



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.172.4

П 85

3-88-46

ПОПОВ
Альберт Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР
МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ
НА ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРАХ ИБР**

**Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц**

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

Дубна 1988

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

КАРНАУХОВ В.А.

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

КОНОНОВ В.Н.

доктор физико-математических наук,
профессор

ЛУКЬЯНОВ А.А.

Ведущая организация - Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова,
Москва

Защита состоится "___" _____ 198__ г. в "___" часов на заседании Специализированного совета Д047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 198__ г.

Ученый секретарь
Специализированного совета

ТАРАН Ю.В.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Успешное развитие атомной энергетики стало возможным благодаря накоплению экспериментальной информации о взаимодействии нейтронов с ядрами и созданию теоретических моделей, описывающих эти взаимодействия. Нейтронные данные играли и продолжают играть огромную роль в становлении физических представлений о свойствах ядер. Недостаток в нейтронных данных для многих элементов и их изотопов определил актуальность исследований на реакторах ИБР нейтронных сечений и параметров наблюдаемых в них резонансов. К моменту начала нейтронноспектрометрических исследований на реакторе ИБР-I особенно значительны были пробелы в данных о параметрах нейтронных резонансов редкоземельных ядер. До сих пор процесс накопления нейтронных данных не исчерпал себя, находятся малоизученные изотопы, расширяются энергетические интервалы, возрастают требования к точности экспериментальных данных, их полноте.

Основная цель настоящей работы состояла в исследовании на импульсных реакторах ИБР методами нейтронной спектроскопии индивидуальных параметров α -волновых нейтронных резонансов и их усредненных характеристик - \bar{D} (среднего расстояния между резонансами), $\bar{\Gamma}_y$ (средней полной радиационной ширины), S^0 (нейтронной силовой функции), их зависимости от спина - для малоизученных изотопов в широкой области атомных весов ($48 \leq A \leq 238$), а также в поиске гипотетических сверхплотных ядер в процессе деления нейтронами ^{235}U и ^{239}Pu .

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации представлены результаты исследований свойств атомных ядер на импульсных быстрых реакторах ИБР с применением времяпролетной методики. Высокая интенсивность нейтронных импульсов реакторов ИБР при наличии длинных пролетных баз позволила проводить с хорошим разрешением на образцах малого веса (в том числе из разделенных изотопов) измерения пропускания, выхода гамма-квантов и вариаций их множественности, угловых распределений рассеянных нейтронов и получать новую информацию о параметрах нейтронных резонансов и их усредненных характеристиках, полных сечениях и дифференциальных сечениях упругого рассеяния нейтронов. Впервые в СССР развиты методики определения спинов по множественности гамма-квантов и полных радиационных ширин из анализа формы резонансов в условиях хорошего разрешения. Впервые предложены и выполнены эксперименты по наблюдению жестких гамма-квантов и быстрых нейтронов, которые могли бы сопровождать процесс рождения сверхплотных ядер в зоне ИБР-30. Обширный экспериментальный материал использован для проверки различных теоретических представлений о свойствах резонансных парамет-

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

ров и их усредненных характеристик. Описанные в диссертации исследования квалифицированы как новое научное направление: резонансная нейтронная спектроскопия с помощью импульсных быстрых реакторов.

Практическая ценность состоит в том, что большая часть полученных результатов включена в мировой банк данных "Neutron cross sections" (Academic Press, v. 1, part A, 1981; part B, 1984), который является важным справочным пособием для физиков, работающих как в прикладном, так и в фундаментальном направлениях.

На защиту выносятся

I. Создание на импульсных реакторах ИБР аппаратуры для спектрометрических исследований взаимодействия нейтронов с ядрами и развитие методов измерения и анализа экспериментальных данных:

- Разработка высокоэффективного жидкостного сцинтилляционного детектора нейтронов и 4-кристального гамма-детектора для измерений спектров пропускания и выхода гамма-квантов, вариаций их множественности.

- Разработка программного обеспечения для первичной обработки экспериментальных спектров, для вычисления параметров резонансов и анализа дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов.

- Применение "метода формы" для нескольких толщин образцов в условиях не очень высокого разрешения для полной автоматизации анализа спектров пропускания с целью извлечения таких параметров резонансов, как их энергии и нейтронные ширины.

- Применение "метода формы" в условиях хорошего разрешения для получения полных радиационных ширин резонансов с точностью 5-10%.

- Разработка метода определения спинов нейтронных резонансов четно-нечетных ядер по множественности гамма-квантов.

2. Полученные автором результаты:

- Экспериментальные данные о полных сечениях, дифференциальных сечениях упругого рассеяния нейтронов и параметрах резонансов - их энергиях, нейтронных и радиационных ширинах и спинах - для ~ 80 ядер в области $48 \leq A \leq 238$.

- Выявленные закономерности в плотности нейтронных резонансов изотопов редкоземельной области и их объяснение особенностями заполнения оболочечных состояний деформированных ядер.

- Анализ адекватности предсказаний статистической, оптической и полумикроскопической моделей экспериментальным данным.

- Отсутствие спиновой зависимости в S-нейтронных силовых функциях и радиационных ширинах.

- Результаты систематики полных радиационных ширин и сравнения экспериментальных значений $\bar{\Gamma}_\gamma$ с разными теоретическими оценками.

- Необнаружение образования сверхплотных ядер в делении.

Апробация работы и публикации. Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на многих всесоюзных и международных конференциях. В сборнике "Neutron cross sections" содержится 25 ссылок на работы, включенные в диссертацию. Материалы диссертации опубликованы в 45 печатных работах, основные из которых приведены в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 230 страниц машинописного текста, включая 23 таблицы и 47 рисунков, и состоит из введения, семи глав и заключения. Список цитированной литературы содержит 188 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается современное состояние нейтронной спектроскопии и очерчен круг задач, решаемый ее методами. Отмечена их актуальность как для развития физических представлений, так и для прикладных целей, показано место импульсных быстрых реакторов среди действующих нейтронных спектрометров.

Первая глава посвящена описанию аппаратуры, входящей в состав нейтронного спектрометра на базе импульсного реактора. Приводятся характеристики реакторов ИБР как основного элемента спектрометра. Типичные параметры широко используемого в описываемых исследованиях бустерного режима таковы: мощность 4-8 кВт, частота 100 Гц, длительность нейтронного импульса на половине высоты ~ 3 мкс, задний его фронт - экспоненциальный $e^{-t/\tau}$, где $\tau \approx 5,0$ или $2,5$ мкс в зависимости от размножения. В измерениях пропускания использовались жидкостные сцинтилляционные детекторы площадью 500-800 см², имеющие эффективность $\sim 30\%$ при энергии нейтронов 10 кэВ, литиевые стекла или батарея ³He-счетчиков, которая применялась также для измерений дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов. В исследованиях радиационного захвата использовались жидкостный сцинтилляционный детектор большого объема и детектор из 4-х кристаллов NaI. Были разработаны вспомогательные устройства для формирования нейтронных пучков и дистанционного перемещения образцов. Возможность нейтронноспектрометрических исследований на импульсных реакторах была обеспечена оснащением измерительно-вычислительного центра многоканальными временными анализаторами и вычислительной техникой, позволившей в настоящее время полностью автоматизировать измерения. Большую роль сыграли вычислительные средства - M-20, БЭСМ-4, CDC-6500, PDP-II/70 - в первичной обработке экспериментальных данных и их анализе.

Во второй главе описываются методики измерения пропускания, радиационного захвата, первичной обработки временных спектров, а также способы определения параметров нейтронных резонансов. Было создано несколько вариантов программ вычисления резонансных параметров методом площадей для ЭВМ М-20, БЭСМ-4 и СРС-6500. С использованием метода наименьших квадратов решалась система уравнений, связывающих площади резонансов из разных экспериментов (пропускание, захват, самоиндикация) с толщинами образцов и параметрами резонанса E_0 , Γ , $g\Gamma_n$, Γ_γ . Большое применение нашла созданная программа для анализа спектров пропускания методом формы, которая позволила повысить точность оцениваемых резонансных параметров и полностью автоматизировать обработку экспериментальных данных. При выборе образцов для нейтронноспектроскопических исследований мы исходили из соображений полного отсутствия сведений о нейтронных резонансах или их ограниченности, стремления получить систематическую информацию о резонансных параметрах для определенной группы ядер, например для изотопов редкоземельной области. Большая часть измерений выполнена с использованием образцов из разделенных изотопов. Были исследованы параметры нейтронных резонансов рутения - 99, 101; палладия - 105; йода; цезия; неодима - 142, 143, 144, 145, 146, 148, 150; самария - 144, 145, 146, 147, 148, 150, 152, 154; гадолиния - 152, 154, 155, 156, 157, 158, 160; тербия; диспрозия - 161, 163; гольмия, эрбия - 164, 166, 167, 168, 170; рения - 185, 187; осмия - 187, 189; иридия - 191, 193. Для каждого изотопа получены сведения о резонансных энергиях - E_0 , нейтронных ширинах - $g\Gamma_n$ (в некоторых случаях о полных радиационных ширинах - Γ_γ) для десятков резонансов в энергетическом интервале от 1-5 эВ до нескольких сотен эВ. Для большинства исследованных ядер полученные данные были новыми, в дальнейшем они были частично подтверждены измерениями в других лабораториях или до сих пор остаются единственными. На основе индивидуальных параметров резонансов для изученных ядер получены такие усредненные характеристики, как средние расстояния между резонансами \bar{D} , силовые функции $S^0 = \frac{\sum g\Gamma_n^2}{\Delta E}$ и средние полные радиационные ширины $\bar{\Gamma}_\gamma$.

В третьей главе представлены результаты измерений полных сечений и сечений дифференциального упругого рассеяния нейтронов. В энергетической области выше 100 кэВ разрешение нейтронного спектрометра ЛНФ ОИЯИ резко ухудшается, появляются трудности в учете фона помещения, рециклических и запаздывающих нейтронов. Для измерений σ_ϵ в области сотен кэВ была предложена новая методика - фильтрование пучка нейтронов с помощью железа или алюминия в сочетании с методом времени пролета. Были измерены полные сечения для Cd и Mo для 20 энергетических точек в области от 24 до 1000 кэВ, которая совершенно недо-

ступна при использовании на ИБР-30 спектрометрии по времени пролета. Эти эксперименты продемонстрировали полезность применения фильтров для других задач, в которых исследуются усредненные по энергетическим интервалам характеристики взаимодействия нейтронов с ядрами. σ_ϵ для Cd и Mo были важны для проверки правильности калибровки полных сечений рассеяния, извлекаемых из измерений угловых распределений упруго рассеянных нейтронов.

Измерения полного сечения ^{186}W в области ниже 10 эВ и в интервале первого резонанса при 18,8 эВ были нацелены на точное определение радиуса потенциального рассеяния R' и параметров резонанса 18,8 эВ, через которые описывается σ_ϵ в низкоэнергетической области

$$\sigma_\epsilon(E) = 4\pi R'^2 + \frac{\pi \Gamma_{\text{рез}}^2}{k_{\text{рез}}^2 [(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4]} + \frac{4\pi \Gamma_{\text{рез}} R' (E-E_0)}{k_{\text{рез}} [(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4]} + \frac{\pi \Gamma_{\text{рез}} \Gamma_\gamma (E_0/E)^{1/2}}{k_{\text{рез}}^2 [(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4]} \quad (1)$$

Здесь в Γ учтена зависимость нейтронной ширины от энергии $\Gamma_n = \Gamma_{\text{рез}} (E/E_0)^{1/2}$. Найденные значения E_0 , Γ_γ , $\Gamma_{\text{рез}}$, R' были использованы совместно с известным значением $\alpha_{\text{ког}}$ для получения оценки величины поляризуемости нейтрона. ^{186}W обладает уникальной особенностью: вблизи тепловой точки из-за интерференции резонансного и потенциального рассеяния сечение рассеяния ничтожно, поэтому σ_ϵ при $E \approx 0,025$ эВ полностью обусловлено захватом.

Измерение полного сечения ^{209}Bi в интервале 0,3-100 эВ также стимулировано возможностью оценки поляризуемости нейтрона из совокупности прецизионных данных о полном сечении и амплитуде когерентного рассеяния.

Вторая часть 3-й главы посвящена описанию методики измерения усредненных дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов с энергией 1-400 кэВ, которые надежно описываются в этом энергетическом интервале разложением по полиномам Лежандра, учитывающим вклад только s- и p-волновых нейтронов

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_s}{4\pi} [1 + \omega_1 P_1(\cos \theta) + \omega_2 P_2(\cos \theta)] \quad (2)$$

Параметры сечения σ_s , ω_1 и ω_2 были извлечены из измерений угловых распределений рассеянных нейтронов для 18-21 энергетических групп для следующих образцов: Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Ge, Se, Y, Zr, Nb, Mo, ^{92}Mo , ^{94}Mo , Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, ^{106}Cd , ^{108}Cd , ^{110}Cd , ^{112}Cd , ^{116}Cd ,

In, ^{116}Sn , ^{117}Sn , ^{118}Sn , ^{119}Sn , ^{120}Sn , ^{122}Sn , ^{124}Sn , Sb, Te, Nd, Dy, Er, Ta, W, Re, ^{238}U . Полученные нами формулы, выражающие зависимости $\sigma_s(E)$, $\omega_1(E)$ и $\omega_2(E)$ через s - и p -нейтронные силовые функции и фазы потенциального рассеяния и разработанные программы анализа экспериментальных данных, позволили определить для всех перечисленных ядер значения s^0 , $s_{1/2}^1$, $s_{3/2}^1$, r_0^1 , r_1^1 (здесь $1/2$ и $3/2$ - полный момент нейтрона).

В четвертой главе обсуждаются измерения полных радиационных ширин. Надежное определение радиационных ширин является существенной проблемой с точки зрения развивающихся представлений о механизме радиационного захвата нейтрона и практического использования в моделировании неизвестных сечений захвата. В гл. 2 была рассмотрена возможность определения Γ_γ из измерений пропускания с использованием метода площадей и данных по радиационному захвату. Однако использование данных по радиационному захвату сопряжено с необходимостью калибровки эффективности гамма-детектора и потока нейтронов, что приводит к дополнительным систематическим ошибкам. В нашей программе "метод формы" варьируемым, искомым параметром вместо полной ширины Γ принята радиационная ширина Γ_γ . Эта замена математически строга, если мы, зная спин резонанса, в формулу для σ_t подставляем $\Gamma = \Gamma_\gamma + g\Gamma_n/g$. При такой параметризации из анализа формы резонансов в кривой пропускания можно определять радиационные ширины, причем, как показал опыт обработки экспериментальных данных, статистические ошибки Γ_γ могут быть меньше 10%. Было проверено влияние неопределенности используемых параметров функции разрешения на ошибки значений Γ_γ , определяемых из анализа спектров пропускания. Оказалось, что ошибки Γ_γ для резонансов ниже 25 эВ даже с учетом возможных систематических ошибок не превышают 5%, а в интервале до 50 эВ составляют около 10%. Описываемым методом были определены значения Γ_γ для резонансов ^{99}Ru , ^{101}Ru , ^{105}Pd , ^{127}I , ^{133}Cs , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{161}Dy , ^{163}Dy , ^{187}Os , ^{189}Os , ^{191}Ir , ^{193}Ir .

В пятой главе описаны измерения спинов нейтронных резонансов методом множественности гамма-квантов. Спин до сих пор остается наиболее трудно определяемой характеристикой компаунд-состояний ядер. Это объясняется тем, что не существует простого и надежного способа измерения спинов. Определение спинов прямым методом с использованием поляризованных нейтронов и ядер очень трудоемко из-за необходимости применения сложного оборудования для получения пучка поляризованных нейтронов и осуществления достаточной поляризации ядер мишени. Определение спинов из комбинации результатов измерений полного и парциальных сечений также является непростой задачей. Нами был развит метод, основанный на предположении, что среднее число γ -квантов в каскаде

(множественность ν) зависит от спина резонанса. Для многокристалльного NaI-детектора, работающего в режимах одиночного счета и совпадений, для каждого резонанса можно получить отношение площади в режиме одиночного счета S_z к площади в режиме совпадений $S_c = R = S_z/S_c$. Эффективная множественность будет зависеть от порога детектирования γ -квантов, поэтому

$$R \approx \frac{n \xi_z \nu_z}{(n-1) \nu_c (\nu_c - 1) \xi_c^2}$$

где n - число кристаллов, ν_z, ν_c - имеют смысл средних чисел γ -квантов в регистрируемых каскадах при используемых порогах в каналах одиночного счета и совпадений, а ξ_z и ξ_c - соответствующие эффективности. Возможность определения спинов резонансов заключается в том, что совокупность отношений R распадается на две группы в зависимости от спина захватного состояния. Расчетные оценки спинового эффекта, определенного как $K = \frac{R_{I-1/2}}{R_{I+1/2}}$, были получены с помощью

программы вычисления спектров γ -квантов, возникающих при захвате нейтронов, в которой учитывались переходы на полосу промежуточных уровней и на известные нижние состояния. Используя расчетную форму гамма-спектра для двух спинов захватного состояния, можно получить оценки ожидаемого спинового эффекта в зависимости от выбираемых порогов. Такие расчеты надежно указывают "знак" величины K , а именно, что $R_{I-1/2} > R_{I+1/2}$. Сравнение расчетных и экспериментальных значений K дает удовлетворительное согласие, при этом подтверждается наличие заметных спиновых эффектов у четно-нечетных ядер и отсутствие у нечетно-четных ($^{121}, ^{123}\text{Sb}$, ^{165}Ho , $^{185}, ^{187}\text{Re}$).

Для оценки достоверности определяемых значений спинов резонансов использовался метод максимума правдоподобия, в котором вероятности значений спинов $I+1/2$ и $I-1/2$ для каждого резонанса вычисляются по всей совокупности отношений R с определением средних значений \bar{R}_J и учетом портер-томазовских флуктуаций. Спины определены в области до нескольких сотен эВ для резонансов следующих ядер: ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{157}Gd , ^{161}Dy , ^{163}Dy , ^{167}Er , ^{173}Yb .

Шестая глава диссертации посвящена проблеме сверхплотных ядер (СПЯ). В ряде теоретических работ были высказаны предположения о возможном существовании материи с плотностью намного большей, чем в обычных ядрах. К сожалению, теория не смогла однозначно ответить на вопрос о величине энергии связи нуклонов в сверхплотном состоянии: должна ли она быть выше или ниже обычной. Первые экспериментальные попытки обнаружить СПЯ были направлены на поиски их в природных образцах или в столкновениях частиц высоких энергий. А.Б.Мигдал указал

на целесообразность поисков СПЯ среди осколков деления. Идея наших экспериментов состояла в том, что при образовании сверхплотного осколка с повышенной энергией связи должна выделиться сверх обычных 200 МэВ избыточная энергия. Такой акт деления можно попытаться зарегистрировать благодаря появлению частицы, несвойственной обычному делению: "жестких", высокоэнергетических γ -квантов или нейтронов.

Поиск жестких γ -квантов из зоны реактора ИБР-30 проводился при мощности ~ 20 кВт и полуширине его всплеск ~ 80 мкс с помощью двух кристаллов NaI, установленных в 70 м от реактора. Был выбран порог регистрации 30 МэВ, а для подавления наложения импульсов от мягких γ -лучей в пучок помещался водяной фильтр толщиной 275 см. Спектр нейтронов деления исследовался на базе 1000 м при мощности ~ 6 кВт и полуширине нейтронных импульсов ~ 3 мкс с помощью пластического сцинтиллятора. Оценка выхода частицы на акт деления δ получается из соотношения

$$A = 3 \cdot 10^{13} W T \delta \kappa \epsilon \frac{\omega}{4\pi},$$

где A - счет детектора, W - мощность реактора в кВт, κ - пропускание веществ, разделяющих точку рождения частицы и детектор, ω и ϵ - телесный угол и эффективность детектора, T - время измерения в секундах. Из полученных результатов были сделаны следующие оценки. Для мгновенных γ -квантов $\delta_\gamma < 3 \cdot 10^{-8}$, а средний выход нейтронов с энергией 40-200 МэВ $\delta_n < 9 \cdot 10^{-7}$. Результаты этих измерений позволили оценить также предельное содержание СПЯ в материалах зоны ИБР-30, если допустить возможность на них (n, γ) -реакции.

В последующем было достигнуто снижение в 50 раз верхней оценки выхода очень быстрых нейтронов за счет подавления фона космических частиц методом антисовпадений. Для этой цели был использован детектор из двух пластических сцинтилляторов: основного и защитного. Для выхода нейтронов с энергией 40-200 МэВ на акт деления реакторного топлива получена оценка $\delta_n < 2 \cdot 10^{-8}$.

Для дальнейшего исследования высокоэнергетической части спектра нейтронов деления был применен метод радиоактивных индикаторов с использованием пороговых реакций (n, xn) на образце ^{209}Bi . После облучения в течение 4-х суток и 21-дневной выдержки был измерен γ -спектр образца ^{209}Bi с помощью Ge(Li)-детектора. Из анализа интенсивностей γ -пиков, принадлежащих разным изотопам Bi с учетом периодов полураспада, и опираясь на значение среднего сечения (n, γ) -реакции на ^{209}Bi , мы получили оценки сечений реакций (n, xn) . Для реакций $(n, 3n)$, $(n, 4n)$, $(n, 5n)$ наши данные являются первым экспериментальным результатом. Было сделано также заключение о высокоэнергетическом "хвосте" спектра деления: при делении ядер реакторного топлива рождаются нейтроны с энергией вплоть до 30 МэВ, а спектр их описывается

распределением Максвелла с температурой 1,4 МэВ. Полученный верхний предел среднего сечения реакции $(n, 5n)$ приводит к оценке выхода нейтронов на акт деления $\delta_n < 4 \cdot 10^{-10}$ в интервале энергий 40-60 МэВ.

В седьмой главе диссертации обсуждаются физические результаты нейтронноспектрометрических исследований. Большинство теоретических представлений о свойствах нейтронных резонансов получены на основе методов, направленных либо на описание усредненных характеристик, либо на обоснование функций распределения резонансных параметров. На начальном этапе изучения нейтронных резонансов уделялось внимание законам распределения приведенных нейтронных ширин, расстояний между резонансами. Статистический подход был использован для изучения закономерностей в плотности уровней. Разные модельные представления привлекались к анализу полных радиационных ширин. Всегда вызвали интерес проявления в свойствах нейтронных резонансов оболочечных эффектов, формы ядер. Наряду со статистической и оптической моделями развивался микроскопический подход для описания силовых функций и плотности уровней, основанный на фрагментации компаунд-состояний по мало-квaziчастичным компонентам волновых функций. Важной проблемой всегда оставалось изучение спин-спиновых и спин-орбитальных эффектов во взаимодействии нейтронов с ядрами, поиск промежуточных структур и нестатистических эффектов. Исследование систематик силовых функций, радиусов рассеяния, полных радиационных ширин, плотности нейтронных резонансов позволяет выявить особенности поведения этих характеристик в зависимости от атомного веса, энергии возбуждения и сопоставить с разными физическими моделями.

Полученная информация и ее место в мировом банке данных

Исследовано более 80 образцов, в том числе около 40 изотопически обогащенных. Для 40 ядер в области $99 \leq A \leq 193$ определены параметры ~ 1500 резонансов, в том числе для 360 резонансов определены спины, для 250 - полные радиационные ширины. Эти результаты вошли в мировой банк нейтронных данных ("Neutron cross sections") и представляют существенную долю от общего вклада СССР в исследования резонансных параметров. Впервые получены данные о дифференциальном сечении упругого рассеяния нейтронов с энергией 1-400 кэВ для 40 ядер в интервале $48 \leq A \leq 238$, из которых оценены нейтронные силовые функции и радиусы рассеяния.

Законы распределений резонансных параметров

Накопленные экспериментальные данные, в том числе и результаты диссертации, подтверждают, что расстояния D между резонансами подчиняются распределению, найденному Вигнером:

$$p(D)dD = \frac{\pi D}{2\langle D \rangle} \exp\left(-\frac{\pi D^2}{4\langle D \rangle^2}\right), \quad (3)$$

которое предсказывает малую вероятность близкого расположения уровней. Хотя предлагалось и другое распределение (Дайсон-Мета), адекватное вигнеровскому, но имеющее существенно меньшую дисперсию, именно последнее используется для практических целей (оценок экспериментальных ошибок $\langle D \rangle$, флуктуаций в нейтронных сечениях). В диссертации демонстрируется согласие распределений приведенных нейтронных ширин с распределением Портера-Томаса (χ^2 -распределение с $\nu = 1$), которое стало настолько общепризнанным, что отклонения экспериментальных данных от этого распределения используют для оценки пропуска слабых резонансов или примеси p -волновых резонансов.

Радиационный распад нейтронных резонансов происходит через большое число выходных каналов, поэтому следует ожидать, что флуктуации полных радиационных ширин будут определяться χ^2 -распределением с большим числом степеней свободы, которое с ростом ν переходит в нормальное распределение. Экспериментальные данные действительно соответствуют этой гипотезе.

S-волновые нейтронные силовые функции и радиусы рассеяния

Нейтронная силовая функция является параметром, характеризующим проницаемость поверхности ядра. В R -матричной теории устанавливается однозначная связь проницаемости с усредненными резонансными параметрами

$$T_l = \frac{2\pi \langle \Gamma_n^l \rangle}{\langle D_l \rangle}$$

Большинство теоретических оценок $S^0 = \frac{\langle \Gamma_n^0 \rangle}{\langle D_0 \rangle}$ проводилось в рам-

ках оптической модели и было нацелено на выбор потенциалов и их параметров. Рассматривались разные формы потенциалов, разные виды поглощения, учитывалось влияние коллективных возбуждений. Наши данные для деформированных редкоземельных изотопов в области $4s$ -одночастичного резонанса хорошо описываются расчетами для комплексного потенциала с диффузной границей и поверхностным поглощением с учетом вибрационного и вращательного движений. Полученные нами новые данные о S^0 из усредненных дифференциальных сечений упругого рассеяния дают возможность сопоставить наши значения S^0 с литературными данными в области $70 < A < 240$ и с современными теоретическими расчетами. Следует отметить следующие результаты: хорошее согласие наших S^0 с другими экспериментальными данными и удовлетворительное описание $S_{\text{экс}}^0(A)$ в указанной области (за исключением минимума при $A \approx 120$) оптическими расчетами с учетом коллективных возбуждений и динамических (при $A \sim 100$),

и статических (при $A \sim 160$) деформаций. Ни один их вариантов оптической модели не описывает поведение $S_{\text{экс}}^0$ в минимуме при $A \approx 120$. Правильное описание S^0 в области $53 < A < 126$ дает квазичастично-фононная модель ядра, развитая группой В.Г.Соловьева.

Ожидалось, что спин-орбитальное взаимодействие должно приводить к появлению дополнительных пиков в структуре гигантских резонансов S -волновой силовой функции. К сожалению, сделать окончательный вывод, например, о предсказываемом дополнительном пике в S^0 при $A \approx 165$ до сих пор не удалось из-за все еще значительных погрешностей $S_{\text{экс}}^0$.

При отсутствии резонансов полное сечение может быть выражено через фазовые сдвиги, тогда при низких энергиях $\sigma_t = \frac{4\pi}{k^2} \sin^2 \delta_0$. Это дало основание ввести величину, названную длиной или радиусом рассеяния

$$R' = - \lim_{k \rightarrow 0} \left(\frac{\delta_0}{k} \right)$$

Величину R' используют также для параметризации полных сечений в области разрешенных резонансов (I). Значения R' находят из полных сечений, сечений рассеяния при низких энергиях или из анализа формы нейтронных резонансов. В R -матричном представлении $R' = R(1 - R_0^\infty)$, где R - радиус ядра (канала), а R_0^∞ - вклад в R -матрицу далеких уровней - параметр, который мы определяем из анализа дифференциальных сечений рассеяния. Поскольку R' в нашем случае определены по широкому энергетическому интервалу, то они должны быть менее подвержены флуктуациям, чем локальные значения R' , для которых можно ожидать значительных флуктуаций из-за статистики нейтронных резонансов. Однако сравнение наших значений R' с известными R' по низкоэнергетическим данным показывает, что оба набора значений R' в пределах ошибок совпадают и имеющиеся расхождения не превышают 15%. Совокупность всех известных значений R' хорошо согласуется с оптико-модельными расчетами для тех же вариантов потенциала, которые дали удовлетворительное описание $S_{\text{экс}}^0(A)$.

Плотность компаунд-состояний в редкоземельной области

Для анализа полученных данных о плотности нейтронных резонансов редкоземельных ядер была использована статистическая модель (SM), которая приводит к следующему выражению для плотности уровней

$$\rho(u, j) = \frac{(2j+1) \exp(2\sqrt{au}) \exp\left[-\frac{(j+1/2)^2}{2\sigma^2}\right]}{24\sqrt{2} a^{1/4} u^{5/4} \sigma^3}, \quad (4)$$

где $\sigma^2 = \frac{6}{\pi^2} \langle m^2 \rangle (au)^{1/2}$,

$\langle m^2 \rangle$ - средний квадрат проекции полного момента оболочечных состояний вблизи поверхности Ферми,

u - эффективная энергия возбуждения ядра.

В поведении полученных значений параметра плотности уровней α в зависимости от A помимо минимумов при $A \approx 90, 140, 210$, которые объясняются эффектами заполнения оболочек сферических ядер, наблюдается и максимум при $A \approx 150$, существование которого не укладывается в рамки этого объяснения. Принимая во внимание, что в модели ферми-газа $\alpha = \frac{\pi^2}{6} g$ (g - плотность одночастичных состояний вблизи поверхности Ферми), мы попытались объяснить ход $\alpha_{\text{эксп}}(N)$ зависимостью $g_{\text{обол}}(N)$, используя для конкретных ядер схему одночастичных уровней в деформированном потенциале. Предполагалось, что ядро состоит из двух независимых систем - протонной и нейтронной, каждая с собственным одночастичным спектром и своей равновесной деформацией. В протонной системе в области редкоземельных ядер идет заполнение середины оболочки, поэтому считалось, что протонная деформация велика ($\beta \sim 0,3$) и мало меняется для каждого семейства изотопов. Принималось также, что деформация нейтронной системы, в которой в районе изотопов Nd, Sm начинается заполнение следующей после $N=82$ оболочки, соответствует экспериментальной. При этих условиях были получены $g_{\text{обол}}$ вблизи поверхности Ферми при ширине интервала усреднения 1 МэВ. Оказалось, что значения $g_{\text{обол}}(N)$ повторяют качественно зависимость $g_{\text{эксп}}(N)$. Таким образом, наличие максимума в $\alpha(N)$ при $N=90$ (в $\alpha(A)$ при $A=150$) можно объяснить увеличением оболочечной плотности из-за перемешивания одночастичных уровней при малых деформациях, а спад после $A \approx 155$ и дальнейший ход - переходом к большим деформациям, приводящим к разрежениям в схеме уровней для середины нейтронной оболочки. Описанный подход благодаря принятым допущениям не отличается строгостью. Однако качественно физическая картина увеличения плотности компаунд-состояний в области $A \approx 150$, по-видимому, дана правильно, о чем свидетельствуют результаты, полученные позже в работах других авторов.

Спиновые эффекты в нейтронных резонансах

Вопрос о зависимости сил взаимодействия нейтронов с ядрами от взаимной ориентации спинов и их величин связан с изучением спиновых эффектов в нейтронных силовых функциях. По мере накопления информации о спинах разными авторами делались как положительные, так и отрицательные утверждения о наличии спиновых эффектов в S^0 . Существенный вклад в прояснение этого вопроса внесли наши данные о спинах и нейтронных ширинах резонансов редкоземельных ядер. Они отвергли на уровне высокой статистической достоверности делавшиеся ранее выводы о наличии зависимости S^0 от J у этих ядер. Наш вывод состоял в том, что если спиновые эффекты и существуют, то они малы и не превышают 10-20%. Позже прямые измерения спиновой зависимости усредненных полных сечений на поляризованных нейтронах и ядрах подтвердили наш результат.

Из картины многоканального радиационного распада нейтронных резонансов через полосу промежуточных состояний с высокой плотностью можно предполагать, что усредненные вероятности распада на эту полосу будут слабо зависеть от спина резонанса. Именно эти первичные переходы дают основной вклад в полную радиационную ширину и поэтому следует ожидать слабую зависимость Γ_{γ} от J . Наши экспериментальные данные для ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{161}Dy действительно демонстрируют совпадение $\bar{\Gamma}_{\gamma}$ для $J=I \pm 1/2$ в пределах 5%. Спиновая независимость Γ_{γ} подтверждается также мировым банком данных.

СМ предсказывает вполне определенную зависимость плотности уровней от спина, которую согласно (4) представим как

$$\rho(J) = \rho_0 (2J+1) \exp\left[-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (5)$$

Анализ плотности нейтронных резонансов в рамках СМ приводит к взаимосвязанным параметрам α и σ . С увеличением информации о спинах появилась возможность прямой оценки σ в предположении (5) из наблюдаемой плотности резонансов с разными спинами. Наши данные для нечетных изотопов Sm и Dy позволили получить нижнюю оценку $\sigma \geq 3+4$. Оценка σ для ядер в интервале $A=170-180$, имеющих спины от 0 до 7, сделана нами также на основании формулы (4) в предположении, что у всех ядер этой группы параметры α и σ одинаковы. Полученная оценка $\sigma \approx 6$ подтверждает справедливость принимаемых в СМ соотношений между σ и другими параметрами, а также хорошо согласуется с расчетами в рамках полумикроскопической модели.

Полные радиационные ширины

Мы провели вычисление средних значений $\Gamma_{\gamma}^{\text{эксп}}$ и их сравнение с теоретическими оценками, основанными на описании $S_{\gamma}(E_{\gamma})$ через среднее сечение фотопоглощения и его модельное представление. Оказалось возможным свести $\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}}$ к выражениям, зависящим от массового числа A , эффективной энергии возбуждения U и параметра плотности уровней α . Если для сечения фотопоглощения $\bar{\sigma}_{\text{св1}}(E_{\gamma})$ использовать разные оценки (одночастичную, лоренцевскую зависимость с экспериментальными или модельными параметрами гигантского дипольного резонанса), то приходим к такому общему представлению

$$\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}} = C A^{\alpha} U^{\beta} \alpha^{\gamma},$$

где C - нормировочный коэффициент, α, β, γ - степенные показатели, зависящие от выбранного модельного описания $\bar{\sigma}_{\text{св1}}(E_{\gamma})$. При сравнении с экспериментальными данными минимизировалась сумма

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{\Gamma_{\gamma i}^{\text{теор}} - \Gamma_{\gamma i}^{\text{эксп}}}{\Delta \Gamma_{\gamma i}^{\text{эксп}}} \right)^2.$$

Программа позволяла проводить расчеты для любой комбинации фиксированных и свободных параметров C, α, β, γ , а также в предположении, что α пропорционально A , т.е. исключалась зависимость $\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}}$ от индивидуальных значений α . Получено заключение о качестве соответствия разных оценок $\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}}$ экспериментальным данным и сделаны следующие выводы. 1) При гипотезе $\alpha \sim A$ для всех вариантов соответствие расчетных значений Γ_{γ} экспериментальным становится по χ^2 в 2-3 раза лучше. 2) Ни одному из модельных вариантов нельзя отдать предпочтение по соответствию во всем интервале A $\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}}$ экспериментальным значениям. Кроме того, ни один из модельных подходов не способен детально описать $\Gamma_{\gamma}^{\text{экс}}$: имеется всегда нерегулярный разброс отношений $\Gamma_{\gamma}^{\text{экс}}/\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}}$ для соседних ядер. 3) Только в подходе Бондаренко-Урина удается получить правильный масштаб теоретических значений Γ_{γ} .

В последнее время в работах группы Кадменского-Фурмана предложен новый метод расчета радиационных силовых функций, основанный на корректном учете фрагментации квазичастиц и дающий в отличие от других моделей $S_{\gamma}(E1) = \text{const}$ в области $E_{\gamma} \leq 2$ МэВ. Наши расчеты $\Gamma_{\gamma}^{\text{теор}}$ с учетом этой радиационной силовой функции и с учетом вклада в Γ_{γ} М1-переходов дали хорошее согласие (в пределах $\pm 25\%$) с экспериментом для сферических ядер в области $78 \leq A \leq 200$, но и в рамках этого подхода не удается плавное описание Γ_{γ} для соседних ядер.

Нестатистические эффекты

Проявление нестатистических эффектов в свойствах нейтронных резонансов возможно благодаря влиянию малочастичных входных состояний. Экспериментально эти эффекты могут проявляться как корреляции парциальных ширин разных каналов, как группирование резонансов с большими ширинами или как усиление жестких γ -переходов. Наличие вариаций нейтронных силовых функций в зависимости от энергетического интервала отмечалось не раз. Однако статистическая достоверность таких фактов была невелика и с увеличением объема данных менялись сами оценки $S^{\circ}(E)$. Тем не менее, в наших данных имеется два примера, дающих повод говорить о группировании резонансов. Так, для ^{149}Sm и ^{185}Re оценки силовых функций по разным интервалам приводят к следующим результатам:

	интервал	$S^{\circ} \cdot 10^4$
^{149}Sm	0-100 эВ	$8,2 \pm 1,9$
	100-200 эВ	$3,1 \pm 0,7$
^{185}Re	0-230 эВ	$1,58 \pm 0,29$
	230-510 эВ	$3,57 \pm 0,65$

Вероятность случайного наблюдения этих пар значений S° (в предположении, что $S^{\circ}(E) = \text{const}$) - 0,2% для ^{149}Sm и 0,5% для ^{185}Re . Наш резуль-

тат для ^{149}Sm был подтвержден японской группой. Отмеченную структуру с шириной 100-200 эВ нельзя объяснить влиянием входных состояний, так как трехквaziчастичное состояние имеет характерную ширину ~ 100 КэВ. Кроме того, после измерения нами спинов резонансов ^{149}Sm стало очевидно, что группирование сильных резонансов ^{149}Sm в интервале 0-100 эВ не связано с каким-то одним спином. Указанные примеры структур для ^{149}Sm и ^{185}Re , несмотря на высокую статистическую достоверность, не нашли физической интерпретации. Можно остановиться и на простом объяснении - игре случая: в большом объеме данных для большого числа изотопов возможно появление маловероятных событий (для отдельных интервалов у некоторых ядер). Для уточнения вывода о наличии структуры у ^{149}Sm и ^{185}Re была бы полезна информация о корреляциях жестких γ -переходов и приведенных нейтронных ширин.

Современное состояние проблемы сверхплотных ядер

Полученные нами оценки выхода жестких гамма-квантов и быстрых нейтронов на акт деления наряду с результатами поисков аномальных излучателей в природных образцах и в ядерных реакциях поставили достаточно низкий предел вероятности образования или существования сверхплотных ядер (СПЯ) с большой энергией связи. Теория по-прежнему скорее ставит вопрос перед экспериментаторами, чем дает предсказание о существовании СПЯ. Теперь надежды на обнаружение СПЯ связывают с реакциями с тяжелыми ионами и поиском СПЯ со "скромными" энергиями связи. Общий же итог всех экспериментов следует воспринимать так, что подтверждений существования или образования СПЯ в природе не найдено.

В заключении содержатся основные итоги изложенных в диссертации исследований, коротко суммированные ниже.

- Создан комплекс аппаратуры, позволивший реализовать спектрометрию нейтронов по времени пролета на импульсных быстрых реакторах ИБР.

- Разработаны методы и создан комплекс программ для обработки экспериментальной информации на ЭВМ вплоть до вычисления параметров резонансов, полных сечений, дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов и извлечения из них значений S° и R' .

- Проведены измерения пропускания, выхода гамма-квантов для 40 ядер в интервале $99 \leq A \leq 193$.

- Развита методика определения спинов резонансов по множественности гамма-квантов и полных радиационных ширин из анализа формы резонансов в спектрах пропускания, измеренных в условиях хорошего разрешения.

- Получена обширная информация о параметрах резонансов исследованных ядер, которая включена в мировой банк нейтронных данных, имеющий важное прикладное и научное значение.

- Проведены измерения усредненных дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов с энергией 1-400 кэВ для 40 ядер в интервале $48 \leq A \leq 238$ и получены значения S-волновых нейтронных силовых функций и радиусов рассеяния.

- Подтверждено, что совокупность резонансных данных хорошо согласуется со статистической моделью. Но имеется два случая - ^{149}Sm и ^{185}Re , когда по формальным статистическим тестам можно констатировать наличие структуры в $\Sigma \Gamma_n^0$.

- Показано, что в целом значения S^0 и R^0 в области $50 < A < 240$ удовлетворительно описываются расчетами по оптической модели с учетом динамических и статических деформаций, коллективных мод возбуждения. Оптические расчеты не дают согласия в минимуме $S^0(A)$ при $A \approx 120$. Поведение $S^0(A)$ в этой области хорошо описывается полумикроскопической моделью.

- Установлено существование максимума в зависимости параметра плотности уровней α от массового числа при $A \approx 150$, которое объяснено зависимостью плотности одночастичных состояний вблизи поверхности Ферми от степени заполнения оболочечных состояний деформированных ядер.

- Полученные данные о S^0 для разных спинов в области редкоземельных ядер продемонстрировали отсутствие влияния спина на силовые функции и заставили отказаться от выводов ряда авторов о спиновых эффектах в S^0 для этих ядер.

- Из анализа плотности нейтронных резонансов с разными спинами и из совокупности данных о плотности резонансов группы ядер с $A = 170-180$ получены прямые оценки спинового фактора σ , описывающего зависимость плотности возбужденных состояний от спина, которые соответствуют предсказаниям статистической и полумикроскопической моделей.

- Проведены оценка средних радиационных ширин нейтронных резонансов и их сравнение с различными теоретическими расчетами. Установлено, что ни один из рассмотренных теоретических подходов не способен дать детальное описание экспериментальных значений Γ_y , большинство из них не дают и правильный масштаб $\Gamma_y^{\text{теор}}$. Только в недавних работах Бондаренко-Урина и Кадменского-Фурмана получены модельные радиационные силовые функции, приводящие к согласию $\Gamma_y^{\text{теор}}$ и $\Gamma_y^{\text{эксп}}$ в пределах 25%.

- Предложены и выполнены эксперименты по поиску гипотетических сверхплотных ядер в зоне реактора ИБР-30. Получены наиболее низкие оценки вероятности образования СПЯ на акт деления.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

- I. Визи И., Жуков Г.П., Забиякин Г.И., Каржавина Э.Н., Пикельнер Л.Б., Попов А.Б., Шарапов Э.И., Язвцкий Ю.С. Жидкостные сцинтилляционные детекторы нейтронов.- In: Nuclear Electronics, IAEA, Vienna, v. 1, 1962, p. 27-37.
2. Каржавина Э.Н., Нгуен Нгуен Фонг, Попов А.Б., Тоскаев А.И. Нейтронные резонансы изотопов Nd.- Ядер. физ., 1968, т. 8, вып. 4, с. 639-647.
3. Каржавина Э.Н., Нгуен Нгуен Фонг, Попов А.Б. Нейтронные резонансы изотопов Gd.- Ядер. физ., 1969, т. 9, вып. 5, с. 897-905.
4. Фурман В.И., Попов А.Б. О влиянии деформации ядер на плотность нейтронных резонансов в редкоземельной области.- Дубна, 1968.- 16 с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P4-3925).
5. Каржавина Э.Н., Попов А.Б. Нейтронные резонансы изотопов самария.- Ядер. физ., 1972, т. 15, вып. 3, с. 401-405.
6. Karzhavina E.N., Kim Sek Su, Popov A.B. The determination of spins of neutron resonances by the gamma-ray multiplicity method.- In: Conf. on Nuclear structure with neutrons. Budapest, July 31 - Aug. 5, 1972, Contributions, p. 20-21.
7. Каржавина Э.Н., Ким Сек Су, Попов А.Б. Параметры нейтронных резонансов изотопов ^{161}Dy и ^{163}Dy .- Ядер. физ., 1975, т. 22, вып. 1, с. 3-12.
8. Каржавина Э.Н., Ким Сен Су, Попов А.Б., Файков Х. Спиновые эффекты в нейтронной силовой функции редкоземельных ядер.- В кн.: Нейтронная физика. Материалы 3-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 9-13 июня 1975, М., ЦНИИатоминформ, 1976, т. 3, с. 229-232.
9. Попов А.Б., Файков Х., Хван Чер Гу. Параметры нейтронных резонансов ^{185}Re и ^{187}Re .- В кн.: Нейтронная физика. Материалы 4-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 18-22 апреля, 1977, М., ЦНИИатоминформ, т. 2, с. 272-275.
10. Попов А.Б., Файков Х., Хван Чер Гу. Параметры нейтронных резонансов гербия.- Ядер. физ., 1977, т. 26, вып. 1, с. 14-19.
11. Popov A.B., Trzeciak K., Khvan Cher Gu. Parameters of neutron resonances of some Ru and Pd isotopes.- In: Neutron Physics and Nuclear Data for reactors and other applied purposes. Proceed. Intern. Conf., Harwell, 25-29 Sept 1978, p. 327-331.
12. Николенко В.Г., Попов А.Б., Самосват Г.С., Хван Чер Гу. Поиски сверхплотных ядер в активной зоне реактора.- Письма в ЖЭТФ, 1978, т. 27, вып. 1, с. 65-67.

13. Попов А.Б., Самосват Г.С., Руденко В.Т. Дальнейшие поиски высокоэнергетических нейтронов в делении.- Ядер.физ., 1980, т. 32, вып. 2(8), с. 342-346.
14. Попов А.Б., Тшецяк К., Хван Чер Гу. Уточненные параметры некоторых нейтронных резонансов Sm и Dy.- Ядер.физ., 1980, т. 32, вып. 3(9), с. 603-606.
15. Малэцки Х., Попов А.Б., Тшецяк К. Средние радиационные ширины нейтронных резонансов.- Ядер. физ., 1983, т. 37, вып. 2, с. 284-288.
16. Bondarenko V.I., Urin M.G., Malecki, Popov A.B., Trzeciak K., Analysis of average radiation widths of neutron resonances.- In: Nuclear Data for Science and Technology. Proceed. Intern. Conf., Antwerp., 6-10 Sept. 1982, p. 630-631.
17. Zo In Ok, Popov A.B., Trzeciak K. Radiation widths of iodine, cesium and iridium resonances.- In: Nuclear Data for Science and Technology. Proceed. Intern. Conf., Antwerp., 6-10 Sept. 1982, p. 758.
18. Nikolenko V.G., Popov A.B., Samosvat G.S. Differential neutron scattering cross sections and average neutron parameters of tin isotopes.- In: Nuclear Data for Science and Technology. Proceed. Intern. Conf., Antwerp. 6-10 Sept. 1982, p. 781-782.
19. Кадменский С.Г., Ломаченков И.А., Попов А.Б., Фурман В.И. Полные радиационные ширины нейтронных резонансов и фотонная дипольная силовая функция компаунд-компаунд переходов.- Дубна, 1983.- II с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: РЗ-83-600).
20. Popov A.B., Samosvat G.S. Differential elastic scattering cross section of cadmium isotopes and p-neutron strength functions in the range $50 < A < 130$.- In: Nuclear Data for basic and applied science. Proceed. Intern. Conf., Santa Fe, 13-17 May 1985, v. 1, p. 621-624.
21. Попов А.Б., Самосват Г.С. Спин-орбитальные эффекты в резонансном и потенциальном рассеянии р-волновых нейтронов.- В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, Дубна, 1986, № 18-86, с. 30-36.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 января 1988 года.