

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3707/82

9/8-82
P3-82-303

Ю.М.Гледенов, И.Квитек, С.Маринова, Ю.П.Попов,
Х.Риголь, В.И.Салацкий

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$
ПРИ ЭНЕРГИЯХ НЕЙТРОНОВ ДО 1000 эВ

Направлено в журнал "Zeitschrift für Physik"

1982

ВВЕДЕНИЕ

До сих пор исследование ядерных реакций с эмиссией заряженных частиц, главным образом α -частиц, проводилось в ЛНФ ОИЯИ на нейтронных пучках реактора ИБР-30 с целым рядом стабильных изотопов и принесло много интересных данных об α -распаде составного ядра^{/1/}. Но так как круг стабильных изотопов, на которых наблюдались реакции (п, α) и (п,p), довольно ограничен, мы обратились к исследованию нестабильных ядер. Кроме того, для стабильных ядер, как правило, энергии связи нейтронов и протонов близки ($V_n \approx V_p$), поэтому энергия протонов в реакции (п,p) мала, малы и сечения. Перспективными с точки зрения возможности измерений реакции (п,p) оказываются радиоактивные нейтронодефицитные ядра, поскольку для них $V_n \gg V_p$.

Нейтронные исследования на радиоактивных ядрах ведутся в ряде лабораторий. Так, в работах^{/2/}, выполненных на пучке тепловых и резонансных нейтронов, изучалась реакция (п, α) на радиоактивных ядрах, в работе^{/3/} представлены результаты измерений параметров нейтронных резонансов нескольких радиоактивных ядер.

Исследуя реакцию (п,p) на радиоактивном ядре ^{22}Na в области энергий тепловых нейтронов, авторы^{/4/} обнаружили сильный протонный переход в первое возбужденное состояние дочернего ядра ^{22}Ne , причем эффективное сечение оказалось большим: $\sigma(\text{п,p}) = 42 \cdot 10^4$ б. Для объяснения такой величины сечения в работе^{/4/} было сделано предположение о наличии сильного резонанса с энергией на 44 кэВ ниже энергии связи нейтрона в составном ядре ^{23}Na . Позднее значение теплового сечения было уточнено^{/5/}, оно оказалось равным $30,6 \pm 2,6 \cdot 10^3$ б, был также найден слабый протонный переход в основное состояние дочернего ядра ^{22}Ne . Отношение интенсивностей протонных переходов в основное и первое возбужденное состояние оказалось равным $7,4 \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$. С помощью измерений на скандиевом фильтре нейтронов авторами работы^{/5/} была также получена верхняя оценка сечения $\sigma(\text{п,p}) < 11$ б для изотопа ^{22}Na при энергии нейтронов 2 кэВ. Это позволило авторам прийти к выводу, что резонанс, ответственный за большую величину теплового сечения, должен быть расположен ниже 1 кэВ по энергии нейтронов.

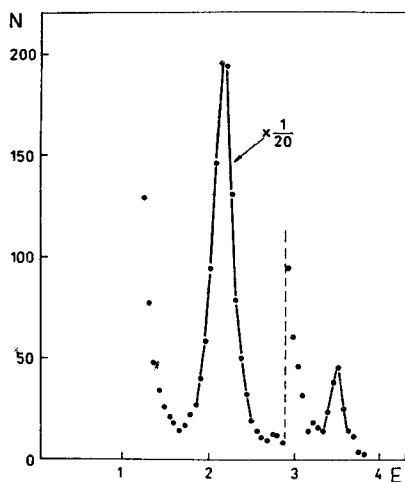


Рис. 2. Спектр заряженных частиц, вылетающих из мишени ^{22}Na . На осях: N - число частиц, E - энергия частиц в мегаэлектрон-вольтах.

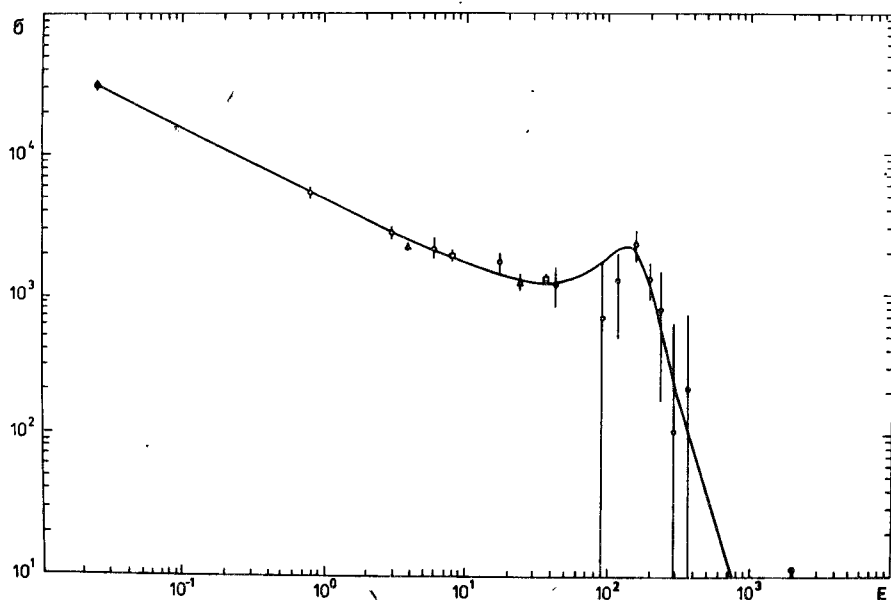


Рис. 3. Сечения реакции $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$. На осях: $\sigma(n,p)$ - в барнах, E - энергия нейтронов в электрон-вольтах. Квадраты соответствуют 1 серии измерений, кружки - 2 серии, а треугольники - 3 серии /см. табл. 1/.

нейтронов E_n ; $N_t(E_n) \Delta E_n$ - то же самое для тритонов из реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$; $\sigma_{\text{Na}}(E_n)$, $\sigma_{\text{Li}}(E_n)$ - эффективное сечение для ^{22}Na и ^6Li соответственно, а K - константа, зависящая от количества ядер ^{22}Na и ^6Li и отношения чисел нейтронов, попавших на эти образцы во время измерений. Величина K определялась нами путем нормировки на сечение реакции в тепловой точке /см. ниже/. Отсюда с использованием найден-

ных из эксперимента величин N_p, N_t и сечения σ_{Li} из атласа $^{13}/$ легко найти величину эффективного сечения реакции $^{22}\text{Na}(n,p)$ в зависимости от энергии нейтронов.

Энергетический спектр заряженных частиц при захвате ^{22}Na нейтронов в диапазоне энергий 0,02-0,08 эВ представлен на рис. 2. Наиболее интенсивный пик (p_1) соответствует протонам с энергией 2,25 МэВ /протонный распад на первое возбужденное состояние ^{22}Ne /. Значительно слабее оказался распад в основном состоянии /пик p_0 при $E_p = 3,47$ МэВ/. Линия при энергии 2,73 МэВ принадлежит тритонам из реакции $^6\text{Li}(n,\text{T})^4\text{He}$, идущей на примеси лития в натриевой мишени.

Выделяя в амплитудном спектре окно, соответствующее пику p_1 , мы получили времяпролетный спектр выхода протонов, на основании которого была построена зависимость сечения реакции $^{22}\text{Na}(n,p_1)$ от энергии нейтронов, приведенная на рис. 3. Фон в этом окне определялся по количеству отсчетов N /см. рис. 2/ в окнах слева и справа от пика с учетом экспоненциального спада фона в зависимости от энергии частиц. Абсолютная нормировка здесь осуществлена по тепловому сечению этой реакции - $\sigma(n,p_1) = /30,6 \pm 2,6/ \cdot 10^3$ б, которое совпадает с полным сечением поглощения, приведенным в атласе сечений: $/29 \pm 1/ \cdot 10^3$ б $^{13}/$. Это в пределах ошибок измерений согласуется с результатом, который получается, если нормировку провести независимо, основываясь на числе ядер ^{22}Na и ^6Li на соответствующих мишенях и относительных интегральных нейтронных потоках /см. выражение 1//. Однако точность при этом оказывается ниже.

На рис. 3 при энергии $E \approx 150$ эВ виден неизвестный ранее нейтронный резонанс. Сплошная кривая на рисунке - сечение, рассчитанное по формуле Брейта-Вигнера с использованием следующих параметров, полученных при подгонке к экспериментальным результатам: $E_0 = 147 \pm 11$ эВ, $\Gamma_n^0 = 3,4 \pm 0,9$ эВ и $\Gamma_{p_1} = 90 \pm 26$ эВ, где E_0 , Γ_n^0 и Γ_{p_1} - положение, приведенная нейтронная и протонная ширины соответственно.

Для 17 экспериментальных точек χ^2 найден равным 17,5. Статистический фактор g брался равным $4/7$ /см. ниже/. Кривую сечения оказалось невозможным описать с помощью резонанса, обусловленного захватом p -нейтронов. В частности, попытка описать ход сечений суммой p -резонанса при 147 эВ и $1/v$ от s -резонанса приводит при $E_n = 2$ кэВ к значению сечения $\sigma(n,p) \approx 100$ б, что противоречит верхней оценке, полученной Квитком $^{5}/$: $\sigma(n,p) < 11$ б.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При захвате медленных s -нейтронов радиоактивным ядром ^{22}Na / $T_{1/2} = 2,6$ г, спин основного состояния $I^\pi = 3^+$ / образуется со-

ставное ядро при энергии возбуждения выше энергии связи нейтрона / $B_n = 12416,7$ кэВ /^{14/} в состояниях со спином $J^\pi = 5/2^+$ или $7/2^+$. Энергетический баланс допускает излучение протонов / $Q_p = 3624,4$ кэВ / и α -частиц / $Q_\alpha = 1951$ кэВ /. Однако вылет α -частиц менее вероятен / в среднем согласно расчетам по статистической модели $\langle \Gamma_\alpha \rangle / \langle \Gamma_p \rangle \sim 2 \cdot 10^{-3}$ /.

Поскольку обнаруженный нами резонанс определяет тепловое сечение, то соотношение ширин распада по разным каналам можно определять вблизи тепловой энергии, где статистическая точность значительно лучше. Из анализа амплитудного спектра заряженных частиц /рис.2/ были получены соотношения параметров, представленные в табл.2.

Таблица 2

E	/кэВ/	E_n , /кэВ/	E_α , /кэВ/	Γ_{p0}/Γ_{p1}	$\Gamma_{\alpha0}/\Gamma_{p1}$	Реакция	Ссылка
12416,8		0,15+0,01	-	/6+2/ · 10 ⁻³	<<1	²² Na(n,p)	наст. раб.
- "	-	4+4	-	/1+1,5/ · 10 ⁻³	-	-	/4/
- "	-	1	-	/7,4+0,2/ · 10 ⁻³	-	-	/5/
12407		/-5/*	2354+4	0,31	-	¹⁹ F(α ,p)	/9/
12412		/0,15/*	2360+4	<0,03	~1	-	-
12447		/35/*	2402+2	0,38	-	-	-

* В скобках представлены возможные энергии нейтронных резонансов, если справедливо предположение о том, что обнаруженный нейтронный резонанс соответствует резонансу с $E_\alpha = 2360$ кэВ в реакции ¹⁹F(α ,p).

Сопоставляя обнаруженный в реакции ²²Na(n,p) резонанс с $E_0 = 147$ эВ /в шкале энергий возбуждения составного ядра ²²Na это соответствует $E_{\text{эксп.}} = 12,4168$ МэВ/ с состояниями, возбуждаемыми в реакции ¹⁹F(α ,p) в том же диапазоне энергий возбуждения /^{9/} /см. табл.2/, где точность определения $E_{\text{эксп.}}$ составляет $\pm 4 \pm 6$ кэВ, можно предположить, что обнаруженный нейтронный резонанс соответствует резонансу с $E_\alpha = 2360$ кэВ. В пользу этого говорит и сравнение отношений Γ_{p0}/Γ_{p1} для разных резонансов /табл.2/. Если это так, то, опираясь на более точное значение B_n , можно уточнить шкалу энергий возбуждения составного ядра ²³Na в реакции ¹⁹F(α ,p).

Однако однозначность такого сопоставления возбужденных состояний, полученных для двух различных реакций, оказывается под вопросом, если сравнить соотношение параметров резонанса $E_\alpha = 2360$ /^{9/}

$$(2J+1) \frac{\Gamma_{p1} \Gamma_{\alpha0}}{\Gamma} = 230 \text{ эВ} \quad /2/$$

(откуда получается, что величины $\Gamma_{\alpha0}$ и Γ_{p1} должны быть одного порядка) с нашими данными $\Gamma_{\alpha0} \ll \Gamma_{p1}$ и $\Gamma_{\alpha0}/\Gamma_{p1} \leq 10^{-3/4}$. Не исключено, что в связи с очень малой шириной $\Gamma_{\alpha0}$ обнаруженный нами резонанс крайне слабо может возбуждаться в практически обратной реакции ¹⁹F(α ,p), которую изучал Куперус /^{9/}. В этом случае резонансы Куперуса, рассмотренные выше, по-видимому, никак не проявляются в реакции ²²Na(n,p) в исследованном нами диапазоне энергий нейтронов.

Наши результаты не позволяют точно определить спин резонанса с $E_0 = 147$ эВ. Но если сопоставить экспериментальное значение $\Gamma_{p0}/\Gamma_{p1} = 6 \cdot 10^{-3}$ с результатами расчетов по оптической модели /^{15/} отношений усредненных по многим состояниям протонных ширин $\langle \Gamma_{p0} \rangle / \langle \Gamma_{p1} \rangle = 0,3$ для $J^\pi = 5/2^+$ и $\langle \Gamma_{p0} \rangle / \langle \Gamma_{p1} \rangle = 0,01$ для $J^\pi = 7/2^+$, то более вероятным оказывается значение $J^\pi = 7/2^+$, которое мы использовали при подгонке параметров нейтронного резонанса.

Экстраполяция полученной нами кривой сечения реакции ²²Na(n,p) до энергий 2 кэВ дает значение $\sigma_{np}/2$ кэВ/ = 0,76, что не противоречит верхней оценке $\sigma_{np} \leq 116$, полученной в работе /^{5/} в измерениях на нейтронах, фильтрованных скандием.

Измерение сечения реакции ²²Na(n,p) в диапазоне энергий до 1 кэВ позволяет получить довольно реальную оценку резонансного интеграла захвата:

$$I_p = \int_{0,5}^{\infty} \sigma(n,p) \frac{dE}{E}, \quad /3/$$

поскольку следующий резонанс находится, по-видимому, достаточно высоко при $E_0 \sim 35$ кэВ /см. табл.2/, а вклад резонансов быстро падает с увеличением E_0 . По нашим оценкам, $I_p = 2,5 \cdot 10^4$ б. Поскольку в области тепловых нейтронов полное сечение поглощения практически совпадает с $\sigma(n,p_1)$, то и это значение I_p должно совпадать с полным резонансным интегралом поглощения. Однако приводимое в атласе сечений /^{13/} $I = 16 \cdot 10^4$ б, что находится в противоречии с полученным нами результатом.

Таким образом, в измерениях реакции (n,p) на радиоактивном ядре ²²Na обнаружен первый нейтронный резонанс, параметры которого хорошо объясняют большую величину теплового сечения.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Ц.Вылову и Б.П.Осипенко за помощь и консультации в работе, Т.С.Зваровой и Н.А.Лебедеву за изготовление мишеней, и Т.А.Волоховской за помощь в обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Ю.П. ЭЧАЯ, 1972, т.2, вып.4, с.925.
2. Emsallem A. et al. Nucl.Phys., 1981, A368, p.108-116; Weigmann H. et al. Nucl.Phys., 1981, A386, p.117-134.
3. Ануфриев В.А. и др. В кн.: Нейтронная физика. Материалы V Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Киев, 1980. ЦНИИАтоминформ, М., 1980, с.136,156,159,161.
4. Ehehalt R. et al. Z.Naturforsch., 1971, 26a, p.590.
5. Kvittek J. et al. Z.Phys.A: Atoms and Nuclei, 1981, 299, p.187-188.
6. Van der Zwan L., Geiger K.W. Nucl.Phys., 1977, A284, p.189.
7. Schier N.A. et al. Nucl.Phys., 1976, A266, p.16.
8. Freeman R.M., Mavi G.S. Nucl.Phys., 1964, 51, p.593.
9. Kuperus J. Physica, 1965, 31, p.1603.
10. Sherr R. et al. Phys.Rev., 1954, 96, p.1258.
11. Heydendurg V.P., Temmer G.M. Phys.Rev., 1954, 94, p.1252.
12. Франк И.М. ЭЧАЯ, 1972, т.2, вып.4, с.807.
13. Mughabghab S.F., Gurber D.F. BNL-325, 3rd Ed., 1973.
14. Кравцов В.А. Массы атомов и энергии связи ядер. Атомиздат М., 1974.
15. Smith W.R. Computer Physics Communication, 1969, 1, p.106-112.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 апреля 1982 года.

Гледенов Ю.М. и др. P3-82-303
Исследование реакции $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$
при энергиях нейтронов до 1000 эВ

С помощью кремниевого полупроводникового спектрометра заряженных частиц исследована реакция (n,p) на радиоактивном ядре ^{22}Na методом времени пролета нейтронов. Измерение проводилось в ЛНФ ОИЯИ на реакторе ИБР-30. Найдена зависимость эффективного сечения реакции (n,p) от энергии нейтронов в области до 1000 эВ. Обнаружен резонанс с параметрами $E_0 = 147 \pm 11$ эВ, $\Gamma_n^0 = 3,4 \pm 0,9$ эВ, $\Gamma_{p1} = 90 \pm 26$ эВ. Этот резонанс определяет большую величину сечения этой реакции при тепловых энергиях нейтронов. Наш результат позволяет уточнить энергетическую шкалу возбужденных состояний ядра ^{23}Na .

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Gledenov Yu.M. et al. P3-82-303
The Investigation of the $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$ Reaction
for a Neutron Energy up to 1000 eV

The $^{22}\text{Na}(n,p)^{22}\text{Ne}$ reaction has been investigated at a neutron energy up to 1000 eV by the time-of-flight method at IBR-30 reactor of JINR. A neutron resonance was found in the reaction cross section. By fit, the parameters assigned to the resonance were $E_0 = 147 \pm 11$ eV; $\Gamma_n^0 = 3.4 \pm 0.9$ eV; $\Gamma_{p1} = 90 \pm 26$ eV. The presence of this resonance explains large values for the thermal cross section of this reaction.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод авторов.