

Несколько замечаний о туннельном эффекте (обзор)

Г. Ивченков, к.т.н,
kashey@kwic.com

Туннельный эффект, наряду с другими аналогичными эффектами по перемещению в пространстве материальных тел и полей (в частности, квантовой телепортации и дальнего действия полей), является одним из примеров телепортации, как бы «соединяя точки в пространстве» в микро и макро-мире. Это феномен является крайне важным и свидетельствует о непонимании «современной физикой» истинной структуры пространства. Изучение данных явлений и их использование приведет к реальному прорыву в науке и, в частности, позволит открыть человечеству дорогу к другим мирам.

1. Туннельный эффект, как квантомеханический феномен

Туннельным эффектом называется материальная телепортация элементарных частиц, атомов и молекул, что позволяет им проникнуть через кулонов потенциальный барьер без потери энергии (1). Причем, энергия указанных частиц E_{kin} меньше энергии потенциального барьера U_{pot} и ее не хватает на его преодоление за счет кинетической энергии частицы ($U_{pot} > E_{kin}$). Истинный физический механизм туннельного эффекта неизвестен. Современная физика называет туннельный эффект квантомеханическим и работающим только в микромире. Согласно этим представлениям, принцип неопределенности Гейзенберга как бы «размазывает» частицу в пространстве и появляется вероятность ее появления в некой области пространства вверх по градиенту электрического поля кулонова барьера без затраты на это энергии. Ниже по тексту дается краткое описание мат аппарата, определяющего туннельный эффект как квантомеханическое явление (1).

Согласно квантовой механике, вероятность нахождения частицы в данной координате пространства определяется «волновой функцией» ψ согласно формуле Шрединберга (2). Вообще-то, сама «волновая функция», являющаяся комплексной величиной, физического смысла не имеет, а вероятностью является квадрат ее модуля $[\psi]^2$. Аналитическое решение уравнения Шрединберга очень сложное и возможно только для простейших случаев. Упрощенное уравнение Шрединберга в одномерном случае (диф уравнение

второй степени) имеет вид:
$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E_{kin} - U_{pot})\psi = 0 \quad (1).$$
 [1]

Его решение дает отношение плотности потока частиц, прошедших барьер к потоку частиц перед барьером который называют «прозрачностью барьера» (1):

$$D \approx C \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U-E)} dx\right) \quad (1), \text{ где } C \approx 1 \quad [2].$$

«Толщина барьера», при которой работает туннельный эффект, определяется как

$$l = \frac{1}{\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U-E)} dx} \quad (1) \quad [3]$$

С точки зрения принципа неопределенности, при прохождении барьера энергия частицы как бы возрастает на недостающую величину $\frac{\Delta p^2}{2m} = \Delta E = U - E$ (1), где $\Delta p^2 = \frac{\hbar}{4l^2}$ -

дисперсия момента частицы. При этом получается, что энергия прошедшей частицы как бы не изменяется, то есть на прохождение барьера энергия не затрачивается.

По поводу формул:

В них «залетела» постоянная Планка \hbar , относящаяся к излучению порций электромагнитной волны при атомных и внутриядерных переходах.

Формула Планка, в которой изначально появилась \hbar , определяет энергию порции электромагнитной волны, излученную атомом $E = \hbar\omega$, где ω – круговая частота излучения ($\omega = 2\pi\nu$). Фактически формула Планка определяет энергию перехода электрона в атоме, но не непосредственно, а через энергию излучения, испущенного при этом переходе (они тождественно равны). Но это относится только к излучению атомами (и атомными ядрами при внутриядерных переходах). К излучению искусственных источников формула Планка ни отношения, ни применения не имеет из за принципиальных различий в механизме излучения. Дело в том, что в искусственных источниках излучение вызывается ускорением зарядов, а не переходом электронов с одной орбитали на другую. В естественных источниках излучение испускается очень короткими порциями (цугами), которые были названы квантами (а затем, фотонами), в то время, как излучение искусственных источников не ограничено по времени. И у этих квантов (порций) излучения очевидно есть своя энергия, которая, как раз, и определяется по формуле Планка.

Вообще-то, у излучения есть мощность, а энергия – это интеграл мощности по времени цуга. Но, так как процесс естественного излучения идет очень короткое время (10^{-8} сек), то получается, что приемники излучения (включая квантовые – фотодиоды и проч.) автоматически интегрируют сигнал (в частности, за счет емкости цепи) и в результате выдают вместо мощности энергию порции электромагнитного излучения. Собственно, отсюда и пошли кванты и фотоны. Таким образом, формула Планка и его постоянная \hbar относится только к излучению естественных источников и не имеет никакого отношения к другим физическим процессам, в том числе и к туннельному эффекту.

Получается, что формула Шредингера изначально описывала вероятность испускания порций электромагнитной волны атомами, но ее в дальнейшем неоправданно распространили на другие процессы. Таким образом, формула Шредингера с его \hbar к туннельному эффекту не может быть применима (ошибки гарантированы). В частности, попробуйте применить ее для нахождения «прозрачности барьера» для соединения алюминиевых контактов. Там она равна 1, проверено экспериментально.

Кроме того, формула $E = h\nu$ позволяет «перевести» любую энергию в волну с частотой ν , что, например, и было сделано при «переводе» кинетической энергии электронов в «волну Де Бройля». Пользуясь этим приемом можно «перевести» потенциальную энергию некоего тела (это же тоже энергия) в волну, что, конечно, является откровенной чепухой. Несмотря на всю очевидность неправильности такого подхода, физики-теоретики объявили постоянной Планка «фундаментальной постоянной мироздания» и «засунули» ее во все формулы квантовой механики.

2. Некоторые замечания по поводу туннельного эффекта:

Переброска частиц и целых молекул в пространстве является очевидной телепортацией, механизм которой неизвестен. Статистический подход к этому эффекту, как и любой статистический подход, не раскрывает и не может раскрыть его физический механизм. Известно, что за статистическим подходом стоит незнание истинной физики процесса. Но, вот «шутка дьявола» - используя статистику можно делать расчеты и даже прогнозы, обходя физику. В свое время это возмущало Эйнштейна: «Бог не играет в кости!». И автор данной статьи с ним в этом согласен – статистика покрывает невежество физиков.

2.1 Туннельный эффект в физических процессах

Туннельный эффект имеет место во многих физических процессах и играет очень важную роль.

1. За счет туннельного эффекта протон туннелируется через потенциальный барьер и вступает в термоядерную реакцию синтеза. Из за этого температура ядерного синтеза внутри Солнца составляет порядка 10^7 К, а не 10^8 (1). Участие туннельного эффекта в термоядерном синтезе примерно оценивается в 10 процентов. Скорости (и энергии) частиц в высокотемпературной плазме подчиняются распределению Максвелла. Таким образом, высокоэнергетические протоны преодолевают кулонов барьер за счет своей кинетической энергии, а часть низкоэнергетических – за счет туннельного эффекта. В этом случае туннельный эффект идет в направлении, противоположном градиенту напряженности электрического поля. И протоны при этом должны попасть в область размером порядка 10^{-13} см чтобы быть захваченными ядерными силами («сильное взаимодействие»). На больших расстояниях они не действуют. Можно оценить «точность попадания» протона при «выходе из туннеля» в зону действия ядерных сил:

Число Авагадо равно $A = 6 \times 10^{23}$ 1/моль соответствует объему в 22,4 литра при нуле (273К) и атмосферном давлении. В центре Солнца температура порядка 2×10^6 К и давление 4.5×10^8 атм. Тогда (с учетом температуры) объем моля атомарного водорода в центре Солнца будет порядка 0,11 см³. Соответственно, расстояние между атомами водорода будет порядка 1.2×10^{-8} см. Это при радиусе зоны действия ядерных сил в 10^{-13} см. То есть, расстояние между атомами в 60000 раз больше зоны, куда ядра водорода (протоны), прошедшие через барьер, должны попасть. За счет чего достигается «такая точность стрельбы», непонятно. То есть, «по идее» должен быть поток из 60 тысяч протонов, чтобы хотя бы один попал в эту зону. Очевидно, что это не так. Выходит, что протон «прицеливается» заранее в одну из зон, преодолевая потенциальный барьер данного атома (другого протона). За счет чего это происходит, никто не знает.

В настоящее время есть попытки, к сожалению, безуспешные, осуществить холодную термоядерную реакцию с помощью туннельного эффекта. Эти попытки безуспешны хотя бы потому, что пока не существует механизмов управления туннельным эффектом.

2. Туннельный эффект является определяющим при криогенных химических реакциях, протекающих в глубоком космосе, за счет чего появляются химические соединения, невозможные при нормальных температурах (2). Дело в том, что при химических реакциях в нормальных условиях действует закон Аррениуса, определяющий

скорость химических реакций: $k_T = A \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right]$, где E_a - энергия активации

(энергетический барьер), R – газовая постоянная для данного газа, T – температура. Таким образом, скорость реакции зависит от температуры и, соответственно, падает с уменьшением температуры. Кстати, это распространяется и на нехимические процессы (растворение сахара, стирка, смывание мыла и т.п.). Согласно этой формуле, скорость реакции должна упасть до нуля при 0К. Скорость реакции действительно снижается и при криогенных температурах уравнение Аррениуса прекращает работать, но начинает (продолжает) работать туннельный эффект. Значение температуры, при которой

туннельный эффект преобладает над аррениусовым примерно равно $T_t = \frac{\hbar}{k_B \pi d \sqrt{2}} \sqrt{\frac{E}{m}}$ (2),

где k_B - квантовый размер частицы, d - классический размер частицы, m - масса частицы (нужно отметить, что и сюда «залетела» постоянная Планка \hbar). Далее скорость реакции выходит на плато и стабилизируется. За счет этого возможно образование химических соединений, невозможных в обычных условиях, например, льда атомарного водорода, метастабильного вещества (в криогенном состоянии), выделяющего при взрыве в двадцать раз большую энергию, чем взрыв гремучего газа (смеси водород – кислород). Возможно, что взрывы ледяных метеоритов (Челябинского, Мамского, Тунгусского) вызваны детонацией подобной «взрывчатки», создаваемой в Поясе Койпера в течении миллионов лет. И, опять же, истинный механизм туннельного эффекта, телепортирующего целые молекулы при криогенных температурах, неизвестен (формула Шредингера с его постоянной Планка, не в счет, см. выше по тексту). И, опять же, направление туннельного эффекта в этом случае идет противоположно градиенту электрического поля заряда. Здесь нужно отметить, что и при высоких температурах этот эффект, дополнительно к аррениусову, участвует в химических реакциях. То есть, туннельный эффект имеет место при любых температурах.

3. Туннельный эффект также ответственен за альфа распад, когда из ядра «вылетает» ядро гелия (альфа частица), причем с приличной скоростью. Например, энергия альфа частиц при распаде Am241 (из пожарных датчиков) составляет 5.4 МэВ, что соответствует скорости в 16000 км/сек. У тяжелых ядер высота энергетического барьера ядерных сил для альфа частиц (заряд 2e) порядка 30 МэВ и частицы с энергией а 5 МэВ не могут его перейти за счет кинетической энергии. Согласно (4) современная квантовая физика считает, что при альфа распаде альфа частица как бы бьется об энергетический барьер изнутри и только после нескольких попыток «карта правильно ложится», «портал открывается» и ядро гелия (альфа частица) оказываются снаружи за счет туннельного эффекта. Вероятность такого перехода определяется формулой [2]. При этом они на выходе из перехода сохраняют свою энергию также, как и в других случаях туннельного эффекта. Это значит, что альфа частица изначально имела эту энергию в 5.4 МэВ внутри

ядра и сохраняет ее после вылета. Впрочем непонятно, за счет чего эта альфа частица получает в ядре эту энергию?. В этом случае туннельный эффект работает как против градиента ядерных сил, так и против градиента напряженности электрического поля (ядро при вылете положительно заряженной альфа частицы получает отрицательный заряд). То есть, альфа частица преодолевает два барьера за один туннельный переход. При этом энергетический барьер в 43 МэВ несравнимо больше кулонового барьера, который, например, для пары электрон – позитрон составляет 0.511 МэВ. И если оценить вероятность выхода альфа-частицы из Am241 по формуле [2], то она, по сравнению с вероятности преодоления кулонового барьера, получается совершенно ничтожной (очень приблизительно $\frac{D_\alpha}{D_e} \approx \frac{1}{e^{5 \times 10^5}}$), так как (опять же, очень приблизительно) $D \propto \exp\sqrt{(U - E)}$.

Тогда получается, что вероятность перехода не зависит от величины потенциального барьера?

Вообще-то, сохранение кинетической энергии частицей при переходе барьера является весьма странным, так как подобные действия должны сопровождаться затратой энергии.

4. В макром мире туннельный эффект пропускает электроны проводимости через две оксидных пленки Al₂O₃ (корунда). Дело в том, что при нахождении алюминия на воздухе на его поверхности сразу образуется тонкая диэлектрическая пленка окиси алюминия толщиной порядка 2×10^{-4} мм, что должно было бы препятствовать протеканию постоянного тока. Но практика показывает, что скрутка алюминиевых проводов (с двойной толщиной оксидной пленки $4 \times 10^{-4} = 0.4$ мкм) прекрасно пропускает и переменный и постоянный ток, а сопротивление контакта отсутствует. Это значит, что все электроны проводимости переходят через этот барьер и никакая статистика здесь не работает. То есть, в данном случае ни Шредингер, ни постоянная Планка не работают, так как «прозрачность барьера» равна единице. Тогда получается, что все ссылки на кванто-механические явления (5) в данном случае несерьезны. Кроме того, совпадение результатов, полученных по кванто-механическим моделям (5) с экспериментом получается только качественным (и то сомнительным). Опять же, электрическое сопротивление контакта алюминий-алюминий отсутствует. Как показывает практика, этот контакт через диэлектрик пропускает все токи, начиная с единиц микроампер до сотен ампер и никакой «пространственный заряд» в пленке диэлектрика, упомянутый в (5) на это не влияет. Линейно-логарифмическая вольт-амперная характеристика перехода для пленки Al₂O₃, приведенная в (5) на рис. 5, будто бы свидетельствует о наличии некоего сопротивления перехода от примерно 5 Ком при $V = 0.5$ В, уменьшающееся до 500 Ом при $V = 1.5$ В (!) при площади перехода в 1 см². Это очевидно не соответствует действительности, так как указанные режимы являются рабочими и широко используются на практике. При этом такие сопротивления перехода не отмечены. «Большим физикам-теоретикам и экспериментаторам» неплохо было бы построить простейшую цепочку с нагрузкой (например, лампочкой), подать ток и поставить термометр на место скрутки (можно просто положить на это место палец). Если там есть сопротивление, то это место будет нагреваться и термометр и палец это почувствуют. Как вам скажет любой электромонтер, этот феномен в природе не наблюдается (иначе бы вся проводка погорела). Аналогично относительно вольт-амперной характеристики, приведенной на рис. 4 в (5). «Ньютоны драгоценные, доценты с кандидатами» заигрались в статистику и несут откровенную чепуху. Вообще-то, кто-то это понимает и старается придумать другое объяснение. При этом высказывают «богатейшие» идеи. Например, у некоторых авторов

получается, что, так как электрон является еще и волной (дуализм), то эта волна представляет собой переменный ток, а переход – конденсатор. Тогда электроны переходят этот переход «по одному» через конденсатор. Комментарии здесь излишни.

Исходя из вышеизложенного получается, что в данном случае напрямую действует механизм телепортации, к квантово-статистическим формулам, приведенным в (5), отношения не имеющих. Это говорит о том, что квантовая механика применительно к туннельному эффекту является полурботающей химерой (неработающей), а физика процесса остается до сих пор неизвестной.

5. Туннельный эффект также работает в в полупроводниковых диодах (туннельные диоды). *«Сильному электрическому полю в полупроводнике соответствует большой наклон энергетических зон. При этом электроны могут проходить сквозь узкий потенциальный барьер (толщиной Δx) без изменения своей энергии – туннелировать благодаря своим квантово-механическим свойствам. Так как процесс туннелирования происходит вследствие перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, то этот процесс можно считать аналогичным автоэлектронной эмиссии или холодной эмиссии электронов из металла»* (7,8). Похожий эффект имеет место в полупроводнике, но с участием фотона (эффект Франца-Келдыша), энергия которого уменьшает величину потенциального барьера и увеличивает вероятность перехода (5).

6. Холодная эмиссия катодов (7,8).

Энергия электронов в металле и снаружи отличаются на величину E_0 , которая является потенциальным барьером, мешающим выходу электронов из металла. Если металл нагрет до высокой температуры (1000К и выше), то кинетической энергии некоторых свободных электронов (высокоэнергетичных) хватает для преодоления этого барьера. Очевидно, что при низких температурах высокоэнергетичных электронов очень мало и их недостаточно для выхода электронов (эмиссии). Если же приложить электрическое поле к некой металлической поверхности, то энергия электронов на границе раздела увеличится на eU (где U – приложенное напряжение), но для выхода электронов напряжение, приложенное к металлу, должно быть $U > \frac{E_0}{e}$. Напряженность такого электрического поля должна быть

порядка 10^{10} В/м. Если это условие не соблюдается, то, согласно классической теории, эмиссии не будет. Но, как показывают эксперименты, и при напряженности поля порядка 10^6 , 10^8 эмиссия имеет место (острие иголки в вакууме при напряжении 1000 В) (7, 8). При этом катод не нагревается, то есть на переход не затрачивается энергия. Тогда «на помощь» приходит туннельный эффект (1) с его «прозрачностью барьера» (формула [2] выше по тексту).

7. Туннельный эффект имеет место и при прохождении электронами вакуумного зазора между металлами. Этот феномен также вызывается холодной эмиссией. Предположим, что промежуток между металлическими поверхностями составляет 1 мкм. Тогда напряженность электрического поля при напряжении между металлами, равном одному вольту, составит 10^6 В/м, а при 100 В 10^8 В/м, что вполне достаточно для холодной эмиссии и перехода электронов через зазор. В то же время свести пропускание электронов проводимости через две оксидных пленки окиси алюминия к данному случаю холодной эмиссии (там тоже получаются значения напряженности электрического поля порядка 10^6 В/м) не получится. Дело в том, что хотя вакуум и является диэлектриком, но

он свободно пропускает элементарные частицы, в то время, как в твердом (жидком, газообразном) диэлектрике электроны тормозятся и пересечь диэлектрический зазор они не могут.

Кроме указанных случаев появления туннельного эффекта есть и другие. Например эффект Джефферсона (5, 6). Этот эффект аналогичен проводимости через диэлектрическую пленку, но в данном случае электродами являются сверхпроводники. В этом случае появляется небольшое напряжение, приложенное к зазору и получается интересный эффект – переход излучает электромагнитные волны с частотой порядка сотен МГц. Это происходит потому, что потенциальные ямы с двух сторон практически одинаковые и электрон «не знает» в каком направлении ему идти и начинает «метаться» между электродами (как Буриданов осел, правда тот стоял строго посередине между кормушками и сдох), так как условия перехода практически равноправные в двух направлениях. Это и вызывает излучение. Этот эффект работает при малых токах и напряжениях. Например, при токе в 1 мкА частота генерации составляет порядка 484 МГц.

3. Влияние полей на туннельный эффект

С электрическим полем более-менее понятно – оно меняет энергию заряженных частиц и создает или уменьшает потенциальный барьер. Оно фигурирует почти во всех проявлениях туннельного эффекта, кроме перехода электронов через диэлектрическую пленку – там «потенциальный барьер» ни на что не влияет. В частности, вероятность перехода в ряде случаев зависит от разности энергии частицы и потенциального барьера $U - E$ (см. формулы 1, 2, 3).

С магнитным полем посложнее. Оно не влияет непосредственно на неподвижные заряды. Но в некоторых случаях магнитное поле влияет на сопротивление некоего «слоеного пирога», состоящего из слоев ферромагнитной и диэлектрической нанопленки: *“Физической причиной протекания тока является квантово-механическое туннелирование свободных носителей заряда сквозь тонкий потенциальный барьер, созданный для них пленкой диэлектрика. Интенсивность туннелирования электрона проводимости в такой структуре оказалась “спин-зависимой”, т.е. зависимой от направления ориентации спина. Вероятность туннельного перехода в область, намагниченную противоположно ориентации спина электрона, оказалась намного меньше, чем в область, намагниченную параллельно ориентации спина электрона. Поэтому при отсутствии внешнего магнитного поля, когда соседние ферромагнитные слои намагничены в противоположных направлениях, сопротивление структуры протеканию электрического тока довольно велико. При наличии внешнего магнитного поля все ферромагнитные слои намагничиваются в направлении этого поля. Интенсивность туннелирования электронов проводимости значительно возрастает, и электрическое сопротивление структуры уменьшается.»* (9). Вообще-то, влияние спина на эффект понятно – спин создает магнитный момент и, соответственно, магнитное поле, складывающееся с приложенным. В принципе, магнитное поле, приложенное к движущемуся вдоль потенциального барьера заряду должно вызвать лоренцеву ЭДС, приложенную перпендикулярно барьеру. Это может вызвать «перетекание» тока через барьер. В сильных магнитных полях эта ЭДС может быть достаточной для «пробоя» барьера. Но это уже другой эффект, не имеющий отношения к туннельному.

3. Заключение

Туннельный эффект, наряду с другими аналогичными эффектами по перемещению в пространстве материальных тел и полей (в частности, квантовой телепортации и дальнего действия полей), является одним из примеров телепортации, как бы «соединяя точки в пространстве» в микро и макро-мире. Квантовая механика, основанная на статистических уравнениях, изначально придуманная для описания структуры атома, была неоправданно перенесена на все процессы в микромире и, в частности, используется в «современной физике» для описания туннельного эффекта. Но многие проявления туннельного эффекта указывают на неправильность этого подхода. Наиболее очевидным подтверждением этого является феномен туннельного перехода через тонкие пленки диэлектрика.

Очень важным фактом является то, что энергия электронов, прошедших барьер при туннелировании не меняется.

- **То есть на переход не тратится энергия**, чего не должно было бы быть согласно представлениям «современной физике» (на любые движения, ускорения и переходы должна быть затрачена энергия).
- Кроме того, **туннельный эффект действует при любой температуре**. Он действует как при криогенных температурах (криохимия), так и при температуре в десятки миллионов градусов (термоядерная реакция).

Выходит, что в микромире есть некоторые пути, соединяющие точки, разнесенные в пространстве (расстояние между ними становится равно нулю). И при переходе обнуляется время – переход происходит мгновенно. Причем переносятся вполне материальные тела (в случае криохимии переносятся целые молекулы). В макромире такому эффекту соответствует феномен дальнего действия, когда изменение состояния гравитационного, электрического и магнитного полей (не путать с эл маг волной) переносится мгновенно на «край Вселенной». Вариантом дальнего действия является и квантовая телепортация, которая сейчас используется для связи между удаленными точками в пространстве. Но «современная физика» не в состоянии дать реальную физическую модель телепортации и дальнего действия, которая в случае микромира заменяется кванто-механической статистикой с ее «прозрачностью барьера», неоправданно перенесенная из описания процессов в атоме (естественное излучение) на неотносящиеся к этому процессы. Это является следствием полного незнания «современной физикой» структуры пространства – туннельный эффект это же подпространственный переход! И, к большому сожалению еще имеет место и полное нежелание изучать структуру пространства. Это, отчасти, потому, что они (физики) не имеют понятия, «с какого бока» к нему подойти, хотя экспериментального материала достаточно. Да так им и проще – есть полурботающая квантомеханическая химера и не нужно ничего выдумывать.

Кроме того, практика показывает то, что влиять на туннельный эффект современная физика (наука и техника), к сожалению, не может. Это, вероятно, связано с фундаментальными основами структуры пространства, которые пока физикам неведомы.

Возвращаясь к туннельному эффекту получается, что все попытки его описания через квантовую механику выглядят совершенно вздорными, противоречиями практике и простым экспериментам.

4. Литература:

1. Туннельный эффект, Википедия,
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82>
2. В.И. Гольданский, «Явление квантового низкотемпературного предела скорости химических реакций», «Успехи химии», Декабрь 1975, том XLIV, выпуск 12, Москва
3. Криохимия, Википедия,
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F>
4. Элементы теории альфа распада, Википедия, https://studopedia.ru/9_155050_elementi-teorii-alfa-raspada-potentsialniy-barer-tunnelniy-effekt.html
5. В.Н. Глазков, «Эффект Джозефсона, Заметки к лекциям по общей физике», МФТИ, Москва, 2017
6. Структура металл-диэлектрик-металл,
https://studwood.ru/2058418/tehnika/struktura_metall_dielektrik_metall
7. Холодная эмиссия электронов из металла,
https://studwood.ru/1835662/matematika_himiya_fizika/holodnaya_emissiya_elektronov_metalla
8. Эмиссия электронов из проводников,
http://ens.tpu.ru/posobie_fis_kusn/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0.%20%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%A2%D0%BE%D0%BA/06-1.htm
9. "Наноэлектронный" этап развития накопителей информации на магнитных дисках, Туннельный магниторезистивный эффект»,
<https://www.intuit.ru/studies/courses/12180/1173/lecture/19636?page=3>