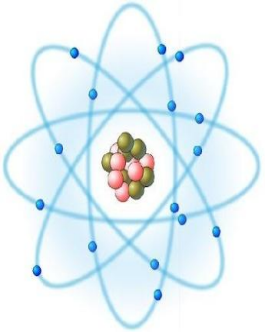


# Теория ядерных реакторов

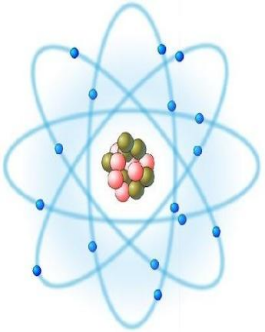
Семинар к курсовому проекту по спецкурсу № 2  
Занятие 3

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  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  от энергии? Область резонансного поглощения на этой зависимости. Эффект Доплера при резонансном поглощении нейтронов.



# Поток нейтронов, плотность потока

Поток нейтронов (плотность потока) определяется соотношением

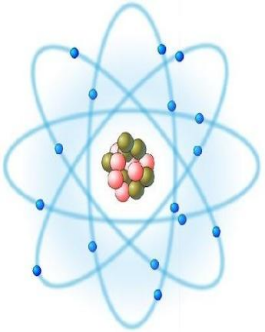
$$\varphi(\vec{r}, E) = n(\vec{r}, E) \cdot v = \int_{4\pi} n(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \cdot v \cdot d\vec{\Omega}$$

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.

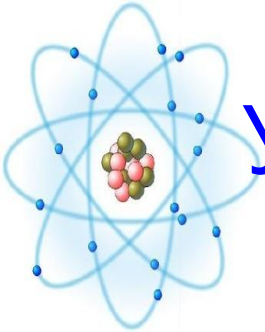
Иногда эту величину толкуют по единице измерения потока ( $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) – как число нейтронов пересекающих единичную площадку в единицу времени.



# 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

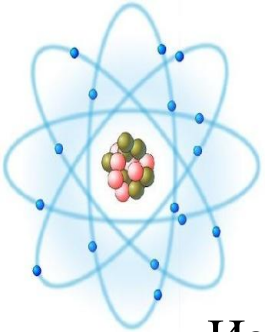
$$\begin{aligned} & \Omega \cdot \nabla \Phi + \sigma \Phi = \\ & = \iint \sigma f(\mathbf{r}; \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) \Phi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE' + Q(\mathbf{r}, \Omega, E) \end{aligned}$$

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

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

или

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



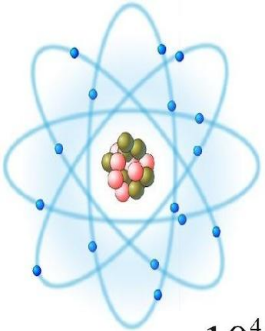
# Размерность ценности

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

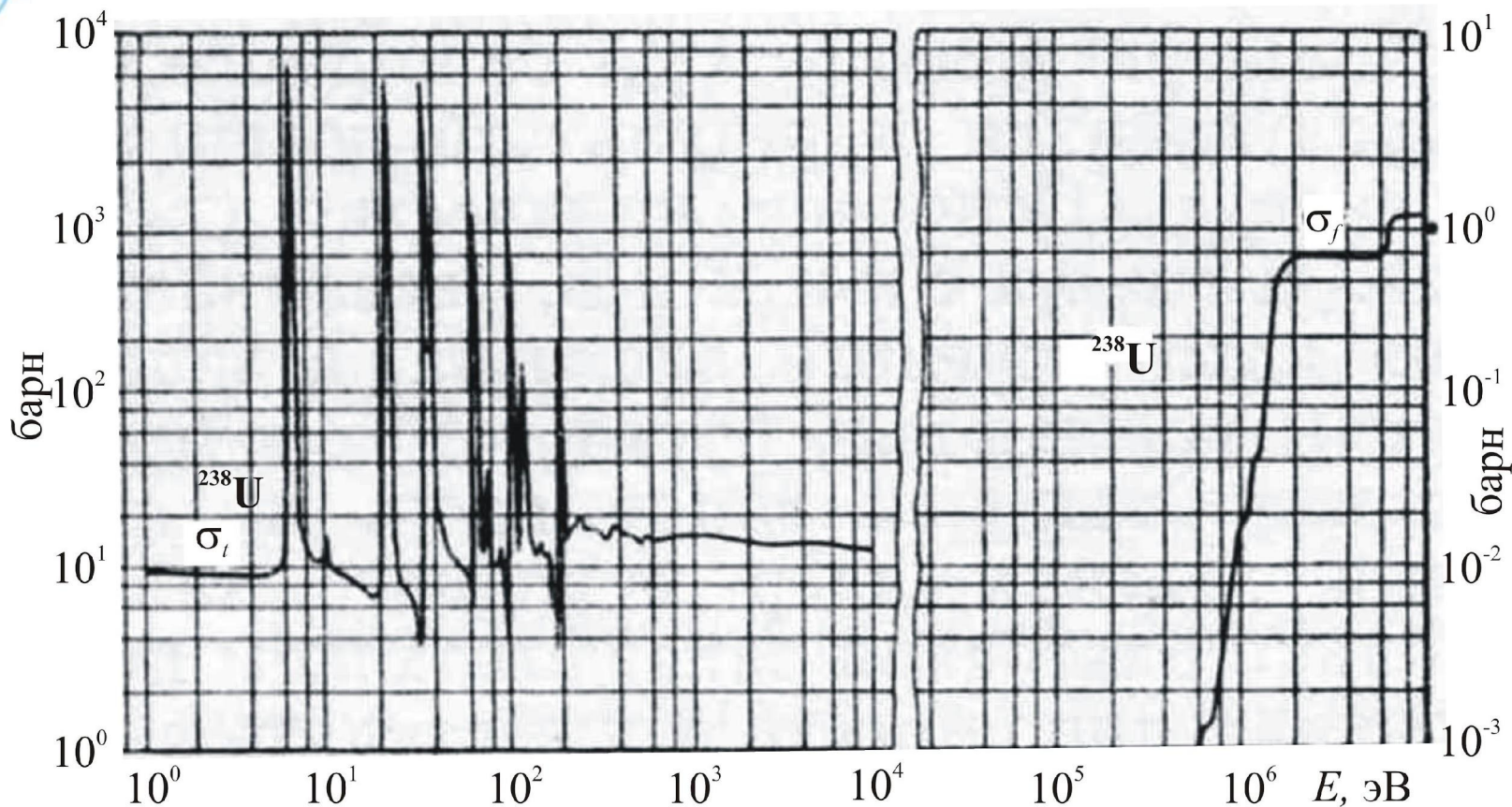
В сопряженном уравнении источник можно было бы нормировать иначе и, тем самым, придать некоторую размерность сопряженной функции (ценности)  $\Phi^+$ . Если, например,  $\sigma_d$  в сопряженном уравнении заменить на  $q\sigma_d$ , где  $q$  – заряд (в кулонах), регистрируемый детектором, то функция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

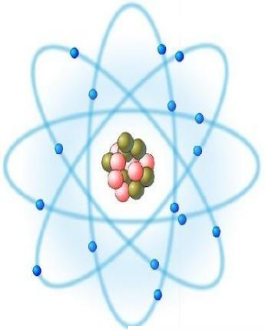


# Зависимость $\sigma_t$ и $\sigma_f$ для $^{238}\text{U}$ от энергии

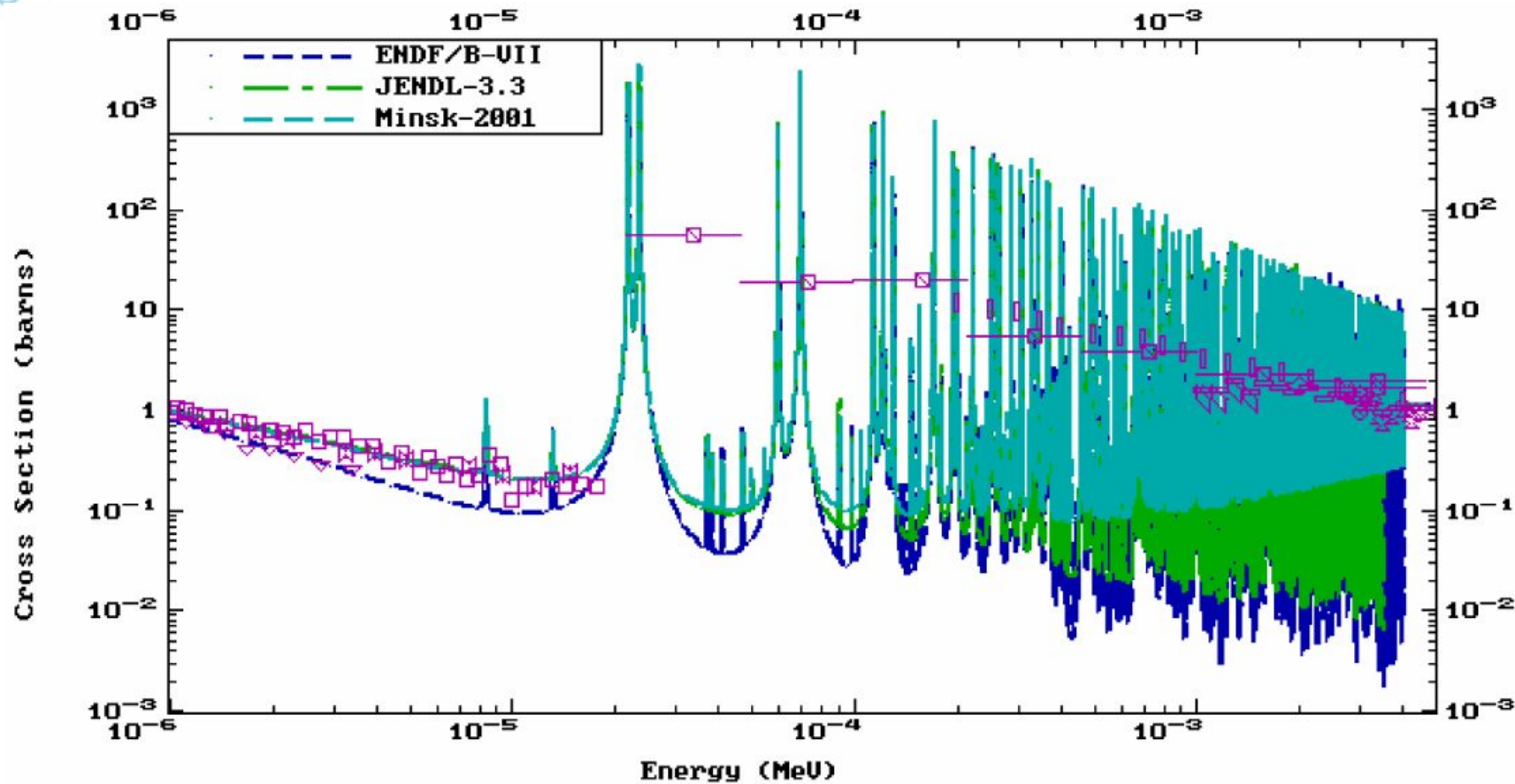


Резонансная область находится в интервале энергий  $\sim (6 \div 200)$  Эв.

Видна энергия порога деления  $^{238}\text{U}$ .



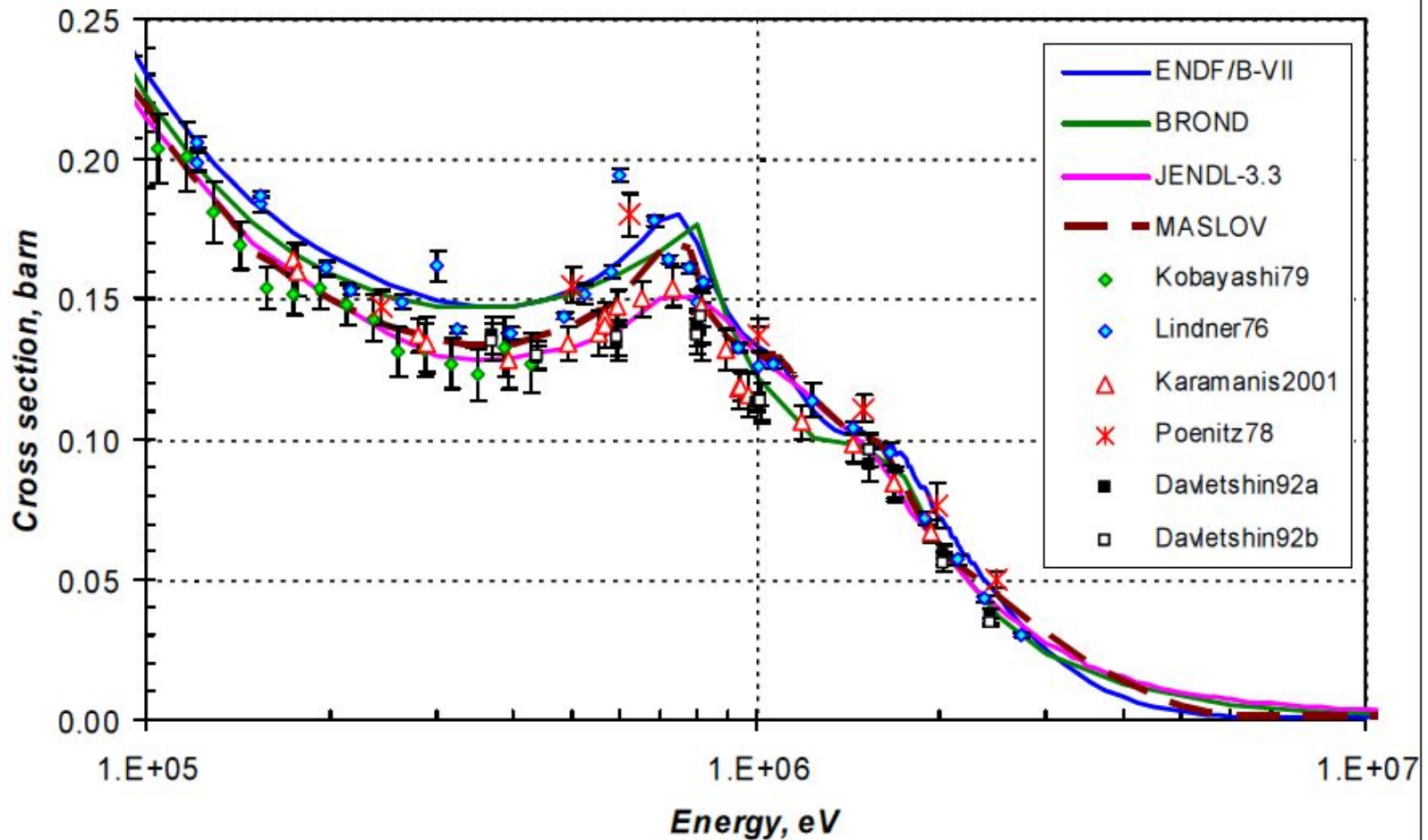
# Зависимость $\sigma_c$ для $^{232}\text{Th}$ от энергии в области резонансов





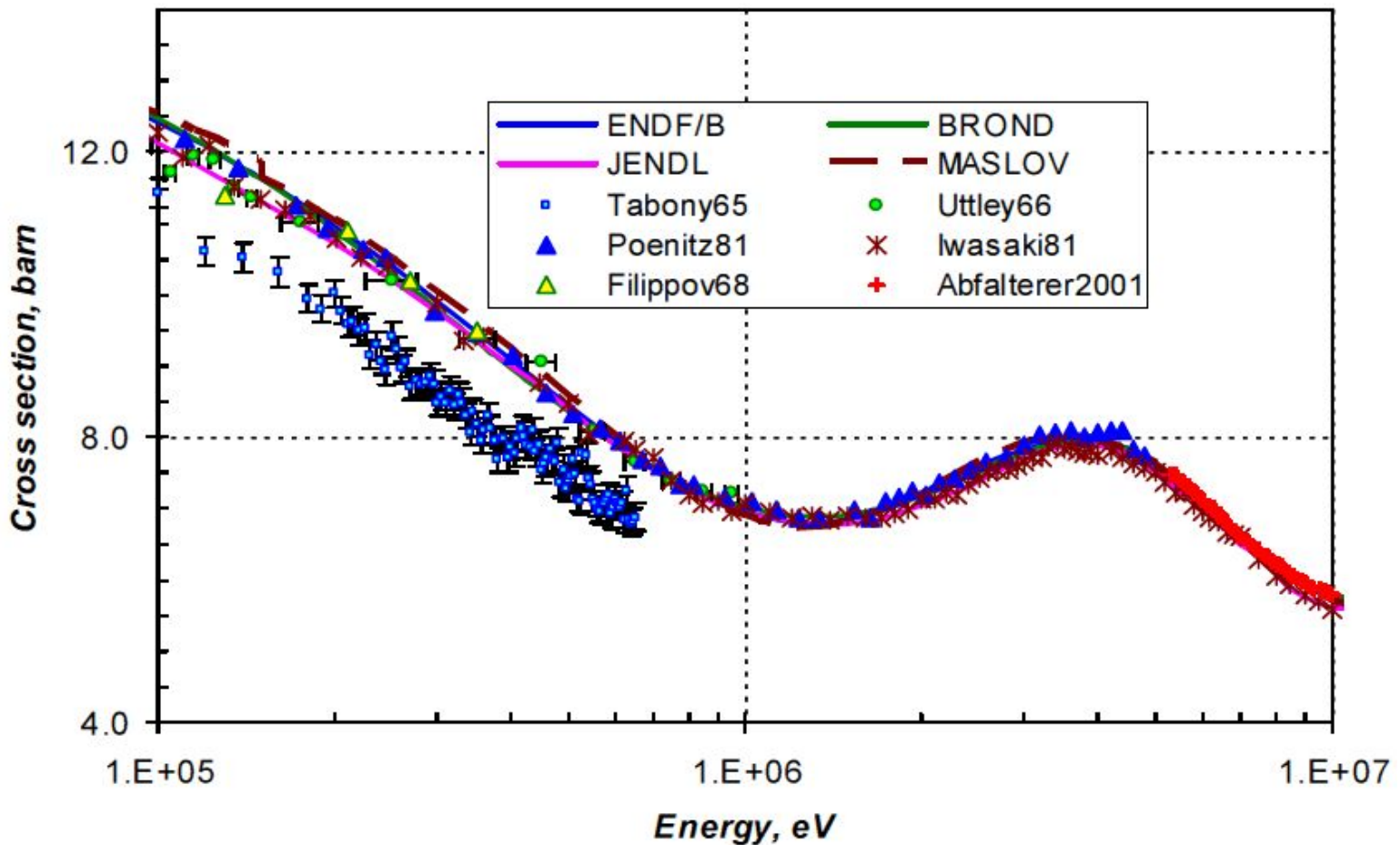


# Зависимость $\sigma_c$ для $^{232}\text{Th}$ от энергии в области от 100 кэВ до 10 МэВ



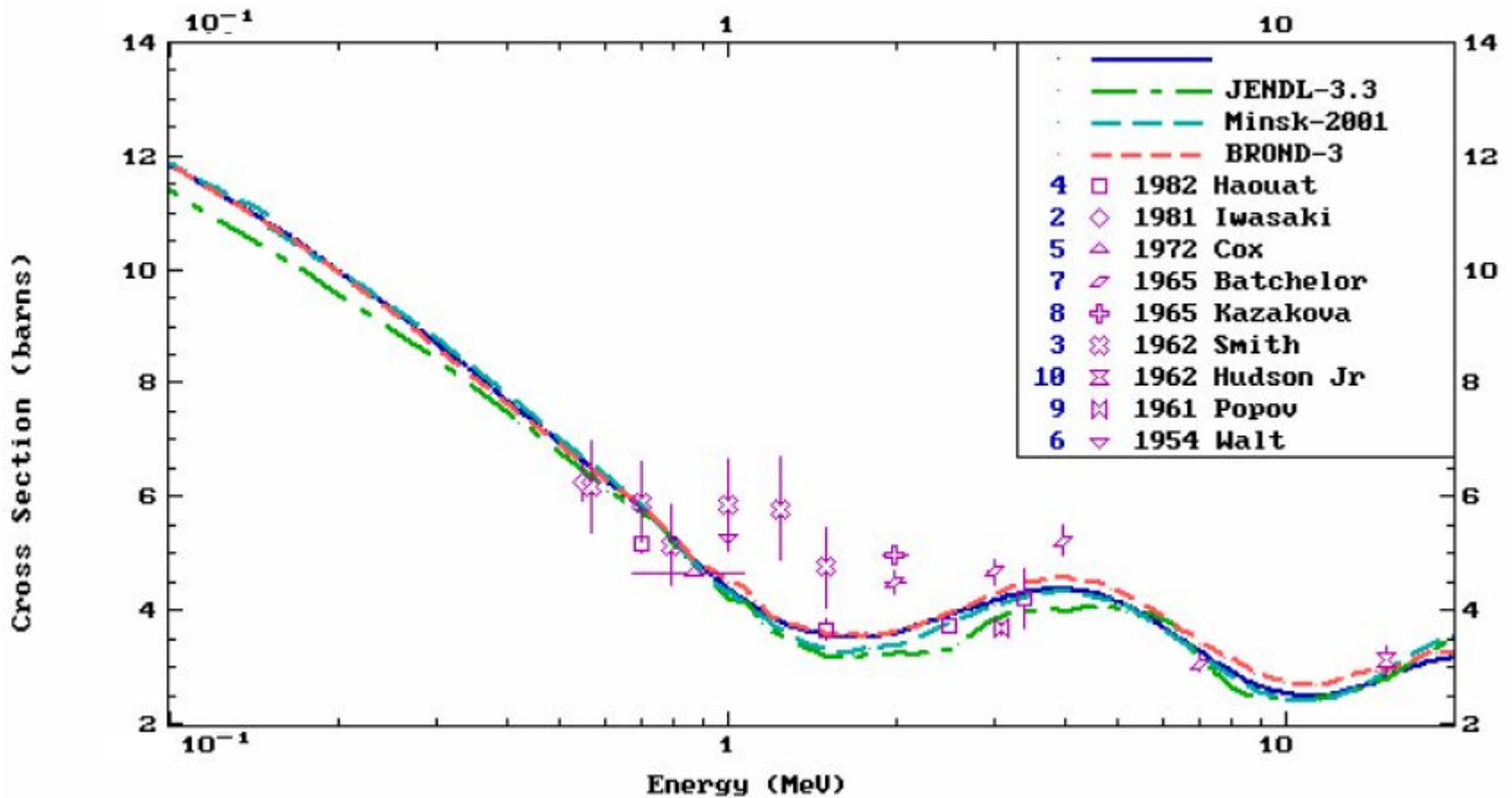


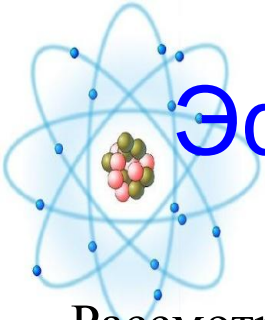
# Зависимость $\sigma_t$ для $^{232}\text{Th}$ от энергии в области от 100 кэВ до 10 МэВ





# Зависимость $\sigma_e$ для $^{232}\text{Th}$ от энергии в области от 100 кэВ до 10 МэВ





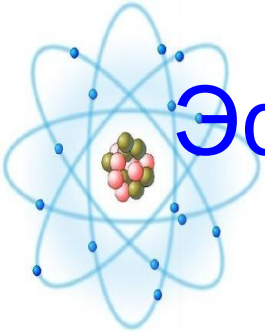
# Эффект Доплера при резонансном поглощении нейтронов

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.

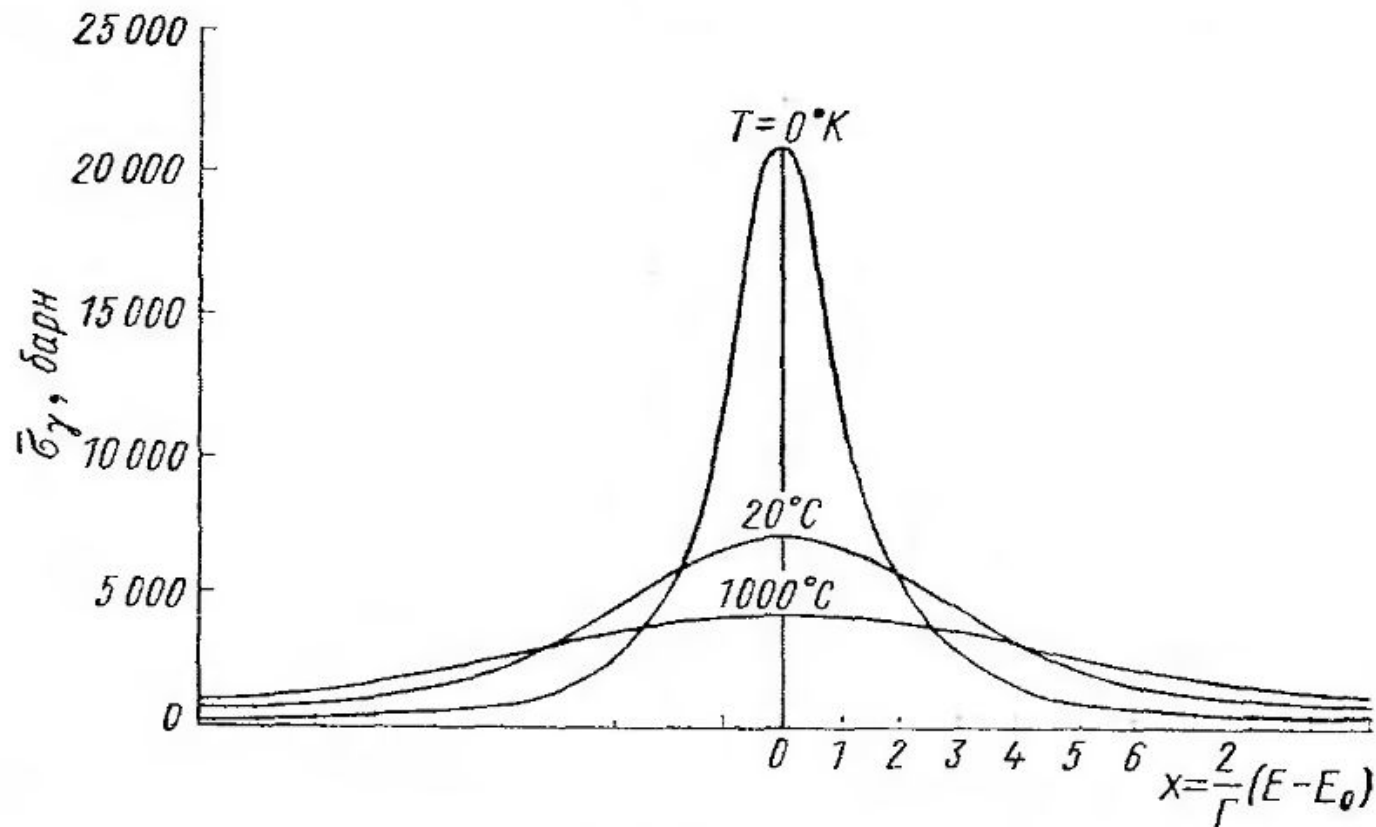
Изменение формы резонанса с ростом температуры обусловлено тем, что величина энергии в области резонанса определяются разностью скоростей ядра-мишени и нейтрона, т.е.

$$E \sim |v_n - v_{я}|^2$$

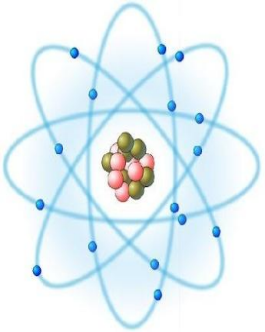
Если ядро покоится, то  $E$  – это энергия нейтрона. При более высоких температурах ядра будут в тепловом движении и их взаимная энергия получается путем усреднения тепловых движений ядер. Это приводит к эффекту Доплера, который состоит в уширении резонанса, как показано на рисунке.



# Эффект Доплера при резонансном поглощении нейтронов



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



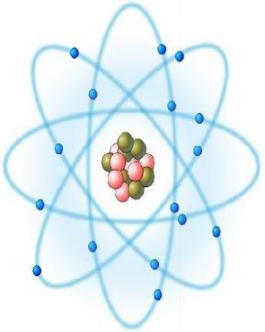
# Уширение резонанса

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.

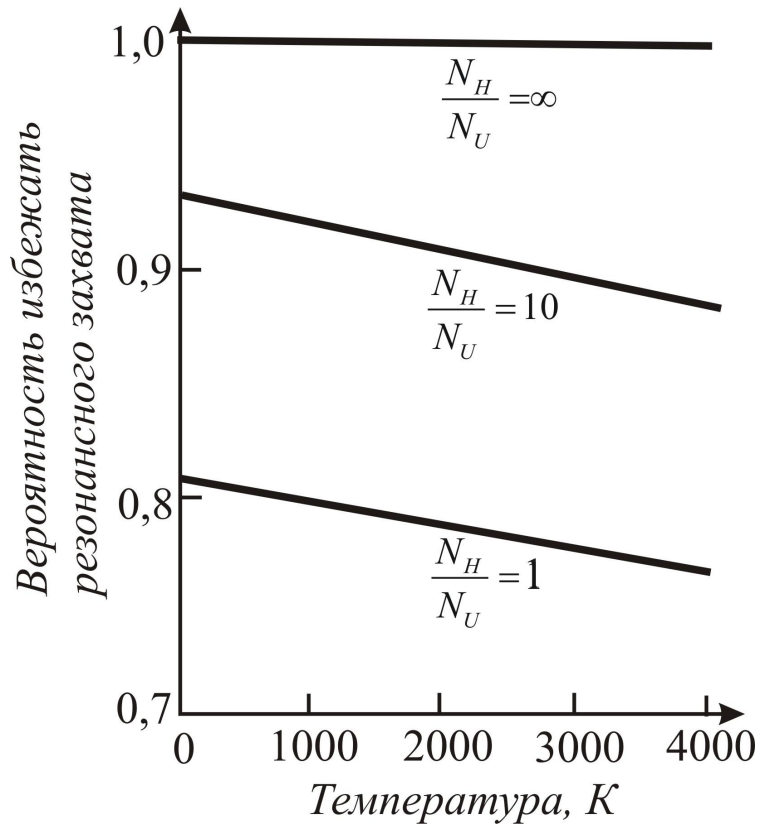
Поэтому, можно было бы предположить, что вероятность избежать резонансного захвата при этом не изменится.

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  $^{238}\text{U}$  с энергией 6,67 эВ от температуры при различных концентрациях  $^{238}\text{U}$  в бесконечном водородсодержащем замедлителе.