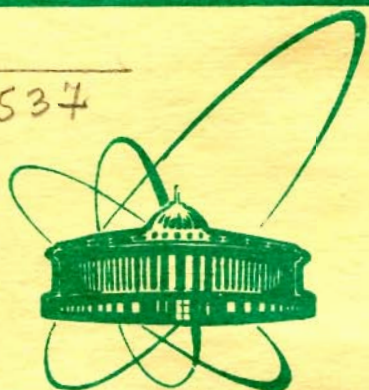


A-537



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

5309/2-79

24/12-79

PЗ - 12667

В.П.Алфименков, С.Б.Борзаков, Я.Вежбицки,  
Б.П.Осипенко, Л.Б.Пикельнер, В.Г.Тишин,  
Э.И.Шарапов

РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ  
ДЕЙТРОНАМИ

1979

РЗ - 12667

В.П.Алфименков, С.Б.Борзаков, Я.Вежбицки,  
Б.П.Осипенко, Л.Б.Пикельнер, В.Г.Тишин,  
Э.И.Шарапов

**РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ  
ДЕЙТРОНАМИ**

Направлено на Международную конференцию  
по ядерным сечениям для технологических задач,  
Ноксвилл, США, октябрь 1979 г.

## Радиационный захват тепловых нейтронов дейтронами

Измерено эффективное сечение радиационного захвата нейтронов дейтронами. Измерения выполнены методом времени пролета на импульсном реакторе ИБР-30 с использованием полупроводникового германиевого детектора и тяжелой воды как образца. Исследовались дейтронная гамма-линия 6,26 МэВ и стандартная гамма-линия 6,11 МэВ хлора. Результат составляет:  $\sigma_D = 487 \pm 24$  микробарн. Он свидетельствует в пользу теоретического значения, найденного при решении уравнения Фаддеева для трехнуклонной задачи.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Thermal Neutron Capture Cross Section  
by Deuterons

The radiative  $nD$  capture cross section  $\sigma_D$  was measured by the time-of-flight method at the IBR-30 pulsed reactor using Ge(Li) detector and  $D_2O$  water sample. The 6.257 MeV  $\gamma$ -ray yield from the  $D(n\gamma)$  reaction was measured with respect to the 6.110 MeV  $\gamma$ -ray yield from the  $Cl(n\gamma)$ - reaction and the value  $\sigma_D = 486(24) \mu b$  was obtained using the new standard cross section  $\sigma_{Cl} = 33.2(5) b$ ,  $I_\gamma(6.110) = 19.8(5)$ . The result obtained improved the accuracy of the  $n\gamma$  determination of  $\sigma_D$  value and lowered the uncertainty of the previous data. It is in favour of the theoretical value found by solving Faddeev equation in the frame of the three body problem.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Величина эффективного сечения радиационного захвата тепловых нейтронов дейтронами  $\sigma_D$  важна как с практической, так и с теоретической точек зрения. Тяжелая вода является одним из распространенных замедлителей в ядерных реакторах. Точность расчетов поглощения нейтронов в тяжеловодных замедлителях зависит от точности экспериментального значения  $\sigma_D$ . В теории расчет захвата нейтрона дейтроном является задачей, доступной для решения современными методами расчета малонуклонных систем. Уточнение экспериментального значения  $\sigma_D$  необходимо в этом случае для выяснения роли мезонных обменных токов в ядре и примесных состояний в полной волновой функции трития.

Между тем имеющиеся данные о  $\sigma_D$  противоречивы. Наиболее точные значения получены активационным методом по выходу трития. Однако различие значений:  $0,57 \pm 0,01^{1/}$  и  $0,520 \pm 0,009$  мб<sup>2/</sup> значительно превышает их ошибки. Данные по выходу гамма-лучей из реакции  $D(n, \gamma)$ , полученные с помощью кристаллов NaI(Tl), менее точны:  $0,60 \pm 0,05^{3/}$  и  $0,353 \pm 0,035$  мб<sup>4/</sup>. Кроме того, имеется значение  $0,37 \pm 0,12$  мб, сообщенное в "Атласе нейтронных сечений" / BNL-325, 1964/, которое основано на измерении диффузионной длины в тяжелой воде<sup>5/</sup>.

В настоящей работе предпринята попытка измерить сечение радиационного захвата тепловых нейтронов дейтронами по выходу гамма-лучей из реакции  $D(n, \gamma)$  с помощью Ge(Li)-детектора. Высокое энергетическое разрешение спектрометра с Ge(Li)-детектором позволило преодолеть трудности, связанные с повышенной ролью фона при определении малого сечения. Измерения выполнены методом времени пролета на импульсном реакторе ИБР-30, работавшем при средней мощности 20 кВт и частоте повторения нейтронных вспышек  $4 \text{ с}^{-1}$ . Пролетное расстояние до детектора составляло 33 м. Геометрия эксперимента представлена на рис. 1. Пучок нейтронов сечением 70 мм x 50 мм формировался коллиматорами 1 и 2. Образцом /3/ служила тяжелая вода объемом 247,5 мл., налитая в тонкостенный стеклянный стакан с герметичной крышкой. Стакан окружался цилиндрической защитой из  ${}^6\text{LiF}$  с толщиной слоя 1 см, предотвращавшей выход тепловых нейтронов из образца. Коаксиальный Ge(Li)-детектор /4/ объемом 55 см<sup>3</sup>

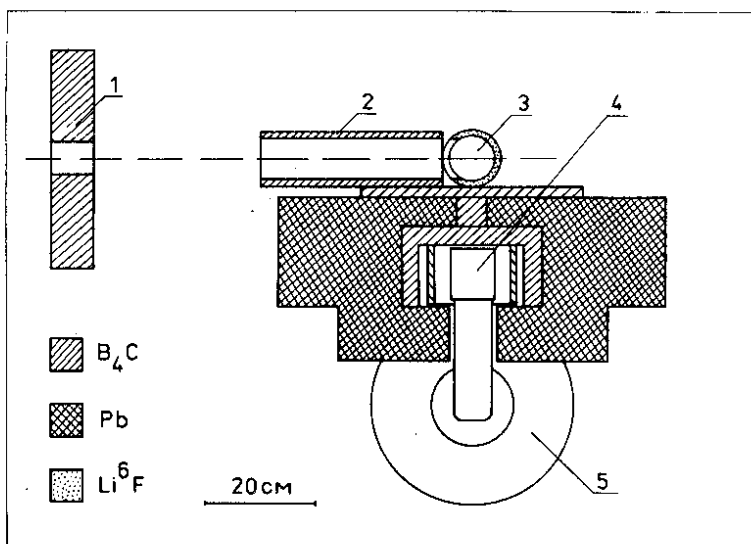


Рис.1. Геометрия установки для измерения эффективного сечения захвата нейтронов дейтронами, пояснения в тексте.

находился на расстоянии 16 см от оси пучка. Он окружался защитой от быстрых нейтронов и гамма-лучей, как показано на рис. 1. Импульсы детектора анализировались амплитудным анализатором во временном окне, соответствовавшем энергии падающих нейтронов от 100 до 15 мэВ. Энергетическое разрешение Ge(Li)-детектора в условиях рабочей загрузки на пучке нейтронов составляло 8,5 кэВ при энергии  $5 \pm 6$  МэВ. Эталонными образцами в наших измерениях служили легкая вода H<sub>2</sub>O и хлористый натрий NaCl, вводившиеся в виде небольшой примеси в D<sub>2</sub>O. В таких условиях для эффективных сечений  $\sigma_D$  и  $\sigma_3$  /э - эталонный образец/ справедливо соотношение

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_3} = \frac{\Sigma N_D}{\Sigma N_3} \frac{n_3}{n_D} \frac{\epsilon_3}{\epsilon_D}, \quad /1/$$

где  $\Sigma N_D$  и  $\Sigma N_3$  - суммы отсчетов детектора в пределах  $\gamma$  - линий,  $n_3/n_D$  и  $\epsilon_3/\epsilon_D$  - отношения соответствующих концентраций и эффективностей регистрации. Геометрические факторы и нормировочные множители не входят в уравнение /1/, т.к.

измерения с искомым и эталонным образцами проводятся одновременно в одинаковых условиях. Возможна, однако, систематическая ошибка в определении отношения  $\epsilon_D/\epsilon_D$ , если энергия эталонной гамма-линии заметно отличается от искомой:  $E_D = 6,26$  МэВ. Именно этот случай имеет место при использовании протонной линии  $E_H = 2,23$  МэВ. Поэтому линия  $E_{Cl} = 6,11$  МэВ более предпочтительна, хотя точность величины сечения  $\sigma_{Cl}$  как стандарта уступает точности  $\sigma_H$ . Согласно работе <sup>16/</sup> парциальный выход линии 6110 кэВ составляет  $0,198 \pm 0,005$  при полном сечении захвата  $33,2 \pm 0,5$  б.

Введение хлора в раствор  $D_2O$  существенно повышало фон под линией  $E_D = 6,26$  МэВ, поэтому измерения были выполнены в два этапа. Сначала измерялся выход  $E_D$ -линии относительно линии  $E_H$  с помощью образца тяжелой воды, содержавшего 8,6 мл легкой воды. Затем в этот образец был введен и растворен 1,000 г соли NaCl, и измерения были повторены вновь. Полученные спектры показаны на рис. 2 и 3. В такой

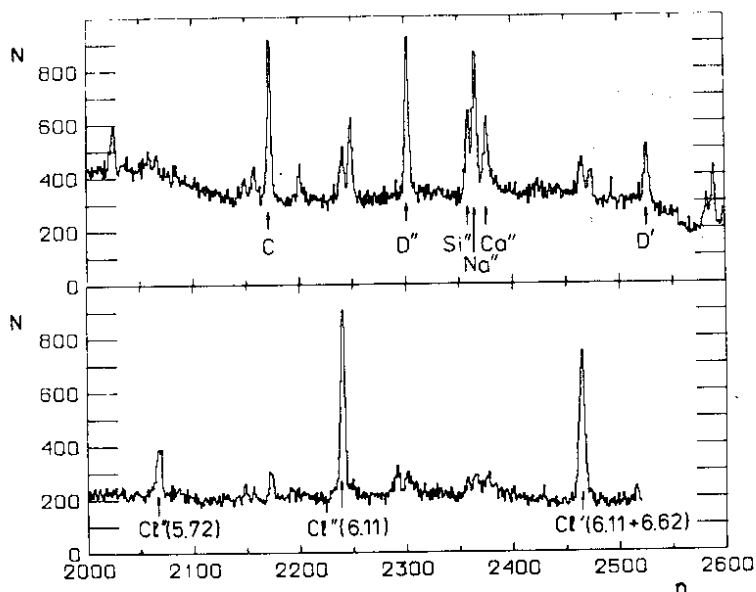


Рис.2. Участки спектров гамма-лучей в районе пиков двойного вылета 6,11 и 6,26 МэВ, полученных с образцами  $D_2O(H_2O)$  /вверху/ и  $D_2O(H_2O) + NaCl$  /внизу/, n - номер канала амплитудного анализатора /энергетическая ширина канала - 2,28 кэВ/, N - число отсчетов детектора за 75 часов /вверху/ и 11 часов /внизу/.

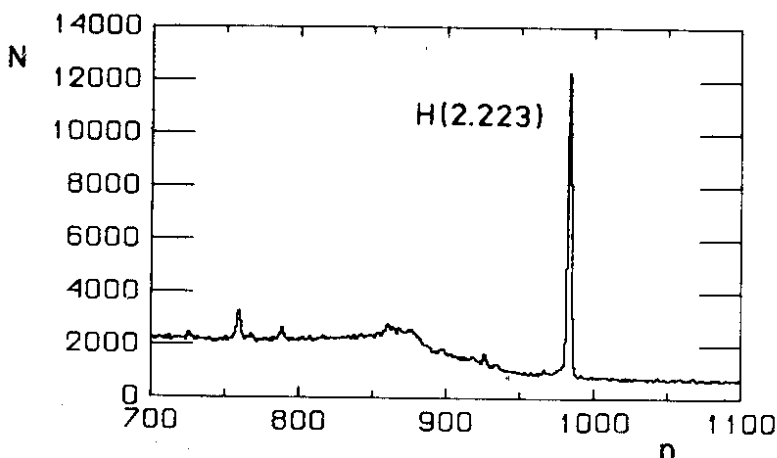


Рис.3. Участок энергетического спектра вблизи пика полной энергии 2,23 МэВ, полученный в реакции  $H(n, \gamma)$  с образцом 238,9 мл ( $D_2O$ ) + 8,6 мл ( $H_2O$ ).

постановке эксперимента протонная линия  $E_H$  является мониторинговой. Из двух уравнений, аналогичных /1/, следует соотношение:

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_{Cl}} = \frac{(\sum N_D / \sum N_H)_{D_2O}}{(\sum N_{Cl} / \sum N_H)_{Cl+D_2O}} \cdot \frac{n_{Cl}}{n_D} \quad /2/$$

Экспериментальное значение этой величины найдено равным

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_{Cl}} = (7,41 \pm 0,37) \cdot 10^{-5}$$

С использованием значения парциального сечения  $\sigma_{Cl} = 6,57 \pm 0,19$  б искоемое сечение захвата тепловых нейтронов дейтронами определено равным  $\sigma_D = 487 \pm 24$  мкб. Это значение является предварительным результатом измерений. Указанная статистическая ошибка будет уменьшена последующим набором статистики. Основной систематической ошибкой, определяющей предельную точность этого метода, является точность значения стандарта  $\sigma_{Cl}$ , равная 2,6%.

В табл. 1 собраны известные к настоящему времени значения величины  $\sigma_D$ . Точность прежних  $\rho\gamma$ -измерений уступала

точности измерений активационным методом. В настоящих измерениях удалось повысить точность  $n\gamma$ -метода. Полученный результат несколько меньше более позднего значения работы <sup>12/</sup>, выполненной активационной методикой, однако окончательное заключение будет сделано по завершении данного эксперимента.

Таблица 1  
Результаты измерений  $\sigma_D$

год	1947	1952	1963	1963	1968	1979
$\sigma_D$ мб	0,37(12)	0,570(10)	0,353(35)	0,600(50)	0,520(9)	0,487(24)
метод, работа	длина диффузии	активац.	$n, \gamma$	$n, \gamma$	активац.	$n, \gamma$ данная работа
	/5/	/1/	/4/	/3/	/2/	

Представляет интерес сравнение экспериментального значения  $\sigma_D$  с теоретическими оценками. Теоретические результаты получены методами дисперсионной теории <sup>17/</sup> и с использованием сепарабельного приближения при решении уравнения Фаддеева <sup>18/</sup>. Система  ${}^2\text{H}+p$ , образующаяся при захвате теплового нейтрона, может, очевидно, при  $L=0$  иметь полный спин и четность  $J=3/2^+$  /квартетный канал/ или  $J=1/2^+$  /дублетный канал/. В обоих случаях возможно в принципе испускание магнитного дипольного излучения на основное состояние тритона  $I=1/2^+$ . Однако эффективное сечение процесса подавлено правилом отбора по симметрии волновой функции конечного продукта тритона. Магнитный переход в реакции  $D(n, \gamma)$ , как и в реакции  ${}^3\text{He}(n, \gamma)$ , рассмотренной в работе <sup>19/</sup>, разрешен лишь между состояниями с симметричными спиновыми волновыми функциями. Последнее утверждение справедливо при наличии в тритоне примеси  $S'$ -состояния /состояния смешанной симметрии/. Вес  $S'$ -состояния в полной волновой функции тритона принят в указанных теоретических работах на уровне  $1 \div 2\%$ . Расчеты проведены как для свободных магнитных моментов нуклонов, так и с учетом мезонного обмена между ними. Результаты приведены в табл. 2.



Таблица 2

Теоретические значения сечения  $\sigma_D$ 

Авторы	$\sigma_D$ , мб свободные моменты	$\sigma_D$ , мб мезонный обмен
Phillips /7/	0,15	0,55
Hadjimichael /8/	0,29	0,52±0,05

Как видно из таблицы, учет обменных токов существенно увеличивает теоретический результат. Интересно, что это происходит в основном за счет роста дублетной компоненты. Поэтому последовательной проверкой теоретического результата мог бы служить поляризационный опыт, допускающий раздельное определение дублетной и квартетной компонент захвата.

Авторы благодарны В.Н.Ефимову и В.Б.Беляеву за полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kaplan L., Ringo G.R., Wilzbach K.E. Phys.Rev., 1952, 87, p. 785.
2. Merritt J.S., Taylor J.G.V., Boyd A.W. Nucl.Sci.Eng., 1968, 34, p. 195.
3. Journey E.T., Motz H.T. Preprint ANL-6797, 1963, p. 236.
4. Trail C.C., Raboy S. Preprint ANL-6797, 1963, p. 247.
5. Sargent B.W., et al. Can.J.Research, 1947, A25, p. 134.
6. Stelts M.L., Chrien R.E. Nucl.Instr.Meth., 1978, 155, p. 233.
7. Phillips A.C. Nucl.Phys., 1972, A184, p. 337.
8. Hadjimichael E. Phys.Rev.Lett., 1973, 31, p. 183.
9. Alfimenkov V.P., et al. JINR, E15-12380, Dubna, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 июля 1979 года.