



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2004-8

Б-823

На правах рукописи
УДК 539.42.3

БОРЗОВ
Иван Николаевич

БЕТА-РАСПАД НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР
И АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

СЗ41.1а + СЗ41е

Дубна 2004

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации – Физико-энергетическом институте им. А. И. Лейпунского.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

доктор физико-математических наук

доктор физико-математических наук

А. И. Вдовин

Д. К. Надежин

И. Н. Изосимов

Ведущая организация:

Российский научный центр – Курчатовский Институт, Москва

Защита диссертации состоится на заседании специализированного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, «_____» _____ 2004 г. по адресу г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан «_____» _____ 200__ г.

Ученый секретарь Совета:

доктор физико-математических наук

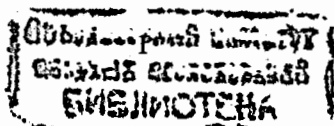


С. В. Голоскоков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Программы развития современных ускорителей радиоактивных ионов (GSI, MAFF, RIKEN, RIA) существенно расширяют возможности синтеза ядер, удаленных от долины β -стабильности. Продвижение в новые области ядерной *terra incognita* стимулирует теоретические исследования ядерных систем с необычным нуклонным составом: от нейтронных звезд – до атомных ядер с сильной нейтрон-протонной асимметрией ($N/Z \gg 1$ и < 1). Фундаментальный аспект проблемы связан с изучением эволюции структуры ядра с ростом квантового числа изоспина, что требует развития *самосогласованных* подходов в теории систем многих тел. Для ядерно-астрофизических приложений, а также для разработки электроядерных систем трансмутации высокоактивных нуклидов важна надежная *экстраполяция* теоретических ядерных данных в экспериментально недоступные области ядерной карты.

Астрофизический аспект исследований ядер с высокой изотопической асимметрией обусловлен фундаментальной связью ядерных процессов и нуклеосинтеза элементов, сопровождающего коллапс массивных звезд. В моделях нуклеосинтеза, помимо неопределенностей, вносимых астрофизическим сценарием, всегда присутствуют погрешности прогнозирования ядерных данных для нескольких тысяч экзотических ядер. Измерения и теоретические предсказания масс и β -распадных характеристик нуклидов вблизи β -нестабильных дважды-магических ядер ^{78}Ni , ^{132}Sn необходимы для решения проблемы r -процесса (быстрого астрофизического нуклеосинтеза), ответственного за образование более половины тяжелых ядер, известных в природе. Знание ядерных характеристик нуклидов из области нейтронно-дефицитных дважды-магических ядер ^{48}Ni , ^{100}Sn важно для анализа быстрого rp -процесса в Сверхновых II типа. Для количественного объяснения распространенностей редких (обойденных) нуклидов, производимых в p -процессе, следует учитывать реакции неупругого рассеяния μ , τ -нейтрино за счет электрослабых нейтральных токов и захвата электронных нейтрино за счет заряженных токов.

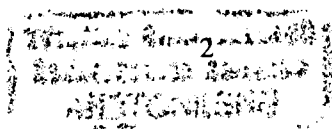


Надежное описание эволюции оболочечной структуры с ростом изоспина ядра требует выхода за рамки феноменологических моделей, основанных на эмпирических потенциалах среднего поля и спаривания. Обоснование их экстраполяции в области ядер с высокой изотопической асимметрией отсутствует. Строгое соотношение между самосогласованными полями и зависящим от плотности эффективным взаимодействием в конечных ферми-системах, удерживаемых внутренними силами (Ходель, Фаянс 1973), позволяет на фундаментальном уровне описать переход от стабильных к бета-нестабильным ядрам и слабосвязанным квантовым системам вблизи линий нуклонной нестабильности.

До недавнего времени для глобальных расчетов ядерных масс использовались эмпирические массовые формулы, а β -распад описывался статистически или в полумикроскопических подходах с эмпирическими потенциалами среднего поля и спаривания и схематическим эффективным NN -взаимодействием. Не ставилась и задача самосогласованного описания β -силовой функции в широком энергетическом интервале, включая область континуума, что необходимо для расчетов ν_e -захвата – процесса, обратного β -распаду. Его сечение определяется полной β -силовой функцией как в пределах, так и вне окна β -распада.

До сих пор глобальные микроскопические расчеты периодов β -распада проводились в приближении разрешенных переходов. Экспериментально было показано (Fogelberg, 1983), что в области ^{132}Sn высокоэнергетический β^- -распад первого запрета (FF) может конкурировать с распадом Гамова-Теллера (GT). Однако анализу роли оболочечных эффектов в высокоэнергетическом β -распаде не уделялось достаточного внимания. Не было и микроскопических расчетов вкладов GT и FF-переходов в периоды β -распада ядер вблизи заполненных нейтронных оболочек с $N=50, 82, 126$, важных для r -процесса.

Итак, не существовало подходов к глобальным расчетам скоростей реакций слабого взаимодействия, основанных на самосогласованном описании основных состояний ядер, а модели, применявшиеся для расчета скоростей слабых ядерных процессов, можно назвать схематичными.



Основная цель диссертации состоит в развитии самосогласованного подхода для теоретического прогнозирования ядерных масс и скоростей процессов слабого взаимодействия экзотических ядер, и применении его к теоретическому анализу экспериментов на пучках радиоактивных ионов и астрофизическому моделированию процессов нуклеосинтеза элементов в Сверхновых II типа.

Научная новизна. В диссертации разработан подход к глобальным расчетам свойств спин-изоспиновых возбуждений ядер в рамках теории локального энергетического функционала плотности (EDF). Для самосогласованного описания основных состояний использованы HF+BCS и обобщенное приближение Томаса-Ферми с интегральной поправкой Струтинского (ETFSI).

Впервые развит подход к зарядово-обменным возбуждениям сверхтекучих ядер в самосогласованной теории конечных ферми-систем (ТКФС) с точным учетом непрерывного спектра, аналогичный CQRPA с учетом спаривания и эффективных спин-изоспиновых NN -взаимодействий в каналах частица-дырка (ph) и частица-частица (pp). Из анализа спектров и поляризационных характеристик реакций перезарядки (p,n), (p,n) найдена константа эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия нуклонов в канале частица-частица.

В рамках EDF+CQRPA подхода впервые рассчитаны периоды β -распада для ≈ 800 сферических ядер, наиболее важных для динамики r -процесса, а также сечения захвата электронных нейтрино (антинейтрино) на стабильных и нестабильных нейтронно-избыточных (дефицитных) ядрах с $Z \geq 26$ вплоть до линии нейтронной (протонной) устойчивости.

Развита микроскопическая модель учета вклада переходов первого запрета в периоды β -распада. Показан их определяющий вклад в периоды β -распада ядер вблизи заполненных нейтронных оболочек с $N = 82, 126$.

Использование ядерных масс и сечений захвата электронных нейтрино (антинейтрино), рассчитанных в рамках ETFSI+CQRPA, позволило впервые количественно объяснить экспериментальную распространенность редкого изотопа ^{138}La ($^{138}\text{La}/^{139}\text{La} = 10^{-4}$) в солнечной системе.

**На защиту выдвигаются следующие
основные положения:**

1. В рамках самосогласованного подхода развито приближение для глобальных расчетов свойств основных состояний и скоростей процессов слабого взаимодействия в атомных ядрах, удаленных от долины стабильности.
2. Впервые для расчета свойств зарядово-обменных возбуждений, в рамках самосогласованной ТКФС развита модель с точным учетом одночастичного континуума, спаривания с блокировкой нечетной квазичастицей и эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия в каналах pp и pn .
3. Найден новый вариант сил Скирма SkSC17, позволяющий описать свойства нейтронной материи и рассчитать в ETFSI-2 приближении ядерные массы с высокой точностью (среднеквадратичное отклонение фита к 1722 экспериментально известным массам – 720 кэВ). В рамках ETFSI-2 приближения предсказаны массы экспериментально неизвестных нейтронно-избыточных ядер вплоть до линии нейтронной устойчивости.
4. Из теоретического анализа спектров реакций перезарядки (p,n) и (n,p) при промежуточной энергии и их поляризационных характеристик определена константа эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия теории конечных ферми-систем в канале частица-частица.

Рассчитаны факторы подавления полной силы β^+ -переходов Гамова-Теллера в нейтронно-дефицитных ядрах и сделан вывод о потере части β^+ -силы в ряде экспериментов, использующих γ -спектроскопию высокого разрешения.

5. В рамках ETFSI+CQRPA приближения предсказаны периоды β -распада Гамова-Теллера для ~ 800 сферических и около-сферических ядер, важных для моделирования r -процесса, и сечения захвата электронных нейтрино и антинейтрино для всех стабильных и нестабильных ядер с $Z \geq 26$.

Впервые показана необходимость учета эффективного NN-взаимодействия в канале частица-частица для корректного описания четно-нечетных эффектов в периодах β -распада.

6. Предложен новый метод расчета вкладов переходов первого запрета в периоды β -распада. На основе HF+BCS+CQRPA расчетов вблизи замкнутых нейтронных оболочек $N = 50, 82, 126$ впервые показана определяющая роль оболочечных эффектов в высокоэнергетическом β -распаде.

Сделан вывод о доминировании высокоэнергетических переходов первого запрета для тяжелых экзотических ядер с $N \sim 82, Z > 50$ и $N = 126, Z = 60-70$, важных для анализа r -процесса нуклеосинтеза. Предсказанные периоды β -распада подтверждаются результатами экспериментов в области нейтронно-избыточных изотопов $^{133-138}\text{Sn}$ и $^{215-218}\text{Bi}$.

7. Предсказанные массы ядер и скорости слабых процессов использованы для астрофизического моделирования r - и p -процессов нуклеосинтеза в Сверхновых II типа. Изучено влияние периодов β -распада на распространенности нуклидов, рассчитанных в различных моделях r -процесса.

Впервые показано, что экспериментальная распространенность редкого изотопа ^{138}La в солнечной системе объясняется его производством в реакции $^{138}\text{Ba}(\nu, e^-)$.

Практическая ценность диссертации. Разработанные в диссертации программы использовались для анализа экспериментов по спин-изоспиновым возбуждениям атомных ядер: в реакциях (p,n) , (n,p) при низких энергиях (ФЭИ, Обнинск; 1988-90) и промежуточных энергиях (UICF; 1992), в реакциях (${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{He}$) (Курчатовский Институт; 1984). Были также выполнены расчеты для разработки In-F детектора солнечных нейтрино и реакторных антинейтрино (Курчатовский институт; 1995).

Подход, базирующийся на самосогласованном описании основных состояний, особенно эффективен для предсказания характеристик спин-изоспиновых возбуждений в ядрах, удаленных от долины стабильности. Он применялся для анализа результатов и постановки новых экспериментов в области нейтронно-дефицитного дважды-магического ядра ${}^{100}\text{Sn}$ (GSI Collaboration; 1993), для анализа экспериментов в области ${}^{146}\text{Gd}$ (ЛИЯФ; 1990). В настоящее время результаты, полученные в диссертации, используются для постановки новых экспериментов по исследованию β -распадных свойств новых нейтронно-избыточных нуклидов в области дважды-магического ${}^{78}\text{Ni}$, и в области к «востоку» от ${}^{208}\text{Pb}$ (ISOLDE, CERN-IKS, Leuven Collaboration; 2003).

Развитый в диссертации подход активно используется для астрофизических приложений. На основе глобальных расчетов периодов β -распада и сечений захвата электронных нейтрино (антинейтрино) сформированы разделы электронной библиотеки ядерных данных для астрофизических приложений <http://www-astro.ulb.ac.be> (Таблицы ядерных масс: [Masses.ETFSI-2], Таблицы периодов β -распада: [Beta-decay], Таблицы сечений захвата нейтрино (анти-нейтрино): [Neutrino (anti-neutrino) cross sections]).

Апробация диссертации. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на семинарах ГНЦ РФ ФЭИ (Обнинск); РИЦ «Курчатовский институт» (Москва); ОИЯИ (Дубна); Института теоретической и экспериментальной физики (Москва); Института астрофизики (Брюссель); Института теории ядра (Сиэтл, США), Института теории ядра (Орсэ, Франция), ежегодных совещаниях по «Структуре ядра и ядерной спектроскопии» (1989-1991); международных конференциях

"Nuclei Far from Stability" (1992, Bernkastel-Kues, Germany, 1995 Arles, France); «Tours Conference on Nuclear Physics», (Tours, France, 1997, 2003); «Stellar abundances and nucleosynthesis» (Сиэтл, США, 2002), на IV-VI международных симпозиумах «Nuclei in the Cosmos» (1996, Notre Dame, USA; 1998, Volos, Greece; 2000, Aarhus, Denmark); международных симпозиумах «Nuclear Many-Body Problem-2001» (Brijuni, Croatia, 2001), «Nuclear astrophysics» и «Nuclear Structure and Dynamics at the Limits», (Hirschegg, Austria, 1998, 2003), «Relativistic Nuclear Models for Physics of Radioactive Beams», (Bad-Honnef, Germany, 2003), NSRT-03 (Дубна, 2003) и на ежегодных международных рабочих совещаниях «Meeting of Nuclear Astrophysicists and Nuclear Physicists» (Brussels, 1993-2002).

Публикации. Включенные в диссертацию результаты опубликованы в 24 работах и отражены в обзорах [14, 23].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 238 страниц текста с 41 рисунком, 17 таблицами и библиографический список литературы из 267 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается влияние точности расчетов ядерных масс и периодов β -распада на моделирование астрофизического нуклеосинтеза. Отмечена особая роль самосогласованных подходов и уникальная возможность их проверки в экспериментах на радиоактивных пучках. Определены основные задачи диссертации.

Отмечено, что наибольшую «ядерно-физическую» неопределенность в моделирование процессов нуклеосинтеза вносят массовые формулы. В часто используемой эмпирической «микро-макро» модели (Finite Range Droplet Model; FRDM, Moeller, 1995) полная энергия связи разделяется на макроскопическую и микроскопическую части, независимым образом параметризованные для ядер вблизи линии стабильности. С ростом изотопической асимметрии предсказания

FRDM и других моделей различаются, но для эмпирических моделей обоснованность экстраполяции неочевидна.

Для надежной экстраполяции ядерных масс следует обратиться к поиску массовых формул, основанных на универсальном энергетическом функционале плотности (лагранжиане, эффективном NN -взаимодействии) с небольшим числом параметров, найденных фитированием рассчитанных и экспериментальных масс для ограниченного числа ядер (Ходель, Саперштейн, 1982; Фаянс 1998; Bulgac, 2002) или фитированием ко всем экспериментальным массам (Pearson et al., 1995).

Расчеты таблиц ядерных масс, основанных на эффективном NN -взаимодействии, фитированном к более чем 1800 экспериментально измеренным массам, были до недавнего времени неосуществимы в приближении Хартри-Фока со спариванием БКШ (HF-BCS), а тем более в приближении Хартри-Фока-Боголюбова-Де Гинеса (HFBG), из-за огромного объема вычислений. Для микроскопических расчетов использовалось обобщенное приближение Томаса-Ферми, с учетом интегральной поправки Струтинского - ETFSI (Extended Thomas-Fermi + Strutinski Integral) (Pearson et al., 1995). Это вариационное приближение к HF методу отвечает массовой формуле «микро-макро» типа, однако степень когерентности ее микро- и макроскопических компонент выше, чем в FRDM - обе эти части базируются на едином эффективном NN -взаимодействии Скирма. В подходе ETFSI-1 ядерные массы описываются с точностью, сравнимой с точностью в FRDM. Однако силы Скирма SKSC4 (Pearson et al., 1995), используемые в массовой формуле ETFSI-1, приводят к коллапсу нейтронной материи при плотностях порядка ядерной плотности. Естественно возникает задача разработки новой массовой формулы, применимой для ядер с экстремальным нейтронным избытком и нейтронных звезд.

Точность расчетов скоростей реакций слабого взаимодействия также сказывается на моделировании r -процесса. Эти характеристики чувствительны к деталям структуры ядра. Так, период β -распада по быстрому GT-каналу определяется энергетическим распределением малой доли (1-2 %) безмодельного правила сумм Икеды $3(N-Z)$. Различные модели дают сильный разброс периодов β -распада, практически не

нарушая правила сумм. Разброс оценок особенно велик для сферических ядер вблизи заполненных нейтронных оболочек $N=50, 82, 126$, определяющих время протекания r -процесса. Учет вклада переходов первого запрета для ядер вблизи $N=82, 126$ приводит к еще более сильным различиям в оценках временного масштаба r -процесса. Отмечено, что при расчетах периодов β -распада также следует контролировать энергию гигантского резонанса Гамова-Теллера (GTR). Иначе периоды β -распада и сечения захвата нейтрино могут существенно искажаться.

Глава 1 посвящена разработке приближения к самосогласованному подходу к расчетам ядерных масс и скоростей процессов слабого взаимодействия.

В разделе 1.1 дан подробный обзор микроскопических подходов к β -силовой функции. Первые микроскопические глобальные оценки периодов β^- -распада были выполнены в трехуровневой RPA-модели (Гапонов, Лютостанский, 1981) со спин-изоспиновым взаимодействием Ландау-Мигдала (параметр g' определялся из условия SU(4)-симметрии). В работах (Klapdor-Kleingrothaus et al., 1990) использовались зарядово-обменное квазичастичное приближение случайной фазы (QRPA), эмпирические массовые формулы и потенциалы среднего поля, сепарабельное NN -взаимодействие в каналах частица-дырка (ph) и частица-частица (pp). Расчеты выполнялись в приближении разрешенных GT-переходов.

Упрощенный вариант аналогичной модели, в котором исключалось эффективное NN -взаимодействие в канале pp , применялся для расчетов полных таблиц периодов β -распада (Moeller, 1997). Фактически, использовалось BCS+RPA приближение, нарушающее $O(8)$ симметрию QRPA уравнений (Kerman, 1961; Flowers, 1961). Более разумный способ исключения pp -взаимодействия сводится к RPA приближению без учета BCS спаривания, что соответствует симметрии SU(4).

Исключать pp -взаимодействие из QRPA уравнений при сохранении парных BCS корреляций некорректно. Во-первых, pp -взаимодействие существенно подавляет вероятности β^+ -распада (Vogel, 1988; Faessler, 1988) и периоды β^- -распада (Борзов и др., 1989). Во-вторых, духовые эффекты, возникающие

за счет нарушения симметрии QRPA, приводят к усилению (до нескольких порядков) четно-нечетных различий периодов β^- -распада соседних изотопов, что не подтверждается экспериментальными данными, в частности, новыми данными, полученными для нейтронно-избыточных изотопов олова (Shergur et al., 2002) и Bi (DeWitte et al., 2003) на RILIS CERN.

В разделе 1.2 изложен подход к основным состояниям в теории локального энергетического функционала плотности (EDF). Выбрано приближение для плотности энергии спаривания.

В разделе 1.3. развивается приближение для описания спин-изоспиновых возбуждений (Борзов и др., 1996). Спиново-зависящие (T -нечетные) компоненты EDF слабо влияют на свойства основных состояний, определяемые скалярными (T -четными) компонентами EDF. Поэтому независимо от исходного функционала для QRPA расчетов выбрано универсальное спин-изоспиновое NN -взаимодействие ТКФС, хорошо описывающее магнитные свойства и спин-изоспиновые функции отклика ядер. В подходе EDF+CQRPA константа Ландау-Мигдала g' для такого взаимодействия, найденная из энергетического положения GTR в ядре ^{208}Pb , близка к известному эмпирическому значению.

Отмечено, что универсальность спин-изоспинового взаимодействия (независимость от A) проявляется лишь для QRPA на полном одночастичном базисе. Для использования этого преимущества впервые развит метод точного учета непрерывного спектра в задаче QRPA для зарядово-обменных возбуждений в сверхтекучих ядрах (Борзов и др., 1989).

Итак, в EDF+CQRPA модели β -силовая функция рассчитывается с самосогласованием основного состояния и с учетом ph континуума, спаривания, и эффективных взаимодействий в каналах ph и pp . Спин-изоспиновое эффективное NN -взаимодействие в канале ph : $g'\delta(r_{12})+\pi\rho$ характеризуется балансом короткодействующего отталкивания g' и дальнедействующего однопионного и ρ -мезонного притяжения. Спин-изоспиновое эффективное NN -взаимодействие в pp -канале, часто называемое $T=0$ спариванием, выбрано в форме $g'_s\delta(r_{12})$, аналогичной $T=1$ спариванию (см. гл. 3).

нарушая правила сумм. Разброс оценок особенно велик для сферических ядер вблизи заполненных нейтронных оболочек $N=50, 82, 126$, определяющих время протекания r -процесса. Учет вклада переходов первого запрета для ядер вблизи $N=82, 126$ приводит к еще более сильным различиям в оценках временного масштаба r -процесса. Отмечено, что при расчетах периодов β^- -распада также следует контролировать энергию гигантского резонанса Гамова-Теллера (GTR). Иначе периоды β^- -распада и сечения захвата нейтрино могут существенно искажаться.

Глава 1 посвящена разработке приближения к самосогласованному подходу к расчетам ядерных масс и скоростей процессов слабого взаимодействия.

В разделе 1.1 дан подробный обзор микроскопических подходов к β -силовой функции. Первые микроскопические глобальные оценки периодов β^- -распада были выполнены в трехуровневой RPA-модели (Гапонов, Лютостанский, 1981) со спин-изоспиновым взаимодействием Ландау-Мигдала (параметр g' определялся из условия $SU(4)$ -симметрии). В работах (Klapdor-Kleingrothaus et al., 1990) использовались зарядово-обменное квазичастичное приближение случайной фазы (QRPA), эмпирические массовые формулы и потенциалы среднего поля, сепарабельное NN -взаимодействие в каналах частица-дырка (ph) и частица-частица (pp). Расчеты выполнялись в приближении разрешенных GT-переходов.

Упрощенный вариант аналогичной модели, в котором исключалось эффективное NN -взаимодействие в канале pp , применялся для расчетов полных таблиц периодов β^- -распада (Moeller, 1997). Фактически, использовалось BCS+RPA приближение, нарушающее $O(8)$ симметрию QRPA уравнений (Kerman, 1961; Flowers, 1961). Более разумный способ исключения pp -взаимодействия сводится к RPA приближению без учета BCS спаривания, что соответствует симметрии $SU(4)$.

Исключать pp -взаимодействие из QRPA уравнений при сохранении парных BCS корреляций некорректно. Во-первых, pp -взаимодействие существенно подавляет вероятности β^+ -распада (Vogel, 1988; Faessler, 1988) и периоды β^- -распада (Борзов и др., 1989). Во-вторых, духовые эффекты, возникающие

за счет нарушения симметрии QRPA, приводят к усилению (до нескольких порядков) четно-нечетных различий периодов β -распада соседних изотопов, что не подтверждается экспериментальными данными, в частности, новыми данными, полученными для нейтронно-избыточных изотопов олова (Shergur et al., 2002) и Bi (DeWitte et al., 2003) на RILIS CERN.

В разделе 1.2 изложен подход к основным состояниям в теории локального энергетического функционала плотности (EDF). Выбрано приближение для плотности энергии спаривания.

В разделе 1.3. развивается приближение для описания спин-изоспиновых возбуждений (Борзов и др., 1996). Спиново-зависящие (T-нечетные) компоненты EDF слабо влияют на свойства основных состояний, определяемые скалярными (T-четными) компонентами EDF. Поэтому независимо от исходного функционала для QRPA расчетов выбрано универсальное спин-изоспиновое NN -взаимодействие ТКФС, хорошо описывающее магнитные свойства и спин-изоспиновые функции отклика ядер. В подходе EDF+CQRPA константа Ландау-Мигдала g' для такого взаимодействия, найденная из энергетического положения GTR в ядре ^{208}Pb , близка к известному эмпирическому значению.

Отмечено, что универсальность спин-изоспинового взаимодействия (независимость от A) проявляется лишь для QRPA на полном одночастичном базисе. Для использования этого преимущества впервые развит метод точного учета непрерывного спектра в задаче QRPA для зарядово-обменных возбуждений в сверхтекучих ядрах (Борзов и др., 1989).

Итак, в EDF+CQRPA модели β -силовая функция рассчитывается с самосогласованием основного состояния и с учетом ph континуума, спаривания, и эффективных взаимодействий в каналах ph и pp . Спин-изоспиновое эффективное NN -взаимодействие в канале ph : $g'\delta(r_{12})+\pi+\rho$ характеризуется балансом короткодействующего отталкивания g' и дальнедействующего однопионного и ρ -мезонного притяжения. Спин-изоспиновое эффективное NN -взаимодействие в pp -канале, часто называемое $T=0$ спариванием, выбрано в форме $g'_s\delta(r_{12})$, аналогичной $T=1$ спариванию (см. гл. 3).

Таким образом, ценой введения констант g' , g'_s удается универсальным образом описать β -силовую функцию в широком диапазоне ядер.

Для расчетов β -распадных характеристик ядер: периода распада, β -моментов и парциального времени жизни использованы переходные плотности ТКФС и формализм β -силовой функции и показаны преимущества такого подхода.

В разделе 1.4 разработана микроскопическая модель учета вклада FF переходов в периоды β -распада. Метод основан на замене релятивистских операторов α (векторный момент) и γ_5 (аксиальный заряд) на операторы, зависящие только от координат и спинов нуклона. Условия согласования приводят к связи β -моментов $\langle\alpha\rangle$ и $\langle i\vec{r}\rangle$, найденной в работе (Ahrens, 1951) из правил сумм, а в работе (Moriga, 1959) на основании CVC. Для матричных элементов γ_5 и $\langle i\vec{\sigma}\cdot\vec{r}\rangle$ точного соотношения нет (из-за PCAC). Основываясь на правилах сумм, в самосогласованной ТКФС получено приближенное соотношение, учитывающее перенормировку γ_5 в ядерной среде. Для редуцированных внешних полей глобальные расчеты β -распадных характеристик нейтронно-избыточных ядер значительно упрощаются.

В разделе 1.5 в рамках самосогласованного подхода к β -силовой функции развита модель для расчетов сечений нейтринного и анти-нейтринного захвата на атомных ядрах. Учтены механизмы IAS-возбуждения, GT-возбуждения и девозбуждения в нестабильных ядрах; последнее играет важную роль в нейтронно-избыточных ядрах вблизи линии нейтронной нестабильности и в нейтронно-дефицитных ядрах.

Глава 2 посвящена разработке функционалов плотности для самосогласованных расчетов характеристик основных состояний ядер. В HF-BCS приближении рассматриваются феноменологический локальный функционал плотности Скирма и функционал более общего вида, предложенный Фаянсом и др., 1984. Для глобальных расчетов основных состояний развито усовершенствованное приближение Томаса-Ферми с интегральной поправкой Струтинского (ETFSI).

В разделе 2.1 рассмотрен функционал DF3, разработанный специально для описания одночастичных состояний нейтронно-избыточных ядер и их распадных характеристик. Точность расчетов масс в рамках DF3 (с использованием регуляризованного спаривания) несколько ниже, чем для ETFSI-2, однако функционал DF3 надежно описывает экспериментальные одночастичные энергии в ^{132}Sn . Наряду с силами Скирма, он важен для расчетов периодов β -распада наиболее важных для r -процесса ядер.

В разделе 2.2 кратко представлены основы ETFSI приближения к HF методу и предложен новый вариант ETFSI-2, устраняющий недостатки предыдущих версий подхода.

Силы SkSC4 (Pearson et al., 1995) приводят к нефизическому коллапсу нейтронной материи уже при плотностях порядка ядерной плотности. Критически проанализированы различные варианты взаимодействия Скирма и предложен новый вариант SkSC17, обеспечивающий одновременно: устойчивость нейтронной материи и оптимальное описание экспериментально известных масс для 1772 атомных ядер. Массовая формула ETFSI-2 применима для описания ядер с экстремальным нейтронным избытком и для нейтронных звезд.

В рамках модифицированного приближения ETFSI-2 оказывается возможным описать ядерные массы с большей точностью, чем в рамках ETFSI-1. Среднеквадратичное отклонение от 1722 измеренных масс для найденного взаимодействия Скирма SkSC17 (Borzov, 2000) составляет 730 кэВ, а для (разностных) величин S_n , Q_β 630 и 690 кэВ, соответственно. Сравнение с недавно проведенными расчетами ядерных масс в рамках HF-BCS подхода (Goriely, 2001) и в рамках HFBG подхода (Samyn, 2002) показывают, что качество фита к известным ядрам и экстраполяция к удаленным ядрам в ETFSI-2 подходе близки к HF-BCS и HFBG. В разделах 2.3-2.4 проанализированы результаты глобальных расчетов масс, деформаций, энергий отделения нуклонов и полных энергий β -распада в рамках ETFSI-2 подхода. Указано, что разности одночастичных энергий для основных β -переходов в ETFSI приближении близки к расчетам в рамках функционала DF3 и к экспериментальным одночастичным энергиям в области ^{132}Sn .

Таким образом, ценой введения констант g' , g'_ξ удастся универсальным образом описать β -силовую функцию в широком диапазоне ядер.

Для расчетов β -распадных характеристик ядер: периода распада, β -моментов и парциального времени жизни использованы переходные плотности ТКФС и формализм β -силовой функции и показаны преимущества такого подхода.

В разделе 1.4 разработана микроскопическая модель учета вклада FF переходов в периоды β -распада. Метод основан на замене релятивистских операторов α (векторный момент) и γ_5 (аксиальный заряд) на операторы, зависящие только от координат и спинов нуклона. Условия согласования приводят к связи β -моментов $\langle \alpha \rangle$ и $\langle i\vec{r} \rangle$, найденной в работе (Ahrens, 1951) из правил сумм, а в работе (Morita, 1959) на основании CVC. Для матричных элементов γ_5 и $\langle i\vec{\sigma} \cdot \vec{r} \rangle$ точного соотношения нет (из-за PCAC). Основываясь на правилах сумм, в самосогласованной ТКФС получено приближенное соотношение, учитывающее перенормировку γ_5 в ядерной среде. Для редуцированных внешних полей глобальные расчеты β -распадных характеристик нейтронно-избыточных ядер значительно упрощаются.

В разделе 1.5 в рамках самосогласованного подхода к β -силовой функции развита модель для расчетов сечений нейтринного и анти-нейтринного захвата на атомных ядрах. Учтены механизмы IAS-возбуждения, GT-возбуждения и девозбуждения в нестабильных ядрах; последнее играет важную роль в нейтронно-избыточных ядрах вблизи линии нейтронной нестабильности и в нейтронно-дефицитных ядрах.

Глава 2 посвящена разработке функционалов плотности для самосогласованных расчетов характеристик основных состояний ядер. В HF-BCS приближении рассматриваются феноменологический локальный функционал плотности Скирма и функционал более общего вида, предложенный Фаянсом и др., 1984. Для глобальных расчетов основных состояний развито усовершенствованное приближение Томаса-Ферми с интегральной поправкой Струтинского (ETFSI).

В разделе 2.1 рассмотрен функционал DF3, разработанный специально для описания одночастичных состояний нейтронно-избыточных ядер и их распадных характеристик. Точность расчетов масс в рамках DF3 (с использованием регуляризованного спаривания) несколько ниже, чем для ETFSI-2, однако функционал DF3 надежно описывает экспериментальные одночастичные энергии в ^{132}Sn . Наряду с силами Скирма, он важен для расчетов периодов β -распада наиболее важных для r -процесса ядер.

В разделе 2.2 кратко представлены основы ETFSI приближения к HF методу и предложен новый вариант ETFSI-2, устраняющий недостатки предыдущих версий подхода.

Силы SkSC4 (Pearson et al., 1995) приводят к нефизическому коллапсу нейтронной материи уже при плотностях порядка ядерной плотности. Критически проанализированы различные варианты взаимодействия Скирма и предложен новый вариант SkSC17, обеспечивающий одновременно: устойчивость нейтронной материи и оптимальное описание экспериментально известных масс для 1772 атомных ядер. Массовая формула ETFSI-2 применима для описания ядер с экстремальным нейтронным избытком и для нейтронных звезд.

В рамках модифицированного приближения ETFSI-2 оказывается возможным описать ядерные массы с большей точностью, чем в рамках ETFSI-1. Среднеквадратичное отклонение от 1722 измеренных масс для найденного взаимодействия Скирма SkSC17 (Bogzov, 2000) составляет 730 кэВ, а для (разностных) величин S_n , Q_β 630 и 690 кэВ, соответственно. Сравнение с недавно проведенными расчетами ядерных масс в рамках HF-BCS подхода (Goriely, 2001) и в рамках HFBG подхода (Samyn, 2002) показывают, что качество фита к известным ядрам и экстраполяция к удаленным ядрам в ETFSI-2 подходе близки к HF-BCS и HFBG. В разделах 2.3-2.4 проанализированы результаты глобальных расчетов масс, деформаций, энергий отделения нуклонов и полных энергий β -распада в рамках ETFSI-2 подхода. Указано, что разности одночастичных энергий для основных β -переходов в ETFSI приближении близки к расчетам в рамках функционала DF3 и к экспериментальным одночастичным энергиям в области ^{132}Sn .

В главе 3 в рамках развитого EDF+CQRPA приближения исследуются спин-изоспиновые возбуждения стабильных ядер и из анализа экспериментальных данных определяются константы эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия в ph и pp -каналах.

В разделе 3.1 предложен метод определения параметров эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия в канале частица-частица из совместного анализа экспериментальных данных о распределении силы GT-переходов (p, n^{-1}) и (n, p^{-1}) , извлеченной из экспериментальных спектров реакций перезарядки (p, n) и (n, p) типов. Показано, что за счет полноты одночастичного базиса и независимости эффективных взаимодействий ТКФС в каналах pp и ph увеличивается разность между эффективной константой g'_ξ , найденной из описания спектров реакций (p, n) , (n, p) и критической константой pp взаимодействия. Таким образом, в CQRPA приближении, основанном на подходе ТКФС, можно достичь удовлетворительного описания экспериментальных вероятностей GT-переходов в области устойчивости QRPA уравнений.

В разделе 3.2 в рамках DWIA приближения с микроскопическими переходными плотностями рассчитаны спектры реакций и поляризационные характеристики реакций перезарядки (p, n) , (n, p) при промежуточных энергиях. Сделан вывод об определяющей роли прямого одноступенчатого механизма возбуждения в формировании жесткой части спектра вылетающих частиц и доминирующем вкладе возбуждений спин-изоспиновой симметрии. Получено удовлетворительное описание спектров реакций перезарядки типа (p, n) , (n, p) и их поляризационных характеристик с параметрами эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия в канале частица-частица, найденными в разделе 3.1.

В разделе 3.3 проведены микроскопические DWBA расчеты спектров реакций перезарядки (p, n) , (n, p) при низких энергиях. Показана необходимость учета эффективного NN -взаимодействия в канале pp для описания жесткой части экспериментальных спектров.

В разделе 3.4 с параметрами эффективного спин-изоспинового NN -взаимодействия в каналах ph и pp ,

определенными в предыдущих разделах, рассчитаны распределения силы GT-переходов в β^+ -распаде нейтронно-дефицитных ядер в областях ^{100}Sn и ^{146}Gd . Показано слабое влияние нейтрон-протонного BCS спаривания на полную силу GT-переходов в β^+ -канале. Из сравнения с нашими расчетами спектров и поляризационных характеристик реакций перезарядки (p,n), (n,p) при промежуточных энергиях сделан вывод о потере значительной части силы GT-переходов в ряде экспериментов по β^+ -распаду нейтронно-дефицитных ядер, впоследствии подтвержденный экспериментально.

Глава 4 посвящена глобальным расчетам периодов β -распада и сечений захвата электронных нейтрино, основанным на самосогласованном описании основных состояний ядер. Отличительной особенностью расчетов является использование универсального (не зависящего от A) спин-изоспинового NN -взаимодействия с параметрами, определенными из экспериментов по реакциям перезарядки. Таким образом, прямая нормировка на изучаемые скорости реакций слабого взаимодействия отсутствует.

В разделе 4.1 в рамках ETFSI-2+CQRPA приближения рассчитаны периоды β -распада ~ 800 околофермических ($\beta_2 \leq 0,1$) ядер (Borzov, 1997-2000). Основное внимание уделено β -распаду важных для анализа r -процесса ядер вблизи замкнутых нейтронных оболочек с $N=50, 82, 126$. Эти ядра достаточно удалены от линии β -стабильности, но большая их часть еще не слишком близка к границам нейтронной устойчивости ($S_n \geq 2-3 \text{ МэВ} > \Delta \sim 1 \text{ МэВ}$). Приближение среднего поля действительно, и спаривание еще может описываться в рамках BCS подхода. Наличие замкнутых нейтронных оболочек приводит к сферичности формы этих ядер. Они преимущественно испытывают высокоэнергетический β -распад Гамова-Теллера или/и β -распады первого запрета. Все это делает описание β -распада ядер в рамках CQRPA подхода достаточно надежным. В отличие от известных расчетов (Moeller, 1997, 2003), четно-нечетное поведение периодов, рассчитанных в ETFSI+CQRPA

для цепочек изотопов вблизи $N=50, 82, 126$ хорошо согласуется с новыми экспериментальными данными (Shergur, 2002).

На основе HF-BCS таблиц ядерных масс (Goriely, 2001) были также проведены самосогласованные HF+BCS+CQRPA расчеты скоростей процессов слабого взаимодействия (Borzov, 2001, 2003). Согласие Z -зависимости периодов β -распада с аналогичными расчетами в мультikonфигурационной модели оболочек (Martinez-Pinedo, 1999-2000) и в HFB+QRPA (Engel, 1999) свидетельствует о перспективности развитого метода для астрофизических приложений.

В разделе 4.2 приведены результаты систематических HF+BCS+CQRPA расчетов вкладов высокоэнергетических переходов Гамова-Теллера и переходов первого запрета в периоды β -распада ядер вблизи замкнутых нейтронных оболочек $N=50, 82, 126$. Впервые показана определяющая роль оболочечных эффектов в высокоэнергетическом β -распаде и сделан вывод о доминировании высокоэнергетических переходов первого запрета в областях ядер с $N=82, Z>50$ и $N=126$, важных для анализа r -процесса нуклеосинтеза в Сверхновых II типа. Надежность этих предсказаний была подтверждена, в частности новыми данными, полученными для нейтронно-избыточных изотопов Sn (Shergur et al., 2002). Расчеты периодов β -распада в области $N=126$ использовались для анализа экспериментов на изотопах Bi (DeWitte et al., 2003), выполненных на RILIS CERN. Показана сильная чувствительность периодов β -распада к симметрии используемых моделей структуры ядра.

В разделе 4.3 представлены основанные на ETFSI приближении глобальные расчеты сечений нейтринного и антинейтринного захвата в ядрах с $Z \geq 26$, расположенных между границами протонной и нейтронной неустойчивости (Borzov, 1999). Показано, что учет девозбуждения необходим в нейтронно-избыточных ядрах вблизи линии нейтронной нестабильности и в нейтронно-дефицитных ядрах. Сечения захвата электронных нейтрино ядрами менее чувствительны к pp -взаимодействию и могут рассчитываться в рамках RPA. Однако в RPA расчетах (ν -A)-сечений (Hektor et al., 2000) одночастичные потенциалы параметризовались из подгонки энергий изобар-

аналогового состояния (IAS) в ядрах среднего веса. Это не устраняет трудностей микроскопического описания IAS и к тому же искажает GT-силовые функции. Энергии IAS следует рассчитывать полностью самосогласованно, а для оценок (ν -A)-сечений можно использовать систематику кулоновских сдвигов.

В главе 5 характеристики основных процессов слабого взаимодействия бета-распада и захвата электронных нейтрино, предсказанные в рамках ETFSI+CQRPA подхода, используются для моделирования r и p -процессов.

В разделе 5.1 проведены расчеты r -процесса в канонической модели, $\alpha+r$ модели и в модели «нейтрино-индуцированного ветра». Проанализировано влияние ядерных данных на распределения концентраций нуклидов, образующихся в r -процессе нуклеосинтеза (Borzov, 2000). Показано, что в модели «нейтрино-индуцированного ветра» периоды β -распада определяют траекторию r -процесса в отличие от канонической модели, где они регулируют общий поток материала r -процесса к более высоким Z .

В разделе 5.2 проведены расчеты образования изотопов в массивных звездах в термоядерном и нейтринном p -процессах нуклеосинтеза. Показано, что для объяснения изотопических распространенностей редких элементов в солнечной системе принципиально важен учет реакций нейтринно-ядерного рассеяния и захвата. Это подтверждает идею о необходимости учета реакций неупругого рассеяния и захвата нейтрино и антинейтрино в расчетах p -процесса (Домогацкий, Надежин 1977; Woosley, 1990). Впервые дано количественное объяснение аномальной распространенности изотопа ^{138}La ($^{138}\text{La}/^{139}\text{La}=10^{-4}$) в солнечной системе, подтвержденное независимыми расчетами (Heger et al., 2003). Отмечена важность экспериментальных измерений сечений фоторасщепления $^{138,139}\text{La}$, которые позволили бы определить относительный вклад термоядерного и нейтринного каналов в производство одного из наиболее редких изотопов в солнечной системе.

В Заключении подробно представлены основные результаты диссертации и обсуждены направления дальнейшего развития данного проекта. **В Приложении** приведен список основных сокращений, используемых в диссертации.

Результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. Борзов И.Н., Журавлев Б.В., Гареев Ф. А., Ершов С.Н., Пятов Н. И., Фаянс С. А. Микроскопический анализ реакции $^{90}\text{Zr}(p,n)^{90}\text{Nb}$ при $E_p=22,5$ МэВ. - ЯФ, 1988, т. 48, вып.2(8), с. 399-408.
2. Борзов И. Н., Фаянс С. А. Силовые функции гамов-теллеровских возбуждений ядер изотопов Fe и Ni.- Изв. АН СССР, сер. физ., 1989, т. 53, № 11, с. 2178-2181.
3. Борзов И. Н., Трыков Е. Л. Спектры зарядово-обменных возбуждений в немагических ядрах.- Изв. АН СССР, сер. физ., 1989, т. 53, № 12, с. 2468-2175.
4. Борзов И. Н., Трыков Е. Л. Микроскопический анализ неравновесной компоненты спектров зарядово-обменных реакций (p,n) и (n,p) .- ЯФ, 1990, т. 52, вып 1(7), с. 52-63.
5. Борзов И. Н., Трыков Е. Л., Фаянс С. А. Силовые функции гамов-теллеровских возбуждений стабильных и нейтронно-дефицитных ядер.- ЯФ, 1990, т. 52, с. 985-1003.
6. Борзов И. Н., Гареев Ф. А., Ершов С. Н., Курманов Р. С., Трыков Е. Л., Фаянс С. А. Микроскопический анализ инклюзивных спектров и поляризационных характеристик реакций (p,n) , (p,p) , $(p^{\rightarrow},n^{\rightarrow})$ и $(n^{\rightarrow},p^{\rightarrow})$ на ^{54}Fe при $E_N=300$ МэВ.- ЯФ., 1992, т. 55, с. 107-122.
7. Борзов И. Н., Рыкашевский К., Фаянс С. А. Гамов-теллеровская сила вблизи ^{100}Sn .- Изв. РАН, сер.физ., 1993, т. 57, № 10, с. 135-139.
8. Borzov I. N., Fayans S. A., Trykov E. L. Gamow-Teller excitations in superfluid odd nuclei and neutrino capture reactions.- Nucl. Phys., 1995, v. A584, p. 335-361.
9. Borzov I. N., Fayans S. A., Kromer E., Zawischa D. Ground state properties and β -decay half-lives near ^{132}Sn in a self-consistent theory.- Zeit. Physik, 1996, v. A355, p. 117-127.
10. Borzov I. N., Goriely S., Pearson J. M. Microscopic calculations of beta-decay characteristics near the $A=130$ r -process peak.- Nucl.Phys., 1997, v. A621, p. 307-311.

11. Borzov I. N., Arnould M., Goriely S., Pearson J. M. Large-scale calculations of the ground state and beta-decay characteristics for astrophysical applications /Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 19-24, 1997, Trieste, Italy, p. 1509-1511.
12. Borzov I. N., Pearson J. M., Nayak N. C., Tondeur F., Rayet M. The ETFSI Mass Formula - Recent developments /Proc. III-Int. Symposium on Nucl. Phys., 2-5 September, 1997, Tours, France.//Ed. M. Arnould et al. AIP Conf. Proc., v. **425**, p.475-484.
13. Borzov I. N., Pearson J. M., Goriely S. Beta-decay rates: towards a self-consistent approach /AIP Conf. Proc., 1997. v. **425**, p.485-494.
14. Borzov I. N., Goriely S. Theoretical β -decay rates and astrophysical implications /Proc. Int. Workshop "Nuclei in the Cosmos-V", 6-11 July 1998, Volos, Greece //Ed. N. Prantzos, S. Harissopulos, Ed. Frontiers, 1998, p. .303-309.
15. Borzov I. N. Theoretical weak rates for astrophysics / Workshop "Beta decay: from weak interaction to nuclear structure",.Strasbourg, March 17-19, 1999 // Ed. P. Dessagne, A. Michalon, Ch. Miehe, p. 43-50.
16. Bobyk A., Kaminski W. A., Borzov I. N. Gamow-Teller strengths in tin isotopes. A comparison of the FFS and pnQRPA approaches.- Acta. Phys. Polonica, 2000, v. **31**, .p. 953-963.
17. Borzov I. N., Goriely S. Weak rates of neutron-rich nuclei and r-process nucleosynthesis.- Phys.Rev. , 2000, v. **C62**, p. 035501-12.
18. Borzov I. N. Supernova electron neutrino capture for astrophysical applications. - Nucl. Phys., 2001. v. **A688**, .p. 382c-385c.
19. Arnould M., Goriely S., Borzov I. N., Rayet M. The puzzle of the rare nuclide ^{138}La .- Astronomy & Astrophysics, 2001, v. **375**, p. L35-L37.
20. Borzov I. N. HF-BCS calculations of the β -decay half-lives /Proc.Int. Workshop Nuclear Many Body Problem-2001, Kluwer Academic Publishers, 2002, p.323-328.
21. Borzov I. N. Gamow-Teller and first-forbidden decays near the r-process paths at N=50, 82, 126.- Phys. Rev., 2003, v. **C67**, p. 025802, 1-14.
22. Borzov I. N. First-forbidden decays near the r-process paths at N=50, 82, 126.- Nucl. Phys., 2003, v. **A718**, p. 635c-637c.
23. Borzov I. N., Goriely S. Microscopic models and nuclear data for astrophysics.- ЭЧАЯ, 2003, т.63 (6), с.1375-1425.
24. Borzov I. N. First-forbidden decays near the r-process paths / Int. Workshop XXXI on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations, Hirschegg, Austria, January 12-18, GSI, 2003 //Ed.H.Feldmeier, J.Knoll, W.Nornberg, J.Wambach, p. 298-303.