

## ИЗУЧЕНИЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ $(n, \alpha)$ НА ИЗОТОПАХ ХРОМА

*В. А. Хрячков, И. П. Бондаренко, Т. А. Иванова,  
Б. Д. Кузьминов, Н. Н. Семенова, А. И. Сергачев*

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научный центр Российской Федерации —  
Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского», Обнинск, Россия

Сечения реакции  $(n, \alpha)$  на изотопах хрома играют огромную роль в радиационной стойкости нержавеющей стали, которая широко используется в реакторостроении. В библиотеке EXFOR имеется лишь ограниченный набор экспериментальных данных для этой реакции, и они в основном относятся к области энергий нейтронов в окрестности 14 МэВ. Экспериментальные данные для вероятности реакции  $(n, \alpha)$  в области энергий, характерных для нейтронов деления, практически отсутствуют. В данной работе представлены результаты изучения реакций  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$  и  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)$ . Показано, что оценка библиотеки ENDF/B VII для реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$  приблизительно в 20 раз выше, чем наши экспериментальные данные. Кроме того, в функции возбуждения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$  наблюдается структура, не предсказываемая ни одной из библиотек. Впервые были получены значения сечения реакции  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)$  для нейтронов реакторного диапазона энергий.

The  $(n, \alpha)$  reaction cross section of chromium isotopes has a significant role in radiation resistance of stainless steel, which is widely used in nuclear reactor industry. In EXFOR there is only a limited amount of experimental data for this reaction and mainly they take place at 14 MeV. The experimental data for  $(n, \alpha)$  reaction probability in fission neutron energy range are almost absent. In this work, results for  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$  and  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)$  reaction excitation function investigations are presented. It was shown that ENDF/B VII library for  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$  reaction has an estimation that is more than 20 times higher than the result of our measurement. Furthermore, we observe irregularity in energy dependence of  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$  cross section which is not predicted by any library. The experimental data for  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)$  reaction in the reactor neutron energy region were obtained for the first time.

PACS: 25.40.-h; 28.20.-v; 28.41.Qb; 29.30.Ep; 29.40.Cs

### ВВЕДЕНИЕ

Ядерные реакции, протекающие под действием быстрых нейтронов и приводящие к образованию газообразных продуктов, например гелия или водорода, во многом определяют радиационную стойкость материалов. Особенно остро данная проблема стоит для конструкционных материалов, поскольку они наиболее широко используются при создании различных механизмов и узлов ядерно-энергетических установок. Проведенный анализ показал, что, несмотря на большую практическую значимость этих элементов, для ряда из них, например для изотопов хрома, набор экспериментальных исследований по измерению сечения  $(n, \alpha)$  чрезвычайно беден и ограничивается работами, выполненными для нейтронов с энергией 14 МэВ [1–3]. В таблице приведены содержание в природной смеси разных изотопов хрома и энергия  $(n, \alpha)$ -реакции.

**Распространенность в природе разных изотопов хрома и энергия  $(n, \alpha)$ -реакции, протекающей на них**

Изотоп	Содержание в природе, %	$Q$ реакции, МэВ
$^{50}\text{Cr}$	4,345	0,3213
$^{52}\text{Cr}$	83,489	-1,2097
$^{53}\text{Cr}$	9,501	1,7903
$^{54}\text{Cr}$	2,365	-1,5466

На рис. 1 приведено состояние дел с экспериментальными данными и оценками для разных изотопов хрома. Анализ приведенных данных показывает, что в ряде случаев данные разных авторов могут отличаться на десятки процентов. В области же энергий нейтронов, приближенной к реакторному диапазону, экспериментальные данные полностью отсутствуют. Следствием этого является и большой разброс в имеющихся теоретических оценках энергетического хода сечения, который показан на рис. 1. На рис. 2 показано отношение сечения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$ , даваемого библиотекой ENDF/B VII, к оценке

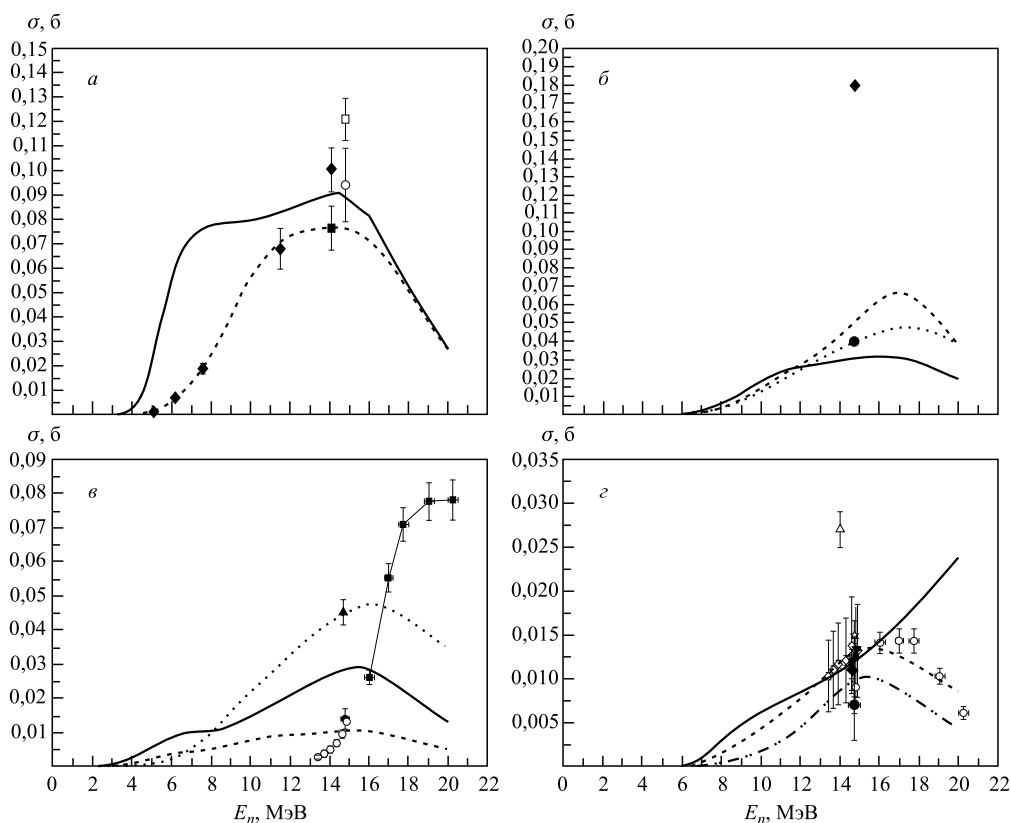


Рис. 1. Существующие к настоящему времени экспериментальные данные и теоретические оценки для изотопов Cr: а)  $^{50}\text{Cr}$ ; б)  $^{52}\text{Cr}$ ; в)  $^{53}\text{Cr}$ ; з)  $^{54}\text{Cr}$

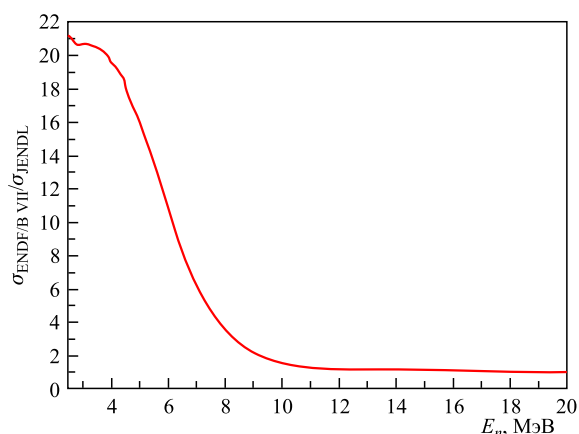


Рис. 2. Отношение сечений  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)$ , приводимых библиотеками ENDF/B VII и JENDL 3

библиотеки JENDL. Разница в сечении в области малых энергий нейтронов достигает 27 раз! Имеющееся разногласие между различными библиотеками может быть устранено только при появлении новых экспериментальных данных.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Для измерения сечения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Ti}$  использовалась твердая мишень из хрома с толщиной покрытия  $365 \text{ мкг/см}^2$ , в которой на долю изотопа  $^{50}\text{Cr}$  приходилось 96,8%. Содержание других изотопов хрома составило:  $^{52}\text{Cr}$  — 2,98%,  $^{53}\text{Cr}$  — 0,18% и  $^{54}\text{Cr}$  — 0,04%. Полная масса мишени — 5,15 мг. Мишень была нанесена на золотую фольгу толщиной  $84 \text{ мг/см}^2$ .

Мишень  $^{52}\text{Cr}$  была нанесена на золотую фольгу толщиной  $190 \text{ мг/см}^2$ . Диаметр мишени 30,9 мм; толщина слоя  $^{52}\text{Cr}$  составляла  $280 \text{ мкг/см}^2$ . Изотопный состав мишени был следующим:  $^{50}\text{Cr}$  — 0,1%,  $^{52}\text{Cr}$  — 99,5%,  $^{53}\text{Cr}$  — 0,3% и  $^{54}\text{Cr}$  — 0,1%. Полная масса мишени  $^{52}\text{Cr}$  составляла 2,1 мг.

Мишени поочередно помещались в детектор, представляющий собой ионизационную камеру с сеткой Фриша, заполненную смесью 97% Kr + 3% CH<sub>4</sub> при давлении 3 атм. Использование водородосодержащего метана в детекторе, работающем в потоке быстрых нейтронов, приводит к тому, что в рабочем объеме камеры рождается большое количество протонов отдачи, являющихся фоном по отношению к изучаемому эффекту. Однако попытка использовать смесь криптона с углекислотой показала, что фон от  $(n, \alpha)$ -реакции, протекающей на кислороде-16, также велик. Причем при использовании цифровых методов спектрометрии сигналов оказывается легче выделить полезные сигналы из большого количества импульсов, принадлежащих протонам, нежели из меньшего числа импульсов от  $\alpha$ -частиц реакции  $^{16}\text{O}(n, \alpha)$ .

Первоначальный опыт расположения мишени на катоде камеры показал, что материал катода при облучении его быстрыми нейтронами становится интенсивным источником  $\alpha$ -частиц, возникающих в результате  $(n, \alpha)$ -реакций, протекающих на компонентах материалов, входящих в его состав, и на кислороде и азоте, растворенных на его поверхности. Для уменьшения фона был использован опыт проведения работ по изучению  $(n, \alpha)$ -

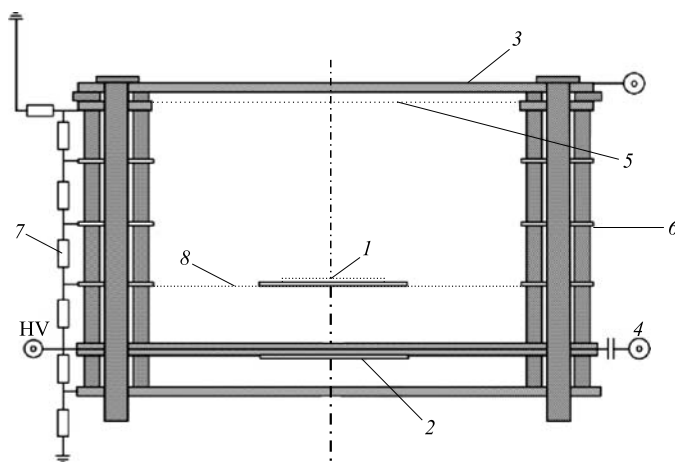


Рис. 3. Схема конструкции детектора: 1 — мишень  $^{50}\text{Cr}$ ; 2 — мишень  $^{238}\text{U}$ ; 3 — анод импульсной ионизационной камеры; 4 — общий катод; 5 — сетка Фриша; 6 — охранные электроды; 7 — делитель; 8 — золотые нити

реакций, протекающих на компонентах рабочего газа ионизационной камеры [4, 5]. Для этого мишень была прикреплена к золотым нитям, крепившимся к первому охранным электроду камеры. В результате мишень находилась в промежутке катод–сетка на расстоянии 1 см от катода (рис. 3). Золотые нити служили не только для фиксации мишени, но и для подачи на нее электрического потенциала, соответствующего месту расположения мишени. В этих условиях сигналы от  $\alpha$ -частиц, рождающихся на поверхности мишени, можно отличить от сигналов частиц, рождающихся на катоде или в самом рабочем газе. Для этого необходимо измерять время дрейфа наиболее удаленных от анода электронов. В случае если частицы рождаются на катоде, то для них всех последние электроны будут приходить из области вблизи катода и им придется преодолеть расстояние 4 см. Если частицы вылетают из мишени, электроны должны продрейфовать расстояние 3 см, разделяющее мишень и анод. Анализ времени дрейфа позволяет разделить частицы по месту их рождения, а следовательно, понизить фон от паразитных реакций. Однако столь детальный анализ формы анодного и катодного сигналов может быть выполнен только средствами цифровой обработки сигналов.

Сигналы, снимаемые с анода и катода ионизационной камеры, после усиления подавались на оцифровщик формы импульсов (LeCroy 2262), который превращал входной сигнал в последовательность чисел, соответствующих амплитудам входного сигнала в разные моменты времени. Оцифрованные сигналы сохранялись на жестком диске персонального компьютера для дальнейшей обработки.

Разработанное программное обеспечение позволяло извлекать из цифровых сигналов следующую информацию: амплитуды анодного и катодного сигналов и времена их начала и окончания. Совместный анализ информации, получаемой для каждого события, позволял нам определить энергию регистрируемой частицы, место ее рождения и ее тип. Каждый из измеряемых параметров позволяет значительно понизить вклад фона и, как следствие, повысить надежность в определении числа событий, принадлежащих изучаемой реакции.

Измерения, описанные в данной работе, были выполнены на ускорителе ЭГ-1 ГНЦ РФ–ФЭИ. Нейтроны генерировались в реакции  $D(d, n)$  на твердой титановой мишени толщиной  $1 \text{ мг/см}^2$ . Измерения были выполнены в интервале энергий нейтронов от 4,7 до 7,2 МэВ.

Для мониторингирования нейтронного потока использовалась плоскопараллельная камера, которая содержала тонкий слой  $^{238}\text{U}$ . Урановая мишень была смонтирована на общем катоде двух камер в геометрии back-to-back с основной камерой (см. рис.3). Содержание изотопа  $^{238}\text{U}$  в мишени составляло 99,99 %. Масса  $^{238}\text{U}$  была определена методом  $\alpha$ -спектрометрии и составила 4,60 мг. Мертвое время в мониторинговом и основном каналах регистрации было идентично из-за особенностей реализованного метода накопления информации. Таким образом, нейтронный поток измерялся в области, очень близкой к положению хромовой мишени. Поправка на разницу в положении слоя урана и хрома (1 см) вносилась на стадии обработки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерения сечения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Tl}$  приведены на рис. 4. Там же отражены оцененные данные библиотек ENDF/B VII и JENDL 3 и известные экспериментальные данные. Измерения были выполнены в диапазоне энергии нейтронов 4,7–7,2 МэВ.

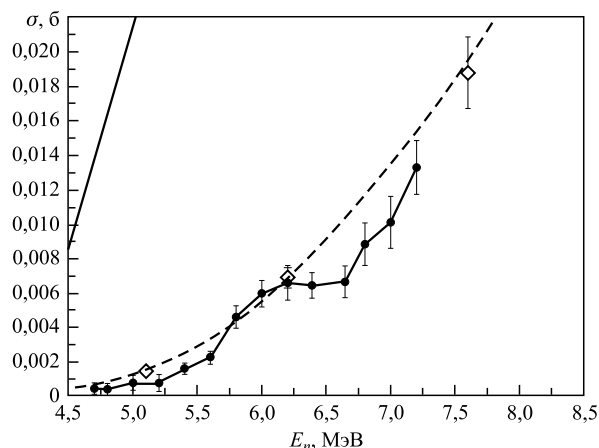
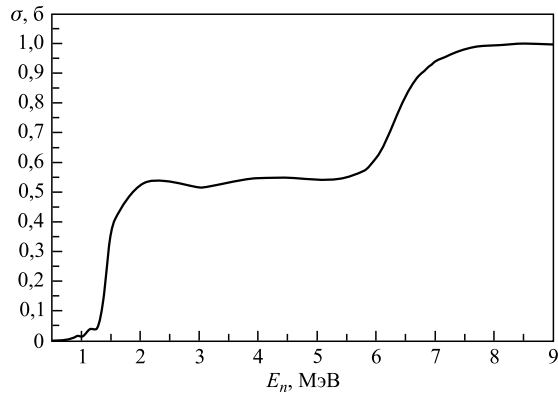


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных с оцененными данными различных библиотек. Точки — данные сечения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Tl}$  настоящей работы, ромбы — данные Matsuyama (данные из EXFOR), сплошная кривая — данные библиотеки ENDF/B VII, штриховая — данные библиотеки JENDL 3

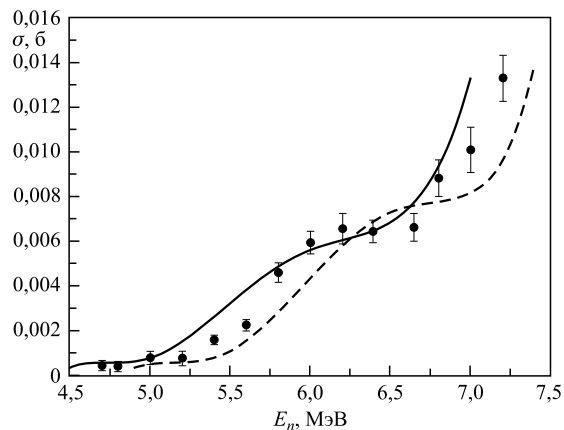
Совершенно очевидно, что результаты наших измерений полностью противоречат оценке, даваемой ENDF/B VII. В ряде точек отношение сечения, даваемого ENDF/B VII, к нашим данным достигает 50. Заметно лучше наши экспериментальные данные согласуются с оценками, даваемыми библиотекой JENDL, хотя в большинстве наши данные лежат ниже. Если интерполировать полученные данные дальше по энергетической шкале,

Рис. 5. Энергетическая зависимость сечения деления  $^{238}\text{U}$ 

то они также будут хорошо согласовываться с библиотекой JENDL. Стоит отметить, что в области энергии нейтронов  $\sim 6$  МэВ в экспериментальных данных наблюдается некая «ступенька», которая отсутствует во всех оценках.

Одна из возможных причин появления такой структуры — сдвиг по энергии нейтронов во время измерений. Такой эффект возможен, если принять во внимание то, что сечение деления  $^{238}\text{U}$  в этой области энергий быстро меняется из-за открывающейся возможности эмиссионного деления (рис. 5).

Для того чтобы исключить вероятность подобной ошибки, было проведено расчетное исследование. В своих расчетах мы исходили из того, что если имеется сдвиг в энергии нейтронов, то достаточно произвести расчет сечения с правильной энергией (правильным сечением деления  $^{238}\text{U}$ ) и наблюдающаяся ступенька в сечении реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Tl}$  исчезнет (сечение станет гладким, как это предсказывают все библиотеки). Расчеты были выполнены для сдвигов по энергии нейтронов от  $-200$  до  $200$  кэВ с шагом  $50$  кэВ. Частично результаты расчета показаны на рис. 6. Как видно из рис. 6, вносимый в энер-

Рис. 6. Результаты расчета сечения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Tl}$  в предположении о существовании сдвига по энергии нейтронов

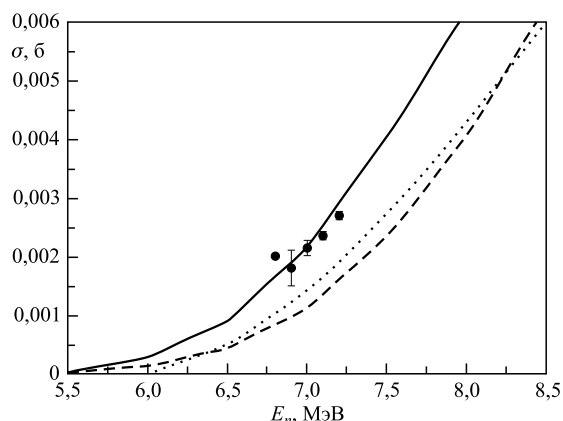


Рис. 7. Сечение реакции  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)^{49}\text{Ti}$  по оцененным данным библиотек ENDF/B VII (сплошная кривая), JENDL 4.0 (штриховая), BROND (пунктирная) и полученные экспериментальные данные (точки)

гию сдвиг не приводит к исчезновению особенности в сечении, а лишь смещает наблюдаемую структуру вдоль оси энергий нейтронов.

Результаты измерения сечения реакции  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)^{49}\text{Ti}$  приведены на рис. 7. На нем также показаны оцененные данные библиотек ENDF/B VII, JENDL 4.0 и BROND.

Имеющиеся к началу настоящей работы экспериментальные данные двух авторов по измерению сечения реакции  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)^{49}\text{Ti}$  для значения  $E_n = 14$  МэВ показаны на рис. 1, б. Расхождение между авторами достигает пяти раз. Данные для нейтронов с меньшей энергией отсутствуют. Неудивительно, что в этих условиях существует и разница между оценками, даваемыми разными библиотеками. Так, для энергии нейтронов 6,75 МэВ разница между оценкой ENDF/B VII и оценкой JENDL 4.0 достигает 100 %.

В данной работе впервые была получена информация о значениях сечения реакции  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)^{49}\text{Ti}$  для нейтронов с энергиями ниже 14 МэВ. Из рис. 7 хорошо видно, что наши данные неплохо согласуются с оцененными данными библиотеки ENDF/B VII. А оцененные данные библиотек JENDL 4.0 и BROND лежат гораздо ниже полученных нами данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный спектрометр способен эффективно работать с твердыми мишенями в условиях большого фона, возникающего в результате паразитных реакций. Проведены измерения сечения реакции  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Ti}$  для нейтронов в диапазоне 4,7–7,2 МэВ. Проведенные исследования показали, что оценки сечения, даваемые библиотекой ENDF/B VII, сильно отличаются от экспериментальных значений. Оценка, даваемая JENDL, хотя и находится намного ближе к эксперименту, не совпадает с ним ни по среднему значению сечения, ни по форме функции возбуждения.

Впервые были получены значения сечения реакции  $^{52}\text{Cr}(n, \alpha)^{49}\text{Ti}$  для нейтронов с энергиями ниже 14 МэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Derndorfer C. et al.* Investigation of the  $^{50}\text{Cr}(n, \alpha)^{47}\text{Ti}$  Reaction at  $E_n = 14.1$  MeV // *Zeit. Physik A. Hadrons and Nuclei*. 1981. V. 301, No. 4. P. 327–334.
2. *Dolja G.D. et al.* // *Proc. of Intern. Conf. on Neutron Physics*. Kiev, 1973. V. 3. P. 131–134.
3. *Grimes S.M. et al.* // *Phys. Rev. C*. 1979. V. 19. P. 2127.
4. *Giorginis G. et al.* The Cross Section of the  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  Reaction in the MeV Energy Range // *Proc. of Intern. Conf. «NDST 2007»*. Nice, 2007. P. 525–528.
5. *Khryachkov V.A., Bondarenko I.P., Kuzminov B.D.* Study of  $(n, \alpha)$  Reaction Cross Section on a Set of Light Nuclei // *Proc. of XVIII Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei «ISINN-18»*. Dubna, 2011.

Получено 8 ноября 2012 г.