

М-263



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6-95-208

На правах рукописи
УДК 539.143.5
+539.184.2

МАРИНОВА
Красимира Петрова

**МЕТОД ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ
РЕЗОНАНСНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ
В АТОМНОМ ПУЧКЕ:
ОПТИЧЕСКИЕ И ЯДЕРНЫЕ АСПЕКТЫ**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Дубна 1995

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

профессор
доктор физико-математических наук **Ю.К. ВОРОНЬКО**

профессор
доктор физико-математических наук **Г.М. ТЕР-АКОПЬЯН**

член корреспондент РАН, профессор
доктор физико-математических наук **А.М. ШАЛАГИН**

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Петербургский Институт ядерной физики
им. П.Б. Константинова, Гатчина, Ленинградская область

Защита диссертации состоится "19" сентября 1995 года
в "14" час. на заседании диссертационного совета Д.047.05 при
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций,
г. Дубна Московской области

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан "30" мая 1995 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 Попеко А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: Сверхтонкое взаимодействие между электрическими и магнитными моментами электронной оболочки атома и атомного ядра, хотя и малое по своей величине, приводит к хорошо измеряемым эффектам: изотопическому сдвигу (ИС) и сверхтонкому расщеплению (СТР) атомных уровней. Эти эффекты являются одними из самых старых источников информации об ядерной структуре, позволяя определить: спин, электромагнитные моменты и изотопическое изменение распределения заряда основного состояния ядра.

Исследования структуры ядра при помощи оптических методов занимают особое место в современной физике. Эта область находится между атомной спектроскопией и ядерной физикой, объединяя в себе сложности обеих сторон. С одной стороны стоят экспериментальные спектроскопические проблемы, связанные с необходимостью добиться максимально выгодного компромисса между высоким разрешением, высокой чувствительностью и быстродействием - требования, которые предъявляет объект исследования: ядро. С другой стороны, довольно серьезные проблемы связаны с исследованием более широкого круга ядер, удаленных от полосы стабильности, с извлечением ядерных параметров и с интерпретацией результатов.

Развитие современных лазеров на красителях сыграло роль настоящего ренессанса по отношению к исследованиям ядерной структуры оптическими спектроскопическими методами [Л1-Л3]. Уникальные свойства этих лазеров: высокая мощность и высокое разрешение, отличная коллимация и возможность перестройки в широком оптическом диапазоне, привели к осуществлению немислимых до сих пор спектроскопических методов. В плане экспериментальных возможностей основные достижения следующие:

- i) высокая точность определения деталей в ядерной структуре из-за высокой точности измерения СТР и ИС в атомных спектрах: разрешение порядка 10^9 ;
- ii) возможность регистрации экстремально малых количеств вещества вплоть до одиночных атомов (ионов);
- iii) исследование длинных цепочек изотопов в основном и изомерном состоянии, включая короткоживущие, не только off line, но и on line с предельно низкими потоками нуклидов ($\approx 10^4 \text{ с}^{-1}$).

Совокупность этих возможностей недоступна другим методам. Поэтому в начале 80-х годов в ряде крупных ядерных центров мира, в том числе и в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ, начались активные работы по разработке методики и созданию установок для исследования ядерной структуры, основанных на применении лазерной спектроскопии.

Основная цель диссертации состоит в комплексном подходе к проблеме лазерно-спектроскопических исследований сверхтонких взаимодействий (СТВ) в атомных спектрах и в структуре ядра.

В первую очередь сюда входит создание экспериментальной методики: выбор экспериментального метода в соответствии с возможностями ускорителей и общими тенденциями научных разработок в Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР), ОИЯИ, и его практическая реализация.

Далее следует разработка методики извлечения оптических и ядерных параметров из экспериментальных спектров. Сюда входят: а) методы определения констант СТР атомных уровней в соответствии с разными степенями сложности экспериментальных случаев и б) методы анализа результатов по ИС, способствующие повышению точности их определения и надежности извлечения параметров, необходимых для вычисления малых изменений зарядовых радиусов при переходе от одного изотопа к другому или от основного состояния к изомерному.

На третьем месте предусматривались измерения сверхтонкой структуры (СТС) и ИС атомных уровней для цепочек изотопов широкого круга элементов, интересных как с оптической, так и с ядерной точки зрения. Особое значение имеют исследования фундаментальных оптических свойств элементов с незаполненными nd - и nf -оболочками: переходные металлы, редкие земли, актиниды. В то же время, с точки зрения ядерной структуры, это ядра из следующих особо интересных областей: а) между двумя соседними магическими нейтронными и протонными числами $20 \leq N, Z \leq 28$; б) вокруг квазимагического протонного числа $Z = 38$ (40); в) в области перехода формы от сферической к деформированной и г) в центре области деформации.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложена и реализована методика извлечения информации из экспериментальных спектров сверхтонкой структуры для определения констант магнитного дипольного и электрического квадрупольного взаимодействия атомных уровней и связанных с ними отношений электромагнитных моментов ядер.
2. Предложены и реализованы нестандартные способы анализа ИС, позволяющие, даже в случаях сложных оптических спектров, получить полный набор параметров, необходимых для извлечения разностей среднеквадратичных зарядовых радиусов (СКЗР) с максимальной возможной точностью.
3. Проведены эксперименты по измерению ИС и СТС всех стабильных изотопов Ti (и ^{44}Ti с $T_{1/2} = 48.2$ года), Zr, Hf (и ^{182}Hf с $T_{1/2} = 9 \cdot 10^6$ лет), Ce, Nd, Sm, Gd и всех долгоживущих изотопов U (233 - 236, 238). Получена новая оптическая информация об ИС и константах СТВ в целом ряде оптических переходов и уровней в спектрах нейтральных атомов этих элементов.
4. На основе полученных данных для Ti и Gd впервые установлена зависимость ИС от углового момента J атома и предложена качественная интерпретация.
5. Детально проанализирована изотопическая зависимость разностей среднеквадратичных зарядовых радиусов $\delta\langle r^2 \rangle$ вблизи замкнутых нейтронных и протонных оболочек (^{22}Ti , ^{40}Zr); в области сильно деформированных ядер (^{72}Hf) и области изменения формы тяжелых элементов (^{92}U). Показано влияние статических и динамических деформаций разных порядков на общую тенденцию изменения зарядового радиуса ядер и подтверждено глобальное значение капельной модели (droplet model) для интерпретации результатов.
6. Впервые предложен и реализован метод комбинированного анализа экспериментальных результатов по а) изменению зарядовых радиусов из оптических измерений и б) абсолютным значениям зарядовых радиусов из спектров мезоатомов и электронного рассеяния для получения полной систематики зарядовых радиусов в зависимости от Z и N , отражающей современный уровень знаний в этой области.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Впервые в таком крупном ядерном центре, как ОИЯИ, создана экспериментальная установка, позволяющая применять методы лазерной спектроскопии к исследованиям ядерных объектов. Таким образом расширен и актуализирован круг экспериментальных возможностей Института.
2. Разработанные методы анализа экспериментальных результатов по ИС и СТС, охватывающие практически весь диапазон реально встречаемых случаев, развиты на уровне программ для расчетов на персональных компьютерах и позволяют быструю и надежную обработку любых экспериментов этого типа.
3. Большой объем новой экспериментальной информации об оптических свойствах исследованных элементов может быть основой детальных теоретических расчетов фундаментальных параметров, описывающих особенности электронной структуры атомов.
4. Новые экспериментальные результаты об изменениях зарядовых радиусов исследованных изотопических цепочек и полная систематика изотопических и изотонических зависимостей зарядовых радиусов для 43 элементов от ${}_{11}\text{Na}$ до ${}_{95}\text{Am}$ выявляют некоторые общие закономерности и являются основой для детальных теоретических исследований. Таблица значений зарядовых радиусов представляет интерес для большого круга областей ядерной физики как база данных в обработке различных экспериментов и в теоретических расчетах, для сравнения или калибровки результатов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Установка для измерения ИС и СТС в атомных спектрах стабильных и радиоактивных нуклидов для широкого круга элементов, включая тугоплавкие, основанная на методе лазерно-индуцированной резонансной флуоресценции в атомном пучке: порог чувствительности 10^{12} атомов в образце, спектральное разрешение, выраженное полной шириной линии на полувысоте, ≈ 20 МГц.
2. Комплексная методика извлечения информации о константах СТВ,

для повышения точности ИС и для определения параметров, необходимых для вычисления изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов, включающая и некоторые нестандартные методы анализа.

3. Результаты прецизионных экспериментальных измерений ИС и СТС элементов с незаполненной nd -оболочкой - Ti , Zr , Hf ; данные о константах сверхтонкого расщепления ряда уровней и о параметрах, характеризующих оптические переходы; установленные закономерности изменений СКЗР в изотопических цепочках стабильных и некоторых радиоактивных изотопов этих элементов. Большинство результатов получены впервые.
4. Данные прецизионных экспериментальных измерений ИС и СТС элементов с незаполненной $4f$ -оболочкой - Ce , Nd , Sm , Gd и вся вытекающая отсюда информация: а) об оптических величинах - константах сверхтонкого взаимодействия, J -зависимости ИС, параметрах оптических переходов и б) об ядерных величинах - отношениях электромагнитных моментов нечетных изотопов, разностях СКЗР. Большинство результатов получены впервые.
5. Данные прецизионных экспериментальных измерений ИС и СТС элементов с незаполненными $5f$ -оболочками - U . Новые результаты о константах СТР, первые результаты об отношениях электромагнитных моментов ${}^{233}\text{U}$ и ${}^{235}\text{U}$, полученные оптическим методом и с высокой точностью. Информация о возможных примесях различных конфигураций в спектре U , новые и более точные значения разностей СКЗР.
6. Впервые составленная изотопическая и изотоническая систематика абсолютных значений зарядовых радиусов, охватывающая широкий диапазон нуклидов: для 43 элементов от ${}_{11}\text{Na}$ до ${}_{95}\text{Am}$ и для длинных изотопических цепочек стабильных и радиоактивных изотопов в основном и изомерном состоянии.
7. Выявление четырех новых эффектов, общих для обеих систематик.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Международных совещаниях по экспериментам на пучках тяжелых ионов (г. Варна, Болгария, 1984; г. Дрезден, ГДР, 1988), на 34, 35, 37, 40, 41 и 44 Международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, на Международных школах семинарах по физике тяжелых ионов (г. Дубна, 1986, 1989, 1993), на Международной конференции по оптике и лазерной технике (г. Варна, Болгария, 1987), на 8-мой и 11-

ой Школе по ядерной физике, нейтронной физике и атомной энергии (г. Варна, Болгария, 1987, 1993), на Международном симпозиуме по слабым и электромагнитным взаимодействиям в ядрах (г. Монреаль, Канада, 1989), на 26-ом Международном коллоквиуме по спектроскопии (г. София, Болгария, 1989), на 3-ем Всесоюзном совещании по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий (г. Алма-Ата, 1989), на Международном совещании по применению лазеров к исследованиям атомного ядра (г. Дубна, 1990), на Международном симпозиуме по лазерам в ядерной физике (Нишина Хол, Япония, 1991), на Международной конференции по экзотическим ядрам (Форос, Крым, 1991), на IV-ой Международной конференции по избранным проблемам ядерной структуры (г. Дубна, 1994), на научных семинарах Физического факультета Софийского университета (г. София, Болгария), в Институте ядерной физике (г. Ташкент, Узбекистан).

Личный вклад. В диссертационную работу включены материалы исследований, проведенных автором в течение 1982-1990 гг. во время его долгосрочной работы и 1991-1994 гг. во время его постоянного сотрудничества, краткосрочной работы и многократных командировок в Лаборатории ядерных реакций, ОИЯИ. Автором поставлены ряд задач научных исследований и предложены пути их решений. Все экспериментальные исследования, включенные в диссертацию, выполнены с активным непосредственным участием автора. Методика обработки эксперимента и способы извлечения необходимых оптических и ядерных параметров предложены и выполнены лично автором или под его непосредственным научным руководством. В проведении экспериментов принимали участие А. Анастасов, С. Г. Земляной, Б.К.Кульджанов, Хоанг Тхи Ким Хуэ и Чан Конг Там.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из пяти глав (включая введение) и заключение, содержит 209 страниц, в том числе 30 рисунков, 42 таблицы, библиографию из 255 наименований и список из 40 публикаций автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава: является на самом деле введением. Выяснено значение оптических методов для исследования структуры ядра. В частности, показано резкое изменение общей ситуации к расширению и углублению наших знаний об ядерной структуре, вызванное применением современных методов лазерной спектроскопии. Обоснована актуальность проблемы и тем самым - цель диссертации. Кратко изложено содержание диссертации и сформулированы основные результаты.

Глава вторая посвящена экспериментальной методике. Сделан сравнительный обзор лазерно-спектроскопических методов, применяемых в ядерной физике и обоснован выбор экспериментального метода, развитого в диссертации. Определяющими являлись два соображения: 1) относительная простота реализации метода в сочетании с высокой точностью, чувствительностью и возможностью исследовать более широкий круг ядер и 2) согласование общей направленности научной тематики и возможностей ускорителей ЛЯР с возможностями лазерно-спектроскопического метода. С учетом дополнительного фактора, отсутствия *on line* масс-сепаратора, выбран *off line* метод: лазерно-индуцированная резонансная флуоресценция в атомном пучке. Лазерный свет, частоту которого можно сканировать в диапазоне до 30 ГГц, пересекает коллимированный атомный пучок. Резонансная флуоресценция детектируется ФЭУ в режиме счета одиночных фотонов. Лазерное излучение, атомный пучок и направление сбора флуоресцентного света взаимно ортогональны. Спектр регистрируется многоканальным анализатором, работающим во временном режиме, синхронно со сканированием. Установка развита в двух модификациях, касающихся метода атомизации: испарение из тигля с нагревателем и лазерное испарение [3,10]. Таким образом, сильно расширен круг веществ, доступных для исследования. Детально исследованы параметры установки и установлены пределы ее возможностей [3,5]: разрешение, выраженное шириной линии резонансной флуоресценции, 20 МГц; эффективность (число счетов в пике компоненты СТС к числу вылетевших из тигля атомов) $\approx 10^{-7}$; чувствительность, характеризуемая минимальным регистрируемым потоком вылетающих из тигля атомов, $2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Минимальное количество атомов исследуемого нуклида в образце, которое соответствует этим параметрам

и реально зарегистрировано нами, порядка 10^{12} атомов. Реализованные параметры установки открывают следующие экспериментальные возможности:

- i) для исследования и анализа микроколичеств вещества в естественных, имплантированных и/или полученных в результате редких процессов образцов;
- ii) для off line спектроскопии стабильных или долгоживущих нуклидов в основном или изомерном состоянии с временами жизни ≥ 60 мин.

Глава третья посвящена методам извлечения оптической и ядерной информации из экспериментальных спектров сверхтонкой структуры (СТС) и изотопических сдвигов (ИС). В ней приводятся некоторые основные формулы, связывающие оптические и ядерные параметры в их наиболее используемом виде, выясняется их физический смысл и значение с точки зрения эксперимента.

Основная задача при экспериментальном исследовании СТС - извлечение констант A магнитного дипольного и B электрического квадрупольного взаимодействия из экспериментальных спектров. Они позволяют определить: 1) величины, характеризующие состояния электронной оболочки, анализ которых дает возможность для более детального понимания электронной структуры атома; 2) ядерные величины - магнитный дипольный μ и электрический квадрупольный Q_s моменты ядра или, по меньшей мере, их отношения для двух изотопов; сверхтонкую аномалию, связанную с природой ядерных магнитных моментов; спин ядра и ИС одного изотопа по отношению к другому, т.е. изменения СКЗР. Разработаны четыре способа извлечения этих констант из экспериментальных спектров СТС. Все они сводят задачу определения 4 неизвестных констант сверхтонкого расщепления обоих уровней оптического перехода к задаче определения двух констант. Для этого используются разные аспекты корреляции между константами сверхтонкого расщепления, электромагнитными моментами и спином ядра с одной стороны, и величинами, определенными электронной оболочкой, с другой. Методы характеризуются различной степенью сложности вычислительной процедуры и требуют разных объемов экспериментальной информации. Все они развиты на уровне программ для расчетов на персональных компьютерах.

Особое значение для случая работы с радиоактивными изотопами,

имеет метод [17, 21], основанный на независимости отношения констант A или B для обоих уровней оптического перехода от параметров ядра, т.е. от изотопа, если не учитывать сверхтонкую аномалию. Радиоактивные изотопы обычно имеются в незначительных количествах и экспериментально регистрируются только самые интенсивные линии СТС. Достаточно измерить три такие компоненты, чтобы при помощи этого метода определить все четыре неизвестные константы. Эта возможность является одной из причин, обуславливающих повышенный интерес к изучению с высокой точностью СТР возможно больше уровней в оптических спектрах стабильных изотопов.

Более сложной вычислительной процедурой отличается метод [33], при помощи которого не только извлекаются константы A и B обоих уровней перехода, но и экспериментально зарегистрированным компонентам СТС приписываются корректные значения квантовых чисел. Этим методом расширяется круг оптических переходов, от экспериментального исследования которых можно извлечь информацию о константах сверхтонкого расщепления.

Определение разностей среднеквадратичных зарядовых радиусов (СКЗР) из экспериментальных ИС представляет собой достаточно сложную процедуру с введением ряда поправок, которые не всегда корректно рассчитываются. С целью исследования совместимости экспериментальных результатов по ИС, получения совокупности более точных их значений и извлечения ядерных параметров из экспериментальных данных, автором диссертации разработана методика анализа ИС. Она основана на применении т.н. графика Кинга, связывающего ИС (модифицированные подходящим образом) на двух оптических переходах прямой линией. Этим графиком, при помощи метода наименьших квадратов, связываются ИС на каждой оптической линии j с соответствующими ИС на всех других исследованных линиях k ($j \neq k$); находятся значения ИС на линии j , лежащие на прямой Кинга, и вычисляются их средние взвешенные по всем другим линиям k [8, 12, 40]. Метод имеет следующие преимущества: полученные таким образом значения ИС отличаются высокой точностью; легко выявляются ошибочные значения и/или особое поведение ИС в некоторых специальных случаях; он дает возможность заполнить пробелы в измерениях, предсказывая недостающие значения ИС. С его помощью можно определить параметры, необходимые для извлечений разностей СКЗР, а также прямым путем получить улучшенные и/или новые значения

изменений СКЗР. Для реализации последних двух возможностей предусматривается введение в описанную процедуру дополнительной информации.

Алгоритм анализа ИС является основой, с помощью которой в дальнейшем извлекаются параметры, необходимые для определения разностей СКЗР. Он является частью более общего алгоритма и связанной с ним вычислительной процедуры, с помощью которой можно определить скорректированные значения ИС и параметры для расчета, а следовательно, относительные и абсолютные значения изменений СКЗР. В зависимости от конкретной ситуации, процедура позволяет выбрать подходящий путь расчета: от начальных значений ИС - через нужные параметры - к изменению СКЗР.

Глава четвертая посвящена экспериментам по измерению ИС и СТС в атомных спектрах. Исследован широкий круг элементов, характеризующихся с одной стороны сложными оптическими спектрами, и с другой стороны - занимающие сильно различающиеся и особые места в общей (Z,N) карте изотопов. В гл.4 элементы объединены с точки зрения электронной структуры атомов.

4.1 Элементы четвертой группы периодической системы с незаполненными nd-оболочками: Ti, Zr, Hf. Энергетический спектр их электронных уровней до сих пор не полностью выяснен. Он характеризуется наличием большого числа низлежащих, близких и сильно взаимодействующих между собой уровней. Это определяет основную трудность в извлечении параметров, нужных для вычисления разностей СКЗР. Наиболее существенные результаты диссертации по исследованию переходных металлов следующие.

4.1.1 Титан. Проведены первые систематические исследования ИС всех стабильных изотопов Ti и ^{44}Ti ($T_{1/2} = 48.2$ года). Впервые определены значения ИС на 8 оптических переходах: от a^3P ($J = 0 - 2$) терма конфигурации $3d^24s^2$ к y^3D^0 ($J = 1 - 3$) терму конфигурации $3d^34p$ и к $z^3P_2^0$ уровню конфигурации $3d^24s4p$. Установлены зависимости ИС от углового момента J атома в пределах a^3P и y^3D^0 термов. Проведен согласованный анализ ИС, в котором включены и модельно-независимые значения разностей СКЗР для двух изотопных пар, $^{46,48}\text{Ti}$ и $^{48,50}\text{Ti}$, из спектров мезоатомов и экспериментов по электронному рассеянию [40]. Таким образом: 1) повышена точность измеренных ИС; 2) однозначно

установлено наличие маленького положительного полевого сдвига; 3) определены все параметры, необходимые для вычисления изменений СКЗР и 4) разделены вклады полевых и массовых составляющих в наблюдаемой J-зависимости ИС и доказано доминирующее влияние массового сдвига. На основе этого анализа предложена качественная схема взаимодействия конфигураций. Константы СТР возбужденных уровней $y^3D_{1,2}^0$ для ^{49}Ti и $z^3P_2^0$ для ^{47}Ti и ^{49}Ti определены впервые.

4.1.2 Цирконий. Получены и приведены результаты первых систематических исследований ИС и СТС всех стабильных изотопов Zr на трех оптических переходах методом лазерно-индуцированной резонансной флуоресценции в атомном пучке. Точность измерений повышена по сравнению с более ранними работами. Определением значений констант СТР для двух возбужденных уровней, 17429.89 см^{-1} и 17813.64 см^{-1} , в спектре ZrI внесен вклад в изучение оптических свойств Zr. Определен полный набор параметров, необходимых для извлечения абсолютных значений разностей СКЗР [10].

4.1.3 Гафний. Исследованы впервые ИС и СТС всех стабильных изотопов Hf на линиях 579.1 нм, 590.3 нм и 594.7 нм и долгоживущего ^{182}Hf ($T_{1/2} = 9 \cdot 10^6$ лет) на линии 590.3 нм [30,32]. Определены с высокой точностью константы СТР обоих стабильных нечетных изотопов для всех 6 уровней исследованных переходов. Совокупность значений этих констант может играть очень существенную роль для более глубокого фундаментального понимания электронной структуры Hf, например, используя ее в качестве входящих данных при параметрическом анализе сверхтонкого расщепления. Анализом ИС определены параметры, необходимые для извлечения изменений СКЗР. Результаты имеют большое значение для экспериментов с нестабильными изотопами, получаемыми в незначительном количестве и особо интересными с ядерно-физической точки зрения, например ^{178m}Hf [39]. Они дают возможность для наиболее удачного выбора оптического перехода и более точного определения разностей СКЗР и констант СТВ (и связанных с ними электромагнитных моментов) этих изотопов.

4.2 Редкоземельные элементы с незаполненной 4f-оболочкой: Ce, Nd, Sm, Gd. По отношению к редким землям цель этой работы определялась: 1) необходимостью заполнить пробелы в оптической информации проведением детальных экспериментальных исследований ИС на ряде оптических переходов и определением констант СТВ различных уровней; 2) ядерно-физическими интересами: получить возможно больше инфор-

магии о разностях СКЗР в области нейтронных чисел $82 \leq N \leq 96$, где происходит переход от сферических ядер к деформированным и 3) необходимостью извлечения корректным способом полный набор параметров для расчета изменений СКЗР.

4.2.1 Церий. Впервые применена лазерная спектроскопия для исследования ИС в спектре CeI. Измерения проведены для всех стабильных изотопов Ce на 4 оптических переходах. В анализе ИС включены данные для чистого перехода ns - np в CeI с легко определяемыми параметрами. Точность этих данных, полученных классическим способом, повышена в 4-7 раз процедурой согласованного анализа [16]. Таким способом удалось определить лучшие до сих пор оптические результаты для извлечения относительных и абсолютных значений разностей СКЗР для стабильных изотопов Ce. С этой точки зрения можно рекомендовать выбранные нами оптические переходы для измерения ИС в длинных цепочках Ce, содержащих и радиоактивные изотопы.

4.2.2 Неодим и самарий. Несмотря на наличие большой информации об ИС и СТС в спектрах этих элементов [Л2], они включены в наши эксперименты в связи с поставленной целью получить более детальную информацию об ИС и зарядовых радиусах в области перехода формы (см. выше). Для каждого из этих элементов исследованы по два оптических перехода. Они выбраны таким образом, что нами внесен, хотя и небольшой, вклад к существующим данным об оптических свойствах Nd и Sm: новый переход с $\lambda = 574.7$ нм в Sm (идентифицированный нами как $a^7F_2 - z^7F_3^o$); новые и/или более точные значения ИС (Nd, Sm), новые значения констант СТР (впервые для уровня $^5H_5^o$, 19816 см^{-1} в Nd). В дополнении, извлечены параметры для расчета изменений СКЗР при помощи скоррелированного анализа ИС из рентгеновских спектров и спектров мезоатомов [8] и подтверждена надежность предложенного в диссертации критерия применимости этого метода.

4.2.3 Гадолиний. Большое число невыясненных проблем, связанных с электронной структурой Gd, обуславливает сильно возросший интерес к экспериментальному и теоретическому исследованию СТР и ИС в спектре GdI в конце 80-х - начале 90-х годах. Появляется большое число работ, посвященных исследованию ИС и СТС в оптических спектрах GdI лазерной спектроскопией. Только одна из них, [Л4], опубликована одновременно с и независимо от нашей последней по оптическим свойствам Gd [13]. Часть из более поздних работ повторяет уже полученную и опубликованную нами

Таблица 1

Константы сверхтонкого расщепления возбужденных z^9F_J и z^9D_J мультиплетов для ^{155}Gd и их отношения для ^{157}Gd и ^{155}Gd .

$E, \text{ см}^{-1}$	Терм	J	A(155), МГц	B(155), МГц	$\frac{A(157)}{A(155)}$	$\frac{B(157)}{B(155)}$
17227.969	9F	1	266.67(24)	76.2(6)	1.313(2)	1.036(11)
17380.827		2	72.97(19)	-328.7(1.0)	1.318(4)	1.076(4)
17617.767		3	31.66(18)	-395.8(1.8)	1.33(8)	1.050(6)
17973.611		4	-4.95(23)	-288.3(3.1)	1.315(66)	1.055(13)
18509.198		5	6.08(21)	-86.6(3.9)	1.298(38)	1.061(40)
17749.978	9D	2	-86.63(11)	-21.6(8)	1.327(2)	1.080(52)
17795.267		3	-93.97(23)	160.2(2.4)	1.315(5)	1.059(24)
17930.516		4	-70.86(41)	229.1(5.2)	1.291(9)	1.039(36)
18083.642		5	-98.63(23)	106.8(4.0)	1.311(3)	1.057(40)
18070.257		6	-101.86(9)	-61.6(2.1)	1.313(1)	1.068(37)

информацию (см., например, [Л5]). Автором настоящей диссертации получены впервые [8, 13] следующие результаты по Gd :

i) Методом лазерной резонансной флуоресценции исследованы ИС и СТС для всех стабильных изотопов Gd на 15 оптических переходах в спектре GdI с основного a^9D^o терма конфигурации $4f^75d6s^2$ к возбужденным z^9F и z^9D термам конфигурации $4f^75d6s6p$.

ii) Определены с высокой точностью константы сверхтонкого расщепления 10 возбужденных уровней z^9F_J и z^9D_J мультиплетов конфигурации $4f^76s6p$ для обоих стабильных нечетных изотопов Gd (табл. 1).

iii) Установлена J-зависимость ИС в пределах всех исследованных термов. Для возбужденных термов она имеет сильно немонотонный характер. Обнаружена корреляция между J-зависимостью ИС и констант В электрического квадрупольного взаимодействия: общая тенденция изменений этих величин в пределах данного терма одинаковая. Этот факт может иметь особое значение для теоретического описания эффектов.

iv) Определены различными способами параметры электронных пере-

ходов, необходимых для извлечения ядерных величин и сделан критический анализ их применимости [8, 12, 20].

Значимость многообразности и точности полученных здесь результатов для будущих теоретических анализов и для более полного понимания электронных свойств атомов Gd очевидна.

4.3 Актинидные элементы с незаполненной 5f-оболочкой. Работа с ними связана с трудностями как экспериментального, так и расчетного характера. С одной стороны, большая часть из них доступна в очень малых количествах (до долей нг); они химически активны, могут использоваться только в виде соединений, что затрудняет их атомизацию. С другой стороны, оптические спектры этих элементов очень сложные и в значительной степени невыясненные. В настоящей диссертации исследованы ИС и СТС всех долгоживущих изотопов урана, 233-236,238, на двух оптических переходах в спектре UI, начинающих с основного $5L_6^0$ уровня. Впервые определены константы СТВ двух возбужденных уровней (16900.39 см^{-1} и 17361.89 см^{-1}) - для обоих нечетных изотопов ^{233}U и ^{235}U , и основного уровня - для ^{233}U . Тем самым, впервые получены оптическим методом, а следовательно, с повышенной точностью отношения электромагнитных моментов этих двух нечетных изотопов. На основе анализа ИС 1) предсказан конфигурационный состав возбужденного уровня 17362 см^{-1} и сделаны выводы качественного характера о возможных примесях конфигураций уровня 16900 см^{-1} и 2) определены параметры для расчета разностей СКЗР. С помощью этих параметров прямым способом показано, что полевые сдвиги пропорциональны изменению числа нейтронов и обоснован простой и надежный способ извлечения разностей СКЗР.

В главе пятой проиллюстрирован вклад лазерной спектроскопии в изучение ядерной структуры и ее свойств, в частности, в наши знания об изменениях зарядовых радиусов ядер в длинных изотопических и изотонических цепочках стабильных и короткоживущих нуклидов.

Распределение электрического заряда в ядре является одной из его важнейших характеристик. Это распределение и связанные с ним зарядовые радиусы определяются во многих экспериментах двух типов. Первый из них дает информацию о абсолютных значениях СКЗР, $\langle r^2 \rangle$, из данных спектров по электронному рассеянию и мезоатомов, характеризуется сравнительно низкой точностью и охватывает сильно ограниченный круг

стабильных (или почти стабильных) ядер. Второй - определяет изменения СКЗР, $\delta\langle r^2 \rangle$, с помощью высокопрецизионных лазерно-спектроскопических методов в длинных изотопических цепочках. Результаты этих двух типов экспериментов являются предметом дискуссий и систематик многих работ. В настоящей работе предложен и развит метод комбинированного анализа экспериментальных результатов обоих типов, по $\langle r^2 \rangle$ и по $\delta\langle r^2 \rangle$, с помощью которого извлечены абсолютные значения зарядовых радиусов $\langle r^2 \rangle^{1/2}$, и сделана систематика нового типа [29, 36]. Полученная информация о $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ имеет следующие особенности:

1) Она покрывает диапазон намного шире, чем та же из экспериментов первого типа по $\langle r^2 \rangle$. Диапазон по Z - это 43 элемента от $_{11}\text{Na}$ до $_{95}\text{Am}$. Диапазон по N определяется двумя факторами: (а) методом комбинированного анализа и (б) наличием экспериментальной информации о $\delta\langle r^2 \rangle$, в длинных изотопических цепочках. Этот факт открывает возможность составить не только изотопическую, но и изотоническую систематику зарядовых радиусов (см. рис. 1 - 3). Полную таблицу зарядовых радиусов можно найти в нашей работе [36].

2) Точность определения $\langle r^2(A) \rangle^{1/2}$ выше экспериментальной в результате усреднения по всем изотопическим цепочкам с разными последовательностями составляющих изменений $\delta\langle r^2(A, A') \rangle$, связывающих изотоп A с изотопом A', и по всем изотопам с известными зарядовыми радиусами $\langle r^2(A') \rangle$.

Сравнение обеих систематик: изотопической на рис.1 и рис.2, и

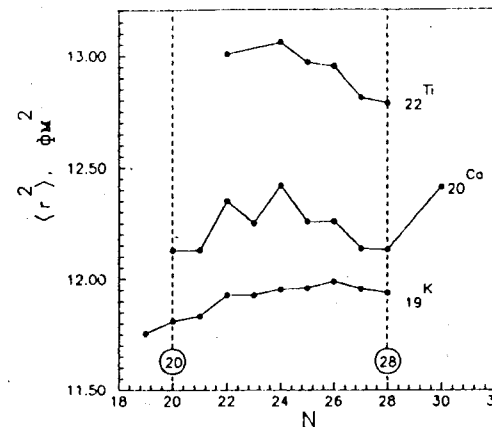


Рис. 1. Абсолютное значение СКЗР $\langle r^2 \rangle$ в зависимости от N в области легких ядер: значения Z около Z = 20.

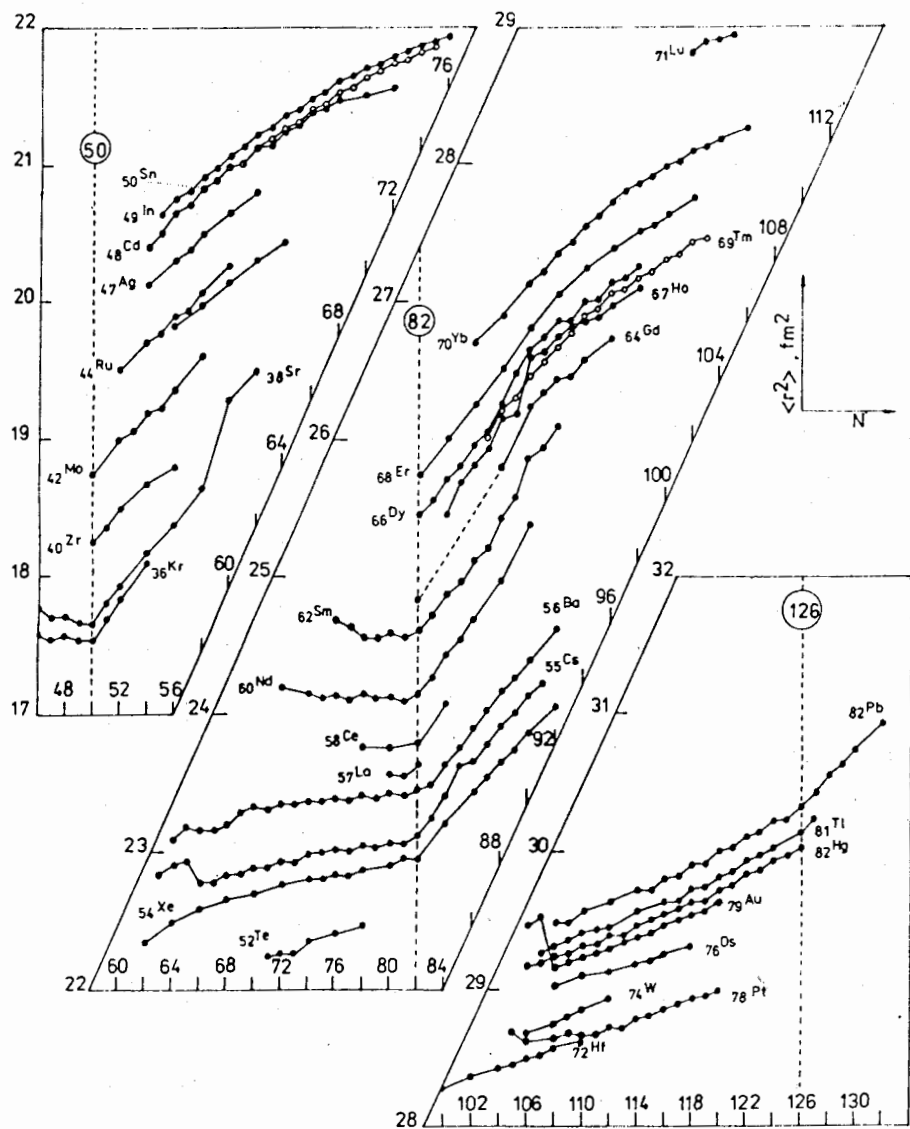


Рис.2. Абсолютные значения СКЗР $\langle r^2 \rangle$ в зависимости от N :
изотопическая систематика. Сплошные линии связывают изотопические
цепочки; штрихованные линии обозначают отсутствующую информацию.

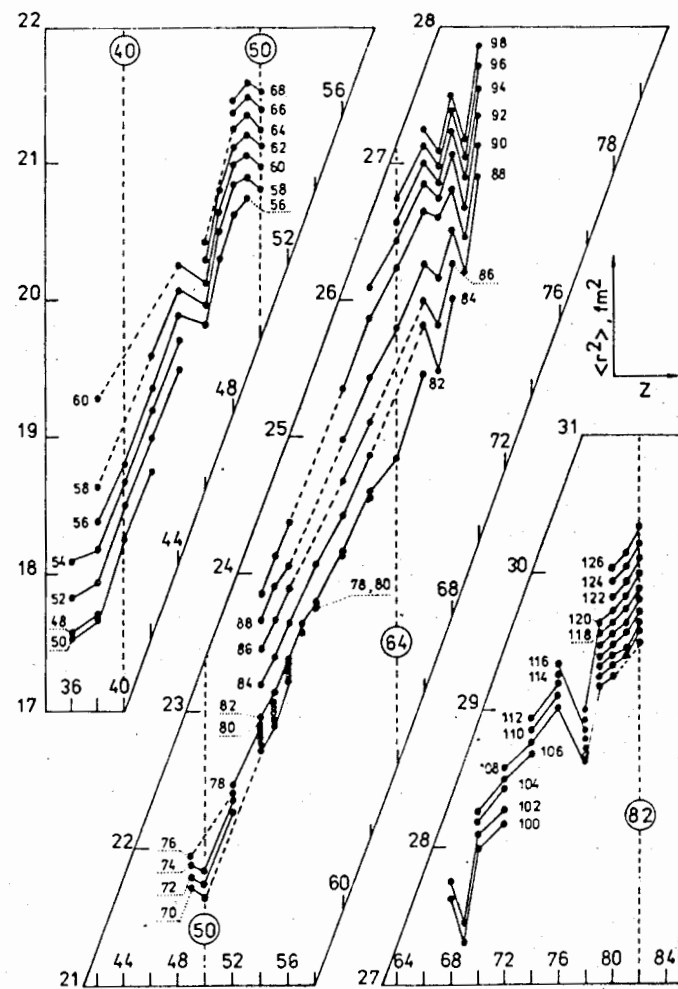


Рис.3. Абсолютные значения СКЗР $\langle r^2 \rangle$ в зависимости от Z :
изотоническая систематика. Сплошные линии связывают изотонические
цепочки; штрихованные линии обозначают отсутствующую информацию.

изотонической на рис.3, выявляет следующие основные характеристики в поведении зарядовых радиусов ядер.

1. Наклон кривых $\langle r^2(Z) \rangle$ на рис. 3 значительно больше, чем наклон кривых $\langle r^2(N) \rangle$ на рис.2. Этот факт может быть объяснен влиянием дополнительного кулоновского взаимодействия между протонами по сравнению с взаимодействием между нейтронами. Оно приводит к более заметному нарастанию $\langle r^2 \rangle$ в случаях добавления протонов, чем в случаях добавления нейтронов к ядру.

2. Вторая характерная особенность связана с магическими числами. Наклон обеих зависимостей $\langle r^2(N) \rangle$ и $\langle r^2(Z) \rangle$ больше в начальном участке интервала между двумя магическими числами и стремится к насыщению к концу этого интервала. Более того, он становится даже отрицательным на рис.1 и рис.2 непосредственно перед нейтронными магическими числами 28, 50 и 82, и на рис.3 - перед протонным магическим числом 50. Изменение наклона кривой $\langle r^2(Z) \rangle$ в указанном смысле обнаруживается на рис.3 перед протонным числом 38, что находится в согласии с другими фактами, указывающие на то, что число 38 может быть протонным магическим числом. Эффект связан с заполнением оболочки перед магическим числом. Включение табличных результатов для Eu в графиках, привело бы к выявлению эффекта описанного типа перед протонным числом 64, но только в области $N = 89 - 91$. Это было бы в согласии с другими экспериментальными фактами, указывающие на то, что 64 может быть протонным магическим числом. Однако есть основания считать, что экспериментальная информация о $\langle r^2 \rangle$ Eu нуждается в пересмотре.

3. Третья характерная особенность, это "staggering" зависимостей $\langle r^2(N) \rangle$ на рис.1 и рис.2, $\langle r^2(Z) \rangle$ на рис.3 и тот факт, что он выявлен лучше на рис.3. Обычно это четно-нечетные различия, проявляющиеся как "провал" кривых для нечетных Z и N (небольшие исключения связаны всегда с эффектами типа 2, обсужденными выше). В обоих случаях, они могут быть объяснены влиянием парных корреляций на коллективный потенциал ядра. В зависимостях $\langle r^2(Z) \rangle$ на рис.3 впервые обнаруживается новый и, пока невыясненный, эффект - четно-четные различия, характеризующиеся сильным уменьшением $\langle r^2(Z) \rangle$ при значениях Z на 4 протона ниже протонных магических чисел 50 и 82.

4. И четвертая, сразу бросающаяся в глаза особенность: подобие в общей форме кривых $\langle r^2(N) \rangle$ для соседних Z на рис.1 и рис.2 и еще более очевидное подобие кривых $\langle r^2(Z) \rangle$ для соседних N на рис.3. Этот факт

может найти свое объяснение в пределах оболочечной модели.

Изотоническая систематика зарядовых радиусов и выявление связанных с ней эффектов становятся возможными лишь на основании разработанного здесь метода комбинированного анализа и полученных с его помощью данных о СКЗР. Она сделана и обсуждена нами впервые.

Кроме рассмотренных выше общих закономерностей поведения зарядового радиуса ядер в зависимости от Z и N , наша систематика дает также наглядную и детальную картину специфических особенностей этого поведения во всех областях, интересных с точки зрения ядерной структуры. Вклад автора диссертации в общую картину отражен в изотопических цепочках Ti на рис.1, Zr и Hf на рис.2, и U (последняя не показана на рисунках). Экспериментальные результаты по ядерным параметрам конкретных элементов детализируют информацию о зарядовых радиусах в отдельных Z , N областях и являются подтверждением обнаруженных общих закономерностей. Большая часть результатов получена впервые. Они относятся к следующим основным областям нуклидов:

5.1 Вблизи замкнутых протонных и нейтронных оболочек: ${}_{22}\text{Ti}$ и ${}_{40}\text{Zr}$. Исследованные изотопы Ti расположены между двумя замкнутыми нейтронными и протонными оболочками ($20 \leq Z, N \leq 28$), а изотопы Zr с замкнутой протонной подоболочкой - вблизи магического $N = 50$.

К настоящему времени самая простая, но одновременно самая реалистичная и глобальная феноменологическая модель ядра, описывающая в первом приближении достаточно хорошо экспериментальные результаты о $\delta \langle r^2 \rangle$ в широком диапазоне Z, N - это капельная модель (см., например, [Л2, Л3]). Обсуждение результатов о $\delta \langle r^2 \rangle$ в диссертации проведено тоже с точки зрения этой модели.

Как видно из рис.1, зависимость $\langle r^2(N) \rangle$ для Ti имеет тот же самый необычный вид (в исследованной области N), как для соседнего ядра Ca, и, в самых общих линиях, его можно объяснить таким же способом. Основной вклад в наблюдаемый эффект вносят коллективные квадрупольные β_2 и октупольные β_3 деформации: увеличение деформаций с удалением от магического $N = 28$ (к меньшим N) компенсирует уменьшение радиуса по сферической капельной модели.

Изменение СКЗР Zr в рассматриваемой цепочке изотопов является тоже подтверждением общих закономерностей вблизи магических нейтронных чисел. Замкнутая протонная подоболочка Zr оказывает стабили-

лизирующее действие на форму ядра; вклад квадрупольной деформации в изменение СКЗР невелик, что позволяет выявить влияние других факторов. В первую очередь сказывается влияние динамической октупольной деформации.

5.2 В центре области деформации: ${}_{72}\text{Hf}$. Изученные изотопы расположены в середине области между двумя протонными и нейтронными замкнутыми оболочками; характеризуются большой статической квадрупольной деформацией $\beta_2 \approx 0.3$. Общий ход изменения зарядовых радиусов соответствует поведению квадрупольной деформации и правильно передается расчетами по капельной модели. В противоречии с обычно наблюдаемой ситуацией в других нуклидах, из оптических результатов по $\delta\langle r^2 \rangle$ и из спектров мезотонов следует разное поведение ядерной деформации в исследуемой области массовых чисел Hf [32]. Причина этого невыяснена.

5.3 В области перехода формы: ${}_{92}\text{U}$. Измеренные в диссертации изменения СКЗР изотопов U относятся к малоизученной области перехода формы от сферической к деформированной для наиболее тяжелых ядер ($Z \geq 88$ и $N \geq 126$), охватывая узкий участок с $Z = 92$, $141 \leq N \leq 146$ [21, 28]. Анализ $\delta\langle r^2 \rangle$ показывает, что основной вклад в изменение СКЗР вносит изменение объема ядра; вклад за счет деформации невелик. Он связан в основном с влиянием квадрупольной β_2 и гексадекапольной β_4 деформаций, изменяющихся в противоположных направлениях и частично компенсирующих друг друга.

Во всех изученных случаях для отдельных изотопических пар наблюдаются расхождения с предсказаниями капельной модели. Они особенно велики для Tl , в случае которого (как и для соседних ядер ${}_{19}\text{K}$ и ${}_{20}\text{Ca}$ [Л2]) интерпретация имеет лишь качественный характер. Остающиеся различия $\approx 0.1 \text{ фм}^2$ могут быть интерпретированы разными способами. Они могут быть сглажены введением изменяющейся толщины поверхностного слоя, могут быть отнесены к неточностям и/или к отсутствию данных о деформации различных порядков, и, не в последнюю очередь, к недостаткам использованной модели. Проблема еще не решена однозначно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Впервые в таком крупном ядерном центре, как ОИЯИ, создана экспериментальная установка, позволяющая применять методы лазерной спектроскопии к исследованиям ядерных объектов. Она основана на методе лазерно-индуцированной резонансной флуоресценции в атомном пучке; отличается относительной простотой экспериментальной реализации; развита в двух модификациях, касающихся способа атомизации, и тем самым, дает возможность исследовать широкий круг нуклидов, доступных в образцах различного химического состава. Типичное спектральное разрешение 25 МГц, реально достигнутая чувствительность на уровне 10^{12} атомов в образце. Сделан детальный анализ параметров установки и выяснены возможные пути к их улучшению.

2. Разработана комплексная методика обработки эксперимента по изотопическим сдвигам (ИС) и сверхтонкому расщеплению (СТР) для извлечения оптической и ядерной информации.

2.1 Развита методика определения констант магнитного дипольного и электрического квадрупольного взаимодействия из спектров сверхтонкой структуры (СТС). Они используют различные физические характеристики сверхтонкого расщепления, отличаются разными степенями сложности и перекрывают широкий диапазон реально встречаемых случаев. Таким образом, сильно расширен круг экспериментальных возможностей установки, как по отношению к оптическим переходам (без ограничения числа уровней с неизвестными константами СТР), так и по отношению к чувствительности (извлечение констант с достаточной точностью из минимальной экспериментальной информации). Последнее особенно существенно при работе с радиоактивными изотопами, доступными в ничтожном количестве.

2.2 Методика обработки эксперимента по изотопическим сдвигам и определения параметров, необходимых для извлечения ядерной информации, разработана в ее полном многообразии, включающем весь диапазон известных методов. Кроме обычного двумерного графика Кинга в его различных модификациях, она включает нестандартные, физически и статистически обоснованные, способы анализа ИС. Особой точностью и возможностью предсказания отсутствующих данных по ИС и/или $\delta\langle r^2 \rangle$ отличается метод "многомерного" согласованного анализа ИС. Развита новая методика к применению скоррелированного анализа ИС из оптических спектров и спектров КХ-лучей и мезоатомов. Он не требует модель-

ных теоретических расчетов, намного проще применяемого в литературе метода и позволяет извлечь разности среднеквадратичных зарядовых радиусов с той же самой точностью, порядка нескольких процентов.

Все методы развиты на уровне программ для расчетов на персональных компьютерах.

3. Проведено большое число экспериментов по измерению ИС и СТС в изотопических цепочках стабильных и долгоживущих радиоактивных изотопов.

3.1 Получена обширная экспериментальная информация об оптических свойствах: а) элементов с незаполненной *nd*-оболочкой - ^{22}Ti , ^{40}Zr , ^{72}Hf ; б) элементов с незаполненной *4f*-оболочкой - ^{58}Ce , ^{60}Nd , ^{62}Sm , ^{64}Gd ; в) элементов с незаполненной *5f*-оболочкой - ^{92}U . Эта информация включает: ИС на большом числе переходов в спектрах нейтральных атомов этих элементов; зависимость ИС от углового момента электронной оболочки и от терма; конфигурационный состав атомных уровней и константы магнитного дипольного и электрического квадрупольного сверхтонкого взаимодействия для целого ряда уровней. Большая часть этих результатов получена впервые, незначительная часть - повторяет с повышенной точностью старые данные и/или расширяет диапазон исследованных изотопов. Результаты являются существенным вкладом в информацию о фундаментальных оптических свойствах атомов и могут быть основой для теоретических расчетов параметров электронной структуры атомов. Следующая таблица иллюстрирует более конкретно полученные данные.

3.2 Во всех исследованных случаях определены с максимально возможной точностью параметры, необходимые для извлечения разностей среднеквадратичных зарядовых радиусов (СКЗР) из экспериментальных результатов по ИС: константы полевого сдвига и специфические массовые сдвиги. Результаты могут быть применены при изучении более длинных изотопических цепочек этих элементов, включая радиоактивные изотопы. Кроме того, вместе со значениями констант СТР и анализом ИС открывается возможность наиболее удачного выбора оптического перехода для таких измерений.

4. На основе оптических данных и с помощью разработанной методики получена обширная информация об ядерных свойствах.

4.1 Определены изменения СКЗР и детально проанализирована их изотопическая зависимость в следующих случаях:

Таблица оптических результатов диссертации по ИС и константам СТВ: 1 - элемент; **2** - исследованные изотопы; **3** - число исследованных переходов; **4** - число уровней с определенными в диссертации константами СТР; **5** - массовое число изотопа, константы СТР которого определены.

1	2	3	4	5
^{22}Ti	стабильные	8: впервые	2: пов.точн. 2: впервые 1: впервые	47 49 47, 49
	^{44}Ti	1: впервые		
^{40}Zr	стабильные	3: пов.точн.	2: впервые	91
^{72}Hf	стабильные	3: впервые	6: впервые	177, 179
	^{182}Hf	1: впервые		
^{58}Ce	стабильные	4: впервые		
^{60}Nd	стабильные	2: пов.точн.	1: впервые	143, 145
^{62}Sm	стабильные	1: впервые		
^{64}Gd	стабильные	15: впервые	10: впервые	155, 157
^{92}U	все долгоживущие	2: впервые	3: впервые 2: впервые	233 235

4.1.1 Впервые для всех стабильных изотопов ^{22}Ti и ^{44}Ti ($T_{1/2} = 48.2$ года) и ^{40}Zr ; показано существенное влияние динамической октупольной деформации на зарядовый радиус ядра вблизи замкнутых нейтронных и протонных оболочек.

4.1.2 Впервые для всех стабильных (включая нечетные) изотопов ^{72}Hf и ^{182}Hf ($T_{1/2} = 9 \cdot 10^6$ лет); подтверждено доминирующее влияние квадрупольной деформации на зарядовый радиус ядра в области сильно деформированных ядер.

4.1.3 Первое систематическое определение с высокой точностью разностей СКЗР в изотопической цепочке $^{233-236,238}\text{U}$. Повышенная точность результатов связана с прецизионностью экспериментального метода и с предложенным в диссертации обоснованным и надежным способом извлечения изменений СКЗР. Показано, что для тяжелых ядер даже в области перехода формы, определяющее влияние на изменение зарядового радиуса имеет размер ядра.

4.2 Предложен и развит метод комбинированного анализа двух типов

экспериментальных результатов по: а) абсолютным значениям зарядовых радиусов $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ из экспериментов по электронному рассеянию и спектров мезоатомов и б) изменениям СКЗР $\delta \langle r^2 \rangle$ из оптических спектров.

4.2.1 С помощью этого метода получена новая систематика зарядовых радиусов, имеющая следующие особенности: i) независимо измеренные зарядовые радиусы отдельных изотопов дополнительно уточнены посредством высоко прецизионных значений разностей СКЗР в длинных изотопических цепочках; ii) предсказаны абсолютные значения зарядовых радиусов $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ остальных изотопов в данной цепочке; iii) точность расчетных значений $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ выше экспериментальной. Полученная информация о зарядовых радиусах покрывает диапазон по Z из 43 элементов от ${}_{11}\text{Na}$ до ${}_{95}\text{Am}$: это элементы, для которых существует экспериментальная информация обоих типов. Диапазон по N определяется наличной информацией об изменениях СКЗР в длинных изотопических цепочках.

4.2.2 Таблицы полученных значений $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ дают возможность составить систематику зарядовых радиусов в двух аспектах: изотопическом и изотоническом, и таким образом выявить некоторые особенности ядерной структуры в широком диапазоне Z и N. Изотоническая систематика зарядовых радиусов, будучи возможной лишь на основании разработанного в диссертации метода комбинированного анализа, сделана и обсуждена впервые.

Основные результаты диссертации

1. Создана экспериментальная установка для лазерной спектроскопии ядерных объектов. Для этого сделан удачный выбор метода лазерно-индуцированной резонансной флуоресценции в атомном пучке. Установка дает возможность для off line спектроскопии стабильных и долгоживущих нуклидов в основном и изомерном состоянии с временами жизни ≥ 60 мин, в количестве $\geq 10^{12}$ атомов.

2. Предложена и разработана комплексная методика извлечения оптической и ядерной информации из лазерного эксперимента. Она включает: а) 4 метода определения констант магнитного дипольного и электрического квадрупольного взаимодействия из спектров сверхтонкой структуры; б) нестандартную, физически и статистически обоснованную методику анализа экспериментальных данных по изотопическим сдвигам и

несколько способов определения параметров для извлечения ядерной информации. Они применимы и в случаях сложных оптических спектров, позволяя получить полный набор необходимых параметров с максимально возможной точностью.

3. Выполнено большое число экспериментов по измерению изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры в спектрах нейтральных атомов широкого круга элементов: $Z = 22, 40, 58, 60, 62, 64, 72$ и 92 . Получена обширная экспериментальная информация, касающаяся различных аспектов фундаментальных оптических свойств трех групп атомов: переходные металлы, редкие земли и актиниды. Она может быть применена в теоретических исследованиях оптических свойств и для расчетов ядерных параметров.

4. Определены, проанализированы и обсуждены изотопические изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов (СКЗР) в исследованных элементах. Они относятся к особо интересным с ядерной точки зрения областям: а) вблизи замкнутых нейтронных и протонных оболочек - ${}_{22}\text{Tl}$ ($22 \leq N \leq 40$), ${}_{40}\text{Zr}$ ($50 \leq N \leq 56$); б) в центре области деформации - ${}_{72}\text{Hf}$ ($102 \leq N \leq 110$); в) в области перехода формы для тяжелых элементов - ${}_{92}\text{U}$ ($141 \leq N \leq 146$).

5. Получена новая систематика зарядовых радиусов на основе экспериментальных данных об изменениях СКЗР из оптических измерений и об абсолютных значениях зарядовых радиусов из данных по электронному рассеянию и спектров мезоатомов. На ее основе выяснено современное состояние наших знаний об изотопическом и изотоническом изменении зарядовых радиусов в широком диапазоне Z и N.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Гангрский Ю.П., Градечны Ч., Илиев С., Марков Б.Н., Маринова К.П., Наджаков Е.Г., Оганесян Ю.Ц., Хан Ген И, Чан Конг Там Применение лазеров на пучках тяжелых ионов. - Труды международного совещания по экспериментам на пучках тяжелых ионов, Дрезден (ГДР) 1984: ОИЯИ-Д7-84-736, Дубна 1984. с.29.
2. Гангрский Ю.П., Марков Б.Н., Маринова К.П., Наджаков Е.Г., Оганесян Ю.Ц., Хан Ген И, Чан Конг Там Установка для измерения зарядовых

- радиусов и ядерных моментов с помощью лазерного излучения на пучках тяжелых ионов. - Тезисы 35-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, апрель 1985: Наука Л., 1985. с.468.
3. Гангрский Ю.П., Маринова К.П., Марков Б.Н., Наджаков Е.Г., Оганесян Ю.Ц., Хан Ген И, Чан Конг Там Определение параметров установки для измерения ядерных моментов с помощью лазерного излучения. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т. 49, с. 2261-2268.
 4. Гангрский Ю.П., Градечны Ч., Марков Б.Н., Маринова К.П., Наджаков Е.Г., Хан Ген И, Чан Конг Там Определение микроколичеств E_u в металлах методом оптической резонансной флуоресценции. - Сообщение ОИЯИ-Р6-86-18. Дубна, 1986. 5 с.
 5. Gangrsky Yu.P., Marinaova K.P., Markov B.N., Nadjakov E.G., Han Gyong I, Tran Cong Tam Low amount nuclide registration by an atomic beam laser spectrometer. - Preprint JINR- E6-86-233. Dubna, 1986. 15 p.
 6. Гангрский Ю.П., Градечны Ч., Земляной С.Г., Маринова К.П., Марков Б.Н., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Измерение зарядовых радиусов ядер Ce, Nd, Sm и Gd по резонансному лазерному излучению. - Proc.Int.School Seminar on Heavy Ions Physics, Dubna, September 1986: JINR-D7-87-68 Dubna, 1987. p.313-321.
 7. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Маринова К.П., Марков Б.Н., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Различие зарядовых радиусов ядер Nd, Sm и Gd с четным и нечетным числом нейтронов. - Тезисы 37-ого совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Юрмала, апрель 1987: Наука Л., 1987, с.103.
 8. Борисов С.К., Гангрский Ю.П., Градечны Ч., Земляной С.Г., Крынецкий Б.Б., Маринова К.П., Марков Б.Н., Мишин В.А., Оганесян Ю.Ц., Стельмах О.М., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Измерение разностей зарядовых радиусов ядер Nd, Sm и Gd по резонансному лазерному излучению. - ЖЭТФ, 1987, т. 93, с.1545-1556.
 9. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Различие зарядовых радиусов редкоземельных элементов с четным и нечетным числом нейтронов. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1988, т. 52, с.48-52.
 10. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Измерение разностей зарядовых радиусов ядер циркония по резонансной лазерной

флуоресценции. - ЖЭТФ, 1988, т. 94, с.9-18.

11. Гангрский Ю.П., Градечны Ч., Земляной С.Г., Илиев С.Н., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Наджаков Е.Г., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Лазерна техника в ядрената физика: метод на лазерно-индуцираната резонансна флуоресценция за регистрация на единични атоми.- Труды международной конференции по оптике и лазерной технике, Варна (Болгария), май 1987: БАН София, 1987. с.350-353.
12. Gangrsky Yu.P., Hoang Thi Kim Hue, Gradecny C., Iliev S.N., Marinaova K.P., Markov B.N., Tran Cong Tam, Zemlyanoi S.G. Investigation of nuclear properties by laser spectroscopy. - Proc. 8 Int. School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), November 1987: World Scientific Singapore, 1988. p.293-309.
13. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Лазерная спектроскопия высокого разрешения в атомном пучке GdI. - Оптика и спектроскопия, 1989, т. 67, с.779-784.
14. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Колесников Н.Н., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Ростовский В.С., Тетерев Ю.Г., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там Определение разностей зарядовых радиусов и параметров деформации ядер церия. - ЯФ, 1989, т. 50, с.1217-1225.
15. Gangrsky Yu.P., Marinaova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G., Kuldjanov B.K. Nuclear charge radii changes and electromagnetic moments of actinides determined by laser spectroscopy. - in: Weak and electromagnetic interactions in nuclei. Proc. Int. Sym., Monreal (Canada), May 1989: Edition Frontieres, Wien, 1989. p. 819-821.
16. Gangrsky Yu.P., Marinaova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G., Kuldjanov B.K. High resolution laser atomic beam spectroscopy on uranium. - XXVI Colloquium Spectroscopicum International (CSI), Abstracts, Sofia (Bulgaria), July 1989: BAS., Sofia, 1989. p.270.
17. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Муминов А.И. Измерение отношений электромагнитных моментов ядер методом резонансного лазерного излучения. - Материалы 3 Всесоюзного совещания по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий, Алма-Ата, март 1989: изд. МГУ, М., 1990. с.25-31.
18. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Маринова К.П., Марков Б.Н., Кульджанов Б.К. Определение разностей зарядовых радиусов и электромаг-

- нитных моментов ядер актинидных элементов. - Proc. Int. School Seminar on Heavy Ion Physics, Dubna, October, 1989: JINR-D7-90-142, Dubna, 1990. p.294-302.
19. Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Хоанг Тхи Ким Хуэ, Чан Конг Там. Измерение сверхтонкого расщепления ^{91}Zr методом резонансной лазерной флуоресценции. - Препринт ИЯФ-Р-1-459. Ташкент, 1989. 7 с.
 20. Gangrsky Yu.P., Kul'djanov B.K., Marinova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G. Determination of nuclear charge-radii changes of Gd from optical isotope shifts. - Bulgarian J.Phys., 1990, v. 17, p.180-186.
 21. Гангрский Ю.П., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н., Земляной С.Г. Определение разностей зарядовых радиусов и отношений электромагнитных моментов ядер урана методом резонансной лазерной флуоресценции. - Изв. АН СССР, сер.физ., 1990, т. 54, с.830-835.
 22. Anastassov A.Ia., Gangrsky Yu.P., Marinova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G. Spectroscopy of long-lived hafnium isotopes and isomers in atomic beam produced by laser evaporation of the samples. - in: Application of lasers in atomic nuclei research (Proc.Int. Workshop), Dubna, Dec. 1990: JINR-D15-91-410 D., 1991. p.17-32.
 23. Anastassov A.Ia., Gangrsky Yu.P., Kul'djanov B.K., Marinova K.P., Markov B.N., Penionzhkevich Yu.E., Sagaidak R.N., Zemlyanoi S.G. Investigation of hafnium isotopes and isomers by laser spectroscopic technique. - in: Application of lasers in atomic nuclei research (Proc.Int.Workshop), Dubna, December 1990. JINR-D15-91-410 D., 1991. p.10-16.
 24. Gangrsky Yu.P., Kul'djanov B.K., Marinova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G. Nuclear charge radii changes and electromagnetic moments ratios of uranium determined by laser spectroscopy.- a) Application of lasers in atomic nuclei research (Proc.Int. Workshop), Dubna, Dec. 1990: JINR-D15-91-410 D., 1991. p.48-54.; б) Int.symposium on lasers in nuclear physics (abs.), Nishina Hall (Japan), September 1991 : Riken , 1991. p.12.
 25. Marinova K.P., Nadjakov E.G. Hyperfine splitting fit: Report. Bulgarian foundation for science. Grant No F17-2003. Sofia: 1992. - 8 p.
 26. K.P.Marinova, E.G.Nadjakov Nuclear radii fit. Algorithm, program, instruction, files.: Report. Bulgarian foundation for science. Grant No F17-2003. Sofia: 1992. - 10 p.
 27. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Kul'djanov B.K., Marinova K.P., Markov

- B.N., Zemlyanoi S.G. Determination of the changes in mean - square charge radii of hafnium isotopes using laser spectroscopic technique.- Exotic nuclei (Proc.Int.Conf.), Foros (Crimea), October 1991: World Scientific Singapore - New Jersey - London - Hong-Kong, 1992. p.301-310.
28. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Marinova K.P., Markov B.N., Kul'djanov B.K., Zemlyanoi S.G. Nuclear charge radii changes of uranium and hafnium isotopes determined by laser spectroscopy.- Hyperfine Interactions, 1992, v. 74, p.31-40.
29. Gangrsky Yu.P., Marinova K.P., Markov B.N., Nadjakov E.G. Isotonic nuclear charge radii. - Сообщение ОИЯИ-Е6-92-17, Дубна, 1992. 7 с.; б) Heavy Ion Physics (Scient.Rep.), JINR-E7-93-57. Dubna, 1993. p.115
30. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Kul'djanov B.K., Marinova K.P., Markov B.N., Nadjakov E.G., Zemlyanoi S.G. Hyperfine splitting constants of the a^3F_3 and z^5G_3 Hfl levels. - Z.Phys., 1992, v. D25, p.1-2.
31. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G., Kul'djanov B.K., Marinova K.P. Changes in nuclear charge radii and electromagnetic moments ratios of hafnium isotopes measured by laser spectroscopic technique. - Heavy Ion Physics (Proc.Int.School Seminar), Dubna, Mai 1993: JINR Dubna, v.1, p.404-413.
32. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Kul'djanov B.K., Marinova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G. Isotope shifts and hyperfine splitting in Hfl: changes in nuclear charge radii of stable isotopes and ^{182}Hf . - Z.Phys., 1993, v. A348, p.177-182.
33. Genova B.K., Ivanov V., Marinova K.P. Extended hyperfine splitting fit.: Report. Bulgarian foundation for science. Grant No F17- 2003. Sofia: 1993. - 16 p.
34. Анастасов А.Я., Гангрский Ю.П., Земляной С.Г., Кульджанов Б.К., Маринова К.П., Марков Б.Н. Измерение разностей зарядовых радиусов ядер гафния методом лазерной резонансной флуоресценции. - ЖЭТФ, 1994, т. 105, с.250-259.
35. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Marinova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G. Optical isotope shifts and changes in nuclear charge radii of stable Ti isotopes. - Z.Phys., 1994, v. D30, p.275-278.
36. Nadjakov E.G., Marinova K.P., Gangrsky Yu.P. Systematics of nuclear charge radii. - At.Data Nucl.Data Tables, 1994, v. 56, p.133-157.
37. Anastassov A., Gangrsky Yu.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G., Marinova

- K.P., Nadjakov E.G., Kul'djanov B.K. Nuclear structure by laser spectroscopy. - а) Proc. 11 Int.School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Nuclear Energy, Varna (Bulg.) October 1993: Inst. Nucl.Res. Nucl. Energy Sofia, 1994. p.112-134.; б) Сообщение ОИЯИ-Е6-94-271. Дубна, 1994. 23 с.
38. Gangrsky Yu.P., Marinova K.P., Markov B.N., Zemlyanoi S.G. Changes in nuclear charge radii of Ti isotopes determined by laser resonance fluorescence. - а) Тезисы 44-ого Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Санкт-Петербург, май 1994: Наука Л., 1994. с.42.; б) IV International conference on selected topics in nuclear structure, Dubna (Russia), July 1994: JINR-E4-94-168 Dubna. p.83.
39. Boos N., Le Blank F. et al. (Orsay, France); Gangrsky Yu.P., Marinova K.P et al. (JINR, Dubna) Measurements of charge radii and nuclear moments for hafnium isotopes and high spin isomer ^{178m}Hf using laser spectroscopy methods. - IV Int.conf. on selected topics in nuclear structure, Dubna (Russia), July 1994: JINR-E4-94-168 Dubna, p.83.
40. Gangrsky Yu.P., Marinova K.P., Zemlyanoi S.G. J-dependences of the isotope shifts in $\text{Ti } 3d^2 4s^2 a^3P$ and $3d^3 4p y^3D^o$ terms. - J Phys.: At. Mol. & Opt.Phys., 1995, v. B28, p.957-964.

Цитированная литература

- Л1. Балыкин В.И., Беков Г.И., Летохов В.С. и др. Лазерное детектирование единичных атомов. - УФН, 1980, т. 132, с.293.
- Л2. Otten E.W. Nuclear radii and moments of unstable isotopes. - in: Tretise on heavy ion science. Nuclei far from stability. D.A.Bromley(ed). - New York: Plenum Press, 1989, v. 8, p.517.
- Л3. Гангрский Ю.П. Зарядовые радиусы ядер измеренные методами лазерной спектроскопии. - ЭЧАЯ, 1992, т. 23, с.1616-1664.
- Л4. Niki H., Miamoto T., Izawa Y. et al. Hyperfine structure and isotope shift measurements on gadolinium levels by laser-induced fluorescence spectroscopy, - Opt.Comm., 1989, v. 70, p.16.
- Л5. Jin W.G., Sakata H., Wakasaki M. et al. J dependences of the isotope shift and hyperfine structure in $\text{GdI } 4f^7 5d 6s^2 {}^9D$, $4f^7 5d 6s 6p {}^9F$ terms. - Phys.Rev., 1990, v. A39, p.1416.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 мая 1995 года.