УДК 539.17.01,539.171.016,539.172.1

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОДХОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ВЕРСИЯХ МОДЕЛИ РЕЗОНИРУЮЩИХ ГРУПП, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИАЦИОННОМУ ЗАХВАТУ

© 2019 г. А. С. Соловьев^{1, 2, *}, С. Ю. Игашов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова", Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тихоокеанский государственный университет", Хабаровск, Россия

> *E-mail: alexander.solovyev@mail.ru Поступила в редакцию 01.10.2018 г. После доработки 15.10.2018 г. Принята к публикации 19.11.2018 г.

Обсуждаются основные свойства одно- и многомасштабной алгебраических версий модели резонирующих групп, а также базирующиеся на них подходы к описанию реакций радиационного захвата. На конкретных примерах проводится сопоставление этих подходов и демонстрируются их возможности.

DOI: 10.1134/S0367676519040276

введение

Сечения ряда ядерных реакций, индуцированных легкими ядрами при низких энергиях, необходимы во многих аспектах прикладных и фундаментальных исследований, особенно в ядерной астрофизике [1, 2]. В большинстве случаев эти сечения либо характеризуются значительными экспериментальными погрешностями, либо вовсе недоступны для надежных измерений в области энергий, представляющей интерес для исследований. Чисто математические экстраполяции экспериментальных данных также зачастую оказываются недостоверными. По этим причинам теоретические расчеты, основанные на микроскопических подходах, представляют собой важный источник знаний о величинах сечений. Более того, построение соответствующих подходов является весьма актуальной проблемой в теории ядерных реакций.

В работах [3–9] мы разработали микроскопический подход к описанию реакций радиационного захвата, основанный на одномасштабной алгебраической версии модели резонирующих групп (АВМРГ). В [10] нами был предложен усовершенствованный микроскопический подход, базирующийся на многомасштабной АВМРГ. Цель настоящей работы заключается в обсуждении основных свойств этих подходов и их сопоставлении на примере зеркальных реакций радиационного захвата 3 Н(α , γ)⁷Li и 3 Не(α , γ)⁷Be, представляющих интерес для ядерной астрофизики.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДОВ

Подробные математические формулировки и детали математических реализаций одно- и многомасштабного АВМРГ-подходов для радиационного захвата представлены в наших соответствующих работах [3–10]. Основная идея этих подходов состоит в разложении волновых функций относительного движения кластеров по базису осцилляторных функций, что приводит к представлению полной волновой функции рассматриваемой ядерной системы в виде разложения в ряд по базисным функциям АВМРГ. Для двухкластерной ядерной системы базис АВМРГ определяется выражением:

$$\Psi_{J^{\pi}Mlsv} = N_{J^{\pi}lsv} \mathbf{A} \left\{ \sum_{m+\sigma=M} C^{JM}_{lm\,s\sigma} \left[\phi^{(1)}_{s_1} \phi^{(2)}_{s_2} \right]_{s\sigma} f_{vlm}(\vec{q}) \right\}, (1)$$

$$f_{vlm}(\vec{q}) = N_{vl} \, \tilde{q}^{l} L_{(v-l)/2}^{(l+1/2)}(\tilde{q}^{2}) \exp(-\tilde{q}^{2}/2) Y_{lm}(\vec{n}_{\vec{q}}), \quad (2)$$

$$N_{\nu l} = (-1)^{(\nu - l)/2} \sqrt{\frac{2 \Gamma((\nu - l + 2)/2)}{r_0^3 \Gamma((\nu + l + 3)/2)}},$$
(3)

$$\tilde{q} = q/r_0. \tag{4}$$

Здесь $N_{J^{\pi}_{lsv}}$ — нормировочная постоянная; А — оператор антисимметризации; $C_{lm\,s\sigma}^{JM}$ — коэффици-енты Клебша—Гордана; *J*, *l*, *s*, *M*, *m*, σ — полный угловой момент, относительный орбитальный



Рис. 1. Ядерный фазовый сдвиг *s*-волны в системе ${}^{4}\text{He} + {}^{3}\text{H}$.

момент, канальный спин и их проекции соответственно; $\phi_{s_1\sigma_1}^{(1)}$, $\phi_{s_2\sigma_2}^{(2)}$ – внутренние трансляционноинвариантные волновые функции первого и второго кластеров со спинами s_1 и s_2 и их проекциями σ_1 и σ_2 соответственно; f_{vlm} – нормированные осцилляторные функции; V – число осцилляторных квантов; r_0 – осцилляторный радиус.

При реализации расчетов в рамках одномасштабного ABMPГ-подхода для всех состояний ядерной системы используется единый базис ABMPГ с единственным значением осцилляторного радиуса. В случае многомасштабного ABMPГ-подхода для описания различных состояний используются различные базисы ABMPГ, отличающиеся значением осцилляторного радиуса. С физической точки зрения использование различных ABMPГ-базисов, различающихся пространственным масштабом, роль которого играет осцилляторный радиус, вполне оправдано и естественно особенно для состояний дискретного и непрерывного спектров, являющихся состояниями различных типов.

Перейдем непосредственно к обсуждению результатов расчетов для реакций ³H(α , γ)⁷Li и ³He(α , γ)⁷Be. Для описания ядерного взаимодействия использовался модифицированный потенциал Хазегавы—Нагаты [11]. На рис. 1 и 2 изображены ядерные фазовые сдвиги для *s*-волн во входных каналах рассматриваемых реакций как функции энергии относительного движения сталкивающихся ядер в системе центра масс $E_{\mu, M}$. Сплошными и штриховыми линиями изображены расчетные кривые, полученные в рамках много- и одномасштабного ABMPГ-подходов соот-



Рис. 2. Ядерный фазовый сдвиг *s*-волны в системе ${}^{4}\text{He} + {}^{3}\text{He}$.

ветственно [10]. Ссылки на извлеченные из эксперимента данные, отмеченные на рис. 1 и 2, приведены в нашей работе [10]. В области низких и средних энергий кривые очень близки друг к другу и находятся в разумном согласии с экспериментальными данными. В области относительно высоких энергий, где помимо канала радиационного захвата открыты также и другие каналы реакций, кривые начинают несколько расходиться и, кроме того, отклоняются от данных, но при этом сплошные линии лежат ближе к экспериментальным точкам.

На рис. 3 и 4 изображены астрофизические S-факторы реакций ${}^{3}H(\alpha, \gamma)^{7}Li \mu {}^{3}He(\alpha, \gamma)^{7}Be co$ ответственно, полученные как в рамках многомасштабного АВМРГ-подхода [10] (сплошные линии), так и в рамках одномасштабного [8, 9] (штриховые линии). Обозначения для экспериментальных данных на рис. 3 и 4 совпадают с обозначениями из нашей работы [10], в которой приведены ссылки на эти данные. Для реакции ³Не(α , γ)⁷Ве обе расчетные кривые находятся в хорошем согласии с экспериментом. Что касается зеркальной реакции. то во многих теоретических работах при проведении сравнений данные, отмеченные сплошными кружками на рис. 3, предполагаются наиболее надежными. В нашем случае расчетная сплошная линия хорошо ложится на эти точки, в то время как штриховая оказывается слегка завышенной. В целом, можно сказать, что расчетные кривые как для фаз упругого рассеяния, так и для астрофизических S-факторов обеих реакций находятся в достаточно хорошем согласии с экспериментальными данными, особенно учитывая разброс последних.



Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных энергетических зависимостей для астрофизического *S*-фактора реакции радиационного захвата 3 H(α , γ)⁷Li.

Рассмотрим теперь такие важные кинематические величины для рассматриваемых реакций как пороги развала конечных ядер ⁷Li и ⁷Be. Особое внимание к этим величинам обусловлено тем, что они напрямую входят в выражение для парциальных сечений реакции радиационного захвата [10]. Экспериментальные [12] и расчетные [10] значения для обоих ядер приведены в таблице. В случае одномасштабного АВМРГ-подхода расчетные значения занижены по сравнению с экспериментальными, в то время как многомасштабный АВМРГ-подход позволят точно воспроизвести их, включая энергию связи α-частицы, равную 28.296 МэВ [13].



Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных энергетических зависимостей для астрофизического *S*-фактора реакции радиационного захвата 3 He(α , γ)⁷Be.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные в работе результаты позволяют сделать следующие основные выводы. Одномасштабный АВМРГ-подход, обладая относительной простотой при реализации расчетов, позволяет одновременно описывать энергетические зависимости фаз упругого рассеяния и астрофизических *S*-факторов реакций радиационного захвата на единой основе, однако не способен достаточно корректно воспроизвести пороги развала конечных ядер. В свою очередь, в рамках многомасштабного АВМРГ-подхода удается достигнуть единого описания для всех этих вели-

Ядро	Величина	Эксперимент	Одномасштабный АВМРГ-расчет	Многомасштабный АВМРГ-расчет
⁷ Li	ε ₀	2.467	1.672	2.467
	ϵ_1	1.989	1.546	1.989
⁷ Be	ε ₀	1.586	0.828	1.586
	ε ₁	1.157	0.710	1.157

Таблица 1. Пороги развала основного ε_0 и первого возбужденного ε_1 состояний ядер ⁷Li и ⁷Be на двухкластерные системы ⁴He + ³H и ⁴He + ³He соответственно (все значения измеряются в МэВ)

чин. В целом, оба подхода являются микроскопическими и каждый из них представляет определенный интерес для теории ядерных реакций, но при этом многомасштабный АВМРГ-подход физически более обоснован и имеет большую предсказательную силу, что создает перспективы для его дальнейшего развития.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проекты №№ 16-12-10048, 19-12-00163).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Adelberger E.G., García A., Robertson R.G.H. et al. // Rev. Mod. Phys. 2011. V. 83. P. 195.
- Xu Y., Takahashi K., Goriely S. et al. // Nucl. Phys. A. 2013. V. 918. P. 61.
- 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.
- 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.

- Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M. // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 569. Art. no. 012020.
- Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M. // EPJ Web Conf. 2015. V. 86. Art. no. 00054.
- 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.
- Solovyev A.S., Igashov S.Yu., Tchuvil'sky Yu.M. // EPJ Web Conf. 2016. V. 117. Art. no. 09017.
- 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. Р. 290.
- Solovyev A.S., Igashov S.Yu. // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. Art. no. 064605.
- Kanada H., Kaneko T., Nagata S., Nomoto M. // Prog. Theor. Phys. 1979. V. 61. P. 1327.
- 12. *Tilley D.R., Cheves C.M., Godwin J.L. et al.* // Nucl. Phys. A. 2002. V. 708. P. 3.
- Audi G., Wapstra A.H., Thibault C. // Nucl. Phys. A. 2003. V. 729. P. 337.