

Введение

“Quantum phenomena do not occur in a Hilbert space, they occur in a laboratory”

A. Peres

Предлагаемое читателям учебное пособие является одним из намеченного авторами цикла пособий, которые основаны на многолетнем опыте преподавания квантовой физики студентам физического факультета и факультета наук о материалах Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Данное издание прежде всего предназначено для студентов, которые слушают межфакультетский курс квантовой физики на физическом факультете МГУ. Но оно также может быть полезно всем, кто хочет самостоятельно разобраться в аксиоматике квантовой механики и других тонких вопросах, связанных с основаниями квантовой теории. С определенной степенью условности квантовую теорию можно разделить на три основные составляющие.

Первая — **нерелятивистская квантовая механика**, которая описывает поведение материи на уровне молекул, атомов и атомных ядер, когда релятивистские эффекты не играют существенной роли. Обычно под этим подразумевается, что характерные энергии в описываемых процессах много меньше энергий покоя участвующих в этих процессах микросистем¹ или что скорости рассматриваемых микрообъектов много меньше скорости света в вакууме. Типичный масштаб, на котором уже необходимо учитывать квантовые эффекты по порядку величины, равен 10^{-6} — 10^{-8} см. Такой масштаб находится за пределами возможностей органов чувств любого человека. Например, видимый свет имеет характерную длину волны порядка 5×10^{-5} см. Поэтому почти

¹Под **микросистемой** мы будем понимать молекулу, атом, ядро атома, элементарную частицу или их совокупность, генетически связанную каким — либо образом. Вместо термина «микросистема» в тексте учебного пособия иногда будут использоваться его синонимы «**микрообъект**» и «**микрочастица**».

все микроробъекты человек не может увидеть даже в самый лучший оптический микроскоп. Это простое рассуждение иллюстрирует важнейшую идею, которая лежит в основании нерелятивистской квантовой механики: *между наблюдателем и микромиром всегда находится измерительный прибор, влияние которого необходимо учитывать при анализе результатов любого эксперимента*².

Вторая составляющая — **релятивистская квантовая механика** — описывает квантовые эффекты в микросистемах, которые движутся со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме. К этому разделу квантовой теории тесно примыкает **квантовая теория излучения**, которая применяется для описания взаимодействия нерелятивистских заряженных частиц с квантами света — фотонами. Последние движутся со скоростью света и, следовательно, по определению являются релятивистскими частицами.

Релятивистская квантовая механика и квантовая теория излучения перекидывают мостик от нерелятивистской квантовой механики к **квантовой теории поля** — третьей важной составляющей квантовой теории. Эта теория последовательно описывает релятивистское поведение любых микрочастиц с учетом их рождения и уничтожения в процессах взаимодействия. Такая теория применяется для элементарных частиц начиная с расстояний порядка 10^{-12} — 10^{-13} см. К сожалению, даже простейшее изложение базовых понятий квантовой теории поля существенно выходит за рамки настоящего учебного пособия.

В хронологии читаемого авторами курса данное пособие отвечает третьей части. Первая часть курса посвящена основам математического формализма,

²Для полноты картины хочется заметить, что не все объекты, описываемые при помощи квантовой механики, имеют размеры менее 10^{-6} см. Например, сверхтекучий гелий, который можно налить в обычный термос, является многочастичной квантовой системой! И нейтронная звезда, характерный размер которой порядка 10 км, тоже представляет собой пример объекта, свойства которого подчиняются квантовым законам. Но сверхтекучесть, сверхпроводимость и нейтронные звезды — это редчайшие исключения из общего правила, которые в очередной раз демонстрируют многообразие, удивительную и парадоксальную красоту окружающего нас мира. При первом знакомстве с квантовой механикой эти исключения лучше не рассматривать вовсе, а ограничиться типичными квантовыми явлениями, которые начинают проявляться на масштабах порядка 10^{-6} см.

необходимого для построения нерелятивистской квантовой теории. Вторая часть включает в себя описание экспериментов, которые демонстрируют недостаточность применения идей классической физики для описания поведения микробъектов (молекул, атомов, элементарных частиц). Мы надеемся в скором времени выпустить пособия, отвечающие первым двум частям. Однако вопросы математического формализма квантовой механики и экспериментальной проверки законов микромира хорошо изложены во многих учебниках (см., например, [1], [2], [3] и [4]). В то время как понятного для студентов обоснования аксиоматики квантовой теории, по мнению авторов, не существует ни в одном известном учебнике. Ранее к курсу был выпущен задачник [5].

Понимание логики построения фундамента квантовой теории является ключом для успешного изучения всех дальнейших разделов квантовой физики. В настоящем учебном пособии будет показано, как попытка формализации процедуры взаимодействия измерительного прибора (макроскопического прибора, или, еще более кратко, макроприбора) с микросистемой, основанная на «почти очевидных» допущениях относительно математической структуры такого взаимодействия, практически неизбежно приводит к набору определенных квантовых аксиом. Эти аксиомы позволяют описать поведение микробъектов в терминах векторов состояния и линейных операторов, действующих на эти векторы в гильбертовых пространствах³.

Для иллюстрации процедуры измерения состояния микробъектов в учебном пособии будут использованы «мысленные эксперименты», которые описывают взаимодействие света с кристаллами турмалина и призмами Николя. Результат каждого такого «эксперимента» будет понятен исходя из здравого смысла. Мы покажем, что любому измерению можно сопоставить некоторый математический объект, который носит название **символа измерения**, или, бо-

³Напомним, что линейное пространство \mathcal{H} с операцией скалярного произведения и нормой, определяемой скалярным произведением, называется **гильбертовым пространством**. В гильбертовом пространстве строится математический аппарат нерелятивистской квантовой механики.

лее развернуто, **символа измерения Швингера**. Логика измерений подскажет нам правила операций с этими символами.

Юлиан⁴ Швингер — американский физик-теоретик, один из пионеров современной квантовой теории поля, совместно с Ричардом Фейнманом и Синьитиро Томонагой в 1965 году был удостоен Нобелевской премии по физике за создание квантовой электродинамики⁵. Ю. Швингер работал во многих областях теоретической физики. В том числе предложил очень красивую формулировку нерелятивистской квантовой механики на основе представлений о **селективных и неселективных измерениях**. Формализм Швингера отличается большой степенью абстракции. В нем используются многие понятия современной алгебры и теории групп. Поэтому данный подход, к сожалению, не получил широкого распространения в учебной литературе.

В настоящем пособии мы используем идеи швингеровского подхода для обоснования *одного из возможных наборов* аксиом, которые лежат в основании математического описания нерелятивистских квантовых систем. При этом иллюзорная «математическая строгость» будет сознательно принесена в жертву интуитивной ясности и физической наглядности, которые предпочтительны при первом знакомстве с весьма непривычными законами микромира. Авторы надеются, что подобный подход сделает взгляды Ю. Швингера на квантовую механику гораздо более доступными и популярными. С оригинальной трактовкой квантовой теории, изложенной самим Ю. Швингером, можно познакомиться по книгам [6] и [7].

Для тех, кто со временем пожелает глубже разобраться в основаниях квантовой теории, заметим, что развиваемый в данном учебном пособии подход можно рассматривать как трактующий символы измерения с точки зрения тео-

⁴В последнее время имя Швингера все чаще переводят на английский манер как Джулиан или даже Джулиус.

⁵Квантовая электродинамика — сокращенно КЭД — это наука о взаимодействии релятивистских заряженных частиц (электронов, пионов и т. д.) с квантами электромагнитного поля — фотонами. КЭД была исторически первой успешной реализацией идей квантовой теории поля для описания окружающего мира.

рии информации. Похожий взгляд (но без всяких ссылок на приоритет Ю. Швингера!) можно найти в появившейся недавно серии статей [8].

Среди учебников квантовой механики по духу к данному пособию ближе всего примыкают книги [9], [10], [11], [12] и [13].

Подчеркнем, что в настоящем учебном пособии аксиоматика нерелятивистской квантовой механики развита не до конца. В книге отсутствуют нестационарное уравнение Шредингера и определение оператора производной оператора по времени. Эти две аксиомы будут введены в учебном пособии, посвященном уравнению Шредингера и его приложениям.

Авторы выражают глубокую благодарность за обсуждение вопросов, затронутых в учебном пособии, д. ф.-м. н. С.П. Баранову, д. ф.-м. н. Д.И. Мелихову, к. ф.-м. н. М.Н. Смолякову, к. ф.-м. н. П.Р. Шараповой, студентам и аспирантам Н.В. Колотинскому, Н.М. Курносову, Г.А. Скорупскому и В.П. Сотникову. Отдельная благодарность добровольному редактору Маше Томс за капризную работу по выявлению многочисленных опечаток и рассогласований в первоначальном тексте пособия.

О своих замечаниях, предложениях по улучшению учебного пособия и найденных опечатках большая просьба сообщать авторам на адрес электронной почты 679nik@mail.ru. В заголовке письма, пожалуйста, указывайте «Учебное пособие. Аксиомы квантовой механики», чтобы ваше сообщение случайно не попало в спам. Авторы не ведут дискуссий по вопросам «альтернативной физики», ниспровержению релятивистской и квантовой теорий.