

ГОРЕТАЯ СОФИЯ ЕВГЕНЬЕВНА,
учащаяся 10 класса МБОУ «СОШ №7 имени А.С.Пушкина»
Научный руководитель-учитель физики
Колесникова Татьяна Сергеевна
olga.sokolova240208@yandex.ru
г. Курск, Россия

КВАНТОВОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ: ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

Квантовое туннелирование, или волномеханическое туннелирование, при котором частица может проходить через барьер, когда её энергия меньше, чем высота барьера. Чем шире барьер и чем выше энергия барьера, тем ниже вероятность туннелирования. К сожалению, наблюдать этот процесс напрямую невозможно, в макроскопическом мире квантовые свойства объектов не поддаются наблюдению, но доказать их возможно экспериментальным путем. Что и было сделано в 1957 году Лео Эсаки. Он продемонстрировал туннелирование электронов через барьер шириной в несколько нанометров, в полупроводниковой структуре и разработал диод, основанный на туннельном эффекте. А через пять лет в 1960 году, следуя работе Эсаки, Ивар Гяэвер экспериментально показал, что туннелирование также имеет место в сверхпроводниках[1].

Если говорить о концепции этого процесса, то он относится к области квантовой механики: изучение того, что происходит в квантовом масштабе, чего не может объяснить классическая механика. Понимать этот процесс, стоит как способ, с помощью которого частицы, находящиеся сначала по одну сторону барьера, попадают на другую его сторону. В данном случае, потенциальный барьер — стандартная одномерная задача, используемая специально для демонстрации этого явления, а так же волномеханического отражения. Зачастую, этот барьер имеет прямоугольный вид и обычно подразумевается, что по обе стороны барьера $U=0$, что полная энергия частицы E связана только с движением в направлении x (нет движения в перпендикулярной плоскости yz) и что масса частицы m неизменна.

В квантовой механике, в отличие от классической, частица может пройти под барьером, что для последней является невозможным, ведь кинетическая энергия частицы, будет отрицательна, но, из-за принципа неопределённости Гейзенберга возможно нарушение закона сохранения энергии на очень малый отрезок времени. Если закон сохранения энергии нарушается на величину ΔE , то существовать такое состояние может не дольше, чем Δt . Их отношение к постоянной Планка \hbar , позволяет сделать ряд оценок, таких как радиус, в котором может существовать частица, прошедшая через барьер, и время, которое эта частица, будет находится за барьером. Дальше рассчитанного радиуса частица вряд ли сможет улететь, как и просуществовать дольше рассчитанного времени. Если область, в которую попадает частица, бесконечно толстая (полупространство), то происходит затухание волновой функции с характерной глубиной. Если же барьер имеет конечную толщину, сопоставимую с этой глубиной, то затухание прекращается за пределами барьера — и волновая функция прошедшей волны соответствует дальнейшему распространению, хотя и с меньшей амплитудой.

Выделяются три основных случая туннельного перехода частицы:

- туннельный переход частицы, находящейся в связанном состоянии, в свободное состояние;
- прохождение свободной частицы сквозь потенциальный барьер;
- туннельный переход частицы из связанного состояния в связанное.

I . туннельный переход частицы, находящейся в связанном состоянии, в свободное состояние.

Рассмотрим туннелирование частицы, которая находится в потенциале перехода, с соответствующей ей потенциальной энергией. В начальный момент времени, частица находится в связанном состоянии, а затем, пройдя потенциальный барьер, выходит в непрерывный спектр. Возникает задача о нахождении вероятности выхода частицы из потенциальной ямы, в определенный промежуток времени, здесь

речь идет о выходе частицы из ограниченной области пространства, а не о падении на потенциальный барьер частицы, приходящей из бесконечности.

Наглядно, первый пример можно описать с помощью ядерного взаимодействия, которое обеспечивает притяжение, последнее в свою очередь создает потенциальную яму, внутри которой находятся протоны и нейтроны. Внутри ядра при распаде, могут образоваться α -частицы, то есть, довольно устойчивое состояние:

два протона, заполненных К оболочкой и два нейтрона, заполненных К оболочкой.

По-другому, эта оболочка еще называется первой или ближайшей к ядру атома. Спонтанно образовавшаяся α -частица, будет существовать внутри барьера какое-то время, пока не подойдет к барьеру. За счет отталкивания одноименно заряженных частиц, согласно закону Кулона, α -частица проходит под барьером и вылетает за него.

То есть, частица может с небольшой вероятностью туннелировать на другую сторону, пересекая таким образом барьер. Причина этого различия кроется в рассмотрении материи как обладающей свойствами волн и частиц, или же корпускулярно-волнового дуализма, соответственно, при рассмотрении квантового туннелирования некоторое количество частиц, мы можем представить в виде волнового пакета, который будет ударяться о барьер[2]. Большая его часть будет отражаться, а часть передастся через барьер, теперь волновой пакет становится более локализованным: он находится по обе стороны барьера и ниже по максимальной амплитуде, но равен по интегральной квадратной величине, что означает, что вероятность того, что частица где-то находится, остается единицей. Туннельный эффект, при универсальности его теории, проявляется в весьма разнообразных физических системах, а в случае альфа-распада туннелирующими частицами являются ядра атомов гелия (альфа-частицы), а координатная зависимость потенциальной энергии «с барьером» образуется за счёт сильных ядерных сил.

Одним из примеров явления, обусловленного эффектом квантово-механического прохождения частицы через потенциальный барьер, служит холодная эмиссия электронов из металлов[3]. Известно, что для того, чтобы электрон отделился из металла, ему нужно совершить работу, она будет называться работой выхода. При переходе электрона из металла в вакуум, его потенциальная энергия возрастает, что означает возможность волнового пакета, указывающего на наличие потенциального барьера, на границе металла и вакуума. За счет создания достаточно большого напряжения во внешней среде на поверхности металла, барьер оказывается определенной неменяющейся ширины и электроны начнут покидать металл под этим барьером, а внутри металла напряжение электростатического поля будет равно нулю, что уже делает эту задачу нерешаемой с точки зрения классической физики. Это явление и называется холодной эмиссией электронов из металла.

Так же, квантовую теорию можно успешно применять в промышленности, например: использование водорода и гелия в качестве топлива требует хорошо развитых технологий разделения газовых смесей, в частности, разделения изотопов того или иного элемента. Наличие квантовых эффектов делает такие процессы возможными, а предложенная система из двух потенциальных барьеров усиливает различия в прохождении изотопов через два слоя вещества, обеспечивая высокую эффективность разделения.

Наличие второго потенциального барьера, расположенного на определенном расстоянии от первого барьера, может оказать критическое влияние на проницаемость системы даже в случае атомов, отличающихся только массой изотопов элемента. Движение волн в пространстве потенциального барьера $U(z)$ может быть описано стационарным уравнением Шрёдингера:

$\Psi'' + 2m/\hbar^2(E-U(z))\Psi = 0$; где Ψ'' - вторая производная от z , обозначающая изменение скорости изменения волновой функции; \hbar - приведенная постоянная Планка, Ψ - волновая функция.

А на расстоянии барьера уравнение приводится к виду:

$$\Psi'' + k\Psi = 0; k = 2m/\hbar^2 E$$

Итак, один потенциальный барьер не обеспечивает необходимой степени разделения смеси изотопов как в случае прямоугольного барьера, так и в случае гладкого барьера (гладкие двойные барьеры, которые возникают во многих различных областях. Например, полупроводниковые гетероструктуры представляют собой слоистые тонкие (около 100 нанометров или менее) структуры, изготовленные из различных полупроводниковых материалов. Существование стыков различных материалов является причиной возникновения в таких структурах последовательности ям и барьеров.) Однако система из двух идентичных потенциальных барьеров, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, стимулирует более интенсивное прохождение одного из изотопов, в то время как проницаемость системы для другого изотопа значительно снижается, что потребует дополнительной калибровки для достижения желаемого резонанса, зависимости от сферы промышленности.

Подводя итог, системы двойного барьера, соответствующие использованию двухслойных мембран, обеспечивают очень эффективное разделение смесей изотопов. Тщательная настройка параметров обеспечит степень разделения, подходящую для промышленных нужд.

Способность частицы проникать в область запрещенных энергий определяется её волновыми свойствами и является специфическим квантовым эффектом, коэффициенты прохождения и отражения определяются следующим образом: D_0 - отношения плотности потока частиц в прошедшей волне к плотности потока в падающей; R - отношение отраженного потока к падающему, или коэффициент отражения. Другими словами говоря, если на потенциальный барьер падает поток частиц, то отношение величины прошедшего потока к падающему равно D_0 , а отраженного к падающему - R . Прохождение частиц сквозь классически недоступную область играет важную роль в различных физических и химических процессах, но к сожалению, является не таким часто наблюдаемым, в ходе эксперимента. Например, не так давно удалось провести прямые измерения зависимости

коэффициента прохождения от ширины барьера, а именно прохождения электронами вакуумного промежутка между двумя поверхностями, при этом, электронный ток уменьшался при увеличении промежутка.

Похожее явление можно наблюдать в оптике, при условии полного отражения то есть, при условии, что угол падения превосходит некоторый критический угол. При этом падающая волна отражается полностью, и значение коэффициента отражения превосходит его самые большие значения для полированных поверхностей [4]. Согласно геометрической оптике, свет не может проникнуть во вторую среду, если угол падения на границу раздела двух сред превышает угол Брюстера (предельное значение), условие которого: $\sin\varphi = n_2/n_1$ (где n_1 и n_2 -показатели преломления первой и второй сред). Рассмотрение, проведенное на основе волновой оптики показало, что во второй среде возникает электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль границы первой и второй сред, так же, она стремительно убывает, по проникновению во вторую среду. Этот опыт доказывает возможность туннелирования частиц, при учете их волновых свойств и таким образом, в мире оптики можно найти аналог описанию квантового туннелирования частиц.

Теперь, можно рассмотреть случай туннелирования частиц, между двумя потенциальными ямами. Представим потенциальную энергию в виде суммы двух потенциалов правого U_r и левого U_l . В этом случае, нас будет интересовать вероятность туннельного перехода частицы из одной потенциальной ямы в другую, в единицу времени. К сожалению использовать теорию возмущений здесь не получится, ибо не получится выделить конкретное возмущение, вызывающее переход, но сама система, условно, делится на две части, где:

- В начале, частица будет находиться в левой яме и наличие правого потенциала U_r будет возмущением для левой ямы.
- В конце, когда частица туннелирует в правую яму, возмущением будет являться левый потенциал U_l .

Эти возмущения нельзя считать несущественными, не говоря уже о том, что они оказываются различными в начальной и конечном состоянии частицы. Найти это состояние можно с помощью уравнения Шрёдингера с полным гамильтонианом (оператор суммы кинетической и потенциальной энергии[5]):

$$H = -\hbar^2/2m^2 \partial^2/\partial x^2 + U_l + U_r$$

Энергия уровней при нахождении соответствует состоянию частицы, при котором она находилась бы между двух потенциальных ям в «размытом» виде.

Вероятность найти частицу в одной из ям вытекает в два случая:

- $\Delta E = 0$, в таком случае, вероятность найти частицу в левой яме, меняется от единицы до нуля, т.к. частица перемещается между потенциальными ямами с определенным промежутком времени.
- $\Delta E^2 \gg 4U_l U_r$; где U_l и U_r - полные потенциальные энергии левой и правой ям; в таком случае частица будет находиться преимущественно в левой яме.

Таким образом, в случае туннелирования частицы из одной потенциальной ямы в другую, с большей вероятностью произойдет при резонансе между уровнями, процесс является обратимым, поэтому, частица которая, условно, находится в правой потенциальной яме, через определенный промежуток времени туннелирует в левую потенциальную яму, с вероятностью в единицу.

Важно понимать, что квантовое туннелирование - это явление распространяющееся не только в квантовой физике и это что-то далекое от макромира, даже не смотря на то, что наблюдение его невозможно, оно существует повсюду, начиная от простых флешек (где информация хранится как наличие или отсутствие заряда в объеме диэлектрика, оксида кремния и для того чтобы этот заряд оттуда убрать, используется эффект туннелирования (диэлектрику прикладывают внешнее поле, эффективно уменьшая величину барьера между толщей оксида и проводящими слоями чипа)) и заканчивая ядерным синтезом на солнце.