

УДК 372.853

А.И. СЕРЫЙ

О ПОДХОДАХ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ

В силу чрезвычайной математической сложности задачи многих тел при наличии ядерных сил, для исследования данной проблемы применяются различные приближенные методы. В силу их многочисленности, важен вопрос об их систематизации (см. таблицы ниже).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика подходов.

Подходы	Микроскопические	Феноменологические
1. Типичные примеры	типа Хартри–Фока	нуклонная Ферми-жидкость
2. Спонтанная спиновая поляризация	как правило, не предсказывается	как правило, предсказывается
3. Должно ли эффективное взаимодействие при $\tilde{\rho} \sim \tilde{\rho}_0$ явно зависеть от $\tilde{\rho}$	как правило, нет (в случае конечных систем – атомных ядер – такое бывает [1, с. 30])	да, обязательно (эффективное взаимодействие типа Скирма)
4. Примеры типичных потенциалов	Bonn В, NSC97e, AV ₁₈ , TBF	D1S, SkM, SkM*, SGII, SLy4, SLy5, T6, RATP, RBP
5. Примеры нарушений пункта 3, в т.ч. применение потенциалов, не характерных для данных подходов	в [2] в эффективном мезон-нуклонном лагранжиане, использованном при разных $\tilde{\rho}$, константа связи была подогнана под 1 значение $\tilde{\rho}$	применение псевдопотенциала Ферми при $\tilde{\rho} \sim \tilde{\rho}_0$ не учитывает существенного влияния плотности окружающих нуклонов на 2-частичное межнуклонное взаимодействие
6. При $\tilde{\rho} \ll \tilde{\rho}_0$ можно при любом подходе использовать взаимодействия как зависящие, так и не зависящие от $\tilde{\rho}$, т.к.	влияние $\tilde{\rho}$ на межнуклонный потенциал и эффективную массу при $\tilde{\rho} \ll \tilde{\rho}_0$ существенно ослабевает и в случае явной, и в случае неявной зависимости	влияние $\tilde{\rho}$ на Ферми-жидкостные амплитуды при $\tilde{\rho} \ll \tilde{\rho}_0$ существенно ослабевает

Таблица 2 – Разновидности методов типа Хартри–Фока.

Плотности по сравнению с плотностью ядерного насыщения $\tilde{\rho}_0$	Низкие ($\tilde{\rho} \ll \tilde{\rho}_0$)	Сравнимые ($\tilde{\rho} \sim \tilde{\rho}_0$)
Учет отталкивания нуклонов на малых расстояниях	не обязателен	необходим
Примеры допустимых потенциалов	Юкавы	Рейда
Появление расходимостей в методе Хартри–Фока	нет	да
Необходимость модификации метода Хартри–Фока	нет	да [3, с. 656]

Таблица 3 – Модификации метода Хартри–Фока.

Сущность модификации	Примечания	Какие фамилии появляются впереди
Необходимость устранения расходимостей при учете отталкивания на малых расстояниях	существуют разные подходы	либо Бракнера, либо Ястрова, либо Пандхарипанде
Учет релятивистских эффектов	это приводит к избавлению от необходимости учета 3-частичных сил	Дирака
Учет эффективных добавок к межнуклонному взаимодействию, зависящих от плотности	применяется сравнительно редко, т.к. это более характерно для Ферми-жидкостного подхода	Скирма

Таблица 4 – Сравнительная характеристика модификаций Бракнера и Ястрова.

Учет корреляций	Модификация	Бракнера (Бете–Бракнера)	Ястрова
2-частичных	С точки зрения пертурбативности подход является	полупертурбативным (частичное суммирование диаграмм теории возмущений)	непертурбативным
	Как модифицируется межнуклонное взаимодействие	потенциал заменяется на G -матрицу (модель «2 частицы + 1 дырка»)	вводится корреляционный фактор Ястрова, мешающий нуклонам подходить слишком близко друг к другу
N-частичных	С точки зрения пертурбативности подход является	полупертурбативным (частичное суммирование диаграмм теории возмущений)	в некоторых разновидностях – пертурбативным (в случае кластерного разложения)
	Разновидности усовершенствований	уравнение Бете–Фаддеева	1) кластерное разложение; 2) гиперцепное суммирование

Таблица 5 – Сравнение результатов Бракнера и Ястрова с экспериментом [3, с. 655, 656].

Величина	Энергия связи на нуклон при насыщении, МэВ	Плотность насыщения, фм^{-3}
Метод Бракнера с 2-частичными корреляциями	-12	0.16
Метод Бракнера с 3-частичными корреляциями	-16	0.19
Метод Ястрова	-12	0.16
Эксперимент	-16	0.16

Таблица 6 – Способы задания элементов G -матрицы в методах Бракнера.

Состояния частиц и дырок	Антисимметризованы	Симметризованы
Элементы G -матрицы	вещественные	комплексные
Спектр 1-частичной потенциальной энергии $U(k)$ вблизи поверхности Ферми	разрывный	непрерывный
Выбор	стандартный (standard or conventional choice)	непрерывный (continuous choice)
Выражение для $U(k)$ [4, с. 172, 173]	$\sum_{k' < k_F} F(k, k'), k < k_F$ (дырки) $0, k > k_F$ (частицы)	$Re \sum_{k' < k_F} F(k, k')$
Выражение для 1-частичного спектра энергии $e(k)$ [4, с. 172, 173]	$e(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + U(k)$	$e(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + \Delta, k \leq k_F;$ $e(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}, k > k_F$

Примечание: $F(k, k') = \langle kk' | G(e(k) + e(k')) | kk' \rangle$.

Таблица 7 – Пертурбативное газовое приближение метода Бракнера [3, с. 655, 656].

Метод	Бракнера–Хартри–Фока	Газовое приближение
Матрица	G	G переходит в T
Как определяется матрица	через интегральное уравнение Бете–Голдстоуна	отличается от амплитуды (либо длины) рассеяния лишь нормировкой
Учет корреляций	2-частичных	не обязателен
Плотности	любые	низкие по сравнению с $\tilde{\rho}_0$
Нуклоны	взаимодействующие	свободные
Малый параметр, пригодный для теории возмущений	r_c / r_0 , где r_c – радиус кора, r_0 – среднее межнуклонное расстояние	f / r_0 , где f – амплитуда рассеяния, r_0 – среднее межнуклонное расстояние

Таблица 8 – Названия разновидностей метода Бракнера–Хартри–Фока.

Учет		Учет состояний	
Релятивистских эффектов	добавок к потенциальной энергии, зависящих от $\tilde{\rho}$	«2 частицы + 1 дырка»	«2 частицы + 2 дырки» [5, р. 64]
нет	нет	Бракнера–Хартри–Фока	Бракнера–Хартри–Фока расширенный
	да	Скирма–Бракнера–Хартри–Фока	Скирма–Бракнера–Хартри–Фока расширенный
да	нет	Дирака–Бракнера–Хартри–Фока	Дирака–Бракнера–Хартри–Фока расширенный
	да	см. примечание	

Примечание: Разработка некоторых методов, не названных в таблице, вряд ли оправдана, т.к. эффективное взаимодействие, явно зависящее от плотности среды, выводится через усреднение 3-частичных сил [4, с. 171], учет которых необходим лишь в нерелятивистском случае.

Таблица 9 – Разновидности «не-бракнеровских» подходов [5, р. 6, 12, 34].

Подход	Математические особенности	С т.зр. релятивизма	Взаимодействия
Jastrow, 1950-е гг.	неунитарный	А, Б	2-частичные, с учетом отталкивания на малых расстояниях
Johnson, Teller, Duerr, Walecka, 1950-е гг.	нелинейные самосогласованные уравнения	Б	среднеполевые модели мезонного обмена
Pandharipande, 1970-е гг.	неунитарный, цепное суммирование	А	2-частичные, с учетом отталкивания на малых расстояниях
Унитарной корреляции	унитарный	А, Б	возможен переход к эффективным взаимодействиям
Vautherin, Brink, 1970-е гг.	наличие дельта-функций, приводит к упрощениям	А	типа Скирма

Примечания: А – подходы могут быть нерелятивистскими; Б – подходы могут быть релятивистскими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев, В.Г. Теория атомного ядра: Квазичастицы и фононы / В.Г. Соловьев – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.
2. Niembro, R. Magnetic susceptibility of neutron matter in a relativistic approach / R. Niembro, S. Marcos, M.L. Quelle, and J. Navarro // Phys. Lett. B. – 1990. – № 249. – P. 373–376.
3. Физическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров; ред. кол. : Д. М. Алексеев [и др]. – М. : Большая Российская Энциклопедия, 1998. – Т. 5. Стробоскопические приборы – Яркость. – 691 с.
4. Mansour, H.M.M. Single Particle Potentials and Three-Body Forces / H. M. M. Mansour // Journal of Nuclear and Particle Physics – 2014. – № 4(6). – P. 171–175.
5. Hu, Jinniu. Extended Brueckner Hartree-Fock theory for nuclear matter with realistic nucleon-nucleon interaction: Doctor of Science Thesis / Jinniu Hu – Osaka 567-0047, Japan: Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, 29 September, 2011. – 156 p.