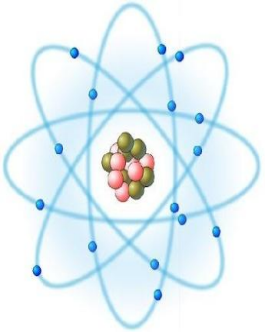


Теория ядерных реакторов

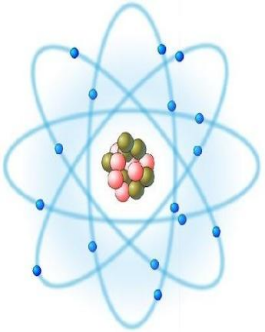
Семинар к курсовому проекту по спецкурсу № 2
Занятие 3

Докладчики студенты
Иванов Иван Иванович
Петров Пётр Петрович
Группа ФТ-4



Тема занятия 3

Поток и ценность нейтронов. Единицы их измерения. Как зависит микроскопическое сечение поглощения нейтронов ^{238}U и ^{232}Th от энергии? Область резонансного поглощения на этой зависимости. Эффект Доплера при резонансном поглощении нейтронов.



Поток нейтронов, плотность потока

Поток нейтронов (плотность потока) определяется соотношением

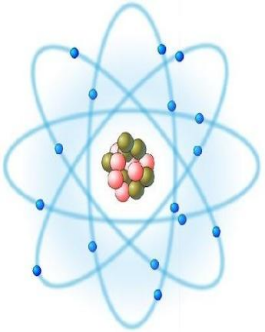
$$\varphi(\vec{r}, E) = n(\vec{r}, E) \cdot v = \int_{4\pi} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \cdot v \cdot d\vec{\Omega}$$

Согласно [ГОСТ 19849-71](#) эту величину называют **плотностью потока**.

По определению – это произведение плотности нейтронов на их скорость. Где под плотностью нейтронов понимается число нейтронов в единице объёма.

Физический смысл плотности потока – это путь, который проходят все нейтроны приходящиеся на единицу объёма вблизи точки r среды за единицу времени.

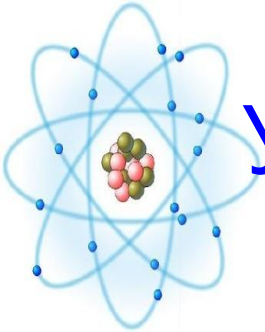
Иногда эту величину толкуют по единице измерения потока ($1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$) – как число нейтронов пересекающих единичную площадку в единицу времени.



Ценность нейтронов

Ценность нейтронов $\phi^+(\mathbf{r}, E, \Omega)$ – это решение уравнения сопряженного уравнению переноса нейтронов. Ценность широко используется в теории возмущений и вариационных расчетах для изучения поведения ядерных реакторов.

Сопряженная функция (ценность) нейтронов является мерой вклада нейтронов в соответствующей точке реактора в цепную реакцию деления (в чувствительность детектора нейтронов). Очевидно, что нейтрон, выходящий из реактора имеет нулевую ценность, т.к. не может вернуться в реактор и вызвать деление, быть зарегистрированным детектором и т.п.



Уравнения для потока и ценности

Поток нейтронов в системе удовлетворяет стационарному уравнению переноса с источником Q , в котором граничное условие описывает отсутствие входящих нейтронов:

$$L\Phi = -Q$$

или

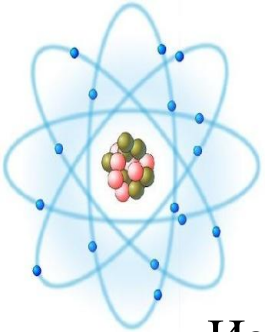
$$\begin{aligned} & \Omega \cdot \nabla \Phi + \sigma \Phi = \\ & = \iint \sigma f(\mathbf{r}; \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) \Phi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE' + Q(\mathbf{r}, \Omega, E) \end{aligned}$$

Кроме того, можно записать неоднородное сопряженное уравнение с безразмерным источником $\sigma_d(\mathbf{r}, E)$:

$$L^+ \Phi^+ = -\sigma_d$$

или

$$\begin{aligned} & -\Omega \cdot \nabla \Phi^+ + \sigma \Phi^+ = \\ & = \iint \sigma f(\mathbf{r}; \Omega, E \rightarrow \Omega', E') \Phi^+(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE' + \sigma_d(\mathbf{r}, E) \end{aligned}$$



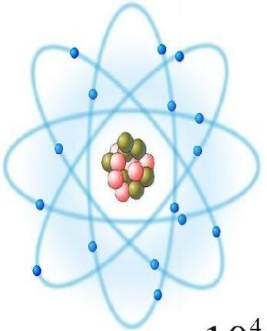
Размерность ценности

Из уравнения для функции сопряженной функции потока в реакторе следует, что функция ценности безразмерна.

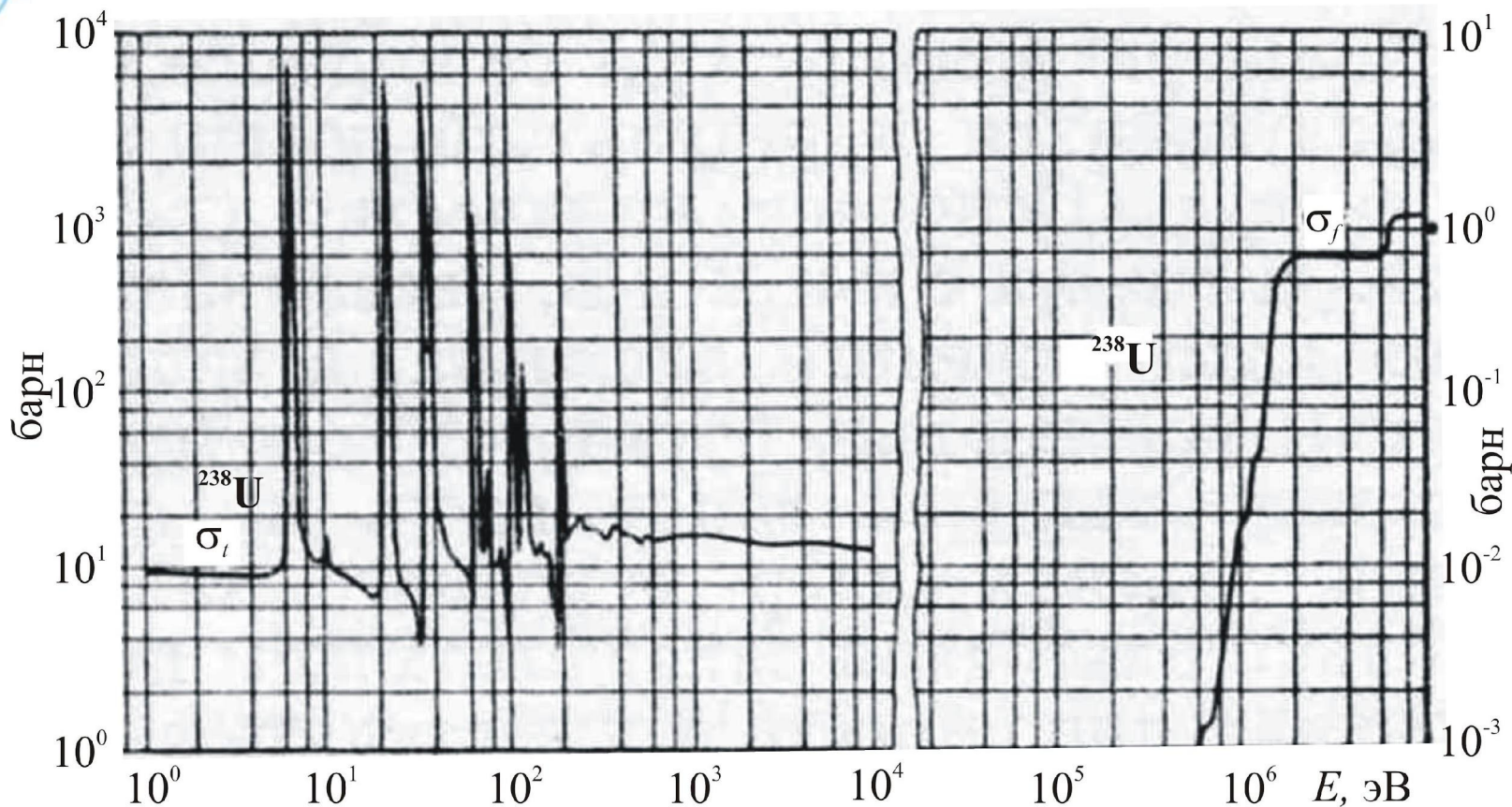
В сопряженном уравнении источник можно было бы нормировать иначе и, тем самым, придать некоторую размерность сопряженной функции (ценности) Φ^+ . Если, например, σ_d в сопряженном уравнении заменить на $q\sigma_d$, где q – заряд (в кулонах), регистрируемый детектором, то функция ценности имела бы размерность в кулонах на один нейтрон.

Таким образом, *размерность функции ценности может выбираться произвольно* в зависимости от условий рассматриваемой задачи.

Функция ценности *в одногрупповом приближении* с точностью до произвольного множителя *совпадает с функцией плотности потока нейтронов*.

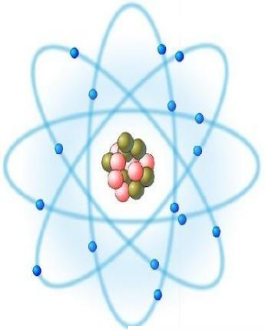


Зависимость σ_t и σ_f для ^{238}U от энергии

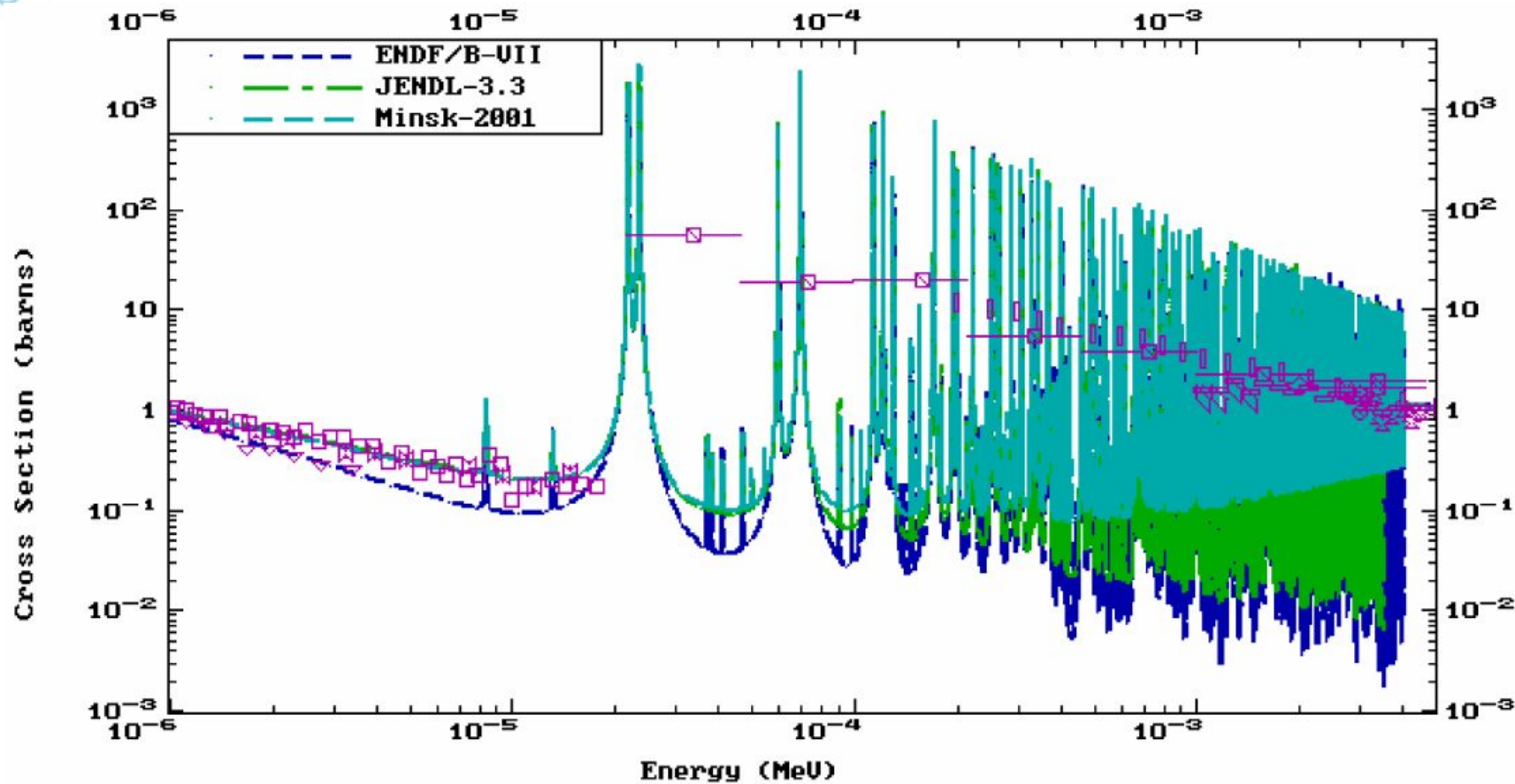


Резонансная область находится в интервале энергий $\sim (6 \div 200)$ Эв.

Видна энергия порога деления ^{238}U .

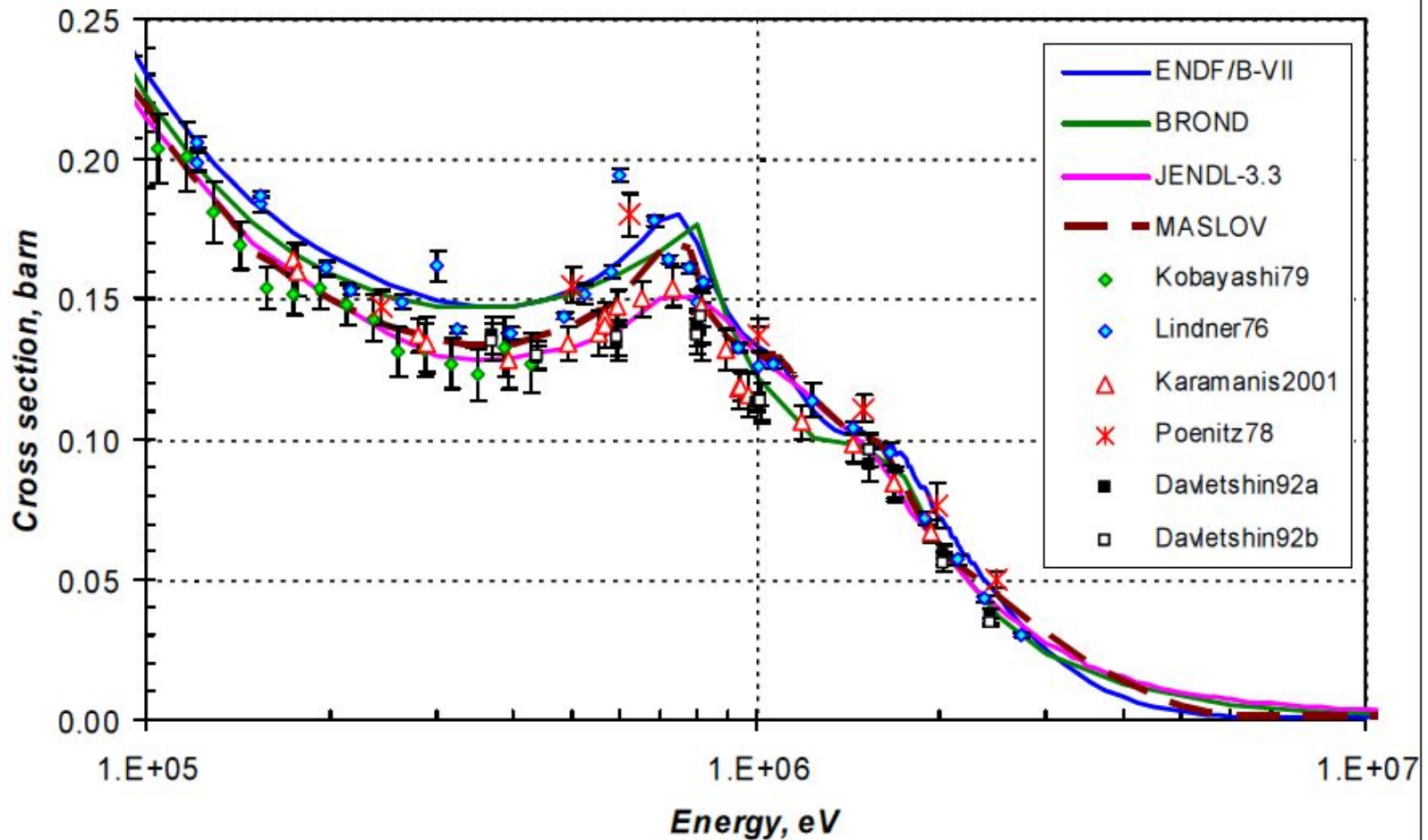


Зависимость σ_c для ^{232}Th от энергии в области резонансов



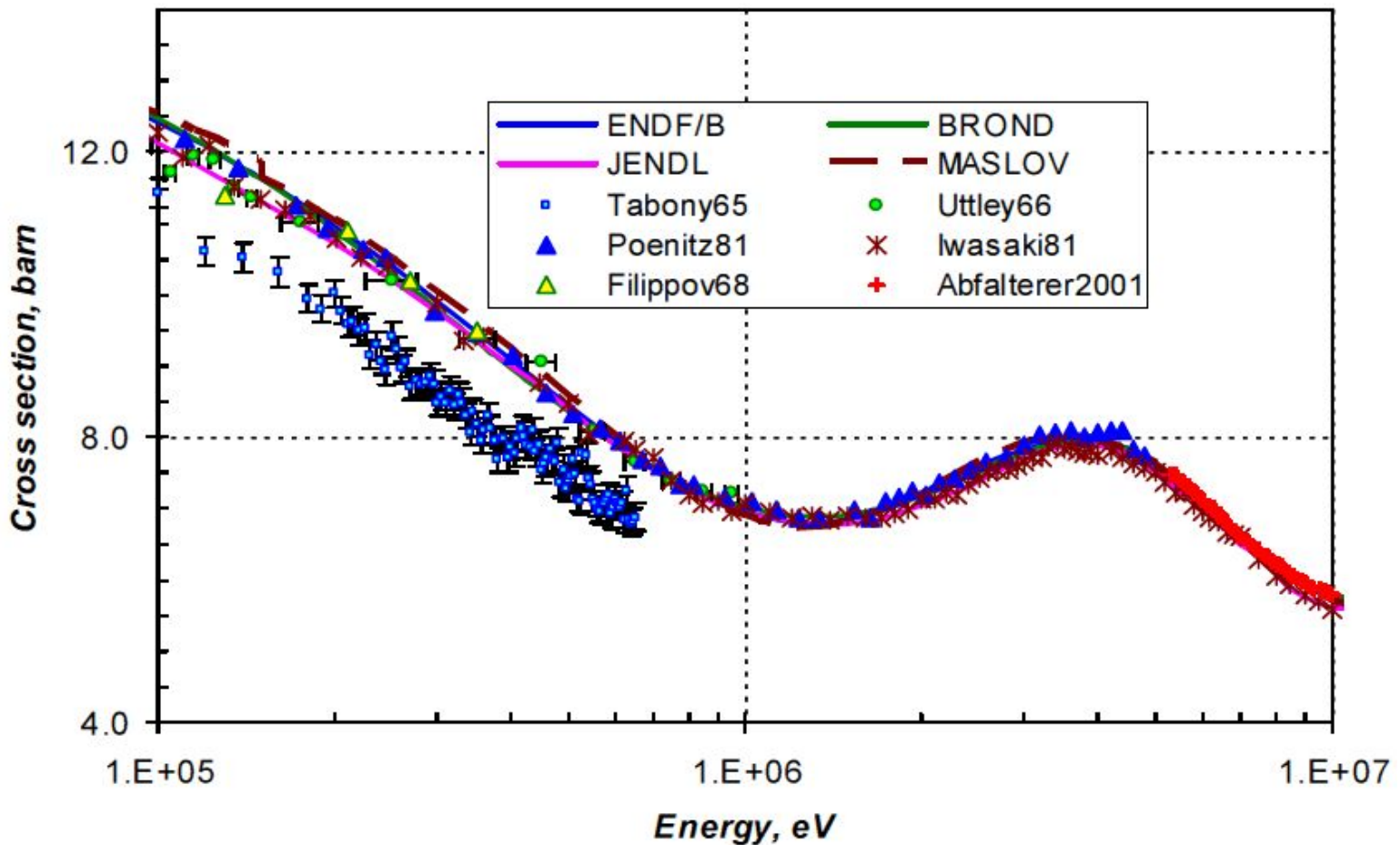


Зависимость σ_c для ^{232}Th от энергии в области от 100 кэВ до 10 МэВ



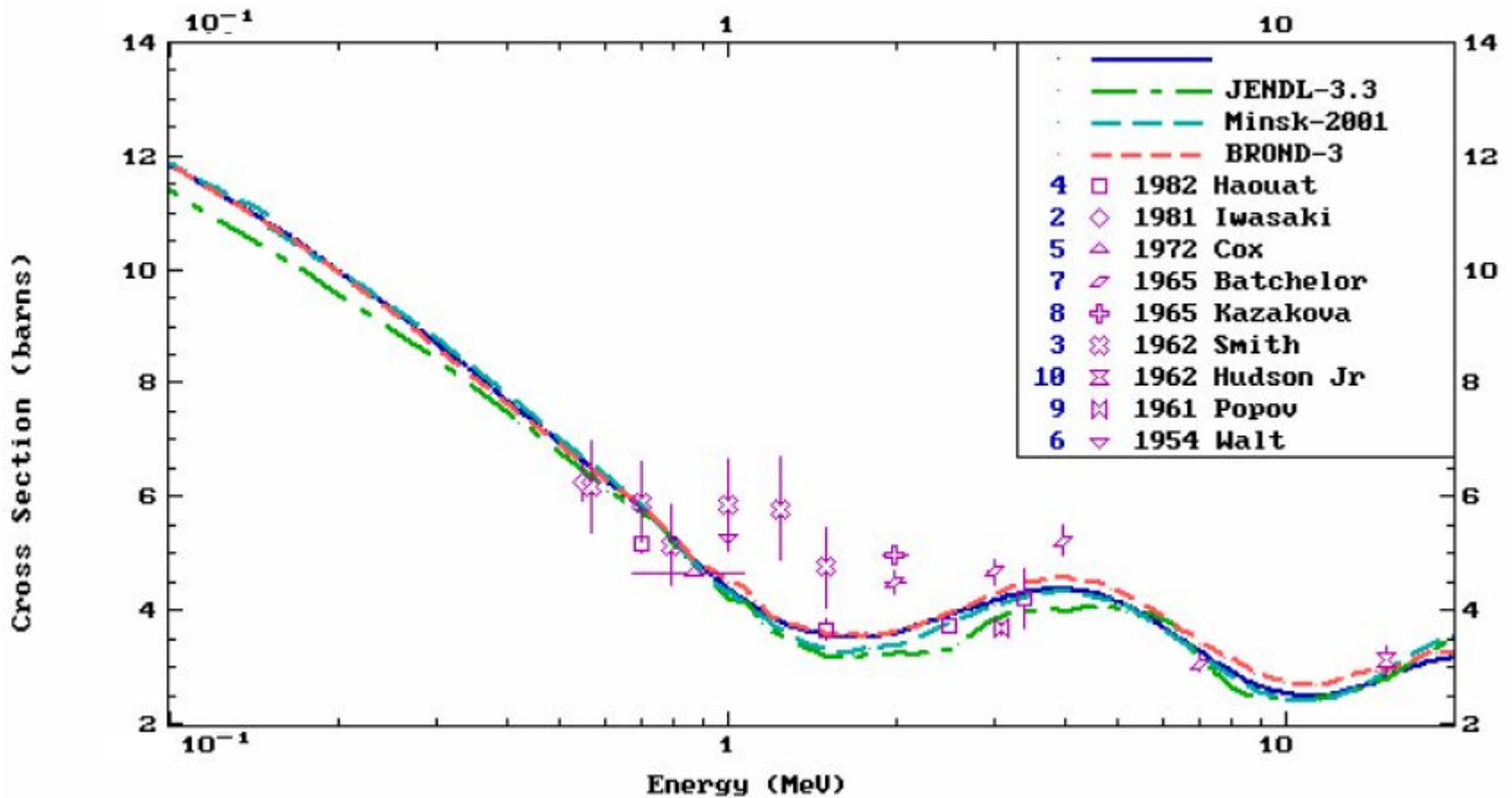


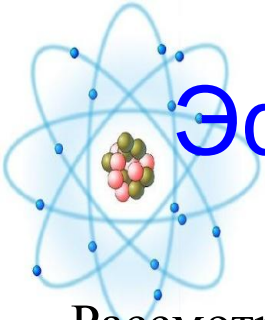
Зависимость σ_t для ^{232}Th от энергии в области от 100 кэВ до 10 МэВ





Зависимость σ_e для ^{232}Th от энергии в области от 100 кэВ до 10 МэВ





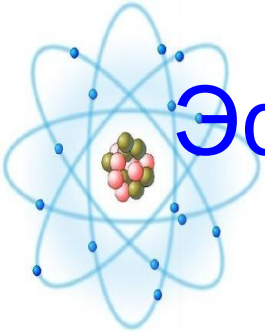
Эффект Доплера при резонансном поглощении нейтронов

Рассмотренные выше зависимости сечений от энергии в резонансной области были сделаны в предположении, что нейтроны движутся, а ядра находятся в состоянии покоя, т.е. абсолютная температура среды $T=0$ К.

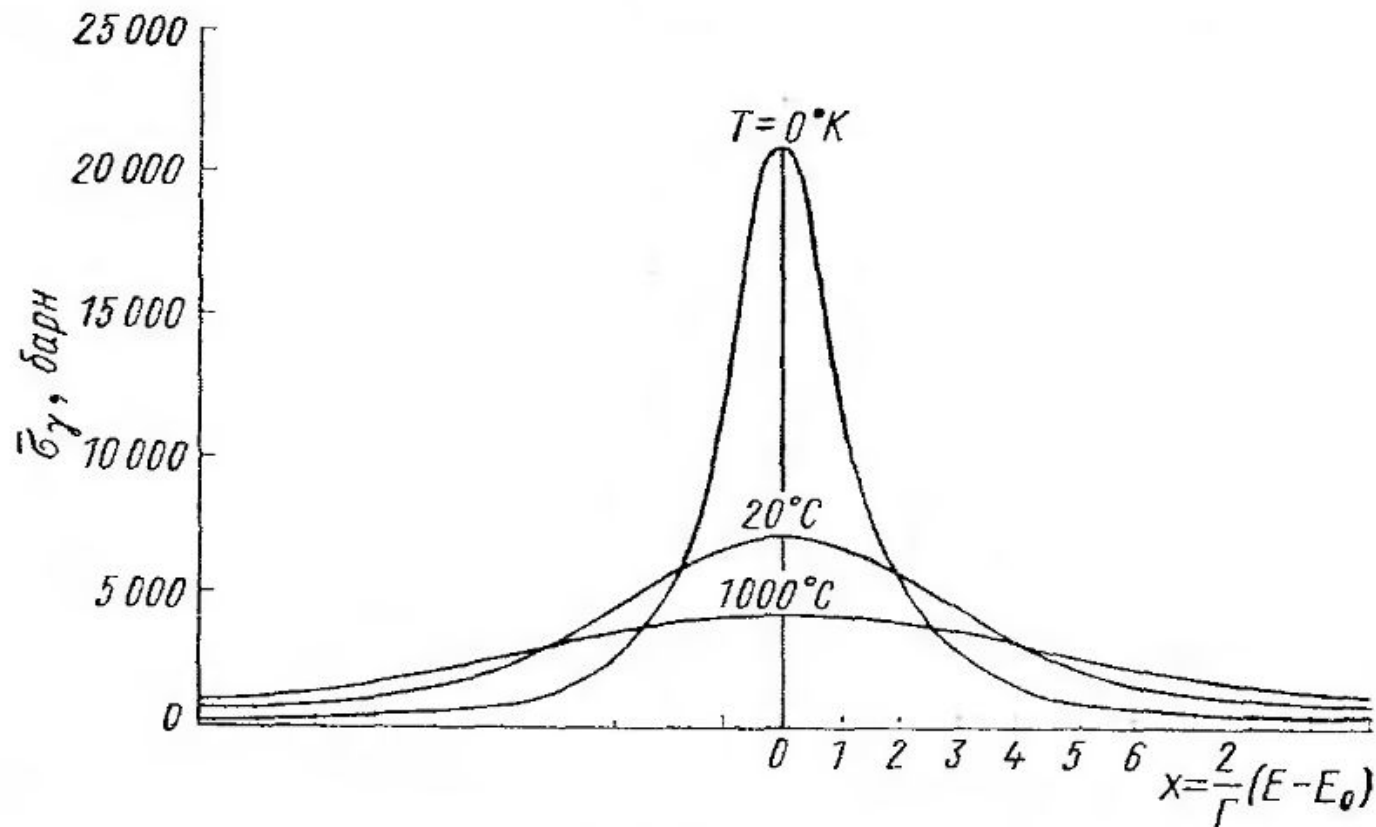
Изменение формы резонанса с ростом температуры обусловлено тем, что величина энергии в области резонанса определяются разностью скоростей ядра-мишени и нейтрона, т.е.

$$E \sim |v_n - v_{я}|^2$$

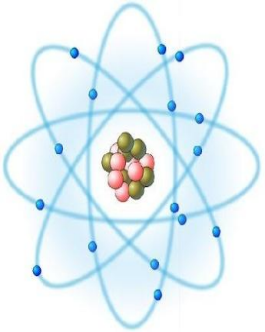
Если ядро покоится, то E – это энергия нейтрона. При более высоких температурах ядра будут в тепловом движении и их взаимная энергия получается путем усреднения тепловых движений ядер. Это приводит к эффекту Доплера, который состоит в уширении резонанса, как показано на рисунке.



Эффект Доплера при резонансном поглощении нейтронов



Доплеровское уширение сечения захвата ^{238}U в резонансе с энергией 6,67 Эв; Γ – ширина резонанса; x – относительное отклонение от энергии резонанса.



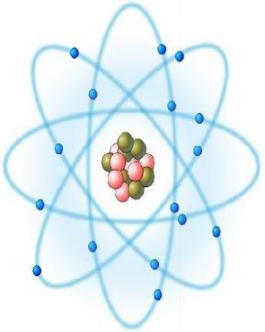
Уширение резонанса

Как видно из рисунка, с увеличением температуры максимум резонанса снижается, а его периферийная часть повышается. Можно считать, что площадь под кривыми постоянна и не зависит от температуры.

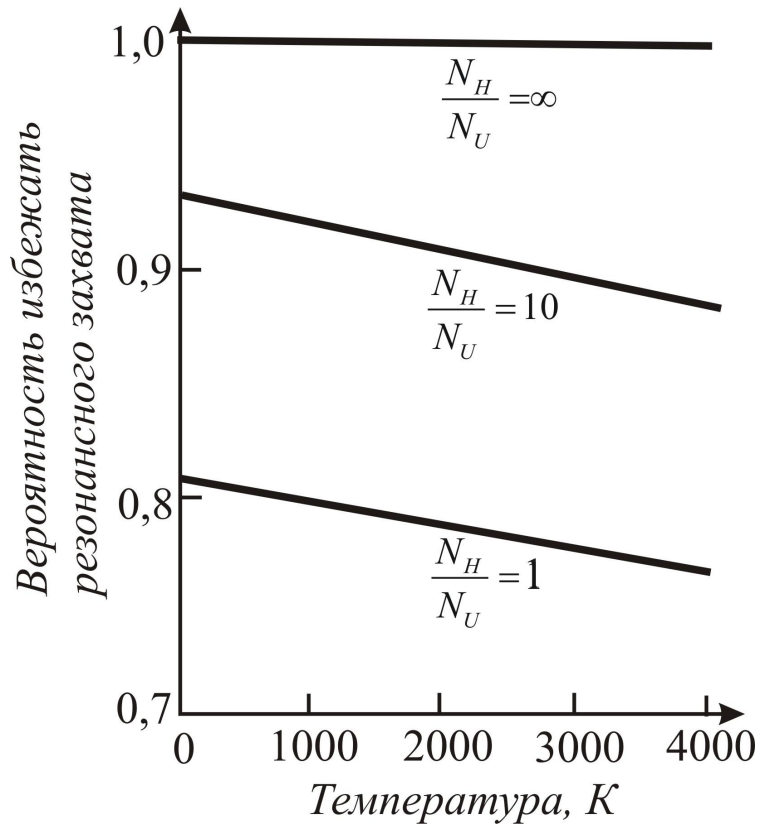
Поэтому, можно было бы предположить, что вероятность избежать резонансного захвата при этом не изменится.

На самом же деле в процессе столкновения с ядрами нейтроны изменяют свою энергию скачком и велика вероятность, что при низкой температуре (узком резонансе) они проскочат этот резонанс.

При высокой температуре (широком резонансе) вероятность такого проскока снижается и вероятность избежать резонансного поглощения уменьшается.



Вероятность избежать резонансного поглощения



Зависимость вероятности избежать резонансного захвата для резонанса ^{238}U с энергией 6,67 эВ от температуры при различных концентрациях ^{238}U в бесконечном водородсодержащем замедлителе.