

### ИЗМЕРЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ

Зависимость поперечного сечения фотоядерных реакций от энергии возбуждения является весьма существенной для понимания механизма взаимодействия  $\gamma$ -квантов с ядрами. Обычный способ измерения кривых возбуждения методом наведённой активности оказывается неприменимым, если конечный продукт реакции является стабильным или обладает очень большим временем жизни. В таких случаях приходится прибегать к регистрации самих вылетающих частиц.

В реферируемой ниже работе<sup>1</sup> исследуется выход фотонейтронов из 22 элементов, облучаемых  $\gamma$ -спектром от бетатрона с максимальной энергией ( $E$ ) 23 Мэв. При этом одновременно исследуется сумма  $(\gamma n)$ -,  $(\gamma^2 n)$ - и  $(\gamma pn)$ -реакций. Нейтроны детектируются посредством счётчика BF<sub>3</sub>.

# Основные данные фотоядерных реакций

334

из текущей литературы

| Элемент             | Полуширина (Мэв)   |                    | $E_m$<br>(Мэв) | $\sigma_m$<br>( $10^{-24}$ см <sup>2</sup> ) | Интегральное поперечное сечение<br>(Мэв $\times 10^{-24}$ см <sup>2</sup> ) |            |                       |                                       | Литература |
|---------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------|------------|
|                     | $\gamma n$         | суммарная          |                |                                              | $\gamma n$                                                                  | $\gamma p$ | $\gamma 2n$           | $\gamma n + \gamma np + 2(\gamma 2n)$ |            |
| Be <sup>9</sup>     | 4,7                |                    | 22,2           | 0,0027                                       |                                                                             | 0,011      |                       |                                       | 2          |
| C                   |                    | 2,0                | 21,4           | 0,014                                        | 0,029                                                                       |            |                       |                                       | 1          |
| C <sup>12</sup>     | 2,8                |                    | 22,9           | 0,013                                        | 0,046                                                                       |            |                       |                                       | 3          |
| C                   |                    | 1,7 ( $\gamma p$ ) | 21,5           | 0,034                                        |                                                                             | 0,063      |                       |                                       | 4          |
| N <sup>14</sup>     |                    |                    | 24,2           | 0,0028                                       | 0,015 *)                                                                    |            |                       |                                       | 5          |
| O                   |                    |                    | 21,9           | 0,0089                                       | 0,019 *)                                                                    |            |                       |                                       | 1          |
| O <sup>16</sup>     |                    |                    | 24,2           | 0,011                                        | 0,031 *)                                                                    |            |                       |                                       | 5          |
| F <sup>19</sup>     | ~13                |                    | ~20            | 0,0035                                       | 0,076                                                                       |            | 0,005                 |                                       | 6          |
| Na                  |                    | 6,0 ( $\gamma p$ ) | 18,3           | 0,013                                        |                                                                             |            |                       | 0,081                                 | 1          |
| Mg                  |                    | 3,9 ( $\gamma p$ ) | 18,8           | 0,011                                        |                                                                             |            |                       | 0,048                                 | 1          |
| Mg <sup>24</sup>    | 5,8                |                    | 19,4           | 0,0098                                       | 0,057                                                                       |            |                       |                                       |            |
| Mg <sup>25+26</sup> |                    | ~4,2               | 17,8           | ~0,016                                       | ~0,065                                                                      |            |                       |                                       | 1          |
| Mg <sup>25</sup>    | 6,0 ( $\gamma p$ ) |                    | 21,7           | 0,015                                        |                                                                             | 0,10       |                       |                                       | 7          |
| Mg <sup>26</sup>    | 3,3 ( $\gamma p$ ) |                    | 22,6           | 0,019                                        |                                                                             | 0,085      |                       |                                       | 7          |
| Al                  |                    | 4,0                | 19,7           | 0,023                                        |                                                                             |            |                       |                                       | 1          |
| Al <sup>27</sup>    | 4,7                |                    | 19,2           | 0,008                                        | 0,045                                                                       |            |                       |                                       | 7          |
| Al                  |                    | 5,4 ( $\gamma p$ ) | 21,2           | 0,022                                        |                                                                             | 0,12       |                       |                                       | 4          |
| Si <sup>28</sup>    | 3,5                |                    | 20,9           | 0,021                                        | 0,070                                                                       |            |                       |                                       | 8          |
| P                   |                    | 5,7                | 20,5           | 0,029                                        | 0,14                                                                        |            | 0,034 ( $\gamma np$ ) | 0,17                                  | 1          |
| P <sup>31</sup>     | 6,5                |                    | 19,5           | 0,017                                        | 0,13                                                                        |            |                       |                                       | 9          |
| P <sup>31</sup>     |                    |                    | 20             | 0,017                                        | 0,099                                                                       |            | 0,047 ( $\gamma np$ ) | 0,15                                  | 10         |
| S                   |                    | 5,2                | 19,8           | 0,013                                        |                                                                             |            |                       | 0,075                                 | 1          |

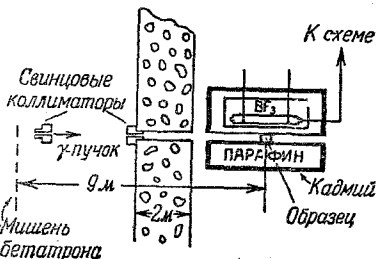
\*) Интегральное поперечное сечение до максимума кривой.

| Элемент          | Полуширина (Мэв)   |                    | $E_m$<br>(Мэв) | $\sigma_m$<br>( $10^{-24}$ см <sup>2</sup> ) | Интегральное поперечное сечение<br>(Мэв $\times 10^{-24}$ см <sup>2</sup> ) |            |                      |                                                  | Литература |
|------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|--------------------------------------------------|------------|
|                  | $\gamma_n$         | суммарная          |                |                                              | $\gamma_n$                                                                  | $\gamma_p$ | $\gamma_{2n}$        | $\gamma_n + \gamma_{np} +$<br>$+ 2(\gamma_{2n})$ |            |
| S <sup>32</sup>  | 4,5                |                    | 20,1           | 0,015                                        | 0,069                                                                       |            |                      |                                                  | 8          |
| S <sup>32</sup>  | 1,0 ( $\gamma_d$ ) |                    | 25,6           | 0,006                                        |                                                                             |            | 0,016 ( $\gamma_d$ ) |                                                  | 9,11       |
| S <sup>34</sup>  | 4                  |                    | ~17            | ~0,060                                       |                                                                             |            |                      | ~0,20                                            | 1          |
| Ca <sup>40</sup> | 4,2                |                    | 19,3           | 0,015                                        | 0,065                                                                       |            |                      |                                                  | 8          |
| Mn               |                    | >8                 | ~19            | 0,10                                         |                                                                             |            |                      | ~0,46 *)                                         | 1          |
| Fe               |                    | 6,1                | 18,0           | 0,075                                        |                                                                             |            |                      | 0,47                                             | 1          |
| Fe <sup>54</sup> | 6,3                |                    | 18,7           | 0,067                                        | 0,48                                                                        |            |                      |                                                  | 3          |
| Ni <sup>58</sup> | 5,6                |                    | 18,5           | 0,054                                        | 0,34                                                                        |            |                      |                                                  | 3          |
| Ni               |                    | 5,4 ( $\gamma_p$ ) | 18,7           | 0,058                                        |                                                                             | 0,32       |                      |                                                  | 4          |
| Co               |                    | 5,4                | 16,9           | 0,13                                         |                                                                             |            |                      | 0,75                                             | 1          |
| Co               |                    | 5,7 ( $\gamma_p$ ) | 21,5           | 0,024                                        |                                                                             | 0,14       |                      |                                                  | 4          |
| Cu               |                    | 7,1                | 19,5           | 0,12                                         |                                                                             |            |                      | 0,87                                             | 1          |
| Cu <sup>63</sup> | 6,1                |                    | 18,1           | 0,10                                         | 0,66                                                                        |            |                      |                                                  | 3          |
| Cu <sup>65</sup> | 7,0                |                    | 18,6           | 0,15                                         | 1,11                                                                        |            |                      |                                                  | 3          |
| Zn <sup>64</sup> | 7,9                |                    | 18,7           | 0,12                                         | 0,99                                                                        |            |                      |                                                  | 3          |
| As               | ~6,2               | 9,4                | 17             | 0,093                                        | 0,76                                                                        |            | 0,11                 | 0,98                                             | 1          |
| Br <sup>80</sup> | 8,0                |                    | 18,0           | 0,13                                         | 1,08                                                                        |            |                      |                                                  | 12         |
| Rb <sup>87</sup> | 6,0                |                    | 17,5           | 0,23                                         | 1,68                                                                        |            |                      |                                                  | 13         |
| Zr <sup>90</sup> | 5,7                |                    | 18,0           | 0,27                                         | 1,67                                                                        |            |                      |                                                  | 13         |
| Mo               |                    | 6,1                | 15,7           |                                              |                                                                             |            |                      | 1,62                                             | 1          |
| Mo <sup>92</sup> | 6,0                |                    | 18,7           | 0,14                                         | 0,85                                                                        |            |                      |                                                  | 13         |
| Nb               |                    | 6,1                | 17,3           | 0,26                                         |                                                                             |            |                      | 1,71                                             | 1          |

\*) Интегральное поперечное сечение до максимума кривой.

| Элемент               | Полуширина (Мэв)    |                    | $E_m$<br>(Мэв) | $\sigma_m$<br>( $10^{-24}$ см <sup>2</sup> ) | Интегральное поперечное сечение<br>(Мэв $\times 10^{-24}$ см <sup>2</sup> ) |            |               |                                           | Литература |
|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|-------------------------------------------|------------|
|                       | $\gamma_n$          | суммарная          |                |                                              | $\gamma_n$                                                                  | $\gamma_p$ | $\gamma_{2n}$ | $\gamma_n + \gamma_{np} + 2(\gamma_{2n})$ |            |
| Nb                    |                     | 6,6 ( $\gamma_p$ ) | 21,3           | 0,018                                        |                                                                             | 0,12       |               |                                           | 4          |
| Ag                    |                     | 9,2                | 16,3           | 0,20                                         | 2,1                                                                         |            | 0,22          | 2,5                                       | 1          |
| Ag <sup>109</sup>     | 4,6                 |                    | 16,5           | 0,32                                         | 1,65                                                                        |            |               |                                           | 14         |
| In                    | ~5,8                | 8,0                | 15,2           | 0,25                                         | ~1,6                                                                        |            | ~0,20         | ~2,0                                      | 1          |
| In <sup>115</sup>     | 5,5                 |                    | 15,0           | 0,42                                         | 2,7                                                                         |            |               |                                           | 15         |
| In <sup>115</sup>     | ~8 ( $\gamma'$ )    |                    | ~15            | 0,05                                         |                                                                             |            |               | ~0,4 ( $\gamma'$ )                        | 15         |
| Sb                    |                     | 7,2                | 15,2           | 0,44                                         |                                                                             |            |               | 3,1                                       | 1          |
| Sb <sup>121</sup>     | 4,8                 |                    | 14,8           | 0,68                                         | 3,5                                                                         |            |               |                                           | 3          |
| Sb <sup>123</sup>     | 4,8                 |                    | 14,8           | 0,36                                         | 1,9                                                                         |            |               |                                           | 3          |
| I                     | ~5,0                | 6,6                | 15,2           | 0,45                                         |                                                                             |            |               | 3,1                                       | 1          |
| Ta <sup>181</sup>     | 4,6                 |                    | 13,9           |                                              | >0,47                                                                       |            |               |                                           | 3          |
| Au                    | ~5,6                | 6,3                | 14,2           | 0,70                                         |                                                                             |            |               | 4,6                                       | 1          |
| Au <sup>197</sup>     | ~10 ( $\gamma'$ )   |                    | 15             | >0,025                                       |                                                                             |            |               | >0,25 ( $\gamma'$ )                       | 16         |
| Pb                    |                     | 5,3                | 13,7           | 0,81                                         |                                                                             |            |               | 4,8                                       | 1          |
| Pb <sup>207+208</sup> | ~6,5 ( $\gamma_p$ ) |                    | 22,0           | 0,028                                        |                                                                             | ~0,17      |               |                                           | 17         |
| Bi                    | ~5,2                | 5,4                | 14,2           | 0,92                                         |                                                                             |            |               | 4,1                                       | 1          |

окружённого парафином (см. рисунок). Подбором положения счётчика авторам удалось добиться одинаковой вероятности регистрации нейтронов различной энергии. В качестве доказательства этого в работе приводятся кривые выхода реакции ( $\gamma n$ ), измеренные на углеороде [при  $E = 23$  Мэв реакции — ( $\gamma 2n$ ) и ( $\gamma pr$ ) на  $C^{12}$  энергетически невозможны] методом активации и методом счётчика. Наибольшее расхождение (4%) наблюдается на 6 Мэв выше порога. Для уменьшения фона от нейтронов счётное устройство вынесено за 2-метровую бетонную стену и находится в 9 метрах от мишени бетатрона. Электронная схема регистрирует нейтроны в интервале 20—800 мксек после окончания пучка. Выход нейтронов для каждого элемента сравнивался с выходом на меди при  $E = 18$  Мэв. В результаты вводилась поправка на поглощение  $\gamma$ -излучения в образцах.



В таблице приведены следующие данные фотоядерных реакций (полученные в настоящей работе, а также в опубликованных ранее опытах): 1) название элемента или изотопа, 2) полуширина кривой поперечного сечения реакции ( $\gamma n$ ) или 3) суммарной кривой, 4) положение резонансного максимума ( $E_m$ ), 5) значение максимального поперечного сечения (в  $10^{-24}$  см<sup>2</sup>), 6) интегральное поперечное сечение реакций ( $\gamma n$ ); ( $\gamma pr$ ); ( $\gamma 2n$ ); ( $\gamma n$ ) + ( $\gamma pr$ ) + 2( $\gamma 2n$ ) и в последней графе ссылки на литературу.

Анализ результатов приводит авторов к следующим выводам: величина  $(\sigma_{\max})_{\gamma n}$  пропорциональна  $A^{1/3}$ , где  $A$  — атомный номер элемента. Полуширина резонансных кривых с ростом  $A$  вначале растёт (до  $A \sim 60$ ), а затем медленно уменьшается. Для  $E_m$  и пороговой энергии  $E_0$  получены выражения:  $E_m = 37A^{-0.186}$  и  $E_0 = 32A^{-0.270}$ . Для элементов As и In при  $E_\gamma = 17, 18$  и  $19$  Мэв отношение поперечных сечений реакции ( $\gamma 2n$ ) и ( $\gamma n$ ) было сравнено с отношением, рассчитанным по статической теории, причём получено удовлетворительное согласие.

Б. Р.

# ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Montalberty, Katz and Goldenberg, Phys. Rev. **91**, 659 (1953).
2. Haslam и др., Can. J. Phys. **31**, 210 (1953).
3. L. Katz a. A. G. W. Cameron, Can. J. Phys. **29**, 518 (1951).
4. J. Halpern a. A. K. Mann, Phys. Rev. **83**, 370 (1951).
5. Johns и др., Phys. Rev. **84**, 856 (1951).
6. Horsley и др., Phys. Rev. **87**, 756 (1952).
7. L. Katz a. A. G. W. Cameron, Phys. Rev. **84**, 1115 (1951).
8. Summers-Gill и др., Can. J. Phys. **31**, 70 (1953).
9. K. Katz a. A. S. Penfold, Phys. Rev. **81**, 815 (1951).
10. Halpern и др., Phys. Rev. **88**, 958 (1952).
11. L. Katz a. A. S. Penfold, Phys. Rev. **83**, 169 (1951).
12. L. Katz и др., Can. J. Phys. **30**, 476 (1952).
13. L. Katz и др., Can. J. Phys. **31**, 250 (1953).
14. B. C. Diven a. G. M. Almy, Phys. Rev. **80**, 407 (1950).
15. J. Goldenberg a. L. Katz, Phys. Rev. **90**, 308 (1953).
16. A. G. W. Cameron a. L. Katz, Phys. Rev. **84**, 608 (1951).
17. A. G. W. Cameron a. L. Katz, Phys. Rev. **83**, 1264 (1951).