УДК 539.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВОГО ВОЗБУЖДЁННОГО СОСТОЯНИЯ ЯДРА 6He НА ОСНОВЕ РАСЧЁТОВ AB INITIO С РЕАЛИСТИЧЕСКИМ НУКЛОН-НУКЛОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

М.К. Ефименко, И.А. Мазур

*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)*

E-mail: 2019105727@pnu.edu.ru.

По данным расчётов ab initio с реалистическим нуклон-нуклонным взаимодействием были определены

значения энергии и ширина резонанса первого возбуждённого состояния 6He. Для решения использовались методы HORSE, SS HORSE и так же параметризация при помощи обратной задачи рассеяния в выбранном формализме.

Целью представленной работы является определение энергии и ширины первого возбуждённого состояния по данным расчётов ab initio с реалистическим нуклон-нуклонным взаимодействием для первого возбуждённого состояния ядра 6He и основного состояния 4He.

## Метод HORSE

Harmonic Oscillator Representation of Scattering Equation (осцилляторное представление уравнений теории рассеяния) или HORSE является одним из эффективных методов расчёта параметров рассеяния квантовой частицы в поле потенциала.

Основная идея метода состоит в представлении решения радиального уравнения Шредингера

в виде разложения по бесконечному набору радиальных осцилляторных функций:

где – осцилляторный радиус, – радиальное квантовое число, – гамма-функция, – обобщённый полином Лагерра.

В формализме HORSE фазы рассеяния могут быть вычислены как:

где – недиагональный элемент оператора кинетической энергии, определяется через и – собственные значения и собственные векторы соответственно.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где – размерность базиса, и и – синусо- и косинусоподобные функции [1].

Более всего метод HORSE подходит для двухчастичных задач, где число базисных векторов т.е. практически совпадает с номером модельного пространства. Однако в случае многочастичных рассеяний число начинает весьма резко возрастать, по отношению к , что затрудняет расчёты. Кроме собственных значений энергии , при многоканальном рассеянии необходимо проецировать на интересующий канал, что так же усложняет задачу численного расчёта с разумной точностью [5].

## Метод SS HORSE

Основная идея метода SS HORSE заключается в том, чтобы вычислять значения фазы рассеяния и S-матрицу только в значениях энергии равных собственным, т.е. . В таком случае выражение для фазы рассеяния значительно упростится

и перестанет включать в себя информацию о собственных векторах . Так же нет необходимости знать все значения : достаточно одного или нескольких низколежащих состояний, рассчитанных относительно соответствующего порога реакции.

Вариация параметров метода и позволяет получить значения фазы рассеяния в некотором интервале энергий.

**Обратная задача рассеяния**

В J-матричном формализме возможно частичное решение обратной задачи рассеяния [6]. Зависимость при этом считается известной.

Компоненты волновой функции в осцилляторном представлении должны быть конечными при любом значении энергии, т.е. в том числе и при . Это возможно только когда

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где — размер матрицы, используемой для решения обратной задачи рассеяния.

Выражение (2) позволяет вычислить собственные значения энергии, в то время как собственные векторы, так же использующиеся в (1), вычисляются следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Следует отметить, что на практике рассчитанные таким образом элементы матрицы потенциала в общем случае не точно удовлетворяют условию полноты , однако значение можно найти не по формуле (2), а искусственно сделать его удовлетворяющим условию полноты, что не должно портить описания фаз для .

**Используемые приближения для трёхчастичной задачи**

Переход к гиперкоординатам удобен только тогда, когда ни одна пара не выделяется в смысле образования связанных состояний и рассеяния на энергетической поверхности (истинно демократическое рассеяние). В этом случае удобно отделить центр масс и перейти к A-1 координатам Якоби [7], и после — использовать метод гиперсферических гармоник, в котором все они сводятся к гиперрадиусу: и гиперугол. При разложении волновой функции по функциям -мерного гармонического осциллятора с частотой она распадается на угловую и радиальную части, так же, как в двухчастичной задаче.

Полученная система связанных уравнений формально эквивалентна системе, описывающей многоканальное рассеяние в системе с гиперсферическими каналами где К — гипермомент, а — набор остальных квантовых чисел, и каналы рассеяния имеют один и тот же порог.

При этом вклад кинетической энергии в матрицу гамильтониана диагонален по индексам, различающим каналы рассеяния [7], при этом матрица потенциальной энергии не является диагональной по ним. Считая, что в исследуемой задаче распад происходит достаточно быстро, можно использовать приближение, при котором учитывается связь открытого канала с c искусственно закрытыми каналами во внешней области, однако с учётом — во внутренней.

Тогда по аналогии с методом HORSE при достаточно больших n матричные элементы потенциальной энергии становятся малы по сравнению с матричными элементами кинетической, поэтому их можно отбросить начиная с некого , и решение строится по аналогии с методом HORSE через синусо- и косинусоподобные функции.

## Результаты расчётов

Расчёт производится для системы двух нейтронов в составе ядра 6He , а это значит – для системы из трёх частиц (), каждая пара которых не образует связанных состояний. Следовательно, мы можем использовать описанные выше приближения. Кроме этого, будем считать, что распад 6He происходит быстро, а выбранный канал превалирует над остальными.

Исходными данными являются значения нижайших состояний собственной энергии рассчитанных при различных и для 6He и для реалистического NN взаимодействия Daejeon16 [8]. Энергия относительного движения нейтронов и ядра может быть вычислена следующим образом:

Полученные данные являются входными для использования метода SS HORSE. Он использовался совместно с описанными приближениями, при этом . Полученные фазы рассеяния представлены на рисунке 1. Однако не во всех достигнута достаточная сходимость, поэтому результаты были подвергнуты предварительной обработке. В ней исключены значения с низкими , образующие петли, а так же результаты для маленьких .



Рис. 1. Фазы, рассчитанные методом SS HORSE.

Метод SS HORSE позволяет получить значения фаз лишь при отдельных значениях энергии, а для HORSE необходимо знать такие связанные с потенциалом параметры как собственные векторы исследуемой системы, которые возможно найти при помощи обратной задачи рассеяния. Однако для её применения в свою очередь так же необходимо иметь полную зависимость , что было достигнуто аппроксимацией данных.

Решение обратной задачи включает в себя следующие шаги: определение собственных значений энергии , определение коэффициентов , вычисление элементов , уточнение коэффициента , а так же минимизация отклонения от кривой аппроксимации путём вариации последнего собственного значения . Выражение для оценки отклонения:

где — фазы, полученные в ходе расчётов методом HORSE, — результат аппроксимации, — правая граница области расчётов.

Входными параметрами (матрица ) и . На выбор накладывала ограничение необходимость, чтобы получаемые собственные значения не отстояли слишком далеко от исходного набора данных. Результаты решения обратной задачи представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты решения обратной задачи квантового рассеяния

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  |  0.6812 | 1.3618 |  3.6084 | 7.1976 | 12.4125 | 21.1241 |
|  | -6.1396 | 1.3632 | -0.7056 | 0.5004 | -0.3651 |  0.2251 |
|  |  4.92E-03 | 3.19E-02 |  9.98E-02 | 0.1914 |  0.3185 |  0.3533 |

Полученные результаты были использованы для прямого расчёта, результат которого представлен на рисунке 2 совместно с отобранными для этого фазами.



Рис. 2. Итоговая фаза рассеяния.

После этого для определения энергии и ширины резонанса были вычислены значения первых производных фазы рассеяния по энергии. Эта зависимость имеет пик, который с большой достоверностью аппроксимируется гауссианом, формула и параметры которого представлены на рисунке 3.

При этом вторая производная равна нулю при значении энергии совпадающим с серединой пика (которая на рисунке 3 обозначена как ), а за ширину резонанса была принята ширина на полувысоте (FWHM). Согласно соответствующим параметрам, энергия первого возбуждённого состояния составила МэВ, а его ширина МэВ.

Соответствующие экспериментальные значения из сборника [1]: МэВ и MэВ.



Рис. 3. Зависимость от .

## Заключение

По данным расчётов ab initio с реалистическим нуклон-нуклонным взаимодействием для первого возбуждённого состояния ядра 6He и основного состояния 4He были определены значения энергии первого возбуждённого состояния для и ширина резонанса, при этом последняя в пределах погрешностей совпала с известными данными.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 0818-2020-0005 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования “Центр данных ДВО РАН”.

## Список использованных источников

1. *D. R. Tilley [et al.]* “Energy levels of light nuclei A=5, A=6, A=7”. В: Nucl.Phys. A 708 (2002), с. 3—163.
2. *С.А. Зайцев.* “Трехдиаональная параметризация взаимодействия в дискретном подходе к проблеме рассеяния”. В: Теоретическая и математическая физика (1998).
3. *С.А. Зайцев, Ю.Ф. Смирнов и А.М. Широков.* “Истинно многочастичное рассеяния в осцилляторном представлении”. В: Теоретическая и математическая физика (1998).
4. *Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц*. Теоретическая физика том третий. Москва: НАУКА, 1989.
5. *Мазур И.* Исследование резонансных ядерных процессов в микроскопических подходах с использованием осцилляторного базиса : Диссертация / И.А. Мазур.
6. *A. M. Shirokov [et al.]* . Inverse scattering J -matrix approach to nucleon-nucleus scattering and the shell model // Phys. Rev. C. — 2009. — Jan. — Vol. 79, issue 1. — P. 014610.
7. *Lurie Y. a., Shirokov A. M*. Loosely bound three-body nuclear systems in the J -matrix approach // Annals of Physics. — 2004. — Vol. 312. — P. 284–318.
8. *A.M. Shirokov [et al.].* N3LO NN interaction adjusted to light nuclei in ab exitu approach //
Physics Letters B. — 2016. — Т. 761. — С. 87—91.