

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМНОГО ЯДРА

* *

§ 63. Введение

1. Первое явление из области ядерной физики было открыто в 1896 г. Анри Беккерелем (1852—1908). Это — естественная радиоактивность солей урана, проявляющаяся в самопроизвольном испускании невидимых лучей, способных вызывать ионизацию воздуха и почернение фотоэмульсий. Через два года Пьер Кюри (1859—1906) и Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) открыли радиоактивность тория и выделили из солей урана полоний и радий, радиоактивность которых оказалась в миллионы раз сильнее радиоактивности урана и тория.

Детальное экспериментальное изучение радиоактивных излучений было произведено Резерфордом. Он показал, что радиоактивные излучения состоят из трех типов лучей, названных соответственно α -, β - и γ -лучами. Бета-лучи состоят из отрицательных электронов, движущихся значительно быстрее, чем электроны в катодных лучах, α -лучи — из положительно заряженных частиц (α -частиц, масса которых равна массе ядра гелия), γ -лучи аналогичны лучам Рентгена, только значительно более жесткие. В соответствии с этим α - и β -лучи отклоняются магнитным полем, и притом в противоположные стороны, а на γ -лучи магнитное поле не действует.

Наименьшей проникающей способностью и наибольшим ионизующим действием обладают α -лучи. Они поглощаются слоем алюминия толщиной всего в несколько микрометров. Для поглощения β -лучей требуется слой алюминия в среднем толщиной 1 мм. Ионизующая способность β -лучей много меньше, чем α -лучей. Наибольшей проникающей способностью и наименьшим ионизующим действием обладают γ -лучи. Для защиты от них применяются свинцовые листы толщиной, зависящей от интенсивности излучения.

Ядерная природа радиоактивности была понята Резерфордом после того, как в 1911 г. он предложил ядерную модель атома (см. § 9) и установил, что радиоактивные излучения возникают в результате процессов, происходящих внутри атомного ядра. С этого момента и ведет свое начало ядерная физика.

2. Долгое время предполагалось, что само атомное ядро состоит из протонов и электронов. Однако такая гипотеза находилась в противоречии с экспериментальными фактами, относящимися к спинам и магнитным моментам ядер (см. § 68). Кроме

того, присутствие электронов внутри ядра оказалось невозможным совместить с принципом неопределенности Гейзенберга (см. § 65, пункт 10). В 1932 г. после открытия Чедвиком (1891—1974) нейтрона было установлено, что ядро состоит из протонов и нейтронов (эти частицы получили общее наименование *нуклонов*). Такая модель ядра была предложена в том же году независимо друг от друга Д. Д. Иваненко (р. 1904) и Гейзенбергом. Свободный протон — стабильная частица. Масса нейтрона больше массы протона на 0,14 % или 2,5 электронных масс. В соответствии с этим в свободном состоянии нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино:



Среднее время жизни нейтрона близко к 15,3 мин. Казалось бы, нет смысла говорить о нейтроне как об «элементарной» частице, а следует рассматривать его как «составную» частицу. Однако внутри ядра протон не свободен и ведет себя так же, как составная частица, распадающаяся на нейтрон, позитрон и электронное нейтрино:



Поэтому с тем же основанием протон можно считать «сложной» частицей, превращающейся в более «простую» — нейтрон. Это означает, что вопрос о том, какая частица — протон или нейтрон — более элементарна, лишен физического смысла. В этом отношении обе частицы равноправны. Какая из них распадается, зависит от энергетических соотношений. В свободном состоянии нейтрон радиоактивен, а протон стабилен, т. е. идет процесс (63.1). Внутри же ядра возможны оба процесса (63.1) и (63.2). Тип распада определяется массами рассматриваемого ядра и возможных продуктов распада. Это обстоятельство и дает возможность рассматривать обе частицы — протон и нейтрон — как *элементарные, взаимно превращающиеся друг в друга*.

Число протонов в ядре (*зарядовое число*) принято обозначать через Z , число нейтронов — через N . Их сумма $A = Z + N$ называется *массовым числом ядра*; число Z называют также *порядковым номером элемента*. Атомы с одинаковыми Z (т. е. атомы одного и того же элемента), но различными N называются *изотопами*, с одинаковыми A , но различными Z — *изобарами*, с одинаковыми N , но различными Z — *изотонами*. Наряду с термином *ядро атома* используется также термин *нуклид*.

3. Основное различие между протоном и нейтроном состоит в том, что протон — *заряженная* частица, заряд которой $e = -4,803 \text{ СГСЭ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Это *элементарный заряд*, численно равный заряду электрона. Нейтрон же, как показывает уже его название, *электрически нейтрален*. Спины протона и нейтрона одинаковы и равны спину электрона, т. е. $1/2$ (в единицах

\hbar) — обе частицы являются *фермионами* и подчиняются статистике Ферми — Дирака. Массы протона и нейтрона почти равны: масса протона $m_p = 1836,15m_e$, масса нейтрона $m_n = 1838,68m_e$, где m_e — масса электрона; $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-28}$ г.

Масса частицы связана с ее полной энергией соотношением Эйнштейна $E_{\text{пол}} = mc^2$. Поэтому в ядерной физике и физике элементарных частиц массу принято измерять в единицах энергии, причем за единицу энергии принимается *мегаэлектронвольт* (МэВ). В этих единицах $m_e = 0,511$ МэВ, $m_p = 938,3$ МэВ, $m_n = 939,6$ МэВ. При этом в указанных разделах физики под m понимается всегда *масса покоя* частицы (обозначение m_0 не применяется). Принято также массу частицы измерять в так называемых атомных единицах массы (а. е. м.). За *атомную единицу массы* принимается $1/12$ часть массы нейтрального атома углерода ^{12}C . Нетрудно подсчитать, что 1 а. е. м. = $931,502$ МэВ.

4. Малое различие в массах и совпадение спинов протона и нейтрона является проявлением общего свойства этих частиц — если отвлечься от различия, связанного с наличием у протона электрического заряда, и от различия в значениях магнитных моментов, то во всех остальных отношениях протон и нейтрон весьма сходны между собой. Это сходство, имеющее фундаментальное значение в ядерной физике, с особой отчетливостью проявляется в свойствах «зеркальных» ядер. Зеркальными называются два ядра с одинаковыми массовыми числами A , каждое из которых получается из другого заменой всех протонов нейтронами, а всех нейтронов — протонами. Примером такой пары могут служить сами протон и нейтрон. Другими примерами являются ^1H и ^2He , ^7Be и ^7Li , $^{11}_5\text{B}$ и $^{11}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ и $^{13}_7\text{N}$, $^{16}_7\text{N}$ и $^{15}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$ и $^{17}_9\text{F}$, $^{29}_{14}\text{Si}$ и $^{29}_{15}\text{P}$ и т. д. (более тяжелое ядро в каждой из этих пар радиоактивно). Как показывает опыт, оба зеркальных ядра имеют почти одинаковые энергии связи, сходное строение спектра возбужденных уровней энергии, одинаковые спины и пр. Это указывает на сходство сил, действующих между двумя протонами и двумя нейтронами.

На малых расстояниях (например, вплоть ядра) между этими частицами действуют мощные ядерные силы, по сравнению с которыми электромагнитные силы в сотни раз слабее. Впренебрежении электромагнитными силами протон и нейтрон обладают одинаковыми свойствами: при прочих равных условиях ядерные силы, действующие между двумя протонами, равны ядерным силам, действующим между двумя нейтронами, а также между нейтроном и протоном. Это свойство называется *зарядовой симметрией ядерных сил*. Оно является проявлением еще более глубокой закономерности, называемой *изотопической инвариантностью*.

5. В настоящее время еще не создана последовательная законченная теория атомного ядра. Причина этого заключается

прежде всего в том, что до сих пор неизвестна аналитическая зависимость ядерных сил от определяющих их параметров. Поэтому в отношении ядерных сил приходится вводить различные заведомо упрощенные и ограниченно применимые предположения, подобранные так, чтобы в определенной области явлений достигнуть согласия с экспериментальными данными.

В атомной физике, даже не зная закона Кулона, можно было бы в значительной степени восстановить его, изучая энергетический спектр атома водорода, поскольку последний содержит очень много уровней. В физике же ядра из-за короткодействующего характера ядерных сил такой возможности нет, так как имеется всего одно связанное состояние из двух нуклонов — дейtron, состоящий из протона и нейтрона. Дейtron же имеет всего один энергетический уровень (см. задачу к § 26), а этого, конечно, мало для суждения о силах, действующих между протоном и нейтроном. Положение осложняется тем, что силы взаимодействия нуклонов зависят не только от *расстояния между ними*, но и от их *скоростей*, а также от *ориентации спинов*.

6. Если бы даже силы взаимодействия между нуклонами были полностью известны, то в теории ядра надо было бы еще решить квантовомеханическую *задачу многих тел*. Она многое сложнее аналогичной классической задачи, с которой не может справиться современная математика (даже в случае трех взаимодействующих тел). Например, если ядро состоит из A нуклонов, то в пренебрежении их спинами его состояние определяется волновой функцией $\psi(r_1, r_2, \dots, r_A)$, зависящей от $3A$ пространственных координат. Эта функция должна быть определена из уравнения Шредингера с $3A$ независимыми переменными. Учет спинов нуклонов невообразимо усложняет эту задачу. С учетом спинов состояние ядра определяется волновой функцией $\psi(s_1, s_2, \dots, s_A; r_1, r_2, \dots, r_A)$, зависящей не только от пространственных координат, но и от спиновых переменных (т. е. от квантовых чисел, определяющих проекции спина на выделенное направление), каждая из которых может принимать два значения: $-1/2$ и $+1/2$. Ее нахождение эквивалентно определению 2^A функций только от $3A$ пространственных координат. Например, при $A = 100$ число таких функций равно $2^{100} \approx 1,27 \cdot 10^{30}$. Ясно, что решение такой задачи абсолютно невозможно даже для самых мощных вычислительных машин.

В теории атома для преодоления аналогичной трудности разработаны превосходные приближенные методы — метод Хартри (1897—1958) и еще более точный метод Фока (1898—1974). Они используют то обстоятельство, что атом практически пуст — расстояния между электронами атомной оболочки, а также между последними и ядром атома очень велики по сравнению с размерами этих частиц. В случае ядер такой возможности нет, так как расстояния между нуклонами ядра того же порядка, что и

размеры самих нуклонов. Поэтому указанные методы в случае ядра неприменимы.

Число нуклонов в ядре (за исключением только протона и дейтрана — ядер атомов водорода идейтерия) всегда больше двух. Поэтому ядро следует рассматривать как систему многих частиц. Если бы число частиц в системе было очень велико, то надежное и даже единственное возможное описание ее состояния давал бы *статистический метод*. Но это условие совсем не выполняется для легких ядер. Для них статистический метод неприменим. Им можно пользоваться для средних и в особенности для тяжелых ядер. Но и здесь применимость статистического метода ограничена, так как число нуклонов даже в тяжелых ядрах все же недостаточно велико.

7. Сказанное делает понятным, почему мы не располагаем последовательной законченной теорией ядра, которая бы единым образом объясняла все его свойства. Вместо такой теории в ядерной физике используются различные *модели ядра*, каждая из которых охватывает лишь ограниченный круг явлений*). Ядерные модели не дают истинной теории явлений, но позволяют систематизировать явления из различных областей ядерной физики, а главное предсказывать новые. В этом и заключается их польза. Достойно удивления, что на этом пути достигнуто так много в понимании известных из опыта ядерных явлений и предсказании новых.

8. Атомные ядра условно принято делить на *стабильные* и *радиоактивные*. Условность такого деления состоит в том, что в сущности все ядра подвергаются радиоактивному распаду, но с различной скоростью. Стабильными называют ядра, распадающиеся достаточно медленно. А понятие медленности зависит от конкретно поставленной задачи. Обычно ядра принято считать стабильными, если со времени образования видимой части Вселенной (порядка 10^{10} лет), т. е. со времени образования химических элементов, распалась ничтожная часть их. Ядра, распадающиеся более быстро, считаются радиоактивными.

Физические величины, характеризующие свойства атомных ядер, можно разделить на *статические* и *динамические*. Статические характеристики относятся к определенному, обычно невозбужденному состоянию ядра; динамические проявляются при возбуждениях и распадах ядра и в ядерных реакциях. Статические характеристики обычно называют свойствами стабильных ядер. Изменение терминологии, которому мы следуем, предложено Ю. М. Широковым и Н. П. Юдиным в их известном учебнике «Ядерная физика» (М.: Наука, 1980). Оно оправдано тем, что между стабильными и радиоактивными ядрами, как уже указывалось выше, нет резкой границы. Статические же свойства при-

*) Краткое описание некоторых моделей ядра дано в гл. X.

сущи не только стабильным, но и радиоактивным ядрам и даже ядрам в возбужденных состояниях.

Важнейшими статическими характеристиками ядра являются: зарядовое число (атомный номер) Z , масса ядра M , энергия связи $E_{\text{св}}$, спин I , магнитный момент μ , электрический квадрупольный момент Q , радиус R и несферичность ядра $\delta R/R$, четность P волновой функции ψ , изотопический спин T , спектр возбужденных состояний.

Радиоактивные ядра дополнительно характеризуются типом радиоактивного превращения (α - или β -распад, спонтанное деление и пр.), временем жизни τ (или периодом полураспада $T_{1/2}$), энергией испускаемых частиц и т. п.

9. В настоящее время в природе известны четыре вида фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное. Сильное взаимодействие удерживает нуклоны в атомных ядрах и присуще также большинству элементарных частиц, так называемых *адронов* (протон, нейтрон, гипероны, мезоны и др.). К электромагнитным взаимодействиям сводятся непосредственно воспринимаемые нами силы природы (за исключением тяготения): упругие, вязкие, молекулярные, химические и пр. Слабые взаимодействия вызывают β -распад радиоактивных ядер (см. § 74) и наряду с электромагнитными силами управляют поведением *лептонов* — элементарных частиц, не участвующих в сильных взаимодействиях и обладающих спином $1/2$ (электрон, мюон, нейтрино и др.). Нейтральные лептоны (все нейтрино и антинейтрино) не участвуют и в электромагнитных взаимодействиях. Гравитационное взаимодействие присуще всем частицам.

Об интенсивности перечисленных взаимодействий можно судить по скорости процессов, вызываемых ими. Обычно для сравнения берут скорости процессов при кинетических энергиях сталкивающихся частиц около 1 ГэВ; такие энергии характерны для физики элементарных частиц. При таких энергиях процессы, вызываемые сильными взаимодействиями, совершаются за времена порядка 10^{-23} с, электромагнитными — за времена порядка 10^{-20} с, слабыми — за времена порядка 10^{-9} с. Другой величиной, характеризующей интенсивность взаимодействия, является длина свободного пробега частицы в веществе. Сильновзаимодействующие частицы при энергии около 1 ГэВ можно задержать железной плитой толщиной в несколько десятков сантиметров. Нейтрино же с энергией 10 МэВ (такова энергия антинейтрино, образующихся в ядерных реакторах), которым свойственно только слабое взаимодействие, для своего задержания потребовали бы слоя железа толщиной не менее 10^9 км.

Сильные и слабые взаимодействия проявляются только на *коротких расстояниях*. Радиус действия сильных взаимодействий составляет примерно 10^{-13} см (1 ферми), а слабых — $2 \cdot 10^{-16}$ см.

(0,002 ферми). Электромагнитные силы, напротив, являются дальнодействующими; они убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими частицами. Поэтому же закону убывают с расстоянием и гравитационные силы. Поэтому отношение электромагнитных и гравитационных сил не зависит от расстояния между взаимодействующими частицами. При одном и том же расстоянии оно равно $F_{\text{эл}}/F_{\text{гр}} = e_1 e_2 / G m_1 m_2$, где G — гравитационная постоянная, m_1 и m_2 — массы частиц, а e_1 и e_2 — их электрические заряды. Для взаимодействия двух протонов эта формула дает $F_{\text{эл}}/F_{\text{гр}} \approx 1,23 \cdot 10^{36}$.

Таким образом, в области, где проявляются слабые силы, гравитационное взаимодействие частиц на много порядков меньше даже слабого. Поэтому в физике микромира при современном ее состоянии гравитационное взаимодействие не учитывается. Но в макромире при рассмотрении движения больших масс: галактик, звезд, планет и пр., а также при рассмотрении движения небольших макроскопических тел в поле таких масс гравитационное взаимодействие становится определяющим. Особенно существенную, пожалуй, главную роль оно играет в процессах образования и эволюции звезд (см. гл. XV). Обусловлено это двумя обстоятельствами: во-первых, дальнодействующим характером гравитационных сил, во-вторых, положительностью масс всех тел. В силу второго обстоятельства гравитационные силы всегда являются силами притяжения. При увеличении масс взаимодействующих тел гравитационное взаимодействие между ними усиливается и при этом пропорционально массам обоих тел. Этого не происходит в случае электрического взаимодействия макроскопических тел, так как положительные и отрицательные заряды составляющих их частиц в высокой степени *нейтрализуют* друг друга. Вот почему электрические силы не оказывают существенного влияния на движение больших масс, хотя в случае взаимодействия тел, состоящих только из положительных или только отрицательных частиц, они значительно больше гравитационных и также являются дальнодействующими.

10. Классическая физика принимала, что взаимодействие между телами передается с конечной скоростью посредством силовых полей. Так, электрический заряд создает вокруг себя электрическое поле, которое в месте нахождения другого электрического заряда воздействует на него с некоторой силой (см. т. III, § 1). Так же, но уже посредством других силовых полей, осуществляются все взаимодействия в природе, например гравитационное. Квантовая физика не изменила такое представление, но учла *квантовые свойства самого поля*. Из-за корпускулярно-волнового дуализма всякому полю должна соответствовать определенная частица (*квант поля*), которая и является переносчиком взаимодействия. Одна из взаимодействующих частиц испускает квант поля, другая его поглощает. В этом и состоит механизм

взаимодействия частиц. В случае электромагнитных взаимодействий квантами поля — переносчиками взаимодействия — являются *фотоны*. Сильные взаимодействия переносятся *глюонами*, слабые — W^\pm - и Z^0 -*промежуточными векторными бозонами*, предсказанными в теории электрослабого взаимодействия и открытыми экспериментально в 1983 г., гравитационное — гипотетическими *гравитонами*. В настоящее время электромагнитное и слабое взаимодействия рассматриваются как различные проявления единого *электрослабого взаимодействия*, подобно тому как электрическое и магнитное поля объединены в единое *электромагнитное поле*. Слабые силы на малых расстояниях (порядка радиуса их действия) одного порядка с электромагнитными. Но они экспоненциально убывают с расстоянием, так что на больших расстояниях слабые силы исчезающие малы по сравнению с электромагнитными.

Против представления взаимодействия посредством обмена квантами поля можно выдвинуть следующее возражение. Пока частица свободна, она не может испустить или поглотить квант поля. Для испускания и поглощения фотона это утверждение уже было доказано в § 1. Повторим его еще раз в измененной форме, не предполагая, что масса покоя кванта поля равна нулю.

Рассмотрим сначала процесс испускания кванта и применим доказательство от противного. Пусть масса покоя частицы до испускания кванта равна m . После испускания кванта масса покоя может измениться, обозначим ее через m' . При испускании частица может получить импульс отдачи p . В системе, в которой частица поконилась до испускания кванта поля, закон сохранения энергии записывается в виде

$$mc^2 = \sqrt{(m'c^2)^2 + (pc)^2} + \mathcal{E}_{\text{кв}}, \quad (63.3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{кв}}$ — энергия испущенного кванта. Если импульс кванта Π , то, очевидно, $p + \Pi = 0$. Из написанного уравнения видно, что $m'c^2 \leq mc^2$. Если частица стабильна, а это надо предполагать, то ее энергия минимальна и не может дальше уменьшаться. Поэтому должно быть $m = m'$, $p = \Pi = 0$, $\mathcal{E}_{\text{кв}} = 0$. Итак, испущенный квант поля не обладает ни энергией, ни импульсом. А это значит, что такого кванта вообще нет. Доказательство, по существу, предполагает, что при испускании кванта поля внутреннее квантовое состояние частицы *не изменяется*. Если то же самое имеет место и при поглощении, то не составит труда распространить доказательство и на поглощение. Это предлагается сделать читателю.

Квантовая теория снимает выдвиннутое возражение, используя принцип неопределенности Гейзенберга. Если квант поля существует в течение короткого промежутка времени Δt , необходимого для переноса взаимодействия, то его энергия \mathcal{E} не может быть точно определенной. Ее неопределенность $\Delta\mathcal{E}$ удовлетворя-

ет соотношению Гейзенберга $\Delta\mathcal{E} \cdot \Delta t \approx \hbar$. Формально это означает, что для таких промежутков времени закон сохранения энергии нарушается. Иначе можно сказать, что для частиц, переносящих взаимодействие, нарушается обычная связь между энергией и импульсом. Поэтому их называют не просто частицами, а виртуальными частицами или виртуальными квантами поля. Из таких виртуальных квантов, испускаемых и поглощаемых действительными частицами, и состоит силовое поле, их окружающее. В частности, электромагнитное поле, окружающее электрический заряд, состоит из испускаемых и поглощаемых виртуальных фотонов. Процессы испускания и поглощения виртуальных частиц называют также виртуальными.

11. Определенная трудность возникает, если механизм взаимодействия частиц микромира пытаться представить наглядно. Вообразим, например, двух людей *A* и *B*, которые стоят в разных местах и перекидываются мячом. Бросив мяч в направлении к *B*, *A* испытывает толчок в обратном направлении. Дополнительный толчок в том же направлении он получает, когда ловит мяч, брошенный *B*. В результате между *A* и *B* возникает сила отталкивания. Можно ли придумать классический пример, когда в результате перекидывания каким-либо предметом между *A* и *B* возникает притяжение? Можно. Для этого мяч надо заменить бumerангом и поставить *A* и *B* спиной друг к другу. *A* бросает бumerанг в направлении от *B* и при этом испытывает силу, направленную к *B*. Бумеранг, изменив направление полета, пролетает за *B*, а затем возвращается к *B*. *B* ловит его и посыпает в сторону, противоположную *A*. В результате возникает сила, направленная к *A*, и т. д. Таким образом, осуществляется притяжение между *A* и *B*. Очевидно, в этом примере существенную роль играет среда (воздух), в которой летит бumerанг. Без такой среды бumerang летел бы по инерции — прямолинейно. Все это является только наглядной иллюстрацией и не претендует на истинное объяснение механизма взаимодействия. Взаимодействие посредством обмена виртуальными частицами не имеет наглядного объяснения.

12. Виртуальные частицы непосредственно не воспринимаются. Каждая частица является источником какого-то поля (например, электрон — источником электромагнитного поля). Согласно корпускулярно-волновому дуализму всякому полю соответствуют частицы, являющиеся квантами этого поля. Масса этих частиц *m* может быть равна нулю (как у фотонов), но может быть и отличной от нуля. Свободная частица, ввиду законов сохранения энергии и импульса, не может испустить реальный квант поля, так как для этого необходима энергия, не меньшая mc^2 . С точки зрения классической физики такой процесс невозможен без поступления энергии извне. Но квантовая физика с ее принципом неопределенности $\Delta\mathcal{E} \cdot \Delta t \approx \hbar$ допускает нарушение закона со-

хранения энергии в течение малых промежутков времени Δt , необходимых для передачи взаимодействия. Чтобы получить требуемую энергию $\Delta E = mc^2$, необходимо время $\Delta t \approx \hbar/mc^2$. За это время виртуальная частица не может уйти дальше чем на расстояние

$$R = c\Delta t = \hbar/mc, \quad (63.4)$$

т. е. на расстояние, равное комптоновской длине волны частицы массой m . Эта длина и может быть принята за радиус действия, переносимого виртуальной частицей. Чем меньше масса m , тем больше радиус действия, переносимого виртуальной частицей.

Электромагнитные взаимодействия осуществляются обменом фотонами. Масса фотона $m = 0$, поэтому радиус действия электромагнитных сил $R = \infty$, т. е. эти силы являются дальнодействующими. Дальнодействующими являются и гравитационные силы, перенос которых осуществляется гипотетическими гравитонами. Гравитоны из-за исключительной слабости гравитационного взаимодействия не наблюдались на опыте и, по-видимому, еще очень долго не будут наблюдаться, но теоретики не сомневаются в их существовании. На основании дальнодействующего характера гравитационных сил следует заключить, что масса гравитона должна равняться нулю.

13. В 1934 г. Таммом (1895—1971) и Иваненко была развита теория ядерных сил, согласно которой переносчиками этих сил являются легкие частицы — электрон и позитрон, нейтрино и антинейтрино (частицы промежуточной массы — мюоны и пионы — в то время еще не были известны). Протон, например, испустив позитрон и нейтрино, превращается в пейтрон. Нейtron же, поглотив те же частицы, превращается в протон. В результате этих процессов и возникают силы притяжения между протоном и пейтроном. В количественном отношении теория Тамма и Иваненко оказалась несостоительной, так как она приводила к ядерному взаимодействию, которое было примерно в 10^{11} — 10^{13} раз слабее требуемого. Но основные идеи этой теории сохранили свое значение и впервые были использованы в 1935 г. японским физиком Юкава (1907—1981).

Юкава в 1935 г. высказал предположение о существовании особого поля ядерных сил. Квантами этого поля являются частицы, которые, согласно гипотезе Юкавы, и осуществляют взаимодействие между нуклонами. По экспериментальным данным радиус действия ядерных сил равен $1,2 \cdot 10^{-13}$ см. Исходя из этого, можно оценить с помощью формулы (63.4) массу гипотетической частицы Юкавы. Она оказалась равной $270m_e$ (около 140 МэВ). Вскоре в 1937 г. Неддермайер (р. 1907) и Андерсон (р. 1905) открыли в космических лучах положительные и отрицательные частицы (μ^\pm) массой $207m_e$ (106 МэВ), называемые теперь мюонами (первоначальное название — мезоны). Естественно было

предположить, что мюоны и являются частицами Юкавы. Однако это предположение сразу же пришлось отвергнуть, так как мюоны очень слабо взаимодействуют с веществом и поэтому не могут быть переносчиками ядерного взаимодействия. (Время жизни мюона в системе отсчета, где он поконится, $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с, так что релятивистские мюоны, образующиеся в верхних слоях атмосферы, могут доходить и действительно доходят до поверхности Земли.)

Лишь через 10 лет в 1947 г. Пауэлл (1903—1969), Оккиалини (р. 1907) и Латтес (р. 1924) в фотоэмulsionях, облученных космическими лучами в верхних слоях атмосферы, открыли следы заряженных частиц, названных *пионами* (π^\pm), которые распадаются на мюоны и нейтрино. В 1950 г. был открыт и нейтральный пион π^0 . Пионы сильно взаимодействуют с веществом (время жизни $\tau_{\pi^\pm} = 2,6 \cdot 10^{-8}$ с, а $\tau_{\pi^0} = 0,83 \cdot 10^{-16}$ с). Поэтому пионы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к частицам, переносящим ядерное взаимодействие. До недавнего времени считали, что пионы осуществляют сильные взаимодействия. Сейчас эта роль отводится глюонам.

Как было указано выше, слабые взаимодействия переносятся W^\pm - и Z^0 -промежуточными бозонами. По экспериментальным данным массы W^\pm - и Z^0 -бозонов соответственно приближенно равны 80 и 90 ГэВ. Эти данные с помощью формулы (63.4) позволяют оценить радиус действия R слабых сил. Для оценки возьмем W^\pm -бозоны, поскольку им соответствуют меньшая масса и, следовательно, больший радиус действия. Полагая $mc^2 = 80$ ГэВ, $\hbar c = 1,973$ ГэВ · см, получим

$$R = \hbar c / mc^2 = 2,5 \cdot 10^{-16} \text{ см.}$$

14. Со времени возникновения *кварковой модели* принято считать, что основное взаимодействие между пуклонами осуществляется не мюонами, а сводится к взаимодействию кварков. Кварки — это гипотетические частицы, из которых состоят адроны, в том числе протоны и нейтроны. Предполагается, что кварки несут дробные заряды $\pm(2/3)e$ и $\pm(1/3)e$ и обладают спином 1/2. Всего в настоящее время различают шесть кварков (и соответствующих им антикварков), которые группируются в три дублета. Взаимодействие между кварками осуществляется путем обмена безмассовыми частицами со спином 1 — *глюонами*. Кварки в свободном состоянии не удалось наблюдать в природе, в космических лучах и получить на ускорителях. Это привело к гипотезе *пленения кварков*, согласно которой они существуют только внутри адронов и не могут существовать в свободном состоянии. Это объясняется тем, что силы взаимодействия между кварками убывают с уменьшением расстояния между ними и растут с увеличением расстояния. Благодаря этому на малых

расстояниях кварки внутри адронов ведут себя как свободные частицы, называемые *партонами*. Гипотеза кварков, поскольку она объяснила множество фактов в поведении элементарных частиц и предсказала существование новых, в настоящее время считается общепринятой (см. гл. XVI).

§ 64. Энергия связи ядра

1. Энергия связи ядра (относительно всех нуклонов) $\mathcal{E}_{\text{св}}$ есть мера его прочности, измеряемая минимальной работой, которую надо произвести, чтобы полностью расщепить ядро на составляющие его протоны и нейтроны. Энергию связи ядра надо отличать от его *внутренней энергии*, т. е. от энергии образования ядра $\mathcal{E}_{\text{об}}$. Если энергию полностью расщепленного ядра принять за нуль, то, очевидно, $\mathcal{E}_{\text{об}} = -\mathcal{E}_{\text{св}}$. Через величину $\mathcal{E}_{\text{св}}$ определяется и *энергия связи ядра по отношению к разделению его на любые две части, состоящие из протонов и нейтронов, т. е. минимальная работа, необходимая для разделения ядра на эти две части*. Например, энергия связи протона в ядре, иначе называемая *энергией отделения протона от ядра*, есть минимальная работа, которую надо произвести, чтобы удалить протон из ядра. Она определяется формулой

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_{\text{св}}(Z, A) - \mathcal{E}_{\text{св}}(Z-1, A-1), \quad (64.1)$$

т. е. равна разности энергий связи исходного и конечного ядра. Аналогично энергия связи нейтрона в ядре (иначе, *энергия отделения нейтрона от ядра*)

$$\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_{\text{св}}(Z, A) - \mathcal{E}_{\text{св}}(Z, A-1), \quad (64.2)$$

а энергия связи α -частицы в ядре (или энергия отделения ее)

$$\mathcal{E}_\alpha = \mathcal{E}_{\text{св}}(Z, A) - \mathcal{E}_{\text{св}}(Z-2, A-4) - \mathcal{E}_{\text{св}}(\alpha), \quad (64.3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{св}}(\alpha)$ — энергия связи α -частицы.

Понятно, что исходное ядро в этих формулах не может быть соответственно протоном, нейроном или α -частицей. Иначе \mathcal{E}_p , например, означала бы энергию отделения протона от ядра, которое само состоит только из одного протона, а такая постановка вопроса лишена смысла.

В силу соотношения между массой и энергией энергия связи ядра может быть вычислена по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{св}}(Z, A) = ZM_p + NM_n - M(Z, A), \quad (64.4)$$

если массы выражены в энергетических единицах. Предполагается, что массы всех частиц в формуле (64.4) — *массы покоя* (индекс нуль опущен, как это принято в ядерной физике и физике элементарных частиц). Массу заряженной частицы можно измерить масс-спектрометрическим методом, основанным на из-