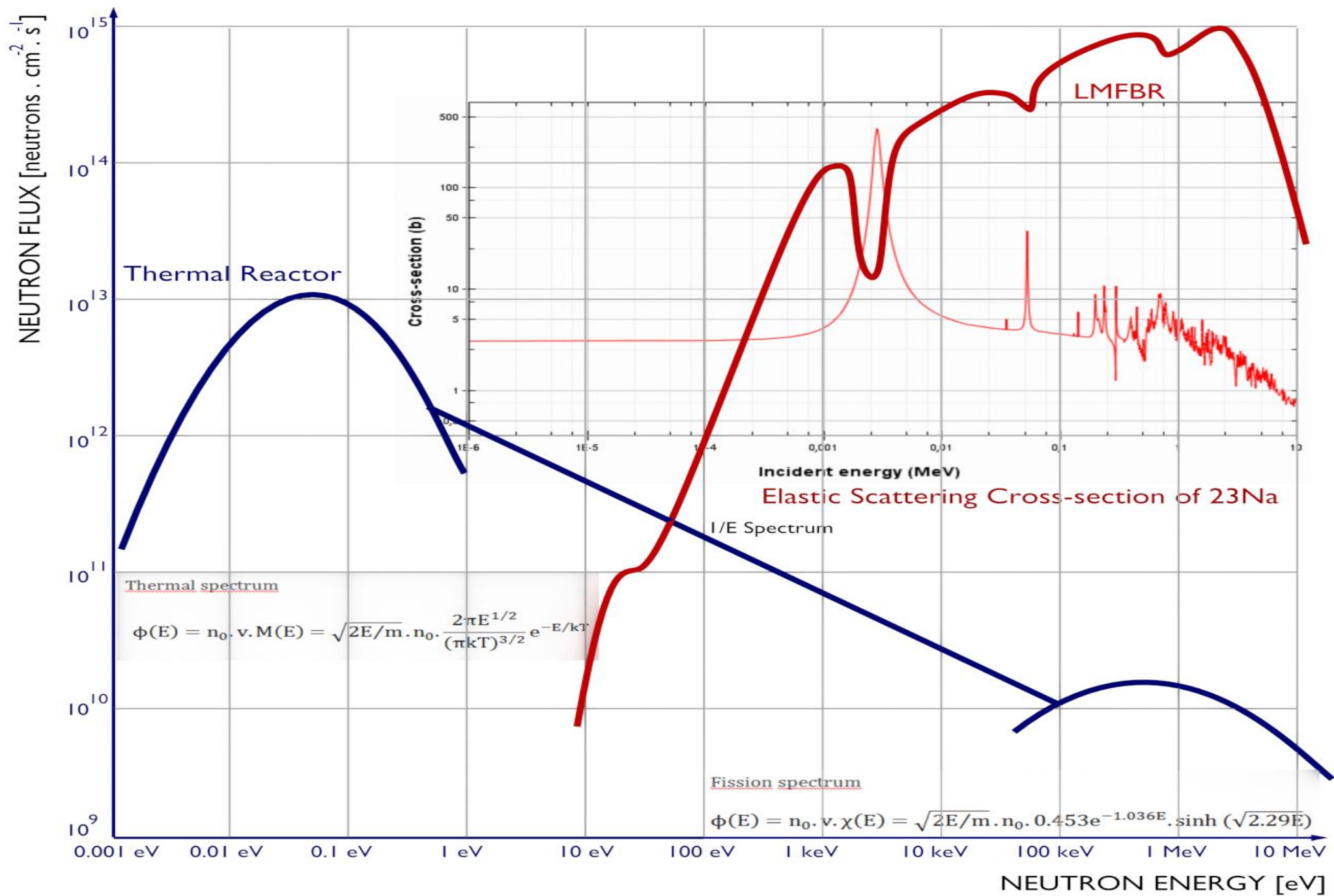


Спектр нейтронов в реакторе

- **Спектр нейтронов в реакторе** — функция, описывающая распределение нейтронов по энергии.
- **В тепловом реакторе выделяют три составляющие спектра:**
- **Быстрые нейтроны** или нейтроны деления (спектр Уатта). Основные характеристики: средняя энергия — приблизительно 2 МэВ, наиболее вероятная энергия — около 0,7 МэВ, условная граница быстрых нейтронов — 10–100 кэВ.
- **Промежуточные (резонансные) или замедляющиеся нейтроны** (спектр Ферми). При взаимодействии со средой быстрые нейтроны замедляются и переходят в эту условную энергетическую область промежуточных нейтронов.
- **Тепловые нейтроны**, находящиеся в термодинамическом равновесии со средой (спектр Максвелла). Как правило, 90–95% нейтронного потока составляют тепловые нейтроны.
- Спектр энергий нейтронов, образующихся при делении, значительно различается в зависимости от конструкции реактора. Например, реакторы с газовым охлаждением имеют значительно более жёсткие спектры нейтронов, чем нейтронные спектры в реакторах с натриевым охлаждением

- Базовая классификация ядерных реакторов основана на средней энергии нейтронов, которые вызывают основную массу делений в активной зоне реактора. С этой точки зрения ядерные реакторы делятся на следующие категории:
- Тепловые реакторы. Почти все современные реакторы, построенные на сегодняшний день, используют тепловые нейтроны для поддержания цепной реакции. Эти реакторы содержат замедлитель нейтронов, который замедляет деление нейтронов до тех пор, пока их кинетическая энергия не достигнет более или менее теплового равновесия с атомами ($E < 1$ эВ) в системе.
- Реакторы на быстрых нейтронах. Быстрые реакторы не содержат замедлителя нейтронов и используют менее замедляющие первичные охлаждающие жидкости, поскольку они используют быстрые нейтроны ($E > 1$ кэВ) для вызывания деления в своем топливе.
- Реакторы на промежуточных нейтронах



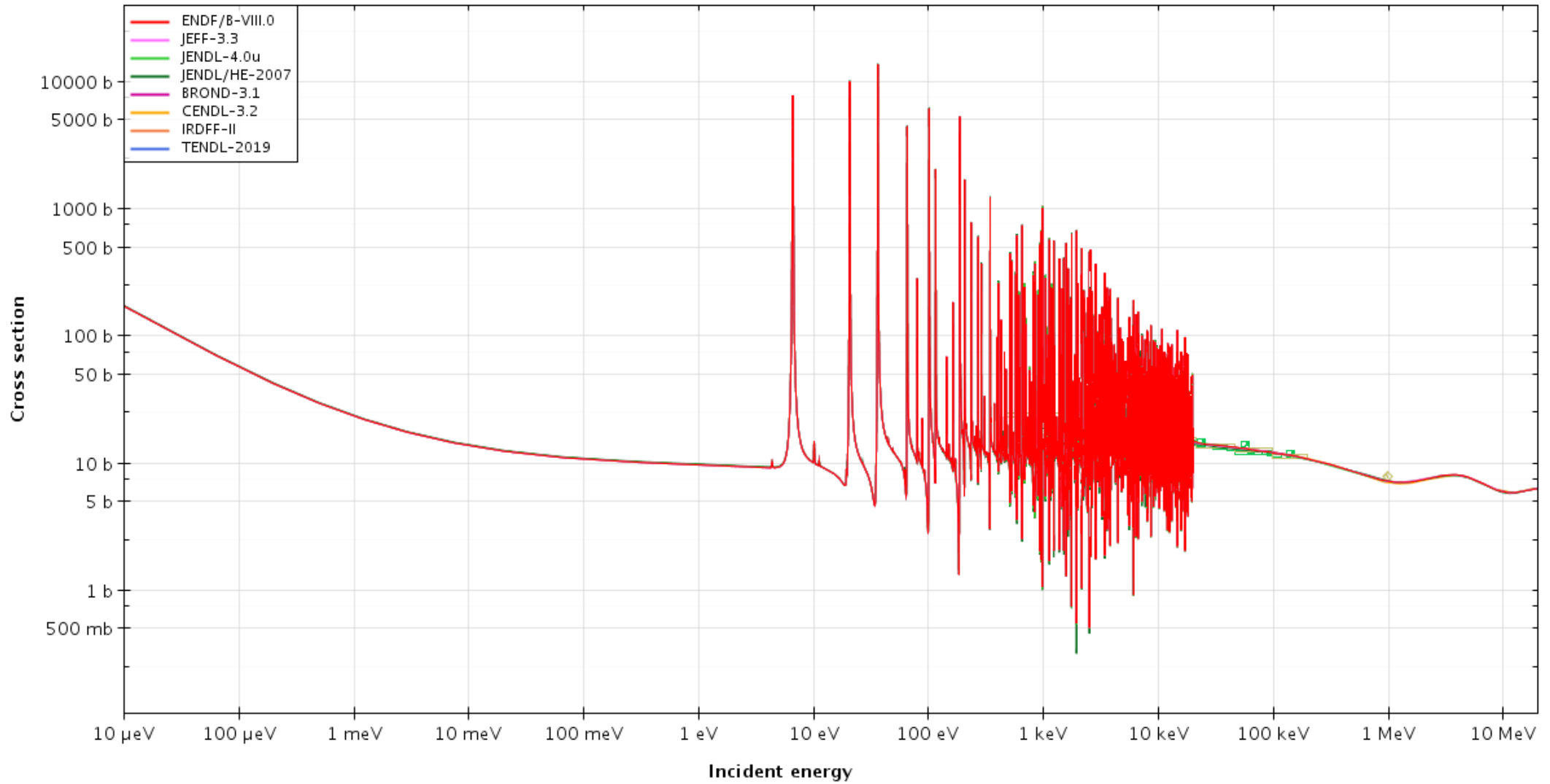
- При расчете ядерных реакторов необходимо знать как пространственное распределение нейтронов, так и энергетическое, особенно в области сильного поглощения нейтронов.
- **Спектром нейтронов** называют энергетическую зависимость плотности потока нейтронов.
- Основная трудность при решении этой задачи заключается в том, что реальные среды неоднородны и конечны.
- Это приводит к тому, что энергетический спектр нейтронов различен в разных областях среды;
- в функции плотности потока нейтронов $\Phi(r,E)$ переменные r и E **не разделяются**.

- **Метод группового описания нейтронного поля** – один из методов, упрощающих анализ замедления нейтронов в многокомпонентных средах.
- При использовании этого метода вся область энергий нейтронов – от энергий нейтронов источника (10.5 МэВ) до тепловой (10^{-3} эВ) делится на конечное число интервалов – **энергетических групп**.
- Обозначим через ΔE_i ширину энергетического интервала i -й группы, а через E_{1i} и E_{2i} – значения энергий нижней и верхней границ этой группы ($i = 1, 2, \dots, n$).
- Будем полагать, что первая группа ($i = 1$) – группа нейтронов с максимальной энергией, а группа $i = n$ – с минимальной.

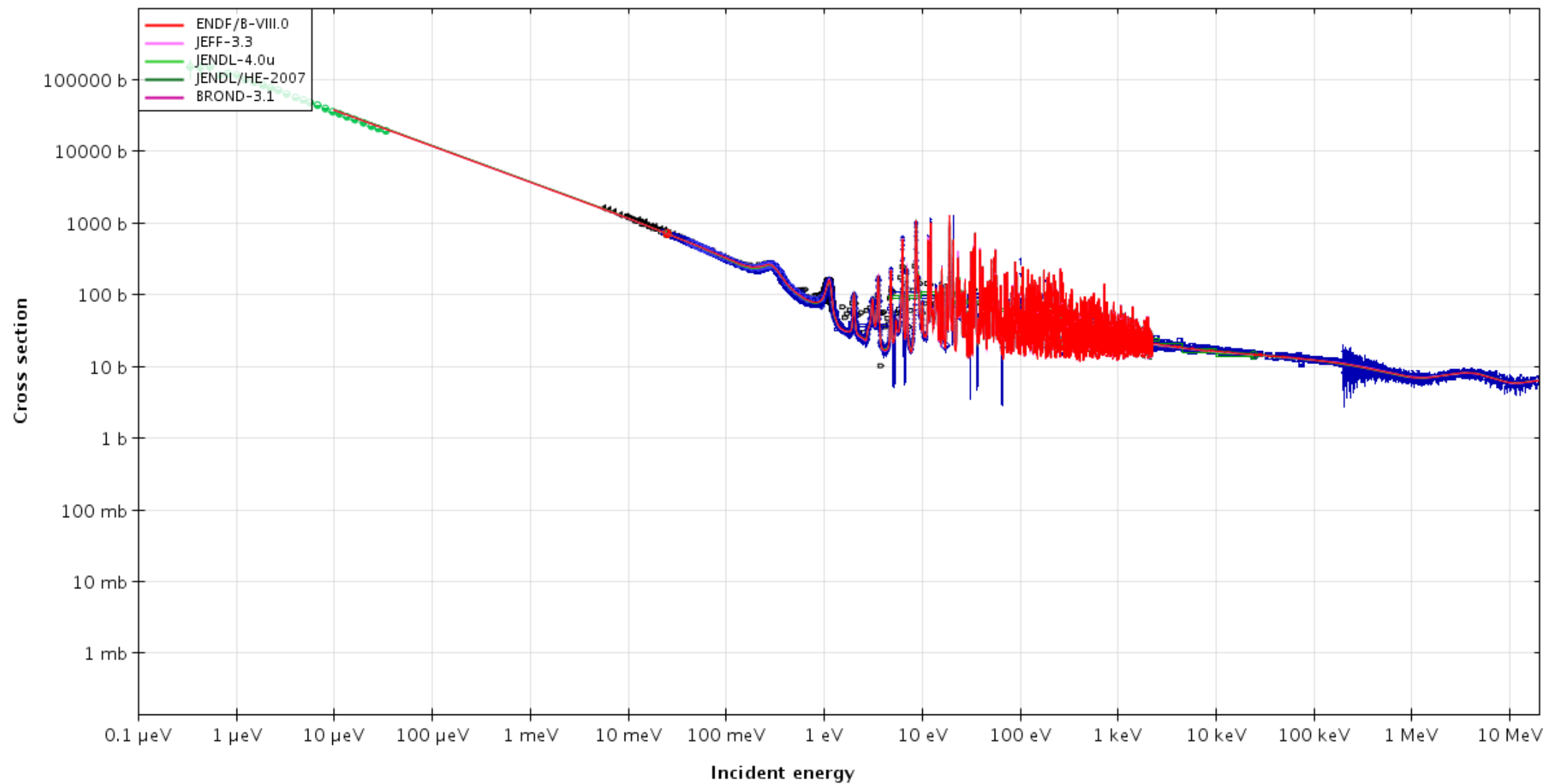
- Основное предположение метода групп заключается в том, что внутри каждой группы нейтроны диффундируют без потери энергии, пока не испытают среднего
- числа столкновений необходимого для уменьшения их энергии до значения, соответствующего энергии следующей, $(i + 1)$ -й, группы;
- в этот момент нейтроны скачком переходят в $(i + 1)$ -ю группу.
- Переходы продолжаются до тех пор, пока нейтроны не перейдут из группы с наивысшей энергией в группу с тепловой энергией.

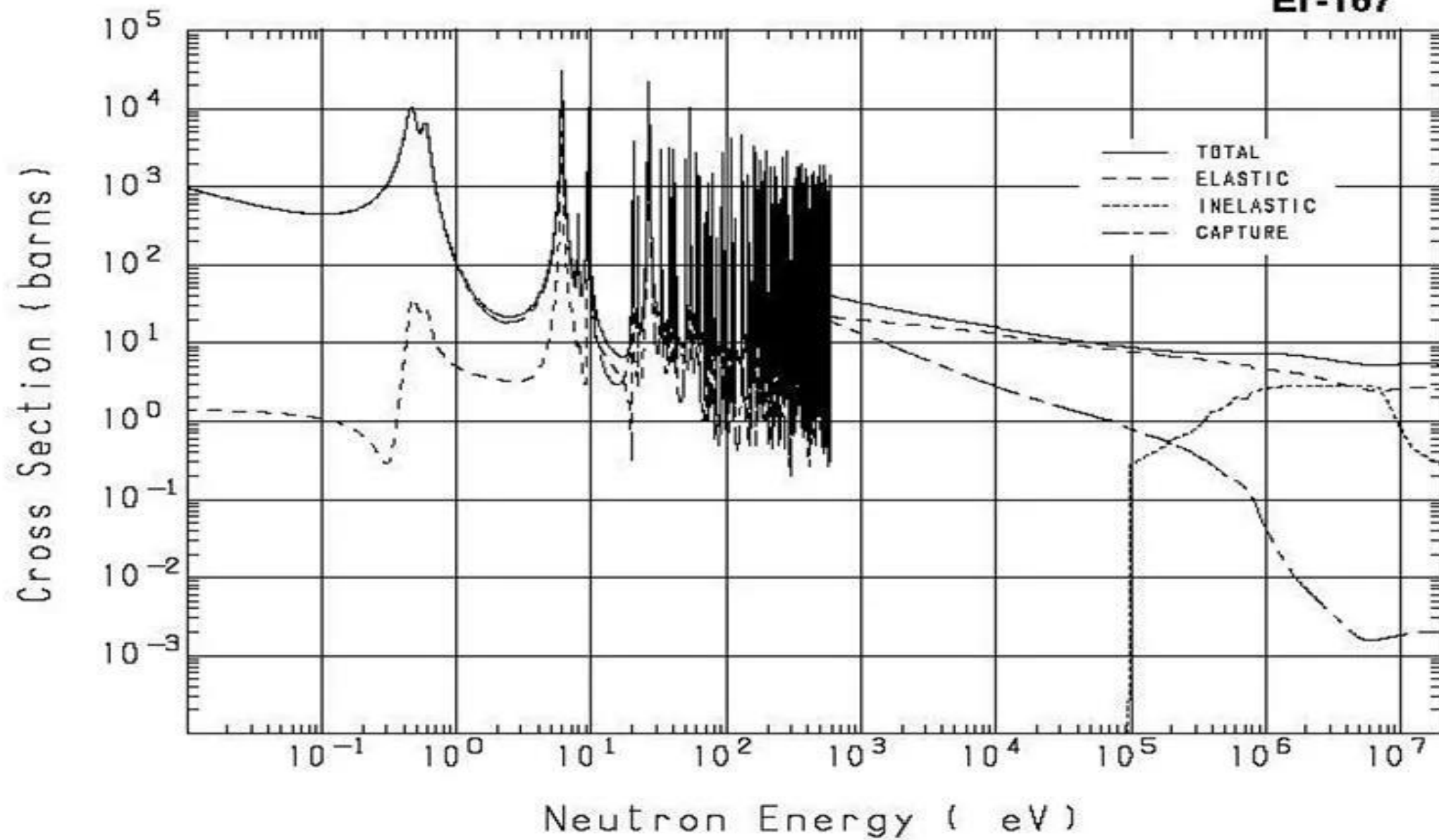
- Границы между областями достаточно **условны** и в некоторых случаях могут быть другими. Нижняя граница для части энергетического спектра быстрых нейтронов выбрана именно такой потому, что нейтроны с энергией 0,8 МэВ и выше способны вызвать реакцию деления [изотопа U-238](#).
- Верхняя граница для части энергетического спектра тепловых нейтронов обусловлена способностью нейтронов именно в этом диапазоне энергий вызывать реакцию деления изотопа [U-235](#).
- Нейтроны из промежуточного диапазона энергии часто называют [резонансными](#) из-за того, что сечения реакций взаимодействия нейтронов с веществом для части химических изотопов носят резонансный характер — гладкая зависимость сечений от энергии нейтрона нарушается одним или несколькими узкими пиками-резонансами.
- Имеется ряд изотопов, для которых сечение взаимодействия с нейтронами в области энергий от единиц до сотен [эВ](#) имеет столь часто расположенные резонансы, что они сливаются и физически неразделимы. В таких случаях эту часть спектра называют областью с **неразрешенными резонансами**.

U238 (n,total)

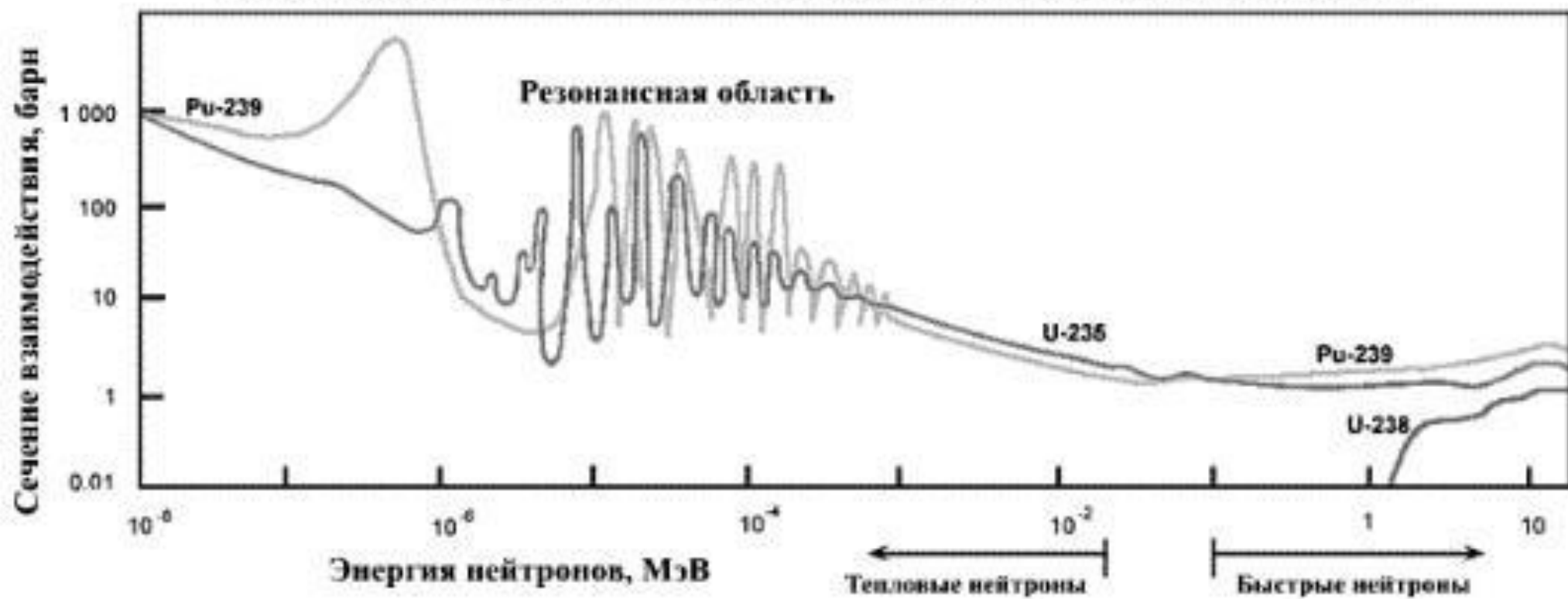


U235 (n,total)



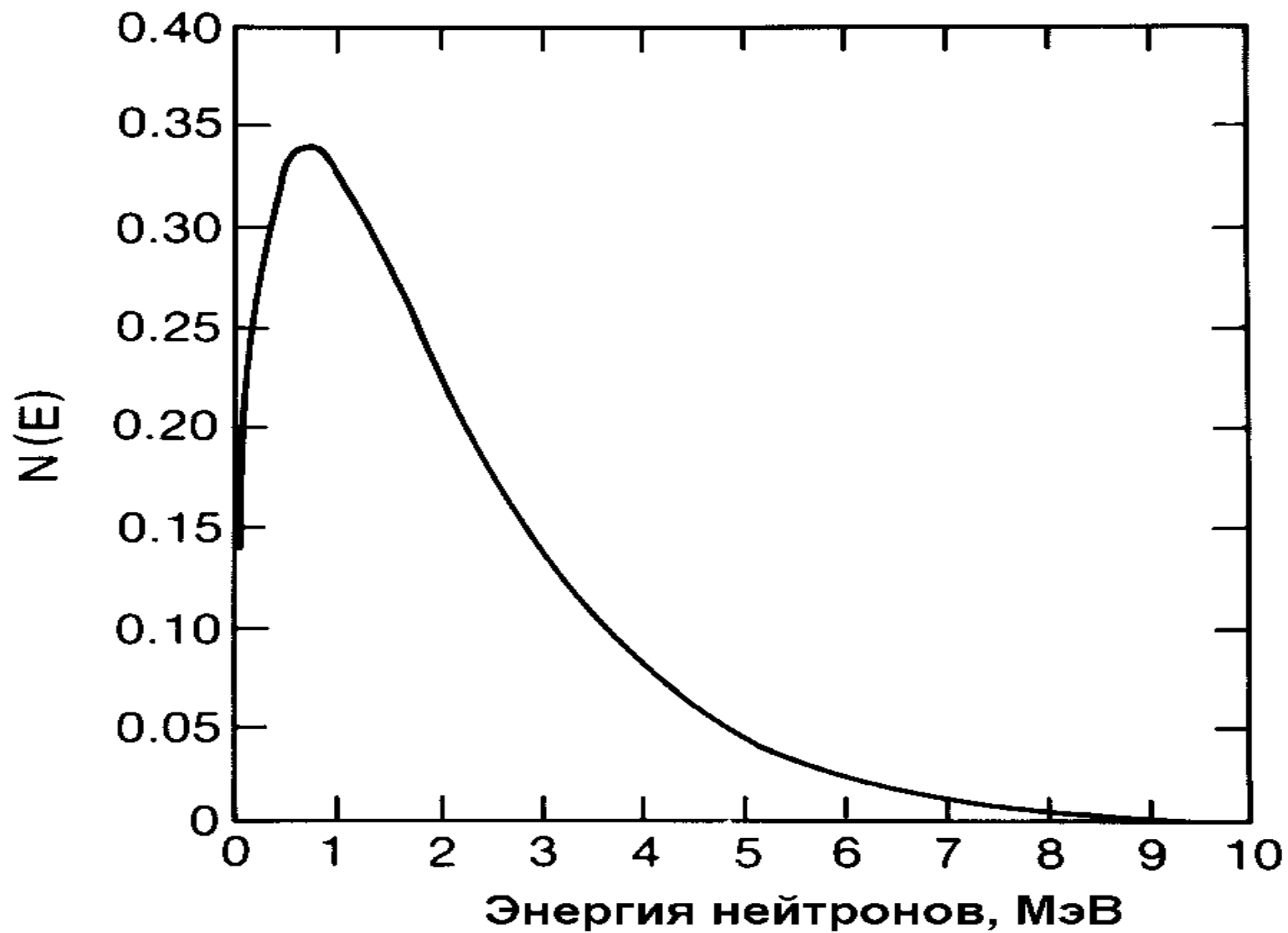
Er-167

СЕЧЕНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА И ПЛУТОНИЯ НЕЙТРОНАМИ



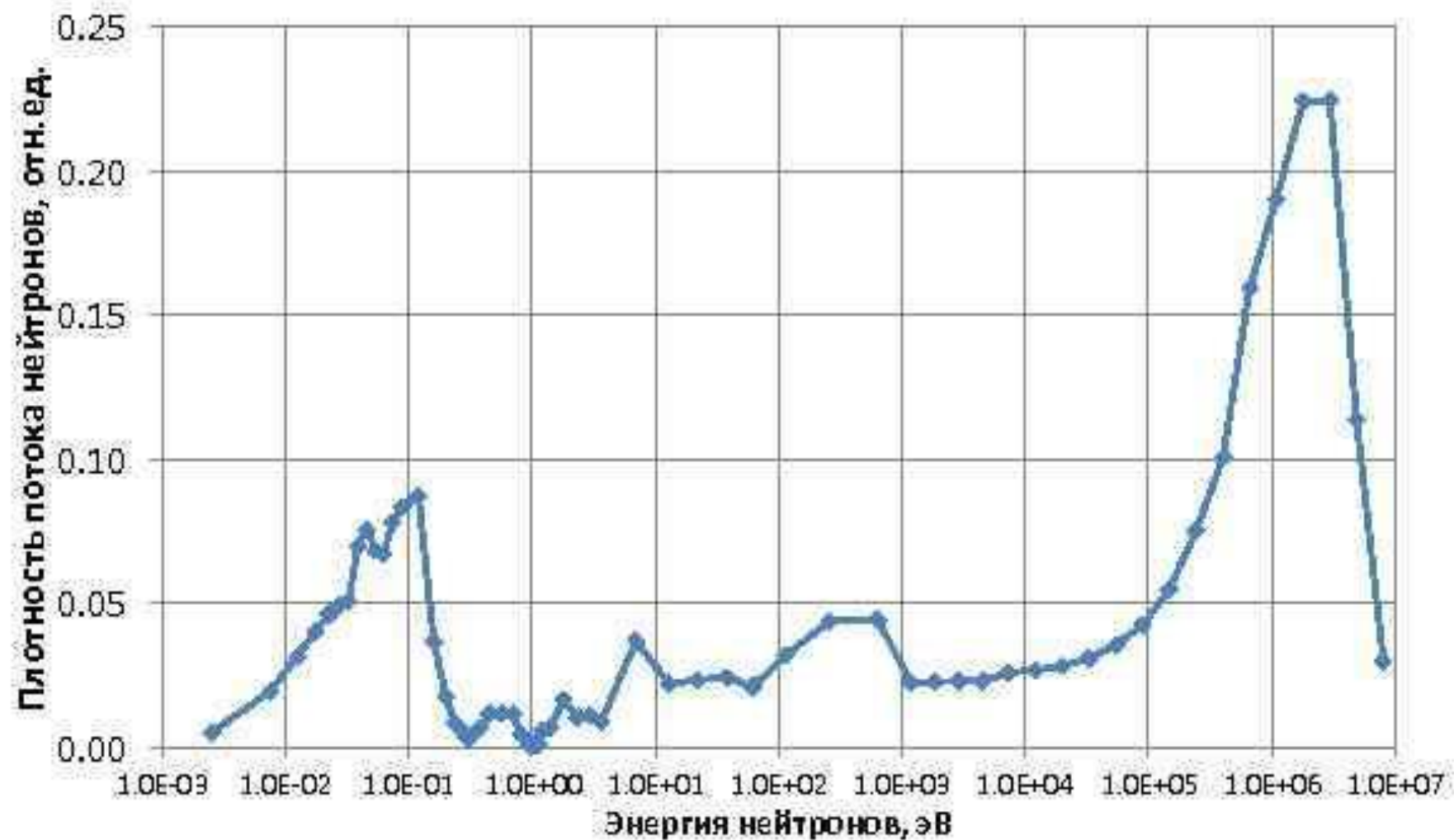
- Метод группового описания нейтронного поля – физико-математическое приближение, так как энергетический спектр нейтронов в реакторе занимает непрерывную область от тепловых энергий до 10 МэВ.
- Это обстоятельство учитывается путем определения для каждой группы средних значений эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами и коэффициентов диффузии в средах – так называемых *групповых постоянных (констант)*.
- Усреднение макроскопических сечений произвольного процесса типа j в i -й группе проводится так, чтобы скорости взаимодействия до и после усреднения оставались неизменными:

- Спектр нейтронов деления

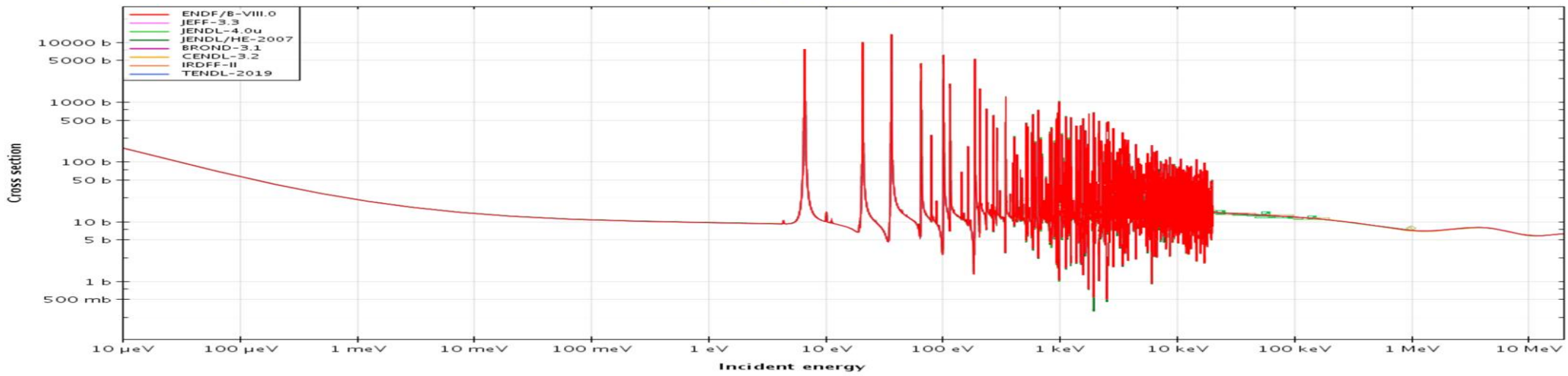


- Любой энергетический спектр в поглощающей среде ядерного реактора имеет динамически равновесный характер: плотность нейтронов любой энергии E поддерживается неизменной во времени в любом единичном объёме за счёт неизменной разницы скоростей:
- -прихода замедляющихся нейтронов на уровень энергии E из области более высоких энергий;
- -ухода замедляющихся нейтронов с уровня энергии E в область более низких энергий;
- -появления в единичном объёме новых нейтронов энергии E за счёт делений ядер (если таковые имеются в рассматриваемом единичном объёме);
- -поглощения нейтронов при энергии E (если в единичном объёме наличествуют поглотители) и
- -утечки нейтронов энергии E из единичного объёма (понимая под утечкой разницу скоростей ухода и прихода нейтронов с энергией E в этом единичном объёме).

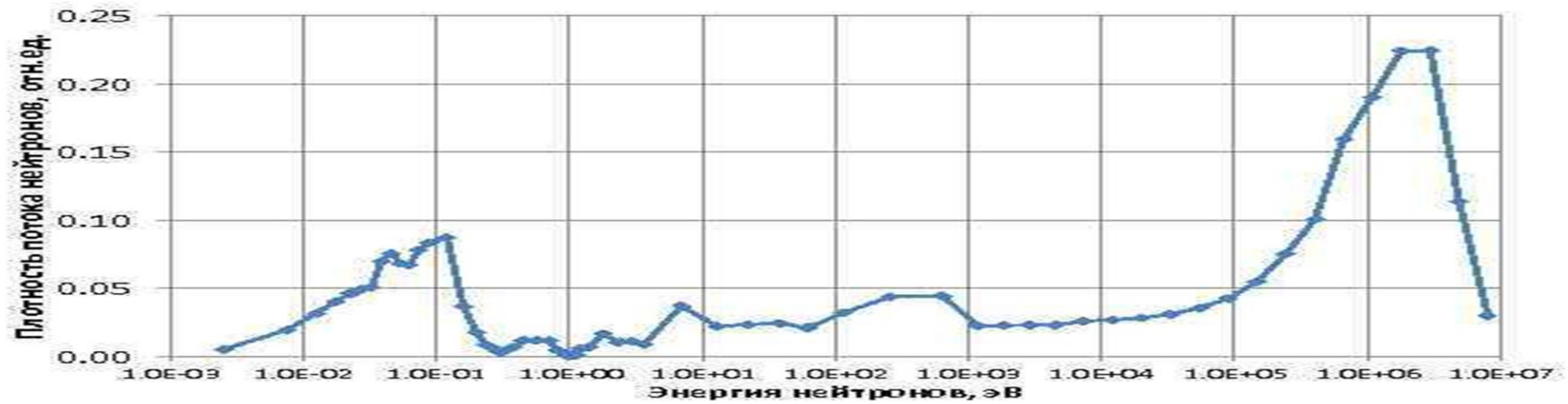
Спектр нейтронов в 69-ти групповом приближении

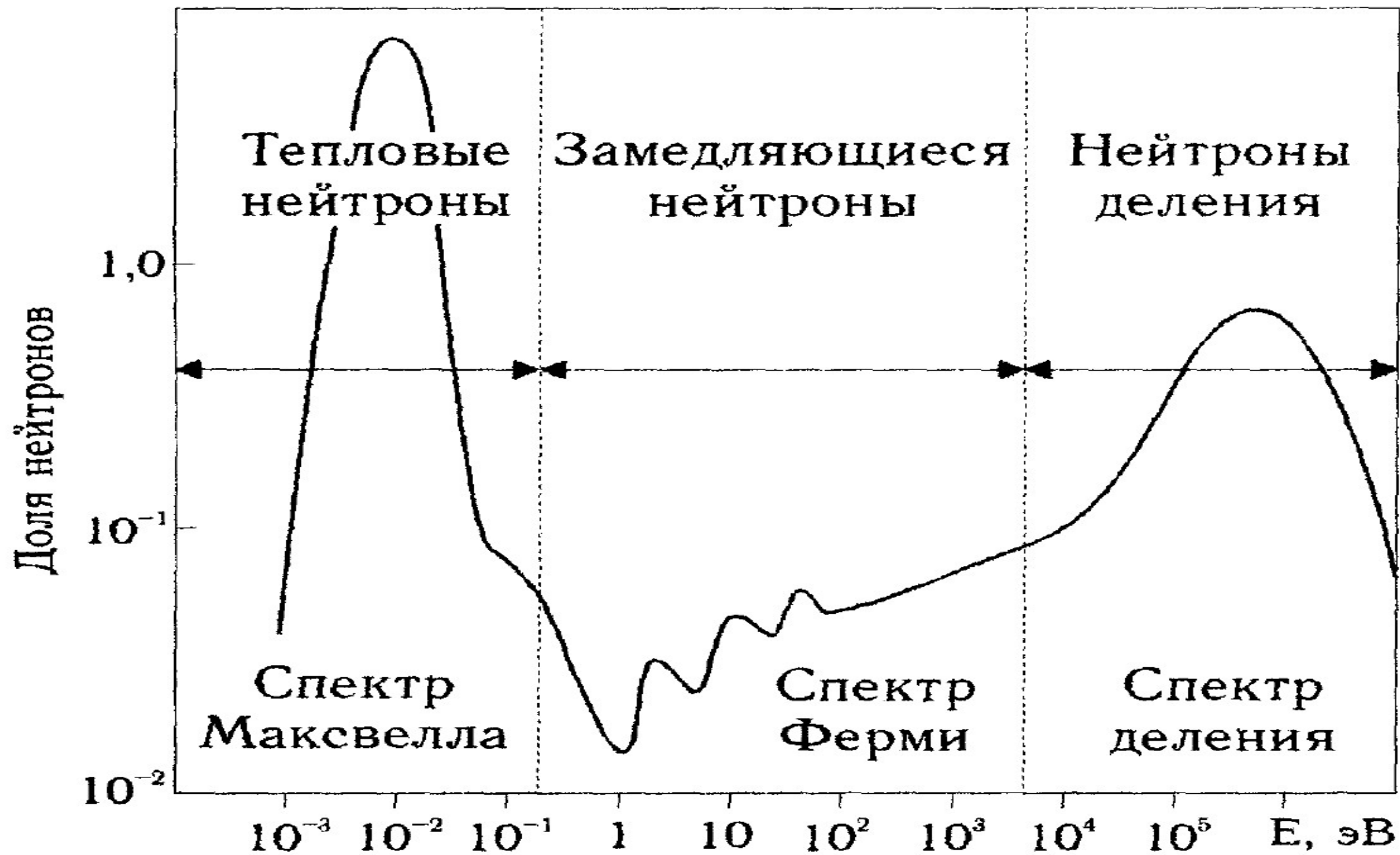


U238 (n,total)



Спектр нейтронов в 69-ти групповом приближении



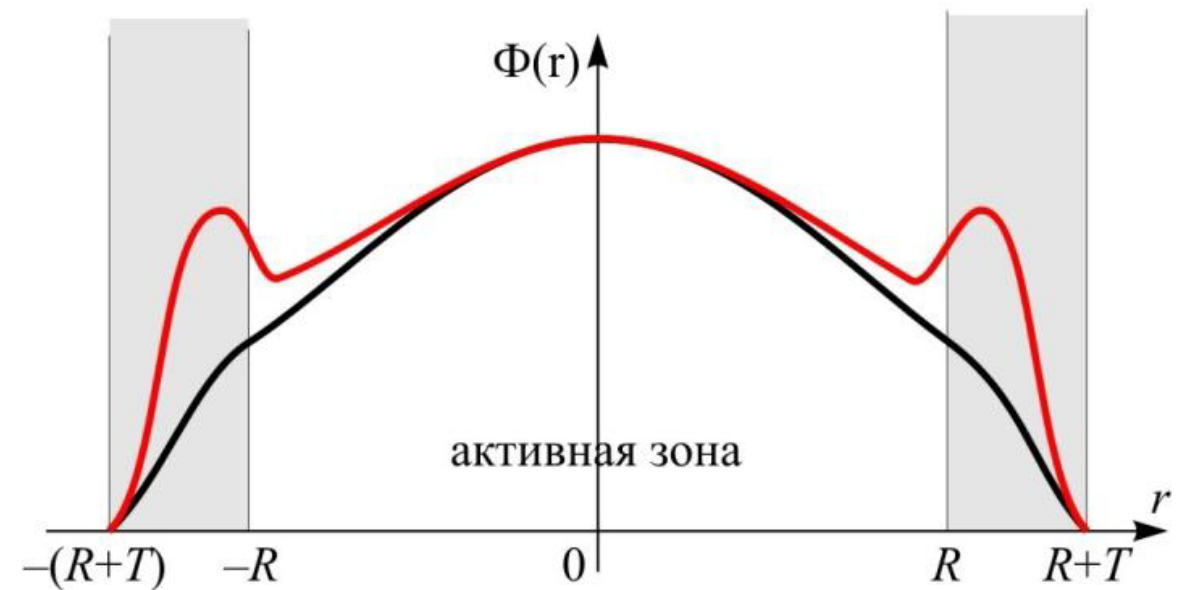


Метод многих групп

- До 60-х годов прошлого века для решения задач физики ядерных реакторов использовали одногрупповой метод. Предполагалось, что в реакторе присутствуют нейтроны только одной энергии, то есть эти нейтроны являются тепловыми.
- В качестве источника тепловых нейтронов рассматривались нейтроны, которые замедлились до тепловой энергии, избежав резонансное поглощение и утечку. Такой подход позволил получить ряд фундаментальных результатов физики реакторов, которые составляют ее основу.
- В том числе исследовали влияние отражателя на распределение нейтронного потока и на критичность реакторов различной формы. Считалось, что нейтроны с энергиями, отличными от тепловой не оказывают влияния на работу реактора и служат лишь источником тепловых нейтронов.

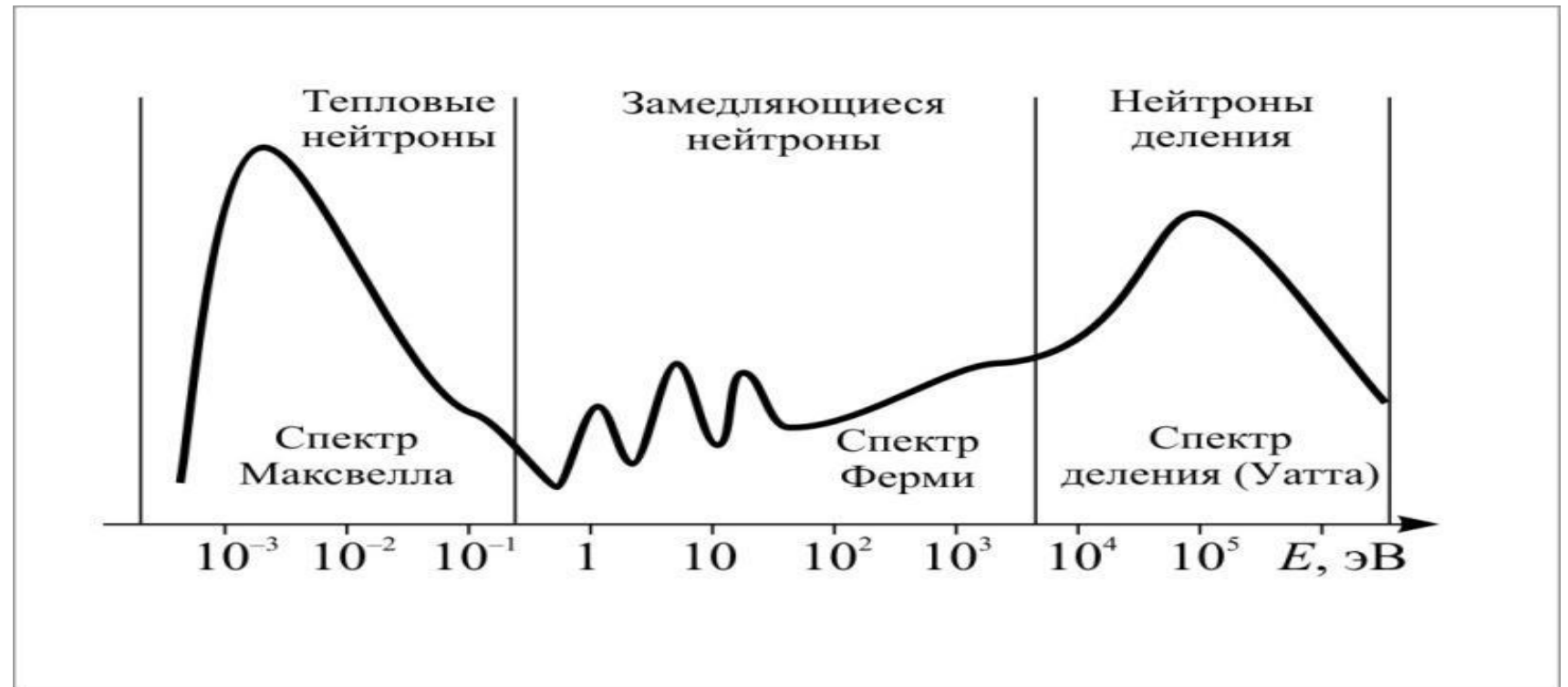
- При определении характеристик нейтронных полей в ЯР непрерывную зависимость спектра нейтронов заменяют кусочно постоянной.
- Такое приближение с большим количеством допущений является самым **первым, оценочным приближением**. Оно пригодно для **гомогенных реакторов больших размеров**.
- С уменьшением размеров активной зоны и ее повышенной гетерогенностью точность результатов значительно падает.

- Дифференциальное по пространству распределение нейтронного потока в реакторе с отражателем в одногрупповом приближении далеко от ситуации близкой к реальной картине.



Энергетическое распределение нейтронов

- Нейтроно-физические процессы в ядерном реакторе –это более **сложная и много факторная задача**. Присутствие в реакторе нейтронов с энергией, отличной от тепловой, существенно влияет на физические процессы в ядерном реакторе.
- Если рассмотреть энергетический спектр нейтронов в тепловом реакторе, то можно выделить три составляющие:



- 1. Энергетическое распределение нейтронов деления описывается уравнением Уатта:

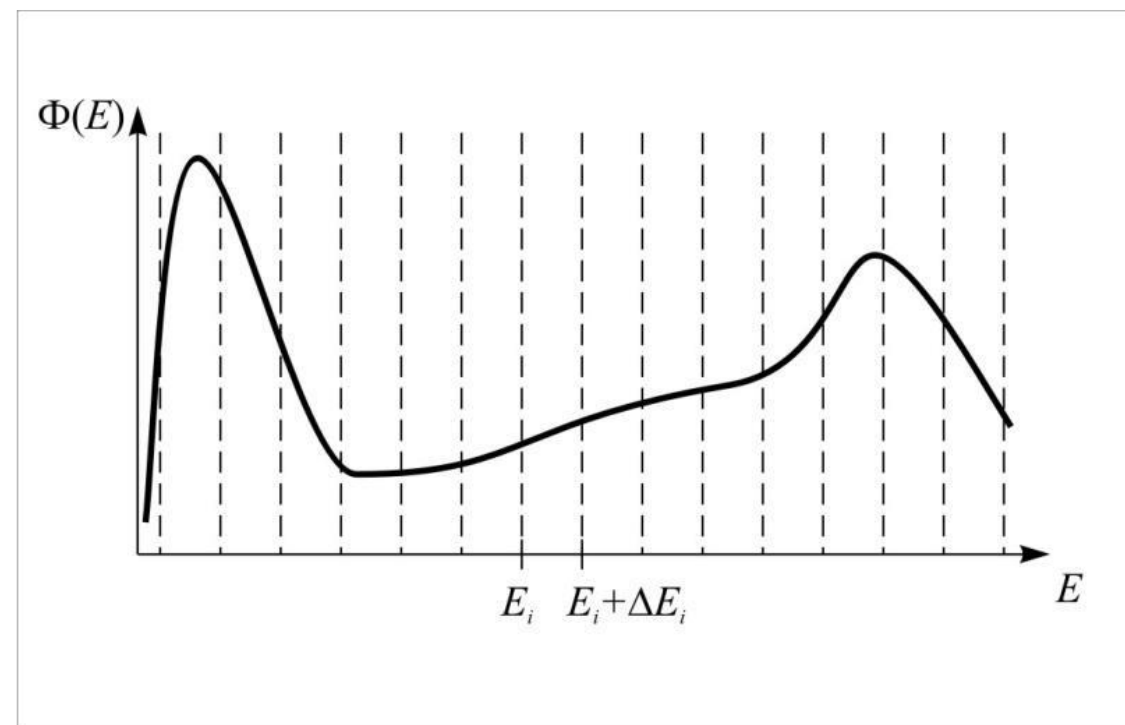
- $$n(E) = C \exp(-E) \operatorname{sh}(\sqrt{2} E)$$

- где $n(E)$ – доля нейтронов, имеющих энергию E ;
- C – константа, характеризующаяся типом делящегося нуклида.
- Основные характеристики спектра нейтронов деления:
 - средняя энергия – приблизительно **2 МэВ**;
 - наиболее вероятная энергия – около **0,7 МэВ**;
 - условная верхняя граница быстрых нейтронов – **0.5 – 10.5 МэВ**
 - условная нижняя граница быстрых нейтронов – **1 - 10 кэВ**.

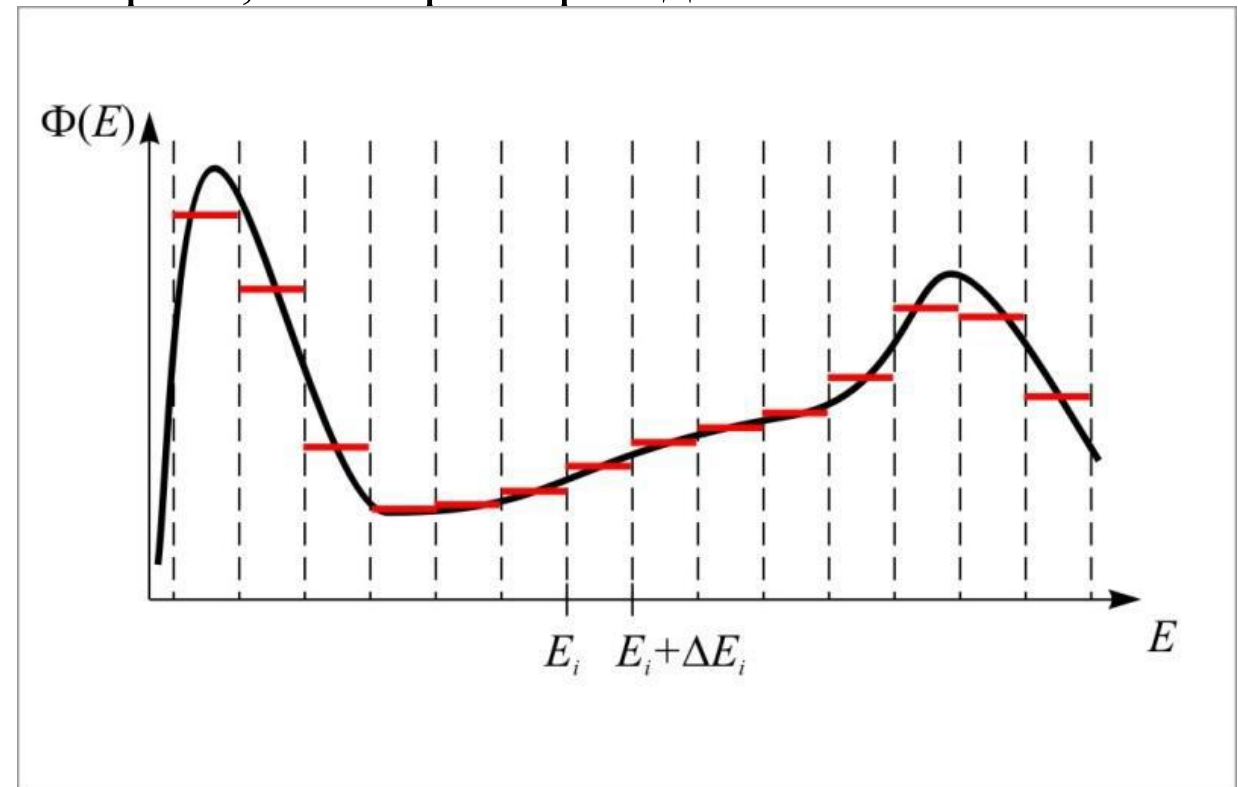
- 2. При взаимодействии со средой быстрые нейтроны замедляются с переходят в следующую условную энергетическую область промежуточных нейтронов
- Замедляющиеся нейтроны описываются спектром Ферми.
- При этом в области промежуточных энергий в энергетических зависимостях сечений нейтронных реакций наблюдаются области резкого повышения, которые называются **резонансами**.
- Поэтому спектр Ферми представляет собой не чистую обратно пропорциональную зависимость, а имеет более сложную резонансную структуру, особенно в области, прилегающей к тепловой группе.

- **3. Энергетическое распределение тепловых нейтронов описывается**
- спектром Максвелла $\Phi(E) \sim \exp(-E) / E$
- Максвелловское распределение имеет следующие характеристики:
 - • средняя энергия –
 - $\Phi(E) = 3/2 kT$
 - • наиболее вероятная энергия – $\Phi(E) = kT$
 - • в результате интенсивного поглощения и утечки тепловых нейтронов время жизни теплового нейтрона конечно и полное тепловое равновесие нейтронов со средой не устанавливается;
 - • реальный спектр тепловых нейтронов сдвинут от спектра атомов и молекул среды в сторону более высоких энергий.

- Деление реакторного спектра на группы (составляющие) является достаточно условным. Внутри каждой энергетической области энергетическая зависимость нейтронного потока $\Phi(r, E)$ достаточно сложна и ее определение является практически неразрешимой задачей.
- Здесь переменные r и E уже не разделяются, соответственно, определение нейтронных потоков и критических параметров не возможно, по крайней мере, в аналитическом виде.
- Рассмотрим некоторое энергетическое распределение потока нейтронов, характерное для теплового реактора.
- Будем выделять интервалы энергий от E_i до E_{i+1} так, чтобы получить непрерывное разбиение (в общем случае неравномерное) всего энергетического диапазона на группы.



- Будем полагать, что внутри каждой энергетической группы нейтронный поток является постоянным и определяется как среднее значение для данного энергетического интервала.
- После того как нейтроны испытают достаточное число взаимодействий их энергия изменится **дискретно (мгновенно скачком)** и нейтрон перейдет в более низкую группу. Переход нейтрона происходит не обязательно в соседнюю группу. Он может попасть в любой лежащий ниже диапазон энергий, что характерно для легких замедлителей.
- При этом внутри каждой группы нейтроны рассеиваются без потерь энергии.
- Такие переходы продолжаются до тех пор пока нейтрон не попадет в самую нижнюю тепловую группу.



Спектр нейтронов в 69-ти групповом приближении

