

Дж. Гринштейн и А. Зайонц

КВАНТОВЫЙ ВЫЗОВ

*Современные экспериментальные исследования
основ квантовой механики*

The Quantum Challenge

*Modern Research on the
Foundations of Quantum
Mechanics*

Second Edition

George Greenstein Arthur G. Zajonc

Amherst College

JONES AND BARTLETT PUBLISHERS *Sudbury, Massachusetts* 2006

Перевод с английского под редакцией А.В. Никулова,
с дополнением В.В. Аристова и А.В. Никулова

Издательский Дом «ИНТЕЛЛЕКТ» 2008

Предисловие редактора перевода

Мы предлагаем вниманию читателей перевод книги, которая должна быть интересна и полезна буквально всем физикам (и не только физикам), от студентов до академиков, от специалистов, чья деятельность тесно связана с проблемой основ квантовой механики, до тех, кто не сталкивался до сих пор с данной проблемой. Авторы книги на примере экспериментов, сделанных недавно или относительно недавно, раскрывают смысл утверждения выдающегося физика, автора широко известного курса лекций по физике, Ричарда Фейнмана о том, что "никто не понимает квантовую механику"¹. Основные, грандиозные достижения физики двадцатого века, от атомной энергетики до электроники, связаны с квантовой механикой. Поэтому утверждение Фейнмана, на первый взгляд может показаться только экстравагантным высказыванием. Принять его всерьез мешает комплекс студента на экзамене (Но я учил!), а также тот факт, что принципы квантовой механики широко используются при описании различных физических, и не только физических, явлений.

Столь широкое использование, на первый взгляд, кажется невозможным без понимания. Но история знает примеры использования без понимания. Одним из них является система Птолемея, которая использовалась не столь широко, как квантовая механика, но зато намного более продолжительное время. Система Птолемея достаточно хорошо описывала наблюдаемое движение небесных светил, но это не значит, что те, кто ею пользовался, понимали реальную механику небесных сфер. Квантовая механика появилась спустя почти два тысячелетия после системы Птолемея, но можно сказать, что они имеют общую причину возникновения и предмет описания – это наблюдения. И здесь мы подходим к главному предмету спора между основоположниками квантовой механики, прежде всего между Эйнштейном и Бором. Авторы книги многократно обращаются к этой проблеме и можно сказать, что оно является сквозной темой книги. Используя аналогию с системой Птолемея эту проблему можно свести к вопросу: «Возможна ли система Коперника для квантового мира?»

Система Коперника, в отличие от системы Птолемея, описывает не только результаты наблюдений, которые могут быть получены с Земли, но и «механику небесных сфер», т.е. реальное движение планет. Мало кто может усомниться в том, что Земля и другие планеты действительно вращаются вокруг Солнца и мы, наблюдая это движение, выявляем объективную реальность, существующую независимо от нашего наблюдения. Эта объективно существующая реальность, как подчеркивал Эйнштейн, в течение столетий была целью научного исследования. Наука выявляла элементы объективной реальности с помощью наблюдений, экспериментов, измерений и на основании этого создавалось по возможности полное описание изучаемой реальности. Но в начале 20 века физики столкнулись с не преодоленной до сих пор проблемой в описании атомного мира. Полученные результаты наблюдений и экспериментов не позволяли создать полное и непротиворечивое описание процессов происходящих в этом мире, и принцип дополнительности Бора фактически постулировал безнадежность любых попыток создать такое описание. Квантовая механика возникла и развивалась не как описание реальности, а как описание результатов наблюдений. Копенгагенская интерпретация этой теории фактически зафиксировала этот статус квантовой механики. Авторы книги многократно подчеркивают, что не все создатели квантовой механики согласились с этим статусом. Сторонники Копенгагенской интерпретации, Бор, Гейзенберг и др., придерживались точки зрения, известной в философии как позитивизм. Согласно этой точке зрения, не имеет смысла говорить о том, что невозможно наблюдать и поэтому квантовая механика является полной теорией.

Здесь следует вспомнить, что сторонники позитивизма конца 19 века, Оствальд, Мах и др., отвергали статистическую механику Максвелла и Больцмана. Сегодня это уже мало кто

помнит, и еще в 1914 году выдающийся физик Мариан Смолуховский писал:² «Сегодня нам уже не легко представить тот образ мышления, который господствовал в конце прошлого столетия. Ведь в то время научные деятели Германии и Франции были убеждены в том, что кинетическая теория атомов уже сыграла свою роль». Чтобы подчеркнуть, что это было не так давно от времен создания квантовой механики, следует вспомнить, что среди тех, кто «несколько отрицательно» относился к теории атомов был Макс Планк,³ а в преодолении позитивизма важную роль сыграла работа Эйнштейна о броуновском движении 1905 года.

Спор Эйнштейна с Бором и другими сторонниками Копенгагенской интерпретации, фактически повторяет, правда на более глубоком уровне, спор Больцмана с Оствальдом и другими сторонниками позитивизма конца 19 века. Авторы книги вполне оправдано используют аналогию с термодинамикой и статистической физикой для объяснения различия между ортодоксальной квантовой механикой и теорией скрытых параметров. Более глубокая теория, необходимость которой отстаивал Эйнштейн и которая известна как теория скрытых параметров, призвана обосновать квантовые принципы, подобно тому, как статистическая физика обосновала принципы термодинамики. Экспериментальные исследования, проведенные в начале 20 века доказали правоту Больцмана, отстаивавшего возможность более глубокого описания термодинамических процессов. Созданная им и другими выдающимися физиками 19 века статистическая механика стала общепризнанной составной частью современной физики. Но квантовый мир оказался настолько странным, что до сих пор не удалось создать приемлемой теории, которая описывала бы не только результаты наблюдений, но и реальность. Более того, эксперименты по проверки неравенств Белла поставили под сомнение само существование объективной реальности. Это достаточно сложно понять и тем более принять и одним из достоинств книги, является то, что даже столь сложные проблемы изложены в ней в доступной форме, так, что читатель сможет понять суть и глубину этой фундаментальной проблемы.

Эйнштейн так и не принял позитивизма Копенгагенской интерпретации и считал, что должна быть создана более полная теория, описывающая не результаты наблюдений, но реальность, которую эти наблюдения выявляют. С Копенгагенской интерпретацией были не согласны и другие основоположники квантовой механики, Планк, Шредингер, де Бройль. Мы должны констатировать, что создатели квантовой механики не поняли, что они создали и утверждение Ричарда Фейнмана о том, что "никто не понимает квантовую механику", относится, прежде всего, к ним. И здесь мы сталкиваемся еще с одним из многочисленных парадоксов квантовой механики. Многие физики, учившие квантовую механику, уверены, что они ее понимают. То есть они уверены, что они понимают, то что не понимали создатели квантовой механики. Причина этого парадокса может стать понятной, если принять во внимание ту ситуацию в истории квантовой механики, отмеченную во Вводной части книги. «После 1930-ых годов последовал длительный период, в течение которого большинство физиков направляли свое внимание в иную сторону, и развитие понимания основ квантовой механики привлекало внимание только относительно небольшого числа людей». Большинство физиков занялось решением конкретных проблем, не просто игнорируя проблемы понимания квантовой механики, но и считая их не имеющими смысла философской ерундой. Такой подход увенчался грандиозными успехами. Но следует заметить, что Эрвин Шредингер еще более полувека назад предупреждал об опасности «варварства специализации», к которому он может привести.⁴

Одним из главных достоинств книги является то, что она способствует преодолению варварства специализации. Парадоксальность квантовой механике в ней показывается на примерах из различных разделов физики, от квантовой оптики до сверхпроводимости. Книга способствует пониманию того, что принципы квантовой механики, широко применяющиеся в различных областях физики и не только физики, имеют общую парадоксальную основу. С наибольшей наглядностью парадоксальность квантовой механике проявляется в экспериментах по интерференции отдельных частиц на двух щелях, рассмотренных в первой главе книги. Ричард Фейнман подчеркивал, что в этих экспериментах проявляется сущность квантовой механики и что: «В действительности, в этом эксперименте есть только тайна,

составляющая основу всей квантовой механики»⁵. Если кто-то думает, что он понимает квантовую механику, пусть он ответит на вопрос: «Как может частица, например электрон, проходить сразу через две щели?» А если электрон не проходит через две щели, то, как может наблюдаться интерференционная картина?

Про интерференцию на двух щелях многие поколения студентов узнавали уже в начале изучения квантовой механики и поэтому большинство физиков не воспринимают это явление как тайну. И здесь следует вспомнить еще одно мудрое высказывание Ричарда Фейнмана о том, что понимание это часто только привычка. В случае квантовой механики это высказывание следует отнести не к отдельным физикам, а целым поколениям физиков, у которых понимание, как привычка, формировалась, начиная со студенческих времен. Но если мы что-то выучили, это не значит, что мы это поняли. Привычка часто бывает только иллюзией понимания. По крайней мере, если понимание – это только привычка, то невозможно понять ничего принципиально нового, так как привычка, по своей сути это то, что отрицает все новое. Поэтому важнейшим достоинством книги является то, что она способствует избавлению от иллюзии понимания, связанной с привычкой.

Еще одним достоинством книги является то, что авторы делают это наиболее подходящим для этого способом. В отличие от некоторых книг, авторы которых скрывают непонимание за сложными формулами и пространными рассуждениями, авторы данной книги стремятся изложить суть очень сложных проблем с предельно возможной доступностью. Из-за отсутствия сложных формул и малопонятных рассуждений книга может восприниматься как популярное издание, содержание которого может быть легко понято. Но это также является иллюзией. Проблемы, рассматриваемые в книге, столь сложны, что их суть трудно понять даже в популярном изложении. Чтобы это подчеркнуть, следует отметить, что Ричард Фейнман в своих знаменитых Лекциях по физике⁶ утверждает, что парадокс Эйнштейна - Подольского – Розена не является парадоксом. Эти Лекции были изданы незадолго до знаменитой теперь работы Белла «Парадокс Эйнштейна - Подольского – Розена»⁷.

В первой из двух глав книги, посвященных ЭПР парадоксу и работе Белла, отмечается, что работа Белла оставалась почти совсем незамеченной, и только постепенно физики осознавали ее значение. Но даже через двадцать лет Дэвид Мермин писал, что по вопросу о фундаментальных последствиях проверки неравенств Белла физики разделились на "индифферентное" большинство и "озабоченное" меньшинство.⁸ Сейчас о работе Белла слышали многие. Но это не значит, что ее истинное значения многими понимается. Вот, например, цитата из недавно переведенной книге, посвященной проблеме квантовых вычислений: «Эйнштейн, Подольский и Розен хотели показать, что квантовая механика неполна. Для этого они намеревались продемонстрировать, что в квантовой механике не хватает некоторых существенных «элементов действительности». Они надеялись заставить мир вернуться к классическому взгляду на законы природы в соответствии с которыми системам можно приписать свойства, существующие независимо от выполняемых над этими системами измерений. К огорчению Эйнштейна и его соавторов, большинство физиков не признало эти доводы убедительными»⁹.

Многие из тех, кто учил квантовую механику, почему-то уверены, что они ее понимают лучше ее создателей. В отличие от тех, кто учил, один из тех, кто создавал квантовую механику, Эрвин Шредингер, не считал, что Эйнштейн, Подольский и Розен хотят только «заставить мир вернуться к классическому взгляду на законы природы». Шредингер ввел понятие *Verschränkung*¹⁰ или *Entanglement*¹¹ именно в связи работой ЭПР¹². Хотя понятие *entanglement* было введено более 70 лет назад, и Шредингер считал, что оно выражает сущность квантовой механики,¹³ оно не было широко известно до последнего времени. Поэтому у нас пока нет устоявшегося перевода этого термина. Некоторые авторы переводят его как запутанность,^{9,14} а другие как перепутанность¹⁵. Мы придерживаемся второго варианта перевода. В литературе используется также термин ЭПР корреляция¹⁶ (EPR correlation or Einstein - Podolsky – Rosen correlation). Этот термин в наибольшей степени отражает суть обозначаемого понятия, введенного Шредингером именно в связи работой

ЭПР¹². Он подчеркивает и не дает забывать о парадоксальности этого квантового принципа. Эйнштейн, Подольский и Розен в своей работе¹² не допускали возможность такой корреляции, так как она нарушает или принцип локальности, или принцип реализма. Существование ЭПР корреляции заставляет нас признать возможность мгновенных воздействий на любом расстоянии, т.е. нелокальность, или признать, что эксперимент не выявляет даже элемента объективной реальности. Это особенно важно помнить, так как перепутанность, или ЭПР корреляция, лежит в основе идеи квантовых вычислений, а также других идей, реализацию которых некоторые авторы^{14,17} считают второй квантовой революцией. Для воплощения этих идей необходимо глубоко понимать парадоксальную сущность ЭПР корреляции. Данная книга, возможно как никакая другая, может способствовать такому пониманию.

Главной целью книги является стремление в наиболее доступной форме рассказать о наиболее актуальных проблемах связанных с основами квантовой механики, которыми эксперты в данной области занимаются буквально сейчас. Она дает возможность всем физикам, начиная со студентов младших курсов, узнать, что происходит на переднем крае исследования наиболее фундаментальных проблем квантовой механики. Авторы во Вводной части книги пишут о конференции, которую они организовали и которая вдохновила их написать данную книгу. Эта конференция состоялась незадолго до смерти Белла, в 1990 году. С тех пор прошло множество конференций, посвященных обсуждению основ квантовой механики. Здесь можно отметить конференции, организуемые с 2000 года в Университете Вахйо, Швеция¹⁸. Проблемы основ квантовой механики остаются предметом острых и активных дискуссий и интенсивного экспериментального исследования. Данное, второе издание книги, дополнено новыми результатами, появившимися после публикации первого издания. Второе издание было опубликовано недавно, в 2006 году. Но данная область исследований столь быстро развивается, что уже и с тех пор появились новые результаты, которые рассматриваются в дополнении к переводу книги. Мы постарались написать дополнение в той же доступной форме, как и авторы книги. Изложение только что полученных результатов и активно обсуждающихся фундаментальных проблем в предельно доступной форме, которое удалось авторам книги, – это то главное, что восхищает в ней. Книга заставляет думать о самых глубоких проблемах физики и эта является ее основным достоинством.

Литература

Предисловие редактора перевода

1. R. P. Feynman, *The Character of Physical Law*, (MIT Press, Cambridge, MA), p.129 (1967).
2. М.Смолуховский, «Границы справедливости второго начала термодинамики», УФН **93**, 724 (1964). (M.Smoluchowski, "Gultigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Warmetheorie", in *Vortrage uber kinetische Theorie der Materie und der Elektrizitat* (Mathematische Vorlesungen an der Universitat Gottingen, VI). Leipzig und Berlin, B.G.Teubner, 1914, p.87).
3. Макс Планк, «Научная автобиография», УФН **64**, 625 (1958). (Max Planck, *Wissenschaftliche Selbstbiographie*, Leipzig, 1955).
4. Э. Шредингер, «Наука и гуманизм», НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Москва – Ижевск, 2001
5. R. P. Feynman and A. R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals*, McGraw-Hill, New York, 1965.
6. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, *Фейнмановские лекции по физике. т. 9, Квантовая механика*. Москва «Мир» 1967, стр. 145-146.
7. J. S. Bell, "On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox", *Physics* **1**, 195, 1964.
8. N.D. Mermin, "Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory" *Physics Today*, **38**, 38 (1985).

9. М. Нильсен, И. Чанг, *Квантовые вычисления и квантовая информация*. Перевод с английского под редакцией М.Н. Вялого и П.М. Островского, Москва “Мир” 2006, стр. 155.
10. E. Schrodinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik", *Naturwissenschaften* 23, 844-849 (1935)
11. E. Schrodinger, "Discussion of probability relations between separated systems," Proc. Cambridge Phil. Soc, **31**, 555-563 (1935)
12. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
13. Caslav Brukner, Marek Zukowski, Anton Zeilinger, «The essence of entanglement», quant-ph/0106119.
14. К.А.Валиев, “Квантовые компьютеры и квантовые вычисления”, *УФН* **175**, 3 – 39 (2005).
15. Д. Боумейстер, А. Экерт, А. Цайлингер (ред.) *Физика квантовой информации. Квантовая криптография. Квантовая телепортация. Квантовые вычисления*. Перевод с английского под редакцией С.П. Кулика и Т.А. Шмаонова, изд. Постмаркет, Москва, 2002.
16. Э. Стин, Квантовые вычисления. Перевод с английского И.Д. Пасынкова, изд. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Москва – Ижевск, 2000.
17. J. P. Dowling, G. J. Milburn, «Quantum Technology: The Second Quantum Revolution» quant-ph/0206091.
18. The international conference on quantum foundations: QTRF - Quantum Theory: Reconsideration of Foundations and FPP - Foundations of Probability and Physics, 2000 – 2007, see at <http://www.vxu.se/msi/aktuellt/konferens/index.xml>

Предисловие авторов книги

Для второго издания, мы сделали три дополнения:

1. Мы дополнили книгу новыми данными. В прошедшее время исследования основ квантовой механики проводились особенно активно, и в последние годы были сделано много новых, удивительных экспериментов.
2. Мы добавили описание экспериментов, доступных для выполнения в студенческих лабораториях. Благодаря необычно быстрому прогрессу технологии, наблюдающемуся в последние годы, многие из пионерских экспериментов, которые мы описываем в этой книге, могут быть сделаны в настоящее время при весьма скромном бюджете и могут быть включены в учебный план студентов. В Приложении мы даем краткий обзор этих захватывающих новых результатов.
3. Мы добавили новую главу о квантовой информации и квантовым вычислениям (Глава 9).

Мы хотели бы сказать несколько слов о философии, которой мы руководствовались при написании этой книги. В своей Нобелевской речи, Ричард Фейнман писал: «Я был вдохновлен замечаниями в тех книгах; но не разделами, в которых все доказывалось и демонстрировалось, [но] замечанием о факте, что это не имеет никакого смысла... Я воспринимал это как вызов и вдохновляющую идею»¹.

Большие проблемы науки, подобно выдающимся произведениям искусства, бросают нам радикальный вызов. Но энтузиазм того, кто реально столкнулся с такими проблемами, обычно подавляется учеными, занимающимися конкретными научными проблемами. Студенты, с другой стороны, часто изолированы от этих очень острых и волнующих вопросов. Мы хотим устранить эту изоляцию.

Мы убеждены, что суть многих фундаментальных научных проблем может быть рассмотрена с интеллектуальной строгостью на уровне продвинутого студента. Монография, написанная на конкретную тему, не требует, в большинстве случаев, широты понимания фундаментальных проблем. С другой стороны, обсуждение этих проблем на уровне популярной книги, часто бывает не достаточно для их активного понимания. Чаще всего, читатель популярной книги должен слепо верить тому, о чем пишет автор и пассивно воспринимать изложенные факты и утверждения. В отличие от этого, мы хотели бы дать возможность читателю активно размышлять о рассматриваемых проблемах самому или самой. Мы стремимся представить перед читателями одну из самых грандиозных проблем, с которыми сегодня столкнулась физика.

Учебник, обычно, дает некоторую информацию и инструктирует своих читателей в методах и подходах в своей области. Цель данной книги совсем иная. Концентрируя внимание на нерешенной, фундаментальной проблеме, она призвана вдохновлять. Как свидетельствовал Ричард Фейнман в своей Нобелевской речи, удивительно веселое возбуждение возникает от пришедших на ум глубочайших вопросов, которые мы можем себе поставить. Такие вопросы должны воодушевлять всех ученых. Многие студенты были впервые привлечены к изучаемой ими области науки, когда детьми читали популярное изложение важных нерешенных проблем. Некоторые из них, возможно, ждут с тех пор, когда смогут начать раскрывать тайны Природы. Мы надеемся, что эта книга позволит им, наконец, начать.

Благодарности

При написании этой книги мы получили неоценимую помощь от коллег и друзей. Мы хотим выразить особенную признательность Дэниелю Гринберджеру, Дуайту Лахману, Дэвиду Мермину, Абнеру Шимонай, и Дэниелю Веллеману, которые прочли части рукописи и дали нам ценные советы. Мы также рады выразить благодарность Эрбе Бернштейну, Кеннену Ягеннетан, и Антону Зеилинджеру за помощь; Мэтью Коллетт, Джонатан Фридман, Пауль

Квоят, Герард Ремпе, Питер Шминдт, и Дэвид Винеланд за полезное обсуждение их работ; и Роберту Хайлборн за помощь с экспериментами на студенческом уровне. Мы хотели бы поблагодарить также всех наших коллег за неисчислимые, увлекательные и стимулирующие беседы. Мы также благодарим Эллен Фелда и Паоло Карини за их терпеливую и неустанную помощь в создании рукописи.

Джордж Гринстейн
Артур Г. Зайонц
Amherst, MA,
Весна, 2005

Введение.

Недавно, авторы данной книги решили организовать конференцию, посвященную основам квантовой механики.

Конференции – это насущный хлеб ученого, работающего в той или иной области науки. Лекции, представленные на конференциях, способствуют более глубокому пониманию последних достижений в этой области. Часто эти лекции издаются отдельной книгой, которая дает представление о состоянии дел в данной области науки. Но как это ни странно, для участников конференции часто наиболее ценным являются не эти лекции. Скорее, более ценным является то, что происходит в перерывах между формальными презентациями: краткая беседа за кофе, случайная встреча в коридоре, научный спор, который не прерывается и во время обеда. Мы решили организовать конференцию, которая состояла бы только из таких неофициальных непринужденных бесед.

Мы решили собрать ученых, чтобы они в течение недели могли обсудить наиболее насущные и фундаментальные проблемы квантовой физики. Число участников должно было быть ограниченным: кроме местных физикам, планировалось пригласить только небольшое число всемирно известных, выдающихся специалистов в данной области. Мы решили, что для полного погружения в обсуждение важных проблем участники конференции должны проживать в комфортных условиях под одной крышей и совместно получать удовольствие от вкусной еды. Мы решили организовать встречу в Амхерст Колледже, нашем родном институте.

После восьми месяцев организации и подготовки, конференция началась с приема на дальней террасе которая, до недавнего времени, было студенческим общежитием колледжа. Учебный год только что закончился; по мощеным дорожкам прохаживались последние из отбывающих студентов, небольшая группа вошла в один из корпусов, чтобы навести порядок, переставить новую мебель, и постелить свежие простыни на кровати. Ярко светило солнце, пушистые белые облака плыли по великолепному синему небу, и участники встречи с энтузиазмом жали друг другу руки. Некоторые прибыли из Европы или пересекли Соединенные Штаты, одни добирались в течение многих часов, в то время как другие пришли пешком из своих офисов. Одни из них сотрудничали друг с другом регулярно, другие не виделись годами; но только немногие знали друг друга только по именам в научных публикациях, и встречались впервые. Чемоданы стояли вокруг, оставленными без присмотра, в то время как их владельцы, и не думая относить их в свои комнаты, были погружены в беседу.

На следующее утро, после изысканного завтрака, мы собрались вокруг большого стола на первом этаже. Один из участников встал, чтобы произнести короткую речь. Он не говорил и пяти минут как кто-то прервал его замечанием. После этого кто-то еще сделал комментарий к комментарию - и мы закончили.

В течение остальной части недели, участники собирались вокруг стола для обсуждения некоторых из самых волнующих и глубоких проблем современной физики - проблем которые являются предметом данной книги. Но конференция проходила не только вокруг того стола. Она проходила также в саду, и на улицах Амхерста, когда двое или трое участников отделялись от группы и неторопливо прогуливались в стороне. Она проходила во время еды, которая была неизменно обильна и неизменно восхитительна. Беседа могла перескакивать от темы к теме с удивительной легкостью - от смысла недавнего эксперимента к состоянию Нью-Йоркской погоды, от кулинарных изысков к возможно новой теореме, которую, как думали четверо из участников, они только что открыли (эти четверо выходя однажды вечером вместе с остальными из кино, откуда они не уходили в течение многих часов, наконец поняли, что их многообещающий, новый подход является, вероятно, не более чем тупиком).

Однажды после полудня, все мы отправились на пикник на дачу Гринштейна. Там Абнер Шимонай, который имеет две степени доктора наук, по философии и физике, и чье имя будет появляться часто на страницах этой книге, представил на обсуждение правила и стратегию игры в крокет с той же самой тщательностью, с какой он относится к изучению квантовой механики. Девид Мермин, содержание статьи которого мы опишем в Главе 5, играл на фортепьяно в четыре руки с Виктором Вайскопфом, прежний генеральный директор ЦЕРНА. Позднее, вечером Вайскопф совместно с Барбарой Гринштейн, которая является скрипачом, исполнял сонаты Бетховена. Ветер доносил через открытое окно, как Хейды Зайонц громко протестовала против намерения своего сына выбить сильным ударом ее крокетный шар с корта: "Но я - твоя мать," кричала она, в то время как шар летел в кусты.

В другой раз, Гринштейн обнаружил, что Джон Белл и Курт Готтфрид удалились в сторону. Читатель этой книги вскоре увидит, что проблемы, которые ставит квантовая механика, столь же трудны, как и глубоки. Среди ученых, работающих в этой области, нет согласия относительно того, как эти проблемы могут быть решены. Временами разногласия, проявлявшиеся в течение конференции, обострялись. Одно из таких обострений произошло как раз в тот день, когда схлестнулись Белл и Готтфрид. В течение многих лет Белл с удивительным блеском и глубиной пытался постичь основы квантовой теории, и он утверждал, что теория заражена фундаментальными противоречиями. Готтфрид, напротив, утверждал, что загадочность квантовой механики сильно преувеличена, и что в действительности трудности, с которыми столкнулась теория, не глубже чем во многих других разделах физики. В тот день, споры между ними обострились.

Гринштейн был встревожен. Белл и Готтфрид столкнулись лбами, не обращая внимания на остальных. Неужели опять спорят? Не приведет ли спор к взрыву эмоций? Гринштейн украдкой подошел подслушать - и увидел, что они спокойно сравнивают свои фотоаппараты.

Мы оба оцениваем ту конференцию как очень важный опыт. Мы принимали участие в одном из самых глубоких наслаждений, которые может дать занятие наукой - недельным дебатам, по проблемам, столь же важным, как и таинственным; дебатам интенсивным, страстным, и регулярно прерываемым взрывами смеха. В течение конференции, уже вошедшие в историю споры между основоположниками квантовой механики, приобретали новую актуальность в процессе обсуждения последних достижений экспериментаторов.

Начиная со своего появления, в первые десятилетия двадцатого века, квантовая механика, наряду с теорией относительности Эйнштейна и теорией эволюции Дарвина, стала одной из основных составляющих современной науки. Вряд ли есть хотя бы одна область физики, которую она не преобразила бы до неузнаваемости. Однако, теория стойко не поддается интерпретации. Она дает формальный набор инструкций для вычисления результатов наблюдений микроскопических процессов, но не может создать полную картину

того, как эти процессы происходят.

Кажется возможным, что такая картина может быть никогда не достигнута. Квантовая механика учит, например, что частица может пройти одновременно через две щели и распределение множества таких частиц на экране создает интерференционную картину. Она учит, что измерения не могут быть абсолютно точными вследствие фундаментальной неопределенности. Она учит, что даже представления о причинно следственных связях должны быть пересмотрены. Что мы можем из этого понять?

Острые споры относительно интерпретации квантовой механики бушевали до начала 1930-ых годов. Основоположники теории, хорошо понимая проблему интерпретации, посвящали много усилий для осознания ее таинственности. Две выдающихся физика доминировали в споре об интерпретации.

С одной стороны, Нилс Бор породил так называемую Копенгагенскую интерпретацию, согласно которой всякая надежда на достижение общей картины объективной реальности должна быть оставлена. Он утверждал, что квантовая теория, может обеспечить только предсказания результатов измерений - но, в отличие от всех предыдущих теорий, она неспособна обеспечить полного представления о том "как природа делает это". Бор утверждал, что даже желание искать такое полное представление является наивным заблуждением. Все представления человека выражаются в терминах классических понятий, возникших из непосредственного опыта, которым он обладает. Но квантовый мир является принципиально неклассическим. Поэтому квантовая реальность не может быть понята в рамках прежних понятий - даже в принципе.

С другой стороны, Альберта Эйнштейна никогда не оставляла неудовлетворенность квантовой механикой. Своим известным изречением, "Бог не играет в кости с вселенной", он выразил несогласие с вероятностной природой теории. В 1949 году, отвечая на почести, расточаемые в честь его семидесятилетия, он подчеркнул, что теория пренебрегла как раз тем, что всегда было целью науки: "полным описанием любой (частной) реальной ситуации (как она существует для всех независимо от любого акта наблюдения или доказательства)"¹. Он подчеркивал, что науки в течение столетий считала своей целью изучение объективно существующей реальности. Это привело к созданию новых понятий, которые должны были соответствовать этой реальности, и такие научные понятия как силы, энергии и импульса были выработаны в течение десятилетий борьбы и споров. Они отражают фундаментальные свойства реального физического мира, и поэтому могли быть с успехом использованы для его понимания. Но Копенгагенская интерпретация настаивает, что эта традиция, которая определила саму природу научного процесса, должна быть теперь оставлена.

Споры между основоположниками квантовой механики не привели к какому-либо общепризнанному результату. Скорее, при нескольких важных исключениях, они были просто отложены в долгий ящик. После 1930-ых годов последовал длительный период, в течение которого большинство физиков направило свое внимание в иную сторону, и развитие понимания основ квантовой механики привлекало внимание только относительно небольшого числа физиков, которые продолжали искать решение этих проблем. В течение этого периода, трудности интерпретации квантовой механики большей частью физического сообщества были в значительной степени упрощены и отменены, как не имеющие смысла и только отвлекающие внимания философские проблемы. Это не значило, однако, что проблемы интерпретации были решены. В действительности, интерпретация квантовой теории осталась столь же неясной, как и прежде: в своей книге *Характер Физических Законов*, Ричард Фейнман со всей определенностью заявил, что "никто не понимает квантовую механику".

Однако, недавно, возобновленные усилия решить проблему интерпретации квантовой механики получили новый импульс - и именно этим было вызвано наше желание организовать конференцию. К этому прогрессу привели многие достижения в столь разных областях как физика, математика и философия, но из этих достижений следует выделить два особенно важных прорыва. Первый прорыв, теорема Джона Белла, опубликованная в 1964 году, заставило изменить представления о квантовой механике, уже ставшие к тому времени привычными. Теорема Белла показала, что спор об основах квантовой механики не был

только чисто философским спором об интерпретации. Вопреки господствовавшему мнению, предмет этого спора стал доступен экспериментальному исследованию. Эти исследования, которые, в конечном счете, были проведены, существенно прояснили вопрос о том, как мы должны интерпретировать не только квантовое описание, но и результаты эксперимента. Белл, фактически, играл основную роль в дискуссиях на нашей конференции; трагично, что он неожиданно скончался, буквально через несколько месяцев после возвращения с конференции.

Вторым важным прорывом стал огромный прогресс технологии, происходивший в последние годы. Это позволило нам ставить эксперименты с единичными квантовыми состояниями любого типа. До недавнего времени, манипуляции с индивидуальными частицами были только мечтой теоретика. Экспериментаторы обычно имели дело, по крайней мере, с миллионами и триллионами частиц. Но сейчас наши новейшие технологии дают экспериментальные методы, которые позволяют нам иметь дело с отдельными атомами, отдельными электронами, отдельными фотонами. При использовании таких методов, недавно были выполнены эксперименты, о которых основатели квантовой механики могли только мечтать. При наших обсуждениях за круглым столом эти важные эксперименты рассматривались многократно, преобразуя то, что в течение многих десятилетий было абстрактным рассуждением в предмет экспериментального изучения. В этой книге мы детально опишем многие из этих экспериментов, показывающих квантовые эффекты в полном смысле слова.

Эти эксперименты не решили проблем, так волновавших создателей квантовой механики. Напротив, по нашему мнению, современные исследования сделали парадоксальный характер теории только более очевидным. Главным выводом нашей книги является то, что квантовые явления вынуждают нас к радикальному пересмотру наших представлений о физическом мире, пересмотру, который пока не достигнут ни в каком смысле. Наша цель не состоит в том, чтобы выполнить эту задачу, поскольку мы понятия не имеем, как это могло бы быть сделано. Скорее, наша цель состоит в том, чтобы высветить, насколько это возможно, трудности понимания квантовой механики.

Авторы книги, стремящиеся осветить подобные проблемы, сталкивались с двумя дополнительными трудностями. Так как теоретический аппарат квантовой механики сложен и непривычен, авторы учебников вынуждены концентрировать внимание на сложных формальных аспектах теории. Большинство учебников, если они вообще обсуждают проблемы интерпретации, делает это очень кратко. На уровне популярной книги, напротив, вопросам интерпретации часто уделяется значительное внимание; но вследствие их непрофессионального характера, уровень такой интерпретации неизбежно ограничен уровнем понимания проблемы, который доступен читателю.

Книга *Квантовый Вызов* предназначена заполнить пробел между этими двумя подходами. Мы считаем, что проблема может быть изложена с разумной строгостью и интеллектуальной честностью на уровне, доступном студенту, изучающему физику, математику или технические науки. В частности, для понимания проблемы не обязательно иметь познания о гильбертовом пространстве, или квантовой электродинамике. Мы стремимся достичь понимания, не выходя за пределы простых вычислений и представлений нерелятивистской квантовой механики. Уникальной особенностью нашего подхода является то, что мы стремимся представить фундаментальные проблемы в экспериментальном контексте, в котором трудности интерпретации становятся очевидны при рассмотрении реальных современных экспериментов.

Что касается аудитории, на которую мы ориентировались, наша цель чисто педагогическая. Цель состоит в том, чтобы как можно больше читателей смогло прочесть нашу книгу. Поэтому мы рассматриваем только те эксперименты, которые могут с наибольшей наглядностью выявить смысл того или иного основополагающего принципа квантовой механики: сжатые состояния как пример принципа неопределенности, квантовые биения как пример дополнительности. Мы не стремились рассматривать квантовую механику во всей ее полноте, и мы были вынуждены оставить без внимания много

прекрасных работ и много интересных проблем. Мы также не рассматриваем подробно все разнообразие альтернативных интерпретаций квантовой механики, и совсем новых теорий, которые были предложены, и уже стали известны. Мы уверены, что одним из главных достоинств является краткость.

Еще одним из достоинств книги мы считаем то, что она написана на языке читателей, предназначенных для нее. В данном случае наши читатели – это ученые, инженеры и математики; и мы предполагаем, что большинство из них придерживаются представлений о природе физической реальности, сформированных их обычным повседневным опытом. Однако по мере чтения книги станет очевидно, что вызовы нашему пониманию, к которым вынуждает квантовая механика, всесторонне расширяют наши представления о природе физической реальности, и о том, в чем состоит цель науки. Описываемые нами исследования делают намного более ясным тот факт, что привычные представления могут быть совершенно неадекватны реальности. Так как всестороннее обсуждение этих проблем увело бы нас далеко за рамки этой книги, мы должны только сообщить читателю, что современное исследование основ квантовой механики породило обширную философскую литературу. Ученые изо всех сил пытаются найти путь понимания, который мог бы дать должную оценку удивительной ситуации, которую выявили исследования.

Больше не имеет смысла игнорировать парадоксальность явлений квантовой физики. Атом за атомом, момент за моментом, мы можем исследовать их, поражаясь результатам. Современные исследования продвинулись далеко вперед по сравнению с проблемами, волновавшими основоположников квантовой механики, к таким проблемам как квантовые биты и квантовые неразрушающие измерения, квантовая нелокальность и квантовое стирание памяти. Укрепляется новое состояние духа, которое находит удовольствие в самой противоречивости квантовых явлений. С этой точки зрения, таинственность квантовой механики очаровывает, призывая нас задавать сколь угодно глубокие вопросы. Возможно, кто-то, размышляя достаточно долго об этой таинственности, придет к новому взгляду, новой идее, которая позволит, в конце концов, понять квантовый мир.

Мы знаем, что в большинстве учебников таинственность квантовой механики в значительной степени скрыта за сложными формулами и стилем изложения, который не позволяет сомневаться в написанном. Эта книга предназначена исправить эти недостатки изложения более широким и более свободным взглядом на проблему. Даже при формально не очень высоком уровне изложения квантовой механики, можно понять многие из ее тайн. Любая новая проблема восхищает, через сомнение она рождает в нас иное более честное представление о механизме устройства мира. Мы надеемся, что каждый читатель найдет, как и мы, что загадки квантовой теории это плоды, которые смакуют, и к которым возвращаются снова и снова; и мы написали эту книгу в надежде, что наши читатели будут участвовать в обсуждении этих удивительных тайн, привлекающих все большее внимание. Удовольствие, которое их ждет, столь же длительно, как и глубоко.

Что описывает квантовый формализм?

Дополнение к переводу

Введение к дополнению

Авторы книги поставили перед собой очень сложную задачу – объяснить как можно более понятно, на уровне не специалиста, то, что не всегда понимают многие специалисты. Нильс Бор утверждал: «Если человек не шокирован квантовой теорией, он ее просто не понял». Мы надеемся, что авторам книги удалось шокировать, по крайней мере, некоторых читателей. Это тем более важно, что имеет место достаточно предвзятое отношение к проблеме основ квантовой механики. Наиболее распространенной является предвзятость, связанная с тем, что квантовую механику учили уже многими поколениями физиков, и это неизбежно притупило то чувство удивления, без которого, согласно Бору, нельзя понять квантовую механику. Многие, прочитав первую главу книги, могут сказать: «Но об интерференции электронов на двух щелях написано в начале Первой главы III тома¹ широко известного курса Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица. Что же нового хотят нам сказать авторы книги *Квантовый вызов?*». Действительно, с формальной точки зрения в описании «волн материи» ничего не изменилось со времен создания квантового формализма и первого наблюдения дифракции электронов. Но изменилось отношение экспертов, принадлежащих, по классификации Дэвид Мермин², к озабоченному меньшинству. Как подчеркивают авторы книги, решающую роль в этом изменении отношения экспертов к квантовой механике сыграла работа Белла «Парадокс Эйнштейна - Подольского – Розена»³.

Чтобы понять, в чем состоит суть этих изменений приведем отрывок из той же Первой главы книги Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица¹: «Процесс измерения обладает в квантовой механике очень существенной особенностью – он всегда оказывает воздействие на подвергаемый измерению электрон, и это воздействие при данной точности измерения принципиально не может быть сделано сколь угодно слабым. Чем точнее измерение, тем сильнее оказываемое им воздействие, и лишь при измерениях очень малой точности воздействие на объект измерения может быть слабым. Это свойство измерения логически связано с тем, что динамические характеристики электрона появляются лишь в результате самого измерения; ясно, что если бы воздействие процесса измерения на объект могло быть сделано сколь угодно слабым, то это значило бы, что измеряемая величина имеет определенное значение сама по себе, независимо от измерения.» И если мы теперь вспомним, что написано в Главе 5 об ЭПР аргументации, то мы увидим, что интерпретация Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем соотношения неопределенности совпадает с ЭПР интерпретацией и что в статье ЭПР⁴ как раз и предложен способ измерения при сколь угодно слабом воздействии на объект измерения. Более того, далее в книге Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица фактически повторяется критерий существования элемента физической реальности, определенный в статье ЭПР⁴ и воспроизведенное на стр. 131 книги *Квантовый вызов*. На стр. 16 книги¹ мы читаем: «Если в некотором состоянии измерение дает с достоверностью однозначный результат, то мы будем говорить, что в этом состоянии соответствующая физическая величина имеет определенное значение».

Таким образом, мы приходим к выводу, которым многим может показаться странным. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц и, следовательно, все кто изучал квантовую механику по их книге, интерпретирует ее в представлении о существовании скрытых параметров. Такой интерпретации, предполагающей изменение существующих параметров при измерении, вследствие чего они и являются скрытыми, фактически придерживались многие физики, включая большинство сторонников Копенгагенской интерпретации.

Это показывает насколько трудно отказаться от представления о существовании объективной реальности. Но именно это вынуждают нас сделать работа Белла³ и эксперименты, сделанные на ее основе. Авторы книги неоднократно подчеркивают ее глубокое философское значения, указывая на то, что Белл сделал предметом

экспериментального исследования, казалось бы чисто философский спор между основоположниками квантовой механики. Чтобы лучше понять суть этого спора следует различать то, что можно назвать квантовой механикой и то, что можно назвать квантовым формализмом. Квантовый формализм это то, что создали Планк, Эйнштейн, Бор, де Бройль, Гейзенберг, Шредингер и другие основоположники квантовой механики и по поводу чего и них не было споров. Но этот формализм, как и любое описание, следует к чему-то отнести, т.е. необходимо ответить на вопрос: «Что описывает квантовый формализм?» И по этому вопросу у основоположников квантовой механики были неразрешимые противоречия, которые они оставили нам в наследство. Важно помнить, что де Бройль был не согласен с той интерпретацией волн де Бройля, которая в течении уже многих лет преподается студентам, так же как Шредингер был не согласен с «общепризнанной» интерпретацией волновой функции Шредингера. Многие могут спросить: «Но почему это важно?» Мнение де Бройля, Шредингера и других основоположников квантовой механики - это история, а интерпретация – это «философия», которая может и не иметь отношения к реальным проблемам физики. Но даже те, кто очень не любит «философии» неявно используют интерпретацию, которая в подавляющем большинстве случаев основана на представлении о существовании объективной реальности, т.е. существовании скрытых параметров. Они подобны тому герою Мольера, который не знал, что он говорит прозой. Поэтому квантовая механика, кроме квантового формализма, по поводу которого нет существенных разногласий, неизбежно включает интерпретацию, по поводу которой были и остаются неразрешенные пока разногласия. На вопрос: «Что описывает квантовый формализм?», не было и пока нет общепризнанного ответа. Из примеров, приведенных в книге, очевидна сложность данного вопроса, который по сути является главным нерешенным вопросом квантовой механики. В дополнении к переводу мы хотели бы сконцентрировать внимание читателей на этом вопросе, осветив более подробно некоторые из проблем рассмотренных в книге.

После публикаций статьи Белла³ прошло уже более сорока лет. Примерно двадцать лет потребовалось на то, чтобы значение этой работы стало понятным "озабоченному" меньшинству² физиков. В настоящее время работа Белла стала чрезвычайно популярной и среди большинства, которое двадцать лет назад было «индифферентно» в отношении ее значения. Но популярность не гарантирует понимания. Общение авторов книги с такими экспертами как Белл, Мермин и др. во время конференции, о которой они пишут во Вводной части книги, помогло им осознать фундаментальные требования к изменению нашего понимания квантовой механики, предъявляемые работой Белла и инициированными ей исследованиями. Но одно дело осознать требования, а другое соответствовать им. Авторы книги демонстрируют, как сложно отказаться от представлений о локальности и тем более о реализме. В Главе 1 они пишут, что в эксперименте по интерференции электрон может быть и не пролетает сразу через две щели, а в Главе 7 они пишут, что в отличии от мяча электрон может пролететь сразу через два окна. В версии Бома ЭПР парадокса и работе Белла,³ рассмотренных в Главе 5, локальным скрытым параметром, существование которого противоречит экспериментальным результатам, рассмотренным в Главе 6, является проекция спина. Но в Главе 7 о направлении спина пишется как о реально существующем параметре. Конечно, чрезвычайно сложно отказаться от представления, что даже если мы можем предсказать результат измерения со 100% вероятностью, то это еще не значит, что существует элемент реальности, соответствующий этому результату измерений. Но именно этого требует от нас нарушение неравенств Белла. Так как это очень сложно принять мы сочли необходимым сказать дополнительно о значении работ Белла в дополнительной к переводу Главе 10. Чтобы это значение стало более понятным, мы рассмотрим кратко историю формирования квантового формализма и его интерпретации, о также упомянем интерпретации появившиеся после работы Белла. Мы коснемся также проблемы создания квантового компьютера, в основе идеи которого лежит ЭПР корреляция, т.е. тот наиболее парадоксальный принцип квантовой механики, который, можно сказать по определению, нарушает принцип локального реализма.

В течение многих лет волновая функция, введенная Шредингером, интерпретировалась как амплитуда вероятности, квадрат которой определял вероятность обнаружения данного положения частицы или данного параметра. При этом в большинстве случаев, как и в книге¹ это интерпретировалось именно как «обнаружение», т.е. определение уже существующего. Но при любой интерпретации, в представлении о скрытых параметрах как в¹, или при отказе от нее, возникает вопрос какой смысл может иметь определение вероятности нахождения частицы в некотором элементе объема, если размер его меньше размера частицы. Актуальность этого вопроса связана с полученными недавно экспериментальными результатами, согласно которым интерференция может наблюдаться при длине волны де Бройля заметно меньшей размера интерферирующих частиц. Проблема возможности универсальной интерпретации волновой функции рассматривается в Главе 11.

Проблема макроскопических квантовых явлений выглядит непонятной и парадоксальной, даже на фоне тех парадоксов, которые выявились в связи с работой Белла. Эта проблема, которой посвящена Глава 7, наименее удачно рассмотрена в книге, так как авторы не являются специалистами по макроскопическим квантовым явлениям, таким как сверхпроводимость. Мы постарались в Главе 12 дать представление о тех проблемах, которые возникают при распространении принципов квантового формализма, развитых для атомного уровня, на такое макроскопическое квантовое явление как сверхпроводимость.

Последние годы наблюдается заметное возрастание интереса к проблемам интерпретации квантового формализма. В нашей стране об этом свидетельствует публикация ряда статей⁵⁻⁹ в журнале «Успехи физических наук». Но обсуждение этих проблем часто носят довольно абстрактный характер. Вред ли многим читателям может быть интересен спор о том, следует ли для решения этих проблем включать в рассмотрение сознание экспериментатора⁵ или этого не следует делать, так как сами частицы обладают сознанием⁷. Здесь интересно только то, что такое обсуждение имело место на страницах такого солидного журнала, как УФН. Но статьи с названием «В защиту квантового идеализма»⁹ удивляет не только тем, что она была опубликована в УФН. В защите, в сложившейся к настоящему времени ситуации, нуждается скорее реализм, чем квантовый идеализм. Но что действительно необходимо, это понимание тех фундаментальных проблем, с которыми сталкиваются в настоящее время эксперты, как можно большим числом физиков. Следует понять, что такое нарушение принципов реализма и локальности и как это связано с такими принципиально новыми направлениями исследования как квантовые вычисления, телепортация и другими, которые уже широко разрекламированы. Авторы книги решают задачу объяснения сложившейся к настоящему времени ситуации наиболее подходящим для широкого читателя способом. Они не занимаются пространственными рассуждениями и не пишут сложных формул, а используют для объяснения конкретные эксперименты, реальные или мысленные. Мы также будем придерживаться этого метода.

Литература

Введение к дополнению

1. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица, Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М. «Наука» 1989 г.
2. N.D. Mermin, “Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory” *Physics Today*, **38**, 38 (1985).
3. J. S. Bell, “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics* **1**, 195, 1964.
4. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
5. М.Б. Менский, “Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов», *УФН* **170**, 631 (2000).

6. А.И. Липкин, “Существует ли явление «редукции волновой функции» при измерении в квантовой механике?» *УФН* **171**, 437 (2001).
7. Р.С. Нахмальсон, “Физическая интерпретация квантовой механики» *УФН* **171**, 441 (2001).
8. И.З. Цехминстро, “Инпликативно-логическая природа квантовых корреляций», *УФН* **171**, 452 (2001).
9. М.А. Попов, “В защиту квантового идеализма», *УФН* **173**, 1382 (2003).