



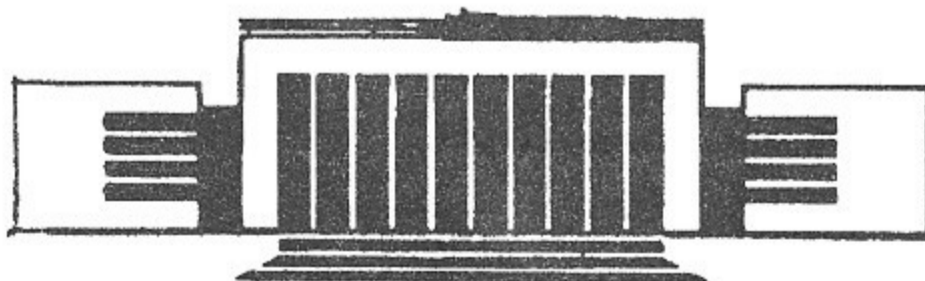
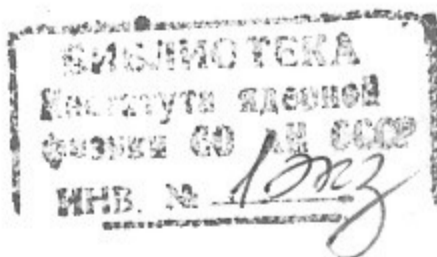
Сибирское отделение Российской Академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

*Б. 86  
1999*

В.Н. Бочаров, А.М. Кудрявцев, В.М. Панасюк

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ  
ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ  
НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
В "ГОРЯЧЕЙ ЗОНЕ" РЕАКТОРА  
(справочный обзор, часть II)

ИЯФ 98-102



НОВОСИБИРСК

1998

**Воздействие продуктов термоядерных реакций на конструкционные материалы  
в «горячей зоне» реактора**  
(справочный обзор, часть II - сечения взаимодействий нейтронов с веществом)

*В.Н. Бочаров, А.М. Кудрявцев, В.М. Панасюк*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск

**Аннотация**

Представляемый обзор составлен, в первую очередь, для того, чтобы помочь непрофессионалам (например, физикам – плазмистам, работающим над проектами установок с параметрами, близкими к параметрам термоядерного реактора) подробнее ознакомиться с инженерными, технологическими и экологическими проблемами, возникающими при длительной эксплуатации таких установок. Авторы собрали воедино значительный объем информации, особенно по взаимодействию нейтронов с металлами, используемыми в конструкционных материалах. Эти данные могут быть полезными при конструировании отдельных узлов и выборе материалов для них.

Из-за большого количества графиков, таблиц и некоторых сведений по материаловедению обзор разбит на три части, издающиеся отдельными препринтами.

Часть I имеет, в основном, "общеобразовательный" характер - в ней в сжатом виде представлен материал, описывающий последствия объемного и поверхностного воздействия радиации (нейтроны,  $\alpha$ -частицы) на конструкционные материалы. При этом большинство разделов включают в себе, как правило, лишь формулировки проблем, терминологию и некоторые количественные данные, иллюстрирующие порядок величин и "области существования" рассматриваемых явлений.

Часть II представляет довольно обширную подборку количественных данных по взаимодействиям нейтронов с различными элементами (в основном, с металлами), представляющими интерес с инженерной точки зрения.

В части III дается более детальное описание поведения водорода и гелия в металлах, механизмов образования дефектов, проблем радиационной безопасности (насколько это связано с выбором конструкционных материалов), а также изложение необходимых сведений из области материаловедения.

## Сечения взаимодействий нейтронов с веществом.

Сечения взаимодействий нейтронов с энергией до 20 МэВ с изотопами элементов периодической системы достаточно полно представлены на сервере T2 Nuclear Information Service (<http://t2.lanl.gov/>) в базах данных ENDF/B-VI(USA), JENDL-3.2(JAPANESE), JEF-2.2(EUROPEAN), BROND-2.2(RUSSIAN).

Взаимодействия нейтронов и соответствующие им сечения классифицированы следующим образом:

полное взаимодействие (total) -  $\sigma_{total} = \sigma_{elast} + \sigma_{nonel}$ ,

упругое рассеяние (elastic) -  $\sigma_{elast}$ ,

неупругие взаимодействия (nonelastic) -  $\sigma_{nonel} = \sigma_{inel} + \sigma_{nucl}$ ,

неупругое рассеяние (inelastic) -  $\sigma_{inel} = \sum \sigma_{n, nk} + \sigma_{n, ncont}$ ,

ядерные реакции (nuclear): (n,  $\gamma$ ), (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, d), (n, t), (n, 2n), (n, np), (n, n $\alpha$ ), (n, nd)... -  $\sigma_{nucl} = \sigma_{n, \gamma} + \sigma_{n, 2n} + \sigma_{n, p} + \sigma_{n, np} + \sigma_{n, \alpha} + \sigma_{n, n\alpha} + \sigma_{n, d} + \sigma_{n, nd} + \sigma_{n, t} + \dots$

Всем видам неупругих взаимодействий сопутствует  $\gamma$  излучение -  $\sigma_{\gamma nonel} = Y_{\gamma} \cdot \sigma_{nonel}$ , где  $Y_{\gamma}$  - выход  $\gamma$  - квантов.

В таблице 1 приведено % содержание в природе ряда стабильных изотопов, входящих в состав конструкционных материалов, керамик. На рис. 1 - 24 приведены сечения взаимодействий нейтронов с этими изотопами по данным JENDL, ENDF, JEF.

Таблица 1.

Изотопы	Fe <sup>56</sup>	Cr <sup>52</sup>	Cr <sup>53</sup>	Ni <sup>58</sup>	Ni <sup>60</sup>	Nb <sup>93</sup>	Cu <sup>63</sup>	Cu <sup>65</sup>	V <sup>51</sup>	Al <sup>27</sup>	O <sup>16</sup>	C <sup>12</sup>	Be <sup>9</sup>
% сод.	91.7	83.8	9.5	68.1	26.2	100	69.2	30.8	99.7	100	99.8	98.9	100

При неупругом рассеянии происходит возбуждение отдельных уровней ядер - (n, n<sub>k</sub>), где k - номер уровня, и континуума (перекрывающиеся уровни) - (n, n<sub>cont</sub>). Время жизни возбуждённых состояний 10<sup>-12</sup>-10<sup>-15</sup>с. Девозбуждение уровней, энергия которых E<sub>k</sub> не превышает ~ 9 МэВ, в основном, происходит через  $\gamma$  излучение (у элементов средней массы E<sub>1</sub> ~ МэВ). При возбуждении уровней с E<sub>k</sub> выше ~9 МэВ возникает вероятность распада возбуждённых ядер с эмиссией частиц (n, p,  $\alpha$ , d), и появляются дополнительные каналы девозбуждения через комплексные реакции типа: O<sup>16</sup>(n, n<sub>5</sub>)O<sup>16\*</sup>( $\alpha$ )C<sup>12</sup>. Так, вероятность девозбуждения O<sup>16\*</sup> с испусканием  $\alpha$ -частицы возникает начиная с 5-ого уровня (E<sub>5</sub>=8.87МэВ), а в континууме (E<sub>30</sub>=14.4МэВ и выше) возникает ещё дополнительно вероятность девозбуждения с испусканием p. Просуммированные по уровням сечения каналов с испусканием определённых частиц вычтены из  $\sigma_{inel}$ , и эти суммы приводятся как сечения отдельных ядерных реакций типа: (n, 2n), (n, np), (n, n $\alpha$ ), (n, nd) (рис. 1 - 20). Для лёгких элементов (Be<sup>9</sup>, C<sup>12</sup>) такая процедура с  $\sigma_{inel}$  не проделана, т. е.  $\sigma_{inel}$  представляет все виды девозбуждения. У C<sup>12</sup> (рис. 21 - 22) только 1-ый уровень (E<sub>1</sub>=4.44МэВ) девозбуждается через  $\gamma$  излучение. Начиная со 2-ого уровня (E<sub>2</sub>=7.65МэВ) C<sup>12\*</sup> распадается на 3  $\alpha$ -частицы. Be<sup>9\*</sup> (рис. 23 - 24) прямо с 1-ого уровня распадается на 2  $\alpha$ -частицы и n. Для Be<sup>9</sup> inelastic, (n, 2 $\alpha$ ), (n, 2n) - это один и тот же процесс.

Сечение наработки гелия  $\sigma_{\alpha prod} = \sum Y_i \sigma_i$ , где  $\sigma_i$  - сечение реакции с образованием  $\alpha$ -частиц, Y<sub>i</sub> - их выход. Аналогично определяются  $\sigma_{p prod}$ ,  $\sigma_{d prod}$ ,  $\sigma_{t prod}$ . Для C<sup>12</sup>  $\sigma_{\alpha prod} = \sigma_{n, \alpha} + 3(\sigma_{inel} - \sigma_{n, n1})$ , для Be<sup>9</sup>  $\sigma_{\alpha prod} = \sigma_{n, \alpha} + 2\sigma_{inel}$ . Для остальных изотопов  $\sigma_{\alpha prod} = \sigma_{n, \alpha} + \sigma_{n, n\alpha}$ ,  $\sigma_{p prod} = \sigma_{n, p} + \sigma_{n, np}$ ,  $\sigma_{d prod} = \sigma_{n, d} + \sigma_{n, nd}$  и  $\sigma_{t prod} = \sigma_{n, t} + \sigma_{n, nt}$ . Сводные графики этих сечений для рассматриваемых изотопов представлены на рис. 25 - 32 (отдельно по данным JENDL, ENDF, JEF).

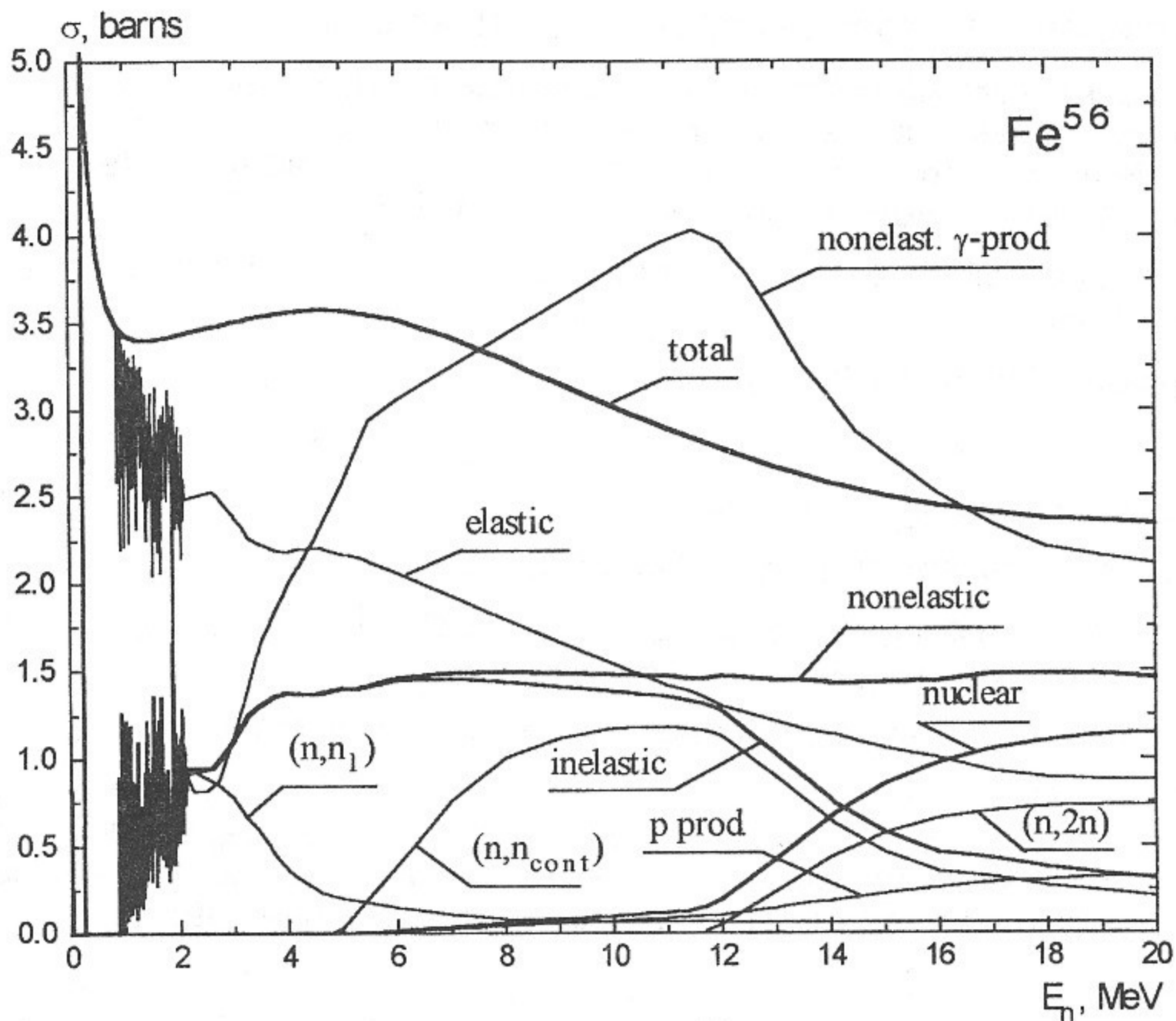


Рис. 1. Сечения взаимодействий нейтронов с  $Fe^{56}$  (JENDL).

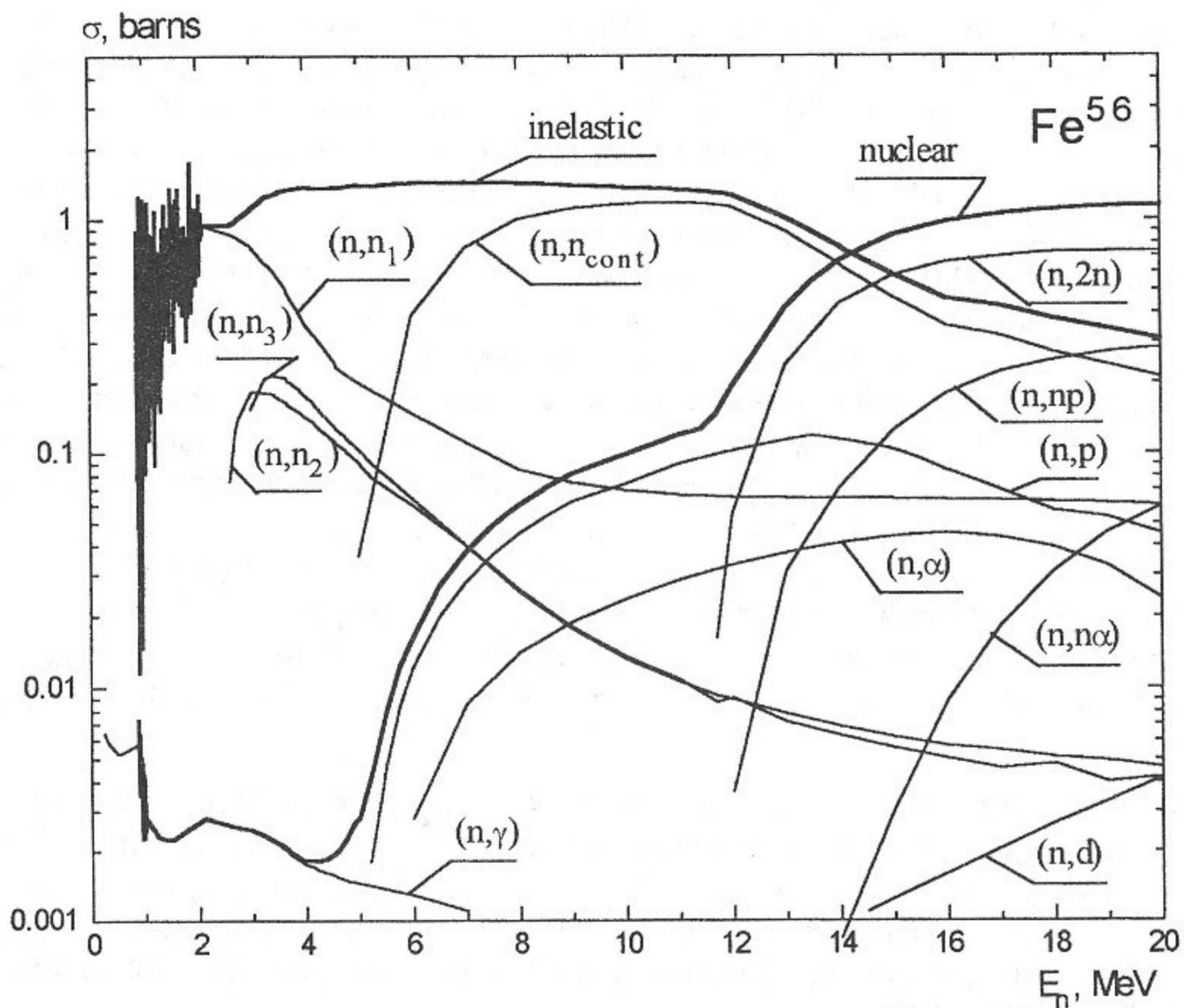


Рис. 2. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $Fe^{56}$  (JENDL).

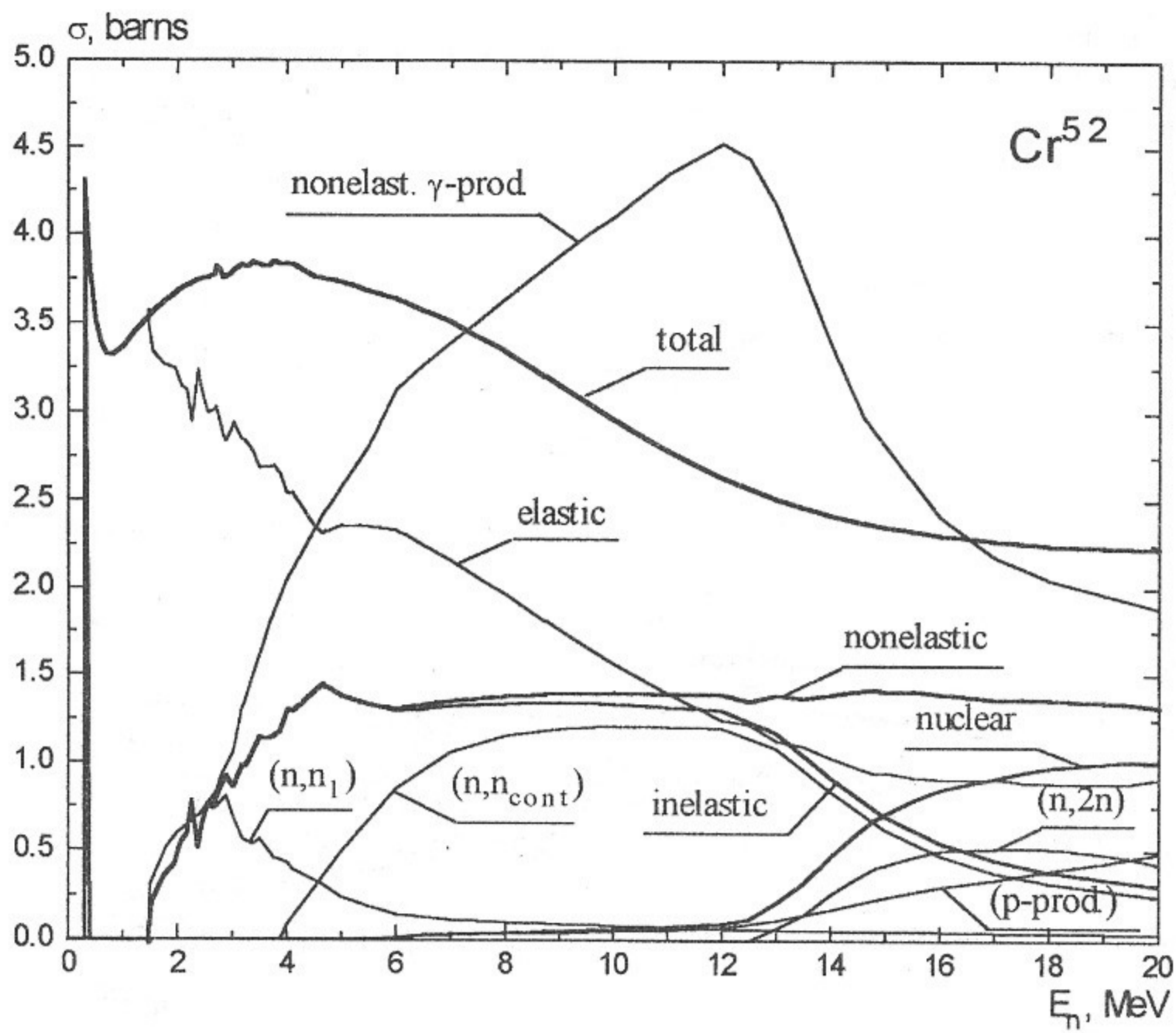


Рис. 3. Сечения взаимодействий нейтронов с  $Cr^{52}$  (JENDL).

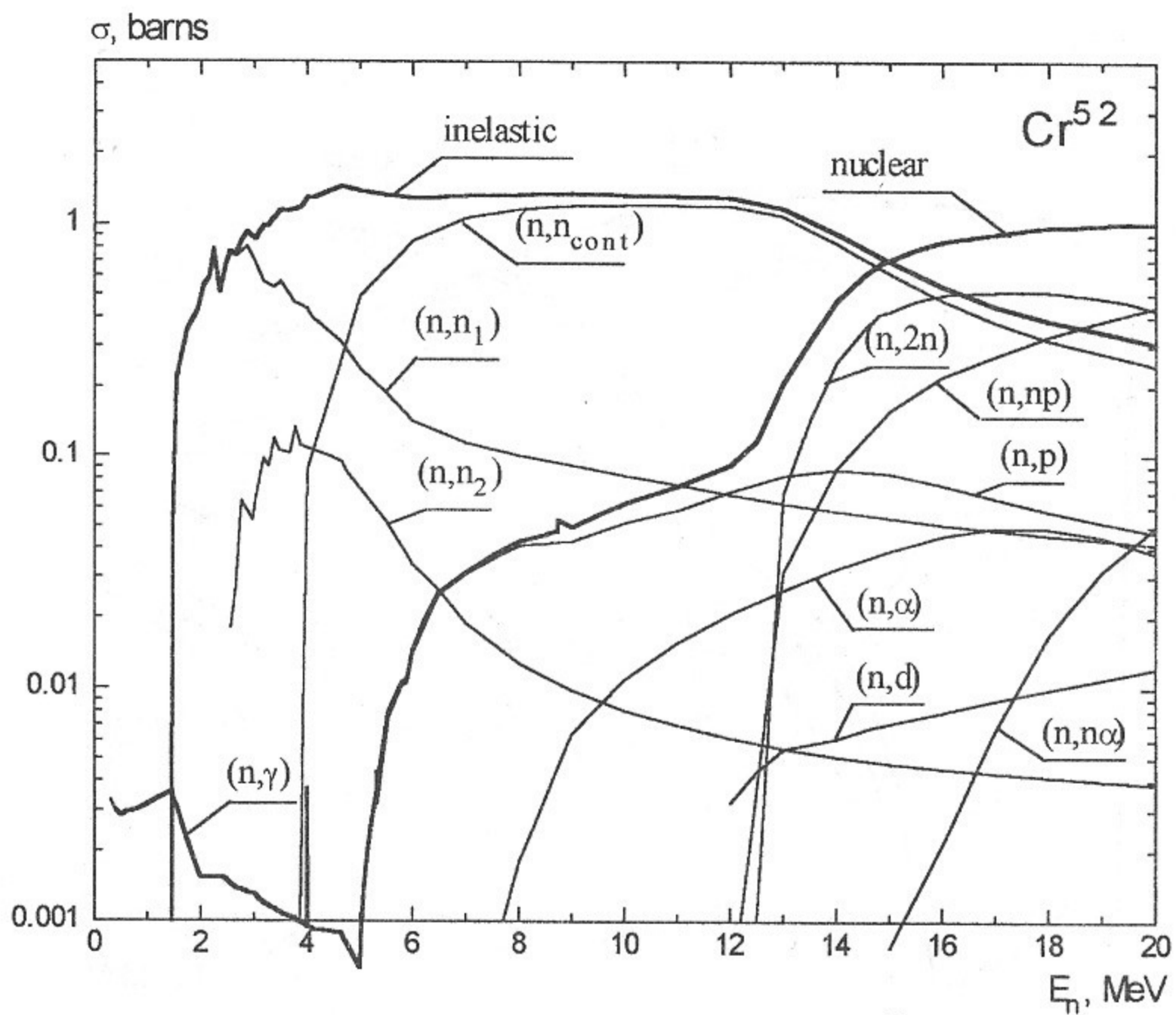


Рис. 4. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $Cr^{52}$  (JENDL).

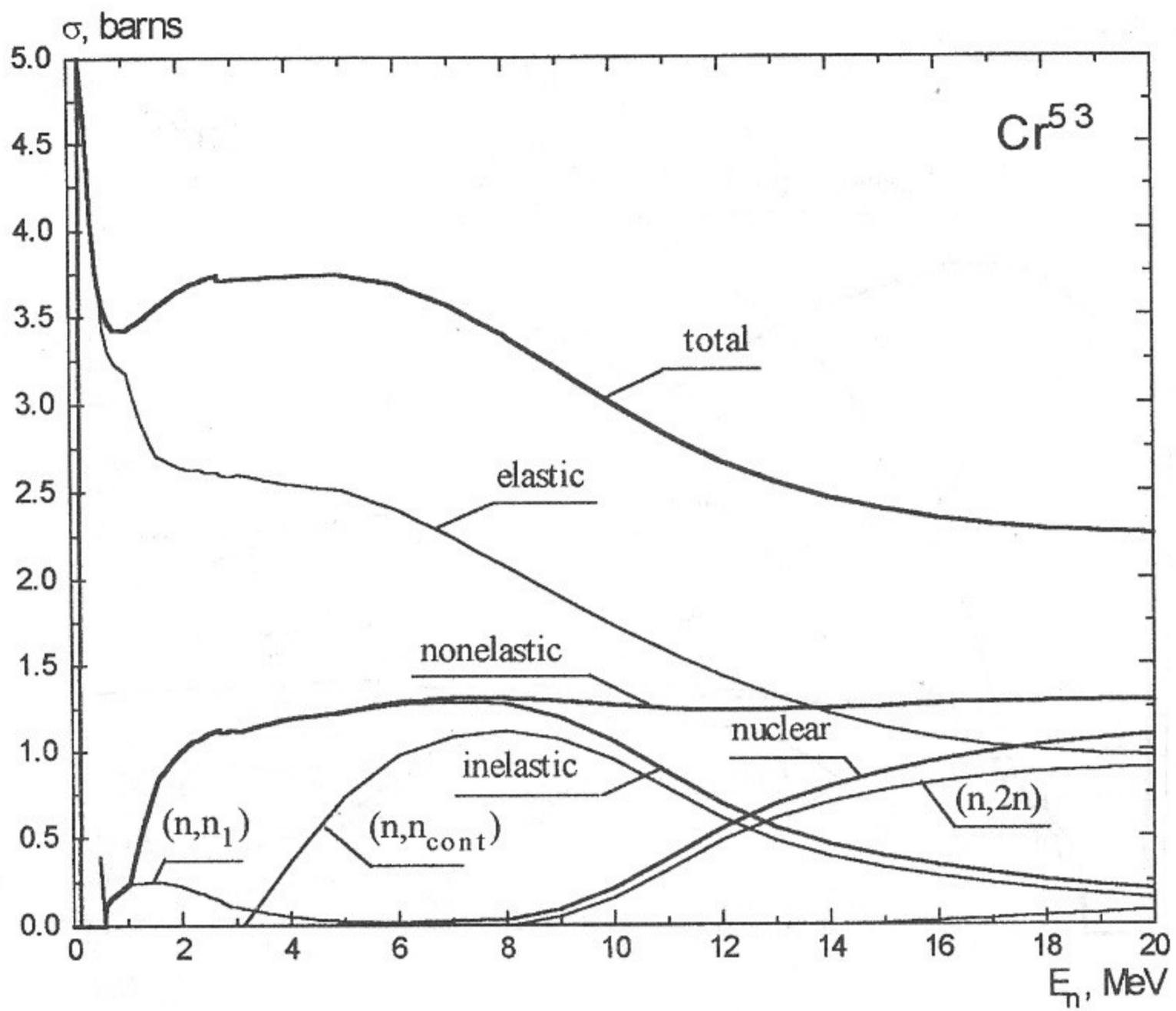


Рис. 5. Сечения взаимодействий нейтронов с  $Cr^{53}$  (JENDL).

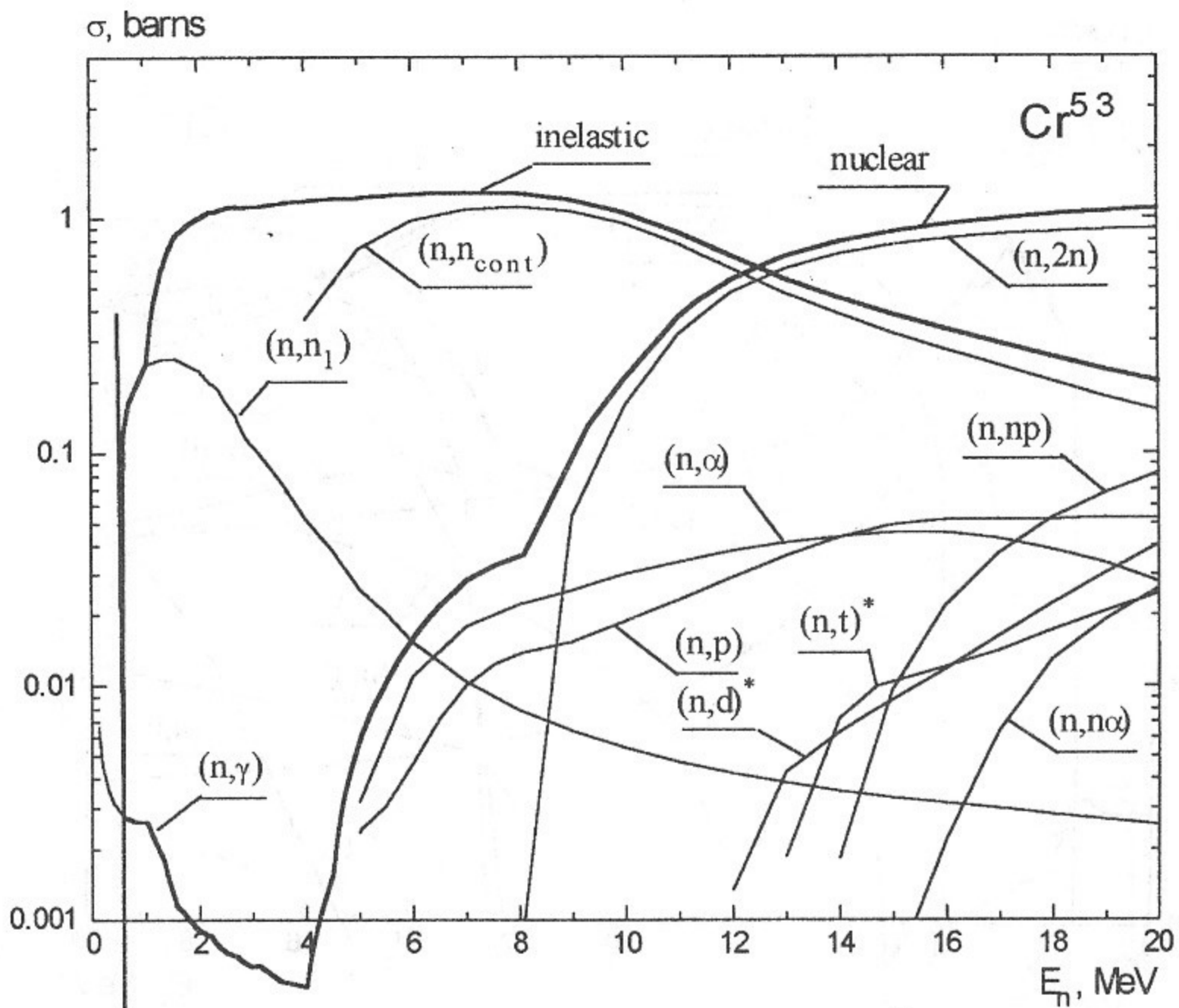


Рис. 6. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $Cr^{53}$  (JENDL).

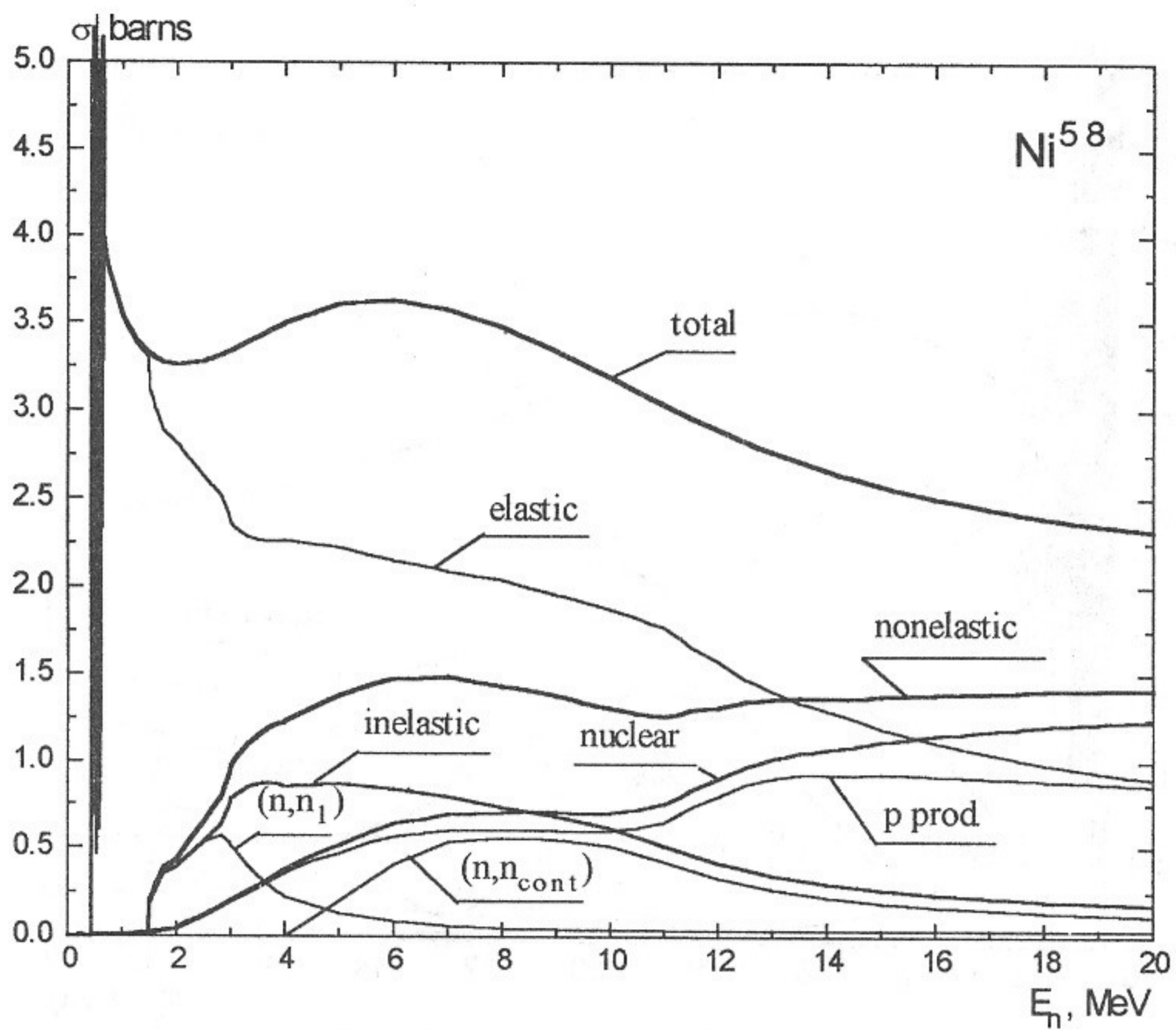


Рис. 7. Сечения взаимодействий нейтронов с  $Ni^{58}$  (JENDL).

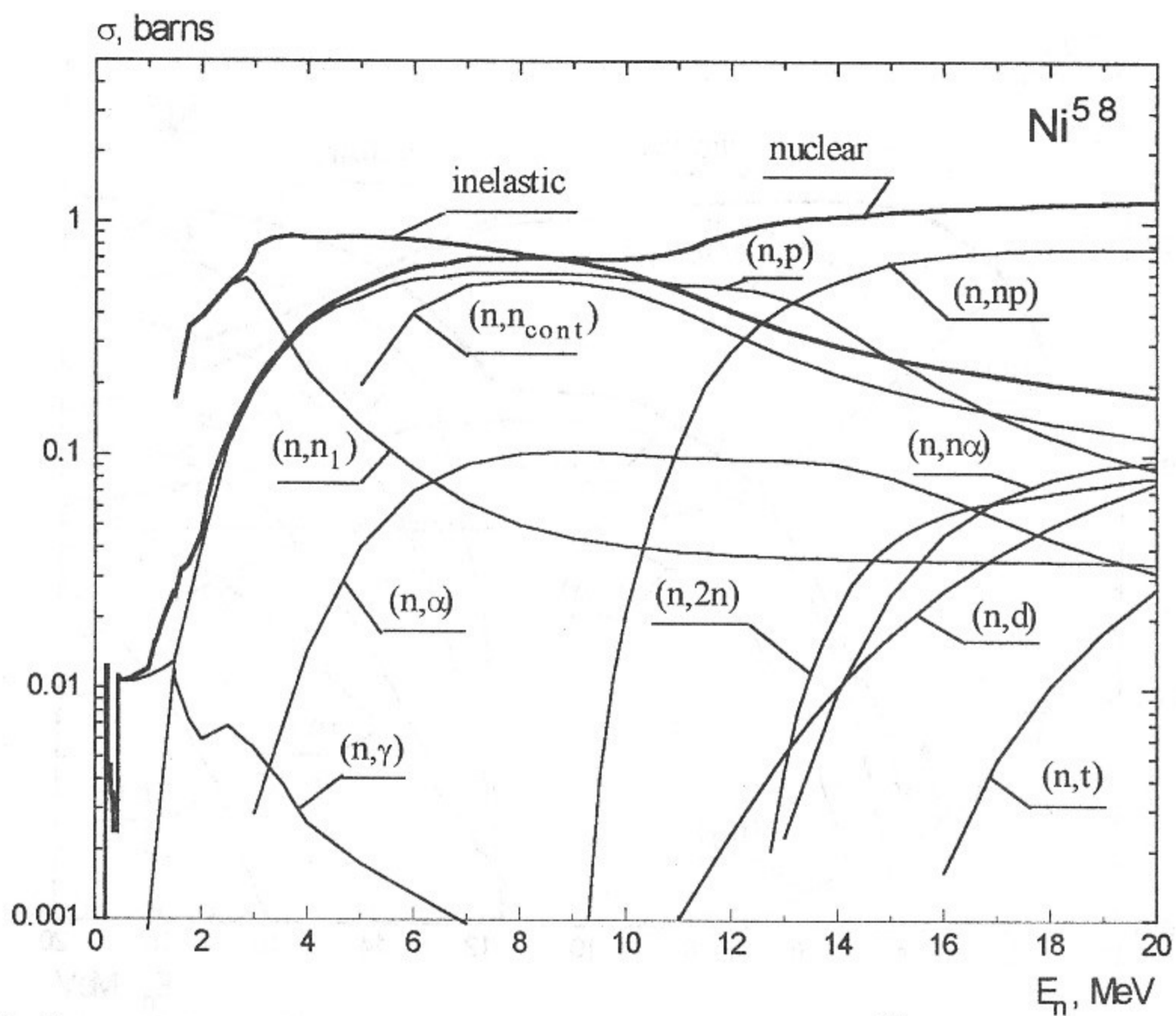


Рис. 8. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $Ni^{58}$  (JENDL).

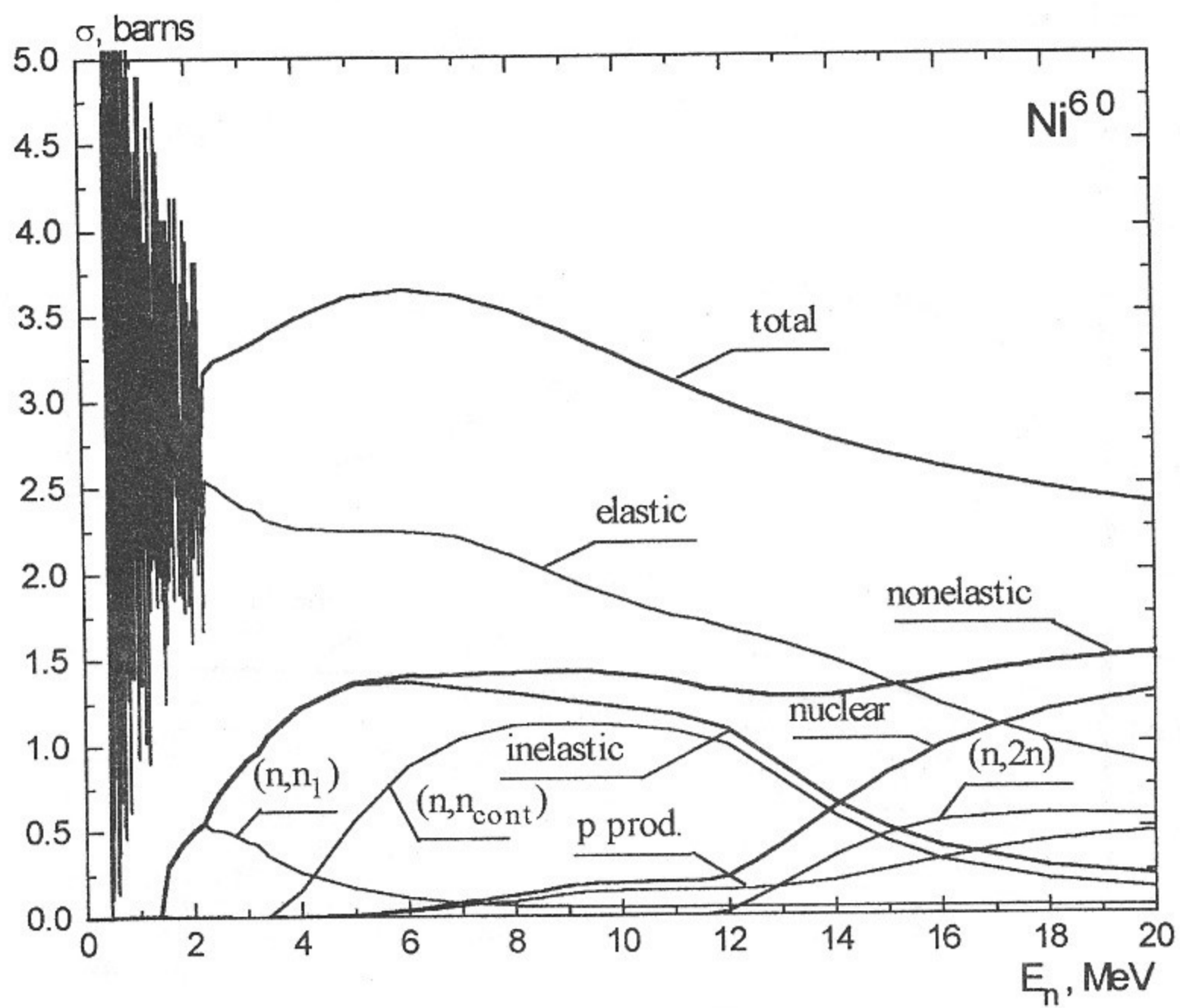


Рис. 9. Сечения взаимодействий нейтронов с  $\text{Ni}^{60}$  (JENDL).

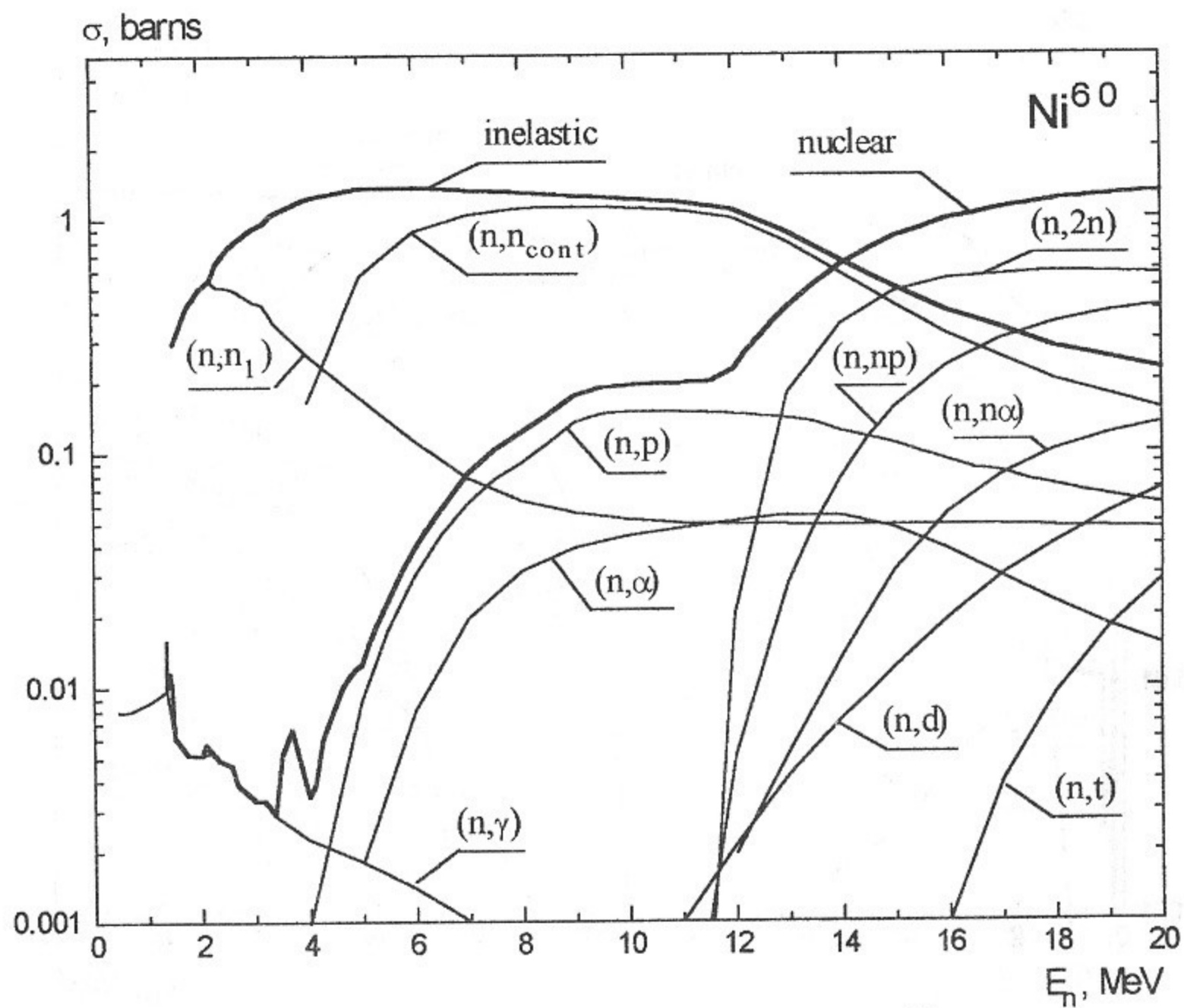


Рис. 10. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $\text{Ni}^{60}$  (JENDL).



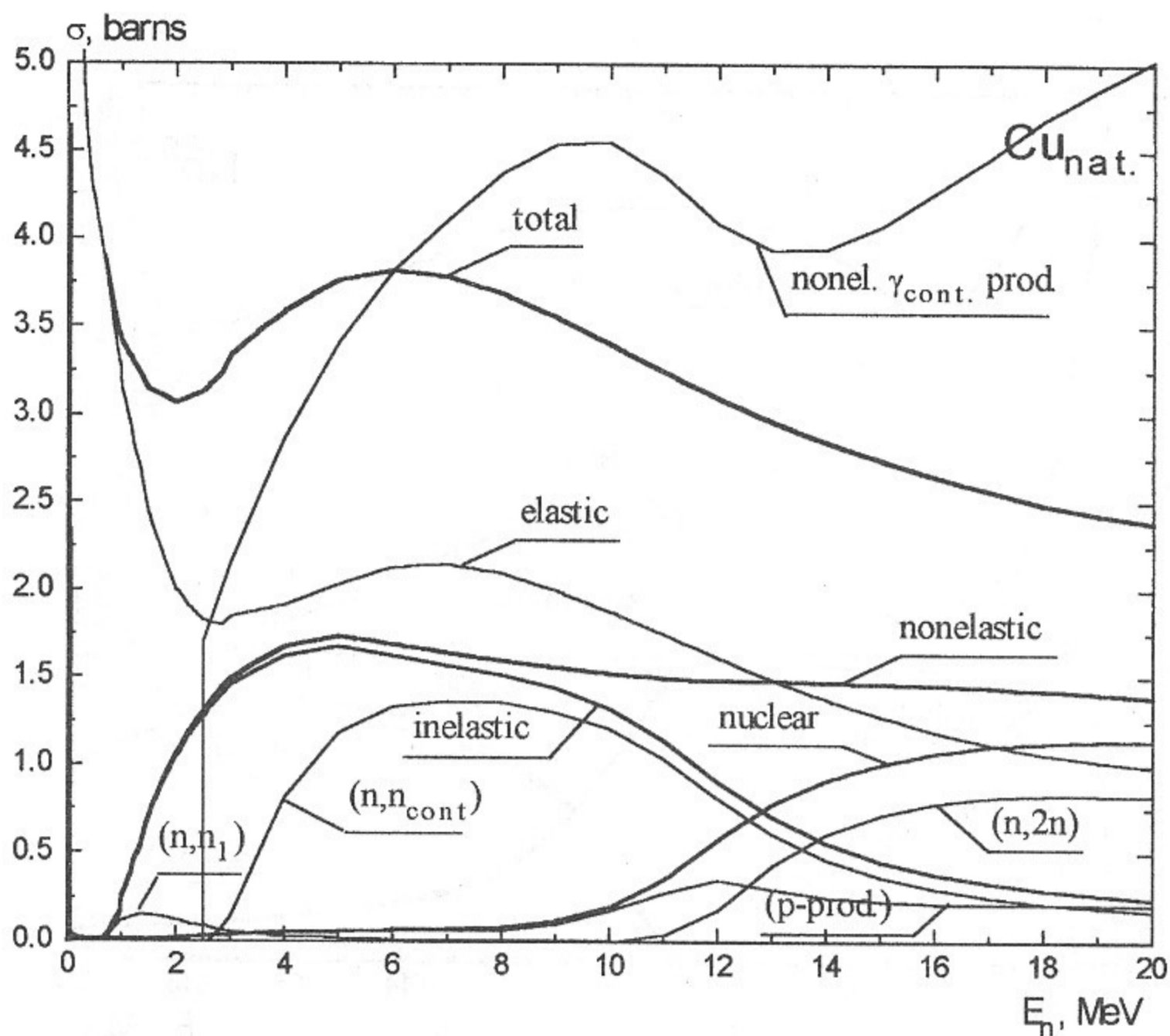


Рис. 11. Сечения взаимодействий нейтронов с  $\text{Cu}_{\text{nat}}$  ( $\text{Cu}^{63}$ -69.2%,  $\text{Cu}^{65}$ -30.8%) (JENDL).

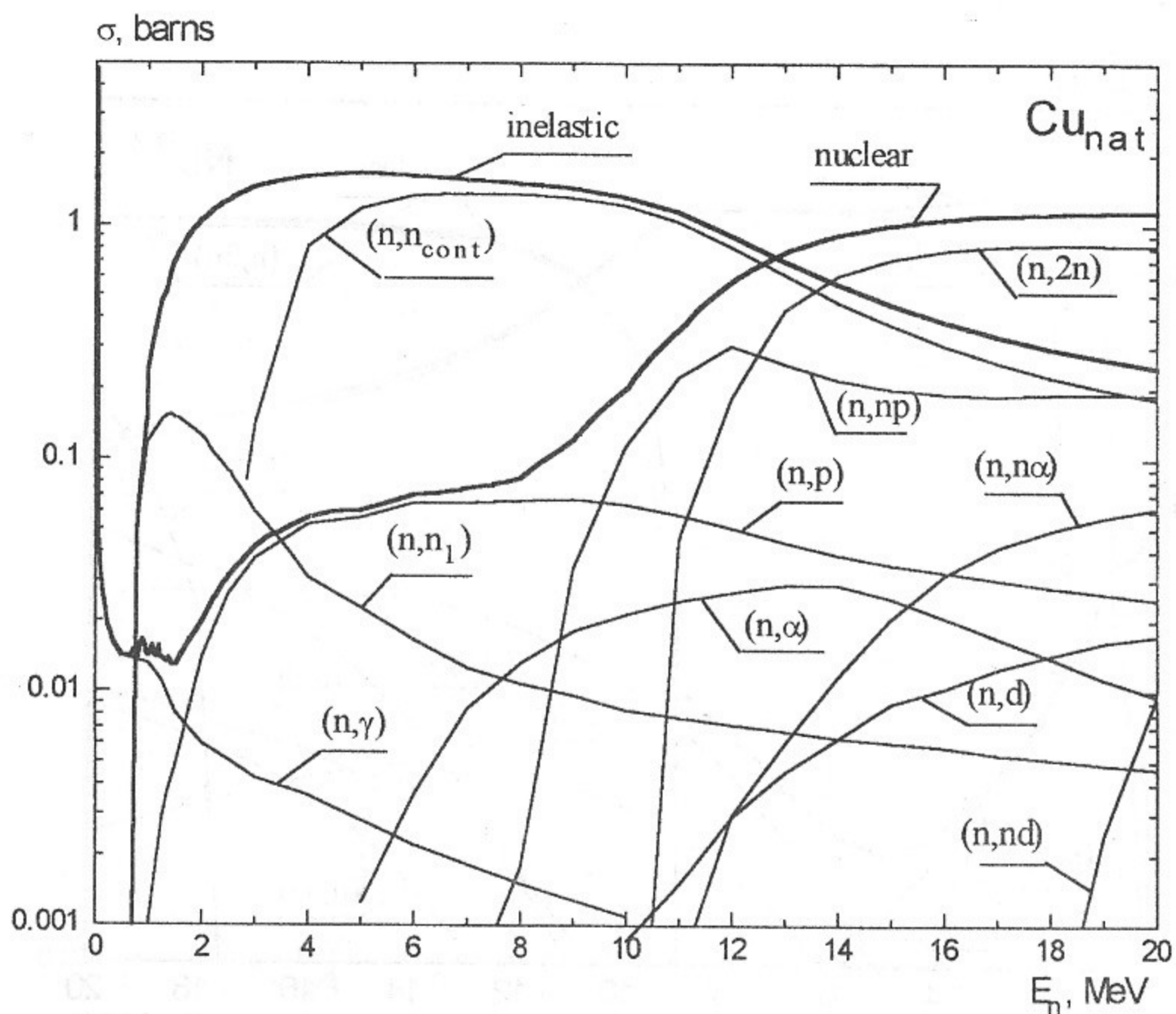


Рис. 12. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $\text{Cu}_{\text{nat}}$  (JENDL).

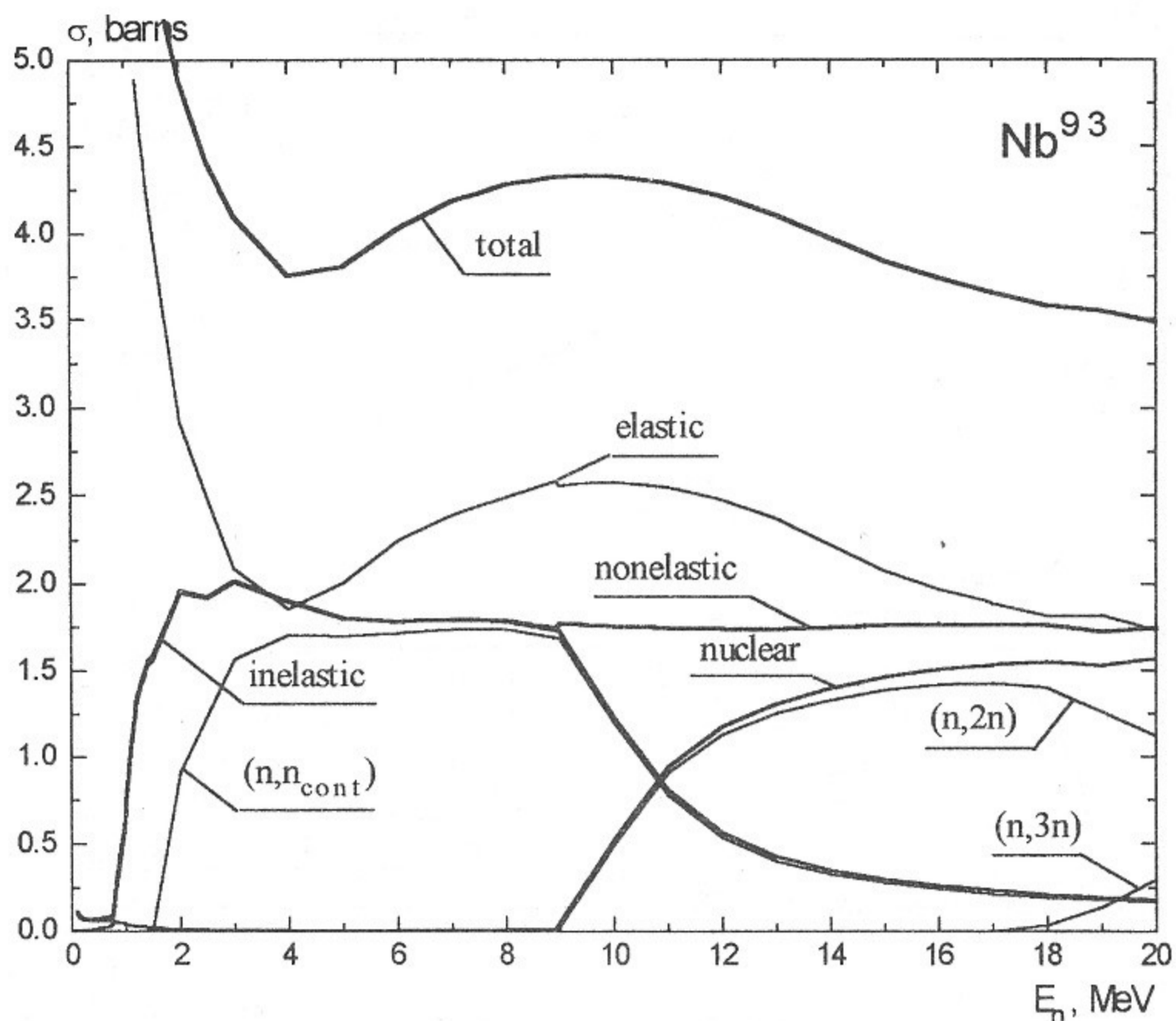


Рис. 13. Сечения взаимодействий нейтронов с  $\text{Nb}^{93}$  (JENDL).

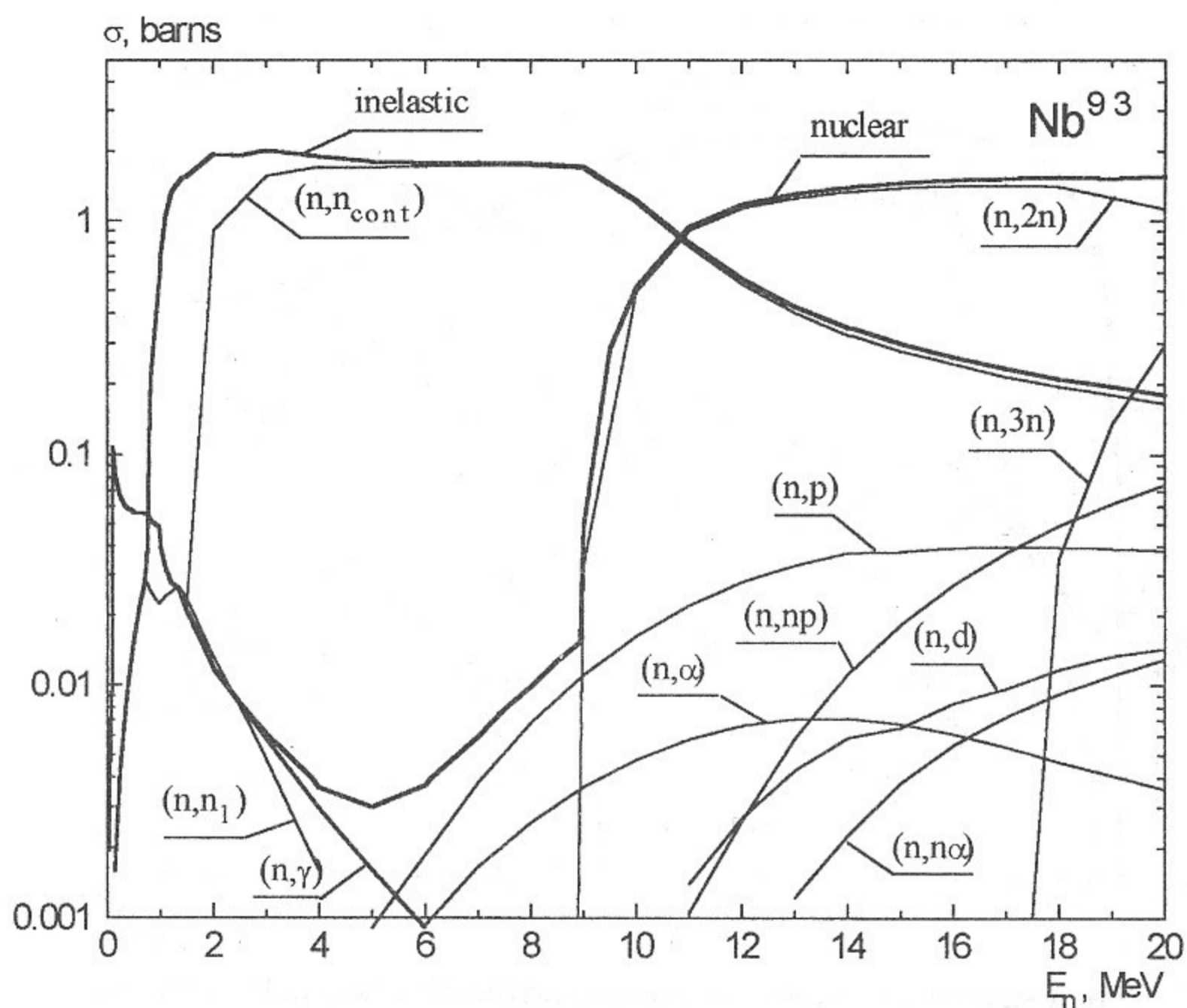


Рис. 14. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $\text{Nb}^{93}$  (JENDL).

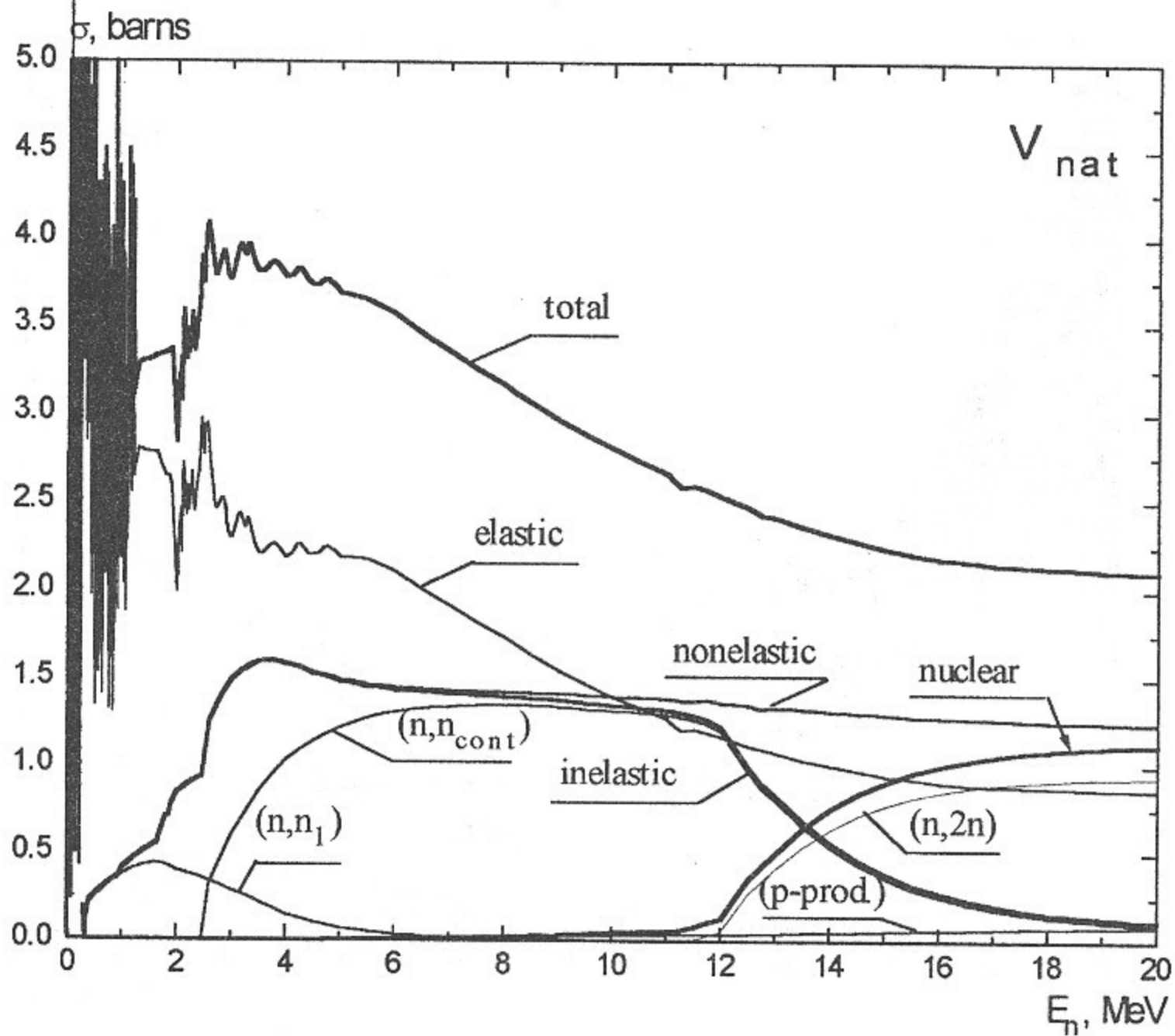


Рис. 15. Сечения взаимодействий нейтронов с  $V_{nat}$  (JEF).

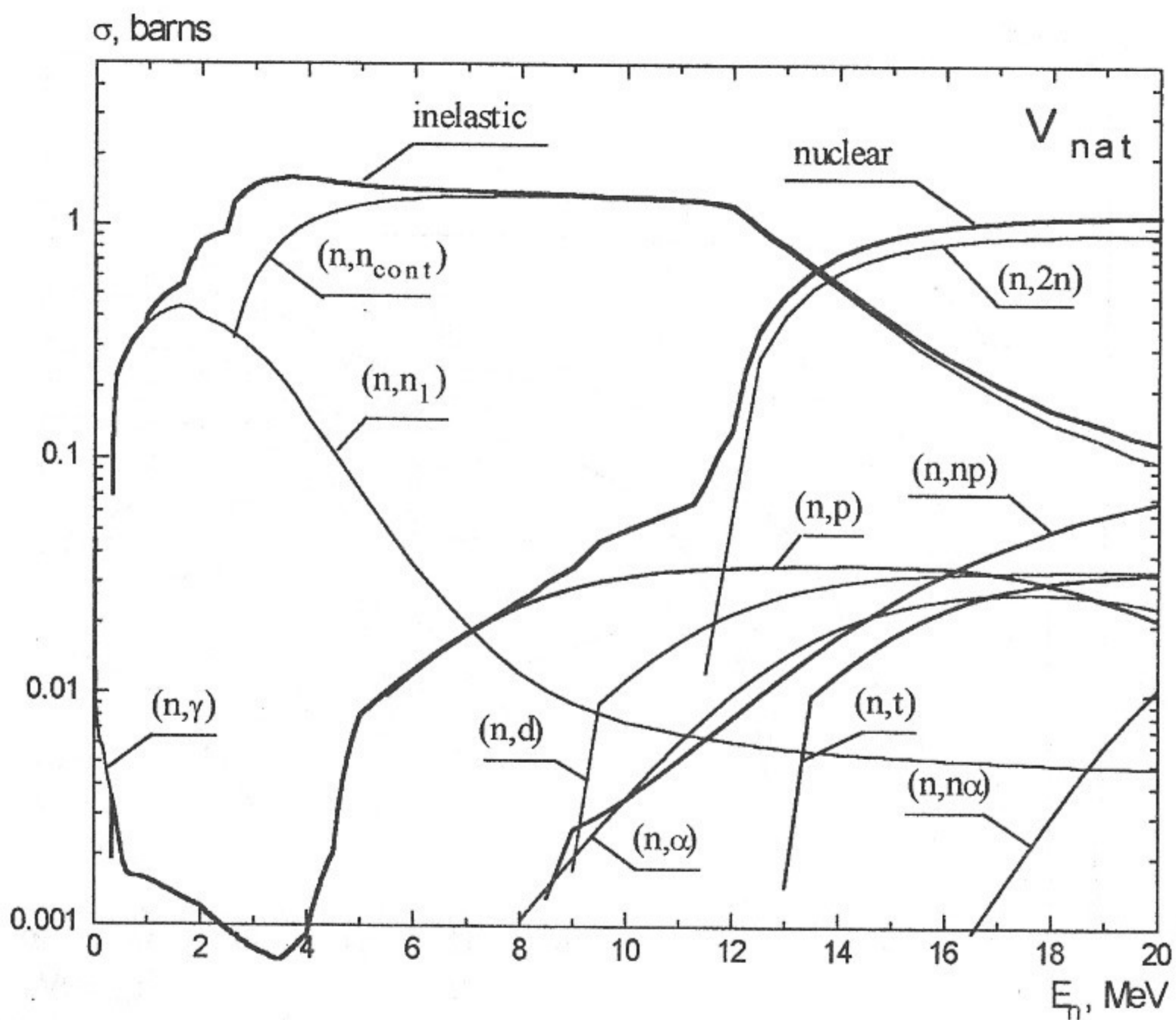


Рис. 16. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $V_{nat}$  (JEF).

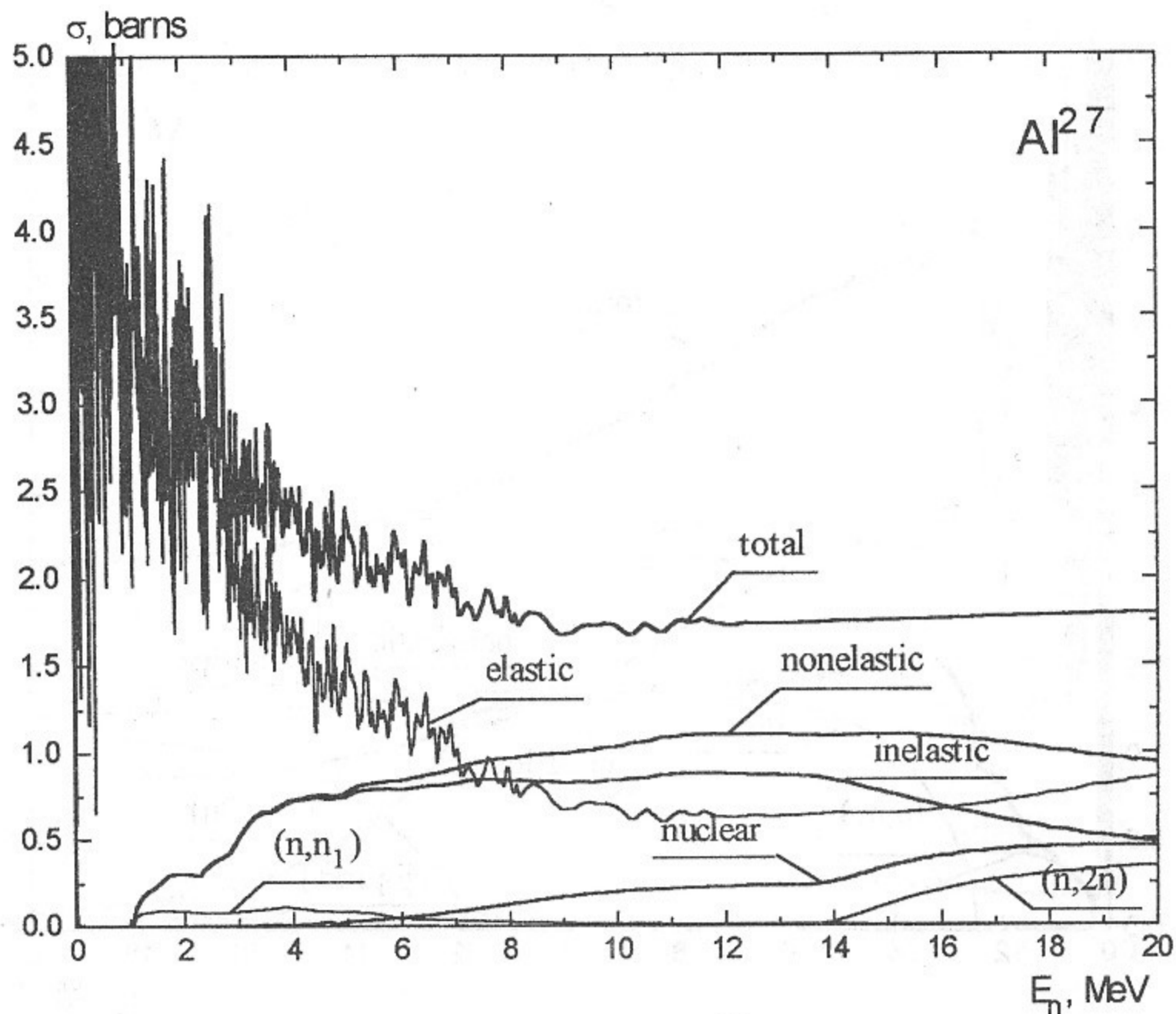


Рис. 17. Сечения взаимодействий нейтронов с  $Al^{27}$  (ENDF).

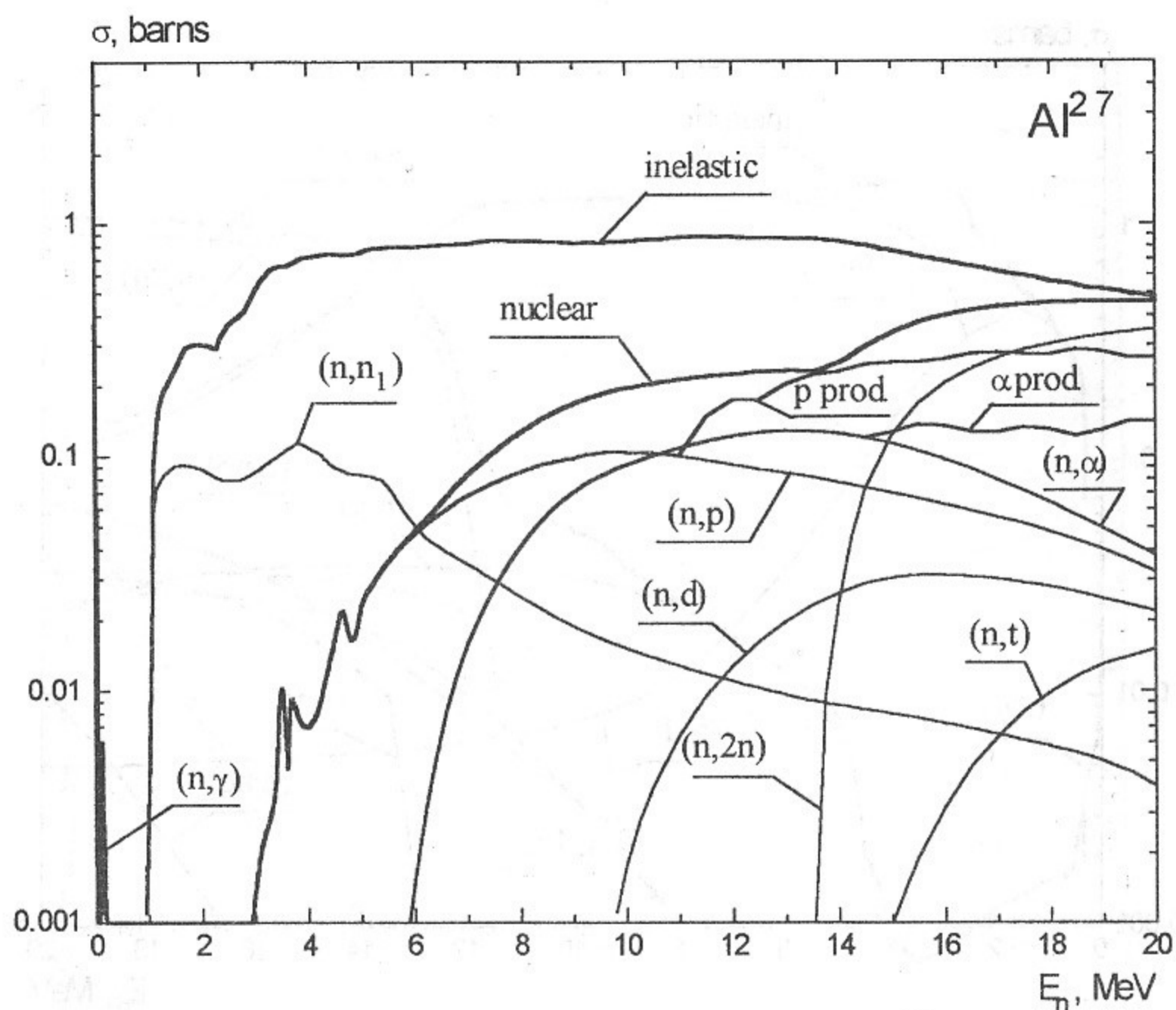


Рис. 18. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $Al^{27}$  (ENDF).

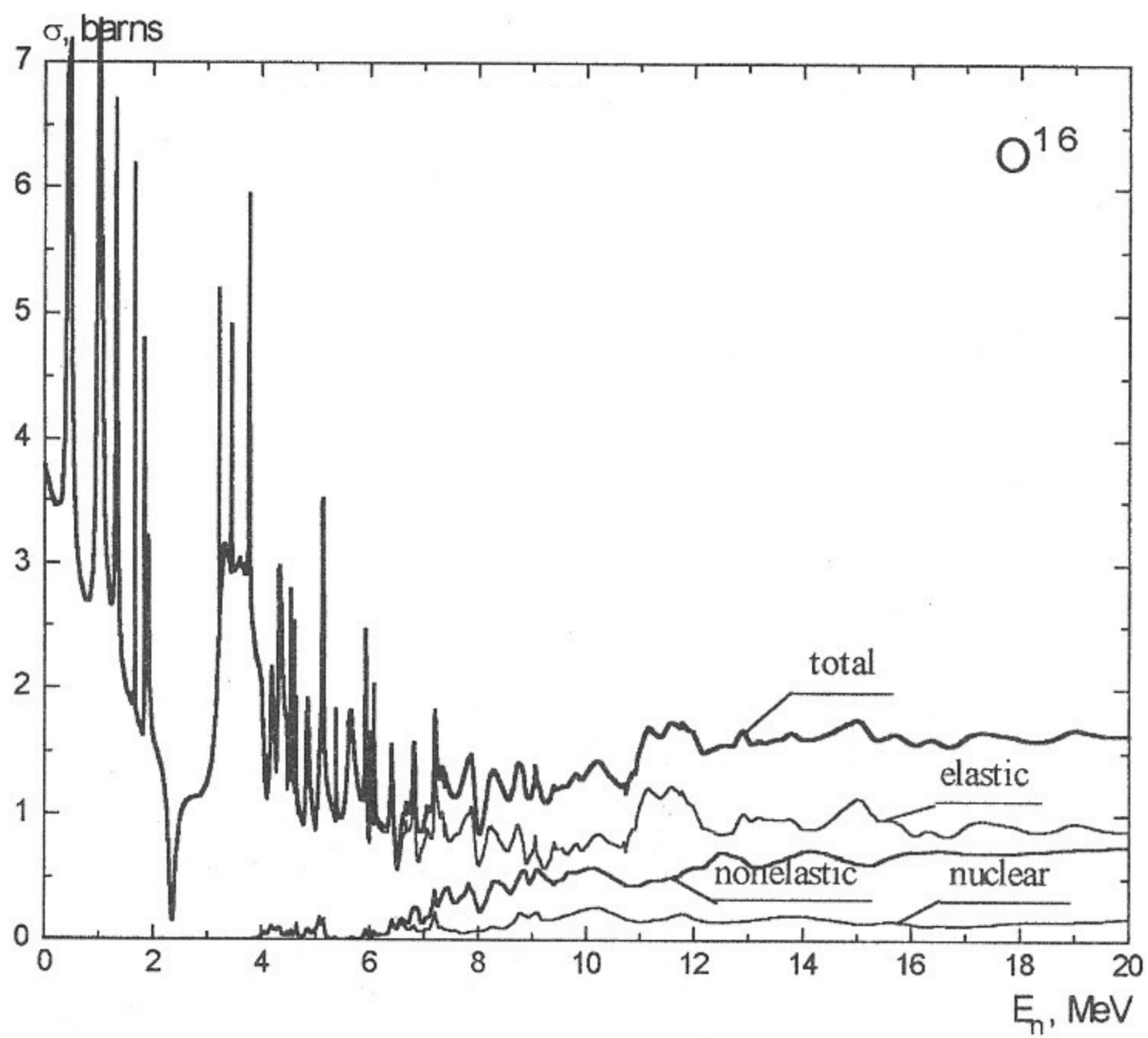


Рис. 19. Сечения взаимодействий нейтронов с  $O^{16}$  (JENDL).

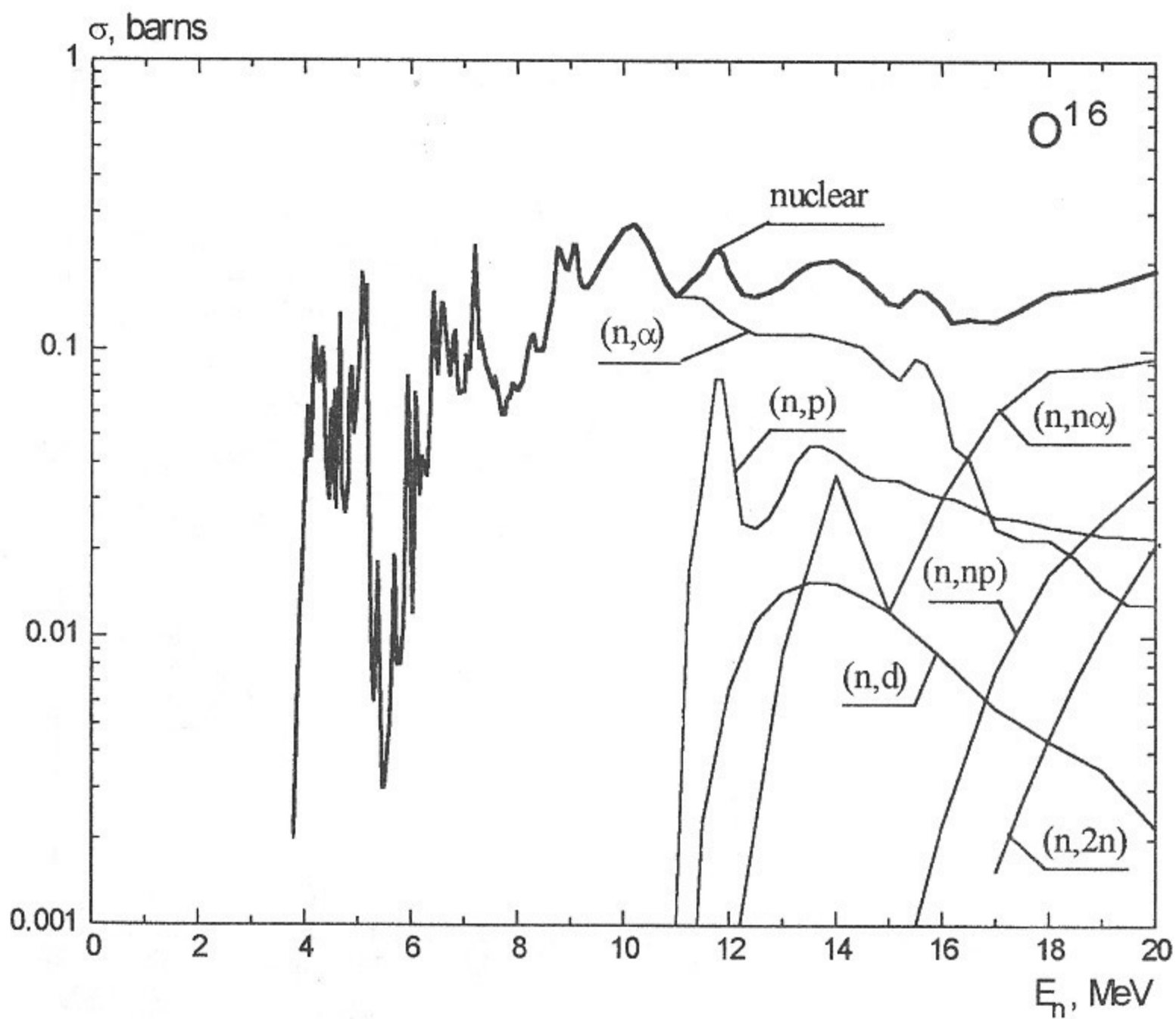


Рис. 20. Сечения ядерных реакций при взаимодействии нейтронов с  $O^{16}$  (JENDL).

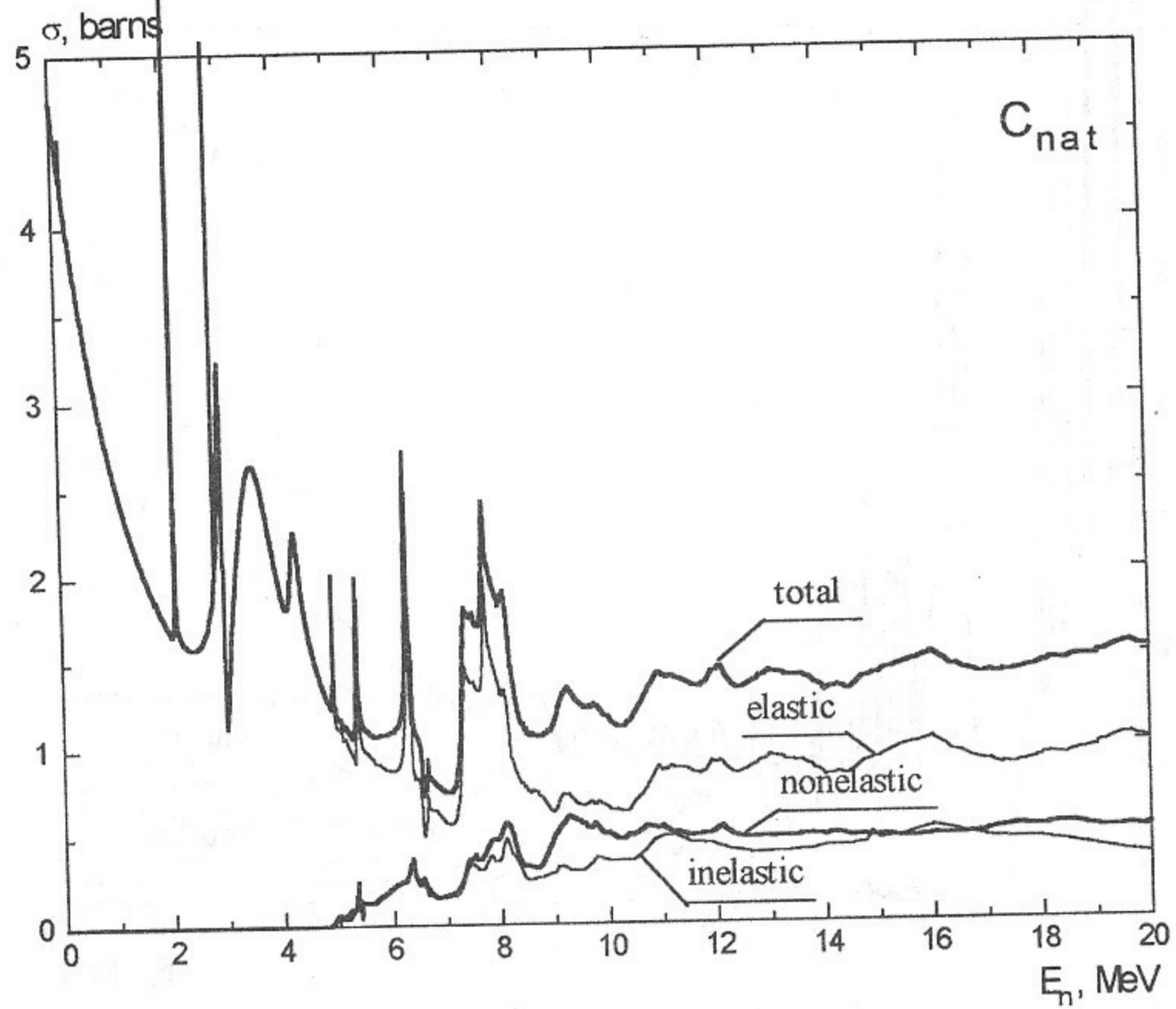


Рис. 21. Сечения взаимодействий нейтронов с  $C^{12}$  (JEF).

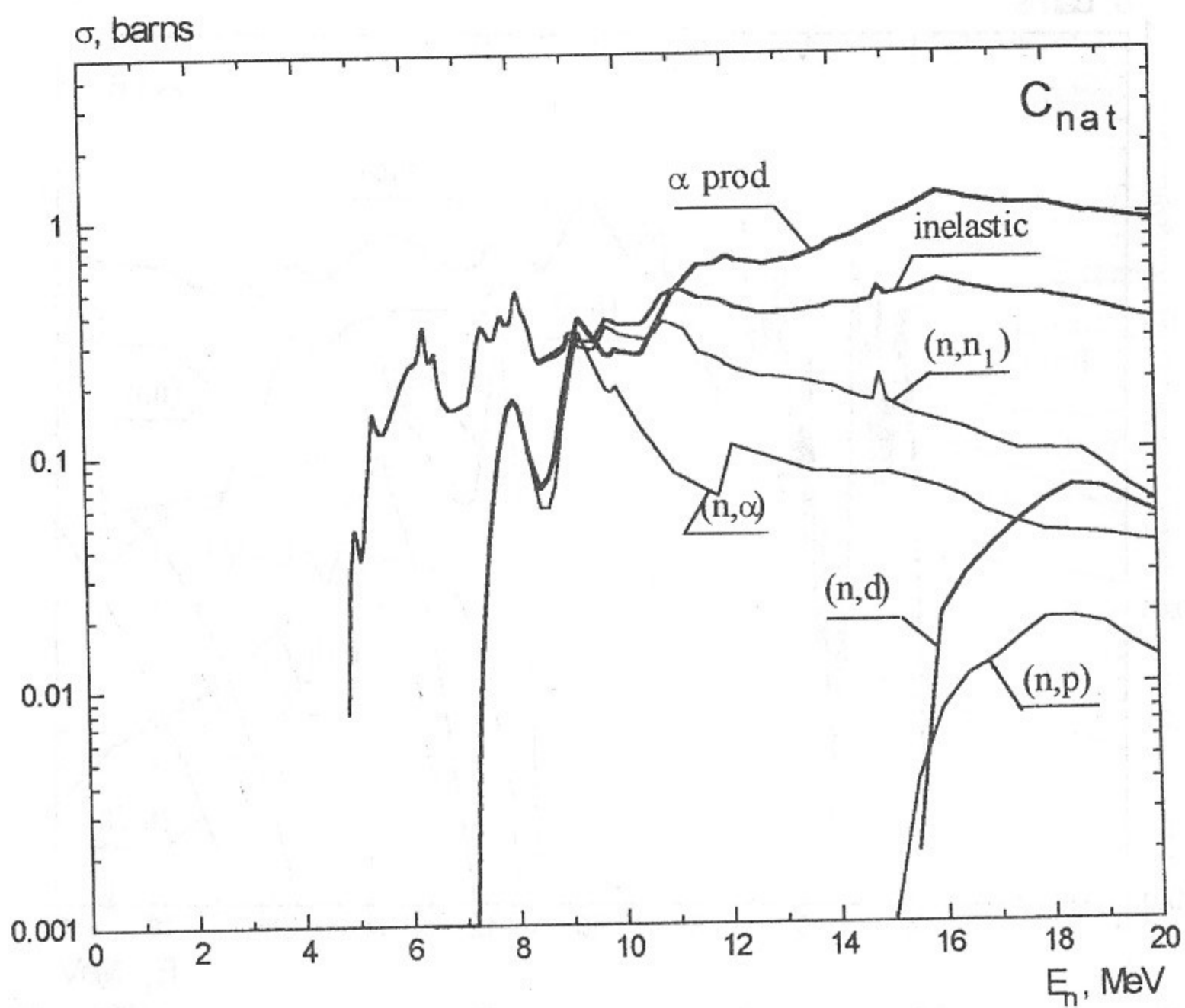


Рис. 22. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $C^{12}$  (JEF).

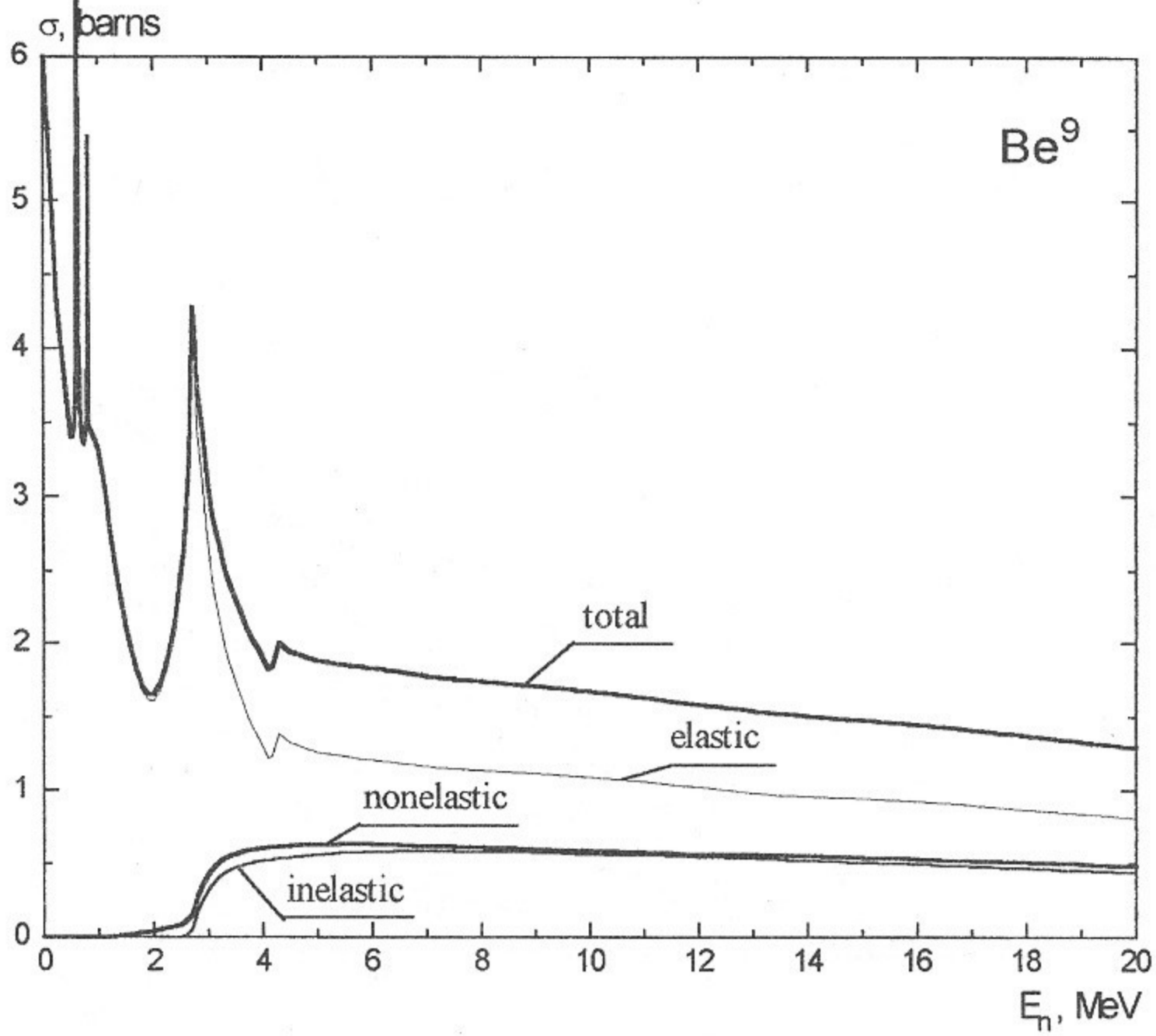


Рис. 23. Сечения взаимодействий нейтронов с  $\text{Be}^9$  (JEF).

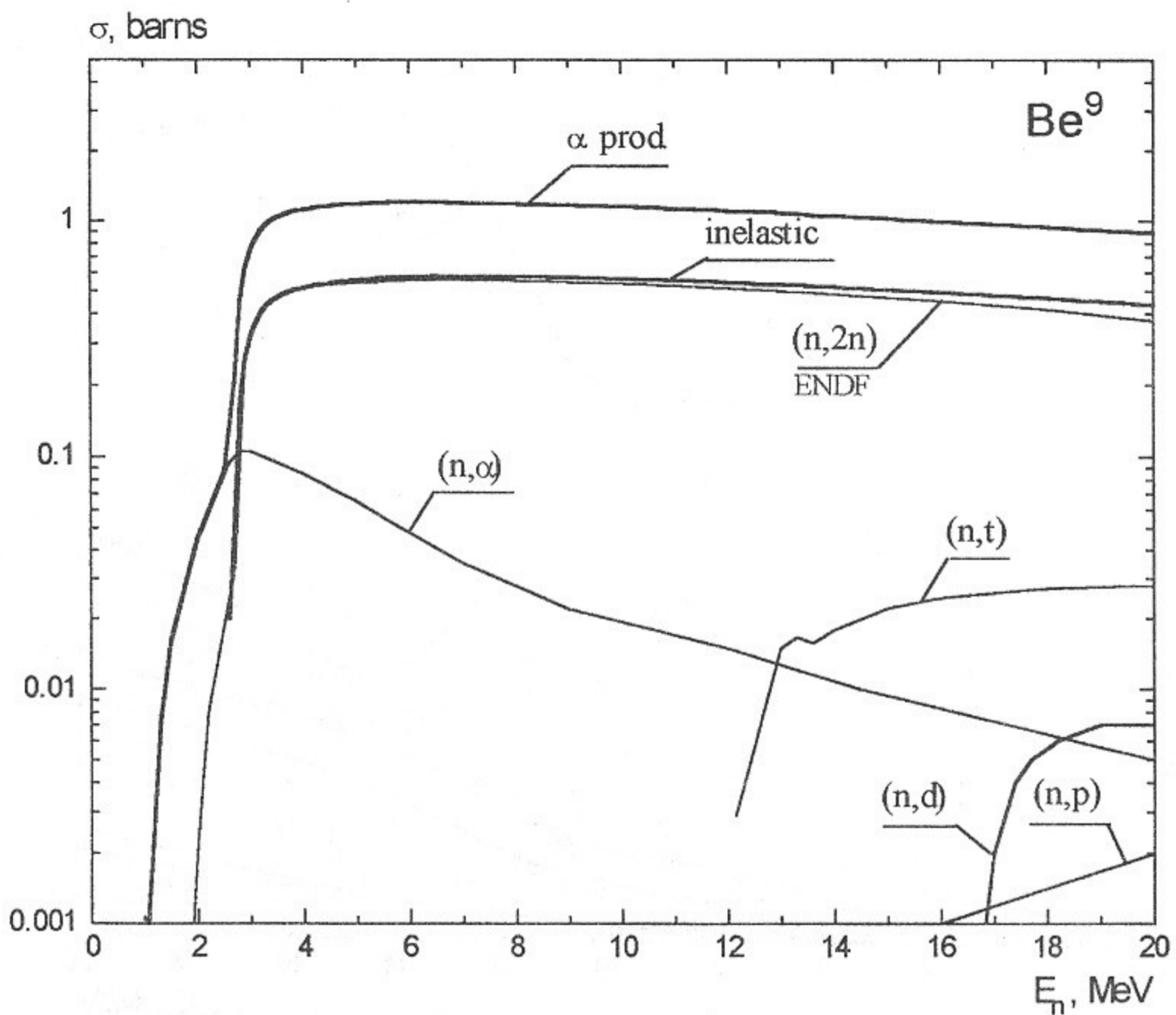


Рис. 24. Сечения неупругих взаимодействий нейтронов с  $\text{Be}^9$  (JEF).

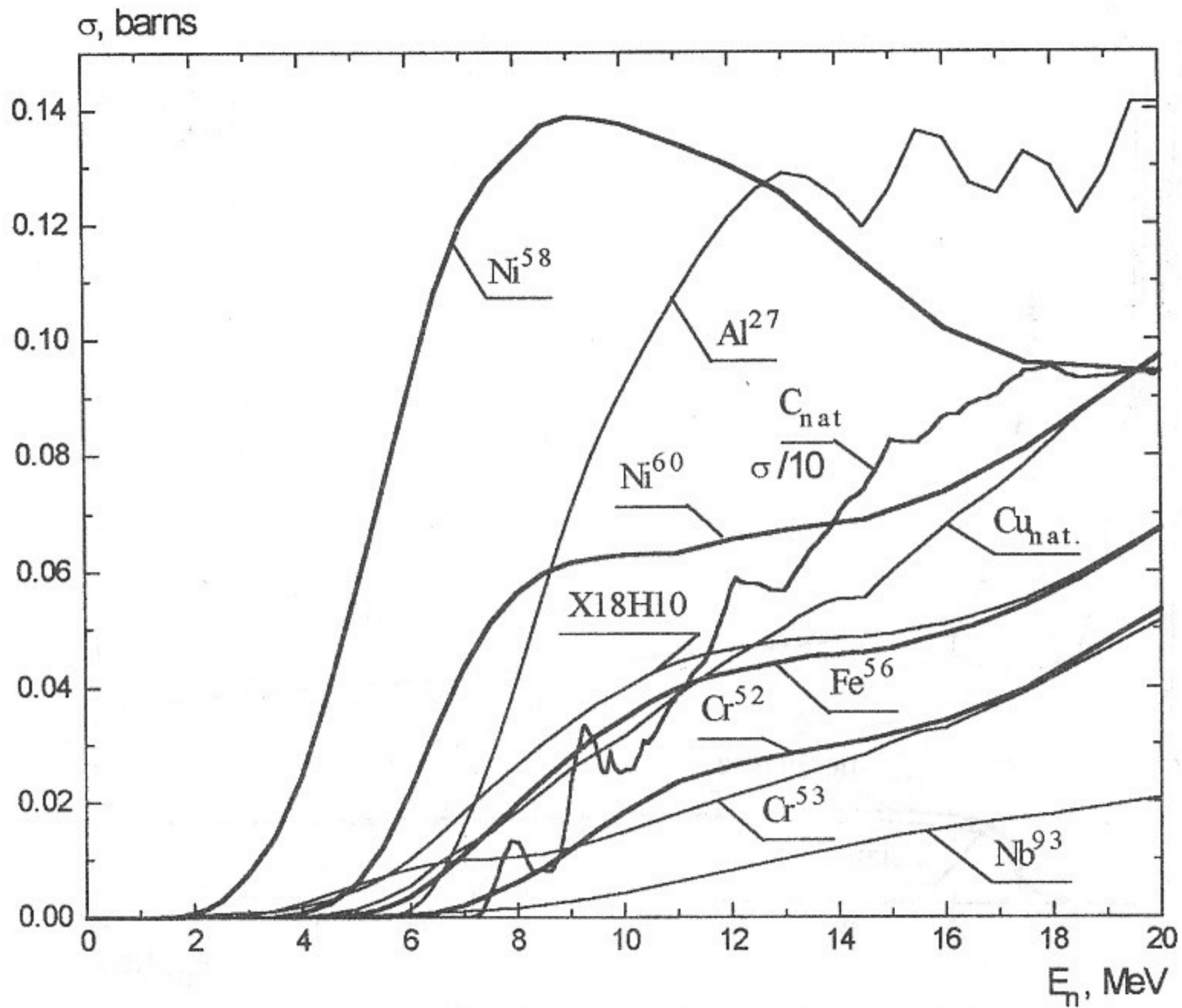


Рис. 25. Сечения образования  $\alpha$ -частиц при облучении нейтронами (ENDF).

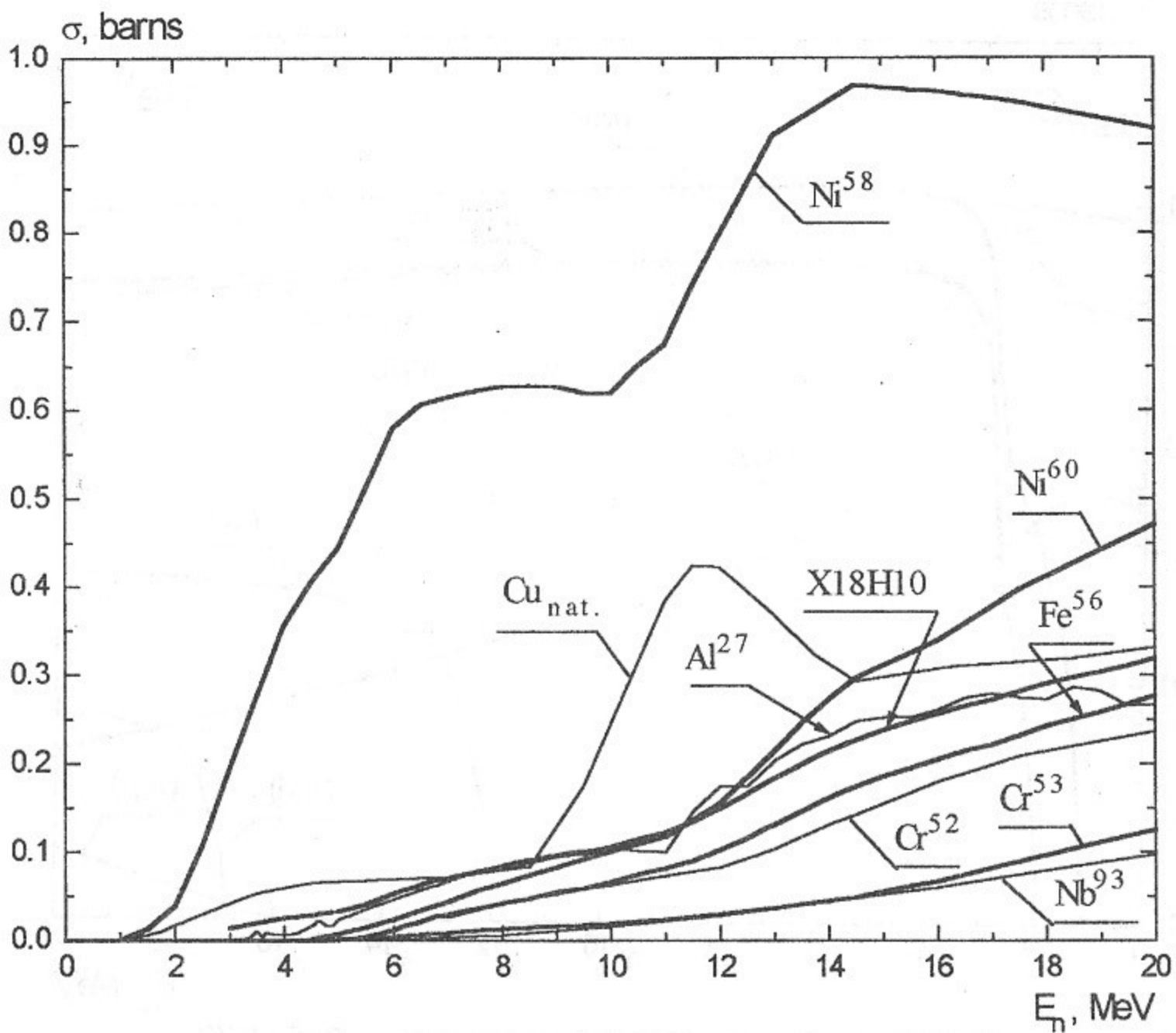


Рис. 26. Сечения образования протонов при облучении нейтронами (ENDF).



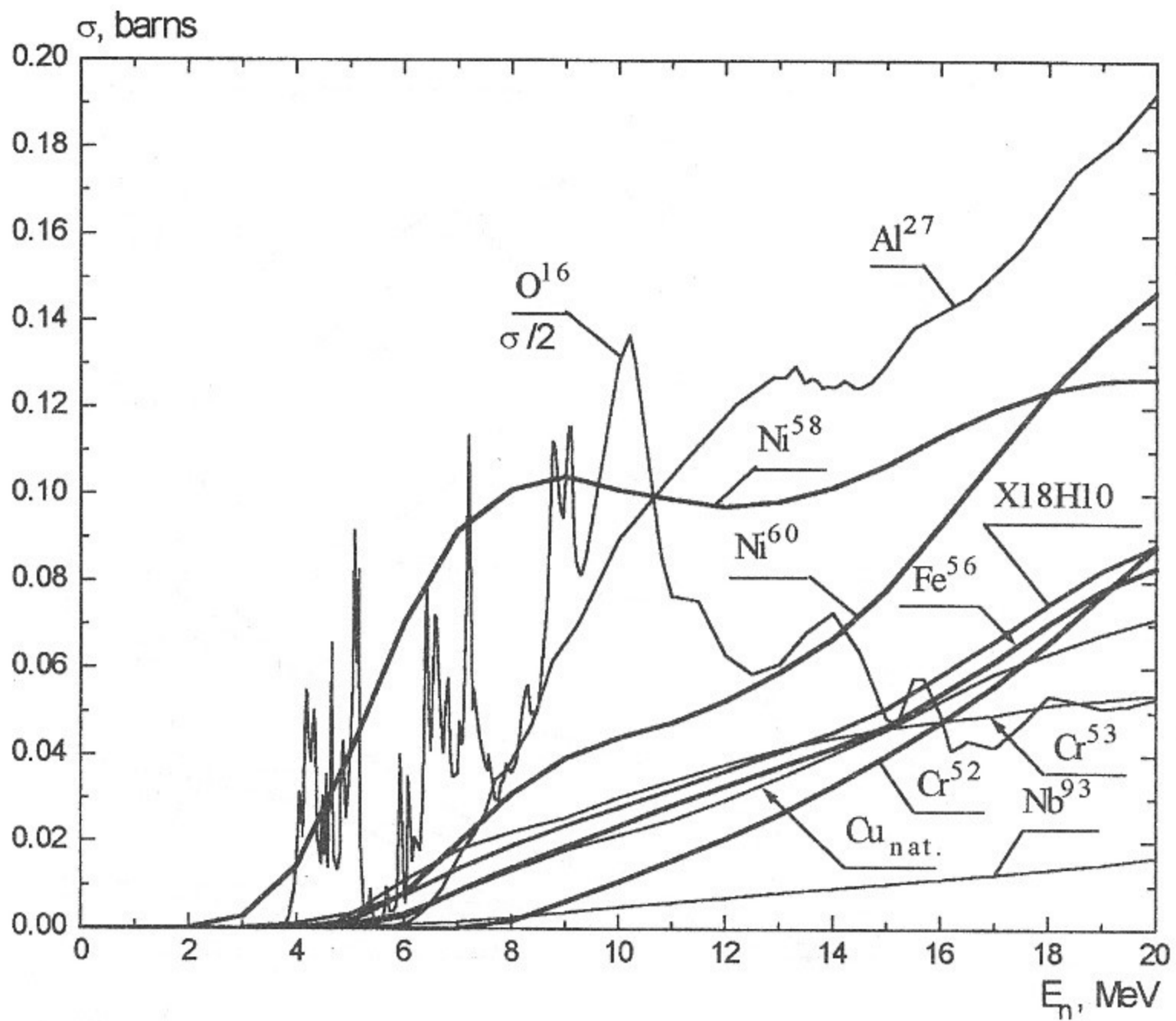


Рис. 27. Сечения образования  $\alpha$ -частиц при облучении нейтронами (JENDL).

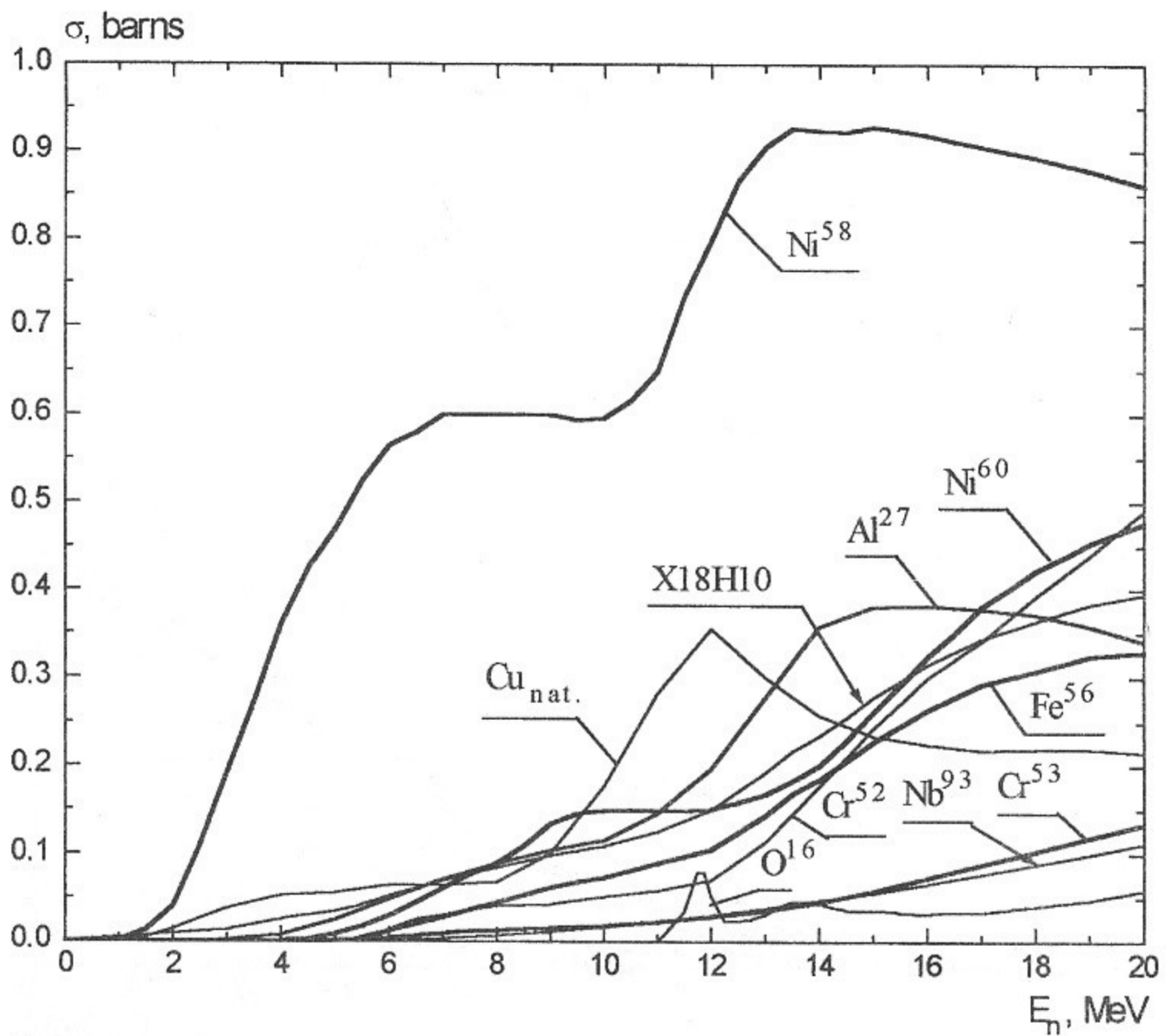


Рис. 28. Сечения образования протонов при облучении нейтронами (JENDL).

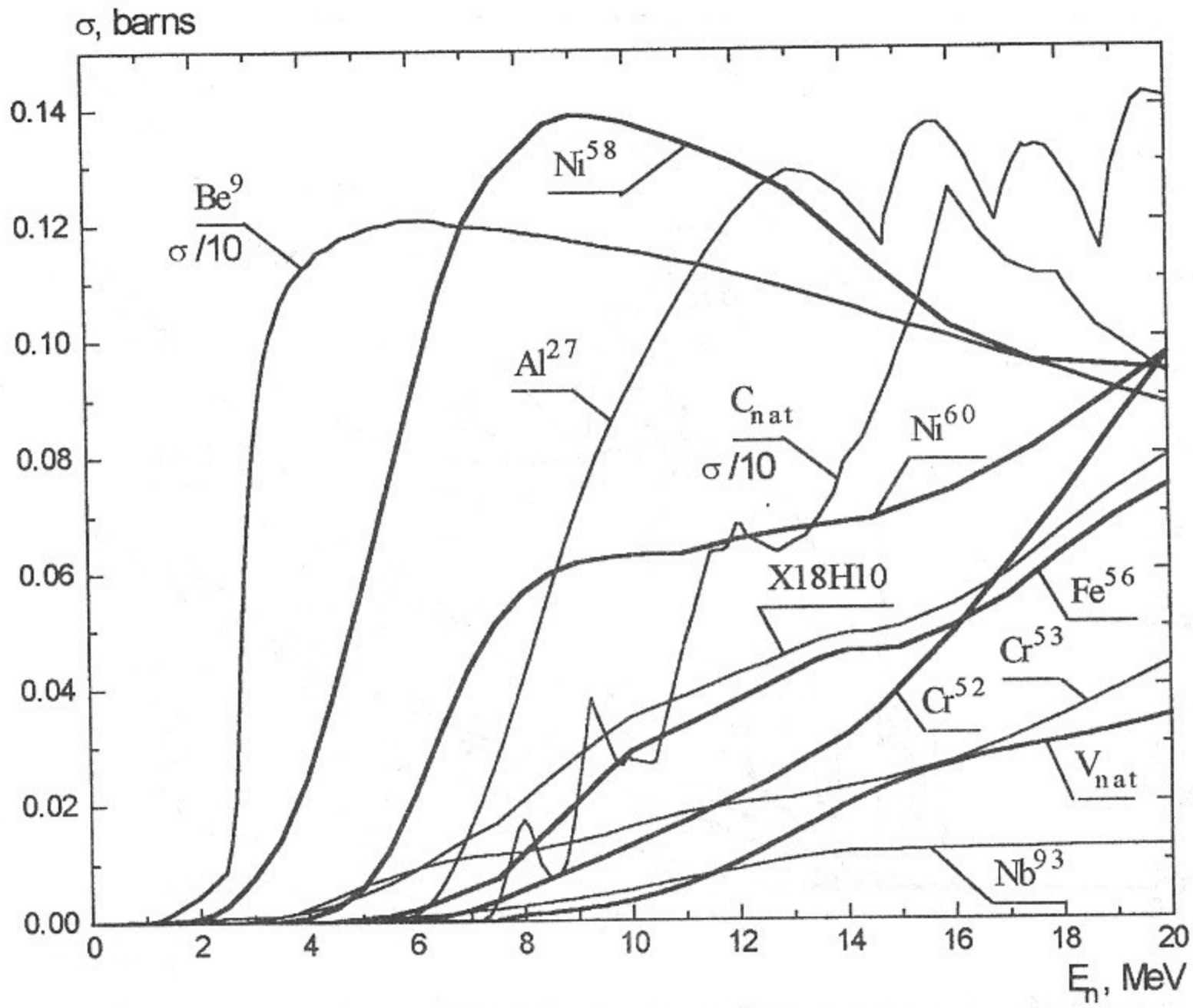


Рис. 29. Сечения образования  $\alpha$ -частиц при облучении нейтронами (JEF).

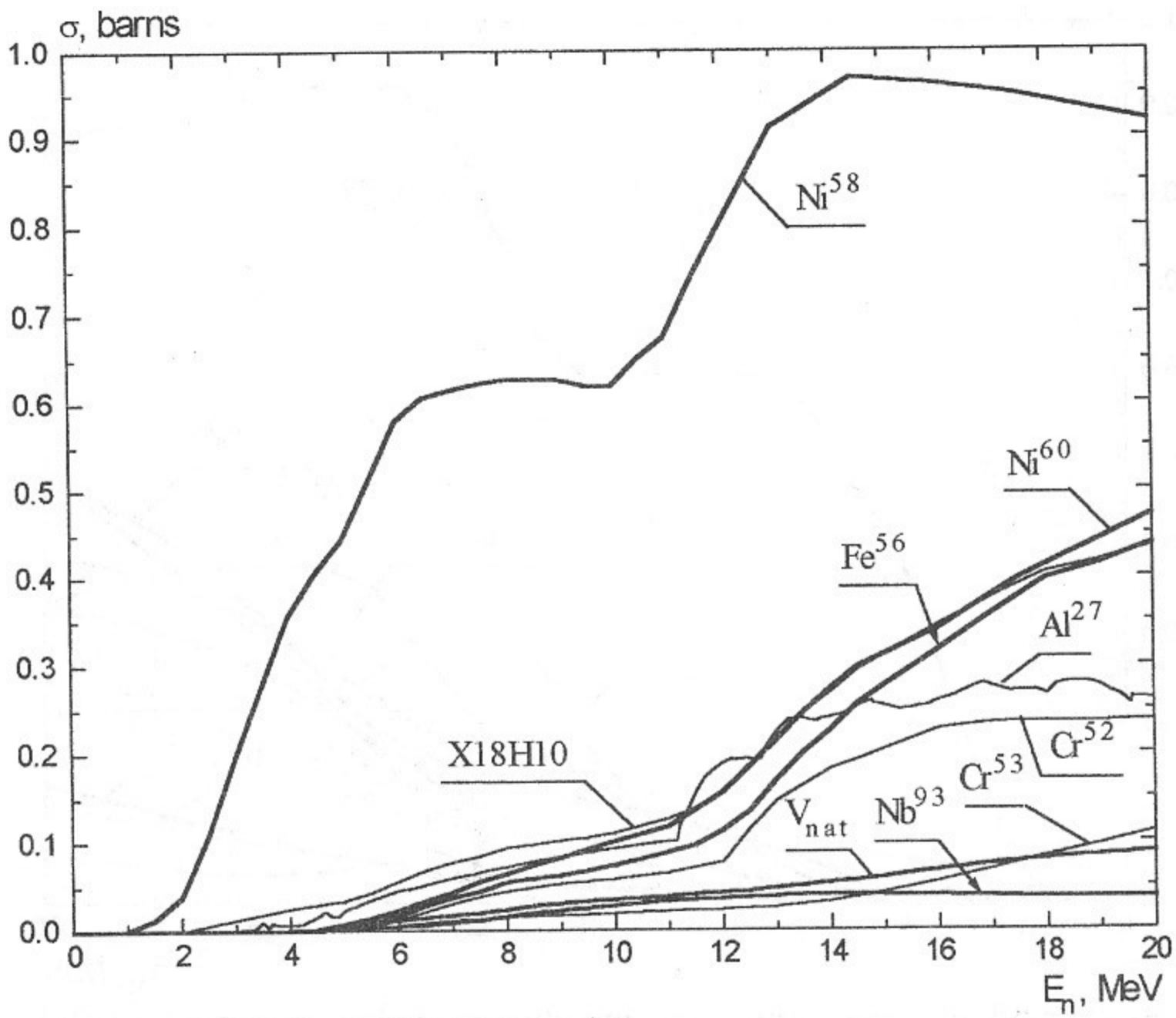


Рис. 30. Сечения образования протонов при облучении нейтронами (JEF).

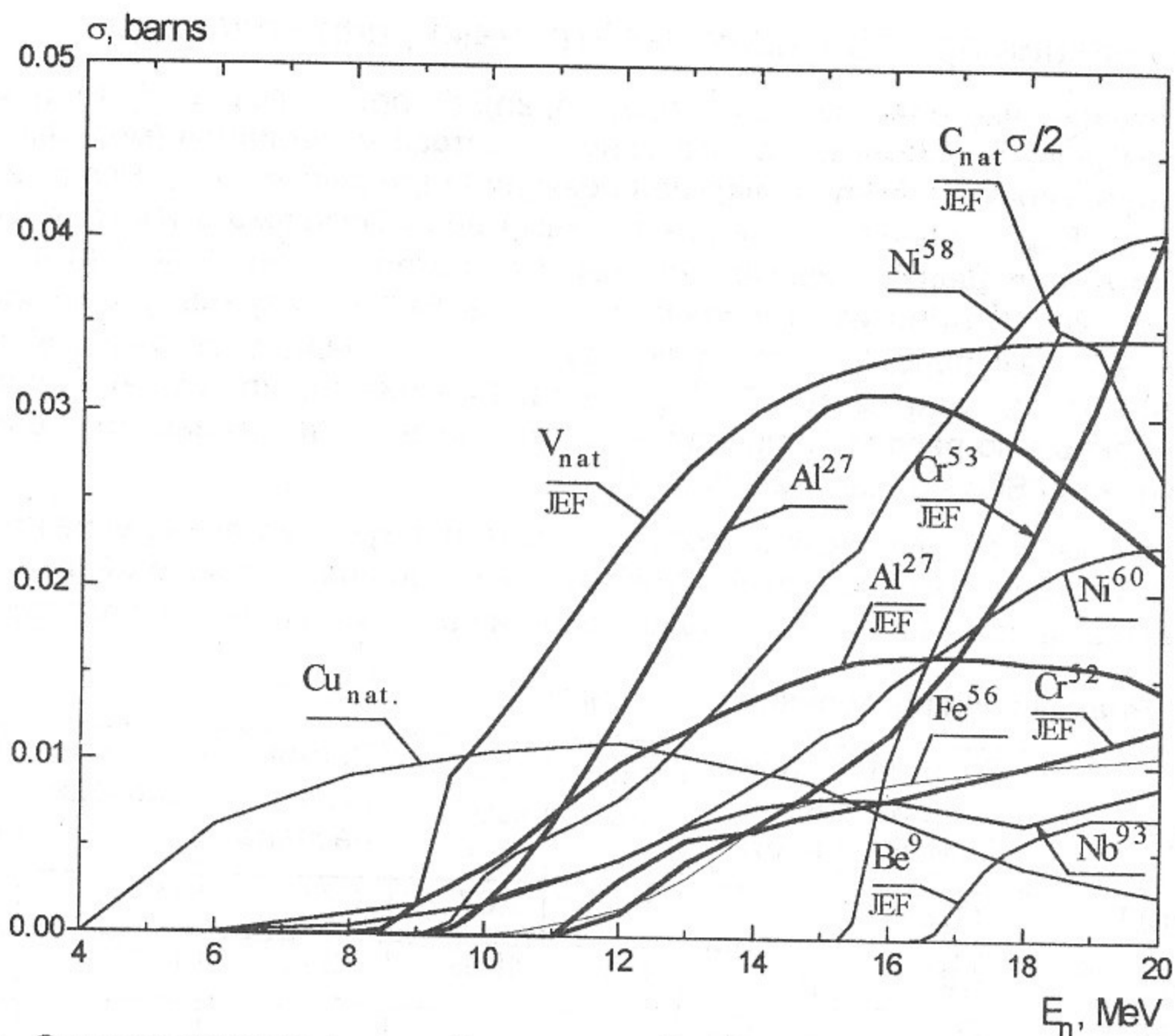


Рис. 31. Сечения образования дейтонов при облучении нейтронами (ENDF).

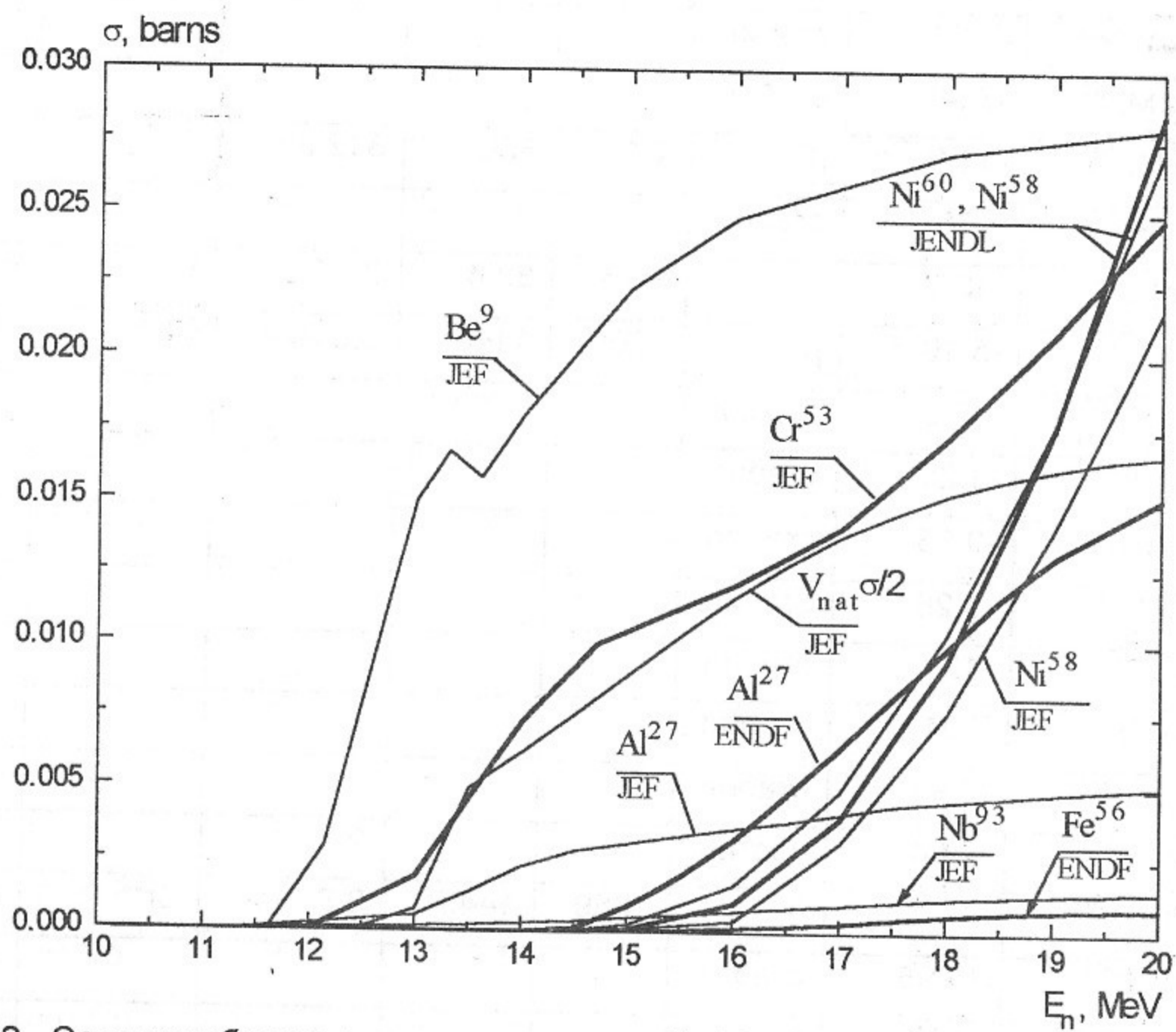


Рис. 32. Сечения образования тритонов при облучении нейтронами.

## Ядерные реакции при облучении нейтронами; цепи распадов.

В результате ядерных реакций: (n, p), (n, α), (n, 2n), (n, np), (n, nα), (n, d), (n, t), и т.д., происходит изменение элементного (изотопного) состава материалов (модификация). Каждая реакция характеризуется энергией реакции Q (дефект массы). Реакции с Q < 0 имеют порог:  $E_{\text{пор}} = -Q(A+1)/A$ , где A - атомный вес облучаемого изотопа. В ряде реакций образуются радиоактивные изотопы. Например,  $\text{Fe}^{56}(n, 2n)\text{Fe}^{55}(\beta^+)\text{Mn}^{55}$  - в результате (n, 2n) реакции из стабильного изотопа  $\text{Fe}^{56}$  образуется радиоактивный изотоп  $\text{Fe}^{55}$ , который превращается в результате  $\beta^+$  распада в стабильный изотоп  $\text{Mn}^{55}$ . Время полураспада изотоп  $\text{Fe}^{55}$  2.7 года. Реакция (n, 2n) имеет порог: Q = -11.2 МэВ. Данные по распаду радиоактивных изотопов представлены на сервере T2 Nuclear Information Service (<http://t2.lanl.gov/>).

Для каждого из перечисленных в таблице 1 изотопов цепочка его превращений до стабильного изотопа после реакций с нейтронами в диапазоне энергий до 20 МэВ представлена в таблице 2.  $E_{\beta}$  и  $E_{\gamma}$  - средние энергии  $\beta$  и  $\gamma$  излучения при распаде.

Таблица 2. Реакции при нейтронном облучении.

Реакция	Энергия реакции Q, МэВ	Радио-актив-ность	$E_{\beta}$ , кэВ	$E_{\gamma}$ , кэВ	Время полу-распада	Продукт распада	Радио-актив-ность
$\text{Fe}^{56}(n, 2n)\text{Fe}^{55}$	-11.2	$\beta^+$	4.07	1.67	2.7 г.	$\text{Mn}^{55}$	стабил.
$\text{Fe}^{56}(n, p)\text{Mn}^{56}$	-2.92	$\beta^-$	831	1692	2.6 ч.	$\text{Fe}^{56}$	стабил.
$\text{Fe}^{56}(n, np)\text{Mn}^{55}$	-10.2	стабил.					
$\text{Fe}^{56}(n, \alpha)\text{Cr}^{53}$	0.33	стабил.					
$\text{Fe}^{56}(n, n\alpha)\text{Cr}^{52}$	-7.61	стабил.					
$\text{Fe}^{56}(n, d)\text{Mn}^{55}$	-7.96	стабил.					
$\text{Fe}^{56}(n, t)\text{Mn}^{54}$	-11.9	$\beta^+$	4.1	836	312 дн.	$\text{Cr}^{54}$	стабил.
$\text{Fe}^{56}(n, \gamma)\text{Fe}^{57}$	7.65	стабил.					
$\text{Cr}^{52}(n, 2n)\text{Cr}^{51}$	-12.0	$\beta^+$	3.76	33.4	27.7 дн.	$\text{V}^{51}$	стабил.
$\text{Cr}^{52}(n, p)\text{V}^{52}$	-3.19	$\beta^-$	1069	1445	3.8 мин.	$\text{Cr}^{52}$	стабил.
$\text{Cr}^{52}(n, np)\text{V}^{51}$	-10.5	стабил.					
$\text{Cr}^{52}(n, \alpha)\text{Ti}^{49}$	-1.21	стабил.					
$\text{Cr}^{52}(n, n\alpha)\text{Ti}^{48}$	-9.35	стабил.					
$\text{Cr}^{52}(n, d)\text{V}^{51}$	-8.28	стабил.					
$\text{Cr}^{52}(n, t)\text{V}^{50}$	-13.1	стабил.					
$\text{Cr}^{52}(n, \gamma)\text{Cr}^{53}$	7.94	стабил.					
$\text{Cr}^{53}(n, 2n)\text{Cr}^{52}$	-7.94	стабил.					
$\text{Cr}^{53}(n, p)\text{V}^{53}$	-2.64	нестаб.			?		
$\text{Cr}^{53}(n, np)\text{V}^{52}$	-11.1	$\beta^-$	1069	1445	3.8 мин.	$\text{Cr}^{52}$	стабил.
$\text{Cr}^{53}(n, \alpha)\text{Ti}^{50}$	1.795	стабил.					
$\text{Cr}^{53}(n, n\alpha)\text{Ti}^{49}$	-9.15	стабил.					

Реакция	Энергия реакции Q, МэВ	Радио-актив-ность	$E_{\beta}$ , кэВ	$E_{\gamma}$ , кэВ	Время полу-распада	Продукт распада	Радио-актив-ность
$\text{Cr}^{53} (n, d) \text{V}^{52}$	-8.91	$\beta^-$	1069	1445	3.8 мин.	$\text{Cr}^{52}$	стабил.
$\text{Cr}^{53} (n, t) \text{V}^{51}$	-9.96	стабил.					
$\text{Cr}^{53} (n, \gamma) \text{Cr}^{54}$	9.72	стабил.					
$\text{Ni}^{58} (n, 2n) \text{Ni}^{57}$	-12.2	$\beta^+$	155	1942	35.7 ч.	$\text{Co}^{57}$	$\beta^+$
$\text{Ni}^{58} (n, p) \text{Co}^{58}$	0.4	$\beta^+$	34.1	976	70.9 дн.	$\text{Fe}^{58}$	стабил.
$\text{Ni}^{58} (n, np) \text{Co}^{57}$	-8.17	$\beta^+$	8.87	123.7	272 дн.	$\text{Fe}^{57}$	стабил.
$\text{Ni}^{58} (n, \alpha) \text{Fe}^{55}$	2.91	$\beta^+$	4.07	1.67	2.7 г.	$\text{Mn}^{55}$	стабил.
$\text{Ni}^{58} (n, n\alpha) \text{Fe}^{54}$	-6.41	стабил.					
$\text{Ni}^{58} (n, d) \text{Co}^{57}$	-5.86	$\beta^+$	8.87	123.7	272 дн.	$\text{Fe}^{57}$	стабил.
$\text{Ni}^{58} (n, t) \text{Co}^{56}$	-11.1	нестаб.			?		
$\text{Ni}^{58} (n, \gamma) \text{Ni}^{59}$	9.0	$\beta^+$	4.41	2.95	$7.5 \cdot 10^4$ л.	$\text{Co}^{59}$	стабил.
$\text{Ni}^{60} (n, 2n) \text{Ni}^{59}$	-11.4	$\beta^+$	4.41	2.95	$7.5 \cdot 10^4$ л.	$\text{Co}^{59}$	стабил.
$\text{Ni}^{60} (n, p) \text{Co}^{60}$	-2.04	$\beta^-$	96.4	2504	5.3 г.	$\text{Ni}^{60}$	стабил.
$\text{Ni}^{60} (n, np) \text{Co}^{59}$	-9.53	стабил.					
$\text{Ni}^{60} (n, \alpha) \text{Fe}^{57}$	1.53	стабил.					
$\text{Ni}^{60} (n, n\alpha) \text{Fe}^{56}$	-6.29	стабил.					
$\text{Ni}^{60} (n, d) \text{Co}^{59}$	-7.23	стабил.					
$\text{Ni}^{60} (n, t) \text{Co}^{58}$	-11.5	$\beta^+$	34.1	976	70.9 дн.	$\text{Fe}^{58}$	стабил.
$\text{Ni}^{60} (n, \gamma) \text{Ni}^{61}$	7.82	стабил.					
$\text{Cu}^{63} (n, 2n) \text{Cu}^{62}$	-10.9	$\beta^+$	1280	1003	9.7 мин.	$\text{Ni}^{62}$	стабил.
$\text{Cu}^{63} (n, p) \text{Ni}^{63}$	0.72	$\beta^-$	17.1		100 л.	$\text{Cu}^{63}$	стабил.
$\text{Cu}^{63} (n, np) \text{Ni}^{62}$	-6.13	стабил.					
$\text{Cu}^{63} (n, \alpha) \text{Co}^{60}$	1.71	$\beta^-$	96.4	2504	5.3 г.	$\text{Ni}^{60}$	стабил.
$\text{Cu}^{63} (n, n\alpha) \text{Co}^{59}$	-5.78	стабил.					
$\text{Cu}^{63} (n, d) \text{Ni}^{62}$	-3.9	стабил.					
$\text{Cu}^{63} (n, nd) \text{Ni}^{61}$	-14.5	стабил.					
$\text{Cu}^{63} (n, \gamma) \text{Cu}^{64}$	7.92	$\beta^-, \beta^+$	122.4	190.7	12.7 ч.	$\text{Zn}^{64}, \text{Ni}^{64}$	стабил.
$\text{Cu}^{65} (n, 2n) \text{Cu}^{64}$	-9.9	$\beta^-, \beta^+$	122.4	190.7	12.7 ч.	$\text{Zn}^{64}, \text{Ni}^{64}$	стабил.
$\text{Cu}^{65} (n, p) \text{Ni}^{65}$	-1.35	нестаб.			?		
$\text{Cu}^{65} (n, np) \text{Ni}^{64}$	-7.44	стабил.					
$\text{Cu}^{65} (n, \alpha) \text{Co}^{62}$	-8.8	нестаб.			?		
$\text{Cu}^{65} (n, n\alpha) \text{Co}^{61}$	-6.77	нестаб.			?		

Реакция	Энергия реакции Q, МэВ	Радио-актив-ность	$E_{\beta}$ , кэВ	$E_{\gamma}$ , кэВ	Время полу-распада	Продукт распада	Радио-актив-ность
$\text{Cu}^{65} (n, d) \text{Ni}^{64}$	-5.2	стабил.					
$\text{Cu}^{65} (n, nd) \text{Ni}^{63}$	-14.9	$\beta^-$	17.1		100 л.	$\text{Cu}^{63}$	стабил.
$\text{Cu}^{65} (n, \gamma) \text{Cu}^{66}$	7.07	$\beta^-$	1076	78	5.1 мин.	$\text{Zn}^{66}$	стабил.
$\text{Nb}^{93} (n, 2n) \text{Nb}^{92}$	-8.83	$\beta^+$	7.41	1506	$3.5 \cdot 10^7$ л.	$\text{Zr}^{92}$	стабил.
$\text{Nb}^{93} (n, 3n) \text{Nb}^{91}$	-16.7	$\beta^+$	5.2	11.9	680 л.	$\text{Zr}^{91}$	стабил.
$\text{Nb}^{93} (n, p) \text{Zr}^{93}$	0.72	$\beta^-$	19		$1.5 \cdot 10^6$ л.	$\text{Nb}^{93}$	стабил.
$\text{Nb}^{93} (n, np) \text{Zr}^{92}$	-6.04	стабил.					
$\text{Nb}^{93} (n, \alpha) \text{Y}^{90}$	4.91	$\beta^-$	934	0.0017	64.1 ч.	$\text{Zr}^{90}$	стабил.
$\text{Nb}^{93} (n, n\alpha) \text{Y}^{89}$	-1.95	стабил.					
$\text{Nb}^{93} (n, d) \text{Zr}^{92}$	-3.81	стабил.					
$\text{Nb}^{93} (n, \gamma) \text{Nb}^{94}$	7.23	$\beta^-$	145	1572	$2.0 \cdot 10^4$ л.	$\text{Mo}^{94}$	стабил.
$\text{V}^{51} (n, 2n) \text{V}^{50}$	-11.06	стабил.					
$\text{V}^{51} (n, p) \text{Ti}^{51}$	-1.68	$\beta^-$	869	369	5.8 мин.	$\text{V}^{51}$	стабил.
$\text{V}^{51} (n, np) \text{Ti}^{50}$	-8.06	стабил.					
$\text{V}^{51} (n, \alpha) \text{Sc}^{48}$	-2.05	$\beta^-$	227	3349	43.7 ч.	$\text{Ti}^{48}$	стабил.
$\text{V}^{51} (n, n\alpha) \text{Sc}^{47}$	-10.3	$\beta^-$	162.8	108	80.3 ч.	$\text{Ti}^{47}$	стабил.
$\text{V}^{51} (n, d) \text{Ti}^{50}$	-5.83	стабил.					
$\text{V}^{51} (n, t) \text{Ti}^{49}$	-10.5	стабил.					
$\text{V}^{51} (n, \gamma) \text{V}^{52}$	7.3	$\beta^-$	1069	1445	3.8 мин.	$\text{Cr}^{52}$	стабил.
$\text{Al}^{27} (n, 2n) \text{Al}^{26}$	-13.1	$\beta^+$	401	2678	$7.2 \cdot 10^5$ л.	$\text{Mg}^{26}$	стабил.
$\text{Al}^{27} (n, p) \text{Mg}^{27}$	-1.83	$\beta^-$	702	891	9.5 мин.	$\text{Al}^{27}$	стабил.
$\text{Al}^{27} (n, np) \text{Mg}^{26}$	-8.27	стабил.					
$\text{Al}^{27} (n, \alpha) \text{Na}^{24}$	-3.13	$\beta^-$	553.7	4123	14.7 ч.	$\text{Mg}^{24}$	стабил.
$\text{Al}^{27} (n, n\alpha) \text{Na}^{23}$	-10.1	стабил.					
$\text{Al}^{27} (n, d) \text{Mg}^{26}$	-6.05	стабил.					
$\text{Al}^{27} (n, t) \text{Mg}^{25}$	-10.9	стабил.					
$\text{Al}^{27} (n, \gamma) \text{Al}^{28}$	7.72	$\beta^-$	1242	1779	2.2 мин.	$\text{Si}^{28}$	стабил.
$\text{O}^{16} (n, 2n) \text{O}^{15}$	-15.7	нестаб.			?		
$\text{O}^{16} (n, p) \text{N}^{16}$	-9.64	$\beta^-$	2763	4491	7.1 сек.	$\text{O}^{16}$	стабил.
$\text{O}^{16} (n, np) \text{N}^{15}$	-12.1	стабил.					
$\text{O}^{16} (n, \alpha) \text{C}^{13}$	-2.22	стабил.					
$\text{O}^{16} (n, n\alpha) \text{C}^{12}$	-7.16	стабил.					

Реакция	Энергия реакции Q, МэВ	Радио-актив-ность	$E_{\beta}$ , кэВ	$E_{\gamma}$ , кэВ	Время полу-распада	Продукт распада	Радио-актив-ность
$O^{16}(n, d)N^{15}$	-9.9	стабил.					
$O^{16}(n, \gamma)O^{17}$	4.14	стабил.					
$C^{12}(n, \alpha)Be^9$	-5.7	стабил.					
$C^{12}(n, p)B^{12}$	-12.6	нестаб.			?		
$C^{12}(n, d)B^{11}$	-13.7	стабил.					
$C^{12}(n, n_k)C^{12*}$	-5.7	(3 $\alpha$ )			МГНОВ.		
$C^{12}(n, \gamma)C^{13}$	4.95	стабил.					
$Be^9(n, p)Li^9$	-12.8	нестаб.			?		
$Be^9(n, \alpha)He^6$	-0.6	$\beta^-$	1570		0.81 с	$Li^6$	стабил.
$Be^9(n, t)Li^7$	-10.4	стабил.					
$Be^9(n, d)Li^8$	-14.6	$\beta^-$	6290		0.84 с	$Be^{8*}$	(2 $\alpha$ )
$Be^9(n, 2n)Be^{8*}$	-1.57	(2 $\alpha$ )			МГНОВ.		
$Be^9(n, \gamma)Be^{10}$	6.81	$\beta^-$	202.5		$1.6 \cdot 10^6$ л	$B^{10}$	стабил.

$C^{12}(n, n_k)C^{12*}(3\alpha)$  - неупругое рассеяние с мгновенным распадом возбужденного ядра начиная со 2-го уровня ( $k \geq 2$ ) на 3 $\alpha$ -частицы.

$Be^9(n, 2n)$  - это несколько каналов реакции с конечным результатом 2 $\alpha$ -частицы и 2n:  
 $Be^9(n, n_k)Be^{9*}(n)Be^{8*}(2\alpha)$ ,  $Be^9(n, n_k)Be^{9*}(\alpha)He^{5*}(n)\alpha$ , при  $k \geq 1$  и  
 $Be^9(n, He^{5*})He^{5*}$  с последующим  $2\{He^{5*}(n)\alpha\}$ .

? в колонке время полураспада означает отсутствие данных по распаду.

## Спектры вторичных нейтронов.

Спектр вторичных нейтронов, образующихся в результате однократного взаимодействия с веществом нейтронов с энергией  $E_0$ , состоит из упруго и неупруго рассеянных нейтронов и нейтронов - продуктов комплексных ядерных реакций.

При взаимодействии нейтронов с элементами средней массы, составляющих основу конструкционных материалов, полное сечение образования нейтронов  $\sigma_{n \text{ prod}}$  в диапазоне  $E_0 = 10 - 20$  МэВ достаточно точно определяется как

$$\sigma_{n \text{ prod}} = \sum \sigma_i \cdot Y_i \approx \sigma_{\text{elast}} + \sigma_{n, n \text{ cont}} + \sigma_{n, n1} + 2\sigma_{n, 2n} + \sigma_{n, np} + \sigma_{n, n\alpha},$$

где  $\sigma_i$  - сечение конкретного процесса,  $Y_i$  - выход нейтронов. При  $E_0 = 20$  МэВ у более тяжёлых элементов (Nb, Mo) заметен вклад от (n, 3n) реакции. В таблице 3 приведены сечения конкретных процессов из JENDL в барнах, вклад которых в  $\sigma_{n \text{ prod}}$  является определяющим. Верхние значения в ячейках это сечения при  $E_0 = 14$  МэВ, нижние - при  $E_0 = 20$  МэВ. В нижней строке приведено суммарное сечение  $\sigma_{n \text{ prod}}$ .

Таблица 3..

Реакции	$^{56}\text{Fe}$	$^{52}\text{Cr}$	$^{53}\text{Cr}$	$^{58}\text{Ni}$	$^{60}\text{Ni}$	$^{27}\text{Al}$	$^{23}\text{V}_{\text{nat}}$ **	$^{29}\text{Cu}_{\text{nat}}$	$^{93}\text{Nb}$
$\sigma_{\text{elast}}$	1.14 0.88	1.03 0.91	1.21 0.96	1.3 0.9	1.48 0.87	0.8 0.83	1.0 0.86	1.38 0.99	2.22 1.74
$\sigma_{n, 2n}$	0.44 0.74	0.26 0.43	0.7 0.9	0.022 0.082	0.35 0.57	0.006 0.228	0.64 0.94	0.61 0.83	1.33 1.12
$\sigma_{n, np}$	0.071 0.285	0.089 0.44	0.002 0.082	0.56 0.77	0.078 0.42	0.28 0.3	0.018 0.067	0.22 0.19	0.011 0.074
$\sigma_{n, n\alpha}$	0.0008 0.059	0.0003 0.05	0.0002 0.026	0.01 0.095	0.013 0.13	0.002 0.153	0.0002 0.011	0.012 0.062	0.002 0.013
$\sigma_{n, n \text{ cont}}$	0.65 0.21	0.84 0.25	0.39 0.15	0.22 0.12	0.58 0.15	0.3 0.11	0.54 0.099	0.47 0.18	0.33 0.17
$\sigma_{n, n1}$	0.064 0.06	0.058 0.042	0.0035 0.0025	0.036 0.035	0.049 0.047	0.009 0.007	0.0056 0.0049	0.0063 0.0046	0* 0.3*
$\sigma_{n \text{ prod}}$	2.8 3.0	2.58 2.55	3.0 3.0	2.2 2.1	2.88 2.76	1.52 1.95	2.84 2.92	3.3 3.1	5.2 5.1

\* - сечение  $\sigma_{n, 3n}$  для  $\text{Nb}^{93}$ , \*\* - сечения для  $\text{V}_{\text{nat}}$  из JEF.

В базах данных JENDL, ENDF, JEF для перечисленных конкретных процессов приведены угловые и энергетические распределения вторичных нейтронов  $p_i$ . Распределения нормированы -  $\int p_i(E_n) dE_n = 1$ .

Упругое рассеяние нейтронов представлено угловым распределением в системе центра масс в виде

$$p(\mu) = 0.5 + \sum (m + 0.5) \cdot a_m \cdot P_m(\mu),$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\mu = \cos(\theta)$  - косинус угла рассеяния в с. ц. м.,  $P_m(\mu)$  - полиномы Лежандра. В базах данных приведены значения коэффициентов  $a_m$  для различных элементов при разных значениях энергии падающих нейтронов  $E_0$ . В лабораторной системе координат угловое распределение  $p(\theta) = p(\mu(\theta)) \cdot d\mu/d\theta$ , где  $\theta$  - угол рассеяния в л. с. к.,  $\cos(\theta) = (m_n + \mu M) / (m_n^2 + M^2 + 2\mu M m_n)^{1/2}$ , и энергетическое распределение  $p(E_n) = p(\mu(E_n)) \cdot d\mu/dE_n$ , где  $E_n = E_0(m_n^2 + M^2 + 2\mu M m_n) / (M + m_n)^2$  - энергия рассеянного нейтрона в л. с. к..



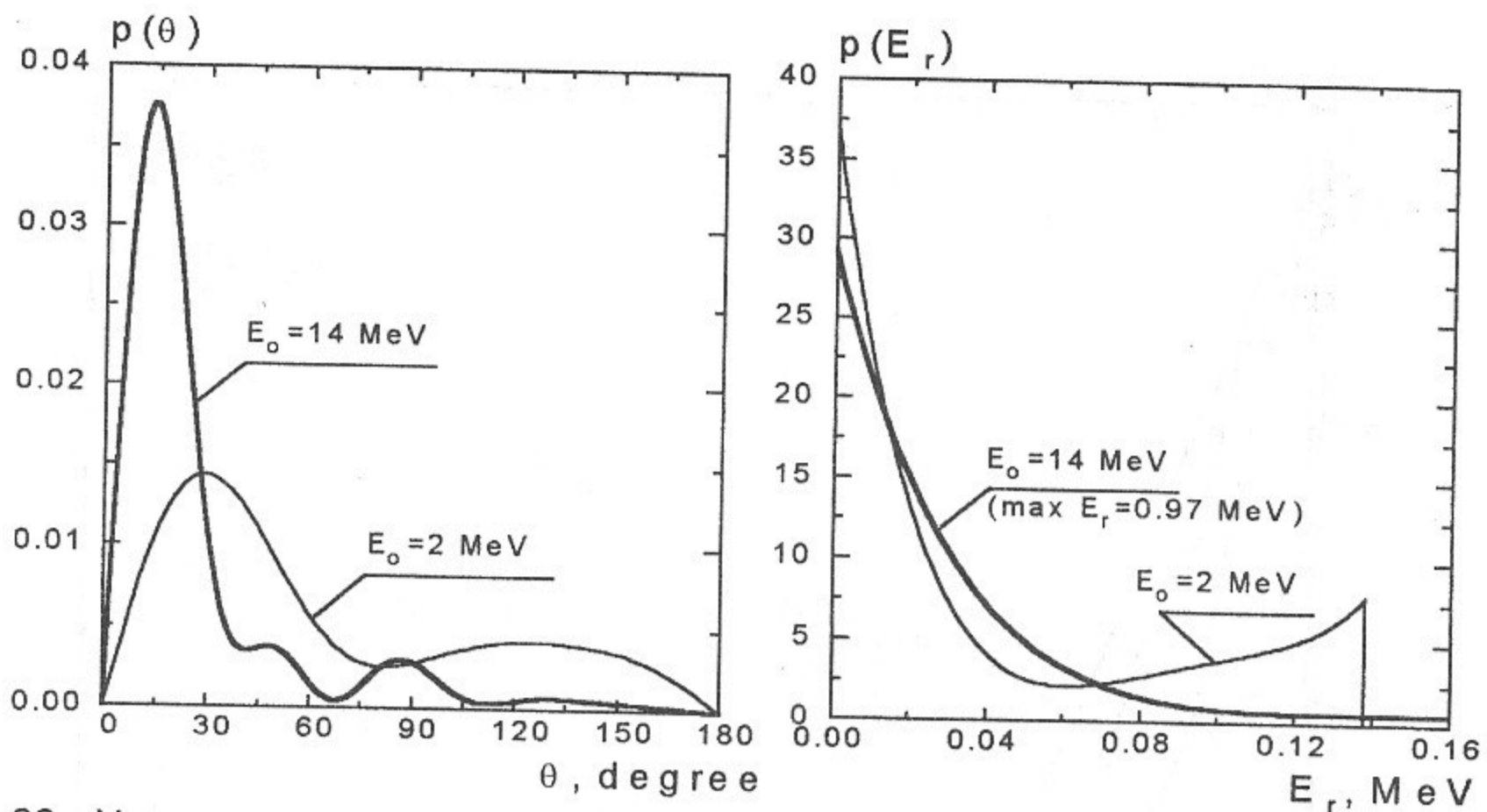


Рис. 33. Угловые распределения нейтронов  $p(\theta)$  и энергетические спектры ядер отдачи  $p(E_r)$  при упругом рассеянии на  $Fe^{56}$  нейтронов с  $E_0 = 14$  МэВ и 2 МэВ. Энергия ядра отдачи  $E_r = E_0 - E_n$ . Коэффициенты  $a_m$  для расчёта взяты из ENDF.

Для  $E_0 = 14$  МэВ максимум спектра  $p(\theta)$  при  $\theta = 13^\circ$ , ширина спектра  $\sim 20^\circ$ , около 75% нейтронов рассеиваются на угол  $\theta < 30^\circ$ . Максимальная энергия ядер отдачи 0.97 МэВ, средняя  $\bar{E}_r \approx 70$  кэВ (соответственно, таковы же потери энергии у нейтронов). Видно, что упруго рассеянные нейтроны в отношении дальнейшего воздействия на вещество несущественно отличаются от нейтронов первоначального потока. Их доля в полном спектре вторичных нейтронов составляет  $\sim 40\%$  ( $100\sigma_{\text{elast}}/\sigma_{n \text{ prod}}$ ). У подавляющей части ядер отдачи энергия  $E_r$  превышает энергию смещения атомов решётки  $E_D \sim 40$  эВ, что приводит к каскадному процессу образования первичных дефектов. Для других элементов средней массы в целом картина такая же.

Распределения вторичных нейтронов по энергии для реакций  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ ,  $(n, pn)$ ,  $(n, p\alpha)$ ,  $(n, n_{\text{cont}})$  представлены в базах данных в виде таблиц. Неупругое рассеяние с возбуждением отдельных уровней представлено в с. ц. м. суммой по полиномам.

Суммарный спектр вторичных нейтронов, образовавшихся в результате только неупругих взаимодействий нейтронов с  $Fe^{56}$  при  $E_0 = 14$  МэВ, и вклад отдельных реакций в спектр показаны на графиках рис. 34. Из-за того, что не учтён вклад в спектр от возбуждения уровней с  $i=2-27$ , в спектре на интервале  $\Delta E$  между вкладами от  $(n, n_1)$  и  $(n, n_{\text{cont}})$  возникает разрыв. Приблизительное значение  $p_n$  в разрыве можно оценить как  $p_n \sim (\sum \sigma_{n, ni}) / (\Delta E \cdot \sigma_{n \text{ prod}})$ ,  $i \geq 2$  (горизонтальные отрезки на рис. 35 - 41). Для сравнения приведен спектр нейтронов деления  $U^{235}$ .

Полные нормированные спектры вторичных нейтронов для ряда элементов, входящих в конструкционные материалы, при энергии падающих нейтронов  $E_0 = 14$  МэВ и  $E_0 = 20$  МэВ представлены на рис. 35 - 41. Спектры определялись как  $p_n = (\sum \rho_i \cdot \sigma_i \cdot Y_i) / \sigma_{n \text{ prod}}$  и построены по данным JENDL. Учтён вклад упругого рассеяния, неупругого рассеяния с возбуждением 1-ого уровня и континуума, реакций  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ ,  $(n, pn)$ ,  $(n, p\alpha)$ . Приводятся значения доли упруго рассеянных нейтронов. Указана доля нейтронов с энергией  $E_n < E_{gr}$ , последующие взаимодействия которых с веществом не приводит (пороги реакций выше) или практически не приводит (малы сечения) к образованию  $p, \alpha, n, d, t$  (см. рис. 1-20).

Изотопы	$Fe^{56}$	$Cr^{52}$	$Cr^{53}$	$Ni^{58}$	$Ni^{60}$	$Nb^{93}$	$Cu_{\text{nat}}$	$V_{\text{nat}}$	$Al^{27}$	$O^{16}$	$C^{12}$	$Be^9$
$E_{gr}$ , МэВ	5	5	4	1	4	5	1	4	3	4	7	1

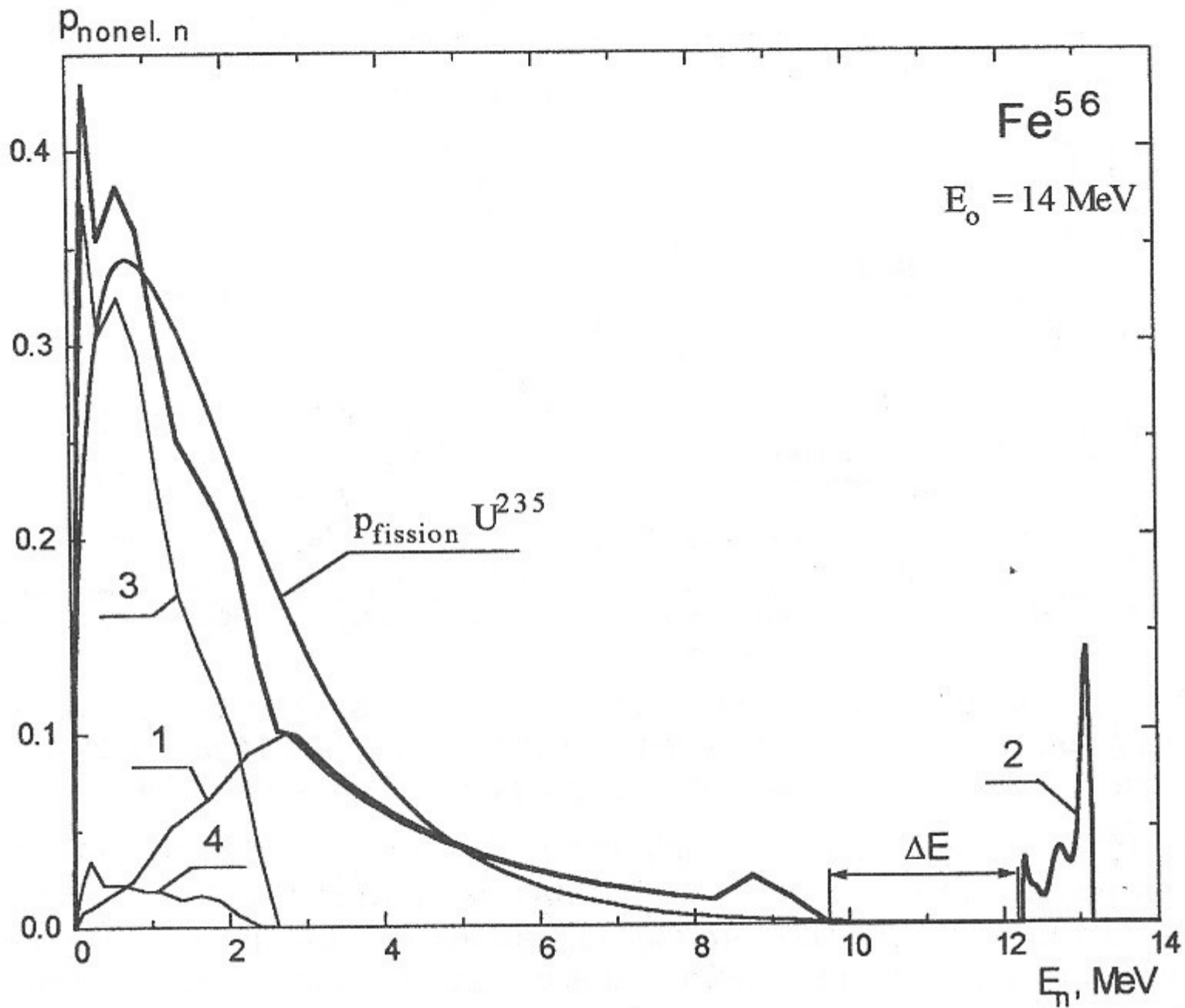


Рис. 32. Спектр нейтронов, образующихся при неупругих взаимодействиях нейтронов с  $Fe^{56}$ ,  $E_0=14$  МэВ. Вклад в спектр от  $(n, n_{cont})$  - 1,  $(n, n_1)$  - 2,  $(n, 2n)$  - 3,  $(n, np)$  - 4.

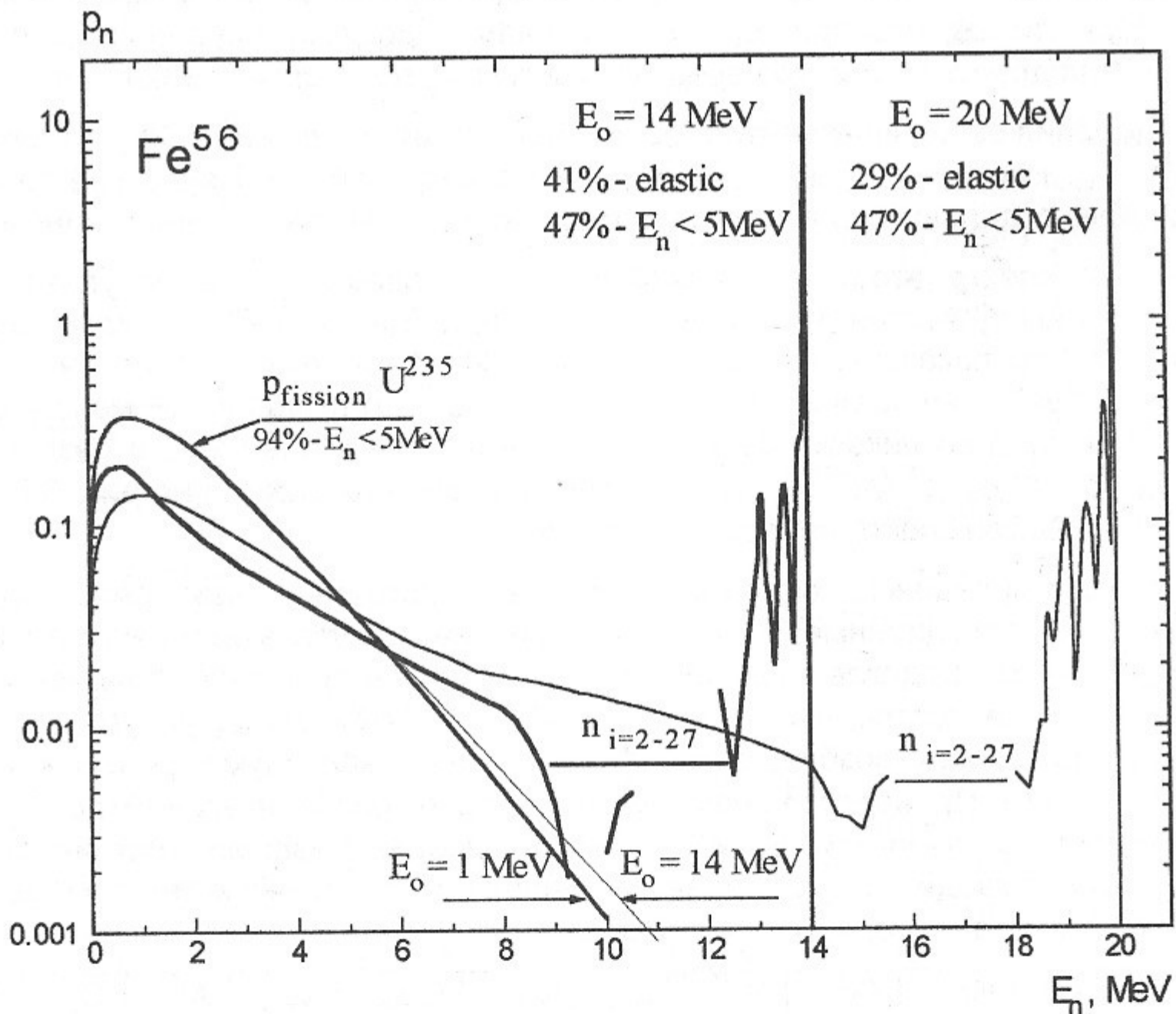


Рис. 33. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $Fe^{56}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения даны спектры деления  $U^{235}$ ,  $E_0=1$  и  $14$  МэВ.

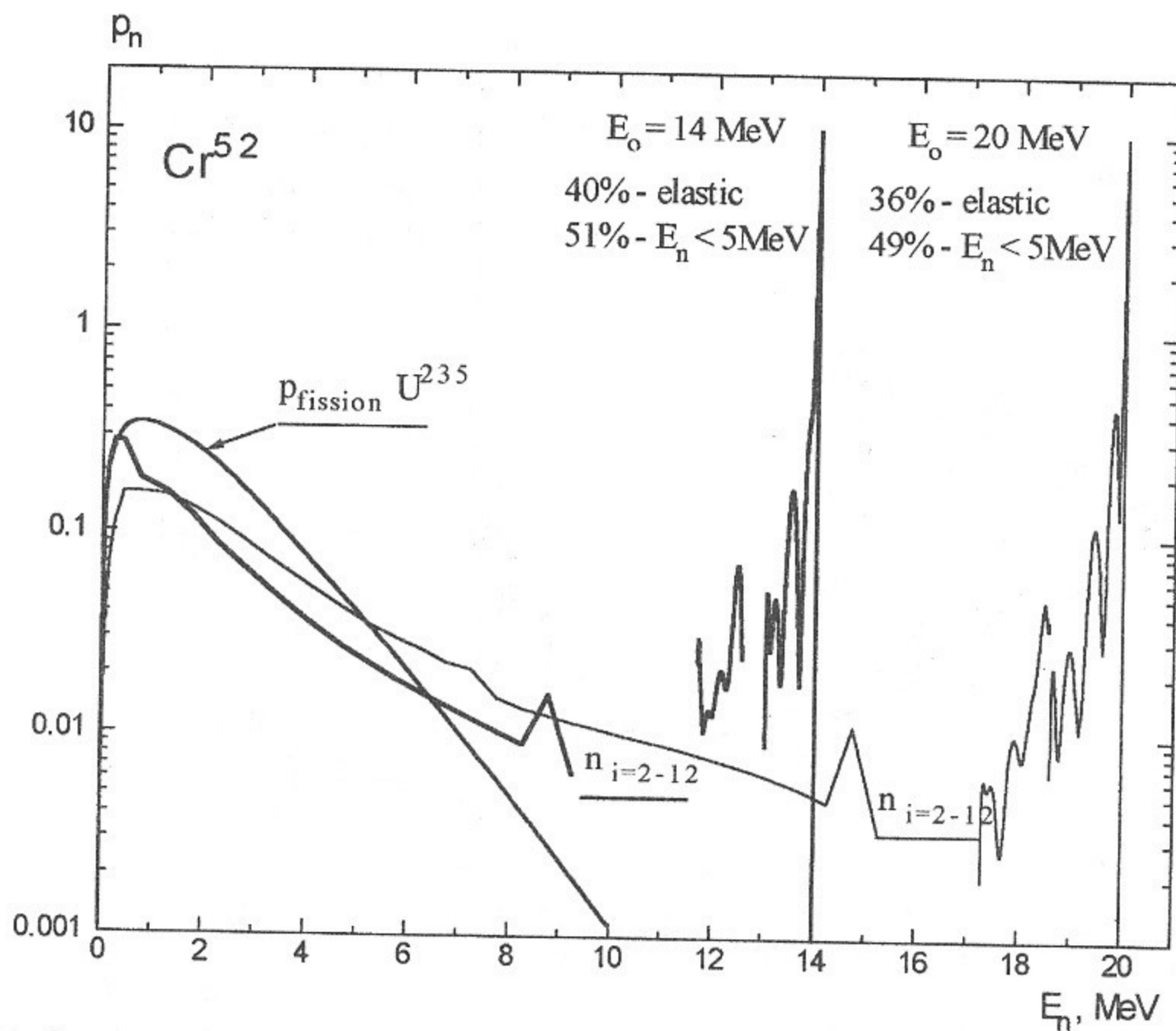


Рис. 34. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $\text{Cr}^{52}$  при  $E_0 = 14$  и  $20 \text{ МэВ}$ . Для сравнения дан спектр деления  $\text{U}^{235}$ ,  $E_0 = 1 \text{ МэВ}$ .

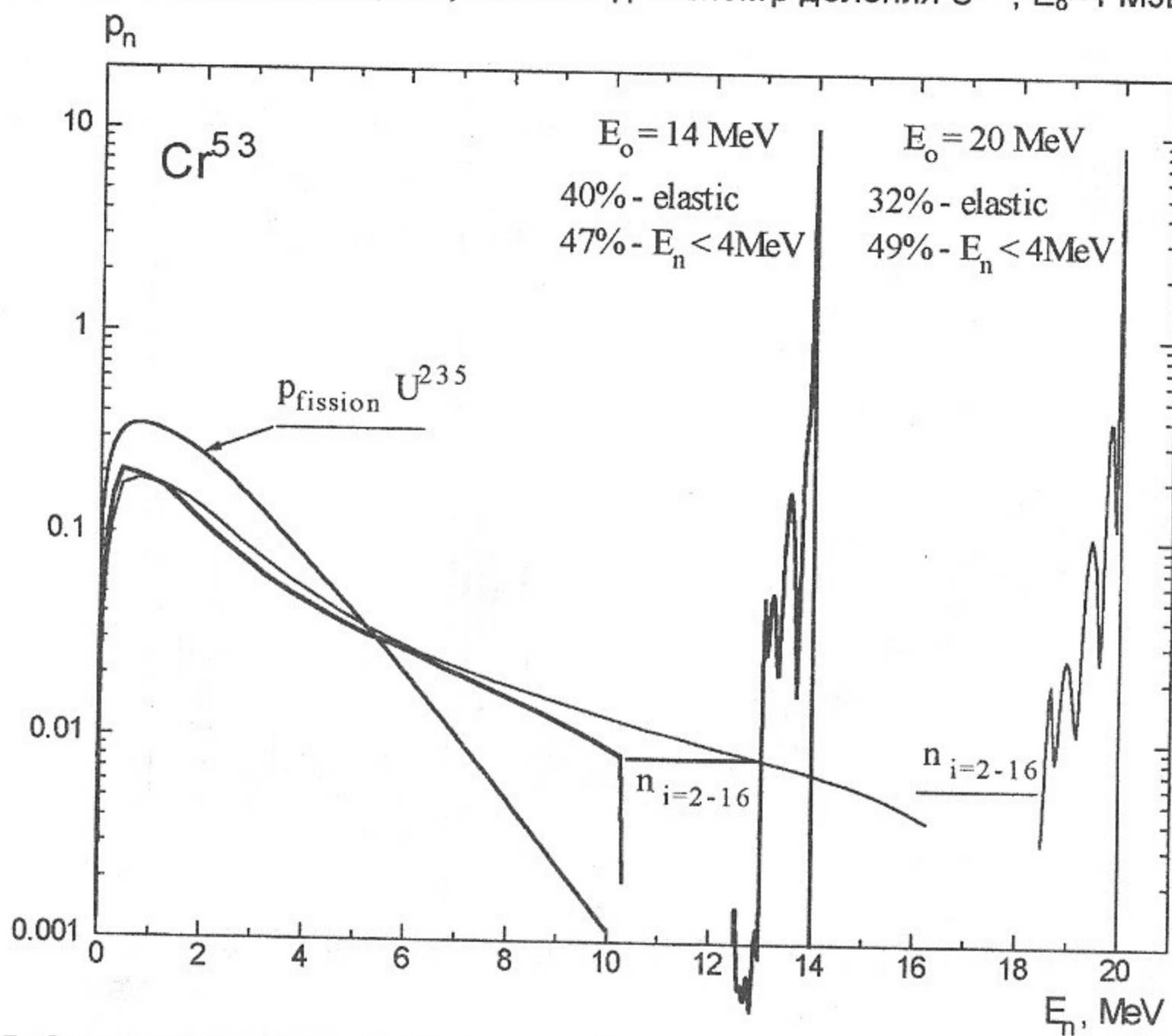


Рис. 35. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $\text{Cr}^{53}$  при  $E_0 = 14$  и  $20 \text{ МэВ}$ . Для сравнения спектр деления  $\text{U}^{235}$ ,  $E_0 = 1 \text{ МэВ}$ .

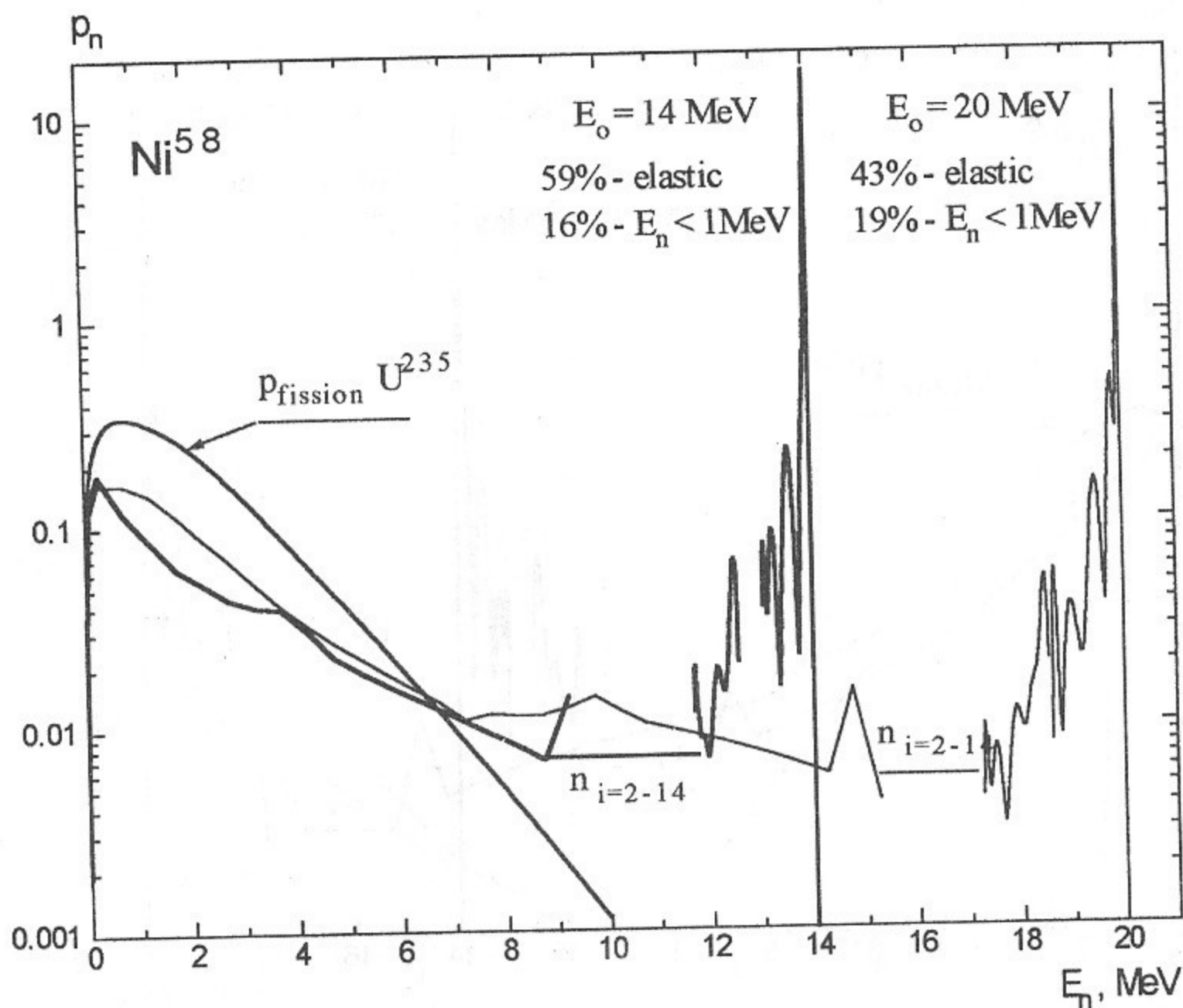


Рис. 36. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $Ni^{58}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения дан спектр деления  $U^{235}$ ,  $E_0=1$  МэВ.

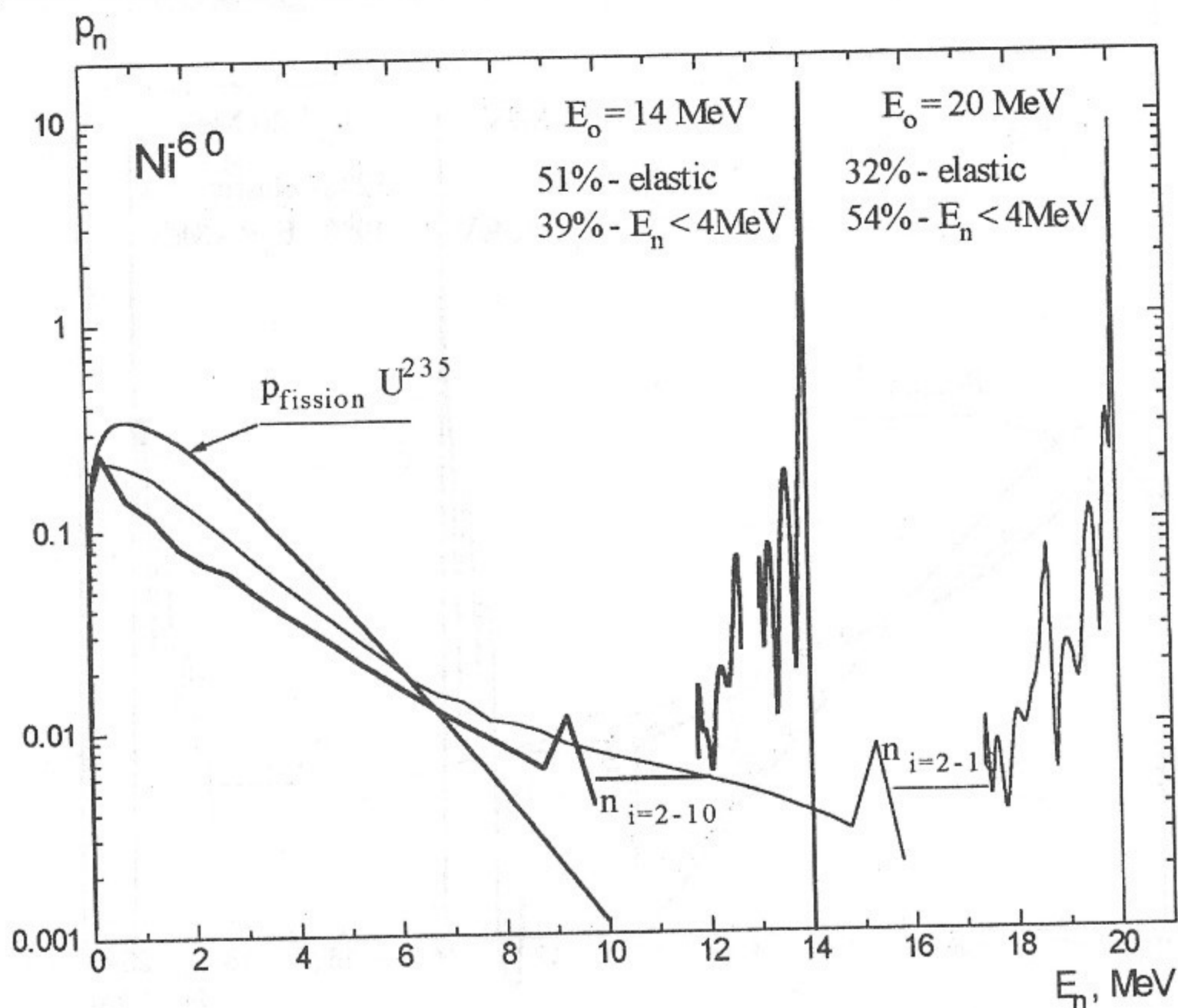


Рис. 37. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $Ni^{60}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения дан спектр деления  $U^{235}$ ,  $E_0=1$  МэВ.

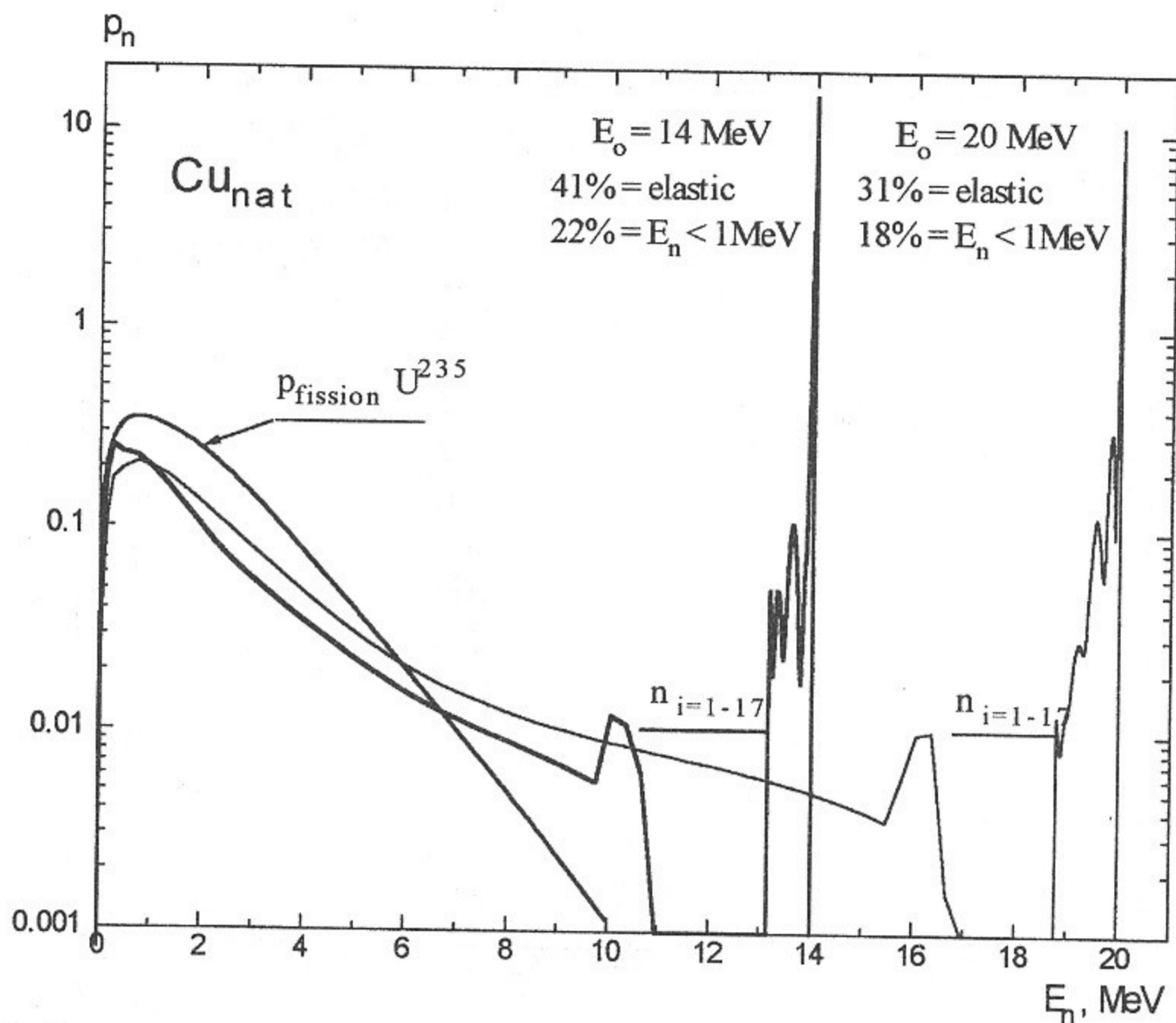


Рис. 38. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $\text{Cu}_{\text{nat}}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения дан спектр деления  $\text{U}^{235}$ ,  $E_0=1$  МэВ.

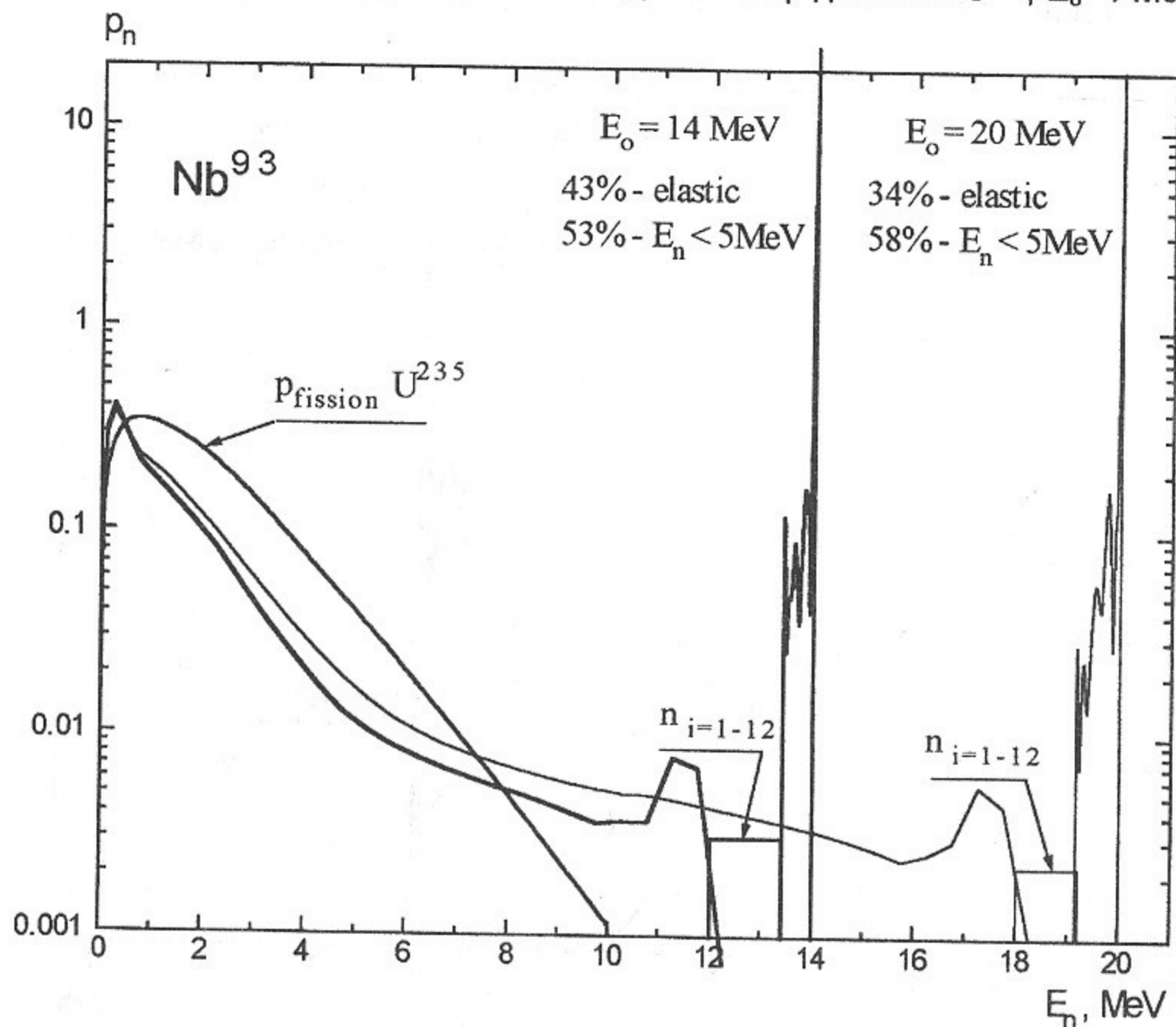


Рис. 39. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $\text{Nb}^{93}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения дан спектр деления  $\text{U}^{235}$ ,  $E_0=1$  МэВ.

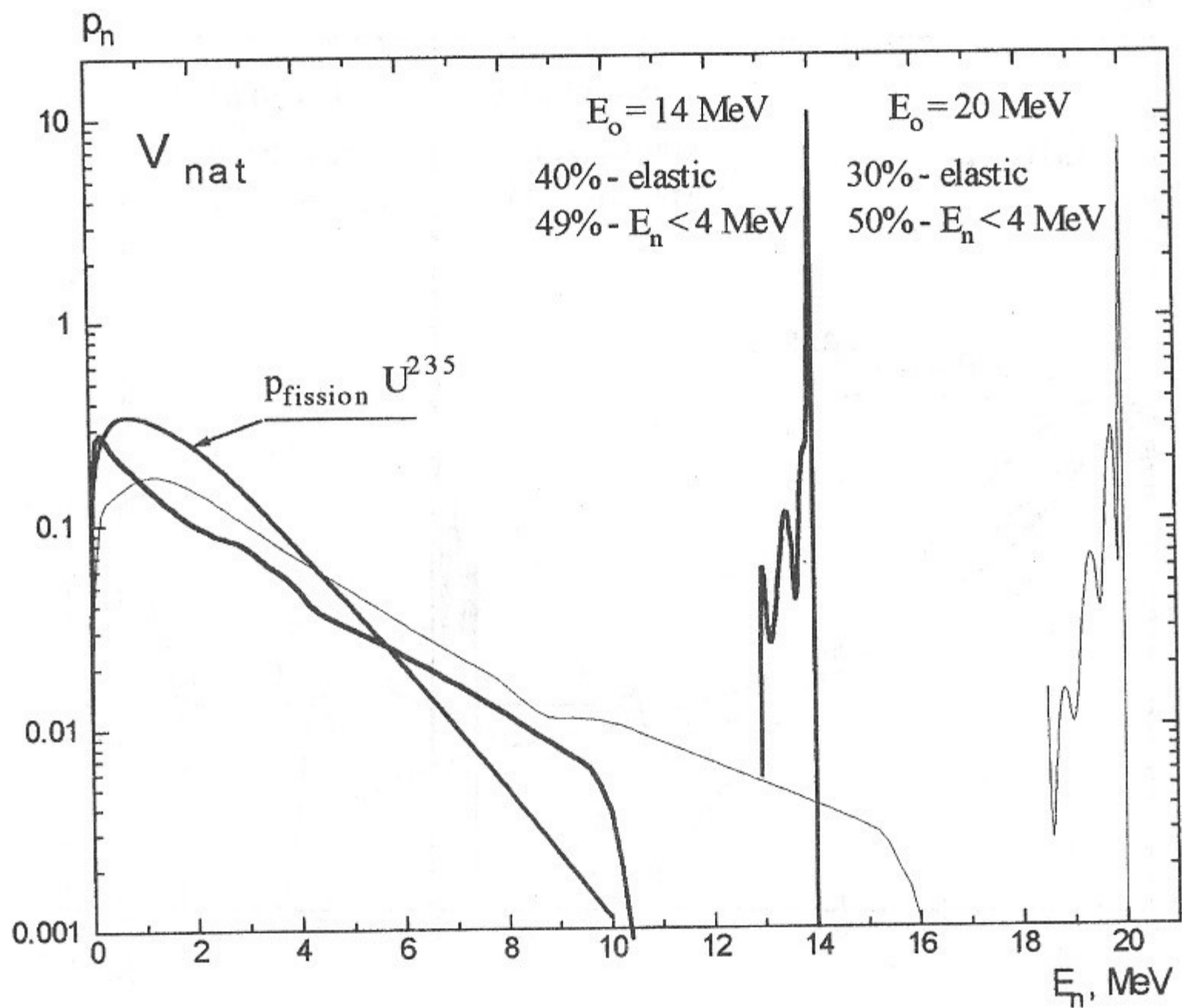


Рис. 40. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $V^{51}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения дан спектр деления  $U^{235}$ ,  $E_0=1$  МэВ.

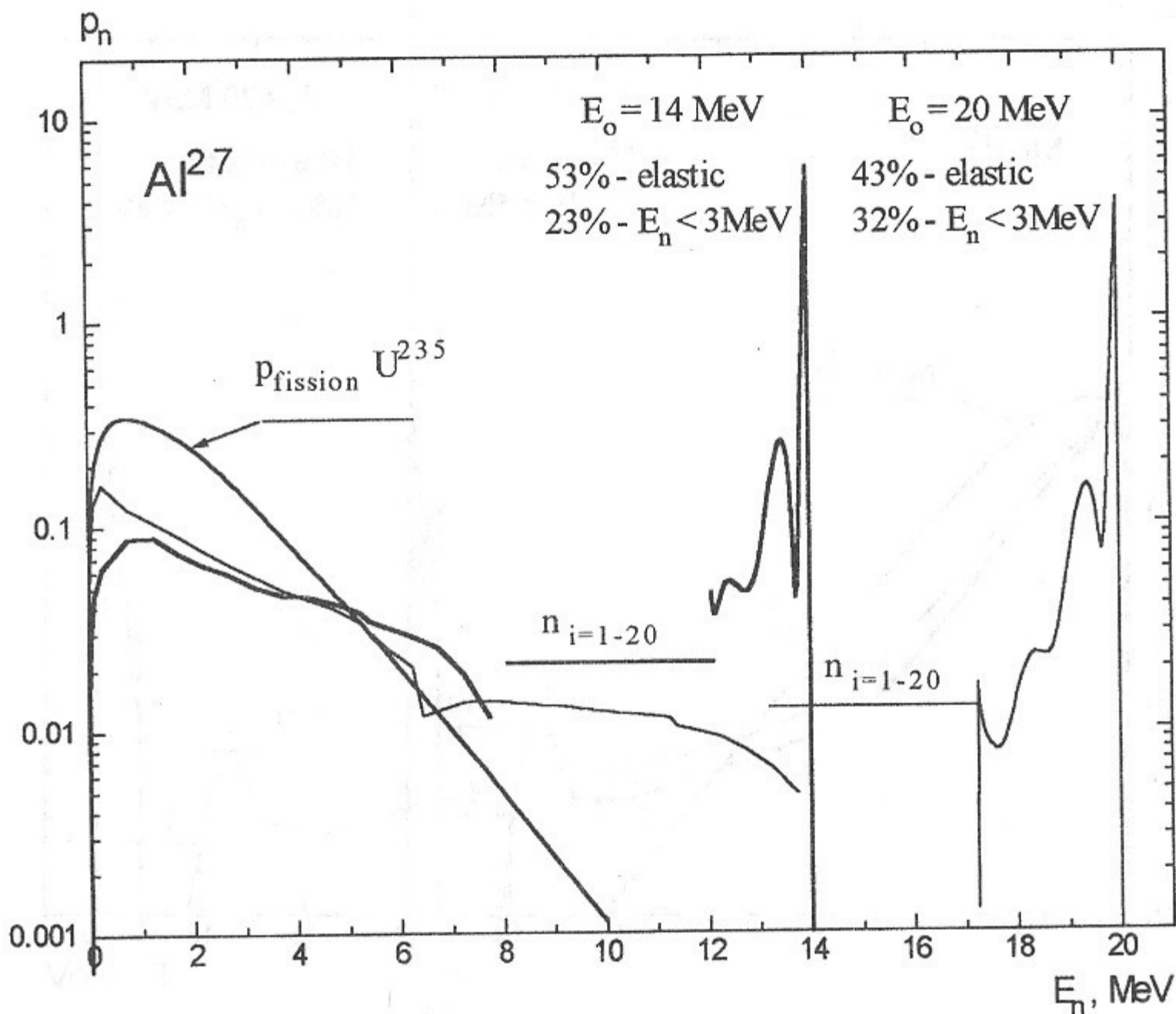


Рис. 41. Спектры вторичных нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтронов с  $Al^{27}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ. Для сравнения дан спектр деления  $U^{235}$ ,  $E_0=1$  МэВ.

## Спектры других продуктов ядерных реакций.

В ENDF для ряда элементов в виде таблиц приведены энергетические спектры для всех продуктов отдельных процессов при различных значениях энергии нейтронов (до 20 МэВ). Например, для реакции  $Fe^{56}(n, np)Mn^{55}$  приведены спектры нейтронов, протонов, ядер отдачи (residual) и  $\gamma$ -квантов. Суммарный спектр протонов в реакциях с нейтронами  $p_p = (\sum p_i \cdot \sigma_i) / \sigma_{p \text{ prod}}$  ( $i=1, 2$ ), где  $\sigma_1 = \sigma_{n,p}$  - сечение,  $p_1$  - спектр протонов в  $(n, p)$  реакции,  $\sigma_2 = \sigma_{n,np}$  - сечение,  $p_2$  - спектр протонов в  $(n, np)$  реакции и  $\sigma_{p \text{ prod}} = \sigma_{n,p} + \sigma_{n,np}$ . Аналогично, с учётом парциальных вкладов соответствующих реакций, можно определить суммарный спектр  $\alpha$ -частиц  $p_\alpha = (\sum p_i \cdot \sigma_i) / \sigma_{\alpha \text{ prod}}$  в реакциях с нейтронами, а также спектры ядер отдачи  $p_{r \text{ nonel}} = (\sum p_i \cdot \sigma_i) / \sigma_{\text{nonel}}$  и  $\gamma$ -квантов  $p_\gamma = (\sum p_i \cdot \sigma_i \cdot Y_i) / \sigma_{\text{nonel } \gamma \text{ prod}}$  (выход  $\gamma$ -квантов  $Y_i > 1$ ) при неупругих взаимодействиях.

Суммарные спектры протонов и  $\alpha$ -частиц, образующихся в результате реакций нейтронов с  $Fe^{56}$  при  $E_0 = 14$  и 20 МэВ, приведены на рис. 42.

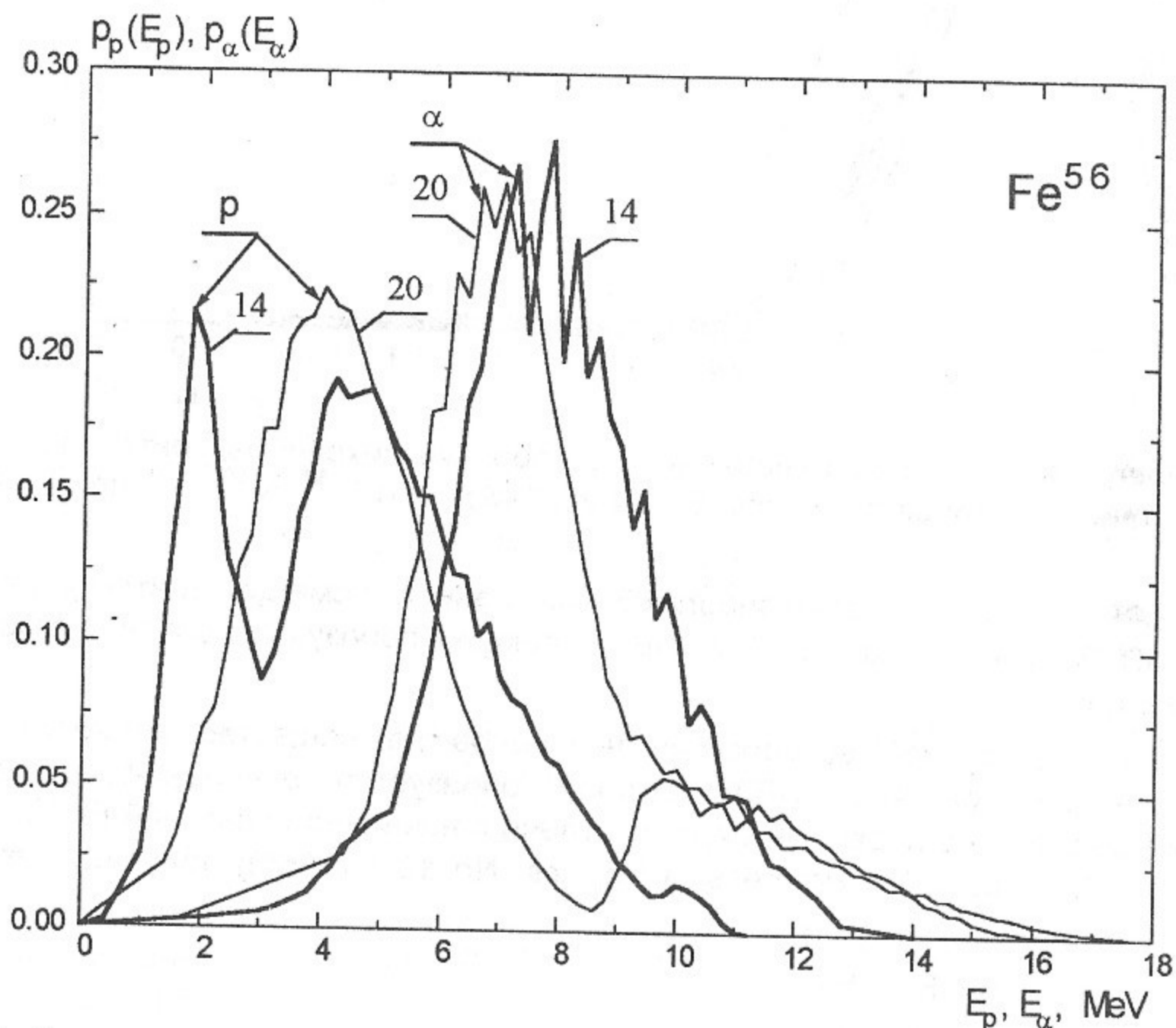


Рис. 42. Спектры протонов и  $\alpha$ -частиц, образующихся в результате ядерных реакций нейтронов с  $Fe^{56}$  при  $E_0=14$  и 20 МэВ (ENDF).

При  $E_0=14$  МэВ сечения  $(n, np)$ - и  $(n, p)$ -реакций приблизительно равны. Пик протонов при  $E_p \approx 2$  МэВ от  $(n, np)$ -реакции ( $Q = -10.2$  МэВ), при  $E_p \approx 4$  МэВ от  $(n, p)$ -реакции ( $Q = -2.9$  МэВ). При  $E_0=20$  МэВ сечения  $(n, np)$  на порядок больше, чем сечение  $(n, p)$ , и основной пик в спектре определяется  $(n, np)$ -реакцией. В спектрах  $\alpha$ -частиц при  $E_0=14$  МэВ основной вклад возникает от  $(n, \alpha)$ -реакции, а при  $E_0=20$  МэВ - от  $(n, n\alpha)$ -реакции.

Суммарные спектры ядер отдачи, которые образуются в результате неупругих взаимодействий нейтронов с  $Fe^{56}$ ,  $Cr^{52}$ ,  $Ni^{58}$ ,  $Ni^{60}$ , приведены на рис. 43. Учтены следующие взаимодействия:  $(n, 2n)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, np)$ ,  $(n, n\alpha)$ ,  $(n, n_{cont})$ ,  $(n, n_1)$ .

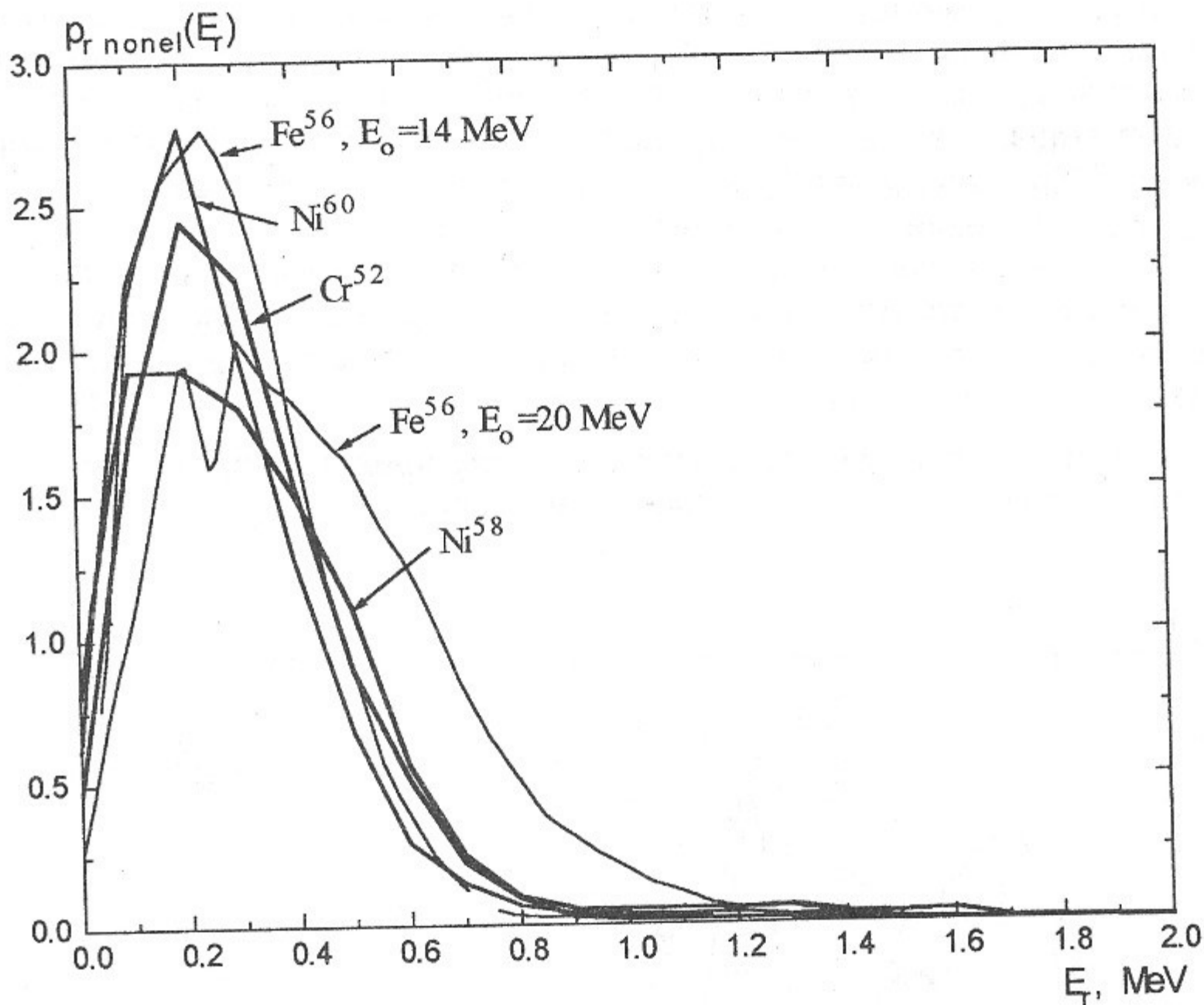


Рис. 43. Спектры ядер отдачи (residual, recoils), образующихся в результате неупругих взаимодействий нейтронов с  $Fe^{56}$  при  $E_0=14$  и  $20$  МэВ и с  $Cr^{52}$ ,  $Ni^{58}$ ,  $Ni^{60}$  при  $E_0 = 14.5$  МэВ (ENDF).

Практически у всех ядер отдачи энергия  $E_r$  выше энергии смещения атомов решётки  $E_D \approx 20-40$  эВ. Энергичные хвосты ( $\sim 2$  МэВ) в спектрах образуются в результате  $(n, \alpha)$  и  $(n, p\alpha)$  реакций.

Важной характеристикой воздействия нейтронов на вещество является число смещений атомов решётки  $\nu(E_r)$ , которое образуется в результате каскада соударений, вызванного первичным ядром отдачи с начальной энергией  $E_r$ . Kinchin G. H., Pease R. S. [Reports on Progress in Physics, No 18,1 (1955)] получили, что  $\nu(E_r)$  равно

$$\begin{aligned} 0 & \text{ при } 0 \leq E_r \leq E_D, \\ 1 & \text{ при } E_D \leq E_r \leq 2E_D, \\ E_r/2E_D & \text{ при } 2E_D \leq E_r \leq E_C, \\ E_C/2E_D & \text{ при } E_r \geq E_C, \end{aligned}$$

где  $E_C = A$  кэВ,  $A$  - атомный номер. Полагалось, что пока энергия выбитого атома не спадёт до  $E_C$ , она расходуется только на ионизацию и возбуждение электронов, ниже  $E_C$  - только на смещение атомов.

Видно, что при неупругих взаимодействиях нейтронов с изотопами средней массы более 90% ядер отдачи приобретают энергию  $E_r \geq E_C$ .

При упругом рассеянии ядра отдачи  $Fe^{56}$  распределены по интервалам энергии следующим образом:  $E_r < 40$  эВ  $\sim 0.15\%$ ,  $40$  эВ  $< E_r < 80$  эВ  $\sim 0.15\%$ ,  $80$  эВ  $< E_r < 56$  кэВ  $\sim 72.7\%$ ,  $E_r > 56$  кэВ  $\sim 27\%$ .



Спектры  $\gamma$ -квантов, которые образуются в результате неупругих взаимодействий нейтронов с  $V_{\text{nat}}$ ,  $Nb^{93}$ ,  $Al^{27}$ , представлены в базах данных. Для  $Fe^{56}$  такой спектр определён как сумма парциальных вкладов следующих взаимодействий:  $(n, 2n)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, pr)$ ,  $(n, p\alpha)$ ,  $(n, n_{\text{cont}})$ ,  $(n, n_1)$ . Спектры приведены на рис. 44.

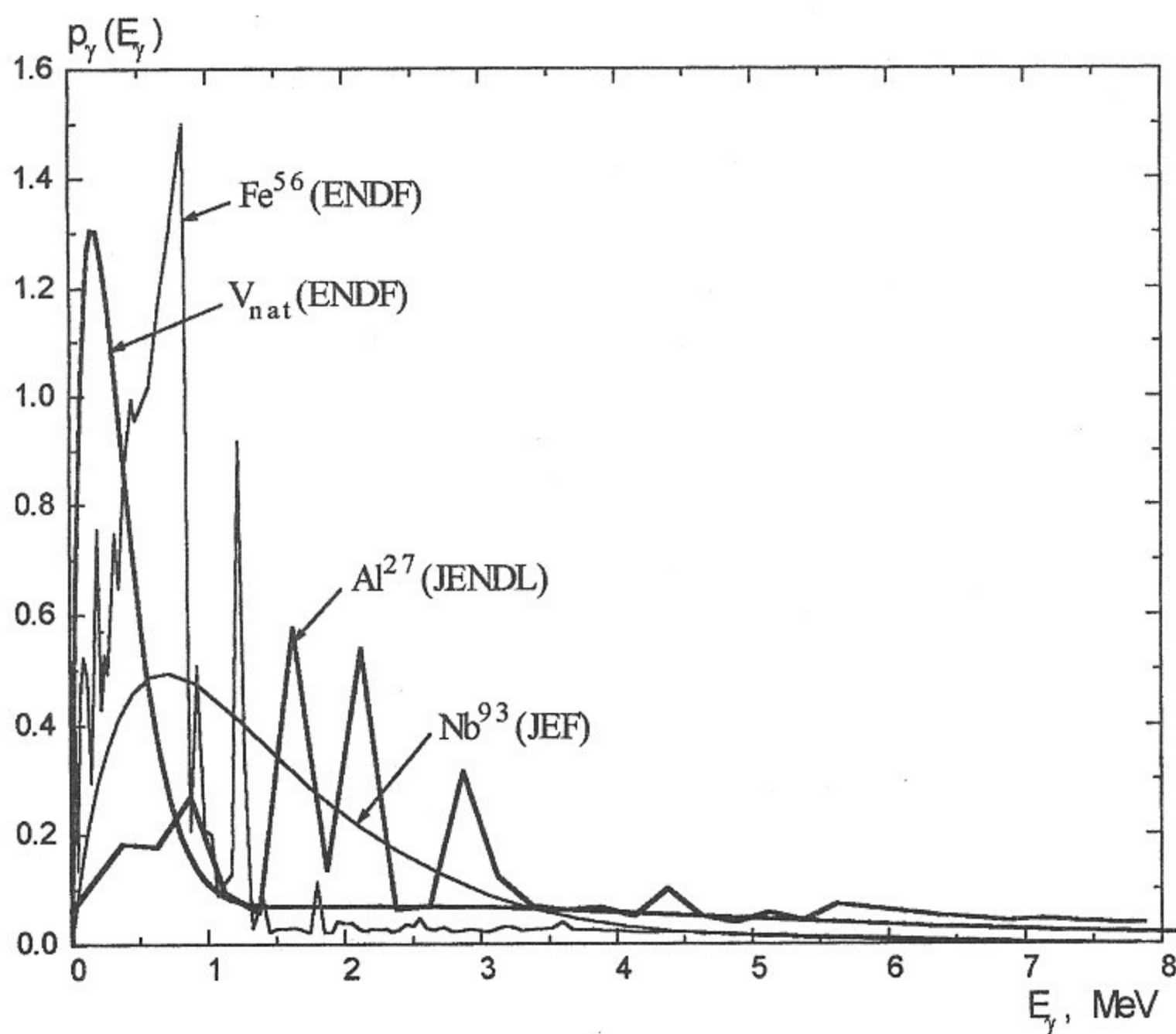


Рис. 44. Спектры  $\gamma$ -квантов, образующихся в результате неупругих взаимодействий нейтронов с  $Fe^{56}$ ,  $V_{\text{nat}}$ ,  $Nb^{93}$ ,  $Al^{27}$  при  $E_0 = 14$  МэВ.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ), грант N 492

*В.Н. Бочаров, А.М. Кудрявцев, В.М. Панасюк*

**Воздействие продуктов термоядерных  
реакций на конструкционные материалы  
в "горячей зоне" реактора  
(справочный обзор, часть II)**

ИЯФ 98-102

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 28.12 1998 г.

---

Сдано в набор 29.12. 1998 г.

Подписано в печать 29.12 1998 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,0 печ.л., 1,6 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ N 102

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
роталпринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.