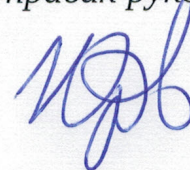


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Н.Н.БОГОЛЮБОВА

*На правах рукописи*



**Юрьев Сергей Александрович**

**Релятивистское исследование трехнуклонных ядер в  
формализме Бете-Солпитера-Фаддеева**

Специальность 01.04.02

“Теоретическая физика”

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Дубна – 2021

Работа выполнена в Лаборатории Теоретической Физики им. Н.Н.Боголюбова  
Объединенного института ядерных исследований

**Научный руководитель** – ***Бондаренко Сергей Григорьевич,***  
*кандидат физико-математических наук,*  
*начальник сектора ЛТФ ОИЯИ*

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте  
Объединенного института ядерных исследований в информационно-  
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://dissertations.jinr.ru>. С печатной  
версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ  
(г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Ю.М.Быстрицкий

# Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В диссертационной работе исследуются системы, состоящие из двух и трех нуклонов. Основное внимание уделяется изучению ядер гелия-3 (гелион,  ${}^3\text{He}$ ) и водорода-3 (тритон,  ${}^3\text{H}$ , T). Изучаются релятивистские свойства этих систем, проводится учет влияния релятивистских эффектов на такие наблюдаемые как энергия связи трехнуклонных ядер и амплитуды состояний, электромагнитные (ЭМ) формфакторы при ненулевых орбитальных моментах частиц в ядре.

Для релятивистского описания трехнуклонных систем, в частности ядер тритона и гелиона, в мировой научной литературе используется ряд теоретических подходов. К ним относятся следующие [1, 2]: "стандартный подход", использующий феноменологические реалистичные модели для ядерного взаимодействия и токов; подход киральной эффективной теории поля в рамках которого ядерное взаимодействие и токи строятся с использованием квантовой теории поля; подход использующий уравнение Гросса и подход использующий релятивистскую Гамильтонову динамику на световом фронте для построения операторов тока.

В данной работе для описания систем трех нуклонов применяется релятивистское обобщение уравнения Фаддеева в формализме Бете-Солпитера. Это уравнение является прямым обобщением обычного (квантовомеханического) уравнения Фаддеева. При этом в качестве двухчастичной  $t$ -матрицы входящей в релятивистское уравнение используется решение двухчастичного теоретико-полевого уравнения Бете-Солпитера (БС), что позволяет нам говорить уже о уравнении Бете-Солпитера-Фаддеева (БСФ). К особенностям этого уравнения относится во-первых то, что оно изначально является релятивистски ковариантным, в отличии от некоторых других подходов, использующих в качестве основного нерелятивистское уравнение и учитывающих релятивистские эффекты как поправки к решению этого уравнения. Второй особенностью Фаддеевского подхода является то, что соответствующее уравнение является модельно-независимым, справедливым для любого парного потенциала взаимодействия между частицами, а также легко обобщаемым на любые системы из трех частиц и даже трехкластерные системы. К особенностям уравнения БСФ можно также отнести то, что оно справедливо лишь для парного взаимодействия частиц

в трехчастичной системе. Это не позволяет напрямую использовать его для изучения вклада трехчастичных сил в характеристики трехнуклонных ядер, но закладывает для этого базис.

Необходимость исследования в том числе релятивистского трехчастичных, в частности, трехнуклонных систем обусловлена рядом причин, среди которых:

- появление в трехчастичных системах эффектов несвойственных системам с меньшим количеством частиц (например, эффект Ефимова, эффект Томаса);

- результаты изучения этих систем могут быть использованы для решения обратной задачи нахождения потенциала из наблюдаемых так как знания характеристик одних лишь двухчастичных систем для этого недостаточно;

- трехчастичные системы являются простейшими объектами на которых возможно изучение трехчастичных сил. При этом, чтобы правильно оценить влияние трехчастичных сил в трехнуклонных системах, необходимо полностью учесть вклад парных взаимодействий, в том числе и релятивистский вклад;

- некоторые системы из более чем трех частиц могут быть эффективно рассмотрены как трехкластерные объекты, что допускает использование трехчастичных подходов. Этот метод дает хорошие результаты при меньших затратах вычислительных мощностей чем это требуется для исследований в рамках многочастичных подходов;

- связанные трехнуклонные состояния ( ${}^3\text{He}(ppn)$ ,  ${}^3\text{H}(pnn)$ ) являются промежуточным звеном в цепочке ( $p$ ,  $D$  ( ${}^2\text{H}$ ),  ${}^3\text{He}$  или  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ ), изучение которой может дать ответ на вопрос о изменении структуры связанного нуклона и дать объяснение ЕМС-эффекта;

- постоянный рост энергии сталкивающихся в ускорителях частиц требует описания трехнуклонных систем, в частности процессов столкновения электронов с трехчастичными ядрами и нуклонов с дейтронами ( $N+D \rightarrow N+D$ ,  $N+D \rightarrow N + p + n$ ), в рамках релятивистского подхода каким и является рассмотренный в данной диссертационной работе формализм Бете-Солпитера-Фаддеева. К числу экспериментов по глубоконеупругому рассеянию электронов на трехчастичных ядрах можно отнести, например, эксперимент Jefferson Lab Experiment E1210103 с энергией сталкивающихся частиц вплоть до 12 ГэВ.

**Цель исследования.** Целью исследований проводимых в данной диссертационной работе является релятивистское изучение систем связанных нукло-

нов. Основное внимание уделено изучению трехнуклонных систем.

### **Задачи исследования.**

В рамках исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Построение сепарабельного потенциала взаимодействия первого ранга нуклонов со скалярными пропагаторами с формфакторами (функциями потенциала) в виде функций Ямагучи для S, P и D состояний пары нуклонов;

2. Обобщение уравнения Бете-Солпитера-Фаддеева на случай, когда орбитальные моменты частиц трехнуклонной связанной системы не равны нулю. Решение полученной системы интегральных уравнений и нахождение энергии связи ядра и амплитуд его S, P и D состояний;

3. Расчет ЭМ формфакторов трехнуклонных ядер с использованием найденных амплитуд состояний. Оценка влияния различных моделей нуклонных формфакторов и видов потенциалов NN-взаимодействия на формфакторы тритона и гелиона;

4. Расчет релятивистских поправок к формфакторам, связанных с преобразованиями Лоренца аргументов подынтегрального выражения, определяющего формфакторы.

**Новизна и практическая значимость.** В рамках релятивистски ковариантного безмодельного формализма Бете-Солпитера был построен релятивистский аналог квантовомеханического уравнения Фаддеева для описания системы трех частиц с ненулевым угловым моментом между ними. Полученное уравнение было впервые применено для изучения трехнуклонных связанных состояний. В рамках релятивистского формализма были найдены численные значения энергии связи трехнуклонного ядра и амплитуды его  $^1S_0$ ,  $^3S_1$ ,  $^3D_1$ ,  $^1P_1$ ,  $^3P_0$ ,  $^3P_1$  состояний. Найдены ЭМ формфакторы тритона и гелиона как функции квадрата переданного импульса вплоть до  $50 \text{ Фм}^{-2}$ . Рассмотренный в данной диссертационной работе подход позволяет проводить расчет процессов с участием трехнуклонных ядер в широких областях энергий.

**Достоверность** полученных результатов основывается на использовании апробированных подходов Бете-Солпитера и Фаддеева, стандартных и широко используемых методов решения интегральных уравнений методом итераций и вычисления интегралов методом Монте-Карло. В качестве численных значений физических величин, используемых в работе, таких как, например, массы

и магнитные моменты нуклонов, масса и энергия связи дейтрона, были использованы современные значения из официальных баз данных.

### **Результаты выносимые на защиту:**

1. Используя анализ низкоэнергетических параметров и фаз нуклон-нуклонного рассеяния в формализме Бете-Солпитера со скалярными пропагаторами, построен релятивистский сепарабельный потенциал NN-взаимодействия первого ранга для S, P и D состояний пары нуклонов;

2. Уравнение Бете-Солпитера-Фаддеева для трехнуклонной связанной системы обобщено на случай, когда орбитальные моменты пары частиц не равны нулю. Найдены энергия связи и амплитуды состояний трехнуклонной системы. Оценен вклад состояний с ненулевыми орбитальными моментами в энергию связи, составивший 0.5-1 % в зависимости от вида потенциала NN-взаимодействия;

3. Найденные амплитуды состояний были использованы для вычисления ЭМ формфакторов тритона и гелиона в статическом приближении – с пренебрежением эффектов преобразований Лоренца аргументов пропагаторов и амплитуд трехнуклонных систем. Обнаружена сильная зависимость ЭМ формфакторов трехнуклонных ядер от модели нуклонных формфакторов и вида потенциала NN-взаимодействия;

4. Проведен расчет релятивистских поправок к ЭМ формфакторам, таких как: - учет преобразований Лоренца аргументов пропагатора; - учет простого полюса в пропагаторе; - учет преобразований Лоренца аргументов волновой функции конечного ядра. Рассмотренные релятивистские поправки частично восстанавливают релятивистскую ковариантность ЭМ тока и вносят большой вклад в результаты расчетов. Они существенно улучшают согласие расчетов с экспериментальными данными, в частности расчет с использованием мультиранговых потенциалов воспроизводит наблюдаемый в экспериментальных данных дифракционный минимум.

**Личный вклад.** Автор принимал непосредственное участие в формировании цели и постановке задач данной работы. Все аналитические и численные вычисления были проведены автором лично. Интерпретация результатов вычислений и подготовка публикаций осуществлялась при непосредственном участии автора.

**Апробация.** Результаты данной работы обсуждались и докладывались на

семинарах Лаборатории теоретической ядерной физики ДВФУ, Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, а также **лично** автором на следующих конференциях:

- International Conference "Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2014" (NTSE-2014), Pacific National University, Khabarovsk, Russia (**2014**);
- International Baldin Seminar "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics JINR, Dubna, Russia (**2014, 2016, 2018**);
- Международный научный форум студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона-2012, ДВФУ, Владивосток, Россия (**2012**);
- Monte Carlo methods in computer simulations of complex systems, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia (**2014**);
- International Conference dedicated to the Novozhilov's 90-th anniversary "In Search of Fundamental Symmetries" , Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia (**2014**);
- Международная научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов ОИЯИ (ОМУС), ОИЯИ, Дубна, Россия (**2015, 2016, 2018, 2019**);
- Летняя школа-конференция по физике для учителей и учащихся среднеобразовательных учреждений, студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, университет Дубна, Дубна, Россия (**2015**);
- Межинститутская молодежная конференция "Физика элементарных частиц и космология" , ИЯИ РАН, Москва, Россия (**2015**);
- Межинститутская молодежная конференция "Физика элементарных частиц и космология" , ФИАН, Москва, Россия (**2018**);
- VII ежегодная конференция молодых ученых и специалистов «Алушта-2018», ОИЯИ, Алушта, Россия (**2018**);
- Hadron Structure and QCD: from Low to High Energies, ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина, Россия (**2018**);
- VI International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2018), Moscow, Russia (**2018**);
- Межинститутская молодежная конференция "Физика элементарных частиц и космология" , МФТИ, Москва, Россия (**2019, 2021**);
- Международная конференция студентов, аспирантов и молодых специа-

листов по фундаментальным наукам "Ломоносов-2019" , МГУ, Москва, Россия (2019);

- Международная конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов по фундаментальным наукам "Ломоносов-2021" , МГУ, Москва, Россия (2021);

- Релятивистская ядерная физика от сотен Мэв до Тэв, Стара Лесна, Словакия (2019);

- Международная конференция Ядро-2019, Дубна, Россия (2019);

**Публикации:** Диссертация написана на основании 12 работ [A1]–[A12] опубликованных автором в том числе в изданиях из списка ВАК и международных баз данных Web of Science и/или Scopus [A6]–[A12] и в трудах международных конференций [A1]–[A5].

В работах [A1, A2, A7] производится вычисление вклада D состояния в энергию связи трехнуклонного связанного состояния с использованием релятивистского сепарабельного потенциала GRAZ-II.

В работах [A3, A6] вычисляются амплитуды S состояния и энергия связи трехнуклонного ядра с использованием релятивистского сепарабельного потенциала Ямагучи.

В работе [A4] вычисляются амплитуды S состояния и ЭМ формфакторы с использованием одноранговых сепарабельных потенциалов.

В работе [A5] проводится вычисление релятивистских поправок к зарядовым формфакторам гелиона с использованием одноранговых сепарабельных потенциалов.

В работе [A8] проводится анализ влияния нуклонных формфакторов на ЭМ формфакторы гелиона с использованием релятивистского сепарабельного потенциала Ямагучи.

В работе [A9] с использованием уравнения Бете-Солпитера производится построение релятивистского сепарабельного потенциала Ямагучи.

В работе [A10] с использованием релятивистского сепарабельного потенциала Ямагучи проводится вычисление вклада P и D состояний в энергию связи трехнуклонного ядра.

В работе [A11] вычисляются релятивистские поправки к зарядовому формфактору гелиона с использованием одноранговых релятивистских сепарабель-



ных потенциалов.

В работе [A12] вычисляются релятивистские поправки к ЭМ формфакторам тритона и гелиона с использованием мультиранговых релятивистских сепарабельных потенциалов GRAZ-II и Paris-1(2). Проводится анализ влияния нуклонных формфакторов на формфакторы ядер в этом случае.

**Структура и объем работы.** Диссертация написана на 122 страницах, состоит из введения, трех глав и заключения, одного приложения, содержит 72 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 87 наименований.

# Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы, описаны цель и задачи диссертации, ее достоверность, новизна и практическая значимость, сформулирован личный вклад автора, перечислены научные конференции и семинары на которых были доложены результаты диссертационной работы, перечислены публикации на основе которых написана диссертация, а также положения выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрен случай двухнуклонной системы. Для изучения такой системы при релятивистских энергиях используется уравнение Бете-Солпитера [3]. Записанное для двухчастичной  $t$ -матрицы оно имеет следующий вид:

$$T(p, p'; s) = V(p, p') + i \int d^4k V(p, k) G(k; s) T(k, p'; s), \quad (1)$$

где  $p = (p_1 - p_2)/2$  – относительный 4-импульс частиц системы в начальном состоянии,  $k$  – соответствующий промежуточный относительный 4-импульс,  $p'$  – относительный 4-импульс частиц системы в конечном состоянии,  $s = P^2$  – квадрат полной энергии системы,  $V$  – потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия. Здесь  $G(k; s)$  – прямое произведение пропагаторов двух свободных частиц. Например, для скалярных частиц  $G(k; s)$  имеет вид:

$$G(k; s) = [(P/2 + k)^2 - m^2 + i\epsilon]^{-1} [(P/2 - k)^2 - m^2 + i\epsilon]^{-1}. \quad (2)$$

Для решения этого уравнения нужно знать потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия. В диссертационной работе используются потенциалы сепарабельного вида. Эти потенциалы в общем случае имеют следующий вид:

$$V(p, p') = \sum_{ij=1}^N \lambda_{ij} g_i(p) g_j(p'), \quad (3)$$

где натуральное число  $N$  определяет ранг этого потенциала,  $\lambda_{ij}$  – числовой параметр,  $g_i(p)$  – формфактор потенциала. В данном исследовании использовались следующие сепарабельные потенциалы – одноранговые: Ямагучи, Табакин и мультиранговые: Graz-II и Paris-1(2). Формфактор в форме Ямагучи для сепарабельного потенциала первого ранга для S, P и D состояний пары нуклонов

имеет вид:

$$g^{[S]}(k_0, k) = \frac{1}{k_0^2 - k^2 - \beta_0^2 + i0} \quad (4)$$

$$g^{[P]}(k_0, k) = \frac{\sqrt{|-k_0^2 + k^2|}}{(k_0^2 - k^2 - \beta_1^2 + i0)^2} \quad (5)$$

$$g^{[D]}(k_0, k) = \frac{C(k_0^2 - k^2)}{(k_0^2 - k^2 - \beta_2^2 + i0)^2} \quad (6)$$

Численные значения параметров входящих в форм-фактор сепарабельного потенциала, а также параметров  $\lambda_{ij}$  выбираются таким образом, чтобы вычисленные с использованием этого потенциала наблюдаемые, такие как, например, длина  $a_L$  и фазы рп-рассеяния, эффективный радиус  $r_L$  и энергия связи дейтрона совпадали с соответствующими экспериментальными данными. Используя данную технику были вычислены значения параметров потенциала Ямагучи для различных парциальных состояний (таблицы 1-3).

Отличительной особенностью сепарабельных потенциалов является то, что если подставить потенциал в таком виде в уравнение (1), то можно получить, что двухчастичная  $t$ -матрица тоже будет иметь сепарабельный вид:

$$T(p, p') = \sum_{ij=1}^N \tau_{ij}(s) g_i(p) g_j(p'), \quad (7)$$

где

$$[\tau^{-1}(s)]_{ij} = [\lambda^{-1}]_{ij} - \frac{i}{4\pi^3} \sum_{L=0,2} \int_{-\infty}^{\infty} dk_0 \int_0^{\infty} k^2 dk g_i^{(L)}(k_0, k) g_j^{(L)}(k_0, k) G(k_0, k; s). \quad (8)$$

Уравнение при этом из интегрального преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений.

Подынтегральное выражение в (8) имеет ряд полюсов и для вычисления интеграла используются методы теории функций комплексного переменного.

В первой главе диссертации с использованием уравнения Бете-Солпитера для частиц со скалярными пропагаторами произведено построение однорангового сепарабельного потенциала NN-взаимодействия с формфакторами в форме Ямагучи (4) - (6). Данный результат опубликован в статье [A9].

Таблица 1: Численные значения параметров потенциала Ямагучи для  $^1S_0$  парциального состояния.

	Эксперимент	$^1S_0$
$\lambda$ (GeV <sup>4</sup> )		-1.12087
$\beta_0$ (GeV)		0.228302
$a_L$ (fm)	-23.748	-23.753
$r_L$ (fm)	2.75	2.75

Таблица 2: Численные значения параметров потенциала Ямагучи для  $^3P_0$ ,  $^1P_1$  и  $^3P_1$  парциальных состояний.

	$^3P_0$	$^3P_1$	$^1P_1$
$\lambda$ (GeV <sup>6</sup> )	0.0428572	-5.83051	-3.68029
$\beta_1$ (GeV)	0.19904	0.48273	0.44127

Во **второй главе** рассматривается связанное состояние трех нуклонов. При этом для описания этих систем используется релятивистское обобщение уравнений Фаддеева [4]. Эти уравнения являются релятивистским обобщением квантовомеханических уравнений Фаддеева и имеют следующий вид [5]:

$$\begin{bmatrix} T^{(1)} \\ T^{(2)} \\ T^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - i \begin{bmatrix} 0 & T_1 G_1 & T_1 G_1 \\ T_2 G_2 & 0 & T_2 G_2 \\ T_3 G_3 & T_3 G_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T^{(1)} \\ T^{(2)} \\ T^{(3)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $T^{(i)}$  – компоненты полной трехчастичной  $t$ -матрицы:

$$T = \sum_i T^{(i)}, \quad (10)$$

$T_i$  –  $t$ -матрица двухчастичной подсистемы,  $G_i$  – функция Грина двух свободных частиц ( $j$  и  $n$ ) (индексы  $ijn$  представляют собой циклическую перестановку тройки (1,2,3)).

В диссертационной работе применяются относительные переменные – переменные Якоби. Используя вместо импульсов частиц относительные переменные

Таблица 3: Численные значения параметров для  ${}^3S_1 - {}^3D_1$  парциальных состояний.

	Эксперимент	${}^3S_1 - {}^3D_1$ ( $p_d = 4\%$ )	${}^3S_1 - {}^3D_1$ ( $p_d = 5\%$ )	${}^3S_1 - {}^3D_1$ ( $p_d = 6\%$ )
$\lambda$ (GeV <sup>4</sup> )		-1.83756	-1.57495	-1.34207
$\beta_0$ (GeV)		0.251248	0.246713	0.242291
$C$		1.71475	2.52745	3.46353
$\beta_2$ (GeV)		0.294096	0.324494	0.350217
$a_L$ (fm)	5.424	5.454	5.454	5.453
$r_L$ (fm)	1.756	1.81	1.81	1.80

ные Якоби система преобразовывается в систему интегральных уравнений с интегрированием по двум переменным.

Входящее в уравнение (9)  $t$ -матрица двухчастичной подсистемы является в нашем случае решением уравнения Бете-Солпитера с использованием сепарабельного потенциала. Использование потенциала взаимодействия в сепарабельном виде позволяет снять интегрирование по одной из переменных, что существенно облегчает численные расчеты.

Произведено парциальное разложение трехчастичной амплитуды и  $t$ -матрицы двухчастичной подсистемы [A10]. В результате этого получена система интегральных уравнений для парциальных амплитуд. В работе рассматривался случай, когда двухчастичная подсистема может иметь орбитальный момент  $l = 0, 1, 2$ , а именно состояния  ${}^1S_0, {}^3S_1, {}^3D_1, {}^3P_0, {}^1P_1, {}^3P_1$ .

Полученная система интегральных уравнений имеет ряд особенностей, а именно, полюса и разрезы в своем ядре. Эти особенности не позволяют применить стандартные методы решения систем интегральных уравнений. Но в рассматриваемом в диссертации случае связанного состояния системы трех частиц полюса и разрезы расположены во втором и четвертом квадранте комплексной плоскости по  $q_0$ . Это позволяет нам выполнить процедуру поворота Вика. После этого преобразования ядро системы интегральных уравнений не будет иметь никаких особенностей и к ней могут быть применены стандартные методы решения интегральных уравнений. В диссертационной работе в каче-

стве такого метода применялся итерационный метод. В нашем случае система интегральных уравнений с параметром, где в качестве параметра выступает энергия связи трехнуклонной системы. Математически система интегральных уравнений имеет решение не при всех значениях параметра, а лишь при тех которые удовлетворяют определенному условию. Используя это условие была найдена энергия связи тритона. Результаты вычисления для потенциала Ямагучи (таблица 4) опубликованы в работах [A3, A6, A10]. Результаты вычисления для мультиранговых потенциалов GRAZ-II и Paris-1(2) (таблица 5) опубликованы в работах [A1, A2, A7]

Помимо энергии связи найдены также и амплитуды состояний трехнуклонных ядер [A3, A4, A6, A10]. Эти амплитуды использованы в третьей главе для вычисления электромагнитных формфакторов тритона и гелиона.

Таблица 4: Значения энергии связи трехнуклонного ядра. Расчет с использованием потенциала NN-взаимодействия в сепарабельном виде с формфакторами потенциала в форме Ямагучи.

$p_D$	$^1S_0 - ^3S_1$	$^3D_1$	$^3P_0$	$^1P_1$	$^3P_1$
4	9.221	9.294	9.314	9.287	9.271
5	8.819	8.909	8.928	8.903	8.889
6	8.442	8.545	8.562	8.540	8.527

Таблица 5: Значение энергии связи трехнуклонной системы для мультирангового потенциала Graz-II.

Потенциал	Нерелятивистский расчет		Релятивистский расчет	
	$^1S_0, ^3S_1$	$^1S_0, ^3S_1, ^3D_1$	$^1S_0, ^3S_1$	$^1S_0, ^3S_1, ^3D_1$
GRAZ-II $p_D = 4$ %	8.372	8.334	8.628	8.617
GRAZ-II $p_D = 5$ %	7.964	7.934	8.223	8.217
GRAZ-II $p_D = 6$ %	7.569	7.548	7.832	7.831

Вторая глава диссертации основана на работах [A1-A4, A6, A7, A10]

В третьей главе диссертации рассматриваются электромагнитные формфакторы тритона и гелиона.

Таблица 6: Значение энергии связи  $E_t$  трехнуклонной системы для релятивистских мультиранговых сепарабельных потенциалов Paris-1(2).

Потенциал	$E_t$
Paris-1	7.535
Paris-2	7.474

Проводится обзор экспериментальных данных для формфакторов тритона и гелиона. Обзор показывает, что в частности для гелиона зарядовый формфактор экспериментально известен до значений квадрата переданного импульса 4 ГэВ<sup>2</sup> и более, что обуславливает необходимость релятивистского изучения задачи. Проводится также обзор теоретических релятивистских подходов [1, 2] в рамках которых рассматриваются трехнуклонные системы, в частности, производится расчет электромагнитных формфакторов тритона и гелиона. Рассматриваются "стандартный подход", использующий феноменологические реалистичные модели для ядерного взаимодействия и токов; подход киральной эффективной теории поля в рамках которого ядерное взаимодействие и токи строятся с использованием квантовой теории поля; подход использующий уравнение Гросса и подход использующий релятивистскую Гамильтонову динамику на световом фронте для построения операторов тока.

Исследуется приближение из статьи [3] для вычисления формфакторов путем разделения интеграла на части и отдельного интегрирования частей. Показана недостаточная точность этого приближения (Рис. 1) [A12].

В интегралах, определяющих формфакторы трехнуклонных ядер подынтегральные выражения зависят от переменных, описывающих частицы как до так и после взаимодействия с внешним полем. В то же время интегрирование проводится по переменным в системе центра масс покоящейся частицы. Поэтому необходимо перевыразить переменные после взаимодействия через переменные до. Переменные до и после взаимодействия связаны между собой преобразованиями Лоренца. Данные преобразования необходимо учесть в расчетах. Учет преобразований Лоренца приводит к тому, что в подынтегральных выражениях в интегралах определяющих формфактор возникает простой полюс. Для вычисления интеграла содержащего полюс в подынтегральном выражении была применена теорема Коши. В результате были рассмотрены 3 реля-

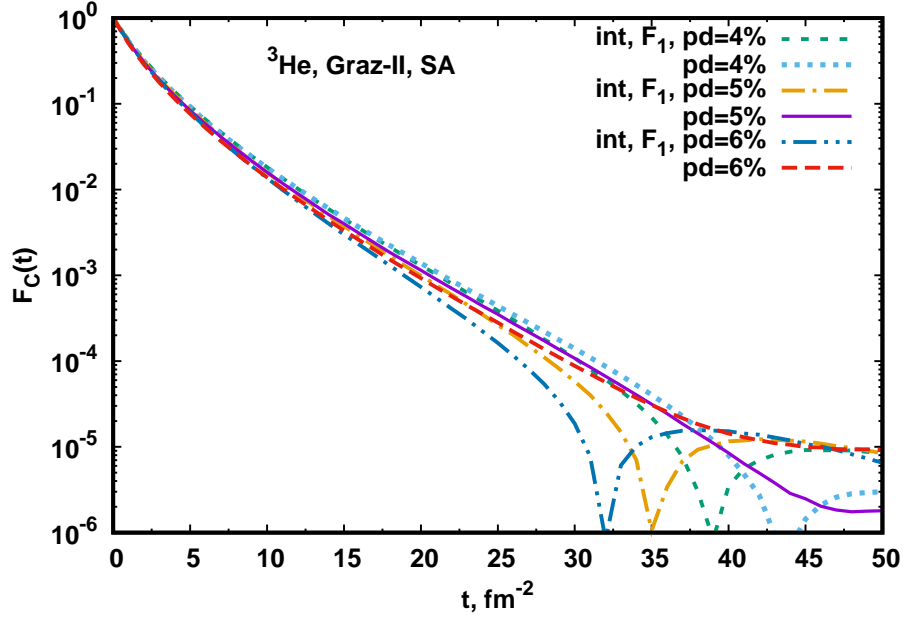


Рис. 1: Статическое приближение для зарядового формфактора гелиона как функция квадрата переданного импульса  $t = Q^2$  для мультирангового сепарабельного потенциала Graz-II при различных значениях вероятности двухнуклонного  $D$ -состояния  $p_d = 4, 5, 6\%$ . Полные расчеты (пунктирная линия для  $p_d=4\%$ , непрерывная линия для  $p_d=5\%$  и длинная пунктирная линия для  $p_d=6\%$ ) сравниваются с расчетами с использованием приближений из работы [3] (штриховая линия для  $p_d=4\%$ , штрих-пунктирная линия для  $p_d=5\%$  и линия штрих-пунктир-пунктир для  $p_d=6\%$ ).

тивистские поправки: поправка связанная с учетом преобразований Лоренца в пропагаторе (BC), поправка возникающая в следствии учета полюса пропагатора (PO) и поправка связанная с учетом преобразований Лоренца в волновой функции конечного ядра, которая вычислялась путем разложения волновой функции в ряд и учета первого члена разложения (EC).

Рассмотрено приближение когда в преобразованиях Лоренца опускаются члены пропорциональные  $Q^2$  – статическое приближение (SA). В диссертации рассматриваются как SA [A4] и релятивистские поправки (RC) к формфакторам [A5, A11, A12]. Результат вычисления SA и RC для магнитного формфактора тритона с использованием потенциала GRAZ-II приведен на Рис. 2. Из рисунка видно, что учет релятивистских поправок смещает положение дифракционного минимума/нуля на 6-9  $\text{Фм}^{-2}$  в сторону к экспериментальным данным.



Видно, что наилучшее согласие с экспериментом наблюдается для расчета RC с использованием потенциала GRAZ-II с  $p_d = 6\%$ .

Показано, что состояния с ненулевыми орбитальными моментами не дают заметного вклада в электромагнитные формфакторы.

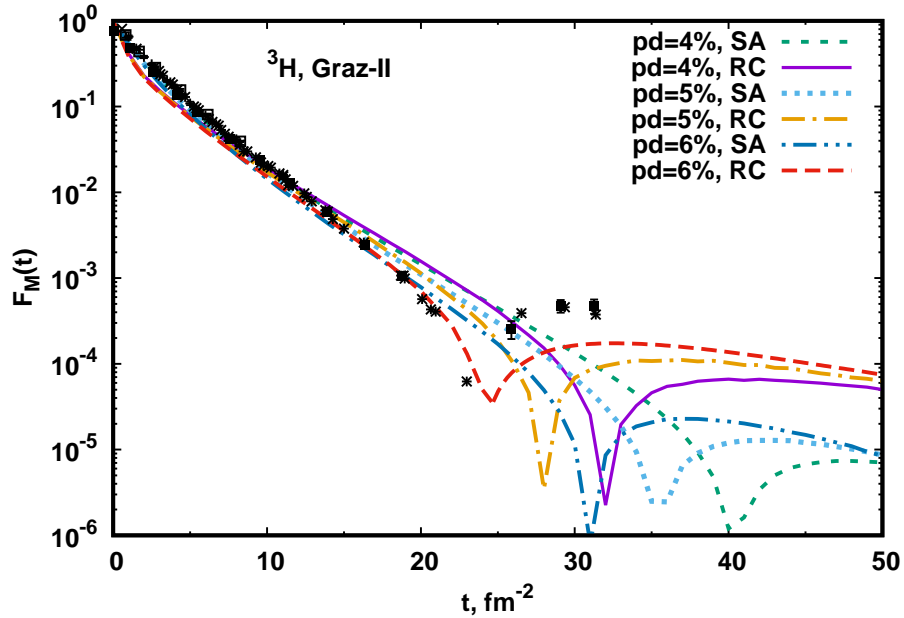


Рис. 2: Статическое приближение (SA) и релятивистские поправки (RC) к магнитному формфактору тритона как функция  $t$  для мультирангового сепарабельного потенциала Graz-II при различных значениях вероятности двухнуклонного  $D$ -состояния  $p_d = 4, 5, 6\%$ . Штриховая линия – SA для  $p_d=4\%$ , пунктирная линия – SA для  $p_d=5\%$ , линия штрих-пунктир-пунктир – SA для  $p_d=6\%$ , непрерывная линия – RC для  $p_d=4\%$ , штрихпунктирная линия – RC для  $p_d=5\%$  и линия с длинным пунктиром – RC для  $p_d=6\%$ .

Проводится анализ влияния различных моделей нуклонных формфакторов на ЭМ формфакторы тритона и гелиона [A8, A11, A12]. Рассматриваются следующие модели нуклонных формфакторов: дипольная модель (DIPOLE), модель релятивистского гармонического осциллятора (RHOM), модель доминантности векторных мезонов (VMDM) и BBVA параметризации для упругих формфакторов нуклонов (BBVA). Результат для вычислений с потенциалом Paris-1 приведен на Рис. 3.

В работе проводятся вычисления зарядовых и магнитных формфакторов тритона и гелиона. Результаты вычислений показывают, что в одних случаях

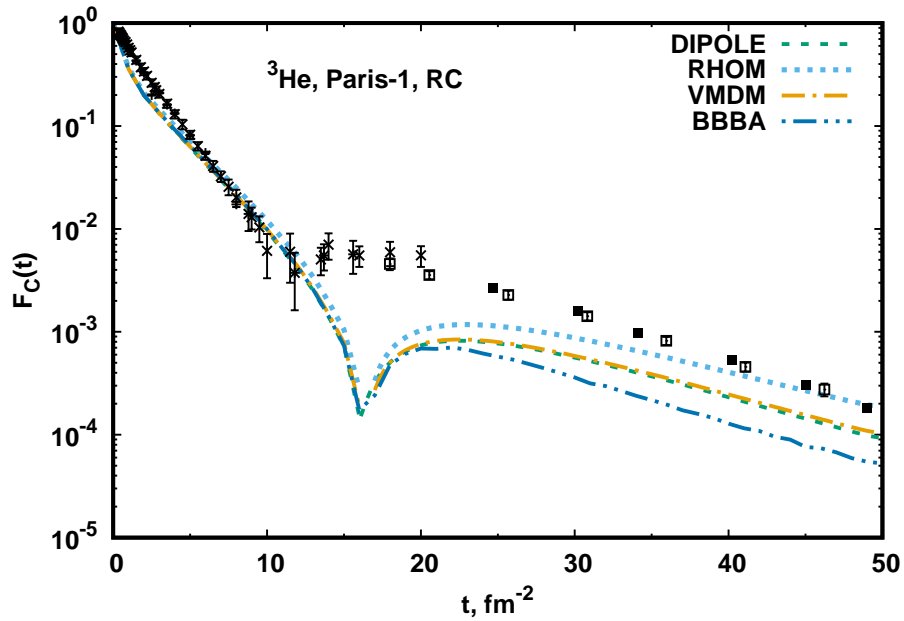


Рис. 3: Релятивистские поправки для зарядового формфактора гелиона для потенциала Paris-1 с четырьмя различными моделями ЭМ формфакторов нуклонов: штриховая линия - DIPOLE, пунктирная линия - RHOM, штрих-пунктирная линия - VMDM, штрих-пунктир-пунктирная линия - BBBA.

имеется более лучшее согласие с экспериментом, чем для других. Так, например, для магнитного формфактора тритона наблюдается достаточно хорошее совпадение. Недостаточно хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментом может являться следствием использования ряда приближений. Например, использование релятивистского импульсного приближения (RIA) явно нарушает калибровочную инвариантность реакции. Улучшение согласие с экспериментом может быть достигнуто путем выхода за рамки RIA и учетом двухчастичного тока. Так же заметную роль в улучшении результатов для гелиона может сыграть учет Кулоновского взаимодействия между протонами. Используемый в данной работе подход позволяет в дальнейшем учесть это и тем самым скорее всего улучшить согласие расчетов с экспериментальными данными.

Третья глава диссертации основана на работах [A4, A5, A8, A11, A12].

В **заключении** приведены основные результаты диссертации:

1. Используя анализ низкоэнергетических параметров и фаз нуклон-нуклонного рассеяния в формализме Бете-Солпитера со скалярными пропагаторами, построен релятивистский сепарабельный потенциал NN-взаимодействия

первого ранга для S, P и D состояний пары нуклонов;

2. Уравнение Бете-Солпитера-Фаддеева для трехнуклонной связанной системы обобщено на случай, когда орбитальные моменты пары частиц не равны нулю. Найдены энергия связи и амплитуды состояний трехнуклонной системы. Оценен вклад состояний с ненулевыми орбитальными моментами в энергию связи, составивший 0.5-1 % в зависимости от вида потенциала NN-взаимодействия;

3. Найденные амплитуды состояний были использованы для вычисления ЭМ формфакторов тритона и гелиона в статическом приближении – с пренебрежением эффектов преобразований Лоренца аргументов пропагаторов и амплитуд трехнуклонных систем. Обнаружена сильная зависимость ЭМ формфакторов трехнуклонных ядер от модели нуклонных формфакторов и вида потенциала NN-взаимодействия;

4. Проведен расчет релятивистских поправок к ЭМ формфакторам, таких как: - учет преобразований Лоренца аргументов пропагатора; - учет простого полюса в пропагаторе; - учет преобразований Лоренца аргументов волновой функции конечного ядра. Рассмотренные релятивистские поправки частично восстанавливают релятивистскую ковариантность ЭМ тока и вносят большой вклад в результаты расчетов. Они существенно улучшают согласие расчетов с экспериментальными данными, в частности расчет с использованием мультранговых потенциалов воспроизводит наблюдаемый в экспериментальных данных дифракционный минимум.

В приложении А отражены используемые для вычислений в диссертации соотношения между импульсами частиц и переменными Якоби.

## Публикации автора по теме диссертации

- [A1] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Proceedings of the 17th Small Triangle Meeting, Institute of Experimental Physics SAS, Sveta Nedelja, Croatia. (2016) P. 6-11
- [A2] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Proceedings of the XX International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2016), JINR, Dubna, Russia (2016) P. 92-96
- [A3] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Proceedings of the International Conference Nuclear Theory in the Supercomputing Era – 2014 (NTSE-2014) Pacific National University, Khabarovsk, Russia. (2016) P. 125-131
- [A4] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Proceedings of 14th international workshop – Relativistic nuclear physics: from hundreds of Mev to TeV. (2019) P. 81-90
- [A5] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Proceedings of the 21th Small Triangle Meeting, Institute of Experimental Physics SAS, Spisske Tomasovice, Croatia. (2020) P. 14-21
- [A6] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. EPJ Web of Conferences. **108** (2016), 02015
- [A7] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. EPJ Web of Conferences. **138** (2017), 06003
- [A8] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. EPJ Web of Conferences. **204** (2019), 05009
- [A9] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Phys. Part. Nucl. Lett. **15** (2018),4, pp.417-421
- [A10] С.Г. Бондаренко, В.В. Буров, С.А. Юрьев, ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, том 82 (2019), №1, с. 1-7
- [A11] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Nucl. Phys. A., 1004 (2020), 122065
- [A12] S.G. Bondarenko , V.V. Burov, S.A. Yurev. Nucl. Phys. A., 1014 (2021), 122251

## Список литературы

- [1] L. Marucci, F. Gross, M. Pena at all, J. Phys. G **43** (2016) 023002
- [2] F. Baroncini, A. Kievsky, E. Pace, and G. Salme, AIP Conf.368Proc. 1056(1)

(2008), 272–279.

[3] E.E. Salpeter, H.A. Bethe, Phys. Rev. **84** (1951), 1232

[4] Л. Д. Фаддеев, ЖЭТФ. **39** (1960), 1459

[5] G. Rupp, J. A. Tjon, Phys. Rev. C **37** (1988), 1729