
ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ**§ 1. Методы изучения ядерных сил**

1. Ядерными называются силы, действующие между нуклонами. В основном эти силы обусловлены так называемыми сильными взаимодействиями — самыми интенсивными взаимодействиями в природе (см. гл. VII, § 7). Детальное изучение ядерных сил необходимо для более глубокого понимания структуры ядра и механизма ядерных реакций.

Изучение сил между частицами проще всего производить в системе возможно меньшего числа частиц. Поэтому в настоящей главе мы будем в основном рассматривать систему, состоящую из двух нуклонов.

2. С классической, некантовой, точки зрения наиболее естественный способ исследования сил между частицами состоит в том, чтобы взять две частицы и измерять действующие между ними силы при различных взаимных расстояниях, скоростях и ориентациях. Именно таким путем были изучены электромагнитные и гравитационные взаимодействия, которые проявляются не только на малых, но и на больших, макроскопических расстояниях.

Ядерные силы имеют очень короткий радиус действия и поэтому действуют только в микромире, свойства которого, как мы уже не раз убеждались, резко отличаются от свойств привычного нам макромира. Так, из-за соотношения неопределенностей между координатой и импульсом $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ (см. гл. I, § 3) два нуклона невозможно установить неподвижно на сколько-нибудь заметное время на расстоянии порядка 10^{-13} см (или меньше) друг от друга. Поэтому для изучения ядерных сил приходится использовать методы, которые с точки зрения классической физики могут показаться косвенными.

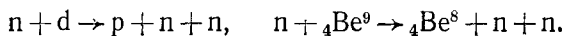
Так, в отношении системы нуклон — нуклон непосредственно мы можем измерять лишь а) характеристики связанных состояний и б) зависимость дифференциального сечения рассеяния от углов и энергий. Кроме того, мы, конечно, можем привлекать для определения вида ядерных сил данные о сечениях и связанных состояниях в системах трех и более нуклонов. Однако вследствие крайней математической громоздкости квантовой задачи многих тел из данных о многонуклонных системах, как правило, практически невозможно

извлечь количественную информацию о ядерных силах. Это видно уже из того, что в главах о ядерных моделях и ядерных реакциях мы с вопросом о виде ядерных сил почти не сталкивались.

3. Возникает естественный вопрос: можно ли хотя бы в принципе полностью определить форму ядерных межнуклонных сил по полной совокупности данных о задаче двух тел. Теоретические исследования дают на этот вопрос следующий ответ. Если для системы двух бесспиновых частиц известны все связанные состояния и дифференциальное сечение рассеяния при всех энергиях, то силы взаимодействия, т. е. квантовый гамильтониан взаимодействия, можно восстановить по этим данным точно, но лишь тогда, когда эти силы не зависят от скоростей. Можно ожидать, что наличие у частиц спинов не повлияет на этот теоретический результат, хотя и сильно осложнит как экспериментальные измерения, так и математические расчеты.

Если же, как это и имеет место для ядерных сил, силы зависят от скоростей, то однозначное восстановление вида взаимодействия по связанным состояниям и сечениям рассеяния становится невозможным. Конечно, это не значит, что ядерные силы, зависящие от скоростей, в квантовом мире вообще невозможно изучить достаточно полно. Привлекая к рассмотрению данные, например, о задаче трех и более тел, в принципе можно получить полную информацию о взаимодействии частиц. Однако практическое извлечение этой информации исключительно громоздко и до сих пор далеко от завершения.

4. Нашей задачей является изучение взаимодействий в системах протон — протон ($p-p$), нейтрон — протон ($n-p$) и нейтрон — нейтрон ($n-n$). Фактически к настоящему времени изучены лишь две из этих систем: $p-p$ и $n-p$. Система же $n-n$ до настоящего времени не поддается экспериментальному изучению из-за отсутствия нейтронных мишеней. Поэтому существующие методы изучения системы $n-n$ либо не совсем чистые, либо сравнительно косвенные. Например, рассеяние $n-p$ при высоких энергиях изучают, бомбардируя нейтронным пучком дейтронную мишень. При этом предполагают, что если энергия E_n падающих нейтронов значительно превышает энергию связи $E_{св} = 2,23$ МэВ дейтрона ($E_n \gg E_{св}$), то падающие нейтроны рассеиваются независимо на протоне и нейтроне дейтрона. Такая аппроксимация называется *импульсным приближением*; точность и пределы применимости этого приближения, однако, до сих пор не вполне ясны, так что этот метод не вполне чистый. При низких энергиях сведения о нейтрон-нейтронном рассеянии можно получить, изучая угловые и энергетические распределения нейтронов в ядерных реакциях с вылетом двух нейтронов. Например, использовались реакции:



Если оба нейтрона вылетают с малым относительным импульсом, то взаимодействие между ними сильно сказывается на сечении реакции. Для получения из этого сечения данных о нейтрон-нейтронном рассеянии требуется сложное теоретическое исследование, так что этот метод — косвенный. Как мы увидим ниже, отсутствие экспериментальных данных о взаимодействии $n-p$ на самом деле не так уж существенно, поскольку сейчас можно считать доказанным, что если отбросить слабое по сравнению с ядерным электромагнитное взаимодействие, то свойства систем $n-p$ и $p-p$ станут в точности одинаковыми (см. § 6).

5. Рассмотрение взаимодействия нуклон — нуклон принято производить отдельно для низких и высоких энергий. При этом низкими называются энергии примерно до 10—20 МэВ, высокими — энергии в сотни МэВ и выше. Промежуточную область от 20 до 100 МэВ иногда называют областью средних энергий. Выделение низких и высоких энергий имеет четкое физическое обоснование. При низких энергиях дебройлевская длина λ волны значительно превышает радиус R действия ядерных сил:

$$\lambda \gg R, \quad (5.1)$$

а при высоких, наоборот, много меньше R :

$$\lambda \ll R. \quad (5.2)$$

Начиная с порога рождения пионов ($E_{\text{пор}} \approx 140$ МэВ), восстановление ядерных сил по данным об упругом рассеянии осложняется неупругими каналами. С дальнейшим увеличением энергии роль неупругих каналов возрастает. При энергии 2—3 ГэВ полное сечение взаимодействия выходит примерно на константу, а сечение упругого рассеяния, оставаясь большим по величине, становится чисто дифракционным (см. гл. II, § 6 и гл. IV, § 9). В этой области энергии понятие «ядерные силы» теряет физический смысл: нуклоны ведут себя как «черные шары», поглощающие все падающие на них дебройлевские волны. Физика нуклон-нуклонных столкновений при таких энергиях рассмотрена в гл. VII, § 7.

§ 2. Дейтрон

1. В системах $n-p$, $p-p$ связанных состояний нет. В системе $p-p$ есть одно связанное состояние — дейтрон. В наличии у системы нуклон — нуклон всего лишь одного связанного состояния резко проявляется различие между короткодействующими ядерными и дальнедействующими кулоновскими силами. Напомним хотя бы, что атом водорода имеет бесконечную систему уровней. Мы еще вернемся к этому вопросу в п. 4.

Основные свойства дейтрона таковы:

а) Энергия связи E_d дейтрона равна 2,23 МэВ, т. е. примерно 1 МэВ на нуклон. Как мы уже знаем из гл. II, § 3, для большинства