

# 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 – <b>ионизирующие частицы</b>			продукты которых – <b>нестабильные ядра</b>			
Конструкционные особенности:	радиатор и детектор ионизирующих частиц <b>совмещены</b>			радиатор и детектор ионизирующих частиц <b>конструктивно разделены</b>			
Детекторы ионизирующих частиц:	ГД	СД	ППД	<b>ДПЗ</b>	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

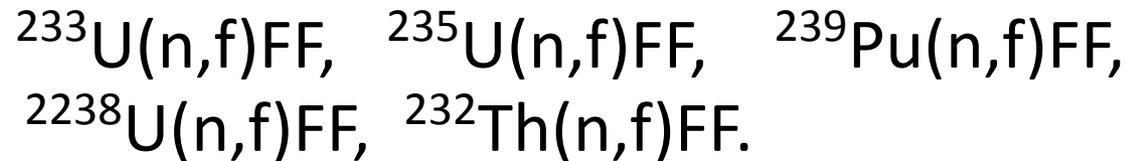
(n,p) реакции:



(n, $\alpha$ ) 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
$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$	$^4\text{He}$	3840	–	–
$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	$^4\text{He}$	940	–	–
$^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$	$^1\text{H}$	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 ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{10}\text{BF}_3$ .
  - Пропорциональные счётчики с радиаторами из  $^{10}\text{B}$ ,  $^{10}\text{BF}_3$ ,  $^3\text{He}$ .
  - Водородные счётчики.
  - Коронные счётчики нейтронов с радиаторами из  $^{10}\text{B}$ ,  $^{10}\text{BF}_3$  .
- 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 ,  $^{10}\text{B}$ .

# 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;

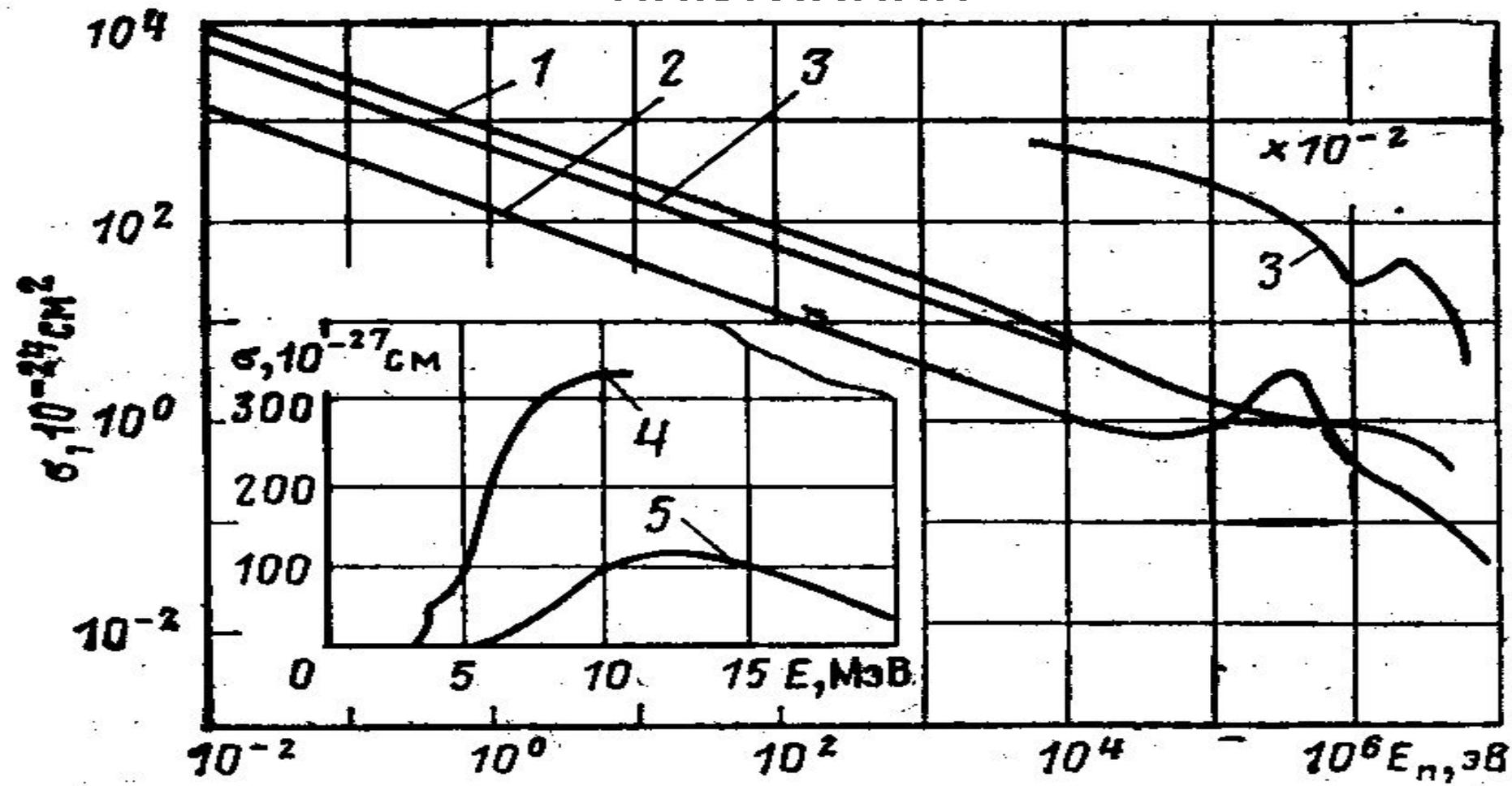
$\int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$  - измеренная активность индикатора, нормированная на одно ядро.

$\sigma_{\text{эф}}$  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.

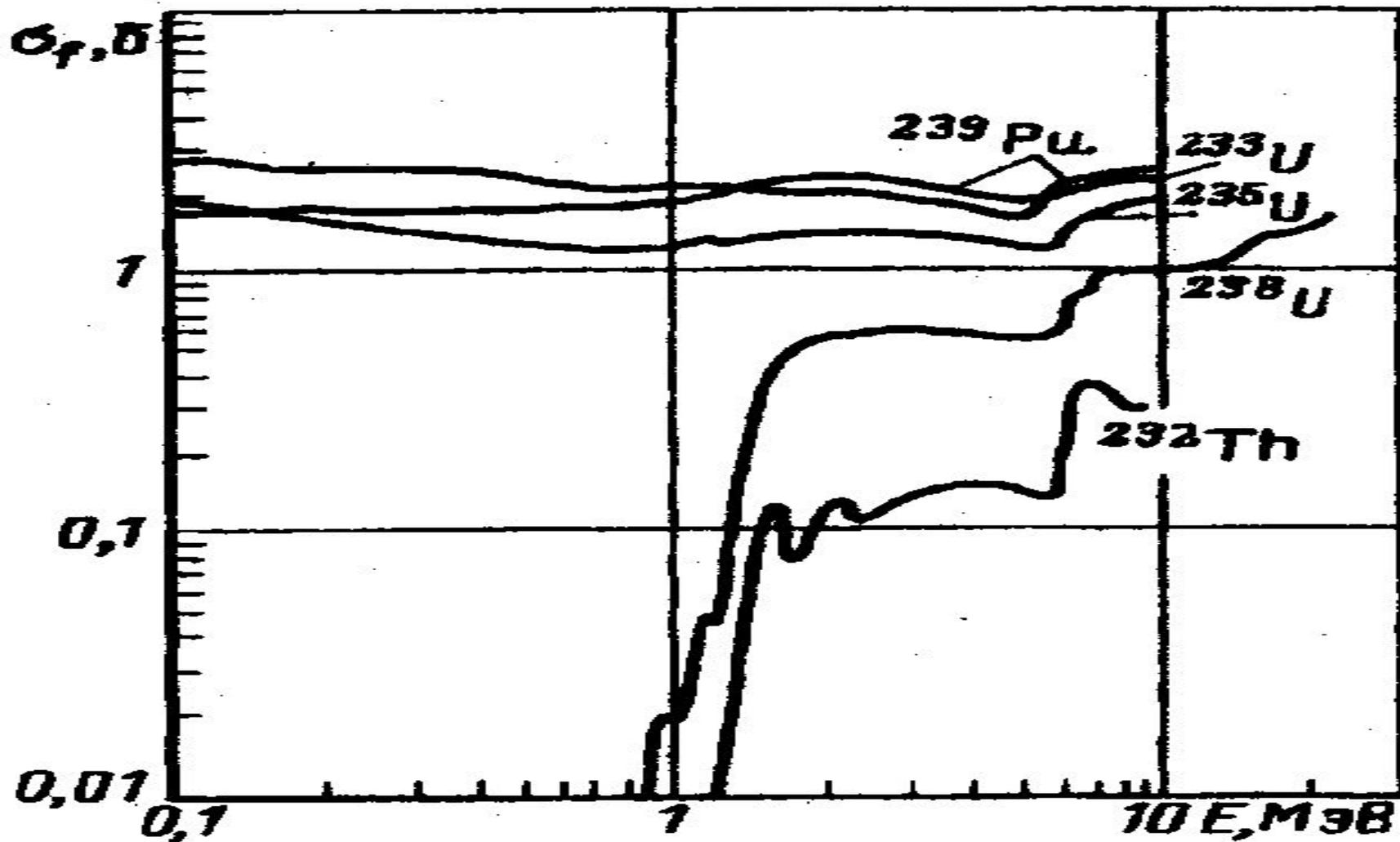
# Зависимости сечений (n,p) и (n, α) реакций от энергии нейтронов

нейтронов

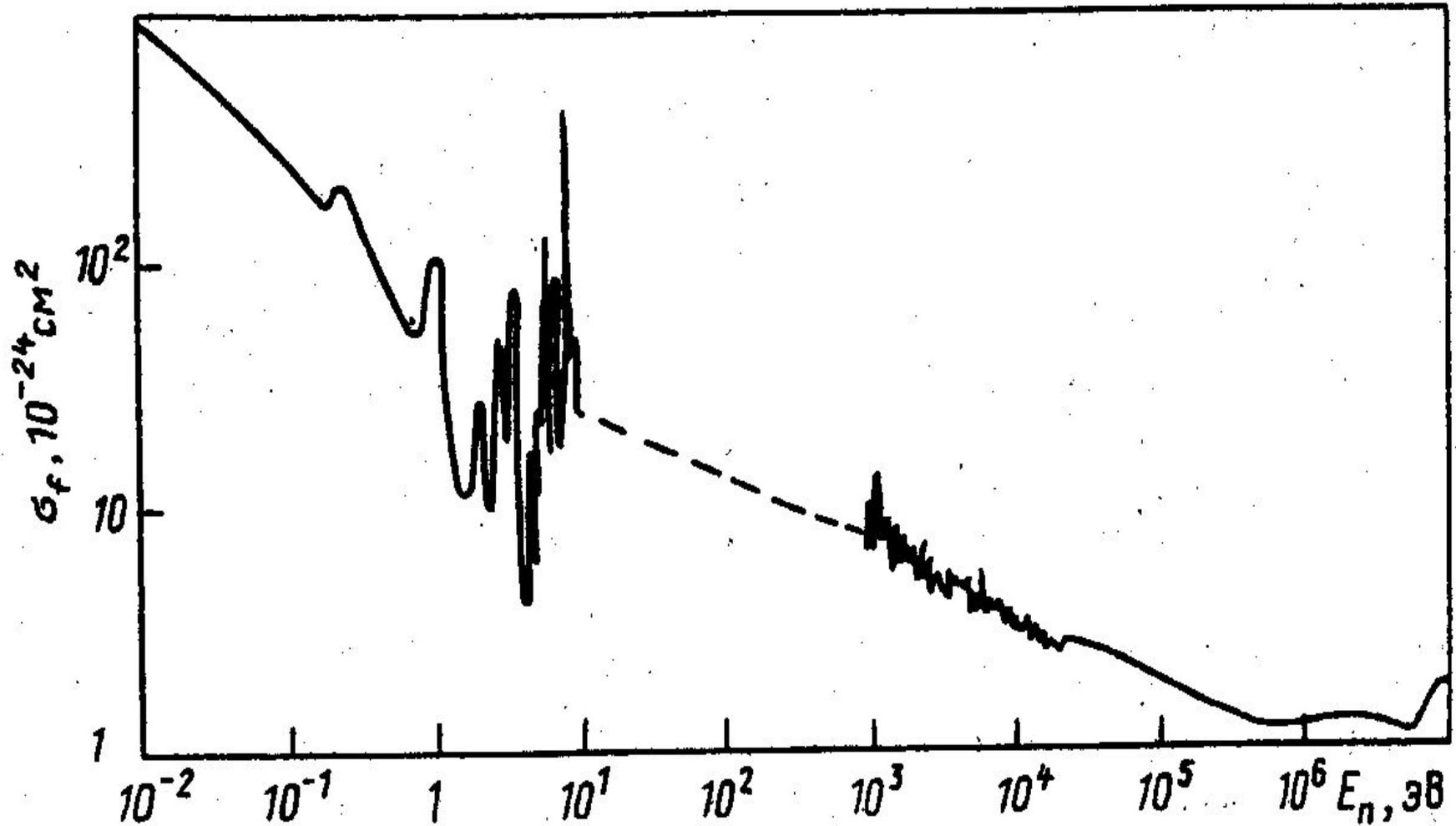


- 1 —  $^3\text{He}(n,p)$ ; 2 —  $^6\text{Li}(n,\alpha)$ ; 3 —  $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ ;  
 4 —  $^{27}\text{Al}(n,p)$ ; 5 —  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$

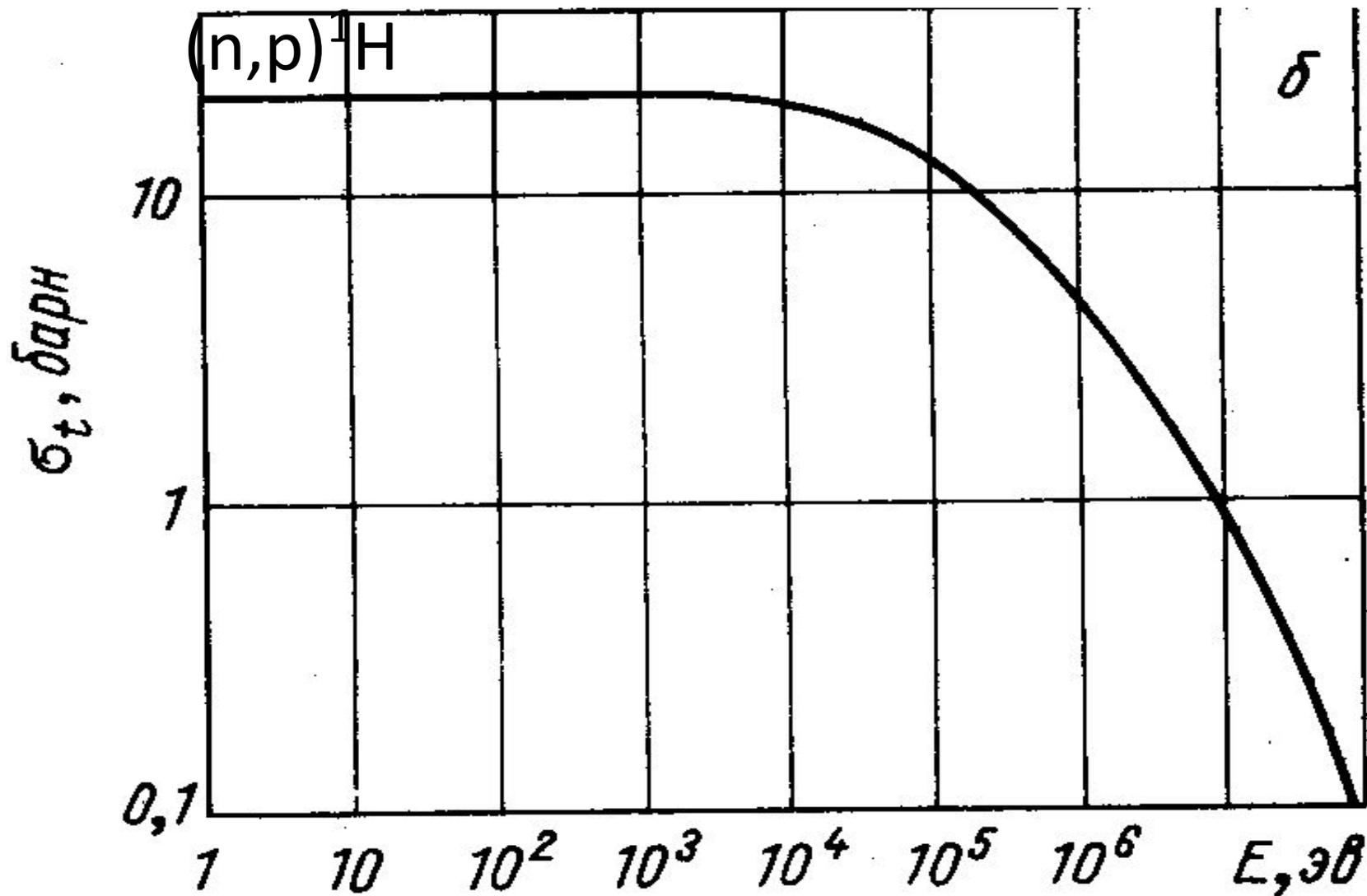
# Зависимости сечений ядерных реакций деления от энергии нейтронов



# Зависимости сечения деления $^{235}\text{U}$ от энергии нейтронов



# Зависимость сечения ядерной реакции ${}^1_0\text{H}$ 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

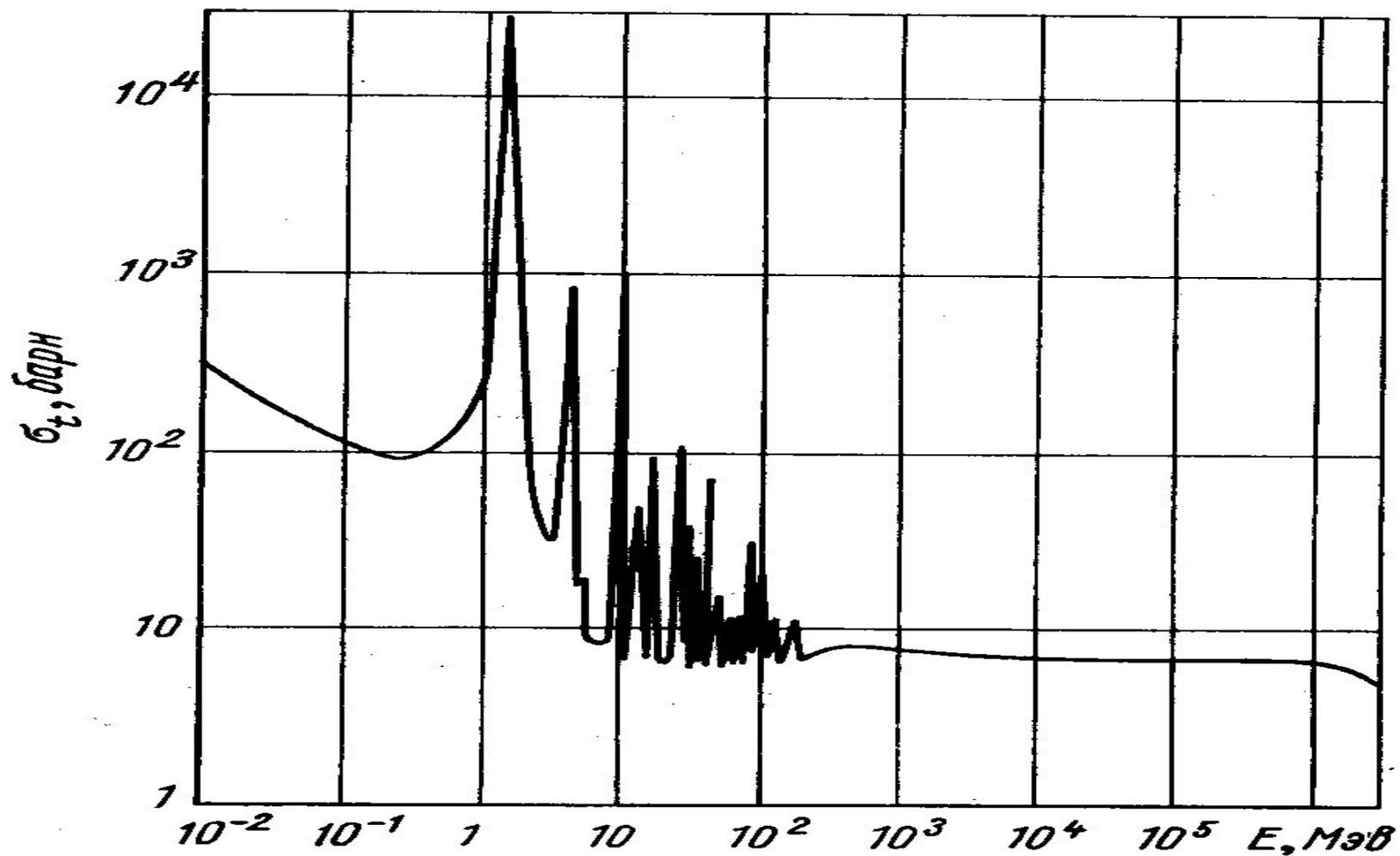
(n,γ) реакции

Реакция	Доля в смеси, %	T <sub>1/2</sub>	α <sub>акт'</sub> б	E <sub>рез'</sub> , эВ	$I_{уст} = \int_{0,55}^{\infty} \sigma_{акт}(E) \frac{dE}{E}$
<sup>63</sup> Cu(n,γ) <sup>64</sup> Cu	69,1	12,87 часа	4,4	490	4,4
<sup>115</sup> In(n,γ) <sup>116m</sup> In <sup>115</sup> In(n,γ) <sup>116</sup> In	95,77	54,12 мин 14,1 с	160 42	1,457	1160
<sup>197</sup> Au(n,γ) <sup>198</sup> Au	100	2,695 сут	98,5	4,905	1150
<b>пороговые реакции</b> <sup>103</sup> Rh(n,γ) <sup>104m</sup> Rh <sup>103</sup> Rh(n,γ) <sup>104</sup> Rh	100	4, 4 мин 42 с	12 140	1,257	656

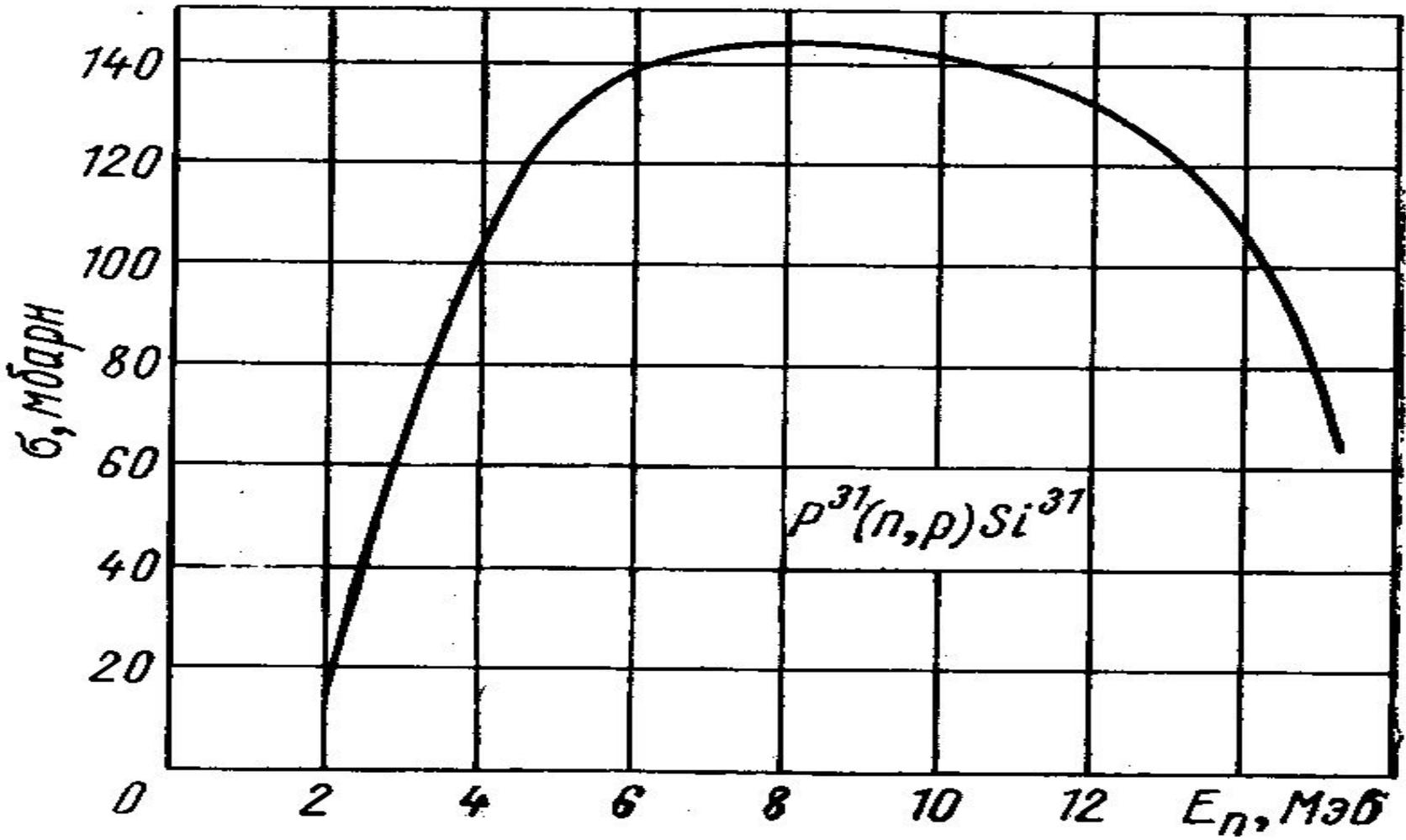
Реакция	T <sub>1/2</sub>	σ <sub>эфф</sub> , мб	E <sub>гр</sub> , МэВ
<sup>103</sup> Rh(n,n') <sup>103m</sup> Rh	57,5 мин	920*(690)**	0,7(0,9)
<sup>58</sup> Ni(n,p) <sup>58</sup> Co	70,78 дня	337*(492)**	2,3(2,6)
<sup>27</sup> Al(n,α) <sup>24</sup> Na	15 часов	65,7*(108)**	7,2(8,4)

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

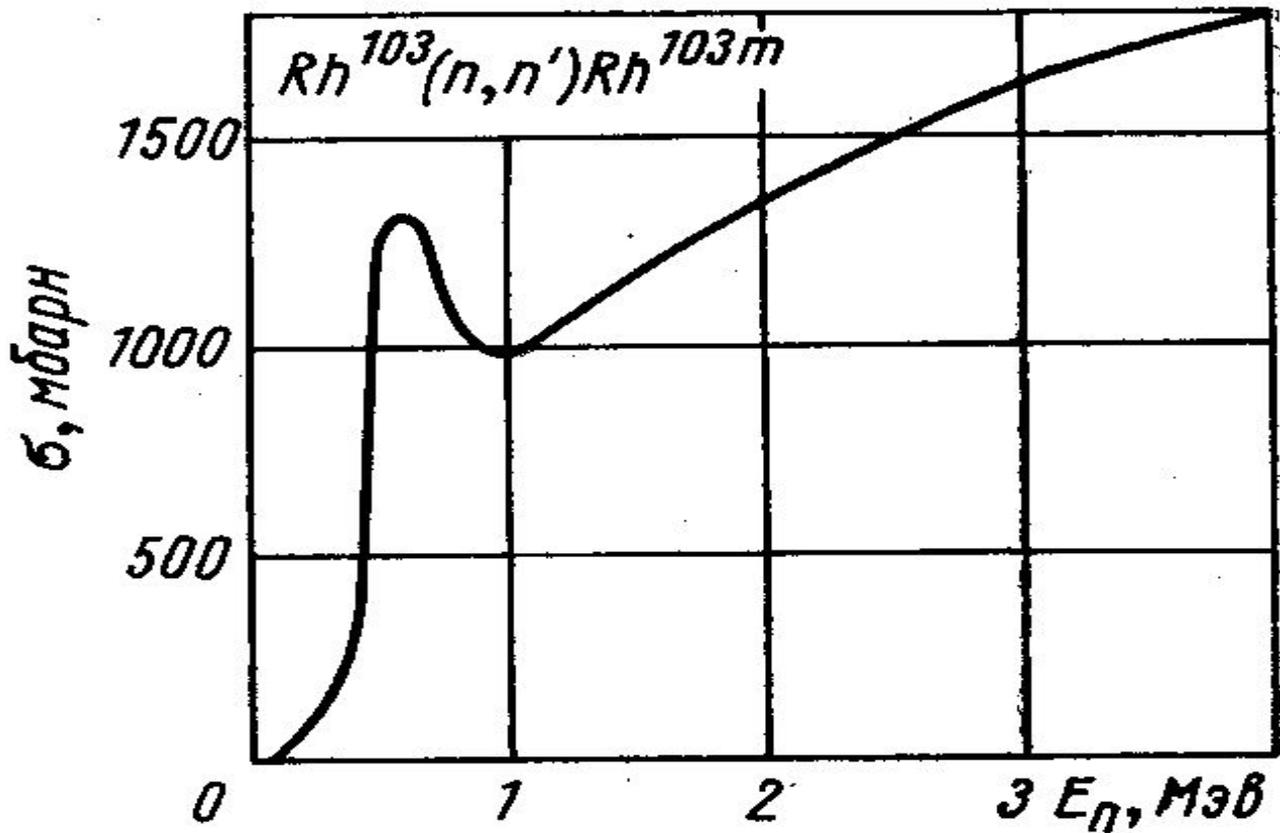
# Сечение $^{114}\text{In}(n,\gamma)^{115}\text{In}$ реакции



# 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;

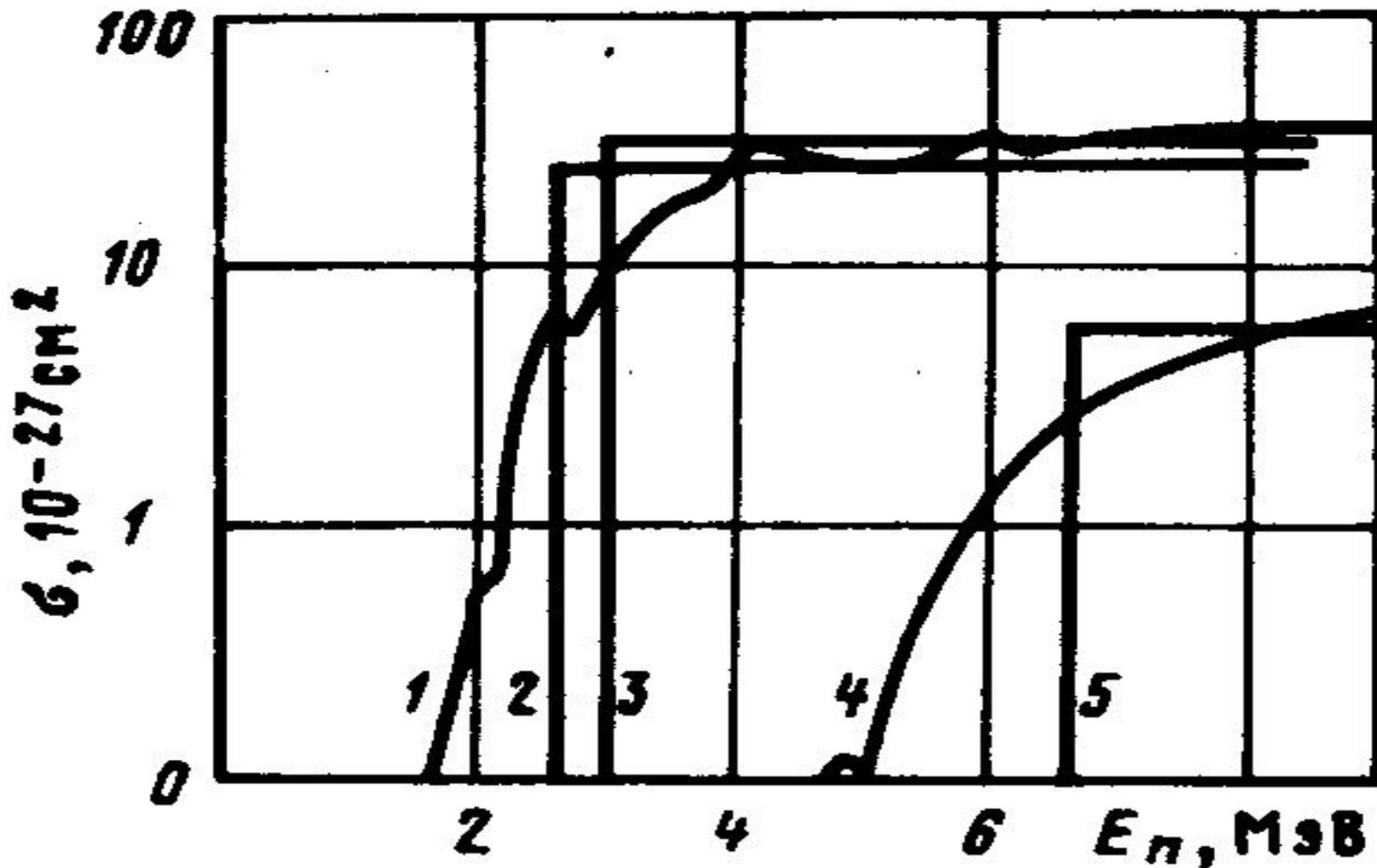
$\int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE$  - измеренная активность индикатора, нормированная на одно ядро.

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