

**А.С. Давыдов**

# **Теория атомного ядра**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 54  
ББК 24  
А11

А11 **А.С. Давыдов**  
Теория атомного ядра / А.С. Давыдов – М.: Книга по Требованию, 2016. – 612 с.

**ISBN 978-5-458-45366-0**

В книге рассматривается большой круг вопросов теории атомного ядра, относящихся к явлениям, протекающим при энергиях, не превышающих сотни МэВ. В частности, излагаются: модель ядерных оболочек, обобщенная модель ядра и вопросы, связанные с несферической формой ядра, вращательные и колебательные уровни ядер с учетом связи с состояниями отдельных нуклонов в ядре, общая теория ядерных реакций, оптическая модель ядерных взаимодействий, теория ядерных реакций срыва и захвата, теория прямых и поверхностных взаимодействий, теория импульсной аппроксимации, теория углового распределения и поляризации нуклонов, рассеянных ядрами, теория взаимодействия электромагнитного излучения с ядрами, теория бета-распада и ряд других вопросов.

**ISBN 978-5-458-45366-0**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2016

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2016

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.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



|                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 68. Разложение матрицы плотности спиновых состояний по базисным матрицам спинового пространства и спин-тензорам . . . . .      | 358        |
| § 69. Угловое распределение и поляризация продуктов ядерных реакций при частичной поляризации частиц во входном канале . . . . . | 363        |
| § 70. Вычисление матричных элементов от спин-тензорных операторов .                                                              | 366        |
| § 71. Рассеяние частично поляризованных нуклонов неполяризованными ядрами . . . . .                                              | 368        |
| § 72. Двукратное и трехкратное упругое рассеяние нуклонов на неполяризованных ядрах . . . . .                                    | 373        |
| <b>Глава XI. Теория взаимодействия ядер с электромагнитным излучением . . . . .</b>                                              | <b>377</b> |
| § 73. Электрическое и магнитное мультипольные излучения . . . . .                                                                | 377        |
| § 74. Теория электромагнитных переходов, связанных с изменением состояния отдельных нуклонов в ядре . . . . .                    | 385        |
| § 75. Элементарная теория внутренней конверсии . . . . .                                                                         | 393        |
| § 76. Ядерная изомерия и ее связь с оболочечной структурой ядра . .                                                              | 399        |
| § 77. Теория электромагнитных переходов в обобщенной модели ядра .                                                               | 401        |
| § 78. Угловое распределение излучения. Угловые корреляции в каскадных переходах . . . . .                                        | 406        |
| § 79. Захват нейтронов протонами и фоторасщепление дейтрона . . . .                                                              | 411        |
| § 80. Захват нуклона ядром и испускание гамма-лучей . . . . .                                                                    | 416        |
| § 81. Фотоядерные реакции . . . . .                                                                                              | 421        |
| § 82. Возбуждение ядер кулоновским полем тяжелых заряженных частиц                                                               | 428        |
| § 83. Рассеяние гамма-лучей ядрами . . . . .                                                                                     | 433        |
| <b>Глава XII. Взаимодействие медленных нейтронов с ядрами . . . .</b>                                                            | <b>438</b> |
| § 84. Понятие о длине когерентного и некогерентного рассеяния нейтронов на одном ядре . . . . .                                  | 438        |
| § 85. Когерентное рассеяние медленных нейтронов поликристаллическим веществом с бесконечно тяжелыми ядрами . . . . .             | 443        |
| § 86. Изотопическая некогерентность рассеянных нейтронных волн . .                                                               | 447        |
| § 87. Упругое рассеяние медленных нейтронов кристаллами с учетом колебаний атомов . . . . .                                      | 450        |
| § 88. Неупругое рассеяние нейтронов кристаллами с испусканием или поглощением одного фонона . . . . .                            | 457        |
| § 89. Неупругое рассеяние нейтронов кристаллами при множественном рождении и поглощении фононов . . . . .                        | 463        |
| § 90. Показатель преломления нейтронных волн в веществе . . . . .                                                                | 467        |
| <b>Глава XIII*. Оптическая модель ядерных взаимодействий при малых энергиях . . . . .</b>                                        | <b>472</b> |
| § 91. Рассеяние нуклонов ядрами как многократное рассеяние . . . . .                                                             | 472        |
| § 92. Когерентное и некогерентное упругое рассеяние нейтронов ядрами                                                             | 476        |
| § 93. Когерентное упругое рассеяние и эффективный комплексный потенциал . . . . .                                                | 478        |
| § 94. Вычисление действительной части эффективного потенциала как решение задачи о самосогласованном поле . . . . .              | 485        |
| § 95. Мнимая часть эффективного потенциала . . . . .                                                                             | 490        |
| § 96. Интерпретация широких резонансов во взаимодействии нейтронов с ядрами . . . . .                                            | 494        |
| <b>Глава XIV. Теория ядерных реакций, не проходящих через стадию составного ядра . . . . .</b>                                   | <b>498</b> |
| § 97. Прямые или «поверхностные» взаимодействия нуклонов с ядрами .                                                              | 498        |
| § 98. Ядерные реакции, вызываемые дейтронами . . . . .                                                                           | 504        |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 99. Элементарная теория углового распределения нуклонов в реакциях срыва . . . . .                       | 508 |
| § 100*. Основные уравнения теории реакций срыва без учета кулоновского взаимодействия . . . . .            | 511 |
| § 101. Учет кулоновского взаимодействия в реакциях срыва . . . . .                                         | 520 |
| § 102. Поляризация освобожденных нуклонов в реакциях срыва . . . . .                                       | 522 |
| Глава XV. Теория ядерных реакций при больших энергиях . . . . .                                            | 525 |
| § 103. Теневое или дифракционное рассеяние . . . . .                                                       | 525 |
| § 104. Оптическая модель взаимодействия быстрых нуклонов с ядрами . . . . .                                | 529 |
| § 105. «Импульсное» приближение . . . . .                                                                  | 535 |
| § 106*. Элементарная теория ядерных реакций с распадом ядер более чем на две частицы . . . . .             | 541 |
| Приложение I. Общие свойства собственных функций операторов моментов количества движения . . . . .         | 545 |
| § А. Состояния системы с определенными спиновыми и орбитальными моментами . . . . .                        | 545 |
| § Б. Векторное сложение моментов количества движения . . . . .                                             | 550 |
| § В. Спин-угловые волновые функции или сферические функции со спином . . . . .                             | 554 |
| § Г. Векторные сферические функции . . . . .                                                               | 555 |
| § Д. Вращение твердого тела и собственные функции симметричного волчка . . . . .                           | 558 |
| § Е. Некоторые преобразования сферических функций Лапласа . . . . .                                        | 563 |
| § Ж. Матричные элементы от тензорных операторов. Инвариантные операторы Тамма . . . . .                    | 565 |
| § З. Производные обобщенных сферических функций по углам Эйлера и времени . . . . .                        | 568 |
| § И. Коэффициенты Рака . . . . .                                                                           | 572 |
| Приложение II. Электрические мультипольные моменты системы частиц . . . . .                                | 575 |
| § К. Квадрупольный электрический момент ядра в адиабатическом приближении. . . . .                         | 575 |
| § Л. Квадрупольный электрический момент, создаваемый одним протоном . . . . .                              | 578 |
| Приложение III. Волновые поля, описываемые уравнением Дирака . . . . .                                     | 579 |
| § М. Свободное движение частицы со спином $\frac{1}{2}$ . . . . .                                          | 579 |
| § Н. Матричные элементы некоторых операторов Дирака . . . . .                                              | 583 |
| § О. Некоторые преобразования волновых функций Дирака . . . . .                                            | 585 |
| § П. Спин-орбитальное взаимодействие и уравнение Дирака . . . . .                                          | 583 |
| Приложение IV. Классическая энергия поверхностных колебаний ядра в гидродинамическом приближении . . . . . | 593 |
| Литература . . . . .                                                                                       | 597 |
| Предметный указатель . . . . .                                                                             | 608 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Последние годы ознаменовались мощным развитием ядерной физики. Громадное значение ядерных явлений в физике и технике в настоящее время несомненно. Десятки научных исследований обогащают каждый день наши сведения о ядрах атомов и наше понимание процессов, происходящих при взаимодействии ядер друг с другом, с излучением и с электронно-нейтринным полем. Поэтому создание учебного пособия, отражающего в собранном виде основные вопросы теоретической ядерной физики с учетом последних достижений в этой области, изложенных в статьях, опубликованных во многих научных журналах, представляется нам очень нужным.

Предлагаемая вниманию читателей книга представляет расширенное изложение курса лекций, читанных автором в течение нескольких лет для студентов физического факультета Московского государственного университета им. Ломоносова. В книге рассматривается большой круг вопросов теории атомного ядра, относящихся к явлениям, протекающим при энергиях, не превышающих сотни *Мэв*. В частности, излагаются: модель ядерных оболочек, обобщенная модель ядра и вопросы, связанные с несферической формой ядра, вращательные и колебательные уровни ядер с учетом связи с состояниями отдельных нуклонов в ядре, общая теория ядерных реакций, оптическая модель ядерных взаимодействий, теория ядерных реакций срыва и захвата, теория прямых или поверхностных взаимодействий, теория импульсной аппроксимации, теория углового распределения и поляризации нуклонов, рассеянных ядрами, теория взаимодействия электромагнитного излучения с ядрами, теория бета-распада и ряд других вопросов.

Ядерные явления, связанные с рождением и поглощением мезонов, не излагаются в этой книге, так как они требуют специального рассмотрения с широким использованием релятивистской теории, квантовой теории поля с методами вторичного квантования и т. д. В связи с этим малое место в книге уделено вопросам теории ядерных сил, которые должны излагаться на основе мезонных теорий.

Книга ставит своей целью изложить современное состояние теории ядра и познакомить читателя с основными методами, которые используются при теоретическом изучении некоторых явлений ядерной физики. В книгу вошел ряд вопросов, которые развивались в последние

годы и еще не излагались в других известных автору книгах или монографиях. Теория многих из этих вопросов еще далеко не завершена и в ряде случаев не свободна от значительных недостатков. Не исключено, что последующее развитие теории будет происходить и в ином направлении. Тем не менее, автор считает целесообразным включить изложение этих вопросов в курс теории ядра, так как надеется, что это облегчит чтение оригинальной литературы.

С целью облегчения самостоятельного изучения в книге уделяется значительное место вычислительной технике. Для той же цели служат приложения — главным образом математического характера.

Ссылки на оригинальные теоретические работы не претендуют на полноту. Ссылки на экспериментальные работы приводятся для сравнения с теоретическими выводами либо для обоснования тех или иных предположений, которые используются для упрощения теоретического рассмотрения.

Для чтения книги нужны знания в объеме обычного курса теоретической физики для университетов. Отмеченные звездочками параграфы и главы, как более трудные, могут быть пропущены при первом чтении.

В заключение я хотел бы выразить искреннюю благодарность проф. Д. И. Блохинцеву, по инициативе которого я приступил к написанию этой книги. Благодарю также И. С. Шапиро и Ю. М. Широкова, прочитавших рукопись и сделавших ряд ценных замечаний, и Е. Е. Жаботинского за тщательное редактирование рукописи.

Автор будет весьма благодарен читателям, которые сообщат ему о всех замеченных недостатках книги.

---

# ГЛАВА I

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

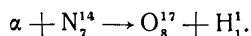
### § 1. Введение

Почти вся масса атома, имеющего размеры порядка  $10^{-8}$  см, сосредоточена в небольшом положительно заряженном объеме — атомном ядре, поперечник которого порядка  $5 \cdot 10^{-13}$  см.

Плотность вещества в атомном ядре составляет примерно  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>. Малые размеры, огромная плотность вещества и энергии резко отличаются ядерное вещество от других тел, с которыми мы имеем дело в обычных условиях.

Задачей теории атомного ядра является установление свойств ядер, законов их устойчивости и превращений друг в друга. Теория атомного ядра является одним из самых молодых разделов теоретической физики. Она ведет свое начало с 1911 г., когда Резерфордом было экспериментально установлено наличие ядра в атомах. Успеху опытов Резерфорда в значительной мере способствовало усовершенствование методов экспериментальных исследований, связанное с огромными достижениями физики в конце XIX века: открытие электронов (1895 г.), рентгеновских лучей (1895 г.), радиоактивности (1896 г.) и т. д. С тех пор ядерная физика стала одной из наиболее быстро развивающихся отраслей науки.

В 1919 г. Резерфорду впервые удалось получить искусственную ядерную реакцию



В 1932 г. Чэдвиком был открыт нейтрон. В этом же году Д. Д. Иваненко [1] и В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о нейтронно-протонном строении ядра, которая в настоящее время получила полное подтверждение.

В 1934 г. Жоллио и Ирэн Кюри открыли искусственную радиоактивность и позитронный бета-распад. 1939 г. ознаменовался открытием Ганом и Штрассманом деления тяжелых ядер. В том же году Жоллио-Кюри, Коварский и Хальбан установили принципиальную возможность

получения цепной (самоподдерживающейся) ядерной реакции, основанной на делении ядер урана. Выяснилось, что такие реакции сопровождаются выделением громадной энергии. С 1939 г. стали усиленно разрабатываться способы получения энергии из атомных ядер. Эти исследования увенчались успехом в декабре 1942 г., когда Ферми с сотрудниками удалось постронть первый ядерный реактор, в котором была осуществлена самоподдерживающаяся ядерная реакция. Эта работа имела громадное значение. Она доказала возможность практического использования ядерной (атомной) энергии и получения искусственным путем новых элементов (в частности, плутония) в значительных количествах. В дальнейшем, к сожалению, успехи ядерной физики в использовании ядерной энергии были направлены не на мирные, а на военные цели. В 1945 г. были произведены первые взрывы атомных бомб.

Применение ядерной энергии в мирных целях началось значительно позже. В июне 1954 г. в СССР была построена первая в мире электростанция, работающая на атомном топливе. Сейчас строятся новые атомные электростанции значительно большей мощности.

С пуском мощных ядерных реакторов и получением новых изотопов в количествах, позволяющих использовать их для различных научно-технических целей, возникла ядерная энергетика и появилась новая область техники — ядерная. Опираясь в своем развитии на научные исследования, эта область техники в свою очередь значительно расширила возможности и масштабы работ в области дальнейшего изучения свойств ядер атомов.

Значительные успехи в последние годы были достигнуты в области изучения свойств элементарных частиц. После открытия  $\mu$ -мезонов и  $\pi$ -мезонов, начиная с 1946—1947 гг., в литературе стали появляться указания на существование в составе космических лучей более тяжелых неустойчивых частиц, которые получили название тяжелых мезонов и гиперонов. В настоящее время доказано существование многих типов элементарных частиц (см. § 2). Исследование свойств этих частиц значительно ускорилося, когда их научились получать искусственным путем на созданных в последнее время ускорителях, сообщающих протонам энергии в миллиарды электроновольт.

В 1955 г. был открыт антипротон, а в 1956 г. антинейтрон. Концы 1956 г. ознаменовался установлением возможности несохранения четности при слабых взаимодействиях, ответственных за явление  $\beta$ -распада атомных ядер и нестабильных элементарных частиц.

Приведенный выше краткий (и очень неполный) перечень основных достижений в области изучения атомного ядра свидетельствует о значении и быстром развитии этой отрасли экспериментальной и теоретической физики.

В этой главе мы приведем основные экспериментальные данные о свойствах атомных ядер, которые используются при построении теории ядра.

## § 2. Состав ядер. Элементарные частицы

Ядра атомов имеют положительный электрический заряд  $q$ , кратный абсолютной величине заряда электрона:  $q = Ze$ . Целое число  $Z$  совпадает с порядковым номером элемента в периодической таблице Менделеева. Второй важной характеристикой ядра является его масса. Масса каждого ядра приблизительно равна целому числу атомных единиц массы. Атомной единицей массы является  $\frac{1}{16}$  массы атома кислорода  $O^{16}$ .

Ближайшее целое к массе ядра число, выраженное в атомных единицах, называется *массовым числом* и обозначается буквой  $A$ .

Ядро атома химического элемента  $X$  обозначается обычно символом химического элемента с двумя числами, указывающими заряд ядра и и массовое число:  $X_Z^A$ . Часто заряд ядра не отмечается, так как он целиком определяется указанием химического символа соответствующего атома. Ядра одинакового заряда, но разного веса называются *изотопами*. Ядра одинакового веса, но разного заряда называются *изобарами*.

Структурными единицами атомного ядра являются протоны и нейтроны. Ядро с массовым числом  $A$  содержит  $Z$  протонов и  $N = A - Z$  нейтронов.

Напомним основные свойства протонов и нейтронов. *Протон* ( $p$ ) — стабильная частица. Масса протона в 1837 раз больше массы электрона. Заряд положителен и равен  $4,802 \cdot 10^{-10}$  единицы электрического заряда (в CGSE-системе). Спин протона равен  $\frac{1}{2}$  в единицах  $\hbar$ ; *нейтрон* ( $n$ ) не имеет заряда и примерно на 2,5 массы электрона тяжелее протона, таким образом, отличие в массах ( $0,0023 \cdot 10^{-24}$  г) немногим больше  $0,1\%$ . Свободный нейтрон нестабилен и распадается с средним временем жизни, равным  $\sim 12$  минутам, на протон, электрон и анти-нейтрино.

Хотя нейтроны в свободном состоянии нестабильны, они образуют вместе с протонами стабильные ядра. Так, например, дейтрон, ядро гелия ( $He^4$ ), ядро кислорода ( $O^{16}$ ) и многие другие ядра, соответствующие определенному отношению числа нейтронов к числу протонов, являются стабильными ядрами. Если отношение числа нейтронов к числу протонов отличается от стабильного, то в таких ядрах становятся возможными превращения нейтрона в протон, электрон и нейтрино или превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино. Такие превращения называются  $\beta$ -распадом (см. главу VI). Они происходят до тех пор, пока ядро не станет стабильным.

Взаимные превращения нейтрона в протон и протона в нейтрон позволяют рассматривать нейтрон и протон как два состояния одной и той же частицы, которую называют *нуклоном*.

Элементарные частицы со спином  $\frac{1}{2}$  описываются уравнением Дирака. Если бы протон и нейтрон тоже описывались уравнением Дирака

для свободных частиц, то магнитный момент нейтрона равнялся бы нулю, а магнитный момент протона — одному *ядерному магнетону*  $\mu_0 = \frac{e\hbar}{2M_p c} \approx 5,05 \cdot 10^{-24} \frac{\text{эрг}}{\text{гаусс}}$ , который в 1837 раз меньше магнетона Бора. На самом же деле магнитный момент протона  $2,792743 \mu_0$ , а магнитный момент нейтрона равен  $-1,913138 \mu_0$ . Эти факты указывают, что свойства протона и нейтрона полностью не отражаются уравнением Дирака для свободных частиц.

Современная квантовая теория поля еще не в состоянии количественно объяснить аномальные значения магнитных моментов протона и нейтрона. Понятие свободной частицы является грубой идеализацией, заимствованной из классической физики. В настоящее время установлено, что свободное пространство — физический вакуум — обладает определенными физическими свойствами. Так, электромагнитное взаимодействие электрона с вакуумом приводит к смещению спектральных термов атомов и к изменению магнитного момента электрона. Однако вследствие слабости электромагнитных взаимодействий так называемые «вакуумные» эффекты очень малы. Нуклоны же взаимодействуют с вакуумом мезонного поля. Это взаимодействие столь велико, что понятие свободного нуклона без окружающего его мезонного поля совершенно несостоятельно. Из-за большой величины взаимодействия нуклона с мезонным полем нельзя применять методы теории возмущений (являющиеся основным аппаратом квантовой электродинамики), и в настоящее время еще не созданы достаточно удовлетворительные методы для количественного описания свойств протонов и нейтронов. За неимением лучшего приходится пользоваться уравнениями типа Паули для описания поведения нерелятивистских нуклонов, подставляя в них экспериментальные значения магнитных моментов.

Кроме протонов и нейтронов, входящих в состав атомных ядер, в настоящее время известно сравнительно большое число частиц, которые считаются элементарными. Элементарными частицами называют частицы, которые на современном этапе наших знаний нельзя рассматривать составленными из более простых. Многие из элементарных частиц являются нестабильными и существуют («живут») очень малое время после их образования, превращаясь в другие элементарные частицы.

Краткий перечень основных элементарных частиц и некоторых их свойств приведен в таблице 1. Более подробные сведения об элементарных частицах можно найти в статье А. М. Шапиро [2].

Согласно современной теории некоторые из элементарных частиц образуют пары; таковы, например, электрон и позитрон, нейтрино и антинейтрино. Одну из составляющих пары называют частицей, а вторую — античастицей. В частности, протону и нейтрону также должны были соответствовать свои античастицы: антипротон и антинейтрон. Долгое время поиски антипротонов и антинейтронов не приводили к успеху. Наконец, в 1955 г. в Калифорнийском университете группой сотрудников под руководством Э. Сегре [3] был открыт *антипротон*.

Таблица 1. Основные элементарные частицы

| Наименование частицы                         | Обозначение и заряд                               | Масса в единицах массы электрона $m_e$     | Спин в единицах $\hbar$              | Изотопический спин*) $T; T_3$                  | Время жизни в свободном состоянии (сек)                 |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Электрон . . . . .                           | $e^- (e)$                                         | 1                                          | $\frac{1}{2}$                        | —                                              | Стабилен                                                |
| Позитрон . . . . .                           | $e^+ (\bar{e})$                                   | 1                                          | $\frac{1}{2}$                        | —                                              | Стабилен**)                                             |
| Фотон . . . . .                              | $\gamma$                                          | 0                                          | $\frac{1}{2}$                        | —                                              | Стабилен                                                |
| Нейтрино . . . . .                           | $\nu$                                             | 0                                          | $\frac{1}{2}$                        | —                                              | Стабилен                                                |
| Антинейтрино . . . . .                       | $\bar{\nu}$                                       | 0                                          | $\frac{1}{2}$                        | —                                              | Стабилен                                                |
| Протон . . . . .                             | $p$                                               | 1836,12                                    | $\frac{1}{2}$                        | $\frac{1}{2}; \frac{1}{2}$                     | Стабилен                                                |
| Нейтрон . . . . .                            | $n$                                               | 1838,65                                    | $\frac{1}{2}$                        | $\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$                    | $1,11 \cdot 10^8$                                       |
| $\mu$ -мезоны . . . . .                      | $\mu^+, \mu^-$                                    | 206,7                                      | $\frac{1}{2}$                        | —                                              | $2,22 \cdot 10^6$                                       |
| $\pi$ -мезоны (пионы) . . . . .              | $\begin{cases} \pi^+, \pi^- \\ \pi^0 \end{cases}$ | $\begin{matrix} 273 \\ 264,3 \end{matrix}$ | $\begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix}$ | $\begin{matrix} 1; 1, -1 \\ 1; 0 \end{matrix}$ | $\begin{matrix} 2,5 \cdot 10^8 \\ 10^{15} \end{matrix}$ |
| Тяжелые мезоны,<br>или $K$ -мезоны . . . . . | $K^+, K^0, K^-, \bar{K}^0$                        | 966                                        | 0                                    | $\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$       | $10^8$                                                  |
| Гипероны . . . . .                           | $\Lambda^0$                                       | 2181,5                                     | $\frac{1}{2}$                        | 0; 0                                           | $3,7 \cdot 10^{10}$                                     |
|                                              | $\Sigma^+, \Sigma^-$                              | 2326,9                                     | $\frac{1}{2}$                        | 1; 1, -1,                                      | $10^{11}$                                               |
|                                              | $\Xi^-$                                           | 2586                                       | $\frac{1}{2}$                        | $\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$                    | $10^{10}$                                               |

\*) Понятие об изотопическом спине дается в § 8.

\*\*) При встрече с электроном образует позитроний с временем жизни  $\sim 10^{-7}$  сек, если сталкиваются электрон и позитрон с параллельными спинами, и  $\sim 10^{-10}$  сек, если сталкиваются электрон и позитрон с антипараллельными спинами.

Антипротоном называют частицу, имеющую отрицательный знак электрического заряда и магнитный момент, обратный протонному. Антипротон находится в таком же отношении к протону, как позитрон к электрону. Так, например, при столкновении антипротона с протоном они «аннигилируют», превращаясь в  $\pi$ -мезоны или со значительно меньшей вероятностью в фотоны, или отдают полностью свою энергию и, следовательно, массу другим частицам, вызывая, например, полный развал ядер. В 1956 г. после долгих попыток был обнаружен и *антинейтрон*.

Антинейтроном называют частицу, которая находится в таком же отношении к нейтрону, как позитрон к электрону.

Наиболее существенным свойством античастиц является их способность «аннигилировать» с частицами с выделением всей энергии, соответствующей массе покоя обеих частиц.

Для характеристики нуклонного и антинуклонного состояний можно ввести «ядерный» заряд или *нуклонный заряд*. При этом нуклонный заряд протона и нейтрона принимается равным 1, а нуклонный заряд антипротона и антинейтрона равен минус 1. В настоящее время предполагается, что нуклонный заряд гиперонов также равен 1, а нуклонный заряд антигиперонов равен минус 1. Нуклонный заряд всех остальных частиц, масса которых меньше массы нуклона, равен нулю. Существенно, что в системе, состоящей из нуклонов и антинуклонов, полный ядерный заряд, пропорциональный разности чисел нуклонов и антинуклонов, остается постоянным независимо от вида процессов, протекающих в системе.

Согласно современным представлениям законы природы инвариантны относительно операции зарядового сопряжения, т. е. превращения всех частиц в античастицы. При операции зарядового сопряжения надо менять одновременно знаки всех зарядов: электрических и нуклонных. В последнее время показано, однако, что в явлениях  $\beta$ -распада ядер (и распада других элементарных частиц) необходимо сохранять инвариантность относительно комбинированной операции: зарядового сопряжения и инверсии, а не отдельно для каждой операции (см. § 39 и 40).

Задачей теории ядра является установление свойств ядер, исходя из свойств протонов и нейтронов, входящих в состав ядер. К сожалению, в настоящее время мы слишком мало еще знаем о силах взаимодействия между нуклонами, чтобы решить эту задачу. Приходится довольствоваться рядом полумпирических методов, используя те или иные гипотезы о ядерных силах. Сравнение теории с опытом позволяет уяснить ценность таких гипотез.

### § 3. Механические величины, характеризующие ядро

Стационарные состояния ядра характеризуются некоторым набором физических величин, сохраняющихся с течением времени, если ядро не подвергается внешним воздействиям. К этим величинам относятся: энергия  $E$ , масса ядра  $M$ , импульс  $P$ , момент количества движения  $J$  и некоторые другие.

В этой главе мы будем рассматривать только стационарные состояния ядер или состояния, близкие к стационарным, в которых энергия имеет почти определенное значение.

Полная энергия и импульс любого тела связаны релятивистским соотношением

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 = (Mc)^2 + P^2, \quad (3,1)$$