

фермионов я обнаружил две группы частиц со спином $11/2$, а среди бозонов – группы частиц со спином 4. Все кварки – фермионы со спином $1/2$.

Момент количества движения, обязанный движению в пространстве, называют орбитальным, хотя, как мы знаем, квантовая механика не допускает движения по орбите. Орбитальный момент имеет всегда целочисленное значение. Величину максимальной проекции орбитального момента обозначают, как мы говорили, буквой l , а иногда L .

Чем больше момент количества движения, тем он ближе к классическому моменту: с ростом s и $l(L)$ растет число возможных проекций на ось квантования, а длина момента приближается к величине максимальной проекции. Это – проявление общего принципа соответствия, согласно которому формулы и выводы квантовой механики переходят в формулы и выводы классической ньютоновской механики, если характеристики движения соответствуют условиям применимости классической механики. В условия применимости классической механики должна обязательно входить постоянная Планка. Условие того, что момент количества движения можно описывать формулами классической механики, выглядит особенно просто: величина момента должна во много раз превосходить \hbar .

Познакомившись с понятием спина, узнав, что электроны – фермионы, продолжим выяснение того, как проявляет себя неразличимость.

Проще и естественнее всего неразличимость изучать на примере двух частиц. Для определенности – на примере двух электронов. Чтобы электроны не разлетелись кто куда, поместим их в поле ядра, имеющего положительный заряд, равный по величине заряду двух электронов. Легко видеть, что получился атом гелия. Так как ядро атома в тысячи раз тяжелее электронов, мы можем считать его неподвижным. Заметьте: неподвижное ядро – абстракция типа идеализации. Но это такой простой случай, что неприлично привлекать к нему внимание. Не учитывая движения ядра, можно получить приближенные, но достаточно точные формулы, описывающие движение электронов (как при классическом описании, так и при квантовом). Правда, аналитически точно решить задачу о движении двух электронов в поле ядра непросто. Но, решив, нетрудно учесть движение ядра и вычислить поправки, обязанные движению ядра. Поправки малы, что подтверждает пригодность приближения.

При классическом описании состояние системы двух электронов определяется траекториями, по которым электроны движутся. При квантовом – волновой функцией (пси-функцией), заданной в конфигурационном пространстве (если состояние стационарно, как движение по определенной замкнутой траектории, то зависимость пси-функции от времени можно исключить).

От какого числа переменных зависит пси-функция двух электронов в стационарном состоянии? Каждый электрон обладает тремя степенями свободы. К трем пространственным координатам каждого электрона надо добавить значение проекции его спина. С учетом спина, у каждого электрона не 3, а 4 степени свободы! А

$2 \times 4 = 8$. Волновая функция двух электронов, следовательно, зависит от 8 переменных.⁴

Вернемся к неразличимости. Переставим мысленно местами два электрона. Формально это означает, что в волновой функции, зависящей от восьми переменных, четыре переменных, относящихся к одному электрону, надо поменять местами с четырьмя переменными, относящимися ко второму электрону. Что произойдет при такой операции с волновой функцией двух электронов? Оказывается, волновая функция двух электронов при этом изменит знак. Смена знака есть следствие того, что электроны – фермионы. Все частицы с полувещным спином ведут себя аналогично. А вот если бы мы переставляли бозоны (частицы с целым или нулевым спином), волновая функция вовсе не изменилась бы.

Естественен вопрос: «Что это за неразличимость, если при перестановке частиц местами волновая функция меняет знак?» Оказывается, процедура вычислений с помощью волновой функции физических величин, описывающих результаты экспериментов, устроена так, что смена знака у волновой функции не влияет на результат. Следовательно, смена знака у пси-функции не противоречит неразличимости.

Сказанное должно пояснить утверждение о различии неразличимостей. Фермионы и бозоны обладают разными неразличимостями и, когда речь идет не об одной частице, разительно не похожи друг на друга. Фермионы – индивидуалисты. А бозоны – коллективисты. Сейчас поясним, что это значит.

Фермионы названы индивидуалистами потому, что смена знака у пси-функции при перестановке двух частиц приводит к принципу запрета, согласно которому в каждом состоянии может находиться лишь один фермион. Бозоны – коллективисты, так как в любом состоянии может скапливаться любое число бозонов.

Принцип запрета, которому подчиняются фермионы, – один из важнейших принципов квантовой физики. По имени сформулировавшего его в 1924–25 годах физика В.Паули принцип запрета называют принципом Паули.

Принцип Паули лежит в основе объяснения структуры атомов и периодического закона Менделеева. Действительно, представьте себе, что ничто не мешает любому числу электронов находиться в одном состоянии. В любом атоме все электроны оказались бы на самом нижнем энергетическом уровне. Атом, который имеет сложную структуру именно потому, что электроны занимают разные состояния, оказался бы бесформенным сгустком электронов, прижатых к ядру (нижний энергетический уровень расположен вблизи ядра). Если бы таково было устройство атома, не могло бы быть никакой надежды объяснить химические свойства различных атомов. А ведь они замечательно объясняются, если при заполнении уровней учитывать требования принципа Паули. Без принципа Паули добавление протона к ядру, означающее переход в соседнюю

⁴ Вас не должно смущать, что одна переменная (проекция спина) принимает только два значения: $+1/2$ и $-1/2$.