

К. Н. Мухин

Занимательная ядерная физика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
К11

К11 **К. Н. Мухин**
Занимательная ядерная физика / К. Н. Мухин – М.: Книга по Требованию, 2012. – 270 с.

ISBN 978-5-458-36500-0

Всякая развивающаяся наука нуждается в молодых энтузиастах, влюбленных в нее и готовых посвятить ей свою жизнь. Такие влюбленные энтузиасты наверняка есть среди учащейся молодежи. Но наука — Особа весьма серьезная и требовательная. Ей одной влюбленности мало. Она хочет иметь среди своих поклонников только тех, кому может ответить взаимностью. А для этого поклонники должны обладать вполне определенным «джентльменским набором» достоинств. Спрашивается, как найти таких молодых людей среди миллионов школьников?...

ISBN 978-5-458-36500-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

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, клякс, 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.

мана является не самоцелью, а только средством привлечь внимание читателя к интересному самому по себе предмету или явлению. Целью у него всегда было раскрытие физической сущности этого явления.

Итак, глубокая физичность, вера в творческую активность читателя и занимательность — вот те «три кита», на которых столь долго держится популярность книг Перельмана.

К сожалению, в последнее время традиция издания занимательных книг о науке, *подобных книгам Перельмана*, была постепенно утрачена. Вероятно, это случилось потому, что писать такие книги очень трудно (гораздо труднее, чем любые другие по своей специальности); между тем никакой агитации за написание этих книг у нас не проводится. И все-таки эту традицию надо возрождать, и сделать это должны работники науки (а не журналисты!). Только люди, которым в науке нравится *все*, которые знают подробности трудной черновой научной работы и находят в ней радость творчества, могут (если сумеют) рассказать об этом так, чтобы читатель сознательно (зная, на что он идет) захотел сделать эту науку своей специальностью.

Перед вами книга, в которой предпринимается такая попытка. Книга посвящена одной из труднейших и интереснейших наук современности — ядерной физике (включая физику элементарных частиц).

Как следует из предыдущего, автору хотелось написать свою книгу в духе «Занимательной физики» Перельмана. Но сделать это оказалось очень не просто, отчасти из-за специфики подобных книг вообще, отчасти из-за отсутствия у автора соответствующего опыта, отчасти из-за сложности предмета. Автор неоднократно бросал, а потом снова начинал (не с того места, на котором остановился) писать эту книгу*. Порядок написания отдельных глав и параграфов абсолютно не соответствует их расположению. Одни разделы написаны, что называется, с ходу, другие много раз переделывались. Отсюда некоторая неровность стиля и другие недостатки. Словом, книга получилась не совсем такой, как была задумана. Тем не менее автор надеется, что, несмотря на это, книга все же найдет своих читателей. И если некоторые из них по-настоящему заинтересуются ядерной физикой, цель, поставленная автором, будет достигнута.

Несколько замечаний о содержании и характере книги.

Выбранная занимательная форма рассказа неизбежно привела к тому, что книга оказалась собранием избранных вопросов из ядерной физики и физики элементарных частиц. Поэтому она ни в какой степени не может заменить любой самый элементарный учебник с присущим ему систематическим изложением материала, упоминанием имен ученых и ссылками на литературу. Эта книга не очень систематична, в ней сравнительно мало имен, а ссылки на литера-

* Пользуясь удобным случаем, хочется отметить, что настоящая книга появляется в свет в значительной степени благодаря деликатной настойчивости Издательства, которое неизменно верило в необходимость подобной книги и в способность автора ее написать.

туру носят эпизодический характер. Однако, по мнению автора, эти особенности книги не мешают читателю понять ее содержание. Поясним эту мысль аналогией.

Есть разные способы изучения иностранного языка. Один опирается на систематическое изучение правил грамматики и перевода, постановку произношения, заучивание слов и т. п. Вероятно, таким способом в конце концов язык выучить можно. Но процедура эта длительная, трудная и неинтересная. Другой способ заключается в том, что человек просто попадает в среду, где все, кроме него, говорят только на иностранном языке. Человеку очень трудно, но интересно. И язык он выучивает быстрее, чем первым способом.

Вот именно таким вторым способом автор и предлагает читателю познакомиться с ядерной физикой. Пусть лучше читателю будет трудно и не сразу все понятно, но зато интересно. Интересные трудности легче преодолевать. Тем более что для этого даже не придется выходить за рамки данной книги: если хорошенько поискать, то в ней можно найти ответы почти на все непонятные вопросы.

Нынешних школьников трудно сравнить с прежними, если так можно выразиться, «довоенными». У нас, кроме книг Перельмана, почти ничего больше не было. Теперь наиболее любознательные школьники знают физику в объеме трехтомного курса под редакцией академика Ландсберга. Имеется много научно-популярных книг по теории относительности, ядерной физике, ядерной энергетике, физике элементарных частиц и др. Наши журналы и газеты печатают множество статей популяризаторов науки. Поэтому автор может рассчитывать на то, что читатель этой книги знает многое из того, о чем в ней не говорится. Это позволяет не тратить время и место на набившие оскомину «обязательные главы» современных научно-популярных книг, посвященные описанию исторического хода развития наших знаний об атоме, атомном ядре и элементарных частицах. Вместо них в книге дана относительно небольшая вводная глава, в которой без особых пояснений сформулировано *состояние* наших знаний на сегодняшний день.

Эта глава представляет собой нечто вроде краткого конспекта по ядерной физике, по которому можно составить представление о месте того или иного конкретного явления в этой науке и о взаимосвязи различных явлений между собой, а также найти те разделы книги, где об этих явлениях рассказывается подробнее. Таким образом, при активном использовании первой главы книгу можно читать не подряд. Естественно, что из-за всех этих особенностей вводная глава написана более строгим языком, чем остальные.

Объекты микромира отличаются очень малыми размерами и массой и, как правило, движутся со скоростями, близкими к скорости света. В обоих случаях классическая механика Ньютона перестает давать правильные результаты. В связи с этим физики, изучающие микромир, используют для интерпретации своих результатов квантовую механику и теорию относительности. Без понимания основных положений этих наук нельзя обойтись и при популярном изло-

жении ядерной физики. Поэтому вторая и третья главы книги посвящены именно этим вопросам. Однако изложение их, в отличие от других научно-популярных книг, приближено к задачам ядерной физики.

Фундаментальнейшими вопросами ядерной физики и физики элементарных частиц являются вопрос о природе и характере взаимодействий, в которых участвуют микрочастицы, и вопрос о законах сохранения и их роли в разных взаимодействиях. Этим вопросам, а также примыкающим сюда вопросам классификации элементарных частиц посвящена четвертая глава.

Последующие главы посвящены собственно ядерной физике: ее достижениям и применениям, ее взаимоотношениям с другими науками и нерешенным вопросам*. Изложение рассмотренных здесь вопросов проведено в общем для книги занимательном стиле. Ряд «наиболее занимательных» вопросов (неожиданные применения, интересные проекты, удивительные точности, любопытные эффекты и остроумные решения) выделен в большую самостоятельную главу.

В книге довольно много формул и расчетов (которые всегда доступны старшекласснику). Автор пошел на это сознательно. Настоящий физик не должен бояться математики. Физика — наука количественная, и подменять ее словами нельзя. Кстати, современный молодой человек, интересующийся физикой, это хорошо понимает. Один наш крупный ученый и хороший популяризатор рассказал как-то автору о своей встрече со школьниками — читателями его научно-популярной книги: школьники упрекали ученого за то, что в его книге слишком *мало* формул!

В заключение несколько советов читателям.

Из педагогических соображений автор всюду старался рассказывать так, чтобы первое знакомство с новым вопросом происходило без особых подробностей. Сначала надо увидеть лес, а уже потом деревья. Представлению о «лесе» в целом в значительной степени посвящена вводная глава, к которой мы рекомендуем периодически возвращаться, чтобы «не потерять за деревьями леса».

Ядерная физика — наука сложная и трудная. Неискушенный читатель встречается здесь с множеством новых необычных явлений и понятий, к которым очень нелегко привыкнуть. Отчетливо представляя себе это и желая облегчить участь читателя, автор старался почаще разбавлять серьезный текст шуточными отступлениями, наглядными и забавными аналогиями, предполагаемыми случаями из жизни читателя и т. п. Все это, конечно, помогает восприятию материала, но при этом нельзя забывать, что аналогия в науке —

* Рассказывая о разнообразных применениях ядерной физики и об ее взаимоотношениях с другими науками, автор зачастую был вынужден довольно далеко отходить в сторону от своей узкой специальности и выступать в качестве дилетанта. Поэтому он заранее приносит свои извинения специалистам (медикам, химикам, археологам и др.), в руки которых может попасть эта книга, за упрощенное изложение соответствующего материала.

вещь рискованная. Буквальное понимание ее часто приводит к вульгаризации. Поэтому, пользуясь аналогией, старайтесь понять, где она кончается, в чем она не проходит, и снова вернитесь к тому физическому явлению, для иллюстрации которого аналогия придумана.

И, наконец, последний совет. В связи с занимательностью материала и облегченным способом его изложения книга может показаться простой. Не доверяйте этому ощущению и отнеситесь к ней достаточно серьезно. Чтобы от книги был толк, ее надо читать с карандашом и бумагой в руках и почаще размышлять над прочитанным.

В заключение автор выражает искреннюю признательность проф. Л. В. Грошеву и чл.-кор. АН СССР И. И. Гуревичу за обсуждение рукописи книги, а также благодарит всех, кто своими советами помог ее написать.

Глава 1. (Вводная, она же заключительная)

ЧТО ТАКОЕ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Чем более вникают в деяния природы, тем видима наиболее становится простота законов, коим следует она в своих деяниях.

А. Н. РАДИЩЕВ

§ 1. НАША ПРОГРАММА

Обращение к читателю. — Этапы познания природы. — Четыре элемента древних греков. — Атомистическая теория. — Тысячи молекул из сотни атомов. — Три элементарных кирпичика. — Новые открытия. — Опять сотня. — А, может быть, их все-таки три? — Программа этой книги.

Начнем с того, что читать эту главу сейчас, в начале всей книги, совсем не обязательно. Это — самая неинтересная (точнее говоря, самая незанимательная) глава, потому что в ней довольно сухо рассказывается о ядерной физике как о науке. Вместе с тем материал этой главы может оказаться полезным по ходу чтения остальных глав книги, так как он связывает их воедино. Может быть, самое разумное обращение с первой главой заключается в следующем: надо прочесть этот параграф, бегло просмотреть остальные и перейти к другим главам, а затем периодически возвращаться к вводной главе за разъяснениями и указаниями, и, наконец, внимательно прочесть ее в заключение всей книги.

Итак, что такое ядерная физика; как она возникла и чем занимается; каковы ее достижения и что она еще не решила; как она связана с другими науками и в чем ее значение?

В процессе познания природы человек всегда стремился как-то классифицировать изучаемые вещества, выделять сходные по свойствам, разбивать на составные (элементарные) части.

Самую первую (из числа известных нам) попытку упорядочения окружающего мира предприняли древнегреческие философы — материалисты, которые считали, что все вещества состоят из четырех вечно существующих элементов: земли, воды, воздуха и огня. Боль-

шое разнообразие веществ они объясняли разными комбинациями этих четырех элементов. Из единства строения всех веществ делали вывод о возможности их взаимных превращений. Некоторые последователи этого учения ввели представление об атомистической природе вещества (которое, впрочем, вскоре было забыто почти на 2000 лет!).

Эти взгляды (кажущиеся сейчас весьма наивными) просуществовали вплоть до XVI столетия и сыграли огромную роль. Они не только утверждали материальность мира, но и в какой-то мере заложили качественные основы современного учения о разных состояниях вещества и об его атомно-молекулярной структуре.

С тех пор прошло 2500 лет. За это время человек накопил много конкретных сведений об окружающих его веществах, изучил их свойства, научился превращать одни вещества в другие и даже получать новые вещества, не встречающиеся в природе. Естественно, что одновременно с углублением познания закономерностей природы совершенствовались и взгляды на структуру вещества.

В XVI—XVII вв. вновь возродилась (на новом уровне знания) атомистическая теория, согласно которой каждое вещество состоит из мельчайших неделимых частиц — *атомов материи*. В конце XVIII в. ученые впервые узнали, что вода — *сложное* вещество, состоящее из двух простых веществ — кислорода и водорода. Соответственно понятие атомы материи было разбито на два: *молекулы* и *атомы*.

Молекула является мельчайшей частицей сложного вещества. Каждое сложное вещество состоит из молекул одного типа. Сколько разных веществ, столько различных типов молекул.

Атом — мельчайшая частица простого вещества — элемента. Различных элементов существенно меньше, чем различных веществ. В начале XIX в. их было известно 50, сейчас (вместе с созданными искусственно) — 104. Столько же имеется разных атомов*. И вот из сотни разных атомов как из элементарных кирпичиков можно построить многие, многие тысячи различных молекул.

Таким образом, атомы приняли на себя функции четырех элементов древних греков. Углубление знаний о веществе привело к резкому возрастанию количества элементарных частиц.

Когда были открыты атомы, им приписали свойство неделимости. И в течение целого столетия ученым казалось, что атомы действительно обладают этим свойством, так как во всех взаимодействиях между собой они вели себя как неделимые частицы. Однако в конце XIX — начале XX столетия неделимость атома была поставлена под сомнение. В это время были открыты катодные и рентгеновские лучи, радиоактивность. Все это указывало на сложный состав и общность структуры разных атомов.

* Строго говоря, разных атомов гораздо больше, так как почти все элементы имеют по несколько изотопов. Однако изотопы были открыты уже после того, как атомы перестали считать элементарными частицами.

В 1911 г. было установлено, что любой атом состоит из *ядра* и окружающих его *электронов*. Этот год можно считать годом рождения ядерной физики, главной задачей которой является изучение атомного ядра.

Первые сведения о структуре ядра были получены в 1919 г., когда в составе ядра открыли *протоны*. Вначале предполагали (ошибочно), что в составе ядра кроме протонов имеются еще и электроны. Ошибка была исправлена в 1932 г., когда в составе ядра открыли *нейтроны*. Теперь изучение любого вещества независимо от его состояния (твердого, жидкого, газообразного) и конкретного вида в конечном итоге сводится к изучению свойств и взаимодействия трех частиц: протонов, нейтронов и электронов. Любой атом состоит из этих частиц.

Сравнительно недавно в связи с развитием работ по получению управляемой термоядерной реакции физики ввели на равных правах новое, четвертое состояние вещества — *плазму*. Плазма состоит не из атомов, а непосредственно из ядер (или ионов) и электронов, не связанных между собой. Наконец, физики и астрономы предполагают существование еще одного состояния вещества — чисто нейтронного. И в этих двух случаях все сводится к свойствам протонов, нейтронов и электронов.

Открытие строения атома и атомного ядра — крупнейшее достижение ядерной физики. Подумайте только, все, что нас окружает, построено из элементарных частиц всего-навсего трех сортов! Каждая из них может участвовать не более чем в четырех видах взаимодействий: *сильном (ядерном), электромагнитном, слабом и гравитационном*, из которых одно — гравитационное — в микромире почти всегда можно не учитывать. Поэтому какое бы явление природы вы ни рассматривали (механическое, химическое, электрическое, магнитное, тепловое, ядерное), с какими бы состояниями вещества (твердое, жидкое, газообразное, плазма) вы ни имели дела, все в конечном итоге сводится к нескольким (одному—трем) взаимодействиям двух-трех сортов частиц, причем очень часто преобладает только одно взаимодействие и всего два сорта элементарных частиц. Например, все атомные явления, в сущности, сводятся к *электромагнитному* взаимодействию электронов с ядром, состоящим из протонов и нейтронов, а ядерные — к *сильному* взаимодействию между протонами и нейтронами ядра.

Таким образом, ядерная физика существенно упростила картину «устройства мира». И в течение некоторого времени казалось, что в физике царит полное благополучие; однако это благополучие очень скоро нарушилось.

Более глубокое изучение свойств протонов, нейтронов и электронов привело к открытию *позитрона, нейтрино, μ - и π -мезонов* и других частиц. Число элементарных составных частей, из которых построен мир, опять начинает возрастать. И в настоящее время их количество (с учетом многочисленных резонансов) снова превосходит сотню.

Изучением свойств элементарных частиц занимается специальная наука — физика элементарных частиц, которая раньше была одним из небольших разделов ядерной физики. Сейчас это изучение продвинулось уже настолько далеко и глубоко, что вновь появилась надежда на сокращение числа первичных элементов, из которых построен мир. И не исключено, что этих элементов будет совсем немного, может быть опять только три!

Вы видите, что для познания окружающего нас мира человеку пришлось пройти увлекательный, но мучительно длинный и трудный путь изучения вещества, начиная от самых сложных его форм и кончая элементарными частицами. Рассказывая об успехах ядерной физики и физики элементарных частиц, очень соблазнительно повторить этот путь на бумаге в том же хронологическом порядке (но, конечно, упрощенно и сокращенно). Обычно так и поступают.

Однако мы с вами сделаем иначе: мы пройдем этот путь не в прямом, а в обратном направлении. Это даст нам возможность избежать длинных обходных путей и миновать многочисленные тупики заблуждений, которые часто встречались ученым при их движении по лабиринту науки.

Конечно, при таком методе изложения материала появляются свои трудности, потому что по мере «упрощения» картины устройства мира существенно усложняется способ его описания. Так, для описания микромира недостаточно классической механики и классической физики, а необходимы релятивистская механика и квантовая физика. Но ведь рано или поздно о них все равно придется рассказывать, так что даже с учетом этих трудностей наш «обратный» путь выглядит более экономным, чем «прямой».

Итак, воспользуемся всем тем, что добыла ядерная физика за время своего существования, включая самые последние годы, и постараемся рассказать об этом по возможности наиболее рациональным способом. Для этого мы рассмотрим сначала свойства известных элементарных частиц, характер их взаимодействия, законы, которым подчиняются эти взаимодействия, классификацию элементарных частиц.

Зная свойства элементарных частиц, нам будет уже сравнительно просто построить из них более сложные объекты: атомные ядра и атомы — и понять их свойства, т. е. перейти от физики элементарных частиц к ядерной и (частично) атомной физике. В этих разделах будут рассмотрены свойства как стабильных, так и радиоактивных ядер, ядерные реакции, ядерная энергетика и другие вопросы, а также многочисленные применения ядерной физики в самых разнообразных областях.

Наконец, комбинируя разные атомы, можно было бы построить все известное нам многообразие различных веществ. Однако эти вопросы выходят за рамки ядерной физики, поэтому мы, как правило, заниматься ими не будем (хотя отдельные свойства макросреды рассмотрим).

Сформулированная программа будет осуществлена дважды: один раз очень кратко, почти конспективно (но зато последовательно и систематично) — в пределах первой главы; второй раз более подробно и, как мы надеемся, более интересно — на протяжении всех остальных глав.

А теперь напоминаем, что те из вас, кому последующие параграфы первой главы покажутся трудными и скучными, могут пролистать их и сразу перейти ко второй главе. Но не забывайте возвращаться к первой главе, если при чтении книги вы встретите что-нибудь непонятное или потеряете общую ориентировку. Найти нужное место в первой главе можно по подзаголовкам ее параграфов.

§ 2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ МЕЖДУ НИМИ

Из чего и как устроен атом. — Протон, нейтрон и электрон. — Ядерные и электромагнитные силы. — Позитрон и нейтрино. — Слабые силы. — Мезоны. — Странные частицы. — Свойства элементарных частиц. — Законы сохранения. — Античастицы. — Резонансы. — Кварки.

Как уже было сказано, впервые об элементарных частицах как о составных частях любого атома стали говорить в конце XIX — начале XX столетия. Именно в это время было показано, что атомы могут преобразовываться друг в друга при радиоактивных превращениях, которые заключаются в испускании атомом (как считали тогда, а на самом деле атомным ядром) α -частиц, электронов, γ -квантов. В эти же годы (несколько раньше) были открыты катодные и рентгеновские лучи, испускание которых различными атомами свидетельствовало о сходстве в устройстве всех атомов.

Следующими этапами в познании строения атома было открытие тяжелой заряженной сердцевины атома — атомного ядра (1911 г.) и его составных частей: протона (1919 г.) и нейтрона (1932 г.). После открытия нейтрона структура атома окончательно определилась, и с тех пор наши представления о его устройстве остаются практически неизменными. Согласно этим представлениям любой атом состоит из определенного количества трех видов элементарных частиц: протонов p , нейтронов n и электронов e . Протоны и нейтроны, масса каждого из которых примерно в 1800 раз больше массы электрона, образуют тяжелое положительно заряженное атомное ядро очень малых (10^{-13} — 10^{-12} см) размеров. Протоны и нейтроны (которые вместе называются *нуклонами* N) удерживаются внутри атомного ядра ядерными силами притяжения (§ 18, п. 3 и § 19, п. 3). Ядерные силы — самые интенсивные силы природы. Они гораздо (раз в 100) сильнее электромагнитных сил и поэтому удерживают внутри ядра одноименно заряженные протоны. Но ядерные силы действуют только на очень малых ($\sim 10^{-13}$ см) расстояниях, а элект-

ромагнитные силы убывают с расстоянием сравнительно медленно (по закону $1/r^2$). Поэтому на расстоянии от ядра $r \geq 10^{-12}$ см протоны сильно отталкиваются от него.

Разные типы атомных ядер отличаются друг от друга числом содержащихся в них протонов и нейтронов. В легких ядрах число протонов примерно равно числу нейтронов, в тяжелых — протонов примерно 40%, а нейтронов 60%.

Вокруг атомного ядра на относительно очень больших расстояниях (10^{-8} см) находятся отрицательно заряженные электроны, которые удерживаются в области атома электромагнитными силами притяжения, действующими на них со стороны положительно заряженного ядра. Число электронов в атоме равно числу протонов в ядре.

При преобразованиях атомных ядер из них испускаются электроны и антинейтрино (β^- -распад), позитроны и нейтрино (β^+ -распад), γ -кванты (испускание γ -лучей). Первые два процесса идут под действием слабых β -сил, ответственных за медленные процессы (слабое взаимодействие, § 19, п. 4), последний под действием электромагнитного взаимодействия (§ 19, п. 2).

Перечисленные частицы не входят в состав ядра, так как они образуются непосредственно в момент испускания. Тем не менее эти частицы также называют элементарными потому, что ни одну из них нельзя «составить» из других (тогда как атомное ядро можно составить из протонов и нейтронов, а атом из протонов, нейтронов и электронов).

После открытия нейтрона начались интенсивные исследования свойств ядерных сил. В результате выяснилось, что для объяснения некоторых из этих свойств надо предположить существование в природе новых элементарных частиц, поиски которых в конце концов привели к открытию μ - и π -мезонов. В свою очередь изучение свойств μ - и π -мезонов привело к открытию K -мезонов и гиперонов, названных за свои удивительные свойства *странными частицами*.

Каждая элементарная частица характеризуется целым набором свойств: масса, *спин* (собственный момент количества движения, характеризующий состояние квантовомеханического «вращения» частиц), *изотопический спин* (характеристика сильновзаимодействующих частиц), электрический заряд, *барионный заряд* (характеристика тяжелых частиц, начиная с нуклонов), *лептонный заряд* (характеристика электронов, позитронов, $\mu^\pm$ -мезонов, нейтрино и антинейтрино), *странность* (характеристика странных частиц), *четность* (характеристика сильновзаимодействующих частиц и фотона), магнитный момент, схема распада, время жизни, характер взаимодействий, в которых она участвует (см. § 19 и 20). Большинство из перечисленных характеристик имеют всего лишь по несколько значений. Например, электрический заряд любой из известных частиц может быть равен либо $+2e$, либо $+e$, либо $-e$, либо 0. Однако масса и время жизни (а также магнитный момент) у большинства