

## Предисловие

Прошло около двадцати лет с тех пор, как увидело свет предыдущее издание этой книги. За это время изменилось очень многое: наука ушла вперед, изменились наши студенты, наша кафедра теоретической физики, да и сам наш Московский физико-технический институт.

Сегодня можно сказать совершенно определенно: жизнь подтвердила нашу правоту — студентов математических специальностей обязательно нужно знакомить с основами релятивистской квантовой механики. Это помогает развитию кругозора студентов и обогащает их новыми физическими идеями, формируя гармоничное естественно-научное мировоззрение.

Настоящее учебное пособие родилось на основе части общего лекционного курса квантовой механики, который я читаю на факультете управления и прикладной математики МФТИ (теперь это Физтех-школа прикладной математики и информатики). Перед вами уже третье издание книги. По сравнению с предыдущими изданиями книга довольно сильно изменилась как по объему, так и по количеству материала, излагаемого в ней.

Теперь эта книга многоуровневая, и я надеюсь, что она заинтересует не только студентов и аспирантов, но также и моих коллег — преподавателей и научных сотрудников.

Большая часть книги (семь глав и часть восьмой главы) — это обязательный учебный материал для студентов. Данная часть книги имеет непосредственное отношение к курсу квантовой механики, изучаемому студентами. Материал, излагаемый в этих главах, уже давно и успешно преподается и вызывает положительную реакцию со стороны студентов. Поэтому в этой части книги изменения не такие существенные и касаются в основном исправления замеченных неточностей и опечаток. Здесь есть, пожалуй, только одно серьезное изменение: заново переписан параграф, касающийся парадокса Клейна и его объяснения. Интересно, что это произошло в связи с изучением клейновского туннелирования в графене, что еще раз показывает, насколько тесно связаны традиционная релятивистская квантовая механика и физика графена.

Оставшаяся часть восьмой главы содержит новый материал, касающийся эволюции спина во внешнем поле, включая уравнение Баргманна—Мишеля—Телегди. Эти темы достаточно редко освещаются в учебниках по квантовой механике, хотя и имеют к ней самое непосредственное отношение.

Девятая глава, посвященная физике нейтрино, уже присутствовала в предыдущем издании книги. Теперь она серьезно расширена и переработана: в ней рассказывается об осцилляциях нейтрино в вакууме и в среде, об эффекте Михеева—Смирнова—Вольфенштейна, а также о взаимодействии массивного нейтрино с аномальным магнитным моментом с внешним магнитным полем и о перевооружении спиральности нейтрино в магнитном поле (сейчас это явление принято называть спиновыми осцилляциями нейтрино). Эта глава может рассматриваться как краткое введение в нейтринную физику и быть полезной для молодых исследователей, интересующихся этими вопросами. Данный материал был включен в книгу еще и ввиду тотального отсутствия учебной литературы на русском языке на эту тему.

Десятая глава, посвященная спиновым операторам — интегралам движения в теории Дирака, переписана заново. Это сложный материал, который может заинтересовать весьма «продвинутых» читателей. Как показывает изучение современной научной литературы, практика работы со спиновыми операторами и практика их применения для поиска точных решений уравнения Дирака, к сожалению, постепенно уходят в прошлое. В связи с этим в учебном пособии (в главах 8 и 9) приводится пошагово несколько конкретных примеров нахождения точных решений уравнения Дирака с использованием различных спиновых операторов.

Одиннадцатая глава совершенно новая. Она посвящена квантовой механике графена. Графен — это новый двумерный материал (слой углерода толщиной всего в один атом), впервые полученный выпускниками Физтеха А. К. Геймом и К. С. Новоселовым. За открытие графена и исследование его свойств они были удостоены Нобелевской премии по физике (2010 г.).

С фундаментальной точки зрения графен интересен тем, что носители заряда в нем описываются при помощи безмассового двумерного уравнения Дирака. Поэтому ряд электронных явлений, возможных в графене, имеет аналоги в релятивистской квантовой механике (в частности, парадокс Клейна и шрёдингеровское дрожание).

ние). Эти явления в графене в настоящее время изучаются как теоретически, так и экспериментально, поэтому исследования графена находятся на стыке физики конденсированных сред и физики высоких энергий.

Собственно говоря, этим и объясняется наш интерес к графену в рамках данного учебного пособия. Везде, где это возможно, мы подчеркивали тесную связь между физикой графена и традиционной релятивистской квантовой механикой. В то же время следует иметь в виду, что сходство между явлениями в релятивистской квантовой физике и в физике графена основывается прежде всего на единстве математического описания частиц в этих системах на основе уравнения Дирака. Физические основы сходных явлений, протекающих в физике высоких энергий и в такой твердотельной системе, как графен, могут быть совершенно различными.

К сожалению, в настоящее время практически полностью отсутствует учебная литература на русском языке, посвященная квантовой механике графена (книга [69] может быть рекомендована только для начального ознакомления с этой темой).

Традиционно большое значение в нашей книге придается физической интерпретации основ теории, что зачастую является весьма непростой задачей в рамках релятивистской квантовой механики вследствие особенностей движения электрона Дирака.

Отличительной чертой нашего учебного пособия является также весьма обширный список литературы. Литературные источники разделены на три большие группы: «Учебники и монографии», «Классические работы» и «Современные статьи». С одной стороны, наличие такого списка литературы объясняется тем, что в учебном пособии охвачен широкий круг вопросов — от физики нейтрино до физики графена. Кроме того, в этот список входит большая подборка работ («Классические работы»), которые являются основополагающими по всем основным темам, рассматриваемым в учебном пособии. При возможности указываются также ссылки на русский перевод. Это может быть полезно как для любознательных студентов, так и для исследователей, желающих изучить оригинальные классические работы.

Несколько слов по поводу того, как читать эту книгу. Как уже отмечалось, необходимый минимум для студентов четвертого курса бакалавриата изложен в семи первых главах и в § 8.1. Представление Фолди—Ваутхайзена, которому посвящена четвертая глава, не

входит в обязательную программу для студентов, поэтому глава 4 при первом чтении может быть пропущена. Упомянутый выше минимум необходим также и для чтения и понимания последующих глав книги, которые носят более специальный характер. Подготовленные читатели могут сразу переходить к изучению глав 9–11.

Текст книги дополнен задачами и упражнениями. Эти задачи необходимы в основном для уточнения и углубления понимания отдельных вопросов, рассматриваемых в книге. Заметим также, что обязательный материал для студентов 4-го курса бакалавриата (см. выше) полностью поддерживается задачами, приведенными в разделе «Релятивистская квантовая механика» нашего задачника [4].

В течение длительного времени автору довелось общаться со многими замечательными учеными и выдающимися педагогами-методистами. Это общение касалось различных областей теоретической физики и, в частности, квантовой механики. Оно оказало существенное влияние на взгляды автора и в конечном счете сформировало его представления в этой области.

Прежде всего я должен вспомнить моего отца — Игоря Михайловича Тернова. Именно от него я очень давно впервые услышал о квантовой механике. При его жизни вышло в свет первое (роптапринтное) издание этой книги, и он был ее первым читателем. В 2021 году исполнилось 100 лет со дня рождения И. М. Тернова, и эту книгу я посвящаю его памяти.

Я глубоко благодарен моим учителям А. В. Борисову и В. Ч. Жуковскому, которые открыли для меня замечательный мир науки и, в частности, удивительный мир физики нейтрино.

Более тридцати лет я проработал на кафедре теоретической физики МФТИ, и здесь я встретил много интереснейших людей — ученых и преподавателей. С большой теплотой я всегда вспоминаю наши беседы и дискуссии с Сергеем Павловичем Аллилуевым, которые касались всех областей теоретической физики. Я признателен выдающимся педагогам Л. П. Котовой и В. П. Кузнецову, у которых я многому научился в методике преподавания теоретической физики.

Я благодарен коллегам, которые в разные годы вели семинарские занятия по квантовой механике на факультете управления и прикладной математики МФТИ, за замечания и советы по улучшению лекционного курса. Я признателен всем сотрудникам кафедры теоретической физики, а также студентам, сообщившим свои замеча-

---

ния. Особенно хотелось бы поблагодарить моих коллег Е. С. Андриана, А. Л. Барабанова, Ю. М. Белоусова, С. Н. Бурмистрова, В. Э. Валиулина, А. В. Геца, А. В. Дорофеенко, Л. Б. Дубовского, Р. О. Зайцева, М. Г. Иванова, В. В. Киселёва, В. П. Крайнова, В. И. Манько, Ю. В. Михайлову, А. В. Михеенкова, А. А. Пухова, Л. П. Суханова и О. И. Толстихина.

Я также благодарен Ю. М. Белоусову, который в течение двадцати лет руководил кафедрой теоретической физики, за создание творческой атмосферы на кафедре и доброжелательное отношение.

Москва, июль 2022 года

*А. И. Тернов*