

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

(Tunneling Effect)

«— Теперь все ясно, — сказал Кролик, — ты застрял.
— Все из-за того, — сердито сказал Пух, — что выход слишком узкий!

— Нет, все из-за того, что кто-то слишком много ест! — строго сказал Кролик».

А.А. Милн.

«Винни-Пух и все-все-все»



Да, в довольно неприятную ситуацию попал медвежонок Винни-Пух, застряв в узком проходе. Говоря языком физики, он оказался в потенциальной яме — не может сдвинуться ни вперед, ни назад. А вот если бы мишка был квантовой частицей, у него появился бы шанс очутиться на свободе без вынужденного недельного голодания. Все дело в том, что в квантовом мире происходит множество удивительных явлений, одним из которых является туннельный эффект.

Туннельным эффектом называют преодоление частицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия (остающаяся при этом неизменной) меньше высоты барьера. Это явление имеет квантовую природу, так как подразумевает собой прохождение частицы сквозь область пространства, пребывание в которой запрещено классической механикой, например перескок электрона сквозь тонкий слой диэлектрика, разделяющий два проводника.

В классической физике частица не может оказаться в области такого барьера и тем более

пройти сквозь него, так как это нарушает закон сохранения энергии. Однако в квантовой физике ситуация принципиально другая. Квантовая частица не движется по какой-либо определенной траектории. Состояние частицы (ее координата и импульс) описывается соответствующей волновой функцией Ψ , физический смысл которой определяется следующим образом: вероятность нахождения частицы в элементарном объеме ΔV равна $|\Psi|^2 \Delta V$. Чтобы вычислить вероятность нахождения частицы за потенциальным барьером, необходимо решить уравнение Шрёдингера с учетом непрерывности волновой функции на стенках барьера (рис. 1). С увеличением высоты и ширины барьера, а также массы частицы вероятность туннельного эффекта экспоненциально падает, т.е. чем больше квантовый медвежонок Винни-Пух ест, тем меньше у него шансов куда-либо туннелировать.

Для качественного понимания туннельного эффекта достаточно лишь вспомнить один из основополагающих законов квантовой физики — принцип неопределенности Гейзенберга, который гласит, что невозможно точно определить положение и импульс частицы одновременно. Таким образом, малая неопределенность координаты частицы (с точностью до толщины барьера) приводит к неопределенности ее импульса, а следовательно, и кинетической энергии. Соответственно, появляется некоторая вероятность прохождения частицы сквозь потенциальный барьер.

Туннельный эффект широко встречается в природе, а также успешно используется в со-

временных технологиях. Например, при альфа-распаде радиоактивных ядер тяжелое ядро излучает альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. Частице при отрыве от ядра приходится преодолевать барьер внутриядерных связей. Происходит туннелирование, и мы наблюдаем спонтанное альфа-излучение. Другой важный пример туннельного эффекта – процесс термоядерного синтеза, питающий энергией звезды. Сильное кулоновское отталкивание препятствует сближению ядер атомов, однако под воздействием высоких температур и давлений возникает вероятность их туннелирования, в результате чего происходит термоядерный синтез.

В последнее время человек научился использовать туннелирование частиц в своих целях: на основе туннелирования работают туннельные диоды, некоторые *одноэлектронные транзисторы*, переключатели на основе колоссального магнетосопротивления, устройства спинтроники, интерференционные SQUID-магнетометры и т.д.

Наконец, нельзя не упомянуть *сканирующий туннельный микроскоп*. Принцип его работы основан на измерении туннельного тока, который возникает между поверхностью исследуе-



Рис. 1. Схематическое представление классической и квантовой физической ситуаций при возникновении барьера на пути частицы

мого образца и тонкой иглой, расположенной на сверхмалом расстоянии. Когда игла находится непосредственно над атомом, сила туннельного тока возрастает. Таким образом, при помощи туннельного микроскопа удастся буквально ощущать образцы и исследовать атомную структуру поверхности.

Литература:

1. Делоне Н.Б. Туннельный эффект // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, №1
2. Трейман С. Этот странный квантовый мир. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Ижевск, 2002.