



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

4-2004-8

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

Дубна 2004

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор

А. И. Вдовин

доктор физико-математических наук

Д. К. Надежин

доктор физико-математических наук

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  $\beta$ -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  $\beta$ -распадных характеристик нуклидов вблизи  $\beta$ -нестабильных дважды-магических ядер  $^{78}\text{Ni}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  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  $^{48}\text{Ni}$ ,  $^{100}\text{Sn}$  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  $\mu$ ,  $\tau$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -силовой функции в широком энергетическом интервале, включая область континуума, что необходимо для расчетов  $\nu_e$ -захвата – процесса, обратного  $\beta$ -распаду. Его сечение определяется полной  $\beta$ -силовой функцией как в пределах, так и вне окна  $\beta$ -распада.

До сих пор глобальные микроскопические расчеты периодов  $\beta$ -распада проводились в приближении разрешенных переходов. Экспериментально было показано (Fogelberg, 1983), что в области  $^{132}\text{Sn}$  высокоэнергетический  $\beta^-$ -распад первого запрета (FF) может конкурировать с распадом Гамова-Теллера (GT). Однако анализу роли оболочечных эффектов в высокоэнергетическом  $\beta$ -распаде не уделялось достаточного внимания. Не было и микроскопических расчетов вкладов GT и FF-переходов в периоды  $\beta$ -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 ( $p,n$ ), ( $n,n$ ) найдена константа эффективного спин-изоспинового  $NN$ -взаимодействия нуклонов в канале частица-частица.

В рамках EDF+CQRPA подхода впервые рассчитаны периоды  $\beta$ -распада для  $\approx 800$  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  $\beta$ -распада. Показан их определяющий вклад в периоды  $\beta$ -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  $^{138}\text{La}$  ( $^{138}\text{La}/^{139}\text{La}=10^{-4}$ ) 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 разработана 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  $\beta^+$ -переходов Гамова-Теллера в нейтронно-дефицитных ядрах и сделан вывод о потере части  $\beta^+$ -силы в ряде экспериментов, использующих  $\gamma$ -спектроскопию высокого разрешения.

5. В рамках ETFSI+CQRPA приближения предсказаны периоды  $\beta$ -распада Гамова-Теллера для  $\sim 800$  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  $\beta$ -распада.

6. Предложен новый метод расчета вкладов переходов первого запрета в периоды  $\beta$ -распада. На основе HF+BCS+CQRPA расчетов вблизи замкнутых нейтронных оболочек  $N = 50, 82, 126$  впервые показана определяющая роль оболочечных эффектов в высокоэнергетическом  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -распада на распространенности нуклидов, рассчитанных в различных моделях  $r$ -процесса.

Впервые показано, что экспериментальная распространенность редкого изотопа  $^{138}\text{La}$  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  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -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» (Сизэтл, 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  $\beta$ -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 «микромикро» 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  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -распада также следует контролировать энергию гигантского резонанса Гамова-Теллера (GTR). Иначе периоды  $\beta$ -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  $\beta$ -силовой функции. Первые микроскопические глобальные оценки периодов  $\beta^-$ -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  $\beta$ -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  $\beta^+$ -распада (Vogel, 1988; Faessler, 1988) и периоды  $\beta^-$ -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  $\beta^-$ -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  $^{208}\text{Pb}$ , 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  $\beta$ -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  $\rho$ -мезонного притяжения. Спин-изоспиновое эффективное  $NN$ -взаимодействие в  $pp$ -канале, часто называемое  $T=0$  спариванием, выбрано в форме  $g'_\pm\delta(r_{12})$ , аналогичной  $T=1$  спариванию (см. гл. 3).

Таким образом, ценой введения констант  $g'$ ,  $g'_\xi$  удастся универсальным образом описать  $\beta$ -силовую функцию в широком диапазоне ядер.

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

В разделе 1.4 разработана микроскопическая модель учета вклада FF переходов в периоды  $\beta$ -распада. Метод основан на замене релятивистских операторов  $\alpha$  (векторный момент) и  $\gamma_5$  (аксиальный заряд) на операторы, зависящие только от координат и спинов нуклона. Условия согласования приводят к связи  $\beta$ -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  $\gamma_5$  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  $\gamma_5$  в ядерной среде. Для редуцированных внешних полей глобальные расчеты  $\beta$ -распадных характеристик нейтронно-избыточных ядер значительно упрощаются.

В разделе 1.5 в рамках самосогласованного подхода к  $\beta$ -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  $^{132}\text{Sn}$ . Наряду с силами Скирма, он важен для расчетов периодов  $\beta$ -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  $S_n$ ,  $Q_\beta$  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  $\beta$ -распада в рамках ETFSI-2 подходе. Указано, что разности одночастичных энергий для основных  $\beta$ -переходов в ETFSI приближении близки к расчетам в рамках функционала DF3 и к экспериментальным одночастичным энергиям в области  $^{132}\text{Sn}$ .

**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  $g'_\xi$ , 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  $\beta^+$ -распаде нейтронно-дефицитных ядер в областях  $^{100}\text{Sn}$  и  $^{146}\text{Gd}$ . Показано слабое влияние нейтрон-протонного BCS спаривания на полную силу GT-переходов в  $\beta^+$ -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  $\beta^+$ -распаду нейтронно-дефицитных ядер, впоследствии подтвержденный экспериментально.

**Глава 4** посвящена глобальным расчетам периодов  $\beta$ -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  $\beta$ -распада  $\sim 800$  околосферических ( $\beta_2 \leq 0,1$ ) ядер (Vogzov, 1997-2000). Основное внимание уделено  $\beta$ -распаду важных для анализа  $r$ -процесса ядер вблизи замкнутых нейтронных оболочек с  $N=50, 82, 126$ . Эти ядра достаточно удалены от линии  $\beta$ -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  $\beta$ -распад Гамова-Теллера или/и  $\beta$ -распады первого запрета. Все это делает описание  $\beta$ -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  $\beta$ -распада с аналогичными расчетами в мультikonфигурационной модели оболочек (Martinez-Pinedo, 1999-2000) и в HF+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  $\beta$ -распада ядер вблизи замкнутых нейтронных оболочек  $N=50, 82, 126$ . Впервые показана определяющая роль оболочечных эффектов в высокоэнергетическом  $\beta$ -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  $\beta$ -распада в области  $N=126$  использовались для анализа экспериментов на изотопах Bi (DeWitte et al., 2003), выполненных на RILIS CERN. Показана сильная чувствительность периодов  $\beta$ -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 ( $\nu$ -A)-сечений (Нектор 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 ( $\nu$ -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  $\beta$ -распада определяют траекторию  $r$ -процесса в отличие от канонической модели, где они регулируют общий поток материала  $r$ -процесса к более высокому  $Z$ .

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 анти-нейтрино в расчетах  $p$ -процесса (Домогацкий, Надежин 1977; Woosley, 1990). Впервые дано количественное объяснение аномальной распространенности изотопа  $^{138}\text{La}$  ( $^{138}\text{La}/^{139}\text{La}=10^{-4}$ ) 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  $^{54}\text{Fe}$  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  $^{100}\text{Sn}$ .- 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  $\beta$ -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  $\beta$ -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. Dessange, 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  $^{138}\text{La}$ .- Astronomy & Astrophysics, 2001, v. **375**, p. L35-L37.
20. Borzov I. N. HF-BCS calculations of the  $\beta$ -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 astrohysics.- 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.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 12.02.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,15. Тираж 100 экз. Заказ № 54301.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)