

Детектирование нейтронов

Для магистров

Определения

Детектирование – обнаружение чего либо.

Детектор нейтронов – аппаратный комплекс, предназначенный для обнаружения (детектирования нейтронов).

Ионизационный метод

В ядерной физике хорошо известен и широко применяется **ионизационный метод детектирования заряженных частиц.**

Перемещающиеся в среде **заряженные частицы или фотоны** взаимодействуют с внешними электронами атомов среды и разрушают их связь. (ионизируют атомы среды). **В среде появляются носители зарядов:** свободные электроны и вакансии (в твёрдом теле) или ионы (в газе или жидкости).

Обнаружение в среде носителей зарядов - **свидетель-ство** появления в ней заряженных частиц или фотонов

Частицы, вызывающие ионизацию среды, называют **ионизирующими**, а изложенный выше метод их обнаружения называют **ионизационным методом.**

Обнаружение нейтронов

Нейтроны не обладает зарядом, не являются ионизирующими частицами, и **не могут быть обнаружены (детектированы) ионизацион-ным методом.**

Однако, ядерные реакции с участием нейтронов часто сопровождаются появлением **ионизирую-щих продуктов, которые обнаруживаются ионизационным методом и свидетельствуют о наличии нейтронов в среде.**

Структура детектора нейтронов

- В состав детектора нейтронов входят два обязательных элемента:
 - **Радиатор**, состоящий из нуклидов, вступающих в ядерную реакцию с нейтронами;
 - **Детектор заряженных частиц**, свидетельствующих о взаимодействии нейтронов с ядрами радиатора.

Процесс детектирования нейтронов

Три этапа детектирования нейтронов:

- взаимодействие нейтронов с ядрами активной радиатора;
- детектирование сопутствующих (или испущенных при распаде образовавшихся в радиаторе нестабильных ядер);
- обработка электронной аппаратурой сигналов, возникших в детекторе ионизирующих частиц, измерение скорости их регистрации и документирование полученной информации

Разновидности детекторов нейтронов

Используемые ядерные реакции:	продукты которых – ионизирующие частицы			продукты которых – нестабильные ядра			
Конструкционные особенности:	радиатор и детектор ионизирующих частиц совмещены			радиатор и детектор ионизирующих частиц конструктивно разделены			
Детекторы ионизирующих частиц:	ГД	СД	ППД	ДПЗ	ГД	СД	ППД

Детекторы ионизирующих частиц:

ГД Газоразрядный

СД Сцинтилляционный

ППД Полупроводниковый

ДПЗ Активационный детектор

прямой зарядки

Конструкционные разновидности детекторов нейтронов

Конструкционно можно выделить два класса нейтронных детекторов, в которых:

1. Радиатор и детектор ионизирующих частиц совмещены;
2. Радиатор и детектор ионизирующих частиц - независимые элементы нейтронного детектора.

Особенности нейтронных детекторов, совмещающих радиатор и детектор ионизирующих частиц

1. Такие детекторы позволяют **получать информацию о состоянии нейтронного поля с ничтожной временной задержкой**. Их целесообразно **применять для оперативного измерения параметров нейтронного поля и переходных процессов в нем**.
2. Конструкционное совмещение радиатора и детектора ионизирующих частиц определяет **объём нейтронного детектора и количество конструкционных материалов** в нём.
3. Последние обстоятельства могут стать причиной **возмущений нейтронного поля** в объёме детектора и поставить под сомнение возможность применения детектора для измерения пространственных распределений параметров нейтронного поля.
4. **Особенности энергетической зависимости сечения** выбранной для детектирования нейтронов ядерной реакции **определяют исследуемую область нейтронного спектра**.

Особенности нейтронных детекторов, в которых радиатор и детектор ионизирующих частиц разделены

КОНСТРУКЦИОННО

1. Процесс **облучения** радиатора в нейтронном поле, **накапливания** в нём возникающих в результате протекания ядерных реакций нестабильных ядер, и **измерение** их активности **разделены во времени и пространстве**.
2. Такой метод определения параметров нейтронного поля называют **активационным методом**. Облучаемый в нейтронном поле радиатор называют **образцом** или **индикатором**.
3. Полученные активационным методом **оценки нейтронного поля усреднены по времени** активации индикатора. Их появление запаздывает на сумму времени, необходимого для облучения, перемещения на измерительную установку, измерения активности и обработки результатов измерений.
4. **Масса индикаторов** выбирается минимально необходимой для обеспечения статистической достоверности результатов оценки параметров нейтронного поля. Как правило, это – доли грамма.
5. **Имеются методики оценки возмущения** нейтронного поля индикаторами и внесения соответствующих поправок в оценки параметров нейтронного поля.
6. Активационный метод позволяет исследовать **пространственные распределения** параметров нейтронного поля.
7. Особенности **энергетической зависимости сечения** выбранной для детектирования нейтронов ядерной реакции **определяют исследуемую область нейтронного спектра**.

Ядерные реакции, сопровождающиеся появлением ионизирующих продуктов

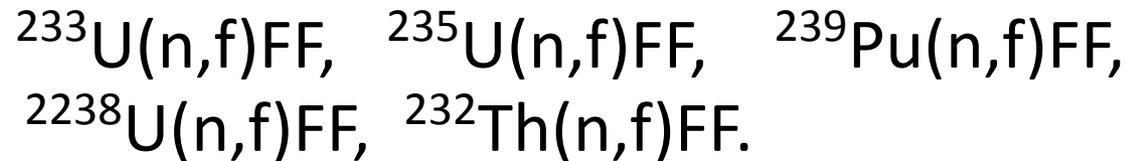
(n,p) реакции:



(n, α) реакции:



(n,f) реакции:



Параметры ядерных реакций, используемых для обнаружения нейтронов посредством детектирования ионизирующих продуктов реакции

Реакция	Ядро-продукт	Усреднённое * сечение, барн	Эффективный порог, МэВ	Эффективное сечение, мбарн
$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$	^4He	3840	–	–
$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	^4He	940	–	–
$^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$	^1H	5400	–	–
$^{233}\text{U}(n,f)\text{FF}$	FF	524,5	–	–
$^{235}\text{U}(n,f)\text{FF}$	FF	577,1	–	–
$^{239}\text{Pu}(n,f)\text{FF}$	FF	740,6	–	–
$^{232}\text{Th}(n,f)\text{FF}$	FF	–	1,4	850
$^{238}\text{U}(n,f)\text{FF}$	FF	–	1,5	596
$^{239}\text{Np}(n,f)\text{FF}$	FF	–	0,58	1600

*- По спектру тепловых нейтронов

Детекторы ионизирующих продуктов ядерных реакций, используемые для детектирования нейтронов

- Газоразрядные детекторы :
 - Ионизационные камеры с радиаторами из делящихся и делимых нуклидов , ^{10}B , $^{10}\text{BF}_3$.
 - Пропорциональные счётчики с радиаторами из ^{10}B , $^{10}\text{BF}_3$, ^3He .
 - Водородные счётчики.
 - Коронные счётчики нейтронов с радиаторами из ^{10}B , $^{10}\text{BF}_3$.
- Детекторы с неорганическими сцинтилляторами:
 - Со сцинтиллятором $^6\text{LiJ}(\text{Eu})$.
- Детекторы с органическими сцинтилляторами:
 - На основе (n,p) реакций.
 - Со сцинтиллятором, наполненным $\text{ZnS}(\text{Ag})$.
- Полупроводниковые детекторы:
 - Поверхностно-барьерные детекторы с напылением (радиаторами) из делящихся или делимых нуклидов , ^{10}B .

Интерпретация результатов измерения скорости регистрации нейтронов

Условие сохранения скорости ядерной

реакции:

$$\sigma_{\text{эф}} \int_0^{\infty} \Phi(E) dE = \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$$

с реальным (справа) и усреднённым по спектру нейтронов сечением $\sigma_{\text{эф}}$.

$\int_0^{\infty} \Phi(E) dE$ - интегральная плотность потока нейтронов;
C - скорость регистрации нейтронов $C = B \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$

B – константа, определяемая при калибровке;

Теперь
$$\int_0^{\infty} \Phi(E) dE = \frac{1}{\sigma_{\text{эф}}} \frac{C}{B} .$$

Представление зависимости сечения пороговых индикаторов от энергии ступенчатой функцией

Условие сохранения скорости ядерной

реакции:

$$\sigma_{\text{эф}} \int_{E_{\text{сп}}}^{\infty} \Phi(E) dE = \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$$

в реальном (справа) и ступенчатом (слева) представлении сечения.

$\sigma_{\text{эф}}$ - эффективное сечение реакции (высота ступеньки);

$E_{\text{эф}}$ - граничная энергия ;

$\int_0^{\infty} \Phi(E) dE$ - интегральная плотность потока нейтронов;

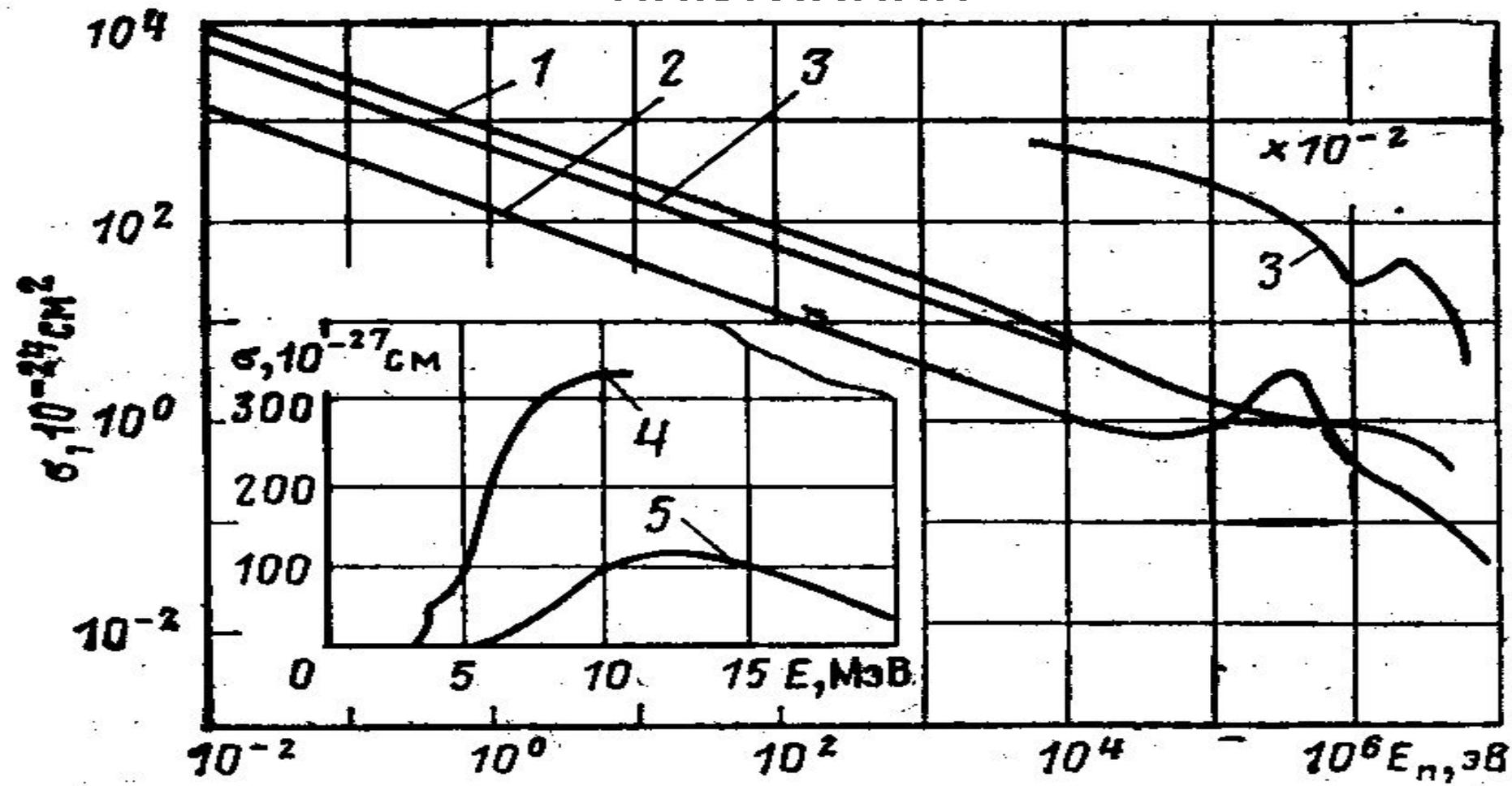
$\int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$ - измеренная активность индикатора, нормированная на одно ядро.

$\sigma_{\text{эф}}$ и $E_{\text{эф}}$ заметно зависят от формы спектра.

Рекомендовано граничную энергию $E_{\text{эф}}$ выбирать такой, чтобы для спектров разной формы имели бы наиболее близкие значения.

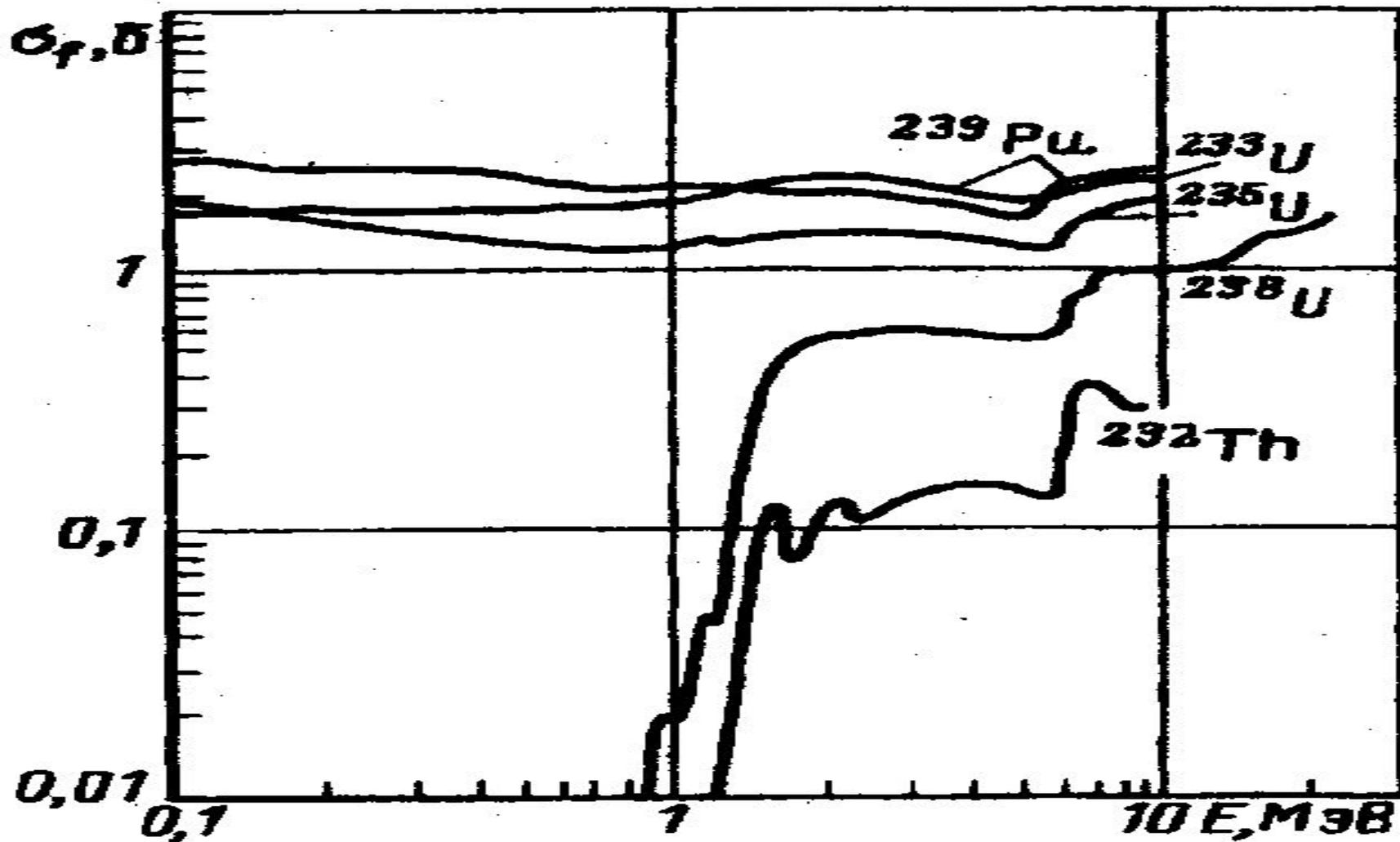
Зависимости сечений (n,p) и (n, α) реакций от энергии нейтронов

нейтронов

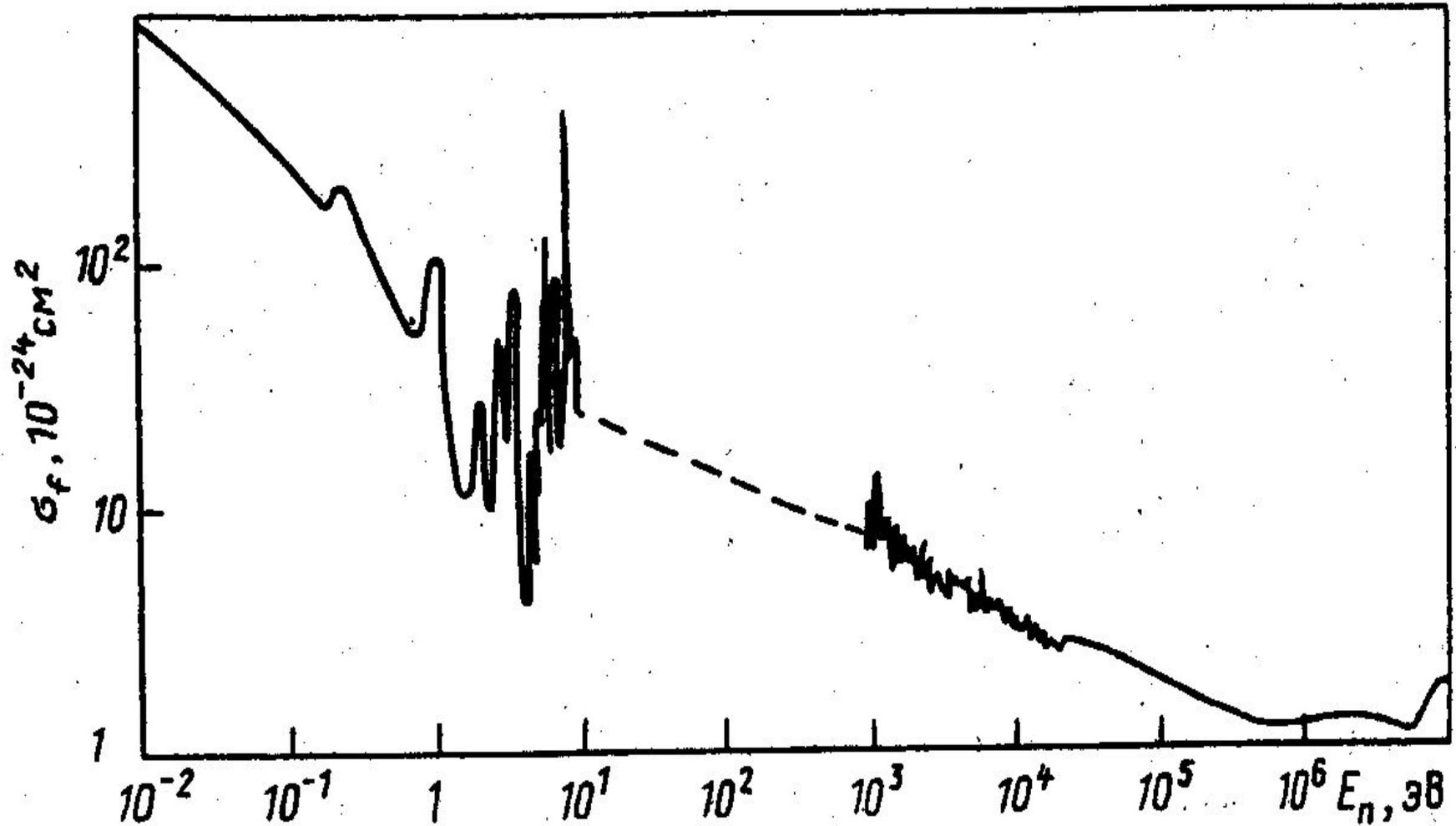


- 1 — ${}^3\text{He}(n,p)$; 2 — ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$; 3 — ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$;
 4 — ${}^{27}\text{Al}(n,p)$; 5 — ${}^{27}\text{Al}(n,\alpha)$

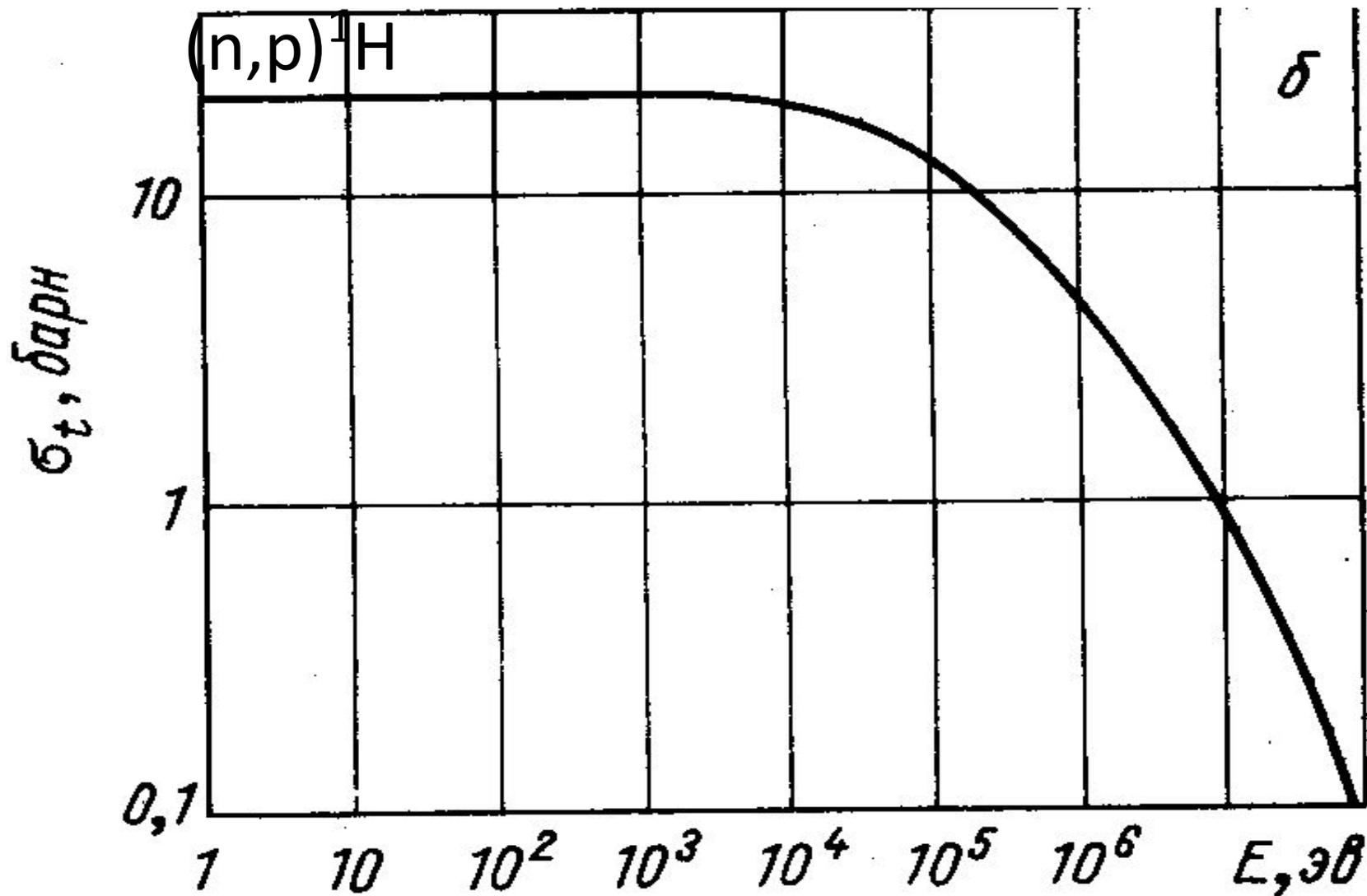
Зависимости сечений ядерных реакций деления от энергии нейтронов



Зависимости сечения деления ^{235}U от энергии нейтронов



Зависимость сечения ядерной реакции ^1_0H от энергии нейтронов



Ядерные реакции, приводящие к образованию нестабильных нуклидов, испускающих ионизирующие продукты распада

Практически все виды ядерных реакций с нейтронами могут продуцировать нестабильные ядра - свидетели свершившейся ядерной реакции. Среди наиболее часто используемых	
реакции деления:	Количество накопленных в образце осколков деления содержит информацию о скорости реакции деления;
(n,γ) реакции:	Количество нестабильных ядер в образце содержит информацию о скорости реакции ядер образца с тепловыми и замедляющимися и резонансными нейтронами
(n,α) реакции (n,p) реакции (n,n') реакции (n,2n') реакци	Среди этих реакций имеется группа "пороговых реакций". Количество образовавшихся нестабильных ядер - продуктов этих реакций содержат информацию о скорости реакции ядер образца в различных энергетических диапазонах.

Интерпретация результатов измерения скорости регистрации нейтронов

Условие сохранения скорости ядерной

реакции:

$$\sigma_{\text{эф}} \int_0^{\infty} \Phi(E) dE = \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$$

с реальным (справа) и усреднённым по спектру нейтронов сечением

$\int_{E_{\text{сп}}}^{\infty} \Phi(E) dE$ – интегральная плотность потока нейтронов;
 A_s – активность насыщения индикатора $A_s \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$
 D – константа, определяемая при расчёте активности насыщения индикатора;

Теперь

$$\int_{E_{\text{сп}}}^{\infty} \Phi(E) dE = \frac{1}{\sigma_{\text{эф}}} \frac{A_s}{D} .$$

Параметры ядерных реакций

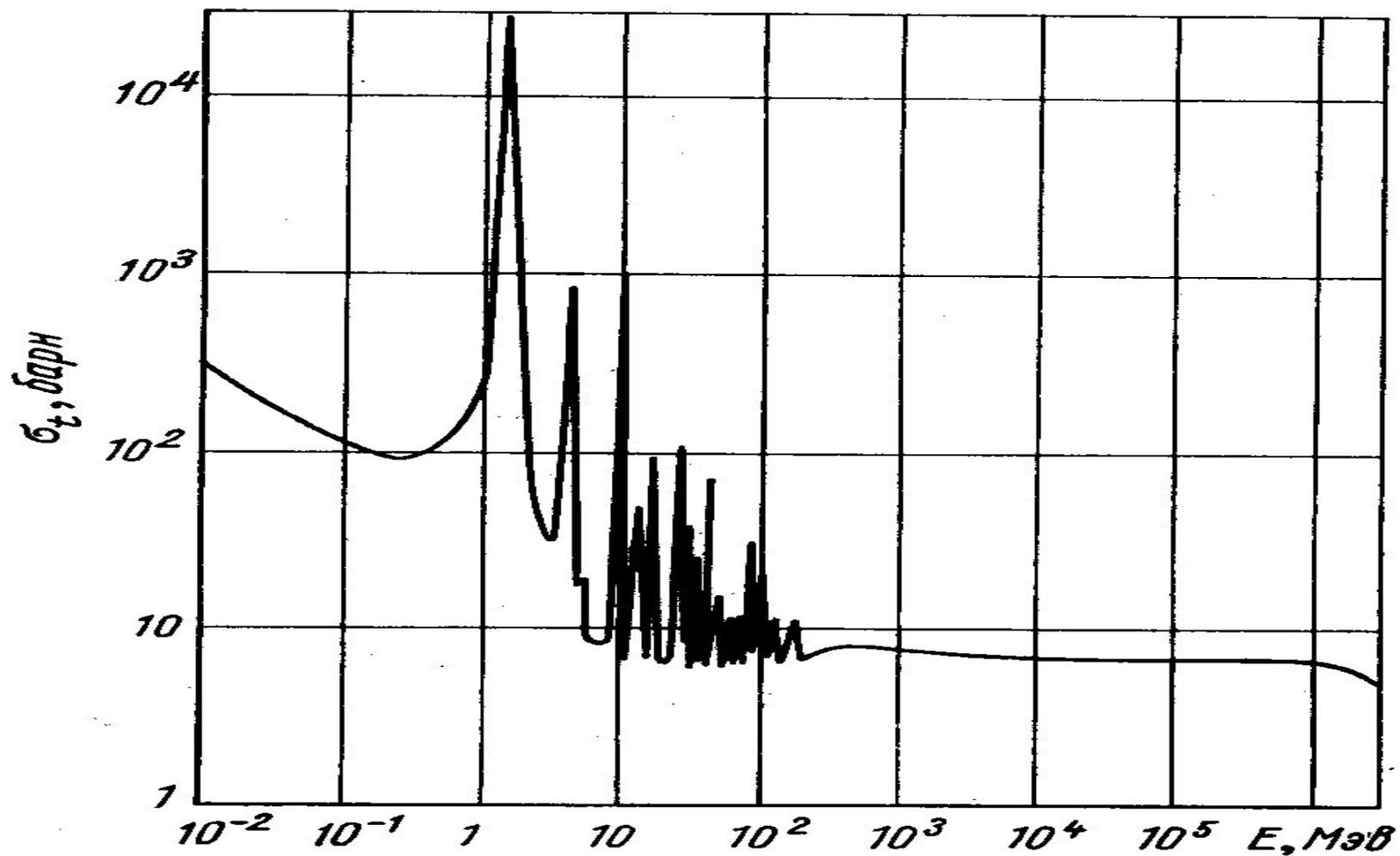
(n,γ) реакции

Реакция	Доля в смеси, %	$T_{1/2}$	$\alpha_{\text{акт'}}$ б	$E_{\text{рез'}}$, эВ	$I_{\text{исп}} = \int_{0,55}^{\infty} \sigma_{\text{акт}}(E) \frac{dE}{E}$
$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	69,1	12,87 часа	4,4	490	4,4
$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}$	95,77	54,12 мин 14,1 с	160 42	1,457	1160
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	100	2,695 сут	98,5	4,905	1150
пороговые реакции $^{103}\text{Rh}(n,\gamma)^{104\text{m}}\text{Rh}$ $^{103}\text{Rh}(n,\gamma)^{104}\text{Rh}$	100	4, 4 мин 42 с	12 140	1,257	656

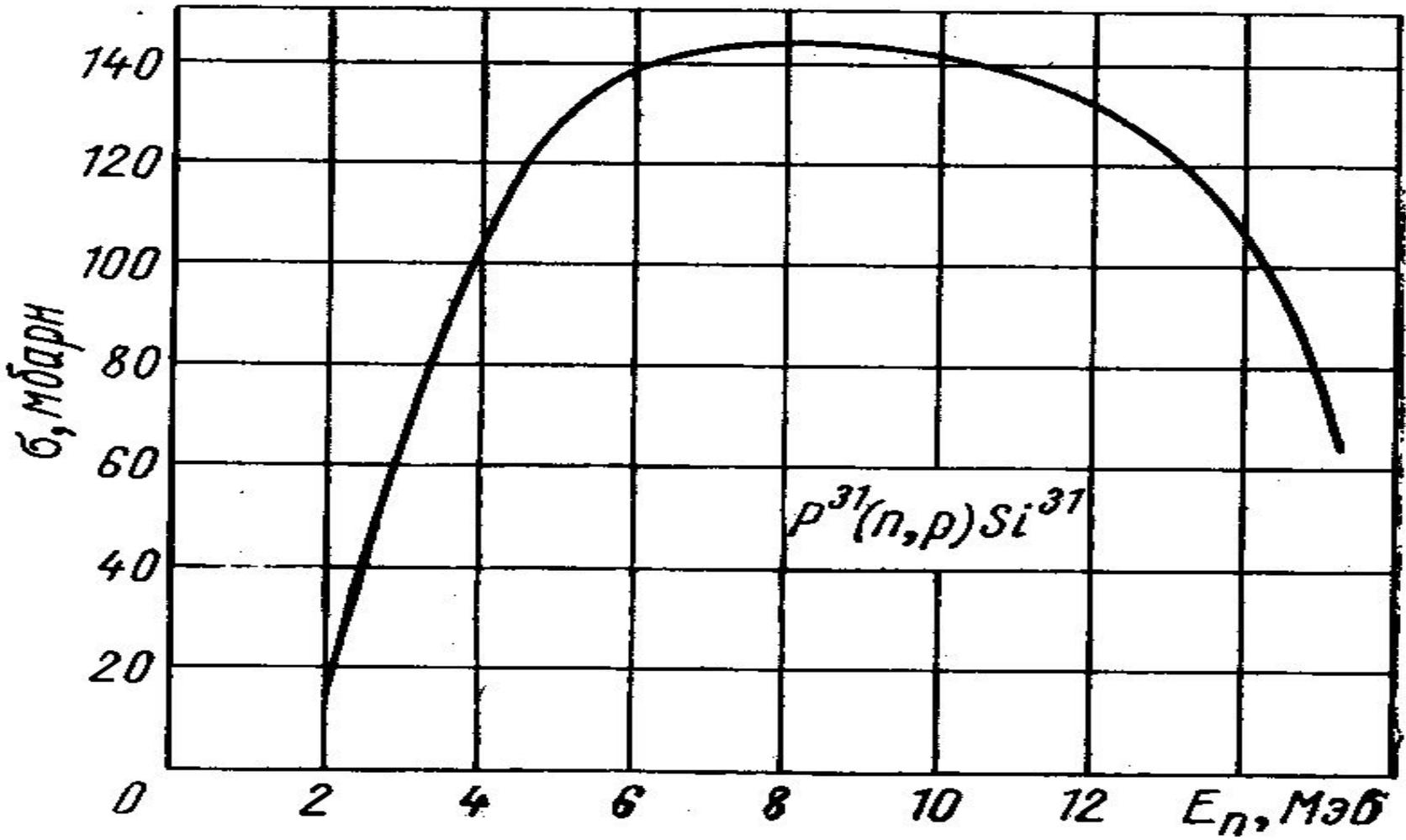
Реакция	$T_{1/2}$	$\sigma_{\text{эфф'}}$, мб	$E_{\text{гр'}}$, МэВ
$^{103}\text{Rh}(n,n')^{103\text{m}}\text{Rh}$	57,5 мин	920*(690)**	0,7(0,9)
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	70,78 дня	337*(492)**	2,3(2,6)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	15 часов	65,7*(108)**	7,2(8,4)

* - усреднение по спектру 252Cf; ** - усреднение по спектру blankets ТЯР.

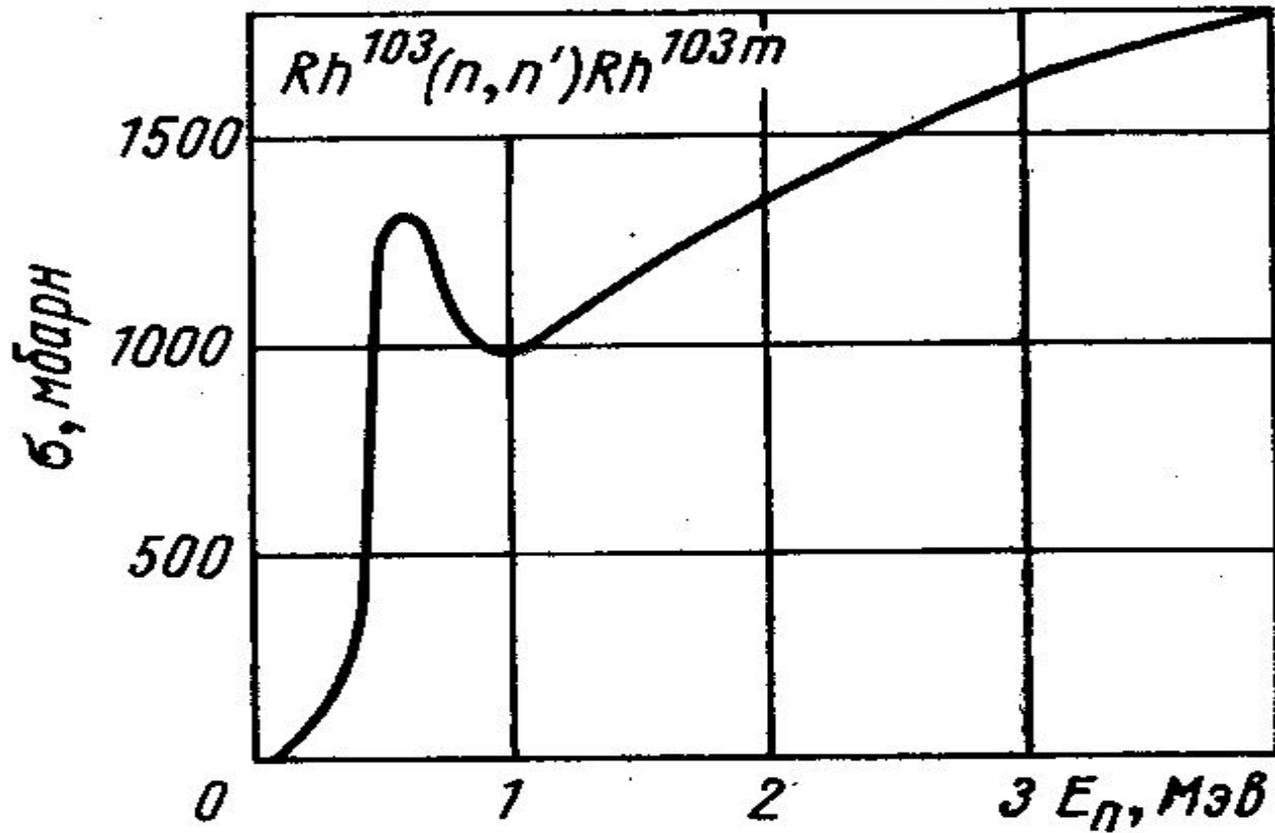
Сечение $^{114}\text{In}(n,\gamma)^{115}\text{In}$ реакции



Сечение $^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$ реакции



Сечение $^{103}\text{Rh}(n,n')^{103m}\text{Rh}$ реакции



Представление зависимости сечения пороговых индикаторов от энергии ступенчатой функцией

Условие сохранения скорости ядерной

реакции:

$$\sigma_{\text{эф}} \int_{E_{\text{сп}}}^{\infty} \Phi(E) dE = \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$$

в реальном (справа) и ступенчатом (слева) представлении сечения.

$\sigma_{\text{эф}}$ - эффективное сечение реакции (высота ступеньки);

$E_{\text{эф}}$ - граничная энергия ;

$\int_0^{\infty} \Phi(E) dE$ - интегральная плотность потока нейтронов;

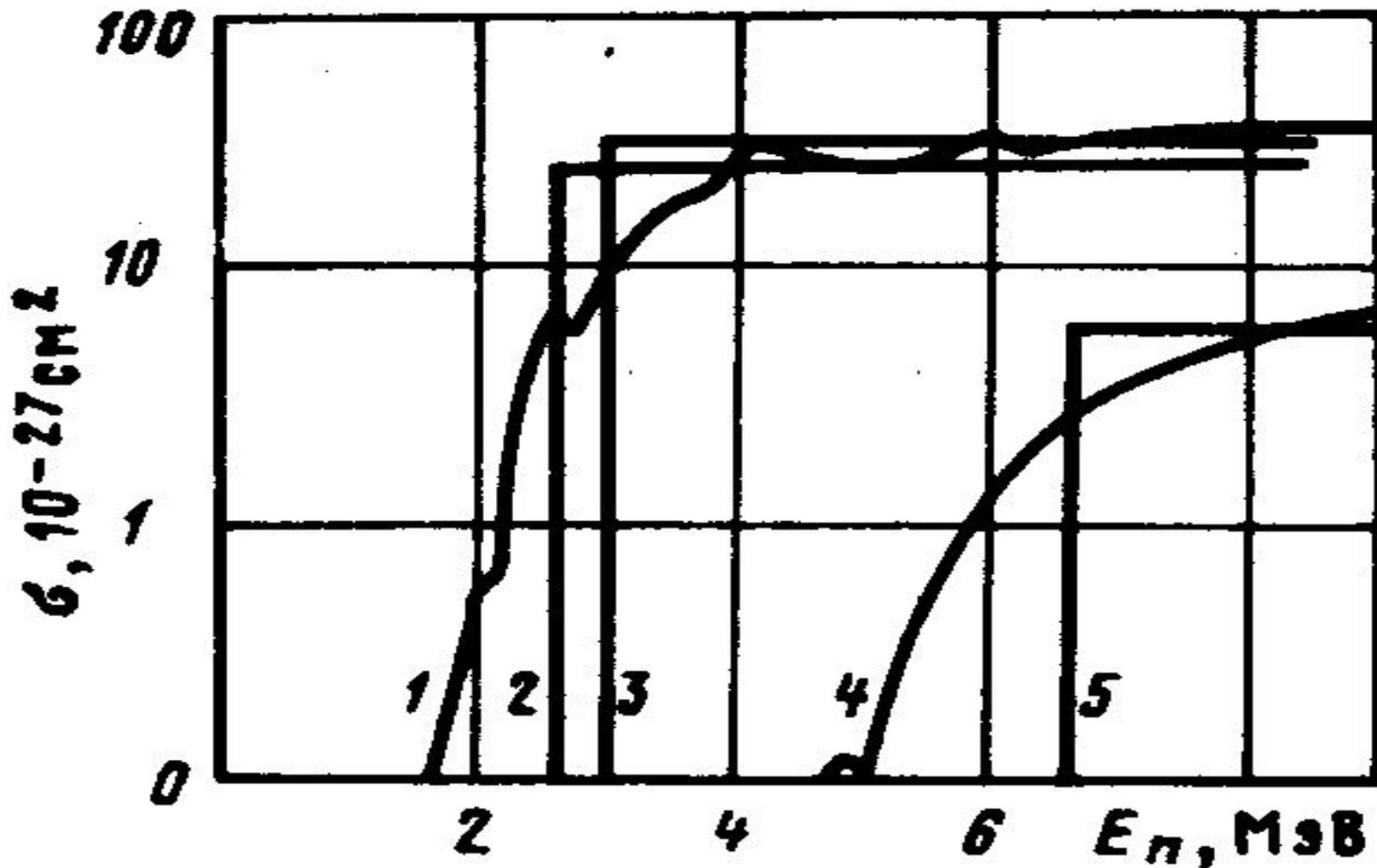
$\int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$ - измеренная активность индикатора, нормированная на одно ядро.

$\sigma_{\text{эф}}$ и $E_{\text{эф}}$ заметно зависят от формы спектра.

Рекомендовано граничную энергию $E_{\text{эф}}$ выбирать такой, чтобы для разных спектров имели бы наиболее близкие значения.

Сечения $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ и $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$

различий



1 - $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$; 2, 3- представление сечения реакции $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ ступенькой;
 4 - $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$; 5- представление сечения реакции $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ ступенькой.

Цитированная литература

1	УДК 621.039.51	<u>Бекурц к., Виртц К.</u> Нейтронная физика. –М.; Атомиздат, 1968
2	ББК 31.46 я7 Б94	<u>Бушуев А.В.</u> Экспериментальная реакторная физика. Учебное пособие. М.:МИФИ, 2008. – 280 с.
3	ББК22.38 А16	<u>Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е. С.</u> Основы экспериментальных методов ядерной физики. Учебное пособие для вузов. – М: Энергоатомиздат, 1985.