

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

K12

4-87-701

КАБЕСАС СОЛОРСАНО

Роберто Хосэ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ  
НА ЯДРАХ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1987

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук,  
доцент

С.П. ИВАНОВА

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Х.Р. ФЕРНАНДЕС

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

А.В. ИГНАТЮК

кандидат физико-математических наук

В.И. ФУРМАН

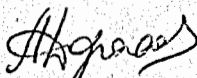
Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Институт ядерных исследований АН УССР, Киев.

Автореферат разослан " 2 " октября 1987 года.

Защита диссертации состоится " 28 " октября 1987 года на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

  
А.Е. ДОРОХОВ

### Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В последнее время большой интерес вызывает проблема неупругого рассеяния нейтронов низких энергий в том энергетическом интервале, где дают равные вклады процессы, различные по своей природе: прямые реакции и реакции, идущие через стадию образования составного ядра.

С одной стороны, неупругое рассеяние нейтронов является ценным инструментом для исследования атомного ядра: спектры, угловые распределения неупруго рассеиваемых нейтронов и  $\gamma$ -кванты, испускаемые в этом процессе, дают нам сведения о структуре ядра, о форме ядерной поверхности, о механизме ядерных реакций и о квантовых характеристиках возбужденных состояний - сведения, часто недоступные другим видам исследований.

С другой стороны, исследование этого процесса и отработка ядерных моделей, используемых для его описания, позволят все больше и больше уменьшить погрешности и неопределенности в предсказании ядерных данных, необходимых для реакторостроения и других прикладных целей, что является проблемой первостепенной важности для такой страны, как Куба, начинающей программу развития атомной энергетики. Точность существующей экспериментальной и теоретической информации о сечениях рассеяния нейтронов в рассматриваемом диапазоне энергий ниже точности, требуемой для анализа сечений рассеяния нейтронов конструкционными материалами. Поэтому усовершенствование теоретических моделей, описывающих этот процесс, является актуальной задачей.

С точки зрения реакции интерес к исследованиям неупругого рассеяния нейтронов низких энергий особенно повысился с появлением экспериментальных данных, не нашедших

удовлетворительной интерпретации в рамках оптико-статистической модели, в которой предполагается независимость каналов реакции.

С точки зрения структуры при описании неупругого рассеяния нейтронов на переходных ядрах с возбуждением коллективных уровней эти ядра традиционно считались либо чисто сферическими, либо хорошо деформированными. Однако ротационная модель с аксиальной симметрией и гармоническая вибрационная модель очень часто оказываются некорректными для многих из этих ядер, в них наблюдаются различные отклонения от сферической или аксиально-симметричной форм ядерной поверхности, такие как статические триаксиальные деформации, мягкость к  $\gamma$ -вибрациям, гексадекапольные неаксиальные деформации, ангармонизм и другие.

Цель работы. Разработка методов теоретического анализа экспериментальных данных по неупругому рассеянию нейтронов низких энергий на тяжелых ядрах переходной области  $150 \leq A \leq 190$  и на ядрах среднего атомного веса. С этой целью исследуется влияние на механизм прямых ядерных реакций коллективных степеней свободы, таких как гексадекапольные неаксиальные деформации в деформированных ядрах и отклонения от гармонической вибрационной модели в сферических ядрах.

Изучение в рамках статистической теории ядерных реакций роли современных поправок к формуле Хаузера-Фешбаха и влияния деформации на сечение рассеяния через составное ядро.

Разработка полумикроскопического подхода к описанию неупругого рассеяния нейтронов низких энергий на средних по массе ядрах в рамках фолдинг-потенциала, построенного на основе переходных ядерных плотностей квазичастично-фононной модели и эффективных нуклон-нуклонных сил.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации впервые исследуется роль гексадекапольных неаксиальных мод при описании неупругого рассеяния нейтронов на ядрах. Впервые также исследуется влияние динамической деформации оптического потенциала и эффектов связи каналов в расчетах компаундных сечений. Показано, что корректный учет особенностей структуры ядер и механизмов ядерной реакции позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные.

Разработанный полумикроскопический подход к описанию неупругого рассеяния нейтронов при низких энергиях на ядрах может быть применен и к другим ядрам, структура которых хорошо описывается квазичастично-фононной моделью.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Метод теоретического анализа неупругого рассеяния нейтронов на ядрах при возбуждении гексадекапольных неаксиальных степеней свободы.
2. Результаты анализа компаундных сечений в рамках статистической теории ядерных реакций при наличии прямых процессов с учетом современных поправок к теории Хаузера-Фешбаха и с учетом динамической деформации потенциала.
3. Полумикроскопический метод анализа неупругого рассеяния нейтронов на средних по массам ядрах в рамках фолдинг-потенциала, построенного на основе квазичастично-фононной модели и эффективных нуклон-нуклонных сил.
4. Проведен анализ неупругого рассеяния нейтронов на ядрах в диапазоне  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{186}\text{W}$ ,  $^{164,166,168,170}\text{Er}$  и получено хорошее соответствие с существующими экспериментальными данными.

Апробация работы. Работы, составившие основу диссертации, докладывались на Международной конференции по ядерным данным (Антверпен, Бельгия, 1982), на Международной конференции по ядерной физике (Харрогейт, Великобритания, 1986), на XXXV и XXXVI Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ленинград, 1985; Харьков, 1986), на Международной конференции по нейтронной физике (Киев, 1987), на IV и VI Национальных симпозиумах Академии наук Кубы (Гавана, Куба, 1983, 1985), на II Школе по современным проблемам ядерных наук (Гавана, Куба, 1985), на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 130 страниц текста, включая библиографию из 189 наименований, 21 рисунка, 16 таблиц.

#### Содержание диссертации

Во введении кратко изложена постановка физической задачи и дано обоснование актуальности и важности исследуемых проблем.

Первая глава диссертации посвящена обзору теоретических методов описания неупругого рассеяния нейтронов низких энергий на ядрах.

В §1 рассматривается прямой механизм взаимодействия нейтронов с ядрами, основанный на обобщенной оптической модели, в которой учитывается связь между каналами.

В §2 даны основные формулы статистической теории ядерных реакций, идущих через стадию образования составного ядра, для анализа сечений при энергиях возбуждения составной ядерной системы в области перекрывающихся резонансов.

В §3 рассматриваются современные поправки к формуле Хаузера-Фешбаха. Основное внимание уделено поправке, связанной с наличием прямых процессов и основанной на преобразовании Энгельбрехта-Вайденмюллера.

Во второй главе диссертации проводится анализ неупругого рассеяния нейтронов на переходных ядрах редкоземельной области.

В §1 рассматривается процесс неупругого рассеяния на неаксиальных ядрах с гексадекапольной деформацией и выясняется, какую роль играют неаксиальные гексадекапольные моды в системе уравнений связанных каналов. Для этого используется разложение радиуса ядра по сферическим гармоникам:

$$R(\Omega) = R_0 \left[ 1 + \alpha_{20} Y_{20} + \alpha_{22} (Y_{22} + Y_{2-2}) + \alpha_{40} Y_{40} + \alpha_{42} (Y_{42} + Y_{4-2}) + \alpha_{44} (Y_{44} + Y_{4-4}) \right], \quad (1)$$

где параметры квадрупольной  $\alpha_{2\mu}$  и гексадекапольной  $\alpha_{4\mu}$  деформаций выбираются из соответствующих спектроскопических данных.

В качестве волновой функции ядра берется волновая функция неаксиального ротатора модели Давыдова-Филиппова.

Получена система уравнений связанных каналов и оценен вклад различных членов разложения (1) в правую часть этой системы уравнения. Показано, что гексадекапольные неаксиальные моды дают дополнительные вклады в матричный элемент, ответственные за новые связи между состояниями основной ротационной  $K=0^+$  и  $\gamma$ -вибрационной  $K=2^+$  полос, а это в свою очередь сказывается на величинах неупругих сечений возбуждения соответствующих состояний.

В §2, §3 и §4 развиваемый формализм применяется для описания неупругого рассеяния нейтронов на ядрах  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{186}\text{W}$  и на четных изотопах  $^{164,166,168,170}\text{Er}$ .

Для случая  $^{152}\text{Sm}(n, n')$  при  $E_n \approx 2-3$  МэВ показано, что процесс может быть удовлетворительно описан с помощью асимметричной ротационной модели, в которой данное ядро деформировано с

параметром неаксиальности  $\gamma = 14,5^\circ$ . Показано, что для правильного описания прямого процесса необходимо учитывать влияние неаксиальных гексадекапольных мод, давших заметный вклад.

Результат вычислений дифференциальных и интегральных сечений при энергии  $E_n = 2,47$  МэВ для состояний  $2_1^+$  и  $4_1^+$  приводится на рис. 1 и в табл. 1 соответственно.

Таблица 1. Сравнение экспериментальных и теоретических сечений в процессе  $^{152}\text{Sm}(n, n')$  при  $E_n = 2,47$  МэВ

| $I^\pi$ | Phys. Rev., 1977, v16, p2223 |                        |                       |                       | Наши расчеты           |                       |                       |
|---------|------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|         | $\sigma_{\text{exp}}$        | $\sigma_{\text{comp}}$ | $\sigma_{\text{dir}}$ | $\sigma_{\text{tot}}$ | $\sigma_{\text{comp}}$ | $\sigma_{\text{dir}}$ | $\sigma_{\text{tot}}$ |
| $2_1^+$ | $600 \pm 40$                 | 140                    | 533                   | 673                   | 112                    | 510                   | 622                   |
| $4_1^+$ | $271 \pm 30$                 | 94                     | 65                    | 159                   | 86                     | 169                   | 255                   |
| $2_2^+$ | -                            | -                      | -                     | -                     | 104                    | 61                    | 165                   |

В случае  $^{186}\text{W}(n, n')$  получается также удовлетворительное согласие с экспериментом, если провести вычисления по модели неаксиального ротатора. Показано, что включение неаксиальных гексадекапольных мод улучшает результаты расчета сечения возбуждения для состояний  $4_1^+$  и  $4_2^+$ , хотя оно мало влияет на возбуждение других состояний (см. табл. 2). Для изотопов эрбия, как и ожидалось, не наблюдается заметной разницы между расчетами по модели аксиального и неаксиального ротатора.

Третья глава посвящена исследованию особенностей неупругого рассеяния нейтронов низких энергий на ядрах среднего атомного веса.

В §1 рассматривается роль ангармоничности при описании нейтронных сечений и на примере ядра  $^{82}\text{Se}$  проводится анализ неупругого рассеяния при  $E_n = 3$  МэВ со схемой связи пяти каналов:  $0^+ - 2_1^+ - 0_2^+ - 2_2^+ - 4_1^+$ . Показано, что вариант расчета, для которого

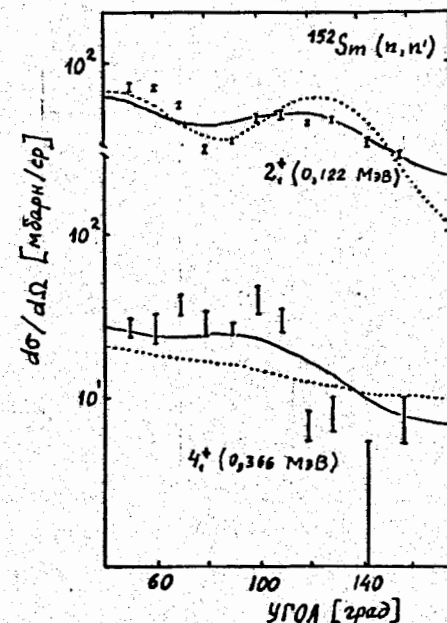


Рис. 1. Угловые распределения состояний  $2_1^+$  и  $4_1^+$  при  $E_n = 2,47$  МэВ и их сравнение с экспериментом. Сплошная кривая - расчет по модели неаксиального ротатора; пунктирная кривая - по модели симметричного ротатора.

ТАБЛИЦА 2. Рассчитанные интегральные сечения (в мб) по модели неаксиального ротатора со включением различных  $\alpha_{\lambda\mu}$  в разложение радиуса (1) в процессе  $^{186}\text{W}(n,n')$  при  $E_n = 2,75$  МэВ. а - это вычисления с квадрупольным неаксиальным членом  $\alpha_{22}(Y_{22} + Y_{2-2})$ , б - включен член  $\alpha_{40}Y_{40}$  и в - включен гексадекапольный неаксиальный член  $\alpha_{42}(Y_{42} + Y_{4-2})$ . Эксперимент из (Изв.АН СССР, сер. физ., 1978, т.42, с.1809)

| $I^\pi$ |   | $\sigma_{dir}$ | $\sigma_{comp}$ | $\sigma_{tot}$ | $\sigma_{exp}$    |
|---------|---|----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| $4_1^+$ | а | 34,5           | 110,4           | 144,9          | $250^{+50}_{-80}$ |
|         | б | 61,7           | 107,8           | 169,5          |                   |
|         | в | 114,3          | 114,1           | 228,4          |                   |
| $2_2^+$ | а | 50,3           | 143,5           | 193,8          | $260 \pm 55$      |
|         | б | 50,1           | 135,2           | 185,3          |                   |
|         | в | 29,7           | 143,2           | 172,9          |                   |
| $4_2^+$ | а | 8,6            | 89,0            | 97,6           | $65 \pm 20$       |
|         | б | 18,8           | 80,4            | 99,2           |                   |
|         | в | 5,7            | 84,0            | 89,7           |                   |

амплитуды однофононно-двухфононных переходов считаются различными и меньшими, чем амплитуда основного-однофононного перехода, лучше согласуется с экспериментом. Показано также, что учет матричных элементов, соответствующих переходам второго порядка (основной-двухфононный и двухфононно-двухфононный), мало влияет на форму и величину угловых распределений и интегральных сечений, поэтому в расчетах можно их не учитывать.

В §2 изучено влияние динамической деформации потенциала на компаундные сечения. На примере  $^{82}\text{Se}$  при энергиях  $E_n = 1,5, 2,0$  и  $3,0$  МэВ показано, что учет динамической деформации потенциала и влияние наличия прямых процессов может давать заметное увеличение

величин сечений компаундного процесса, особенно в районе  $E_n = 1+3$  МэВ, когда открыто малое число каналов. Такой эффект позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные (см. рис. 2 и 3).

В §3 проводится анализ неупругого рассеяния нейтронов на  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{50}\text{Cr}$  и  $^{60}\text{Ni}$  и исследуется роль связи каналов при описании нейтронных сечений. Показано, что количество учитываемых каналов является еще одним источником неопределенности расчета. Увеличение числа учитываемых каналов связи сложным образом сказывается на сечениях прямого возбуждения первых  $2^+$ -уровней: с их ростом сечения уменьшаются, с уменьшением параметра  $\beta_{21}$  - увеличиваются. В суммарных сечениях эта неопределенность достигает 10% в области энергий нейтронов до 3-4 МэВ и с ростом энергии уменьшается.

В главе 4 разработан полумикроскопический подход к описанию неупругого рассеяния нейтронов на сферических ядрах в рамках фолдинг-потенциала, построенного на основе переходных ядерных плотностей квазичастично-фононной модели и эффективных нуклон-нуклонных сил.

В §1 выводятся выражения этих плотностей для всевозможных переходов в схеме связи  $0^+ - 2_1^+ - 4_1^+$ . Включены и переходные плотности, связанные с реориентационным эффектом.

В §2 строится фолдинг-потенциал на основе полученных переходных плотностей и эффективного потенциала нуклон-нуклонных сил в виде МЗУ-взаимодействия типа Рейда.

В §3 решается уравнение связанных каналов с таким потенциалом и рассматривается задача рассеяния на примере  $^{56}\text{Ni}(n,n')$  при  $E_n = 1,5, 2,0, 2,5$  и  $3,0$  МэВ. Показано, что развиваемый формализм удовлетворительно описывает экспериментальные данные (см. рис. 4).

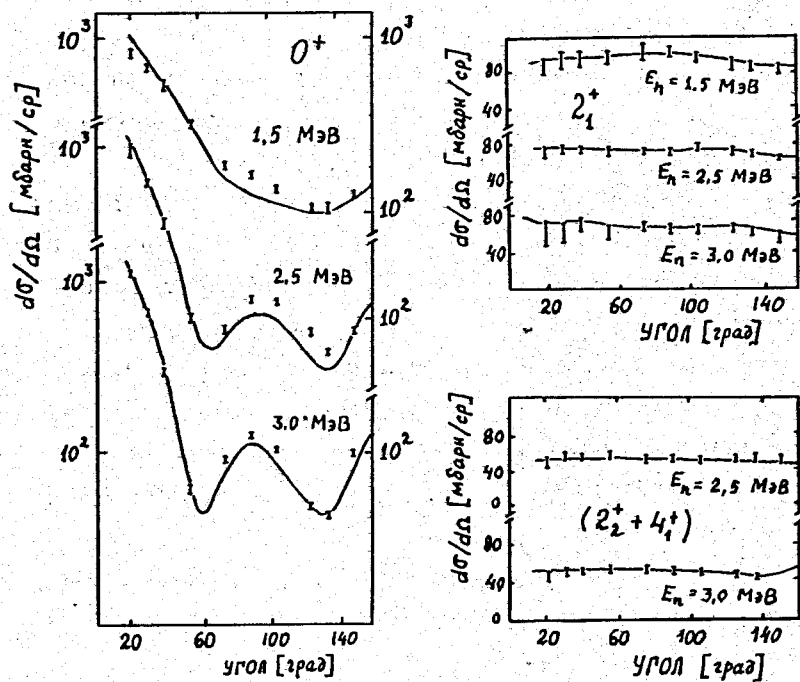


Рис.2. Упругие и неупругие дифференциальные сечения на  $^{22}\text{Se}$  при  $E_n = 1,5, 2,5$  и  $3,0$  МэВ. Сплошная кривая — расчеты по модели Давыдова-Филиппова.

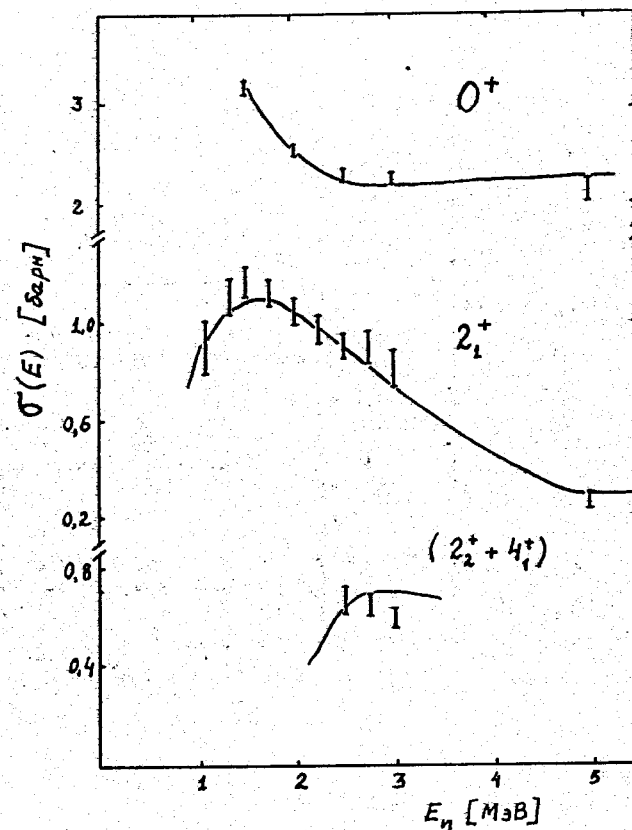


Рис.3. Интегральные сечения рассеяния на  $^{22}\text{Se}$  ( $n, n'$ ) для состояний  $0^+$ ,  $2_1^+$  и  $(2_2^+ + 4_1^+)$ .

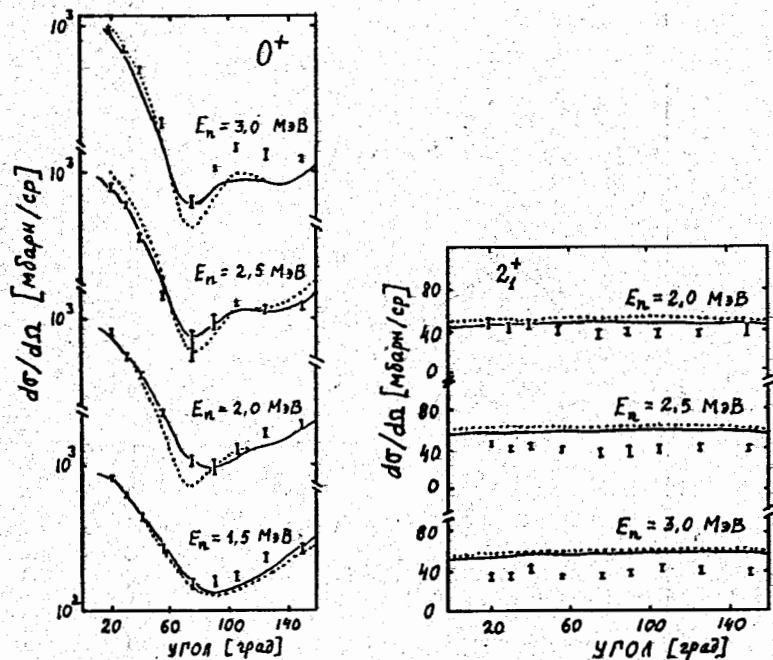


Рис. 4. Упругие и неупругие дифференциальные сечения на  $^{58}\text{Ni}$  при  $E_n = 1,5, 2,0, 2,5$  и  $3,0$  МэВ. Сплошная кривая — микроскопические расчеты, пунктирная кривая — феноменологические расчеты.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации:

1. На основе метода связанных каналов рассчитаны сечения прямых процессов и проведен анализ влияния эффектов деформации поверхности ядер, таких как квадрупольные и гексадекапольные неаксиальные деформации в деформированных ядрах и эффекты ангармоничности в сферических ядрах, на неупругие сечения возбуждения. Показано, что в рамках модели Давыдова-Филиппова удается удовлетворительно описать экспериментальные данные о ядрах  $^{152}\text{Sm}$  и  $^{186}\text{W}$ , находящихся на краях редкоземельной области. Показано также, что учет гексадекапольных неаксиальных мод играет заметную роль при описании сечения возбуждения состояний основной ротационной и  $\gamma$ -вибрационных полос со спином  $I^\pi = 4^+$ .
2. В рамках статистической теории ядерных реакций с учетом современных поправок к формуле Хаузера-Фешбаха проведены расчеты компаундных дифференциальных и интегральных сечений рассеяния в районе энергии нейтронов от 1 до 9 МэВ на тяжелых ядрах  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{186}\text{W}$ ,  $^{164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{170}\text{Er}$  и на средних по массам ядрах  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{50}\text{Cr}$ ,  $^{58,60}\text{Ni}$  и  $^{82}\text{Se}$ . Рассчитан вклад компаундного процесса в полное сечение и показано, что в исследуемом районе энергий он является преобладающим.
3. Проведен анализ влияния учета динамической деформации потенциала при вычислении коэффициентов прилипания на компаундные сечения и наличия прямых процессов. Показано, что в случае средних по массе ядер, в районе  $E_n = 1-3$  МэВ, когда открыто малое число каналов, такой эффект является существенным. Учет этого эффекта позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные.
4. Разработан полумикроскопический подход к описанию неупругого рассеяния нейтронов низких энергий на сферических ядрах в рамках



фолдинг-потенциала, построенного на основе переходных ядерных плотностей квазичастично-фононной модели ядра и эффективных нуклон-нуклонных сил. На основе этого подхода рассчитаны прямые и компаундные сечения и показано, что он удовлетворительно описывает экспериментальные данные по неупругому рассеянию нейтронов на ядре  $^{58}\text{Ni}$  в районе энергии 1-3 МэВ.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Fernandez J.R., Cabezas R. Study of the Low-Energy Neutron Inelastic Scattering in Deformed Transitional Nuclei:  $^{186}\text{W}$ . -J. Phys. G: Nucl. Phys., 1983, v.9, No.9, p.1115-1123.
2. Fernandez J.R., Cabezas R. On the Inelastic Scattering of Fast Neutrons in Strongly Deformed Nuclei. -Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Antwerp, Reidel Publishing Company, 1982, p.582-584.
3. Иванова С.П., Кабесас Р., Корж И.А. и др. Роль связи каналов в неупругом рассеянии нейтронов с энергией до 9,0 МэВ четно-четными ядрами с  $48 \leq A \leq 64$ . -ЯФ, 1987, т.46, вып.2.
4. Fernandez J.R., Cabezas R. Evidence of Triaxial Shapes in  $^{152}\text{Sm}$  Isotope. -Proc. Int. Nuclear Physics Conf., Harrogate, 1986, v.1, p.421.
5. Григорьев Е.П., Иванова С.П., Кабесас Р. и др. Механизм неупругого рассеяния нейтронов на изотопах  $^{164,166,168,170}\text{Er}$ . -Изв. АН СССР, сер. физ., 1987, т.51, вып.5, с.1031-1034.
6. Гареев Ф.А., Гарсия Ф., Иванова С.П., Кабесас Р., Мико Г. Неупругое рассеяние низкоэнергетических нейтронов на ядре  $^{168}\text{Er}$ . -Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т.49, вып.11, с.2218-2221.
7. Фернандес Х.Р., Кабесас Р., Лопес Р. К вопросу о неупругом рассеянии нейтронов низких энергий на ядре  $^{152}\text{Sm}$ . -ЯФ, 1985, т.41, вып.6, с.1508-1514.

8. Кабесас Р., Гарсия Ф., Мико Г. О неупругом рассеянии нейтронов на ядре  $^{168}\text{Er}$ . -Тезисы докладов XXXV Всесоюзного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., Наука, 1985, с.548.
9. Кабесас Р., Мико Г., Гарсия Ф. Учет вклада прямого механизма в сечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах  $^{164-170}\text{Er}$ . -Тезисы докладов XXXVI Всесоюзного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Харьков, Наука, 1986, с.505-506.
10. Lopez R., Cabezas R., Garcia F. ANLECIS-1: Version del programa ANLECIS para el calculo por el modelo del rotor asimetrico. -Nucleus, 1986, No.1, p.10-14.
11. Иванова С.П., Кабесас Р., Педраса Р., Пономарев В.Д. Полумикроскопическое описание неупругого рассеяния нейтронов на ядрах среднего атомного веса. -Препринт ОИЯИ, Р4-87-700, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 сентября 1987 года.