

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

соседями. В этом смысле в коллективных моделях ядро трактуется как жидкость или как твердое тело. Одночастичные же степени свободы (опять-таки с точки зрения физики сплошных сред) проявляются тогда, когда свободный пробег, наоборот, значительно больше размеров системы, так что каждая частица независимо движется в некотором усредненном самосогласованном поле.

С только что описанной точки зрения сосуществование коллективных и одночастичных моделей выглядит парадоксальным, поскольку в этих моделях о свободном пробеге нуклона в ядре делаются противоположные и взаимоисключающие допущения. Разрешение этого парадокса состоит в том, что для нуклона в ядре просто нельзя вводить понятие свободного пробега, причем по двум причинам: во-первых, из-за того, что в ядре слишком мало частиц, чтобы трактовать его как сплошную среду; во-вторых, вследствие того, что движение нуклонов в ядре является существенно квантовым процессом, ибо дебройлевская длина волны нуклона в ядре имеет порядок размеров ядра. Другими словами, парадокс возник за счет слишком буквального понимания терминов, заимствованных из физики жидкости и твердого тела.

Приведенные соображения показывают, что часто употребляемыми терминами «модели с сильным взаимодействием» и «модели независимых частиц» надо пользоваться с осторожностью.

3. В этом пункте мы перечислим используемые в физике ядра модели, взяв за основу классификации принимаемые за независимые степени свободы ядра. Для каждой модели будут указаны учитываемые степени свободы и основная область применимости. Модели ядра подразделяются на коллективные, одночастичные и обобщенные.

К коллективным относятся следующие модели:

а) *Капельная модель*. Ядро трактуется как заряженная капля жидкости. Независимыми степенями свободы считаются объемное сжатие и первая гармоника колебаний поверхности. В энергии связи ядра учитываются объемная, поверхностная и кулоновская энергии. Дополнительно обычно учитываются выходящие за рамки чисто капельного представления энергия симметрии и энергия спаривания, т. е. в конечном итоге все слагаемые, входящие в полуэмпирическую формулу (2.8). Область применимости модели: описание усредненной энергии связи ядер как функции A и Z , рассмотрение поверхностных колебаний сферических ядер, качественное объяснение процесса деления ядер.

б) *Модель несферичного ядра*. Ядро трактуется как сгусток вещества, имеющий по каким-то причинам несферичную форму в равновесном состоянии. За независимые принимаются вращательные и колебательные степени свободы. Область применимости модели: описание ряда низколежащих возбужденных уровней некоторых ядер сферически несимметричной формы.

К одночастичным моделям принадлежат следующие:

а) *Модель оболочек без остаточного взаимодействия.* Нуклоны считаются движущимися независимо друг от друга в самосогласованном поле общего для всех нуклонов силового центра. Реальное взаимодействие между нуклонами всегда можно представить как сумму самосогласованного и некоторого остаточного взаимодействия. В рассматриваемой модели остаточное взаимодействие считается малым и отбрасывается. Область применимости модели: получение магических чисел, объяснение спинов и четностей основных состояний дважды магических ядер, объяснение спинов, четностей и магнитных моментов основных и некоторых возбужденных состояний ядер, отличающихся от магических на один (лишний или недостающий) нуклон.

Приведенная модель является простейшим частным вариантом модели оболочек, имеющей ряд обобщений и разветвлений. В основе модели оболочек лежит допущение о доминирующей роли самосогласованного поля. Варианты этой модели характеризуются главным образом различными методами учета остаточного взаимодействия.

б) *Модель оболочек с феноменологическим спариванием.* Остаточное взаимодействие учитывается допущением о спаривании одинаковых нуклонов в ядре. Это допущение состоит в том, что нуклоны одного сорта объединяются в пары таким образом, чтобы у каждой пары момент равнялся нулю, а четность была положительной. При нечетном числе одинаковых нуклонов один из них остается неспаренным. Область применимости модели: объяснение значений спинов и четностей основных состояний всех четно-четных ядер и почти всех ядер с нечетным A , приближенное объяснение величин магнитных моментов почти всех ядер с нечетным A .

Наконец, к обобщенным моделям относятся следующие:

а) *Обобщенная модель со слабым взаимодействием.* В нулевом приближении ядро считается состоящим из сплошного сферического остова и одного или нескольких внешних нуклонов. Для описания остова применяется одна из коллективных моделей, для описания внешнего нуклона — самосогласованное поле. Кроме того, вводится слабое взаимодействие между степенями свободы остова и внешнего нуклона. Область применимости модели: объяснение расположения и характеристик некоторых низколежащих возбужденных уровней для небольшого числа ядер с нечетным A .

б) *Обобщенная модель с сильным взаимодействием.* Как и в модели оболочек, считается, что все нуклоны независимо движутся в самосогласованном поле. В отличие от оболочечной модели, силовой центр имеет сферически несимметричную форму и, кроме того, может сам вращаться как целое. При этом во вращение вовлекаются (полностью или частично) все нуклоны. Область применимости модели: объяснение расположения и характеристик большого числа низколежащих уровней многих ядер.

Перечисленные модели будут подробнее описаны в последующих трех параграфах. В последнем параграфе этой главы мы рассмотрим некоторые другие модели, используемые в теории структуры ядра.

4. Область применимости той или иной модели определяется совокупностью фактов, которые эта модель способна объяснить. В каждой модели, разумеется, имеются произвольные параметры, которые приходится подбирать, т. е. «подгонять» под экспериментальные данные.

Конечно, введя достаточно много параметров, можно объяснить любые данные на основе любой модели. Но такие модели, в которых бедность физической идеи компенсируется большим числом параметров, как правило, хорошо объясняют известные факты, но не способны предсказать новых явлений. Поэтому наиболее ценны модели с минимальным числом параметров, позволяющие делать нетривиальные предсказания хотя бы качественного характера.

§ 3. Коллективные модели ядра

1. Простейшей по замыслу из коллективных моделей является капельная модель ядра, сыгравшая немалую роль в развитии ядерной физики. Аналогия ядра с заряженной жидкой каплей поддается первым трем членами полуэмпирической формулы Вейцекера (2.8) для энергий связи ядер, описывающими соответственно объемную, поверхностную и кулоновскую энергии капли. Тем самым успех формулы Вейцекера подтверждает, что капельная модель (с добавочным учетом энергий симметрии и спаривания) неплохо объясняет осредненную зависимость энергий связи от A и Z .

Чтобы понять, что еще способна объяснить и предсказать капельная модель, надо рассмотреть возбуждение различных возможных степеней свободы ядра-капли. В свободном, невозбужденном состоянии жидкость принимает сферическую форму. Движение частиц в жидкости всегда является коллективным. Поэтому и возбуждаться в жидкости могут лишь коллективные степени свободы. При возбуждении жидкость практически несжимаема, но может сравнительно легко менять свою форму. Поэтому легче всего возбуждаются степени свободы жидкости, соответствующие поверхностным колебаниям.

Неквантовая теория малых поверхностных колебаний свободной жидкой капли была развита еще до возникновения ядерной физики. Согласно этой теории наименьшую частоту $\omega_{кв}$ имеют квадрупольные собственные колебания, при которых капля попеременно становится то вытянутым, то сжатым эллипсоидом (рис. 3.1). Несколько более высокую частоту $\omega_{окт}$ имеют октапольные колебания, при которых капля в деформированном состоянии имеет грушевидную форму (рис. 3.2). Остальные типы собственных колебаний капли