

§ 7. Свойства ядерных сил

В этом параграфе мы подведем итоги изучения ядерных сил. Перечислим свойства ядерных сил и укажем, какие экспериментальные факты свидетельствуют о существовании каждого из этих свойств.

1. Ядерные силы велики по абсолютной величине. Это самые сильные из всех известных взаимодействий в природе. Для примера достаточно сказать, что обусловленная ядерными силами энергия связи простейшего ядра — дейтрона — равна 2,23 МэВ, в то время как обусловленная электромагнитными силами энергия связи простейшего атома — водорода — равна 13,6 эВ.

2. Ядерные силы являются очень короткодействующими. Радиус их действия имеет порядок 10^{-13} см. Свойство короткодействия было выведено из сравнения энергий связи дейтрона, тритона и α -частицы (см. § 2). Однако оно следует уже из опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц ядрами.

3. Ядерные силы существенно зависят от спинов. Зависимость ядерных сил от спинов проявляется уже в низкоэнергетическом рассеянии нейтрон — протон (см. § 3).

4. Ядерные силы нецентральноны, т. е., выражаясь классическим некантовым языком, направлены под углом к прямой, соединяющей взаимодействующие частицы. Квантовое определение нецентральности сил состоит в том, что под их действием орбитальный момент перестает быть интегралом движения. Нецентральность ядерных сил с неизбежностью следует из наличия у дейтрона квадрупольного электрического момента (см. гл. II, § 7). Только благодаря этому свойству нуклоны высоких энергий поляризуются при рассеянии друг на друге (§ 5).

Из различных возможных видов нецентральных сил для взаимодействия нуклон — нуклон, по-видимому, основную роль играет спин-орбитальное взаимодействие, стремящееся ориентировать спины двух нуклонов параллельно орбитальному моменту их относительного движения.

5. Ядерные силы, по крайней мере частично, носят обменный характер. Обменность является существенно квантовым свойством, благодаря которому нуклоны при столкновении могут передавать друг другу свои заряды, проекции спинов и даже координаты. Существование обменных сил прямо следует из опытов по рассеянию нейтронов высоких энергий на протонах (§ 5).

6. Ядерные силы обладают нетривиальной симметрией в отношении протонов и нейтронов, называемой изотопической инвариантностью. Изотопическая инвариантность проявляется в спектрах ядер, а также в рассеянии нуклон — нуклон (§ 6).

7. Ядерные силы притягивают нуклоны друг к другу на расстояниях в области 10^{-13} см, но на существенно меньших расстоя-

ниях переходят в силы отталкивания. Это свойство объясняют наличием у ядерных сил отталкивающей сердцевины. Оно было обнаружено при анализе протон-протонного рассеяния при высоких энергиях (§ 5).

8. Ядерные силы обладают свойством насыщения (гл. II, § 3). Насыщение проявляется в том, что энергия связи на нуклон в ядре при увеличении размеров ядра не растет, а остается примерно постоянной. Происхождение свойства насыщения долгие годы было загадочным. Сейчас считается установленным, что насыщение обусловлено совместным действием отталкивающей сердцевины и обменного характера ядерных сил. Отталкивающая сердцевина препятствует тому, чтобы в сферу действия сил одного нуклона попадало большое количество его соседей. Такова же и роль обменных сил. Дело в том, что у обменных сил притяжение чередуется с отталкиванием (например, притяжение при четных орбитальных моментах заменяется на отталкивание при нечетных). А всякое отталкивание способствует насыщению. Наиболее ярко влияние обменных сил на насыщение проявляется в легчайших ядрах. При переходе от дейтрона к α -частице энергия связи на нуклон резко растет (см. гл. II, § 3, рис. 2.5). Здесь обменные силы еще не сказываются потому, что все нуклоны находятся в S -состоянии. А вот в следующем за α -частицей ядре ${}^6\text{He}$ один нуклон вынужден из-за принципа Паули находиться в P -состоянии, где обменные силы являются отталкивающими. Поэтому пятый нуклон не может удержаться в ядре, т. е. ${}^6\text{He}$ не является стабильным ядром.

9. Из мезонной теории (см. ниже § 8) следует, что должны существовать тройные ядерные силы, радиус действия которых примерно вдвое меньше радиуса действия обычных парных сил. Напомним, что тройными называются силы между тремя телами, обращаемые в нуль при удалении на бесконечность хотя бы одного тела. Интенсивность (и даже знак) тройных сил неизвестна.

10. Не исключено, что ядерные силы сильно зависят от скоростей, т. е. от кинетических энергий сталкивающихся частиц. Как мы уже говорили, для опытного изучения этой зависимости необходимо использовать данные о столкновении более чем двух нуклонов.

Исследования такого рода до сих пор почти не проводились из-за их сложности и громоздкости.

§ 8. Теория ядерных сил

1. В теории ядерных сил имеются различные параллельно развивающиеся направления. Простейшим из них является феноменологический анализ.

Феноменологический анализ сводится к эмпирическому подбору такого гамильтониана нуклон-нуклонного взаимодействия, чтобы