

**ЎзР ФА «ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИИЧБ  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**  

---

**НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ**

**ЮСУПОВ ЭЛМУРОД КУЧКАРБОВЕВИЧ**

**ГАДОЛИНИЙ  $A=156,158,160$  ИЗОТОПЛАРИ РОТАЦИОН  
ҲОЛАТЛАРИНИНГ ҲОССАЛАРИ**

**01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси.  
Тезлаштирувчи техника**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2022**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**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**

**Юсупов Элмурод Кучкарбоевич**

Гадолиний  $A=156,158,160$  изотоплари ротацион ҳолатларининг  
ҳоссалари..... 3

**Юсупов Элмурод Кучкарбоевич**

Свойства ротационных уровней  $A=156,158,160$  изотопов гадолиния .... 23

**Yusupov Elmurod Kuchkarboyevich**

Properties of rotation states of  $A=156,158,160$  isotopes gadolinium..... 43

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 47

**ЎзР ФА «ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИИЧБ  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**  

---

**НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ**

**ЮСУПОВ ЭЛМУРОД КУЧКАРБОЕВИЧ**

**ГАДОЛИНИЙ  $A=156,158,160$  ИЗОТОПЛАРИ РОТАЦИОН  
ҲОЛАТЛАРИНИНГ ҲОССАЛАРИ**

**01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси.  
Тезлаштирувчи техника**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2022**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.4.PhD/FM255 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Наманган муҳандислик-технология институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (<http://fti-kengash.uz/>) ва «Ziynet» Ахборот-таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Усманов Пазлитдин Нуритдинович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Саидханов Насир Шакирович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Надирбеков Махмуджон Сулайманович**  
физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

**Етақчи ташкилот:**

**Жиззах давлат педагогика институти**

Диссертация ҳимояси «Физика-Қуёш» ИИЧБ ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент ш., Чингиз Айтматов кўчаси, 2б-уй, Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net), Физика-техника институти мажлислар зали).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( \_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент ш., Чингиз Айтматов кўчаси, 2б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91.

Диссертация автореферати 2022 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.

(2022 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**С.Л. Лутпуллаев**

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
раиси, ф.-м.ф.д., профессор

**Ж.С. Ахатов**

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
илмий котиби, т.ф.д., катта  
илмий ходим

**К.Г. Гуламов**

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
ҳузуридаги илмий семинар раиси  
ф.-м.ф.д., академик

## КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Ҳозирги кунда жаҳонда атом ядроси физикаси билан боғлиқ ядро структурасини ўрганиш соҳасида кўплаб эксперимент маълумотлар мавжуд. Буларнинг кўп қисмини бир-бирига зид келмайдиган моделлар ёрдамида тушунтиришлар мавжуд. Деформацияланган жуфт-жуфт ядроларга таълуқли охириги эксперимент натижалар адиабатик назариядан яққол четланишлар мавжудлигини кўрсатади. Адиабатик назариядан катта четланишлар ротацион бандларнинг энергия спектрида ва ротацион банд ҳолатлари орасидаги тармоқланган электромагнит ўтишларда кузатилган. Кўп ҳолларда адиабатик назариянинг башоратлари эксперимент натижаларидан бир неча баробарга фарқ қилади. Бундай четланишларни бандларнинг Кориолис таъсир параметрлари бўйича паст тартибли ғалаёнлар назарияси асосида тушунтириб бўлмайди. Шунинг учун ҳам деформацияланган ядролар ротацион ҳолатлари хусусиятларига Кориолис кучлари таъсирини ҳисобга олувчи феноменологик моделлар яратиш ва уларни такомиллаштириш орқали мавжуд эксперимент натижаларни тавсифлаш ядро структураси назарияси билан шуғулланувчи барча Жаҳон олимлари олдида турган муҳим масалалардан биридир.

Бугунги кунда жаҳонда Ноёб Ер элементлари деформацияланган ядроларининг уйғонган ҳолатлари хусусиятларини назарий тадқиқ этишнинг долзарблиги ядронинг айланиш жараёни билан боғлиқ бўлган муаммолар тўлиқ тушуниб етилмаганлиги билан боғлиқ. Жуда юқори бўлмаган спинлардаги ноадиабатик эффектларни уйғониш энергиялари нисбатан катта бўлмаган чекланган сонли ҳолатларни Кориолис аралашувини ўрганувчи моделлар ёрдамида тушунтириш мумкин. Бундай моделлар ёрдамида коллектив бандларни боғлиқлиги кўплаб муаллифлар томонидан ўрганилган. Аммо аксарият ҳолларда улар энергия спектрини қуйи қисми ва аралашишда кам сонли ротацион бандлар иштирокини ўрганиш билан чегараланганлар. Шу сабабли кенг диапазондаги уйғониш энергияли ва бурчак моментли ҳолатларни спектрал ва электромагнит характеристикаларини тадқиқ қиладиган феноменологик ва микроскопик моделларни яратиш ҳамда мавжудларини имкониятларини янада кенгайтириш ниҳоятда долзарбдир.

Мамлакатимизда бугунги кунда ядро физикасини ривожлантириш, хусусан, атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси соҳасида тажрибавий ва назарий фундаменталь тадқиқотларни жаҳон даражасида амалга оширишга катта эътибор қаратилмоқда. Мамлакатимиз илм-фан ривожига ҳамда фундаменталь тадқиқот натижаларини ҳаётга тадбиқ қилиш учун фундаменталь тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги Ҳаракатлар стратегиясига<sup>1</sup> киритилган. Ушбу ишда олиб борилган тадқиқотлар, дунёда замонавий тадқиқотларнинг илғорларидан ҳисобланувчи ядровий физика муаммолари, ҳамда

---

<sup>1</sup> 2017 йил 07 февральдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони

бошқариладиган термоядро жараёнлари физикаси, жумладан ядро энергетикаси билан бевосита боғлиқ.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги, 2017 йил 16 февралдаги ПФ-4958-сонли «Олий ўқув юртидан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида»ги Фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида»ги Қарорлари, ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Деформацияланган ядролар хусусиятларини ўрганишда феноменологик моделлар йўналишига кирувчи Бор ва Моттельсонлар томонидан таклиф қилинган ядронинг адиабатик модели муҳим роль ўйнади. Бу моделга асосан, деформацияланган ядроларнинг қуйи уйғонган ҳолатлари аксиаль-симметрик ядронинг бутунлигича айланиши билан боғлиқдир. Бир қатор, юқори спинли уйғонган ҳолатлар ядро сиртини тебраниши билан боғлиқ деб қаралади. Бундай оддий феноменологик талқин деформацияланган ядроларга таълуқли бўлган кўплаб экспериментал фактларни тушунтириш ва бир қатор янги хусусиятларни башорат қилиш имконини берди: Джолос Р.В. (Россия), Михайлов И.Н. (Россия), Михайлов В.М. (Россия), Нестеренко В. (Россия), Briançon Ch. (Франция), Квасил Я. (Чехия), Арима А. (Япония), Сафаров Р.Х. (Ўзбекистон), Шарипов Ш. (Ўзбекистон), Чориев Б. (Ўзбекистон), Усманов П.Н. (Ўзбекистон), Надирбеков М. С. (Ўзбекистон).

Ядро ҳолатларининг кенг диапазондаги бурчак моментларини экспериментал тадқиқотидаги катта имкониятлар ядро структурасини ўрганишда янги йўналишларни вужудга келишига сабаб бўлди. Экспериментнинг охириги натижалари адиабатик назариядан аниқ четланишлар мавжудлигини кўрсатди. Адиабатик назария қонунларидан катта четланишлар уйғонган ҳолатларнинг ротацион бандлари энергияларида ва ротацион бандлар орасидаги тармоқланган электромагнит ўтишларида яққол намоён бўлади. Кўп ҳолларда адиабатик назариянинг башоратлари эксперимент натижалардан бир неча фоизга ва баъзи ҳолларда бир неча баробарга фарқ қилади: Питц Х.Х. (Германия), Полумба Ф. (Германия), Весселборг С. (Германия), Зильгес А. (Германия), Апрахамиан А. (АҚШ), Лешер С. Р. (АҚШ), Говор Л. И. (Россия), Демидов А. М. (Россия), Михайлов И. В. (Россия).

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Наманган муҳандислик-технология институти илмий-тадқиқот ишлари режаларининг ОТ-Ф2-75 «Деформацияланган ўта оғир,

трансуран ва ноёб Ер элементлари ядролари ротацион ҳолатларининг хусусиятларини тадқиқоти» (2017-2020), FRGS13 «Dynamics of Excited States of Deformed Nuclei in Transuranium and Rare-Earth Regions» (2013-2016) илмий фундаменталь лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** деформацияланган жуфт-жуфт ноёб Ер элементлари ядролари коллектив ҳолатларининг энергиялари ва электромагнит хусусиятларидаги ноадиабатикликни аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

гадолиний  $A=156,158,160$  изотоплари инерция моментларини ҳисоблаш учун эффектив методни аниқлаш;

адиабатик ротацион бандларни инерция моментларини бир хил деб ҳисоблаб, экспериментда мавжуд барча  $K^\pi = 0^+, 2^+$  ва  $1^+$  бандлар Кориолис аралашувини эътиборга олувчи феноменологик модель ёрдамида ротацион ҳолатлар энергияларини назарий қийматларини, ҳамда тўлқин функцияларини ҳисоблаш;

ротацион бандлар ичидаги ва бандлар ўртасидаги  $E2$ –ўтишларнинг келтирилган эҳтимолликларини, ҳамда уларнинг нисбатларини ҳисоблаш ва уларни эксперимент натижалари билан солиштириш;

ротацион ҳолатларнинг магнит хусусиятларини – магнит моментлари,  $g_R$  –факторини, мультиполь аралашув коэффициенти  $\delta(E2/M1)$ , ротацион бандлар ичидаги ва бандлар ўртасидаги  $M1$ –ўтишлар келтирилган эҳтимолликларини феноменологик модель доирасида назарий қийматларини таҳлил қилиш;

экспериментал натижаларнинг таҳлили ва уларда ноадиабатикликни намоён бўлишини ўрганиш.

**Тадқиқотнинг объекти** гадолиний  $A=156,158,160$  изотоплари.

**Тадқиқотнинг предмети** гадолиний  $A=156,158,160$  изотопларининг мусбат жуфтликдаги ротацион банд ҳолатлари энергиялари, Кориолис аралашуви, электр ва магнит ўтишларнинг эҳтимолликларидан иборат.

**Тадқиқот усуллари.** Квант механикасининг математик аппарати, сонли методи ва ФОРТРАН тилида дастурлаш.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

Кориолис аралашувини ҳисобга олувчи феноменологик модель бандларнинг инерция моментларини бир деб олиб, ҳамда Гамильтон оператори базис ҳолатлар диапазонини кенгайтириш асосида такомиллаштирилди. Шу модель доирасида ноёб Ер элементлари ядролари мусбат жуфтлик ҳолатлари энергия спектри ва электромагнит хусусиятларини талқин этишнинг мукамаллашган янги параметрлаш усули таклиф этилди;

илк бор  $^{156,158,160}\text{Gd}$  изотопларини қуйи жойлашган  $K^\pi = 0^+$  банд ҳолатларидан электр квадруполь ўтишларнинг келтирилган эҳтимолликлари нисбатларида ноадиабатиклик кескинроқ намоён бўлиши сабаблари кўрсатилган;

экспериментда кузатилган  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  банд ҳолатларини магнит хусусиятлари бўлган мультиполь аралашув коэффиценти  $\delta(E2/M1)$  ҳамда асосий банд ҳолатларига  $M1$ –ўтишлар келтирилган эҳтимолликлари  $K$  –таъқиқланган ўтишлар орқали илк бор тушунтирилди;

илк бор гадолийни  $A=156,158,160$  изотоплари  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  ротацион бандларида янги ҳолатлар ва  $A=158$  изотопида характеристикалари  $K^\pi = 1^+$  бўлган кўшимча ҳолатларни мавжуд бўлишлиги назарий башорат қилинган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

экспериментда маълум ва инерция моментлари бир-хил бўлган ротацион бандларнинг Кориолис аралашувини ҳисобга олувчи феноменологик модель гамилтониани ноёб Ер элементлари жуфт-жуфт ядроларининг мусбат жуфтлилиқ ҳолатлари энергия спектри ва электромагнит хусусиятларини янада яхши талқин этиш учун такомиллашган янги параметрлаш усули таклиф этилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** олинган натижаларни батафсил солиштирилганда эксперимент натижалари ва бошқа муаллифлар натижалари билан мувофиқлиги, назарий ядро структураси назарияси асослари ҳулосаларига мослиги, назарий физика ва квант механикаси усуллари, ҳамда юқори эффективли «фортран» дастури ва сонли усулларнинг қўлланилишига асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти янги параметрлаш усули орқали такомиллашган модель асосида деформацияланган жуфт-жуфт ядроларнинг замонавий экспериментларда олинган спектроскопик характеристикаларини таҳлили билан аниқланади ва бу натижаларни ядронинг янги уйғонган ҳолатларни аниқлашда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти Ўзбекистон ФА ЯФИ лабораторияларида, Бирлашган Ядро Тадқиқотлар Институтининг (Дубна, Россия) назарий физика, ядро муаммолари ва ядро реакциялари лабораторияларида, МТМ Курчатов институти (Москва, Россия) лабораторияларида, Дармштадт ва Мюнхен (Германия) физика институтларида, ОРСЭ (Франция), Мичиган ва Кентуки университетлари (АҚШ) лабораторияларида олинган натижаларни физик асосида тушунишда ҳамда диссертацияда башорат қилинган янги ҳолатларни экспериментда аниқлашда фойдаланиш мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Гадолийни  $A=156,158,160$  изотоплари ротацион ҳолатларининг ҳоссалари бўйича олинган илмий ҳулосалар асосида тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши:

гадолийнинг  $A = 156,158,160$  изотопларини ротацион ҳолатлари инерция моментларига оид олинган янги натижалар халқаро олимлар томонидан илмий журналда (Journal Sains Malaysiana, 2022) жуфт-жуфт деформацияланган ядроларда квантланган марказдан қочирма чўзилишни ротацион спектрга таъсирини ўрганишда фойдаланилган;

мультиполь аралашув коэффициенти  $\delta(E2/M1)$ , ротацион бандлар ичидаги ва бандлар ўртасидаги  $M1$ – ва  $E2$ – ўтишлар келтирилган эҳтимолликлари FRGS19-039-0647 «Dynamics of excited states of neutron-rich well-deformed lanthanide nuclei» 2019/2022 (Халқаро Малайзия Ислон Университетининг 2021 йил 18 ноябрдаги маълумотномаси) фундаменталь лойиха доирасида фойдаланилган;

инерция моментларини Харрисни икки параметрли формуласидан фойдаланиб аниқланган натижалар ва ротацион бандлар Кориолис аралашувини эътиборга олувчи феноменологик модель ёрдамида олинган тўлқин функциялар FRGS19-039-0647 «Dynamics of excited states of neutron-rich well-deformed lanthanide nuclei» 2019/2022 (Халқаро Малайзия Ислон Университетининг 2021 йил 18 ноябрдаги маълумотномаси) фундаменталь лойиха доирасида фойдаланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши деформацияланган ядроларнинг айланма ҳолатлари спектрининг нозик структурасини аниқлашга имкон берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 14 та халқаро ва маҳаллий илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 21 та илмий иш, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола, 3 таси хорижий журналларда нашр қилинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 86 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида мавзунинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, мақсад ва вазифалари келтирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари кўрсатилган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларга боғлиқлиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган ҳамда нашр қилинган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Энергия ва ҳолатлар структурасини таҳлили**» деб номланган биринчи бобида тадқиқ этилаётган  $^{156,158,160}\text{Gd}$  изотопларининг ротацион банд ҳолатларининг энергиялари, инерция моментлари, квадруполь моментлари, электр характеристикалари, хусусан ротацион бандлар ичидаги ва бандлар орасидаги квадруполь ўтиш эҳтимолликлари бўйича адабиётларда келтирилган натижалар таҳлил қилинган.

Фойдаланилган феноменологик модель Гамильтон оператори қуйидаги кўринишга эга:

$$H = H_{\text{rot}}(I^2) + H_{KK'} \quad (1)$$

$$H_{K,K'} = \omega_K \delta_{K,K'} - \omega_{\text{rot}}(I) \langle K | \hat{j}_x | K' \rangle \chi(I, K) \delta_{K,K' \pm 1}, \quad (2)$$

бу ерда  $\omega_{\text{rot}}(I) = dE_{\text{core}}(I)/dI$  – ўзак айланма ҳаракати бурчак частотаси,  $j_x$  – ички бурчак моментини  $X$  ўқиға проекцияси ва  $\omega_K$  – ротацион бандларнинг бош энергия қийматлари ва

$$\chi(I, 0) = 1, \quad \chi(I, 1) = \left| 1 - \frac{2}{I(I+1)} \right|^{1/2} \quad (3)$$

Гамильтониан операторининг хусусий тўлқин функцияси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$\begin{aligned} |IMK\rangle = & \sqrt{\frac{2I+1}{16\pi^2}} \left\{ \sqrt{2} \Psi_{0,1,K}^I D_{M,0}^I(\theta) + \right. \\ & \left. + \sum_{K'} \frac{\Psi_{K',K}^I}{\sqrt{1+\delta_{K',0}}} \left[ D_{M,K'}^I(\theta) b_{K'}^+ + (-1)^{I+K'} D_{M,-K'}^I(\theta) b_{-K'}^+ \right] \right\} |0\rangle \end{aligned} \quad (4)$$

бу ерда  $D_{M,K'}^I(\theta)$  – умумлашган сферик функция,  $\Psi_{K',K}^I$  – Гамильтон оператори базасига киритилган ротацион банд ҳолатларининг амплитуда аралашув коэффициентлари. Базис ҳолатлари асосий  $|0\rangle$  – вакуум  $b_K^+$  оператор учун.

Шрёдингер тенгламасини

$$(H_{K,v} - \varepsilon_v) \psi_{K,v} = 0 \quad (5)$$

ечиб, мусбат жуфтликлик ротацион ҳолатларни хусусий энергиялари ва тўлқин функцияларини аниқлаймиз.

Ҳолатнинг тўла энергияси қуйидагича топилади:

$$E_v(I) = E_{\text{rot}}(I) + \varepsilon_v(I) \quad (6)$$

Кейинги йилларда олиб борилган тадқиқотларга асосан, Бор–Моттельсон ва Бенгтссон–Фрауендорфлар, ядро ўзагининг айланиш энергиялари қуйи спинларда асосий банд ҳолат энергиялари билан мос тушишини исботлашган. Шунинг учун ўзакнинг инерция параметрларини қуйидаги Харриснинг икки параметрли формула ёрдамида асосий банднинг экспериментал энергиялари асосида аниқлаймиз:

$$E_{\text{rot}}(I) = \frac{1}{2} \mathfrak{I}_0 \omega_{\text{rot}}^2(I) + \frac{3}{4} \mathfrak{I}_1 \omega_{\text{rot}}^4(I) \quad (7)$$

$$\sqrt{I(I+1)} = \mathfrak{I}_0 \omega_{\text{rot}}(I) + \mathfrak{I}_1 \omega_{\text{rot}}^3(I), \quad (8)$$

бу ерда  $\mathfrak{I}_0$  ва  $\mathfrak{I}_1$  ўзакнинг инерция параметрлари бўлиб, уларни аниқлашнинг турли методлари мавжуд.

Ҳисоблашлар  $A=156,158,160$  ядролари учун амалга оширилган. Мазкур изотоплар асосий банд экспериментал энергияларининг  $I \leq 10\hbar$  гача бўлган қийматларидан фойдаланиб, (7) формула ёрдамида кичик квадратлар методи билан инерция параметрлари  $\mathfrak{I}_0$  ва  $\mathfrak{I}_1$  ҳисобланган энергиянинг эксперимент билан мослиги асосида аниқланган. 1-жадвалда биринчи уйғонган ҳолат энергияларининг  $E_{2^+}$  ва квадруполь моментларининг экспериментал қийматлари  $Q_0$  ҳамда инерция параметрлари  $\mathfrak{I}_0$  ва  $\mathfrak{I}_1$  нинг ҳисобланган қийматлари келтирилган. Изотопларда нуклонлар сони  $A$  ни қиймати ортиб боргани сари  $\mathfrak{I}_0$  ҳам монотон ортиб боради. Монотон бўлмаган боғланишни  $\mathfrak{I}_1$  учун кузатиш мумкин. Олинган натижалардан шуни кўриш мумкинки, ядроларининг деформация даражаси қанча юқори бўлса, яъни квадруполь моменти қанча юқори бўлса,  $\mathfrak{I}_0$  параметр шунча юқори ва биринчи уйғонган ҳолатининг энергия қиймати эса шунча паст бўлади.

### 1-жадвал

**Ҳолат энергияларини ҳисоблашда фойдаланилган модель параметрлари:**

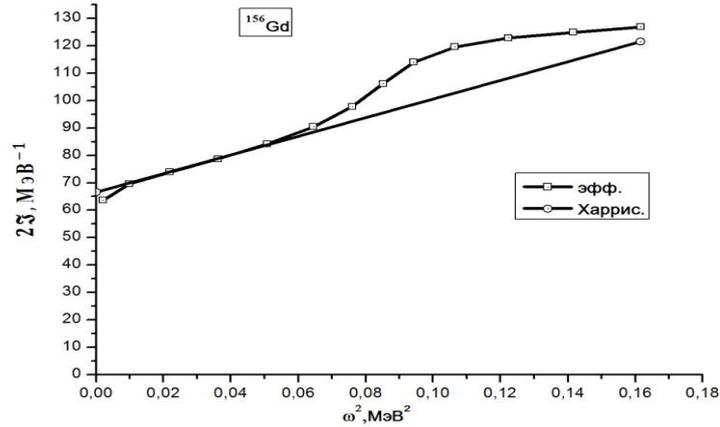
$E_{2^+}$  –изотопларнинг уйғонган биринчи  $I^\pi = 2^\pi$  ҳолатининг энергияси;

$Q_0$  – ядронинг квадруполь моменти;  $\mathfrak{I}_0, \mathfrak{I}_1$  – айланувчи ўзакнинг инерция параметрлари

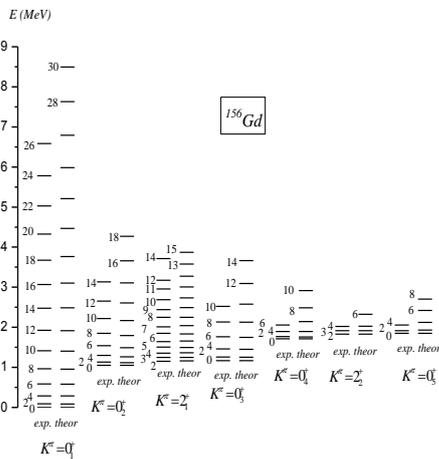
A	$\mathfrak{I}_0, \text{МэВ}^{-1}$	$\mathfrak{I}_1, \text{МэВ}^{-3}$	$E_{2^+} (\text{кэВ})$	$Q_0, \text{е Фм}^2$
156	33.33	169.47	88.97	687
158	37.52	107.00	79.51	703(4)
160	39.724	83.488	75.26	722(29)

1-расмда  $^{156}\text{Gd}$  изотопининг  $\mathfrak{I}_{\text{эфф}}(I)$  ва  $\mathfrak{I}(I) = \mathfrak{I}_0 + \mathfrak{I}_1\omega^2(I)$  ларни бурчак айланиш частотаси квадрати  $\omega_{\text{rot}}^2(I)$  га боғлиқлик графиклари келтирилган. Бурчак айланиш частотаси юқори қийматларида улар орасидаги фарқ борлиги, яъни ноадиабатиклик кузатилади. Худди шундай манзарани  $^{158,160}\text{Gd}$  ядроларида ҳам кўриш мумкин. Бу ноадиабатикликларни тушунтириш учун асосий ва барча экспериментда маълум бўлган ротацион бандлар ҳолатлари билан Кориолис аралашувини ҳисобга олиб феноменологик модель ёрдамида ҳисоблашлар амалга оширилган. Кориолис аралашувида иштирок этаётган барча адиабатик бандларнинг инерция параметрларини бир хил деб, юқорида аниқланган қийматга тенг деб олинган.

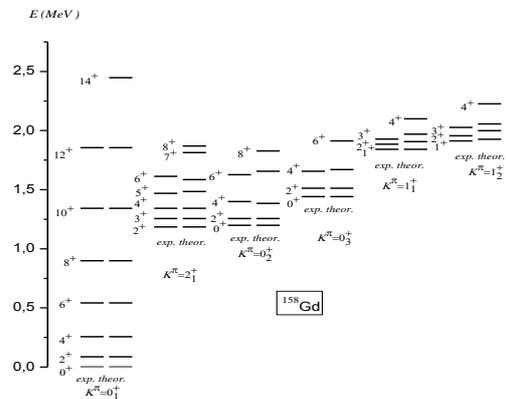
Тадқиқотда модель Гамильтон операторини ҳолатлар базасига  $A=156$  изотопи учун асосий  $(0_1^+)$ , бешта  $K^\pi = 0^+$ , иккита  $K^\pi = 2^+$  ва ўн бешта  $K^\pi = 1_v^+$ ,  $A=158$  изотопи учун асосий  $(0_1^+)$ , иккита  $K^\pi = 0^+$ , битта  $K^\pi = 2^+$  ва учта  $K^\pi = 1_v^+$ ,  $A=160$  изотопи учун асосий  $(0_1^+)$ , иккита  $K^\pi = 0^+$ , битта  $K^\pi = 2^+$



1-расм. Инерция моменти  $\mathcal{I}_{эфф}(I)$  ва  $\mathcal{I}(I)$  ларни бурчак айланиш частотаси квадрати  $\omega_{rot}^2(I)$  га боғлиқлиги.



2-расм.  $^{156}\text{Gd}$  изотопининг назарий ва эксперимент энергия қийматларини таққослаш.



3-расм.  $^{158}\text{Gd}$  изотопининг назарий ва эксперимент энергия қийматларини таққослаш.

ва ўн битта  $K^\pi = 1_1^+$  ротация бандлари киритилган.  $^{156}\text{Gd}$  ядроси учун Гамильтон оператори  $(23 \times 23)$  ўлчамли,  $^{158}\text{Gd}$  учун Гамильтон оператори  $(7 \times 7)$  ўлчамли,  $^{160}\text{Gd}$  учун Гамильтон оператори  $(15 \times 15)$  ўлчамли матрицалар кўринишига эга бўлиб, уларни сонли метод билан диагоналлаштирилиб, ротация банд ҳолатларини энергия ва тўлқин функциялари ҳисобланган.

2 ва 3 расмларда  $^{156,158}\text{Gd}$  ядроларининг ротацион ҳолатлари ҳисобланган энергиялари келтирилган ва эксперимент қийматлари билан таққосланган. Таққослашлардан кўриниб турибдики биз фойдаланган модель ўрганилган ядроларнинг уйғонган ҳолатлар энергиялари эксперимент қийматларини яхши аниқликда ҳисоблай олади.

Расмлардан кўриниб турибдики  $^{156}\text{Gd}$  изотопида  $K^\pi = 0_2^+$  банд  $K^\pi = 2_1^+$  бандга нисбатан пастда жойлашган ва бу икки банд  $K^\pi = 0_3^+$  билан жуда яқин

жойлашган.  $^{158}\text{Gd}$  ва  $^{160}\text{Gd}$  изотопларида аксинча  $K^\pi = 2_1^+$  банд  $K^\pi = 0_2^+$  банддан пастда ва бир-бирига яқин жойлашган.

Асосий банд ( $0_1^+$ ) нинг юқори спинли ҳолатларида назария ва эксперимент орасида тафовут ортиб бориши кузатилган. Бу айланма ҳаракат бурчак частотаси юқори бўлганда, ядронинг айланишини унинг ички структурасига таъсирини ҳисобга олиш зарурлиги туфайли бўлиши мумкин.

Гадолиний  $^{156}\text{Gd}$  изотопи  $K^\pi = 2_1^+$  банднинг  $\psi_{K',K}^I$  амплитуда аралашув коэффициентларини қийматлари 2-жадвалда келтирилган. Жадвалда банднинг фақатгина  $K^\pi = 1_1^+$  компонентаси  $\psi_{1,K}^I$  гина киритилган. Чунки бандларнинг қолган  $\psi_{1_v,K}^I$  компоненталарини қуйидаги формула ёрдамида аниқлаш мумкин:

$$\psi_{1_v,K}^I = \psi_{1,K}^I \frac{\omega_{1_1} - \omega_K}{\omega_{1_v} - \omega_K} \quad (9)$$

Жадвалдан кўришиб турибдики, юқорида муҳокама қилинган бандларнинг бош энергиялари қанча яқин бўлса, уларнинг Кориолис аралашуви шунча юқори бўлади.  $K^\pi = 2_1^+$ ,  $0_2^+$  ва  $0_3^+$  бандларнинг бош энергиялар яқин бўлганлиги учун уларнинг Кориолис аралашуви коэффициентлар ҳам сезиларли микдордаги қийматларга эга бўлади.

## 2-жадвал

$^{156}\text{Gd}$  изотопини  $K^\pi = 2_1^+$  банд ҳолатлари  $\psi_{K2_1^+}^I$  амплитуда аралашув коэффициентлари

$I$	$K$							
	$0_1^+$	$0_2^+$	$0_3^+$	$0_4^+$	$0_5^+$	$1_1^+$	$2_1^+$	$2_2^+$
2	0.0021	0.0954	-0.0144	-0.0076	-0.0029	-0.0116	-0.9949	-0.0005
3	-	-	-	-	-	-0.0209	-0.9987	-0.0013
4	0.0052	0.2667	-0.0352	-0.0191	-0.0073	-0.0168	-0.9620	-0.0014
5	-	-	-	-	-	-0.0328	-0.9967	-0.0032
6	0.0070	0.3819	-0.0460	-0.0253	-0.0096	-0.0164	-0.9217	-0.0019
7	-	-	-	-	-	-0.0424	-0.9945	-0.0053
8	0.0078	0.4465	-0.0510	-0.0283	-0.0108	-0.0149	-0.8920	-0.0021
9	-	-	-	-	-	-0.0504	-0.9921	-0.0076
10	0.0082	0.4841	-0.0536	-0.0298	-0.0114	-0.0136	-0.8721	-0.0022
11	-	-	-	-	-	-0.0572	-0.9898	-0.0097
12	0.0085	0.5078	-0.0551	-0.0307	-0.0117	-0.0124	-0.8585	-0.0023
13	-	-	-	-	-	-0.0630	-0.9875	-0.0119
14	0.0087	0.5237	-0.0560	-0.0313	-0.0119	-0.0115	-0.8489	-0.0023
15	-	-	-	-	-	-0.0682	-0.9854	-0.0139
16	0.0088	0.5350	-0.0566	-0.0317	-0.0121	-0.0108	-0.8418	-0.0024
17	-	-	-	-	-	-0.0727	-0.9833	-0.0158
18	0.0089	0.5435	-0.0571	-0.0320	-0.0122	-0.0102	-0.8363	-0.0024
19	-	-	-	-	-	-0.0768	-0.9812	-0.0177
20	0.0089	0.5500	-0.0574	-0.0322	-0.0123	-0.0097	-0.8321	-0.0024

Диссертациянинг «<sup>156,158,160</sup>Gd изотопларининг электр характеристикалари» деб номланган иккинчи бобида олдинги бобда кенг ёритилган феноменологик модель ёрдамида ҳисобланган, келтирилган ва таҳлил қилинган тўлқин функциясидан фойдаланиб, бандларнинг Кориолис ўзаро таъсирлашувини ҳисобга олиб, ротацион бандларнинг ичидаги ва бандлар орасидаги электр квадруполь ўтиш эҳтимолликлари таҳлил қилинган.

Маълум бошланғич  $\langle I_i K_i |$  ҳолатдан  $\langle I_f 0_1 |$  асосий бандни  $I_f$  спинли ҳолатига келтирилган  $E2$  – ўтиш эҳтимоллиги учун ифода биз фойдаланаётган модель доирасида қуйидаги кўринишга эга:

$$B(E2; I_i K_i \rightarrow I_f 0_1) = \left\{ \sqrt{\frac{5}{16\pi}} eQ_0 \left[ \Psi_{0_1,0_1}^{I_f} \Psi_{0_1,K_i}^{I_i} C_{I_i,0;20}^{I_f 0} + \sum_n \Psi_{K_n,0_1}^{I_f} \Psi_{K_n,K_i}^{I_i} C_{I_i,K_n;20}^{I_f K_n} \right] + \sqrt{2} \left[ \Psi_{0_1,0_1}^{I_f} \sum_n \frac{(-1)^{K_n} m_{K_n} \Psi_{K_n,K_i}^{I_i} C_{I_i,K_n;2-K_n}^{I_f 0}}{\sqrt{1+\delta_{K_n,0}}} + \Psi_{0_1,K_i}^{I_i} \sum_n \frac{m_{K_n} \Psi_{K_n,0_1}^{I_f} C_{I_i,0;2K_n}^{I_f K_n}}{\sqrt{1+\delta_{K_n,0}}} \right] \right\}^2 \quad (10)$$

$m_{K_n} = \langle 0_1 | \hat{m}(E2) K_n | \rangle$  – асосий банд ( $0_1^+$ ) ва (1) Гамильтон операторига киритилган қолган  $K_n$  – бандлар ички тўлқин функциялари орасида  $E2$  – оператор матрица элементлари,  $C_{I_i K; 2K_i + K_f}^{I_f K_f}$  – Клебш-Гордан коэффицентлари.

Ротацион ҳолатларнинг  $I = 2$  спинли ҳолатлари учун Кориолис ўзаро таъсири жуда кичик бўлиб,  $E2$  – ўтишларда муҳим роль ўйнамайди. Шунинг учун  $m_{0_i}$  ва  $m_{2_i}$  параметрларнинг сонли қийматларини  $E2$  – ўтиш келтирилган эҳтимоллигини адиабатик формуласи ёрдамида  $B(E2; 2K_i \rightarrow 00_1)$  нинг эксперимент қийматларидан фойдаланиб аниқланди.

Адиабатик формула юқоридаги параметрларни абсолют қийматини аниқлайди, лекин ишорасини аниқлаб бўлмайди.

$K^\pi = 1_v^+$  ротацион банд ҳолатларидан асосий бандга  $E2$  – ўтишларнинг келтирилган эҳтимолликларининг эксперимент қийматлари мавжуд эмас. Шунинг учун  $m_{1_v}$  параметрларнинг сонли қийматларини ҳамда  $m_{2_i}$  параметрларни ишоралари  $K^\pi = 2_1^+$  банднинг тоқ спинли ҳолатларидан асосий банд ҳолатига  $E2$  – ўтишлар келтирилган эҳтимолликларининг нисбати  $R_{I_2_1}$  учун маълум бўлган эксперимент натижаларга назарий қийматларни мос келишига асосланиб аниқланди. Барча ҳолларда  $m_{1_v}$  параметрлар бир-хил қийматга эга деб қаралди: яъни  $m_1 = m_{1_v}$ .  $m_{0_i}$  параметрларнинг ишоралари  $K^\pi = 0_2^+ -$ ,  $0_3^+ -$  ва  $K^\pi = 2_1^+ -$  бандларнинг жуфт спинли ҳолатларидан  $E2$  – ўтиш эҳтимолликларининг эксперимент ва назарий натижалар билан ўзаро мос келишига асосланиб аниқланди.

3-жадвалда  $^{156}\text{Gd}$   $K^\pi = 2_1^+, 0_2^+ -$  ва  $0_3^+$  банд ҳолатларидан асосий банд ҳолатларига келтирилган эҳтимолликлар  $E2$  – ўтишлар учун бизни ҳисоблаган қийматларимиз берилган ва мос эксперимент натижалар келтирилган. Ўтиш эҳтимолликларининг экспериментал қийматлари  $K^\pi = 2_1^+$ , банд ҳолатлари учун  $I=5$  спингача,  $K^\pi = 0_2^+$  ва  $K^\pi = 0_3^+$  бандлар учун  $I=4$  гача бўлган ҳолатлар учун маълум. Таъкидлаш лозимки, кўп ҳолларда экспериментда олинган натижаларнинг хатоликлари катта. Бизни  $2^+0_2 \rightarrow 4^+0_1$  ва  $4^+0_2 \rightarrow 6^+0_1$  ўтишлар учун ҳисоблаган  $B(E2)$  қийматлари экспериментдан анча кичик. Бундай баъзи номуносивликка қарамай умуман олганда бизни ҳисоблаган назарий қийматларимиз эксперимент билан мослигини қониқарли деб ҳисоблаш мумкин.

### 3-жадвал

$^{156}\text{Gd}$  изотопи  $K^\pi = 2_1^+ -$ ,  $0_2^+ -$   $0_3^+ -$  банд ҳолатларидан  $E2$  – ўтишларнинг келтирилган эҳтимолликлари

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$B(E2), e^2 \text{Фм}^4$			
		Эксперимент	Эксперимент	Эксперимент	Назария
$2^+2_1$	$0^+0_1$	222(11)	233(8)	175(35)	237
$2^+2_1$	$2^+0_1$	355(19)	361(13)	255(55)	354
$2^+2_1$	$4^+0_1$	32(3)	38(2)	40(9)	43
$3^+2_1$	$2^+0_1$	364(17)	364(70)	385(75)	379
$3^+2_1$	$4^+0_1$	280(60)	255(50)	255(55)	264
$4^+2_1$	$2^+0_1$	78(9)	90(+20, -25)	95(25)	151
$4^+2_1$	$4^+0_1$	460(50)	509(+115, -145)	565(155)	346
$5^+2_1$	$4^+0_1$	295	399(+1000, -250)	500(380)	283
$5^+2_1$	$6^+0_1$	410(40)	549(+1700, -400)	745(565)	369
$2^+0_2$	$0^+0_1$	31.6(18)	31.4(30)	43(15)	51
$2^+0_2$	$2^+0_1$	164(16)	165(15)	235(75)	106
$2^+0_2$	$4^+0_1$	181(17)	205(20)	275(95)	33
$4^+0_2$	$2^+0_1$	61(7)	65(+25, -35)	79(32)	81
$4^+0_2$	$4^+0_1$	140(13)	–	159(61)	162
$4^+0_2$	$6^+0_1$	91(14)	105(+35, -55)	130(50)	5
$2^+0_3$	$0^+0_1$	15.4(14)	15.4(2)	11(4)	25
$2^+0_3$	$2^+0_1$	$8.4^{+24}_{-19}$	21(+3, -2)	4.3(17)	57
$2^+0_3$	$4^+0_1$	210(25)	215(25)	153(58)	153
$4^+0_3$	$2^+0_1$	15(4)	–	–	26
$4^+0_3$	$4^+0_1$	230(20)	–	–	75
$4^+0_3$	$6^+0_1$	370(30)	–	–	167

4-жадвалда  $^{156}\text{Gd}$  учун келтирилган ўтиш эҳтимолликлари нисбати  $R_{IK} = B(E2; IK \rightarrow I_1 0_1) / B(E2; IK \rightarrow I_2 0_1)$  нинг  $K_i^\pi = 2_1^+, 0_2^+$  ва  $0_3^+$  банд ҳолатларидан асосий банд ҳолатларига ўтишлардан назарий ва эксперимент қийматлари берилган ва улар орасидаги жуда яхши мосликни кузатиш мумкин. Бу жадвалда  $R_{IK}$  нинг адиабатик назария асосида ҳисобланган қийматлари ҳам келтирилган. Нисбат  $R_{IK}$  нинг адиабатик ва бизни ҳисоблаган назарий қийматлар орасидаги фарқ хатто спиннинг кичик қийматларида ҳам каттадир. Бу  $K_i^\pi = 2_1^+, 0_2^+$  ва  $0_3^+$  банднинг бош энергиялари бир-бирига жуда яқин жойлашганлиги билан боғлиқдир. Нисбат  $R_{IK}$  нинг  $K^\pi = 0_2^+$  банд ҳолатларидан ўтишлар учун қийматлари бошқа бандларга нисбатан кескинроқ фарқ қилади. Бунинг сабаби  $K^\pi = 0_2^+$  банднинг коллективлиги энергияси бўйича яқин жойлашган  $K^\pi = 2_1^+$  банд коллективлигига нисбатан сезиларли кичик эканлигидир.

Худди шундай ҳисоблашлар ва эксперимент натижалар билан таққослашлар  $^{158,160}\text{Gd}$  изотоплари учун ҳам амалга оширилган. Таққослашлар натижасида электр характеристикаларида намоён бўладиган ноадиабатиклик таҳлил қилинган.

#### 4-жадвал

$^{156}\text{Gd}$  изотопи  $K_i^\pi = 2_1^+, 0_2^+$  – ва  $0_3^+$  – ротацион банд ҳолатларидан асосий банд ҳолатларига  $E2$  – ўтиш эҳтимоллик нисбатлари  $R_{IK} = B(E2; IK \rightarrow I_1 0_1) / B(E2; IK \rightarrow I_2 0_1)$

$IK$	$I_1 0_1$	$I_2 0_1$	$R_{IK}$ (Эксперимент)	Назария	Алага қоидаси
$2^+ 2_1$	$2^+ 0_1$	$0^+ 0_1$	1.55(1) 1.75(55) 1.54(5) 1.56(17)	1.50	1.43
$2^+ 2_1$	$4^+ 0_1$	$2^+ 0_1$	0.106(3) 0.101(6) 0.105(3)	0.122	0.05
$3^+ 2_1$	$4^+ 0_1$	$2^+ 0_1$	0.70(3) 0.77(15) 0.56(21) 0.67(18)	0.70	0.40
$4^+ 2_1$	$4^+ 0_1$	$2^+ 0_1$	6.03(12) 5.9(6) 5.38(29) 5.81(24)	2.29	2.95
$4^+ 2_1$	$6^+ 0_1$	$4^+ 0_1$	0.046(8) 0.030(6)	0.33	0.09
$5^+ 2_1$	$6^+ 0_1$	$4^+ 0_1$	1.44(15) 1.40(16) 1.41(16) 1.45(19)	1.30	0.57

6 <sup>+2</sup> <sub>1</sub>	6 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	5.9(14) 3.7(3)	2.05	3.71
7 <sup>+2</sup> <sub>1</sub>	8 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	6 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2.0(12)	1.92	0.67
9 <sup>+2</sup> <sub>1</sub>	10 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	8 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2.5(12)	2.57	0.73
2 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	0 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	5.50(38) 5.06(51) 5.26(25)	2.10	1.43
2 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	1.18(8) 1.10(11) 1.17(5)	0.31	1.8
4 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2.20(17) 2.30(22) 2.94(35)	2.01	0.91
4 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	6 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	0.71(33) 0.65(9) 0.7(3)	0.2	1.75
6 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	6 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	1.59(50) 1.2(8)	1.76	0.81
8 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	8 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	6 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	1.98(22)	1.32	0.59
10 <sup>+0</sup> <sub>2</sub>	10 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	8 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	18.5 (13) >1.7	0.95	0.74
2 <sup>+0</sup> <sub>3</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	0 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	3.94(18) 0.55(17) 0.50(15)	2.30	1.43
2 <sup>+0</sup> <sub>3</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	3.58(12) 25(8) 28(8)	2.69	1.8
4 <sup>+0</sup> <sub>3</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	15(4) 16(5)	2.84	0.91
4 <sup>+0</sup> <sub>3</sub>	6 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	1.6(2) 3.0(3)	2.23	1.75
3 <sup>+2</sup> <sub>2</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	1.41(12)	0.95	0.40
4 <sup>+2</sup> <sub>2</sub>	4 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	2 <sup>+0</sup> <sub>1</sub>	7.19(102)	4.53	2.95

Диссертациянинг «<sup>156,158,160</sup>Gd изотопларининг магнит характеристикалари» деб номланган учинчи бобида феноменологик модель доирасида <sup>156,158,160</sup>Gd ядролар магнит характеристикалари – мультиполь аралашув коэффициенти  $\delta(E2/M1)$ , магнит диполь ўтишлар келтирилган эҳтимолликлари  $B(M1)$  ва асосий бандлар уйғонган ҳолатларини магнит моментлари  $\mu(I^+0_1)$ га ротацион бандларнинг Кориолис аралашуви қандай таъсир қилишини таҳлил қилинган. Хусусан ядронинг айланма ҳаракатини магнит характеристикаларига таъсири ўрганилган.

Магнит диполь келтирилган эҳтимолликларини  $I_i K_i$  уйғонган ҳолатдан асосий банднинг  $I_f 0_1$  ҳолатига ўтишлари феноменологик модель асосида куйидаги кўринишга эга:

$$B(M1; I_i K_i \rightarrow I_f 0_1) = \left( \frac{3}{4\pi} \right) \times \left( \sum_{K_1=1}^2 (g_{K_1} - g_R) K_1 \Psi_{K_1, K}^I \Psi_{K_1, 0_1}^{I'} C_{IK_1; 10}^{I'K_1} + \frac{\sqrt{6}}{10} \sum_{\nu} m'_{1\nu} (\Psi_{0_1, 0_1}^{I'} \Psi_{1\nu, K}^I - \Psi_{1\nu, 0_1}^I \Psi_{0_1, K}^{I'}) C_{11; 1-1}^{I'0} \right)^2, \quad (11)$$

бу ерда  $m'_{1\nu} = \langle 0_1^+ | \hat{m}(M1) | 1\nu^+ \rangle$  – асосий ( $0_1^+$ ) ва  $K^\pi = 1\nu^+$  бандлар ички тўлқин функциялари орасидаги матрица элементи;  $g_K - K \neq 0$  бандларнинг ички  $g$ -факторлари;  $g_R = Z/A$  – гиромангнит фактори бўлиб, ядронинг айланиши билан боғлиқ. Деформацияланган Ноёб Ер ва Трансуран элементлар области ядролари учун гиромангнит нисбатларининг систематикасига кўра  $g_R \approx 0.4 \pm 0.1$ .

$M1$ –ўтишларда  $m'_{1\nu}$  – параметр иштирок этган қисми асосий ролни ўйнайди. Бу параметрларни сонли қийматларини  $K^\pi = 1\nu^+$  – бандларнинг бош ҳолатларидан асосий банднинг бош ҳолатига бўлган  $M1$ –ўтишларнинг эксперимент қийматлари  $B^{эксн.}(M1; 11\nu \rightarrow 00_1)$  дан фойдаланиб адиабатик формула ёрдамида аниқланган.

Ҳисобланган  $\delta(E2/M1)$  нинг  $^{156}\text{Gd}$ ,  $^{160}\text{Gd}$  изотоплари учун қийматлари мос равишда 5 ва 6- жадвалларда келтирилган ҳамда эксперимент маълумотлар билан таққосланган. Тадқиқ қилинаётган  $^{156,160}\text{Gd}$  изотопларда  $\delta(E2/M1)$  нинг  $K^\pi = 2_1^+$  банднинг ҳолатларидан ўтишлар учун экспериментал қийматлари,  $0_2^+$  –,  $0_3^+$  – банд ҳолатларидан ўтишларга нисбатан анча катта. Бу  $2_1^+$  банд ҳолатларидан ўтишлар учун  $B(E2)$  ни қиймати  $0_2^+$  –,  $0_3^+$  – бандлардан ўтишларга нисбатан ҳамма вақт катта бўлиб, ўз навбатида  $2_1^+$ ,  $0_2^+$  –,  $0_3^+$  – бандлардан ўтишлар учун  $B(M1)$  қийматлари бир бирига яқинлиги билан боғлиқ.

Ҳисобланган мультиполь аралашув коэффициентларини ишоралари эксперимент билан мос келади. Лекин кўп ҳолларда  $\delta_{наз.}$  абсолют қийматлари экспериментдан кичик. Шунга қарамай бизни ҳисоблаш натижаларимизни уларнинг эксперимент қийматлари  $\delta_{эксн.}$  ни хатоликлари доирасида мослигини қониқарли деб ҳисоблаш мумкин.

Жадвалларда  $K^\pi = 1\nu^+$  ҳолатларидан асосий банд ҳолатларига ўтишлар учун мультиполь аралашув коэффициентларини аниқланган адиабатик қийматлари  $\delta_{адиаб.}$  келтирилган. Жадвалдан  $\delta_{наз.}$  ва  $\delta_{адиаб.}$  ларнинг қийматлар кўп фарқ қилмаслигини кўриш мумкин. Адиабатик модель доирасида  $K^\pi = 0_n^+$  – ва  $K^\pi = 2^+$  – бандларнинг ҳолатларидан асосий банд ҳолатларига  $M1$ –ўтишлар таъқиқланган.

$^{156}\text{Gd}$  ядроси учун мультиполь аралашинш коэффициентлари  $\delta(E2/M1)$ . Бу ерда  $\langle E2 \rangle_{if}$  ва  $\langle M1 \rangle_{if}$  —  $E2$  – ва  $M1$  – ўтишларнинг мос равишда келтирилган матрица элементлари,  $E_\gamma$  – ўтиш энергияси

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$E_\gamma, \text{МэВ}$	$\langle E2 \rangle_{if}$ е $\Phi\text{М}^2$	$\langle M1 \rangle_{if} \mu_N$	$\delta_{\text{эсп.}}$	$\delta_{\text{наз.}}$	$\delta_{\text{адиаб.}}$
22 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.0652	-18.81	0.0412	-16(5)	-4.1	-
32 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.159	19.46	-0.0313	-11.8(+6,-7)	-6.0	-
32 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	0.9598	-16.23	0.0260	-12(+13,-5)	-5.0	-
42 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.0672	-18.60	0.0639	+4.0(+9,-16)	-2.6	-
52 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.2187	-16.83	0.0488	$\delta > 7$	-3.5	-
52 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	0.922	19.21	-0.0417	-	-3.5	-
62 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	1.060	17.00	-0.063	$\delta < -0.8$ ёки $\delta > 2.5$	-2.4	-
72 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	1.2648	15.06	-0.0634	-	-2.5	-
82 <sub>1</sub>	80 <sub>1</sub>	1.0457	15.84	-0.0584	$\delta < -0.6$ ёки $\delta > 1.6$	-2.4	-
92 <sub>1</sub>	80 <sub>1</sub>	1.2843	-13.73	0.0758	$\delta < -0.8$ 0.39(6)	-1.9	-
20 <sub>2</sub>	20 <sub>1</sub>	1.0405	10.31	-0.1011	+5.9(+14,-28)	-0.9	-
40 <sub>2</sub>	40 <sub>1</sub>	1.0106	-12.75	0.2176	-	0.49	-
11 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.876	14.66	0.5503	+0.41(+25, -14) +0.35(4)	0.41	0.37
11 <sub>2</sub>	20 <sub>1</sub>	1.938	14.61	-0.3812	-0.55(3)	-0.63	-0.55
11 <sub>3</sub>	20 <sub>1</sub>	2.0977	14.49	-0.1888	-1.2(2) ёки -1.08(+0.03, -0.22)	-1.34	-1.20
11 <sub>4</sub>	20 <sub>1</sub>	2.1807	14.44	-0.3579	-0.66(+0.06,-0.08)	-0.73	-0.66
20 <sub>3</sub>	20 <sub>1</sub>	1.1691	-7.53	-0.0539	0.38(6)	1.4	-
40 <sub>3</sub>	40 <sub>1</sub>	1.1741	-8.65	-0.0934	-	0.91	-

$^{160}\text{Gd}$  ядроси учун мультиполь аралашинш коэффициентлари  $\delta(E2/M1)$ . Бу ерда  $\langle E2 \rangle_{if}$  ва  $\langle M1 \rangle_{if}$  –  $E2$ – ва  $M1$ – ўтишларнинг мос равишда келтирилган матрица элементлари,  $E_\gamma$  – ўтиш энергияси

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$E_\gamma, \text{МэВ}$	$\langle E2 \rangle_{if}$ е $\Phi \text{М}^2$	$\langle M1 \rangle_{if} \mu_N$	$\delta_{\text{эксн.}}$	$\delta_{\text{эксн.}}$	$\delta_{\text{наз.}}$	$\delta_{\text{адиаб.}}$
22 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	0.9134	-18.23	-0.050	-0.45(+4,-5)	-72(+35,-∞)	2.8	-
32 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	0.9822	18.71	0.056	+47(+18,-10)	+47(+18,-10)	2.7	-
32 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	0.8089	14.39	0.049	0.11(3)	-11.7(+16,-23)	1.98	-
42 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	0.8995	-19.70	-0.110	+21(+21,-7)	+21(+21,-7)	1.34	-
52 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.0125	16.55	0.089	+15(+17,-6)	+49(+34,-14)	1.57	-
52 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	0.746	16.88	0.082	+8(+13,-4)	+0.03(3) ёки -22(+11,-800)	1.28	-
62 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	0.8782	-19.16	-0.175	-	+30 < $\delta$ < -1.5	0.80	-
20 <sub>2</sub>	20 <sub>1</sub>	1.3611	-4.47	0.108	0.00(8)	-0.02(4) ёки +2.46(+30,-25)	- 0.46	-
40 <sub>2</sub>	40 <sub>1</sub>	1.3130	-6.48	0.190	+0.28(+34,-12)	+0.57(+17,-44)	- 0.37	-
11 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.4934	7.48	0.010	+1.34(+16,-6)	+0.3 < $\delta$ < 24.6	9.31	9.53
11 <sub>1</sub>	22 <sub>1</sub>	0.5801	-6.098	-0.003	+0.28(+25,-18)	+0.45(+50,-24) ёки +2 < $\delta$ < -11	11.8	-
21 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.5114	-0.776	0.064	-	+0.24(5) ёки +5.8(+24,-13)	- 0.15	2.11
31 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.5897	-5.316	0.008	-	+0.9(5)	-9.0	-4.15
31 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.4167	5.538	0.007	-	+1.5(5)	9.68	6.75
20 <sub>3</sub>	20 <sub>1</sub>	1.5235	5.213	-0.081	-	0.83(+10,-15) ёки -3.4(+8,-11)	- 0.82	-
20 <sub>3</sub>	32 <sub>1</sub>	0.5414	-1.676	-0.001	-	+0.06(5) ёки -4.3(+13,-29)	8.4	-

## 7- жадвал

$^{156}\text{Gd}$  изотопи  $K^\pi = 2_1^+, 0_3^+$  банд ҳолатларидан асосий ( $0_1$ ) банд ҳолатларига  $M1$  – ўтишлар келтирилган эҳтимолликлари

$IK_i$	$E_I$	$E_\gamma$	Эксперимент		Назария
			$B(M1)W.м.$	$B(M1) (\mu_N)$	$B(M1) \mu_N$
$2^+2_{2_1}$	1154	1065.2	$6 \cdot 10^{-5}(4)$	$1.07 \cdot 10^{-4}(72)$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
$3^+2_{2_1}$	1248	959.8	$6 \cdot 10^{-5}(4)$	$1.07 \cdot 10^{-4}(72)$	$6.76 \cdot 10^{-4}$
		1159	$1.4 \cdot 10^{-4}(3)$	$2.51 \cdot 10^{-4}(54)$	$9.80 \cdot 10^{-4}$
$4^+2_{2_1}$	1355	1067.2	$0.014(+7, -8)$	$2.51 \cdot 10^{-3}(+1.25, -1.43)$	$4.10 \cdot 10^{-3}$
$2^+0_3$	1258	1169.1	$0.0078(+9, -7)$	$1.40 \cdot 10^{-2}(+16, -13)$	$2.9 \cdot 10^{-3}$

## 8- жадвал

$^{158}\text{Gd}$  изотопи  $K^\pi = 0_2^+, 0_3^+$  ва  $2_1^+$  банд ҳолатларидан асосий банд ҳолатларига  $M1$  – ўтишлар келтирилган эҳтимолликлари

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$B(M1), \mu_N$	
		Эксперимент	Назария
$22_1$	$20_1$	$0.00032 (13)$	$0.0001$
$42_1$	$40_1$	$0.00077 (+ 111, -9)$	$0.0028$
$20_2$	$20_1$	$0.00079 (11)$	$0.0019$
$40_2$	$40_1$	$0.00174 (+ 348, -25)$	$0.0033$
$20_3$	$20_1$	$0.0029 (7)$	$0.0020$

Биз фойдаланаётган модель доирасида бундай ўтишлар Кориолис аралашуви сабабли вибрацияли ҳолатлар тўлқин функцияларида  $1_v^+$  – компоненталарини вужудга келиши билан тушунтирилади. Асосий ротацион банд ҳолатлари магнит моментларини  $^{156,158}\text{Gd}$  изотоплар учун биз ҳисоблаган қийматлари 7 ва 8- жадвалларда келтирилган. Магнит моменти  $\mu(I^+0_1)$  назарий ва эксперимент қийматлар билан мослигини яхши деб эътироф этиш мумкин.

## ХУЛОСА

Биринчи марта  $^{156,158,160}\text{Gd}$  изотоплари учун феноменологик модель доирасида экспериментда аниқланган барча мусбат жуфтлилик ротацион банд ҳолатларини Кориолис аралашувини ҳисобга олиб қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Экспериментда маълум ва инерция моментлари бир хил бўлган ротацион бандларнинг Кориолис аралашувини ҳисобга олувчи феноменологик модель гамилтонианини ноёб Ер элементлари жуфт-жуфт ядролари мусбат жуфтлилик ҳолатлари энергия спектри ва электромагнит хусусиятларини янада яхши талқин этишнинг такомиллашган янги параметрлаш усули таклиф этилди.

2.  $^{156,158,160}\text{Gd}$  изотопларининг қуйи жойлашган  $K^\pi = 0^+$  банд ҳолатларидан электр квадруполь ўтишларнинг келтирилган эҳтимолликлари нисбатларидаги ноадиабатиклик кескинроқ намоён бўлиши ва бунинг сабаби  $K^\pi = 0^+$  бандларнинг коллективлиги энергияси бўйича яқин жойлашган  $K^\pi = 2^+$  банд коллективлигига нисбатан сезиларли кичик эканлиги кўрсатилди.

3. Экспериментда кузатилган  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  банд ҳолатларини магнит хусусиятлари – мультиполь аралашув коэффициентини  $\delta(E2/M1)$  ҳамда асосий банд ҳолатларига  $M1$ -ўтишлар келтирилган эҳтимолликларидаги  $K$  – таъқиқланган ўтишлар, Кориолис аралашуви туфайли  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  банд ҳолатларида вужудга келадиган  $K^\pi = 1_v^+$  бандлар компонентларини натижаси эканлиги билан тушунтирилди.

4. Гадолийнинг  $A=156,158,160$  изотоплари  $K^\pi = 1_v^+$  бандларига таълуқли бўлган модель энергетик ва электромагнит параметрларини таққослаш натижасида  $^{158}\text{Gd}$  изотопида характеристикалари  $K^\pi = 1^+$  бўлган қўшимча ҳолатлар мавжуд бўлишлиги назарий асосда башорат қилинди.

5.  $K^\pi = 0^+$ ,  $K^\pi = 2^+$  ва  $K^\pi = 1^+$  ротацион бандлар ҳолатлари энергияларида ва электромагнит характеристикаларида намоён бўладиган ноадиабатик эффектлар ядро айланма ҳаракати туфайли мазкур бандларнинг Кориолис аралашуви натижаси эканлиги кўрсатилди.

6. Асосий банднинг юқори спинли ҳолатларида энергиянинг назарий ва эксперимент қийматлари орасида фарқ сезиларли бўлиб, спин ортиб бориши билан бу фарқ ортиб боради. Бу факт бурчак частотасининг юқори қийматларида ядро айланишини ички структурага таъсирини эътиборга олиш зарурлигини кўрсатади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
ПРИ НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ» АН РУз**

---

**НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**ЮСУПОВ ЭЛМУРОД КУЧКАРБОВЕВИЧ**

**СВОЙСТВА РОТАЦИОННЫХ УРОВНЕЙ  $A=156,158,160$  ИЗОТОПОВ  
ГАДОЛИНИЯ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ  
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2022**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2021.4.PhD/FM255.**

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно-технологическом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.fti.uz/) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

**Научный руководитель:** **Усманов Пазлитдин Нуритдинович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Саидханов Насир Шакирович**  
доктор физико-математических наук, профессор

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

**Ведущая организация:** **Джизакский государственный педагогический институт**

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 при НПО «Физика-Солнце» АН РУз. Адрес: Ул. Чингиза Айтматова 26. 100084, г.Ташкент, Узбекистан. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./факс: (+99871)235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирован за №\_\_\_\_\_). (Адрес: Ул. Чингиза Айтматова 26. 100084, г. Ташкент, Узбекистан. Физико-технический институт. Тел./факс: (+99871) 235-42-91.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года

(протокол рассылки \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2022 года).

**С.Л. Лутпуллаев**  
председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор

**Ж.С. Ахатов**  
ученый секретарь Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д. т. н., с.н.с

**К.Г. Гуламов**  
председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученых  
степеней, д.ф.-м.н., академик

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** На сегодняшний день в мире собрано множество экспериментальных данных в области изучения структуры ядра, относящихся к физике атомного ядра. Многие из них объясняются с помощью моделей, основанных на предположениях, которые не противоречат друг другу. Последние данные экспериментов для четно-четных деформированных ядер четко указывают на наличие отклонения от правил адиабатической теории. Существенные отклонения от правил адиабатической теории наблюдаются в спектре энергий ротационных полос возбужденных состояний и ветвлении электромагнитных переходов между состояниями ротационных полос. Предсказания адиабатической теории нередко отличаются на порядки величины от данных эксперимента. Эти отклонения, как правило, не поддаются описанию в низжайших порядках теории возмущений по параметрам Кориолисовой связи полос. Поэтому один из основных задач ученых мира занимающиеся теорией структуры ядра является создание и усовершенствование феноменологических моделей, учитывающих влияние кориолисова взаимодействия на свойства ротационных состояний деформированных ядер.

В настоящее время актуальность теоретического исследования свойств возбужденных состояний деформированных ядер редкоземельных элементов обусловлена тем, что до конца не изучены проблемы, связанные с вращательным процессом ядра. В области умеренных спинов описание неадиабатических эффектов возможно в рамках моделей, в которых рассматривается смешивание ограниченного числа состояний, имеющих относительно небольшую энергию возбуждения. Учет связи коллективных полос в рамках подобных моделей проводился многими авторами. Однако во многих случаях они ограничились рассмотрением низкой части спектра энергии и недостаточного числа ротационных полос, участвующих в смешивании. В этой связи актуальным является поиск феноменологических и микроскопических подходов, также расширении возможностей имеющиеся моделей, способных описать спектральные и электромагнитные характеристики состояний в широком диапазоне энергии возбуждения и углового момента.

В нашей Республике уделяется большое внимание развитию ядерной физики, в частности, экспериментальным и теоретическим работам в области физики атомного ядра и элементарных частиц, а также проведению фундаментальных исследований в этом направлении на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и её дальнейшего практического применения, отражены в Стратегии<sup>1</sup> действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг. Выполненные в данной работе исследования непосредственно связаны с проблемами ядерной физики и

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 г.

физики управляемых термоядерных процессов, в том числе ядерной энергетики, что является передним краем современных исследований в мире.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам, утвержденным в государственных нормативных документах, 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 послевузовского образования», в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности».

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии в Республике Узбекистан II: «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** Адиабатическая модель ядра, предложенная Бором и Моттельсоном, относящаяся к области феноменологических моделей, сыграла важную роль в изучении свойств деформированных ядер. Согласно этой модели, нижние состояния возбуждения деформированных ядер связаны с полным вращением аксиально-симметричного ядра в целом. Считается, что ряд состояний с высокими возбуждениями связаны с вибрацией поверхности ядра. Такая простая феноменологическая интерпретация позволила, объяснить многих экспериментальных фактов, и предсказать ряд новых свойств касающиеся деформированным ядрам, и использовалась учеными нашей страны и всего мира, такими как Джолос Р. В. (Россия), Михайлов И. Н. (Россия), Михайлов В. М. (Россия), Нестеренко В. (Россия), Briaņon Ch. (Франция), Квасил Я. (Чехия), Арима А. (Япония), Сафаров Р. Х. (Узбекистан), Шарипов Ш. (Узбекистан), Чориев Б. (Узбекистан), Усманов П. Н. (Узбекистан), Надирбеков М. С. (Узбекистан).

Большой потенциал экспериментального изучения угловых моментов в широком диапазоне ядерных состояний привел к появлению новых направлений в изучении структуры ядра. Недавние результаты эксперимента показали, что есть явные отклонения от адиабатической теории. Большие отклонения от законов адиабатической теории очевидны в энергиях вращательных полос возбужденных состояний и в разветвленных электромагнитных переходах между вращательными полосами. Во многих случаях предсказания адиабатической теории отличаются на несколько процентов, а в некоторых случаях в несколько раз от экспериментальных результатов. Это можно наблюдать в работах следующих авторов: Питц Х.Х. (Германия), Полумба Ф. (Германия), Вессельборг С. (Германия), Зильгес А. (Германия), Апрахамиан А. (США), Лешер С. Р. (США), Говор Л. И. (Россия), Демидов А. М. (Россия), Михайлов И. В. (Россия).

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ и научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа была выполнена в Наманганском инженерно-технологическом институте в рамках фундаментальных научных проектов ОТ-Ф2-75 «Исследование свойств ротационных уровней деформированных ядер сверхтяжелой, трансурановой и редкоземельной области» (2017-2020 гг.), FRGS13 «Динамика возбужденных состояний деформированных ядер в Трансуран и редкоземельные регионы» (2013-2016 гг.).

**Целью исследования** является определение неадиабатичности проявляемых в энергиях и электромагнитных свойствах коллективных состояний четно-четных деформированных ядер редкоземельных элементов.

**Задачи исследования:**

определение эффективного метода для вычисления моментов инерции изотопов  $^{156,158,160}\text{Gd}$ ;

провести расчет теоретических значений энергий вращательных состояний и волновых функций с использованием феноменологической модели, учитывая Кориолисово смешивание экспериментально всеизвестные  $K^\pi = 0^+, 2^+$  и  $1^+$  полос, предполагая, что моменты инерции адиабатических полос одинаковыми;

проведение расчетов приведенных вероятностей внутриволосных и междуполосных  $E2$ –переходов, а также сравнение их с экспериментальными данными;

провести анализ в рамках феноменологической модели магнитных свойств – магнитные моменты,  $g_R$ –факторов, коэффициентов смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$ , внутри волосных и между волосных приведенных вероятностей  $M1$ –переходов ротационных состояний.

анализ и изучение неадиабатичностей проявляемых в экспериментальных результатах.

**Объектом исследования** являются изотопы гадолиния  $A = 156, 158, 160$ .

**Предметом исследования** являются энергии состояний ротационных волос положительной четности, Кориолисово смешивание, вероятности электрических и магнитных переходов изотопов гадолиния  $A = 156, 158, 160$ .

**Методы исследования.** Математический аппарат квантовой механики, численные методы и программирование на языке ФОРТРАН.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

феноменологическая модель, учитывающая Кориолисово смешивание, была усовершенствована расширения базовых состояний оператора Гамильтона и считая, что смешивающие волосы имеют одинаковые момент инерции. В рамках этой модели предложена новая параметризация, обеспечивающая более хорошего описания спектра энергии и электромагнитных свойств состояний положительной четности редкоземельных деформированных ядер;

впервые показана причина более сильного проявления неадиабатичности в отношениях приведенных вероятностей квадрупольных переходов из состояний низколежащих волосах  $K^\pi = 0^+$  в изотопах  $^{156,158,160}\text{Gd}$ ;

впервые объяснены обнаруженные в эксперименте  $K$  – запрещенные переходы в магнитных свойствах – коэффициентах смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$  и приведенных вероятностях  $M1$ – переходов на уровне основной полосы из состояний  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  полос;

впервые теоретически предсказаны новые уровни в ротационных полосах  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  в изотопах  $A=156,158,160$  и возможности проявления новых состояний с характеристиками  $K^\pi = 1^+$  в изотопе  $A=158$  гадолия.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

использованием новую параметризацию для хорошего описания спектра энергии и электромагнитных свойств состояний положительной четности редкоземельных четно-четных деформированных ядер, усовершенствована феноменологическая модель, которая учитывает Кориолисово смешивание экспериментально известных адиабатических ротационных полос, имеющих одинаковые моменты инерции.

**Достоверность результатов исследования** детальное сравнение полученных результатов основано на актуальности экспериментальных результатов и результатов других авторов, соответствии теории структуры ядра, использованием методов теоретической физики и квантовой механики, а также применение высокоэффективных программных и численных методов на языке «fortran».

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов, полученных на основе предложенного усовершенствованного модели, определяется анализом спектроскопических характеристик деформированных четно-четных ядер, полученных в экспериментах, и эти результаты могут быть использованы для определения новых возбужденных состояний ядер.

Практическая значимость результатов исследований является использование для понимания экспериментальных результатов, полученных в лабораториях ЯФ АН РУз., лабораториях теоретической физики, ядерных проблем и ядерных реакций ОИЯИ (Дубна, Россия), лабораториях НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия), Дармштадт и Мюнхен (Германия), ORCЭ (Франция), лабораториях Мичиганского университета и Университета Кентукки (США) на физической основе, а также для экспериментального исследования новых уровней, предсказанных в диссертации.

**Внедрение результатов исследования.** Представление результатов исследований на основе научных выводов о свойствах вращательных состояний изотопа гадолия  $A = 156,158,160$ :

полученные результаты по определению момента инерции изотопов  $A = 156,158,160$  гадолия использованы международными исследователями (ссылка в зарубежном научном журнале *Journal Sains Malaysiana*, 2022) для исследования и анализа вращательных спектров четно-четных ядер;

коэффициенты смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$ , внутри полосные и межполосные вероятности  $M1$ – и  $E2$ – переходов использованы в проекте

FRGS19-039-0647 «Dynamics of excited states of neutron-rich well-deformed lanthanide nuclei» (2019-2022) (справка Международного исламского университета Малайзии, 18 ноября 2021 г.);

моменты инерции определенные с использованием двухпараметрической формулы Харриса и волновые функции полученные в рамках феноменологической модели учитывая Кориолисово смешивания ротационных полос использованы в проекте FRGS19-039-0647 «Dynamics of excited states of neutron-rich well-deformed lanthanide nuclei» (2019-2022) (справка международного исламского университета Малайзии, 18 ноября 2021 г.). Применение научных результатов позволило возможность определить тонкую структуру ротационных состояний деформированных ядер.

**Апробация результатов исследования.** Результаты этого исследования обсуждались на 14 международных и республиканских научных конференциях.

**Опубликование результатов исследования.** Всего по теме диссертации опубликовано 21 научная статья, из них 7 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан и 3 статьи в зарубежных журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации 86 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** изложены актуальность и необходимость темы, цели и задачи объекта, предмет и методы исследования, зависимость исследования от приоритетов развития науки и техники, научная новизны исследования, достоверность проводимого исследования, результаты, научная и практическая значимость и краткие сведения о структуре диссертации.

В первой главе диссертации называемой «**Анализ энергии и структура состояний**», проведен анализ литературных данных по энергии состояний ротационных полос, моментов инерции, квадрупольных моментов, электрических характеристик, в частности вероятностей внутренних и между полосных переходов в исследуемых изотопах  $^{156,158,160}\text{Gd}$ .

Оператор Гамильтона исследуемого феноменологической модели имеет следующий вид:

$$H = H_{\text{rot}}(I^2) + H_{KK'} \quad (1)$$

$$H_{K,K'} = \omega_K \delta_{K,K'} - \omega_{\text{rot}}(I) \langle K | \hat{j}_x | K' \rangle \chi(I, K) \delta_{K,K' \pm 1}, \quad (2)$$

здесь  $\omega_{\text{rot}}(I) = dE_{\text{core}}(I)/dI$  – угловая частота вращения остова,  $j_x$  – проекция внутреннего углового момента на ось X и  $\omega_K$  – головная энергия вращательных полос и

$$\chi(I, 0) = 1, \quad \chi(I, 1) = \left| 1 - \frac{2}{I(I+1)} \right|^{1/2} \quad (3)$$

Собственная волновая функция оператора Гамильтона имеет следующий вид:

$$|IMK\rangle = \sqrt{\frac{2I+1}{16\pi^2}} \left\{ \sqrt{2} \Psi_{0_1, K}^I D_{M, 0}^I(\theta) + \sum_{K'} \frac{\Psi_{K', K}^I}{\sqrt{1 + \delta_{K', 0}}} \left[ D_{M, K'}^I(\theta) b_{K'}^+ + (-1)^{I+K'} D_{M, -K'}^I(\theta) b_{-K'}^+ \right] \right\} |0\rangle \quad (4)$$

Здесь  $D_{M, K'}^I(\theta)$  – обобщенные сферические функции;  $|0\rangle$  – вакуум для  $b_K^+$  операторов;  $\Psi_{K', K}^I$  – являются амплитудами смешивания состояний полос включенных в базу оператора Гамильтона.

Решая уравнения

$$(H_{K, v} - \varepsilon_v) \psi_{K, v} = 0 \quad (5)$$

определяем собственные значения энергии и волновых функции состояний ротационных состояний положительной четности.

Полная энергия состояния определяется следующим образом:

$$E_v(I) = E_{\text{rot}}(I) + \varepsilon_v(I) \quad (6)$$

На основе исследований последних лет, Бор-Моттelson и Бенгтссон-Фраундорф доказали что, при низких значениях спина энергии основного состояния совпадают с вращательными энергиями остова. Поэтому мы инерционных параметров остова определяем на основе экспериментальной энергии основной полосы по двухпараметрической формуле Харриса:

$$E_{\text{rot}}(I) = \frac{1}{2} \mathfrak{I}_0 \omega_{\text{rot}}^2(I) + \frac{3}{4} \mathfrak{I}_1 \omega_{\text{rot}}^4(I) \quad (7)$$

$$\sqrt{I(I+1)} = \mathfrak{I}_0 \omega_{\text{rot}}(I) + \mathfrak{I}_1 \omega_{\text{rot}}^3(I) \quad (8)$$

где  $\mathfrak{I}_0$  и  $\mathfrak{I}_1$  инерционные параметры остова и имеются различные другие методы определения.

Расчеты проводились для ядер  $A=156, 158, 160$ . На основе экспериментальных энергии до  $I \leq 10\hbar$  основной полосы по формуле (7) используя метод наименьших квадратов получены инерционные параметры  $\mathfrak{I}_0$  и  $\mathfrak{I}_1$ , из условия согласия вычисленных энергии с экспериментом. В таблице 1 приведены экспериментальные значения энергии первого возбужденного состояния  $E_{2^+}$  и экспериментальные значения квадрупольных моментов  $Q_0$  также вычисленные значения инерционных параметров  $\mathfrak{I}_0$  и  $\mathfrak{I}_1$ . В изотопах с ростом число нуклонов  $A$  параметр  $\mathfrak{I}_0$  монотонно растет. Немонотонную связь можно наблюдать для  $\mathfrak{I}_1$ . Из полученных результатов можно наблюдать, что насколько больше степень деформации ядра, т.е. квадрупольный момент

насколько больше, параметр  $\mathfrak{I}_0$  настолько больше и энергия первого возбужденного состояния настолько будет меньше.

**Таблица 1**

**Параметры модели, используемые при расчете энергий состояний:**

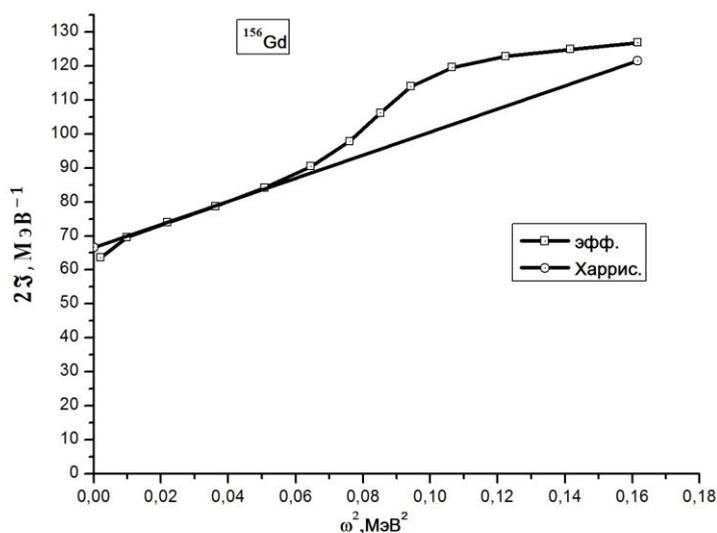
$E_{2^+}$  – энергия первых  $I^\pi = 2^\pi$  возбужденных состояний изотопов;

$Q_0$  – внутренний квадрупольный момент;

$\mathfrak{I}_0, \mathfrak{I}_1$  – инерционные параметры вращающегося остова.

A	$\mathfrak{I}_0, \text{МэВ}^{-1}$	$\mathfrak{I}_1, \text{МэВ}^{-3}$	$E_{2^+}$ (кэВ)	$Q_0, \text{е Фм}^2$
156	33.33	169.47	88.97	687
158	37.52	107.00	79.51	703(4)
160	39.724	83.488	75.26	722(29)

На рис.1 для  $^{156}\text{Gd}$  приведены зависимость  $\mathfrak{I}_{\text{эфф}}(I)$  и  $\mathfrak{I}(I) = \mathfrak{I}_0 + \mathfrak{I}_1\omega^2(I)$  от квадрата угловой частоты  $\omega_{\text{rot}}^2(I)$ . При больших значениях угловой частоты вращения наблюдается различие между ними, т.е. наблюдается неадиабатичность. Такую же картину можно увидеть и для ядер  $^{158,160}\text{Gd}$ . Чтобы объяснить эту неадиабатичность, учитывая Кориолисова смешивания состояния основной и всех экспериментально известных ротационных полос проводились расчеты в рамках феноменологической модели. Адиабатические полосы участвующих в Кориолисово смешивание считали, что имеют одинаковые момент инерции и для них использовали значения определенные выше.



**Рис. 1.** Зависимости момента инерции  $\mathfrak{I}_{\text{эфф}}(I)$  и  $\mathfrak{I}(I)$  от квадрата угловой частоты  $\omega_{\text{rot}}^2(I)$ .

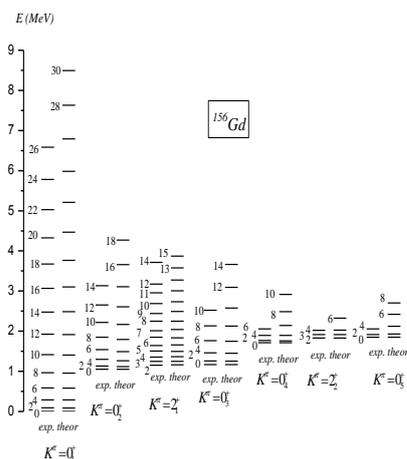


Рис. 2. Сравнение теоретических и экспериментальных значений энергии изотопа  $^{156}\text{Gd}$ .

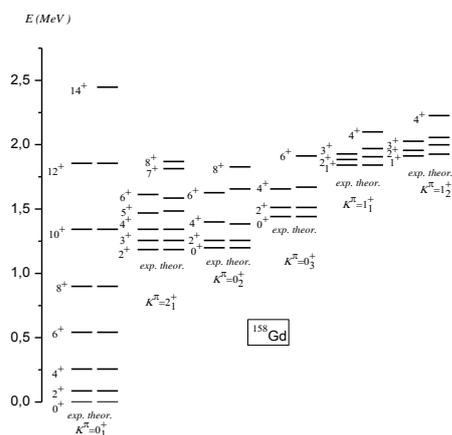


Рис. 3. Сравнение теоретических и экспериментальных значений энергии изотопа  $^{158}\text{Gd}$ .

В исследованиях в базисные состояния Гамильтониана модели были включены для изотопа  $A=156$  основная ( $0_1^+$ ), пять  $K^\pi = 0^+$ , две  $K^\pi = 2^+$  и пятнадцать  $K^\pi = 1_1^+$ , для изотопа  $A=158$  основная ( $0_1^+$ ), две  $K^\pi = 0^+$ , одна  $K^\pi = 2^+$  и три  $K^\pi = 1_1^+$ , для изотопа  $A=160$  основная ( $0_1^+$ ), две  $K^\pi = 0^+$ , одна  $K^\pi = 2^+$  и одиннадцать  $K^\pi = 1_1^+$  полос. Для изотопа  $^{156}\text{Gd}$  оператор Гамильтониана имеет размерность ( $23 \times 23$ ), для  $^{158}\text{Gd}$  ( $7 \times 7$ ), для  $^{160}\text{Gd}$  ( $15 \times 15$ ) и диагонализирова численным методом которых, вычислены энергии и волновые функции состояний ротационных полос.

На рис.2 и 3 для ядер  $^{156,158}\text{Gd}$  приведены сравнения вычисленных и экспериментальных значений энергии, соответственно. Из сравнения видно, что используя нами модель может описывать с хорошей точностью экспериментальные значения энергии.

Из рисунков видно, что  $K^\pi = 0_2^+$  полоса в изотопе  $^{156}\text{Gd}$  расположена ниже, чем  $K^\pi = 2_1^+$  полоса, и эти две полосы находятся очень близко к  $K^\pi = 0_3^+$  полосе. В изотопах  $^{158}\text{Gd}$  и  $^{160}\text{Gd}$  наоборот  $K^\pi = 2_1^+$  полоса относительно  $K^\pi = 0_2^+$  находится ниже, и они расположены близко друг другу.

При высоких спинах в основной полосе ( $0_1^+$ ) наблюдается различие теории от эксперимента и оно растет с увеличением спина. Это видимо связано с тем, что при больших значениях угловой частоты вращения необходимо учитывать влияние вращения на внутреннюю структуру ядра.

В таблице 2 представлены коэффициенты амплитуды смешивания  $\Psi_{K',K}^I$  полосы  $K^\pi = 2_1^+$  для изотопа  $^{156}\text{Gd}$ . В таблице приведены только первая  $K^\pi = 1_1^+$  компонента  $\Psi_{1_1,K}^I$ . Потому, что другие  $\Psi_{1_1,K}^I$  компоненты можно определить с помощью следующей формулой:

$$\Psi_{1_v K}^I = \Psi_{1_1 K}^I \frac{\omega_{1_1} - \omega_K}{\omega_{1_v} - \omega_K} \quad (9)$$

Из таблицы видно, что чем близки головные энергии выше обсужденных полос тем заметнее Кориолисово смешивания этих полос. Из-за близости головных энергии  $K^\pi = 2_1^+$ ,  $0_2^+$  и  $0_3^+$  полос их компоненты Кориолисово смешивания имеют заметные значения.

**Таблица 2**

**Амплитуды смешивания базовых состояний  $\Psi_{K 2_1^+}^I$  для  $K^\pi = 2_1^+$   
полосы ядра  $^{156}\text{Gd}$**

$K$								
$I$	$0_1^+$	$0_2^+$	$0_3^+$	$0_4^+$	$0_5^+$	$1_1^+$	$2_1^+$	$2_2^+$
2	0.0021	0.0954	-0.0144	-0.0076	-0.0029	-0.0116	-0.9949	-0.0005
3	-	-	-	-	-	-0.0209	-0.9987	-0.0013
4	0.0052	0.2667	-0.0352	-0.0191	-0.0073	-0.0168	-0.9620	-0.0014
5	-	-	-	-	-	-0.0328	-0.9967	-0.0032
6	0.0070	0.3819	-0.0460	-0.0253	-0.0096	-0.0164	-0.9217	-0.0019
7	-	-	-	-	-	-0.0424	-0.9945	-0.0053
8	0.0078	0.4465	-0.0510	-0.0283	-0.0108	-0.0149	-0.8920	-0.0021
9	-	-	-	-	-	-0.0504	-0.9921	-0.0076
10	0.0082	0.4841	-0.0536	-0.0298	-0.0114	-0.0136	-0.8721	-0.0022
11	-	-	-	-	-	-0.0572	-0.9898	-0.0097
12	0.0085	0.5078	-0.0551	-0.0307	-0.0117	-0.0124	-0.8585	-0.0023
13	-	-	-	-	-	-0.0630	-0.9875	-0.0119
14	0.0087	0.5237	-0.0560	-0.0313	-0.0119	-0.0115	-0.8489	-0.0023
15	-	-	-	-	-	-0.0682	-0.9854	-0.0139
16	0.0088	0.5350	-0.0566	-0.0317	-0.0121	-0.0108	-0.8418	-0.0024
17	-	-	-	-	-	-0.0727	-0.9833	-0.0158
18	0.0089	0.5435	-0.0571	-0.0320	-0.0122	-0.0102	-0.8363	-0.0024
19	-	-	-	-	-	-0.0768	-0.9812	-0.0177
20	0.0089	0.5500	-0.0574	-0.0322	-0.0123	-0.0097	-0.8321	-0.0024

Во второй главе диссертации «Электрические характеристики изотопов  $^{156,158,160}\text{Gd}$ », исследуются внутриволновые и между волновые вероятности квадрупольных электрических переходов в рамках феноменологической модели учитывая Кориолисово смешивания состояний ротационных полос. При этом используются волновые функции определенные и обсужденные в предыдущей главе, полученные при описании энергии состояний положительной четности.

Из начального состояния  $\langle I_i K_i |$  на уровни  $I_f$  основной полосы  $\langle I_f 0_1 |$  приведенная вероятность  $E2$  – переходов имеет следующий вид:

$$B(E2; I_i K_i \rightarrow I_f 0_1) = \left\{ \sqrt{\frac{5}{16\pi}} eQ_0 \left[ \Psi_{0_1,0_1}^{I_f} \Psi_{0_1,K_i}^{I_i} C_{I_i,0;20}^{I_f 0} + \sum_n \Psi_{K_n,0_1}^{I_f} \Psi_{K_n,K_i}^{I_i} C_{I_i,K_n;20}^{I_f K_n} \right] + \sqrt{2} \left[ \Psi_{0_1,0_1}^{I_f} \sum_n \frac{(-1)^{K_n} m_{K_n} \Psi_{K_n,K_i}^{I_i} C_{I_i,K_n;2-K_n}^{I_f 0}}{\sqrt{1+\delta_{K_n,0}}} + \Psi_{0_1,K_i}^{I_i} \sum_n \frac{m_{K_n} \Psi_{K_n,0_1}^{I_f} C_{I_i,0;2K_n}^{I_f K_n}}{\sqrt{1+\delta_{K_n,0}}} \right] \right\}^2 \quad (10)$$

где  $m_{K_n} = \langle 0_1 | \hat{m}(E2) K_n | \rangle$  – это матричные элементы  $E2$  – оператора между внутренними волновыми функциями основной полосы ( $0_1^+$ ) и прочих  $K_n$  – полос, включенных в базис гамильтониана (1) модели;  $C_{I_i,K;2K_i+K_f}^{I_f K_f}$  – коэффициенты Клебша-Гордана.

Для состояний со спинами  $I=2$  Кориолисова взаимодействия является очень слабой и не играет большую роль в  $E2$  – переходах. Поэтому численные значения параметров  $m_{0_1}$  и  $m_{2_1}$  вероятностей  $E2$  – переходов определялись по адиабатической формуле, используя экспериментальные данные для приведенных вероятностей  $B(E2; 2K_i \rightarrow 00_1)$  переходов. Адиабатическая формула позволяет определить только абсолютные значения параметров, но их знаки не может определить.

Нет экспериментальных данных для приведенных вероятностей  $E2$  – переходов из состояний  $K^\pi = 1_1^+$  полос в основную полосу. Поэтому численные значения  $m_{1_1}$  и знаки параметров  $m_{2_1}$  определялись из наилучшего согласия теоретических и экспериментальных отношений  $R_{I2_1}$  приведенных вероятностей  $E2$  – переходов из нечетных состояний  $K^\pi = 2_1^+$  полосы. Во всех случаях параметров  $m_{1_1}$ , считали одинаковыми: т.е.  $m_1 = m_{1_1}$ . Знаки параметров  $m_{0_1}$  определялись из наилучшего согласия теоретических и экспериментальных приведенных вероятностей  $E2$  – переходов из четных состояний  $K^\pi = 0_2^+ -$ ,  $0_3^+ -$  и  $K^\pi = 2_1^+ -$  полос.

В таблице 3 представлены вычисленные приведенные вероятности  $E2$  – переходов из уровней  $K^\pi = 2_1^+, 0_2^+ -$  и  $0_3^+$  полос в состояния основной полосы и соответствующие экспериментальные результаты для  $^{156}\text{Gd}$ .

Экспериментальные значения переходов известны до спина  $I=5$  для полосы  $K^\pi = 2_1^+$ , для  $K^\pi = 0_2^+$  и  $K^\pi = 0_3^+$  полос до состояния  $I=4$ . Надо отметить, что во многих случаях погрешности эксперимента являются большими. Нами вычисленные значения  $B(E2)$  для переходов  $2^+0_2 \rightarrow 4^+0_1$  и  $4^+0_2 \rightarrow 6^+0_1$  меньше чем экспериментальные. Не смотря на некоторые разногласия в общем можно считать, что согласия наших вычисленных значений с экспериментом удовлетворительным.

**Таблица 3**

**Приведенные вероятности  $E2$  – переходов из состояний  $K^\pi = 2_1^+$ ,  $0_2^+$  и  $0_3^+$  – полос изотопа  $^{156}\text{Gd}$**

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$B(E2), e^2 \text{Фм}^4$			
		Эксперимент	Эксперимент	Эксперимент	Теория
$2^+2_1$	$0^+0_1$	222(11)	233(8)	175(35)	237
$2^+2_1$	$2^+0_1$	355(19)	361(13)	255(55)	354
$2^+2_1$	$4^+0_1$	32(3)	38(2)	40(9)	43
$3^+2_1$	$2^+0_1$	364(17)	364(70)	385(75)	379
$3^+2_1$	$4^+0_1$	280(60)	255(50)	255(55)	264
$4^+2_1$	$2^+0_1$	78(9)	90(+20,-25)	95(25)	151
$4^+2_1$	$4^+0_1$	460(50)	509(+115,-145)	565(155)	346
$5^+2_1$	$4^+0_1$	295	399(+1000,-250)	500(380)	283
$5^+2_1$	$6^+0_1$	410(40)	549(+1700,-400)	745(565)	369
$2^+0_2$	$0^+0_1$	31.6(18)	31.4(30)	43(15)	51
$2^+0_2$	$2^+0_1$	164(16)	165(15)	235(75)	106
$2^+0_2$	$4^+0_1$	181(17)	205(20)	275(95)	33
$4^+0_2$	$2^+0_1$	61(7)	65(+25,-35)	79(32)	81
$4^+0_2$	$4^+0_1$	140(13)	–	159(61)	162
$4^+0_2$	$6^+0_1$	91(14)	105(+35,-55)	130(50)	5
$2^+0_3$	$0^+0_1$	15.4(14)	15.4(2)	11(4)	25
$2^+0_3$	$2^+0_1$	$8.4^{+24}_{-19}$	21(+3,-2)	4.3(17)	57
$2^+0_3$	$4^+0_1$	210(25)	215(25)	153(58)	153
$4^+0_3$	$2^+0_1$	15(4)	–	–	26
$4^+0_3$	$4^+0_1$	230(20)	–	–	75
$4^+0_3$	$6^+0_1$	370(30)	–	–	167

В таблице 4 представлены для  $^{156}\text{Gd}$  сравнения теоретических и экспериментальных значений отношений приведенных вероятностей переходов  $R_{IK} = B(E2; IK \rightarrow I_1 0_1) / B(E2; IK \rightarrow I_2 0_1)$  из состояний  $K_i^\pi = 2_1^+, 0_2^+$  и  $0_3^+$  полос на уровни основной полосы, которые дают хорошие согласия. В таблице также представлены адиабатические значения  $R_{IK}$ . Разница между адиабатическими и нами вычисленными теоретическими значениями отношений  $R_{IK}$  даже при низких значениях спина является большой. Эта связана с тем, что головные энергии  $K_i^\pi = 2_1^+, 0_2^+$  и  $0_3^+$  полос расположены близко друг другу. Неадиабатичности в отношениях  $R_{IK}$  приведенных вероятностей квадрупольных переходов в состояниях полосы  $K^\pi = 0_2^+$  проявляется сильнее. Эта связана с тем, что коллективность  $K^\pi = 0_2^+$  полосы является намного меньше, чем коллективность близко расположенной  $K^\pi = 2_1^+$  полосы.

Аналогичные расчеты и сравнения с экспериментальными результатами были выполнены для изотопов  $^{158,160}\text{Gd}$ . В результате сравнений были проанализированы неадиабатичности, проявляющиеся в электрических характеристиках.

**Таблица 4**

**Теоретические и экспериментальные значения отношений**  
 $R_{IK} = B(E2; IK \rightarrow I_1 0_1) / B(E2; IK \rightarrow I_2 0_1)$   $E2$  – переходов с уровнями  
 $K_i^\pi = 2_1^+, 0_2^+$  – и  $0_3^+$  – полос на уровни основной полосы для  $^{156}\text{Gd}$

$IK$	$I_1 0_1$	$I_2 0_1$	$R_{IK}$ (Эксперимент)	Теория	Правило Алага
$2^+ 2_1$	$2^+ 0_1$	$0^+ 0_1$	1.55(1) 1.75(55) 1.54(5) 1.56(17)	1.50	1.43
$2^+ 2_1$	$4^+ 0_1$	$2^+ 0_1$	0.106(3) 0.101(6) 0.105(3)	0.122	0.05
$3^+ 2_1$	$4^+ 0_1$	$2^+ 0_1$	0.70(3) 0.77(15) 0.56(21) 0.67(18)	0.70	0.40
$4^+ 2_1$	$4^+ 0_1$	$2^+ 0_1$	6.03(12) 5.9(6) 5.38(29) 5.81(24)	2.29	2.95
$4^+ 2_1$	$6^+ 0_1$	$4^+ 0_1$	0.046(8) 0.030(6)	0.33	0.09
$5^+ 2_1$	$6^+ 0_1$	$4^+ 0_1$	1.44(15) 1.40(16) 1.41(16) 1.45(19)	1.30	0.57

6 <sup>+</sup> 2 <sub>1</sub>	6 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	5.9(14) 3.7 (3)	2.05	3.71
7 <sup>+</sup> 2 <sub>1</sub>	8 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	6 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2.0(12)	1.92	0.67
9 <sup>+</sup> 2 <sub>1</sub>	10 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	8 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2.5(12)	2.57	0.73
2 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	0 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	5.50(38) 5.06(51) 5.26(25)	2.10	1.43
2 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	1.18(8) 1.10(11) 1.17(5)	0.31	1.8
4 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2.20(17) 2.30(22) 2.94(35)	2.01	0.91
4 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	6 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	0.71(33) 0.65(9) 0.7(3)	0.2	1.75
6 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	6 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	1.59(50) 1.2(8)	1.76	0.81
8 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	8 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	6 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	1.98(22)	1.32	0.59
10 <sup>+</sup> 0 <sub>2</sub>	10 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	8 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	18.5 (13) >1.7	0.95	0.74
2 <sup>+</sup> 0 <sub>3</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	0 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	3.94(18) 0.55(17) 0.50(15)	2.30	1.43
2 <sup>+</sup> 0 <sub>3</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	3.58(12) 25(8) 28(8)	2.69	1.8
4 <sup>+</sup> 0 <sub>3</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	15(4) 16(5)	2.84	0.91
4 <sup>+</sup> 0 <sub>3</sub>	6 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	1.6(2) 3.0(3)	2.23	1.75
3 <sup>+</sup> 2 <sub>2</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	1.41(12)	0.95	0.40
4 <sup>+</sup> 2 <sub>2</sub>	4 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	2 <sup>+</sup> 0 <sub>1</sub>	7.19(102)	4.53	2.95

В третьей главе диссертации «**Магнитные характеристики изотопов <sup>156,158,160</sup>Gd**», в рамках феноменологической модели исследованы влияние эффекта смешивания состояний ротационных полос на магнитные характеристики – коэффициенты смеси мультipoлей  $\delta(E2/M1)$ , вероятности приведенных дипольных переходов  $B(M1)$  и магнитные моменты возбужденных состояний  $\mu(I^+0_1)$  основной полосы ядер <sup>156,158,160</sup>Gd. В частности изучено влияние вращения ядра на магнитные характеристики.

В рамках феноменологической модели приведенные вероятности магнитных дипольных переходов из возбужденных состояний  $I_i K_i$  на уровни  $I_f 0_1$  основной полосы имеет следующий вид:

$$B(M1; I_i K_i \rightarrow I_f 0_1) = \left( \frac{3}{4\pi} \right) \times \left( \sum_{K_1=1}^2 (g_{K_1} - g_R) K_1 \psi_{K_1, K}^I \psi_{K_1, 0_1}^{I'} C_{IK_1; 10}^{I'K_1} + \frac{\sqrt{6}}{10} \sum_{\nu} m'_{1\nu} (\psi_{0_1, 0_1}^{I'} \psi_{1\nu, K}^I - \psi_{1\nu, 0_1}^I \psi_{0_1, K}^{I'}) C_{I1; 1-1}^{I'0} \right)^2, \quad (11)$$

где  $m'_{1\nu} = \langle 0_1^+ | \hat{m}(M1) | 1\nu^+ \rangle$  – матричные элементы между внутренними волновыми функциями основной ( $0_1^+$ ) и  $K^\pi = 1\nu^+$  полос;  $g_K$  – внутренний  $g$  – фактор полосы с  $K \neq 0$ ,  $g_R = Z/A$  – гиромангнитный фактор, связанный с вращением. Из систематики гиромангнитных отношений для деформированных ядер редкоземельной и трансурановой области следует  $g_R \approx 0.4 \pm 0.1$ .

В  $M1$  – переходах основная роль играет часть формулы, где присутствует  $m'_{1\nu}$  – параметр. Численные значения этих параметров определены на основе экспериментальных данных  $B^{эксп.}(M1; 11\nu \rightarrow 00_1)$  для  $M1$  – переходов из головных уровней  $K^\pi = 1\nu^+$  – полос используя адиабатическую формулу.

Вычисленные значения  $\delta(E2/M1)$  для изотопов  $^{156}\text{Gd}$  и  $^{160}\text{Gd}$  приведены в таблицах 5 и 6, которые сравниваются с экспериментальными данными. В исследуемых изотопах  $^{156,160}\text{Gd}$  экспериментальные значения  $\delta(E2/M1)$  для переходов из состояний  $K^\pi = 2_1^+$  полосы относительно для переходов из состояний  $0_2^+$  –,  $0_3^+$  – полос намного больше. Это связано с тем, что значения  $B(E2)$  для переходов из состояний  $2_1^+$  полосы относительно переходов из  $0_2^+$  –,  $0_3^+$  – полос всегда больше, тогда как значения  $B(M1)$  для переходов из  $2_1^+$ ,  $0_2^+$  –,  $0_3^+$  – полос близки друг другу.

Знаки вычисленных значений коэффициентов смеси мультиполей совпадают с экспериментом. Но во многих случаях абсолютные значения  $\delta_{теор.}$  меньше чем экспериментальных значений. Тем не менее, можно предположить, что наши расчетные результаты дают удовлетворительное согласие с экспериментальными данными в пределах погрешностей ошибок  $\delta_{эксп.}$ .

В таблицах приведены адиабатические значения коэффициентов смеси мультиполей  $\delta_{адиаб.}$  для переходов из состояний  $K^\pi = 1\nu^+$ . Из таблицы видно, что значения  $\delta_{теор.}$  и  $\delta_{адиаб.}$  близки. В адиабатическом приближении  $M1$  – переходы из состояний  $K^\pi = 0_n^+$  – и  $K^\pi = 2^+$  – полос на уровне основной полосы запрещены.

Таблица 5

Коэффициенты смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$  для  $^{156}\text{Gd}$ .  $\langle E2 \rangle_{if}$   
и  $\langle M1 \rangle_{if}$  – приведенные матричные элементы  $E2$ – и  $M1$ – переходов,  
соответственно;  $E_\gamma$  – энергия перехода

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$E_\gamma, \text{МэВ}$	$\langle E2 \rangle_{if}$ е $\Phi_M^2$	$\langle M1 \rangle_{if} \mu_N$	$\delta_{\text{эксн.}}$	$\delta_{\text{теор.}}$	$\delta_{\text{адиаб.}}$
22 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.0652	-18.81	0.0412	-16(5)	-4.1	-
32 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.159	19.46	-0.0313	-11.8(+6,-7)	-6.0	-
32 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	0.9598	-16.23	0.0260	-12(+13,-5)	-5.0	-
42 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.0672	-18.60	0.0639	+4.0(+9,-16)	-2.6	-
52 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.2187	-16.83	0.0488	$\delta > 7$	-3.5	-
52 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	0.922	19.21	-0.0417	-	-3.5	-
62 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	1.060	17.00	-0.063	$\delta < -0.8$ или $\delta > 2.5$	-2.4	-
72 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	1.2648	15.06	-0.0634	-	-2.5	-
82 <sub>1</sub>	80 <sub>1</sub>	1.0457	15.84	-0.0584	$\delta < -0.6$ или $\delta > 1.6$	-2.4	-
92 <sub>1</sub>	80 <sub>1</sub>	1.2843	-13.73	0.0758	$\delta < -0.8$ 0.39(6)	-1.9	-
20 <sub>2</sub>	20 <sub>1</sub>	1.0405	10.31	-0.1011	+5.9(+14,-28)	-0.9	-
40 <sub>2</sub>	40 <sub>1</sub>	1.0106	-12.75	0.2176	-	0.49	-
11 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.876	14.66	0.5503	+0.41(+25,-14) +0.35(4)	0.41	0.37
11 <sub>2</sub>	20 <sub>1</sub>	1.938	14.61	-0.3812	-0.55(3)	-0.63	-0.55
11 <sub>3</sub>	20 <sub>1</sub>	2.0977	14.49	-0.1888	-1.2(2) или -1.08(+0.03, -0.22)	-1.34	-1.20
11 <sub>4</sub>	20 <sub>1</sub>	2.1807	14.44	-0.3579	-0.66(+0.06,-0.08)	-0.73	-0.66
20 <sub>3</sub>	20 <sub>1</sub>	1.1691	-7.53	-0.0539	0.38(6)	1.4	-
40 <sub>3</sub>	40 <sub>1</sub>	1.1741	-8.65	-0.0934	-	0.91	-

Таблица 6

Коэффициенты смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$  для  $^{160}\text{Gd}$ .  $\langle E2 \rangle_{if}$   
и  $\langle M1 \rangle_{if}$  – приведенные матричные элементы  $E2$ – и  $M1$ – переходов,  
соответственно;  $E_\gamma$  – энергия перехода

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$E_\gamma, \text{МэВ}$	$\langle E2 \rangle_{if}$ е $\Phi \text{M}^2$	$\langle M1 \rangle_{if}$ $\mu_N$	$\delta_{\text{эксп.}}$	$\delta_{\text{эксп.}}$	$\delta_{\text{теор.}}$	$\delta_{\text{адиаб.}}$
22 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	0.9134	-18.23	-0.050	-0.45(+4,-5)	-72(+35,-∞)	2.8	-
32 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	0.9822	18.71	0.056	+47(+18,-10)	+47(+18,-10)	2.7	-
32 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	0.8089	14.39	0.049	0.11(3)	-11.7(+16,-23)	1.98	-
42 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	0.8995	-19.70	-0.110	+21(+21,-7)	+21(+21,-7)	1.34	-
52 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.0125	16.55	0.089	+15(+17,-6)	+49(+34,-14)	1.57	-
52 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	0.746	16.88	0.082	+8(+13,-4)	+0.03(3) или -22(+11,-800)	1.28	-
62 <sub>1</sub>	60 <sub>1</sub>	0.8782	-19.16	-0.175	-	+30 < $\delta$ < -1.5	0.80	-
20 <sub>2</sub>	20 <sub>1</sub>	1.3611	-4.47	0.108	0.00(8)	-0.02(4) или +2.46(+30,-25)	-0.46	-
40 <sub>2</sub>	40 <sub>1</sub>	1.3130	-6.48	0.190	+0.28(+34,-12)	+0.57(+17,-44)	-0.37	-
11 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.4934	7.48	0.010	+1.34(+16,-6)	+0.3 < $\delta$ < 24.6	9.31	9.53
11 <sub>1</sub>	22 <sub>1</sub>	0.5801	-6.098	-0.003	+0.28(+25,-18)	+0.45(+50,-24) или +2 < $\delta$ < -11	11.8	-
21 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.5114	-0.776	0.064	-	+0.24(5) или +5.8(+24,-13)	-0.15	2.11
31 <sub>1</sub>	20 <sub>1</sub>	1.5897	-5.316	0.008	-	+0.9(5)	-9.0	- 4.15
31 <sub>1</sub>	40 <sub>1</sub>	1.4167	5.538	0.007	-	+1.5(5)	9.68	6.75
20 <sub>3</sub>	20 <sub>1</sub>	1.5235	5.213	-0.081	-	0.83(+10,-15) или -3.4(+8,-11)	-0.82	-
20 <sub>3</sub>	32 <sub>1</sub>	0.5414	-1.676	-0.001	-	+0.06(5) или -4.3(+13,-29)	8.4	-

Таблица 7

Приведенные вероятности  $M1$  – переходов из состояний полос  
с  $K^\pi = 2_1^+, 0_3^+$  на основную ( $0_1$ ) полосу для  $^{156}\text{Gd}$

$IK_i$	$E_I$	$E_\gamma$	Эксперимент		Теория
			$B(M1)W.u.$	$B(M1) (\mu_N)$	$B(M1) \mu_N$
$2^+2_{2_1}$	1154	1065.2	$6 \cdot 10^{-5}(4)$	$1.07 \cdot 10^{-4}(72)$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
$3^+2_{2_1}$	1248	959.8	$6 \cdot 10^{-5}(4)$	$1.07 \cdot 10^{-4}(72)$	$6.76 \cdot 10^{-4}$
		1159	$1.4 \cdot 10^{-4}(3)$	$2.51 \cdot 10^{-4}(54)$	$9.80 \cdot 10^{-4}$
$4^+2_{2_1}$	1355	1067.2	$0.014(+7, -8)$	$2.51 \cdot 10^{-3}(+1.25, -1.43)$	$4.10 \cdot 10^{-3}$
$2^+0_3$	1258	1169.1	$0.0078(+9, -7)$	$1.40 \cdot 10^{-2}(+16, -13)$	$2.9 \cdot 10^{-3}$

Таблица 8

Приведенные вероятности  $M1$  – переходов из состояний полос  
 $K^\pi = 0_2^+, 0_3^+$  и  $2_1^+$  на основную полосу в ядре  $^{158}\text{Gd}$

$I_i K_i$	$I_f K_f$	$B(M1), \mu_N$	
		Эксперимент	Теория
$22_1$	$20_1$	$0.00032 (13)$	$0.0001$
$42_1$	$40_1$	$0.00077 (+ 111, -9)$	$0.0028$
$20_2$	$20_1$	$0.00079 (11)$	$0.0019$
$40_2$	$40_1$	$0.00174 (+ 348, -25)$	$0.0033$
$20_3$	$20_1$	$0.0029 (7)$	$0.0020$

В используемой нами модели такие переходы появляются благодаря компонентом  $1_v^+$  – в их волновых функциях в результате Кориолисова смешивания. В таблицах 7 и 8 приведены магнитные моменты ротационных состояний основной полосы изотопов  $^{156,158}\text{Gd}$ . Совпадение теоретических и экспериментальных значения магнитных моментов  $\mu(I^+ 0_1)$  можно признать хорошей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для изотопов  $^{156,158,160}\text{Gd}$  в рамках феноменологической модели, учитывая Кориолисово смешивание состояний всех экспериментально известных ротационных полос положительной четности, сделаны следующие выводы:

1. Предложена новая параметризация феноменологического модельного гамильтониана, обеспечивающая более хорошее описание спектра энергии и электромагнитных свойств состояний положительной четности редкоземельной четно-четных деформированных ядер, где учитывается Кориолисово смешивание экспериментально известных адиабатических ротационных полос имеющих одинаковые моменты инерции.

2. Показаны сильные проявления неадиабатичности в отношениях приведенных вероятностей квадрупольных переходов в состояниях низколежащей полосе  $K^\pi = 0^+$  в изотопах  $^{156,158,160}\text{Gd}$  причина, которой объяснена тем, что коллективность  $K^\pi = 0^+$  полосы является намного меньше, чем коллективности близко расположенной  $K^\pi = 2^+$  полосы.

3. Обнаруженные в эксперименте  $K$  – запрещенные переходы в магнитных свойствах – коэффициентах смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$  и приведенных вероятностях  $M1$ –переходов на уровни основной полосы в состояниях  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  полос объяснены с появлением  $K^\pi = 1_{\text{v}}^+$  компонентов в состояниях  $K^\pi = 0_{2,3}^+, 2_1^+$  полос из-за Кориолисова смешивания.

4. В результате сравнения энергетических и электромагнитных модельных параметров относящихся к  $K^\pi = 1_{\text{v}}^+$  полосам изотопов  $A=156,158,160$  гадолия предсказана возможность проявления дополнительных состояний с характеристиками  $K^\pi = 1^+$  в изотопе  $^{158}\text{Gd}$ .

5. Неадиабатические эффекты, проявляемые в энергиях и электромагнитных характеристиках состояний  $K^\pi = 0^+$ ,  $K^\pi = 2^+$  и  $K^\pi = 1^+$  полос, объяснены Кориолисова смешиванием вышеуказанных полос из-за вращательного движения ядра.

6. В основной полосе при высоких значениях спина между экспериментальными и теоретическими значениями энергии имеются заметное расхождение, которое с ростом спина увеличивается. Этот факт указывает на то, что при высоких значениях угловой частоты вращения необходимо учитывать влияние вращения ядра на внутреннюю структуру.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 AT SPA «PHYSICS-SUN»  
ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**  

---

**NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

**YUSUPOV ELMUROD KUCHKARBOYEVICH**

**PROPERTIES OF ROTATION STATES OF A=156,158,160 ISOTOPES  
GADOLINIUM**

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

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

**Tashkent – 2022**

**Theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2021.4.PhD/FM255.**

Dissertation has been prepared at Namangan Institute of Engineering and Technology.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council ([www.fti.uz/](http://www.fti.uz/)) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (<http://www.ziyo.net>).

**Scientific supervisor:** **Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Official opponents:** **Saidkhanov Nasir Shakirovich**  
Doctor of Physical and Mathematical sciences

**Nadirbekov Mahmudjon Sulaymanovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Leading organization:** **Jizzakh State Pedagogical Institute**

The defense will be take «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 at \_\_\_ at the meeting of Scientific council DSc.02/27.02.2020.FM/T.110.01 at the SPA «Physics-Sun» Academy of Sciences of RUz. Address: Chingiz Aytmatov str. 2b, 100084-Tashkent, Uzbekistan. Conference hall of the Physical-technical Institute. Phone/Fax: (99871) 235-42-91, e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical–technical Institute (is registered №\_\_\_). Address: Chingiz Aytmatov str. 2b, 100084-Tashkent, Uzbekistan. Physical-technical Institute. Phone/Fax: (99871) 235-42-91.

Abstract of the dissertation was distributed on «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 year.

(mailing report № \_\_\_ on «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 year).

**S.L. Lutpullaev**

Chairman of the scientific council on award of scientific degrees, doctor of sciences in physics and mathematics, professor

**J.S. Akhatov**

Scientific secretary of the Scientific council on award of scientific degrees, Doctor of technical sciences

**K.G. Gulamov**

Chairman of the scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, doctor of sciences in physics and mathematics, academician

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of the research** is to define the non-adiabaticity in energies and electromagnetic properties of collective states of even-even deformed nuclei rare-earth elements.

### **The tasks of the research:**

determination of the effective methods for calculating the moment of inertia isotopes of gadolinium with  $A = 156, 158, 160$ ;

to calculate the theoretical values of the energies of rotational states and wave functions using a phenomenological model, taking into account the Coriolis mixing of the experimentally all known  $K^\pi = 0^+, 2^+$  and  $1^+$  bands, assuming that the moments of inertia of the adiabatic bands are the same;

to calculate the reduced probabilities of  $E2$  – transitions between the bands and compared with experimental data;

to carry out an analysis within the framework of the phenomenological model of magnetic properties - magnetic moments,  $g_R$  – factors, coefficients of a mixture of multipoles  $\delta(E2/M1)$ , within the band and between the band reduced probabilities of  $M1$  – transitions of rotational states;

to analysis and study of non-adiabaticities manifested in the experimental results.

**The objects of the research** are isotopes of gadolinium with  $A=156, 158, 160$ .

**The subjects of the research** are energy states of rotational band positive parity, Coriolis mixture, probability of electrical and magnetic transitions of isotopes of gadolinium  $A=156, 158, 160$ .

**The scientific novelty of the research** is as follows:

the phenomenological model into account of Coriolis mixture has been improved with a extending the base of Hamiltonian operator and assuming that the mixing bands have the same moment of inertia. Framework of this model new parameterization is proposed which is provided the more description of energy spectra and electromagnetic properties of states of positive parity of transuranium deformed nuclei;

the reasons for the stronger manifestation of nonadiabaticity in the ratios of the reduced probabilities of quadrupole transitions in the states of the low-lying  $K^\pi = 0^+$  bands in  $^{156, 158, 160}\text{Gd}$  isotopes are shown;

experimentally founded  $K$  – forbidden transitions in the magnetic properties – the multipole mixture coefficients  $\delta(E2/M1)$  and the reduced probabilities of  $M1$  – transitions from the  $K^\pi = 0^+, 2^+$  bands to ground state bands has been explained;

theoretically the new levels of rotational bands  $K^\pi = 0^+, 2^+$  in isotopes of gadolinium with a mass  $A=156, 158, 160$  and possibility of manifestation of new states with  $K^\pi = 1^+$  characteristics in gadolinium isotope with a mass  $A=158$  are predicted.

**Implementation of the research results.** Presentation of research results based on scientific conclusions about the properties of rotational states of the isotope of gadolinium  $A = 156, 158, 160$ :

the obtained results on the describing of moment of inertia in  $A=156,158,160$  gadolinium has been used by the international authors (Journal Sains Malaysiana, 2022) in calculation and analyzing the energy spectra of even – even deformed nuclei;

multipole mixture coefficients  $\delta(E2/M1)$ , within–band and between–band probabilities of  $E2$ – and  $M1$ – transitions are used in the FRGS19–039–0647 project under the title "Dynamics of excited states of neutron–rich well–deformed nuclei of lanthanides" (2019–2022) (International Islamic University of Malaysia, November 18, 2021);

moments of inertia of isotopes determined using the two-parameter Harris formula used in the FRGS19–039–0647 project under the title "Dynamics of excited states of neutron-rich well-deformed nuclei of lanthanides" (2019-2022) (International Islamic University of Malaysia, November 18, 2021).

**Approbation of research results.** The main results of the dissertation were reported at 14 international and local scientific conferences.

**Publication of the research results.** 21 scientific articles were published on the topic of the dissertation, of which 7 articles in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan and 3 articles in foreign journals.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a bibliography and an appendix. The total volume of the thesis is 86 pages.

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

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Усманов П.Н., Охунов А.А., Абу Х. Кассим., Юсупов Э.К., Салихбаев У.С. Электрические характеристики коллективных  $0^+$  и  $2^+$  состояний в изотопах  $^{158,160}\text{Gd}$  // Узбекский Физический журнал. – Ташкент: АН РУз, 2018. – № 6. – С. 339-344 (01.00.00. №5).

2. Усманов П.Н., Сабиров С.С., Бозоров Х. Н, Юсупов Э. К. Кориолисово смешивание состояний ротационных полос положительной четности  $^{158,160}\text{Gd}$  // Научно-технический журнал. Ферганского политехнического института. – Фергана, 2018. – С. 9-13 (05.00.00. № 20).

3. Usmanov P.N., Vdovin A.I., Yusupov E.K., Salikhbaev U.S. Phenomenological analysis of characteristics of rotational bands in  $^{158,160}\text{Gd}$  isotopes. // Physics of Particles and Nuclei Letters. – Moscow (Russia), 2019. Vol. 16, No 6, — pp. 706-712. (№2. Journal Impact Factor; IF=0.74)

4. Юсупов Э. К. Энергетический спектр и структура состояний изотопа  $^{156}\text{Gd}$  // Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. – Ташкент: АН РУз, 2020. – № 2. сс 26-31 (01.00.00. №7).

5. Usmanov P. N., Vdovin A. I., Yusupov E. K. Analyzing the Magnetic Characteristics of  $^{158,160}\text{Gd}$  States Using a Phenomenological Model. // Bulletin of the Russian Academy Sciences: Physics, 2020, Vol. 84, No 8, pp. 968-973. (01.00.00; №26) (№2. Journal Impact Factor; IF=0.48)

6. Усманов П. Н., Юсупов Э. К., Султонов Б. К. Изучение свойств ротационных состояний  $^{156}\text{Gd}$ . // НамДУ Илмий ахборотномаси. 2020. № 6. с.23-31. (01.00.00. №45).

7. Usmanov P. N., Vdovin A. I., Yusupov E. K. Electric properties of rotation states in  $^{156}\text{Gd}$  // Bulletin of the Russian Academy Sciences: Physics, 2021, Vol. 85, No 10, pp. 1102-1107. (01.00.00; №26) (№2. Journal Impact Factor; IF=0.48)

**II бўлим (II часть; part II)**

8. Усманов П. Н., Юсупов Э. К. Анализ электромагнитных характеристик возбужденных состояний изотопов  $^{158,160}\text{Gd}$  // Ёш олим ва талабаларнинг «XXI аср-интеллектуал авлод асри» шиори остидаги худудий ва республика илмий амалий конференция, 30-31 май, 2016 йил, с. 184-186, Наманган.

9. Усманов П. Н., Юсупов Э. К., Жалолова П. М. Магнитные характеристики ротационных состояний изотопов  $^{158,160}\text{Gd}$ . // «Конденсатланган мухитлар физикаси ва физика ўқитишнинг долзарб муаммолари» Республика илмий-амалий анжумани, 2016 йил 8-9 июль, с. 161-163, Наманган.

10. Усманов П. Н., Охунов А. А., Абу. Х. Кассим, Юсупов Э. К, Бозоров Х. Межротационные квадрупольные переходы в изотопах  $^{158,160}\text{Gd}$ . // «Полимерли композитлар физикаси ва кимёси ҳамда констукцион материаллар

технологиясини долзарб муаммолари» Наманган 7-8 июль, 2017 НамДУ, с. 20-22, Наманган.

11. Усманов П. Н., Охунов А. А., Абу. Х. Кассим, Юсупов Э. К., Салихбаев У. С., Коржовов М. Д. Магнитные моменты ротационных состояний основной полосы изотопов  $^{158,160}\text{Gd}$ . // «Физикани ўқитишнинг долзарб муаммолари» 2018 йил 10-11 июль, с 7-9, Наманган.

12. Усманов П. Н., Охунов А. А., Абу. Х. Кассим, Юсупов Э. К., Салихбаев У. С. Электрические характеристики коллективных  $0^+$  и  $2^+$  состояний в изотопах  $^{158,160}\text{Gd}$ . // «Физикани ўқитишнинг долзарб муаммолари» 2018 йил 10-11 июль, с 17-19, Наманган.

13. Усманов П. Н., Охунов А. А., Юсупов Э. К. Свойства квадрупольных переходов коллективных состояний изотопов  $^{158,160}\text{Gd}$ . // «Физика ва экологиянинг долзарб муаммолари», 21-22 сентябрь 2018 йил, с 81-82, Термиз.

14. Усманов П. Н., Вдовин А. И., Юсупов Э. К. Анализ магнитных характеристик состояний  $^{158,160}\text{Gd}$  в рамках феноменологической модели. // LXIX «NUCLEUS-2019» on nuclear spectroscopy and nuclear structure. «Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies», Book of abstracts. 1-5 July, 2019, с.31, Dubna, Russia.

15. Usmanov P. N., Vdovin A. I., Yusupov E. K. Properties of Collective States of Isotopes  $^{156,158,160}\text{Gd}$ . // IX. International conference «Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies» September 24-27, 2019. pp 89-91 Tashkent, Republic of Uzbekistan.

16. Усманов П.Н., Вдовин А. И., Юсупов Э.К. Йулдашев Ж.Б. Исследование электромагнитных свойств возбужденных состояний изотопов  $^{156,158,160}\text{Gd}$ . // Материалы Республиканской научно-теоретической и практической конференции «Физика и экология» 17-18 октября 2019 года с.3-5, Нукус.

17. Усманов П. Н., Вдовин А. И., Юсупов Э. К. Энергетический спектр и структура состояний изотопа  $^{156}\text{Gd}$  // LXX International Conference «NUCLEUS-2020» Nuclear Physics and Elementary Particle Physics. Nuclear Physics Technologies. Book of abstracts. Online part. 12-17 October 2020 pp. 26-27, Saint Petersburg, Russia.

18. Усманов П. Н., Юсупов Э. К., Султонов Б. К. Электрические свойства состояний  $^{156}\text{Gd}$  // IX Global Science and Innovations 2020: Central Asia. Nur-Sultan, Kazakhstan, June-July 2020 pp. 69-71.

19. Усманов П. Н., Вдовин А. И., Юсупов Э. К., Нишонов А. Н.  $^{156}\text{Gd}$  ядро уйғонган ҳолатларининг магнит хусусиятлари // VI Республиканская Конференция Молодых физиков Узбекистана «Ядерная Физика и Ядерные Технологии» 1-2 декабрь с.44-53, Ташкент – 2020.

20. Усманов П. Н., Вдовин А. И., Юсупов Э. К., Сабиров С. С. Изучение коэффициентов смеси мультиполей  $\delta(E2/M1)$  состояний положительной четности ядра  $^{156}\text{Gd}$  // «Роль передовых инновационных технологий и образования в решении задач автоматизации и энергетики, направленная на повышение энергоэффективности производств и социальной сферы». 24-25 июнь, с.173-176, Наманган – 2021.

21. Усманов П. Н., Вдовин А. И., Юсупов Э. К. Магнитные характеристики состояний положительной четности ядра  $^{156}\text{Gd}$  // III Международный научный форум, «Ядерная наука и технологии», 20-24 сентября, с.67-68, Алматы – 2021, Республика Казахстан.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (18.02.2022 йил).

Босишга рухсат этилди: 22.02.2022 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 3,5. Адади: 100. Буюртма: № \_\_\_\_\_.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,  
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.