

УДК 539.17.01, 539.171.016, 539.172.1

## УПРУГОЕ РАССЕЙЯНИЕ И РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ В СИСТЕМАХ ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ И ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$

© 2020 г. А. С. Соловьев\*

Федеральное государственное унитарное предприятие

“Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова”, Москва, Россия

\*E-mail: alexander.solovyev@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

В рамках микроскопического подхода исследованы ядерные системы  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$  и  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ , представляющие значительный интерес для ядерно-астрофизических приложений. Рассмотрены протекающие в этих системах процессы упругого рассеяния и радиационного захвата в широком диапазоне энергий. В частности, для радиационного захвата вычислены сечения (астрофизические  $S$ -факторы). Для упругого рассеяния рассчитаны ядерные фазы. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0367676520040316

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы радиационного захвата, протекающие в системах  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$  и  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  при низких энергиях, представляют значительный интерес для ядерной астрофизики. Этот интерес обусловлен тем, что сечения (астрофизические  $S$ -факторы) соответствующих процессов служат входными данными для ядерно-астрофизических приложений (первичный нуклеосинтез, эволюция звезд и т.д.) [1–3]. По этой причине рассматриваемые системы были и остаются предметом многих экспериментальных и теоретических исследований. Обзор недавних и более ранних работ можно найти в [4, 5].

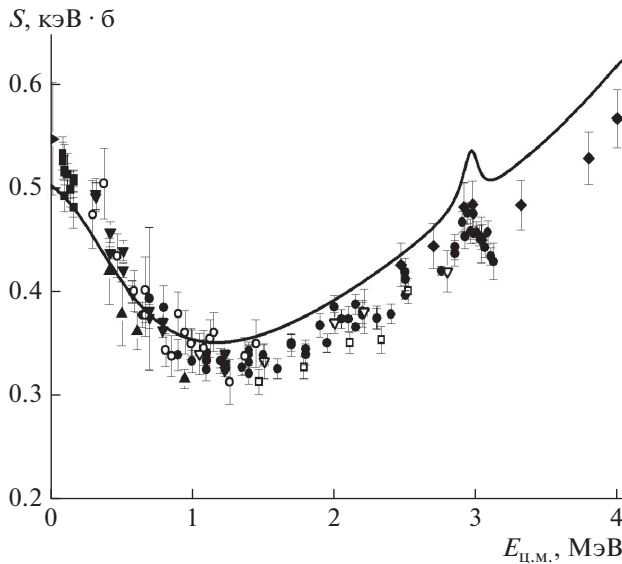
Настоящая работа также нацелена на изучение ядерных систем  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$  и  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  и протекающих в них процессов упругого рассеяния и радиационного захвата в рамках развиваемого микроскопического подхода, базирующегося на многомасштабной алгебраической версии модели резонирующих групп (АВМРГ) [4, 5]. Основная цель настоящей работы заключается в представлении результатов, полученных в рамках данного подхода для рассматриваемых процессов в широком энергетическом диапазоне, который наряду с астрофизически важной низкоэнергетической областью покрывает также и область промежуточных энергий, включающих низколежащие резонансные состояния.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

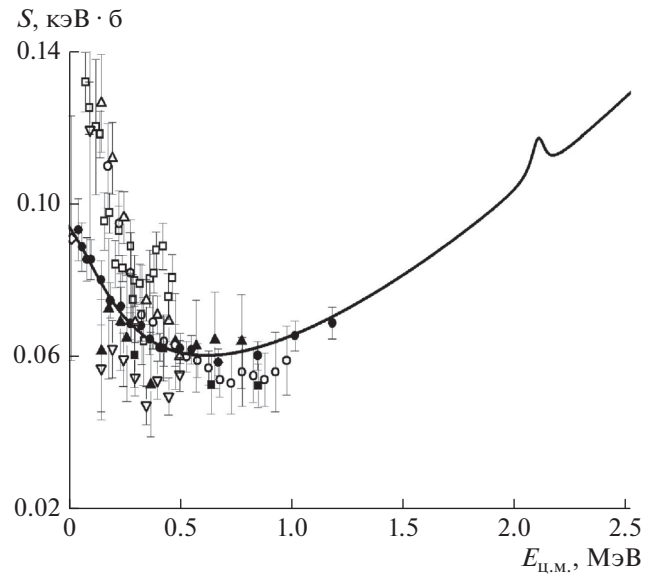
В основе АВМРГ лежат кластерные представления о ядерной структуре и динамике и математический аппарат разложений по базису осцилляторных функций [6, 7]. Фактически, динамические уравнения АВМРГ – это линейные алгебраические уравнения с учетными граничными условиями для нахождения неизвестных коэффициентов разложения. Микроскопический подход к реакциям радиационного захвата, основанный на одномасштабной АВМРГ, был предложен и развит в [8–15]. Более усовершенствованный подход, базирующийся на многомасштабной АВМРГ, был предложен в [4] и затем развит в [5]. Сопоставление этих подходов на конкретных примерах выполнено в [16], где были продемонстрированы преимущества многомасштабной АВМРГ. Математический формализм многомасштабной АВМРГ в деталях изложен в [4]. Подробности расчетов представлены в [4, 5]. Поэтому перейдем к результатам, полученным в рамках соответствующего подхода.

Начнем с обсуждения радиационного захвата в системах  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$  и  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ , т.е. реакций  ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$  и  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ . На рис. 1 для реакции  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  изображена расчетная энергетическая зависимость полного астрофизического  $S$ -фактора

$$S(E_{\text{ц.м.}}) = E_{\text{ц.м.}} \exp\left(\sqrt{E_G/E_{\text{ц.м.}}}\right) \sigma(E_{\text{ц.м.}}),$$



**Рис. 1.** Полный астрофизический  $S$ -фактор радиационного захвата в системе  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ . Сплошная линия – расчет в рамках многомасштабной АВМРГ. Экспериментальные данные взяты из работ [17–29]:  $\blacktriangle$  – [17],  $\blacksquare$  – [18–20, 22],  $\blacktriangledown$  – [21],  $\bullet$  – [23],  $\nabla$  – [24, 27],  $\square$  – [25],  $\circ$  – [26],  $\blacktriangleright$  – [28],  $\blacklozenge$  – [29].



**Рис. 2.** Полный астрофизический  $S$ -фактор радиационного захвата в системе  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ . Сплошная линия – расчет в рамках многомасштабной АВМРГ. Экспериментальные данные взяты из работ [31–37]:  $\blacktriangle$  – [31],  $\blacksquare$  – [32],  $\square$  – [33],  $\circ$  – [34],  $\bullet$  – [35],  $\triangle$  – [36],  $\nabla$  – [36],  $\diamond$  – [37].

где  $E_G$  и  $E_{c.m.}$  – это, соответственно, энергия Гамова и энергия относительного движения в системе центра масс для сталкивающихся ядер,  $\sigma$  – полное сечение реакции [5]. На рис. 1 отмечены также современные экспериментальные данные [17–29]. Между расчетной кривой и этими данными имеется достаточно хорошее согласие в энергетическом диапазоне вплоть до окрестности пика, который соответствует нижайшему резонансному состоянию ядра  ${}^7\text{Be}$  со значениями полного углового момента и четности  $J^\pi = 7/2^-$  и энергией  $E_r = 2.98$  МэВ [30]. Расчетные значения астрофизического  $S$ -фактора в области пика слегка завышены по сравнению с экспериментальными данными. При этом положение пика строго воспроизведено.

На рис. 2 изображен вычисленный полный астрофизический  $S$ -фактор реакции  ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$  вместе с экспериментальными данными [31–37]. Расчетная кривая и данные [35] находятся в очень хорошем согласии. Область пика в расчетной энергетической зависимости, отвечающего нижайшему резонансному состоянию ядра  ${}^7\text{Li}$  с  $J^\pi = 7/2^-$  и  $E_r = 2.18$  МэВ [30], не покрыта экспериментальными данными, поэтому выполнить какое-либо сопоставление в этом энергетическом диапазоне на данный момент времени не представляется возможным.

Экстраполяция результатов расчетов к нулевой энергии столкновения ядер дает следую-

щие значения астрофизического  $S$ -фактора:  $S(0) = 0.504$  кэВ · б для реакции  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  и  $S(0) = 0.095$  кэВ · б для реакции  ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ .

Расчеты полных астрофизических  $S$ -факторов реакций  ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$  и  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  были выполнены с учетом всех разрешенных E1, E2 и M1 переходов из  $s$ -,  $p$ -,  $d$ - и  $f$ -волн рассеяния в основное ( $J^\pi = 3/2^-$ ) и первое возбужденное ( $J^\pi = 1/2^-$ ) состояния ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$ . В качестве потенциала ядерного взаимодействия использовался модифицированный потенциал Хазегавы–Нагаты [38]. Доминирующий вклад в энергетическую зависимость полных астрофизических  $S$ -факторов этих реакций при низких энергиях дают E1 переходы из  $s$ -волны ( $J^\pi = 1/2^+$ ) [4]:

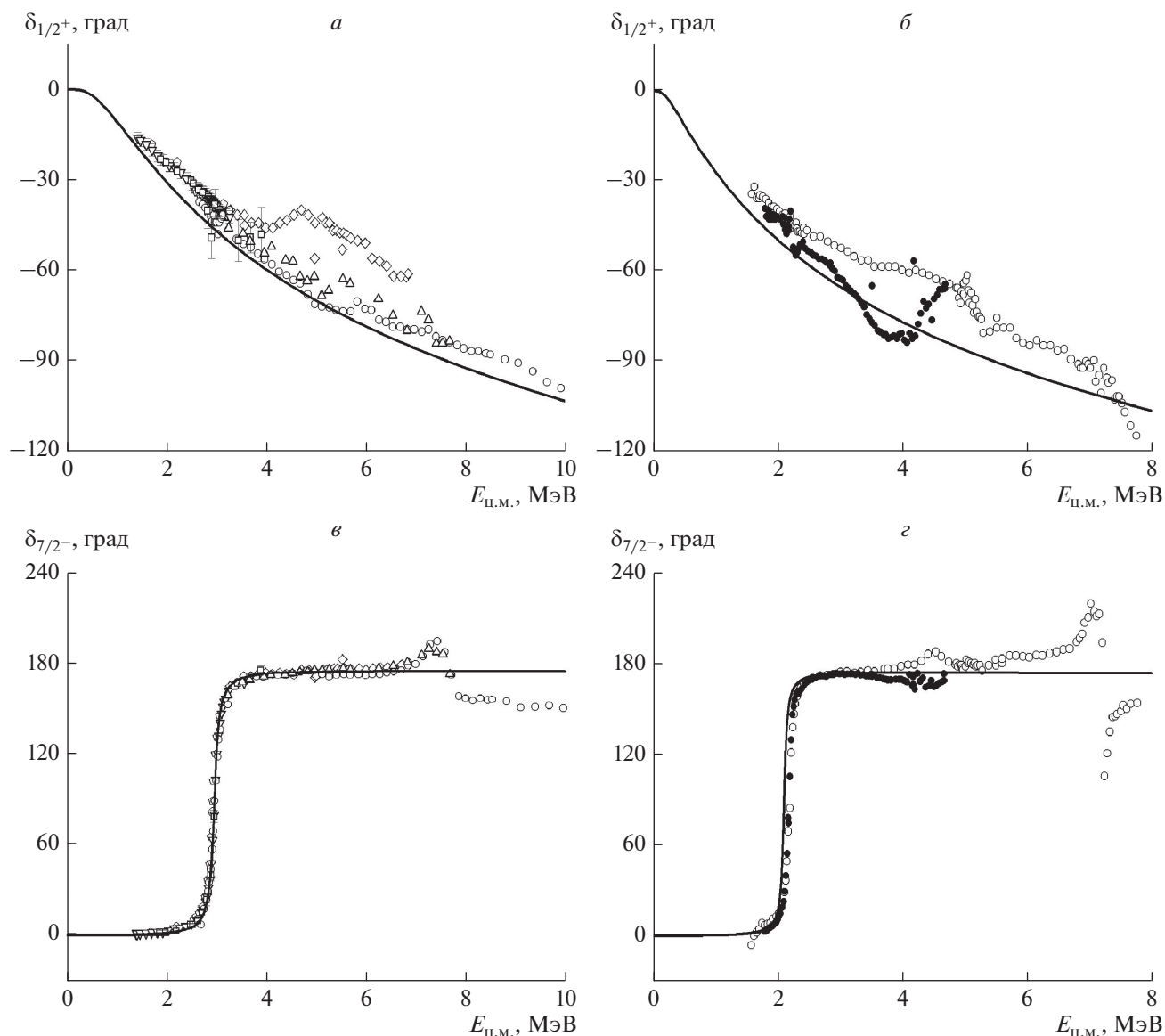
$$1/2^+ \xrightarrow{E1} 3/2^-, \quad 1/2^+ \xrightarrow{E1} 1/2^-.$$

Формирование резонансных пиков обусловлено E2 переходом из  $f$ -волны с  $J^\pi = 7/2^-$  в основное состояние [5]:

$$7/2^- \xrightarrow{E2} 3/2^-.$$

В свою очередь, M1 переходы оказываются несущественными при рассмотренных энергиях [5].

На рис. 3а и 3в представлены соответственно  $s$ - и  $f$ -фазы упругого рассеяния в системе  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ . Расчетные кривые хорошо согласуются с данными, извлеченными из экспериментов [39–44]. В случае упругого рассеяния в системе  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$



**Рис. 3.** Ядерные фазы упругого рассеяния в  $s$ -состоянии  $1/2^+$  и  $f$ -состоянии  $7/2^-$  ( $a$  и  $в$  – для системы  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ ,  $б$  и  $г$  – для системы  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ ). Сплошные линии – расчеты в рамках многомасштабной АВМРГ. Экспериментальные данные взяты из работ [39–45]:  $\square$  – [39],  $\diamond$  – [40],  $\nabla$  – [41],  $\circ$  – [42],  $\square$  – [43],  $\triangle$  – [44],  $\bullet$  – [45].

между расчетными кривыми и экспериментальными данными [42, 45] также имеется достаточно хорошее согласие. На рис. 3б приведена  $s$ -фаза, а на рис. 3г –  $f$ -фаза упругого рассеяния в системе  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ . Результаты расчетов  $p$ - и  $d$ -фаз упругого рассеяния для обеих систем в рамках многомасштабной АВМРГ представлены в работе [5]. Кроме того, в этой работе можно найти результаты подробного рассмотрения электромагнитных свойств связанных состояний, а также свойств низколежащих резонансных состояний ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$ , образующихся в ходе изучаемых процессов радиационного захвата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, микроскопический подход, основанный на многомасштабной АВМРГ, достаточно хорошо описывает процессы упругого рассеяния и радиационного захвата в системах  ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$  и  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  в широком диапазоне энергий. Представленные результаты расчетов находятся в согласии с соответствующими экспериментальными данными. Кроме того, расчет для реакции  ${}^3\text{H}(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$  покрывает область промежуточных энергий, при которых в настоящий момент времени отсутствуют экспериментальные

данные по астрофизическому  $S$ -фактору этой реакции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fields B.D.* // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2011. V. 61. P. 47.
2. *Serenelli A., Peña-Garay C., Haxton W.C.* // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. Art. № 043001.
3. *Coc A., Vangioni E.* // Int. J. Mod. Phys. E. 2017. V. 26. Art. № 1741002.
4. *Solovyev A.S., Igashov S.Yu.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. Art. № 064605.
5. *Solovyev A.S., Igashov S.Yu.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. Art. № 054618.
6. *Филиппов Г.Ф., Охрименко И.П.* // ЯФ. 1980. Т. 32. С. 932; *Filippov G.F., Okhrimenko I.P.* // Phys. Atom. Nucl. 1980. V. 32. P. 480.
7. *Филиппов Г.Ф.* // ЯФ. 1981. Т. 33. С. 928; *Filippov G.F.* // Phys. Atom. Nucl. 1981. V. 33. P. 488.
8. *Соловьев А.С., Игашов С.Ю.* // Яд. физ. и инж. 2013. Т. 4. С. 989.
9. *Соловьев А.С., Игашов С.Ю., Чувильский Ю.М.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. С. 621; *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. P. 433.
10. *Соловьев А.С., Игашов С.Ю., Чувильский Ю.М.* // ЯФ. 2014. Т. 77. С. 1525; *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // Phys. Atom. Nucl. 2014. V. 77. P. 1453.
11. *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 569. Art. № 012020.
12. *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // EPJ Web Conf. 2015. V. 86. Art. № 00054.
13. *Соловьев А.С., Игашов С.Ю., Чувильский Ю.М.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. С. 541; *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. P. 499.
14. *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // EPJ Web Conf. 2016. V. 117. Art. № 09017.
15. *Соловьев А.С., Игашов С.Ю., Чувильский Ю.М.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 322; *Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 290.
16. *Соловьев А.С., Игашов С.Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. С. 555; *Solovyev A.S., Igashov S.Yu.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 504.
17. *Nara Singh B.S., Hass M., Nir-El Y., Haquin G.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. Art. № 262503.
18. *Bemmerer D., Confortola F., Costantini H. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. Art. № 122502.
19. *Gyürky Gy., Confortola F., Costantini H. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. Art. № 035805.
20. *Confortola F., Bemmerer D., Costantini H. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. Art. № 065803.
21. *Brown T.A.D., Bordeanu C., Snover K.A. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. Art. № 055801.
22. *Costantini H., Bemmerer D., Confortola F. et al.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 814. P. 144.
23. *Di Leva A., Gialanella L., Kunz R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. № 232502.
24. *Carmona-Gallardo M., Nara Singh B.S., Borge M.J.G. et al.* // Phys. Rev. C. 2012. V. 86. Art. № 032801(R).
25. *Bordeanu C., Gyürky Gy., Halász Z. et al.* // Nucl. Phys. A. 2013. V. 908. P. 1.
26. *Kontos A., Uberseder E., deBoer R. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. Art. № 065804.
27. *Carmona-Gallardo M., Rojas A., Borge M.J.G. et al.* // EPJ Web Conf. 2014. V. 66. Art. № 07003.
28. *Takács M.P., Bemmerer D., Szücs T., Zuber K.* // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. Art. № 123526.
29. *Szücs T., Gyürky G., Halász Z. et al.* // EPJ Web Conf. 2017. V. 165. Art. № 01049.
30. *Tilley D.R., Cheves C.M., Godwin J.L. et al.* // Nucl. Phys. A. 2002. V. 708. P. 3.
31. *Griffiths G.M., Morrow R.A., Riley P.J., Warren J.B.* // Can. J. Phys. 1961. V. 39. P. 1397.
32. *Burzyński S., Czerski K., Marcinkowski A., Zupranski P.* // Nucl. Phys. A. 1987. V. 473. P. 179.
33. *Schröder U., Redder A., Rolfs C. et al.* // Phys. Lett. B. 1987. V. 192. P. 55.
34. *Utsunomiya H., Lui Y.-W., Haenni D.R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 847.
35. *Brune C.R., Kavanagh R.W., Rolfs C.* // Phys. Rev. C. 1994. V. 50. P. 2205.
36. *Tokimoto Y., Utsunomiya H., Yamagata T. et al.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 63. Art. № 035801.
37. *Быстрицкий В.М., Дудкин Г.Н., Емец Е.Г. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14. С. 366; *Bystritsky V.M., Dudkin G.N., Emets E.G. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14. P. 560.
38. *Kanada H., Kaneko T., Nagata S., Nomoto M.* // Prog. Theor. Phys. 1979. V. 61. P. 1327.
39. *Miller P.D., Phillips G.C.* // Phys. Rev. 1958. V. 112. P. 2048.
40. *Tombrello T.A., Parker P.D.* // Phys. Rev. 1963. V. 130. P. 1112.
41. *Barnard A.C.L., Jones C.M., Phillips G.C.* // Nucl. Phys. 1964. V. 50. P. 629.
42. *Spiger R.J., Tombrello T.A.* // Phys. Rev. 1967. V. 163. P. 964.
43. *Boykin W.R., Baker S.D., Hardy D.M.* // Nucl. Phys. A. 1972. V. 195. P. 241.
44. *Hardy D.M., Spiger R.J., Baker S.D. et al.* // Nucl. Phys. A. 1972. V. 195. P. 250.
45. *Ivanovich M., Young P.G., Ohlsen G.G.* // Nucl. Phys. A. 1968. V. 110. P. 441.