

ми — классической, фермиевской и бозевской — на простейшем случае, когда имеются две одинаковые частицы и два различных одночастичных состояния. Число возможных состояний такой физической системы будет разным для разных статистик.

В классической статистике возможны четыре состояния:

- а) обе частицы в первом состоянии;
- б) обе частицы во втором состоянии;
- в) первая частица в первом состоянии, вторая — во втором;
- г) первая частица во втором состоянии, вторая — в первом.

В статистике Ферми возможно только одно состояние:

одна из частиц (какая именно, здесь и ниже — вопрос, не имеющий смысла) находится в первом состоянии, другая — во втором.

В статистике Бозе — Эйнштейна возможны три состояния:

- а) обе частицы в первом состоянии;
- б) обе частицы во втором состоянии;
- в) одна из частиц в первом состоянии, другая — во втором.

8. В релятивистской квантовой теории поля строго доказывается, что статистика однозначно определяется спином частицы. Частицы с целым (в том числе с нулевым) спином подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна (γ -кванты и др.). Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми — Дирака (электроны, протоны, нейтроны, ядра с нечетным числом нуклонов и т. д.). Все имеющиеся экспериментальные данные согласуются с этим выводом.

§ 9. Четность

1. Четность является фундаментальным понятием. Она характеризует свойства симметрии ядер, элементарных частиц и вообще любых физических систем по отношению к зеркальным отражениям. Важность этого понятия обусловлена законом сохранения четности, согласно которому физическая система, обладающая зеркальной симметрией в начальном состоянии, сохраняет эту симметрию во все последующие моменты времени. Этот закон справедлив как для электромагнитных взаимодействий, определяющих структуру атомов и молекул, так и для ядерных сил, определяющих структуру ядер. О нарушении закона сохранения четности в так называемых слабых взаимодействиях см. гл. VI, § 4, п. 10 и гл. VII, § 8, п. 7.

2. Действие закона сохранения четности можно продемонстрировать на эффекте Зеемана. Рассмотрим сферически симметричный источник света, например, нагретый шар 1 (рис. 2.23). В свободном состоянии излучение этого источника будет, как говорят, *изотропным*, т. е. одинаковым во все стороны. Если же мы окружим этот источник круговым проводником 2, по которому течет ток, то излучение, скажем, в плоскости тока будет иным, чем излучение в направлении, перпендикулярном этой плоскости, за счет того, что созданное круговым током магнитное поле поляризует атомы и

молекулы источника света. Закон сохранения четности здесь позволяет предсказать, что независимо от деталей углового распределения испускаемого света излучение будет зеркально симметричным относительно плоскости, в которой течет ток. Так, на рис. 2.23 излучение вверх будет точно таким же, как и излучение вниз.

3. Закон сохранения четности приводит к ряду ограничений, или, как говорят, правил отбора, для различных реакций взаимопревращений ядер и элементарных частиц. Для формулировки этих правил необходимо точное квантовомеханическое определение четности как сохраняющейся величины.

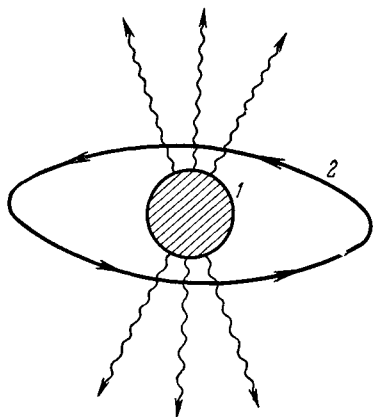


Рис. 2.23. Иллюстрация проявления закона сохранения четности.

В квантовой теории состояние системы n частиц описывается комплексной волновой функцией $\Psi(r_1, \dots, r_n)$, зависящей от координат этих частиц (см. гл. I, § 3).

Для протонов, нейтронов и электронов, т. е. для частиц, из которых состоят атомы и ядра, а также для ряда других микрочастиц определение четности эквивалентно разделению функций на четные и нечетные. Состояние системы n таких частиц называется

четным, если ее волновая функция не меняется при изменении знаков координат всех частиц:

$$\Psi_{\text{четн}}(-r_1, \dots, -r_n) = \Psi_{\text{четн}}(r_1, \dots, r_n), \quad (2.49)$$

и нечетным, если волновая функция при такой операции (называемой инверсией координат) меняет знак:

$$\Psi_{\text{нечетн}}(-r_1, \dots, -r_n) = -\Psi_{\text{нечетн}}(r_1, \dots, r_n). \quad (2.50)$$

Связь этого определения четности с зеркальной симметрией обусловлена тем, что преобразование инверсии $r \rightarrow -r$ состоит из зеркального отражения относительно плоскости, проходящей через начало координат, с последующим поворотом на 180° вокруг оси, перпендикулярной этой плоскости. Для общего случая произвольных микрочастиц определения четности состояния (2.49), (2.50) приходится немного усложнить. Именно, оказывается, что каждая частица с ненулевой массой покоя обладает неотъемлемой характеристикой, называемой *внутренней четностью*. Внутренняя четность Π частицы является числом, равным либо $+1$, либо -1 . Частицы, для которых $\Pi = +1$, называются четными, а частицы с $\Pi = -1$ называются нечетными. Охватывающее все частицы опреде-

ление четности состояния таково: состояние четно, если

$$\Pi_1 \dots \Pi_n \Psi_{\text{четн}}(-r_1, \dots, -r_n) = \Psi_{\text{четн}}(r_1, \dots, r_n), \quad (2.51)$$

и нечетно, если

$$\Pi_1 \dots \Pi_n \Psi_{\text{нечетн}}(-r_1, \dots, -r_n) = -\Psi_{\text{нечетн}}(r_1, \dots, r_n). \quad (2.52)$$

В (2.51), (2.52) Π_1, \dots, Π_n — внутренние четности частиц.

Из этих формул могут быть выведены следующие простые правила, позволяющие использовать закон сохранения четности для получения правил отбора в различных ядерных реакциях, а также для экспериментального определения внутренних четностей элементарных частиц и атомных ядер:

а) Четность частицы с орбитальным моментом l и внутренней четностью Π равна $\Pi (-1)^l$.

б) Внутренняя четность Π_{12} сложной системы, состоящей из двух частиц (и вообще из двух подсистем) с внутренними четностями Π_1 и Π_2 и с относительным орбитальным моментом l , равна $\Pi_1 \Pi_2 (-1)^l$. При этом внутренней четностью системы частиц мы называем ее четность в состоянии с нулевым суммарным импульсом.

Из совокупности самых разных опытных данных следует, что внутренние четности протона, нейтрона и электрона можно положить равными единице. Тогда из правил а), б) следует важное для теории атомов и ядер соотношение: четность системы n нуклонов (или электронов) с орбитальными моментами l_1, \dots, l_n равна $(-1)^{l_1+l_2+\dots+l_n}$. Только что изложенные правила определения четностей различных состояний неприменимы для фотонов (и вообще для частиц с нулевой массой покоя и ненулевым спином). Правила отбора по четности для электромагнитного излучения будут изложены в гл. VI, § 6.

4. Основные состояния четно-четных ядер характеризуются положительной четностью. Основные состояния других ядер могут быть как четными, так и нечетными. Например, основное состояние изотопа кислорода ${}^8\text{O}^{17}$ имеет положительную четность, а изотопа азота ${}^7\text{N}^{15}$ — отрицательную. Эти особенности четности основных состояний разъясняются в оболочечной модели ядра (см. гл. III).

Ядра в возбужденных состояниях могут иметь различную четность, не обязательно совпадающую с четностью основного состояния. Например, ядро свинца ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ в основном состоянии четно и имеет спин 0, а в первом возбужденном состоянии — нечетно и имеет спин 3. На схемах ядерных уровней принято указывать как спин, так и четность каждого уровня. Спин указывается числом, а четность — знаками плюс для четных и минус для нечетных уровней. Этот знак ставится справа сверху от числа, указывающего спин. Например, символ $1/2^+$ обозначает четный уровень со спином $1/2$, а символ 3^- обозначает нечетный уровень со спином три.

Совокупность значений спина и четности называется *характеристикой* уровня ядра. На рис. 2.24 для примера приведены характеристики основного и двух возбужденных уровней ядра ${}_{82}\text{Pb}^{208}$.

5. В качестве примера использования закона сохранения четности рассмотрим ядерную реакцию, в которой при столкновении протона p с ядром лития ${}_{3}\text{Li}^7$ образуются две α -частицы:

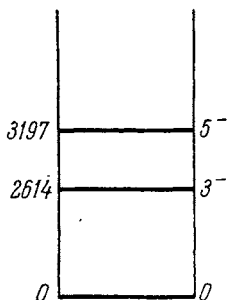
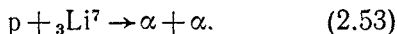


Рис. 2.24. Низшие возбужденные состояния ядра изотопа свинца ${}_{82}\text{Pb}^{208}$.

Энергии даны в кэВ.

Если налетающий протон имеет небольшую энергию (порядка 1 МэВ), то, как будет объяснено в гл. IV, § 4, относительный орбитальный момент системы $p + {}_{3}\text{Li}^7$ близок к нулю, так что согласно правилу б) четность этой системы совпадает с четностью ядра ${}_{3}\text{Li}^7$. С другой стороны, система двух α -частиц всегда четна в соответствии с (2.47). Согласно закону сохранения четности, для того чтобы реакция могла идти, ядро ${}_{3}\text{Li}^7$ должно также быть четным. Экспериментально эта реакция при низких энергиях сильно подавлена, что с определенностью указывает на отрицатель-

ную четность ядра ${}_{3}\text{Li}^7$. А это в свою очередь является одним из указаний на то, что ядро ${}_{3}\text{Li}^7$ можно себе представить как α -частичный остов, окруженный тремя нуклонами, каждый из которых имеет орбитальный момент, равный единице.

Может возникнуть вопрос, как истолковать использование закона сохранения четности для исследования реакции лития с протонами (или для других реакций) в рамках общей формулировки закона сохранения четности, данного в начале настоящего параграфа. Не вдаваясь в математические детали, укажем, что эта трактовка такова. При низких энергиях волновая функция системы $p + {}_{3}\text{Li}^7$ приближенно антисимметрична относительно зеркального отражения, в то время как волновая функция двух α -частиц симметрична. Это и приводит к подавлению реакции. Другие примеры использования закона сохранения четности приведены в гл. IV, VI.

§ 10. Заключительные замечания

1. Перечисленные в предшествующих параграфах статические характеристики атомных ядер по крайней мере на сегодняшний день следует считать основными. Это, конечно, не исключает возможности существования у ядер целого ряда других характеристик, исследование которых также представляет интерес для понимания структуры ядра. Перечислим некоторые из этих дополнительных характеристик.