



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФЭ 2000–13  
ОРИ

Г.И. Крупный, Д.В. Снитко, А.А. Янович

**Сечения реакций**  
 **$Al^{27}(p, spall)Be^7$ ,  $Al^{27}(p, 3p3n)Na^{22}$  и  $Al^{27}(p, 3pn)Na^{24}$**   
**в диапазоне энергий протонов 37 МэВ - 70 ГэВ**

Протвино 2000

**Аннотация**

Крупный Г.И., Снитко Д.В., Янович А.А.. Сечения реакций  $Al^{27}(p, spall)Be^7$ ,  $Al^{27}(p, 3p3n)Na^{22}$  и  $Al^{27}(p, 3pn)Na^{24}$  в диапазоне энергий протонов 37 МэВ - 70 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2000–13.– Протвино, 2000. 5 с., 1 рис., 2 табл., библиогр.: 11.

Представлены результаты измерений сечений образования  $Be^7$ ,  $Na^{22}$  и  $Na^{24}$  в реакциях на алюминии в широком диапазоне энергий протонов от 37 МэВ до 70 ГэВ на ускорительном комплексе ИФВЭ.

**Abstract**

Krupny G.I. et al. Cross-Section of Responses  $Al^{27}(p, spall)Be^7$ ,  $Al^{27}(p, 3p3n)Na^{22}$  and  $Al^{27}(p, 3pn)Na^{24}$  in a Range of Energies of Protons 37 MeV- 70 GeV : IHEP Preprint 2000–13. – Protvino, 2000, – p. 5, figs 1, tables 2, refs.: 11.

The investigation results of measurements of cross-sections derivation  $Be^7$ ,  $Na^{22}$  and  $Na^{24}$  in responses on aluminum in a broad band of energies of protons from 37 MeV up to 70 GeV on accelerator complex IHEP.

Знание сечений обусловлено важной практической потребностью решения радиационно-физических задач. К таким задачам можно отнести мониторинг числа протонов на электрофизических установках, вопросы, связанные с протонной спектрометрией и т.д.

В работе измерены сечения образования  $\text{Be}^7$ ,  $\text{Na}^{22}$  и  $\text{Na}^{24}$  в реакциях на алюминиевой мишени (фольга) в широком диапазоне энергий протонов от 37 МэВ до 70 ГэВ на ускорительном комплексе ИФВЭ.

Мониторинг числа протонов осуществляется различными способами:

- в качестве мониторинговой фольги используется сама алюминиевая мишень;
- монитором является медная фольга, устанавливаемая перед алюминиевой мишенью;
- монитором являются показания токового трансформатора на выведенном пучке протонов.

Ускорительный комплекс ИФВЭ имеет электрофизические установки:

- ЛУ-100, линейный ускоритель протонов, на котором можно получать протоны с энергиями 37, 73 и 100 МэВ [1];
- У-1.5, кольцевой инжектор ускорителя У-70, на котором энергию ускоренных протонов можно плавно изменять от 300 до 1320 МэВ [2];
- У-70, протонный синхротрон на энергию 76 ГэВ [3].

На ЛУ-100 измерения сечений  $\text{Al}^{27}(\text{p}, \text{spall})\text{Be}^7$  и  $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Na}^{24}$  выполнены на пучке протонов, прошедшем через отклоняющий магнит и коллиматор. Моноэнергетичность пучка не хуже 1.5%, размеры пучка составляют примерно 50 мм в диаметре, в котором сосредоточено ~95% интенсивности. Число протонов за экспозицию определялось по активности  $\text{Na}^{22}$  в алюминиевой фольге, образующегося в реакции  $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Na}^{22}$ , при этом величина сечения принята равной 34; 25.5 и 20 мбарн для протонов с энергиями 37; 73 и 100 МэВ соответственно [4]. Погрешность мониторинга в данном случае определяется погрешностью сечений и по нашей оценке не превышает ~10%.

На У-1.5 измерения сечений  $\text{Al}^{27}(\text{p}, \text{spall})\text{Be}^7$ ,  $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Na}^{22}$  и  $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Na}^{24}$  выполнены на выведенном из ускорителя пучке протонов с энергиями 350; 420; 800; 1000; 1320 МэВ с разбросом по энергии не хуже 1%. Размеры пучка ~30 мм в диаметре, где сосредоточено 99% интенсивности. Число протонов за экспозицию измеряется токовым трансформатором с погрешностью не хуже  $\pm 5\%$ .

На У-70 измерения сечений  $\text{Al}^{27}(\text{p}, \text{spall})\text{Be}^7$ ,  $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Na}^{22}$  и  $\text{Al}^{27}(\text{p}, 3\text{p}3\text{n})\text{Na}^{24}$  выполнены в режиме медленного вывода [5] протонов из ускорителя. Энергия протонов 70 ГэВ определяется с погрешностью не хуже 1%. Размеры пучка ~2 x 6 мм, в пределах этих размеров сосредоточено более 99% интенсивности. Число протонов за экспозицию определялось по активности  $\text{Na}^{24}$ , в мониторинговой фольге из меди, которая устанавливалась вместе с алюминиевой фольгой. Сечение реакции  $\text{Cu}(\text{p}, \text{spall})\text{Na}^{24}$  принято равным 3.9 мбарн [6].

Погрешность в определении числа протонов данным способом сильно зависит от погрешности величины сечения (в нашем случае  $\pm 2\%$ ). Полная погрешность в определении числа протонов не более 4%.

Наблюдение за положением пучка на облучаемых фольгах проводилось на ЛУ-100 и У-70 с помощью изображения пучка на фотографических носителях (фотобумага, фотопленка), а на У-1.5 с помощью ТВ-наблюдения и координатных  $\delta$ -камер. Из облучённых фольг вырезались области, в которых сосредотачивалось не менее 99% активности. Фольги взвешивались с точностью  $\pm 0.1\%$ . В эксперименте использовались фольги диаметром 110 мм и толщиной: алюминий – 200 микрон, медь – 100 микрон. Примеси других элементов в фольгах отсутствуют. Фольги обсчитывались на полупроводниковом гамма-спектрометре с детектором типа ДГДК-80В, разрешение (полная ширина на полувысоте) которого для  $E_\gamma=1332$  кэВ ( $\text{Co}^{60}$ ) составляет 2.5 кэВ.

Программа обработки спектров позволяет проводить автоматический и ручной режимы поиска, идентификации фотопиков, вычислять их площадь путем подгонки пика модельной функцией, описывающей форму пика полного поглощения и фона под ним, оценивать подгонку пика на достоверность по  $\chi^2$ -критерию и минимальной погрешности. Статистическая погрешность при обработке фотопиков не более  $\pm 2\%$ . Учитывается самопоглощение излучения в самой фольге.

При облучении и обсчете фольг соблюдаются следующие условия:

- время облучения фольг значительно меньше периода полураспада  $T_{1/2}$  идентифицируемого радионуклида;
- время обсчета фольги на спектрометре много меньше  $T_{1/2}$ .

Зависимости измеренных сечений от энергии приведены на рис. 1, где значками  $\bullet$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\blacksquare$  обозначены наши данные, а значками  $\circ$ ,  $\nabla$ ,  $\square$  – литературные данные [4, 7, 8, 9, 10, 11] по образованию  $\text{Na}^{22}$ ,  $\text{Na}^{24}$  и  $\text{Be}^7$  соответственно. Следует ещё раз подчеркнуть, что наши данные при энергиях протонов 37; 73 и 100 МэВ получены с использованием в качестве опорных данных сечений образования  $\text{Na}^{22}$  [4]; при энергиях 350; 420; 800; 1000 и 1320 МэВ получены абсолютные значения сечений реакций с образованием  $\text{Be}^7$ ,  $\text{Na}^{22}$  и  $\text{Na}^{24}$ , а те же сечения при энергии 70 ГэВ получены с монитором числа протонов, определяемых по активности  $\text{Na}^{24}$ , в реакции  $\text{Cu}(p, \text{spall})\text{Na}^{24}$ .

Численные значения измеренных сечений и их погрешности приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены значения отношения сечений образования на алюминии  $\text{Na}^{22}$  и  $\text{Be}^7$  к сечению реакции  $\text{Al}^{27}(p, 3\text{pn})\text{Na}^{24}$ , полученных по нашим данным и по данным работы [11].

Сравнение наших данных с литературными [4, 7, 8, 9, 10, 11] показывает согласие в пределах погрешности. Относительно большая погрешность наших данных связана как с погрешностью определения числа протонов при получении абсолютных сечений, так и с относительно большими размерами пучка (кроме измерений на У-70) Тем не менее для условий поставленных задач данные погрешности вполне приемлемы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы выражают признательность Я.Н. Расцветалову за поддержку и интерес к работе, С.И. Пилипенко за обеспечение измерений на ЛУ-100, Ю.В. Миличенко, Г. Лосеву за организацию работ на У-1.5 и Д.А. Демиховскому, А.Г. Афонину за обеспечение измерений на медленном выводе протонов из У-70.

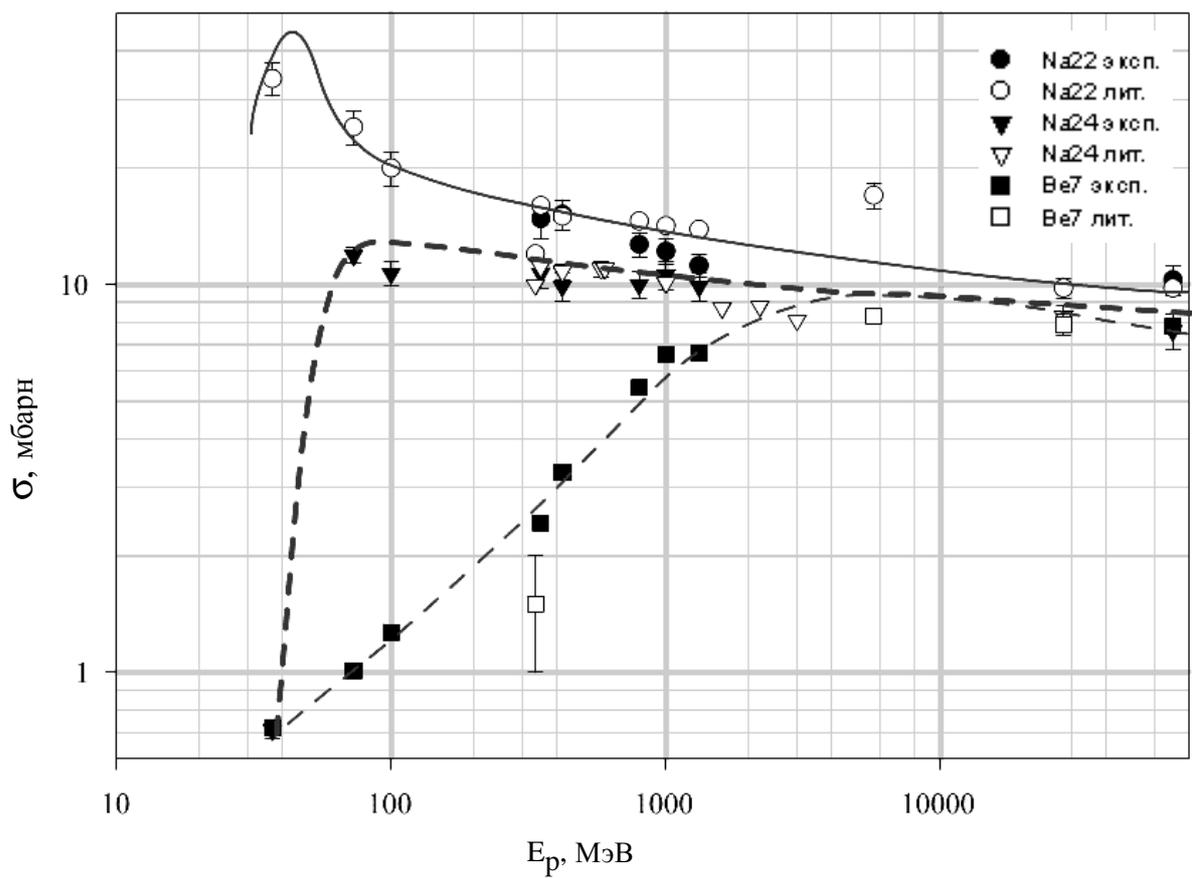


Рис. 1. Зависимость сечений образования Na<sup>22</sup>, Na<sup>24</sup>, Be<sup>7</sup> на Al от энергии протонов.

Таблица 1.

Зависимость сечений образования  $\text{Be}^7$ ,  $\text{Na}^{22}$  и  $\text{Na}^{24}$  на алюминии от энергии протонов

| Энергия протонов, МэВ               | 37                                                                                               | 73         | 100     | 350                                                                                               | 420         | 800         | 1000        | 1320        | 70000       | Примеч.     |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ускоритель протонов                 | ЛУ-100                                                                                           |            | У-1.5   |                                                                                                   |             |             |             |             |             |             |
| $\sigma_p(\text{Na}^{22})$ , мб     | 34                                                                                               | 25.5       | 20      | 16                                                                                                | 15          | 14.6        | 14.2        | 13.9        | 9.8         | [4]         |
| $\text{Al}^{27}$                    | 34±10%                                                                                           | 25.5±10%   | 20±10%  | 14.8±11%                                                                                          | 15.2 ± 8.8% | 12.7 ± 7.4% | 12.2 ± 7.2% | 11.2 ± 6.7% | 10.3 ± 8.7% | наши данные |
| $(p, \text{spall})\text{Na}^{22}$   |                                                                                                  |            |         | 11.1±1.8%                                                                                         | 10.8±4.64%  |             |             |             |             | [7]         |
| $\sigma_p(\text{Na}^{24})$ , мб     | 0.71±5%                                                                                          | 11.9±4.5%  | 10.7±7% | 10.7±8.4%                                                                                         | 9.9±8.1%    | 10.0±8.0%   | 10.6±8.5%   | 9.9±8.1%    | 7.6±10.5%   | наши данные |
| $\text{Al}^{27}$                    | 0.72±11%                                                                                         | 1.01±7.38% | 1.27±6% | 2.43±7.9%                                                                                         | 3.28±7.7%   | 5.43±8.3%   | 6.61±8.7%   | 6.66±7.4%   | 7.8±10.3%   | наши данные |
| $(p, \text{spall})\text{Be}^7$      |                                                                                                  |            |         |                                                                                                   |             |             |             |             |             |             |
| Метод измерения интенсивн. протонов | По активности $\text{Na}^{22}$ , образующегося в реакции $\text{Al}^{27}(p, 3p3n)\text{Na}^{22}$ |            |         | По токовому трансформатору с точностью ±5%                                                        |             |             |             |             |             |             |
|                                     |                                                                                                  |            |         | По активности $\text{Na}^{24}$ образующегося в реакции $\text{Cu}(p, \text{spall})\text{Na}^{24}$ |             |             |             |             |             |             |

Таблица 2

Зависимость отношений сечений  $\sigma(\text{Na}^{22})/\sigma(\text{Na}^{24})$  и  $\sigma(\text{Be}^7)/\sigma(\text{Na}^{24})$   
от энергии протонов

| $E_p$ , МэВ | $\sigma(\text{Na}^{22})/\sigma(\text{Na}^{24})$ | $\sigma(\text{Be}^7)/\sigma(\text{Na}^{24})$ |
|-------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 37          | $47.89 \pm 7.18$                                | $1.01 \pm 0.17$                              |
| 73          | $2.14 \pm 0.31$                                 | $0.085 \pm 0.01$                             |
| 100         | $1.87 \pm 0.32$                                 | $0.12 \pm 0.02$                              |
| 350         | $1.38 \pm 0.27$                                 | $0.23 \pm 0.04$                              |
| 420         | $1.54 \pm 0.26$                                 | $0.33 \pm 0.05$                              |
| 800         | $1.27 \pm 0.20$                                 | $0.54 \pm 0.09$                              |
| 1000        | $1.15 \pm 0.18$                                 | $0.62 \pm 0.11$                              |
| 1320        | $1.13 \pm 0.17$                                 | $0.67 \pm 0.10$                              |
| 2000 [11]   | $1.29 \pm 0.06$                                 | –                                            |
| 2900 [11]   | $1.21 \pm 0.04$                                 | $0.82 \pm 0.04$                              |
| 5700 [11]   | $1.62 \pm 0.13$                                 | $0.79 \pm 0.04$                              |
| 28000 [11]  | $1.18 \pm 0.04$                                 | $0.95 \pm 0.03$                              |
| 70000       | $1.36 \pm 0.26$                                 | $1.03 \pm 0.21$                              |

### Список литературы

1. Ильевский С.А. и др. Препринт ИФВЭ 68-63. - Серпухов, 1968.
2. Адо Ю.М. и др. В кн.: Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна. 1976. – М.: Наука, 1977, т.1. с.42-48.
3. Адо Ю.М. и др. В кн.: Труды 4-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва. 1974. – М.: Наука, 1975. т.1. с.36-43.
4. Charalambus, J. Dutrannois and K. Goebel. Preprint CERN/DI/HP 90, 14.07.1966.
5. Мызников К.П. и др. В кн.: Труды 7-й Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Ереван. 1969. - Изд.-во АН Арм. ССР, 1970. т.1. с.480-492
6. Baker S.I., Kerns C.R., Pordess S.H. et al. // NIM Phys. Res.222, №3, 467-473 (1984).
7. Walter E. Grandall, George P. Millburn, Robert V. Pyle et al. Phys. Rev. 101, 329-337 (1956).
8. L. Marquez and I. Perlman. // Phys. Rev. 81, 953-957 (1951).
9. P.A. Benioff. // Phys. Rev. 119, 316-324 (1960).
10. J.B. Cumming, G. Friedlander, J. Hudis et al. // Phys. Rev. 127, 950-954 (1962).
11. J.B. Cumming, J. Hudis, A.M. Poskanzer et al. Phys.Rev. 128, 2392-2397 (1962).

*Рукопись поступила 11 мая 2000 г.*

Г.И. Крупный, Д.В. Снитко, А.А. Янович.  
Сечения реакций  $Al^{27}(p, spall)Be^7$ ,  $Al^{27}(p, 3p3n)Na^{22}$  и  $Al^{27}(p, 3pn)Na^{24}$  в диапазоне энергий протонов  
37 МэВ - 70 ГэВ

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В. Орлова.

---

Подписано к печати 12.05.2000      Формат 60 × 84/8.      Офсетная печать.  
Печ.л. 0,6.      Уч.- изд.л. 0,5. Тираж 100.      Заказ 118.      Индекс 3649.ЛР №020498 от 17.04.97 .

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ    2000-13    ИФВЭ    2000

---