

значения, какая из частиц полетела, напр., вверх, поскольку частицы одинаковы, — практически надо учесть обе возможности (рис. 11, а и 11, б). Однако в принципе в классич. механике можно различить эти два процесса, т. к. можно проследить за траекториями частиц во время столкновения. В К. м. траекторий, в строгом смысле этого слова, нет, и область столкновения обе частицы проходят с нек-рой неопределённостью, с «размытыми траекториями» (рис. 11, в). В процессе столкновения области размытия перекрываются, и невозможно даже в принципе различить эти два случая рассеяния. Следовательно, в К. м. одинаковые частицы полностью неразличимы — тождественны. Не имеет смысла говорить о двух разных случаях рассеяния, есть только один случай — одна из одинаковых частиц полетела вверх, другая — вниз, индивидуальности у частиц нет. Все состояния, получающиеся перестановкой одинаковых частиц, в К. м. (в отличие от классической) неразличимы и при подсчёте числа состояний должны приниматься за одно состояние (это разрешает парадокс Гиббса в статистич. физике).

Квантовомеханич. принцип неразличимости одинаковых частиц можно сформулировать математически на языке волновых ф-ций. Вероятность нахождения частиц в данном месте пространства определяется квадратом модуля волновой ф-ции, зависящей от координат обеих частиц, $|\psi(1, 2)|^2$, где 1 и 2 означают совокупность пространств и спиновых переменных соответственно первой и второй частицы. Тождественность частиц требует, чтобы при перемене их местами вероятности были одинаковыми:

$$|\psi(1, 2)|^2 = |\psi(2, 1)|^2.$$

Отсюда вытекают две возможности:

$$\psi(1, 2) = \psi(2, 1),$$

$$\psi(1, 2) = -\psi(2, 1).$$

Если при перемене частиц местами волновая ф-ция не меняет знака, то она наз. с и м м е т р и ч н о й, если меняет — а н т и с и м м е т р и ч н о й. Поскольку только суперпозиция ф-ций одинаковой симметрии обладает определ. симметрией, то в соответствии с принципом суперпозиции все состояния к.-л. пары одинаковых частиц должны описываться либо симметричными, либо антисимметричными волновыми ф-циями. Т. к. все взаимодействия одинаковых частиц симметричны относительно переменных 1, 2 (т. е. гамма-кванты коммутируют с оператором перестановки), то свойства симметрии или антисимметрии волновой ф-ции сохраняются во времени. Это означает, что требование одной определ. симметрии относительно перестановки одинаковых частиц не противоречит принятым ранее постулатам К. м.

В системе из большего числа одинаковых частиц могли бы в принципе осуществляться более сложные представления группы перестановок частиц (см. *Парастатистика*). Однако, как показывает опыт, в системе из произвольного числа тождеств. частиц имеет место симметрия или антисимметрия относительно перестановки любой пары частиц. Свойство симметрии или антисимметрии оказывается характерным признаком данного сорта частиц. Соответственно все частицы делятся на два класса. Частицы, описываемые симметричными волновыми ф-циями, наз. *бозонами*, антисимметричными — *фермионами*. Эмпирически было установлено правило, связывающее симметрию волновых ф-ций тождеств. частиц со значением их спина (т. н. связь спина и статистики). В нерелятивистской К. м. оно было принято в качестве постулата:

V. Частицы с целым спином являются бозонами, с полуцелым — фермионами.

В дальнейшем связь спина и статистики была в определ. предположениях обоснована теоретически Паули (*Паули теорема*, являющаяся одной из осн. теорем релятивистской К. м.). В частности, фермионами явля-

ются все *лептоны*, *барионы*, *кварки*, а бозонами — фотоны, *промежуточные векторные бозоны*, *глюоны*, π - и K -мезоны и др. Сложные частицы (напр., атомные ядра), состоящие из нечётного числа фермионов, являются фермионами, а из чётного — бозонами.

Свойства симметрии волновой ф-ции определяют статистич. свойства системы. Пусть, напр., взаимодействующие тождеств. частицы находятся в одинаковых внеш. условиях (напр., во внеш. поле). Состояние такой системы можно определить, задав *числа заполнения* — числа частиц, находящихся в каждом данном (индивидуальном) состоянии, т. е. имеющих одинаковые наборы квантовых чисел. Если тождеств. частицы имеют одинаковые квантовые числа, то их волновая ф-ция симметрична относительно перестановки частиц. Отсюда следует, что два одинаковых фермиона не могут находиться в одинаковых состояниях, т. к. для фермионов волновая ф-ция должна быть антисимметричной. Это свойство наз. принципом запрета Паули (принципом Паули). Т. о., числа заполнения для фермионов могут принимать лишь значения 0 или 1. Принцип Паули существенно влияет на поведение электронов в атомах, молекулах и т. д. Для бозонов же числа заполнения могут принимать произвольные целые значения. Поэтому с учётом квантовомеханич. свойств тождеств. частиц существуют два типа статистик: *Ферми — Дирака статистика* для фермионов и *Бозе — Эйнштейна статистика* для бозонов. Пример ферми-системы — электронный газ в металле, пример бозе-системы — газ фотонов (т. е. равновесное эл.-магн. излучение), жидкий ^4He .

Принцип Паули является определяющим для объяснения периодич. системы элементов Менделеева, ядерных оболочек (см. *Ядро атомное*); он объясняет характерные свойства электронов в металлах, напр. их теплоёмкость и электропроводность.

Обменное взаимодействие. Химическая связь

Молекула представляет собой связанную систему ядер и электронов, между к-рыми действуют электрич. (кулоновские) силы (притяжения и отталкивания). Т. к. ядра значительно тяжелее электронов, электроны движутся гораздо быстрее и образуют нек-рое распределение отрицат. заряда, в поле к-рого находятся ядра. В классич. механике и электростатике доказывается, что система такого типа неустойчива (*Ирришоу теорема*). Поэтому, даже если принять устойчивость атомов (к-рую нельзя объяснить на основе законов классич. физики), невозможно без специфически квантовомеханич. закономерностей объяснить устойчивость молекул. Особенно непонятно с точки зрения классич. представлений существование молекул из одинаковых атомов, т. е. с *ковалентной связью* (напр., простейшей молекулы H_2). Оказалось, что свойство антисимметрии электронной волновой ф-ции так изменяет характер взаимодействия электронов, находящихся у разных ядер, что возникновение такой связи становится возможным.

Рассмотрим для примера молекулу водорода H_2 , состоящую из двух протонов и двух электронов. Волновая ф-ция такой системы представляет собой произведение двух ф-ций, одна из к-рых зависит только от координат, а другая — только от спиновых переменных обоих электронов. Если суммарный спин электронов равен нулю (спины антипараллельны), спиновая ф-ция антисимметрична относительно перестановки спиновых переменных электронов, и для того чтобы полная волновая ф-ция (в соответствии с принципом Паули) была антисимметричной, координатная часть волновой ф-ции $\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ должна быть симметричной относительно перестановки координат электронов. Приближённо она может быть представлена в виде

$$\psi \sim \psi_a(1)\psi_b(2) + \psi_b(1)\psi_a(2), \quad (83)$$

где $\psi_a(\mathbf{r}_i)$, $\psi_b(\mathbf{r}_i)$ — координатная часть волновой ф-ции i -го электрона ($i=1, 2$) соответственно у ядер a и b .