

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 539.123

СЕЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ НЕЙТРИНО ЯДРАМИ ГАЛЛИЯ-71

© 2020 г. С. В. Семенов*

Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт”,
пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

*E-mail: Semenov_SV@nrcki.ru

Поступила в редакцию 06.09.2019 г.

После доработки 03.08.2020 г.

Принята к публикации 04.08.2020 г.

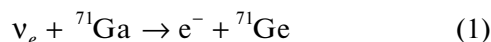
Рассматривается взаимодействие нейтрино, излучаемых искусственными источниками, изотопами ^{37}Ar , ^{51}Cr , ^{65}Zn , с ядрами галлия-71, что представляет интерес для калибровочных экспериментов, направленных на обнаружение стерильных нейтрино. Сечение поглощения нейтрино рассчитывается с учетом новых экспериментальных результатов по измерению величины порога реакции. На основе данных, полученных при изучении реакции перезарядки, проводится оценка вкладов в сечение возбужденных состояний германия-71.

Ключевые слова: искусственные источники нейтрино, сечение поглощения нейтрино, реакция перезарядки

DOI: 10.1134/S2079562920040156

ВВЕДЕНИЕ

Галлий-германиевый метод детектирования нейтрино [1], базирующийся на реакции



отличается малым значением порога, $Q = 233$ кэВ, что позволяет регистрировать нейтрино, относящиеся к низкоэнергетической части спектра и составляющие большую часть потока солнечных нейтрино. Теоретическое значение интенсивности захвата нейтрино в отсутствие осцилляций составляет $I_{\text{теор.}} = 124.2 \pm 3.4$ (стат) ± 1.1 (сист) SNU [2]. Эксперименты SAGE [3], GALLEX и GNO [4] дают следующий экспериментальный результат для солнечных нейтрино с энергией выше Q : $I_{\text{экс.}} = 66.1 \pm 3.1$ SNU. Обнаруженный галлий-германиевым методом дефицит солнечных электронных нейтрино, $I_{\text{экс.}} < I_{\text{теор.}}$, наблюдается и с помощью хлор-аргонового метода [5], приводит к теоретическому подходу, основанному на рассмотрении нейтринных осцилляций [6]. Полный поток солнечных нейтрино, совпадающий с теоретическим предсказанием, был определен в ходе эксперимента SNO [7] с применением обусловленной нейтральными токами реакции нейтрино с дейтроном [8], которая одинаково чувствительна к нейтрино всех флейворов.

Коллаборациями SAGE [3] и GALLEX [4] были выполнены эксперименты по детектированию электронных нейтрино, излучаемых искусственными источниками ^{37}Ar и ^{51}Cr , помещенными

внутри детектора. Определялась величина R , отношение измеренной и теоретической интенсивности поглощения нейтрино ядрами галлия-71. Среднее значение R для этих экспериментов равно: $R = 0.86_{-0.05}^{+0.05}$ [9]. Для интерпретации экспериментальных результатов, полученных в [3] и [4], рассматривается возможность существования нового типа нейтрино — стерильных нейтрино с массой порядка 1 эВ [10]. Безусловно, важным для анализа калибровочных экспериментов является вычисление сечения захвата ядрами галлия-71 нейтрино, излучаемых искусственными источниками.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРИНО
С ЯДРОМ ${}^{71}\text{Ga}$

Энергетический спектр нейтрино, возникающих при электронном захвате в изотопах ^{51}Cr , ^{37}Ar , ^{65}Zn , состоит из ряда монохроматических линий, как это видно из табл. 1.

Сечение поглощения нейтрино определенной энергии будет равно сумме сечения образования в реакции (1) германия-71 в основном состоянии и вклада в сечение возбужденных состояний ${}^{71}\text{Ge}$.

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{g.s.}} + \sum_i \sigma_{\text{exc.,}i} \quad (2)$$

Число возбужденных состояний германия-71 в сумме $\sum_i \sigma_{\text{exc.,}i}$ зависит от энергии нейтрино. Вы-

Таблица 1. Энергетический спектр нейтрино от искусственных источников

Изотоп	E_ν , МэВ	B.R., %
^{51}Cr	0.752	8.49
	0.747	81.63
	0.432	0.93
	0.427	8.95
^{37}Ar	0.813	9.8
	0.811	90.2
^{65}Zn	1.352	48.35

ражение для сечения реакции (1) с образованием германия-71 в определенном состоянии имеет вид:

$$\sigma_{GT}(E_\nu) = \frac{G_F^2 m_e^2}{\pi} g_A^2 B(GT) \pi_e \epsilon_e F(Z_f, \epsilon_e). \quad (3)$$

Здесь $G_F = G_F \cos \theta_C$, g_A — аксиально-векторная константа связи, π_e и ϵ_e — импульс и энергия электрона в единицах mc и mc^2 соответственно. $B(GT)$ — гамов-теллеровская сила перехода в определенное состояние ядра германия-71, равная квадрату соответствующего матричного элемента, деленному на $(2J_i + 1)$, где J_i — момент начального ядра, $J_i = 3/2$ для ^{71}Ga . Энергия электрона равна: $\epsilon_e = (E_\nu - \Delta)/m_e c^2$, где Δ — разность масс конечного и начального ядра. Функция Ферми $F(Z_f, \epsilon_e)$ учитывает влияние электростатического поля ядра. Значения фундаментальных констант $G_F = 1.1663787 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$ [11], $\cos \theta_C = 0.9741$ [12], $g_A = -1.2755$ [13] дают в результате соотношение:

$$\sigma_{GT}(E_\nu) = 67.98 B(GT) \pi_e \epsilon_e F(Z_f, \epsilon_e) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2.$$

Функция $F(Z_f, \epsilon_e)$ записывается следующим образом: $F(Z_f, \epsilon_e) = F_0 L_0$,

$$F_0(Z_f, \epsilon_e) = 4(2pR_A)^{2(\gamma_1-1)} e^{\pi y} \frac{|\Gamma(\gamma_1 + iy)|^2}{[\Gamma(2\gamma_1 + 1)]^2},$$

$\gamma_1 = [1 - (\alpha Z_f)^2]^{1/2}$, $y = \alpha Z_f \epsilon_e / p$. Метод расчета $F_0(Z_f, \epsilon_e)$ рассмотрен в работе [14]. L_0 — медленно меняющаяся функция энергии электрона, близкая к единице [15]. Усреднение по объему ядра приводит к дополнительному множителю $3/(2\gamma_1 + 1)$. При вычислении сечений учитывались поправки к функции $F(Z_f, \epsilon_e)$, отвечающие эффекту экранирования электронной оболочкой атома [16, 17].

В работе [18] получен следующий результат измерения значения порога реакции (1):

$$Q = 232.443 \pm 0.093 \text{ кэВ}. \quad (4)$$

Гамов-теллеровскую силу перехода в основное состояние германия-71 $B(GT)_{\text{g.s.}}$ можно найти из

величины $T_{1/2}$ для процесса, обратного реакции (1), электронного захвата в ^{71}Ge [19]:

$$e^- + ^{71}\text{Ge} \rightarrow \nu_e + ^{71}\text{Ga}.$$

Значение $\lg ft_{1/2}$, соответствующее порогу реакции (4), определенному в [18] равно [20]:

$$\lg ft_{1/2}(^{71}\text{Ge}) = 4.3495 \pm 0.0015.$$

Для $B(GT)_{\text{g.s.}}$ справедливо соотношение [21]

$$B(GT)_{\text{g.s.}} = \frac{2J_{\text{Ge}} + 1}{2J_{\text{Ga}} + 1} \frac{D}{g_A^2 ft_{1/2}} = \frac{1}{2} \frac{D}{g_A^2 ft_{1/2}}, \quad (5)$$

$$D = \frac{2\pi^3 \ln 2}{G_F^2 \cos^2 \vartheta_C m_e^5}.$$

Здесь учитывается, что для основного состояния германия-71 $J_{\text{Ge}} = 1/2$.

Фундаментальные константы [11, 12] задают величину D , равную $D = 6288.6 \text{ с}$. В результате получается следующее значение гамов-теллеровской силы для перехода в основное состояние ^{71}Ge :

$$B(GT)_{\text{g.s.}} = 0.0864 \pm 0.0003. \quad (6)$$

В [22] $\lg ft_{1/2}(^{71}\text{Ge})$ и $B(GT)_{\text{g.s.}}$ находились исходя из порога реакции $Q = 233.5 \pm 1.2 \text{ кэВ}$, определенном в [23]. Соответственно получены следующие значения:

$$\lg ft_{1/2} = 4.353 \pm 0.005,$$

$$B(GT)_{\text{g.s.}} = 0.086 \pm 0.001.$$

Таким образом, новые измерения порога реакции приводят к большей силе перехода (6) в основное состояние германия-71 и к меньшей ошибке при вычислении этой величины. Гамов-теллеровская сила (5) позволяет получить наиболее точное, к настоящему времени, значение сечения перехода на основное состояние германия-71 при поглощении галлием-71 нейтрино от искусственных источников ^{37}Ar , ^{51}Cr , ^{65}Zn .

$$^{51}\text{Cr} \sigma_{\text{g.s.}} = (55.39 \pm 0.19) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2,$$

$$^{37}\text{Ar} \sigma_{\text{g.s.}} = (66.25 \pm 0.23) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2,$$

$$^{65}\text{Zn} \sigma_{\text{g.s.}} = (72.16 \pm 0.25) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2.$$

Для вычисления полного сечения поглощения нейтрино ядрами ^{71}Ga необходимо учесть вклады энергетически разрешенных возбужденных состояний ^{71}Ge . Для источников ^{37}Ar , ^{51}Cr такими разрешенными состояниями являются: $E_x = 175 \text{ кэВ}$ ($5/2^-$) и $E_x = 500 \text{ кэВ}$ ($3/2^-$). В случае ^{65}Zn к ним еще добавляются $E_x = 708 \text{ кэВ}$ ($3/2^-$); $E_x = 808 \text{ кэВ}$ ($1/2^-$); $E_x = 1096 \text{ кэВ}$ ($3/2^-$).

Возбужденные состояния германия-71 исследовались в [2, 24] с помощью реакции перезаряд-

Таблица 2. Гамов-теллеровские силы перехода в основное и возбужденные состояния ^{71}Ge

$E_x(^{71}\text{Ge}), \text{кэВ}$	J^π	$B(\text{GT}) \cdot 10^{-2}$
g.s.	$1/2^-$	8.52 (40)
175	$5/2^-$	0.34(16)
500	$3/2^-$	1.76(14)
708	$3/2^-$	0.11(5)
808	$1/2^-$	2.29(10)
1096	$3/2^-$	1.83(17)

ки. Изучались характеристики реакции $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$ в пучке ионов $^3\text{He}^{++}$ с энергией 420 МэВ. Гамов-теллеровские силы перехода находятся из соотношения, связывающего $B(\text{GT})$ и дифференциальное сечение при нулевой передаче импульса [25, 26]:

$$\frac{d\sigma^{GT}}{d\Omega}(q=0) = \left(\frac{4\pi\mu}{h^2}\right)^2 \frac{k_f}{k_i} N_D^{\sigma\tau} |f_{\sigma\tau}|^2 B(\text{GT}).$$

Здесь $N_D^{\sigma\tau}$ — фактор искажения, $f_{\sigma\tau}$ — объемный интеграл нуклон-нуклонного взаимодействия. Так как в настоящее время эти факторы не вычисляются с необходимой точностью, в [2, 24] при определении сил перехода в качестве реперного значения используется сила перехода в основное состояние $B(\text{GT})_{\text{g.s.}}$, которая известна, исходя из $\lg ft_{EC}$ (5). В результате получены следующие величины $B(\text{GT})$, приведенные в табл. 2.

При этом значение $B(\text{GT})_{\text{g.s.}}$, равное $8.52 \cdot 10^{-2}$ находилось, исходя из $\log ft_{EC} = 4.350$ [24]. В настоящих расчетах учитывалось, что $B(\text{GT})_{\text{g.s.}} = 8.64 \cdot 10^{-2}$ (5).

Таким образом, данные табл. 2 позволяют рассчитать вклады в сечения возбужденных состояний германия-71. Для полного сечения поглощения нейтрино от искусственных источников ^{37}Ar , ^{51}Cr , ^{65}Zn ядрами галлия-71 получены следующие результаты:

$$^{51}\text{Cr} \sigma_{\text{tot}} = (59.38 \pm 1.16) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2,$$

$$^{37}\text{Ar} \sigma_{\text{tot}} = (71.69 \pm 1.47) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2,$$

$$^{65}\text{Zn} \sigma_{\text{tot}} = (88.12 \pm 1.90) \cdot 10^{-46} \text{ см}^2.$$

Для ^{51}Cr , вклад возбужденных состояний в полное сечение составляет $6.7 \pm 2\%$, для ^{37}Ar $7.6 \pm 2\%$, для ^{65}Zn $18.1 \pm 2.2\%$. Ошибки полного сечения преимущественно обусловлены неточностью определения сил перехода в возбужденные состояния германия-71

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точный расчет сечения поглощения нейтрино ядрами галлия-71 необходим для интерпретации данных калибровочных экспериментов и поиска новых типов нейтрино. Новые измерения порога реакции [18] позволяют с высокой точностью вычислять сечение для перехода в основное состояние германия-71. Вместе с тем, безусловно, желательно повысить точность определения гамов-теллеровских сил перехода на возбужденные состояния конечного ядра. Дальнейшее повышение точности метода, основанного на исследовании реакции перезарядки [27], имеет важное значение для определения ядерных матричных элементов и расчета сечения взаимодействия нейтрино с ядрами в заряженном канале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Kuzmin V.A. // Sov. Phys. JETP. 1966. V. 22. P. 1051.
2. Frekers D., Adachi T., Akimune H. et al. // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. P. 034608.
3. Abdurashitov J.N. et al. // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 015807.
4. Kaether F. et al. // Phys. Lett. B. 2010. V. 685. P. 47.
5. Davis L. (Jr) et al. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. P. 1402.
6. Pontecorvo B. // Sov. Phys. JETP. 1968. V. 26. P. 984.
7. Ahmad Q.R. et al. (SNO Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 011301.
8. Gaponov Yu.V., Tyutin I.V. // Sov. Phys. JETP. 1965. V. 20. P. 1231.
9. Giunti C., Laveder M. // Phys. Rev. D: Part. Fields. 2010. V. 82. P. 053005.
10. Giunty C. // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46. P. 123; Khurschov V.V., Fomichev S.V., Titov O.A. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 79. P. 708; Хрущев В.В., Фомичев С.В., Семенов С.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. С. 1098; Gorbachev V.V., Gavrin V.N., Ibragimova T.N. // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. P. 685.
11. Patrignani C., Particle Data Group // Chin. Phys. C. 2016. V. 40. P. 100001.
12. Hardy J.C., Towner S. // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. P. 025501.
13. Czarnecki A., Marciano W.J., Sirlin A. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 202002.
14. Semenov S.V., Šimkovic F., Khurschev V.V., Domin P. // Phys. At. Nucl. 2000. V. 63. P. 1196.
15. Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series. Ed. by Schopper H. Behrens H., Jänecke J. Numerical Tables for Beta-Decay and Electron Capture. 1969. Berlin: Springer. Vol. 4. <https://link.springer.com/book/9783540045939>
16. Bahcall J.N. // Nucl. Phys. 1966. V. 75. P. 10.
17. Rose M.E. // Phys. Rev. 1936. V. 49. P. 727; Longmire C, Brown B. // Phys. Rev. 1949. V. 75. P. 1102.
18. Allansary M., Frekers D., Eronen T. et al // Int. J. Mass Spectrom. 2016. V. 406. P. 1.

19. *Bahcall J.N.* // Phys. Rev. C. 1997. V. 56. P. 3391.
20. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. <http://www.nndc.bnl.gov/logft/>
21. *Giunti C., Laveder M., Li Y.F. et al* // Phys. Rev. D: Part. Fields. 2012. V. 86. P. 113014.
22. *Barinov V., Cleveland B., Gavrin V. et al.* // Phys. Rev. D: Part. Fields. 2018. V. 97. P. 073001.
23. *Frekers D. et al* // Phys. Lett. B. 2013. V. 722. P. 233.
24. *Frekers D., Ejiri H., Akimune H. et al.* // Phys. Lett. B. 2011. V. 706. P. 134.
25. *Taddeucci T.N., Couling C.A., Greenfield M.B et al.* // Nucl. Phys. A. 1987. V. 469. P. 125.
26. *Goodman C.D., Couling C.A., Greenfield M.B et al.* // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. P. 1755.
27. *Frekers D., Alansari M.* // Eur. Phys. J. A. 2019. V. 54. P. 177.

Cross Section Of Neutrino Absorption By Gallium-71 Nuclei

S. V. Semenov*

National Research Centre “Kurchatov Institute”, Academician Kurchatov Sq. 1, Moscow, 123182 Russia

**e-mail: Semenov_SV@nrcki.ru*

Received September 6, 2019; revised August 3, 2020; accepted August 4, 2020

The cross sections of neutrino absorption by the gallium-71 nucleus are obtained for neutrinos from artificial ^{37}Ar , ^{51}Cr , and ^{65}Zn sources. The calculations rely on the new measurement of the energy threshold of this absorption reaction, and contributions of germanium-71 excited states to the total cross section are estimated by invoking the data on the $^{71}\text{Ga}(^3\text{He}, t)^{71}\text{Ge}$ charge-exchange reaction. The results are important for searches for sterile neutrinos in calibration experiments.

Keywords: artificial neutrino source, neutrino absorption cross section, charge-exchange reaction