

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.14

МИШЕВ

Стоян Райков

КОРРЕЛЯЦИИ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ И
СТРУКТУРА НИЗКОЛЕЖАЩИХ СОСТОЯНИЙ В
НЕЧЁТНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ И ПЕРЕХОДНЫХ
ЯДРАХ

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных
частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2011

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
В.В. Воронов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Р.В. Джолос

доктор физико-математических наук
И.Н. Борзов

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ

Защита состоится “___” декабря 2011 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, 141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛТФ ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А.Б. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы.

В диссертации исследуется влияние корреляций в основных состояниях на свойства низколежащих уровней в нечётных сферических и переходных ядрах.

В работе Г. Бете [1] отмечается, что одночастичная модель ядра применима потому что нуклоны проводят большую часть времени на своей орбите. Классическим способом экспериментальной проверки этой гипотезы являются прямые ядерные реакции одно-нуклонных передач [2,3]. Использование реакций с электронами позволило получить более точные данные о спектроскопических факторах в стабильных ядрах [4–7]. По мере усовершенствования экспериментальных методов получения пучков тяжёлых ионов, стало возможным изучение отклонения от одночастичной модели для ядер удалённых от линий стабильности [8,9]. Несмотря на некоторые несовпадения между результатами, полученными с использованием разных экспериментальных методов, все измерения указывают на значительное ослабление сил одночастичных состояний около уровня Ферми, что не согласуется с предсказаниями модели независимых частиц.

Модель независимых частиц применима для описания некоторых свойств ядер вблизи магических чисел нуклонов, но ее применимость к ядрам с открытыми оболочками не является оправданным. В диссертации особое внимание уделено переходным ядрам, свойства которых занимают промежуточное место между свойствами сферических и деформированных ядер.

Как известно, причиной фрагментации чистых состояний является остаточное взаимодействие. При этом сила одночастичных состояний распределяется между множеством состояний со сложной структурой. Многочастичные примеси в волновой функции основного состояния приводят к корреляциям в основном состоянии.

Многочисленные исследования (напр. [10, 12, 13]) указывают на важнейшую роль корреляций при определении свойств низколежащих состояний в чётно-чётных ядрах. В частности, как показано в [14], переходная

зарядовая плотность во внутренней части ядра подавлена из-за эффекта блокировки, являющегося следствием изменения чисел заполнения нуклонов на валентных оболочках. Вследствие этого, в моделях, учитывающих корреляции в основном состоянии, вероятности электромагнитных переходов воспроизводятся в лучшем согласии с экспериментальными данными. Так как степень коллективизации часто измеряется силой перехода с данного состояния на основное, то примеси в основном состоянии существенно влияют на эту важнейшую характеристику низколежащих состояний.

В настоящее время понятно, что структура большинства состояний в нечетно-четных ядрах определяется взаимодействием между последним нечётным нуклоном и коллективными возбуждениями остова. Сила этого взаимодействия зависит в большой мере от уровня коллективизации низколежащих состояний в четно-четных ядрах и, как было упомянуто выше, она сильно меняется из-за наличия многочастичных конфигураций в основных состояниях. Таким образом, можно заключить, что последовательный учёт корреляций в основных состояниях является важной проблемой, как с точки зрения микроскопической теории ядра, так и с точки зрения анализа и интерпретации экспериментальных данных.

Цель работы.

1. Расширить квазичастично-фононную модель (КФМ) ядра для нечётных сферических и переходных ядер, последовательно учитывая корреляции в основных состояниях.
2. На основе выведенных уравнений исследовать влияние корреляций в основном состоянии на такие характеристики низколежащих уровней в нечётных ядрах, как энергии, спектроскопические факторы и вероятности электромагнитных переходов.

Научная новизна и практическая ценность.

Основной целью диссертации является разработка подхода, позволяющего изучать эффекты, порождаемые нуклонными корреляциями, и их влияние на свойства низколежащих состояний в нечетных сферических и переходных ядрах. Для этого были сделаны следующие обобщения стандартной квазичастично-фононной модели [15]:

- расширение конфигурационного пространства так, чтобы квазичастичные состояния и состояния типа квазичастица \times фонон могли существовать в основном состоянии четно-четного остова.
- применение расширенного приближения случайных фаз (РПСФ) для расчёта матричных элементов разных квантовомеханических операторов в расширенном конфигурационном пространстве.

Помимо парных корреляций сверхпроводящего типа, обусловленных короткодействующей компонентой эффективного ядерного взаимодействия, дальнедействующая компонента квазичастичного взаимодействия также приводит к корреляциям в основном состоянии. В РПСФ, число квазичастиц в основном состоянии на каждом уровне учитывается в явном виде. Волновая функция нечетного ядра строится по аналогии с ПСФ и включает обратные амплитуды. Обобщенные уравнения КФМ выводятся с помощью метода уравнений движения. Во всех вычислениях принцип Паули учитывался посредством расчета точных коммутационных соотношений между операторами квазичастиц и фононов.

Таким образом были получены выражения для матричных элементов квазичастично-фононного взаимодействия как в возбуждённых состояниях так в рамках стандартного и расширенного приближений случайных фаз. Гамильтониан системы содержит два вида остаточного взаимодействия - спаривательное и дальнедействующее. Из общего мультипольного разложения для дальнедействующей силы был сохранен только квадрупольный член, играющий, как хорошо известно, основную роль для структуры низколежащих коллективных состояний. В рамках стандартного ПСФ мы изучили влияние на спектры и силы одночастичных состояний в окрестности уровня Ферми в нечетных изотопах бария. Одним из наиболее важных результатов диссертации является эффект сближения уровней первого и второго состояний с одинаковыми угловыми моментами и чётностями по сравнению с предсказаниями моделей, не учитывавших обратные амплитуды. Этот результат согласуется с экспериментальными данными и кроме того, улучшилось и описание фрагментации низколежащих одночастичных состояний.

Было сделано систематическое исследование поведения приведённых вероятностей E2-переходов из основного в первое квадрупольное состояние для серия чётно-чётных ядер в окрестности $A \sim 130$. Результаты этого исследования показали превосходство модели, основанной на РПСФ, при описании этих наблюдаемых величин. Это послужило мотивацией для последующего применения расширенной модели для исследования вероятностей электромагнитных переходов в нескольких нечётных изотопах, для которых существуют экспериментальные данные. Результаты расчётов указывают на улучшение, появляющееся главным образом из-за усиления фрагментации вследствие учета квазичастично-фононных примесей в волновой функции основного состояния. Применение РПСФ менее важно для описания вероятностей переходов в нечётных ядер, однако, оно одновременно приводит к улучшению согласия с экспериментальными данными при фиксированном значении параметров взаимодействия, как для нечётного ядра, так и для его чётно-чётного остова. В частности, если сила квадруполь-квадрупольного взаимодействия подогнана по спектру нечётного ядра, то энергия состояния 2_1^+ в соответствующем чётно-чётном остова получается ближе к измеренной по сравнению со стандартным ПСФ.

Проблема несохранения числа частиц в приближении БКШ в данной работе рассмотрена на основе метода Липкина-Ногами в рамках РПСФ. Помимо уменьшения эффектов, связанных с несохранением числа частиц, достоинством этого метода является отсутствие пороговых значений для сил спаривательного взаимодействия, ниже которых не существуют сверхпроводящие решения. Проведенные численные вычисления для переходной зарядовой плотности первого квадрупольного состояния в ^{68}Zn указывает на то, что полученные коррекции работают в правильном направлении, но они незначительны по величине.

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований и Европейского центра теоретических исследований по ядерной физике и смежным областям в городе Тренто (Италия), а также докладывались на следующих

научных форумах:

1. International Workshop “Nuclear Structure: Recent Developments” (dedicated to the 85th anniversary of V.G.Soloviev’s birth), October 14-16 2010, Dubna, Russia
2. 7th International Balkan School on Nuclear Physics “Nuclear Structure Challenges with Radioactive Beams”, September 15-22 2010, Adrasan-Antalya, Turkey
3. 29th International Workshop on Nuclear Theory, June 20-26 2010, Rila mountains, Bulgaria
4. 28th International Workshop on Nuclear Theory, June 21-26 2009, Rila mountains, Bulgaria
5. International Bogolyubov Conference “Problems of Theoretical and Mathematical Physics”, August 21-27 2009, РАН, МГУ, ОИЯИ, Москва-Дубна, Россия
6. 27th International Workshop on Nuclear Theory, June 23-28 2008, Rila mountains, Bulgaria
7. Helmholtz International Summer School "Nuclear Theory and Astrophysical Applications BLTP, JINR, Dubna, Russia
8. 26th International Workshop on Nuclear Theory, June 25-30 2007, Rila mountains, Bulgaria
9. 25th International Workshop on Nuclear Theory, June 26 - July 1 2006, Rila mountains, Bulgaria

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ, 4 из них из списка ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации 100 страниц машинописного текста, включая 8 рисунков и список литературы из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проведенных исследований. Дано краткое содержание диссертации.

В первой главе вводятся основные элементы квазичастично-фононной модели ядра [15] для сферических четно-четных и нечетных ядер.

В КФМ взаимодействие между квазичастицами и фононами определяет структуру состояний в нечетных ядрах. Отличительной особенностью этой модели является то, что квазичастично-фононное взаимодействие зависит только от характеристик квазичастиц и фононов и нет необходимости вводить дополнительные свободные параметры. В рамках этой модели изучалась фрагментация одноквазичастичных состояний в деформированных [16] и сферических ядрах [15, 17, 18]. В этих работах использовалось квазибозонное приближение

$$\langle [Q_{\lambda\mu i}, Q_{\lambda'\mu' i'}^\dagger] \rangle = \delta_{\lambda\lambda'} \delta_{\mu\mu'} \delta_{ii'}. \quad (1)$$

вместе с приближением ([20, 22]):

$$[\alpha_{jm}, Q_{\lambda\mu i}^\dagger] = 0. \quad (2)$$

Эти приближения исходят от предположения о бозонной природе фононных операторов $Q_{\lambda\mu i}^\dagger$. Позже, в работе [19] была разработана версия этой модели, в которой точно учитывалась фермионная структура фононов

$$[\alpha_{jm}, Q_{\lambda\mu i}^\dagger] = \sum_{j'm'} \langle jmj'm' | \lambda\mu \rangle \psi_{jj'}^{\lambda i} \alpha_{j'm'}^\dagger \quad (3)$$

и были получены поправки, учитывающие действие принципа Паули на трехквазичастичные состояния.

Волновые функции нечетного ядра, которые рассматривались в этих работах, включают только одноквазичастичные состояния и состояния типа квазичастица \times фонон:

$$\Psi_\nu(JM) = C_{J\nu} \alpha_{JM}^\dagger + \sum_{j\lambda i} D_{j\lambda i}(J\nu) P_{j\lambda i}^\dagger(JM)|\rangle, \quad (4)$$

где

$$P_{j\lambda i}^\dagger(JM) = [\alpha_j^\dagger Q_{\lambda i}^\dagger]_{JM} \quad (5)$$

оператор рождения состояния типа квазичастица×фонон.

В диссертации использовался следующий гамильтониан

$$H = \sum_{\tau}^{(n,p)} \left[\sum_{jm} (E_j - \lambda_\tau) a_{jm}^\dagger a_{jm} - \frac{1}{4} G_\tau^{(0)} : (P_0^\dagger P_0)^\tau : - \frac{1}{2} \sum_{\lambda\mu} \kappa^{(\lambda)} : (M_{\lambda\mu}^\dagger M_{\lambda\mu}) : \right]$$

, который включает среднее поле, спаривательное взаимодействие и дальнедействующую компоненту эффективных ядерных сил, соответственно.

Во второй главе обсуждаются ограничения квазибозонного приближения и вводится так называемое расширенное приближение случайных фаз (РПСФ), которое устраняет часть от рассогласованности стандартного ПСФ. Проблема с несохранением числа частиц, присущая приближению БКШ, решается в рамках РПСФ на основе метода Липкина-Ногами. Основные научные результаты диссертации представлены в параграфе 2.4, где обсуждается влияние обратных амплитуд на структурные изменения волновых функции. Обнаружены значительные изменения, как в энергии состояний из нижней части спектра рассмотренных ядер, так и в переходах между ними. РПСФ использовано при вычислении матричных элементов квазичастично×фононного взаимодействия.

Многочисленные улучшения ПСФ путем введения корреляций в основных состояний четно-четных ядер были предприняты, например, в работах [23–27]. Эти усовершенствованные модели основаны на более точных чем квазибозонное приближение и также связаны с более точным учетом принципа Паули при расчёте матричных элементов различных операторов.

РПСФ, которое было впервые предложено в работах [10] и [11], а затем разработано в [12, 14], доказало свою эффективность в улучшении теоретических результатов для описания многих физических наблюдаемых таких как, например, переходные зарядовые плотности.

В РПСФ вводятся величины ρ_j

$$\rho_j = \frac{1}{\sqrt{2j+1}} \sum_m \langle |\alpha_{jm}^\dagger \alpha_{jm}| \rangle, \quad (6)$$

которые представляют плотности числа заполнения квазичастиц на уровне j в основном состоянии. Основное состояние ядра $|\rangle$ является вакуумным состоянием для операторов фонона, т.е. $Q_{\lambda\mu i}|\rangle = 0$. Последовательный учёт квазичастичных плотностей в основных состояниях изменяет все уравнения стандартного КФМ. В результате система уравнений, которая описывает четно-четные ядра приобретает следующий вид:

$$\frac{1}{2} \sum_j (2j+1) \left\{ 1 - \frac{(1-2\rho_j)(E_j - \lambda)}{\sqrt{(E_j - \lambda)^2 + \Delta^2}} \right\} = n \quad (7)$$

$$\frac{G}{4} \sum_j \frac{2j+1}{\sqrt{(E_j - \lambda)^2 + \Delta^2}} (1 - 2\rho_j) = 1 \quad (8)$$

$$\frac{\kappa\lambda}{2\lambda+1} \sum_{jj'} (1 - \rho_{jj'}) \frac{(f_{jj'}^\lambda u_{jj'}^+)^2 (\varepsilon_j + \varepsilon_{j'})}{(\varepsilon_j + \varepsilon_{j'})^2 - \omega_{\lambda i}^2} = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{jj'} (1 - \rho_{jj'}) [(\psi_{jj'}^{\lambda i})^2 - (\varphi_{jj'}^{\lambda i})^2] = 2 \quad (10)$$

$$\rho_j = \frac{1}{2} \sum_{\lambda i j'} \frac{2\lambda+1}{2j+1} (1 - \rho_{jj'}) (\varphi_{jj'}^{\lambda i})^2. \quad (11)$$

Эта система отличается от стандартных уравнений КФМ присутствием “блокирующих” факторов $(1 - \rho_{jj'})$, благодаря которым уравнения (7)-(11) зацепляются. Эта взаимосвязь отражает тот факт что дальнедействующая сила разрывает пары нуклонов, что, соответственно, изменяет уравнения БКШ (7) и (8). Пологая $\rho_j = 0$ получаем базовую версию КФМ, в которой свойства квазичастиц влияют количественно на компонентный состав

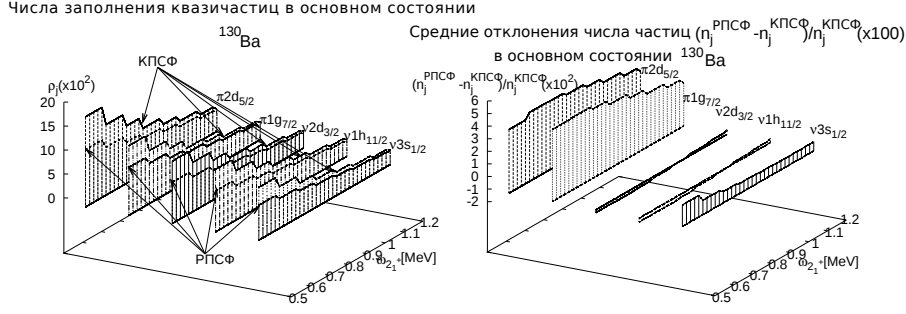


Рис. 1: Левая часть - квазичастичные плотности $\rho_j \times 100$ для валентных подоболочек в основном состоянии ^{130}Ba в рамках стандартного и расширенного ПСФ, как функции от энергии первого квадрупольного фонона. Правая часть - тоже самое что и левая, но для относительной разницы в числах заполнения нуклонов в указанных приближениях.

вибрационных состояний, но обратное действие - влияние вибрационных состояний на свойства квазичастиц - пренебрегается.

Результат расчёта для чисел заполнения валентных оболочек у ^{130}Ba представлен на рисунке 1, из которого видно, что размытость около уровня Ферми увеличивается вместе с интенсивностью дальнодействующей силы (и соответственно с уменьшением ω_{2+}). Из рисунка видно, что относительные разницы в числах заполнения достигают 5 %, как, например, для протонной подоболочки $2d_{5/2}$.

В параграфе 2.2 дано краткое изложение метода Липкина-Ногами и его применение для решения проблемы несохранения числа частиц в фоннном вакууме. Получена расширенная система уравнений, которая дополняет уравнения РПСФ.

В параграфе 2.3 рассматриваются состояния нечетного ядра, принадлежащие следующему классу функций [21]

$$\Psi_\nu(JM) = O_{JM\nu}| \rangle, \quad (12)$$

где

$$O_{JM\nu} = C_{J\nu}\alpha_{JM}^\dagger + \sum_{j\lambda i} D_{j\lambda i}(J\nu)P_{j\lambda i}^\dagger(JM) - E_{J\nu}\tilde{\alpha}_{JM} - \sum_{j\lambda i} F_{j\lambda i}(J\nu)\tilde{P}_{j\lambda i}(JM). \quad (13)$$

В отличие от волновых функций (4), наличие обратных амплитуд $E_{J\nu}$ и $F_{j\lambda i}(J\nu)$ в (12) учитывает вероятность существования квазичастичных и квазичастица×фононных конфигураций в основном состоянии четно-четного остова.

Структурные коэффициенты в волновой функции (12) определяются так, чтобы выполнялось уравнение движения

$$\langle\langle\{\delta O_{JM\nu}, H, O_{JM\nu}^\dagger\}\rangle\rangle = \eta_{J\nu}\langle\langle\{\delta O_{JM}, O_{JM}^\dagger\}\rangle\rangle. \quad (14)$$

При этой постановке задачи появляются два типа вершин квазичастично-фононного взаимодействия:

$$V(Jj\lambda i) = \left\langle\left\langle\left\{[\alpha_{JM}, H], P_{j\lambda i}^+(JM)\right\}\right\rangle\right\rangle \quad (15)$$

и

$$W(Jj\lambda i) = \left\langle\left\langle\left\{[\alpha_{JM}^+, H], \tilde{P}_{j\lambda i}^+(JM)\right\}\right\rangle\right\rangle. \quad (16)$$

Вершины $W(Jj\lambda i)$ возникают при включении в волновую функцию нечетного ядра обратных амплитуд. Ниже приведены приближенные выражения для этих величин в стандартном и расширенном ПСФ:

$$V^{\text{RPA}}(Jj\lambda i) = -\frac{1}{\sqrt{2}}[1 + \mathcal{L}(Jj\lambda i)]\Gamma(Jj\lambda i), \quad (17)$$

$$W^{\text{RPA}}(Jj\lambda i) = -\frac{1}{4}\sqrt{\frac{2\lambda+1}{2J+1}}[1 + \mathcal{L}(Jj\lambda i)]\sum_{i'\tau_0} \mathcal{A}_{\tau_0}(\lambda i i')\varphi_{J_j}^{\lambda i'}, \quad (18)$$

$$V^{\text{ERPA}}(Jj\lambda i) = -\frac{1}{\sqrt{2}}[1 - \rho_j + \mathcal{L}^*(Jj\lambda i)]\Gamma(Jj\lambda i), \quad (19)$$

$$W^{\text{ERPA}}(Jj\lambda i) = -\frac{1}{4}\sqrt{\frac{2\lambda+1}{2J+1}}[1 - \rho_j + \mathcal{L}^*(Jj\lambda i)] \sum_{i'} \mathcal{A}(\lambda i' i) \varphi_{Jj}^{\lambda i'}. \quad (20)$$

В этих формулах перенормировочные факторы, содержащие $\mathcal{L}(Jj\lambda i)$ отражают действие принципа Паули на трехквaziчастичные состояния. Для запрещённых состояний эти факторы зануляются, исключая их из конфигурационного пространства. Применение РПСФ дает важный эффект ослабления квазичастично-фононного взаимодействия, которое, как показано в диссертации, становится все более выраженным с ростом силы квадруполь-квадрупольного взаимодействия. Этот эффект позволяет при фиксированном значении силы квадруполь-квадрупольного взаимодействия, достигнуть лучшее согласие с экспериментом для энергии состояния 2_1^+ и спектра нечетного ядра.

В третьей главе на основе описанных в первой и второй главе приближении исследуется влияние корреляций в основном состоянии на вероятности электромагнитных переходов в четно-четных и нечетных ядрах, а также на энергетические спектры и спектроскопические факторы низлежащих состояний нечетных ядер в окрестности $A \sim 130$. Также, на примере ядра ^{68}Zn исследовано влияние учета сохранения частиц по методу Липкина-Ногами на переходную зарядовую плотность.

Установлено улучшенное согласие с экспериментальными данными для всех рассмотренных величин, являющееся следствием включения обратных амплитуд в волновую функцию нечётного ядра (12). Так например, установлено существенное уменьшение энергетического интервала между первыми и вторыми уровнями с одинаковыми угловыми моментами и четностями в серии нечетных изотопов бария $^{131-137}\text{Ba}$. Этот эффект становится более ярко выраженным по мере удаления от магического числа 82 для нейронной подсистемы. Как известно, вероятности переходов в нечетно-четных ядрах зависят главным образом от переходов между чистыми квазичастичными состояниями и состояниями типа квазичастица×фонон. Из-за увеличенной фрагментации одночастичных состояний при включении обратных амплитуд, увеличивается вклад состояния типа квазичастица×фонон в волновую функцию нечетного ядра, а вместе с ними и силы переходов, что позволяет приблизить резуль-

таты вычисления к экспериментальным значениям. Применение РПСФ улучшает результаты стандартного ПСФ так, что значение квадруполь-квадрупольного взаимодействия при котором достигается наилучшее совпадение с экспериментальными значениями для вероятностей переходов в нечетных ядрах, приближает энергию первого квадрупольного фонона в соответствующих четно-четных остовах к экспериментальным значениям для состояния 2_1^+ .

В заключении кратко сформулированы полученные в диссертации результаты.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Разработан метод, позволяющий одновременно учесть влияние корреляций в основных состояниях и принципа Паули на структуру низколежащих состояний в нечетных сферически и переходных ядрах. Вычислены матричные элементы взаимодействия квазичастиц с фононами в квазичастичном и расширенном ПСФ с учетом принципа Паули.
2. Выведенные новые уравнения нелинейной системы решены численно для конкретных ядер и установлено что в результате взаимодействия квазичастиц с фононами в основном состоянии энергетический интервал между первым и вторым состояниями с одинаковыми угловыми моментами и четностью существенно сокращается. Улучшается и описание спектроскопических факторов.
3. Достигнуто улучшенное описание для вероятностей перехода между низколежащими состояниями в нечетных ядрах. Показано, что это является следствием увеличенной фрагментации квазичастичных состояний из-за учета обратных амплитуд и применения расширенного ПСФ.

4. Установлено превосходство РПСФ над КПСФ при описании вероятностей перехода $B(E2|0_1^+ \rightarrow 2_1^+)$ в ядрах в окрестности ^{130}Ba .
5. Метод Липкина-Ногами применен в рамках расширенного ПСФ для более точного учета закона сохранения числа частиц в приближении БКШ. Проведенные вычисления для переходных зарядовых плотностей в ^{68}Zn показывают что полученные коррекции работают в правильном направлении, но они незначительны по величине.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. *Quasiparticle Phonon Nuclear Model for Odd-Mass Nuclei - Recent Developments*
S. Mishev, V.V. Voronov; Phys of Part and Nucl 41, N7 p.1119 (6 pp) (2010)
2. *Extended approximation for the lowest-lying states in odd-mass nuclei*
S. Mishev, V.V. Voronov, Phys Rev C 82, 064312 (7 pp) (2010)
3. *Корреляции в основном состоянии и структура нечетных ядер*
С.Р.Мишев и В.В.Воронов, , Письма в ЭЧАЯ 5, p.579 (9 стр.) (2008)
4. *Effects of ground state correlations on the structure of odd-mass spherical nuclei*
S. Mishev V. V. Voronov, Phys. Rev. C 78, 024310 (8 pp) (2008)
5. *Low-Lying States in Odd-Mass Nuclei and the Extended Random Phase Approximation*
S. Mishev. and V. V. Voronov, Proceedings of the XXVII International Workshop, Rila Mountains, Bulgaria, June 22 - 27 (8 pp) (2008).
6. *Extended random phase approximation and Lipkin-Nogami method*
S.Mishev, D.Karadjov, V.V.Voronov, Phys Atom Nucl 66, N10, p.1878 (5 стр.) (2003)

Список литературы

- [1] H.A.Bethe, Phys. Rev. **103** 5, (1956) 1353
- [2] M. B. Tsang, J. Lee, W. G. Lynch, Phys. Rev. Lett. **95** 22, (2005) 222501
- [3] M. B. Tsang *et al*, Phys. Rev. Lett. **102** 6, (2009) 062501
- [4] Peter K.A. De Witt Huberts, Nuclear Physics A **507** 1 (1990) 189
- [5] A. E. L. Dieperink, P. K. A. de Witt Huberts, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **40** (1990) 239
- [6] V. R. Pandharipande, I. Sick, P. K. A. d. Huberts, Rev. Mod. Phys. **69** 3 (1997) 981
- [7] G. J. Kramer, H. P. Blok, L. Lapikas, Nuclear Physics A **679** 3-4 (2001) 267
- [8] B.P.Кай *et al*, Phys. Rev. C **84** 2 (2011) 024325
- [9] K.L. Jones *et al*, Phys. Rev. C **84** 3 (2011) 034601
- [10] K. ji Hara, Progress of Theoretical Physics **32** 1 (1964) 88.
- [11] K. Ikeda, T. Udagawa, H. Yamaura, Progress of Theoretical Physics **33** 1 (1965) 22.
- [12] P.B. Джолос, Ф. Дэнау, Д. Янсен, ТМФ 20 (1974) 112
- [13] H. Lenske, J. Wambach, Physics Letters B **249** 3-4 (1990) 377

- [14] D. Karadjov, V. V. Voronov, F. Catara, Physics Letters B **306** (1993) 197.
- [15] V.G. Soloviev, Theory of Complex Nuclei, Pergamon, Oxford, 1976.
- [16] L. A. Malov, V. G. Soloviev, Nuclear Physics A **270** 1 (1976) 87.
- [17] D. Dambasuren, V. G. Soloviev, C. Stoyanov, A. I. Vdovin, Journal of Physics G: Nuclear Physics **2** 1 (1976) 25.
- [18] А. И. Вдовин, В. В. Воронов, В. Г. Соловьев, Ч. Стоянов, ЭЧАЯ **16** (1985) 246.
- [19] C. Z. Khuong, V. G. Soloviev, V. V. Voronov J. Phys. G **7** (1981) 151.
- [20] T. T. S. Kuo, E. U. Baranger, M. Baranger, Nuclear Physics A **79** (1965) 513.
- [21] V. V. der Sluys, D. V. Neck, M. Waroquier, J. Ryckebusch, Nuclear Physics A **551** (2) (1993) 210.
- [22] M. Waroquier, K. Heyde, Nuclear Physics A **164** (1) (1971) 113.
- [23] D. J. Rowe, Phys. Rev. **175** (4) (1968) 128.
- [24] J. D. Providencia, Nuclear Physics A **108** (1968) 589.
- [25] H. Lenske, J. Wambach, Physics Letters B **249** (3-4) (1990) 377.
- [26] S. Catara F., Dang N.D., Nuclear Physics A **579** (1994) 1.
- [27] J. Dukelsky, P. Schuck, Physics Letters B **387** (1996) 233.