

Введение

Хорошо известно, что определение астрофизического S-фактора реакции захвата с участием легких ядер при нулевой энергии имеет важное значение в ядерной астрофизике [1,2]. Цель данной работы – определение значения $S_{17}(0)$ -фактора прямого ядерного синтеза ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ в рамках двухчастичной потенциальной модели. Теоретические расчеты значения астрофизического S-фактора реакции захвата при нулевой энергии выполнены на основе формул из работы [3]. При этом в интеграле перекрытия для сечения процесса захвата при $E=0$ волновая функция рассеяния заменяется на модифицированные функции Бесселя. Для вычисления астрофизического S-фактора реакции радиационного захвата $p+{}^7\text{Be}\rightarrow{}^8\text{B}+\gamma$ использованы исходный $p-{}^7\text{Be}$ -потенциал V_D из работы [4], а также модифицированный потенциал V_M [5], который корректно описывает экспериментальную длину $p-{}^7\text{Be}$ -рассеяния в 3S_1 -волне. Надо отметить, что оценка $S_{17}(0)$ сильно зависит от значения асимптотического нормировочного коэффициента (АНК), т.е. от асимптотики волновой функции связанного состояния ядра ${}^8\text{B}$ в канале $p+{}^7\text{Be}$.

Астрофизический S-фактор

Полное сечение реакции радиационного захвата $p+{}^7\text{Be}\rightarrow{}^8\text{B}+\gamma$ в потенциальной кластерной модели имеет следующий вид [3]:

$$\sigma_{l_i l_f}^{E\lambda}(E) = \frac{8\pi e^2 \mu}{\hbar q^3} \cdot k_\gamma^{2\lambda+1} \cdot N_{E\lambda} \cdot [I(E)]^2 \quad (1)$$

Где $I(E)$ интеграл перекрытия между начальным и конечным состояниями:

$$I(E) = \int_0^\infty u_i(r) r^\lambda u_f(E, r) dr \quad (2)$$

Здесь $u_i(r)$, $u_f(E, r)$ соответствующие волновые функции конечное связанное состояние и начальная состояния рассеяния в системе $p+{}^7\text{Be}$ и $N_{E\lambda}$:

$$u_i(E, r) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \cos \delta_i(E) F_l(\eta, kr) + \sin \delta_i(E) G_l(\eta, kr) \quad (3)$$

$$N_{E\lambda} = \left[Z_1 \left(\frac{A_2}{A} \right)^\lambda + Z_2 \left(\frac{-A_1}{A} \right)^\lambda \right] (-1)^{J_i+l_i+s} \frac{[\lambda](\lambda+1)[J_i][J_f][l_i]}{\lambda[(2\lambda+1)!!]^2 [S_1][S_2]} \cdot C_{\lambda 0 l_i 0} \begin{Bmatrix} J_i & l_i & S \\ l_f & J_f & \lambda \end{Bmatrix} \quad (4)$$

где l_i , J_i и l_f , J_f – орбитальные и полные угловые моменты начального и конечного состояний, соответственно. $A=A_1+A_2$, A_1 , A_2 , Z_1 , Z_2 – значения масс и зарядов, S – спин входного канала.

Величина астрофизического S-фактора процесса захвата выражается следующими формулами [3]:

$$S(E) = \sum_{l_f J_f} S_{l_f J_f}(E) = E \exp(2\pi\eta) \sum_{l_f J_f} \sum_{l_i J_i} \sum_{\lambda} \sigma_{l_i l_f}^{E\lambda}(E) \quad (5)$$

Для вычисления астрофизического S-фактора при нулевой энергии в интеграле перекрытия в сечения захвата волновая функция рассеяния заменяется на модифицированные функции Бесселя со следующими формулами:

$$\lim_{E \rightarrow 0} k^{-1/2} \exp(\pi\eta) F_l(\eta, kr) = \sqrt{\pi r} I_{2l+1}(x) \quad (6)$$

$$\lim_{E \rightarrow 0} k^{-1/2} \exp(-\pi\eta) G_l(\eta, kr) = 2\sqrt{r/\pi} K_{2l+1}(x) \quad (7)$$

Здесь: $x=(8r/a_N)^{1/2}$, $a_N = \frac{(\hbar c)^2}{Z_1 Z_2 e^2 \mu}$ – ядерный радиус Бора.

Поставляя (6) и (7) в (3) получим следующее выражение для $S(0)$ -фактора:

$$S(0) = \frac{8\pi^2 e^2 \mu}{2q^3} \left(\frac{E_B}{\hbar c} \right)^{2\lambda+1} \cdot N_{E\lambda} \cdot \left\{ \int_0^\infty u_i(r) r^{\lambda+1/2} \left[I_{2l+1} \left(\frac{8r}{a_N} \right) + \frac{2 \exp(2\pi\eta)}{\pi} \cdot K_{2l+1} \left(\frac{8r}{a_N} \right) \right] dr \right\}^2 \quad (8)$$

На основе выражение (8) выполнены теоретические расчеты для парциальных вкладов E1, E2 и M1-переходов (рис.1) в астрофизический $S(0)$ -фактор данного процесса захвата. На рисунке 2 показаны результаты астрофизического S-фактора процесса синтеза $p+{}^7\text{Be}\rightarrow{}^8\text{B}+\gamma$ из работы [5], рассчитанные с потенциалами V_M и V_D в сравнении с имеющими экспериментальными данными.

Результаты

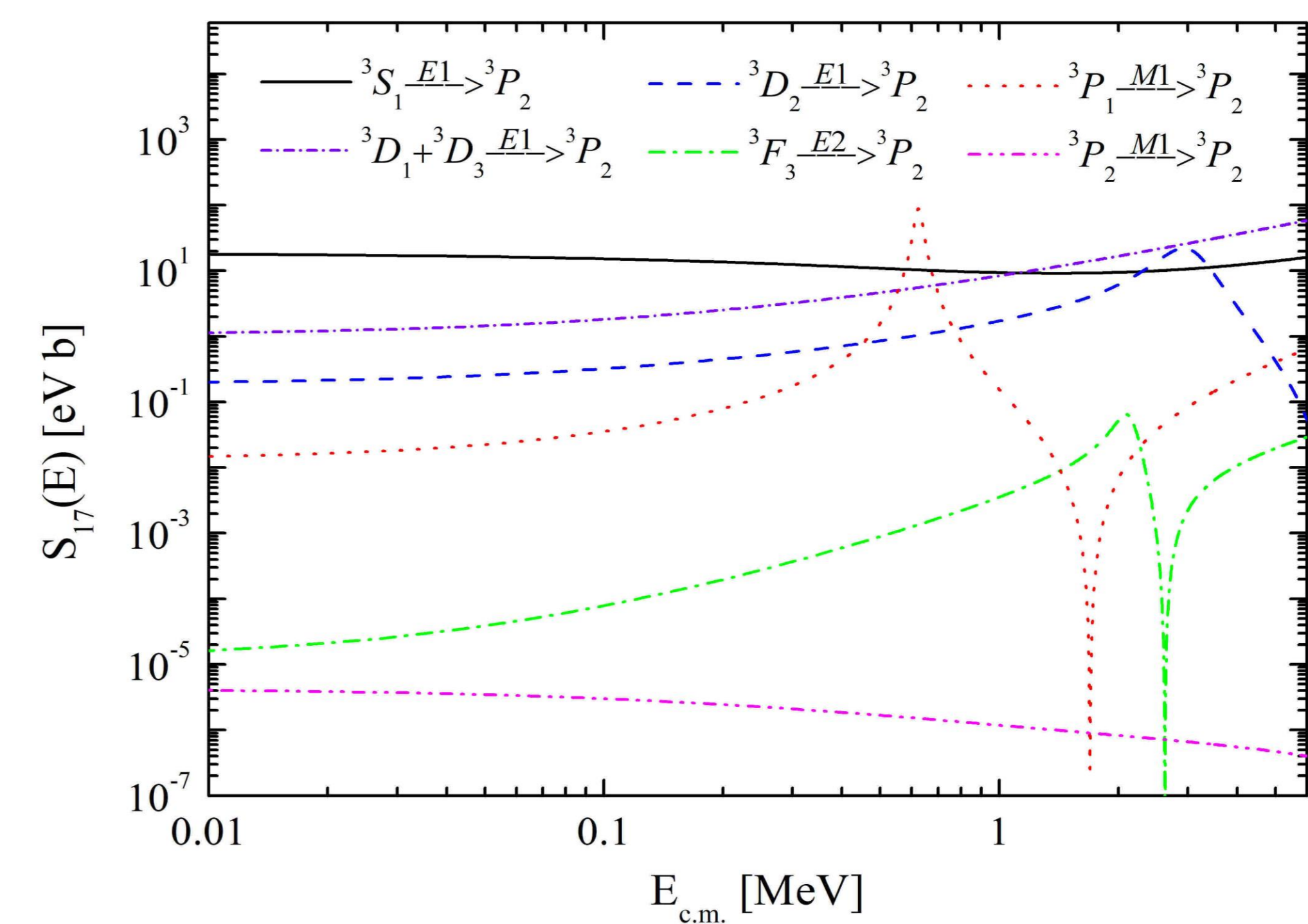


Рис. 1. Парциальные вклады E1, E2 и M1-переходов в астрофизический S-фактор процесса синтеза $p+{}^7\text{Be}\rightarrow{}^8\text{B}+\gamma$, рассчитанный с потенциалом V_M как было показано в работе [5].

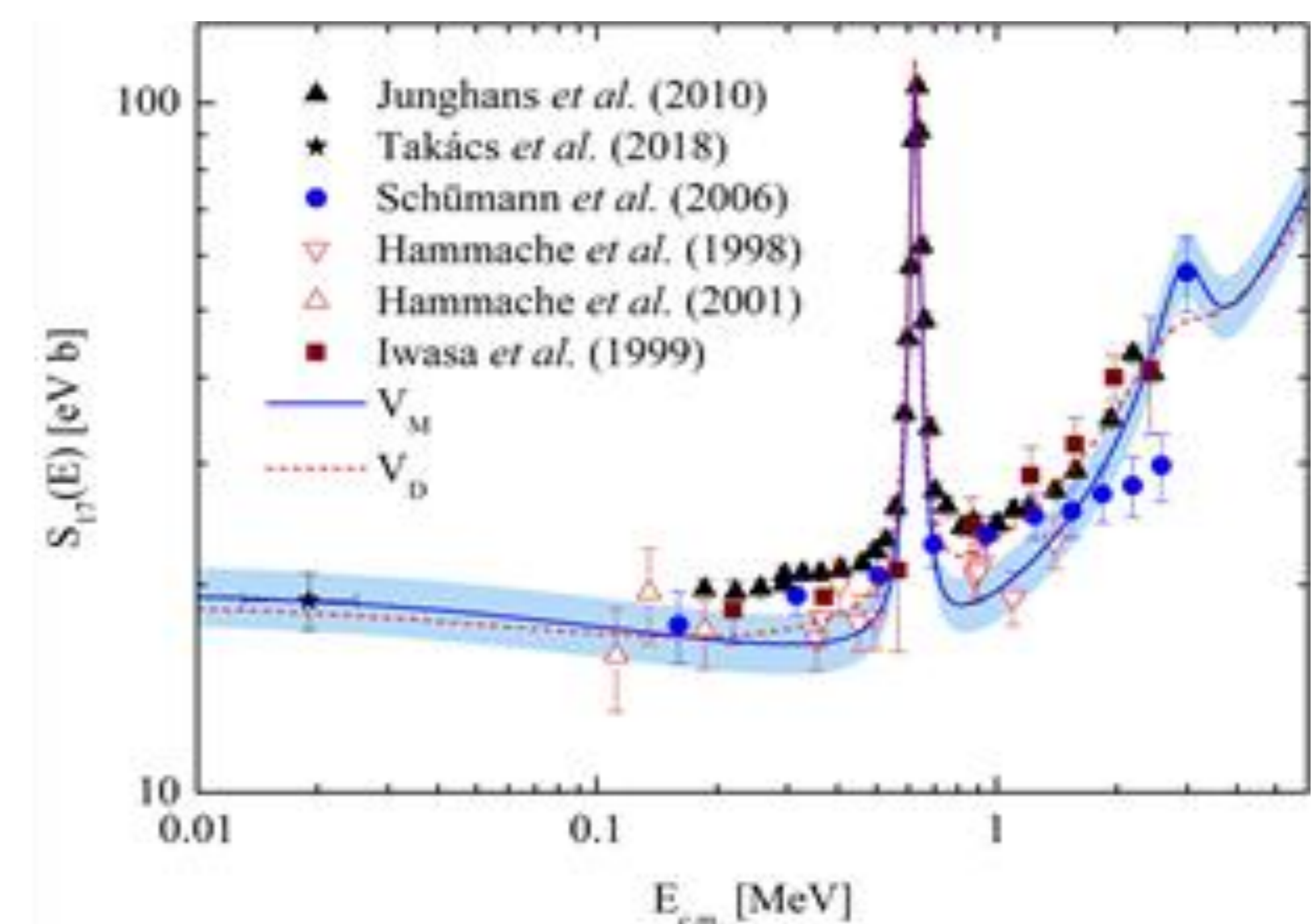


Рис. 2. Астрофизический S-фактор процесса синтеза $p+{}^7\text{Be}\rightarrow{}^8\text{B}+\gamma$ из работы [5], рассчитанный с потенциалами V_M и V_D в сравнении с экспериментальными данными [7-12].

Таблица 1. Значение АНК для ядра ${}^8\text{B}$ в канале $p+{}^7\text{Be}$ и $S_{17}(0)$ для потенциалов V_D и V_M .

Модель	C_B , $\text{фм}^{-1/2}$	$S(0)$, эВ бн
V_D	0.704	19.19
V_M	0.733	20.38

В таблице 1 приведены значения АНК и соответствующие оценки $S_{17}(0)$ для потенциала V_D из работы [4] и модифицированного потенциала V_M . Значение астрофизического S-фактора в модели V_M , экстраполированное на нулевую энергию оказывается равным $S_{17}(0) \approx (20.38^{+1.92}_{-1.82})$ эВ бн, что хорошо согласуется с оценкой $S_{17}(0) \approx (20.8 \pm 2.1)$ эВ бн модели Solar Fusion II [6].

Литература

1. D. Baye, E. Brainis, Phys. Rev. C **61**, 025801 (2000).
2. D. Baye, Phys. Rev. C **62**, 065803 (2000).
3. D. Baye, P. Descouvemont, M. Hesse, Phys. Rev. C **58**, 545 (1998).
4. S.B. Dubovichenko, N.A. Burkova, A.V. Dzhazairov-Kakhramanov, A.S. Tkachenko, Nucl. Phys. A **983**, 175 (2019).
5. E.M. Tursunov et al., Phys. Rev. C **104**, 045806 (2021).
6. E. G. Adelberger et al., Rev. Mod. Phys. **83**, 195 (2011).
7. F. Hammache et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 928 (1998).
8. F. Hammache et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 3985 (2001).
9. A.R. Junghans et al., Phys. Rev. C **81**, 012801 (2010).
10. N. Iwasa et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 2910 (1999).
11. F. Schumann et al., Phys. Rev. C **73**, 015806 (2006).
12. M.P. Takacs, D. Bemmerer, A.R. Junghans, K. Zuber, Nucl. Phys. A **970**, 78 (2018).