

Имеется вероятность, что квантовая частица проникнет за барьер, который непреодолим для классической элементарной частицы.

Представьте шарик, катающийся внутри сферической ямки, вырытой в земле. В любой момент времени энергия шарика распределена между его кинетической энергией и потенциальной энергией силы тяжести в пропорции, зависящей от того, насколько высоко шарик находится относительно дна ямки (согласно первому началу термодинамики). При достижении шариком борта ямки возможны два варианта развития событий. Если его совокупная энергия превышает потенциальную энергию гравитационного поля, определяемую высотой точки нахождения шарика, он выпрыгнет из ямки. Если же совокупная энергия шарика меньше потенциальной энергии силы тяжести на уровне борта лунки, шарик покатится вниз, обратно в ямку, в сторону противоположного борта; в тот момент, когда потенциальная энергия будет равна совокупной энергии шарика, он остановится и покатится назад. Во втором случае шарик никогда не выкатится из ямки, если не придать ему дополнительную кинетическую энергию — например, подтолкнув. Согласно законам механики Ньютона

шарик никогда не покинет ямку без придания ему дополнительного импульса, если у него недостаточно собственной энергии для того, чтобы выкатиться за борт.

А теперь представьте, что борта ямы возвышаются над поверхностью земли (наподобие лунных кратеров). Если шарик удастся перевалить за приподнятый борт такой ямы, он покатится дальше. Важно помнить, что в ньютоновском мире шарика и ямки сам факт, что, перевалив за борт ямки, шарик покатится дальше, не имеет смысла, если у шарика недостаточно кинетической энергии для достижения верхнего края. Если он не достигнет края, он из ямы просто не выберется и, соответственно, ни при каких условиях, ни с какой скоростью и никуда не покатится дальше, на какой бы высоте над поверхностью снаружи ни находился край борта.

В мире квантовой механики дело обстоит иначе. Представим себе, что в чем-то вроде такой ямы находится квантовая частица. В этом случае речь идет уже не о реальной физической яме, а об условной ситуации, когда частице требуется определенный запас энергии, необходимый для преодоления барьера, мешающего ей вырваться наружу из того, что физики условились называть «*потенциальной ямой*». У этой ямы есть и энергетический аналог борта — так называемый

«*потенциальный барьер*»

. Так вот, если снаружи от потенциального барьера уровень напряженности энергетического поля ниже

чем энергия, которой обладает частица, у нее имеется шанс оказаться «за бортом», даже если реальной кинетической энергии этой частицы недостаточно, чтобы «перевалить» через край борта в ньютоновском понимании. Этот механизм

прохождения частицы через потенциальный барьер и назвали квантовым туннельным эффектом.

Работает он так: в квантовой механике частица описывается через волновую функцию, которая связана с вероятностью местонахождения частицы в данном месте в данный момент времени. Если частица сталкивается с потенциальным барьером, уравнение Шрёдингера позволяет рассчитать вероятность проникновения частицы через него, поскольку волновая функция не просто энергетически поглощается барьером, но очень быстро гасится — по экспоненте. Иными словами, потенциальный барьер в мире квантовой механики размыт. Он, конечно, препятствует движению частицы, но не является твердой, непроницаемой границей, как это имеет место в классической механике Ньютона.

Если барьер достаточно низок или если суммарная энергия частицы близка к пороговой, волновая функция, хотя и убывает стремительно при приближении частицы к краю барьера, оставляет ей шанс преодолеть его. То есть имеется определенная вероятность, что частица будет обнаружена по другую сторону потенциального барьера — в мире механики Ньютона это было бы невозможно. А раз уж частица перевалила через край барьера (пусть он имеет форму лунного кратера), она свободно покатится вниз по его внешнему склону прочь от ямы, из которой выбралась.

Квантовый туннельный переход можно рассматривать как своего рода «утечку» или «просачивание» частицы через потенциальный барьер, после чего частица движется прочь от барьера. В природе достаточно примеров такого рода явлений, равно как и в современных технологиях. Возьмем типичный радиоактивный распад: тяжелое ядро излучает альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. С одной стороны, можно представить себе этот процесс таким образом, что тяжелое ядро удерживает внутри себя альфа-частицу посредством сил внутриядерной связи, подобно тому как шарик удерживался в ямке в нашем примере. Однако даже если у альфа-частицы недостаточно свободной энергии для преодоления барьера внутриядерных связей, всё равно имеется вероятность ее отрыва от ядра. И, наблюдая спонтанное альфа-излучение, мы получаем экспериментальное подтверждение реальности туннельного эффекта.

Другой важный пример туннельного эффекта — процесс термоядерного синтеза, питающий энергию звезды (см. Эволюция звезд). Один из этапов термоядерного синтеза — столкновение двух ядер дейтерия (по одному протону и одному нейтрону в каждом), в результате чего образуется ядро гелия-3 (два протона и один нейтрон) и

испускается один нейтрон. Согласно закону Кулона, между двумя частицами с одинаковым зарядом (в данном случае протонами, входящими в состав ядер дейтерия) действует мощнейшая сила взаимного отталкивания — то есть налицо мощнейший потенциальный барьер. В мире по Ньютону ядра дейтерия попросту не могли бы сблизиться на достаточное расстояние и синтезировать ядро гелия. Однако в недрах звезд температура и давление столь высоки, что энергия ядер приближается к порогу их синтеза (в нашем смысле, ядра находятся почти на краю барьера), в результате чего начинает действовать туннельный эффект, происходит термоядерный синтез — и звезды светят.

Наконец, туннельный эффект уже на практике применяется в технологии электронных микроскопов. Действие этого инструмента основано на том, что металлическое острие щупа приближается к исследуемой поверхности на сверхмалое расстояние. При этом потенциальный барьер не дает электронам из атомов металла перетечь на исследуемую поверхность. При перемещении щупа на предельно близком расстоянии вдоль исследуемой поверхности он как бы перебирает атом за атомом. Когда щуп оказывается в непосредственной близости от атомов, барьер ниже

чем когда щуп проходит в промежутках между ними. Соответственно, когда прибор «нащупывает» атом, ток возрастает за счет усиления утечки электронов в результате туннельного эффекта, а в промежутках между атомами ток падает. Это позволяет подробнейшим образом исследовать атомные структуры поверхностей, буквально «картографируя» их. Кстати, электронные микроскопы как раз и дают окончательное подтверждение атомарной теории строения материи.