

Министерство образования и науки,  
молодежи и спорта Украины  
Харьковский национальный университет  
имени В.Н.Каразина

К 200-летию Харьковского университета

**В.В.Ульянов**

**ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО  
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ**

Часть первая

$$\Psi \begin{cases} \Psi(x) \\ \Psi(p) \\ \Psi(E_n) \end{cases} \quad |\Psi\rangle \begin{cases} \langle x | \Psi \rangle \\ \langle p | \Psi \rangle \\ \langle E_n | \Psi \rangle \end{cases}$$

Харьков 2011

К 65-летию кафедры теоретической физики  
имени академика И.М.Лифшица

**В.В.Ульянов**

**ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО  
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ**

**I**

Издание второе, дополненное

Харьков 2011

УДК 530.145  
ББК 22.314я73-1  
У 51

Рецензент – доктор физико-математических наук, профессор  
А.М.Ермолаев.

У 51 **Ульянов В.В.** Вводные лекции по квантовой механике. Ч.1/  
В.В.Ульянов. 2-е изд, доп. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина,  
2011. - 48 с.

Вводные лекции написаны в 1977 году по горячим следам реально прочитанного автором курса квантовой механики. Они продолжают серию изданий, приуроченную к 200-летию Харьковского университета и 65-летию кафедры теоретической физики имени академика И.М.Лифшица. Во втором издании добавлены некоторые материалы и прилагается компакт-диск с электронными версиями некоторых книг автора по квантовой теории.

Посвящаются Льву Элеазаровичу Паргаманику – профессору кафедры теоретической физики, известному физику-теоретику, воспитавшему многих выдающихся специалистов.

Предназначены для преподавателей, студентов и аспирантов физических специальностей вузов.

Издается по решению кафедры теоретической физики имени академика И.М.Лифшица от 17 мая 2011 года (протокол № 11)

УДК 530.145  
ББК 22.314я73-1

© Ульянов В.В., 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди учебников по квантовой механике Лекции В.В.Ульянова выгодно отличаются тем, что в них на первый план выдвигается толкование основных понятий квантовой механики, а математический аппарат органично вплетается в текст, не заслоняя физического смысла понятий. Изложение материала глубокое и всесторонне продуманное.

Автор рассказывает о происхождении терминов (этого, к сожалению, нет в стандартных учебниках), совершает экскурсы в историю квантовой физики и философию, приводит высказывания физиков о физиках, оценивает существующую литературу.

Чувствуется глубокое понимание автором проблем квантовой физики, его лекторское мастерство. Каждая лекция снабжена оживляющими элементами.

Нет сомнения в том, что издание Лекций В.В.Ульянова будет способствовать более глубокому пониманию квантовой механики студентами, преподавателями, специалистами.

А.М.Ермолаев

*Квантовая механика принадлежит  
к тем достижениям человечества,  
которые всегда будут вызывать  
восхищение и удивление.*

*М.И.Каганов*

## О Т А В Т О Р А

Это пособие написано в 1977 году, когда я читал курс квантовой механики и впервые решил после каждой лекции записать ее реальное содержание в конспективной форме, а затем мой неразборчивый почерк пыталась расшифровать знакомая машинистка, оставлявшая пустыми неясные для нее места, которые я потом заполнял записями от руки.

Умышленно оставляю все в том виде, какой имели эти наброски в то время, лишь введя некоторые цитаты из книг, изданных в разные годы. Я не собирался их издавать, но сейчас показалось, что они могут служить документальной страничкой истории нашей кафедры.

Посвящаются Льву Элеazarовичу Паргаманику – профессору кафедры теоретической физики Харьковского университета, известному физику-теоретику. Лев Элеazarович в течение многих лет читал курс лекций по квантовой механике физикам и радиофизикам нашего Университета. Он был научным

руководителем моей дипломной работы. Пусть эта небольшая книжечка записей лекций послужит выражением нашей признательности этому человеку, отдавшему лучшие годы своей жизни служению благородному делу университетского образования.

Публикация приурочена к 200-летию Харьковского университета и 65-летию кафедры теоретической физики имени академика И.М.Лифшица.

Второе издание дополнено некоторыми материалами, а также компакт-диском с электронными версиями некоторых книг автора по квантовой теории.

Надеюсь, что эти записки прочитают также и те, кто пожелает окунуться в физическую атмосферу второй половины прошлого столетия.

Благодарю Александра Михайловича Ермолаева за внимательное отношение к рукописям автора, за лестный отзыв о данном пособии и помощь советами и редкой литературой.

## 1-я лекция

### Краткое содержание

- I. Построение курса.
2. Роль практических занятий.
3. Новые идеи. Цель курса.
4. Объявление темы: Квантовая механика – современная теория строения материи.
5. Предмет квантовой механики.
6. Практические достижения.
7. Естественно-научное значение.
8. Роль в философии.
9. Новые разделы квантовой физики. Смежные науки.
10. Место квантовой механики в квантовой теории.
- II. Область применимости.
12. Современные направления.
13. О ведении конспектов.
14. Литература.
15. Домашнее задание.
16. Выдержки из книги Компанейца.

## 1-я лекция

### Введение. Квантовая механика - современная теория строения материи

#### I. Вводные замечания.

1. Знакомство со студентами. Поздравление с началом учебного года.
2. Объявление общей темы.
3. Порядок первой лекции.
4. Структура курса. Слитное чтение, а не обзорные лекции. Первый семестр - общие особенности, история идей, основные положения, принципы, расчетный аппарат (кинематика). Второй семестр - конкретные приложения, движение в определенных условиях (динамика). Зачет и экзамен.
5. Об особой роли практических занятий. Ньютон: "... примеры полезнее правил". Кто ведет практику? Как она будет проходить. Цель практических занятий: овладение основами, научиться пользованию аппаратом. Закрепление умений. Своими руками.
6. Овладеть новой идеологией. Привыкнуть к новому способу описания. Перестройка мышления.

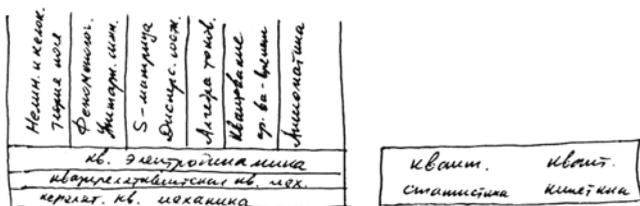
Тема. Цель. Курс.

#### II. Предмет квантовой механики.

1. Общее определение. Объекты.
2. От отдельных микрочастиц до твердых тел (см. отдельный листок).
3. Выход в практику. Значение в народном хозяйстве (ядерная энергетика, лазеры, полупроводниковые приборы, спектроскопия, физика низких температур).
4. Значение квантовой механики для других наук, для общего развития естествознания и философии. Новый стиль мышления. Новые проблемы и решения.
5. Логические и философские аспекты.
6. Появление новых разделов квантовой теории (квантовая радиофизика, квантовая химия). Смежные науки. Квантовая макрофизика.

## 7. Место квантовой механики в квантовой теории.

Схема:



8. Область применимости нерелятивистской квантовой механики.
9. Современные направления развития теории.
10. Связь с биологическими вопросами.

Предмет

### III. Отступление о ведении конспектов

1. После экзаменов оставляют конспекты. Нужно хранить хороший конспект.
2. Оставлять места для будущих пометок (при чтении учебника, при подготовке к зачету, после практических занятий, после сдачи экзаменов, при подготовке к экзаменам).
3. Вводить побольше логических элементов (знаки-связки, взаимосвязи, что из чего вытекает, зачем).
4. Часто выписывают преобразование и формулы, но нет замечаний о физическом смысле, об идейной стороне. Выделение наиболее важного. Определения. Рамочки.
5. Как работать с книгой и конспектом.

Конспекты

### IV. Литература (см. отдельный лист)

1. Писать на доске.
2. Обсуждение каждой книги (внешний вид, доступность, содержательность, роль в читаемом курсе и научных исследованиях, общий уклон).

### У. Домашнее задание

1. Блохинцев [1]. Введение (2 страницы).

2. Фок [9]. § I (2 страницы)

(Доп. 3.Компанеец [8]. Введение (2 страницы)

### УІ. Выдержки из книги Компанейца [8].

1. Самый последний абзац.

2. Аннотация.

3. Из предисловия М.И.Каганова.

---

### Оживляющие элементы:

---

1. Цитата Ньютона: "Примеры полезнее правил".

2. Разговор о ведении конспектов.

3. Выдержки из книги Компанейца.

Фундаментальные структуры природы или мира еще абстрактнее, еще менее доступны нашим органам чувств, но они также и проще, так как представляют всеобщее и уже никоим образом не особенное.

Результаты современного естествознания не допускают наглядности, но их достоверность нельзя ставить под сомнение, если допустимы эксперимент и рациональный анализ.

В.Гейзенберг

### Литература

1. Д.И.Блохинцев. Основы квантовой механики.-М.: Наука, 1976.
2. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика.-М.: Наука, 1974.
3. А.С.Давидов. Квантовая механика.-М.: Наука, 1973.
4. Л.Шифф. Квантовая механика.-М.: ИЛ, 1959.
5. Д.Бом. Квантовая теория.-М.: Наука, 1965.
6. Н.Мотт, И.Снеддон. Волновая механика и ее применения.-М.: Наука, 1966.
7. ФЭС, т. I-5.-М.: Сов.энцикл., 1960-1966.
8. А.С.Компанеев. Что такое квантовая механика? -М.: Наука, 1977.
9. В.А.Фок. Квантовая физика и строение материи.-Л.: изд-во ЛГУ, 1965.
10. Д.И.Блохинцев. Принципиальные вопросы квантовой механики.-М.: Наука, 1966.
11. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Статистическая физика, ч. I.-М.: Наука, 1976.

Чтение лекций - процесс творческий, где индивидуальные особенности преподавателя играют доминирующую роль. Единого рецепта для построения лекционных курсов существовать не может. Но общим для всех лекторов должно быть умение обратить внимание слушателей на "суть" преподаваемой дисциплины, выработать у них правильный "подход" к постановке и анализу излагаемых проблем.

С.Э.Фриш

Приложение к 1-й лекции

**ПРЕДМЕТ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**

1. Отдельные микрочастицы. Пучки. Рассеяние. Внешние поля. Элементарные частицы. Движение - изменение состояния.
2. Атомные ядра. Строение и форма ядер. Устойчивость. Взаимопревращения. Рассеяние нуклонов ядрами. Радиоактивность.
3. Атомы. Свойства. Уровни энергии. В электрических и магнитных полях. Излучение. Периодическая система элементов.
4. Молекулы. Строение. Свойства. Спектры. Излучение. Химическая связь.
5. Газы. Идеальные. Реальные. Плазма. Статистика. Квазичастицы.
6. Жидкости. Сверхтекучесть. Ферми-жидкость. Гелий. Электронная проводимость металлов.
7. Твердые тела. Упругие свойства. Звук. Электрические свойства. Оптические свойства. Магнетизм. Сверхпроводимость. Зонная структура энергетического спектра. Диэлектрики. Полупроводники. Металлы. Размерные эффекты. Граничные явления. Явления переноса. Квазичастицы. Квантовые кристаллы.

Мне кажется, что университеты, более каких-либо других вузов, прививают своим воспитанникам стремление к поиску нового в наиболее общих и принципиальных областях. Всегда и везде дух независимости, самостоятельности мышления культивировался в университетах больше, чем где бы то ни было.

С.Э.Фриш

## 2-я лекция

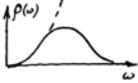
### Краткое содержание

- I. Итоги предыдущей лекции.
2. Тема: ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ
3. Цель. Основные идеи квантовой теории. Недостаточность классической физики.
4. Главные этапы от Планка до наших дней. 77 лет квантовой теории.
5. 1900 М.Планк  
1905 А.Эйнштейн  
1907 А.Эйнштейн  
1911 Э.Резерфорд  
1913 Н.Бор  
1915 А.Зоммерфельд  
1916 А.Эйнштейн  
1923 Л. де Бройль
6. Дополнительная литература:
  - а) У.П.Франкфурт и А.М.Френк. У истоков квантовой теории. 1975
  - б) Квантовая механика и философские проблемы современной физики. 1976  
(Статья М.С.Ельяшевича. Становление квантовой механики).
7. О датировке событий.
8. О сроках печати работ. О влиянии личных контактов ученых.
9. Домашнее задание.
10. Ближайшие планы.
- II. Итоги занятия.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

1. Что было рассмотрено на предыдущем занятии (предмет, место в теории).
2. Тема. Цель – показать недостаточность классических представлений и проследить за эволюцией новых квантовых идей.
3. Общая картина развития от Планка до наших дней. 77 лет квантовой теории.

4. 1900 М.Планк. Спектральная плотность черного излучения. Смысл  $\rho(\omega)$  и площади под кривой. Идея дискретности излучения. Формула Планка  $\rho(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\hbar \omega / T} - 1}$ .  
 Ультрафиолетовая катастрофа. Область Рэлея-Джинса.



Дискретный элемент энергии  $\hbar \omega$ . Постоянная Планка  $h = 2\pi \hbar$ .  
 Квант действия  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$  эрг.сек. "В отчаянии".

5. 1905 А.Эйнштейн. Фотоэффект. Формула Эйнштейна  $\hbar \omega = \frac{mv^2}{2} + W$ .  
 Идея дискретности поля Кванты света. Уравнения Эйнштейна  $\begin{cases} \epsilon = \hbar \omega \\ \vec{p} = \hbar \vec{k} \end{cases}$ .  
 Корпускулярно-волновой дуализм. Флуктуации энергии электромагнитного поля,  $(\omega, \vec{k}) \rightarrow (\epsilon, \vec{p})$ . Сравнение с пивсом.  
 Особенность первых шагов – развитие квантовой электродинамики.

6. 1907 А.Эйнштейн. Теплоемкость кристаллической решетки. Классический закон Дюлонга-Пти. Идея квантовых механических колебаний. Модель Эйнштейна.

Закон Дебая. Малые колебания и осцилляторы.



7. 1911. Э.Резерфорд. Рассеяние  $\alpha$ -частиц атомами. Открытие атомного ядра. Невозможность классического описания существования атомов в рамках планетарной модели (и дискретной структуры спектров излучения).

Подтверждение планетарной модели.

8. 1913 Н.Бор. Квантовые постулаты. Постулат стационарных состояний и постулат частот.  $\hbar \omega_{nm} = E_n - E_m$ .

Дополнительный постулат квантования момента импульса. Предвидение квантования вращательного движения. Отделить общие положения от конкретного расчета атомов водорода.

$$E_n = - \frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Идея дискретных состояний и уровней энергии.

9. 1915 А. Зоммерфельд (Ч. Вильсон). Основной квантовый постулат

$$\oint p dx = h n, \quad E = \frac{p^2}{2m} + U(x).$$

Идея квантования действия.

Правила квантования Бора-Зоммерфельда. Уточнение в современной теории. Полуцелые числа и т.п.  $(n+\gamma)$ . Роль в современной квантовой механике.

10. 1916 А. Эйнштейн. Индуцированное излучение.

11. 1923 Л. де Бройль. Гипотеза волн, связанных с частицами.

Цель - объяснение правил квантования Бора-Зоммерфельда  $\oint p dx = h n$ .

Идея единства материального мира от Эйнштейна: прочтение уравнений Эйнштейна в другом направлении. Уравнение де Бройля  $\begin{cases} \varepsilon = \hbar \omega, \\ \vec{p} = \hbar \vec{k} \end{cases}$

Длина волны де Бройля  $\lambda = \frac{h}{p}$ .  $(\vec{p}, \varepsilon) \rightarrow (\vec{k}, \omega)$ .

Идея волновых свойств частиц.

Оценка для электронов, прошедших через потенциалы  $V_0$ :

$$\lambda_e = \frac{12,25}{\sqrt{V(B)}} \text{ \AA},$$

а для протона

$$\lambda_p = \frac{0,286}{\sqrt{V(A)}} \text{ \AA}.$$

Сложность наблюдения. Опыты по дифракции микрочастиц в 1927 г.

и последующие опыты (атомы, нейтроны, отдельные частицы - электроны и фотоны).

Подняли на смех идею физики-корифеи.

12. Вспомогательная литература по теме.

13. Домашнее задание: Блохинцев, гл. I.

14. Дополнительные элементы: цитаты де Бройля (о распространении квантов как масляного пятна - своими словами).

15. Сроки публикации работ во времена создания квантовой теории были порядка 2 месяцев. Важную роль играли личные встречи, переписка. Все крупные физики знали друг друга в лицо и часто встречались на съездах, конференциях.

16. Трудность датировки: одни историки берут дату по письмам, в которых описана идея, другие - по дате получения редакцией статьи, третьи - по выходу статьи в свет.

---

### Оживляющие элементы

---

1. Пример Эйнштейна о пиве (кружками наливается в бочку, но в самой бочке память о порционности не сохраняется).
2. Смех корифеев физики на одном из конгрессов, когда было сообщено о гипотезе волновых свойств частиц де Бройля.
3. О целых числах в правилах квантования Бора-Зоммерфельда и высказывание Паули: "Если целые числа - иди к Зоммерфельду".

Одно время, испугавшись своей собственной смелости, Планк сделал попытку ограничить свою гипотезу: "свет испускается квантами, но поглощается непрерывно". Это вызвало у юного Эйнштейна следующее непочтительное суждение: "В столовой всегда, а в уборной иногда?".

А.Абрагам

### 3-я лекция

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

1. Итоги предыдущей лекции.
2. Тема: Создание квантовой механики
3. Цель – понять идейные истоки основных положений квантовой механики  
Познакомиться с личностями создателей квантовой механики.
4. Основные годы:

1924. М.Борн – название "квантовая механика".

1925. В.Гейзенберг и В.Паули.

1926. Э.Шредингер и М.Борн.

1927. П.Дирак, В.Гейзенберг, Н.Бор.

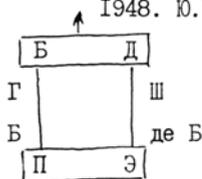
1928. П.Дирак.

1927–1935. П.Дирак, В.Паули, В.Гейзенберг, Э.Ферми

1942. С.Томонага.

1948. Ю.Швингер, Р.Фейнман.

5. Схема:



Вклад.

Возраст.

Происхождение.

Нобелевские премии.

Судьба.

6. Дополнительная литература: а) Дж.Тригг. Решающие эксперименты в современной физике. 1974.  
б) Л. де Бройль. Революция в физике.  
в) С.И.Вавилов. Глаз и солнце, с.39–42.

7. Тема: Философские вопросы квантовой механики

1. Качественно новые законы движения микрочастиц.

2. Диалектическое единство корпускулярных и волновых представлений.

8. Домашнее задание.

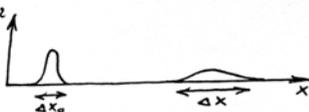
### 3-я лекция

#### СОЗДАНИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

1. Окончание предыдущей темы - достижения де Бройля (1923):

$$\oint \frac{dx}{\lambda} = n, \quad \psi(x, t) = A e^{\frac{i}{\hbar}(\rho x - \epsilon t)}$$

Идеализация свободного движения. Недостаточность. Волновые пакеты и их расщивание:



Оценки для электрона:  $\Delta x_0 \sim 10^{-13}$  см,  $\Delta t \sim 10^{-26}$  сек и т.д.

Несостоятельность концепции "волн материи".

2. 1924. М.Борн. ввел название "квантовая механика".

*Quantum* (нем.) - количество  
*quantum* (лат.) - сколько.

3. 1925. В.Гейзенберг  
М.Борн и П.Иордан  
М.Борн, В.Гейзенберг и П.Иордан } построение матричной квантовой механики (см.отдельно)

В.Паули ввел принцип, получивший его имя (нобелевская премия, 1945)

4. 1926. Э.Шредингер - создание волновой механики (серия статей и доказательство единства матричной и волновой механики) (см.отдельно)

Н.Бор - статистический принцип (Нобелевская премия, 1954)

П.Дирак - математическая формулировка (обобщение).

5. 1927. П.Дирак - теория излучения и поглощения электромагнитных волн.

В.Гейзенберг - анализ процесса измерения, принцип неопределенности

Н.Бор - концепция дополнительности (см.отдельно).

6. 1928. П.Дирак - квазирелятивистская теория (см.отдельно).

7. 1927-1935. П.Дирак  
В.Гейзенберг  
В.Паули  
Э.Ферми } развитие квантовой электродинамики (первое приближение)

8. 1942-1948. С.Томонага  
Ю.Швингер  
Р.Фейнман } завершение создания квантовой электродинамики

9. Схема основных шагов. Вклад советских физиков (Тамм, Фок, Иваненко, Ландау - см.отдельно)
10. Возраст участников. Взаимоотношения в школе Бора. Первые учебники. Основные журналы.
11. Иллюстрации (цитаты де Бройля, Паули, Борна).
12. Драматические моменты. Основные идеи.
13. Произношение фамилий (*Heisenberg, Schrödinger, Dirac* ).
14. Дополнительная литература.
15. Домашнее задание: 1. Давыдов. Предисловие к § I.  
2. В чем недостаточность классической физики? (вопрос к размышлению). Краткий ответ типа *экзистенциального*.
16. Итоги лекции.
17. Новая тема: Философские вопросы квантовой механики  
Оживляющие элементы:
  1. Бор об атмосфере *дружеских дискуссий* (выступление в мае 1961 г. в Москве). Не боялись признаться, что глупы и т.д.
  2. Паули в письме Кронигу о ситуации накануне появления работы Гейзенберга.
  3. О произношении фамилий иностранцев (и об их написании). Примеры из "Науки и жизни".
  4. Борн и Гейзенберг (незнание матриц и ревность к волновой механике)

Человек приходит домой и докладывает жене: "Я заработал сегодня два франка: автобус отъехал до того, как я успел вскочить в него; я побежал за ним до следующей остановки, но опять не успел сесть, и так пробежал за ним всю дорогу до дома." - "Вот дурак, - говорит жена, - почему же ты не бежал за такси, заработал бы двадцать франков".

А.Абрагам

Основные работы

- В.Гейзенберг "Квантовотеоретическое истолкование кинетических и механических зависимостей" (июль послано – сентябрь опубликовано. 1925 г.)
- Борн и Иордан "К квантовой механике" (сентябрь 1925).
- Борн, Гейзенберг и Иордан "К квантовой механике II" (ноябрь 1925).
- Дирак "Фундаментальные уравнения квантовой механики" (ноябрь 1925) (24 года) ( $\varrho$ -числа, перест.соотн.)
- Дирак "Квантовая механика и предварительное исследование атома водорода" (январь 1926) (кв. *смазки* Пуассона)
- Паули "О водородном спектре с точки зрения новой квантовой механики" (январь 1926) (матричным методом – атом водорода)
- Борн и Винер "Новая формулировка квантовых законов для периодических и неперiodических <sup>процессов</sup> ~~законов~~" (январь 1926) (операторы)
- Шредингер "Квантование как проблема собственных значений (первое сообщение)" (январь 1926) (стац.ур.Шредингера, атом водорода)
- "Фазовые волны" де Бройля. "Квантование как проблема собственных значений (второе сообщение) (февраль 1926)
- Эккарт, Нейман, Паули (*не опубли.*) "О связи квантовой механики Гейзенберга–Борна–Иордана с моей" (март 1926) (*идентичность* механик, операторы).
- "Квантование как проблема собственных значений"(третье сообщение) (май 1926) (*теория возмущений и эрмит Штарка*)
- "Квантование как проблема собственных значений" (четвертое сообщение) (июнь 1926) (*кестмац.* ур.Шредингера и *кест.т.вект.* ток)
- Дирак "О теории квантовой механики" (август 1926) (обобщ.мат.аппарат)
- "Физическая интерпретация квантовой механики" (декабрь 1926) (обобщ.мат.аппарат)
- Иордан "О новом обосновании квантовой механики" (декабрь 1926) (обобщ.форма кв.мех.)

- Борн июнь 1926 (краткое сообщение)  
 июль 1926 (подробная статья)  
 (В рамках Шредингеровой теории рассмотрены вопросы столкновений  
 и дана статистическая интерпретация волновой механики).
- Дирак "Квантовая теория испускания и поглощения излучения" (февраль  
 1927) (квантование поля излучения и *взаимодействие* с атомом).
- Паули "К квантовой механике магнитного электрона" (май 1927) (феноме-  
 нологический учет спина, матрицы Паули, уровни Паули).
- Дирак "Квантовая теория электрона, I" (январь 1928)  
 "Квантовая теория электрона, II" (февраль 1928)  
 (релятивистское уравнение электрона, формула тонкой структуры  
 Заммерфельда)
- Гейзенберг (первая статья) "О наглядном содержании квантотеорети-  
 (март 1927)  
 ческой кинематики и механики" (июль 1927)  
 (СН для координаты и импульса)
- Бор "Физическая интерпретация квантовой механики (конгрессы в августе  
 и октябре) Доклады переработаны в статью "Основной квантовый  
 постулат и новейшее развитие атомной теории" (апрель 1928)  
 (принцип дополнительности).

#### Основные журналы

- Zeitschrift für Physik* (журнал по физике)  
*Annalen der Physik* (Анналы физики. Летопись)  
*Proceedings of the Royal Society* (Доклады Королевского общества)

#### Первые учебники

- Введение в волновую механику. Я.И.Френкель, 1929  
 Начала квантовой механики. В.А.Фок, 1932  
 Принципы квантовой механики. П.А.М. Дирак, 1930  
 Физические принципы квантовой механики. В.Гейзенберг, 1930  
 Волновая механика. А.Зоммерфельд, 1930

### Первые лекции в нашей стране

Осенью 1928 г. в Ленинграде В.А.Фок прочитал курс лекций по квантовой механике.

### Первые работы наших ученых по квантовой механике

И.Е.Тамм. К квантовой механике ротатора (апрель 1926).

В.А.Фок. К Шредингеровой волновой механике (июль 1926).

Об инвариантной форме волнового уравнения и уравнений движения для заряженной частицы (июль 1926).

Д.Д.Иваненко и Л.Д.Ландау. К выводу уравнения Клейна-Фока (ноябрь 1926).

Л.Д.Ландау. К теории спектров двухатомной молекулы (ноябрь 1926).

Я не отдаю и никогда не отдавал предпочтения матричной механике. Когда появилась волновая механика Шредингера, я сейчас же почувствовал, что она требует вероятностного толкования. Я подозревал, что есть плотность вероятности, но прошло некоторое время, пока я нашел физические аргументы в пользу этого предположения, а именно столкновения и переходы под действием внешних сил. И тогда неожиданным образом обнаружилось, что у Гейзенберга другое мнение, и он обвинил меня в измене духу матричной механики. Правда, он скоро преодолел свои сомнения и создал удивительное объединение представлений волн и частиц в принципе неопределенности.

М. Борн

#### 4-я лекция

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

1. Причинные связи в микромире.
2. Взаимоотношение физики и философии.
3. Принцип соответствия.
4. Математический аппарат квантовой механики.
5. Передний край развития физической науки.
6. Общая тема I главы: Основные понятия квантовой механики.
7. Главные принципы: 1. Статистический принцип.
  2. Принцип наблюдаемых.
  3. Принцип суперпозиции.
  4. Принцип причинности.
  5. Принцип тождественности одинаковых частиц.
8. § I. Волновая функция.

Понятие состояния. Чистые и смешанные состояния. Обозначения.  
Название *Физический* смысл. Пример одной частицы в одном измерении.  
Нормировка.
9. Домашнее задание: Блохинцев, § 9 (Статистическое толкование волн де Бройля)  
§ 10 (Вероятность местоположения частицы)
10. Дополнительная литература:

Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., ИЛ, 1961.  
Сборник статей и выступлений: Биология и атомная физика. Квантовая физика и биология. Физическая наука и проблема жизни. Дискуссии с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике и др.

#### 4-я лекция

### Продолжение темы ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

#### I. Причинные связи в микромире

а) Причинность – связь, заключающаяся в порождении одних явлений другими по определенным законам.

б) Схема четырех миров

Ничего нельзя.

Ничего нельзя, кроме того, что можно.

(Законы выступают в роли дозволений, разрешений – движение только по траектории)

Все можно, кроме того, что нельзя.

(Закон в роли запретов, ограничений – сохранение среднего значения энергии)

Все можно.

в) "Вероятностная Вселенная" (Н.Винер)

г) Статистические и динамические закономерности. Категории необходимости и случайности. Тенденции. Описание в квантовой механике. Цитата М. Борна о сочетании статистических и динамических элементов.

М.С.Сабитов. Диалектика необходимости и случайности в квантовой механике. 1974.

д) Вероятность – количественная мера возможности. Вероятность – потенциальная возможность (доопытная, априорная характеристика случайных событий). Статистичность – реализовавшаяся возможность (послеопытная, апостериорная характеристика случайных событий). Стохастический – греч. *Stochastikos* догадка – вероятностный, случайный. Статистический коллектив – совокупность завершенных опытов по измерению некоторой величины. Прогнозы, предсказания, тенденции. Хаотичность, случайность, необходимость. Признаки вероятности: отсутствие алгоритма указания событий и устойчивость частот.

е) Объективная вероятность и субъективная вероятность. Статисти-



ческое моделирование динамических систем (метод статистических испытаний – метод Монте-Карло). Пример расчета кристаллических структур из "Науки и жизни" (А.С.Компанейца).

ж) Событие. Статистический коллектив. Одиночный объект.

з) Гипотезы о природе статистичности (см.отдельно). Фундаментальность вероятности. Принципиальные отличия от массовых явлений (классической статфизики).

## 2. Взаимоотношение физики и философии

а) Предмет философии – наиболее общие законы природы, общества и сознания. Нельзя ли из общих законов дедуктивным путем вывести законы конкретных наук, в частности, физические законы? На этот вопрос Ф.Энгельс дал отрицательный ответ.

б) Подобная связь на количественном уровне касается взаимоотношений с математикой (образ "мясорубки" – математической обработки, однако выход зависит от начинки, от входа, от "полуфабриката", физических идей).

в) Физика служит <sup>источником</sup> ~~наложением~~ идей и проблем, а также сферой применений, приложений философии (в подтверждении законченная философская наука уже не нуждается).

г) Философия ~~не~~ дает: гносеологический анализ, осмысление, интерпретация данных, разрешение методологических проблем, эвристическая роль. Наконец, формирование мировоззрения, а не умозрительные построения и рецепты, схемы натурфилософии. Подсознательное и сознательное использование философских концепций.

д) Важность знания и владения материалистической диалектикой. Примеры исторические. Позитивистские наклонности стихийных материалистов и постепенный переход в область материалистической диалектики. Борьба на высшем уровне в философских вопросах естествознания с (нео)позитивизмом, агностицизмом и т.п. Изменение взглядов и высказываний Бора.

### 3. Принцип соответствия

а) Краткая история (от зачатков в 1913 г. и формулировки в 1920 г., к окончательному оформлению около 1923 года). См. Франкфурта и Френка.

б) Логика старой теории, революционное начало. Заострение первого этапа отрицания.

в) Второй этап - отрицание отрицания. Преемственность. Экстраполяция понятий. Использование образов и идей старой теории.

г) Более полная теория должна содержать менее полную в виде своего предельного случая. Она должна указывать пределы применимости последней и объяснять ее постулаты и физические идеи

д) В этом проявляется принцип ограничений (общая теория ограничивает "владения" частной теории, указывает ее границы).

е) Эвристическая роль принципа соответствия при создании квантовой механики (история с Бором и Гейзенбергом).

ж) Особенность взаимоотношений классической и квантовой теорий. Классическая механика - предельный случай и необходимая основа квантовой механики. Макроскопическая ступень в цепи познания (измерения).

з) Чисто квантовые эффекты. Случаи совпадения классических и квантовых результатов. Предельный переход  $\hbar \rightarrow 0$ .

и) Диалектика познания. Относительная и абсолютная истина. Закон отрицания отрицания. Спиралевидный характер развития.

#### Дополнительные замечания

I. Математический аппарат.

а) Теория вероятностей.

б) Линейная алгебра.

в) Специальные функции.

Не теоремы единственности и существования, а умения, работа, применение математического аппарата.

Простота используемой математики, за которой скрыта сложность доказательства возможности использования этого <sup>простого</sup> ~~участка~~ аппарата (обо-

снование квантовой механики). Порождение новых разделов математики (обобщенные функции, оснащенное гильбертово пространство). Необходимость интегралов Лебега (по мере), сходимости и условности знаков равенства, функционалы и т.д.

Изложение подобных тонкостей в специальных курсах квантовой механики (для математиков), а также в книге Неймана "Математические основы квантовой механики".

2. Передний край квантовой физики (макромир – твердые тела, жидкости и кристаллы, жидкие кристаллы, аморфные тела, полимеры, биологические объекты; микромир – физика элементарных частиц, физика высоких энергий; мегамир – астрофизика новых явлений – пульсаров, черных дыр и т.д.).
3. О дискуссии Бора и Эйнштейна, которая длилась 20 лет (1935–1955), но научные споры никогда не переносились на личную почву. Цитаты: Эйнштейна о квантовой механике.

Новая тема (гл. I): Основные понятия квантовой механики

*Вступительные* замечания – перечисление главных принципов:

1. Статистический принцип.
2. Принцип наблюдаемых.
3. Принцип суперпозиции.
4. Принцип применимости.
5. Принцип тождественности одинаковых частиц.

#### § I. Волновая функция

а) Состояние системы – некоторая информация о данной системе, на основе которой мы можем предсказать результаты измерений.

б) Вычленение системы.

в) Чистые состояния и описание с помощью  $\psi$ -функции волнового вектора  $\psi$ , или  $|\psi\rangle$ . Смешанные состояния и описание с помощью матрицы плотности – статистического оператора  $\hat{\rho}$ . Подробности различий и примеры будут даны позднее.

г) Физический смысл волновой функции на примере одной частицы в одном измерении



Элементарная вероятность обнаружения (локализации, местонахождения) частицы вблизи точки  $x$  в интервале  $dx$

$$dW(x) = |\psi(x)|^2 dx.$$

Плотность вероятности  $\rho(x) = \frac{dW}{dx} = |\psi(x)|^2$ .

Вероятность при измерении получить значения координат в интервале:

$$W(a < x < b) = \int_a^b |\psi(x)|^2 dx.$$

Условие нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1.$$

д) Замечание о степенях свободы. Одномерное реальное - либо движение вдоль трубки (линейная цепочка - полимерная молекула), либо отделение ветви (в однородном поле силы тяжести). Одномерное иллюстративное (методическое). Рассказ о наглядном изображении трехмерия учителем математики (пожилой человек пробежал вдоль доски, затем понесся по проходу между рядами парт, а затем подпрыгивал вверх на месте - из Гарднера).

Домашнее задание: Блохинцев, § 9, 10.

Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. 1961.

Ответы на вопросы. Цитата Ленина.

Оживляющие элементы: 1. Рассказ о схеме четырех миров.

2. Показ трехмерности *присутствия* учителем математики.

3. Образы микрочастиц (бульбочки в манной каше, возбуждения квантованного поля).

Старый анекдот: Некто разделся донага и бросился в кусты крапивы. Когда позже у него спросили, зачем он это сделал, он ответил: "Теперь хорошенько не помню, но тогда это показалось интересной идеей".

А. Абрагам

## 5-я лекция

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

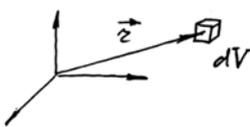
#### ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ (продолжение)

- I. Одна частица в трехмерном пространстве.
2. Две частицы в координатном представлении.
3.  $\mathcal{N}$  частиц. Конфигурационное пространство.
4. Импульсное представление.
5. Энергетическое (дискретное) представление.
6. Обозначения Дирака.
7. Волновой вектор (вектор состояния) и его проекции.
8. Поточная роль фазы волновой функции координатного представления (предварительно).
9. Пример плоской монохроматической волны де Бройля (смысл, нормировка).
10. Фазовый множитель.
- II. О гипотезах пространственно-временной структуры микромира (Мостепаненко).
12. Временной аргумент. Принцип причинности. Классические уравнения второго порядка и квантовые уравнения движения.

5-я лекция

ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ (продолжение)

1. Одна частица в трехмерном координатном пространстве:



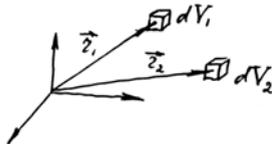
$$\psi(\vec{z}), \quad dW(\vec{z}) = |\psi(\vec{z})|^2 dV,$$

$$\rho(\vec{z}) = |\psi(\vec{z})|^2,$$

$$W_{dV} = \int_{dV} |\psi(\vec{z})|^2 dV,$$

$$\int |\psi(\vec{z})|^2 dV = 1.$$

2. Две частицы в координатном пространстве:



$$\psi(\vec{z}_1, \vec{z}_2), \quad dW_{1,2} = |\psi(\vec{z}_1, \vec{z}_2)|^2 dV_1 dV_2,$$

$$\rho(\vec{z}_1, \vec{z}_2) = |\psi(\vec{z}_1, \vec{z}_2)|^2,$$

$$\iint |\psi(\vec{z}_1, \vec{z}_2)|^2 dV_1 dV_2 = 1.$$

3.  $N$  частиц в координатном пространстве:

$$\psi(\varrho), \quad \varrho \equiv \{\vec{z}_1, \vec{z}_2, \dots, \vec{z}_N\},$$

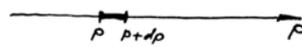
$$dW(\varrho) = |\psi(\varrho)|^2 d\varrho, \quad d\varrho \equiv dV_1 dV_2 \dots dV_N,$$

$$\rho(\varrho) = |\psi(\varrho)|^2,$$

$$\int |\psi(\varrho)|^2 d\varrho = 1.$$

О прочтении равенств в двух направлениях; смысл и практическое использование.

4. Импульс (одномере) одной частицы:



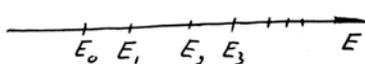
$$\psi(p),$$

$$dW(p) = |\psi(p)|^2 dp,$$

$$\rho(p) = |\psi(p)|^2,$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(p)|^2 dp = 1.$$

5. Дискретное представление (энергетическое, например):



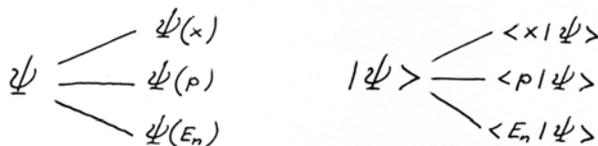
$$\psi(E_n),$$

$$W(E_n) = |\psi(E_n)|^2,$$

$$\sum_n |\psi(E_n)|^2 = 1.$$

6. Обозначения Дирака:	$\psi$	$ \psi\rangle$
	$\psi(x)$	$\langle x \psi\rangle$
	$\psi(z)$	$\langle z \psi\rangle$
	$\psi(q)$	$\langle q \psi\rangle$
	$\psi(p)$	$\langle p \psi\rangle$
	$\psi(E_n)$	$\langle E_n \psi\rangle$

7. Вектор состояния и его проекции:



8. Вопрос о переходе от одного представления к другому. Индекс представления. Проектирование. Роль фазы волновой функции на примере координатного представления:

Потоки.  $\psi(z) = |\psi(z)\rangle e^{i\phi(z)}$

Значение фазы в ф. коорд. представления в описании состояния в импульсном представлении и т.д.

9. Плоская монохроматическая волна де Бройля:

$\psi(z, t) = A e^{i(\vec{p}z - Et)}$ ,  $\rho(z, t) = |A|^2$ , Классический аналог - равномерное распределение частиц.  
 $\int_V \rho(z, t) dV = 1$ ,  $A = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i\alpha}$ .  
 Бесконечный объем и особые условия нормировки.

10.  $\psi \leftrightarrow \psi' = \psi e^{i\alpha}$ . Фазовый множитель. Не путать с фазой в ф. Аналогия - потенциальная энергия.

11. 0 гипотезе Мостепаненко. Итальянская шутка "4-колесная бабушка".

Цитаты из книги Мостепаненко. Рассуждения, предположения, сносительное наклонение и итальянская шутка:

"Если бы у моей бабушки было четыре колеса, то она была бы автобусом".

12. О временном аргументе:  $\psi(\vec{r}, t)$ .

Формулировка принципа причинности в квантовой механике (предварительно). Сравнение с классической механикой. Число входных данных (начальных условий). Порядок дифференциальных уравнений. Обыкновенные дифференциальные уравнения <sup>и уравнения</sup> в частных производных. Пока временной аргумент выписывается явно не будет.

13. Подведение итогов. Ближайшие темы.

14. Домашнее задание: I. ФЭС [7], а) Квантовая механика (вводная часть);

б) Квантовая механика (философские вопросы).

2. Дополнительно: А.Н.Мостепаненко. Пространство и время в макро-, мега- и микромире. 1974.

Оживляющие элементы: итальянская шутка "четырёхколесная бабушка".

Теоретическая физика - строгая наука, требующая тонких физических соображений и кропотливых, иногда очень трудных математических расчетов. Получить новые результаты можно, только овладев всем арсеналом средств, методов и представлений современной физической теории. И, как в любой сфере человеческой деятельности, оказывается, что источником результатов служит труд, к счастью приносящий радость не только своими результатами, но и непосредственно в процессе решения еще не решенных задач.

М.И.Каганов

НОВЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

I. Дискретность и непрерывность

1) Спектры физических величин (дискретные, непрерывные, смешанные; всегда одинаковые  $-\vec{e}, M_e, \vec{M}^2, I$  - и изменяющиеся  $-E$ ; квантование заряда, массы; *Quantum* (нем.) - количество, *quantum* (лат.) - сколько; название "квантовая механика" предложено М. Борном в 1924 г.).

2) Корпускулярно-волновой дуализм (диалектическое единство, синтез-парадокс по классическим представлениям; единение на механическом уровне и после вторичного квантования - в теории поля; частицы и поля в историческом аспекте; явные проявления дуализма - уравнения Эйнштейна - де Бройля  $\epsilon = \hbar\omega$ ,  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ , формула Планка для теплового излучения - переход от области Рэлея - Джинса к области Вина по частотам, флуктуации энергии электромагнитного поля по Эйнштейну - два члена). Квазичастицы.

3) Символ дискретности - постоянная Планка  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$  (осуществляет единение в п.2; дискретность - причина устойчивости, устойчивость и одинаковость атомов (одного сорта, без возбуждений) - проблема классической физики). Обменное взаимодействие. Спектральность (классическое падение в центр:  $\frac{f}{r}$  ).

4) Пространство-время (не квантуются, отделены друг от друга и от материальной начинки в квантовой механике - нерелятивистской теории; квантование пространства-времени).

2. Неопределенность и дополнителность

1) Неопределенность физических величин (принцип неопределенности Гейзенберга - 1927 г., статистический разбор, неопределенность координат и точечность частиц, неопределенность структуры частиц).

2) Дополнителность (восстановление полной картины по отдельным

чертам, анализ-парадокс по классическим представлениям, дополнительные классы динамических переменных, количественное выражение в соотношении неопределенностей, качественное - в некоммутативности операторов; объект - единство противоположных моментов, один из аспектов дополнительнойности - познание отражает физическую сущность через совокупность понятий, которые по своей природе исключают друг друга; принцип дополнительнойности представляет собой одну из конкретных форм выражения противоречивого процесса познания для определенной области явлений; дополнительность введена Н. Бором для описания нового в рамках старых классических понятий; естественность единства противоположных моментов в диалектическом подходе; изучение одной черты нарушает другую, дополнительную по отношению к первой; наблюдение за процессом мышления нарушает его; наблюдение постороннего за работой человека может нарушить ее).

3) Отсутствие траекторий, роль скорости (если фиксировать точность измерения координаты частицы  $\Delta x$  и замеры делать через интервалы  $\Delta t$ , то последовательные положения не укладываются в непрерывную линию - одиночные испытания, но в повторяющейся ситуации - квантовомеханические последовательные измерения, однако для статистических измерений в каждый момент времени средние положения дают последовательность с непрерывным расположением в пространстве, т.е. существует некоторая кривая средних положений, которая при малом разбросе - в условиях движения, близких к классическим, - переходит в классическую траекторию, скорость в точке не имеет смысла, но среднее значение скорости характеризует свойства такой средней линии по теореме Эренфеста; скорость - не локальная, а интегральная характеристика движения частицы, средняя мера; потоковая картина движения с определенной скоростью; виртуальные траектории и картина Фейнмана).

4) Современная кинематика (отсутствие статики, пересмотр предмета кинематики - все, что не связано с конкретным видом взаимодействий, - законы сохранения, понятийный и расчетный аппарат, основные постулаты - принципы, теория представлений, симметрии и пр.).

### 3. Неклассический способ описания

1) Два уровня (непосредственно не наблюдаемые абстрактные величины  $\hat{f}$ ,  $\psi$ ,  $\hat{p}$ , отражающие качественную особенность микромира, измеряемые физические величины ( $f_n$ ); экстраполяция классических свойств, новые черты, обобщения).

2) Вероятность (вероятностный характер движения при фиксации объекта на уровне механики, вероятностность структуры – в теории элементарных частиц, теории поля; статистический принцип Макса Борна – 1926 г.; вероятность (априорная категория) – потенциальная возможность, статистичность (апостериорная категория) – реализовавшаяся возможность; статистический коллектив – совокупность завершенных опытов по измерению некоторой величины – полного набора; фундаментальность вероятности: неразрывная связь с окружением – цена вычленения (плата), модель Велтона броуновского движения классической частицы под действием флуктуаций вакуума, возбуждения полей квантованных; усиление вероятности при продвижении познания вглубь сопровождается увеличением точных, достоверных утверждений – законов сохранения, спектров и пр.).

3) Виртуальное (воображаемое – классические перемещения, кинематически допустимое – траектории в принципе стационарности действия и картине Фейнмана; промежуточное – частицы, процессы в квантовой электродинамике; переходы – в нестационарной теории возмущений механики; становление – резонансное рассеяние Вигнера на еще не "вылупившемся" уровне энергии; способное, сильное – среди непрерывного спектра энергии отдельные значения – квазиуровни; фактическое – метастабильные состояния; реальное, но в виде возможности, а не действительности; неявное, подтверждающее факты – взаимопревращение частиц, появление частиц, влияние вакуума; описание в современной теории поля на языке виртуальных процессов – физическая картина скрытого движения – черный ящик анатомируется; связь с квазичастичным описанием и обменным взаимодействием).

1. *virtual* (нем.) – мнимый, воображаемый, возможный;
2. *virtuel* (фр.) – потенциальный, скрытый, возможный;
3. *virtualis* (лат.) – способный, который должен или может проявиться, возможный;
4. *virtual* (англ.) – фактический (в отличие от номинального), действительный, эффективный,  
(*vɜ: tʃuəl*)  
*virtue* – добродетель, целомудрие, достоинство, сила, действие  
(*vɜ: tʃu*)

4) Относительность к средствам наблюдения и дополнительность – на смену абсолютизации и детализации движения в классическом описании (отрыв описания от измерения в КСО, независимость от средств наблюдения из-за пренебрежимости малостью действия приборов и условий наблюдения на физический объект; возможность совместного измерения различных характеристик, игнорирование влияния приборов и их физической природы; относительность к средствам наблюдения носит всеобщий характер (СТО, кв. мех и др.); объекты не безразличны к приборам, в разных условиях измерения ведут себя различным образом; крайняя точка зрения (Ломсадзе) – до акта измерения вообще нет смысла говорить о частице: частица есть дискретное проявление свойств материи, она формируется в момент воздействия – измерения; менее жесткая точка зрения то же повторяет о самой физической величине (координате, импульсе, энергии и пр.); в квантовой механике принцип относительности имеет особенность в виде дополнительности).

Перед тем как выбросить квантовую механику, проверим еще раз все предохранители.

А. Абрагам

## ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

Кроссворд природы (Эйнштейн)

1. Философия и физика (натурфилософский подход, умозрительные построения; не рецепты и построение картин устройства мира, не требования, а выводы, обобщения, гносеологический анализ, эвристическая нить, осмысление развития физики и естествознания, анализ теорий и парадоксов, путей научного поиска, разрешение методологических проблем, формирование мировоззрения; эвристическая роль принципа принципиальной наблюдаемости; физика – источник проблем и объект подтверждения по отношению к философии, а философия – интерпретация, осмысление, эвристическая роль; взаимоотношение философии и естественных наук исследовалось Энгельсом – на вопрос, нельзя ли с помощью философии получить дедуктивным путем результаты конкретных наук, он давал отрицательный ответ; аналогия с количественным уровнем – взаимоотношением физики и математики).

2. Причинность (связь, выражающаяся в порождении одних явлений другими по определенным законам; динамические и статистические законы; связь с законами сохранения; лапласовский детерминизм; момент закона – причинная связь; конкретные выражения причинности в квантовой физике; уравнение Шредингера – единство динамической и статистической закономерностей). Схема четырех миров.

3. Бесконечность (неограниченность, метрическая бесконечность, топологическая бесконечность; неисчерпаемость; интенсивная и экстенсивная, актуальная и потенциальная; космологическая проблема – бесконечность Вселенной; модели Вселенной; точка зрения Наана; иллюстрации различия понятий ограниченности и конечности:

конечное и ограниченное – на плоскости   
конечное и неограниченное – поверхность сферы,  
бесконечное и ограниченное – полоса на плоскости   
бесконечное и неограниченное – вся плоскость).

4. Вероятность (иррегулярность – нет алгоритма – и устойчивость частот; хаотичность, вероятностность, достоверность; вероятностная Вселенная (Винер); вероятностный стиль мышления; объективная и субъективная вероятность – метод Монте-Карло – метод статистических испытаний – статистическое моделирование динамических систем).

5. Структура (структура – неизменный, инвариантный элемент некоторой системы; линия первоначальной Демокрита и бесконечная делимость (Эмпедокла линия), современное единство; виртуальная, статистическая структура; диалектика целого и части; отдельное и общее, элементарное; пространственная и временная в форм-факторах, но не пространственная только; ядерная демократия и кварковая модель, не "состоит из", а "превращается в"; фидомоны; дефект масс и энергия связи; соотношение неопределенностей – чем меньше расстояния, тем больше энергии – слияние микромира и Вселенной).

6. Симметрия (тождественное в различном и противоположном; симметрия объектов и законов; теория групп; законы сохранения; асимметрия; "Диссимметрия творит явление" – Пьер Кюри; гармония – сочетание симметрии и асимметрии).

7. Наглядность (модели; два этапа – физическая модель и математическое описание; теоретико-информационный подход; информационная емкость – абстрактность, статистичность; отделение от органов чувств, но и упрощение – всеобщее; "Результаты современного естествознания не допускают наглядности, но их достоверность нельзя ставить под сомнение, если допустимы эксперимент и рациональный анализ" – Гейзенберг; "Фундаментальные структуры природы или мира еще абстрактнее, еще менее допустимы непосредственно нашим органам чувств, но они также и проще, так как представляют всеобщее и уже никоим образом не особенное" – Гейзенберг).

8. Пространство-время (фон, классичность и абсолютизм в нерелятивистской квантовой теории).

9. Прерывность и непрерывность (материальных сущностей, черт движения, пространственно-временного описания; см. "Новые понятия и представления").

10. Борьба с идеализмом, (нео)позитивизмом, агностицизмом (логика понятий, отбрасывание основного вопроса философии – черты позитивистского подхода).

#### Дополнительные вопросы

1. Измерение (формирует теорию – исходные понятия входят в связь с измерением – и подтверждает теорию; противоречивость процесса познания; относительность объекта и прибора; эксперимент и рациональный анализ, обобщения; прямое и косвенное измерение).

2. Неопределенность (снятая неопределенность – информация; статистический подход и выход за его рамки – Колмогоров).

3. Необходимость и случайность (необходимость пробиваться сквозь массу случайностей – тенденции).

4. Принцип соответствия (отрицание отрицания, преемственность).

5. Дополнительность (диалектическое единство противоположностей, раскрывается в процессе познания).

6. Завершенность теории (внутренние взаимосвязи и связь с другими теориями, пересмотр принципов, интерпретация, философский анализ, объяснение смысла величин на стыке теорий, усовершенствование методов, расширение области применимости, открытие новых явлений; витки спирали познания; из отдельных эмпирических законов – обобщение (например, формула Планка), объясняющее разрозненные факты и гипотезы, но в себе вновь содержит элементы, требующие объяснения – нового уровня знания (квант действия – загадка), теорема Геделя.

7. Интенсивное (качественное, вглубь) и экстенсивное (количественно, вширь). Экстенсивное развитие физики – основа интенсивного развития всего естествознания.

## ИЗРЕЧЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ УЧЕНЫХ

Разумно применять квантовую теорию до тех пор, пока это дает плоды, даже если она и не является совершенным описанием.

А.Эйнштейн

Самое непонятное в мире – это то, что он понятен.

А.Эйнштейн

Бог изощрен, но не злобен (злонамерен).

А.Эйнштейн

Вероятность – это здравый смысл плюс точность.

П.Лаплас

Существует ритм и повторяющиеся структуры в явлениях природы, которые не видны при простом наблюдении, но открываются лишь анализом. И это те ритмы и структуры, которые мы называем физическими законами... В основе всех законов физики лежат принципы симметрии, тесно связанные с наличием в изменении сохраняющихся моментов.

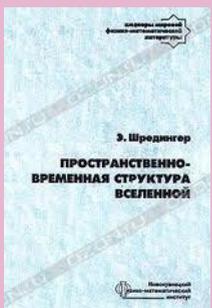
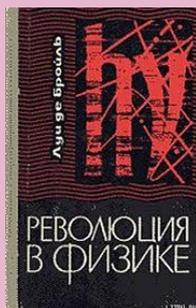
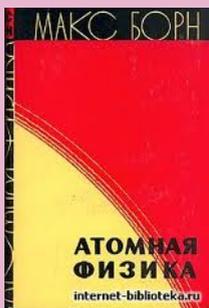
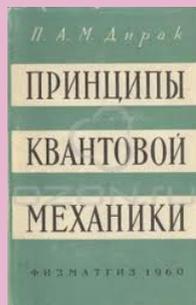
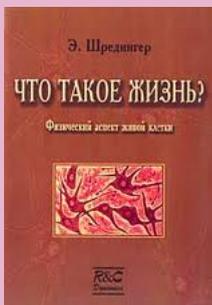
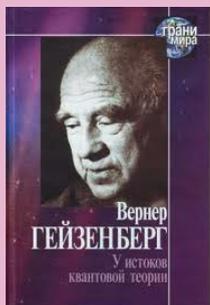
Р.Фейнман

Теоретическая физика – это область физики, которая посвящена пониманию и обобщению экспериментальных данных, выявлению единства ряда внешне различных явлений, математической формулировке физических представлений и законов, анализу вытекающих из этих законов следствий.

В.Л.Гинзбург

## НЕКОТОРЫЕ ТЕРМИНЫ

1. Quantum (нем.) - количество, масса;  
quantum (лат.) - сколько.
2. mechanike от mechane (гр.) - орудие.
3. dynamikos (гр.) - относящийся к силе.
4. kinema(tos) (гр.) - движение.
5. kinetikos (гр.) - относящийся к движению.
6. statos (гр.) - стоящий.
7. Анналы (от лат.) - летопись.
8. stochasis (гр.) - догадка (стохастический,  
вероятностный, случайный).



## ДОПОЛНЕНИЕ

К монографии прилагается компакт-диск, на котором содержатся электронные версии следующих книг автора по квантовой теории (файлы формата pdf).

1. Ульянов В.В. Задачи по квантовой механике и квантовой статистике. - Х.: Высш. шк., 1980. - 216 с.
2. Ульянов В.В. Интегральные методы в квантовой механике. - Х.: Высш. шк., 1982. - 160 с.
3. Ульянов В.В. Методы квантовой кинетики. - Х.: Высш.шк., 1987. - 144 с.
4. Ульянов В.В. Вводные лекции по квантовой механике. Часть 1-я. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2002. - 40 с.
5. Ульянов В.В. Вводные лекции по квантовой механике. Часть 2-я. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2002. - 28 с.
6. Ульянов В.В. Вступ до квантової кінетики. - Х.: ХНУ імені В.Н.Каразіна, 2004. - 164 с.
7. Василевская Ю.В., Ульянов В.В. Новые квазиточнорешаемые модели в квантовой теории спиновых систем. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2005. - 124 с.
8. Ульянов В.В. Конспект вводных лекций по квантовой механике. Часть 3-я. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2011. - 52 с.
9. Ульянов В.В. Конспект вводных лекций по квантовой механике. Часть 4-я. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2011. - 52 с.
10. Ульянов В.В. Конспект лекций по квантовой статистике. Часть 1-я. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2011. - 40 с.
11. Ульянов В.В. Конспект лекций по квантовой статистике. Часть 2-я. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2011. - 40 с.
12. Ульянов В.В. Вводные лекции по квантовой механике. Часть 1-я. 2-е изд., доп. - Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2011. - 48 с.

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие А.М.Ермолаева . . . . .	3
От автора . . . . .	4
Первая лекция. Введение . . . . .	6
Вторая лекция. Возникновение и развитие квантовой теории.	12
Третья лекция. Создание квантовой механики. . . . .	16
Четвертая лекция. Основные понятия квантовой механики. .	22
Пятая лекция. Волновая функция . . . . .	28
Новые понятия и представления. . . . .	32
Философские проблемы квантовой физики . . . . .	36
Изречения известных ученых . . . . .	39
Некоторые термины . . . . .	40
Обложки некоторых книг классиков . . . . .	41
Дополнение. . . . .	42

Навчальне видання

Володимир Володимирович Ульянов  
ВСТУПНІ ЛЕКЦІЇ З КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

Частина перша  
Друге видання, доповнене

Навчальний посібник

Російською мовою

Відповідальний за випуск Г.І.Рашба

---

Підп. до друку 10.06.2011. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний. Друк ризографічний.  
Умов. друк. арк. 2,6 . Тираж 50 пр. Ціна договірна.

---

Надруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП “Азамаєв В.Р.”  
Свідотство про державну реєстрацію ВО2 № 229278 від 25.11.1998 р.  
Свідотство про внесення суб’єкта визначеної справи до державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції.  
Серія ХК № 135 від 23.02.05 р.  
м.Харків, вул. Познанська 6, к. 84 тел. 8(057) 362-01-52

**Издания кафедры теоретической физики имени академика И.М.Лифшица (вклад Ульяновых)**  
**К 200-летию Харьковского университета**

**Серия монографий и учебных пособий**

1. В.В.Ульянов. ВСТУП ДО КВАНТОВОЇ КІНЕТИКИ. – 2004.
2. Ю.В.Василевская, В.В.Ульянов  
НОВЫЕ КВАЗИТОЧНОРЕШАЕМЫЕ МОДЕЛИ В  
КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СПИНОВЫХ СИСТЕМ. – 2005.
3. Е.Н.Синельник, В.В.Ульянов  
ФРАКТАЛЫ: ОТ МАТЕМАТИКИ К ФИЗИКЕ(+CD). – 2005.
4. А.В.Лымарь, В.В.Ульянов. ФРАКТАЛЫ: ОТ МАТЕМАТИКИ К  
ФИЗИКЕ. Ч. 2 (+CD). – 2010.
5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА НА ФИЗИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ  
ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. Сост. В.В.Ульянов. – 2009.
6. В.В.Ульянов. О КВАЗИКЛАССИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ  
ЧАСТИЦ В ПОЛЯХ С ОСОБЕННОСТЯМИ. – 2002.
- 7,8. В.В.Ульянов, Н.В.Ульянов. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВА-  
НИЯ КВАНТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ. Ч. 1, 2 (+CD). – 2011, 2012.
- 9,10,11,12. В.В.Ульянов. ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО КВАНТОВОЙ  
МЕХАНИКЕ. Ч. 1, 2, 3, 4. – 2002, 2011.
- 13,14. В.В.Ульянов. ЛЕКЦИИ ПО КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКЕ.  
Ч. 1, 2. – 2011.
- 15,16. В.В.Ульянов. ВВОДНЫЕ ЛЕКЦИИ ПО КВАНТОВОЙ  
МЕХАНИКЕ. Ч. 1, 2. Изд. 2-е, доп. – 2011.
17. В.В.Ульянов. К ИСТОРИИ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА  
И КАФЕДРЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. Ч. 1. – 2003.
18. В.В.Ульянов. К ИСТОРИИ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА  
И КАФЕДРЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. Ч. 2. – 2003.
19. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
К ИСТОРИИ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА  
И КАФЕДРЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. Ч. 3. – 2004.
20. А.М.Ермолаев, Н.В.Ульянов. СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ  
В НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРОВОДНИКАХ  
С ПРИМЕСНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ЭЛЕКТРОНОВ. – 2006.
21. А.М.Ermolaev, N.V.Ulyanov. ELECTRON SPIN WAVES IN  
NONMAGNETIC CONDUCTORS WITH RESONANCE STATES  
OF ELECTRONS. – 2008.
22. О.М.Єрмолаєв, В.В.Ульянов. СТИСЛИЙ НАРИС ІСТОРІЇ  
КАФЕДРИ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМЕНІ АКАДЕМІКА  
І.М.ЛІФШИЦЯ. – 2008.

## К 200-летию Харьковского университета

### **Серия воспоминаний об ученых-физиках**

1. В.В.Ульянов  
ИЛЬЯ МИХАЙЛОВИЧ ЛИФШИЦ. – 2001,2007(+DVD).
2. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
МОИСЕЙ ИСААКОВИЧ КАГАНОВ. – 2001.
3. В.В.Ульянов. ЛЕВ ЭЛЕАЗАРОВИЧ ПАРГАМАНИК. – 2002.
4. В.Г.Песчанский, В.В.Ульянов  
ЛЕОНИД СТЕПАНОВИЧ ГУЛИДА. – 2002.
5. В.В.Ульянов  
БОРИС ИЕРЕМИЕВИЧ ВЕРКИН. – 2002.
6. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
АРНОЛЬД МАРКОВИЧ КОСЕВИЧ. – 2002.
7. В.В.Ульянов  
ВИКТОР МОИСЕЕВИЧ ЦУКЕРНИК. – 2002.
8. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
ВАЛЕНТИН ГРИГОРЬЕВИЧ ПЕСЧАНСКИЙ. 2002.
9. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
ЭМАНУИЛ АЙЗИКОВИЧ КАНЕР. – 2002.
10. А.М.Ермолаев, Ю.П.Степановский, В.В.Ульянов  
АЛЕКСАНДР ИЛЬИЧ АХИЕЗЕР. – 2002.
11. В.В.Ульянов  
АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЖЕЛЕХОВСКИЙ. – 2003.
12. В.Г.Песчанский, В.В.Ульянов  
ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ ГАЛАЙКО. – 2003.
13. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
ИГОРЬ ИВАНОВИЧ ФАЛЬКО. – 2003.
14. Г.И.Рашба, В.В.Ульянов  
АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ ЕРМОЛАЕВ. –2003.
- 15.
16. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов  
ОЛЕГ ИВАНОВИЧ ЛЮБИМОВ. – 2005.
17. В.В.Ульянов. ЛАНДАУ В ХАРЬКОВЕ. – 2008.
18. В.В.Ульянов. ВОСПОМИНАНИЯ ФИЗИКА-ТЕОРЕТИКА. Ч.1. – 2008.
19. В.В.Ульянов. К 95-ЛЕТИЮ Л.Э.ПАРГАМАНИКА. – 2009 (CD).
20. В.В.Ульянов. ЛАНДАУ В ХАРЬКОВЕ (2-е изд., доп.). – 2010.
21. А.М.Ермолаев, В.В.Ульянов. М.И.КАГАНОВ В ХГУ. – 2011.
22. В.В.Ульянов. К 90-ЛЕТИЮ М.И.Каганова. – 2011 (CD).

## К 200-летию Харьковского университета

### **Серия воспоминаний о Детях физмата**

1. В.В.Ульянов. АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ШАРАПОВ. – 2002, 2007.
2. В.В.Ульянов. НА УНИВЕРСИТЕТСКОЙ. – 2002, 2007.
3. В.В.Ульянов. АНАТОЛИЙ ГАВРИЛОВИЧ КЛАДКОВОЙ (Мой друг Толька). – 2002, 2007(CD).
4. ЛЕГЕНДЫ И БЫЛИ СТАРОГО ФИЗМАТА
  - Ч.I. Сборник рассказов. Агафонова Н.Ф., Дзюба А.С., Перваков В.А., Сизова З.И., Ульянов В.В., Шарапов А.И. - 2002.
  - Ч. I I. Сборник рассказов. Агафонова Н.Ф., Бляшенко Г.С., Гапон Э.В, Иванов И.Г., Кондратьев Б.В., Мерисов Б.А., Ульянов В.В., Хижковский В.П., Шарапов А.И. - 2002.
  - Ч. I I I. Сборник рассказов. Агафонова Н.Ф., Бляшенко Г.С., Козинец В.В., Кондратьев Б.В., Николаев Г.Т., Ульянов В.В., Шарапов А.И. - 2002.
  - Ч.IV. Сборник рассказов. Бляшенко Г.С., Гребенник И.П., Мерисов Б.А., Ульянов В.В., Чебанова Т.С. - 2002.
  - Ч. V. Сборник рассказов. Бляшенко Г.С., Валиев Б.М., Гребенник И.П., Мерисов Б.А., Сизова З.И., Ульянов В.В. - 2002.
  - Ч. VI. Сборник рассказов. Барьяхтар В.Г., Гребенник И.П., Креснин А.А., Манжелей В.Г., Пустовалов В.В., Рофе-Бекетов Ф.С., Ульянов В.В., Яцук К.П. - 2003.
  - Ч. VII. Сборник стихов. Николаев Г.Т., Рогинкина Н.А., Рофе-Бекетов Ф.С., Сизова З.И., Степановский Ю.П., Ульянов В.В., Шарапов А.И. - 2003.
  - Ч. VIII. Сборник рассказов. Гребенник И.П., Тартаковский В.К., Ульянов В.В., Яцук К.П. - 2003.
  - Ч. IX. Сборник рассказов. Бляшенко Г.С., Гребенник И.П., Пустовалов В.В., Ульянов В.В., Яцук К.П. - 2003..
  - Ч. X. Сборник рассказов. Гребенник И.П., Ульянов В.В., Хижковский В.П., Яцук К.П. - 2003.
  - Ч. XI. Сборник стихов. Бирюков В.Я., Кан Я.С., Николаев Г.Т., Рофе-Бекетов Ф.С., Ульянов В.В., Шарапов А.И., Яцук К.П., Яцук Л.П. - 2003.
  - Ч. XII. Сборник рассказов. Боярский Л.А., Гребенник И.П., Малеев В.Я., Пустовалов В.В., Ульянов В.В., Чебанова Т.С. - 2004.
  - Ч. XIII. Сборник рассказов. Ковинько Н.М., Мазель Е.З., Ривкина Э.М., Розенберг В.Я., Тартаковский В.К., Ульянов В.В., Шарапов А.И. - 2008.
  - Ч. XIV. Сборник стихов. Бирюков В.Я., Евланов М.В., Кан Я.С., Николаев Г.Т., Рогинкина Н.А., Рофе-Бекетов Ф.С., Сизова З.И., Степановский Ю.П., Таранова Г.М., Ульянов В.В., Шарапов А.И., Яцук К.П., Яцук Л.П. - 2009.
  - Ч. XV. Сборник рассказов. Креснин А.А., Ульянов В.В., Федченко Л.Ю., Хайтман Е.Н., Яровая Р.Г. - 2009.
  - Ч. XVI. Сборник рассказов. Рофе-Бекетов Ф.С., Татарченко Л.П., Ульянов В.В. – 2009.
5. В.В.Ульянов. КАК МЫ ПРАЗДНОВАЛИ 50-ЛЕТИЕ ОКОНЧАНИЯ УНИВЕРСИТЕТА (+CD). – 2007.

## К 200-летию Харьковского университета

### **Серия воспоминаний о жизни в XX веке**

1. В.В.Ульянов. Д О В О Й Н Ы (1934-1941). – 2002.
2. В.В.Ульянов. В О Е Н Н Ы Е Г О Д Ы (1941-1945). – 2002.
3. В.В.Ульянов. В Ш К О Л Е (1945-1952). – 2002.
4. В.В.Ульянов  
РАССКАЗЫ О ЛЕТНЕМ ОТДЫХЕ (1934-1950). – 2003.
5. В.В.Ульянов  
РАССКАЗЫ О ЛЕТНЕМ ОТДЫХЕ (1951-1954). – 2003.
6. В.В.Ульянов, И.П.Ульянова  
РАССКАЗЫ О ЛЕТНЕМ ОТДЫХЕ (1955-1957). – 2003.
7. В.В.Ульянов, И.П.Ульянова  
РАССКАЗЫ О ЛЕТНЕМ ОТДЫХЕ (1958-1961). – 2003.
8. В.В.Ульянов. Д В А Д Н Я В А Л У Ш Т Е. – 2003.  
(Волейбольные грёзы)
9. В.В.Ульянов. Д В А Д Ц А Т Ы Й Д О М. – 2003.
10. В.В.Ульянов. 5 0 Л Е Т С П У С Т Я. – 2003.
11. В.А.Ульянов  
ВОСПОМИНАНИЯ ДЕТСТВА И ЮНОСТИ. – 2003.
12. В.А.Ульянов. МОЯ ПОЕЗДКА В США И ОБРАТНО. – 2003.
13. В.А.Ульянов. С Т Р А Н И Ч К И Ж И З Н И. – 2003.
14. В.В.Ульянов  
РОДОСЛОВНАЯ НАШЕЙ СЕМЬИ. – 2004.
15. В.В.Ульянов. ПОЛВЕКА В УНИВЕРСИТЕТЕ. – 2004.
16. В.В.Ульянов, И.П.Ульянова  
РАССКАЗЫ О ЛЕТНЕМ ОТДЫХЕ (1962-1967)+CD. – 2006.
17. В.В.Ульянов. ПОЛВЕКА В УНИВЕРСИТЕТЕ(2-е изд., доп.). – 2007.
18. В.В.Ульянов. ВИКТОР ЕВГЕНЬЕВИЧ РУБАЛОВИЧ(+CD). – 2008.
19. В.В.Ульянов. НОВОЕ О ПУШКИНЕ И ГОГОЛЕ. – 2009 (CD).
20. В.В.Ульянов. ИЗДАНИЯ. ВЫСТАВКА КНИГ. – 2009 (CD).
21. Н.В. и И.П.Ульяновы. ЧЕРНОГОРИЯ. ИЮЛЬ 2009. – 2009 (CD).
22. Н.В.Ульянов, И.П.Ульянова. ПО ЮГУ ЕВРОПЫ. – 2009 (CD).
23. В.В.Ульянов. К 150-ЛЕТИЮ А.П.ЧЕХОВА. – 2010 (CD).
24. В.В.Ульянов. К 170-ЛЕТИЮ П.И.ЧАЙКОВСКОГО. – 2010 (CD).
25. Н.В. и И.П.Ульяновы. БОЛГАРИЯ И РУМЫНИЯ. – 2010 (CD).
26. В.В. и Н.В.Ульяновы. МИСХОР – АВГУСТ 2010. – 2010 (CD).
27. В.В.Ульянов. К 110-летию В.А.Ульянова. Рисунок отца.–2011(CD).
28. В.В.Ульянов. АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ ЗАВАЛИШИН.–2011(CD).
29. В.В.Ульянов  
МОЯ МУЗЫКАЛЬНАЯ ИСТОРИЯ(+DVD). – 2011.
30. В.В.Ульянов, И.П.Ульянова  
РАССКАЗЫ О ЛЕТНЕМ ОТДЫХЕ (1968-1973)+DVD. – 2011.

1900 М.Планк  
1905 А.Эйнштейн  
1907 А.Эйнштейн  
1911 Э.Резерфорд  
1913 Н.Бор  
1915 А.Зоммерфельд  
1916 А.Эйнштейн  
1923 Л. Де Бройль

1924 М.Борн  
1925 В.Гейзенберг и В.Паули  
1926 Э.Шредингер и М.Борн  
1927 П.Дирак, В.Гейзенберг, Н.Бор  
1928 П.Дирак  
1927-1935 П.Дирак, В.Паули,  
В.Гейзенберг, Э.Ферми  
1942 С.Томонага  
1948 Ю.Швингер, Р.Фейнман