

# Осцилляции потенциального барьера - причина кажущегося подбарьерного туннелирования

*Косарев А.В., д.т.н.*

## Аннотация

В статье проведён анализ принятого механизма подбарьерного туннелирования, когда частицы малой энергии имеют вероятность пройти через высокий потенциальный барьер. Показана его противоречивость с законом сохранения энергии не только в классической области физики. Предложен механизм явления, в основе которого лежит процесс осцилляции потенциального барьера. Это приводит к вероятности прохождения частицей малой энергии через барьер в момент его осцилляционного минимума.

Ключевые слова: туннельный эффект, потенциальный барьер, принцип неопределённости, ядерный синтез, звёзды, альфа частицы, осцилляции, вероятность.

## Введение

Туннельный эффект (туннелирование) - преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия (остающаяся при туннелировании неизменной) меньше высоты барьера. Туннельный эффект - явление квантовой природы, невозможное в классической механике. Явление туннельного эффекта лежит в основе многих важных процессов в атомной и молекулярной физике, в физике атомного ядра, твёрдого тела и т.д.

На рубеже 19-го и 20-го веков были обнаружены  $\alpha$  и  $\beta$  распады, которые часто сопровождалось  $\gamma$ - излучением. В 1928 г. разработана теория  $\alpha$  - распада как туннельного процесса (Г. Гамов, Э. Кондон, Р. Герни). Теория туннелирования Гамова объяснила сильную зависимость периода полураспада  $\alpha$  излучающих нуклидов от энергии  $\alpha$  - частицы. Однако величины периодов полураспада для многих ядер были предсказаны с большими погрешностями. Поэтому теория Гамова неоднократно усовершенствовалась.

Анализ литературы [1, 3, 4, 5, 6, 10, 14, 15] показывает, что в основу физики туннельного эффекта положен принцип неопределённости Гейзенберга и волновые свойства частиц. Фиксация положения микрочастицы приводит к возрастанию её импульса, в результате чего возникает вероятность проникновения через потенциальный барьер. Во втором случае считается, что волна никогда не оказывается полностью сосредоточенной в области барьера. Это и позволяет частице пройти сквозь барьер. Интересный подход к явлению туннельного эффекта в связке с волновыми свойствами микрочастиц рассмотрен в [11].

## 1. Закон сохранения энергии и туннельный эффект

Рассмотрим подход к объяснению туннельного эффекта, связанный с принципом неопределённости Гейзенберга. В классической физике считается, что каждая динамическая переменная системы может быть измерена в принципе сколь угодно точно. Анализ реального поведения микроскопических систем, проведённый Гейзенбергом показал, что существует принципиальный предел точности, с которой параметры микросистем могут быть измерены и указаны. Этот предел точности измерения, принцип неопределённости, для координаты положения микрочастицы  $q$  и её импульса  $p$  записывается соотношением:  $\Delta q \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ . Где  $\Delta q$  и  $\Delta p$  - средние ошибки измерения  $q$  и  $p$ . [3]. В классической физике в соответствии с законом сохранения энергии считается, что если полная энергия частицы  $\mathcal{E} < U_0$ , то частица не может проникнуть за потенциальный барьер  $U_0$  и отразится от него. Так как полная энергия частицы  $\mathcal{E} = p^2/2m_0 + U_0$  меньше высоты потенциального барьера, то в случае проникновения за барьер её импульс  $p = \sqrt{2m_0(\mathcal{E} - U_0)}$  стал бы чисто мнимым. В квантовой механике принято считать, что прохождение микрочастицы с энергией  $\mathcal{E} < U_0$  через потенциальный барьер не приводит к бессмысленному выводу об отрицательной кинетической энергии. Кинетическая и потенциальная

энергия, согласно принципу неопределённости, не имеют одновременно точных значений. Так как ширина барьера имеет определённое значение, то неопределённость импульса  $\Delta p > h/4\lambda a$ . Где  $a$  - ширина барьера. Связанная с этим разбросом кинетическая энергия микрочастицы может оказаться достаточной для того, чтобы полная энергия частицы оказалась больше потенциальной. [13]. Таков подход к объяснению туннельного эффекта, связанный с принципом неопределённости Гейзенберга. Странный подход. Соотношение неопределённостей записано для погрешностей измерения. И на основе погрешности измерения делается вывод об абсолютной величине измеряемого параметра. [8].

Рассмотрим подход к объяснению туннельного эффекта, связанный с волновыми свойствами микрочастиц. В этом случае теоретические построения строятся на представлении об амплитуде волны де Бройля как вероятностной характеристике. Квадрат амплитуды - есть вероятность нахождения частицы в данной области пространства. При прохождении через барьер амплитуда волны снижается по экспоненте, а частота волны (и энергия) остаётся неизменной. Квадрат остаточной амплитуды волны за барьером даёт вероятность прохождения волны - частицы через барьер. При таком подходе волна де Бройля не имеет физического смысла, а есть только математический объект. Это спорный момент на протяжении всего времени от построения квантовой механики. Эксперименты указывают на физическую реальность волновых свойств микрочастиц.

Туннельный эффект в принципе невозможен в рамках классической физики, т.к. нарушает основной закон физики. Но он невозможен и в микромире. Если есть вероятность частицы малой энергии пройти через высокий потенциальный барьер, то это означает, что есть вероятность нарушения закона сохранения энергии. И тогда как следствие становится возможным вечный двигатель первого рода.

## **2. Осцилляции потенциального барьера - причина туннелирования**

В данном пункте предлагается увязать эффект кажущегося туннелирования микрочастицы через высокий потенциальный барьер с осцилляциями потенциального барьера.

### **2.1. Осцилляции кулоновского барьера атомного ядра**

В 1936 г. Н. Бором было показано, что система частиц, связанных силами взаимного притяжения, может совершать коллективные колебания. Существование больших квадрупольных моментов ядер само по себе служит доказательством присутствия в них коллективных явлений. Окончательно представление о существовании у ядер коллективных колебательных и вращательных состояний оформилось в начале 50-х гг. прошлого века из анализа схем уровней чётно-чётных ядер.

Атомное ядро по характеру возможных возбуждений ближе к молекуле, где наряду с одноэлектронными переходами возможны коллективные возбуждения - колебательные и вращательные. В молекулах (и ядрах) возникают три накладывающиеся ветви возбуждений, из которых одна одночастичная и две коллективных. Энергии одночастичных возбуждений в ядрах исчисляются мегаэлектронвольтами (расстояние между подоболочками). Коллективные ядерные возбуждения типа вибраций и вращений могут иметь энергии существенно более низкие. Вибрационные - сотни-тысячи килоэлектронвольт, вращательные - десятки-сотни килоэлектронвольт. Реальный ядерный спектр сложен. Лишь в очень ограниченном числе ядер (или ограниченной области энергий) доминирует какая-либо одна из выше перечисленных ветвей возбуждений. Кроме того, в ядрах большую роль играют такие состояния, в которых присутствует, одновременно смешиваясь, несколько типов возбуждений. Так, например, несферическое ядро, вращаясь, может при этом испытывать колебания формы и содержать несколько одночастичных возбуждений. "Атомное ядро поэтому представляет собой исключительно сложный динамический объект, единственный в своем роде". [7].

С ростом энергии возбуждений спектр ядерных коллективных возбуждений существенно обогащается. Появляются, например, поляризационные коллективные возбуждения, в процессе которых происходит динамическое пространственное разделение протонов и нейтронов ядра и

последнее приобретает соответствующий, гармонически меняющийся со временем, электромагнитный момент. На рисунке - 1 (рисунок взят из [7], где обозначен под номером 7.19) показаны три примера таких возбуждений: электрические дипольные, электрические квадрупольные и магнитные дипольные, называемые ножничными. Показаны крайние положения протонной и нейтронной составляющих ядра в процессе этих колебаний (они меняются местами через половину периода). Частота подобных колебаний в ядрах  $10^{21}$  -  $10^{22}$  Гц. Отметим, что поляризационные дипольные колебания не запрещены. Они относятся к внутриядерным возбуждениям и протекают без смещения центра масс ядра.

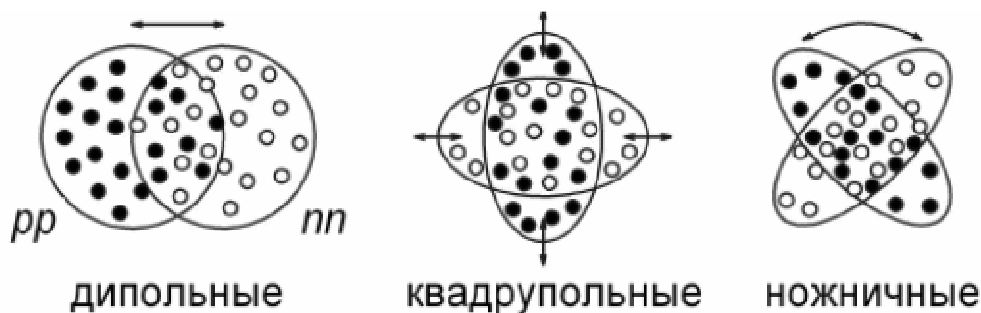


Рис. 1. Электрические дипольные, электрические квадрупольные и магнитные дипольные (ножничные) возбуждения ядра.

Из рисунка - 1 видно, что при дипольных колебаниях ядра имеет место периодическое изменение плотности протонов и нейтронов в ядре. Это приводит к тому, что в области увеличения плотности протонов кулоновский барьер повышается, а в области снижения плотности протонов понижается. В областях пониженного кулоновского барьера в ядро проникают и вылетают из ядра микрочастицы с малой энергией в сравнении со средним уровнем потенциального барьера. Эти события носят вероятностный характер.

Материал для данного пункта почерпнут главным образом из [7].

Выше рассмотрены осцилляции потенциального барьера ядра, связанные с упругими свойствами ядра. Теперь рассмотрим скачки высоты потенциального барьера, связанные со случайными флуктуациями нуклонов. Сильное взаимодействие между нуклонами является короткодействующим. Наибольшую величину эти силы имеют в центральной части ядра и снижаются к внешней границе ядра. На границе ядра сильное взаимодействие уравнивается кулоновским отталкиванием. Отсюда во внешней оболочке ядра силы притяжения слабы, чем и объясняется образование  $\alpha$  - частиц на периферии ядра. Сильное взаимодействие в ядре гелия значительно больше сильного взаимодействия ядра в данной внешней оболочке. Внутри ядер  $\alpha$  - частицы не образуется. Таким образом во внешней оболочке ядер нуклоны слабо связаны и относительно свободны. Возникают условия для флуктуации нуклонов при их общем вращательном движении вокруг спиновой оси ядра. Нас интересуют флуктуации протонов во внешней оболочке ядра. Эти флуктуации протонов приводят к спорадическим скачкам потенциала как в высоту так и к минимуму. Накладываясь случайным образом на осцилляции кулоновского барьера они ещё более усложняют картину случайных отклонений величины кулоновского барьера от средней величины. По всей внешней границе ядра случайным образом возникают кратковременные области с различной высотой кулоновского барьера.

Математическое описание вероятности флуктуаций протонов во внешней оболочке ядра подобно описанию флуктуаций свободных электронов проводимости в металлическом кристалле. Для большего сходства представим вращение металлического шарика вокруг оси симметрии. Тогда электроны проводимости будут совершать кроме хаотических флуктуаций ещё и общее вращение как и протоны в ядре.

Согласно математической статистике величина флуктуации (отклонение от среднего) определяется формулой  $\Delta N = N - \langle N \rangle$ ; Где:  $\Delta N$  - величина флуктуации,  $N$  число частиц в искомом объёме в момент флуктуации,  $\langle N \rangle$  - среднее число частиц в искомом объёме.

## 2.2. Согласование с экспериментом

Рассмотрим два примера.

а). Опыт показывает существование сильной корреляции между периодом полураспада ядер и энергией испускаемых  $\alpha$  - частиц: чем больше энергия, тем меньше время жизни. Например, у  $\alpha$  - радиоактивного изотопа полония  ${}_{84}\text{Po}^{212}$  период полураспада равен  $3 \cdot 10^{-7}$  сек. А у  $\alpha$  - радиоактивного изотопа уран  ${}_{92}\text{U}^{238}$  период полураспада равен  $4,5 \cdot 10^9$  лет. [3, стр. 291]. Периоды полураспада  $\alpha$  - излучатели лежат в необычайно широком интервале значений. Это можно объяснить тем, что различные ядра имеют различные потенциальные барьеры с различными частотными характеристиками. Различные ядра имеют и различные скорости  $\alpha$  - частиц, покидающих ядро.

б). Для потенциальной ямы, согласно [14, стр. 769] “туннельный эффект характеризуется вероятностью  $W$  выхода частицы из этой области в единицу времени; величина  $W$  равна произведению частоты колебаний частицы внутри потенциальной ямы на вероятность прохождения сквозь барьер”. От частоты колебаний зависит скорость частицы и её вероятность столкновения с барьером в нужный момент, а вероятность прохождения зависит от вероятности совпадения момента прохождения частицей барьера с его осцилляционным понижением. Отсюда и произведение вероятностей. В [14, стр. 769] так же отмечается, что вероятность прохождения частицы через барьер тем больше чем меньше её масса. Это связано с тем, что чем меньше масса тем выше скорость частицы и соответственно выше вероятность проскочить в момент понижения потенциального барьера.

## 2.3. Роль туннельного эффекта в реакциях синтеза

Реакция ядерного синтеза требует для своего течения определённой температуры и плотности среды. Для реакций холодного ядерного синтеза (ХЯС) решающую роль играет туннельный эффект. Рассмотрим это на примере ХЯС в физических условиях кавитирующей жидкости.

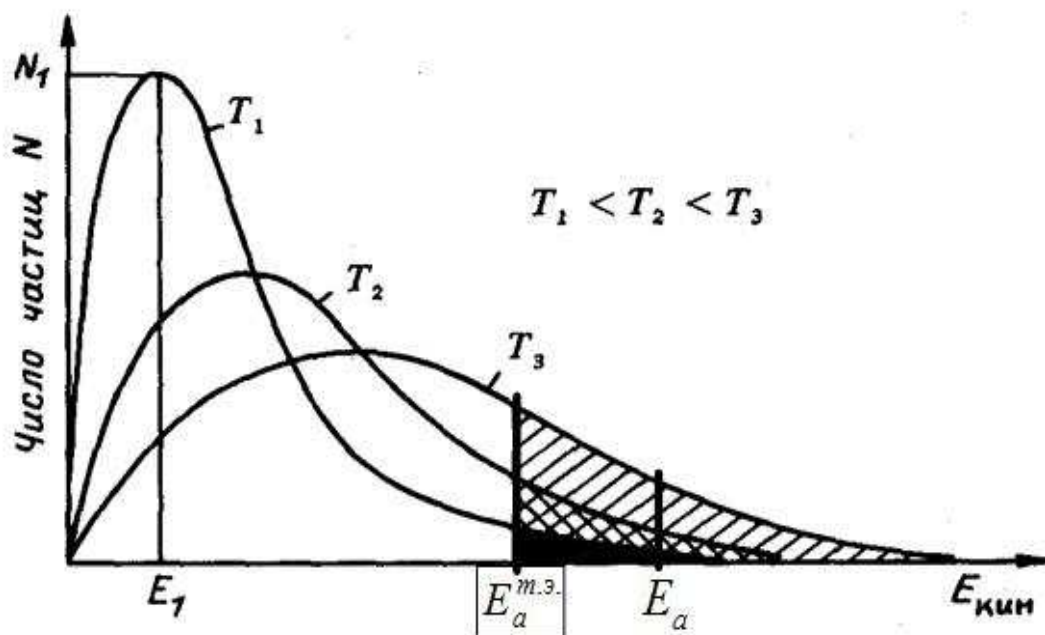


Рис. 2. Распределение Максвелла по энергиям частиц. График распределения по скоростям частиц имеет аналогичный вид.

При холодном ядерном синтезе лёгким ядрам так же нужна соответствующая величина кинетической энергии, т.к. потенциальный барьер кулоновских сил необходимо преодолеть для сближения ядер на расстояния, на которых действует сильное взаимодействие. Холодная среда на первый взгляд с очевидностью не может обеспечить лёгкие ядра подобной энергией. Однако теплофизика подсказывает возможность осуществления ядерного синтеза и в условиях относительно холодной среды, при этом не противореча требованиям ядерной физики. Рассмотрим график функции Максвелловского распределения по энергиям и скоростям частиц многомолекулярной системы, изображённый на рисунке - 2. Из графика на видно, что всегда в термодинамической системе имеется вероятность нахождения частиц обладающих большой скоростью и соответственно кинетической энергией. Концентрация частиц, обладающих энергией для преодоления кулоновского барьера и превышающих её, находится из формулы:

$$n_a = n \cdot \int_{v(E_a)}^{\infty} f(v) dv ; \text{Где: } f(v) - \text{ функция распределения Максвелла; } n - \text{ количество частиц газа в}$$

единице объёма;  $E_a$  - кинетическая энергия активации ядерного синтеза, необходимая частице (ядру) для преодоления кулоновского барьера. Для преодоления потенциального барьера сталкивающимся протонам (ядрам водорода) должна быть сообщена энергия  $E_a \geq 10 \text{кэВ}$ , что соответствует температуре  $\geq 10^8 \text{°К}$ . [14].

Наглядно место энергии активации и место частиц, обладающих энергией активации, отмечено на рисунке - 2, на котором изображено Максвелловское распределение по энергиям частиц. Отсюда следует основная идея механизма холодного ядерного синтеза. ***В системе большого числа свободных частиц всегда имеются, с отличной от нуля вероятностью, высокоэнергетичные частицы способные преодолеть кулоновский барьер отталкивания и инициировать реакцию ядерного синтеза.***

Эта идея снимает противоречие между холодным ядерным синтезом и термоядерным синтезом. Проблема для ядерного синтеза в среде, например, воды, содержащей лёгкие ядра водорода и кислорода состоит в том, что молекул из хвоста распределения Максвелла с энергией достаточной для преодоления кулоновского барьера, ничтожно мало. Решение проблемы было найдено в физических условиях кавитации.

Остановимся на влиянии туннельного эффекта на реакцию синтеза, который снижает температуру протекания ядерного синтеза с  $10^8 \text{°К}$  до  $15 \cdot 10^6 \text{°К}$  как, например, в ядре Солнца. Для действия туннельного эффекта быстрой частице необходимо войти в зону сечения сильного взаимодействия и тогда появляется вероятность реакции синтеза уже при энергиях ниже кулоновского барьера. Дополнительное количество частиц в единице объёма, способных вступить в реакцию синтеза благодаря туннельному эффекту определится из формулы:

$$\Delta n_a = n \cdot \int_{E_a^{m\phi}}^{E_a} f(E) dE ; \text{Где: } E_a^{m\phi} - \text{ энергия быстрой частицы, при которой вероятность туннельного}$$

эффекта становится существенно отличной от нуля;  $E_a = 10^8 \text{°К}$  - энергия кулоновского барьера.

Число таких дополнительных частиц велико в сравнении с суммой частиц с энергией  $E_a \geq 10^8 \text{°К}$  из-за экспоненциального закона распределения по скоростям и энергиям. При достижении необходимой величины макросечения реакции синтеза, которая растёт в увеличением плотности, каждая быстрая частица попадает в сечение реакции синтеза. Согласно физике туннельного эффекта каждая быстрая частица попавшая в сечение реакции имеет вероятность положительного исхода и при энергии меньше чем  $T \leq 10^8 \text{°К}$ . Высокая плотность воды (концентрация ядер водорода и кислорода) обеспечивает необходимую величину макросечения реакций синтеза. В условиях кавитации туннельный эффект обеспечивает необходимую интенсивность реакций синтеза.

Отметим, что температура  $15 \cdot 10^6$  °К в ядре Солнца вовсе не означает, что именно при такой температуре вклад туннельного эффекта становится заметным. Эта температура не является физической константой в отличие от температуры  $10^8$  °К, соответствующей высоте кулоновского барьера для ядер водорода. Температура в ядре Солнца - это температура среды в которой протекает реакция синтеза. Температура среды является функцией многих факторов: плотности частиц высокой энергии и плотности ядер - мишеней, размеров области течения реакции синтеза, условий тепло отвода из области реакции, элементного состава среды протекания реакции и др.

При холодном ядерном синтезе реакция не принимает взрывного характера по той причине, что мала концентрация ядер достаточно высокой энергии.

### **Заключение**

Туннельный эффект как и все явления в микромире носит квантовый характер. Однако вероятностный характер этого явления определяется не столько волновыми свойствами проникающей через барьер микрочастицы сколько осцилляциями высоты потенциального барьера. Такой подход снимает противоречие с основным законом физики.

Туннельный эффект является главным фактором обеспечивающим течение реакций холодного ядерного синтеза в физических условиях кавитирующих жидкостей.

### **Литература**

1. Бекман И.Н. Радиоактивность и радиация. Радиохимия. Том-1. – МО, Щёлково: Издатель Мархотин П.Ю. 2011г. - 398с.
2. Бекман И.Н. Ядерная физика. Курс лекций. МГУ. Москва, 2010г.  
Режим доступа: <http://profbeckman.narod.ru/YadFiz.htm>
3. Вихман Э. Берклиевский курс физики. Том 4. Квантовая физика. – М.: “Наука”, 1977г.– 416с.
4. Гольданский В.М., Трахтенберг Л.И., Флёров В.Н. Туннельные явления в химической физике. - М.: “Наука”, 1986г. - 296с.
5. Делоне Н.Б. Туннельный эффект. //Соросовский образовательный журнал, Том 6, №1, 2000 г. С. 79 - 84.
6. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Том 3. – М.: “Наука”, 1970г.– 496с.
7. Капитонов И.М. Введение в физику ядра и частиц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010г. – 512с.
8. Косарев А.В. Явление трансмутации в биологических системах. // Журнал «Атомная стратегия». Санкт-Петербург. Режим доступа:  
<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=8839>
9. Косарев А.В. Холодная трансмутация и холодный синтез в свете известных законов ядерной физики. Материалы РКХТЯ и ШМ-26 «Проблемы холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии». – М.: “ДеЛибри”, 2020г., С. 316 - 336.
10. Матвеев А.Н. Атомная физика. - М.: “Высшая школа”, 1989г. - 439с.
11. Сапогин Л.Г., Константинов С.И. Отказ от планетарной модели атома Резерфорда, постулаты Бора и туннельный эффект. // «Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ.26840, 19.12.2020г.
12. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. – М.: “Наука”, 1972г. - 672с.
13. Физика микромира. Мал-я энциклопедия. [Гл. ред. Д.В. Ширков]. - М.: "Советская энциклопедия", 1980г. - 528с.
14. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983г. – 945с.