

## ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА ПРИРОДНОМ КАЛЬЦИИ ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 160 МэВ

© 2024 г. М. В. Желтоножская<sup>1)\*</sup>, А. В. Овсянников<sup>1)</sup>, А. Е. Шемяков<sup>2)</sup>, А. П. Черняев<sup>1)</sup>,  
С. Р. Адоньев<sup>1)</sup>, А. А. Щербаков<sup>1)</sup>, О. В. Яценко<sup>3)</sup>

Поступила в редакцию 09.12.2023 г.; после доработки 09.12.2023 г.; принята к публикации 09.12.2023 г.

Исследование функций возбуждения радионуклидов в протон-индуцированных ядерных реакциях представляет фундаментальный интерес для методов верификации лечения *in-vivo* в протонной терапии. Однако экспериментальные данные для этих реакций весьма ограничены, особенно для энергий протонов выше 20 МэВ, и имеют значительные расхождения. В настоящей работе измерены экспериментальные сечения реакций для ускоренных протонов с энергией 160 МэВ на мишени металлического кальция естественного изотопного состава. Впервые получены новые данные о сечениях выхода реакций с вылетом от одного до пяти протонов на ядрах <sup>44</sup>Ca. Проведены расчеты полученных сечений в модели ферми-газа и Гогни–Хартри–Фока–Боголюбова с помощью программного кода TALYS1.96. Показано, что в сечениях доминируют предравновесные процессы. Отмечается, что расчетные сечения, как правило, не превышают 30% от экспериментальных.

DOI: 10.31857/S0044002724030178, EDN: IVPBWS

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основное преимущество протонной терапии по сравнению с традиционной лучевой терапией заключается в том, что она обеспечивает лучшее распределение дозы в объеме опухоли при одновременном снижении дозы, поступающей в окружающие здоровые ткани [1]. Резкое возрастание плотности ионизации в конце пробега протонов приводит к накоплению максимальной дозы (пик Брэгга). В протонной терапии пик Брэгга устанавливается в соответствии с расположением и размером опухоли. Минимальное воздействие на здоровые ткани делает протонную терапию рекомендуемой при опухолях, расположенных вблизи органов риска, а также в педиатрии, поскольку снижает долгосрочные последствия облучения, такие как возникновение вторичных опухолей [2].

Доза облучения пациента зависит от распределения позитронных  $\beta^+$ -излучателей, создаваемых протонным пучком в организме пациента [3]. Для того чтобы в полной мере использовать преимущества протонной терапии, необходимо убедиться, что доза подводится в соответствии с планом лечения. Это можно сделать с помощью ПЭТ-сканера, получив карту активности пациента, соответствующую  $\beta^+$ -распаду радиоактивных ядер, образующихся на пути следования протонного пучка. ПЭТ-изображение может быть получено либо непосредственно в процессе терапии, либо уже после процедуры, при этом регистрируется распад короткоживущих или долгоживу-

щих  $\beta^+$ -излучателей соответственно [4, 5]. Измеренные с помощью ПЭТ показатели активности затем необходимо сравнить с расчетными, обычно выполняемыми с помощью метода моделирования Монте-Карло [6, 7]. Если не принимать во внимание эффекты “вымывания” позитронных излучателей за счет физиологических процессов [8, 9], то точность оценок распределения активности при моделировании зависит от данных о сечениях образования интересующих нас  $\beta^+$ -излучателей. Другими словами, исследование функций возбуждения  $\beta^+$ -излучающих радионуклидов в протон-индуцированных ядерных реакциях представляет фундаментальный интерес для методов верификации лечения *in-vivo* в протонной терапии. Отдельно хотелось бы отметить, что по данным [10], короткоживущие  $\beta^+$ -излучающие радионуклиды могут увеличивать терапевтическую дозу до 25%. Очевидно, что для таких оценок необходимы экспериментальные измерения выходов этих радионуклидов или введение поправочных факторов, опираясь на известные экспериментальные данные о сечениях реакций на ускоренных протонах.

Однако экспериментальные данные для этих реакций весьма ограничены, особенно для энергий выше 20 МэВ, и имеют значительные расхождения [3, 11, 12]. Поэтому необходимы новые измерения и последующие оценки сечений протон-индуцированных реакций во всем интересующем диапазоне энергий для уменьшения неопределенностей в оценке наработанной активности, что позволит в дальнейшем прово-

<sup>1)</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия.

<sup>2)</sup> Физико-технический центр ФИАН, Протвино, Россия.

<sup>3)</sup> ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна ФМБА, Москва, Россия.

\* E-mail: zhelton@yandex.ru

**Таблица 1.** Технические характеристики синхротрона комплекса протонной терапии “ПРОМЕТЕУС” ФТЦ ФИАН

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Энергия пучка                                | (30–330 ± 0.15%) МэВ      |
| Интенсивность пучка                          | 109 с <sup>-1</sup>       |
| Время ускорения до максимальной энергии      | 1 с                       |
| Медленный выпуск пучка в диапазоне           | 0.1–10 с                  |
| Средняя потребляемая мощность                | 50 кВт                    |
| Шаг выбора энергии на ускорителе “ПРОМЕТЕУС” | 0.1 МэВ                   |
| Размер пучка в ортогональной плоскости       | не более 3 мм для 150 МэВ |
| Диаметр кольца                               | 5 м                       |
| Вес  | 20 т                      |

дить целенаправленную верификацию субмиллиметрового диапазона пучков [13]. Необходимость подобных данных отмечается и в итоговом отчете Технического совещания МАГАТЭ по ядерным данным для медицинского применения, состоявшемся в декабре 2018 г. [14].

В настоящей работе получены экспериментальные сечения образования радионуклидов на ядрах кальция с  $T_{1/2} > 30$  мин для достаточно часто используемой в терапии энергии протонов 160 МэВ, сопоставленные с теоретическими аналогами, рассчитанными в модели ферми-газа и Гогни–Хартри–Фока–Боголюбова.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте пучком протонов с  $E = 160$  МэВ облучались мишени металлической стружки естественного кальция массой 4.3 г, завернутые в алюминиевую фольгу. Облучение проводилось в центре коллективного пользования комплекса протонной терапии “Прометеус” (КПТ “Прометеус”) на пучке протонов, ускоренных на синхротроне до энергии 160 МэВ. Характеристики синхротрона приведены в табл. 1. КПТ “Прометеус” ФТЦ ФИАН представляет собой высокотехнологическую медицинскую установку российского производства для лечения новообразований у онкологических больных с использованием методики дистанционной радиационной терапии пучком протонов.

Облучение мишеней происходило сканирующим методом, т.е. точечный пучок перемещается вдоль горизонтальной оси, как бы “заштриховывая” мишень. Сигма пучка составляла 3.5 мм, поле облучения —  $38 \times 38$  мм<sup>2</sup>, время облучения — 71 мин, плотность потока —  $\Phi_p = 10^{11}$  p/см<sup>2</sup>. Размеры поля при 95% дозы были  $34 \times 34$  мм<sup>2</sup>, т.е.  $1.08 \times 10^{12}$  протонов проходят через центральную 95% зону (рис. 1). Размер облучаемой мишени составлял  $30 \times 30 \times 30$  мм<sup>3</sup>, так что образец полностью находился в поле пучка протонов с плотностью потока  $10^{11}$  p/см<sup>2</sup>.

После облучения образец помещался в чашку Петри диаметром 35 мм и измерялся на полупроводниковом спектрометре Санберга® с детектором из сверх-

чистого германия большого объема. Энергетическое разрешение спектрометра было 2.1 кэВ по гамма-линии <sup>60</sup>Со.

Для калибровки спектрометра по эффективности в этой геометрии был изготовлен смешанный калибровочный источник геометрии чашки Петри, содержащий активности <sup>60</sup>Со, <sup>133</sup>Ва, <sup>137</sup>Сs, <sup>152</sup>Eu и <sup>241</sup>Am с насыпной плотностью 1.2 г см<sup>-2</sup>, близкой к насыпной плотности образца кальция. Эта же эффективность, с учетом самопоглощения гамма-излучения в мишени, рассчитывалась после моделирования реальных облучаемых мишеней в программном коде MCNP [15]. Для этого расчета определялась эффективность регистрации нужных гамма-линий для точечной ( $\epsilon_T$ ) и реальной ( $\epsilon_R$ ) мишеней и вводилась поправка на самопоглощение  $k = \epsilon_R/\epsilon_T$ . При введении поправки эффективность расчетной регистрации для объемной мишени совпадала с экспериментальной с точностью ~5%.

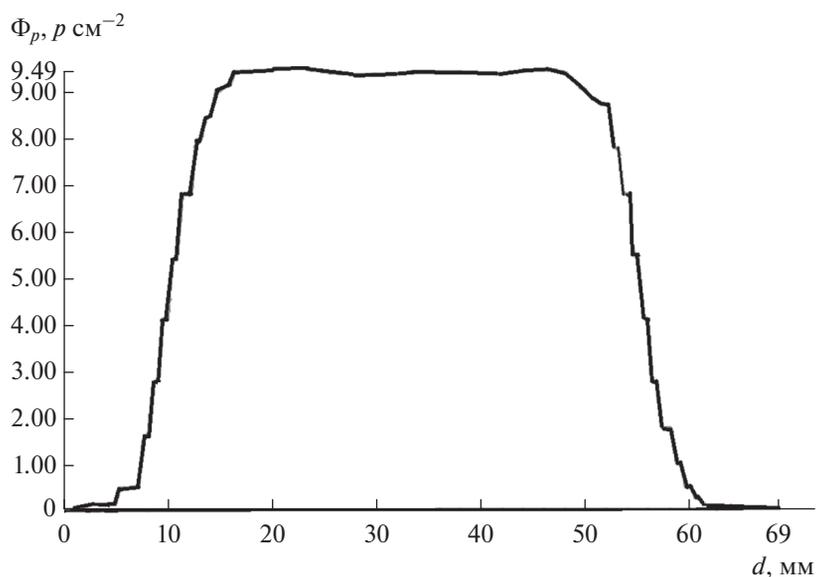
Кальций встречается в природе в виде смеси шести изотопов: <sup>40</sup>Ca, <sup>42</sup>Ca, <sup>43</sup>Ca, <sup>44</sup>Ca, <sup>46</sup>Ca и <sup>48</sup>Ca, среди которых наиболее распространенный — <sup>40</sup>Ca (96.97%), тем не менее активность в облученной мишени кальция в основном обусловлена изотопами <sup>44</sup>Ca и <sup>48</sup>Ca.

В полученном гамма-спектре (рис. 2) были надежно идентифицированы гамма-переходы, сопутствующие радиоактивным распадам продуктов <sup>38</sup>S, <sup>38</sup>Cl, <sup>39</sup>Cl, <sup>41</sup>Ar, <sup>42</sup>K, <sup>43</sup>K, <sup>43</sup>Sc, <sup>44m</sup>Sc, <sup>44</sup>Sc, <sup>47</sup>Ca, <sup>47</sup>Sc, <sup>48</sup>Sc реакций Ca( $k_1p, k_2n$ ), где  $k_1(k_2)$  — число протонов (нейтронов), образующихся в реакции (табл. 2). Так как гамма-лучи с  $E_\gamma = 373$  кэВ, сопутствующие распаду <sup>43</sup>Sc, совпадают по энергии с гамма-лучами, сопутствующими распаду <sup>43</sup>K (табл. 2), то вклад гамма-лучей от распада <sup>43</sup>K в суммарный гамма-пик 373 кэВ оценивался по гамма-переходу 617 кэВ.

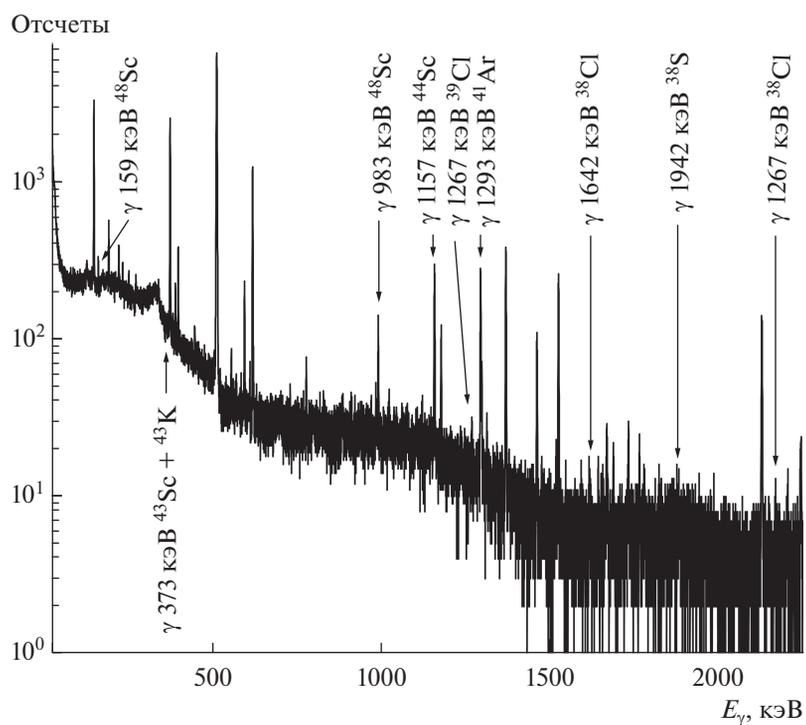
Сечения изученных реакций рассчитывались из уравнения активации:

$$A = \Phi_p N \sigma (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_n}, \quad (1)$$

где  $A$  — активность образовавшегося радионуклида (Бк),  $N$  — количество исходных ядер,  $\sigma$  — сечение выхода реакции (бн),  $\Phi_p$  — плотность потока протонов (p/см<sup>2</sup>),  $\lambda$  — постоянная распада образовавшегося радионуклида (с<sup>-1</sup>),  $t_{\text{обл}}$ ,  $t_n$  — времена облучения и па-



**Рис. 1.** Распределение дозы при облучении мишени из металлической стружки естественного кальция полем размером  $34 \times 34 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 2.** Гамма-спектр облученной мишени металлического кальция с образованием различных продуктов реакции  $\text{Ca}(k_1p, k_2n)$ , где  $k_1$  ( $k_2$ ) — число протонов (нейтронов), образующихся в реакции. Для каждого продукта указаны соответствующие ему энергии  $\gamma$ .

Таблица 2. Основные параметры изученных реакций

| Реакция                   | $E_{\text{порог}}$ , МэВ | Продукт реакции   | Период полураспада | Гамма-переходы, кэВ (интенсивность) [16] |
|---------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|--|
| $^{44}\text{Ca}(p, 5p2n)$ | 61.3                     | $^{38}\text{S}$   | 170 мин            | 1942 (86%)                               |
| $^{44}\text{Ca}(p, 4p3n)$ | 59.1                     | $^{38}\text{Cl}$  | 37 мин             | 1642 (33%); 2167 (44%)                   |
| $^{44}\text{Ca}(p, 4p2n)$ | 50.8                     | $^{39}\text{Cl}$  | 56 мин             | 1267 (54%)                               |
| $^{44}\text{Ca}(p, 3pn)$  | —                        | $^{41}\text{Ar}$  | 110 мин            | 1293 (99%)                               |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2pn)$  | 22.3                     | $^{42}\text{K}$   | 12.3 ч             | 1525 (18%)                               |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2p)$   | 12.5                     | $^{43}\text{K}$   | 22.3 ч             | 373 (87%); 617 (79%)                     |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2n)$   | 14.5                     | $^{43}\text{Sc}$  | 3.9 ч              | 373 (22%)                                |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)$    | 4.5                      | $^{44m}\text{Sc}$ | 58.6 ч             | 271 (87%)                                |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)$    | 4.5                      | $^{44}\text{Sc}$  | 3.9 ч              | 1157 (100%)                              |
| $^{48}\text{Ca}(p, pn)$   | 10.2                     | $^{47}\text{Ca}$  | 4.5 сут            | 1297 (67%)                               |
| $^{48}\text{Ca}(p, 2n)$   | 8.9                      | $^{47}\text{Sc}$  | 3.3 сут            | 159 (68%)                                |
| $^{48}\text{Ca}(p, n)$    | 0.5                      | $^{48}\text{Sc}$  | 43.7 ч             | 983 (12%); 1312 (12%)                    |

Таблица 3. Экспериментальные  $Y_{\text{Э}}$  и теоретические  $Y_{\text{T}}$  сечения выходов исследованных реакций, мбн

| Реакция  | $Y_{\text{Э}}^*$ | $Y_{\text{Э}}$ [10] | $Y_{\text{T}}$ | $Y_{\text{Э}}/Y_{\text{T}}$ |
|--|------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|
| $^{44}\text{Ca}(p, 5p2n)^{38}\text{S}$                 | 0.14(3)          | —                   | 0.06           | 2.3                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, 4p3n)^{38}\text{Cl}$                | 6.0              | —                   | 2.4            | 2.5                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, 4p2n)^{39}\text{Cl}$                | 1.8(3)           | —                   | 3.7            | 0.5                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, 3pn)^{41}\text{Ar}$                 | 5.1              | —                   | 5.5            | 0,9                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2pn)^{42}\text{K}$                  | 39               | 37(6)               | 21             | 1.9                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2p)^{43}\text{K}$                   | 25               | 26(4)               | 15             | 1.2                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2n)^{43}\text{Sc}$                  | 6.3              | —                   | 2.7            | 2.3                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)^{44m}\text{Sc} + ^{44}\text{Sc}$ | 4.7              | —                   | 1.2            | 3.9                         |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)^{44m}\text{Sc}$                  | 1.24             | 1.17                | —              | —                           |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)^{44}\text{Sc}$                   | 3.46             | —                   | —              | —                           |
| $^{48}\text{Ca}(p, pn)^{47}\text{Ca}$                  | 89               | 107(11)             | 30             | 3.0                         |
| $^{48}\text{Ca}(p, 2n)^{47}\text{Sc}$                  | 22               | —                   | 5.5            | 4.0                         |
| $^{48}\text{Ca}(p, n)^{48}\text{Sc}$                   | 11.1             | 8.6(11)             | 0.6            | 18                          |

Примечание. \* Погрешность наших измерений составила ~10%.

узы между окончанием облучения и началом измерений облученных мишеней на полупроводниковых спектрометрах (с) соответственно.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные значения сечений выходов всех изученных реакций приведены в табл. 3. Новые данные о реакциях с вылетом от одного до пяти протонов на ядрах  $^{44}\text{Ca}$  получены впервые. С помощью программы GEANT4 [17] мы оценили самопоглощение протонов, оцененная энергия протонов в мишени кальция оказалась равной  $159 \pm 1$  МэВ.

Для определения механизмов протекания исследуемых протон-индуцированных реакций нами бы-

ли проведены теоретические расчеты их сечений выходов в модели ферми-газа [18] и микроскопической модели Гогни–Хартри–Фока–Боголюбова с температурно-зависимыми плотностями уровней [19]. В расчетах использовался программный код TALYS1.96 [20], который учитывает статистические, предравновесные и прямые процессы (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что в сечения выходов всех реакций доминирующий вклад дают предравновесные процессы, причем рассчитанные сечения разных реакций за счет предравновесных процессов могут изменяться на 30–50%. Сопоставление рассчитанных сечений выходов исследуемых реакций с экспериментальными (табл. 3) показывает, что теоретические выходы занижены в 2–3 раза. Такое расхождение указывает на необходимость включения других механизмов взаимодействия протонов с энергией 150–160 МэВ с ядрами кальция, прежде всего, механизма, связанного с внутриядерными каскадами. Этот механизм учитывается в полумпирических оценках [21, 22], не обладающих большой точностью. Другими словами, и наши расчеты с использованием хорошо апробированных теоретических моделей и расчетных кодов, и оценки вклада внутриядерных каскадов не позволяют достоверно определить механизм взаимодействия ускоренных протонов с ядрами кальция. Для более однозначных выводов необходимы экспериментальные исследования таких реакций на других ядрах.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведены исследования сечений выходов реакций с ускоренными протонами с энергией 160 МэВ на мишени металлического кальция естественного изотопного состава. Впервые получены новые данные о реакциях с вылетом от одного до пяти протонов на ядрах  $^{44}\text{Ca}$ . Проведены расчеты выходов реакций в модели ферми-газа и микроско-

**Таблица 4.** Расчеты сечений изученных реакций на  $^{44}\text{Ca}$  и  $^{48}\text{Ca}$  в рамках модели ферми-газа и модели Гогни–Хартри–Фока–Боголюбова для энергии протонов 150 и 160 МэВ, мбн

| Реакция                                 | Модель ферми-газа<br>с учетом ( <i>a</i> ) и без учета ( <i>b</i> )<br>предравновесных процессов |                       |                       |                       | Модель Гогни–Хартри–Фока–Боголюбова<br>с учетом ( <i>a</i> ) и без учета ( <i>b</i> )<br>предравновесных процессов |                       |                       |                       |
|---|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|   | 150 МэВ  |                       | 160 МэВ               |                       | 150 МэВ  |                       | 160 МэВ               |                       |
|   | <i>a</i>   | <i>b</i>              | <i>a</i>              | <i>b</i>              | <i>a</i>   | <i>b</i>              | <i>a</i>              | <i>b</i>              |
| $^{44}\text{Ca}(p, 5p2n)^{38}\text{S}$  | $3.75 \times 10^{-3}$  | $8.86 \times 10^{-5}$ | $3.58 \times 10^{-3}$ | $2.13 \times 10^{-5}$ | $7.94 \times 10^{-2}$  | $1.08 \times 10^{-2}$ | $6.06 \times 10^{-2}$ | $2.83 \times 10^{-3}$ |
| $^{44}\text{Ca}(p, 4p3n)^{38}\text{Cl}$ | 1.21   | $1.12 \times 10^{-2}$ | $5.99 \times 10^{-1}$ | $1.80 \times 10^{-3}$ | 4.40   | $1.13 \times 10^{-1}$ | 2.30                  | $2.55 \times 10^{-2}$ |
| $^{44}\text{Ca}(p, 4p2n)^{39}\text{Cl}$ | $4.39 \times 10^{-1}$  | $3.19 \times 10^{-4}$ | $4.61 \times 10^{-1}$ | $6.90 \times 10^{-5}$ | 3.57   | $2.37 \times 10^{-2}$ | 3.75                  | $7.80 \times 10^{-3}$ |
| $^{44}\text{Ca}(p, 3pn)^{41}\text{Ar}$  | 1.96   | –                     | 1.77                  | –                     | 6.32   | $6.38 \times 10^{-5}$ | 5.99                  | $1.11 \times 10^{-5}$ |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2pn)^{42}\text{K}$   | $1.85 \times 10^1$   | –                     | $1.38 \times 10^1$    | –                     | $2.46 \times 10^1$   | –                     | $1.84 \times 10^1$    | –                     |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2p)^{43}\text{K}$    | $1.02 \times 10^1$   | –                     | $1.02 \times 10^1$    | –                     | $1.23 \times 10^1$   | –                     | $1.24 \times 10^1$    | –                     |
| $^{44}\text{Ca}(p, 2n)^{43}\text{Sc}$   | 2.38   | –                     | 2.01                  | –                     | 3.15   | –                     | 2.84                  | –                     |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)^{44m,g}\text{Sc}$ | 1.09   | –                     | 1.04                  | –                     | 1.09   | –                     | 1.04                  | –                     |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)^{44m}\text{Sc}$   | $1.33 \times 10^{-1}$  | –                     | $1.29 \times 10^{-1}$ | –                     | $1.69 \times 10^{-1}$  | –                     | $1.69 \times 10^{-1}$ | –                     |
| $^{44}\text{Ca}(p, n)^{44g}\text{Sc}$   | $9.56 \times 10^{-1}$  | –                     | $9.12 \times 10^{-1}$ | –                     | $9.21 \times 10^{-1}$  | –                     | $8.71 \times 10^{-1}$ | –                     |
| $^{48}\text{Ca}(p, pn)^{47}\text{Ca}$   | $3.12 \times 10^1$   | –                     | $2.83 \times 10^1$    | –                     | $3.28 \times 10^1$   | –                     | $2.95 \times 10^1$    | –                     |
| $^{48}\text{Ca}(p, 2n)^{47}\text{Sc}$   | 5.26   | –                     | 4.95                  | –                     | 5.84   | –                     | 5.48                  | –                     |
| $^{48}\text{Ca}(p, n)^{48}\text{Sc}$    | $6.43 \times 10^{-1}$  | –                     | $5.82 \times 10^{-1}$ | –                     | $6.49 \times 10^{-1}$  | –                     | 5.86                  | –                     |

пической модели Гогни–Хартри–Фока–Боголюбова с температурно-зависимыми плотностями уровней с помощью программного кода TALYS1.96. Показано, что доминирующий вклад в сечения вносят предравновесные процессы, причем этот вклад для разных реакций может изменяться на 30–50%. Расчетные выходы, как правило, не превышают 30% от экспериментальных. Для более однозначных выводов о механизме таких реакций необходимы экспериментальные исследования на других ядрах.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы “Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина” Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Облучение образцов проводилось в центре коллективного пользования КПП “Прометеус”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- W. Newhauser and R. Zhang, Phys. Med. Biol. **60**, R155 (2015).
- M. Moteabbed, T. Yock, and H. Paganetti, Phys. Med. Biol. **59**, 2883 (2014).
- T. Rodriguez-Gonzalez, C. Guerrero, C. M. Backer, J. Bauer, C. Baumer, S. Brons, W. Jentzen, M. C. Jimenez-Ramos, M. A. Millan-Callado, C. Schomers, B. Timmermann, J. M. Quesada, and R. Capote, Nucl. Data Sheets **187**, 579 (2023).
- U. Oelfke, G. Lam, and M. Atkins, Phys. Med. Biol. **41**, 177 (1996).
- K. Parodi, T. Bortfeld, and T. Haberer, Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. **71**, 945 (2008).
- K. Parodi, A. Ferrari, F. Sommerer, and H. Paganetti, Phys. Med. Biol. **52**, 3369 (2007).
- A. C. Kraan, Front. Oncol. **5**, article 150 (2015).
- C. Toramatsu, A. Mohammadi, H. Wakizaka, C. Seki, F. Nishikido, S. Sato, I. Kanno, M. Takahashi, K. Karasawa, Y. Hirano, and T. Yamaya, Phys. Med. Biol. **65**, 105011 (2020).
- C. Toramatsu, A. Mohammadi, H. Wakizaka, H. Sudo, N. Nitta, C. Seki, I. Kanno, M. Takahashi, K. Karasawa, Y. Hirano, and T. Yamaya, Phys. Med. Biol. **67**, 125006 (2022).

10. M. Faßbender, Y. Shubin, and S. Qaim, *Radiochim. Acta* **84**, 59 (1999).
11. A. L. Nichols and R. Capote, *Nucl. Data Sheets* **120**, 239 (2014).
12. F. T. Tarkanyi, A. V. Ignatyuk, A. Hermanne, R. Capote, B. V. Carlson, J. W. Engle, M. A. Kellett, T. Kibedi, G. N. Kim, F. G. Kondev, M. Hussain, O. Lebeda, A. Luca, Y. Nagai, H. Naik, A. L. Nichols, et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **319**, 533 (2019).
13. S. Espana, X. Zhu, J. Daartz, G. El. Fakhri, T. Bortfeld, and H. Paganetti, *Phys. Med. Biol.* **56**, 2687 (2011).
14. IAEA, International Nuclear Data Committee (INDC). Summary Report Technical Meeting on Nuclear Data for Medical Applications (Vienna, 2019).
15. J. F. Briesmeister, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code (Los Alamos, 1993), Report LA-12625-M.
16. R. B. Firestone, *Table of Isotopes*, 8th ed. (Hungary, 1997).
17. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **506**, 250 (2003).
18. S. Goriely, S. Hilaire, and A. Koning, *Phys. Rev. C* **78**, 064307 (2008).
19. A. Koning and D. Rochman, *Nucl. Data Sheets* **113**, 2841 (2012).
20. A. Gilbert and A. Cameron, *Can. J. Phys.* **43**, 1446 (1965).
21. G. Rudstam, *Nucl. Phys. A* **126**, 401 (1969).
22. R. Silberberg and C. Tsao, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **25**, 315 (1973).

## NUCLEAR REACTIONS AT 160 MeV PROTON ENERGY ON NATURAL CALCIUM

M. V. Zheltonozhskaya<sup>1)</sup>, A. V. Ovsyannikov<sup>1)</sup>, A. E. Shemyakov<sup>2)</sup>, A. P. Chernyaev<sup>1)</sup>, S. R. Adonyev<sup>1)</sup>,  
A. A. Scherbakov<sup>1)</sup>, O. V. Yatsenko<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia*

<sup>2)</sup> *Physical-Technical Centre of the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Protvino, Russia*

<sup>3)</sup> *Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia*

The study of radionuclide excitation functions in proton-induced nuclear reactions is of fundamental interest for in vivo treatment verification methods in proton therapy. However, experimental data for these reactions are very limited, especially for proton energies above 20 MeV, and show significant discrepancies. In the present work, experimental cross sections of reactions for accelerated protons with an energy of 160 MeV on targets of metallic calcium of natural isotopic composition are measured. For the first time, new data have been obtained on the yield cross sections of reactions with the departure of one to five protons at <sup>44</sup>Ca nuclei. Calculations of the obtained cross sections in the Fermi gas and Gogni–Hartree–Fock–Bogolyubov models using the TALYS1.96 program code are carried out. It is shown that pre-equilibrium processes dominate in the cross sections. It is noted that the calculated cross sections, as a rule, do not exceed 30% of the experimental ones.