

УДК 539.1.

С.Б. ДУБОВИЧЕНКО

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ S-ФАКТОР p^3H КАНАЛА ЯДРА 4He

Рассмотрена возможность описания новых экспериментальных данных по астрофизическому S – фактору радиационного p^3H захвата в рамках потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями.

Процесс радиационного p^3H захвата входит в водородный термоядерный цикл и вместе с реакцией $^3He + ^3He \rightarrow ^4He + 2p$ приводит к образованию стабильного ядра 4He . Астрофизический S-фактор определяет скорость такой реакции и является входным параметром математической модели процесса эволюции звезд. Рассмотрим возможность расчета S-фактора в рамках потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями и разделением орбитальных состояний по схемам Юнга.

В рамках такого подхода выполнялись расчеты дифференциальных сечений в p^3H системе для потенциалов с запрещенными состояниями и разделением по схемам Юнга [1]. Полные сечения для этих же процессов на основе потенциальной кластерной модели рассматривались нами в работе [2].

В такой модели основной вклад в сечения E1 фоторазвала ядра 4He в p^3H канал или радиационного p^3H захват дают процессы с изменением изоспина $\Delta T = 1$ [3]. Тогда нужно использовать 1P потенциал рассеяния из чистого по изоспину с $T = 1$ синглетного состояния p^3He системы, параметры которого приведены в табл.1 и потенциал основного чистого состояния 4He с $T=0$ системы p^3H . В работе [2], для основного чистого состояния с $T = 0$ приводятся три варианта взаи-

модействия, однако, здесь мы будем использовать только одно из них - его параметры даны в табл.2.

В случае переходов без изменения изоспина с $\Delta T = 0$ будем использовать потенциалы чистой синглетной 1P фазы с $T = 0$ для системы p^3H и основного состояния 4He в p^3H канале также с $T = 0$ (табл.2).

Все потенциалы записываются в гауссовом виде

$$V(r) = V_0 \exp(-\alpha r^2) + V_1 \exp(-\beta r)$$

с притягивающей V_0 и экспоненциальной отталкивающей V_1 частью, и кулоновской потенциалом обычной формы с нулевым радиусом. Параметры этих потенциалов (табл.1) строятся так, чтобы правильно описать экспериментальные фазы упругого рассеяния в p^3He системе.

На рис.1а и 1б непрерывными линиями показаны расчетные фазы для потенциалов из табл.1 и экспериментальные данные работ [5,6,7] - точки, квадратики и вертикальные линии и [8] - треугольники. Поскольку имеется несколько различных вариантов фазовых анализов в p^3He системе для синглетной 1P и триплетной 3P волн, параметры потенциала, приведенные в табл.1, подбирались так, чтобы получить определенный компромисс между разными фазовыми анализами.

Таблица 1. Потенциалы p^3He взаимодействия, чистые по

орбитальным симметриям и изоспину, и энергии связанных состояний E

Для всех потенциалов $R = 0$. В скобках даны энергии для p^3H системы, S – спин состояния.

L_J	V_0 , (МэВ)	α , (Фм^{-2})	V_1 , (МэВ)	β , (Фм^{-1})	E_{cc} , (МэВ)
1S_1	-110	0.37	+45	0.67	-9.0 (-11.4)
1P_1	-14.0	0.1	---	---	---
3S_1	-43	0.26	---	---	-3.6 (5.3)
3P_0	-10	0.1	---	---	---
3P_1	-14	0.1	---	---	---
3P_2	-20	0.1	---	---	---

Таблица 2. Чистые по схемам Юнга потенциалы взаимодействия p^3H
кластерной системы

Для всех потенциалов $R = 0$. S – спин состояния. В скобках – экспериментальная величина энергии связи p^3H [4].

L_J	V_0 , (МэВ)	α , (Фм^{-2})	V_1 , (МэВ)	β , (Фм^{-1})	E_{cc} , (МэВ)
1S_1	-63.088	0.17	---	---	-19.814 (-19.814)
1P_1	+8	0.03	---	---	---
3S_1	-70.0	0.39	+15	0.39	-1.4
3P_0	-11	0.1	---	---	---
3P_1	-19	0.1	---	---	---
3P_2	-24	0.1	---	---	---

Для более точного описания синглетных данных [8], показанных на рис. 1б треугольниками,

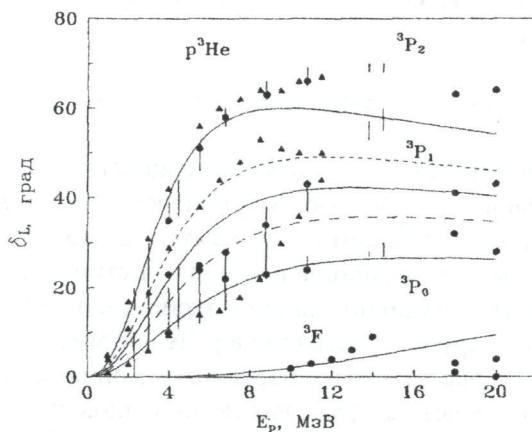


Рис.1а. Триплетные нечетные фазы упругого $p^3\text{He}$ рассеяния

Точки, квадраты и вертикальные линии – эксперимент из [5,6,7], треугольники из [8]. Кривые – результаты расчетов для различных потенциалов из табл.1.

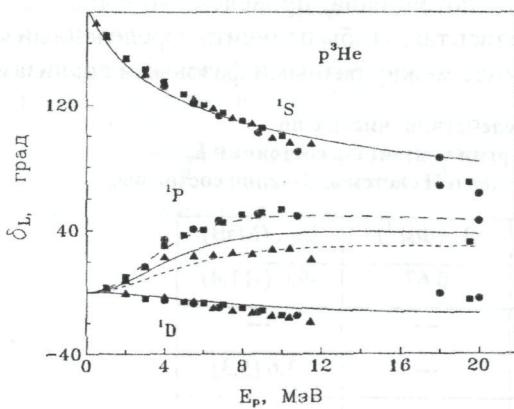


Рис.1б. Синглетные фазы упругого $p^3\text{He}$ рассеяния
Точки и квадраты – эксперимент из работ [5,6,7], треугольники из [8]. Кривые – расчеты для потенциалов из табл.1.

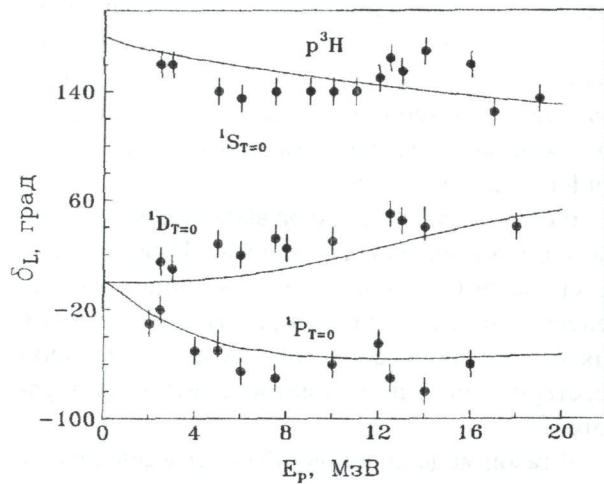


Рис.1в. Чистые со схемой {4} фазы упругого p^3H рассеяния

Точки, кривые – результаты расчетов чистых фаз для потенциалов с параметрами из табл.2.

нужен потенциал с глубиной около -11 МэВ (точечная линия на рис.1б), а фазы работ [6] воспроизводятся более глубоким взаимодействием с $V = -17$ МэВ (штриховая линия). Для воспроизведения триплетной 3P волны работы [8] глубина потенциала должна быть -17 МэВ (точечная линия на рис.1а), а для данных работ [6] - 13 МэВ (штриховая линия).

Фазы рассеяния p^3H системы находятся вполне однозначно и приводят к определенным параметрам смешанных по изоспину и схемам Юнга взаимодействий [9]. На основе известных фаз в $p^3\text{He}$ и p^3H системах строятся чистые фазы p^3H рассеяния, которые приведены на рис.1в [9]. На их основе получены чистые потенциалы p^3H взаимодействия, параметры которых приведены в табл.2. Такие взаимодействия правильно описы-

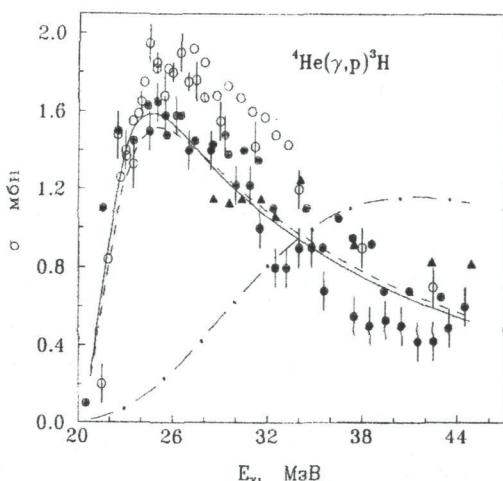


Рис.2. Полные сечения фоторазвала ядра ^4He в p^3H канал
Кривые - расчеты для потенциалов из табл.1, 2. Точки, треугольники и кружки - эксперимент из работ [10-13].

вают канальную энергию связи p^3H системы и среднеквадратичный радиус ядра ^4He [2].

На рис.2 штриховой линией приведены результаты расчета полных сечений фоторазвала ^4He в p^3H канал для переходов с $\Delta T = 1$. Поскольку ^1P потенциал p^3H системы выбирался, как некий компромисс между различными фазовыми анализами, его величина определена не однозначно. Поэтому можно несколько увеличить его глубину и принять $V = -15$ МэВ (вместо -14 МэВ) и $\alpha = 0.1 \text{ Фм}^3$.

Тогда в максимуме сечение увеличивается примерно на 0.1 мб. и несколько лучше согласу-

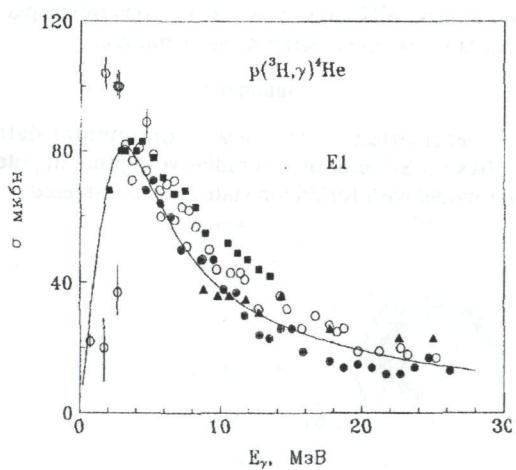


Рис.3а. Полные сечения радиационного захвата в p^3H канал

Непрерывная кривая - расчеты для потенциалов из табл.1, 2. Точки, треугольники, квадраты и кружки - эксперимент [10-13].

ется с экспериментальными данными [12,13], как показано на рис.2 непрерывной линией.

Экспериментальные полные сечения фоторазвала ^4He взяты из работ [10,11] - кружки, [12] - треугольники и [13] - точки. Видно, что разброс различных экспериментальных данных достигает 20-30%, причем более поздние измерения [12,13] лежат заметно ниже результатов, полученных ранее в работах [10, 11].

Для рассмотрения переходов без изменения изоспина с $\Delta T = 0$ необходимо использовать отталкивающий ^1P волновой потенциал из p^3H системы (см. табл.2). В этом случае, вообще не удается правильно передать даже форму экспериментальных сечений, как показано на рис.2 штрих-пунктирной линией.

На рис.3а даны расчетные сечения радиационного p^3H захвата для $\Delta T = 1$, полученные с ^1P волновым взаимодействием рассеяния глубиной -15 МэВ, которые приводят к описанию процесса фоторазвала. Экспериментальные данные взяты работ [10-13] и на момент этих расчетов были известны нам только для энергий выше 700 кэВ. Для этого же потенциала рассматривался и астрофизический S фактор, а его расчеты были выполнены при энергиях до 10 кэВ [2] (рис.3б).

Впоследствии в работах [14,15] появились новые экспериментальные данные по S-фактору при энергиях до 70 кэВ. Результаты этих измерений S-фактора взяты нами из обзора [16].

Из рис.3б видно, что расчеты сделанные нами около 15 лет назад хорошо воспроизводят S-фак-

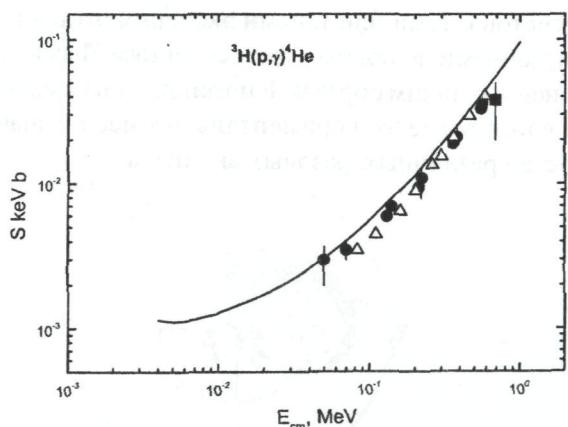


Рис.3б. Астрофизический S фактор для радиационного p^3H захвата

Непрерывная кривая - расчеты для потенциалов из табл.1, 2. Квадрат - экспериментальные данные из работ [10-13], точки - [14], треугольники [15].

тор при всех энергиях, где на сегодняшний день сделаны его измерения.

Здесь мы продолжили эти расчеты, и вычислили S-фактор при энергиях до 4 кэВ, вид, которого также приведен на рис.3б. Линейная экстраполяция S-фактора к энергии 1 кэВ дает величину около $1.3(2) \cdot 10^{-3}$ кэВ бн. В тоже время, простая экстраполяция имеющихся экспериментальных данных к 1 кэВ по трем последним точкам приводит к его значению $6(2) \cdot 10^{-3}$ кэВ бн, т.е. в два раза меньше.

В настоящее время, точность наших вычислений энергии связи в p^3H канале ядра 4He составляет около 1-2 кэВ, поэтому расчеты других характеристик при энергии, например, 2 кэВ могут содержать 100% ошибку. Имеющийся программно-вычислительный комплекс пока не может обеспечить большую точность, и именно этим обусловлен выбор энергии 4 кэВ для расчетов S-фактора. В этих расчетах массы частиц

задавались целыми числами, а константа $\frac{\hbar^2}{m_0}$ принималась равной 41.4686 МэВ Фм².

Таким образом, потенциальная кластерная модель позволяет правильно передать форму сечений фоторазвала 4He при использовании E1 переходов с $\Delta T = 1$ для рассмотренных реакций в p^3H канале. Величина расчетных сечений находится в пределах неоднозначностей различных экспериментальных результатов.

Варьируя глубину Р взаимодействия в пределах 10-20% можно несколько улучшить согласие расчетов с теми или иными экспериментальными данными по полным фотосечениям. Фазы измененных таким образом Р потенциалов находятся в интервале экспериментальных неоднозначностей различных фазовых анализов.

Удалось предсказать поведение S-фактора при энергии до 70 кэВ, а вновь сделанные расчеты до 4 кэВ позволят в будущем сравнить их с новыми экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neudatchin V.G., et.al., Phys. Rev., 1992, V.C45, P.1512; Неудачин В.Г., и др., ЭЧАЯ, 1993, Т.23, С.480.
2. Дубовиченко С.Б., ЯФ, 1995, Т.58, № 8, С.1377.
3. Gibson B.F., Nucl. Phys., 1981, V.A353, P.85.
4. Tilley D.R., et. al., Nucl. Phys., 1987, V.A474, P.1. (<http://www.tunl.duke.edu/nucldata/> HTML/A=3/03He_1987_newv.shtml)
5. Berg H., et. al., Nucl. Phys., 1980, V.A334, P.21; Kavanagh R.W., Parker P.D., Phys. Rev., 1966, V.143, P.143.
6. McSherry D., Baker S.D., Phys. Rev., 1970, V.1C, P.888; Szaloky G., Seiler F., Nucl. Phys., 1978, V.A303, P.57; Могров L., Haeberli W., Nucl. Phys., 1969, V.A126, P.225.
7. Drigo L., Pisent G., Nuovo Cim., 1967, V.LI B, P.419.
8. Tombrello T., Phys. Rev., 1965, V.138, P.40B.
- 9 Дубовиченко С.Б., Свойства легких атомных ядер в потенциальной кластерной модели. Алматы, Данекер, 2004, 248с.
10. Meyerhof W.E., et.al., Nucl. Phys., 1970, V.A148, P.211; Arkatov Yu., et al., Nucl. Phys., 1970, V.10, P.639; 1971, V.12, P.123; 1976, V.21, P.475.
11. Gemmel D.S., Jones G.A., Nucl. Phys., 1962, V.33, P.102; Gorbunov A., Phys. Lett., 1968, v.B27, p.436.
12. Bernabei R., et. al., Phys. Rev., 1988, V.C38, P.1990.
13. Balestra F., et. al., Nuovo Cim., 1977, V.A38, P.145.
14. Hahn K., et. al., Phys. Rev., 1995, V.C51, P.1624.
15. Perry J., et. al., Phys. Rev., 1955, V.99, P.1368.
16. Angulo C., Nucl. Phys., 1999, V. A656, P. 3.

Резюме

Шектелінген потенциялды кластерлік моделінің тиым салу күйіндегі астрофизикалық S- жағдайындағы радиациялық p^3H қармауына жаңа тәжірибелерді колданудағы мүмкіншілдіктер қарастырылды.

Summary

A description of the new experimental data for astrophysical S-factor of p^3H radiative capture in potential cluster model with forbidden states was considered.