

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



B-926

P6 - 11675

4510/2-78

Ц.Вылов, К.Я.Громов, А.И.Иванов,  
Б.П.Осипенко, Е.А.Фролов, В.Г.Чумин,  
А.Ф.Щусь, М.Ф.Юдин

НОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ  
ЭНЕРГИИ СВЯЗИ ДЕЙТРОНА

**1978**

Р6 - 11675

Ц.Вылов, К.Я.Громов, А.И.Иванов,<sup>1</sup>  
Б.П.Осищенко, Е.А.Фролов,<sup>1</sup> В.Г.Чумин,  
А.Ф.Щусь,<sup>2</sup> М.Ф.Юдин<sup>1</sup>

НОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ  
ЭНЕРГИИ СВЯЗИ ДЕЙТРОНА

*Направлено в ЯФ*

---

<sup>1</sup> ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Ленинград.

<sup>2</sup> Харьковский государственный университет.

## Новое измерение энергии связи дейтрона

Впервые по пику полного поглощения  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом выполнено измерение энергии связи дейтрона -  $\epsilon_D$ . Измерение выполнено с помощью полупроводниковых  $Ce(Li)$  детекторов с использованием набора нормалей энергии  $\gamma$ -лучей, основанного на значении  $E_\gamma(411,8 \text{ } ^{198}\text{Hg}) = (411,794 \pm 0,007) \text{ кэВ}$ . Получено значение  $\epsilon_D = (2224,572 \pm 0,040) \text{ кэВ}$ . Указывается на систематическую ошибку, допущенную в более ранних измерениях  $\epsilon_D$ , связанную с проведением измерений по пику двойного вылета.

Пересчет полученного значения с использованием нового, более точного значения  $E_\gamma(411,8 \text{ } ^{198}\text{Hg}) = (411,805 \pm 0,0015) \text{ кэВ}$  приводит к величине  $\epsilon_D = (2224,631 \pm 0,016) \text{ кэВ}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

## A New Measurement of Deuteron Binding Energy

A new measurement of deuteron binding energy  $\epsilon_D$  has been performed for the first time by using the full absorption peak of  $\gamma$ -rays emitted at the neutron capture by hydrogen. The measurement was made by means of semiconductor  $Ce(Li)$  detectors using the set of standard  $\gamma$ -ray energies based on the value of  $E_\gamma(411,8 \text{ } ^{198}\text{Hg}) = (411,794 \pm 0,007) \text{ keV}$ . The value of  $\epsilon_D = (2224,572 \pm 0,040) \text{ keV}$  was obtained. The systematical error is pointed which was made in previous measurements of  $\epsilon_D$  due to the use of a double escape peak. Using the new more accurate value of  $E_\gamma(411,8 \text{ } ^{198}\text{Hg}) = (411,805 \pm 0,0015) \text{ keV}$  was recalculated and the value for  $\epsilon_D = (2224,631 \pm 0,016) \text{ keV}$  was obtained.

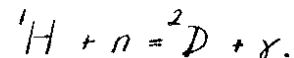
The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Дейтрон - простейшая устойчивая ядерная система, и это определяет значительный интерес к исследованию его основных характеристик. В частности, повышение точности измерения энергии связи позволяет уточнить массу дейтрона, массу нейтрона и, таким образом, непосредственно повлиять на точность шкалы масс атомных ядер.

Анализ экспериментов по определениюэнергии связи дейтрона

Наиболее точные определения энергии связи дейтрона сделаны при измерении энергии  $\gamma$ -лучей  $E_D$  в реакции захвата тепловых нейтронов водородом:



Энергию связи дейтрона  $E_D$  определяют по формуле

$$E_D = E_D + E_{\text{д.о.}}$$

Используя стандартные данные<sup>/1/</sup>, энергию отдачи ядра получаем равной

$$E_{\text{д.о.}} = \frac{1}{2} \left( \frac{E_D}{m_D c^2} \right)^2 m_D c^2 = 1317 \pm 1 \text{ эВ}.$$

Соответствующие эксперименты проводились с помощью комптоновского<sup>/2/</sup>, сцинтилляционного<sup>/3/</sup>, кристалл-дифракционных<sup>/4-6/</sup> и полупроводниковых<sup>/7-9/</sup> гамма-спектрометров. Полученные результаты и значения нормалей, относительно которых выполнены сравнительные измерения, приведены в табл. I.

Таблица I  
 Результаты измерений энергии связи дейтрона  $E_D$ .

ГОД.СОМЛКА	СПЕКТРОМЕТР	$\epsilon_D$	ЯЗДЛД	НОРМАЛИ ЭНЕРГИИ			
				ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДАННЫЕ		НАШИ ДАННЫЕ	
				E	$\epsilon$	E	$\epsilon$
1959 /2/	КОМПТОНОВСКИЙ	2224.3 ±1.0					
1961 /3/	Ge(Li)	2219 ±2	207Bi 68Tl 207Pb 24Na 88Y 24Na	570.8 898.7 1063.9 1368.6 1836.2 2753.0	0.5 0.7 0.4 0.3 1.7 1.0	569.683 898.048 1063.660 1368.615 1836.074 2753.989	0.011 0.019 0.019 0.025 0.034 0.051
1960 /4/	ИЗОГНУТЫЙ КРИСТАЛЛ	2224.6 ±1.5	198Au	510.976 411.770	0.007 0.036	- 411.794	- 0.007
1961 /5/	ИЗОГНУТЫЙ КРИСТАЛЛ	2224.5 ±1.5	198Au	510.976	0.007	-	-
1962 /6/	ДВУХКРИСТАЛЛЬНЫЙ	2224.52 ±0.20	198Au	510.976	0.007	-	-
1965 /7/	Ge(Li)	2224.62 ±0.15	198Au 177Cs 60Co 60Co 24Na 24Na	511.006 661.59 1173.226 1332.483 1368.615 2753.92	0.005 0.04 0.040 0.046 0.044 0.12	- 661.648 1173.236 1332.485 1368.615 2753.989	- 0.013 0.021 0.025 0.025 0.051
1966 /8/	Ge(Li)	2224.61 ±0.07	198Au 60Co 60Co 24Na	511.006 1173.226 1332.485 1368.526	0.002 0.040 0.046 0.044	- 1173.236 1332.485 1368.615	- 0.021 0.025 0.025
1967 /9/	Ge(Li)	2224.667 ±0.046	139La 228Th 228Th 228Th 60Co 60Co 228Th 228Th	165.84 258.624 510.84 583.139 1173.226 1332.483 1592.46 2614.47	0.03 0.009 0.07 0.023 0.040 0.046 0.10 0.10	165.854 - - - 1173.236 1332.485 - -	0.003 - - - 0.021 0.025 - -
	ВЗВЕШЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ	2224.642 ±0.042	-	-	-	-	-
1971 /12/	СОГЛАСОВАНИЕ	2224.64 ±0.04	-	-	-	-	-
1977 /13/	СОГЛАСОВАНИЕ	2224.628 ±0.030	-	-	-	-	-
1978 НАСТ. РАБОТА	Ge(Li)	2224.572 ±0.040	СМ. ТАБЛ. 2	-	-	-	-

Рассматривая данные табл. I, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее точные измерения  $E_D$  выполнены с помощью Ge(Li)-детекторов. В области выше 1 МэВ кристалл-дифракционные спектрометры дают худшие результаты из-за низкой эффективности и трудностей при измерении очень малых углов;
2. Точность измерений энергий  $\gamma$ -лучей зависит от выбора нормалей, относительно которых проводят измерения. Как показано в работе /10/, исследования нелинейности спектрометра с Ge(Li)-детек-

тором требуют использования значительного числа реперных пиков. Из данных табл. I, однако, следует, что в прецизионных измерениях  $E_D$  с помощью Ge(Li)-детекторов это требование не было соблюдено.

3. Все измерения  $E_D$  на Ge(Li)-детекторах выполнены по пикам двойного вылета (ДВ) от  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом. Выбор такого способа измерения был обусловлен отсутствием достаточно точных и согласованных нормалей энергии в области выше 1,5 МэВ. Вместе с тем в последнее время стало ясно (см., например, /11/), что сложные кинематические процессы в электрическом поле детектора, происходящие при регистрации электрон-позитронных пар, могут сдвигать пики ДВ и приводить к систематическим ошибкам при определении энергии  $\gamma$ -лучей. Так, в частности, определенные по пикам ДВ с помощью Ge(Li)-детектора (38 см<sup>3</sup>) значения энергии  $\gamma$ -лучей в области 2 МэВ оказались завышенными примерно на 100 эВ. /11/

4. В последние 10 лет дважды проводилось согласование масс ядер /12,13/, но не было ни одного нового измерения энергии связи дейтрона.

5. В нашей лаборатории проведена работа /10,11,14/ по уточнению и расширению набора нормалей энергий  $\gamma$ -лучей. Как видно из табл. I, существенно повышена точность определения энергии для использованных в /7-9/ нормалей. Предложен набор нормалей также и для области энергий выше 2 МэВ (см. табл. 2).

Эти факты стимулировали постановку нового эксперимента по измерению энергии связи дейтрона с помощью Ge(Li)-детекторов.

Таблица 2

Нормали энергии  $\gamma$ -лучей /10, II, I4/, использованные при измерении энергии связи дейтрона в предположении  $E_d$  ( $4II, 8 - {}^{198}Hg$ ) = ( $4II, 794 \pm 0, 007$ ) кэВ /19/

E	$\Delta E$	НУКЛИД	E	$\Delta E$	НУКЛИД	E	$\Delta E$	НУКЛИД
569.683	0.011	207Bi	898.048	0.019	88Y	1489.132	0.027	144Ce
657.744	0.013	110mAg	937.507	0.017	110mAg	1505.036	0.028	110mAg
661.648	0.013	137Cs	1037.841	0.018	56Co	1562.303	0.029	110mAg
677.613	0.014	110mAg	1063.660	0.019	207Bi	1770.253	0.034	207Bi
687.001	0.014	110mAg	1115.555	0.020	65Zn	1771.347	0.032	56Co
696.492	0.013	144Ce	1173.236	0.021	60Co	1836.074	0.034	88Y
706.672	0.014	110mAg	1238.271	0.022	56Co	2015.196	0.040	56Co
744.271	0.015	110mAg	1274.531	0.023	22Na	2034.772	0.037	56Co
763.936	0.016	110mAg	1332.485	0.025	60Co	2185.607	0.041	144Ce
818.028	0.015	110mAg	1360.209	0.024	56Co	2598.444	0.047	56Co
834.858	0.015	54Mn	1368.615	0.025	241Pa	2753.989	0.051	241Pa
846.777	0.016	56Co	1384.285	0.026	110mAg	3253.414	0.060	56Co
884.695	0.016	110mAg	1475.778	0.027	110mAg	3273.000	0.062	56Co

### Эксперимент

Геометрия экспериментов по измерению энергии  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом изображена на рис. 1 слева.  $Po-Be$  источник ( $9,1 \cdot 10^6$  нейтронов/с) помещен в парафиновый параллелепипед размерами  $34 \times 34 \times 40$  см<sup>3</sup>, который одновременно выполнял функции замедлителя нейтронов и водородной мишени. Спектр  $\gamma$ -лучей (рис. 2) исследован с помощью  $38$  см<sup>3</sup> Ge(Li)-детектора и спектрометрической аппаратуры, описанной в нашей работе /II/. Характерные аппаратные спектры  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом и спектр калибровочных источников представлены на рис. 3 и 4. Значение  $E_D$  и его погрешности рассчитаны по следующим формулам /10, II/:

$$E_D = \frac{\sum_{i=1}^n E_i (1/\Delta E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (1/\Delta E_i)^2}, \quad \Delta E_D = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2)^{1/2},$$

$$\alpha_1^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/\Delta E_i)^2}, \quad \alpha_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (1/\Delta E_i)^2 (E - E_i)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (1/\Delta E_i)^2},$$

$$\alpha_3^2 = \rho^2 E_D^2, \quad \alpha_4^2 = \mu^2 E_D^2.$$

Здесь  $n=10$  - число серий измерений;  $E_D$  - энергия в кэВ;  $\alpha_3$  - погрешность нормалей 3-го порядка в предположении  $E_d$  ( $4II, 8 - {}^{198}Hg$ ) =  $4II, 794 \pm 0, 000$  кэВ;  $\rho = 5 \cdot 10^{-6}$ . И использованные нормали энергии 3-го порядка перечислены в табл. 2.  $\alpha_4$  - погрешность нормали второго порядка при  $E_d$  ( $4II, 8 - {}^{198}Hg$ ) =  $4II, 794 \pm 0, 007$  кэВ;  $\mu = 17 \cdot 10^{-6}$ . Для расчета  $\Delta E_D$  выбирает погрешность, наибольшую из погрешностей  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Погрешность  $\Delta E_D$  рассчитывают в предположении  $\alpha_4 = 0$ .

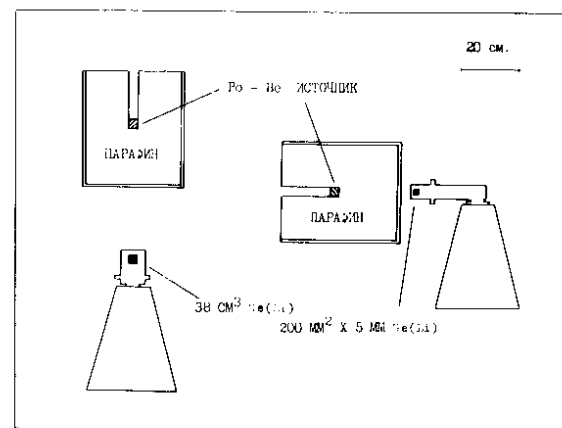


Рис. 1. Геометрия экспериментов по измерению энергии  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом. Слева - геометрия основных измерений по пику полного поглощения. Справа - геометрия контрольного эксперимента - измерения по пику двойного вылета.

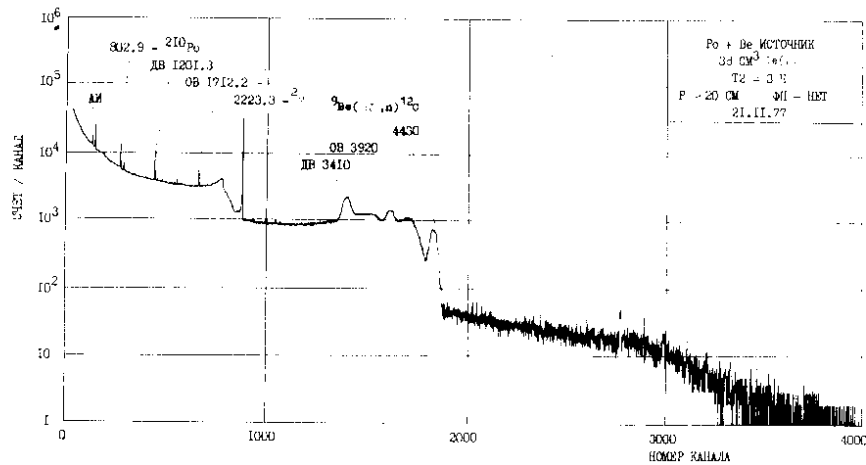


Рис. 2. Аппаратурный спектр  $\gamma$ -лучей, возникающих при захвате нейтрона водородом. Используются:  $Po-Be$ -источник нейтронов,  $Ge(Li)$ -детектор объемом  $38 \text{ см}^3$ ; время измерения  $T_2 = 3 \text{ ч}$ ,  $P$  (расстояние источник-детектор) - больше  $20 \text{ см}$ , поглощающие фильтры (ФП) не использовались.

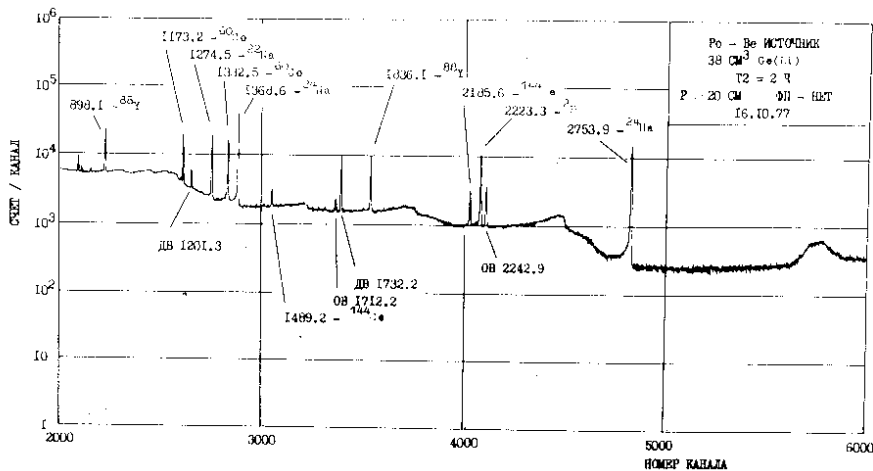


Рис. 3. Пример аппаратного спектра  $\gamma$ -лучей, возникающих при захвате нейтрона водородом, и  $\gamma$ -лучей от калибровочных источников. Обозначения те же, что и на рис. 2.

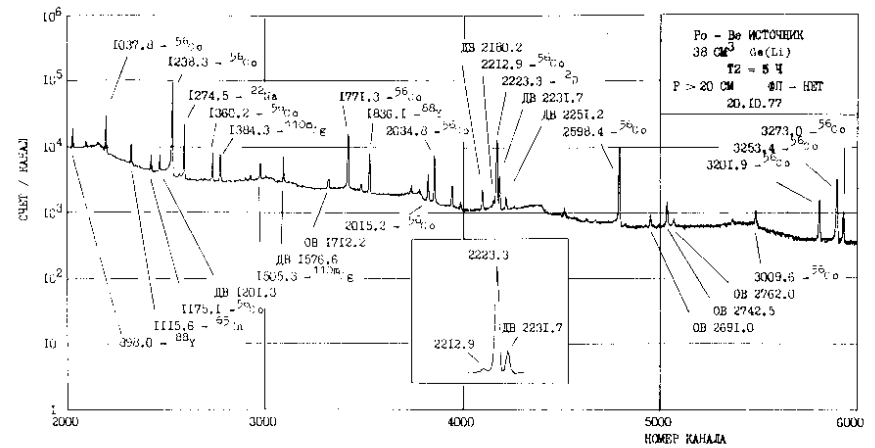


Рис. 4. Другой пример аппаратного спектра.

Результаты обработки 10 серий измерений с использованием различных усилителей и аналого-цифровых преобразователей приведены в табл. 3. Видно, что использование энергии пиков вылета может приводить к систематическим ошибкам в определении энергии связи дейтрона.

Таблица 3

Результаты экспериментов по измерению энергии  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом с помощью полупроводниковых (ППД)  $Ge(Li)$ -детекторов. Измерения выполнены по пикам полного поглощения (ФП), одиночного вылета (ОВ), двойного вылета (ДВ)

ППД	ПИК	E	$\Delta E$	$\Delta E'$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
$38 \text{ см}^3$	ФП	2223.255	0.040	0.014	0.008	0.005	0.011	0.038
	ДВ	2223.371	0.025	0.014	0.009	0.013	0.006	0.020
	ОВ	2223.188	0.038	0.025	0.019	0.023	0.009	0.029
$200 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$	ДВ	2223.235	0.028	0.022	0.008	0.019	0.006	0.020

Были выполнены две серии контрольных измерений  $E_D$  по пикам двойного вылета с помощью планарного  $200 \times 5 \text{ мм}^2 \text{ Ge(Li)}$ -детектора при напряжении смещения 1000 В. Геометрия эксперимента показана в правой части рис. 1. Один из спектров представлен на рис. 5.

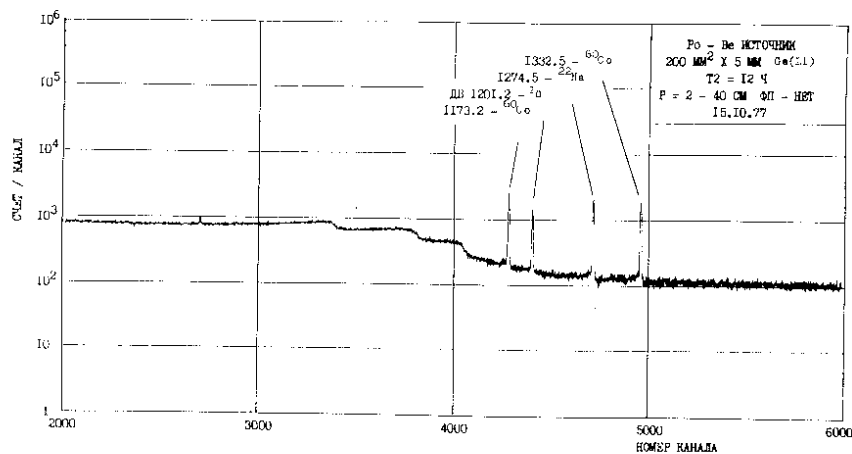


Рис. 5. Аппаратурный спектр, полученный в измерениях  $E_D$  по пику двойного вылета. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Результат обработки этих измерений дан в последней строке табл. 3. Видно, что полученное значение  $E_D$  совпадает в пределах погрешностей с результатами измерения по пику полного поглощения на  $\text{Ge(Li)}$ -детекторе ( $38 \text{ см}^3$ ) при  $U_{см} = 3000 \text{ В}$ . Таким образом, возможен случай, когда геометрия эксперимента и параметры детектора позволяют применять пики двойного вылета для прецизионных измерений энергий  $\gamma$ -лучей. В то же время ясно, что высокая точность и надежность результата может быть достигнута только при специальном исследовании условий эксперимента.

Отметим, что погрешность  $\Delta E_D' (\alpha_4 = 0)$  при измерении по пику полного поглощения равна 14 эВ, т.е. существенная часть  $\Delta E_D = 40 \text{ эВ}$

обусловлена погрешностью нормали второго порядка  $E_\gamma 4 \text{ II, 8} - 198 \text{ Нг}$ .

Энергия связи дейтрона равна:

$$E_D = E_D + E_{a.o.} \approx 2224,572 \pm 0,040 \text{ кэВ.}$$

#### Масса покоя нейтрона

В настоящее время наиболее точным методом определения массы покоя нейтрона или, что более удобно, разности масс нейтрона и атома водорода ( $n - {}^1\text{H}$ ) является измерение энергии связи дейтрона из реакции  ${}^1\text{H}(n\gamma){}^2\text{D}$ . Если учесть, что  $2{}^1\text{H} = \text{H}_2$ , то уравнение для определения  $n - {}^1\text{H}$  можно записать в следующем виде:

$$n - {}^1\text{H} = E_D - (\text{H}_2 - {}^2\text{D}).$$

Точность измерения масс-спектроскопического дублета ( $\text{H}_2 - {}^2\text{D}$ ) очень высока. С использованием переводного множителя а.е.м (931501,600  $\pm$  2,6) кэВ величина разности масс дублета ( $\text{H}_2 - {}^2\text{D}$ ) равна <sup>15/</sup>:

$$(\text{H}_2 - {}^2\text{D}) = 1442,232 \pm 0,004 \text{ кэВ.}$$

Тогда

$$n - {}^1\text{H} = 782,340 \pm 0,040 \text{ кэВ.}$$

#### Заключение

Таким образом, используя методику прецизионной спектроскопии  $\gamma$ -лучей и набор нормалей энергии  $\gamma$ -лучей <sup>10, 11, 14/</sup>, мы измеряли энергию связи дейтрона в реакции захвата нейтрона водородом. Полученное значение  $E_D = (2224,572 \pm 0,040) \text{ кэВ}$  следует сравнивать с наиболее точным ранним экспериментальным значением  $(2224,667 \pm 0,046) \text{ кэВ}$  <sup>9/</sup>, средним взвешенным значением  $(2224,642 \pm 0,042) \text{ кэВ}$

(табл. I) и согласованным значением  $(2224,628 \pm 0,030)$  кэВ (табл. I и <sup>13/</sup>). На первый взгляд все эти четыре значения в пределах указанных ошибок совпадают. Однако следует учитывать, что в погрешностях всех приведенных значений  $E_D$  значительную часть (около 2/3, см. табл. 3) составляет погрешность, вносимая использованным значением нормали  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$ . Учитывая это, приходим к выводу, что полученное нами значение меньше других. Так, разность между нашим значением  $E_D$  и значением из <sup>9/</sup> равна  $(0,095 \pm 0,020)$ . Мы предполагаем, что завышение энергии связи дейтрона в <sup>9/</sup> и <sup>13/</sup> вызвано использованием для измерения энергии  $\gamma$ -лучей при захвате нейтрона водородом пика двойного вылета.

В последнее время появились сообщения о новых, более точных измерениях  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$  <sup>16,17/</sup>. Полученные значения оказались больше принятого значения (см. табл. 4). К такому же выводу пришел Б.С.Джелепов <sup>18/</sup> в 1974 году при анализе имевшихся в то время измерений  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$ . В таблице 4 мы приводим значения энергии связи дейтрона, которые вытекают из наших измерений при использовании  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$  из работ <sup>18,16,17/</sup>. Очевидно, что совпадение значений, основанных на <sup>16,17/</sup>, с согласованным значением из <sup>15/</sup> (см. табл.) случайное, вызванное компенсацией погрешностей, возникающих при измерении  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$  и при использовании пика двойного вылета.

Таблица 4.  
Значения  $E_D$ , полученные на основе наших измерений при использовании новых значений  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$

В 411,8	$E_D$	Л-РА
$411,803 \pm 0,014$	$2224,621 \pm 0,077$	Джелепов /18/
$411,801 \pm 0,0027$	$2224,608 \pm 0,020$	Кеслер /16/
$411,805 \pm 0,0015$	$2224,631 \pm 0,016$	Борхерт /17/

Хотя в измерениях  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg})$  в <sup>16,17/</sup> достигнута более высокая точность, пока мы считаем преждевременным изменять принятое значение нормали второго порядка  $E_\gamma(411,8 - ^{198}\text{Hg}) = (411,794 \pm 0,007)$  кэВ, на которой построен <sup>10,14/</sup> использованный нами набор нормалей энергии  $\gamma$ -лучей третьего порядка. Поэтому результатом настоящей работы следует считать приведенное выше значение:  $E_D = (2224,572 \pm 0,040)$  кэВ. Отметим еще раз, что если будет принято новое значение нормали второго порядка, полученный результат легко может быть пересчитан (на основе приведенных в <sup>10/</sup> формул), как это сделано в табл. 4.

#### Литература

1. Фундаментальные физические константы. ГСССД-76. Издательство стандартов, 1976.
2. Motz H.T., Carter R.E. and Fisher P.C. Bull. Am. Phys. Soc., 11, 4, 477, 1959.
3. Monahan J.E., Raboy S. and Trail C.C. Nucl. Phys., 24, 400 1961.
4. Jewell R.W. and John W. UCRL-6095. University of California, 1960.
5. Kazi A.H., Rasmussen N.G. and Mark H. Phys. Rev., 123, 1310, 1961.
6. Knomles J.W. Can. J. Phys., 40, 257, 1962.
7. Prestwich W.V., Kennett T.J., Hugues L.B. and Fielder J. Can. J. Phys., 43, 2086, 1965.
8. Greenwood R.C. and Black W.W. Phys. Lett., 21, 702, 1966.
9. Taylor H.W., Neff N. and King J.D. Phys. Lett., 24B, 659, 1967.
10. Вылов Ц. ОИЯИ, Р6-10417, Дубна, 1977.
11. Вылов Ц., Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р6-10414, Дубна, 1977.
12. Wapstra A.H., Cove N.B. Nucl. Data, A9, 1971.



13. Wapstra A.H. and Bos K. Atomic Data and Nucl. Data Tables, v. 19, No. 3 (1977).
14. Вылов Ц., Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р6-10415, Дубна, 1977.
15. Smitt L.G. and Wapstra A.H. Phys.Rev. C, 11, 1892, 1975.
16. Kessler E.G., Deslattes R.D., Henins A. and Sauder W.C. Phys. Rev.Lett., 40, 171, 1978.
17. Borchert C.L. Annual Report, 1975, КРА-1КР10/76.
18. Дзеденков Б.С. Методы разработки сложных схем распада. "Наука", Л., 1974.
19. Murray G. , Graham R.L. and Geiger J.S. Nucl. Phys. 63, 313, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июня 1978 года.