

**A. Marx**

# **Основы квантовой механики**

**Москва**  
**«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
А11

А11 **А. Marx**  
Основы квантовой механики / А. Marx – М.: Книга по Требованию, 2021. –  
309 с.

**ISBN 978-5-458-33693-2**

Из предисловия автора: Начиная с 1926 г., для большинства физиков стало почти невозможным следить за развитием квантовой теории. Объясняется это не только тем, что новая физика пользуется иногда совершенно непривычными математическими методами, но также и тем, что она пугает количеством абстракций, которое вероятно даже у Гегеля вызвало бы некоторое уважение. За это время появилось много книг по квантовой теории, среди них такие шедевры как: Вейль, Теория групп и квантовая механика, Борн и Иордан, Элементарная квантовая механика; однако, благодаря трудному изложению, они едва ли облегчили популяризацию новых идей. Ущерб был бы невелик, если бы речь шла о теории, представляющей интерес только для узкого круга специалистов; речь идет, однако, о теории, преобразующей все наши представления о физическом мире и интересующей, поэому, не только теоретиков, но и экспериментаторов и философов. Развитие науки задерживается, если нет возможности ознакомиться с ее идеями без чересчур большой затраты времени и сил. Мы можем поэтому в предисловии к этой книге для оправдания ее сослаться на существование действительной потребности в ее издании.

**ISBN 978-5-458-33693-2**

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



только „принципиально наблюдаемыми величинами“ является чистейшим троизмом, ибо оно сводится к требованию, чтобы в состав теории входили только такие элементы, которые сами по себе были бы физически возможны. При помощи каких же критерев можно решить вопрос о том, является ли данная физическая величина возможной и, следовательно, принципиально наблюдаемой? Никакого общего однозначного масштаба здесь нет и не может быть дано, ибо отнесение той или иной величины к принципиально наблюдаемым всегда производится на основе какой-либо теории. Различие теорий заключается именно в том, что согласно одной из них какая-либо величина является принципиально наблюдаемой, тогда как согласно другой — ненаблюдаемой. Например, проблема построения *регретум mobile* до введения закона сохранения энергии имела физический смысл и *регретум mobile* должен был квалифицироваться, как принципиально наблюдаемое явление. Наоборот, после установления закона сохранения энергии физический смысл *регретум mobile* был утрачен и явление это перешло в разряд принципиально ненаблюдаемых. Совершенно аналогично обстоит дело, например, с понятием абсолютного ускорения или понятием абсолютной скорости движения земли. Согласно принципам классической механики абсолютное ускорение принципиально наблюдаемо, как может быть наблюдаема и абсолютная скорость земли, если стать на точку зрения теории Френеля-Лоренца о покоящемся эфире. Наоборот, согласно теории относительности обе названные величины ни в коем случае не могут быть наблюдаемы и постановка вопроса о них не имеет никакого физического смысла. Поэтому Планк был прав, утверждая, что „для характеристики преимущества квантовой механики над классической недостаточно сказать, что первая имеет дело только с принципиально наблюдаемыми величинами — это в соответствующем смысле справедливо и в применении к классической механике, — но нужно фиксировать те именно величины, которые по новой теории принципиально наблюдаемы или же ненаблюдаемы — и затем показать, что опыт это подтверждает“. Такая позиция и представляется нам единственно приемлемой.

Итак с физической точки зрения содержание „начала принципиальной наблюдаемости“ сводится к троизму. Гораздо хуже обстоит дело с его общефилософским смыслом. И здесь мы должны перейти к оценке фигурирующей в формулировке „начала“ апелляции к непосредственному опыту.

Ход рассуждений теоретика, руководствующегося „началом принципиальной наблюдаемости“, развертывается примерно так.

Допустим, что нам нужно описать движение какого-либо тела путем задания координат, как функции времени. Практически мы можем знать значения координат только для некоторых моментов времени, для которых мы производим измерения. Континуум всех положений тела для всех моментов времени в данном интервале никогда не может быть предметом нашего непосредственного опыта. Мы имеем только совокупность отдельных наблюдений. Поэтому никаких заключений о поведении тела между двумя наблюдениями, строго говоря, мы делать не имеем права. Подобные заключения всегда являются результатом интерполяции, которая не имеет никаких коррелятов в непосредственном опыте.

Нетрудно видеть, что такое направление мысли ведет гораздо дальше, чем это может показаться на первый взгляд. Строго придерживаясь гносеологического смысла „начала принципиальной наблюдаемости“, мы должны были бы сказать, что тело вообще является для нас реальным лишь постольку, поскольку мы его актуально воспринимаем, ибо всякое заключение о существовании тела между двумя его восприятиями тоже есть результат интерполяции. Иными словами, прямой смысл заключающейся в „начале принципиальной наблюдаемости“ апелляции к непосредственному опыту сводится к старому и хорошо знакомому всем гносеологическому принципу субъективного идеализма: *esse — percipi* (т. е. „быть, это значит — быть в восприятии“), от которого идет прямой путь к солипсизму. Построить же на солипсической основе какую-либо науку — тщетная надежда. Нельзя же в самом деле серьезно полагать, что изучаемая физикой реальность существует лишь постольку, поскольку ее кто-то наблюдает и воспринимает и что всякое тело перестает существовать, как только нам заблагорассудится повернуться к нему спиной. Между тем, из „начала принципиальной наблюдаемости“ должны следовать именно такие выводы.

Надо, впрочем, отметить, что теоретики квантовой механики, выдвигающие „начало принципиальной наблюдаемости“ в качестве своей существенной методологической установки, бывают непоследовательны как при решении общей проблемы реальности, так и при построении чисто позитивного содержания своей теории. Декларировав программу ограничения физической теории только принципиально наблюдаемым, они по самому ходу своей работы не в состоянии выполнить ее до конца. Метод волновой механики, в известной степени противостоящий методу гейзенберговской матричной механики, является лучшим тому свидетельством. Новая квантовая механика

объявила принципиально ненаблюдаемыми некоторые представления механики „классической“, например — „орбиты“ электрона, его „положения“ и т. д. Однако, волновая механика неизбежно должна пользоваться такими же понятиями; например — понятие „характеристической функции“. Принципиально эти характеристические „функции“ никаким экспериментом не контролируются и поэтому в смысле своей наблюдаемости ничем не отличаются от понятий классической квантовой теории, подобных „орбите“ и т. д. Иными словами „характеристические функции“ не более наблюдаемы, чем „орбиты электронов“. На это обстоятельство, если не ошибаемся, впервые указал Зоммерфельд, и указание его было совершенно справедливо.

Во всяком случае, читателю книги Марха должно быть ясно одно. Начало принципиальной наблюдаемости отнюдь не является органической составной частью квантовой механики, а представляет собою лишь внешнюю для нее философскую пристройку, выполненную по архитектурному проекту Маха. Поэтому та непропорционально большая роль, которую приписывает ей Марх, совершенно неосновательна. Квантовая механика только выиграла бы, если бы была освобождена от своей идеалистической философской орнаментики, построенной на „начале принципиальной наблюдаемости“, ибо гносеологические установки этого „начала“, конечно, заставляют теоретиков трактовать вопросы теории в специфическом духе.

Мы уже указывали на неосновательность попытки Марха связать „принцип неопределенности“ с „началом принципиальной наблюдаемости“. Правда, исторически Гейзенберг пришел к формулировке „принципа неопределенности“, именно руководствуясь „началом“, однако реальное физическое содержание принципа Гейзенberга совершенно не связано с гносеологическими установками махизма.

Чтобы понять физический смысл принципа неопределенности, приходится обратиться к методу волновой механики.

Квантовая физика разлагает всякий процесс движения материальной частицы на отдельные периодические волны. Последние отвечают характеристическим функциям данного образования. Элементарным процессом в квантовой механике является, следовательно, не движение частицы, а движение волны. Для того чтобы определить положение или движение материальной точки в пространстве, у волновой механики имеется одно лишь средство: суперпозиция волн, произведенная таким образом, чтобы их волновые функции всюду тушили друг друга путем интерференции и усиливали друг друга в некоторой области, содержащей заданную

точку. Но для того чтобы выделить такую область, необходимо пользоваться волнами с различной длиной и, следовательно, с различным импульсом и притом в тем более широком интервале, чем меньше рассматриваемая пространственная область. В этом и заключается существо метода „волнового пакета“. Из самого его характера с необходимостью вытекает, что определение положения точки средствами волновой механики всегда связано с некоторой неопределенностью. Отсюда согласно И. Бору и выводится „соотношение неточностей“, которое формулировал Гейзенберг.

„Это соотношение — говорит, например, Планк — вытекает из того простого соображения, что примененные волны, если они должны путем интерференции тушить друг друга вне пределов малой области конфигурации, на противоположных краях области, несмотря на свою малую разность частот, должны, однако, обнаруживать заметную разность хода. Если, по квантовому постулату, заменить разность хода разностью импульсов, то получится закон, формулированный Гейзенбергом: произведение неточности в определении положения и неточности в определении импульса по меньшей мере имеет порядок величины кванта действия. Чем точнее определено положение точки конфигурации, тем менее точно известно значение импульса. Обе неточности обнаруживаются, таким образом, в известном смысле дополнительность, чему, однако, положен предел тем, что по волновой механике, при известных обстоятельствах, импульсы можно определить абсолютно точно, между тем как положение точки конфигурации всегда остается в пределах конечной области неопределенным“.

Приведенные соображения не могут, конечно, считаться решением проблемы. Однако, они намечают некоторые пути для него и показывают, что дело здесь идет отнюдь не о гносеологической установке, а о некоторой объективной особенности изучаемой физикой реальности. Они показывают, следовательно, что „принцип неопределенности“ совершенно не зависит от „начала принципиальной наблюдаемости“.

Мы отметили наиболее существенный недостаток курса Марха. Хотя из русского издания и выкинуто редактором несколько мест, где автор предается общепhilософским рассуждениям в махистском духе, это, разумеется, не изменило общего характера книги. Читатель должен относиться к ней критически и помнить, что философия составителя курса далеко не отвечает требованиям, которые следует предъявлять к физику на достигнутом ныне уровне развития научного мировоззрения.

С. Ф. Васильев.

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.

Основное достоинство книги Марха заключается, как мне кажется, в том, что в ней впервые дана в сравнительно элементарном изложении та наиболее общая и глубокая трактовка квантовой механики, которая известна под именем теории преобразований Иордана и Дирака. От других вышедших до сих пор руководств элементарного характера книга Марха отличается также введением ряда других вопросов, обычно опускаемых в виду их якобы сложности (например теория квантованных волн или полей). Правда, автор совершенно опустил все вопросы, связанные со „спином“ электронов и вообще с релятивистской квантовой теорией, о чём конечно нельзя не пожалеть. Далее, приложения к конкретным проблемам рассмотрены им большей частью очень неполно и схематично, кроме таких основных задач, как теория атома водорода и гармонического осциллятора.

Что касается характера и метода изложения, то они не всегда вполне педагогичны с точки зрения начинающего, так например Гамильтон-Якобиева форма классической механики считается известной и не поясняется. Далее, я считаю неправильным и иллюзорным базирование квантовой механики на начале принципиальной наблюдаемости и Гейзенберговском соотношении неопределенности. Не говоря уже о том, что второе отнюдь не вытекает из первого, квантовая механика не может быть дедуцирована из соотношения неопределенности, которое является лишь одним из частных аспектов ее. Значение этого соотношения для квантовой механики сравнивалось самим Гейзенбергом и другими с значением принципа постоянства скорости света для Эйнштейновской теории относительности. Так же, однако, как последняя не может быть выведена из этого принципа (без дополнительных предположений о линейности уравнений преобразования и т. д.), и квантовая механика не может быть выведена из соотношения неопределенности. В этом легко убедиться при дальнейшем чтении самого же Марха, который отнюдь не выводит волновых функций де-Бrogля — Шредингера из соотноше-

ния неопределенности, но лишь показывает, что последнее может быть выведено из рассмотрения волновых пакетов.

Я не счел нужным использовать свои полномочия редактора перевода для того, чтобы значительно переделывать книгу, тем более, что моя точка зрения на спорные вопросы достаточно полно отражена в моем собственном курсе волновой механики. Я ограничился поэтому прежде всего внешним оформлением перевода и исправлением нескольких мелких ошибок. Кроме того, я снабдил критическими примечаниями соображения автора о теории световых квантов (являющиеся заведомо неправильными) и о флюктуациях плотности в поле излучения и выпустил ряд соображений чисто философского характера, не имеющих никакого физического значения.

*Я. Френкель.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА.

Начиная с 1926 г., для большинства физиков стало почти невозможным следить за развитием квантовой теории. объясняется это не только тем, что новая физика пользуется иногда совершенно непривычными математическими методами, но также и тем, что она пугает количеством абстракций, которое вероятно даже у Гегеля вызвало бы некоторое уважение. За это время появилось много книг по квантовой теории, среди них такие шедевры как: Вейль, Теория групп и квантовая механика, Борн и Иордан, Элементарная квантовая механика; однако, благодаря трудному изложению, они едва ли облегчили популяризацию новых идей. Ущерб был бы невелик, если бы речь шла о теории, представляющей интерес только для узкого круга специалистов; речь идет, однако, о теории, преобразующей все наши представления о физическом мире и интересующей, поэтому, не только теоретиков, но и экспериментаторов и философов. Развитие науки задерживается, если нет возможности ознакомиться с ее идеями без чересчур большой затраты времени и сил. Мы можем поэтому в предисловии к этой книге для оправдания ее сослаться на существование действительной потребности в ее издании.

Книга эта создалась из лекций, подготовленных мной для летнего семестра 1929 г., но не прочитанных тогда. Я хотел бы, чтобы она прежде всего была понятным учебником, знакомящим читателя с основами новой квантовой механики. Вначале я намеревался обратить наибольшее внимание на имеющую принципиальное значение теорию преобразования, а также на квантование волновых полей, не излагая приложений теории, уже исчерпывающие рассмотренных другими авторами, например, Зоммерфельдом в дополнительном томе к его книге: „Строение атома и спектры“. В процессе изложения я нашел, однако, нужным включить в книгу хотя бы наиболее существенные примеры: осциллятор, атом водорода, атом гелия и т. д. (так как беспрестанная ссылка на другие источники слишком затруднила бы читателя), не обременяя при этом книги рассмотрением хорошо известных эффектов Штарка и Зеемана, а также эффекта Комптона и фотозеффеクта. Мне пришлось

также, чтобы не выйти за пределы намеченного объема книги, отказаться от изложения релятивистских вопросов и, следовательно, к сожалению, также и от изложения теории Дирака „вращающегося“ электрона.

При работе над этой книгой, целью которой является последовательное изложение квантовой механики в статистическом истолковании, я не следовал ни одному из существующих образцов, хотя книга Вейля „Теория групп и квантовая механика“ и произвела на меня сильное впечатление. Важнее всего для меня — убедить читателя в том, что новая теория, несмотря на ее кажущуюся абстрактность, гораздо ближе к действительности, чем классическая механика. В качестве исходного пункта взяты поэтому соотношения неопределенности Гейзенберга и на основе их построено все остальное. Трудности этого построения заключались не только в приятии простой и ясной формы усложненным расчетам оригинальных работ, но и в уточнении некоторых чрезвычайно существенных для квантовой механики понятий (например, понятия определенного состояния без определенной энергии). Наибольшее внимание уделялось при этом тому, чтобы сделать изложение понятным; при внимательном чтении читатель должен без особых затруднения следить за ходом изложения. Я, не задумываясь, отвергал иногда работу нескольких недель, если сказанное казалось мне недостаточно отчетливым и ясным. Не следует, конечно, ожидать легкого чтения — в новой теории много сложного; этих трудностей избежать нельзя было, но не следовало увеличивать их небрежностью изложения.

Мне пришлось поэтому еще раз обдумывать весь комплекс вопросов квантовой теории; в результате по некоторым принципиальным вопросам (например, квантовых скачков) книга не придерживается принятых до сих пор точек зрения. Благодаря наличию большого количества литературы по квантовой механике, трудно установить, что именно в этой книге является новым; мне кажется, однако, что соотношения неопределенности для электромагнитного поля и для световых квантов до сих пор рассмотрены не были.

Я считаю своим долгом выразить особую благодарность профессору Гейзенбергу, критически просмотревшему часть рукописи и существенно содействовавшему цennыми советами.

Далее, моя приятная обязанность — выразить сердечное спасибо издателю за внимание и предупредительность, с которыми он шел навстречу моим желаниям.

*Arthur Marx.*

Инсбрук, август 1930.

## О ГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
От издательства . . . . .	V
Предисловие редактора . . . . .	XI
Предисловие автора . . . . .	XII

### Глава первая.

#### Волновая механика материальной частицы.

§ 1. Основные идеи новой квантовой физики. . . . .	1
§ 2. Соотношения неопределенности Гейзенберга; координаты и импульс. . . . .	3
§ 3. Соотношения неопределенности Гейзенберга; время и энергия. . . . .	7
§ 4. Новая механика и принцип причинности. . . . .	10
§ 5. Волны де-Броglie. . . . .	13
§ 6. Метод волнового пакета. . . . .	17
§ 7. Переход к классической механике. . . . .	21
§ 8. Волновая механика частицы в силовом поле. . . . .	26
§ 9. Оптический метод волновой механики. . . . .	31
§ 10. Дифракция волн вероятности от рассеивающего центра. . . . .	37
§ 11. Дифракция электронных лучей от кристаллической решетки. . . . .	42
§ 12. Волны вероятности в $p$ -пространстве. . . . .	46

### Глава вторая.

#### Волновая механика светового кванта.

§ 13. Постановка задачи. Соотношение неопределенности для светового кванта. . . . .	52
§ 14. Волны вероятности светового кванта для пустого пространства. . . . .	57
§ 15. Волны вероятности светового кванта для материальной среды. . . . .	61
§ 16. Механическое объяснение преломления и эффекта Дошилера. . . . .	65

### Глава третья.

#### Волновая механика стационарных состояний.

§ 17. Волновое уравнение Шредингера. . . . .	68
§ 18. Экспериментальные возможности. . . . .	71
§ 19. Состояния с неопределенной энергией. . . . .	73
§ 20. Волновая механика и теория Бора. . . . .	78
§ 21. Временное уравнение; вероятные значения механических величин. . . . .	80
§ 22. Представление стационарных состояний в пространстве импульсов; принцип преобразования. . . . .	84
§ 23. Операторы и вероятные значения. . . . .	92
§ 24. Линейный осциллятор. . . . .	94
§ 25. Атом водорода. . . . .	98
§ 26. Обсуждение решения; сравнение с теорией Бора. . . . .	107
§ 27. Волновая механика и принцип соответствия; вероятности перехода. . . . .	114

### Глава четвертая.

#### Квантовая механика в матричной форме.

§ 28. Основные идеи матричной механики. . . . .	122
§ 29. Пространство Гильберта; понятие матрицы. . . . .	123
§ 30. Сложение и умножение матриц. . . . .	126

	Стр.
§ 31. Траспонированные, унитарные, эрмитовы матрицы . . . . .	130
§ 32. Преобразование к главным осям. . . . .	132
§ 33. Матричные функции. . . . .	139
§ 34. Значение матриц в квантовой механике. . . . .	142
§ 35. Соотношение коммутативности. . . . .	145
§ 36. Эрмитовы формы и вероятные значения. . . . .	149
§ 37. Связь волновой механики с механикой матричной. . . . .	151
§ 38. Основная проблема матричной механики. . . . .	153
§ 39. Однозначность решения. . . . .	158
§ 40. Тождество решений матричной и волновой механики. . . . .	160
§ 41. Динамический закон квантовой механики и принцип причинности. . . . .	163
§ 42. Механические системы с любым числом степеней свободы. . . . .	168
§ 43. Матричная механика и принцип соответствия. . . . .	173

### Г л а в а п я т а я.

#### Теория возмущений квантовой механики.

§ 44. Возмущение невырожденной системы. . . . .	178
§ 45. Теория возмущений волновой механики. . . . .	182
§ 46. Зависимость возмущенной системы от времени. . . . .	185
§ 47. Возмущение вырожденной системы. . . . .	188
§ 48. Дисперсия света. . . . .	195
§ 49. Рассеяние света. . . . .	205

### Г л а в а ш е с т а я.

#### Квантовая механика системы частиц.

§ 50. Уравнение Шредингера для системы частиц. . . . .	209
§ 51. Симметричные и антисимметричные решения. . . . .	214
§ 52. Комбинационный запрет симметричных и антисимметричных состояний. . . . .	219
§ 53. Атом гелия. . . . .	223
§ 54. Молекула водорода. . . . .	227
§ 55. Система с любым числом одинаковых частиц. . . . .	231
§ 56. Принцип Паули. . . . .	234
§ 57. Периодическая система элементов. . . . .	236
§ 58. Статистика Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дираха. . . . .	238

### Г л а в а с с е й м а я.

#### Квантовая механика волнового поля.

§ 59. Тепловое излучение, как газ световых квантов. . . . .	247
§ 60. Эйнштейновская теория идеального газа. . . . .	253
§ 61. Излучение в пустом пространстве, как волновое поле; классический метод Джинса. . . . .	258
§ 62. Теория теплового излучения Дебая . . . . .	263
§ 63. Электромагнитная теория излучения по квантовой механике. . . . .	265
§ 64. Соотношения неопределенностей для электромагнитного поля. . . . .	271
§ 65. Испускание и поглощение света. . . . .	274
§ 66. Волновое представление о материи. . . . .	281
Приложения I — III. . . . .	289