

На правах рукописи

Куликов Василий Андреевич

**Исследование ядер в модели оболочек без инертного кора с
нуклон-нуклонным взаимодействием, полученным в J -матричном
формализме обратной задачи рассеяния**

специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на Кафедре физики атомного ядра и квантовой теории столкновений Физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель

Широков Андрей Михайлович
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник НИИЯФ МГУ

Официальные оппоненты

Зеленская Наталья Семеновна
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник НИИЯФ МГУ

Фетисов Владимир Николаевич
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник ФГБУН “Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН”

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО “Тихоокеанский
государственный университет”,
Хабаровск

Защита состоится “___” _____ г. в ___ час. на заседании диссертационного совета Д501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу 119991, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 5, НИИЯФ МГУ (“корпус 19”), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу 119192, г. Москва, Ломоносовский проспект, дом 27.

Автореферат разослан “___” _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д501.001.77
доктор физико-математических наук,
профессор

С. И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Описание ядер на основе нуклон-нуклонного взаимодействия и развитие такого взаимодействия является важнейшей задачей теории атомного ядра. В разное время предлагались различные подходы к решению этой задачи. Разрабатывались специализированные модели эффективного сильного взаимодействия, описывающие только узкий круг ядер в весьма ограниченном модельном пространстве какой-либо модели, например, модели оболочек, но при этом не воспроизводящие данные NN -рассеяния. Современное состояние теории ядра требует такие NN -потенциалы, которые способны описывать свойства широкого круга ядер, а также данные по NN -рассеянию.

В течение долгого времени основным подходом в рамках решения этой задачи было использование теории мезонного обмена. Само предсказание π -мезона Юкавой было сделано на основе феноменологической модели NN -взаимодействия. После этого в рамках этого подхода были построены различные потенциалы, например, боннский, парижский.

Развитие NN -потенциалов ускорило с появлением нейменгенского фазового анализа. Для этого сначала был проведен анализ всех опубликованных к 1992 году данных по нуклон-нуклонному рассеянию в диапазоне энергий 0–350 МэВ и были созданы базы данных, в которых были оставлены только достоверные, согласованные друг с другом результаты с небольшими погрешностями. Появление нейменгенского фазового анализа дало толчок к разработке NN -потенциалов, описывающих данные NN -рассеяния с высокой точностью, так как стало возможным подгонять NN -взаимодействие отдельно в каждой парциальной волне. Такие потенциалы были названы реалистическими. Важным параметром для оценки того, насколько точно потенциал позволяет описывать NN -данные, является величина χ^2/datum , получаемая на основе сравнения предсказаний, полученных с помощью потенциала, с базами данных, введенными нейменгенской группой. Так, лучшие, из существовавших к моменту появления нейменгенского фазового анализа потенциалы (боннский, парижский) позволяли описывать NN -данные с $\chi^2/\text{datum} \approx 2$. После появления нейменгенского анализа появились потенциалы с χ^2/datum ,

Таблица 1: Значения χ^2/datum для различных широко используемых сейчас NN -потенциалов и нейменгенского фазового анализа (PSA 1993).

	Число данных	Диапазон энергий (МэВ)	CD-Bonn	AV'18	PSA 1993	Idaho N3LO	JISP16
База <i>np</i> -дан- ных 1999 г.	3058	0–350	1.02	1.07	0.99	1.10 ¹	1.05

близким к единице. Для сравнения, в табл. 1 приведены значения χ^2/datum для некоторых потенциалов, активно используемых сейчас для расчетов ядер. Из NN -взаимодействий, построенных в мезонном подходе, наиболее популярными сейчас являются NN -потенциалы CD-Bonn и Argonne v_{18} .

Рассуждая о фундаментальности современных потенциалов, построенных в рамках теории мезонного обмена, необходимо отметить, что им присуща общая черта — для увеличения точности описания экспериментальных NN -данных в эти взаимодействия вводят различные феноменологические подгонные параметры, не связанные с мезонной теорией, и допускают определенную несогласованность, например, зависимость констант связи от углового момента.

Еще в 70-х годах появились NN -потенциалы, при построении которых пытались тем или иным образом учесть роль кварковой структуры нуклонов. Одним из таких потенциалов является московский потенциал, дальнейшим развитием которого явилась дибарионная модель ядерного взаимодействия. Эти потенциалы также включают феноменологические параметры.

Современный этап развития подхода, учитывающего кварковую природу нуклонов, связан с киральной эффективной теорией поля. На данный момент разработан и используется в расчетах NN -потенциал N3LO (next-to-next-to-next-to leading order), построенный на основе этой теории. С помощью такого взаимодействия в принципе возможно описывать NN -данные с высокой точностью, так как увеличение точности описания экспериментальных данных напрямую связано с включением более высоких порядков теории возмуще-

¹Значение дано для диапазона энергий 0–290 МэВ

ния.

Помимо высокоточного описания NN -данных, сильное взаимодействие должно воспроизводить свойства многочастичных систем. Для обеспечения этого в большинстве моделей сильного взаимодействия при расчетах атомных ядер учитываются трехчастичные силы, что позволяет с высокой точностью описывать характеристики ядер, но требует значительного увеличения мощности суперкомпьютеров по сравнению с расчетами с двухчастичным взаимодействием в таком же модельном пространстве. Соответственно, круг ядер, которые с учетом мощности существующих суперкомпьютеров можно описать при учете NNN -сил, значительно уже по сравнению с ядрами, описываемыми только NN -взаимодействием. Здесь стоит отметить, что зачастую используемые в NNN -силах параметры не согласованы с теми же параметрами в NN -силах. Исключением является NN -взаимодействие N3LO, комбинируемое с NNN -потенциалом N2LO.

В данной работе развивается NN -взаимодействие типа JISP (J -matrix inverse scattering potential), полученное J -матричным методом обратной задачи рассеяния. В отличие от вышеприведенных взаимодействий, этот потенциал не связан с мезонной теорией или квантовой хромодинамикой, а получен подгонкой под NN -данные. Это взаимодействие также является реалистичным и позволяет рассчитывать характеристики ядер с $A \leq 16$ без использования трехчастичных сил. Расчетам с данным взаимодействием посвящено приблизительно 25 работ различных научных групп. В данной работе решается и другая важная задача теории атомного ядра — описание различных характеристик ядер на основе нуклон-нуклонного взаимодействия. Характеристики ядер рассчитываются нами в рамках актуального подхода *ab initio*, который предполагает проведение расчетов из первых принципов, без использования модельных приближений. Так, представленные в работе результаты получены методом полной конфигурации без инертного кора (No-core full configuration — NCFC) [1], основанном на экстраполяции результатов модели оболочек без инертного кора, в литературе известной как No-core shell model (NCSM) [2], в которой используется осцилляторный базис модели оболочек, а все нуклоны считаются спектроскопически активными, то есть не вводится понятие инертного кора. Метод NCFC апробирован в многочисленных рас-

четах, неоднократно его результаты для различных ядер сопоставлялись как нами, так и другими авторами с результатами, полученными другими методами с теми же NN -взаимодействиями. Достоверность получаемых в NCFC результатов была убедительно продемонстрирована в работе [3], где предсказывались энергия связи и спектр ядра ^{14}F , которые были впоследствии подтверждены экспериментально [4].

Разработка потенциалов сильного взаимодействия, позволяющих с высокой точностью описывать NN -данные и свойства достаточно широкого круга ядер, и расчет этих свойств является актуальной задачей современного этапа развития теории атомного ядра.

Цель диссертационной работы.

Целью работы являлось широкомасштабное систематическое исследование энергий связи ядер s - и p -оболочек в подходе *ab initio*, полученных на основе NN -потенциала JISP16, анализ полученных результатов и формулировка на этой основе вывода о необходимости дальнейшей модификации NN -потенциала JISP16 с целью улучшения описания энергий связи и спектров ядер и проведение этой модификации в случае необходимости. Эту модификацию можно осуществить с помощью фазово-эквивалентных преобразований.

Кроме того, предполагалось получить и апробировать в расчетах на примере ядер ^3H и ^4He новый тип фазово-эквивалентных преобразований, не изменяющих волновую функцию дейтрона. Такие преобразования могут быть полезны для дальнейшей работы по уточнению NN -взаимодействий для описания свойств атомных ядер.

Основные результаты, полученные в диссертации.

1. Проведен анализ описания свойств легких ядер на основе реалистического нелокального NN -взаимодействия JISP16 без использования NNN -сил. Для этого осуществлено систематическое широкомасштабное исследование энергий основных и возбужденных состояния ядер с $A \leq 16$, рассчитанных методами модели оболочек без инертного кора с последующей экстраполяцией результатов на случай бесконечного базиса. Исследованы все состояния с шириной менее 300 кэВ во всех ядрах s - и p -оболочки, кроме зеркальных ядер, из которых исследовалось лишь одно ядро с $Z \leq N$ и кроме ядер ^{15}C , ^{16}C . Показано, что с помощью взаимодействия JISP16 можно с высокой точностью описывать энергии связи ядер s - и начала p -оболочки. В частности, с помощью этого потенциала, получено правильное значение спина и четности основного состояния ядра ^{10}B . Однако ядра конца p -оболочки в расчетах с этим взаимодействием получаются пересвязанными, из чего был сделан вывод о необходимости дальнейшей модификации потенциала.
2. Посредством фазово-эквивалентных преобразований из NN -потенциала JISP16 было получено новое NN -взаимодействие JISP16₂₀₁₀. Этот потенциал был апробирован в расчетах ядер методами модели оболочек без инертного кора с последующей экстраполяцией результатов, результаты которых показали, что это взаимодействие, также как и JISP16, позволяет с высокой точностью описывать ядра s -оболочки, а энергии основных состояний ядер p -оболочки, рассчитанные со взаимодействием JISP16₂₀₁₀, лежат значительно ближе к экспериментальным значениям, чем энергии тех же ядер, рассчитанные с потенциалом JISP16.
3. Предложен новый тип фазово-эквивалентных преобразований (ФЭП) — преобразование DET-PET, позволяющее преобразовывать потенциал таким образом, что сохраняется не только описание фаз NN -рассеяния, как в обычных ФЭП, но и волновая функция дейтрона и, следовательно, все наблюдаемые дейтрона. На основании расчетов ^3H и ^4H со взаимодействием JISP16 и полученных из него путем DET-PET, была

изучена корреляция энергий связи этих ядер и было показано, что предложенное нами преобразование DET-PET позволяет изменять энергию связи ${}^4\text{He}$ в интервале от 21.25 до 30.41 МэВ, то есть, преобразованное с помощью DET-PET NN -взаимодействие может изменять энергию основного состояния ядра ${}^4\text{He}$ более чем на 7 МэВ от его изначального значения, полученного со взаимодействием JISP16. В случае ядра ${}^3\text{H}$, диапазон изменения энергии связи составляет $7.21 \leq E_t \leq 8.67$ МэВ, то есть энергия связи изменяется более чем на 1 МэВ от исходного значения, рассчитанного с JISP16.

Научная новизна.

Использование новейших методов расчетов (NCFC) и мощнейших суперкомпьютеров позволило описать в едином подходе с одним и тем же взаимодействием широкий круг ядер и получить результаты, находящиеся на переднем крае науки. Предложена новая версия NN -взаимодействия — потенциал JISP16₂₀₁₀. Предложенное нами преобразование DET-PET является новым типом ФЭП.

Практическая значимость работы.

Результаты могут быть использованы в исследованиях структуры ядра и ядерных реакций; результаты могут быть использованы для предсказания экспериментальных данных.

Личный вклад автора.

Большая часть расчетов энергий связи ядер с использованием потенциалов JISP16 и JISP16₂₀₁₀, представленных в данной работе, проведена автором на суперкомпьютерах Franklin и Nopper. Расчеты, связанные с преобразованием DET-PET, проведены автором самостоятельно с использованием вычислительных мощностей суперкомпьютерного центра Iowa State University и суперкомпьютера Ломоносов.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [K1]–[K7], кроме того, результаты представлены в тезисах конференций [K8]–[K13]. Эти результаты неоднократно обсуждались на семинарах НИИЯФ МГУ и были доложены на автором на международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра “Ядро-2011” (г. Саров), конференциях “Ломоно-

сов” (г. Москва) и конференции “Nuclear theory in the supercomputing era” (г. Хабаровск).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация включает 9 таблиц, 19 рисунков и 79 ссылок на цитируемую литературу.

Содержание работы

Во Введении содержится краткое изложение истории проблемы разработки нуклон-нуклонного взаимодействия, дан обзор методов *ab initio* расчетов свойств ядер, обсуждаются области их применения и обосновывается выбор метода NCFC для получения результатов, представленных в диссертации. Сформулирована цель диссертации, обосновывается ее актуальность, перечислены основные этапы апробации результатов диссертации и указаны ссылки на основные работы по теме, а также дано распределение материала по главам.

В первой главе кратко описан J -матричный метод обратной задачи рассеяния, который использовался при построении потенциалов типа JISP, описаны фазово-эквивалентные преобразования (ФЭП), использованные для уточнения этих потенциалов. Данные преобразования позволяют изменять потенциал таким образом, что сохраняется описание данных по NN -рассеянию, но при этом модифицируются наблюдаемые, полученные в расчетах многочастичных систем. Использование ФЭП позволяет улучшать описание ядер, не изменяя высокоточного описания NN -данных потенциалами типа JISP. В первой главе также описаны методы расчетов в модели оболочек без инертного кора (NCSM) [1] и её дальнейшего расширения на случай бесконечного базиса — метода NCFC [2]. В этой главе обсуждаются на конкретных примерах сложности получения результатов для энергий основных и возбужденных состояний различных ядер с использованием взаимодействия JISP16. Представлены результаты систематического широкомасштабного исследования ядер со взаимодействием JISP16, среднеквадратичное отклонение которых от экспериментальных данных сравнивается с данными из расчетов, про-

веденных со взаимодействием AV'18 в комбинации с NN -силами Illinois7. Часть этих результатов для основных состояний ядер представлена на рис. 1.

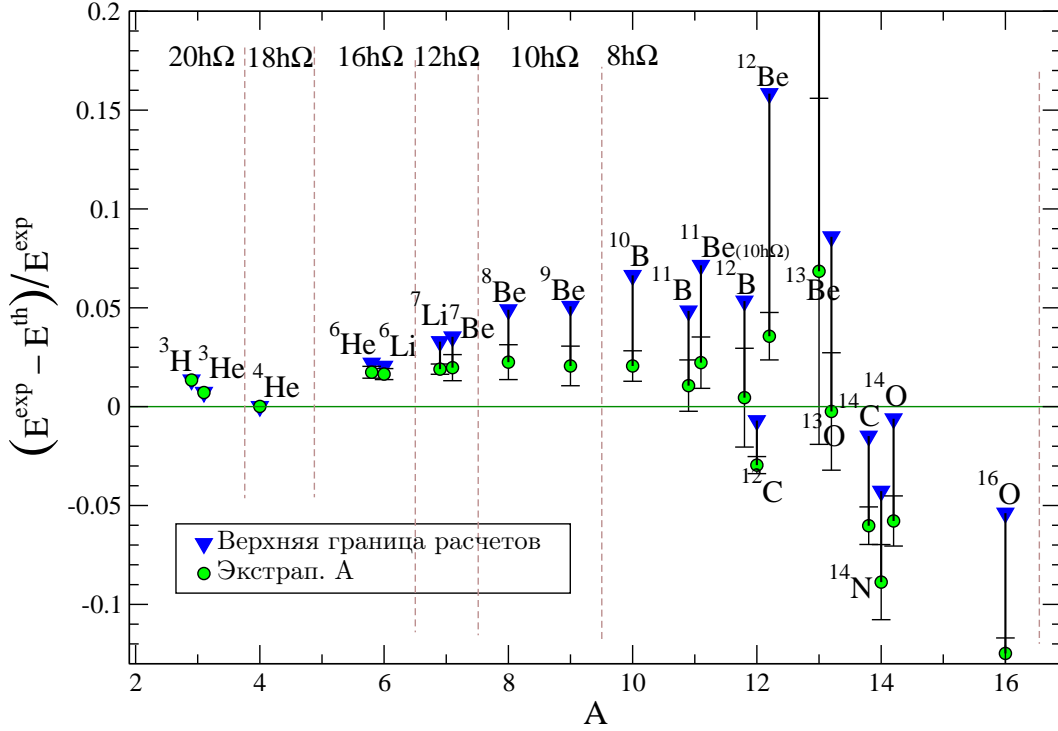


Рис. 1: Отклонения от экспериментальных значений энергий основных состояний ядер, рассчитанных в подходе модели оболочек без инертного кора с использованием JISP16 (треугольники, направленные вниз) и с использованием экстраполяций на основе NN -взаимодействия JISP16 (кружки), нормированные на экспериментальные значения.

По результатам данного исследования сделаны выводы о том, что потенциал JISP16 позволяет хорошо описывать ядра с $A \leq 12$ и нуждается в доработке с точки зрения описания более тяжелых ядер. Также в данной главе представлены результаты расчетов среднеквадратичного радиуса и квадрупольного момента ядра ${}^6\text{Li}$.

Во второй главе предпринята попытка уточнения потенциала JISP16 с помощью фазово-эквивалентных преобразований. Полученная нами новая версия взаимодействия — потенциал JISP16₂₀₁₀ — исследована с позиций точности описания энергий основных состояний и спектров ряда ядер в диапазоне $2 \leq A \leq 16$. Полученные результаты для основных состояний ядер показаны на рис. 2.

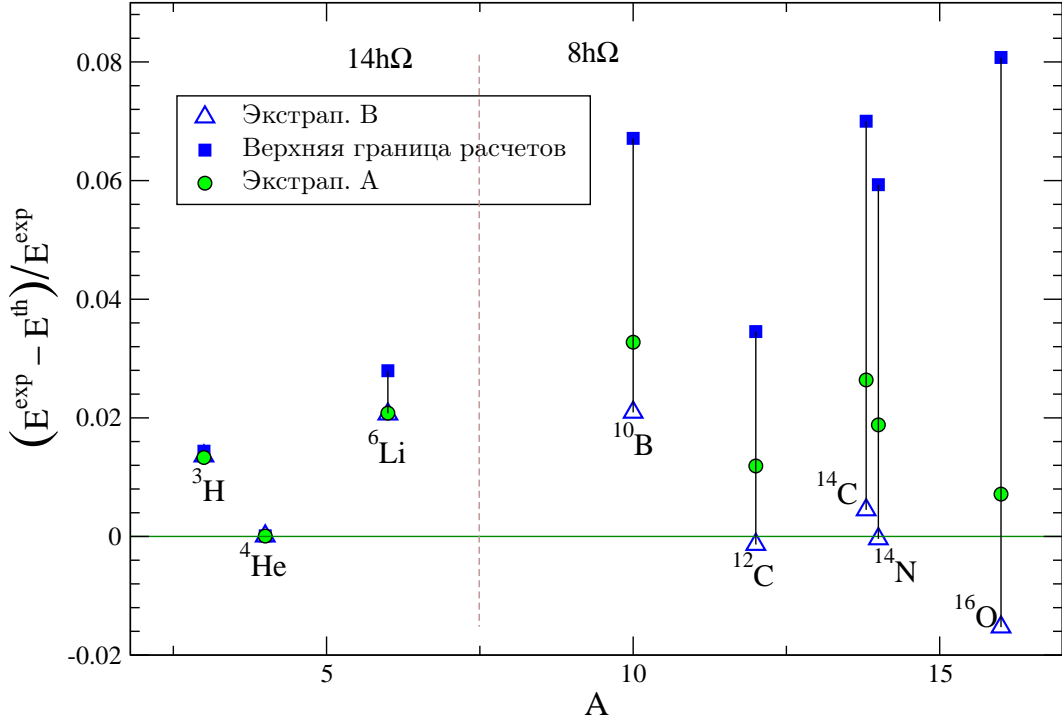


Рис. 2: Отклонения от экспериментальных значений энергий основных состояний ядер, рассчитанных в подходе NCSM (квадраты) и методами экстраполяции А (кружки) и экстраполяции В (треугольники) с использованием JISP16₂₀₁₀.

Было предпринято сравнение результатов, полученных с потенциалами JISP16 и JISP16₂₀₁₀ в расчетах всех ядер, указанных на рисунке 2. Для энергий основных и возбужденных состояний этих ядер вычислено их среднеквадратичное отклонение Δ от экспериментальных данных (см. табл. 2). Расчет этого отклонения проводился и для энергий возбуждения.

Расчет осуществлялся как для отклонения абсолютных величин:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i^{exp} - E_i^{th})^2}, \quad (1)$$

так и для относительных величин

$$\Delta_{rel} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i^{exp} - E_i^{th}}{E_i^{exp}} \right)^2}, \quad (2)$$

и энергий на нуклон

$$\Delta_A = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i^{exp} - E_i^{th}}{A_i} \right)^2}, \quad (3)$$

Таблица 2: Сравнение среднеквадратичного отклонения (МэВ) для результатов, полученных с помощью экстраполяции V для потенциалов JISP16 и JISP16₂₀₁₀. В скобках даны ссылки на формулы, по которым осуществлялся расчет.

Параметр	JISP16	JISP16 ₂₀₁₀
Абсолютная энергия (МэВ) (1)	4.4	2.9
Энергия возбуждения (МэВ) (1)	1.33	2.34
Относительная энергия (2)	0.054	0.039
Энергия на нуклон (МэВ) (3)	0.39	0.24
Энергия основного состояния (МэВ) (1)	8.0	0.9

где A_i — массовое число соответствующего ядра, E_i^{exp} — экспериментальное значение энергии, а E_i^{th} — полученное в расчетах NCFC значение энергии. Расчет среднеквадратичного отклонения для энергий возбуждения осуществлялся по формуле (1), в которую подставлялись энергии возбуждения уровней. Введение относительных величин (2), (3) позволило учитывать вклад от ошибок в расчетах легких и тяжелых ядер более адекватно.

В результате было показано, что взаимодействие JISP16₂₀₁₀ в целом позволяет улучшить описание энергий связи ядер p -оболочки, но при этом несколько ухудшает описание спектров исследованных ядер.

В третьей главе вводится новый тип фазово-эквивалентных преобразований — преобразование DET-PET, которое, как и обычные ФЭП, позволяет изменять потенциал вне массовой поверхности, но при этом не модифицирует его на массовой поверхности и, кроме того, оставляет неизменной волновую функцию дейтрона. Это преобразование используется для модификации потенциала JISP16 и с модифицированным взаимодействием рассчитываются энергии связи ядер ${}^3\text{H}$ и ${}^4\text{He}$, строится и изучается их корреляция — так называемая линия Тьона [5]. Пример такой корреляции показан на рис. 3. Здесь кривые, обозначенные как $0s2s1s3s^+$ и $0s2s1s3s^-$ соответствуют результатам, полученным с различными DET-PET-преобразованиями. На рисунке приведены результаты, полученные в расчетах с другими моделями сильного взаимодействия, учитывающими как двухчастичные, так и двухчастичные в комбинации с трехчастичными силы.

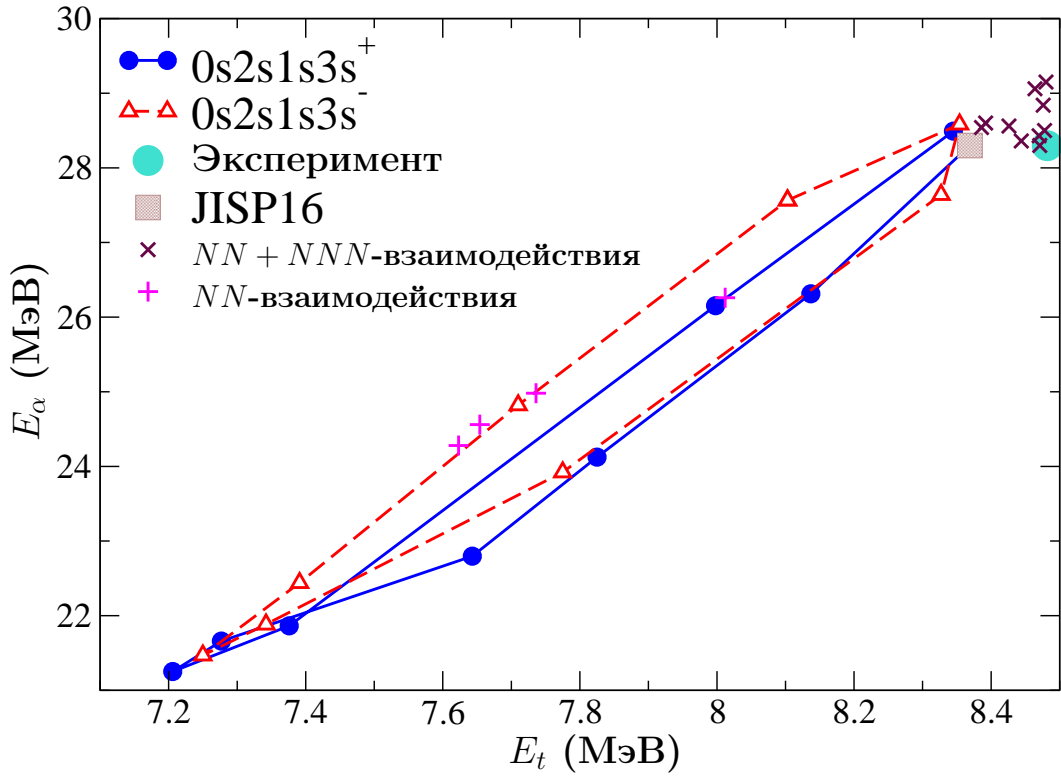


Рис. 3: Линия Тьона, полученная со взаимодействием JISP16, преобразованном с помощью DET-PET в сравнении с результатами, полученными с различными моделями NN - и $NN + NNN$ -взаимодействия.

Линия Тьона была изучена для нескольких различных типов DET-PET. По результатам этого исследования сделаны выводы о том, что преобразование DET-PET позволяет изменять потенциал таким образом, что рассчитываемая энергия связи меняется в заметных пределах (порядка 1 МэВ для ${}^3\text{H}$ и 7 МэВ для ${}^4\text{He}$), а корреляция энергий связи этих ядер может заметно размываться (см. рис. 3).

Таким образом, DET-PET может использоваться для модификаций потенциалов, направленных на улучшение описания свойств ядер, и оставляющих неизменными волновые функции дейтрона.

В заключении сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Список публикаций, отражающих основное содержание работы.

- К1. А. М. Широков, В. А. Куликов, А. И. Мазур, Е. А. Мазур, П. Марис, Дж. П. Вэри. “Развитие реалистического NN -взаимодействия JISP16.” Изв. РАН. Сер. физ. 2010, Т. **74**. С. 571.
- К2. А. М. Широков, Дж. П. Вэри, В. А. Куликов, П. Марис, А. И. Мазур, Е. А. Мазур. “Легкие ядра в подходе *ab initio* с реалистическим NN -взаимодействием, полученным методами обратной задачи рассеяния.” Изв. РАН. Сер. физ. 2011, Т. **75**. С. 499.
- К3. А. М. Широков, В. А. Куликов, А. И. Мазур, Дж. П. Вэри, П. Марис. “Фазово-эквивалентное преобразование, не изменяющее свойств связанной системы и его проявление в многочастичных системах.” Изв. РАН. Сер. физ. 2012, Т. **76**. С. 573.
- К4. А. М. Shirokov, V. A. Kulikov, A. I. Mazur, J. P. Vary, P. Maris. “Deuteron-equivalent and phase-equivalent interactions within light nuclei.” Phys. Rev. C. 2012. V. **85**. 034004.
- К5. А. М. Shirokov, V. A. Kulikov, P. Maris, A. I. Mazur, E. A. Mazur, J. P. Vary. ” NN Interaction JISP16: Current Status and Prospect.” EPJ Web of Conf. 2010. V. **3** (19th Int. IUPAP Conf. on Few-Body Problems in Phys.). 05015 [arXiv: 0912.2967 (2009).]
- К6. А. М. Shirokov, V. A. Kulikov, P. Maris, A. I. Mazur, E. A. Mazur, J. P. Vary. “New development of realistic J -matrix inverse scattering NN interaction and *ab initio* description of light nuclei.” In: The 3rd Int. Conf. “Current Problems in Nucl. Phys. and Atomic Energy” (NPAE—Kyiv2010). Proceedings. June 7–12, 2010. Kyiv, Ukraine. Kyiv: 2011. Part I. P. 321 [arXiv: 1009.2993 (2010).]
- К7. А. М. Shirokov, V. A. Kulikov, P. Maris, A. I. Mazur, J. P. Vary. “Inverse scattering NN -interaction JISP and *ab initio* theory of light nuclei.” Вестник ТОГУ. 2013 Т. **29**. 17.

- К8. В. А. Куликов, А. М. Широков, Дж. П. Вэри, П. Марис. “Развитие реалистического NN -взаимодействия JISP16.” В сб.: 59 Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2009». Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты ядерной физики: от космоса до нанотехнологий. 15-19 июня 2009, Чебоксары, Россия. СПб.: 2009. С. 193.
- К9. A. M. Shirokov, V. A. Kulikov, P. Maris, A. I. Mazur, E. A. Mazur, J. P. Vary. “New development of realistic J -matrix inverse scattering NN interaction and *ab initio* description of light nuclei.” In: The 3rd Int. Conf. “Current problems in nucl. phys. and atomic energy” (NPAE—Kyiv2010). Book of abstracts. June 7–12, 2010, Kyiv, Ukraine. Kyiv: 2010. P. 89.
- К10. A. M. Shirokov, J. P. Vary, P. Maris, A. I. Mazur, E. A. Mazur, V. A. Kulikov. “Light nuclei in *ab initio* approach with realistic inverse scattering NN -interaction.” In: LX Int. Conf. on Nucl. Phys. «NUCLEUS 2010», Methods of Nucl. Phys. for Fempto- and Nanotechnologies. Book of Abstracts, July 6–9, 2010, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: 2010. P. 206.
- К11. В. А. Куликов, А. М. Широков, Дж. П. Вэри, П. Марис. “Фазово-эквивалентное преобразование, не изменяющее свойств связанной системы, и его проявление в многочастичных системах.” В сб.: 61 Международная конференция «Ядро-2011» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. 10-14 октября 2011, Саров, Россия. Саров: 2011. С. 140.
- К12. А. М. Широков, А. И. Мазур, В. А. Куликов, Дж. П. Вэри, П. Марис. “Структура ядра с NN -взаимодействием JISP.” В сб.: 61 Международная конференция «Ядро-2011» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. 10-14 октября 2011, Саров, Россия. Саров: 2011. С. 51.
- К13. Andrey M Shirokov, J.Vary, P.Maris, A. I. Mazur, V.A.Kulikov. “Oscillator basis, scattering and nuclear structure.” In: Hites 2012. Horizons of Innovative Theories, Experiments, and Supercomputing in Nuclear Physics. Int. Conf.

in honor of Prof. Jerry P. Draayer's 70th Birthday. Book of Abstracts, June 4–7, 2012, New Orleans, Louisiana. P. 20.

Список цитированной литературы.

1. *P. Maris, J. P. Vary, A. M. Shirokov.* “*Ab initio* no-core full configuration calculations of light nuclei.” *Phys. Rev. C.* 2009. V. **79**. 014308.
2. *P. Navrátil, J. P. Vary, B. R. Barrett.* “Properties of ^{12}C in the *Ab Initio* Nuclear Shell Model.” *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. **84**. P. 5728; “Large-basis *ab initio* no-core shell model and its application to ^{12}C .” *Phys. Rev. C.* 2000. V. **62**. 054311.
3. *P. Maris, A. M. Shirokov, J. P. Vary.* “*Ab initio* nuclear structure simulations: the speculative ^{14}F nucleus.” *Phys. Rev. C.* 2010. V. **81**. 021301.
4. *V. Z. Goldberg, B. T. Roeder, G. V. Rogachev et al.* “First observation of ^{14}F .” *Phys. Lett. B.* 2010. V. **692**. 307
5. *J. A. Tjon.* “Bound states of ^4He with local interactions.” *Phys. Lett. B.* 1975. V. **56**. 217.