
ЯДЕРНЫЕ МОДЕЛИ**§ 1. Необходимость модельных представлений о ядре**

1. Как видно из предыдущей главы, атомные ядра — это сложные и своеобразные физические объекты, обладающие многими интересными свойствами. Для того чтобы разобраться в этих свойствах и тем самым научиться предсказывать, как будет себя вести ядро в тех или иных ситуациях, необходимы какие-то теоретические представления о ядре. Вопросы, охватываемые теорией ядра, можно разбить на две большие группы, граница между которыми не является вполне четкой:

- а) структура ядра;
- б) механизм ядерных реакций.

Следующие три основные трудности препятствуют созданию последовательной теории атомного ядра:

- а) до сих пор неизвестен точный вид сил, действующих между нуклонами в ядре;
- б) уравнения, описывающие движение нуклонов в ядре, крайне громоздки;
- в) ядро нельзя трактовать как сплошную макроскопическую среду.

Ядро является квантовой системой многих частиц — нуклонов. Многие особенности структуры ядер становятся более понятными при сравнении ядра с другой квантовой системой многих тел — атомом. Поэтому мы будем неоднократно использовать это сравнение.

В целом наши теоретические представления о структуре ядер значительно беднее представлений об атомной структуре. Это ни в коей мере не означает, что наши знания о ядре ничтожны. Просто атомную структуру мы понимаем настолько глубоко и полно, что умеем рассчитать практически любую характеристику атома с достаточной для экспериментальных целей точностью.

2. При переходе от атома к ядру мы прежде всего сталкиваемся с трудностью, связанной с недостаточностью наших знаний о силах, действующих между нуклонами. На электроны в атоме действуют электромагнитные силы, количественная квантовая теория которых хорошо разработана и прекрасно согласуется с экспериментальными данными. Количественная же теория взаимодействия нуклонов до сих пор не построена. Поэтому ядерные силы взаимодействия

между нуклонами приходится подбирать просто путем подгонки к известным экспериментальным данным.

К тому же и на этом пути возникает дополнительная трудность, в какой-то мере случайного характера, обязанная своим происхождением свойству короткодействия ядерных сил. В теории атома, даже не имея квантовой электродинамики, мы могли бы довольно точно определить потенциал взаимодействия двух зарядов по данным о задаче двух тел, изучая систему энергетических уровней атома водорода. Как известно, атом водорода имеет богатую систему уровней, по которой можно восстановить многие, даже очень тонкие детали электромагнитного взаимодействия. В противоположность этому получение явного вида действующих между нуклонами ядерных сил по экспериментальным данным о задаче двух тел является значительно более тяжелой задачей. Объясняется это тем, что в системе нуклон — нуклон имеется всего лишь одно связанное состояние — дейтрон, а одна цифра — это очень небольшая информация о виде сил взаимодействия. Можно, конечно, воспользоваться экспериментальными данными о нуклон-нуклонном рассеянии, но данные по рассеянию всегда несравненно менее точны, чем данные об экспериментальных уровнях. Кроме того, даже по полной и точной совокупности экспериментальных данных о рассеянии и связанных состояниях точный вид сил может быть установлен однозначно лишь тогда, когда эти силы не зависят от скоростей, что для ядерных сил не имеет места.

Наконец, из-за отсутствия последовательной количественной теории ядерных сил мы в настоящее время ничего не можем сказать о роли тройных и вообще множественных сил в ядре. Тройными принято называть такие силы, которые действуют между тремя частицами и стремятся к нулю при бесконечном удалении хотя бы одной из этих частиц. Современная теория предсказывает существование таких сил, но не дает возможности рассчитать их интенсивность и даже знак.

Таким образом, первая основная трудность теории структуры ядра состоит в том, что мы плохо знаем силы взаимодействия между нуклонами.

3. Вторая основная трудность состоит в том, что даже если бы мы точно знали силы взаимодействия между нуклонами, то все равно еще оставалась бы проблема математического решения квантовой задачи многих тел, причем вследствие громоздкости, в общем случае непреодолимой даже с помощью современной машинной техники, эта трудность носит не технический, а принципиальный характер. Известно, что уже неклассическая задача трех тел является сложной математической проблемой. При переходе от классической задачи многих тел к задаче о движении нуклонов в ядре необходимый здесь учет квантовых свойств приводит к колоссальным усложнениям. Действительно, в квантовой теории система из A нуклонов описы-

вается волновой функцией

$$\Psi_{m_1 m_2 \dots m_A}(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A),$$

зависящей от $3A$ пространственных координат $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_A$ и от A спиновых индексов m_1, \dots, m_A , каждый из которых пробегает два значения соответственно двум возможным ориентациям спина нуклона. Поэтому уравнение Шредингера, например, для ядра из ста нуклонов будет представлять собой систему дифференциальных уравнений для 2^{100} ($\approx 10^{30}$) функций от 300 переменных. Очевидно, что даже для легких ядер с $A = 10$ эта задача практически неразрешима без серьезных упрощающих допущений. И здесь ядру «не повезло» по сравнению с атомом. В атоме за счет того, что он почти пуст, уравнение Шредингера удается решающим образом упростить, применив приближение Хартри — Фока самосогласованного поля. Для ядерного уравнения Шредингера хорошие упрощающие предположения найти труднее.

4. В системах малого числа частиц изучают все имеющиеся степени свободы. В системах очень большого числа частиц проводят статистическое усреднение и изучают агрегатное состояние вещества, описывая его небольшим числом макроскопических параметров, таких как давление, температура, плотность и т. д. К сожалению, атомные ядра занимают в этом отношении промежуточное положение. В ядре частиц слишком много, чтобы изучать все без исключения степени свободы, но все же не настолько много, чтобы оправданно трактовать ядро как сплошную среду. Действительно, для применимости понятия сплошной среды необходимо, чтобы очень большое по сравнению с единицей число частиц содержалось не только во всей рассматриваемой физической системе, но и в очень малой ее части, которую можно было бы принять за «бесконечно малый» элемент объема. В ядре это требование явно не выполняется. Несмотря на это, в применении к ядру часто используются такие заимствованные из физики сплошных сред понятия, как поверхность, температура, свободный пробег и даже агрегатное состояние. Очевидно, что при использовании этих понятий необходимо соблюдать большую осторожность и помнить, что они обычно имеют крайне ограниченный смысл. Так, например, в понятии поверхности жидкости или твердого тела подразумевается, что число частиц, принадлежащих поверхности, ничтожно по сравнению с общим числом частиц. В ядре же, даже в тяжелом, на поверхности находится примерно половина нуклонов.

В дальнейшем, описывая структуру ядра, мы будем стараться не пользоваться терминами, заимствованными из физики сплошных сред. В тех же случаях, когда употребление этих понятий является традиционным, мы будем тщательно оговаривать их реальный смысл.

5. Из сказанного вытекает необходимость создания ядерных моделей, в которых ядро заменяется некоторой модельной физической системой, достаточно хорошо описывающей определенную совокупность свойств ядра и вместе с тем допускающей достаточно простую математическую трактовку.

Хорошая модель должна, во-первых, объяснять свойства основных состояний ядер (спины, четности, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты и т. д.), во-вторых, объяснять свойства возбужденных состояний и прежде всего спектр возбуждения ядра и, в-третьих, описывать динамические свойства ядра, например, вероятности испускания γ -квантов отдельными возбужденными уровнями ядра. Ясно, что любая модель не может дать полного описания ядра. Поэтому в ядерной физике приходится использовать большое число моделей, приспособленных для описания того или иного круга явлений.

§ 2. Классификация ядерных моделей

1. В основу каждой модели кладется допущение о приближенной независимости какого-либо набора степеней свободы ядра. Принимается, что учитываемые степени свободы слабо взаимодействуют друг с другом и с остальными степенями свободы. Это допущение, конечно, выполняется только приближенно и только для ограниченного круга явлений.

Степени свободы ядра естественно разделить на одночастичные, описывающие движение индивидуальных частиц, и коллективные, соответствующие коррелированному движению большого числа частиц. В соответствии с этим используемые в физике ядра модели можно разделить на коллективные, одночастичные и обобщенные, в которых используются как коллективные, так и одночастичные степени свободы. Несомненно, что многие внутриядерные движения и возбуждения ядра обусловлены степенями свободы промежуточного типа, соответствующими движению некоторой части нуклонов. Однако математическая трактовка таких степеней свободы очень громоздка. Исследование промежуточных степеней свободы ядер пока еще находится в зачаточном состоянии.

2. Модели, основанные на коллективных степенях свободы ядра, принято называть моделями с сильным взаимодействием между частицами, а модели, основанные на учете одночастичных степеней свободы, часто называют моделями независимых частиц. К возникновению такой терминологии привело уже обсуждавшееся выше уподобление ядра сплошной среде. Действительно, с точки зрения физики сплошных сред коллективные эффекты проявляются в таких состояниях вещества, когда свободный пробег каждой частицы мал по сравнению с размерами системы, так что главную роль играют частые и интенсивные взаимодействия частицы с ее ближайшими