

**YADRO FIZIKA INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**YADRO FIZIKA INSTITUTI**

**BOZAROV OYBEK AZAMIDDINOVICH**

**LANTANIDLAR VA AKTINIDLAR SOHASIDAGI  
DEFORMATSIYALANGAN JUFT-JUFT YADROLARNING  
DINAMIK VA STATIK NOAKSIALLIGI**

**01.04.08 – Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika**

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по физико-математическим наукам**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on  
physical and mathematical sciences**

**Bozarov Oybek Azamiddinovich**

Lantanidlar va aktinidlar sohasidagi deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning dinamik va statik noaksiialligi..... 3

**Бозаров Ойбек Азамиддинович**

Динамическая и статическая неаксиальность деформированных четно-четных ядер в области лантанидов и актинидов..... 18

**Bozarov Oybek**

Dynamic and static triaxiality deformed even-even nuclei in the region lanthanides and actinides..... 34

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 38

**YADRO FIZIKA INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**YADRO FIZIKA INSTITUTI**

**BOZAROV OYBEK AZAMIDDINOVICH**

**LANTANIDLAR VA AKTINIDLAR SOHASIDAGI  
DEFORMATSIYALANGAN JUFT-JUFT YADROLARNING  
DINAMIK VA STATIK NOAKSIALLIGI**

**01.04.08 – Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi. Tezlashtiruvchi texnika**

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1122 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Doktorlik dissertatsiyasi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) va "Ziyonet" Axborot-ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Nadirkbekov Makhmudjon Sulaymanovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

**Rasmiy opponentlar:**

**Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Olimov Qosim**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:**

**"Yangi O'zbekiston" universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil \_\_\_\_\_ soat \_\_\_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-41; faks: (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_\_\_ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, YaFI. Tel.: (+99871) 289-31-19).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2025-yil "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_\_ raqamli reyestr bayonnomasi).

**M.Yu.Tashmetov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy  
kengash raisi f.-m.f.d., professor

**O.R.Tojiboyev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy  
kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD.,  
katta ilmiy xodim

**S.B.Igamov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy  
kengash huzuridagi Ilmiy seminar raisi,  
f.-m.f.d., katta ilmiy xodim

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Zamonaviy yadro strukturasi nazariyasining asosiy yo‘nalishlaridan biri ham statik, ham dinamik noaksial deformatsiyalar va ularning aylanma-tebranma spektrlari tuzilishiga ta‘sirini o‘rganishdan iboratdir. Og‘ir juft-juft yadrolarning ko‘pgina kollektiv xususiyatlari, ayniqsa lantanid va aktinid sohalarida, multipol deformatsiyalar bilan tavsiflanadi. Bir vaqtning o‘zida kvadropol va oktupol deformatsiyalari bo‘lsa, juft-juft yadrolar o‘zgaruvchan juftlikdagi murakkab energiya spektriga ega bo‘ladi.

Energiya sathlari, o‘tish ehtimolliklari va aylanish polosalarining tuzilishi bo‘yicha zamonaviy eksperimental ma‘lumotlar aksial va noaksial deformatsiyalarni bir vaqtning o‘zida hisobga olishga qodir bo‘lgan universal nazariy modellarni yaratishni talab qiladi. Bu, ayniqsa, deformatsiyalangan og‘ir yadrolarda kuzatiladigan o‘zgaruvchan juftlikdagi holatlarini tavsiflash uchun juda muhimdir. Spektroskopik o‘lchovlarning aniqligini oshirish y-rast va non-yrast polosalarning energiya spektrini,  $\Delta I=1$  staggering effektni tavsiflash imkonini beruvchi kollektiv o‘zgaruvchilarga asoslangan fenomenologik modellarni ishlab chiqish, shuningdek, E2-o‘tish ehtimolliklarining tarmoqlanishining batafsil tahlilini o‘tkazish kerak. Shunday qilib, K-aralashmali noaksial kvadropol-oktupol tebranishlarni hisobga oladigan murakkab yondashuvni yaratish va qo‘llash zamonaviy yadro fizikasi nazariyasining dolzarb muammolariga javob beradi.

O‘zbekiston Respublikasida yadro fizikasini ham eksperimental, ham nazariy jihatdan rivojlantirishga alohida e‘tibor berilmoqda. Atom yadrosi va elementar zarrachalar fizikasi sohasidagi fundamental tadqiqotlar yuqori ilmiy saviyada olib borilmoqda va mamlakatimiz ilmiy salohiyatini mustahkamlashda muhim ahamiyat kasb etmoqda. Bu yo‘nalishlarning ahamiyati “2022-2026-yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi”da o‘z ifodasini topgan bo‘lib, unda davlatning barqaror rivojlanishi uchun ilm-fan va texnikani rivojlantirish ustuvorligi ta‘kidlangan.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi farmoni, 2017-yil 13-fevraldagi PQ-2772-sonli “2017-2021-yillarda elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari to‘g‘risida”, 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-sonli “Fanlar akademiyasi faoliyati, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustivor yo‘nalishlariga mosligi.** Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning II. “Energetika, energiya tejankorligi va muqobil energiya manbalari” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Dunyoning yetakchi ilmiy markazlarining ko‘plab olimlari juft-juft yadrolarning uyg‘ongan kollektiv

holatlarining statik va dinamik xususiyatlarini o'rganmoqdalar, xususan: bolgariyalik (N.Minkov, S.Drenska, P.Yotov), rossiyalik (E.V.Mardiban, T.M.Shneydman, E.A.Kolganova, R.V.Jolos), germaniylik ( W. Greiner, Amand Fessler, W. Scheid, M. Strecker), yunonistonlik (D. Bonatsos, D. Lenis, D. Petrellis), italyalik (L. Fortunato), belaruslik (Yu. V. Porodzinskiy, E. Sh. Suxovitskiy), ukrainalik (V. Yu. Denisov, A. Ya. Dzyublik), hindistonlik (J. B. Gupta, H. K. Mittal, S.Sharma, A.K.Kavathekar, Parveen Kumari), o'zbekistonlik (R.B.Begjanov, Sh.Sharipov, B.Ch.Choriev, G.A.Kulabdullaev, P.N.Usmonov, M.S.Nadirbekov, M.J.Ermamatov, S.N.Kudiratov, A.A.Oxunov, E.K.Yusupov) va boshqa mutaxassislar.

Tadqiqotlar natijasida sirt kvadrupol tebranishlarining turli xil potentsial energiyasi uchun Shredinger tenglamasining Bor Gamiltonian bilan yechimlari ko'rib chiqilgan. Biroq, bu ishlarda kollektiv aylanish natijasida yuzaga keladigan yuqori spinli holatlar tahlil qilinmaydi va ko'ndalang tebranishlarning hissasi umuman hisobga olinmaydi yoki faqat qisman hisobga olinadi.

Turli modellar asosida noaksial juft-juft yadrolarning o'zgaruvchan juftlikdagi uyg'ongan kollektiv holatlarning energiya spektri o'rganilgan. Biroq, bu yondashuvlarda yadroning inersiya momenti spinga bo'g'liq ravishda monoton ortadi deb taxmin qilinadi. Shu bilan birga, yadro shakli inersiya momentiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi, shuning uchun ham bo'ylama, ham ko'ndalang deformatsiyalarni hisobga olish zarur. Bu kvadrupol va oktopol deformatsiyalanuvchi yadrolarning noadiabatik kollektiv modelini yanada rivojlantirishni, shuningdek, polosalar ichidagi/orasidagi E2-o'tishlarning keltirilgan ehtimolliklarini to'la tarmoqlanishini tahlil qilishni talab qiladi.

**Dissertatsiya tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy tadqiqot ishlari O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo'ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan "Bir necha jism kvant fizikasi masalalarini yechish uchun yuqori samarali variatsion metodlarni rivojlantirish" mavzusi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** noaksial aylanishlar va aksial kvadrupol-oktopol tebranishlarni tavsiflovchi hamda K-aralashmani hisobga oluvchi murakkab model yaqinlashuvi doirasida noaksial juft-juft yadrolarning o'zgaruvchan juftlikdagi kollektiv holatlarini aniqlashdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

kvadrupol va oktopol deformatsiyalangan noaksial juft-juft yadrolarning noadiabatik kollektiv modelning asosiy tenglamalarini aniqlash;

sirt tebranishlarining Davidson potentsial energiyasi uchun noaksial juft-juft yadrolarning uyg'ongan kollektiv holatlarining o'zgaruvchan juftlikdagi energetik spektri va to'lqin funktsiyalarining aniq ko'rinishdagi ifodalarini olish;

noaksial juft-juft yadrolarning yrast- va birinchi non-yrast polosalarning energiya spektrini hisoblash hamda ularni tajriba natijalari bilan solishtirish;

noaksial juft-juft yadrolarning yrast-polosa energiya spektridagi toq-juft  $\Delta I=1$  “staggering”-effekt ko‘rinishini tahlili, hamda ularni tajriba natijalari bilan qiyoslash;

noaksial juft-juft yadrolarning uyg‘ongan kollektiv holatlar energetik polosalar ichida/orasida keltirilgan E2-o‘tishlar ehtimolligini to‘la tarmoqlanishini tahlil qilish va bu holatlarda noaksiallik parametrining rolini aniqlash.

**Tadqiqot obyekti** sifatida lantanid va aktinid sohasidagi juft-juft yadrolar olingan.

**Tadqiqot predmetini** kvadrupol va oktopol erkinlik darajalarining kollektiv dinamikasi; noaksial juft-juft yadrolarning o‘zgaruvchan juftlikdagi uyg‘ongan kollektiv holatlari yrast-polosa energiya spektridagi “staggering”-effektning zig-zagsimon ko‘rinishi; noaksial juft-juft yadrolarning kollektiv uyg‘ongan holatlari energiya spektri polosalar ichida/orasida keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklarini to‘liq tarmoqlanishi tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari:** kollektiv o‘zgaruvchilar bilan Shredinger tenglamasining yechimlari uchun kvant mexanikasining matematik apparati; FORTRAN tilida dasturlash.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi:**

o‘zgaruvchan juftlikdagi uyg‘ongan kollektiv holatlarini shakllantirishning dinamik mexanizmini ta‘minlaydigan hamda K-aralashma va statik noaksiallikni hisobga oluvchi kvadrupol hamda oktopol deformatsiyalanuvchi noaksial juft-juft yadrolarning noadiabatik kollektiv modeli takomillashtirilgan;

taklif etilgan noadiabatik kollektiv model doirasida yumshoq (lantanoidlar) va qattiq (aktinoidlar) sirtga ega bo‘lgan noaksial juft-juft yadrolarning yrast- va birinchi non-yrast-polosalarning uyg‘ongan kollektiv holatlarining energetik spektri qoniqarli tavsiflangan.

takomillashtirilgan dinamik model doirasida olingan natijalarni tebranma harakatlar effektiv hisobga olinuvchi noaksial kvadrupol-oktopol adiabatik rotor yondashuvi bilan taqqoslash natijasida tebranma-aylanma bog‘lanishning muhimligi ko‘rsatilgan;

dinamik ixtiyoriy noaksiallik modeli doirasida kollektiv uyg‘ongan holatlari asosiy,  $\beta$ - va  $\gamma$ -polosalar ichida/orasida keltirilgan E2- o‘tishlari ehtimolliklarining  $\gamma_0$  noaksial parametriga sezgirligi aniqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

$^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{154,156}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{220}\text{Ra}$ ,  $^{224,226,228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{230,236,238}\text{U}$  va  $^{240}\text{Pu}$  juft-juft yadrolarning yrast- hamda birinchi-non-yrast polosalar energetik spektrlari hisoblangan, hamda nazariy natijalar eksperimental ma‘lumotlar bilan yaxshi mos kelishi ko‘rsatilgan;

takomillashtirilgan dinamik modelda ko‘ndalang  $\gamma$ -deformatsiyalar uchun effektiv potensialdan foydalanilganda asosiy va  $\beta$ - polosalar orasida E2-o‘tishlardan tashqari boshqa polosalar-aro E2-o‘tishlarning keltirilgan ehtimolliklari to‘liq tavsiflab bo‘lmasligi aniqlangan.

**Tadqiqot natijalarning ishonchliligi** kvadрупol va oktupol deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning takomillashtirilgan noadiabatik kollektiv modelining fizik nuqtai nazardan asoslanganligi, hisob-kitoblarning eksperimental ma'lumotlar bilan muvofiqligi, qat'iy matematik apparatlardan foydalanish va muqobil nazariy yondashuvlar bilan taqqoslash bilan ta'minlanadi.

**Tadqiqot natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundaki, nazariy xulosalar noaksial juft-juft yadrolarda o'zgaruvchan juftlikdagi uyg'ongan kollektiv holatlarning energetik spektrlari haqidagi fizik tasavvurlarni kengaytiradi.

Natijalarning amaliy ahamiyati kollektiv holatlarni tavsiflashning nazariy modellarini ishlab chiqish, eksperimental ma'lumotlarning talqinini optimallashtirish bilan belgilanadi. Olingan natijalar yadro texnologiyasi va eksperimental spektroskopiya sohasidagi amaliy tadqiqotlar uchun foydali bo'lishi mumkin.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Lantanidlar va aktinidlar sohasida deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning dinamik va statik noaksialigini o'rganish bo'yicha olingan natijalarga asoslanib:

statik noaksial kvadрупol-oktupol deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning noadiabatik kollektiv modeli takomillashtirilgan;

yumshoq (lantanidlar) va qattiq (aktinidlar) sirtga ega noaksial juft-juft yadrolarning yrast- va birinchi non-yrast-polosalarining uyg'ongan kollektiv holatlarining energiya spektrini tavsiflandi;

Og'ir juft-juft yadrolarning uyg'ongan kollektiv holatlari asosiy,  $\beta$ - va  $\gamma$ - polosalar ichida/orasida keltirilgan E2-o'tish ehtimolliklarini noaksiallik parametri  $\gamma_0$  sezgirligi, Malayziya Xalqaro Islom universitetida Oliy ta'lim vazirligi FRGS19-039-0647-sonli "Neytronga boy chuqur deformatsiyalangan lantanid yadrolarining uyg'ongan holatlari dinamikasi" (2019-2023) granti doirasida og'ir yadrolarning spektroskopik xususiyatlarini o'rganishda foydalanilgan (Malayziya Xalqaro Islom universitetining 2024 yil 18 dekabrda 007-KOE-24-sonli xati). Olingan natijalardan foydalanish ko'p nuklonli uzatish reaksiyalarida olingan reaksiya mahsulotlarining yashash davrini baholash imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 5 ta xalqaro va respublika ilmiy konferensiyalarida ma'ruza qilingan hamda muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 10 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 5 ta maqola, jumladan, 3 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 99 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va usullari aniqlangan, tadqiqotning fan rivojining ustuvor yo‘nalishlariga muvofiqligi ko‘rsatilgan. O‘zbekiston Respublikasida fan va texnikani rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi taqdim etilgan, olingan natijalarning ishonchligi asoslantirilgan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati, natijalarni amalga oshirish va ishning aprobatsiyasi haqida qisqacha ma‘lumot, shuningdek, dissertatsiyaning tuzilishi berilgan.

Dissertatsiyaning “**Fenomenologik noadiabatik kollektiv modelning asosiy tenglamalari**” deb nomlangan birinchi bobida modelning asosiy tenglamalari keltirilgan. Kvadrupol va oktopol deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning kollektiv harakatining to‘la energiyasining aniq shakli olindi.

Kvadrupol va oktopol deformatsiyalanuvchi juft-juft yadrolarning umumiy nazariyasi yetti dinamik o‘zgaruvchini o‘z ichiga olgan Gamilton operatori bilan aniqlanadi  $\beta_2(\beta_2 \geq 0)$ ,  $\gamma(0 \leq \gamma \leq 2\pi/3)$ ,  $\beta_3(\beta_3 \geq 0)$ ,  $\eta(0 \leq \eta \leq \pi)$ ,  $\theta_1(0 \leq \theta_1 \leq 2\pi)$ ,  $\theta_2(0 \leq \theta_2 \leq \pi)$ ,  $\theta_3(0 \leq \theta_3 \leq 2\pi)$ :

$$\hat{H} = \hat{T}_{\beta_2} + \hat{T}_{\beta_3} + \hat{T}_{\gamma} + \hat{T}_{\eta} + \hat{T}_{rot} + V(\beta_2, \beta_3, \gamma, \eta), \quad (1)$$

bunda

$$\hat{T}_{\beta_2} = -\frac{\hbar^2}{2B_2} \frac{1}{\beta_2^4} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( \beta_2^4 \frac{\partial}{\partial \beta_2} \right), \quad (2)$$

$$\hat{T}_{\beta_3} = -\frac{\hbar^2}{2B_3} \frac{1}{\beta_3^4} \frac{\partial}{\partial \beta_3} \left( \beta_3^4 \frac{\partial}{\partial \beta_3} \right), \quad (3)$$

$$\hat{T}_{\gamma} = -\frac{\hbar^2}{2B_2} \frac{1}{\beta_2^2 \sin(3\gamma)} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \sin(3\gamma) \frac{\partial}{\partial \gamma} \right), \quad (4)$$

$$\hat{T}_{\eta} = -\frac{\hbar^2}{2B_3} \frac{1}{\beta_3^2} \left( \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \frac{24 \cos^2 2\eta - 6 \cos 2\eta \cos \eta}{5 + 5 \cos 2\eta + 8 \cos^2 2\eta \sin \eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \right). \quad (5)$$

(2), (3), (4) va (5) ifodalar, mos ravishda,  $\beta_2$ -,  $\beta_3$ -,  $\gamma$ - va  $\eta$ -tebranishlarning kinetik energiya operatorlari hisoblanadilar;  $V(\beta_2, \beta_3, \gamma, \eta)$  – yuqorida ko‘rsatilgan tebranishlarning potensial energiyasi va

$$\hat{T}_{rot} = \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\hbar^2 \hat{I}_{\kappa}^2}{2J_{\kappa}}, \quad (6)$$

aylanma energiya operatori, bu yerda  $I_{\kappa}$  ( $\kappa=1, 2, 3$ ) – to‘la aylanma moment proyeksiyalari,  $J_{\kappa}$  – to‘la inersiya momenti proyeksiyalari, ular  $B_2$ ,  $B_3$  kvadrupol va oktopol deformatsiyalar massa parametrlariga hamda  $\beta_2$ ,  $\gamma$ ,  $\beta_3$ ,  $\eta$  deformatsiya parametrlariga bog‘liq.

Dissertatsiyaning “**Kvadrupol va oktopol deformatsiyalangan og‘ir noaksial juft-juft yadrolarning o‘zgaruvchan juftlikdagi kollektiv holatlari**” deb nomlangan ikkinchi bobida deformatsiyalangan noaksial juft-juft yadrolarning quyi

o'zgaruvchan juftlikdagi kollektiv holatlari o'rganildi. Uyg'ongan kollektiv holatlar yrast- va birinchi non-yrast-polosalar energetik sathlarini tavsiflash noadiabatik kollektiv model doirasida Davidson sirt tebranishlarining potensial energiyasi uchun amalga oshirildi.

(1) gamiltonian uchun Shredinger tenglamasining umumiy yechimi murakkab, shuning uchun turli soddalashtirishlar qo'llaniladi. Modelning shunday soddalashtirishlaridan biri Davydov-Chaban modelining analogi hisoblanadi, u modelga ko'ra,  $\gamma$  va  $\eta$  o'zgaruvchilar o'zlarining  $\gamma_{\text{eff}}$  hamda  $\eta_{\text{eff}}$  effektiv qiymatlari bilan almashtiriladi. U holda, (1) gamiltonian ushbu ko'rinishga keladi:

$$\hat{H} = \hat{T}_{\beta_2} + \hat{T}_{\beta_3} + \hat{T}_{rot} + V(\beta_2, \beta_3), \quad (7)$$

bunda

$$\hat{T}_{\beta_2} = -\frac{\hbar^2}{2B_2} \frac{1}{\beta_2^3} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( \beta_2^3 \frac{\partial}{\partial \beta_2} \right), \quad (8)$$

$$\hat{T}_{\beta_3} = -\frac{\hbar^2}{2B_3} \frac{1}{\beta_3^3} \frac{\partial}{\partial \beta_3} \left( \beta_3^3 \frac{\partial}{\partial \beta_3} \right), \quad (9)$$

$$\hat{T}_{rot} = \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\hbar^2 \hat{I}_{\kappa}^2}{2J_{\kappa}^2}, \quad (10)$$

bu holda aylanma energiya operatori (10)  $\gamma$  va  $\eta$  o'zgaruvchilarning effektiv qiymatlariga bo'liq bo'lib qoladi, ya'ni  $\gamma_{\text{eff}}$  va  $\eta_{\text{eff}}$ .

Endi (7) gamiltonian bilan Shredinger tenglamasini yozamiz:

$$\begin{aligned} & -\frac{\hbar^2}{2B_2} \left[ \frac{3}{\beta_2} \frac{\partial}{\partial \beta_2} + \frac{\partial^2}{\partial \beta_2^2} \right] \Psi_I^{\pm}(\beta_2, \beta_3, \theta) - \frac{\hbar^2}{2B_3} \left[ \frac{3}{\beta_3} \frac{\partial}{\partial \beta_3} + \frac{\partial^2}{\partial \beta_3^2} \right] \Psi_I^{\pm}(\beta_2, \beta_3, \theta) + \\ & + \left[ \hat{T}_{rot} + V(\beta_2, \beta_3) \right] \Psi_I^{\pm}(\beta_2, \beta_3, \theta) = E_I^{\pm} \Psi_I^{\pm}(\beta_2, \beta_3, \theta). \end{aligned} \quad (11)$$

Qutb koordinatalariga o'tamiz  $\sigma$  ( $0 \leq \sigma \leq \infty$ ) va  $\varepsilon$  ( $-\pi/2 \leq \varepsilon \leq \pi/2$ ):

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{B}{B_2}} \sigma \cos \varepsilon, \quad \beta_3 = \sqrt{\frac{B}{B_3}} \sigma \sin \varepsilon, \quad B = \frac{B_2 + B_3}{2}. \quad (12)$$

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2B_2} \left[ \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} + \frac{\partial}{\sigma \partial \sigma} + \frac{\partial^2}{\sigma^2 \partial \varepsilon^2} \right] + \hat{T}_{rot} + W(\sigma, \varepsilon) - E_I^{\pm} \right\} \Psi_I^{\pm}(\sigma, \varepsilon, \theta) = 0, \quad (13)$$

bu yerda

$$\hat{T}_{rot} = \frac{\hbar^2}{8B\sigma^2} \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\hat{I}_{\kappa}^2}{J_{\kappa}^2}. \quad (14)$$

$J_{\kappa}$ - juft-juft yadroning keltirilgan o'lchamsiz inersiya momentining (yoki inert-siya momemti tenzorining) proyeksiyalari. Bu inersiya momenti  $\gamma_{\text{eff}}$ ,  $\eta_{\text{eff}}$  va  $\varepsilon$  kattaliklarga bog'liq. Oktupol deformatsiyalanuvchi yadrolarda potensial energiyaning  $\beta_{20}$ ,  $\beta_{30}$  va  $\beta_{20}$ ,  $-\beta_{30}$  yoki  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  va  $\sigma_0$ ,  $-\varepsilon_0$  koordinatalar bilan aniqlanuvchi ikkita minimumi mavjud.  $V(\sigma_0, \varepsilon_0)$  potensial energiyani muvozanat

holatlar birining siljishi darajalari bo'yicha qatorga yoyib va kesishuvchi hadlarni hisobga olmasdan  $V$  potensial energiyani  $\sigma_0$  va  $\pm\varepsilon_0$  minimumlar atrofida ifodalaymiz:

$$V(\sigma, \varepsilon) = V(\sigma) + \frac{C_\varepsilon}{2\sigma^2}(\varepsilon \pm \varepsilon_0)^2, \quad (15)$$

$C_\varepsilon$  –  $\varepsilon$ -tebranishlar bikrlilik parametri. (15)-ifodadagi ikkinchi qo'shiluvchi doyimiy qiymat qabul qiladi, agar  $\varepsilon = \varepsilon_0$  deb tasavvur qilsak.

Tenglama (13) ning umumiy yechimi juda murakkab. Faraz qilamiz:

$$\Psi_{I_\tau}^\pm(\sigma, \theta) = F_{I_\tau}^\pm(\sigma)\Phi_{IM_\tau}^\pm(\theta), \quad (16)$$

bunda  $M$  – to'la aylanma moment  $I$  ning laboratoriya koordinatalar sistemasidagi uchinchi o'qqa proyeksiyasi.

Aylanma harakat qismi uchun Shredinger tenglamasini olamiz:

$$\left[ \frac{1}{2} \sum_{\kappa=1}^3 \frac{I_\kappa^2}{J_\kappa^2} - \epsilon_{I_\tau}^\pm \right] \Phi_{IM_\tau}^\pm(\theta) = 0. \quad (17)$$

Hamda  $\sigma$  o'zgaruvchi uchun Shredinger tenglamasi:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2B_2} \left[ \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} + \frac{\partial}{\sigma \partial \sigma} \right] + \frac{\hbar^2 \epsilon_{I_\tau}^\pm}{4B\sigma^2} + V(\sigma) - E_{I_\tau}^\pm \right\} F_{I_\tau}^\pm(\sigma) = 0, \quad (18)$$

Bu yaqinlashuvda  $\gamma_{\text{eff}}$  va  $\eta_{\text{eff}}$  deformatsiyaning effektiv parametrlari hisoblanadi. Shunday qilib, biz keltirilgan inersiya momentlari  $J_\kappa = J_\kappa(\gamma_{\text{eff}}, \eta_{\text{eff}})$  ikkita parametrlarga bog'liq deb tasavvur qilamiz. Bu yerda (12) qutb koordinatalarini hisobga olgan holda dinamik o'zgaruvchilar uchun (14) tenglamada  $\hbar^2/(8B\sigma^2)$  ko'paytmani olamiz.

(17) tenglamaning  $\varepsilon$  o'zgaruvchi uchun yechimi juda murakkab, shuning uchun birinchi yaqinlashuvda  $\varepsilon$  o'zgaruvchining yadroning muvozanat holatidagi qiymatini foydalanamiz, ya'ni  $\varepsilon_0$ . U holda (17) tenglamadagi o'lchamsiz  $\epsilon_{I_\tau}$  energetik kattalik  $\gamma_{\text{eff}}, \eta_{\text{eff}}, \varepsilon_0$  parametrlarning funksiyasi hisoblanadi.

(18) tenglama yechimini topish uchun,  $V(\sigma)$  kattalikni Davidson potentsiali ko'rinishida olamiz:

$$V(\sigma) = V_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - \frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2, \quad (19)$$

bunda  $V_0$  va  $\sigma_0$  – mos ravishda, asosiy holat potensial energiyasi va deformatsiya parametri.

(18) tenglama to'lqin funksiyalarini topamiz:

$$F_{I_\tau}^\pm(x) = N_\sigma x^s e^{-\frac{x}{2}} F(-n, 2s+1, x), \quad (20)$$

bunda  $N_\sigma$  – normallashtiruvchi koeffitsiyenti,  $F(-n, 2s+1, x)$  – konflyuent gipergeometrik funksiya,  $n=0,1,2,\dots$  –  $\sigma$ -tebranishlarning kvant soni, ta'qidlaymizki  $n = 0$  yrast-polosa energetik sathlariga mos keladi,  $n = 1$  birinchi non-yrast-polosa energetik sathlariga mos keladi va hokozalar,  $x = 2BV_0\sigma^2 / (\hbar\sigma_0)$ .

Energetik spektr

$$E_{nr}^\pm = \left[ 2n + 1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{nr}^\pm}{2} + \frac{1}{\mu^4}} \right] \hbar\omega - 2V_0, \quad (21)$$

bunda  $\mu = \hbar^2 / (2BV_0\sigma_0^2)$  – noadiabatlik parametri.

Taklif etilgan yaqinlashuvda ushbu parametrlar foydalanildi: energetik faktor  $\hbar\omega$  (keV), kvadrupol noaksiiallik  $\gamma_{\text{eff}}$  (graduslarda), oktopol noaksiiallik  $\eta_{\text{eff}}$  (graduslarda), qutb koordinatalarida muvozanat holati parametri  $\epsilon_0$  (graduslarda) va noadiabatiklik parametri  $\mu$  (o'lchamsiz). Noaksiiallik parametrlarining o'zgarish sohalari  $0^0 < \eta_{\text{eff}} < 180^0$ ,  $0^0 < \gamma_{\text{eff}} < 180^0$  va  $-90^0 < \epsilon_0 < 90^0$ .

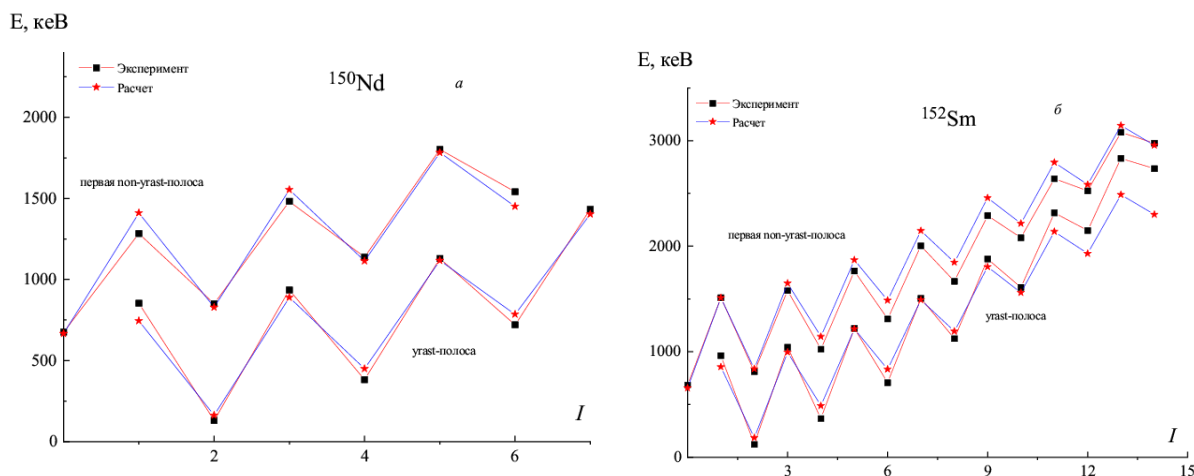
Assimetriya parametri  $\gamma_{\text{eff}}$  ni hisoblash uchun ko'plab nazariy yondashuvlar mavjud, shulardan,  $R_{4/2} = E_{4+}/E_{2+}$  va E2-o'tish ehtimoligini tajribalarda o'lchashdan iborat. Davydov va Filippov, shuningdek, Varshni va Bose  $\gamma_{\text{eff}}$  aniqlash uchun  $R_{4/2}$  munosabatidan foydalanganlar. E2-o'tish tezligidan  $\gamma_{\text{eff}}$  ni hisoblash noaniq qiymatlarga olib keladi, ishonchli qiymatlar esa  $\gamma_{\text{eff}}$  energiya sathlarning qiymatlaridan olingan.

Oktopol  $\eta$  assimetriya parametrining qiymatlari baholanmagan. Bunday harakatlar bo'lgan, unda  $^{228}\text{Th}$  va  $^{232,234}\text{U}$  dagi manfiy juftlik holatlari bo'yicha tajriba ma'lumotlar uchta assimetrik rotator modellarning bashoratlari orqali taqqoslangan: sof kvadrupol, sof oktopol va aralash kvadrupol/oktopol. Sof kvadrupol va oktopol modellarida assimetriya parametrlari  $\gamma$  hamda  $\eta$ , shuningdek, noadiabatik parametr  $\mu$  erkin parametrlardir. Biroq  $^{232}\text{U}$  va  $^{234}\text{U}$  manfiy juftlik sathlari solishtirilganda, ularga mos keladigan  $\beta$ -tebranma polosa energetik sathlari mavjud emas, shuning uchun  $\mu$  qiymati musbat juftlik energetik sathlari taxminiy birinchi tartib sifatida ishlatiladi. Aralash kvadrupol-oktopol modeli  $\gamma$ ,  $\mu$  qiymatlarini va musbat juftlik moslashuvidan umumiy masshtab faktor ishlatiladi hamda faqat  $\eta$  va  $D=B_3\beta_3^2/(B_2\beta_2^2)$  parametrlarini o'zgartiradi va manfiy juftlik sathlariga mos keladi. Shunday qilib, mualliflar barcha uchta modelda manfiy juftlik sathlarini tavsiflash uchun bir xil miqdordagi erkin parametrlar mavjud degan xulosaga kelishdi. Ular X(5) modelida bo'lgani kabi,  $\gamma$ -deformatsiyaning ta'sirini oddiy baholashni  $\gamma = 0$  atrofida kichik o'zgarishlar orqali amalga oshirish mumkinligini ko'rsatishgan.

Dissertatsiya ishida  $\beta_2$ - $\beta_3$  fazoda kollektiv harakat paytida  $\gamma$ -deformatsiya ta'sirining mumkin bo'lgan usullari va noaksiiallikni hisobga olish imkoniyati ko'rib chiqildi, oktopol erkinlik darajasi qayd etildi. Bundan tashqari, kvadrupol va oktopol erkinlik darajalarining noaksiialligi effektiv hisobga olinadi hamda  $\beta_2$  va  $\beta_3$  dinamik o'zgaruvchilar holida  $\gamma_{\text{eff}}$  hamda  $\eta_{\text{eff}}$  kattaliklar parametr sifatida ishlatildi.

O'rganilayotgan  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{232,234,236,238}\text{U}$  va  $^{240}\text{Pu}$  yadrolar uchun  $\hbar\omega$ ,  $\gamma_{\text{eff}}$ ,  $\eta_{\text{eff}}$ ,  $\epsilon_0$ ,  $\mu$  parametrlarning hamda o'rta kvadratik og'ishlarning RMS (keVlarda) qiymatlari olindi. 1-rasmida  $^{150}\text{Nd}$  (*a*),  $^{154}\text{Sm}$  (*b*) yadrolarning yrast-

va birinchi non-yrast-polosalarining energiya sathlarining nazariy hamda eksperimental qiymatlari solishtirilgan.



**1-rasm.  $^{150}\text{Nd}$  (a)  $\hbar\omega = 332.81$  keV,  $\gamma_{\text{eff}} = 67.95^0$ ,  $\eta_{\text{eff}} = 61.73^0$ ,  $\varepsilon_0 = 0.0012^0$ ,  $\mu = 0.7272$ , RMS = 60.98 keV,  $^{152}\text{Sm}$  (b)  $\hbar\omega = 327.33$  keV,  $\gamma_{\text{eff}} = 67.5^0$ ,  $\eta_{\text{eff}} = 26.28^0$ ,  $\varepsilon_0 = 0.0069^0$ ,  $\mu = 0.7982$ , RMS = 148.92 keV, yadrolarning uygʻongan holatlarining nazariy va tajriba qiymatlari**

Tadqiqotda yrast va birinchi non-yrast-polosalar energetik sathlarining nazariy hamda tajriba qiymatlarini taqqoslanishi keltirilgan. Barcha yadrolar uchun yrast va birinchi non-yrast-polosalar energetik sathlarining nazariy hamda tajriba qiymatlari taqdim etilgan koʻrinishi tajriba maʼlumotlari bilan yaxshi mos keladi, shu jumladan, yuqori spinli holatlar,  $^{236,238}\text{U}$  va  $^{240}\text{Pu}$  yadrolari birinchi non-yrast-polosada bundan mustasno. Har bir koʻrib chiqilgan yadro uchun RMS qiymatlari  $\sim 100$  keV oraligʻida oʻzgarib turadi, bu taklif qilingan modelni qoʻllash uchun yaxshi mezondir. Dissertatsiya ishida taklif etilgan modelning RMS qiymatlari va adiabatik yaqinlashuvdagi kvadrupol-oktupol noaksial rotor model RMS qiymatlari solishtirildi. RMSning barcha qiymatlari noaksial rotor modelning qiymatlaridan bir necha barobar kichik. Bu natija, modelga tebranma harakatni hisobga olish bilan bogʻliqdir.

Energetik faktor qiymatlari,  $^{232}\text{U}$  da  $\hbar\omega=268$  keV dan va  $^{154}\text{Sm}$  da  $\hbar\omega=810$  keV oraligʻida oʻzgarib turadi, bu oxirgi yadroning kollektiv harakatiga sirt tebranishining kuchli hissasini koʻrsatadi. Shu bilan birga,  $\mu$  parametrining qiymatlari  $^{232}\text{U}$  da  $\mu=0.576$  da “kuchli noadiabatikalik” va  $^{240}\text{Pu}$  da  $\mu=0.240$  da “zaif noadiabatiklik”ni koʻrsatadi. “Kuchli noadiabatikalik”ni mavjudligi  $^{232}\text{U}$  yadrosida tajriba bilan yaxshi kelishuvga erishish qiyinligini qoʻshimcha tushuntirishi mumkin. Shuningdek, biz shuni taʼkidlaymizki, parametrlarning olingan qiymatlari nuqtai nazaridan “zaif noadiabatiklik” past energiyali tebranish rejimini anglatmaydi, masalan,  $^{240}\text{Pu}$  da tebranish chastota koeffitsiyenti  $\hbar\omega=698$  keV unchalik katta emas. Shakl parametrlariga kelsak, aksariyat yadrolarda  $\varepsilon_0$  qiymatlari  $\varepsilon_0=10^{-3} \div 10^{-4}$  tartibida, bu asosiy holatda oktupol rejimidan, odatda, kichik hissa qoʻshishini koʻrsatadi ((11) tenglamaga qarang), ( $^{230}\text{U}$  va  $^{232}\text{U}$  dan tashqari), bu yerda  $\varepsilon_0$  mos ravishda  $4^0$  va  $10^0$  qiymatlarini oladi. Boshqa tomondan,  $\gamma_{\text{eff}}$  va  $\eta_{\text{eff}}$

ning olingan qiymatlari turli darajadagi kvadrupol hamda oktopol noaksiallikni bildiradi, ular ko‘rib chiqilayotgan barcha yadrolarning o‘zgaruvchan juftlik spektrlarida o‘zini namoyon qiladi.

“Staggering” effektlar aylanma momentlarning bir necha birligi bilan farq qiluvchi holatlar ketma-ketligidagi aylanma polosalarining tarmoqlanishini ifodalaydi. Bunday  $\Delta I = 1$ ,  $\Delta I = 2$ ,  $\Delta I = 4$  “staggering” effektlar o‘ta og‘ir deformatsiyalangan yadrolarning energiya sohalarida kuzatiladi. Ushbu effektlar juft-juft yadrolarda juda yaxshi ma‘lum va turli xil kollektiv modellarni sinab ko‘rishga imkon beradi.

Bunday polosa lantanidlarda va aktinidlarda kuzatiladi. Juft-juft yadrolarning bu polosalarida I ning toq qiymatli manfiy-juftlikdagi energiya sathi va I ning juft qiymatli musbat-juftlikdagi energiya sathiga nisbatan siljiydi. Ya‘ni I qiymatli energiya sathi  $I \pm 1$  qiymatli energiya sathiga nisbatan ko‘chadi. Odatda, toq-juft “staggering” yoki  $I^\pi = \pm 1$  “staggering” deb ataladigan bu miqdor, agar juft va toq energiya sathlari bitta polosani tashkil qilsa, yo‘qolib ketishi kerak.

Dissertatsiya ishida ushbu effektning tahlili va talqini alohida qiziqish uyg‘otadi, chunki u yadrolarning turli sohalarida kollektiv dinamikaning xususiyatlari haqida ma‘lumotni o‘z ichiga oladi va aylanma spektrining nozik tuzilishiga juda sezgir va  $K \geq 0$  turli aylanma polosalarida aniq  $\Delta I = 1$  “staggering”ni ta‘minlaydi.

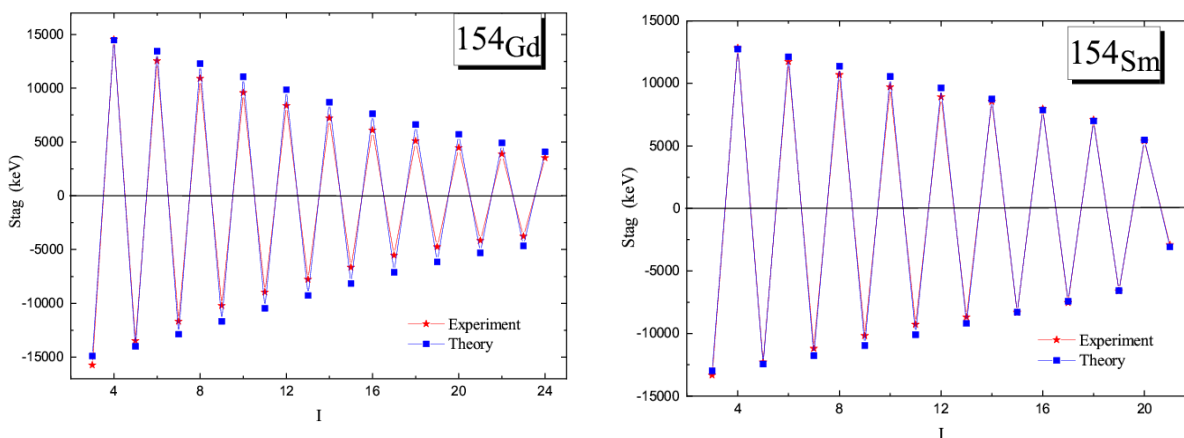
$\Delta I = 1$  “staggering”-effektning aylanma momentning funksiyasi sifatida energiyaning beshinchi hosilasi orqali miqdoriy ifodalash mumkin:

$$Stag(I) = 6\Delta E(I) - 4\Delta E(I-1) - 4\Delta E(I+1) + \Delta E(I+2) + \Delta E(I-2), \quad (22)$$

bunda  $\Delta E(I) = E(I+1) - E(I)$ . Agar aylanma momentning toq va juft qiymatli sathlari yagona polosani tashkil etsagina, bu kattalik nolga aylanadi hamda agar ketma-ket sathlar bir-biriga nisbatan siljisa turli zigzag ko‘rinishlarni ifodalaydi.

Ko‘pgina yadrolarda tajribadagi “staggering” funksiyasi kuchli zigzag ko‘rinishni namoyon qiladi va amplitudasi asta-sekin kattaroq aylanma momentiga qarab kamayadi. Biroq bir nechta yadrolar <sup>228,230</sup>Th, <sup>232</sup>U va <sup>240</sup>Pu juda yuqori aylanma momentida bir jinslilikni namoyon qiladi. Ular yadroning ichki tuzilishidagi ma‘lum o‘zgarishlarni ko‘rsatadi, bu esa aylanadigan kvadrupol-oktopol shaklining o‘ziga xos xususiyatlari bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. 2-rasmda <sup>154</sup>Gd (chapda) va <sup>154</sup>Sm (o‘ngda) yadrolarning o‘zgaruvchan juftlik spektridagi  $\Delta I = 1$  “staggering”- effektning nozik strukturasi yaxshi tasvirlaydi.

Yuqorida olingan natijalar va RMS qiymatlari birgalikda tavsiya etilgan modelni tavsiflash sifati noaksial lantanid hamda aktinid yadrolarda kvadrupol-oktopol aylanma-tebranma noadiabatik yondashuvning dolzarbligini ko‘rsatadi.



**2-rasm.  $^{154}\text{Gd}$  ( $\hbar\omega=726.06$  keV,  $\mu=0.3665$ ,  $\varepsilon_0=0.0^0$ ,  $\gamma_{\text{eff}}=53.93^0$ ,  $\eta_{\text{eff}}=47.9^0$ ,  $\text{RMS}=72.73$  keV) va  $^{154}\text{Sm}$  ( $\hbar\omega=459.3$  keV,  $\mu=0.4661$ ,  $\varepsilon_0=0.0015^0$ ,  $\gamma_{\text{eff}}=67.07^0$ ,  $\eta_{\text{eff}}=60.83^0$ ,  $\text{RMS}=118.12$  keV) yadrolar uchun “staggering”-effektning nazariy va tajriba ko‘rinishi**

Dissertatsiyaning “**Kvadrupol deformatsiyalangan juft-juft yadrolarda noaksiallik dinamikasi**” deb nomlangan uchinchi bobida juft-juft og‘ir yadrolarda kvadrupol uyg‘onishda noaksiallikning roli o‘rganildi, noaksial model doirasida  $\gamma$  va  $\beta$  o‘zgaruvchilar dinamik kattaliklardir. Davidson potentsiali  $\gamma$  va  $\beta$  o‘zgaruvchilari uchun foydalanildi. Uyg‘ongan kollektiv holatlarning energetik spektri ifodasida, aylanma energiya operatorini ( $\gamma-\gamma_0$ ) darajalari bo‘yicha qatorga yoyilishi hisobga olinadi.

Taqdim etilgan model doirasida keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklari noaksiallik parametri  $\gamma_0$  ning butun o‘zgarish diapazonida va asosiy-,  $\beta$ -,  $\gamma$ -polosalardagi ichida/orasida- keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklari tarmoqlanishi og‘ir juft-juft yadrolarda o‘rganiladi. Asosiy,  $\gamma$ - va  $\beta$ -polosalar ichida/orasida keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklari  $\gamma_0$  noaksiallik parametriga sezgirliigi tahlil qilindi. Dinamik  $\gamma$  tebranishlarining keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklariga hissasi taqribiy hisobga olindi.

Quyida asosiy-polosa ichidagi keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklari parametr  $\gamma_0$  ning  $0^0 \leq \gamma_0 \leq 20^0$  oralqdagi qiymatlarida uning o‘zgarishiga sezgir emas va  $\gamma_0$  ning  $20^0 \leq \gamma_0 \leq 30^0$  oralig‘idagi qiymatlari uchun E2-o‘tishlarning sezgirliigi ortadi. Bu o‘tishlar deyarli barcha og‘ir deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning, shu jumladan, yuqori spinli holatlarning kollektiv uyg‘onish spektrlarida kuzatiladi. Hamda, E2-o‘tishlar  $\mu_\beta$  deformatsiya parametriga sezgir emas. Chunki bu, asosan, aylanma-polosadir.

Asosiy- va  $\beta$ -polosalardagi keltirilgan E2-o‘tish ehtimolliklarining ko‘rinishi o‘xshash, ammo  $\beta$ -polosadagi E2-o‘tish ehtimolliklari qiymatidan ancha katta. Parametr  $\gamma_0$  ning kichik qiymatlarida bu o‘tishlar ham ushbu parametrdagi o‘zgarishlarga nisbatan sezgir emas. Hamda ularning amplituda qiymatlari  $\gamma_0$  o‘zgaruvchan parametrda bir oz farq qiladi. E2-o‘tish ehtimolliklarga deformatsiyaning ta‘siri sezilarli. Bu E2-o‘tishlarning kattaligi  $\mu_\beta$  deformatsiya parametrining ortishi bilan kamayadi. Ularning amplituda qiymatlari deformatsiya parametri  $\mu_\beta$  oshishi bilan kamayadi.  $b(E2, 2I_\beta \rightarrow (2I-2)_\beta)$  o‘tishlari eng og‘ir

deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi. Chunki bu polosa tebranma-aylanmadir.

$\gamma$ -polosa ichida juft, toq va aralash spinlar orasidagi keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklari alohida taqdim etildi. Juft spinlar orasidagi ehtimolliklar murakkab koʻrinishga ega. Keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklari parametr  $\gamma_0$  ning oʻzgarishlariga oʻta sezgir. Deformatsiyaning bu ehtimolliklarga taʼsiri ancha yuqori. Ushbu ehtimolliklarning qiymati  $\mu_\beta$  parametrining oshishi bilan ortadi. Chunki bu polosa tebranma-aylanmadir. Bu ehtimolliklar ushbu juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi:  $^{164,166,168}\text{Er}$ .

$\gamma$ -polosa toq spinlari orasidagi keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklari yanada murakkab koʻrinishga ega. E2-oʻtish ehtimolliklarinig deformatsiyaning oʻzgarishiga sezgirligi yuqori. Ularning qiymati  $\mu_\beta$  parametrining oshishi bilan ortadi. Chunki bu polosa tebranma-aylanmadir. Bu oʻtishlar ushbu juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi:  $^{166,168}\text{Er}$ . Eʼtibor qiling,  $\gamma$  polosaning toq va juft spinlari orasidagi keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklarining koʻrinishi boshqa-boshqa.

$\gamma$ -polosa aralash spinlari orasidagi keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklari yanada murakkab koʻrinishga ega. E2-oʻtish ehtimolliklarinig deformatsiyaning oʻzgarishiga sezgirligi yuqori. Bu oʻtishlar ushbu juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi:  $^{152}\text{Sm}$  va  $^{166,168}\text{Er}$ .

Endi asosiy-,  $\beta$ -,  $\gamma$ -polosalar orasidagi keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklari oʻrganildi.  $b(E2, 2I_\gamma \rightarrow (2I-2)_1)$  parametr  $\gamma_0$  ning oraliqlardagi  $20^\circ \leq \gamma_0 \leq 30^\circ$  oʻzgarishlariga oʻta sezgir. Bu oʻtishlar ushbu juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{162,164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{188}\text{Yb}$ ,  $^{230,232}\text{Th}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ .

Polosalar-aro keltirilgan E2-oʻtish  $b(E2, 2I_\gamma \rightarrow 2I_1)$  ehtimolliklari ushbu juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{162,164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{188}\text{Yb}$ ,  $^{230,232}\text{Th}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ .  $b(E2, (2I_\beta \rightarrow (2I-2)_1))$  ehtimolliklari esa ushbu juft-juft yadrolarning kollektiv uygʻonish spektrlarida kuzatiladi:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{162,164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{188}\text{Yb}$ ,  $^{230,232}\text{Th}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ .

Kollektiv uygʻonish spektridagi  $\beta$ - va  $\gamma$ -polosalar orasidagi keltirilgan E2-oʻtish ehtimolliklari:  $b(E2, 2I_\beta \rightarrow 2I_\gamma)$   $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{168}\text{Er}$  yadrolarda;  $b(E2, 2I_\gamma \rightarrow (2I-2)_\beta)$   $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{156}\text{Gd}$  yadrolarda;  $b(E2, (2I+1)_\gamma \rightarrow 2I_{-1})$   $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{166,168}\text{Er}$  yadrolarda;  $b(E2, (2I+1)_\gamma \rightarrow 2I_\beta)$   $^{168}\text{Er}$  yadroda kuzatiladi.

## XULOSA

“Lantanidlar va aktinidlar sohasidagi deformatsiyalangan juft-juft yadrolarning dinamik va statik noaksiialligi” mavzusidagi fizika-matematika fanlari boʻyicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi boʻyicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi asosiy xulosalar taqdim etildi:

1. Kvadrupol va oktopol deformatsiyalanuvchi noaksial juft-juft yadrolar uchun Gamilton operatori bilan sirt tebranishlarining Davidson potentsiali uchun Shredinger tenglamasining analitik yechimi olindi. Noaksial juft-juft yadrolarning

o'zguruvchan juftlikdagi kollektiv holatlarining energetik spektri va to'lqin funksiyalarining aniq ko'rinishdagi ifodalari topildi.

2.  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{154,156}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{220}\text{Ra}$ ,  $^{224,226,228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{230,236,238}\text{U}$  va  $^{240}\text{Pu}$  juft-juft yadrolarning yrast- hamda birinchi-non-yrast polosalar energetik spektri hisoblandi. Eksperimental va nazariy natijalar bilan solishtirildi hamda qoniqarli moslikga erishildi. Og'ir juft-juft yadrolarning noaksial shaklini hisobga olib taklif etilgan noadiabatik kollektiv modelning dolzarbligi ko'rsatildi.

3.  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{154,156}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{226,228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{230,236,238}\text{U}$  va  $^{240}\text{Pu}$  juft-juft yadrolarning yrast-polosa energetik spektrida  $\Delta I=1$  "staggering"-effektning zigzagsimon ko'rinishi aniqlandi.  $\Delta I=1$  "staggering"-effektning ko'rinishi qaralayotgan yadrolardagi o'zguruvchan juftlikdagi spektrning nozik strukturasi yaxshi tasvirlaydi.

4. Asosiy,  $\beta$ - va  $\gamma$ -polosalar ichida/orasida keltirilgan E2-o'tishlar ehtimolliklarining barcha tarmoqlanishlari tahlil qilindi. Taklif etilgan model doirasida polosalar ichidagi E2-o'tishlarning keltirilgan ehtimolliklari yaxshi tavsiflanadi. Asosiy va  $\beta$ - polosalar orasida E2-o'tishlardan tashqari boshqa polosalar-aro E2-o'tishlarning keltirilgan ehtimolliklari ushbu model doirasida tavsiflanmasligi ko'rsatildi, chunki qo'llanilgan modelda ko'ndalang  $\gamma$ -deformatsiyalar uchun effektiv potensial foydalanilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**БОЗАРОВ ОЙБЕК АЗАМИДИНОВИЧ**

**ДИНАМИЧЕСКАЯ И СТАТИЧЕСКАЯ НЕАКСИАЛЬНОСТЬ  
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ЯДЕР В ОБЛАСТИ  
ЛАНТАНИДОВ И АКТИНИДОВ**

**01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации доктора философии (PhD) по физико–математическим наукам

**Ташкент – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико–математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.2.PhD/FM1122.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академия наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Надырбеков Махмуджон Сулайманович**  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

**Официальные оппоненты:**

**Усманов Пазлитдин Нуритдинович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Олимов Косим**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Ведущая организация:**

**Университет «Новый Узбекистан»**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУ. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрирована за № \_\_\_\_\_). Адрес: 100214, Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289-31-19.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.  
(протокол рассылки № “\_\_\_” от \_\_\_\_\_ 2025 г.)

**М.Ю. Ташметов,**  
председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор

**О.Р. Тожибоев**  
ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней, PhD ф.-м.н.,  
старший научный сотрудник

**С.И. Игамов**  
председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н.,  
старший научный сотрудник

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Одним из ключевых направлений современной теории ядерной структуры является исследование как статических, так и динамических неаксиальных деформаций и их влияния на структуру вращательно-колебательных спектров. Многие коллективные свойства тяжелых четно-четных ядер, особенно в области лантанидов и актинидов, обусловлены мультипольными деформациями. В случае одновременного существования квадрупольной и октупольной деформаций, спектр четно-четных ядер приобретает сложный спектр энергетических уровней с переменной четностью.

Современные экспериментальные данные по энергетическим уровням, вероятностям переходов и структуре вращательных полос требуют построения более универсальных теоретических моделей, способных одновременно учитывать аксиальные и неаксиальные деформации. Это особенно важно для описания состояний переменной четности, наблюдаемых в четно-четных деформированных тяжелых ядрах. В условиях роста точности спектроскопических измерений необходимо развитие феноменологических моделей, основанных на коллективных переменных, которые позволяют описывать энергетический спектр  $\gamma$ - и non- $\gamma$ -полос,  $\Delta I=1$ -staggering эффектов, а также проводить детальный анализ разветвлений внутри/полосных вероятностей  $E2$ -переходов. Таким образом, построение и применение комбинированного подхода, учитывающего неаксиальные квадрупольно-октупольные колебания с учетом  $K$ -смешивания, отвечает актуальным задачам современной теории ядерной физики.

В Республике Узбекистан вопросам развития ядерной физики — как в экспериментальном, так и в теоретическом аспектах — уделяется особое внимание. Фундаментальные исследования в области физики атомного ядра и элементарных частиц проводятся на высоком научном уровне и играют важную роль в укреплении научного потенциала страны. Значение этих направлений отражено в «Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы», подчёркивающей приоритетность развития науки и технологий для устойчивого развития государства.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года “О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг.”, № УП-4958 от 16 февраля 2017 года “О дальнейшем совершенствовании системы после вузовского образования”, в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года “О мерах дальнейшего совершенствовании деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности” а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационная работа выполнена в

соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

**Степень изученности проблемы.** Изучением статических и динамических свойств возбужденных коллективных состояний четно-четных ядер занимаются многие ученые ведущих научных центров мира, в частности: болгарские (N.Minkov, S.Drenska, P.Yotov), российские (Е.В.Мардыбан, Т.М.Шнейдман, Е.А.Колганова, Р.В.Джолос), германские (W.Greiner, Amand Faessler, W.Scheid, M.Strecker), греческие (D.Bonatsos, D.Lenis, D.Petrellis), итальянские (L.Fortunato), белорусские (Ю.В.Породзинский, Е.Ш.Суховицкий), украинские (В.Ю.Денисов, А.Я.Дзюблик), индийские (J.V.Gupta, H.M.Mittal, S.Sharma, A.K.Kavathekar, Parveen Kumari), узбекистанские (Р.Б.Бегжанов, Ш.Шарипов, Б.Ч.Чориев, Г.А.Кулабдуллаев, П.Н.Усманов, М.С.Надирбеков, М.Дж.Эрмаматов, С.Н.Кудиратов, А.А.Охунов, Э.К.Юсупов) и другие специалисты.

В результате проведенных исследований рассмотрены решения уравнения Шредингера с гамильтонианом Бора для различных видов потенциальной энергии поверхностных квадрупольных колебаний. Однако в этих работах не анализируются высокоспиновые состояния, возникающие за счет коллективного вращения, а вклад поперечных колебаний либо не учитывается вовсе, либо рассматривается лишь приближенно.

Изучен энергетический спектр возбужденных состояний с переменной четностью аксиально-несимметричных четно-четных ядер на основе различных моделей. Однако в этих подходах предполагается, что момент инерции ядра монотонно увеличивается со спином. В то же время форма ядра оказывает существенное влияние на момент инерции, поэтому необходимо учитывать как продольные, так и поперечные деформации. Для этого требуется дальнейшее развитие неадиабатической коллективной модели ядра с квадрупольной и октупольной деформациями, а также анализ полной структуры разветвления внутри- и междуполосных приведенных вероятностей E2-переходов.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высших образовательных и научно-исследовательских учреждений, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21-ноября 2019-года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан на 2020-2024-годы по теме: “Развитие высокоэффективных вариационных методов для решения задач квантовой физики нескольких тел”.

**Целью работы является** определение спектра коллективных состояний неаксиальных четно-четных ядер переменной четности комбинированным модельным подходом, описывающим аксиальные квадрупольно-октупольные колебания с неаксиальными вращениями и К-смешиванием.

**Задачи исследования.**

определение основных уравнений модели на коллективных переменных для неаксиальных четно-четных ядер с квадрупольной и октупольной деформациями.

получение в явном виде выражения энергетического спектра и волновых функций возбужденных коллективных состояний переменной четности неаксиальных четно-четных ядер для потенциальной энергии поверхностных колебаний Дэвидсона.

проведение расчетов энергетического спектра для  $yrast$ - и первый  $non-yrast$ -полос и сравнения их с экспериментальными данными.

анализ поведения нечетно-четного  $\Delta I=1$  “staggering” эффекта в  $yrast$ -полосе энергетического спектра неаксиальных четно-четных ядер, также сравнения их с экспериментальными данными.

анализ полного разветвления внутри-/между-полосных приведенных вероятностей  $E2$ -переходов в возбужденных коллективных состояниях неаксиальных четно-четных ядер и определение роли неаксиальности в этих состояниях.

**Объектом исследования** являются четно-четные ядра в области лантанидов, актинидов.

**Предметом исследования** являются коллективная динамика квадрупольно-октупольных степеней свободы, зигзагообразное поведение спектра энергетических уровней переменной четности  $yrast$ -полосы неаксиальных четно-четных ядер; полное разветвление между-/внутри-полосных приведенных вероятностей  $E2$ -переходов в энергетическом спектре неаксиальных четно-четных ядер.

**Методы исследования:** математический аппарат квантовой механики для решений уравнения Шредингера с коллективными переменными; программирование на языке ФОРТРАН.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

усовершенствована неадиабатическая коллективная модель четно-четных ядер с квадрупольной и октупольной деформациями, обеспечивающая динамический механизм формирования возбужденных коллективных состояний переменной четности с  $K$ -смешиванием и статической неаксиальностью;

в рамках предложенной неадиабатической коллективной модели получено удовлетворительное описание энергетического спектра возбужденных коллективных состояний  $yrast$ - и первой  $non-yrast$ -полос неаксиальных четно-четных ядер с мягкой (лантаниды) и жесткой (актиниды) поверхностью;

показана важная роль колебательно-вращательной связи, выявленной в развиваемой динамической модели, по сравнению с адиабатическим подходом неаксиального квадрупольно-октупольного ротора, в котором колебательные движения учитываются эффективно;

в рамках модели произвольной динамической неаксиальности установлена чувствительность разветвленных внутри-/междуполосных приведенных

вероятностей  $E2$ - переходов в основной-,  $\beta$ - и  $\gamma$ -полосах тяжелых четно-четных ядер к параметру неаксиальности  $\gamma_0$ .

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

рассчитаны энергетические спектры  $yrast$  - и первой  $non-yrast$  полос для четно-четных ядер  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{154,156}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{220}\text{Ra}$ ,  $^{224,226,228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{230,236,238}\text{U}$  и  $^{240}\text{Pu}$ , при этом теоретические значения находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными;

установлено, что при использовании эффективного потенциала для поперечных  $\gamma$ -деформаций в усовершенствованной динамической модели невозможно полностью описать приведенные вероятности межполосных  $E2$ -переходов, кроме  $E2$ -переходов между основной и  $\beta$ -полосами.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается физической обоснованностью усовершенствованной неадиабатической коллективной модели квадруполь-октупольно деформированных четно-четных ядер, согласованностью проведенных расчетов с экспериментальными данными, использованием строгого математического аппарата и сравнением с альтернативными теоретическими подходами.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов заключается в расширении физических представлений об энергетических спектрах возбужденных коллективных состояний переменной четности неаксиальных четно-четных ядер.

Практическая значимость результатов определяется развитием теоретических моделей описания коллективных состояний, оптимизацией интерпретации экспериментальных данных. Полученные результаты могут быть полезны для прикладных исследований в области ядерных технологий и экспериментальной спектроскопии.

**Внедрение результатов исследования:** на основе полученных результатов динамической и статической неаксиальности деформированных четно-четных ядер в области лантанидов и актинидов:

усовершенствованная неадиабатическая коллективная модель квадруполь-октупольно деформированных четно-четных ядер со статической неаксиальностью;

описание энергетического спектра возбужденных коллективных состояний  $yrast$ - и первой  $non-yrast$ -полос неаксиальных четно-четных ядер с мягкой (лантаниды) и жесткой (актиниды) поверхностью;

выявленная чувствительность разветвленных внутри-/между-полосных приведенных вероятностей  $E2$ - переходов в основной-,  $\beta$ - и  $\gamma$ -полосах тяжелых четно-четных ядер к параметру неаксиальности  $\gamma_0$  были использованы в исследованиях спектроскопических характеристик тяжелых ядер, проводимых в Международном исламском университете Малайзии в рамках гранта FRGS19-039-0647 Министерства высшего образования Малайзии “Dynamics of Excited States of Neutron Rich Well Deformed Lanthanide Nuclei” (2019-2023) (Письмо Международного исламского университета Малайзии от 18 декабря 2024 года № 007-КОЕ-24). Использование результатов позволило оценить

время жизни продуктов реакций получаемых в реакциях многонуклонных передач.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 5 ти Международных и республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследований.** По теме диссертации опубликованы 10 научных работ, в том числе 5 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 3 в зарубежных научных журналах.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 99 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы.

В первой главе диссертации **“Основные уравнения феноменологической неадиабатической коллективной модели”** излагаются основные уравнения модели. Получен явный вид полной энергии коллективных движений четно-четного ядра с квадрупольной и октупольной деформациями.

Общая теория квадрупольной и октупольной деформаций четно-четных ядер определяется оператором Гамильтона, содержащим семь динамических переменных  $\beta_2(\beta_2 \geq 0)$ ,  $\gamma(0 \leq \gamma \leq \pi)$ ,  $\beta_3(\beta_3 \geq 0)$ ,  $\eta(0 \leq \eta \leq \pi)$ ,  $\theta_1(0 \leq \theta_1 \leq 2\pi)$ ,  $\theta_2(0 \leq \theta_2 \leq \pi)$ ,  $\theta_3(0 \leq \theta_3 \leq 2\pi)$ :

$$\hat{H} = \hat{T}_{\beta_2} + \hat{T}_{\beta_3} + \hat{T}_{\gamma} + \hat{T}_{\eta} + \hat{T}_{rot} + V(\beta_2, \beta_3, \gamma, \eta), \quad (1)$$

где

$$\hat{T}_{\beta_2} = -\frac{\hbar^2}{2B_2} \frac{1}{\beta_2^4} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( \beta_2^4 \frac{\partial}{\partial \beta_2} \right), \quad (2)$$

$$\hat{T}_{\beta_3} = -\frac{\hbar^2}{2B_3} \frac{1}{\beta_3^4} \frac{\partial}{\partial \beta_3} \left( \beta_3^4 \frac{\partial}{\partial \beta_3} \right), \quad (3)$$

$$\hat{T}_{\gamma} = -\frac{\hbar^2}{2B_2} \frac{1}{\beta_2^2 \sin(3\gamma)} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \sin(3\gamma) \frac{\partial}{\partial \gamma} \right), \quad (4)$$

$$\hat{T}_\eta = -\frac{\hbar^2}{2B_3} \frac{1}{\beta_3^2} \left( \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \frac{24 \cos^2 2\eta - 6 \cos 2\eta \cos \eta}{5 + 5 \cos 2\eta + 8 \cos^2 2\eta} \frac{\cos \eta}{\sin \eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \right), \quad (5)$$

выражения (2), (3), (4) и (5) являются операторами кинетической энергии  $\beta_2$ -,  $\beta_3$ -,  $\gamma$ - и  $\eta$ -колебаний соответственно;  $V(\beta_2, \beta_3, \gamma, \eta)$  - потенциальная энергия вышеуказанных колебаний и

$$\hat{T}_{rot} = \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\hbar^2 \hat{I}_\kappa^2}{2J_\kappa^2} \quad (6)$$

оператор вращательной энергии, здесь  $I_\kappa$  ( $\kappa = 1, 2, 3$ ) - проекции полного углового момента, а  $J_\kappa$  - проекции полного момента инерции, которые явно зависят от массовых параметров квадрупольной и октупольной деформаций  $B_2$ ,  $B_3$  и параметров деформаций  $\beta_2$ ,  $\gamma$ ,  $\beta_3$ ,  $\eta$ .

Во второй главе диссертации “**Коллективные состояния переменной четности тяжелых неаксиальных четно-четных ядер с квадрупольной и октупольной деформациями**” исследуются низколежащие возбужденные коллективные состояния переменной четности в деформированных неаксиальных четно-четных ядрах. Описание  $yrast$ -, первой  $non-yrast$ -полос производится в рамках неадиабатической коллективной модели с мягкой или жесткой квадрупольно-октупольной коллективностью с потенциальной энергией поверхностных колебаний Дэвидсона.

Получены в явном виде выражения энергетического спектра и волновых функций переменной четности. Проведены сравнения полученных теоретических результатов с экспериментальными данными для ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{232,234,236,238}\text{U}$  и  $^{240}\text{Pu}$ .

Общее решение уравнения Шредингера с гамильтонианом (1) сложное, поэтому используются различные упрощения. Одной из таких моделей является аналог модели Давыдова-Чабана, где переменные  $\gamma$  и  $\eta$  заменяются эффективными значениями  $\gamma_{\text{eff}}$  и  $\eta_{\text{eff}}$ . Тогда гамильтониан (1) принимает следующий вид:

$$\hat{H} = \hat{T}_{\beta_2} + \hat{T}_{\beta_3} + \hat{T}_{rot} + V(\beta_2, \beta_3), \quad (7)$$

где

$$\hat{T}_{\beta_2} = -\frac{\hbar^2}{2B_2} \frac{1}{\beta_2^3} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( \beta_2^3 \frac{\partial}{\partial \beta_2} \right), \quad (8)$$

$$\hat{T}_{\beta_3} = -\frac{\hbar^2}{2B_3} \frac{1}{\beta_3^3} \frac{\partial}{\partial \beta_3} \left( \beta_3^3 \frac{\partial}{\partial \beta_3} \right), \quad (9)$$

$$\hat{T}_{rot} = \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\hbar^2 \hat{I}_\kappa^2}{2J_\kappa^2}, \quad (10)$$

В этом случае оператор вращательной энергии (10) зависит от эффективных значений переменных  $\gamma$  и  $\eta$ , т.е. от  $\gamma_{\text{eff}}$  и  $\eta_{\text{eff}}$ .

Теперь напишем уравнение Шредингера с гамильтонианом (7):

$$-\frac{\hbar^2}{2B_2} \left[ \frac{3}{\beta_2} \frac{\partial}{\partial \beta_2} + \frac{\partial^2}{\partial \beta_2^2} \right] \Psi_I^\pm(\beta_2, \beta_3, \theta) - \frac{\hbar^2}{2B_3} \left[ \frac{3}{\beta_3} \frac{\partial}{\partial \beta_3} + \frac{\partial^2}{\partial \beta_3^2} \right] \Psi_I^\pm(\beta_2, \beta_3, \theta) +$$

$$+ \left[ \hat{T}_{rot} + V(\beta_2, \beta_3) \right] \Psi_I^\pm(\beta_2, \beta_3, \theta) = E_I^\pm \Psi_I^\pm(\beta_2, \beta_3, \theta). \quad (11)$$

Переходим к полярным координатам  $\sigma$  ( $0 \leq \sigma < \infty$ ) и  $\varepsilon$  ( $-\pi/2 \leq \varepsilon \leq \pi/2$ ):

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{B}{B_2}} \sigma \cos \varepsilon, \beta_3 = \sqrt{\frac{B}{B_3}} \sigma \sin \varepsilon, B = \frac{B_2 + B_3}{2}. \quad (12)$$

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2B_2} \left[ \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} + \frac{\partial}{\sigma \partial \sigma} + \frac{\partial^2}{\sigma^2 \partial \varepsilon^2} \right] + \hat{T}_{rot} + W(\sigma, \varepsilon) - E_I^\pm \right\} \Psi_I^\pm(\sigma, \varepsilon, \theta) = 0, \quad (13)$$

где

$$\hat{T}_{rot} = \frac{\hbar^2}{8B\sigma^2} \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\hat{I}_\kappa^2}{J_\kappa^2}, \quad (14)$$

$J_\kappa$  - проекция приведенных безразмерных моментов инерции (или тензор момента инерции) четно-четного ядра.

Этот момент инерции зависит от  $\gamma_{eff}$ ,  $\eta_{eff}$  и  $\varepsilon$ . В ядрах с октупольной деформацией есть два минимума потенциальной энергии, определяемые координатами  $\beta_{20}$ ,  $\beta_{30}$  и  $-\beta_{20}$ ,  $-\beta_{30}$  или  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  и  $\sigma_0$ ,  $-\varepsilon_0$ . Разлагая потенциальную энергию  $V(\sigma_0, \varepsilon_0)$  по степеням смещений одного из этих равновесных положений и пренебрегая перекрестными членами, представим  $V$  в окрестности минимума  $\sigma_0, \pm\varepsilon_0$  в виде:

$$V(\sigma, \varepsilon) = V(\sigma) + \frac{C_\varepsilon}{2\sigma^2} (\varepsilon \pm \varepsilon_0)^2, \quad (15)$$

$C_\varepsilon$  - параметр жесткости  $\varepsilon$ -колебаний. Второе слагаемое в (15) принимает постоянное значение, если подразумевать  $\varepsilon = \varepsilon_0$ .

Общее решение уравнения (13) очень сложное. Полагая

$$\Psi_{I\tau}^\pm(\sigma, \theta) = F_I^\pm(\sigma) \Phi_{IM\tau}^\pm(\theta), \quad (16)$$

где  $M$  - проекция полного углового момента  $I$  на третью ось в лабораторной системе координат,

получаем уравнение Шредингера для вращательной части

$$\left[ \frac{1}{2} \sum_{\kappa=1}^3 \frac{I_\kappa^2}{J_\kappa^2} - \epsilon_{I\tau}^\pm \right] \Phi_{IM\tau}^\pm(\theta) = 0, \quad (17)$$

а также уравнение Шредингера для переменной  $\sigma$

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2B_2} \left[ \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} + \frac{\partial}{\sigma \partial \sigma} \right] + \frac{\hbar^2 \epsilon_{Ir}^\pm}{4B\sigma^2} + V(\sigma) - E_I^\pm \right\} F_I^\pm(\sigma) = 0, \quad (18)$$

В этом приближении  $\gamma_{\text{eff}}$  и  $\eta_{\text{eff}}$  являются эффективными параметрами деформации. Таким образом, мы подразумеваем приведенный момент инерции в зависимости от двух параметров  $J_k = J_k(\gamma_{\text{eff}}, \eta_{\text{eff}})$ . В случае динамических переменных с учетом полярных координат (12) мы получим множитель  $\hbar^2/(8BV\sigma^2)$  в уравнении (17).

Решение уравнения (17) с переменной  $\epsilon$  очень сложное, поэтому в первом приближении используем значение переменной  $\epsilon$  в равновесном положении ядра, т.е.  $\epsilon_0$ . Тогда безразмерная величина энергии  $\epsilon_{It}$  в уравнении (17) является функцией параметров  $\gamma_{\text{eff}}, \eta_{\text{eff}}, \epsilon_0$ .

Чтобы получить решение уравнения (18), величину  $V(\sigma)$  берем в форме потенциала Дэвидсона

$$V(\sigma) = V_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - \frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2, \quad (19)$$

где  $V_0$  и  $\sigma_0$  - потенциальная энергия и параметр деформации основного состояния, соответственно.

Находим волновые функции уравнения (18):

$$F_I^\pm(x) = N_\sigma x^s e^{-\frac{x}{2}} F(-n, 2s+1, x), \quad (20)$$

где  $N_\sigma$  - коэффициент нормировки,  $F(-n, 2s+1, x)$  - конфлюэнтная гипергеометрическая функция,  $n=0, 1, 2, \dots$  - квантовое число  $\sigma$ -колебаний.

Отметим, что  $n=0$  соответствует энергетическим уровням *yrast*-полосы, а  $n=1$  соответствует энергетическим уровням первой *non-yrast*-полосы и т.д.,  $x = 2BV_0 \sigma^2 / (\hbar \sigma_0)$ .

Энергетический спектр

$$E_{Inr}^\pm = \left[ 2n + 1 + \sqrt{\frac{\epsilon_{Ir}^\pm}{2} + \frac{1}{\mu^4}} \right] \hbar \omega - 2V_0, \quad (21)$$

где  $\mu = \hbar^2 / (2BV_0 \sigma_0^2)$  - параметр неадиабатичности.

В представленном приближении используются следующие подгоночные параметры:  $\hbar \omega$  (в кэВ),  $\gamma_{\text{eff}}$  (в градусах),  $\eta_{\text{eff}}$  (в градусах),  $\epsilon_0$  (в градусах) и  $\mu$  (безразмерный). В целом, область изменения параметров неаксиальности составляют  $0^0 < \eta_{\text{eff}} < 180^0$ ,  $0^0 < \gamma_{\text{eff}} < 180^0$  и  $-90^0 < \epsilon_0 < 90^0$ .

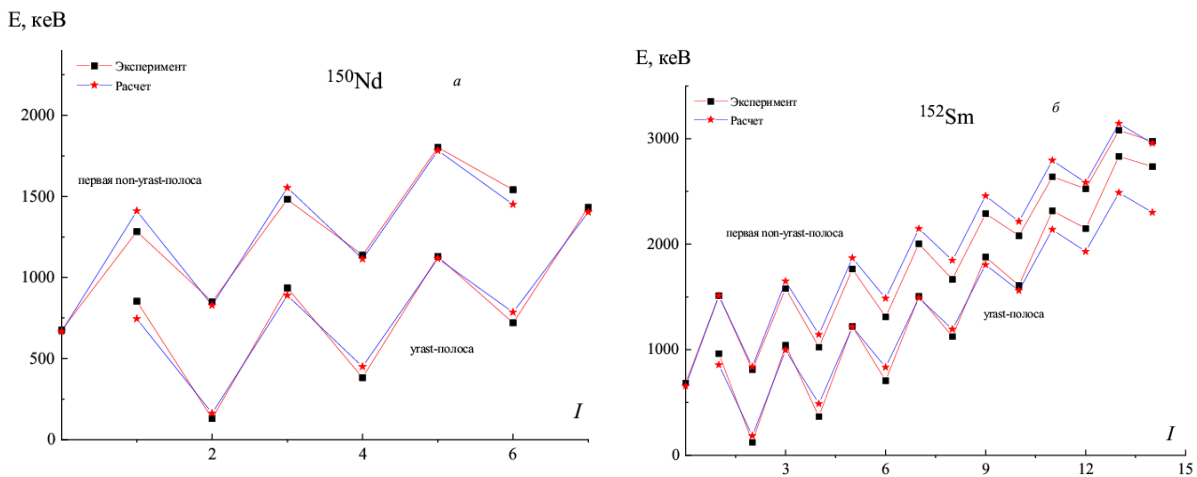
Существует множество теоретических подходов для вычисления параметра асимметрии  $\gamma_{\text{eff}}$  на основе экспериментально наблюдаемых величин, таких как  $R_{4/2} = E_{4+}/E_{2+}$ , а также экспериментального измерения вероятностей E2-переходов, т.е.  $B(E2)$ . Давыдов и Филиппов, а также Варшни и Бозе использовали соотношение  $R_{4/2}$  для определения  $\gamma_{\text{eff}}$ . При этом расчет  $\gamma_{\text{eff}}$  из скоростей E2-переходов приводит к неоднозначным результатам, в то время как

значения, полученные из энергетических уровней, считаются более надёжными.

На данный момент не получена оценка значений параметра октупольной асимметрии  $\eta$ . Ранее такая попытка была предпринята, где экспериментальные данные для состояний с отрицательной четностью в  $^{228}\text{Th}$  и  $^{232,234}\text{U}$  сравнивались с предсказаниями трех возможных моделей асимметричного ротатора: чистый квадруполь, чистый октуполь и смешанный квадруполь/октуполь. В чисто квадрупольной и октупольной моделях параметры асимметрии  $\gamma$  и  $\eta$ , а также параметр жесткости  $\mu$  являются свободными параметрами. Однако при подгонке уровней отрицательной четности  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  не существует уровней  $\beta$ -вибрационной полосы для подгонки, поэтому значение  $\mu$  из подгонки к положительным уровням четности используется в качестве приближения первого порядка. В смешанной квадрупольно-октупольной модели используются значения  $\gamma$ ,  $\mu$  и общий масштабный коэффициент из подгонки с положительной четностью, и изменяются только параметры  $\eta$  и  $D=B_3\beta_3^2/(B_2\beta_2^2)$  для подгонки к уровням отрицательной четности. Таким образом, делается вывод об одинаковом количестве свободных параметров для описания уровней отрицательной четности во всех трех моделях.

Простая оценка влияния  $\gamma$ -деформации может быть выполнена, если предположить небольшие изменения системы около  $\gamma=0$ , как в случае модели X(5). В диссертации обсуждаются возможные механизмы влияния  $\gamma$ -деформации в рамках коллективного движения в пространстве  $\beta_2$ - $\beta_3$ , а также рассматривается возможность учета неаксиальности и роль октупольной степени свободы. Неаксиальность квадрупольной и октупольной степеней свободы эффективно учитывается с помощью параметров  $\gamma_{\text{eff}}$  и  $\eta_{\text{eff}}$ , которые используются в качестве подгоночных параметров для случая динамических переменных  $\beta_2$  и  $\beta_3$ .

В результате анализа были получены значения параметров:  $\hbar\omega$ ,  $\gamma_{\text{eff}}$ ,  $\eta_{\text{eff}}$ ,  $\epsilon_0$ ,  $\mu$ , а также рассчитаны среднеквадратичные отклонения (RMS) уровней энергии (в кэВ) между теорией и экспериментом для всех рассмотренных четно-четных ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{232,234,236,238}\text{U}$  и  $^{240}\text{Pu}$ . На рисунке 1 представлено сравнение теоретических и экспериментальных уровней энергии  $yrast$ - и первой  $non-yrast$ -полос для ядер  $^{150}\text{Nd}$  и  $^{154}\text{Sm}$ .



**Рис. 1. Теоретические и экспериментальные значения энергий уровней возбужденных состояний ядер  $^{150}\text{Nd}$  (а) с  $\hbar\omega = 332.81$  кэВ,  $\gamma_{\text{eff}} = 67.95^0$ ,  $\eta_{\text{eff}} = 61.73^0$ ,  $\varepsilon_0 = 0.0012^0$ ,  $\mu = 0.7272$ ,  $\text{RMS} = 60.98$  кэВ.  $^{152}\text{Sm}$  (б) с  $\hbar\omega = 327.33$  кэВ,  $\gamma_{\text{eff}} = 67.5^0$ ,  $\eta_{\text{eff}} = 26.28^0$ ,  $\varepsilon_0 = 0.0069^0$ ,  $\mu = 0.7982$ ,  $\text{RMS} = 148.92$  кэВ**

Поведение теоретических энергетических уровней этих полос для всех рассматриваемых ядер хорошо согласуется с экспериментальными данными, включая состояния с большими значениями спина, за исключением ядер  $^{236,238}\text{U}$  и  $^{240}\text{Pu}$  в первой non-yrast-полосе. Значения RMS для каждого рассматриваемого ядра изменяются в пределах  $\sim 100$  кэВ, что является хорошим критерием применимости предложенной модели.

В работе также проведено сравнение полученных RMS-факторов с результатами, полученными в рамках адиабатического приближения неаксиального квадрупольно-октупольного ротора. Все значения RMS оказались меньше, чем у неаксиального ротора, что, по-видимому, связано с учетом в модели колебательной моды.

Значения подгоночных параметров показывают, что энергетический множитель  $\hbar\omega$  изменяется от  $\hbar\omega=268$  кэВ для  $^{232}\text{U}$  до  $\hbar\omega=810$  кэВ в  $^{154}\text{Sm}$ , что указывает на значительный вклад колебательной моды в коллективное движение последнего ядра. В то же время значения параметра  $\mu$  свидетельствуют о выраженной неадиабатичности в  $^{232}\text{U}$  при  $\mu=0.576$  и слабой неадиабатичности в  $^{240}\text{Pu}$  при  $\mu=0.240$ . Наличие сильной неадиабатичности может служить дополнительным объяснением трудностей получения хорошего согласия с экспериментальными данными для  $^{232}\text{U}$ . Следует отметить, что в терминах полученных значений параметров “слабая неадиабатичность” не обязательно соответствует низкоэнергетической колебательной моде: например, в  $^{240}\text{Pu}$  коэффициент частоты колебаний  $\hbar\omega = 698$  кэВ нельзя считать малым. Что касается параметров формы, то для большинства ядер значения  $\varepsilon_0$  оказываются очень малыми – порядка  $\varepsilon_0=10^{-3}\div 10^{-4}$ , что указывает на небольшой вклад октупольной моды в основном состоянии [см. уравнение (11)]. Исключение составляют ядра  $^{230}\text{U}$  и  $^{232}\text{U}$ , для которых  $\varepsilon_0$  достигает значений  $4^0$  и  $10^0$  соответственно. Кроме того, полученные значения  $\gamma_{\text{eff}}$  и  $\eta_{\text{eff}}$  свидетельствуют о разной степени квадрупольной и октупольной

неаксиальности, проявляющейся в спектрах переменной четности всех рассматриваемых ядер.

“Staggering” эффекты представляют собой разветвления вращательных полос в последовательностях состояний, различающихся несколькими единицами углового момента. Такие  $\Delta I = 1$ ,  $\Delta I = 2$ ,  $\Delta I = 4$  “staggering” эффекты наблюдаются в энергетических полосах супердеформированных ядер. Эти эффекты очень хорошо изучены в четно-четных ядрах и используются для проверки различных коллективных моделей.

Аналогичные полосы наблюдаются в четно-четных ядрах лантанидов и актинидов. В таких полосах уровни с нечётными значениями углового момента и отрицательной чётности смещены относительно уровней с чётными значениями углового момента и положительной чётностью. То есть уровень с моментом  $I$  смещён относительно соседнего уровня с моментом  $I \pm 1$ . Этот эффект, обычно называемый нечетно-четным “staggering”ом или  $\Gamma^\pi = \pm 1$  “staggering”, должен исчезать в случае, если четные и нечетные уровни энергий формируют единственную полосу.

Анализ и интерпретация данного эффекта представляет особый интерес в рамках настоящей диссертационной работы, поскольку он содержит информацию о свойствах коллективной динамики в различных областях ядер и является очень чувствительным к тонкой структуре вращательного спектра и обеспечивает явное  $\Delta I = 1$  “staggering” поведение в различных вращательных полосах с  $K \neq 0$ .

$\Delta I=1$  “staggering”-эффект можно выразить количественно через пятую дискретную производную энергии как функцию углового момента:

$$Stag(I) = 6\Delta E(I) - 4\Delta E(I-1) - 4\Delta E(I+1) + \Delta E(I+2) + \Delta E(I-2), \quad (22)$$

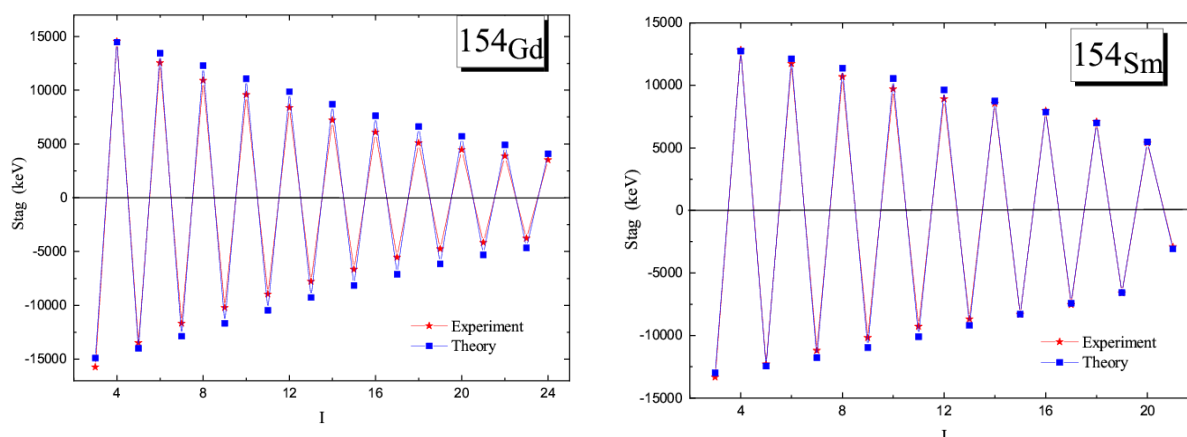
с  $\Delta E(I) = E(I+1) - E(I)$ . Эта величина обращается в нуль в случае, если четные и нечетные уровни углового момента образуют единую полосу вращения и демонстрируют различное зигзагообразное поведение, когда два последовательных уровня энергии смещаются друг относительно друга.

В большинстве ядер экспериментальная функция “staggering” демонстрирует сильное зигзагообразное поведение с постепенно уменьшающейся амплитудой в сторону более высоких угловых моментов. Однако в нескольких ядрах  $^{228,230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{U}$  и  $^{240}\text{Pu}$  наблюдаются неоднородности при очень больших угловых моментах. Они указывают на определенные изменения внутренней структуры ядра, которые могут быть связаны со специфическими свойствами вращающейся квадрупольно-октупольной формы.

На рисунке 2 представлено хорошее воспроизведение тонкой структуры  $\Delta I=1$  “staggering”-эффекта в спектре переменной четности ядер  $^{154}\text{Gd}$  (слева) и  $^{154}\text{Sm}$  (справа).

Полученные результаты вместе с приведенными выше количественными среднеквадратичными характеристиками качества описания модели подтверждают актуальность предложенного неадиабатического неаксиального

квадрупольно-октупольного вращательно-колебательного подхода в области тяжелых четно-четных ядер в области лантанидов и актинидов.



**Рис. 2. Теоретическое и экспериментальное поведение “staggering”-эффекта для ядер  $^{154}\text{Gd}$  с  $\hbar\omega=726.06$  кэВ,  $\mu=0.3665$ ,  $\varepsilon_0=0.0^0$ ,  $\gamma_{\text{eff}}=53.93^0$ ,  $\eta_{\text{eff}}=47.9^0$ ,  $\text{RMS}=72.73$  кэВ и  $^{154}\text{Sm}$  с  $\hbar\omega=459.3$  кэВ,  $\mu=0.4661$ ,  $\varepsilon_0=0.0015^0$ ,  $\gamma_{\text{eff}}=67.07^0$ ,  $\eta_{\text{eff}}=60.83^0$ ,  $\text{RMS}=118.12$  кэВ**

В третьей главе диссертации “Динамика неаксиальности в квадрупольно-деформированных четно-четных ядрах” исследуется динамика неаксиальности квадрупольной формы четно-четных тяжелых ядер в рамках модели произвольной неаксиальности, где переменные  $\gamma$  и  $\beta$  являются динамическими. Потенциал Дэвидсона используется для переменных  $\gamma$  и  $\beta$ . Энергетические уровни возбужденных коллективных состояний получены с учетом высших членов ряда оператора вращательной энергии ( $\gamma-\gamma_0$ ).

В рамках представленной модели изучены приведенные вероятности E2-переходов для всего диапазона изменения параметра неаксиальности и ветвления внутри-/между-полосных приведенных вероятностей E2-переходов в основной-,  $\beta$ - и  $\gamma$ -полос в тяжелых четно-четных ядрах. Проанализирована чувствительность внутри-/между-полосных приведенных вероятностей E2-переходов к параметру неаксиальности  $\gamma_0$ . Вклад  $\gamma$ -колебаний на приведенные вероятности E2-переходов учитывается численно.

Далее представлены внутриполосные приведенные E2-вероятности переходов в основной полосе. При значениях параметра  $\gamma_0$   $0^0 \leq \gamma_0 \leq 20^0$  эти переходы не чувствительны к изменению этого параметра, а при значениях  $20^0 \leq \gamma_0 \leq 30^0$ , чувствительность переходов к параметру  $\gamma_0$  увеличивается. Эти переходы наблюдаются в спектрах коллективных возбуждений почти всех тяжелых деформированных четно-четных ядер, включая высоко-спиновые состояния. Влияние параметра деформации  $\mu_\beta$  на E2-переходы оказывается не существенным, поскольку основная полоса носит преимущественно вращательный характер.

Поведение внутриполосных приведенных вероятностей E2-переходов в основной- и  $\beta$ -полосах аналогичное, но значения вероятностей E2-перехода в этой полосе намного больше, чем в основной полосе. Эти переходы при малых

значениях параметра  $\gamma_0$ , также менее чувствительны к изменению этого параметра, и их амплитудные значения немного отличаются по переменному параметру  $\gamma_0$ . Влияние деформации на E2-переходы более чувствительно. Величины этих E2-переходов уменьшаются с увеличением параметра деформации  $\mu_\beta$ . Их амплитудные значения уменьшаются с увеличением параметра деформации  $\mu_\beta$ . Переходы  $b(E2, 2I_\beta \rightarrow (2I-2)_\beta)$  наблюдаются в спектрах коллективных возбуждений большинства тяжелых деформированных четно-четных ядер, потому что эта полоса является колебательно-вращательной.

Внутриполосные приведенные вероятности E2-переходов в  $\gamma$ -полосе между четными спинами имеют более сложное поведение. Эти E2-переходы представлены между четными, нечетными и смешанными спинами для  $\gamma$ -полосы отдельно. При малых значениях параметра  $\gamma_0$  эти переходы наиболее чувствительны к его изменению. Влияние деформации на E2-переходы также проявляется с большей чувствительностью. Значения этих E2-переходов растут с увеличением параметра  $\mu_\beta$ . Эти переходы наблюдаются в спектрах коллективного возбуждения четно-четных ядер:  $^{164,166,168}\text{Er}$ , так как эта полоса является колебательно-вращательной.

Внутриполосные приведенные вероятности E2-переходов в  $\gamma$ -полосе между нечетными спинами имеют более сложное поведение. Влияние деформации на E2-переходы более чувствительное. Значения этих E2-переходов растут с увеличением параметра  $\mu_\beta$ . Эти переходы наблюдаются в спектрах коллективного возбуждения четно-четных ядер  $^{166,168}\text{Er}$ , потому что эта полоса является колебательно-вращательной. Следует отметить, что поведение приведенных вероятностей E2-переходов внутри нечетных и четных спинов  $\gamma$ -полосы различается.

Поведение внутриполосных приведенных вероятностей E2-переходов  $b(E2, (2I+1)_\gamma \rightarrow 2I_\gamma)$  более чувствительны к изменению параметра  $\gamma_0$ . Эти переходы наблюдаются в спектрах коллективного возбуждения четно-четных ядер  $^{152}\text{Sm}$  и  $^{166,168}\text{Er}$ .

Приведенные вероятности E2-переходов между основной и  $\beta$ -полосой  $b(E2, 2I_\beta \rightarrow (2I-2)_1)$  наблюдаются в спектрах коллективного возбуждения следующих деформированных четно-четных ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{162,164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{188}\text{Yb}$ ,  $^{230,232}\text{Th}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ .

Приведенные вероятности E2-переходов  $b(E2, 2I_\gamma \rightarrow (2I-2)_1)$  наблюдаются в спектрах коллективных возбуждений большинства тяжелых деформированных четно-четных ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{162,164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{188}\text{Yb}$ ,  $^{230,232}\text{Th}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ .

Приведенные вероятности E2-переходов между одинаковыми спинами  $b(E2, 2I_\gamma \rightarrow 2I_1)$  наблюдаются в спектрах коллективных возбуждений следующих деформированных четно-четных ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{162,164,166,168}\text{Er}$ ,  $^{188}\text{Yb}$ ,  $^{230,232}\text{Th}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ .

Приведенные вероятности E2-переходов между  $\beta$ - и  $\gamma$ -полосами в спектрах коллективных возбуждений наблюдаются в следующих случаях: переходы вида  $b(E2, 2I_\beta \rightarrow 2I_\gamma)$  – в ядрах  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{168}\text{Er}$ ; переходы  $b(E2, 2I_\gamma \rightarrow (2I-2)_\beta)$  –

в ядрах  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ; переходы  $b(E2, (2I+1)_\gamma \rightarrow 2I_1)$  – в ядрах  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{166,168}\text{Er}$ ; а также переходы  $b(E2, (2I+1)_\gamma \rightarrow 2I_\beta)$  – в ядре  $^{168}\text{Er}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Динамическая и статическая неаксиальность деформированных четно-четных ядер в области лантанидов и актинидов», сделаны следующие основные выводы:

Получено аналитическое решение уравнения Шредингера с гамильтонианом, описывающим деформированные неаксиальные четно-четные ядра с квадрупольной и октупольной деформациями, для потенциальной энергии поверхностных колебаний Дэвидсона. Найдены явные выражения энергетического спектра и волновых функций возбужденных коллективных состояний переменной четности в неаксиальных четно-четных ядрах.

Выполнен расчет энергетических спектров  $yrast$ - и первой- $non-yrast$  полос четно-четных ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{154,156}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{224,226,228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{230,236,238}\text{U}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{220}\text{Ra}$  и  $^{240}\text{Pu}$ . Проведено сравнение с экспериментальными данными, показавшее хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных. Подтверждена актуальность предложенной неадиабатической коллективной модели с квадрупольной и октупольной деформациями, учитывающей эффективную неаксиальность формы тяжелых четно-четных ядер.

Определено зигзагообразное поведение  $\Delta I=1$  "staggering" -эффекта в спектре энергетических уровней  $yras$  -полосы переменной четности неаксиальных четно-четных ядер:  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{152,154}\text{Sm}$ ,  $^{154,156}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{224,226,228,230,232}\text{Th}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{230,236,238}\text{U}$ ,  $^{172}\text{Yb}$ ,  $^{220}\text{Ra}$  и  $^{240}\text{Pu}$ . Полученное поведение  $\Delta I=1$  "staggering" -эффекта хорошо воспроизводит тонкую структуру спектров переменной четности в перечисленных ядрах.

Проанализированы все возможные разветвления внутри- и междуполосных приведенных вероятностей  $E2$ -переходов в основной-,  $\beta$ - и  $\gamma$ -полосах тяжелых четно-четных ядер. В рамках предложенной модели все внутриволосные приведенные вероятности  $E2$ -переходов описываются удовлетворительно. Показано что междуполосные приведенные вероятности  $E2$ -переходов в большинстве случаев не воспроизводятся моделью, за исключением переходов между основной и  $\beta$ -полосами, что объясняется использованием эффективного потенциала для поперечных  $\gamma$ -деформаций.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**BOZAROV OYBEK AZAMIDDINOVICH**

**DYNAMIC AND STATIC TRIAXIALITY OF DEFORMED EVEN-EVEN  
NUCLEI IN THE LANTHANIDES AND ACTINIDES REGION**

**01.04.08 – Atomic nucleus and elementary particles physics. Accelerator facility**

**DISSERTATION ABSTRACT  
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

**Tashkent – 2025**

**The dissertation theme of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences has been registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.1.PhD/FM1122.**

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian and English) languages on the website of the Scientific Council at [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and on the website of “Ziyonet” Information and Educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Nadirkbekov Makhmudjon Sulaymanovich**  
doctor of physical and mathematical sciences,  
senior scientific researcher

**Official opponents:** **Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich**  
doctor of physical and mathematical sciences,  
professor

**Olimov Qosim**  
doctor of physical and mathematical sciences,  
professor

**Leading organization:** **New Uzbekistan University**

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 at the meeting of Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, (Address: INP, Ulugbek settlement 100214 Tashkent city, tel. (+99871)289 36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked though at the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No \_\_\_\_\_). Address: INP, Ulugbek settlement, 100214 Tashkent city. tel.: (+99871) 289-31-19.

Abstract of dissertation was distributed on «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025.  
(Registry record No \_\_\_\_\_ dated “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025)

**M.Yu. Tashmetov**  
Chairman of the Scientific Council for Awarding of  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

**O.R. Tojiboyev**  
Scientific secretary of the Scientific Council  
for awarding academic degrees, PhD.ph.-m.s.,  
Senior Researcher

**S.B. Igamov**  
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council  
on award of the Scientific Degrees,  
Doctor of physical and mathematical sciences,  
Senior Researcher

## INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research work** is determination of the spectrum of collective states of tri-axial even-even nuclei with alternating parity using a combined model approach describing axial quadrupole-octupole oscillations with triaxial rotations and K-mixing.

**The task of the research work:**

definitions of the main equations of the model on collective variables for static triaxial even-even nuclei with quadrupole and octupole deformations.

obtaining an explicit form expression of the energy spectrum and wave functions of excited collective states of alternating parity of triaxial even-even nuclei for the Davidson potential energy of surface oscillations.

carrying out calculations of the energy spectrum for the yrast- and first non-yrast-bands and comparing them with experimental data.

carrying out an analysis of the behavior of the odd-even  $\Delta I=1$  “staggering” effect in the yrast-band of the energy spectrum of tri-axial even-even nuclei, also comparing them with experimental data.

carrying out an analysis of the full branching of the intra-/inter-band reduced E2-transitions probabilities in excited collective states of triaxial even-even nuclei and determining the role of triaxiality in these states.

**The object of the research work** is even-even nuclei in the region of lanthanides and actinides.

**The subject of the research work** is collective dynamics of quadrupole-octupole degrees of freedom; zigzag behavior of the spectrum of variable-parity energy levels of the yrast-band of triaxial even-even nuclei; full branching of inter-/intra-band reduced E2-transitions probabilities in the energy spectrum of triaxial even-even nuclei.

**The scientific novelty of the research work:**

a non-adiabatic collective model of deformed triaxial even-even nuclei with quadrupole and octupole deformations has been improved, providing a dynamic mechanism for the formation of excited collective states of alternating parity with K-mixing and static triaxiality;

a satisfactory description of the energy spectrum of excited collective states of the yrast- and first non-yrast-bands of triaxial even-even nuclei with a soft (lanthanide) and stiff (actinide) surface has been obtained within the framework of the proposed non-adiabatic collective model;

the important role of vibrational-rotational coupling revealed in the developed dynamic model is shown in comparison with the adiabatic approach of a triaxial quadrupole-octupole rotor, where vibrational motions are taken into account effectively;

within the framework of the free triaxiality model with dynamic variables of longitudinal and transverse deformations, the sensitivity of branched intra-/inter-band reduced E2-transitions probabilities in the ground,  $\beta$ - and  $\gamma$ -bands of heavy even-even nuclei to the  $\gamma_0$  triaxiality parameter is determined.

**Implementation of the research results.** The study of dynamic and static triaxiality of the deformed even-even nuclei in lanthanide and actinide regions yielded the following results:

an improved non-adiabatic collective model for even-even nuclei with static triaxiality and quadrupole-octupole deformation;

a description of the energy spectra of excited collective states for the yrast and first non-yrast bands in non-axial even-even nuclei with a soft (lanthanide) or stiff (actinide) surface;

the identified sensitivity of branching intra-/inter-band reduced E2 transition probabilities within the ground,  $\beta$ -, and  $\gamma$ -bands of heavy even-even nuclei to the triaxiality parameter  $\gamma_0$ ;

these results were utilized in studies of the spectroscopic characteristics of heavy nuclei at the International Islamic University Malaysia, as part of the grant FRGS19–039–0647, “Dynamics of Excited States of Neutron Rich Well Deformed Lanthanide Nuclei” (2019-2023), funded by the Ministry of Higher Education of Malaysia (Letter from the International Islamic University Malaysia, No. 007–KOE–24, December 18, 2024). The use of the results made it possible to estimate the lifetime of the reaction products obtained in multi-nucleon transfer reactions.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of the introduction, three chapters, a conclusion and a list of used literature. The total volume of the dissertation is 99 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; Part I)**

1. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A. Effective triaxiality of even-even nuclei with quadrupole and octupole deformations // Uzbek Journal of Physics. – Tashkent, 2021. – №23(4). – pp. 8-18 (01.00.00. № 5)
2. Nadirbekov M. S., Kudiratov S. N., Bozarov O. A. Alternating-Parity Collective States of Heavy Nonaxial Even–Even Nuclei with Quadrupole and Octupole Deformations // Physics of Atomic Nuclei. – Springer, 2022. – Vol. 85. – No.6. – pp. 425-434. (IF = 0.4) (№3. Scopus; IF = 0,474).
3. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A., Kudiratov S. N., Minkov N. Quadrupole and Octupole deformations with effective triaxiality in even–even nuclei // International Journal of Modern Physics E. – Singapore: World Scientific, 2022. – Vol. 31(8). – id. 2250078 (17 p.) (№3. Scopus; IF =0.883 ).
4. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A., Kudiratov S. N. Branching intra-/inter-band reduced E2-transition probabilities in the model free triaxiality // Journal of Fundamental and Applied Research. – Tashkent: National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineer”, 2023. – Vol. 3(2). – id. 20230011 (11 p.) (01.00.00.)
5. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A., Kudiratov S. N. Triaxiality dynamics in quadrupole deformed heavy even–even nuclei // International Journal of Modern Physics E. – Singapore: World Scientific, 2024. – Vol. 33(No. 03-04). – id. 2450015 (14p.) (№3. Scopus; IF =0.883 ).

**II бўлим (II часть; Part II)**

6. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A. Effective triaxiality of even-even nuclei with quadrupole and octupole deformations // “Ядерная наука и технологии”: III Международный научный форум, 20-24 сентября 2021. Сборник тезисов. – Алматы (Казахстан): Институт ядерной физики, 2021. –С. 87.
7. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A., Kudiratov S. N. Effective triaxiality in even-even nuclei with quadrupole and octupole deformations // “Modern problems of physics”: VIII International conference, October 21-22, 2022. – Dushanbe (Tajikistan), 2022. – pp. 35.
8. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A., Kudiratov S. N., Minkov N. Quadrupole and octupole deformations with effective triaxiality in even-even nuclei // International Workshop SDANCA-23, September 21-23, 2023. – Sofia (Bulgaria), 2023. – pp. 53.
9. Bozarov O. A., Muratova I. Behavior of the rotational-vibration excitations in heavy even-even nuclei // “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики”: Международная конференция, 19-21 октября 2023.

Сборник материалов. – Ташкент: Физико-технический институт АН РУз, 2023. – С. 165-168.

10. Nadirbekov M. S., Bozarov O. A., Kudiratov S. N. Triaxiality in quadrupole deformed heavy even-even nuclei // “Informatsion texnologiyalar va iqtisodiyot tarmoqlarini rivojlantirishda nanofizika va fotoenergetika sohalarining zamonaviy muammolari va yechimlari” xalqaro ilmiy-amaliy anjumani, 25-26 oktabr, 2023. – Namangan: NamMTI, 2023. – 252-253 b.