрения.

**Точка зрения Эйнштейна.** Предположим, что в движении фотона и электрона после столкновения есть неопределенность.

В этом случае, измеряя энергию одной из частиц, мы можем получить любую величину вблизи некоторого среднего значения. То есть процесс измерения энергии носит случайный, статистический характер. Ясно, что измерение энергии одной частицы не может оказать никакого влияния на измерение энергии другой (ведь расстояние между фотоном и электроном может быть сколь угодно большим). Таким образом, если предположить, что в движении частиц есть неопределенность, то законы сохранения энергии и импульса должны незначительно (в пределах неопределенности) нарушаться в каждом отдельно взятом элементарном процессе. Но они строго выполняются. Следовательно, никакой неопределенности в движении частиц не существует. И именно в этом смысле квантовая механика не полна.

**Точка зрения Бора.** После столкновения фотон и электрон представляют единое целое. Это отражено и в математическом аппарате квантовой механики, где они описываются общей волновой функцией с не разделяющимися переменными: волновая функция фотона зависит, в том числе, и от состояния электрона, и наоборот. При измерении, скажем, импульса отдачи электрона, мы оказываем воздействие на всю систему: «электрон-фотон». И вся система скачкообразно переходит в новое состояние. Этот процесс описывается редукцией волновой функции. При этом не только электрон, но и фотон приобретает определенный импульс. Только после этого электрон и фотон становятся *независимыми* объектами.

Итак, эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена хорош только как мысленный. Проанализировав его можно прийти к выводу: либо квантовая механика не полна, либо нелокальна и третьего не дано. Но этот эксперимент нет смысла проводить на практике. Он все равно не позволит пролить свет на суть квантово-механических процессов. Последователь Эйнштейна будет трактовать его в рамках классической физики. Он скажет, что частицы после столкновения уже имели определенные

импульсы и энергии. А позиция Бора покажется ему абсурдной. Последователь Бора будет утверждать, что определенные импульсы и энергии частицы получили *только в момент измерения*, проделанного над одной из двух частиц.

Как же решить, кто прав?

Выход из, казалось бы, тупиковой ситуации был найден американским физиком Дэвидом Бомом.

## 6.2 Эксперимент Бома

Бом предложил следующую модернизацию мысленного эксперимента Эйнштейна-Подольского-Розена [1]. Молекула, обладающая нулевым спином, самопроизвольно распадается на два атома, каждый из которых имеет спин  $\frac{1}{2}$ . Образовавшиеся атомы пропускаются через приборы Штерна-Герлаха, оси которых ориентированы параллельно друг другу. Затем оси приборов поворачиваются, и проводится аналогичный опыт с другой точно такой же распавшейся молекулой.

Прибор Штерна-Герлаха представляет собой неоднородное магнитное поле. Его ось – это линия, вдоль которой направлен градиент поля. Если направление спина атома совпадает с направлением градиента поля, то он, проходя через прибор, всегда отклоняется в направлении градиента. Если направление спина противоположное, то он, соответственно, всегда отклоняется в противоположную сторону. Если спин атома имеет промежуточное направление, то он с некоторой долей вероятности может отклониться как в одну, так и в другую сторону. Причем эта вероятность определяется величиной угла между направлением спина атома и направлением градиента магнитного поля. Здесь важно следующее. Куда бы ни был направлен спин атома, атом, проходя через неоднородное поле, может отклониться только в одном из двух направлений. Либо в направлении градиента поля, либо – в противоположном.

Теперь вернемся к эксперименту Боба и проанализируем исход этого эксперимента сначала с позиции Эйнштейна, а затем с позиции Бора.

**Позиция Эйнштейна.** Никакой неопределенности в движении квантовых объектов нет. Поэтому сразу же после распада молекулы спины атомов ориентированы в пространстве вполне определенным образом. Кроме того, исходя из закона сохранения момента импульса и, учитывая, что молекула до распада имела нулевой спин, можно утверждать, что спины атомов будут направлены строго в противоположных направлениях. Пропустим теперь эти атомы через приборы Штерна-Герлаха, оси которых параллельны друг другу. Если случайно окажется, хотя вероятность этого мала, что оси приборов будут параллельны спинам атомов, то один атом отклонится вверх, проходя через прибор, а другой – вниз. Если случайно окажется, вероятность чего тоже мала, что оси приборов будут перпендикулярны спинам атомов, то произойдет следующее. Каждый атом, проходя через прибор, может отклониться как вниз, так и вверх, причем с одинаковой вероятностью. При этом в 25 случаях из ста оба атома отклонятся вверх, в 25 случаях – вниз, в 50 случаях – в противоположные стороны.

Итак, если оси приборов будут параллельны спинам атомов, то в поведении атомов будет наблюдаться стопроцентная корреляция. Если же оси приборов будут перпендикулярны спинам атомов, то никакой корреляции в поведении атомов наблюдаться не будет. Наиболее вероятно, если оси приборов будут расположены под неким углом (от нуля до  $90^\circ$ ) к спинам атомов. В этом случае в поведении атомов будет наблюдаться некоторая корреляция: она будет тем больше, чем меньше угол.

**Позиция Бора.** После распада молекулы состояние спина каждого атома будет неопределенным. Кроме того, два атома будут образовывать единую систему в том смысле, что измерение спина одного атома мгновенно повлияет на состояние другого. Так как спины атомов не имеют определенной ориентации, совершенно не важно, как ориентированы оси приборов. При

любой ориентации этих осей произойдет следующее. Атом, первым достигший прибора Штерна-Герлаха, расщепится на два волновых пакета и будет двигаться одновременно по верхнему и нижнему пути. Мы сможем зарегистрировать его на одном из этих путей с вероятностью 50 процентов. Допустим, мы регистрируем его на верхнем пути. При этом происходит квантовый скачок, и состояние всей системы мгновенно изменяется. Зарегистрированный нами атом приобретет определенный момент импульса:  $+\frac{1}{2}$  (спин вверх), а другой атом в этот же момент времени также приобретает определенный момент импульса:  $-\frac{1}{2}$  (спин вниз).

Таким образом, независимо от ориентации приборов в поведении атомов будет наблюдаться *стоппроцентная (!)* корреляция: если первый атом отклониться вверх, то второй, однозначно, – вниз, и наоборот.

Проводя эксперимент Бора многократно, можно будет определить, какая точка зрения правильная. Если в поведении атомов будет наблюдаться стоппроцентная корреляция (атомы всегда будут отклоняться в противоположные стороны), то прав Бор. Если же в значительном числе случаев атомы будут отклоняться *одновременно* вверх или *одновременно* вниз, то прав Эйнштейн.

Следует отметить, что большинство физиков середины двадцатого века придерживалось точки зрения Эйнштейна. Просто потому, что она проста и наглядна, так как основывается на привычной для нас логике классического мира. Точку зрения Бора мало кто понимал. Но зато ее придерживались самые значимые физики: Борн, Гейзенберг, Паули, Бом, Фейнман. Де Бройль ясно понимал и позицию Бора, и позицию Эйнштейна, но колебался между ними. Дирак придерживался позиции Бора, но иногда у него проскальзывали высказывания, выдававшие в нем последователя Эйнштейна [12]:

Современная квантовая механика – величайшее достижение. Но вряд ли она будет существовать вечно. Мне кажется весьма вероятным, что когда-нибудь в будущем появится улучшенная

квантовая механика, в которой будет содержаться возврат к причинности и которая оправдывает точку зрения Эйнштейна.

Под причинностью Дирак, по-видимому, понимает механистический детерминизм. Так как квантовая механика в копенгагенской интерпретации, конечно же, теория в полной мере удовлетворяющая принципу причинности.

Прочитываемые выше слова, были сказаны Дираком в 1975 году. Если бы нечто подобное он произнес или написал в первой половине XX века, ему наверняка «досталось» бы от Паули, как в свое время – Шредингеру и Бому. Вот отрывок из письма Паули Борну [5]:

Вопреки всем реакционным усилиям (Шредингер, Бом и др., а в некотором смысле и Эйнштейн) я уверен, что статистический характер волновой  $\Psi$ -функции (а таким образом, и законов природы), который Вы с самого начала усиленно подчеркивали в противоположность Шредингеру, будет определять стиль законов в течение по крайней мере нескольких столетий. Возможно, что позднее, например в связи с процессами жизни, будет найдено нечто совершенно новое, но мечтать о возвращении к прошлому, к классическому стилю Ньютона – Максвелла (а то, чему посвящают себя эти господа, есть только мечты) – это кажется мне безнадежным, неправильным, признаком плохого вкуса. И мы могли бы добавить, что это даже не красивые мечты.

Больше всего в этих словах мне импонирует то, что Паули понимает, насколько сложно такое явление как Жизнь. Он даже допускает, что существующие физические законы могут быть как-то модернизированы по мере изучения процессов, происходящих в живых организмах. Многие из современных физиков (не таких значимых, как Паули) не понимают этого.

Ярым противником ортодоксальной квантовой механики был Джон Белл. Он считал точку зрения Бора абсурдной и потратил много сил, чтобы доказать правоту Эйнштейна. В частности, он рассчитал, в скольких случаях из ста корреляция в движении атомов должна нарушаться при многократном проведении эксперимента Боба. Свои расчеты он выполнил в

1964 году. После этого физикам оставалось подождать еще лет десять, пока экспериментальная техника не достигла нужного уровня. И в 70-х годах они приступили к экспериментам.

Это было интересное и знаменательное время: сложные, почти философские споры об устройстве мироздания, которые вели Эйнштейн, Бор и другие выдающиеся физики, теперь можно было перевести в плоскость эксперимента. На все каверзные вопросы квантовой механики должен был ответить эксперимент. И в 1982 году этот ответ был получен. А.Аспект, Ж.Далибар и Ж.Роже из Оптического института Парижского университета провели несколько модернизированный эксперимент Боба с требуемой точностью. Следует отметить, что эти физики были последователями Эйнштейна и Белла и хотели опровергнуть ортодоксальную квантовую механику, доказав, что никакой нелокальности в микромире нет.

В проведенном ими эксперименте измерялись не спины атомов, а поляризация двух фотонов, находящихся в едином квантовом состоянии. Поэтому прежде чем обсуждать его, имеет смысл, вкратце напомнить, что такое поляризация.

### 6.3 Поляризация фотона

Электромагнитное излучение представляет собой волны, которые совершают колебания в плоскости, перпендикулярной направлению движения. Это так называемые поперечные волны. Рассмотрим монохроматическую световую волну, которая распространяется в направлении  $Z$ . Чтобы полностью описать ее движение, нужно знать, как векторы электрического и магнитного полей колеблются в плоскости  $XY$ . Так как при движении световой волны магнитное поле всегда перпендикулярно электрическому, то достаточно знать, как колеблется электрическое поле.

Наиболее простой случай – когда вектор электрического поля совершает колебания только вдоль оси  $X$  или только вдоль оси  $Y$ . Такая волна называется линейно поляризованной. При

сложении двух одинаковых волн, одна из которых линейно поляризована вдоль оси  $X$ , а другая – вдоль оси  $Y$ , получится волна, линейно поляризованная вдоль оси, составляющей 45 градусов к осям  $X$  и  $Y$ . Если мы сложим две линейно поляризованные волны, которые сдвинуты по фазе друг относительно друга, то в самом общем случае получится эллиптическая поляризация – у такой волны вектор электрического поля будет описывать эллипс в плоскости  $XU$ . Если эллипс описывается по часовой стрелке (мы смотрим в то направление, куда распространяется волна), то свет называется правополяризованным, если против часовой – левополяризованным. Частным случаем эллиптической поляризации может быть круговая или линейная поляризация.

Как известно, любой вектор  $\vec{C}$ , расположенный на обычной плоскости, всегда можно представить в виде суммы двух векторов  $\vec{A}$  и  $\vec{B}$ . При условии, что эти векторы не параллельны друг другу.

$$\vec{C} = \alpha\vec{A} + \beta\vec{B} \tag{6.1}$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  – некоторые числа.

Векторы  $\vec{A}$  и  $\vec{B}$  можно выбрать в качестве базисных, и в общем случае они могут быть любыми. Но обычно в качестве базисных векторов удобно использовать единичные, ортогональные векторы. Например, можно выбрать произвольный единичный вектор на плоскости и взять еще один единичный, перпендикулярный ему. Затем любой вектор на плоскости можно будет выразить в виде линейной комбинации этих двух векторов.

Теперь рассмотрим единичный фотон. Он характеризуется энергией или частотой, и импульсом или направлением распространения. Кроме этого, он также характеризуется своей поляризацией. При этом все возможные состояния его поляризации можно уподобить множеству векторов на плоскости. Это означает, что из всех возможных поляризаций



можно выбрать два базисных состояния, а затем, через их линейную комбинацию, выразить состояния с произвольной поляризацией.

Например, в качестве ортогональных базисных состояний можно выбрать состояния с линейной поляризацией вдоль осей  $X$  и  $Y$ . Неважно, как направлены эти оси, главное, чтобы они были перпендикулярны друг другу. Квантовое состояние произвольным образом поляризованного фотона всегда можно представить в виде суммы двух линейно поляризованных состояний.

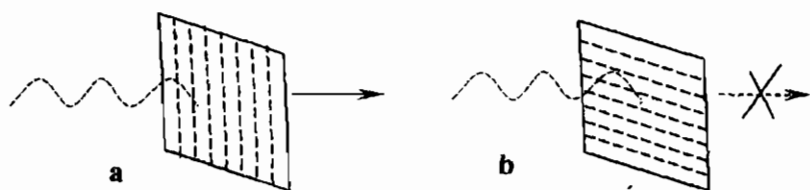
Но в качестве базисных состояний не обязательно брать линейно поляризованные. Состояние с правой круговой поляризацией и состояние с левой круговой поляризацией также являются ортогональными базисными состояниями. Какие же состояния лучше брать в качестве базисных? Это дело вкуса. С математической точки зрения все они абсолютно равноправны. В большинстве случаев удобно представлять произвольную поляризацию в виде суммы линейно поляризованных волн.

Но иногда удобно представлять ее в виде суммы право и левополяризованных волн. Такое представление имеет некоторое физическое преимущество. Дело в том, что фотон с правой круговой поляризацией обладает вполне определенным моментом импульса, равным  $+1$  (в единицах  $\hbar$ ). А левополяризованный фотон, соответственно, имеет момент импульса, равный  $-1$ .

Что касается линейнополяризованного фотона, то он не обладает определенным моментом импульса. Хотя, наверно, лучше говорить, что он обладает моментом импульса  $+1$  с вероятностью 50 процентов и моментом импульса  $-1$  также с вероятностью 50 процентов. Любая поляризация всегда связана с моментом импульса, и поэтому сохраняется при движении фотона.

Существуют вещества, прозрачность которых зависит от того, как поляризован проходящий через них свет. Пленки, сделанные из таких веществ, называются поляроидами. Как

правило, обычный поляроид имеет так называемую главную ось. Если свет линейно поляризован вдоль этой оси, то он проходит через поляроид словно через прозрачное стекло. Если свет линейно поляризован в перпендикулярном направлении, то он вообще не проходит через поляроид (рис. 6.1).



**Рис. 6.1.** Если свет линейно поляризован, то, вращая поляроид, можно добиться, что его ось будет параллельна линии, вдоль которой поляризован свет. В этом случае весь свет пройдет сквозь поляроид (а). Если теперь повернуть поляроид на  $90^\circ$  (б), то он вообще не будет пропускать свет.

А как будет проходить через поляроид свет с произвольной поляризацией?

На этот вопрос ответить нетрудно, если воспользоваться принципом суперпозиции – основным принципом как классической электродинамики, так и квантовой механики. Согласно этому принципу любую электромагнитную волну или даже любое квантовое состояние отдельного фотона можно произвольным способом разложить на сумму различных слагаемых. В частности, квантовое состояние фотона с произвольной поляризацией  $\vec{C}$  подобно вектору в двухмерном пространстве, и поэтому его всегда можно представить в виде суммы двух линейно поляризованных состояний, одно из которых ( $\vec{A}$ ) линейно поляризовано вдоль главной оси поляроида, а другое ( $\vec{B}$ ) – в перпендикулярном направлении:

$$\vec{C} = \alpha\vec{A} + \beta\vec{B} \quad (6.2)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  – некоторые комплексные числа. При этом:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (6.3)$$

Исходя из уравнения (6.2) можно сделать вывод, что фотон с поляризацией  $\vec{C}$  пройдет через поляроид с вероятностью  $|\alpha|^2$ , и не пройдет, соответственно, с вероятностью  $|\beta|^2$ . Если, к примеру, фотон линейно поляризован в направлении, составляющем угол  $\theta$  с главной осью поляроида, то:

$$\vec{C} = \cos\theta \vec{A} + \sin\theta \vec{B} \quad (6.4)$$

То есть он пройдет сквозь него с вероятностью  $\cos^2\theta$ , а не пройдет, соответственно, с вероятностью  $\sin^2\theta$ .

После такого длинного отступления вернемся к модифицированной версии эксперимента Боба, проведенного Аспектом, Далибаром и Роже в 1982 году.

## 6.4 Решающий эксперимент

В 1969 году Абнер Шимони предложил модифицировать эксперимент Боба, который достаточно трудно провести по техническим причинам, следующим образом. Возбужденный атом испускает два фотона, которые движутся в различных направлениях. Начальное и конечное состояние атома имеют вполне определенный момент импульса. Поэтому исходя из закона сохранения момента импульса можно сделать вывод, что два фотона также имеют определенный суммарный момент импульса.

При этом согласно квантовой механике каждый фотон не имеет ни определенного момента импульса, ни определенной поляризации. Но при измерении поляризации одного фотона, второй фотон также получает определенную поляризацию. Когда первый фотон долетает до поляроида, происходит редукция волновой функции, и квантовое состояние обоих фотонов изменяется скачкообразно. Если при этом главные оси поляроидов параллельны, то фотоны либо оба пройдут через

поляроиды, либо оба – не пройдут. Такое синхронное поведение фотонов часто называется одним словом – корреляция.

Именно в этом месте квантовая механика вступает в явное противоречие с обычной логикой, основанной на принципе локальности. Поэтому многочисленные последователи Эйнштейна хотели провести этот эксперимент с целью опровержения квантовой механики. Они рассуждали примерно так.

Прохождение первого фотона через поляроид не может повлиять на состояние второго фотона. Поэтому в ряде случаев корреляция в поведении двух фотонов будет нарушаться. При этом даже не важно, имели фотоны или нет определенные поляризации после испускания их атомами. Рассмотрим оба варианта.

**Первый вариант:** фотоны не имели определенной поляризации. В этом случае вероятность прохождения фотона через поляроид всегда равна 50 процентам и совершенно не зависит от того, прошел или нет другой фотон через поляроид. В половине случаев корреляция в поведении таких фотонов будет нарушаться.

**Второй вариант:** фотоны уже имели определенные поляризации сразу же после испускания их атомом. Кроме того, в силу закона сохранения момента импульса они были линейно поляризованы в одном и том же направлении. Если случайно окажется, что оси поляроидов либо параллельны, либо перпендикулярны линейной поляризации фотонов, то в поведении фотонов будет наблюдаться стопроцентная корреляция. Они либо оба пройдут через такие поляроиды, либо оба не пройдут. Но вероятность подобного совпадения мала. Скорее всего, оси поляроидов будут составлять некоторый угол с осью линейно поляризованных фотонов. В этом случае корреляция в поведении фотонов будет иногда нарушаться.

Используя неравенство Белла, можно рассчитать в скольких случаях из ста корреляция будет нарушаться, и затем провести эксперимент, который это подтвердит и, таким образом, опровергнет квантовую механику.

Подобные эксперименты последователи Эйнштейна проводили регулярно, начиная с 70-х годов. И все они подтверждали квантовую механику. Вопреки здравому смыслу в поведении фотонов наблюдалась (в пределах погрешности эксперимента) стопроцентная корреляция!

Однако эти эксперименты оставляли некоторую возможность для сторонников классического мировоззрения еще на что-то надеяться. И вот почему.

Поляроиды при проведении опытов сохраняли свои ориентации в течение длительного времени (порядка минуты) и можно было допустить наличие некоего гипотетического механизма, позволяющего фотонам обмениваться информацией. На мой взгляд, это, конечно же, ерунда. Но сторонники Эйнштейна цеплялись даже за такую возможность лишь бы избежать нелокальности.

Чтобы исключить даже такую неправдоподобную возможность, А.Аспект, Ж.Далибар и Ж.Роже из Оптического института (Париж) выполнили эксперимент, в котором выбор ориентации поляроидов или, как их иначе называют, поляризационных анализаторов, производился оптическими переключателями *во время полетов* фотонов. На пути каждого фотона стоял небольшой сосуд с водой, в котором ультразвук периодически возбуждал стоячие волны, играющие роль дифракционной решетки. При возбуждении стоячей волны фотон отклонялся на один анализатор, а при отсутствии стоячей волны летел по прямой ко второму анализатору, ориентированному иначе. В течение 10 наносекунд можно было изменить состояние оптического переключателя и сделать так, чтобы фотон полетел к нужному анализатору.

Расстояние между анализаторами составляло 13 метров. Если его поделить на скорость света, то получится 40 наносекунд, что существенно больше 10. Такая предосторожность позволяла исключить возможность любого гипотетического механизма обмена информацией о состоянии анализаторов между фотонами.

Но несмотря на такие предосторожности в поведении фотонов всё равно наблюдалась стопроцентная (в пределах небольшой погрешности эксперимента) корреляция. Каждый фотон, проходя поляризатор, вроде бы вел себя совершенно случайно. Но непостижимым образом случайное поведение другого фотона было точно скоррелировано с поведением первого. Фотоны либо оба проходили через поляризаторы, либо оба задерживались. Они вели себя подобно вращающимся гипотетическим монетам из параграфа 1.3.

Через несколько месяцев после того, как данные этого эксперимента были опубликованы, телеканал Би-Би-Си организовал документальную радиопередачу о парадоксах квантовой механики. В число ее участников входили Аспект, Джон Белл, Дэвид Бом, Джон Уиллер, Джон Тейлор и Рудольф Пайерлс. В роли ведущего выступил известный английский ученый и популяризатор науки Пол Девис. Вот что он написал об этом [11,с.55]:

Я спросил всех участников передачи, как они оценивают результаты эксперимента Аспекта и не кажется ли им, что реальность, основанная на представлениях здравого смысла, теперь мертва. Разнообразие ответов было поразительным.

Один или два участника передачи, вообще не выразили удивления по поводу эксперимента Аспекта. Их вера в правильность общепринятой точки зрения, давно провозглашенной Бором, была столь сильна, что эксперимент Аспекта они восприняли лишь как подтверждение (хотя и весьма желательное) того, что никогда не вызывало серьезных сомнений. Другие участники передачи не разделяли такой точки зрения. Их уверенность в существовании реальности, укладывающейся в рамки здравого смысла, – той поиском которой занимался Эйнштейн, – осталась непоколебимой. По их мнению, следовало бы отказаться от предположения, что сигналы не могут распространяться со скоростью выше скорости света. В конечном счете должно существовать какое-то «призрачное действие на расстоянии». Бором уже была разработана теория, включающая подобные «нелокальные» эффекты.

Сначала я подумал, что легко угадаю тех физиков, которых не удивил эксперимент Аспекта. Один из них это, конечно же, Дэвид Бом. Именно он, по моему мнению, глубже остальных участников передачи понимал квантовую механику. Но затем я засомневался. Если бы речь шла только о физическом смысле квантовой механики. Но был поднят вопрос об объективной реальности. А это очень скользкий вопрос.

Когда вспоминают о споре между Эйнштейном и Бором, то обычно говорят, что Эйнштейн защищал объективную реальность. Это не совсем верно. Он защищал объективную реальность, основанную на принципе локальности. А Бор считал, что нельзя заранее наделять микромир какими-либо известными свойствами. Потому что все они взяты из макромира и в новой области могут оказаться ошибочными. Бор также как Эйнштейн верил в объективную реальность и совсем не был позитивистом, для которого существуют только факты, а все остальное – надуманная метафизика. Об отрицательном отношении Бора, Паули и Гейзенберга к позитивизму см. [9,с.318].

Чтобы не запутаться в квантовой механике, следует рассматривать связанные с нею вопросы по отдельности.

Первый вопрос: нелокальность. Эксперимент Аспекта, как, впрочем, и ряд других опытов, проведенных в 70-е годы, наглядно продемонстрировал нелокальный характер квантовых процессов. Для многих физиков, в том числе и для участника радиопередачи Би-Би-Си Дэвида Бома, это было и так ясно. Вот что, к примеру, он писал в 50-е годы [1,с.171].

Поэтому, по-видимому, необходимо отказаться от представления, что вселенную можно фактически разбить на отдельные части, и заменить это представлением о всем мире как едином целом. Только в классическом пределе можно без всяких оговорок правильно пользоваться представлением о вселенной, состоящей из отдельных частей. Повсюду, где квантовые явления играют существенную роль, мы найдём, что отдельные "части" вселенной могут существенно изменяться с течением времени вследствие неизбежных и неразделимых связей, существующих между ними. Таким образом, мы приходим к картине вселенной как неделимого, но гибкого и постоянно изменяющегося целого.

Что касается второго вопроса, связанного с существованием «объективной реальности», то его лучше разделить на две части.

Первая часть: существуют ли квантовые объекты, когда за ними наблюдают?

Вторая часть. Можно ли наглядно представить себе движение квантовых объектов?

На первую часть вопроса и Бор, и Эйнштейн отвечали одинаково – да. А на вторую часть – по-разному. Эйнштейн считал, что объективная реальность существует в пространстве и во времени, и поэтому поведение квантовых объектов можно наглядно представить в виде некоторого процесса, разворачивающегося в пространственно-временных рамках. Бор, по-видимому, не имел ничего против такой точки зрения, но подчеркивал, что все имеющиеся модели поведения квантовых объектов не свободны от тех или иных противоречий и именно поэтому лучше от них отказаться.

Я думаю, возможно несколько самонадеянно, что модель дискретного движения примирила бы Эйнштейна и Бора. С одной стороны, она позволяет наглядно представить, как квантовые процессы протекают в пространстве и во времени, как того требовал Эйнштейн. С другой стороны, она раскрывает физический смысл корпускулярно-волнового дуализма, нелокальности и квантовых скачков. То есть всего того нового, что внесла квантовая механика в физику, и чем так дорожил Бор.

## **6.5 Ловушка редукционизма: только атомы и пустота**

В детстве я мечтал стать биологом-космонавтом. Хотел изучать жизнь на других планетах. Меня интересовало само явление жизни. Но в восьмом классе все радикально изменилось. Во-первых, на уроках физики мы узнали, что все в мире подчиняется законам классической механики. Достаточно только определить взаимное расположение тел и сил, действующих



между ними, и тогда, используя три закона Ньютона, можно будет рассчитать их дальнейшее движение. Во-вторых, на тех же уроках мы узнали, что все тела состоят из атомов. То есть, чтобы понять биологию, нужно было изучать физику, потому что все живые существа также состоят из атомов. Получалось, что поведение живого организма полностью предопределено расположением атомов внутри его тела. Перед моим внутренним взором предстала следующая картина.

Мириады разноцветных атомов, двигаясь с поразительной правильностью по точным и неизменным законам, совершают свой замысловатый танец, порождая все великолепие мира.

Вот учитель физики рассказывает нам о законах движения. Возможно, вчера он старательно готовился к сегодняшнему уроку. Совершенно напрасно. Он мог ни стараться, ни волноваться. То, что он нам говорит – говорит, по сути, не он. Ведь все это порождено движением атомов, из которых он состоит. Ни один атом не может отклониться от предначертанного ему пути. А раз так, то и человек не властен над своими поступками. Все великолепие мира вдруг куда-то исчезло. Я только что разговаривал с человеком, и вот нет человека. Остались одни только атомы.

Примерно в то же время на уроках литературы мы изучали роман Тургенева «Отцы и дети». Главный герой романа Базаров был нигилистом, отрицал существование романтических отношений между мужчиной и женщиной. В двух словах его позицию можно было выразить так: любовь – это иллюзия, есть только животные инстинкты. Я, как последовательный редукционист, считал нигилиста Базарова наивным романтиком.

Если бы существовали эти животные инстинкты, о которых он говорил! Это было бы хоть что-то. Страшная правда состоит в том, что все это одна большая иллюзия, а реальны только атомы и пустота. Мир – это черно-белый фильм, в котором мириады атомов совершают свой бессмысленный танец в бесконечном пространстве.

Я попал в так называемую «ловушку редукционизма», когда сложное явление сводится к простому, а простое, в свою очередь, к еще более простому и т. д. Очень кратко суть редукционизма можно выразить так:

Целое состоит из своих частей. Разобравшись, как устроены части целого, мы узнаем о целом абсолютно все. Нет ничего в целом сверх того, чего бы не было в его частях.

Можно подумать, что интеллектуальный уровень редукциониста – это уровень восьмиклассника. Но как оказалось, это не так. В ловушку редукционизма попадают и более зрелые *homo sapiens*, такие, как, например, нобелевский лауреат по физике Стивен Вайнберг. В его книге «Мечты об окончательной теории» [8] есть даже целая глава «Похвала редукционизму». Стивен Хокинг также с гордостью называет себя «твердолобым редукционистом» [22].

Давайте посмотрим, почему наиболее часто в ловушку редукционизма попадают именно физики, и как можно выбраться из нее.

Мысленно разделим какое-нибудь тело на множество мелких частей, таких мелких, чтобы каждая часть содержала не более одной субатомной частицы (протона, нейтрона или электрона). В результате получим огромное число маленьких ячеек пространства: либо пустых, либо содержащих всего одну частицу.

Движение каждой такой отдельной частицы будет определяться, во-первых, ее собственным состоянием, во-вторых, состоянием различных полей (гравитационных, электромагнитных, ядерных, слабых) внутри ячейки, в которой она находится. При этом нужно учесть, что эти поля будут создаваться не только частицами, составляющими данное тело, но и всей остальной материей во Вселенной.

Итак, движение частицы будет полностью определяться ее состоянием и состоянием непосредственно окружающего ее пространства. Соответственно, и движение рассматриваемого тела будет полностью определяться состоянием всех

составляющих его частиц и состоянием различных полей, окружающих каждую частицу. Получается, чтобы понять, как будет вести себя то или иное тело, нужно обязательно углубиться на субатомный уровень, а, возможно, и еще глубже, например, на субкварковый. При этом не важно, что за тело мы рассматриваем. Это может быть как неодушевленный предмет, так и живой организм. Существуют лишь атомы (элементарные частицы) и пустота (различные поля). Все остальное – это иллюзия. И только от недостатка полного знания об элементарных частицах мы верим в какую-либо иллюзию (например, Базаров верил в животные инстинкты).

Изложенный выше подход – это и есть последовательный «научный» редукционизм. И многие физики до сих пор придерживаются подобного взгляда на мир, считая главной и фундаментальной наукой физику элементарных частиц, а прочие науки и даже разделы физики – феноменологией.

Мне такой подход всегда казался абсурдным, но, тем не менее, я был вынужден придерживаться подобного мировоззрения в старших классах средней школы, потому что не мог найти ошибку в приведенном выше рассуждении. А, оставаясь в рамках классической физики, которая является строго локальной, эту ошибку и невозможно найти. То есть до тех пор, пока мы будем придерживаться принципа локальности, последовательный редукционизм будет вполне корректным, по крайней мере, в рамках физики. Но как только мы допустим существование нелокальных взаимодействий, последовательный редукционизм будет уже некорректным.

Действительно, в рамках квантовой механики существуют нелокальные связи между пространственно разделенными объектами. И теперь мы уже не вправе считать, что движение элементарной частицы определяется только ее непосредственным окружением, так как она может находиться в нелокальном взаимодействии с удаленными частицами. Кроме того, элементарная частица теперь уже не локализована в какой-либо

маленькой ячейке пространства, и может присутствовать сразу во многих ячейках и даже различных телах.

Говоря другими словами, поведение атома внутри живого организма определяется не столько его ближайшим окружением, сколько сложнейшими нелокальными связями, которыми пронизан живой организм. А, возможно, и нелокальными связями, которыми связаны все живые существа, рожденные на планете Земля (гипотеза о нелокальных связях между живыми существами обсуждается в [31]).

Получается, поведение человека определяется не только и не столько расположением атомов внутри его тела, а в первую очередь сложным квантовым состоянием всего организма. А квантовое состояние любого объекта, как мы уже знаем (см. параграф 3.6), в свою очередь, определяется его историей, то есть в данном случае биографией человека. При этом на квантовое состояние могут влиять и прочитанные книги, и прослушанная музыка, и созерцание окружающего мира, и даже размышления.

Окружающий нас мир – это единое целое. Он буквально пронизан нелокальными связями, которые еще предстоит изучить физикам (и не только) третьего тысячелетия. Нелокальные связи – вот истинный фундамент нашего мира! А элементарные частицы, и уж тем более кварки – это пыль фундамента.

## КВАНТОВАЯ ЭКЗОТИКА

### 7.1 Что следует требовать от хорошей интерпретации?

Я полагаю, что модель дискретного движения позволяет наглядно объяснить все парадоксы квантового мира. Более того, именно эту интерпретацию следует использовать для того, чтобы лучше понять квантовую механику. Но что думают по этому поводу другие физики?

Конечно, до сих пор есть физики (и их, как выясняется, немало), которые не хотят принимать то новое, что принесла с собой квантовая механика. Они все еще надеются вернуться к классическому взгляду на мир. Говорить таким физикам о дискретном движении все равно, что пересказывать какой-нибудь фантастический фильм.

Но что думают по поводу дискретного движения физики, которые принимают квантовую механику со всеми ее парадоксами?

Чтобы выяснить это, я обратился к одному из своих друзей. И очень удивился, услышав такой ответ:

– Я считаю, что дискретное движение не помогает понять квантовую механику, потому что в данном случае одно непонятное явление (поведение квантовых объектов) объясняется через другое, еще более непонятное, явление (дискретное движение).

Мне пришлось согласиться с таким замечанием, так как, конечно же, дискретное движение – это нечто очень необычное и непривычное. Да я и сам не люблю, когда одно непонятное явление объясняют через другое, еще более непонятное.

Что же делать? Отбросить дискретное движение? Но мне-то оно помогло и до сих пор продолжает помогать все лучше и лучше понимать квантовую механику. И наверняка найдутся физики, которым оно также поможет.

А что следует требовать от интерпретации квантовой механики? И зачем, вообще, нужна какая-то интерпретация для этой теории?

Я думаю, дело здесь не в том, что поведение квантовых объектов необычно, а в том, что оно все время озадачивает. Никогда не уверен заранее, чего следует ожидать от квантовых объектов в каком-то новом эксперименте. Думаешь, будет вот так, а оказывается все совсем по-другому. Причем квантовый мир озадачивает не только новичков, но и людей, которые всю жизнь исследовали его. Об этом, кстати, неоднократно писал и Ричард Фейнман [18,с.203].

Раз поведение атомов так не похоже на наш обыденный опыт, то к нему очень трудно привыкнуть. И новичку в науке, и опытному физику – всем оно кажется своеобразным и туманным. Даже большие учёные не понимают его настолько, как им хотелось бы, и совершенно естественно, потому что весь непосредственный опыт человека, вся его интуиция – всё это обращено к крупным телам. Мы знаем, что будет с большим предметом; но именно так мельчайшие тельца и не поступают.

Смотри также [17].

Нет ни модели, ни даже образа, чтобы можно было наглядно представить себе, *как* движется квантовый объект, когда над ним не проводится каких-либо измерений. Если бы у нас была модель движения квантового объекта, позволяющая наглядно представить, *как* будет протекать тот или иной эксперимент. И если при этом квантовый объект никогда не выйдет за рамки этой модели (потому что если выйдет, то снова нас одурачит). То такая модель – это все, что нам нужно для понимания квантовой механики (естественно, помимо знания самой квантовой механики).

Но именно такой моделью и является дискретное движение. Да, дискретное движение – это достаточно сложное и необычное движение. Но если бы оно было проще, то не смогло бы описать всю полноту и сложность квантовых движений. Кроме того, оно не такое уж сложное. О парадоксах квантовой механики написаны книги, а о дискретном движении можно рассказать на двух – трех страницах. Зато, взяв на вооружение это понятие, вы никогда не попадете в тупик, разбирая квантовые парадоксы.

Я не знаю, как происходит озарение и прояснение при решении разных задач и проблем у кого-либо другого, поэтому могу рассказать о пользе дискретного движения только на собственном примере.

Во-первых, мне было трудно понять физический смысл волновой  $\Psi$ -функции. Скажем, все электроны одинаковы, а волновые функции, описывающие их, разные. Чем два электрона, находящиеся в свободном движении, могут так сильно отличаться друг от друга?

Если опираться на непрерывное движение, то два свободных электрона могут различаться только своими импульсами. Дискретное движение вносит в поведение частиц многомерность и многоплановость. Если два электрона движутся дискретно, они могут отличаться друг от друга размером и количеством областей, в которых они движутся дискретно, и разными распределениями вероятностей и фаз внутри этих областей. Именно для того, чтобы полностью описать сложное состояние дискретно движущегося электрона, и нужна волновая  $\Psi$ -функция.

Во-вторых, я имел очень смутное представление о редукции волновой функции и о квантовых скачках. Что такое квантовый скачок? Я ошибочно полагал, что это очень быстрый процесс, длительностью которого в данной задаче можно пренебречь. А что такое редукция волновой функции, которую иногда называют «стягиванием» волнового пакета? С какой скоростью «стягивается» волновой пакет?

Когда я стал использовать понятие дискретного движения, то *логически* пришел к понятию квантового скачка. Действительно, если электрон движется дискретно в разных областях пространства, и мы ловим его в какой-то маленькой области, то в то же самое время, как только мы его ловим, он теряет возможность двигаться во всех остальных областях. Остальные области при этом не стягиваются, а просто исчезают.

Это исчезновение реальных волновых пакетов, возможно, одна из самых мистических особенностей квантовой механики. И эта наиболее таинственная особенность становится наглядной и очевидной в рамках дискретного движения. При этом также становится ясно, что новая волновая функция, описывающая электрон после того, как его поймали, *никак не связана* со старой волновой функцией, описывающей электрон, до того, как его поймали. Не существует никакого непрерывного перехода между ними. Но после того как электрон поймали, надо отбросить старую волновую функцию и вместо неё использовать новую. Это и есть редукция волновой функции – математическое описание квантового скачка.

А ведь есть физики, которые всю жизнь изучали квантовую механику и, более того, пишут по ней методические пособия и при этом имеют совершенно неверное представление о редукции волновой функции. Примеры неправильного понимания этого понятия рассмотрены в [31].

Но самое главное – это даже не то, что дискретное движение помогло мне понять физический смысл терминологии, используемой в квантовой механике, а то, что благодаря новому понятию, я стал хорошо ориентироваться в квантовых экспериментах. Причем не только в относительно простых, рассмотренных в предыдущей главе, но и в более сложных, относящихся к квантовой экзотике. Некоторые примеры этой экзотики мы рассмотрим в следующих параграфах.



## 7.2 Почему исчезает интерференция?

В 1998 году я читал журналы «В мире науки», в которых рассказывалось о уже проведенных квантовых экспериментах [23,24]. Тогда я еще ничего не знал о дискретном движении, и знакомство с квантовыми парадоксами приводило меня в легкое состояние шока. Я показывал описание этих экспериментов своим знакомым, выпускникам физического факультета Новосибирского государственного университета. Некоторые из них совсем недавно прослушали университетский курс по квантовой механике. Молодые ученые, как один заявляли: такого не может быть. Слово «нелокальность», по-видимому, тоже никто не слышал. По крайней мере, я его услышал чуть позже от Жоры, после очередного воскресного футбола (см. параграф 1.1).

После того, как я стал использовать модель дискретного движения для описания поведения квантовых объектов, густой туман, плотно окутывающий микромир, стал понемногу рассеиваться. Все то, что раньше было таинственным и загадочным, вдруг стало простым и понятным. У меня даже возникло легкое чувство ностальгии по тому времени, когда я блуждал в потемках по сюрреалистичному квантовому царству, находя что-то диковинное буквально на каждом шагу.

Но вернемся к нашим экспериментам. Я выбрал из статьи [23] два наиболее трудных, на мой взгляд. Вот дословное описание первого из них.

Большинство экспериментов действительно содержит возмущающие измерения. Например, блокирование одного из двух путей или перемещение детекторов вплотную к щелям, очевидно, вносит возмущение в процесс прохождения фотонов в эксперименте с отложенным выбором. Однако эксперимент, проведенный в прошлом году группой Мандела в Рочестерском университете, показал, что фотон можно заставить переключаться и вести себя то как волна, то как частица, воздействуя на него гораздо более тонким способом, чем прямое физическое вмешательство.

Эксперимент основан на использовании параметрического преобразователя с понижением частоты – необычной линзы,

расщепляющей фотон с данной энергией на два фотона, энергия каждого из которых вдвое меньше. Хотя эта установка была разработана в 60-х годах, группа из Рочестерского университета была первой, кто использовал ее в опытах по квантовой механике. В проведенном ими эксперименте свет от лазера попадает на светоделитель. Отраженные от него фотоны направляются к одному понижающему преобразователю, а фотоны, прошедшие сквозь светоделитель, – к другому. Каждый из понижающих преобразователей расщепляет отдельный падающий на него фотон на два более низкоэнергетических фотона, один из которых называется сигнальным, а другой – дополнительным. Два понижающих преобразователя расположены таким образом, что оба дополнительных луча соединяются в один. Зеркала направляют этот суммарный дополнительный луч в один детектор, а два сигнальных луча – в другой.

Эта установка не позволяет наблюдателю ответить на вопрос, какой из путей выбирает отдельный фотон после прохождения светоделителя. Поэтому каждый фотон идет и слева, и справа от светоделителя подобно волне и проходит через оба понижающих трансформатора, образуя две сигнальные волны и две дополнительные. Сигнальные волны дают на соответствующем детекторе интерференционную картину. Эту картину можно обнаружить, если постепенно увеличивать расстояние, которое сигнальные волны должны пройти от одного из понижающих трансформаторов до детектора. При этом интенсивность сигнала детектора соответственно возрастает и падает, когда «гребни» и «впадины» интерферирующих волн смещаются относительно друг друга, проходя «в фазе» или «не в фазе».

Теперь происходит нечто странное. Сигнальные и дополнительные фотоны, однажды излученные из понижающего преобразователя, более никогда не могут встретиться; они направляются к своим отдельным детекторам независимо друг от друга. Тем не менее если экспериментатор просто перекрывает путь одной группе дополнительных фотонов, то разрушается интерференционная картина от сигнальных фотонов. Что же при этом изменилось?

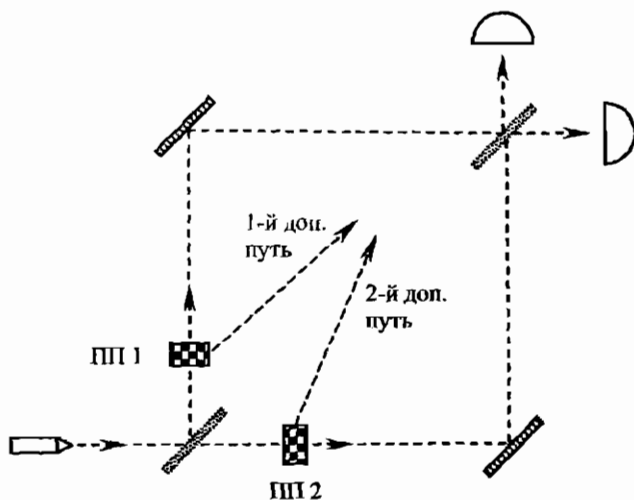
Ответ состоит в том, что изменилось потенциальное знание наблюдателя. Теперь он может определить, по какому из маршрутов сигнальные фотоны прошли к своему детектору, если сравнить время их прибытия со временем прибытия оставшейся незаблокированной группы дополнительных фотонов. Исходный фотон больше не может, подобно волне, идти через светоделитель

сразу по обоим путям, а должен, подобно частице, либо отразиться от светоделителя, либо пройти сквозь него.

Для того чтобы разрушить интерференционную картину, нет необходимости проводить сравнение времен прибытия фотонов. Как поясняет Мандел, одна лишь «угроза» получения информации о том, по какому пути прошел фотон, вынуждает его выбирать только единственный маршрут. «Квантовое состояние отражает не только то, что мы знаем о данной системе, но и то, что можно в принципе узнать», – говорит Мандел.

Проанализируем этот эксперимент. Правда, в статье не указано, как именно происходила интерференция двух пучков. Но это не имеет принципиального значения. Вполне возможно, что для этого использовался интерферометр Маха-Цандера.

Итак, фотон, проходя через светоделитель, расщепляется на два волновых пакета и движется сразу по обоим путям (рис. 7.1).



**Рис. 7.1.** Проходя через параметрический преобразователь (ПП), каждый волновой пакет разделяется на два. При этом один продолжает двигаться по основному пути, а другой «сворачивает» на дополнительный. Перекрывая один из дополнительных путей, мы локализуем не только дополнительный фотон, но и сигнальный.

Затем каждый из этих пакетов, проходя через параметрический преобразователь, делится еще на два пакета. Новизна здесь в том, что теперь в четырех волновых пакетах присутствует не один, а уже два фотона. Все четыре волновых пакета, в которых дискретно движутся два фотона, связаны между собой нелокальными связями. Сигнальные пакеты, проходя сквозь второй светоделитель, дают интерференционные эффекты аналогичные тем, что были рассмотрены в параграфе 5.4.

Теперь перекрывается путь одному из дополнительных пакетов. Происходит редукция квантового состояния *всех* четырех пакетов. Один фотон оказывается на каком-то из дополнительных путей, а другой – на каком-то из основных. Два волновых пакета, двигающихся по другим путям бесследно исчезают. Исчезновение волнового пакета, идущего по основному пути, приводит к потере интерференционных явлений. Все просто. Никакой мистики.

А в статье, к сожалению, неправильно расставлены акценты. Ничего не говорится ни о нелокальных связях, связывающих сигнальный и дополнительный фотоны, ни о редукции квантового состояния, когда перекрывается один из дополнительных путей. Вместо этого делается ударение на «потенциальное знание наблюдателя». И у читателя может сложиться впечатление, что информация в сознании наблюдателя может как-то влиять на поведение фотона. Это, разумеется, не так.

### 7.3 Квантовый ластик

Вот описание другого эксперимента, взятого из той же статьи [23]:

Может ли быть отменена сделанная однажды «угроза» получения разоблачающей информации? Другими словами, обратимы ли измерения? Многие теоретики, включая Бора, думали, что необратимы, и фраза «редукция (коллапс) волновой функции» отражает эту уверенность. Однако в 1983 г. Марлан О.Скулли,

теоретик из Университета в Нью-Мехико, доказал, что можно получить информацию о состоянии квантового объекта, нарушив этим его волновые свойства, а затем восстановить эти свойства, «стерев ластиком» полученную информацию.

Несколько групп, работающих в области оптической интерферометрии, в том числе группа Мандела, заявили, что они собираются продемонстрировать явление, которое Скули назвал «квантовым ластиком». Скули считает, что наиболее близко к осуществлению этой идеи подошла группа под руководством Раймонда Чао из Калифорнийского университета в Беркли.

В начале этого года экспериментаторы из группы Чао пропустили луч света через понижающий преобразователь, что привело к образованию двух одинаковых фотонов, которые направились по различным путям. Затем с помощью зеркал эти фотоны снова встретились на полупрозрачном зеркале, после которого попали в два детектора. Поскольку невозможно определить, какой из фотонов попал в какой из детекторов, каждый фотон идет сразу по обоим путям. Как и в эксперименте Мандела, интерференционную картину можно обнаружить, если удлинить одно плечо интерферометра. На приборе, который называется счетчиком совпадений и фиксирует сигналы, возникающие на двух детекторах фотонов одновременно, наблюдается соответственно рост или падение интенсивности сигнала, когда обе волны поступают в свои детекторы «в фазе» или «не в фазе».

Затем исследователи добавили к интерферометру устройство, которое поворачивало на  $90^\circ$  поляризацию одной из групп фотонов. Если представить луч света в виде стрелы, то поляризация – это ориентация наконечника стрелы относительно его плоскости. Одной из характерных особенностей поляризации является ее строго бинарный характер: фотоны всегда поляризованы либо вертикально, либо горизонтально. Изменение поляризации служило в качестве «метки»: помещая индикаторы поляризации перед обычными детекторами света, стоящими в конце маршрутов, можно определить, какой из маршрутов, выбрал каждый фотон. Два пути теперь перестают быть неотличимыми друг от друга, и интерференционная картина исчезает.

Наконец, группа Чао поместила в экспериментальную установку два устройства, которые разрешали пройти к детекторам только свету, поляризованному в определенном направлении. Два пути стали снова неразличимыми, и вновь появилась интерференционная картина. В отличие от шалтая-болтая редуцированную волновую функцию можно опять «собрать».

В 1998 году я еще не знал, кто же прав Бор или Скулли. Неужели Бор ошибался? Сейчас могу уверенно сказать: Бор прав. Редуцированную волновую функцию собрать невозможно. Процесс измерения принципиально необратим во времени. И модель дискретного движения делает это утверждение простым и наглядным. Действительно, пусть фотон движется в виде двух волновых пакетов по различным путям. Если мы локализуем его на одном пути, то он сразу же потеряет возможность двигаться по второму. Вернуть фотон на оба пути можно только при одном условии – снова пропустить его через светоделитель.

В чем же ошибка Скулли? Исходя из отсутствия интерференции, он делает вывод, что фотон движется по одному пути. Это не так. Наличие интерференции – это гарантия того, что фотон движется по обоим путям. Но обратное утверждение в общем случае неверно.

Напомним, что квантовое состояние фотона подобно вектору на двухмерной плоскости. А вектора складываются по правилу параллелограмма (рис. 7.2).

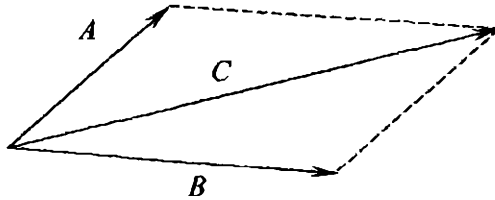


Рис. 7.2.

В общем случае:

$$\vec{A} + \vec{B} = \vec{C} \quad (7.1)$$

$$|\vec{A}|^2 + |\vec{B}|^2 \neq |\vec{C}|^2 \quad (7.2)$$

В переводе на квантовый язык это означает:

При сложении двух квантовых состояний складываются их амплитуды, но не вероятности, которые равны квадрату модуля амплитуд (см. параграф 3.3).

Выполнение неравенства (7.2) как раз и означает, что происходит интерференция при сложении двух состояний. И это свидетельствует, что фотон движется сразу по обоим путям.

Что нужно сделать, чтобы интерференция исчезла?

Во-первых, можно вызвать редукцию квантового состояния, в результате которой фотон будет двигаться только по одному пути. Этот процесс, очевидно, необратим.

Во-вторых, можно взять вектор  $\vec{B}$  перпендикулярный вектору  $\vec{A}$ . Только в этом случае:

$$|\vec{A}|^2 + |\vec{B}|^2 = |\vec{A} + \vec{B}|^2 = |\vec{C}|^2 \quad (7.3)$$

Только в этом частном случае сумма квадратов векторов равна квадрату их суммы. И теперь ясно, что нужно сделать, чтобы исчезла интерференция, а фотон при этом шел по обоим путям.

Нужно чтобы волновой пакет, идущий по второму пути, находился в квантовом состоянии *ортогональном* квантовому состоянию волнового пакета, идущего по первому пути. Для этого достаточно повернуть плоскость поляризации второго волнового пакета на  $90^\circ$ , как это сделал Чао.

Скажем, у нас есть фотон, поляризованный в вертикальном направлении. Мы пропускаем его через светоделитель. Первый волновой пакет не «трогаем», а плоскость поляризации второго поворачиваем на  $90^\circ$ . В результате фотон движется по обоим путям, но все интерференционные эффекты исчезают. Затем мы поворачиваем плоскость поляризации второго волнового пакета на  $-90^\circ$ , и все интерференционные эффекты снова восстанавливаются.

Никакой редукции волновой функции, а уж тем более ее «сборки» здесь не происходит.

Получается, что человек, использующий модель дискретного движения, разбирается в сложном квантовом эксперименте, о котором знает совсем немного, *лучше*, чем его автор.

## 7.4 Квантовые киборги

Применима ли квантовая механика к классическим объектам? Вроде бы ответ очевиден: нет. Действительно, основной принцип квантовой механики – это принцип суперпозиции. Если электрон может находиться на Земле (обозначим это состояние как  $\Psi_3$ ) и может находиться на Луне ( $\Psi_L$ ), то может существовать состояние  $\Psi_0$ , которое является суперпозицией этих двух состояний:

$$\Psi_0 = \alpha\Psi_3 + \beta\Psi_L \quad (7.4)$$

То есть электрон может находиться одновременно на Земле (вероятность  $|\alpha|^2$ ) и на Луне (вероятность  $|\beta|^2$ ). Ясно, что, скажем, обычный камень на такое не способен. Он может находиться либо на Земле, либо на Луне.

Но почему? Чем камень принципиально отличается от электрона?

Чтобы электрон перевести в суперпозицию двух разных состояний, его необходимо разделить на два волновых пакета. Это не так трудно сделать, используя возможности современной техники. Затем нужно один волновой пакет оставить на Земле, а второй очень осторожно (чтобы не вызвать необратимого процесса редукции) отправить на Луну. Вот и все.

Более того, используя возможности современной техники, на два волновых пакета можно разделить не только электрон, но и нейтрон и даже атом [6]. Возможно, со временем физики научатся разделять на волновые пакеты и более тяжелые объекты. По крайней мере, такие надежды есть [23]. Так может быть классические объекты не отличаются радикально от квантовых? Просто их очень трудно технически перевести в суперпозицию различных состояний.

Современная техника развивается стремительно. На смену микротехнологиям приходят нанотехнологии. Еще немного – и инженеры смогут собирать из атомов любые сложные молекулы, словно из деталей конструктора. И, вполне возможно, что в



ближайшее время какую-нибудь наночастицу удастся перевести в суперпозицию различных состояний. Техническое осуществление этой сложной процедуры позволит глубже понять квантовую механику.

Но сейчас я хочу рассказать о другой более интересной процедуре, которая, на мой взгляд, способна произвести не просто революцию, а *фантастическую* революцию в технике.

Предположим, инженеры научились собирать по атомам наноробота. Пусть он состоит из  $N$  атомов, где  $N$  очень большое число. Тогда я предлагаю следующее.

Возьмем два одинаковых набора таких атомов. Затем разделим каждый атом на два волновых пакета и будем собирать наноробота из этих волновых пакетов. Скажем, вместо одного атома азота возьмем один волновой пакет от атома азота из первого набора и второй волновой пакет от атома азота из второго набора.

Любой атом можно рассматривать как волновой пакет, в котором данный атом находится со сто процентной вероятностью. Я предлагаю каждый атом наноробота заменить на два волновых пакета, принадлежащих двум *разным* атомам. Причем, в каждом волновом пакете каждый атом будет находиться с вероятностью 50 процентов. А два другие волновых пакета пойдут на создание другого наноробота.

То есть вместо того, чтобы наноробота (или любой другой макроскопический объект) переводить в суперпозицию двух состояний, как это предлагается в статье [23], я предлагаю перевести в суперпозицию двух состояний все атомы, а затем из таких «суперпонируемых» атомов построить наноробота. В результате мы получим двух нанороботов, связанных друг с другом нелокальными связями.

Здесь у читателя, наверняка, возникнут два вопроса. Можно ли подобное осуществить технически? И зачем это нужно?

Разделить атом на два волновых пакета нетрудно. Это научились делать почти двадцать лет назад. Манипулировать с волновым пакетом, в котором находится атом с какой-то

вероятностью, не намного сложнее, чем просто с атомом. Поэтому, если инженеры смогут построить из атомов наноробота (а в этом особых сомнений нет), то они смогут построить наноробота и из волновых пакетов.

Основная трудность здесь в другом. Взаимодействие наноробота с окружением вызовет редукцию волновых пакетов. После чего два наноробота с нелокальными связями превратятся в обычных нанороботов.

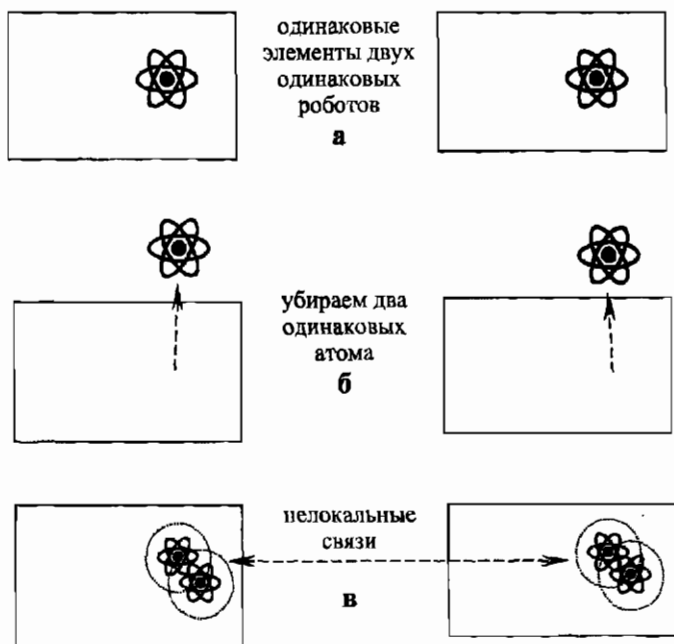
Чтобы этого не случилось, предлагается следующее. Берем двух обычных роботов. У каждого из них делаем внутри хорошо защищенный от внешнего воздействия контейнер. Этот контейнер будет играть роль своеобразного «квантового сердца» или «квантового разума». И «начинку» этого контейнера строим из суперпонирированных атомов. В результате имеем двух роботов, сердца или разумы которых соединены между собой нелокальными связями. Если получится создать двух таких роботов, то, значит, можно будет их создать целое множество.

Зачем это нужно?

Поведение каждого такого робота, предлагается их в дальнейшем называть квантовыми киборгами, будет определяться не только его собственной программой. Оно будет также зависеть от квантового состояния всех остальных роботов. Ведь все они связаны нелокальными связями. Квантовые киборги будут находиться в едином квантовом состоянии, то есть их поведение будет описываться одной (общей на всех) волновой функцией. Их общее квантовое состояние будет невообразимо сложное. Добавление только одного киборга к уже имеющимся  $N$  киборгам будет «усложнять» это состояние в  $N$  раз!

Каждый киборг, выполняя какое-нибудь простое действие, изменит квантовое состояние всех остальных киборгов. Благодаря действиям всех киборгов их общее квантовое состояние будет очень быстро усложняться. Ведь квантовое состояние системы – это ее история. Более сложное квантовое состояние будет «отражаться» в квантовом состоянии каждого киборга, делая его «умнее». Квантовые киборги смогут очень

быстро обучаться новым программам, и, вполне возможно, что они смогут полностью адаптироваться к окружающей их среде. Так же или почти так же, как адаптировались к окружающей среде живые существа.



**Рис. 7.3.** Общий принцип построения квантовых киборгов

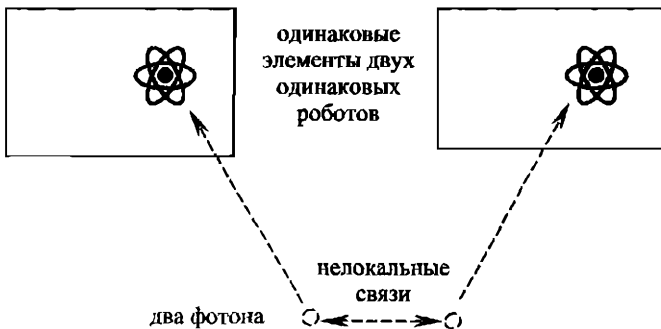
Берем одинаковые элементы у двух одинаковых роботов (а). Убираем из них по одному одинаковому атому (б). Расщепляем каждый атом на два волновых пакета. Вместо одного атома на его место возвращаем два волновых пакета, принадлежащие разным атомам. В результате между роботами возникают нелокальные связи (в). Повторяем процедуру, вовлекая в нее как можно больше атомов из каждого робота.

Даже если один киборг будет обладать довольно скромным компьютером, то все вместе они образуют единый супермощный

компьютер, возможности которого трудно себе представить! Можно даже сказать, что квантовые киборги будут обладать неким подобием коллективного разума. Их поведение в какой-то мере можно будет сравнить с поведением муравьев.

Будут ли они подобны живым существам?

Необратимые процессы редукции, происходящие с волновыми пакетами внутри каждого киборга, будут приводить к ослаблению нелокальных связей между киборгам и к «ослаблению» их коллективного разума. Чтобы восстановить эти связи понадобится, по крайней мере, на первых порах, помощь человека. Хотя в дальнейшем, по мере развития технического прогресса (а если удастся создать квантовых киборгов, то они наверняка вызовут небывалый взлет технического прогресса), квантовые киборги сами научатся восстанавливать нелокальные связи друг с другом.



**Рис. 7.4.** Более простой способ получения квантовых киборгов

Берем одинаковые элементы двух одинаковых роботов. Выбираем в них два одинаковых атома. Берем два фотона, связанных друг с другом нелокальными связями. Одним фотоном возбуждаем первый атом, а другим – второй. В результате нелокальные связи фотонов переносятся на атомы.

Слово киборг означает кибернетический организм. Это некий сплав живой ткани и техники. Я считаю, что подобный

сплав всегда останется «поверхностным». Потому что существует пропасть между живыми существами и неживой материей. Квантовые киборги – это исключительно технические создания. Но при их построении учитывается основной принцип Жизни – нелокальные связи. Мы можем создать технические устройства по подобию живых организмов. Что, в конце концов, из этого получится, сейчас трудно предугадать.

Но уже ясно, по крайней мере, мне, что научно-технический прогресс будет развиваться именно в этом направлении. Ведь если мы хотим «выжать» из технических устройств максимум того, на что они способны, то необходимо «подключать» к этому квантовую механику. Настает время, когда корпускулярно-волновой механизм, нелокальные связи и квантовые скачки мы сможем использовать в народном хозяйстве.

Ведь живые существа в процессе своей эволюции научились в полной мере использовать весь потенциал квантовомеханических средств. Теперь очередь за человеком – воплотить основные принципы существования и развития живых организмов в работу технических устройств. И создание квантовых киборгов – первый этап на этом пути.

## Список литературы

1. Бом Д. Квантовая теория. Москва: Наука, 1965.
2. Бор Н. Дискуссии с Эйнштейном по проблемам теории познания в атомной физике // Избранные научные труды, том 2, Москва: Наука, 1971.
3. Бор Н. Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным? (там же).
4. Борн М. Непрерывность, детерминизм, реальность // Борн М. Размышления и воспоминания физика. М.: Наука, 1977, с.162-187.
5. Борн М. Интерпретация квантовой механики // Борн М. Физика в жизни моего поколения. М.: ИЛ, 1963, с.252-266.
6. Боумейстер Д., Цайлингер А. Физика квантовой информации: основные понятия // Физика квантовой информации. М.: Постмаркет, 2002, с. 18–32.
7. Бройль Л. Интерпретация волновой механики // Философские вопросы современной физики. М.: Государственное издательство политической литературы, 1958, с.79-102.
8. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008.
9. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. Москва: Наука, 1989.
10. Гинзбург В. О науке, о себе и о других. М.: Физматлит, 2001, с.48.
11. Девис П. Суперсила. М.: Мир, 1989, с.55.
12. Дирак П. Воспоминания о необычайной эпохе. М.: 1990, с.131.
13. Дойч Д., Экерт А. Введение в квантовые вычисления // Физика квантовой информации. М.: Постмаркет, 2002, с.126–139.
14. Ландау Л., Лифшиц Е. Квантовая механика. М.: Наука, 1989, с.14.
15. Менский М. Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов. Успехи физических наук, т.170, 2000, № 6, с.634.
16. Поппер К. Квантовая теория и раскол в физике. Москва: Логос, 1998, с.102,103.
17. Фейнман Р. Характер физических законов. Москва: Наука, 1987.

18. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 3,4. М.: URSS, 2008, 2009.
19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 7. М.: URSS, 2010.
20. Фейнман Р., Моринго Ф., Вагнер У. Фейнмановские лекции по гравитации. М.: Янус-К, 2000, с.37.
21. Фрэзер Дж. Золотая ветвь: исследование магии и религии. М.: Эксмо, 2006.
22. Хокинг С. Возражения убежденного редукциониста // Пенроуз Р. Большое, малое и человеческий разум. М.: Мир, 2004.
23. Хорган Дж. Квантовая философия. В мире науки, 1992, №9-10.
24. Шимони А. Реальность квантового мира // В мире науки, 1988, №3.
25. Шредингер Э. Существуют ли квантовые скачки? // Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976, с.261-284.
26. Эйнштейн А. Вводные замечания об основных понятиях // Собрание научных трудов, том 3, Москва: Наука, 1966.
27. Эйнштейн А. Квантовая механика и действительность (там же).
28. Эйнштейн А. Замечание о квантовой теории (там же).
29. Эйнштейн А. Элементарные соображения по поводу интерпретации основ квантовой механики (там же).
30. Эйнштейн А., Подольский Б. Розен Н. Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным? (там же)
31. Янчилин В. Логика квантового мира и возникновение Жизни на Земле. М.: Новый Центр, 2004, 2007.
32. Янчилин В. Неопределенность, гравитация, космос. М.: URSS, 2009.
33. Янчилина Ф. По ту сторону звезд. Что начинается там, где заканчивается Вселенная?.. М.: URSS, 2003.

## Другие книги нашего издательства:



URSS

### Серия «Relata Refero»

- Опарин Е. Г.* Физические основы бестопливной энергетики.
- Зверев Г. Я.* Физика без механики Ньютона.
- Андронов Г. Ф.* Сложность элементарных частей.
- Бойко С. В.* Основы механизма физических процессов.
- Плохотников К. Э. и др.* Основы психорезонансной электронной технологии.
- Федулаев Л. Е.* Физическая форма гравитации: Диалектика природы.
- Федулаев Л. Е.* Философия гравитации. Глазами Гегеля на проблемы современной физики.
- Биллик А. С.* Атомная физика, изложенная на языке физики свойств.
- Низовцев В. В.* Время и место физики XX века.
- Стельмахович Е. М.* Пространственная (топологическая) структура материи.
- Ацюковский В. А.* Физические основы электромагнетизма и электромагнитных явлений.
- Брусин Л. Д., Брусин С. Д.* Иллюзия Эйнштейна и реальность Ньютона.
- Долгушин М. Д.* Эвристические методы квантовой химии или о смысле научных занятий.
- Терлецкий Н. А.* О пользе и вреде излучения для жизни.
- Кирылло А. И., Пятницкая Н. Н.* Квант-силовая физика. Гипотеза.
- Харченко К. П., Сухарев В. Н.* «Электромагнитная волна», лучистая энергия — поток реальных фотонов.
- Бернштейн В. М.* Перспективы «возрождения» и развития электродинамики и теории гравитации Вебера.
- Михайлов В. Н.* Закон всемирного тяготения.
- Михеев С. В.* Темная энергия и темная материя — проявление нулевых колебаний электромагнитного поля.
- Галавкин В. В.* Дорогой Декарта, или физика глазами системотехника.
- Галавкин В. В.* Аристотель против Ньютона, или экономика глазами системотехника.
- Федосин С. Г.* Современные проблемы физики. В поисках новых принципов.
- Федосин С. Г.* Основы синкретики. Философия носителя.
- Демин А. И.* Парадигма дуализма: пространство — время, информация — энергия.
- Иванов М. Г.* Безворонные двигатели космических аппаратов.
- Иванов М. Г.* Антигравитационные двигатели «летающих тарелок». Теория гравитации.
- Смольяков Э. Р.* Теоретическое обоснование межзвездных полетов.
- Хохлов Ю. Н.* О нас и нашем мире.
- Васильев В. И.* Повторяется ли история?

### Тел./факс:

(499) 135-42-46,

(499) 135-42-16,

### E-mail:

URSS@URSS.ru

<http://URSS.ru>

### Наши книги можно приобрести в магазинах:

- «Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (495) 625-2437)
- «Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)
- «Молодая гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (495) 238-5801, 786-3370)
- «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 137-6019)
- «Дом книги на Лядовской» (м. Бауманская, ул. Лядовская, 8, стр. 1. Тел. 267-0362)
- «Глобус» (м. Университет, 1 г-н. корпус МГУ, пом. 141. Тел. (495) 839-4713)
- «У Нептуна» (РГТУ) (м. Новослободская, ул. Чапаева, 15. Тел. (499) 979-4301)
- «СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 448-2355)



## Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.



URSS

Среди выпущенных и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

### Серия «Relata Refero»

*Янчилин В. Л.* Неопределенность, гравитация, космос.

*Янчилин В. Л.* Квантовая теория гравитации.

*Янчилина Ф.* По ту сторону звезд. Что начинается там, где заканчивается Вселенная?

*Петров Ю. И.* Парадоксы фундаментальных представлений физики.

*Петров Ю. И.* Некоторые фундаментальные представления физики: критика и анализ.

*Сазанов А. А.* Преодоление классического мировоззрения. Кн. 1, 2.

*Зукакишвили Л. М.* Физика сплошной среды: Единая теория поля.

*Колесников А. А.* Гравитация и самоорганизация.

*Штепа В. И.* Единая теория Поля и Вещества с точки зрения Логики.

*Агафонов К. П.* Единство физической картины мира (неоклассическая концепция).

*Циммерманс Л.-Х.* Вселенная до и после Большого взрыва.

*Циммерманс Л.-Х.* Вселенная во Вселенной.

*Шадрин А. А.* Структура Мироздания Вселенной.

*Шульман М. Х.* Теория шаровой расширяющейся Вселенной.

*Шульман М. Х.* Вариация на тему квантовой теории.

*Кириянов В. И.* Описание фазовых состояний Вселенной через фундамент. постоянные.

*Ясимова Н. Н.* Фрактальная Вселенная и золотое отношение.

*Лютко М. Г.* Физика материи островной Метагалактики.

*Шевелев А. К.* Структура ядер, элементарных частиц, вакуума.

*Шевелев А. К.* Структурное единство физического вакуума и фотона.

*Артеха С. Н.* Критика основ теории относительности.

*Попов Н. А.* Сущность времени и относительности.

*Матосов М. В.* Теория относительности Эйнштейна: Реальная и виртуальная физика.

*Матосов М. В.* Контактная разность потенциалов: Миф и реальность.

*Матосов М. В.* Термоны — носители энергии.

*Бондаренко С. Б.* Космология и культура.

*Бондаренко С. Б.* Теория дескриптивных систем.

*Кубышкин Е. И.* Нелинейная алгебра пространства-времени.

*Арманд А. Д.* Два в одном: Закон дополнителности.

*Лучин А. А.* О ключевых вопросах физики в электронике (с философским подтекстом).

*Соломонов М. С.* Новая модель небесной механики.

*Тьмсон Дж., Планк М. и др.* Эфир и материя.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:  
 тел./факс (499) 135-42-16, 135-42-46  
 или электронной почтой URSS@URSS.ru  
 Полный каталог изданий представлен  
 в интернет-магазине: <http://URSS.ru>

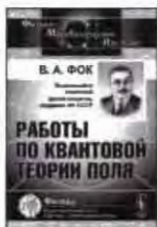
Научная и учебная  
литература



Окончил физико-математическую школу при Новосибирском государственном университете, учился на физическом факультете НГУ. Область научных интересов — квантовая механика и гравитация. Является автором книг: «Новая интерпретация квантовой механики» (2000), «Квантовая теория гравитации» (URSS, 2002; на англ. яз. — «The Quantum Theory of Gravitation», URSS, 2003), «Взрывающаяся Вселенная. Как образовались галактики и почему они вращаются?» (2006), «Logic of the Quantum World and the Origin of Live on Earth» (URSS, 2008), «Неопределенность, гравитация, космос» (2-е изд. URSS, 2009) и других.

Автор рисунка на обложке: Леонид Янчилин

### Представляем другие книги нашего издательства:



8142 ID 108950

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

E-mail:  
URSS@URSS.ru

Тел./факс: 7 (499) 135-42-16

Тел./факс: 7 (499) 135-42-16

интернет-магазин

изданий  
ете:

URSS.ru

OZON.RU



Любые отзывы о настоящем издании, а также по адресу URSS@URSS.ru, Ваши замечания и отражены на web-странице этой книги в наш



29241462