

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 удвоенное 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 10^7 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

да

влением 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 слабевают 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 механики 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 атомах 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.