

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, обращаясь 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

получить согласие с имеющейся совокупностью экспериментальных данных. Другими словами, закон зависимости силы от расстояния подбирается по известным опытным фактам о действии этих сил. В истории физики известны примеры, когда такой подход давал блестящие результаты. Достаточно сказать, что именно на этом пути был установлен закон Кулона для электростатического взаимодействия между зарядами. При этом закон, установленный из опытов на расстояниях порядка сантиметров, оказался справедливым вплоть до внутриатомных масштабов! Но история науки не склонна к повторениям. Угадать достаточно универсальный закон взаимодействия нуклон — нуклон было проведено до энергий в несколько десятков МэВ, были подобраны гамильтонианы взаимодействия, удовлетворительно описывающие эти опыты. Но когда начались опыты на нуклонах с энергиями в сотни МэВ, то оказалось, что все известные «низкоэнергетические» гамильтонианы здесь неприменимы. Их поведение на малых расстояниях пришлось существенно видоизменять. Напомним, что согласно соотношению неопределенностей координата-импульс увеличение энергии столкновения дает возможность исследовать силы на меньших расстояниях.

Сейчас имеется несколько довольно громоздких гамильтонианов взаимодействия, удовлетворительно описывающих опытные данные по рассеянию нуклон — нуклон вплоть до энергий в несколько сотен МэВ. Но нет надежды на то, что эти гамильтонианы окажутся пригодными при более высоких энергиях. Таким образом, успех феноменологического направления оказался предельно ограниченным даже в отношении «угадывания» вида сил. Кроме того, в этом направлении не ставится задача о выяснении природы ядерных сил и о связи этих сил с взаимодействиями между другими частицами.

2. Значительно более глубокой и содержательной является мезонная теория ядерных сил (Г. Юкава, 1935). Если феноменологический подход можно сравнивать с открытием закона Кулона, то историческим образом для мезонной теории ядерных сил может служить система уравнений Максвелла, из которой можно получить не только закон взаимодействия двух зарядов, но и излучение радиоволн, интерференцию света, действие электрического тока на магниты. Точно так же к мезонной теории относится не только получение закона взаимодействия двух нуклонов, но и такие вопросы, как рождение пи-мезонов, или, как их теперь чаще называют, пионов при нуклонных столкновениях, а также законы взаимодействия пионов с нуклонами и друг с другом.

Механизм нуклон-нуклонного взаимодействия в мезонной теории мы рассмотрим в гл. VII, § 5. Здесь же отметим только, что приводимая в старых учебниках схема, согласно которой это взаимодействие осуществляется путем переброса так называемых виртуальных (см. гл. VII, § 5) мезонов, является не только не единственным,

но и не главным механизмом взаимодействия. Тем не менее уже эта переупрощенная схема дает качественное объяснение многих свойств ядерных сил.

В частности, на этом пути естественно объясняются обменные силы. Например, если при столкновении с протоном нейтрон испустит отрицательно заряженный пион, то этот нейтрон превратится в протон. Исходный же протон, поглотив пион, в свою очередь станет нейтроном. А это как раз то, что и характеризует обменный характер сил.

Появление мезонной теории позволило сделать большое число предсказаний фундаментального характера. Так, задолго до экспериментального открытия пионов были предсказаны: а) существование пионов; б) их масса с точностью 10%; в) спин и четность пионов; г) количество различных пионов, их электрические заряды; д) изотопический спин пионов; е) большая величина сечения рассеяния пионов на нуклонах; ж) существование реакций рождения пионов при столкновениях нуклонов с нуклонами, а также при поглощении нуклонами γ -квантов с энергией свыше 150 МэВ. Из этого перечня видно, что мезонная теория дает более глубокое и правильное описание природы ядерных сил до энергий столкновения порядка сотен МэВ.

При энергиях выше 1 ГэВ утрачивают смысл как феноменологические гамильтонианы, так и мезонная теория. Взаимодействие нуклонов в этой области энергий подчиняется более глубоким законам физики элементарных частиц.