

Київський університет імені Тараса Шевченка

На правах рукопису
УДК 539.14

Лісецький Олександр Федорович

ДИНАМІКА КОЛЕКТИВНИХ РУХІВ
ВАЛЕНТНИХ НУКЛОНІВ
В ДЕФОРМОВАНИХ АТОМНИХ ЯДРАХ

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1997

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі квантової теорії поля фізичного факультету Київського університету імені Тараса Шевченка.

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук,
доцент Доценко І. С.

доктор фізико-математичних наук,
професор Філіпов Г. Ф.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Дзюблик О. Я.

доктор фізико-математичних наук,
професор Єжов С. М.

Провідна установа: Харківський державний університет

Захист відбудеться 17 червня 1997 року о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої ради Д 01.01.26 при Київському університеті імені Тараса Шевченка (252022, Київ-22, МСП, проспект акад. Глушкова, 6, фізичний факультет, ауд 500).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Київського університету ім. Тараса Шевченка (м. Київ, вул. Володимирська, 66).

Автореферат розісланий 15 травня 1997 року.

Вчений секретар спеціалізованої ради,
доктор фізико-математичних наук



Л. В. Поперенко

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00752691 (U)

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми.

Досвід багаторічного вивчення властивостей атомних ядер показав, що внутрішні рухи нуклонів в ядрах характеризуються значною різноманітністю. Для пояснення енергетичних спектрів та електромагнітних переходів було побудовано багато ядерних моделей. Проте навіть вся сукупність цих моделей не може повністю охопити якісну різноманітність збуджень атомних ядер. Тому актуальною залишається проблема побудови нових та узагальнення вже існуючих ядерних моделей, які б описували нові явища та ефекти в ядрах.

Проблемі дослідження низькоенергетичних колективних станів в атомних ядрах за останнє десятиріччя було присвячено багато експериментальних та теоретичних робіт.

Відомі два альтернативних підходи до теоретичного дослідження таких колективних збуджень в ядрах. Один із них полягає в побудові феноменологічних колективних моделей ядра, а інший – в використанні мікроскопічних оболонкових теорій. Вивчення та застосування цих підходів, а також встановлення зв'язку між ними є одним із актуальних питань теорії ядерної структури.

Значну увагу дослідників багатьох країн останнім часом привертає мода ножиць, існування якої було передбачено більше п'ятнадцяти років тому в рамках феноменологічної моделі двох аксіальних ротаторів. Відновлення інтересу до цієї задачі викликано появою нових експериментальних даних та встановленням зв'язку інтенсивностей ізовекторних магнітних дипольних переходів із ступенем деформації ядер. Теоретичний опис такої низькоенергетичної моди у мікроскопічному підході є важкою проблемою, оскільки він містить у собі всі труднощі квантовомеханічної задачі багатьох тіл. Велика кількість алгебраїчних та феноменологічних моделей відносно добре описує енергетичний спектр, що, на жаль, не можна сказати про ймовірності електромагнітних переходів. Крім того, більшість підходів не дає можливості описати фрагментацію моди ножиць, а також дати загальну її картину в рамках одного підходу.

Тому проблема дослідження структури слабкозбуджених станів із-

АН України

векторного характеру та проблема отримання задовільної єдиної картини, яка б пояснювала природу їх збудження, залишається надзвичайно актуальною задачею.

Дана дисертаційна робота знаходиться в контексті вищезгаданих актуальних задач.

Метою дисертаційної роботи є: теоретичне дослідження динаміки колективних рухів валентних нуклонів парно-парних ядер шляхом побудови ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів, побудова базису $SU(3) \times SU(3)$ цієї моделі в просторі Фока-Баргмана, дослідження ізовекторних магнітних дипольних переходів та закономірностей у відносній орієнтації протонної та нейтронної підсистем при збудженні моди ножиць.

Наукова новизна та практична цінність роботи.

1. Запропоновано та реалізовано алгоритм побудови базису мікроскопічної версії моделі двох неаксіальних ротаторів, оснований на послідовному використанні теоретико-групових методів, техніки узагальнених когерентних станів та представлення Фока-Баргмана. З цієї метою вперше було побудовано генератори групи $U(3)$, сконструйовано з них оператор Казіміра другого порядку C_2 групи $U(3)$ для випадку двох неаксіальних ротаторів та знайдено його власні функції. Побудовано оператор Баргмана-Мошинського та знайдено деякі його власні функції.

2. Отримано *аналітичні* вирази для ймовірностей магнітних дипольних переходів та описано фрагментацію моди ножиць в парно-парних ядрах.

3. Встановлено закономірності у відносному розташуванні протонної та нейтронної підсистем ядра при збудженні моди ножиць.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розвинутий підхід дозволяє вивчати електромагнітні ізовекторні та ізоскалярні переходи як в легких та середніх, так і у важких парно-парних деформованих ядрах. Нова версія моделі двох неаксіальних ротаторів дає можливість встановлювати природу та квантові характеристики деяких збуджених станів. Крім того, дисертаційна робота відкриває можливості для теоретичного дослідження моди ножиць в непарно-парних та непарно-непарних

ядрах та використовувати отриманий базис для вивчення трикластерних систем.

Ступінь достовірності

Достовірність отриманих результатів та висновків дисертації забезпечується використанням адекватних фізичних моделей та сучасного математичного апарату, узгодженням ряду отриманих результатів з існуючими експериментальними даними та висновками інших авторів.

Основні положення, що виносяться на захист

1. Розроблено мікроскопічну версію ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів, на основі якої описується динаміка колективних рухів валентних нуклонів парно-парних ядер.

2. Отримано аналітичні формули для зведених ймовірностей ізовекторних $M1$ переходів для всіх деформованих парно-парних ядер та описано явище фрагментації моди ножиць.

3. Проведено ідентифікацію деяких енергетичних рівнів для ядер $^{46,48}\text{Ti}$ та десяти важких ядер рідкоземельних елементів та актиноїдів.

4. Встановлено загальні закономірності в макроскопічній картині взаємного розташування ротаторів на прикладі ядер ^8Be , ^{20}Ne та ^{22}Ne .

Апробація роботи

Основні результати дисертації доповідалися на Міжнародній конференції "Groningen Conference on Giant Resonances" (Нідерланди, Гронінген, 1995 р.), на Міжнародній конференції "Symmetry Methods in Physics" (Російська Федерація, Дубна, 1995 р.), на Всеукраїнській конференції молодих вчених (Київ, 1994 р.), на семінарах відділу структури атомних ядер Інституту теоретичної фізики НАН України та кафедри квантової теорії поля фізичного факультету Київського університету імені Тараса Шевченка.

Публікації

По темі дисертації виконано дев'ять робіт, три з яких опубліковано у вигляді статей, чотири – у вигляді препрінтів та дві у вигляді тез. Список публікацій наводиться в кінці автореферату.

Особистий внесок дисертанта полягає у формулюванні задач, у виборі деяких методів їх розв'язання, у виконанні приведених в ди-

сертації аналітичних та чисельних розрахунків, в обговоренні та аналізі отриманих результатів та у написанні наукових статей.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, заключної частини та списку літератури, що включає 56 джерел, на які в роботі є посилання. Дисертація написана на 124 сторінках машинописного тексту, включає 8 таблиць і 18 малюнків.

Основний зміст роботи

У вступі стисло окреслено проблему дослідження динаміки колективних рухів валентних нуклонів парно-парних ядер та проведено огляд літератури по ній. Обгрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи, відображено наукову новизну та практичну цінність, представлено основні положення, що виносяться на захист.

Коротко основну ідею підходу, що використовується в роботі для дослідження динаміки колективних явищ в атомних ядрах, та самі ці явища можна пояснити наступним чином.

Поряд із відносними коливаннями центрів мас протонної та нейтронної підсистем, які призводять до електричних гігантських дипольних резонансів ($E1$ мода) [1], в деформованих ядрах існує можливість таких відносних рухів сукупності протонів та сукупності нейтронів, при яких їх центри мас не зміщуються один відносно одного. Геометрично такі рухи пояснювалися як відносні коливання та обертання протонного та нейтронного аксіальних ротаторів навколо осі, перпендикулярної до їх осей симетрії [2]. Такі рухи часто називають модою ножиць або магнітною дипольною модою ($M1$ мода).

В дисертаційній роботі встановлюється зв'язок між двома альтернативними підходами до дослідження цієї моди – колективною моделлю двох ротаторів та мікроскопічною оболонковою $SU(3)$ моделлю. Модель двох ротаторів інтерпретується на основі мікроскопічної ядерної $SU_{\pi}(3) \times SU_{\nu}(3)$ моделі.

Вибір $SU(3)$ схеми класифікації нуклонних конфігурацій [3] обумовлюється двома моментами. По-перше, використання такої схеми дає результати, які добре узгоджуються з уявленнями про структуру низькоенергетичних спектрів легких та середніх атомних ядер. По-друге, динаміка одного неаксіального ротатора описується моделлю $SU(3)$ Еліота, і стани ротатора можна класифікувати у відповідності з їх $(\lambda\mu)$ симетрією [4].

Але оскільки в моделі Еліота ізоспін T ядра $SU(3)$ мультиплету $(\lambda\mu)$ є фіксованим, то ізовекторні (зі зміною ізоспину) $M1$ та $E2$ переходи неможливо описати в рамках цієї моделі. Тому базис Еліота розширюється до базису прямого добутку $SU_\pi(3) \times SU_\nu(3)$, та встановлюється нова класифікація станів. В загальному випадку такі базисні стани записуються в аналітичному вигляді як функції шести динамічних змінних. Вони знаходяться як власні функції оператора Казіміра \hat{C}_2 групи $U(3)$.

Побудована в такий спосіб сукупність станів не вичерпує всі можливі конфігурації валентних нуклонів з одним і тим же числом осциляторних квантів, але містить всі базисні стани, які дають можливість описати моду ножиць та її фрагментацію, розраховувати відповідні ймовірності електромагнітних переходів.

В першому розділі дисертації послідовно викладається ідея методу твірної функції та показується як на його основі задача дослідження динаміки рухів валентних нуклонів зводиться до побудови ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів.

В параграфі 1.1 описується процедура побудови твірної функції. Така функція називається узагальненим когерентним станом та будується у вигляді детермінанта Слетера Φ , елементами якого є одностинкові хвильові функції в полі гармонічного осцилятора. При цьому протони заповнюють оболонки в системі координат, яка задається трійкою ортонормованих векторів u_1, u_2, u_3 , а нейтрони – в іншій системі, орієнтація якої описується репером v_1, v_2, v_3 . Центри цих систем координат співпадають.

В роботі показується, що твірна функція є ядром інтеграль-

ного перетворення, яке відображає багаточастинкові хвильові функції $\Psi(\{\mathbf{r}_i, \sigma_i, \tau_i\})$, визначені в координатному просторі, на їх образи $\Psi(\{\mathbf{u}_s, \mathbf{v}_s\})$ в просторі генераторних координат, який ототожнюється з простором Фока-Баргмана. Образи базисних функцій можна інтерпретувати як хвильові функції системи двох ротаторів з певною $SU(3)$ симетрією (λ, μ) повної системи та певними значеннями орбітального моменту L та його проєкції M . Зручність використання представлення Фока-Баргмана пояснюється тим, що в ньому базисні стани системи є функціями лише шести динамічних змінних, в той час, як в координатному представленні вони є функціями $3(A-1)$ змінних, де A - кількість нуклонів ядра.

В параграфі 1.2 дисертаційної роботи досліджуються властивості інтеграла перекриття твірних функцій

$$\langle \tilde{\Phi} | \Phi \rangle = \int \cdots \int \Phi(\{\tilde{\mathbf{u}}_s, \tilde{\mathbf{v}}_s\}; \{\mathbf{r}_i, \sigma_i, \tau_i\}) \Phi(\{\mathbf{u}_s, \mathbf{v}_s\}; \{\mathbf{r}_i, \sigma_i, \tau_i\}) d\mathbf{r}_1 \cdots d\mathbf{r}_A,$$

де проводиться інтегрування по координатам усіх нуклонів ядра. Встановлено, що інтеграл перекриття твірних функцій, побудованих у різних системах координат, записується у вигляді добутку інтегралів перекриття для кожної з оболонок гармонічного осцилятора. Показано, що інтеграл перекриття повністю заповнених оболонок дорівнює одиниці, й структура інтеграла перекриття всієї системи визначається лише конфігурацією нуклонів відкритих оболонок. В роботі інтеграл перекриття знаходиться для загального випадку та записується в наступному вигляді:

$$\langle \tilde{\Phi} | \Phi \rangle = (\mathbf{u}_1 \tilde{\mathbf{u}}_1)^{\lambda_\pi} (\mathbf{u}_3 \tilde{\mathbf{u}}_3)^{\mu_\pi} (\mathbf{v}_1 \tilde{\mathbf{v}}_1)^{\lambda_\nu} (\mathbf{v}_3 \tilde{\mathbf{v}}_3)^{\mu_\nu}. \quad (1)$$

В цьому виразі збережено інформацію про те, що для твірної функції квантовими числами є індекси $SU(3)$ незвідного представлення (λ_ν, μ_ν) нейтронної підсистеми, (λ_π, μ_π) - протонної та повне число квантів системи $N = \lambda_\nu + \lambda_\pi + 2\mu_\nu + 2\mu_\pi$. $SU(3)$ базис повної системи з квантовими числами (λ, μ) , орбітальним моментом L та його проєкцією M у лабораторній системі координат отримується в результаті проєктування (1) на білінійну комбінацію шуканих хвильових функцій $\Psi_{L\omega M}^{N\lambda\mu}$:

$$\langle \tilde{\Phi} | \Phi \rangle = \sum_{\lambda\mu} \sum_{LM\omega} \tilde{\Psi}_{L\omega M}^{N\lambda\mu} \Psi_{L\omega M}^{N\lambda\mu}, \quad (2)$$

де ω – квантове число Баргмана-Мошинського. Ця конструкція по суті є матрицею густини станів. Базисні стани $\Psi_{L\omega M}^{N\lambda\mu}$ вже характеризуються певною $(\lambda\mu)$ симетрією групи $SU(3)$ для ядра в цілому та є функціями шести генераторних координат $\theta, \phi_\nu, \phi_\pi; \alpha, \beta, \gamma$ в просторі Фока-Баргмана.

В другому розділі дисертації побудовано хвильові функції ядерної моделі двох ротаторів в явному вигляді для різних випадків.

У вступі до цього розділу описано алгебраїчний аспект редукції прямого добутку незвідних $SU(3)$ представлень (λ_π, μ_π) та (λ_ν, μ_ν) на суму $SU(3)$ представлень (λ, μ) для системи в цілому

$$(\lambda_\pi, \mu_\pi) \times (\lambda_\nu, \mu_\nu) = \sum_{m, k, \nu_1, \nu_2} (\lambda, \mu),$$

де вводяться додаткові параметри редукції m, k, ν_1, ν_2 , та

$$\lambda = \lambda_\nu + \lambda_\pi - 2m - \nu_1 - \nu_2 + k, \quad \mu = \mu_\nu + \mu_\pi - 2k - \nu_1 - \nu_2 + m.$$

Пояснюється, що базисні стани системи знаходяться в явному вигляді як власні функції оператора Казимира другого порядку \hat{C}_2 та що цей спосіб є альтернативним до техніки коефіцієнтів Клебша-Гордона. В параграфі 2.2 вводиться власна система координат в такий же спосіб, як і в [5]:

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1}{|\mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1|}, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{\mathbf{u}_1 - \mathbf{v}_1}{|\mathbf{u}_1 - \mathbf{v}_1|}, \quad \mathbf{e}_3 = \frac{[\mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1]}{|[\mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1]|}, \quad (3)$$

Орієнтація цієї системи відносно лабораторної задається трьома кутами Ейлера α, β, γ , які й описують обертання ядра як цілого. У власній системі визначаються внутрішні ступені вільності $\theta, \phi_\pi, \phi_\nu$, які задають орієнтацію протонної та нейтронної підсистем відносно неї. У внутрішній системі координат побудовано генератори групи $U(3)$ для протонної $a_{ij}(\pi)$, нейтронної $a_{ij}(\nu)$ підсистем та для системи в цілому $A_{ij} = a_{ij}(\pi) + a_{ij}(\nu)$ в явному вигляді як оператори шести змінних. Проаналізовано їх структуру та отримано комутаційні співвідношення у власній системі координат. Із генераторів A_{ij} будується оператор Казимира другого порядку групи $U(3)$ в явному вигляді $\hat{C}_2 = A_{ij}A_{ji}$. Показано, що цей оператор пов'язаний з мікроскопічним гамільтоніаном, який відповідає ядерній взаємодії квадруполь-квадрупольного типу

$\hat{Q}\hat{Q} = \sum_i \hat{Q}_{2,\mu}(i)\hat{Q}_{2,-\mu}(i)$ валентних нуклонів:

$$\hat{H} = \hat{H}_{osc} + \hat{Q}\hat{Q} \quad (4)$$

де $\hat{Q}\hat{Q} = 4\hat{C}_2 - 3\hat{L}\hat{L}$, $\hat{Q}_{2,\mu}(i)$ - оператор квадрупольного моменту i -ї частинки, \hat{L} - оператор орбітального моменту, а \hat{H}_{osc} - гамільтоніан гармонічного осцилятора системи А нуклонів.

В роботі аналізується структура оператора \hat{C}_2 та він записується в компактній формі для загального випадку двох неаксіальних ротаторів. Власні функції цього оператора задовільняють наступну рівність

$$C_N \Psi_{LM\omega}^{N\lambda\mu} = C_N(\lambda\mu) \Psi_{LM\omega}^{N\lambda\mu}, \quad (5)$$

де $C_N(\lambda\mu)$ - відомі його власні значення.

В параграфі 2.4 дисертаційної роботи розглянуто модель двох аксіальних ротаторів. Для цього випадку індекси $SU(3)$ симетрії набувають наступних значень: $(\lambda_\pi, 0)$ та $(\lambda_\nu, 0)$, що відповідає аксіальній симетрії протонної та нейтронної підсистем. Головні осі протонного та нейтронного еліпсоїдів співпадають у цьому випадку відповідно з напрямками векторів u_1 та v_1 , та єдиною внутрішньою динамічною змінною є кут θ між цими векторами. Задача знаходження власних функцій оператора Казимира зводиться до розв'язання звичайного диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних. Власні функції оператора Казимира набувають наступного вигляду:

$$y_K^{\lambda\mu}(\theta) = \sin^\mu \theta D_{MK}^L F\left(-\frac{\lambda+q}{2}, -\frac{\lambda-K}{2}, -\lambda; 1 - e^{-i2\theta}\right) e^{i\theta(\lambda+q-K)/2}, \quad (6)$$

де $D_{MK}^L \equiv D_{MK}^L(\alpha, \beta, \gamma)$ - сферичні функції Вігнера, $F(a, b, c; z)$ - гіпергеометрична функція, а $q = \lambda_\pi - \lambda_\nu$.

В загальному випадку квантове число K не є інтегралом руху, оскільки повна протон-нейтронна система в моделі, яка розглядається, не характеризується осью симетріїю. Тому базисні стани з певним значенням L орбітального моменту потрібно записуватися у вигляді суперпозиції функцій (6).

Така задача розв'язується в параграфі 2.5 дисертаційної роботи для хвильових функцій з $L=2$. Для цього використовуються властивості інтеграла перекриття (1). Задача знаходження коефіцієнтів суперпозицій

зводиться до проблеми діагоналізації квадратичної форми, яка будується із власних функцій оператора Казимира \hat{C}_2 .

В наступному параграфі 2.6 задача конструювання суперпозицій функцій з різними значеннями K розв'язується іншим способом – методом діагоналізації оператора Баргмана-Мошинського. Цей оператор будується як скалярна згортка наступного вигляду: $\hat{\Omega} = \hat{L}_i A_{ij} \hat{L}_j$, де A_{ij} – генератори групи $U(3)$, \hat{L}_i – оператори проєкцій орбітального моменту. Оператор Баргмана-Мошинського сконструйовано в явному вигляді в лабораторній системі координат. Знайдено власні значення та власні функції оператора $\hat{\Omega}$ при $L=2$. Власні значення цього оператора використовуються як квантові числа для класифікації базисних станів. В роботі також встановлюється зв'язок між хвильовими функціями, що характеризуються квантовим числом Баргмана-Мошинського, та функціями побудованими в параграфі 2.5.

В параграфі 2.7 дисертації розв'язується проблема побудови хвильових функцій для випадку, коли один із двох ротаторів є неаксіальним. В результаті редукції прямого добутку $(\lambda_\pi, \mu_\pi) \times (\lambda_\nu, 0)$ на суму незвідних представлень групи $SU(3)$ повної системи, квантові числа (λ, μ) набувають наступних значень: $(\lambda, \mu) = (\lambda_\pi + \lambda_\nu - 2m - \nu, \mu_\pi + m - \nu)$. Для конкретності, вибрано випадок коли протонний ротатор є неаксіальним ($\mu_\pi \neq 0$). При цьому система характеризується двома внутрішніми динамічними змінними – кутами θ та ϕ_π . Задача знаходження власних функцій оператора Казимира зводиться до розв'язання звичайного диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних. Точний розв'язок рівняння при $L=0$ представляється в наступному вигляді:

$$\Psi_{L=0}^{\lambda\mu\nu}(\theta, \phi_\pi) = (1 - t^2)^{m/2} [(1 - t^2)(1 - \tau^2)]^{\nu/2} \times$$

$$\sum_{p,q} C_{p,q} (1 - t^2)^p (1 - \tau^2)^q F\left(-\frac{N_1}{2}, -\frac{N_2}{2} + p, \frac{1}{2}; t^2\right) F\left(-\frac{L_1}{2} + q, -\frac{m}{2}, \frac{1}{2}; \tau^2\right),$$

де $\tau = \sin \phi_\pi$, $t = \cos \theta$, $\nu = (N - \lambda - 2\mu)/3$, $r = \min\{N_2/2, L_1/2\}$, $N_1 = \lambda_\pi - m$, $N_2 = \lambda_\nu - m - \nu$ та $L_1 = \mu_\pi - \nu$. Для коефіцієнтів $C_{p,q}$ знайдено рекурентні співвідношення.

Рівняння розв'язується також для моменту $L=1$ при $\mu_\pi = 2$ та довільних парних значеннях чисел λ_π, λ_ν . Отримано в явному вигляді функції для двох станів (а не для одного, як у випадку двох аксіальних ротаторів) з різною $SU(3)$ симетрією:

$$|(\lambda_\pi + \lambda_\nu - 2, 3); L = 1, M >, |(\lambda_\pi + \lambda_\nu - 1, 1); L = 1, M > .$$

В параграфі 2.8 дисертаційної роботи будуються хвильові функції ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів. В цьому випадку кількість ступенів вільності системи збільшується до шести, яким відповідають три кути Ейлера α, β, γ , що описують обертання системи як цілого, та три кути $\phi_\pi, \phi_\nu, \theta$ відносного руху ротаторів. Для кожної підсистеми всі індекси $SU(3)$ симетрії (λ_π, μ_π) та (λ_ν, μ_ν) будуть відмінними від нуля. Хвильові функції моделі побудовано при $L=0$ та довільних значеннях чисел (λ_π, μ_π) та (λ_ν, μ_ν):

$$\Psi_{L=0}^{\lambda_\mu} = F\left(-\frac{\mu_\pi}{2}, -\frac{\mu_\nu}{2}, \frac{1}{2}; \tau^2\right) F\left(-\frac{\lambda_\pi}{2}, -\frac{\lambda_\nu}{2}, \frac{1}{2}; t^2\right) + \frac{\lambda_\pi \lambda_\nu \mu_\pi \mu_\nu}{\lambda_\pi + \lambda_\nu + \mu_\pi + \mu_\nu} (1-t^2) \sqrt{1-\tau_\pi^2} \sqrt{1-\tau_\nu^2} \times$$

$$tr F\left(-\frac{\lambda_\pi}{2} + 1, -\frac{\lambda_\nu}{2} + 1, \frac{3}{2}; t^2\right) F\left(-\frac{\mu_\pi}{2} + 1, -\frac{\mu_\nu}{2} + 1, \frac{3}{2}; \tau^2\right) - \quad (7)$$

$$\frac{\lambda_\nu \mu_\pi}{2(\lambda_\pi + \lambda_\nu + \mu_\pi + \mu_\nu)} (1-t^2)(1-\tau_\pi^2) F\left(-\frac{\lambda_\pi}{2}, -\frac{\lambda_\nu}{2} + 1, \frac{1}{2}; t^2\right) F\left(-\frac{\mu_\pi}{2} + 1, -\frac{\mu_\nu}{2}, \frac{1}{2}; \tau^2\right) -$$

$$\frac{\lambda_\pi \mu_\nu}{2(\lambda_\pi + \lambda_\nu + \mu_\pi + \mu_\nu)} (1-t^2)(1-\tau_\nu^2) F\left(-\frac{\lambda_\pi}{2} + 1, -\frac{\lambda_\nu}{2}, \frac{1}{2}; t^2\right) F\left(-\frac{\mu_\pi}{2}, \frac{\mu_\nu}{2} + 1, \frac{1}{2}; \tau^2\right) + \dots,$$

де члени більш високого порядку по параметрам $\sqrt{(1-\tau_\nu^2)(1-t^2)}$, $\sqrt{(1-t^2)}$, $\sqrt{(1-\tau_\pi^2)(1-t^2)}$ позначені трьома крапками, а $t = \cos \theta$, $\tau_\nu = \sin \phi_\nu$, $\tau_\pi = \sin \phi_\pi$ та $\tau = \tau_\pi \tau_\nu + t \sqrt{1-\tau_\pi^2} \sqrt{1-\tau_\nu^2}$.

Знайдено нормувальні множники для станів з нульовим орбітальним моментом, та чотирьох станів з різною $SU(3)$ симетрією та одиничним значенням орбітального моменту. Проаналізовано структуру станів з $L=1$.

В третьому розділі дисертаційної роботи досліджуються властивості низькоенергетичних збуджень парно-парних деформованих ядер. В ньому базис ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів використовується для аналізу ізовекторних і агнітних дипольних переходів та взаємного розташування двох ротаторів.

В параграфі 3.1 дисертації побудовано оператор ізовекторних $M1$ переходів, проаналізовано його властивості як генератора вожицеподібних станів та знайдено деякі його матричні елементи. На основі цих матричних елементів записуються аналітичні формули для зведених ймовірностей переходів:

$$B(M1; 0^+ \rightarrow 1^+) = \frac{3}{4\pi} \left[\frac{\lambda_\nu \lambda_\pi (\mu_\pi + \mu_\nu + 2)}{(\lambda_\nu + \lambda_\pi - 1)(\mu_\pi + \mu_\nu + 1)} \right] \mu_n^2$$

для стану $|(\lambda_\nu + \lambda_\pi - 2, \mu_\nu + \mu_\pi + 1), m = 1, L = 1, M \rangle$,

$$B(M1; 0^+ \rightarrow 1^+) = \frac{3}{4\pi} \left[\frac{\mu_\nu \mu_\pi (\lambda_\nu + \lambda_\pi + 2)}{(\mu_\nu + \mu_\pi - 1)(\lambda_\nu + \lambda_\pi + 1)} \right] \mu_n^2$$

для стану $|(\lambda_\nu + \lambda_\pi + 1, \mu_\nu + \mu_\pi - 2), k = 1, L = 1, M \rangle$,

$$B(M1; 0^+ \rightarrow 1^+) = \frac{3}{4\pi} \left[\frac{\lambda_\nu \mu_\pi}{(\lambda_\nu + \lambda_\pi + \mu_\pi + \mu_\nu)} \right] \mu_n^2 \quad (8)$$

для стану $|(\lambda_\nu + \lambda_\pi - 1, \mu_\nu + \mu_\pi - 1), \nu_1 = 1; L = 1, M \rangle$ та

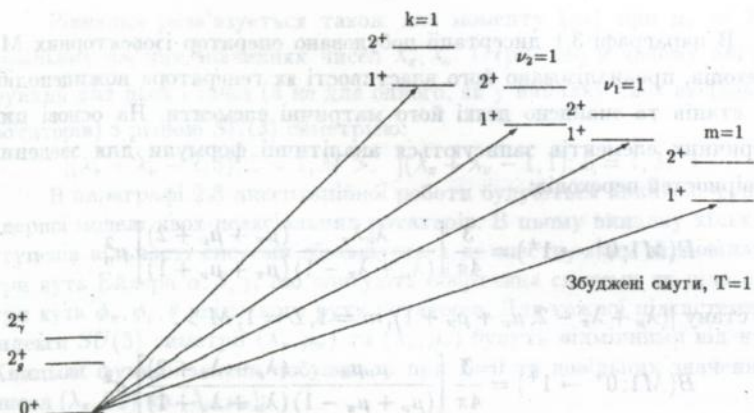
$$B(M1; 0^+ \rightarrow 1^+) = \frac{3}{4\pi} \left[\frac{\lambda_\pi \mu_\nu}{(\mu_\nu + \mu_\pi + \lambda_\nu + \lambda_\pi)} \right] \mu_n^2$$

для стану $|(\lambda_\nu + \lambda_\pi - 1, \mu_\nu + \mu_\pi - 1), \nu_2 = 1; L = 1, M \rangle$, де μ_n - магнетон Бора. Схему переходу $0^+ \rightarrow 1^+$, який фрагментується на чотири переходи, зображено на рисунку.

В роботі були досліджені також переходи $1^+ \rightarrow 2^+_{g_1}$ та $1^+ \rightarrow 2^+_{g_2}$ де стан 1^+ входить до збудженої смуги, що характеризується параметром редукції m , який набуває одиничного значення.

Всі отримані формули не містять будь-яких феноменологічних параметрів, а величини $B(M1)$ є функціями лише квантових чисел λ_ν, λ_π та μ_ν, μ_π : В цих формулах враховано, що для протонного g -фактора $g_\pi = 1$, а для нейтронного $-g_\nu = 0$.

За допомогою цих формул в дисертаційній роботі підраховуються чисельні значення зведених ймовірностей переходів для ядер середньої маси $^{46,48}\text{Ti}$ та для десяти важких ядер $^{154}\text{Sm}, ^{156-160}\text{Gd}, ^{168}\text{Er}, ^{174}\text{Yb}, ^{232}\text{Th}, ^{236,238}\text{U}, ^{242}\text{Pu}$. Для фрагментованого переходу $0^+ \rightarrow 1^+$ величини $B(M1)$ порівнюються з експериментальними даними по непружному



Основа смуга, T=0

розсіяню електронів та γ -квантів, а також із сумарними значеннями величин $B(M1)$, що були отримані в рамках моделі взаємодіючих бозонів МВБ-2. Як приклад, в таблиці наведено такі значення для деяких із вищеперерахованих ядер. Найкраще узгодження з експериментом для всіх фрагментованих переходів спостерігаємо для ядра ^{160}Gd .

В наступному параграфі 3.2 дисертаційної роботи встановлено закономірності у відносному розташуванні двох ротаторів. На основі базисних станів, отриманих в явному вигляді в другому розділі роботи, аналізується залежність функції густини ймовірності

$$\rho(\theta, \phi_\pi, \phi_\nu; \alpha, \beta, \gamma) \equiv |\Psi_{L,M}^{\lambda\mu\nu}|^2. \quad (9)$$

від внутрішніх кутів $\theta, \phi_\pi, \phi_\nu$. Для цього шляхом інтегрування функції густини ймовірності (9) по кутах Ейлера α, β, γ знаходиться функція $\rho(\theta, \phi_\pi, \phi_\nu)$. Така функція будується для станів з $L = 0, 1, 2$ для системи двох аксіальних ротаторів та станів з $L = 0, 1$ для системи, в якій один з двох ротаторів є неаксіальним. Побудовано графіки, які відображають залежність функції $\rho(\theta)$ від кута θ для ядер ^8Be , ^{20}Ne та функції $\rho(\theta, \phi_\nu)$ від кутів θ, ϕ_ν для ядра ^{22}Ne в основному та деяких збуджених

Ядро	$B(M1; 0_g^+ \rightarrow 1^+), (\mu_n^2)$			
	Th^1	Exp.(e,e')	Exp.(γ, γ')	Th^2
^{46}Ti	1.20	1.01 ± 0.16	-	$\Sigma 0.80$
	0.18	-	-	
^{48}Ti	0.80			$\Sigma 0.85$
	0.51	0.52 ± 0.08		
^{156}Gd	1.91	1.5 ± 0.3	$\Sigma 2.7 \pm 0.7$	$\Sigma 2.91$
	0.54	-		
^{160}Gd	1.77	0.8 ± 0.2	1.62 ± 0.18	$\Sigma 3.46$
	0.48	0.9 ± 0.3	0.43 ± 0.05	
	0.27	-	0.25 ± 0.03	
	0.56	0.60 ± 0.17	-	

Таблиця: Теоретичні та експериментальні значення зведених ймовірностей переходів із основного стану в 1^+ стани. В стовбчику Th^1 записуються результати даної роботи, в Th^2 – сумарні ймовірності МВЕ-2, в стовбчиках Exp.(e,e') та Exp.(γ, γ') відповідні експериментальні дані.

станах. Знайдено найбільш ймовірні значення кутів для цих станів та схематично зображено найбільш ймовірну геометричну картину відносного розташування двох ротаторів. Виявлено добре узгодження отриманих в роботі результатів з розрахунками, виконаними Драером та ін. [6].

В цьому ж параграфі дисертації встановлено, що проведений в роботі графічний аналіз властивостей хвильових функцій відображає геометричну картину збудження моди ножиць в парно-парних ядрах, які з мікроскопічної точки зору можна розглядати як сукупність двох підсистем з аксіально-симетричним розподілом нуклонів в них та, коли одна із двох підсистем характеризується неаксіальним розподілом.

В заключній частині роботи проаналізовано основні результати, відзначено деякі аргументи щодо переваг розвинутого наближення, та вказано на можливість застосування результатів дисертації для розрахунків інших фізичних величин, для розширення наближення для опису моди ножиць в непарно-парних і непарно-непарних ядрах та для аналізу трикластерних ядер.

Висновки

1. Побудовано базис ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів, яка інтерпретується на основі мікроскопічної $SU_{\pi}(3) \times SU_{\nu}(3)$ моделі. Знайдено аналітичні вирази для генераторів групи $U(3)$ окремо для протонної та нейтронної підсистем, а також для ядра в цілому. З генераторів сконструйовано оператор Казіміра другого порядку та знайдено його власні функції. З них побудовано базисні стани моделі в явному вигляді в просторі Фока-Баргмана.

2. Встановлено, що мода ножиць є наслідком рухів лише валентних протонів відносно валентних нейтронів.

3. Розв'язано проблему додаткового квантового числа двома альтернативними методами. Побудовано оператор Баргмана-Мошинського, знайдено його власні числа і функції при $L=2$ та встановлено зв'язок цих функцій з еліптічськими хвильовими функціями.

4. Побудовано в явному вигляді із генераторів групи $U(3)$ оператор ізовекторних магнітних дипольних переходів в просторі Фока-Баргмана і знайдено його матричні елементи на базисних функціях ядерної моделі двох неаксіальних ротаторів.

5. Отримано аналітичні формули для ймовірностей $M1$ переходів для загального випадку двох неаксіальних ротаторів. Вирази для ймовірностей не містять феноменологічних параметрів, а є функціями квантових чисел $\lambda_{\nu}, \lambda_{\pi}$ та μ_{ν}, μ_{π} . Виявлено фрагментацію моди ножиць.

6. Розраховано зведені ймовірності $M1$ переходів між основним і збудженими станами ядер $^{46,48}\text{Ti}$, ^{154}Sm , $^{156-160}\text{Gd}$, ^{168}Er , ^{174}Yb , ^{232}Th , $^{236,238}\text{U}$, ^{242}Pu . Проведено порівняння розрахунків для переходів $0^+ \rightarrow 1^+$ з експериментальними даними. Встановлено добре узгодження з експериментом як для окремих фрагментованих переходів, так і для сумарних ймовірностей переходів. Найкраще узгодження з експериментом для фрагментованих переходів спостерігається для ядра ^{160}Gd .

7. Досліджено поведінку хвильових функцій моделі в залежності від внутрішніх кутів у випадку двох аксіальних та випадку одного неаксіального та одного аксіального ротаторів. Знайдено найбільш ймовірні значення кутів для основного та деяких збуджених станів. Графічно від-

створено найбільш ймовірну форму поверхні ядра для таких станів. Встановлено необґрунтованість застосування феноменологічної моделі двох аксіальних ротаторів до ядер, які з мікроскопічної точки зору утворюють сукупність неаксіально-симетричних розподілів протонів і нейтронів, та необґрунтованість використання наближення малих кутів для дослідження властивостей легких та середніх ядер.

Цитована література

- [1] Мигдал А. В. Квадрупольное и дипольное гамма-излучение ядер. // ЖЭТФ. -1945. -т.15. -с.81-83.
- [2] Lo Iudice N., Palumbo F. New Isovector Collective Mode in Deformed Nuclei. //Phys.Rev. Lett.-1978.-Vol.41,N22.-p.1532-1534.
- [3] Elliott J.P. Collective motion in the nuclear shell model. I.Classification schemes for states of mixed configurations //Proc.Roy.Soc.-1958.-Vol.A245.-p.128-143. II.The introduction of intrinsic wave functions //Proc.Roy.Soc.-1958. -Vol.A245.-p.562-580.
- [4] Филиппов Г. Ф., Авраменко В. И. Эффективный гамильтониан вращательных возбуждений в системе $SU(3)$ Эллиотта с реальным взаимодействием//ЯФ -1983.-т.37,N3.-с.597-606.
- [5] Филиппов. Г. Ф., Доценко И. С. Интерпретация модели Палумбо двух аксиальных ротаторов на основе микроскопического подхода.// ЯФ. -1994. -т.57. -с.2181-2195.
- [6] Rompf D., Draayer J. P., Troltenier D., Scheid W.. Algebraic realization of a coupled rotor picture //Z.Phys.-1996.-Vol.A354.-p.359-365.

Основні результати дисертації опубліковано в роботах:

- 1 Filippov G. F., Draayer J. P., Lisetskyi A. F. Microscopic Version of a Two Triaxial Rotor Model.// УФЖ.-1997.-т.42, N2.-с.133-139.
- 2 Filippov G. F., Dotsenko I. S., Lisetskyi A. F. Construction of the basis states with $L = 2$ for a three-cluster system.// УФЖ.-1996.-т.41, N9.-с.779-785.
- 3 Dotsenko I. S., Filippov G. F., Lisetskyi A. F. Relative orientation of proton and neutron subsystems in the microscopic two axial rotators model.// УФЖ.-1996.-т.41, N9.-с.786-791.
- 4 Филиппов Г.Ф., Доценко И.С., Лисецкий А.Ф. Построение собственных функций оператора Баргмана-Мошинского в рамках модели $SU(3) \times SU(3)$.// Препринт ИТФ-95-7Р. -1995. -19 с.
- 5 Filippov G. F., Dotsenko I. S., Lisetskyi A. F. Microscopic description of the giant angle dipole mode.// Book of Abstracts. -Groningen Conference on Giant Resonances, Groningen, The Netherlands, June 28-July 1, 1995 -p12.23.
- 6 Filippov G. F., Dotsenko I. S., Lisetskyi A. F. "Construction of the Basis States with $L = 2$ for a Three Cluster System".// Preprint ITP-95-13E. -1995. -11p.
- 7 Филиппов Г.Ф., Доценко И.С., Лисецкий А.Ф. Микроскопическая модель двух аксиальных ротаторов для ядер с различными нейтронными и протонными оболочечными конфигурациями.// Препринт ИТФ-94-3Р. -1994. -12 с.
- 8 Филиппов Г.Ф., Доценко И.С., Лисецкий А.Ф. Закономерности в относительной ориентации протонной и нейтронной подсистем в микроскопической модели двух аксиальных ротаторов.// Препринт ИТФ-94-7Р. -1994. -13 с.
- 9 Лисецкий О.Ф. Мікроскопічний опис ядерної моделі двох аксіальних ротаторів.// Праці Всеукраїнської конференції молодих вчених (фізика). -1994. -с.109-115.

АННОТАЦІЯ

Лисецкий А.Ф. Динамика коллективных движений валентных нуклонов в деформированных атомных ядрах (рукопись)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика. Киевский университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина, 1997 г.

Защищаются результаты 9 работ, в которых на основе микроскопического подхода исследуются коллективные динамические процессы в деформированных четно-четных ядрах в рамках ядерной модели двух ротаторов. В диссертации представлены результаты теоретических исследований: построение базиса микроскопической ядерной модели $SU_v(3) \times SU_v(3)$ в представлении Фока-Баргмана для общего случая двух неаксиальных ротаторов, применение этого базиса для получения аналитических формул для вероятностей изовекторных M1 переходов и их расчет для ядер $^{46,48}\text{Ti}$, ^{154}Sm , $^{164-160}\text{Gd}$, ^{168}Er , ^{174}Yb , ^{232}Th , $^{236,238}\text{U}$, ^{242}Pu , исследование закономерностей в относительной ориентации протонной и нейтронной подсистем.

SUMMARY

Lisetskyi A.F. Dynamics of collective motion of the valence nucleons in deformed atomic nuclei (manuscript)

The thesis is submitted for a degree of Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) according to the speciality 01.04.02 - theoretical physics. Taras Shevchenko Kyiv University, Kyiv, Ukraine, 1997.

The main results are published in 9 scientific papers, where the collective dynamic processes in deformed even-even nuclei are investigated in the microscopic approach in the frame of the nuclear two rotor model. The results of theoretical investigation are presented: the construction of a basis of the microscopic nuclear $SU_v(3) \times SU_v(3)$ model in the Fock-Bargmann representation for the general case of two triaxial rotors, the application of this basis for getting the analytical expressions for isovector M1 transitions probabilities and calculation of these ones for $^{46,48}\text{Ti}$, ^{154}Sm , $^{164-160}\text{Gd}$, ^{168}Er , ^{174}Yb , ^{232}Th , $^{236,238}\text{U}$, and ^{242}Pu nuclei, the study of regularities in the relative orientation of neutron and proton subsystems.

Ключові слова: модель двох ротаторів, модель $SU_v(3) \times SU_v(3)$, ймовірності переходів, мода ножиць, парно-парні ядра, фрагментація переходів.

AB 37.913