

88.РАДИЙ

88.0. Общие замечания

Элемент №88 открыт супругами Кюри в 1898 г. в минерале, известном под названиями урановой смолки, смоляной обманки и настурана. Уже в ходе этой самой первой работы стало ясно, что новый элемент – аналог бария: при фракционном разделении компонентов активность накапливалась в бариевой фракции.

В название элемента №88, как и в названия галогенов, положено одно из самых очевидных его свойств. Слово radium («радий») происходит от латинского radius – «луч», так что дословно название этого элемента переводится как «излучающий», «лучистый».

Чем же важен и чем интересен радий?

«Изучение и использование радиоактивных свойств Ra сыграло огромную роль в исследовании строения атомного ядра и явления радиоактивности. Химические методы, разработанные при выделении из руд соединений Ra и изучении их свойств, легли в основу методов радиохимии».

В этих двух фразах, взятых из краткой энциклопедии «Атомная энергия», сосредоточено в самой общей форме то главное, чем интересен для нас радий, чем славен этот элемент. Можно утверждать, что если бы три четверти века назад не был открыт элемент радий, то вряд ли наш век называли бы атомным. Проследим же историю элемента №88 – историю его служения науке.

С годами, по мере развития ядерной физики и атомной техники, радий постепенно был отодвинут на второй план. Другие радиоактивные элементы и изотопы оказались более приемлемыми и для гамма-дефектоскопии, и для радиотерапии. (Кобальт-60, применяемый ныне для этих целей, намного дешевле и доступнее радия.)

Другие менее опасные излучатели пришли и в производство светящихся красок. Радий-бериллиевые и радон-бериллиевые источники нейтронов тоже постепенно сошли со сцены: появились более совершенные.

Лишь в качестве эталонов радиоактивности соли радия не утратили своих позиций. И еще – как источник радона.

Последнее большое событие в истории элемента №88 произошло в 1967 г. Практически одновременно в знаменитых лабораториях Дубны и Беркли были получены нейтроно-дефицитные изотопы радия с массовыми числами от 206 до 214. До этого времени были известны лишь изотопы с массовыми числами 213 и от 218 до 230.

Все эти изотопы оказались короткоживущими альфа-излучателями с периодами полураспада от 0,4 до 15 секунд. А самый долгоживущий изотоп радия – тот самый радий-226, который открыли супруги Кюри, «живет» 1617 лет, если, конечно, временем жизни изотопа считать период полураспада его ядер.

Для библиотеки РОСФОНД требовалось отобрать нейтронные данные для 5-ти долгоживущих изотопов радия: Ra-223 ($T_{1/2}=11.435$ дн.), Ra-224 ($T_{1/2}=3.66$ дн.), Ra-225 ($T_{1/2}=14.9$ дн.), Ra-226 ($T_{1/2}=1600$ лет) и Ra-228 ($T_{1/2}=5.75$ лет).

Все экспериментальные данные, используемые при сравнении с оцененными сечениями, были взяты из базы данных EXFOR-CINDA (версия 1.81, июнь 2005).

Во всех современных версиях библиотек, таких как ENDF/B-VIIb2, JEFF-3.1 и JENDL-3.3 для первых четырех нуклидов радия используется оценка N.Takagi (Tokyo Institute of Technology, TIT), выполненная в августе 1988 года и по сей день, практически, не пересмотренная. Такое положение дел объясняется крайне небольшим количеством экспериментальных данных для полной оценки взаимодействия нейтронов с изотопами радия.

Что касается Ra-226, то в перечисленных выше библиотеках отсутствуют оцененные нейтронные данные; но в библиотеке EAF-2003 имеется оценка нейтронных сечений для него в неполном наборе.

88.1. Радий-223

Альфа активен ($T_{1/2}=11.435$ дн.). Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{231}Pa , ведущий к образованию ^{227}Ac , который испытывает бета-распад в ^{227}Th , α -распадающийся в ^{223}Ra .

В таблице 1 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 1 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

Нуклид	Оценка	Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ)				Резонансный интеграл	
		Полное	Упругое	Деление	Захват	Деление	Захват
Ra-223	JENDL	143.1	12.4	0.70	130.0	0.767	472.

В EXFORe содержатся результаты двух экспериментов по измерению сечения деления ^{223}Ra тепловыми нейтронами: Peterson-47: 100 барн; Jain-67: более 0.7 барн (возможно в 4 – 5 раз); и один эксперимент по измерению сечения захвата тепловыми нейтронами - Harbottle67: 125 ± 15 барн. По оценке Мухабхаба (1984) $\sigma_f=130 \pm 20$ барн; $\sigma_c=0.7 \pm 3$ барн. Видимо, величина, измеренная Петерсоном, содержит большую систематическую погрешность. Заметим, что и для нуклида Ac-227 между экспериментом Петерсона ($\sigma_f=2$ барна) и оцененной величиной ($\sigma_f=0.29$ мбарн) наблюдается сильное расхождение.

Энергетические зависимости сечений показаны на рисунке 1.

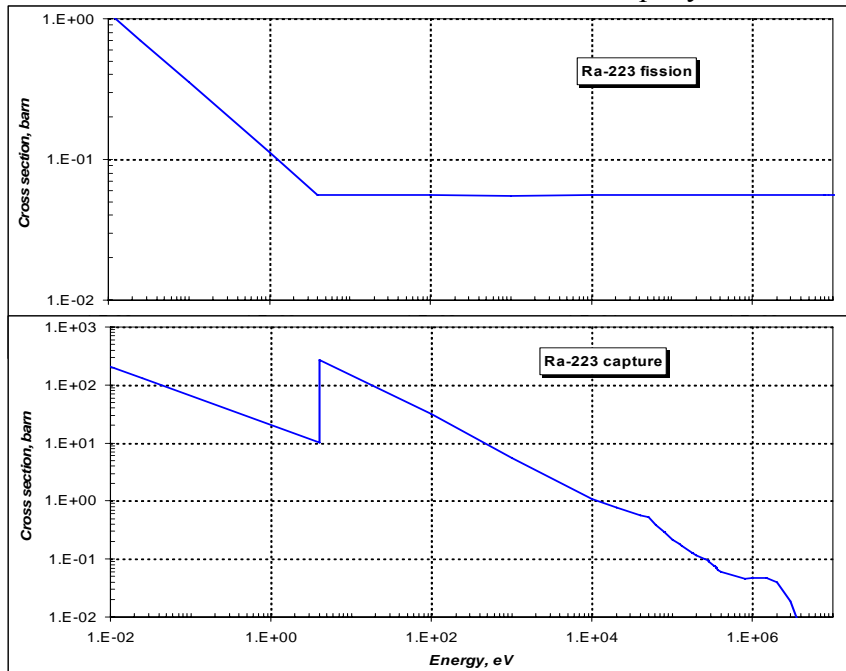


Рисунок 1 – Сечение деления и радиационного захвата на Ra-223.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

88.2. Радий-224

Альфа активен ($T_{1/2}=3.6319$ дн.). Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{232}U , ведущий к образованию ^{228}Th , α -распадающегося в ^{224}Ra , а также распад тория-232, порождающего ^{228}Ra , превращающегося затем в ^{224}Ra (см. ниже раздел 88.5).

В таблице 2 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 2 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

Нуклид	Оценка	Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ)				Резонансный интеграл	
		Полное	Упругое	Деление	Захват	Деление	Захват
Ra-224	JENDL	24.5	12.5	-	12.0	-	33.6

В EXFORe никаких экспериментальных данных не содержится.

По оценке Мухабхаба (1984) $\sigma_c=12\pm0.5$ барн со ссылкой на работу Baerg-53.

Оцененное поведение сечения захвата показано на рисунке 2.

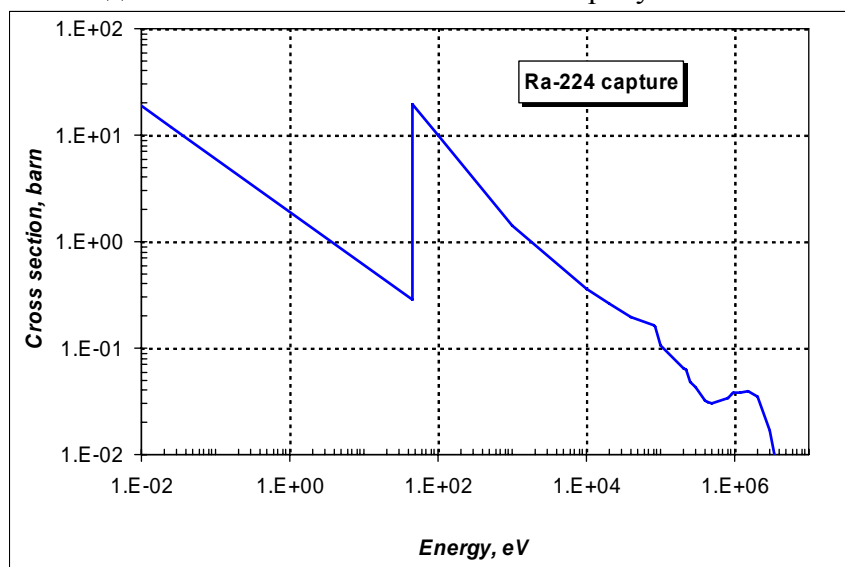


Рисунок 2 – Сечение радиационного захвата на Ra-224.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.

88.3. Радий-225

Радиоактивен ($T_{1/2}=14.9$ дн.). Испытывает бета-распад в ^{225}Ac . Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{233}U , ведущий к образованию ^{229}Th , α -распадающегося в ^{225}Ra .

В таблице 3 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 3 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

Нуклид	Оценка	Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ)				Резонансный интеграл	
		Полное	Упругое	Деление	Захват	Деление	Захват
Ra-225	JENDL	112.4	12.4	-	100.	-	617.

В EXFORе никаких экспериментальных данных не содержится.

У Мухабхаба также нет никаких оценок сечений этого изотопа.

Оцененное поведение сечения захвата показано на рисунке 3.

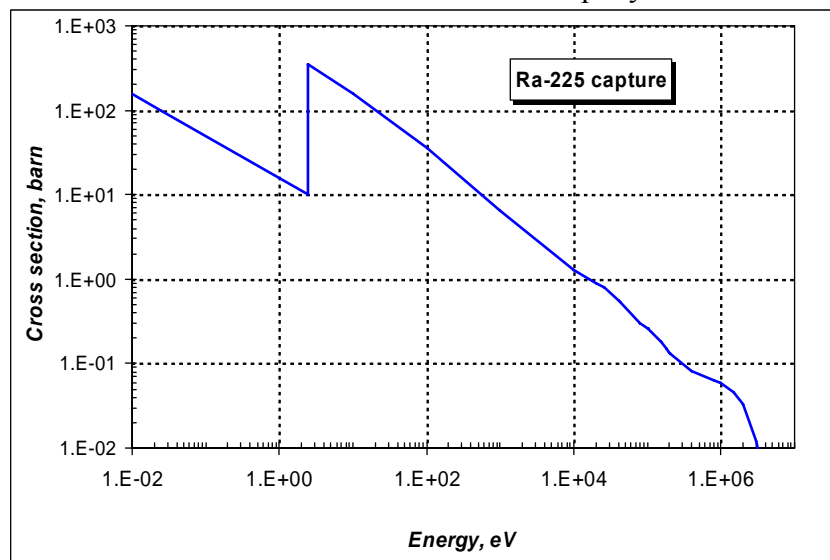


Рисунок 3 – Сечение радиационного захвата на Ra-225.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

88.4. Радий-226

Наиболее долгоживущий изотоп ($T_{1/2}=1600$ лет). Испытывает бета-распад в ^{222}Rn . Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{234}U , ведущий к образованию ^{230}Th , α -распадающегося в ^{226}Ra .

В таблице 4 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 4 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

Нуклид	Оценка	Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ)				Резонансный интеграл	
		Полное	Упругое	Деление	Захват	Деление	Захват
Ra-226	JENDL	22.61	9.82	7 мкб	12.79	5.7 мкб	282.

Содержащиеся в EXFORе экспериментальные данные о сечении деления противоречивы:

Ames-47: $\sigma_f=0.11$ миллибарн;

Nakahara-74: $\sigma_f=0.46$ миллибарн;

Nakahara-76: $\sigma_f<0.007$ миллибарн;

Оценка, принятая Мухабхабом: $\sigma_f<0.05$ миллибарн. Как видно, оценка Такаги опирается на последний результат Накахары.

Содержащиеся в EXFORе экспериментальные данные о сечении захвата:

Peterson-49: $\sigma_f=19$ барн;

Hagemann-50: $\sigma_f=15$ барн;

Butler-53: $\sigma_f=23\pm 1$ барн;

Оценка, принятая Мухабхабом: $\sigma_c=12.8\pm 1.5$ барн.

Резонансный интеграл по оценке Мухабхаба равен 280 барн без указания погрешности.

Оцененное поведение сечения деления в сравнении с имеющимися экспериментальными данными показано на рисунке 4.

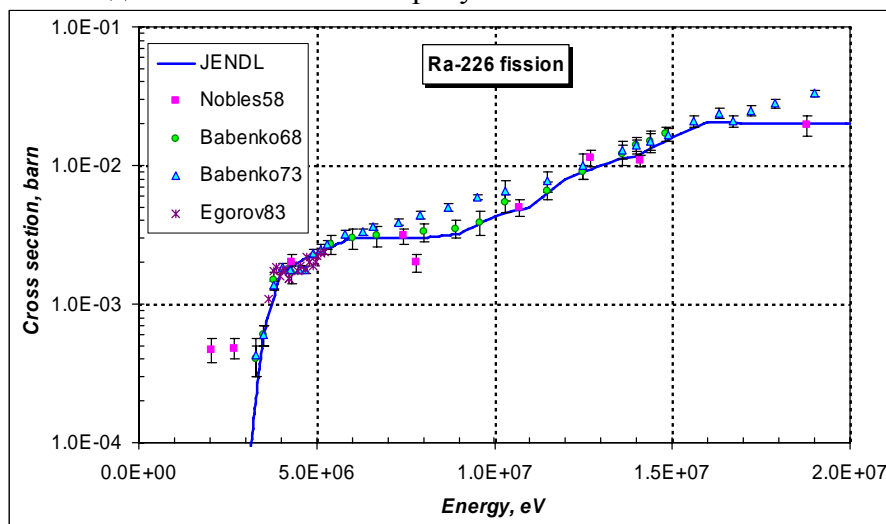


Рисунок 4 - Сечение деления на Ra-226

На рисунке 5 показана оцененная энергетическая зависимость сечения захвата. Как видно, резонансная структура сечений принята во внимание только до ~ 300 эВ. Между тем Известны параметры 33 резонансов с энергиями до 945 эВ и положения семи сильных уровней выше этой энергии.

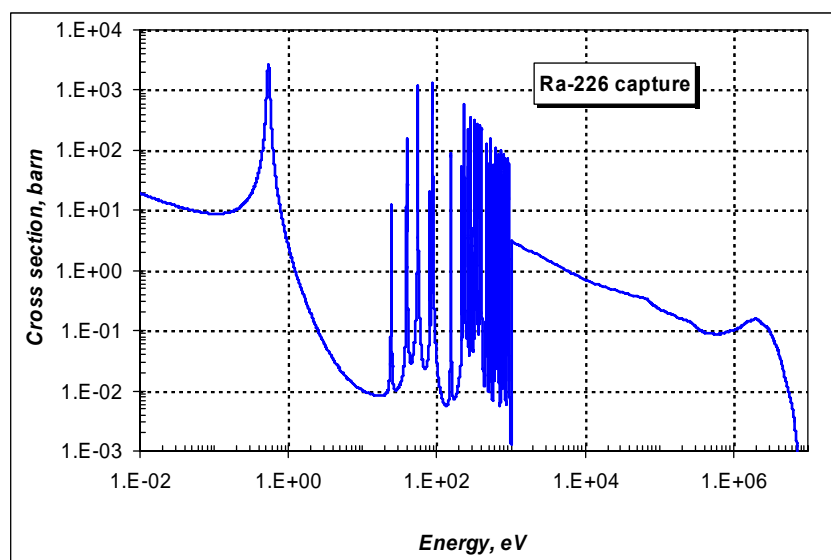


Рисунок 5 – Сечение радиационного захвата на Ra-226.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку N.Takagi, 1988 (JENDL-3.3 = JEFF-3.1 = ENDF/B-VIIb2)).

Автор отбора данных

Кошечев В.Н.

88.5. Радий-228

Радиоактивен ($T_{1/2}=5.75$ лет.). Испытывает бета распад в ^{228}Ac , который затем распадается в ^{228}Th , который, испытывая уже альфа-распад порождает ^{224}Ra . Источником этого изотопа в ядерном топливе является α -распад ^{232}Th .

Полных наборов оцененных нейтронных данных, как отмечалось, не имеется. Оцененные сечения нейтронных реакций содержатся в EAF-2003.

В таблице 5 приводятся величины теплового сечения и резонансного интеграла для изотопов радия, полученные с помощью программы INTER из пакета программ ENDF UTILITY CODES (release 6.13).

Таблица 5 – Тепловые сечения и резонансные интегралы изотопов радия (барн).

Нуклид	Оценка	Тепловое сечение ($E=0.0253$ эВ)				Резонансный интеграл	
		Полное	Упругое	Деление	Захват	Деление	Захват
Ra-228	JENDL	-	-	2.00	36.0	0.926	16.08

В EXFORe приведены следующие экспериментальные данные:

Peterson-47: $\sigma_f < 2$ барн;

Derokas-52: $\sigma_c = 36 \pm 5$ барн.

Эти результаты приняты и Мухабхабом.

Оцененное поведение сечения захвата показано на рисунке 6.

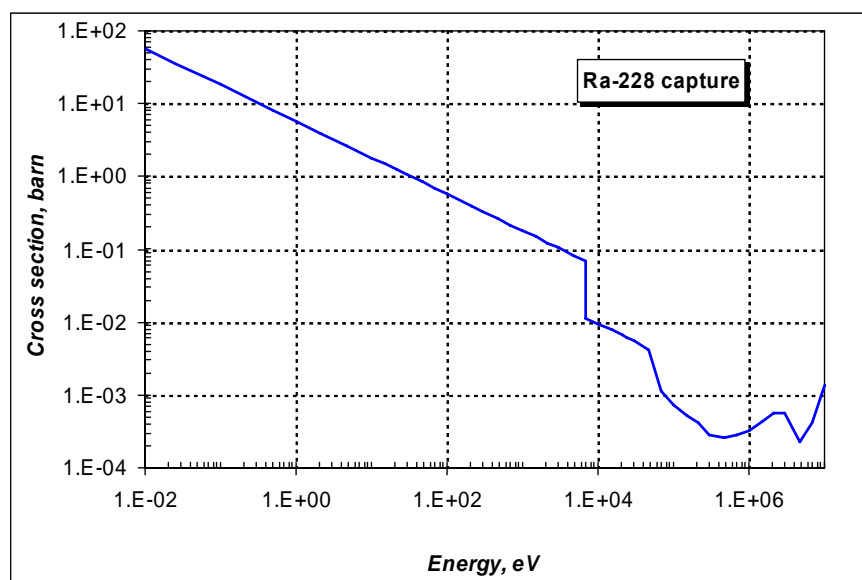


Рисунок 6 – Сечение радиационного захвата на Ra-228.

Заключение

Принять в РОСФОНД оценку нейтронных сечений из EAF-2003.

Автор отбора данных
Кошечев В.Н.