**Кулоновское взаимодействие в формализме осцилляторного представления теории рассеяния**

***Яников У.М.***

*Студент*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

*E-mail: yanikov-u@yandex.ru*

Современные расчеты связанных состояний легких атомных ядер проводятся методами *ab initio*, т. е. моделированием на суперкомпьютерах без использования каких-либо модельных предположений о структуре ядра. Одним из наиболее развитых и перспективных таких подходов является No-core Shell Model (NCSM) [1]. Важнейшим направлением развития теории ядра является разработка методов *ab initio* для описания резонансных состояний ядер и ядерных реакций.

Недавно В.Д. Эфросом [3] был предложен подход в теории рассеяния на основе вариационного метода Хьюльтена–Кона, который в принципе можно использовать для расчета ядерных реакций в комбинации с NCSM. Наша общая цель – модифицировать метод Эфроса, используя осцилляторный базис и наработки формализма осцилляторного представления в теории рассеяния (по-английски Harmonic Oscillator Representation of Scattering Equations, или HORSE) [4], что позволит существенно упростить расчеты и разработать подход, который в комбинации с NCSM можно будет реализовать с учетом возможностей современных суперкомпьютеров для исследования *ab initio* ядерных реакций.

Формализм HORSE является одним из методов исследования состояний непрерывного спектра и использовался для изучения резонансных состояний ядер, упругого рассеяния и ядерных реакций при низких энергиях в рамках различных приближений (кластерная модель, метод резонирующих групп). Кроме того, упрощенная версия HORSE – Single-state HORSE (SS-HORSE) [5] – применялась для изучения резонансных состояний ядер на основе расчетов в NCSM. Непосредственное использование полной версии HORSE в комбинации с NCSM для исследования ядерных реакций невозможно, так как требует расчета очень большого числа собственных состояний образуемого в результате столкновения промежуточного ядра даже в случае реакций с легкими ядрами. Метод Эфроса позволяет использовать небольшое число собственных состояний NCSM и открывает возможности исследования *ab initio* ядерных реакций.

Важным элементом для осуществления этих планов является аккуратное и эффективное в вычислительном плане описание асимптотик волновых функций непрерывного спектра сталкивающихся заряженных частиц, трудности которого обусловлены дальнодействующим характером кулоновского потенциала. Методы описания кулоновских асимптотик в рамках HORSE предлагались в работах [2] и [4]. Метод И.П. Охрименко [2] хорошо работает в рамках метода резонирующих групп, но предполагает расчет сумм $\sum\_{n'}^{}V\_{nn'}^{C}a\_{n'}^{as}$ ($a\_{n'}^{as}$ – асимптотические коэффициенты разложения кулоновских функций по осцилляторному базису) с учетом большого числа матричных элементов кулоновского взаимодействия $V\_{nn'}^{C}$ с большими значениями радиальных квантовых чисел $n’$ далеко за пределами обрезания матрицы потенциальной энергии сильного взаимодействия нуклонов в ядре~~,~~ что представляется неэффективным для расчетов *ab initio* многочастичных ядерных систем в NCSM. В работе [4] предлагалось обрезать кулоновский потенциал на некотором радиусе $b$ за пределами действия ядерных сил, что позволяет провести простые расчеты рассеяния в HORSE без учета кулоновских искажений волновых функций на асимптотике, а затем на основе анализа $P$-матрицы пересчитать полученные фазы рассеяния или $S$-матрицу на случай учета кулоновской асимптотики. Этот подход, однако, встречает трудности в многочастичной задаче, где кулоновское взаимодействие определяется взаимодействиями протонов из различных сталкивающихся ядер, находящихся на разных расстояниях друг от друга.

Целью нашего исследования является разработка описания волновых функций сталкивающихся заряженных частиц на асимптотике в рамках разложения их по осцилляторному базису в формализме HORSE, которое позволит проводить эффективные расчеты фазовых сдвигов и других характеристик рассеяния заряженных частиц по методу Эфроса. На начальном этапе рассматриваются модельное рассеяние частицы на потенциале с короткодействующим ядерным взаимодействием и кулоновским отталкиванием на больших расстояниях, точное описание которого можно получить различными численными методами. Задачи начального этапа: 1) проанализировать эффективность расчетов в методе Эфроса фаз рассеяния с учетом кулоновских асимптотик в разложениях HORSE, предложенных в работах [2], [4]; 2) проанализировать устойчивость этих методов к изменению их параметров, например, устойчивость метода [4] к изменению радиуса обрезания кулоновского потенциала b в пределах размера ядра или к существенному уменьшению числа учитываемых матричных элементов кулоновского взаимодействия $V\_{nn'}^{C}$ в методе [2]; 3) изучить возможности альтернативных подходов к описанию кулоновского взаимодействия в HORSE, эффективных в расчетах по методу Эфроса, например, аналитического расчета сумм $\sum\_{n'}^{}V\_{nn'}^{C}a\_{n'}^{as}$ в методе [2], используя уравнения, предложенные в работе [6]. После этого планируется перейти к исследованию рассеяний протона на ядре 4He на основе расчетов в NCSM в комбинации с методом Эфроса и с учетом описания асимптотик волновых функций в формализме HORSE.

На данный момент в рамках модельной задачи разработаны, отлажены и тщательно оттестированы программы расчетов характеристик рассеяния методами HORSE и Эфроса без учета кулоновского взаимодействия. Исследована асимптотика коэффициентов разложения по осцилляторному базису регулярного и нерегулярного решения кулоновской задачи. Продемонстрировано, что асимптотическое трехчленное рекуррентное соотношение, представленное в работе [2], позволяет воспроизвести эти коэффициенты с хорошей точностью практически до $n=0$. Предложен метод расчета характеристик рассеяния по методу Эфроса с учетом кулоновского взаимодействия, продемонстрирована его сходимость при изменении параметров, проведено сравнение результатов с точным решением.

[1] B.R. Barrett, P. Navrátil, and J.P. Vary, «Ab initio no core shell model», Prog. Part. Nucl. Phys. 69, 131 (2013).

[2] I.P. Okhrimenko, «Allowance for the Coulomb Interaction in the Framework of an Algebraic Version of the Resonating Group Method», Nucl. Phys. A 424, 121 (1984).

[3] V.D. Efros, «Calculating Reactions with Use of No-Core Shell-Model States», Phys. Rev. C 99, 034620 (2019).

[4] J.M. Bang, A.I. Mazur, A.M. Shirokov, Yu.F. Smirnov, and S.A. Zaytsev, «P-Matrix and J-Matrix Approaches: Coulomb Asymptotics in the Harmonic Oscillator Representation of Scattering Theory», Ann. Phys. (NY) 280, 299-335 (2000).

[5] A.M. Shirokov, A.I. Mazur, I.A. Mazur, and J.P. Vary, «Shell model states in the continuum», Phys. Rev. C 94, 064320 (2016).

[6] С.А. Зайцев, Ю.Ф. Смирнов, А.М. Широков, «Истинно многочастичное рассеяние в осцилляторном представлении», ТМФ 117, 227 (1998).