

Сечения реакции

1-31 04 05 Медицинская физика 4
Кафедра ядерной и
радиационной безопасности
МГЭИ им.А.Д.Сахарова БГУ
2020

Сечения реакции

- При прохождении через вещество частицы взаимодействуют с атомами, из которых оно состоит, т. е. с электронами и атомными ядрами (или нуклонами ядра). При столкновениях с атомными ядрами они могут выбивать из них заряженные частицы, которые ионизируют и возбуждают атомы среды.
- При этом следует рассматривать упругое и неупругое рассеяния.

Сечения реакций

- Когда сталкиваются две субатомные частицы (например, α -частица и ядро золота в опыте Резерфорда), между ними может произойти взаимодействие, а может и не произойти.
- В последнем случае частицы сохраняют неизменными все свои характеристики.
- Мы не можем предсказать результат столкновения двух конкретных частиц, а лишь вероятность того или иного исхода столкновения.
- Таким образом, мы оперируем с вероятностями событий.
- Это вероятностное, а не строго определенное знание (или предсказание) того или иного события отличает физику микромира от физики классических объектов.

Сечения реакций

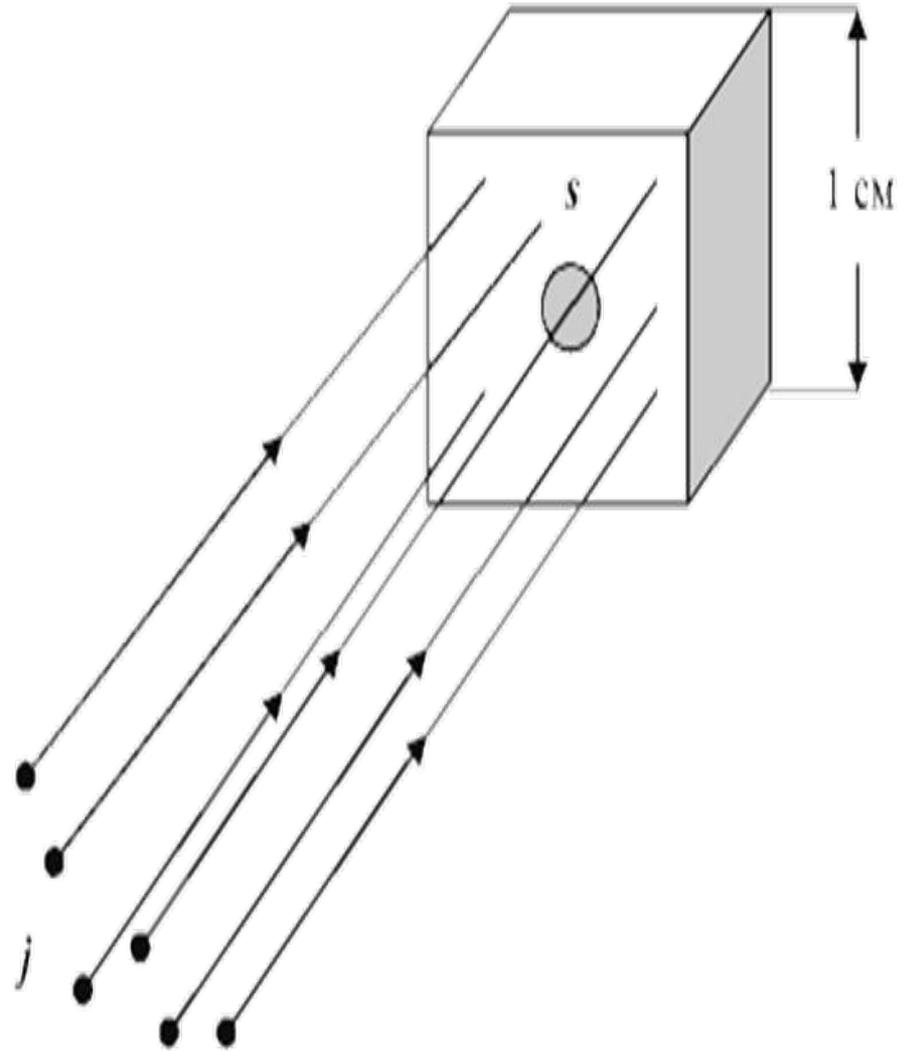
- Основной величиной, которой оперируют физики, исследующие столкновение микрообъектов, является **эффективное сечение** или просто **сечение** (более полное название **эффективное поперечное сечение**).
- Именно эта величина определяет вероятность того или иного результата столкновения.
- Результат опыта Резерфорда и, вообще, почти всех экспериментов по столкновению частиц выражается через эту величину. Определим её.
- Для этого вернемся к опыту Резерфорда.

Опыт Резерфорда

Пусть мишенью является ядро золота, расположенное внутри объема пространства кубической формы с длиной ребра 1 см (рис.).

На одну из граней этого кубика под углом 90° в единицу времени (1 с) падает j α -частиц

однородно распределенных в пространстве (j – не что иное как плотность потока α -частиц и имеет

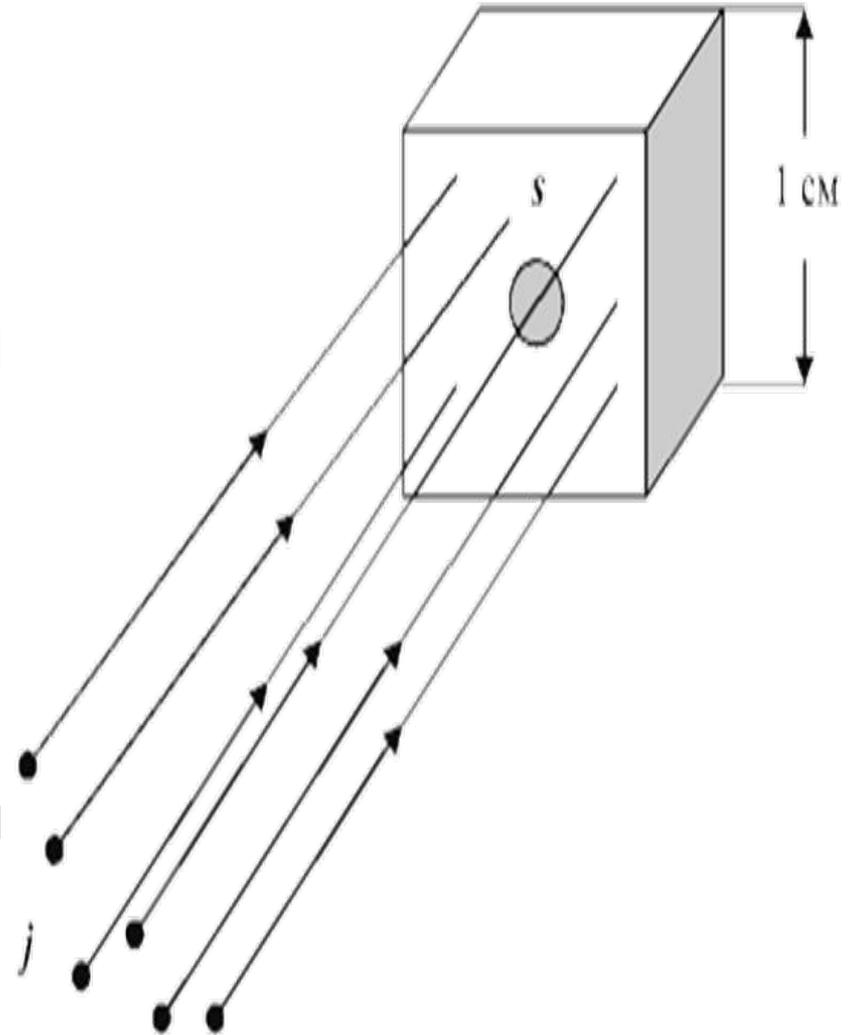


Опыт Резерфорда

Отметим, что других α -частиц помимо тех, которые бомбардируют кубик, нет.

В результате взаимодействия с ядром из каждых j частиц N изменит траекторию (рассеется).

Поэтому численно вероятность взаимодействия отдельной α -частицы с ядром золота равна N/j . Именно это отношение с учетом его размерности и называют эффективным сечением σ , т.



Опыт Резерфорда

- Происхождение словосочетания “поперечное эффективное сечение” можно пояснить следующим примером.
- При механическом соударении двух шаров, из которых один покоится внутри единичного кубического объема, а о другом известно лишь то, что он падает нормально на грань этого кубика и имеет размеры незначительные по сравнению с размерами покоящегося шара, вероятность соударения шаров численно равна площади поперечного сечения s покоящегося шара, т.е.

$$\sigma = s \quad (1)$$

Сечение реакции

Для взаимодействий, не являющихся механическими (контактными),

σ - эффективная площадь, характеризующая вероятность конкретного процесса.

Она может быть как больше геометрической площади (например, кулоновское взаимодействие), так и меньше неё (слабое взаимодействие).

Реальная мишень содержит не одно, а большое число ядер. В этом случае число N частиц, испытавших в единицу времени взаимодействие с ядрами и изменивших траекторию (рассеявшихся), при условии однократного взаимодействия каждой частицы (тонкая мишень) дается формулой

$$N = j n S \sigma = j M \sigma, \quad (2)$$

Сечение реакции

$$N = j n S l \sigma = j M \sigma, \quad (2)$$

где σ – уже определённое нами эффективное сечение рассеяния частицы ядром;

n – число ядер мишени в единице объёма (в см^{-3});

S – облучаемая площадь мишени (в см^2);

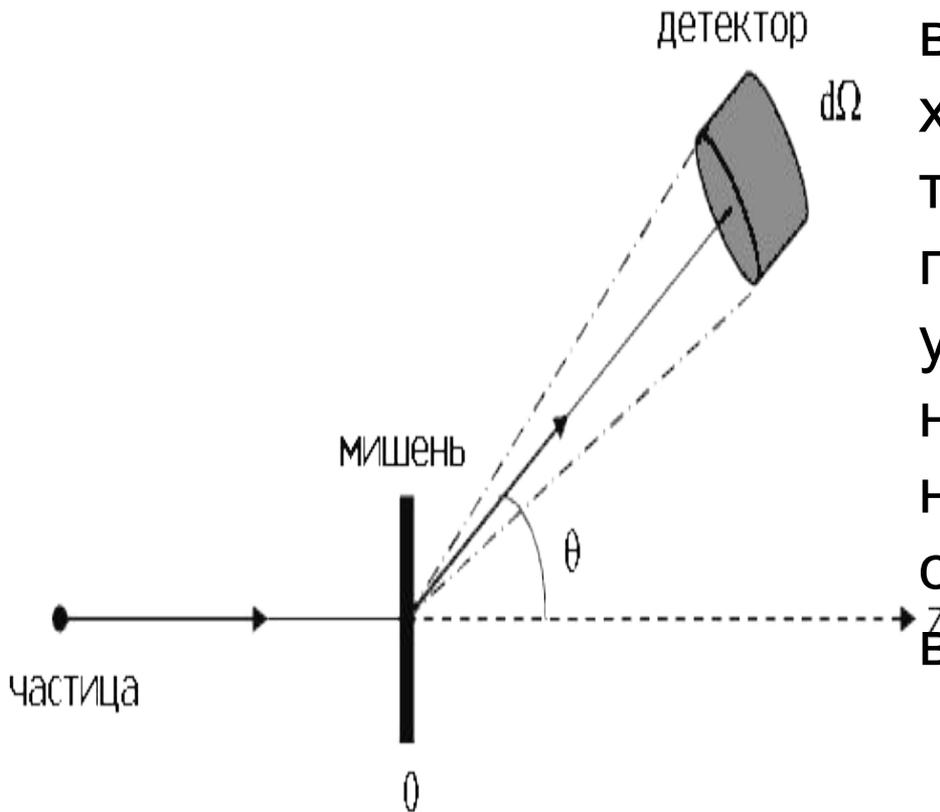
l – толщина мишени (в см);

M – полное число ядер в облучаемой части мишени

Сечение реакции

- Понятие σ используют как для характеристики вероятности реакции между частицами $a + b \rightarrow c + d$, так и для ядерной реакции
- $A + a \rightarrow B + b$,
- где A и B – начальное и конечное ядра,
- a – налетающая на ядро A частица,
- b – появившаяся в результате реакции частица (например, выбитый из ядра A протон).
- В этом случае N – число частиц b , вылетающих в единицу времени из мишени во всех направлениях.

К понятию “дифференциальное сечение” $d\sigma/d\Omega$. Случай аксиальной симметрии

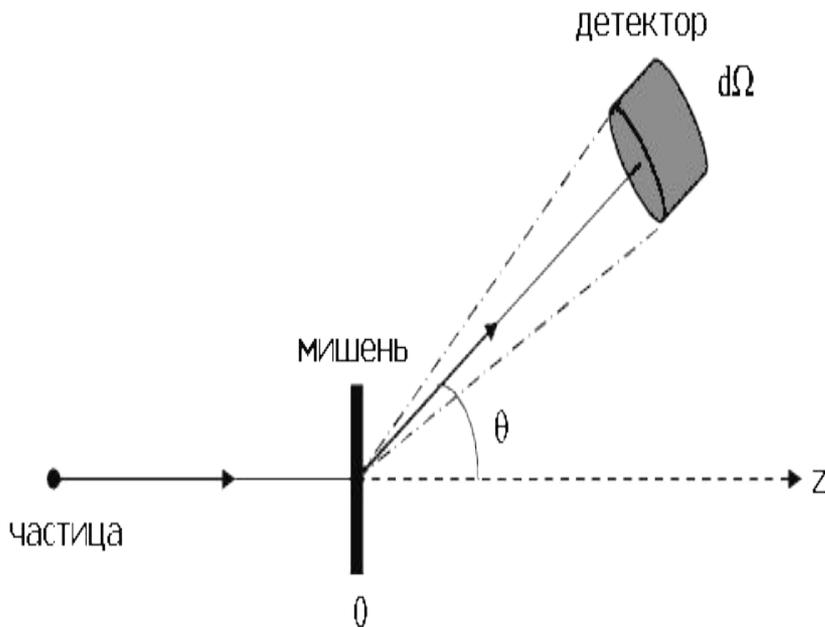


Если рассматривать частицы, вылетающие в направлении, характеризуемом углами и в телесный угол $d\Omega$ (θ и φ – полярный и азимутальный углы, а ось z совпадает с направлением движения налетающей частицы), то соотношение (2) записывается в виде

$$dN(\theta, \varphi) = j M d\sigma(\theta, \varphi) \quad (3)$$

где $dN(\theta, \varphi)$ – число частиц, вылетевших под углами θ и φ и внутри d , или

К понятию “дифференциальное сечение” $d\sigma/d\Omega$. Случай аксиальной симметрии



$$\frac{dN(\theta, \varphi)}{d\Omega} = jM \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega}. \quad (4)$$

Величина $d\sigma/d\Omega = \sigma(\theta, \varphi)$ называется дифференциальным сечением, в отличие от σ – полного сечения в случае аксиальной симметрии:

$$\sigma = \int_0^{4\pi} \frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega} d\Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \sigma(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta$$

Сечение реакции

В случае кулоновского рассеяния частицы с энергией E и зарядом Z_1 на тяжелом точечном рассеивающем центре с зарядом Z_2 дифференциальное сечение рассеяния имеет вид

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2} \quad (5)$$

Эта формула была использована Резерфордом для описания упругого рассеяния α -частиц на ядрах золота и называется формулой Резерфорда.

Сечение реакции

- Если, помимо углов вылета продуктов реакции, определять их энергию, то можно найти вероятность процесса, в котором какой-то из продуктов реакции летит под углами θ и φ внутри телесного угла $d\Omega$ и имеет при этом энергию от E до $E + dE$.
- Сечение данного процесса обозначают

$$\frac{d^2\sigma(\theta, \varphi, E)}{d\Omega dE}$$

- и называют дважды дифференциальным.

Сечение реакции

- Очевидно, ещё большая детализация наших знаний о реакции требует использования понятий трижды, четырежды и т.д. дифференциальных сечений.

$$\frac{d^2\sigma(\theta, \varphi, E)}{d\Omega dE}$$

-
- Единица измерения полного сечения σ – 1 барн:
- 1 барн = 1 б = 10^{-24} см² = 100 Фм², что по порядку величины – поперечная площадь атомного ядра.

Дифференциальное эффективное сечение $d\sigma/d\Omega$ измеряют в барн/стерадиан.

Сечение реакции

- Эта величина с одной стороны имеет тот же физический смысл, что и в классической механике, то есть **эффективное сечение** — это площадь поперечного сечения такой области пространства около частицы-мишени, при пересечении которой бомбардирующей частицей-точкой со 100% вероятностью возникает взаимодействие, но при этом имеются существенные различия:

Сечение реакции

- ни в пределах объёма ядра, ни вблизи элементарной частицы нет такой области, при пересечении которой другой частицей обязательно произойдёт взаимодействие.
- Эффективное сечение просто даёт то число взаимодействий, которое в зависимости от его величины должно произойти.
- При этом в некоторых случаях даже при пересечении бомбардирующей частицей области эффективного сечения взаимодействия не происходит, тогда как в других случаях взаимодействие происходит, несмотря на пролёт частицы за пределами области эффективного сечения.

Сечение

- эффективные ~~реакции~~ сечения определяются не столько геометрическими размерами сложных микрочастиц или радиусами действия сил, сколько волновыми свойствами частиц.
- При возникновении связанных состояний область пространства, занятая взаимодействующей частицей, имеет радиус порядка дебройлевской длины волны λ , а следовательно, сечение порядка $\pi \lambda^2$.

Сечение

- Поскольку **реакции** обратно пропорциональна скорости, сечение возрастает при убывании энергии.
- Однако связанные состояния образуются при строгих энергетических соотношениях, и отвечающие им сечения наблюдаются только при избранных значениях энергии, что приводит к очень сложной картине поведения сечений как функции энергии.

Единицы измерения

- В СИ – м^2 .
- В СГС – см^2 .
- Внесистемная единица – барн (б)
 $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$.
- Используется также $\text{фм}^2 = 10^{-30} \text{ м}^2$.

Макроскопическое сечение

- Макроскопическое сечение Σ_{ij} i -го процесса для j -го [нуклида](#) в среде можно определить как произведение i -го микроскопического сечения ядра этого нуклида σ_{ij} и ядерной плотности j -го нуклида N_j :

$$\Sigma_{ij} = N_j \sigma_{ij}$$

- То есть макроскопическое сечение представляет собой как бы сечение всех ядер в единице объёма вещества. Правда такая трактовка довольно условна, так как из выражения видно, что оно не является собственно сечением и измеряется в 1/м.
- При описании прохождения потоков [фотонов](#) через вещество эту величину также называют *линейным коэффициентом ослабления*.
- Используя представленное выше выражение эффективного сечения ядра для плоской мишени, можно дать другое определение макроскопического сечения:

- .

Макроскопическое сечение

- σ_{ij} — это число взаимодействий i -го типа в единицу времени в единице объёма j -го нуклида при единичном nv то есть Φ).
- То есть если макроскопическое сечение представляет собой произведение концентрации ядер на какое-то парциальное микроскопическое сечение, например сечение рассеяния или захвата, то оно тоже будет парциальным и выражать скорость конкретных процессов в единице вещества, например число случаев рассеяния или поглощения нейтронов.
- Ядерную плотность определяют по формуле:

$$N_j = N_A \rho_j / M_j,$$

где: N_A — число Авогадро,

M_j — атомная масса,

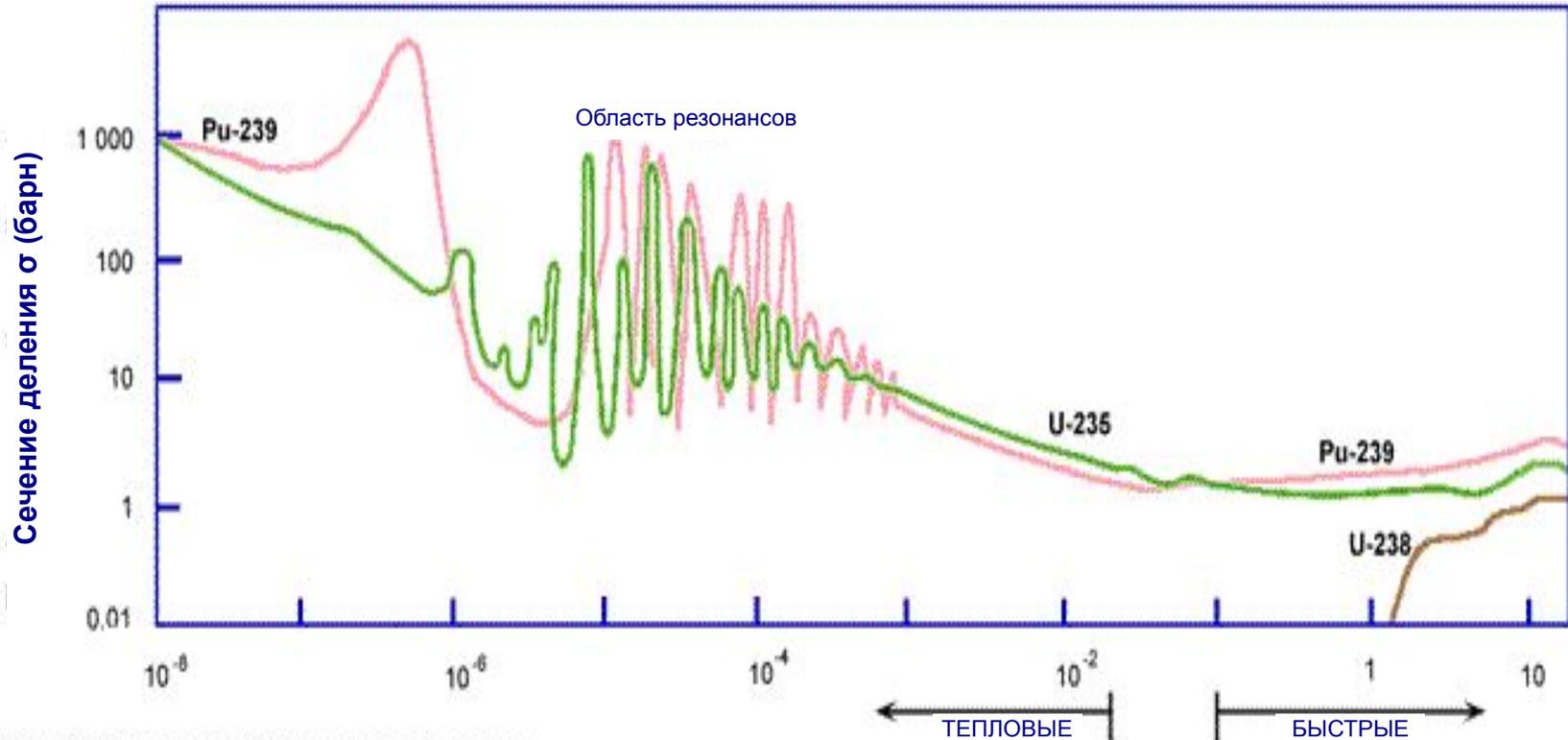
ρ_j — плотность вещества

Макроскопическое сечение

- Если вещество представляет собой гомогенную смесь различных ядер, то макроскопическое сечение смеси определяют как сумму макроскопических сечений веществ в смеси.
- При гетерогенном расположении материалов необходимо учитывать объёмную долю, занятую данным веществом ω_j . Тогда ядерные плотности каждого вещества N_{0j} домножают на эту величину:
- ω_j (сумма $\sum \omega_j = 1$)
- Необходимо отметить, что в случае гетерогенного расположения материалов сечение не всегда определяют как сумму сечений, так как различные материалы могут находиться в разных условиях

Зависимость сечений деления от энергии нейтронов

СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА И ПЛУТОНИЯ НЕЙТРОНАМИ



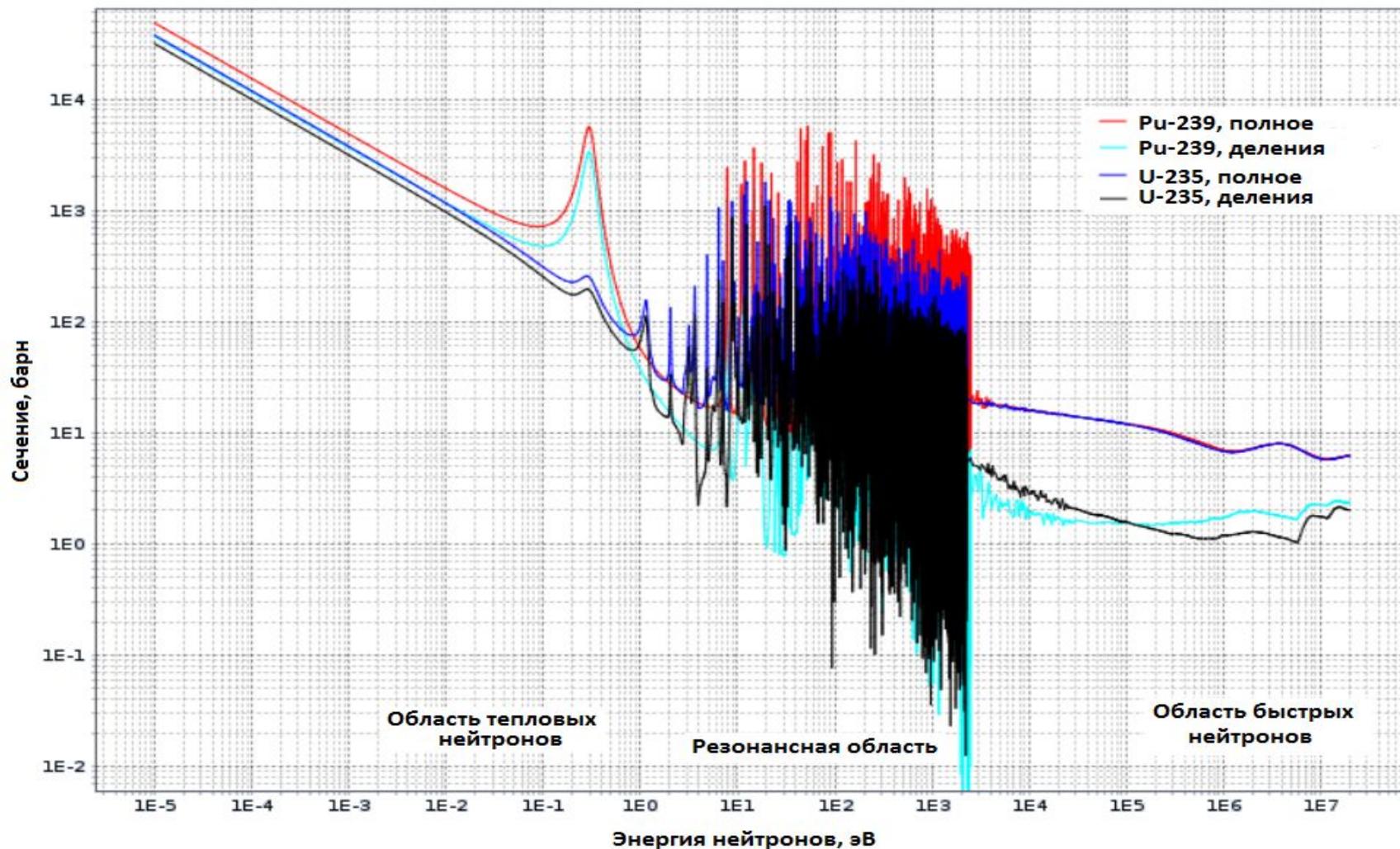
Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.

Taube 1974, Plutonium - a general survey.

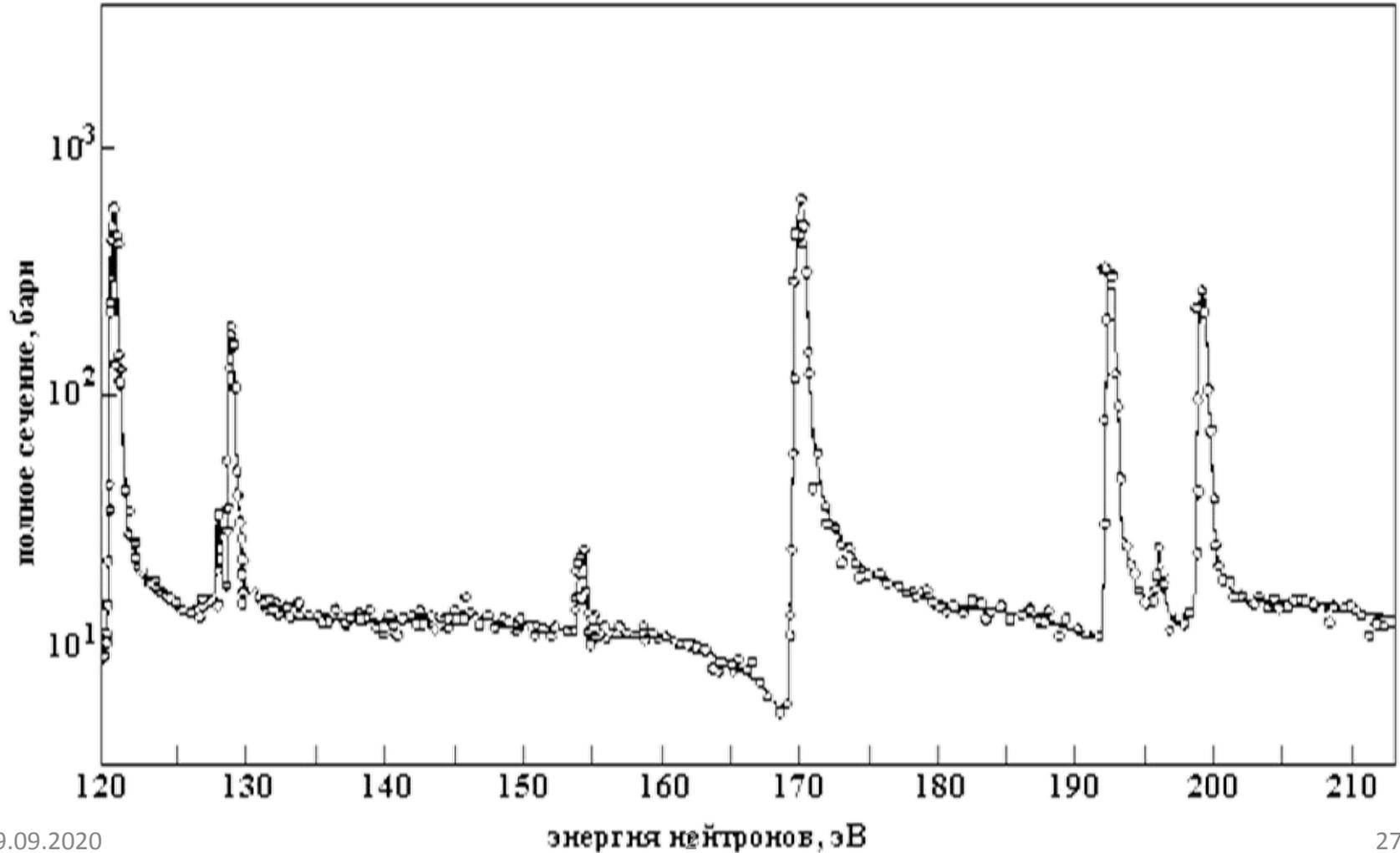
1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

Энергия падающих нейтронов (МэВ)

Сечение деления и полное сечение взаимодействия с нейтроном для ^{235}U и ^{239}Pu в зависимости от энергии нейтронов



Зависимость полного сечения реакции $n+^{232}\text{Th}$ от энергии нейтронов



Базы экспериментальных сечений и библиотеки оцененных ядерных

- [NEA — Nuclear Data Services — Evaluated Nuclear Data Library Descriptions](#)
- [ENDFPLOT: online graph plot for neutron cross section](#)
- ENDF-B
- BROND
- JEF
- JENDL

Боровская теория ядерных реакций. Сечение ядерной реакции, идущей через составное ядро

- Многие реакции взаимодействия ядер с нейтронами протекают по механизму, разработанному Н.Бором, и называются реакциями, идущими через составное ядро (compound nucleus).
- Этот механизм состоит в том, что нейтрон сначала захватывается ядром и превращает его в другой изотоп химического элемента, который может оказаться в возбужденном состоянии, либо претерпевать радиоактивные превращения.

Боровская теория ядерных реакций. Сечение ядерной реакции, идущей через составное ядро



- Энергия частицы a распределяется между всеми частицами ядра, либо значительной их частью - ядро как бы подогревается (Я.И. Френкель, СССР, 1936).
- Термодинамический подход к теории составного ядра был развит Х. Бете (Ch. Bethe) и В. Вайскопфом (W. Weiskopf) (США) и Л.Д. Ландау (СССР) в 1936 – 1937 гг. Резонансные реакции исследовались Г. Брейтом (G. Breit) и Ю. Вигнером (E. Wigner) в 1936 г.

Боровская теория ядерных реакций.

Сечение ядерной реакции, идущей через составное ядро

- Превращения составного ядра C могут происходить по разным каналам в зависимости от того, каким из частей ядра – одному или несколькими нуклонам в отдельности, или образованиям, таким, как альфа-частицы, дейтроны, тритоны и т.п. – передается избыточная энергия.
- Поэтому количество и тип частиц b и B в реакции, идущей через составное ядро, определены неоднозначно.

Радиационный захват

- Если энергия возбуждения составного ядра меньше энергии отделения от него какой-либо частицы, то происходит *радиационный захват* частицы a :



- Пример



- ${}^{236}\text{U}$ в основном состоянии альфа-активен и имеет период полураспада примерно 23,4 млн. лет

Другие каналы

- Другим каналом «распада» $^{236}\text{U}^*$ является его деление на осколки.
- Многообразие вариантов деления с испусканием различного количества мгновенных нейтронов (от 0 до 8) приводит к тому, что у реакции деления ядер нейтронами появляется множество каналов.
- **И всегда еще присутствует канал упругого рассеяния.**
- В зависимости от энергии нейтронов и свойств ядра одним из каналов может быть и неупругое рассеяние.

Вероятность протекания реакции

- Каждый канал превращения составного ядра, находящегося в возбужденном состоянии, характеризуется своей вероятностью w_b . Сумма таких вероятностей по всем каналам превращения составного ядра равна 1:

$$\sum_b w_b = w_a + w_b + w_{b'} + \dots = 1$$

Вероятность протекания

реакции

- Если обозначить σ_{aC} сечение образования составного ядра C , то сечение σ_{ab} реакции по каналу b представится в виде

$$\sigma_{ab} = w_b \sigma_{aC}$$

- Поскольку одно и то же составное ядро, как мы видели выше, может образовываться по различным каналам, то возможна и реакция



Вероятность протекания реакции

- Тогда

$$\sigma_{b'b} = w_b \sigma_{b'C}$$

- Это значит, что отношения сечений по каждому из каналов реакции будет одним и тем же:

$$\frac{\sigma_{ab}}{\sigma_{ab'}} = \frac{\sigma_{b'b}}{\sigma_{b'b'}} = \frac{w_b}{w_{b'}}$$

Угловое распределение продуктов реакции

- Угловое распределение продуктов реакции в системе центра инерции симметрично относительно угла $\chi = 90^\circ$ (симметрия «вперед-назад»).
- Такая симметричность обусловлена тем, что направление движения налетающей частицы, можно сказать, «забывается» за время жизни составного ядра (импульс движения составного ядра как целого в расчет не принимается, так как речь идет о системе центра инерции).

Виды реакций, идущих через составное ядро

- *Резонансные реакции*
- *Нерезонансные реакции*