**Принцип запрета Паули**

Два электрона в атоме не могут находиться в одном состоянии.

Австрийский физик Вольфганг Паули — один из нескольких европейских физиков-теоретиков, сформулировавших в конце 1920-х — начале 1930-х годов основные принципы и постулаты квантовой механики. Принцип, носящий его имя, является одним из основополагающих в этом разделе физической науки. Проще всего представить себе, в чем именно заключается принцип Паули, если сравнить электроны с автомобилями на многоярусной крытой стоянке. В каждый бокс помещается только одна машина, а после того, как все боксы на нижнем этаже стоянки заняты, автомобилям приходится в поисках свободного места заезжать на следующий этаж. Так же и электроны в атомах — на каждой орбите вокруг ядра их помещается не больше, чем там имеется «парковочных мест», а после того, как все места на орбите заняты, следующий электрон ищет себе место на более высокой орбите.

Далее, электроны ведут себя, условно говоря, так, будто они вращаются вокруг своей оси (то есть, обладают собственным моментом вращения, который в этом случае принято называть спином и который может принимать лишь два значения: +1/2 или –1/2). Два электрона с противоположным спином могут занимать одно место на орбите. Это, как если бы в один бокс помещались одновременно машина с правым рулем и машина с левым рулем, а две машины с одинаковым расположением руля не помещались. Вот почему в первом ряду периодической системы Менделеева мы видим всего два атома (водород и гелий): на нижней орбите отведено всего одно сдвоенное место для электронов с противоположным спином. На следующей орбите помещается уже восемь электронов (четыре со спином –1/2, и четыре со спином +1/2), поэтому во втором ряду таблицы Менделеева мы видим уже восемь элементов. И так далее.

Внутри стареющих звезд температура настолько высока, что атомы в основном находятся в ионизированном состоянии, и электроны свободно перемещаются между ядрами. И здесь снова срабатывает принцип запрета Паули, но уже в видоизмененной форме. Теперь он гласит, что в определенном пространственном объеме может одновременно находиться не более двух электронов с противоположным спином и определенными интервалами предельно допустимых скоростей. Однако картина резко изменяется после того, как плотность вещества внутри звезды превысит пороговое значение порядка 107 кг/м3 (для сравнения — это в 10 000 раз выше плотности воды; спичечный коробок такого вещества весит около 100 тонн). При такой плотности принцип Паули начинает выражаться в стремительном росте внутреннего давления в звезде. Это дополнительное давление вырожденного электронного газа, и его проявлением становится тот факт, что гравитационный коллапс старой звезды останавливается после того, как она сжимается до размеров, сопоставимых с размерами Земли. Такие звезды называют белыми карликами, и это последняя стадия эволюции звезд с массой, близкой к массе Солнца (см. Предел Чандрасекара).

Выше я описал действие запрета Паули применительно к электронам, но он действует и в отношении любых элементарных частиц с полуцелым спиновым числом (1/2, 3/2, 5/2 и т. д.). В частности, спиновое число нейтрона равно, как и у электрона, 1/2. Это значит, что нейтронам, как и электронам, требуется определенное «жизненное пространство» вокруг себя. Если масса белого карлика превышает 1,4 массы Солнца (см. Предел Чандрасекара), силы гравитационного притяжения заставляют протоны и электроны внутри звезды попарно объединяться в нейтроны. Но тогда нейтроны, подобно электронам в белых карликах, начинают производить внутренне давление, которое называется давлением вырожденного нейтронного газа, и в этом случае гравитационный коллапс звезды останавливается на стадии образования нейтронной звезды, диаметр которой сопоставим с размерами большого города. Однако при еще большей массе звезды (начиная примерно с тридцатикратной массы Солнца) силы гравитации сламывают и сопротивление вырожденного нейтронного газа, и звезды коллапсируют дальше, превращаясь в черные дыры.

Принцип запрета Паули представляет собой яркий пример закона природы нового типа, и по мере развития компьютерных технологий такие «неявные» законы будут неизбежно играть всё большую роль. Законы этого типа принципиально отличаются от законов классической физики, таких как законы движения Ньютона, — они не предсказывают, что произойдет в системе. Вместо этого они определяют, чего в системе не может произойти. Именно их биолог и структурный теоретик Харольд Моровиц (Harold Morowitz, р. 1927) назвал «правилами отсечения»: такие правила, в частности, принцип запрета Паули сводятся к тому, что при решении самых сложных и комплексных проблем (а расчет орбит электронов в сложных атомов к таковым, несомненно, относится) следует запрограммировать компьютер таким образом, чтобы он даже не рассматривал заведомо невозможные варианты решения. Тем самым такое правило отсекает от ствола возможных решений задачи заведомо мертвые ветви, оставляя лишь допустимые возможности для ее решения, благодаря чему время компьютерных расчетов сокращается до разумных пределов. Таким образом, правила, подобные принципу запрета Паули, становятся всё более важными, поскольку мы всё больше зависим от компьютеров в решении самых сложных и комплексных проблем.

**Эффект Паули**

Раньше ученые масштаба Исаака Ньютона или Майкла Фарадея успешно сочетали в себе навыки экспериментаторов и теоретиков — сами проводили эксперименты по исследованию различных аспектов физического мира и сами же разрабатывали теории для объяснения полученных ими опытным путем результатов. Те времена прошли. Примерно с начала ХХ столетия узкая специализация, эпидемией пронесшаяся по всем отраслям человеческой деятельности, распространилась и на естествознание, включая физику. Сегодня мы видим, что подавляющее большинство ученых относится к одной из двух категорий — экспериментаторов или теоретиков. Совместить в себе две эти ипостаси в наше время практически невозможно.

Вольфганг Паули был ярко выраженным физиком-теоретиком и, как свойственно многим ученым этой категории, весьма презрительно относился к «сантехникам» (по его же выражению), марающим руки об экспериментальные установки. Снобизм Паули в отношении экспериментаторов, равно как и его полная неспособность заставить работать даже самую простую экспериментальную установку, вошли в легенду. Рассказывают, что стоило ему появиться в физической лаборатории, как какое-нибудь оборудование тут же выходило из строя. Говорят, что чудовищный взрыв в Лейденском университете (Нидерланды) произошел минута в минуту по прибытии Паули в этот город поездом из Цюриха.

Правда всё это или нет, но «эффект Паули» — способность человека разрушительно влиять на эксперимент одним своим присутствием — прочно вошел в физический фольклор. Однако, как и в объяснении Бора, в нем, скорее всего, много преувеличений, если разобраться.

**\*\*\***

Вольфганг ПАУЛИ

Wolfgang Pauli, 1900–58

Австрийский, затем швейцарский физик-теоретик. Родился в Вене, в семье профессора Венского университета. Крёстным отцом Паули был Эрнст Мах (см. Ударные волны). Ещё школьником освоил частную и общую теорию относительности. Изучал теоретическую физику в Мюнхенском университете в одной группе с Вернером Гейзенбергом (см. Принцип неопределенности Гейзенберга), диплом защитил в 1922 году.

Паули явился одним из пионеров квантовой механики, внеся в новую научную дисциплину ряд принципиальных вкладов, самым поразительным из которых, вероятно, является его принцип запрета, сформулированный в 1924 году, — за него в 1945 году Паули был удостоен Нобелевской премии по физике. Его идея наличия квантовых спиновых чисел у элементарных частиц была экспериментальна подтверждена двумя годами позже. Кроме того, Паули удалось объяснить кажущееся нарушение закона сохранения энергии при бета-распаде (см. Радиоактивный распад) посредством предположения об излучении при нём, помимо электрона, неизвестной частицы, позже названной нейтрино.

В годы второй мировой войны Паули работал в США, в Принстонском Институте перспективных исследований. По окончании войны вернулся в Европу, принял швейцарское гражданство и занял должность профессора экспериментальной физики в федеральном Институте технологии в Цюрихе.