

---

---

## ЛЕКЦИЯ 12

---

# РЕАКЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

### 1. Нейтронная физика

С помощью нейтронов можно изучать кристаллическую и магнитную структуру вещества и другие параметры. По сути основой ядерных реакторов тоже являются нейтроны.

Есть некоторая классификация нейтронов.

1. Быстрые нейтроны.  $E > 1$  МэВ
2. Резонансные нейтроны.  $E \sim$  эВ
3. Тепловые (медленные).  $E \sim 0.0025$  эВ
4. Ультра холодные нейтроны (УХН).  $E < 10^{-7}$  эВ

При попадании нейтрона в вещество при взаимодействии с ядром могут произойти различные процессы.

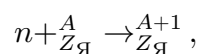
Это может быть либо упругий, либо неупругий вылет нейтрона  $(n, n')$ .

Может быть радиационный захват нейтрона и снятие возбуждения с помощью гамма-кванта

Может быть реакция с вылетом заряженных частиц  $(n, p)$ ;  $(n, \alpha)$ . Для этих реакций существует кулоновский барьер.

Может произойти реакция деления  $(n, f)$ .

Как правило, все эти реакции идут через образование составного ядра, или **компаунд-состояние**.



а уже дальше возможны различные реакции.

Когда быстрый нейтрон попадает в вещество, то кроме реакций, может произойти замедление нейтронов. Как когда бильярдный шар наталкивается на другие и теряет



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

энергию. Замедление происходит довольно быстро. Водород является наиболее хорошим замедлителем. Например, в воде на длине 5 см нейтроны из быстрых (1 МэВ) становятся медленными (0,025 эВ). Для графита это 11 см. То есть нейтрон может замедлиться или исчезнуть за счет ядерных реакций.

Мы будем говорить про деление с помощью нейтронов.

## 2. График зависимости энергии от деформации

Для того, чтобы реакция произошла мгновенно, энергию нужно поднять до уровня барьера (см. рис. 12.1).

Например, для  $^{235}\text{U}$ , при поглощении нейтрона (теплого), ядро возбуждается до уровня выше барьера. Поэтому  $^{235}\text{U} + n \rightarrow$  деление.

А для  $^{238}\text{U}$  необходим уже быстрый нейтрон, потому что энергия возбужденного состояния от нейтрона меньше барьера примерно на 1 МэВ.

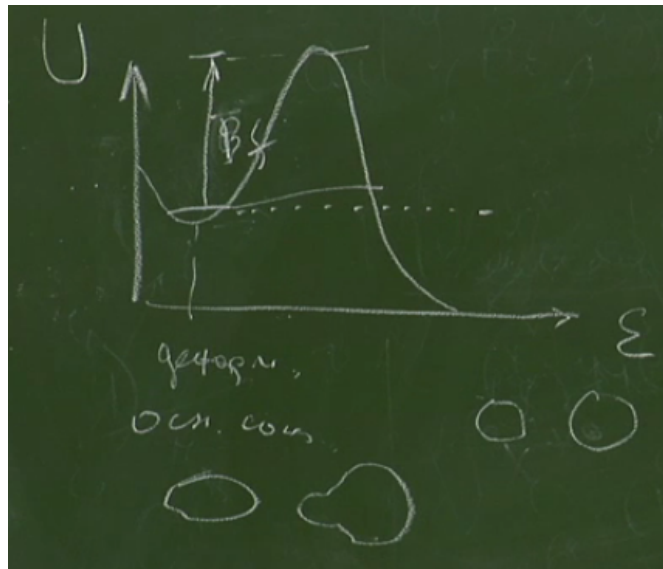


Рис. 12.1

На рис. 12.2 приведён график зависимости удельной энергии связи от количества нуклонов. Для тяжелых элементов возможно самопроизвольное деление, при котором образуется два других ядра, осколка. При такой реакции образуется энергия:

$$E_{\text{дел}} \approx A\Delta\bar{B} \approx 140 * 1,5 \sim 200 \text{ МэВ}$$

Эта энергия переходит в кинетическую энергию осколков.

Пусть есть два ядра (осколка) (см. рис. 12.3). Их энергия:

$$T = E_{\text{кул}} = \frac{(Z/2)^2 e^2}{2R_{\text{я}}} \approx \frac{70^2 * 25 * 10^{-20}}{2 * 10^{-12}} \approx 200 \text{ МэВ},$$

т. е. почти вся энергия уйдет в кинетическую энергию осколков. Эти осколки будут нагревать среду. Значит, можно получать энергию.



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

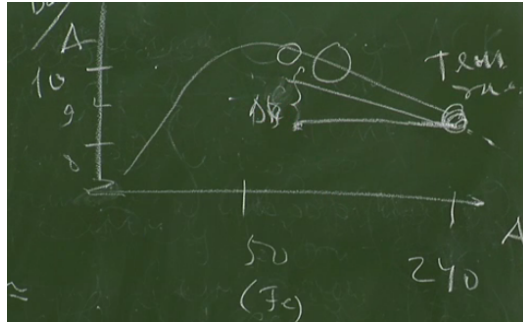


Рис. 12.2

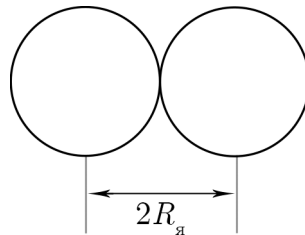


Рис. 12.3

Но на самом деле это вынужденное деление. Нарисуем долину ядерной стабильности. При образовании вторичных ядер еще образуются нейтроны (для  $^{235}\text{U}$  их будет в среднем 2,5), которые летят дальше и могут вызвать новый акт деления.

Зависимость сечения реакции от энергии такая: есть резонансная область, в районе 1 эВ, в которой нейтрон останется в ядре (см. рис. 12.4). Есть нерезонансная область, где выполняется закон Бете  $\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E}} = \frac{1}{v}$ . С наибольшей вероятностью деление произойдет, когда нейтрон тепловой. Но они могут потеряться в резонансной области. То есть то, что образовалось 2,5 нейтрона, ничего не означает.

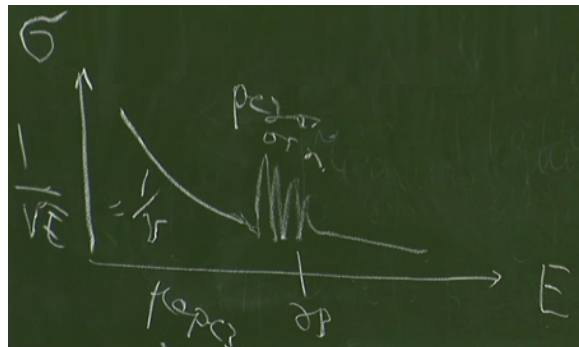


Рис. 12.4

Рассмотрим цепную реакцию, которая может возникнуть при нейтронном возбуждении (см. рис. 12.5). Это называется цепная ядерная реакция. Это то, на чем основана ядерная бомба. Мы же хотим сделать управляемую цепную реакцию деления. Но как — не очень понятно.

Время между двумя последовательными процессами столкновений  $T$  называется время жизни одного поколения. Точнее, это время между столкновениями, которые приво-

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

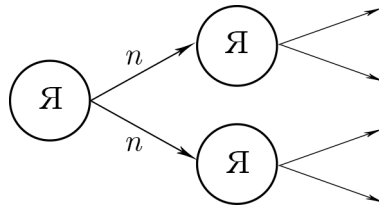


Рис. 12.5

дят к делению ядер.

$$T \approx \frac{l}{v} = \frac{1}{n\sigma v} = \frac{1}{5 * 10^{22} * 10^3 * 2 * 10^3} \approx 10^{-5} \text{ с.}$$

То есть оно ничтожно, процесс размножения будет идти очень быстро.

Но ведь не все нейтроны приводят к делению. Нужно делать так, чтобы не было веществ, которые поглощают нейтроны. Вводят такое понятие, как избыток нейтронов  $k$ .  $k$  — это эффективное число нейтронов, которые приводят к делению.  $k - 1$  — то количество, которое дает возможность размножиться.

Если  $k - 1 > 0$ , то имеем надкритический режим, т. е. цепная реакция будет. Если  $k - 1 < 0$ , то имеем подкритический режим т. е. ничего не будет.

Пусть  $k - 1 \simeq 10^{-4}$ .

За какое время произойдет реакция?

$$\frac{dN}{dT} = \frac{k - 1}{T} N.$$

Количество актов деления:

$$N = N_0 \exp\left(\frac{k - 1}{T} t\right)$$

— количество делящихся ядер возрастает экспоненциально!

Выделение энергии пропорционально количеству делящихся ядер. Энергия возрастет в сто раз за время:

$$\frac{W}{W_0} \approx 100;$$

$$\frac{N}{N_0} = 100 = \exp\left(\frac{k - 1}{T} t\right);$$

$$t = 0,46 \text{ с.}$$

Это взрыв. Здесь ни о каком теплорегулировании не может быть и речи.

Но существуют запаздывающие нейтроны, которые образуются при бета-распаде (см. рис. 12.6). Время жизни этих нейтронов совпадает с временем бета-распада:  $\langle T \rangle \simeq 12 \text{ с}$

Сколько их? Примерно  $\frac{1}{1000} = \beta$ .

Если есть и мгновенные, и запаздывающие нейтроны, то среднее время жизни поколения будет:

$$\langle T_{\text{зап}} \rangle = \beta T_{\text{зап}} + 1 * T_{\text{зап}} \simeq 10^{-2} \text{ с.}$$



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

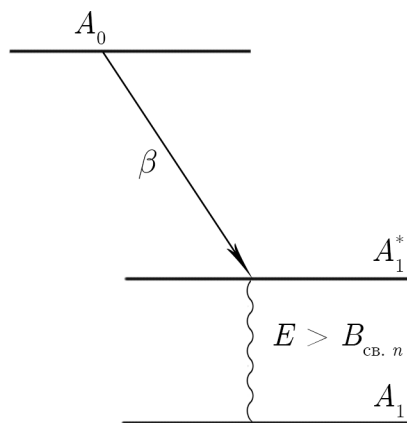


Рис. 12.6

Теперь посчитаем, насколько увеличится энергия, за то же время 0,46 с, но с учетом запаздывающих нейтронов.

$$\frac{W}{W_0} \approx 1,005.$$

То есть реакция происходит медленно. А значит, можно регулировать цепную реакцию. Нужны поглотители нейтронов.

### 3. Ядерный реактор

У ядерного реактора несколько главных составляющих. Это: сосуд с водой, которая и замедляет и охлаждает; ТВЭЛы — тепловыделяющие элементы (уран, плутоний, это ядерное горючее) (см. рис. 12.7).

Нейтроны движутся в воде и могут вызвать деление ядер ТВЭЛа.

Для того, чтобы регулировать, нужно иногда вставлять отравитель, который поглощает нейтроны (Cd, B, Gd).

Образующийся пар идет на турбину и образуется электричество.

Плохо то, что нужен  $^{235}\text{U}$ , а его содержится всего 0,7%. Все остальное — это  $^{238}\text{U}$ . То есть нужно обогащать уран. Сейчас научились это делать с помощью центрифуг. Раньше делали с помощью термодиффузии, но для этого нужны длины порядка километров.

Мы рассматривали так называемый водно-водяной ядерный реактор, где вода является и охладителем, и замедлителем. Но по мере горения ядерного топлива нужно заменять ТВЭЛы. Когда вытаскивают отработанные, то они очень радиоактивны, и их нужно помещать в бассейн с водой для охлаждения. Но большой проблемой эта радиоактивность является, например, для подводных лодок. Существуют специальные станции на берегу, которые подключаются к подводкам и охлаждают. Большую проблему составляет утилизация отработанного топлива. Для этого делают шахты глубиной километры-десятки километров и закапывают там топливо.

Можно сделать реактор и на быстрых нейтронах.



Быстрые реакторы строят, потому что можно сделать размножение топлива.

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

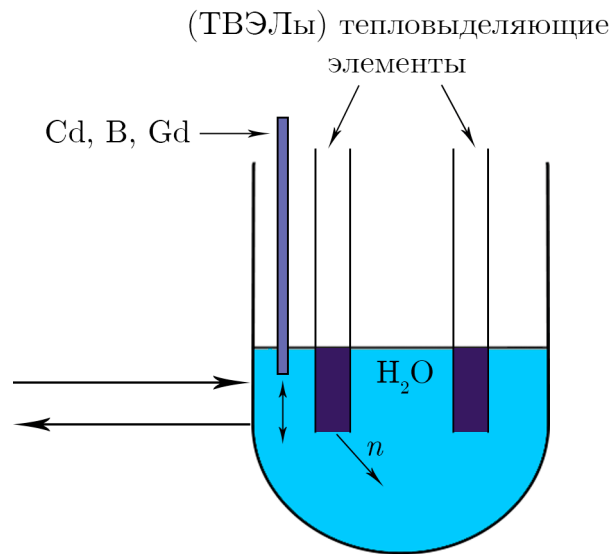
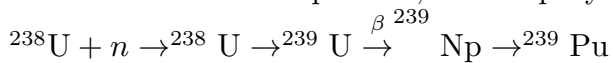


Рис. 12.7

Есть котел с нейтронами,  $^{238}\text{U}$  образуют стенки вокруг котла (см. рис. 12.8). Реакция:



На плутонии тоже можно делать реакции.

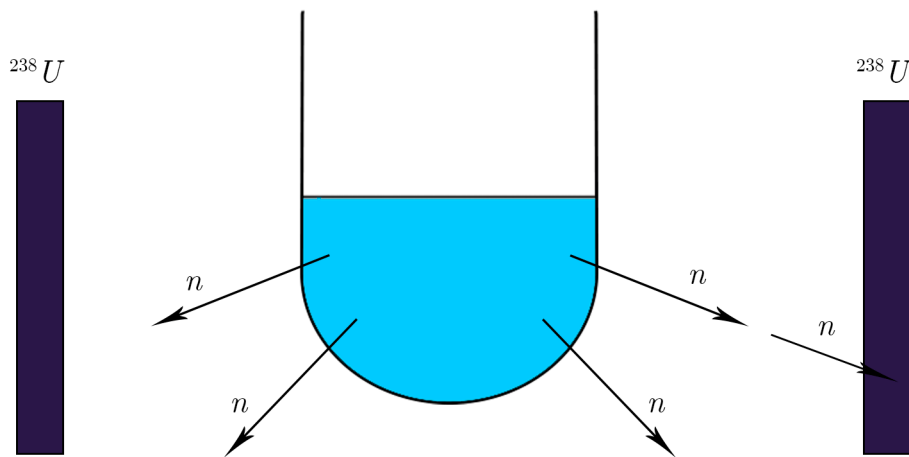


Рис. 12.8

Такой реактор-размножитель называется бридер. Но оказывается, что это выгодно лишь когда период удвоения плутония составляет меньше 10 лет. Пока что это сделать не удается.

В реакторе на быстрых нейтронах есть проблема охлаждения. Если это вода, то нейтроны будут замедляться, а нам этого не надо. Решение найдено в виде жидкого натрия, который достаточно тяжелый, и при этом хорошо отводит тепло.

В чем же плюсы ядерной энергетики? Две основные причины. Этот способ необычайно эффективный. Один грамм урана соответствует тоннам угля. Если нужна энергия где-то далеко, то конечно легче перемещать небольшое количество урана. Запустить в работу тепловую станцию достаточно тяжело, несколько дней необходимо, чтобы рас-

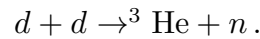
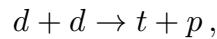


**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

крутить турбину до нужных оборотов. Для ядерного же реактора период запуска составляет всего 2-3 часа. Когда срочно необходима энергия — запускают ядерный реактор.

Второй способ получения ядерной энергии — это синтез (идти с другого конца зависимости, см. рис. 12.9).

Возьмем ядра тяжелой воды — дейтроны.



При этом выделится суммарная энергия 3,5 МэВ.

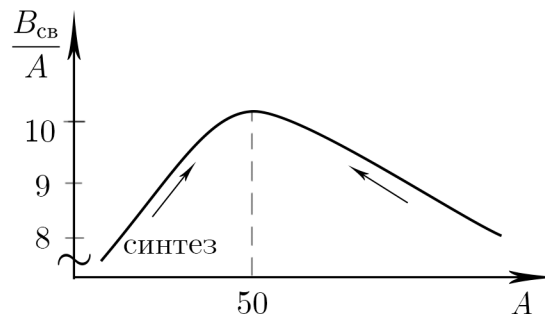
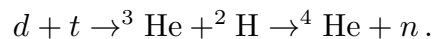


Рис. 12.9

Если взять дейтрон и тритон:



Выделение энергии составит 17 МэВ.

Но как заставить их сблизиться? Эти ядра заряжены, и испытывают кулоновское отталкивание (см. рис. 12.10). Нужно сблизить их настолько, чтобы произошло ядерное притяжение. Можно их сильно нагреть, и тогда они будут обладать большой кинетической энергией, и смогут столкнуться.

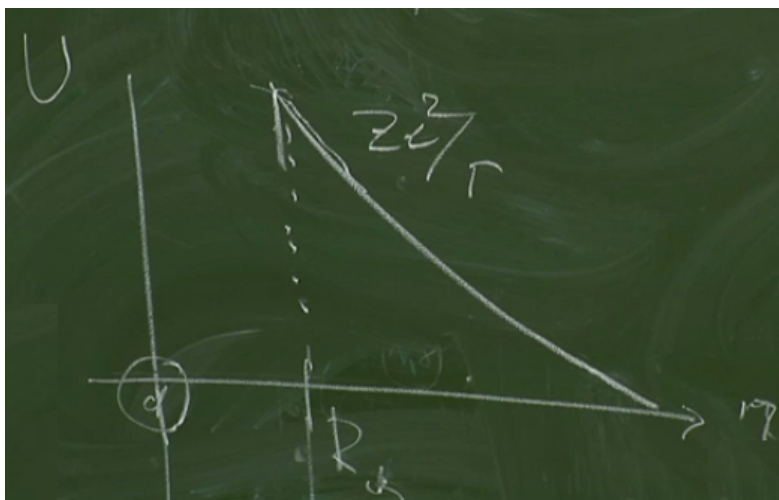


Рис. 12.10

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

Какая должна быть температура дейтронов?

Сначала найдем радиус дейтрона:

$$R_d = 1,25^3 \sqrt{2} \text{ фМ} \approx 1,8.$$

$$U_{\text{кул}} = \frac{zZe^2}{[h]} = \frac{e^2}{R_1},$$

$$\frac{3}{2} kT_{\text{кин}} = E_{\text{кин}} \approx U_{\text{кул}}.$$

$$T = \frac{2 * 1,6 * 10^{-12} * 10^6}{3 * 1,4 * 10^{-16}} \approx 7 * 10^9 \text{ K}$$

— семь миллиардов градусов. Это огромная температура. Нужно изолировать объект, то есть чтобы теплопроводность материала была мала.

На самом же деле реакция может произойти за счет туннелирования.

Как в классике выглядит сечение реакции от энергии? График представлен на рис. 12.11. Но в плазме, нагретой до температуры  $T$ , существует максвелловское распределение скоростей (см. рис. 12.12).

$$dn = Av^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv.$$

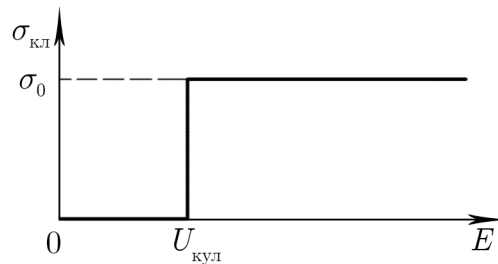


Рис. 12.11

Возьмем  $T = 10^8 \text{ K}$ . Вызовет реакцию деления только ничтожный хвост (см. рис. 12.12).

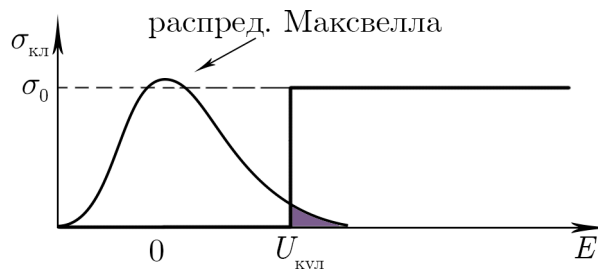


Рис. 12.12

На самом деле надо сравнивать не сечения, а скорости выделения энергии. Что это значит?

Если частица  $a$  и частица  $b$  сталкиваются, то количество столкновений этих частиц будет:

$$N_{ab} = \sigma n_a (n_b v_{ab}) \propto J_{\text{налет. част.}}$$



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)



**!** Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).

Теперь реакция с участием дейтронов:

$$N_{dd} = \frac{n_d^2}{2} \langle \sigma_i v_i \rangle,$$

$n_d$  — плотность плазмы.

Посчитаем энергетический выход:

$$W_{\text{кл}} \langle \sigma v \rangle_{\text{кл}} = A \int_{v_0}^{\infty} E * e^{\frac{E}{kT}} dE =$$

На интервале  $kT$  функция убывает в  $e$  раз.

$$= AU_0 e^{-\frac{U_0}{kT}} kT;$$

$A$  — константа.

Такое будет тепловыделение.

Теперь перейдем к квантовому случаю (см. рис. 12.13).

Тут уже частицы любых энергий могут проникнуть сквозь барьер за счет туннелирования.

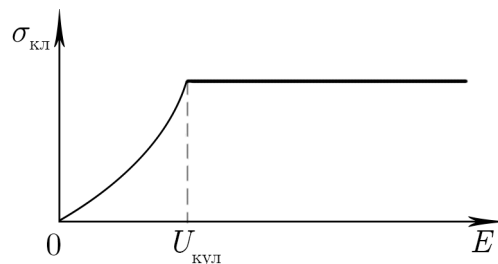


Рис. 12.13

Точка поворота:

$$R_{\text{п}} = \frac{e^2}{E};$$

$$D = \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{R_{\text{п}}}^{R_0} \sqrt{2m(U_0 - E)} dr \right] =$$

Но поскольку  $E < U_{\text{кул}}$

$$= \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int \sqrt{\frac{2me^2}{\hbar}} dr \right] = \exp \left[ -\frac{4}{\hbar} e^2 \sqrt{\frac{2m}{E}} \right]$$

Теперь нужно найти то же, что и в классическом случае.

Найдем максимум квантовости. Максвелловское распределение и туннелирование в зависимости от энергии приведены на рис. 12.15.

**!** Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на [pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)

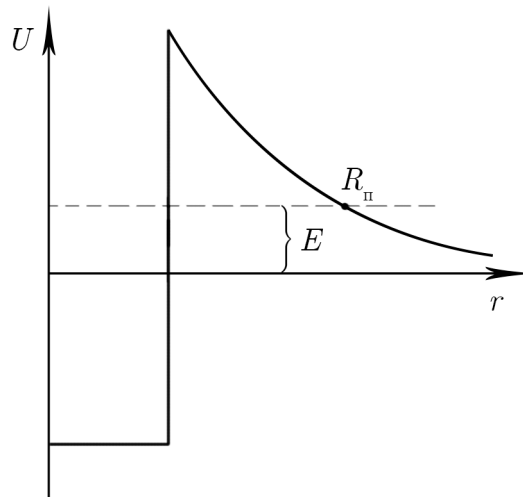


Рис. 12.14

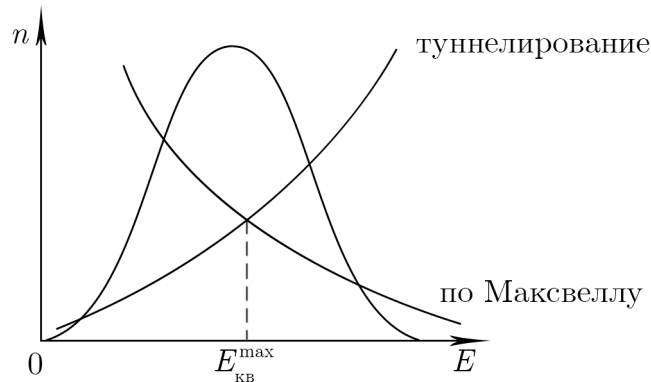


Рис. 12.15

Найдем  $E_{\text{кв}}$  из условия:

$$0 = \frac{d}{dE} \left( \frac{E}{kT} + \frac{4e^2}{\hbar} \sqrt{\frac{2m}{E}} \right).$$

Оказывается:  $E_{\text{макс}}^{\text{кв}} = 4 * 10^8$  К. Оказывается, что разница больше чем на порядок между классическим и квантовым рассмотрением.

Тогда отношение энерговыделения квантового к классическому:

$$\frac{W_{\text{кв}}}{W_{\text{кл}}} = \frac{E_{\text{макс}}^{\text{кв}} e^{-\frac{E}{kT}}}{U_0 e^{-\frac{E}{kT}}} = 10^{20}.$$

Получается, что квантовые эффекты повышают вероятность синтеза на 20 порядков! Дальше надо просто строить реакторы. Сейчас самое распространенное — это «токамак», то есть ток в магнитном поле (см. рис. 12.16).

Как это греть?

Греть можно тремя способами. Первый — чисто за счет сопротивления. Электроны сталкиваются с дейтерием и нагревают. Это дает только 10 миллионов градусов.



*Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки.  
Следите за обновлениями на [lectoriy.mipt.ru](http://lectoriy.mipt.ru).*

Можно впрыскивать нейтральные частицы. Они будут замедляться и нагревать. Это дает еще в два раза больше.

То есть механизмы нагрева есть.

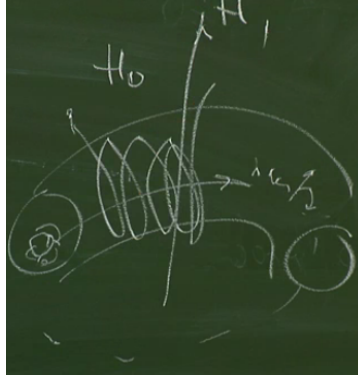


Рис. 12.16

На самом деле синтезе столь энергоэффективный, как в ядерном реакторе, т. к. плотность плазмы очень мала, и энергия, выделяемая при реакции тоже намного меньше. Но если обложить пластинами из  $^{238}\text{U}$ , то можно получать ядерное топливо, как в бридере.

*! Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой.  
! Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на  
[pulsar@phystech.edu](mailto:pulsar@phystech.edu)*